



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง พฤติกรรมของดินเหนียวบดอัดที่เกี่ยวข้องกับการแตกร้าวของไหล่ทางแอสฟัลต์คอนกรีต

Behaviour of Compacted Clay Related to Cracks on Asphaltic-Concrete Shoulder

นามผู้วิจัย นายกฤษ เหลาสุภาพ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อภินิติ โชติสังกาศ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์বারเมศ วรรณะภูติ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์อัศคพัฒน์ สว่างสุริย์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงกูร, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วัน เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

พฤติกรรมของดินเหนียวบดอัดที่เกี่ยวข้องกับการแตกร้าว
ของไหล่ทางแอสฟัลต์คอนกรีต

Behaviour of Compacted Clay Related to Cracks on
Asphaltic-Concrete Shoulder

โดย

นายกฤษ เหลาสภาพ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กฤษ เหลาสภาพ 2554: พฤติกรรมของดินเหนียวบดอัดที่เกี่ยวข้องกับการแตกร้าว
ของไหล่ทางแอสฟัลต์คอนกรีต วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อภินิติ โชติสังาศ, Ph.D. 173 หน้า

ปัญหาการแตกร้าวของไหล่ทางแอสฟัลต์คอนกรีตในพื้นที่ภาคกลาง ส่วนหนึ่งอาจเกิดจากการนำดินเหนียวมาบดอัดใช้เป็นวัสดุคันทาง เนื่องจากคุณสมบัติของดินเหนียวนั้นมีการยึดหดตัวเมื่อปริมาณความชื้นเปลี่ยนแปลง การวิจัยนี้จึงให้ความสำคัญกับการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานและพฤติกรรมของดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวแตกต่างกันในพื้นที่ทางหลวงหมายเลข 357 สายเลียงเมืองสุพรรณบุรี ซึ่งการวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมของดินเหนียวทั้งจากคุณสมบัติทางกายภาพของดิน การศึกษาเส้นอัตราค้ำของน้ำในดิน กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดและกำลังรับแรงเฉือนคงค้างของดินเหนียวบดอัดในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำและกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดในสถานะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ จากผลการทดสอบดังกล่าวนำไปสู่การวิเคราะห์เสถียรภาพของคันทางและการวิเคราะห์การไหลซึมที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของคันทาง

ผลจากการทดสอบเส้นอัตราค้ำของน้ำในดินพบว่าดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูงจะมีค่าแรงค้ำที่อากาศเริ่มเข้าไปในช่องว่างของดินสูงกว่าและมีการเปลี่ยนปริมาตรตามแรงค้ำมากกว่า ในส่วนกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดและกำลังรับแรงเฉือนคงค้างของดินเหนียวบดอัดในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำและกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดในสถานะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลางนั้นมีค่ากำลังรับแรงเฉือนที่สูงกว่าและมีการยึดหดตัวน้อยกว่า ในส่วนของการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันทางนั้นพบว่าระดับน้ำใต้ดินที่เปลี่ยนแปลงและค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ลดลงส่งผลทำให้คันทางมีโอกาสเกิดการเคลื่อนตัว และทำให้เกิดการแตกร้าวของไหล่ทางแอสฟัลต์คอนกรีต เช่นเดียวกับการวิเคราะห์การไหลซึมที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของคันทาง พบว่าปริมาณน้ำฝนที่ไหลซึมลงสู่คันทางนั้นส่งผลทำให้เสถียรภาพของคันทางลดต่ำลงและคันทางมีโอกาสเกิดการเคลื่อนตัวเช่นเดียวกัน จากผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์ทั้งหมดสามารถนำไปใช้เพื่อสรุปเป็นแนวทางในการพิจารณาเลือกใช้วัสดุคันทางต่อไป

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Krit Lousuphap 2011: Behaviour of Compacted Clay Related to Cracks on Asphaltic-Concrete Shoulder. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Apiniti Jotisankasa, Ph.D. 173 pages.

The problem of cracks along asphaltic-concrete shoulder of highways in central part of Thailand is related to the use of compacted high plasticity clay as construction material. This clay can exhibit a highly shrink-swell behavior with varying moisture content. This study thus emphasizes on the properties of the compacted clay samples with different shrink-swell potentials on highway route no. 357, the by-pass route of Suparnburi. This study involves various aspects of the behavior of compacted soil including physical properties, soil-water characteristics curve (SWCC), peak and residual shear strength in saturated state, peak shear strength in unsaturated state. These test results are used in stability analysis and seepage analysis related to movement of shoulder.

The test results from soil-water characteristics curve (SWCC) show that air-entry suction and volume change of the high shrink-swell potential soil is higher than the medium shrink-swell potential one. From the direct shear tests on fully saturated sample, it is shown the shear strength of compacted clay with higher shrink-swell potential is lower than the medium shrink-swell potential clay and shrinkage in higher shrink-swell potential is higher than the medium shrink-swell potential clay too. The slope stability analysis results show that the change in ground water level and decrease in shear strength greatly affects the stability, which is related to movement and cracks along asphaltic-concrete shoulder. The seepage analysis related to slope stability results shows that the amount of rain during rainy season influence the stability related to movement of shoulder too. These experimental and analysis results are of significance in the selection of subgrade material for highway shoulder.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.อภินิติ โชติสังกาศ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อ.ดร.บารเมศ วรรณะภูติ และอ.ดร.อัศกพัฒน์ สว่างสุริย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่คอยให้คำปรึกษาและแนะแนวทางในการค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขและให้ความเห็นเพิ่มเติมจนกระทั่งวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ กราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ศุภกิจ นนทนันทน์ ประธานการสอบ และ รศ.ดร.ชวเลข วณิชเวทิน ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ได้กรุณาให้ความรู้และคำแนะนำ เพื่อให้วิทยานิพนธ์สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนทั้งในเรื่องวิชาการและการดำเนินชีวิตเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการทำงานต่อไปในอนาคต

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.อภินิติ โชติสังกาศ ที่คอยส่งเสริมและสนับสนุนในการทำงานวิจัยและให้โอกาสได้ไปศึกษาวิจัยที่ประเทศญี่ปุ่นซึ่งเป็นประสบการณ์ที่มีค่าอย่างยิ่งและนำความรู้ที่ได้เพิ่มเติมมาต่อยอดความรู้เดิมให้ดียิ่งขึ้น กราบขอบพระคุณ อ.ดร.บารเมศ วรรณะภูติ ที่ช่วยให้เข้าใจถึงความสำคัญและขั้นตอนของการทำงานวิจัยมากยิ่งขึ้น ขอขอบคุณนายฐนันท เจริญชาศรี นักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการทำวิจัย ขอขอบคุณพี่ๆ ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานรากทุกท่านที่ได้ช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมปฐพีทุกท่าน ขอขอบคุณนายรินทร์ หรรษชัยนันท์ นางสาวจิตติมา เทพพานิช ที่ให้คำปรึกษาแนะนำวิธีการทดสอบ การทำเครื่องมือ และช่วยเหลือในการปฏิบัติงานภาคสนามในงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณนายสุรยุทธ ช่วงโอภาส ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือต่างๆ ในขั้นตอนการทำงานวิจัย ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ ชาววิศวกรรมปฐพีทุกๆ คน ที่ไม่ได้เอ่ยถึงในที่นี้ที่คอยช่วยเหลือสนับสนุน แนะนำ การทำวิจัยในครั้งนี้ด้วยดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณครอบครัวที่ได้อบรมสั่งสอน อีกทั้งคอยสนับสนุนและให้กำลังใจในการเรียนมาโดยตลอด

กฤษ เหลาสู่ภาพ

เมษายน 2554

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	68
อุปกรณ์	68
วิธีการ	71
ผลและวิจารณ์	87
สรุปและข้อเสนอแนะ	136
สรุปผลการวิจัย	136
ข้อเสนอแนะ	138
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	140
ภาคผนวก	147
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	173

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณสมบัติที่สำคัญของแร่ดินเหนียว	6
2	ค่า Atterberg Limits ของแร่ดินเหนียว	7
3	ศักยภาพการบวมตัวของดิน	8
4	ศักยภาพการบวมตัวของดิน	8
5	คุณสมบัติของดินและโอกาสบวมตัว	9
6	การกระจายตัวของดินเวอร์ทิกซอลล์ในประเทศไทย	13
7	ความรุนแรงในการบวมตัวของดินตลอดความยาวคลองผันน้ำ	16
8	การจำแนกศักยภาพการบวมตัวของดิน Expansive soils	17
9	ผลสรุปค่าตัวแปรกำลังรับแรงเฉือนของดินแต่ละชนิด	39
10	รายละเอียดการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัยในแต่ละทางเลือก	50
11	ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัยในแต่ละทางเลือก	52
12	ผลการทดสอบค่า Atterberg's Limit ของดินในบริเวณซึ่งพบรอยแตก และการทรุดตัวบริเวณไหล่ทางที่รุนแรง (TP1-1) และ (TP1-2)	89
13	ผลการทดสอบค่า Atterberg's Limit ของดินในบริเวณซึ่งไม่พบ รอยแตกหรือรอยแตกบริเวณไหล่ทางไม่มีความรุนแรง (TP2-1) และ (TP1-2)	91
14	คุณสมบัติขั้นพื้นฐานของดินเหนียวบดอัดที่ได้จากการทดสอบ	95
15	สรุปค่าแรงเชื่อมแน่น, มุมเสียดทานภายใน และมุมของแรงเฉือน	97
16	สรุปค่ามุมของแรงเฉือนเนื่องจากแรงดูด	98
17	ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุคันทางและดินฐานรากที่ใช้ในการวิเคราะห์ สำหรับบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง	120
18	ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุคันทางและดินฐานรากที่ใช้ในการวิเคราะห์ สำหรับบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัว ปานกลาง	121

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
19	สรุปรายละเอียดและผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง	130
20	สรุปรายละเอียดและผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง	133
ตารางผนวกที่		
ก1	ผลการทดสอบเส้นอัตราลัษณของน้ำในดินบริเวณคันทางที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง ตัวอย่างที่ 1	149
ก2	ผลการทดสอบเส้นอัตราลัษณของน้ำในดินบริเวณคันทางที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง ตัวอย่างที่ 2	152
ก3	ผลการทดสอบเส้นอัตราลัษณของน้ำในดินบริเวณใต้คันทางที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง ตัวอย่างที่ 1	155
ก4	ผลการทดสอบเส้นอัตราลัษณของน้ำในดินบริเวณใต้คันทางที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง ตัวอย่างที่ 2	158
ก5	ผลการทดสอบเส้นอัตราลัษณของน้ำในดินบริเวณคันทางที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง ตัวอย่างที่ 1	161
ก6	ผลการทดสอบเส้นอัตราลัษณของน้ำในดินบริเวณคันทางที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง ตัวอย่างที่ 2	164

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก7 ผลการทดสอบเส้นอัตตลักษณ์ของน้ำในดินบริเวณใต้คันทาง ที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง ตัวอย่างที่ 1	167
ก8 ผลการทดสอบเส้นอัตตลักษณ์ของน้ำในดินบริเวณใต้คันทาง ที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง ตัวอย่างที่ 2	170

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ตำแหน่งที่ตั้งพื้นที่ราบลุ่มแม่น้ำภาคกลางตอนล่าง	5
2	การจำแนกดินตามระบบ อนุกรมวิธานของดิน Soil Taxonomy	14
3	ขั้นตอนของกระบวนการทางดิน ในพัฒนาการของเวอร์ทิซอลล์	15
4	แสดงการกระจายตัวโดยสังเขปของเวอร์ทิซอลล์ในประเทศไทย	15
5	บริเวณที่ดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในธรรมชาติเนื่องจากวัฏจักรของน้ำ	37
6	เครื่องมือวัดแรงดูด Tensiometer	20
7	KU-tensiometer และ ชุดทดสอบ KU-Tensiometer	20
8	อุปกรณ์ห่อความดัน หรือ Pressure Plate (ASTM D6836-02)	21
9	ชุดทดสอบ KU-Total Suction Probe	22
10	Drying Curve ในอุดมคติ	23
11	Drying Curve โดยทั่วไปสำหรับดินเหนียว	23
12	ตัวอย่าง Soil – Water Characteristic Curve ของ Silty Soil	24
13	ตัวอย่าง Soil – Water Characteristic Curve ของดินทราย, ดินทรายแป้ง และ ดินเหนียว	25
14	ผลการทดสอบที่แสดงค่า Bishop's effective stress parameter (χ) กับ Degree of saturation	33
15	วิธีการกำหนดจุดวิกฤติในมวลดินแบบต่างๆ	35
16	ความสัมพันธ์ของการวัดของดินในรูปแบบของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Soil)	38
17	ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นอัตราเฉื่อยและเส้นขอบเขตกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ	38
18	กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวในสภาวะระบายน้ำจากการทดสอบ Triaxial Test	41
19	ค่ากำลังรับแรงเฉือนคงค้าง (Residual Strength) ของดินเหนียวที่มีการเคลื่อนตัวมาก	41

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	Stress-Displacement Curve ที่ค่า Effective Normal Stress คงที่	42
21	ตัวอย่างผลการทดสอบ Reversal Shear Box Test	45
22	ลักษณะการบีบอัดต่างๆ ของลาดดินเหนียว	48
23	การวิเคราะห์แรงที่กระทำบนแต่ละ Slice โดยวิธี Slice Method	49
24	รูปตัดของคันดินที่ใช้ในการศึกษา	50
25	แรงดันน้ำภายในคันดินเนื่องจากน้ำฝน (40 มม./ชม.) ขณะที่เกิดการบีบอัด	52
26	แรงดันน้ำซึ่งมีค่าติดลบในช่วง Active zone เหนือระดับน้ำใต้ดิน	54
27	ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนช่องว่าง, ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ, หน่วยแรงดันสุทธิ และ แรงดูด	54
28	แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินไม่อิ่มน้ำชนิดต่างๆ เมื่อถูกนำไปแช่น้ำที่ค่าหน่วยแรงรวมต่างๆ และค่า Swelling Pressure สำหรับดินเหนียวที่ความแน่นต่างๆ	55
29	ความเครียดพลาสติก (Plastic Strain) สะสมบริเวณตีนของลาดภายหลังการเปิดสลับแห้งตามฤดูกาลเทียบกับระยะเวลา 5 ปี (การทดสอบโดย Centrifuge เทียบเท่าลาดดินสูง 8.4 เมตร)	58
30	แรงดันน้ำระหว่างการทดสอบ มีค่าติดลบในช่วงฤดูแล้งและมีค่าบวกในฤดูฝน	59
31	ทิศทางของ Vector การเคลื่อนที่ในฤดูฝนและฤดูแล้ง	59
32	เปรียบเทียบลักษณะลาดดินเหนียวก่อนและหลังการเปิดสลับแห้ง 6 ครั้ง	60
33	ลักษณะรอยแตกแนวขอบผิวทาง (Edge Crack)	61
34	การเกิดรอยแตกที่ขอบผิวทางในถนนลาดยางเมื่อก่อสร้างคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อน	63
35	การเกิดรอยแตกที่ขอบผิวทางในถนนลาดยางโดยไม่มีร่องรอยของการทรุดตัว	63

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
36	การเกิดรอยแตกที่ขอบผิวทางในถนนลาดยางเมื่อเกิดการลดระดับ ของน้ำข้างทาง	63
37	การเกิดรอยแตกที่ขอบผิวทางในถนนลาดยางเมื่อเกิดการพังทลาย ของวัสดุในบริเวณไหล่ทาง	64
38	สถานที่ตั้งโครงการก่อสร้างทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 357 สายเลี้ยวเมืองสุพรรณบุรีทั้ง 9 โครงการ	65
39	ภาพตัดขวางทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 357 สายเลี้ยวเมืองสุพรรณบุรี ตอน 4 ด้านเหนือ	67
40	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	72
41	การเก็บตัวอย่างดินโดยสว่านมือ (Hand Auger) ในพื้นที่ที่ทำการศึกษา	74
42	พื้นที่บริเวณซึ่งพบรอยแตกและการทรุดตัวของบริเวณไหล่ทางที่รุนแรงกับ บริเวณซึ่งไม่พบรอยแตกหรือรอยแตกบริเวณไหล่ทางไม่มีความรุนแรง	74
43	ชั้นดินต่างๆของผลการเจาะสำรวจชั้นดินบริเวณซึ่งพบรอยแตกและการทรุด ตัวของบริเวณไหล่ทางที่รุนแรง	75
44	ชั้นดินต่างๆของผลการเจาะสำรวจชั้นดินบริเวณซึ่งไม่พบรอยแตกหรือรอย แตกบริเวณไหล่ทางไม่มีความรุนแรง	76
45	ชุดดินที่มีลักษณะพฤติกรรมแบบเวอร์ทิซอลล์ (Vertisol) บริเวณทางหลวง หมายเลข 357 สายเลี้ยวเมืองสุพรรณบุรี	77
46	อุปกรณ์การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ	78
47	แสดงขั้นตอนการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ	
	(ก) ดอกกระบอกเปลือกบางซึ่งมีกระบอก PVC อยู่ภายใน	
	(ข) เคลือบตัวอย่างดินด้วย Paraffin เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น	78
48	ขั้นตอนการทดสอบหาเส้นอัตราลักษณ์ของดิน ด้วยวิธี Point-Wise Measurement	82

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
49	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเส้นอัตรลักษณ์ของน้ำในดิน (SWCC)	83
50	แบบแสดงการติดตั้ง Tensiometer บน Direct Shear Box	85
51	แบบแสดงการติดตั้ง Tensiometer บน Direct Shear Box	85
52	ขั้นตอนการติดตั้ง KU-Tensiometer ในสนาม	86
53	แสดงตำแหน่งการเก็บตัวอย่างดินเพื่อนำมาทดสอบของตัวอย่างดินในบริเวณ ซึ่งพบรอยแตกและการทรุดตัวบริเวณไหล่ทางที่รุนแรง	88
54	แสดงตำแหน่งการเก็บตัวอย่างดินในบริเวณซึ่งไม่พบรอยแตกหรือรอยแตก บริเวณไหล่ทางไม่มีความรุนแรง	88
55	Plasticity Chart ของดินในบริเวณซึ่งพบรอยแตกและการทรุดตัวบริเวณ ไหล่ทางที่รุนแรง (TP1-1) และ (TP1-2)	90
56	Plasticity Chart ของดินในบริเวณซึ่งไม่พบรอยแตกหรือรอยแตกบริเวณ ไหล่ทางไม่มีความรุนแรง (TP2-1) และ (TP1-2)	92
57	ตำแหน่งและรายละเอียดการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพบริเวณที่เป็นดิน เหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง	93
58	ตำแหน่งและรายละเอียดการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพบริเวณที่เป็น ดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง	93
59	หน้าตัดแสดงความลึกของชั้นดินที่ทำการเก็บตัวอย่างแบบคงสภาพ บริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง	94
60	หน้าตัดแสดงความลึกของชั้นดินที่ทำการเก็บตัวอย่างแบบคงสภาพ บริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง	94
61	เส้นอัตรลักษณ์ของน้ำในดินที่ได้จากการทดสอบ	96
62	การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนช่องว่าง (e) และแรงดูด (Suction)	96

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
63	ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงแบบปกติในสภาวะดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (ก) บริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง (ข) บริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง	99
64	ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงแบบปกติในสภาวะดินอิ่มตัวด้วยน้ำโดยวิธี Reversal Shear Box Test (ก) บริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง (ข) บริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง	100
65	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดและกำลัง รับแรงเฉือนคงค้าง กับค่าแรงกดในแนวดิ่ง	100
66	ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงแบบชนิดวัดแรงคูคในสภาวะดินไม่อิ่มตัว ด้วยน้ำ (ก) บริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง (ข) บริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง	101
67	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดและแรงคูค	101
68	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด, ค่าแรงกดในแนวดิ่ง และ ค่าแรงคูคบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง	102
69	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด, ค่าแรงกดในแนวดิ่ง และ ค่าแรงคูคบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง	102
70	ตำแหน่งและรายละเอียดการติดตั้ง Tensiometer ในบริเวณที่เป็นดินเหนียว บดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง	103
71	ตำแหน่งและรายละเอียดการติดตั้ง Tensiometer ในบริเวณที่เป็นดินเหนียว บดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง	103

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
72	การติดตั้ง KU-Tensiometer ในสนาม (ก) บริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยืดหดตัวสูง (ข) บริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยืดหดตัวปานกลาง	104
73	ผลการตรวจวัดค่าแรงคูมเมตริกบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยืดหดตัวสูง	104
74	ผลการตรวจวัดค่าแรงคูมเมตริกบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยืดหดตัวปานกลาง	105
75	ค่าแรงคูมเมตริกบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยืดหดตัวสูง (ก) เดือนสิงหาคม 2552 (ข) เดือนตุลาคม 2552	106
76	ค่าแรงคูมเมตริกบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยืดหดตัวปานกลาง (ก) เดือนสิงหาคม 2552 (ข) เดือนตุลาคม 2552	107
77	ค่าศักย์รวม (Total Head) บริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยืดหดตัวสูง (ก) เดือนสิงหาคม 2552 (ข) เดือนตุลาคม 2552	108
78	ค่าศักย์รวม (Total Head) บริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยืดหดตัวปานกลาง (ก) เดือนสิงหาคม 2552 (ข) เดือนตุลาคม 2552	109
79	รูปตัดตามขวางของคันทางที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ก) บริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยืดหดตัวสูง (ข) บริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยืดหดตัวปานกลาง	111
80	ลักษณะของ Finite element mesh, Boundary conditions และลักษณะแรงดัน น้ำภายในลาดดินคันทางภายหลังมีการไหลซึม รวม 425 มม. สำหรับบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยืดหดตัวสูง	115

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
81	ลักษณะของ Finite element mesh, Boundary conditions และลักษณะแรงดันน้ำภายในลาดดินคันทางภายหลังมีการไหลซึมรวม 425 มม. สำหรับบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง	116
82	ค่าแรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงหลังการไหลซึมของน้ำฝน (5 วัน) สำหรับบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง	117
83	ค่าแรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงหลังการไหลซึมของน้ำฝน (5 วัน) สำหรับบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง	118
84	ลักษณะความสัมพันธ์ต่างๆในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำสำหรับบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูงและดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง (ก) K_f และ Suction (ข) Volumetric Water Content และ Suction	119
85	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง กรณีที่ 3	123
86	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง กรณีที่ 4	123
87	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง กรณีที่ 9	124
88	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง กรณีที่ 10	124
89	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง กรณีที่ 4	125
90	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง กรณีที่ 10	125

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
91	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็น ดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง กรณีที่ 6	126
92	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็น ดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง กรณีที่ 13	126
93	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็น ดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง กรณีที่ 12	127
94	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็น ดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง กรณีที่ 14	127
95	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็น ดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง กรณีที่ 6	128
96	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็น ดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง กรณีที่ 13	128
97	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็น ดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง กรณีที่ 12	129
98	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็น ดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง กรณีที่ 14	129

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก1 ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ของน้ำในดินบริเวณคันทาง ที่เป็นดินเหนียวคอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง ตัวอย่างที่ 1	151
ก2 ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ของน้ำในดินบริเวณคันทาง ที่เป็นดินเหนียวคอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง ตัวอย่างที่ 2	154
ก3 ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ของน้ำในดินบริเวณใต้คันทาง ที่เป็นดินเหนียวคอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง ตัวอย่างที่ 1	157
ก4 ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ของน้ำในดินบริเวณใต้คันทาง ที่เป็นดินเหนียวคอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง ตัวอย่างที่ 2	160
ก5 ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ของน้ำในดินบริเวณคันทาง ที่เป็นดินเหนียวคอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง ตัวอย่างที่ 1	163
ก6 ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ของน้ำในดินบริเวณคันทาง ที่เป็นดินเหนียวคอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง ตัวอย่างที่ 2	166
ก7 ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ของน้ำในดินบริเวณใต้คันทาง ที่เป็นดินเหนียวคอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง ตัวอย่างที่ 1	169
ก8 ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ของน้ำในดินบริเวณใต้คันทาง ที่เป็นดินเหนียวคอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง ตัวอย่างที่ 2	172

พฤติกรรมของดินเหนียวบดอัดที่เกี่ยวข้องกับการแตกร้าว ของไหล่ทางแอสฟัลต์คอนกรีต

Behaviour of Compacted Clay Related to Cracks on Asphaltic-Concrete Shoulder

คำนำ

จำนวนประชากรในประเทศไทยมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ประกอบกับการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว ความต้องการใช้พื้นที่ก็เพิ่มมากขึ้นไม่เพียงเฉพาะในเขตกรุงเทพมหานครเท่านั้น ทั่วทุกจังหวัดในประเทศไทยมีความต้องการใช้พื้นที่เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งทุกจังหวัดจำเป็นต้องพัฒนาพื้นที่อยู่อาศัยและระบบสาธารณูปโภคต่างๆ เพื่อรองรับการเติบโตทางเศรษฐกิจ โดยเฉพาะการพัฒนาในส่วนของระบบคมนาคมซึ่งมีความสำคัญและมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ดังนั้นจึงเกิดการก่อสร้างสิ่งอำนวยความสะดวกในการคมนาคมเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย เช่น ถนน, ทางรถไฟ สิ่งเหล่านี้ไม่เพียงแต่จะช่วยลดความแออัดในปัญหาการจราจรแต่ยังช่วยให้เศรษฐกิจเติบโตเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงการก่อสร้างถนน ซึ่งมีการดำเนินการก่อสร้างขึ้นใหม่หลายสายทาง แต่เนื่องจากในบางสายทางนั้นมีงบประมาณและระยะเวลาในการก่อสร้างจำกัดจึงมีการพิจารณาดินที่อยู่ในพื้นที่มาใช้เป็นวัสดุคันทาง เช่นการนำดินเหนียวมาใช้เป็นวัสดุคันทาง

โดยจุดประสงค์แล้วการก่อสร้างถนนขึ้นใหม่หรือถนนที่มีอยู่เดิมนั้นจะต้องมีสภาพพร้อมใช้งานไม่เกิดปัญหาที่จะส่งผลกระทบต่อความสะดวกและความปลอดภัยในการเดินทาง แต่กลับพบว่ามี ความเสียหายเกิดขึ้นกับโครงสร้างทางหลวงหลายสาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเสียหายบริเวณไหล่ทาง ปัญหาการเกิดรอยแตกบริเวณไหล่ทางแอสฟัลต์คอนกรีตก็เป็นลักษณะความเสียหายชนิดหนึ่งที่มักพบในแถบพื้นที่ภาคกลาง เช่น จังหวัดสุพรรณบุรี ลพบุรี พระนครศรีอยุธยา เป็นความเสียหายที่พบมากที่สุดชนิดหนึ่งโดยมีลักษณะเป็นรอยแตกตามยาว(Longitudinal หรือ Edge Crack) ที่เกิดตามบริเวณไหล่ทางขนานไปกับแนวขอบผิวทางและอยู่ห่างจากขอบผิวทางในระยะประมาณ 25 ถึง 70 เซนติเมตร โดยเฉพาะโครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 357 สายเลียงเมืองสุพรรณบุรีก็เป็นสายทางหนึ่งที่พบปัญหาดังกล่าวเกือบตลอดสายทั้งที่ยังไม่เปิดบริการอย่างเป็นทางการ

ทางการ ส่งผลทำให้ไม่สามารถเปิดให้บริการได้และต้องจัดงบประมาณมาดำเนินการแก้ไขซ่อมแซม ทำให้เสียงบประมาณในส่วนนี้เป็นจำนวนมาก

ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งที่จะศึกษาพฤติกรรมของดินเหนียวบดอัดที่เกี่ยวข้องกับการเกิดรอยแตกบริเวณไหล่ทางแอสฟัลต์คอนกรีต ได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพของดิน ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงเฉือนและค่าแรงคูดในดิน เส้นอัตราลึกลับของน้ำในดิน เพื่อศึกษากลไกและพฤติกรรมของการแตกร้าวของไหล่ทางแอสฟัลต์คอนกรีต



วัตถุประสงค์

1. ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานและพฤติกรรมของดินเหนียวบดอัด ในสภาวะที่แรงดันน้ำมีค่าบวกและลบที่มีผลต่อการแตกบริเวณไหล่ทางแอสฟัลต์คอนกรีต
2. ศึกษาและประเมินเสถียรภาพของคันทางที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการไหลซึมของปริมาณน้ำฝน
3. ศึกษากลไกและพฤติกรรมการเกิดรอยแตกและการทรุดตัวของไหล่ทางแอสฟัลต์คอนกรีตโดยใช้แบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับแรงดันน้ำด้านลบ, เสถียรภาพ, การไหลซึม และการเคลื่อนตัว

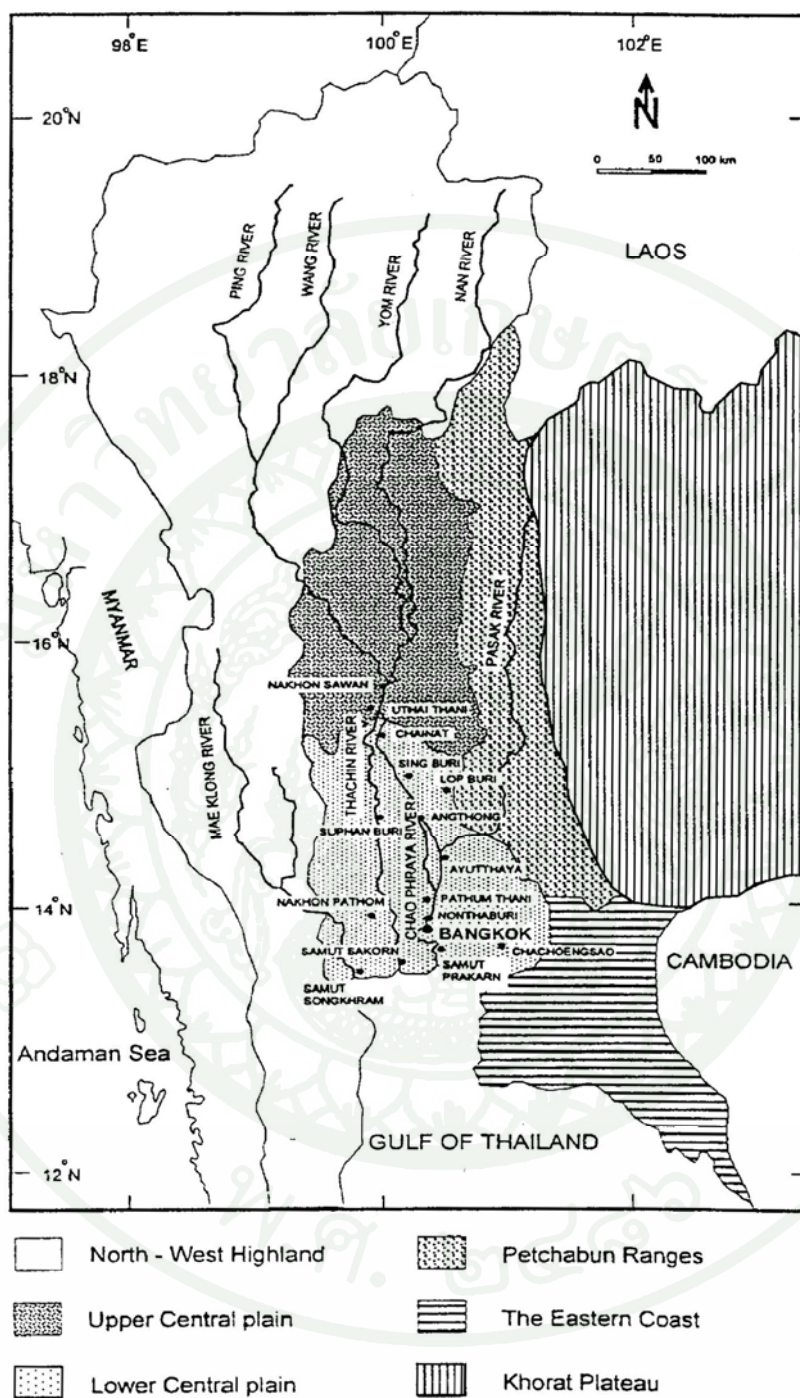
ขอบเขตการวิจัย

1. พื้นที่ในการศึกษาวิจัยบริเวณทางหลวงหมายเลข 357 สายเลียงเมืองสุพรรณบุรี โดยเลือกช่วงบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มน้ำการยึดหดตัวสูง และอีกช่วงบริเวณที่ดินเหนียวบดอัดมีแนวโน้มน้ำการยึดหดตัวปานกลางและทำการติดตั้งเครื่องวัดพฤติกรรมในสนาม ได้แก่ เครื่องวัดแรงดันน้ำและแรงดูดในดินพร้อมทั้งเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ (Undisturbed Sample) เพื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินทั้ง 2 พื้นที่ดังที่ได้คัดเลือก
2. ศึกษาพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินดังกล่าวในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำและทำการวัดแรงดูดของน้ำในดินโดย KU-Tensiometer ในการทดสอบเส้นอัตราลักษณะของน้ำในดินและกำลังรับแรงเฉือน
3. วิเคราะห์พฤติกรรมของลาดดินเหนียวบดอัดในด้านเสถียรภาพโดยวิธี Limit Equilibrium และวิเคราะห์การไหลซึม และการเคลื่อนตัวโดยใช้วิธี Finite Element Analysis โดยเลือกใช้ชุดโปรแกรม Geostudio 2007 พิจารณาในระหว่างการใช้งานที่มีการไหลซึมของน้ำฝนในบริเวณไหล่ทางของทั้ง 2 พื้นที่ดังที่ได้คัดเลือก

การตรวจเอกสาร

ลักษณะชั้นดินบริเวณพื้นที่ภาคกลาง

บริเวณภาคกลางของประเทศไทยเป็นที่ราบลุ่มที่เกิดจากการกระทำของแม่น้ำ ซึ่งไหลจากภูเขาสูงทางภาคเหนือลงสู่อ่าวไทย ได้แก่ แม่น้ำเจ้าพระยา และแม่น้ำ ปิง วัง ยม น่าน รวมทั้งแม่น้ำซึ่งไหลจากทิศตะวันตก ได้แก่ แม่น้ำแม่กลอง แม่น้ำสะแกกรัง และแม่น้ำไหลที่ไหลจากทิศตะวันออก ได้แก่ แม่น้ำป่าสัก แม่น้ำลพบุรี และแม่น้ำบางปะกง ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยที่แม่น้ำเจ้าพระยามีความสำคัญต่อสภาพธรณีวิทยาของพื้นที่ภาคเหนือต่อกับภาคกลางของประเทศอย่างมาก เพราะเป็นตัวกลางที่นำดินจากทางเหนือของประเทศไปตกตะกอนตลอดเส้นทางที่แม่น้ำแต่ละสายไหลผ่าน โดยพื้นที่ภาคเหนือมีลักษณะภูมิประเทศที่มีความลาดชันสูง กรวด ทราย ที่มีขนาดเม็ดใหญ่กว่าก็จะตกตะกอนก่อน เมื่อความลาดชันเริ่มลดลง ดินแป้ง (Silt) ที่มีขนาดเม็ดรองลงมาก็จะตกตะกอนบริเวณพื้นที่ภาคเหนือตอนล่าง จนกระทั่งเข้าสู่ที่ราบภาคกลาง ดินตะกอนขนาดเล็ก คือขนาดเม็ดดินเหนียวจะเริ่มตกตะกอน ทำให้ปริมาณของดินเหนียวจะมากขึ้นในพื้นที่ภาคกลางตอนล่าง



ภาพที่ 1 ตำแหน่งที่ตั้งพื้นที่ราบลุ่มแม่น้ำภาคกลางตอนล่าง

ที่มา: ดัดแปลงจาก ว.ส.ท. (2547)

ดินบวมตัว (Expansive soils)

ดินบวมตัว (Expansive Soils) คือดินเหนียวซึ่งมีความเป็นพลาสติกสูงสามารถเปลี่ยนแปลงปริมาตรได้มากเมื่อความชื้นในดินเปลี่ยนแปลงไป โดยดินจะหดตัวมากเมื่อสูญเสียความชื้นในฤดูแล้งและจะขยายตัวได้มากเมื่อมีความชื้นเพิ่มในฤดูฝนหรือเมื่อมีน้ำขัง ทั้งนี้ศักยภาพในการบวมตัวของดิน (Expansion Potential) จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น โครงสร้างของดิน การเรียงตัวของเม็ดดินและสภาพแวดล้อมอื่นๆ โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อศักยภาพในการบวมตัวของดินนั้นขึ้นอยู่กับแร่ดินเหนียวในดิน

โดยทั่วไปดินเหนียวจะประกอบด้วยแร่ดินเหนียวหลักที่สำคัญคือ Montmorillonite, Illite และ Kaolinite โดยที่แร่ดินเหนียวดังกล่าวมี Cation Exchange Capacity ที่สูงแตกต่างกันไปดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งส่งผลให้มีค่า Aterberg Limits สูงแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2

Donaldson (1969) ได้จำแนกต้นกำเนิดของดินบวมตัว (Expansive Soils) ออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกเกิดจากหินอัคนี เช่น หินบะซอลต์หรือแอนดีไซต์ และกลุ่มที่สองเกิดจากหินชั้นที่มีแร่ Montmorillonite เป็นองค์ประกอบ ได้แก่ หิน Shale และ Claystones

ตารางที่ 1 คุณสมบัติที่สำคัญของแร่ดินเหนียว

Property	Kaolinite	Illite	Montmorillonite
Particle thickness	0.5 – 2	0.003 – 0.1	Less than
	microns	microns	9.5A
Particle diameter	0.5 – 4	0.5 – 10	0.05 – 10
	microns	microns	microns
Specific surface (sq.m/g)	10 - 20	65 - 180	50 - 840
Cation exchange capacity	3 - 15	10 - 40	70 - 80
CEC (meq/100 g)			

ที่มา: Woodward-Clyde and Associates (1967); Chen (1988)

ตารางที่ 2 ค่า Atterberg Limits ของแร่ดินเหนียว

Mineral	Exchange- able Ion	Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	Plasticity Index (%)	Shrinkage Limit (%)
Montmorillonite	Na	710	54	656	9.9
	K	660	98	562	9.3
	Ca	510	81	429	10.5
	Mg	410	60	350	14.7
	Fe	290	75	215	10.3
	Fe ^a	140	73	67	-
Illite	Na	120	53	67	15.4
	K	120	60	60	17.5
	Ca	100	45	55	16.8
	Mg	95	46	49	14.7
	Fe	110	49	61	15.3
	Fe ^a	79	46	33	-
Kaolinite	Na	53	32	21	26.8
	K	49	29	20	-
	Ca	38	27	11	24.5
	Mg	54	31	23	28.7
	Fe	59	37	22	29.2
	Fe ^a	56	35	21	-
Attapulgit	H	270	150	120	7.6

^a ภายหลังผ่านการเปียกสลับแห้ง 5 รอบ

ที่มา: Cornell (1951)

การทดสอบคุณสมบัติของดินเบื้องต้นเพื่อใช้ในการประเมินการบวมตัวของดินประเภท Expansive Soils จะใช้ค่าจากการทดสอบ Aterberg Limits เป็นหลักซึ่งมีผู้เสนอเกณฑ์ต่างๆไว้ดังนี้

Gerald (1974) ได้จำแนกสัณยภาพการบวมตัวของดินโดยใช้ค่า Aterberg Limits เป็นเกณฑ์ในการจำแนกดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สัณยภาพการบวมตัวของดิน

Percentage Passing #200	Liquid Limit (%)	Plasticity Index (%)	Shrinkage Limit (%)	Degree of Expansion
< 30	< 30	< 18	> 15	Low
30 - 60	30 - 40	15 - 28	10 - 16	Medium
60 - 95	40 - 60	25 - 41	7 - 12	High
> 95	> 60	> 35	< 11	Very High

ที่มา: Gerald (1974)

Chen (1988) ได้จำแนกสัณยภาพการบวมตัวของดินโดยใช้ค่า Plasticity Index เป็นเกณฑ์ในการจำแนกดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สัณยภาพการบวมตัวของดิน

Swelling potential	Plasticity index
Low	0 -15
Medium	10 -35
High	20 - 55
Very high	35 and Above

ที่มา: Chen (1988)

Day (1999) ได้จำแนกศักยภาพการบวมตัวของดินโดยพิจารณาจากค่า Expansion Index, Clay Content, Plasticity Index และ % Swelling ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 คุณสมบัติของดินและโอกาสบวมตัว

Expansion potential	Very low	Low	Medium	High	Very high
Expansion index	0-20	21-50	51-90	91-130	>130
Clay content (<2 μ m)	0-10%	10-15%	15-25%	25-35%	35-100%
Plasticity Index	0-10	10-15	15-25	25-35	>35
% Swell @ 2.8 kPa	0-3	3-5	5-10	10-15	>15
% Swell @ 6.9 kPa	0-2	2-4	4-7	7-12	>12
% Swell @ 31 kPa	0	0-1	1-4	4-6	>6

ที่มา: Day (1999)

$$\text{*Expansion Index} = 1000 \times \frac{(h_p - h_i)}{h_i} = 10 \times (\% \text{ Primary Swelling})$$

เมื่อ h_p = ความสูงของดินตัวอย่าง ภายหลังจากที่ Vertical Stress = 6.89 kPa เมื่อ Primary Swelling สิ้นสุดลง

h_i = ความสูงเริ่มต้นของดินตัวอย่าง

การทดสอบ Expansion Index Test กระทำได้ตามมาตรฐาน ASTM D 4829-95 (1998) เป็นการวัดการบวมตัวของดินเมื่อแช่น้ำในอุปกรณ์ Oedometer โดยดินตัวอย่างในสภาวะเริ่มต้นต้องมีค่าระดับอิ่มตัวด้วยน้ำ $S_r = 49-51\%$

บาร์เมสและคณะ (2553) ได้รวบรวมการศึกษาทางด้านปฐพีวิทยาเกี่ยวกับเรื่องดินในประเทศไทยไว้โดยทางกรมพัฒนาที่ดินได้ทำการจำแนกชนิดดินโดยระบบอนุกรมวิธานของดิน (Soil Taxonomy) ออกเป็น 12 อันดับ และพบในประเทศไทย 9 อันดับ คือ 1. ดินอินทรีย์ หรือ ฮิสโทซอลล์ (Histosols), 2. ดินที่มีชั้นดานของเซสควิออกไซด์และฮิวมัส หรือสไปดโดซอลล์

(Spodosols), 3. ดินที่มีการพองอยู่กับที่สูง หรือ ออกซิซอลล์ (Oxisols), 4. ดินเหนียวสีคล้ำที่ยึดหดตัว หรือ เวอร์ทิซอลล์ (Vertisols), 5. ดินที่มีด่างต่ำ หรืออัลทิซอลล์ (Ultisols), 6. ดินทุ่งหญ้า หรือ มอลลิซอลล์ (Mollisols), 7. ดินที่มีด่างสูง หรือ แอลฟิซอลล์ (Alfisols), 8. ดินเริ่มมีการพัฒนาการ หรือ อินเซปทิซอลล์ (Inceptisols), และ 9. ดินแรกเกิด หรือ เอนทิซอลล์ (Entisols) ดังแสดงในภาพที่ 2

จากการศึกษานั้นพบว่าดินจำพวกเวอร์ทิซอลล์ (Vertisols) เป็นดินที่มีคุณสมบัติและลักษณะคล้ายดินบวมตัว (Expansive Soils) โดยดินเวอร์ทิซอลล์ในประเทศไทยมีลักษณะเด่นเฉพาะตัวที่สำคัญคือ เป็นดินเหนียวที่มีสีดำหรือมีสีคล้ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับดินอื่นๆ และมีการยึดหดตัวได้สูงเมื่อความชื้นเปลี่ยนแปลง ซึ่งทำให้ผิวหน้าดินแตกเป็นร่องระแหงที่กว้างและลึกเมื่อขาดความชื้น ในขณะที่ร่องระแหงเปิดวัสดุจากผิวหน้าดินจะตกลงไปตามร่องระแหงอย่างต่อเนื่อง และเมื่อขึ้นหรือเปียกขึ้นก็จะขยายตัวทำให้งร่องระแหงปิด แต่เนื่องจากว่ามีวัสดุแทรกอยู่ตามร่องอยู่แล้วจากที่ตกลงไป จึงต้องการปริมาตรเพิ่มขึ้น จึงเกิดการเลื่อนของกลุ่มมวลของดินทำให้สามารถพบผิวหน้าที่ถูกแรงอัด (Pressure Faces) และผิวหน้าที่เป็นรอยไถล (Slickenside) ภายในดินกับลักษณะการแตกเป็นรูปลิ้นที่มีทิศทางตัดกันได้ในตัวดิน และส่งผลให้บางส่วนขึ้นมาที่ผิวหน้าดินทำให้เกิดเป็นความต่างระดับของผิวหน้าดิน คือจะประกอบไปด้วยเนินและหลุมเล็กๆสลับกัน หรือที่เรียกว่า ความต่างระดับขนาดเล็ก (Gilgai) ดังแสดงในภาพที่ 3

สำหรับการกระจายของดินเวอร์ทิซอลล์ (Vertisols) ในประเทศไทยนั้นเอบ (2533) ได้รวบรวมและสรุปการกระจายตัวของดินชนิดนี้ว่าครอบคลุมพื้นที่ประมาณร้อยละ 0.65 ของพื้นที่ทั้งประเทศ โดยส่วนใหญ่พบในพื้นที่ราบภาคกลางดังแสดงในภาพที่ 4 โดยลักษณะของดินเวอร์ทิซอลล์ (Vertisols) ที่พบในประเทศไทยเกิดในบริเวณที่วัตถุต้นกำเนิดมีแร่ Montmorillonite เป็นแร่หลัก ซึ่งวัตถุต้นกำเนิดเหล่านี้ส่วนมากจะเกี่ยวข้องกับหินปูนหรือมาร์ล ที่พัฒนามาจากวัตถุตะกอนน้ำพาหรือตะกอนตลิ่งของหินอัคนีที่มีปฏิกิริยาเป็นด่าง และการจำแนกดินเวอร์ทิซอลล์ (Vertisols) ในประเทศไทยนั้นตามการแยกชุดดินของกรมพัฒนาที่ดินยังสามารถแบ่งออกได้ 5 ชุดดินได้แก่ ชุดดินที่ 1, 2, 3, 4 และ ชุดดินที่ 28 จากผลการรวบรวมข้อมูลจากกรมพัฒนาที่ดินพบว่า ชุดดินที่ 1 และชุดดินที่ 28 จะมีลักษณะพฤติกรรมที่มีโอกาสเป็น Expansive Soils สูงกว่า ชุดดินที่ 2, 3 และ 4 และอาจก่อให้เกิดปัญหาในการนำมาเป็นวัสดุก่อสร้าง ลักษณะดินชุดที่ 1, 2, 3, 4 และ 28 สรุปได้ดังนี้

1. ชุดดินที่ 1

เนื้อดินเป็นดินเหนียวจัด หน้าดินแตกกระแหว่งเป็นร่องเล็กในฤดูร้อน สีดินส่วนมากเป็นสีดำ หรือสีเทาแก่ ตลอดชั้นดินอาจมีจุดประสีน้ำตาลหรือสีเหลืองปะปนอยู่บ้างในดินชั้นบน ส่วนดินชั้นล่างมักจะมีก้อนปูนปะปน เกิดจากต้นกำเนิดดินพวกตะกอนลำนํ้าบริเวณเทือกเขาหินปูน หรือหินภูเขาไฟ สภาพพื้นที่พบตามที่ราบลุ่มตั้งแต่ที่ราบนํ้าท่วมถึงตะพักลำนํ้าระดับต่ำ มีนํ้าแช่ขังในฤดูฝนลึก 30 ถึง 40 ซม. นาน 3 ถึง 4 เดือน มีความอุดมสมบูรณ์ตามธรรมชาติปานกลางถึงสูง มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างปริมาณตั้งแต่ 6.5 ถึง 8.0

2. ชุดดินที่ 2

เนื้อดินเป็นดินเหนียว ดินบนมีสีเทาหรือเทาแก่ ดินล่างมีสีเทา จุดประสีน้ำตาลและสีเหลืองหรือสีแดง พบตามที่ราบลุ่มภาคกลางเป็นส่วนใหญ่ มีนํ้าแช่ขังลึก 20 ถึง 50 ซม. นาน 3 ถึง 5 เดือน ถ้าเป็นดินที่ได้รับอิทธิพลจากนํ้าทะเลจะพบสารจาโรไซต์สีเหลืองฝังในระดับความลึก มีความทึบนํ้า ความอุดมสมบูรณ์ตามธรรมชาติปานกลาง มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างปริมาณ ตั้งแต่ 4.5 ถึง 5.5

3. ชุดดินที่ 3

เนื้อดินเป็นพวกดินเหนียว ดินบนเป็นสีเทาเข้ม สีนํ้าตาลปนเทาเข้ม ดินล่างเป็นสีเทาหรือนํ้าตาลอ่อน มีจุดประสีน้ำตาลแก่ สีนํ้าตาลปนเหลือง สีแดงปนเหลือง พบตามที่ราบลุ่มหรือที่ราบเรียบ มีความทึบนํ้า ฤดูฝนขังนํ้าลึก 20 ถึง 50 ซม. นาน 4 ถึง 5 เดือน ฤดูแล้งดินแห้งแตกกระแหว่งเป็นร่องกว้างลึก ถ้าพบบริเวณชายฝั่งทะเล มักมีเปลือกหอยอยู่ในดินชั้นล่าง ดินมีความอุดมสมบูรณ์ตามธรรมชาติปานกลาง มีปฏิกิริยาดินเป็นกรดปานกลางถ้าเป็นกรดเล็กน้อย มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างปริมาณ 5.5 ถึง 6.5 ส่วนดินชั้นล่างหากมีเปลือกหอยปะปน จะมีปฏิกิริยาเป็นด่างอ่อนหรือมีค่าความเป็นด่างปริมาณ 7.5 ถึง 8.0

4. ชุดดินที่ 4

เนื้อดินเป็นพวกดินเหนียว ดินบนมีสีน้ำตาลปนเทาหรือสีน้ำตาล ดินล่างมีสีน้ำตาลปนเทา หรือสีน้ำตาล หรือสีเทาปนสีเขียวมะกอกมีจุดประสีน้ำตาลปนเหลืองหรือสีน้ำตาลแก่ อาจพบก้อนปูน ก้อนสารเคมีสะสมพวกเหล็ก และแมงกานีสในชั้นดินล่าง มีความทึบน้ำค่อนข้างสูง พบตามที่ราบเรียบหรือที่ราบลุ่มระหว่างคันดินริมลำน้ำ กับลานตะพักน้ำค่อนข้างใหม่ น้ำแข็งในฤดูฝนลึก 30 ถึง 50 ซม. นาน 4 ถึง 5 เดือน ดินมีความอุดมสมบูรณ์ตามธรรมชาติปานกลาง มีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 5.5 ถึง 6.5 ถ้าดินมีก้อนปูนปะปนอยู่ ค่าความเป็นกรดเป็นด่างจะเป็น 7.0 ถึง 8.0

5. ชุดดินที่ 28

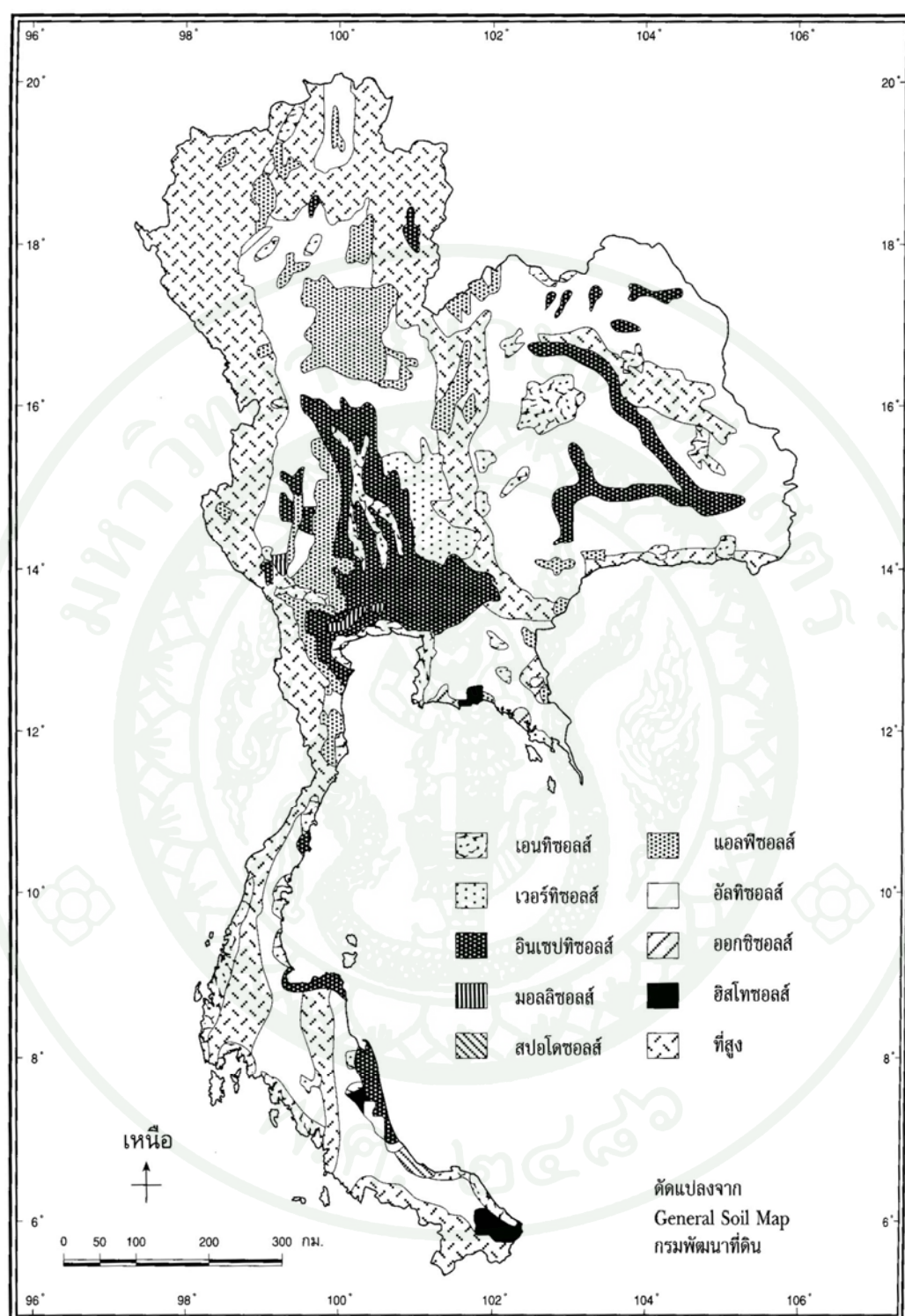
เนื้อดินเป็นพวกดินเหนียวจัดในชั้นดินล่างลึกๆ อาจพบชั้นปูนมาร์ล สีดินเป็นสีดำ เทา เข้มหรือสีน้ำตาล อาจพบจุดประสีน้ำตาลหรือสีแดงปนน้ำตาลแต่พบเป็นปริมาณน้อยในช่วงดินชั้นบน มีสภาพพื้นที่ราบเรียบหรือค่อนข้างราบเรียบ มีความลาดชันประมาณ 0.2% บริเวณเทือกเขาหินปูนหรือเทือกเขาหินภูเขาไฟ เป็นดินลึก การระบายน้ำดี ระดับน้ำใต้ดินอยู่ลึกกว่า 1 เมตรตลอดปี มีความอุดมสมบูรณ์ตามธรรมชาติปานกลางถึงสูง ค่าความเป็นกรดเป็นด่างประมาณ 7.0 ถึง 8.0

ลักษณะดินชุดที่ 1, 2, 3, 4 และ 28 มีการกระจายตัวอยู่ตามจังหวัดต่างๆในประเทศไทย ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การกระจายตัวของดินเวอร์ทิวอลต์ในประเทศไทย

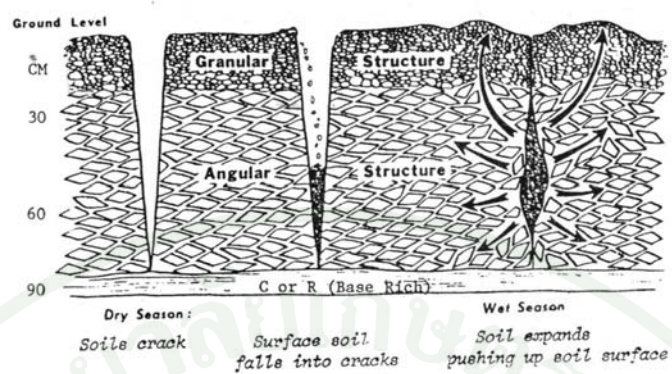
จังหวัด	พื้นที่โดยประมาณ	
	ไร่	% ของพื้นที่
กาญจนบุรี	200,000	8.45
ชัยภูมิ	19,694	0.83
บุรีรัมย์	75,687	3.20
นครราชสีมา	105,575	4.46
นครสวรรค์	182,956	7.73
พระนครศรีอยุธยา	250,975	10.61
เพชรบุรี	4,756	0.20
เพชรบูรณ์	75,431	3.19
ลพบุรี	963,694	40.73
เลย	4,994	0.21
สุพรรณบุรี	92,425	3.91
สระบุรี	355,500	15.02
สุรินทร์	27,175	1.15
จังหวัดอื่นๆ	7,337	0.31
รวม	2,366,199	100

ที่มา: เอ็ม (2533)



ภาพที่ 2 การจำแนกดินตามระบบ อนุกรมวิธานของดิน Soil Taxonomy

ที่มา: ดัดแปลงจากกรมพัฒนาที่ดิน (2541)



ภาพที่ 3 ขั้นตอนของกระบวนการทางดิน ในพัฒนาการของเวอร์ทิซอลล์

ที่มา: Buol *et al.* (1980)



ภาพที่ 4 แสดงการกระจายตัวโดยสังเขปของเวอร์ทิซอลล์ในประเทศไทย

ที่มา: เอิบ (2533)

ในประเทศไทยพบปัญหาดินบวมตัว (Expansive Soils) และปัญหาทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องโดยฝ่ายก่อสร้างพลังน้ำ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ได้พบปัญหาดินบวมตัวในการก่อสร้างคลองผันน้ำแม่มาะ-ห้วยทราย ของโครงการจัดการส่งน้ำแม่มาะเมื่อปี 2536 โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้ทำการศึกษาคุณสมบัติและพฤติกรรมของดินบวมตัว (Expansive Soils) และหาวิธีที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวที่ได้ส่งผลทำให้เกิดการแตกร้าวของคอนกรีตคานหน้าของคลองผันน้ำ โดยจากตารางที่ 7 ได้จำแนกดินที่มีศักยภาพการบวมตัวจากตัวอย่างดินที่ทำทดสอบทั้งหมด 163 ตัวอย่าง พบว่าดินที่ทำทดสอบมีศักยภาพการบวมตัวตั้งแต่ต่ำจนถึงสูงมาก เมื่อทำการทดสอบใน Double Oedometer พบว่าค่า Percent Swelling มีค่าตั้งแต่ 0 - 17.7% โดยจำแนกศักยภาพการบวมตัวโดยวิธีของ Holtz (1959) ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 7 ความรุนแรงในการบวมตัวของดินตลอดความยาวคลองผันน้ำ

(1) Based on % Swelling at 2 kPa

% Swelling	Degree of Expansion	Number of Occurrence
< 1	Low	42 (26%)
1 – 5	Medium	66 (40%)
5 - 10	High	32 (20%)
> 10	Very high	23 (14%)
		163 (100%)

(2) Based on % Swelling at 1 psi (เปรียบเทียบกับตารางที่ 8)

% Swelling at 1 psi	Degree of Expansion	Number of Occurrence
< 1	Low	55 (34%)
1 – 5	Medium	66 (40%)
5 - 10	High	34 (21%)
> 10	Very high	8 (5%)
		163 (100%)

