ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา | วิศวกรรมโยธา

สาขา | **ภาควิชา**

เรื่อง การศึกษาอิทธิพลของแรงเสียดทานในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ ที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของตัวอย่างดิน

The Study of Friction during Consolidation Test that Influence the Behavior of Soil Sample

นามผู้วิจัย นายอภิศักดิ์ ยิ้มช้อย

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

(อาจารย์สมชาย ประยงค์พันธ์, D.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา .....

(อาจารย์กมล อมรฟ้า, D.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. .....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาอิทธิพลของแรงเสียดทานในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ ที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของตัวอย่างดิน

The Study of Friction during Consolidation Test that Influence the Behavior of Soil Sample

โดย

นายอภิศักดิ์ ยิ้มช้อย

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)
พ.ศ. 2558

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อภิศักดิ์ ยิ้มช้อย 2558: การศึกษาอิทธิพลของแรงเสียดทานในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของตัวอย่างดิน ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิศวกรรมปฐพี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์สมชาย ประยงค์พันธ์, D.Eng. 125 หน้า

การทดสอบการทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์สำหรับการคำนวนปริมาณการทรุดตัวและเวลาในการทรุดตัวของดิน แต่ในชุดการทดสอบนั้นมีวงแหวนโลหะที่ทำหน้าที่ในการบังคับตัวอย่างดินให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งเพียงทิศทางเดียว ซึ่งตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบจะต้องสัมผัสกับวงแหวนที่ใช้ในการทดสอบทำให้เกิดแรงเสียดทานขึ้น ซึ่งแรงเสียดทานดังกล่าวนั้นส่งผลกระทบกับผลของการทดสอบ

การวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลกระทบจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ โดยได้ทำการเปรียบเทียบผลของการทดสอบตามชนิดของดิน 3 ชนิด คือ ดินเหนียว, ดินเหนียวปนทราย และดินเหนียวปนทรายแป้ง ในช่วงความเค้นระหว่าง 0.16-2.53 กก./ซม^2 โดยทำการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ 3 วิธี คือ การทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring, Floating-Ring และTriaxial

จากผลการทดสอบพบว่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นนั้นส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ ค่าดัชนีการอัดตัว และค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำจะมีค่าน้อยลงเมื่อเกิดแรงเสียดทานขึ้นในระหว่างการทดสอบ ในส่วนของดัชนีการอัดตัวและดัชนีการอัดตัวซ้ำนั้นการทดสอบโดยวิธี Fixed-Ring มีค่าความแตกต่างเมื่อเทียบกับการทดสอบโดยวิธี Triaxial เท่ากับ 26.05% และ 2.67% ตามลำดับ, การทดสอบโดยวิธี Floating-Ring มีค่าความแตกต่างเมื่อเทียบกับการทดสอบโดยวิธี Triaxial เท่ากับ 19.57% และ 7.63% ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์ในการปรับแก้ดัชนีการอัดตัวในการทดสอบโดยวิธี Fixed-Ring สำหรับดินเหนียว, ดินเหนียวปนทราย และดินเหนียวปนทรายแป้งเท่ากับ 1.35, 1.14 และ 1.23 ตามลำดับ และในการทดสอบโดยวิธี Floating-Ring เท่ากับ 1.25, 1.11 และ 1.18 ตามลำดับ

_____ _____ ___ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Aphisak Yimchoy 2015: The Study of Friction during Consolidation Test that Influence the Behavior of Soil Sample. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering.
Thesis Advisor: Mr. Somchai Prayongphan, D.Eng. 125 pages.

The consolidation test is conducted for predicting the parameter to calculate settlement and time for consolidation process of soil under the foundation of structure. During the test, consolidation ring confines specimen preventing lateral displacement. Only vertical displacement is allowed during consolidation test using consolidation ring. The contact area between soil and consolidation ring induce the frictional force. That frictional force may effect the resulting of consolidation test in both qualitative and quantitative.

In this research, the effect of frictional force during consolidation test is observed for clay, sandy clay and silty clay respectively three types of consolidation test are adopted, fixed-ring test, floating-ring test and triaxial test. Vertical stress during the test is controlled in the range of 0.16-2.53 ksc.

The results show that the frictional force caused effect to the coefficient of consolidation, compression index and recompression index. The research found that, the coefficient of consolidation is decreasing when the frictional force is increasing. When comparing to triaxial test, compression index and recompression index of fixed-ring test are smaller around 26.05% and 2.67% respectively. For floating-ring test, compression index and recompression index are 19.57% and 7.53% lower comparing to triaxial test. The correction factors are introduced to modify compression index of the consolidation test. For clay, sandy clay and silty clay, during fixed-ring test, the correction factors of 1.35, 1.14 and 1.23 is introduced for revising compression index. During floating-ring test, the factors of 1.25, 1.11 and 1,18 is included to improve compression index.

_____ _____ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร.สมชาย ประยงค์พันธ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาในการศึกษา การวิเคราะห์วิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และกราบขอบพระคุณ ดร.ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก และ อ.ดร.กมล อมรฟ้า ประธานในการสอบ ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนด้วยดีตลอดมา รวมถึงบุคลากรทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา วิทยาเขตกำแพงแสน ที่สนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้

ความดีอันเกิดจากการศึกษาค้นคว้าในครั้งนี้ ผู้เขียนขอมอบให้แก่ บิดา มารดา อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ผู้เขียนมีความซาบซึ้งในความกรุณาอันดียิ่งจากทุกท่าน และขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

อภิศักดิ์ ยิ้มช้อย

ธันวาคม 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	41
อุปกรณ์	41
วิธีการ	49
ผลและวิจารณ์	59
สรุปและข้อเสนอแนะ	88
สรุปผลการวิจัย	88
ข้อเสนอแนะ	92
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	93
ภาคผนวก	96
ภาคผนวก ก ข้อมูลการอัดตัวคายน้ำ	97
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	125

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สมการเชิงประสบการณ์ของดัชนีการอัดตัว	13
2	การเปลี่ยนแปลงของระดับการอัดตัวคายน้ำเฉลี่ยกับแฟคเตอร์เวลา	24
3	แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ	32
4	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานและมุมแรงเสียดทานของผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตหยาบ	33
5	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานและมุมแรงเสียดทานของผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบ	33
6	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานและมุมแรงเสียดทานของผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบ	34
7	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานและมุมแรงเสียดทานของผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตหยาบ	34
8	แสดงอัตราส่วนผสมของตัวอย่างดิน	42
9	แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของดินประดิษฐ์	59
10	แสดงค่ากำลังจากการทดสอบแรงอัดแกนเดียวต่อหน่วยน้ำหนักที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆกัน	61
11	แสดงการเปรียบเทียบแรงเสียดของชนิดดินในการทดสอบ Fixed-Ring	65
12	แสดงการเปรียบเทียบแรงเสียดของชนิดดินในการทดสอบ Floating-Ring	66
13	แสดงการเปรียบเทียบแรงเสียดที่เกิดขึ้นในประเภทของการทดสอบ	66
14	แสดงค่าพารามิเตอร์ของการคำนวณการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Triaxial	70
15	แสดงค่าการอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of Saturation) ของดิน	72
16	แสดงการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวของดินเหนียวปนทรายแป้ง	73
17	แสดงค่าพารามิเตอร์ของการคำนวณการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring	76
18	แสดงค่าพารามิเตอร์ของการคำนวณการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring	79
19	แสดงค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการปรับแก้ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ	83
20	แสดงค่าพารามิเตอร์ของการคำนวณการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Clay	86

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

21 แสดงค่าพารามิเตอร์ของการคำนวณการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Silty Clay 87

22 แสดงค่าพารามิเตอร์ของการคำนวณการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Sandy Clay 87

ตารางผนวกที่

ก1 ข้อมูลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Fixed Ring ตัวอย่างดิน Clay 98

ก2 ข้อมูลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Fixed Ring ตัวอย่างดิน SiltyClay 101

ก3 ข้อมูลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Fixed Ring ตัวอย่างดิน SandyClay 104

ก4 ข้อมูลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Floating Ring ตัวอย่างดิน Clay 107

ก5 ข้อมูลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Floating Ring ตัวอย่างดิน SiltyClay 110

ก6 ข้อมูลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Floating Ring ตัวอย่างดิน SandyClay 113

ก7 ข้อมูลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Triaxialตัวอย่างดิน Clay 116

ก8 ข้อมูลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Triaxialตัวอย่างดิน SiltyClay 119

ก9 ข้อมูลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Triaxialตัวอย่างดิน Sandy Clay 122

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงสัมประสิทธิ์การเสียรูปของดินภายใต้ฐานรากดัดตัว	6
2	แสดงลักษณะของฐานรากที่ตั้งอยู่บนชั้นดินสองชั้น	7
3	แสดงตัวอย่างการทรุดตัวของดินเหนียวที่ถูกประกบด้วยดินทราย	8
4	การเปลี่ยนแปลงของความเค้นรวมที่เพิ่มขึ้น ความดันน้ำส่วนเกินและความเค้นประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้นกับเวลา	9
5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและแรงของดินเหนียวอัดตัวปกติ	10
6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและแรงของดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติกรณีที่แรงกดทับน้อยกว่าแรงที่ดินเคยได้รับ	11
7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและแรงของดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติกรณีที่แรงกดทับมากกว่าแรงที่ดินเคยได้รับ	12
8	อิทธิพลของระยะเวลาการวางน้ำหนักต่อความสัมพันธ์ $e-\log\sigma'_v$	14
9	อิทธิพลของอัตราการเพิ่มน้ำหนักต่อความสัมพันธ์ $e-\log\sigma'_v$	14
10	การประมาณค่าแรงกดทับสูงสุดในอดีตโดยวิธีของ Casagrande	15
11	แสดงการประมาณค่าแรงกดทับสูงสุดในอดีตโดยวิธีของ Janbu	17
12	การประมาณค่าแรงกดทับสูงสุดในอดีตโดยวิธีของ Pacheco Silva	18
13	แสดงการประมาณค่าแรงกดทับสูงสุดในอดีตโดยวิธีของ Beker et al.	19
14	แสดงการประมาณค่าแรงกดทับสูงสุดในอดีตโดยวิธีของ Burland	20
15	แสดงการประมาณค่าแรงกดทับสูงสุดในอดีตด้วยวิธีของ Onitsuka et al.	21
16	(a) ชั้นดินที่เกิดการอัดตัวคายน้ำ (b) การไหลของน้ำในก้อนดินเล็กๆ ระหว่างการอัดตัวคายน้ำ	22
17	ความสัมพันธ์ระหว่าง U_z และ T_v	23
18	วิธีล็อคกาลิทึมของเวลา (Logarithm of Time Method)	25
19	แสดงวิธีรากที่สองของเวลา (Square Root of Time Method)	26
20	วิธีไฮดพอร์บอลลิค (Hyperbolic Method)	27

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	แสดงเครื่องมือการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ	28
22	แสดงแบบจำลองการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Fixed-Ring	29
23	แสดงแบบจำลองการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Floating -Ring	30
24	แสดงแรงเสียดที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ	31
25	แสดงวิถีความเค้นของการทดสอบแรงอัดสามแกนโดยการอัดตัวคายน้ำแบบต่างๆ	37
26	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและอายุของการบ่มที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ	39
27	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของดินประดิษฐ์และดินจริง	39
28	พฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของดินประดิษฐ์ที่อายุบ่ม 7 วัน	40
29	แสดงอัตราส่วนผสมที่จำแนกโดย USDA and UK-ADAS Textural Triangle	42
30	แสดงแบบจำลองการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ ประเภท Fixed-Ring	44
31	แสดงแบบจำลองการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ ประเภท Floating-Ring	46
32	แสดงแบบจำลองการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Triaxial	47
33	แสดงการนำส่วนผสมของดินประดิษฐ์เข้าตู้อบ	49
34	แสดงการตวงดินตามอัตราส่วนผสม	50
35	แสดงการผสมดินประดิษฐ์	50
36	แสดงตัวอย่างดินประดิษฐ์	51
37	แสดงการใช้พลาสติกห่อตัวอย่างดิน	51
38	แสดงการนำตัวอย่างดินเข้ากล่องโฟม	52
39	แสดงการสร้างแรงกดทับในอดีตให้กับตัวอย่างดิน	53
40	แสดงการทำให้ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ	53
41	แสดงชุดทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring	54
42	แสดงการใส่น้ำหนักบรรทุกการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring	54
43	แสดงชุดทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ ประเภท Floating -Ring	55
44	แสดงการนำตัวอย่างดินเข้าเครื่องทดสอบ Triaxial	56

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
45	แสดงการให้แรงดัน Cell Pressure และ Back Pressure	57
46	แสดงการอัดตัวแบบคายน้ำใน Triaxial	57
47	แสดงแผนผังในการทดสอบ	58
48	แสดงการสอบเทียบ Load Cell ของชุดทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ ประเภท Fixed Ring	62
49	แสดงการสอบเทียบ Load Cell ของชุดทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ ประเภท Fixed-Ring	62
50	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่กระทำกับตัวอย่างดินและแรงเสียดทาน	65
51	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Void Ratio และ Pressure ในระหว่างการทดสอบ การอัดตัวคายน้ำโดยใช้เครื่องมือ Triaxial	67
52	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Coefficient of Consolidation และ Pressure ในระหว่างการทดสอบการอัดตัวคายน้ำโดยใช้เครื่องมือ Triaxial	69
53	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา	71
54	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Void Ratio และ Pressure ของการทดสอบ การอัดตัวคายน้ำประเภท Fixed-Ring	73
55	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Coefficient of Consolidation และ Pressure ของการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Fixed-Ring	75
56	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Void Ratio และ Pressure ของการทดสอบ การอัดตัวคายน้ำประเภท Floating-Ring	77
57	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Coefficient of Consolidation และ Pressure ของการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Floating-Ring	78
58	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Void Ratio และ Pressure ของดินเนียว	82
59	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Void Ratio และ Pressure ของดินเหนียว ปนทรายแป้ง	82
60	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Void Ratio และ Pressure ขอ ดินเหนียว ปนทราย	83

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
61	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Coefficient of Consolidation และ Pressure ของดินเหนียว	85
62	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Coefficient of Consolidation และ Pressure ของดินเหนียวปนทรายแป้ง	85
63	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Coefficient of Consolidation และ Pressure ของดินเหนียวปนทราย	86

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การศึกษาอิทธิพลของแรงเสียดทานในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ ที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของตัวอย่างดิน

The Study of Friction during Consolidation Test that Influence the Behavior of Soil Sample

คำนำ

เนื่องจากในปัจจุบันนั้นในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ (Consolidation Test) โดยใช้เครื่อง Oedometer นิยมทำการทดสอบกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งการทดสอบนั้นจะอยู่บนพื้นฐานทฤษฎีของ Terzaghi ที่กล่าวไว้ว่า ตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบนั้นต้องมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันตลอด มีความอิ่มตัวด้วยน้ำ 100% มีแรงกดจากภายนอกกระทำในแนวดิ่งเท่านั้น น้ำที่ไหลออกจากมวลดินต้องไหลออกในแนวดิ่งและการไหลของน้ำเป็นไปตามกฎของ Darcy ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ของความซึมน้ำ (k) ที่คงที่สำหรับช่วงความเค้นกดอัดหนึ่งๆ และพฤติกรรมของดินเหนียวที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำนั้นจะมีการทรุดตัวเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอก โดยในช่วงแรกเมื่อได้รับแรงกระทำนั้นน้ำที่อยู่ในมวลดินจะรับแรงที่เกิดจากแรงกระทำจากภายนอกทั้งหมดและเมื่อเวลาผ่านไปน้ำจะถูกระบายออกจากมวลดินทำให้โครงสร้างของดินเป็นส่วนที่รับแรงกระทำจากภายนอกแทน และอนุภาคของดินจะเคลื่อนตัวชิดกันแทนช่องว่างที่เกิดจากการไหลออกของน้ำจึงเป็นสาเหตุทำให้ดินยุบตัวลง ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบการทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำเพื่อหาพารามิเตอร์สำหรับการคำนวณการทรุดตัวและอัตราการทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำของสิ่งก่อสร้าง เพื่อให้เกิดความมั่นใจในการใช้งานและเพื่อพิจารณาค่าการทรุดตัวที่ต่างกันของโครงสร้างอันเนื่องมาจากการยุบตัวของดินใต้ฐานรากที่ต่างชนิดกันซึ่งเป็นสาเหตุให้สิ่งก่อสร้างเกิดความเสียหาย

แต่ในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำนั้น มีอุปกรณ์ที่เรียกว่าวงแหวนในการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Ring) ซึ่งวงแหวนดังกล่าวจะทำหน้าที่ควบคุมไม่ให้ตัวอย่างดินมีการขยายตัวทางด้านข้าง ซึ่งจากทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำของ Terzaghi นั้นได้ตั้งสมมุติฐานไว้ว่าการเคลื่อนที่ของตัวอย่างดินเกิดในแนวดิ่งเท่านั้นและเป็นการเคลื่อนที่อย่างอิสระ แต่ในการทดสอบนั้นการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบจะมีแรงเสียดทานระหว่างมวลดินกับผิวของวงแหวน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ ซึ่งแรงเสียดทานดังกล่าวนั้นอาจจะส่งผลกระทบกับผลของการทดสอบ

จากเหตุผลที่ได้กล่าวมานั้นจึงเป็นสมมุติฐานที่จะดำเนินการหาผลกระทบของแรงเสียดทานดังกล่าวว่าส่งผลกระทบกับการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำในด้านใดบ้าง และดำเนินการปรับแก้ผลการทดสอบให้เป็นไปตามสมมุติฐานของ Terzaghi ต่อไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาชนิดและประเภทของดินกับแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ

2. เพื่อศึกษาประเภทของการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำกับค่าแรงเสียดทานว่าการทดสอบแต่ละประเภทมีค่าแรงเสียดทานมากน้อยเพียงใด

3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของแรงเสียดทานระหว่างตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบกับวงแหวนในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำต่อค่าพารามิเตอร์ของการอัดตัวคายน้ำ

4. เพื่อปรับแก้ผลการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำให้เป็นไปตามสมมุติฐานของ Terzaghi

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

ในส่วนของการตรวจเอกสารนั้นจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ การทรุดตัวทันที (Immediate Settlement) ซึ่งเป็นการทรุดตัวที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินโดยที่ไม่เกิดการระบายออกของน้ำจากมวลดิน ต่อมาจะกล่าวถึงการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินโดยการไหลออกของน้ำในมวลดิน และยังกล่าวถึงวิธีของการทดสอบให้ได้มาซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณการทรุดและเวลาที่ใช้ในการทรุดตัวด้วย และในส่วนสุดท้ายนั้นจะกล่าวถึงดินประดิษฐ์ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในการทดสอบการอัดตัวคายน้ำในงานวิจัยนี้ ซึ่งจะแสดงรายละเอียดทั้งหมดดังต่อไปนี้

1. การทรุดตัวทันที (Immediate Settlement)

การทรุดตัวทันที (Immediate Settlement) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรมวลดิน โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาตรมวลดินดังกล่าวนั้นไม่ได้เกิดจากการระบายน้ำออกจากมวลดิน และเนื่องจากการทรุดตัวทันทีเกิดขึ้นไม่มากนัก การทรุดตัวทันทีจึงสามารถคำนวณได้จากทฤษฎียืดหยุ่น (Elastic Theory)

1.1 การทรุดตัวทันทีในชั้นดินที่หนามาก

ในกรณีที่ชั้นดินมีความหนาไม่จำกัด (Infinite Depth) การทรุดตัวทันทีหรือการทรุดตัวแบบยืดหยุ่นเนื่องจากน้ำหนักกระจายสม่ำเสมอกระทำบนรากฐานแบบดัดตัว (Flexible Footing) สามารถคำนวณได้โดยสมมติว่าดินใต้ฐานรากเป็นวัตถุยืดหยุ่น ดังสมการที่ (1)

$$S_i = \frac{q_{net} B}{E}\left(1 - v^2\right) I \qquad (1)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อ

q_{net}	=	ความดันสุทธิที่กระจายใต้ฐานราก
B	=	ความกว้างของฐานราก
V	=	อัตราส่วนโพซอง
E	=	โมดูลัสของยัง
I	=	ตัวประกอบการเสียรูปในแนวดิ่ง
S_i	=	การทรุดตัวแบบยืดหยุ่น

สมการนี้สามารถใช้ในการประมาณการทรุดตัวที่ขึ้นกับฐานรากที่ออกแบบโดยใช้อัตราส่วนปลอดภัยมากกว่า 3.0 ซึ่งความเค้นที่กระทำต่อชั้นดินประมาณหนึ่งในสามของกำลังรับแรงแบกทาน การทรุดตัวทันทีในดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำเกิดจากการจัดเรียงตัวของเม็ดดินและเป็นสภาวะซึ่งไม่มีการระบายน้ำออกของน้ำ จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรในมวลดิน

1.2 การทรุดตัวทันทีในชั้นดินบาง

ปัญหาทั่วไปที่มักพบ คือ ชั้นดินมีความหนาที่จำกัดและมักวางตัวอยู่เหนือชั้นดินที่แข็ง ในกรณีเช่นนี้ การหาการทรุดตัวทันทีโดยอาศัยสมการที่ 1 (เหมาะสำหรับชั้นดินที่มีความหนาเกิน 2 เท่าของความกว้างฐานราก) จะให้ค่าการทรุดตัวที่มากเกินจริง

สำหรับกรณีชั้นดินอัดตัวได้ (Compressible Soil) ใต้ฐานรากมีความหนาน้อยกว่า 2 เท่าของความกว้างฐานราก ดังภาพที่ 1 Janbu et al. (1956) เสนอสมการคำนวณการทรุดตัวดังนี้

$$S_i = \frac{q_{net} B}{E} \mu_0 \mu_1 (1 - v^2) \qquad (2)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อ

S_i = การทรุดตัวแบบทันที

μ_0 = สัมประสิทธิ์ซึ่งขึ้นอยู่กับความกว้างของฐานราก

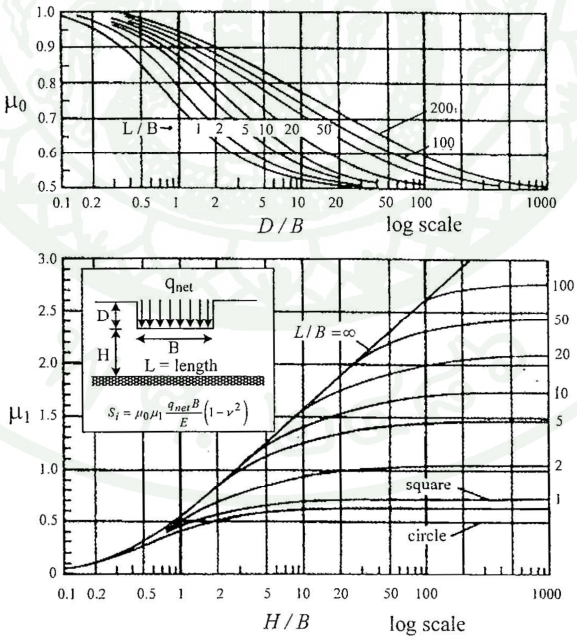
μ_1 = สัมประสิทธิ์ซึ่งขึ้นอยู่กับความลึกของฐานราก

B = ความกว้างของฐานราก

E = โมดูลัสของยัง

V = อัตราส่วนโพซอง

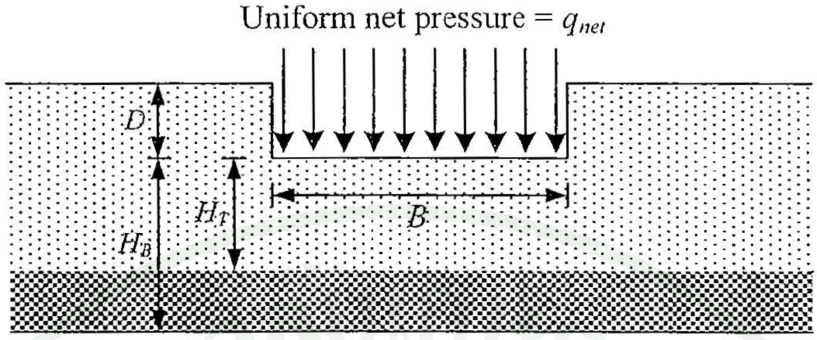
ในกรณีที่มีชั้นดินใต้ฐานรากสองชั้น ชั้นแรกเป็นชั้นดินแข็งและชั้นล่างเป็นชั้นดินอ่อน ดังแสดงในภาพที่ 2 ลักษณะเช่นนี้มีความคล้ายคลึงกับชั้นดินในแถบกรุงเทพมหานคร ชั้นบนจะเป็นชั้นดินที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและปริมาณความชื้น (Weathered Crust) และชั้นล่างเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนที่หนามาก และทรุดตัวทันทีของดินชั้นล่างสามารถคำนวณได้โดยการหาค่า $\mu_{1(B)}$ สำหรับชั้นดินหนา H_B และต่อมาหาค่า $\mu_{1(T)}$ สำหรับชั้นดินหนา H_T การทรุดตัวทันทีในชั้นดินเหนียวอ่อนคำนวณได้โดยแทนค่า $\mu_1 = \mu_{1(B)} \quad \mu_{1(T)}$



ภาพที่ 1 แสดงสัมประสิทธิ์การเสียรูปของดินภายใต้ฐานรากดัดตัว

ที่มา: Janbu et al. (1956)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 2 แสดงลักษณะของฐานรากที่ตั้งอยู่บนชั้นดินสองชั้น

2. การอัดตัวคายน้ำ (Consolidation)

เมื่อมีน้ำหนักกดทับบนชั้นดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำอย่างทันทีทันใด ความดันน้ำในมวลดินจะเพิ่มขึ้นทันที ความดันน้ำที่เพิ่มขึ้นนี้เรียกว่าความดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore Pressure, Δu) ระยะเวลาที่ใช้ในการระบายตัวของความดันน้ำส่วนเกินจะแปรผันตามประสิทธิ์การซึมผ่าน สำหรับดินเหนียว ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่ต่ำมาก การระบายความดันน้ำส่วนเกินจะใช้เวลานาน ในขณะที่ชั้นดินทรายมีการซึมผ่านสูง การระบายความดันน้ำในโพรงระหว่างเม็ดดินจะเกิดขึ้นและเสร็จสิ้นในเวลาอันสั้น ดังนั้น การทรุดตัวทันทีและการอัดตัวคายน้ำจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กันทันทีที่มีน้ำหนักกระทำบนชั้นดินประเภทนี้

ขบวนการทรุดตัวในชั้นดินเหนียวเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกกระทำสามารถอธิบายได้ดังนี้ ทันทีที่มีน้ำหนักบรรทุกกระทำการทรุดตัวแบบยืดหยุ่นจะเกิดขึ้นทันที และน้ำหนักที่กระทำนี้จะก่อให้เกิดความดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore Water Pressure, Δu) ซึ่งจะค่อยๆ ระบายออกกับเวลา ส่งผลให้เกิดการอัดตัวคายน้ำที่กินเวลานานหลังจากการสิ้นสุดการทรุดตัวทันที การทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำมีค่าสูงกว่าการทรุดตัวทันทีหลายเท่าตัว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

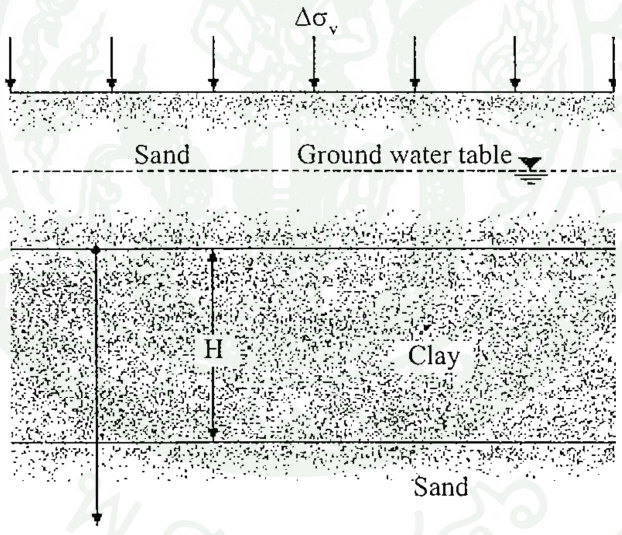
ภาพที่ 3 และ 4 แสดงชั้นดินที่รับน้ำหนักบรรทุกกระจายสม่ำเสมอ และการเปลี่ยนแปลงความเค้นและความดันน้ำหนักส่วนเกินในมวลดินกับเวลาตามลำดับ ซึ่งเป็นกรณีที่ชั้นดินเหนียวมีความหนา H อยู่ระหว่างชั้นดินทรายทั้งด้านบนและด้านล่าง และรับน้ำหนักการกดทับอย่างทันทีด้วยความเค้นรวมที่เพิ่มขึ้นในแนวดิ่งเท่ากับ $\Delta\sigma_v$ ความเค้นรวมที่เพิ่มขึ้นนี้จะมีค่าคงที่ตลอดความลึกและจะส่งไปยังความดันน้ำและเม็ดดิน ซึ่งหมายความว่าความเค้นรวมที่เพิ่มขึ้นจะถูกแบ่งรับโดยส่วนประกอบของแรงสองส่วน ได้แก่ ความเค้นประสิทธิผล และความดันน้ำ ดังนี้

$$\Delta\sigma_v = \Delta\sigma'_v + \Delta u \qquad (3)$$

เมื่อ

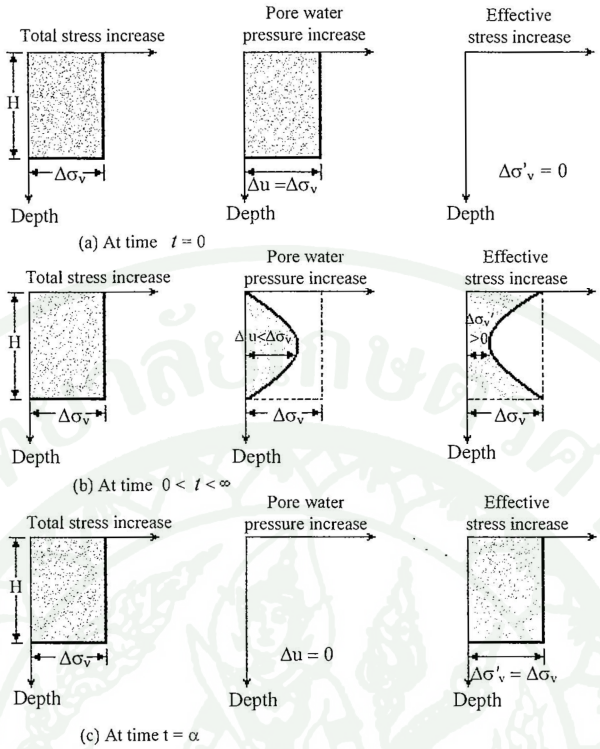
$\Delta\sigma'_v$ = ความเค้นประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้นในแนวดิ่ง และ

Δu = ความดันน้ำส่วนเกิน



ภาพที่ 3 แสดงตัวอย่างการทรุดตัวของดินเหนียวที่ถูกประกบด้วยดินทราย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 4 การเปลี่ยนแปลงของความเค้นรวมที่เพิ่มขึ้น ความดันน้ำส่วนเกินและความเค้นประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้นกับเวลา

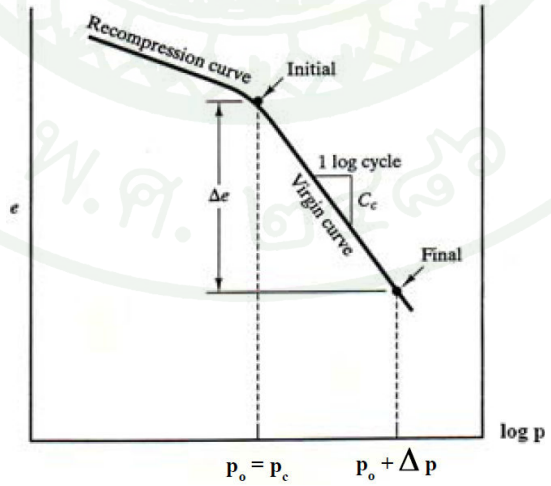
เนื่องจากดินเหนียวมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมที่ต่ำ และน้ำเป็นวัสดุที่อัดตัวไม่ได้ ดังนั้นที่เวลาเริ่มต้น (t = 0) ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่มีการระบายความดันน้ำส่วนเกิน (Undrained Condition) ความเค้นรวมที่เพิ่มขึ้นในแนวดิ่งจะถูกต้านรับโดยความดันน้ำ ($\Delta\sigma_v = \Delta u$) หลังจากเม็ดดินเริ่มรับน้ำหนักจากความเค้นรวมที่เพิ่มขึ้นในแนวดิ่ง น้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินเริ่มถูกบีบ และระบายออกไปยังชั้นทรายซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสูงที่สภาวะนี้ความดันน้ำที่จุดใดๆ ในชั้นดินจะค่อยๆ ลดลงในขณะเดียวกัน ความเค้นประสิทธิผลก็จะเพิ่มขึ้นเพื่อรักษาสภาวะสมดุล ดังแสดงในสมการที่ 10 หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าที่เวลา $0 < t < \alpha$, $\sigma'_v > 0$ และ $\Delta u < \Delta\sigma_v$ ขนาดของ σ'_v และ Δu ที่ตำแหน่งใดๆ จะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างตำแหน่งที่พิจารณากับชั้นทราย $\Delta u = 0$ ที่ผิวด้านบนและผิวด้านล่างของชั้นดินเหนียว ซึ่งความดันน้ำส่วนเกินสามารถระบายน้ำออกได้อย่างสะดวก ดังนั้น $\Delta\sigma_v = \Delta\sigma'_v$ เสมอ ดังแสดงภาพที่ 4 ในทางทฤษฎี ที่เวลา t = α ความดันน้ำส่วนเกินจะกลายเป็นศูนย์ ($\Delta u = 0$) เนื่องจากสิ้นสุดการระบายความดันน้ำส่วนเกิน ส่งผลให้ความเค้นรวมที่เพิ่มขึ้นในแนวดิ่งมีค่าเท่ากับความเค้นประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้น ($\Delta\sigma_v = \Delta\sigma'_v$)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อตระหนักว่า ตัวอย่างที่อธิบายข้างต้นนี้เป็นลักษณะการอัดตัวคายน้ำใน 1 มิติ กล่าวคือ การระบายความดันน้ำส่วนเกินจากมวลดินเหนียวเกิดขึ้นเฉพาะในแนวดิ่งเพียงทิศทางเดียวและไม่เกิดการเสียรูปด้านข้าง ในกรณีเช่นนี้จะไม่เกิดการทรุดตัวทันที (Immediate Settlement) ดังนั้น ในช่วงเวลาเริ่มต้น (t = 0) ความดันน้ำส่วนเกินจะมีค่าเท่ากับความเค้นในแนวดิ่ง ($\Delta u = \sigma_v$) แต่ในกรณีที่มีการเสียรูปด้านข้างในมวลดิน (การเสียรูปแบบเป็น 3 มิติ) ที่ t = 0 ความดันน้ำส่วนเกินจะมีค่าน้อยกว่าความเค้นในแนวดิ่ง ($\Delta u < \Delta\sigma_v$) ดังนั้น ภายใต้การเพิ่มความเค้นในแนวดิ่งที่เท่ากันการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ 3 มิติ จะมีค่าน้อยกว่าการทรุดตัว 1 มิติ

3. การประมาณค่าการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ

การทรุดตัวเนื่องการอัดตัวคายน้ำเกิดจากปริมาณน้ำหรืออากาศถูกบีบออกจากมวลดินทำให้ปริมาตรของดินลดลง ซึ่งมักเป็นสาเหตุสำคัญของการทรุดตัวของดินอ่อน สามารถแยกการคำนวณออกเป็น 2 ประเภทคือ ดินเหนียวอัดตัวปกติ (Normally Consolidated Clays) แสดงดังภาพที่ 5 และคำนวณได้จากสมการที่ (4) และดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติ (Over Consolidated Clays) ซึ่งในประเภทนี้จะแยกการออกเป็นอีก 2 กรณีคือ กรณีที่แรงกดทับน้อยกว่าแรงที่ดินเคยได้รับแสดงดังภาพที่ 6 และคำนวณได้จากสมการที่ (5) และอีกกรณีหนึ่งนั้นคือ กรณีที่แรงกดทับมากกว่าแรงที่ดินเคยได้รับแสดงดังภาพที่ 7 และคำนวณได้จากสมการที่ (6)

