



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง อิทธิพลของฐานรากดินอ่อนที่มีผลต่อโครงสร้างชั้นทาง

The Influence of Soft Foundation on Pavement Layer

นามผู้วิจัย นายคมพันธ์ จินดาวัฒน์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(อาจารย์บารเมศ วรรณะภักดิ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์วิชาญ ภูพัฒน์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พรเกษม จงประดิษฐ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงกูร, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญาณี ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

อิทธิพลของฐานรากดินอ่อนที่มีผลต่อโครงสร้างชั้นทาง

The Influence of Soft Foundation on Pavement Layer

โดย

นายคมพันธ์ จินดาวัฒน์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คมพันธ์ จินดาวัฒน์ 2554: อิทธิพลของฐานรากดินอ่อนที่มีผลต่อโครงสร้างชั้นทาง
ปริญญานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชา
วิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์บาร์เมศ วรรณะภูติ, Ph.D.
286 หน้า

ปัจจุบันการก่อสร้างโครงสร้างชั้นทางบนดินเหนียวอ่อน มักประสบกับปัญหาในเรื่อง
ของการแตกร้าว และความไม่ราบเรียบของพื้นผิวด้านบน ปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมดังกล่าวคือ
ค่า Elastic Modulus รวมทั้งความหนาของโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินอ่อนด้านล่าง ทำให้เกิด
การไหลตัวของดินอ่อนชั้นฐานราก เกิด Flexural Stress ในโครงสร้างชั้นทาง และค่าหน่วยแรง
ทางด้านข้างภายในโครงสร้างชั้นทางมีการเปลี่ยนแปลง ภายหลังจากมีน้ำหนักรถกระทำบนชั้นผิว
ทาง

การวิจัยในครั้งนี้ศึกษาถึงพฤติกรรมการบีบอัดของชั้นผิวทางซึ่งมีสาเหตุมาจากการไหลตัว
ของชั้นดินฐานราก โดยสร้างแบบจำลอง Continuous Two-Elastic Layer และกำหนดให้วัสดุมี
คุณสมบัติชนิด Elastic-Perfectly Plastic ใช้วิธีการหาผลลัพธ์โดยวิธี Finite Element ซึ่งมีตัวแปรที่
พิจารณา คือ ค่า Elastic Modulus ของวัสดุชั้นผิวทางและชั้นดินฐานราก ค่าความหนาของชั้นผิว
ทาง และค่าความกว้างของน้ำหนักรถที่กระทำ

จากการศึกษาพบว่า สำหรับโครงสร้างชั้นทางซึ่งมีความหนาน้อยไม่ว่าโครงสร้างชั้นทาง
จะมีความแข็งแรงเพียงใด การบีบอัดจะเกิดขึ้นในรูปแบบคล้ายการบีบอัดแบบลิ่ม (Mode A) แต่เมื่อ
ชั้นผิวทางมีค่าความหนามากขึ้น และค่าความแตกต่างของ Elastic Modulus ระหว่างโครงสร้างชั้น
ทางกับดินฐานรากมีมากกว่าช่วง 20 - 100 เท่า รูปแบบการบีบอัดของโครงสร้างชั้นทางจะ
เปลี่ยนจากรูปแบบลิ่มกลายเป็นรูปแบบวงบีบอัดที่ระดับตื้น (Mode B) และจากการศึกษาความ
กว้างของน้ำหนักรถที่กระทำจะไม่มีผลต่อรูปแบบการบีบอัดที่เกิดขึ้น

Kompunt Jindawat 2011: The Influence of Soft Foundation on Pavement Layer.

Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Mr. Barames Vardhanabhuti, Ph.D. 286 pages.

One of problems for pavement construction on soft ground is cracks, rutting and undulation of pavement surface. The important factors leading to the damages are thickness of pavement layer and low elastic modulus of soft ground foundation comparing to that of pavement materials. As the wheel load is applied on the pavement surface, the soft ground underneath could flow out laterally, induced flexural stress, and consequently, the confining pressure in the pavement layer was changed.

This mechanism could be illustrated by the finite element analysis result of a continuous two-elastic layer model and assuming the material behavior as elastic-perfectly plastic. In this study, the important variable parameters are (1) the elastic modulus of pavement (E_1) and soft ground foundation (E_2), (2) the thickness of pavement layer, and (3) the width of wheel load.

The analytical results show that, for a very thick soft ground layer and low pavement thickness, the mode of pavement failure is similar to punching shear failure (Mode A). When the proportion of E_1/E_2 is increased to a value higher than 20 to 100 times, the failure mode change from punching shear failure to general shear failure (Mode B). The width of wheel load was no significant effect to the mode of failure mechanism.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ดร.बारเมศ วรรณะภูติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักที่ได้เสียสละเวลา ในการให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา และตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ท่านอาจารย์ รศ.ดร.วิชาญ ภูพัฒน์ ผศ.ดร. พรเกษม จงประดิษฐ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษา อันเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยงานวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ตลอดจน ท่าน รศ. วัชรินทร์ วิทยกุล ที่เป็นประธานการสอบท่าน รศ.ดร. ชวเลข วณิชเวทิน ที่เป็นผู้ทรงคุณวุฒิการสอบรวมถึงทำการตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์จนแล้วเสร็จด้วยดี

ท้ายที่สุด ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจและสนับสนุนทุนการศึกษาเสมอมา รวมถึง พี่ น้องและเพื่อนๆ ที่ได้ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือมาโดยตลอด จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ประโยชน์อันเนื่องมาจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่ คุณพ่อ คุณแม่ และคณาจารย์ทุกท่านที่ได้เมตตาอบรมสั่งสอนให้มีความรู้จนถึงปัจจุบัน

คมพันธ์ จินดาวัฒน์

เมษายน 2554

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(12)
คำอธิบายสัญลักษณ์	(25)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย	39
ผลและวิจารณ์	71
สรุปผลการวิจัย	222
ข้อเสนอแนะ	227
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	228
ภาคผนวก	234
ภาคผนวก ก ทฤษฎีบทในการวิเคราะห์	235
ภาคผนวก ข แบบจำลองเชิงอิลาสติกชนิดต่างๆ	245
ภาคผนวก ค ผลการวิจัย	249
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	286

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 พารามิเตอร์ของดินคันทางในชั้นต่างๆ	11
2 สรุปดัชนีทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ	18
3 พารามิเตอร์ประกอบ K , n และ R_f	19
4 ค่า E_{us}/s_u สำหรับดินเหนียวอ่อน	20
5 ค่า E_{us}/s_u สำหรับดินเหนียวแข็งปานกลาง	21
6 ค่า E_{us}/s_u สำหรับดินเหนียวแข็ง	22
7 ช่วงค่า Rigidity Index เบื้องต้นของดินแต่ละชนิด	23
8 พารามิเตอร์ Drained Tangent Modulus	24
9 ช่วงค่า Drained Secant Modulus ของดิน	25
10 ช่วงค่า Drained Poisson's Ratio	26
11 สรุปคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ	29
12 สรุป Geometry แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์	43
13 สรุปสรุปคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นผิวทางและชั้นดินฐานราก	49
14 สรุปคุณสมบัติการรับแรงเฉือนของชั้นผิวทางและชั้นดินฐานราก	50
15 สรุปพารามิเตอร์แบบจำลองกรณีศึกษา Simple Box Case I	56
16 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณค่าแรงดันน้ำส่วนเกินกรณีศึกษา Simple Box Case I	57
17 แสดงการคำนวณค่า Excess Pore Pressure ด้วยค่า Increment of Total Stress ที่ได้จากโปรแกรม (Case I)	57
18 แสดงการคำนวณโดยผลลัพธ์จากค่า Increment of Strain ที่ได้จากโปรแกรม (Case I)	58
19 เปรียบเทียบผลลัพธ์โดยใช้ค่า Excess Pore Water Pressure ที่ได้จากโปรแกรม (Case I)	58
20 สรุปพารามิเตอร์แบบจำลองกรณีศึกษา Simple Box Case II	59
21 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณค่าแรงดันน้ำส่วนเกินกรณีศึกษา Simple Box Case II	59

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
22	แสดงการคำนวณค่า Excess Pore Pressure ด้วยค่า Increment of Total Stress ที่ได้จากโปรแกรม (Case II)	60
23	แสดงการคำนวณโดยผลลัพธ์จากค่า Increment of Strain ที่ได้จากโปรแกรม (Case II)	60
24	เปรียบเทียบผลลัพธ์โดยใช้ค่า Excess Pore Water Pressure ที่ได้จากโปรแกรม (Case II)	61
25	สรุปพารามิเตอร์แบบจำลองกรณีศึกษา Simple Box Case III	62
26	แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณค่าแรงดันน้ำส่วนเกินกรณีศึกษา Simple Box Case III	62
27	แสดงการคำนวณค่า Excess Pore Pressure ด้วยค่า Increment of Total Stress ที่ได้จากโปรแกรม (Case III)	63
28	แสดงการคำนวณโดยผลลัพธ์จากค่า Increment of Strain ที่ได้จากโปรแกรม (Case III)	63
29	เปรียบเทียบผลลัพธ์โดยใช้ค่า Excess Pore Water Pressure ที่ได้จากโปรแกรม (Case III)	64
30	สรุป Geometry แบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบ	66
31	สรุปคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	66
32	แสดงผลการเปรียบเทียบค่า Total Vertical Stress ในวัสดุชั้นที่ 2 ระหว่างแบบจำลอง Finite Element และแบบจำลอง Two-Layer Systems	67
33	การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์	68
34	แสดงรูปแบบของการบีบอัดที่เกิดขึ้นในวัสดุชั้นผิวทาง	95
35	แสดงค่าน้ำหนักที่มากกระทำกับชั้นผิวทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A และโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.50 เมตร	137

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
36 แสดงค่าน้ำหนักที่มากกระทำกับชั้นผิวทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A และโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.00 เมตร	145
37 แสดงค่าน้ำหนักที่มากกระทำกับชั้นผิวทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C และโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.50 เมตร	154
38 แสดงค่าน้ำหนักที่มากกระทำกับชั้นผิวทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C และโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.00 เมตร	162
39 แสดงค่าน้ำหนักที่มากกระทำกับชั้นผิวทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D และโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.50 เมตร	171
40 แสดงค่าน้ำหนักที่มากกระทำกับชั้นผิวทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D และโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.00 เมตร	179
41 แสดงค่า Relative Shear Stress ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A เปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.5 เมตร	187
42 แสดงค่า Relative Shear Stress ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C เปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.5 เมตร	188
43 แสดงค่า Relative Shear Stress ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D เปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.5 เมตร	189

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
44 แสดงค่า Relative Shear Stress ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A เปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.0 เมตร	190
45 แสดงค่า Relative Shear Stress ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C เปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.0 เมตร	191
46 แสดงค่า Relative Shear Stress ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D เปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.0 เมตร	192
47 แสดงการพัฒนาตัวของผิวการบีบอัดวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A เปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.5 เมตร	194
48 แสดงการพัฒนาตัวของผิวการบีบอัดวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C เปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.5 เมตร	195
49 แสดงการพัฒนาตัวของผิวการบีบอัดวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D เปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.5 เมตร	196
50 แสดงการพัฒนาตัวของผิวการบีบอัดวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A เปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.0 เมตร	197
51 แสดงการพัฒนาตัวของผิวการบีบอัดวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C เปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.0 เมตร	198

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
52 แสดงการพัฒนาตัวของผิวการพิบัติวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D เปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.0 เมตร	199
53 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดสำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทางชนิดต่างๆ	224
 ตารางผนวกที่	
ค1 แสดงค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรอง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 0.50 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินอ่อน ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา	250
ค2 แสดงค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรอง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 0.50 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินแข็ง ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา	251
ค3 แสดงค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรอง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 2.00 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินอ่อน ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา	252
ค4 แสดงค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรอง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 2.00 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินแข็ง ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา	253

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ค11 แสดงค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรอง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 2.00 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินอ่อน ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา	260
ค12 แสดงค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรอง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 2.00 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินแข็ง ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา	261
ค13 แสดงค่าของเส้นทางเดินหน่วยแรง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 0.50 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินอ่อน ($E1/E2 = 10$ เท่า) ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา	262
ค14 แสดงค่าของเส้นทางเดินหน่วยแรง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 0.50 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินแข็ง ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา	262
ค15 แสดงค่าของเส้นทางเดินหน่วยแรง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 2.00 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินอ่อน ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา	263
ค16 แสดงค่าของเส้นทางเดินหน่วยแรง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 2.00 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินแข็ง ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา	263
ค17 แสดงค่าของเส้นทางเดินหน่วยแรง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 0.50 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินแข็ง ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา	264

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ค18 แสดงค่าของเส้นทางเดินหน่วยแรง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 0.50 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานราก ดินแข็ง ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา	264
ค19 แสดงค่าของเส้นทางเดินหน่วยแรง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 2.00 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานราก ดินอ่อน ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา	265
ค20 แสดงค่าของเส้นทางเดินหน่วยแรง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 2.00 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานราก ดินแข็ง ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา	265
ค21 แสดงค่าของเส้นทางเดินหน่วยแรง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 0.50 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานราก ดินอ่อน ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา	266
ค22 แสดงค่าของเส้นทางเดินหน่วยแรง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 0.50 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานราก ดินแข็ง ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา	266
ค23 แสดงค่าของเส้นทางเดินหน่วยแรง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 2.00 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานราก ดินอ่อน ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา	267
ค24 แสดงค่าของเส้นทางเดินหน่วยแรง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 2.00 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานราก ดินแข็ง ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา	267
ค25 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดเปรียบเทียบระหว่างฐานรากดินอ่อนและฐานรากดินแข็ง โดยความหนาของโครงสร้างชั้นทางเท่ากับ 0.5 เมตร	268
ค26 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดเปรียบเทียบระหว่างฐานรากดินอ่อนและฐานรากดินแข็ง โดยความหนาของโครงสร้างชั้นทางเท่ากับ 1.0 เมตร	269

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ค40 แสดงค่าน้ำหนักที่ทำให้เกิดพื้นที่พลาสติก และตำแหน่งที่พื้นที่พลาสติกเกิดขึ้น โดยความหนาของโครงสร้างชั้นทางเท่ากับ 3.0 เมตร	283
ค41 แสดงค่าน้ำหนักที่ทำให้เกิดพื้นที่พลาสติก และตำแหน่งที่พื้นที่พลาสติกเกิดขึ้น โดยความหนาของโครงสร้างชั้นทางเท่ากับ 3.5 เมตร	284
ค42 แสดงค่าน้ำหนักที่ทำให้เกิดพื้นที่พลาสติก และตำแหน่งที่พื้นที่พลาสติกเกิดขึ้น โดยความหนาของโครงสร้างชั้นทางเท่ากับ 4.0 เมตร	285

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะการแตกร้าวของคันชั้นผิวทางที่ก่อสร้างบนฐานรากดินเหนียวอ่อน	2
2	แสดงการเกิดผิวทรุดเป็นแอ่ง	5
3	แสดงการเกิดผิวเป็นร่อง	6
4	ลักษณะการเกิด General Shear Failure	7
5	ลักษณะการเกิด Punching Shear Failure	7
6	ลักษณะการเกิด Local Shear Failure	8
7	แสดงรูปแบบของการบีบอัดโดยความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของโครงสร้างกับค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชั้นดินฐานราก	9
8	โครงสร้างชั้นทางโดยทั่วไปของถนนลาดยาง	10
9	การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในชั้นโครงสร้างทางแกร่ง	12
10	ลักษณะโครงสร้างของถนนคอนกรีต	13
11	แสดงแรงกระทำและพฤติกรรมทางกลของคันทางบนดินอ่อนหลังเปิดการจราจร	14
12	แผนที่เขตจังหวัดและเขตดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ	15
13	รูปตัดสามมิติของดินตะกอนบริเวณที่ราบกลางตอนล่างตอนกลาง	17
14	ความสัมพันธ์ของ Initial Void Ratio ของดินชนิดต่างๆ กับ พารามิเตอร์ G_v และ F_v	27
15	แบบจำลองดินที่ใช้ในงานวิศวกรรมปฐพี	34
16	วิธีการดำเนินงานวิจัย	40
17	แสดงรูปร่าง และการแบ่ง Element ของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์	43
18	การใส่ระดับน้ำใต้ดินในแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์	44
19	แสดงแบบจำลองในขั้นตอน Initial Stage	51
20	แสดงแบบจำลองในขั้นตอน Pavement Construction Stage	52
21	แบบจำลองในขั้นตอน Loading Stage	52
22	แสดงแบบจำลองที่ใช้เปรียบเทียบสภาวะการทดสอบ	53
23	แสดงการเกิด Excess Pore Water Pressure ทั้ง 2 สภาวะ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของดินฐานราก	54
24	แสดงเส้นทางเดินของหน่วยแรงทั้ง 2 สภาวะ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของดินฐาน	55

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
25	แสดงรูปร่างของแบบจำลองกรณีศึกษา Simple Box Case I	56
26	แสดงรูปร่างของแบบจำลองกรณีศึกษา Simple Box Case II	59
27	แสดงรูปร่างของแบบจำลองกรณีศึกษา Simple Box Case III	62
28	แสดงรูปร่าง และการแบ่ง Element ของแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบ	65
29	แสดงการกำหนดระดับน้ำใต้ดินในแบบจำลองทดสอบ	67
30	แสดงแผนภูมิการวิเคราะห์และประมาณผลด้วยคอมพิวเตอร์	69
31	แสดงลักษณะพื้นที่พลาสติกที่เกิดบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นผิวทางและชั้นฐานราก	74
32	แสดงลักษณะพื้นที่พลาสติกซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกันทั้งที่ตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของชั้นผิวทาง	74
33	แสดงลักษณะพื้นที่พลาสติกซึ่งเกิดขึ้นที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นผิวทาง	76
34	แสดงลักษณะพื้นที่พลาสติกซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกันทั้งที่ตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของชั้นผิวทาง	76
35	การพัฒนาตัวของ Plastic Zone ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน โดยวัสดุชั้นผิวทางมีค่าความหนา 0.50 เมตร	78
36	การพัฒนาตัวของ Plastic Zone ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน โดยวัสดุชั้นผิวทางมีค่าความหนา 2.00 เมตร	80
37	การพัฒนาตัวของ Plastic Zone ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน โดยวัสดุชั้นผิวทางมีค่าความหนา 0.50 เมตร	82
38	การพัฒนาตัวของ Plastic Zone ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน โดยวัสดุชั้นผิวทางมีค่าความหนา 2.00 เมตร	84
39	การพัฒนาตัวของ Plastic Zone ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง โดยวัสดุชั้นผิวทางมีค่าความหนา 0.50 เมตร	86
40	การพัฒนาตัวของ Plastic Zone ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง โดยวัสดุชั้นผิวทางมีค่าความหนา 2.00 เมตร	87
41	การพัฒนาตัวของ Plastic Zone ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง โดยวัสดุชั้นผิวทางมีค่าความหนา 0.50 เมตร	88

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
42 การพัฒนาตัวของ Plastic Zone ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็งโดยวัสดุชั้นผิวทางมีค่าความหนา 2.00 เมตร	90
43 ลักษณะการเกิดการพิบัติรูปแบบ A	92
44 ลักษณะการเกิดการพิบัติรูปแบบ B	93
45 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งภายในโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีวัสดุโครงสร้างชั้นทาง มีความหนาน้อย	103
46 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งภายในโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีวัสดุโครงสร้างชั้นทาง มีความหนาปานกลางถึงสูง	104
47 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งภายในโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีวัสดุโครงสร้างชั้นทาง มีความหนาน้อย	105
48 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งภายในโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีวัสดุโครงสร้างชั้นทาง มีความหนาปานกลางถึงสูง	106
49 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งภายในโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีวัสดุโครงสร้างชั้นทาง มีความหนาน้อย	107
50 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งภายในโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีวัสดุโครงสร้างชั้นทาง มีความหนาปานกลางถึงสูง	108
51 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีโครงสร้าง ชั้นทางมีความหนาน้อย	114

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
52 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง	115
53 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย	116
54 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง	117
55 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย	118
56 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง	119
57 การกระจายตัวของค่าแรงดันน้ำส่วนเกินภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย	124
58 การกระจายตัวของค่าแรงดันน้ำส่วนเกินภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง	125
59 การกระจายตัวของค่าแรงดันน้ำส่วนเกินภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย	126

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
60	การกระจายตัวของค่าแรงดันน้ำส่วนเกินภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีโครงสร้างชั้นทาง มีความหนาปานกลางถึงสูง 127
61	การกระจายตัวของค่าแรงดันน้ำส่วนเกินภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีโครงสร้างชั้นทาง มีความหนาน้อย 128
62	การกระจายตัวของค่าแรงดันน้ำส่วนเกินภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีโครงสร้างชั้นทาง มีความหนาปานกลางถึงสูง 129
63	การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ 133
64	การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง 134
65	การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง 135
66	การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง 136
67	แสดงเส้นทางเดินหน่วยแรงของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง ที่ระดับความลึกต่างๆ กรณีโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาเท่ากับ 0.50 เมตร 138

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
68 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ	141
69 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง	142
70 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ	143
71 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง	144
72 แสดงเส้นทางเดินหน่วยแรงของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง ที่ระดับความลึกต่างๆ กรณีโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาเท่ากับ 2.00 เมตร	146
73 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ	150
74 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง	151
75 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง	152

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
76 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง	153
77 แสดงเส้นทางเดินหน่วยแรงของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง ที่ระดับความลึกต่างๆ กรณีโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาเท่ากับ 0.50 เมตร	155
78 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ	158
79 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง	159
80 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ	160
81 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง	161
82 แสดงเส้นทางเดินหน่วยแรงของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง ที่ระดับความลึกต่างๆ กรณีโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาเท่ากับ 2.00 เมตร	164
83 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ	167

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
84	การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง 168
85	การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง 169
86	การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง 170
87	แสดงเส้นทางเดินหน่วยแรงของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง ที่ระดับความลึกต่างๆ กรณีโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาเท่ากับ 0.50 เมตร 172
88	การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ 175
89	การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง 176
90	การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ 177
91	การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง 178

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
92 แสดงเส้นทางเดินหน่วยแรงของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง ที่ระดับความลึกต่างๆ กรณีโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาเท่ากับ 2.00 เมตร	181
93 ลักษณะเส้นทางเดินหน่วยแรงที่บริเวณด้านบนของชั้นผิวทาง สำหรับการบีบอัดรูปแบบ A	183
94 แสดงการลดลงของค่าความชันของเส้นทางเดินหน่วยแรง ที่บริเวณด้านบนของชั้นผิวทาง	184
95 แสดงการเพิ่มขึ้นของค่าความชันของเส้นทางเดินหน่วยแรงหลังจาก มีการกลับทิศของค่าหน่วยแรงที่บริเวณด้านบนของชั้นผิวทาง	184
96 แสดงค่ากำลังการรับแรงสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A บนชั้นฐานราก ดินอ่อน เมื่อเพิ่มความกว้างของหน่วยแรงที่มากระทำ และเพิ่มความหนาของ ชั้นผิวทาง	201
97 แสดงค่ากำลังการรับแรงสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade B บนชั้นฐานราก ดินอ่อน เมื่อเพิ่มความกว้างของหน่วยแรงที่มากระทำ และเพิ่มความหนาของชั้น ผิวทาง	201
98 แสดงค่ากำลังการรับแรงสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C บนชั้นฐานราก ดินอ่อน เมื่อเพิ่มความกว้างของหน่วยแรงที่มากระทำ และเพิ่มความหนาของชั้น ผิวทาง	202
99 แสดงค่ากำลังการรับแรงสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D บนชั้นฐานราก ดินอ่อน เมื่อเพิ่มความกว้างของหน่วยแรงที่มากระทำ และเพิ่มความหนาของชั้น ผิวทาง	202
100 แสดงค่ากำลังการรับแรงสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A บนชั้นฐานราก ดินแข็ง เมื่อเพิ่มความกว้างของหน่วยแรงที่มากระทำ และเพิ่มความหนาของชั้น ผิวทาง	203

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
101 แสดงค่ากำลังการรับแรงสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทางGrade B บนชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อเพิ่มความกว้างของหน่วยแรงที่มากกระทำ และเพิ่มความหนาของชั้นผิวทาง	203
102 แสดงค่ากำลังการรับแรงสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทางGrade C บนชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อเพิ่มความกว้างของหน่วยแรงที่มากกระทำ และเพิ่มความหนาของชั้นผิวทาง	204
103 แสดงค่ากำลังการรับแรงสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทางGrade D บนชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อเพิ่มความกว้างของหน่วยแรงที่มากกระทำ และเพิ่มความหนาของชั้นผิวทาง	204
104 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทางGrade A โดยเปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็งดินแข็ง กับขนาดความกว้างของหน่วยแรงที่มากกระทำ	205
105 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทางGrade B โดยเปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็งดินแข็ง กับขนาดความกว้างของหน่วยแรงที่มากกระทำ	206
106 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทางGrade C โดยเปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็งดินแข็ง กับขนาดความกว้างของหน่วยแรงที่มากกระทำ	207
107 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทางGrade D โดยเปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็งดินแข็ง กับขนาดความกว้างของหน่วยแรงที่มากกระทำ	208
108 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดของวัสดุชั้นผิวทางซึ่งก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินอ่อน และค่าอัตราส่วนของความหนาของชั้นผิวทางต่อความกว้างของน้ำหนักรวมที่มากกระทำ	209
109 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดของวัสดุชั้นผิวทางซึ่งก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินอ่อน และค่าอัตราส่วน Elastic Modulus ระหว่างชั้นผิวทางและชั้นดินฐานราก	210

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
110 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดของวัสดุชั้นผิวทางซึ่งก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินแข็ง และค่าอัตราส่วนของความหนาของชั้นผิวทางต่อความกว้างของน้ำหนักรถที่มากกระทำ	210
111 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดของวัสดุชั้นผิวทางซึ่งก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินอ่อน และค่าอัตราส่วน Elastic Modulus ระหว่างชั้นผิวทางและชั้นดินฐานราก	211
112 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดของวัสดุชั้นผิวทางซึ่งก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินอ่อน ต่อค่ากำลังรับแรงสูงสุดของชั้นฐานรากดินอ่อน และค่าอัตราส่วนของความหนาของชั้นผิวทางต่อความกว้างของน้ำหนักรถที่มากกระทำ	212
113 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดของวัสดุชั้นผิวทางซึ่งก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินแข็ง ต่อค่ากำลังรับแรงสูงสุดของชั้นฐานรากดินแข็ง และค่าอัตราส่วนของความหนาของชั้นผิวทางต่อความกว้างของน้ำหนักรถที่มากกระทำ	212
114 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงสูงสุดและข้อมูลการเกิด First Plastic Point เมื่อชั้นผิวทางมีการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรง, ค่าความหนา และความกว้างของน้ำหนักรถที่มากกระทำ กรณีชั้นฐานรากดินอ่อน	214
115 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงสูงสุดและข้อมูลการเกิด First Plastic Point เมื่อชั้นผิวทางมีการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรง, ค่าความหนา และความกว้างของน้ำหนักรถที่มากกระทำ กรณีชั้นฐานรากดินแข็ง	215
116 แสดงค่าปริมาณการทรุดตัวสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A โดยเปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง และขนาดความกว้างของหน่วยแรงที่มากกระทำ	216
117 แสดงค่าปริมาณการทรุดตัวสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade B โดยเปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของวัสดุโครงสร้างชั้นทางและขนาดความกว้างของหน่วยแรงที่มากกระทำ	217

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
118 แสดงค่าปริมาณการทรุดตัวสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทางGrade C โดยเปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง และขนาดความกว้างของหน่วยแรงที่มากระทำ	217
119 แสดงค่าปริมาณการทรุดตัวสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทางGrade D โดยเปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง และขนาดความกว้างของหน่วยแรงที่มากระทำ	218
120 แสดงตัวอย่างการวัดค่าแองการทรุดตัว	219
121 แสดงค่าขนาดของแองการทรุดตัวของวัสดุโครงสร้างชั้นทางGrade A โดยเปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง และขนาดความกว้างของหน่วยแรงที่มากระทำ	220
122 แสดงค่าขนาดของแองการทรุดตัวของวัสดุโครงสร้างชั้นทางGrade B โดยเปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง และขนาดความกว้างของหน่วยแรงที่มากระทำ	220
123 แสดงค่าขนาดของแองการทรุดตัวของวัสดุโครงสร้างชั้นทางGrade C โดยเปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง และขนาดความกว้างของหน่วยแรงที่มากระทำ	221
124 แสดงค่าขนาดของแองการทรุดตัวของวัสดุโครงสร้างชั้นทางGrade D โดยเปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง และขนาดความกว้างของหน่วยแรงที่มากระทำ	221

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก1 การกำหนดทิศทางของความเค้นในโปรแกรม PLAXIS	237
ก2 แบบจำลองดินที่แสดงพฤติกรรม Elastoplastic	239
ก3 Yield Surface ของแบบจำลองแบบ Mohr-Coulomb กรณีที่ $c = 0$	241

คำอธิบายสัญลักษณ์

E_1	=	ค่า Elastic Modulus ของชั้นผิวทาง
E_2	=	ค่า Elastic Modulus ของชั้นดินฐานราก
c	=	ค่า Cohesion
ϕ	=	ค่า Friction Angle
ν	=	ค่า Poisson Ratio
E_{ui}	=	Undrained Initial Tangent Modulus
SL	=	Stress Levels
σ_c	=	Isotropic Confining Stress
s_u	=	Undrained Shear Strength
I_r	=	Rigidity Index
σ'_1	=	Effective Major Principal Stress
σ'_3	=	Effective Minor Principal Stress
	=	พารามิเตอร์ประกอบแสดงในตารางที่ 8
ϕ'_{tc}	=	ค่า Friction Angle ซึ่งได้จากการทดสอบ Triaxial Compression
p_a	=	Atmospheric Pressure
E_{ds}	=	Drained Secant Modulus
SPT	=	Standard Penetration Test
q_c	=	Tip Cone Resistance
ν_d	=	Drained Poisson's Ratio
ν_{di}	=	Initial Tangent Drained Poisson's Ratio
e_i	=	Initial Void Ratio
ϕ_{rel}	=	Relative Friction Angle
σ'_c	=	Effective Confining Stress
γ	=	Unit Weight
γ_{sat}	=	Saturated Unit Weight
E	=	Young's Modulus
E_u	=	Undrained Elastic Modulus

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

ψ	=	Dilatancy Angle
$\Delta\varepsilon_v$	=	Incremental Volumetric Strain
ΔU	=	Excess Pore Water Pressure
K_u	=	Undrained Bulk Modulus
K'	=	Effective Bulk Modulus
B	=	Skemton's B-parameter
$K_{w,ref}/n$	=	Pore Fluid
Δu	=	Excess Pore Water Pressure
Δp	=	Increment of Total Mean Stress
σ_{xx}	=	Increment of Total Stress ตามแนวแกน X
σ_{yy}	=	Increment of Total Stress ตามแนวแกน Y
σ_{zz}	=	Increment of Total Stress ตามแนวแกน Z
ε_{xx}	=	Increment of Strain ตามแนวแกน X
ε_{yy}	=	Increment of Strain ตามแนวแกน Y
ε_{zz}	=	Increment of Strain ตามแนวแกน Z
ε_v	=	Total Increment of Strain
P_{excess}	=	Excess Pore Water Pressure ที่ได้จากโปรแกรม
σ_{yy}	=	Total Vertical Stress
σ_{xx}	=	Total Horizontal Stress
σ'_{yy}	=	Effective Vertical Stress
σ'_{xx}	=	Effective Total Horizontal Stress

อิทธิพลของฐานรากดินอ่อนที่มีผลต่อโครงสร้างชั้นทาง

The Influence of Soft Foundation on Pavement Layer

คำนำ

การก่อสร้างถนนชนิด Flexible Pavement ในบริเวณภาคกลางของประเทศไทย โดยเฉพาะบริเวณพื้นที่ลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่างมักประสบปัญหาการแตกร้าว และความไม่ราบเรียบของผิวทางภายหลังจากการเปิดให้บริการ เช่น การเกิดร่องล้อ และการเกิดหลุมบ่อ ดังแสดงในภาพที่ 1 เป็นต้น การชำรุดเสียหายของโครงสร้างชั้นทางส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้ใช้ถนน และอายุการใช้งานของโครงสร้างชั้นทางที่ลดลง รวมทั้งต้องเสียงบประมาณในการซ่อมบำรุงสูง

หนึ่งในสาเหตุของการแตกร้าวซึ่งเกิดในโครงสร้างชั้นทางมีสาเหตุมาจากการไหลตัวออกด้านข้าง และการทรุดตัวของดินฐานรากขณะรับน้ำหนักของล้อ เนื่องจากชั้นดินฐานรากประกอบไปด้วยดินเหนียวอ่อน ที่มีคุณสมบัติการรับแรงเฉือนต่ำ และมีปริมาณการยุบตัวสูง จึงเป็นสาเหตุความอ่อนแอของโครงสร้างชั้นทางซึ่งจะพัฒนาตัวกลายเป็นการบีบอัดต่อไป



ภาพที่ 1 ลักษณะการแตกร้าวของคันโครงสร้างชั้นทางที่ก่อสร้างบนฐานรากดินเหนียวอ่อน

ที่มา : วิชาญ (2545)

การวิจัยครั้งนี้ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมของโครงสร้างชั้นทางโดยจำลองให้มีแรงบีบอัดทางด้านข้าง (Confined Pavement) และพิจารณาปัจจัยที่สำคัญต่อพฤติกรรมของผิวทาง คือ (1) ค่าอัตราส่วนโมดูลัสระหว่างโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานราก (2) ความหนาของโครงสร้างชั้นทาง และ (3) ความกว้างของน้ำหนักรถที่มากกระทำ ในการวิเคราะห์พฤติกรรมกลของโครงสร้างชั้นทางทำโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Finite Element) และกำหนดให้วัสดุโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานรากเป็นระบบ Continuous Two-Elastic Layers และมีพฤติกรรมแบบ Elastic Perfectly Plastic

ผลการวิเคราะห์ประกอบด้วย รูปแบบของการพิบัติที่เกิดขึ้น, การกระจายตัวของค่าหน่วยแรง และเส้นทางเดินของหน่วยแรงภายในโครงสร้างชั้นทาง, ปริมาณและขนาดของแอ่งการทรุดตัว และน้ำหนักรถทุกประลัยของวัสดุ ซึ่งจะช่วยให้วิศวกรเข้าใจถึงอิทธิพลของชั้นดินฐานรากที่มีผลต่อพฤติกรรมของการพิบัติและน้ำหนักรถทุกประลัยของโครงสร้างชั้นทาง และสามารถนำไปพัฒนาเกณฑ์การออกแบบบนดินอ่อน เพื่อลดปัญหาความเสียหายจากร่องล้อในอนาคต

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าหน่วยแรง, เส้นทางเดินของหน่วยแรง และการบิดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทาง โดยศึกษาเปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง, ค่าอัตราส่วน Elastic Modulus ระหว่างโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานราก และความกว้างของน้ำหนักรถที่กระทำที่มีผลต่อกำลังรับแรง สูงสุดของวัสดุ
3. เพื่อพัฒนาองค์ความรู้ และแนวทางการออกแบบโครงสร้างชั้นทาง

ขอบเขตการวิจัย

1. การศึกษานี้ใช้หลักการทาง Finite Element เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation) หน่วยความเค้นและความเครียด (Stress and Strain) ที่เกิดขึ้นในแต่ละพื้นที่ของโครงสร้างชั้นทาง และชั้นดินฐานราก โดยกำหนดให้แบบจำลองมีคุณสมบัติเป็น Elastic Perfectly Plastic โดยใช้ Yield Function ชนิด Mohr-Coulomb
2. แบบจำลองที่ใช้เป็นแบบจำลองชนิด Two Elastic Confined Layers โดยที่ชั้นบนเป็นชั้นวัสดุผิวทาง และชั้นล่างเป็นดินฐานราก โดยพิจารณาค่าอัตราส่วน Elastic Modulus (E_1/E_2) ระหว่างโครงสร้างชั้นทาง (E_1) และชั้นดินฐานราก (E_2) กรณีของชั้นฐานรากดินอ่อนมีค่าเท่ากับ 10, 100, 1,000, 10,000 เท่า และกรณีของชั้นฐานรากดินแข็งมีค่าเท่ากับ 0.2, 2, 20, 200 เท่า พิจารณาความหนาของโครงสร้างชั้นทางตั้งแต่ 0.50 ถึง 4.00 เมตร และความกว้างของน้ำหนักรถที่กระทำมีค่าตั้งแต่ 0.30 ถึง 0.50 เมตร กำหนดให้ขนาดความลึกและความยาวของแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 25 และ 80 เมตรตามลำดับ
3. การวิจัยไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำภายในชั้นดิน โดยจะกำหนดให้ระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าระดับของชั้นดินที่พิจารณา
4. การศึกษาพฤติกรรมทางกลของวัสดุโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานรากจะทำการเพิ่มน้ำหนักขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งการบีบอัดเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์ หรือพฤติกรรมของวัสดุอยู่ในสภาวะ Plastic
5. การวิจัยนี้พิจารณาผลของพฤติกรรมเคลื่อนตัวที่เกิดจาก Elastic-Plastic Settlement เท่านั้น โดยไม่คำนึงถึงผลกระทบที่เกิดจากกระบวนการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Process)

การตรวจเอกสาร

1. ลักษณะการทรุดตัวและแตกร้าวของผิวทางถนนบนดินอ่อน

การทรุดตัวและรอยแตกบนถนนโดยเฉพาะส่วนที่เป็นผิวทางลาดยาง (Asphaltic Pavement) สามารถเกิดได้ในหลายลักษณะ เนื่องจากหลายสาเหตุด้วยกัน สำหรับลักษณะการแตกร้าวของผิวทางที่ก่อสร้างบนดินเหนียวอ่อน สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทคือ ผิวทางทรุดตัวเป็นแอ่ง (Depression) และผิวเป็นร่อง (Rutting)

ผิวทรุดเป็นแอ่ง (Depression) เป็นลักษณะของการชำรุดที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างชั้นทางซึ่งตัดผ่านดินอ่อน มีสาเหตุเนื่องจากกระบวนการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) ของชั้นดินอ่อนทำให้เกิดการยุบตัว แต่ปริมาณการยุบตัวไม่เท่ากัน จึงทำให้ผิวทางเป็นแอ่ง มีระดับต่ำกว่าผิวทางในบริเวณข้างเคียงหรืออาจเกิดจากมีข้อผิดพลาดในการบดทับชั้นโครงสร้างทาง ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แสดงการเกิดผิวทรุดเป็นแอ่ง

ที่มา: Sewerhistory (2004)

สำหรับผิวทางเป็นร่อง (Rutting) จะเกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทางที่มีรถวิ่งเป็นประจำ โดยมีลักษณะเป็นร่องจากการยุบตัว (ถ้าเป็นรอยดินจะเห็นเมื่อน้ำฝนขังเท่านั้น) และที่บริเวณข้างร่องจะ

เกิดการยุบตัวขึ้น สาเหตุเกิดจากวัสดุในชั้นโครงสร้างทางหรือชั้นดินเบื้องล่างถูกอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) หรือเกิดการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Lateral Movement) โดยน้ำหนักการจราจร หรืออาจจะเกิดจากความบกพร่องในการบดอัด (Compaction) ในการก่อสร้าง โดยลักษณะของผิวทางเป็นร่องดังแสดงในภาพที่ 3



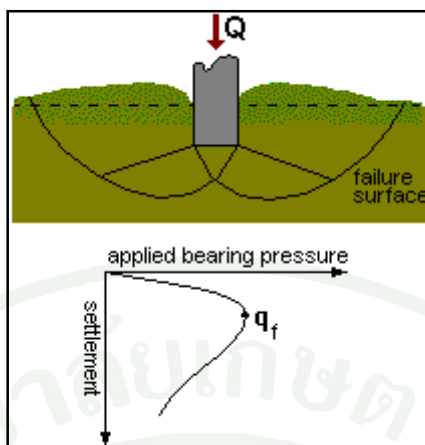
ภาพที่ 3 แสดงการเกิดผิวเป็นร่อง

ที่มา: [Memphis](#) (2010)

รูปแบบของการบีบอัด

General Shear Failure

เมื่อมีน้ำหนัก Q กระทำลงบนโครงสร้างฐานราก การยุบตัวที่เกิดขึ้นในวัสดุจะเริ่มจากสถานะที่เป็นอิลาสติก จากนั้นจะค่อยๆ เปลี่ยนเป็นพลาสติกเมื่อน้ำหนักที่กระทำมีค่ามากขึ้น การบีบอัดจะเกิดขึ้นเมื่อพื้นที่พลาสติกพัฒนาตัวจากบริเวณข้างใต้ของน้ำหนักที่มากกระทำ มาบรรจบครบวงที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง การบีบอัดชนิดนี้มักจะเกิดในทราย และดินเหนียวซึ่งมีความแน่นอยู่พอสมควร โดยลักษณะการเกิดขึ้นของ General Shear Failure ดังแสดงในภาพที่ 4

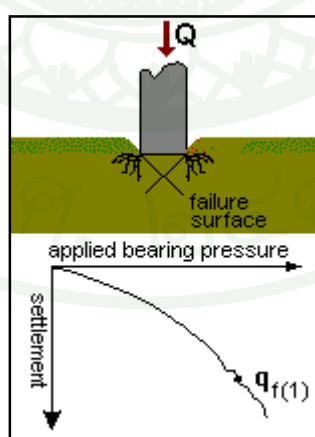


ภาพที่ 4 ลักษณะการเกิด General Shear Failure

ที่มา: Environment.uwe (2010)

Punching Shear Failure

รูปแบบการพิบัติชนิดนี้จะเกิดขึ้นในดินที่มีความแข็งแรงต่ำ หรือในดินที่มีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่ำ (Low Relative Density) โดยจะเกิดการยุบตัวในแนวตั้งจากบริเวณด้านบนของฐานรากลงมาถึงที่ที่ใด ดังแสดงในภาพที่ 5

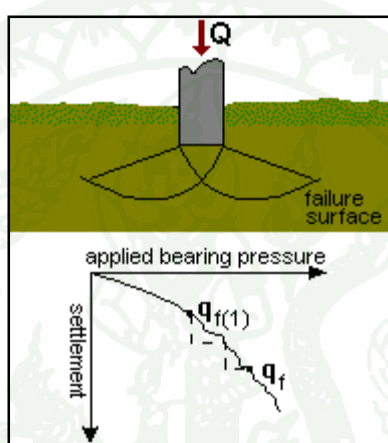


ภาพที่ 5 ลักษณะการเกิด Punching Shear Failure

ที่มา: Environment.uwe (2010)

Local Shear Failure

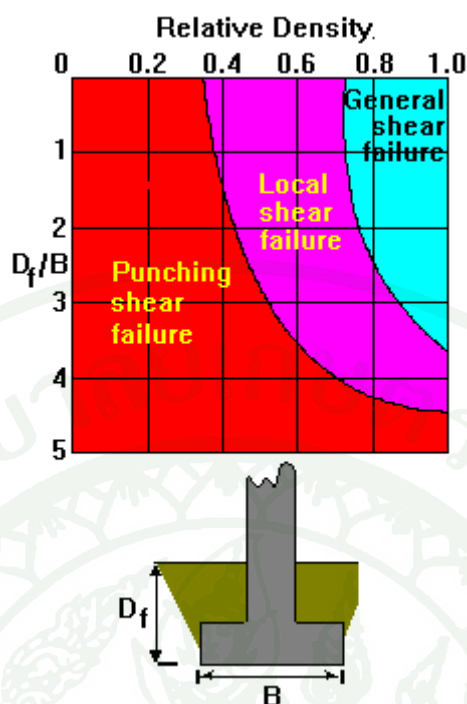
รูปแบบของการบีบอัดดินนี้จะเกิดขึ้นในดินที่มีความแข็งแรงพอประมาณ หรือมีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์พอประมาณ (Medium Relative Density) โดยจะมีการยุบตัวใน แนวตั้งซึ่งการบีบอัดจะเริ่มบริเวณด้านข้างของโครงสร้าง และวงการบีบอัดจะไม่พัฒนาตัวไปจนถึง ด้านบนของผิวชั้นฐานรากหรือไม่มีการเลื่อนขาดในเนื้อดินเกิดขึ้น โดยลักษณะการเกิดขึ้นของ Local Shear Failure ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ลักษณะการเกิด Local Shear Failure

ที่มา: Environment.uwe (2010)

จากผลการทดสอบในทราย Vesic (1938) กล่าวว่าไว้ว่ารูปแบบของการบีบอัดที่เกิดขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของโครงสร้างฐานรากและความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชั้นดิน



ภาพที่ 7 แสดงรูปแบบของการพังทลายโดยความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของโครงสร้างกับค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชั้นดินฐานราก

ที่มา: Vesic (1938)

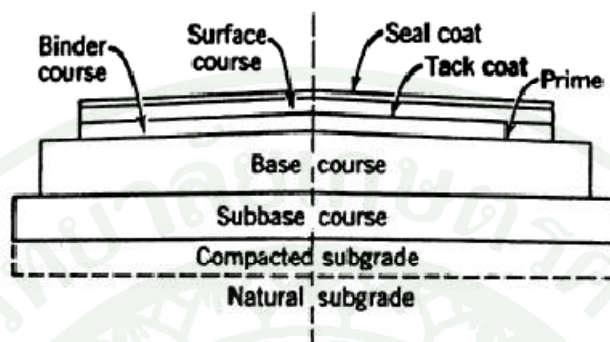
2. ลักษณะโครงสร้างของโครงสร้างชั้นทาง

Yoder (1959) ได้จำแนกประเภทของผิวทาง โดยพิจารณาจากพฤติกรรมการกระจายแรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกและ โครงสร้างชั้นทาง ออกเป็น 2 ประเภท คือ (1) ถนนที่มีโครงสร้างผิวทางแบบยืดหยุ่น (Flexible Pavement) และ (2) ถนนที่มีโครงสร้างผิวทางแบบแข็ง (Rigid Pavement)

2.1 โครงสร้างทางยืดหยุ่น (Flexible Pavement)

ถนนประเภทโครงสร้างทางยืดหยุ่นหรือถนนลาดยาง โดยทั่วไปจะมีโครงสร้างชั้นทาง ประกอบด้วย ชั้นผิวทาง (Surface) วางบนชั้นพื้นทาง (Base Course) และชั้นรองพื้นทาง

(Subbase Course) ซึ่งโครงสร้างทางทั้งหมดจะวางอยู่บนชั้นดินคันทาง (Subgrade) ซึ่งจะได้รับการบดอัดอีกทีหนึ่ง ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 โครงสร้างชั้นทางโดยทั่วไปของถนนลาดยาง

ที่มา: Yoder (1959)

ผิวทาง (Surface)

เป็นวัสดุผสมแอสฟัลท์ ซึ่งมีความหนาประมาณ 1 นิ้วลงไปจนถึงชั้นดินเดิม ขึ้นกับประเภทของผิวทางที่ใช้ แต่ผิวทางโดยทั่วไปในปัจจุบัน จะเป็นแอสฟัลท์คอนกรีตมีความหนาอยู่ระหว่าง 2 นิ้วไปจนถึงชั้นดินเดิมเช่นกันขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบ

พื้นทางและรองพื้นทาง (Base and Subbase Course)

เป็นส่วนประกอบของชั้นโครงสร้างถนนที่อยู่ข้างล่างต่อจากชั้นผิวทาง มีจุดประสงค์ในการกระจายน้ำหนักบรรทุกจากการจราจรเพื่อลดค่า Stress ที่เกิดขึ้น ก่อนถ่ายลงสู่ดินคันทางหรือดินเดิม เพื่อป้องกันไม่ให้เกิด Shear Failure ขึ้นในชั้นดินคันทาง

วัสดุสำหรับพื้นทางและรองพื้นทางนี้สามารถเลือกใช้ได้หลายชนิดโดยความหนาจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัววัสดุเอง ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้วัสดุที่มีลักษณะเป็นเม็ดบดอัดแน่น เช่น หินคลุก ตะกรัน กรวด ทราย หรือส่วนผสมของวัสดุเหล่านี้ หรืออาจใช้ดินที่ปรับปรุงคุณภาพก็ได้

ดินคันทาง (Subgrade / Embankment)

หรือเรียกอีกอย่างว่าดินเดิม ซึ่งตามนิยามถือเป็นวัสดุตามธรรมชาติที่ไม่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพทำหน้าที่เสมือนเป็นฐานรากในการรองรับน้ำหนักทั้งหมดที่มากระทำบนถนน แต่ในทางปฏิบัติจะต้องมีการบดอัดให้ได้ความหนาแน่นสูงสุดที่ความลึกระดับหนึ่งเพื่อเสริมสร้างความแข็งแรงของคันทาง

คุณสมบัติของวัสดุชั้นทาง

Fwa *et al.* (1998) ได้ศึกษาพารามิเตอร์ของชั้นคันทางในทุกๆชั้น ด้วยวิธีการทดสอบ Triaxial Test ร่วมกับการทดสอบ Marshall Test เพื่อให้ได้คุณสมบัติของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง ซึ่งผลการทดสอบคุณสมบัติของโครงสร้างชั้นทาง ดังแสดงในตารางที่ 1

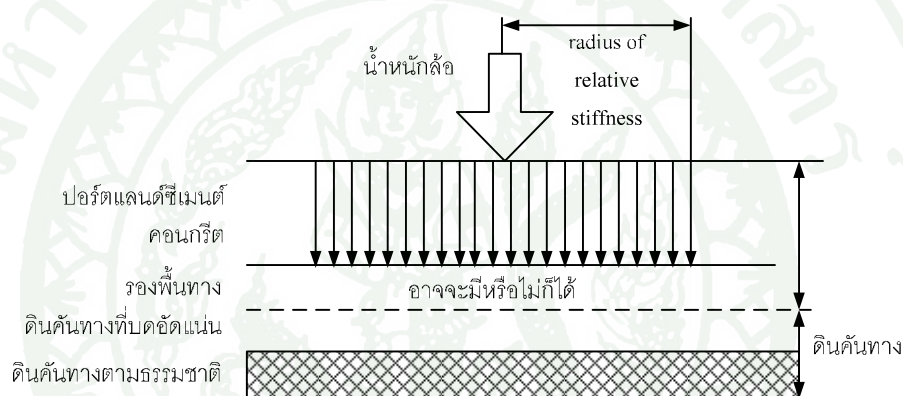
ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของดินคันทางในชั้นต่างๆ

วัสดุชั้นทาง	Cohesion c' (kPa)	Friction Angle ϕ' (degree)	Drained	Drained
			Elastic Modulus E' (kPa)	Poisson Ratio v'
1. Asphaltic Layer	210	30	27.6×10^6	0.35
2. Base Layer	80	54.1	276×10^3	0.35
3. Subbase Layer	50	38.5	104×10^3	0.35
4. Subgrade Layer	20.4	23	34.5×10^3	0.35

ที่มา: Fwa et al. (1998)

2.2 โครงสร้างทางแข็ง (Rigid Pavement)

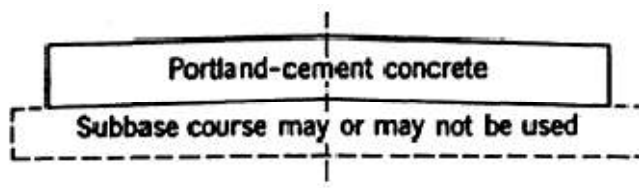
โครงสร้างทางแข็งโดยทั่วไปจะหมายถึงถนนที่มีผิวทางเป็นคอนกรีตและเนื่องจากคอนกรีตมีค่าความแข็งแรง (Rigidity) และค่าอิลาสติกโมดูลัส (Modulus of Elasticity) สูง จึงทำให้แผ่นคอนกรีตทำหน้าที่เหมือนคานส่งผลให้การกระจายน้ำหนักจากล้อในชั้นผิวทางซึ่งเป็นคอนกรีตเป็นไปอย่างสม่ำเสมอและเป็นเนื้อที่กว้าง ทำให้หน่วยแรงซึ่งกระจายลงไปยังชั้นโครงสร้างทางถัดไปมีค่ามากจนกระทั่งอาจมีค่าน้อยกว่ากำลังแบกทานของดินชั้นทาง ดังนั้นโครงสร้างชั้นรองพื้นทางจะมีหรือไม่ก็ได้ ดังลักษณะในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในชั้นโครงสร้างทางแข็ง

ที่มา: วิชา (2545)

โครงสร้างถนนคอนกรีตตามวิธีออกแบบในแนวทาง Semi-Empirical จะประกอบด้วยชั้นทางหลักเพียง 2 ชั้น คือ ชั้นผิวทาง (Surface) และชั้นรองพื้นทาง (Subbase) วางบนชั้นดินชั้นทางดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ลักษณะโครงสร้างของถนนคอนกรีต

ที่มา: Yoder (1959)

ผิวทาง (Surface)

ชั้นผิวทางเป็น Portland Cement Concrete Slab (PCC) ทำหน้าที่เป็นผิวจราจรและเป็นโครงสร้างหลักในการรับแรงน้ำหนักล้อและกระจายแรงกระทำออกเป็นบริเวณกว้างเพื่อลดหน่วยแรงกด ที่เกิดขึ้นในชั้นดินคันทาง

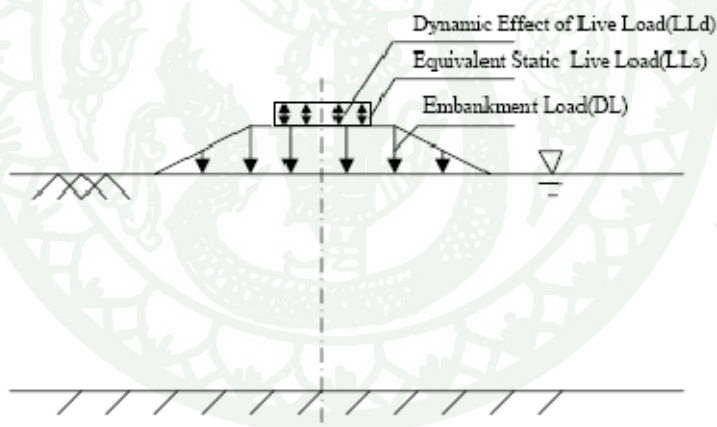
รองพื้นทาง (Subbase)

ตามแนวคิดพื้นฐานในการออกแบบนั้น ชั้นรองพื้นทางไม่ได้มีส่วนช่วยในการรับน้ำหนัก แต่มีวัตถุประสงค์เพื่อ

- 1) ช่วยเป็น Working Platform สำหรับเครื่องจักรในการก่อสร้าง
- 2) ช่วยให้เกิด Uniform Bearing Surface ได้แผ่นคอนกรีต
- 3) ช่วยลดการแอ่นตัว (Deflection) ที่รอยต่อและช่วยในการถ่ายเทหน่วยแรงที่รอยต่อของชั้นผิวทาง ในกรณีของรอยต่อประเภท Aggregate Interlock
- 4) ช่วยบรรเทาปัญหาที่เกี่ยวกับการยึดหดตัวของดินคันทาง
- 5) ช่วยในการป้องกันการเกิดความเสียหายของชั้นผิวทาง เนื่องจากแรงดันน้ำ

2.3 น้ำหนักจรบนคันทาง

ในการออกแบบถนน นอกจากจะพิจารณาเฉพาะน้ำหนักดินถมคันทาง (Static Load) แล้ว จำเป็นต้องมีการพิจารณาถึงน้ำหนักจร (Live Load) หรือน้ำหนักที่เกิดจากขบวนพาหนะสัญจร หลังจากการเปิดการจราจร เนื่องจากชนิดของยานพาหนะที่ต้องใช้กับถนนมีหลายขนาดและหลายแบบ (จิรพัฒน์, 2549) AASHTO (1993) จึงได้กำหนดน้ำหนักมาตรฐานขึ้นโดยกำหนดมาตรฐานของรถขน (Standard Axle Load) เท่ากับ 18,000 ปอนด์ (เพลาเดี่ยว) และ 32,000 ปอนด์ (เพลาคู่) ซึ่งเป็นน้ำหนักกระทำแบบจุด อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์เสถียรภาพและการทรุดตัวของคันทาง นิยมแปลงน้ำหนักบรรทุกทุกแต่ละแบบให้เป็นน้ำหนักแผ่รวม (Equivalent Static Live Load) สำหรับเพลามาตรฐาน 18,000 ปอนด์ จะมีค่าเทียบเท่า 640 Lb/ft^2 หรือประมาณ 1 Ton/m^2 ดังแสดงในภาพที่ 11

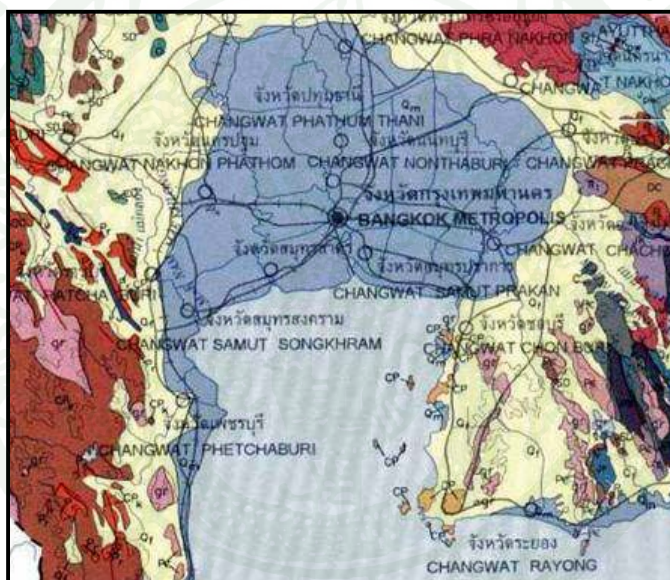


ภาพที่ 11 แสดงแรงกระทำและพฤติกรรมทางกลของคันทางบนดินอ่อนหลังเปิดการจราจร

ที่มา: วิชาญ (2545)

3. คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เป็นชื่อที่ถูกขนานนามโดย Moh (1969) หมายถึงชั้นดินตะกอนอ่อนบริเวณที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง ดังแสดงในภาพที่ 12 ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เป็นดินตะกอนใหม่ที่มีอายุน้อย ประมาณ 6,000 ถึง 8,000 ปี (ว.ส.ท., 2546) ซึ่งอนุภาคของดินมีขนาดเล็กจำพวกดินเหนียวและทรายแป้ง และมีความหนาเฉลี่ยประมาณ 10 - 18 เมตร มีความพรุนสูง และมีปริมาณน้ำในมวลดินมาก จึงทำให้เมื่อมีแรงกระทำจะเกิดการทรุดตัวสูง และทำให้การก่อสร้างบนดินเหนียวอ่อนต้องมีความระมัดระวังสูง



ภาพที่ 12 แผนที่เขตจังหวัดและเขตดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

ที่มา: ว.ส.ท. (2546)

ชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ สามารถแยกตามลักษณะและประวัติทางธรณีวิทยาของตะกอน ได้ 3 ส่วน (ว.ส.ท., 2546) ดังนี้

ส่วนที่ (1) Marine Clay เป็นชั้นดินที่มีความหนาประมาณ 10 - 20 เมตร วางอยู่บนชั้นดินเหนียวแข็ง (ที่เกิดตอนปลายของยุค Pleistocene) ประกอบด้วยดินเหนียว (Clay) ปนดินแป้ง (Silt) สีเทาเข้มปนน้ำตาล เนื้ออ่อนนุ่ม มีทรายละเอียดชั้นบางๆแทรกอยู่ มีซากพืชและเปลือกหอยกระจาย

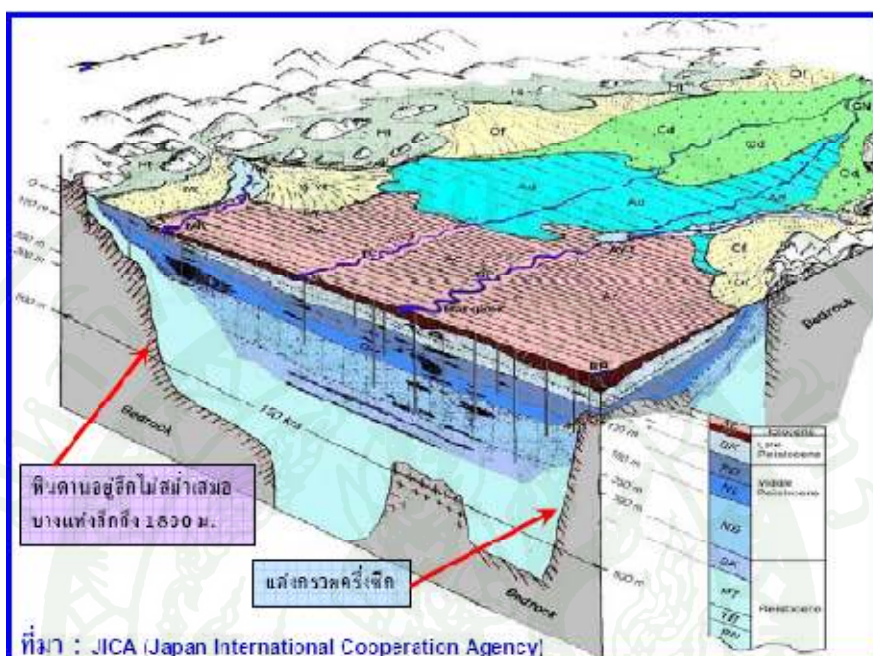
อยู่ทั่วไป โดยดินส่วนนี้คาดว่าเกิดจากการตกตะกอนในทะเล ที่เกิดจากการยกระดับขึ้นของน้ำทะเล ตอนต้นของยุค Holocene โดยเปลี่ยนสภาพจาก ทรายและโคลน (ที่ราบลุ่มที่มีป่าชายเลนขึ้นอยู่ทั่วไป) จนกลายเป็นที่ราบลุ่มน้ำท่วมถึง และเป็นที่อยู่อาศัยของสัตว์ทะเลต่างๆ (สุวัฒน์ และคณะ, 2538) Morgenstren (1968) ได้คาดคะเนดิน Marine Deposit ในพื้นที่นี้ว่า ได้เกิดกระบวนการยุบตัวขั้นต้น (Primary Consolidation) เสร็จสมบูรณ์แล้วเป็นส่วนใหญ่ และกำลังอยู่ในกระบวนการยุบตัวขั้นที่สอง (Secondary Consolidation)

ส่วนที่ (2) Intertidal Deposit เป็นดินที่ตกตะกอนในทะเลเช่นกัน แต่เป็นตะกอนดินที่ตกริมชายฝั่งทะเล โดยลักษณะของเม็ดดินยังคงคล้ายคลึงกับดินในส่วนที่ (1) โดยสันนิษฐานว่าดินส่วนนี้เกิดในช่วงที่น้ำทะเลยกตัวและรุกเข้าไปในแผ่นดิน ส่วนของดินตะกอนที่ทับถมอยู่ตอนบนของ Marine Clay เป็นชั้นหนาประมาณ 6 – 8 เมตรน่าจะเกิดขึ้นในตอนที่น้ำทะเลเริ่มมีการถอยระดับลง โดยโครงสร้างของดินเหนียวส่วนที่เป็น Intertidal Deposit จะไม่เป็นแบบ Flocculate มากเท่ากับดินเหนียวในส่วนที่เป็น Marine Deposit

ส่วนที่ (3) Weathered Clay and Recent Flood Sediments เป็นชั้นหน้าดินที่อยู่ส่วนบน ความหนาประมาณ 1 - 2 เมตร เป็นดินที่ผ่านกระบวนการต่างๆทางธรรมชาติทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม คือ ปริมาณน้ำภายในเม็ดดินมีน้อยลง และกำลังรับแรงเฉือนสูงขึ้น ดินชั้น Weathered Crust นี้นอกจากจะเป็นดิน Marine Clay เดิมที่ถูกกระบวนการทางธรรมชาติเปลี่ยนแปลงสภาพแล้ว ยังพบดินตะกอนจากแม่น้ำมาตกทับอยู่ตอนบน โดยเฉพาะในบริเวณเหนือของเขตพื้นที่ดินเหนียวกรุงเทพฯ ตั้งแต่จังหวัดพระนครศรีอยุธยาขึ้นไปทางตอนเหนือ ซึ่งตะกอนเดิมกับดินตะกอนแม่น้ำสามารถแบ่งได้จากปริมาณ Potassium (K) คือ ถ้าเป็นดินตะกอนแม่น้ำจะมีปริมาณ Potassium น้อยกว่า < 39% และดินตะกอนแม่น้ำเป็นดินเหนียวที่มีโครงสร้าง Disperse มากกว่า รวมไปถึงการที่มีปริมาณเกลือแร่ต่ำกว่า

การตกตะกอนของดินในช่วงยุค Holocene นี้ ทำให้เกิดชั้นดินอ่อน ที่ครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่บริเวณที่ราบลุ่มตอนกลางของประเทศ โดยสำหรับพื้นที่ลักษณะเป็นแอ่งกระทะตอนซีก ดังแสดงในภาพที่ 13 สำหรับพื้นที่ในเขตกรุงเทพมหานคร ชั้นดินเหนียว (Soft to Hard Clay) ทางทิศตะวันตก (เขตหนองแขม) มีความหนาไม่มากจะค่อยๆเพิ่มมากขึ้นบริเวณใกล้แม่น้ำเจ้าพระยาโดยบางแห่งอาจมีความหนาถึง 30 เมตร แล้วความหนาจะลดลงอย่างรวดเร็วเหลือเพียง 16 - 18 เมตร

ในเขตวังทองหลาง บางกะปิ และบึงกุ่ม จากนั้นก็จะมีความหนาเพิ่มขึ้นในเขตมีนบุรี และหนองจอก



ภาพที่ 13 รูปตัดสามมิติของดินตะกอนบริเวณที่ราบกลางตอนล่างตอนกลาง

ที่มา: JICA (Japan International Cooperation Agency)

3.1 ดัชนีทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

ปญทุ (2546) และองอาจ (2548) ได้ทำการรวบรวมข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินในเขตกรุงเทพมหานคร และสรุปข้อมูล ดัชนีทางวิศวกรรมของดิน ชั้น Weathered Clay, Soft to Medium Clay และ Stiff to Very Stiff Clay แสดงในตารางที่ 2 สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Soft to Medium Clay) นั้น มีค่า Natural Water Content (W_n) อยู่ในช่วง 45 ถึง 81 %, ค่า Liquid Limit (LL) อยู่ในช่วง 55 ถึง 85 % และ Plastic Limit (PL) อยู่ระหว่าง 25 ถึง 40%, ค่า Initial Void Ratio อยู่ในช่วง 1.7 ถึง 2.4

ตารางที่ 2 สรุปดัชนีทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

		Particle size distribution			W _n (%)	LL (%)	PL (%)	LI	γ_t (t/m ³)	G _s	e ₀
		Sand, (%) (2 - 0.06 mm.)	Silt, (%) (0.06 - 0.002 mm.)	Clay, (%) (< 0.002 mm.)							
Weathered Clay	Gulachol (1970) Weathered Clay				51.2±6.9	77.5±2.1	33.9±0.5	0.4		2.71±0.1	
	Brand (1971) Weathered Clay				62.9±4.2	89.6±5.1	38.6±2.4				
	Phuong (1973) Weathered Clay				50-90	80-100	30-45	0.6-1.0		2.66-2.7	
	TASNEENART (1984) Weathered Clay				30-100	30-90	20-35	0.2-2.0	1.55-19		
Soft to Medium Clay	Moh et.al. (1969)(AIT) 4.5-7.5 m.	1-3	40-50	50-60	0-110	0-110	35-45	0.8-1.1		2.66-2.74	
	Phuong (1973)(AIT) 4.5-9.0 m.	1-4	35-65	55-90	80-120	80-120	25-65	0.6-1.0		2.66-2.72	
	ศรีบุญฤทธิ์ (1982)(AIT)				63.5±11.5	63.5±12.8		1.172±0.584		2.66±0.035	1.73±0.33
	TSAI (1982)(AIT)				85-70	79-95	30-34	0.91-0.75			2.06±0.32
	PARENTILLA (1983)				26.1±7.6	49.9±9.7	22.5±3.9	0.159±0.306	2.0±0.18		
	สุพรรณ (2530) บางเขน				68.22±7.9	66.9±10.4	37.92±8.4	0.158±0.06		2.64±2.69	
	อาคม (2542)				94.35	93.9	31.7	1.5		2.68±0.05	
Stiff to Very Stiff Clay	ปทุมฯ (2545) 5-15 m.				39.4-74	51.6-82.6	22.8-34.4		1.4-18	2.57	
	Muktabhant et.al. (1966) 26-36 ft.				20-40	45-70	23-30		1.54-1.6	2.7-2.8	
	Vongthiesree (1966) 48 ft.				30	58	24		1.49		
	Hengchaovanich (1969) 36 ft.				20-30	59.5±5.9	22.6±1.6		1.61	2.74±0.02	
	กวีวงศ์ (2530) Stiff-Very Stiff Clay				27-30	52.58	23-26	0.1-0.2	1.9-2.0	2.65-2.71	0.74-0.84
	ปทุมฯ (2545) 15-25 m.				17.9-48.3	39.7-69.1	19.1-31.7		1.86-2.0		

ที่มา: คัดแปลงจากปทุมฯ (2546) และองอาจ (2548)

3.2 คุณสมบัติทางอิลาสติกของดินเหนียว

3.2.1 โมดูลัสยืดหยุ่นในสภาพไม่ระบายน้ำ

Kulhawy (1969) เสนอสมการสำหรับประมาณค่า Undrained Tangent Modulus (E_{ut}) ดังนี้

$$E_{ut} = E_{ui} (1 - SL)^2 \text{ or } E_{ut} = K \cdot p_a \left(\frac{\sigma_c}{p_a} \right)^n \left(1 - \frac{R_f (\sigma_1 - \sigma_3)}{2s_u} \right)^2 \quad (1)$$

เมื่อ E_{ui} = Undrained Initial Tangent Modulus
 SL = Stress Levels
 σ_c = Isotropic Confining Stress
 s_u = Undrained Shear Strength (ใช้หน่วยเดียวกับ σ_1, σ_3)
 K, n, R_f = พารามิเตอร์ประกอบแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ประกอบ K , n และ R_f

Unified Soil Classification	K	n	R_f
CL	100 – 200	1	0.9
CH	100 – 300	1	0.9

ที่มา: Kulhawy *et al.* (1990)

สำหรับค่า Undrained Secant Modulus (E_{us}) ซึ่งนิยามหาที่ระดับครึ่งหนึ่งของหน่วยแรงสูงสุด สามารถประมาณจากค่า Undrained Shear Strength (s_u) และไม่ขึ้นกับชนิดการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในตารางที่ 4, 5 และ 6 สำหรับดินเหนียวอ่อน, ดินเหนียวแข็งปานกลาง และดินเหนียวแข็งตามลำดับ

ตารางที่ 4 ค่า E_{us}/s_u สำหรับดินเหนียวอ่อน

E_{us}/s_u	อ้างอิง	หมายเหตุ
1,000 – 1,500	D'Appolonia (1971)	สำหรับดิน CH and OC
500 – 1,500	Bjerrum (1972)	s_u จากผลการทดสอบ Field Vane Shear
70 - 250	Balasubramaniam and Brenner (1981)	s_u จากผลการทดสอบ Field Vane Shear
200 - 500	Bowels (1988)	สำหรับ Normally Consolidated Sensitive Clay
150	Bergado et al. (1990)	สำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ, การทรุดตัวของถนนสายบางนา-บางปะกง
100-200	สุรฉัตร (2540, 2548)	สำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ, การทรุดตัวของคันดินระหว่างก่อสร้าง ($PI \approx 60\%$)
900 – 1,500	Shibuya et al. (1997)	แปลงค่าจากผลการทดสอบ Shear Modulus ในห้องปฏิบัติการ และภาคสนาม
480	Cambridge In-situ (1997)	สำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ, Self-Boring Pressuremeter Test, D-Wall Structure (MRTA Project)
240	Teparaksa (1999)	สำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ, Tunnel Structure (MRTA Project)
150	Teparaksa (2001)	สำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ, วิเคราะห์การเคลื่อนตัวของ Sheet Pile Wall FSP โครงการอาคาร Bai Yok II, Paolo Hospital, Saladang Mansion และ Peninzula Hotel
500	วันชัย (2545)	สำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ, ทดสอบ Self Boring Pressuremeter ในภาคสนาม และทดสอบ Low Strain, งานขุดโดยก่อสร้าง D-wall ของโครงการอาคารมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, โครงการอุโมงค์ลอดทางแยกทางด่วนดินแดง และโครงการสาธิตคอมเพล็กซ์

ตารางที่ 4 (ต่อ) ค่า E_{us}/s_u สำหรับดินเหนียวอ่อน

E_{us}/s_u	อ้างอิง	หมายเหตุ
250 - 300	รศสุคนธ์ (2546)	สำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ, s_u จากผลการทดสอบ Field Vane Shear
107 - 145	ธีระชาติ (2545)	สำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ, จากโครงการทางหลวงหมายเลข 34 ตอนบางนา-ชลบุรี บริเวณ กม. 14+177 ถึง กม. 56+855

ที่มา: บารเมศ และคณะ (2552)

ตารางที่ 5 ค่า E_{us}/s_u สำหรับดินเหนียวแข็งปานกลาง

E_{us}/s_u	อ้างอิง	หมายเหตุ
200 - 500	Bowels (1988)	สำหรับ Normally Consolidated Insensitive และ Lightly Overconsolidated Clay
250	Teparaksa (2001)	สำหรับดินเหนียวแข็งปานกลางกรุงเทพฯ, วิเคราะห์การเคลื่อนตัวของ Sheet Pile Wall FSP โครงการอาคาร Bai Yok II, Paolo Hospital, Saladang Mansion และ Peninzula Hotel
500	วันชัย และคณะ (2549)	สำหรับดินเหนียวแข็งปานกลางกรุงเทพฯ, วิเคราะห์การเคลื่อนตัวของ D-Wall โครงการอาคาร Millennium Sukhumvit Hotel

ที่มา: บารเมศ และคณะ (2552)

ตารางที่ 6 ค่า E_{us}/s_u สำหรับดินเหนียวแข็ง

E_{us}/s_u	อ้างอิง	หมายเหตุ
1,500 – 2,000	Bowles (1988)	สำหรับ Heavily Overconsolidated Clay
1,020	Cambridge In-situ (1997)	Self-Boring Pressuremeter Test D-Wall Structure (MRTA Project)
480	Teparaksa (1999)	สำหรับดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ, Tunnel Structure (MRTA Project)
1,000	Teparaksa (2001)	สำหรับดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ, วิเคราะห์การเคลื่อน ตัวของ Sheet Pile Wall FSP โครงการอาคาร Bai Yok II, Paolo Hospital, Saladang Mansion และ Peninzula Hotel, วิเคราะห์การเคลื่อนตัวของ D-Wall ที่สถานี รถไฟฟ้าใต้ดินบางซื่อ และสามย่าน
2,000	วันชัย (2545)	สำหรับดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ, ทดสอบ Self-Boring Pressuremeter ในภาคสนาม และทดสอบ Low Strain, งานชุดโดยก่อสร้าง D-wall ของโครงการอาคาร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, โครงการอุโมงค์ลอดทาง แยกทางด่วนดินแดง และโครงการสาทรคอมเพล็กซ์

ที่มา: บารเมศ และคณะ (2552)

จากตารางที่ 4 และ 6 สรุปได้ว่าดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ นั้นมีค่า E_{us}/s_u ระหว่าง 100 - 500 และดินเหนียวแข็ง มีค่าอยู่ที่ระหว่าง 500 - 2,000

นอกจากนี้ค่า E_{us} สามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{E_{us}}{s_u} = 3I_r \quad \text{หรือ} \quad \frac{3G}{s_u} = 3I_r \quad (2)$$

I_r คือ Rigidity Index ซึ่งสามารถหาได้จากการทดสอบ Consolidation และ Triaxial Compression ตารางที่ 7 สรุปช่วง I_r สำหรับดินชนิดต่างๆ

ตารางที่ 7 ช่วงค่า Rigidity Index เบื้องต้นของดินแต่ละชนิด

ชนิดของดิน	I_r
Sands ($D_r = 0.5 - 0.8$)	70 – 150
Silts	50 – 75
Clays	150 – 250

ที่มา: Bowles (1988)

3.2.2 โมดูลัสยืดหยุ่นในสภาพระบายน้ำ

Duncan and Chang (1970) ได้เสนอสมการประมาณค่า Drained Tangent Modulus (E_{dt}) สำหรับดินประเภท Granular Soil รวมถึง Silt ดังนี้

$$E_{dt} = K \cdot p_a \left(\frac{\sigma'_3}{p_a} \right)^n \left(1 - \frac{R_f (1 - \sin \phi'_{tc})(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{(2\sigma'_3 \sin \phi'_{tc})} \right)^2 \quad (3)$$

โดยที่ σ'_1 = Effective Major Principal Stress

σ'_3 = Effective Minor Principal Stress

K, n, R_f = พารามิเตอร์ประกอบแสดงในตารางที่ 8

ϕ'_{tc} = ค่า Friction Angle ซึ่งได้จากการทดสอบ Triaxial Compression

p_a = Atmospheric Pressure ซึ่งมีค่าเท่ากับ 100 kPa

ตารางที่ 8 พารามิเตอร์ Drained Tangent Modulus

Unified Soil Classification	K	n	R _f
GW	300 ถึง 1,200	1/3	0.7
GP	500 ถึง 1,800	1/3	0.8
SW	300 ถึง 1,200	1/2	0.7
SP	300 ถึง 1,200	1/2	0.8
ML	300 ถึง 1,200	2/3	0.8

ที่มา: Kulhawy *et al.* (1983)

สำหรับ Drained Secant Modulus (E_{ds}) สามารถประมาณได้จากค่า Blow Count (N) จากการทดสอบ Standard Penetration Test (SPT) และค่า Tip Cone Resistance (q_c) จากการทดสอบ Cone Penetration Test (Schmertmann, 1970) ดังสมการที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

$$E_{ds} = 766N \text{ (kPa)} \quad (4)$$

$$E_{ds} = 2.5q_c \text{ สำหรับฐานรากสี่เหลี่ยมและวงกลม} \quad (5ก)$$

$$E_{ds} = 3.5q_c \text{ สำหรับฐานราก Strip} \quad (5ข)$$

Coduto (1994) และ Das (1999) แนะนำค่า E_{ds} ของดินชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 9 สำหรับ Soft Clay นั้น ค่า E_{ds} เท่ากับ 250 ถึง 1,500 kPa สำหรับ Stiff Clay นั้น ค่า E_{ds} เท่ากับ 1,200 ถึง 20,000 kPa

ตารางที่ 9 ช่วงค่า Drained Secant Modulus (E_{ds}) ของดินชนิดต่างๆ

Type	E_{ds} (kPa)
Loose Coarse Sand	25,000 – 35,000
Medium Dense Coarse Sand	30,000 – 40,000
Dense Coarse Sand	40,000 – 45,000
Loose Fine Sand	20,000 – 25,000
Medium Dense Fine Sand	25,000 – 35,000
Dense Fine Sand	35,000 – 40,000
Loose Sandy Silt	8,000 – 12,000
Medium Dense Sandy Silt	10,000 – 12,000
Dense Sandy Silt	12,000 – 15,000
Soft Clay	250 – 1,500
Medium Clay	500 – 3,500
Stiff Clay	1,200 – 20,000

ที่มา: Coduto (1994) และ Das (1999)

3.2.3 อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's Ratio; V)

สภาวะระบายน้ำ ปริมาตรของดินจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อถูกแรงกดกระทำ ซึ่งค่า Drained Poisson's Ratio (V_d) จึงมีค่าแปรปรวนตามชนิดของดิน ดังตารางที่ 10 (Das, 1999) ค่า V_d มีค่าอยู่ในช่วง 0.15 - 0.40 แต่สำหรับดินประเภท Dilatant Soil ซึ่งปริมาตรของดินเพิ่มขึ้น ขณะถูกเฉือนนั้น ค่า V_d อาจสูงกว่า 0.5 (Kulhawy and Mayne, 1990)

Kulhawy et al. (1969) ได้นำเสนอสมการที่ 6 สำหรับการประมาณค่า Initial Tangent Drained Poisson's Ratio (V_{dt}) โดยใช้พารามิเตอร์ G_v และ F_v ที่ขึ้นกับ Initial Void Ratio (e_i) ดังแสดงในรูปที่ 14 ต่อมา Trautmann and Kulhawy (1987) ได้จัดรูปแบบสมการสำหรับการประมาณค่า V_d เพื่อใช้ในการประมาณค่า ดังแสดงในสมการที่ 7 และ สมการที่ 8

$$V_{di} = G_v - F_v \log(\sigma'_c / p_a) \quad (6)$$

$$V_d \approx 0.1 + 0.3\phi_{rel} \quad (7)$$

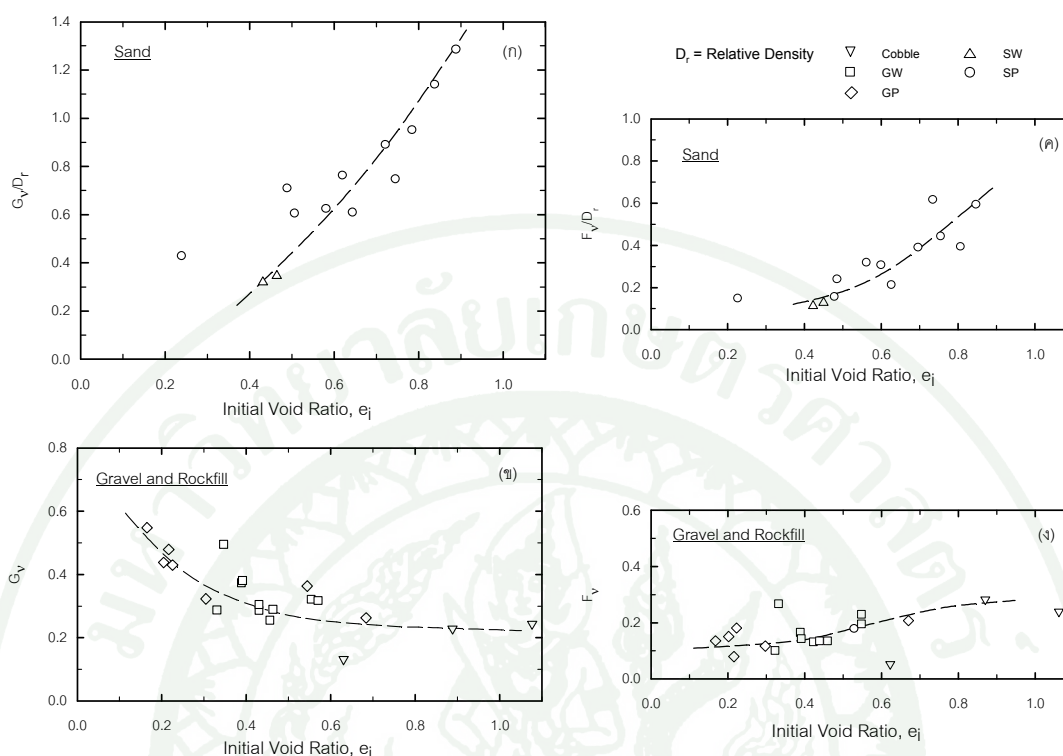
$$\phi_{rel} = (\phi'_{tc} - 25^\circ) / 20^\circ; (0 \leq \phi_{rel} \leq 1) \quad (8)$$

เมื่อ	ϕ_{rel}	=	Relative Friction Angle
	ϕ'_{tc}	=	Friction Angle จากการทดสอบ Triaxial Compression Test
	σ'_c	=	Effective Confining Stress
	p_a	=	แรงดันบรรยากาศ (100 kPa)

ตารางที่ 10 ช่วงค่า Drained Poisson's Ratio

Soils	V_d
Coarse Sand	0.15-0.20
Medium Loose Sand	0.20-0.25
Fine Sand	0.25-0.30
Sandy Silt and Silt	0.30-0.35
Saturated Clay	0.20-0.40

ที่มา: Das (1999)



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ของ Initial Void Ratio ของดินชนิดต่างๆ กับ พารามิเตอร์ G_v และ F_v

ที่มา: Kulhawy (1969)

สำหรับกรณีสถานะไม่ระบายน้ำ ของดินประเภท Fined Grain Soils และอิมตัว ปริมาตรของดินจะไม่เปลี่ยนแปลงขณะรับแรงกด ดังนั้นค่า Undrained Poisson's Ratio (ν_u) มีค่าเท่ากับ 0.5 ($\Delta\varepsilon_a + 2\Delta\varepsilon_r = \Delta \text{ volume strain}$ และ $\Delta \text{ volume strain} = 0$)

3.3 คุณสมบัติการรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

สำหรับดินประเภท Fine Grained Soils นั้น วิศวกรสนามนิยมตรวจสอบค่า Plasticity Index (PI) โดยสังเกตแรงที่ใช้ในการบีบอัดเม็ดดินให้แตก รวมทั้งประเมินระดับความแข็งแรงของดินโดยการตรวจสอบค่า Undrained Shear Strength ด้วยการทดสอบโดยอุปกรณ์ Pocket Penetrometer ซึ่งจะให้ค่าของผลการทดสอบออกมาเป็นค่า Unconfined Compressive Strength; q_u โดยที่ $s_u = q_u/2$ หรือ Torvane (ให้ค่า Undrained Shear Strength; s_u) ซึ่งค่า Unconfined

Compressive Strength ของดินประเภท Soft มีค่าอยู่ระหว่าง 25 - 50 kPa และดินประเภท Stiff มีค่าอยู่ระหว่าง 100 - 200 kPa (Sower, 1979)

และสำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ปณฺท (2546) สรุปค่าคุณสมบัติการรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, s_u) จากการทดสอบในสนาม [Field Vane Shear Test, s_u (FV)] และในห้องปฏิบัติการ [Unconfined Compression Test, s_u (UC)] ค่า S_u (FV) ของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ดังแสดงในตารางที่ 11 ซึ่งพบว่าค่า s_u ของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ มีค่าอยู่ในช่วง 2.4 - 4.5 T/m²



ตารางที่ 11 สรุปคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

Layer	Reference	s_u (UC) (t/m ²)	Sensitivity (UC)	s_u (FV) (t/m ²)	Sensitivity (Vane)	SPT (Blows/ft)
Soft to Medium Clay	ศรีบุญฤทธิ์ (1982) 2 - 14 m.	3.13±1.98	2.6±1.87	2.72±1.7	2.59±1.67	
	TSAI (1982)					
	TSAI (1982)(Ngong Ngoo Hao)					
	TSAI (1982)(Pathumwan)					
	TSAI (1982)(Pom Prachul)					
	PARENTILLA (1983)					
	TASNEENART (1984) Soft Clay					
	กวีวงษ์ (2530) Soft-Medium Clay	2.4-3.4			2.4-7.9	
	ปณุต (2545) 5-15m.	4.48±2.6				
Stiff to Very Stiff Clay	Vongthiesree (1966)		1.3-1.5			
	Hengchaovanich (1969)	5.0-15.0	1.3			
	ศรีบุญฤทธิ์ (1977) 14 - 25 m.	15.6±9.15				
	TASNEENART (1984) 1st Stiff Clay					
	TASNEENART (1984) 2nd Stiff Clay					
	กำธร (2529)	6.93±2.4				23.4±6.7
	กวีวงษ์ (2530) Stiff-Very Stiff Clay	10.0-12.0				23-25
	ปณุต (2545) 15 - 25 m.	12.1±8.8				

ที่มา: คัดแปลงจากปณุต (2546) และองอาจ (2548)

4. หลักการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างชั้นทางโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ปราโมทย์ (2537) กล่าวว่าไฟไนต์เอลิเมนต์คือวิธีการแก้ปัญหาเพื่อหาผลเฉลยที่แม่นยำตรง (Exact Solution) โดยประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equation) และเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ที่กำหนดให้ โดยปัญหาดังกล่าวจะประกอบด้วยค่าของตัวแปรต่างๆกัน บนรูปร่างลักษณะของปัญหา แล้วทำการเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่มีเป็นจำนวนอนันต์ค่านั้นเป็นค่าที่มีจำนวนนับได้ (Finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหด้วยเอลิเมนต์ที่มี จากนั้นสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้น จะประกอบเข้าเป็นระบบสมการชุดใหญ่ และทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้สอดคล้องกับสภาพเงื่อนไขที่เกิดขึ้น แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าวซึ่งจะทำให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ณ ตำแหน่งต่างๆของปัญหานั้น

4.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. การแบ่งขอบเขตรูปร่างลักษณะของดินฐานรากออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ซึ่งโดยปกติเอลิเมนต์จะเป็นรูปสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมที่ต่อเนื่องกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะชั้นดินและความไม่ต่อเนื่องของมวลดิน

2. การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ (Element Interpolation Function) เช่น เอลิเมนต์สามเหลี่ยมประกอบด้วย 3 จุดที่มีหมายเลข 1, 2, และ 3 โดยจุดต่อเหล่านี้เป็นตำแหน่งของตัวไม่รู้ค่า (Nodal Unknowns) ซึ่งคือ h_1 , h_2 และ h_3 ลักษณะการกระจายของตัวไม่ทราบค่าบนเอลิเมนต์นี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ได้ดังนี้

$$h(x,y) = N_1(x,y)h_1 + N_2(x,y)h_2 + N_3(x,y)h_3 \quad (9)$$

โดย $N_i(x,y)$, $i = 1, 2, 3$ คือฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์

3. การสร้างสมการของเอลิเมนต์ (Element Equation) ดังตัวอย่างเช่น สมการของเอลิเมนต์สามเหลี่ยม จะอยู่ในรูป

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}_e \begin{Bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}_e \quad (10)$$

หรือในรูป

$$[k]_e \{h\}_e = \{F\}_e \quad (11)$$

4. การนำสมการของแต่ละอิลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน จะได้ระบบสมการพร้อมกัน (System of Simultaneous Equation) ในรูป

$$\sum (Element Equations) \rightarrow [k]_{sys} \{h\}_{sys} = \{F\}_{sys} \quad (12)$$

5. ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ลงในระบบสมการพร้อมกัน แล้วแก้สมการเพื่อหา $\{F\}_{sys}$ ซึ่งก็คือตัวไม่รู้ค่าของจุดต่อ (Nodal Unknowns)

6. นำค่าที่จุดต่อหาค่าอื่นที่ต้องการทราบ

4.2 แบบจำลองพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของดิน

Desai and Christian (1977) ได้รวบรวมรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ใช้ในงานวิศวกรรมปฐพีดังแสดงในภาพที่ 15 โดยสามารถจำแนกความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดได้ดังนี้

Nonlinearly Elastic วัสดุที่มีความสัมพันธ์เช่นนี้เมื่อนำแรงกระทำออกจะทำให้ค่าความเครียดสามารถคืนตัวได้หมดและความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดจะไม่เป็นเชิงเส้น ดังแสดงในภาพที่ 15(ก)

Linearly Elastic เมื่อนำแรงกระทำออกจะทำให้ค่าความเครียดสามารถกลับคืนได้หมด และมีรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเป็นเชิงเส้น ดังแสดงในภาพที่ 15(ข)

Non Elastic เมื่อนำแรงกระทำออกจะทำให้ค่าความเครียดไม่สามารถสามารถกลับคืนตัวได้ทั้งหมด สามารถแสดงในภาพที่ 15(ค)

Perfectly Plastic คือความสัมพันธ์ที่มีความเป็นพลาสติกโดยสมบูรณ์ เมื่อนำแรงกระทำออกความเครียดจะไม่สามารถคืนตัวได้ ดังแสดงในภาพที่ 15(ง)

Elastoplastic คือความสัมพันธ์ที่ความเครียดสามารถคืนตัวได้ในช่วงต้น แต่เมื่อถึงจุดหนึ่งหากใช้แรงกระทำเพิ่มจะทำให้ความเครียดไม่สามารถคืนตัวซึ่งความสัมพันธ์รูปแบบนี้สามารถแบ่งย่อยออกเป็น 3 รูปแบบได้แก่ Elastic Perfectly Plastic(1), Strain Hardening(2) และ Strain Softening(3) ได้ดังแสดงไว้ในภาพที่ 15(จ)

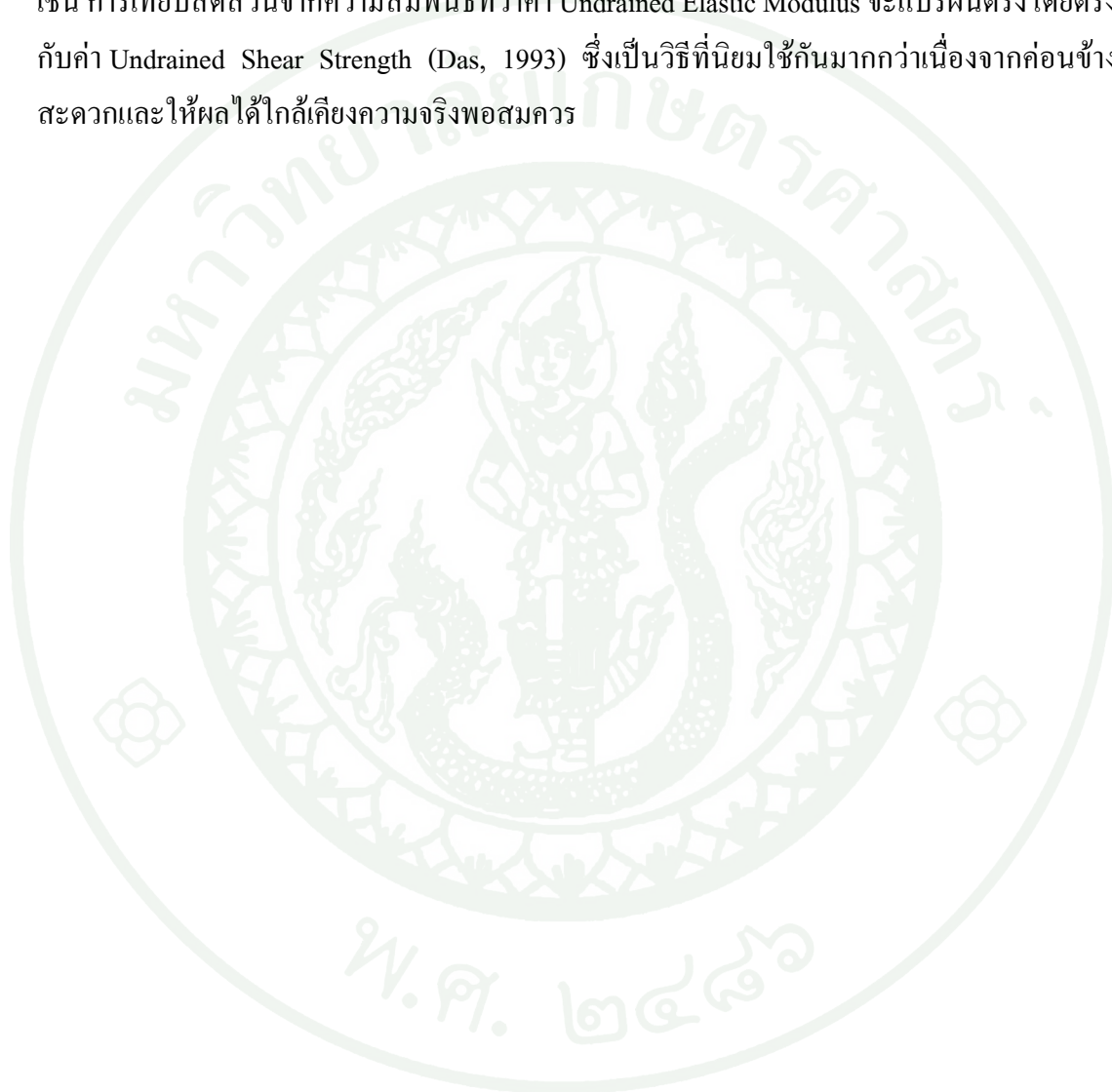
Viscous Elastic Creep at Constant Stress คือรูปแบบความสัมพันธ์ที่ค่าความเครียดเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ผ่านไปถึงแม้ว่าแรงที่กระทำจะคงที่ก็ตาม เช่นการเกิด Consolidation และการเกิด Creep ภาพที่ 15(ฉ)

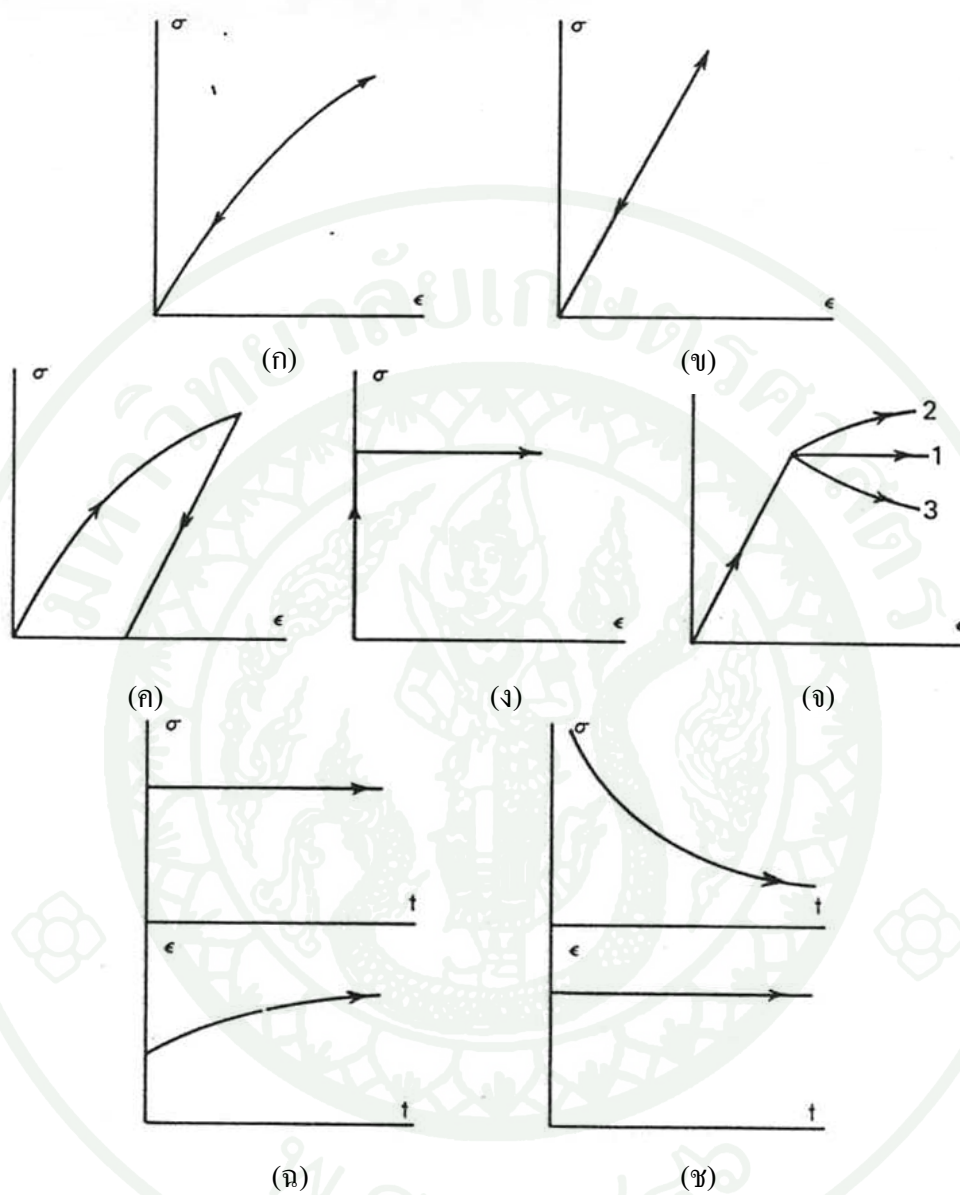
Viscous Elastic Relaxation at Constant Strain คือรูปแบบความสัมพันธ์ในวัสดุที่มีความเครียดคงที่แต่แรงกระทำลดลงตามเวลาที่ผ่านไป ภาพที่ 15(ช)

แบบจำลองประเภท Elastic Perfectly Plastic เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับดินเหนียวเนื่องจากการคำนวณไม่ซับซ้อนมากและมีตัวแปรที่ต้องใช้น้อย แบบจำลอง Elastic Perfectly Plastic จำเป็นต้องหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ คือ Elastic Modulus (E) ของดินเหนียว โดยทั่วไปสามารถหาได้ 2 วิธี (สุรฉัตร, 2540) วิธีแรก คือ การหาค่าโดยตรงทำได้โดยการทดสอบในสนามหรือห้องปฏิบัติการเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด เช่นการทดสอบโดยใช้ Unconfined Compressive Strength หรือ Triaxial Test เป็นต้น อย่างไรก็ตามพบว่าค่า Elastic Modulus ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการมักจะได้อ่านได้น้อยกว่าในสนามทั้งนี้เพราะค่า Elastic Modulus ทั่วไปจะมีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 4 ประการ คือ วิธีการทดสอบดิน, ค่า Confining Pressure, ปริมาณความชื้นในดิน และความเครียดที่ใช้ทดสอบ (Bowling, 2004)

1996) โดยเฉพาะค่าความเครียดพบว่าที่ระดับความเครียดต่างกันค่า Elastic Modulus จะมีความแตกต่างกันมาก

วิธีที่สอง เป็นวิธีการหาค่าทางอ้อม (Indirect Method) ที่นิยมใช้กันทั่วไปในภาคสนาม เช่น การเทียบสัดส่วนจากความสัมพันธ์ที่ว่าค่า Undrained Elastic Modulus จะแปรผันตรงโดยตรงกับค่า Undrained Shear Strength (Das, 1993) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากกว่าเนื่องจากค่อนข้างสะดวกและให้ผลได้ใกล้เคียงความจริงพอสมควร





ภาพที่ 15 แบบจำลองเงินที่ใช้ในงานวิศวกรรมปฐพี

ที่มา: Desai and Christian (1977)

5. เส้นทางเดินหน่วยแรง (Stress Path)

Stress Path คือ ทางเดินของหน่วยแรงเพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงในมวลดิน โดยใช้เส้น และลูกศร ซึ่งชัดเจนและสะดวกกว่า Mohr's circle โดยแสดงทางเดินของจุดยอด Mohr Circle (Lambe, 1969)

ในการสร้างเส้นทางเดินหน่วยแรงเพื่อใช้ในการพิจารณาพฤติกรรมของวัสดุ นั้น จะสามารถสร้างขึ้นมาจากค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก (Major Principal Effective Stress) และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรอง (Minor Principal Effective Stress) ซึ่งค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองคำนวณโดยใช้ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ และค่าหน่วยแรงเฉือน ที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งความลึกต่างๆ ดังสมการที่ 13

$$\left. \begin{matrix} \sigma'_1 \\ \sigma'_3 \end{matrix} \right\} = \frac{\sigma'_{xx} + \sigma'_{yy}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma'_{xx} - \sigma'_{yy}}{2} \right)^2 + (\tau'_{xy})^2} \quad (13)$$

โดยที่ σ'_1 = ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก (Major Principal Effective Stress)
 σ'_3 = ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรอง (Minor Principal Effective Stress)
 σ'_{yy} = ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง (Vertical Effective Stress)
 σ'_{xx} = ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ (Horizontal Effective Stress)
 τ'_{xy} = ค่าหน่วยแรงเฉือน (Shear Stress)

ภายหลังจากคำนวณค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองได้แล้ว ต่อมาจึงนำมาคำนวณเพื่อสร้างเส้นทางเดินของหน่วยแรงดังในสมการที่ 14 และสมการที่ 15

$$p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \quad (14)$$

$$q' = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \quad (15)$$

6. การศึกษาพฤติกรรมกลของโครงสร้างทางที่ผ่านมาในอดีต

การศึกษาพฤติกรรมการบีบอัดของชั้นผิวทางที่เกิดเนื่องมาจากความแตกต่างของ Elastic Modulus ระหว่างวัสดุชั้นผิวทางและชั้นดินฐานรากนั้น ได้มีการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาใช้เพื่อการทำนายการบีบอัดที่เกิดขึ้น และตรวจสอบกับผลที่ตรวจวัดจริงในสนาม โดย Frank *et al.* (1971) ได้ทำการศึกษาโดยใช้โปรแกรม Elastic Modulus II ซึ่งใช้ทฤษฎี Linear Elastic ในการสร้างแบบจำลอง พบว่าเมื่อความแตกต่างของค่าอัตราส่วน Elastic Modulus มีค่ามากขึ้นค่าการแอ่นตัวของชั้นผิวทาง (Deflection) จะมีค่าลดลง แต่เมื่อมีการศึกษาและพัฒนาโปรแกรมต่อมาโดยนำค่าตรวจวัดจริงในสนามเข้ามาเปรียบเทียบ พบว่าแบบจำลอง Linear Elastic Theory จะให้ค่าผลลัพธ์จากการคำนวณที่มากกว่าที่เกิดขึ้นจริงในสนามมาก (Moore, 1973)

ต่อมาได้มีการนำ Finite Element เข้ามาใช้ศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของการบีบอัดในโครงสร้างชั้นทางโดยจากการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองชั้นโครงสร้างทาง พบว่าค่าหน่วยแรงดึงในแนวราบจะเกิดสูงสุด ณ จุดกึ่งกลางของล้อรถ ซึ่งตำแหน่งนี้จะเป็นตำแหน่งที่รอยแตกเริ่มต้น และหน่วยแรงกดสูงสุดจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวทางด้านบน การเพิ่มขึ้นของค่า Elastic Modulus ของชั้น Wearing Course จะทำให้เกิดหน่วยแรงดึงในแนวราบที่เพิ่มขึ้นบนผิวด้านบนของผิวทาง และหน่วยแรงกดในแนวดิ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดรอยแตก โดยที่การส่งผลต่อชั้น Wearing และชั้น Base Course จะส่งผลไม่เหมือนในชั้น Granular (Akbulut, 2004) โดยเมื่อชั้นผิวทางเกิดการบีบอัดจะมีค่า Maximum Tensile Strains เกิดขึ้นที่บริเวณด้านล่างของผิว Asphalt และมีค่า Maximum Vertical Compressive Strains เกิดขึ้นผิวด้านบนของชั้น Base (Lacey, 2007)

Kai Su (2008) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของค่าหน่วยแรงเฉือน (Shear Stress) ที่เกิดขึ้นในดินฐานราก ณ สถานะต่างๆ ได้ข้อสรุปดังนี้

- (1) ค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดจะเกิดขึ้นที่บริเวณขอบล้อ
- (2) ความหนาของวัสดุชั้นผิวทางจะไม่มีอิทธิพลต่อค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในชั้นดินฐานราก
- (3) การเชื่อมต่อที่ไม่ดีระหว่างชั้นผิวทางระหว่างชั้นผิวทางและดินฐานรากจะทำให้เกิด Shear Stress ขึ้นที่บริเวณรอยต่อ ซึ่งจะเป็สาเหตุของการแตกร้าว

เมื่อถนนถูกแรงกระทำจะคงสภาพของวัสดุเป็นอีลาสติก (Elastic) แต่เมื่อทำการถอนน้ำหนักออกจะพบตำแหน่งที่เป็นพลาสติก (Plastic) เกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของถนน ดังนั้นเมื่อถนนรับแรงกระทำซ้ำๆ (Cyclic Load) จะทำให้มีพลาสติกโซน (Plastic Zone) ขยายตัวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ (Ninouh, 2008)

จากการศึกษาโดย Bassem (2009) พบว่าชั้นผิวทางซึ่งมีค่า Elastic Modulus สูงช่วยป้องกันการเกิด Rutting ในชั้นผิวทางได้

ก้องรัฐ (2547) ได้ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมกลที่เกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้างของชั้นทางชนิด Unconfined Pavement บนดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยเพิ่มความสูงของชั้นทางขึ้นเรื่อยๆ เพื่อสังเกตถึงพฤติกรรมของดินฐานรากในสถานะต่างๆ ของวัสดุ โดยพฤติกรรมการกระจายของหน่วยแรงภายในชั้นดินฐานราก ซึ่งได้แก่ ค่าหน่วยแรงในแนวดิ่ง ค่าหน่วยแรงในแนวราบ และค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุด พบว่าในสถานะ Elastic State การกระจายตัวของหน่วยแรงจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและเป็นระเบียบ และเมื่อ Plastic Zone เริ่มเกิดขึ้นจะเริ่มพบความไร้ระเบียบของเส้นชั้นหน่วยแรง และจะไร้ระเบียบอย่างชัดเจนเมื่อเข้าสู่สถานะ Limit Equilibrium โดยอิทธิพลของการเคลื่อนตัวจะส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าหน่วยแรงในแนวราบและส่งผลไปถึงค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุด คือ ค่าการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าหน่วยแรงในแนวราบลดลง ส่งผลให้ค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น

พฤติกรรมการเคลื่อนตัว หรือปริมาณการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับความสูงของชั้นคันทางและการเปลี่ยนแปลงสถานะของชั้นดินฐานราก กล่าวคือ ในช่วงต้นของการก่อสร้างคันทางยังอยู่ในสถานะ Elastic State ปริมาณการเคลื่อนตัวจะมีค่าน้อย แต่เมื่อความสูงของคันทางมีค่าเพิ่มขึ้นจนเกิด Plastic Point ปริมาณการเคลื่อนตัวจะเพิ่มสูงขึ้น และจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อ Plastic Zone เกิดการขยายตัวเนื่องจากการเพิ่มสูงขึ้นของ Shear Distortion นอกจากนี้จากการศึกษาปริมาณการเคลื่อนตัวยังช่วยให้สามารถแยกสถานะ Limit Equilibrium State ออกจากสถานะ Fully Plastic State ได้จากปริมาณการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นได้ เนื่องจากปริมาณการทรุดตัวที่พบแตกต่างกันโดยสิ้นเชิง

สำหรับการศึกษาพฤติกรรมการพิบัติเมื่อมีความแตกต่างระหว่างของค่า Elastic Modulus ระหว่างโครงสร้างชั้นทาง และชั้นดินฐานรากโดยใช้การตรวจวัดจริงในสนาม วิชาญ (2521) ได้ทำ

การศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการก่อสร้างถนนบนดินฐานรากชนิดต่าง ๆ กัน ได้แก่ ฐานรากดินอ่อน และฐานรากดินแข็ง โดยวิธีการตรวจวัดจากข้อมูลจริงในสนาม ของทางพิเศษ บางนา-บางปะกง พบว่าการเกิดขึ้นของแอ่งการทรุดตัว (Deflection Bowls) ระหว่างฐานรากดินอ่อนและฐานรากดินแข็งจะมีค่าแตกต่างกัน ทำให้สันนิษฐานได้ว่ารอยแตกที่เกิดขึ้นนั้นควรมีขนาดที่ต่างกัน ในดินฐานรากแต่ละชนิดด้วย

และจากการศึกษาพบว่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของน้ำหนักรถที่มากกระทำ จะมีอิทธิพลต่อผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณอย่างมาก โดย Novak (2003) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมกระจายตัวของหน่วยแรงในแนวราบ และพฤติกรรมในแนวดิ่งเปรียบเทียบระหว่างหน่วยแรงจากล้อรถชนิด Radial Tire และกับน้ำหนักที่กระทำชนิด Uniform Load พบว่าการพัฒนาตัวของหน่วยแรงที่เกิดจากแบบจำลองล้อรถชนิด Radial Tire จะมีค่าหน่วยแรงที่มากกว่าแบบจำลองล้อรถชนิด Uniform Load ที่บริเวณด้านบนระดับชั้นๆของโครงสร้างชั้นทาง โดยความละเอียดในการแบ่งโครงสร้างชั้นทางในการคำนวณ (Sub - Layer) ไม่มีอิทธิพลต่อค่าผลลัพธ์จากการคำนวณที่ออกมา (Alkasawneh, 2006)

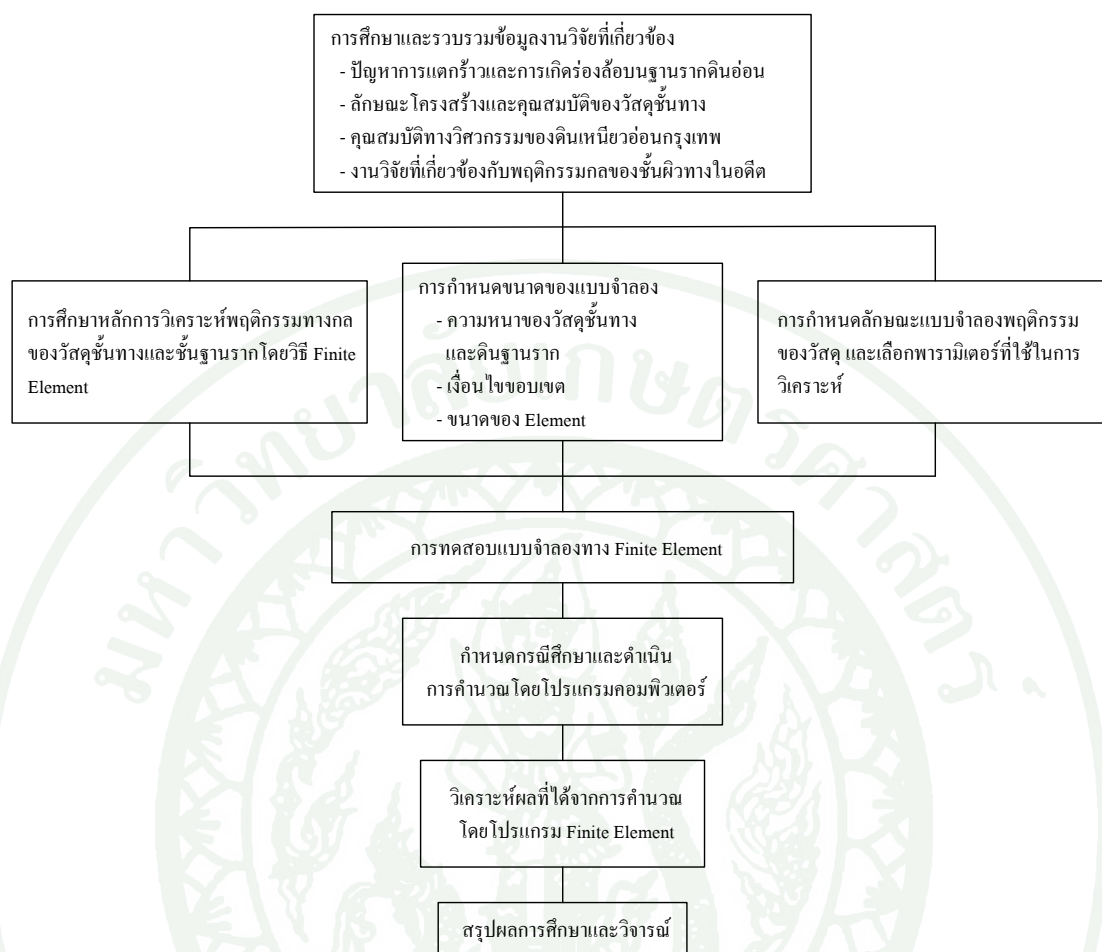
อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

1. อุปกรณ์

1. เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ PC โดยใช้ Core 2 quad CPU Q 9550 พร้อมด้วยระบบปฏิบัติการ Windows XP และเครื่องพิมพ์
2. โปรแกรมสำเร็จรูปไฟไนท์อีลิเมนต์ PLAXIS ทำงานบนระบบปฏิบัติการ Windows XP หรือสูงกว่า
3. แผ่นฐานแม่เหล็กบันทึกข้อมูล (Compact Disk) ขนาด 700 MB เพื่อใช้เก็บสำรองข้อมูล (Backup) จากเครื่องอ่านและบันทึกฐานแม่เหล็ก

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

กระบวนการดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย 8 ขั้นตอนดังแสดงในภาพที่ 16 คือ (1) การศึกษาและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง, (2) การศึกษาหลักการวิเคราะห์พฤติกรรมทางกลโดยวิธี Finite Element, (3) การกำหนดและเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง, (4) การกำหนดแบบจำลองพฤติกรรมของวัสดุ (Soil Model) และการเลือกพารามิเตอร์, (5) การทดสอบแบบจำลองทาง Finite Element, (6) การกำหนดกรณีศึกษาและการคำนวณ, (7) การวิเคราะห์ผลที่ได้จากโปรแกรม Finite Element และ (8) สรุปผลการศึกษาและวิจารณ์ โดยวิธีการดำเนินงานวิจัยดังแสดงในภาพที่ 16 ซึ่งการดำเนินการวิจัยในแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 16 วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การศึกษาและรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การศึกษาลักษณะการแตกร้าวและการเกิดร่องล้อของโครงสร้างชั้นทางบนดินอ่อน

การศึกษาลักษณะความเสียหายของโครงสร้างชั้นทางซึ่งก่อสร้างบนดินอ่อนนั้น ทำโดยศึกษาข้อมูลของการก่อสร้างถนน โครงสร้างยืดหยุ่น (Flexible Pavement) บนดินอ่อนซึ่งมักประสบปัญหาการแตกร้าวและการเกิดร่องล้อบนโครงสร้างชั้นทาง งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาถึงลักษณะพฤติกรรมการแตกร้าวที่เกิดเนื่องจากการอูด้ว (Heave) ในโครงสร้างชั้นทางภายหลังจากมีน้ำหนักรบกวนกระทำ โดยที่ความอ่อนแอของโครงสร้างชั้นทางที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากอิทธิพลของชั้นดินฐานราก

2.1.2 การศึกษาลักษณะโครงสร้างและคุณสมบัติวัสดุของชั้นทาง

สำหรับการศึกษาถึงลักษณะโครงสร้างและคุณสมบัติชั้นทาง ได้ทำการศึกษาถึงส่วนประกอบและรูปร่างของโครงสร้างของชั้นทางโดยทั่วไป ซึ่งได้แก่ โครงสร้างทางยืดหยุ่น (Flexible Pavement) และโครงสร้างทางแข็ง (Rigid Pavement) และทำการรวบรวมข้อมูลคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุชั้นทางแต่ละชนิด ประกอบด้วย ชั้น Asphaltic, ชั้น Base, ชั้น Subbase และชั้น Subgrade ซึ่งเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างชั้นทางยืดหยุ่นที่จะมุ่งเน้นศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้ และศึกษาถึงอิทธิพลของน้ำหนัก (Load) แต่ละประเภทที่กระทำต่อโครงสร้างชั้นทาง

2.1.3 การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

การศึกษาถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ ได้ศึกษาถึงกระบวนการตกตะกอนและการกำเนิดของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ ลักษณะทั่วไปและการแบ่งแยกรูปแบบชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ ศึกษาคุณสมบัติในเชิงดัชนีวิศวกรรม, คุณสมบัติทางอัสติก และคุณสมบัติการรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

2.1.4 การศึกษาพฤติกรรมกลของโครงสร้างชั้นทาง

สำหรับการศึกษางานวิจัยในอดีต ได้รวบรวมบทความทางวิชาการในด้านการศึกษาพฤติกรรมกลของโครงสร้างชั้นทางที่มีในอดีตมาทำการศึกษา และนำไปเป็นแนวทางในการวิจัยต่อไป

2.2 ศึกษาหลักการวิเคราะห์พฤติกรรมทางกลของวัสดุชั้นทางและดินฐานรากโดยวิธี

Finite Element

วัตถุประสงค์สำคัญอย่างหนึ่งในการวิจัย คือ เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของหน่วยแรงที่เกิดขึ้น รวมไปถึงพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของโครงสร้างชั้นทางและดินฐานราก ดังนั้นในการศึกษากครั้งนี้จึงจำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิธีการการคาดคะเนและประมาณค่า

พฤติกรรมที่เกิดขึ้น โดยวิธี Finite Element และใช้แบบจำลอง Elastic Perfectly Plastic Stress-Strain สำหรับจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างชั้นทางและดินฐานราก

2.3 การกำหนดขนาดและเงื่อนไขของแบบจำลอง

การวิจัยครั้งนี้ต้องการศึกษาถึงพฤติกรรมของโครงสร้างชั้นทางชนิดที่มีแรงบีบอัดทางด้านข้าง (Confined Pavement) โดยจะทำการศึกษาพฤติกรรม Stress-Strain ที่เกิดขึ้น ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมจึงจำเป็นต้องกำหนดให้แบบจำลองมีความกว้างและความลึกที่มากเพียงพอเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอิทธิพลเนื่องมาจากขอบเขตของแบบจำลอง โดยจะพิจารณาจากการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายหลังจากน้ำหนักระทำ ซึ่งแบบจำลองที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์นั้นจะต้องมีการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่บริเวณขอบของแบบจำลองน้อยกว่า 1 % ของค่าน้ำหนักที่ทำการกระทำ ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้กำหนดให้แบบจำลองมีความกว้างเท่ากับ 80 เมตร และมีความลึกของชั้นดินฐานรากเท่ากับ 25 เมตร

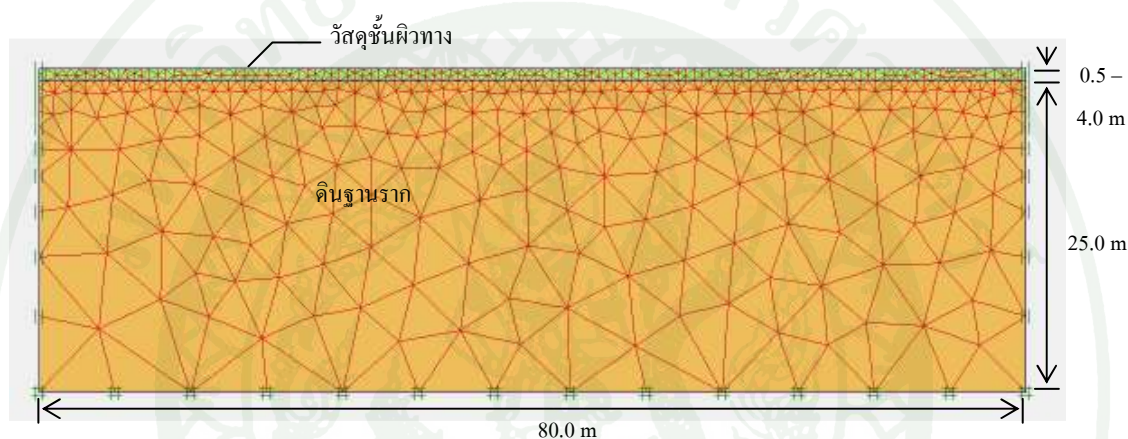
สำหรับค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทางที่ใช้ในการวิเคราะห์ กำหนดให้มีความหนาตั้งแต่ 0.50 ถึง 4.00 เมตร เพราะความหนาของโครงสร้างทางผิวทางยึดหยุ่นสำหรับทางหลวงแผ่นดินในประเทศไทย มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 45 - 55 เซนติเมตร (วิชชา, 2545) การวิจัยครั้งนี้จึงได้เลือกค่าความหนา 0.50 เมตร เป็นค่าความหนาที่น้อยที่สุดของโครงสร้างชั้นทางในการวิจัย และสำหรับค่าความหนาสูงสุด 4.00 เมตรนั้น เป็นการจำลองโครงสร้างของโครงสร้างชั้นทางที่หนาได้แก่ โครงสร้างทางขึ้น-ลงเครื่องบิน เป็นต้น

เนื่องจากในการวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างชั้นทางโดยละเอียด ดังนั้นการแบ่งความละเอียดของ Element ที่ใช้ในการวิเคราะห์ จึงกำหนดให้ Element ของโครงสร้างชั้นทางมีความละเอียดระดับ Very Fine ซึ่งเป็นความละเอียดของ Element ระดับละเอียดที่สุดที่โปรแกรมสามารถทำได้ ส่วนชั้นดินฐานรากเพื่อลดระยะเวลาในการคำนวณจึงกำหนดให้มีความละเอียดอยู่ที่ระดับ Medium

สำหรับการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์จะพิจารณาให้บริเวณด้านข้างของแบบจำลองมีการยุบตัวลงภายหลังจากมีน้ำหนักมากระทำ ดังนั้นจึงกำหนดให้บริเวณด้านข้างของแบบจำลองใช้ขอบเขตชนิด Horizontal Fixity ($u_x =$

0) ส่วนบริเวณด้านล่างของแบบจำลองต้องไม่มีการเคลื่อนที่ของขอบเขตเกิดขึ้นจึงกำหนดใช้ขอบเขตชนิด Full Fixity ($u_x=u_y=0$) ซึ่งการกำหนดขอบเขตเงื่อนไขของแบบจำลองรูปแบบนี้สามารถกำหนดได้โดยใช้คำสั่ง Standard Fixities ในโปรแกรม PLAXIS

โดยรูปร่างและความละเอียดของการแบ่ง Element แบบจำลอง ที่ใช้ในการวิเคราะห์ รวมถึงเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังแสดงในภาพที่ 17 และการสรุป Geometry ของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 12

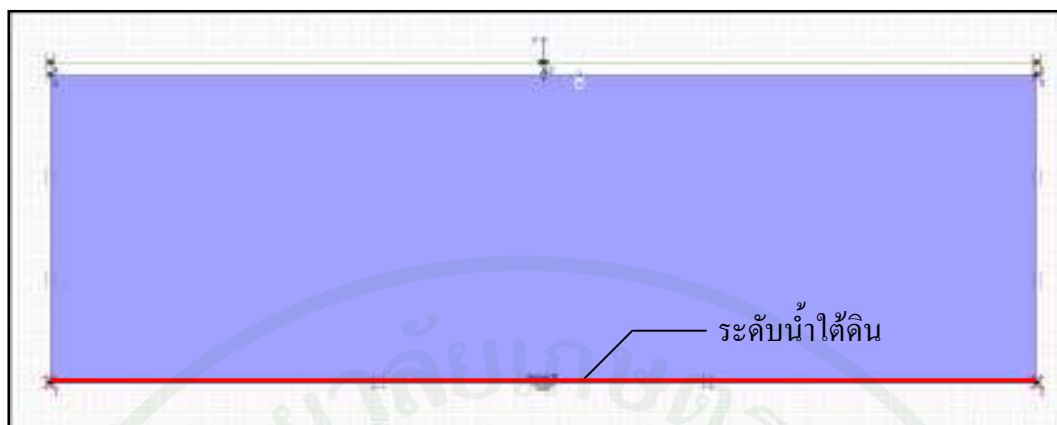


ภาพที่ 17 แสดงรูปร่าง และการแบ่ง Element ของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตารางที่ 12 สรุป Geometry แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

วัสดุ	กว้าง (m)	หนา (m)	ขนาดของ Mesh	Boundary Conditions
ชั้นพื้นทาง	80.0	0.5 - 4.0	Very Fine	Standard Fixities
ชั้นดินฐานราก	80.0	25.0	Medium	

การวิจัยในครั้งนี้กำหนดให้ระดับของน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าระดับของชั้นดินฐานราก เพื่อให้ในการวิเคราะห์ไม่ต้องคำนึงถึงแรงดันของไหลสถิต (Hydrostatic Pressure) ที่เกิดจากน้ำใต้ดิน โดยการใส่ระดับน้ำใต้ดินในแบบจำลองดังแสดงในภาพที่ 18



ภาพที่ 18 การใส่ระดับน้ำใต้ดินในแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

2.4 การกำหนดแบบจำลองพฤติกรรมของวัสดุ (Soil Model) การเลือกพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ และการขั้นตอนในการคำนวณ

2.4.1. ชนิดของแบบจำลองและการเลือกพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์

การวิจัยครั้งนี้ใช้โปรแกรม PLAXIS ในการจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างชั้นทางและดินฐานรากเมื่อน้ำหนักล้อมากระทำ โดยเลือกใช้แบบจำลองชนิด Plain Strain ซึ่งมีโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานรากเป็นชั้นอีลาสติกสองชั้น (Two Elastic Layer System)

สำหรับการกำหนดพฤติกรรมการบีบอัดของแบบจำลอง จะใช้แบบจำลองพฤติกรรมชนิด Mohr-Coulomb Model ซึ่งใช้ Coulomb's Friction Law ในการกำหนด Yield Function พารามิเตอร์ที่ใช้แสดงคุณสมบัติในโปรแกรม PLAXIS สำหรับแบบจำลองพฤติกรรมชนิด Mohr-Coulomb Model ประกอบด้วย

γ	=	Unit Weight (kN/m^3)
γ_{sat}	=	Saturated Unit Weight (kN/m^3)
E	=	Young's Modulus (kN/m^2)
ν	=	Poisson's Ratio
ϕ	=	Friction Angle (Degree)
c	=	Cohesion (kN/m^2)
ψ	=	Dilatancy Angle (Degree)

ซึ่งพารามิเตอร์ดังกล่าวนี้โปรแกรม PLAXIS แนะนำให้ใช้ค่าที่ได้จากการทดสอบวัสดุแบบระบายน้ำ (Drained Parameter) เช่น Drained Young's Modulus (E_D), ค่า c' และ ϕ' เป็นต้น สำหรับดินฐานรากดินอ่อน และดินแข็งซึ่งไม่มีผลการทดสอบแบบระบายน้ำนั้น โปรแกรม PLAXIS ยอมให้ใช้ค่า Undrained Shear Strength (s_u) แทนในค่า c และค่า $\phi = 0$

สำหรับการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างชั้นทางและดินฐานรากเมื่อน้ำหนักมากระทำในการวิจัยครั้งนี้กำหนดให้โครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานรากไม่สามารถระบายน้ำออกได้ (Undrained Analysis) ซึ่งสามารถกำหนดในโปรแกรม PLAXIS โดยเลือก Material Type เป็น Undrained และใส่คุณสมบัติของวัสดุที่จะใช้ในการวิเคราะห์เป็นชนิด Drained Parameter จากนั้นโปรแกรมจะทำการวิเคราะห์ค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore Water Pressure) ออกมาให้ โดยค่าแรงดันน้ำส่วนเกินนี้จะถูกคำนวณมาจากค่า Volumetric Strain ($\Delta\epsilon_v$) ที่เกิดขึ้นภายหลังจากมีน้ำหนักมากระทำกับโครงสร้างชั้นทาง

การคำนวณค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจากค่า Volumetric Strain จะทำโดยใช้สมมติฐานที่ว่า เมื่อมีหน่วยแรงมากระทำกับวัสดุที่ไม่ระบายน้ำ (Undrained Material) ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะเกิดขึ้นเพื่อช่วยรับหน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างชั้นทางดังในสมการที่ 16

$$\sigma = \sigma' + \Delta u \quad (16)$$

เมื่อ	σ	=	Total Stress
	σ'	=	Effective Stress
	Δu	=	Excess Pore Water Pressure

โดยที่โปรแกรมจะทำการเพิ่มค่า Undrained Bulk Modulus (K_u) เข้าไปแทนที่ในช่องว่างของโครงสร้างชั้นทาง (Soil Skeleton + Water) และแบ่งการคำนวณออกเป็นเป็นค่าหน่วยแรงรวม (Total Stress), ค่าหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress) และทำการแปลงเป็นค่าแรงดันน้ำส่วนเกินในเวลาต่อมา โดยในการคำนวณจะเป็นไปดังในสมการที่ 17 ถึงสมการที่ 19

$$\text{Total Stress} \quad \Delta p = K_u \Delta \varepsilon_v \quad (17)$$

$$\text{Effective Stress} \quad \Delta p' = (1 - B) \Delta p = K' \Delta \varepsilon_v \quad (18)$$

$$\text{Excess Pore Pressure} \quad \Delta p_w = B \Delta p = \frac{K_w}{n} \Delta \varepsilon_v \quad (19)$$

โดยในการวิเคราะห์จะใช้พารามิเตอร์ชนิด Drained Parameter แต่เมื่อเลือกพิจารณาพฤติกรรมของวัสดุเป็นชนิด Undrained Material โปรแกรมจะทำการแปลงพารามิเตอร์ชนิด Drained Parameter ให้กลายเป็น Undrained Parameter โดยใช้ความสัมพันธ์เชิงอิลาสติกของฮุกส์ (Hook's Law) ดังในสมการที่ 20

$$K_u = \frac{2G(1 + \nu_u)}{3(1 - 2\nu_u)} \quad (20)$$

$$\text{เมื่อ} \quad G = \frac{E'}{2(1 + \nu')}$$

$$\text{โดยที่ค่า} \quad \nu_u = 0.495 \quad (\text{เมื่อใช้ Standard Setting})$$

$$\text{หรือ} \quad \nu_u = \frac{3\nu' + B(1 - 2\nu')}{3 - B(1 - 2\nu')} \quad (\text{เมื่อใช้ Manual Setting})$$

โดยที่ค่า Undrained Poisson's Ratio (ν_u) ในสมการที่ 20 สามารถแทนที่ด้วยค่า Bulk Stiffness ของแรงดันของไหล (Pore Fluid, $K_{w,ref}/n$) เป็นดังในสมการที่ 21

$$\frac{K_{w,ref}}{n} = K_u - K' \quad (21)$$

เมื่อ K' คือค่า Effective Bulk Modulus สามารถคำนวณได้ดังในสมการที่ 22

$$เมื่อ \quad K' = \frac{E'}{3(1 - 2\nu')} \quad (22)$$

โดยที่ค่าของ $K_{w,ref}/n$ จะมีค่าไม่น้อยกว่าค่า Bulk Stiffness ของน้ำธรรมชาติ ($K_w^0 = 2 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$) และค่าของ Skemton's B-parameter สามารถคำนวณได้จากค่าอัตราส่วนของ Bulk Stiffness ของ Soil Skeleton และค่า Pore Fluid ดังแสดงในสมการที่ 23

$$B = \frac{1}{1 + \frac{nK'}{K_w}} \quad (23)$$

ซึ่งค่าของแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นจากในสมการที่ 19 จะช่วยรับค่าหน่วยแรงซึ่งเกิดจากน้ำหนักที่มากกระทำ และค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจะแบ่งกันรับระหว่างค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน และวัสดุทำหน้าที่ยรับเอาไว้ (Effective Stress)

โดยจากการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุชนิดต่างๆเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์จะสามารถสรุปคุณสมบัติของวัสดุได้เป็น (1) วัสดุโครงสร้างชั้นทางจะเป็นคุณสมบัติชนิด Drained Parameter ซึ่งได้จากการทดสอบ Triaxial Test โดยอ้างอิงจาก Fwa et al. (1998) และ (2) วัสดุชั้นดินฐานรากจะเป็นคุณสมบัติชนิด Undrained Parameter โดยแบ่งเป็นคุณสมบัติเชิงอีลาสติกและคุณสมบัติกำลังรับแรง โดยคุณสมบัติเชิงอีลาสติกของชั้นฐานรากดินอ่อนและชั้นฐานรากดินแข็ง อ้างอิงจาก Teparaksa (2001) ส่วนคุณสมบัติการรับแรงอ้างอิงจาก Sower (1979) และค่าหน่วยน้ำหนัก (Unit Weight, γ) ของโครงสร้างชั้นทางจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 24 kN/m^3 ทั้งค่าหน่วยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วยน้ำ และค่าหน่วยน้ำหนักที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated and Unsaturated Unit Weight, γ_{sat} and γ_{unsat}) เนื่องจากค่า B Parameter มีค่าใกล้เคียง 1 เช่นเดียวกัน ในวัสดุชั้นฐานรากจะ

กำหนดให้ค่าหน่วยน้ำหนักมีค่าเท่ากับ 14 kN/m^3 ในชั้นฐานรากดินอ่อน และ 18 kN/m^3 ในชั้นฐานรากดินแข็ง ทั้งค่าหน่วยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วยน้ำ และค่าหน่วยน้ำหนักที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

สำหรับคุณสมบัติของวัสดุชนิด Undrained Parameter จำเป็นที่จะต้องแปลงคุณสมบัติให้เป็นคุณสมบัติชนิด Drained Parameter เสียก่อน เพื่อให้โปรแกรมไม่เกิดความสับสนในการวิเคราะห์ โดยต้องทำการแปลงคุณสมบัติเชิงอีลาสติกโดยใช้สมการที่ 24

$$E' = \frac{2(1 + \nu')}{3} E_u \quad (24)$$

โดยที่การสรุปคุณสมบัติเชิงอีลาสติกของโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานรากดังแสดงในตารางที่ 13 และคุณสมบัติการรับแรงของโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานรากดังแสดงในตารางที่ 14 (รายละเอียดของโครงสร้างชั้นทางอยู่ในหัวข้อ 2.6)

ตารางที่ 13 สรุปคุณสมบัติเชิงกลของโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานราก

ชนิดของ Parameter	Parameter ที่สรุปได้จากการศึกษา	Parameter ที่ Input ในโปรแกรม	Parameter ที่โปรแกรมใช้ในการคำนวณ
Elastic Modulus (E, kPa)			
โครงสร้างชั้นทาง	Drained Parameter	Drained Parameter	Undrained Condition
- Grade A	$E \leq 5 \times 10^4$	2.7×10^4	2.709×10^4
- Grade B	$5 \times 10^4 \leq E \leq 5 \times 10^5$	2.7×10^5	2.709×10^5
- Grade C	$5 \times 10^5 \leq E \leq 5 \times 10^6$	2.7×10^6	2.709×10^6
- Grade D	$E \geq 5 \times 10^6$	2.7×10^7	2.709×10^7
ชั้นดินฐานราก	Undrained Parameter	Drained Parameter	Undrained Condition
- ชั้นฐานรากดินอ่อน	3,000 ($150 S_u$)	2,666.67 ($8/9 \times E_u$)	3,000
- ชั้นฐานรากดินแข็ง	150,000 ($2,000 S_u$)	133,333.33 ($8/9 \times E_u$)	150,000
Poisson Ratio (V)			
โครงสร้างชั้นทาง	Drained Parameter	Drained Parameter	Undrained Condition
- Grade A	0.2	0.2	0.495
- Grade B	0.2	0.2	0.495
- Grade C	0.2	0.2	0.495
- Grade D	0.2	0.2	0.495
ชั้นดินฐานราก	Undrained Parameter	Drained Parameter	Undrained Condition
- ชั้นฐานรากดินอ่อน	0.35	0.35	0.495
- ชั้นฐานรากดินแข็ง	0.35	0.35	0.495

ตารางที่ 14 สรุปคุณสมบัติการรับแรงเฉือนของชั้นผิวทางและชั้นดินฐานราก

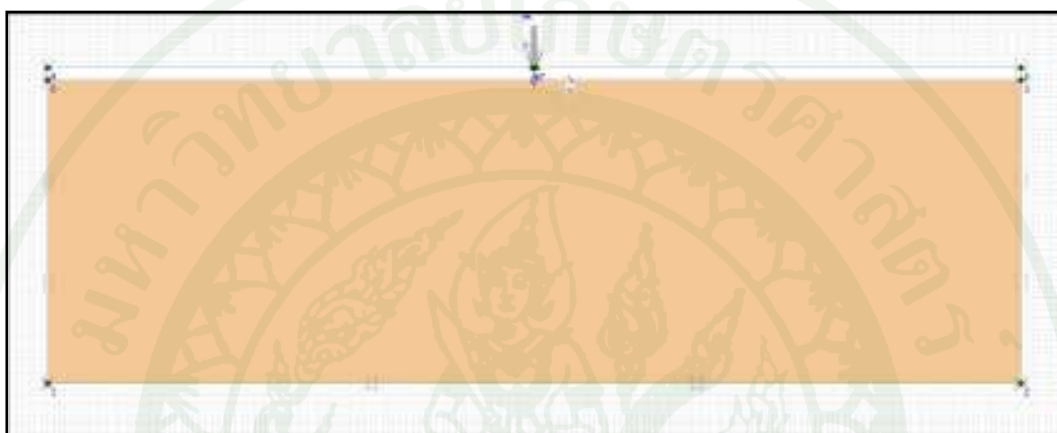
ชนิดของ Parameter	Parameter ที่สรุปได้จากการศึกษา	Parameter ที่ Input ในโปรแกรม	Parameter ที่โปรแกรมใช้ในการคำนวณ
Cohesion (c, kPa)			
โครงสร้างชั้นทาง	Drained Parameter	Drained Parameter	Undrained Condition
- Grade A	20.4	20.4	20.4
- Grade B	50	50	50
- Grade C	80	80	80
- Grade D	210	210	210
ชั้นดินฐานราก	Undrained Parameter	Undrained Parameter	Undrained Condition
- ชั้นดินรากลินอ่อน	20	20	20
- ชั้นดินรากลินแข็ง	75	75	75
Friction Angle (ϕ , Degree)			
โครงสร้างชั้นทาง	Drained Parameter	Drained Parameter	Undrained Condition
- Grade A	23	23	23
- Grade B	38.5	38.5	38.5
- Grade C	54.1	54.1	54.1
- Grade D	30	30	30
ชั้นดินฐานราก	Undrained Parameter	Undrained Parameter	Undrained Condition
- ชั้นดินรากลินอ่อน	0	0	0
- ชั้นดินรากลินแข็ง	0	0	0

2.4.2. ขั้นตอนการคำนวณ (Calculation Stage)

การสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการจำลองพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างชั้นทาง แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนได้แก่ (1) Initial Stage (2) Pavement Construction Stage และ (3) Loading Stage โดยแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.4.2.1. Initial Stage

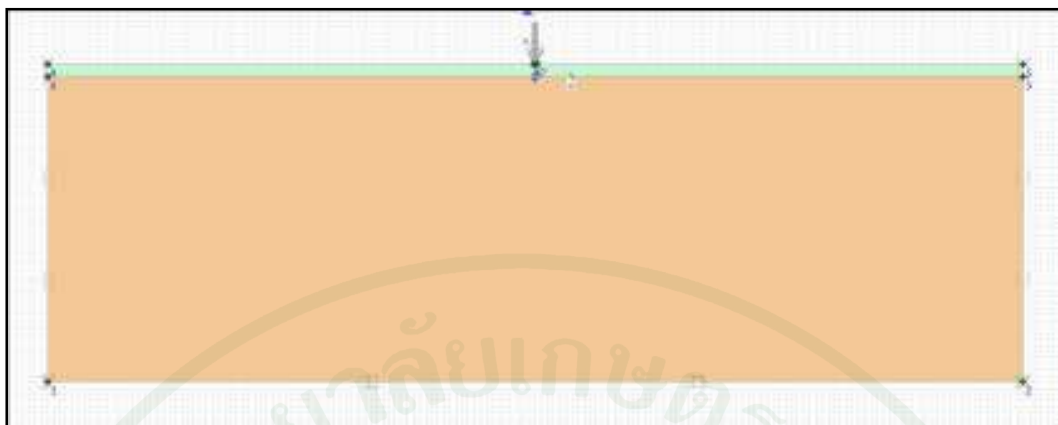
เป็นการจำลองพฤติกรรมของวัสดุในสภาวะแรกเริ่มซึ่งมีเพียงชั้นดินฐานราก ขั้นตอนนี้จะทำการคำนวณค่าหน่วยแรงเริ่มต้น (Initial Stress) ออกมาเพื่อใช้ในการคำนวณขั้นต่อไป โดยรูปร่างของแบบจำลองในขั้นตอน Initial Stage ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 แสดงแบบจำลองในขั้นตอน Initial Stage

2.4.2.2. Pavement Construction Stage

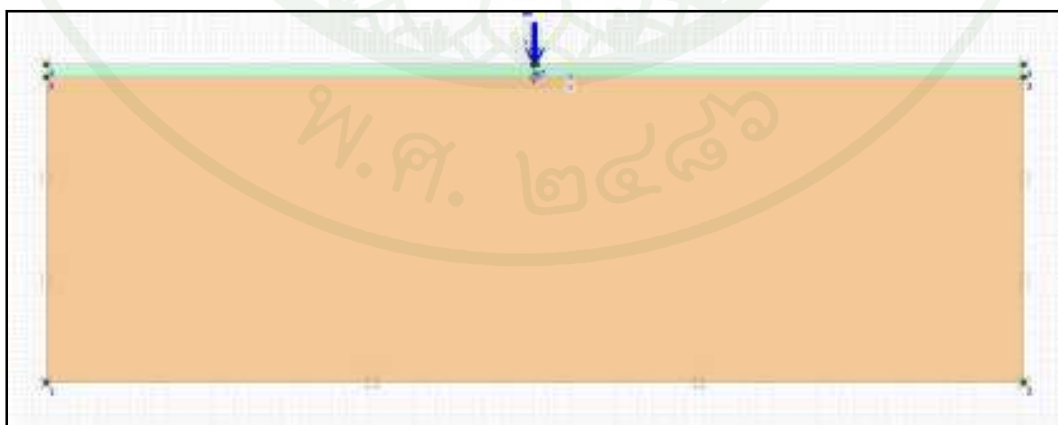
เป็นการจำลองสภาวะของการก่อสร้างโครงสร้างชั้นทาง โดยตั้งสมมติฐานของแบบจำลองว่าโครงสร้างชั้นทางทำการก่อสร้างมาเป็นเวลานานแล้ว ทำให้ค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore Water Pressure) สลายไปจนหมด ดังนั้นในขั้นตอนนี้จะกำหนดไม่ให้มีค่าแรงดันน้ำส่วนเกินเกิดขึ้นในวัสดุที่เป็น Undrained Material โดยใช้คำสั่ง Ignore Undrained Behavior ในการคำนวณ โดยรูปร่างของแบบจำลองในขั้นตอน Pavement Construction Stage ดังแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 20 แสดงแบบจำลองในขั้นตอน Pavement Construction Stage

2.4.2.3. Loading Stage

เป็นการจำลองสถานะขณะมีน้ำหนักมากระทำกับโครงสร้างชั้นทาง โดยจะทำการเพิ่มน้ำหนักที่มากขึ้นทีละน้อย เพื่อพิจารณาพฤติกรรมของโครงสร้างชั้นทาง จนกระทั่งเกิดการพิบัติ ซึ่งพฤติกรรมที่ต้องการพิจารณาได้แก่ การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงทั้งในแนวดิ่งและแนวราบ, รูปแบบของการพิบัติที่เกิดขึ้น เป็นต้น โดยเมื่อแบบจำลองพิบัติจะทำให้ค่ากำลังรับแรงสูงสุด, ค่าการทรุดตัวสูงสุด และขนาดของแอ่งการทรุดตัว เป็นต้น โดยแบบจำลองในขั้นตอน Loading Stage ดังแสดงในภาพที่ 21



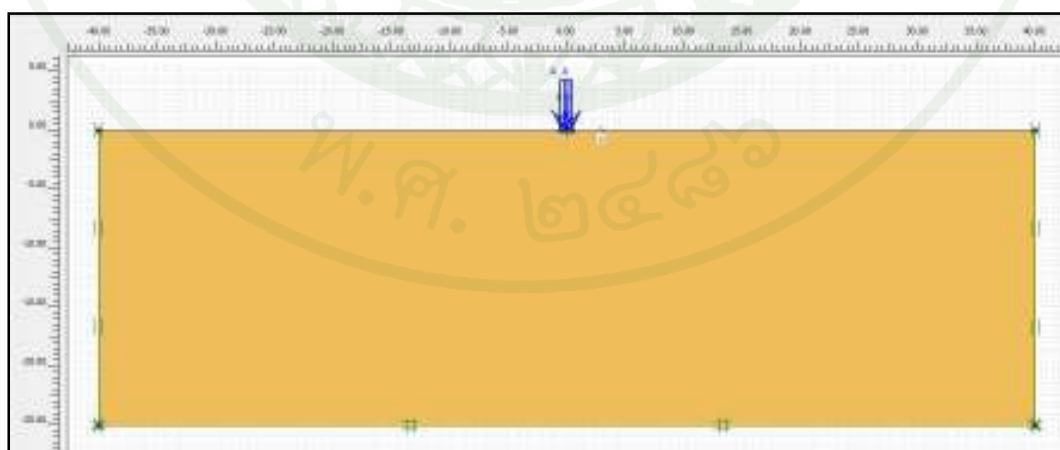
ภาพที่ 21 แบบจำลองในขั้นตอน Loading Stage

2.5 การทดสอบแบบจำลองทาง Finite Element

2.5.1 การทดสอบโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์ในสถานะต่างๆ

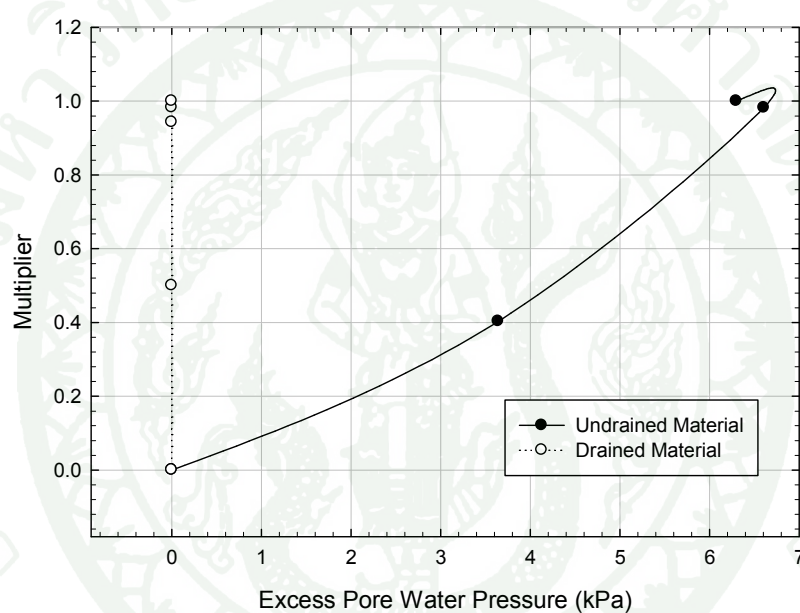
สำหรับการวิจัยในครั้งนี้ จะพิจารณาถึงสถานะที่น้ำหนักเข้ามากระทำในแบบทันทีทันใด (Immediate Loading) โดยโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานรากนั้นจะกำหนดให้เป็นวัสดุไม่ระบายน้ำ (Undrained Material) ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PLAXIS นั้นจะต้องเลือกใช้ชนิดของวัสดุในการวิเคราะห์ให้ถูกต้อง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทราบว่า การวิเคราะห์ด้วยวัสดุไม่ระบายน้ำ (Undrained Material) มีความแตกต่างกับการวิเคราะห์ด้วยวัสดุระบายน้ำ (Drained Material) อย่างไรบ้าง เพื่อใช้อธิบายผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ต่อไป

ในการทดสอบจะสร้างแบบจำลองดินอ่อนอย่างง่าย ขนาดความกว้าง 80.0 เมตร มีความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนเท่ากับ 25.0 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 22 มีค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 14.0 kN/m^3 ค่าคุณสมบัติทางอีลาสติก ค่า Elastic Young's Modulus เท่ากับ $2,666.67 \text{ kPa}$ อัตราส่วน Poisson's Ratio เท่ากับ 0.35 มีค่าคุณสมบัติการรับแรงเฉือน ค่า Cohesion เท่ากับ 20 kPa โดยทำการทดสอบเปรียบเทียบแบบจำลองดินอ่อนในระหว่างกรณีวัสดุไม่ระบายน้ำ (Undrained Material) และกรณีวัสดุระบายน้ำ (Drained Material) ซึ่งทั้ง 2 สถานะนั้นกำหนดให้มีน้ำหนักมากระทำเท่ากัน คือเท่ากับ 100 kN และความกว้างของพื้นที่แรงกระทำเท่ากับ 0.50 เมตร

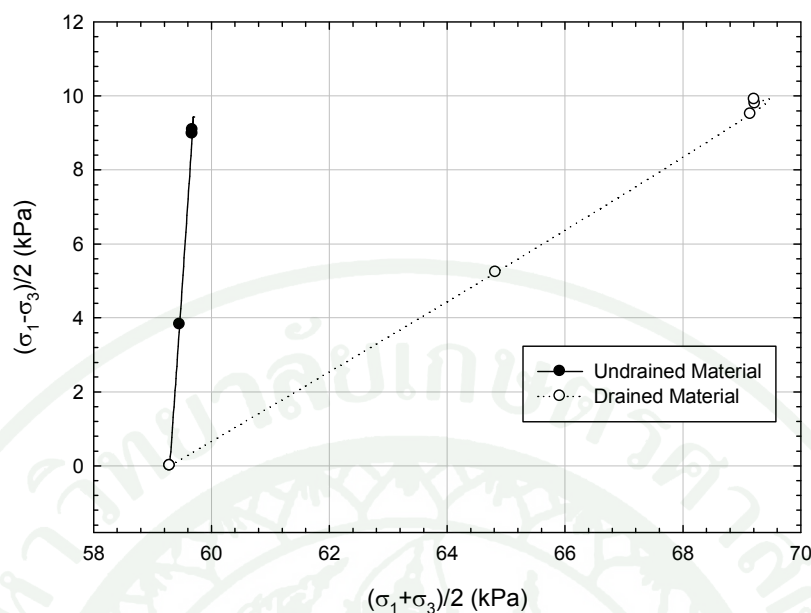


ภาพที่ 22 แสดงแบบจำลองที่ใช้เปรียบเทียบสถานะการทดสอบ

จากผลการทดสอบพบว่าในกรณีซึ่งเป็นวัสดุไม่ระบายน้ำนั้น จะมีค่า Excess Pore Water Pressure เกิดขึ้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุระบายน้ำนั้นจะพบว่า ค่า Excess Pore Water Pressure จะมีค่าเท่ากับ 0 ตลอด หรือไม่มีการเกิดค่า Excess Pore Water Pressure ขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 23 (Multiplier คือ Process ซึ่งดำเนินไปแล้วใน Stage นั้นๆ) และเมื่อมาศึกษาพฤติกรรมเส้นทางเดินของหน่วยแรง (Stress Path) จะพบว่าเส้นทางเดินของหน่วยแรงในสภาวะไม่ระบายน้ำจะมีความชันที่มากกว่าสภาวะระบายน้ำ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเกิดขึ้นของค่าแรงดันน้ำส่วนเกินนั่นเอง เส้นทางเดินของหน่วยแรงทั้ง 2 สภาวะดังแสดงในภาพที่ 24



ภาพที่ 23 แสดงการเกิด Excess Pore Water Pressure ทั้ง 2 สภาวะ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของ
ดินฐานราก



ภาพที่ 24 แสดงเส้นทางเดินของหน่วยแรงทั้ง 2 สภาวะ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของดินฐานราก

และเมื่อทำการทดลองเปรียบเทียบในกรณีการวิเคราะห์แบบไม่ระบายน้ำ และการวิเคราะห์แบบระบายน้ำ สำหรับกรณีที่วัสดุเป็นวัสดุชนิดไม่ระบายน้ำ (Undrained Material) และใช้คำสั่งบังคับการวิเคราะห์ให้เป็นกรณีระบายน้ำ โดยใช้คำสั่ง Ignore Undrained Behavior จะพบว่า สำหรับวัสดุชนิดไม่ระบายน้ำเมื่อทำการคำนวณด้วยวิธีนี้จะไม่มีความดันน้ำส่วนเกินเกิดขึ้นเช่นกัน

2.5.2 ความถูกต้องของการคำนวณค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore Water Pressure)

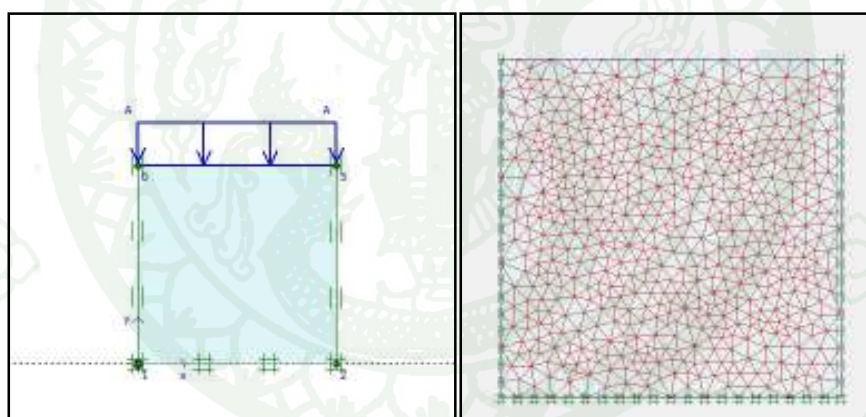
เมื่อทำการเลือกชนิดวัสดุเป็นชนิดไม่ระบายน้ำ (Undrained Material) เมื่อมีน้ำหนักมากระทำโปรแกรม PLAXIS จะทำการคำนวณค่าแรงดันน้ำส่วนเกินขึ้นมาจากค่า Increment of Volumetric Strain ($\Delta\epsilon_v$)

ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสมการที่ (17) และสมการที่ (19) จะพบว่าค่าแรงดันน้ำส่วนเกินสามารถคำนวณได้จากทั้งค่า Increment of Total Mean Stress (Δp) และค่า Increment of Volumetric Strain ($\Delta\epsilon_v$)

ดังนั้นเพื่อศึกษาถึงความถูกต้องจากการคำนวณค่า Excess Pore Water Pressure การวิจัยครั้งนี้จึงได้กำหนดกรณีศึกษาที่เรียกว่า SimpleBox ขึ้น เพื่อพิจารณาการคำนวณค่า Excess Pore Water Pressure ในกรณีต่างๆขึ้น

2.5.2.1 SimpleBox Case I

กรณีศึกษาที่ 1 กำหนดให้วัสดุมีความกว้างและยาวของแบบจำลองด้านละ 1 เมตร เป็นแบบจำลองชนิด Linear Elastic Material มีน้ำหนักชนิด Uniform Load ขนาด 10 kPa มีความยาวเป็นอนันต์ กระทำอยู่ที่ด้านบนของแบบจำลอง โดยรูปร่างของแบบจำลองเป็นดังแสดงในภาพที่ 25 สำหรับการสรุปพารามิเตอร์ของแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 15 และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณค่าแรงดันน้ำส่วนเกินดังแสดงในตารางที่ 16



ภาพที่ 25 แสดงรูปร่างของแบบจำลองกรณีศึกษา SimpleBox Case I

ตารางที่ 15 สรุปพารามิเตอร์แบบจำลองกรณีศึกษา SimpleBox Case I

Layer	Material	Material	Mesh	γ	E'_{ref}	ν'	c'	ϕ'
	Model	Type	Condition	(kN/m^3)	(kN/m^2)		(kN/m^2)	(Degree)
1	Linear Elastic	Undrained	Very Fine	0	1×10^4	0.2	-	-

ตารางที่ 16 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณค่าแรงดันน้ำส่วนเกินกรณีศึกษา SimpleBox

Case I

Layer	E (kN/m ²)	V _u	V'	G (kN/m ²)	K _u (kN/m ²)	K' (kN/m ²)	K _w /n (kN/m ²)	B
1	1x10 ⁴	0.495	0.2	4166.667	415277.78	5555.56	409722.2	0.987

จากการวิเคราะห์จะได้ผลลัพธ์ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินซึ่งคำนวณจากค่า Increment of Total Mean Stress (Δp), Increment of Volumetric Strain ($\Delta \epsilon_v$) และค่าดินน้ำที่คำนวณได้จากโปรแกรมดังแสดงในตารางที่ 17 ถึงตารางที่ 19

ตารางที่ 17 แสดงการคำนวณค่า Excess Pore Pressure ด้วยค่า Increment of Total Stress ที่ได้จากโปรแกรม

X	Y	σ_{yy}	σ_{xx}	σ_{zz}	Δp ($\sigma_{yy} + \sigma_{xx} + \sigma_{zz}$)/3	Δu $\Delta p \cdot B$
[m]	[m]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]
0.5	1	-9.99997	-9.80195	-9.80195	-9.86795	-9.73594
0.5	0.971854	-10	-9.802	-9.802	-9.86801	-9.73599
0.5	0.943709	-10	-9.80198	-9.80198	-9.86798	-9.73597
0.5	0.943709	-10	-9.80198	-9.80198	-9.86798	-9.73597

ตารางที่ 18 แสดงการคำนวณโดยผลลัพธ์จากค่า Increment of Strain ที่ได้จากโปรแกรม (Case I)

X	Y	ϵ_{xx}	ϵ_{yy}	ϵ_{zz}	ϵ_v ($\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}$)	Δp $\epsilon_v \times K_u$	Δu $\Delta p \times B$
[m]	[m]	[%]	[%]	[%]	[%]	[kN/m ²]	[kN/m ²]
0.5	1	1.04E-10	-0.00238	0	-0.00238	-9.86795	-9.73594
0.5	0.971854	5.74E-10	-0.00238	0	-0.00238	-9.86801	-9.73599
0.5	0.943709	-4.6E-10	-0.00238	0	-0.00238	-9.86798	-9.73597
0.5	0.943709	-4.8E-10	-0.00238	0	-0.00238	-9.86798	-9.73597

ตารางที่ 19 เปรียบเทียบผลลัพธ์โดยใช้ค่า Excess Pore Water Pressure ที่ได้จากโปรแกรม (Case I)

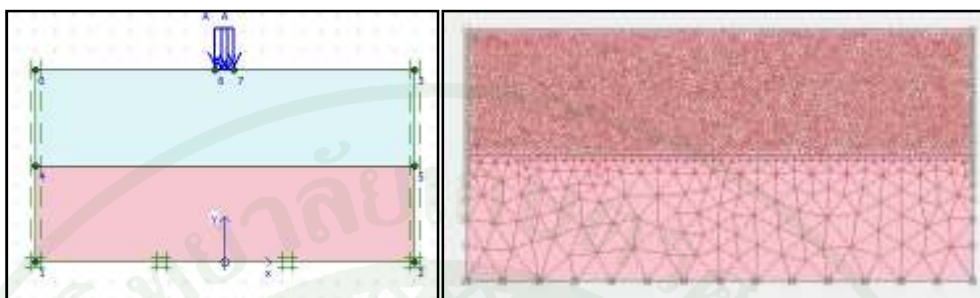
X	Y	P_excess	Different From Stress	Different From Strain
[m]	[m]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]
0.5	1	-9.73594	3.2107E-08	-7.47222E-08
0.5	0.971854	-9.73599	-5.2843E-08	-1.55972E-07
0.5	0.943709	-9.73597	1.5273E-08	1.46042E-07
0.5	0.943709	-9.73597	4.8161E-08	2.40278E-07

จากผลลัพธ์ที่แสดงออกมาแสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันน้ำส่วนเกินซึ่งคำนวณจากค่า Increment of Total Stress และ Increment of Volumetric Strain จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

2.5.2.2 SimpleBox Case II

กรณีศึกษาที่ 2 กำหนดให้แบบจำลองมีความกว้างเท่ากับ 2 เมตรและมีความลึก 1 เมตร เป็นแบบจำลองชนิด Linear Elastic Material แบ่งออกเป็นวัสดุ 2 ชั้น มีความหนาชั้นละ 0.50 เมตร โดยความละเอียดของการแบ่ง Mesh ของ Element ในแต่ละชั้นมีความแตกต่างกัน มีน้ำหนักชนิด Uniform Load ขนาด 10 kPa มีความกว้าง 0.10 เมตร กระทำอยู่ที่ด้านบนของแบบจำลอง โดยรูปร่างของแบบจำลองเป็นดังแสดงในภาพที่ 26 สำหรับการสรุปพารามิเตอร์ของ

แบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 20 และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณค่าแรงดันน้ำส่วนเกินดังแสดงในตารางที่ 21



ภาพที่ 26 แสดงรูปร่างของแบบจำลองกรณีศึกษา SimpleBox Case II

ตารางที่ 20 สรุปพารามิเตอร์แบบจำลองกรณีศึกษา SimpleBox Case II

Layer	Material Model	Material Type	Mesh Condition	γ (kN/m ³)	E'_{ref} (kN/m ²)	V'	c' (kN/m ²)	ϕ' (Degree)
1	Linear Elastic	Undrained	Very Fine	0	1×10^4	0.2	-	-
2	Linear Elastic	Undrained	Medium	0	1×10^3	0.35	-	-

ตารางที่ 21 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณค่าแรงดันน้ำส่วนเกินกรณีศึกษา SimpleBox Case II

Layer	E (kN/m ²)	V_u	V'	G (kN/m ²)	K_u (kN/m ²)	K' (kN/m ²)	K_w/n (kN/m ²)	B
1	1×10^4	0.495	0.2	4166.667	415277.78	5555.56	409722.2	0.987
2	1×10^3	0.495	0.35	1851.852	184567.9	5555.56	179014.3	0.9699

จากการวิเคราะห์จะได้ผลลัพธ์ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินซึ่งคำนวณจากค่า Increment of Total Mean Stress (Δp), Increment of Volumetric Strain ($\Delta \epsilon_v$) และค่าดันน้ำที่คำนวณได้จากโปรแกรมดังแสดงในตารางที่ 22 ถึงตารางที่ 24

ตารางที่ 22 แสดงการคำนวณค่า Excess Pore Pressure ด้วยค่า Increment of Total Stress ที่ได้จากโปรแกรม (Case II)

X	Y	σ_{yy}	σ_{xx}	σ_{zz}	Δp ($\sigma_{yy} + \sigma_{xx} + \sigma_{zz}$)/3	Δu $\Delta p \times B$
[m]	[m]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]
0	1	-10.0003	-10.2471	-10.0225	-10.09	-9.95501
1E-12	0.990102	-9.96627	-7.77786	-8.78335	-8.84249	-8.7242
1E-12	0.990102	-9.97076	-7.77117	-8.78226	-8.84139	-8.72312
1E-12	0.986056	-9.9206	-6.84019	-8.29659	-8.35246	-8.24072
1E-12	0.986056	-9.91539	-6.84288	-8.29534	-8.3512	-8.23948
0	0.972895	-9.50846	-4.37731	-6.87346	-6.91974	-6.82717

ตารางที่ 23 แสดงการคำนวณโดยผลลัพธ์จากค่า Increment of Strain ที่ได้จากโปรแกรม (Case II)

X	Y	ϵ_{xx}	ϵ_{yy}	ϵ_{zz}	ϵ_v ($\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}$)	Δp $\epsilon_v \times K_u$	Δu $\Delta p \times B$
[m]	[m]	[%]	[%]	[%]	[%]	[kN/m ²]	[kN/m ²]
0	1	0.000266	-0.0027	0	-0.00243	-10.09	-9.95501
1E-12	0.990102	-0.0142	0.012066	0	-0.00213	-8.84249	-8.7242
1E-12	0.990102	-0.01426	0.012133	0	-0.00213	-8.8414	-8.72312
1E-12	0.986056	-0.01949	0.017477	0	-0.00201	-8.35246	-8.24072
1E-12	0.986056	-0.01944	0.01743	0	-0.00201	-8.3512	-8.23948
0	0.972895	-0.03162	0.029954	0	-0.00167	-6.91974	-6.82717

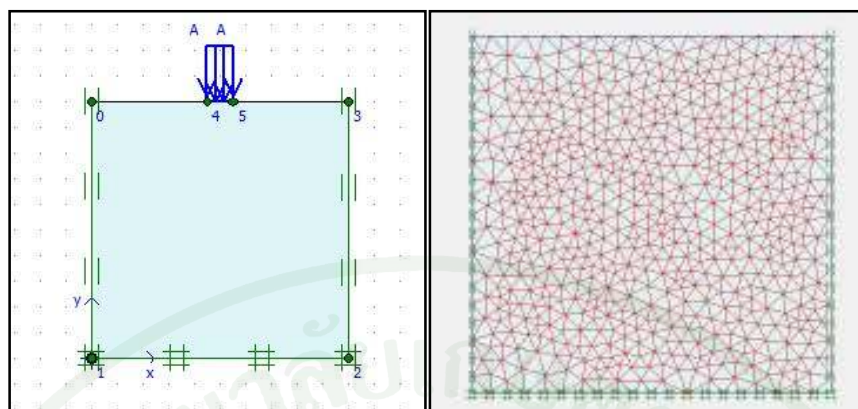
ตารางที่ 24 เปรียบเทียบผลลัพธ์โดยใช้ค่า Excess Pore Water Pressure ที่ได้จากโปรแกรม (Case II)

X	Y	P_excess	Different From Stress	Different From Strain
[m]	[m]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]
0	1	-9.95501	1.18172E-07	-1.39583E-07
1E-12	0.990102	-8.7242	-1.40468E-08	5.88889E-07
1E-12	0.990102	-8.72312	3.534E-08	1.82222E-06
1E-12	0.986056	-8.24072	-1.67224E-08	-4.30556E-07
1E-12	0.986056	-8.23948	2.00669E-09	-1.48889E-06
0	0.972895	-6.82717	-1.00334E-08	1.70833E-06

จากผลลัพธ์ที่แสดงออกมาแสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันน้ำส่วนเกินซึ่งคำนวณจากค่า Increment of Total Stress และ Increment of Volumetric Strain จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลจากรูปร่าง (Geometry), การแบ่งชั้นของแบบจำลอง (Layer System), ความแตกต่างของขนาด Mesh แต่ละ Element และความกว้างของน้ำหนักที่มากระทำ (Load Width) จะไม่มีผลต่อการคำนวณค่าแรงดันน้ำส่วนเกินเมื่อเป็นแบบจำลองชนิด Linear Elastic

2.5.2.3 SimpleBox Case III

กรณีศึกษาที่ 3 กำหนดให้วัสดุมีความกว้างและยาวของแบบจำลองด้านละ 1 เมตร เป็นแบบจำลองชนิด Mohr-Coulomb มีน้ำหนักชนิด Uniform Load ขนาด 10 kPa มีความกว้าง 0.10 เมตร กระทำอยู่ที่ด้านบนของแบบจำลอง โดยรูปร่างของแบบจำลองเป็นดังแสดงในภาพที่ 27 สำหรับการสรุปพารามิเตอร์ของแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 25 และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณค่าแรงดันน้ำส่วนเกินดังแสดงในตารางที่ 26



ภาพที่ 27 แสดงรูปร่างของแบบจำลองกรณีศึกษา SimpleBox Case III

ตารางที่ 25 สรุปพารามิเตอร์แบบจำลองกรณีศึกษา SimpleBox Case III

Layer	Material Model	Material Type	Mesh Condition	γ (kN/m ³)	E'_{ref} (kN/m ²)	ν'	c' (kN/m ²)	ϕ' (Degree)
1	MC	Undrained	Very Fine	0	1×10^4	0.2	-	-

ตารางที่ 26 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณค่าแรงดันน้ำส่วนเกินกรณีศึกษา SimpleBox Case III

Layer	E (kN/m ²)	ν_u	ν'	G (kN/m ²)	K_u (kN/m ²)	K' (kN/m ²)	K_w/n (kN/m ²)	B
1	1×10^4	0.495	0.2	4166.667	415277.78	5555.56	409722.2	0.987

จากการวิเคราะห์จะได้ผลลัพธ์ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินซึ่งคำนวณจากค่า Increment of Total Mean Stress (Δp), Increment of Volumetric Strain ($\Delta \epsilon_v$) และค่าดันน้ำที่คำนวณได้จากโปรแกรมดังแสดงในตารางที่ 27 ถึงตารางที่ 29

ตารางที่ 27 แสดงการคำนวณค่า Excess Pore Pressure ด้วยค่า Increment of Total Stress ที่ได้จากโปรแกรม (Case III)

X	Y	σ_{yy}	σ_{xx}	σ_{zz}	Δp $(\sigma_{yy} + \sigma_{xx} + \sigma_{zz})/3$	Δu $\Delta p \times B$
[m]	[m]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]
0.5	1	-9.88048	-9.76905	-9.79044	-9.81333	-9.68204
0.5	0.974293	-9.43178	-4.31846	-5.32493	-6.35839	-6.27333
0.5	0.974293	-9.49474	-4.32213	-5.33757	-6.38481	-6.2994
0.5	0.956824	-8.73694	-2.47874	-3.72358	-4.97975	-4.91313
0.5	0.956824	-8.5552	-2.38849	-3.61265	-4.85211	-4.7872

ตารางที่ 28 แสดงการคำนวณโดยผลลัพธ์จากค่า Increment of Strain ที่ได้จากโปรแกรม (Case III)

X	Y	ϵ_{xx}	ϵ_{yy}	ϵ_{zz}	ϵ_v $(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz})$	Δp $\epsilon_v \times K_u$	Δu $\Delta p \times B$
[m]	[m]	[%]	[%]	[%]	[%]	[kN/m ²]	[kN/m ²]
0.5	1	-0.00108	-0.00131	0	-0.00238	-9.899	-9.7675
0.5	0.9742926	-0.04909	0.048046	0	-0.00105	-4.3496	-4.2914
0.5	0.9742926	-0.04966	0.048617	0	-0.00105	-4.3485	-4.290
0.5	0.95682369	-0.06008	0.059477	0	-0.0006	-2.500	-2.4674
0.5	0.95682369	-0.0592	0.058623	0	-0.00058	-2.4053	-2.3731

ตารางที่ 29 เปรียบเทียบผลลัพธ์ โดยใช้ค่า Excess Pore Water Pressure ที่ได้จากโปรแกรม (Case III)

X	Y	P_excess	Different From Stress	Different From Strain
[m]	[m]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]
0.5	1	-9.76756	-0.085512575	-9.16667E-08
0.5	0.974293	-4.29147	1.981860423	-1.96667E-06
0.5	0.974293	-4.29034	2.009063127	-2.9E-06
0.5	0.956824	-2.46741	2.44572177	7.77778E-07
0.5	0.956824	-2.37318	2.414019579	2.63889E-07

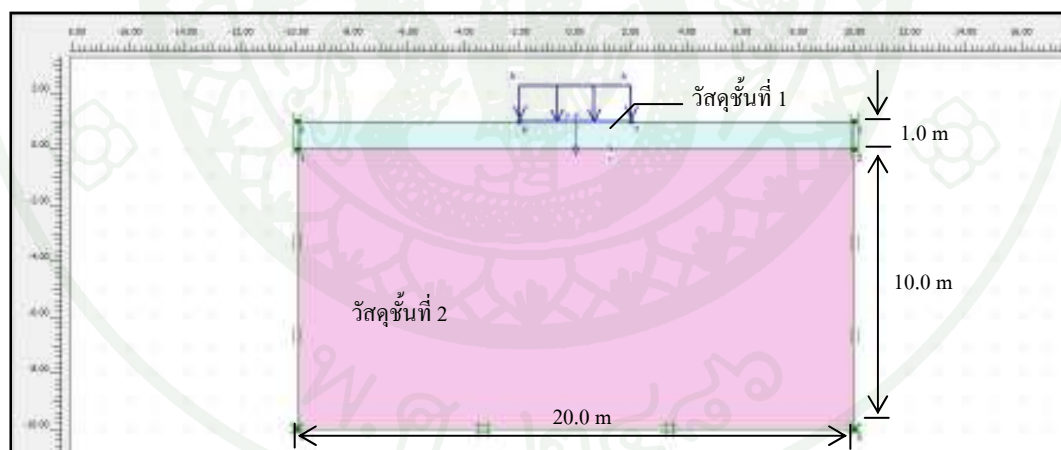
จากผลลัพธ์การคำนวณค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน พบว่าค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่คำนวณจากค่า Increment of Total Stress จะมีค่าแตกต่างจากค่าแรงดันน้ำส่วนเกินซึ่งคำนวณได้จากค่า Increment of Volumetric Strain อยู่พอสมควรแสดงว่าปัจจัยที่ทำให้เกิดความแตกต่างของการคำนวณเกิดขึ้นจากการเลือกกำหนดชนิดของแบบจำลอง (Material Type) สำหรับในกรณีศึกษาที่ใช้แบบจำลองชนิด Mohr-Coulomb ซึ่งในการคำนวณเมื่อมีค่า Stress เกิดขึ้นค่า Strain ที่โปรแกรมนำมาใช้ในการคำนวณอาจจะไม่ใช่ Strain ของวัสดุซึ่งอยู่สถานะ Elastic แต่อาจจะเป็นค่า Strain ซึ่งเกิดในสถานะ Plastic เนื่องจากค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเกินกว่าความสามารถในการรับหน่วยแรงของวัสดุวัสดุจึงเปลี่ยนสถานะจาก Elastic เป็นสถานะ Plastic ทำให้การคำนวณเกิดความผิดพลาดขึ้น และอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการคำนวณก็คือ ค่าความกว้างของน้ำหนักระทำการ (Load Width) ซึ่งกรณีที่ความกว้างของน้ำหนักระทำการมีค่าเป็นอนันต์ค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในวัสดุในแต่ละพื้นที่ในระดับความลึกเท่ากันจะมีขนาดเท่าๆกัน แต่เมื่อความกว้างของน้ำหนักระทำการมีความกว้างน้อยจะทำให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละพื้นที่มีขนาดไม่เท่ากันการเคลื่อนที่จึงมีค่าไม่เท่ากันด้วยทำให้มีความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณเกิดขึ้น