ตารางที่ 8 การจำแนกศักยภาพการบวมตัวของดิน Expansive soils

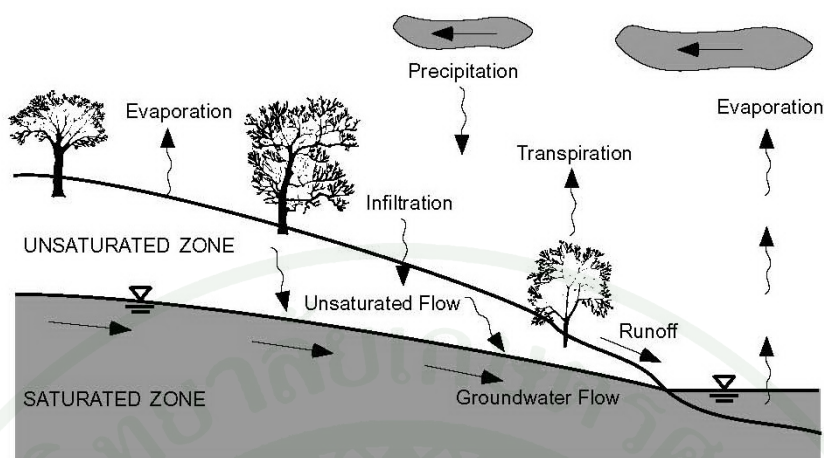
Data from index tests			% Swelling based on	Degree of expansion
200 # content (%)	L.L.(%)	N - value	vertical load of 1 psi	
> 95%	> 60%	> 30	> 10%	Very high
60 - 95	40 - 60	20 - 30	5 - 10	High
30 - 60	30 - 40	10 - 20	1 - 5	Medium
< 30	< 30	< 10	< 1	Low

ที่มา: Holtz (1959)

แรงดูดเมตริก

สภาพดินในธรรมชาติโดยทั่วไป ดินจะมีปริมาณความชื้นเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมและฤดูกาลตามธรรมชาติ ดังแสดงในภาพที่ 5 ในการศึกษาเพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของดินที่เกิดขึ้นจริงในธรรมชาติจึงจำเป็นต้องให้ความสำคัญกับการศึกษากลศาสตร์ของดินไม่อุ้มน้ำควบคู่ไปกับการศึกษากลศาสตร์ของดินอุ้มน้ำด้วยน้ำ โดยทั่วไปดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินนั้นจะมีแรงดันน้ำในช่องว่างที่ติดลบและมักจะอยู่ในสภาวะที่ไม่อุ้มน้ำด้วยน้ำ ค่าตัวแปรที่สำคัญซึ่งบ่งชี้ถึงสภาวะของน้ำในดินไม่อุ้มน้ำด้วยน้ำ คือ แรงดูดของดิน (Soil Suction)

แรงดูดของดิน (Soil Suction) พิจารณานิยามได้ว่าเป็นพลังงานที่ใช้ในการดึงน้ำออกจากมวลดินที่ความชื้นใดๆซึ่งพิจารณาได้ 3 รูปแบบได้แก่ แรงดูดเมตริก (Matric Suction, s), แรงดูดออสโมติก (Osmotic Suction, π) และแรงดูดรวมของดิน (Total Suction, ψ) โดยแรงดูดเมตริก (Matric Suction, s) นั้นเป็นพลังงานที่ใช้ในการดึงน้ำจากมวลดิน ในสภาวะที่ไม่มีการระเหยของน้ำ เป็นการดึงน้ำจากมวลดินในสภาวะของเหลว ส่วนแรงดูดออสโมติก (Osmotic Suction, π) นั้นเป็นพลังงานที่ใช้ในการดึงน้ำจากมวลดินโดยขึ้นอยู่กับปริมาณของสารละลายเกลือของน้ำในดินและแรงดูดรวมของดิน (Total Suction, ψ) นั้นเป็นพลังงานที่ใช้ในการดึงน้ำจากมวลดินในสภาวะที่มีการระเหยของน้ำ เป็นการดึงน้ำออกจากมวลดินในสภาวะไอน้ำ



ภาพที่ 5 บริเวณที่ดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในธรรมชาติเนื่องจากวัฏจักรของน้ำ

ที่มา: Lu and Likos (2004)

อภินิติ (2551) ได้อธิบายปรากฏการณ์หลักๆ ของการเกิดแรงดูดเมทริก(Matric Suction, s) นี้มีอยู่ด้วยกัน 2 ปรากฏการณ์คือ แรงดึงดูดไฟฟ้าและ Surface Adsorption ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากประจุไฟฟ้าลบที่ผิวของอนุภาคดินเหนียว อย่างไรก็ตามศักยภาพหรือความสามารถในการดูดน้ำเข้าหาตัวของดินก็ยังขึ้นอยู่กับปริมาณของสารละลายเกลือของน้ำในดิน ซึ่งเรียกว่า แรงดูดออสโมติก (Osmotic Suction, π) โดยดินที่มีสารละลายเกลือปนอยู่ในน้ำมากก็จะมีศักยภาพในการดูดน้ำหาตัวเองได้มากไปด้วย โดยทั่วไปแล้วจะสามารถพิจารณา แรงดูดทั้งสองชนิดรวมกันเรียกว่า แรงดูดรวม (Total Suction, ψ) ดังสมการที่ (1)

$$\psi = \pi + s \quad (1)$$

แรงดูดรวมจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศที่อยู่ ในช่องว่างดินตามหลักของเทอร์โมไดนามิกส์ดังสมการที่ (2)

$$\psi = - \left[\frac{RT}{V_{mol}} \right] \cdot \ln(R_h) \quad (2)$$

เมื่อ R_h = ความชื้นสัมพัทธ์ มีค่าเท่ากับ อัตราส่วนระหว่างแรงดันไอน้ำในสภาวะปกติต่อแรงดันไอน้ำในสภาวะอิ่มตัว (P/P_0)

R = ค่าคงที่ของก๊าซ (Universal gas constant) = $8.314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$

V_{mol} = molecular volume ของไอน้ำ (0.01802 m^3),

T = อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{K}$) , และ Total suction, ψ , มีหน่วยเป็น kPa

ในส่วน of แรงดูดเมทริก (Matric Suction, s) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3)

$$s = u_a - u_w \quad (3)$$

โดย u_w เท่ากับแรงดันน้ำในช่องว่างดิน และ u_a เท่ากับแรงดันอากาศในช่องว่างดิน เครื่องมือที่ใช้วัดแรงดูดเมทริกโดยตรงเรียกว่า Tensiometer ซึ่งจะใช้งานในสภาวะที่ค่า u_a ของดินมีค่าเท่ากับ 0 และค่า Suction ที่วัดได้ก็คือ ค่าที่ติดลบของแรงดันน้ำ ($s = -u_w$)

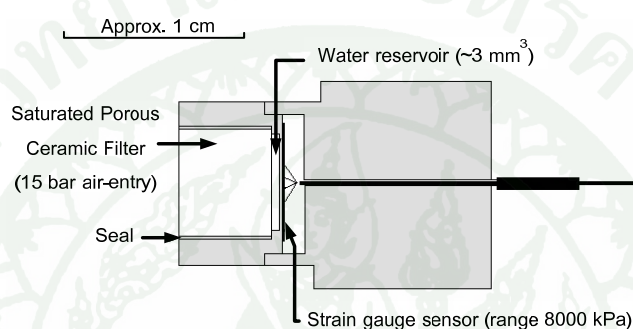
การวัดค่าแรงดูดของดิน

การวัดค่าแรงดูดในดินนั้นมีวิธีการหลากหลาย เช่น Tensiometer, Axis Translation, Electrical/Thermal Conductivity Sensors, Humidity Measurement โดยที่นี้จะกล่าวถึง Tensiometer ซึ่งเป็นเครื่องมือที่นิยมใช้เป็นอย่างมากในการวัดแรงดูดเมทริกของดินในช่วง 0 – 100 kPa โดยการนำ Tensiometer มาใช้ในงานวิศวกรรมปฐพีนั้นเริ่มมีการวิจัยและนำมาใช้อย่างกว้างขวางในช่วงเวลา 10 – 20 ปีมาแล้วโดยเฉพาะในต่างประเทศ

Ridley และ Burland (1993) ได้พัฒนา Tensiometer โดยให้ชื่อว่า Suction Probe ซึ่งมีขนาดที่เล็กดังภาพที่ 6 และสามารถนำไปใช้ทดสอบร่วมกับเครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกนได้ ก่อนการใช้งานต้องปรับสภาพ Tensiometer โดยใช้แรงดันอัดผ่านดินเผาเข้าไปในกระเปาะน้ำที่ความดัน 20 บาร์ เป็นระยะเวลา 2 วัน สามารถวัดแรงดูด (Suction) ได้ในช่วง 0 - 1500 kPa

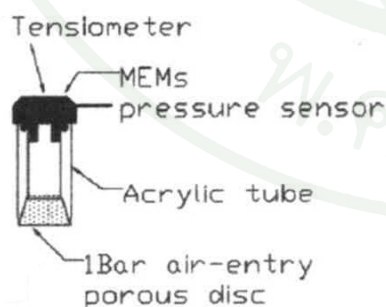
ส่วนการวิจัยและนำมาใช้ในประเศไทยนั้น อิทธิสุนทร (2532) นำพัฒนา Tensiometer เพื่อนำไปใช้ในการวัดความชื้นของดินเพื่อการให้น้ำพืชอย่างมีประสิทธิภาพ

Jotisankasa *et al.* (2007) ได้พัฒนา Tensiometer ที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งให้ชื่อว่า KU - Tensiometer ดังภาพที่ 7 วัดแรงดูดได้ในช่วงประมาณ 0 – 80 kPa ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของ Sensor และหินพรุนที่ใช้ ซึ่ง Tensiometer นี้สามารถตอบสนองด้วยความไวสูง โดยทั่วไปเครื่องมือประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ 1) หัวดินเผารับแรงดูด 2) กะเปาะน้ำ และ 3) อุปกรณ์วัดแรงดันหรือเกจสุญญากาศ (Vacuum Gauge) โดยขณะที่ใช้งานทุกส่วนต้องมีน้ำเต็มช่องว่างเพื่อให้สามารถส่งถ่ายแรงดึงระหว่างน้ำในมวลดินและน้ำด้านหน้าเซ็นเซอร์วัดแรงดันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

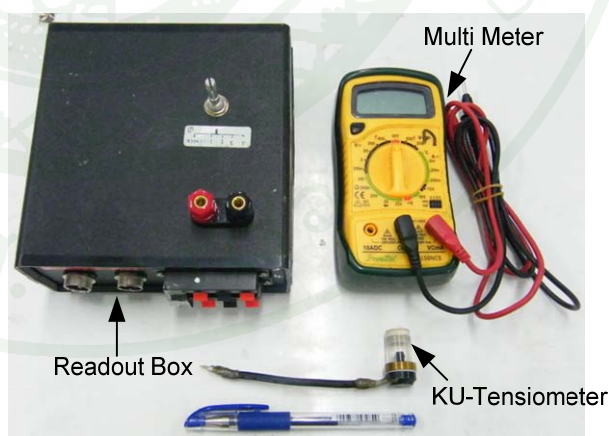


ภาพที่ 6 เครื่องมือวัดแรงดูด Tensiometer

ที่มา: Ridley and Burland (1993)



(ก) KU-tensiometer



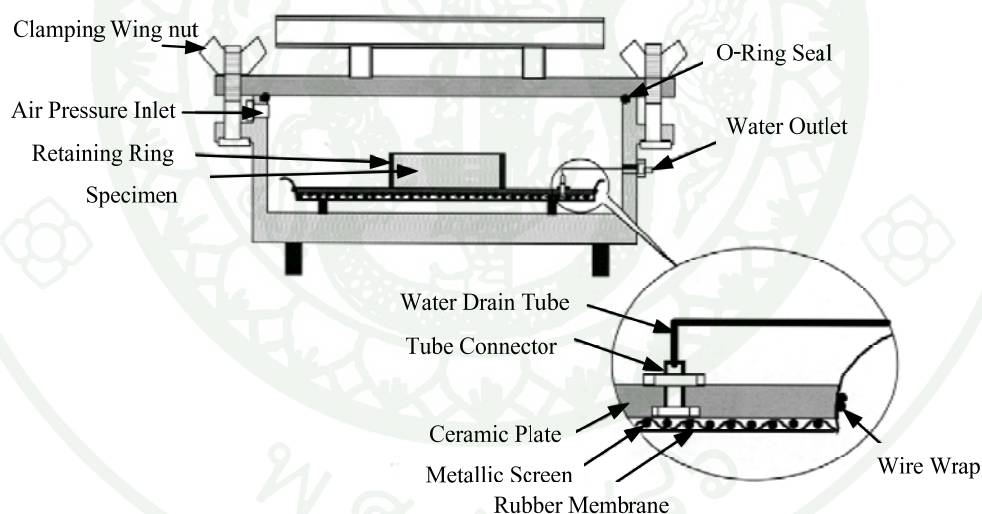
(ข) ชุดทดสอบ KU-Tensiometer

ภาพที่ 7 KU-tensiometer และชุดทดสอบ KU-Tensiometer

Axis Translation Technique

เทคนิคนี้ใช้ในการควบคุมค่าแรงดูดเมทริกของดิน (Soil Suction) สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นการหาแรงดูดหรือแรงดันน้ำด้านลบของดินโดยตรงอีกแบบหนึ่ง ค่าแรงดูดที่ควบคุมคือ แรงดูดเมทริก โดยหลักการควบคุมค่าแรงดูดเมทริกของดินด้วยเครื่องมือ หม้อแรงดัน (Pressure Plate) ดังภาพที่ 8 ซึ่งเป็นการเพิ่มแรงดันอากาศในช่องว่างดิน (u_a) เพื่อเพิ่มแรงดูด (Suction) ในขณะที่ค่าแรงดันน้ำในช่องว่าง (u_w) เท่ากับศูนย์

สำหรับวิธีนี้วัดค่าหน่วยแรงดูดได้ในช่วง 0 - 1500 kPa ขึ้นอยู่กับค่า Air entry value (AEV) ของดินเผา (Ceramic) หรือ หินพรุน (Porous Stone) และความแข็งแรงของหม้อแรงดันที่ใช้ วิธีนี้จะใช้ในกรณีที่ค่าแรงดูดที่ต้องการวัดหรือควบคุมมีค่ามากกว่า 80 kPa ซึ่ง KU-Tensiometer ไม่สามารถวัดได้



ภาพที่ 8 อุปกรณ์หม้อความดัน หรือ Pressure Plate (ASTM D6836-02)

ที่มา: ASTM D6836-02

KU-Total Suction Probe

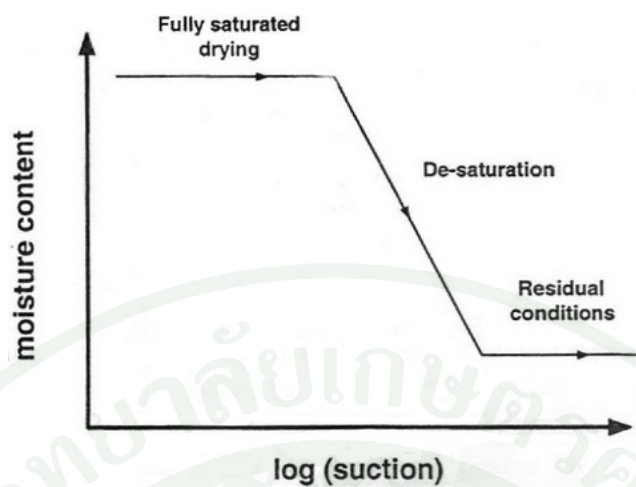
การวัดแรงดูดรวมหรือ Total Suction ทำได้โดยการวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ (R_h) และ อุณหภูมิ (T) ภายในตัวอย่างดิน Jotisankasa *et al.* (2007) ได้พัฒนาเครื่องมือ Psychrometer ที่ประกอบไปด้วยคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ชนิดวัดความชื้นสัมพัทธ์และเทอร์มิสเตอร์เพื่อวัดอุณหภูมิ ซึ่งสามารถนำค่าทั้งสองไปคำนวณเป็นค่าแรงดูดรวม (Total Suction) ได้ดังสมการที่ 2 โดยเหมาะสำหรับวัดค่า Total Suction ตั้งแต่ 1,000 ถึง 1,000,000 kPa ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ชุดทดสอบ KU-Total Suction Probe

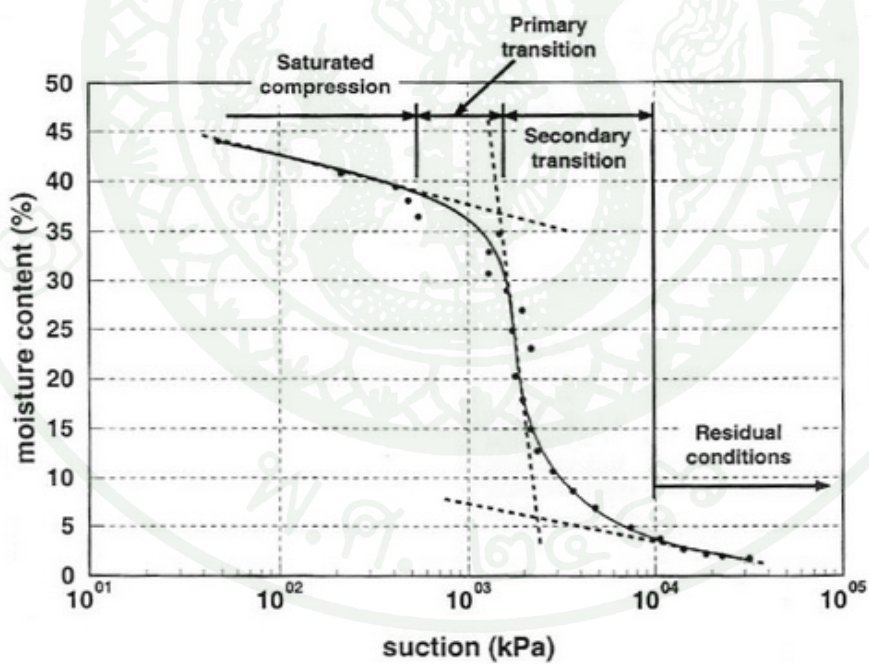
เส้นอรรถลักษณะของน้ำในดิน (Soil – Water Characteristic Curve, SWCC)

เส้นอรรถลักษณะของน้ำในดิน (SWCC) อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นในดินกับแรงดูดของดิน (Soil Suction) ซึ่งเป็นเส้นบอกความจุในการเก็บน้ำของดินที่ค่าแรงดูดใดๆ ภาพที่ 10 จะแสดงถึง Drying Curve ในอุดมคติของวัสดุที่พรุนแข็งเกร็ง (Rigid Porous Media) โดยจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วงที่สัมพันธ์กันขณะ Drying ได้แก่ Fully Saturated Drying, De-Saturation, Residual Conditions แต่เนื่องจากพฤติกรรมของการ Drying ของดินจริงนั้นจะไม่เหมือนในอุดมคติ เนื่องจากมีอิทธิพลจากปัจจัยหลากหลาย เช่น การเปลี่ยนแปลงปริมาตรระหว่างการแข็ง, ชนิดของดิน, การรับน้ำหนักของดินในอดีตและการสุ่งของดิน นอกเหนือจากนั้นยังมีความแตกต่างของโครงสร้างดินตามธรรมชาติและการบดอัด ทำให้ Drying Curve แตกต่างจากอุดมคติไปดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 10 Drying Curve ในอุดมคติ

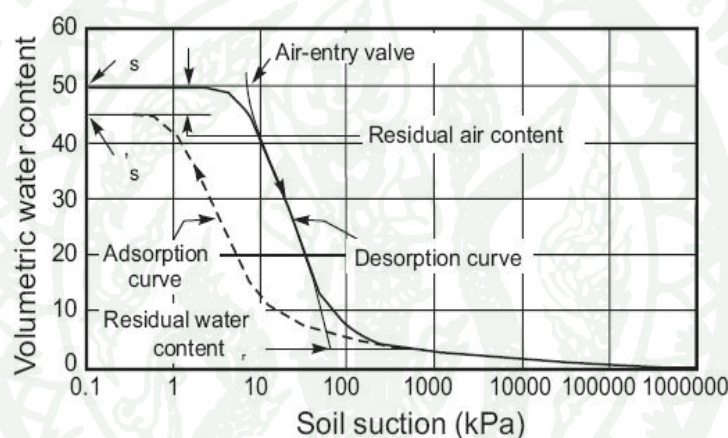
ที่มา: Dineen (2000)



ภาพที่ 11 Drying Curve โดยทั่วไปสำหรับดินเหนียว

ที่มา: Dineen (2000)

เส้นอัตตลักษณ์ของน้ำในดิน (SWCC) โดยส่วนใหญ่ที่พบในงานวิจัยจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric Water Content (θ) กับค่าแรงดูด (Suction) ดังภาพที่ 12 โดยภาพดังกล่าวจะแสดงให้เห็นถึงค่า Air-Entry Value โดยค่าดังกล่าวคือค่าแรงดูดเมทริก (Matric Suction) ที่อากาศเริ่มเข้ามาภายในช่องว่างของเม็ดดิน โดยที่เส้นอัตตลักษณ์ของน้ำในดิน (SWCC) จะแสดงให้เห็นถึงเส้นโค้ง 2 เส้น ได้แก่ Drying Curve (Desorption Curve) และ Wetting Curve (Adsorption Curve) ดังแสดงในภาพที่ 12 การที่เส้นโค้งทั้ง 2 เส้นมีความแตกต่างกันเนื่องจาก Hysteresis โดยมีอิทธิพลจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น Pore Fluid Composition, Pore Structure และ Movement of Wetting and Drying Fronts

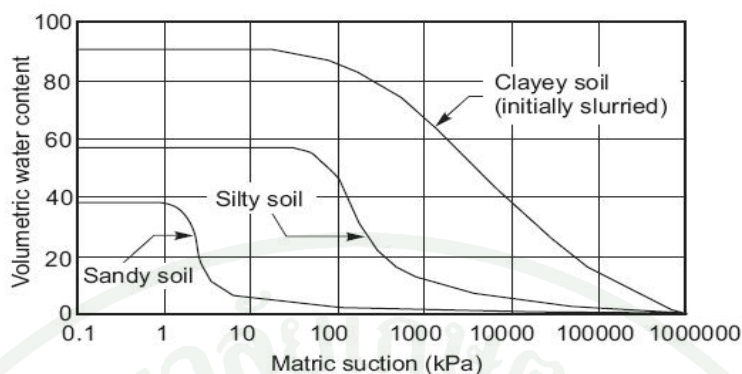


ภาพที่ 12 ตัวอย่าง Soil – Water Characteristic Curve ของ Silty Soil

ที่มา: Fredlund and Xing (1994)

ดินแต่ละประเภทก็จะมีเส้นอัตตลักษณ์ของน้ำในดิน (SWCC) ที่แตกต่างกันออกไปดังแสดงในภาพที่ 13

ลักษณะของเส้นอัตตลักษณ์ของน้ำในดิน (SWCC) ยังสามารถนำไปประมาณการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การซึมน้ำกับแรงดูดได้โดยมีผู้เสนอวิธีการคำนวณไว้หลากหลาย (เช่น Jackson, 1972)



ภาพที่ 13 ตัวอย่าง Soil – Water Characteristic Curve ของดินทราย, ดินทรายแป้ง และดินเหนียว

ที่มา: Fredlund and Xing (1994)

การประมาณค่าเส้นอัตราลักษณ์ของน้ำในดิน

Arya and Paris (1981) สร้างแบบจำลองเพื่อทำนายเส้นอัตราลักษณ์ของดินจากเส้นการกระจายตัวของขนาดเม็ดดิน ค่าความหนาแน่นแห้ง (Bulk Density) และความหนาแน่นของเม็ดดิน (Particle Density) โดยค่าความชื้นโดยปริมาตร (Volumetric Water Content) และค่าแรงดูดในดิน (Soil Water Pressure) สามารถหาได้ดังนี้

1. การหาค่าความชื้นโดยปริมาตร

ทำการแบ่งเส้นการกระจายตัวของขนาดเม็ดดินสะสม โดยแบ่งเป็น n ส่วน ซึ่งมีสมมุติฐานว่าเม็ดดินในแต่ละขนาดรวมกันเป็นกลุ่ม และเมื่อรวมแต่ละขนาดของเม็ดดินทั้งหมดเข้าด้วยกัน จะมีค่าเท่ากับค่าความหนาแน่นแห้งที่วัดจากตัวอย่างดินในสภาพธรรมชาติ ซึ่งความเป็นจริงของสภาพธรรมชาติ เม็ดดินไม่ได้แยกกันในแต่ละเม็ดดินขนาดเดียวกัน แต่มีการกระจายตัวอย่างอิสระ ซึ่งสมมุติฐานนี้สามารถอธิบายถึงปริมาตรของช่องว่างได้

การคำนวณปริมาตรช่องว่างซึ่งมีความสัมพันธ์กับสัดส่วนในแต่ละขนาดดังนี้

$$V_{v_i} = \left(\frac{W_i}{\rho_p} \right) e; i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

เมื่อ	V_{v_i}	คือ	ปริมาตรช่องว่างต่อมวลตัวอย่างดินหนึ่งหน่วย ในแต่ละช่วงของขนาดเม็ดดิน i ช่วง
	W_i	คือ	มวลของดินต่อหนึ่งหน่วยตัวอย่างในแต่ละช่วงของขนาดเม็ดดิน i ช่วง
	ρ_p	คือ	ความหนาแน่นของเม็ดดิน(Particle Density)
	e	คือ	อัตราส่วนช่องว่าง

ค่าของ W_i ได้จากการกระจายตัวของขนาดเม็ดดิน ความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์เม็ดดินสะสมหารด้วย 100 ผลของการรวมค่า W_i มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งค่าอัตราส่วนช่องว่างสามารถหาได้จากสมการที่ (5) ดังนี้

$$e = \left(\frac{\rho_p - \rho_b}{\rho_b} \right) \quad (5)$$

เมื่อ	ρ_b	คือ	ค่าความหนาแน่นแห้ง(Bulk Density) ที่วัดจากตัวอย่างธรรมชาติ
-------	----------	-----	--

ปริมาตรช่องว่าง (V_{v_i}) ในแต่ละขนาดเม็ดดินนำมารวมสะสม เพื่อพิจารณาน้ำที่สามารถเติมลงไปได้ ซึ่งค่าความชื้นโดยปริมาตร (Volumetric Water Content, θ_{v_i}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6)

$$\theta_{v_i} = \frac{\sum_{j=1}^{j=i} V_{v_j}}{V_b}; i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

เมื่อ	θ_{v_i}	คือ	ค่าความชื้นโดยปริมาตร แทนปริมาตรช่องว่างที่มีขนาดช่องว่างใหญ่ที่สุดตรงขอบเขตบนของแต่ละช่วงของขนาดเม็ดดิน i ช่วง
-------	----------------	-----	---

V_b คือ ปริมาตรตัวอย่างทั้งก้อนต่อตัวอย่างดินหนึ่งหน่วย ซึ่งหาค่าจาก

$$V_b = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{\rho_b} = \frac{1}{\rho_b}; i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

ค่าความชื้นโดยปริมาตร ที่แทนกึ่งกลางของช่วงขนาดของเม็ดดินซึ่งสามารถประมาณได้ตามสมการที่ (8) (เมื่อความกว้างของแต่ละช่วงของขนาดเม็ดดินสั้น)

$$\theta_{v_i}^* = \frac{(\theta_{v_i} + \theta_{v_{i+1}})}{2} \quad (8)$$

เมื่อ $\theta_{v_i}^*$ คือ ค่าความชื้นโดยปริมาตร (Volumetric Water Content) เฉลี่ย แทนปริมาตรของช่องว่างที่มีขนาดของช่องว่างใหญ่ที่สุดตรงจุดกึ่งกลางของแต่ละช่วงของขนาดเม็ดดิน

2. ค่าแรงดูดในดิน (Soil Water Pressure)

สามารถหาได้จากสมมุติฐาน

2.1 ปริมาตรของดินได้จากการรวมขนาดของทรงกลมที่มีขนาดเดียวกันซึ่งกำหนดโดยรัศมีของเม็ดดินเฉลี่ยในแต่ละช่วง

2.2 ปริมาตรของช่องว่างสามารถประมาณจาก Uniform-Size Cylindrical Capillary Tubes ซึ่งรัศมีมีความสัมพันธ์กับรัศมีเฉลี่ยของเม็ดดินในแต่ละช่วง จากสมมุติฐานที่กล่าวมานี้จึงใช้เป็นหลักความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างและรัศมีของเม็ดดิน

ถ้ามวลของเม็ดดินในแต่ละช่วงของขนาดเม็ดดิน i ช่วง แทนด้วยเม็ดดินทรงกลม n_i เม็ดดิน และรูปแบบปริมาตรช่องว่างแทนด้วยลักษณะช่องว่างทรงกระบอก ดังสมการที่ (9) และ (10)

$$V_{p_i} = \frac{n_i 4\pi R_i^3}{3} = \frac{W_i}{\rho_p} \quad (9)$$

และ

$$V_{v_i} = \pi r_i^2 h_i = \left(\frac{W_i}{\rho_p} \right) e \quad (10)$$

เมื่อ	V_{p_i}	คือ	ปริมาตรรวมของดินทั้งหมด
	R_i	คือ	รัศมีของเม็ดดินเฉลี่ย
	r_i	คือ	รัศมีช่องว่างเฉลี่ย
	h_i	คือ	ความยาวของช่องว่างทั้งหมด

หารสมการที่ (10) ด้วยสมการที่ (9) จะได้

$$\frac{r_i^2}{R_i^3} = \frac{4n_i e}{3h_i} \quad (11)$$

การรวมเม็ดดินเข้าด้วยกันให้ประมาณค่า h_i เท่ากับจำนวนของเม็ดดินที่วางตัวตามแนวความยาวของช่องว่าง ด้วยเหตุนี้ การรวมเม็ดดินที่มีลักษณะทรงกลมในแต่ละขนาดเข้าด้วยกัน ความยาวของ h_i จะมีค่าเท่ากับ $n_i 2R_i$ ดินในธรรมชาติค่า h_i จะขึ้นกับรูปร่างของเม็ดดิน ขนาดและตำแหน่งการวางตัวในมวลดิน ซึ่งในความเป็นจริงเม็ดดินมีรูปทรง Nonspherical ความยาวของแต่ละเม็ดดินมีค่ามากกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลม ส่งผลให้ จำนวนเม็ดดินทรงกลมรัศมี R_i จะมีค่ามากกว่า n_i จึงแทนจำนวนเม็ดดินด้วย n_i^α เมื่อ α มีค่ามากกว่า 1 ความยาวของช่องว่างทั้งหมด h_i จะมีค่าเท่ากับ $n_i^\alpha 2R_i$

แทน h_i ในสมการที่ (11) ได้

$$r = R_i \left[\frac{4en_i^{(1-\alpha)}}{6} \right]^{1/2} \quad (12)$$

ค่าของ n_i ในสมการที่ (11) สามารถหาได้จากสมการที่ (9) และ α หาได้จาก Empirically

รัศมีของช่องว่างที่หาได้ จะสามารถหาค่าแรงดันน้ำในดินได้ โดยหาจากสมการ Capillarity

$$\psi_i = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho_w g r_i} \quad (13)$$

เมื่อ	ψ_i	คือ	ค่าแรงดันน้ำในดิน
	γ	คือ	ค่าแรงตึงผิวของน้ำ
	θ	คือ	Contact Angle
	ρ_w	คือ	ความหนาแน่นของน้ำ
	g	คือ	ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
	r_i	คือ	รัศมีของช่องว่าง

ค่าแรงตึงผิวและค่าความหนาแน่นของน้ำมีค่าขึ้นกับอุณหภูมิ ขณะที่ค่า Contact Angle อาจจะเปลี่ยนแปลงขึ้นกับ Organic Content ของดิน

ในส่วนวิธีการ Fitting Curve ของเส้นอรรถลักษณะที่ได้จากการทดลองนั้น มีผู้เสนอสมการที่ใช้ในการ Fitting Curve หลากหลาย (เช่น Van Genuchten, 1980; Gitiana and Fredlund, 2004)

การประมาณค่า Hydraulic Conductivity Function

Jackson (1972) เสนอการประมาณหาค่า k-function จากเส้นอรรถลักษณะของน้ำในดิน (SWCC) โดยใช้สมมุติฐานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำและการกระจายช่องว่างประสิทธิผล (Effective Pore Size Distribution) ในดิน โดยฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การชื้นน้ำของดินจะขึ้นอยู่กับโอกาสทางสถิติที่ช่องว่างคู่ต่างๆ จะต่อเนื่องกันในระนาบใดๆ การคำนวณทำได้โดยแบ่งความพรุน ของดินออกเป็นส่วนๆ ที่มีขนาดช่องว่าง (Pore Size, r) ต่างๆกัน จะสามารถคำนวณความน่าจะเป็นที่ช่องว่างในแต่ละขนาดจะสัมผัสกันและยอมให้น้ำผ่านได้ ซึ่งช่องว่างที่มีขนาดเล็ก และมีจำนวนมาก ก็มีโอกาสที่ช่องว่างจะต่อเนื่องกันมากขึ้น ดังสมการที่ (14)

$$K_i = K_s \left(\frac{\theta_i}{\theta_s} \right)^c \frac{\sum_{j=i}^m [(2j+1-2i) \times \psi_j^{-2}]}{\sum_{j=1}^m [(2j-1) \times \psi_j^{-2}]} \quad (14)$$

เมื่อ	K_i	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำที่ความชื้น θ_i
	K_s	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำที่สภาวะอิ่มตัว
	m	คือ	จำนวน increment ของ θ โดยแบ่งตั้งแต่สภาวะอิ่มตัว $\theta_s = n$ จนถึงสภาวะแห้งสนิท $\theta = 0$
	ψ_i	คือ	ค่า suction head(m,cm) ที่จุดกึ่งกลางของ θ -increment
	i	คือ	ดัชนีบ่งชี้ถึงขนาดของช่องว่าง (pore size class)
	j	คือ	ดัชนีสำหรับคำนวณอนุกรม
	c	คือ	ค่าแฟกเตอร์ปรับแก้ 0-4/3 (ทั่วไปใช้เท่ากับ 1)

วิธีวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำ

การวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในทางคณิตศาสตร์ เป็นการแก้สมการ Laplace's Equation เพื่อให้ได้ค่าศักย์ของน้ำ ณ ตำแหน่งต่างๆ บนพื้นที่การไหลใดๆ ดังสมการที่ (15) โดยในการหาผลเฉลยมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีคือ

$$h = f(x, y) \quad (15)$$

1. การแก้สมการโดยตรงทางคณิตศาสตร์(Exact Solution) เป็นการใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ในการแก้สมการ Laplace's Equation เพื่อหาคำตอบที่แท้จริง ซึ่งในปัจจุบันวิธีนี้ไม่เป็นที่นิยม เพราะมีวิธีการยุ่งยาก และไม่สามารถนำประโยชน์จากคอมพิวเตอร์มาช่วยได้มากนัก

2. การใช้วิธีเลขจำนวน(Numerical Method) เป็นวิธีการที่นำเครื่องคอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณ ด้วยเทคนิคของ Relaxation, Finite Element, Finite Differences เป็นต้น โดยการแบ่งขอบเขตของปัญหาออกเป็นพื้นที่ส่วนย่อยๆ และกำหนดค่าของขอบเขตเริ่มต้นให้ใกล้เคียงสภาพความเป็นจริง หาค่าศักย์ของน้ำที่ตำแหน่งต่างๆ โดยสมมุติค่าและปรับค่าลงแต่ละพื้นที่ย่อยๆ ที่แบ่งและขยับไปจนทั่วพื้นที่การไหลทั้งหมดโดยให้ค่าที่ปรับแล้วอยู่ในค่ากำหนดที่ยอมรับได้ โดยในปัจจุบัน

นิยมนำวิธี Finite Element มาประยุกต์ใช้กับปัญหาทางด้านวิศวกรรม เพราะสามารถวิเคราะห์ปัญหาที่มีเงื่อนไขซับซ้อนได้เป็นอย่างดี

3. วิธี Electrical Analogy เนื่องจากความคล้ายคลึงกันของการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านแผ่นกึ่งตัวนำ และการไหลซึมของน้ำผ่านตัวกลางพรุน จึงใช้การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านแผ่นความต้านทานที่มีพื้นที่เหมือนพื้นที่การไหลซึมผ่านของน้ำ และวัดศักย์ของน้ำโดยวัดค่าความต่างศักย์ด้วยโวลต์มิเตอร์

4. วิธีใช้แบบจำลอง เป็นการจำลองการไหลน้ำ โดยการย่ออัตราส่วนลงมา เพื่อทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เช่น แบบจำลองถังทราย ด้วยการฉีดน้ำสีซึ่งไม่กระจายตัวในน้ำ ลงในตำแหน่งต่างๆ แนวของสีที่ไหลไปตามน้ำจะแทนเส้น Flow Lines และแบบจำลองน้ำมัน โดยนำหลักการการไหลของของเหลวที่มีความหนืดมากๆ ให้ไหลผ่านช่องว่างระหว่างแผ่นแก้วที่มีรูปจำลองของสิ่งก่อสร้างที่ทึบน้ำที่มีช่องว่างขนาดเล็ก

5. วิธีใช้ Flownets เขียนด้วยมือ เป็นวิธีการที่ต้องอาศัยความชำนาญและเข้าใจถึงคุณสมบัติของ Flownets อย่างดี โดยการเขียนเส้นกราฟแสดงศักย์รวมที่เท่ากัน (Equipotential Lines) และเส้นกราฟที่ตั้งฉากกัน จะแสดงทิศทางการไหลของน้ำ (Flow Lines)

การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นการแก้ปัญหา โดยมีสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขของขอบเขตค่าผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact solution) ของปัญหาดังกล่าวจะประกอบด้วยค่าต่างๆ ทั้งหมดนับเป็นจำนวนอนันต์ค่า ซึ่งการหาค่าผลเฉลยแม่นยำตรงในทางปฏิบัติจะทำได้ยากหรือทำไม่ได้ ดังนั้นจึงทำการเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ (Finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยชิ้นส่วนเล็กๆ หรือเรียกว่าเอลิเมนต์ (Elements)

ปัญหาการไหลซึมของของไหลในงานวิศวกรรมมีความซับซ้อน ดังนั้นวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงเป็นวิธีการในการช่วยแก้ปัญหาได้ ประกอบกับคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันมีประสิทธิภาพสูงทำให้นำมาช่วยในการหาผลเฉลยของปัญหาคด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้สะดวกและรวดเร็ว

สำหรับการวิเคราะห์การไหลแบ่งเป็น 2 แบบ คือแบบคงที่ (Steady Flow) เป็นการไหลที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา และแบบไม่คงที่ (Transient Flow) ด้วยค่าความชื้นน้ำ แรงดันน้ำและปริมาณน้ำฝนเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งจะมีพฤติกรรมเป็นแบบดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งต้องอาศัยความสัมพันธ์ของเส้นอรรถลักษณะของน้ำในดิน (Soil-Water Characteristic Curve) และความสัมพันธ์ของการไหลซึมของน้ำที่เปลี่ยนแปลงตามค่าแรงดูด เรียกว่า Permeability Function โดยจะขึ้นอยู่กับชนิดของดิน

ทฤษฎีหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress Theory)

Terzaghi (1925) ในสภาวะสมดุลของดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated Soil) เมื่อมีหน่วยแรงภายนอกกระทำ หน่วยแรงส่วนหนึ่งรับโดยบริเวณที่สัมผัสดิน อีกส่วนรับด้วยแรงดันของน้ำในมวลดินที่เรียกว่า Pore Pressure, u_w โดยให้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงรวมและความดันในโพรงที่จุดจุดหนึ่งในมวลดินว่า

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (16)$$

โดยที่ σ = หน่วยแรงรวมในแนวตามแกน (Total Normal Stress)

σ' = หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Normal Stress)

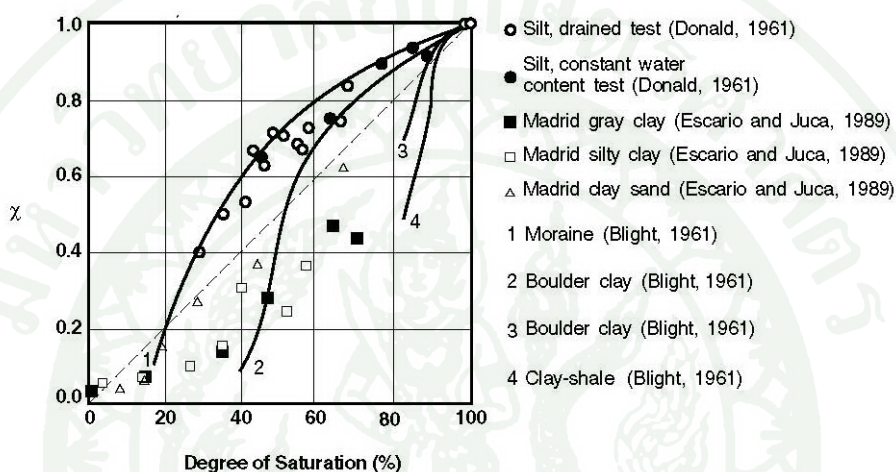
u_w = แรงดันน้ำในโพรง (Pore – Water Pressure)

สุรฉัตร (2540) อธิบายว่าสำหรับดินเม็ดหยาบหน่วยแรงประสิทธิผลอาจหมายความว่า เป็นหน่วยแรงที่เกิดจากแรงระหว่างจุดสัมผัสของเม็ดดิน ส่วนในดินเม็ดละเอียดหน่วยแรงประสิทธิผลจะรวมถึงผลของหน่วยแรงที่เกิดจากประจุไฟฟ้า และปฏิกิริยาทางเคมีของธาตุในดินเม็ดละเอียด

Bishop (1959) ได้เสนอความสัมพันธ์ของหน่วยแรงประสิทธิผลของดินที่อยู่ในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำซึ่งจะมีแรงดูดเข้ามาเกี่ยวข้องในรูปของสมการที่ (17)

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (17)$$

ค่า χ เป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับระดับความอิ่มตัวของน้ำซึ่งมีค่าแตกต่างกันตามชนิดของดิน ในสภาวะดินอิ่มตัวหรือใกล้อิ่มตัว ($S_r > 95\%$) ค่า χ จะมีค่าเท่ากับ 1 และ $\sigma' = \sigma - u_w$ หรือ สมการเดิมของ Effective stress ภาพที่ 14 แสดงค่า χ จากผลการทดสอบดินแต่ละชนิดซึ่งค่า χ มีค่าอยู่ระหว่าง 0 (เมื่อตัวอย่างดินอยู่ในสภาวะแห้งอย่างสมบูรณ์) ถึง 1 (เมื่อตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ)



ภาพที่ 14 ผลการทดสอบที่แสดงค่า Bishop's effective stress parameter (χ) กับ Degree of saturation

ที่มา: Lu and Likos (2004)

ทฤษฎีกำลังรับแรงเฉือนของดิน (Shear Strength Theory)

กำลังรับแรงเฉือน

Bishop (1954) ได้ให้นิยามว่า กำลังรับแรงเฉือนของดินคือ ค่าหน่วยแรงเฉือน (Shear Stress) สูงสุดที่ดินจะทนทานได้

Hvorslev (1960) ได้ให้นิยามว่า กำลังรับแรงเฉือนของดินคือ ค่าหน่วยแรงเฉือน (Shear Stress) บนระนาบการวิบัติในขณะที่เกิดการวิบัติ

หลักการกำหนดจุดวิบัติ (Failure Point Criteria)

มาตรฐานข้อกำหนดกำลังรับแรงเฉือน มาตรฐานการวิบัติมีอยู่ด้วยกัน 5 จุด ดังภาพที่ 15 ที่แตกต่างกันของกำลังรับแรงเฉือนของดินเสนอโดย Head (1986) ดังนี้

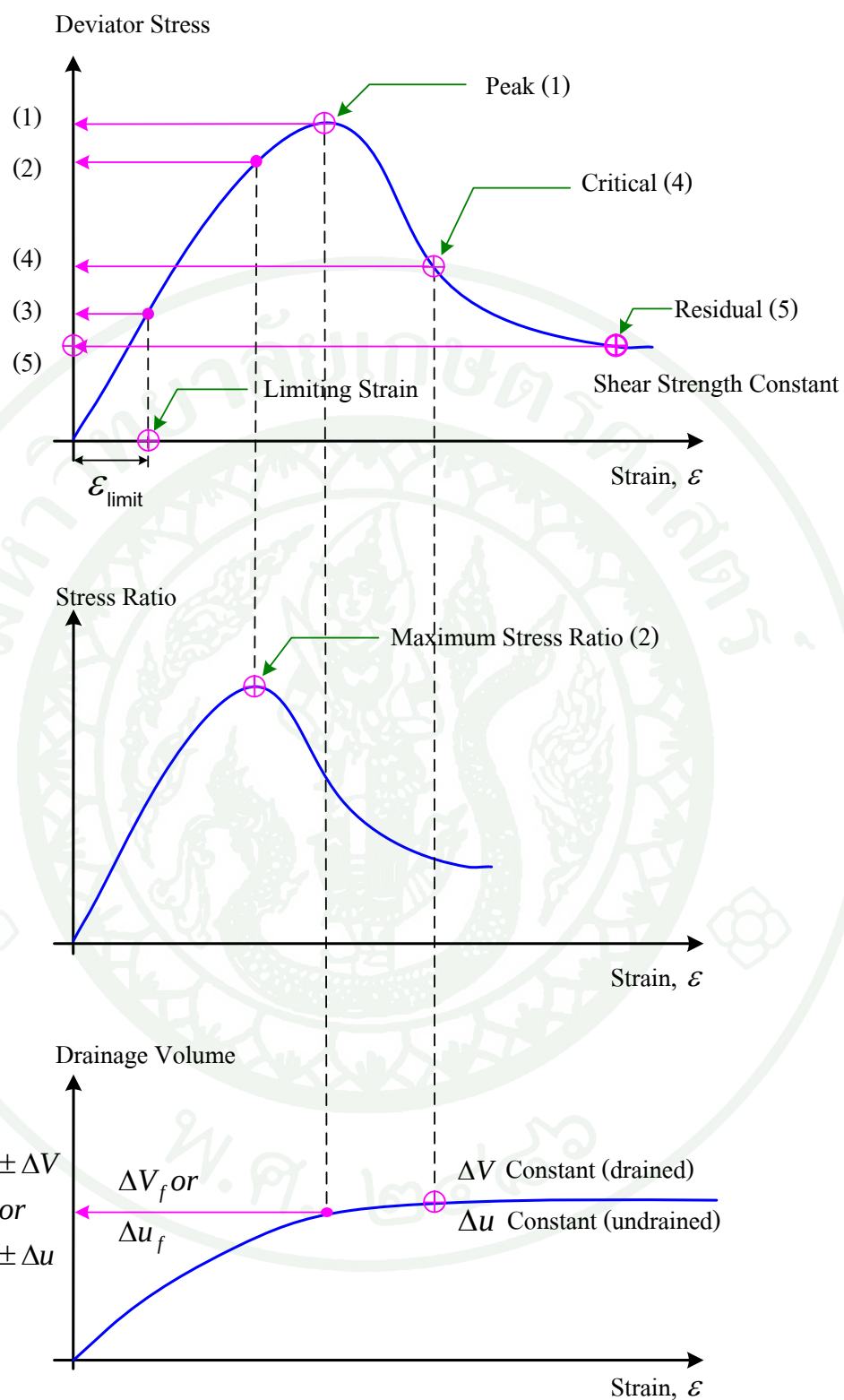
ก. จุดวิบัติที่มีค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุด (Maximum Deviator Stress, $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ จุดที่เกิดค่าแรงเฉือนสูงสุด $(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2})$ นั้นเอง เป็นวิธีการนิยามจุดวิบัติที่ใช้กันโดยทั่วไป โดยเฉพาะการวิเคราะห์ด้วย $\phi = 0$ Concept ซึ่งจุดวิบัตินี้แสดงดังจุดที่ (1) ในภาพที่ 15

ข. จุดวิบัติที่มีค่าอัตราส่วนระหว่าง Principal stress สูงสุด (Maximum Principal Stress Ratio, $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{\max}$) เรียกโดยทั่วไปว่า Maximum obliquity $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{\max}$ ส่วนใหญ่จะใช้ในการวิเคราะห์ในรูปหน่วยแรงประสิทธิภาพ (Effective Stress Analysis) และกรณีที่ต้องการเส้นขอบเขตการวิบัติของ Mohr Coulomb ที่แท้จริง แสดงโดยจุดที่ (2) ในภาพที่ 15

ค. จุดวิบัติที่มีการกำหนดค่าความเครียดสูงสุดไว้ (Limiting Strain) แสดงโดยจุดที่ (3) ในภาพที่ 15

ง. จุดวิบัติที่ Critical state หรือจุดวิบัติ ณ สถานะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำในโพรงดินส่วนเกินสำหรับการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแบบระบายน้ำ แสดงโดยจุดที่ (4) ในภาพที่ 15

จ. จุดวิบัติที่ Residual state หรือจุดวิบัติ ณ สถานะที่เกิดการเคลื่อนตัวอย่างสมบูรณ์ (Fully Mobilized) แสดงโดยจุดที่ (5) ในภาพที่ 15 โดย Skempton (1964) จะกำหนดให้สภาวะ Residual เกิดขึ้นเมื่อมีการเลื่อนไถล ระหว่าง Slip plane เป็นระยะทางมากๆ



ภาพที่ 15 วิธีการกำหนดจุดวิบัติในมวลดินแบบต่างๆ

ที่มา: Head (1986)

กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว (Shear Strength of Clay)

กำลังรับแรงเฉือนในมวลดินเหนียว มีปัจจัยพื้นฐาน 3 ประการ คือ

1. ค่าความเชื่อมแน่น (c) ของดิน เกิดเนื่องจากแรงดึงผิวและประจุไฟฟ้า หรือแรงดันน้ำ ด้านลบ รวมไปถึงการเชื่อมประสาน (Cementation) ระหว่างเม็ดดิน
2. ความเสียดทานภายในมวลดิน เป็นแรงต้านทานระหว่างอนุภาคดิน ซึ่งขึ้นกับแรงกระทำตั้งฉากที่กระทำต่อเม็ดดิน
3. ความดันน้ำ สำหรับดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำ เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ น้ำที่มีอยู่เต็มในช่องว่างของดิน จะรับเอาแรงกระทำนั้นเป็นความดันชั่วขณะหนึ่ง เมื่อน้ำในช่องว่างระบายออกไป แรงจะเปลี่ยนเป็นแรงดันระหว่างอนุภาค (แรงดันประสิทธิผล) ซึ่งจะเป็นการเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนให้กับมวลดิน

ในปี ค.ศ.1776 C.A. Coulomb ได้ค้นพบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับหน่วยแรงตั้งฉากกับพื้นที่ระนาบใดๆ ของมวลดินในรูปของสมการที่ (18)

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (18)$$

จากสมการที่ 6 เมื่อพิจารณาในรูปหน่วยแรงประสิทธิผลจะแสดงในรูปของสมการที่ (19)

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (19)$$

เมื่อมีแรงมากระทำกับมวลดินเพิ่มมากขึ้นจนดินไม่สามารถต้านทานแรงกระทำนั้นได้ ดินก็จะเกิดการพิบัติและเริ่มเคลื่อนตัวออกจากกันโดยปรากฏเป็นระนาบขึ้น การพิบัติของดินจะเกิดขึ้นเนื่องจากแรงเฉือน กล่าวคือดินจะเกิดการพิบัติบนระนาบซึ่งหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมากกว่าหน่วยแรงเฉือนที่ดินสามารถต้านทานได้

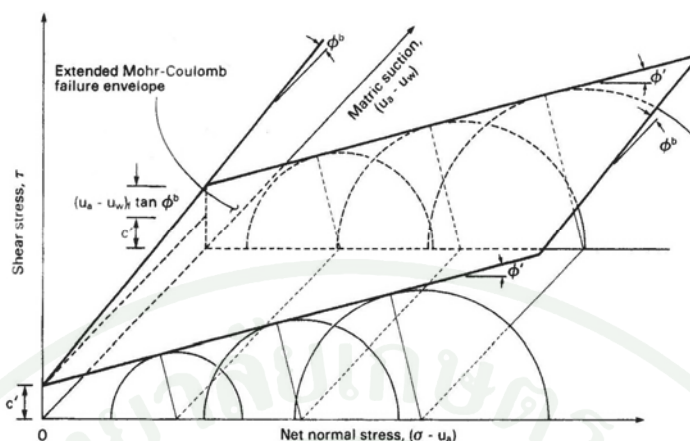
ในกรณีของดินไม่อิ่มน้ำนั้น Fredlund *et al.* (1978) พบว่าจะมีเทอมที่ประกอบด้วยแรงดันของน้ำและอากาศดังแสดงในสมการที่ (20) โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือน แรงดูด และหน่วยแรงตั้งฉาก และแสดงระนาบการพิบัติดังภาพที่ 16 ดังนี้

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (20)$$

โดยที่ c'	คือ	ค่าแรงยึดเหนี่ยวที่ค่าแรงดูดเมทริกและหน่วยแรงกระทำตั้งฉาก สุทธิมีค่าเป็นศูนย์
$(\sigma - u_a)_f$	คือ	หน่วยแรงกระทำตั้งฉากสุทธิบนระนาบการพัง
ϕ'	คือ	ค่ามุมเสียดทานภายในซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าหน่วยแรงกระทำ ตั้งฉากสุทธิที่เปลี่ยนแปลงไป
$(u_a - u_w)_f$	คือ	ค่าแรงดูดเมทริกขณะเกิดการพิบัติ
ϕ^b	คือ	ค่ามุมเสียดทานภายในซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าแรงดูดเมทริก

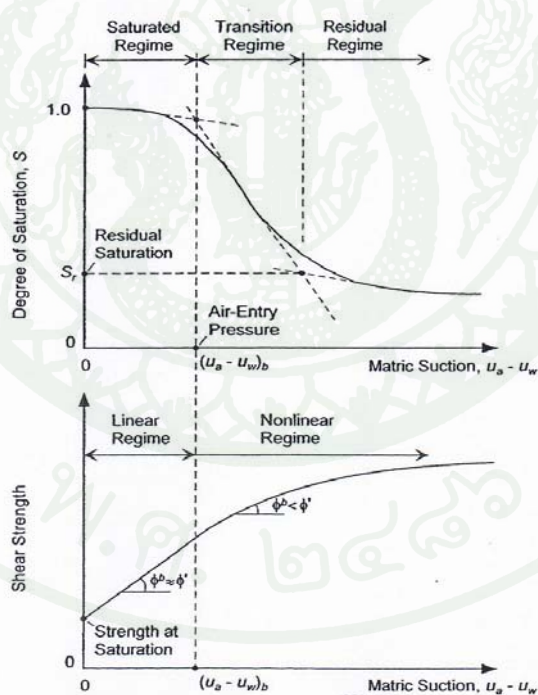
จากการทดสอบ (อาทิเช่น Gan *et al.*, 1988; Escario *et al.*, 1989; Vanapalli *et al.*, 1996) แสดงให้เห็นว่า ค่ามุม ϕ^b เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นที่ค่าแรงดูดเมทริกสูงจะมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งพบว่าเส้นขอบเขตกำลังรับแรงเฉือนจะไม่เป็นเส้นตรงเมื่อมีค่าแรงดูดเมทริกที่สูงขึ้นมีลักษณะสอดคล้องกับพฤติกรรมของเส้นอัตราลักษณะของน้ำในดิน ดังภาพที่ 17 แสดงถึงเส้น Drying Curve ในช่วงที่ค่าแรงดูดเมทริกมีค่าต่ำหรือค่าแรงดูดมีค่าน้อยกว่าค่าแรงดันของอากาศที่สามารถจะเข้าสู่ช่องว่างภายในมวลดิน (Air-Entry Pressure) ได้ ช่องว่างในมวลดินนั้นยังคงอึดด้วยน้ำ เส้นขอบเขตกำลังรับแรงเฉือนจะเป็นเส้นตรงและค่า ϕ^b จะมีค่าเท่ากับค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ') ส่วนตำแหน่งที่ถัดจากค่า Air-Entry Pressure จะมีพฤติกรรมที่ไม่เป็นเส้นตรง ตามลักษณะการระบายน้ำในช่องว่างของเม็ดดิน ถ้าการระบายน้ำยังเกิดขึ้นต่อเนื่อง จะเกิดการลดลงของปริมาตรน้ำภายในช่องว่างระหว่างเม็ดดินอย่างรวดเร็ว ส่งผลถึงค่าแรงดึงผิวของน้ำระหว่างเม็ดดินที่สูงขึ้น นำไปสู่ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่มากขึ้นด้วย

Fredlund and Rahardjo (1993) ได้ทำการสรุปผลการทดสอบหาค่า ϕ^b ในดินหลายชนิด และแสดงให้เห็นว่าค่ามุม ϕ^b จะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่ามุม ϕ' ดังแสดงในตารางที่ 9



ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ของการวิบัติของดินในรูปแบบของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Soil)

ที่มา: Fredlund and Morgenstern (1977)



ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นอัตราลักษณ์และเส้นขอบเขตกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ดัดแปลงจาก Vanapalli *et al.* (1996)

ที่มา: Lu and Likos (2004)

ตารางที่ 9 ผลสรุปค่าตัวแปรกำลังรับแรงเฉือนของดินแต่ละชนิด

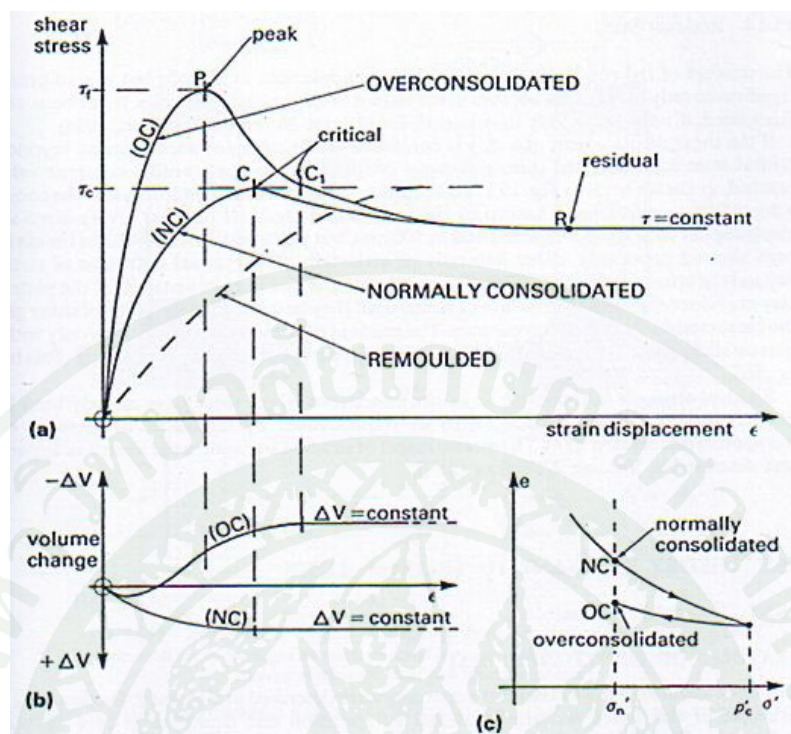
Soil Type	c' (kPa)	ϕ' (deg)	ϕ^b (deg)	References
Compacted shale; $w = 18.6\%$	15.8	24.8	18.1	Bishop et al. (1960)
Boulder clay; $w = 11.6\%$	9.6	27.3	21.7	Bishop et al. (1960)
Dhanauri clay; $w = 22.2\%$, $\rho_d = 1580 \text{ kg/m}^3$	37.3	28.5	16.2	Satija (1978)
Dhanauri clay; $w = 22.2\%$, $\rho_d = 1478 \text{ kg/m}^3$	20.3	29.0	12.6	Satija (1978)
Madrid gray clay; $w = 29\%$	23.7	22.5	16.1	Escario (1980)
Undisturbed decomposed granite	28.9	33.4	15.3	Ho and Fredlund (1982)
Tappen-Notch Hill silt; $w = 21.5\%$, $\rho_d = 1590 \text{ kg/m}^3$	0.0	35.0	16.0	Krahn et al. (1989)
Compacted glacial till; $w = 12.2\%$, $\rho_d = 1810 \text{ kg/m}^3$	10.0	25.3	7 – 25.5	Gan et al. (1988)

ที่มา: Modified from Fredlund and Rahardjo (1993)

ความสัมพันธ์ระหว่าง Peak, Fully Soften (หรือ Critical State) และ Residual State ของดินเหนียว