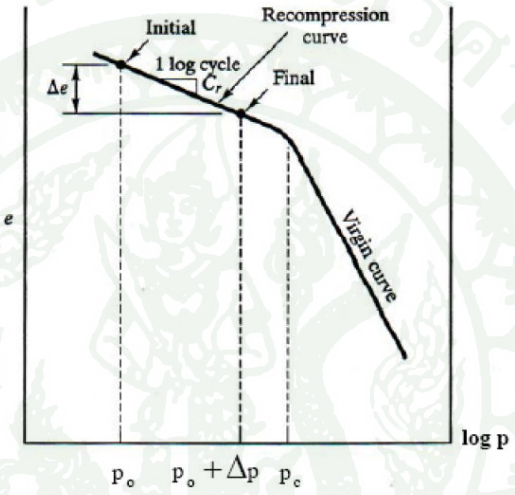


ภาพที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและแรงของดินเหนียวอัดตัวปกติ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สำหรับ Normally Consolidated Clays

$$S = \frac{C_c}{1+e_0} H \log\left[\frac{P'_0 + \Delta P'}{P'_0}\right] \quad (4)$$

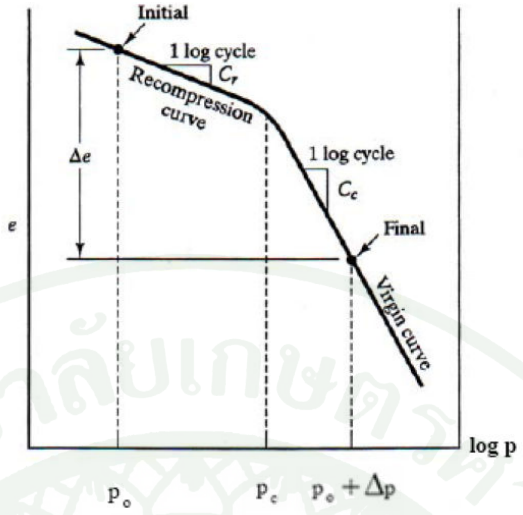


ภาพที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและแรงของดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติ กรณีที่แรงกดทับน้อยกว่าแรงที่ดินเคยได้รับ

สำหรับ Over Consolidated Clays เมื่อ $P'_0 + \Delta P' \leq P_c$

$$S = \frac{C_r}{1+e_0} H \log\left[\frac{P'_0 + \Delta P'}{P'_0}\right] \quad (5)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและแรงของดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติ กรณีที่แรงกดทับมากกว่าแรงที่ดินเคยได้รับ

สำหรับ Over Consolidated Clays เมื่อ $P'_0 \le P_c \le P'_0 + \Delta P'$

$$S = \frac{C_r}{1+e_0} H \log\left[\frac{P'_c}{P'_0}\right] + \frac{C_c}{1+e_0} H \log\left[\frac{P'_0 + \Delta P'}{P'_0}\right] \qquad (6)$$

เนื่องจากการหาดัชนีการอัดตัวโดยการทดสอบการอัดตัวคายน้ำกินเวลานานมาก Nagaraj and Srinivasa Murthy (1986) จึงได้รวบรวมสมการเชิงประสบการณ์ (Empirical Equations) ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในการประมาณค่า C_c จากคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 1 สมการเชิงประสบการณ์ของดัชนีการอัดตัว

สมการ	อ้างอิง	ใช้ได้กับดินประเภท
$C_c = 0.007(LL-10)$	Skempton (1944)	ดินเหนียวอัดตัวปกติ $S_t < 1.5$
$C_c = 0.009(LL-10)$	Terzaghiand Peck(1967)	ดินเหนียวไวตัวปานกลาง $S_t < 5$
$C_c = 0.01Wn$	Koppula(1981)	ดินเหนียวอัดตัวปกติ $S_t < 1.5$
$C_c = 0.015Wn$	Bowles(1979)	ดินเหนียวอัดตัวปกติ $S_t < 1.5$
$C_c = 0.75(e_0-0.50)$	Bowles(1979)	ดินเหนียวอัดไวปานกลาง $S_t < 5$
$C_c = 0.0046(LL-9)$	Bowles(1979)	ดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติ
$C_c = 1.21+1055(e_0-1.87)$	Bowles(1979)	ดินเหนียวอัดตัวไวสูง $S_t < 5$
$C_c = 0.3(e_0-0.27)$	Bowles(1979)	ดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติ
$C_c = 0.208(e_0-0.083)$	Bowles(1979)	ดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติ
$C_c = 0.156(e_0-0.0107)$	Bowles(1979)	ดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติ

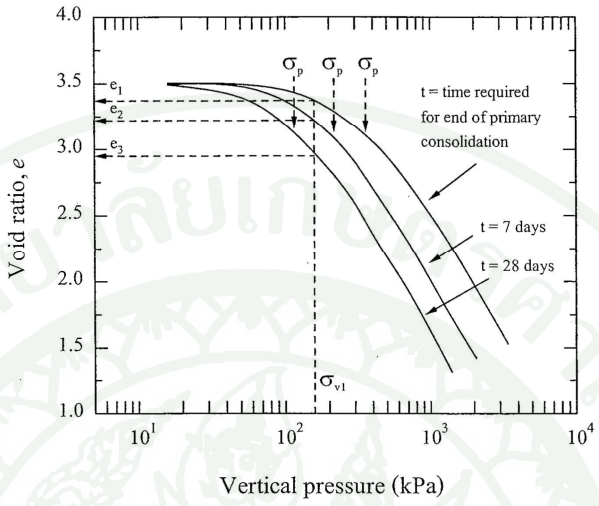
ที่มา: Nagarai and srinivasa Murthy (1986)

4. ปัจจัยที่มีผลต่อความสัมพันธ์ $e - \log \sigma'_v$

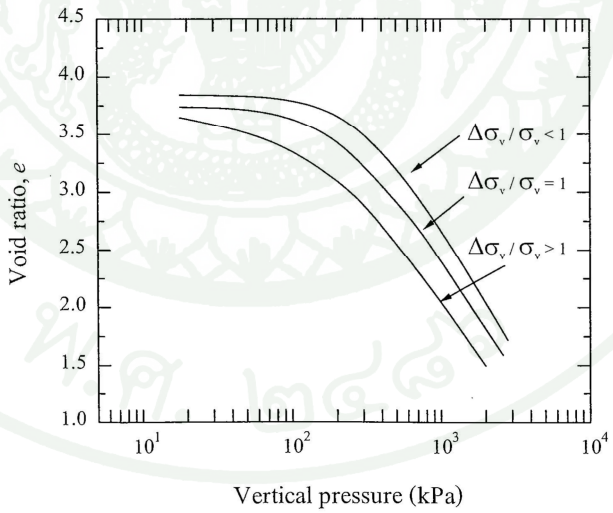
Crawford (1964) ทำการทดสอบดินเหนียวลีดา (Leda) โดยมีค่า $\Delta\sigma_v/\sigma_v = 1.0$ และทำการเปลี่ยนค่าระยะเวลาน้ำหนักต่างๆ กันผลทดสอบแสดงดังภาพที่ 8 จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลาการวางน้ำหนักมากขึ้น ความสัมพันธ์นี้จะเลื่อนไปทางซ้ายมือ ซึ่งหมายความว่าอัตราส่วนโพรงที่เวลาสิ้นสุด การอัดตัวคายน้ำมีค่าลดลงกับเวลาที่เพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่นที่ $\sigma_v = \sigma_{v1}, e = e_1$ สำหรับเวลา 7 วันและ $e = e_3$ สำหรับเวลา 24 วัน จะเห็นได้ว่าค่า $e_3 < e_1$ เนื่องจากการอัดตัวคายน้ำทุติยภูมิ (Secondary Consolidation) ของดินตัวอย่างเพิ่มขึ้นกับเวลา นอกจากนี้ เราจะพบว่าค่าความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นที่กดทับดินในอดีตมีค่าเพิ่มขึ้นกับระยะเวลาที่ลดลง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อัตราการเพิ่มของน้ำหนักก็มีอิทธิพลต่อความสัมพันธ์ $e-\log\sigma'_v$ ดังแสดงในภาพที่ 9 จะเห็นได้ว่าเมื่อ $\Delta\sigma_v/\sigma_v$ มีค่าเพิ่มขึ้นความสัมพันธ์ $e-\log\sigma'_v$ จะเคลื่อนไปทางซ้ายมือ



ภาพที่ 8 อิทธิพลของระยะเวลาการวางน้ำหนักต่อความสัมพันธ์ $e-\log\sigma'_v$



ภาพที่ 9 อิทธิพลของอัตราการเพิ่มน้ำหนักต่อความสัมพันธ์ $e-\log\sigma'_v$

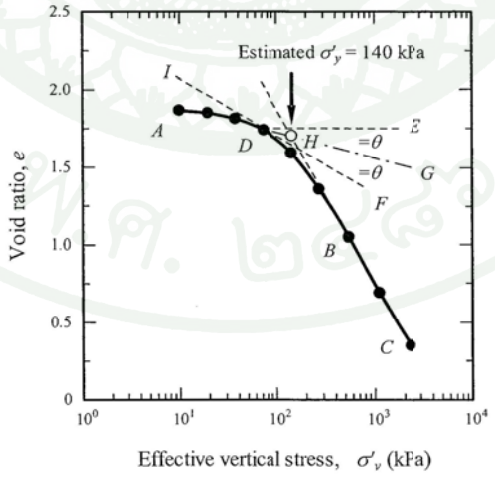
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5. การประมาณค่าแรงกดทับสูงสุดในอดีต

หน่วยแรงกดทับสูงสุดในอดีตของดิน (Preconsolidation or Maximum Pressure) เป็นคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่สำคัญอย่างหนึ่งของดินที่ชี้บ่งสภาวะอัดแน่นของดิน เมื่อดินซึ่งถูกกดทับด้วยหน่วยแรงปัจจุบันน้อยกว่าหน่วยแรงในอดีตดินนั้นอยู่ในสภาวะอัดแน่นเกินตัว หากดินถูกกดทับด้วยหน่วยแรงปัจจุบันเท่ากับหน่วยแรงในอดีตดินนั้นอยู่ในสภาวะอัดแน่นปกติ ซึ่งการหาค่าหน่วยแรงกดทับสูงสุดในอดีตของดินนั้น Jamiolkowski et al. (1985) กล่าวว่าการประมาณค่าแรงกดทับสูงสุดในอดีตเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากในการประมาณการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำและการตรวจสอบเสถียรภาพของลาดดิน (Stability Problems) การประมาณค่าแรงกดทับสูงสุดในอดีตด้วยกันหลายวิธีดังนี้

5.1 วิธีของ Casagrande (1936)

วิธีการประมาณค่าแรงกดทับสูงสุดในอดีตได้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Casagrande ในปี ค.ศ.1936 วิธีนี้เป็นวิธีกราฟฟิคที่สร้างขึ้นจากกราฟความสัมพันธ์ $e - \log \sigma'_v$ ของผลทดสอบการอัดตัวการคายน้ำดังแสดงในภาพที่ 10 ขั้นตอนการประมาณแรงกดทับสูงสุดกล่าวโดยสรุปได้ ดังนี้



ภาพที่ 10 การประมาณค่าแรงกดทับสูงสุดในอดีตโดยวิธีของ Casagrande

ที่มา: Casagrande (1936)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1. หาจุด D ซึ่งเป็นจุดที่เส้นความสัมพันธ์ $e - \log \sigma'_v$ มีรัศมีความโค้งน้อยที่สุด

2. ลากเส้นตรง $\overline{DE}$ ขนานกับแนวนอน

3. ลากเส้นตรง $\overline{FI}$ ให้สัมผัสกับจุด D

4. ลากส้นตรง $\overline{DG}$ ซึ่งเป็นเส้นแบ่งครึ่งมุม EDF

5. จากเส้นตรง BC ซึ่งเส้นความสัมพันธ์ $e - \log \sigma'_v$ เป็นเส้นตรงลากเส้นตรงต่อขึ้นมาตัดเส้นตรง $\overline{DE}$ ที่จุด H จุด H คือค่าแรงกดทับสูงสุดในอดีต

5.2 วิธีของ Janbu (1969)

ในปี ค.ศ.1969 Janbu ได้เสนอวิธีการหาค่าแรงกดทับสูงสุดในอดีตจากกราฟ Constrained Modulus ($M = 1 / m_v$, เมื่อ m_v คือสัมประสิทธิ์การอัดตัวของปริมาตร) และความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่ง ดังแสดงในภาพที่ 11 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

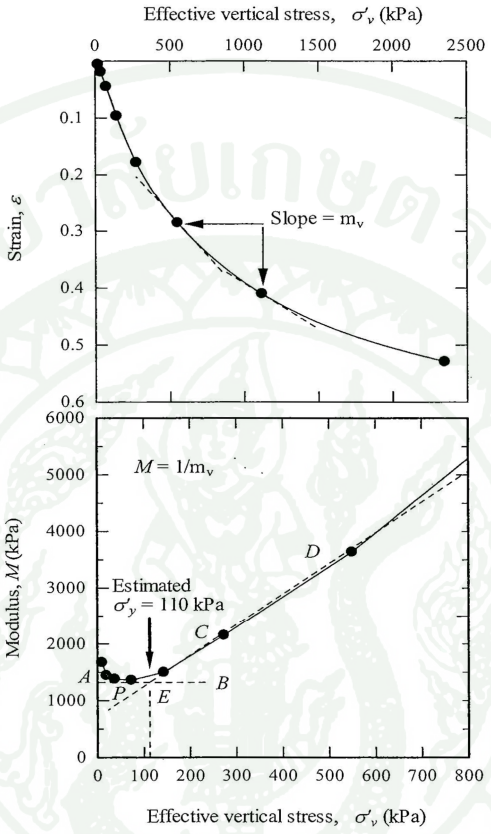
1. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด (ε) กับความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่ง (σ'_v) และหาค่า m_v

2. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Constrained Modulus (M) กับความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่ง (σ'_v)

3. ลากเส้นตรง $\overline{AB}$ ขนานกับแนวนอนและสัมผัสเส้นกราฟที่จุด P ซึ่งเป็นจุดต่ำสุดของกราฟในช่วงก่อนที่จะเกิดการเพิ่มขึ้นของความสัมพันธ์ระหว่าง M กับ σ'_v

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. จากส่วนของกราฟที่เป็นเส้นตรง $\overline{CD}$ ต่อเส้นตรงมาตัดกับเส้นตรง $\overline{AB}$ ที่จุด E จุด E นี้คือจุดที่ให้ค่าแรงกดทับสูงสุดในอดีต



ภาพที่ 11 แสดงการประมาณค่าแรงกดทับสูงสุดในอดีตโดยวิธีของ Janbu

ที่มา: Janbu (1969)

5.3 วิธีของ Pacheco Silva (1970)

Pacheco (1970) ได้เสนอวิธีกราฟฟิคสำหรับประมาณค่าแรงกดทับสูงสุดในอดีตจากความสัมพันธ์ $e - \log \sigma'_V$ ในปี ค.ศ.1970 ดังแสดงในภาพที่ 12 และสรุปเป็นขั้นตอนดังนี้

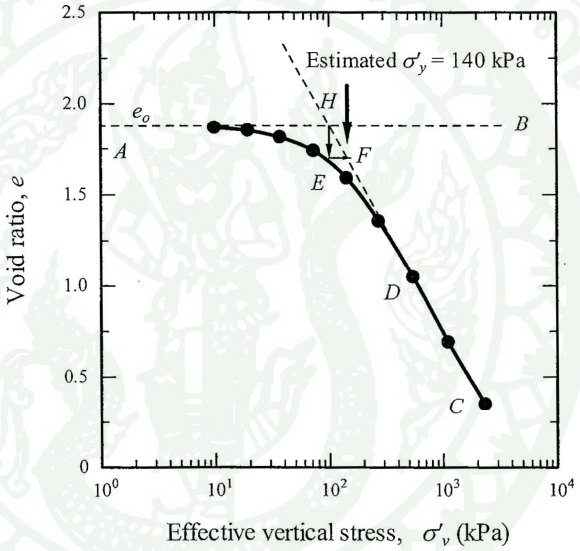
1. จากค่า e_0 ลากเส้นตรง $\overline{AB}$ ให้ขนานกับแนวนอน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. จากช่วง CD ซึ่งความสัมพันธ์ $e - \log \sigma'_v$ เป็นเส้นตรง ลากเส้นตรงต่อขึ้นมาตัดเส้นตรง $\overline{AB}$ ที่จุด H

3. ลากเส้นตรง $\overline{HE}$ ขนานกับแนวดิ่งให้ตัดความสัมพันธ์ $e - \log \sigma'_v$ ที่จุด E

4. ลากเส้นตรง $\overline{EF}$ ขนานกับแนวนอนตัดกับเส้นตรง $\overline{DF}$ และจุด F นี้คือจุดที่ให้ค่าแรงกดทับสูงสุดในอดีต



ภาพที่ 12 การประมาณค่าแรงกดทับสูงสุดในอดีตโดยวิธีของ Pacheco Silva

ที่มา: Pacheco (1970)

5.4 วิธีของ Beker et al. (1987)

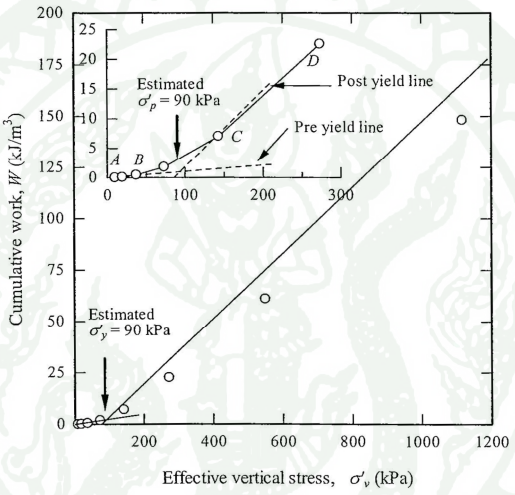
Beker et al. (1987) ได้เสนอวิธีประมาณค่าแรงกดทับสูงสุดในอดีตจากความสัมพันธ์ระหว่างงานสะสม (W) กับความเค้น σ'_y ดังแสดงในภาพที่ 13 และสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1. คำนวณงานที่เกิดจากความเค้นตามสมการ $\Delta W = \frac{1}{2}(\sigma_{i+1} + \sigma_i)(\varepsilon_{i+1} \quad \varepsilon_i)$ และคำนวณงานสะสมตามสมการ $W = \Sigma \Delta W$

2. สร้างความสัมพันธ์ระหว่าง W กับ σ'_v

3. ต่อเส้นตรง Pre-yield Line และ Post-yield Line จากส่วนที่กราฟเป็นเส้นตรง $\overline{AB}$ และ $\overline{CD}$ ตามลำดับ มาตัดกัน ซึ่งจุดตัดดังกล่าวนี้คือจุดที่ให้ค่าแรงกดทับสูงสุดในอดีต



ภาพที่ 13 แสดงการประมาณค่าแรงกดทับสูงสุดในอดีตโดยวิธีของ Beker et al.

ที่มา: Beker et al. (1987)

5.5 วิธีของ Burland (1990)

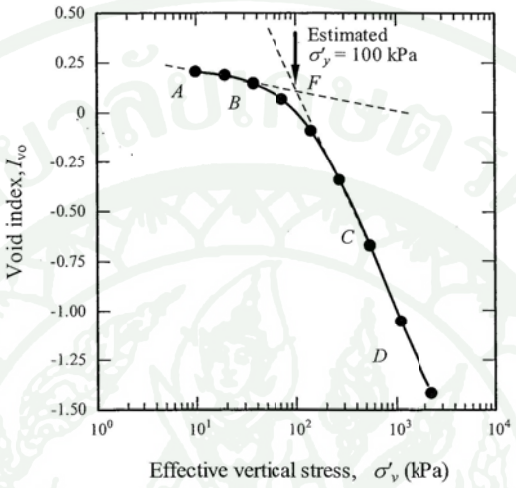
ในปี ค.ศ. 1990 Burland เสนอวิธีประมาณค่าแรงกดทับสูงสุดในอดีตดังแสดงในภาพที่ 14 และสรุปเป็นขั้นตอนดังนี้

1. จากกราฟความสัมพันธ์ $e - \log \sigma'_v$ คำนวณดัชนีโพรง (Void index) ตามสมการ $I_{V0} = (e - e_{100})/(e_{100} - e_{1000}) \approx (e - e_{100})/C_c$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. สร้างความสัมพันธ์ระหว่าง I_{V_0} กับ $\log \sigma'_v$

3. ลากเส้นตรงสัมผัสกับกราฟส่วนที่เส้นตรง $\overline{AB}$ และ $\overline{CD}$ ตามลำดับ มาตัดกันที่จุด F จุด F นี้คือจุดที่ให้ค่าแรงกดทับสูงสุดในอดีต



ภาพที่ 14 แสดงการประมาณค่าแรงกดทับสูงสุดในอดีตโดยวิธีของ Burland

ที่มา: Burland (1990)

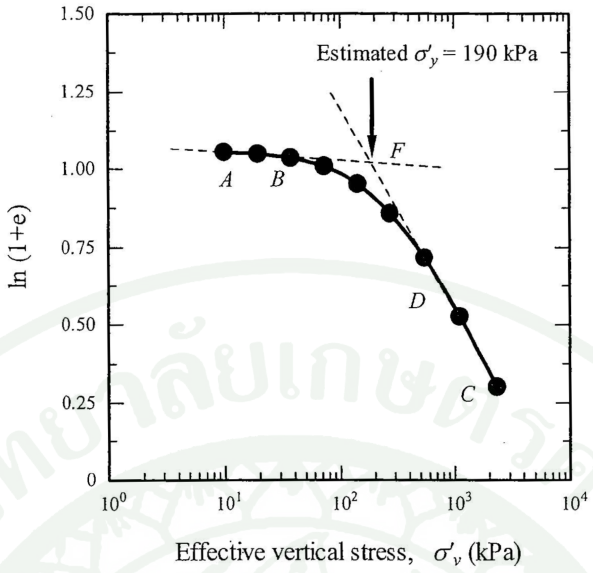
5.6 Onitsuka et al. (1995)

Onitsuka et al. (1995) เสนอวิธีประมาณค่าแรงกดทับสูงสุดในอดีตจากความสัมพันธ์ $\ln(1 + e) - \log \sigma'_v$ ดังแสดงในภาพที่ 15 และสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1. ลากเส้นตรงสัมผัสกับกราฟส่วนที่เป็นเส้นตรง $\overline{AB}$

2. ลากเส้นตรงสัมผัสกับกราฟส่วนที่เป็นเส้นตรง $\overline{CD}$ มาตัดกันที่จุด F ซึ่งจุด F นี้ที่ให้ค่าแรงกดทับสูงสุดในอดีต

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 15 แสดงการประมาณค่าแรงกดทับสูงสุดในอดีตด้วยวิธีของ Onitsuka et al.

ที่มา: Onitsuka et al. (1995)

6. อัตราการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำปฐมภูมิ

Terzaghi (1925) เป็นผู้แรกที่เสนอทฤษฎีในการคำนวณอัตราการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำการคำนวณตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า

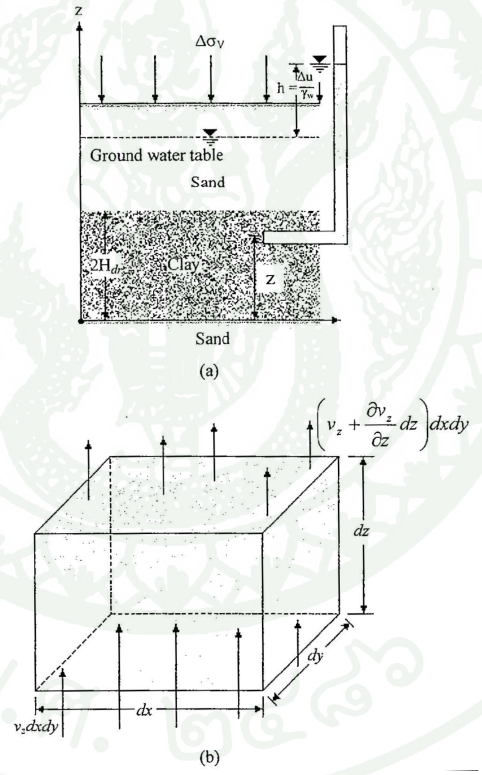
1) ดินมีคุณสมบัติสม่ำเสมอและเหมือนกันทุกทิศทาง (Homogenous and Isotropic)
2) ดินอยู่สภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ
3) ดินและน้ำมีคุณสมบัติอัดตัวไม่ได้
4) การระบายของน้ำอยู่ในทิศทางเดียวกัน ดังนั้น การอัดตัวคายน้ำเกิดขึ้นในทิศทางเดียว
5) การไหลของน้ำในดินเป็นไปตามกฎของดาร์ซี่
6) สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินมีค่าคงที่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพที่ 16(a) แสดงชั้นดินเหนียวที่มีความหนา $2H_{dr}$ ที่ถูกประกบด้วยชั้นทรายที่มีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสูง ถ้าชั้นดินเหนียวนี้ถูกกดทับด้วยความเค้นที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ $\Delta\sigma_v$ ความดันน้ำที่จุดใดๆ ในชั้นดินจะเพิ่มขึ้น และความดันน้ำส่วนเกินจะระบายในแนวดิ่งสู่ชั้นทราย

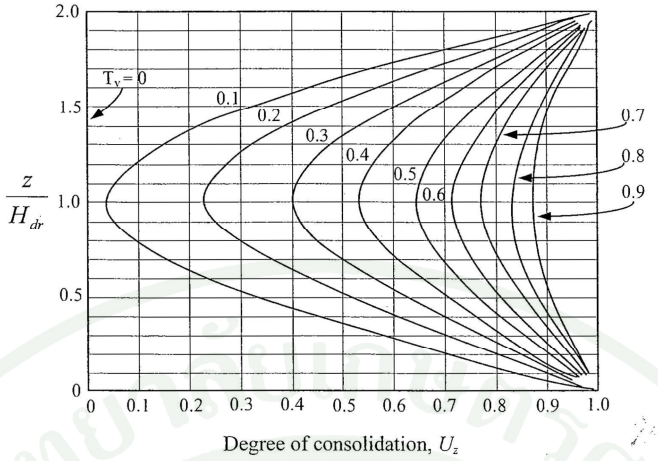
ภาพที่ 16(b) แสดงการไหลของน้ำผ่านมวลดินเล็กๆ ที่ระยะ z ใดๆ จะได้ว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่เวลาใดๆ เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกมีค่าเท่ากับอัตราการไหลออก อัตราการไหลเข้า

ภาพที่ 17 จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง U_z และ T_v ซึ่งสามารถหาค่าระดับการอัดตัวคายน้ำเฉลี่ย (Average Degree of Consolidation, U) ตลอดความลึกของชั้นดินเหนียวที่เวลาใดๆ ในกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าว



ภาพที่ 16 (a) ชั้นดินที่เกิดการอัดตัวคายน้ำ (b) การไหลของน้ำในก้อนดินเล็กๆ ระหว่างการอัดตัวคายน้ำ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่าง U_z และ T_v

$$U = 1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v} \qquad (7)$$

ในกรณีที่ Δu_z มีค่าเท่ากันตลอดความลึกของชั้นดิน ผลคำตอบของสมการที่ (7) แสดงได้ดังตารางที่ 2

ค่าในตารางที่ 5 สามารถประมาณได้โดยสมการที่เสนอโดย Terzaghi ดังต่อไปนี้

$$T_v = \frac{\pi}{4}\left(\frac{U\%}{100}\right)^2 \qquad \text{สำหรับ U = 0\% ถึง 60\%} \qquad (8)$$

$$T_v = 1.871 - 0.933 \log (100 - U\%) \qquad \text{สำหรับ U > 60\%} \qquad (9)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของระดับการอัดตัวคายน้ำเฉลี่ยกับแฟคเตอร์เวลา

ระดับการอัดตัวคายน้ำเฉลี่ย (%)	แฟคเตอร์เวลา	ระดับการอัดตัวคายน้ำเฉลี่ย (%)	แฟคเตอร์เวลา
0	0	55	0.238
5	0.002	60	0.236
10	0.007	65	0.342
15	0.018	70	0.403
20	0.031	75	0.477
25	0.049	80	0.567
30	0.071	85	0.684
35	0.096	90	0.848
40	0.126	95	1.129
45	0.160	100	α
50	0.196		

7. สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ

สำหรับความเค้นที่เพิ่มขึ้นค่าหนึ่ง $(\Delta\sigma_v)$บนดินตัวอย่าง วิธีนี้นิยมใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำในห้องปฏิบัติการได้แก่ วิธีล็อคกาลิทึมของเวลา (Logarithm of Time Method) เสนอโดย Casagrande and Fadum (1940) วิธีรากที่สองของเวลา (Square Root of Time Method) เสนอโดย Taylor (1942) และไฮเพอร์โบลิค (Hyperbolic Method) เสนอโดย Sridharan et al. (1987)

7.1 วิธีล็อคกาลิทึมของเวลา (Logarithm of Time Method)

สำหรับความเค้นที่เพิ่มขึ้นค่าหนึ่ง $(\Delta\sigma_v)$ สร้างความสัมพันธ์ระหว่างการเสียรูป (Deformation) กับเวลาในสเกลซิมิล็อคกาลิทึม ดังแสดงในภาพที่ 18 วิธีการหาค่า c_v ทำได้ดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1. ต่อเส้นตรงจากส่วนที่เป็นส่วนของการอัดตัวคายน้ำปฐมภูมิและทุติยภูมิมาพบกันที่จุด A ตำแหน่ง A คือ d_{100} ซึ่งเป็นค่าการทรุดตัวทั้งหมดเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำปฐมภูมิ

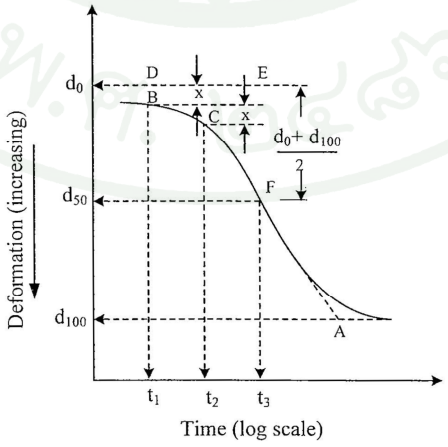
2. สมมุติให้ส่วนโค้งในช่วงแรกของกราฟมีความสัมพันธ์แบบพาราโบล่าบนสเกลปกติ เลือก t_1 และ t_2 บนกราฟ โดยที่ t_1 และ t_2 และความแตกต่างของการเสียรูประหว่างเวลาทั้งสอง $(t_2 = t_1)$ เท่ากับ x

3. ลากเส้นตรง DE ขนานแนวนอน โดยที่ระยะในแนวดิ่ง BD เท่ากับ x ค่าเสียรูปที่ได้จากเส้นตรง DE คือ d_0

4. พิกัด F บนเส้นโค้งคือการเสียรูปที่ร้อยละ 50 ของการอัดตัวคายน้ำเฉลี่ย และเวลาที่จุดนี้คือ t_{50}

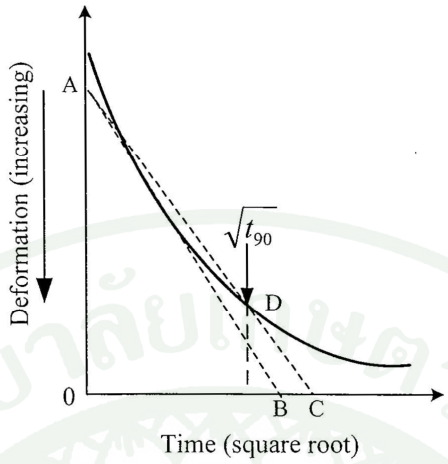
5. ที่ระดับการอัดตัวคายน้ำเฉลี่ยร้อยละ 50 แฟคเตอร์เวลา (T_{50}) มีค่าเท่ากับ 0.197 ดังนั้น

$$c_v = \frac{0.197 H_{dr}^2}{t_{50}} \qquad (10)$$



ภาพที่ 18 วิธีล็อคกาลิทึมของเวลา (Logarithm of Time Method)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 19 แสดงวิธีรากที่สองของเวลา (Square Root of Time Method)

7.2 วิธีรากที่สองของเวลา (Square Root of Time Method)

วิธีนี้จะทำการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการเสียรูปกับรากที่สองของเวลา ดังแสดงในภาพที่ 19 วิธีการคำนวณหา c_v ทำได้โดย

1. ลากเส้นตรง AB ผ่านส่วนที่เป็นเส้นตรงของกราฟ

2. ลากเส้นตรง AC ที่ทำให้ความยาว OC เท่ากับ 1.15 เท่า ของความยาว OB จุด D คือจุดตัดของเส้นตรง AC กับเส้นกราฟการอัดตัวคายน้ำ และเป็นจุดที่ระดับการอัดตัวคายน้ำเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 90

3. ที่ระดับการอัดตัวคายน้ำเฉลี่ยร้อยละ 90 แฟคเตอร์เวลา (T_{90}) เท่ากับ 0.848 ดังนั้น

$$c_v = \frac{0.848 H_{dr}^2}{t_{90}} \qquad (11)$$

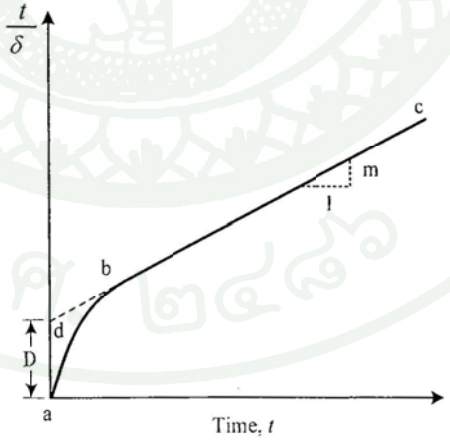
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7.3 วิธีไฮเพอร์บอลิค (Hyperbolic Method)

Sridharan and Rao (1981) and Sridharan and Prakash (1985) ได้เสนอวิธี Hyperbola การหาค่า c_v โดยวิธีการนี้ได้จากการพล็อตเวลาต่อการทรุดตัว ดังแสดงในภาพที่ 20 ค่า c_v สามารถหาได้ดังขั้นตอนต่อไปนี้

1. บันทึกเวลา (t) และการเสียรูปของดินตัวอย่าง (δ)
2. สร้างความสัมพันธ์ระหว่าง t/δ และ t ดังแสดงในภาพที่ 22
3. จากส่วนที่เป็นเส้นตรง bc ลากเส้นตรงต่อมายังจุด d และหาค่าจุดตัดบนแกน t/δ ซึ่งมีค่าเท่ากับ D
4. หาค่าความชัน m ของเส้นตรง bc
5. คำนวณหา c_v จากสมการ

$$c_v = 0.24\left(\frac{mH}{D}\right)^2 \qquad (12)$$



ภาพที่ 20 วิธีไฮเพอร์บอลิค (Hyperbolic Method)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

8. การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ

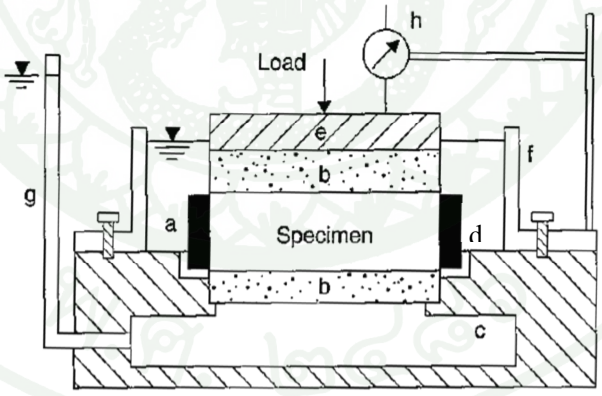
การทดสอบการอัดตัวคายน้ำในทิศทางเดียวเสนอโดย Terzaghi การทดสอบนี้กระทำในเครื่องมือที่เรียกว่าโออิโดมิเตอร์ (Oedometer) ดังแสดงในภาพที่ 21 ดินตัวอย่างถูกวางในวงแหวนและประกอบด้วยหินพรุน (Porous Stone) ที่ด้านบนและด้านล่าง ดินตัวอย่างที่ใช้ทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50 ถึง 60 มิลลิเมตร และความสูง 20 มิลลิเมตร ในการทดสอบนี้จะทำการเพิ่มน้ำหนักกดทับบนตัวอย่างดินและทำการบันทึกการทรุดตัวกับเวลาด้วยมาตรวัด (Dial Gauge) เป็นเวลา 24 ชั่วโมงต่อน้ำหนักค่าหนึ่ง เมื่อครบ 24 ชั่วโมงก็ทำการเพิ่มน้ำหนักต่อไปทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งน้ำหนักสุดท้ายซึ่งควรจะเป็นค่าที่ทำให้เกิดความเค้นประสิทธิผลในดินตัวอย่างมากกว่า 4 เท่าของความเค้นกดทับประสิทธิผล ในปัจจุบันของดินในสนามหลังสิ้นสุดการทดสอบทำการบันทึกหน่วยน้ำหนักแห้ง และปริมาณความชื้น