2.5.3 การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง Finite Element

เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ จะทำการพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลอง Finite Element กับแบบจำลอง Elastic Two-Layer Systems (Fox, 1948a)

โดยรูปร่างของแบบจำลองที่จะทำการเปรียบเทียบมีขนาดความยาว 20.00 เมตร วัสดุชั้นที่ 1 มีความหนา 1.00 เมตร ($h = 1.00$) และวัสดุชั้นที่ 2 มีความหนา 10.00 เมตร โดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองเป็นชนิด Standard Fixities ค่าความกว้างของน้ำหนักรถที่มีค่าเท่ากับ 4.00 เมตร ($a = 2.00$) มีขนาดเท่ากับ 100 kPa

ซึ่งรูปร่างของแบบจำลองและความละเอียดของแบบจำลอง รวมถึงเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังแสดงในภาพที่ 28 และการสรุป Geometry ของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 30



ภาพที่ 28 แสดงรูปร่าง และการแบ่ง Element ของแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบ

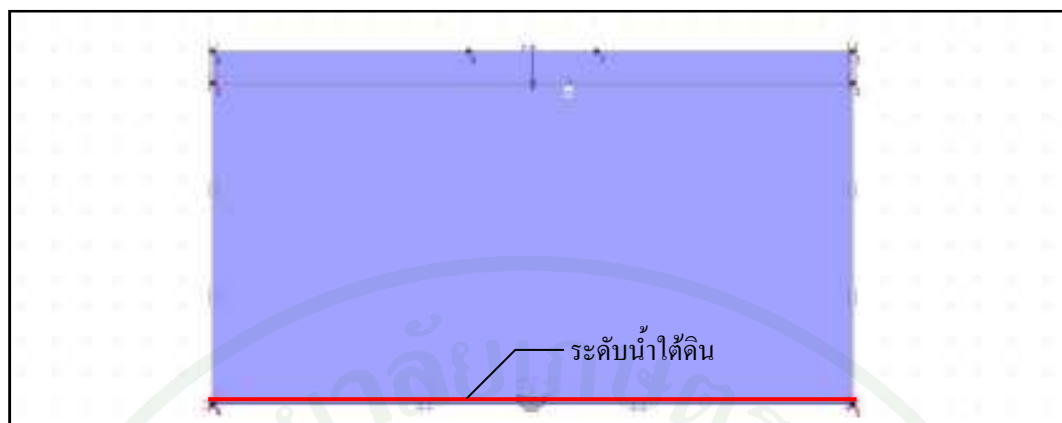
ตารางที่ 30 สรุป Geometry แบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุ	กว้าง (m)	หนา (m)	ขนาดของ Mesh	Boundary Conditions
ชั้นที่ 1	20.00	1.00	Medium	Standard Fixities
ชั้นที่ 2	20.00	10.00	Medium	

ในการวิเคราะห์จะกำหนดคุณสมบัติของวัสดุชั้นที่ 1 และวัสดุชั้นที่ 2 ไว้ดังแสดงในตารางที่ 31 โดยในการทดสอบครั้งนี้กำหนดให้แบบจำลองเป็นวัสดุชนิดระบายน้ำ (Drained Material) เพื่อป้องกันการเกิดขึ้นของค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore Water Pressure) ที่ไม่ต้องการพิจารณา และกำหนดระดับของน้ำใต้ดินไว้ที่ด้านล่างของแบบจำลองเพื่อป้องกันการเกิดค่าแรงดันน้ำสถิตย (Hydrostatic Pressure) โดยการกำหนดระดับน้ำใต้ดินดังแสดงในภาพที่ 29

ตารางที่ 31 สรุปคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุ	คุณสมบัติทางอีลาสติก		คุณสมบัติการรับแรงเฉือน		Unit Weight
	E_{ref} (kPa)	V_d	c' (kPa)	ϕ' (Degree)	γ (kN/m ³)
1) วัสดุชั้นที่ 1	5,000.00	0.49	50	38.5	14
2) วัสดุชั้นที่ 2	500	0.49	50	38.5	14



ภาพที่ 29 แสดงการกำหนดระดับน้ำใต้ดินในแบบจำลองทดสอบ

โดยเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ออกมาของค่า Total Vertical Stress ของวัสดุชั้นที่ 2 ระหว่างแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบ และแบบจำลอง Two-Layer Systems ชนิด Perfectly Smooth Interface ดังแสดงในตารางที่ 32

ตารางที่ 32 แสดงผลการเปรียบเทียบค่า Total Vertical Stress (σ_{yy}) ในวัสดุชั้นที่ 2 ระหว่างแบบจำลอง Finite Element และแบบจำลอง Two-Layer Systems (Fox, 1948a) กรณี E_1/E_2 เท่ากับ 10 เท่า และ $a/h = 2$

Depth Below Interface	Finte Element (kPa)	Two-Layer Systems (kPa)
0.00 m	65.27	67.70
1.00 m. (h)	54.33	57.60
2.00 m. (2h)	46.40	42.10

ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ออกมาจะพบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลอง Finite Element ที่คำนวณโดยโปรแกรม PLAXIS มีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลอง Two-Layer Systems แสดงว่าการคำนวณโดยโปรแกรม PLAXIS ให้คำตอบจากการคำนวณที่น่าเชื่อถือ และสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อไปได้

2.6 การกำหนดกรณีศึกษาและดำเนินการคำนวณโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

สำหรับในการวิเคราะห์นั้นจะเริ่มจากสร้างแบบจำลองที่จะใช้ในการวิเคราะห์ โดยมีค่าคงที่คือชนิดของวัสดุชั้นฐานราก และมีตัวแปรที่ทำการเปลี่ยนแปลงค่า ได้แก่ (1) ชนิดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง, (2) ค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง และ (3) ความกว้างของน้ำหนักรั้วที่มากกระทำ

การวิเคราะห์จะเพิ่มน้ำหนักรั้วแบบจำลองพิบัติ เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของโครงสร้างชั้นทาง แล้วจึงเปลี่ยนแปลงชนิดของชั้นดินฐานราก จากนั้นจึงเปลี่ยนแปลงความกว้างของน้ำหนักรั้วที่มากกระทำ แล้วจึงเปลี่ยนแปลงความหนาของโครงสร้างชั้นทาง โดยผลที่ต้องการศึกษาจากการวิเคราะห์ ได้แก่ รูปแบบของการพิบัติ, ค่ากำลังรับแรงสูงสุด, ปริมาณการทรุดตัวสูงสุด, ขนาดของแอ่งการทรุดตัว กระจายของค่าหน่วยแรงในแนวราบและค่าหน่วยแรงในแนวดิ่งภายในโครงสร้างชั้นทาง และเส้นทางเดินหน่วยแรงของโครงสร้างชั้นทาง

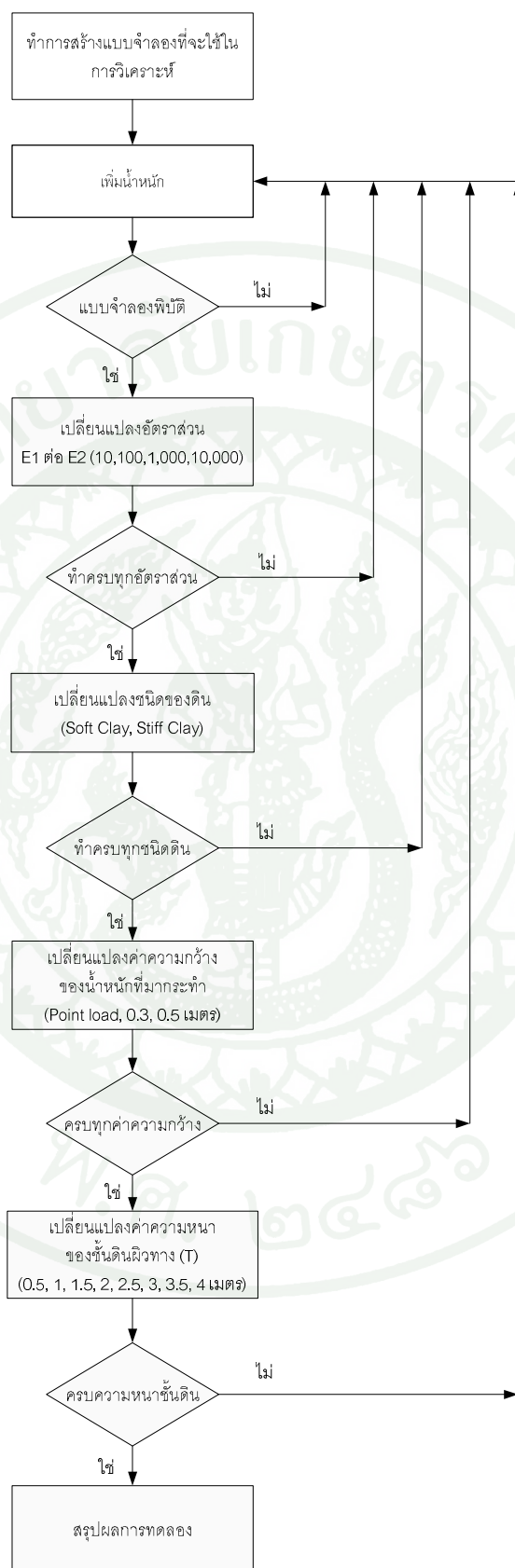
การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 33 และแผนภูมิสำหรับการวิจัยดังแสดงในภาพที่ 30 จำนวนการวิเคราะห์รวมทั้งสิ้น 768 กรณี

ตารางที่ 33 การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

เงื่อนไข	กรณี	หน่วย
อัตราส่วน E_1/E_2 (ดินเหนียวอ่อน)	10, 100, 1,000, 10,000	เท่า
อัตราส่วน E_1/E_2 (ดินเหนียวแข็ง)	0.2, 2, 20, 200	เท่า
ชนิดของดินฐานราก	ดินเหนียวอ่อน, ดินเหนียวแข็ง	-
ความกว้างของ นน. ที่มากกระทำ	0.3, 0.4, 0.5	เมตร
ความหนาของโครงสร้างชั้นทาง	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0	เมตร

หมายเหตุ E_1 คือ ค่า Drained Modulus ของโครงสร้างชั้นทาง

E_2 คือ ค่า Drained Modulus ของชั้นดินฐานราก



ภาพที่ 30 แสดงแผนภูมิการวิเคราะห์และประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์

2.7 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการประมวลผลโดยโปรแกรมทาง Finite Element และศึกษาพฤติกรรมกลของวัสดุโครงสร้างชั้นทางและดินฐานราก

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม Finite Element จะนำมาจัดกลุ่มของรูปแบบการบีบอัดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทาง โดยการพิจารณารูปร่างของ Plastic Point และค่า Relative Shear Stresses ที่เกิดขึ้นภายในแบบจำลอง เมื่อสามารถจัดกลุ่มของการบีบอัดที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างชั้นทางเสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงเลือกตัวแทนของรูปแบบการบีบอัดที่เกิดขึ้นมาเปรียบเทียบกับระหว่างวัสดุชั้นฐานรากดินอ่อน และดินแข็ง โดยสิ่งที่ต้องการพิจารณาเปรียบเทียบได้แก่ ค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่ง, ค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบ และเส้นทางเดินของหน่วยแรงภายในโครงสร้างชั้นทาง เพื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของชั้นดินฐานราก, ชนิดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง และค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทางที่มีต่อรูปแบบของการบีบอัดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทาง

จากนั้นจึงพิจารณาถึงอิทธิพลของค่าความกว้างของน้ำหนักรถที่มากกระทำ, ชนิดของโครงสร้างชั้นทาง และค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทางที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงสูงสุด โดยจะพิจารณาค่าการทรุดตัวซึ่งเกิดจากน้ำหนักรถสูงสุดที่มากกระทำ รวมถึงขนาดของแอ่งการทรุดตัวที่เกิดขึ้นด้วย

2.8 สรุปผลการศึกษาและวิจารณ์

สรุปอิทธิพลของค่าตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อพฤติกรรมของโครงสร้างชั้นทาง อันได้แก่ ค่ากำลังรับแรงสูงสุด และรูปแบบของการบีบอัดที่เกิดขึ้น เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปพัฒนาสร้างเป็นแผนภูมิเพื่อให้ออกแบบและป้องกันการบีบอัดของวัสดุผิวทางต่อไปในอนาคต

ผลและวิจารณ์

การวิจัยครั้งนี้ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมการบีบอัดของโครงสร้างชั้นทางภายหลังจากมีน้ำหนักมากระทำ ซึ่งการบีบอัดที่เกิดขึ้นมีอิทธิพลมาจากชั้นดินฐานราก ในการศึกษาได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่างๆเพื่อศึกษาถึงผลลัพธ์ที่ออกมา สำหรับผลลัพธ์ที่สนใจสำหรับการศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ Plastic Point ที่เกิดขึ้น, ค่าหน่วยแรงรวมในแนวตั้ง (Total Vertical Stress, σ_{yy}), ค่าหน่วยแรงรวมในแนวนอน (Total Horizontal Stress, σ_{xx}), ค่ากำลังรับสูงสุด (Ultimate Pressure), ปริมาณการทรุดตัว (Magnitude of Settlement) และขนาดของแอ่งการทรุดตัว (Bowl of Settlement)

จากผลลัพธ์ที่ออกมาได้นำมาสรุปพฤติกรรมการบีบอัดของโครงสร้างชั้นทาง โดยจากผลลัพธ์ของค่า Plastic Point ทำให้เราทราบถึงตำแหน่งที่พฤติกรรมพลาสติกเริ่มเกิดขึ้น และการพัฒนาตัวของ พื้นที่การบีบอัด ซึ่งจากลักษณะการพัฒนาตัวของพื้นที่การบีบอัดที่แสดงออกมาทำให้เราสามารถ จำแนกรูปแบบของการบีบอัดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทางได้ และทำการศึกษาความแตกต่างกันของการบีบอัดที่เกิดขึ้น โดยทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมของโครงสร้างชั้นทางบนชั้นฐานรากดินอ่อนและชั้นฐานรากดินแข็งเมื่อค่าตัวแปรต่างๆเปลี่ยนแปลงไป สิ่งที่น่าสนใจศึกษา ได้แก่ ค่าหน่วยแรงรวมในแนวตั้ง, ค่าหน่วยแรงรวมในแนวนอน, ค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน และเส้นทางเดินหน่วยแรง

และเมื่อสามารถสรุปชนิดและความแตกต่างของโครงสร้างชั้นทางได้ จึงทำการศึกษาถึงพฤติกรรมด้านอื่นๆของแบบจำลองได้แก่ ค่ากำลังรับแรงสูงสุด, ปริมาณการทรุดตัวสูงสุด และขนาดของแอ่งการทรุดตัว เป็นต้น

1. รูปแบบของการพิบัติ

1.1 ตำแหน่งเริ่มต้นของพื้นที่พลาสติกในโครงสร้างชั้นทาง (First Plastic Point)

Plastic Point เป็นจุดซึ่งแสดงถึงตำแหน่งของ Element ที่เปลี่ยนพฤติกรรมจากสภาวะอีลาสติก (Elastic) เป็นสภาวะพลาสติก (Plastic) โดยโปรแกรม PLAXIS ได้แบ่ง Plastic Point ออกเป็น 2 ชนิดซึ่งแสดงถึงสภาพพฤติกรรมความเป็นพลาสติกที่แตกต่างกันได้แก่ (1) จุดสีแดง และ (2) จุดสีขาว โดยจุดทั้ง 2 ชนิดมีความแตกต่างกันดังนี้

(1) จุดสีแดง เมื่อมีจุดสีแดงเกิดขึ้นในแบบจำลองแสดงว่า ณ ตำแหน่งนั้นมีค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นไปและอยู่ที่บริเวณผิวของเส้น Coulomb Failure Envelop ซึ่งแสดงว่าตำแหน่งนั้นมีการพิบัติเกิดขึ้น

(2) จุดสีขาว แสดงถึงการเกิดขึ้นของ Tension Cut-Off ซึ่งจะปรากฏขึ้นเมื่อ ณ ตำแหน่งนั้นมีค่าหน่วยแรงดึงเกิดขึ้นเกินกว่าที่วัสดุจะรับได้ (การเกิด Tension Cut-Off จะเกิดขึ้นเฉพาะกรณีที่ขนาดของ Shear Stress ที่เกิดขึ้นในวัสดุมีขนาดน้อยมาก) ซึ่งปกติแล้วค่า Tension Cut-Off สำหรับแบบจำลอง Mohr-Coulomb ถูกตั้งไว้ให้มีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นเมื่อมีค่าหน่วยแรงดึงเกิดขึ้นจะทำให้มีจุดสีขาวเกิดขึ้นในตำแหน่งนั้น

การวิจัยในครั้งนี้สนใจพฤติกรรมการพิบัติของวัสดุ ที่เกิดเนื่องจากน้ำหนักที่มากกระทำกับโครงสร้างชั้นทาง ทำให้ค่าหน่วยแรงบริเวณนั้นมีค่ามากกว่าความสามารถในการรับหน่วยแรงของวัสดุ ซึ่งกำหนดโดยพารามิเตอร์ต่างๆของแบบจำลอง Mohr-Coulomb ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จึงจะพิจารณาเฉพาะ Plastic Point ซึ่งเป็นจุดสีแดงหรือพิจารณาเฉพาะการพิบัติซึ่งเกิดจากหน่วยแรงกดเท่านั้นเพื่อนำไปพิจารณาสรุปชนิดของรูปแบบการพิบัติต่อไป

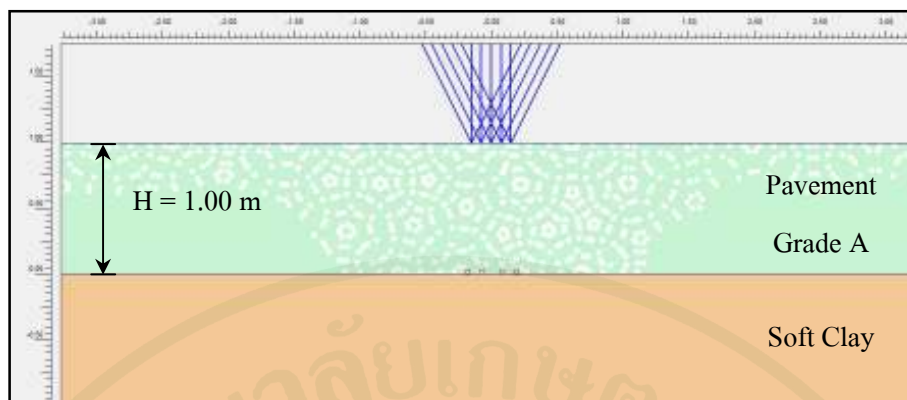
การศึกษาการเกิดขึ้นของ First Plastic Point ทำให้เราทราบว่า การพิบัติเริ่มต้นที่บริเวณใดระหว่างโครงสร้างชั้นทาง หรือชั้นดินฐานราก โดยตำแหน่งเริ่มต้นของพื้นที่พลาสติกดังแสดงไว้ในภาคผนวก ค และจากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

กรณีของชั้นฐานรากดินอ่อน เมื่อน้ำหนักที่มากระทำกับโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทางที่มีความแข็งแรงต่ำ (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A) ในทุกค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง (0.50 - 4.00 เมตร) ตำแหน่งเริ่มต้นของพื้นที่พลาสติกจะเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานราก เนื่องจากชั้นดินฐานรากมีค่าความแข็งแรงต่ำทำให้การบีบอัดเริ่มพัฒนาตัวขึ้นมาจากบริเวณด้านบนของชั้นฐานราก

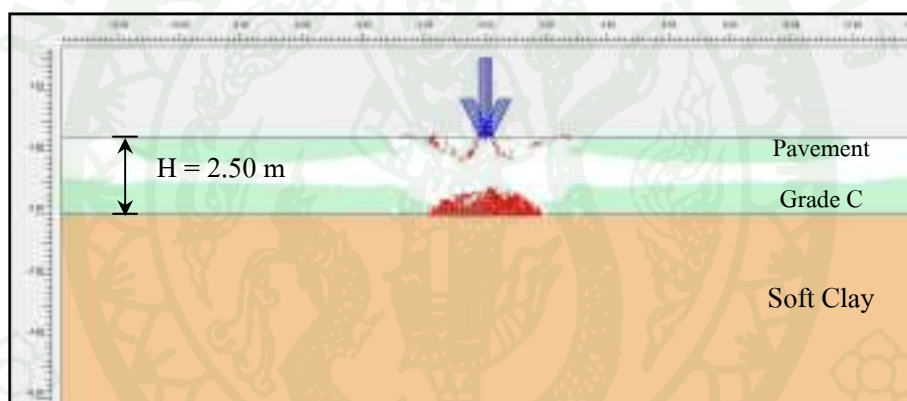
สำหรับกรณีที่วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงปานกลาง (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade B และ Grade C) และค่าความหนาของวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีค่าน้อย (0.50 - 1.00 เมตร) พื้นที่พลาสติกจะเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อระหว่างผิวทางและชั้นฐานราก ต่อมาเมื่อวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความหนาเพิ่มขึ้น (1.50 - 4.00 เมตร) การเกิดขึ้นของพื้นที่พลาสติกจะเกิดขึ้นพร้อมกันทั้งที่ตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง เพราะการที่วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรับหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากค่าน้ำหนักกระทำที่เพิ่มขึ้นได้นั้น จะทำให้วัสดุเกิดเป็นสถานะเสมือนกันจึงทำให้การบีบอัดเกิดขึ้นพร้อมๆกันทั้งบริเวณด้านบนและด้านล่างของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง และทำให้เกิดการบีบอัดในวงดินในเวลาต่อมา

กรณีที่วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีค่าความแข็งแรงสูง (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D) พบว่าตำแหน่งเริ่มต้นการบีบอัดจะเกิดขึ้นพร้อมกันทั้งที่ตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของวัสดุโครงสร้างชั้นทางในทุกค่าความหนาของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง เนื่องจากวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีค่าความแข็งแรงมากจึงมีสถานะเสมือนเป็นวัสดุแข็งเกร็งจึงทำให้การบีบอัดเกิดขึ้นทั้งด้านบนและด้านล่างของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง

โดยภาพลักษณะพื้นที่พลาสติกที่เกิดบริเวณรอยต่อระหว่างโครงสร้างชั้นทางและชั้นฐานรากดังแสดงในภาพที่ 31 ภาพลักษณะพื้นที่พลาสติกซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกันทั้งที่ตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของโครงสร้างชั้นทางดังแสดงในภาพที่ 32



ภาพที่ 31 แสดงลักษณะพื้นที่พลาสติกที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างโครงสร้างชั้นทางและชั้นฐานราก



ภาพที่ 32 แสดงลักษณะพื้นที่พลาสติกซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกันทั้งที่ตำแหน่งด้านบน และด้านล่างของโครงสร้างชั้นทาง

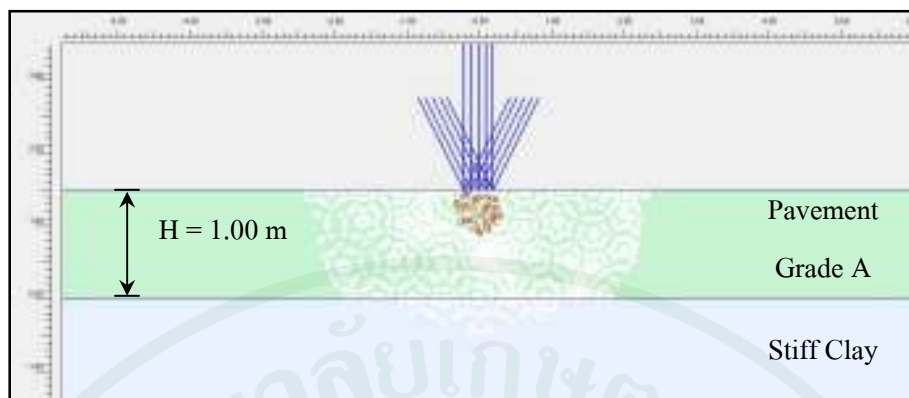
กรณีของชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อน้ำหนักที่มากกระทำกับโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทางซึ่งมีความแข็งแรงปานกลางค่อนข้างต่ำ (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A และ Grade B) พบว่าทุกค่าความหนาของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง พื้นที่พลาสติกจะเกิดขึ้นบริเวณด้านบนของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง สำหรับในกรณีแรก (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A) ค่า Elastic Modulus ของวัสดุชั้นดินฐานรากมีค่ามากกว่าวัสดุโครงสร้างชั้นทางทำให้การถ่ายเทของค่าหน่วยแรงจากโครงสร้างชั้นทางมายังชั้นดินฐานรากทำได้ไม่ดีการบีบอัดจึงเกิดขึ้นที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง ส่วนในกรณีที่สอง (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade B) ซึ่งถึงแม้ว่าค่า Elastic Modulus ของวัสดุโครงสร้างชั้นทางจะมีค่ามากกว่าชั้นดินฐานรากทำให้การถ่ายเทหน่วย

แรงระหว่างโครงสร้างชั้นทางและชั้นฐานรากทำได้ดีขึ้น แต่จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อค่าน้ำหนักที่มากกระทำมีค่าเท่ากัน จะพบว่าวัสดุโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็งจะมีหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทางมากกว่าวัสดุโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อนประกอบกับกำลังรับแรงเฉือนของชั้นฐานรากดินแข็งมีค่าสูง ทำให้การพิบัติเกิดขึ้นในวัสดุโครงสร้างชั้นทางก่อนที่จะเกิดในชั้นดินฐานราก

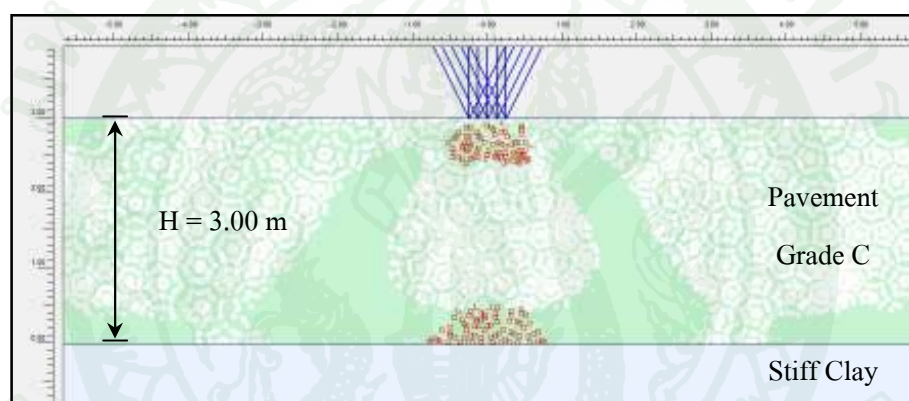
กรณีที่วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงปานกลางก่อนไปทางสูง (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C) และมีความหนาแน่น (0.50 - 1.00 เมตร) พื้นที่พลาสติกจะเกิดขึ้นบริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง เพราะค่าหน่วยแรงที่เกิดจากน้ำหนักที่มากกระทำสามารถถ่ายเทลงไปยังชั้นฐานรากได้ดี แต่ค่าหน่วยแรงส่วนมากจะเกิดขึ้นที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทางทำให้การพิบัติขึ้นเกิดที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง ซึ่งเมื่อค่าความหนาของวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้น (1.50 - 4.00 เมตร) พื้นที่พลาสติกจะเกิดขึ้นพร้อมกันทั้งที่บริเวณด้านบนและด้านล่างของโครงสร้างชั้นทาง เนื่องจากเมื่อค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทางมีค่ามากขึ้น และวัสดุมีค่า Elastic Modulus ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้วัสดุมีสถานะเสมือนเป็นคานทำให้การพิบัติเกิดขึ้นพร้อมกันทั้งด้านบนและด้านล่างของโครงสร้างชั้นทาง

และกรณีที่วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงสูง (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D) พื้นที่พลาสติกจะเกิดขึ้นทั้งในบริเวณด้านบน และด้านล่างของวัสดุชั้นดินฐานราก ในทุกค่าความหนาของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง

โดยภาพลักษณะพื้นที่พลาสติกที่เกิดบริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทางดังแสดงในภาพที่ 33 ภาพลักษณะพื้นที่พลาสติกซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกันทั้งที่ตำแหน่งด้านบน และด้านล่างของวัสดุโครงสร้างชั้นทางดังแสดงในภาพที่ 34



ภาพที่ 33 แสดงลักษณะพื้นที่พลาสติกซึ่งเกิดขึ้นที่ตำแหน่งด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง



ภาพที่ 34 แสดงลักษณะพื้นที่พลาสติกซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกันทั้งที่ตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของโครงสร้างชั้นทาง

1.2 การพัฒนาตัวของพื้นที่พลาสติก (Development of Plastic Zone)

จากหัวข้อที่ผ่านมา ทำให้เราทราบถึงตำแหน่งเริ่มต้นของการบีบอัดที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างชั้นทาง และในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาต่อเพื่อพิจารณาถึงลักษณะการพัฒนาตัวของพื้นที่พลาสติกจนกระทั่งแบบจำลองบีบอัด การศึกษาลักษณะการพัฒนาตัวของพื้นที่พลาสติกเมื่อเปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อนและชั้นฐานรากดินแข็งสามารถสรุปได้ดังนี้

1.2.1 ขั้นฐานรากดินอ่อน

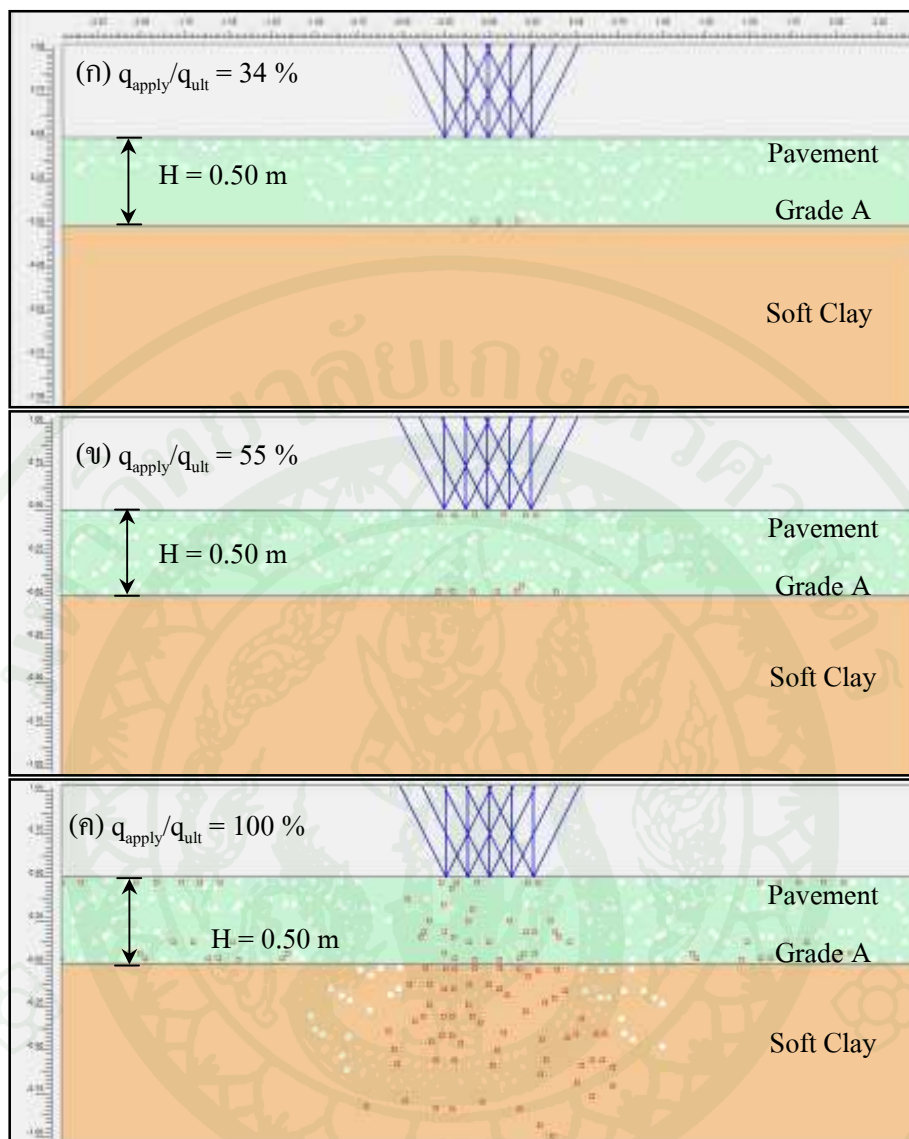
สำหรับกรณีขั้นฐานรากดินอ่อนสามารถแบ่งลักษณะการพัฒนาตัวของพื้นที่การพิบัติที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานรากได้ดังต่อไปนี้

วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงต่ำ (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A)

สำหรับวัสดุที่มีความแข็งแรงต่ำซึ่งก่อสร้างอยู่บนขั้นฐานรากดินอ่อน เมื่อความหนาของโครงสร้างชั้นทางมีค่าน้อยมาก ลักษณะการพัฒนาตัวของพื้นที่พลาสติกเริ่มขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานราก จากนั้นพื้นที่พลาสติกจะพัฒนาตัวลงมาจากบริเวณด้านล่างของน้ำหนักรถที่มากกระทำ ซึ่งเมื่อความหนาของโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้นการพัฒนาตัวของพื้นที่พลาสติกลงมายังชั้นดินฐานรากจะมีค่าน้อยลง โดยลักษณะการพัฒนาตัวของพื้นที่พลาสติกของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งก่อสร้างบนขั้นฐานรากดินอ่อนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย (0.50 เมตร)

กรณีขั้นฐานรากดินอ่อนเมื่อวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย จะพบว่า Plastic Zone จะเริ่มพัฒนาตัวขึ้นบริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทาง แล้วจึงเกิดขึ้นบริเวณใต้ น้ำหนักรถที่มากกระทำ จากนั้น Plastic Zone จึงมาเชื่อมต่อกันพอดีที่บริเวณกึ่งกลางของโครงสร้างชั้นทาง และพัฒนาตัวลงมายังชั้นดินฐานรากในเวลาต่อมา การพัฒนาตัวของ Plastic Zone ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนขั้นฐานรากดินอ่อน โดยวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนา 0.50 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 35



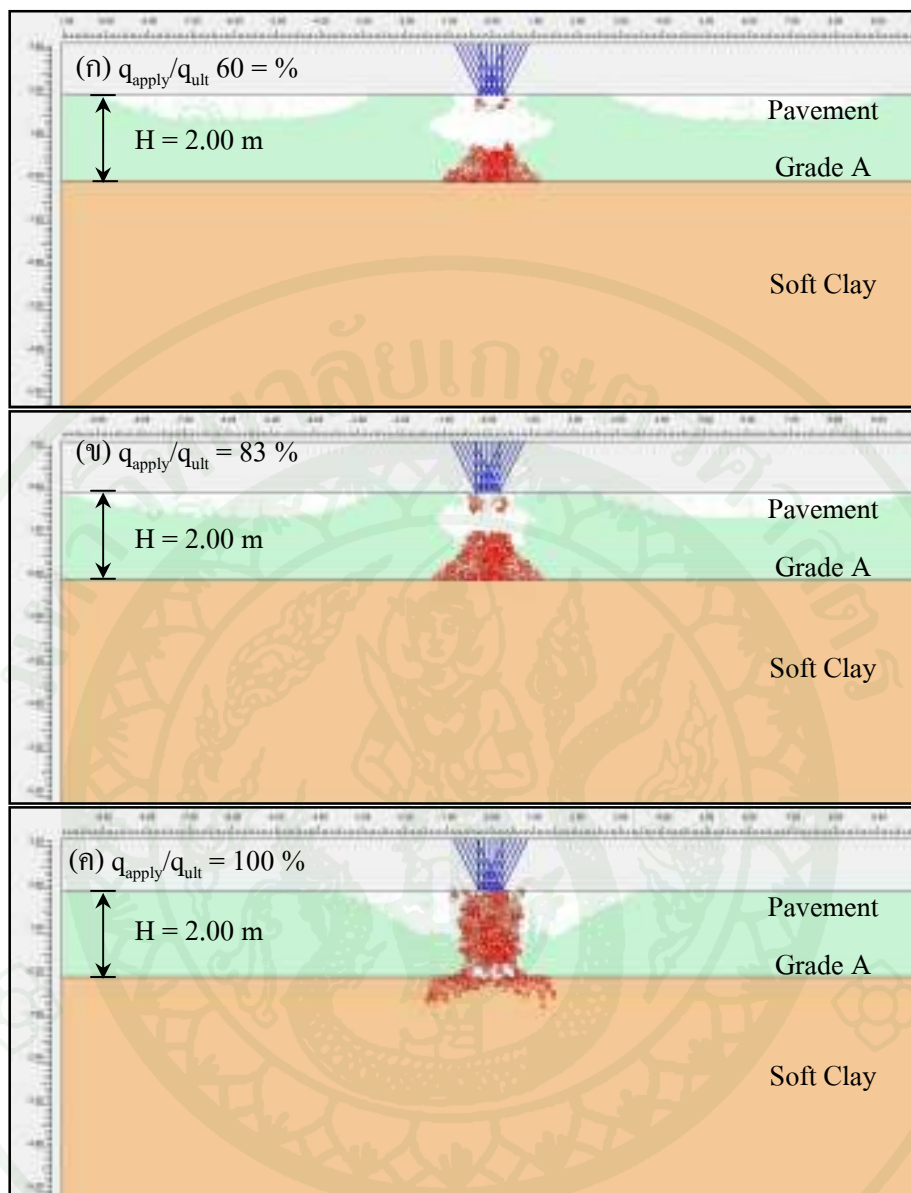
ภาพที่ 35 การพัฒนาตัวของ Plastic Zone ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10 เท่า) โดยโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนา 0.50 เมตร

วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงความหนามาก (1.00 - 4.00 เมตร)

เมื่อวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงต่ำ (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10 เท่า) และมีความหนาปานกลาง พบว่า Plastic Zone จะเริ่มพัฒนาตัวจากบริเวณด้านล่างของโครงสร้าง

ชั้นทาง แล้วจึงเกิดขึ้นที่ด้านบนของโครงสร้างชั้นทางบริเวณได้น้ำหนักที่มากกระทำ จากนั้น Plastic Zone ที่ด้านบนและด้านล่างจะมาบรรจบกันที่บริเวณกึ่งกลางของโครงสร้างชั้นทาง และพัฒนาตัวต่อไปยังบริเวณชั้นดินฐานรากก่อนที่จะเกิดการพิบัติ โดยการพัฒนาตัวของ Plastic Zone ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน โดยวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนา 2.00 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 36





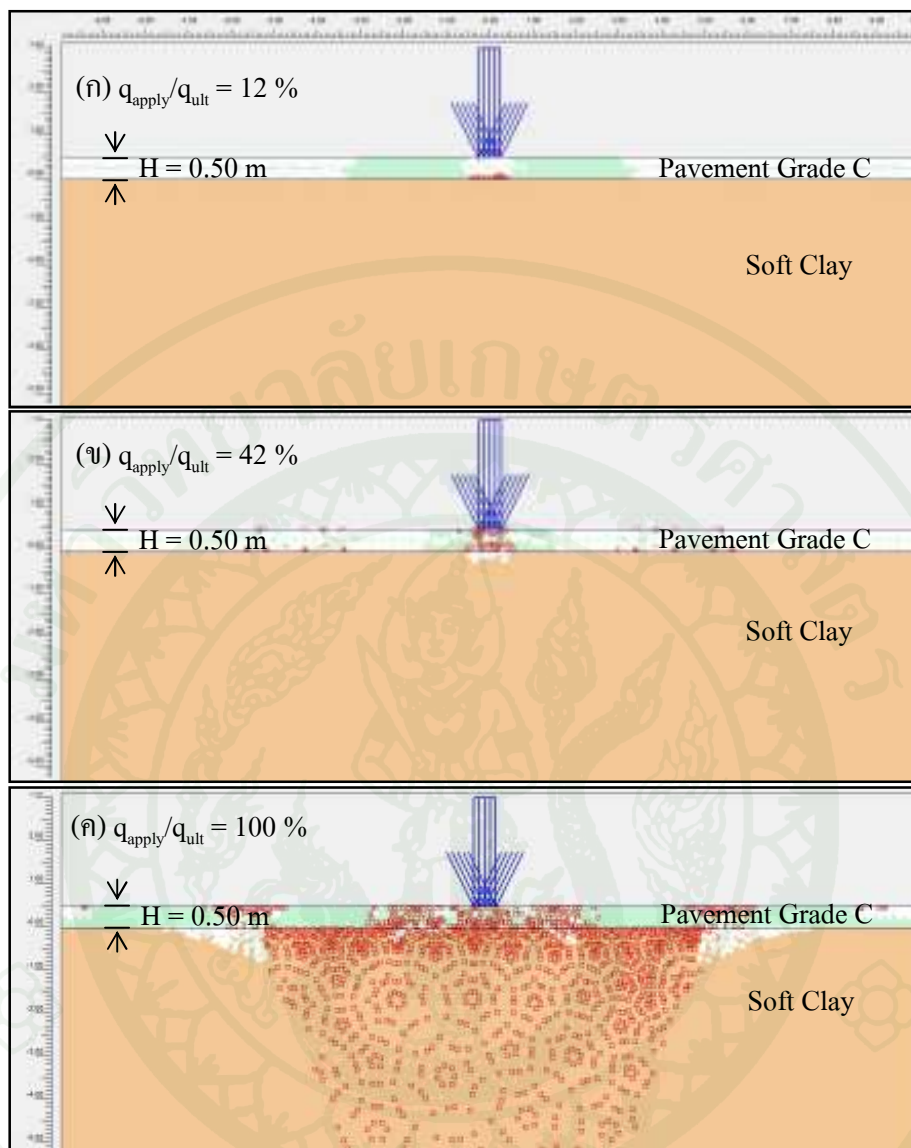
ภาพที่ 36 การพัฒนาตัวของ Plastic Zone ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10 เท่า) โดยวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนา 2.00 เมตร

วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงปานกลางถึงความแข็งแรงสูง (วัสดุ
โครงสร้างชั้นทาง Grade B, Grade C และ Grade D)

ลักษณะการพัฒนาคือของพื้นที่การบีบอัด สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทางซึ่งมีความแข็งแรงปานกลางถึงความแข็งแรงสูง พบว่าเมื่อค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทางมีค่าน้อย การพัฒนาคือของพื้นที่พลาสติกจะเริ่มที่บริเวณรอยต่อระหว่างโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานราก และพัฒนาตัวจากด้านล่างของน้ำหนักรถที่มากกระทำลงมายังชั้นดินฐานราก แต่เมื่อความหนาของโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้นพบว่าการพัฒนาตัวของพื้นที่พลาสติกจะไม่พัฒนาตัวลงไปยังชั้นดินฐานรากทันที แต่จะพัฒนาตัวเป็นแนวการบีบอัดในระดับตื้นและเมื่อขนาดของน้ำหนักรถที่มากกระทำเพิ่มขึ้นจึงจะพัฒนาตัวต่อไปยังชั้นดินฐานราก โดยลักษณะการพัฒนาคือของพื้นที่พลาสติกของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade B, Grade C และ Grade D ซึ่งก่อสร้างบนชั้นดินฐานรากดินอ่อนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย (0.50 เมตร)

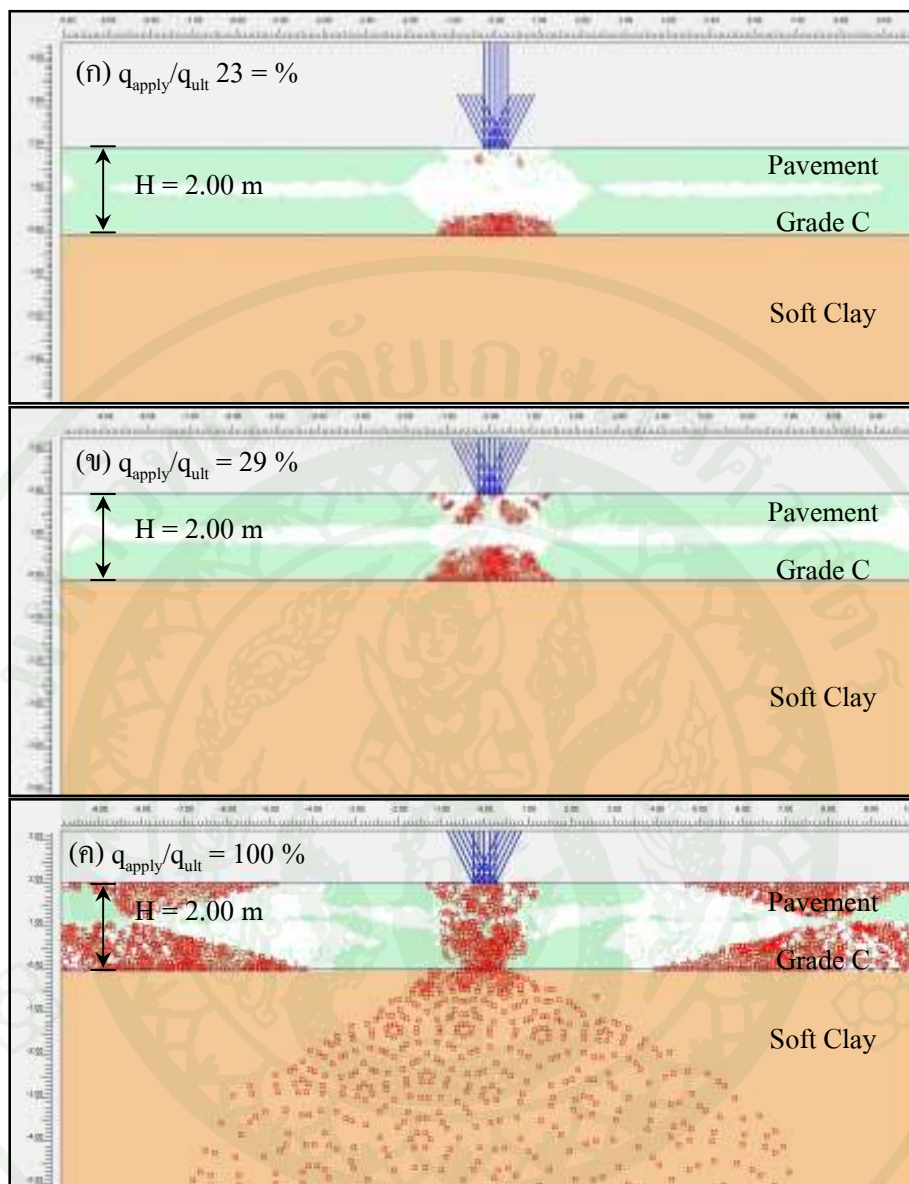
กรณีชั้นดินฐานรากดินอ่อน เมื่อวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงปานกลางและความแข็งแรงสูง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 มีค่าระหว่าง 100 ถึง 10,000 เท่า) ขณะที่วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาน้อย จะพบว่า Plastic Zone เกิดขึ้นที่บริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทาง จากนั้นจึงพัฒนาตัวจนเต็มพื้นที่ของโครงสร้างชั้นทาง โดยสังเกตได้ว่าที่บริเวณด้านข้างของโครงสร้างชั้นทางมีพื้นที่พลาสติกขึ้นเช่นกัน เนื่องจากวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีค่า Elastic Modulus สูงทำให้โครงสร้างชั้นทางมีสภาพเสมือนคาน ซึ่งต่อมา Plastic Zone จะพัฒนาตัวจากบริเวณชั้นดินฐานรากได้น้ำหนักรถที่มากกระทำไปและ Plastic Zone ที่อยู่ด้านข้างของโครงสร้างชั้นทางทำให้เกิดการบีบอัดลึกลงไปยังชั้นดินฐานราก การพัฒนาตัวของ Plastic Zone ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นดินฐานรากดินอ่อน โดยวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนา 0.50 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 37



ภาพที่ 37 การพัฒนาตัวของ Plastic Zone ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน $E1/E2$ เท่ากับ 1,000 เท่า) โดยวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนา 0.50 เมตร

วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงความหนามาก (1.00 - 4.00 เมตร)

สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงปานกลางถึงความแข็งแรงสูง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 อยู่ระหว่าง 100 ถึง 10,000 เท่า) และโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาปานกลางถึงมาก เมื่อพิจารณาการเกิดของ Plastic Zone จะพบวงการบีบอัดแบบตันเกิดขึ้นที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง พร้อมกับมี Plastic Zone เกิดขึ้นที่บริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทาง จากนั้น Plastic Zone บริเวณด้านบนและด้านล่างของโครงสร้างชั้นทางจะพัฒนาตัวจนมาพบกันบริเวณกึ่งกลางของโครงสร้างชั้นทาง แล้วจึงพัฒนาตัวต่อไปยังชั้นฐานราก การพัฒนาตัวของ Plastic Zone ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน โดยวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนา 2.00 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 38



ภาพที่ 38 การพัฒนาตัวของ Plastic Zone ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 1,000 เท่า) โดยวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนา 2.00 เมตร

1.2.2 ขั้นฐานรากดินแข็ง

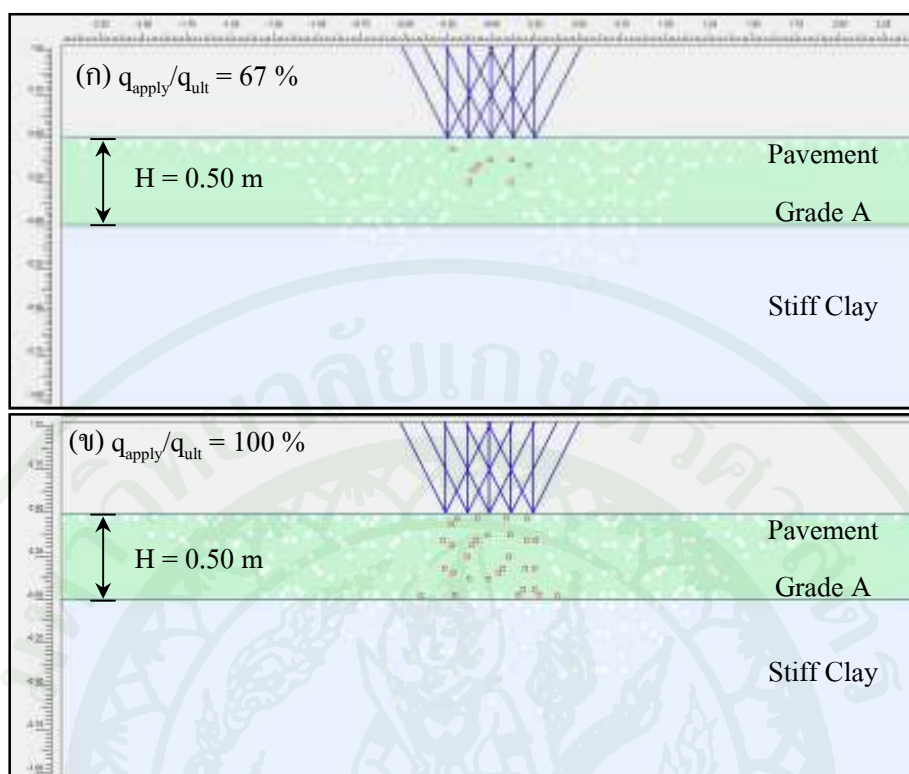
สำหรับขั้นฐานรากดินแข็งสามารถแบ่งลักษณะการพัฒนาตัวของพื้นที่การบีบอัดที่เกิดขึ้นได้ดังต่อไปนี้

วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงต่ำถึงปานกลาง (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A, Grade B และ Grade C)

ในขั้นฐานรากดินแข็ง กรณีที่วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงต่ำถึงปานกลาง การพัฒนาตัวของพื้นที่พลาสติกในทุกค่าความหนา เริ่มขึ้นจากด้านบนของโครงสร้างชั้นทางบริเวณด้านล่างของน้ำหนักรวมกระทำ จากนั้นจะพัฒนาตัวลงมายังชั้นดินฐานรากโดยที่เมื่อความหนาของโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้นการพัฒนาตัวของพื้นที่พลาสติกลงมายังชั้นดินฐานรากจะมีค่าน้อยลง โดยลักษณะการพัฒนาตัวของพื้นที่พลาสติกของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A, Grade B และ Grade C ซึ่งก่อสร้างบนขั้นฐานรากดินแข็งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย (0.50 เมตร)

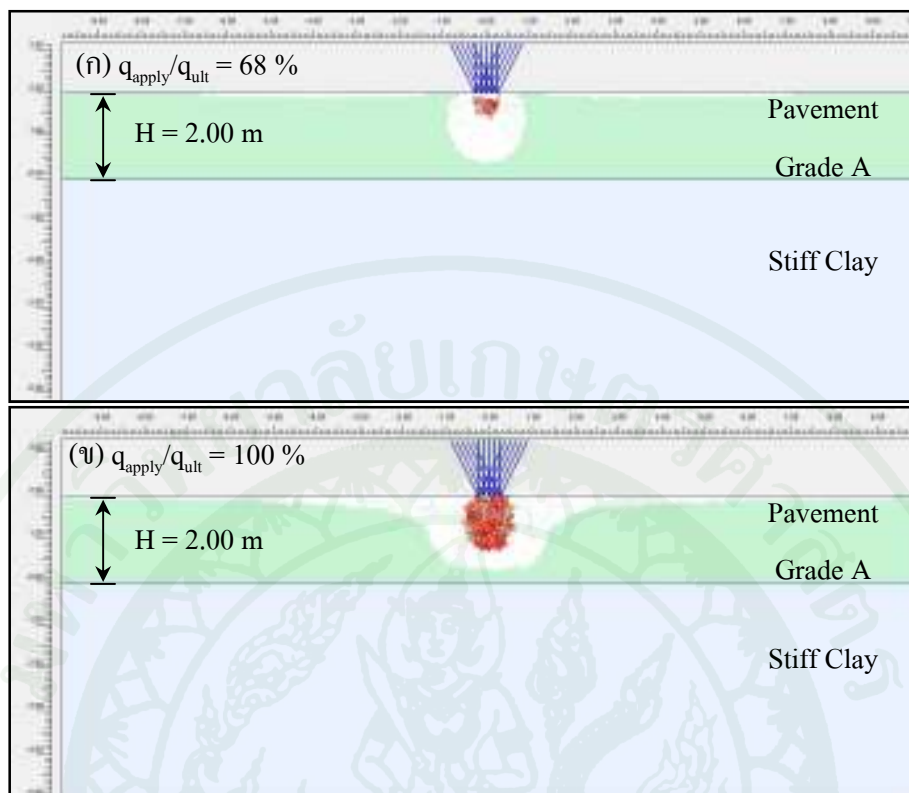
สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทางซึ่งมีความแข็งแรงต่ำถึงปานกลาง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 อยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 20 เท่า) กรณีของขั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อความหนาของโครงสร้างชั้นทางมีค่าน้อย พบว่า Plastic Zone จะเกิดขึ้นเป็นครั้งแรกที่บริเวณตำแหน่งกึ่งกลางก่อนไปทางด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง และพัฒนาตัวต่อจนเต็มพื้นที่โครงสร้างชั้นทางบริเวณใต้น้ำหนักรวมกระทำ การพัฒนาตัวของ Plastic Zone ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนขั้นฐานรากดินแข็ง โดยวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนา 0.50 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 39



ภาพที่ 39 การพัฒนาตัวของ Plastic Zone ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 0.2 เท่า) โดยวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.50 เมตร

วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงความหนา (1.00 - 4.00 เมตร)

สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทางซึ่งมีความแข็งแรงต่ำถึงปานกลาง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 อยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 20 เท่า) กรณีของชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงหนา พบว่าการพัฒนาตัวของ Plastic Zone เกิดขึ้นที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง จากนั้นจึงพัฒนาตัวลงมายังบริเวณกึ่งกลางของโครงสร้างชั้นทางก่อนที่จะเกิดการพิบัติ ซึ่งจากลักษณะของการพิบัติที่ปรากฏออกมาแสดงให้เห็นว่าการพิบัติของวัสดุโครงสร้างชั้นทางที่มีความหนาปานกลางถึงหนานั้นการพิบัติจะเกิดขึ้นเฉพาะในวัสดุโครงสร้างชั้นทางเท่านั้น การพัฒนาตัวของ Plastic Zone ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง โดยวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.00 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 40



ภาพที่ 40 การพัฒนาตัวของ Plastic Zone ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 0.2 เท่า) โดยวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.00 เมตร

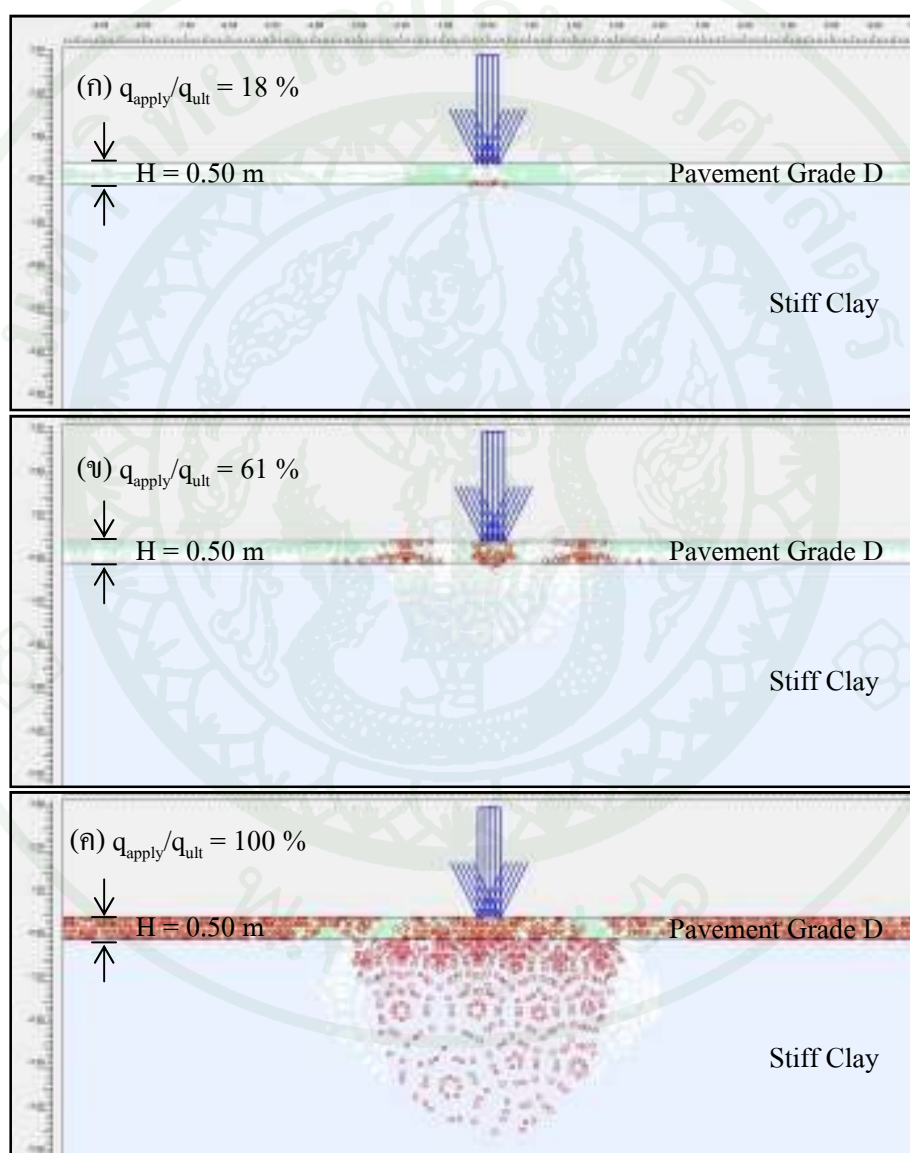
วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงสูง (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D)

สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทางซึ่งมีความแข็งแรงสูง เมื่อมีน้ำหนักมากระทำกับโครงสร้างชั้นทางจะทำให้พื้นที่พลาสติกเกิดขึ้นทั้งบริเวณด้านบนและด้านล่างของโครงสร้างชั้นทาง โดยเมื่อค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทางมีค่ามากขึ้นการพัฒนาตัวของพื้นที่พลาสติกจะเปลี่ยนแปลงไป โดยมีรายละเอียดดังนี้

วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย (0.50 เมตร)

กรณีชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงสูง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 200 เท่า) เมื่อวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย พบว่าพื้นที่พลาสติก

จะเกิดขึ้นที่บริเวณด้านบนและด้านล่างของชั้นดินฐานรากพร้อมๆกัน ต่อมาจึงเกิดขึ้นที่บริเวณด้านข้างของโครงสร้างชั้นทาง และเมื่อขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำมีค่าเพิ่มขึ้น พื้นที่พลาสติกบริเวณด้านข้างของโครงสร้างชั้นทาง และที่บริเวณชั้นดินฐานรากก็จะมาบรรจบกันพอดี การพัฒนาตัวของ Plastic Zone ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง โดยวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนา 0.50 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 41



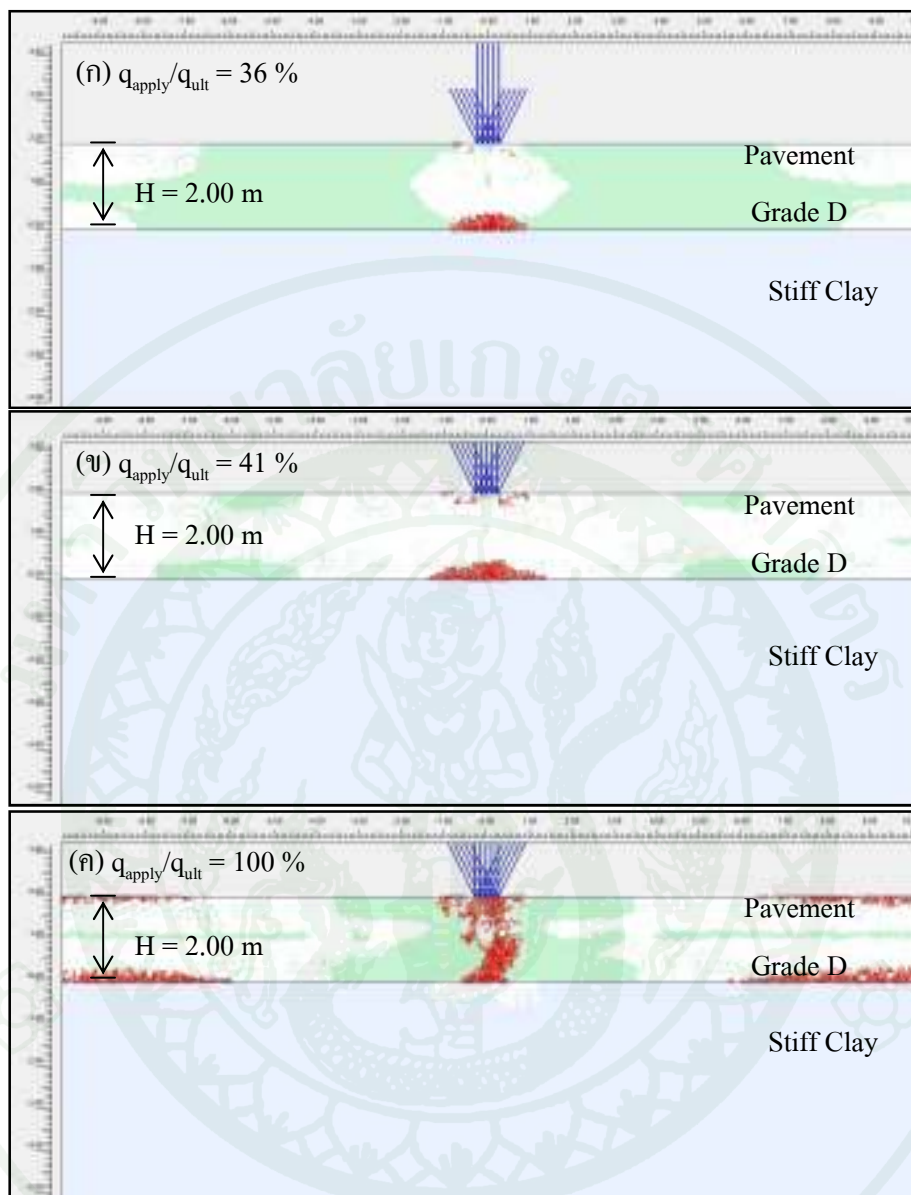
ภาพที่ 41 การพัฒนาตัวของ Plastic Zone ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 200 เท่า) โดยวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนา 0.50 เมตร

วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงความหนามาก (1.00 - 4.00

เมตร)

สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงสูง กรณีของชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 200 เท่า) เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงความหนามาก พบว่าพื้นที่พลาสติกเกิดบริเวณด้านบนและด้านล่างของโครงสร้างชั้นทางพร้อมๆกัน โดยเมื่อน้ำหนักที่มากกระทำมีค่าเพิ่มขึ้นจะพบการวิบัติในวงดื่น เกิดขึ้นที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทางจากนั้นจึงพัฒนาตัวจนเกิดการเชื่อมต่อของจุดพลาสติก (Plastic Point) บริเวณด้านบนและด้านล่างของโครงสร้างชั้นทาง การพัฒนาตัวของ Plastic Zone ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง โดยวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนา 2.00 เมตร ดังแสดงในภาพที่

42



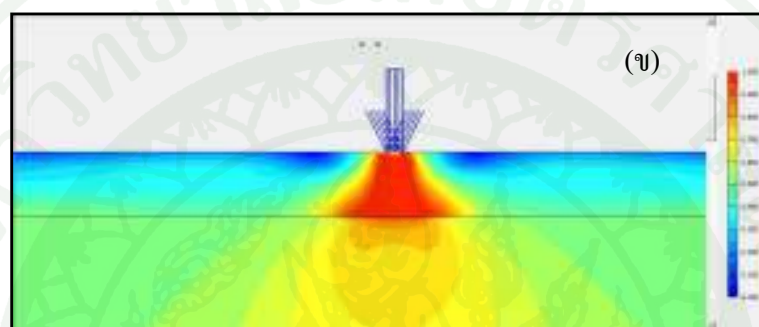
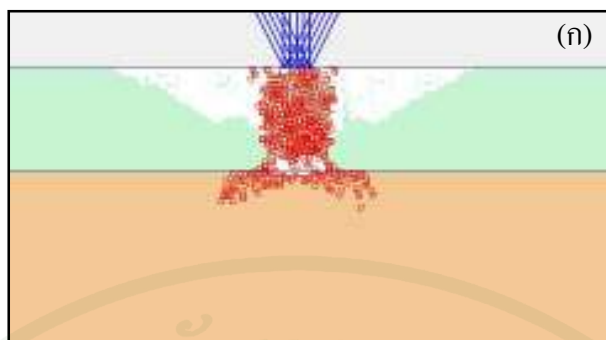
ภาพที่ 42 การพัฒนาตัวของ Plastic Zone ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 200 เท่า) โดยวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนา 2.00 เมตร

1.3 ชนิดของการพิบัติที่เกิดขึ้น

จากการศึกษาดำเนินการเริ่มต้นของการเกิดจุดพลาสติก และการพัฒนาตัวของพื้นที่พลาสติกที่ผ่านมาในข้างต้นพบว่าการพิบัติที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทางจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือกรณีที่การพัฒนาตัวของพื้นที่พลาสติกเกิดขึ้นจากบริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทางลงมายังชั้นฐานรากโดยตรง ซึ่งการพิบัติในลักษณะนี้เรียกว่าการพิบัติรูปแบบ A และกรณีที่การพัฒนาตัวของพื้นที่พลาสติกเกิดเป็นการพิบัติในวงตัวของโครงสร้างชั้นทาง ซึ่งการพิบัติในลักษณะนี้เรียกว่าการพิบัติรูปแบบ B และ โดยการพิบัติทั้ง 2 ประเภทจะมีลักษณะดังต่อไปนี้

1.3.1 การพิบัติรูปแบบ A

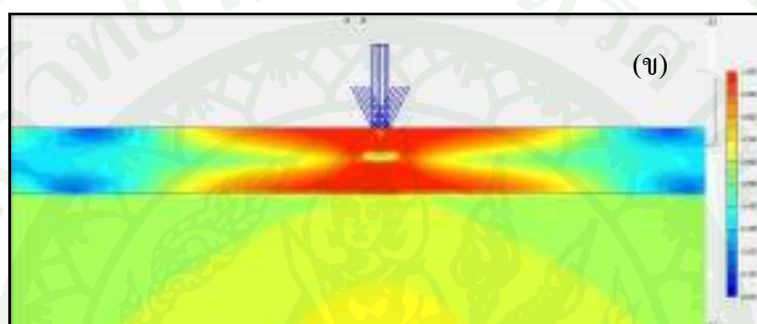
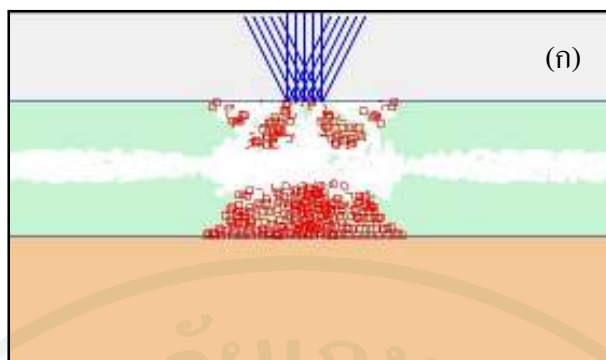
การพิบัติชนิดนี้เกิดจากวัสดุโครงสร้างชั้นทางและชั้นฐานรากมีความแข็งแรงไม่เพียงพอ เมื่อน้ำหนักมากระทำจึงเกิดการยุบตัวทะลุจากโครงสร้างชั้นทางลงไปยังชั้นดินฐานราก ซึ่งจากการศึกษาพบว่า Plastic Point ที่เกิดในการพิบัติชนิดนี้จะขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อน้ำหนักที่มากระทำมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยลักษณะการเกิดขึ้นของการพิบัติรูปแบบ A ดังแสดงในภาพที่ 43



ภาพที่ 43 ลักษณะการเกิดการบีบอัดรูปแบบ A (ก) Plastic Zone (ข) Relative Shear Stress

1.3.2 การบีบอัดรูปแบบ B

การบีบอัดชนิดนี้จะเกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทาง ซึ่งมีสาเหตุสำคัญมาจากชั้นดินฐานรากที่อ่อนแอ และโครงสร้างชั้นทางมีพฤติกรรมการรับแรงเปรียบเสมือนคาน จากการศึกษพบว่าลักษณะของ Plastic Point ที่แสดงออกมาในการบีบอัดชนิดนี้มีลักษณะเป็นวงการบีบอัดในระดับดิน โดยจะเกิดที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง และขณะเดียวกันจะพบ Plastic Point เกิดขึ้นที่บริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทางบริเวณรอยต่อกับชั้นดินฐานราก โดยลักษณะการเกิดขึ้นของการบีบอัดรูปแบบ B ดังแสดงในภาพที่ 44



ภาพที่ 44 ลักษณะการเกิดการบีบอัดรูปแบบ B (ก) Plastic Zone (ข) Relative Shear Stress

การบีบอัดรูปแบบ A จะเกิดขึ้นในกรณีที่ค่าความหนาของวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีค่าน้อยมาก (0.50 เมตร) โดยเกิดขึ้นทั้งในชั้นฐานรากดินแข็งและชั้นฐานรากดินอ่อน เนื่องจากวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาน้อยทำให้ไม่สามารถรับน้ำหนักที่มากกระทำทำให้เกิดการฉีกขาด หรือแตกหักของวัสดุ และเมื่อค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้น (1.00 - 4.00 เมตร) สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อนจะเกิดการบีบอัดรูปแบบ A รวมไปถึงในกรณีของชั้นฐานรากดินแข็งสำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A, Grade B และ Grade C จะเกิดการบีบอัดรูปแบบ A ขึ้นเช่นเดียวกัน

และการบีบอัดรูปแบบ B จะเกิดขึ้นในวัสดุโครงสร้างชั้นทางกรณีที่มีความหนาของโครงสร้างชั้นทางมีค่าเท่ากับ 1.00 - 4.00 เมตร โดยสำหรับชั้นฐานรากดินอ่อนจะเกิดในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade B, Grade C และ Grade D สำหรับชั้นฐานรากดินแข็งจะเกิดในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D เท่านั้น

จากรูปแบบของการบีบอัดที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่า วัสดุโครงสร้างชั้นทางซึ่งมีค่าความหนาของวัสดุโครงสร้างชั้นทางน้อย หรือมีความแข็งแรงของวัสดุต่ำ ทำให้ไม่สามารถรับน้ำหนักที่มากระทำได้ จึงเกิดการบีบอัดรูปแบบ A ขึ้นทันที เมื่อวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาเพิ่มขึ้น และมีความแข็งแรงของวัสดุเพียงพอที่จะรับน้ำหนักที่มากระทำได้มากขึ้น ค่าอัตราส่วน Elastic Modulus ระหว่างวัสดุโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานราก จะเป็นตัวกำหนดรูปแบบของการบีบอัดระหว่างการบีบอัดรูปแบบ A และการบีบอัดรูปแบบ B โดยรูปแบบของการบีบอัดที่เกิดขึ้นในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง เป็นไปดังในตารางที่ 34

โดยจากการศึกษาจะพบว่า สำหรับกรณีของชั้นฐานรากดินอ่อน รูปแบบของการบีบอัดจะเปลี่ยนจากรูปแบบ A เป็นรูปแบบ B เมื่อค่าความแตกต่างของค่าอัตราส่วน Elastic Modulus ระหว่างโครงสร้างชั้นทางและดินฐานรากอยู่ในช่วง 10 - 100 เท่า และสำหรับกรณีของชั้นฐานรากดินแข็งรูปแบบการบีบอัดจะเปลี่ยนแปลงเมื่อความแตกต่างของค่าอัตราส่วน Elastic Modulus อยู่ในช่วง 20 - 200 เท่า ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการบีบอัดในโครงสร้างชั้นทางจะเปลี่ยนแปลงจากรูปแบบ A ไปเป็นรูปแบบ B เมื่อความแตกต่างของค่า Elastic Modulus ระหว่างโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานรากอยู่ในช่วง 20 - 100 เท่า

และในการพิจารณาลักษณะของการบีบอัดจากลักษณะของ Plastic Point ที่เกิดขึ้นพบว่าภายหลังจากที่มีน้ำหนักมากระทำกับโครงสร้างชั้นทาง Plastic Point จะเกิดขึ้นที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง ก่อนที่จะพัฒนาตัวลงมายังชั้นฐานราก ซึ่งลักษณะการเกิดขึ้นของ Plastic Point เป็นพฤติกรรมในสภาวะการเกิดการบีบอัดชนิด Rutting หรือการเกิดร่องล้อขึ้นในโครงสร้างชั้นทาง โดยที่ในวัสดุโครงสร้างชั้นทางซึ่งมีความอ่อนแอ เมื่อขนาดของน้ำหนักที่มากระทำมีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้รอยร่องล้อมีความลึกมากขึ้นและพัฒนาต่อไปเป็นรอยแตก (Cracking) ส่วนวัสดุโครงสร้างชั้นทางซึ่งมีความแข็งแรงสูงภายหลังเกิดร่องล้อขึ้นแล้ว ยังคงเพิ่มขนาดของน้ำหนักที่มากระทำต่อไปจะทำให้เกิดพฤติกรรมการโก่งตัว (Heave) ขึ้นที่บริเวณด้านข้างของการเกิดร่องล้อ เนื่องจากเกิดการบีบอัดในระดับดินชั้นนั้นเอง

ตารางที่ 34 แสดงรูปแบบของการพังทลายที่เกิดขึ้นในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง

Pavement Failure Mode												
Pavement Type												
		Grade A			Grade B			Grade C			Grade D	
Pavement	Load Width	Load Width		Load Width		Load Width		Load Width		Load Width		
Thickness (m)	0.3	0.4	0.5	0.3	0.4	0.5	0.3	0.4	0.5	0.3	0.4	0.5
Soft Foundation	0.50	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	1.00	A	A	A	B	B	B	B	B	B	B	B
	1.50	A	A	A	B	B	B	B	B	B	B	B
	2.00	A	A	A	B	B	B	B	B	B	B	B
	2.50	A	A	A	B	B	B	B	B	B	B	B
	3.00	A	A	A	B	B	B	B	B	B	B	B
	3.50	A	A	A	B	B	B	B	B	B	B	B
	4.00	A	A	A	B	B	B	B	B	B	B	B
Stiff Foundation	0.50	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	1.00	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B	B
	1.50	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B	B
	2.00	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B	B
	2.50	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B	B
	3.00	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B	B
	3.50	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B	B
	4.00	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B	B
Remark	A = การพังทลายรูปแบบ A											
	B = การพังทลายรูปแบบ B											

2. พฤติกรรมการพิบัติของโครงสร้างชั้นทาง (Pavement Failure Behavior)

จากการศึกษาที่ผ่านมาในข้างต้นทำให้สรุปรูปแบบของการพิบัตืออกมาได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ การพิบัติรูปแบบ A และ การพิบัติรูปแบบ B ซึ่งจากการศึกษาพบว่ารูปแบบของการพิบัตืที่เกิดขึ้นในวัสดุโครงสร้างชั้นทางจะขึ้นอยู่กับชนิดของชั้นดินฐานราก, ความแข็งแรงของวัสดุโครงสร้างชั้นทางหรือค่าอัตราส่วน Elastic Modulus ระหว่างโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานราก และค่าความหนาของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง โดยที่ค่าความกว้างของน้ำหนักรถที่มากกระทำจะไม่มีผลต่อรูปแบบของการพิบัตืที่เกิดขึ้น [สำหรับอัตราส่วนค่าความกว้างของน้ำหนักรถที่มากกระทำต่อค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง (W/T) อยู่ในช่วง 0.075 ถึง 1.000]

เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของชั้นดินฐานรากที่มีผลต่อรูปแบบการพิบัตืที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทาง การวิจัยครั้งนี้จึงทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรซึ่งมีผลต่อรูปแบบของการพิบัตือันได้แก่ ค่าอัตราส่วน Elastic Modulus และค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง

สำหรับการศึกษาเพื่อให้เข้าใจถึงปัจจัยที่ทำให้เกิดความแตกต่างของรูปแบบการพิบัตืในโครงสร้างชั้นทาง การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่ง (Total Vertical Stress, σ_{yy}), ค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบ (Total Horizontal Stress, σ_{xx}), ค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore Water Pressure, Δu) และลักษณะของเส้นทางเดินหน่วยแรง (Stress Path) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทาง

ผลการวิเคราะห์รูปแบบของการพิบัตืที่ปรากฏออกมาแสดงให้เห็นว่าเมื่อวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงต่ำ (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A) ไม่ว่าโครงสร้างชั้นทางมีความหนาเท่าใดการพิบัตืจะเกิดใน รูปแบบของการพิบัตืรูปแบบ A เท่านั้น ส่วนวัสดุโครงสร้างชั้นทางที่มีความแข็งแรงปานกลาง (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade B และ Grade C) เมื่อความหนาของโครงสร้างชั้นทางมีค่าน้อยจะเกิดการพิบัตืในรูปแบบ A แต่เมื่อความหนาของโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้นวัสดุโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อนจะเกิดการพิบัตืในรูปแบบ B ส่วนวัสดุโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็งจะเกิดการพิบัตืในรูปแบบ A และเมื่อวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงสูง (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D) กรณีที่โครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อยการพิบัตืจะเกิดในรูปแบบ A และเมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนาเพิ่มขึ้นการพิบัตื

จะเกิดในรูปแบบ B ทั้งในวัสดุโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และในวัสดุโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง

ดังนั้นการแบ่งหัวข้อเพื่อทำการศึกษาก็จะสามารถแบ่งได้เป็น (1) กรณีที่วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงต่ำก่อสร้างอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อนและชั้นฐานรากดินแข็งซึ่งเกิดการพิบัติในรูปแบบ A ในทุกค่าความหนา, (2) กรณีที่วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงปานกลางซึ่งเมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อยจะเกิดการพิบัติในรูปแบบ A แต่เมื่อความหนาของโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้น กรณีของชั้นฐานรากดินอ่อนจะเกิดการพิบัติในรูปแบบ B ส่วนกรณีชั้นฐานรากดินแข็งจะเกิดการพิบัติในรูปแบบ B และ (3) กรณีที่วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงสูง เมื่อความหนาของโครงสร้างชั้นทางมีค่าน้อยจะเกิดการพิบัติในรูปแบบ A แต่เมื่อวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความหนาเพิ่มขึ้นจะเกิดการพิบัติในรูปแบบ B ทั้งในกรณีของชั้นฐานรากดินอ่อนและชั้นฐานรากดินแข็ง

โดยโปรแกรม PLAXIS ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้จะกำหนดให้เครื่องหมาย + แทนที่ค่าหน่วยแรงดึง (Tension) และเครื่องหมาย - แทนที่ค่าหน่วยแรงกด (Compression) ตามการวิเคราะห์โครงสร้างโดยทั่วไป ดังนั้นเพื่อให้การกำหนดเครื่องหมายเป็นไปตามการวิเคราะห์ในเชิงวิศวกรรม ปฐพีวิศวกรรมจึงปรับผลการวิเคราะห์โดยกำหนดให้เครื่องหมาย + แทนที่ค่าหน่วยแรงกด และเครื่องหมาย - แทนที่ค่าหน่วยแรงดึง

2.1 ค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่ง (Total Vertical Stress, σ_{yy})

2.1.1 วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงต่ำ (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A)

2.1.1.1 โครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย (0.50 เมตร)

สำหรับกรณีที่โครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย และมีความแข็งแรงต่ำ (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A) เมื่อเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้น ณ ค่าน้ำหนักที่ทำให้เกิดพฤติกรรม First Plastic Point และ Soil Failure ของโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10 เท่า) และโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 0.2 เท่า) พบว่าค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งภายในโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากทั้ง 2 ชนิดมีลักษณะการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งที่คล้ายคลึงกัน กล่าวคือ มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอเป็นระเบียบ แต่ในกรณีของชั้นฐานรากดินแข็งจะสามารถกระจายค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นลงมายังชั้นดินฐานรากได้ดีกว่า เนื่องจากกรณีของชั้นฐานรากดินอ่อน การบีบอัดจะเกิดขึ้นบริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทางก่อนซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานราก ทำให้เมื่อถึงค่าน้ำหนักหนึ่งค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทางจะมีค่าเพิ่มขึ้นได้เพียงเล็กน้อย และจะพบอิทธิพลของชั้นดินฐานรากที่ปรากฏในโครงสร้างชั้นทางอย่างชัดเจน เนื่องจากค่าน้ำหนักที่ทำให้เกิดพฤติกรรม First Plastic Point และพฤติกรรม Soil Failure ของโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนดินชั้นฐานรากทั้ง 2 ชนิดจะมีค่าแตกต่างกัน คือ ในกรณีของชั้นฐานรากดินแข็งจะต้องการค่าน้ำหนักที่มากกว่าที่ทำให้เกิดพฤติกรรมทั้ง 2 ชนิดที่มากกว่าในกรณีของชั้นฐานรากดินอ่อน เนื่องจากวัสดุชั้นฐานรากดินแข็งมีความแข็งแรงมากกว่าชั้นฐานรากดินอ่อน

โดยพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.50 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 45

2.1.1.2 วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาปานกลางถึงสูง (1.00 - 4.00

เมตร)

สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทางที่มีความหนาปานกลาง และมีความแข็งแรงต่ำ เมื่อพิจารณาค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่ง พบว่าขนาดของน้ำหนักที่มากระทำกับโครงสร้างชั้นทางที่ทำให้เกิดพฤติกรรม First Plastic Point ระหว่างโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10 เท่า) และโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 0.2 เท่า) เริ่มที่จะมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งที่พิจารณา ณ พฤติกรรมการเกิด Soil Failure พบว่าค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งภายในโครงสร้างชั้นทางของโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน จะมีค่ามากกว่าโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง เนื่องจากชั้นฐานรากดินแข็งมีค่า Elastic Modulus ที่มากกว่าชั้นฐานรากดินอ่อนทำให้มีสภาพเป็นวัสดุแข็งเกร็งมากกว่า และเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโครงสร้างชั้นทาง ในกรณีของชั้นฐานรากดินแข็งจะสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้เพียงเล็กน้อย จากนั้นจึงเกิดการพิบัติขึ้น จึงทำให้ค่ากำลังรับแรงสูงสุดของโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อนมีค่ามากกว่าโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง และจะสังเกตได้ว่าก่อนที่จะเกิดการพิบัติค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งบริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทางจะมีค่าลดลง

โดยพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งภายในโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.00 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 46

2.1.2 วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงปานกลาง (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade B และ Grade C)

2.1.2.1 โครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย (0.50 เมตร)

สำหรับกรณีที่โครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย และวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีค่าความแข็งแรงปานกลาง เมื่อพิจารณาค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งจะพบว่า การถ่ายเทของค่าหน่วยแรงในโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 มีค่าอยู่ระหว่าง 10 ถึง 1,000 เท่า) จากบริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทางลงมายังชั้นดินฐานราก จะเกิดขึ้นน้อย

กว่าโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 มีค่าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 20 เท่า) และพบว่าชั้นดินฐานรากมีอิทธิพลต่อการเกิดขึ้นของพฤติกรรม First Plastic Point และ Soil Failure กล่าวคือโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็งต้องการค่าน้ำหนักที่มากกระทำกับโครงสร้างชั้นทางมากกว่าโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อนเพื่อที่จะเกิดพฤติกรรมเหล่านี้

โดยพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งภายในโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.50 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 47

2.1.2.2 โครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาปานกลางถึงสูง (1.00 - 4.00 เมตร)

สำหรับกรณีที่โครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลาง และมีความแข็งแรงปานกลาง เมื่อพิจารณาค่าหน่วยแรงในแนวดิ่ง จะพบอิทธิพลของชั้นดินฐานมีผลต่อพฤติกรรมของการบีบอัด เนื่องจากวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีค่า Elastic Modulus ที่สูง จึงทำให้การถ่ายเทค่าหน่วยแรงจากโครงสร้างชั้นทางลงมายังชั้นฐานรากทำได้ดี โดยค่าน้ำหนักที่ทำให้เกิด First Plastic Point ระหว่างโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 มีค่าอยู่ระหว่าง 100 ถึง 1,000 เท่า) และโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 มีค่าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 20 เท่า) มีค่าแตกต่างกันมาก (315 kPa และ 1,050 kPa ตามลำดับ) โดยเมื่อพิจารณาถึงค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่ง เมื่อเกิดพฤติกรรม First Plastic Point กรณีของชั้นฐานรากดินอ่อนการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งจะไม่สม่ำเสมอไม่เป็นระเบียบ ขณะที่ในกรณีของชั้นฐานรากดินแข็งเมื่อเกิดพฤติกรรม First Plastic Point การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งจากโครงสร้างชั้นทางลงมายังชั้นฐานรากจะยังคงมีความสม่ำเสมอเป็นระเบียบ และเมื่อพิจารณา ณ ค่าน้ำหนักที่ทำให้เกิด Soil Failure พบว่าโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อนจะมีการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งภายในโครงสร้างชั้นทางที่ไม่เป็นระเบียบ ขณะที่โครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็งยังมีการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงที่สม่ำเสมอ

โดยพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.00 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 48

2.1.3 วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงสูง (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D)

2.1.3.1 โครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาน้อย (0.50 เมตร)

สำหรับกรณีที่วัสดุโครงสร้างชั้นทางที่มีความแข็งแรงสูง แต่มีค่าความหนาน้อย เมื่อพิจารณาค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่ง จะพบอิทธิพลของชั้นดินฐานรากที่มีต่อทั้งการเกิดพฤติกรรม First Plastic Point และพฤติกรรม Soil Failure เนื่องจากโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 มีค่าเท่ากับ 200 เท่า) ต้องการน้ำหนักที่มากกระทำกับโครงสร้างชั้นทางที่มากกว่าโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 มีค่าเท่ากับ 10,000 เท่า) เพื่อทำให้เกิดพฤติกรรมทั้ง 2 ชนิดขึ้น โดยเมื่อสังเกตลักษณะการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งภายในโครงสร้างชั้นทางบนดินฐานรากทั้ง 2 ชนิด จะพบลักษณะการกระจายตัวที่คล้ายคลึงกัน

โดยพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งภายในโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.50 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 49

2.1.3.2 โครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาปานกลางถึงสูง (1.00 - 4.00 เมตร)

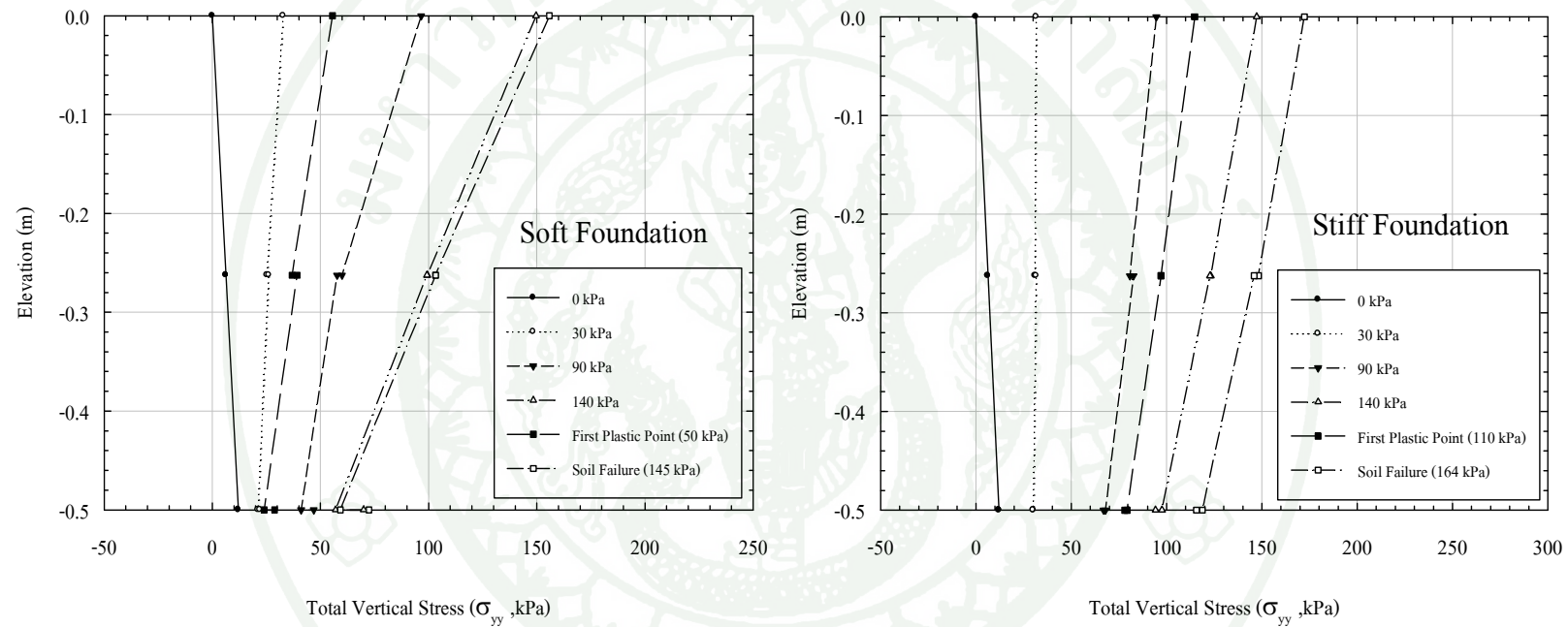
เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนาเพิ่มขึ้น อิทธิพลของชั้นดินฐานรากจะมีผลต่อการเกิดพฤติกรรม First Plastic Point แต่เมื่อพิจารณาที่ขนาดของน้ำหนักที่ทำให้เกิด Soil Failure ความแตกต่างของชั้นดินฐานรากจะไม่ส่งผลต่อค่าน้ำหนักที่ทำให้เกิดพฤติกรรมนี้ และเมื่อสังเกตพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นพบว่า การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งของโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากทั้ง 2 ชนิดจะมีลักษณะการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอไม่เป็นระเบียบ

โดยพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงแรงรวมในแนวดิ่งภายในโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.00 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 50

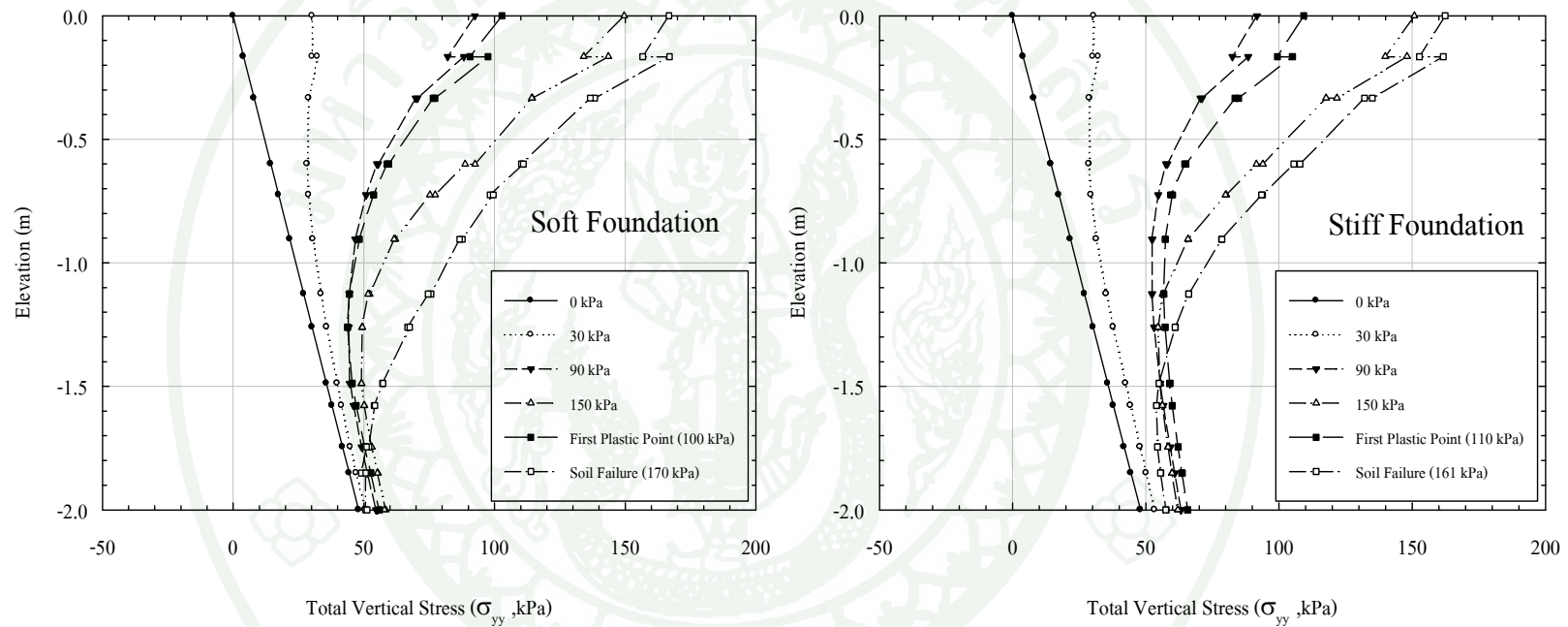
ผลการศึกษาการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงแรงรวมในแนวดิ่ง ภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทางซึ่งมีความแข็งแรงต่ำ (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A), วัสดุโครงสร้างชั้นทางซึ่งมีความแข็งแรงปานกลาง (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade B และ Grade C) และวัสดุโครงสร้างชั้นทางซึ่งมีความแข็งแรงสูง (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D) พบว่าการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงแรงรวมในแนวดิ่งซึ่งเกิดขึ้นภายในโครงสร้างชั้นทางที่มีความแข็งแรงต่ำ (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A) จะมีการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงแรงรวมที่สม่ำเสมอเป็นระเบียบ โดยเมื่อความหนาของโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้นก็จะมีพฤติกรรมเป็นแบบเดิม

สำหรับวัสดุที่มีความแข็งแรงปานกลาง (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade B และ Grade C) จะพบว่ากรณีที่โครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงแรงรวมในแนวดิ่งจะมีความสม่ำเสมอทั้งในกรณีของชั้นฐานรากดินอ่อน และในชั้นฐานรากดินแข็ง แต่เมื่อความหนาของโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มมากขึ้น กรณีของชั้นฐานรากดินอ่อนซึ่งมีรูปแบบการพิบัติเป็นรูปแบบ B จะพบว่าภายหลังจากที่มี Plastic Point เกิดขึ้นบริเวณที่ระดับความลึกซึ่งมีการเฉือนขาดเกิดขึ้นค่าหน่วยแรงแรงรวมในแนวดิ่งจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ขณะที่กรณีของชั้นฐานรากดินแข็งซึ่งมีรูปแบบการพิบัติรูปแบบ A ค่าหน่วยแรงแรงรวมในแนวดิ่งจะมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ เช่นเดิม

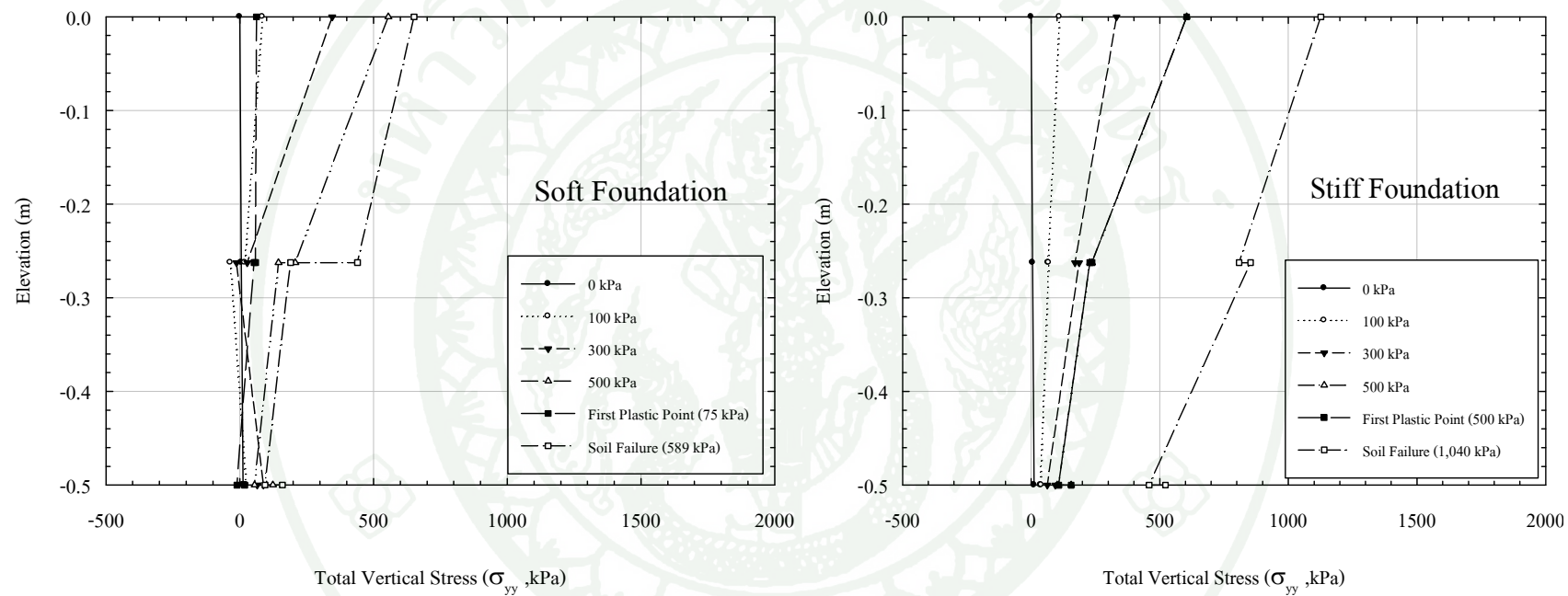
และสำหรับกรณีที่วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงสูง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย ค่าหน่วยแรงแรงรวมในแนวดิ่งจะมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอทั้งในกรณีของชั้นฐานรากดินอ่อนและชั้นฐานรากดินแข็ง เนื่องจากในดินฐานรากทั้ง 2 ชนิดเกิดการพิบัติในรูปแบบ A และเมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนาเพิ่มขึ้น การพิบัติในกรณีของชั้นดินฐานรากทั้ง 2 ชนิดจะเปลี่ยนจากรูปแบบ A กลายเป็นรูปแบบ B โดยสังเกตได้จากเมื่อมี Plastic Point เกิดขึ้นจะพบการลดลงของค่าหน่วยแรงแรงรวมในแนวดิ่ง ณ บริเวณระดับความลึกที่มีการรวมการพิบัติเกิดขึ้น



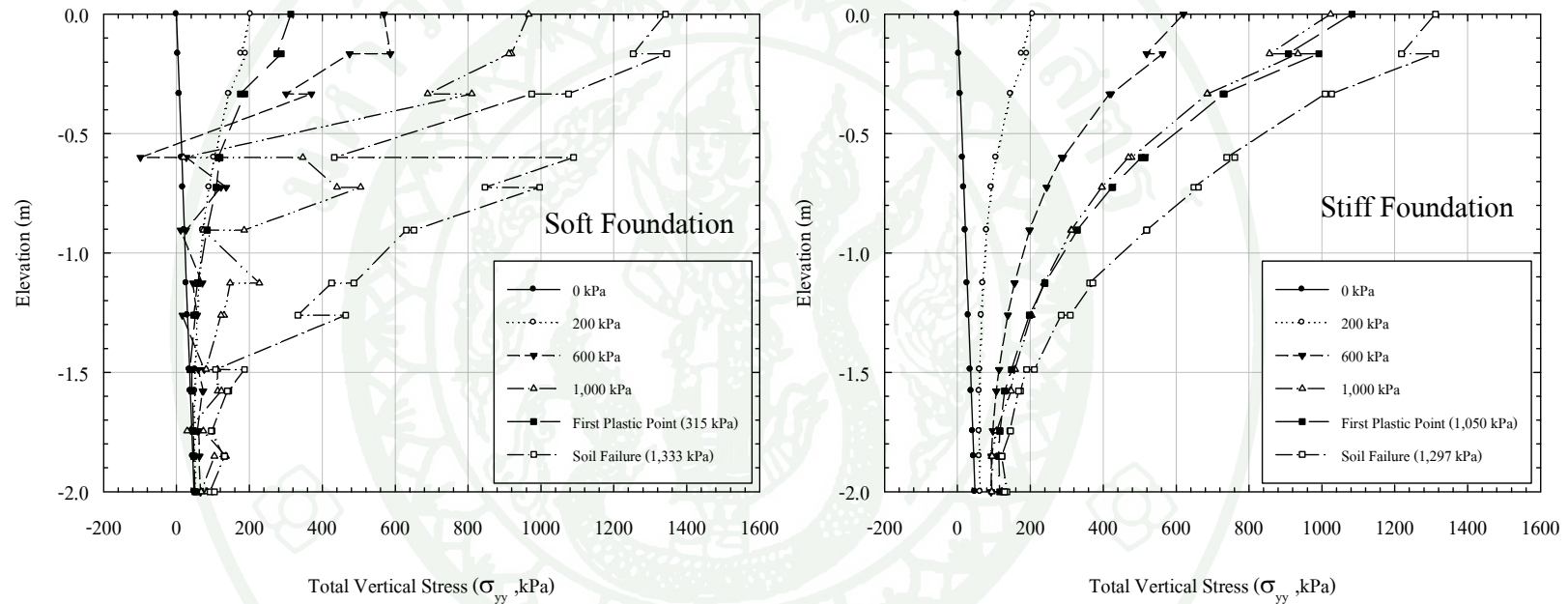
ภาพที่ 45 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งภายในโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10 เท่า) และชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 0.2 เท่า) กรณีวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความหนาแน่น (0.50 เมตร)



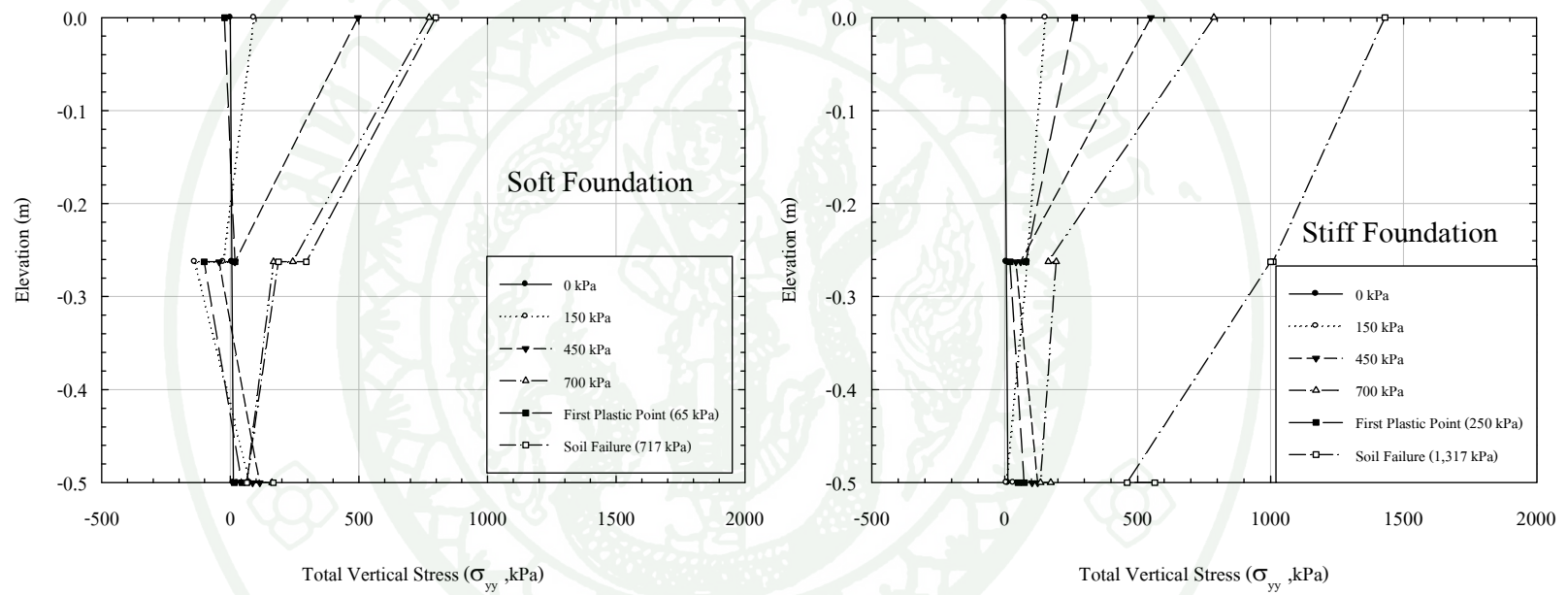
ภาพที่ 46 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งภายในโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10 เท่า) และชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 0.2 เท่า) กรณีวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง (1.00 - 4.00 เมตร)



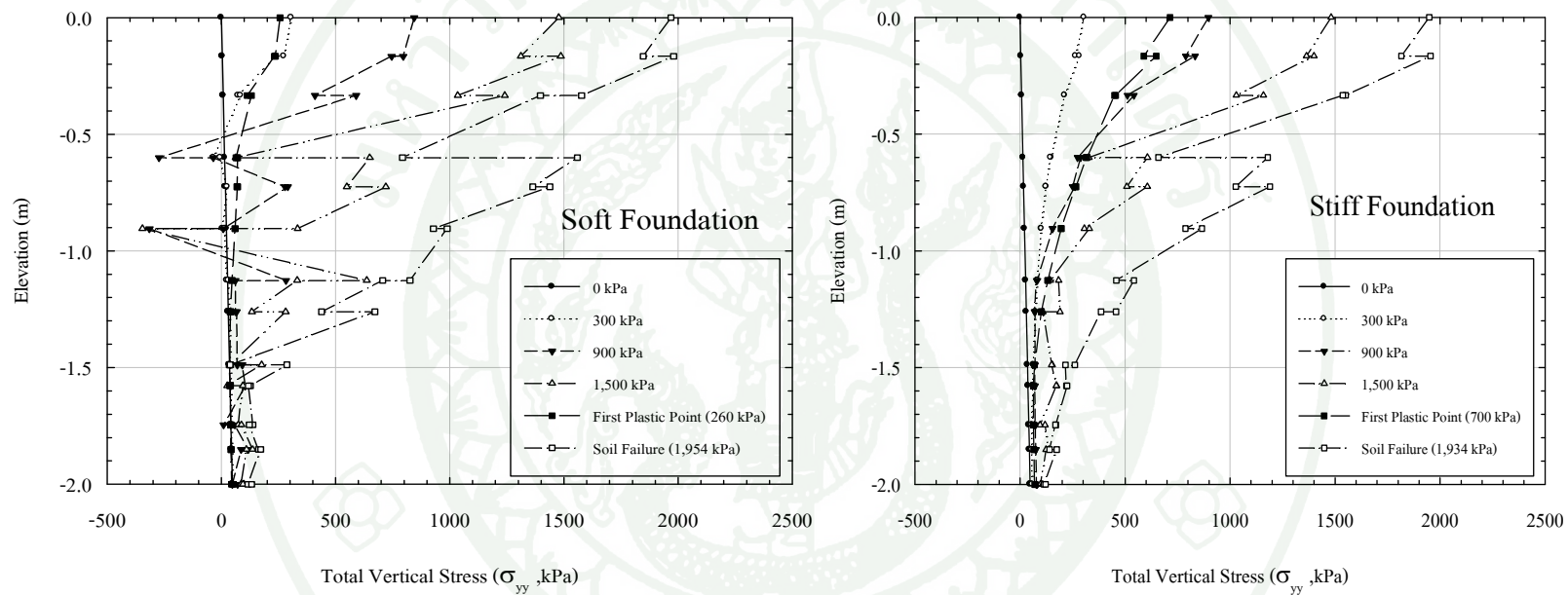
ภาพที่ 47 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งภายในโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 1,000 เท่า) และชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 20 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาแน่น (0.50 เมตร)



ภาพที่ 48 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งภายในโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 1,000 เท่า) และชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 20 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง (1.00 - 4.00 เมตร)



ภาพที่ 49 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งภายในโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10,000 เท่า) และชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 200 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย (0.50 เมตร)



ภาพที่ 50 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งภายในโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10,000 เท่า) และชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 200 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง (1.00 - 4.00 เมตร)

2.2 ค่าหน่วยแรงรวมในแนวนอน (Total Horizontal Stress, σ_{xx})

2.2.1 วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงต่ำ (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A)

2.2.1.1 โครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาแน่น (0.50 เมตร)

สำหรับกรณีที่โครงสร้างชั้นทางมีความหนาแน่น และมีความแข็งแรงต่ำ พบว่าในโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10 เท่า) เมื่อมีการเกิดพฤติกรรม First Plastic Point ขึ้นในโครงสร้างชั้นทาง ค่าหน่วยแรงรวมในแนวนอนจะแสดงให้เห็นถึงลักษณะการแอ่นตัวของโครงสร้างชั้นทางโดยสังเกตได้จากการที่ค่าหน่วยแรงรวมในแนวนอนที่บริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทางมีค่าลดลงจนมีค่าเป็นค่าหน่วยแรงดึง และมีค่าเพิ่มขึ้นก่อนที่จะเกิดการพิบัติ ส่วนกรณีของชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 0.2 เท่า) จะพบว่าขณะที่เกิดพฤติกรรม First Plastic Point ค่าหน่วยแรงรวมในแนวนอนจะไม่ลดลงจนเป็นค่าหน่วยแรงดึงแต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นก่อนที่จะเกิดการพิบัติเช่นเดียวกับในกรณีของชั้นฐานรากดินอ่อน

โดยพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวนอนภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.5 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 51

2.2.1.2 โครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาปานกลางถึงสูง (1.00 - 4.00 เมตร)

สำหรับกรณีที่โครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลาง และมีความแข็งแรงต่ำ จะพบว่าชั้นดินฐานรากมีอิทธิพลกับโครงสร้างชั้นทางน้อยลง เนื่องจากค่าน้ำหนักที่ทำให้เกิด First Plastic Point ของโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10 เท่า) จะมีค่าใกล้เคียงกับโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 0.2 เท่า) เพียงแต่ค่าหน่วยแรงรวมในแนวนอนบริเวณด้านล่างโครงสร้างชั้นทางของโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อนจะลดลงจนมีค่าเป็นหน่วยแรงดึง ซึ่งแตกต่างกับชั้นฐานรากดินแข็งที่ไม่พบการลดลงของค่าหน่วยแรงรวมในแนวนอนจนมีค่าเป็นหน่วยแรงดึง และเมื่อพิจารณาที่ค่ากำลังรับแรงสูงสุดที่ทำให้เกิดการพิบัติจะพบว่าชั้นดินฐานรากทั้ง 2 ชนิดจะมี

ลักษณะการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชนิดของดินฐานรากเริ่มที่จะไม่มีอิทธิพลต่อค่ากำลังรับแรงสูงสุดของแบบจำลอง

โดยพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.00 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 52

2.2.2 วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงปานกลาง (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade B และ Grade C)

2.2.2.1 โครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาน้อย (0.50 เมตร)

สำหรับกรณีที่โครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย และความแข็งแรงปานกลาง จะพบว่าเมื่อขนาดของน้ำหนักที่กระทำมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบจะลดลงจนมีค่าเป็นหน่วยแรงดึงทั้งในโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 มีค่าอยู่ระหว่าง 100 ถึง 1,000 เท่า) และวัสดุโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 มีค่าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 20 เท่า) และเมื่อพิจารณาค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบภายหลังจากการเกิดพฤติกรรม First Plastic Point ไปจนกระทั่งค่าน้ำหนักที่ทำให้เกิดการพิบัติ (Soil Failure) ที่บริเวณด้านล่างของแบบจำลอง กรณีชั้นฐานรากดินอ่อนค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ขณะที่กรณีของชั้นฐานรากดินแข็งค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนเกือบจะเปลี่ยนจากหน่วยแรงดึงกลายเป็นหน่วยแรงกด แต่ในขณะเดียวกันที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทางค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบจะมีค่าลดลง

โดยพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.5 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 53

2.2.2.2 โครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาปานกลางถึงสูง (1.00 - 4.00 เมตร)

สำหรับกรณีที่โครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลาง และมีความแข็งแรงปานกลางถึงสูง พบว่าการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวนอกระหว่างโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 อยู่ระหว่าง 100 ถึง 10,000 เท่า) จะมีลักษณะใกล้เคียงกับโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 อยู่ระหว่าง 2 ถึง 20 เท่า) จนกระทั่งเมื่อมีพฤติกรรม First Plastic Point เกิดขึ้น ลักษณะการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวนอกระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อนจะมีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอไม่เป็นระเบียบ ขณะที่กรณีของชั้นฐานรากดินแข็งจะยังคงมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามรูปแบบการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวนอกระหว่างชั้นฐานรากทั้ง 2 ชนิดจะยังคงเป็นรูปแบบเดิม คือ เมื่อขนาดของน้ำหนักระทำมีค่าเพิ่มขึ้น ที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทางค่าหน่วยแรงรวมในแนวนอจะมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่บริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทางจะมีค่าลดลง

โดยพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวนอภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.00 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 54

2.2.3 วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงสูง (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D)

2.2.3.1 โครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาน้อย (0.50 เมตร)

สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทางที่มีความแข็งแรงสูง แต่มีความหนาของโครงสร้างชั้นทางน้อยจะพบว่าขณะที่เกิดพฤติกรรม First Plastic Point ทั้งในโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10,000 เท่า) และโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 200 เท่า) จะมีลักษณะการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวนอที่คล้ายคลึงกัน และเมื่อพิจารณา ณ ค่าน้ำหนักที่ทำให้เกิดที่พฤติกรรม Soil Failure พบว่า โครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อนแม้ว่าจะมีค่าน้ำหนักที่กระทำน้อยกว่าแต่เกิดค่าหน่วยแรงกดที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง และเกิดหน่วยแรงดึงที่บริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทางที่มากกว่าโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง

โดยพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบ ภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.00 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 55

2.3.3.2 โครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาปานกลางถึงสูง (1.00 - 4.00 เมตร)

สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทางซึ่งมีความแข็งแรงสูง และมีความหนาปานกลางจะพบอิทธิพลของชั้นฐานรากในพฤติกรรม First Plastic Point กล่าวคือค่าน้ำหนักที่ทำให้เกิด First Plastic Point สำหรับชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็งมีค่าเท่ากับ 260 kPa และ 700 kPa ตามลำดับ เมื่อพิจารณา ณ ที่พฤติกรรม Soil Failure จะไม่พบอิทธิพลของชั้นดินฐานรากที่มีต่อค่าหน่วยแรงในโครงสร้างชั้นทาง ซึ่งลักษณะการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบจะมีลักษณะคล้ายคลึงกันในชั้นฐานรากทั้ง 2 ชนิด คือมีการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงที่ไม่สม่ำเสมอไม่เป็นระเบียบภายหลังจากที่มีพฤติกรรม First Plastic Point เกิดขึ้น

โดยพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบ ภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D เปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.00 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 56

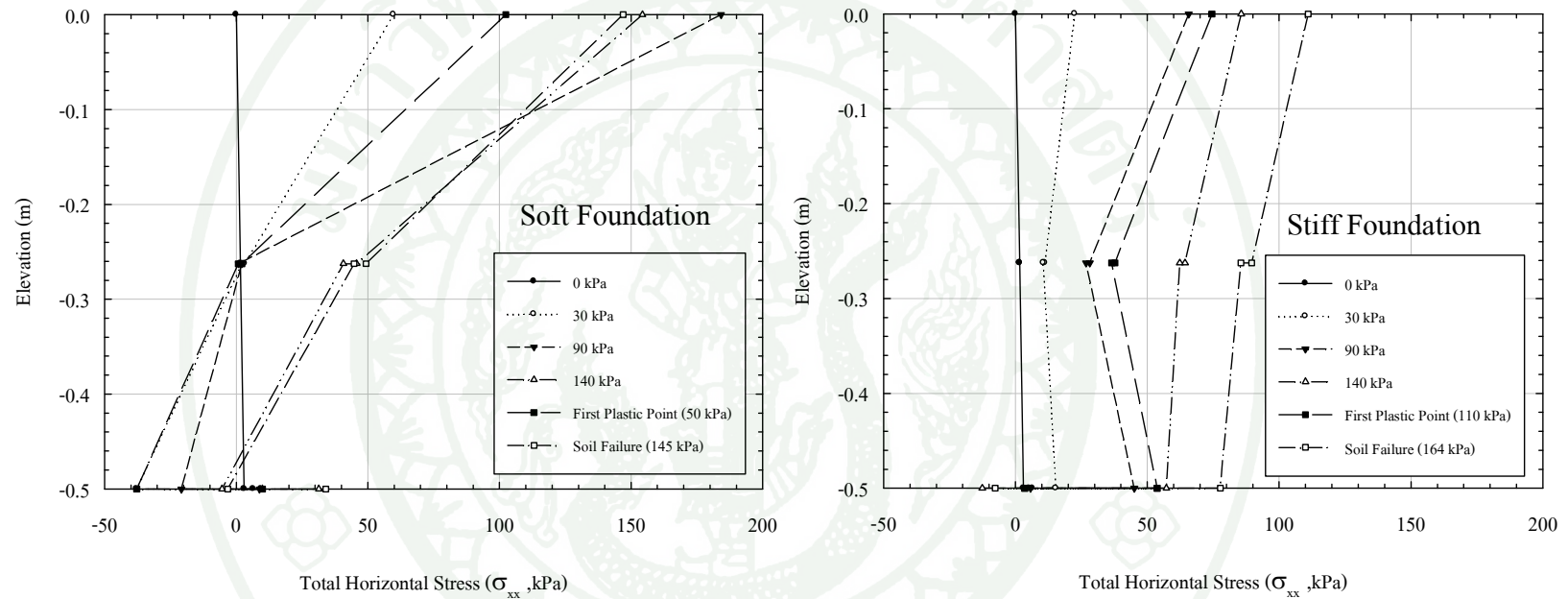
สำหรับแบบจำลองซึ่งมีการแบ่งชั้นของวัสดุ เมื่อความแตกต่างของค่า Elastic Modulus ระหว่างวัสดุโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานรากมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 10 เท่า ($E_1/E_2 \geq 10$) วัสดุโครงสร้างชั้นทางจะมีพฤติกรรมเสมือนเป็นคาน (Beam) และเมื่อความแตกต่างของค่า Elastic Modulus ระหว่างโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานรากมีค่าน้อยหรือเท่ากับ 0.2 เท่า ($E_1/E_2 \leq 0.2$) ทั้งโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานรากจะมีพฤติกรรมเสมือนเป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน (Homogeneous)

กรณีที่โครงสร้างชั้นทางมีพฤติกรรมเสมือนเป็นคาน ($E_1/E_2 \geq 10$) เมื่อมีน้ำหนักกระทำในแนวดิ่งจะทำให้เกิดค่าหน่วยแรงในแนวราบในรูปแบบของ Flexural Stress และทำให้เกิดทั้ง หน่วยแรงดึงและหน่วยแรงกดภายในโครงสร้างชั้นทาง ซึ่งจะเกิดเป็นหน่วยแรงกดที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทางและเกิดหน่วยแรงดึงที่บริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทาง โดยที่ค่าหน่วยแรงในแนวราบจะมีค่ามากกว่าค่าหน่วยแรงในแนวดิ่งที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง

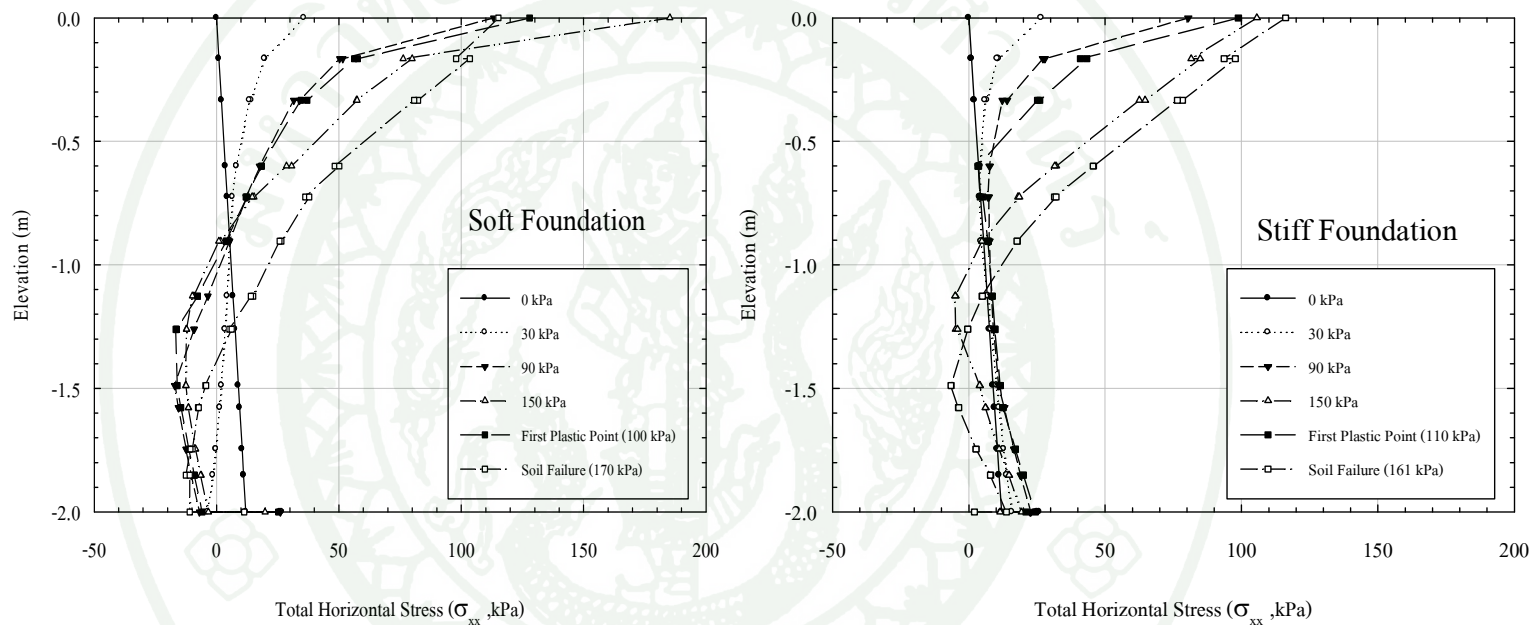
และสำหรับกรณีที่โครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานรากมีพฤติกรรมเสมือนเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน ($E_1/E_2 \leq 0.2$) การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงระหว่างโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานรากจะเสมือนกับเป็นวัสดุชนิดเดียว คือ มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอและต่อเนื่อง โดยที่ค่าหน่วยแรงในแนวดิ่งจะมีค่ามากกว่าค่าหน่วยแรงในแนวราบเสมอ

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงในแนวดิ่งและค่าหน่วยแรงในแนวราบ ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน ($E_1/E_2 = 10$) และวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง ($E_1/E_2 = 0.2$) จะพบว่าที่บริเวณผิวด้านบนของโครงสร้างชั้นทางกรณีชั้นฐานรากดินอ่อนค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบมีค่ามากกว่าค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่ง และค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบจะค่อยๆ มีค่าลดลงและกลายเป็นหน่วยแรงดิ่งเมื่อระดับความลึกมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนกรณีของชั้นฐานรากดินแข็งค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งจะมีค่ามากกว่าค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบเสมอ

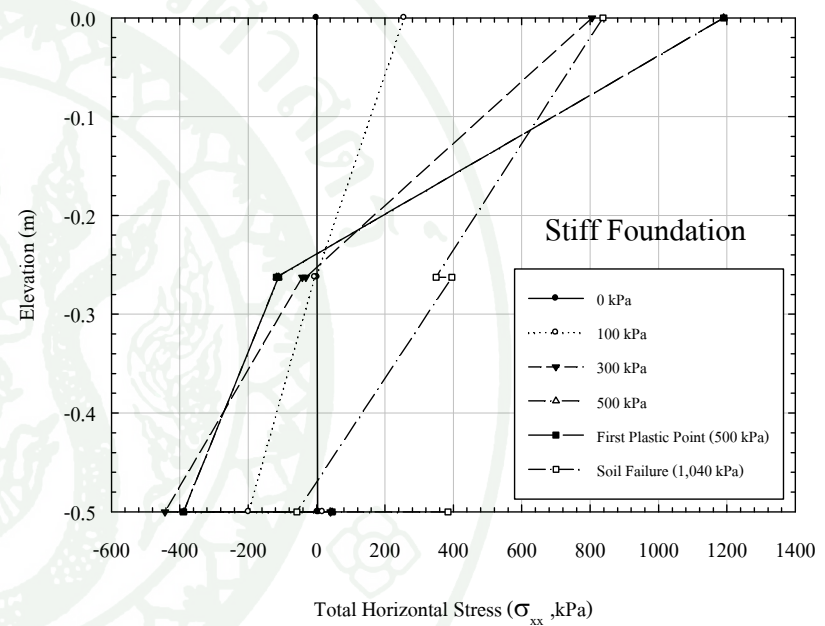
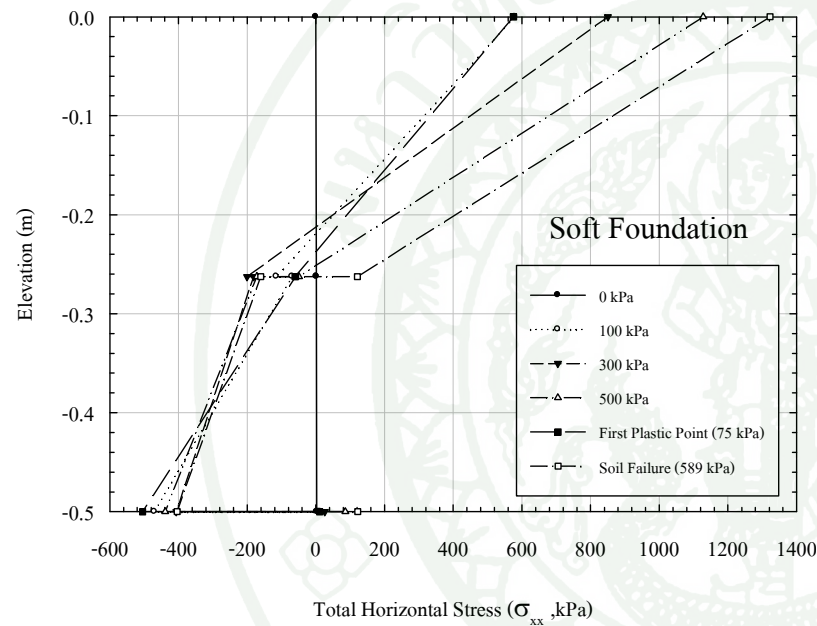
โดยที่การกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอไม่เป็นระเบียบของค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบภายในโครงสร้างชั้นทาง จะเกิดขึ้นเมื่อรูปแบบของการบีบอัดในวัสดุเป็นรูปแบบ B ซึ่งการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอจะเกิดขึ้นภายหลังจากมีพฤติกรรม First Plastic Point เกิดขึ้น ขณะที่โครงสร้างชั้นทางซึ่งมีการบีบอัดรูปแบบ A แม้ว่าจะมีพฤติกรรม First Plastic Point เกิดขึ้น ค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบก็ยังคงมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอเป็นระเบียบ



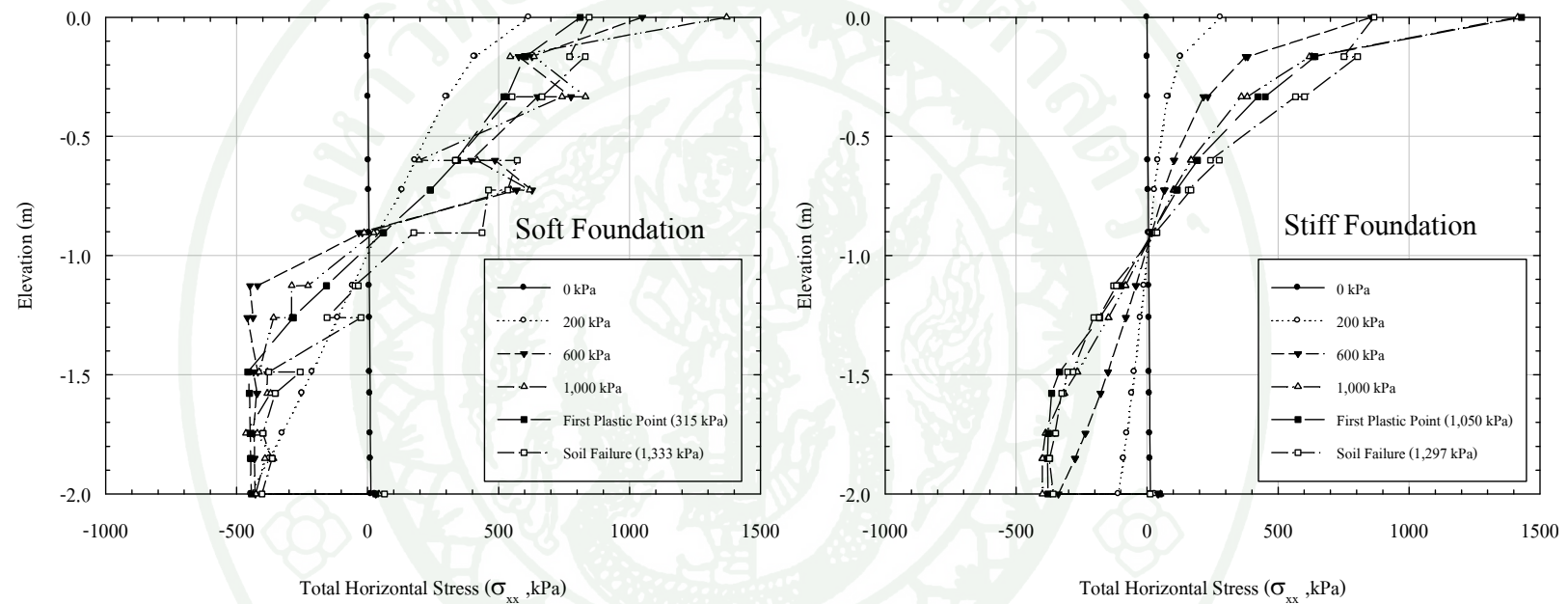
ภาพที่ 51 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10 เท่า) และชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 0.2 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาแน่น (0.50 เมตร)



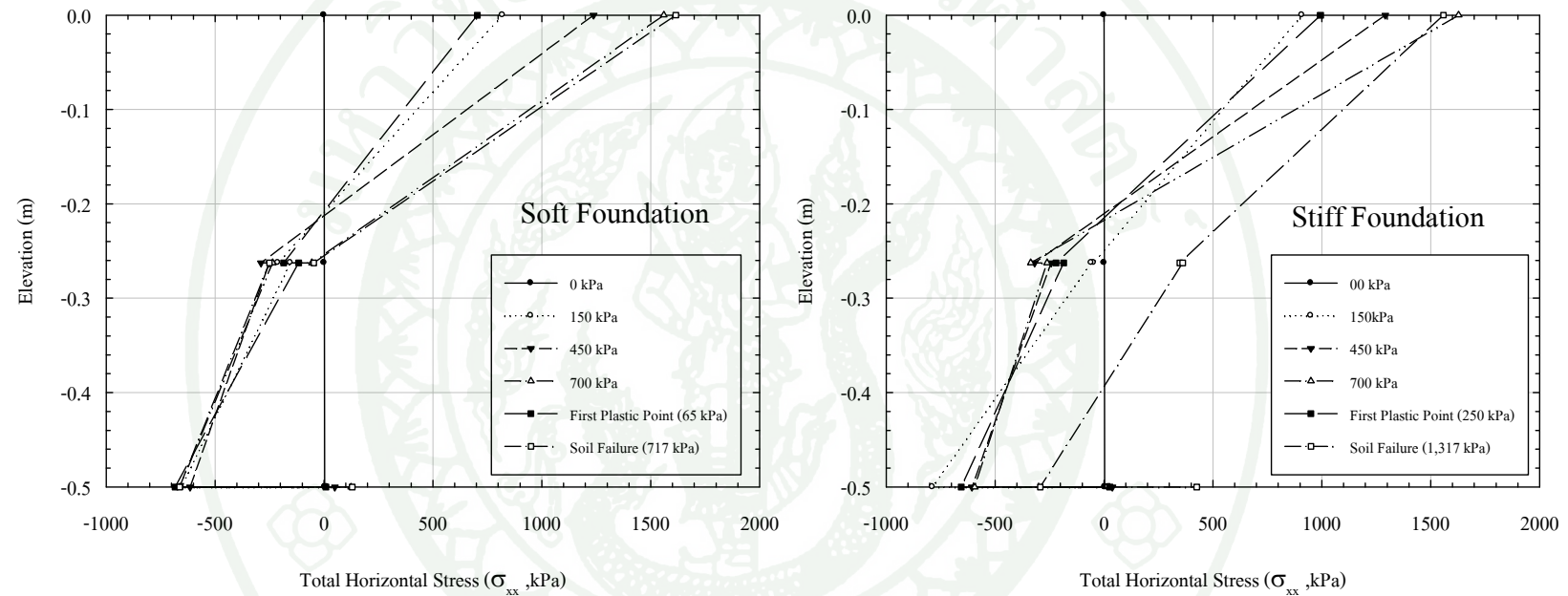
ภาพที่ 52 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10 เท่า) และชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 0.2 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง (1.00 - 4.00 เมตร)



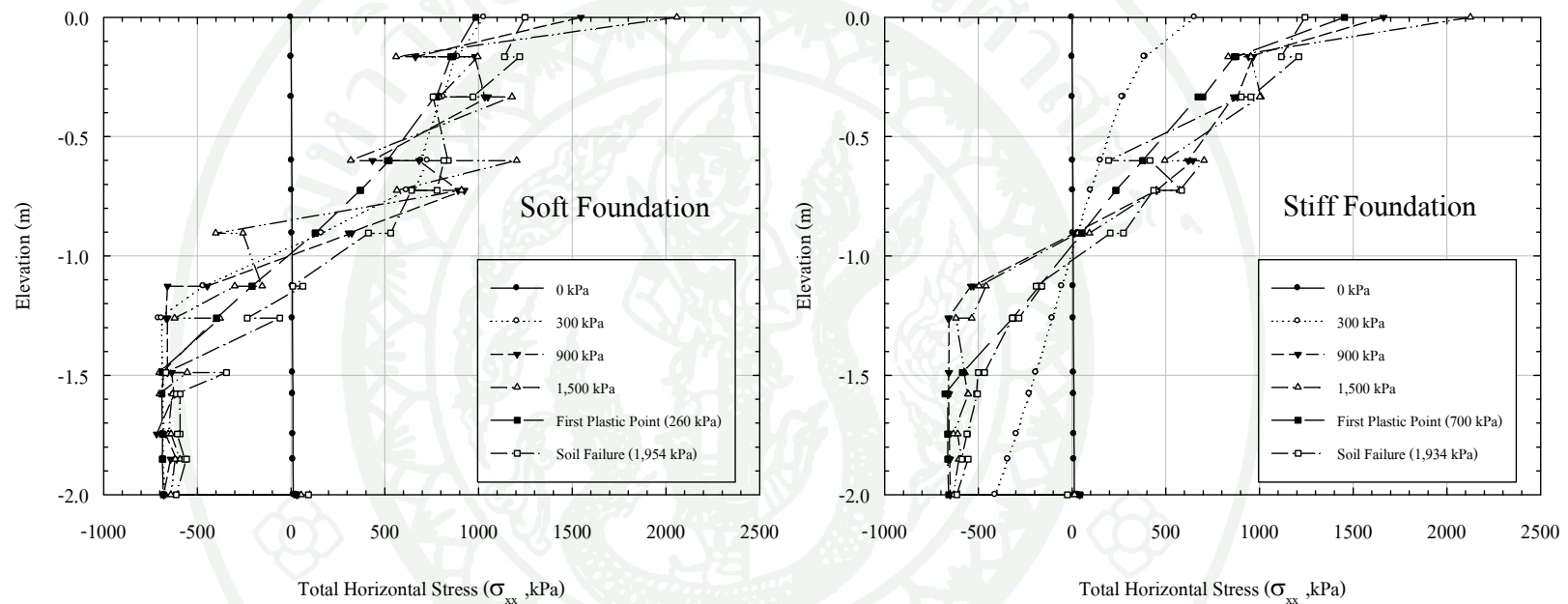
ภาพที่ 53 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 1,000 เท่า) และชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 20 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย (0.50 เมตร)



ภาพที่ 54 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 1,000 เท่า) และชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 20 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง (1.00 - 4.00 เมตร)



ภาพที่ 55 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10,000 เท่า) และชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 200 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาแน่น (0.50 เมตร)



ภาพที่ 56 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10,000 เท่า) และชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 200 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง (1.00 - 4.00 เมตร)

2.3 แรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore Water Pressure, Δu)

2.3.1 วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงต่ำ (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A)

2.3.1.1 โครงสร้างชั้นทางมีความหนาแน่น (0.50 เมตร)

เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาแน่น และมีความแข็งแรงต่ำ กรณีชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 มีค่าเท่ากับ 10 เท่า) เมื่อน้ำหนักที่มากกระทำกับโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้นค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีค่าเพิ่มขึ้นบริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง แต่ที่บริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทางค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีค่าลดลง และเมื่อขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำมีค่าเพิ่มขึ้นค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะค่อยๆมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าเป็นบวก ทั้งที่บริเวณด้านบนและด้านล่างของโครงสร้างชั้นทาง ส่วนกรณีของชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 มีค่าเท่ากับ 0.2 เท่า) จะพบว่าค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำทั้งที่บริเวณด้านบนกึ่งกลาง และด้านล่างของโครงสร้างชั้นทาง

โดยพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าแรงน้ำส่วนเกินภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็งเมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.50 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 57

2.3.1.2 โครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง (1.0 - 4.0 เมตร)

สำหรับโครงสร้างชั้นทางซึ่งมีความหนาปานกลาง แต่มีความแข็งแรงต่ำ กรณีของชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 มีค่าเท่ากับ 10 เท่า) เมื่อขนาดน้ำหนักที่มากกระทำมีค่าเพิ่มขึ้นค่าแรงดันน้ำส่วนเกินบริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทางจะมีค่าเพิ่มขึ้นขณะที่บริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทางค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีค่าลดลงจนมีค่าเป็นหน่วยแรงดึง และกรณีของชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 มีค่าเท่ากับ 0.2 เท่า) ที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทางค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และที่บริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทางค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเช่นกัน แต่จะมีค่าลดลงก่อนที่จะเกิดการพิบัติขึ้น

โดยพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าแรงน้ำส่วนเกินภายในวัสดุ โครงสร้างชั้นทาง Grade A บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็งเมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.00 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 58

2.3.2 วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงปานกลาง (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade B และ Grade C)

2.3.2.1 โครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย (0.50 เมตร)

สำหรับโครงสร้างชั้นทางซึ่งมีความแข็งแรงปานกลาง แต่มีค่าความหนาน้อย กรณีของชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 มีค่าอยู่ระหว่าง 100 ถึง 1,000 เท่า) เมื่อขนาดของน้ำหนักรวมที่กระทำกับโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้นค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทางจะมีค่าเพิ่มขึ้นส่วนที่บริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทางจะมีค่าลดลงโดยจะเริ่มพบการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอไม่เป็นระเบียบของค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน และกรณีของชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 มีค่าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 20 เท่า) จะมีลักษณะการกระจายตัวของค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่คล้ายคลึงกันกับในกรณีของชั้นฐานรากดินอ่อนคือบริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทางค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าลดลงที่บริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทาง แต่ลักษณะของการกระจายตัวจะมีความสม่ำเสมอเป็นระเบียบมากกว่าในกรณีของชั้นฐานรากดินอ่อน

โดยพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าแรงน้ำส่วนเกินภายในวัสดุ โครงสร้างชั้นทาง Grade C บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็งเมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.50 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 59

2.3.2.2 โครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาปานกลางถึงสูง (1.0 - 4.0 เมตร)

สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทางที่มีความแข็งแรงปานกลาง และมีค่าความหนาปานกลาง กรณีของชั้นฐานรากดินอ่อนเมื่อขนาดของน้ำหนักรวมที่กระทำมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทางจะมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่บริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทางค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีค่าลดลงโดยค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีการกระจายตัวที่

ไม่สม่ำเสมอไม่เป็นระเบียบอย่างชัดเจน ส่วนในกรณีของชั้นฐานรากดินแข็งจะมีลักษณะการกระจายตัวของค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่คล้ายคลึงกันกับในกรณีของชั้นฐานรากดินอ่อนคือบริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทางค่าแรงดันน้ำส่วนเกินมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าลดลงที่บริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทางแต่ลักษณะของการกระจายตัวจะมีความสม่ำเสมอมากกว่าในกรณีของชั้นฐานรากดินอ่อน

โดยพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าแรงดันน้ำส่วนเกินภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.00 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 60

2.3.3 วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงสูง (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D)

2.3.3.1 โครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย (0.50 เมตร)

สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทางซึ่งมีความแข็งแรงสูง แต่มีค่าความหนาน้อย กรณีของชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 มีค่าเท่ากับ 10,000 เท่า) เมื่อขนาดของน้ำหนักรวมกระทำกับโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้นค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทางจะมีค่าเพิ่มขึ้นส่วนที่บริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทางจะมีค่าลดลงโดยการกระจายตัวของค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะไม่สม่ำเสมอ และกรณีของชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 มีค่าเท่ากับ 200 เท่า) จะมีลักษณะการกระจายตัวของค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่คล้ายคลึงกันกับในกรณีของชั้นฐานรากดินอ่อนคือบริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทางค่าแรงดันน้ำส่วนเกินมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าลดลงที่บริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทางและลักษณะของการกระจายตัวของค่าแรงดันน้ำส่วนเกินเริ่มที่จะไม่สม่ำเสมอไม่เป็นระเบียบ

โดยพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าแรงดันน้ำส่วนเกินภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็งเมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.50 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 61

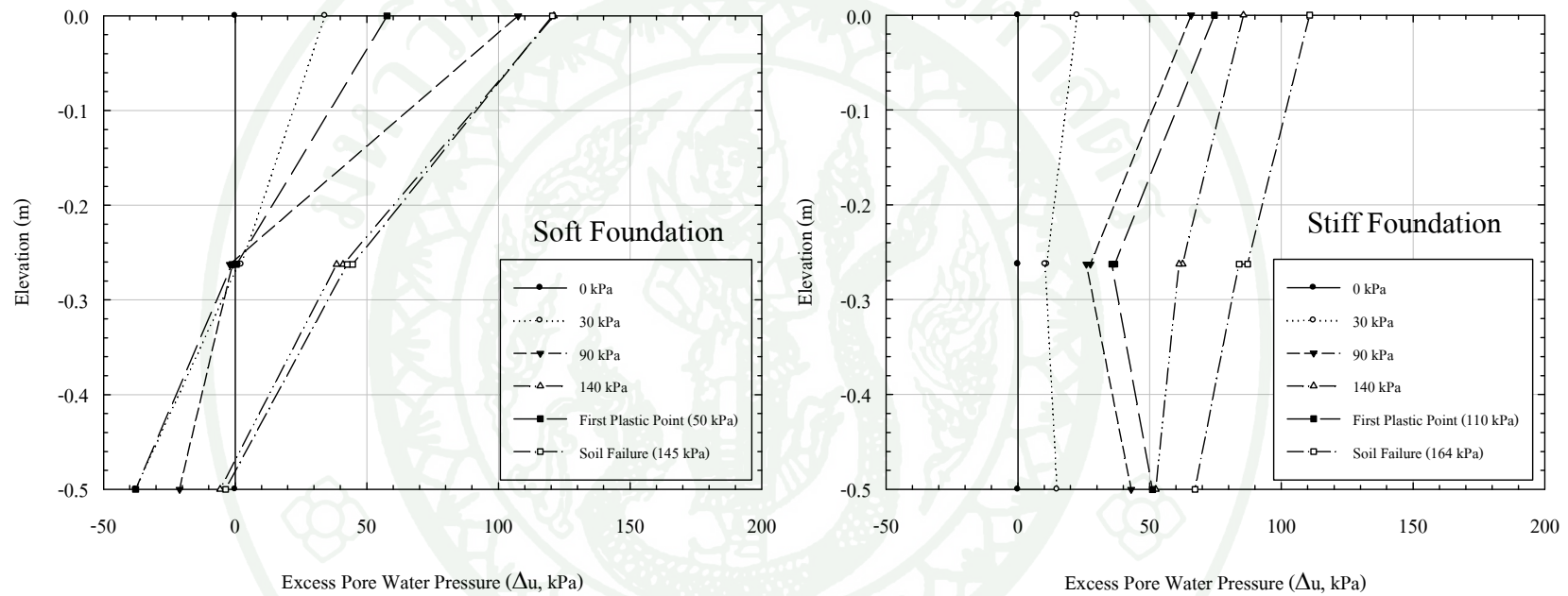
2.3.3.2 โครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาปานกลางถึงสูง (1.0 - 4.0 เมตร)

สำหรับโครงสร้างชั้นทางซึ่งมีความหนาปานกลาง แต่มีความแข็งแรงสูง กรณีของชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 มีค่าเท่ากับ 10,000 เท่า) เมื่อขนาดน้ำหนักรถที่กระทำมีค่าเพิ่มขึ้นค่าแรงดันน้ำส่วนเกินบริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทางจะมีค่าเพิ่มขณะที่บริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทางค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีค่าลดลงจนมีค่าเป็นหน่วยแรงดึง และกรณีของชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 มีค่าเท่ากับ 200 เท่า) ที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทางค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และที่บริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทางค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ เช่นกัน ซึ่งพบว่าการกระจายตัวของโครงสร้างชั้นทางจะไม่สม่ำเสมอทั้งในกรณีของชั้นฐานรากดินอ่อน และกรณีชั้นของชั้นฐานรากดินแข็ง

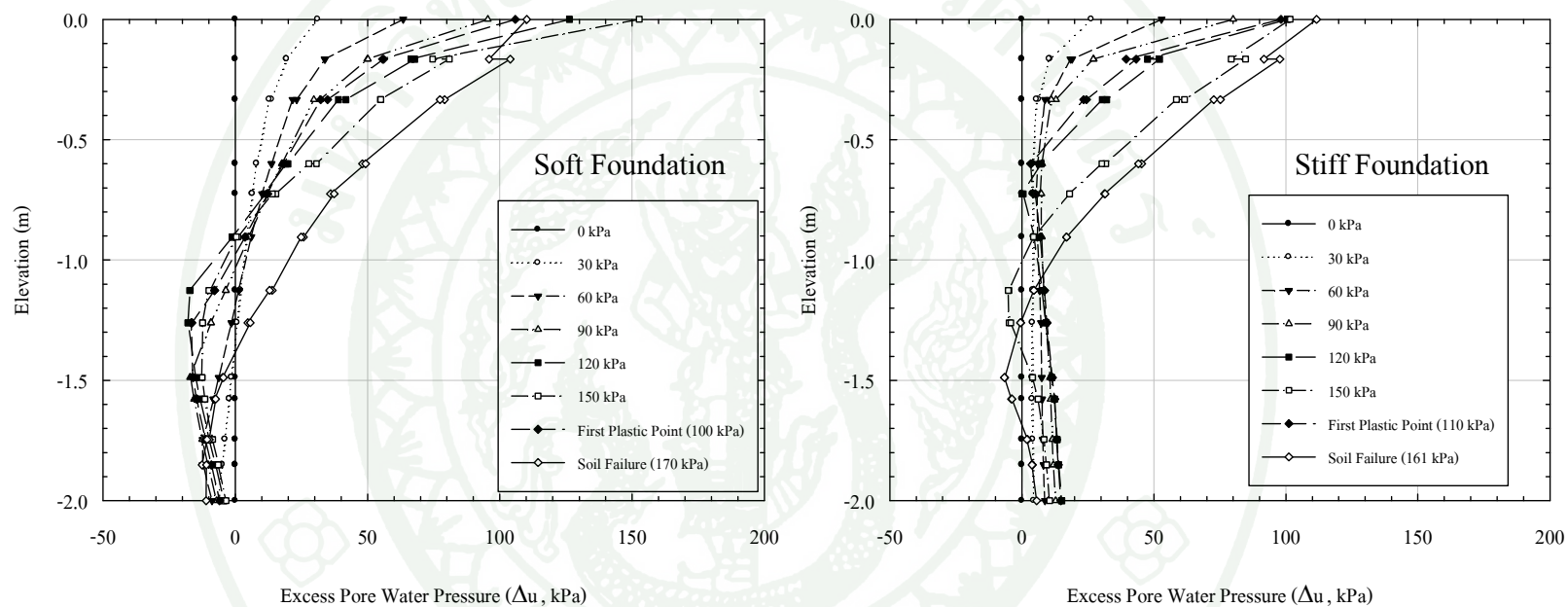
โดยพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าแรงดันน้ำส่วนเกินภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็งเมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.00 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 62

การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการบีบอัดของโครงสร้างชั้นทางเมื่อทำการกำหนดให้โครงสร้างชั้นทางมีพฤติกรรมไม่ระบายน้ำ ซึ่งจะทำให้มีค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore Water Pressure) เกิดขึ้นในระหว่างที่ทำการวิเคราะห์ จากการศึกษาจะพบว่าค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะการกระจายตัวที่คล้ายคลึงกันกับค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบ (Total Horizontal Stress, σ_{xx}) เสมอในทุกกรณี

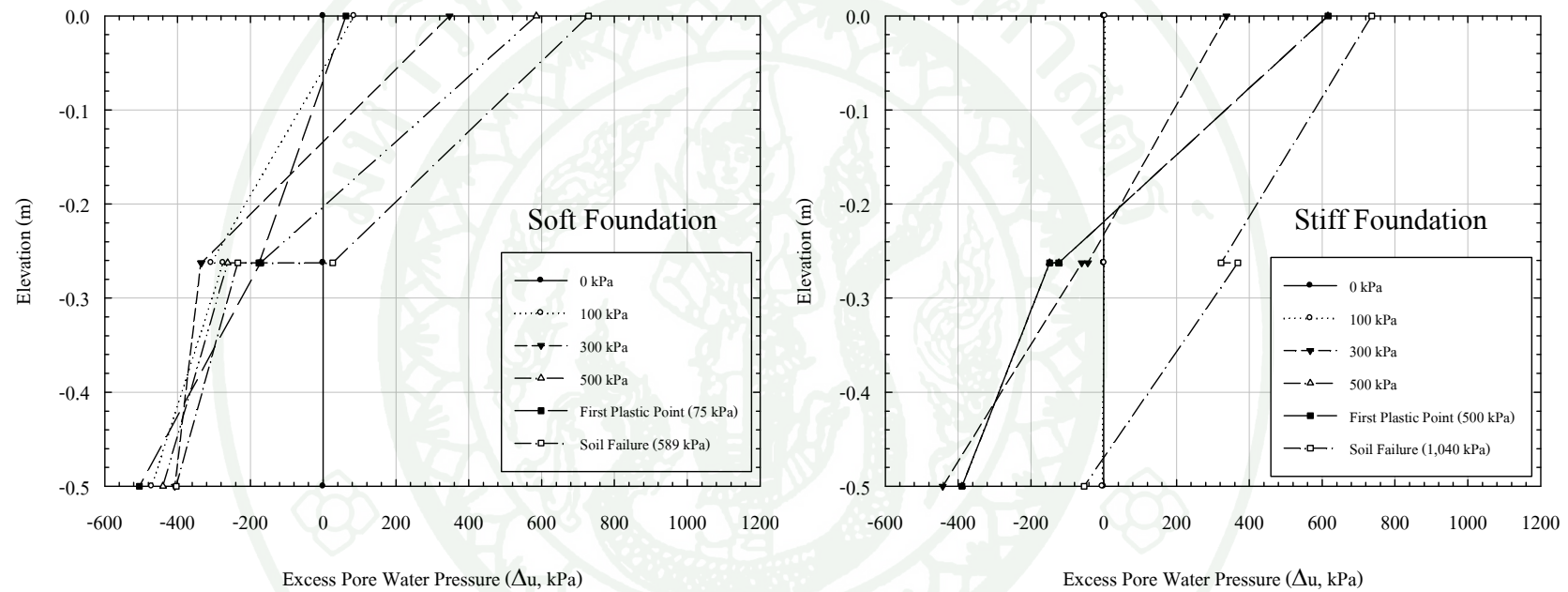
ดังนั้นเมื่อการกระจายตัวของค่าแรงดันน้ำส่วนเกินมีความสม่ำเสมอ ซึ่งมีรูปแบบการบีบอัดเป็นรูปแบบ A เปลี่ยนเป็นการบีบอัดในรูปแบบ B ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีความไม่สม่ำเสมอภายหลังจากที่มี Plastic Point เกิดขึ้น



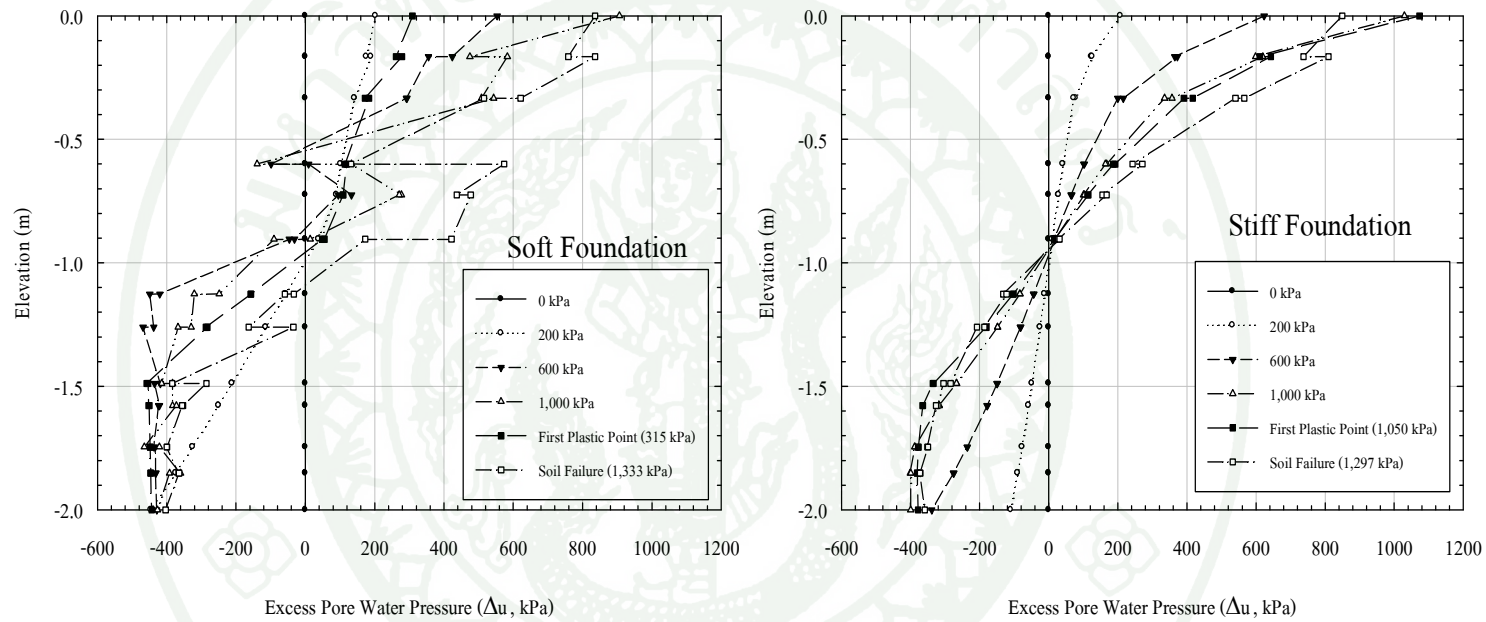
ภาพที่ 57 การกระจายตัวของค่าแรงดันน้ำส่วนเกินภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10 เท่า) และชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 0.2 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาแน่น (0.50 เมตร)



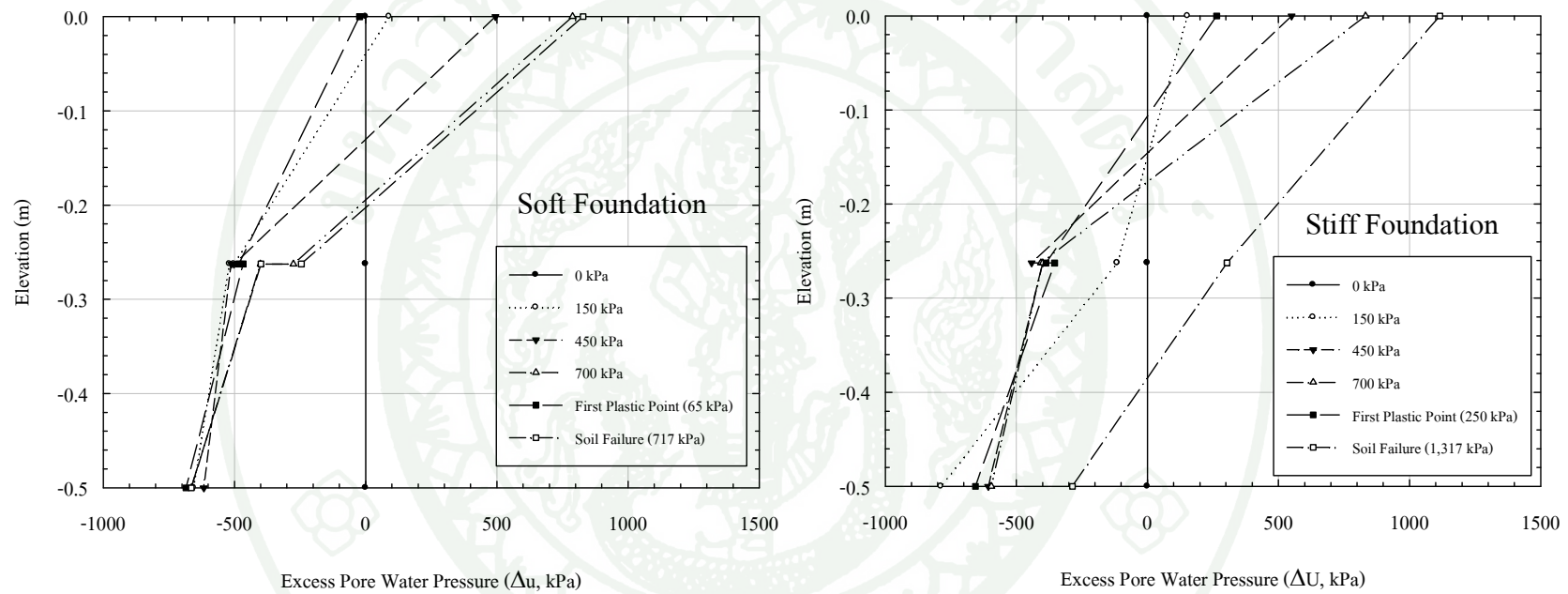
ภาพที่ 58 การกระจายตัวของค่าแรงดันน้ำส่วนเกินภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10 เท่า) และชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 0.2 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง (1.00 - 4.00 เมตร)



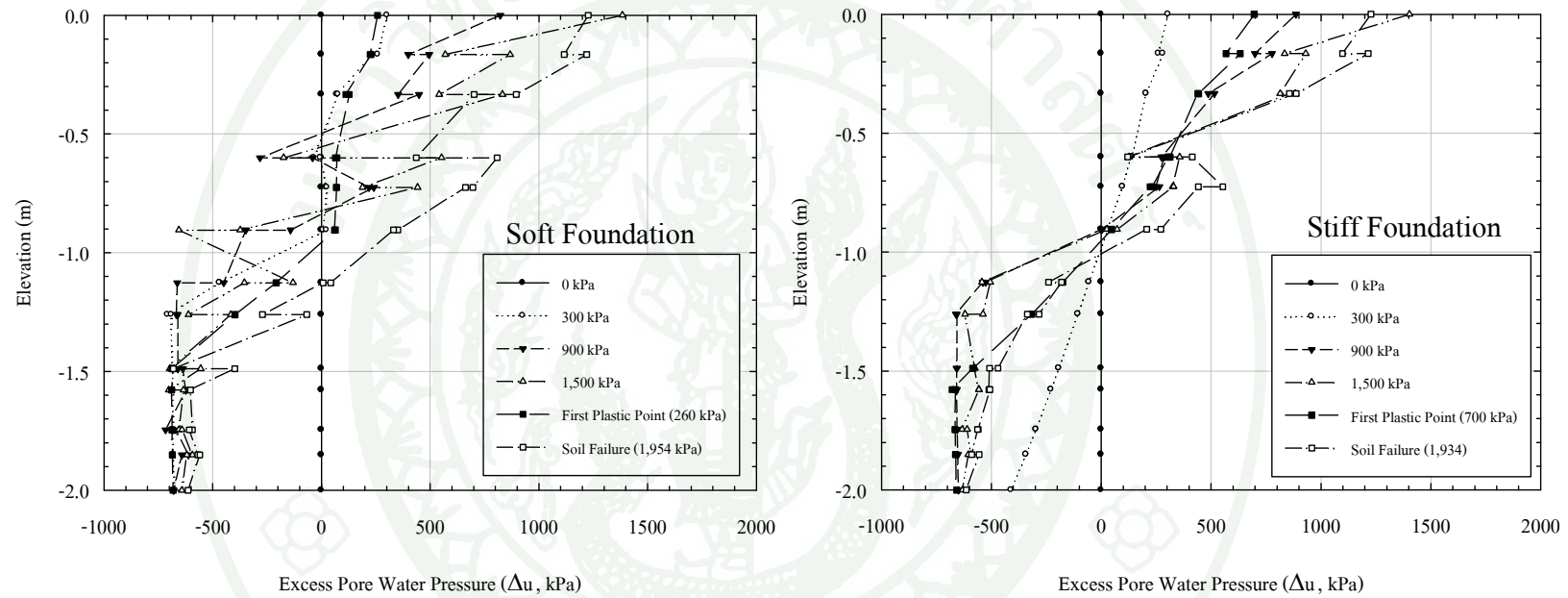
ภาพที่ 59 การกระจายตัวของค่าแรงดันน้ำส่วนเกินภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 1,000 เท่า) และชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 20 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาแน่น (0.50 เมตร)



ภาพที่ 60 การกระจายตัวของค่าแรงดันน้ำส่วนเกินภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 1,000 เท่า) และชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 20 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง (1.00 - 4.00 เมตร)



ภาพที่ 61 การกระจายตัวของค่าแรงดันน้ำส่วนเกินภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10,000 เท่า) และชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 200 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาแน่น (0.50 เมตร)



ภาพที่ 62 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10,000 เท่า) และชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 200 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง (1.00 - 4.00 เมตร)

2.4 เส้นทางเดินหน่วยแรง (Stress Path)

ในการพิจารณาพฤติกรรมการบีบอัดที่แตกต่างกันระหว่างโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง ในการวิจัยครั้งนี้ได้นำเส้นทางเดินหน่วยแรงมาใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการบีบอัดร่วมกับการศึกษาอื่นๆ เนื่องจากเส้นทางเดินหน่วยแรงสามารถใช้อธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในแต่ละระดับความลึกของโครงสร้างชั้นทางตั้งแต่เริ่มรับน้ำหนักจนกระทั่งเกิดการบีบอัดได้

สำหรับการพิจารณาพฤติกรรมการบีบอัดของโครงสร้างชั้นทางโดยใช้เส้นทางเดินหน่วยแรง การวิจัยครั้งนี้เลือกพิจารณา ณ ตำแหน่งกึ่งกลางความกว้างของน้ำหนักลงมาตลอดแนวความลึกของโครงสร้างชั้นทาง ซึ่งกำหนดให้ค่าหน่วยแรงเฉือนมีค่าเท่ากับ 0 โดยกรณีที่โครงสร้างชั้นทางมีรูปแบบการบีบอัดเป็นรูปแบบ B จะพิจารณาเส้นทางเดินหน่วยแรงที่บริเวณระดับความลึกซึ่งมีวงบีบอัดเกิดขึ้นมาพิจารณาเพิ่มเติมด้วย

ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของเส้นทางเดินหน่วยแรงได้ดีขึ้น ในการวิจัยครั้งนี้จะแสดงผลการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง (Effective Vertical Stress, σ'_{yy}), ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ (Effective Horizontal Stress, σ'_{xx}), ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก (Major Principal Effective Stress, σ'_1) และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรอง (Minor Principal Effective Stress, σ'_3) ภายในโครงสร้างชั้นทางที่ระดับความลึกต่างๆ โดยแสดงเปรียบเทียบกันระหว่างกรณีของชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง

สำหรับค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองที่ใช้ในการคำนวณหาเส้นทางเดินหน่วยแรง ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ก

2.4.1 วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงต่ำ (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A)

2.4.1.1 โครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย (0.50 เมตร)

สำหรับโครงสร้างชั้นทางที่มีค่าความหนาน้อย และมีความแข็งแรงต่ำ กรณีของชั้นฐานรากดินอ่อน (E_1/E_2 มีค่าเท่ากับ 10) เมื่อน้ำหนักที่มากกระทำมีค่าเพิ่มขึ้นจะพบว่าที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทางค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากนั้นจึงมีค่าลดลงก่อนที่จะเกิดการพิบัติ แต่ค่าของหน่วยแรงประสิทธิผลหลักที่เกิดขึ้นนั้นจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวราบซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำ โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าหน่วยแรงในแนวดิ่งมาก แต่ก่อนที่จะเกิดการพิบัติค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบจะมีค่าลดลง ดังนั้นค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจึงถูกแทนที่ด้วยค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำ ส่วนค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีค่าลดลงเรื่อยๆจนมีค่าเป็นหน่วยแรงดิ่ง และจึงมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าเป็นหน่วยแรงกดและลดลงอีกครั้งก่อนที่จะเกิดการพิบัติขึ้น ซึ่งช่วงแรกค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวดิ่ง เนื่องจากในช่วงแรกหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งมีค่าเป็นหน่วยแรงดิ่ง และก่อนที่จะเกิดการพิบัติหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งจะมีค่ามากกว่าค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ ดังนั้นค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจึงถูกแทนที่ด้วยหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ

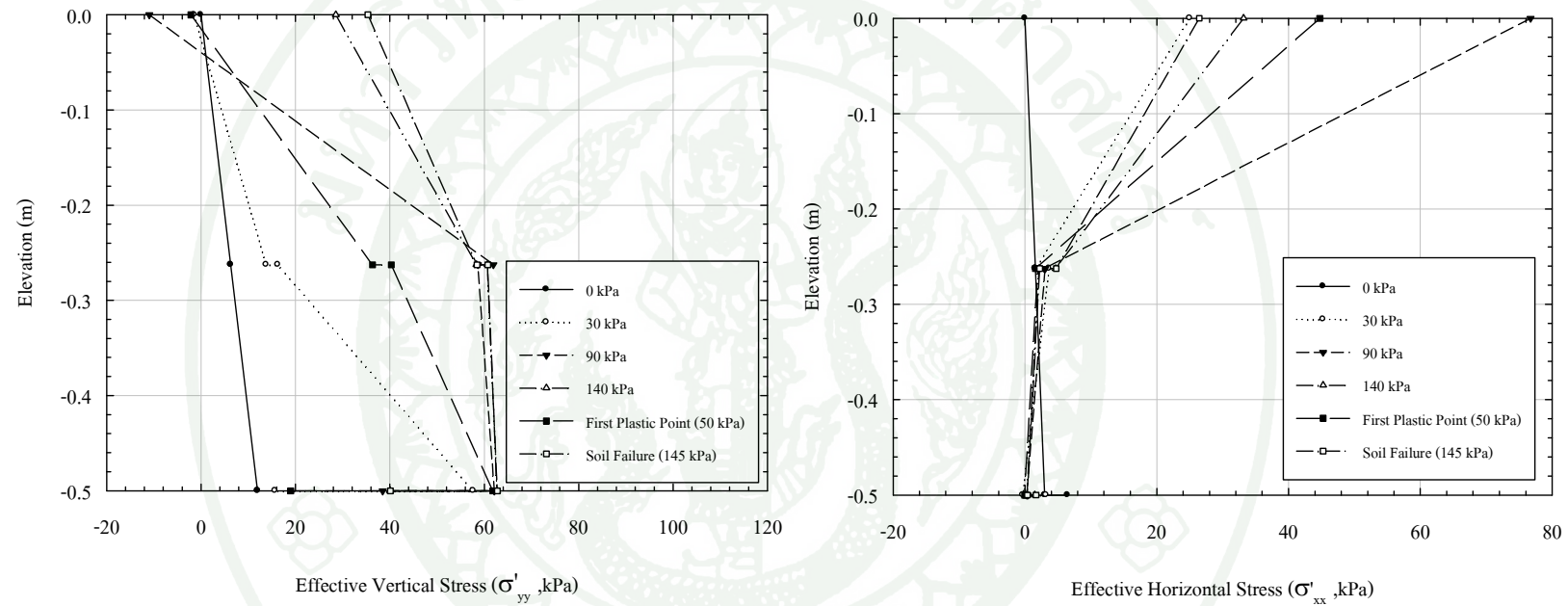
ที่บริเวณกึ่งกลางของโครงสร้างชั้นทาง ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำจากนั้นจึงมีค่าลดลงเล็กน้อยก่อนเกิดการพิบัติ ซึ่งค่าของหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวราบที่เพิ่มขึ้นตามขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำ ส่วนค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำเช่นกัน แต่จะเพิ่มขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก ซึ่งค่าของหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวราบ

ที่บริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทาง ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง ที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำ และสำหรับค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรอง เมื่อขนาดของน้ำหนักที่กระทำมีค่าเพิ่มขึ้นค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีค่าลดลงจากค่าเริ่มต้นและจะลดลงจนกระทั่งเกือบจะมีค่าเป็น 0 และมีค่าเพิ่มขึ้นก่อนที่จะเกิดการพิบัติขึ้น

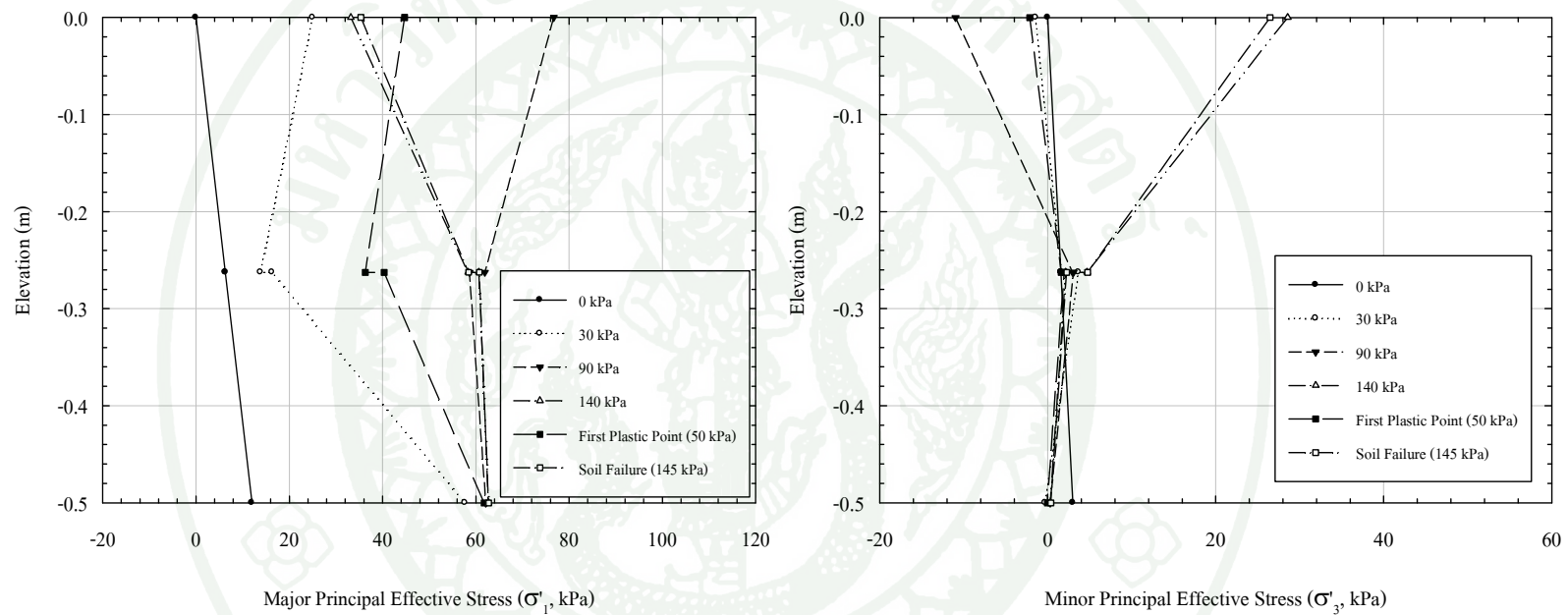
โดยพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้าง
ชั้นทาง Grade A บนชั้นฐานรากดินอ่อน เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.50 เมตร กรณีหน่วย
แรงประสิทธิภาพในแนวดิ่ง และหน่วยแรงประสิทธิภาพในแนวราบดังแสดงในภาพที่ 63 และกรณี
หน่วยแรงประสิทธิภาพหลัก และหน่วยแรงประสิทธิภาพรองดังแสดงในภาพที่ 64