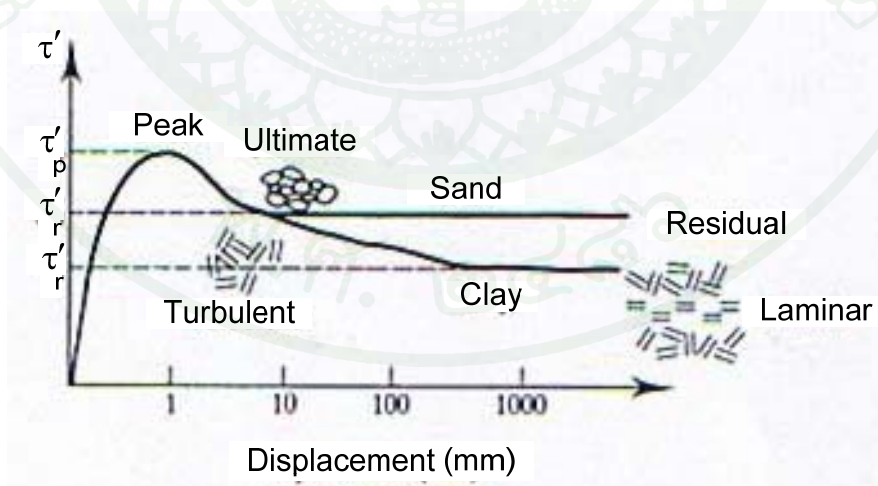
Head (1986) ได้อธิบายถึงกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวจากการทดสอบ Triaxial Test ในสภาวะระบายน้ำของดิน Normally consolidated และดิน Overconsolidated ดังแสดงในภาพที่ 18 โดยจะกล่าวถึงดินประเภท Overconsolidated Clay เมื่อพิจารณา Stress – Strain Curve จะพบว่าค่า Shear Stress จะสูงขึ้นจนถึงจุดสูงสุด (จุด P) โดยที่มีค่า Strain Displacement ต่ำ และเมื่อพิจารณา ณ จุดนี้ จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรในขณะที่ดินถูกเฉือน โดยดินเกิดการบวมตัวขึ้นและในจุดนี้มีค่าความชันสูงสุดส่งผลให้เกิด Angle of Dilation (ψ) สูงสุด และหลังจากที่ดินเกิดการบวมตัวผลที่ตามมาคือดินมีปริมาณความชื้นเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่า Shear Stress ลดลงเรื่อยๆ จนถึง Critical State (Fully Softened) ที่จุด C_1 โดย ณ จุดนี้ดินจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงปริมาตร และเมื่อทำการเฉือนตัวอย่างดินไปเรื่อยๆ ค่า Shear Stress จะลดลงจากจุด C_1 ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่า Shear Stress มีค่าคงที่ (จุด R) ซึ่งค่ากำลังต้านทานต่อแรงเฉือนที่จุดนี้ คือค่า Residual Strength การที่ค่า Shear Stress จะมีค่าคงที่นั้นค่า Strain Displacement จะต้องมีความมาก โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 100 – 500 มม. แต่บางทีอาจมากกว่า 1 ม. การลดลงของค่า Shear Stress จากจุด C_1 ถึงจุด R นั้น เกิดจากการจัดเรียงตัวกันระหว่างอนุภาคดินเหนียวที่อยู่ติดกับแนวการเฉือนจนกระทั่งอนุภาคของดินเหนียวขนานไปกับแนวที่ถูกเฉือน

Atkinson (2007) ได้กล่าวถึงจุดที่เกิดค่า Peak โดยทั่วไปจะมี Strain ประมาณ 1 % ในขณะที่จุด Ultimate หรือ Fully Softened นั้นจะมี Strain ประมาณ 10% นอกจากนั้นยังได้กล่าวถึงพฤติกรรมของทรายและดินเหนียวพลาสติกที่มีการเคลื่อนตัวมาก ดังแสดงในภาพที่ 19 ค่า Shear Stress ที่ลดต่ำลงหลังจากที่มีการเคลื่อนตัวมากนั้นเรียก Residual State ซึ่งสัมพันธ์กับ Laminar flow ของอนุภาคดินเหนียวซึ่งมีการเรียงตัวกันขนานไปกับบริเวณที่เกิดรอยแตกดังแสดงในภาพที่ 19 แต่ในส่วน of ทรายและดินชนิดอื่นอนุภาคของดินมีลักษณะกลมมันนั้นจะไม่มีโอกาสที่จะเกิด Laminar Flow ดังนั้นที่จุด Residual State จะมีค่าเท่ากับ Ultimate State หรือ Fully Softened



ภาพที่ 18 กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวในสภาวะระบายน้ำจากการทดสอบ Triaxial Test

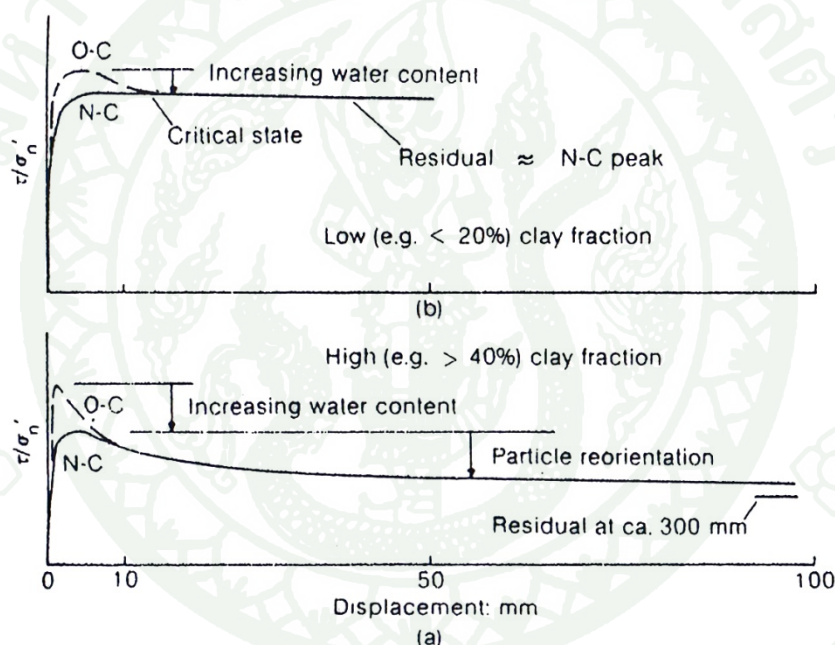
ที่มา: Head (1986)



ภาพที่ 19 ค่ากำลังรับแรงเฉือนคงค้าง (Residual Strength) ของดินเหนียวที่มีการเคลื่อนตัวมาก

ที่มา: Atkinson (2007)

Skempton (1985) ได้อธิบายเรื่องกำลังที่ลดต่ำลงของดินหลังจากจุด Peak ของดินประเภท Overconsolidated Clay แบบระบายน้ำ โดยแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะกล่าวถึงการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้น เนื่องจากการบวมตัว และส่วนที่สองจะกล่าวถึงการจัดเรียงอนุภาคของดินเหนียวที่ขนานไปกับแนวการเฉือน ซึ่งเมื่อสิ้นสุดกระบวนการในส่วนแรกแล้วนั้น กำลังของดินจะเข้าสู่สภาวะ Fully Softened หรือ Critical State และที่ตำแหน่งที่มีการเคลื่อนตัวมากมายนั้น เมื่อการจัดเรียงตัวของอนุภาคดินเหนียวสิ้นสุด กำลังจะลดต่ำลงและมีค่าคงที่ที่จุด Residual และยังแยกให้เห็นถึงความแตกต่างของ Stress-Displacement Curve เนื่องจากปริมาณดินเหนียวที่มีอยู่ในดิน ดังแสดงในรูปที่ 20



ภาพที่ 20 Stress-Displacement Curve ที่ค่า Effective Normal Stress คงที่

ที่มา: Skempton (1985)

Terzaghi *et al.* (1996) กล่าวถึงกำลังรับแรงเฉือนของดินประเภท Overconsolidated Clay นั้นขึ้นอยู่กับสภาพของมวลดินในธรรมชาติ เช่นในกรณีที่มวลดินในธรรมชาติอยู่ในสภาพสมบูรณ์ (Intact Condition) ไม่พบรอยแตกร้าวและไม่พบระนาบวิบัติในอดีต (Pre-existing Failure Plane) จะมีกำลังรับแรงเฉือนสูงและเรียกว่า Intact Shear Strength ถ้าสภาพของมวลดินในธรรมชาติพบ

รอยแตกรอยแยก หรือรอยต่อ (Joint) จำนวนมากจะทำให้ความแข็งของเนื้อดินลดลง เนื่องจากการผุกร่อน กัดเซาะตามธรรมชาติ กำลังรับแรงเฉือนจะลดลงและมีค่าเท่ากับ Fully Softened Shear Strength และถ้าหากมวลดินเคยเกิดการเคลื่อนตัวและพิบัติเนื่องจากแรงเฉือนมาก่อนในอดีต และสังเกตเห็นผิวรอยแตกที่เรียบเนียน (Slickenside) จากการเคลื่อนของมวลดินในระนาบพิบัติ กำลังรับแรงเฉือนของมวลดินในระนาบพิบัตินั้นจะมีค่าเท่ากับ Residual Shear Strength

การทดสอบ Direct Shear Test

การหาลำดับรับแรงเฉือนของดินโดยวิธีเฉือนตรง (Direct Shear Test) เป็นวิธีการทดลองหาค่าความต้านทานแรงเฉือนของดินที่สะดวกและรวดเร็ว การทดลองโดยวิธีเฉือนตรงสามารถทำการทดลองได้ 3 แบบ คือ

1. แบบไม่มีการอัดตัวคายน้ำและไม่มีการระบายน้ำ (Unconsolidated undrained test, UU test) การทดลองวิธีนี้จะกระทำอย่างรวดเร็ว การใส่แรงเฉือนจะกระทำก่อนที่ตัวอย่างจะเกิดการอัดตัวคายน้ำเนื่องจากการใส่น้ำหนักในแนวดิ่ง
2. แบบมีการอัดตัวคายน้ำแต่ไม่มีการระบาย (Consolidated undrained test, CU test) การทดลองวิธีนี้เมื่อใส่น้ำหนักกระทำในแนวดิ่งแล้วจะต้องรอให้ตัวอย่างดินหยุดการทรุดตัวเสียก่อน แล้วจึงใส่แรงเฉือนให้กระทำอย่างรวดเร็ว
3. แบบมีการอัดตัวคายน้ำและมีการระบายน้ำ (Consolidated drained test, CD test) การทดลองนี้จะคล้ายกับการทดลองแบบ CU แต่เมื่อมีการทรุดตัวในแนวดิ่งของตัวอย่างดินสิ้นสุดแล้วจึงใส่แรงเฉือนอย่างช้าๆ เพื่อไม่ให้เกิดความดันโพรงขึ้น

สำหรับการเฉือนดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะเฉือนที่สภาวะความชื้นคงที่ จึงสามารถจำแนกได้เป็นรูปแบบการทดสอบอีกกลุ่มคือ Constant Water Content

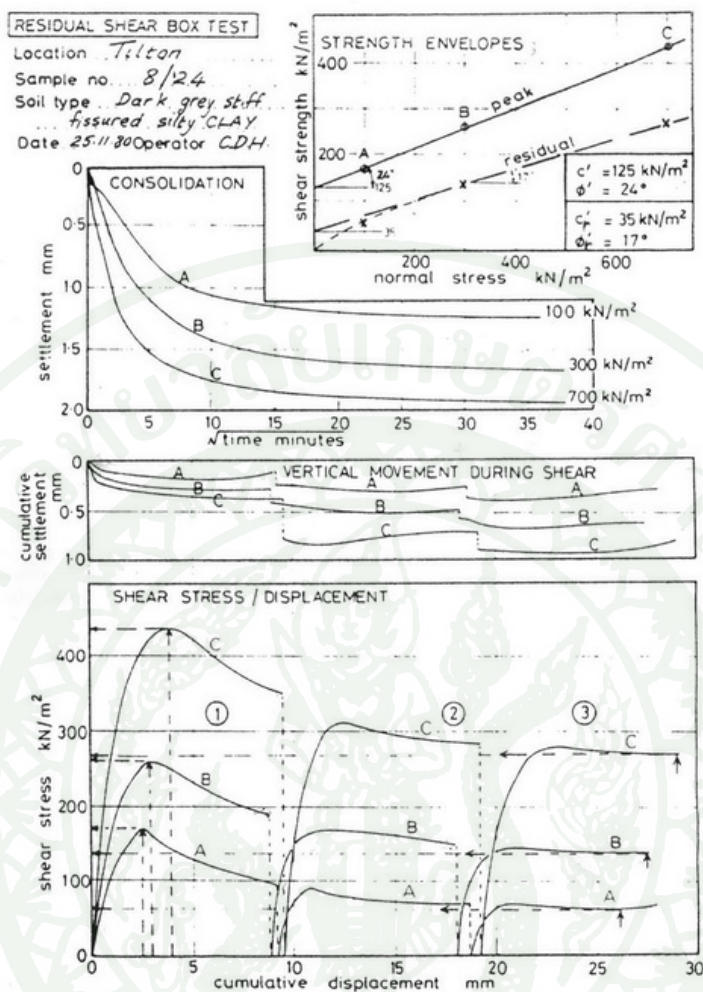
การทดลองโดยวิธีแรงเฉือนตรงนิยมทดลองกับดินที่ไม่มีความชื้นแน่นหรือดินเม็ดหยาบ แต่ในปัจจุบันเป็นที่ยอมรับว่าสามารถหาค่าที่นำเชื่อถือได้กับดินเม็ดละเอียด แต่ก็ยังมีข้อโต้แย้งว่าวิธีการนี้ไม่ค่อยเหมาะสม เนื่องจากเหตุผลดังนี้

1. ผิวหน้าของการวิบัติที่แท้จริงจะไม่ใช่ระนาบ ซึ่งจะทำให้การกระจายของความเค้นเลื่อนเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอบนระนาบวิบัติ
2. การทดลองใช้ตัวอย่างที่มีขนาดเล็ก ผลจากการเตรียมตัวอย่างที่ไม่ดีจะทำให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนมาก
3. การทดลองวิธีนี้ไม่สามารถตรวจสอบความดันของน้ำระหว่างทำการทดลองได้ ไม่สามารถควบคุมสถานะไม่ระบายน้ำ (Undrained) อย่างแท้จริงได้
4. การทดลองนี้ไม่สามารถหาค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น และอัตราปัวร์ซองได้
5. มีการสร้างเครื่องมือทดลองแบบใหม่ขึ้น คือเครื่องมือสำหรับการทดลองแบบแรงอัด 3 แกน (Triaxial Compression Test)

การทดสอบ Direct Shear Test แบบ Reversal Shear Box Test

การทดสอบ Direct Shear Test แบบ Reversal Shear Box Test เป็นวิธีการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนคงค้าง (Residual Shear Strength) เนื่องจากการที่จะเข้าสู่ Residual State ได้นั้น จะต้องมีการเคลื่อนตัวเนื่องจากแรงเฉือนที่มาก และด้วยข้อจำกัดของเครื่อง Direct Shear ที่สามารถเคลื่อนตัวสูงสุดได้เพียงประมาณ 10 มม. ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบโดยการเลื่อนตัวอย่างไป-กลับหลายๆครั้ง และถือว่าเมื่อรวมการเคลื่อนตัวเนื่องจากแรงเฉือนที่ทำการทดสอบหลายๆครั้ง เป็นระยะทางที่มากพอที่จะเข้าสู่ Residual State โดยมีตัวอย่างผลการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 21 เนื่องจากการทดสอบเพื่อที่จะหาค่ากำลังรับแรงเฉือนคงค้าง (Residual Strength) นั้น จะต้องทำการทดสอบโดยการเลื่อนตัวอย่างไป-กลับหลายๆครั้ง Head (1986) จึงกำหนดวิธีการเพื่อลดจำนวนครั้งในการเลื่อนตัวอย่างลงโดยการสร้างระนาบการเลื่อนขึ้น (Cut-Plane Method) เพื่อเป็นการลดจำนวนครั้งในการทดสอบ

ข้อเสียของการทดสอบด้วยวิธีนี้คือการสูญเสียของตัวอย่างดินจากขั้นตอนการถอยตัวอย่างกลับเพื่อจะทำการเลื่อนตัวอย่างครั้งต่อไป ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้นั้น มีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง



ภาพที่ 21 ตัวอย่างผลการทดสอบ Reversal Shear Box Test

ที่มา: Head (1986)

หลักการวิเคราะห์ความมั่นคง

วรากร (2546) สาเหตุของการทำให้เกิดการเคลื่อนพังหรือความไม่มั่นคงในลาดดิน อาจเกิดจากสิ่งต่อไปนี้เพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่ง หรือหลายอย่างประกอบกันคือ

1. แรงดึงดูดของโลกหรือความต่างระดับของมวลดิน
2. แรงกระทำจากภายนอกมวลดิน เช่น น้ำหนักบรรทุกหรือแผ่นดินไหว

3. การสูญเสียกำลังของดิน เนื่องจากแรงดันน้ำ การบวมตัว การอิ่มตัว การไหลซึมของน้ำ
4. การกัดกร่อนผุพังตามธรรมชาติ หรือการกัดเซาะโดยเฉพาะที่ส่วนล่างของลาดดิน

การวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดิน จะใช้วิธีการพิจารณา “สมดุลจำกัดของมวลดิน” (Limit Equilibrium) วิธีนี้มีสมมติฐานว่า “ณ ช่วงเวลาที่เกิดการเคลื่อนพังพอดิในขณะนั้นมวลดินอยู่ในสภาวะสมดุล” โดยเริ่มจากการสมมติรูปลักษณะของผิวเคลื่อนที่จะเกิดขึ้น จากนั้นคำนวณแรงต้านทานที่เพียงพอทำให้เกิดความสมดุลของมวลดินที่พิบัติ และเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างกำลังของดินต่อหน่วยแรงต้านทานขณะสมดุล ซึ่งเรียกว่า “อัตราส่วนปลอดภัย” (Factor of Safety, F.S.)

อัตราส่วนปลอดภัย คือ อัตราส่วนของกำลังรับน้ำหนักของดินบนผิวเคลื่อนต่อหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงในพื้นที่ผิวเดียวกัน ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$F.S. = \frac{\text{Shear Strength}}{\text{Shear Stress}} = \frac{\tau_f}{\tau} \quad (21)$$

โดย τ_f = กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของมวลดินซึ่งตามทฤษฎีของ Mohr – Coulomb แล้วจะมีค่า $c + \sigma \tan \phi$
 τ = หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจริงซึ่งเพียงพอทำให้มวลดินนั้นสมดุล

และสำหรับการพิบัติในลักษณะจำเพาะต่างๆ เช่น ผิวเคลื่อนเป็นส่วนโค้งของวงกลม อัตราส่วนปลอดภัยอาจหมายถึง อัตราส่วนของโมเมนต์รอบจุดศูนย์กลาง ก็ได้เช่น

$$F.S. = \frac{\text{โมเมนต์ที่เกิดจากกำลังรับแรงเฉือนของดินต้านทานการพิบัติ}}{\text{โมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักมวลดินที่จะทำให้พิบัติ}} \\ = \frac{M_R}{M_D} \quad (22)$$

โดยทั่วไปแล้วขั้นตอนในการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดิน โดยวิธี “Limit Equilibrium” ทำได้ดังนี้

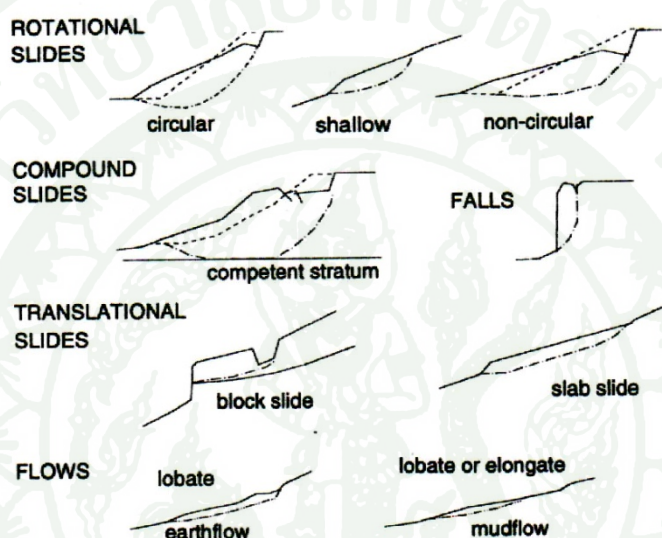
1. สมมติหรือสันนิษฐานลักษณะพิบัติหรือผิวการเคลื่อนพัง
2. คำนวณแรงต้านทานที่เพียงพอทำให้เกิดความสมดุลของมวลดินที่พิบัติ
3. เปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างกำลังของดินต่อหน่วยแรงต้านทานขณะสมดุล ซึ่งเรียกว่า “อัตราส่วนปลอดภัย” (Factor of Safety)
4. โดยการเปลี่ยนลักษณะหรือผิวการเคลื่อนพังที่น่าจะหรือมีโอกาสเกิดขึ้นไปเรื่อยๆ จนพบค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่น้อยที่สุด ซึ่งควรเป็นลักษณะการพิบัติที่น่าจะเกิดขึ้นมากที่สุด และหาค่า F.S. ที่ควรเป็น

วิธีการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดิน

ในที่นี้จะกล่าวถึงลักษณะและการพิบัติและการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดินเหนียว ลักษณะการพิบัติของลาดดินเหนียว (Mode of Failure) มีหลายรูปแบบดังตัวอย่างแสดงในภาพที่ 22 โดยส่วนใหญ่ลักษณะของการพิบัติที่มักเกิดขึ้นจะเป็นแบบ Rotational Slide และในส่วนของ การวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดินนั้นวิธี Method of Slices เป็นวิธีที่วิศวกรนิยมใช้ในการ วิเคราะห์โดยจะพิจารณาแบ่งมวลดินออกเป็น Slice ย่อยๆ และตรวจสอบแรงที่กระทำของแต่ละ Slice ใน 2 มิติ ดังแสดงในภาพที่ 23

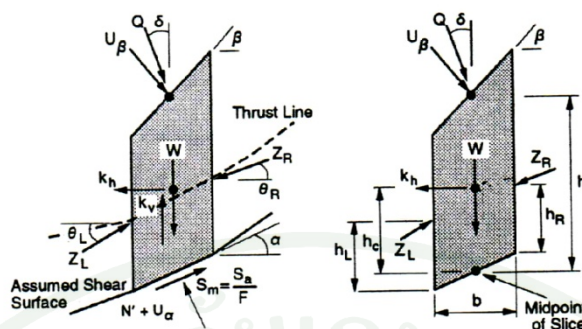
อกินิตี (2551) ได้อธิบายว่าโดยทั่วไปในงานวิศวกรรมการออกแบบลาดดิน จะสมมติให้ ลาดดินอยู่ในสภาวะอิ่มน้ำและผิวหน้าดินมีแรงดันน้ำในสภาวะสถิตย์หรือระดับน้ำอยู่ที่ผิวดิน ซึ่งจะเป็นสภาวะที่ Effective Stress ของดินมีค่าน้อยที่สุดและกำลังรับแรงเฉือนน้อยที่สุดนั่นเอง อย่างไรก็ตามสำหรับสำหรับการบำรุงรักษา การวิเคราะห์ลาดดินตามสภาพดินที่เป็นอยู่จริงซึ่งอยู่ ในสภาวะสลับเปียก สลับแห้ง จะช่วยให้เกิดความเข้าใจมากขึ้นว่าสภาวะการไหลซึมน้ำอย่างไร จึงจะก่อให้เกิดความไม่มั่นคงต่อลาดดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการป้องกันไม่ให้แรงดันน้ำในลาดดินมี ค่ามากเกินไป

การวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดินโดยทั่วไปก็จะพิจารณากรณีที่ก่อให้เกิดความเสียหายมากที่สุดนั่นก็คือสมมุติให้ลาดดินอยู่ในสภาวะอิ่มน้ำ และในงานก่อสร้างถนนที่ใช้ดินเหนียวมาบดอัดเพื่อเป็นคันทางก็เช่นเดียวกัน แต่ในสภาพความเป็นจริงแล้วคันดินไม่ได้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำเสมอไป เพราะคันดินที่บดอัดโดยทั่วไปจะอยู่ในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ เพราะเหตุนี้การวิเคราะห์ที่เหมาะสมควรจะใช้ทฤษฎีกลศาสตร์ของดินไม่อิ่มน้ำ



ภาพที่ 22 ลักษณะการพังทลายต่างๆ ของลาดดินเหนียว

ที่มา: Skempton and Hutchinson (1968)



- | | |
|--|---|
| F = factor of safety | Z_L = left interslice force |
| S_a = available strength
= $C + N' \tan \phi$ | Z_R = right interslice force |
| S_m = mobilized strength | θ_L = left interslice force angle |
| U_α = pore water force | θ_R = right interslice force angle |
| U_β = surface water force | h_L = height to force Z_L |
| W = weight of slice | h_R = height to force Z_R |
| N' = effective normal force | α = inclination of slice base |
| Q = external surcharge | β = inclination of slice top |
| k_v = vertical seismic coefficient | b = width of slice |
| k_h = horizontal seismic coefficient | h = average height of slice |
| | h_c = height to centroid of slice |

ภาพที่ 23 การวิเคราะห์แรงที่กระทำบนแต่ละ Slice โดยวิธี Slice Method

ที่มา: Abramson *et al.* (1996)

ในการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดินโดยใช้ทฤษฎีกลศาสตร์ของดินไม่อึดน้ำได้ มีผู้ศึกษาและใช้ประเมินความมั่นคงของคันดินกันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะในต่างประเทศ อาทิ Ridley *et al.* (2004) ได้ศึกษาโดยให้ความสำคัญกับการใช้เครื่องมือเพื่อวัดค่าแรงดันน้ำในคันดิน ซึ่งมีผลอย่างมากเมื่อสภาพอากาศมีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล, ศึกษาคุณสมบัติของการไหลซึมของน้ำบริเวณผิวของลาดดิน และพืชที่ปลูกบริเวณผิวลาดดิน ที่ส่งผลต่อความมั่นคงของลาดดิน Rahardjo *et al.* (1995) ได้ศึกษาและอธิบายการไหลซึมของน้ำฝนในลาดดินที่ไม่อึดตัวด้วยน้ำ ทำให้เกิดบริเวณที่เปียกชื้นส่งผลทำให้เกิด Shallow Slip Failures ด้วยเหตุนี้การวิเคราะห์ความมั่นคงของคันดินควรที่จะพิจารณากรณีที่มีการไหลซึมของน้ำฝนเข้าไปด้วยนอกเหนือจากวิธี Limit Equilibrium ในหลายๆการศึกษาวิจัยในปัจจุบัน ได้อธิบายว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเกิด Shallow Slip Failure ขนานไปกับ Slope Failure เนื่องจากการไหลซึมของน้ำฝนลงสู่ลาดดิน (Blatz *et al.*, 2006; Huat *et al.*, 2006) โดยพฤติกรรมการพิบัติลักษณะนี้จะวิเคราะห์ความไม่มั่นคงของลาดดินไม่อึดตัวด้วยน้ำโดยสมมติฐานของลาดดินเป็น Infinite slope หรือ Finite slope ก็ได้ (Cho and Lee, 2002; Babu and Murthy, 2005)

Won Teak Oh and Vanapalli (2008) ได้ทำการวิเคราะห์ความไม่มั่นคงของลาดดินบดอัดไม่อิมตัวด้วยน้ำเนื่องจากการไหลซึมของน้ำฝนโดยใช้ Finite Element (SEEP/W and SLOPE/W) โดยได้กำหนดทางเลือกในการวิเคราะห์ไว้ทั้งสิ้น 4 แนวทางโดยมีรูปแบบดังแสดงภาพที่ 24 และมีรายละเอียดดังตารางที่ 10 ค่าอัตราส่วนปลอดภัยคำนวณโดยใช้สมการที่ (23)

$$FS = \frac{c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b}{\gamma_t z_w \sin \alpha \cos \alpha} \quad (23)$$

ตารางที่ 10 รายละเอียดการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัยในแต่ละทางเลือก

Scenario	Details of analysis
A	- Conventional stability analysis of embankment assuming saturated conditions - Assuming no infiltration - Shear strength parameter (test type) - Case 1: $c' (=36.8 \text{ kPa})$, $\phi' (=23.1^\circ)$ (CU) - Case 2: $c' (=5 \text{ kPa})$, $\phi' (=23.1^\circ)$ (CD)
B	- Stability analysis of saturated embankment - Assumeing infiltration equal to $k_s (=10^{-7} \text{ m/sec})$ - $c' (=5 \text{ kPa})$, $\phi' (=23.1^\circ)$ (CD)
C	Stage 1 - Stability analysis of unsaturated embankment - $c' (=5 \text{ kPa})$, $\phi' (=23.1^\circ)$ (CD) and $\phi^b (=12.3^\circ)$ - No infiltration - Long term stability (uniform suction of 200 kPa) Stage 2 - Stability analysis of unsaturated embankment - $c' (=5 \text{ kPa})$, $\phi' (=23.1^\circ)$ (CD) and $\phi^b (=12.3^\circ)$ - Infiltration with UCP function - Long term stability (uniform suction of 200 kPa)

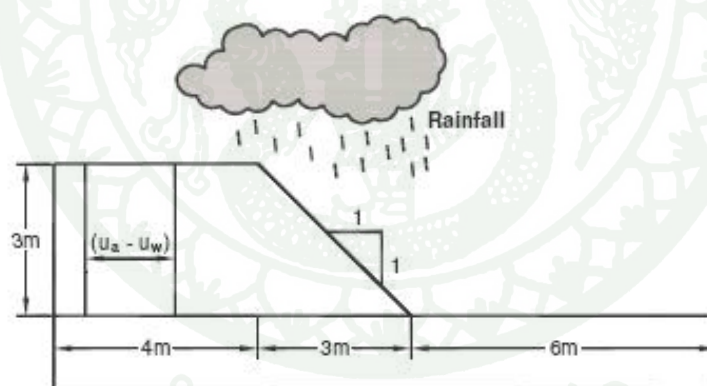
ตารางที่ 10 (ต่อ)

Scenario	Details of analysis
D	- Stability analysis of unsaturated embankment - c (=86.9 kPa), ϕ (=11.2°) (Isotropic confinement undrained test For unsaturated soil, IU) - No infiltration - Short term stability (uniform suction of 200 kPa)

โดยที่ UCP = Unsaturated coefficient of permeability function

k_s = Permeability under saturated condition

200 kPa = ค่าแรงดูดเมทริกเริ่มต้นของคันดินบดอัดที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 13.2%



ภาพที่ 24 รูปตัดของคันดินที่ใช้ในการศึกษา

ที่มา: Won Teak Oh and Vanapalli (2008)

การวิเคราะห์ทั้งสี่ 4 แนวทางโดยใช้ Finite Element สามารถสรุปอัตราส่วนปลอดภัยได้
ดังแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัยในแต่ละทางเลือก

Scenario	Case or Stage	FS
A (Saturated)	Case 1 $c' = 36.8 \text{ kPa}$, $\phi' = 23.1^\circ$	5.35
	Case 2 $c' = 5 \text{ kPa}$, $\phi' = 23.1^\circ$	1.35
B (Saturated +Ponding)	Infiltration equal to $k_s (=10^{-7} \text{ m/sec})$ $c' = 5 \text{ kPa}$, $\phi' = 23.1^\circ$	1.32
C (Unsaturated)	Stage 1	10.26
	$c' = 5 \text{ kPa}$, $\phi' = 23.1^\circ$ and $\phi^b = 12.3^\circ$	
	Long term stability without infiltration	
	Stage 2	1.27
	$c' = 5 \text{ kPa}$, $\phi' = 23.1^\circ$ and $\phi^b = 12.3^\circ$	
	Long term stability with infiltration	
D (Unsaturated)	$c = 86.9 \text{ kPa}$, $\phi = 11.2^\circ$	10.35
	Short term stability	



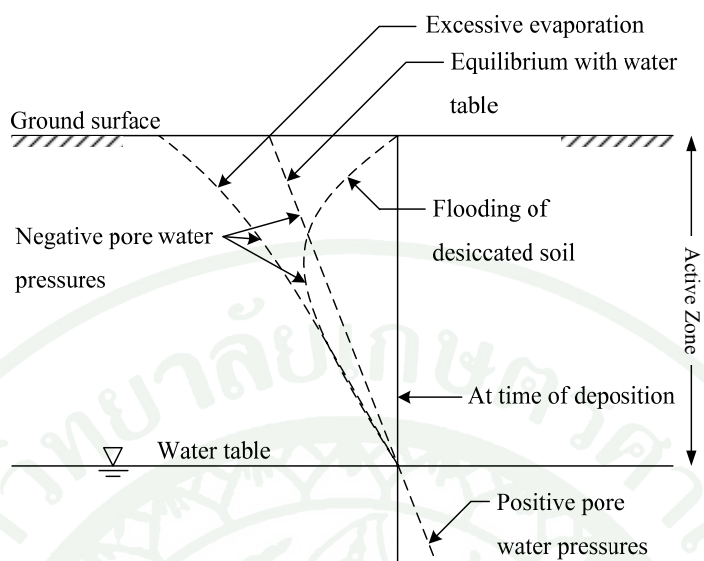
ภาพที่ 25 แรงดันน้ำภายในคันดินเนื่องจากน้ำฝน (40 มม./ชม.) ขณะที่เกิดการพิบัติ

ที่มา: Won Teak Oh and Vanapalli (2008)

ผลการวิเคราะห์จะเห็นว่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ต่ำสุดเกิดในกรณีที่ดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ และมีการไหลซึมของน้ำฝนลงสู่ชั้นดินกรณี C (Stage 2) และจากการศึกษาพบว่าปริมาณน้ำฝนเป็นสาเหตุทำให้เกิด Shallow Circular Failure บริเวณด้านบนเนื่องจากการไหลซึมของน้ำก่อนที่จะเกิดการพิบัติแบบ Infinite Slope

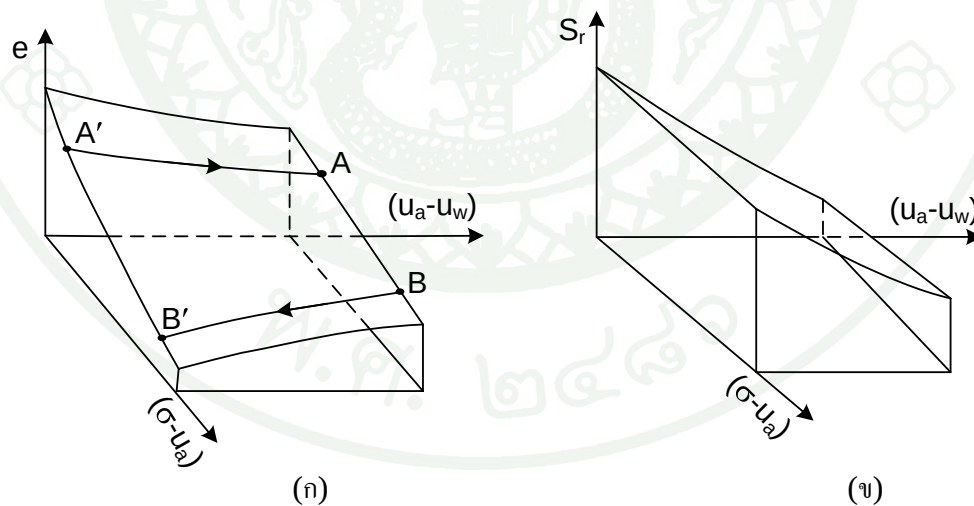
การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินไม่อิ่มน้ำ

อกินิตี (2549) ได้อธิบายการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินไม่อิ่มน้ำไว้ว่าอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำในช่องว่างดินซึ่งมีค่าติดลบ (Negative Pore Water Pressure) หรือภายใต้สภาวะแรงดูด (Suction) ดังภาพที่ 26 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะความชื้นในมวลดินตามฤดูกาลจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำในช่องว่างและปริมาตรของดินนั่นเอง โดยสามารถแสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาตร หน่วยแรงสุทธิตะ ($\sigma - u_a$) และแรงดูด ($u_a - u_w$) ในกราฟสามมิติ ดังแสดงใน ภาพที่ 27ก จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของแรงดูด (Suction, $u_a - u_w$) เทียบเท่ากับการสูญเสียความชื้นของดินส่งผลทำให้ดินหดตัว (Desiccation Shrinkage) (ค่า e ลด) เมื่อค่าหน่วยแรงสุทธิตะ ($\sigma - u_a$) มีค่าน้อย ($A' \rightarrow A$) แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าดินมีโครงสร้างหลวม ดินนั้นอาจยุบตัวได้เมื่อค่า Suction ลดลง โดยเฉพาะเมื่อค่า หน่วยแรงสุทธิตะ มีค่ามาก ($B \rightarrow B'$) นอกจากนั้นเส้นอัตราลักษณะของน้ำในดิน (Soil-Water Characteristic Curve) ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างระดับอิ่มตัวด้วยน้ำ (S_r) หรือ ความชื้นโดยปริมาตร (Volumetric Water Content, $\theta = nS_r$) และแรงดูด (Suction) ดังภาพที่ 27ข ก็ยังเปลี่ยนแปลงได้ตามค่า Confining Pressure ที่เปลี่ยนแปลงไป ดินเหนียวซึ่งมีค่าพลาสติกซิติสูง (High Plasticity Clay) เช่น ดินประเภท Expansive Soils จะมีโอกาสบวมตัวได้มากเมื่อนำไปแช่น้ำ ในขณะที่ดินที่ค่าพลาสติกซิติต่ำ (Low Plasticity Clay) จะเกิดการทรุดตัวได้เมื่อนำไปแช่น้ำดังแสดงในภาพที่ 28 ดังนั้นถ้าในมวลดินมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่ไม่เท่ากัน เช่น ค่าแรงดูดจะเพิ่มมากขึ้นในบริเวณผิวดิน ในอัตราที่มากกว่าในบริเวณในมวลดิน จะทำให้เกิดการหดตัวของดินที่ไม่เท่ากัน และเกิดรอยแตกขึ้นได้



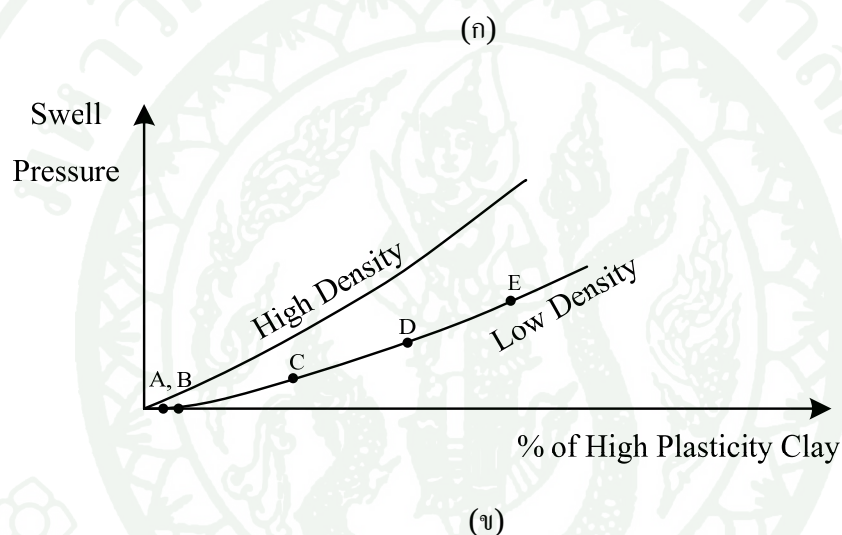
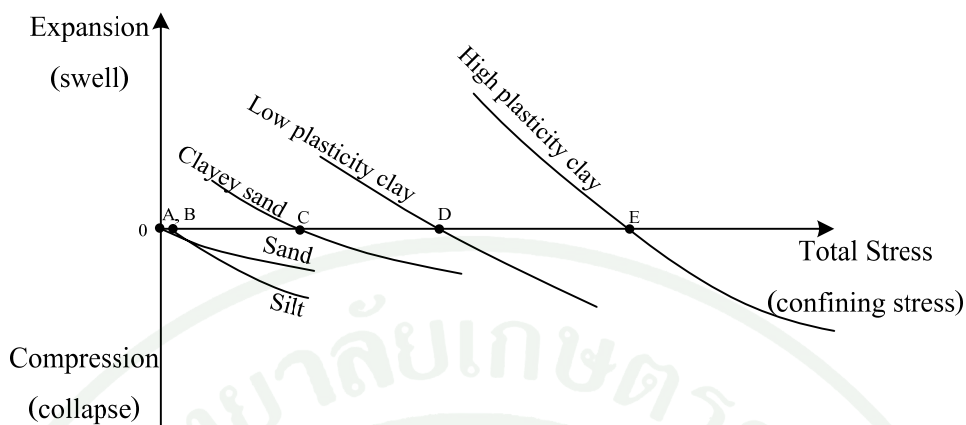
ภาพที่ 26 แรงดันน้ำซึ่งมีค่าติดลบในช่วง Active zone เหนือระดับน้ำใต้ดิน

ที่มา: Fredlund and Rahardjo (1993)



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนช่องว่าง, ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ, หน่วยแรงดันสุทธิ และแรงดูด

ที่มา: Wheeler and Karube (1996)



ภาพที่ 28 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินไม่อุ้มน้ำชนิดต่างๆ เมื่อถูกนำไปแช่น้ำที่
 ค่าหน่วยแรงรวมต่างๆ และค่า Swelling Pressure สำหรับดินเหนียวที่ความแน่นต่างๆ
 (ก) แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินไม่อุ้มน้ำชนิดต่างๆ เมื่อถูกนำไปแช่น้ำที่
 ค่าหน่วยแรงรวมต่างๆ
 (ข) ค่า Swelling Pressure สำหรับดินเหนียวที่ความแน่นต่างๆ

ที่มา: Gibbs (1969)

ทฤษฎีพื้นฐานการไหลของดินไม่อิ่มน้ำ

อกินิตี และอัคคพัฒน์ (2551) ได้อธิบายสมการพื้นฐานสำหรับการไหลของดิน ดังสมการที่ (24)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q = m_w \left(\frac{\partial u_w}{\partial t} \right) \quad (24)$$

เมื่อ ค่า k_x และ k_y คือค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำในแนวแกน x และ y ซึ่งจะแปรผันตามค่าแรงดันน้ำติดลบ, ค่า h คือ ศักย์น้ำรวม (Total Hydraulic Head), ค่า Q คือ ปริมาณน้ำไหลเข้าออกที่ขอบเขต (Applied Boundary Flux), และค่า m_w คือ ความชันของเส้นอรรถลักษณะของน้ำในดิน $m_w = \frac{\partial \theta}{\partial u_w}$ Soil-Water Characteristic Curve วัตถุประสงค์สำคัญในการแก้สมการที่ (24) คือ การหาค่าแรงดันน้ำ u_w สำหรับการคำนวณหน่วยแรงประสิทธิผล σ' ในการคำนวณเสถียรภาพ (Stability) และการเสียรูป (Deformation) ของลาดดินนั่นเอง ทั้งนี้เมื่อพิจารณาสมการที่ (24) ก็จะเห็นได้ชัดเจนว่า ค่าแรงดันน้ำจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่สำคัญสองตัว คือ

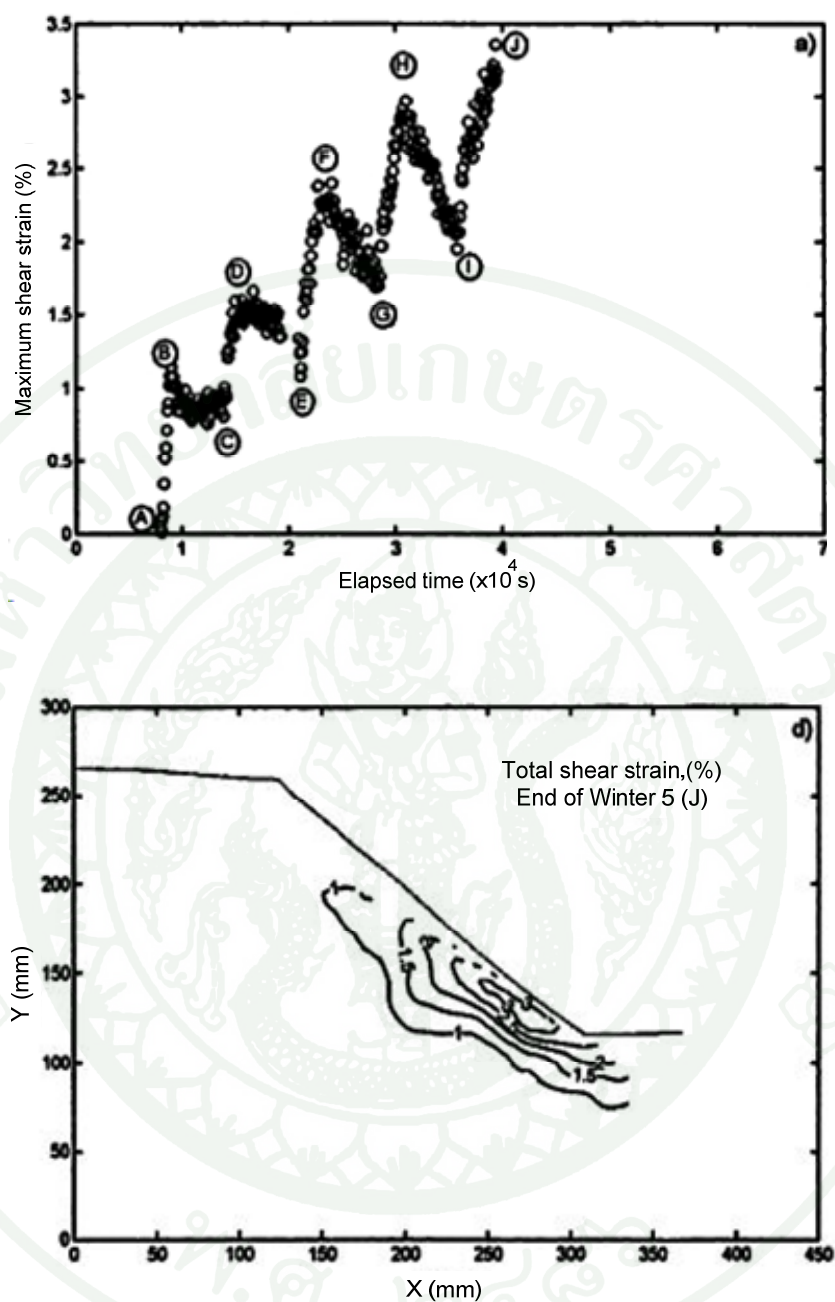
1. การไหลซึมต่อหน่วยพื้นที่ของน้ำฝนเข้าสู่ลาดดินหรือการคายระเหยออกจากลาดดิน (Q)

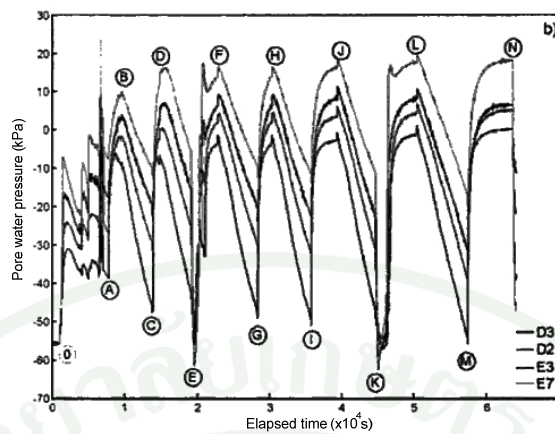
2. อัตราส่วนของความชื้นน้ำต่อความชันของเส้นอรรถลักษณะ $\frac{k}{m_w}$

Ng and Shi (1998) ได้เสนอว่า ดินที่อัตราส่วน $\frac{k}{m_w}$ มีค่าสูง (นั่นคือความชื้นน้ำสูง และความชันเส้นอรรถลักษณะต่ำ) จะส่งผลให้ ระดับน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีฝนตก และน้ำไหลซึมเข้าในลาดดิน

อิทธิพลจากการเปียกสลับแห้งต่อการคืบ กำลังรับแรงเฉือน และเสถียรภาพของลาดดินเหนียว

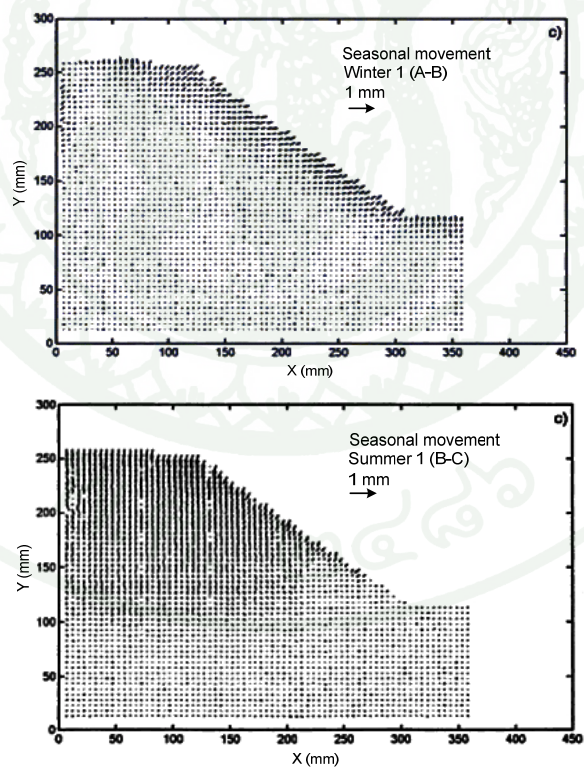
จากการรวบรวมงานวิจัยโดยอภินิติ (2549) พบว่าในประเทศไทยอังกฤษ เมื่อไม่นานมานี้โดย Take and Bolton (2004) และ Take (2003) ได้พบ ว่าอิทธิพลจากการเปียกสลับแห้งเนื่องจากฤดูกาล ส่งผลต่อเสถียรภาพของลาดดินเหนียวได้มาก โดยก่อให้เกิดความเครียดพลาสติก (Plastic Strain) สะสมบริเวณตีนของลาดดิน และเกิดรอยแตก Tension Crack ได้บริเวณด้านบนของลาดดังกล่าวภาพที่ 29 โดยพบว่าการเปียกสลับแห้งนี้ส่งผลให้เกิดแรงดันน้ำด้านลบและการหดตัวในช่วงฤดูแล้ง ดังภาพที่ 30 และเกิดแรงดันน้ำด้านบวก ดินเกิดการการบวมตัวและเคลื่อนตัวด้านข้างออกจากลาดเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก อนึ่ง แม้ว่าแรงดันน้ำด้านบวกที่เกิดขึ้นนี้จะไม่เพียงพอที่จะทำให้ลาดเกิดการพิบัติในทันที ($FS > 1$) แต่ก็ทำให้เกิดการคืบและเกิดรอยแตกร้าวได้ ทั้งนี้ พบว่าความเครียดที่เกิดขึ้นในลักษณะซ้ำไปมานี้ (Cyclic Strain) จะทำให้กำลังเฉือนที่เกิดขึ้น (Mobilized Shear Strength) มีค่าลดลงจนถึงจุด Critical State หรือ Fully Soften ได้ ลักษณะดังกล่าวจะส่งผลให้เกิดการพิบัติของลาดแบบ Progressive Failure หรือ Delay Failure โดยความรุนแรงจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อลาดดินเป็นดินจำพวกพลาสติกชนิดสูง หรือพวกเวอร์ทิซอลส์ (Vertisol) ซึ่งกำลังอาจจะลดต่ำลงถึงจุด Residual Strength ได้ ซึ่งพบว่ามีค่ากำลังต่ำกว่ากำลังในสภาวะ Peak Strength อยู่มาก และยังมี การยึดหดตัวเกิดการแตกร้าวสูง เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบลักษณะการพิบัติโดยสาเหตุดังกล่าวดังแสดงในภาพที่ 31 และ 32 พบว่ามีความเป็นไปได้สูงที่การคืบเนื่องจากการเปียกสลับแห้งนี้จะ เป็นสาเหตุหนึ่งของการแตกร้าวของลาดคันทางในภาคกลางเช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่มีความเปลี่ยนแปลงของความชื้นดินในช่วงฤดูแล้งและฤดูฝน อาทิบริเวณที่มีน้ำท่วมขังในฤดูฝนและมีดินไม่ไผ่มีอัตราการคายระเหยของน้ำจากดินได้มากในช่วงฤดูแล้ง





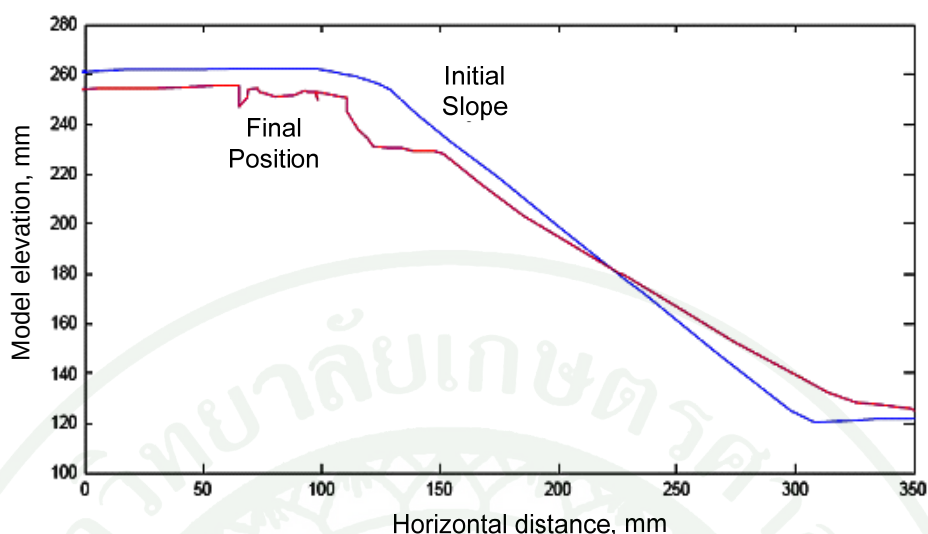
ภาพที่ 30 แรงดันน้ำระหว่างการทดสอบ มีค่าติดลบในช่วงฤดูแล้งและมีค่าบวกในฤดูฝน

ที่มา: Take and Bolton (2004)



ภาพที่ 31 ทิศทางของ Vector การเคลื่อนที่ในฤดูฝนและฤดูแล้ง

ที่มา: Take and Bolton (2004)



ภาพที่ 32 เปรียบเทียบลักษณะลาดดินเหนียวก่อนและหลังการเป็ยกลบแห้ง 6 ครั้ง

ที่มา: Take and Bolton (2002)

การเกิดความเสียหายบริเวณไหล่ทางหลวงในพื้นที่ภาคกลาง

ความหมายของไหล่ทาง (Shoulder) ตามคำนิยามของ AASHTO หมายถึง ส่วนของโครงสร้างทางที่อยู่ติดกับผิวจราจร โดยทำหน้าที่เป็นส่วนรองรับด้านข้างของชั้นพื้นทางและชั้นผิวทาง รวมทั้งเป็นบริเวณที่หยุดรถในกรณีที่เกิดเหตุฉุกเฉินต่างๆ

นักวิจัยและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับงานทาง (เช่น ยงยุทธ และคณะ, 2547; สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ สำนักบริหารบำรุงทาง, กรมทางหลวง, 2550; Federal Highway Administration, 2003) ได้สรุปลักษณะการแตกร้าวของถนนรวมถึงไหล่ทางตามชนิดของถนน ซึ่งแบ่งออกเป็น ถนนลาดยาง (Asphalt Pavement) และ ถนนคอนกรีต (Concrete Pavement) ซึ่งสาเหตุการแตกร้าวของผิวทางและบริเวณไหล่ทางเกิดจากปัจจัยต่างๆ เช่น น้ำหนักบรรทุก (Wheel Load), สภาพแวดล้อม (Environment), การระบายน้ำที่ไม่เหมาะสม (Poor Drainage), การใช้วัสดุที่ไม่มีคุณภาพ (Material Deficiency), การก่อสร้างไม่ได้มาตรฐาน (Construction Deficiency) และสาเหตุปัจจัยภายนอกอื่นๆ เป็นต้น สรุปลักษณะการแตกร้าวที่พบบริเวณไหล่ทางถนนลาดยางและถนนคอนกรีตมีดังต่อไปนี้

ลักษณะการแตกร้าวที่พบบริเวณไหล่ทางของถนนคอนกรีตและถนนลาดยาง สามารถจำแนกออกเป็น 5 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้ คือ 1.รอยแตกจากความล้า (Fatigue Crack or Alligator Crack), 2. รอยแตกที่ขอบผิวทาง (Edge Crack), 3. รอยแตกจากการหดตัว (Shrinkage Crack or Block Crack), 4. รอยแตกสะท้อน (Reflective Crack) และ 5. รอยแตกแบบเลื่อนไถล (Slippage Crack) โดยลักษณะความเสียหายที่มักพบบริเวณไหล่ทางหลวงในพื้นที่ภาคกลางคือ รอยแตกแนวขอบผิวทาง (Edge Crack) ดังภาพที่ 33



ภาพที่ 33 ลักษณะรอยแตกแนวขอบผิวทาง (Edge Crack)

ความเสียหายจากการแตกร้าวและการทรุดตัวของบริเวณไหล่ทางมีหลากหลายสาเหตุ ซึ่งผลจากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา (ขงยุทธ และคณะ, 2547) และจากประสบการณ์ผู้เชี่ยวชาญวิศวกรรมงานทาง สามารถสรุปปัจจัยที่สำคัญ 6 ปัจจัย ที่ก่อให้เกิดการแตกร้าวและการทรุดตัวของบริเวณไหล่ทาง ดังนี้

1. คุณสมบัติและชั้นดินใต้คันทาง ชั้นดินฐานรากของคันทางเป็นดินเหนียวอ่อน ทำให้กำลังรับน้ำหนักใต้คันทางต่ำและอาจส่งผลให้เกิดทรุดตัว, การเคลื่อนตัว หรือมีความรุนแรงจนเกิดการวิบัติบริเวณดินลาดคันทาง (Toe Failure) แนวการวิบัติจะส่งผลไปถึงชั้นทางและไหล่ทางเป็นแนววงกว้าง ดังภาพที่ 34

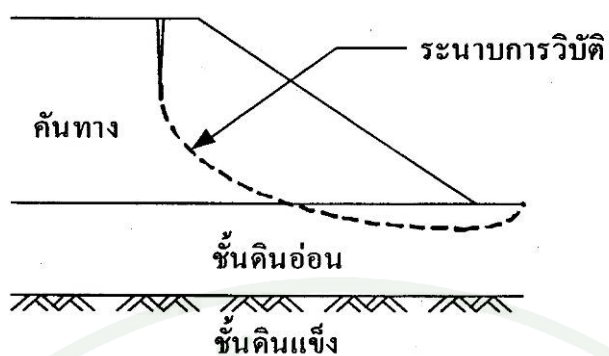
2. วัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้างทาง วัสดุในงานถมคันทางอาจมีคุณสมบัติการหดตัวหรือบวมตัวสูง ซึ่งการหดตัวและบวมตัวส่งผลต่อการแตกร้าวของดินถมคันทางภายในและสะท้อนเป็นแนวยาวขึ้นไปถึงชั้นทางและไหล่ทางตามแนวยาวของถนน ดังภาพที่ 35 อีกทั้งวัสดุที่ใช้ในการเชื่อมรอยต่อของไหล่ทางกับถนนอาจไม่มีคุณสมบัติเพียงพอต่อการยึดเหนี่ยวและป้องกันการซึมผ่านของน้ำ

3. รูปแบบแปลนถนน การกำหนดความสูงและความลาดของคันทางที่ไม่เหมาะสมกับคุณสมบัติของดิน หรือชั้นดินฐานราก รวมทั้งแบบการขยายความกว้างของทางที่ไม่เหมาะสม ส่งผลให้เกิดการวิบัติของลาดคันทาง รวมถึงการกำหนดแนวการระบายน้ำของถนนเมื่อมีฝนตกไม่ดีทำให้น้ำท่วมขังเป็นเวลานานส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินถมคันทาง ดังภาพที่ 36

4. งานควบคุมการก่อสร้าง การควบคุมงานก่อสร้างไม่ตระหนักถึงความสำคัญของไหล่ทาง โดยขาดการตรวจสอบและเข้มงวดในการก่อสร้างไหล่ทาง ทำให้ความหนาแน่นบริเวณไหล่ทางต่ำกว่ามาตรฐาน ส่งผลต่อการทรุดตัวเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกและเกิดการเคลื่อนตัวด้านข้างได้ง่าย ซึ่งเป็นเหตุให้ไหล่ทางแตกร้าวและทรุดตัวเป็นแนวยาวเฉพาะไหล่ทาง ดังในภาพที่ 37

