การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์

นายอานนท์ ชลภัสสรณ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2553

CONSOLIDATION BEHAVIOR OF
COMPOSITE SOFT CLAY GROUND

Arnon Cholaphatsron

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for

the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2010

การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

____

(ผศ. ดร.พรพจน์ ตันเส็ง)
ประธานกรรมการ

____

(ศ. ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

____

(ผศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)
กรรมการ

____

(ผศ. ดร.ปรียาพร โกษา)
กรรมการ

____

(ผศ. ดร.อนุชิต อุชายภิชาติ)
กรรมการ

____

(อ. ดร.วุฒิ ด่านกิตติกุล)
รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

____

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อานนท์ ชลภัสสรณ์ : การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ (CONSOLIDATION BEHAVIOR OF COMPOSITE SOFT CLAY GROUND) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข, 93 หน้า.

การเสริมเสาเข็มเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและใช้กันอย่างแพร่หลายในการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อน งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการทรุดตัว ความดันน้ำ และความเค้นที่เกิดขึ้นในชั้นดินเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยแบบจำลองกายภาพย่อส่วนแบบสมมาตรรอบแกน และเปรียบเทียบผลทดสอบที่ได้กับผลวิเคราะห์ทางไฟไนท์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D Version 8.2 โดยใช้เอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยมประกอบด้วย 15 โหนด

ผลการศึกษาพบว่า การทรุดตัวสุดท้ายของแต่ละน้ำหนักบรรทุกจะเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ และเมื่อให้น้ำหนักกดทับจนเสาเข็มเกิดการวิบัติ ความเค้นในมวลดิน และความดันน้ำส่วนเกินจะเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน หลังจากนั้นความดันน้ำส่วนเกินที่ใกล้เสาเข็มมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว ความดันน้ำส่วนเกินในมวลดินจะระบายได้เร็วในตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับขอบเขตที่ระบายน้ำได้ ถึงแม้ว่ากำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์จะแปรผันตามปริมาณปูนซีเมนต์ แต่ค่าสติฟเนสของเสาเข็มดินซีเมนต์ไม่แปรผันตามปริมาณปูนซีเมนต์ ดังนั้น ปริมาณปูนซีเมนต์จึงเพียงแต่เป็นตัวควบคุมความต้านทานน้ำหนักบรรทุกของชั้นดินเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์เท่านั้น ตัวแปรหลักที่ควบคุมการทรุดตัวสุดท้าย ระยะเวลาการทรุดตัว ความเค้นในเสาเข็ม (stress concentration ratio, *n*) และความดันน้ำส่วนเกิน คืออัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มต่ออัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นดินเสริมเสาเข็ม พฤติกรรมของความดันน้ำส่วนเกินแบบระบายน้ำทางเดียวและสองทางในดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์มีลักษณะคล้ายกับการอัดตัวคายน้ำหนึ่งมิติของ Terzaghi (1925)

ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (c_v) ที่หาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลาของดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยทฤษฎีของ Terzaghi (1925) สามารถนำมาประมาณการทรุดตัวได้ใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

สาขาวิชา<u>วิศวกรรมโยธา</u>	ลายมือชื่อนักศึกษา______________________
ปีการศึกษา 2553	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา________________
	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม_____________

ARNON CHOLAPHATSRON : CONSOLIDATION BEHAVIOR OF COMPOSITE SOFT CLAY GROUND. THESIS ADVISOR : PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D., 93 PP.

COMPOSITE GROUND/CONSOLIDATION/MODEL/SETTLEMENT

Columnar inclusion is one of the effective and widely used methods for improving engineering properties of soft clay ground. This research investigated consolidation behavior and pore pressure and stress developments in composite soft clay ground using physical model tests under an axial-symmetry condition. The test results were compared with finite element simulations. The Plaxis 2D program Version 8.2 and 15 node triangular elements were applied for the simulations.

This study shows that final settlement of the composite ground increases with applied load. At the failure state, the stress and excess pore pressure developed in the surrounding clay suddenly increase. The excess pore pressure at the position close to the soil-cement column dissipates very fast because the cracks on the column act as the drainage path, accelerating the dissipation of the excess pore pressure. Even though the strength of soil-cement column increases with cement content, the stiffness does not. As such, the input cement only controls the failure load on the composition ground, not the resistance to compression. The final settlement, rate of consolidation, stress concentration ratio and excess pore pressure are controlled by the ratio of diameter of soil-cement column to diameter of composite ground. The dissipation behavior of excess pore pressure in the surrounding clay for both single and double drainage conditions is similar to the 1-D consolidation behavior of the natural clay

(without soil-cement column). The coefficient of consolidation obtained from a relationship between settlement and time of the composite ground by the Terzaghi's theory can be used to approximate the rate of consolidation. This approximation is close to the finite element simulation.