ในกรณีของชั้นฐานรากดินแข็ง (E_1/E_2 มีค่าเท่ากับ 0.2) ค่าอัตราส่วน
Elastic Modulus ระหว่างโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานรากมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.2 ดังนั้น
โครงสร้างชั้นทางและดินฐานรากจึงมีลักษณะเสมือนเป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ค่า
หน่วยแรงประสิทธิภาพหลักที่บริเวณด้านบน กึ่งกลาง และด้านล่างของโครงสร้างชั้นทางจะเพิ่มขึ้น
ตามขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำ ซึ่งมีทิศตามหน่วยแรงในแนวดิ่ง ส่วนค่าหน่วยแรงประสิทธิภาพ
รองที่บริเวณด้านบนและด้านล่างของโครงสร้างชั้นทางจะมีค่าลดลงเมื่อขนาดของหน่วยแรงที่มา
กระทำมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าเพิ่มขึ้นก่อนที่จะเกิดการพิบัติ ขณะที่บริเวณกึ่งกลางของโครงสร้างชั้น
ทางค่าหน่วยแรงประสิทธิภาพรองจะค่อยๆมีค่าเพิ่มขึ้น โดยพฤติกรรมของค่าหน่วยแรงประสิทธิภาพ
รองจะเป็นไปตามค่าหน่วยแรงประสิทธิภาพในแนวราบ

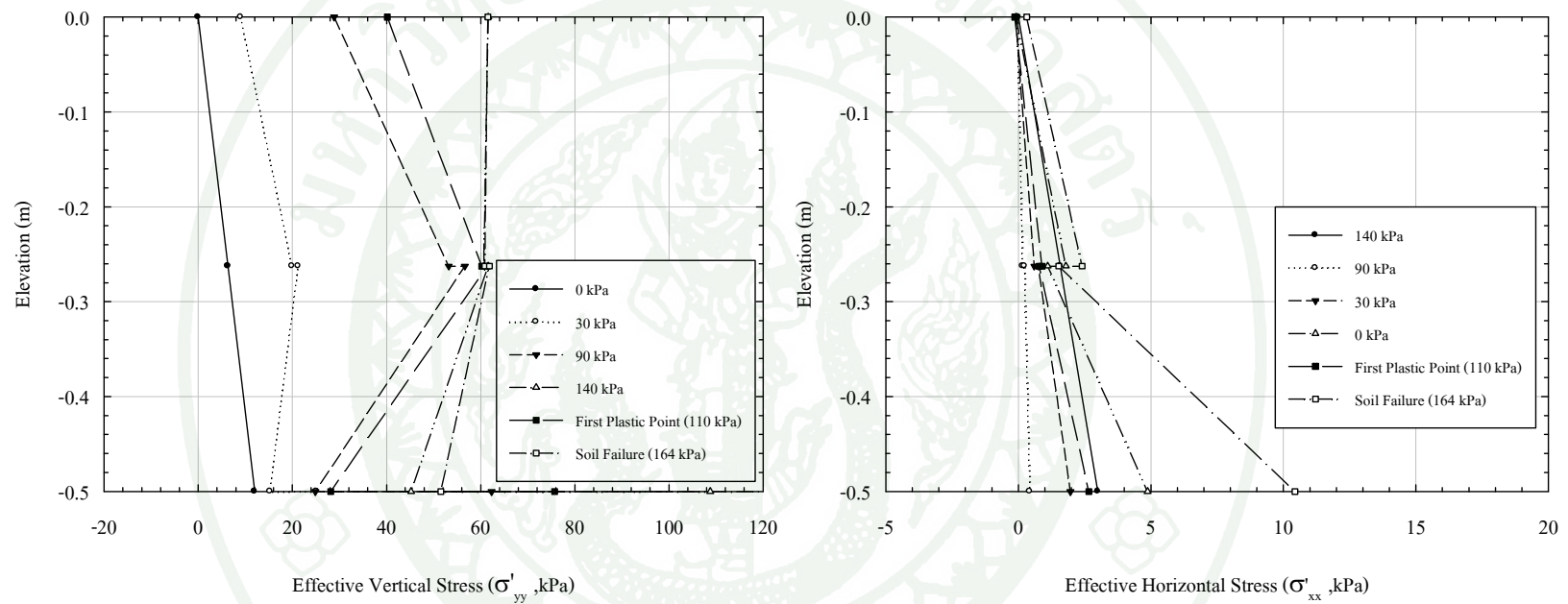
โดยพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้าง
ชั้นทาง Grade A บนชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.50 เมตร กรณีหน่วย
แรงประสิทธิภาพในแนวดิ่ง และหน่วยแรงประสิทธิภาพในแนวราบ ดังแสดงในภาพที่ 65 และกรณี
หน่วยแรงประสิทธิภาพหลัก และหน่วยแรงประสิทธิภาพรอง ดังแสดงในภาพที่ 66



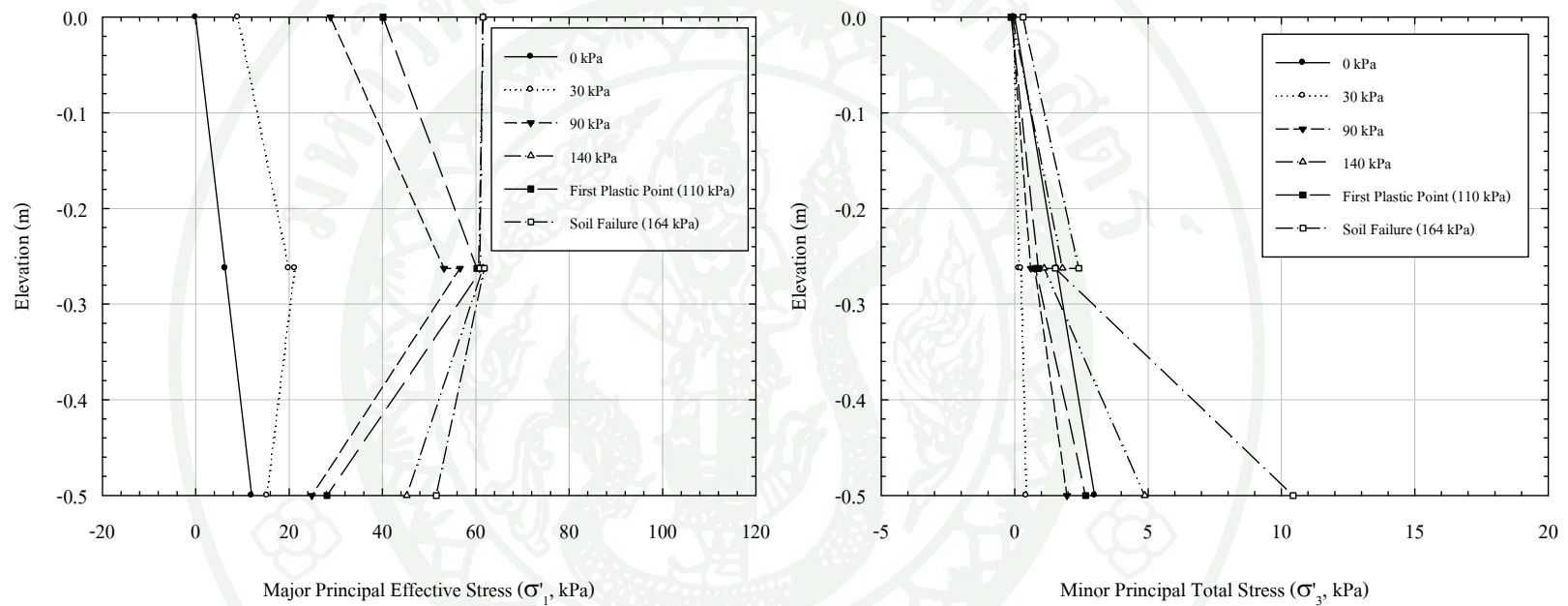
ภาพที่ 63 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย (0.50 เมตร) กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ



ภาพที่ 64 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย (0.50 เมตร) กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง



ภาพที่ 65 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 0.2 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาแน่น (0.50 เมตร) กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ



ภาพที่ 66 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 0.2 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย (0.50 เมตร) กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง

ในการพิจารณาเส้นทางเดินหน่วยแรงเพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการ
 พับระหว่างโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้น
 ฐานรากดินแข็ง สำหรับกรณีที่โครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงต่ำ และโครงสร้างชั้นทางมีความ
 หนาแน่น จะพิจารณา ๓ ขนาดของน้ำหนักที่กระทำมีค่าดังแสดงในตารางที่ 35

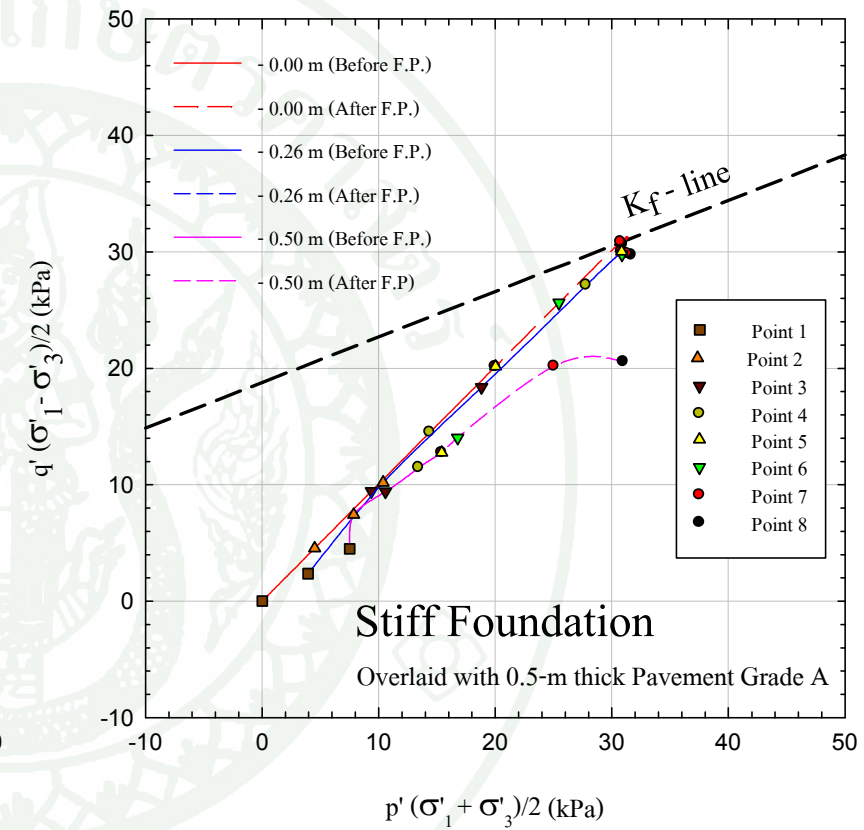
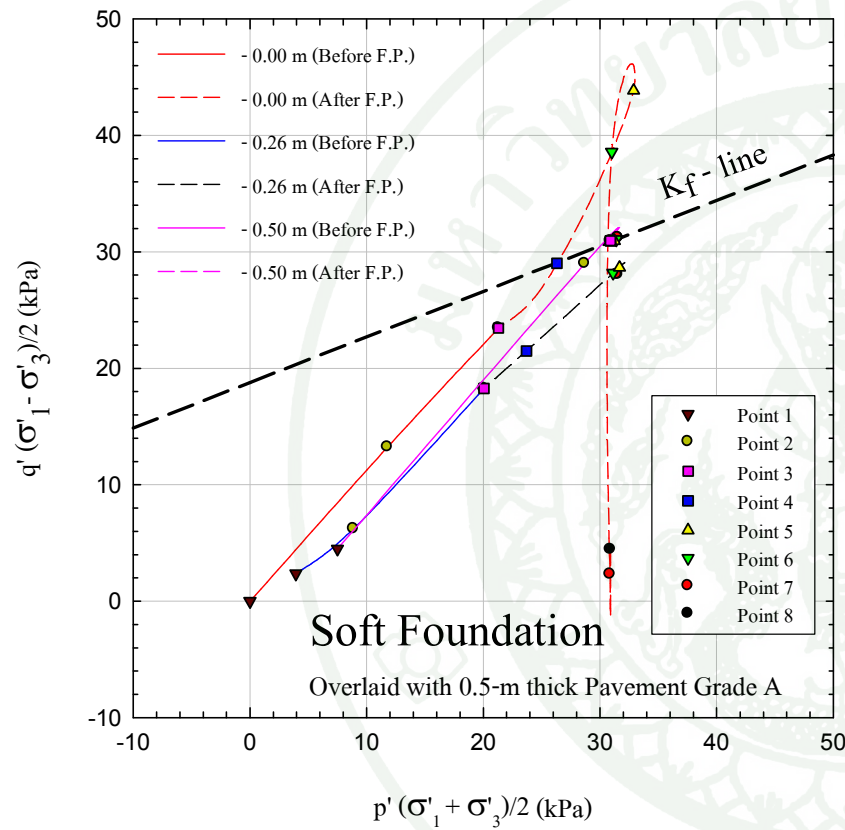
ตารางที่ 35 แสดงค่าน้ำหนักที่กระทำกับโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้น
 ฐานรากดินแข็ง กรณีวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A และโครงสร้างชั้นทางมีความ
 หนา 0.50 เมตร

Point	Load (kPa)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Soft Foundation	0	30	50 (F.P)	60	90	120	140	145 (S.F.)
Stiff Foundation	0	30	60	90	110 (F.P.)	120	140	164 (S.F.)

Remark F.P = First Plastic Point S.F. = Soil Failure

สำหรับโครงสร้างชั้นทางที่มีความหนาแน่น จะเกิดการพับใน
 รูปแบบ A ซึ่งกรณีของชั้นฐานรากดินอ่อนจะพบว่าที่ระดับความลึก 0.00 เมตร และ - 0.50 เมตร จะ
 เกิดการพับขึ้นพร้อมๆกัน โดยที่พบว่า ณ บริเวณกึ่งกลางของโครงสร้างชั้นทาง การพับจะไม่
 เกิดขึ้น ซึ่งแตกต่างกับในกรณีของชั้นฐานรากดินแข็งที่เราจะพบว่า การพับจะเกิดบริเวณ
 ด้านบนของโครงสร้างชั้นทางที่ระดับ 0.00 เมตร เท่านั้นเนื่องจากเมื่อพิจารณาเส้นทางเดินของ
 หน่วยแรงที่ระดับ - 0.26 เมตร และ - 0.50 เมตร จะพบว่าเส้นทางเดินหน่วยแรงจะไม่แตะกับเส้น
 K_f-line

โดยเส้นทางเดินหน่วยแรงของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่
 บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง ที่ระดับความลึก 0.00 เมตร, - 0.26 เมตร และ - 0.50
 เมตร จากด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง ดังแสดงในภาพที่ 67



ภาพที่ 67 แสดงเส้นทางดินหน่วยแรงของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10 และ 0.2 เท่าตามลำดับ) ที่ระดับความลึกต่างๆ กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาเท่ากับ 0.50 เมตร

2.4.1.2 โครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาปานกลางถึงสูง (1.0 - 4.0 เมตร)

กรณีของชั้นฐานรากดินอ่อน สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทางที่มีค่าความหนาปานกลาง และมีความแข็งแรงต่ำ (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10 เท่า) ที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทางค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีเพิ่มขึ้นตามขนาดของน้ำหนักรถที่มากกระทำ โดยที่ในช่วงแรกค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวราบซึ่งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายหลังจากที่มีน้ำหนักรถกระทำ และค่อยๆมีค่าลดลงในเวลาต่อมา ขณะเดียวกันค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งจะค่อยๆมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของน้ำหนักรถที่มากกระทำจนกระทั่งมีค่ามากกว่าค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ ดังนั้นค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักก่อนที่จะเกิดการพิบัติขึ้นจึงมีค่าทิศตามหน่วยแรงในแนวดิ่ง ส่วนค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทางนั้นเมื่อน้ำหนักรถกระทำจะมีค่าลงจนกระทั่งมีค่าเป็นหน่วยแรงดิ่งและจะค่อยๆมีค่าเพิ่มขึ้นก่อนที่จะเกิดการพิบัติ โดยในช่วงแรกนั้นค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวดิ่ง และจะมีค่าตามหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบก่อนที่จะเกิดการพิบัติ

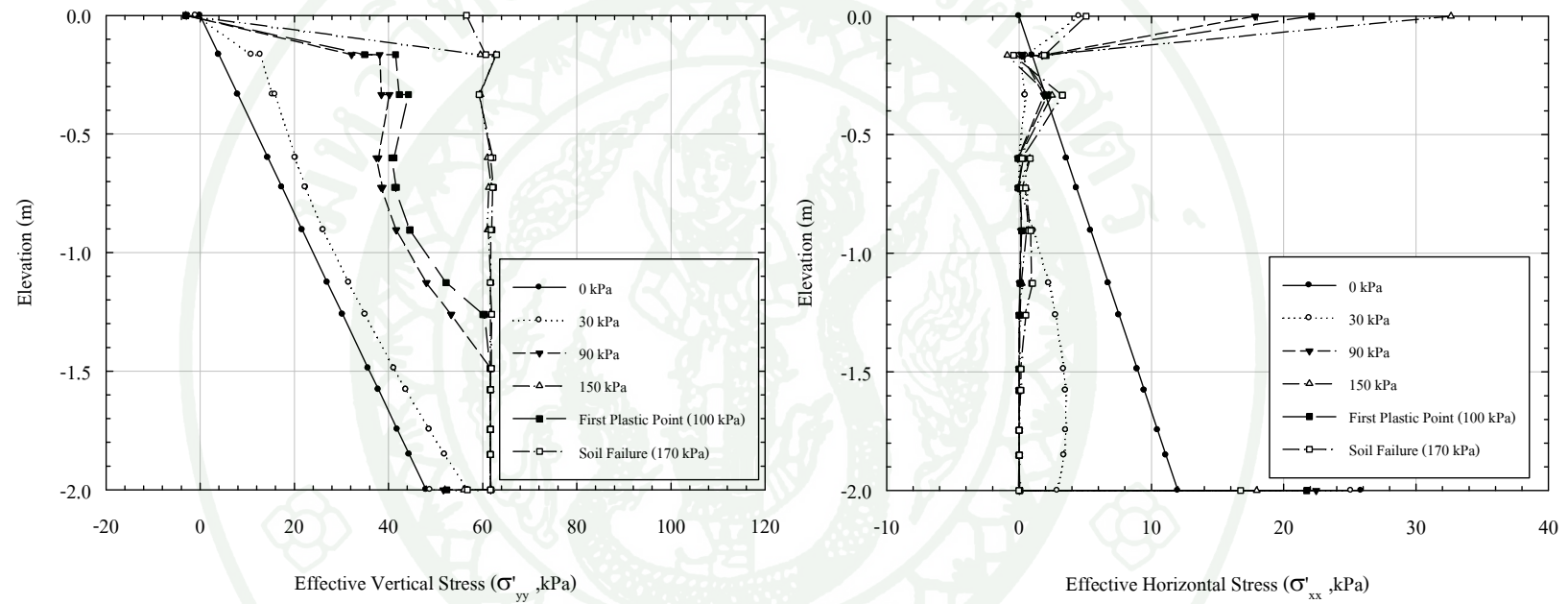
ที่บริเวณความลึก - 0.72 เมตร, - 1.26 เมตร และที่บริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทาง ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของน้ำหนักรถที่มากกระทำ โดยที่ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีค่าตามหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง ส่วนค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีค่าค่อยๆมีค่าลดลงจากค่าเริ่มต้น เมื่อขนาดของน้ำหนักรถที่มากกระทำกับโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้น และที่บริเวณกึ่งกลางของโครงสร้างชั้นทางค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยก่อนที่จะเกิดการพิบัติ โดยที่ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวราบ

โดยพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A บนชั้นฐานรากดินอ่อน เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.00 เมตร กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ ดังแสดงในภาพที่ 68 และกรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง ดังแสดงในภาพที่ 69

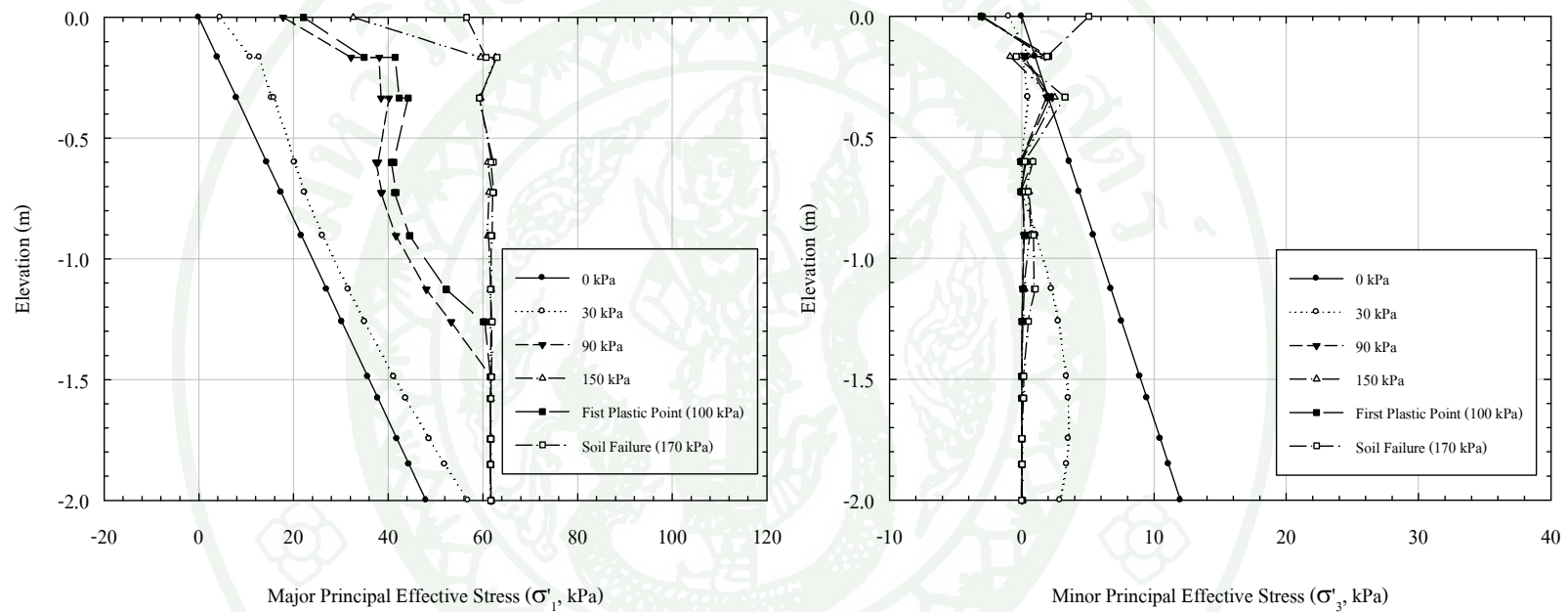
กรณีของชั้นฐานรากดินแข็ง สำหรับโครงสร้างชั้นทางที่มีค่าความหนาปานกลาง และมีความแข็งแรงต่ำ (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 0.2 เท่า) เมื่อค่าน้ำหนักรถที่มากกระทำมีค่าเพิ่มมากขึ้น พบว่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกระดับความลึก โดย

บริเวณกึ่งกลางของชั้นฐานรากจะพบการเพิ่มขึ้นของค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักมากที่สุด และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีค่าลดลงเมื่อขนาดของน้ำหนักที่มากระทำกับโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันกับกรณีของชั้นฐานรากดินอ่อน เพียงแต่จะไม่ลดลงจนมีค่าเป็นหน่วยแรงดึง และลักษณะของการลดลงของค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะช้ากว่าในกรณีของชั้นฐานรากดินอ่อน โดยค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวดิ่ง ส่วนค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวราบ

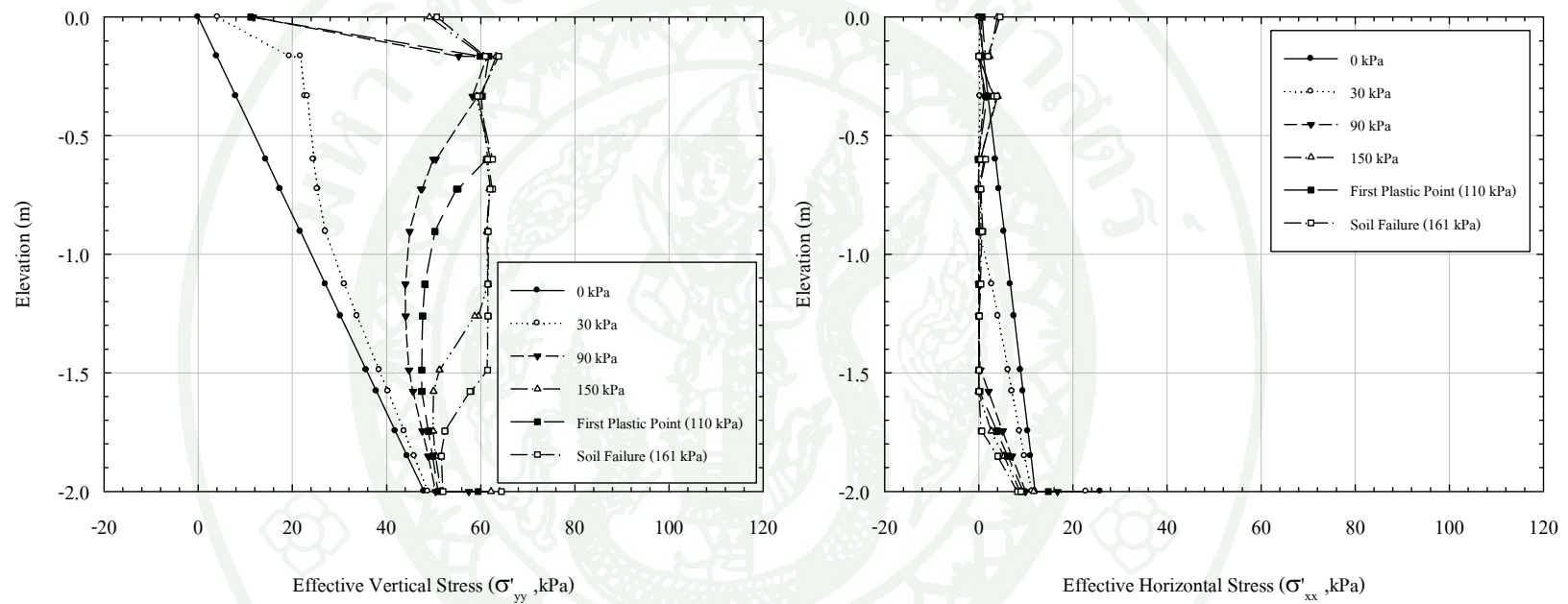
โดยพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A บนชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.00 เมตร กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ ดังแสดงในภาพที่ 70 และกรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง ดังแสดงในภาพที่ 71



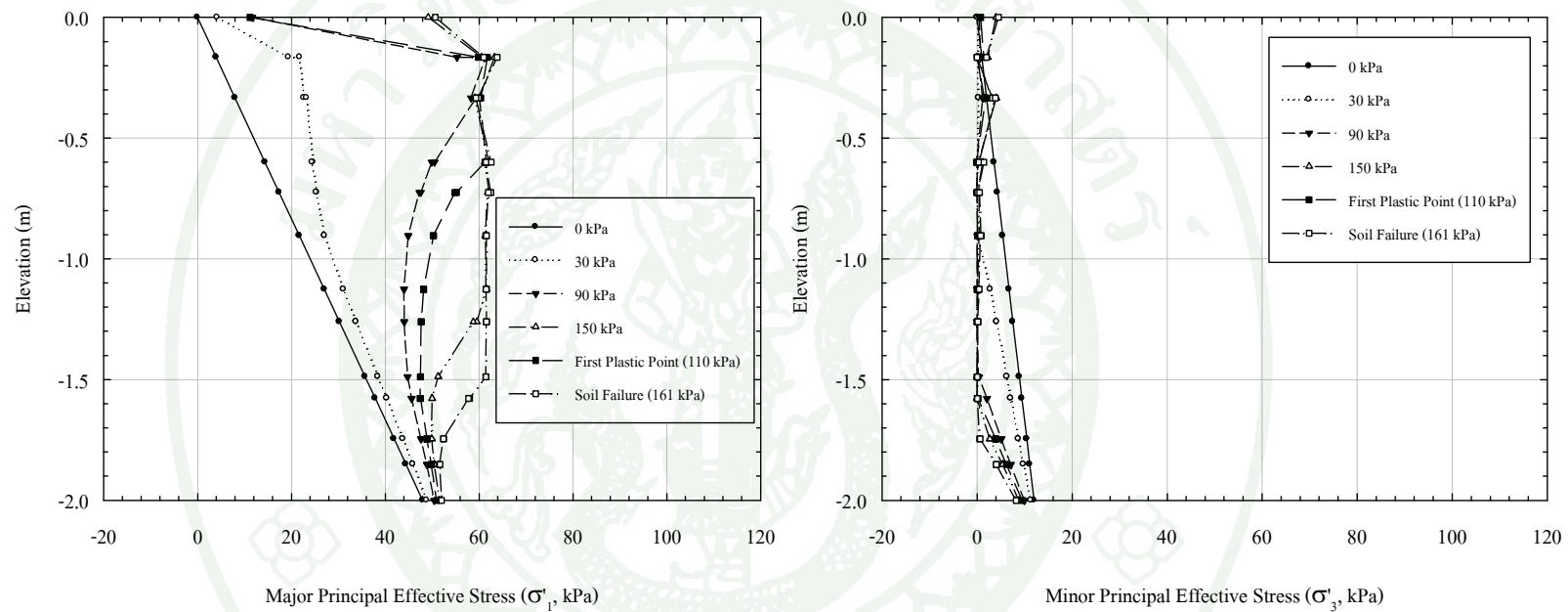
ภาพที่ 68 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง (1.00 - 4.00 เมตร) กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ



ภาพที่ 69 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง (1.00 - 4.00 เมตร) กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง



ภาพที่ 70 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 0.2 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง (1.00 - 4.00 เมตร) กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวนอน



ภาพที่ 71 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 0.2 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง (1.00 - 4.00 เมตร) กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง

ในการพิจารณาเส้นทางเดินหน่วยแรงเพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการพิบัติระหว่างโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง สำหรับกรณีที่วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงต่ำ และโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง จะพิจารณา ขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำมีค่าดังแสดงในตารางที่ 36

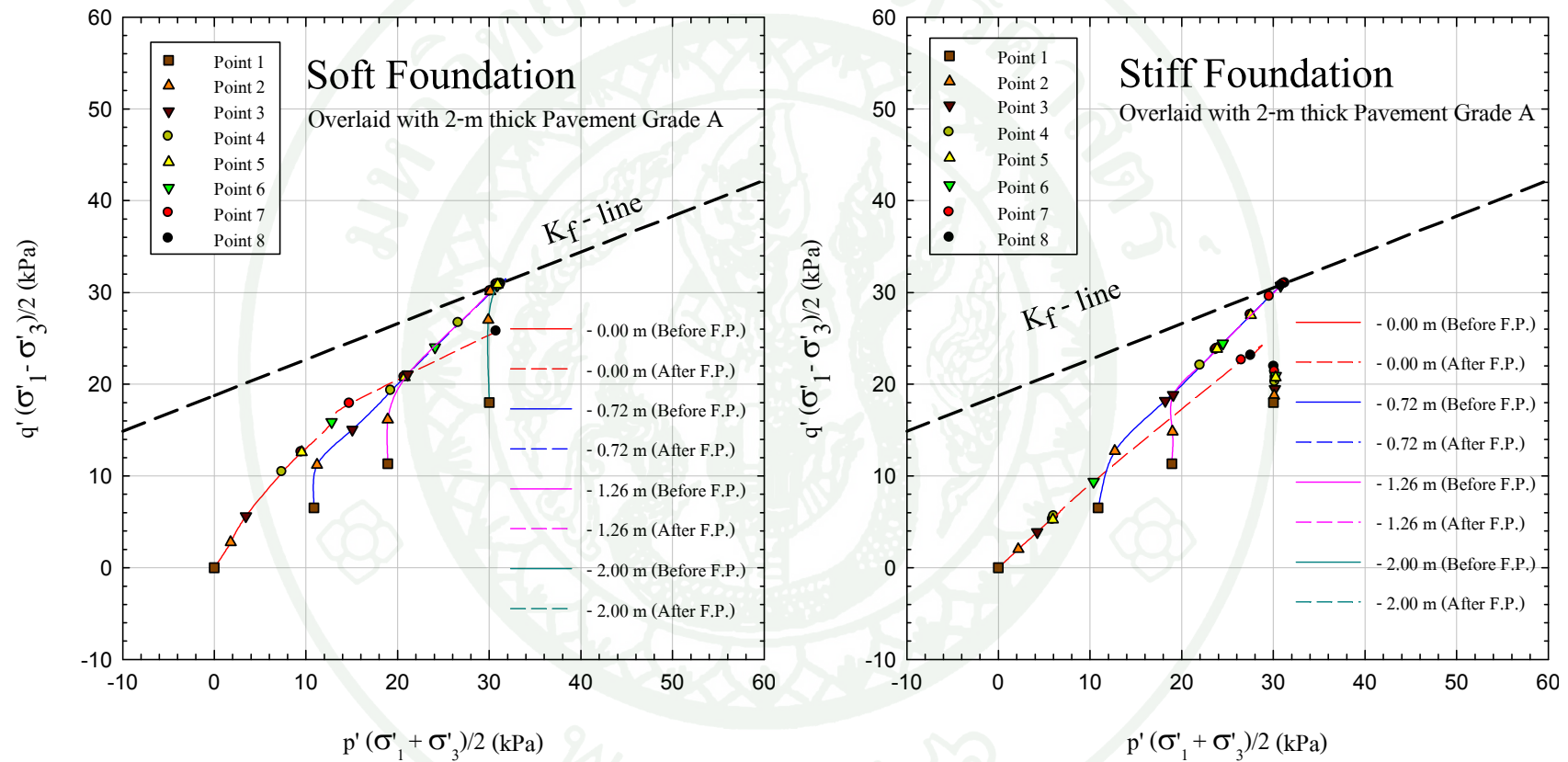
ตารางที่ 36 แสดงค่าน้ำหนักที่มากกระทำกับโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A และโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.00 เมตร

Point	Load (kPa)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Soft Foundation	0	30	60	90	100 (F.P.)	120	150	170 (S.F.)
Stiff Foundation	0	30	60	90	110 (F.P)	120	150	161 (S.F.)

Remark: F.P. = First Plastic Point S.F. = Soil Failure

เมื่อพิจารณาเส้นทางเดินหน่วยแรงที่เกิดขึ้น พบว่ากรณีของชั้นฐานรากดินอ่อนการพิบัติจะเกิดขึ้นจากบริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทางขึ้นมาจนกระทั่งเกือบถึงที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง โดยพบว่าในช่วงแรกเมื่อน้ำหนักที่มากกระทำมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความชันของเส้นทางเดินหน่วยแรงที่ระดับความลึก - 0.72 เมตร, - 1.26 เมตร และ - 2.00 เมตรจะมีค่ามากซึ่งแสดงถึงการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก ก่อนที่ค่าความชันของเส้นทางเดินหน่วยแรงจะมีค่าลดลงจนและมีค่าคงที่จนกระทั่งไปแตะเส้น K_1 -line ขณะที่ในกรณีของชั้นฐานรากดินแข็งการพิบัติจะเกิดขึ้นที่บริเวณกึ่งกลางของโครงสร้างชั้นทางเท่านั้น เนื่องจากเมื่อพิจารณาที่ระดับความลึก 0.00 เมตร จะพบว่าค่าความชันของเส้นทางเดินหน่วยแรงมีค่าน้อย ส่วนที่ระดับความลึก - 2.00 เมตร พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าหน่วยแรงที่บริเวณนี้จะมีค่าน้อยมาก

โดยเส้นทางเดินหน่วยแรงของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง ที่ระดับความลึก 0.00 เมตร, - 0.72 เมตร, - 1.26 เมตร และ - 2.00 เมตร จากด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง ดังแสดงในภาพที่ 72



ภาพที่ 72 แสดงเส้นทางดินหน่วยแรงของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10 และ 0.2 เท่าตามลำดับ) ที่ระดับความลึกต่างๆ กรณีโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาเท่ากับ 2.00 เมตร

2.4.2 วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงปานกลาง (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade B และ Grade C)

2.4.2.1 โครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย (0.50 เมตร)

กรณีของชั้นฐานรากดินอ่อน สำหรับโครงสร้างชั้นทางที่มีค่าความหนาน้อย และมีค่าความแข็งแรงปานกลาง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 มีค่าอยู่ระหว่าง 100 ถึง 1,000 เท่า) เมื่อพิจารณาค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก ที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทางจะพบว่าเมื่อขนาดของน้ำหนักรวมที่กระทำกับโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้นค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะทิศตามหน่วยแรงในแนวราบ ส่วนค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ โดยที่ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวดิ่ง

ที่บริเวณกึ่งกลางกลางของโครงสร้างชั้นทางเมื่อขนาดของน้ำหนักรวมที่กระทำมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักและค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีค่าเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะเพิ่มขึ้นตามหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองซึ่งมีค่าตามหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ

ที่บริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทางจะพบว่าเมื่อขนาดของน้ำหนักรวมที่กระทำมีค่าเพิ่มขึ้นค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแต่ถ้ามีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดของน้ำหนักรวมที่กระทำกับโครงสร้างชั้นทาง โดยที่ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะทิศตามหน่วยแรงในแนวดิ่ง และสำหรับค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรอง เมื่อขนาดของน้ำหนักรวมที่กระทำมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีค่าลดลงจากค่าเริ่มต้นจนกระทั่งเกือบมีค่าเท่ากับ 0 แต่จะไม่ลดลงจนมีค่าเป็นหน่วยแรงดิ่ง โดยที่ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะทิศตามหน่วยแรงในแนวราบ

โดยพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C บนชั้นฐานรากดินอ่อน เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.50 เมตร กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ ดังแสดงในภาพที่ 73 และกรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง ดังแสดงในภาพที่ 74

กรณีของชั้นฐานรากดินแข็ง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทางที่มีค่าความหนาแน่น และมีค่าความแข็งแรงปานกลาง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 อยู่ระหว่าง 2 ถึง 20 เท่า) สำหรับค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก พบว่าเมื่อค่าน้ำหนักที่มากกระทำกับโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้นค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะค่อยๆมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าลดลงก่อนที่จะเกิดการพิบัติ โดยในช่วงแรกค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวราบ เนื่องจากในช่วงแรกค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วก่อนที่จะเริ่มมีค่าลดลง ขณะที่ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งจะค่อยๆมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่ามากกว่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ จึงทำให้ก่อนที่จะเกิดการพิบัติค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักมีค่าตามหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง ส่วนค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองเมื่อขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะลดลงจนมีค่าเป็นหน่วยแรงดึง แล้วจึงเพิ่มขึ้นก่อนที่จะเกิดการพิบัติ โดยช่วงแรกที่เกิดการลดลงของค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะทิศตามหน่วยแรงในแนวดิ่ง และก่อนที่จะเกิดการพิบัติค่าของหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบจะมีค่ามากกว่าค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง จึงทำให้ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองก่อนที่จะเกิดการพิบัติมีค่าตามค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ

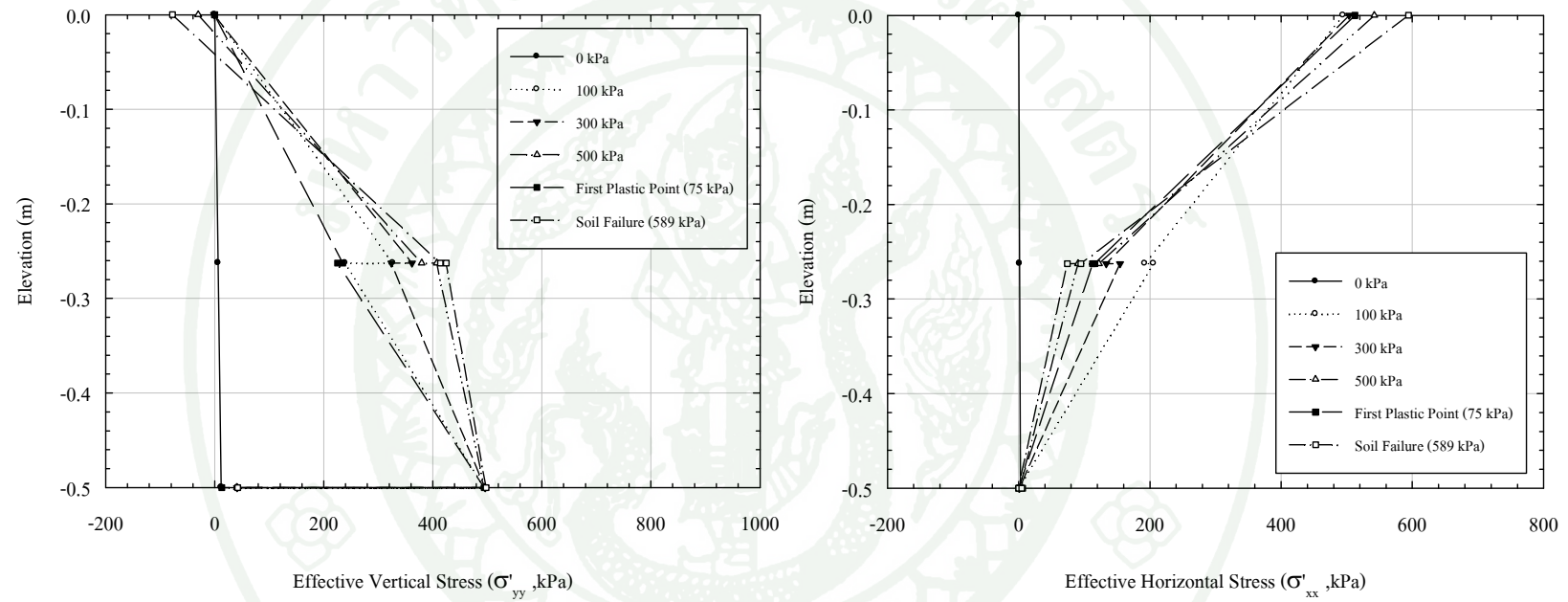
ที่บริเวณกึ่งกลางของโครงสร้างชั้นทางจะมีการเพิ่มขึ้นของค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักช้าที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับที่บริเวณด้านบนและด้านล่างของโครงสร้างชั้นทาง ส่วนค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่การเพิ่มขึ้นของค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองนั้นจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก โดยค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะทิศตามหน่วยแรงในแนวดิ่ง และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะทิศตามหน่วยแรงในแนวราบ

ที่บริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทางค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองเมื่อขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีค่าลดลงเรื่อยๆจนเกือบจะมีค่าเท่ากับ 0 โดยค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวดิ่ง และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีค่าทิศตามหน่วยแรงในแนวราบ

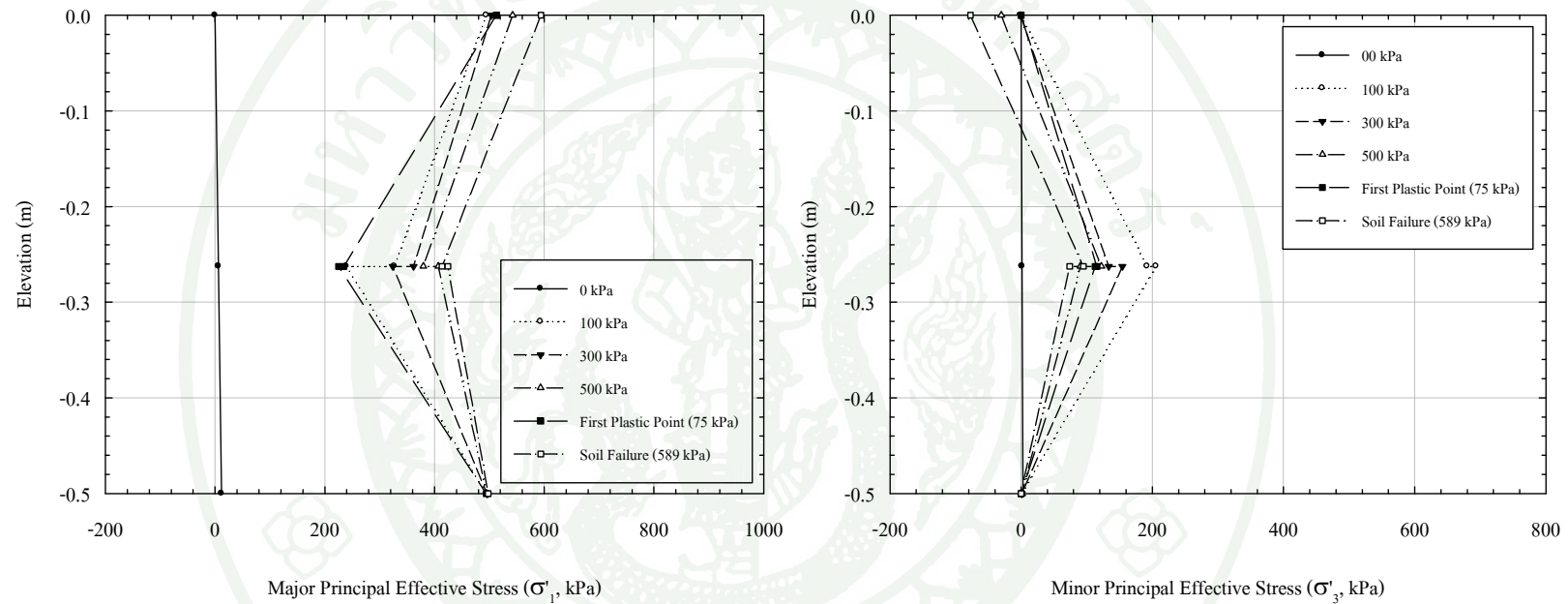
โดยพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C บนชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.50 เมตร กรณีหน่วย

แรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ ดังแสดงในภาพที่ 75 และกรณี
หน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง ดังแสดงในภาพที่ 76

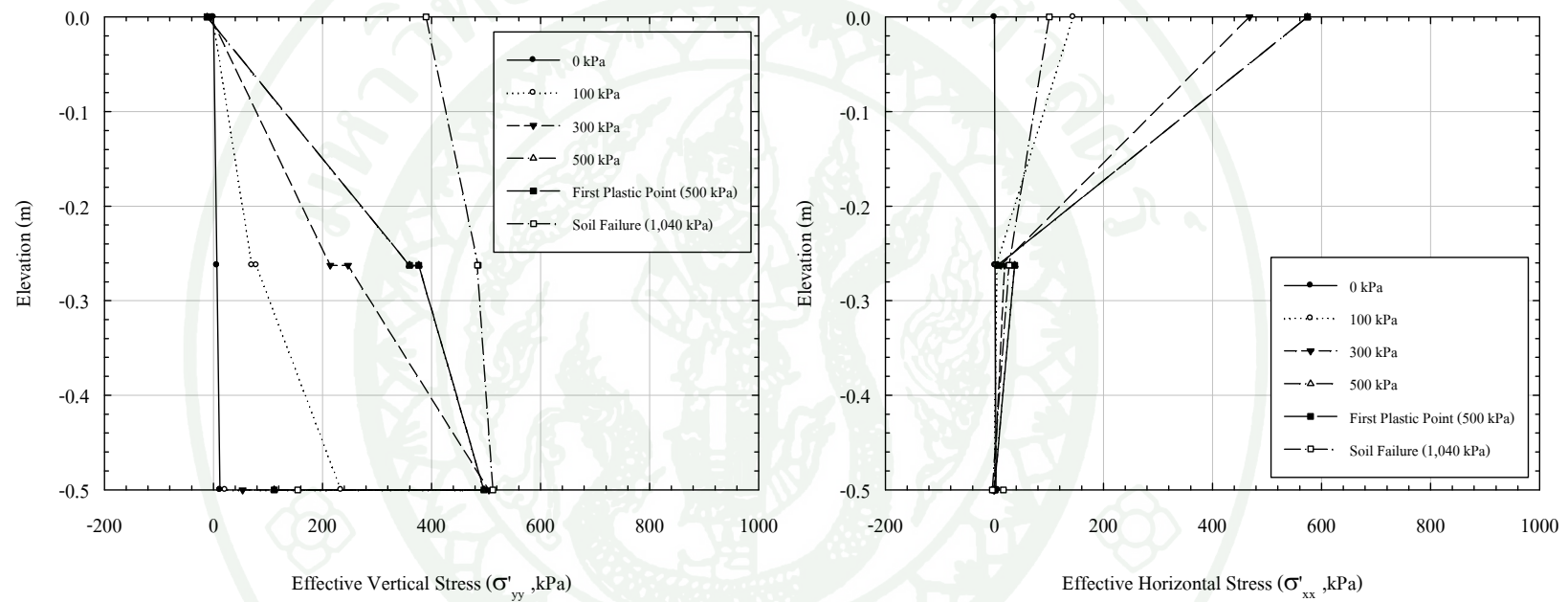




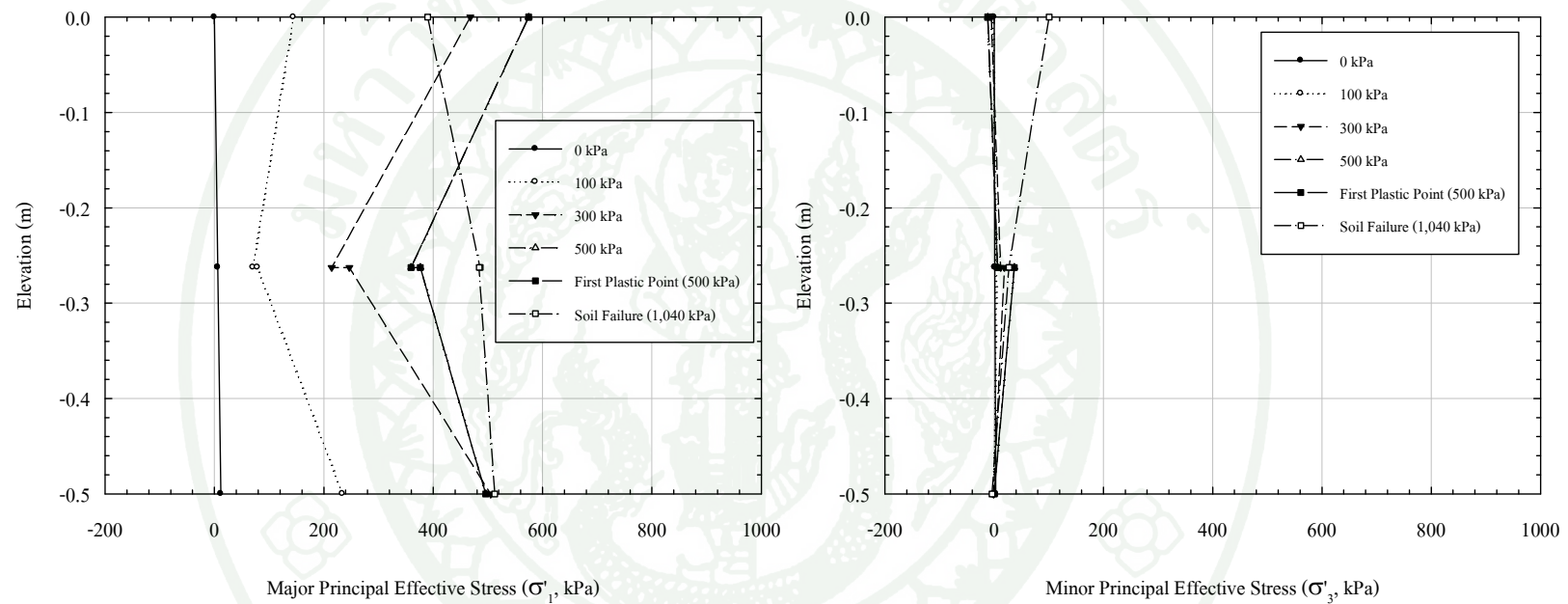
ภาพที่ 73 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 1,000 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย (0.50 เมตร) กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ



ภาพที่ 74 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 1,000 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย (0.50 เมตร) กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง



ภาพที่ 75 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 20 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาแน่น (0.50 เมตร) กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ



ภาพที่ 76 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 20 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย (0.50 เมตร) กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง

ในการพิจารณาเส้นทางเดินหน่วยแรงเพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการ
พิบัติระหว่างโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้น
ฐานรากดินแข็ง สำหรับกรณีวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงปานกลาง และโครงสร้างชั้น
ทางมีความหนาน้อย จะพิจารณา ณ ขนาดของน้ำหนักที่กระทำมีค่าดังแสดงในตารางที่ 37

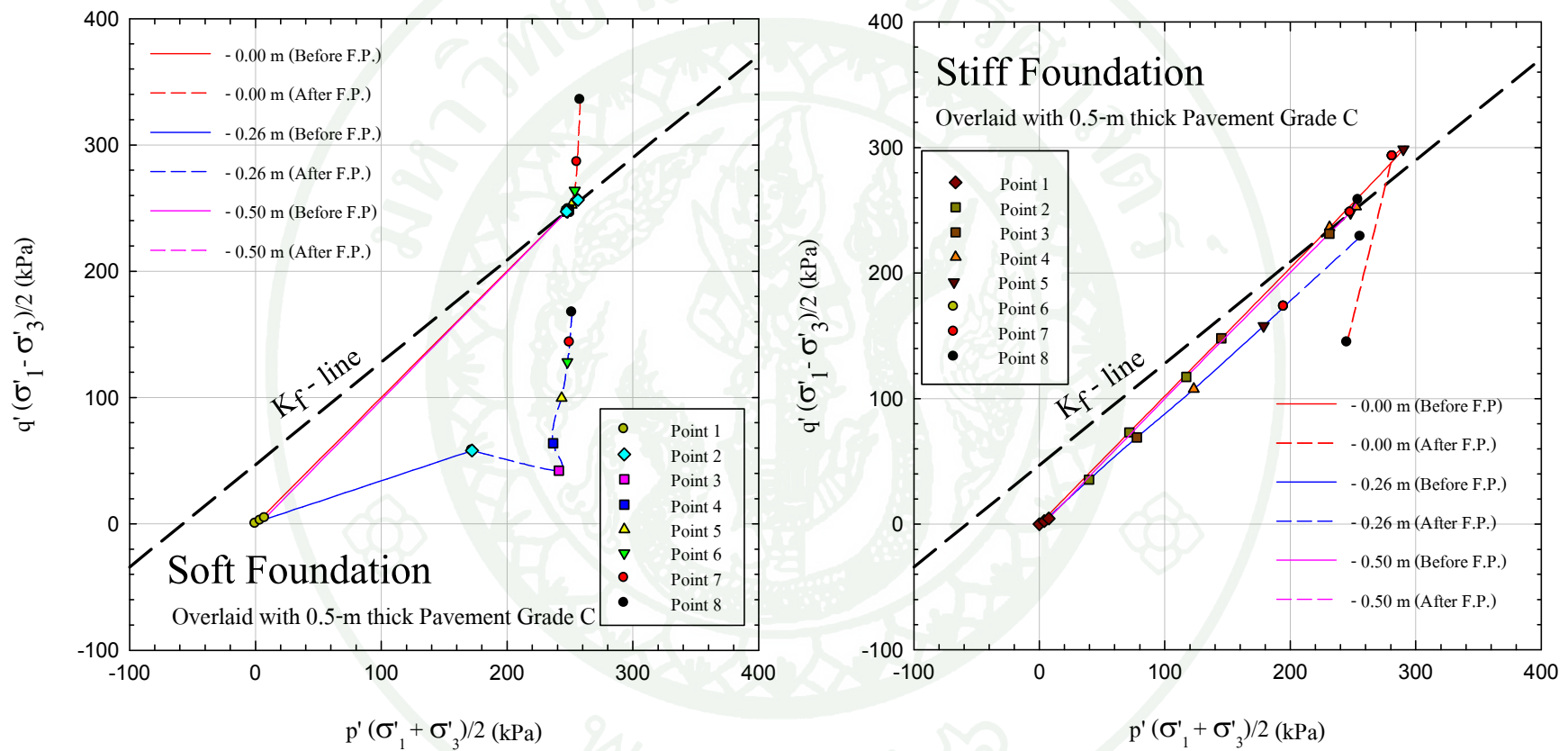
ตารางที่ 37 แสดงค่าน้ำหนักที่กระทำกับโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้น
ฐานรากดินแข็ง กรณีวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C และโครงสร้างชั้นทางมีความ
หนา 0.50 เมตร

	Load (kPa)							
Point	1	2	3	4	5	6	7	8
Soft Foundation	0	75 (F.P.)	100	200	300	400	500	589 (S.F.)
Stiff Foundation	0	100	200	300	400	500	500 (F.P.)	1040 (S.F.)

Remark F.P = First Plastic Point S.F. = Soil Failure

เมื่อพิจารณาเส้นทางเดินของหน่วยแรงสำหรับกรณีของวัสดุ
โครงสร้างชั้นทางซึ่งมีความแข็งแรงปานกลาง โดยเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บน
ชั้นฐานรากดินอ่อนและชั้นฐานรากดินแข็ง จะพบว่ากรณีชั้นฐานรากดินอ่อนที่ระดับความลึก 0.00
เมตร และ - 0.50 เมตร เมื่อค่าน้ำหนักที่กระทำมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเส้นทางเดินหน่วยแรงก็
จะไปแตะเส้น K_f -line ทันที ซึ่งทำให้เกิดการพิบัติขึ้นพร้อมๆกันทั้งที่บริเวณด้านบนและด้านล่าง
ของโครงสร้างชั้นทาง โดยที่การพิบัติจะไม่เกิดขึ้นที่บริเวณกึ่งกลางของโครงสร้างชั้นทางและ
สำหรับกรณีของชั้นฐานรากดินแข็งมีพฤติกรรมเป็นเช่นเดียวกันกับชั้นฐานรากดินอ่อน แต่ในชั้น
ฐานรากดินแข็งจะต้องการน้ำหนักที่ทำให้เกิดการพิบัติที่มากกว่ากรณีของชั้นฐานรากดินอ่อน และ
กรณีของชั้นฐานรากดินแข็งมีโอกาที่จะเกิดการพิบัติบริเวณกึ่งกลางของโครงสร้างชั้นทางที่
มากกว่ากรณีของชั้นฐานรากดินอ่อน

โดยเส้นทางเดินหน่วยแรงของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่
บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง ที่ระดับความลึก 0.00 เมตร, - 0.26 เมตร และ - 0.50
เมตร จากด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง ดังแสดงในภาพที่ 77



ภาพที่ 77 แสดงเส้นทางดินหน่วยแรงของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 1,000 และ 20 เท่าตามลำดับ) ที่ระดับความลึกต่างๆ กรณีโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาเท่ากับ 0.50 เมตร

2.4.2.2 โครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาปานกลางถึงสูง (1.0 - 4.0 เมตร)

กรณีของชั้นฐานรากดินอ่อน สำหรับโครงสร้างชั้นทางที่มีค่าความหนาปานกลาง และมีความแข็งแรงปานกลาง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 อยู่ระหว่าง 100 ถึง 1,000 เท่า) พบว่าค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง และที่ระดับความลึก - 0.72 เมตร จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อมี Plastic Point เกิดขึ้น ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว และจึงค่อยๆ มีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งก่อนที่จะเกิดการพิบัติ เนื่องจากในช่วงแรกค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวราบ ซึ่งค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าๆหนึ่งจากนั้นจึงมีค่าลดลง และก่อนที่จะเกิดการพิบัติค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวตั้งซึ่งค่อยๆ มีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของน้ำหนักระทำ ส่วนค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะค่อยๆ มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และมีค่าลดลงก่อนที่จะเกิดการพิบัติ โดยที่ในช่วงแรกค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวตั้ง แต่ก่อนที่จะเกิดการพิบัติค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวราบ

ที่ระดับความลึก - 1.26 เมตร และที่บริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทาง ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนไปถึงค่าๆหนึ่ง (450 kPa) ก่อนที่ในระดับความลึก - 1.26 เมตร จะมีค่าลดลงเล็กน้อย ส่วนค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีค่าลดลงจากค่าเริ่มต้นก่อนจะค่อยๆ มีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของน้ำหนักระทำ แต่ถือว่าการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก โดยค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวตั้ง และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวราบ

โดยพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C บนชั้นฐานรากดินอ่อน เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.00 เมตร กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ ดังแสดงในภาพที่ 78 และกรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง ดังแสดงในภาพที่ 79

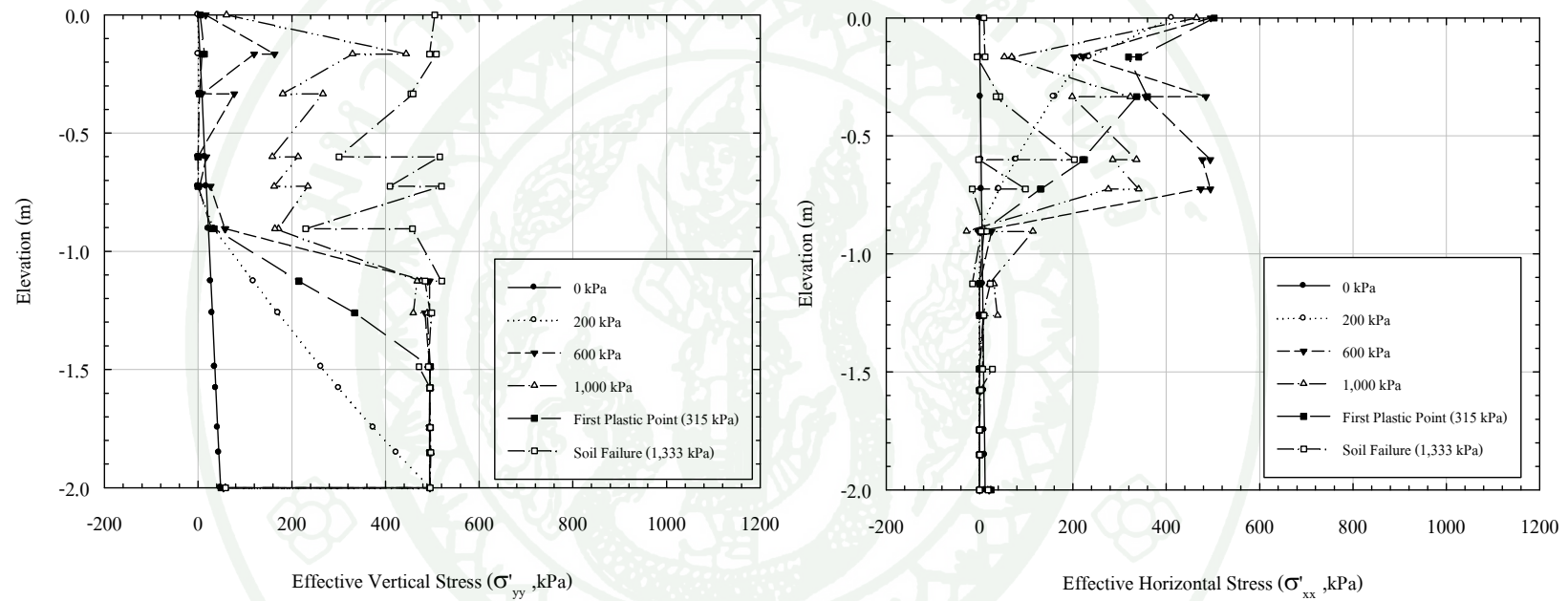
กรณีของชั้นฐานรากดินแข็ง สำหรับโครงสร้างชั้นทางที่มีค่าความหนาปานกลาง และมีความแข็งแรงปานกลาง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 อยู่ระหว่าง 2 ถึง 20 เท่า) เมื่อน้ำหนักระทำกับโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้น ที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทางค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆก่อนที่จะมีค่าลดลงเล็กน้อย และมีค่าเพิ่มขึ้นก่อนที่จะเกิดการ

พิบัติ โดยที่ในช่วงแรกค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวราบ และก่อนที่จะเกิดการพิบัติค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวตั้ง ส่วนค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองเมื่อขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำกับโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้นค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีค่าลดลงจนมีค่าเป็นหน่วยแรงดึง จากนั้นจึงมีค่าเพิ่มขึ้นจนเป็นหน่วยแรงกดก่อนที่จะเกิดการพิบัติ โดยที่ในช่วงแรกค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวตั้ง แต่ก่อนที่จะเกิดการพิบัติค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวราบ

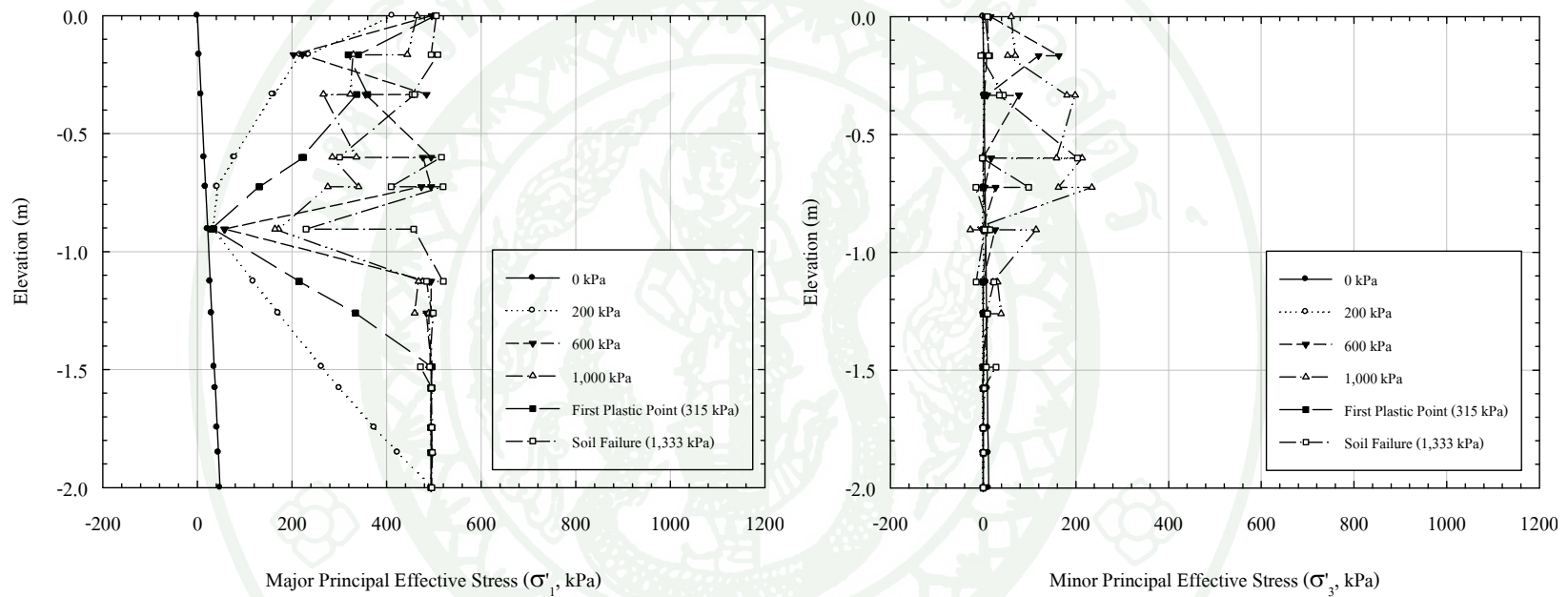
ที่ระดับความลึก - 0.72 เมตร และ - 1.26 เมตร ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำ ส่วนค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองเมื่อขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนมีค่าเป็นหน่วยแรงดึง และจะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยจนมีค่าเป็นหน่วยแรงกดก่อนที่จะเกิดการพิบัติ โดยค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีค่าทิศตามหน่วยแรงในแนวตั้ง และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวราบ

ที่บริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทาง เมื่อขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนไปหยุดอยู่ที่ค่าหนึ่ง (450 kPa) และคงที่จนกระทั่งเกิดการพิบัติ สำหรับค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองเมื่อขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีค่าลดลงจากค่าเริ่มต้น จนเกือบจะมีค่าเป็น 0 โดยค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวตั้ง และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวราบ

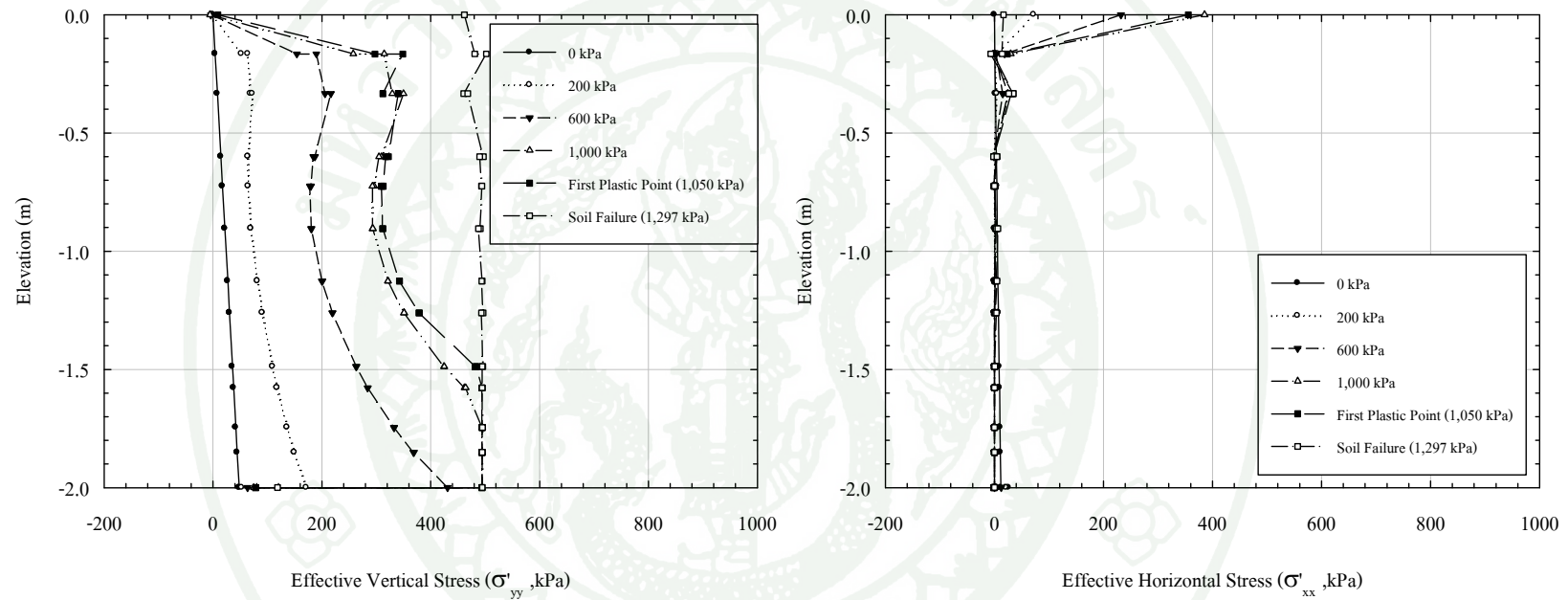
โดยพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C บนชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.00 เมตร กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ ดังแสดงในภาพที่ 80 และกรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง ดังแสดงในภาพที่ 81



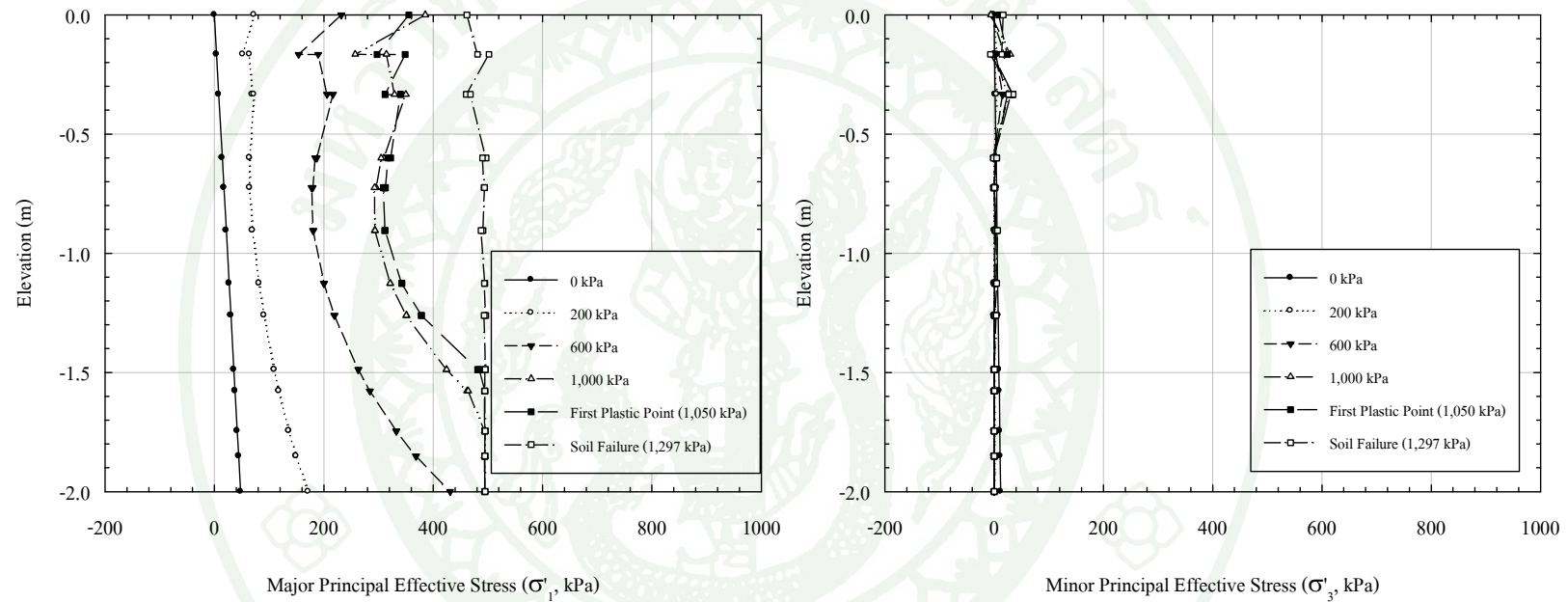
ภาพที่ 78 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 1,000 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง (1.00 - 4.00 เมตร) กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ



ภาพที่ 79 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 1,000 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง (1.00 - 4.00 เมตร) กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง



ภาพที่ 80 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 20 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง (1.00 - 4.00 เมตร) กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวนอน



ภาพที่ 81 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 20 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง (1.00 - 4.00 เมตร) กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง

ในการพิจารณาเส้นทางเดินหน่วยแรงเพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการพิบัติระหว่างโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีที่วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงปานกลาง และโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง จะพิจารณา ขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำมีค่าดังแสดงในตารางที่ 38

ตารางที่ 38 แสดงค่าน้ำหนักที่มากกระทำกับโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C และโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.00 เมตร

Point	Load (kPa)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Soft Foundation	0	200	315 (F.P.)	400	600	800	1000	1333 (S.F.)
Stiff Foundation	0	200	400	600	800	1000	1050 (F.P.)	1297 (S.F.)