5. ปริมาณการจราจร และน้ำหนักรบรรทุก ปริมาณการจราจรมากขึ้น และน้ำหนักรบรรทุกสูงกว่าการออกแบบในครั้งแรก ทำให้ดินถมลาดคันทางมีค่าความปลอดภัยลดลง และมีโอกาสเกิดการเคลื่อนตัว ซึ่งส่งผลต่อการแตกร้าวและทรุดตัวไหล่ทาง

6. ปริมาณน้ำฝนในช่วงฤดูฝนและฤดูร้อน ปริมาณน้ำมากในช่วงฤดูฝนทำให้ดินบริเวณลาดคันทางมีความชุ่มชื้นสูง ก่อให้เกิดการขยายตัวของมวลดิน ในกรณีที่ดินมีคุณสมบัติการหด-บวมตัวสูงจะทำให้ดินบวมตัวและเมื่อผ่านช่วงฤดูฝนปริมาณความชื้นในดินลดลงอย่างรวดเร็ว เพราะสภาพอากาศที่ร้อนทำให้ดินคลายความชื้นและหดตัว ซึ่งการเกิดซ้ำๆ อาจก่อให้เกิดรอยแตกสำหรับดินลาดคันทางและส่งผลให้น้ำไหลซึมลงในดินถมคันทางได้ง่าย



ภาพที่ 34 การเกิดรอยแตกที่ขอบผิวทางในถนนลาดยางเมื่อก่อสร้างคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อน

ที่มา: ขงยุทธ และคณะ (2547)



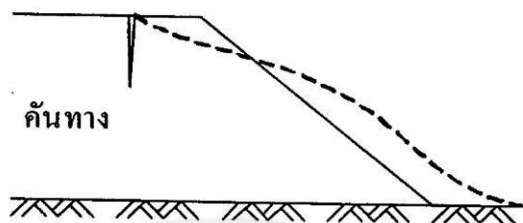
ภาพที่ 35 การเกิดรอยแตกที่ขอบผิวทางในถนนลาดยางโดยไม่มีร่องรอยของการทรุดตัว

ที่มา: ขงยุทธ และคณะ (2547)



ภาพที่ 36 การเกิดรอยแตกที่ขอบผิวทางในถนนลาดยางเมื่อเกิดการลดระดับของน้ำข้างทาง

ที่มา: ขงยุทธ และคณะ (2547)



ภาพที่ 37 การเกิดรอยแตกที่ขอบผิวทางในถนนลาดยางเมื่อเกิดการพังทลายของวัสดุในบริเวณไหล่ทาง

ที่มา: ยงยุทธ และคณะ (2547)

ประวัติสายทาง

ทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 357 สายเลียงเมืองสุพรรณบุรีสร้างขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ในการลดเวลาการเดินทาง และแก้ไขปัญหาการจราจรที่คับคั่งในตัวเมือง ซึ่งถนนสายนี้จะมีลักษณะเป็นวงแหวน มีระยะทางประมาณ 42 กม. มีทั้งสิ้น 9 โครงการดังแสดงในภาพที่ 38 คือ

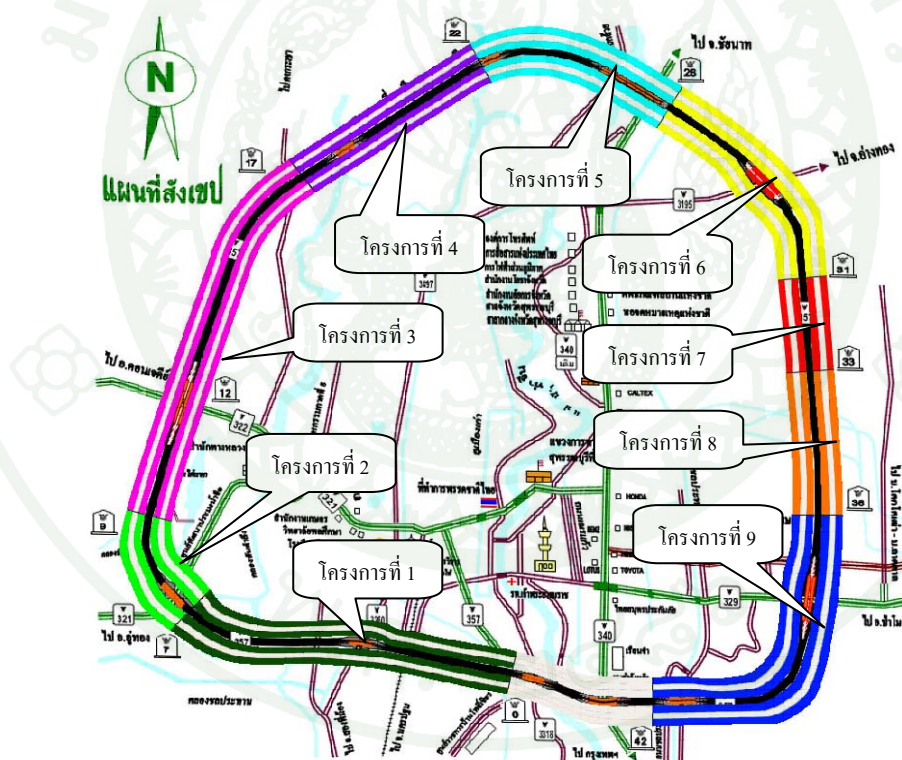
1. ทางเลียงเมืองสุพรรณบุรีสาย 357 ด้านใต้ กม. 0+000.000 ถึง กม.6+122.508
2. ทางเลียงเมืองสุพรรณบุรีสาย 357 ด้านเหนือตอน 1A กม. 7+596.244 ถึงกม.9+600.000
3. ทางเลียงเมืองสุพรรณบุรีสาย 357 ด้านเหนือตอน1B กม. 9+600.000 ถึง กม.17+599.996
4. ทางเลียงเมืองสุพรรณบุรีสาย 357 ด้านเหนือตอน 2 (ส่วนที่ 1) กม.17+599.996 ถึง กม.22+245.000
5. ทางเลียงเมืองสุพรรณบุรีสาย 357 ตอน 3 (ส่วนที่ 1) กม. 22+500.000 ถึง กม.26+150.000
6. ทางเลียงเมืองสุพรรณบุรีสาย 357 ด้านเหนือตอน 4 กม. 26+150.000 ถึง กม.31+050.000

7. ทางเลี้ยวเมืองสุพรรณบุรีสาย 357 ตอน 3 (ส่วนที่ 2) กม. 31+050.000 ถึง กม.33+150.000

8. ทางเลี้ยวเมืองสุพรรณบุรีสาย 357 ด้านเหนือตอน 5 (ส่วนที่ 2) กม.33+150.000 ถึง กม.36+200.000

9. ทางเลี้ยวเมืองสุพรรณบุรีสาย 357 ด้านเหนือตอน 5 (ส่วนที่ 1) กม.36+200.000 ถึง กม.42+200.000

การศึกษาครั้งนี้ส่วนหนึ่งเป็นโครงการศึกษาการแตกร้างและการทดด้วยบริเวณไหล่ทางหลวงในพื้นที่ภาคกลาง สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง



ภาพที่ 38 สถานที่ตั้งโครงการก่อสร้างทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 357 สายเลี้ยวเมืองสุพรรณบุรี ทั้ง 9 โครงการ

ที่มา: รายงานฉบับสุดท้ายโครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 357 (2549)

สภาพพื้นที่ก่อสร้างเดิม

ลักษณะภูมิประเทศบริเวณโครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 357 เป็นที่ราบลุ่มแม่น้ำ ดังนั้นสภาพดินในบริเวณนี้จึงเป็นดินที่เกิดจากการตกตะกอนในแม่น้ำ บริเวณที่ก่อสร้างส่วนใหญ่เป็นทุ่งนา และมีน้ำขัง สภาพดินเดิมเป็นดินเหนียวปนทราย มีหน้าดินเป็นดินสีดำ และมีคุณสมบัติการยุบตัวค่อนข้างสูงและคุณสมบัติการรับน้ำหนักค่อนข้างต่ำ (สรุปรายงานเดือนเมษายน โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 357 กม. 26+150.000 ถึง กม. 31+050.000, 2552)

สภาพธรณีวิทยาบริเวณโครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 357 ครอบคลุม 6 ชุดดินที่มีการจำแนกโดยกรมพัฒนาที่ดิน ได้แก่ ชุดดินที่ 1, 2, 3, 7, 21, และ 33

โครงสร้างถนน

โครงสร้างถนนของทางหลวงหมายเลข 357 สายเลี่ยงเมืองสุพรรณบุรี เป็นโครงสร้างมาตรฐานชั้นทางพิเศษ ชนิดผิวทางคอนกรีตเสริมเหล็กหนา 25 cm แบบ 4 Lane Divided Highway (Depress Median) ช่องจราจรด้านกว้างช่องละ 3.50 m ถนนมีความชัน 2% ไหล่ทางเป็น Asphaltic Concrete 2 ชั้น หนาชั้นละ 5 cm ไหล่ทางด้านนอกความกว้าง 2.50 m ไหล่ทางด้านในความกว้าง 1.50 m ไหล่ทางทั้งสองด้านมีความชัน 1 ต่อ 2 เกาะกลางเป็นร่องระบายน้ำกว้าง 5.25-17.00 m ดังแสดงในภาพที่ 39

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

อุปกรณ์และวิธีการวิจัยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือในส่วนของการปฏิบัติงานในภาคสนาม และการปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการ

การปฏิบัติงานในภาคสนาม

อุปกรณ์

1. การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ
 - 1.1 กระบอกลูก PVC
 - 1.2 กระบอกลูกเก็บตัวอย่าง
 - 1.3 ตู้น้ำหนักสำหรับตอกเก็บตัวอย่าง
2. การติดตั้งเครื่องมือวัดตรวจวัดทางธรณีเทคนิค (Geotechnical Instrument)
 - 2.1 เครื่องมือวัดแรงดันดิน (KU-Tensiometer)

สถานที่

พื้นที่บริเวณทางหลวงหมายเลข 357 สายเลี้ยวเมืองสุพรรณบุรี

การปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการ

อุปกรณ์

1. ชุดเครื่องมือทดสอบ ชีดจำกัดความชื้นเหลวของดิน (Atterberg's Limit Test) ตามมาตรฐาน ASTM D4318-98
2. ชุดเครื่องมือทดสอบ ความถ่วงจำเพาะของดิน (Specific Gravity Test) ตามมาตรฐาน ASTM D854-98
3. ชุดเครื่องมือทดสอบการทดสอบหาปริมาณความชื้นในมวลดิน (w_n) ASTM D2216 – 98
4. ชุดเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Direct Shear Test) ตามมาตรฐาน ASTM D3080-90
5. ชุดเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Direct Shear Test) ชนิดวัดแรงดูดโดยใช้ KU-Tensiometer อ้างอิงมาตรฐาน ASTM D3080-90
6. ชุดเครื่องมือทดสอบหาเส้นอรรถลักษณะของดิน (Soil-Water Characteristic Curve) โดยใช้ KU-Tensiometer
7. ชุดเครื่องมือทดสอบหาเส้นอรรถลักษณะของดิน (Soil-Water Characteristic Curve) ตามมาตรฐาน ASTM D6836-02 (Method B)
8. ชุดเครื่องมือทดสอบหาเส้นอรรถลักษณะของดิน (Soil-Water Characteristic Curve) โดยใช้ KU-Total Suction Probe
9. เครื่องคอมพิวเตอร์

10. โปรแกรม FEM สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ การไหลซึม และการเคลื่อนตัว

สถานที่

1. ห้องวิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรมปฐพี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ
2. ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ
3. ห้องปฏิบัติการปฐพีวิทยา ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ

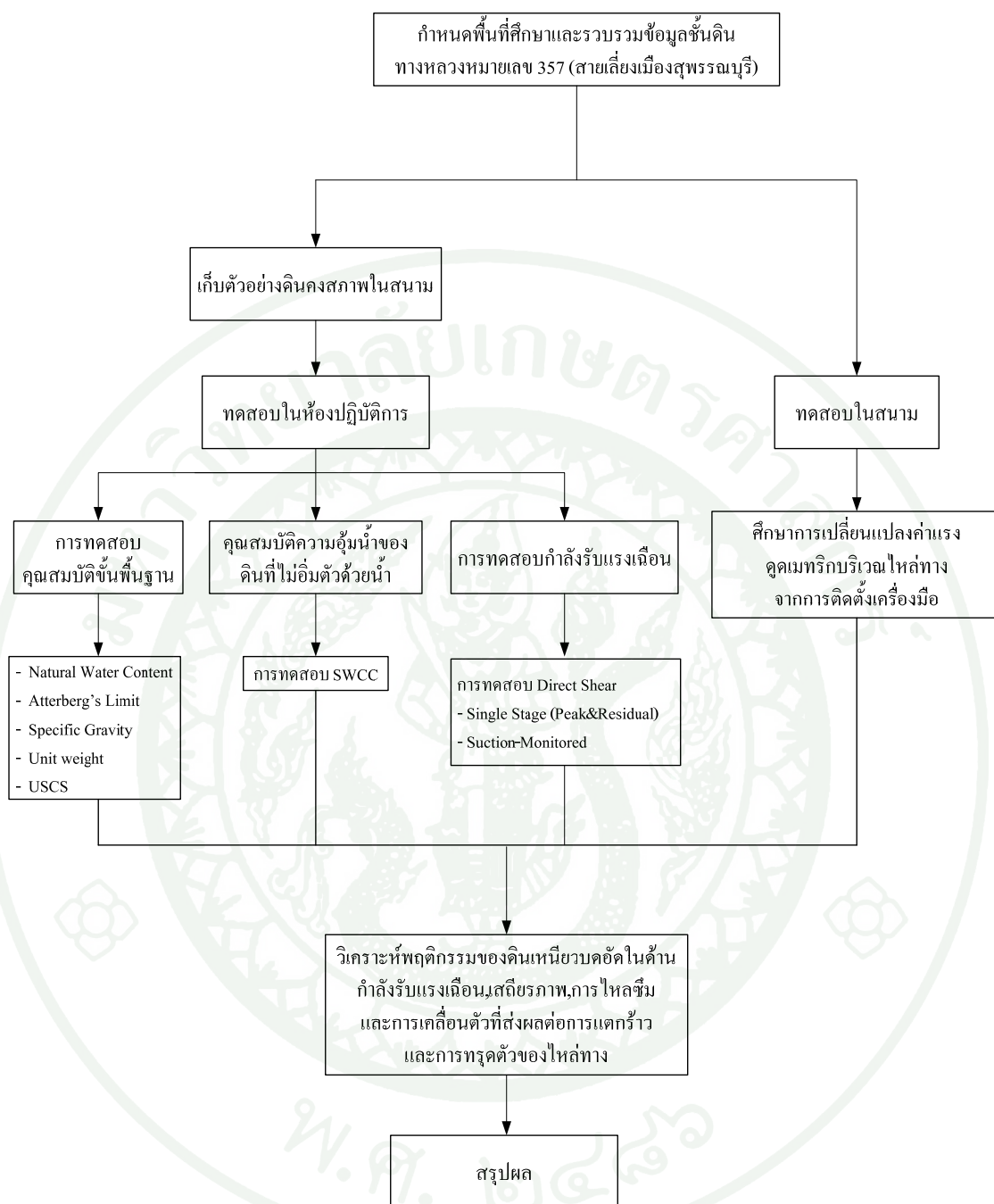
วิธีการ

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังภาพที่ 40 ประกอบไปด้วย การศึกษารวบรวมข้อมูลชั้นดิน เก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพมาทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งประกอบไปด้วยการทดสอบ คุณสมบัติชั้นพื้นฐาน, คุณสมบัติความชุ่มน้ำของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ, การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน รวมถึงการติดตั้งเครื่องมือวัดในสนามเพื่อศึกษาค่าแรงคูคเมทริก แล้วนำมาวิเคราะห์พฤติกรรมของดินเหนียวบดอัดในด้านกำลังรับแรงเฉือน, เสถียรภาพ, การไหลซึม และการเคลื่อนตัว เพื่อนำไปสรุปผลการวิจัยเพื่อนำไปใช้งาน

การกำหนดพื้นที่ศึกษานั้นจะพิจารณาจากการลงพื้นที่เพื่อสำรวจความเสียหายของไหล่ทาง แอสฟัลต์คอนกรีตบริเวณทางหลวงหมายเลข 357 สายเลี่ยงเมืองสุพรรณบุรี และเก็บตัวอย่างดิน เบื้องต้นโดยสว่านมือ (Hand Auger) เพื่อนำมาทดสอบขีดจำกัดความชื้นเหลวของดิน (Atterberg's Limit Test) จากนั้นจึงพิจารณากำหนดพื้นที่ที่จะทำการศึกษา

ในส่วนของการรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นเพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติของดินในบริเวณทางหลวง หมายเลข 357 สายเลี่ยงเมืองสุพรรณบุรีนั้นจะทำการรวบรวมข้อมูลในด้านต่างๆ ได้แก่

1. ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน จากรายงานโครงการศึกษาการแตกร้าวและการทรุดตัว บริเวณไหล่ทางหลวงในพื้นที่ภาคกลาง ของสำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง
2. ลักษณะชนิดกลุ่มดินในพื้นที่จังหวัดสุพรรณบุรี ของกรมพัฒนาที่ดิน



ภาพที่ 40 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1. การกำหนดพื้นที่ศึกษาและรวบรวมข้อมูลชั้นดิน

1.1 การกำหนดพื้นที่ศึกษา

การกำหนดพื้นที่ศึกษานั้นจะดำเนินการโดยนำตัวอย่างดินมาทำการทดสอบหาค่า Atterberg's Limits โดยทำการเก็บตัวอย่างดินโดยใช้ส่วนมือ (Hand Auger) ดังภาพที่ 41 จากบริเวณซึ่งพบรอยแตกและการทรุดตัวของบริเวณไหล่ทางที่รุนแรงกับบริเวณซึ่งไม่พบรอยแตกหรือรอยแตกบริเวณไหล่ทางไม่มีความรุนแรงดังภาพที่ 42

1.2 การรวบรวมข้อมูลชั้นดิน

ข้อมูลชั้นดินได้ทำการรวบรวมจากรายงานโครงการศึกษาการแตกร้าวและการทรุดตัวของบริเวณไหล่ทางหลวงในพื้นที่ภาคกลาง ของสำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง (บารเมศ และคณะ, 2553) พบว่าในบริเวณซึ่งพบรอยแตกและการทรุดตัวของบริเวณไหล่ทางที่รุนแรงนั้น ในชั้นดิน Subgrade เป็นชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff Clay: CL-CH) มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ย (γ) 1.85 t/m^3 , ความชื้นในมวลดิน (W_p) 23 – 27 %, ดัชนีความเหลว (LL) 48-49 %, ดัชนีความเหนียว (PI) 25-31 % และค่า N-SPT 10 blows/ft และได้ชั้นดิน Subgrade เป็นดินเดิม ซึ่งประกอบด้วย ชั้น Stiff Clay (CH) หนา 2.50 เมตร, ชั้น Very Stiff Clay (CL-CH) หนา 3.00 เมตร, ชั้น Medium Dense Silty Sand (SM) หนา 2.50 เมตร, ชั้น Dense Silty Sand (SP-SM) หนา 2.50 เมตร และ ชั้นสุดท้ายของการเจาะสำรวจคือ Hard Clay (CL-CH) หนามากกว่า 5.00 เมตรตามลำดับ โดยมีรายละเอียดสรุปในภาพที่ 43 บริเวณซึ่งไม่พบรอยแตกหรือรอยแตกบริเวณไหล่ทางไม่มีความรุนแรง พบว่าชั้นดิน Subgrade เป็นชั้นดินเหนียวแข็ง (Hard Clay: CL) มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ย (γ) 2.14 t/m^3 , ความชื้นในมวลดิน (W_p) 15-23%, ดัชนีความเหลว (LL) 35-39%, ดัชนีความเหนียว (PI) 16-23% และค่า N-SPT 34 blows/ft ได้ชั้น Subgrade ลงมาเป็นดินเดิม ซึ่งมีชั้น Stiff Clay (CH) หนา 3.00 เมตร, ชั้น Very Stiff Clay (CH) หนา 2.50 เมตร, ชั้น Medium Dense Silty Sand (SM, SP-SM) หนา 5.0 เมตร, ชั้น Very Stiff Clay (CH) หนา 1.00 เมตร, ชั้น Hard Clay (CL) หนา 3.50 เมตร และ ชั้นสุดท้ายของการเจาะสำรวจคือ Very Dense Silty Sand (SM) หนามากกว่า 4.00 เมตรตามลำดับ โดยมีรายละเอียดสรุปในภาพที่ 44 จากลักษณะดินฐานรากที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมค่อนข้างดีจึงกล่าวได้ว่า การเกิดรอยแตกร้าวไม่น่าจะเกิดจากการบีบอัดของชั้นดินฐานราก (Bearing Capacity Failure)

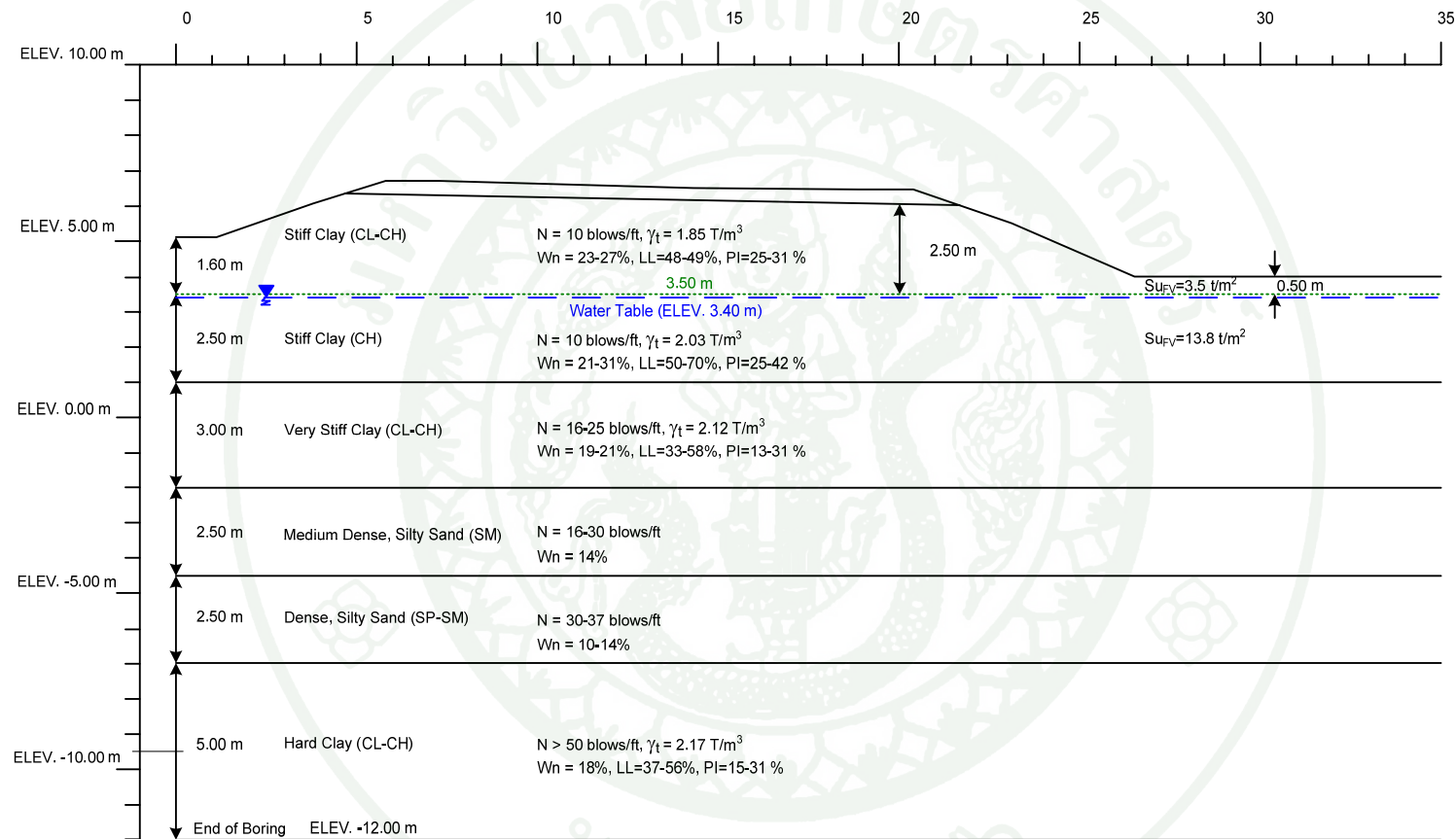
ข้อมูลดินทางด้านปฐพีวิทยาในพื้นที่บริเวณโดยรอบทางหลวงหมายเลข 357 สายเลียงเมือง สุพรรณบุรีนั้น พบว่ามีชุดดินที่มีลักษณะคล้ายดินเหนียวสีคล้ำที่ยึดหดตัว หรือ เวอร์ทิซอลส์ (Vertisols) กระจายอยู่ในพื้นที่ดังกล่าว ดังแสดงในภาพที่ 45



ภาพที่ 41 การเก็บตัวอย่างดินโดยสว่านมือ (Hand Auger) ในพื้นที่ที่ทำการศึกษา

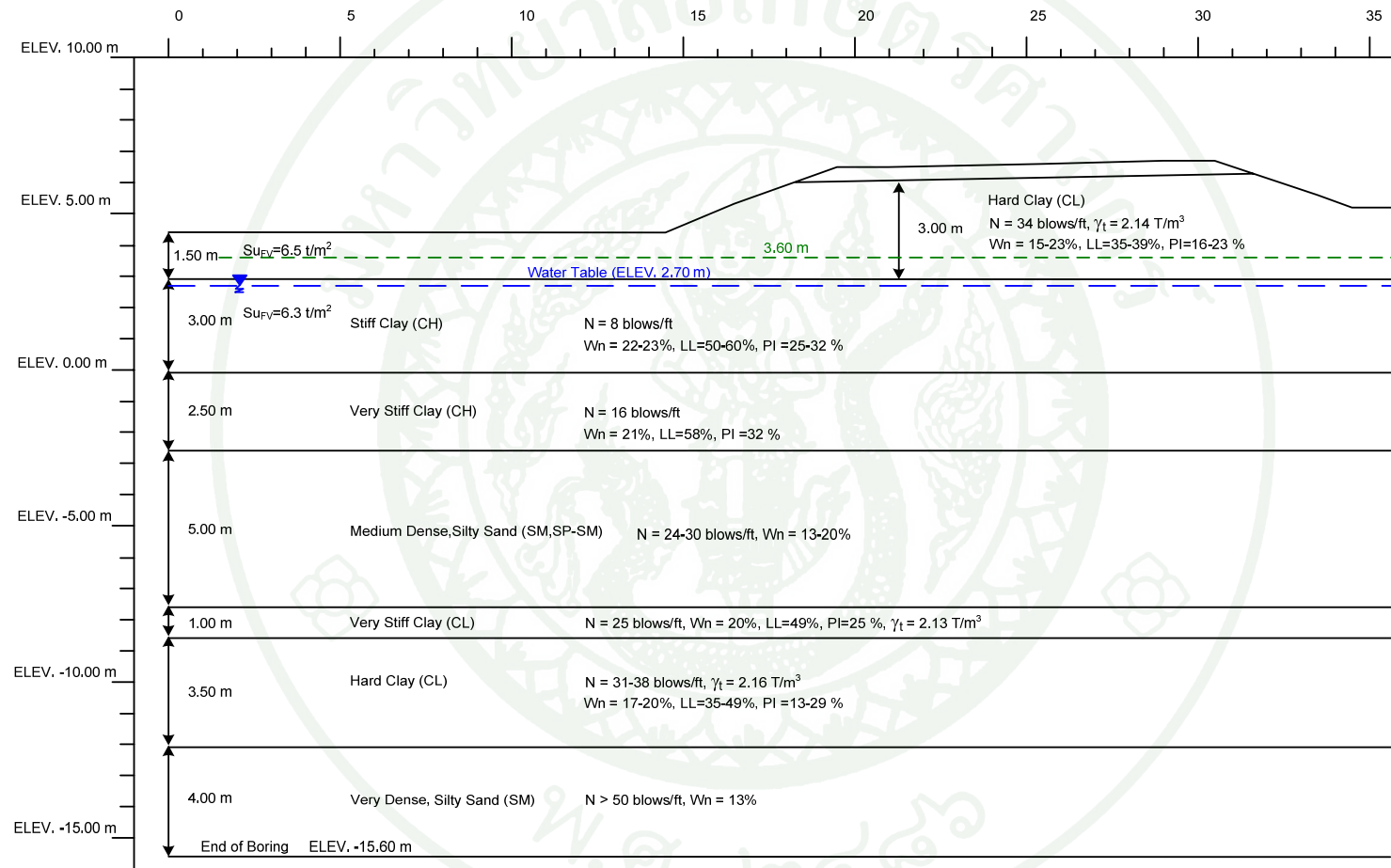


ภาพที่ 42 พื้นที่บริเวณซึ่งพบรอยแตกและการทรุดตัวของบริเวณไหล่ทางที่รุนแรงกับบริเวณซึ่งไม่พบรอยแตกหรือรอยแตกบริเวณไหล่ทางไม่มีความรุนแรง



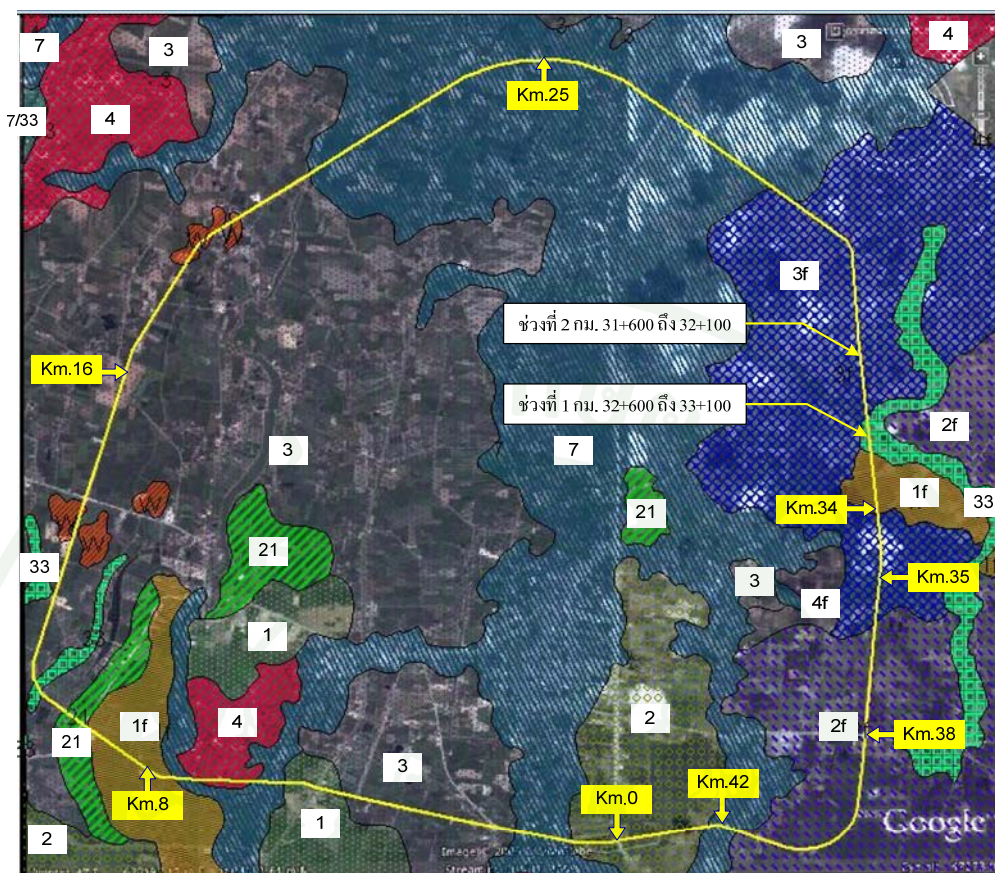
ภาพที่ 43 ชั้นดินต่างๆของผลการเจาะสำรวจชั้นดินบริเวณซึ่งพบรอยแตกและการทรุดตัวบริเวณไหล่ทางที่รุนแรง

ที่มา: บารเมศ และคณะ (2553)



ภาพที่ 44 ชั้นดินต่างๆ ของผลการเจาะสำรวจชั้นดินบริเวณ ซึ่งไม่พบรอยแตกหรือรอยแตกบริเวณไหล่ทางไม่มีความรุนแรง

ที่มา: บารเมศ และคณะ (2553)



ภาพที่ 45 ชุดดินที่มีลักษณะพฤติกรรมแบบเวอร์ทีซอลล์ (Vertisol) บริเวณทางหลวงหมายเลข 357 สายเลี้ยวเมืองสุพรรณบุรี

2. การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ (Undisturbed Sample)

ตัวอย่างดินแบบคงสภาพเก็บโดยการตอกระบอกเปลือกบางซึ่งมีกระบอก PVC ภายใน (นงลักษณ์, 2547) โดยมีอุปกรณ์ต่างๆดังแสดงในภาพที่ 46 ซึ่งประกอบไปด้วยกระบอกเก็บตัวอย่าง, กระบอก PVC, ตั้มน้ำหนักสำหรับตอกเก็บตัวอย่าง ภาพที่ 47 แสดงการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ โดยหลังจากที่นำ PVC ออกจากกระบอกเปลือกบางแล้วจะหุ้มตัวอย่างดินด้วยพลาสติกใสแล้วห่อด้วยแผ่นเปลวอะลูมิเนียมหรือฟรอยด์ หลังจากนั้นนำตัวอย่างเคลือบด้วย Paraffin เหลวเพื่อกันการสูญเสียความชื้นของตัวอย่าง การเก็บตัวอย่างดินนั้นจะครอบคลุมในส่วนของดินเหนียวบดอัดที่ใช้เป็นวัสดุกันทางและดินฐานรากเพื่อนำไปใช้ในการทดสอบเส้นอัตราลักษณะของน้ำในดิน (SWCC) และการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน โดยผลการทดสอบที่ได้จะนำไปใช้เป็นข้อมูลเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของดินเหนียวบดอัดต่อไป



ภาพที่ 46 อุปกรณ์การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ



(ก)



(ข)

ภาพที่ 47 แสดงขั้นตอนการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ

(ก) ตอกกระบอกลีอกบางซึ่งมีกระบอกลีอก PVC อยู่ภายใน

(ข) เคลือบตัวอย่างดินด้วย Paraffin เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น

3. การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

3.1 การทดสอบคุณสมบัติขั้นพื้นฐาน

ในส่วนนี้จะเป็นการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างดินตามมาตรฐาน ASTM โดยทำการทดสอบดังนี้

- การทดสอบความชื้นในมวลดิน (Water Content) ASTM D 2216 - 98
- การทดสอบพิกัดแอดเตอร์เบอร์ก (Atterberg's Limit) ASTM D 4318 - 98
- การทดสอบความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (G_s) ASTM D 854 - 98
- การทดสอบหาหน่วยน้ำหนัก (γ_t)
- การกระจายตัวของเม็ดดิน (Grain Size Distribution Test) ASTM D422-63

นอกจากนั้นยังจำแนกชนิดของดินโดยวิธี Unified Soil Classification (USCS) เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการทดสอบเบื้องต้นดังที่ได้ให้รายละเอียดไว้ และนำไปใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของลาดคันทางต่อไป

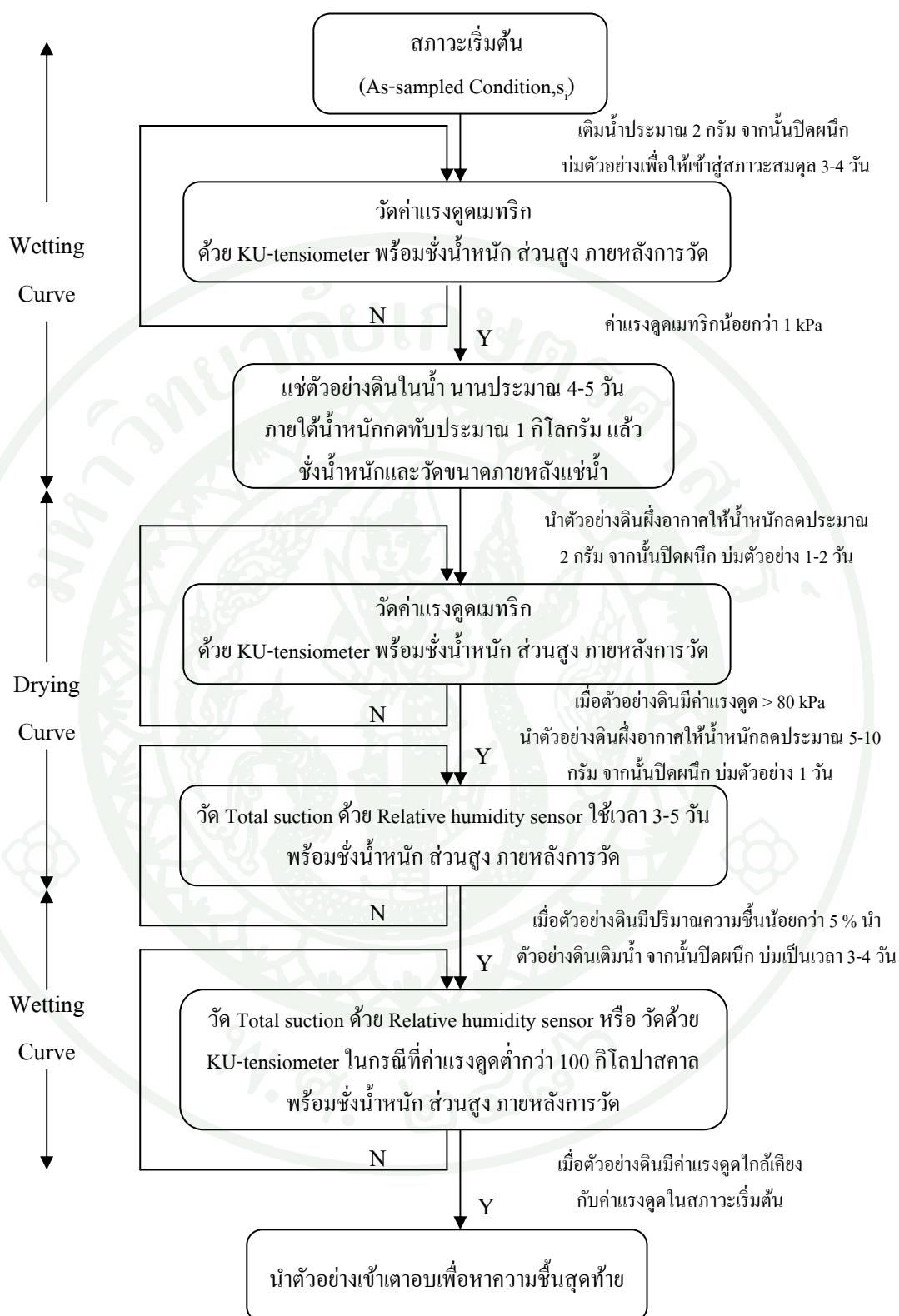
3.2 การทดสอบเส้นอรรถลักษณะของน้ำในดิน(SWCC)

การทดสอบจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วงการทดสอบคือในช่วงแรงดูด 0-90 kPa ใช้เครื่องมือ KU-Tensiometer ช่วงที่สองเมื่อมีค่าแรงดูดระหว่าง 90 kPa ถึง 1,500 kPa จะใช้เครื่องมือ Pressure Plate ซึ่งอาศัยหลักการ Axis Translation Technique ดังภาพที่ 8 สองช่วงแรกจะเป็นการวัดแรงดูดเมตริก และช่วงสุดท้ายคือช่วงที่มีแรงดูด 1,500 kPa จนถึง 1,000,000 kPa ใช้เครื่องมือ KU-Total Suction Probe ซึ่งเป็นเซนเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์ใช้สำหรับการวัดแรงดูดรวมดังภาพที่ 9

โดยในการทดสอบเส้นอรรถลักษณะของน้ำในดิน (SWCC) นั้นประกอบด้วย เส้นการเปียก(Wetting Curve) ทดสอบโดยเพิ่มน้ำให้กับตัวอย่างดินและเส้นการแห้ง (Drying Curve) ทดสอบด้วยการนำตัวอย่างดินไปผึ่ง ซึ่งจะกระทำตามขั้นตอนดังภาพที่ 48 ดินที่ได้จากการเก็บตัวอย่างแบบคงสภาพนั้นเป็นดินเหนียวและเมื่อพิจารณาจากตัวอย่างเส้นอรรถลักษณะของน้ำในดิน (SWCC) ของดินประเภทต่างดังแสดงในภาพที่ 13 จะเห็นว่าดินเหนียวมีค่า Air Entry Value สูง

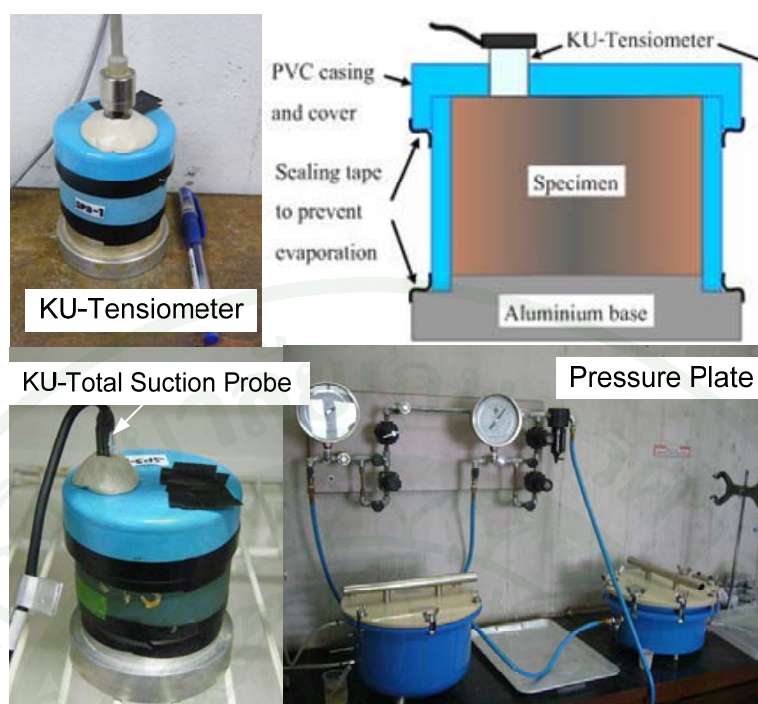
(มากกว่า 100 kPa) ดังนั้นการทดสอบโดยใช้เครื่องมือ KU-Tensiometer และ KU-Total Suction Probe จะสามารถวัดค่าแรงดูดได้ในช่วง 0-90 kPa และ 1,500 ถึง 1,000,000 kPa ตามลำดับเท่านั้น ซึ่งจะเห็นว่าค่าแรงดูดในช่วง 90-1,500 kPa ขาดหายไป ดังนั้นเพื่อให้การทดสอบเส้นอัตราลักษณะของน้ำในดิน (SWCC) ของดินเหนียวมีความสมบูรณ์และถูกต้องมากขึ้นจึงเพิ่มการทดสอบโดยใช้หม้อแรงดัน (Pressure Plate) ซึ่งนำหลักการ Axis Translation Technique มาใช้เพื่อวัดค่าแรงดูดที่ขาดหายไปในช่วงดังกล่าว โดยเริ่มต้นจากการเก็บตัวอย่างคงสภาพจากสนาม เนื่องจากดินที่นำมาทดสอบได้จากการเก็บตัวอย่างซึ่งใช้เป็นกระบอกเปลือกบางมี PVC อยู่ภายในดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น การเตรียมตัวอย่างดินจะต้องทำการตัดแต่งดินให้ผิวหน้าของตัวอย่างดินมีความสม่ำเสมอเพื่อให้ KU-Tensiometer สามารถสัมผัสกับผิวดินได้เป็นอย่างดี จากนั้นหาค่าความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างดิน ชั่งน้ำหนัก วัดขนาดและส่วนสูงเริ่มต้น จากนั้นใช้ฐานอลูมิเนียมที่มีน้ำหนักประมาณ 1 กิโลกรัม รองด้านล่างตัวอย่างดิน และครอบด้านบนด้วยฝาพีวีซี ปิดผนึกด้วยเทปพันสายไฟ แล้วบ่มตัวอย่างดินในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 20 °C เป็นเวลา 1-2 วัน เพื่อให้ตัวอย่างดินเข้าสู่ภาวะสมดุล มีความชื้นสม่ำเสมอทั้งตัวอย่างดิน ค่าแรงดูดเมทริกที่วัดได้จาก KU-Tensiometer จะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากในขั้นตอนของการวัดค่าและใช้เวลาในการวัดค่าแรงดูดเมทริกที่เร็วขึ้นด้วยสภาวะนี้ถือเป็นสภาวะเริ่มต้น แต่เนื่องจากตัวอย่างดินที่ได้จากการเก็บตัวอย่างในสนามนั้นมีค่าแรงดูดมากกว่า 90 kPa แต่น้อยกว่า 1,500 kPa ดังนั้นการทดสอบจึงเริ่มจากการเพิ่มน้ำกับตัวอย่างดิน (ทดสอบช่วงเปียก, Wetting) ประมาณ 2 กรัมเพื่อให้สามารถวัดค่าแรงดูดเมทริกจาก KU-Tensiometer ได้โดยสเปรย์น้ำกระจายทั้งหน้าตัดของตัวอย่างดิน ปิดผนึกตัวอย่างดิน ทำการบ่มโดยใช้ระยะเวลา 3-4 วัน ภายหลังจากการบ่มนำตัวอย่างดินมาวัดค่าแรงดูดเมทริกด้วย KU-Tensiometer โดยติดตั้งเซ็นเซอร์ผ่านช่องด้านบนของฝาพีวีซี ใช้ระยะเวลาในการวัดค่าแรงดูดเมทริกประมาณ 2-3 ชั่วโมงเป็นอย่างน้อย หรือจนกว่าค่าแรงดูดเมทริกที่วัดได้มีค่าคงที่ ภายหลังจากการวัดค่าแรงดูดแต่ละครั้งจะต้องทำการวัดขนาด ส่วนสูง และชั่งน้ำหนักตัวอย่างดิน เพื่อให้ทราบการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่างดินตลอดการทดสอบ จากนั้นเติมน้ำประมาณ 2 กรัมโดยสเปรย์น้ำกระจายทั้งหน้าตัดของตัวอย่างดิน ปิดผนึกตัวอย่างดิน ทำการบ่มโดยใช้ระยะเวลา 3-4 วัน แล้วทำการวัดค่าแรงดูดเมทริก กระทำซ้ำจนกระทั่งตัวอย่างดินมีค่าแรงดูดเมทริกน้อยกว่า 1 kPa ซึ่งค่าที่วัดได้ในช่วงนี้ คือค่าของเส้นการเปียกที่ต้องอาศัยการเติมน้ำ จากนั้นนำตัวอย่างดินแช่น้ำประมาณ 5 วัน ตัวอย่างดินจะอยู่ในสภาวะใกล้อิ่มตัวด้วยน้ำ แล้วจึงชั่งน้ำหนัก พร้อมวัดขนาด ส่วนสูง ขั้นตอนหลังจากนี้จะเป็นการวัดค่าในช่วงของเส้นการแห้ง(Drying) โดยนำตัวอย่างดินผึ่งอากาศทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที น้ำหนักน้ำในตัวอย่างดินจะลดลงประมาณ 2 กรัม ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของแต่ละตัวอย่างดิน นำตัวอย่างดินปิดผนึกแล้วนำไปบ่มใช้ระยะเวลา 1-2 วัน จากนั้นนำมา

วัดค่าแรงดูดเมทริกจนกว่าค่าแรงดูดเมทริกที่วัดได้มีค่าคงที่ภายหลังการวัดแรงดูดแต่ละครั้งจะต้องทำการวัดขนาด ส่วนสูง และชั่งน้ำหนักตัวอย่างดิน กระทำซ้ำจนกระทั่งตัวอย่างดินมีค่าแรงดูดเมทริกประมาณ 80-90 kPa จากนั้นจึงนำตัวอย่างดินไปทดสอบโดยใช้หม้อแรงดัน (Pressure Plate) โดยจะทำการทดสอบที่ค่าแรงดูดเท่ากับ 100, 200 และ 300 kPa การทดสอบกระทำโดยเพิ่มค่าแรงดันอากาศในช่องว่างดิน (u_a) โดยใช้ก๊าซไนโตรเจน และรอจนถึงสมดุล หลังจากนั้นทำการวัดขนาด ส่วนสูง และชั่งน้ำหนักตัวอย่างดิน จากนั้นจะเปลี่ยนมาใช้ KU-Total Suction Probe ซึ่งเป็นเซนเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์ (Psychrometer) แทนเนื่องจากสามารถวัดแรงดูดได้ในช่วง 1,500-1,000,000 kPa กระทำการลดน้ำหนักของตัวอย่างดินโดยนำตัวอย่างดินผึ่งอากาศทิ้งไว้ประมาณ 2-7 วัน ทำการบ่มโดยใช้เวลา 1 วัน จากนั้นทำการวัดค่าแรงดูดประมาณ 3 วันเป็นอย่างน้อยหรือจนกว่าค่าแรงดูดที่วัดได้มีค่าคงที่ กระทำซ้ำจนกระทั่งตัวอย่างดินมีค่าความชื้น(w%)น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นจะทำการเพิ่มน้ำให้กับตัวอย่างดิน บ่มและวัดค่าแรงดูด เพื่อให้ได้ค่าของเส้นการเปียกที่ยังขาดหายไปให้บรรจบกับสภาวะเริ่มต้นของการทดสอบ โดยมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบทั้ง 3 ช่วงของค่าแรงดูดดังแสดงในภาพที่ 49 ขั้นตอนสุดท้ายนำตัวอย่างดินเข้าเตาอบเพื่อหาความชื้นสุดท้ายและเปรียบเทียบความชื้น(w%) ที่ได้จากการทดสอบกับความชื้นที่ได้จากการคำนวณตลอดทั้งการทดสอบจะมีค่าใกล้เคียงกัน ระยะเวลาต่างๆในขั้นตอนของการทดสอบนี้ เหมาะสมกับลักษณะของชนิดดินที่เป็นดินเหนียวซึ่งเป็นตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ ระยะเวลาในการทดสอบสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามชนิดของตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบ จากการทดสอบนี้จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดูดกับความชื้นโดยปริมาตรหรือดัชนีความอิ่มตัวด้วยน้ำซึ่งกราฟดังกล่าวก็คือเส้นอรรถลักษณะของน้ำในดิน (SWCC)



ภาพที่ 48 ขั้นตอนการทดสอบหาเส้นอัตตลักษณ์ของดิน ด้วยวิธี Point-Wise Measurement

ที่มา: อภินิติ (2551)



ภาพที่ 49 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ของน้ำในดิน (SWCC)

3.3 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

3.3.1 การทดสอบเฉือนตรง

ทดสอบเฉือนตรงแบบมีการอัดตัวคายน้ำและการระบายน้ำ (Consolidated Drained Test, CD test) กับตัวอย่างดินแช่น้ำโดยทดสอบแบบ Single Stage ภายใต้สภาวะแรงกดในแนวดิ่งเท่ากับ 16, 31, 62 kPa ก่อนเริ่มขั้นตอนการ Consolidation นั้นจะนำตัวอย่างดินที่จะทำการทดสอบแช่น้ำทิ้งไว้ประมาณ 72 ชั่วโมง โดยในขั้นตอนการ Consolidation ใช้เวลาทั้งสิ้น 24 ชั่วโมงก่อนที่จะทำการเฉือนตัวอย่าง เนื่องจากเป็นการทดสอบแบบ Consolidated Drain Test การกำหนดอัตราการเฉือนจึงเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุด ดังนั้นจึงต้องหาระยะเวลาการเฉือนที่ตัวอย่างเกิดการพิบัติจากการหาค่า t_{50} (เวลาที่เกิดการ Consolidation ไปแล้ว 50%) และ t_{90} (เวลาที่เกิดการ Consolidation ไปแล้ว 90%) ซึ่งหาได้จากวิธี Log time และ Root time (ASTM D2435,2003) โดยมีสมการดังนี้

$$t_f = 11.7 t_{90} \quad (25)$$

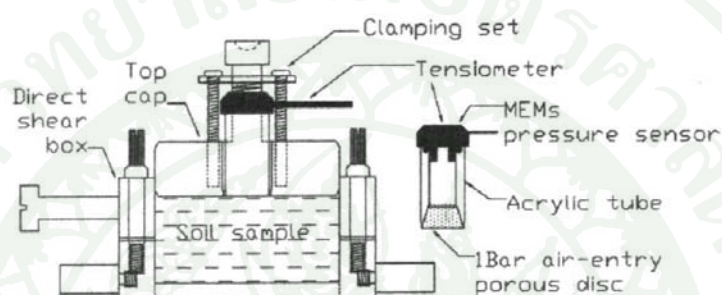
$$t_f = 50 t_{50} \quad (26)$$

และในการทดสอบแรงเฉือนตรงแบบปกตินี้ นอกจากการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดแล้วยังทำการทดสอบแรงเฉือนตรงเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนคงค้าง (Residual Strength) เพิ่มเติม โดยใช้วิธีทดสอบที่ทำการเฉือนตัวอย่างซ้ำหลายๆ ครั้ง (Reversal Shear Box Test) ร่วมกับวิธีการสร้างระนาบการพัง (Cut-Plane Method) มีขั้นตอนการทดสอบดังนี้ หลังจากที่ได้ทำการทดสอบแรงเฉือนตรงและได้ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดแล้ว ทำการถอดตัวอย่างกลับมายังตำแหน่งเริ่มต้นโดยที่ยังอยู่ภายใต้สภาวะที่มีแรงกดในแนวดิ่งกระทำอยู่ ทั้งระยะเวลาไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้แรงดันน้ำระบายจนสมดุลก่อนที่จะทำการเฉือนตรงอีกครั้ง โดยที่ใช้อัตราการเฉือนเท่าเดิม ทำในลักษณะเช่นนี้เข้าไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่เปลี่ยนแปลง และเนื่องจากการทดสอบในลักษณะนี้อาจจะต้องทำการเฉือนตรงหลายๆ ครั้ง ดังนั้นจึงใช้วิธีการสร้างระนาบการพัง (Cut-Plane Method) มาใช้เพื่อช่วยลดจำนวนครั้งที่จะต้องทำการเฉือนตรง โดยหลังจากที่ได้ทำการทดสอบแรงเฉือนตรงเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดแล้ว ใช้ลวดตัดเพื่อสร้างระนาบการพังอย่างระมัดระวัง จากนั้นนำตัวอย่างกลับยังตำแหน่งเดิมและเริ่มขั้นตอน Consolidation อีกครั้งและทำการเฉือนตัวอย่างด้วยอัตราการเฉือนเท่าเดิม ทำการเฉือนตัวอย่างซ้ำหลายๆ ครั้งดังมีรายละเอียดขั้นตอนตามที่ได้อธิบายไว้ โดยมีตัวอย่างผลการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 19

3.3.2 การทดสอบแรงเฉือนตรงชนิดวัดแรงดูด

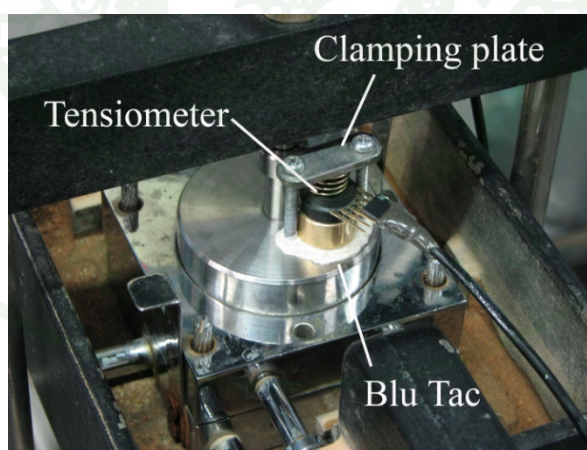
Jotisankasa and Mairing (2010) ได้ดัดแปลงเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนตรงที่ใช้ โดยให้สามารถวัดแรงดูดของตัวอย่างได้ผ่านทางช่องเปิดของฝาครอบด้านบนด้วย Tensiometer ดังแสดงในภาพที่ 50 และ 51 ซึ่ง Tensiometer จะถูกยึดไว้ด้วยแผ่นเหล็กและสกรู โดยมีสปริงขนาดเล็กวางอยู่ด้านบนของ Tensiometer เพื่อช่วยให้ Tensiometer นั้นสัมผัสกับตัวอย่างตลอดเวลาที่ทำการทดสอบ นอกจากนั้นแล้วเพื่อเป็นการรักษาปริมาณความชื้นโดยน้ำหนักของตัวอย่างดิน ในระหว่างการทดสอบให้คงที่โดยการใส่สเปรย์ฝอยเล็กน้อยบริเวณที่นำดินตัวอย่างวางลงบนเครื่องทดสอบแรงเฉือนตรงและคลุมด้วยผ้าชุบน้ำหมาดๆ อีกครั้งหนึ่ง เพื่อให้มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูงและส่งผลให้ดินไม่เกิดการระเหยระหว่างทำการทดสอบ และในส่วนที่มีช่องว่างระหว่าง Tensiometer กับฝาปิดนั้นจะใช้ Blu Tac ช่วยป้องกันการระเหยที่จะส่งผลต่อค่าแรงดูดที่อ่านได้

การทดสอบด้วยวิธีนี้ในขั้นตอนการ Consolidation นั้นจะใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะแรงกดในแนวดิ่งเท่ากับ 16 kPa จากนั้นจึงทำการเนียนตัวอย่างโดยใช้อัตราการเนียน 0.05 มม./นาที่ โดยที่ระหว่างที่เนียนตัวอย่างนั้นจะต้องจดบันทึกค่าแรงดูดที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดการเนียน ซึ่งใช้เวลาในการเนียนตัวอย่างประมาณ 3 ชั่วโมง โดยแต่ละการทดสอบจะทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของตัวอย่างดินโดยวิธีการสเปรย์น้ำที่ผิวของตัวอย่างเพื่อลดแรงดูดในดินจนได้ค่าที่ต้องการ



ภาพที่ 50 แบบแสดงการติดตั้ง Tensiometer บน Direct Shear Box

ที่มา: Jotisankasa and Mairing (2010)

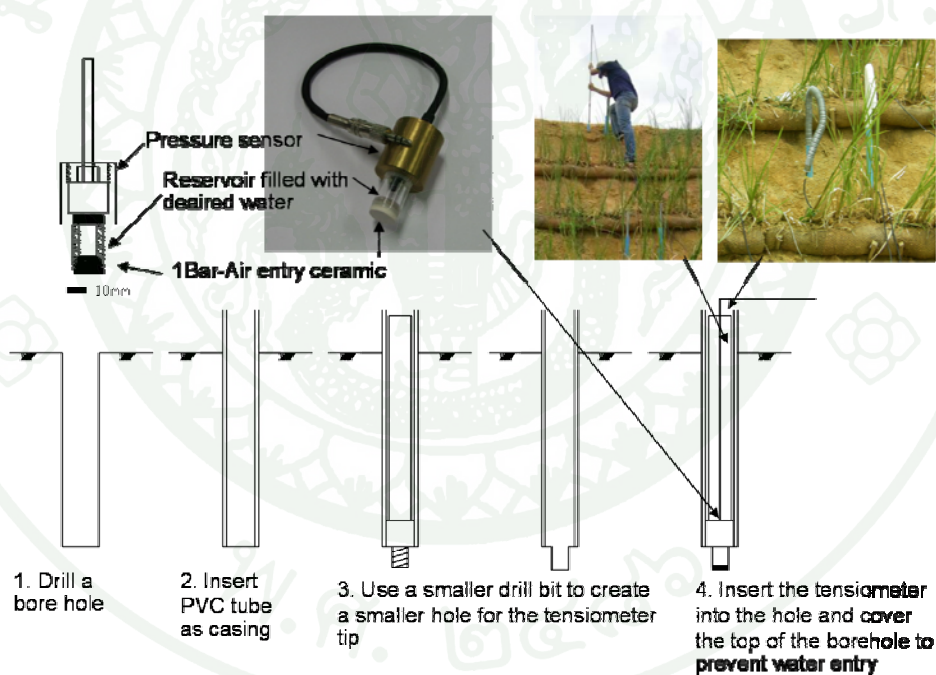


ภาพที่ 51 แบบแสดงการติดตั้ง Tensiometer บน Direct Shear Box

ที่มา: Jotisankasa (2008)

4. การติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแรงดูดเมทริก (Tensiometer)