ภาพที่ 21 แสดงเครื่องมือการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

8.1 การทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring

การทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Fixed-Ring นั้นเป็นที่นิยมในการใช้ในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำในปัจจุบันเนื่องจากเป็นเครื่องมือที่สามารถทดสอบได้กับชนิดของดินโดยที่ดินไม่เกิดความเสียหายในระหว่างของการทดสอบ ซึ่งในระหว่างของการทดสอบนั้น Consolidation Ring ที่ทำหน้าที่ควบคุมดินตัวอย่างไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ทางด้านข้างจะไม่สามารถเลื่อนขึ้นลงได้จึงทำให้เกิดแรงเสียดทานในระหว่างการทดสอบค่อนข้างมาก และส่วนประกอบของเครื่องมือจะมีรายละเอียดดังนี้ (a) Brass Ring ทำหน้าที่รองรับ Consolidation Ring ไม่ให้เคลื่อนที่ (b) Porous Stone ทั้งด้านบนและด้านล่างทำหน้าที่ในการระบายออกของน้ำที่จะไหลออกจากมวลดิน (c) Base Plate รองรับน้ำที่ไหลออกจากมวลดิน (d) Consolidation Ring ทำหน้าที่ควบคุมดินตัวอย่างไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง (e) Loading Head ทำหน้าที่เป็นจุดรับน้ำหนักบรรทุก (f) Metal Ring ทำหน้าที่ขังน้ำเพื่อหล่อเลี้ยงไม่ให้ดินตัวอย่างแห้ง (g) Standpipe ทำหน้าที่วัดแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ (h) Dial Gauge ทำหน้าที่วัดการทรุดตัวที่เกิดขึ้น แสดงดังภาพที่ 22

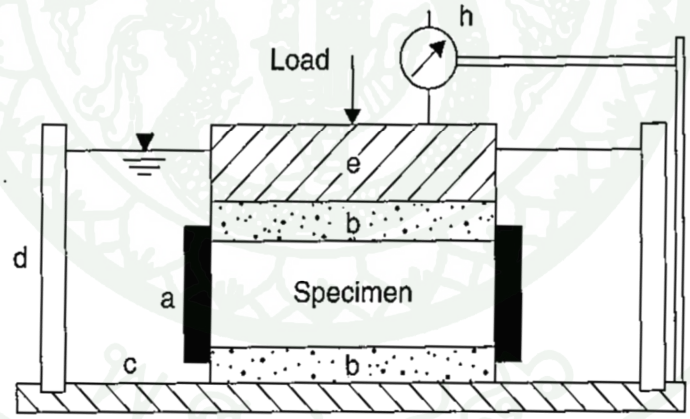


ภาพที่ 22 แสดงแบบจำลองการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Fixed-Ring

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

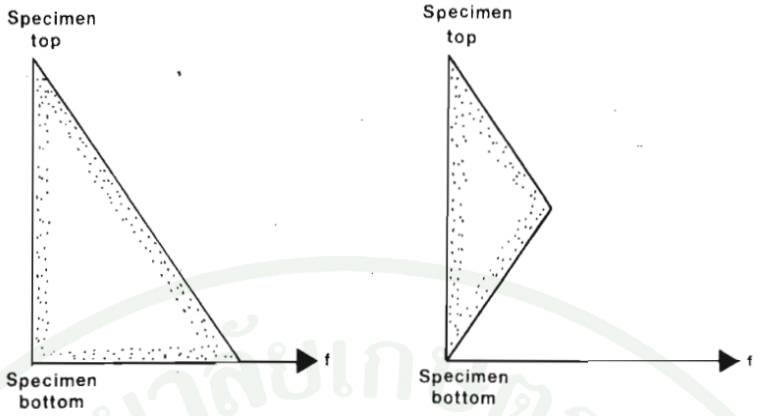
8.2 การทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating- Ring

การทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring นั้นในปัจจุบันไม่นิยมใช้ เนื่องจากเมื่อทดสอบกับดินเหนียวอ่อนนั้นจะทำให้ Consolidation Ring เลื่อนลงทำให้ดินที่ใช้ในการทดสอบเกิดความเสียหายเนื่องจากตัวอย่างดินบางส่วนจะหลุดออกนอก Consolidation Ring และไม่สามารถที่จะทำการทดสอบได้ แต่ในการทดสอบนั้นจะเกิดแรงเสียดทานค่อนข้างน้อยซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed -Ring แล้ว แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะน้อยกว่ากว่าการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed -Ring ประมาณ 10% (Kezdi, A. 1979) และส่วนประกอบของเครื่องมือจะประกอบด้วย (a) Consolidation Ring ทำหน้าที่ควบคุมดินตัวอย่างไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง (b) Porous Stone ทั้งด้านบนและด้านล่างทำหน้าที่ในการระบายออกของน้ำที่จะไหลออกจากมวลดิน (c) Base Plate ทำหน้าที่เป็นฐานรอง Porous Stone และรับแรงจากน้ำหนักบรรทุก (d) Plastic Ring ทำหน้าที่ขังน้ำเพื่อหล่อเลี้ยงไม่ให้ดินตัวอย่างแห้ง (e) Loading Head ทำหน้าที่เป็นจุดรับน้ำหนักบรรทุก (h) Dial Gauge ทำหน้าที่วัดการทรุดตัวที่เกิดขึ้น แสดงดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 แสดงแบบจำลองการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Floating -Ring

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 24 แสดงแรงเสียดที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ

ที่มา: (Kezdi, A. 1979)

ภาพที่ 24 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกับแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Fixed-Ring จะเกิดแรงเสียดทานในระหว่างการทดสอบมากกว่าการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Floating-Ring ค่อนข้างมาก โดยที่การทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Fixed-Ring จะเกิดแรงเสียดทานทางด้านบนน้อยแล้วเพิ่มมากขึ้นจนถึงมากที่สุดบริเวณด้านล่าง ในขณะที่การทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Floating-Ring นั้นเกิดแรงเสียดทานบริเวณทั้งด้านบนและด้านล่างน้อยและมากที่สุดที่ตรงกลางของตัวอย่าง ซึ่งทั้ง 2 การทดสอบนั้นมีความแตกต่างกันของแรงเสียดทานประมาณ 10 % ประกอบกับงานวิจัยของ ชัยรัตน์ (2544) ได้ทำการทดสอบเพื่อหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างต่าง ๆ ในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างดินที่ใช้ในงานศึกษาวิจัยนี้เป็นตัวอย่างดินเหนียวอ่อน ซึ่งมีต้นกำเนิดบริเวณกรุงเทพฯ โดยเก็บที่ระดับความลึก 1-3 เมตรจากผิวดิน แล้วนำมาอบแห้งและบดให้ละเอียดเป็นผงก่อนนำไปเตรียมตัวอย่างในกระบอกเตรียมตัวอย่างที่พัฒนาขึ้นมา แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพดังตารางที่ 3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 3 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ

คุณสมบัติ	ปริมาณ
สีเทาถึงเทาเข้ม (Grey to Dark grey)	-
ปริมาณความชื้น, w (%)	33-37%
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	2.64
ขีดเหลว (Liquid Limit)	64.2%
ขีดพลาสติก (Plastic Limit)	22.9%
ดัชนีพลาสติกซิตี้ (Plasticity Index)	41.3%
หน่วยน้ำหนักรวม (Total Unit Weight)	1.88t/m^3

ที่มา: ชัยรัตน์ (2544)

วัสดุโครงสร้างที่ใช้ทดสอบ ได้แก่คอนกรีตผิวหยาบ คอนกรีตผิวเรียบ เหล็กผิวหยาบ และเหล็กผิวเรียบ โดยวัสดุโครงสร้างจะมีการฉาบผิวด้วยสารหล่อลื่นต่าง ๆ ซึ่งสารหล่อลื่นที่นำมาใช้ทดสอบการลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส ได้แก่ สารละลายเบนโทไนต์ น้ำมันหล่อลื่น จาระบีซิลิโคนกรีส และสีอีป๊อกซี่

จากการทดสอบพบว่าค่าแรงเสียดทานสูงสุดที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างมีค่าน้อยกว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือนตรงของดินเหนียว โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงสุดที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตมีค่าอยู่ระหว่าง 0.33 ถึง 0.40 ส่วนค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงสุดที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กมีค่าอยู่ระหว่าง 0.28 ถึง 0.33 เมื่อมีการใช้สารหล่อลื่นเพื่อลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสพบว่า จาระบีและซิลิโคนกรีส สามารถลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสได้มากที่สุด คือ ลดแรงเสียดทานสูงสุดที่ผิวสัมผัสได้ถึง 80% ส่วนสารละลายเบนโทไนต์ลดแรงเสียดทานสูงสุดที่ผิวสัมผัสได้ประมาณ 25% เมื่อพิจารณาถึงการทรุดตัวในแนวดิ่งขณะทำการเฉือนพบว่าค่าการทรุดตัวในการทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวมีค่ามากกว่าค่าการทรุดตัวในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส และเมื่อมีการใช้สารหล่อลื่นที่ผิวสัมผัสจะช่วยให้ค่าการทรุดตัวขณะทำการเฉือนมีค่าน้อยลงซึ่งผลของการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-7

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานและมุมแรงเสียดทานของผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตหยาบ

การทดสอบ	ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานสูงสุด	ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานที่ระยะการเฉือน 6 มม.	ค่ามุมแรงเสียดทาน
คอนกรีตหยาบ	0.40	0.38	21
คอนกรีตหยาบทาสารละลายเบนโทไนต์	0.30	0.27	16
คอนกรีตหยาบทาสี	0.19	0.18	10
คอนกรีตหยาบทาจาระบี	0.07	0.06	4

ที่มา: ชัยรัตน์ (2544)

ตารางที่ 5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานและมุมแรงเสียดทานของผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบ

การทดสอบ	ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานสูงสุด	ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานที่ระยะการเฉือน 6 มม.	ค่ามุมแรงเสียดทาน
คอนกรีตเรียบ	0.33	0.32	18
คอนกรีตเรียบทาสารละลายเบนโทไนต์	0.24	0.23	13
คอนกรีตเรียบทาสี	0.16	0.14	9
คอนกรีตเรียบทาสีและสารละลายเบนโทไนต์	0.11	0.10	6
คอนกรีตเรียบทาจาระบี	0.06	0.05	3

ที่มา: ชัยรัตน์ (2544)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานและมุมแรงเสียดทานของผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบ

การทดสอบ	ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานสูงสุด	ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานที่ระยะการเฉือน 6 มม.	ค่ามุมแรงเสียดทาน
เหล็กหยาบ	0.32	0.24	17
เหล็กหยาบทาสารละลายเบนโทไนต์	0.25	0.22	14
เหล็กหยาบทาน้ำมันหล่อลื่น	0.15	0.12	8
เหล็กหยาบทาจาระบี	0.06	0.04	3

ที่มา: ชัยรัตน์ (2544)

ตารางที่ 7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานและมุมแรงเสียดทานของผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตหยาบ

การทดสอบ	ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานสูงสุด	ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานที่ระยะการเฉือน 6 มม.	ค่ามุมแรงเสียดทาน
เหล็กเรียบ	0.28	0.18	15
เหล็กเรียบทาสารละลายเบนโทไนต์	0.22	0.16	12
เหล็กหยาบทาน้ำมันหล่อลื่น	0.13	0.07	7
เหล็กเรียบทาจาระบี	0.06	0.03	3

ที่มา: ชัยรัตน์ (2544)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

8.3 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำด้วยเครื่องมือทดสอบสามแกน
(Triaxial Consolidation Test)

การทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Consolidation Test) นั้นจะมีขั้นตอนหนึ่งที่เป็นการอัดตัวคายน้ำของดิน ซึ่งในการทดสอบการอัดตัวคายน้ำในเครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกนนั้นจะไม่เกิดแรงเสียดทานระหว่างตัวอย่างดินและแรงดันน้ำที่ทำหน้าที่ในการควบคุมไม่ให้ตัวอย่างดินเกิดการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง ซึ่งจะแตกต่างกับการทดสอบการอัดตัวคายน้ำในเครื่องโออิโดมิเตอร์ ที่เกิดแรงเสียดทานระหว่างตัวอย่างดินกับ Consolidation Ring ซึ่งการทดสอบการอัดตัวคายน้ำในเครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกนจะทำให้ผลของการทดสอบนั้นเป็นไปตามทฤษฎีมากกว่าการทดสอบการอัดตัวคายน้ำในเครื่องโออิโดมิเตอร์ ซึ่งขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Stage)ในเครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกนเป็นขั้นตอนการจำลองสถานะความเค้นประสิทธิผลให้เหมือนกับในสนามโดยทำการเพิ่มแรงดันเซลล์ $(\Delta\sigma_c)$ ทีละขั้น (Step By Step) และในแต่ละขั้นต้องรอให้กระบวนการอัดตัวคายน้ำเสร็จสิ้นนั่นคือแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore Pressure, Δ_u) ลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ เพื่อให้ความเค้นประสิทธิผลเท่ากับแรงดันเซลล์ $\Delta\sigma_c = \Delta\sigma'$ กระบวนการอัดตัวคายน้ำแบบใช้แรงดันเท่ากันทุกทิศทางเรียกว่าการอัดตัวคายน้ำแบบเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic Consolidation) อาจมีเงื่อนไขการอัดตัวคายน้ำแบบอื่นได้ เช่น เงื่อนไขปราศจากความเครียดด้านข้างหรือเป็นที่รู้จักกันในชื่อ เงื่อนไข K_0 (K_0 = Consolidation) เป็นต้น

ขั้นตอนนี้ต้องระวังให้ตัวอย่างอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated) โดยอาจจะต้องทำการเปิดแรงดัน (Back Pressure, σ_b) เข้าช่วยในการไล่ฟองอากาศที่แทรกตัวระหว่างดินออกให้หมด เทคนิคการตรวจสอบการอิ่มตัวด้วยน้ำของดินได้แนะนำไว้โดย (Bishop and Henkel, 1962) ว่าให้ทำการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์แรงดันน้ำสเคมตัน B (B Check) ว่ามีค่าเข้าใกล้ 1 หรือประมาณ 0.98 นั่นคือ

$$B = \Delta u / \Delta\sigma_c \longrightarrow 1 \tag{13}$$

ดังนั้นแรงดันเซลล์สุทธิ (Net Cell Pressure) จึงมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างแรงดันเซลล์ภายนอกกับแรงดันหลัง (แรงดันภายใน) หรือ

$$\sigma_c^{net} = \sigma_c - \sigma_b \tag{14}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

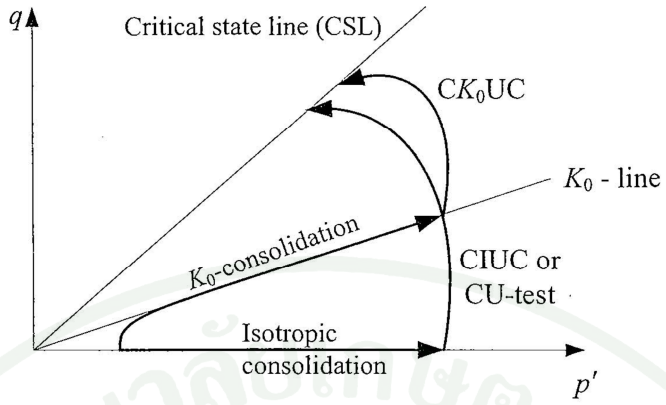
ในขั้นตอนแรกของการทดสอบทั้งแบบ CU-Test และ CD-Test จะเป็นขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำ (Consolidationstage)มักนิยมทดสอบแบบใช้แรงดันเท่ากันทุกทิศทางที่เรียกว่า การอัดตัวคายน้ำแบบเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic Consolidation) โดยทำการเพิ่มแรงดันเซลล์ $\left(\Delta\sigma_c\right)$ ทีละขั้น (Step by Step) และในแต่ละขั้นต้องรอให้กระบวนการอัดตัวคายน้ำเสร็จสิ้น โดยอาจจะพิจารณาจากค่าแรงดันน้ำส่วนเกินในมาตรวัดแรงดัน (Pressure Transducer) จะต้องลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ $\left(\Delta u \rightarrow 0\right)$ มีข้อแนะนำว่าเวลาในแต่ละขั้นการเพิ่มแรงดันเซลล์อยู่ประมาณ 8 – 24 ชั่วโมง ในระหว่างการเพิ่มแรงดันเซลล์ทีละขั้นนั้น เราสามารถอ่านค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่างดิน (Volume change, ΔV) จากบิวเรตต์ (Burette) ดังนั้น อัตราส่วนโพรงหลังการเพิ่มแรงดันเซลล์ในแต่ละขั้น $\left(e_1\right)$

$$e_i = e_{i-1} \frac{\Delta V_i}{V_0}\left(1 + e_0\right) \tag{15}$$

เมื่อดัชนีล่าง i หมายถึงขั้นการเพิ่มน้ำหนักขั้นที่ i และ V_0 คือปริมาตรของตัวอย่างดินเริ่มต้น

อย่างไรก็ตามเครื่องมือทดสอบสามแกนสามารถทำการทดสอบการอัดตัวคายน้ำเงื่อนไขแบบอื่นได้ เช่น เงื่อนไข K_0 (K_0- Consolidation) หรือเงื่อนไขการควบคุมทิศทางวิถีความเค้น (Stress-Path Control) เป็นต้น ดังแสดงด้วยตัวอย่างแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Compression Test) ด้วยเงื่อนไขการอัดตัวคายน้ำแบบต่างๆ เช่น แบบเงื่อนไขแรงดันเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic Consolidation Undrained Compression Test, CIUC หรือ CU-test) และแบบเงื่อนไข K_0 (K_0 - Consolidation Undrained Compression Test, CK_0UC) ดังแสดงในภาพที่ 25

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 25 แสดงวิถีความเค้นของการทดสอบแรงอัดสามแกนโดยการอัดตัวคายน้ำแบบต่างๆ

9. ดินประดิษฐ์

ดินประดิษฐ์นั้นเป็นดินเหนียวที่ผสมขึ้นเพื่อควบคุมคุณสมบัติของตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบให้เหมือนกันหรือใกล้เคียงกันในทุกๆตัวอย่างที่ทำการทดสอบ ซึ่งตัวอย่างของดินประดิษฐ์ที่ได้มานั้นจะเป็นตัวอย่างที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน และดินประดิษฐ์ยังทำให้การทดสอบนั้นมีความผิดพลาดที่น้อยลงเนื่องจากสามรถกำหนดและควบคุณสมบัติของตัวอย่างดินให้เหมือนกันได้ทุกตัวอย่าง

9.1 วิวัฒนาการของดินประดิษฐ์

ในช่วงแรกนั้นดินประดิษฐ์ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อควบคุมคุณสมบัติของตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบให้เหมือนกัน ซึ่งส่วนผสมในช่วงแรกนั้นจะมีวัสดุในการผสมที่หลากหลายแต่ยังไม่เป็นที่ยอมรับ เนื่องจากเมื่อนำไปทดสอบจริงแล้วไม่สามารถที่จะบ่งบอกถึงพฤติกรรมของดินได้ทั้งหมด และในท้ายที่สุดนั้น วัสดุที่นำมาใช้เป็นส่วนผสมของดินประดิษฐ์นั้น ได้แก่ ดินขาว เบนโทไนท์ และปูนซีเมนต์ ซึ่งในปัจจุบันมี 2 วิธีในการเตรียมตัวอย่างดินประดิษฐ์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

9.1.1 ดินประดิษฐ์จากการตกตะกอน (Artificially Sedimented Clay)

Bjerrumand Rosenqvist (1956) ได้เป็นผู้คิดค้นขั้นตอนของการทำดินประดิษฐ์แบบการตกตะกอน โดยนำตัวอย่างดินเดิมมาทำลายโครงสร้าง และปล่อยให้ตกตะกอนตามแรงโน้มถ่วงของโลก จากนั้นก็นำตัวอย่างดินที่ตกตะกอนแล้วนั้นมาทำการอัดตัวคายน้ำในสารละลายต่างๆ เช่น โซเดียมคลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์ น้ำจืด เป็นต้น ซึ่งการเตรียมตัวอย่างดินเหนียวประเภทการตกตะกอนนั้นมีข้อดีคือ ตัวอย่างดินประดิษฐ์นั้นจะมีคุณสมบัติเหมือนกับดินจริง แต่ต้องใช้เวลาในการเตรียมตัวอย่างที่ยุ่งยากและใช้เวลาค่อนข้างนาน

9.1.2 การผสมปูนซีเมนต์

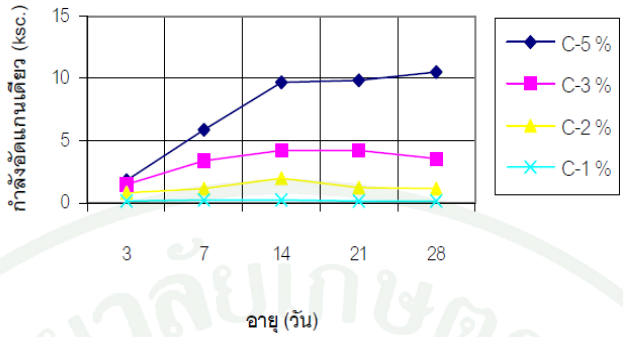
Tavenas et al. (1973) เป็นผู้ที่คิดค้นดินประดิษฐ์ที่มีความคล้ายคลึงกับดิน Champlain โดยการนำเอา ดินขาว 400 กรัม เบนโทไนท์ 50 กรัม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่สาม 150 กรัม และน้ำ 1000 กรัม ซึ่งดินที่ประดิษฐ์ขึ้นมานั้นได้นำมาใช้ในการทดลองการแทงทะลุของกรวย ซึ่งได้ผลการทดสอบเป็นที่น่าพึงพอใจ

9.2 องค์ประกอบของดินประดิษฐ์

สายชล และ คณะ (2543) ได้กล่าวไว้ว่าดินประดิษฐ์ที่ใช้ในแบบจำลองทางวิศวกรรมได้พัฒนาขึ้นโดยการหาอัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวและเบนโทไนท์ให้มีคุณสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ หลังจากนั้นทำการทดสอบผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อปรับคุณสมบัติทางวิศวกรรม ซึ่งจากการทดลองพบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมคือ ดินขาว 88% เบนโทไนท์ 11% ปูนซีเมนต์ประเภทที่สาม 1% และน้ำ 70% โดยน้ำหนัก ทำให้ดินประดิษฐ์มีคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรม ใกล้เคียงกับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ซึ่งมีผลการทดสอบดังภาพที่ 26, 27 และ 28

ดินประดิษฐ์นั้นจะมีอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวอย่างดินที่จะนำมาทำการทดสอบ ซึ่งจากภาพที่ 26 นั้นได้แสดงปริมาณเปอร์เซ็นต์ของปูนซีเมนที่ใส่ลงในส่วนผสมของดินประดิษฐ์ ซึ่งพบว่าปริมาณเปอร์เซ็นต์ของปูนซีเมนต์ที่ 1% นั้นมีกำลังใกล้เคียงกับดินเหนียวกรุงเทพมากที่สุด

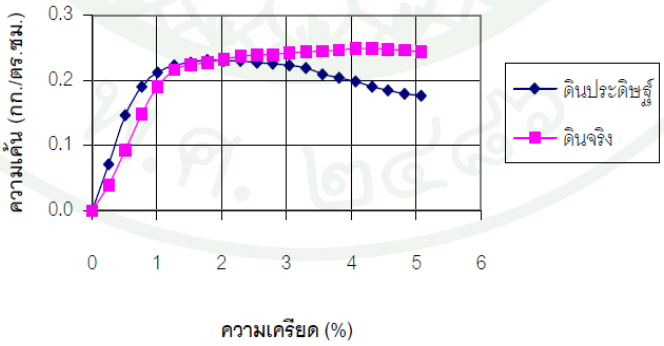
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและอายุของการบ่มที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ

ที่มา : สายชล และ คณะ (2543)

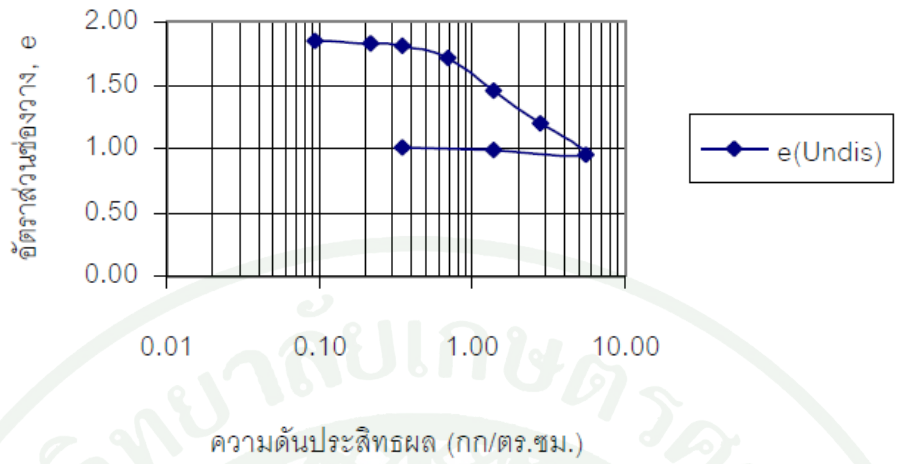
หลังจากได้อัตราส่วนผสมที่มีความใกล้เคียงกับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพแล้วนั้น จึงได้นำดินประดิษฐ์มาทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวและการอัดตัวคายน้ำเทียบกับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ซึ่งพบว่า ดินประดิษฐ์ให้กำลังอัดใกล้เคียงกับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพและมีพฤติกรรมใกล้เคียงกันแสดงดังภาพที่ 27 และในส่วนของการอัดตัวคายน้ำเมื่อเปรียบเทียบกับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพนั้นก็มีพฤติกรรมที่เหมือนกันและค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบก็ใกล้เคียงกันแสดงดังภาพที่ 28



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของดินประดิษฐ์และดินจริง

ที่มา : สายชล และ คณะ (2543)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 28 พฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของดินประดิษฐ์ที่อายุบ่ม 7 วัน

ที่มา : สายชล และ คณะ (2543)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

ในส่วนของอุปกรณ์และวิธีการนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ วิธีการในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำและขั้นตอนของการวิเคราะห์ผลการทดสอบ ซึ่งจะแสดงดังต่อไปนี้

อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ วัสดุหรือส่วนผสมของดินประดิษฐ์ ซึ่งจะประกอบด้วย ดินขาว, เบนโทไนท์, ทราย และปูนซีเมนต์ ในส่วนของเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ (Consolidation Test) นั้นจะประกอบด้วยชุดเครื่องมือการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring ชุดเครื่องมือการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring และชุดเครื่องมือการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Triaxial ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ดินประดิษฐ์

ดินประดิษฐ์นั้นเป็นดินที่ผสมขึ้นเพื่อควบคุมคุณสมบัติของตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบให้เหมือนกันหรือใกล้เคียงกันในทุกๆ ตัวอย่างที่ทำการทดสอบ และเพื่อให้การทดสอบนั้นมีความผิดพลาดที่น้อยลง ซึ่งดินที่เลือกใช้ในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ (Consolidation Test) ในการทดสอบนี้จะแบ่งดินออกเป็น 3 ชนิด คือ ดินเหนียว (Clay) ดินเหนียวปนทรายแป้ง (Silty Clay) และดินเหนียวปนทราย (Sandy Clay) ซึ่งส่วนผสมของดินทั้ง 3 ชนิด นั้นมาจากอัตราส่วนของดินที่จำแนกโดยวิธี United State Department of Agriculture และได้แสดงอัตราส่วนผสมไว้ในตารางที่ 8 และภาพที่ 29 ซึ่งในการผสมดินประดิษฐ์นั้นจะมีอุปกรณ์ในการผสมดังนี้

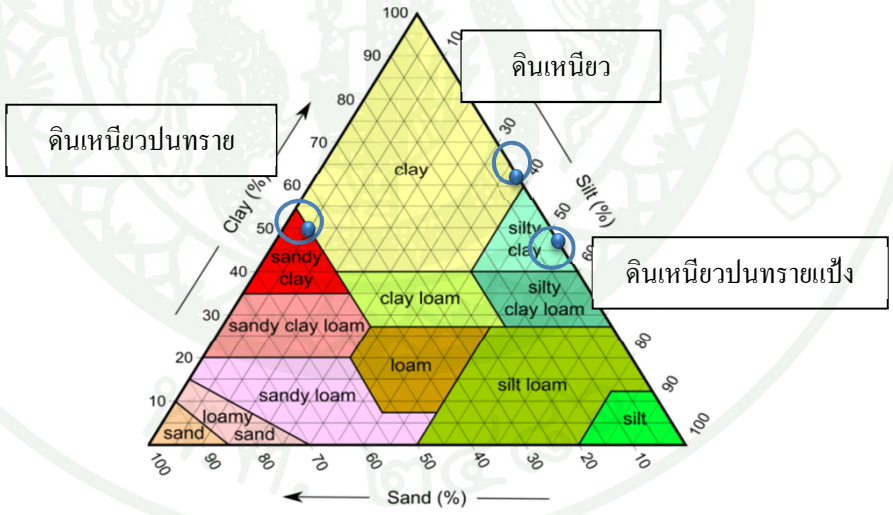
1.	เครื่องชั่งน้ำหนัก	1	เครื่อง
2.	เครื่องปั่นมอร์ต้า	1	เครื่อง
3.	บีกเกอร์ตวงน้ำ	1	อัน
4.	ไม้พาย	1	อัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5.	ซิลิโคนกรีส	1	หลอด
6.	พลาสติกแรปอาหาร	1	ม้วน
7.	แบบหล่อดินเหนียว	30	อัน
8.	กล่องโฟม	1	ใบ

ตารางที่ 8 แสดงอัตราส่วนผสมของตัวอย่างดิน

วัสดุ ชนิด	**ดินขาว**	**เบนโทไนท์**	**ปูนซีเมนต์**	**ทราย**	**น้ำ**
ดินเหนียว	39%	60%	1%	-	80%
ดินเหนียวปนทรายแป้ง	60%	39%	1%	-	80%
ดินเหนียวปนทราย	4%	50%	1%	45%	80%



ภาพที่ 29 แสดงอัตราส่วนผสมที่จำแนกโดย USDA and UK-ADAS Textural Triangle

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. เครื่องมือทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ (Consolidation Test)

เครื่องมือสำหรับการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ (Consolidation Test) ในงานวิจัยนี้นั้นแบ่งออกเป็น 3 การทดสอบ คือ การทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring, การทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring และการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำโดยอาศัยการทดสอบ Triaxial ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบนั้นมีดังต่อไปนี้

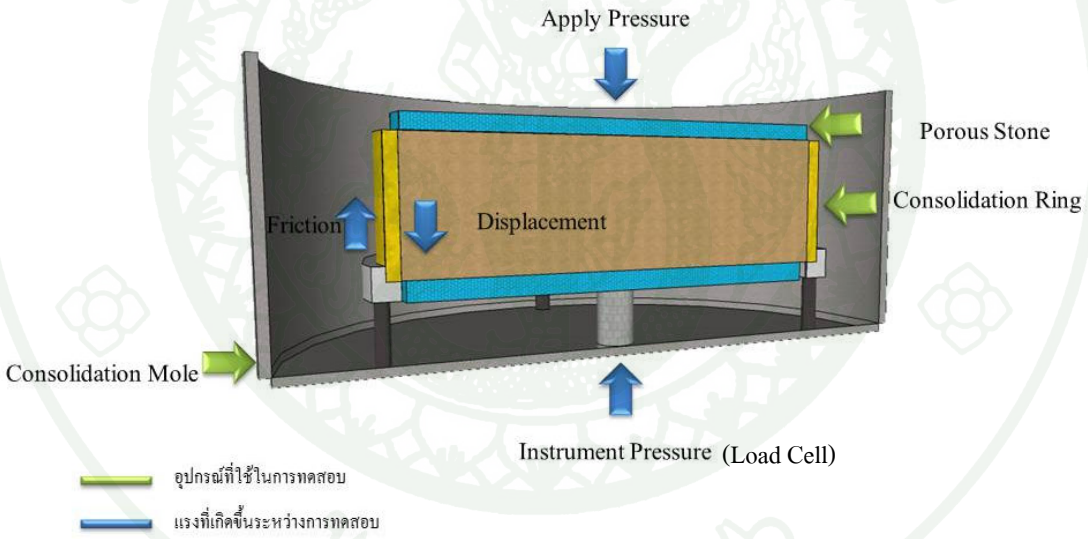
2.1 อุปกรณ์ที่ใช้การทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring

1. ชุดการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring	1	ชุด
2. Consolidation Ring	1	อัน
3. หินพรุน (Porous Stone)	2	อัน
4. Load Cell 500 kg	1	ตัว
5. Displacement Gauge	1	ตัว
6. เครื่องทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ	1	เครื่อง
7. ซิลิโคนกรีส	1	หลอด
8. Data Logger	1	เครื่อง

ในส่วนของการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring นั้น เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบเป็นเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถวัดค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบได้ ซึ่งในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed – Ring นั้น เมื่อตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบได้รับความเค้นจะเกิดการทรุดตัวของตัวอย่างดินจากด้านบนเพียงด้านเดียว เนื่องจากการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring นั้นมีวงแหวนในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำซึ่งจะวางอยู่บนหินพรุนที่มีขนาดที่ใหญ่กว่าวงแหวนดังกล่าว จึงทำให้ในระหว่างการทดสอบไม่เกิดการเคลื่อนที่ของวงแหวนการอัดตัวคายน้ำ และเกิดการทรุดตัวของตัวอย่างดินจากด้านบน โดยทางด้านล่างไม่เกิดการเคลื่อนที่ของตัวอย่างดิน ส่งผลทำให้เกิดแรงเสียดทานทางด้านบนน้อยและค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงด้านล่าง จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้เกิดแรงเสียดทานในระหว่างการทดสอบมาก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เครื่องมือที่ทำการพัฒนาในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring นั้น จะสามารถทำการวัดค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างวงแหวนที่ใช้ในการทดสอบกับตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบได้ การวัดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นนั้นจะวัดโดยการติดตั้ง Load Cell ขนาด 500 kg ไว้ใต้หินพรุนตัวล่างของตัวอย่าง และวงแหวนในการทดสอบจะรองรับด้วยขาตั้ง ซึ่งขาตั้งดังกล่าวจะถ่ายแรงลงโมลที่ใช้ในการทดสอบโดยไม่เกี่ยวข้องกับ Load Cell ทำให้แรงที่ Load Cell อ่านได้นั้นเป็นแรงที่กระทำกับตัวอย่างดินจริงๆ และเมื่อนำแรงที่กระทำกับตัวอย่างดินหักล้างกับแรงที่ Load Cell อ่านได้ จะกลายเป็นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระบบของการทดสอบ ซึ่งภาพที่ 30 ได้แสดงไดอะแกรมของแรงที่เกิดขึ้นในระบบทั้งหมด และในส่วนของการทรุดตัวที่เกิดขึ้นนั้น จะวัดค่าการทรุดตัวโดย Displacement Gauge อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทุกชิ้นนั้นจะต่อเข้ากับ Data Logger เพื่อเก็บข้อมูล และแสดงผลการทดสอบด้วยคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 30 แสดงแบบจำลองการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ ประเภท Fixed-Ring

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.2 อุปกรณ์ที่ใช้การทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring

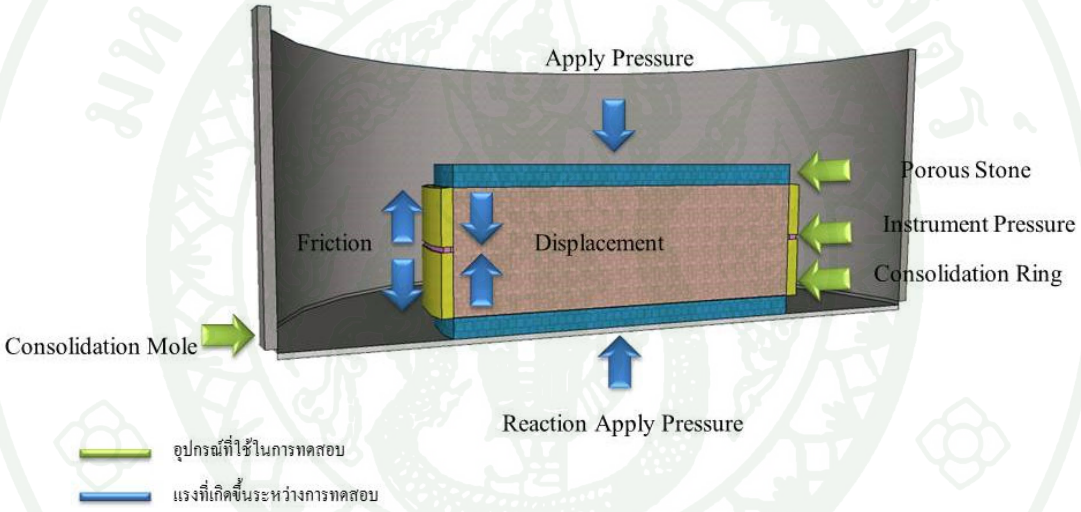
1. ชุดการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring	1	ชุด
2. Consolidation Ring	1	อัน
3. หินพรุน (Porous Stone)	2	อัน
4. Load cell 10 kg	3	ตัว
5. Displacement Gauge	1	ตัว
6. เครื่องทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ	1	เครื่อง
7. ซิลิโคนกรีส	1	หลอด
8. Data Logger	1	เครื่อง

ในส่วนการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring นั้นเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบเป็นเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถวัดค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบได้ ซึ่งเมื่อตัวอย่างดินได้รับความเค้นจะเกิดการทรุดตัวของตัวอย่างทั้งด้านบนและด้านล่าง เนื่องจากการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring ใช้หินพรุนทั้งด้านบนและด้านล่างที่มีขนาดเท่ากับวงแหวนการอัดตัวคายน้ำจึงทำให้เมื่อดินตัวอย่างรับความเค้นจะเกิดการทรุดตัวทั้งด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างดิน เนื่องจากหินพรุนทั้งด้านบนและด้านล่าง สามารถที่จะเคลื่อนที่เข้าไปในวงแหวนการอัดตัวคายน้ำได้ ส่งผลให้ทั้งด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างดินเกิดแรงเสียดทานน้อยและค่อยๆ มากขึ้น จนถึงกึ่งกลางของตัวอย่างที่ไม่เกิดการเคลื่อนที่ของดินและเกิดแรงเสียดทานที่มากที่สุด จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้เกิดแรงเสียดทานที่น้อยกว่าการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring

และในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring นั้นเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นจะแตกต่างกับการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring โดยที่วงแหวนที่ใช้ในการทดสอบนั้นสามารถที่จะเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ ซึ่งการวัดแรงเสียดทานดังกล่าวนั้นจะวัดจากแรงอัดที่เกิดขึ้นในวงแหวนที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งวงแหวนนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังแสดงในภาพที่ 31 ซึ่งการวัดค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring นั้น จะทำการติดตั้ง Load cell ขนาด 10 kg จำนวน 3 ตัวไว้ที่วงแหวนที่ใช้ในการทดสอบส่วนบนโดยที่การติดตั้งจะมีลักษณะที่สมมาตรกัน และวงแหวนที่ใช้ในการทดสอบส่วนล่างจะมีแท่งเหล็กที่ยึดไว้เพื่อถ่ายแรงจากด้านล่างเข้าสู่ Load cell และเมื่อเกิดความเค้นกระทำ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กับตัวอย่างดินจะทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างตัวอย่างดินและวงแหวนที่ใช้ในการทดสอบ และเมื่อเกิดการเคลื่อนที่ของดินแล้วนั้น แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นนั้นจะดึงเอาวงแหวนส่วนบนให้เคลื่อนที่ลงด้านล่าง และเช่นเดียวกันกับวงแหวนด้านล่างที่แรงเสียดทานจะดึงวงแหวนด้านล่างให้เคลื่อนที่ขึ้นด้านบน เมื่อเกิดการเคลื่อนที่ของวงแหวนทั้ง 2 ส่วนจึงทำให้สามารถวัดค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นได้ โดยที่วงแหวนส่วนล่างที่มีแท่งเหล็กยึดติดอยู่จะเคลื่อนที่ขึ้นมาดัน Load cell ที่ยึดติดกับวงแหวนส่วนบน และในส่วนของการทรุดตัวที่เกิดขึ้นนั้น จะวัดค่าการทรุดตัวโดย Displacement Gauge โดยที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทุกชิ้นนั้นจะต่อเข้ากับ Data Logger เพื่อเก็บข้อมูล และแสดงผลการทดสอบด้วยคอมพิวเตอร์เช่นเดียวกับเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring



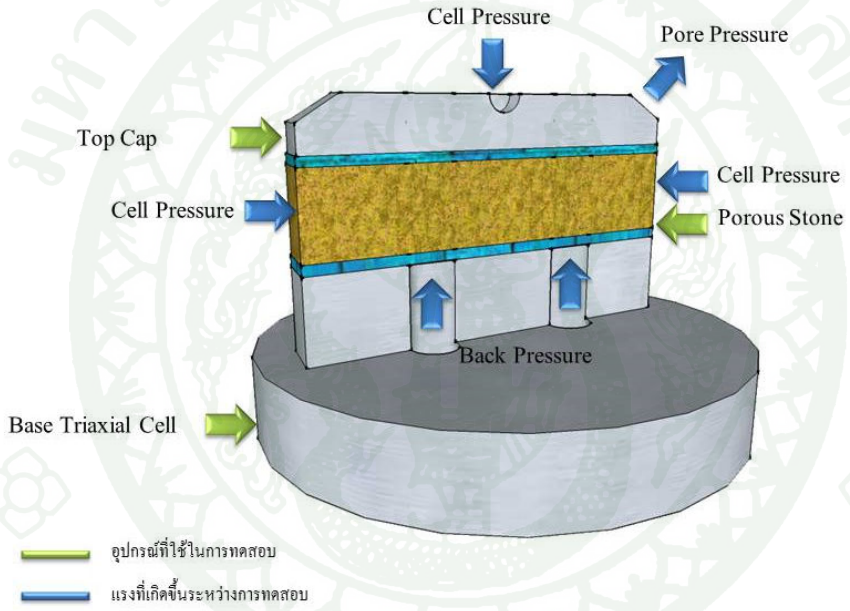
ภาพที่ 31 แสดงแบบจำลองการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ ประเภท Floating-Ring

2.3 อุปกรณ์ที่ใช้การทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Triaxial

1. ชุดการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภทTriaxial	1	ชุด
2. Cell Membrane	1	ชิ้น
3. หินพรุน (Porous Stone)	2	อัน
4. Volume Changes	1	ตัว
5. Pressure Gauge	3	ตัว
6. Data Logger	1	เครื่อง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Triaxial จะทำเช่นเดียวกับขั้นตอนของการอัดตัวคายน้ำแบบปกติที่ทำในการทดสอบ Triaxial ประเภท CU และ CD แต่ในการทดสอบครั้งนี้จะเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจำนวน 7 ค่าด้วยกัน ซึ่งในปกตินั้นขั้นตอนของการอัดตัวแบบคายน้ำในการทดสอบ Triaxial นั้น จะกระทำเพียงน้ำหนักบรรทุกเดียว และตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบนั้นจะมีขนาดเท่ากับการอัดตัวแบบคายน้ำ คือ มีเส้นผ่านศูนย์กลางยาว 6.35 เซนติเมตร ซึ่งในการทดสอบ Triaxial Test นั้น จะใช้ตัวอย่างในการทดสอบ 3.8 เซนติเมตร จึงทำให้ต้องพัฒนาเครื่องมือในการทดสอบให้สามารถทดสอบกับตัวอย่างดินที่มีขนาด 6.35 เซนติเมตร ได้ โดยการขยายขนาดของฐานรองรับตัวอย่างทั้งด้านบนและด้านล่างให้มีขนาดเท่ากับ 6.35 เซนติเมตร แสดงดังภาพที่ 32



ภาพที่ 32 แสดงแบบจำลองการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Triaxial

3. การสอบเทียบเครื่องมือทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ

การสอบเทียบชุดเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring และการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring นั้นทำเพื่อปรับเทียบ Load Cell ที่ใช้ในการวัดค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบเพื่อให้ค่าที่อ่านได้จาก Load Cell นั้นมีค่าที่ตรงกับแรงที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ ซึ่งชุดเครื่องมือทั้ง 2 นั้นจะมีลักษณะคล้ายกับการสอบเทียบที่เหมือนกัน แต่จะมีความแตกต่างกันที่ชุดการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Floating-Ring จะให้แรงกระทำที่น้อยกว่าการสอบเทียบชุดเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring เนื่องจากการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring นั้นวัดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบโดยตรงซึ่งต่างจากการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring ที่วัดแรงที่เหลือจากความเค้นที่กระทำกับตัวอย่างดินจริง ซึ่งจากทฤษฎีนั้นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะมีค่าประมาณ 10-20 เปอร์เซ็นต์ของแรงที่กระทำจริง จึงทำให้ชุดการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring ต้องใช้ Load Cell ที่สามารถรับแรงมากกว่า Load Cell ในชุดการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring และขั้นตอนของการสอบเทียบมีดังต่อไปนี้

1. ติดตั้งชุดอุปกรณ์บนเครื่องการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ

2. ต่อสายสัญญานจาก Load Cell เข้ากับ Data Logger เพื่อบันทึกข้อมูล

3. ให้แรงกระทำกับชุดเครื่องมือการทดสอบ โดยที่ชุดเครื่องมือการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring จะให้แรงกระทำเพิ่มขึ้นครั้งละ 5 kg. โดยจะเพิ่มแรงกระทำจนถึง 80 kg. และในชุดเครื่องมือการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring จะให้แรงกระทำเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.5 kg. โดยจะเพิ่มแรงกระทำจนถึง 8 kg. ซึ่งแรงที่ใช้ในการสอบเทียบดังกล่าวนั้นจะเป็นช่วงของความเค้นที่น้อยและมากที่สุดของการทดสอบในแต่ละประเภทของการทดสอบ

4. ดำเนินการตามขั้นตอนที่ 3 จำนวน 3 ครั้งและนำผลการสอบเทียบที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย

5. นำค่าแรงที่อ่านได้จาก Load Cell มาสร้างความสัมพันธ์กับแรงที่กระทำจริงเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการปรับแก้ค่าที่อ่านได้จาก Load Cell

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิธีการ

วิธีการที่ใช้ในการทดสอบนั้นจะแบ่งออกเป็น 4 การทดสอบหลักๆ คือ ขั้นตอนการจำลองดินประดิษฐ์ การทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring, การทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring และการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำโดยอาศัยการทดสอบ Triaxial ซึ่งในแต่ละประเภทของการทดสอบนั้นจะมีความแตกต่างกันและจะอธิบายดังต่อไปนี้

1. ขั้นตอนการจำลองดินประดิษฐ์

ในการจำลองดินประดิษฐ์เพื่อใช้ในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ (Consolidation Test) นั้น ดินที่จำลองขึ้นนั้นต้องการคุณสมบัติที่เหมือนกันหรือใกล้เคียงกันในทุกตัวอย่างซึ่งขั้นตอนของการจำลองนั้นมีวิธีการปฏิบัติดังต่อไปนี้

1. นำดินขาว เบนโทไนท์และทรายเข้าตู้อบเพื่อไล่ความชื้นที่อยู่ในเนื้อของดินเนื่องจากในดินแต่ละชนิดนั้นจะมีความชื้นอยู่ แสดงดังภาพที่ 33

ภาพที่ 33 แสดงการนำส่วนผสมของดินประดิษฐ์เข้าตู้อบ

2. ตวงดินขาว, เบนโทไนท์, ทราย,ปูนซีเมนต์ และน้ำตามอัตราส่วนผสมในตารางที่ 8 แสดงดังภาพที่ 34

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพที่ 34 แสดงการตวงดินตามอัตราส่วนผสม

3. นำส่วนผสมทั้งหมดใส่ในเครื่องปั่นมอร์ต้า เดินเครื่องปั่นรอบช้าปั่นส่วนผสมแห้งให้เข้ากันก่อนแสดงดังภาพที่ 35

ภาพที่ 35 แสดงการผสมดินประดิษฐ์

4. ค่อยๆ เติมน้ำลงในเครื่องปั่นและใช้ไม้พายแต่งดินที่ติดอยู่ข้างของโมลของเครื่องปั่นด้วยความเร็วรอบที่ต่ำ

5. เพิ่มความเร็วรอบในการปั่นให้เร็วขึ้นและปั่นให้ส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6. นำตัวอย่างดินที่เป็นเนื้อเดียวกันแล้วใส่ในแบบหล่อโดยควบคุมให้ดินมีความหนาแน่นที่เท่ากันแสดงดังภาพที่ 36

ภาพที่ 36 แสดงตัวอย่างดินประดิษฐ์

7. ใช้พลาสติกห่อตัวอย่างดินเพื่อบ่มตัวอย่างดินไม่ให้ความชื้นภายในตัวอย่างออกจากตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 37

ภาพที่ 37 แสดงการใช้พลาสติกห่อตัวอย่างดิน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

8. นำตัวอย่างดินทั้งหมดบ่มในกล่องโฟมที่มีน้ำอยู่ภายในเพื่อควบคุมความชื้นแสดงดังภาพที่ 38

ภาพที่ 38 แสดงการนำตัวอย่างดินเข้ากล่องโฟม

2. ขั้นตอนการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring

1. นำดินประดิษฐ์แช่น้ำและใส่น้ำหนักบรรทุก 21 กิโลกรัม (0.73 ksc) นาน 24 ชั่วโมง เนื่องจากในการทดสอบที่ได้ดำเนินการก่อนหน้างานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการอัดตัวคายน้ำของดินประดิษฐ์ซึ่งพบว่าแรงกดทับสูงสุดที่ดินประดิษฐ์เคยได้รับมีค่าน้อยกว่า 21 กิโลกรัม (0.73 ksc) ในงานงานวิจัยนี้จึงได้สร้างแรงกดทับในอดีตที่ 21 กิโลกรัม (0.73 ksc) เพื่อให้ทราบแรงกดทับสูงสุดในอดีตของดินประดิษฐ์ก่อนการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำแสดงดังภาพที่ 39

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

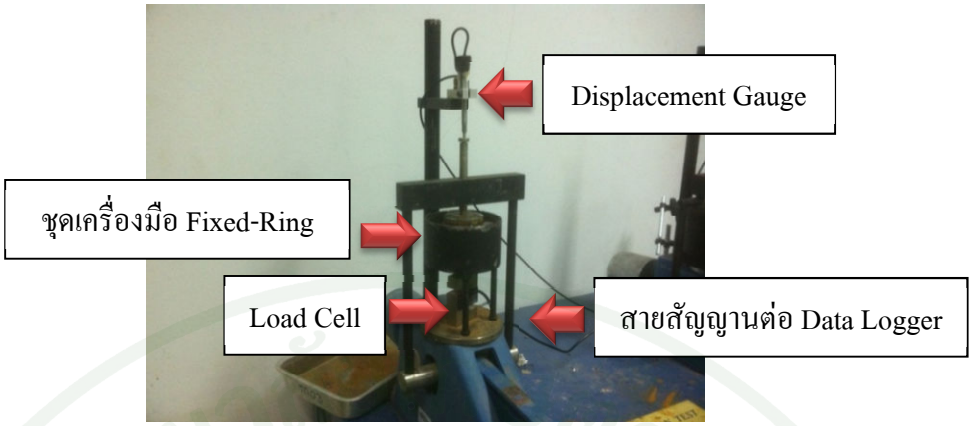
ภาพที่ 39 แสดงการสร้างแรงกดทับในอดีตให้กับตัวอย่างดิน

2. เมื่อใส่น้ำหนักบรรทุกครบ 24 ชั่วโมงแล้วจึงนำน้ำหนักบรรทุกออกจากตัวอย่างดิน เพื่อให้ตัวอย่างดินนั้นดูดน้ำเข้าไปในตัวอย่างจนดินนั้นอิ่มตัวไปด้วยน้ำซึ่งขั้นตอนนี้ใช้เวลา 24 ชั่วโมง และแสดงดังภาพที่ 40

ภาพที่ 40 แสดงการทำให้ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

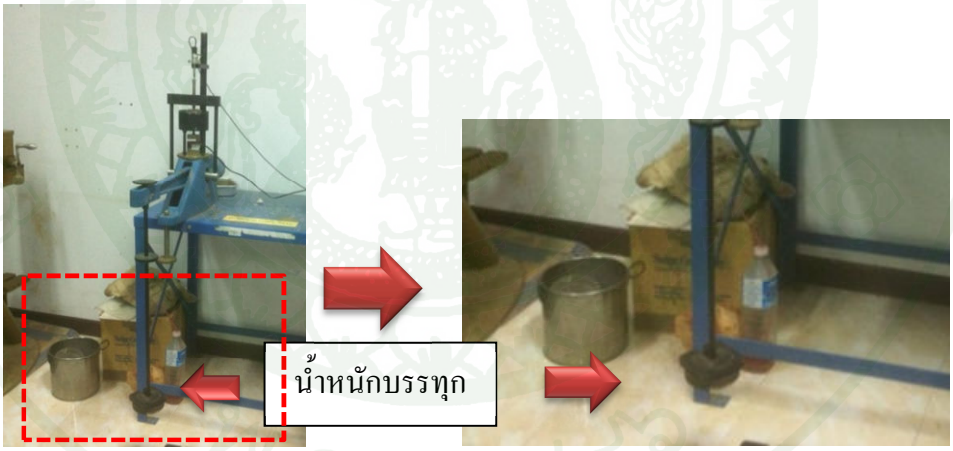
3. หลังจากตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบอิ่มตัวด้วยน้ำแล้วนั้นจึงนำตัวอย่างดินเข้าเครื่องทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ จากนั้นทำการติดตั้ง Load Cell เพื่อวัดค่าแรงที่เกิดขึ้นจริงในระบบ และติดตั้ง Displacement Gauge เพื่อวัดการยุบตัวของตัวอย่างดินซึ่ง Sensor ทั้งหมดต่อเข้ากับ Data Logger เพื่อเก็บข้อมูลที่วัดได้ แสดงดังภาพที่ 41

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 41 แสดงชุดทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring

4. เมื่อนำตัวอย่างดินที่จะใช้ในการทดสอบเข้าเครื่องการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำเรียบร้อยแล้วจึงเริ่มทำการทดสอบ โดยใส่น้ำหนักบรรทุกที่ 5, 10, 20, 40, 20, 40 และ 80 กิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งในแต่ละน้ำหนักบรรทุกนั้นจะใช้เวลา 24 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 42



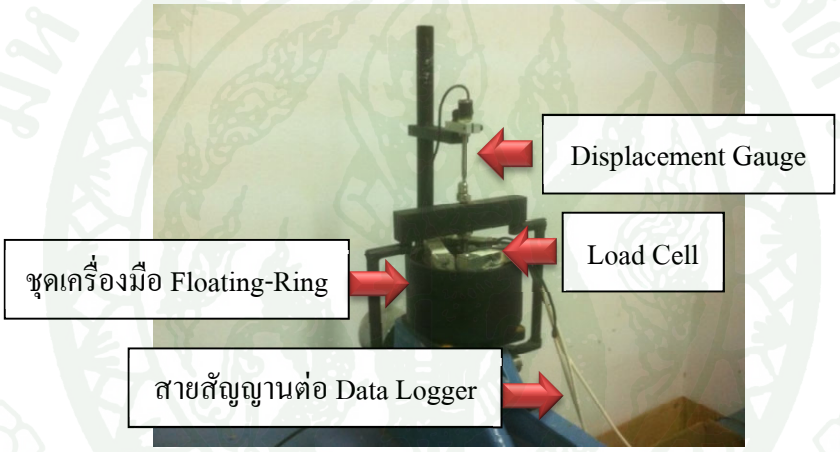
ภาพที่ 42 แสดงการใส่น้ำหนักบรรทุกการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. ขั้นตอนการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring

1. ขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 นั้นจะทำเช่นเดียวกับการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring

2. หลังจากตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบอิ่มตัวด้วยน้ำแล้วนั้นจึงนำตัวอย่างดินเข้าเครื่องทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ จากนั้นทำการติดตั้ง Load Cell จำนวน 3 ตัว ไว้ทางด้านบนของตัวอย่างดินเพื่อวัดค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระบบและติดตั้ง Displacement Gauge เพื่อวัดการยุบตัวของตัวอย่างดินซึ่ง Sensor ทั้งหมดต่อเข้ากับ Data Logger เพื่อเก็บข้อมูลที่วัดได้ แสดงดังภาพที่ 43



ภาพที่ 43 แสดงชุดทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ ประเภท Floating -Ring

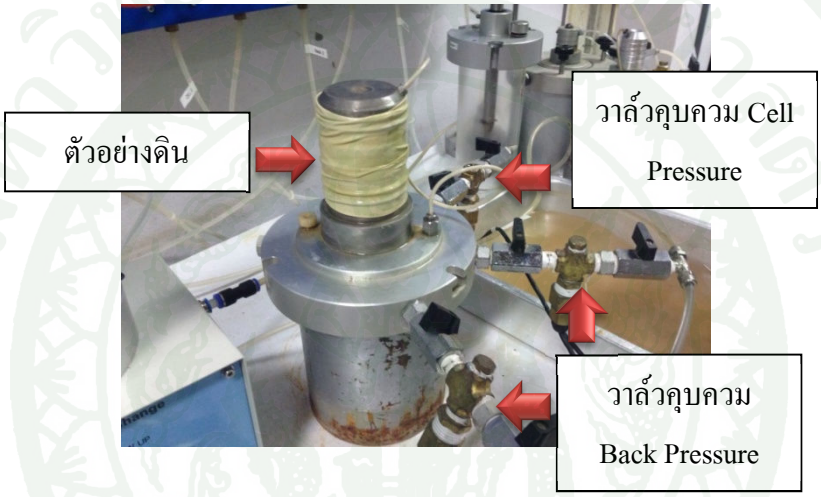
3. เมื่อนำตัวอย่างดินที่จะใช้ในการทดสอบเข้าเครื่องการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำเรียบร้อยแล้ว จึงใส่น้ำหนักบรรทุกตามขั้นตอนที่ 4 ในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. ขั้นตอนการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Triaxial

1. ขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 นั้นจะทำเช่นเดียวกับการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring

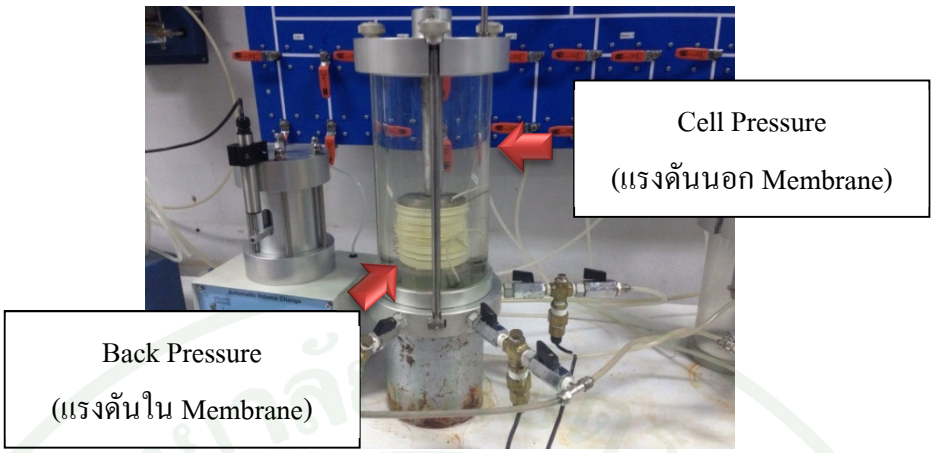
2. หลังจากตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบอิ่มตัวด้วยน้ำแล้วนั้นจึงนำตัวอย่างดินเข้าเครื่องทดสอบ Triaxial เปิดน้ำ ใส่ในโมลของการทดสอบแสดงดังภาพที่ 44



ภาพที่ 44 แสดงการนำตัวอย่างดินเข้าเครื่องทดสอบ Triaxial

3. เมื่อใส่น้ำจนเต็มโมลของการทดสอบแล้ว จึงใส่ Cell Pressure 50 Kpa และ Back Pressure 40 Kpa นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นเพิ่ม Cell Pressure 100 Kpa และ Back Pressure 90 Kpa นาน 24 ชั่วโมง และเพิ่ม Cell Pressure 200 Kpa และ Back Pressure 190 Kpa นาน 24 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบอิ่มตัวด้วยน้ำ แสดงดังภาพที่ 45

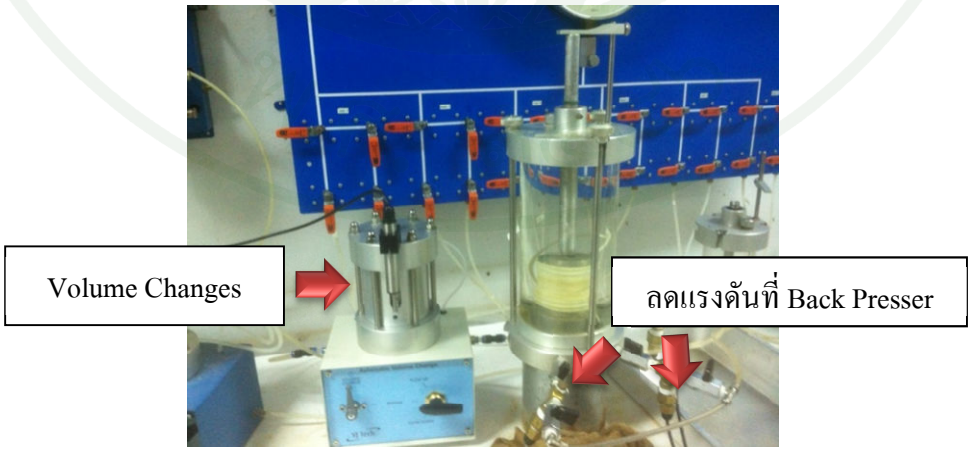
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 45 แสดงการให้แรงดัน Cell Pressure และ Back Pressure

4. เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนของการทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำแล้วนั้นจึงเพิ่ม Cell Pressure เป็น 240 Kpa และตรวจสอบ Parameter B

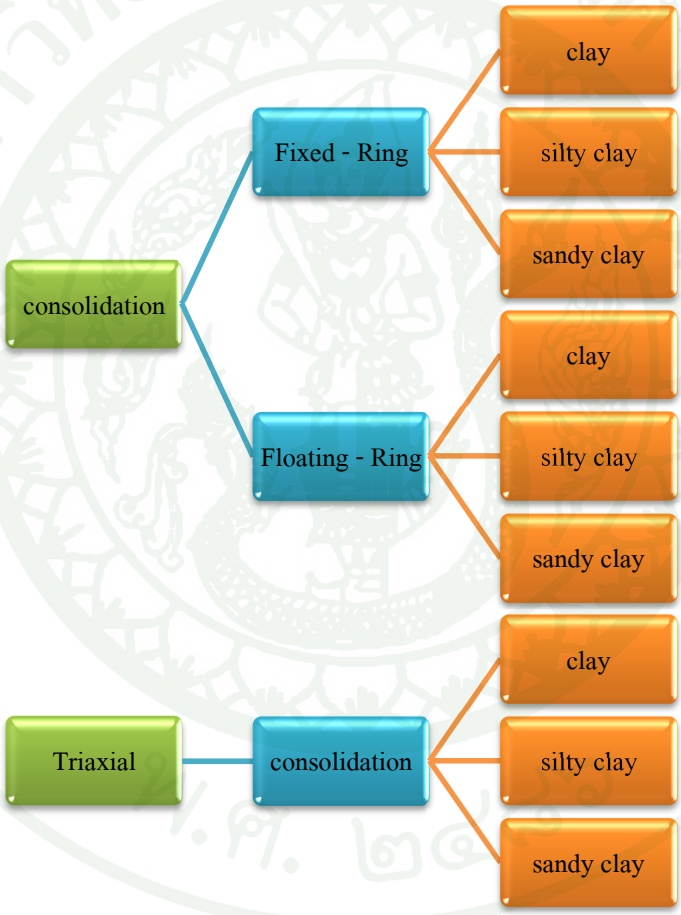
5. เมื่อตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบอิ่มตัวด้วยน้ำแล้วจึงทำการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำโดยใส่ Back Pressure เป็น 225 Kpa, 210 Kpa, 180 Kpa, 120 Kpa, 180 Kpa, 120 Kpa, และ 0 Kpa ตามลำดับ ซึ่งในแต่ละน้ำหนักบรรทุกนั้นใช้เวลา 24 ชั่วโมง และวัดค่าการทรุดตัวจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่างดิน ซึ่งวัดจากปริมาณน้ำที่ไหลออกจากมวลดินผ่าน Volume Changes แสดงดังภาพที่ 46



ภาพที่ 46 แสดงการอัดตัวแบบคายน้ำใน Triaxial

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สำหรับการทดสอบการอัดตัวคายน้ำในงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 3 วิธีการทดสอบ คือ การทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring, การทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring, การทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำโดยอาศัยการทดสอบ Triaxial ซึ่งในแต่ละวิธีนั้นจะทำการทดสอบกับตัวอย่างดิน 3 ชนิด คือ ดินเหนียว (Clay) ดินเหนียวปนทรายแป้ง (Silty Clay) และดินเหนียวปนทราย (Sandy Clay) และในแต่ละชนิดของตัวอย่างดินนั้นจะทดสอบ 3 ตัวอย่างและนำทั้ง 3 ตัวอย่างมาเฉลี่ยให้เหลือเพียงชนิดดินละ 1 ละตัวอย่าง ซึ่งในภาพที่ 47 ได้แสดงแผนผังของการทดสอบทั้งหมด



ภาพที่ 47 แสดงแผนผังในการทดสอบ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

ผลของการวิจัยนั้นจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่ 1 นั้นจะเป็นอัตราส่วนของกำลังจากการทดสอบแรงอัดแกนเดียวต่อหน่วยน้ำหนักของดินประดิษฐ์กับระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างดิน ส่วนที่ 2 จะเป็นผลการปรับเทียบเครื่องมือในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ ส่วนที่ 3 จะเป็นของเรื่องแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระบบของการทดสอบ ซึ่งแรงเสียดทานดังกล่าวจะมีส่วนลดหน่วยแรงประสิทธิผลที่กระทำกับตัวอย่างของดินที่ใช้ในการทดสอบ และในส่วนที่ 4 นั้น จะเป็นผลของการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำทั้ง 3 ประเภท คือการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring การทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring และการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Triaxial ซึ่งมีผลของการวิจัยดังต่อไปนี้

1. อัตราส่วนกำลังต่อหน่วยน้ำหนักของดินประดิษฐ์กับระยะเวลาในการบ่มตัวอย่าง

ตารางที่ 9 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของดินประดิษฐ์

	ตัวอย่างดินประดิษฐ์		
	ดินเหนียว	ดินเหนียวปนทรายแป้ง	ดินเหนียวปนทราย
ความถ่วงจำเพาะ ,Gs	2.65	2.70	2.8
ปริมาณความชื้น ,w	89.05	87.31	90.55
อัตราส่วนโพรง , e	2.38	2.49	2.74
การอิ่มตัวด้วยน้ำ , S (%)	84.36	79.24	82.53
หน่วยน้ำหนักรวม, γ_T (T/m^3)	1.48	1.44	1.41

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ จะใช้ตัวอย่างในการทดสอบเป็นดินประดิษฐ์ซึ่งตารางที่ 9 ได้แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของดินประดิษฐ์ทั้ง 3 ชนิดไว้ และดินประดิษฐ์ที่พัฒนาขึ้นมานั้นจะมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ ซึ่งปูนซีเมนต์จะทำหน้าที่ในการเชื่อมประสานและเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวของดินประดิษฐ์ ทำให้ต้องทำการบ่มตัวอย่างดินประดิษฐ์ก่อนที่จะนำตัวอย่างดินประดิษฐ์ไปใช้ในการทดสอบเนื่องจากต้องรอปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์เสร็จสิ้น ซึ่งจากอัตราส่วนของกำลังจากการทดสอบแรงอัดแกนเดียวต่อหน่วยน้ำหนักของดินประดิษฐ์ทั้ง 3 ชนิดที่ได้ทำการทดสอบแสดงดังตารางที่ 10 นั้นยังไม่ทราบว่าปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์เสร็จสิ้นเมื่อใด หากดินตัวอย่างมีกำลังจากการทดสอบแรงอัดแกนเดียวต่อหน่วยน้ำหนักไม่คงที่หรือไม่เหมือนกันในทุกๆตัวอย่างแล้วนั้นจะส่งผลทำให้เมื่อทำการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำจะเกิดแรงเสียดทานที่ไม่เท่ากัน กล่าวคือหากดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีกำลังมากจะส่งผลทำให้เกิดแรงเสียดทานในระหว่างการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำมากตามไปด้วย เพราะฉะนั้นจึงต้องดำเนินการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการนำดินตัวอย่างไปใช้

จากการทดสอบพบว่าในช่วงอายุการบ่มตัวอย่างดินประดิษฐ์ที่ 7-14 วัน ดินประดิษฐ์มีการพัฒนากำลังจากการทดสอบแรงอัดแกนเดียวต่อหน่วยน้ำหนักค่อนข้างมาก เกิดจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ที่กระทำกับน้ำ ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวนั้นทำหน้าที่ในการประสานอนุภาคของมวลดินให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันส่งผลทำให้ดินมีกำลังที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และหลังจากการบ่มตัวอย่างที่ 14 วันนั้น อัตราส่วนของกำลังจากการทดสอบแรงอัดแกนเดียวต่อหน่วยน้ำหนักของดินประดิษฐ์มีอัตราการเพิ่มขึ้นที่น้อยมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเวลาที่เหมาะสำหรับการนำดินประดิษฐ์ไปใช้งานคือหลังจากการบ่มที่ 14 วัน และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของกำลังจากการทดสอบแรงอัดแกนเดียวต่อหน่วยน้ำหนักของดินประดิษฐ์ พบว่าดินเหนียวปนทรายมีค่ากำลังจากการทดสอบแรงอัดแกนเดียวต่อหน่วยน้ำหนักมากที่สุด รองลงมาคือดินเหนียวและดินเหนียวปนทรายแป้งมีค่ากำลังจากการทดสอบแรงอัดแกนเดียวต่อหน่วยน้ำหนักน้อยที่สุด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 10 แสดงค่ากำลังจากการทดสอบแรงอัดแกนเดียวต่อหน่วยน้ำหนักที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆกัน

ตัวอย่าง	กำลังจากการทดสอบแรงอัดแกนเดียวต่อหน่วยน้ำหนัก $\left(\frac{kg/cm^2}{kg/cm^3}\right)$		
	7 วัน	**14 วัน**	**28 วัน**
ดินเหนียว	0.141	0.165	0.167
ดินเหนียวปนทรายแป้ง	0.118	0.133	0.137
ดินเหนียวปนทราย	0.145	0.168	0.169

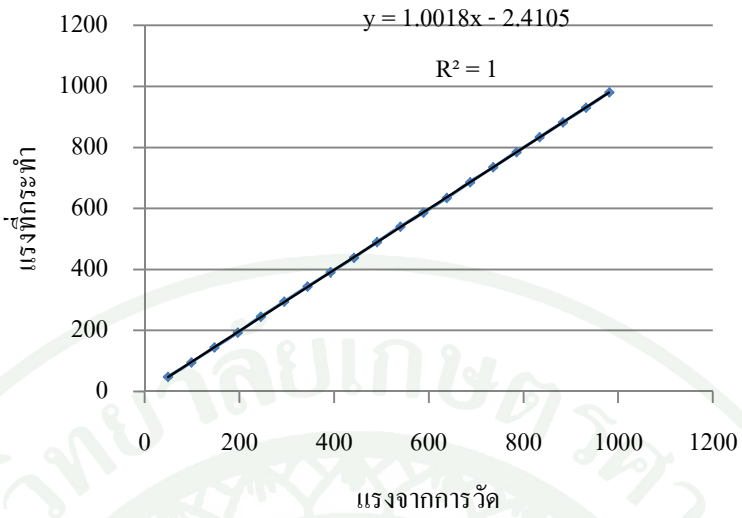
2. การสอบเทียบเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ

จากการสอบเทียบ Load Cell ที่ใช้ในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring แสดงดังภาพที่ 48 ซึ่งวิธีการสอบเทียบชุดทดสอบนั้นทำโดยการให้แรงกระทำจริงกับชุดเครื่องมือและวัดค่าแรงจาก Load Cell ซึ่งผลของการสอบเทียบพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำจริงกับแรงที่วัดค่าได้จาก Load Cell นั้นมีค่า $R^2 = 1$ และลักษณะความสัมพันธ์ของกราฟเป็นแบบแปรผันกันโดยมีลักษณะของกราฟเป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งจากกราฟเชิงเส้นดังกล่าวสามารถแสดงเป็นสมการสำหรับการปรับแก้ค่าที่ได้จากการวัดจาก Load Cell แสดงดังสมการที่ 43 เพื่อให้แรงที่วัดได้จาก Load Cell นั้นมีค่าเท่ากับแรงที่กระทำกับชุดเครื่องมือการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring จริง

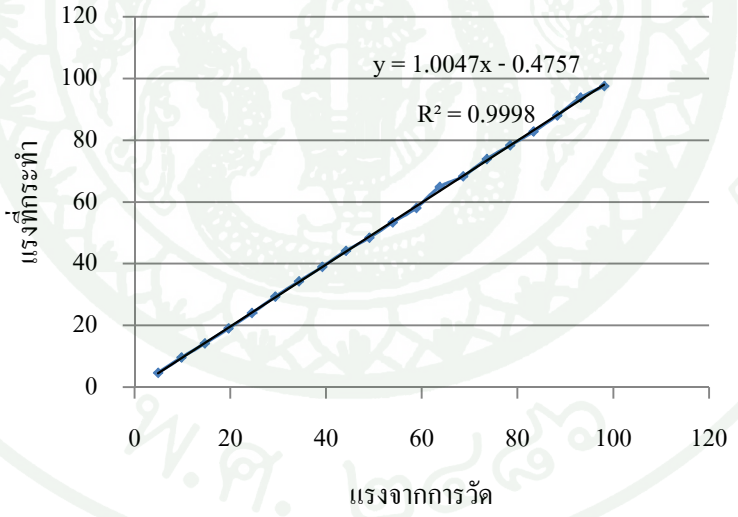
$$y = 1.0018x - 2.4105 \quad (43)$$

เมื่อ y คือ แรงที่กระทำ และ x คือ แรงที่วัดได้จาก Load Cell

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 48 แสดงการสอบเทียบ Load Cell ของชุดทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring



ภาพที่ 49 แสดงการสอบเทียบ Load Cell ของชุดทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากการสอบเทียบชุดเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring แสดงดังภาพที่ 49 ซึ่งวิธีการสอบเทียบจะดำเนินการเช่นเดียวกันโดยการให้แรงกระทำจริงกับชุดเครื่องมือและวัดค่าแรงจาก Load Cell แต่จะให้แรงกระทำที่น้อยกว่าการสอบเทียบชุดเครื่องมือ Fixed-Ring เนื่องจากการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring นั้นวัดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบโดยตรงซึ่งต่างจากการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring ที่วัดแรงที่เหลือจากความเค้นที่กระทำกับตัวอย่างดินจริง ซึ่งผลของการสอบเทียบพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำจริงกับแรงที่วัดค่าได้จาก Load Cell นั้นมีค่า $R^2 = 0.9998$ และลักษณะความสัมพันธ์ของกราฟเป็นแบบแปรผันกันโดยมีลักษณะของกราฟเป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งจากกราฟเชิงเส้นดังกล่าวสามารถแสดงเป็นสมการสำหรับการปรับแก้ค่าที่ได้จากการวัดจาก Load Cell แสดงดังสมการที่ 44 เพื่อให้แรงที่วัดได้จาก Load Cell นั้นมีค่าเท่ากับแรงที่กระทำกับชุดเครื่องมือการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring จริง

$$y = 1.0047x - 0.4757 \quad (44)$$

เมื่อ y คือ แรงที่กระทำ และ x คือ แรงที่วัดได้จาก Load Cell

3. แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ

จากตารางที่ 11 และตารางที่ 12 นั้นแสดงค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ ซึ่งในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring และ Floating-Ring นั้น ในระหว่างของการทดสอบจะเกิดแรงเสียดทานขึ้น ซึ่งแรงเสียดทานดังกล่าวนั้นเกิดขึ้นจากตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบและวงแหวนในการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Ring) และทั้ง 2 ประเภทของการทดสอบนั้นจะเกิดแรงเสียดทานขึ้นไม่เท่ากัน เนื่องจากทั้ง 2 ประเภทของการทดสอบนั้นมีลักษณะการทรุดตัวของดินตัวอย่างในระหว่างการทดสอบที่ต่างกัน แต่ค่าปริมาณการทรุดตัวที่เกิดขึ้นทั้งหมดนั้น การทดสอบทั้ง 2 ประเภทมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อเกิดการเคลื่อนที่ของตัวอย่างดินเนื่องจากการทรุดตัวแล้วจะส่งผลทำให้เกิดแรงเสียดทานที่น้อยลง ซึ่งการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring เกิดการเคลื่อนที่ของตัวอย่างดินทางด้านบนมากและทางด้านล่างไม่เกิดการเคลื่อนที่ของตัวอย่างดิน ส่งผลทำให้เกิดแรงเสียดทานทางด้านบนน้อยและเพิ่มขึ้นจนถึงด้านล่างของตัวอย่างที่เกิดแรงเสียดทานมากที่สุด แสดงในบทที่ 2 ภาพที่ 24 จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้เกิดแรงเสียดทานในระหว่างการทดสอบมาก

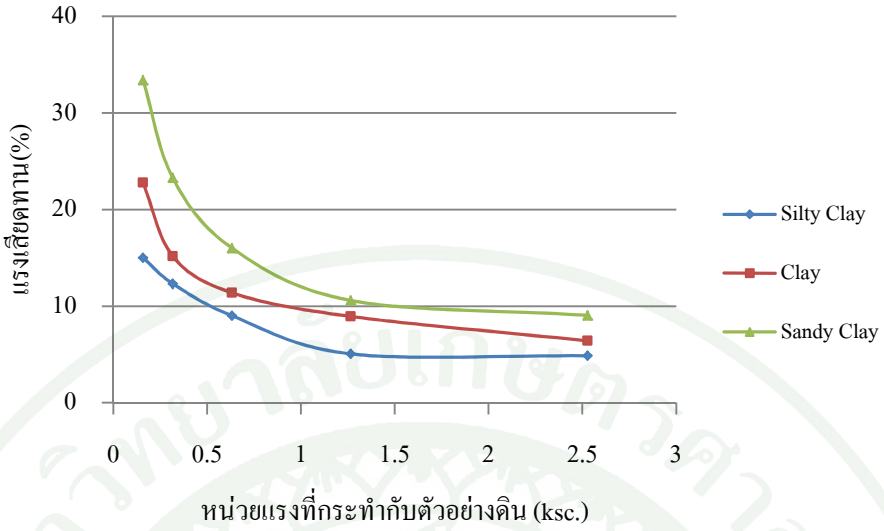
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ส่วนการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring นั้นเมื่อตัวอย่างดินได้รับความเค้นจะเกิดการทรุดตัวของตัวอย่างทั้งด้านบนและด้านล่าง ส่งผลให้ทั้งด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างดินเกิดแรงเสียดทานน้อยและค่อยๆ มากขึ้น จนถึงตรงกลางของตัวอย่างที่ไม่เกิดการเคลื่อนที่ของดินและเกิดแรงเสียดทานที่มากที่สุด แสดงในบทที่ 2 ภาพที่ 24 จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้เกิดแรงเสียดทานเฉลี่ยที่น้อยกว่าการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและแรงเสียดทานแสดงดังภาพที่ 50 นั้น พบว่าแรงเสียดทานระหว่างตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบกับวงแหวนที่ใช้ในการทดสอบ ดินเหนียวปนทราย (Sandy Clay) เมื่อนำมาทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำจะมีแรงเสียดทานระหว่างดินกับวงแหวนที่ใช้ในการทดสอบมากที่สุด ดินเหนียว (Clay) จะมีแรงเสียดทานรองลงมา และดินเหนียวปนทรายแป้ง (Silty Clay) จะมีแรงเสียดทานน้อยที่สุด ซึ่งปริมาณแรงเสียดทานที่พิจารณาตามชนิดของดินนั้นสอดคล้องกับกำลังจากการทดสอบแรงอัดแกนเดียวต่อหน่วยน้ำหนักที่ดินเหนียวปนทราย (Sandy Clay) มีค่ากำลังจากการทดสอบแรงอัดแกนเดียวต่อหน่วยน้ำหนักมากที่สุด รองลงมาคือดินเหนียว (Clay) และดินเหนียวปนทรายแป้ง (Silty Clay) มีค่ากำลังจากการทดสอบแรงอัดแกนเดียวต่อหน่วยน้ำหนักน้อยที่สุด โดยที่ดินตัวอย่างทั้ง 3 ชนิดนั้นจะมีลักษณะที่คล้ายกัน คือ เมื่อมีความเค้นกระทำน้อยจะเกิดแรงเสียดทานขึ้นมาก และเมื่อมีความเค้นกระทำมากขึ้นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะน้อยลง เนื่องจากเมื่อเกิดความเค้นกระทำกับตัวอย่างดินทำให้ตัวอย่างดินนั้นเกิดการทรุดตัวและทำให้พื้นที่ของการเกิดแรงเสียดทานระหว่างตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบและวงแหวนที่ใช้ในการทดสอบลดลงจึงทำให้เกิดแรงเสียดทานที่น้อยลงเมื่อมีความเค้นกระทำมากๆ

จากตารางที่ 13 ได้เปรียบเทียบค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำในแต่ละการทดสอบ พบว่าการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring มีค่าแรงเสียดทานระหว่างตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบและวงแหวนในการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Ring) มากที่สุด รองลงมาคือการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring เนื่องจากการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring เมื่อรับความเค้นจะเกิดการทรุดตัวทั้งด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างดิน ส่งผลให้ทั้งด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างดินเกิดแรงเสียดทานน้อยและค่อยๆ มากขึ้น จนถึงตรงกลางของตัวอย่างที่ไม่เกิดการเคลื่อนที่ของดินและเกิดแรงเสียดทานที่มากที่สุด และการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำใน Triaxial ไม่เกิดแรงเสียดทานเนื่องจากในการทดสอบ Triaxial นั้นใช้ Cell Pressure ควบคุมการเคลื่อนที่ทางข้างของตัวอย่างดินแทนวงแหวนในการอัดตัวคายน้ำ Consolidation Ring

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่กระทำกับตัวอย่างดินและแรงเสียดทาน

ตารางที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบแรงเสียดของชนิดดินในการทดสอบ Fixed-Ring

ความเค้น (ksc)	ดินเหนียวปนทรายแป้ง		ดินเหนียว		ดินเหนียวปนทราย	
	หน่วยแรงที่กระทำกับตัวอย่าง (ksc)	แรงเสียดทาน (%)	หน่วยแรงที่กระทำกับตัวอย่าง (ksc)	แรงเสียดทาน (%)	หน่วยแรงที่กระทำกับตัวอย่าง (ksc)	แรงเสียดทาน (%)
0.158	0.139	15.025	0.122	22.784	0.105	33.408
0.316	0.277	12.341	0.268	15.189	0.242	23.296
0.632	0.575	9.018	0.560	11.392	0.530	16.020
1.264	1.200	5.063	1.151	8.939	1.129	10.594
2.527	2.404	4.867	2.365	6.410	2.298	9.052

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบแรงเสียดของชนิดดินในการทดสอบ Floating-Ring

ความเค้น (ksc)	ดินเหนียวปนทรายแป้ง		ดินเหนียว		ดินเหนียวปนทราย	
	หน่วยแรงที่กระทำกับตัวอย่าง (ksc)	แรงเสียดทาน (%)	หน่วยแรงที่กระทำกับตัวอย่าง (ksc)	แรงเสียดทาน (%)	หน่วยแรงที่กระทำกับตัวอย่าง (ksc)	แรงเสียดทาน (%)
0.158	0.152	3.797	0.149	5.696	0.139	11.397
0.316	0.307	2.848	0.301	4.747	0.279	11.444
0.632	0.603	4.589	0.591	6.487	0.552	12.491
1.264	1.153	8.782	1.134	10.285	1.079	14.570
2.527	2.423	4.116	2.405	4.282	2.333	7.659

ตารางที่ 13 แสดงการเปรียบเทียบแรงเสียดที่เกิดขึ้นในประเภทของการทดสอบ

ประเภทชนิดดิน	แรงเสียดทาน (%)		
	Triaxial	Floating-Ring	Fixed-Ring
ดินเหนียว	-	6.409	12.943
ดินเหนียวปนทรายแป้ง	-	4.826	8.663
ดินเหนียวปนทราย	-	11.51	18.474

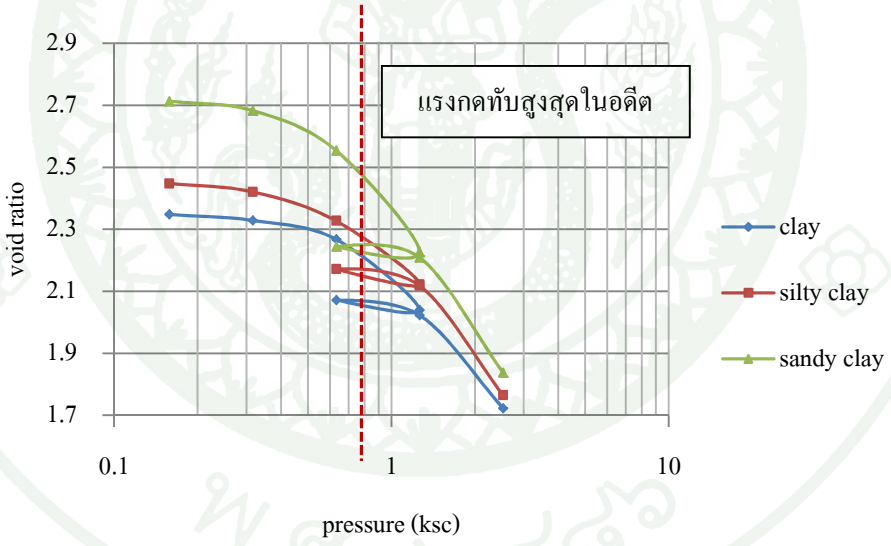
4. ผลการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ (Consolidation Test)

ผลของการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ (Consolidation Test) ในงานวิจัยนี้นั้นได้แบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ ผลการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Triaxial, ผลการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring, ผลการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring, ผลการปรับแก้การทดสอบเนื่องจากการเคลื่อนตัวของตัวอย่างดินออกจาก Consolidation Ring และการไม่อิ่มตัวด้วยน้ำของดินตัวอย่าง ซึ่งผลของการทดสอบทั้งหมดจะแสดงดังต่อไปนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.1 ผลการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำโดยใช้เครื่องมือ Triaxial

การทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำโดยใช้เครื่องมือ Triaxial นั้นจะเป็นการทดสอบดินประดิษฐ์ทั้ง 3 ชนิด คือ ดินเหนียว (Clay) ดินเหนียวปนทรายแป้ง (Silty Clay) และดินเหนียวปนทราย (Sandy Clay) ซึ่งผลการทดสอบของตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิดนั้น เป็นค่าเฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่างของการทดสอบ และการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำโดยใช้เครื่องมือ Triaxial นั้นจะวัดการทรุดตัวที่เกิดโดยวัดจากปริมาณของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งจะมีความแตกต่างจากการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring และการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring ที่วัดการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริงของดิน และการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำโดยใช้เครื่องมือ Triaxial นั้นจะไม่เกิดแรงเสียดทานขึ้นในระบบของการทดสอบ เนื่องจากในการทดสอบ Triaxial ไม่มี Consolidation Ring ที่ใช้ในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring และการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring

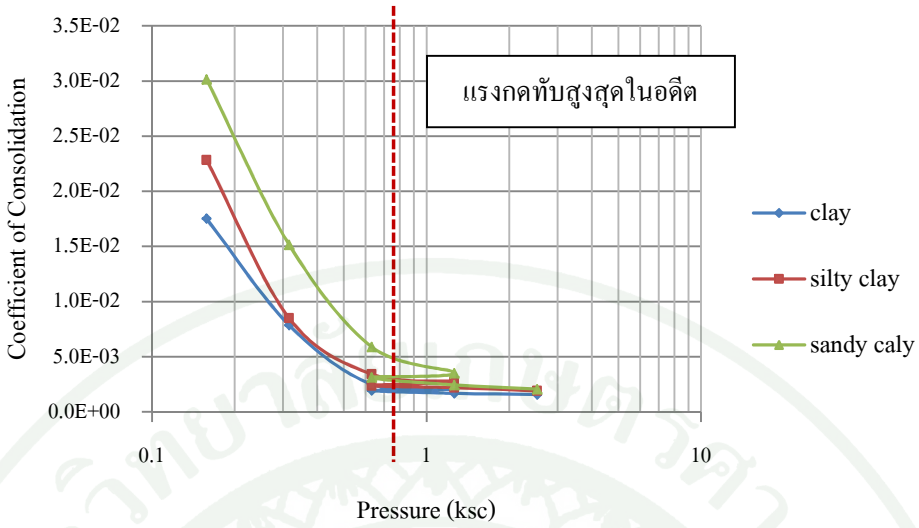


ภาพที่ 51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Void Ratio และ Pressure ในระหว่างการทดสอบการอัดตัวคายน้ำโดยใช้เครื่องมือ Triaxial

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรง (Void Ratio) และความเค้น (Pressure) ของการอัดตัวคายน้ำโดยใช้เครื่องมือ Triaxial ในภาพที่ 51 และตารางที่ 14 ซึ่งแสดงค่าพารามิเตอร์ของการคำนวณการอัดตัวแบบคายน้ำโดยใช้เครื่องมือ Triaxial นั้นจะเห็นได้ว่า ดินทั้ง 3 ชนิด มีการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟเป็น 2 ช่วง ซึ่งในช่วงแรกนั้น ดินทั้ง 3 ชนิดจะมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงที่น้อย ซึ่งในช่วงนี้เป็นช่วงของดินที่เคยรับความเค้นในอดีตมาก่อนแล้ว จึงทำให้ดินมีความแข็งแรงและเกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงที่น้อยซึ่งเรียกการทรุดตัวในช่วงดังกล่าวว่า Over Consolidation และจะเกิดในช่วงของความเค้นที่น้อยกว่าความเค้นที่เคยกดทับในอดีต ในส่วนต่อมาของกราฟจะมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนโพรงที่มาก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงในช่วงนี้เป็นส่วนของดินที่ไม่เคยได้รับความเค้นในอดีตมาก่อนซึ่งเรียกการทรุดตัวในช่วงนี้ว่า Normally Consolidation ในส่วนของความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงซึ่งเกิดจากการทรุดตัวของดินนั้น ดินเหนียวปนทราย (Sandy Clay) มีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนโพรงมากที่สุด รองลงมาคือดินเหนียวปนทรายแป้ง (Silty Clay) และน้อยที่สุดคือดินเหนียว (Clay) ความแตกต่างดังกล่าวเกิดจากการไหลออกของน้ำในมวลดินที่ไม่เท่ากันเมื่อได้รับความเค้นที่เท่ากัน โดยที่ดินแต่ละชนิดนั้นมีอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นที่ไม่เท่ากัน โดยดินที่มีอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นมาก จะเกิดการไหลออกของน้ำในมวลดินได้ดีกว่าดินที่มีอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นน้อย ส่งผลทำให้ดินที่มีอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นมากนั้นจะเกิดการทรุดตัวมากกว่าดินที่มีอัตราส่วนโพรงน้อยเมื่อมีความเค้นกระทำที่เท่ากัน ซึ่งในดินเหนียวปนทรายมีอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นที่มากส่งผลให้เกิดปริมาณการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงมากเมื่อมีความเค้นกระทำกับตัวอย่างดิน และเมื่อพิจารณาในดินเหนียวปนทรายแป้งและดินเหนียวซึ่งมีอัตราส่วนโพรงที่เริ่มต้นที่น้อยกว่าดินเหนียวปนทราย พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงที่น้อยกว่า ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าววัดได้จากการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรในมวลดินที่ลดลงเนื่องจากการคายน้ำออกจากมวลดิน และการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงที่แตกต่างกันของดินทั้ง 3 ชนิดนั้นยังส่งผลกระทบต่อค่า Compression Index (Cc) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่พิจารณาจากความชันของกราฟที่อยู่ในช่วงของ Normally Consolidation และค่า Recompression Index (Cr) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่พิจารณาจากความชันของกราฟที่อยู่ในช่วง Over Consolidation มีค่าแตกต่างกัน ซึ่งดินเหนียวปนทรายจะมีค่า Compression Index (Cc) และ Recompression Index (Cr) มากกว่าดินเหนียวปนทรายแป้งและดินเหนียว ในส่วนของค่า Maximum Past Pressure ของดินทั้ง 3 ชนิด มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากก่อนทำการทดสอบนั้นได้ทำการให้ความเค้นกับดินทั้ง 3 ชนิด เพื่อสร้างแรงกดทับในอดีต เนื่องจากดินประดิษฐ์ที่พัฒนาขึ้นนั้น ไม่ทราบค่าความเค้นที่เคยได้รับในอดีตที่แน่นอนจึงต้องทำการให้ความเค้นกับดินทั้ง 3 ชนิดก่อนการทดสอบเพื่อกำหนดแรงกดทับในอดีตที่ชัดเจน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Coefficient of Consolidation และ Pressure ในระหว่างการทดสอบการอัดตัวคายน้ำโดยใช้เครื่องมือ Triaxial

จากกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation) และความเค้น (Pressure) ของการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำโดยใช้เครื่องมือ Triaxial แสดงดังภาพที่ 52 และตารางที่ 14 ซึ่งแสดงค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation) จากการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำโดยใช้เครื่องมือ Triaxial พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำดังกล่าว พิจารณาจากการทรุดตัวของดินที่ 90% ของการทรุดตัวทั้งหมดเทียบกับเวลาในการทรุดตัวซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำจะใช้ในการคำนวณระยะเวลาในการทรุดตัวของดินเมื่อมีแรงกระทำกับดิน จากการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Triaxial นั้นพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation) มีความแตกต่างกันในแต่ละชนิดของดิน โดยเมื่อพิจารณาความเค้นที่อยู่ในช่วงของ Over Consolidation แล้วนั้นจะมีความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำค่อนข้างมาก เมื่อพิจารณาความเค้นที่เท่ากัน เนื่องจากในช่วง Over Consolidation นั้น ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบจะมีอัตราส่วนโพรงที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก ทำให้ใช้เวลาในการคายน้ำออกจากมวลดินไม่เท่ากัน โดยดินที่มีอัตราส่วนโพรงมากนั้นจะใช้เวลาในการอัดตัวคายน้ำได้เร็ว เนื่องจากเมื่อรับความเค้นที่เท่ากัน ดินที่มีอัตราส่วนโพรงมาก จะสามารถคายน้ำออกจากมวลดินได้ง่ายกว่าดินที่มีอัตราส่วนโพรงน้อยจึงทำให้เกิดการอัดตัวคายน้ำได้เร็วกว่าดินที่มีอัตราส่วนโพรงน้อย และในส่วนของความเค้นที่อยู่ในช่วงของ Normally Consolidation ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำของดินทั้ง 3 ชนิด มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อพิจารณาความเค้นที่เท่ากัน เนื่องจากในขณะที่ทำการทดสอบอัตราส่วนโพรงของดินทั้ง 3 ชนิดนั้นลดลงจน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มีความใกล้เคียงกัน จึงทำให้ใช้เวลาในการอัดตัวคายน้ำที่ใกล้เคียงกัน โดยดินเหนียวปนทรายมีค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำสูงที่สุดรองลองมาคือ ดินเหนียวปนทรายแป้ง และน้อยที่สุดคือดินเหนียว

ตารางที่ 14 แสดงค่าพารามิเตอร์ของการคำนวณการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Triaxial

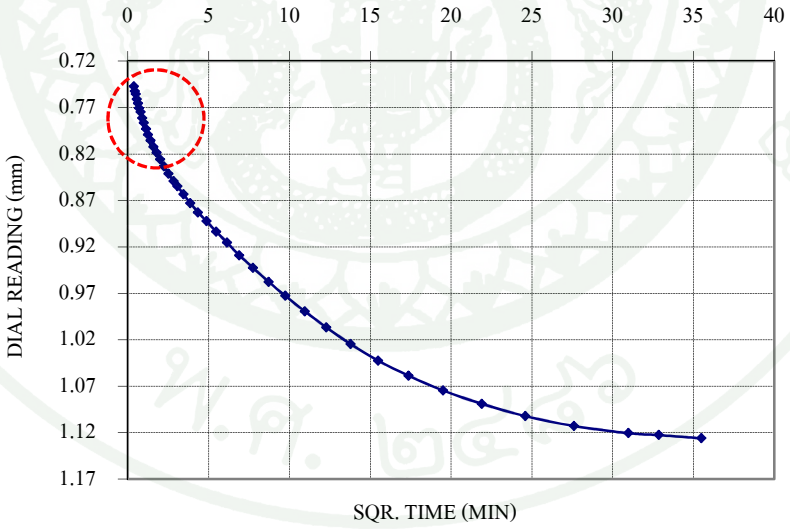
พารามิเตอร์	ดินเหนียว	ดินเหนียวปนทรายแป้ง	ดินเหนียวปนทราย
แรงกดทับสูงสุดในอดีต ,Pc (ksc)	0.75	0.76	0.79
ดัชนีการอัดตัว, Cc	0.238	0.280	0.294
ดัชนีการอัดตัวซ้ำ ,Cr	0.132	0.192	0.217
สัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำ (cm/s)	1.78×10^{-03} to 2.79×10^{-02}	1.91×10^{-03} to 2.88×10^{-02}	2.07×10^{-03} to 3.01×10^{-02}

4.2 ผลการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring

การทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring จะทำการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Triaxial ซึ่งจะทดสอบกับดินประดิษฐ์ทั้ง 3 ชนิด คือ ดินเหนียว (Clay) ดินเหนียวปนทรายแป้ง (Silty Clay) และดินเหนียวปนทราย (Sandy Clay) ซึ่งการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring นั้นจะเกิดการทรุดตัวของดินจากด้านบนของตัวอย่างลงสู่ด้านล่างเพียงอย่างเดียว ส่งผลทำให้ในระหว่างการทดสอบนั้นเกิดแรงเสียดทานระหว่างวงแหวนที่ใช้ในการทดสอบกับตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งแรงเสียดทานดังกล่าวนั้นจะต้านทานการทรุดตัวของดินทำให้ผลการทดสอบไม่เป็นไปโดยอิสระ และเป็นที่สังเกตุว่าปริมาณการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงของดิน (Void Ratio) ของการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring นั้นเกิดขึ้นมากกว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงของดิน (Void Ratio) ในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Triaxial ค่อนข้างมาก ซึ่งจะส่งผลทำให้ค่าพารามิเตอร์ Compression Index (Cc) และ Recompression Index (Cr) มีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Triaxial ซึ่งปริมาณการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงของดินดังกล่าวนั้นนอกจากจะเกิดขึ้นโดยอาศัยทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำของ Terzaghi แล้วนั้น ยังมีการทรุดตัวที่เกิดขึ้นไม่ได้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากการไหลออกของน้ำในมวลดิน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพียงอย่างเดียว แต่ส่วนหนึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของดินตัวอย่างออกจากวงแหวนการอัดตัวคายน้ำและตัวอย่างดินนั้นได้ไหลออกตามรอยต่อระหว่างวงแหวนการอัดตัวคายน้ำและหินพรุน (Porous Stone) ทำให้การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเกิดมากขึ้นซึ่งส่งผลทำให้วัดค่าการทรุดตัวได้มากขึ้นด้วย และอีกส่วนหนึ่งนั้นเกิดจากการที่ตัวอย่างดินที่นำมาทำการทดสอบนั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งจากข้อกำหนดของ ASTM-D2435 ได้กำหนดไว้ว่าให้ดำเนินการนำตัวอย่างดินที่จะใช้ในการทดสอบแช่น้ำไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมงเพื่อให้ตัวอย่างดินนั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ แต่เมื่อนำตัวอย่างดินที่แช่น้ำมาทดสอบเปอร์เซ็นต์การอิ่มตัวด้วยน้ำพบว่าตัวอย่างดินดังกล่าวไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ 100% และเมื่อทำการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแล้วนั้น การทรุดตัวที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบการทรุดตัวแบบทันทีทันใด (Immediate Settlement) ในช่วงแรกของการทดสอบซึ่งไม่ได้เป็นการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำเพียงอย่างเดียวและเป็นการทรุดตัวที่เร็วและไม่ได้เป็นไปตามทฤษฎีของการอัดตัวคายน้ำ จากที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นจึงต้องทำการปรับแก้การทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของดินตัวอย่างออกจากวงแหวนการอัดตัวคายน้ำและการไม่อิ่มตัวด้วยน้ำของตัวอย่างดิน ซึ่งมีรายละเอียดและผลของการปรับแก้ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา แสดงดังภาพที่ 53 นั้นจะเห็นได้ว่าช่วงแรกของการทรุดตัวนั้นจะมีอัตราการทรุดตัวที่เร็ว ซึ่งการทรุดตัวดังกล่าวนั้นไม่ใช่เกิดจากการคายน้ำของดินเพียงอย่างเดียวแต่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของดินตัวอย่างออกจากวงแหวนการอัดตัวคายน้ำ และตัวอย่างดินนั้นได้ไหลออกตามรอยต่อระหว่างวงแหวนการอัดตัวคายน้ำและหินพรุน (Porous Stone) และการไม่อิ่มตัวด้วยน้ำของดินทำให้เมื่อทดสอบการอัดตัวคายน้ำแล้วนั้น การทรุดตัวที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณการทรุดตัวแบบทันทีทันใด (Immediate Settlement) ร่วมด้วย โดยค่าการอิ่มตัวแสดงดังตารางที่ 15 ซึ่งสาเหตุดังกล่าวทำให้เกิดทรุดตัวของดินที่ไม่เป็นไปตามทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำ ซึ่งการปรับแก้ค่าการทรุดตัวดังกล่าวนั้นจะดำเนินการตัดการพิจารณากราฟการทรุดตัวในช่วงแรกของการทรุดตัวที่มีความชันของกราฟค่อนข้างมากออก และเมื่อพิจารณาเฉพาะช่วงของการทรุดตัวที่เกิดจากการอัดตัวคายน้ำเพียงอย่างเดียวแล้วนั้นทำให้ค่าการทรุดตัวในแต่ละความเค้นที่กระทำกับดินตัวอย่างลดลงแสดงดังตารางที่ 16

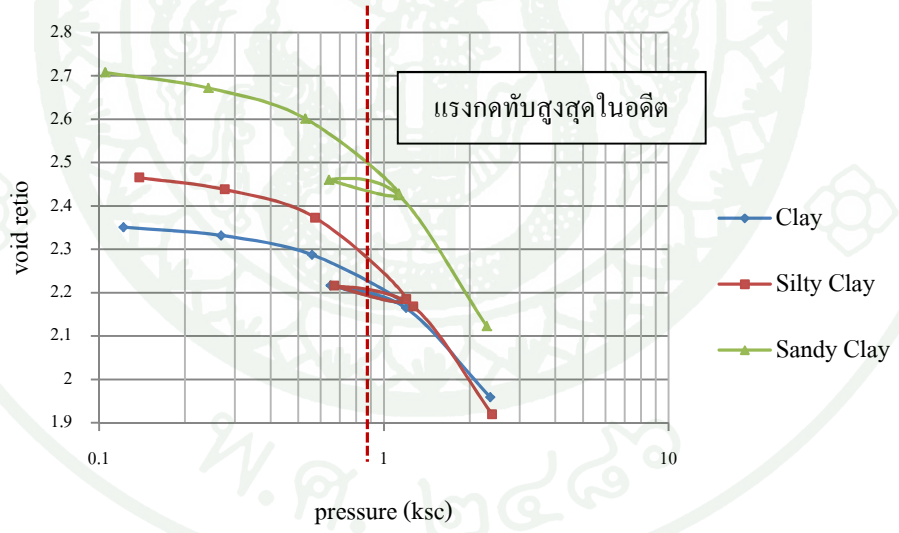
ตารางที่ 15 แสดงค่าการอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of Saturation) ของดิน

	ดินตัวอย่าง		
ตัวอย่างดิน	ดินเหนียว	ดินเหนียวปนทรายแป้ง	ดินเหนียวปนทราย
ความถ่วงจำเพาะ ,Gs	2.65	2.76	2.80
Cell Pressure (Kpa)	200	200	200
Back Pressure (Kpa)	169	159.5	165
การอิ่มตัวด้วยน้ำ , S (%)	84.36	79.24	82.53

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 16 แสดงการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวของดินเหนียวปนทรายแป้ง

ความเค้น (ksc.)	การทรุดตัว (mm)	
	ก่อนการปรับแก้	หลังการปรับแก้
0.157	0.1849	0.1849
0.315	0.4172	0.3678
0.631	1.1941	1.0261
1.263	3.1307	2.6958
0.631	2.8568	2.4741
1.263	3.1875	2.7348
2.527	6.2177	5.6192

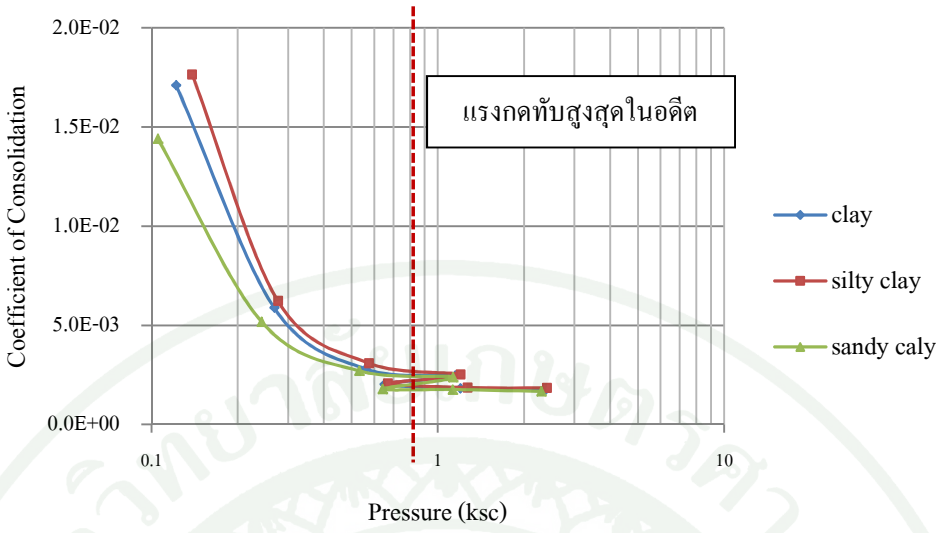


ภาพที่ 54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Void Ratio และ Pressure ของการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Fixed-Ring

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรง (Void Ratio) และความเค้น (Pressure) ของการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring ในภาพที่ 54 และตารางที่ 17 ซึ่งแสดงค่าพารามิเตอร์ของการคำนวณการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring นั้น จะเห็นว่าดินทั้ง 3 ชนิดมีปริมาณการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรง (Void Ratio) ที่แตกต่างกัน แต่จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงที่คล้ายกับการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงของการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Triaxial กล่าวคือ ดินทั้ง 3 ชนิด มีการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟเป็น 2 ช่วง ซึ่งในช่วงแรกนั้น ดินทั้ง 3 ชนิดจะมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงที่น้อย ซึ่งในช่วงนี้เป็นช่วงของดินที่เคยรับความเค้นในอดีตมาก่อนแล้ว จึงทำให้ดินมีความแข็งแรงและเกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงที่น้อยซึ่งเรียกการทรุดตัวในช่วงนี้ว่า Over Consolidation และจะเกิดในช่วงของความเค้นที่น้อยกว่าความเค้นที่กดทับในอดีต ในส่วนต่อมาของกราฟจะมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนโพรงที่มาก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงในช่วงนี้เป็นส่วนของดินที่ไม่เคยได้รับความเค้นในอดีตมาก่อนซึ่งเรียกการทรุดตัวในช่วงนี้ว่า Normally Consolidation ซึ่งดินเหนียว (Clay) จะมีปริมาณการอัตราส่วนโพรงที่น้อยที่สุด รองลงมาคือ ดินเหนียวปนทราย (Sandy Clay) และดินเหนียวปนทรายแป้งจะมีปริมาณการอัตราส่วนโพรงมากที่สุด ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงดังกล่าวนั้นเกิดจากการที่น้ำในมวลดินไหลออกจากมวลดินที่เกิดขึ้นจากความเค้น สอดคล้องกับอัตราส่วนโพรงเริ่มต้น (Void Ratio) ของดิน กล่าวคือ เมื่อดินที่ใช้ในการทดสอบมีอัตราส่วนโพรงมากแล้วนั้นจะส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงมากตามไปด้วย และการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงที่แตกต่างกันของดินทั้ง 3 ชนิดนั้นยังส่งผลกระทบต่อค่า Compression Index (Cc) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่อยู่ในช่วงของ Normally Consolidation และค่า Recompression Index (Cr) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่อยู่ในช่วง Over Consolidation มีค่าแตกต่างกัน ซึ่งดินเหนียวปนทรายจะมีค่า Compression Index (Cc) และ Recompression Index (Cr) มากกว่าดินเหนียวปนทรายแป้งและดินเหนียว และในส่วนของค่า Maximum Past Pressure ของดินทั้ง 3 ชนิด มีค่าใกล้เคียงกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 55 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Coefficient of Consolidation และ Pressure ของการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Fixed-Ring

จากกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation) และความเค้น (Pressure) ของการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring แสดงดังภาพที่ 55 และตารางที่ 17 ซึ่งแสดงค่าพารามิเตอร์ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation) นั้น ดินทั้ง 3 ชนิดมีความแตกต่างกันของค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation) โดยเมื่อพิจารณา Over Consolidation จะมีความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำค่อนข้างมาก และเมื่อพิจารณาความเค้นที่เท่ากัน ดินเหนียวปนทรายแป้ง (Silty Clay) จะมีค่า สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation) สูงที่สุด รองลงมาคือดินเหนียว (Clay) และดินเหนียวปนทราย (Sandy Clay) จะมีค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation) ต่ำที่สุด ซึ่งเมื่อพิจารณาร่วมกับอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นของดินแต่ละชนิดแล้วนั้นพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation) นั้นไม่สอดคล้องกับค่าอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นของดินชนิดนั้นๆ ซึ่งเกิดจากในระหว่างการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring นั้นเกิดแรงเสียดทานขึ้นซึ่งแรงเสียดทานดังกล่าวนั้นลดปริมาณการทรุดตัวของดิน ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation) สอดคล้องกับค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ คือ ดินเหนียวปนทราย (Sandy Clay) จะมีแรงเสียดทานระหว่างดินกับวงแหวนที่ใช้ในการทดสอบมากที่สุด รองลงคือดินเหนียว (Clay) และดินเหนียวปนทรายแป้ง (Silty Clay) จะมีแรงเสียดทานน้อยที่สุด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ(Coefficient of Consolidation) ในช่วง Normally Consolidation พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำของดินทั้ง 3 ชนิด มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาความเค้นที่เท่ากัน เนื่องจากอัตราส่วนโพรงของดินทั้ง 3 ชนิดนั้นลดลงจนมีความใกล้เคียงกัน และค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นมี อิทธิพลในการต้านทานการทรุดตัวที่น้อย จึงทำให้ใช้เวลาในการอัดตัวคายน้ำที่ใกล้เคียงกัน

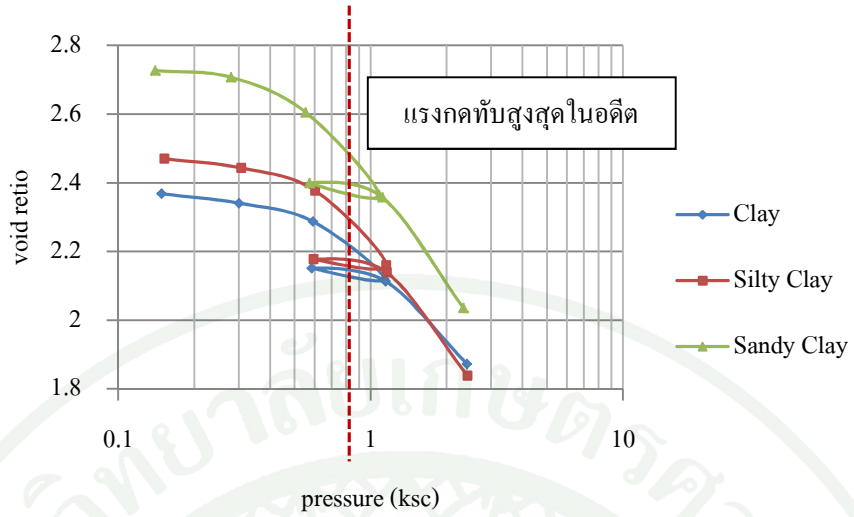
ตารางที่ 17 แสดงค่าพารามิเตอร์ของการคำนวณการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring

พารามิเตอร์	ดินเหนียว	ดินเหนียวปนทรายแป้ง	ดินเหนียวปนทราย
แรงกดทับสูงสุดในอดีต ,Pc (ksc)	0.79	0.78	0.72
ดัชนีการอัดตัว, Cc	0.269	0.343	0.338
ดัชนีการอัดตัวซ้ำ ,Cr	0.129	0.306	0.235
สัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำ (cm/s)	1.71×10^{-03} to 171×10^{-02}	1.86×10^{-03} to 1.74×10^{-02}	1.67×10^{-03} to 1.44×10^{-02}

4.3 ผลการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring

การทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring จะทำการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Triaxial และการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ringซึ่งจะทดสอบกับดินประดิษฐ์ทั้ง 3 ชนิด คือ ดินเหนียว (Clay) ดินเหนียวปนทรายแป้ง (Silty Clay) และดินเหนียวปนทราย (Sandy Clay) ซึ่งการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring นั้นจะเกิดการทรุดตัวของดินทั้งจากด้านบนของตัวอย่างลงสู่ด้านล่างและจากด้านล่างของตัวอย่างดินขึ้นสู่ด้านบนด้วย ส่งผลทำให้ในระหว่างการทดสอบนั้นเกิดแรงเสียดทานระหว่างวงแหวนที่ใช้ในการทดสอบกับตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบ แต่เกิดแรงเสียดทานที่น้อยกว่าการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring ซึ่งแรงเสียดทานดังกล่าวนั้นจะต้านทานการทรุดตัวของดินทำให้ผลการทดสอบไม่เป็นไปตามทฤษฎี และอีกส่วนหนึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของดินตัวอย่างออกจากวงแหวนการอัดตัวคายน้ำและการไม่อิ่มตัวด้วยน้ำของดิน จึงได้ทำการปรับแก้เช่นเดียวกับการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

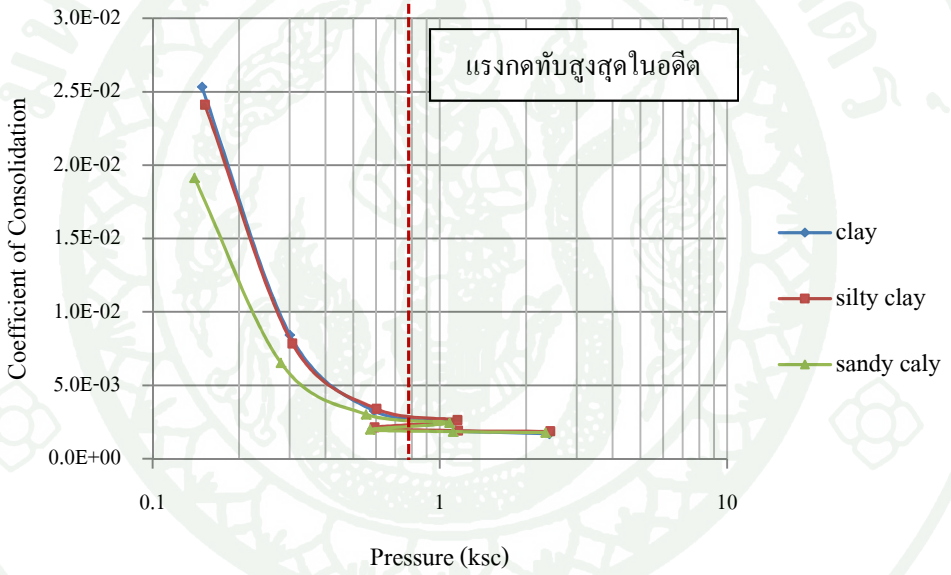


ภาพที่ 56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Void Ratio และ Pressure ของการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Floating-Ring

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรง (Void Ratio) และความเค้น (Pressure) ของการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring ในภาพที่ 56 นั้นจะคล้ายกับการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring คือจะเห็นได้ว่า ดินทั้ง 3 ชนิด มีการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟเป็น 2 ช่วง ซึ่งในช่วงแรกนั้น ดินทั้ง 3 ชนิด จะมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงที่น้อย ซึ่งในช่วงนี้เป็นช่วงของดินที่เคยรับความเค้นในอดีตมาก่อนแล้ว จึงทำให้ดินมีความแข็งแรงและเกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงที่น้อยซึ่งเรียกการทรุดตัวในช่วงนี้ว่า Over Consolidation และจะเกิดในช่วงของความเค้นที่น้อยกว่าความเค้นที่เคยกดทับในอดีต ในส่วนต่อมาของกราฟจะมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนโพรงที่มาก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงในช่วงนี้เป็นส่วนของดินที่ไม่เคยได้รับความเค้นในอดีตมาก่อน ซึ่งเรียกการทรุดตัวในช่วงนี้ว่า Normally Consolidation และเมื่อพิจารณาปริมาณการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรง (Void Ratio) พบว่ามีความแตกต่างกัน คือ ดินเหนียว (Clay) จะมีค่าการทรุดตัวที่น้อยที่สุด รองลงมาคือ ดินเหนียวปนทราย (Sandy Clay) และดินเหนียวปนทรายแป้งจะมีปริมาณการอัตราส่วนโพรงมากที่สุด ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงดังกล่าวนั้นเกิดจากการที่น้ำในมวลดินไหลออกจากมวลดินที่เกิดขึ้นจากความเค้น สอดคล้องกับอัตราส่วนโพรงเริ่มต้น (Void Ratio) ของดิน และการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงที่แตกต่างกันของดินทั้ง 3 ชนิดนั้นยังส่งผลกระทบต่อค่า Compression Index (Cc) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่อยู่ในช่วงของ Normally Consolidation และค่า Recompression Index (Cr) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่อยู่ในช่วง Over Consolidation มีค่า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แตกต่างกัน ซึ่งดินเหนียวปนทรายจะมีค่า Compression Index (Cc) และ Recompression Index (Cr) มากกว่าดินเหนียวปนทรายแป้งและดินเหนียว เนื่องจากดินเหนียวปนทรายมีปริมาณการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงมาก ดินเหนียวและดินเหนียวปนทรายแป้ง ทำให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงและแรงดันของดินเหนียวปนทรายมีความชันมากกว่า ในส่วนของค่า Maximum Past Pressure ของดินทั้ง 3 ชนิด มีค่าใกล้เคียงกัน แต่การทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring จะแตกต่างจากการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring คือมีปริมาณการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรง (Void Ratio) ที่มากกว่า ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring ได้แสดงดังตารางที่ 18



ภาพที่ 57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Coefficient of Consolidation และ Pressure ของการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Floating-Ring

จากกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation) และความเค้น (Pressure) ของการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring นั้นมีลักษณะเช่นเดียวกับการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring แสดงในรูปที่ 57 และตารางที่ 18 ซึ่งแสดงค่าพารามิเตอร์ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation) นั้น ดินทั้ง 3 ชนิดมีความแตกต่างกันของค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation) โดยเมื่อพิจารณา Over consolidation จะมีความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การอัด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตัวคายน้ำค่อนข้างมาก และเมื่อพิจารณาความเค้นที่เท่ากัน ดินเหนียวปนทรายแป้ง (Silty Clay) จะมีค่า สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation) สูงที่สุด รองลงมาคือดินเหนียว (Clay) และดินเหนียวปนทราย (Sandy Clay) จะมีค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation) ต่ำที่สุด ซึ่งเมื่อพิจารณาร่วมกับอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นของดินแต่ละชนิดแล้วนั้น พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation) นั้นไม่สอดคล้องกับค่าอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นของดินชนิดนั้นๆ ซึ่งเกิดจากในระหว่างการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Float-Ring นั้นเกิดแรงเสียดทานขึ้นซึ่งแรงเสียดทานดังกล่าวนั้นลดปริมาณการทรุดตัวของดิน ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation) สอดคล้องกับค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ คือ ดินเหนียวปนทราย (Sandy Clay) จะมีแรงเสียดทานระหว่างดินกับวงแหวนที่ใช้ในการทดสอบมากที่สุด รองลงคือดินเหนียว (Clay) และดินเหนียวปนทรายแป้ง (Silty Clay) จะมีแรงเสียดทานน้อยที่สุด

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ(Coefficient of Consolidation) ในช่วง Normally Consolidation พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำของดินทั้ง 3 ชนิด มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาความเค้นที่เท่ากัน เนื่องจากอัตราส่วนโพรงของดินทั้ง 3 ชนิดนั้นลดลงจนมีความใกล้เคียงกัน และค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นมี อิทธิพลในการต้านทานการทรุดตัวที่น้อย จึงทำให้ใช้เวลาในการอัดตัวคายน้ำที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 18 แสดงค่าพารามิเตอร์ของการคำนวณการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring

พารามิเตอร์	ดินเหนียว	ดินเหนียวปนทรายแป้ง	ดินเหนียวปนทราย
แรงกดทับสูงสุดในอดีต ,Pc (ksc)	0.71	0.74	0.69
ดัชนีการอัดตัว, Cc	0.228	0.350	0.359
ดัชนีการอัดตัวซ้ำ ,Cr	0.192	0.244	0.206
สัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำ (cm/s)	$1.69x10^{-03}$ to $2.53x10^{-02}$	$1.86x10^{-03}$ to $2.41x10^{-02}$	$1.78x10^{-03}$ to $1.91x10^{-02}$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.4 การเปรียบเทียบผลการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ

การเปรียบเทียบผลของการทดสอบการอัดตัวคายน้ำนั้น จะเปรียบเทียบกันระหว่างการทดสอบแต่ละประเภทโดยใช้ตัวอย่างดินในการทดสอบชนิดเดียวกัน ซึ่งในการเปรียบเทียบนั้นจะเปรียบเทียบทั้ง 3 ประเภทของการทดสอบ คือ การทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring, การทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring และการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Triaxial ซึ่งผลของการทดสอบแสดงดังต่อไปนี้

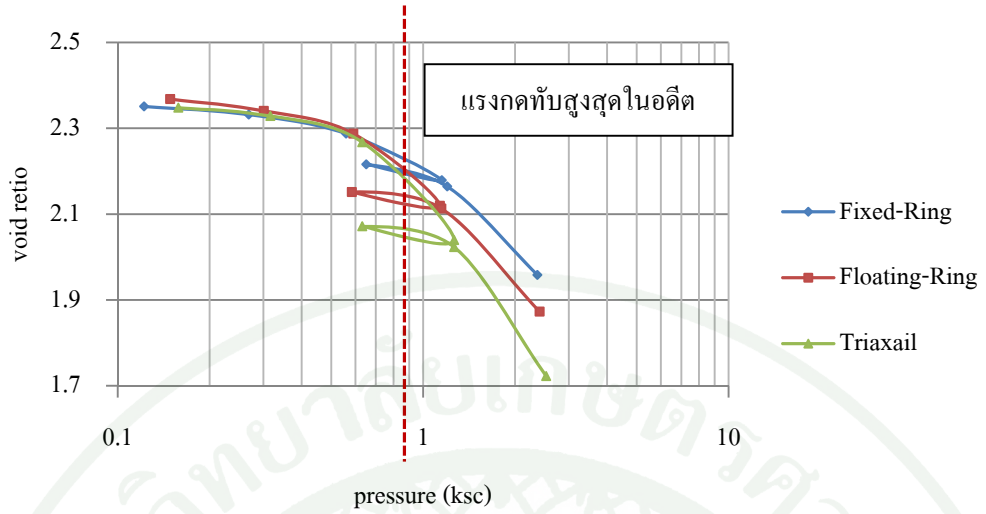
4.4.1 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงและความเค้น

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงของดิน (Void Ratio) และความเค้น (Pressure) ของดินเหนียวทั้ง 3 ชนิด ดังที่ได้แสดงในภาพที่ 58, 59 และ 60 นั้น พบว่าการทดสอบสอบทั้ง 3 ประเภทนั้นมีการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟเป็น 2 ช่วง ซึ่งในช่วงแรกนั้น การทดสอบสอบทั้ง 3 ประเภทจะมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงที่น้อย ซึ่งในช่วงนี้เป็นช่วงของดินที่เคยรับความเค้นในอดีตมาก่อนแล้ว จึงทำให้ดินมีความแข็งแรงและเกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงที่น้อยซึ่งเรียกการทรุดตัวในช่วงนี้ว่า Over Consolidation และจะเกิดในช่วงของความเค้นที่น้อยกว่าความเค้นที่เคยกดทับในอดีต ในส่วนนี้นั้นการทดสอบทั้ง 3 ประเภทจะมีความชันของกราฟที่ใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากดินที่ใช้ในการทดสอบเป็นดินชนิดเดียวกันซึ่งมีอัตราส่วนโพรงที่เหมือนกันจึงทำให้การเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟใกล้เคียงกันด้วย แต่จากแตกต่างกันในส่วนของความเค้นที่ได้รับ คือ การทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring จะเกิดแรงเสียดทานในระหว่างการทดสออบมากที่สุดส่งผลให้ได้รับความเค้นในการทดสอบน้อยที่สุด การทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring เกิดแรงเสียดทานน้อยกว่าการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring จึงได้รับความเค้นมากกว่า และการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Triaxial ไม่เกิดแรงเสียดทานจึงทำให้ได้รับความเค้นมากที่สุด แต่ความแตกต่างของความเค้นที่ได้รับในแต่ละการทดสอบทดสอบนั้นไม่ได้ส่งผลต่อปริมาณการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงในช่วง Over Consolidation มากนักเนื่องจากความเค้นที่กระทำมีปริมาณน้อยกว่าความเค้นที่ดินเคยได้รับในอดีต ซึ่งส่งผลทำให้ค่า Recompression Index (Cr) ที่พิจารณาจากความชันของกราฟในช่วง Over Consolidation ในการทดสอบทั้ง 3 ประเภทนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

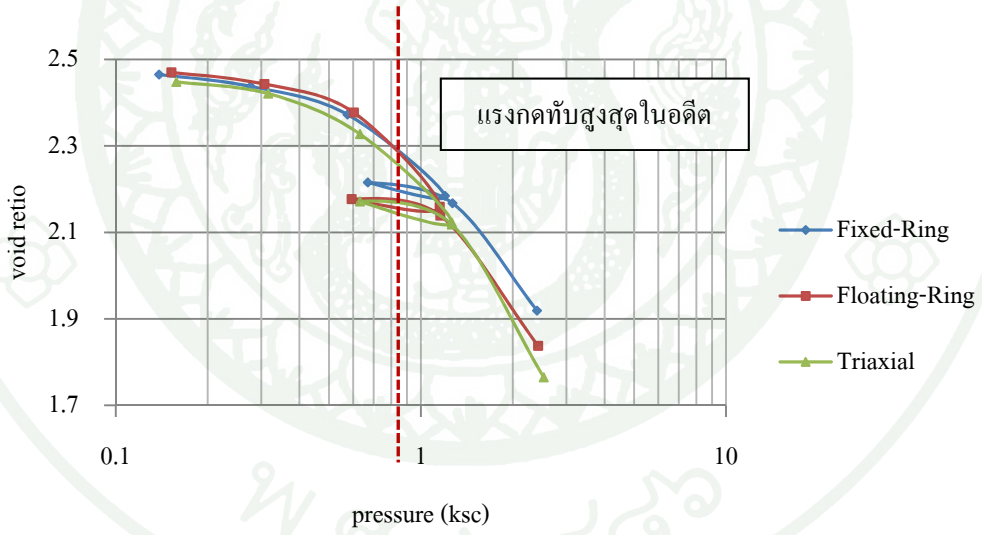
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ในส่วนต่อมาของกราฟจะมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนโพรงที่มาก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงในช่วงนี้เป็นส่วนของดินที่ไม่เคยได้รับความเค้นในอดีตมาก่อนซึ่งเรียกการทรุดตัวในช่วงนี้ว่า Normally Consolidation ซึ่งในการทดสอบทั้ง 3 ประเภท มีความแตกต่างของค่าพารามิเตอร์ Compression Index (Cc) อยู่ค่อนข้างมาก สาเหตุที่ค่าพารามิเตอร์ Compression Index (Cc) ยังมีความแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Triaxial นั้น เกิดจากในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring และการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring นั้นเกิดแรงเสียดทานในระหว่างการทดสอบ ซึ่งแรงเสียดทานดังกล่าวจะไปต้านการทรุดตัวที่เกิดขึ้นทำให้การทรุดตัวของการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring และการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring เกิดขึ้นน้อยกว่าการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Triaxial และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงของดิน (Void Ratio) และความเค้น (Pressure) ของดินเหนียวทั้ง 3 ชนิด หลังจากการปรับแก้การทรุดตัวเนื่องจากการเคลื่อนตัวของดินออกจากวงแหวนที่ใช้ในการทดสอบและการไม่อิ่มตัวด้วยน้ำของตัวอย่าง พบว่าการทดสอบสอบทั้ง 3 ประเภทนั้นมีปริมาณของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงของดินที่แตกกัน ซึ่งการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Triaxial มีปริมาณของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงของดินมากที่สุด รองลงมาคือการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring และน้อยที่สุดคือการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring จากที่กล่าวมานั้นจึงต้องปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ Compression Index (Cc), Recompression Index (Cr) ให้เป็นไปตามทฤษฎีมากที่สุด โดยได้เสนอค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ Compression Index (Cc), Recompression Index (Cr)ได้แสดงในตารางที่ 19 โดยค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวนั้นสามารถนำไปปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ Compression Index (Cc), Recompression Index (Cr) ในกรณีที่การทดสอบไม่ได้พิจารณาแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการปรับแก้ที่นำเสนอนั้นพิจารณาจากค่าพารามิเตอร์ Compression Index (Cc), Recompression Index (Cr) ซึ่งได้จากการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring และการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring ที่ไม่ได้พิจารณาผลกระทบจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

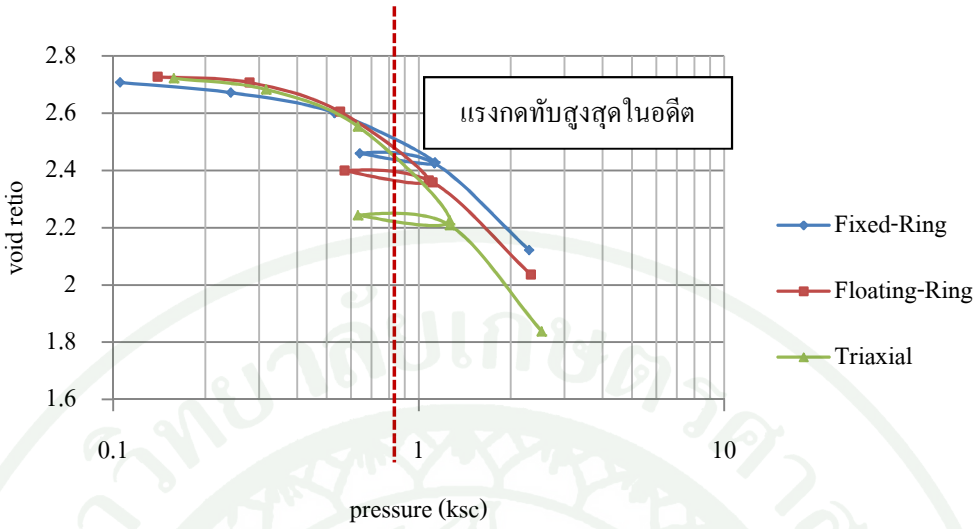


ภาพที่ 58 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Void Ratio และ Pressure ของดินเนียว



ภาพที่ 59 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Void Ratio และ Pressure ของดินเหนียวปนทรายแป้ง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 60 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Void Ratio และ Pressure ของดิน

ตารางที่ 19 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการปรับแก้ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ

พารามิเตอร์	Fixed-Ring			Floating-Ring		
	ดินเหนียว	ดินเหนียวปนทรายแป้ง	ดินเหนียวปนทราย	ดินเหนียว	ดินเหนียวปนทรายแป้ง	ดินเหนียวปนทราย
ดัชนีการอัดตัว ,Cc	1.35	1.23	1.14	1.25	1.18	1.11
ดัชนีการอัดตัวซ้ำ ,Cr	1.02	1.03	1.02	1.02	1.10	1.07

4.4.2 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำและความเค้น

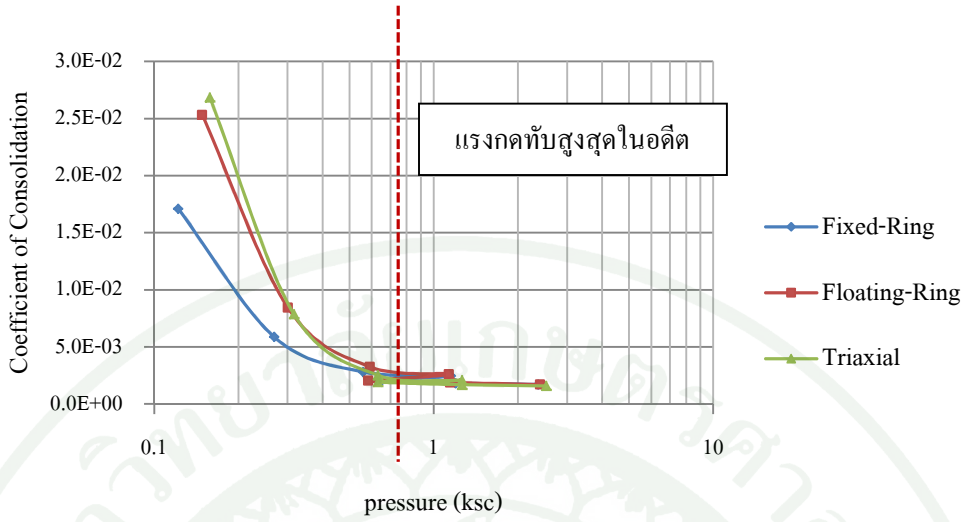
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation) และความเค้น (Pressure) ของการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำของดินทั้ง 3 ชนิดนั้น แสดงดังภาพที่ 61, 62, 63 และตารางที่ 20, 21, 22 ตามลำดับ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันในแต่ละประเภทในการทดสอบพบว่ามีความแตกต่างกันของค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation) ในช่วงของดินที่เป็น Over Consolidation ซึ่งค่า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

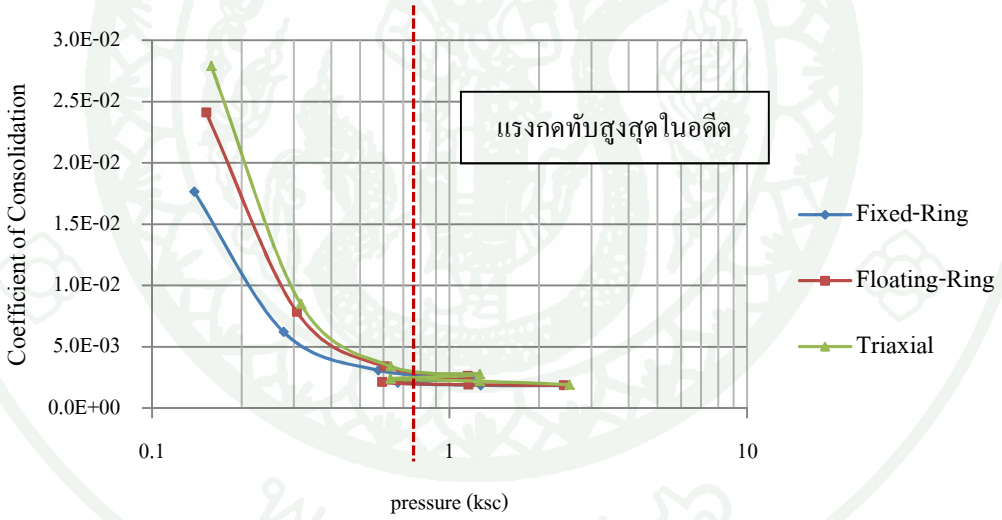
สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำดังกล่าวพิจารณาจากการทรุดตัวของดินที่ 90% ของการทรุดตัวทั้งหมดเทียบกับเวลาในการทรุดตัวซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำจะใช้ในการคำนวณระยะเวลาในการทรุดตัวของดินเมื่อมีแรงกระทำกับดิน ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ความเค้น (Pressure) เท่ากันแล้วนั้น การทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำใน Triaxial จะมีค่าค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation) สูงที่สุด การทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring จะมีค่าค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation) รองลงมา และการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring มีค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation) ต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับกับค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระบบของการทดสอบ ซึ่งแรงเสียดทานดังกล่าวจะเกิดขึ้นกับการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring และการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring โดยแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างวงแหวนที่ใช้ในการทดสอบ (Consolidation Ring) กับตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบจะต้านทานการทรุดตัวของดิน ทำให้การทรุดตัวที่ 90% ของการทรุดตัวทั้งหมดนั้นช้าลง ส่งผลทำให้เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation) ที่ความเค้นที่เท่ากัน การทดสอบที่เกิดแรงเสียดทานระหว่างวงแหวนที่ใช้ในการทดสอบ (Consolidation Ring) กับตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบมากจะมีค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation) น้อย

เมื่อพิจารณาช่วง Normally Consolidation พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำของการทดสอบทั้ง 3 ประเภท มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อพิจารณาความเค้นที่เท่ากัน เนื่องจากค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นมี อิทธิพลในการต้านทานการทรุดตัวที่น้อย จึงทำให้ใช้เวลาในการอัดตัวคายน้ำที่ใกล้เคียงกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

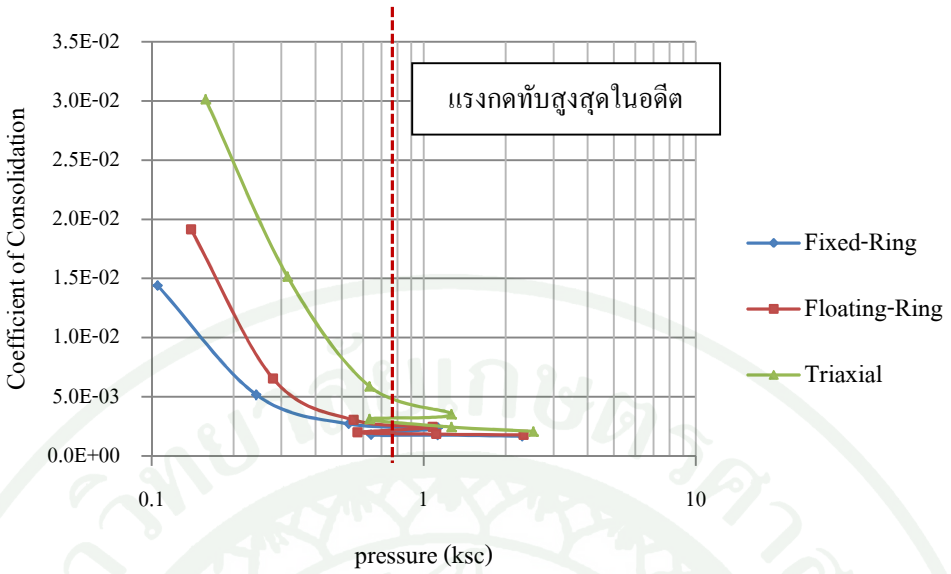


ภาพที่ 61 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Coefficient of Consolidation และ Pressure ของ Clay



ภาพที่ 62 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Coefficient of Consolidation และ Pressure ของ Silty Clay

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 63 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Coefficient of Consolidation และ Pressure ของ Sandy Clay

ตารางที่ 20 แสดงค่าพารามิเตอร์ของการคำนวณการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Clay

พารามิเตอร์	Fixed-Ring	Floating-Ring	Triaxial
แรงกดทับสูงสุดในอดีต ,Pc (ksc)	0.79	0.71	0.75
ดัชนีการอัดตัว, Cc	0.269	0.228	0.238
ดัชนีการอัดตัวซ้ำ ,Cr	0.129	0.192	0.132
สัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำ (cm/s)	1.71×10^{-03} to 1.71×10^{-02}	1.69×10^{-03} to 2.53×10^{-02}	1.78×10^{-03} to 2.79×10^{-02}

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 21 แสดงค่าพารามิเตอร์ของการคำนวณการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Silty Clay

พารามิเตอร์	Fixed-Ring	Floating-Ring	Triaxial
แรงกดทับสูงสุดในอดีต ,Pc (ksc)	0.79	0.71	0.76
ดัชนีการอัดตัว, Cc	0.343	0.350	0.280
ดัชนีการอัดตัวซ้ำ ,Cr	0.306	0.244	0.192
สัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำ (cm/s)	1.71×10^{-03} to 171×10^{-02}	1.69×10^{-03} to 2.53×10^{-02}	1.91×10^{-03} to 2.88×10^{-02}

ตารางที่ 22 แสดงค่าพารามิเตอร์ของการคำนวณการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Sandy Clay

พารามิเตอร์	Fixed-Ring	Floating-Ring	Triaxial
แรงกดทับสูงสุดในอดีต ,Pc (ksc)	0.78	0.74	0.79
ดัชนีการอัดตัว, Cc	0.338	0.359	0.294
ดัชนีการอัดตัวซ้ำ ,Cr	0.235	0.206	0.217
สัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำ (cm/s)	1.86×10^{-03} to 1.74×10^{-02}	1.86×10^{-03} to 2.41×10^{-02}	2.07×10^{-03} to 3.01×10^{-02}

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

1. ชนิดและประเภทของดินส่งผลกระทบต่อปริมาณของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ โดยที่ในการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Fixed-Ring นั้น ดินเหนียวปนทราย (Sandy Clay) มีแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบมากที่สุดคือ 18.47% ดินเหนียว (Clay) มีแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบรองลงมาคือ 12.94% และดินเหนียวปนทรายแป้ง (Silty Clay) มีแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบน้อยที่สุดคือ 8.66% ในส่วนของการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Floating-Ring นั้นมีลักษณะเช่นเดียวกับการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Fixed-Ring นั้นคือ ดินเหนียวปนทราย (Sandy Clay) มีแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบมากที่สุดคือ 11.51% ดินเหนียว (Clay) มีแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบรองลงมาคือ 6.41% และดินเหนียวปนทรายแป้ง (Silty Clay) มีแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบน้อยที่สุดคือ 4.83%

2. ประเภทของการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำนั้นส่งผลกระทบต่อปริมาณของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ โดยที่ในการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Fixed-Ring มีแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ ดินเหนียว ดินเหนียวปนทรายแป้ง และดินเหนียวปนทรายคือ 12.94%, 8.66% และ 18.47% ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Floating-Ring ที่เกิดแรงเสียดทานขึ้นในระหว่างการทดสอบ ดินเหนียว ดินเหนียวปนทรายแป้ง และดินเหนียวปนทรายคือ 6.41%, 4.83% และ 11.51% ตามลำดับ

3. แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ Coefficient of Consolidation (Cv) ของตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring และ Floating-Ring จะมีความแตกต่างกันของค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำเมื่อพิจารณาที่ความเค้นที่เท่ากันโดยความเค้นที่ใช้ในการทดสอบจะอยู่ระหว่าง 0.16-2.53 ksc. ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำยังแปรผกผันกับปริมาณของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ ซึ่งสามารถสรุปผลทดสอบได้ดังต่อไปนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.1 การทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring

- ดินเหนียวปนทรายแป้งมีค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำมากที่สุดมีค่าระหว่าง $1.86x10^{-03}$ ถึง $1.74x10^{-02}$เซนติเมตร/วินาที

- ดินเหนียวมีค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำรองลงมามีค่าระหว่าง $1.71\ x10^{-03}$ ถึง $171\ x\ 10^{-02}$เซนติเมตร/วินาที

- ดินเหนียวปนทรายมีค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำน้อยที่สุดมีค่าระหว่าง $1.67x10^{-03}$ ถึง $1.44x10^{-02}$เซนติเมตร/วินาที

3.2 การทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring

- ดินเหนียวปนทรายแป้งมีค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำมากที่สุดมีค่าระหว่าง $1.86x10^{-03}$ ถึง $2.41x10^{-02}$เซนติเมตร/วินาที

- ดินเหนียวมีค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำรองลงมามีค่าระหว่าง$1.69x10^{-03}$ ถึง $2.53x10^{-02}$เซนติเมตร/วินาที