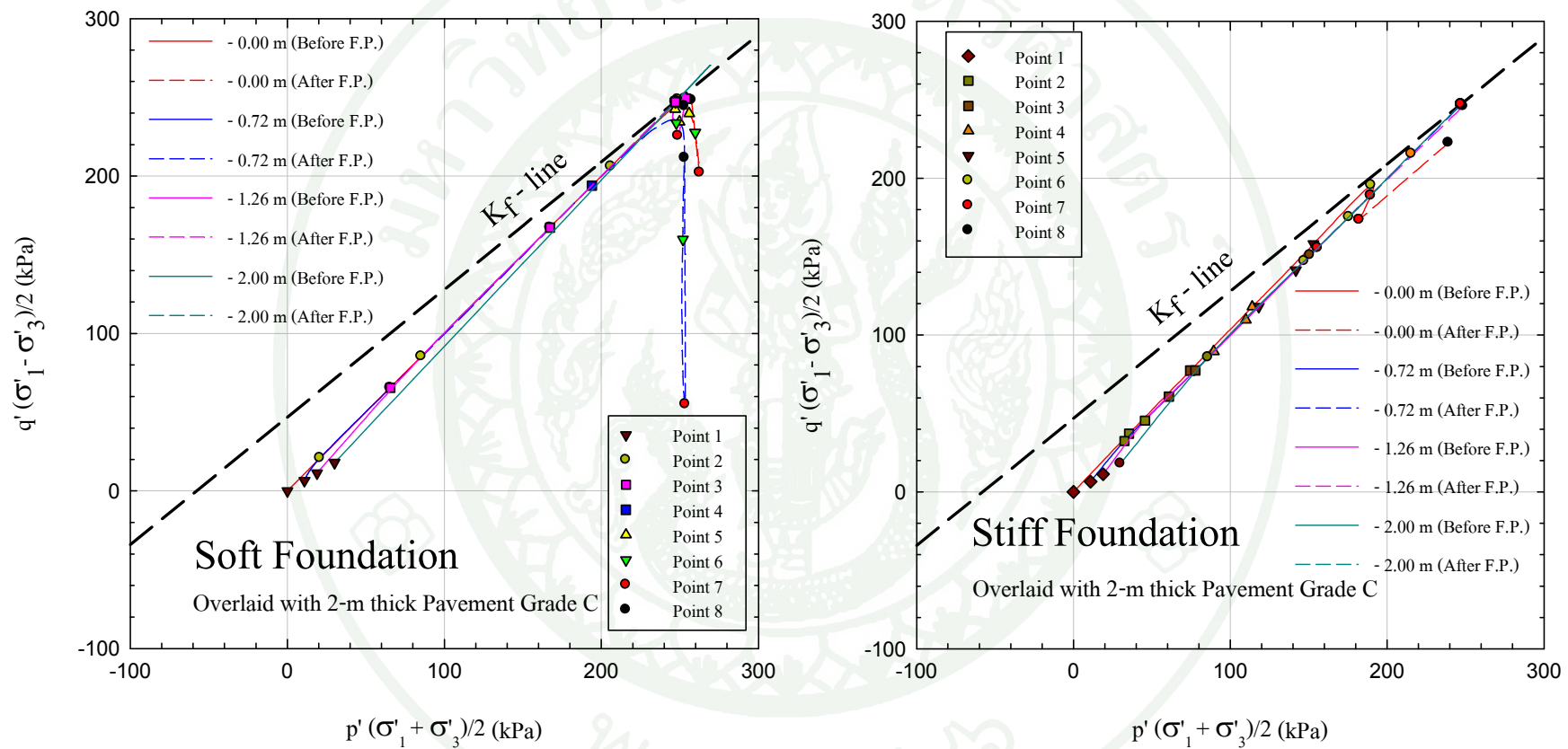
Remark F.P. = First Plastic Point S.F. = Soil Failure

สำหรับกรณีที่วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลาง และมีความแข็งแรงปานกลาง จะพบว่าเมื่อน้ำหนักที่มากกระทำกับโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้น ในวัสดุโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อนจะมีการพัฒนาตัวของวงการพิบัติซึ่งเป็นรูปแบบการพิบัติชนิด B ซึ่งเกิดขึ้นที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง โดยมีระยะความลึกของวงการพิบัติประมาณ 0.50 เมตร ซึ่งวงการพิบัติลักษณะนี้จะไม่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็งสำหรับในกรณีศึกษา

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบเส้นทางเดินหน่วยแรงกรณีของชั้นฐานรากดินอ่อน ซึ่งเกิดการพิบัติในรูปแบบ B พบว่าเมื่อขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำกับโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้น เส้นทางเดินหน่วยแรงที่ระยะความลึก 0.00 เมตร และ - 2.00 เมตร จะวิ่งไปตามเส้น K_f -line ก่อน จากนั้นจึงเกิดการพิบัติที่ระดับความลึกอื่นๆตามมา โดยที่เมื่อการพิบัติเริ่มเกิดขึ้นแล้ว (เกิดพฤติกรรม First Plastic Point) ค่าความชันของเส้นทางเดินหน่วยแรงจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เกิดจากการลดลงของค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก ซึ่งหมายถึงการลดลงของค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ เนื่องจากโครงสร้างชั้นทางมีสภาพเสมือนเป็นคาน ซึ่งจะทำให้เกิด Flexural Stress เมื่อขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบจะเกิดขึ้นมากกว่าค่า

หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง และมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากนั้นจึงมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน ขณะที่ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งหรือค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะค่อยๆมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งไม่ทันกับการลดลงของค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก ทำให้ทิศทางของเส้นทางเดินหน่วยแรงเกิดการเปลี่ยนแปลง (มีทิศกลับหักลงมา) และเมื่อหน่วยแรงประสิทธิผลหลักมีค่าตามหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง เส้นทางเดินของหน่วยแรงจึงมีทิศทางพุ่งเฉียงขึ้นของตามปกติอีกครั้ง ขณะที่ในกรณีของชั้นฐานรากดินแข็งซึ่งเกิดการพิบัติในรูปแบบ A เมื่อขนาดของน้ำหนัก ที่มากระทำมีค่าเพิ่มขึ้นจะพบว่าเส้นทางเดินหน่วยแรงจะวิ่งไปแตะเส้น K_t -line เท่านั้น โดย ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นทางเดินหน่วยแรงให้เห็น (ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักยังเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง)

โดยเส้นทางเดินหน่วยแรงของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง ที่ระดับความลึก 0.00 เมตร, - 0.72 เมตร, - 1.26 เมตร และ - 2.00 เมตร จากด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง ดังแสดงในภาพที่ 82



ภาพที่ 82 แสดงเส้นทางดินหน่วยแรงของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 1,000 และ 20 เท่าตามลำดับ) ที่ระดับความลึกต่างๆ กรณีโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาเท่ากับ 2.00 เมตร

2.4.3 วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงสูง (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D)

2.4.3.1 โครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาแน่น (0.5 เมตร)

สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทางซึ่งมีความแข็งแรงสูง แต่มีความหนาแน่น หนาแน่นของชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10,000 เท่า) ที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทางเมื่อขนาดของน้ำหนักรถที่มากกระทำกับโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้น หน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยที่ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวราบ ส่วนค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ โดยที่ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวตั้ง

ที่บริเวณกึ่งกลางของโครงสร้างชั้นทางเมื่อขนาดของน้ำหนักรถที่มากกระทำมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักและค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยการเพิ่มขึ้นของค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะเพิ่มขึ้นตามหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง และมีค่ามากกว่าค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองซึ่งมีค่าตามค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ

ที่บริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทาง พบว่าเมื่อขนาดของน้ำหนักรถที่มากกระทำมีค่าเพิ่มขึ้นค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและจะไปหยุดอยู่ที่ค่าหนึ่ง (730 kPa) และเพิ่มขึ้นได้อีกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยที่ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวตั้ง ส่วนค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองเมื่อน้ำหนักรถที่มากกระทำมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีค่าลดลงจากค่าเริ่มต้นจนกระทั่งเกือบจะมีค่าเท่ากับ 0 แต่จะไม่ลดลงจนมีค่าเป็นหน่วยแรงดึง โดยที่ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวราบ

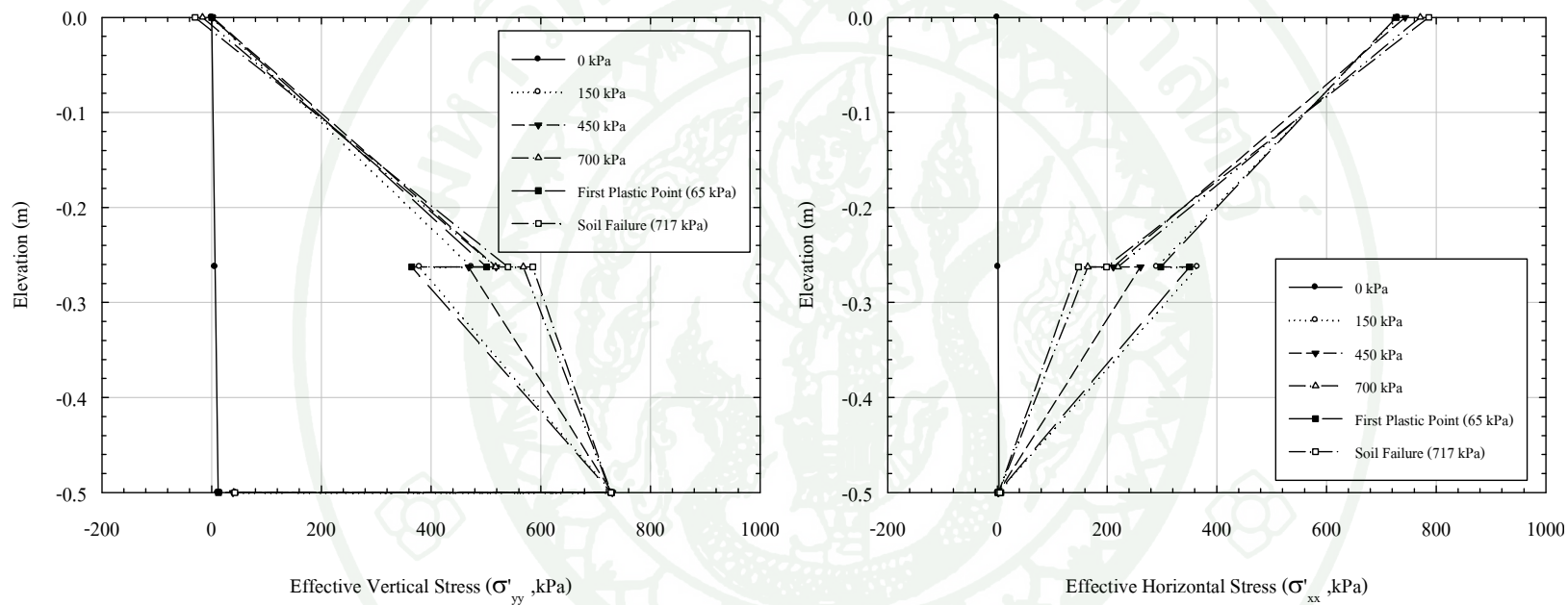
โดยพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D บนชั้นฐานรากดินอ่อน เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.50 เมตร กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ ดังแสดงในภาพที่ 83 และกรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง ดังแสดงในภาพที่ 84

สำหรับกรณีของชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 200 เท่า) เมื่อน้ำหนักที่มากกระทำกับโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้น ที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทางค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากนั้นจึงมีค่าลดลงเล็กน้อย ก่อนจะมีค่าเพิ่มขึ้น จากนั้นจึงมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วก่อนที่จะเกิดการพิบัติ โดยที่ในช่วงแรกค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวราบ ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและหลังจากนั้นจึงลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน ทำให้เกิดการลดลงของค่าประสิทธิผลหลัก และก่อนที่จะเกิดการพิบัติค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวดิ่ง ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามขนาดของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีค่าลดลงจนมีค่าเป็นหน่วยแรงดิ่ง ก่อนที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นจนเป็นหน่วยแรงกด โดยที่ในช่วงแรกค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวดิ่ง และก่อนที่จะพิบัติค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวราบ

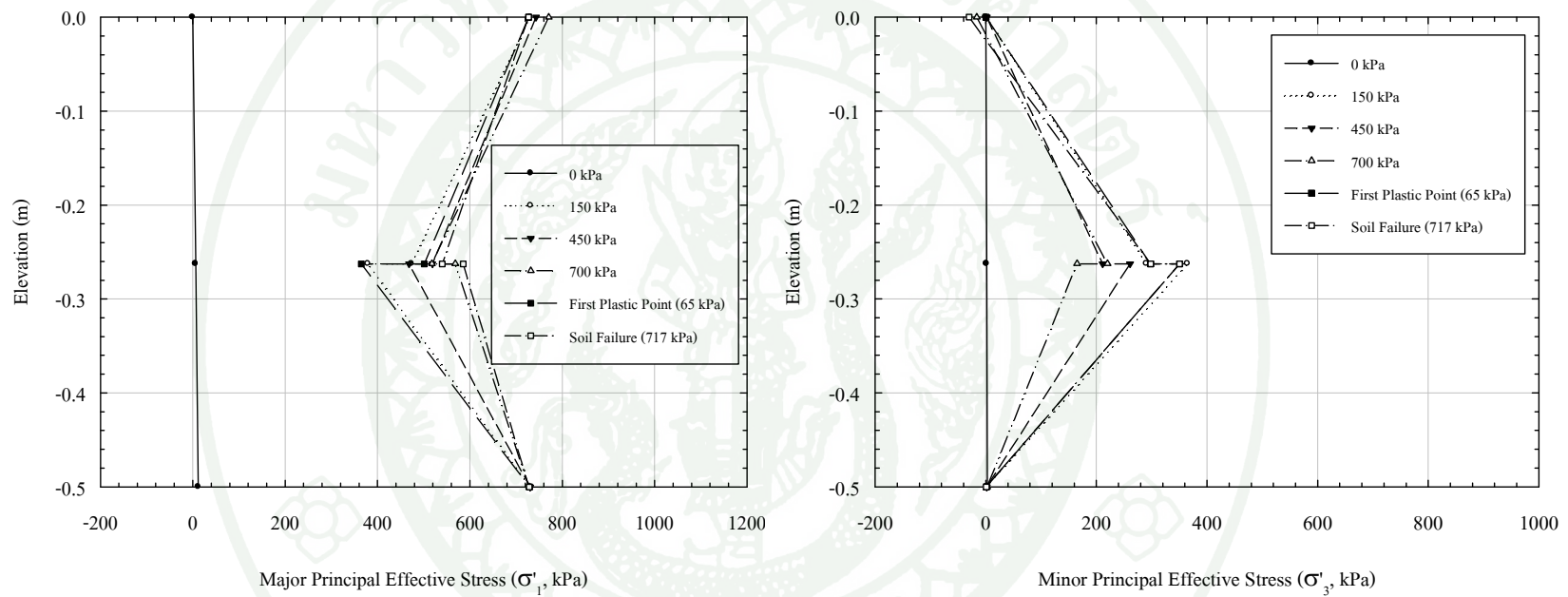
ที่บริเวณกึ่งกลางกลางของโครงสร้างชั้นทางเมื่อขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักและค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยการเพิ่มขึ้นของค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะเพิ่มขึ้นตามหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง และมีค่ามากกว่าค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองซึ่งมีค่าตามหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ

ที่บริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทาง พบว่าเมื่อขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำมีค่าเพิ่มขึ้นค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อยแม้ว่าขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากก็ตาม โดยที่ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวดิ่ง ส่วนค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองเมื่อน้ำหนักที่มากกระทำมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีค่าลดลงจากค่าเริ่มต้นจนกระทั่งเกือบจะมีค่าเท่ากับ 0 แต่จะไม่ลดลงจนมีค่าเป็นหน่วยแรงดิ่ง โดยที่ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวราบ

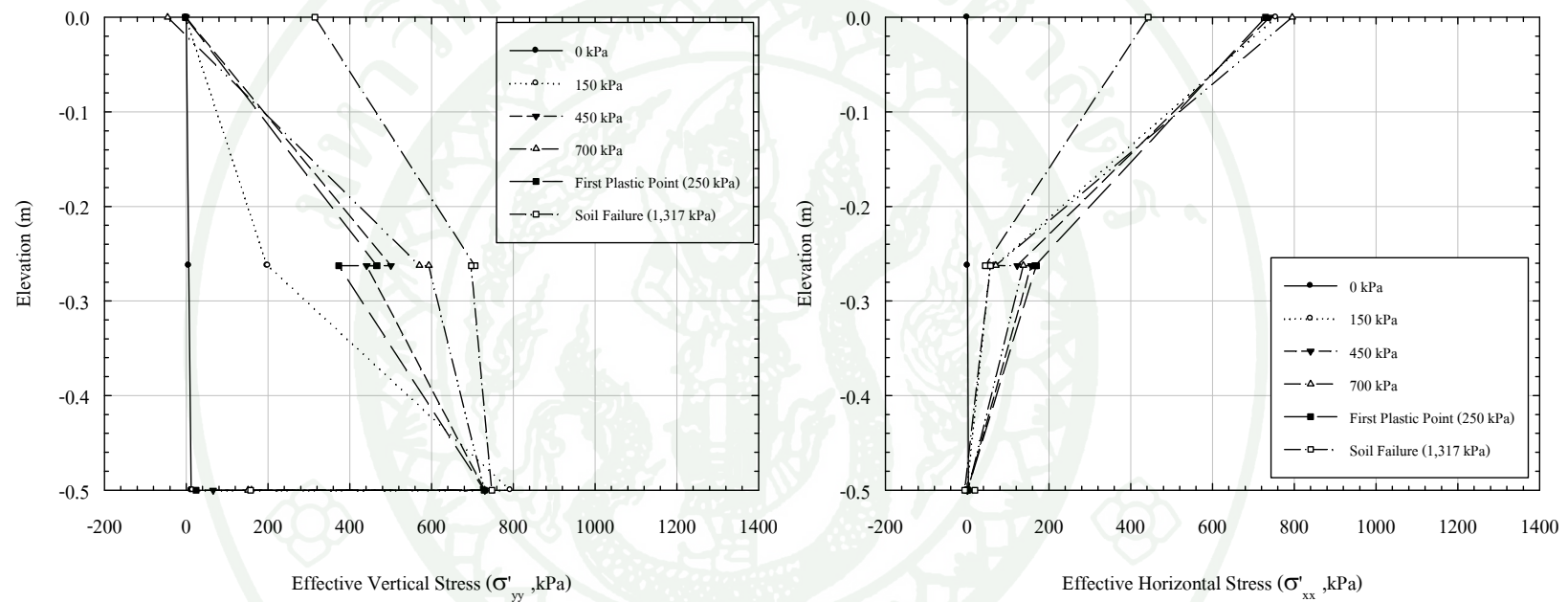
โดยพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D บนชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.50 เมตร กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ ดังแสดงในภาพที่ 85 และกรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง ดังแสดงในภาพที่ 86



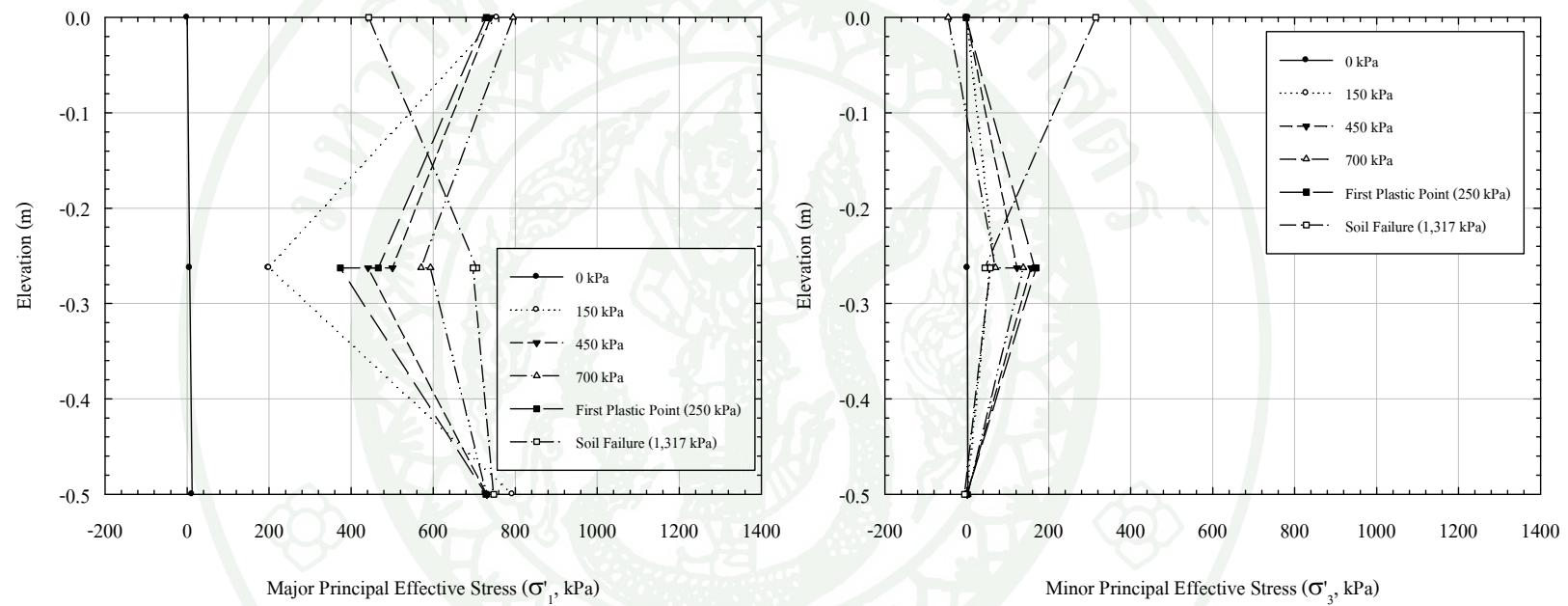
ภาพที่ 83 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10,000 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.50 เมตร กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ



ภาพที่ 84 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10,000 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาแน่น (0.50 เมตร) กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง



ภาพที่ 85 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 200 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาแน่น (0.50 เมตร) กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ



ภาพที่ 86 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 200 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย (0.50 เมตร) กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง

ในการพิจารณาเส้นทางเดินหน่วยแรงเพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรม การ
พืดระหว่างโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้น
ฐานรากดินแข็ง สำหรับกรณีที่วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงสูง และโครงสร้างชั้นทางมี
ความหนาน้อย จะพิจารณา ขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำมีค่าดังแสดงในตารางที่ 39

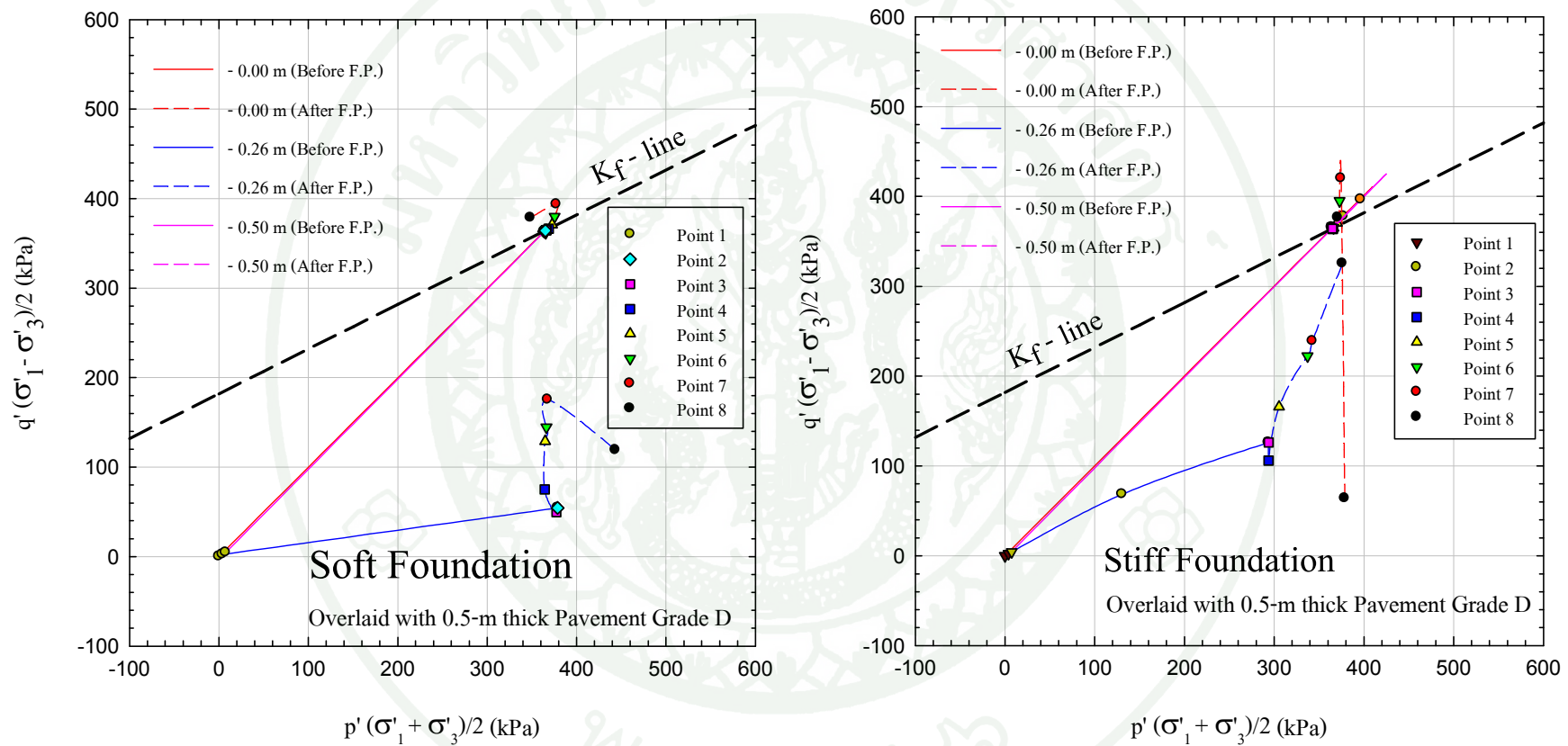
ตารางที่ 39 แสดงค่าน้ำหนักที่มากกระทำกับโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้น
ฐานรากดินแข็ง กรณีวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D และโครงสร้างชั้นทางมีความ
หนา 0.50 เมตร

Point	Load (kPa)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Soft Foundation	0	65 (F.P.)	150	300	450	600	700	717 (S.F)
Stiff Foundation	0	150	250 (F.P.)	300	450	600	700	1317 (S.F)

Remark F.P = First Plastic Point S.F. = Soil Failure

สำหรับโครงสร้างชั้นทางที่มีค่าความหนาน้อย ถึงแม้ว่าวัสดุมีความ
แข็งแรงของสูง การพืดจะเกิดในรูปแบบ A โดยพบว่าลักษณะของเส้นทางเดินหน่วยแรงของ
โครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อนและโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง
จะมีลักษณะคล้ายคลึงกัน คือที่ระดับความลึก 0.00 เมตร และ - 0.50 เมตร เส้นทางเดินหน่วยแรงจะ
มีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำและไปแตะเส้นแนวการพืดพร้อมๆ ขณะที่บริเวณ
กึ่งกลางของโครงสร้างชั้นทางจะไม่เกิดการพืดขึ้น

โดยเส้นทางเดินหน่วยแรงของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่
บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง ที่ระดับความลึก 0.00 เมตร, - 0.26 เมตร และ - 0.50
เมตร จากด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง ดังแสดงในภาพที่ 87



ภาพที่ 87 แสดงเส้นทางดินหน่วยแรงของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10,000 และ 200 เท่าตามลำดับ) ที่ระดับความลึกต่างๆ กรณีโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาเท่ากับ 0.50 เมตร

2.4.3.2 โครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาปานกลางถึงสูง (1.0 - 4.0 เมตร)

กรณีของชั้นฐานรากดินอ่อน สำหรับโครงสร้างชั้นทางที่มีค่าความหนาปานกลาง และมีความแข็งแรงปานสูง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10,000 เท่า) เมื่อขนาดของน้ำหนักรวมกระทำกับโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้นพบว่าที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีการลดลง ก่อนที่จะเพิ่มขึ้นจนไปหยุดนิ่งอยู่ที่ค่าๆหนึ่ง โดยช่วงแรกค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวราบ และมีค่าตามค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในดิ่งก่อนที่จะเกิดการบีบอัด ส่วนค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าหน่วยแรงในช่วงแรกจะมีค่าตามหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง และก่อนที่จะเกิดการบีบอัดค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวราบ

ที่ระดับความลึก - 0.72 เมตรจะพบว่าเมื่อขนาดของน้ำหนักรวมกระทำกับโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีการลดลง ก่อนที่จะเพิ่มขึ้นจนเกิดการบีบอัด โดยค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวราบ ขณะที่ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะค่อยๆเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวดิ่ง

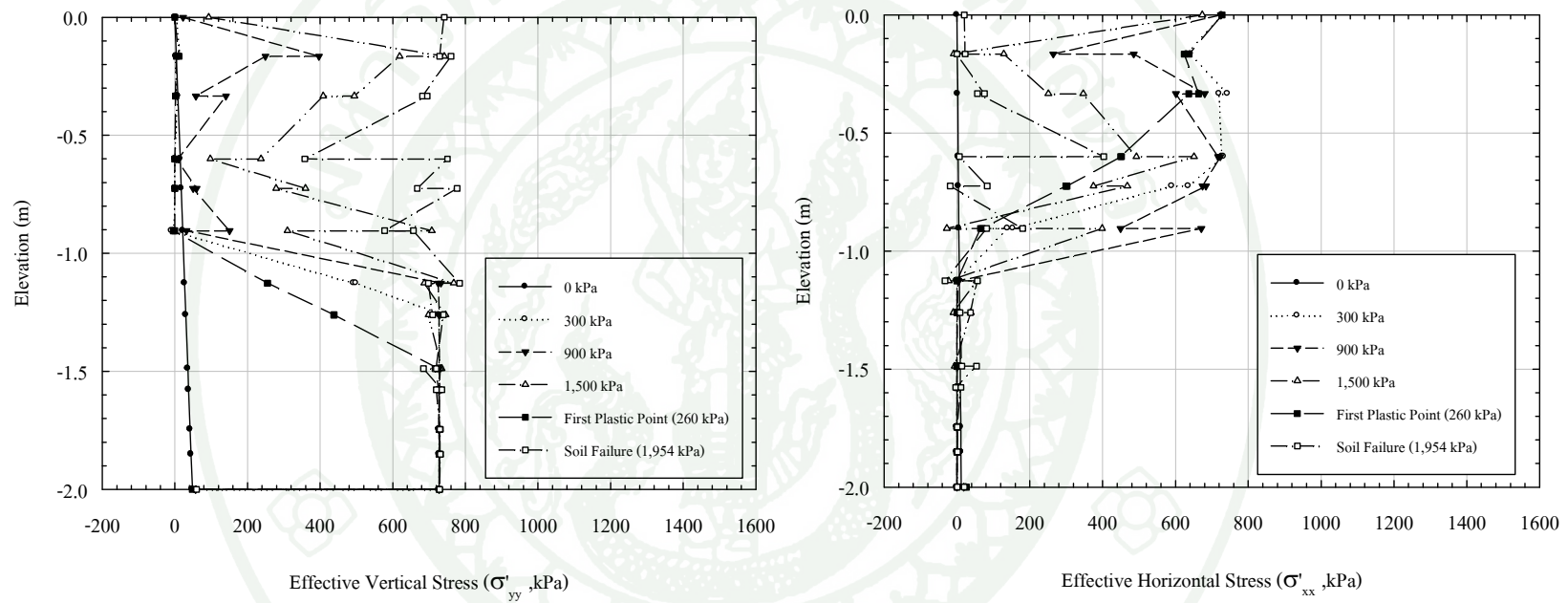
ที่ระดับความลึก - 1.26 เมตร และที่บริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทาง ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งไปหยุดอยู่ที่ค่าๆหนึ่ง (723 kPa) ส่วนค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีค่าลดลงจากค่าเริ่มต้นจนกระทั่งเกือบจะมีค่าเท่ากับ 0 โดยค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวดิ่ง และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวราบ

โดยพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D บนชั้นฐานรากดินอ่อน เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.00 เมตร กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ ดังแสดงในภาพที่ 88 และกรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง ดังแสดงในภาพที่ 89

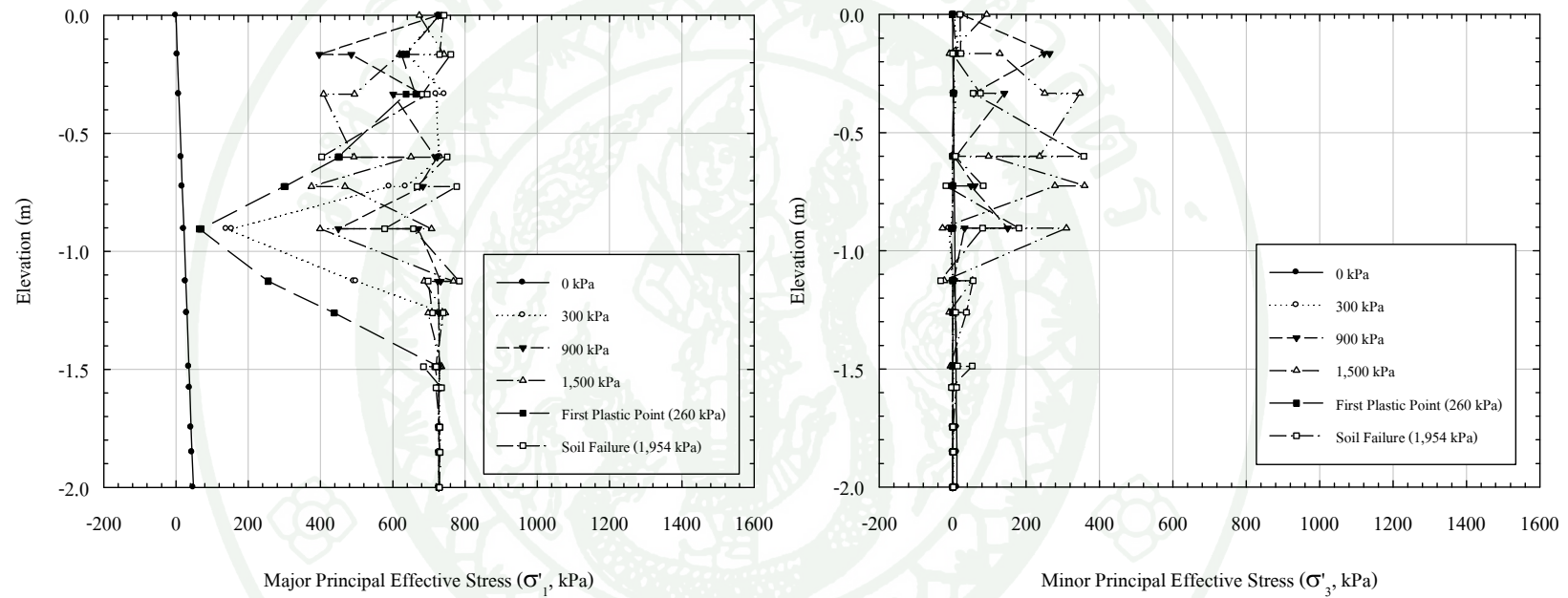
กรณีของชั้นฐานรากดินแข็ง สำหรับโครงสร้างชั้นทางที่มีค่าความหนาปานกลาง และมีความแข็งแรงสูง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 200 เท่า) เมื่อน้ำหนักที่มากกระทำกับโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้น พบว่าค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง และที่ระดับความลึก - 0.72 เมตร จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นจึงลดลงอย่างรวดเร็ว และจึงค่อยๆมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งก่อนที่จะเกิดการพิบัติ โดยที่ในช่วงแรกค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวราบ และก่อนที่จะเกิดการพิบัติค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวดิ่ง ส่วนค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะค่อยๆมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำ โดยที่ในช่วงแรกค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวดิ่ง แต่ก่อนที่จะเกิดการพิบัติค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวราบ

ที่ระดับความลึก - 1.26 เมตร และที่บริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทาง ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะเพิ่มขึ้นจนไปถึงค่าๆหนึ่ง (723 kPa) ส่วนค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีค่าลดลงจากค่าเริ่มต้นก่อน จะค่อยๆมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำ แต่ถือว่าการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก โดยค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวดิ่ง และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะมีทิศตามหน่วยแรงในแนวราบ

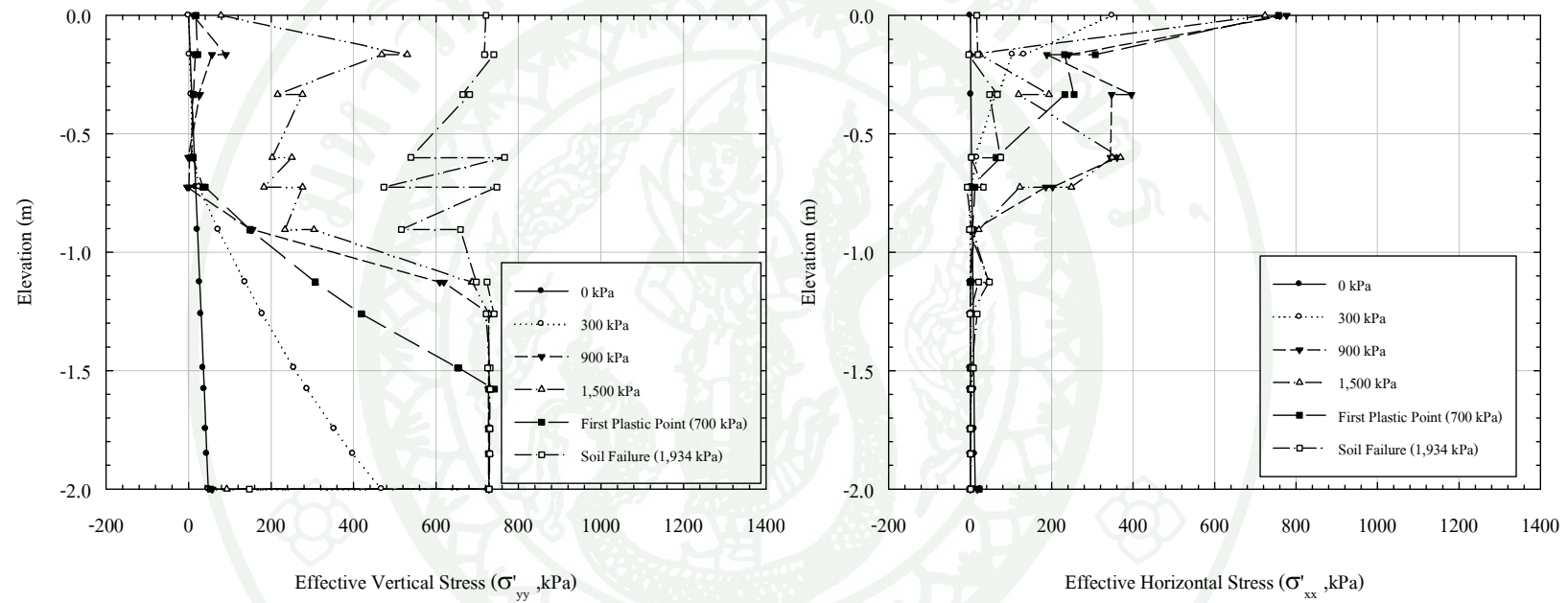
โดยพฤติกรรมการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D บนชั้นฐานรากดินรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.00 เมตร กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ ดังแสดงในภาพที่ 90 และกรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง ดังแสดงในภาพที่ 91



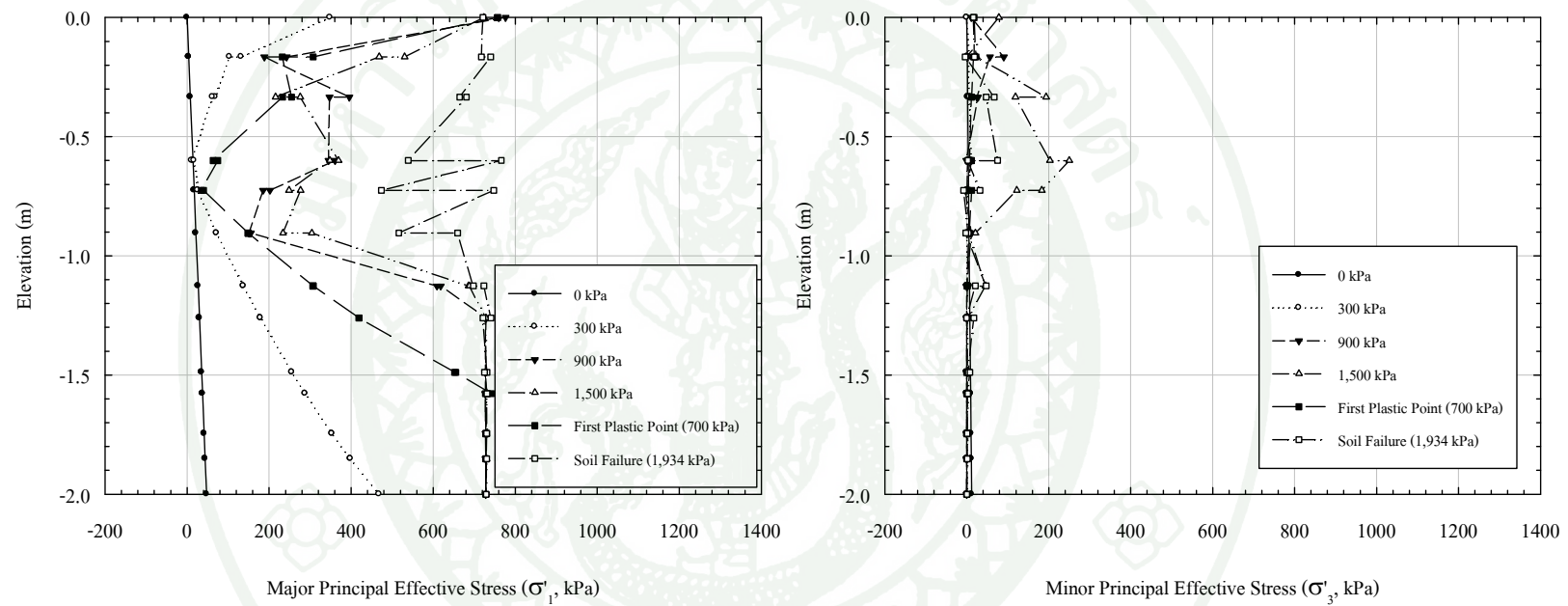
ภาพที่ 88 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10,000 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง (1.00 - 4.00 เมตร) กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ



ภาพที่ 89 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10,000 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง (1.00 - 4.00 เมตร) กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง



ภาพที่ 90 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 200 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาแน่น (0.50 เมตร) กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ



ภาพที่ 91 การกระจายตัวของค่าหน่วยแรงภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 200 เท่า) กรณีโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย (0.50 เมตร) กรณีหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และหน่วยแรงประสิทธิผลรอง

ในการพิจารณาเส้นทางเดินหน่วยแรงเพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการพิบัติระหว่างโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง สำหรับกรณีที่วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงสูง และโครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลางถึงสูง จะพิจารณา ขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำมีค่าดังแสดงในตารางที่ 40

ตารางที่ 40 แสดงค่าน้ำหนักที่มากกระทำกับโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง กรณีวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D และโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.00 เมตร

Point	Load (kPa)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Soft Foundation	0	260 (F.P.)	300	600	900	1200	1500	1954 (S.F.)
Stiff Foundation	0	300	600	700 (F.P.)	900	1200	1500	1934 (S.F.)

Remark F.P. = First Plastic Point S.F. = Soil Failure

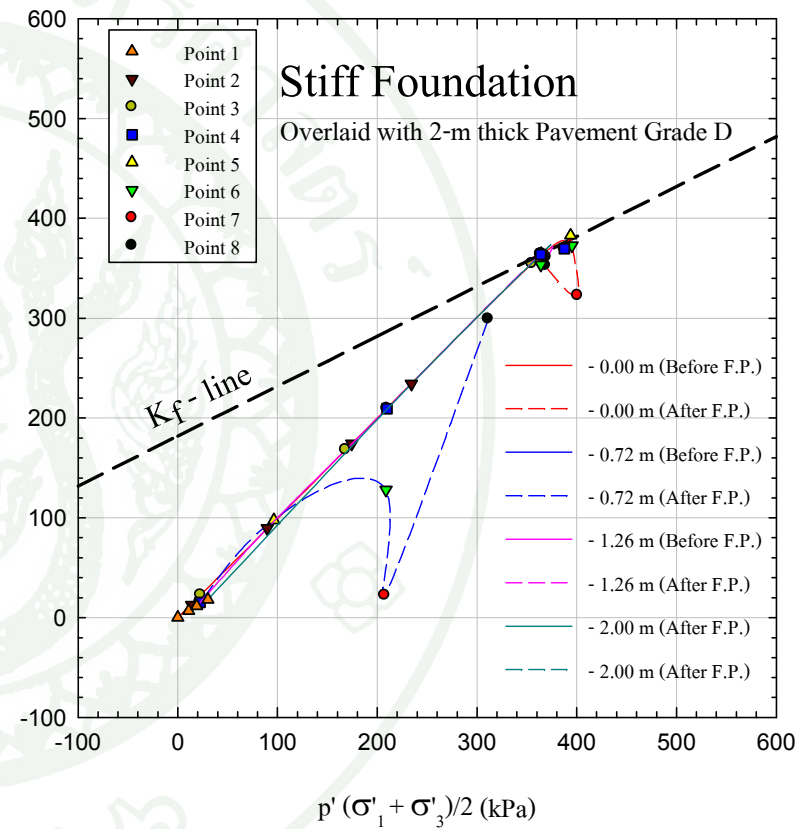
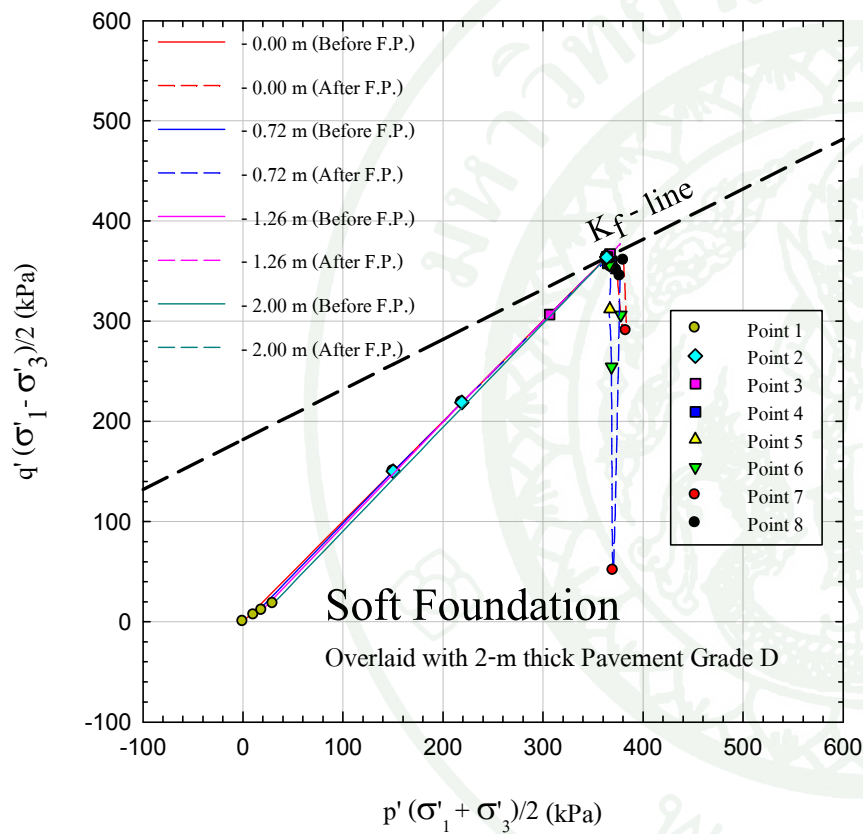
สำหรับกรณีที่โครงสร้างชั้นทางมีความหนาปานกลาง และมีความแข็งแรงสูง พบว่าเมื่อน้ำหนักที่มากกระทำกับโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้น ที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทางจะมีวงพิบัติในระดึบดินเกิดขึ้น ซึ่งการพิบัติในลักษณะนี้เกิดขึ้นในกรณีของดินฐานรากทั้งสองชนิด เพียงแต่การเกิดขึ้นในกรณีของชั้นฐานรากดินแข็งจะเกิดขึ้นช้ากว่ากรณีของชั้นฐานรากดินอ่อน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบเส้นทางเดินหน่วยแรงกรณีของชั้นฐานรากดินอ่อนและชั้นฐานรากดินแข็ง ซึ่งเกิดการพิบัติในรูปแบบ B ด้วยกันทั้งคู่นั้น จะพบว่าเมื่อขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำกับโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้นภายหลังจากที่เริ่มมีการพิบัติเกิดขึ้นแล้ว (เส้นทางเดินหน่วยแรงวิ่งไปแตะ K_f -line เริ่มมีการเกิด First Plastic Point) เส้นทางเดินหน่วยแรงที่ระควมลึก 0.00 เมตร และ - 0.72 เมตร จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงค่าความชัน โดยที่ค่าความชันของเส้นทางเดินหน่วยแรงจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เกิดจากการลดลงของค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก ซึ่งหมายถึงการลดลงของค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ เนื่องจากโครงสร้างชั้นทางมีสภาพเสมือนเป็นคาน ซึ่งจะทำให้เกิด Flexural Stress เมื่อขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบจะเกิดขึ้นมากกว่าค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง และจะมี

ค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากนั้นจึงมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ขณะที่ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งหรือค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองจะค่อยๆมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งไม่ทันกับการลดลงของค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก ทำให้ทิศทางของเส้นทางเดินหน่วยแรงเกิดการเปลี่ยนแปลง

โดยเส้นทางเดินหน่วยแรงของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง ที่ระดับความลึก 0.00 เมตร, - 0.72 เมตร, - 1.26 เมตร และ - 2.00 เมตร จากด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง ดังแสดงในภาพที่ 92





ภาพที่ 92 แสดงเส้นทางดินหน่วยแรงของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง (ค่าอัตราส่วน E_1/E_2 เท่ากับ 10,000 และ 200 เท่าตามลำดับ) ที่ระดับความลึกต่างๆ กรณีโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาเท่ากับ 2.00 เมตร

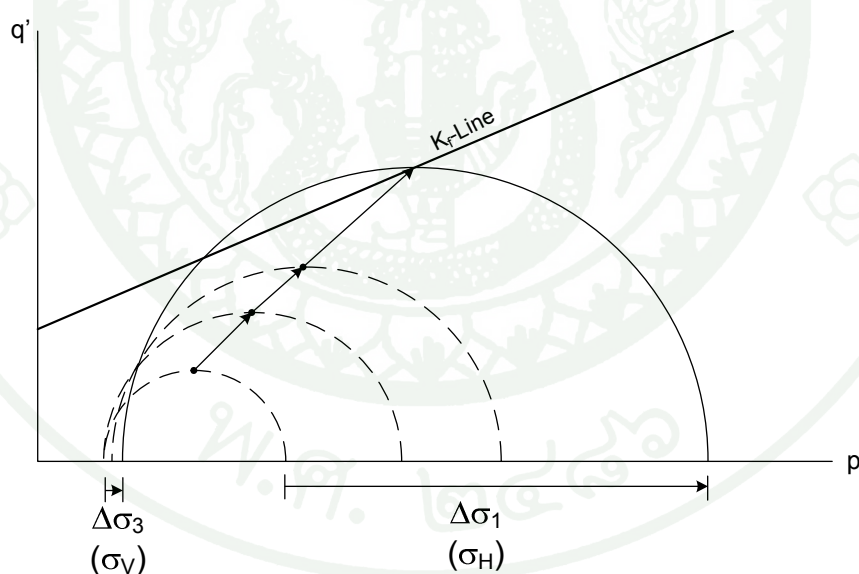
จากการศึกษาเส้นทางเดินของหน่วยแรง ภายในวัสดุโครงสร้างชั้นทางซึ่งมีความแข็งแรงต่ำ (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A), วัสดุโครงสร้างชั้นทางซึ่งมีความแข็งแรงปานกลาง (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade B และ Grade C) และวัสดุโครงสร้างชั้นทางซึ่งมีความแข็งแรงสูง (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D) พบว่า

จากการศึกษาลักษณะของเส้นทางเดินหน่วยแรงของการพิบัติในรูปแบบ A และการพิบัติในรูปแบบ B จะพบความแตกต่างกันของเส้นทางเดินหน่วยแรงที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทางเท่านั้น เนื่องจากที่บริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทางเส้นทางเดินหน่วยแรงจะมีทิศเข้าหา K_f -line โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทาง เนื่องจากค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ขณะที่ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

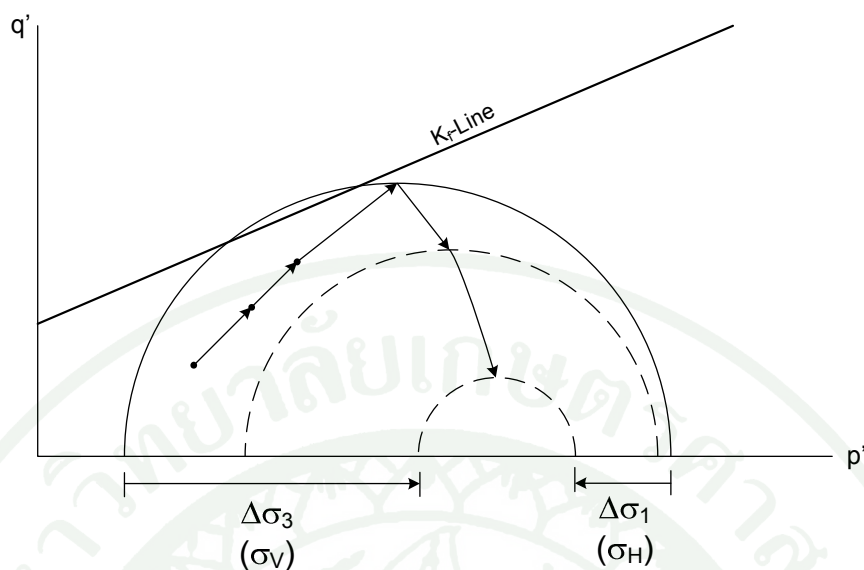
สำหรับความแตกต่างของเส้นทางเดินหน่วยแรงระหว่างการพิบัติรูปแบบ A และการพิบัติรูปแบบ B ที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง มีรายละเอียดดังนี้

การพิบัติในรูปแบบ A เมื่อมีน้ำหนักรวมกระทำกับโครงสร้างชั้นทาง จะเกิดสถานะ Flexural Stress ขึ้น ทำให้หน่วยแรง ในแนวราบเกิดขึ้นมากกว่าหน่วยแรงในแนวดิ่ง ซึ่งจะทำให้ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักในช่วงแรกมีทิศตามหน่วยแรงในแนวราบ ส่วนค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองมีทิศตามหน่วยแรงในแนวดิ่ง เมื่อขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำมีค่าเพิ่มขึ้น พบว่าการเพิ่มขึ้นของค่าหน่วยแรงทั้ง 2 ชนิดมีค่าไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งต่อมาในเวลาที่ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก (ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ) กำลังลดลงเนื่องจากหน่วยแรงในแนวราบเกิดขึ้นเกินความสามารถในการรับหน่วยแรงของวัสดุ ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรอง (ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง) จะเพิ่มขึ้นมาพอคี่เช่นกัน ทำให้ไม่เกิดการลดลงของค่าของค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก เนื่องจากค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักเปลี่ยนไปมีทิศตามหน่วยแรงในแนวดิ่งซึ่งกำลังเพิ่มขึ้น และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองก็จะเปลี่ยนไปมีทิศตามหน่วยแรงในแนวราบซึ่งกำลังมีค่าลดลง ทำให้เส้นทางเดินหน่วยแรงจะมีทิศทางเดินคงเดิมจนไปแตะเส้น K_f -line โดยลักษณะเส้นทางเดินหน่วยแรงที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทางสำหรับการพิบัติรูปแบบ A ดังแสดงในภาพที่ 93

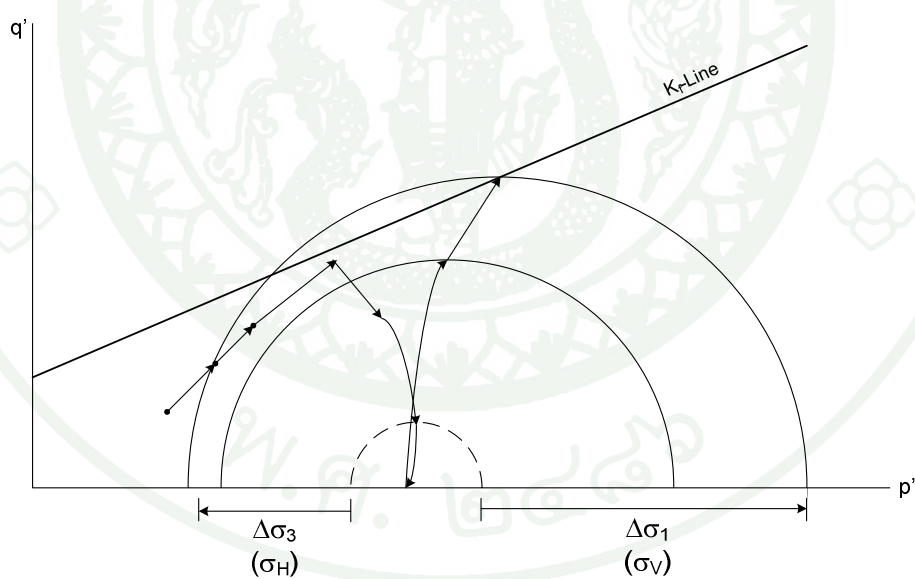
การบีบอัดในรูปแบบ B จะเกิดในสภาวะ Flexural Stress ขึ้นเช่นกันและจะเกิดในกรณี
ที่โครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานรากมีความแตกต่างของค่า Elastic Modulus ที่มาก และ
โครงสร้างชั้นทางมีความหนาที่เพียงพอ โดยเมื่อน้ำหนักมากกระทำ ค่าหน่วยแรงในแนวราบจะ
เกิดขึ้นมากกว่าค่าหน่วยแรงในแนวดิ่งมาก ทำให้ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลักในช่วงแรกมีทิศตาม
หน่วยแรงในแนวราบ ส่วนค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรองมีทิศตามหน่วยแรงในแนวดิ่ง เช่นเดียวกัน
กับการบีบอัดในรูปแบบ A ดังแสดงในภาพที่ 93 แต่เมื่อขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำมีค่าเพิ่มขึ้น ทำ
ให้ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก (มีทิศตามหน่วยแรงในแนวราบ) มีค่าลดลง ค่าหน่วยแรง
ประสิทธิผลรอง (มีทิศตามหน่วยแรงในแนวดิ่ง) จะมีค่าเพิ่มขึ้นไม่ทัน เนื่องจากความแตกต่างของ
ค่าอัตราส่วน Elastic Modulus ระหว่างโครงสร้างชั้นทางและดินฐานรากมีค่ามาก ทำให้การลดลง
ของค่าหน่วยแรงในแนวราบเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงเกิดการลดลงของค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก
ดังนั้นเส้นทางการเคลื่อนที่หน่วยแรงมีการเปลี่ยนทิศทางเป็นหักลงมาในแนวเฉียงดังแสดงในภาพที่ 94 และ
เมื่อเกิดการกลับทิศกันระหว่างค่าหน่วยแรงในแนวราบและค่าหน่วยแรงในแนวดิ่งเส้นทางการเคลื่อนที่
หน่วยแรงจะกลับไปหักเฉียงขึ้นเช่นเดิมดังแสดงในภาพที่ 95



ภาพที่ 93 ลักษณะเส้นทางการเคลื่อนที่หน่วยแรงที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทางสำหรับการบีบอัด
รูปแบบ A



ภาพที่ 94 แสดงการลดลงของค่าความชันของเส้นทางเดินหน่วยแรงที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง



ภาพที่ 95 แสดงการเพิ่มขึ้นของค่าความชันของเส้นทางเดินหน่วยแรงภายหลังจากมีการกลับทิศของค่าหน่วยแรงที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง

3. อิทธิพลของชั้นดินฐานรากที่มีผลต่อโครงสร้างชั้นทาง

การศึกษาอิทธิพลของชั้นดินฐานรากที่มีผลต่อโครงสร้างชั้นทาง สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นดินฐานรากดินอ่อน และโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นดินฐานรากดินแข็ง เพื่อพิจารณาถึงความแตกต่างที่เกิดจากชั้นดินฐานรากแต่ละชนิด

โดยจากการศึกษารูปแบบของการพิบัติที่เกิดขึ้นซึ่งกล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา พบว่าค่าความกว้างของน้ำหนักรถที่มากกระทำกับโครงสร้างชั้นทางจะไม่ส่งผลต่อรูปแบบของการพิบัติที่เกิดขึ้น ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงทำการศึกษาระหว่างชั้นดินฐานรากดินอ่อนและชั้นดินฐานรากดินแข็ง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่างๆ อันได้แก่ ชนิดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A, Grade B, Grade C และ Grade D) และค่าความหนาของชั้นโครงสร้างชั้นทาง (0.50 - 4.00 เมตร) สำหรับค่าความกว้างของน้ำหนักรถที่มากกระทำกับโครงสร้างชั้นทางมีค่าคงที่เท่ากับ 0.50 เมตร

สิ่งที่สนใจในกรณีศึกษานี้ ได้แก่ การพัฒนาตัวของพื้นที่การพิบัติ (Failure Zone Development) และการพัฒนาตัวของผิวการพิบัติ (Failure Surface Development) โดยทำการศึกษาพิจารณาภาพรวมของแบบจำลอง

3.1 การพัฒนาตัวของพื้นที่การพิบัติ (Development of Failure Zone)

จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อน้ำหนักรถที่มากกระทำกับชั้นผิวทางมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับโครงสร้างชั้นทางที่มีความหนาน้อย ซึ่งเกิดการพิบัติในรูปแบบ A ในทุกชนิดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง พบว่าพื้นที่การพิบัติในแต่ละวัสดุ จะเริ่มพัฒนามาจากบริเวณที่ตำแหน่งด้านล่างของโครงสร้างชั้นทางจากนั้นจึงพัฒนาลงมาด้านล่างยังชั้นดินฐานราก

และสำหรับโครงสร้างชั้นทางที่มีความหนามาก กรณีวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงต่ำ (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A) การพัฒนาตัวของพื้นที่การพิบัติจะเริ่มจากด้านบนของโครงสร้างชั้นทางลงมายังด้านล่างของโครงสร้างชั้นทางก่อนจะพัฒนาตัวต่อลงมายังชั้นดินฐานราก ซึ่งเป็นการพิบัติในรูปแบบ A กรณีวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงปานกลาง (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade B และ Grade C) การพัฒนาตัวของพื้นที่การพิบัติซึ่งเกิดในกรณีของชั้นดินฐานราก

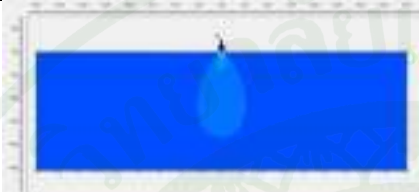
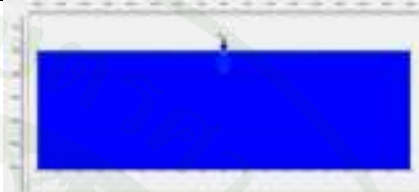
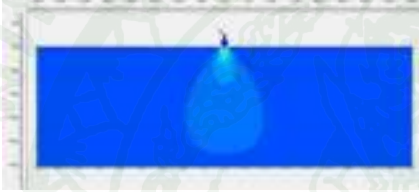
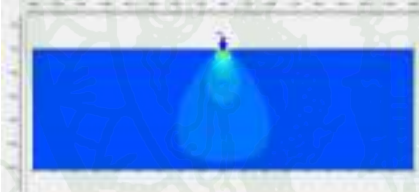
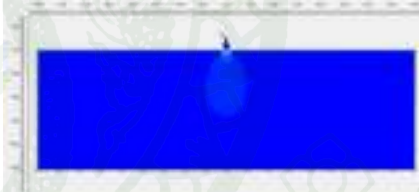
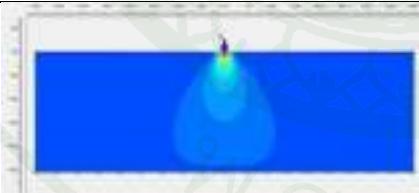
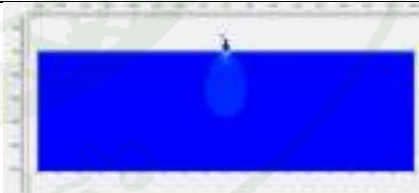
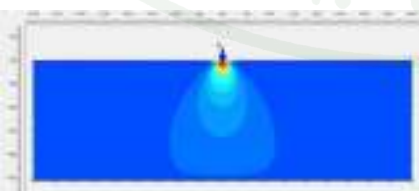
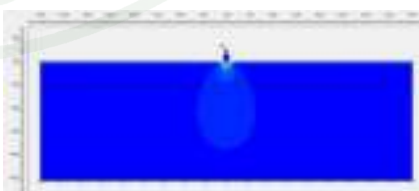
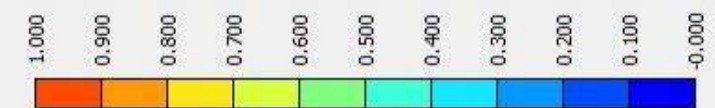
อ่อน มีลักษณะเป็นวงพิบัติในระดับต้นก่อนที่จะพัฒนาตัวลงมายังชั้นดินฐานราก เป็นการพิบัติในรูปแบบ B ส่วนในกรณีของชั้นฐานรากดินแข็ง พื้นที่การพิบัติจะพัฒนาตัวจากบริเวณด้านบนลงมายังชั้นดินฐานรากทันที เป็นการพิบัติในรูปแบบ A และกรณีวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงสูง (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D) การพัฒนาตัวของพื้นที่การพิบัติทั้งในกรณีของชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง จะเกิดในลักษณะของวงพิบัติในระดับต้น ก่อนที่จะพัฒนาตัวต่อลงมายังชั้นดินฐานราก ซึ่งเป็นการพิบัติในรูปแบบ B ทั้งในกรณีของชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง

โดยจากพฤติกรรมการพัฒนาตัวของพื้นที่การพิบัติที่เกิดขึ้น เมื่อพิจารณาถึงการส่งถ่ายค่าหน่วยแรงจากโครงสร้างชั้นทางลงไปยังชั้นดินฐานราก จะพบว่าการพัฒนาตัวของพื้นที่การพิบัติซึ่งเกิดในกรณีของชั้นฐานรากดินอ่อน จะเกิดขึ้นได้เร็วกว่าชั้นฐานรากดินแข็ง แสดงให้เห็นว่าเมื่อขนาดของน้ำหนักที่มากระทำมีค่าเท่ากัน ค่าหน่วยแรงซึ่งเกิดขึ้นภายในชั้นฐานรากดินอ่อนมีค่ามากกว่าค่าหน่วยแรงซึ่งเกิดขึ้นภายในชั้นฐานรากดินแข็ง

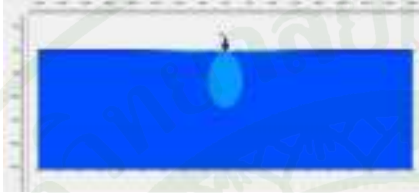
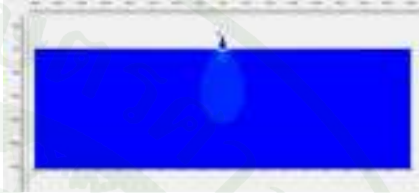
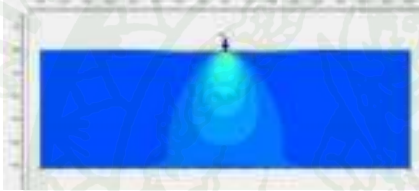
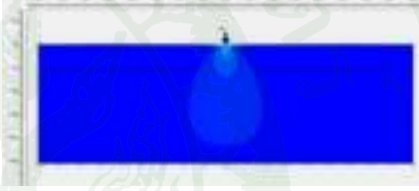
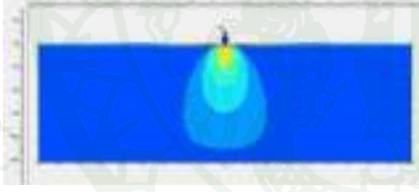
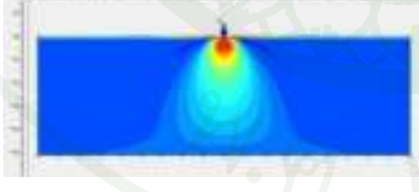
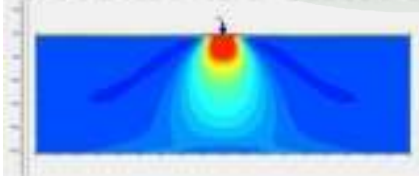
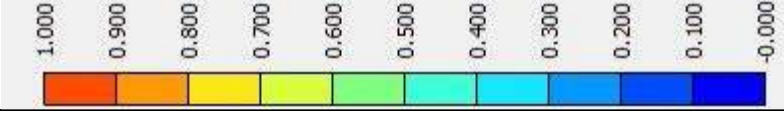
ดังนั้นเมื่อชั้นฐานรากมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น จะทำให้การเกิดขึ้นของค่าหน่วยแรงในชั้นดินฐานรากมีค่าลดลงไปด้วย

การพัฒนาตัวของพื้นที่การพิบัติในแต่ละชนิดวัสดุ (Relative Shear Stresses) ซึ่งเป็นพื้นที่แสดงค่าอัตราส่วนระหว่าง ค่า Shear Stress ที่เกิดขึ้น ต่อค่า Shear Strength ของวัสดุ ดังแสดงในตารางที่ 41 ถึงตารางที่ 46

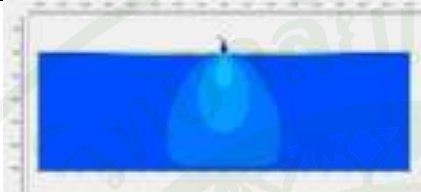
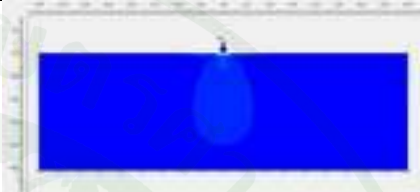
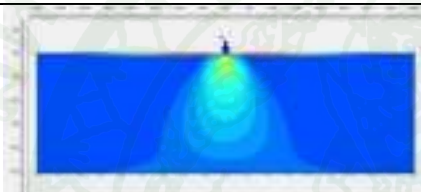
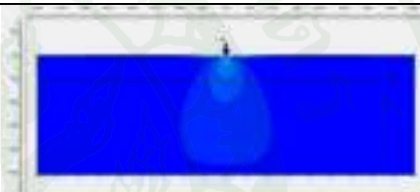
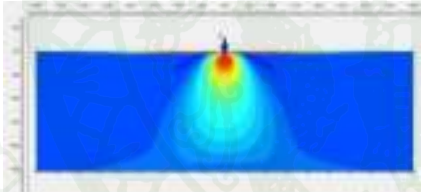
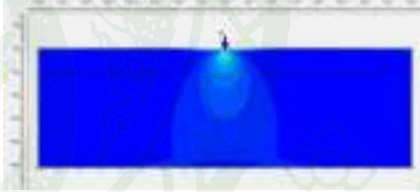
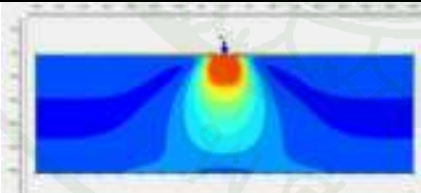
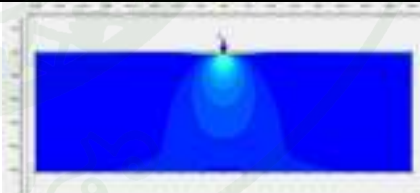
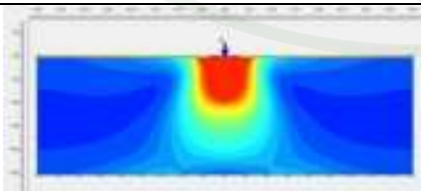
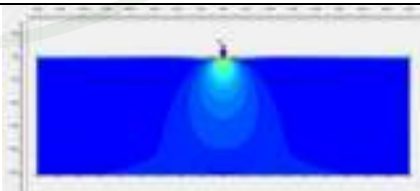
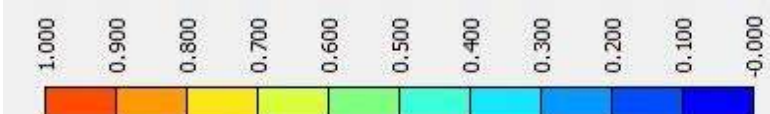
ตารางที่ 41 แสดงค่า Relative Shear Stress ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A เปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.5 เมตร

Load	Soft Foundation ($E_1/E_2 = 10$ time)	Stiff Foundation ($E_1/E_2 = 0.2$ time)
30 kPa	 Extreme Relative Shear Stress = 0.74	 Extreme Relative Shear Stress = 0.46
60 kPa	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00	 Extreme Relative Shear Stress = 0.75
90 kPa	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00	 Extreme Relative Shear Stress = 0.99
120 kPa	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00
140 kPa	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00
Legend		

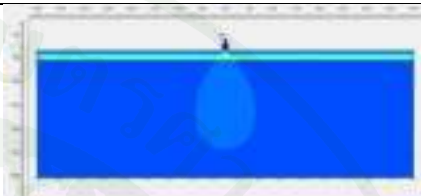
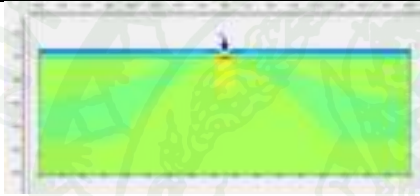
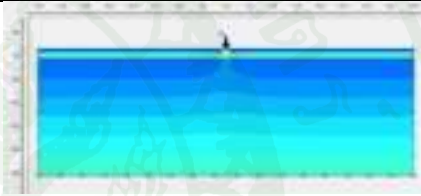
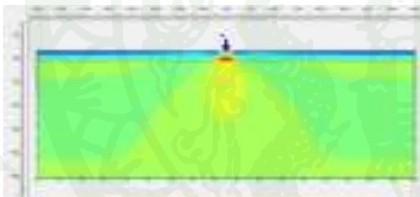
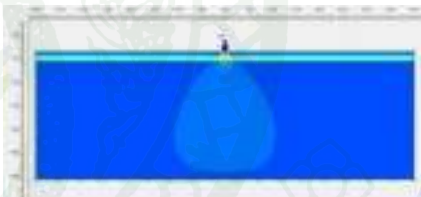
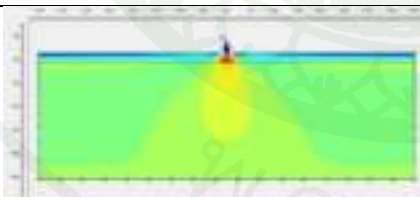
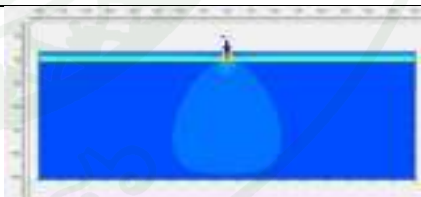
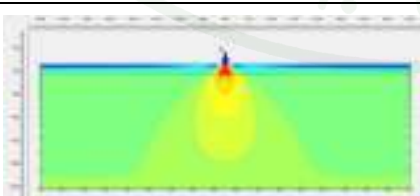
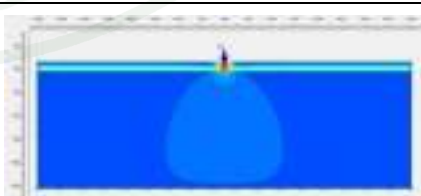
ตารางที่ 42 แสดงค่า Relative Shear Stress ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C เปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.5 เมตร

Load	Soft Foundation ($E_1/E_2 = 1,000$ time)	Stiff Foundation ($E_1/E_2 = 20$ time)
100 kPa	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00	 Extreme Relative Shear Stress = 0.72
200 kPa	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00	 Extreme Relative Shear Stress = 0.94
300 kPa	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00
400 kPa	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00
500 kPa	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00
Legend		

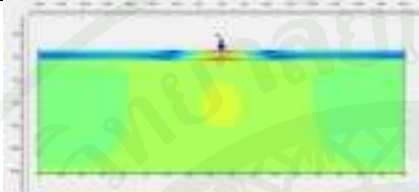
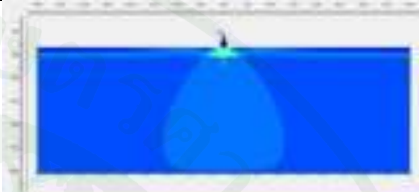
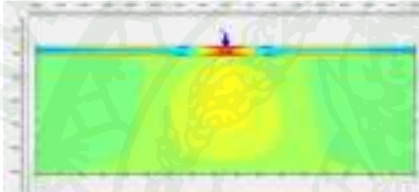
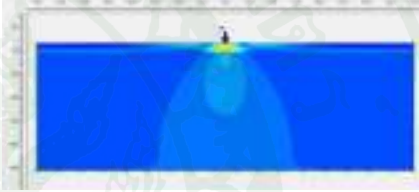
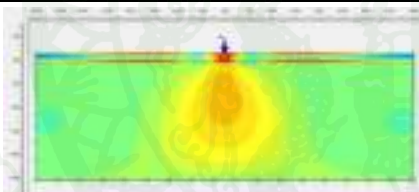
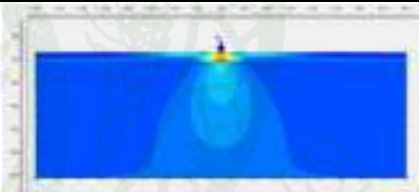
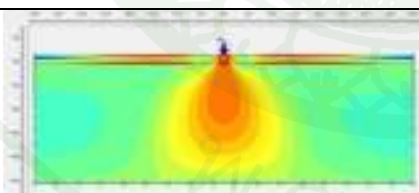
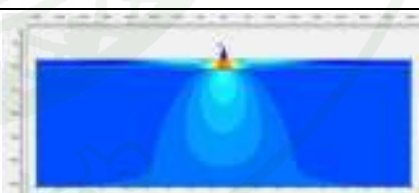
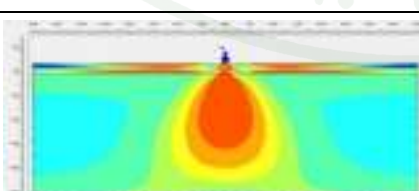
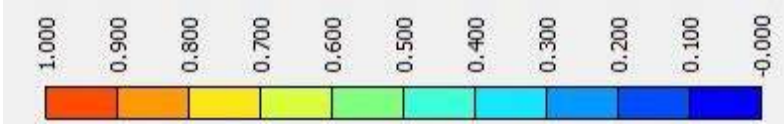
ตารางที่ 43 แสดงค่า Relative Shear Stress ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D เปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.5 เมตร

Load	Soft Foundation ($E_1/E_2 = 10,000$ time)	Stiff Foundation ($E_1/E_2 = 200$ time)
150 kPa	 Extreme Relative Shear Stress = 0.28	 Extreme Relative Shear Stress = 0.07
300 kPa	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00
450 kPa	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00
600 kPa	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00
700 kPa	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00
Legend		

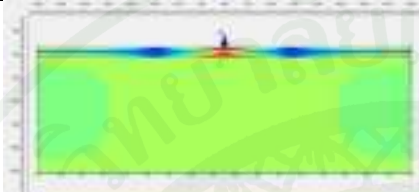
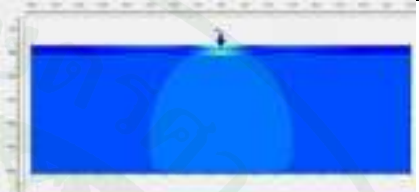
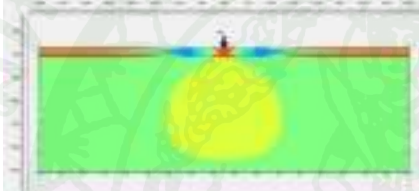
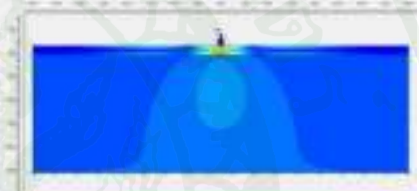
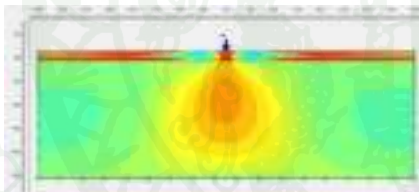
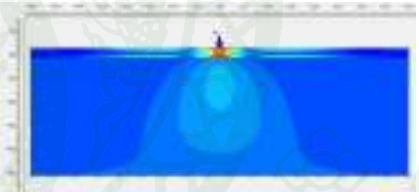
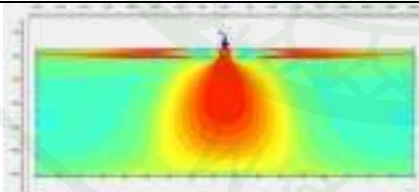
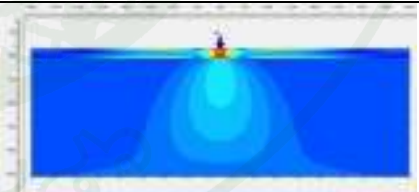
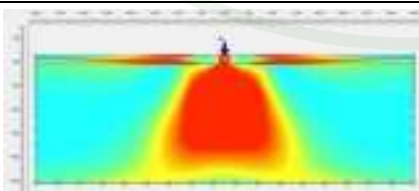
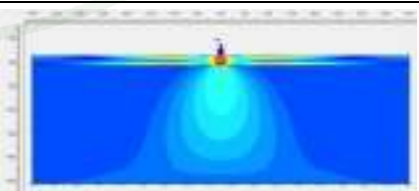
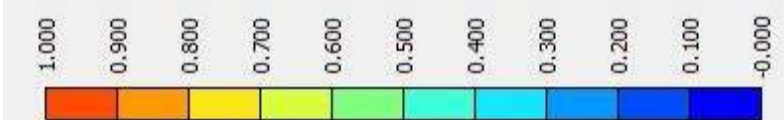
ตารางที่ 44 แสดงค่า Relative Shear Stress ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A เปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.0 เมตร

Load	Soft Foundation ($E_1/E_2 = 10$ time)	Stiff Foundation ($E_1/E_2 = 0.2$ time)
30 kPa	 Extreme Relative Shear Stress = 0.87	 Extreme Relative Shear Stress = 0.61
60 kPa	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00	 Extreme Relative Shear Stress = 0.79
90 kPa	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00
120 kPa	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00
150 kPa	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00
Legend		

ตารางที่ 45 แสดงค่า Relative Shear Stress ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C เปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.0 เมตร

Load	Soft Foundation ($E_1/E_2 = 1,000$ time)	Stiff Foundation ($E_1/E_2 = 20$ time)
200 kPa	 Extreme Relative Shear Stress = 0.99	 Extreme Relative Shear Stress = 0.72
400 kPa	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00	 Extreme Relative Shear Stress = 0.88
600 kPa	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00	 Extreme Relative Shear Stress = 0.96
800 kPa	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00
1,000 kPa	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00
Legend		

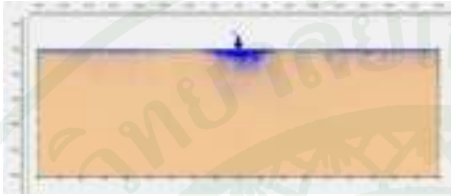
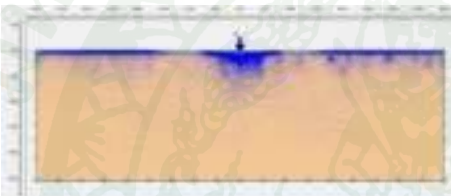
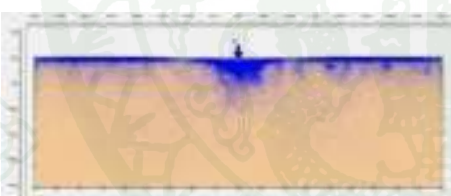
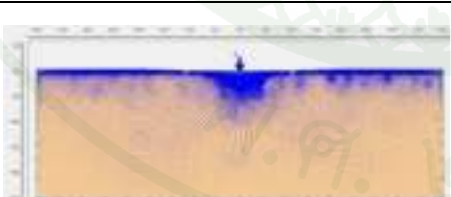
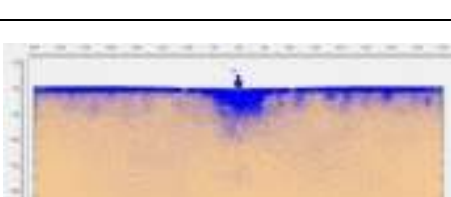
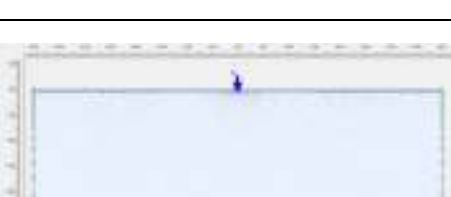
ตารางที่ 46 แสดงค่า Relative Shear Stress ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D เปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.0 เมตร

Load	Soft Foundation ($E_1/E_2 = 10,000$ time)	Stiff Foundation ($E_1/E_2 = 200$ time)
300 kPa	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00	 Extreme Relative Shear Stress = 0.76
600 kPa	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00
900 kPa	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00
1,200 kPa	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00
1,500 kPa	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00	 Extreme Relative Shear Stress = 1.00
Legend		

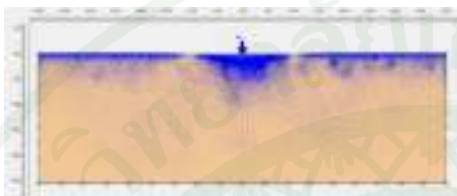
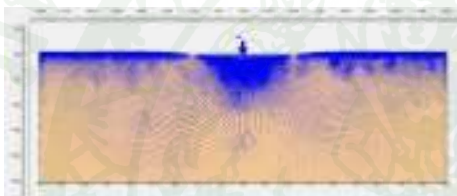
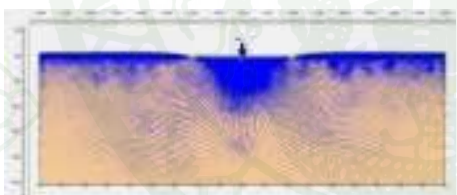
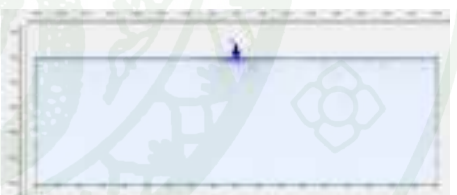
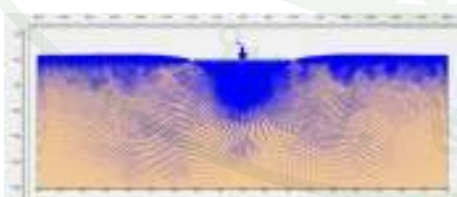
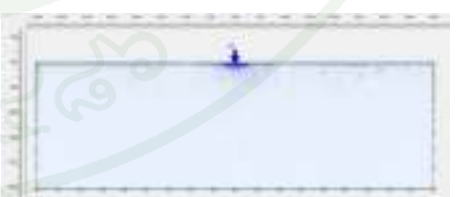
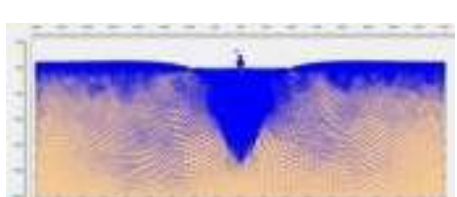
3.2 การพัฒนาตัวของผิวการพิบัติ (Failure Surface Development)

ในการศึกษาถึงการพัฒนาตัวของผิวการพิบัติโดยพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง จะพบว่าการพัฒนาตัวของผิวการพิบัติของโครงสร้างชั้นทางอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อนจะมีปริมาณการเคลื่อนตัวที่มากกว่าโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็งมาก ขณะที่น้ำหนักที่มากระทำกับชั้นผิวทางมีค่าเท่ากัน และเมื่อเปลี่ยนชนิดของวัสดุโครงสร้างชั้นทางให้มีความแข็งมากขึ้น (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A, Grade B, Grade C และ Grade D) พบว่าค่าปริมาณการเคลื่อนตัวจะมีค่าลดลง การพัฒนาตัวของผิวการพิบัติวัสดุชั้นผิวทางแต่ละชนิด เปรียบเทียบระหว่างชั้นผิวทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นผิวทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง ดังแสดงในตารางที่ 47 ถึงตารางที่ 52

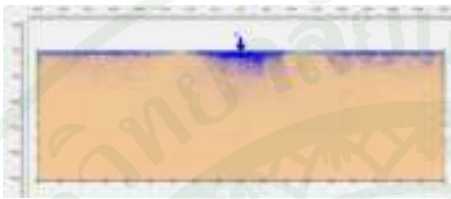
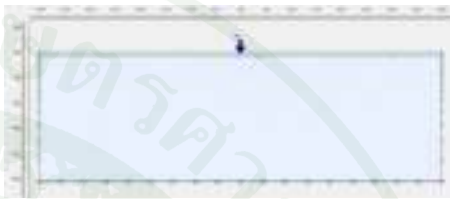
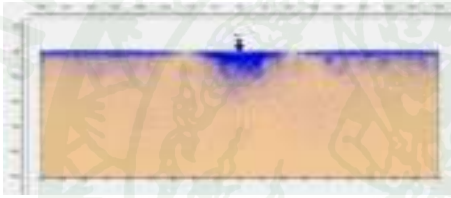
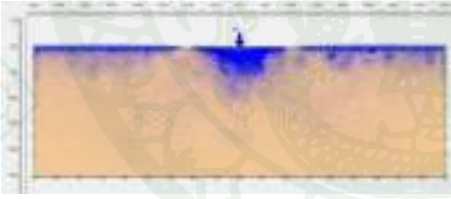
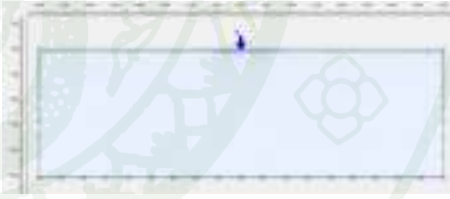
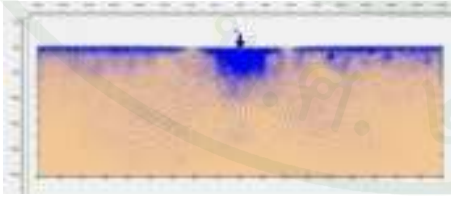
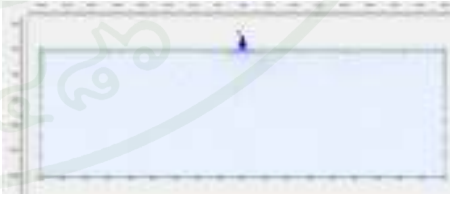
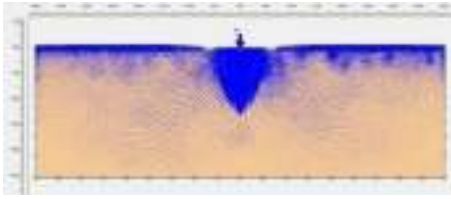
ตารางที่ 47 แสดงการพัฒนาตัวของผิวการบีบตัวของโครงสร้างชั้นทาง Grade A เปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.5 เมตร

Load	Soft Foundation ($E_1/E_2 = 10$ time)	Stiff Foundation ($E_1/E_2 = 0.2$ time)
30 kPa (Scale 100 time)	 Extreme Total Displacement = 8.33×10^{-3} m	 Extreme Total Displacement = 416.11×10^{-6} m
50 kPa (Scale 100 time)	 Extreme Total Displacement = 16.98×10^{-3} m	 Extreme Total Displacement = 867.55×10^{-6} m
70 kPa (Scale 100 time)	 Extreme Total Displacement = 29.29×10^{-3} m	 Extreme Total Displacement = 1.34×10^{-3} m
100 kPa (Scale 100 time)	 Extreme Total Displacement = 39.37×10^{-3} m	 Extreme Total Displacement = 2.04×10^{-3} m
150 kPa (Scale 100 time)	 Extreme Total Displacement = 53.04×10^{-3} m	 Extreme Total Displacement = 2.99×10^{-3} m

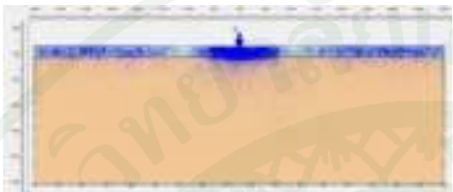
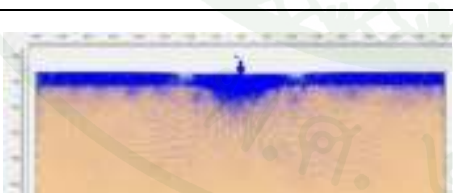
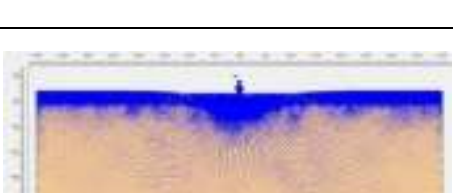
ตารางที่ 48 แสดงการพัฒนาตัวของผิวการบีบตัวของโครงสร้างชั้นทาง Grade C เปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.5 เมตร

Load	Soft Foundation ($E_1/E_2 = 1,000$ time)	Stiff Foundation ($E_1/E_2 = 20$ time)
100 kPa (Scale 100 time)	 Extreme Total Displacement = 16.33×10^{-3} m	 Extreme Total Displacement = 517.14×10^{-6} m
200 kPa (Scale 100 time)	 Extreme Total Displacement = 39.07×10^{-3} m	 Extreme Total Displacement = 1.04×10^{-3} m
300 kPa (Scale 100 time)	 Extreme Total Displacement = 64.43×10^{-3} m	 Extreme Total Displacement = 1.57×10^{-3} m
400 kPa (Scale 100 time)	 Extreme Total Displacement = 97.17×10^{-3} m	 Extreme Total Displacement = 2.15×10^{-3} m
500 kPa (Scale 100 time)	 Extreme Total Displacement = 182.07×10^{-2} m	 Extreme Total Displacement = 2.75×10^{-3} m

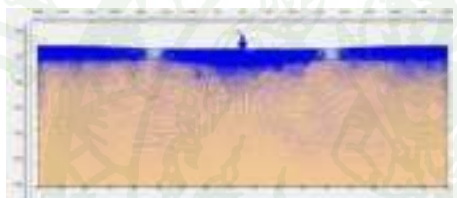
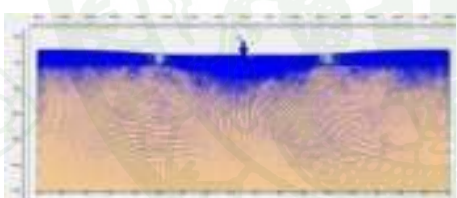
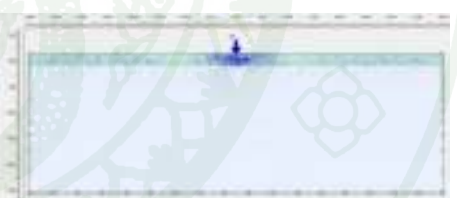
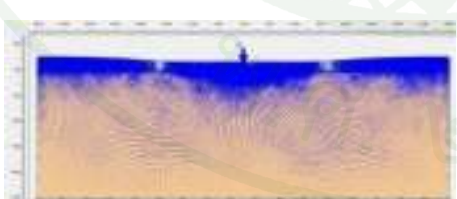
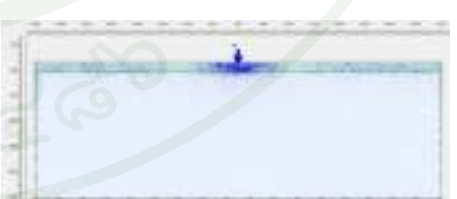
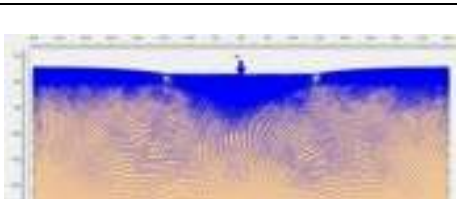
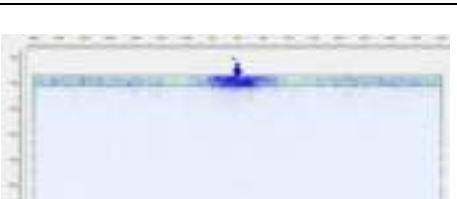
ตารางที่ 49 แสดงการพัฒนาตัวของผิวการบีบตัวของโครงสร้างชั้นทาง Grade D เปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 0.5 เมตร

Load	Soft Foundation ($E_1/E_2 = 10,000$ time)	Stiff Foundation ($E_1/E_2 = 200$ time)
150 kPa (Scale 25 time)	 Extreme Total Displacement = 21.22×10^{-3} m	 Extreme Total Displacement = 578.38×10^{-6} m
300 kPa (Scale 25 time)	 Extreme Total Displacement = 55.72×10^{-3} m	 Extreme Total Displacement = 1.27×10^{-5} m
450 kPa (Scale 25 time)	 Extreme Total Displacement = 96.69×10^{-3} m	 Extreme Total Displacement = 2.07×10^{-3} m
600 kPa (Scale 25 time)	 Extreme Total Displacement = 200.35×10^{-2} m	 Extreme Total Displacement = 2.93×10^{-3} m
700 kPa (Scale 25 time)	 Extreme Total Displacement = 580.82×10^{-2} m	 Extreme Total Displacement = 3.56×10^{-3} m