เพื่อเป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดูดเมทริกบริเวณไหล่ทางและใช้เป็นข้อมูลประกอบการวิเคราะห์พฤติกรรมของดินเหนียวบดอัดที่เกี่ยวข้องกับการแตกร้าวของไหล่ทาง จึงทำการติดตั้ง Tensiometer เพื่อตรวจวัดค่าแรงดูดเมทริกที่เปลี่ยนไปในแต่ละช่วงเวลา โดยในขั้นตอนการติดตั้ง Tensiometer ในสนามนั้น อภินิติ (2551) ได้สรุปขั้นตอนการติดตั้งที่แต่ละระดับความลึกไว้ดังภาพที่ 52 โดยขั้นที่หนึ่งเป็นการเจาะหลุมด้วยสว่านมือจนถึงระดับความลึกที่ต้องการ จากนั้นใส่ท่อ PVC ตามลงไปในดินเพื่อทำหน้าที่เป็นปลอกของ Tensiometer ในขั้นที่สองใช้ท่อส่งดอกสว่านเพื่อสร้างรูขนาดเล็กที่มีขนาดเท่ากับหัวของ Tensiometer พอดี เสร็จแล้วจึงส่งหัว Tensiometer ตามลงไปในหลุมโดยให้หัว Ceramic แนบสนิทกับหลุมอย่างพอดี จากนั้นใช้ซิลิโคนยาแนวเพื่อกันน้ำเข้าไปปลายท่อ PVC



ภาพที่ 52 ขั้นตอนการติดตั้ง KU-Tensiometer ในสนาม

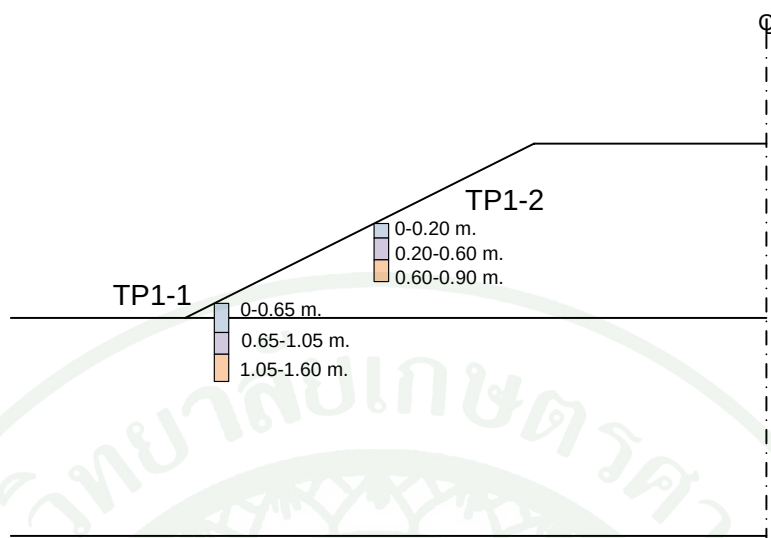
ที่มา: อภินิติ (2551)

ผลและวิจารณ์

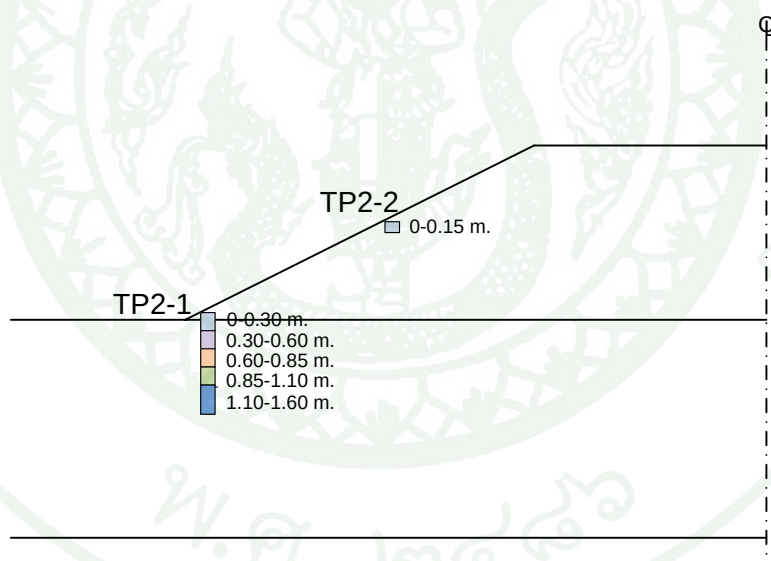
1. ผลจากการกำหนดพื้นที่ศึกษาและรวบรวมข้อมูลชั้นดิน

การเก็บตัวอย่างดินด้วยสว่านมือ (Hand Augur) เพื่อกำหนดพื้นที่ศึกษานั้นมีรายละเอียดการเก็บตัวอย่างดินในบริเวณซึ่งพบรอยแตกและการทรุดตัวบริเวณไหล่ทางที่รุนแรงแสดงในภาพที่ 53 และบริเวณซึ่งไม่พบรอยแตกหรือรอยแตกบริเวณไหล่ทางไม่มีความรุนแรงแสดงในภาพที่ 54

ผลการทดสอบ Atterberg's Limits บริเวณซึ่งพบรอยแตกและการทรุดตัวบริเวณไหล่ทางที่รุนแรงแสดงในตารางที่ 12ก และ 12ข และมี Plasticity Chart ดังแสดงในภาพที่ 55ก และ 55ข และในส่วนผลการทดสอบ Atterberg's Limits บริเวณซึ่งไม่พบรอยแตกหรือรอยแตกบริเวณไหล่ทางไม่มีความรุนแรงแสดงในตารางที่ 13ก และ 13ข และมี Plasticity Chart ดังแสดงในภาพที่ 56ก และ 56ข จากผลการทดสอบ Atterberg's Limits โดยพิจารณาเฉพาะดินเหนียวบดอัดที่นำมาใช้เป็นวัสดุคันทางและการรวบรวมข้อมูลชั้นดินจากรายงานโครงการศึกษาการแตกร้าวและการทรุดตัวบริเวณไหล่ทางหลวงในพื้นที่ภาคกลาง ของสำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง พบว่า บริเวณ กม.32+600 ถึง 33+100 ด้านซ้ายทางวัสดุคันทางมีค่า PI อยู่ในช่วง 26-34 ในขณะที่ กม.31+600 ถึง 32+100 ด้านขวาทางวัสดุคันทางมีค่า PI อยู่ในช่วง 12-22 จึงสรุปพื้นที่ศึกษาโดยใช้เกณฑ์การจำแนกแนวโน้มการยึดหดตัวของดินของ Gerald (1974) ดังแสดงในตารางที่ 3 ออกเป็น 2 บริเวณได้แก่บริเวณที่วัสดุคันทางเป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูงและบริเวณที่วัสดุคันทางเป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง



ภาพที่ 53 แสดงตำแหน่งการเก็บตัวอย่างดินเพื่อนำมาทดสอบของตัวอย่างดินในบริเวณซึ่งพบรอยแตกและการทรุดตัวบริเวณไหล่ทางที่รุนแรง



ภาพที่ 54 แสดงตำแหน่งการเก็บตัวอย่างดินในบริเวณซึ่งไม่พบรอยแตกหรือรอยแตกบริเวณไหล่ทางไม่มีความรุนแรง

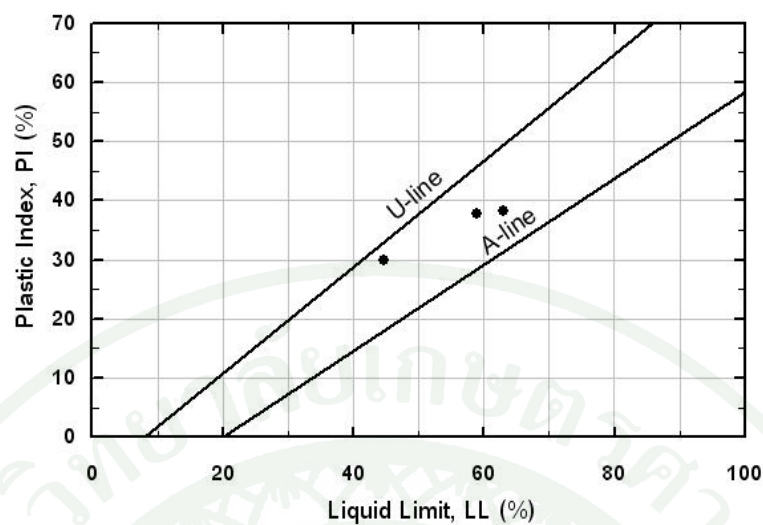
ตารางที่ 12 ผลการทดสอบค่า Atterberg's Limit ของดินฐานรากในบริเวณซึ่งพบรอยแตก
และการทรุดตัวบริเวณไหล่ทางที่รุนแรง (TP1-1) และ (TP1-2)

**(ก) ผลการทดสอบค่า Atterberg's Limit ของดินฐานรากในบริเวณซึ่งพบรอยแตก
และการทรุดตัวบริเวณไหล่ทางที่รุนแรง (TP1-1)**

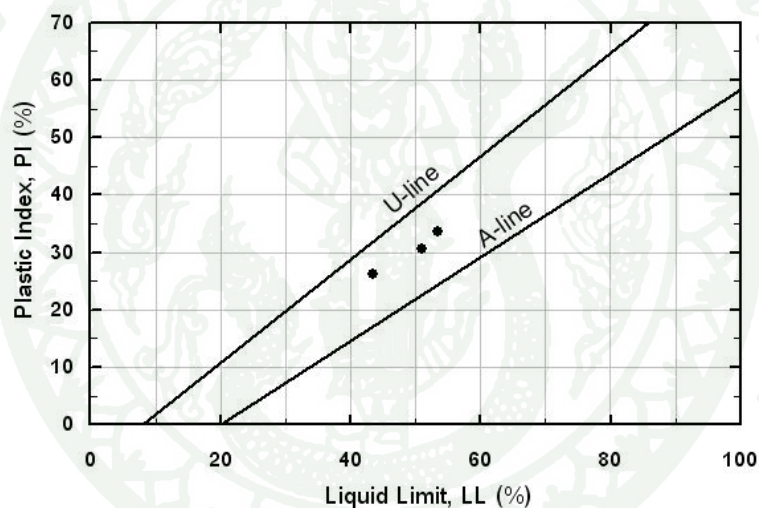
Depth	Liquid Limit ,LL (%)	Plastic Limit ,PL (%)	Plasticity Index ,PI (%)
0 – 0.65 m.	62.97	24.65	38.32
0.65 – 1.05 m.	44.68	14.84	29.84
1.05 – 1.60 m.	59.00	21.20	37.80

**(ข) ผลการทดสอบค่า Atterberg's Limit ของดินคันทางในบริเวณซึ่งพบรอยแตก
และการทรุดตัวบริเวณไหล่ทางที่รุนแรง (TP1-2)**

Depth	Liquid Limit ,LL (%)	Plastic Limit ,PL (%)	Plasticity Index ,PI (%)
0 – 0.20 m.	51.04	20.36	30.68
0.20– 0.60 m.	53.45	19.79	33.66
0.60 – 0.90 m.	43.41	17.16	26.25



(ก)



(ข)

ภาพที่ 55 Plasticity Chart ของดินในบริเวณซึ่งพบรอยแตกและการทรุดตัวบริเวณไหล่ทางที่รุนแรง (TP1-1) และ (TP1-2)

(ก) Plasticity Chart ของดินในบริเวณซึ่งพบรอยแตกและการทรุดตัวบริเวณไหล่ทางที่รุนแรง (TP1-1)

(ข) Plasticity Chart ของดินในบริเวณซึ่งพบรอยแตกและการทรุดตัวบริเวณไหล่ทางที่รุนแรง (TP1-2)

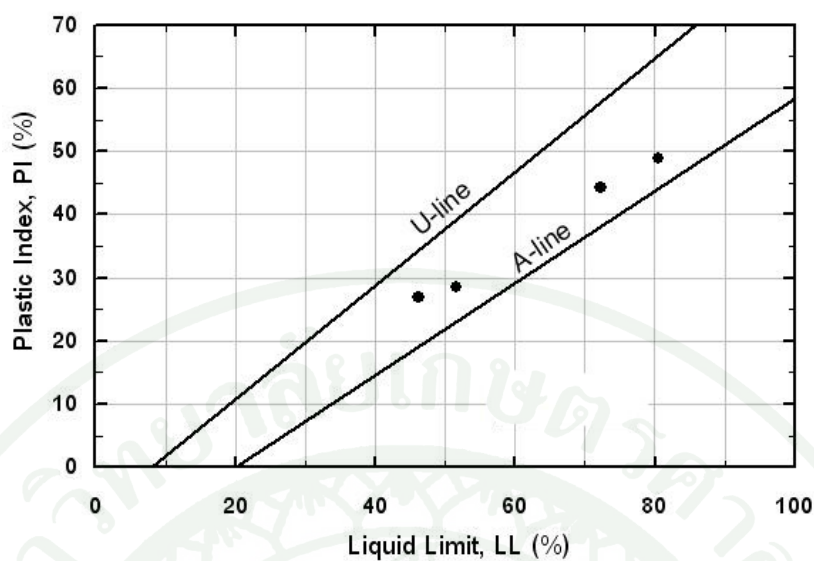
ตารางที่ 13 ผลการทดสอบค่า Atterberg's Limit ของดินฐานรากในบริเวณซึ่งไม่พบรอยแตก
หรือรอยแตกบริเวณไหล่ทางไม่มีความรุนแรง (TP2-1) และ (TP2-2)

**(ก) ผลการทดสอบค่า Atterberg's Limit ของดินฐานรากในบริเวณซึ่งไม่พบรอยแตก
หรือรอยแตกบริเวณไหล่ทางไม่มีความรุนแรง (TP2-1)**

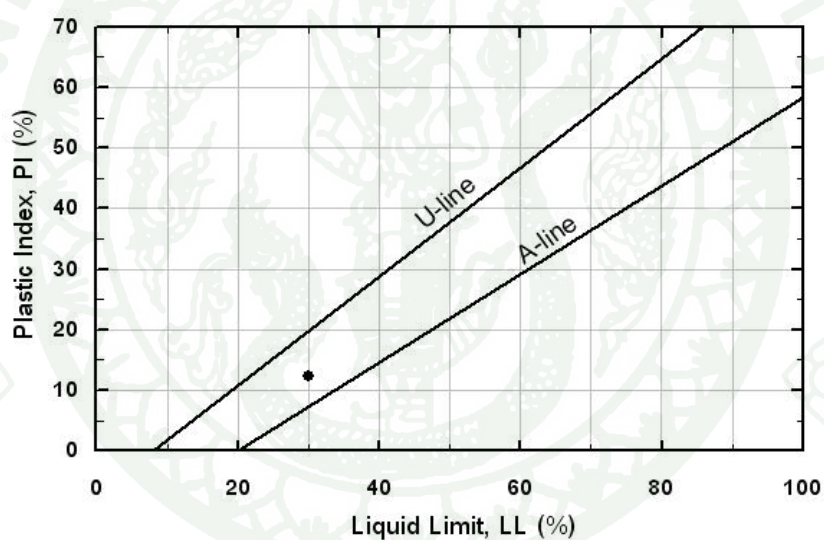
Depth	Liquid Limit ,LL (%)	Plastic Limit ,PL (%)	Plasticity Index ,PI (%)
0 – 0.30 m.	72.24	28.00	44.24
0.30 – 0.60 m.	46.20	19.29	26.91
0.60 – 0.85 m.	51.56	23.06	28.50
0.85 – 1.10 m.	-	N.P.	-
1.10 – 1.60 m.	80.55	31.58	48.97

**(ข) ผลการทดสอบค่า Atterberg's Limit ของดินคันทางในบริเวณซึ่งไม่พบรอยแตกหรือรอยแตก
บริเวณไหล่ทางไม่มีความรุนแรง (TP2-2)**

Depth	Liquid Limit ,LL (%)	Plastic Limit ,PL (%)	Plasticity Index ,PI (%)
0 – 0.15 m.	30.05	17.80	12.25



(ก)



(ข)

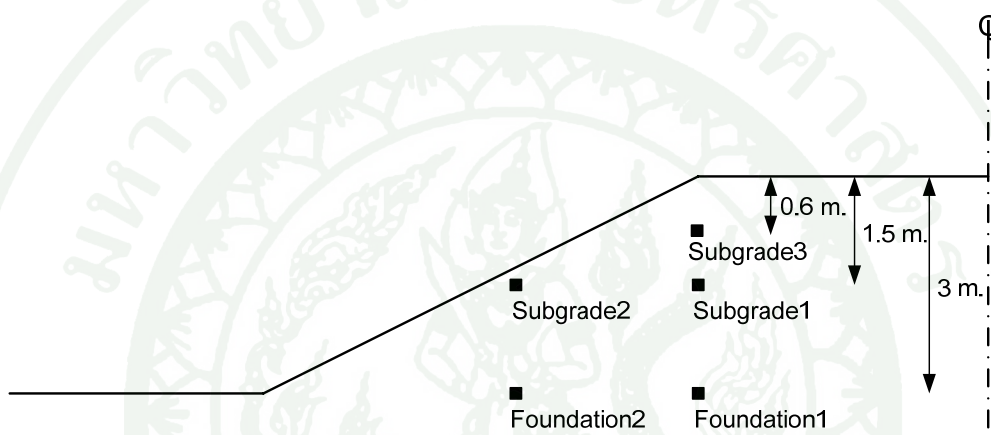
ภาพที่ 56 Plasticity Chart ของดินในบริเวณซึ่งไม่พบรอยแตกหรือรอยแตกบริเวณไหล่ทาง
ไม่มีความรุนแรง (TP2-1) และ (TP2-2)

(ก) Plasticity Chart ของดินในบริเวณซึ่งไม่พบรอยแตกหรือรอยแตกบริเวณไหล่ทาง
ไม่มีความรุนแรง (TP2-1)

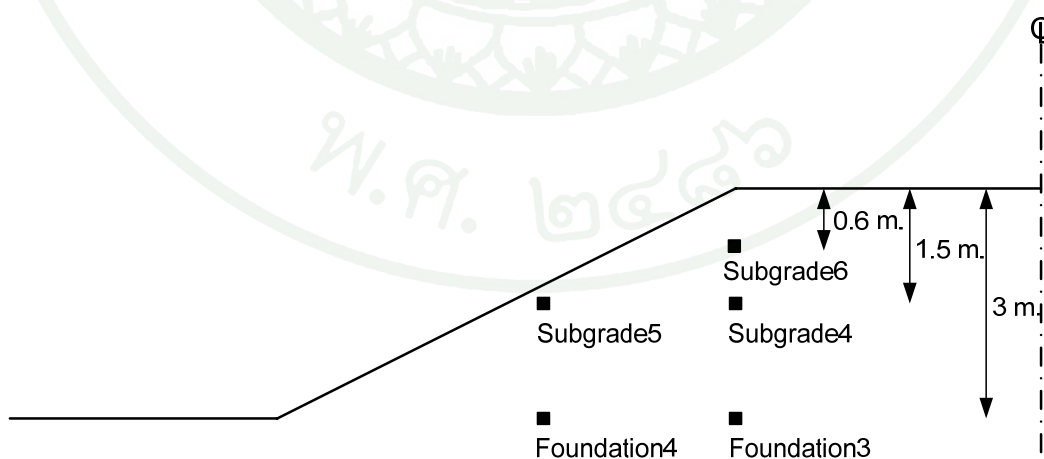
(ข) Plasticity Chart ของดินในบริเวณซึ่งไม่พบรอยแตกหรือรอยแตกบริเวณไหล่ทาง
ไม่มีความรุนแรง (TP2-2)

2. การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ (Undisturbed Sample)

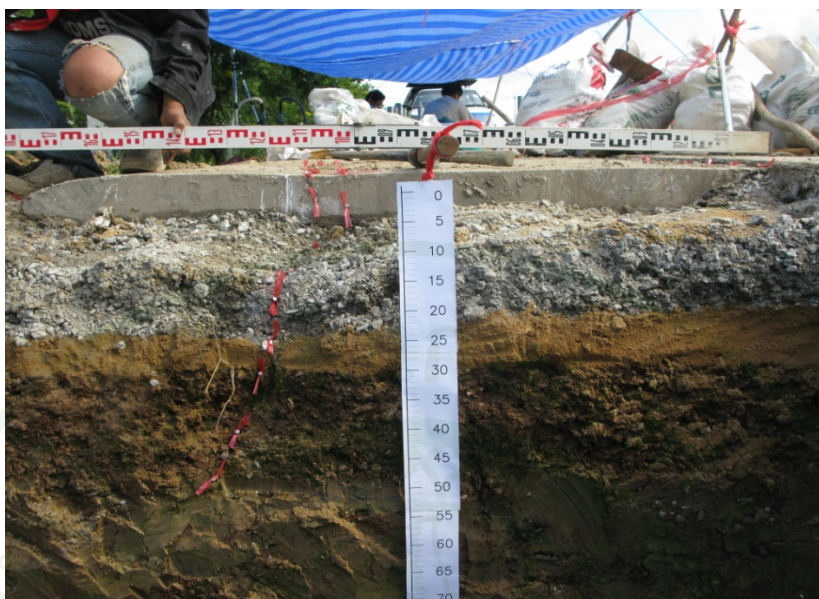
ทำการเก็บตัวอย่างในบริเวณพื้นที่ศึกษา โดยในแต่ละพื้นที่นั้นจะทำการเก็บตัวอย่างทั้งหมด 5 ตำแหน่งโดยที่แต่ละตำแหน่งนั้นจะทำการเก็บตัวอย่าง 6 ตัวอย่าง โดยมีรายละเอียดดังแสดงในภาพที่ 57 และภาพที่ 58 และมีหน้าตัดแสดงระดับความลึกดังภาพที่ 59 และ 60 โดยพฤติกรรมของดินที่จะนำเสนอต่อไปคือดินคันทาง (Subgrade)



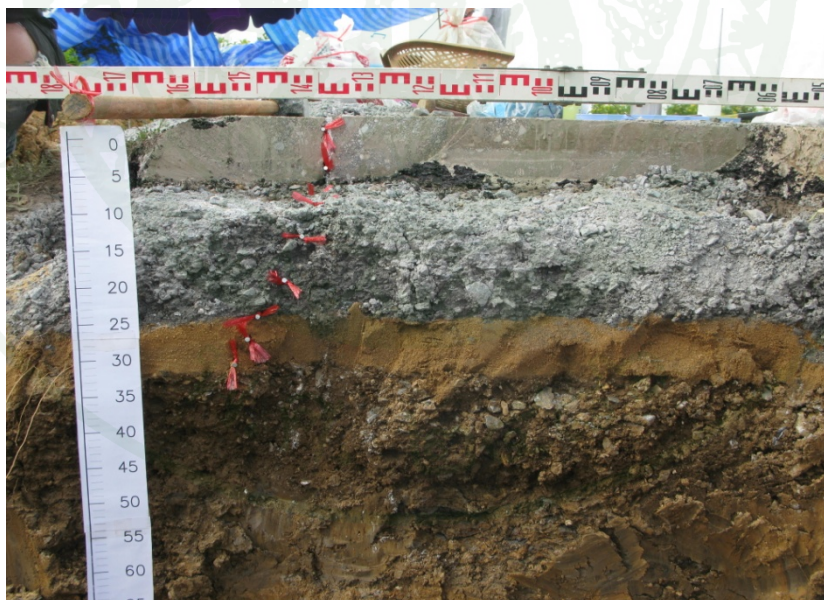
ภาพที่ 57 ตำแหน่งและรายละเอียดการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มน้ำการยืดหดตัวสูง



ภาพที่ 58 ตำแหน่งและรายละเอียดการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มน้ำการยืดหดตัวปานกลาง



ภาพที่ 59 หน้าตัดแสดงความลึกของชั้นดินที่ทำการเก็บตัวอย่างแบบคงสภาพบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง



ภาพที่ 60 หน้าตัดแสดงความลึกของชั้นดินที่ทำการเก็บตัวอย่างแบบคงสภาพบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง

3. ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

3.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติชั้นพื้นฐาน

จากผลการทดสอบคุณสมบัติชั้นพื้นฐานของดินในบริเวณทั้ง 2 พื้นที่ศึกษาพบว่าดินมีแนวโน้มการยึดหดตัวแตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อพิจารณาจากค่าพิกัดเหลว (LL), พิกัดพลาสติก (PL), Plasticity Index (PI) และการจำแนกดินในส่วนที่เป็นดินเหนียว (% ผ่านน้อยกว่า $2 \mu\text{m}$) อีกทั้งเมื่อจำแนกประเภทดินตามระบบ Unified Soil Classification สามารถจำแนกดินบริเวณ 2 พื้นที่ศึกษาได้เป็นดินเหนียวที่มีค่าพลาสติกชี้ต่ำถึงสูง (CL-CH) และดินเหนียวที่มีค่าพลาสติกชี้ต่ำ (CH) โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 14

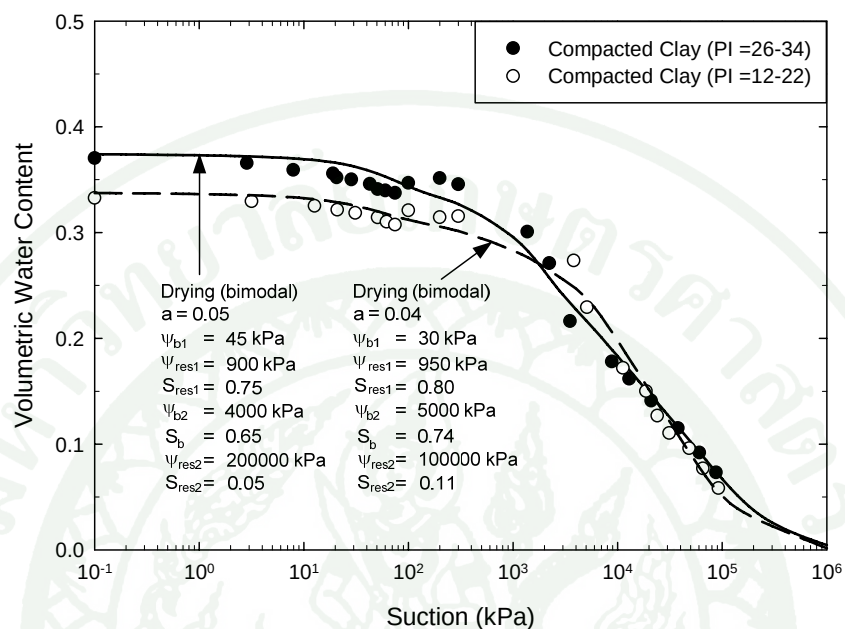
ตารางที่ 14 คุณสมบัติชั้นพื้นฐานของดินเหนียวบดอัดที่ได้จากการทดสอบ

คุณสมบัติ	บริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัด ที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง	บริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัด ที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง
ปริมาณความชื้นในธรรมชาติ (%)	20.90	18.96
หน่วยน้ำหนักรวม ($\gamma_t, \text{t/m}^3$)	2.10	2.13
ความถ่วงจำเพาะ (Gs)	2.71	2.83
Liquid Limit, (LL)	43 - 53	30 - 40
Plastic Limit, (PL)	17 - 21	16 - 18
Plasticity Index, (PI)	26 - 34	12 - 22
ส่วนที่เป็นดินเหนียว, (% ผ่านน้อยกว่า $2 \mu\text{m}$)	41.2%	30.8%
ประเภทดิน (จำแนกโดยวิธี Unified Soil Classification System)	CL - CH	CL

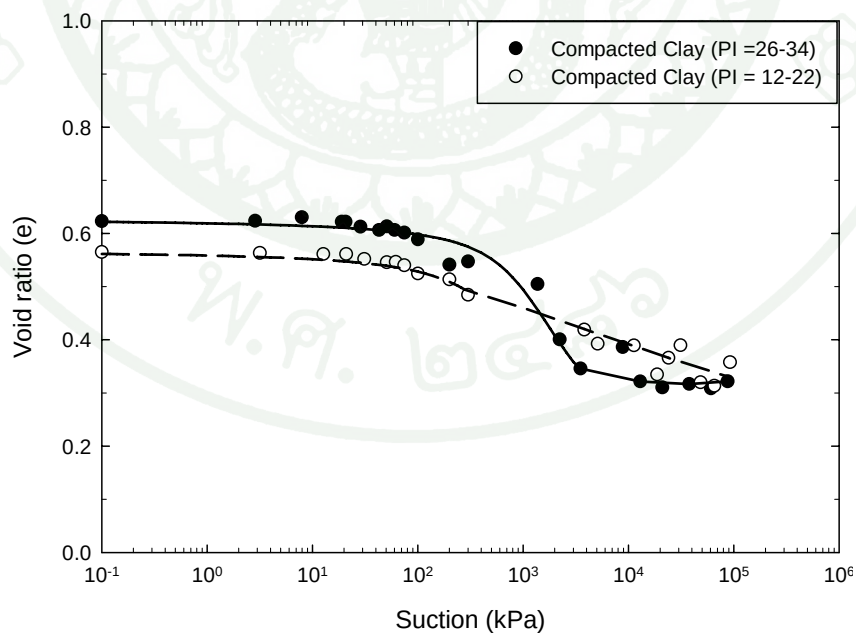
3.2 ผลการทดสอบเส้นอรรถลักษณะของน้ำในดิน (SWCC)

จากภาพที่ 61 แสดงเส้นอรรถลักษณะของน้ำในดินที่ได้จากการวัดจริงและทำการ Fitting Curve จากสมการของ Gitirana and Fredlund (2004) ซึ่งพบว่าเส้นอรรถลักษณะของน้ำในดินของดินทั้ง 2 ประเภทนั้นมีลักษณะคล้ายกัน โดยมีค่าแรงดูดที่อากาศเริ่มเข้าไปในช่องว่างของดินสูงแสดงให้เห็นว่าดินสามารถเก็บน้ำไว้ได้มาก และ ดินจะคงอยู่ในสภาวะใกล้อิ่มน้ำ แม้ว่าแรงดูดมีค่าสูงถึงประมาณ 300 kPa ภาพที่ 62 แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนช่องว่าง (e) และแรงดูดระหว่าง

การแห้งของตัวอย่างดิน เห็นได้ชัดว่าดินที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูงกว่าจะหดตัวมากกว่า หรือมีค่าอัตราส่วนช่องว่าง (e) ลดลงได้มากกว่าเมื่อแรงดูดสูงขึ้น



ภาพที่ 61 เส้นอัตราสัญลักษณ์ของน้ำในดินที่ได้จากการทดสอบ



ภาพที่ 62 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนช่องว่าง (e) และแรงดูด (Suction)

3.3 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

3.3.1 การทดสอบเฉือนตรง

ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงแบบปกติในสภาวะดินอิ่มตัวด้วยน้ำแสดงดังภาพที่ 63 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Displacement ในระหว่างที่ทำการเฉือนตัวอย่าง จะเห็นได้ว่าดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มน้ำการยึดหดตัวสูงนั้นจะมีพฤติกรรมใกล้เคียงแบบ Strain-Hardening ซึ่งต่างจากดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มน้ำการยึดหดตัวปานกลางที่แสดงพฤติกรรมแบบ Strain-Softening อย่างชัดเจนเนื่องจากมีปริมาณดินเหนียวและอัตราส่วนช่องว่างน้อยกว่า และในส่วนผลการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนคงค้าง (Residual Shear Strength) นั้นแสดงดังภาพที่ 64 โดยได้ทำการเฉือนตัวอย่างซ้ำไปมาเป็นจำนวน 4 รอบและพิจารณาเลือกใช้ค่า Shear Stress ที่ลดต่ำลงจนมีค่าคงที่เป็นค่ากำลังรับแรงเฉือนคงค้างซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า Shear Stress หลังจากทำการเฉือนตัวอย่างซ้ำไปมาเป็นจำนวน 4 รอบของดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มน้ำการยึดหดตัวปานกลางและดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มน้ำการยึดหดตัวสูงนั้นมีค่าลดลงและมีแนวโน้มน้ำคงที่ ในส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดและกำลังรับแรงเฉือนคงค้างกับค่าแรงกดในแนวดิ่งแสดงดังภาพที่ 65 จะเห็นว่าความชัน (ϕ') ของดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มน้ำการยึดหดตัวสูงกว่านั้นน้อยกว่าดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มน้ำการยึดหดตัวปานกลาง จากผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนตรงสามารถสรุปค่าแรงเชื่อมแน่น, มุมเสียดทานภายใน ไว้ดังแสดงในตารางที่ 15

ตารางที่ 15 สรุปค่าแรงเชื่อมแน่น, มุมเสียดทานภายใน และมุมของแรงเฉือนเนื่องจากแรงกด

PI	Peak Shear Strength		Residual Shear Strength	
	c' (kPa)	ϕ' (deg)	c' (kPa)	ϕ' (deg)
12-22	5	28	0	19
26-34	3	26	2	17

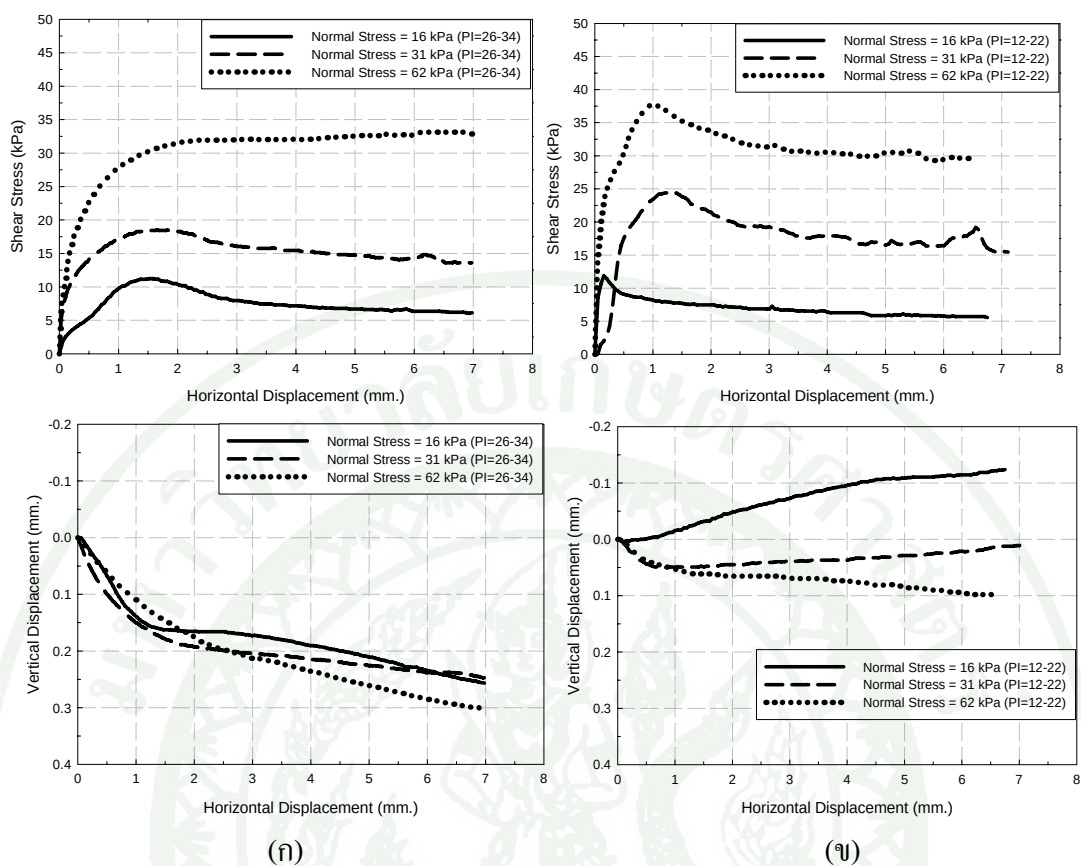
3.3.2 การทดสอบเนื้อตรงชนิดวัดแรงดัน

ผลการทดสอบเนื้อตรงชนิดวัดแรงดัน แสดงดังภาพที่ 66 โดยในช่วงแรกของการเนื้อแรงดันจะมีค่าลดลงเนื่องจากดินเกิดการยุบตัวและทำให้เกิดแรงดันน้ำสูงขึ้น จากนั้นแรงดันจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มที่จะคงที่ ภาพที่ 67 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเนื้อสูงสุด (Peak Shear Strength) กับแรงดันพบว่าดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูงจะมีความชัน (ϕ^b) น้อยกว่าดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง อย่างไรก็ตามความแปรปรวนของผลการทดสอบสำหรับดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูงพบว่ามีค่าความแปรปรวนต่างจากเส้นแนวโน้มมากกว่าดินที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลางคาดว่าเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของเนื้อดินที่บดอัด จากผลการทดสอบความชัน (ϕ^b) ของดินเหนียวบดอัดทั้ง 2 ประเภทนั้นมีค่ามากกว่าความชัน (ϕ') ของค่ากำลังรับแรงเนื้อสูงสุดที่ได้จากการทดสอบเนื้อตรง ซึ่งตามทฤษฎีแล้วค่าความชัน (ϕ^b) จะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความชัน (ϕ') และเมื่อพิจารณาผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ (SWCC) ดังแสดงในภาพที่ 61 และความสัมพันธ์ระหว่างเส้นอัตราลักษณ์ (SWCC) และเส้นขอบเขตกำลังรับแรงเนื้อของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำดังแสดงในภาพที่ 17 จะพบว่าค่าความชัน (ϕ^b) ที่มีค่าต่ำกว่าค่า Air-Entry Value นั้นจะมีค่าประมาณค่าความชัน (ϕ') ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบ ดังนั้นการพิจารณาค่าความชัน (ϕ') ไปใช้ควรใช้ค่าเท่ากับค่าความชัน (ϕ^b) โดยสรุปผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 16

ตารางที่ 16 สรุปค่ามุมของแรงเนื้อเนื่องจากแรงดัน

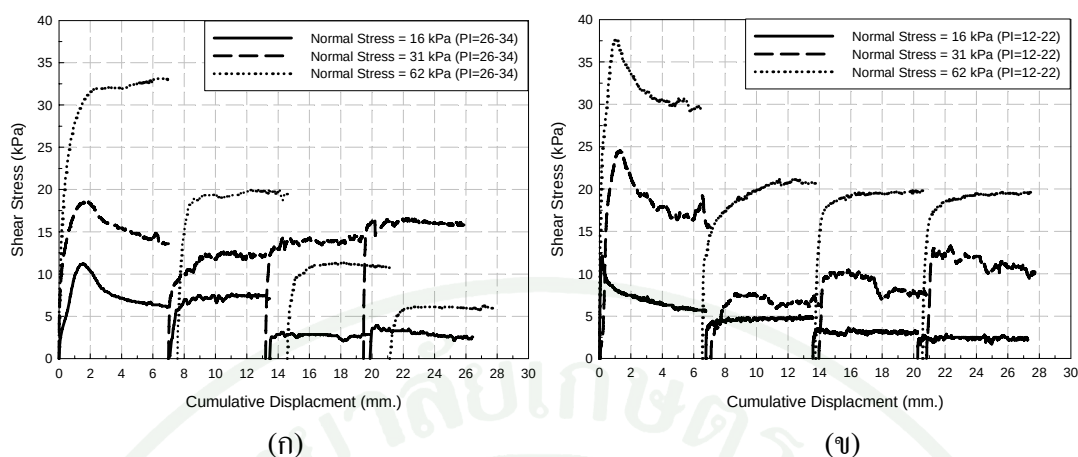
PI	ϕ^b (deg)	ϕ^b (deg)
	จากการทดสอบ	ใช้ในการวิเคราะห์
12-22	30	28
26-34	27	26

จากผลการทดสอบเนื้อตรงและผลการทดสอบเนื้อตรงชนิดวัดแรงดันแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเนื้อสูงสุด, ค่าแรงกดในแนวตั้ง และค่าแรงดันดังแสดงในภาพที่ 68 และ 69



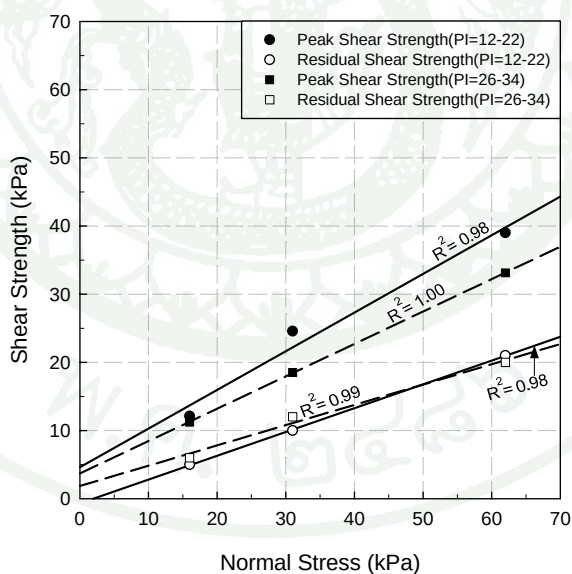
ภาพที่ 63 ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงแบบปกติในสภาวะดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

- (ค) บริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง
 (ง) บริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง

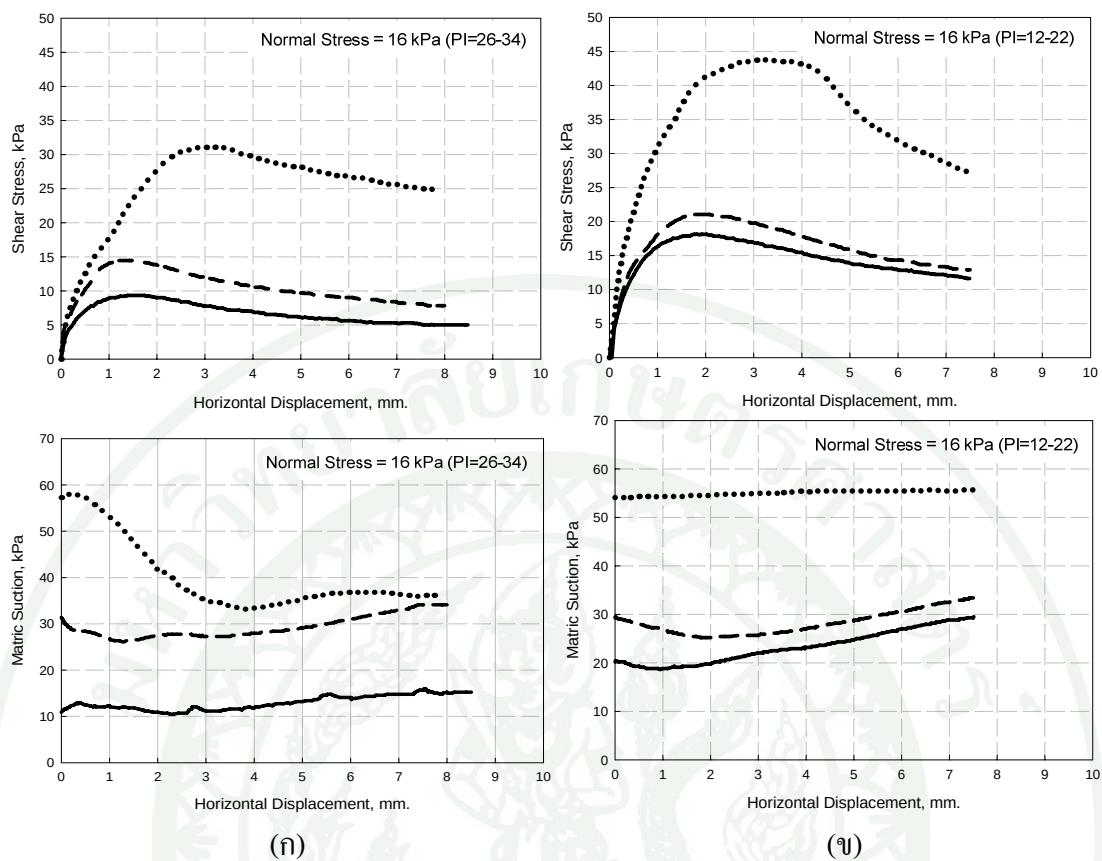


ภาพที่ 64 ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงแบบปกติในสภาวะดินอิ่มตัวด้วยน้ำโดยวิธี Reversal Shear Box Test

- (ค) บริเวณที่เป็นดินเหนียวคอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง
(ง) บริเวณที่เป็นดินเหนียวคอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง



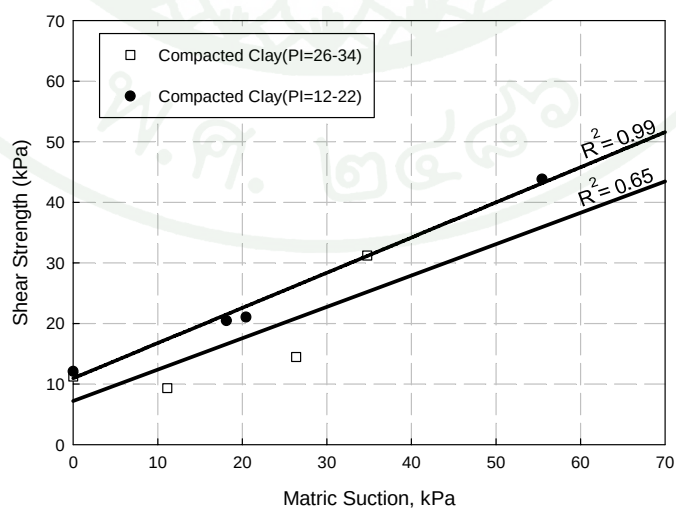
ภาพที่ 65 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดและค่ากำลังรับแรงเฉือนคงค้างกับค่าแรงกดในแนวดิ่ง



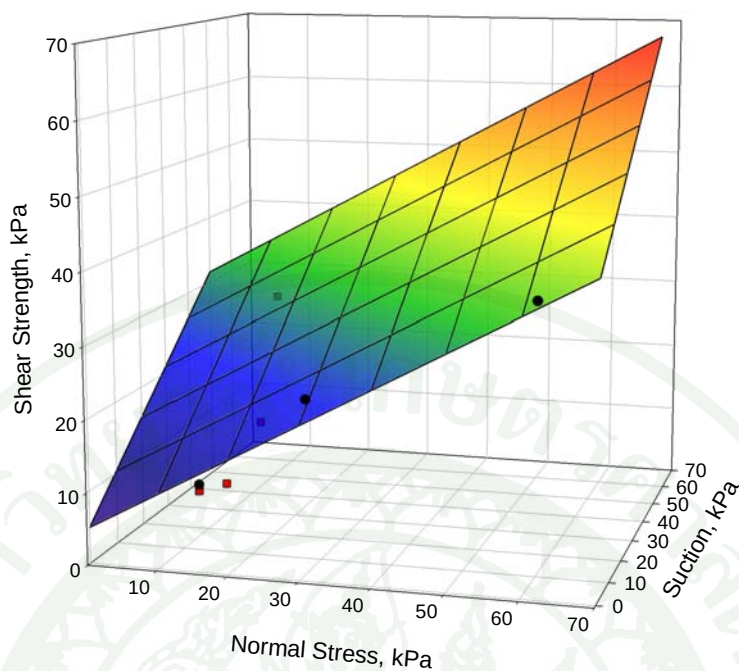
ภาพที่ 66 ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงแบบชนิดวัดแรงดูดในสภาวะดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

(ค) บริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง

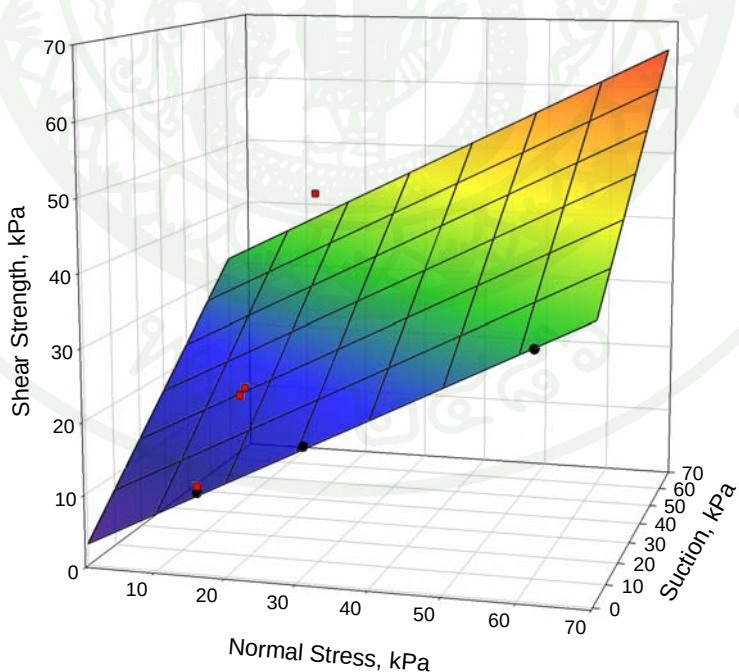
(ง) บริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง



ภาพที่ 67 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดและแรงดูด



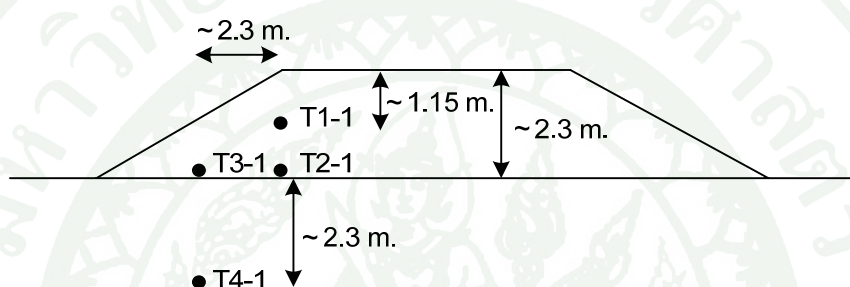
ภาพที่ 68 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด, ค่าแรงกดในแนวตั้ง และค่าแรงดูด บริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง



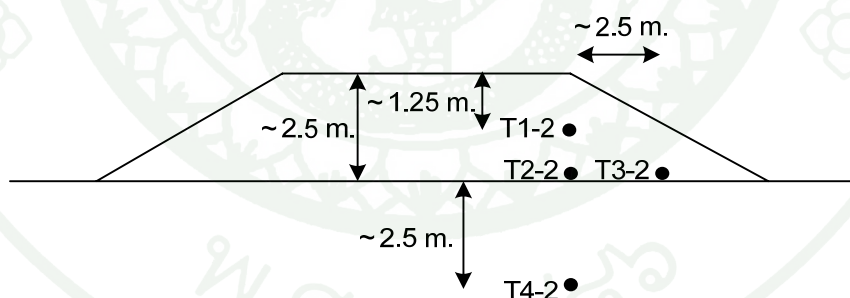
ภาพที่ 69 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด, ค่าแรงกดในแนวตั้ง และค่าแรงดูด บริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง

4. ผลการติดตั้งเครื่องมือและตรวจวัดค่าแรงดูดเมทริก (Tensiometer)

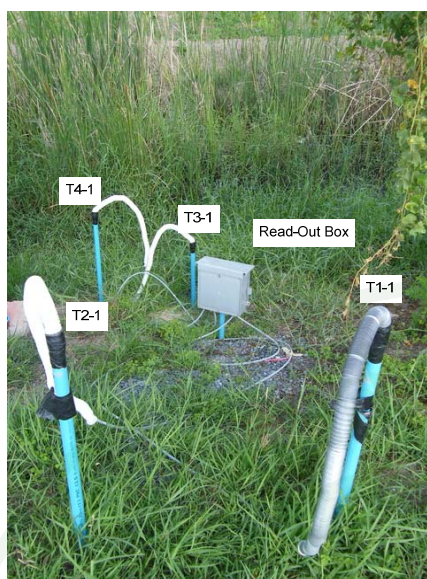
ทำการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดค่าแรงดูดเมทริก (Tensiometer) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดูดเมทริกบริเวณไหล่ทางในบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูงและบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลางในช่วงก่อนฝนตกและหลังฝนตก โดยทำการตรวจวัดตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2552 ถึงเดือนพฤษภาคม 2553 รายละเอียดและตำแหน่งการติดตั้งดังแสดงในภาพที่ 70 และ 71



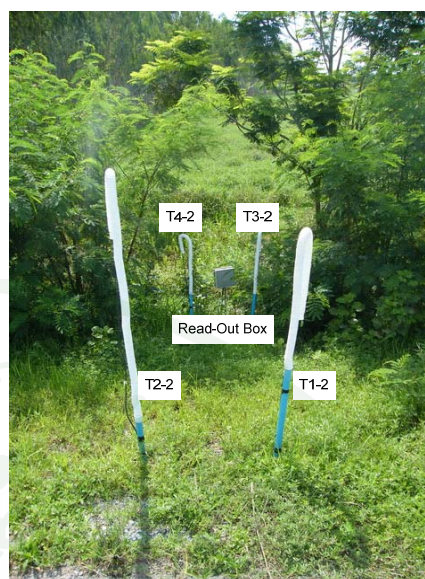
ภาพที่ 70 ตำแหน่งและรายละเอียดการติดตั้ง Tensiometer ในบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง



ภาพที่ 71 ตำแหน่งและรายละเอียดการติดตั้ง Tensiometer ในบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง



(ก)

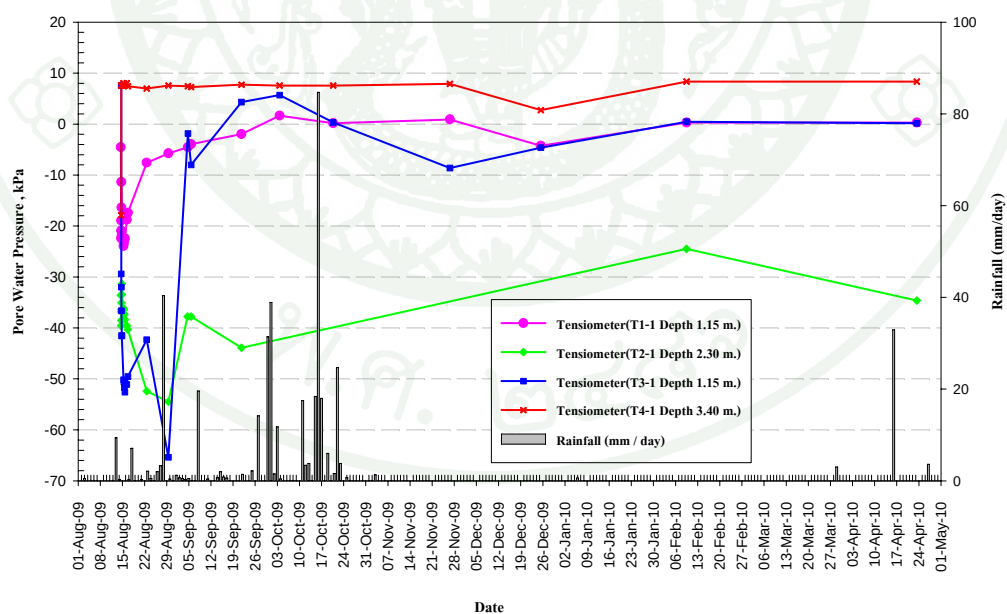


(ข)

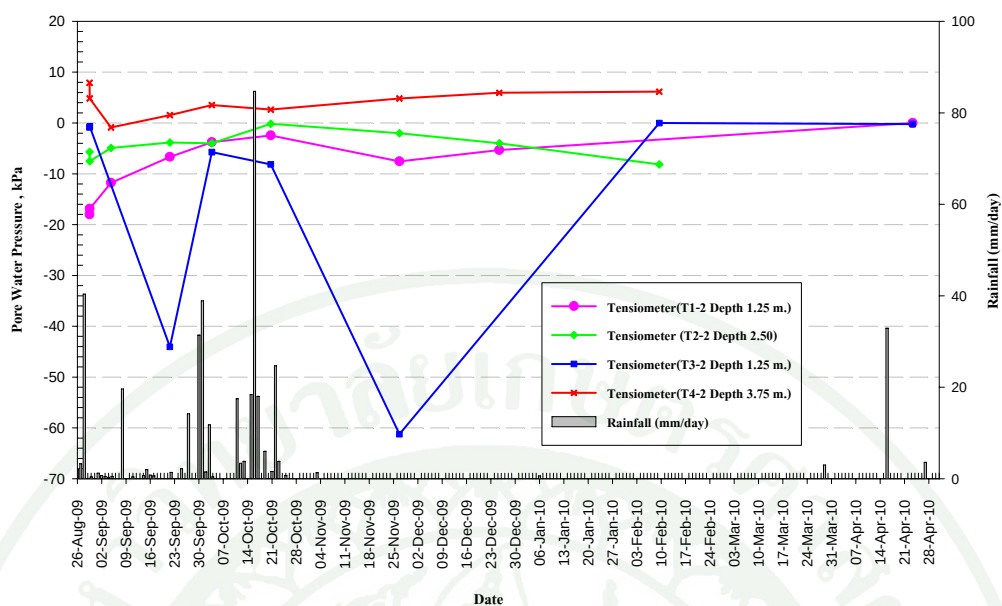
ภาพที่ 72 การติดตั้ง KU-Tensiometer ในสนาม

(ค) บริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยืดหดตัวสูง

(ง) บริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยืดหดตัวปานกลาง



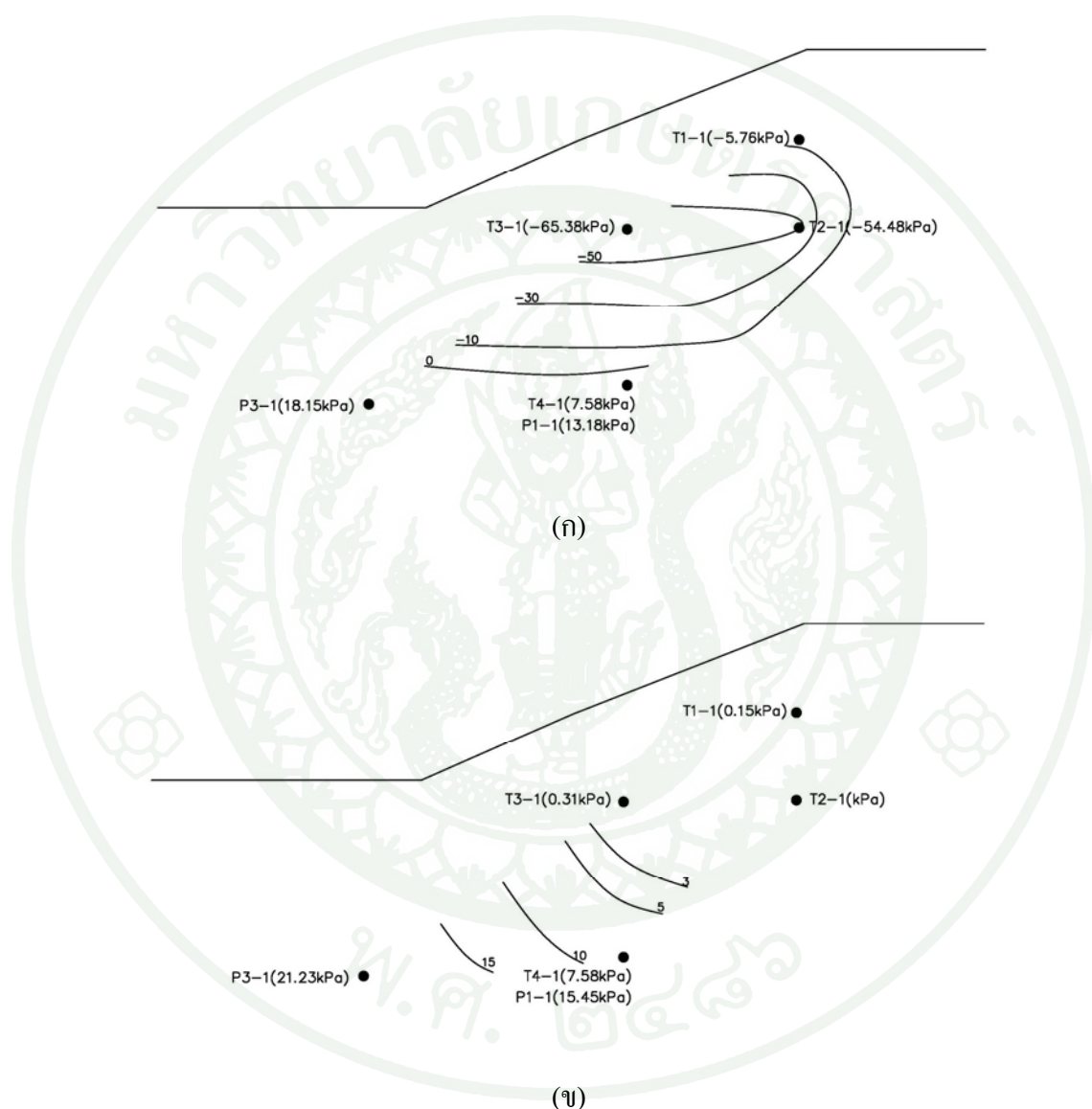
ภาพที่ 73 ผลการตรวจวัดค่าแรงดูดเมทริกบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยืดหดตัวสูง



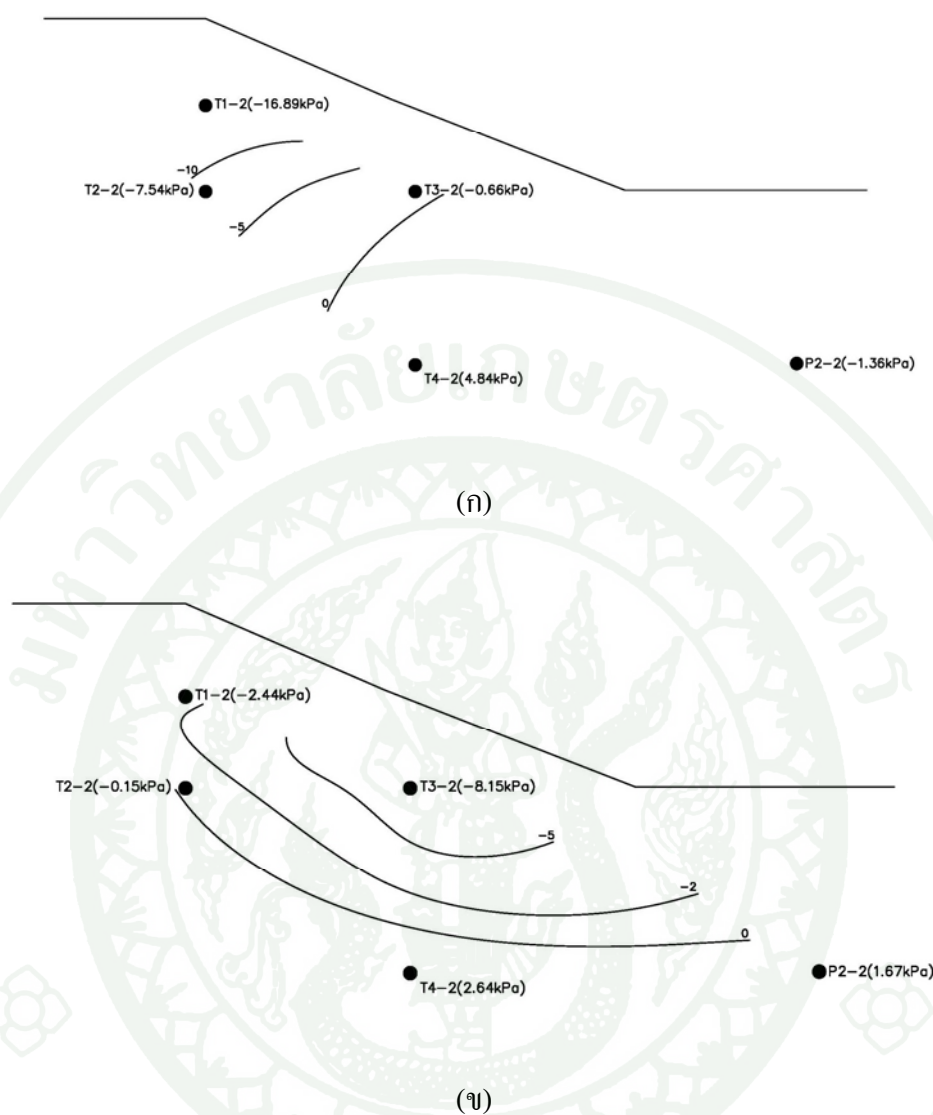
ภาพที่ 74 ผลการตรวจวัดค่าแรงดันเมตริกบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้ม
การยืดหดตัวปานกลาง

ภาพที่ 72 แสดงการติดตั้ง Tensiometer เสร็จเรียบร้อยตามขั้นตอนดังที่กล่าวและมีผลการตรวจวัดค่าแรงดันเมตริกและปริมาณน้ำฝนที่ได้จากสถานีตรวจวัดของกรมอุตุนิยมวิทยาในพื้นที่จังหวัดสุพรรณบุรี ดังแสดงในภาพที่ 73 และ 74 จะเห็นว่าค่าแรงดันเมตริกบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยืดหดตัวสูงและบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยืดหดตัวปานกลางมีค่าแรงดันเมตริกในช่วงเดือนสิงหาคม 2552 สูงและมีค่าลดลงเรื่อยๆ แสดงถึงความชื้นที่เพิ่มขึ้นของไหล่ทางซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลของปริมาณน้ำฝนในพื้นที่ดังกล่าว และในเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนธันวาคม 2552 ค่าแรงดันเมตริกกลับมามีค่าสูงขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นถึงความชื้นที่ลดลงเนื่องจากไม่มีฝนตกในช่วงดังกล่าว สำหรับการศึกษาในเรื่องการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเมตริกสำหรับบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยืดหดตัวสูงและบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยืดหดตัวปานกลางในช่วงก่อนฝนตกและหลังฝนตกแสดงโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดค่าแรงดันเมตริกจากเครื่องมือที่ทราบตำแหน่งและระดับความลึกซึ่งสามารถนำมาสร้างเป็น Contour ของค่าแรงดันเมตริกได้ดังแสดงในภาพที่ 75 และ 76 ตามลำดับ โดยในช่วงก่อนฝนตกพิจารณาใช้ข้อมูลการตรวจวัดเดือนสิงหาคม 2552 และช่วงฝนตกใช้ข้อมูลการตรวจวัดเดือนตุลาคม 2552 และจากข้อมูลเดียวกันนี้ยังสามารถสร้าง Contour ในส่วนค่าศักย์รวม (Total Head) ดังแสดงในภาพที่ 77 และ 78 ซึ่งแสดงถึงทิศทางการไหลในบริเวณที่ดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ จากการตรวจวัดค่าแรงดันเมตริกพบว่าบริเวณไหล่ทางจะเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเมตริกหลังจากที่มี

ฝนตกและมีการไหลซึมของน้ำฝนลงสู่ไหล่ทาง ซึ่งผลที่ได้จากการตรวจวัดดังกล่าวอาจเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินและค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety, F.S.) ของลาดคันทางซึ่งส่งผลทำให้เกิดปัญหาการแตกร้าวของไหล่ทางได้



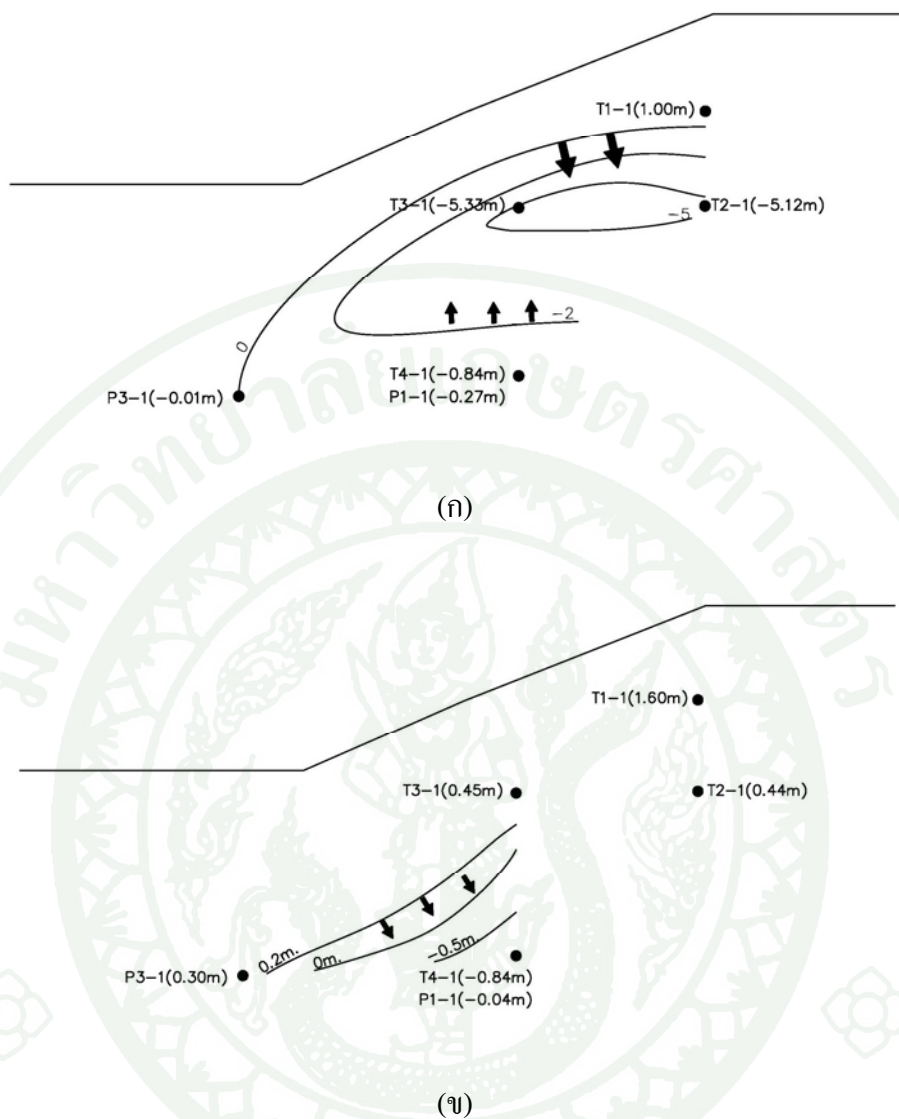
ภาพที่ 75 ค่าแรงคูเมทริกบริเวณที่เป็นดินเหนียวดัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง
(ก) เดือนสิงหาคม 2552 (ข) เดือนตุลาคม 2552



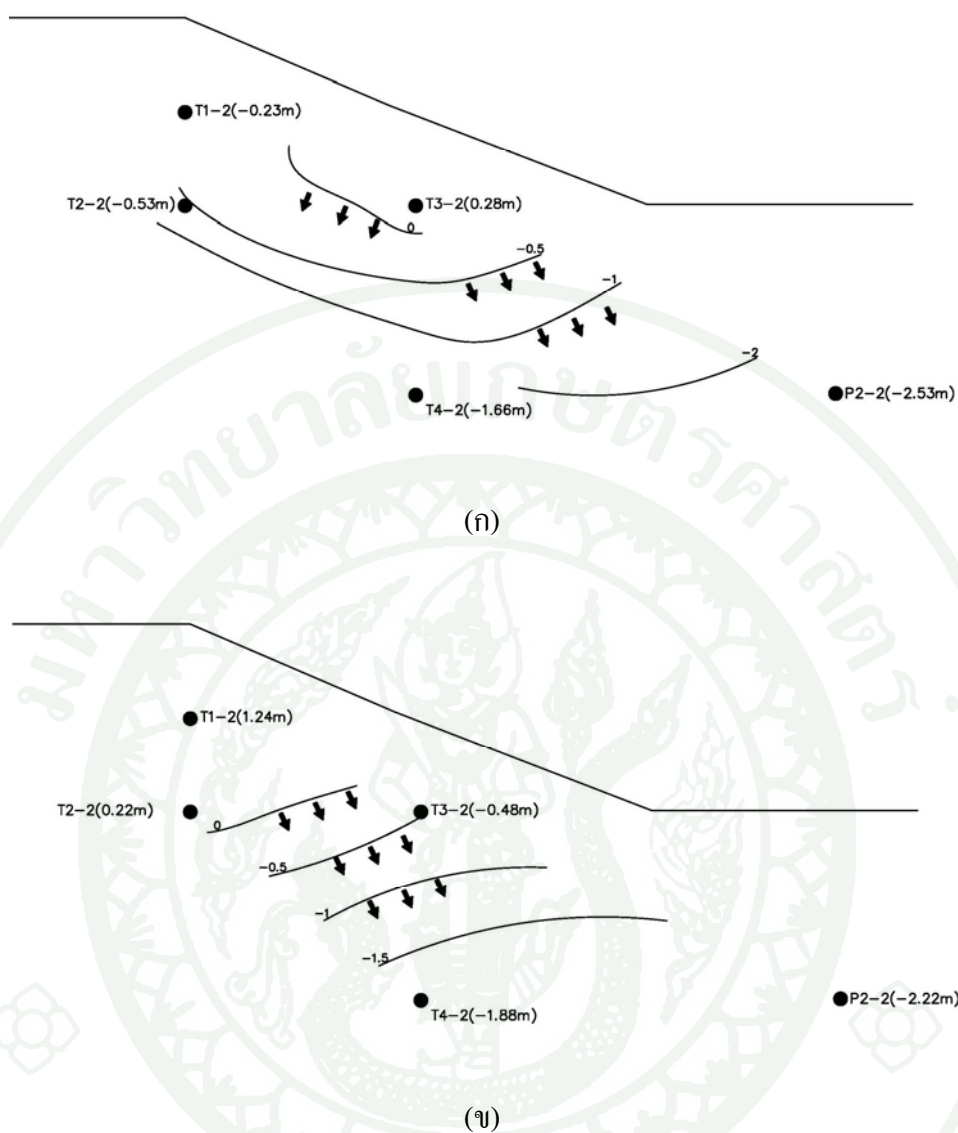
ภาพที่ 76 ค่าแรงดูดเมทริกบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มน้ำการยึดหดตัวปานกลาง

(ก) เดือนสิงหาคม 2552

(ข) เดือนตุลาคม 2552



ภาพที่ 77 ค่าศักย์รวม (Total Head) บริเวณที่เป็นดินเหนียวดัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง
(ก) เดือนสิงหาคม 2552 (ข) เดือนตุลาคม 2552



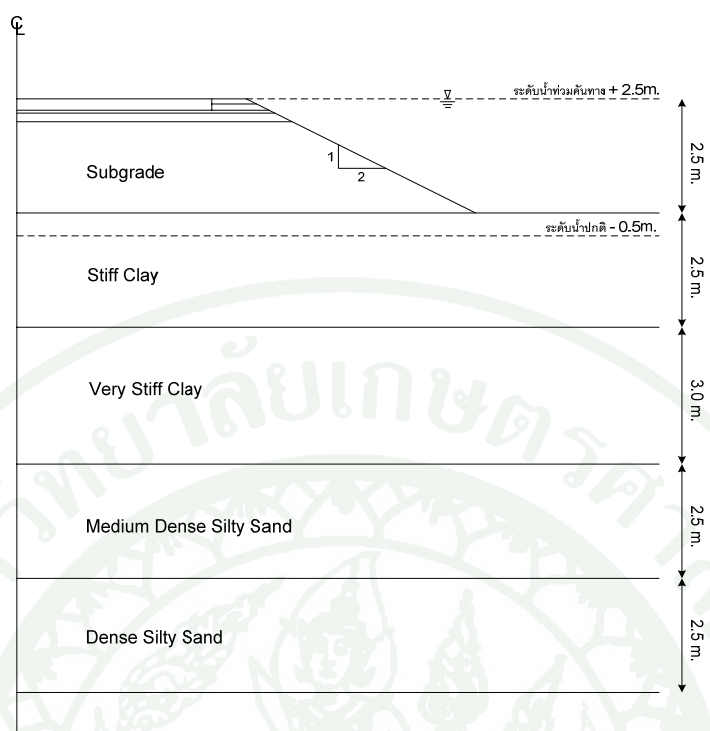
ภาพที่ 78 ค่าศักย์รวม (Total Head) บริเวณที่เป็นดินเหนียวดัดที่มีแนวโน้ม
การยึดหดตัวปานกลาง (ก) เดือนสิงหาคม 2552 (ข) เดือนตุลาคม 2552

5. การวิเคราะห์แบบจำลองและสรุปผลการวิเคราะห์

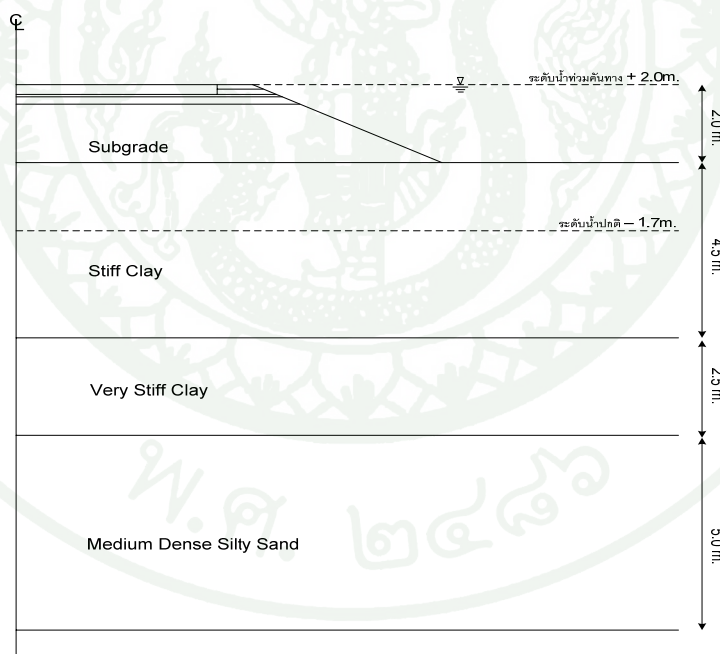
ในส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์โดยการจำลองพฤติกรรมของลาดดินคันทางในด้านต่างๆ ทั้งเสถียรภาพ (Stability) และการไหลซึม (Seepage) โดยได้เลือกใช้ชุดโปรแกรม Geostudio 2007 (โดยความอนุเคราะห์ของศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์) ในการวิเคราะห์ได้แก่ การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาด (Stability Analysis, SLOPE/W) ซึ่งพิจารณาทั้งดินในสภาวะอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ แรงดันน้ำทั้งค่าบวกและลบ และการไหลซึมในสภาวะ Transient (SEEP/W) ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของลาดดินคันทาง

5.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทาง (Stability Analysis)

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางนั้นจะพิจารณาระดับน้ำใต้ดินในระดับต่างๆ และการเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงเฉือนของชั้นดินคันทาง(Subgrade) จากกำลังรับแรงเฉือนสูงสุด (Peak Shear Strength) เป็นกำลังรับแรงเฉือนคงค้าง (Residual Shear Strength) , มุมของแรงเฉือนเนื่องจากแรงกด (ϕ^b) , สภาวะรับน้ำหนักบรรทุกบนไหล่ทาง, การไหลซึมของน้ำฝนลงสู่ลาดดินคันทาง, Tension crack เพื่อศึกษาโอกาสการเกิดรอยแตกร้าวบริเวณไหล่ทางจากค่า Factor of Safety โดยที่รูปตัดคันทางที่ใช้ในการวิเคราะห์และดินฐานรากได้จากข้อมูลการสำรวจภาคสนาม และการทดสอบในห้องปฏิบัติการจากรายงานโครงการศึกษาการแตกร้าวและการทรุดตัวบริเวณไหล่ทางหลวงในพื้นที่ภาคกลาง ของสำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง (บาร์เมส และคณะ, 2553) แสดงในภาพที่ 79



(ก)



(ข)

ภาพที่ 79 รูปตัดตามขวางของคันทางที่ใช้ในการวิเคราะห์

(ก) บริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง

(ข) บริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางมีทั้งสิ้น 56 กรณี ดังมีรายละเอียดในแต่ละกรณีดังตารางที่ 19 และ 20 สำหรับบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูงและบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลางตามลำดับ ในส่วนของพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางนั้นประกอบไปด้วยค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินและหน่วยน้ำหนักของวัสดุคันทางและฐานรากที่ได้รวบรวมจากรายงานโครงการศึกษาการแตกร้าวและการทรุดตัวบริเวณไหล่ทางหลวงในพื้นที่ภาคกลาง ของสำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง (बारमेศและคณะ, 2553) ยกเว้นกำลังรับแรงเฉือนของชั้นดินคันทาง (Subgrade) ที่ได้จากการทดสอบเนื้อตรงแบบปกติ (Consolidated Drained Test, CD test) ดังสรุปในตารางที่ 17 และ 18 สำหรับบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูงและบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลางตามลำดับและมีรายละเอียดที่ใช้พิจารณาสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางดังนี้

- การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำ

พิจารณาระดับน้ำในสภาวะปกติจากผลการตรวจวัดจากรายงานโครงการศึกษาการแตกร้าวและการทรุดตัวบริเวณไหล่ทางหลวงในพื้นที่ภาคกลาง ของสำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง (बारमेศและคณะ, 2553) ร่วมกับการพิจารณาในกรณีที่ฝนตกหนักจนมีระดับน้ำท่วมคันทางและสภาวะที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว (Rapid Drawdown) โดยมีระดับน้ำปกติและระดับน้ำท่วมคันทางบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูงและบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลางดังแสดงในภาพที่ 79

- กำลังรับแรงเฉือนของชั้นดินคันทาง (Subgrade)

พิจารณาค่ากำลังรับแรงเฉือนของชั้นดินคันทางที่ลดลงจากค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด (Peak Shear Strength) เข้าสู่กำลังรับแรงเฉือนคงค้าง (Residual Shear Strength) ที่ได้จากการทดสอบเนื้อตรงแบบปกติ (Consolidated Drained Test, CD test) โดยมีขั้นตอนและวิธีการดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว

- มุมของแรงเฉือนเนื่องจากแรงคูด (ϕ^b)

ในกรณีที่ระดับน้ำอยู่ในระดับปกติชั้นดินคันทางจะอยู่ในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำหรือในสภาวะที่แรงดันน้ำมีค่าเป็นลบ เพื่อเป็นการศึกษาและประเมินเสถียรภาพของคันทางในสภาวะที่ชั้นดินคันทางไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ดังนั้นจึงนำค่ามุมของแรงเฉือนเนื่องจากแรงคูด(ϕ^b) ที่ได้จากกรทดสอบเฉือนตรงชนิดวัดแรงคูดของดินในบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูงและบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง

- สภาวะรับน้ำหนักบรรทุกบนไหล่ทาง

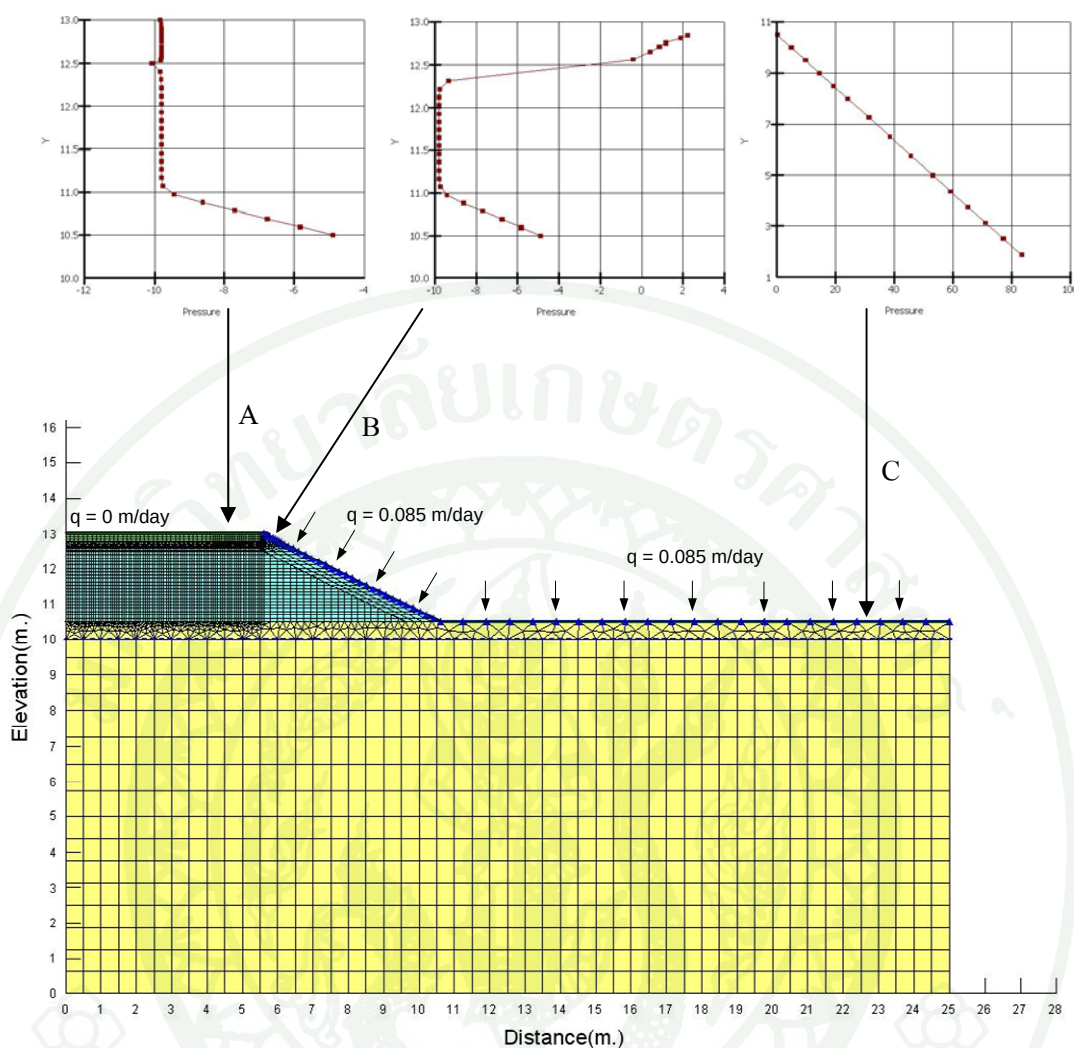
ในกรณีที่มิมีน้ำหนักรถยนต์นั้นกำหนดให้มีลักษณะแบบ Uniform Load กระทำตลอดทั้งผิวทางและมีค่าเท่ากับ 1 t/m^2

- การไหลซึมของน้ำฝนลงสู่ลาดดินคันทาง

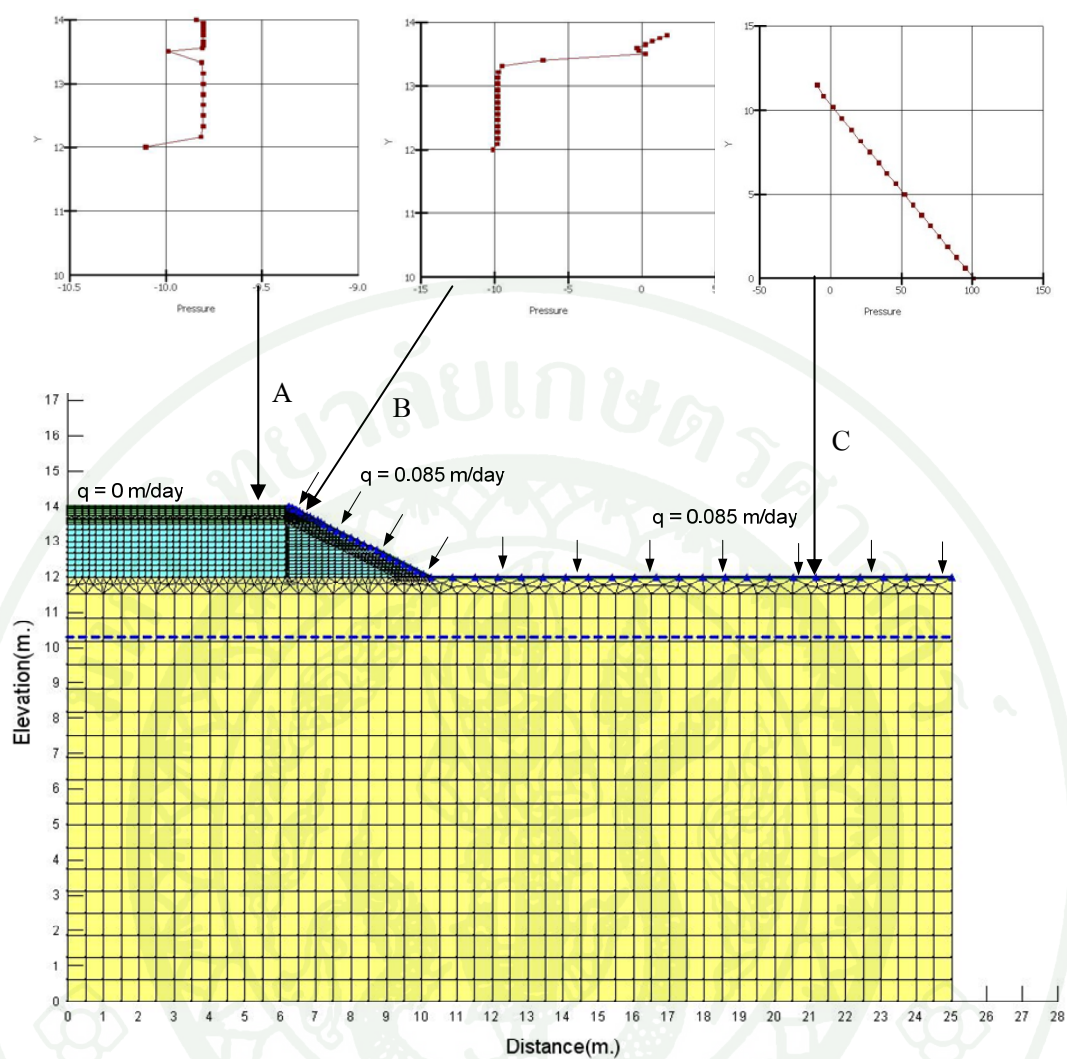
การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางจากการไหลซึมของน้ำฝนเป็นการวิเคราะห์ที่ใช้การเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำในคันทางภายหลังจากที่มีการไหลซึมของน้ำฝนระยะเวลาหนึ่ง โดยเลือกใช้วิธีการไหลซึมแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา(Transient Analysis) และกำหนดให้พาด้านบนของลาดคันทางไม่เกิดสภาพเจ็นองของน้ำบนลาดคันทาง โดยมีลักษณะขอบเขต (Boundary Conditions) ในการวิเคราะห์ให้มีการไหลซึมบริเวณด้านข้างของลาดคันทางเท่านั้นและไม่มีการไหลซึมในส่วนที่เป็นผิวทางเนื่องจากมีวัสดุผิวทางปกคลุมอยู่ (พิจารณาในกรณีที่วัสดุผิวทางมีคุณภาพดีน้ำไม่สามารถไหลซึมลงไปในพื้นที่นี้ได้) ในเบื้องต้นกำหนดค่าการไหลซึมมีปริมาณน้ำฝน Unit Flux (q) เท่ากับ 0.085 เมตร/วัน ซึ่งเป็นปริมาณน้ำฝนที่ตกมากที่สุดในช่วงเดือนสิงหาคมถึงตุลาคม 2552 ที่ได้ข้อมูลจากสถานีตรวจวัดน้ำฝนของกรมอุตุนิยมวิทยาในพื้นที่จังหวัดสุพรรณบุรี และกำหนดให้ทำการวิเคราะห์การไหลซึมแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient Analysis) เป็นระยะเวลา 5 วัน เทียบเท่ากับปริมาณน้ำฝน 425 มม. และการวิเคราะห์การไหลซึมในลักษณะดังกล่าวขนาดของตารางไฟไนท์อีลิเมนต์ (Mesh) นั้นมีอิทธิพลต่อการวิเคราะห์อย่างมาก Toll et al. (2007) แนะนำการกำหนด Mesh สำหรับแต่ละอีลิเมนต์ขนาด $0.1 \times 0.1 \text{ m}^2$ เนื่องจากให้ผลที่มีความถูกต้องกว่าขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$ ในการศึกษาจึงได้เลือกใช้อีลิเมนต์ขนาด $0.1 \times 0.1 \text{ m}^2$ ในบริเวณลาดคันทางซึ่งเป็นจุดที่สนใจและเลือกใช้อีลิเมนต์ขนาดใหญ่ขึ้นใน

ชั้นดินฐานราก โดยมีลักษณะของตารางไฟไนท์อีลิเมนต์ (Mesh) และลักษณะของแรงดันน้ำภายในลาดดินคันทางภายหลังมีการไหลซึมรวม 425 มม.แสดงในภาพที่ 80 และ 81 สำหรับบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูงและบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลางตามลำดับ และมีค่าแรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงหลังจากการไหลซึมของน้ำฝน (5 วัน) แสดงในภาพที่ 82 และ 83 สำหรับบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูงและบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลางตามลำดับ

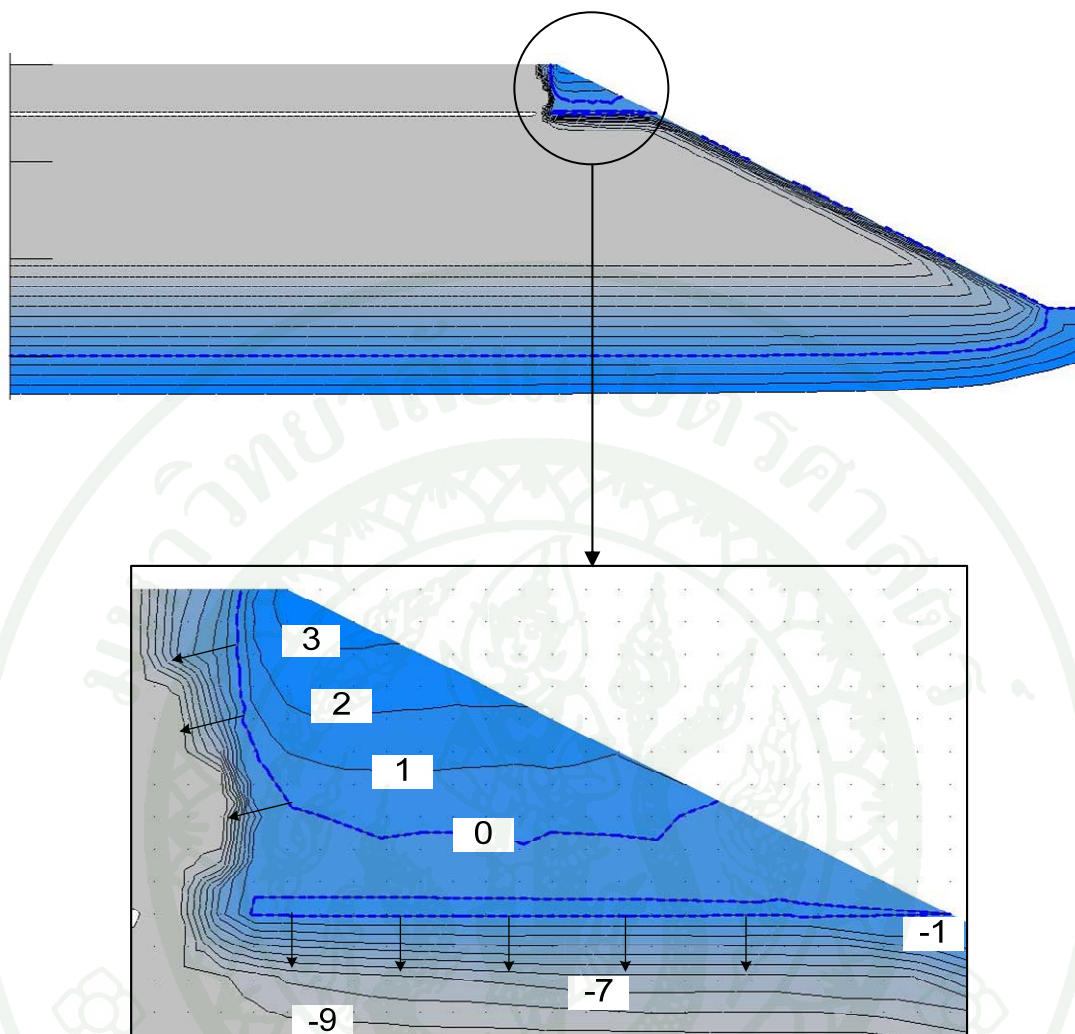
เนื่องจากการวิเคราะห์การไหลซึมในบริเวณคันทางซึ่งอยู่สูงกว่าระดับน้ำใต้ดินดังแสดงในภาพที่ 80 และ 81 เป็นการไหลซึมผ่านดินในสถานะไม่อิ่มน้ำหรือในสถานะที่แรงดันน้ำมีค่าติดลบ พารามิเตอร์สำคัญที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์การไหลซึมนี้จึงต้องใช้พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับดินไม่อิ่มน้ำ ได้แก่ Permeability Function (K_p) และ Soil-Water Characteristic Curve ในเบื้องต้นเพื่อเป็นการศึกษาถึงเสถียรภาพของลาดดินคันทางจากการไหลซึมของน้ำฝน จึงได้เลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวที่ได้จากรายงานโครงการศึกษาการแตกร้าวและการทรุดตัวบริเวณไหล่ทางหลวงในพื้นที่ภาคกลาง ของสำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง (बारमेศ และคณะ, 2553) ซึ่งได้ประมาณค่าจากฐานข้อมูลชุดดินในประเทศไทยโดย Yingjajaval (1993) และจากสมการเอ็มพริคัลโดย Jackson (1972); Arya and Paris (1982) สำหรับพารามิเตอร์ของดินไม่อิ่มน้ำของดินบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูงและบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลางได้สรุปไว้ดังแสดงในภาพที่ 84



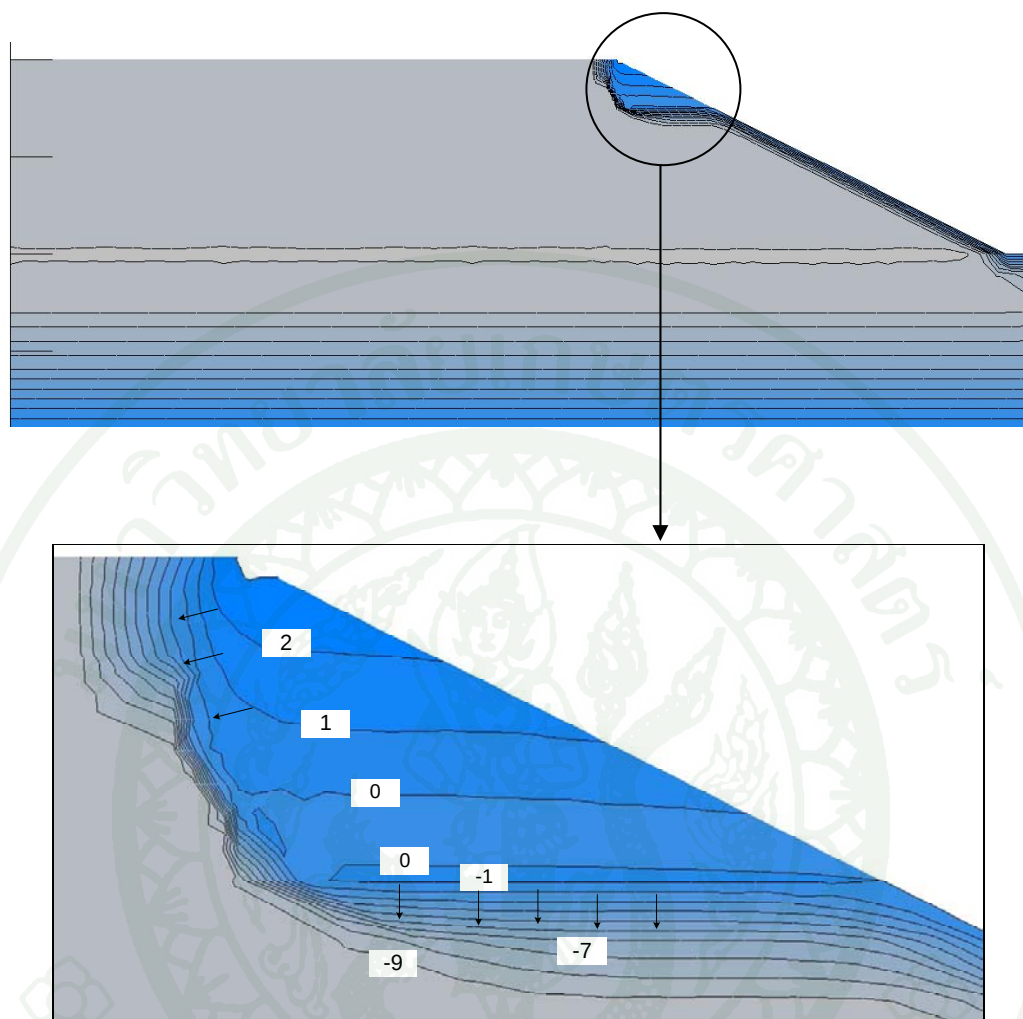
ภาพที่ 80 ลักษณะของ Finite element mesh, Boundary conditions และลักษณะแรงดันน้ำภายในลาดดินคันทางภายหลังมีการไหลซึมรวม 425 มม. สำหรับบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง



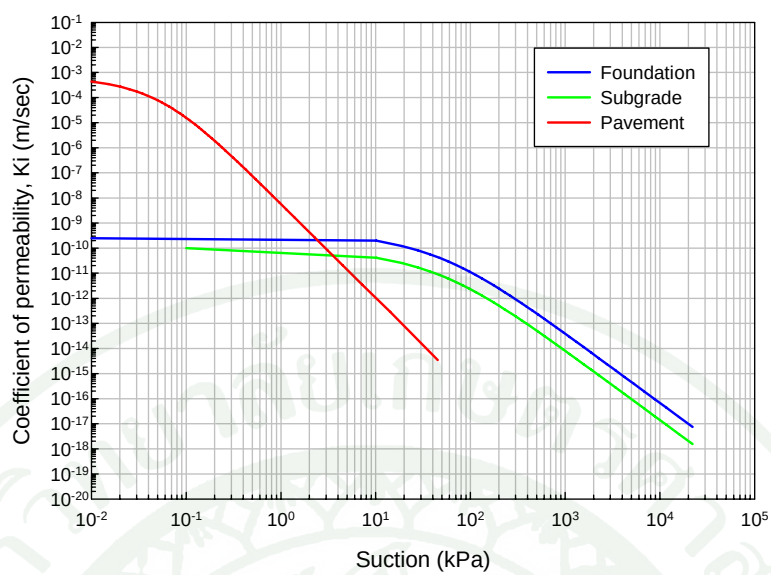
ภาพที่ 81 ลักษณะของ Finite element mesh, Boundary conditions และลักษณะแรงดันน้ำภายในลาดดินคันทางภายหลังมีการไหลซึมรวม 425 มม. สำหรับบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง



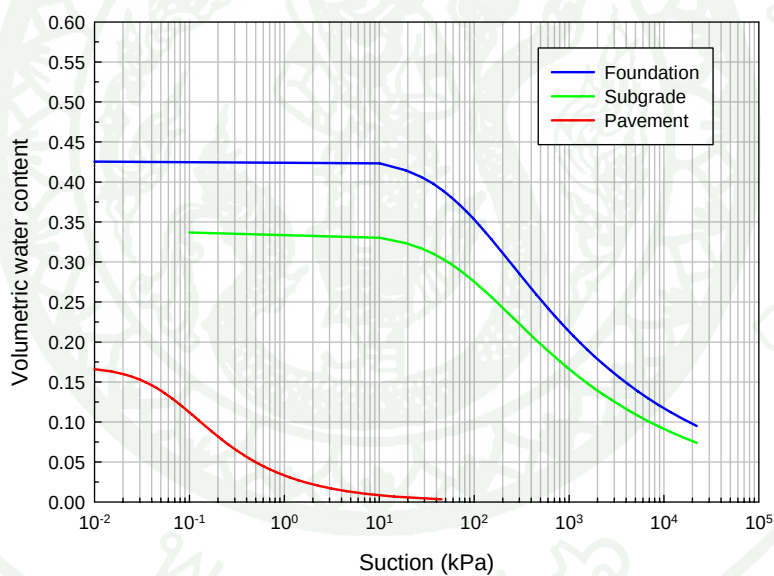
ภาพที่ 82 ค่าแรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงหลังการไหลซึมของน้ำฝน (5 วัน)
สำหรับบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มน้ำการยึดหดตัวสูง



ภาพที่ 83 ค่าแรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงหลังการไหลซึมของน้ำฝน (5 วัน)
สำหรับบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง



(ก)



(ข)

ภาพที่ 84 ลักษณะความสัมพันธ์ต่างๆในสถานะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำสำหรับบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มน้ำการยึดหดตัวสูงและดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มน้ำการยึดหดตัวปานกลาง
(ก) K_i และ Suction (ข) Volumetric Water Content และ Suction

- Tension Crack

กำหนดบริเวณที่เกิด Tension Crack โดยใช้ข้อมูลจากรายงานการสำรวจและทดสอบดินภาคสนามของโครงการศึกษาการแตกร้าวและการทรุดตัวบริเวณไหล่ทางหลวงในพื้นที่ภาคกลาง ของสำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง (बारเมศ และคณะ, 2553) ซึ่งทำให้ทราบถึงตำแหน่งและความลึกโดยบริเวณคันทางที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูงและบริเวณคันทางที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลางนั้น Tension Crack จะอยู่บริเวณไหล่ทางแอสฟัลต์คอนกรีตและมีความลึกถึงชั้น Subbase

ตารางที่ 17 ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุคันทางและดินฐานรากที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง

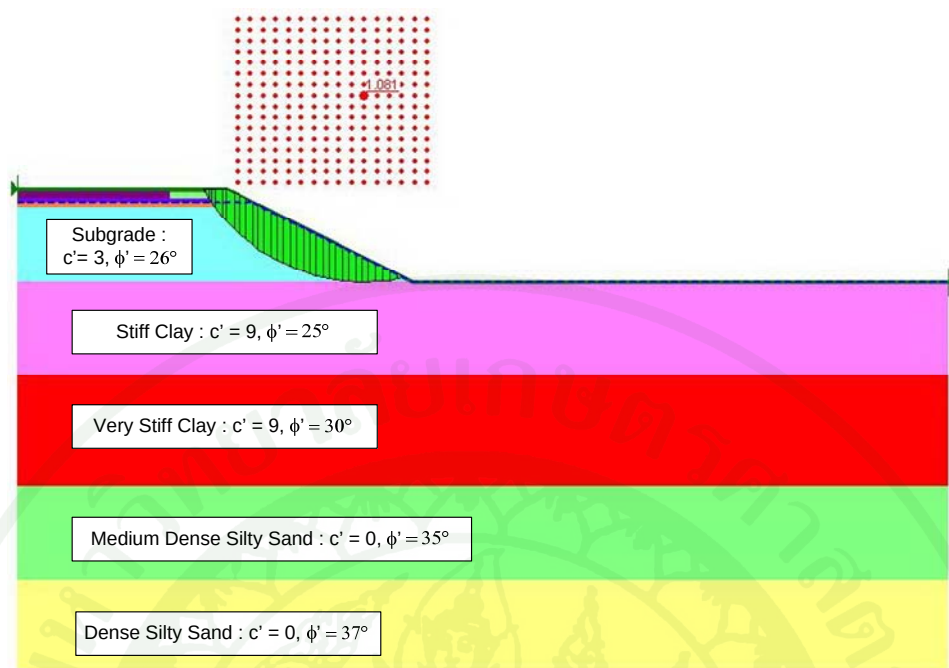
วัสดุ	γ (kN/m^3)	Peak		Residual		ϕ^b (Degree)
		c' (kPa)	ϕ' (Degree)	c' (kPa)	ϕ' (Degree)	
1. RC-Pavement	24	0	40	-	-	-
2. Asphaltic Concrete	23	0	40	-	-	-
3. Crushed Rock	23	0	40	-	-	-
4. Sand Cushion	18	0	33	-	-	-
5. Subbase	22	6	40	-	-	-
6. Compacted Subgrade	17	3	26	2	17	26
7. Stiff Clay	20	9	25	-	-	-
8. Very Stiff Clay	21	9	30	-	-	-
9. Medium Dense Silty Sand	21	0	35	-	-	-
10. Dense Silty Sand	22	0	37	-	-	-

ตารางที่ 18 ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุคันทางและดินฐานรากที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง

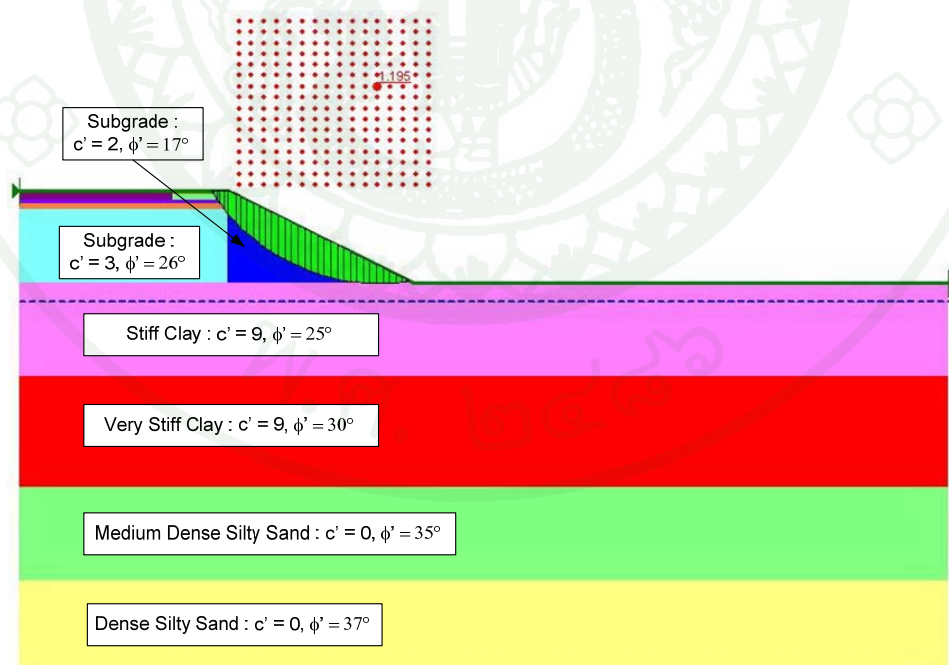
วัสดุ	γ (kN/m ³)	Peak		Residual		ϕ^b (Degree)
		c' (kPa)	ϕ' (Degree)	c' (kPa)	ϕ' (Degree)	
1. RC-Pavement	24	0	40	-	-	-
2. Asphaltic Concrete	23	0	40	-	-	-
3. Crushed Rock	23	0	40	-	-	-
4. Sand Cushion	18	0	33	-	-	-
5. Subbase	22	14	40	-	-	-
6. Compacted Subgrade	17	5	28	0	19	28
7. Stiff Clay	20	9	25	-	-	-
8. Very Stiff Clay	21	9	30	-	-	-
9. Medium Dense Silty Sand	21	0	35	-	-	-

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางอันเนื่องมาจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งแตกต่างกันในแต่ละกรณีนั้นสรุปได้ดังตารางที่ 19 และ 20 สำหรับบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูงและบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลางตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์โดยพิจารณาจากค่า Factor of Safety นั้นพบว่าค่า F.S. ทุกกรณีนั้นมีค่ามากกว่า 1 โดยปัจจัยที่ส่งผลทำให้ค่า F.S. น้อยกว่า 1.5 ซึ่งมีโอกาสที่คันทางจะเกิดการเคลื่อนตัวนั้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำและกำลังรับแรงเฉือนที่ลดลงบริเวณลาดคันทาง ดังเช่นกรณีที่ 3, 4, 9, 10 ของบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง แสดงในภาพที่ 85, 86, 87 และ 88 และกรณีที่ 4, 10 ของบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลางดังแสดงในภาพที่ 89 และ 90 โดยการพิจารณากำลังรับแรงเฉือนที่ลดลงบริเวณลาดคันทางสอดคล้องกับผลการตรวจวัดภาคสนามโดย Kunzelstab และการสังเกตระนาบรอยแตกและความชื้นในวัสดุคันทางจากการขุด Test Pit จากรายงานของโครงการศึกษาการแตกร้าวและการทรุดตัวของบริเวณไหล่ทางหลวงในพื้นที่ภาคกลาง ของสำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง (बारमेศและคณะ, 2553) ในส่วนการศึกษาพฤติกรรมของลาดคันทางเนื่องจากการไหลซึมของน้ำฝนลงสู่ลาดคันทางโดยพิจารณาจากค่า F.S. นั้นพบว่าในสภาวะเริ่มต้นที่คันทางอยู่ในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำนั้นค่า F.S. มีค่าสูงและเมื่อมีเกิดฝนตกและมีการไหลซึมของน้ำฝนลงสู่ลาดคันทางค่า F.S. จะลดต่ำลง ดังเช่นกรณีที่ 6 และ 13 (F.S. ลดลงจาก 3.38 เหลือ 2.47) ดังแสดงในภาพที่ 91

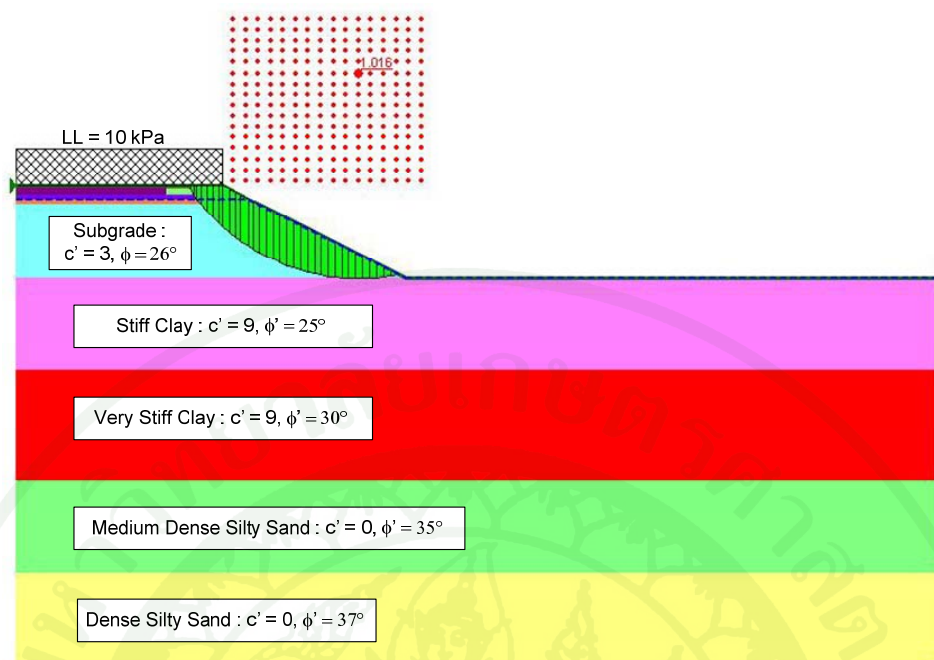
และ 92 และกรณีที่ 12 และ 14 (F.S.ลดลงจาก 2.51 เหลือ 2.14) ดังแสดงในภาพที่ 93 และ 94 ภายในระยะเวลา 5 วัน เทียบเท่ากับปริมาณน้ำฝน 425 มม.ของบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง และกรณีที่ 6 และ 13 (F.S.ลดลงจาก 6.12 เหลือ 3.62) ดังแสดงในภาพที่ 95 และ 96 และกรณีที่ 12 และ 14 (F.S.ลดลงจาก 4.16 เหลือ 2.94) ดังแสดงในภาพที่ 97 และ 98 ภายในระยะเวลา 5 วัน เทียบเท่ากับปริมาณน้ำฝน 425 มม.ของบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวปริมาณน้ำฝนก็เป็นปัจจัยที่สำคัญในการนำมาใช้พิจารณาเสถียรภาพของลาดดินคันทางในกรณีที่คันทางอยู่ในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำด้วยเช่นเดียวกัน ดังนั้นในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่ใช้ดินเหนียวเป็นวัสดุคันทางและอยู่ในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำนั้นจะต้องพิจารณาการลดลงของค่ากำลังรับแรงเฉือน และการเสถียรภาพที่ลดลงเนื่องจากการไหลซึมของน้ำฝนเพิ่มเติมเพื่อตรวจสอบโอกาสที่คันทางจะเกิดการเคลื่อนตัวและส่งผลทำให้ปัญหาการแตกร้าวของไหล่ทาง



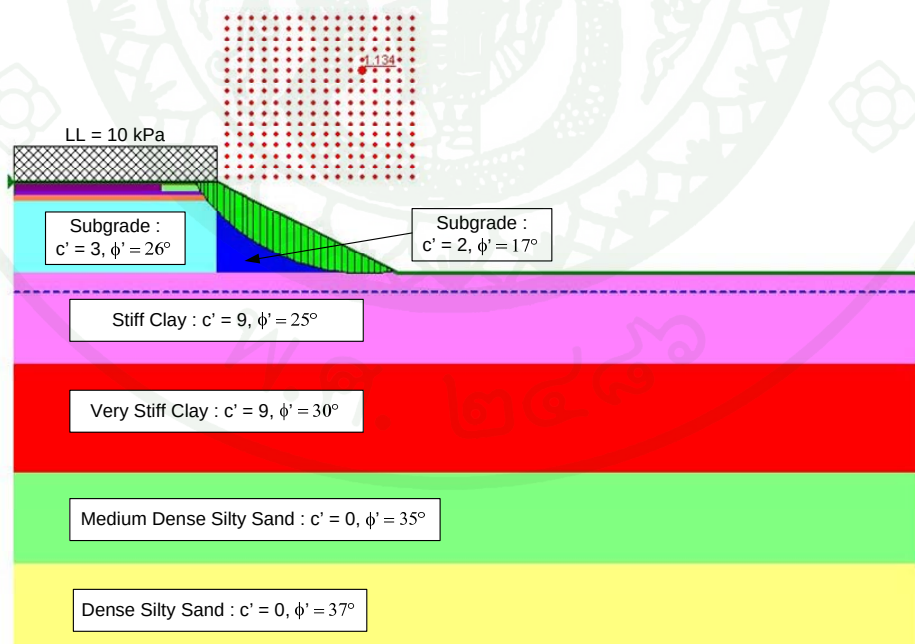
ภาพที่ 85 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้ม
การยืดหดตัวสูง กรณีที่ 3



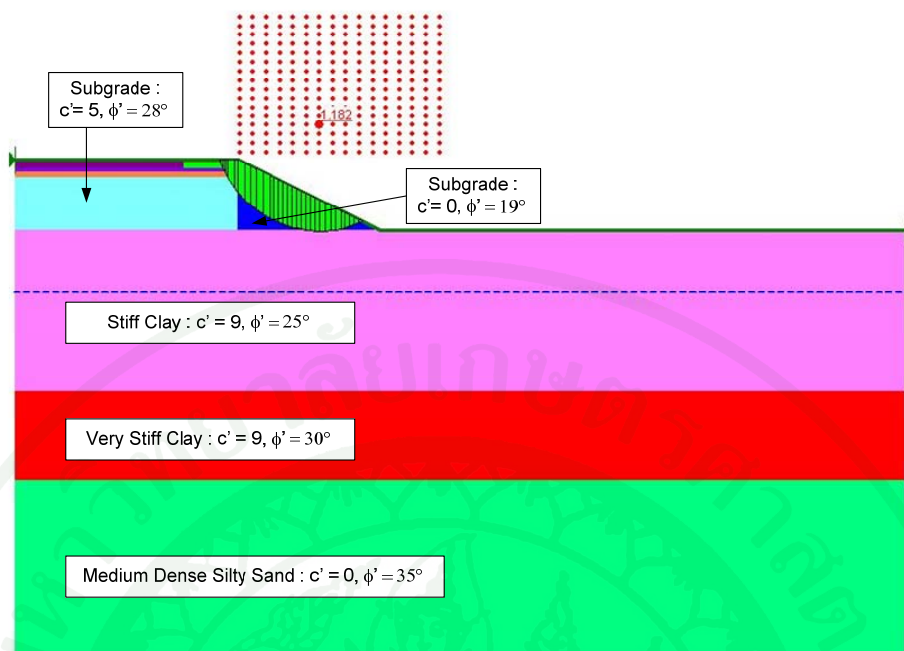
ภาพที่ 86 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้ม
การยืดหดตัวสูง กรณีที่ 4