- ดินเหนียวปนทรายมีค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำน้อยที่สุดมีค่าระหว่าง$1.78x10^{-03}$ ถึง $1.91x10^{-02}$เซนติเมตร/วินาที

3.3 การทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Triaxial

- ดินเหนียวปนทรายมีค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำมากที่สุดมีค่าระหว่าง $2.07x10^{-03}$ ถึง $3.01x10^{-02}$เซนติเมตร/วินาที

- ดินเหนียวปนทรายแป้งมีค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำรองลงมามีค่าระหว่าง $1.91x10^{-03}$ ถึง $2.28x10^{-02}$เซนติเมตร/วินาที

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

- ดินเหนียวมีค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำน้อยที่สุดมีค่าระหว่าง $1.58x10^{-03}$ ถึง $1.75x10^{-02}$เซนติเมตร/วินาที

เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบทั้ง 3 ประเภทนั้นพบว่า การทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Triaxial มีค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำมากที่สุด การทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring มีค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำรองลงมา โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำโดยใช้เครื่องมือ Triaxial ระหว่าง 2.61% ถึง 36.54% และการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring มีค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำน้อยที่สุดโดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำโดยใช้เครื่องมือ Triaxial ระหว่าง 2.61% ถึง 52.16%

4. แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำส่งผลต่อค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression Index,C_r) และ ค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index,C_c) ในกราฟสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงและความเค้น ซึ่งในการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Fixed-Ring และการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Floating-Ring มีค่าน้อยกว่าการทดสอบการอัดตัวคายน้ำในการทดสอบ Triaxial ซึ่งเป็นผลจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Fixed-Ring

- ดินเหนียวปนทรายแป้ง (Silty Clay) มีค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression Index,C_r) และค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index,C_c) คือ 0.19 และ 0.23 ตามลำดับ และมีความแตกต่างของค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression Index,C_r) และค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index,C_c) เมื่อเทียบกับการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Triaxial คือ 8.02% และ 18.57% ตามลำดับ

- ดินเหนียว (Clay) มีค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression Index,C_r) และค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index,C_c) คือ 0.13 และ 0.18 ตามลำดับ และมีความแตกต่างของค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression Index,C_r) และค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index,C_c) คือ 4.65% และ 26.05% ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

- ดินเหนียวปนทราย (Sandy Clay) มีค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression Index,C_r) และค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index,C_c) คือ 0.21 และ 0.26 ตามลำดับ และมีความแตกต่างของค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression Index,C_r) และค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index,C_c) คือ 9.86% และ 12.24% ตามลำดับ

4.2 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Floating-Ring

- ดินเหนียวปนทรายแป้ง (Silty Clay) มีค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression Index,C_r) และค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index,C_c) คือ 0.17 และ 0.24 ตามลำดับ และมีความแตกต่างของค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression Index,C_r) และค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index,C_c) เมื่อเทียบกับการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Triaxial คือ 1.15%และ 15.00% ตามลำดับ

- ดินเหนียว (Clay) มีค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression Index,C_r) และค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index,C_c) คือ 0.13 และ 0.19 ตามลำดับ และมีความแตกต่างของค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression Index,C_r) และค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index,C_c) คือ 5.38% และ 19.57% ตามลำดับ

- ดินเหนียวปนทราย (Sandy Clay) มีค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression Index,C_r) และค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index,C_c) คือ 0.19 และ 0.29 ตามลำดับ และมีความแตกต่างของค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression Index,C_r) และค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index,C_c) คือ 4.95%และ 10.20% ตามลำดับ

5. ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ของการอัดตัวคายน้ำเนื่องแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำ สำหรับการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Fixed-Ring นั้น ดินเหนียว (Clay) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ 1.35 และ 1.02 ในการปรับแก้ค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index,C_c) และค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression Index,C_r) ตามลำดับ ดินเหนียวปนทรายแป้ง (Silty Clay) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ 1.23 และ 1.03 ในการปรับแก้ค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index,C_c) และค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression Index,C_r) ตามลำดับและ ดินเหนียวปนทราย (Sandy Clay) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ 1.14 และ 1.02 ในการปรับแก้ค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index,C_c) และค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression Index,C_r) ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Floating-Ring นั้น ดินเหนียว (Clay) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ 1.25 และ 1.02 ในการปรับแก้ค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index,C_c) และค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression Index,C_r) ตามลำดับ ดินเหนียวปนทรายแป้ง (Silty Clay) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ 1.18 และ 1.10 ในการปรับแก้ค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index,C_c) และค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression Index,C_r) ตามลำดับและ ดินเหนียวปนทรายแป้ง (Sandy Clay) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ 1.11 และ 1.07 ในการปรับแก้ค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index,C_c) และค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression Index,C_r) ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

1. ในการวิเคราะห์ผลของแรงเสียดทานจากการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Fixed-Ring และการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำประเภท Floating-Ring ควรที่จะวิเคราะห์กำลังรับแรงเฉือนของดินด้วย เนื่องจากกำลังของดินส่งผลกับแรงเสียดทานที่เกิดในระหว่างการทดสอบ

2. ในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำควรหาวิธีทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ 100% เพื่อให้การทดสอบเป็นไปตามสมมุติฐาน

3. ควรแยกการวิเคราะห์การทรุดตัวเนื่องจากการเคลื่อนที่ของดินออกจากวงแหวนที่ใช้ในการทดสอบและการทรุดตัวเนื่องจากการที่ดินตัวอย่างไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ เพื่อจะได้ทราบผลกระทบจากสาเหตุของความคลาดเคลื่อนในระหว่างการทดสอบที่มีต่อผลการทดสอบได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กริชฤทธิ์ หยิบเจริญพร. 2544. **สมบัติและพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินเหนียวประดิษฐ์กรุงเทพ.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ชัยรัตน์ ระตีพูน. 2544. **แรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สายชล ชอบประดิถ. 2543. **ดินเหนียวประดิษฐ์เพื่อใช้ในการจำลองดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ.** การประชุมวิทยาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 38. 1-4 กุมภาพันธ์ 2543.

สุขสันต์ หอพิบูลสุข และรุ้งลาวัลย์ ราชัน. 2546. **การจำแนกสถานะและการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพ**. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8. หน้า GTE399-GTE-404.

Akrapongpisai, S. 1970. **Compression of strengths measured by vane shear, unconfined compression and triaxial shear tests in Bankok clay**. M. Eng. Thesis AIT., Bankok.

Bjerrum, L. 1972. Embankment on soft ground. State of art report, Proc. ASCE Spec. Conf. on performance of earth and earth. Supported structure. **Lafayett** 2: 150.

Bjerrum, L. and I. T.H. Rosenqvist. 1956. Some experiments with aetificiallysedimented of clays. **Geotechnique.** 6(3): 124-136

Casagrande, A. 1936**. Determination of preconsolidation load and its practical significance**, Proceedings of 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineer-ing, Cambridge, Mass, 13: 60-64.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Fahmy, Y.M.H. 1993. **The impact of varying the apex angle on static cone penetration measurements in simulated Champlain clays**. M. Eng. Thesis. EcolePolytechnique, Montreal, Canada.

Janbu, N., L. Bjerrum and B. Kjaernnsli. 1956**. Veiledringvedlosningavfundermenteringav soppgever**, Norwegian Geotechnical Institute Publication, No.16, Oslo.

Kezdi, A. 1979. **Stabilizwd Earth Soads.Elsevier Scientific Publishing Company**. Amsterdam-Oxford-New York.

Kulhawy, F.H. and P.W. Mayne. 1990. **Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Desighn, Report** No.EPRI EL-6800, Cornell University.

Nagaraj, T.S. and B.R. Srinivasa Murthy. 1985**. Compressibility of partly saturated soils**, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.111 No.7, pp.937-942.

Nagaraj, T.S. and Srinivasa Murthy, B.R. 1986**. A critical reappraisal of compression index equations**, Geotechnical, Vol.36, No.1, pp.27-32

Narasimha, R., P.S.R., Pandian, N.S. and T.S. Nagaraj. 1995**. Analysis and estimation of the coefficient of consolidation**, Geotechnical Testing Journal, ASTM, Vol.18, No.2, pp.252-258.

_____,_____,_____. 1997**. Anintergrated approach forthe estimation of the coefficient of consolidation**, Geotechnical Engineering Journal, Institute of Civil Engineers, London, Vol.125, pp.224-229.

Tavenas, F.,M. Roy and P. La Rochelle. 1973. **An artificial material for simulating Champlain Clays.** Canadian Geotechnical JournalVol. 10:489-503.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Terzaghi, K. 1925**. Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer**, Deutichke, Vienna.

_____. 1925**. Theoretical Soil Mechanics**, Wiley, New York.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการอัดตัวคายน้ำ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 ข้อมูลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Fixed Ring ตัวอย่างดิน Clay

Time	DIAL READING																			
SQR	Load 5 kg			Load 10 kg			Load 20 kg			Load 40 kg			Unload 20 kg			Reload 40 kg			Load 80 kg		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
0.50	0.13	0.13	0.11	0.21	0.21	0.20	0.37	-	-	0.80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.56	0.13	0.13	0.11	0.21	0.21	0.20	0.37	-	-	0.80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.63	0.13	0.13	0.11	0.21	0.21	0.20	0.37	-	-	0.80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.70	0.13	0.13	0.11	0.21	0.21	0.20	0.38	-	-	0.80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.79	0.13	0.13	0.11	0.21	0.21	0.20	0.38	-	-	0.81	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.89	0.13	0.13	0.11	0.21	0.21	0.20	0.38	-	-	0.81	-	-	-	-	1.29	-	-	-	-	-	-
1.00	0.14	0.13	0.12	0.21	0.21	0.20	0.38	-	-	0.81	0.56	-	1.61	1.22	1.29	1.35	-	1.03	-	-	-
1.12	0.14	0.14	0.12	0.21	0.21	0.20	0.39	-	-	0.82	0.56	-	1.61	1.22	1.28	1.37	-	1.03	-	1.18	-
1.25	0.14	0.14	0.12	0.22	0.21	0.20	0.39	-	-	0.82	0.58	0.54	1.60	1.22	1.28	1.37	-	1.04	-	1.19	1.44
1.41	0.14	0.14	0.12	0.22	0.21	0.20	0.39	0.30	0.29	0.82	0.58	0.54	1.60	1.21	1.28	1.38	0.94	1.04	1.72	1.20	1.46
1.58	0.14	0.14	0.12	0.22	0.21	0.20	0.40	0.30	0.30	0.83	0.59	0.55	1.60	1.21	1.28	1.38	0.95	1.05	1.75	1.22	1.47
1.78	0.14	0.14	0.13	0.22	0.21	0.21	0.41	0.30	0.30	0.84	0.60	0.56	1.59	1.21	1.27	1.39	0.95	1.05	1.76	1.23	1.49
2.00	0.14	0.15	0.13	0.22	0.21	0.21	0.41	0.31	0.31	0.85	0.61	0.58	1.59	1.21	1.27	1.39	0.95	1.06	1.85	1.25	1.51

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	DIAL READING																				
SQR	Load 5 kg			Load 10 kg			Load 20 kg			Load 40 kg			Unload 20 kg			Reload 40 kg			Load 80 kg		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
2.24	0.15	0.15	0.13	0.23	0.22	0.21	0.42	0.31	0.31	0.86	0.62	0.57	1.59	1.20	1.27	1.39	0.96	1.06	1.83	1.26	1.53
2.52	0.15	0.15	0.13	0.23	0.22	0.21	0.42	0.32	0.32	0.87	0.63	0.59	1.58	1.20	1.26	1.40	0.96	1.07	1.87	1.28	1.54
2.82	0.15	0.16	0.14	0.23	0.22	0.21	0.43	0.33	0.33	0.88	0.64	0.60	1.58	1.19	1.26	1.40	0.97	1.07	1.90	1.30	1.57
3.07	0.16	0.16	0.14	0.23	0.22	0.21	0.43	0.33	0.33	0.89	0.65	0.60	1.57	1.19	1.26	1.41	0.97	1.08	1.92	1.32	1.58
3.45	0.16	0.16	0.14	0.24	0.22	0.22	0.43	0.34	0.34	0.90	0.66	0.61	1.57	1.18	1.25	1.41	0.98	1.08	1.95	1.34	1.61
3.87	0.16	0.17	0.15	0.24	0.22	0.22	0.44	0.34	0.34	0.92	0.67	0.63	1.56	1.18	1.24	1.42	0.98	1.09	1.99	1.37	1.64
4.34	0.16	0.17	0.15	0.25	0.23	0.22	0.46	0.35	0.34	0.94	0.68	0.65	1.56	1.18	1.24	1.42	0.99	1.09	2.03	1.40	1.67
4.88	0.17	0.17	0.15	0.25	0.23	0.23	0.46	0.36	0.35	0.96	0.70	0.66	1.56	1.17	1.23	1.43	1.00	1.10	2.07	1.43	1.70
5.47	0.17	0.18	0.16	0.26	0.24	0.23	0.48	0.37	0.36	0.98	0.71	0.68	1.55	1.16	1.22	1.44	1.00	1.11	2.11	1.47	1.74
6.14	0.17	0.19	0.17	0.26	0.24	0.24	0.49	0.38	0.37	1.00	0.73	0.70	1.54	1.16	1.21	1.45	1.01	1.12	2.16	1.51	1.79
6.90	0.18	0.19	0.17	0.27	0.24	0.24	0.51	0.38	0.38	1.03	0.75	0.72	1.54	1.15	1.20	1.46	1.02	1.13	2.21	1.55	1.84

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	DIAL READING																				
SQR	Load 5 kg			Load 10 kg			Load 20 kg			Load 40 kg			Unload 20 kg			Reload 40 kg			Load 80 kg		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
7.74	0.18	0.20	0.18	0.28	0.25	0.25	0.52	0.40	0.39	1.07	0.77	0.75	1.53	1.14	1.19	1.47	1.03	1.14	2.28	1.61	1.89
8.71	0.18	0.20	0.18	0.29	0.25	0.25	0.54	0.41	0.40	1.10	0.80	0.77	1.52	1.12	1.18	1.48	1.04	1.15	2.35	1.67	1.95
9.74	0.19	0.20	0.18	0.30	0.26	0.21	0.56	0.42	0.41	1.15	0.82	0.80	1.50	1.11	1.17	1.49	1.05	1.17	2.43	1.74	2.02
10.9	0.19	0.20	0.19	0.31	0.26	0.26	0.58	0.43	0.42	1.19	0.85	0.83	1.49	1.09	1.16	1.51	1.06	1.19	2.52	1.81	2.09
12.2	0.20	0.20	0.19	0.32	0.27	0.27	0.60	0.45	0.43	1.26	0.88	0.88	1.47	1.08	1.14	1.53	1.07	1.20	2.62	1.89	2.17
13.7	0.20	0.20	0.19	0.33	0.28	0.27	0.63	0.46	0.45	1.31	0.91	0.93	1.45	1.06	1.13	1.55	1.08	1.23	2.72	1.99	2.26
15.4	0.20	0.20	0.19	0.34	0.28	0.28	0.66	0.49	0.4	1.36	0.95	0.98	1.43	1.04	1.10	1.57	1.10	1.25	2.83	2.09	2.37
17.3	0.20	0.20	0.19	0.35	0.29	0.28	0.70	0.49	0.48	1.44	0.99	1.05	1.40	1.03	1.09	1.59	1.11	1.28	2.96	2.20	2.48
19.5	0.20	-	0.19	0.36	0.29	0.29	0.74	0.51	0.50	1.51	1.09	1.10	1.38	1.00	1.06	1.62	1.13	1.31	3.08	2.32	2.59
21.9	0.20	-	0.19	0.36	0.29	0.29	0.77	0.52	0.51	1.55	1.07	1.15	1.36	0.98	1.05	1.64	1.14	1.34	3.21	2.44	2.72
24.5	0.21	-	0.19	0.36	0.30	0.29	0.78	0.56	0.54	1.58	1.10	1.19	1.35	0.96	1.04	1.67	1.15	1.37	3.33	2.56	2.84
27.6	0.21	-	-	0.37	0.30	-	0.78	0.54	0.53	1.60	1.14	1.22	1.35	0.95	1.04	1.67	1.16	1.39	3.44	2.67	2.94
30.9	0.21	-	-	-	0.30	-	0.79	0.56	0.53	1.61	1.18	1.26	1.35	0.94	1.03	1.69	1.17	1.41	3.54	2.78	3.05
32.8	0.21	-	-	-	0.30	-	0.79	0.56	0.53	1.61	1.19	1.27	1.35	0.94	1.03	1.70	1.17	1.42	3.59	2.82	3.10

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก2 ข้อมูลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Fixed Ring ตัวอย่างดิน Silty Clay

Time	DIAL READING																				
SQR	Load 5 kg			Load 10 kg			Load 20 kg			Load 40 kg			Unload 20 kg			Reload 40 kg			Load 80 kg		
	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3
1.26	-	-	-	-	0.29	0.11	0.31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.41	0.00	0.01	0.00	0.13	0.30	0.12	0.31	0.48	0.33	0.73	0.88	0.86	2.07	2.04	2.33	1.86	1.83	2.11	2.12	2.09	2.38
1.59	0.01	0.02	0.01	0.13	0.30	0.12	0.31	0.48	0.33	0.75	0.89	0.88	2.07	2.04	2.33	1.86	1.83	2.11	2.14	2.10	2.40
1.78	0.01	0.03	0.01	0.14	0.31	0.12	0.32	0.48	0.34	0.77	0.91	0.90	2.06	2.04	2.32	1.86	1.83	2.11	2.17	2.12	2.42
2.00	0.02	0.04	0.01	0.14	0.31	0.12	0.32	0.48	0.36	0.78	0.94	0.92	2.06	2.04	2.32	1.86	1.83	2.11	2.20	2.15	2.44
2.24	0.02	0.05	0.02	0.14	0.31	0.12	0.33	0.49	0.36	0.80	0.95	0.93	2.06	2.04	2.31	1.87	1.83	2.12	2.24	2.17	2.47
2.52	0.03	0.06	0.02	0.14	0.31	0.13	0.33	0.49	0.37	0.82	0.97	0.95	2.06	2.03	2.31	1.87	1.84	2.12	2.27	2.20	2.50
2.83	0.03	0.07	0.03	0.15	0.32	0.14	0.34	0.50	0.39	0.84	0.99	0.98	2.05	2.03	2.31	1.87	1.84	2.12	2.32	2.23	2.54
3.07	0.03	0.08	0.03	0.15	0.32	0.14	0.35	0.50	0.39	0.86	1.00	1.00	2.05	2.03	2.31	1.88	1.84	2.13	2.35	2.26	2.56
3.45	0.04	0.10	0.04	0.16	0.33	0.15	0.35	0.51	0.41	0.88	1.03	1.02	2.05	2.02	2.30	1.88	1.85	2.13	2.39	2.30	2.60
3.87	0.05	0.12	0.04	0.16	0.33	0.16	0.36	0.53	0.42	0.90	1.05	1.05	2.04	2.02	2.30	1.89	1.85	2.14	2.48	2.35	2.66
4.35	0.06	0.13	0.05	0.17	0.34	0.16	0.38	0.54	0.43	0.92	1.07	1.09	2.04	2.02	2.29	1.89	1.86	2.14	2.47	2.41	2.71
4.88	0.06	0.16	0.05	0.18	0.35	0.17	0.39	0.56	0.44	0.96	1.10	1.12	2.03	2.01	2.29	1.90	1.87	2.15	2.53	2.47	2.77
5.48	0.07	0.18	0.06	0.18	0.35	0.18	0.40	0.57	0.46	0.99	1.13	1.16	2.04	2.01	2.28	1.91	1.87	2.16	2.58	2.54	2.85

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

Time	DIAL READING																				
SQR	Load 5 kg			Load 10 kg			Load 20 kg			Load 40 kg			Unload 20 kg			Reload 40 kg			Load 80 kg		
	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3
6.15	0.08	0.21	0.07	0.19	0.36	0.19	0.42	0.58	0.48	1.04	1.16	1.21	2.02	2.00	2.27	1.91	1.88	2.17	2.68	2.63	2.93
6.90	0.10	0.22	0.07	0.20	0.37	0.20	0.43	0.59	0.50	1.09	1.20	1.26	2.01	1.99	2.26	1.92	1.88	2.17	2.75	2.69	3.01
7.75	0.11	0.24	0.08	0.22	0.38	0.22	0.45	0.61	0.52	1.14	1.24	1.32	2.01	1.98	2.25	1.93	1.90	2.19	2.81	2.80	3.08
8.72	0.11	0.24	0.09	0.23	0.40	0.23	0.47	0.64	0.55	1.21	1.30	1.39	1.99	1.98	2.24	1.94	1.91	2.20	2.90	2.87	3.21
9.75	0.12	0.25	0.09	0.24	0.41	0.25	0.49	0.66	0.57	1.29	1.34	1.46	1.98	1.96	2.23	1.95	1.92	2.21	3.00	2.98	3.31
11.0	0.12	0.26	0.10	0.25	0.42	0.26	0.52	0.68	0.60	1.34	1.40	1.55	1.97	1.95	2.22	1.96	1.93	2.22	3.14	3.10	3.44
12.3	0.12	0.27	0.10	0.26	0.43	0.27	0.55	0.71	0.64	1.43	1.47	1.63	1.96	1.94	2.20	1.98	1.95	2.24	3.29	3.23	3.58
13.8	0.12	0.28	0.10	0.27	0.44	0.28	0.57	0.75	0.68	1.53	1.55	1.74	1.94	1.92	2.19	2.00	1.96	2.26	3.45	3.38	3.73
15.5	0.13	0.28	0.10	0.28	0.45	0.29	0.61	0.78	0.71	1.64	1.62	1.83	1.92	1.91	2.18	2.01	1.98	2.28	3.62	3.54	3.92
17.4	0.13	0.28	0.10	0.28	0.45	0.30	0.64	0.81	0.73	1.72	1.72	1.92	1.90	1.89	2.15	2.04	2.00	2.30	3.81	3.69	4.10
19.5	0.13	0.28	0.11	0.29	0.46	0.30	0.66	0.82	0.75	1.80	1.81	2.01	1.88	1.87	2.14	2.06	2.02	2.32	4.02	3.94	4.27
21.9	0.13	0.29	0.11	0.29	0.47	0.31	0.67	0.83	0.78	1.86	1.86	2.09	1.87	1.85	2.12	2.08	2.05	2.34	4.19	4.13	4.41
24.6	0.13	0.29	0.11	0.30	0.47	0.32	0.69	0.85	0.80	1.92	1.92	2.16	1.87	1.84	2.11	2.10	2.06	2.35	4.30	4.39	4.51
27.6	0.13	0.29	0.11	0.30	0.47	0.32	0.70	0.86	0.82	1.97	1.96	2.23	1.86	1.83	2.11	2.10	2.07	2.37	4.38	4.53	4.59

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

Time	DIAL READING																				
SQR	Load 5 kg			Load 10 kg			Load 20 kg			Load 40 kg			Unload 20 kg			Reload 40 kg			Load 80 kg		
	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3
31.0	0.13	0.29	0.11	0.30	0.48	0.32	0.72	0.87	0.84	2.02	2.00	2.27	1.86	1.83	2.11	2.11	2.08	2.37	4.46	4.61	4.66
32.9	0.13	0.29	0.11	0.31	0.48	0.32	0.73	0.87	0.86	2.04	2.02	2.30	1.86	1.83	2.11	2.11	2.08	2.38	4.50	4.65	4.69
35.5	0.13	0.29	0.11	0.31	0.48	0.33	0.73	0.88	0.86	2.07	2.04	2.33	1.86	1.83	2.11	2.12	2.09	2.38	4.54	4.70	4.72
37.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก3 ข้อมูลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Fixed Ring ตัวอย่างดิน Sandy Clay

Time	DIAL READING																				
SQR	Load 5 kg			Load 10 kg			Load 20 kg			Load 40 kg			Unload 20 kg			Reload 40 kg			Load 80 kg		
	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3
0.71	0.04	0.05	-	0.06	0.07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.80	0.04	0.05	-	0.06	0.07	-	-	-	-	0.30	0.31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.89	0.04	0.05	-	0.06	0.07	-	-	-	-	0.32	0.33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.00	0.04	0.05	-	0.06	0.07	-	-	-	-	0.34	0.34	-	1.17	1.14	-	-	-	-	-	-	-
1.13	0.04	0.05	-	0.06	0.07	-	0.12	0.13	-	0.35	0.35	-	1.17	1.14	-	-	-	-	-	-	-
1.26	0.04	0.05	-	0.06	0.08	-	0.12	0.13	-	0.37	0.36	-	1.17	1.14	-	-	-	-	-	-	-
1.41	0.04	0.05	-	0.06	0.08	-	0.12	0.13	-	0.38	0.37	-	1.17	1.14	-	-	-	-	-	-	-
1.59	0.04	0.06	-	0.07	0.08	-	0.13	0.14	-	0.39	0.38	-	1.16	1.13	-	1.04	1.01	-	1.39	-	-
1.78	0.04	0.06	-	0.07	0.08	-	0.13	0.14	-	0.40	0.41	-	1.16	1.13	-	1.05	1.02	-	1.43	-	-
2.00	0.04	0.06	-	0.07	0.08	-	0.13	0.14	-	0.41	0.43	-	1.16	1.13	-	1.05	1.02	-	1.46	1.36	-
2.24	0.05	0.06	-	0.07	0.08	-	0.14	0.15	-	0.43	0.44	-	1.16	1.13	-	1.06	1.03	-	1.49	1.40	-
2.52	0.05	0.06	-	0.07	0.08	-	0.14	0.15	-	0.45	0.44	-	1.16	1.13	-	1.07	1.04	-	1.51	1.44	-
2.83	0.05	0.06	-	0.07	0.08	-	0.15	0.16	-	0.46	0.46	-	1.15	1.13	-	1.07	1.04	-	1.54	1.47	-
3.07	0.05	0.06	-	0.07	0.09	-	0.15	0.16	-	0.47	0.48	-	1.15	1.12	-	1.07	1.04	-	1.58	1.51	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

Time	DIAL READING																				
SQR	Load 5 kg			Load 10 kg			Load 20 kg			Load 40 kg			Unload 20 kg			Reload 40 kg			Load 80 kg		
	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3
3.45	0.05	0.06	-	0.08	0.09	-	0.16	0.17	-	0.49	0.51	-	1.15	1.12	-	1.08	1.05	-	1.62	1.54	-
3.87	0.05	0.06	-	0.08	0.09	-	0.16	0.17	-	0.51	0.52	-	1.15	1.12	-	1.09	1.06	-	1.66	1.58	-
4.35	0.05	0.06	-	0.08	0.09	-	0.18	0.18	-	0.54	0.53	-	1.14	1.11	-	1.09	1.07	-	1.70	1.63	-
4.88	0.05	0.06	-	0.08	0.10	-	0.18	0.19	-	0.54	0.56	-	1.14	1.11	-	1.11	1.08	-	1.75	1.67	-
5.48	0.05	0.06	-	0.09	0.10	-	0.19	0.20	-	0.56	0.59	-	1.14	1.11	-	1.12	1.09	-	1.80	1.72	-
6.15	0.05	0.06	-	0.09	0.10	-	0.20	0.21	-	0.59	0.63	-	1.13	1.10	-	1.13	1.10	-	1.86	1.77	-
6.90	0.05	0.06	-	0.10	0.11	-	0.21	0.22	-	0.62	0.66	-	1.13	1.10	-	1.14	1.11	-	1.94	1.84	-
7.75	0.05	0.06	-	0.10	0.11	-	0.23	0.23	-	0.66	0.70	-	1.12	1.09	-	1.16	1.13	-	2.01	1.88	-
8.72	0.05	0.07	-	0.10	0.12	-	0.24	0.25	-	0.69	0.72	-	1.11	1.09	-	1.17	1.14	-	2.11	1.98	-
9.75	0.06	0.07	-	0.11	0.12	-	0.25	0.26	-	0.73	0.78	-	1.11	1.08	-	1.19	1.16	-	2.20	2.06	-
11.0	0.06	0.07	-	0.11	0.12	-	0.26	0.27	-	0.75	0.82	-	1.11	1.08	-	1.21	1.18	-	2.31	2.15	-
12.3	0.06	0.07	-	0.11	0.12	-	0.27	0.28	-	0.81	0.88	-	1.10	1.07	-	1.23	1.20	-	2.42	2.25	-
13.8	0.06	0.07	-	0.11	0.12	-	0.28	0.29	-	0.85	0.94	-	1.10	1.07	-	1.26	1.23	-	2.54	2.38	-
15.5	0.06	0.07	-	0.11	0.13	-	0.28	0.29	-	0.91	0.99	-	1.09	1.06	-	1.29	1.26	-	2.67	2.52	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

Time	DIAL READING																				
SQR	Load 5 kg			Load 10 kg			Load 20 kg			Load 40 kg			Unload 20 kg			Reload 40 kg			Load 80 kg		
	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3
17.4	0.06	0.07	-	0.11	0.13	-	0.29	0.30	-	0.97	1.03	-	1.08	1.06	-	1.32	1.29	-	2.80	2.65	-
19.5	0.06	0.07	-	0.12	0.13	-	0.29	0.30	-	1.01	1.06	-	1.08	1.05	-	1.35	1.32	-	2.91	2.77	-
21.9	0.06	0.07	-	-	-	-	0.30	0.31	-	1.06	1.08	-	1.07	1.04	-	1.36	1.34	-	3.02	2.90	-
24.6	0.06	-	-	-	-	-	0.30	0.31	-	1.09	1.10	-	1.06	1.03	-	1.38	1.35	-	3.13	3.00	-
27.6	0.06	-	-	-	-	-	0.30	0.31	-	1.11	1.11	-	1.06	1.03	-	1.38	1.35	-	3.17	3.08	-
31.0	0.06	-	-	-	-	-	0.30	0.31	-	1.13	1.12	-	1.05	1.02	-	1.39	1.36	-	3.23	3.14	-
32.9	-	-	-	-	-	-	0.30	0.31	-	1.14	1.14	-	1.05	1.02	-	1.39	1.36	-	3.23	3.20	-
35.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.15	1.14	-	1.04	1.01	-	-	-	-	-	3.25	-
37.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.30	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก4 ข้อมูลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Floating Ring ตัวอย่างดิน Clay

Time	DIAL READING																				
SQR	Load 5 kg			Load 10 kg			Load 20 kg			Load 40 kg			Unload 20 kg			Reload 40 kg			Load 80 kg		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
1.13	-	-	-	0.01	-	0.33	-	0.25	1.45	-	-	2.46	-	-	3.66	-	-	3.54	-	-	4.59
1.26	0.00	0.00	-	0.13	-	0.35	-	0.25	1.47	-	-	2.48	-	-	3.65	-	-	3.55	-	-	4.60
1.41	0.01	0.00	0.00	0.14	0.04	0.37	0.33	0.26	1.50	-	-	2.51	-	-	3.65	-	-	3.55	-	-	4.62
1.59	0.01	0.00	0.01	0.14	0.05	0.39	0.34	0.26	1.52	-	-	2.53	-	-	3.65	-	-	3.56	-	-	4.64
1.78	0.01	0.01	0.01	0.14	0.05	0.40	0.34	0.27	1.53	0.95	-	2.56	-	-	3.64	1.87	-	3.56	-	-	4.65
2.00	0.02	0.01	0.01	0.15	0.06	0.42	0.35	0.27	1.55	0.96	0.67	2.59	2.15	1.59	3.64	1.88	1.41	3.57	2.25	-	4.67
2.24	0.02	0.01	0.02	0.15	0.06	0.44	0.36	0.28	1.56	0.98	0.69	2.61	2.15	1.59	3.63	1.88	1.42	3.57	2.29	1.59	4.67
2.52	0.03	0.01	0.02	0.16	0.07	0.46	0.37	0.29	1.58	1.00	0.72	2.64	2.14	1.59	3.62	1.89	1.42	3.57	2.31	1.61	4.71
2.83	0.03	0.01	0.02	0.16	0.07	0.49	0.38	0.30	1.60	1.01	0.73	2.67	2.13	1.58	3.62	1.90	1.42	3.58	2.34	1.63	4.73
3.07	0.03	0.01	0.03	0.16	0.08	0.51	0.39	0.30	1.60	1.03	0.75	2.69	2.13	1.58	3.61	1.90	1.42	3.58	2.36	1.64	4.75
3.45	0.04	0.02	0.03	0.17	0.08	0.53	0.41	0.31	1.61	1.05	0.76	2.72	2.13	1.58	3.61	1.91	1.43	3.59	2.39	1.67	4.77
3.87	0.05	0.02	0.04	0.17	0.09	0.56	0.42	0.32	1.62	1.07	0.78	2.75	2.12	1.57	3.60	1.91	1.43	3.59	2.43	1.69	4.80
4.35	0.05	0.02	0.05	0.18	0.10	0.60	0.44	0.33	1.64	1.10	0.80	2.77	2.11	1.57	3.51	1.92	1.43	3.60	2.47	1.72	4.83
4.88	0.06	0.02	0.05	0.19	0.11	0.63	0.46	0.34	1.66	1.13	0.82	2.80	2.11	1.56	3.58	1.93	1.44	3.60	2.51	1.76	4.87

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

Time	DIAL READING																				
SQR	Load 5 kg			Load 10 kg			Load 20 kg			Load 40 kg			Unload 20 kg			Reload 40 kg			Load 80 kg		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
5.48	0.06	0.03	0.06	0.20	0.12	0.67	0.48	0.36	1.67	1.17	0.85	2.84	2.10	1.56	3.57	1.94	1.44	3.61	2.55	1.79	4.91
6.15	0.07	0.03	0.07	0.20	0.14	0.72	0.50	0.38	1.69	1.20	0.88	2.88	2.09	1.55	3.56	1.95	1.45	3.62	2.60	1.84	4.95
6.90	0.08	0.03	0.08	0.21	0.15	0.78	0.53	0.39	1.71	1.24	0.92	2.92	2.08	1.55	3.55	1.97	1.45	3.62	2.65	1.88	5.00
7.75	0.09	0.03	0.08	0.23	0.17	0.83	0.56	0.41	1.73	1.29	0.95	2.97	2.07	1.54	3.54	1.98	1.46	3.63	2.72	1.94	5.05
8.72	0.09	0.04	0.09	0.24	0.19	0.91	0.59	0.43	1.75	1.34	1.00	3.03	2.06	1.54	3.53	1.99	1.47	3.64	2.79	2.00	5.12
9.75	0.10	0.04	0.10	0.25	0.20	0.97	0.62	0.46	1.77	1.41	1.05	3.07	2.05	1.53	3.52	2.01	1.47	3.65	2.87	2.06	5.18
11.0	0.10	0.04	0.10	0.26	0.21	1.04	0.66	0.49	1.80	1.46	1.11	3.14	2.03	1.52	3.50	2.03	1.48	3.66	2.96	2.14	5.26
12.3	0.11	0.04	0.11	0.27	0.22	1.07	0.70	0.51	1.84	1.53	1.17	3.21	2.02	1.51	3.49	2.05	1.49	3.67	3.06	2.22	5.34
13.8	0.11	0.04	0.11	0.28	0.22	1.11	0.75	0.54	1.87	1.60	1.24	3.29	2.00	1.49	3.47	2.08	1.50	3.69	3.16	2.31	5.43
15.5	0.12	0.04	0.12	0.29	0.23	1.11	0.80	0.58	1.91	1.68	1.30	3.33	1.98	1.48	3.46	2.11	1.52	3.70	3.27	2.41	5.53
17.4	0.12	0.04	0.13	0.30	0.23	1.12	0.84	0.61	1.92	1.77	1.38	3.37	1.96	1.46	3.45	2.14	1.53	3.72	3.40	2.53	5.64
19.5	0.13	0.04	0.13	0.30	0.23	1.13	0.87	0.63	1.92	1.86	1.45	3.40	1.93	1.45	3.44	2.17	1.54	3.73	3.52	2.64	5.76
21.9	0.13	0.04	0.13	0.31	0.24	1.13	0.90	0.64	1.92	1.92	1.51	3.43	1.91	1.43	3.43	2.20	1.56	3.75	3.65	2.75	5.88
24.6	0.13	-	-	0.31	0.24	1.13	0.92	0.65	-	1.98	1.55	3.45	1.90	1.43	3.43	2.22	1.57	3.76	3.77	2.88	6.00