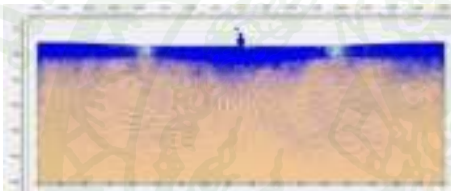
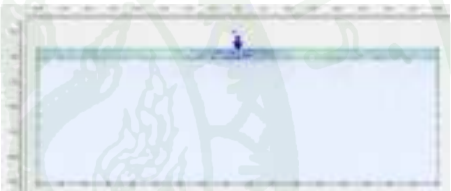
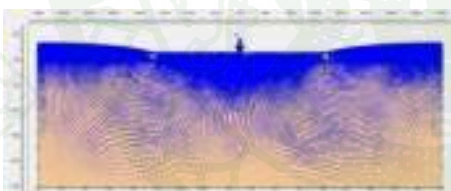
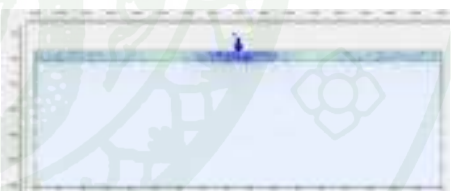
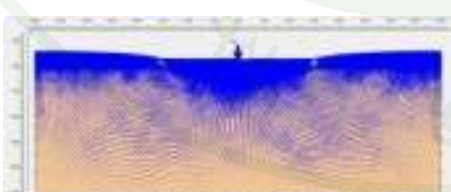
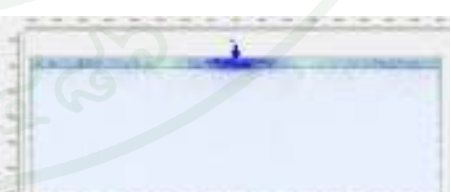
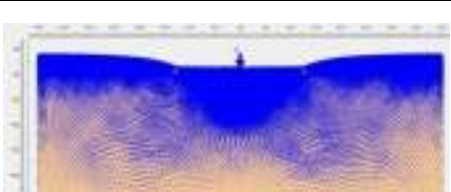
ตารางที่ 50 แสดงการพัฒนาตัวของผิวการบีบตัวของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A เปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.0 เมตร

Load	Soft Foundation ($E_1/E_2 = 10 \text{ time}$)	Stiff Foundation ($E_1/E_2 = 0.2 \text{ time}$)
30 kPa (Scale 100 time)	 Extreme Total Displacement = $5.01 \times 10^{-3} \text{ m}$	 Extreme Total Displacement = $669.21 \times 10^{-6} \text{ m}$
50 kPa (Scale 100 time)	 Extreme Total Displacement = $10.24 \times 10^{-3} \text{ m}$	 Extreme Total Displacement = $1.42 \times 10^{-3} \text{ m}$
70 kPa (Scale 100 time)	 Extreme Total Displacement = $15.93 \times 10^{-3} \text{ m}$	 Extreme Total Displacement = $2.19 \times 10^{-3} \text{ m}$
100 kPa (Scale 100 time)	 Extreme Total Displacement = $22.20 \times 10^{-3} \text{ m}$	 Extreme Total Displacement = $3.80 \times 10^{-3} \text{ m}$
150 kPa (Scale 100 time)	 Extreme Total Displacement = $33.81 \times 10^{-3} \text{ m}$	 Extreme Total Displacement = $9.56 \times 10^{-3} \text{ m}$

ตารางที่ 51 แสดงการพัฒนาตัวของผิวการบีบตัวของโครงสร้างชั้นทาง Grade C เปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.0 เมตร

Load	Soft Foundation ($E_1/E_2 = 1,000$ time)	Stiff Foundation ($E_1/E_2 = 20$ time)
200 kPa (Scale 50 time)	 Extreme Total Displacement = 10.23×10^{-3} m	 Extreme Total Displacement = 603.65×10^{-6} m
400 kPa (Scale 50 time)	 Extreme Total Displacement = 24.38×10^{-3} m	 Extreme Total Displacement = 1.22×10^{-3} m
600 kPa (Scale 50 time)	 Extreme Total Displacement = 46.29×10^{-3} m	 Extreme Total Displacement = 1.85×10^{-3} m
800 kPa (Scale 50 time)	 Extreme Total Displacement = 70.52×10^{-3} m	 Extreme Total Displacement = 2.47×10^{-3} m
1,000 kPa (Scale 50 time)	 Extreme Total Displacement = 105.45×10^{-2} m	 Extreme Total Displacement = 3.10×10^{-3} m

ตารางที่ 52 แสดงการพัฒนาดัชนีของผิวการบีบตัวของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D เปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนา 2.0 เมตร

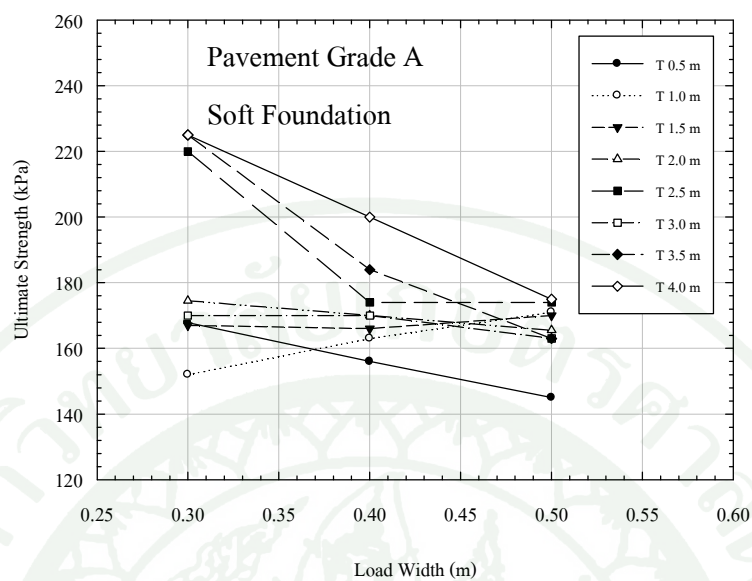
Load	Soft Foundation ($E_1/E_2 = 10,000$ time)	Stiff Foundation ($E_1/E_2 = 200$ time)
300 kPa (Scale 50 time)	 Extreme Total Displacement = 5.68×10^{-3} m	 Extreme Total Displacement = 510.63×10^{-6} m
600 kPa (Scale 50 time)	 Extreme Total Displacement = 25.03×10^{-3} m	 Extreme Total Displacement = 1.03×10^{-3} m
900 kPa (Scale 50 time)	 Extreme Total Displacement = 57.24×10^{-3} m	 Extreme Total Displacement = 1.69×10^{-3} m
1,200 kPa (Scale 50 time)	 Extreme Total Displacement = 102.69×10^{-3} m	 Extreme Total Displacement = 2.62×10^{-3} m
1,500 kPa (Scale 50 time)	 Extreme Total Displacement = 203.42×10^{-3} m	 Extreme Total Displacement = 3.67×10^{-3} m

4. ค่ากำลังรับแรงสูงสุด (Ultimate Strength)

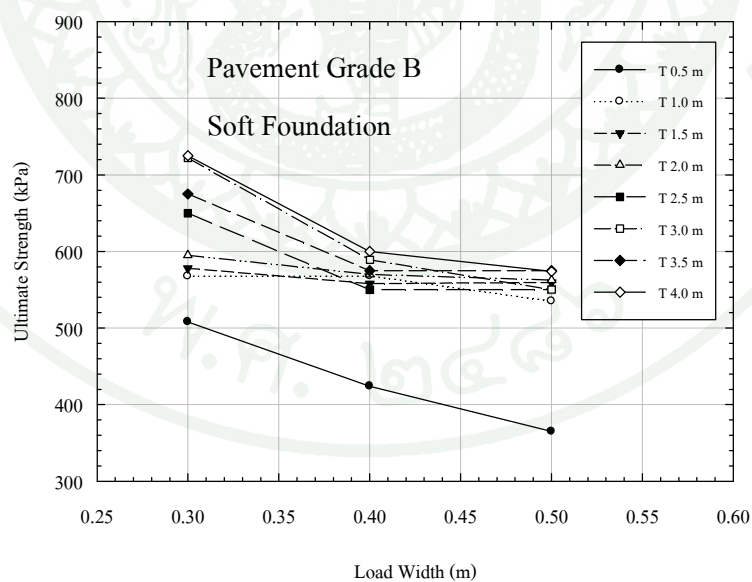
เพื่อการศึกษาถึงอิทธิพลของชั้นดินฐานรากที่มีผลต่อโครงสร้างชั้นทาง ในหัวข้อนี้จะนำค่ากำลังรับแรงสูงสุดมาพิจารณา โดยที่จะพิจารณาค่ากำลังรับแรงสูงสุดภายหลังการเปลี่ยนแปลงกรณีเงื่อนไข ซึ่งในการวิเคราะห์แต่ละกรณีเงื่อนไขนั้น จะศึกษาอิทธิพลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ค่าอัตราส่วน Elastic Modulus ระหว่างโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานราก (E_1/E_2) ค่าความกว้างของน้ำหนักรถที่มากกระทำ (Load Width) และค่าความหนาของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง (Thickness) เป็นต้น โดยค่ากำลังรับแรงสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทางชนิดต่างๆ บนชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็งดังสรุปไว้ในภาคผนวก ก

4.1 อิทธิพลของความกว้างของน้ำหนักรถที่มากกระทำที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงสูงสุด

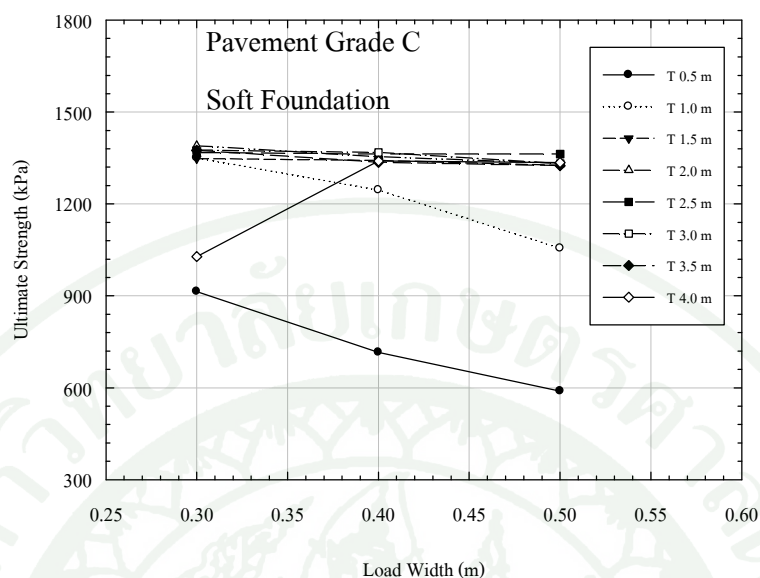
จากผลลัพธ์การศึกษาค่ากำลังรับแรงสูงสุดจะพบว่า เมื่อค่าความกว้างของหน่วยแรงที่มากกระทำกับโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงสูงสุดของแบบจำลองที่สามารถรับได้นั้นมีค่าลดลง กล่าวคือ เมื่อพื้นที่ของหน่วยแรงที่มากกระทำมีมากขึ้นก็จะทำให้การกระจายตัวของหน่วยแรงภายในโครงสร้างชั้นทางมีมากขึ้นตามจึงทำให้โครงสร้างชั้นทางที่มีคุณสมบัติการรับแรงเท่าเดิมเกิดการพิบัติเร็วขึ้น ซึ่งจะเหมือนกันทุกประเภทวัสดุ โดยจะพบว่าในชั้นฐานรากดินอ่อนนั้น เมื่อค่าความกว้างของหน่วยแรงที่มากกระทำมีค่าเพิ่มขึ้นจะพบว่าค่ากำลังรับแรงสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้จะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในภาพที่ 96 ถึงภาพที่ 99 ส่วนในชั้นฐานรากดินแข็งนั้นพบว่าเมื่อค่าความกว้างของหน่วยแรงที่มากกระทำมีค่าเพิ่มมากขึ้นค่ากำลังสูงสุดจะลดลงเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 100 ถึงภาพที่ 103



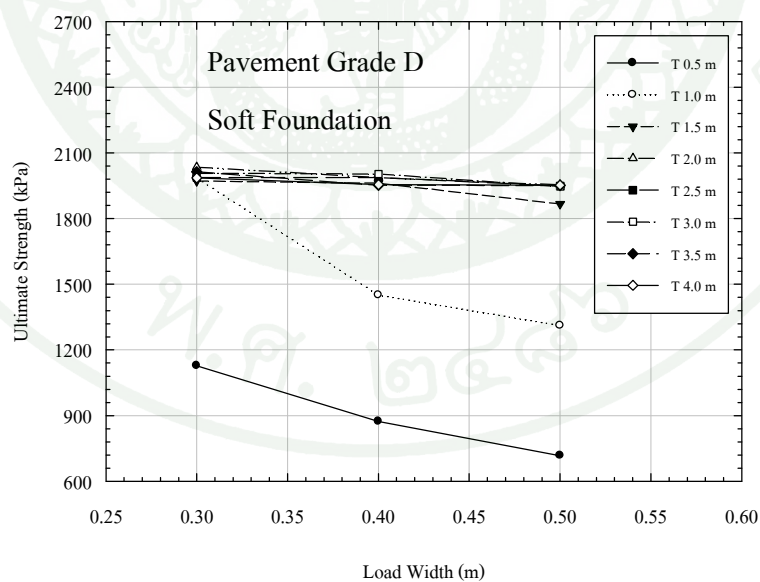
ภาพที่ 96 แสดงค่ากำลังการรับแรงสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A บนชั้นฐานรากดินอ่อน เมื่อเพิ่มความกว้างของหน่วยแรงที่มากระทำ และเพิ่มความหนาของโครงสร้างชั้นทาง



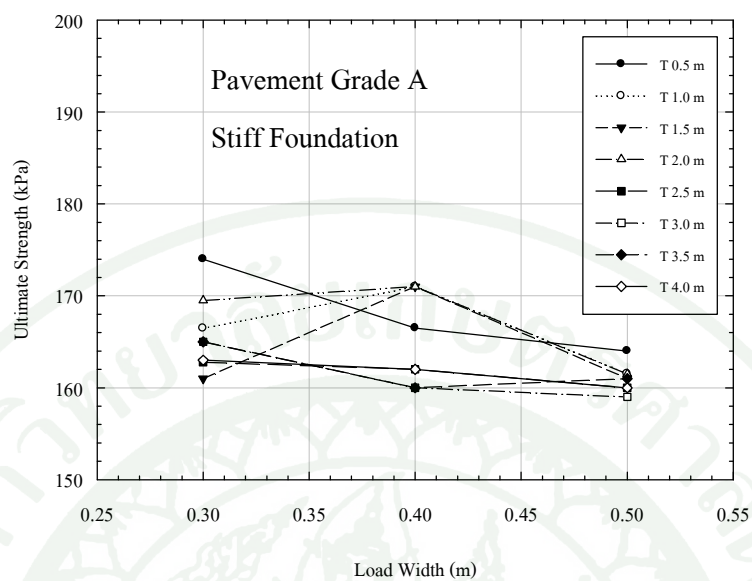
ภาพที่ 97 แสดงค่ากำลังการรับแรงสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade B บนชั้นฐานรากดินอ่อน เมื่อเพิ่มความกว้างของหน่วยแรงที่มากระทำ และเพิ่มความหนาของโครงสร้างชั้นทาง



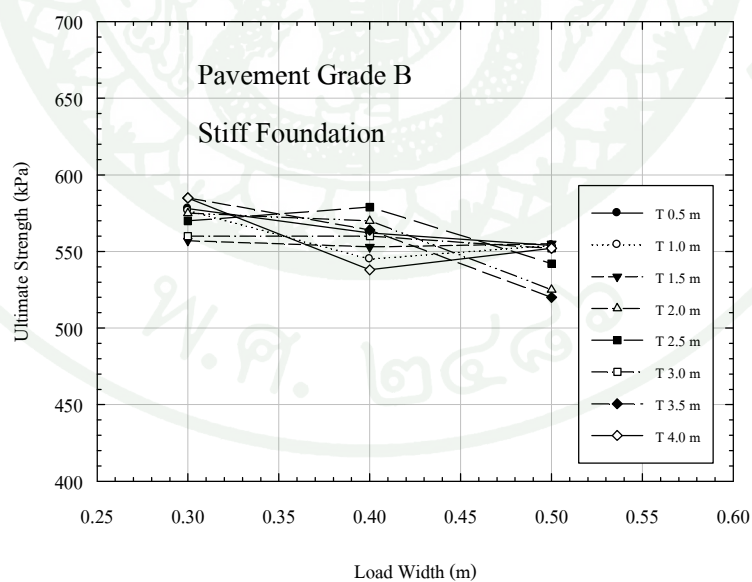
ภาพที่ 98 แสดงค่ากำลังการรับแรงสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C บนชั้นฐานรากดินอ่อน เมื่อเพิ่มความกว้างของหน่วยแรงที่มากระทำ และเพิ่มความหนาของโครงสร้างชั้นทาง



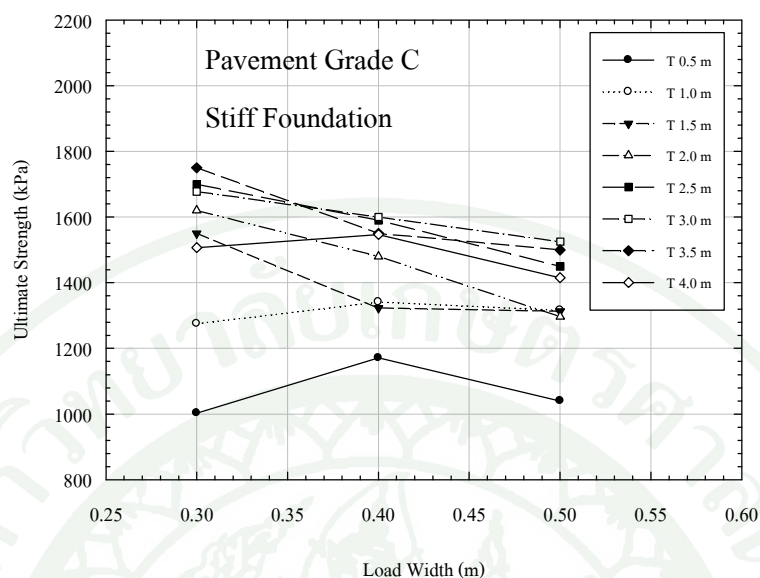
ภาพที่ 99 แสดงค่ากำลังการรับแรงสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D บนชั้นฐานรากดินอ่อน เมื่อเพิ่มความกว้างของหน่วยแรงที่มากระทำ และเพิ่มความหนาของโครงสร้างชั้นทาง



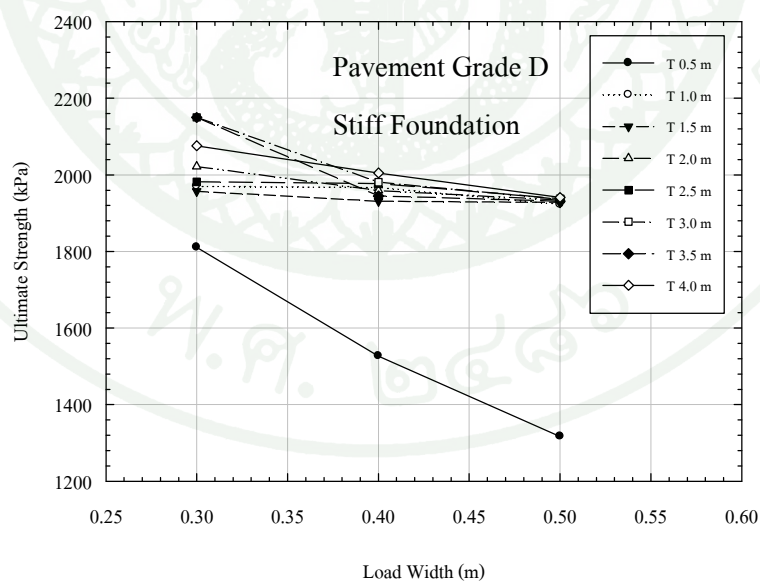
ภาพที่ 100 แสดงค่ากำลังการรับแรงสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A บนชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อเพิ่มความกว้างของหน่วยแรงที่มากระทำ และเพิ่มความหนาของโครงสร้างชั้นทาง



ภาพที่ 101 แสดงค่ากำลังการรับแรงสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade B บนชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อเพิ่มความกว้างของหน่วยแรงที่มากระทำ และเพิ่มความหนาของโครงสร้างชั้นทาง



ภาพที่ 102 แสดงค่ากำลังการรับแรงสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C บนชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อเพิ่มความกว้างของหน่วยแรงที่มากระทำ และเพิ่มความหนาของโครงสร้างชั้นทาง

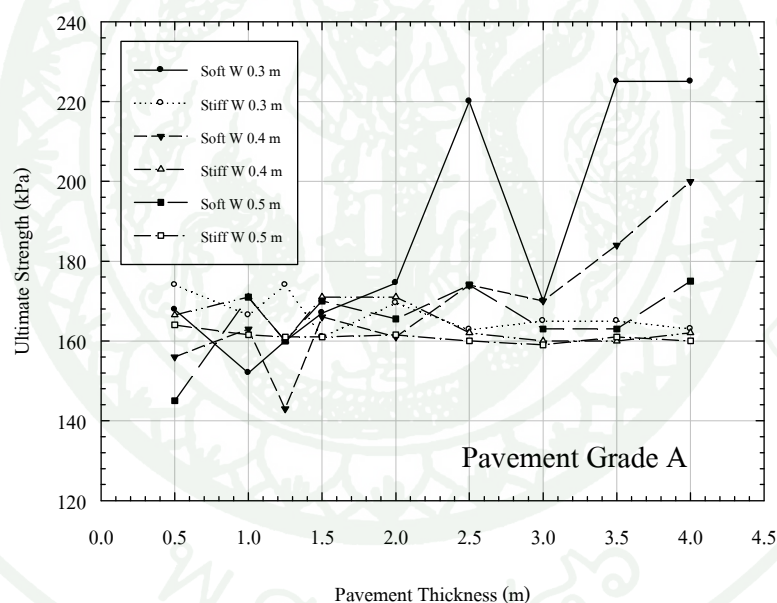


ภาพที่ 103 แสดงค่ากำลังการรับแรงสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D บนชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อเพิ่มความกว้างของหน่วยแรงที่มากระทำ และเพิ่มความหนาของโครงสร้างชั้นทาง

4.2 อิทธิพลของค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทางต่อกำลังรับแรงสูงสุด

เมื่อค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้น จะพบว่าค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุด จะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งแต่ละชนิดวัสดุจะมีผลการวิเคราะห์แตกต่างกันดังต่อไปนี้

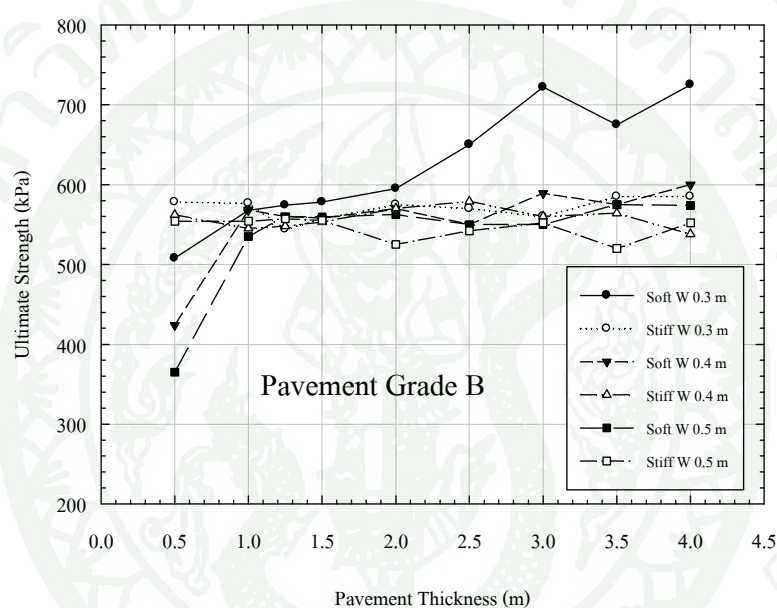
วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A วัสดุชนิดนี้เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงต่ำ จึงเป็นผลให้เมื่อเพิ่มน้ำหนักที่มากกระทำกับโครงสร้างชั้นทางจะทำให้เกิดการบีบอัดขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะพบว่าความหนาของโครงสร้างชั้นทางจะไม่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงสูงสุด เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากค่ากำลังรับแรงสูงสุดที่ความหนาต่างๆ ค่ากำลังรับแรงสูงสุดจะมีค่าคงที่เสมอไม่ว่าความหนาของโครงสร้างชั้นทางจะมีค่าเท่าใด และชั้นฐานรากชนิดใดก็ตาม ดังแสดงในภาพที่ 104



ภาพที่ 104 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A โดยเปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็งดินแข็ง กับขนาดความกว้างของหน่วยแรงที่มากกระทำ

วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade B เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงปานกลางค่อนข้างต่ำ จึงมีพฤติกรรมคล้ายคลึงกับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A แต่เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนาเพิ่มขึ้น ค่ากำลังรับแรงสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และเมื่อความหนาของโครงสร้างชั้นทางมีค่า

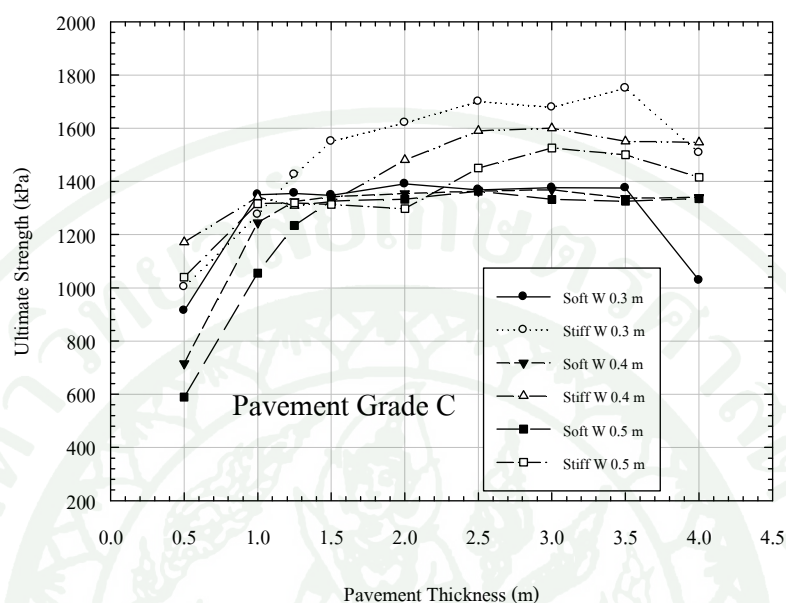
เพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่ง (1.00 เมตร) ค่ากำลังรับแรงสูงสุดจะเริ่มมีค่าคงที่ และพบว่าเมื่อความหนาของโครงสร้างชั้นทางมีค่าน้อย (0.5 - 2.0 เมตร) ค่ากำลังรับแรงสูงสุดของโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง มีค่ามากกว่าค่ากำลังรับแรงสูงสุดของโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และเมื่อความหนามีค่าเพิ่มขึ้น (2.5 - 4.0 เมตร) พบว่าค่ากำลังรับแรงสูงสุดของโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อนจะมีค่ามากกว่าโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 105



ภาพที่ 105 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade B โดยเปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็งดินแข็ง กับขนาดความกว้างของหน่วยแรงที่กระทำ

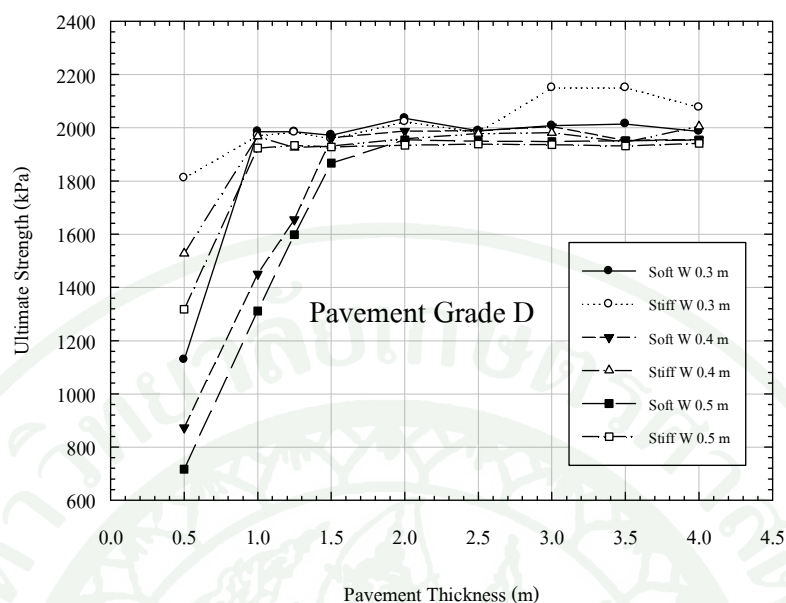
วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงปานกลางค่อนข้างสูง จึงสามารถรับหน่วยแรงที่กระทำกับโครงสร้างชั้นทางได้มาก ทำให้การถ่ายเทหน่วยแรงไปยังชั้นดินฐานรากสามารถทำได้ดี จากผลลัพธ์ที่ออกมาแสดงให้เห็นว่า เมื่อค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ากำลังรับแรงสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยค่ากำลังรับแรงของโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็ง จะมีค่ามากกว่าค่ากำลังรับแรงของวัสดุที่อยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อนเสมอ ค่ากำลังรับแรงสูงสุดของโครงสร้างชั้นทาง Grade C โดยเปรียบเทียบระหว่างฐานชั้น

รากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง กับขนาดความกว้างของหน่วยแรงที่มากกระทำดังแสดงในภาพที่ 106



ภาพที่ 106 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C โดยเปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็งดินแข็ง กับขนาดความกว้างของหน่วยแรงที่มากกระทำ

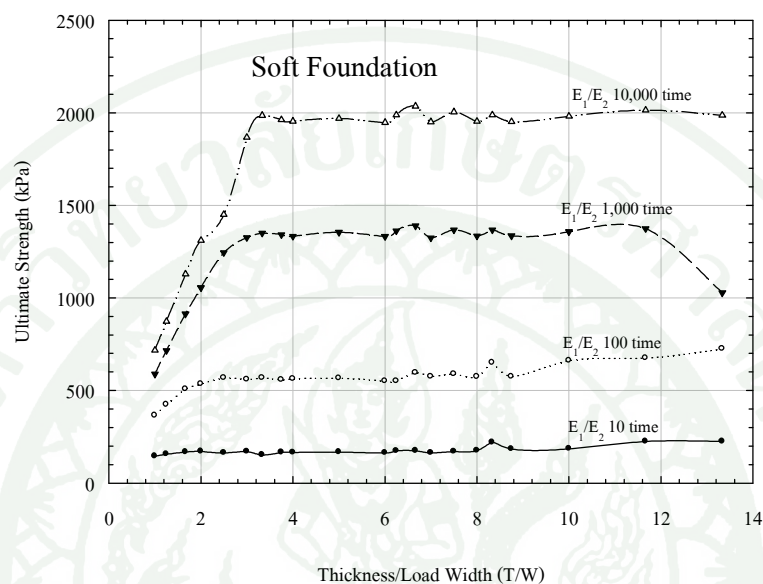
วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง ทำให้สามารถรับหน่วยแรงที่มากกระทำได้ แต่เนื่องจากการที่เป็นวัสดุที่มีค่า Elastic Modulus สูงมาก จึงเป็นวัสดุที่มีความแข็งแต่เปราะ เมื่อพิจารณาจากผลลัพธ์ที่ออกมา ในช่วงแรกที่มีความหนาของโครงสร้างชั้นทางมีค่าน้อย กำลังรับแรงสูงสุดของโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็งจะมีค่ามากกว่าค่ากำลังรับแรงสูงสุดของโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน แต่เมื่อความหนาของโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้น (2.00 - 4.00 เมตร) ค่ากำลังการรับแรงสูงสุดของทั้งโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็งและโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อนจะมีค่าคงที่ไม่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการที่วัสดุมีความแข็งแรงมากทำให้อิทธิพลของหน่วยแรงที่มากกระทำกับโครงสร้างชั้นทางส่งลงมาไม่ถึงชั้นดินฐานราก ซึ่งโครงสร้างชั้นทางจะทำการรับหน่วยแรงที่มากกระทำเอาไว้ทั้งหมดจึงทำให้อิทธิพลของชั้นดินฐานรากไม่มีผล ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงสูงสุดมีค่าไม่เพิ่มขึ้น ค่ากำลังรับแรงสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D โดยเปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง กับขนาดความกว้างของหน่วยแรงที่มากกระทำ ดังแสดงในภาพที่ 107



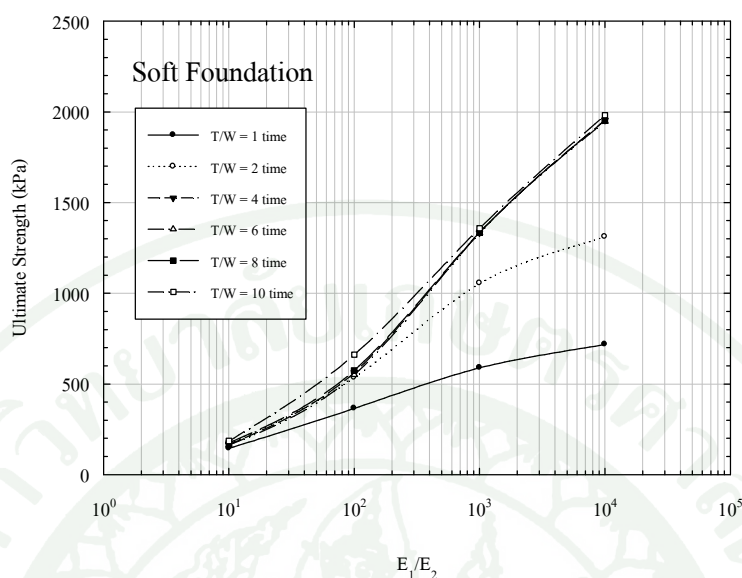
ภาพที่ 107 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D โดยเปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็งดินแข็ง กับขนาดความกว้างของหน่วยแรงที่กระทำ

จากผลลัพธ์ของค่ากำลังรับแรงสูงสุดที่ออกมา เมื่อนำค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง และค่าความกว้างของน้ำหนักรที่กระทำ มาเปรียบเทียบกับกันเป็นอัตราส่วนเพื่อที่จะสามารถเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงสูงสุดกันได้ จะพบว่าเมื่อค่า E_1/E_2 มีค่าเพิ่มมากขึ้นค่ากำลังรับแรงสูงสุดจะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย โดยลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนความหนาของโครงสร้างชั้นทางต่อความกว้างของน้ำหนักรที่กระทำที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อค่าอัตราส่วนความหนาของโครงสร้างชั้นทางต่อความกว้างของน้ำหนักรที่กระทำมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าๆ หนึ่ง (ประมาณ 2 ถึง 4 เมตร) จะพบว่าค่ากำลังรับแรงสูงสุดจะมีค่าคงที่และไม่เพิ่มขึ้นไปกว่านี้ แสดงว่าค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทางและค่าความกว้างของน้ำหนักรที่กระทำเริ่มไม่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงสูงสุดของ โดยค่ากำลังรับแรงสูงสุดของโครงสร้างชั้นทางซึ่งก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินอ่อน และค่าอัตราส่วนของความหนาของโครงสร้างชั้นทางต่อความกว้างของน้ำหนักรที่กระทำ ดังแสดงในภาพที่ 108 ค่ากำลังรับแรงสูงสุดของโครงสร้างชั้นทางซึ่งก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินอ่อน และค่าอัตราส่วน Elastic Modulus ระหว่างโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานรากดังแสดงในภาพที่ 109 ค่ากำลังรับแรงสูงสุดของโครงสร้างชั้นทางซึ่งก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินแข็ง และค่าอัตราส่วนของความหนาของโครงสร้างชั้นทางต่อความกว้างของน้ำหนักรที่กระทำ ดัง

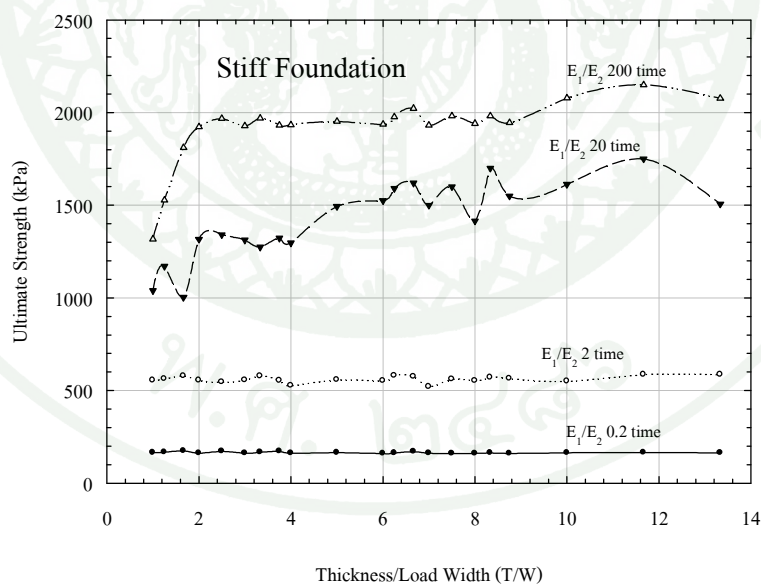
แสดงในภาพที่ 110 และค่ากำลังรับแรงสูงสุดของโครงสร้างชั้นทางซึ่งก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินแข็ง และค่าอัตราส่วน Elastic Modulus ระหว่างโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานราก ดังแสดงในภาพที่ 111



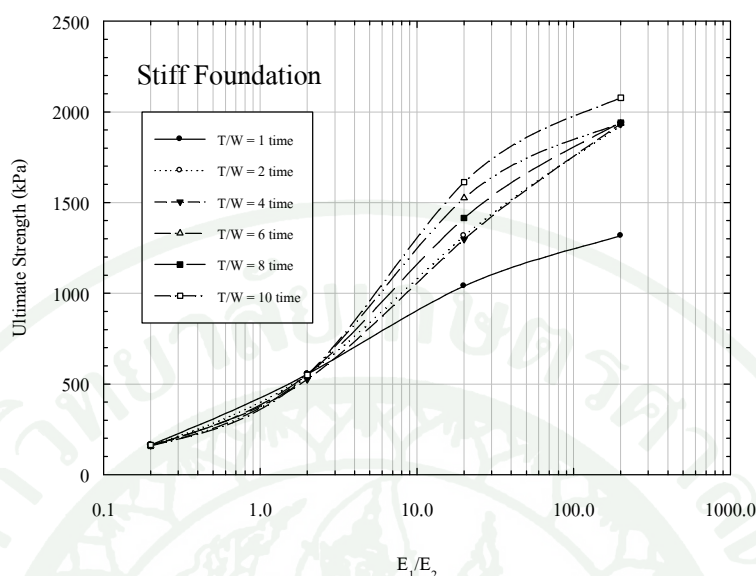
ภาพที่ 108 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดของโครงสร้างชั้นทางซึ่งก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินอ่อน และค่าอัตราส่วนของความหนาของโครงสร้างชั้นทางต่อความกว้างของน้ำหนักรที่มากระทำ



ภาพที่ 109 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดของโครงสร้างชั้นทางซึ่งก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินอ่อน และค่าอัตราส่วน Elastic Modulus ระหว่างโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานราก

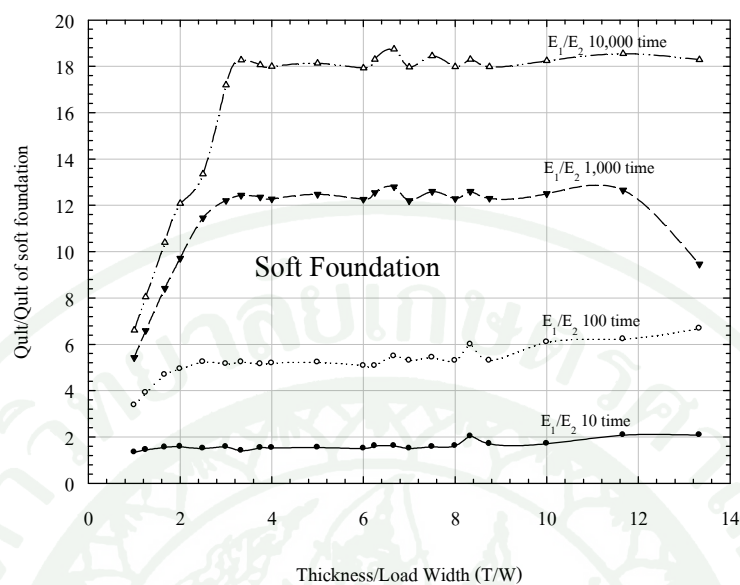


ภาพที่ 110 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดของโครงสร้างชั้นทางซึ่งก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินแข็ง และค่าอัตราส่วนของความหนาของโครงสร้างชั้นทางต่อความกว้างของน้ำหนักรที่กระทำ

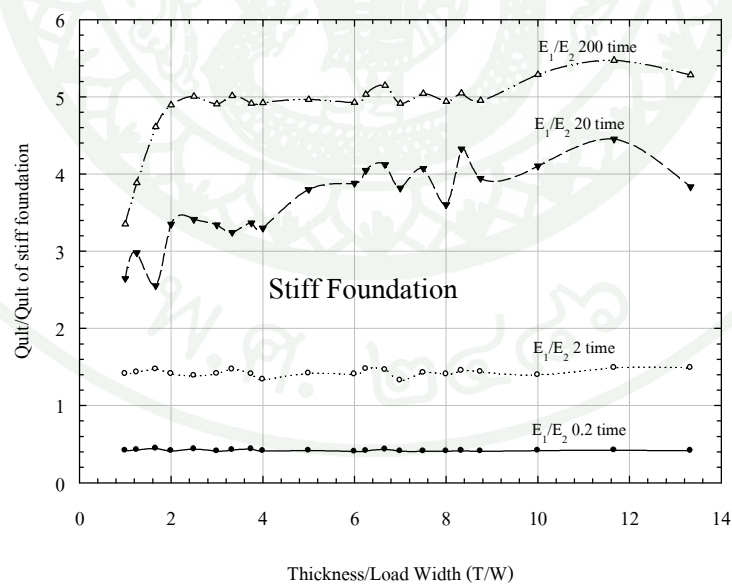


ภาพที่ 111 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดของโครงสร้างชั้นทางซึ่งก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินแข็ง และค่าอัตราส่วน Elastic Modulus ระหว่างโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานราก

และเมื่อนำค่ากำลังรับแรงสูงสุดของโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นดินฐานราก มาทำเป็นอัตราส่วนกับค่ากำลังรับแรงสูงสุดของชั้นฐานรากดินอ่อนกรณีไม่มีโครงสร้างชั้นทาง (109 kPa) และชั้นฐานรากดินแข็งกรณีไม่มีโครงสร้างชั้นทาง (393 kPa) ซึ่งจากผลลัพธ์จากค่าอัตราส่วนที่ออกมาจะพบว่าในฐานรากดินอ่อนเมื่อมีโครงสร้างชั้นทางมาก่อสร้างอยู่ด้านบนจะทำให้ค่ากำลังรับแรงสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกกรณี ซึ่งจะแตกต่างกับในชั้นฐานรากดินแข็ง คือในกรณีที่วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A มาก่อสร้างบนชั้นดินฐานรากจะทำให้ค่ากำลังรับแรงสูงสุดของวัสดุมีค่าลดลงซึ่งเป็นเพราะโครงสร้างชั้นทางมีกำลังต่ำ ทำให้เมื่อไปก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินแข็งค่ากำลังการรับแรงสูงสุดจะมีค่าลดลง เนื่องจากโปรแกรม PLAXIS จะหยุดการคำนวณเมื่อมีวัสดุเกิดการพิบัติขึ้น และการพิบัติเกิดขึ้นบนโครงสร้างชั้นทาง ทำให้ค่ากำลังรับแรงสูงสุดที่ออกมาจึงมีค่าต่ำกว่าชั้นฐานรากดินอ่อน โดยค่ากำลังรับแรงสูงสุดของโครงสร้างชั้นทางซึ่งก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินอ่อนต่อค่ากำลังรับแรงสูงสุดของชั้นฐานรากดินอ่อน และค่าอัตราส่วนของความหนาของโครงสร้างชั้นทางต่อความกว้างของน้ำหนักระทำ ดังแสดงในภาพที่ 112 และค่ากำลังรับแรงสูงสุดของโครงสร้างชั้นทางซึ่งก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินแข็งต่อค่ากำลังรับแรงสูงสุดของชั้นฐานรากดินแข็ง และค่าอัตราส่วนของความหนาของโครงสร้างชั้นทางต่อความกว้างของน้ำหนักระทำ ดังแสดงในภาพที่ 113



ภาพที่ 112 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดของโครงสร้างชั้นทางซึ่งก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินอ่อนต่อค่ากำลังรับแรงสูงสุดของชั้นฐานรากดินอ่อน และค่าอัตราส่วนของความหนาของโครงสร้างชั้นทางต่อความกว้างของน้ำหนักรถที่มากกระทำ



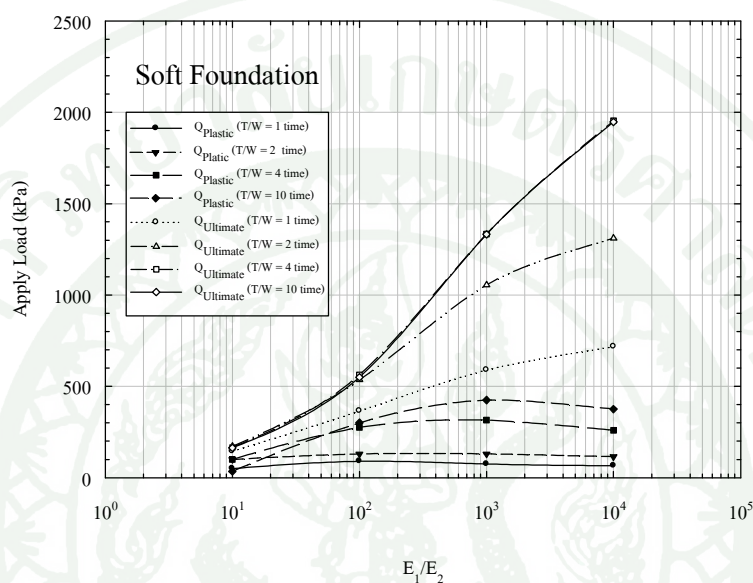
ภาพที่ 113 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดของโครงสร้างชั้นทางซึ่งก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินแข็งต่อค่ากำลังรับแรงสูงสุดของชั้นฐานรากดินแข็ง และค่าอัตราส่วนของความหนาของโครงสร้างชั้นทางต่อความกว้างของน้ำหนักรถที่มากกระทำ

สำหรับการพิจารณาถึงลักษณะของการบีบอัดที่แตกต่างกันของวัสดุชั้นต่างๆ เมื่อพิจารณาจากเส้นกราฟระหว่างค่ากำลังรับแรงสูงสุดและค่าอัตราส่วนระหว่างความหนาของโครงสร้างชั้นทางต่อความกว้างของน้ำหนักรวมที่มากกระทำ จะพบว่าโครงสร้างชั้นทางซึ่งมีค่าอัตราส่วน Elastic Modulus ที่ต่ำ (10, 100 เท่า ในชั้นฐานรากดินอ่อน และ 0.2, 2 เท่าในชั้นฐานรากดินแข็ง) จะพบว่าค่ากำลังรับแรงสูงสุดจะมีค่าค่อนข้างคงที่ซึ่งอาจเป็นเพราะการบีบอัดจะเกิดขึ้นบนโครงสร้างชั้นทางก่อน เนื่องจากวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงต่ำ ขณะที่วัสดุโครงสร้างชั้นทางที่มีค่าอัตราส่วน Elastic Modulus ที่สูง (1,000, 10,000 เท่า ในชั้นฐานรากดินอ่อน และ 20, 200 เท่าในชั้นฐานรากดินแข็ง) จะพบว่าค่ากำลังรับแรงสูงสุดจะค่อยๆมีค่าเพิ่มขึ้นก่อนที่จะเริ่มคงที่ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อความหนาของโครงสร้างชั้นทางมีค่าต่ำค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำหนักรวมกระทำจะส่งผ่านไปยังชั้นดินฐานรากได้ แต่เมื่อความหนาของโครงสร้างชั้นทางมีค่ามากขึ้นลักษณะของการบีบอัดจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณโครงสร้างชั้นทางเท่านั้นเนื่องจากโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนาที่มากเกินไป

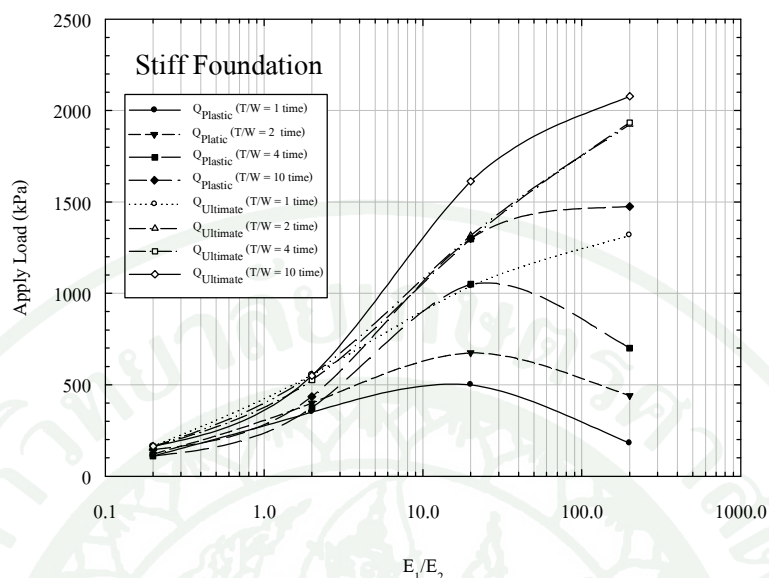
โดยเมื่อพิจารณาข้อมูลของการเกิด First Plastic Point และค่ากำลังรับแรงสูงสุด จะพบว่าสำหรับกรณีชั้นฐานรากดินอ่อนเมื่อค่าความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้น (ค่า Elastic Modulus ของโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้น) จนทำให้วัสดุมีความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุดที่มากกระทำได้มากขึ้น แต่ค่าน้ำหนักที่ทำให้เกิด First Plastic Point แทบจะไม่เปลี่ยนแปลงรวมไปถึงการเพิ่มความหนาของโครงสร้างชั้นทาง และการลดความกว้างของน้ำหนักรวมที่มากกระทำด้วย จะมีอิทธิพลต่อค่าน้ำหนักที่ทำให้เกิด First Plastic Point น้อย ส่วนกรณีของชั้นฐานรากดินแข็งเมื่อความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้น และความหนาของโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าน้ำหนักที่ทำให้เกิด First Plastic Point ก็มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางมีค่ามากเกินไป ค่าน้ำหนักที่ทำให้เกิด First Plastic Point ก็จะมีค่าลดลง

แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางมากเกินไปโดยไม่ปรับปรุงความแข็งแรงของชั้นดินฐานราก ก่อให้เกิดความเสี่ยงในการก่อสร้าง เนื่องจากความแข็งแรงของชั้นดินฐานรากจะเป็นอีกปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลต่อพฤติกรรมของโครงสร้างชั้นทาง และการซ่อมแซมโครงสร้างชั้นทางจะเริ่มทำก็ต่อเมื่อมี First Plastic Point เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทางหรือโครงสร้างชั้นทางเกิดการบีบอัดขึ้น

โดยการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงสูงสุดและข้อมูลการเกิด First Plastic Point เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรง, ค่าความหนา และความกว้างของน้ำหนักรั้วน้ำหนักรั้วกระทำ กรณีฐานรากดินอ่อน ดังแสดงในภาพที่ 114 และกรณีของฐานรากดินแข็งดังแสดงในภาพที่ 115



ภาพที่ 114 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงสูงสุดและข้อมูลการเกิด First Plastic Point เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรง, ค่าความหนา และความกว้างของน้ำหนักรั้วน้ำหนักรั้วกระทำ กรณีฐานรากดินอ่อน



ภาพที่ 115 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงสูงสุดและข้อมูลการเกิด First Plastic Point เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรง, ค่าความหนา และความกว้างของน้ำหนัที่มากกระทำ กรณีชั้นฐานรากดินแข็ง

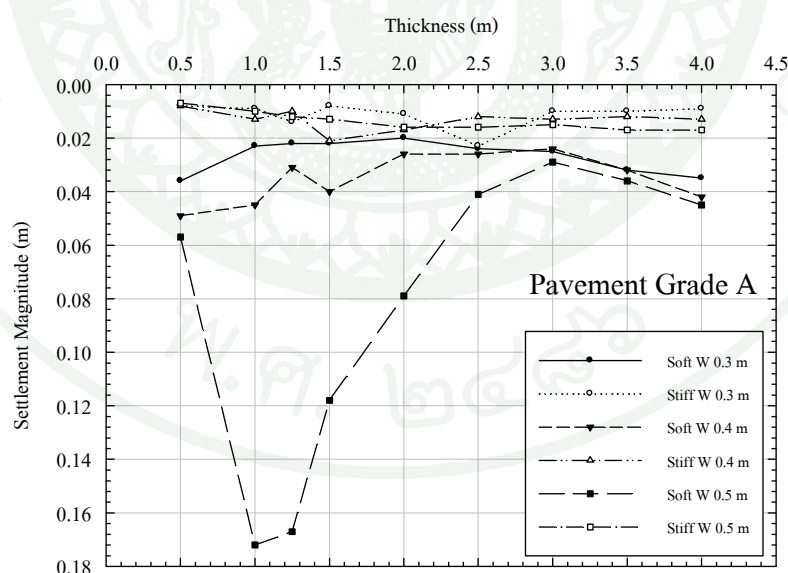
4. ปริมาณการทรุดตัวสูงสุด (Settlement Magnitude)

การวิจัยครั้งนี้จะทำการพิจารณาถึงค่าการทรุดตัวของโครงสร้างชั้นทาง เมื่อมีหน่วยแรงมากกระทำกับโครงสร้างชั้นทางมากกระทำแบบทันทีทันใด (Impact Load) โดยการทรุดตัวจะพิจารณาจากค่ากำลังรับแรงสูงสุดที่สามารถรับได้ (Ultimate Load) ซึ่งผลการศึกษาดังนี้

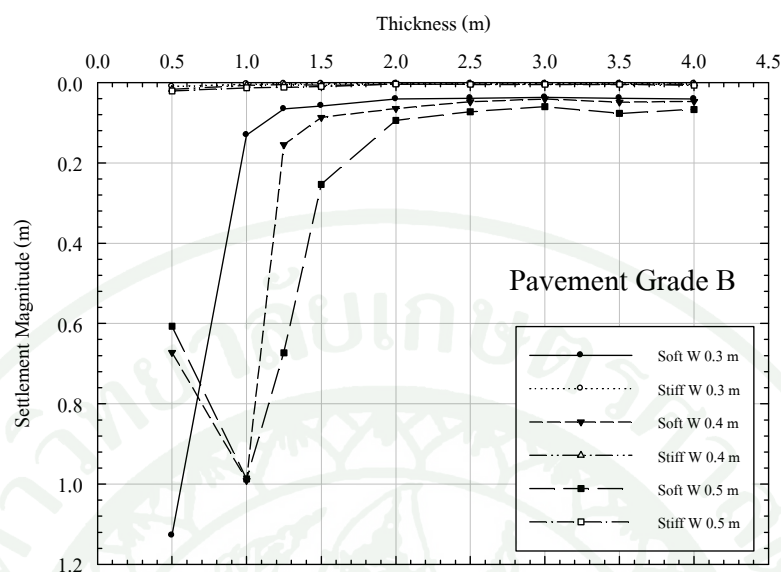
เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงประเภทของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง พบว่าเมื่อวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงมากขึ้น (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A, Grade B และ Grade C) ค่ากำลังรับแรงสูงสุดจะมีมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจะส่งผลทำให้ปริมาณการทรุดตัวมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อวัสดุมีความแข็งแรงมาก (วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D) จะพบว่าแม้ว่าค่ากำลังรับแรงสูงสุดจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่ปริมาณการทรุดตัวจะลดลง

และเมื่อความกว้างของหน่วยแรงที่มากกระทำกับโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่าการทรุดตัวจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากพื้นที่ของน้ำหนักที่กระทำมีค่ามากทำให้เกิดการเคลื่อนตัวภายในวัสดุที่มากขึ้นตามไปด้วย

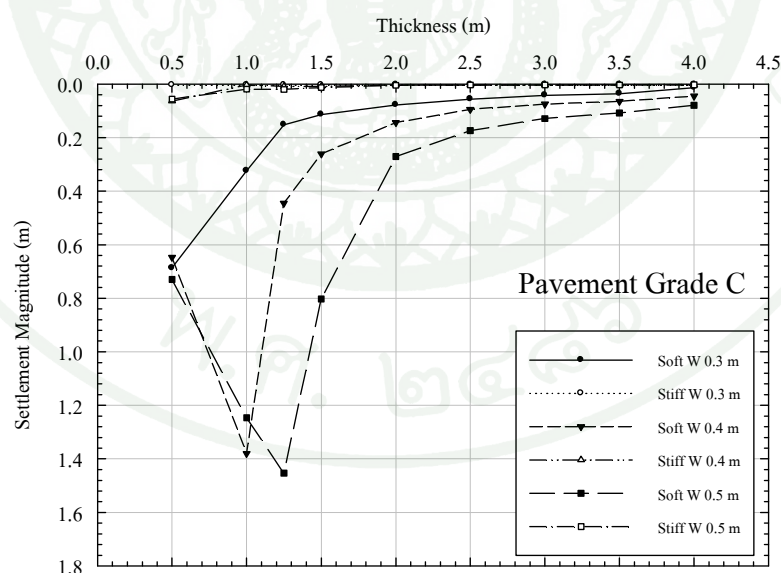
สำหรับกรณีที่ความหนาของโครงสร้างชั้นทางมีค่าน้อยมาก (0.50 เมตร) จะพบว่าพฤติกรรมการบีบอัดจะมีลักษณะเป็นการพังแบบการเฉือนขาดเนื่องจากโครงสร้างชั้นทางมีความหนาที่ไม่เพียงพอ ทำให้ปริมาณการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อย เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนาเพิ่มขึ้น (1.00 - 2.50 เมตร) ปริมาณการทรุดตัวของโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อนจะมีค่ามากกว่าโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็งมาก โดยที่ปริมาณการทรุดตัวจะค่อยๆลดลงเมื่อค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มมากขึ้น และเมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนาที่เพียงพอ (3.00 - 4.00 เมตร) พบว่าค่าปริมาณการทรุดตัวของวัสดุซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินอ่อน และโครงสร้างชั้นทางซึ่งอยู่บนชั้นฐานรากดินแข็งจะมีปริมาณใกล้เคียงกัน ค่าปริมาณการทรุดตัวสูงสุดของโครงสร้างชั้นทางชนิดต่างๆ โดยเปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง และขนาดความกว้างของหน่วยแรงที่มากกระทำจะแสดงดังในภาพที่ 116 ถึงภาพที่ 119



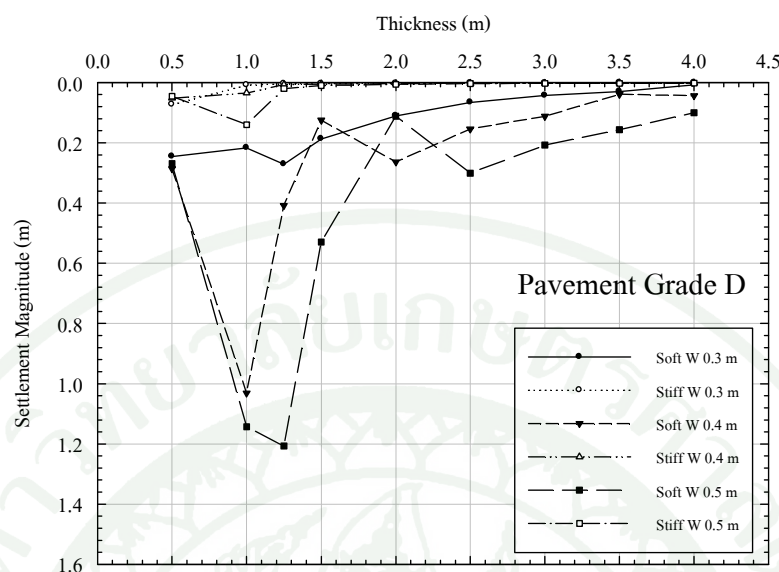
ภาพที่ 116 แสดงค่าปริมาณการทรุดตัวสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A โดยเปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง และขนาดความกว้างของหน่วยแรงที่มากกระทำ



ภาพที่ 117 แสดงค่าปริมาณการทรุดตัวสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade B โดยเปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง และขนาดความกว้างของหน่วยแรงที่กระทำ



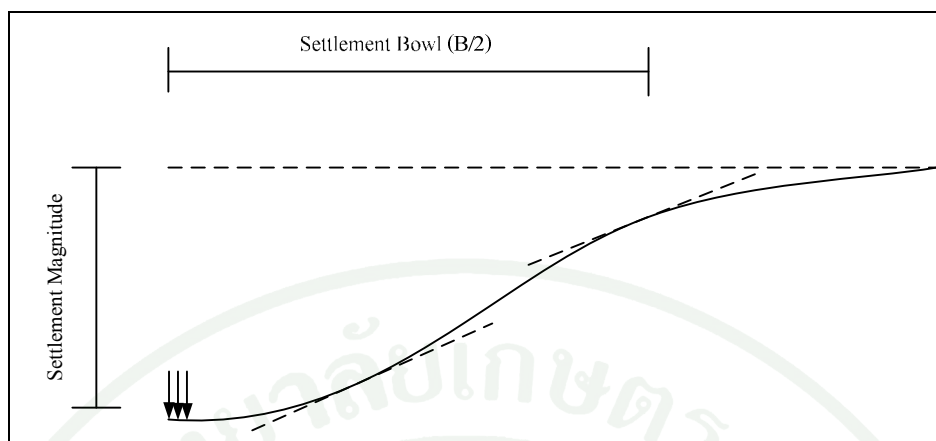
ภาพที่ 118 แสดงค่าปริมาณการทรุดตัวสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C โดยเปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง และขนาดความกว้างของหน่วยแรงที่กระทำ



ภาพที่ 119 แสดงค่าปริมาณการทรุดตัวสูงสุดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D โดยเปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง และขนาดความกว้างของหน่วยแรงที่กระทำ

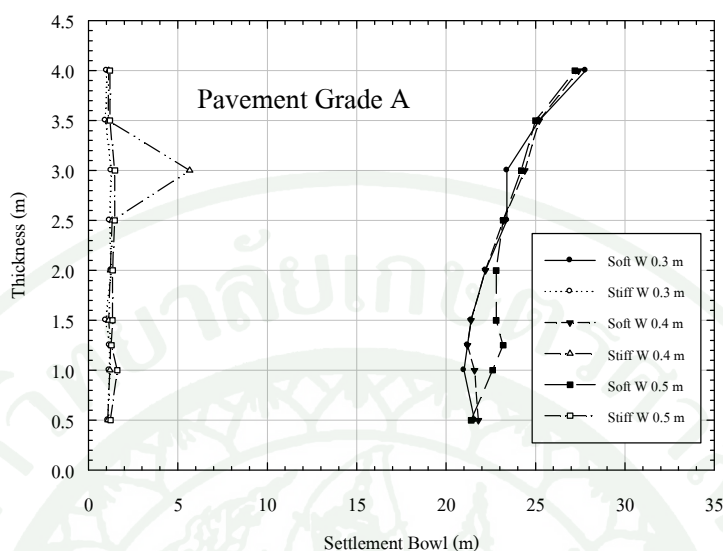
5. ขนาดของแอ่งการทรุดตัว (Settlement Bowl)

แอ่งการทรุดตัวเป็นการวัดค่าความกว้างของพื้นที่ซึ่งยุบตัวลงไปเนื่องจากการทรุดตัวภายหลังที่มีหน่วยแรงมากระทำกับโครงสร้างชั้นทาง ในการวิจัยครั้งนี้จะสนใจแอ่งการทรุดตัวที่เกิดจากการบีบอัดที่เกิดขึ้น ค่ากำลังรับแรงสูงสุดของวัสดุ โดยจะวัดค่าความกว้างของแอ่งการทรุดตัวมาใช้เป็นตัวเปรียบเทียบเพื่อพิจารณาเปรียบเทียบถึงอิทธิพลของชนิดโครงสร้างชั้นทาง ความกว้างของหน่วยแรงที่กระทำกับโครงสร้างชั้นทาง และค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง โดยการวัดค่าแอ่งการทรุดตัวในการศึกษาครั้งนี้จะวัด ณ ตำแหน่งซึ่งเส้นโค้งความชันของแอ่งการทรุดตัวมีการเปลี่ยนแปลงความชัน ดังแสดงในภาพที่ 120

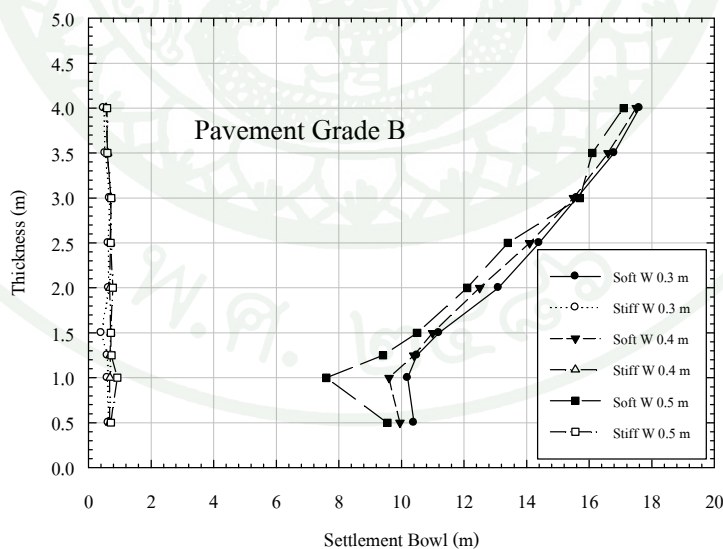


ภาพที่ 120 แสดงตัวอย่างการวัดค่าแองการทรุดตัว

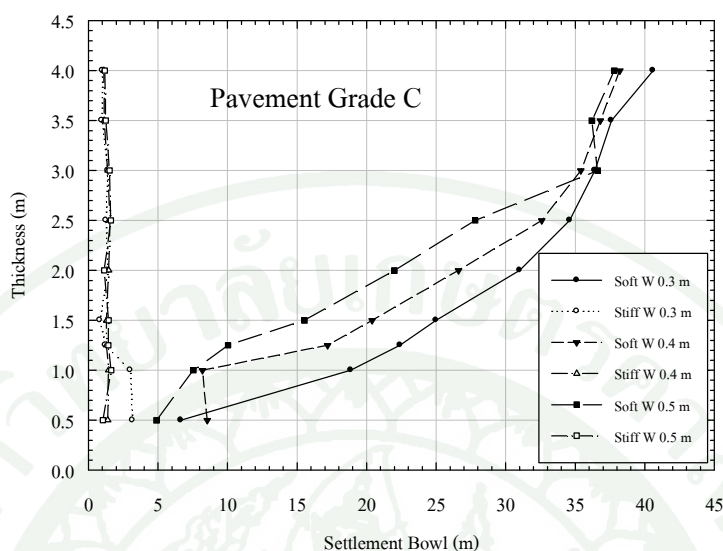
สำหรับโครงสร้างชั้นทางซึ่งมีความหนาน้อย เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงมากขึ้น ขนาดของการทรุดตัวจะมีค่าลดลง เนื่องจากโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อยทำให้เกิดการบีบอัดขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งการบีบอัดส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทาง ซึ่งเมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นจะมีสภาพเหมือนวัสดุแข็ง (Rigid Material) ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวน้อย ส่วนโครงสร้างชั้นทางซึ่งมีความหนามาก เมื่อมีน้ำหนักมากระทำหน่วยแรงและการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นจะสามารถถ่ายเทลงไปยังชั้นฐานรากได้ดีทำให้เมื่อความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางเพิ่มขึ้น ขนาดความกว้างของแองการทรุดตัวจึงมีค่าเพิ่มขึ้น และการเพิ่มขึ้นของความกว้างของหน่วยแรงที่มากระทำจะส่งผลให้ค่าความกว้างของแองการทรุดตัวมีค่าที่ลดลง เนื่องจากปริมาณการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นทำให้ขนาดของแองการทรุดตัวจึงมีค่าลดลง ค่าขนาดของแองการทรุดตัวของวัสดุโครงสร้างชั้นทางชนิดต่างๆ โดยเปรียบเทียบระหว่างฐานรากดินอ่อน และดินแข็ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง และขนาดความกว้างของหน่วยแรงที่มากระทำดังแสดงในภาพที่ 121 ถึงในภาพที่ 124



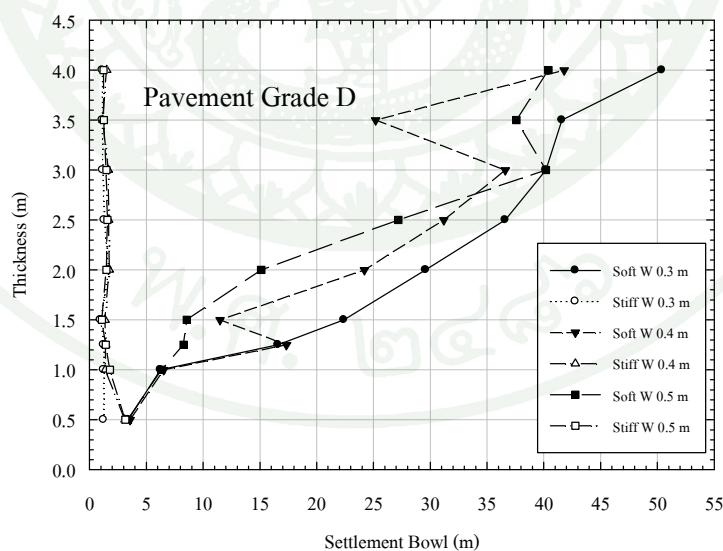
ภาพที่ 121 แสดงค่าขนาดของแอ่งการทรุดตัวของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A โดยเปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง และขนาดความกว้างของหน่วยแรงที่มากกระทำ



ภาพที่ 122 แสดงค่าขนาดของแอ่งการทรุดตัวของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade B โดยเปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง และขนาดความกว้างของหน่วยแรงที่มากกระทำ



ภาพที่ 123 แสดงค่าขนาดของแอ่งการทรุดตัวของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C โดยเปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง และขนาดความกว้างของหน่วยแรงที่มากกระทำ



ภาพที่ 124 แสดงค่าขนาดของแอ่งการทรุดตัวของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D โดยเปรียบเทียบระหว่างชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง และขนาดความกว้างของหน่วยแรงที่มากกระทำ

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมภายหลังจากที่มีหน่วยแรงกระทำของโครงสร้างชั้นทางซึ่งก่อสร้างบนชั้นดินฐานราก โดยใช้ทฤษฎี Continuum Mechanic วิธีเชิงตัวเลข Finite Element และกำหนดให้แบบจำลองเป็นแบบจำลองชนิด Two Elastic Confined Layers และมีพฤติกรรมแบบ Elastic Perfectly Plastic ใช้ Yield Function ชนิด Mohr's Coulomb ในการศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ อันได้แก่ ค่าอัตราส่วน Elastic Modulus ระหว่างโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานราก, ค่าความกว้างของน้ำหนักรวมที่กระทำกับโครงสร้างชั้นทาง, ค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง และชนิดของชั้นดินฐานราก โดยในการศึกษาได้ทำการเปลี่ยนแปลงชนิดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง ซึ่งได้แก่ วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A (Subgrade), วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade B (Subbase), วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C (Base) และวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D (Subbase) รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงชนิดของชั้นดินฐานราก ได้แก่ ชั้นฐานรากดินอ่อน และชั้นฐานรากดินแข็ง จากนั้นจึงทำการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง และค่าความกว้างของน้ำหนักรวมที่กระทำกับโครงสร้างชั้นทาง เพื่อนำมาศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ของโครงสร้างชั้นทาง โดยสามารถสรุปออกมาเป็นหัวข้อต่าง ได้แก่ 1) รูปแบบการพิบัติและ พฤติกรรมการพิบัติของโครงสร้างชั้นทาง 2) อิทธิพลของชั้นดินฐานรากที่มีผลต่อโครงสร้างชั้นทาง 3) กำลังรับแรงสูงสุด 4) ปริมาณการทรุดตัวสูงสุด และ 5) ขนาดของแอ่งการทรุดตัว โดยในแต่ละหัวข้อมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. รูปแบบการพิบัติและ พฤติกรรมการพิบัติของโครงสร้างชั้นทาง

1. เมื่อวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงต่ำในกรณีของชั้นฐานรากดินอ่อน การพิบัติจะเริ่มพัฒนาตัวจากบริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทางส่วนที่อยู่ติดกับชั้นดินฐานราก ส่วนกรณีของชั้นฐานรากดินแข็งการพิบัติจะเริ่มพัฒนาตัวจากบริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง และเมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงมากขึ้นการพิบัติจะเกิดขึ้นจากบริเวณด้านบนและด้านล่างของโครงสร้างชั้นทางพร้อมๆ กัน

2. การพัฒนาตัวของพื้นที่พิบัติในโครงสร้างชั้นทางจะถูกแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ คือ (1) รูปแบบ A คือ Plastic Point เกิดขึ้นที่บริเวณด้านล่างของโครงสร้างชั้นทาง จากนั้นจึงเกิดขึ้นที่

บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง และ Plastic Point จึงพัฒนาจากด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง ลงมายังชั้นดินฐานรากในเวลาต่อมา (2) รูปแบบ B คือ Plastic Point เกิดขึ้นที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง จากนั้น Plastic Point ที่เกิดขึ้นนั้นจะค่อยๆขยายตัวกลายเป็นวงพืดที่ระดับต้นของโครงสร้างชั้นทาง จากนั้นจึงค่อยพัฒนาตัวลงมาจนถึงชั้นดินฐานราก

3. กรณีที่วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย (0.5 เมตร) การพืดในโครงสร้างชั้นทาง จะเกิดขึ้นในรูปแบบ A เท่านั้น แต่เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีค่าความหนามากขึ้น (1.0 - 4.0 เมตร) จะพบว่าเมื่อค่าอัตราส่วน Elastic Modulus ระหว่างโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานราก (E_1/E_2) มีค่ามากกว่าหรืออยู่ในช่วง 20 - 100 เท่า รูปแบบการพืดที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนจากรูปแบบ A เป็นรูปแบบ B

4. ค่าความกว้างของน้ำหนักระทำที่ไม่มีผลต่อรูปแบบการพืดซึ่งเกิดขึ้นภายในโครงสร้างชั้นทาง ในช่วงความกว้างของน้ำหนักระทำในการศึกษา (0.3 - 0.5 เมตร)

5. เมื่อความแตกต่างของค่า Elastic Modulus ระหว่างวัสดุโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานรากมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 10 เท่า วัสดุโครงสร้างชั้นทางจะมีพฤติกรรมเสมือนเป็นคาน ซึ่งจะเกิดสถานะ Flexural Stress ขึ้น และเมื่อความแตกต่างของค่า Elastic Modulus ระหว่างวัสดุโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานรากมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.2 เท่า ทั้งโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานรากจะมีพฤติกรรมเสมือนเป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน

6. สำหรับโครงสร้างชั้นทางที่เกิดการพืดในรูปแบบ A การกระจายตัวของค่าหน่วยแรง จะมีความสม่ำเสมอแม้ว่ามี Plastic Point เกิดขึ้น แต่สำหรับโครงสร้างชั้นทางที่เกิดการพืดในรูปแบบ B เมื่อมี Plastic Point เกิดขึ้น พบว่าการกระจายตัวของค่าหน่วยแรงจะเกิดความไม่สม่ำเสมอไม่เป็นระเบียบขึ้น

7. เมื่อมีน้ำหนักระทำกับโครงสร้างชั้นทาง จะทำให้ค่าหน่วยแรงในแนวราบมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว กรณีที่โครงสร้างชั้นทางเกิดการพืดในรูปแบบ A จะพบการลดลงของค่าหน่วยแรงในแนวราบเพียงเล็กน้อย ขณะที่โครงสร้างชั้นทางเกิดการพืดในรูปแบบ B ค่าหน่วยแรงในแนวราบจะลดลงอย่างรวดเร็ว

2. อิทธิพลของชั้นดินฐานรากที่มีผลต่อวัสดุโครงสร้างชั้นทาง

1. การพัฒนาตัวของพื้นที่การบีบอัดในกรณีของชั้นฐานรากซึ่งมีความแข็งแรงต่ำจะเกิดขึ้นได้เร็วกว่ากรณีของชั้นฐานรากดินซึ่งมีความแข็งแรงสูง เมื่อวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงเท่ากัน

2. ลักษณะการพัฒนาตัวของผิวการบีบอัดซึ่งเกิดในกรณีของชั้นฐานรากซึ่งมีความแข็งแรงต่ำมีปริมาณมากกว่าในกรณีของชั้นฐานรากซึ่งมีความแข็งแรงสูงมาก เมื่อวัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงเท่ากัน

3. กำลังรับแรงสูงสุด

1. เมื่อค่าอัตราส่วนระหว่างค่า Elastic Modulus ระหว่างโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินฐานรากมีค่ามากขึ้น พบว่าค่ากำลังรับแรงสูงสุด จะมีค่าที่มากขึ้นตามไปด้วย โดยที่ค่ากำลังรับแรงสูงสุดในวัสดุชนิดต่างๆ จะเป็นไปตามดังในตารางที่ 53

ตารางที่ 53 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดสำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทางชนิดต่างๆ (ความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 0.5 - 4.0 เมตร)

Type of Material	Soft Foundation	Stiff Foundation
	Ultimate Strength (kPa)	
Grade A	145 - 225	145 - 171
Grade B	400 - 725	520 - 585
Grade C	425 - 1,376	925 - 1,750
Grade D	525 - 2,014	1,317 - 2,150

2. การเพิ่มขึ้นของค่า Elastic Modulus ของโครงสร้างชั้นทางทำให้ค่ากำลังรับแรงสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่สำหรับชั้นฐานรากที่อ่อนแอ ความสามารถในการรับน้ำหนักก่อนเกิด First Plastic Point จะไม่เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่า Elastic Modulus ส่วนชั้นฐานรากที่แข็งแรง ความสามารถในการรับน้ำหนักก่อนเกิด First Plastic Point จะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่า Elastic Modulus

3. เมื่อความกว้างของน้ำหนักรถที่มากกระทำกับโครงสร้างชั้นทางมีค่ามากขึ้นจะทำให้ ค่ากำลังรับแรงสูงสุดของวัสดุจะมีค่าลดลง เนื่องจากพื้นที่ของน้ำหนักรถที่มากกระทำกับโครงสร้างชั้นทางมีขนาดใหญ่ขึ้น ขณะที่วัสดุมีความสามารถในการรับแรงของวัสดุมีค่าเท่าเดิมจึงทำให้ค่ากำลังรับแรงสูงสุดมีค่าลดลง

4. เมื่อความหนาของโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่ากำลังรับแรงสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่ค่ากำลังรับแรงสูงสุดจะเริ่มมีค่าคงที่เมื่อโครงสร้างชั้นทางไม่ได้รับอิทธิพลจากชั้นฐานราก หรือค่ากำลังรับแรงสูงสุดเกิดจากความสามารถในการรับแรงของโครงสร้างชั้นทางเพียงอย่างเดียว ซึ่งค่าความหนาที่ทำให้ค่ากำลังรับแรงสูงสุดมีค่าคงที่ในแต่ละชนิดของโครงสร้างชั้นทางจะแตกต่างกันออกไป ดังนี้

วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A จะพบว่าไม่ว่าโครงสร้างชั้นทางมีความหนาเท่าไร จะพบอิทธิพลของชั้นฐานรากที่มีต่อโครงสร้างชั้นทางเสมอ

วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade B ที่ความหนา 1.00 - 2.00 เมตร ค่ากำลังรับแรงสูงสุดจะเริ่มคงที่

วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ที่ความหนา 1.25 - 2.00 เมตร ค่ากำลังรับแรงสูงสุดจะเริ่มคงที่

วัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ที่ความหนา 1.50 - 2.00 เมตร ค่ากำลังรับแรงสูงสุดจะเริ่มคงที่

4. ปริมาณการทรุดตัวสูงสุด

1. สำหรับการทรุดตัวที่พิจารณา ณ ค่ากำลังรับแรงสูงสุด พบว่าขณะที่วัสดุโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงมากขึ้น ปริมาณการทรุดตัวจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อค่าอัตราส่วน Elastic Modulus มีค่าสูงมาก ปริมาณทรุดตัวจะมีค่าลดลง
2. เมื่อความกว้างของน้ำหนักรถที่มากกระทำกับโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณการทรุดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย
3. ปริมาณการทรุดตัวจะมีค่าลดลงเมื่อค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทางมีค่าเพิ่มมากขึ้น

5. ขนาดของแอ่งการทรุด

1. ในกรณีที่โครงสร้างชั้นทางมีความหนาน้อย เมื่อค่าอัตราส่วน Elastic Modulus มีค่ามากขึ้น ค่าความกว้างของแอ่งการทรุดตัวจะมีค่าลดลง แต่เมื่อโครงสร้างชั้นทางมีความหนามาก เมื่อค่า Elastic Modulus มีค่ามากขึ้น พบว่าค่าความกว้างของแอ่งการทรุดตัวจะมีค่ามากขึ้น
2. เมื่อเมื่อค่าความกว้างของน้ำหนักรถที่มากกระทำมีค่ามากขึ้น ขนาดของแอ่งการทรุดตัวจะมีค่าลดลง

ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้การวิจัยอรรถิผลของชั้นดินฐานรากที่มีผลต่อพฤติกรรมของโครงสร้างชั้นทาง โดยใช้ทฤษฎี Continuum Mechanic วิธี Finite Element มีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะเพื่อเป็นผลประโยชน์ที่จะใช้พัฒนาการวิจัยในอนาคตดังต่อไปนี้

1. ในการวิจัยครั้งนี้ใช้แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดชนิด Elastic Perfectly Plastic โดยใช้ Yield Function ชนิด Mohr-Coulomb ซึ่งสามารถจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดในช่วงก่อนที่จะเกิดการวิบัติได้ดีในระดับหนึ่ง แต่ไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิด Softening หลังจากที่เกิดการพิบัติขึ้นแล้ว ซึ่งการวิจัยต่อไปในอนาคตควรที่จะเลือกใช้แบบจำลองที่สามารถทำนายพฤติกรรมภายหลังเกิดการพิบัติขึ้นได้
2. สำหรับการวิจัยในครั้งนี้จะไม่ได้สนใจในการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดิน โดยจะทำให้ค่าแรงดันน้ำใต้ดิน (Hydro Static Pore Water Pressure) มีค่าคงที่คือเท่ากับ 0 กรณีที่ในอนาคตมีการทำวิจัยต่อจึงควรพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าระดับน้ำใต้ดินด้วย
3. ในการวิเคราะห์ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินไม่สามารถมีค่าเป็นแรงดึงได้เกิน 1 Bar (100 kPa) ดังนั้นเมื่อค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่ได้จากการคำนวณมีค่าเกิน - 100 kPa ควรกำหนดให้ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินมีค่าเป็น - 100 kPa เท่านั้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมทางหลวง. 2551. คู่มือปฏิบัติงานบำรุงรักษาทางหลวง. กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.

ก้องรัฐ นกแก้ว. 2548. การศึกษาพฤติกรรมทางกลในระหว่างก่อสร้างคันทางบนดินเหนียวอ่อน
กรุงเทพ.วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จิรพัฒน์ โชติกไกร. 2549. การออกแบบทาง. พิมพ์ครั้งที่ 1. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

बारमेศ वर्धननः, विद्या गुप्त, अनिता शोडसंग, सरस्वती शिवसिंह, अरुण प्रभाकर, सुरेश चव
ओगास, अरुण रेड्डी. 2552. ร่างคู่มือ การแปลผลคุณสมบัติของดินและหินที่ใช้ในการ
ออกแบบวิศวกรรมงานทาง. สำนักงานวิจัยและพัฒนาทาง, กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.

ปณฺฑิต สุวรรณวิวัฒนา. 2546. ลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯ โดยระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์
GRASS. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปราโมทย์ เตชะอำไพ. 2537. ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์ และ จอม จันทร์หิรัญ. 2545. การวิเคราะห์พฤติกรรมของถนนบนดินอ่อน
ปรับปรุงคุณภาพด้วย Cement Column ของทางหลวงหมายเลข 34 ตอน บางนา-ชลบุรี.
รายงานวิจัยฉบับที่ วพ.197, ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง, กรมทางหลวง.

รสสุคนธ์ ชื่นวัฒนา. 2546. คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์. 2540, 2548. วิศวกรรมปฐพี. ครั้งที่ 1 และ 2, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย
ในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.

สุวัฒน์ ดิยะไพรัช, นิรันดร์ ชัยมณี และพิสิทธิ์ ชีรดิolk. 2538. ดินเหนียวกรุงเทพฯ:สภาพธรณีวิทยาและการประยุกต์ใช้. น. 93-99. ใน การประชุมวิชาการ กทช. ปี 2538 เรื่องความก้าวหน้าและวิสัยทัศน์ของการพัฒนาทรัพยากรธรณี. 11-13 มกราคม 2538.

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. 2546. ข้อมูลสภาพดินบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง. พิมพ์ครั้งที่ 2. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. กรุงเทพฯ ฯ.

วิชาญ ภูพัฒน์. 2545. การออกแบบฐานรากบนดินอ่อน. ในเอกสารประกอบการสอนวิชาฐานรากบนดินอ่อน. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ ฯ.

วิชา ปิ่นตะพันธ์. 2545. การเปรียบเทียบความเหมาะสมระหว่างผิวทางคอนกรีตและผิวทางลาดยางสำหรับออกแบบทางหลวงในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วันชัย เทพรักษ์. 2549. การเสียรูปของอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินเนื่องจากการก่อสร้างชั้นใต้ดินลึกมากในเขตปลอดภัยของรถไฟฟ้าใต้ดิน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

วันชัย เทพรักษ์. 2545. การตรวจวัดและวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของกำแพงที่จอดรถใต้ดิน. การอบรมเรื่อง การก่อสร้างชั้นใต้ดินใน กทม., วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

Akbulut H. and Aslanta K. 2005. **Finite Element Analysis of Stress Distribution on Bituminous Pavement and Failure Mechanism.** Materials and Design 26. 383 - 387 pp.

American Association of State Highway Officials. 1972. **Interim Guide for Design of Pavement Structure.** American Association of State Highway and Transport Officials., Washington, D.C.

- Balasubramaniam A.S, and R.P. Brenner. 1981. **Consolidation and settlement of soft clay, in soft clay engineering**, edit by Brand. E.W. and Brenner. R.P. Elsevier Scientific Publication Company. New York.
- Bassem Ali, Marwan Sadek and Isam Shahrour. 2009. **Finite - Element Model for Urban Pavement Rutting Analysis of Pavement Rehabilitation Methods**. Journal of Transportation Engineer.
- Bergado, D.T., S. Ahmed Casan, L. Sampaco and A. S. Balasubramaniam. 1990. **Settlements of Bangna-Bangpakong highway on soft Bangkok clay**. ASCE - Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering. Vol.116. No.1.
- Bjerrum, L. 1972. **Embankments on soft ground**. Proceedings, Performance of Earth and Earth-Supported Structures. Lafayette.
- Bowles, J.E. 1988. **Foundation analysis and design**. 4th. McGraw-Hill. Singapore.
- Brinkgreve, R.B.Jl. 1998. **General information PLAXIS Version 7**. A.A.Balkema. Rotterdam, Netherlands.
- Cambridge In-situ. 1997. **Self boring pressuremeter MRTA initial system project**. North Contract. Thailand
- Coduto, D.P. 1994. **Foundation design: Principles and practices**. Prentice Hall. USA.
- Das, B.M. 1999. **Shallow foundations: Bearing capacity and settlement**. CRC Press. USA.
- Dasai, C. S. and Christian, J. T. 1977. **Numerical Methods in Geotechnical Engineering**. McGraw-Hill. United State of America.