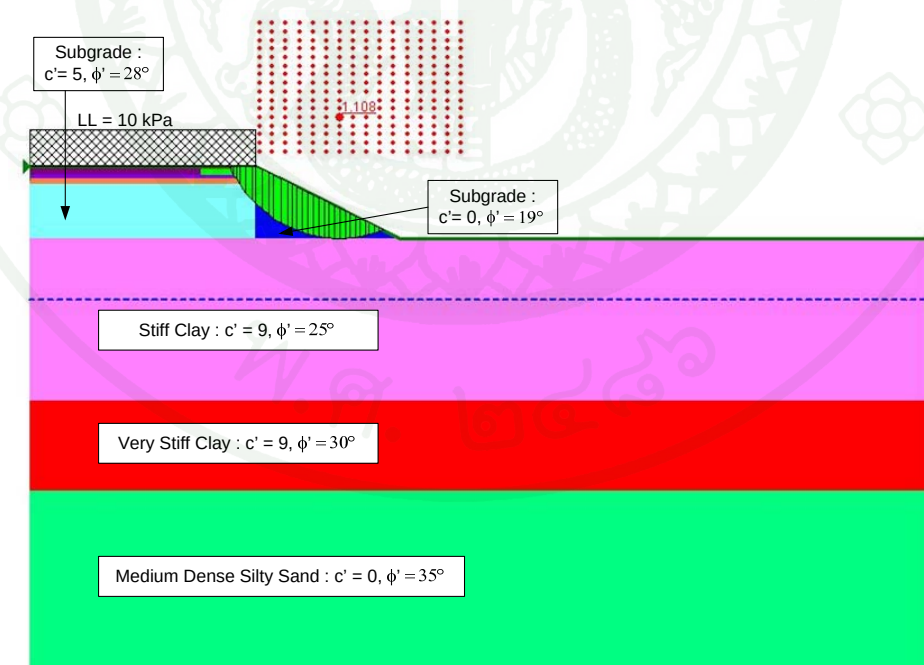
ภาพที่ 87 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง กรณีที่ 9



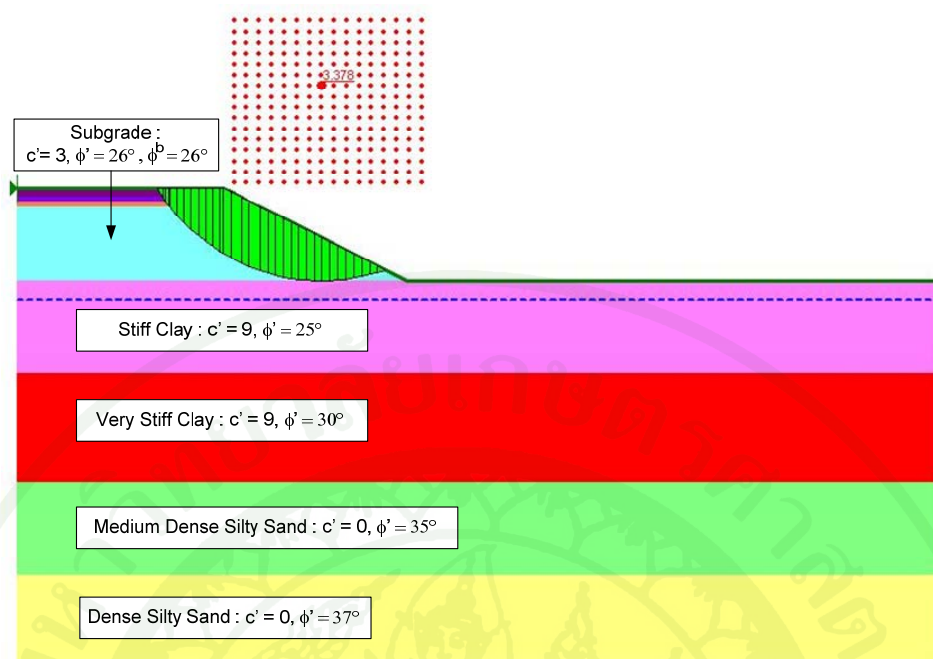
ภาพที่ 88 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง กรณีที่ 10



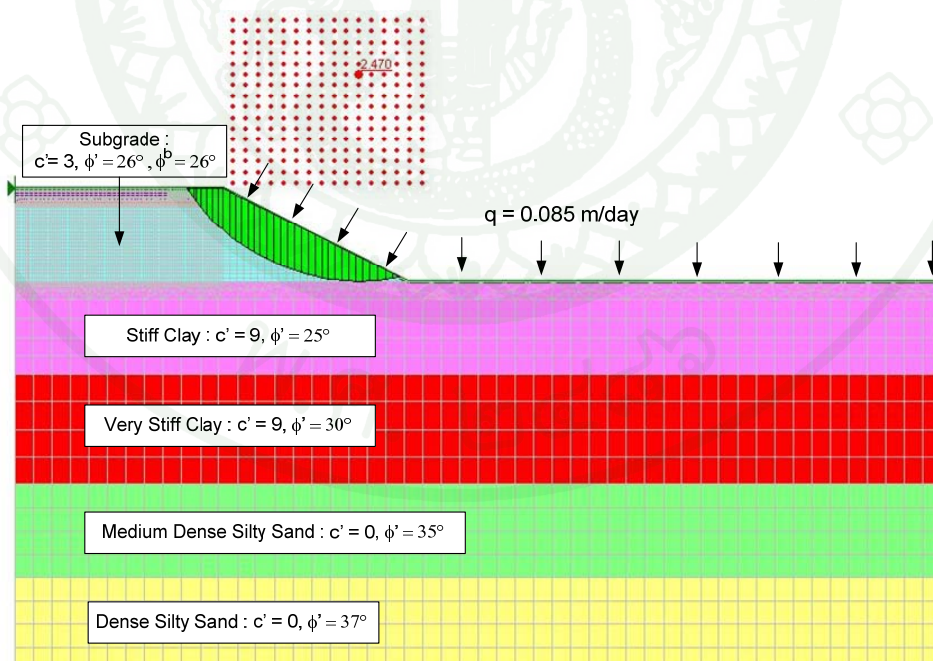
ภาพที่ 89 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง กรณีที่ 4



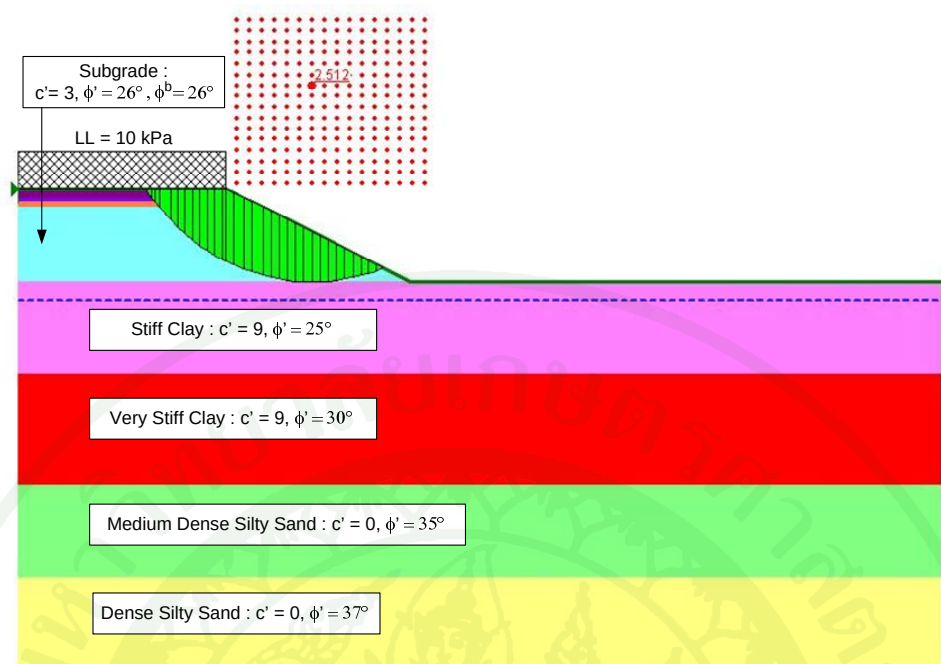
ภาพที่ 90 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง กรณีที่ 10



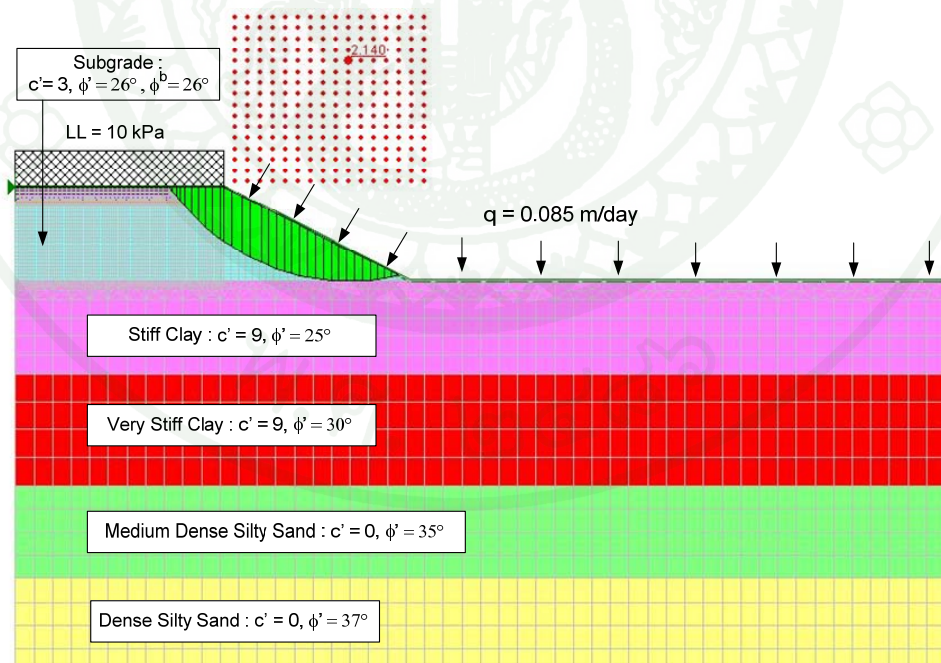
ภาพที่ 91 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยืดหดตัวสูง กรณีที่ 6



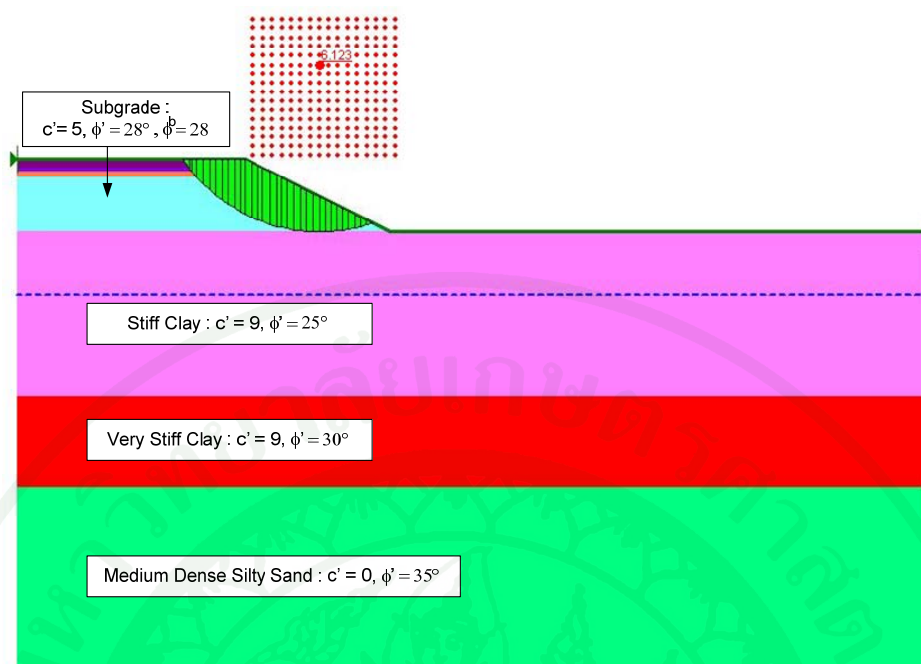
ภาพที่ 92 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยืดหดตัวสูง กรณีที่ 13



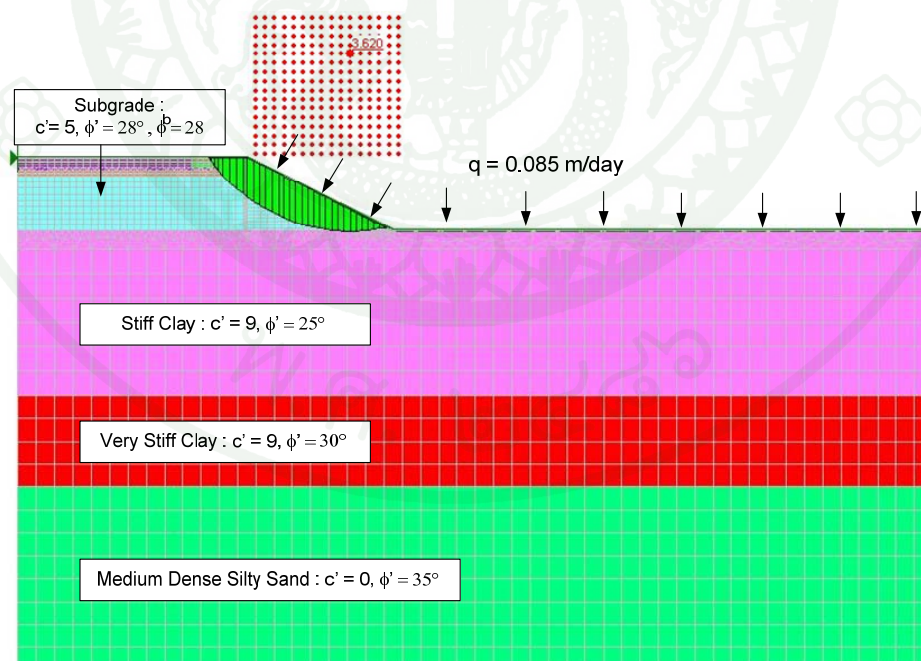
ภาพที่ 93 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้ม
การยืดหดตัวสูง กรณีที่ 12



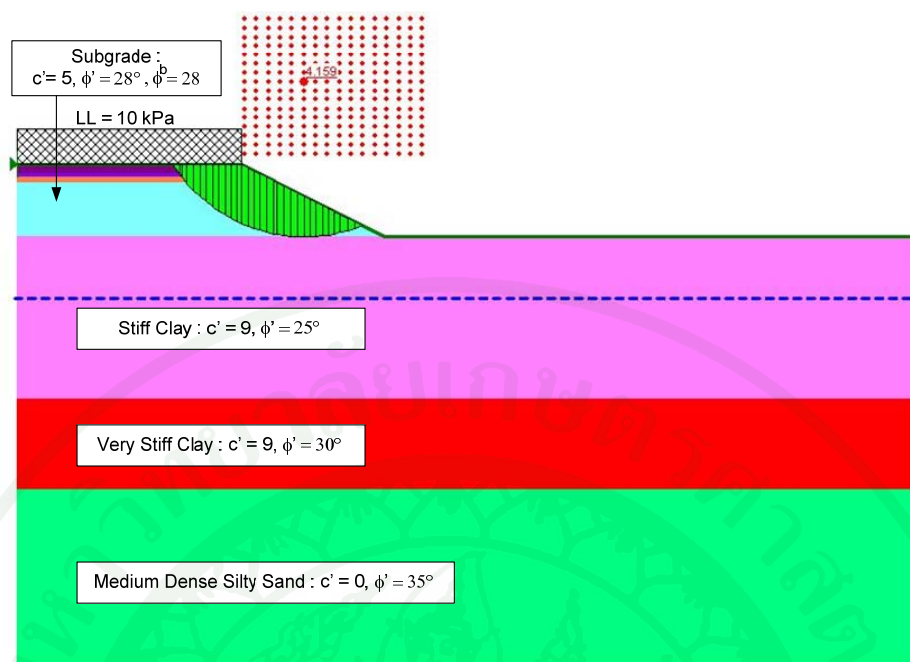
ภาพที่ 94 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้ม
การยืดหดตัวสูง กรณีที่ 14



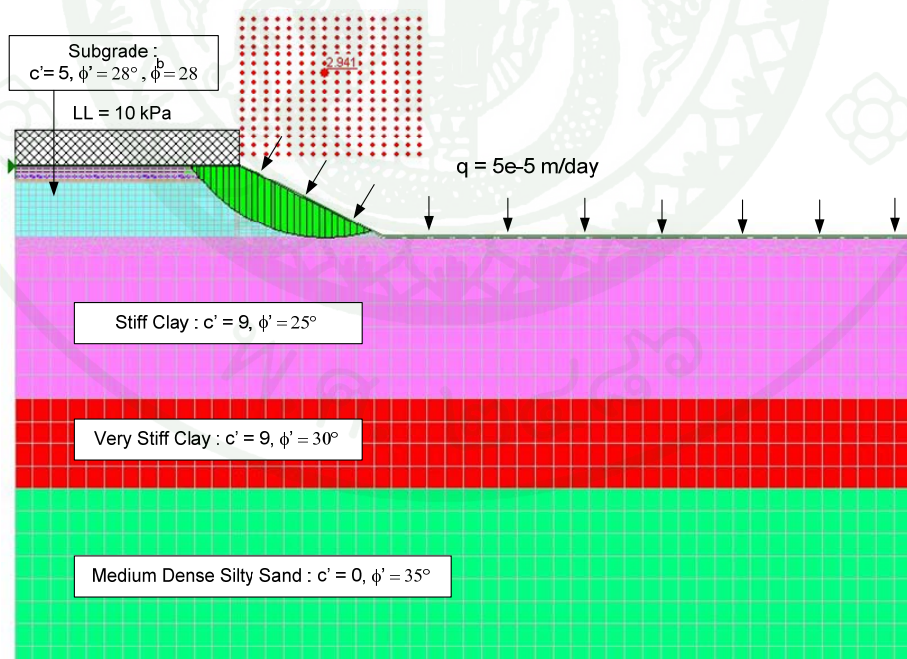
ภาพที่ 95 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็นดินเหนียวคอด้มีแนวโน้มการยืดหดตัวปานกลาง กรณีที่ 6



ภาพที่ 96 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็นดินเหนียวคอด้มีแนวโน้มการยืดหดตัวปานกลาง กรณีที่ 13



ภาพที่ 97 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง กรณีที่ 12



ภาพที่ 98 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง กรณีที่ 14

ตารางที่ 19 สรุปรายละเอียดและผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง

กรณี	ลักษณะระดับน้ำ			กำลังรับแรงเฉือนของ		พิจารณามุมของแรงเฉือน		พิจารณา	พิจารณาการไหล	พิจารณา	F.S.
	ระดับปกติ	น้ำท่วมคันทาง	Rapid Drawdown	ชั้นดินคันทาง (Subgrade)		เนื่องจากแรงดูด (ϕ^b)					
				Peak	Residual	Unsaturated Parameter	Surcharge	ซึมของน้ำฝน	Tension Crack		
1	/			/							1.81
2		/		/							2.73
3			/	/							1.08
4	/				/						1.20
5		/			/						1.86
6	/			/		/					3.38
7	/			/			/				1.63
8		/		/			/				2.12
9			/	/			/				1.02
10	/				/		/				1.13

ตารางที่ 19 (ต่อ)

กรณี	ลักษณะระดับน้ำ			กำลังรับแรงเฉือนของ		พิจารณามุมของแรงเฉือน		พิจารณา	พิจารณาการไหล	พิจารณา	F.S.
				ชั้นดินคันทาง (Subgrade)		เนื่องจากแรงดูด (ϕ^b)					
	ระดับปกติ	น้ำท่วมคันทาง	Rapid Drawdown	Peak	Residual	Unsaturated Parameter	Surcharge				
11		/			/		/				1.58
12	/			/		/	/				2.51
13	/			/		/			/		2.47
14	/			/		/	/		/		2.14
15	/			/						/	1.83
16		/		/						/	2.82
17			/	/						/	1.08
18	/				/					/	1.20
19		/			/					/	1.88
20	/			/		/				/	3.38

ตารางที่ 19 (ต่อ)

กรณี	ลักษณะระดับน้ำ			กำลังรับแรงเฉือนของ		พิจารณาผลของแรงเฉือน				F.S.
	ระดับปกติ	น้ำท่วมคันทาง	Rapid Drawdown	ชั้นดินคันทาง (Subgrade)		เนื่องจากแรงดูด (ϕ^b)	พิจารณา	พิจารณาการไหลซึมของน้ำฝน	พิจารณา	
				Peak	Residual	Unsaturated Parameter	Surcharge		Tension Crack	
21	/			/			/		/	1.70
22		/		/			/		/	2.18
23			/	/			/		/	1.03
24	/				/		/		/	1.16
25		/			/		/		/	1.71
26	/			/		/	/		/	2.51
27	/			/		/		/	/	2.53
28	/			/		/	/	/	/	2.17

ตารางที่ 20 สรุปรายละเอียดและผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคันทางบริเวณที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง

กรณี	ลักษณะระดับน้ำ			กำลังรับแรงเฉือนของ ชั้นดินคันทาง (Subgrade)		พิจารณาผลของแรงเฉือน เนื่องจากแรงดูด (ϕ^b)		พิจารณาการไหล ซึมของน้ำฝน	พิจารณา Tension Crack	F.S.
	ระดับปกติ	น้ำท่วมคันทาง	Rapid Drawdown	Peak	Residual	Unsaturated Parameter	Surcharge			
1	/			/						2.55
2		/		/						3.98
3			/	/						1.76
4	/				/					1.18
5		/			/					1.64
6	/			/		/				6.12
7	/			/			/			2.16
8		/		/			/			2.84
9			/	/			/			1.54
10	/				/		/			1.11

ตารางที่ 20 (ต่อ)

กรณี	ลักษณะระดับน้ำ			กำลังรับแรงเฉือนของ		พิจารณาผลของแรงเฉือน		พิจารณา	พิจารณาการไหล	พิจารณา	F.S.
	ระดับปกติ	น้ำท่วมคันทาง	Rapid Drawdown	ชั้นดินคันทาง (Subgrade)		เนื่องจากแรงดูด (ϕ^b)					
				Peak	Residual	Unsaturated Parameter	Surcharge				
11		/			/		/				1.59
12	/			/		/	/				4.16
13	/			/		/		/			3.62
14	/			/		/	/	/			2.94
15	/			/						/	2.58
16		/		/						/	4.21
17			/	/						/	1.76
18	/				/					/	1.16
19		/		/						/	1.47
20	/			/		/				/	6.13

ตารางที่ 20 (ต่อ)

กรณี	ลักษณะระดับน้ำ			กำลังรับแรงเฉือนของ		พิจารณามุมของแรงเฉือน		พิจารณา	พิจารณาการไหล	พิจารณา	F.S.
	ระดับปกติ	น้ำท่วมคันทาง	Rapid Drawdown	ชั้นดินคันทาง (Subgrade)		เนื่องจากแรงดูด (ϕ^b)					
				Peak	Residual	Unsaturated Parameter	Surcharge	ซึมของน้ำฝน	Tension Crack		
21	/			/			/		/		2.26
22		/		/			/		/		2.92
23			/	/			/		/		1.59
24	/				/		/		/		1.12
25		/			/		/		/		1.32
26	/			/		/	/		/		4.16
27	/			/		/		/	/		3.72
28	/			/		/	/	/	/		3.00

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

1. จากผลการทดสอบคุณสมบัติชั้นพื้นฐานและกำลังรับแรงเฉือนในสถานะที่ดินอิ่มตัวด้วยน้ำและไม่อิ่มตัวด้วยน้ำพบว่าบริเวณที่มีการแตกร้าวของไหล่ทางแอสฟัลต์คอนกรีตรุนแรงดินเหนียวที่ไซบดอัดเป็นวัสดุคันทาง (Subgrade) มีค่า PI อยู่ในช่วง 26-34 มีส่วนที่เป็นดินเหนียว 41.2% จำแนกประเภทดินได้เป็น CL-CH และเมื่อพิจารณาจากค่า PI สามารถจำแนกแนวโน้มการยึดหดตัวของดินโดยใช้เกณฑ์ของ Gerald (1974) ได้เป็นดินที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง ในสถานะที่ดินอิ่มตัวด้วยน้ำกำลังรับแรงเฉือนสูงสุด (Peak Shear Strength) ที่ได้จากการทดสอบมีค่า $c' = 3$, $\phi' = 26^\circ$ กำลังรับแรงเฉือนคงค้าง (Residual Shear Strength) มีค่า $c' = 2$, $\phi' = 17^\circ$ และในสถานะที่ดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำค่ามุมของแรงเฉือนเนื่องจากแรงดูด (ϕ^b) ที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 27° บริเวณที่ไม่มีการแตกร้าวหรือรอยแตกร้าวของไหล่ทางแอสฟัลต์คอนกรีตไม่รุนแรงดินเหนียวที่ไซบดอัดเป็นวัสดุคันทาง (Subgrade) มีค่า PI อยู่ในช่วง 12-22 มีส่วนที่เป็นดินเหนียว 30.8% จำแนกประเภทดินได้เป็น CL และเมื่อพิจารณาจากค่า PI สามารถจำแนกแนวโน้มการยึดหดตัวของดินโดยใช้เกณฑ์ของ Gerald (1974) ได้เป็นดินที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง ในสถานะที่ดินอิ่มตัวด้วยน้ำกำลังรับแรงเฉือนสูงสุด (Peak Shear Strength) ที่ได้จากการทดสอบมีค่า $c' = 5$, $\phi' = 28^\circ$ กำลังรับแรงเฉือนคงค้าง (Residual Shear Strength) มีค่า $c' = 0$, $\phi' = 19^\circ$ และในสถานะที่ดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำค่ามุมของแรงเฉือนเนื่องจากแรงดูด (ϕ^b) ที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 30°

2. จากผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณะของดินบริเวณที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง (PI อยู่ในช่วง 26-34) และบริเวณที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง (PI อยู่ในช่วง 12-22) นั้นพบว่าค่าแรงดูดที่อากาศเริ่มเข้าไปในช่องว่างของดินทั้ง 2 มีค่าสูง โดยเมื่อเทียบกับ θ (Volumetric water content) ที่ค่าแรงดูดเท่ากันจะพบว่าดินที่มีค่า PI มากกว่าจะมีปริมาณน้ำในดินต่อปริมาตรทั้งหมดสูงกว่า และมีการหดตัวมากกว่าเมื่อแรงดูดเพิ่มขึ้น ทำให้เมื่อนำมาใช้เป็นวัสดุคันทางแล้วจะส่งผลให้ดินบริเวณนี้มีความอ่อนตัวและหดตัวง่าย มีแนวโน้มจะทำให้เกิดปัญหาการแตกร้าวบริเวณไหล่ทางแอสฟัลต์คอนกรีตได้

3. ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดคันทางโดยพิจารณาจากค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety, F.S.) บริเวณที่ดินคันทางมีแนวโน้มการยึดหดตัวสูงและบริเวณที่ดินคันทางมีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลางพบว่าค่า F.S. ทุกกรณีนั้นมีค่าสูงกว่า 1 อย่างไรก็ตามเมื่อค่า F.S. น้อยกว่า 1.5 ไหล่ทางอาจมีโอกาสดันตัวได้ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลทำให้ค่า F.S. ลดต่ำลงน้อยกว่า 1.5 ในบริเวณของทั้ง 2 พื้นที่นั้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำและกำลังรับแรงเฉือนที่ลดลงเท่ากับค่ากำลังรับแรงเฉือนคงค้าง (Residual Shear Strength) ในบริเวณลาดคันทาง

4. เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety, F.S.) ที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดคันทางบริเวณที่ดินคันทางมีแนวโน้มการยึดหดตัวสูงพบว่าเมื่อทำการเปิดใช้งานถนนขึ้นใหม่ ดินเหนียวคอัดที่ใช้เป็นวัสดุคันทาง (Subgrade) จะอยู่ในสถานะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำมีค่า $F.S. = 2.51$ และเมื่อมีการไหลซึมของน้ำฝนลงสู่ลาดคันทางค่า F.S. จะลดต่ำลงเท่ากับ 2.14 ส่วนในกรณีที่เกิดรอยแตกร้าวบริเวณไหล่ทางและมีการไหลซึมของน้ำฝนลงสู่ลาดคันทางจนทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนลดลงจากค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด (Peak Shear Strength) เท่ากับค่ากำลังรับแรงเฉือนคงค้าง (Residual Shear Strength) พบว่าค่า F.S. ลดลงจาก 1.63 เหลือ 1.13 เช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดคันทางบริเวณที่ดินคันทางมีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลางพบว่าค่า F.S. ลดลงจาก 4.16 เหลือ 2.94 ในกรณีที่เปิดใช้งานถนนขึ้นใหม่และมีการไหลซึมของน้ำฝนลงสู่ลาดคันทาง ส่วนในกรณีที่เกิดรอยแตกร้าวบริเวณไหล่ทางและมีการไหลซึมของน้ำฝนลงสู่ลาดคันทางจนทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนลดลงจากค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด (Peak Shear Strength) เท่ากับค่ากำลังรับแรงเฉือนคงค้าง (Residual Shear Strength) พบว่าค่า F.S. ลดลงจาก 2.16 เหลือ 1.11 ซึ่งจากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดคันทางทั้ง 2 บริเวณดังกล่าวพบว่าปริมาณน้ำฝนที่ไหลซึมลงสู่ลาดคันทางส่งผลทำให้ค่า F.S. ลดลงอย่างชัดเจน เช่นเดียวกับการลดลงของกำลังรับแรงเฉือนจนเท่ากับค่ากำลังรับแรงเฉือนคงค้าง (Residual Shear Strength) ดังนั้นเมื่อจะต้องพิจารณาดินเหนียวที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูงและดินเหนียวที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลางมาคอัดใช้เป็นวัสดุคันทาง (Subgrade) นั้นจะต้องทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดคันทางร่วมกับการไหลซึมของปริมาณน้ำฝน และกรณีที่กำลังรับแรงเฉือนลดลงเท่ากับค่ากำลังรับแรงเฉือนคงค้าง (Residual Shear Strength) เพื่อป้องกันปัญหาการแตกร้าวบริเวณไหล่ทางแอสฟัลต์คอนกรีตอันเนื่องจากการเคลื่อนตัวของลาดคันทาง

ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการเลือกพื้นที่ในการเก็บตัวอย่างดินเพื่อนำมาศึกษาเพิ่มเติมจากบริเวณที่นำดินเหนียวมาบดอัดใช้เป็นวัสดุคันทาง (Subgrade) และเกิดปัญหาการแตกร้าวของไหล่ทาง เพื่อศึกษาถึงค่าพลาสติกชีตี่ต่างๆ ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของดินเหนียวบดอัด และกำลังรับแรงเฉือน

2. การหาค่ากำลังรับแรงเฉือนคงค้าง (Residual Shear Strength) โดยการทดสอบเฉือนตรงนั้น ค่าที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อนจากกำลังรับแรงเฉือนคงค้างเนื่องจากขั้นตอนที่ใช้ในการทดสอบไม่เหมาะสม ดังนั้นควรใช้การทดสอบที่เหมาะสม เช่นการทดสอบเฉือนตรงที่สามารถเคลื่อนที่ในแนวราบได้ระยะทางมากๆ

3. การทดสอบเฉือนตรงชนิดวัดแรงเฉือนของดินเหนียวเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ในสภาวะที่ดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำนั้น การระเหยมีผลต่อค่าแรงเฉือนของดินเป็นอย่างมาก ดังนั้น ในทุกๆ ขั้นตอนการทดสอบจึงควรหาวิธีป้องกันการระเหยของตัวอย่างดิน และควรตรวจสอบค่าแรงเฉือนตลอดระยะเวลาการทดสอบ

4. ควรมีการทดสอบหาค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำเปรียบเทียบกับค่าประมาณค่าดังกล่าวจากการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ของน้ำในดินเพื่อพิจารณาความสอดคล้องของค่าดังกล่าวเพื่อให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้ตรงกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในสนาม และสามารถหาวิธีการออกแบบป้องกันปัญหาการแตกร้าวบริเวณไหล่ทางเนื่องจากการไหลซึมของน้ำได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

แนวทางการวิจัยในอนาคต

1. เก็บตัวอย่างดินเพิ่มเติมบริเวณที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูงเพื่อทำการทดสอบเงื่อนไขตรงชนิดวัดแรงดัดเพิ่มเติม เพื่อให้ค่ามุมของแรงเฉือนเนื่องจากแรงดัดมีความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมากขึ้น

2. วิเคราะห์เสถียรภาพของลาดคันทางในกรณีที่มีการไหลซึมของน้ำฝนในบริเวณดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูงและบริเวณดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลางโดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนจริงในพื้นที่มาใช้ในการวิเคราะห์ และทำการทดสอบเพิ่มเติมเพื่อหาค่าการไหลซึมในสถานะที่ดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Permeability Function) ของดินเหนียวบดอัดของทั้ง 2 ชนิด เพื่อให้การวิเคราะห์ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงมากยิ่งขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- จิตติมา เทพพานิช. 2553. พฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินในพื้นที่ อ.ลับแล จ.อุตรดิตถ์ ที่มีผลต่อการพังทลายของลาดดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นงลักษณ์ ไทยเจียมอารีย์. 2547. คุณสมบัติดินทางวิศวกรรมเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ลุ่มน้ำ น้ำก้อ ต.น้ำก้อ อ.หล่มสัก จ.เพชรบูรณ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ฝ่ายก่อสร้างพลังน้ำ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2536. รายงานด้านเทคนิคและบริหารงานก่อสร้าง โครงการจัดการส่งน้ำแม่เกาะสำหรับโรงไฟฟ้าแม่เกาะเครื่องที่ 8 ถึง 11 ภาค 3 เทคนิคการก่อสร้างคลองผันน้ำแม่เกาะ – ห้วยทราย.
- พิจิต ลัทธิสุงเนิน, ปิติ อังสุไวทย์, ชินะวัฒน์ มุกตพันธุ์ และวัชรินทร์ กาสลัก. 2539. คู่มือปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- บารเมศ วรรณะภูติ, วิชาญ ภูพัฒน์, อภินิติ โชติสังกัส, สรศักดิ์ เชื้อวศิริกุล, กฤษณ์ เสาเวียง, อรุณ ปราบมาก, คมพันธ์ จินดาวัฒน์, วสันต์ ปั่นสังข์, สุรยุทธ ช่างโอภาส, กฤษ เหลาสภาพ. 2553. โครงการศึกษาการแตกร้าวและการทรุดตัวบริเวณไหล่ทางหลวงในพื้นที่ภาคกลาง. รายงานฉบับสุดท้าย, สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง.
- ขงยุทธ แต่ศิริ, ปณิก จิตต์อารีกุล, จีรกุล บุญคำ. 2547. การแก้ไขความเสียหายบริเวณไหล่ทาง. การสัมมนาเจ้าหน้าที่วิเคราะห์ห้วยจ้อย กรมทางหลวง ประจำปีงบประมาณ 2547. สำนักวิเคราะห์ห้วยจ้อยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.
- วรากร ไม้เรียง. 2546. วิศวกรรมเขื่อนดิน. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วิชาญ ภูพัฒน์, สิริลักษณ์ จันทรางศุ, ชัย มุกตพันธ์, อรุณ ชัยเสรี, นิพนธ์ รัตนันทน, ศรีสุข จันทรางศุ, เรืองวิทย์ โชติวิทยานิพนธ์, ธิติ ปวีณธนา, สุรินทร์ กาญจนโณภาส และวิจิต อัจฉรา สรรพกิจจำนง. 2520. ข้อมูลสภาพดินบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง. สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.

สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง. 2552. ร่างคู่มือการแปลผลคุณสมบัติของดินและหิน ที่ใช้ในการออกแบบวิศวกรรมทาง. สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.

สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์. 2540. วิศวกรรมปฐพี. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.

อภินิติ โชติสังกาศ. 2549. เอกสารประกอบการสอนวิชา Unsaturated Soil Mechanics. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

_____. 2551. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินไม่อิ่มน้ำ ในประเทศไทย. ม.ป.ท.

_____. และ วิษณุพงศ์ พอลิละ. 2551. การพัฒนาเครื่องมือวัดศักย์แรงดันน้ำในดิน. การประชุม วิชาการครั้งที่ 46 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, จัดโดย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, บางเขน, 29 มกราคม-1 กุมภาพันธ์ 2551.

_____. และ อัครพัฒน์ สว่างสุริย์. 2551. การประยุกต์ใช้ความรู้ทางกลศาสตร์ของดินไม่อิ่มน้ำ สำหรับงานเสถียรภาพของลาดดิน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13, จัดโดย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยศรีปทุม ร่วมกับวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 14-16 พฤษภาคม 2551, พัทยา จ.ชลบุรี.

อิทธิสุนทร นันทกิจ. 2532. การใช้วัสดุดินเผาภายในประเทศเพื่อประกอบเครื่องมือวัดความชื้นใน ดินแบบ Tensiometer. รายงานผลการวิจัยสาขาพืช การประชุมทางวิชาการของ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 28. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

เอิบ เขียวรัตน์มย์. 2533. **ดินของประเทศไทย ลักษณะการแจกกระจายและการใช้**. ภาควิชา
ปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Arya, L. M., and J. F. Paris. 1981. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 45: 1023-1030.

ASTM . 2004. **Annual Book of ASTM Standard, Vol.4.08 Soil and Rock**. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.

Atkinson, J.H. 1993. **An Introduction to The Mechanics of Soil and Foundations**. McGraw-Hill, n.p.

Atkinson, J.H. 2007. **The Mechanics of Soils and Foundations**, 2 nd, New York, Taylor and Francis, 442 p.

Babu, G.L.S. and D.S.N. Murthy. 2005. Reliability analysis of unsaturated soil slopes. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering** 131 (11): 1423-1428.

Blatz, J.A., W.A. Take and D. Priyanto. 2006. **Influence of a weathered zone on the susceptibility of slope to rainfall induced instability**. Unsaturated Soils, International Conference on Unsaturated Soils, Carefree, Arizona, 2291-2299

Bishop, A.W. 1954. The use of pore pressure coefficients in practice. **Geotechnique** 4(4): 1-14.

Bishop, A.W. 1959. **The principle of effective stress**. Lecture delivered in Oslo, Norway, in 1955; published in Teknisk Ukeblad.

- Chandler, R. J. 1984. **Recent European experience of landslides in overconsolidated clay and soft rock.** Proc. IV Int. Symp. Pn Landslides.
- Cho, S.E. and S.R. Lee, 2002. Evaluation of surficial stability for homogeneous slopes considering rainfall characteristics. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering** 128 (9): 756-763.
- Cornell University, 1951. **Final Report on Soil Solidification Reserch.** Ithaca, N.Y.
- Coulomb, C.A. 1776. Essai Sur une Application des regles des Maximis et Minimis a Quelques Problemes des Statique Relatifs a L'Architecture. **Mem. Acad. Roy. Pres. Divers Savants, Paris**, Vol. 7, 1776.
- Day, R.W. 1999. **Geotechnical and Foundation Engineering, Design and Construction.** McGraw-Hill, n.p.
- Dineen, K. 2000. **Msc Lecture handouts (Partly saturated soils).** Imperial College, London.
- Donalson, G.W. 1969. **The Occurrence of Problems of Heave and the Factors Affecting its Nature.** Second International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils, Texas A & M Press.
- Fredlund, D.G. and N.R. Morgenstern. 1977. Stress State Variable for Unsaturated Soils. **ASCE J. Geotech. Eng. Div. GT5**, 103: 447-466.
- Fredlund, D. G., N. R. Morgenstern and R. A. Widger. 1978. Shear strength of unsaturated Soils. **Canadian Geotechnical Journal**. 15 (3): 313-321.
- _____. and H. Rahardjo. 1993. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**, Wiley, New York.

Fredlund, D.G., and A. Xing. 1994, Equations for the soil-water characteristic curve.

Reproduced with permission from, **Canadian Geotechnical Journal** 31(3): 521-532.

Fu Hua C. 1988. **Foundation on Expansive Soils**. Developments in Geotechnical Engineering, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam,

Gitirana, J.R. and G. Fredlund. 2004. Soil-Water Characteristic Curve Equation with Independent Properties. **ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineer.**

Gerald, J. G. 1971. Review of Expansive Soils. **ASCE Journal of Geotechnical Engineering Divison.**

Head, K.H. 1986. **Manual of Soil Laboratory Testing. Vol.2: Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests**. Pentech press, London.

Head, K.H. 1986. **Manual of Soil Laboratory Testing. Vol.3: Effective Stress Tests**. Pentech press, London.

Holtz, W.G. 1959. **Expansive Clay – Properties and Problems**. Colorado School of Mines Quarterly. 54 (4): 10.

Huat, B.K., F.H. Ali and R.S.K. Rajoo. 2006. Stability analysis and stability chart for unsaturated residual soil slope. **American Journal of Environmental Science** 2(4): 154-160.

Hvorslev, M.J. 1960. **Physical Components of the Shear Strength of Saturated Clays**. Proc. Research Conf. on Shear Strength of Cohesives Soils. Boulda, ASCE.

Jackson, R.D. 1972. On the calculation of hydraulic conductivity. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.** 36: 350-383

- Jotisankasa, A. and W. Mairing. 2010. Suction-monitored direct shear testing of residual soils from landslide-prone areas. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, Vol. 136. No. 3, March 1, 2010.
- Krahn, J. 2004. **Seepage modeling with SEEP/W (SEEP/W manual)**. GEO-SLOPE International Ltd., n.p.
- Lu, N. and W.J. Likos. 2004. **Unsaturated soil mechanics**. Wiley.
- Ng, C.W.W. and Q. Shi. 1998. **A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes**. Computers and Geotechnics.
- Rahardjo, H., T.T. Lim, M.F. Chang and D.G. Fredlund. 1994. Shear-strength characteristics of a residual soil. **Canadian Geotechnical Journal** 32(1): 60-77.
- Ridley, A.M. and J.B. Burland, 1993. A new instrument for the measurement of soil moisture suction. **Geotechnique** 43 (2): 321-324.
- Ridley, A., B. McGinnity and P. Vaughan. 2004. Role of pore water pressure in embankment stability. **Geotechnical Engineering** 157(GE4): 193-198.
- Sinclair, S R. and E. W. Brooker. 1967. The shear strength of Edmonton Shale. **Proc. Geotechnical Conf., Oslo** 1: 295 - 299
- Skempton, A.W. and J.N. Hutchinson. 1969. **“Stability of Natural Slopes and Embankment Foundation,”** Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State-of-the-Art Volumes Mexico City.
- Skempton, A. W. 1985. Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory. **Geot.** 35 (1): 3-18

Stark, T. D. and H. T. Eid. 1994. Drained residual shear strength of cohesive soils

J. Geotech. Geoenviron. Eng. 120(1): 269 – 273.

Take, W.A. 2003. **The influence of seasonal moisture cycles on clay slopes.** University of Cambridge PhD dissertation

Take, W.A. and M.D. Bolton. 2004. **Identification of seasonal slope behavior mechanisms from centrifuge case studies.** Advances in geotechnical engineering. The skempton Conference Volume 2. Thomas Telford

Terzaghi, K. 1925. **Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage.** อ้างโดย สุรฉัตร สัมพันธ์ราษฎร์. วิศวกรรมปฐพี. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

Terzaghi, K, R.B. Peak, and G. Mesri. 1996. **Soil Mechanics in Engineering Practice,** 3 rd. Jon Wiley and Sons, New York.

Toll, D.G., K.K., Phoon, Y.G. Cheng and M. Karthikeyan. 2007. **The Effect of Climate on Landslides in Singapore.** Proceedings of Workshop on Climate Change and Slope stability, Singapore.

Wheeler, S.J. and D. Karube. 1996. **Constitutive model: State of the art report,** Unsaturated Soils (eds. Alonso and Delage), Balkema, Rotterdam, 1179 - 1200

Won Taek Oh, Sai K. Vanapalli. 2008. **Instability of unsaturated compacted soil slope due to rain infiltration.** GeoEdmonton'08, 513-520.

Yingjajaval, S. 1993. **A catalogue of water retention functions of major soil series of Thailand.** Department of Soil Science, Kasetsart University, Kamphaeng Saen, July 1993.





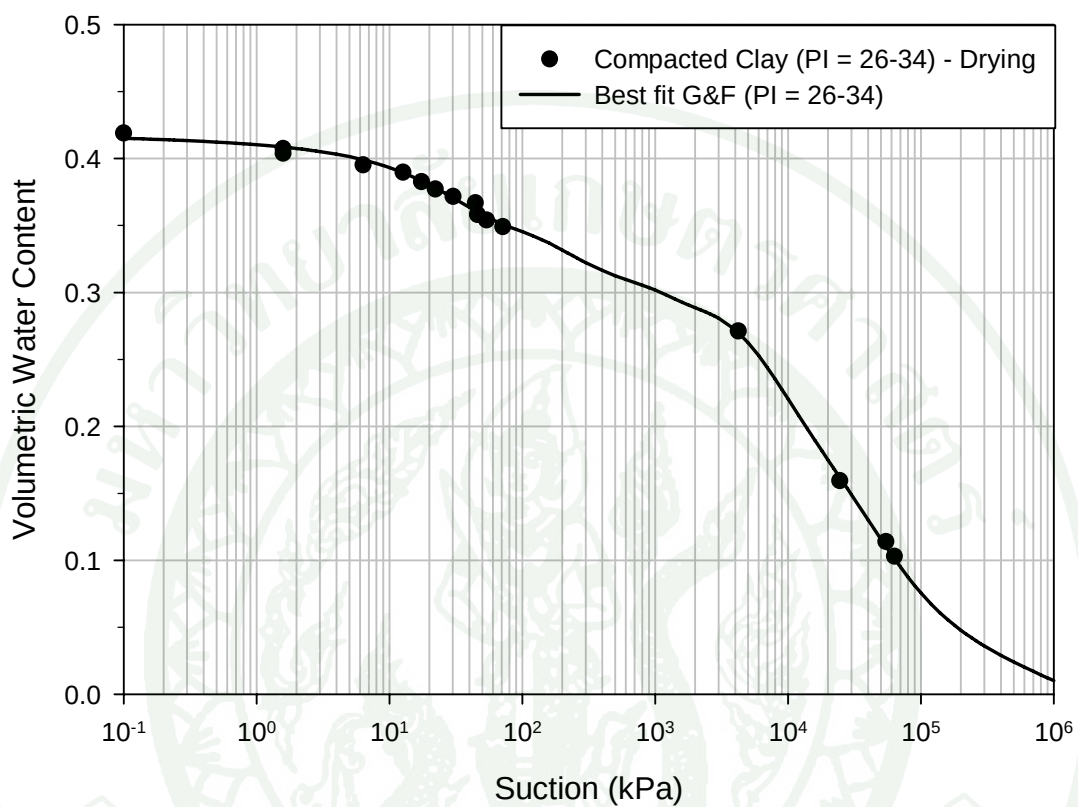
ผลการทดสอบเส้นอัตลักษณ์ของน้ำในดิน (SWCC)

ตารางผนวกที่ ก1 ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ของน้ำในดินบริเวณคันทางที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง ตัวอย่างที่ 1

Date	Sample	Diameter				Height				nominal	Wet soil mass	Actual Mass		cal.	suction	Dry	Total	e	Sr	θ	n
		1	2	3	Aver.	1	2	3	Aver.	vol. cc		+PVC	Mass	Msolid							
17/2/2010	Initial	63.0	63.3	63.5	63.27	50.2	50.8	50.0	50.33	158.23	328.90	310.93	251.60	23.6	23.81	1.59	1.97	0.701	91.0	37.5	0.412
19/2/2010	1 Wetting	63.0	63.3	63.5	63.27	50.9	50.6	50.0	50.50	158.76	329.38	311.41	251.60	23.8	15.87	1.58	1.96	0.707	91.0	37.7	0.414
23/2/2010	2 Wetting	63.0	63.3	63.5	63.27	50.5	50.1	50.0	50.20	157.81	329.77	311.80	251.60	23.9	11.90	1.59	1.98	0.697	92.9	38.1	0.411
26/2/2010	3 Wetting	63.0	63.3	63.5	63.27	50.5	50.1	49.6	50.07	157.39	330.25	312.28	251.60	24.1	9.52	1.60	1.98	0.692	94.2	38.6	0.409
2/3/2010	4 Wetting	63.0	63.3	63.5	63.27	50.3	50.9	49.5	50.23	157.92	330.45	312.48	251.60	24.2	6.35	1.59	1.98	0.698	93.8	38.6	0.411
5/3/2010	5 Wetting	63.0	63.3	63.5	63.27	49.8	50.1	50.4	50.08	157.45	330.84	312.87	251.60	24.4	3.17	1.60	1.99	0.693	95.1	38.9	0.409
9/3/2010	6 Wetting	63.0	63.3	63.5	63.27	49.8	50.1	50.4	50.07	157.39	331.67	313.70	251.60	24.7	1.59	1.60	1.99	0.692	96.5	39.5	0.409
15/3/2010	Saturation	63.0	63.3	63.5	63.27	50.6	50.1	49.8	50.15	157.66	335.62	317.65	251.60	26.3	0.10	1.60	2.01	0.695	102.2	41.9	0.410
17/3/2010	1 Drying	63.0	63.3	63.5	63.27	49.7	50.6	50.6	50.27	158.02	333.95	315.98	251.60	25.6	1.59	1.59	2.00	0.699	99.0	40.7	0.411
21/3/2010	2 Drying	63.0	63.3	63.5	63.27	50.2	50.3	50.1	50.17	157.71	333.25	315.28	251.60	25.3	1.59	1.60	2.00	0.696	98.4	40.4	0.410
22/3/2010	3 Drying	63.0	63.3	63.5	63.27	50.1	50.0	50.0	50.02	157.24	331.72	313.75	251.60	24.7	6.35	1.60	2.00	0.690	96.8	39.5	0.408
24/3/2010	4 Drying	63.0	63.3	63.5	63.27	50.2	49.7	49.8	49.90	156.87	330.70	312.73	251.60	24.3	12.70	1.60	1.99	0.687	95.7	39.0	0.407
31/3/2010	5 Drying	63.0	63.3	63.5	63.27	50.0	50.1	49.7	49.92	156.92	329.62	311.65	251.60	23.9	17.46	1.60	1.99	0.687	94.0	38.3	0.407
3/4/2010	6 Drying	63.0	63.3	63.5	63.27	50.0	49.5	49.5	49.63	156.03	328.43	310.46	251.60	23.4	22.22	1.61	1.99	0.678	93.4	37.7	0.404
9/4/2010	7 Drying	63.0	63.3	63.5	63.27	50.0	49.4	49.3	49.53	155.72	327.45	309.48	251.60	23.0	30.16	1.62	1.99	0.674	92.3	37.2	0.403
13/4/2010	8 Drying	63.0	63.3	63.5	63.27	49.5	49.4	50.0	49.60	155.93	326.78	308.81	251.60	22.7	44.44	1.61	1.98	0.676	90.9	36.7	0.403
26/4/2010	9 Drying	63.0	63.3	63.5	63.27	49.1	49.6	49.8	49.47	155.51	325.26	307.29	251.60	22.1	46.03	1.62	1.98	0.672	89.1	35.8	0.402
29/4/2010	10 Drying	63.0	63.3	63.5	63.27	49.1	49.6	49.6	49.40	155.30	324.54	306.57	251.60	21.8	53.97	1.62	1.97	0.670	88.3	35.4	0.401
6/4/2010	11 Drying	63.0	63.3	63.5	63.27	49.7	49.2	49.2	49.35	155.14	323.72	305.75	251.60	21.5	71.43	1.62	1.97	0.668	87.2	34.9	0.400

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Date	Sample	Diameter				Height				nominal	Wet soil mass	Actual Mass		cal.	suction	Dry	Total	e	Sr	θ	n
		1	2	3	Aver.	1	2	3	Aver.	vol. cc		Mass	Msolid	m/c%	probe	density, g/cc	density, g/cc				
16/7/2010	12 Drying-H	60.0	60.2	60.3	60.17	32.2	32.3	32.4	32.30	91.83	212.47	194.50	169.60	14.7	4238	1.85	2.12	0.465	85.5	27.1	0.317
27/7/2010	13 Drying-H	59.2	59.2	59.4	59.27	31.3	31.4	31.6	31.43	86.72	201.39	183.42	169.60	8.1	24542	1.96	2.12	0.383	57.5	15.9	0.277
5/8/2010	14 Drying-H	58.90	58.4	58.4	58.57	31.5	32.0	31.4	31.60	85.13	197.27	179.30	169.60	5.7	54561	1.99	2.11	0.358	43.2	11.4	0.263
20/8/2010	15 Drying-H	58.95	58.70	58.90	58.85	31.6	31.6	31.6	31.60	85.95	196.42	178.45	169.60	5.2	63235	1.97	2.08	0.371	38.1	10.3	0.271
21/9/2010	7 Wetting-H	58.65	58.65	58.65	58.65	31.6	31.6	31.6	31.60	85.37	198.00	180.03	169.60	6.1	38721	1.99	2.11	0.362	46.0	12.2	0.266
27/9/2010	8 Wetting-H	58.75	58.75	58.75	58.75	31.7	31.7	31.7	31.70	85.93	200.91	182.94	169.60	7.9	19262	1.97	2.13	0.371	57.4	15.5	0.270
3/10/2010	9 Wetting-H	59.25	59.25	59.25	59.25	32.0	32.0	32.0	32.00	88.23	205.37	187.40	169.60	10.5	4941	1.92	2.12	0.407	69.7	20.2	0.289
10/10/2010	10 Wetting-H	59.60	59.35	59.20	59.38	32.0	32.0	32.0	32.00	88.63	206.57	188.60	169.60	11.2	1870	1.91	2.13	0.414	73.3	21.4	0.293



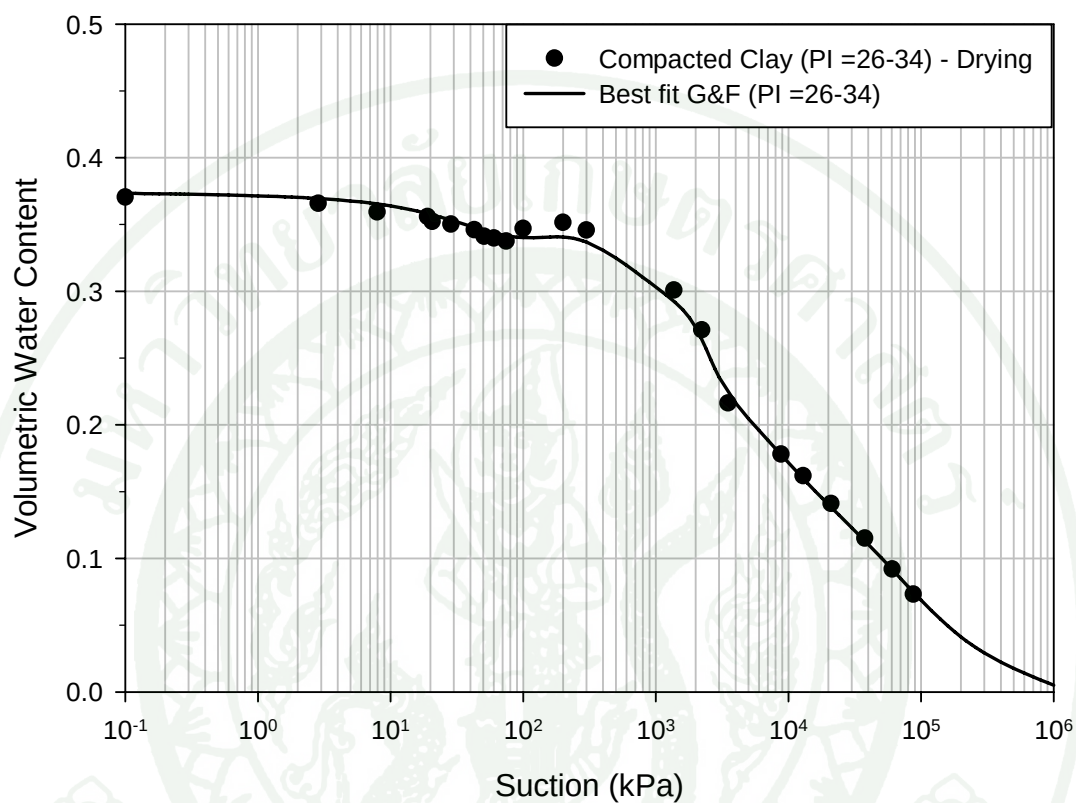
ภาพผนวกที่ ก1 ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ของน้ำในดินบริเวณคันทางที่เป็นดินเหนียว
บดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง ตัวอย่างที่ 1

ตารางผนวกที่ ก2 ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ของน้ำในดินบริเวณคันทางที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง ตัวอย่างที่ 2

Date	Sample	Diameter				Height				nominal	Wet soil mass	Actual Mass		cal.	suction	Dry	Total	e	Sr	θ	n
		1	2	3	Aver.	1	2	3	Aver.	vol. cc	+PVC	Mass	Msolid	m/c%	probe	density, g/cc	density, g/cc				
9/4/2010	Initial	61.6	62.8	63.0	62.47	51.6	51.6	52.0	51.72	158.50	346.21	321.18	267.13	20.2	65.68	1.69	2.03	0.605	90.5	34.1	0.377
14/4/2010	1 Wetting	61.6	62.8	63.0	62.47	51.7	51.8	51.6	51.70	158.44	346.92	321.89	267.13	20.5	34.92	1.69	2.03	0.604	91.7	34.6	0.377
22/4/2010	2 Wetting	61.6	62.8	63.0	62.47	51.6	52.0	51.8	51.78	158.70	347.63	322.60	267.13	20.8	22.22	1.68	2.03	0.607	92.5	35.0	0.378
26/4/2010	3 Wetting	61.6	62.8	63.0	62.47	52.0	52.3	52.0	52.07	159.57	348.37	323.34	267.13	21.0	14.29	1.67	2.03	0.616	92.4	35.2	0.381
2/5/2010	4 Wetting	61.6	62.8	63.0	62.47	52.4	52.3	52.2	52.28	160.23	348.97	323.94	267.13	21.3	9.52	1.67	2.02	0.623	92.4	35.5	0.384
7/5/2010	5 Wetting	61.6	62.8	63.0	62.47	52.3	52.0	52.0	52.07	159.57	349.55	324.52	267.13	21.5	6.35	1.67	2.03	0.616	94.4	36.0	0.381
11/5/2010	6 Wetting	61.6	62.8	63.0	62.47	52.2	52.9	52.6	52.55	161.05	349.61	324.58	267.13	21.5	4.76	1.66	2.02	0.631	92.2	35.7	0.387
16/5/2010	7 Wetting	61.6	62.8	63.0	62.47	52.5	52.7	52.4	52.48	160.85	350.50	325.47	267.13	21.8	1.59	1.66	2.02	0.629	94.0	36.3	0.386
23/5/2010	Saturated	61.6	62.8	63.0	62.47	52.3	52.2	52.4	52.30	160.28	351.53	326.50	267.13	22.2	0.10	1.67	2.04	0.623	96.5	37.0	0.384
29/5/2010	1 Drying	61.6	62.8	63.0	62.47	52.3	52.1	52.6	52.32	160.33	350.79	325.76	267.13	21.9	2.86	1.67	2.03	0.624	95.2	36.6	0.384
2/6/2010	2 Drying	61.6	62.8	63.0	62.47	53.0	52.5	52.2	52.53	161.00	349.99	324.96	267.13	21.6	7.94	1.66	2.02	0.630	92.9	35.9	0.387
11/6/2010	3 Drying	61.6	62.8	63.0	62.47	52.4	52.2	52.2	52.27	160.18	349.16	324.13	267.13	21.3	19.05	1.67	2.02	0.622	92.8	35.6	0.383
8/6/2010	4 Drying	61.6	62.8	63.0	62.47	52.3	52.3	52.3	52.27	160.18	348.58	323.55	267.13	21.1	20.63	1.67	2.02	0.622	91.8	35.2	0.383
14/6/2010	5 Drying	61.6	62.8	63.0	62.47	51.8	52.0	52.1	51.97	159.26	347.93	322.90	267.13	20.9	28.57	1.68	2.03	0.613	92.2	35.0	0.380
21/6/2010	6 Drying	61.6	62.8	63.0	62.47	51.7	51.7	51.9	51.77	158.65	347.05	322.02	267.13	20.5	42.86	1.68	2.03	0.607	91.6	34.6	0.378
24/6/2010	7 Drying	61.6	62.8	63.0	62.47	52.0	51.9	52.1	51.98	159.31	346.48	321.45	267.13	20.3	50.79	1.68	2.02	0.613	89.7	34.1	0.380
28/6/2010	8 Drying	61.6	62.8	63.0	62.47	51.7	51.6	52.0	51.77	158.65	346.06	321.03	267.13	20.2	60.32	1.68	2.02	0.607	90.0	34.0	0.378
1/7/2010	9 Drying	61.6	62.8	63.0	62.47	51.5	51.7	51.6	51.60	158.14	345.53	320.50	267.13	20.0	74.60	1.69	2.03	0.601	89.9	33.7	0.376
5/8/2010	10 Drying - PP	61.6	62.8	63.0	62.47	51.2	51.2	51.2	51.20	156.91	321.57	321.57	267.13	20.4	100.00	1.70	2.05	0.589	93.6	34.7	0.371