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

Time	DIAL READING																				
SQR	Load 5 kg			Load 10 kg			Load 20 kg			Load 40 kg			Unload 20 kg			Reload 40 kg			Load 80 kg		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
27.6	0.13	-	-	0.31	0.24	1.13	0.93	0.65	-	2.03	1.56	3.46	1.88	1.42	3.42	2.23	1.58	3.76	3.88	3.00	6.11
31.0	0.13	-	-	0.32	0.25	-	0.94	0.66	-	2.09	1.58	3.48	1.88	1.41	3.41	2.23	1.59	3.76	3.98	3.10	6.21
32.9	-	-	-	0.32	-	-	0.94	0.66	-	2.12	1.59	3.48	1.88	1.41	3.40	2.24	1.59	3.76	4.03	3.15	6.26
35.5	-	-	-	0.32	-	-	0.94	0.67	-	2.15	-	3.49	1.87	-	3.39	2.22	1.59	3.76	4.08	3.21	6.31
37.9	-	-	-	-	-	-	0.94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก5 ข้อมูลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Floating Ring ตัวอย่างดิน Silty Clay

Time	DIAL READING																				
SQR	Load 5 kg			Load 10 kg			Load 20 kg			Load 40 kg			Unload 20 kg			Reload 40 kg			Load 80 kg		
	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3
0.71	0.00	-	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.78
0.80	0.00	-	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.80
0.89	0.00	0.00	0.06	-	0.12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.97	-	-	-	2.82
1.00	0.01	0.00	0.06	-	0.13	0.19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.97	-	-	-	2.84
1.13	0.01	0.01	0.06	-	0.13	0.19	-	0.37	-	-	-	-	-	-	-	-	2.98	-	-	-	2.87
1.26	0.01	0.01	0.06	-	0.13	0.19	-	0.39	-	-	-	-	-	-	-	-	2.98	-	-	-	2.89
1.41	0.01	0.01	0.07	0.10	0.13	0.19	0.23	0.40	0.37	0.75	1.67	1.03	2.48	3.19	2.70	2.24	2.98	2.47	2.54	3.22	2.91
1.59	0.01	0.01	0.07	0.10	0.14	0.20	0.24	0.41	0.38	0.79	1.68	1.05	2.48	3.19	2.69	2.25	2.98	2.48	2.58	3.26	2.94
1.78	0.02	0.02	0.07	0.11	0.14	0.20	0.25	0.42	0.38	0.81	1.70	1.09	2.48	3.19	2.69	2.25	2.99	2.48	2.62	3.29	2.95
2.00	0.02	0.02	0.08	0.11	0.15	0.20	0.25	0.43	0.38	0.82	1.72	1.11	2.47	3.18	2.69	2.25	2.99	2.48	2.64	3.31	2.98
2.24	0.02	0.03	0.08	0.11	0.15	0.20	0.26	0.46	0.39	0.84	1.73	1.12	2.47	3.18	2.69	2.26	2.99	2.48	2.68	3.36	3.03
2.52	0.02	0.03	0.09	0.11	0.16	0.21	0.27	0.48	0.41	0.85	1.75	1.14	2.47	3.18	2.68	2.26	2.99	2.49	2.71	3.39	3.08
2.83	0.03	0.03	0.09	0.12	0.16	0.21	0.28	0.50	0.43	0.89	1.78	1.16	2.47	3.18	2.68	2.27	3.00	2.49	2.74	3.42	3.12
3.07	0.03	0.04	0.10	0.12	0.17	0.21	0.28	0.51	0.44	0.91	1.80	1.17	2.46	3.17	2.68	2.27	3.00	2.49	2.79	3.44	3.17

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก5 (ต่อ)

Time	DIAL READING																				
SQR	Load 5 kg			Load 10 kg			Load 20 kg			Load 40 kg			Unload 20 kg			Reload 40 kg			Load 80 kg		
	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3
3.45	0.04	0.04	0.10	0.12	0.17	0.22	0.30	0.56	0.45	0.94	1.84	1.21	2.46	3.17	2.67	2.27	3.00	2.50	2.81	3.48	3.22
3.87	0.04	0.05	0.11	0.13	0.18	0.23	0.31	0.58	0.47	1.00	1.87	1.24	2.45	3.16	2.67	2.28	3.01	2.50	2.88	3.56	3.30
4.35	0.05	0.06	0.12	0.13	0.19	0.23	0.32	0.61	0.48	1.03	1.91	1.28	2.45	3.16	2.67	2.29	3.01	2.51	2.93	3.61	3.36
4.88	0.06	0.07	0.12	0.13	0.20	0.24	0.33	0.66	0.50	1.09	1.93	1.33	2.44	3.16	2.66	2.30	3.02	2.51	3.01	3.65	3.44
5.48	0.06	0.07	0.13	0.14	0.22	0.24	0.34	0.71	0.52	1.14	1.98	1.38	2.44	3.15	2.65	2.30	3.03	2.52	3.11	3.71	3.51
6.15	0.07	0.08	0.14	0.15	0.23	0.26	0.36	0.77	0.55	1.20	2.05	1.45	2.43	3.14	2.64	2.31	3.04	2.53	3.19	3.78	3.59
6.90	0.07	0.08	0.14	0.15	0.24	0.27	0.38	0.81	0.56	1.27	2.09	1.51	2.42	3.13	2.64	2.32	3.05	2.54	3.26	3.85	3.69
7.75	0.08	0.09	0.15	0.16	0.25	0.28	0.40	0.86	0.60	1.33	2.14	1.58	2.41	3.13	2.63	2.33	3.05	2.55	3.38	3.92	3.81
8.72	0.08	0.09	0.16	0.17	0.27	0.29	0.43	0.94	0.62	1.43	2.22	1.66	2.40	3.12	2.62	2.35	3.06	2.56	3.48	4.03	3.93
9.75	0.09	0.10	0.16	0.18	0.29	0.30	0.46	1.02	0.67	1.52	2.30	1.75	2.39	3.11	2.61	2.36	3.07	2.58	3.60	4.14	4.06
11.0	0.09	0.10	0.17	0.19	0.30	0.31	0.48	1.12	0.71	1.62	2.36	1.84	2.38	3.10	2.60	2.37	3.09	2.59	3.75	4.26	4.20
12.3	0.09	0.11	0.17	0.19	0.31	0.32	0.52	1.21	0.75	1.70	2.48	1.96	2.36	3.08	2.58	2.39	3.10	2.61	3.89	4.37	4.41
13.8	0.10	0.11	0.17	0.20	0.32	0.33	0.56	1.31	0.80	1.85	2.58	2.10	2.34	3.07	2.57	2.41	3.12	2.62	4.03	4.51	4.56
15.5	0.10	0.11	0.18	0.20	0.33	0.33	0.60	1.43	0.86	1.98	2.70	2.22	2.33	3.05	2.55	2.43	3.14	2.64	4.27	4.69	4.81

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก5 (ต่อ)

Time	DIAL READING																				
SQR	Load 5 kg			Load 10 kg			Load 20 kg			Load 40 kg			Unload 20 kg			Reload 40 kg			Load 80 kg		
	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3
17.4	0.10	0.12	0.18	0.21	0.34	0.34	0.63	1.51	0.89	2.10	2.83	2.33	2.30	3.03	2.54	2.45	3.15	2.67	4.47	4.86	5.00
19.5	0.10	0.12	0.18	0.21	0.35	0.34	0.65	1.57	0.92	2.18	2.95	2.45	2.28	3.01	2.53	2.48	3.18	2.69	4.72	5.04	5.19
21.9	0.10	0.12	0.18	0.22	0.36	0.35	0.67	1.60	0.94	2.25	3.03	2.54	2.26	2.99	2.52	2.49	3.20	2.71	4.88	5.32	5.35
24.6	0.10	0.12	0.18	0.22	0.36	0.36	0.69	1.62	0.96	2.31	3.10	2.59	2.26	2.99	2.50	2.50	3.21	2.72	4.98	5.56	5.49
27.6	0.10	0.12	0.18	0.22	0.37	0.36	0.71	1.63	0.98	2.37	3.13	2.63	2.25	2.98	2.50	2.52	3.22	2.73	5.08	5.70	5.53
31.0	0.10	0.12	0.19	0.23	0.37	0.37	0.73	1.65	1.00	2.42	3.16	2.66	2.25	2.98	2.49	2.53	3.22	2.73	5.17	5.81	5.58
32.9	0.10	-	-	0.23	-	0.37	0.73	1.66	1.01	2.44	3.17	2.68	2.24	2.98	2.48	2.53	3.22	2.74	5.21	5.86	5.60
35.5	-	-	-	0.23	-	-	0.75	1.67	1.02	2.46	3.19	2.70	2.24	2.97	2.48	2.54	-	2.74	5.23	5.90	5.61
37.9	-	-	-		-	-	-	-	1.03	2.48	-	-	-	2.97	2.47	-	-	-	5.24	5.92	5.62

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก6 ข้อมูลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Floating Ring ตัวอย่างดิน Sandy Clay

Time	DIAL READING																				
SQR	Load 5 kg			Load 10 kg			Load 20 kg			Load 40 kg			Unload 20 kg			Reload 40 kg			Load 80 kg		
	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3
0.56	0.06	0.11	-	0.19	0.31	-	0.44	0.66	-	1.49	3.54	-	3.20	5.54	-	2.99	5.36	-	3.76	6.45	-
0.63	0.07	0.12	-	0.19	0.32	-	0.45	0.67	-	1.50	3.56	-	3.20	5.53	-	2.99	5.37	-	3.79	6.47	-
0.71	0.07	0.12	-	0.19	0.32	-	0.45	0.68	-	1.51	3.58	-	3.20	5.53	-	3.00	5.37	-	3.82	6.49	-
0.80	0.07	0.12	-	0.20	0.32	-	0.45	0.69	-	1.51	3.61	-	3.20	5.53	-	3.00	5.37	-	3.85	6.51	-
0.89	0.07	0.12	-	0.20	0.33	-	0.46	0.70	-	1.52	3.63	-	3.20	5.53	-	3.01	5.38	-	3.88	6.53	-
1.00	0.07	0.12	-	0.20	0.33	-	0.46	0.71	-	1.53	3.65	-	3.19	5.52	-	3.01	5.38	-	3.91	6.55	-
1.13	0.07	0.12	-	0.20	0.33	-	0.47	0.73	-	1.54	3.68	-	3.19	5.52	-	3.01	5.38	-	3.94	6.57	-
1.26	0.07	0.13	-	0.20	0.33	-	0.47	0.75	-	1.56	3.70	-	3.19	5.52	-	3.02	5.38	-	3.97	6.59	-
1.41	0.07	0.13	-	0.20	0.33	-	0.48	0.76	-	1.58	3.72	-	3.18	5.52	-	3.02	5.39	-	4.00	6.61	-
1.59	0.08	0.13	-	0.21	0.33	-	0.48	0.77	-	1.61	3.75	-	3.18	5.52	-	3.02	5.39	-	4.03	6.63	-
1.78	0.08	0.13	-	0.21	0.34	-	0.49	0.78	-	1.66	3.77	-	3.17	5.52	-	3.03	5.39	-	4.06	6.65	-
2.00	0.08	0.13	-	0.21	0.34	-	0.49	0.79	-	1.70	3.79	-	3.17	5.51	-	3.03	5.39	-	4.09	6.67	-
2.24	0.08	0.14	-	0.21	0.34	-	0.50	0.79	-	1.75	3.81	-	3.16	5.51	-	3.04	5.39	-	4.12	6.69	-
2.52	0.08	0.14	-	0.21	0.34	-	0.51	0.82	-	1.77	3.84	-	3.16	5.51	-	3.04	5.40	-	4.15	6.71	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก6 (ต่อ)

Time	DIAL READING																				
SQR	Load 5 kg			Load 10 kg			Load 20 kg			Load 40 kg			Unload 20 kg			Reload 40 kg			Load 80 kg		
	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3
2.83	0.09	0.15	-	0.22	0.35	-	0.52	0.83	-	1.80	3.85	-	3.15	5.50	-	3.04	5.40	-	4.18	6.73	-
3.07	0.09	0.15	-	0.22	0.35	-	0.53	0.84	-	1.82	3.88	-	3.14	5.50	-	3.05	5.40	-	4.21	6.75	-
3.45	0.09	0.15	-	0.22	0.35	-	0.53	0.87	-	1.86	3.92	-	3.13	5.50	-	3.05	5.40	-	4.26	6.77	-
3.87	0.10	0.16	-	0.23	0.36	-	0.54	0.90	-	1.89	3.95	-	3.12	5.50	-	3.06	5.41	-	4.31	6.84	-
4.35	0.10	0.16	-	0.23	0.37	-	0.55	0.91	-	1.94	3.99	-	3.11	5.49	-	3.06	5.42	-	4.36	6.88	-
4.88	0.10	0.17	-	0.23	0.37	-	0.57	0.94	-	1.97	4.06	-	3.11	5.49	-	3.07	5.42	-	4.41	6.95	-
5.48	0.11	0.18	-	0.24	0.38	-	0.58	0.98	-	2.00	4.10	-	3.10	5.48	-	3.08	5.43	-	4.48	7.00	-
6.15	0.12	0.19	-	0.24	0.39	-	0.59	1.01	-	1.75	4.17	-	3.09	5.47	-	3.09	5.44	-	4.53	7.07	-
6.90	0.12	0.19	-	0.25	0.39	-	0.61	1.05	-	2.09	4.25	-	3.08	5.46	-	3.10	5.45	-	4.62	7.13	-
7.75	0.13	0.20	-	0.26	0.40	-	0.62	1.09	-	2.13	4.34	-	3.07	5.46	-	3.11	5.46	-	4.68	7.22	-
8.72	0.13	0.20	-	0.27	0.41	-	0.65	1.15	-	2.22	4.44	-	3.07	5.45	-	3.12	5.48	-	4.79	7.33	-
9.75	0.13	0.21	-	0.27	0.42	-	0.67	1.20	-	2.28	4.53	-	3.05	5.43	-	3.14	5.49	-	4.91	7.44	-
11.0	0.14	0.21	-	0.28	0.43	-	0.70	1.27	-	2.37	4.64	-	3.04	5.42	-	3.15	5.50	-	5.04	7.57	-
12.3	0.14	0.21	-	0.29	0.44	-	0.73	1.33	-	2.47	4.76	-	3.03	5.41	-	3.18	5.52	-	5.17	7.74	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก6 (ต่อ)

Time	DIAL READING																				
SQR	Load 5 kg			Load 10 kg			Load 20 kg			Load 40 kg			Unload 20 kg			Reload 40 kg			Load 80 kg		
	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3
13.8	0.14	0.22	-	0.30	0.44	-	0.76	1.41	-	2.58	4.89	-	3.01	5.40	-	3.19	5.53	-	5.32	7.86	-
15.5	0.14	0.22	-	0.30	0.45	-	0.79	1.50	-	2.69	5.02	-	2.99	5.38	-	3.22	5.55	-	5.50	8.03	-
17.4	0.14	0.22	-	0.31	0.46	-	0.83	1.56	-	2.82	5.22	-	2.97	5.35	-	3.24	5.57	-	5.70	8.18	-
19.5	0.14	0.23	-	0.31	0.46	-	0.86	1.60	-	2.96	5.36	-	2.95	5.34	-	3.27	5.60	-	5.91	8.41	-
21.9	0.14	0.23	-	0.31	0.47	-	0.90	1.62	-	3.08	5.43	-	2.93	5.32	-	3.30	5.62	-	6.11	8.59	-
24.6	-	0.23	-	0.32	0.47	-	0.92	1.65	-	3.14	5.47	-	2.92	5.31	-	3.32	5.63	-	6.28	8.65	-
27.6	-	0.23	-	0.32	0.48	-	0.93	1.67	-	3.18	5.51	-	2.91	5.30	-	3.34	5.64	-	6.38	8.70	-
31.0	-	-	-	0.32	0.49	-	0.94	1.69	-	3.21	5.54	-	2.91	5.30	-	3.34	5.65	-	6.46	8.75	-
32.9	-	-	-	0.32	0.49	-	0.95	1.71	-	3.23	5.55	-	2.90	5.30	-	3.34	5.66	-	6.50	8.77	-
35.5	-	-	-	0.32	0.49	-	0.95	1.72	-	3.24	5.57	-	2.90	5.30	-	3.35	5.66	-	6.54	8.79	-
37.9	-	-	-	-	-	-	0.95	1.72	-	3.25	-	-	2.90	5.29	-	-	5.66	-	-	-	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก7 ข้อมูลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Triaxial ตัวอย่างดิน Clay

Time	DIAL READING																				
SQR	Load 5 kg			Load 10 kg			Load 20 kg			Load 40 kg			Unload 20 kg			Reload 40 kg			Load 80 kg		
	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3
0.71	0.01	0.01	-	0.07	0.10	-	0.26	0.34	-	0.49	0.62	-	2.04	2.27	-	1.84	2.08	-	2.25	2.49	
0.80	0.01	0.01	-	0.08	0.10	-	0.26	0.34	-	0.50	0.64	-	2.04	2.27	-	1.84	2.08	-	2.25	2.49	
0.89	0.01	0.01	-	0.08	0.10	-	0.26	0.34	-	0.51	0.65	-	2.04	2.27	-	1.85	2.09	-	2.26	2.50	
1.00	0.01	0.01	-	0.08	0.10	-	0.26	0.34	-	0.53	0.66	-	2.04	2.27	-	1.85	2.09	-	2.26	2.50	
1.13	0.01	0.01	-	0.09	0.11	-	0.27	0.35	-	0.53	0.67	-	2.03	2.26	-	1.85	2.09	-	2.27	2.51	
1.26	0.01	0.01	-	0.09	0.11	-	0.27	0.35	-	0.56	0.68	-	2.03	2.26	-	1.85	2.09	-	2.27	2.51	
1.41	0.01	0.02	-	0.09	0.11	-	0.27	0.35	-	0.58	0.68	-	2.03	2.26	-	1.85	2.09	-	2.28	2.52	
1.59	0.02	0.02	-	0.09	0.11	-	0.27	0.35	-	0.59	0.70	-	2.02	2.26	-	1.86	2.10	-	2.29	2.53	
1.78	0.02	0.03	-	0.10	0.11	-	0.27	0.36	-	0.60	0.72	-	2.02	2.25	-	1.86	2.10	-	2.32	2.56	
2.00	0.02	0.03	-	0.10	0.12	-	0.28	0.36	-	0.66	0.74	-	2.02	2.25	-	1.87	2.11	-	2.32	2.56	
2.24	0.02	0.03	-	0.11	0.13	-	0.28	0.36	-	0.67	0.77	-	2.01	2.24	-	1.87	2.11	-	2.35	2.59	
2.24	0.02	0.04	-	0.11	0.13	-	0.28	0.36	-	0.70	0.80	-	2.01	2.24	-	1.88	2.12	-	2.37	2.61	
2.52	0.03	0.04	-	0.12	0.14	-	0.29	0.37	-	0.72	0.83	-	2.01	2.24	-	1.88	2.12	-	2.39	2.63	
2.83	0.03	0.04	-	0.12	0.15	-	0.29	0.38	-	0.74	0.86	-	2.00	2.23	-	1.89	2.13	-	2.42	2.66	

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก7 (ต่อ)

Time	DIAL READING																				
SQR	Load 5 kg			Load 10 kg			Load 20 kg			Load 40 kg			Unload 20 kg			Reload 40 kg			Load 80 kg		
	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3
3.07	0.03	0.05	-	0.13	0.15	-	0.30	0.38	-	0.78	0.90	-	2.00	2.23	-	1.89	2.13	-	2.47	2.71	
3.45	0.04	0.05	-	0.14	0.16	-	0.31	0.39	-	0.83	0.94	-	1.99	2.22	-	1.90	2.14	-	2.49	2.73	
3.87	0.04	0.06	-	0.15	0.18	-	0.31	0.39	-	0.88	0.99	-	1.99	2.22	-	1.92	2.16	-	2.53	2.77	
4.35	0.05	0.07	-	0.16	0.19	-	0.32	0.40	-	0.93	1.05	-	1.98	2.21	-	1.93	2.17	-	2.57	2.81	
4.88	0.05	0.07	-	0.17	0.20	-	0.33	0.41	-	0.99	1.08	-	1.98	2.21	-	1.94	2.18	-	2.62	2.86	
5.48	0.06	0.08	-	0.18	0.22	-	0.34	0.42	-	1.06	1.16	-	1.97	2.20	-	1.95	2.19	-	2.65	2.89	
6.90	0.06	0.08	-	0.19	0.23	-	0.35	0.43	-	1.14	1.25	-	1.96	2.19	-	1.97	2.21	-	2.72	2.96	-
7.75	0.07	0.09	-	0.21	0.25	-	0.36	0.45	-	1.21	1.34	-	1.95	2.18	-	1.98	2.22	-	2.79	3.03	-
8.72	0.07	0.09	-	0.22	0.27	-	0.38	0.46	-	1.31	1.43	-	1.94	2.17	-	2.00	2.24	-	2.85	3.09	-
9.75	0.07	0.09	-	0.24	0.29	-	0.39	0.48	-	1.39	1.54	-	1.93	2.16	-	2.03	2.27	-	2.92	3.16	-
11.0	0.07	0.09	-	0.25	0.31	-	0.41	0.49	-	1.52	1.64	-	1.92	2.14	-	2.04	2.28	-	3.02	3.26	-
12.3	0.07	0.09	-	0.25	0.32	-	0.42	0.51	-	1.65	1.80	-	1.90	2.13	-	2.07	2.31	-	3.12	3.36	-
13.8	0.07	0.09	-	0.25	0.32	-	0.44	0.52	-	1.78	1.90	-	1.89	2.11	-	2.10	2.34	-	3.23	3.47	-
15.5	-	-	-	0.25	0.33	-	0.44	0.52	-	1.89	2.00	-	1.86	2.09	-	2.14	2.38	-	3.37	3.61	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก7 (ต่อ)

Time	DIAL READING																				
SQR	Load 5 kg			Load 10 kg			Load 20 kg			Load 40 kg			Unload 20 kg			Reload 40 kg			Load 80 kg		
	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3
17.4	-	-	-	0.25	0.33	-	0.44	0.53	-	1.97	2.10	-	1.85	2.08	-	2.17	2.41	-	3.48	3.72	-
19.5	-	-	-	0.25	0.33	-	0.45	0.53	-	2.00	2.20	-	1.83	2.07	-	2.19	2.43	-	3.59	3.83	-
21.9	-	-	-	0.25	0.33	-	0.45	0.53	-	2.02	2.25	-	1.82	2.07	-	2.20	2.44	-	3.72	3.96	-
24.6	-	-	-	0.25	0.34	-	0.45	0.53	-	2.04	2.27	-	1.82	2.06	-	2.21	2.45	-	3.82	4.06	-
27.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.22	2.46	-	3.90	4.14	-
31.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.23	2.47	-	3.95	4.19	-
32.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.23	2.47	-	3.98	4.22	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก8 ข้อมูลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Triaxial ตัวอย่างดิน Silty Clay

Time	DIAL READING																				
SQR	Load 5 kg			Load 10 kg			Load 20 kg			Load 40 kg			Unload 20 kg			Reload 40 kg			Load 80 kg		
	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3
0.71	0.04	0.03	-	0.10	0.04	-	0.18	0.16	-	0.85	0.72	-	2.18	2.05	-	1.98	1.86	-	2.44	2.31	-
0.80	0.04	0.03	-	0.10	0.04	-	0.19	0.17	-	0.86	0.73	-	2.18	2.04	-	1.98	1.87	-	2.45	2.32	-
0.89	0.04	0.03	-	0.10	0.04	-	0.19	0.17	-	0.88	0.75	-	2.18	2.05	-	1.99	1.87	-	2.44	2.32	-
1.00	0.04	0.03	-	0.10	0.04	-	0.20	0.18	-	0.88	0.75	-	2.17	2.04	-	1.99	1.87	-	2.45	2.33	-
1.13	0.04	0.03	-	0.10	0.04	-	0.21	0.18	-	0.89	0.77	-	2.17	2.04	-	1.99	1.88	-	2.46	2.33	-
1.26	0.05	0.03	-	0.11	0.04	-	0.22	0.19	-	0.90	0.78	-	2.17	2.04	-	1.99	1.88	-	2.48	2.34	-
1.41	0.05	0.03	-	0.11	0.04	-	0.22	0.20	-	0.92	0.79	-	2.17	2.04	-	1.99	1.88	-	2.50	2.34	-
1.59	0.05	0.03	-	0.11	0.04	-	0.23	0.20	-	0.93	0.81	-	2.16	2.03	-	2.00	1.88	-	2.52	2.35	-
1.78	0.05	0.03	-	0.11	0.05	-	0.24	0.21	-	0.95	0.82	-	2.16	2.03	-	2.01	1.89	-	2.54	2.38	-
2.00	0.05	0.03	-	0.11	0.05	-	0.25	0.22	-	0.96	0.84	-	2.16	2.03	-	2.01	1.90	-	2.56	2.39	-
2.24	0.05	0.03	-	0.11	0.05	-	0.26	0.23	-	0.97	0.84	-	2.15	2.02	-	2.02	1.90	-	2.57	2.42	-
2.52	0.06	0.03	-	0.11	0.05	-	0.26	0.23	-	1.04	0.91	-	2.15	2.02	-	2.03	1.91	-	2.59	2.43	-
2.83	0.06	0.03	-	0.11	0.05	-	0.28	0.25	-	1.05	0.93	-	2.15	2.02	-	2.04	1.92	-	2.61	2.46	-
3.07	0.06	0.03	-	0.11	0.06	-	0.29	0.25	-	1.07	0.95	-	2.14	2.01	-	2.05	1.93	-	2.62	2.49	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก8 (ต่อ)

Time	DIAL READING																				
SQR	Load 5 kg			Load 10 kg			Load 20 kg			Load 40 kg			Unload 20 kg			Reload 40 kg			Load 80 kg		
	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3
3.45	0.07	0.03	-	0.12	0.06	-	0.31	0.27	-	1.10	0.97	-	2.14	2.01	-	2.05	1.94	-	2.65	2.54	-
3.87	0.07	0.03	-	0.12	0.07	-	0.33	0.28	-	1.11	0.99	-	2.13	2.00	-	2.07	1.95	-	2.68	2.56	-
4.35	0.08	0.03	-	0.12	0.07	-	0.35	0.31	-	1.15	1.03	-	2.13	2.00	-	2.08	1.96	-	2.71	2.60	-
4.88	0.08	0.03	-	0.13	0.08	-	0.37	0.32	-	1.15	1.03	-	2.12	1.99	-	2.09	1.98	-	2.75	2.64	-
5.48	0.08	0.03	-	0.13	0.09	-	0.41	0.35	-	1.24	1.11	-	2.12	1.98	-	2.10	1.99	-	2.82	2.69	-
6.15	0.09	0.03	-	0.13	0.10	-	0.43	0.37	-	1.29	1.17	-	2.11	1.98	-	2.12	2.00	-	2.86	2.72	-
6.90	0.09	0.03	-	0.14	0.11	-	0.47	0.40	-	1.35	1.23	-	2.10	1.97	-	2.14	2.03	-	2.93	2.79	-
7.75	0.09	0.03	-	0.14	0.11	-	0.50	0.42	-	1.42	1.28	-	2.09	1.96	-	2.16	2.04	-	2.97	2.86	-
8.72	0.09	0.03	-	0.14	0.12	-	0.54	0.44	-	1.49	1.33	-	2.08	1.95	-	2.18	2.07	-	3.06	2.92	-
9.75	0.09	0.03	-	0.15	0.13	-	0.59	0.48	-	1.56	1.43	-	2.07	1.93	-	2.21	2.09	-	3.12	2.99	-
11.0	0.09	0.03	-	0.15	0.14	-	0.64	0.53	-	1.66	1.50	-	2.05	1.92	-	2.24	2.12	-	3.23	3.09	-
12.3	0.09	0.03	-	0.15	0.14	-	0.67	0.57	-	1.75	1.60	-	2.04	1.91	-	2.27	2.16	-	3.35	3.19	-
13.8	0.09	0.03	-	0.15	0.14	-	0.70	0.60	-	1.81	1.67	-	2.02	1.89	-	2.30	2.19	-	3.48	3.29	-
15.5	0.10	0.03	-	0.15	0.14	-	0.72	0.62	-	1.88	1.75	-	2.00	1.88	-	2.34	2.22	-	3.60	3.44	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก8 (ต่อ)

Time	DIAL READING																				
SQR	Load 5 kg			Load 10 kg			Load 20 kg			Load 40 kg			Unload 20 kg			Reload 40 kg			Load 80 kg		
	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3
17.4	0.10	0.03	-	0.16	0.15	-	0.75	0.64	-	1.96	1.79	-	1.99	1.87	-	2.35	2.24	-	3.75	3.54	-
19.5	0.10	0.03	-	0.16	0.15	-	0.77	0.65	-	2.02	1.84	-	1.98	1.86	-	2.37	2.25	-	3.84	3.65	-
21.9	0.10	0.03	-	0.16	0.15	-	0.78	0.67	-	2.07	1.88	-	1.98	1.86	-	2.38	2.27	-	3.91	3.72	-
24.6	0.10	-	-	0.16	0.15	-	0.80	0.68	-	2.11	1.93	-	1.97	1.85	-	2.39	2.28	-	3.95	3.75	-
27.6	0.10	-	-	0.16	0.15	-	0.81	0.69	-	2.14	1.98	-	1.96	1.85	-	2.40	2.29	-	3.96	3.78	-
31.0	-	-	-	0.16	-	-	0.82	0.70	-	2.18	2.03	-	1.96	1.84	-	2.41	2.29	-	3.99	-	-
32.9	-	-	-	0.17	-	-	0.83	0.71	-	-	2.06	-	1.96	1.84	-	2.41	2.29	-	4.01	-	-
35.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.06	-	1.96	1.84	-	-	-	-	-	-	-
37.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.06	-	1.96	-	-	-	-	-	-	-	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก9 ข้อมูลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำประเภท Triaxial ตัวอย่างดิน Sandy Clay

Time	DIAL READING																				
SQR	Load 5 kg			Load 10 kg			Load 20 kg			Load 40 kg			Unload 20 kg			Reload 40 kg			Load 80 kg		
	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3
0.71	0.02	0.02	-	0.08	0.08	-	0.14	0.33	-	0.66	0.90	-	1.99	2.23	-	1.79	2.04		2.21	2.44	-
0.80	0.02	0.02	-	0.08	0.09	-	0.14	0.34	-	0.67	0.91	-	1.99	2.23	-	1.80	2.04		2.22	2.45	-
0.89	0.02	0.02	-	0.08	0.09	-	0.15	0.35	-	0.69	0.93	-	1.99	2.23	-	1.80	2.04		2.22	2.45	-
1.00	0.02	0.02	-	0.08	0.09	-	0.16	0.35	-	0.69	0.93	-	1.99	2.23	-	1.80	2.04		2.23	2.46	-
1.13	0.02	0.02	-	0.08	0.09	-	0.16	0.36	-	0.70	0.94	-	1.99	2.23	-	1.80	2.05		2.23	2.46	-
1.26	0.02	0.02	-	0.08	0.09	-	0.17	0.37	-	0.71	0.95	-	1.98	2.22	-	1.81	2.05		2.25	2.47	-
1.41	0.02	0.02	-	0.08	0.10	-	0.17	0.37	-	0.73	0.97	-	1.98	2.22	-	1.81	2.05		2.28	2.47	-
1.59	0.03	0.03	-	0.08	0.10	-	0.18	0.38	-	0.74	0.98	-	1.98	2.22	-	1.81	2.05		2.30	2.48	-
1.78	0.03	0.03	-	0.08	0.10	-	0.18	0.38	-	0.76	1.00	-	1.97	2.21	-	1.81	2.06		2.31	2.52	-
2.00	0.03	0.03	-	0.08	0.11	-	0.19	0.39	-	0.77	1.01	-	1.97	2.21	-	1.82	2.06		2.33	2.52	-
2.24	0.03	0.03	-	0.08	0.11	-	0.20	0.40	-	0.78	1.02	-	1.97	2.21	-	1.83	2.07		2.35	2.55	-
2.52	0.04	0.03	-	0.09	0.12	-	0.20	0.40	-	0.85	1.09	-	1.96	2.20	-	1.83	2.07		2.36	2.57	-
2.83	0.04	0.04	-	0.09	0.12	-	0.22	0.42	-	0.86	1.10	-	1.96	2.20	-	1.84	2.08		2.38	2.59	-
3.07	0.04	0.04	-	0.09	0.13	-	0.22	0.43	-	0.88	1.12	-	1.96	2.20	-	1.84	2.08		2.39	2.62	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก9 (ต่อ)

Time	DIAL READING																				
SQR	Load 5 kg			Load 10 kg			Load 20 kg			Load 40 kg			Unload 20 kg			Reload 40 kg			Load 80 kg		
	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3
3.45	0.05	0.04	-	0.09	0.13	-	0.24	0.44	-	0.91	1.15	-	1.95	2.19	-	1.85	2.09		2.42	2.67	-
3.87	0.05	0.05	-	0.09	0.14	-	0.25	0.45	-	0.92	1.16	-	1.95	2.19	-	1.86	2.10		2.45	2.69	-
4.35	0.05	0.05	-	0.09	0.15	-	0.27	0.47	-	0.96	1.20	-	1.94	2.18	-	1.87	2.11		2.48	2.73	-
4.88	0.06	0.06	-	0.10	0.16	-	0.28	0.48	-	0.96	1.20	-	1.94	2.18	-	1.88	2.12		2.52	2.77	-
5.48	0.06	0.06	-	0.10	0.18	-	0.30	0.50	-	1.05	1.29	-	1.93	2.17	-	1.89	2.14		2.59	2.82	-
6.15	0.06	0.06	-	0.10	0.19	-	0.32	0.52	-	1.10	1.34	-	1.92	2.16	-	1.91	2.15		2.64	2.85	-
6.90	0.06	0.06	-	0.10	0.22	-	0.34	0.55	-	1.16	1.40	-	1.91	2.15	-	1.92	2.16	-	2.70	2.92	-
7.75	0.07	0.07	-	0.11	0.24	-	0.37	0.58	-	1.21	1.45	-	1.90	2.14	-	1.94	2.18	-	2.74	2.99	-
8.72	0.07	0.07	-	0.11	0.26	-	0.40	0.60	-	1.27	1.52	-	1.89	2.13	-	1.96	2.19	-	2.80	3.05	-
9.75	0.07	0.07	-	0.11	0.28	-	0.43	0.64	-	1.35	1.59	-	1.88	2.12	-	1.98	2.21	-	2.89	3.12	-
11.0	0.07	0.07	-	0.11	0.30	-	0.46	0.67	-	1.42	1.66	-	1.87	2.11	-	2.00	2.25	-	2.97	3.22	-
12.3	0.07	0.07	-	0.12	0.31	-	0.50	0.72	-	1.50	1.75	-	1.85	2.09	-	2.03	2.27	-	3.05	3.32	-
13.8	0.07	0.07	-	0.12	0.31	-	0.54	0.76	-	1.57	1.83	-	1.83	2.07	-	2.06	2.30	-	3.17	3.42	-
15.5	0.07	0.07	-	0.12	0.31	-	0.56	0.79	-	1.65	1.91	-	1.82	2.05	-	2.09	2.34	-	3.27	3.57	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก9 (ต่อ)

Time	DIAL READING																				
SQR	Load 5 kg			Load 10 kg			Load 20 kg			Load 40 kg			Unload 20 kg			Reload 40 kg			Load 80 kg		
	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3
17.4	0.07	0.07	-	0.12	0.32	-	0.58	0.81	-	1.73	2.00	-	1.80	2.04	-	2.12	2.36	-	3.43	3.68	-
19.5	0.07	0.07	-	0.12	0.32	-	0.59	0.83	-	1.78	2.06	-	1.80	2.04	-	2.14	2.38	-	3.57	3.79	-
21.9	0.07	0.07	-	0.12	0.32	-	0.61	0.84	-	1.84	2.10	-	1.79	2.03	-	2.16	2.40	-	3.66	3.92	-
24.6	0.08		-	0.13	0.32	-	0.62	0.86	-	1.90	2.13	-	1.78	2.02	-	2.17	2.41	-	3.71	4.02	-
27.6	0.08		-	0.13	0.32	-	0.63	0.87	-	1.94	2.15	-	1.78	2.02	-	2.18	2.42	-	3.73	4.10	-
31.0	-	-	-	0.13		-	0.64	0.88	-	1.99	2.21	-	1.78	2.01	-	2.18	2.42	-	3.76	4.15	-
32.9	-	-	-	0.13		-	0.64	0.88	-	2.00	2.24	-	1.78	2.01	-	2.18	2.43	-	3.78	4.18	-
35.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.00	2.24	-	1.78	2.01	-	-	-	-	-	-	-
37.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.00	2.24	-	1.78	2.01	-	-	-	-	-	-	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-สกุล	นายอภิศักดิ์ ยิ้มช้อย
เกิดวันที่	31 มกราคม 2530
สถานที่เกิด	อำเภอศรีประจันต์ จังหวัดสุพรรณบุรี
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์