Duncan, J.M. and C.Y. Chang. 1970. **Nonlinear analysis of stress and strain in soils.** **Journal of Soil Mechanics and Foundation Division.** ASCE. Vol.96. No.SM5. 1629-1653 pp.

D'Appolonia, D.J., H.G. Poulos and C.C. Ladd. 1971. **Initial settlement of structures on clay.** **Journal of The Soil Mechanics and Foundations Division.** ASCE. Vol.97. SM10. 1359-1377 pp.

Environment.uwe, 2010. **Foundation Failure. GeotechniCAL Reference.** แหล่งที่มา:
<http://environment.uwe.ac.uk/geocal/foundations/foundations.htm#GENERAL>, 24
 มิถุนายน 2553.

FOX, E.N., 1948(a). **Computations of traffic Stresses in a simple road structure.** Proc, 2nd
 Int.Conf. Soil Mechs. Fndn. Eng., Vol. 2, pp. 236 - 246.

Frank H. S., Chester H. M. and William M. Moore. 1971. **Calculation of the Elastic Moduli of a Two Layer Pavement System from Measured Surface Deflections Part II.** Highway Design Division Research Section Texas Highway Department. 65 pp.

Fwa T.F., Tan S. A. and Zhu L.Y. 2001. **Reexamining $c-\phi$ Concept for Asphalt Paving Mix Design.** Journal of Transportation Engineering. January/ February 2001, 67-77 pp.

Geraint L, Guillermo T. and Fernando R. **Three - Dimensional Finite Element Model For Flexible Payment Analyses Base on Field Modulus Measurements.** The Arabian Journal for Science and Engineering. Volume 33. 65 - 75 pp.

Kai S., Lijun S. Yoshitaka H. and Ryota M. 2008. **Analysis of Shear Stress in Asphaltic Pavement Under Actual Measure Tire-Pavement Contact Pressure.** 6th ICPT, Sapporo, Japan. 11 -18 pp.

Kulhawy, F.H. 1969. **Finite element analysis of the behavior of embankments**. Ph.D. Dissertation. University of California. Berkeley.

Kulhawy, F.H. and P.W. Mayne. 1990. **Manual on estimation soil properties for foundation design**. Report No. EL-6800. Electric Power Research Institute. Palo Alto. CA.

Lambe, T. W. and Whitman, R. V. 1969. **Soil Mechanics**. John Wile & Sonse, Inc.

Mark N., Bjorn B. and Reynoldo R. 2003. **Near - Surface stress states in flexible pavement using measured radial tire contact stresses and ADINA**. Elsevier Science Ltd.

[Memphis.edu](http://www.ce.memphis.edu/7166/Asphalt%20Rutting.jpg), 2010. Image of Road Crack. **Department of Civil Engineering**.

แหล่งที่มา: <http://www.ce.memphis.edu/7166/Asphalt%20Rutting.jpg>, 11 มกราคม 2553.

Moh , Z.C. 1969. **Strength and Compressibility of Soft Bangkok clay**. Res.Rep.No. 7 AIT. Bangkok.

Ninouh T and Giemfoud M. 2008. **Numerical Simulation of an Idealized Road Structure**. Journal of Engineering and Applied Scieces. Medwell Journals. 64 - 69 p

Sowers, G.F. 1979. **Introductory soil mechanics and foundations: Geotechnical engineering**. 4th. Macmillan Publishing, USA.

Teparaksa, W. 1999. **Principle and application of instrumentation for the first MRTA subway project in Bangkok**. Proceeding of the 5th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics. Singapore.

Teparaksa, W. 2001. **Analysis of sheet pile deflection for deep braced excavation in soft Bangkok clay**. Proceeding of the 14th Southeast Asian Geotechnical Engineering Conference. Hongkong

Trautman C.H. and F.H. Kulhawy. 1987. **CUFAD – A computer program for compression and uplift foundation analysis and design**. Report EL-4540-CCM. Vol.16. Electric Power Research Institute. Palo Alto. October.

Sewerhistory.org. 2004. Image of Road Cracking. **The history of Sanitary Server.**

แหล่งที่มา: http://www.sewerhistory.org/images/mi/mid/mid_spdwy08.jpg, 11 มกราคม 2553.

Vesic, A.S. 1973. **Analysis of Ultimate Loads of Shallow Foundation**. JSMFD, ASCE, vol. 99, SM1, Jan., pp. 45-73.

Wael A, Roger G. **Flexible Pavement Response to Elastic Modulus Variation with Depth**.

Dept. of Civil Engineering, The University of Akron.

Yoder, E.J. and M.W. Witczak. 1975. **Principle of Pavement Design**. 2nd ed. John Wiley and Son. Inc. New York.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
 ทฤษฎีบทในการวิเคราะห์

คำจำกัดความและสมการพื้นฐานของแบบจำลองความสัมพันธ์แบบ

Elastoplastic (Mohr-Coulomb's Model)

1. คำนิยามทั่วไปของหน่วยแรงและการเคลื่อนตัวของโปรแกรม PLAXIS

โดยทั่วไปสมการพื้นฐานของ PLAXIS ที่ใช้ในการบอกความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดนิยมอธิบายรูปแบบของอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าหน่วยแรง (Stress Rate, $\underline{\sigma}$) การเพิ่มขึ้นของความเครียด (Strain rate, $\underline{\varepsilon}$) ดังสมการต่อไปนี้

$$\underline{\sigma}' = \underline{M} \underline{\dot{\varepsilon}} \quad (1)$$

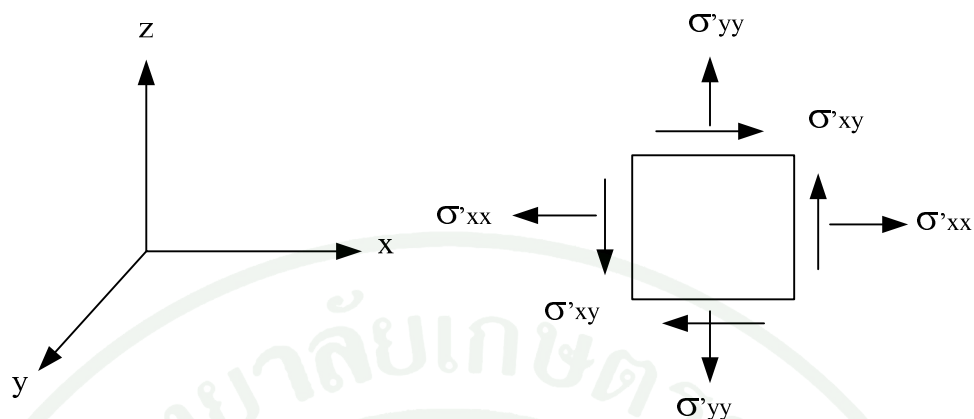
โดยที่ $\underline{M}$ คือ Stiffness Matrix ของวัสดุ

จากสมการที่ xx ค่า Stress tensor และค่า Strain Tensor ซึ่งถูกเขียนในรูปแบบของ Vector Notation สามารถที่จะกระจายออกเป็นส่วนประกอบย่อย (Cartesian Component) 6 ส่วนได้ดังต่อไปนี้

$$\underline{\sigma}' = (\sigma'_{xx}, \sigma'_{yy}, \sigma'_{zz}, \sigma'_{xy}, \sigma'_{yz}, \sigma'_{xz})^T \quad (2)$$

$$\underline{\varepsilon} = (\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}) \quad (3)$$

เนื่องจากปัญหาของ Plane Strain และ Axis metrics ต้องการ Cartesian เพียง 4 ตัวเท่านั้นเนื่องจาก σ_{yz} σ_{zx} γ_{yz} γ_{zx} จะมีค่าเป็นศูนย์ ในส่วนของการกำหนดทิศทางสำหรับโปรแกรม PLAXIS จะทำการกำหนดให้ค่าบวกสำหรับ normal Stress จะแสดงถึง Tension ค่าลบของ Normal Stress จะแสดงถึง Compression และค่าบวกของ Normal Strain จะแสดงถึงการยืดตัว (extension) และค่าลบจะแสดงถึงการหดตัว (Compression) ดังแสดงในภาพผนวกที่ 1



ภาพผนวกที่ ก1 การกำหนดทิศทางของความเค้นในโปรแกรม PLAXIS

ที่มา: Brinkgreve (1998)

2. พฤติกรรมทั่วไปของ Elastoplastic Material

สมการแสดงการเคลื่อนตัว (Strain) และอัตราการเคลื่อนตัว (Strain rate) ของ Elastoplastic Material จะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ การเคลื่อนตัวในสถานะ Elastic และการเคลื่อนตัวที่เกิดจากสถานะ Plastic ดังแสดงในสมการด้านล่าง

$$\underline{\varepsilon} = \underline{\varepsilon}^e + \underline{\varepsilon}^p, \underline{\dot{\varepsilon}} = \underline{\dot{\varepsilon}}^e + \underline{\dot{\varepsilon}}^p \quad (4)$$

เมื่อเราใช้ความสัมพันธ์ของ Hook's law แทนค่าส่วนของอัตราการเคลื่อนตัวที่เป็น Elastic จะได้ว่า

$$\underline{\sigma}' = \underline{D}^e \underline{\dot{\varepsilon}}^e = \underline{D}^e (\underline{\dot{\varepsilon}} + \underline{\dot{\varepsilon}}^p) \quad (5)$$

โดยที่

$$\underline{\dot{\sigma}}' = (\dot{\sigma}_{xx}, \dot{\sigma}_{yy}, \dot{\sigma}_{zz}, \dot{\sigma}_{xy}, \dot{\sigma}_{yx}, \dot{\sigma}_{xz})^T \quad (6)$$

$$\underline{\dot{\varepsilon}}' = (\dot{\varepsilon}_{xx}, \dot{\varepsilon}_{yy}, \dot{\varepsilon}_{zz}, \dot{\gamma}_{xy}, \dot{\gamma}_{yz}, \dot{\gamma}_{xz})^T \quad (7)$$

$$\underline{\underline{D}}^e = \text{Stiffness Matrix}$$

ในส่วนการเคลื่อนตัวในสถานะของอีลาสติกจะใช้ Hook's Law เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถแสดงได้ดังสมการดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{\sigma}'_{xx} \\ \dot{\sigma}'_{yy} \\ \dot{\sigma}'_{zz} \\ \dot{\sigma}'_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E'}{(1-2\nu')(1+\nu')} \begin{bmatrix} 1-\nu' & \nu' & \nu' & 0 \\ \nu' & 1-\nu' & \nu' & 0 \\ \nu' & \nu' & 1-\nu' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-\nu' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}_{xx}^e \\ \dot{\varepsilon}_{yy}^e \\ \dot{\varepsilon}_{zz}^e \\ \dot{\gamma}_{xy}^e \end{bmatrix} \quad (8)$$

จากทฤษฎี Plasticity ของ Hill (1950) ที่ว่าอัตราส่วนการเคลื่อนตัวที่สถานะพลาสติกจะเป็นสัดส่วนกับ Derivative ของ Yield Function กับค่าความเค้นที่กระทำ (Stress) ซึ่งหมายความว่า Plastic Strain สามารถที่จะใช้แทนด้วย เวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับ Yield Surface แต่ในกรณีของ Mohr's Coulomb Yield Function (f) จะได้ค่าการเคลื่อนตัวที่มากเกินไปจริงจึงต้องมีการแทน Yield Function ด้วย Plastic Potential Function (g) ซึ่งในกรณีที่ $g \neq f$ จะเรียกว่าวัสดุนั้นเป็น Non-Associated Plasticity ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการแสดงอัตราการเคลื่อนตัวได้ดังนี้

$$\dot{\varepsilon}^P = \lambda \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}'} \quad (9)$$

เมื่อ λ คือ Plastic Multiplier ในกรณีที่วัสดุแสดงพฤติกรรมของ Elastic ค่า λ จะมีค่าเป็นศูนย์ ในขณะที่วัสดุแสดงพฤติกรรมของพลาสติกค่า λ จะมีค่าเป็นบวก

$$\lambda = 0 \text{ สำหรับ } f < 0 \quad \text{หรือ} \quad \frac{\partial f}{\partial \underline{\sigma}'} \underline{D}^e \underline{\varepsilon} \leq 0 \quad (\text{Elasticity})$$

$$\lambda > 0 \text{ สำหรับ } f < 0 \quad \text{หรือ} \quad \frac{\partial f}{\partial \underline{\sigma}'} \underline{D}^e \underline{\varepsilon} \geq 0 \quad (\text{Plasticity})$$



ภาพผนวกที่ ก2 แบบจำลองดินที่แสดงพฤติกรรม Elastoplastic

ที่มา: Brinkgreve (1998)

โดยสมการที่จะเขียนสมการใหม่ให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง Effective Stress Rate และ Strain Rate สำหรับ Elastoplasticity (Smith&Griffith, 1982 Vermeer & Deborst, 1984) ได้ดังนี้

$$\dot{\underline{\sigma}} = \left(\underline{D}^e - \frac{\alpha}{d} \underline{D}^e \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}'} \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma}'} \underline{D}^e \right) \dot{\underline{\varepsilon}} \quad (10)$$

เมื่อ

$$d = \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma}'} D^e \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}'} \quad (11)$$

โดยค่า α จะเป็นค่าที่ใช้ในการเปลี่ยนสภาวะของวัสดุโดยจะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อวัสดุแสดงพฤติกรรมของ อีลาสติกและมีค่าเป็นบวกเมื่อวัสดุแสดงพฤติกรรมเป็นพลาสติก

ในกรณีที่วัสดุมี Yield Surface มากกว่าหนึ่งพื้นผิว (Mohr-Coulomb Material) Koiter(1960) ได้เสนอสมการการเคลื่อนตัวของวัสดุที่มี Plastic Potential Function มากกว่าหนึ่งดังนี้

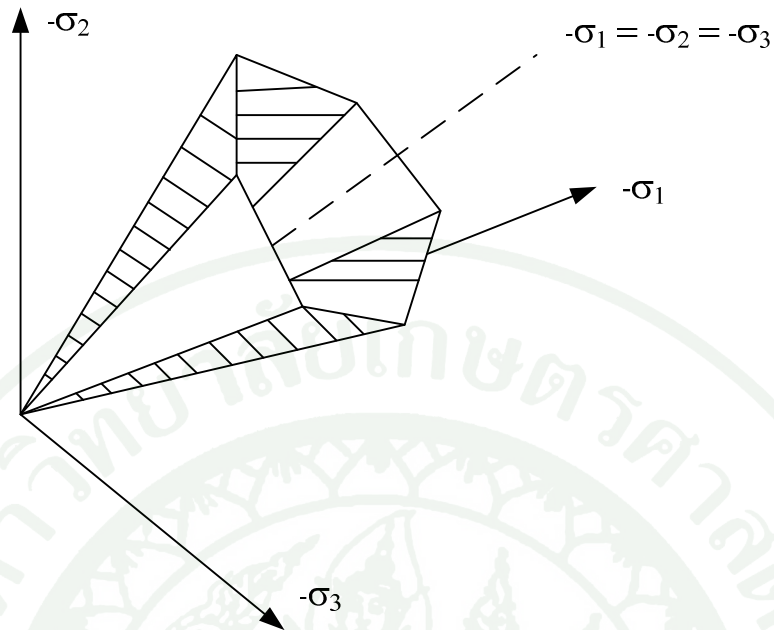
$$\dot{\underline{\epsilon}}^P = \lambda_1 \frac{\partial g_1}{\partial \underline{\sigma}'} + \lambda_2 \frac{\partial g_2}{\partial \underline{\sigma}'} + \dots \quad (12)$$

3. แบบจำลอง Mohr-Coulomb

Yield Surface ของแบบจำลอง Mohr-Coulomb สามารถแสดงในรูปแบบของหน่วยแรงหลัก (Principal Stress) โดยสมการต่อไปนี้ (Smith & Griffith, 1982)

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{1}{2} |\sigma'_2 - \sigma'_3| + \frac{1}{2} (\sigma'_2 + \sigma'_3) \sin \phi - c \cos \phi \leq 0 \\ f_2 &= \frac{1}{2} |\sigma'_3 - \sigma'_1| + \frac{1}{2} (\sigma'_3 + \sigma'_1) \sin \phi - c \cos \phi \leq 0 \\ f_3 &= \frac{1}{2} |\sigma'_1 - \sigma'_2| + \frac{1}{2} (\sigma'_1 + \sigma'_2) \sin \phi - c \cos \phi \leq 0 \end{aligned} \quad (13)$$

โดยค่า c จะแทน Cohesion ของดินและ ϕ จะแทน Friction Angle และเราสามารถที่จะแสดง Yield Surface ในรูปกราฟหกเหลี่ยมในฟังก์ชันของ Principal Stress ได้ดังนี้



ภาพผนวกที่ ก3 Yield Surface ของแบบจำลองแบบ Mohr-Coulomb กรณีที่ $c = 0$

ที่มา: Brinkgreve (1998)

ในขณะเดียวกันเราสามารถที่จะแสดง Yield Function ในรูปแบบของ Plastic Potential Functions สำหรับแบบจำลอง Mohr-Coulomb ได้ดังนี้

$$g_1 = \frac{1}{2} |\sigma'_2 - \sigma'_3| + \frac{1}{2} (\sigma'_2 + \sigma'_3) \sin \psi$$

$$g_2 = \frac{1}{2} |\sigma'_3 - \sigma'_1| + \frac{1}{2} (\sigma'_3 + \sigma'_1) \sin \psi \quad (14)$$

$$g_3 = \frac{1}{2} |\sigma'_1 - \sigma'_2| + \frac{1}{2} (\sigma'_1 + \sigma'_2) \sin \psi$$

โดย ψ จะแทนค่า Dilatancy Angle นอกนี้หากเราไม่ต้องการให้เกิด Tension ในดิน (สมมติว่าดินรับแรงดึงไม่ได้) นอกจากสมการ Yield Surface ที่แสดงข้างต้นแล้วยังต้องเพิ่มสมการเพื่อป้องกันไม่ให้หน่วยแรงหลัก (Principal Stress) มีค่าเป็นลบ (Tension Cut off) ดังนี้

$$f_4 = \sigma'_1 - \sigma_t \leq 0$$

$$f_5 = \sigma'_2 - \sigma_t \leq 0 \quad (15)$$

$$f_6 = \sigma'_3 - \sigma_t \leq 0$$

4. การวิเคราะห์แบบ Undrained ด้วย Effective Parameter

วิธีวิเคราะห์ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินของโปรแกรม PLAXIS จะทำการวิเคราะห์โดยใช้พารามิเตอร์เป็น Effective Parameter ทั้งหมดและอาศัยหลักการของ Terzaghi ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นรวม (σ) ความเค้นประสิทธิผล (σ') และค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน (σ_w) ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\sigma'_{xx} = \sigma_{xx} + \sigma_w$$

$$\sigma'_{yy} = \sigma_{yy} + \sigma_w$$

$$\sigma'_{zz} = \sigma_{zz} + \sigma_w$$

$$\sigma'_{xy} = \sigma_{xy}$$

หมายเหตุ ในที่นี้ค่าหน่วยแรงรวมและค่าหน่วยแรงประสิทธิผลจะค่าเป็นบวกตามทิศทางหน่วยแรงหลัก และค่าแรงดันน้ำมีค่าเป็นลบ

เมื่อพิจารณาค่าแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นพบว่าประกอบไปด้วย 2 ส่วนได้แก่ ค่าแรงดันน้ำสถิตย (P_{Steady}) และค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน (P_{Excess}) ดังสมการที่

$$\sigma_w = P_{Steady} + P_{Excess} \quad (16)$$

เนื่องจากค่าแรงดันน้ำสถิตยมีค่าคงที่ขึ้นอยู่กับความลึกและระดับน้ำ เมื่อทำการ Differentiate สมการที่ 16 จะได้ผลกันต่อไปนี้

$$\dot{\sigma}_w = \dot{P}_{Excess} \quad (17)$$

จากกฎของ Hook เมื่อนำไปแทนสมการที่ 8 จะได้ผลดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}'_{xx} \\ \dot{\epsilon}'_{yy} \\ \dot{\epsilon}'_{zz} \\ \dot{\epsilon}'_{xy} \end{bmatrix} &= \frac{1}{E} \begin{bmatrix} \nu' & 1-\nu' & \nu' & 0 \\ -\nu' & 1 & \nu' & 0 \\ -\nu' & \nu' & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2+2\nu' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\sigma}^e_{xx} \\ \dot{\sigma}^e_{yy} \\ \dot{\sigma}^e_{zz} \\ \dot{\sigma}^e_{xy} \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{E} \begin{bmatrix} \nu' & -\nu' & -\nu' & 0 \\ -\nu' & 1 & -\nu' & 0 \\ -\nu' & -\nu' & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2+2\nu' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\sigma}^e_{xx} - \sigma'_w \\ \dot{\sigma}^e_{yy} - \sigma'_w \\ \dot{\sigma}^e_{zz} - \sigma'_w \\ \dot{\sigma}^e_{xy} - \sigma'_w \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (18)$$

สำหรับอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำสามารถพิจารณาในกรณีที่น้ำมีการยุบอัดตัวน้อยมากได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\sigma_w = \frac{K_w}{n} \left(\dot{\varepsilon}_{xx}^e + \dot{\varepsilon}_{yy}^e + \dot{\varepsilon}_{zz}^e \right) \quad (19)$$

เมื่อค่า K_w คือค่า Bulk Modulus ของน้ำและ n คือค่า Porosity ของดิน และพบว่าสามารถที่จะเขียนให้อยู่ในรูปของ Undrained Parameter (E_u และ ν_u) ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$E_u = 2G(1 + \nu_u) \quad \nu_u = \frac{\nu + \mu(1 + \nu)}{1 + 2\mu(1 + \nu)}$$

$$\mu = \frac{1}{3n} \frac{K_w}{K} \quad K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

โดยค่า E_u และค่า ν_u คือค่า Undrained Modulus และค่า Undrained Poisson's Ratio ตามลำดับ ค่า E และค่า ν คือค่า Effective Modulus และค่า Effective Poisson's Ratio μ ในที่นี้คือพารามิเตอร์ช่วยในการคำนวณและแปลงค่าจาก Effective Parameter เป็น Total Parameter

โดยทั่วไปขณะที่ดินอยู่ในสภาพ Undrained ค่า Poisson's Ratio จะมีค่าเท่ากับ 0.5 แต่สำหรับการคำนวณแล้วจะทำให้ Matrix เกิดเป็น Singularity ดังนั้นสำหรับการคำนวณจึงกำหนดให้ค่า Poisson's Ratio ที่สภาวะ Undrained มีค่าเท่ากับ 0.495 และในส่วน of ค่า Elastic Modulus ของดินสามารถที่จะแปลงค่าจากค่า Effective Modulus เป็นค่า Undrained Modulus ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$E = \frac{2(1 + \nu)}{3} E_u \quad (20)$$



แบบจำลองอีลาสโตพลาสติกอย่างง่าย (Simple Elasto-Plastic Models)

ข้อจำกัดของแบบจำลองอีลาสติกนั้นมีข้อจำกัดหลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความเครียดแบบพลาสติกที่เกิดขึ้นเมื่อความเค้นสูงกว่าความเค้นคราก (Yield Stress) ดังนั้นจึงนำไปสู่การเลือกใช้แบบจำลองอีลาสโตพลาสติก

แบบจำลองอีลาสโตพลาสติกนั้นตั้งอยู่บนทฤษฎีพลาสติกซิตี (Plasticity Theory) โดยทฤษฎีนี้จะใช้ฟังก์ชันคราก (Yield Function, f) ประกอบการอธิบายวัสดุในภาวะพลาสติก กล่าวคือวัสดุจะมีพฤติกรรมอีลาสโตพลาสติกเฉพาะภายใต้ภาวะความเค้นที่อยู่ภายในพื้นผิวคราก (Yield Surface) และเมื่อภาวะความเค้นถึงเงื่อนไขคราก (Yield Criteria) เมื่อใดเมื่อวัสดุจะแสดงพฤติกรรมอีลาสโตพลาสติก

Linear Elastic Model

แบบจำลองนี้สร้างโดยอ้างอิงจากทฤษฎีของ ฮุก (Hook's law) และ Isotropic linear elasticity โดยแบบจำลองเกี่ยวข้องกับตัวแปรที่สำคัญ 2 ตัว คือค่า E (Elastic Young's Modulus) และค่า ν (Poisson's ratio) การประยุกต์ใช้สำหรับแบบจำลองนี้ใช้สำหรับจำลองสภาพพฤติกรรมของดินได้เพียงไม่กี่ชนิด โดยมากมักจะใช้จำลองลักษณะของโครงสร้างในดิน

Mohr-Coulomb Model (Perfect-Plasticity)

สภาวะ Plastic หมายถึงสภาวะที่เมื่อมี strain เกิดขึ้นจะไม่สามารถคืนสภาพได้ ในการพิจารณาว่ามีสภาวะ Plastic เกิดขึ้นในการคำนวณหรือไม่จะมีการนำเอา Yield function (f) ซึ่งเป็น ฟังก์ชันระหว่าง Stress และ Strain เป็นตัวแทนแสดงถึงการเกิด Principal Stress ที่ผิวได้ โดยที่แบบจำลอง Perfectly-Elastic เป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นมาจาก Yield Surface โดย Yield Surface จะถูกสร้างขึ้นมาด้วยสมการจากตัวแปรต่างๆ ซึ่งตัวแปรเหล่านั้นจะไม่ได้รับผลกระทบเมื่อมี Strain เกิดขึ้น และเมื่อมี Stress ที่เกิดขึ้นที่ผิวจะแทนที่ด้วยจุดต่างๆซึ่งอยู่ใน Yield Surface

โดยจุดต่างๆเหล่านี้จะมีสถานะเป็น Purely elastic และกรณีที่เกิด Strain ขึ้นจะสามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้

โดยที่แบบจำลองตัวนี้เป็นที่รู้จักและใช้กันอย่างแพร่หลายในการจำลองพฤติกรรมของดินทั่วไป โดยในแบบจำลองจะมีการใส่ค่าของตัวแปรต่างๆได้แก่ Young's Modulus (E), Poison's ratio (ν), Cohesion (c), friction angle (ϕ) และค่า dilatancy angle (ψ)

Soft Soil Model (SSM)

เป็นแบบจำลองซึ่งจำลองพฤติกรรมของ Cam-Clay ซึ่งมักจะใช้จำลองพฤติกรรมของดินเหนียวอ่อน เช่นการทรุดตัวของดินเหนียวอ่อน หรือดินสารอินทรีย์ (Peat) โดยแบบจำลองนี้ถูกเสนอขึ้นมาโดย Vermeer และ Brinkgreve (1995) แบบจำลองจะการได้ได้ดีในกรณีที่ Primary's Compression โดยที่ SSM ต้องการค่าตัวแปรต่างๆดังนี้

λ^*	คือค่า modified compression index ได้จากการสร้างกราฟ ซึ่งจะเป็นค่าคงที่คนละตัวกับที่ BURLAND (1990) เสนอไว้
K^*	คือค่า modified swelling index ซึ่งได้มาจากการสร้างกราฟ เช่นเดียวกัน
C	คือค่า ความเชื่อมแน่นของดิน(Cohesion)
ϕ	คือค่า Friction angle
ψ	คือค่า Dilatancy angle

Soft Soil Creep Model

สำหรับแบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองที่พัฒนาต่อมาจาก Visco - Plasticity โดยที่แบบจำลองสามารถใช้ในการจำลองพฤติกรรมชนิด ขึ้นกับเวลา (Time-Dependent) ของดินเหนียวอ่อนได้ ซึ่งนอกจากจะมีตัวแปรพื้นฐานที่ต้องใส่ค่าลงไป 5 ตัวแปรแล้ว ยังมีตัวแปรพิเศษคือ หรือที่เรียกว่า Modified Creep Index เพื่อพิจารณาการเกิด Creep ภายในดินเหนียว

Hardening Soil Model

แบบจำลองชนิดนี้เป็นชนิด Elastro-Plastic และเป็นแบบจำลอง Hyperbolic สร้างขึ้นมาจากข้อบ่งชี้ Friction Hardening Plastic ซึ่งจะเหมาะสำหรับการจำลองพฤติกรรมของ Stiff Soil เช่นดินเหนียว Overconsolidated, ทราย และในหิน ตัวแปรบางชนิดจะใช้เหมือนกันกับของ Mohr-Colomb ตัวแปรซึ่งเพิ่มเข้ามาได้แก่

E_{ref50} คือค่า Secant stiffness in standard drained ของการทดสอบ Triaxial

E_{refoed} คือค่า Tangent stiffness for primary oedometer loading

M คือค่า กำลังของ stress-level dependency of stiffness. $M = 1.0$ สำหรับดินเหนียวอ่อน และ 0.5 กรณีที่เป็นทราย



ตารางผนวกที่ ค1 แสดงค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรอง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 0.50 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินอ่อน ($E_1/E_2 = 10$ เท่า) ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา

Vertical Effective Stress									Horizontal Effective Stress							
Elev.	Load (kPa)								Load (kPa)							
(m)	0	30	50 (F.P.)	60	90	120	140	145 (S.F.)	0	30	50 (F.P.)	60	90	120	140	145 (S.F.)
0.00	0.000	-1.447	-2.142	-2.709	-10.965	-7.589	28.550	35.336	0.000	25.017	44.743	55.323	76.716	69.609	33.176	26.453
-0.26	6.302	15.077	38.319	45.196	60.304	59.286	59.503	59.587	1.576	2.658	1.782	2.209	3.010	2.924	3.397	3.490
-0.50	12.000	57.678	61.813	61.853	62.159	62.452	62.720	62.759	3.000	-0.300	-0.057	-0.003	0.290	0.338	0.321	0.344
Major Principal Effective Stress									Minor Principal Effective Stress							
Elev.	Load (kPa)								Load (kPa)							
(m)	0	30	50 (F.P.)	60	90	120	140	145 (S.F.)	0	30	50 (F.P.)	60	90	120	140	145 (S.F.)
0.00	0.000	25.017	44.743	55.323	76.716	69.609	33.176	35.336	0.000	-1.447	-2.142	-2.709	-10.965	-7.589	28.550	26.453
-0.26	6.302	15.077	38.319	45.196	60.304	59.286	59.503	59.587	1.576	2.658	1.782	2.209	3.010	2.924	3.397	3.490
-0.50	12.000	57.678	61.813	61.853	62.159	62.452	62.720	62.759	3.000	-0.300	-0.057	-0.003	0.290	0.338	0.321	0.344
Remark	S.F. = Soil Failure F.P. = First Plastic Point															

ตารางผนวกที่ ค2 แสดงค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรอง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 0.50 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินแข็ง ($E_1/E_2 = 0.2$ เท่า) ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา

Vertical Effective Stress									Horizontal Effective Stress							
Elev.	Load (kPa)								Load (kPa)							
(m)	0	30	60	90	110 (F.P.)	120	140	164 (S.F.)	0	30	60	90	110 (F.P.)	120	140	164 (S.F.)
0.00	0.000	9.033	18.837	28.893	40.152	51.068	61.612	61.517	0.000	-0.037	-0.073	-0.107	-0.128	-0.165	-0.091	0.311
-0.26	6.302	20.578	37.218	54.928	60.850	60.631	61.121	61.377	1.576	0.201	0.440	0.676	0.836	1.097	1.452	1.963
-0.50	12.000	15.265	20.002	24.899	28.163	30.786	45.218	51.544	3.000	0.435	1.171	1.964	2.659	2.743	4.875	10.436
Major Principal Effective Stress									Minor Principal Effective Stress							
Elev.	Load (kPa)								Load (kPa)							
(m)	0	30	60	90	110 (F.P.)	120	140	164 (S.F.)	0	30	60	90	110 (F.P.)	120	140	164 (S.F.)
0.00	0.000	9.033	18.837	28.893	40.152	51.068	61.612	61.517	0.000	-0.037	-0.073	-0.107	-0.128	-0.165	-0.091	0.311
-0.26	6.302	20.578	37.218	54.928	60.850	60.631	61.121	61.377	1.576	0.201	0.440	0.676	0.836	1.097	1.452	1.963
-0.50	12.000	15.265	20.002	24.899	28.163	30.786	45.218	51.544	3.000	0.435	1.171	1.964	2.659	2.743	4.875	10.436
Remark	S.F. = Soil Failure F.P. = First Plastic Point															

ตารางผนวกที่ ค3 แสดงค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรอง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 2.00 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินอ่อน ($E_1/E_2 = 10$ เท่า) ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา

Vertical Effective Stress									Horizontal Effective Stress							
Elev.	Load (kPa)								Load (kPa)							
(m)	0	30	60	90	100 (F.P.)	120	150	170 (S.F.)	0	30	60	90	100 (F.P.)	120	150	170 (S.F.)
0.00	0.000	-0.974	-2.177	-2.984	-3.054	-3.074	-3.067	56.541	0.000	4.537	9.088	17.831	22.099	28.670	32.627	5.067
-0.72	17.409	22.394	30.117	38.585	41.502	48.114	61.600	62.201	4.352	-0.003	0.001	0.004	0.007	0.024	0.242	0.357
-1.27	30.262	35.069	42.151	53.322	60.236	61.629	61.711	61.919	7.566	2.784	0.015	0.028	0.018	0.013	0.089	0.482
-2.00	48.000	56.884	61.664	61.726	61.758	61.770	61.794	61.669	12.000	2.898	0.009	0.036	0.049	0.054	0.068	-0.025
Major Principal Effective Stress									Minor Principal Effective Stress							
Elev.	Load (kPa)								Load (kPa)							
(m)	0	30	60	90	100 (F.P.)	120	150	170 (S.F.)	0	30	60	90	100 (F.P.)	120	150	170 (S.F.)
0.00	0.000	4.537	9.088	17.831	22.099	28.670	32.627	56.541	0.000	-0.974	-2.177	-2.984	-3.054	-3.074	-3.067	5.067
-0.72	17.409	22.394	30.117	38.585	41.502	48.114	61.600	62.201	4.352	-0.003	0.001	0.004	0.007	0.024	0.242	0.357
-1.27	30.262	35.069	42.151	53.322	60.236	61.629	61.711	61.919	7.566	2.784	0.015	0.028	0.018	0.013	0.089	0.482
-2.00	48.000	56.884	61.664	61.726	61.758	61.770	61.794	61.669	12.000	2.898	0.009	0.036	0.049	0.054	0.068	-0.025
Remark	S.F. = Soil Failure F.P. = First Plastic Point															

ตารางผนวกที่ ๓4 แสดงค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรอง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 2.00 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินแข็ง ($E_1/E_2 = 0.2$ เท่า) ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา

Vertical Effective Stress									Horizontal Effective Stress							
Elev.	Load (kPa)								Load (kPa)							
(m)	0	30	60	90	110	120	150	161	0	30	60	90	110	120	150	161
0.00	0.000	4.176	8.133	11.677	11.172	19.754	49.133	50.650	0.000	0.159	0.347	0.502	0.714	1.010	3.982	4.500
-0.72	17.409	25.406	36.388	47.422	55.037	61.535	62.003	62.248	4.352	0.000	0.000	0.000	-0.003	0.040	0.211	0.307
-1.27	30.262	33.807	37.889	44.049	47.677	48.961	59.140	61.560	7.566	4.156	0.237	0.016	0.018	0.018	0.056	0.139
-2.00	48.000	48.821	49.632	50.458	50.966	51.170	51.534	51.987	12.000	11.332	10.664	9.975	9.534	9.340	8.822	8.203
Major Principal Effective Stress									Minor Principal Effective Stress							
Elev.	Load (kPa)								Load (kPa)							
(m)	0	30	60	90	110	120	150	161	0	30	60	90	110	120	150	161
0.00	0.000	4.176	8.133	11.677	11.172	19.754	49.133	50.650	0.000	0.159	0.347	0.502	0.714	1.010	3.982	4.500
-0.72	17.409	25.406	36.388	47.422	55.037	61.535	62.003	62.248	4.352	0.000	0.000	0.000	-0.003	0.040	0.211	0.307
-1.27	30.262	33.807	37.889	44.049	47.677	48.961	59.140	61.560	7.566	4.156	0.237	0.016	0.018	0.018	0.056	0.139
-2.00	48.000	48.821	49.632	50.458	50.966	51.170	51.534	51.987	12.000	11.332	10.664	9.975	9.534	9.340	8.822	8.203
Remark	S.F. = Soil Failure F.P. = First Plastic Point															

ตารางผนวกที่ ค5 แสดงค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรอง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 0.50 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินอ่อน ($E_1/E_2 = 1,000$ เท่า) ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา

Vertical Effective Stress									Horizontal Effective Stress								
Elev.	Load (kPa)									Load (kPa)							
(m)	0	75 (F.P.)	100	200	300	400	500	589 (S.P.)		0	75 (F.P.)	100	200	300	400	500	589 (S.P.)
0.00	0.000	-0.105	-0.041	0.340	-1.185	-10.086	-30.483	-77.369		0.000	512.623	494.667	498.016	503.702	517.628	542.098	593.806
-0.26	6.302	230.082	283.058	300.471	342.850	376.135	393.333	418.978		1.576	114.076	198.963	172.780	143.944	119.797	106.223	84.360
-0.50	12.000	494.445	494.708	496.515	495.904	495.302	494.825	497.740		3.000	-0.003	0.479	0.535	0.843	1.021	1.299	-0.374
Major Principal Effective Stress									Minor Principal Effective Stress								
Elev.	Load (kPa)									Load (kPa)							
(m)	0	75 (F.P.)	100	200	300	400	500	589 (S.P.)		0	75 (F.P.)	100	200	300	400	500	589 (S.P.)
0.00	0.000	512.623	494.667	498.016	503.702	517.628	542.098	593.806		0.000	-0.105	-0.041	0.340	-1.185	-10.086	-30.483	-77.369
-0.26	6.302	230.082	283.058	300.471	342.850	376.135	393.333	418.978		1.576	114.076	198.963	172.780	143.944	119.797	106.223	84.360
-0.50	12.000	494.445	494.708	496.515	495.904	495.302	494.825	497.740		3.000	-0.003	0.479	0.535	0.843	1.021	1.299	-0.374
Remark	S.F. = Soil Failure F.P. = First Plastic Point																

ตารางผนวกที่ ๑๖ แสดงค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรอง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 0.50 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินแข็ง ($E_1/E_2 = 20$ เท่า) ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา

Vertical Effective Stress									Horizontal Effective Stress							
Elev.	Load (kPa)								Load (kPa)							
(m)	0	100	200	300	400	500	500 (F.P.)	1040 (S.P.)	0	100	200	300	400	500	500 (F.P.)	1040 (S.P.)
0.00	0.000	-1.476	-2.898	-5.068	-8.546	-11.384	-11.384	390.001	0.000	144.676	292.991	467.745	588.795	574.430	574.430	100.735
-0.26	6.302	74.823	146.612	230.642	336.503	368.062	368.062	484.796	1.576	4.169	8.519	15.555	20.848	21.849	21.849	27.059
-0.50	12.000	234.161	462.446	505.162	496.020	496.057	496.057	512.381	3.000	-0.201	-0.427	-0.582	-0.191	-0.028	-0.028	-3.863
Major Principal Effective Stress									Minor Principal Effective Stress							
Elev.	Load (kPa)								Load (kPa)							
(m)	0	100	200	300	400	500	500 (F.P.)	1040 (S.P.)	0	100	200	300	400	500	500 (F.P.)	1040 (S.P.)
0.00	0.000	144.676	292.991	467.745	588.795	574.430	574.430	390.001	0.000	-1.476	-2.898	-5.068	-8.546	-11.384	-11.384	100.735
-0.26	6.302	74.823	146.612	230.642	336.503	368.062	368.062	484.796	1.576	4.169	8.519	15.555	20.848	21.849	21.849	27.059
-0.50	12.000	234.161	462.446	505.162	496.020	496.057	496.057	512.381	3.000	-0.201	-0.427	-0.582	-0.191	-0.028	-0.028	-3.863
Remark	S.F. = Soil Failure F.P. = First Plastic Point															

ตารางผนวกที่ ค7 แสดงค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรอง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 2.00 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินอ่อน ($E_1/E_2 = 1,000$ เท่า) ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา

Vertical Effective Stress									Horizontal Effective Stress							
Elev.	Load (kPa)								Load (kPa)							
(m)	0	200	315 (F.P.)	400	600	800	1000	1333 (S.F.)	0	200	315 (F.P.)	400	600	800	1000	1333 (S.F.)
0.00	0.000	0.086	4.426	3.396	16.142	32.146	60.524	505.469	0.000	412.080	502.813	500.451	495.466	487.276	464.691	9.268
-0.72	17.409	-0.070	0.176	0.048	15.254	92.189	198.375	464.481	4.352	41.674	131.025	387.751	484.132	411.642	308.384	41.481
-1.27	30.262	170.753	334.446	494.021	489.340	481.433	474.227	497.319	7.566	0.043	0.054	0.021	4.664	14.014	23.375	8.536
-2.00	48.000	497.273	494.153	494.334	494.490	494.215	494.628	495.363	12.000	0.000	0.027	0.046	0.065	0.012	0.125	0.263
Major Principal Effective Stress									Minor Principal Effective Stress							
Elev.	Load (kPa)								Load (kPa)							
(m)	0	200	315 (F.P.)	400	600	800	1000	1333 (S.F.)	0	200	315 (F.P.)	400	600	800	1000	1333 (S.F.)
0.00	0.000	412.080	502.813	500.451	495.466	487.276	464.691	505.469	0.000	0.086	4.426	3.396	16.142	32.146	60.524	9.268
-0.72	17.409	41.674	131.025	387.751	484.132	411.642	308.384	464.481	4.352	-0.070	0.176	0.048	15.254	92.189	198.375	41.481
-1.27	30.262	170.753	334.446	494.021	489.340	481.433	474.227	497.319	7.566	0.043	0.054	0.021	4.664	14.014	23.375	8.536
-2.00	48.000	497.273	494.153	494.334	494.490	494.215	494.628	495.363	12.000	0.000	0.027	0.046	0.065	0.012	0.125	0.263
Remark	S.F. = Soil Failure F.P. = First Plastic Point															

ตารางผนวกที่ ค8 แสดงค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรอง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 2.00 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินแข็ง ($E_1/E_2 = 20$ เท่า) ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา

Vertical Effective Stress									Horizontal Effective Stress							
Elev.	Load (kPa)								Load (kPa)							
(m)	0	200	400	600	800	1000	1050 (F.P.)	1297 (S.F.)	0	200	400	600	800	1000	1050 (F.P.)	1297 (S.F.)
0.00	0.000	-1.698	-2.861	-3.935	-4.976	-5.718	8.875	461.720	0.000	72.562	151.925	232.064	311.108	385.308	355.713	16.667
-0.72	17.409	64.900	121.551	178.855	236.273	294.206	311.142	493.377	4.352	0.008	0.023	0.036	0.062	0.082	0.175	0.468
-1.27	30.262	90.926	155.075	219.511	283.154	350.843	378.492	494.357	7.566	0.074	0.169	0.266	0.385	0.494	0.634	2.750
-2.00	48.000	171.557	301.857	430.960	493.898	493.897	494.135	494.654	12.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	0.021	0.166
Major Principal Effective Stress									Minor Principal Effective Stress							
Elev.	Load (kPa)								Load (kPa)							
(m)	0	200	400	600	800	1000	1050 (F.P.)	1297 (S.F.)	0	200	400	600	800	1000	1050 (F.P.)	1297 (S.F.)
0.00	0.000	72.562	151.925	232.064	311.108	385.308	355.713	461.720	0.000	-1.698	-2.861	-3.935	-4.976	-5.718	8.875	16.667
-0.72	17.409	64.900	121.551	178.855	236.273	294.206	311.142	493.377	4.352	0.008	0.023	0.036	0.062	0.082	0.175	0.468
-1.27	30.262	90.926	155.075	219.511	283.154	350.843	378.492	494.357	7.566	0.074	0.169	0.266	0.385	0.494	0.634	2.750
-2.00	48.000	171.557	301.857	430.960	493.898	493.897	494.135	494.654	12.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	0.021	0.166
Remark	S.F. = Soil Failure F.P. = First Plastic Point															

ตารางผนวกที่ ๑๑ แสดงค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรอง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 0.50 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินอ่อน ($E_1/E_2 = 10,000$ เท่า) ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา

Vertical Effective Stress									Horizontal Effective Stress							
Elev.	Load (kPa)								Load (kPa)							
(m)	0	65 (P.F.)	150	300	450	600	700	717 (S.F.)	0	65 (P.F.)	150	300	450	600	700	717 (S.F.)
0.00	0.000	0.545	1.184	2.608	1.773	-4.320	-16.142	-30.082	0.000	726.993	730.077	735.245	743.224	755.238	770.966	726.993
-0.26	6.302	433.013	426.649	439.527	493.639	510.839	543.003	562.666	1.576	324.303	327.915	289.163	236.101	221.680	192.510	324.303
-0.50	12.000	729.282	730.408	731.069	730.464	727.250	727.866	728.138	3.000	0.903	0.980	1.787	1.645	3.495	2.489	0.903
Major Principal Effective Stress									Minor Principal Effective Stress							
Elev.	Load (kPa)								Load (kPa)							
(m)	0	65 (P.F.)	150	300	450	600	700	717 (S.F.)	0	65 (P.F.)	150	300	450	600	700	717 (S.F.)
0.00	0.000	726.993	730.077	735.245	743.224	755.238	770.966	726.993	0.000	0.545	1.184	2.608	1.773	-4.320	-16.142	-30.082
-0.26	6.302	433.013	426.649	439.527	493.639	510.839	543.003	562.666	1.576	324.303	327.915	289.163	236.101	221.680	192.510	324.303
-0.50	12.000	729.282	730.408	731.069	730.464	727.250	727.866	728.138	3.000	0.903	0.980	1.787	1.645	3.495	2.489	0.903
Remark	S.F. = Soil Failure		F.P. = First Plastic Point													

ตารางผนวกที่ ค10 แสดงค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรอง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 0.50 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินแข็ง ($E_1/E_2 = 200$ เท่า) ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา

Vertical Effective Stress									Horizontal Effective Stress							
Elev.	Load (kPa)								Load (kPa)							
(m)	0	150	250 (F.P.)	300	450	600	700	1317 (S.F.)	0	150	250 (F.P.)	300	450	600	700	1317 (S.F.)
0.00	0.000	-0.614	-1.667	0.505	-0.394	-22.299	-45.536	314.953	0.000	755.217	729.441	730.091	740.595	767.872	794.794	442.496
-0.26	6.302	199.103	419.950	399.859	471.086	559.573	581.752	701.567	1.576	62.174	167.664	187.765	139.804	114.677	103.839	50.841
-0.50	12.000	793.115	729.006	729.135	730.842	731.106	729.602	747.286	3.000	-0.249	0.722	1.130	1.234	1.196	2.001	-5.625
Major Principal Effective Stress									Minor Principal Effective Stress							
Elev.	Load (kPa)								Load (kPa)							
(m)	0	150	250 (F.P.)	300	450	600	700	1317 (S.F.)	0	150	250 (F.P.)	300	450	600	700	1317 (S.F.)
0.00	0.000	755.217	729.441	730.091	740.595	767.872	794.794	442.496	0.000	-0.614	-1.667	0.505	-0.394	-22.299	-45.536	314.953
-0.26	6.302	199.103	419.950	399.859	471.086	559.573	581.752	701.567	1.576	62.174	167.664	187.765	139.804	114.677	103.839	50.841
-0.50	12.000	793.115	729.006	729.135	730.842	731.106	729.602	747.286	3.000	-0.249	0.722	1.130	1.234	1.196	2.001	-5.625
Remark	S.F. = Soil Failure		F.P. = First Plastic Point													

ตารางผนวกที่ ค11 แสดงค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรอง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 2.00 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินอ่อน ($E_1/E_2 = 10,000$ เท่า) ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา

Vertical Effective Stress									Horizontal Effective Stress							
Elev.	Load (kPa)								Load (kPa)							
(m)	0	260 (F.P.)	300	600	900	1200	1500	1954 (S.F.)	0	260 (F.P.)	300	600	900	1200	1500	1954 (S.F.)
0.00	0.000	-0.359	4.136	9.137	22.407	71.487	92.904	741.272	0.000	728.193	727.290	728.030	724.475	684.231	673.471	19.998
-0.72	17.409	-0.001	0.005	6.803	54.948	114.054	318.951	722.019	4.352	300.648	612.917	722.734	678.639	623.047	421.359	32.254
-1.27	30.262	437.787	734.051	727.792	728.138	723.018	721.719	724.577	7.566	0.018	0.009	0.183	0.735	10.033	13.832	22.434
-2.00	48.000	727.565	727.680	727.813	727.616	727.371	728.556	729.074	12.000	0.034	0.073	0.119	0.048	0.372	0.390	0.889
Major Principal Effective Stress									Minor Principal Effective Stress							
Elev.	Load (kPa)								Load (kPa)							
(m)	0	260 (F.P.)	300	600	900	1200	1500	1954 (S.F.)	0	260 (F.P.)	300	600	900	1200	1500	1954 (S.F.)
0.00	0.000	728.193	727.290	728.030	724.475	684.231	673.471	741.272	0.000	-0.359	4.136	9.137	22.407	71.487	92.904	19.998
-0.72	17.409	300.648	612.917	722.734	678.639	623.047	421.359	722.019	4.352	-0.001	0.005	6.803	54.948	114.054	318.951	32.254
-1.27	30.262	437.787	734.051	727.792	728.138	723.018	721.719	724.577	7.566	0.018	0.009	0.183	0.735	10.033	13.832	22.434
-2.00	48.000	727.565	727.680	727.813	727.616	727.371	728.556	729.074	12.000	0.034	0.073	0.119	0.048	0.372	0.390	0.889
Remark	S.F. = Soil Failure		F.P. = First Plastic Point													

ตารางผนวกที่ ค12 แสดงค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ, ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลหลัก และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลรอง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 2.00 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินแข็ง ($E_1/E_2 = 200$ เท่า) ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา

Vertical Effective Stress									Horizontal Effective Stress							
Elev.	Load (kPa)								Load (kPa)							
(m)	0	300	600	700 (F.P.)	900	1200	1500	1934 (S.F.)	0	300	600	700 (F.P.)	900	1200	1500	1934 (S.F.)
0.00	0.000	0.228	0.504	18.154	11.145	22.457	78.407	721.090	0.000	348.728	709.590	757.105	776.612	768.046	723.525	15.919
-0.72	17.409	26.573	45.611	37.558	-1.480	80.790	229.613	610.455	4.352	1.300	0.289	6.975	193.768	336.834	185.307	12.306
-1.27	30.262	179.320	336.346	418.956	728.416	717.657	728.608	730.721	7.566	0.093	0.223	0.300	0.010	10.389	1.469	8.365
-2.00	48.000	468.438	727.461	727.863	728.109	728.485	728.556	729.063	12.000	0.000	0.000	0.134	0.216	0.354	0.245	0.245
Major Principal Effective Stress									Minor Principal Effective Stress							
Elev.	Load (kPa)								Load (kPa)							
(m)	0	300	600	700 (F.P.)	900	1200	1500	1934 (S.F.)	0	300	600	700 (F.P.)	900	1200	1500	1934 (S.F.)
0.00	0.000	348.728	709.590	757.105	776.612	768.046	723.525	721.090	0.000	0.228	0.504	18.154	11.145	22.457	78.407	15.919
-0.72	17.409	26.573	45.611	37.558	193.768	336.834	229.613	610.455	4.352	1.300	0.289	6.975	-1.480	80.790	185.307	12.306
-1.27	30.262	179.320	336.346	418.956	728.416	717.657	728.608	730.721	7.566	0.093	0.223	0.300	0.010	10.389	1.469	8.365
-2.00	48.000	468.438	727.461	727.863	728.109	728.485	728.556	729.063	12.000	0.000	0.000	0.134	0.216	0.354	0.245	0.245
Remark	S.F. = Soil Failure			F.P. = First Plastic Point												

ตารางผนวกที่ ค13 แสดงค่าของเส้นทางดินหน่วยแรง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 0.50 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินอ่อน ($E_1/E_2 = 10$ เท่า) ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา

Elev. (m)	Load	0	30	50 (F.P)	60	90	120	140	145 (S.F.)
0.00	p'	0.000	11.785	21.300	26.307	32.876	31.010	30.863	30.895
	q'	0.000	13.232	23.443	29.016	43.841	38.599	2.313	4.441
-0.26	p'	3.939	8.867	20.051	23.702	31.657	31.105	31.450	31.538
	q'	2.363	6.209	18.268	21.493	28.647	28.181	28.053	28.048
-0.50	p'	7.500	28.689	30.878	30.925	31.225	31.395	31.520	31.551
	q'	4.500	28.989	30.935	30.928	30.935	31.057	31.200	31.208
Remark S.F. = Soil Failure F.P. = First Plastic Point									

ตารางผนวกที่ ค14 แสดงค่าของเส้นทางดินหน่วยแรง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ที่มีค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 0.50 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดินแข็ง ($E_1/E_2 = 0.2$ เท่า) ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา

Elev. (m)	Load	0	30	60	90	110 (F.P.)	120	140	164 (S.F.)
0.00	p'	0.000	4.498	9.382	14.393	20.012	25.451	30.760	30.914
	q'	0.000	4.535	9.455	14.500	20.140	25.617	30.852	30.603
-0.26	p'	3.939	10.390	18.829	27.802	30.843	30.864	31.286	31.670
	q'	2.363	10.188	18.389	27.126	30.007	29.767	29.834	29.707
-0.50	p'	7.500	7.850	10.586	13.432	15.411	16.765	25.046	30.990
	q'	4.500	7.415	9.416	11.467	12.752	14.021	20.171	20.554
Remark S.F. = Soil Failure F.P. = First Plastic Point									

ตารางผนวกที่ ค15 แสดงค่าของเส้นทางดินหน่วยแรง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ที่มี
ค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 2.00 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดิน
อ่อน ($E_1/E_2 = 10$ เท่า) ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา

Elev. (m)	Load	0	30	60	90	100 (F.P.)	120	150	170 (S.F.)
0.00	p'	0.000	1.782	3.455	7.424	9.523	12.798	14.780	30.804
	q'	0.000	2.756	5.632	10.407	12.576	15.872	17.847	25.737
-0.72	p'	10.881	11.195	15.059	19.295	20.755	24.069	30.921	31.279
	q'	6.528	11.198	15.058	19.291	20.748	24.045	30.679	30.922
-1.27	p'	18.914	18.927	21.083	26.675	30.127	30.821	30.900	31.201
	q'	11.348	16.142	21.068	26.647	30.109	30.808	30.811	30.718
-2.00	p'	30.000	29.891	30.837	30.881	30.904	30.912	30.931	30.822
	q'	18.000	26.993	30.827	30.845	30.854	30.858	30.863	30.847
Remark		S.F. = Soil Failure		F.P. = First Plastic Point					

ตารางผนวกที่ ค16 แสดงค่าของเส้นทางดินหน่วยแรง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade A ที่มี
ค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 2.00 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดิน
แข็ง ($E_1/E_2 = 0.2$ เท่า) ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา

Elev. (m)	Load	0	30	60	90	110 (F.P)	120	150	161 (S.F.)
0.00	p'	0.000	2.168	4.240	6.089	5.943	10.382	26.557	27.575
	q'	0.000	2.009	3.893	5.588	5.229	9.372	22.575	23.075
-0.72	p'	10.881	12.703	18.194	23.711	27.517	30.787	31.107	31.278
	q'	6.528	12.703	18.194	23.711	27.520	30.747	30.896	30.971
-1.27	p'	18.914	18.982	19.063	22.032	23.848	24.489	29.598	30.850
	q'	11.348	14.826	18.826	22.017	23.829	24.472	29.542	30.710
-2.00	p'	30.000	30.076	30.148	30.216	30.250	30.255	30.178	30.095
	q'	18.000	18.745	19.484	20.242	20.716	20.915	21.356	21.892
Remark		S.F. = Soil Failure		F.P. = First Plastic Point					

ตารางผนวกที่ ค17 แสดงค่าของเส้นทางเดินหน่วยแรง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ที่มี
ค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 0.50 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดิน
แข็ง ($E_1/E_2 = 1,000$ เท่า) ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา

Elev. (m)	Load	0	75 (F.P.)	100	200	300	400	500	589 (S.P.)
0.00	p'	0.000	256.259	247.313	249.178	251.258	253.771	255.807	258.219
	q'	0.000	256.364	247.354	248.838	252.443	263.857	286.291	335.587
-0.26	p'	3.939	172.079	241.011	236.625	243.397	247.966	249.778	251.669
	q'	2.363	58.003	42.048	63.846	99.453	128.169	143.555	167.309
-0.50	p'	7.500	247.221	247.593	248.525	248.374	248.162	248.062	248.683
	q'	4.500	247.224	247.114	247.990	247.531	247.140	246.763	249.057
Remark		S.F. = Soil Failure F.P. = First Plastic Point							

ตารางผนวกที่ ค18 แสดงค่าของเส้นทางเดินหน่วยแรง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ที่มี
ค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 0.50 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดิน
แข็ง ($E_1/E_2 = 20$ เท่า) ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา

Elev. (m)	Load	0	100	200	300	400	500	500 (F.P.)	1040 (S.P.)
0.00	p'	0.000	71.600	145.046	231.338	290.125	281.523	281.523	245.368
	q'	0.000	73.076	147.945	236.406	298.670	292.907	292.907	144.633
-0.26	p'	3.939	39.496	77.565	123.099	178.675	194.956	194.956	255.928
	q'	2.363	35.327	69.047	107.544	157.828	173.107	173.107	228.868
-0.50	p'	7.500	116.980	231.010	252.290	247.915	248.014	248.014	254.259
	q'	4.500	117.181	231.436	252.872	248.105	248.042	248.042	258.122
Remark		S.F. = Soil Failure F.P. = First Plastic Point							

ตารางผนวกที่ ค19 แสดงค่าของเส้นทางดินหน่วยแรง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ที่มี
ค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 2.00 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดิน
อ่อน ($E_1/E_2 = 1,000$ เท่า) ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา

Elev. (m)	Load	0	200	315 (F.P.)	400	600	800	1000	1333 (S.F.)
0.00	p'	0.000	206.083	253.620	251.923	255.804	259.711	262.607	257.369
	q'	0.000	205.997	249.194	248.528	239.662	227.565	202.084	248.100
-0.72	p'	10.881	20.802	65.601	193.900	249.693	251.915	253.380	252.981
	q'	6.528	20.872	65.425	193.852	234.439	159.726	55.005	211.500
-1.27	p'	18.914	85.398	167.250	247.021	247.002	247.724	248.801	252.927
	q'	11.348	85.355	167.196	247.000	242.338	233.710	225.426	244.392
-2.00	p'	30.000	248.637	247.090	247.190	247.277	247.113	247.376	247.813
	q'	18.000	248.637	247.063	247.144	247.213	247.102	247.251	247.550
Remark		S.F. = Soil Failure		F.P. = First Plastic Point					

ตารางผนวกที่ ค20 แสดงค่าของเส้นทางดินหน่วยแรง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade C ที่มี
ค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 2.00 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดิน
แข็ง ($E_1/E_2 = 20$ เท่า) ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา

Elev. (m)	Load	0	200	400	600	800	1000	1050 (F.P)	1297 (S.F.)
0.00	p'	0.000	35.432	74.532	114.065	153.066	189.795	182.294	239.193
	q'	0.000	37.130	77.393	117.999	158.042	195.513	173.419	222.526
-0.72	p'	10.881	32.454	60.787	89.445	118.167	147.144	155.658	246.922
	q'	6.528	32.446	60.764	89.410	118.106	147.062	155.484	246.455
-1.27	p'	18.914	45.500	77.622	109.889	141.770	175.668	189.563	248.553
	q'	11.348	45.426	77.453	109.623	141.385	175.175	188.929	245.803
-2.00	p'	30.000	85.779	150.928	215.479	246.948	246.948	247.078	247.410
	q'	18.000	85.779	150.929	215.480	246.950	246.949	247.057	247.244
Remark		S.F. = Soil Failure		F.P. = First Plastic Point					

ตารางผนวกที่ ค21 แสดงค่าของเส้นทางเดินหน่วยแรง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ที่มี
ค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 0.50 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดิน
อ่อน ($E_1/E_2 = 10,000$ เท่า) ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา

Elev. (m)	Load	0	65 (F.P.)	150	300	450	600	700	717 (S.F.)
0.00	p'	0.000	363.769	365.631	368.927	372.498	375.459	377.412	348.456
	q'	0.000	363.224	364.447	366.318	370.726	379.779	393.554	378.538
-0.26	p'	3.939	378.658	377.282	364.345	364.870	366.259	367.757	443.484
	q'	2.363	54.355	49.367	75.182	128.769	144.580	175.247	119.181
-0.50	p'	7.500	365.092	365.694	366.428	366.055	365.372	365.177	364.521
	q'	4.500	364.189	364.714	364.641	364.409	361.877	362.688	363.618
Remark		S.F. = Soil Failure F.P. = First Plastic Point							

ตารางผนวกที่ ค22 แสดงค่าของเส้นทางเดินหน่วยแรง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ที่มี
ค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 0.50 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดิน
แข็ง ($E_1/E_2 = 200$ เท่า) ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา

Elev. (m)	Load	0	150	250 (F.P.)	300	450	600	700	1317 (S.F.)
0.00	p'	0.000	377.301	363.887	365.298	370.101	372.786	374.629	378.725
	q'	0.000	377.916	365.554	364.793	370.495	395.085	420.165	63.771
-0.26	p'	3.939	130.639	293.807	293.812	305.445	337.125	342.796	376.204
	q'	2.363	68.464	126.143	106.047	165.641	222.448	238.957	325.363
-0.50	p'	7.500	396.433	364.864	365.133	366.038	366.151	365.802	370.830
	q'	4.500	396.682	364.142	364.002	364.804	364.955	363.801	376.456
Remark		S.F. = Soil Failure F.P. = First Plastic Point							

ตารางผนวกที่ ค23 แสดงค่าของเส้นทางดินหน่วยแรง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ที่มี
ค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 2.00 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดิน
อ่อน ($E_1/E_2 = 10,000$ เท่า) ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา

Elev. (m)	Load	0	260 (F.P.)	300	600	900	1200	1500	1954 (S.F.)
0.00	p'	0.000	363.917	365.713	368.584	373.441	377.859	383.188	380.635
	q'	0.000	364.276	361.577	359.446	351.034	306.372	290.284	360.637
-0.72	p'	10.881	150.323	306.461	364.768	366.794	368.551	370.155	377.136
	q'	6.528	150.325	306.456	357.966	311.846	254.496	51.204	344.883
-1.27	p'	18.914	218.902	367.030	363.988	364.437	366.526	367.775	373.506
	q'	11.348	218.884	367.021	363.805	363.702	356.493	353.944	351.071
-2.00	p'	30.000	363.800	363.876	363.966	363.832	363.871	364.473	364.982
	q'	18.000	363.765	363.803	363.847	363.784	363.500	364.083	364.093
Remark		S.F. = Soil Failure		F.P. = First Plastic Point					

ตารางผนวกที่ ค24 แสดงค่าของเส้นทางดินหน่วยแรง สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทาง Grade D ที่มี
ค่าความหนาของโครงสร้างชั้นทาง 2.00 เมตร กรณีก่อสร้างบนชั้นฐานรากดิน
แข็ง ($E_1/E_2 = 200$ เท่า) ณ ระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณา

Elev. (m)	Load	0	300	600	700 (F.P.)	900	1200	1500	1934 (S.F.)
0.00	p'	0.000	174.478	355.047	387.629	393.879	395.251	400.966	368.505
	q'	0.000	174.250	354.543	369.476	382.733	372.795	322.559	352.585
-0.72	p'	10.881	13.937	22.950	22.267	96.144	208.812	207.460	311.381
	q'	6.528	12.636	22.661	15.291	97.624	128.022	22.153	299.075
-1.27	p'	18.914	89.707	168.284	209.628	364.213	364.023	365.038	369.543
	q'	11.348	89.614	168.061	209.328	364.203	353.634	363.570	361.178
-2.00	p'	30.000	234.219	363.731	363.999	364.162	364.419	364.401	364.654
	q'	18.000	234.219	363.731	363.865	363.947	364.066	364.156	364.409
Remark		S.F. = Soil Failure		F.P. = First Plastic Point					

ตารางผนวกที่ ค25 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดเปรียบเทียบระหว่างฐานรากดินอ่อนและฐานรากดินแข็ง โดยความหนาของโครงสร้างชั้นทางเท่ากับ 0.5 เมตร

Thickness 0.5 m								
Load Width	Soft Foundation				Stiff Foundation			
	E_1/E_2	Ultimate Load	Settlement Magnitude	Settlement Bowl	E_1/E_2	Ultimate Load	Settlement Magnitude	Settlement Bowl
(m)		(kPa)	(m)	(m)		(kPa)	(m)	(m)
0.3	10	195	0.036	21.600	0.2	174	0.008	1.080
	100	400	1.128	20.800	2	578	0.01	1.260
	1,000	675	0.687	6.640	20	1,003	0.004	3.160
	10,000	850	0.246	3.400	200	1,811	0.073	1.240
0.4	10	156	0.049	21.800	0.2	166.5	0.008	1.076
	100	424	0.672	19.900	2	562	0.017	1.350
	1,000	715.5	0.647	8.540	20	1,171	0.063	1.378
	10,000	873	0.286	3.566	200	1,527	0.052	3.100
0.5	10	145	0.057	21.400	0.2	164	0.007	1.226
	100	275	0.607	19.100	2	554	0.021	1.432
	1,000	425	0.73	4.900	20	925	0.056	1.036
	10,000	525	0.269	3.360	200	1,317	0.046	3.140

ตารางผนวกที่ ค26 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดเปรียบเทียบระหว่างฐานรากดินอ่อนและฐานราก
ดินแข็ง โดยความหนาของโครงสร้างชั้นทางเท่ากับ 1.0 เมตร

Thickness 1.0								
Load Width	Soft Foundation				Stiff Foundation			
	E_1/E_2	Ultimate Load	Settlement Magnitude	Settlement Bowl	E_1/E_2	Ultimate Load	Settlement Magnitude	Settlement Bowl
(m)		(kPa)	(m)	(m)		(kPa)	(m)	(m)
0.3	10	152	0.023	21.000	0.2	166.46	0.009	1.162
	100	567.5	0.131	20.400	2	576.6	0.004	1.206
	1,000	1,350	0.324	18.860	20	1,275	0.004	3.000
	10,000	1,985	0.217	6.240	200	1,970	0.009	1.230
0.4	10	163	0.045	21.600	0.2	171	0.013	1.200
	100	568	0.991	19.200	2	545	0.007	1.368
	1,000	1,245	1.38	8.200	20	1,341	0.004	1.448
	10,000	1,450	1.031	6.520	200	1,967	0.035	1.380
0.5	10	171	0.172	22.600	0.2	161.52	0.01	1.606
	100	535	0.987	15.200	2	554	0.013	1.838
	1,000	1055	1.246	7.540	20	1,316	0.019	1.634
	10,000	1311	1.143	6.340	200	1,923	0.14	1.788

ตารางผนวกที่ ค27 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดเปรียบเทียบระหว่างฐานรากดินอ่อนและฐานรากดินแข็ง โดยความหนาของโครงสร้างชั้นทางเท่ากับ 1.25 เมตร

Thickness 1.25 m								
Load Width	Soft Foundation				E_1/E_2	Stiff Foundation		
	E_1/E_2	Ultimate Load	Settlement Magnitude	Settlement Bowl		Ultimate Load	Settlement Magnitude	Settlement Bowl
(m)		(kPa)	(m)	(m)		(kPa)	(m)	(m)
0.3	10	160	0.022	21.200	0.2	174	0.014	1.174
	100	574	0.066	21.000	2	544	0.003	1.208
	1,000	1,355	0.152	22.400	20	1,425	0.004	1.224
	10,000	1,984	0.271	16.600	200	1,982	0.004	1.236
0.4	10	143	0.031	21.200	0.2	160	0.01	1.246
	100	560	0.155	20.800	2	548	0.005	1.396
	1,000	1,324	0.445	17.200	20	1,309	0.009	1.290
	10,000	1,655	0.408	17.340	200	1,925	0.007	1.410
0.5	10	160	0.167	23.200	0.2	161	0.012	1.280
	100	560	0.673	18.820	2	557	0.012	1.466
	1,000	1,234	1.453	10.040	20	1,319	0.02	1.424
	10,000	1,598	1.207	8.280	200	1,933	0.02	1.410

ตารางผนวกที่ ค28 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดเปรียบเทียบระหว่างฐานรากดินอ่อนและฐานราก
ดินแข็ง โดยความหนาของโครงสร้างชั้นทางเท่ากับ 1.5 เมตร

Thickness 1.5 m								
Load Width	Soft Foundation				Stiff Foundation			
	E_1/E_2	Ultimate Load	Settlement Magnitude	Settlement Bowl	E_1/E_2	Ultimate Load	Settlement Magnitude	Settlement Bowl
(m)		(kPa)	(m)	(m)		(kPa)	(m)	(m)
0.3	10	167	0.022	21.400	0.2	161	0.008	0.958
	100	578	0.058	22.400	2	557	0.003	0.818
	1,000	1,348	0.114	25.000	20	1,550	0.004	0.820
	10,000	1,972	0.187	22.400	200	1,957	0.004	0.952
0.4	10	166	0.04	21.400	0.2	171	0.021	1.128
	100	558	0.087	22.000	2	553	0.007	1.416
	1,000	1,342	0.261	20.400	20	1,323	0.009	1.302
	10,000	1,962	0.125	11.500	200	1,931	0.005	1.358
0.5	10	170	0.118	22.800	0.2	161	0.013	1.338
	100	559.5	0.254	21.000	2	555	0.01	1.426
	1,000	1,326	0.803	15.520	20	1,313	0.013	1.448
	10,000	1,867	0.53	8.560	200	1,928	0.01	1.082

ตารางผนวกที่ ค29 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดเปรียบเทียบระหว่างฐานรากดินอ่อนและฐานรากดินแข็ง โดยความหนาของโครงสร้างชั้นทางเท่ากับ 2.0 เมตร

Thickness 2.0 m								
Load Width	Soft Foundation				Stiff Foundation			
	E_1/E_2	Ultimate Load	Settlement Magnitude	Settlement Bowl	E_1/E_2	Ultimate Load	Settlement Magnitude	Settlement Bowl
(m)		(kPa)	(m)	(m)		(kPa)	(m)	(m)
0.3	10	167	0.02	22.200	0.2	161	0.011	1.256
	100	578	0.041	26.200	2	557	0.003	1.296
	1,000	1,348	0.078	31.000	20	1,550	0.003	1.400
	10,000	1,972	0.111	29.600	200	1,957	0.003	1.696
0.4	10	166	0.026	22.200	0.2	171	0.017	1.228
	100	558	0.065	25.000	2	553	0.004	1.358
	1,000	1,342	0.144	26.600	20	1,323	0.004	1.454
	10,000	1,962	0.264	24.200	200	1,931	0.004	1.740
0.5	10	170	0.079	22.800	0.2	161	0.016	1.346
	100	559.5	0.094	24.200	2	555	0.004	1.554
	1,000	1,326	0.271	22.000	20	1,313	0.005	1.132
	10,000	1,867	0.112	15.120	200	1,928	0.006	1.478

ตารางผนวกที่ ค30 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดเปรียบเทียบระหว่างฐานรากดินอ่อนและฐานราก
ดินแข็ง โดยความหนาของโครงสร้างชั้นทางเท่ากับ 2.5 เมตร

Thickness 2.5 m								
Load Width	Soft Foundation				Stiff Foundation			
	E_1/E_2	Ultimate Load	Settlement Magnitude	Settlement Bowl	E_1/E_2	Ultimate Load	Settlement Magnitude	Settlement Bowl
(m)		(kPa)	(m)	(m)		(kPa)	(m)	(m)
0.3	10	220	0.024	23.400	0.2	162.5	0.023	1.168
	100	650	0.039	28.800	2	570	0.003	1.268
	1,000	1,368	0.056	34.600	20	1,700	0.003	1.244
	10,000	1,988	0.066	36.600	200	1,982	0.002	1.292
0.4	10	174	0.026	23.200	0.2	162	0.012	1.328
	100	550	0.048	28.200	2	579	0.004	1.400
	1,000	1,363	0.094	32.600	20	1,590	0.004	1.558
	10,000	1,988	0.154	31.200	200	1,977	0.003	1.684
0.5	10	174	0.041	23.200	0.2	160	0.016	1.464
	100	550	0.073	26.800	2	542	0.005	1.418
	1,000	1,363	0.174	27.800	20	1,450	0.004	1.606
	10,000	1,949	0.301	27.200	200	1,938	0.004	1.574

ตารางผนวกที่ ค31 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดเปรียบเทียบระหว่างฐานรากดินอ่อนและฐานราก
ดินแข็ง โดยความหนาของโครงสร้างชั้นทางเท่ากับ 3.0 เมตร

Thickness 3.0 m								
Load Width	Soft Foundation				Stiff Foundation			
	E_1/E_2	Ultimate Load	Settlement Magnitude	Settlement Bowl	E_1/E_2	Ultimate Load	Settlement Magnitude	Settlement Bowl
(m)		(kPa)	(m)	(m)		(kPa)	(m)	(m)
0.3	10	192	0.025	23.400	0.2	165	0.01	1.262
	100	722	0.037	31.200	2	560	0.003	1.348
	1,000	1,376	0.042	36.400	20	1,678	0.003	1.388
	10,000	2,007	0.043	40.200	200	2,150	0.002	1.156
0.4	10	170	0.024	24.400	0.2	160	0.013	5.660
	100	589	0.041	31.000	2	560	0.004	1.430
	1,000	1,368	0.075	35.400	20	1,600	0.003	1.382
	10,000	2,004	0.112	36.600	200	1,981	0.003	1.644
0.5	10	163	0.029	24.200	0.2	159	0.015	1.476
	100	550	0.06	31.400	2	552	0.005	1.450
	1,000	1,332	0.129	36.600	20	1,525	0.004	1.520
	10,000	1,947	0.208	40.200	200	1,936	0.003	1.466

ตารางผนวกที่ ค32 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดเปรียบเทียบระหว่างฐานรากดินอ่อนและฐานรากดินแข็ง โดยความหนาของโครงสร้างชั้นทางเท่ากับ 3.5 เมตร

Thickness 3.5 m								
Load Width	Soft Foundation				Stiff Foundation			
	E_1/E_2	Ultimate Load	Settlement Magnitude	Settlement Bowl	E_1/E_2	Ultimate Load	Settlement Magnitude	Settlement Bowl
(m)		(kPa)	(m)	(m)		(kPa)	(m)	(m)
0.3	10	225	0.032	25.200	0.2	165	0.01	0.952
	100	675	0.039	33.600	2	585	0.003	1.058
	1,000	1,375	0.036	37.600	20	1,750	0.003	0.966
	10,000	2,014	0.03	41.600	200	2,150	0.001	1.124
0.4	10	184	0.032	25.200	0.2	160	0.012	1.106
	100	575	0.049	33.200	2	564	0.004	1.222
	1,000	1,336	0.065	36.800	20	1,550	0.003	1.142
	10,000	1,952	0.039	25.200	200	1,945	0.002	1.152
0.5	10	163	0.036	25.000	0.2	161	0.017	1.198
	100	575	0.077	32.200	2	520	0.005	1.202
	1,000	1,325	0.108	36.200	20	1,500	0.004	1.252
	10,000	1,951	0.157	37.600	200	1,931	0.003	1.244

ตารางผนวกที่ ค33 แสดงค่ากำลังรับแรงสูงสุดเปรียบเทียบระหว่างฐานรากดินอ่อนและฐานรากดินแข็ง โดยความหนาของโครงสร้างชั้นทางเท่ากับ 4.0 เมตร

Thickness 4.0 m								
Load Width	Soft Foundation				Stiff Foundation			
	E_1/E_2	Ultimate Load	Settlement Magnitude	Settlement Bowl	E_1/E_2	Ultimate Load	Settlement Magnitude	Settlement Bowl
(m)		(kPa)	(m)	(m)		(kPa)	(m)	(m)
0.3	10	225	0.035	27.800	0.2	163	0.009	1.024
	100	725	0.041	35.200	2	585	0.003	0.964
	1,000	1,028	0.013	40.600	20	1,507	0.002	1.014
	10,000	1,986	0.008	50.400	200	2,076	0.001	1.120
0.4	10	200	0.042	27.400	0.2	162	0.013	1.136
	100	600	0.047	35.000	2	538	0.004	1.124
	1,000	1,340	0.045	38.200	20	1,547	0.003	1.114
	10,000	1,955	0.044	41.800	200	2,005	0.002	1.504
0.5	10	175	0.045	27.200	0.2	160	0.017	1.196
	100	574	0.067	34.200	2	552	0.007	1.180
	1,000	1,335	0.079	37.800	20	1,415	0.003	1.174
	10,000	1,953	0.1	40.400	200	1,941	0.002	1.226

ตารางผนวกที่ ค34 แสดงค่าน้ำหนักที่ทำให้เกิดพื้นที่พลาสติก และตำแหน่งที่พื้นที่พลาสติกเกิดขึ้น โดยความหนาของโครงสร้างชั้นทางเท่ากับ 0.5 เมตร

Thickness 0.5m								
Load		Soft Foundation			Stiff Foundation			
width	E_1/E_2	Load	Location of First Plastic Point		E_1/E_2	Load	Location of First Plastic Point	
(m)		(kPa)				(kPa)		
0.3	10	80	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ		0.2	130	ด้านบนของชั้นทาง	
		100	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ			2	430	ด้านบนของชั้นทาง
		1,000	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ			20	550	ด้านบนของชั้นทาง
		10,000	ทั้งหมดของชั้นทาง			200	650	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
0.4	10	100	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ		0.2	120	ด้านบนของชั้นทาง	
		100	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ			2	425	ด้านบนของชั้นทาง
		1,000	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ			20	400	ด้านบนของชั้นทาง
		10,000	ทั้งหมดของชั้นทาง			200	400	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
0.5	10	50	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		0.2	110	ด้านบนของชั้นทาง	
		100	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง			2	350	ด้านบนของชั้นทาง
		1,000	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ			20	500	ด้านบนของชั้นทาง
		10,000	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ			200	250	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง

ตารางผนวกที่ ค35 แสดงค่าน้ำหนักที่ทำให้เกิดพื้นที่พลาสติก และตำแหน่งที่พื้นที่พลาสติกเกิดขึ้น โดยความหนาของโครงสร้างชั้นทางเท่ากับ 1.0 เมตร

Thickness 1.0m							
Load		Soft Foundation			Stiff Foundation		
width	E ₁ /E ₂	Load	Location of First Plastic Point		E ₁ /E ₂	Load	Location of First Plastic Point
(m)		(kPa)				(kPa)	
0.3	10	140	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ		0.2	135	ด้านบนของโครงสร้างชั้นทาง
		100	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ			2	ด้านบนของชั้นทาง
		1,000	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ			20	ด้านบนของชั้นทาง
		10,000	ทั้งหมดของชั้นทาง			200	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
0.4	10	80	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ		0.2	120	ด้านบนของชั้นทาง
		100	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ			2	ด้านบนของชั้นทาง
		1,000	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ			20	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
		10,000	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ			200	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
0.5	10	100	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ		0.2	120	ด้านบนของชั้นทาง
		100	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ			2	ด้านบนของชั้นทาง
		1,000	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง			20	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
		10,000	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ			200	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง

ตารางผนวกที่ 36 แสดงค่าน้ำหนักที่ทำให้เกิดพื้นที่พลาสติก และตำแหน่งที่พื้นที่พลาสติกเกิดขึ้น โดยความหนาของโครงสร้างชั้นทางเท่ากับ 1.25 เมตร

Thickness 1.25 m							
Load		Soft Foundation			Stiff Foundation		
width	E ₁ /E ₂	Load	Location of First Plastic Point		E ₁ /E ₂	Load	Location of First Plastic Point
(m)		(kPa)				(kPa)	
0.3	10	155	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ		0.2	140	ด้านบนของชั้นทาง
		100	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ			2	ด้านบนของชั้นทาง
		1,000	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง			20	ด้านบนของชั้นทาง
		10,000	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง			200	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
0.4	10	120	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ		0.2	120	ด้านบนของชั้นทาง
		100	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง			2	ด้านบนของชั้นทาง
		1,000	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง			20	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
		10,000	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง			200	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
0.5	10	120	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ		0.2	110	ด้านบนของชั้นทาง
		100	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ			2	ด้านบนของชั้นทาง
		1,000	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง			20	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
		10,000	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง			200	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง

ตารางผนวกที่ ค37 แสดงค่าน้ำหนักที่ทำให้เกิดพื้นที่พลาสติก และตำแหน่งที่พื้นที่พลาสติกเกิดขึ้น โดยความหนาของโครงสร้างชั้นทางเท่ากับ 1.5 เมตร

Thickness 1.5m							
Load		Soft Foundation			Stiff Foundation		
width	E_1/E_2	Load	Location of First Plastic Point		E_1/E_2	Load	Location of First Plastic Point
(m)		(kPa)				(kPa)	
0.3	10	155	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		0.2	140	ด้านบนของชั้นทาง
	100	325	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		2	475	ด้านบนของชั้นทาง
	1,000	340	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		20	1310	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
	10,000	200	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		200	950	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
0.4	10	130	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		0.2	120	ด้านบนของชั้นทาง
	100	250	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		2	500	ด้านบนของชั้นทาง
	1,000	250	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		20	1025	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
	10,000	175	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		200	725	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
0.5	10	110	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ		0.2	120	ด้านบนของชั้นทาง
	100	200	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		2	450	ด้านบนของชั้นทาง
	1,000	190	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		20	875	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
	10,000	150	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		200	600	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง

ตารางผนวกที่ ค38 แสดงค่าน้ำหนักที่ทำให้เกิดพื้นที่พลาสติก และตำแหน่งที่พื้นที่พลาสติกเกิดขึ้น โดยความหนาของโครงสร้างชั้นทางเท่ากับ 2.0 เมตร

Thickness 2.0 m							
Load		Soft Foundation			Stiff Foundation		
width	E_1/E_2	Load	Location of First Plastic Point		E_1/E_2	Load	Location of First Plastic Point
(m)		(kPa)				(kPa)	
0.3	10	160	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		0.2	140	ด้านบนของชั้นทาง
	100	420	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		2	450	ด้านบนของชั้นทาง
	1,000	525	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		20	1550	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
	10,000	325	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		200	1150	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
0.4	10	140	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		0.2	120	ด้านบนของชั้นทาง
	100	325	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		2	400	ด้านบนของชั้นทาง
	1,000	300	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		20	1250	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
	10,000	275	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		200	875	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
0.5	10	100	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ		0.2	110	ด้านบนของชั้นทาง
	100	275	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		2	375	ด้านบนของชั้นทาง
	1,000	315	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		20	1050	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
	10,000	260	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		200	700	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง

ตารางผนวกที่ ค39 แสดงค่าน้ำหนักที่ทำให้เกิดพื้นที่พลาสติก และตำแหน่งที่พื้นที่พลาสติกเกิดขึ้น โดยความหนาของโครงสร้างชั้นทางเท่ากับ 2.5 เมตร

Thickness 2.5 m							
Load		Soft Foundation			Stiff Foundation		
width	E_1/E_2	Load	Location of First Plastic Point		E_1/E_2	Load	Location of First Plastic Point
(m)		(kPa)				(kPa)	
0.3	10	80	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ		0.2	140	ด้านบนของชั้นทาง
		100	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ		2	450	ด้านบนของชั้นทาง
		1,000	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		20	1150	เกิดบริเวณด้านบนของชั้นทาง
		10,000	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		200	1350	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
0.4	10	60	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ		0.2	130	ด้านบนของชั้นทาง
		100	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		2	425	ด้านบนของชั้นทาง
		1,000	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		20	1450	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
		10,000	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		200	1000	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
0.5	10	50	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ		0.2	110	ด้านบนของชั้นทาง
		100	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		2	350	ด้านบนของชั้นทาง
		1,000	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		20	1200	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
		10,000	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		200	825	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง

ตารางผนวกที่ ค40 แสดงค่าน้ำหนักที่ทำให้เกิดพื้นที่พลาสติก และตำแหน่งที่พื้นที่พลาสติกเกิดขึ้น โดยความหนาของโครงสร้างชั้นทางเท่ากับ 3.0 เมตร

Thickness 3.0 m								
Load		Soft Foundation			Stiff Foundation			
width	E ₁ /E ₂	Load	Location of First Plastic Point		E ₁ /E ₂	Load	Location of First Plastic Point	
(m)		(kPa)				(kPa)		
0.3	10	70	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ		0.2	140	ด้านบนของชั้นทาง	
		100	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง			2	470	ด้านบนของชั้นทาง
		1,000	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง			20	1400	ด้านบนของชั้นทาง
		10,000	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง			200	1550	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
0.4	10	60	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ		0.2	140	ด้านบนของชั้นทาง	
		100	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง			2	425	ด้านบนของชั้นทาง
		1,000	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง			20	1200	ด้านบนของชั้นทาง
		10,000	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง			200	1150	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
0.5	10	50	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ		0.2	120	ด้านบนของชั้นทาง	
		100	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง			2	350	ด้านบนของชั้นทาง
		1,000	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง			20	1450	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
		10,000	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง			200	950	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง

ตารางผนวกที่ ค41 แสดงค่าน้ำหนักที่ทำให้เกิดพื้นที่พลาสติก และตำแหน่งที่พื้นที่พลาสติกเกิดขึ้น โดยความหนาของโครงสร้างชั้นทางเท่ากับ 3.5 เมตร

Thickness 3.5 m							
Load		Soft Foundation			Stiff Foundation		
width	E_1/E_2	Load	Location of First Plastic Point		E_1/E_2	Load	Location of First Plastic Point
(m)		(kPa)				(kPa)	
0.3	10	70	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ		0.2	140	ด้านบนของชั้นทาง
	100	175	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		2	450	ด้านบนของชั้นทาง
	1,000	460	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		20	1400	ด้านบนของชั้นทาง
	10,000	1000	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		200	1800	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
0.4	10	60	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ		0.2	140	ด้านบนของชั้นทาง
	100	140	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		2	400	ด้านบนของชั้นทาง
	1,000	350	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		20	1200	ด้านบนของชั้นทาง
	10,000	750	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		200	1300	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
0.5	10	50	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ		0.2	120	ด้านบนของชั้นทาง
	100	110	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		2	375	ด้านบนของชั้นทาง
	1,000	280	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		20	1000	ด้านบนของชั้นทาง
	10,000	600	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		200	1100	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง

ตารางผนวกที่ ค42 แสดงค่าน้ำหนักที่ทำให้เกิดพื้นที่พลาสติก และตำแหน่งที่พื้นที่พลาสติกเกิดขึ้น โดยความหนาของโครงสร้างชั้นทางเท่ากับ 4.0 เมตร

Thickness 4.0 m							
Load		Soft Foundation			Stiff Foundation		
width	E ₁ /E ₂	Load	Location of First Plastic Point		E ₁ /E ₂	Load	Location of First Plastic Point
(m)		(kPa)				(kPa)	
0.3	10	0	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ		0.2	140	ด้านบนของชั้นทาง
	100	0	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		2	475	ด้านบนของชั้นทาง
	1,000	0	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		20	1400	ด้านบนของชั้นทาง
	10,000	0	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		200	1800	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
0.4	10	0	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ		0.2	150	ด้านบนของชั้นทาง
	100	0	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		2	400	ด้านบนของชั้นทาง
	1,000	0	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		20	1200	ด้านบนของชั้นทาง
	10,000	0	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		200	1400	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง
0.5	10	0	ด้านล่างของชั้นทางที่บริเวณรอยต่อ		0.2	120	ด้านบนของชั้นทาง
	100	0	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		2	375	ด้านบนของชั้นทาง
	1,000	0	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		20	900	ด้านบนของชั้นทาง
	10,000	0	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง		200	1150	ด้านล่าง และด้านบนของชั้นทาง

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายคมพันธ์ จินดาวัฒน์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 3 ธันวาคม 2527
สถานที่เกิด	นนทบุรี
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ.2549)