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

Date	Sample	Diameter				Height				nominal	Wet soil mass +PVC	Actual Mass		cal.	suction	Dry	Total	e	Sr	θ	n
		1	2	3	Aver.	1	2	3	Aver.	vol. cc		Mass	Msolid	m/c%	probe	density, g/cc	density, g/cc				
11/8/2010	11 Drying - PP	61.6	62.8	63.0	62.47	49.8	49.5	49.7	49.67	152.21	320.62	320.62	267.13	20.0	200	1.75	2.11	0.541	100.1	35.1	0.351
19/8/2010	12 Drying - PP	61.6	62.8	63.0	62.47	50.2	50.1	49.3	49.85	152.77	319.94	319.94	267.13	19.8	300	1.75	2.09	0.547	97.8	34.6	0.354
5/9/2010	13 Drying - H	60.55	61.25	61.65	61.15	50.6	50.7	50.5	50.60	148.60	336.87	311.84	267.13	16.7	1370	1.80	2.10	0.505	89.7	30.1	0.335
10/9/2010	14 Drying - H	59.35	59.35	59.35	59.35	50.1	50.1	49.9	50.00	138.33	329.65	304.62	267.13	14.0	2224	1.93	2.20	0.401	94.7	27.1	0.286
17/9/2010	15 Drying - H	58.80	58.80	58.80	58.8	49.0	49.0	49.0	48.95	132.92	320.91	295.88	267.13	10.8	3515	2.01	2.23	0.346	84.1	21.6	0.257
23/9/2010	16 Drying - H	60.50	59.60	59.20	59.77	48.8	48.8	48.8	48.80	136.91	316.54	291.51	267.13	9.1	8805	1.95	2.13	0.386	63.9	17.8	0.279
29/9/2010	17 Drying - H	58.30	58.20	58.80	58.43	48.9	48.5	48.7	48.67	130.51	313.28	288.25	267.13	7.9	12913	2.05	2.21	0.322	66.5	16.2	0.243
7/10/2010	18 Drying - H	58.35	57.75	58.25	58.12	48.7	48.5	49.2	48.78	129.41	310.42	285.39	267.13	6.8	21030	2.06	2.21	0.310	59.6	14.1	0.237
16/10/2010	19 Drying - H	58.35	58.00	58.60	58.32	48.8	48.6	48.7	48.68	130.03	307.12	282.09	267.13	5.6	37768	2.05	2.17	0.317	47.8	11.5	0.241
2/11/2010	20 Drying - H	58.20	58.10	58.60	58.30	48.4	48.5	48.3	48.41	129.24	304.04	279.01	267.13	4.4	60775	2.07	2.16	0.309	39.0	9.2	0.236
19/11/2010	21 Drying - H	58.65	58.00	58.80	58.48	48.6	48.6	48.7	48.60	130.55	301.71	276.68	267.13	3.6	87700	2.05	2.12	0.322	30.0	7.3	0.244
27/11/2010	8 Wetting - H	58.50	59.00	59.10	58.87	48.5	48.7	48.5	48.55	132.14	303.95	278.92	267.13	4.4	49997	2.02	2.11	0.338	35.3	8.9	0.253
6/12/2011	9 Wetting - H	58.85	58.50	59.15	58.83	48.9	49.1	49.2	49.03	133.30	306.89	281.86	267.13	5.5	27067	2.00	2.11	0.350	42.6	11.1	0.259
12/12/2010	10 Wetting - H	58.80	58.80	58.80	58.80	49.4	49.1	49.1	49.18	133.56	307.78	282.75	267.13	5.8	21030	2.00	2.12	0.352	44.9	11.7	0.261
15/12/2010	11 Wetting - H	58.50	58.50	58.50	58.50	49.1	49.0	49.1	49.05	131.84	310.29	285.26	267.13	6.8	14310	2.03	2.16	0.335	54.8	13.8	0.251



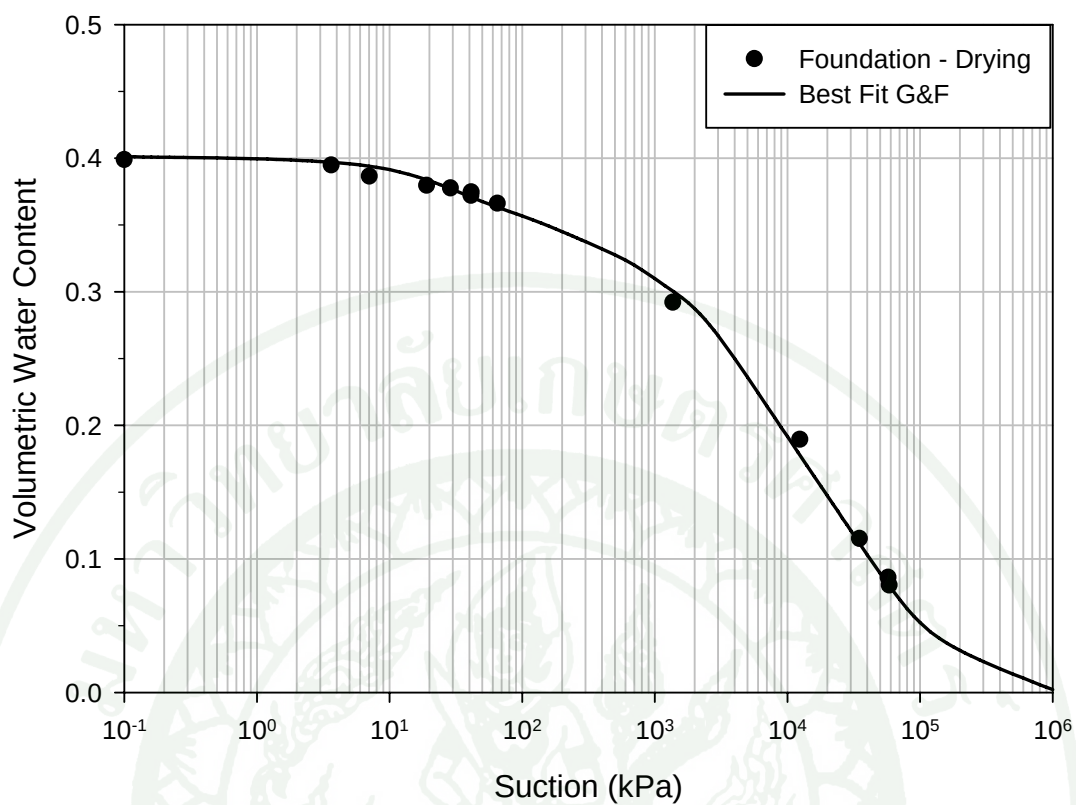
ภาพผนวกที่ ก2 ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ของน้ำในดินบริเวณคันทางที่เป็นดินเหนียว
บดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง ตัวอย่างที่ 2

ตารางผนวกที่ ก3 ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ของน้ำในดินบริเวณใต้คันทางที่เป็นดินเหนียวคอดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง ตัวอย่างที่ 1

Date	Sample	Diameter				Height				nominal	Wet soil mass	Actual Mass		cal.	suction	Dry	Total	e	Sr	θ	n
		1	2	3	Aver.	1	2	3	Aver.	vol. cc		Mass	Msolid	m/c%	probe	density, g/cc	density, g/cc				
16/2/2010	Initial	62.5	62.2	62.7	62.47	43.3	43.2	42.7	43.07	131.99	281.60	258.93	209.56	23.6	60.68	1.59	1.96	0.669	93.3	37.4	0.401
19/2/2010	1 Wetting	62.5	62.2	62.7	62.47	43.5	43.6	43.6	43.55	133.47	282.41	259.74	209.56	23.9	24.55	1.57	1.95	0.688	92.3	37.6	0.408
23/2/2010	2 Wetting	62.5	62.2	62.7	62.47	44.0	43.4	43.5	43.63	133.72	282.79	260.12	209.56	24.1	20.00	1.57	1.95	0.691	92.5	37.8	0.409
26/2/2010	3 Wetting	62.5	62.2	62.7	62.47	43.9	43.7	43.5	43.68	133.88	282.43	259.76	209.56	24.0	9.55	1.57	1.94	0.693	91.6	37.5	0.409
2/3/2010	4 Wetting	62.5	62.2	62.7	62.47	44.3	43.4	43.6	43.77	134.13	283.79	261.12	209.56	24.6	3.64	1.56	1.95	0.696	93.7	38.4	0.410
5/3/2010	5 Wetting	62.5	62.2	62.7	62.47	43.6	43.5	44.0	43.70	133.93	284.02	261.35	209.56	24.7	2.50	1.56	1.95	0.694	94.4	38.7	0.410
9/3/2010	6 Wetting	62.5	62.2	62.7	62.47	43.7	43.7	44.2	43.83	134.34	284.65	261.98	209.56	25.0	2.05	1.56	1.95	0.699	94.9	39.0	0.411
13/3/2010	7 Wetting	62.5	62.2	62.7	62.47	43.9	43.6	44.0	43.83	134.34	284.83	262.16	209.56	25.1	1.14	1.56	1.95	0.699	95.2	39.2	0.411
20/3/2010	Saturation	62.5	62.2	62.7	62.47	43.8	43.7	44.1	43.87	134.44	285.86	263.19	209.56	25.6	0.10	1.56	1.96	0.700	96.9	39.9	0.412
22/3/2010	1 Drying	62.5	62.2	62.7	62.47	43.8	43.0	43.9	43.55	133.47	284.92	262.25	209.56	25.1	3.64	1.57	1.96	0.688	96.9	39.5	0.408
24/3/2010	2 Drying	62.5	62.2	62.7	62.47	44.0	43.6	43.5	43.70	133.93	283.99	261.32	209.56	24.7	7.05	1.56	1.95	0.694	94.4	38.6	0.410
31/3/2010	3 Drying	62.5	62.2	62.7	62.47	44.1	43.6	43.4	43.68	133.88	283.04	260.37	209.56	24.2	19.09	1.57	1.94	0.693	92.7	38.0	0.409
3/4/2010	4 Drying	62.5	62.2	62.7	62.47	43.2	43.2	43.4	43.27	132.60	282.30	259.63	209.56	23.9	28.86	1.58	1.96	0.677	93.6	37.8	0.404
9/4/2010	5 Drying	62.5	62.2	62.7	62.47	43.1	43.1	43.2	43.12	132.14	281.73	259.06	209.56	23.6	41.36	1.59	1.96	0.671	93.3	37.5	0.402
12/4/2010	6 Drying	62.5	62.2	62.7	62.47	43.2	43.0	43.1	43.08	132.04	281.36	258.69	209.56	23.4	41.27	1.59	1.96	0.670	92.8	37.2	0.401
21/4/2010	7 Drying	62.5	62.2	62.7	62.47	43.2	42.9	42.9	42.97	131.68	280.45	257.78	209.56	23.0	65.23	1.59	1.96	0.665	91.7	36.6	0.399
16/7/2010	8 Drying-H	59.8	60.5	60.6	60.30	41.9	41.5	41.5	41.62	118.85	266.93	244.26	209.56	16.6	1370.00	1.76	2.06	0.503	87.3	29.2	0.335
27/7/2010	9 Drying-H	58.4	58.5	58.8	58.57	41.0	39.8	41.1	40.62	109.42	252.96	230.29	209.56	9.9	12450.00	1.92	2.10	0.384	68.3	18.9	0.277
5/8/2010	10 Drying-H	58.4	58.6	59.6	58.85	39.8	40.1	40.4	40.10	109.08	244.79	222.12	209.56	6.0	35013.00	1.92	2.04	0.379	41.9	11.5	0.275

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

Date	Sample	Diameter				Height				nominal	Wet soil mass	Actual Mass		cal.	suction	Dry	Total	e	Sr	θ	n
		1	2	3	Aver.	1	2	3	Aver.	vol. cc	+PVC	Mass	Msolid	m/c%	probe	density, g/cc	density, g/cc				
20/8/2010	11 Drying-H	58.0	57.8	57.3	57.67	40.6	41.0	40.6	40.70	106.30	241.39	218.72	209.56	4.4	57515	1.97	2.06	0.344	33.7	8.6	0.256
8/9/2010	12 Drying-H	58.0	57.8	57.3	57.67	41.8	41.5	40.0	41.10	107.34	240.85	218.18	209.56	4.1	58810	1.95	2.03	0.357	30.5	8.0	0.263
21/9/2010	8 Wetting-H	58.25	58.25	58.25	58.25	41.0	41.0	41.0	40.95	109.13	244.88	222.21	209.56	6.0	22017	1.92	2.04	0.380	42.1	11.6	0.275
27/9/2010	9 Wetting-H	59.70	59.70	59.70	59.7	41.6	41.6	41.6	41.55	116.31	248.97	226.30	209.56	8.0	8805	1.80	1.95	0.471	45.0	14.4	0.320
3/10/2010	10 Wetting-H	58.65	58.80	59.70	59.05	42.1	42.1	41.8	41.98	114.98	253.35	230.68	209.56	10.1	1370	1.82	2.01	0.454	58.8	18.4	0.312



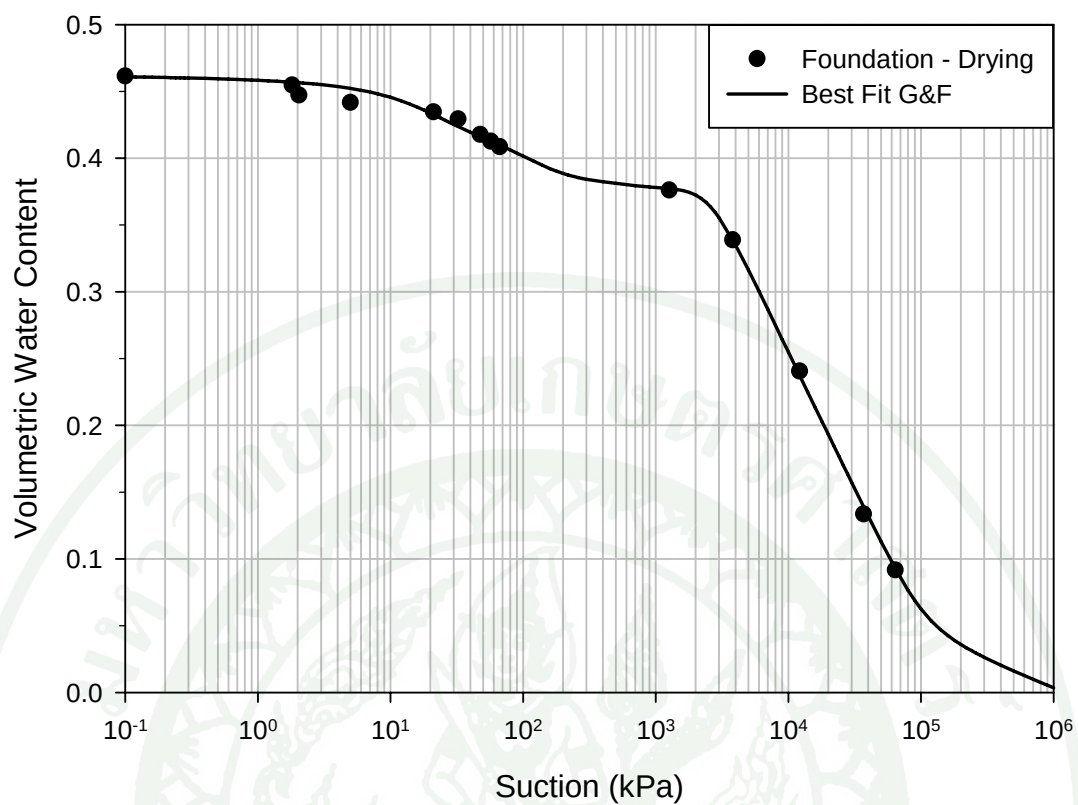
ภาพผนวกที่ ก3 ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ของน้ำในดินบริเวณใต้คันทางที่เป็นดินเหนียว
บดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง ตัวอย่างที่ 1

ตารางผนวกที่ ก4 ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ของน้ำในดินบริเวณใต้คันทางที่เป็นดินเหนียวบดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง ตัวอย่างที่ 2

Date	Sample	Diameter				Height				nominal	Wet soil mass	Actual Mass		cal.	suction	Dry	Total	e	Sr	θ	n
		1	2	3	Aver.	1	2	3	Aver.	vol. cc	+PVC	Mass	Msolid	m/c%	probe	density, g/cc	density, g/cc				
16/2/2010	Initial	61.8	61.6	62.9	62.10	43.4	43.3	43.4	43.37	131.35	276.63	252.83	196.05	29.0	26.14	1.49	1.92	0.775	99.0	43.2	0.437
18/2/2010	1 Wetting	61.8	61.6	62.9	62.10	43.4	43.6	43.6	43.53	131.85	277.34	253.54	196.05	29.3	10.23	1.49	1.92	0.782	99.3	43.6	0.439
20/2/2010	2 Wetting	61.8	61.6	62.9	62.10	43.8	43.7	43.7	43.73	132.46	278.14	254.34	196.05	29.7	2.73	1.48	1.92	0.790	99.7	44.0	0.441
24/2/2010	3 Wetting	61.8	61.6	62.9	62.10	43.3	43.7	43.8	43.58	132.01	277.91	254.11	196.05	29.6	7.05	1.49	1.92	0.784	100.1	44.0	0.440
26/2/2010	4 Wetting	61.8	61.6	62.9	62.10	44.2	43.5	43.8	43.80	132.66	278.32	254.52	196.05	29.8	2.27	1.48	1.92	0.793	99.6	44.1	0.442
2/3/2010	5 Wetting	61.8	61.6	62.9	62.10	43.4	43.6	43.4	43.45	131.60	278.32	254.52	196.05	29.8	3.41	1.49	1.93	0.779	101.5	44.4	0.438
5/3/2010	6 Wetting	61.8	61.6	62.9	62.10	44.1	44.2	43.6	43.95	133.12	278.85	255.05	196.05	30.1	0.63	1.47	1.92	0.799	99.8	44.3	0.444
12/3/2010	Saturation	61.8	61.6	62.9	62.10	43.8	44.0	44.1	43.97	133.17	281.30	257.50	196.05	31.3	0.10	1.47	1.93	0.800	103.8	46.1	0.444
13/3/2010	1 Drying	61.8	61.6	62.9	62.10	43.7	43.6	43.8	43.70	132.36	280.02	256.22	196.05	30.7	1.82	1.48	1.94	0.789	103.1	45.5	0.441
17/3/2010	2 Drying	61.8	61.6	62.9	62.10	43.9	43.5	43.7	43.68	132.31	279.01	255.21	196.05	30.2	2.05	1.48	1.93	0.788	101.4	44.7	0.441
21/3/2010	3 Drying	61.8	61.6	62.9	62.10	44.0	43.7	43.7	43.77	132.56	278.40	254.60	196.05	29.9	5.00	1.48	1.92	0.792	99.9	44.2	0.442
22/3/2010	4 Drying	61.8	61.6	62.9	62.10	43.4	43.6	43.3	43.43	131.55	277.03	253.23	196.05	29.2	21.14	1.49	1.92	0.778	99.3	43.5	0.438
24/3/2010	5 Drying	61.8	61.6	62.9	62.10	43.0	43.5	43.4	43.28	131.10	276.12	252.32	196.05	28.7	32.50	1.50	1.92	0.772	98.5	42.9	0.436
3/4/2010	6 Drying	61.8	61.6	62.9	62.10	43.1	43.2	43.3	43.20	130.84	274.50	250.70	196.05	27.9	47.62	1.50	1.92	0.769	96.1	41.8	0.435
13/4/2010	7 Drying	61.8	61.6	62.9	62.10	43.1	43.2	43.1	43.12	130.59	273.74	249.94	196.05	27.5	57.14	1.50	1.91	0.765	95.2	41.3	0.433
22/4/2010	8 Drying	61.8	61.6	62.9	62.10	43.0	42.8	42.9	42.90	129.94	272.93	249.13	196.05	27.1	66.67	1.51	1.92	0.756	94.9	40.8	0.431
4/7/2010	9 Drying-H	61.5	61.4	62.3	61.73	42.6	42.5	42.3	42.47	127.11	267.65	243.85	196.05	24.4	1270.00	1.54	1.92	0.718	90.0	37.6	0.418
16/7/2010	10 Drying-H	60.0	59.8	60.0	59.92	41.8	41.8	41.6	41.70	117.58	259.68	235.88	196.05	20.3	3810.00	1.67	2.01	0.589	91.4	33.9	0.371
27/7/2010	11 Drying-H	57.7	58.1	58.0	57.93	40.3	40.0	40.2	40.15	105.84	245.31	221.51	196.05	13.0	12182.00	1.85	2.09	0.431	79.9	24.1	0.301

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

Date	Sample	Diameter				Height				nominal	Wet soil mass	Actual Mass		cal.	suction	Dry	Total	e	Sr	θ	n
		1	2	3	Aver.	1	2	3	Aver.	vol. cc		Mass	Msolid	m/c%	probe	density, g/cc	density, g/cc				
5/8/2010	12 Drying-H	57.4	56.75	57.1	57.08	39.8	39.8	39.8	39.80	101.86	233.46	209.66	196.05	6.9	37062	1.92	2.06	0.377	48.8	13.4	0.274
20/8/2010	13 Drying-H	57.2	56.6	57.0	56.90	39.6	40.0	39.6	39.72	100.99	229.11	205.31	196.05	4.7	64187	1.94	2.03	0.365	34.3	9.2	0.267
21/9/2010	7 Wetting-H	56.70	56.7	56.7	56.7	40.0	40.0	40.0	40.00	101.00	233.29	209.49	196.05	6.9	26051	1.94	2.07	0.365	49.7	13.3	0.267
27/9/2010	8 Wetting-H	56.60	56.60	56.60	56.6	40.2	40.2	40.2	40.20	101.15	237.32	213.52	196.05	8.9	13553	1.94	2.11	0.367	64.3	17.3	0.269
3/10/2010	9 Wetting-H	57.80	57.80	58.10	57.9	40.3	40.3	40.5	40.37	106.28	241.96	218.16	196.05	11.3	5530	1.84	2.05	0.437	68.4	20.8	0.304



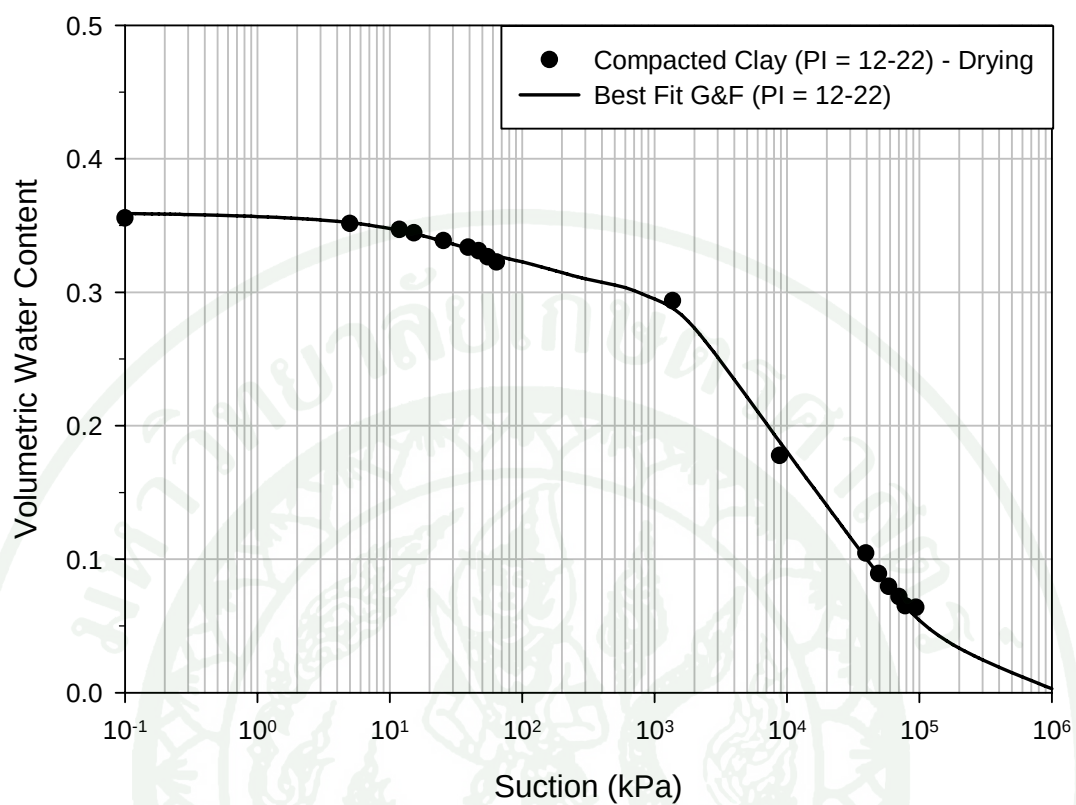
ภาพผนวกที่ ก4 ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ของน้ำในดินบริเวณใต้คันทางที่เป็นดินเหนียว
บดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวสูง ตัวอย่างที่ 2

ตารางผนวกที่ ก5 ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ของน้ำในดินบริเวณคันทางที่เป็นดินเหนียวคอัดที่มีแนวโน้มการบีบอัดตัวปานกลาง ตัวอย่างที่ 1

Date	Sample	Diameter				Height				nominal vol. cc	Wet soil mass +PVC	Actual Mass		cal. m/c%	suction probe	Dry density, g/cc	Total density, g/cc	e	Sr	θ	n
		1	2	3	Aver.	1	2	3	Aver.			Mass	Msolid								
23/2/2010	1 Wetting	63.6	64.5	61.0	63.03	46.8	46.8	47.0	46.87	146.25	328.54	310.50	264.50	17.4	76.14	1.81	2.12	0.564	87.2	31.5	0.360
25/2/2010	2 Wetting	63.6	64.5	61.0	63.03	47.1	47.0	46.8	46.97	146.56	329.18	311.14	264.50	17.6	69.09	1.80	2.12	0.567	87.9	31.8	0.362
2/3/2010	3 Wetting	63.6	64.5	61.0	63.03	47.3	47.0	47.3	47.18	147.24	329.90	311.86	264.50	17.9	39.68	1.80	2.12	0.574	88.2	32.2	0.365
5/3/2010	4 Wetting	63.6	64.5	61.0	63.03	47.3	47.5	47.2	47.33	147.71	330.54	312.50	264.50	18.1	26.98	1.79	2.12	0.579	88.6	32.5	0.367
9/3/2010	5 Wetting	63.6	64.5	61.0	63.03	46.9	47.4	47.5	47.25	147.45	331.37	313.33	264.50	18.5	15.45	1.79	2.13	0.576	90.6	33.1	0.366
13/3/2010	6 Wetting	63.6	64.5	61.0	63.03	47.6	47.5	47.7	47.57	148.43	332.38	314.34	264.50	18.8	11.11	1.78	2.12	0.587	90.8	33.6	0.370
17/3/2010	7 Wetting	63.6	64.5	61.0	63.03	47.7	47.3	48.0	47.65	148.69	333.24	315.20	264.50	19.2	7.94	1.78	2.12	0.590	91.9	34.1	0.371
20/3/2010	8 Wetting	63.6	64.5	61.0	63.03	48.0	48.3	47.5	47.93	149.58	333.86	315.82	264.50	19.4	6.35	1.77	2.11	0.599	91.6	34.3	0.375
23/3/2010	9 Wetting	63.6	64.5	61.0	63.03	48.3	48.4	48.4	48.37	150.93	335.34	317.30	264.50	20.0	1.59	1.75	2.10	0.614	92.0	35.0	0.380
30/3/2010	Saturation	63.6	64.5	61.0	63.03	48.9	49.1	48.5	48.82	152.33	336.71	318.67	264.50	20.5	0.10	1.74	2.09	0.629	92.1	35.6	0.386
2/4/2010	1 Drying	63.6	64.5	61.0	63.03	48.5	48.6	48.6	48.57	151.55	335.81	317.77	264.50	20.1	5.00	1.75	2.10	0.620	91.8	35.1	0.383
8/4/2010	2 Drying	63.6	64.5	61.0	63.03	48.7	48.6	48.2	48.47	151.24	335.01	316.97	264.50	19.8	11.82	1.75	2.10	0.617	90.9	34.7	0.382
12/4/2010	3 Drying	63.6	64.5	61.0	63.03	48.3	48.5	48.3	48.33	150.83	334.48	316.44	264.50	19.6	15.23	1.75	2.10	0.613	90.6	34.4	0.380
21/4/2010	4 Drying	63.6	64.5	61.0	63.03	48.2	48.1	48.2	48.15	150.25	333.42	315.38	264.50	19.2	25.45	1.76	2.10	0.606	89.7	33.9	0.378
25/4/2010	5 Drying	63.6	64.5	61.0	63.03	48.2	48.2	48.2	48.17	150.31	332.70	314.66	264.50	19.0	39.09	1.76	2.09	0.607	88.3	33.4	0.378
29/4/2010	6 Drying	63.6	64.5	61.0	63.03	47.8	47.9	47.8	47.82	149.21	331.94	313.90	264.50	18.7	47.05	1.77	2.10	0.595	88.7	33.1	0.373
2/5/2010	7 Drying	63.6	64.5	61.0	63.03	47.8	47.9	47.8	47.80	149.16	331.25	313.21	264.50	18.4	55.00	1.77	2.10	0.595	87.6	32.7	0.373
7/5/2010	8 Drying	63.6	64.5	61.0	63.03	48.0	47.8	47.7	47.82	149.21	330.67	312.63	264.50	18.2	64.09	1.77	2.10	0.595	86.4	32.3	0.373
1/7/2010	9 Drying-H	63.6	61.55	62.1	62.42	38.0	38.1	38.1	38.07	116.48	266.19	248.15	213.96	16.0	1370.00	1.84	2.13	0.540	83.8	29.4	0.350

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

Date	Sample	Diameter				Height				nominal	Wet soil mass	Actual Mass		cal.	suction	Dry	Total	e	Sr	θ	n
		1	2	3	Aver.	1	2	3	Aver.	vol. cc		Mass	Msolid	m/c%	probe						
8/7/2010	10 Drying-H	60.5	60.8	61.0	60.75	37.2	37.0	37.1	37.10	107.54	251.10	233.06	213.96	8.9	8805	1.99	2.17	0.421	59.9	17.8	0.296
24/7/2010	11 Drying-H	61.0	61.3	61.7	61.32	36.9	37.0	36.9	36.93	109.06	243.40	225.36	213.96	5.3	39449	1.96	2.07	0.441	34.1	10.5	0.306
2/8/2010	12 Drying-H	61.60	61.1	60.3	61	36.8	37.0	36.7	36.83	107.64	241.60	223.56	213.96	4.5	49389	1.99	2.08	0.423	30.0	8.9	0.297
17/8/2010	13 Drying-H	58.90	58.50	58.30	58.57	36.7	37.0	37.1	36.90	99.41	239.90	221.86	213.96	3.7	58810	2.15	2.23	0.314	33.3	7.9	0.239
13/9/2010	14 Drying-H	59.35	59.00	59.20	59.18	37.0	36.8	37.1	36.95	101.65	239.31	221.27	213.96	3.4	70344	2.10	2.18	0.344	28.1	7.2	0.256
7/11/2010	15 Drying-H	61.30	61.00	60.30	60.87	36.9	36.7	36.7	36.75	106.93	238.95	220.91	213.96	3.2	78368	2.00	2.07	0.413	22.2	6.5	0.292
24/11/2010	16 Drying-H	60.50	61.10	61.05	60.88	36.8	36.9	37.0	36.90	107.43	238.86	220.82	213.96	3.2	94299	1.99	2.06	0.420	21.6	6.4	0.296



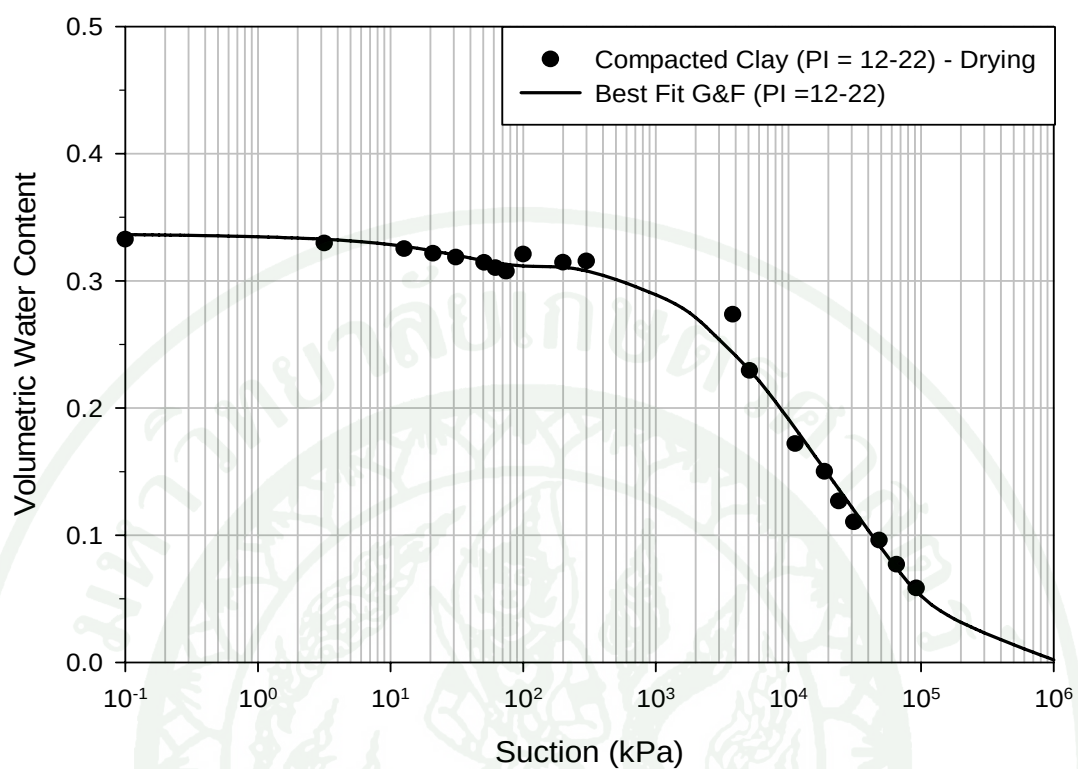
ภาพผนวกที่ ก5 ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ของน้ำในดินบริเวณคันทางที่เป็นดินเหนียว
บดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง ตัวอย่างที่ 1

ตารางผนวกที่ ก6 ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ของน้ำในดินบริเวณคันทางที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง ตัวอย่างที่ 2

Date	Sample	Diameter				Height				nominal vol. cc	Wet soil mass +PVC	Actual Mass		cal. m/c%	suction probe	Dry density, g/cc	Total density, g/cc	e	Sr	θ	n
		1	2	3	Aver.	1	2	3	Aver.			Mass	Msolid								
22/2/2010	1 Wetting	63.4	62.2	62.1	62.57	48.4	48.7	49.1	48.70	149.73	342.45	323.33	279.19	15.8	47.27	1.86	2.16	0.517	86.5	29.5	0.341
25/2/2010	2 Wetting	63.4	62.2	62.1	62.57	48.6	49.0	48.5	48.67	149.63	343.19	324.07	279.19	16.1	35.91	1.87	2.17	0.516	88.2	30.0	0.340
28/2/2010	3 Wetting	63.4	62.2	62.1	62.57	49.0	49.2	48.8	48.98	150.60	343.64	324.52	279.19	16.2	23.81	1.85	2.15	0.525	87.4	30.1	0.344
3/3/2010	4 Wetting	63.4	62.2	62.1	62.57	49.3	49.0	49.0	49.08	150.91	344.58	325.46	279.19	16.6	9.52	1.85	2.16	0.529	88.7	30.7	0.346
6/3/2010	5 Wetting	63.4	62.2	62.1	62.57	49.7	49.5	49.3	49.48	152.14	345.54	326.42	279.19	16.9	6.35	1.84	2.15	0.541	88.4	31.0	0.351
10/3/2010	6 Wetting	63.4	62.2	62.1	62.57	50.3	50.1	49.6	50.00	153.73	346.68	327.56	279.19	17.3	3.17	1.82	2.13	0.557	87.9	31.5	0.358
13/3/2010	7 wetting	63.4	62.2	62.1	62.57	49.9	50.1	50.0	49.95	153.57	347.61	328.49	279.19	17.7	1.59	1.82	2.14	0.556	89.9	32.1	0.357
1/4/2010	Saturation	63.4	62.2	62.1	62.57	50.2	50.3	50.3	50.25	154.49	349.70	330.58	279.19	18.4	0.10	1.81	2.14	0.565	92.1	33.3	0.361
3/4/2010	1 Drying	63.4	62.2	62.1	62.57	50.2	50.4	50.1	50.20	154.34	349.17	330.05	279.19	18.2	3.17	1.81	2.14	0.563	91.4	33.0	0.360
9/4/2010	2 Drying	63.4	62.2	62.1	62.57	50.1	50.3	50.1	50.13	154.14	348.43	329.31	279.19	18.0	12.70	1.81	2.14	0.561	90.4	32.5	0.360
13/4/2010	3 Drying	63.4	62.2	62.1	62.57	50.1	50.3	50.1	50.13	154.14	347.87	328.75	279.19	17.8	20.91	1.81	2.13	0.561	89.4	32.2	0.360
22/4/2010	4 Drying	63.4	62.2	62.1	62.57	49.8	49.8	49.9	49.83	153.21	347.13	328.01	279.19	17.5	31.14	1.82	2.14	0.552	89.6	31.9	0.356
25/4/2010	5 Drying	63.4	62.2	62.1	62.57	49.6	49.7	49.7	49.63	152.60	346.28	327.16	279.19	17.2	50.79	1.83	2.14	0.546	89.0	31.4	0.353
29/4/2010	6 Drying	63.4	62.2	62.1	62.57	49.6	49.9	49.5	49.65	152.65	345.68	326.56	279.19	17.0	61.90	1.83	2.14	0.546	87.8	31.0	0.353
2/5/2010	7 Drying	63.4	62.2	62.1	62.57	49.4	49.6	49.5	49.45	152.03	345.05	325.93	279.19	16.7	74.60	1.84	2.14	0.540	87.7	30.7	0.351
5/8/2010	8 Drying - PP	63.4	62.2	62.1	62.57	49.0	49.0	49.0	48.95	150.50	327.50	327.50	279.19	17.3	100.00	1.86	2.18	0.524	93.3	32.1	0.344
11/8/2010	9 Drying - PP	63.4	62.2	62.1	62.57	48.6	48.6	48.6	48.60	149.42	326.18	326.18	279.19	16.8	200.00	1.87	2.18	0.514	92.7	31.4	0.339
19/8/2010	10 Drying - PP	63.4	62.2	62.1	62.57	47.8	47.0	48.2	47.67	146.55	325.42	325.42	279.19	16.6	300.00	1.91	2.22	0.484	96.7	31.5	0.326
22/8/2010	11 Drying - H	63.4	62.2	62.1	62.57	49.2	49.5	49.2	49.28	151.52	344.44	325.32	279.19	16.5	2958.00	1.84	2.15	0.535	87.4	30.4	0.348

ตารางผนวกที่ ก6 (ต่อ)

Date	Sample	Diameter				Height				nominal	Wet soil mass	Actual Mass		cal.	suction	Dry	Total	e	Sr	θ	n
		1	2	3	Aver.	1	2	3	Aver.	vol. cc	+PVC	Mass	Msolid	m/c%	probe	density, g/cc	density, g/cc				
31/8/2010	12 Drying - H	60.6	61.25	62.0	61.28	48.5	48.4	48.7	48.53	143.16	340.21	321.09	279.19	15.0	3383	1.95	2.24	0.450	94.3	29.3	0.310
5/9/2010	13 Drying - H	61.8	60.15	60.7	60.88	48.1	48.1	48.2	48.12	140.08	336.63	317.51	279.19	13.7	3810	1.99	2.27	0.419	92.7	27.4	0.295
10/9/2010	14 Drying - H	59.50	60.95	61.3	60.58	47.9	47.5	47.7	47.68	137.46	329.85	310.73	279.19	11.3	5098	2.03	2.26	0.392	81.4	22.9	0.282
17/9/2010	15 Drying - H	61.15	61.15	61.15	61.15	46.7	46.7	46.7	46.70	137.15	321.89	302.77	279.19	8.4	11276	2.04	2.21	0.389	61.4	17.2	0.280
23/9/2010	16 Drying - H	59.70	59.85	59.50	59.68	47.1	47.1	47.1	47.10	131.77	318.09	298.97	279.19	7.1	18700	2.12	2.27	0.335	59.9	15.0	0.251
29/9/2010	17 Drying - H	61.05	61.00	59.95	60.67	46.6	46.7	46.7	46.65	134.85	315.41	296.29	279.19	6.1	24051	2.07	2.20	0.366	47.3	12.7	0.268
7/10/2010	18 Drying - H	61.35	61.40	60.95	61.23	46.6	46.6	46.6	46.58	137.18	313.45	294.33	279.19	5.4	31183	2.04	2.15	0.390	39.4	11.0	0.280
16/10/2010	19 Drying - H	59.60	59.70	59.55	59.62	46.8	46.6	46.8	46.68	130.31	310.82	291.70	279.19	4.5	48453	2.14	2.24	0.320	39.6	9.6	0.242
2/11/2010	20 Drying - H	59.30	59.70	59.40	59.47	47.0	46.5	46.6	46.68	129.66	308.30	289.18	279.19	3.6	65528	2.15	2.23	0.313	32.3	7.7	0.239
19/11/2010	21 Drying - H	60.20	61.00	60.20	60.47	46.6	46.9	46.6	46.68	134.06	306.13	287.01	279.19	2.8	92269	2.08	2.14	0.358	22.1	5.8	0.264
27/11/2010	8 Wetting - H	61.20	60.60	61.90	61.23	46.9	47.0	47.0	46.92	138.16	308.58	289.46	279.19	3.7	52066	2.02	2.10	0.399	26.0	7.4	0.285
6/12/2011	9 Wetting - H	60.45	61.10	60.95	60.83	47.1	46.7	46.7	46.82	136.07	312.52	293.40	279.19	5.1	26051	2.05	2.16	0.378	38.0	10.4	0.274
12/12/2010	10 Wetting - H	60.40	60.40	60.40	60.40	46.9	47.5	47.3	47.23	135.34	313.41	294.29	279.19	5.4	21593	2.06	2.17	0.371	41.2	11.2	0.271
15/12/2010	11 Wetting - H	60.00	60.00	60.00	60.00	47.2	47.2	47.7	47.33	133.83	316.08	296.96	279.19	6.4	13094	2.09	2.22	0.356	50.6	13.3	0.262
20/12/2010	12 Wetting - H	61.40	61.40	61.40	61.40	46.9	47.4	47.3	47.18	139.71	316.47	297.35	279.19	6.5	7711	2.00	2.13	0.415	44.3	13.0	0.293



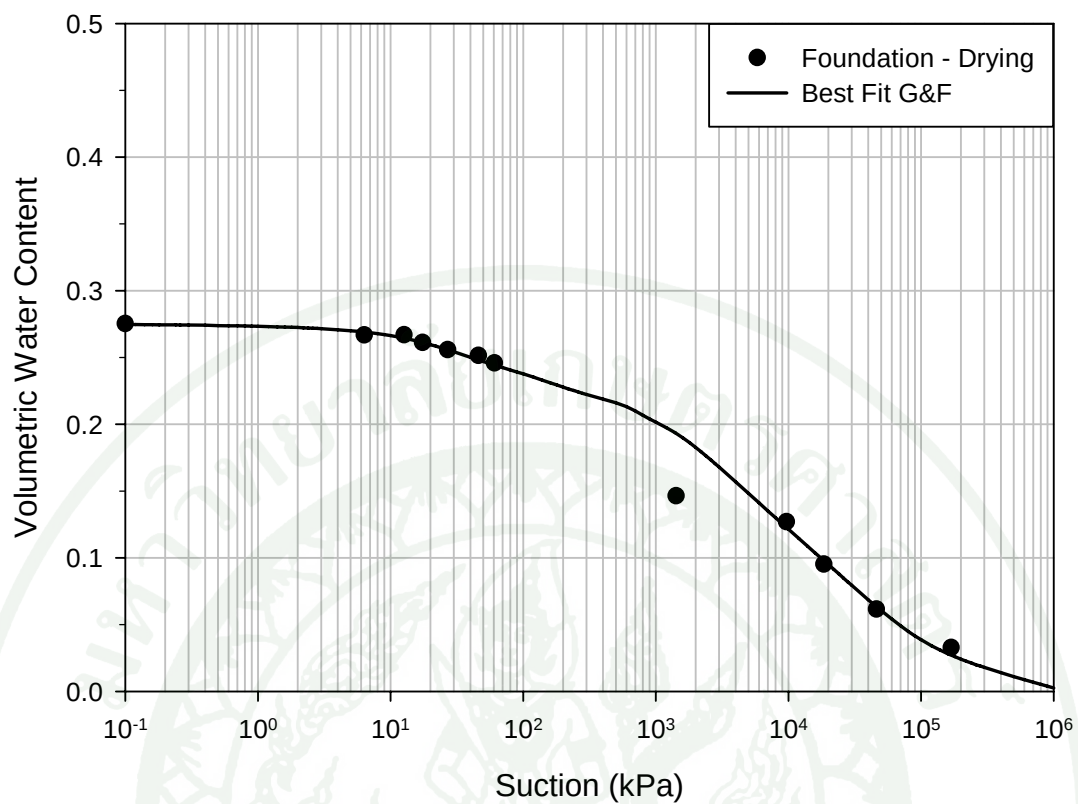
ภาพผนวกที่ ก6 ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ของน้ำในดินบริเวณคันทางที่เป็นดินเหนียว
บดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง ตัวอย่างที่ 2

ตารางผนวกที่ ก7 ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ของน้ำในดินบริเวณใต้คันทางที่เป็นดินเหนียวดัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง ตัวอย่างที่ 1

Date	Sample	Diameter				Height				nominal vol. cc	Wet soil mass +PVC	Actual Mass		cal. m/c%	suction probe	Dry density, g/cc	Total density, g/cc	e	Sr	θ	n
		1	2	3	Aver.	1	2	3	Aver.			Mass	Msolid								
29/11/2009	1 Wetting	61.5	62.4	61.9	61.93	46.1	46.4	46.8	46.43	139.88	326.01	306.91	273.15	12.4	70.68	1.95	2.19	0.322	99.0	24.1	0.244
3/12/2009	2 Wetting	61.5	62.4	61.9	61.93	46.0	46.8	46.2	46.33	139.58	327.35	308.25	273.15	12.9	22.22	1.96	2.21	0.319	103.9	25.1	0.242
5/12/2009	3 Wetting	61.5	62.4	61.9	61.93	46.1	45.9	45.9	45.97	138.48	328.31	309.21	273.15	13.2	14.29	1.97	2.23	0.309	110.3	26.0	0.236
9/1/2010	4 Wetting	61.5	62.4	61.9	61.93	46.2	46.2	46.2	46.20	139.18	326.98	307.88	273.15	12.7	28.41	1.96	2.21	0.316	104.0	25.0	0.240
11/1/2010	5 Wetting	61.5	62.4	61.9	61.93	46.1	46.1	46.1	46.10	138.88	327.85	308.75	273.15	13.0	12.70	1.97	2.22	0.313	107.6	25.6	0.238
14/1/2010	6 Wetting	61.5	62.4	61.9	61.93	46.4	46.5	46.1	46.32	139.53	328.96	309.86	273.15	13.4	3.49	1.96	2.22	0.319	108.8	26.3	0.242
17/1/2010	7 Wetting	61.5	62.4	61.9	61.93	47.0	46.5	46.5	46.65	140.54	329.33	310.23	273.15	13.6	6.35	1.94	2.21	0.328	106.7	26.4	0.247
25/1/2010	Saturation	61.5	62.4	61.9	61.93	46.5	46.5	46.5	46.45	139.93	330.77	311.67	273.15	14.1	0.10	1.95	2.23	0.323	112.8	27.5	0.244
27/1/2010	1 Drying	61.5	62.4	61.9	61.93	47.2	47.0	46.5	46.87	141.19	329.92	310.82	273.15	13.8	6.35	1.93	2.20	0.335	106.4	26.7	0.251
2/2/2010	2 Drying	61.5	62.4	61.9	61.93	46.2	46.2	46.3	46.23	139.28	329.42	310.32	273.15	13.6	12.70	1.96	2.23	0.317	111.0	26.7	0.240
4/2/2010	3 Drying	61.5	62.4	61.9	61.93	46.2	46.5	46.1	46.25	139.33	328.63	309.53	273.15	13.3	17.46	1.96	2.22	0.317	108.5	26.1	0.241
8/2/2010	4 Drying	61.5	62.4	61.9	61.93	46.4	46.1	46.1	46.15	139.03	327.82	308.72	273.15	13.0	26.98	1.96	2.22	0.314	107.0	25.6	0.239
10/2/2010	5 Drying	61.5	62.4	61.9	61.93	45.8	45.9	45.9	45.87	138.18	326.99	307.89	273.15	12.7	46.03	1.98	2.23	0.306	107.3	25.1	0.234
12/2/2010	6 Drying	61.5	62.4	61.9	61.93	45.8	46.0	45.6	45.80	137.98	326.16	307.06	273.15	12.4	60.91	1.98	2.23	0.304	105.4	24.6	0.233
10/3/2010	7 Drying-H	61.5	62.4	61.9	61.93	44.8	44.8	44.9	44.82	135.01	312.01	292.91	273.15	7.2	1426.37	2.02	2.17	0.276	67.6	14.6	0.216
21/3/2010	8 Drying-H	61.7	61.6	61.6	61.62	44.7	44.8	44.7	44.72	133.34	309.17	290.07	273.15	6.2	9704.17	2.05	2.18	0.260	61.4	12.7	0.207
26/3/2010	9 Drying-H	61.5	61.55	61.3	61.43	44.7	44.6	44.8	44.67	132.40	304.86	285.76	273.15	4.6	18521.17	2.06	2.16	0.252	47.4	9.5	0.201
2/4/2010	10 Drying-H	61.8	61.2	61.6	61.53	44.7	45.0	44.7	44.80	133.23	300.45	281.35	273.15	3.0	46225.17	2.05	2.11	0.259	29.9	6.2	0.206
15/4/2010	11 Drying-H	61.7	61.85	61.8	61.77	44.8	44.7	44.9	44.77	134.14	296.65	277.55	273.15	1.6	168898.0	2.04	2.07	0.268	15.5	3.3	0.211

ตารางผนวกที่ ก7 (ต่อ)

Date	Sample	Diameter				Height				nominal	Wet soil mass	Actual Mass		cal.	suction	Dry	Total	e	Sr	θ	n
		1	2	3	Aver.	1	2	3	Aver.	vol. cc	+PVC	Mass	Msolid	m/c%	probe	density, g/cc	density, g/cc				
25/4/2010	1 Wetting-H	61.7	61.85	61.8	61.77	44.9	45.2	45.1	45.05	134.99	300.72	281.62	273.15	3.1	27953	2.02	2.09	0.276	29.0	6.3	0.216
30/4/2010	2 Wetting-H	61.4	62.05	62.3	61.92	44.8	44.6	45.4	44.92	135.24	305.26	286.16	273.15	4.8	5502	2.02	2.12	0.278	44.2	9.6	0.218
17/6/2010	3 Wetting-H	61.40	62.05	62.3	61.92	45.8	45.2	44.9	45.28	136.35	307.82	288.72	273.15	5.7	1426	2.00	2.12	0.289	51.0	11.4	0.224



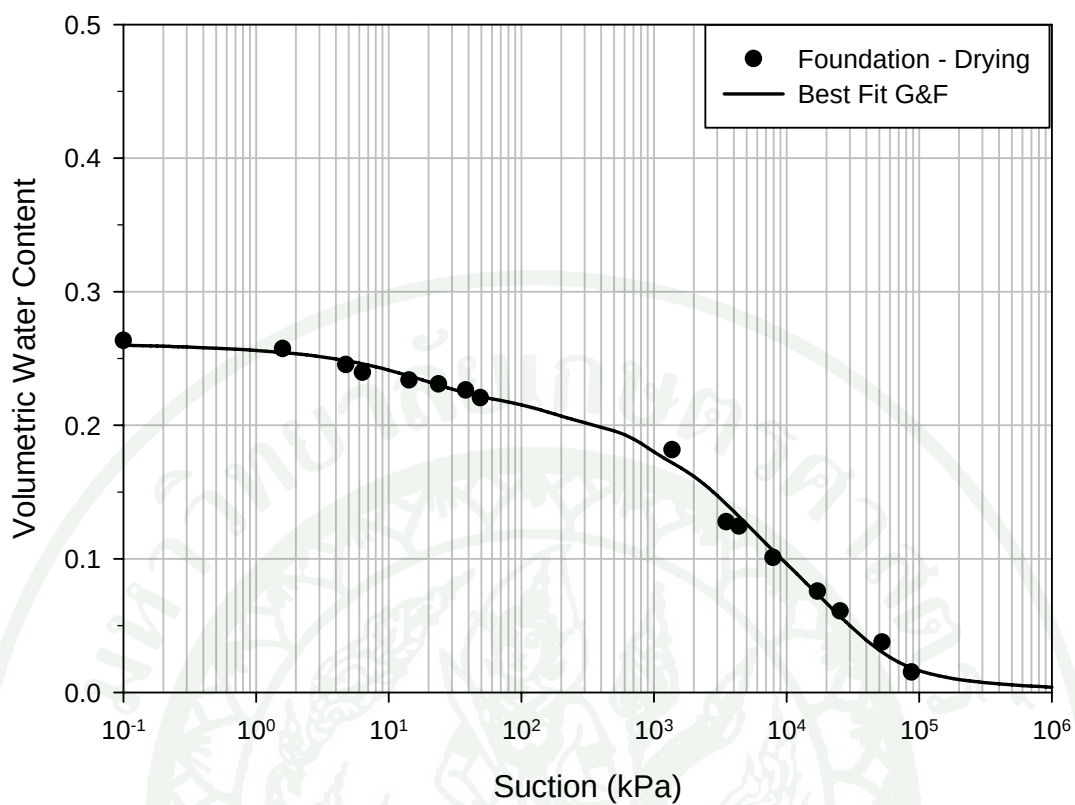
ภาพผนวกที่ ก7 ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ของน้ำในดินบริเวณใต้คันทางที่เป็นดินเหนียว
บดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง ตัวอย่างที่ 1

ตารางผนวกที่ 8 ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ของน้ำในดินบริเวณใต้คันทางที่เป็นดินเหนียวคออัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง ตัวอย่างที่ 2

Date	Sample	Diameter				Height				nominal vol. cc	Wet soil mass +PVC	Actual Mass		cal. m/c%	suction probe	Dry density, g/cc	Total density, g/cc	e	Sr	θ	n
		1	2	3	Aver.	1	2	3	Aver.			Mass	Msolid								
3/12/2009	1 Wetting	62.3	62.1	62.1	62.17	43.0	42.5	42.9	42.80	129.91	296.65	276.13	246.70	11.9	9.52	1.90	2.13	0.360	85.6	22.7	0.265
5/12/2009	2 Wetting	62.3	62.1	62.1	62.17	42.9	43.1	42.5	42.83	130.01	297.56	277.04	246.70	12.3	6.67	1.90	2.13	0.361	88.0	23.3	0.265
10/1/2010	3 Wetting	62.3	62.1	62.1	62.17	42.4	42.5	42.7	42.53	129.10	296.24	275.72	246.70	11.8	23.81	1.91	2.14	0.351	86.5	22.5	0.260
13/1/2010	4 Wetting	62.3	62.1	62.1	62.17	42.5	43.0	42.3	42.60	129.30	297.59	277.07	246.70	12.3	3.17	1.91	2.14	0.353	90.0	23.5	0.261
15/1/2010	5 Wetting	62.3	62.1	62.1	62.17	42.8	42.3	42.9	42.67	129.51	298.88	278.36	246.70	12.8	1.59	1.90	2.15	0.355	93.2	24.4	0.262
23/1/2010	Saturation	62.3	62.1	62.1	62.17	42.8	43.1	42.2	42.68	129.56	301.34	280.82	246.70	13.8	0.10	1.90	2.17	0.356	100.3	26.3	0.263
24/1/2010	1 Drying	62.3	62.1	62.1	62.17	42.4	42.6	42.5	42.50	129.00	300.42	279.90	246.70	13.5	1.59	1.91	2.17	0.350	99.2	25.7	0.259
26/1/2010	2 Drying	62.3	62.1	62.1	62.17	42.2	42.2	42.1	42.17	127.99	298.62	278.10	246.70	12.7	4.76	1.93	2.17	0.340	96.8	24.5	0.253
2/2/2010	3 Drying	62.3	62.1	62.1	62.17	42.5	42.2	42.1	42.27	128.29	297.95	277.43	246.70	12.5	6.35	1.92	2.16	0.343	93.8	24.0	0.255
3/2/2010	4 Drying	62.3	62.1	62.1	62.17	42.8	42.0	42.1	42.30	128.39	297.24	276.72	246.70	12.2	14.29	1.92	2.16	0.344	91.4	23.4	0.256
5/2/2010	5 Drying	62.3	62.1	62.1	62.17	42.4	41.9	42.3	42.20	128.09	296.79	276.27	246.70	12.0	23.81	1.93	2.16	0.341	90.9	23.1	0.254
9/2/2010	6 Drying	62.3	62.1	62.1	62.17	41.8	42.1	42.3	42.07	127.69	296.11	275.59	246.70	11.7	38.10	1.93	2.16	0.336	89.9	22.6	0.252
12/2/2010	7 Drying	62.3	62.1	62.1	62.17	41.6	42.1	41.7	41.78	126.83	295.18	274.66	246.70	11.3	49.21	1.95	2.17	0.327	89.4	22.0	0.247
22/2/2010	8 Drying-H	61.0	60.05	61.6	60.87	41.3	41.4	41.2	41.30	120.17	289.03	268.51	246.70	8.8	1370.42	2.05	2.23	0.258	88.6	18.2	0.205
28/2/2010	9 Drying-H	60.3	59.75	62.0	60.67	40.9	41.1	41.3	41.10	118.80	282.39	261.87	246.70	6.1	3515.00	2.08	2.20	0.243	65.2	12.8	0.196
4/3/2010	10 Drying-H	60.3	59.75	62.0	60.67	40.9	40.9	41.1	40.95	118.37	281.95	261.43	246.70	6.0	4382.52	2.08	2.21	0.239	64.5	12.4	0.193
17/3/2010	11 Drying-H	59.7	61.45	63.0	61.35	40.8	40.9	41.1	40.90	120.90	279.43	258.91	246.70	4.9	7909.00	2.04	2.14	0.265	48.2	10.1	0.210
22/3/2010	12 Drying-H	60.2	61.05	61.8	61.02	41.0	40.8	41.2	41.00	119.89	276.29	255.77	246.70	3.7	17149.37	2.06	2.13	0.255	37.3	7.6	0.203
26/3/2010	13 Drying-H	60.6	62.1	61.2	61.30	40.8	41.2	41.2	41.05	121.15	274.59	254.07	246.70	3.0	25381.7	2.04	2.10	0.268	28.8	6.1	0.211

ตารางผนวกที่ ก8 (ต่อ)

Date	Sample	Diameter				Height				nominal	Wet soil mass	Actual Mass		cal.	suction	Dry	Total	e	Sr	θ	n
		1	2	3	Aver.	1	2	3	Aver.	vol. cc	+PVC	Mass	Msolid	m/c%	probe	density, g/cc	density, g/cc				
2/4/2010	14 Drying-H	60.0	60.9	60.0	60.28	41.1	41.4	41.4	41.25	117.74	271.64	251.12	246.70	1.8	52457	2.10	2.13	0.232	19.9	3.8	0.188
15/4/2010	15 Drying-H	60.1	61	60.5	60.53	40.8	41.3	41.4	41.15	118.43	269.01	248.49	246.70	0.7	87700	2.08	2.10	0.239	7.8	1.5	0.193
25/4/2010	1 Wetting-H	60.10	61	60.5	60.53	41.6	41.2	41.0	41.22	118.62	271.70	251.18	246.70	1.8	35013	2.08	2.12	0.241	19.4	3.8	0.195
30/4/2010	2 Wetting-H	60.50	62.35	60.75	61.2	41.5	41.3	41.3	41.33	121.59	274.60	254.08	246.70	3.0	14780	2.03	2.09	0.273	28.3	6.1	0.214
7/5/2010	3 Wetting-H	60.50	62.35	60.75	61.2	42.0	42.5	42.6	42.37	124.63	278.22	257.70	246.70	4.5	3515	1.98	2.07	0.304	37.8	8.8	0.233



ภาพผนวกที่ ก8 ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ของน้ำในดินบริเวณใต้คันทางที่เป็นดินเหนียว
บดอัดที่มีแนวโน้มการยึดหดตัวปานกลาง ตัวอย่างที่ 2

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อสกุล	กฤษ เหลาสุภาพ
เกิดวันที่	วันที่ 22 เมษายน 2524
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-