School of Civil Engineering — Student's Signature ____________________

Academic Year 2010 — Advisor's Signature ____________________

Co-advisor's Signature ____________________

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย งานวิจัยนี้จะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ถ้าปราศจากการช่วยเหลือจากบุคคลและหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง การกล่าวขอบคุณบุคคลที่ช่วยเหลือให้ครบทุกท่านเป็นไปได้ยาก ผู้วิจัยต้องขอขมามา ณ ที่นี้ด้วย หากมิได้กล่าวนามของท่าน

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร. สุขสันติ์ หอพิบูลสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษา ให้ความเมตตา อบรม สั่งสอน ชี้แนะ ตลอดจนแนะนำการเขียนและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ตันเส็ง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปรียาพร โกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการ และให้คำชี้แนะแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนุชิต อุชายภิชาติ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล ที่เสียสละเวลาเข้าร่วมเป็นกรรมการสอบ และอาจารย์ ดร. จิระยุทธ สืบสุข มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการ และกำลังใจมาโดยตลอด

ผู้วิจัยขอขอบคุณ พี่น้องบัณฑิตทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง นายอเนก เนรมิตครบุรี นักศึกษาปริญญาเอก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และนายธงชัย บุญกลึง นักศึกษาปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำปรึกษาในเรื่องต่าง ๆ และให้กำลังใจมาโดยตลอด ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับสิ่งอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือ และขอขอบคุณบุคลากรสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ที่อำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงาน

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา จนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จ

อานนท์ ชลภัสสรณ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ก

บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ข

กิตติกรรมประกาศ ง

สารบัญ จ

สารบัญตาราง ซ

สารบัญรูป ฌ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ ฑ

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย 1

1.2 วัตถุประสงค์ 2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

2 ปริทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 บทนำ 4

2.2 การทรุดตัวและการอัดตัวคายน้ำ 4

2.2.1 การทรุดตัวทันทีในชั้นดินที่หนามาก 5

2.2.2 การทรุดตัวทันทีในชั้นดินบาง 5

2.2.3 การอัดตัวคายน้ำ 7

2.2.4 การคำนวณการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำปฐมภูมิ 9

2.2.5 อัตราส่วนการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำปฐมภูมิ 11

2.2.6 การอัดตัวคายน้ำปฐมภูมิในสามทิศทาง 18

2.2.7 การอัดตัวคายน้ำทุติยภูมิ 20

2.3 รูปแบบของการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคผสมลึก 21

2.4 การออกแบบฐานรากเสาเข็มดินซีเมนต์ 22

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.1 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยว 22
2.4.2 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของกลุ่มเสาเข็ม 23
2.5 การทรุดตัวทั้งหมด 25
2.5.1 อัตราการทรุดตัว 28
2.6 พฤติกรรมของ Composite Ground ในแบบจำลองกายภาพ 36
3 วิธีดำเนินการ 41
3.1 บทนำ 41
3.2 สถานที่ทำการทดลองและเก็บข้อมูล 42
3.3 การทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐาน 42
3.4 การสร้างถังทดสอบแบบจำลอง 43
3.5 การเก็บและเตรียมตัวอย่างดิน 44
3.6 การเตรียมตัวอย่างเสาเข็มดินซีเมนต์ 44
3.7 การจำลองชั้นดินในถังทดสอบแบบจำลอง 44
3.8 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก
ในแบบจำลองกายภาพ 45
3.9 เงื่อนไขในการทดสอบ 46
4 การทดสอบและวิเคราะห์ผล 47
4.1 บทนำ 47
4.2 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียว 47
4.3 พฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ 49
4.4 วิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลข 56
4.4.1 การทรุดตัวสุดท้ายและระยะเวลาการทรุดตัว 58
4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มดินซีเมนต์
และดินล้อมรอบ 58
4.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง stress concentration ratio, *n* กับเวลา 58
4.4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับเวลา 58

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5 พฤติกรรมของความดันน้ำส่วนเกินแบบระบายน้ำทางเดียว และสองทางในดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ 71
4.6 การประมาณการทรุดตัวสำหรับดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ 75
5 บทสรุป 79
5.1 สรุปผลงานวิจัย 79
5.1.1 พฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ 79
5.1.2 วิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลข 79
5.1.3 การประมาณการทรุดตัวสำหรับดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ 80
5.1.4 พฤติกรรมของความดันน้ำส่วนเกินแบบระบายน้ำทางเดียว และสองทางในดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ 80
5.2 ข้อเสนอแนะ 80
รายการอ้างอิง 81
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา 83
ประวัติผู้เขียน 93

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

3.1 ตัวอย่างการทดสอบ 46
4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่าง 47
4.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองกายภาพย่อส่วน 57

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 สัมประสิทธิ์การเสียรูปของดินใต้ฐานรากดัดตัว 6
2.2 ลักษณะของฐานรากที่ตั้งอยู่บนดินสองชั้น 6
2.3 ตัวอย่างการทรุดตัวของดินเหนียวที่ถูกประกบด้วยดินทราย 7
2.4 การเปลี่ยนแปลงของความเค้นรวมที่เกิดขึ้น ความดันน้ำส่วนเกิน และความเค้นประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้นกับเวลา 8
2.5 การทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ 9
2.6 (a) ชั้นดินที่เกิดการอัดตัวคายน้ำ (b) การไหลของน้ำในก้อนดินเล็ก ๆ ระหว่างการอัดตัวคายน้ำ 12
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง U_z และ T_v 15
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการอัดตัวคายน้ำและแฟคเตอร์เวลา เมื่อ Δu_0 มีค่าคงที่ตลอดความลึก 16
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการอัดตัวคายน้ำเฉลี่ยและแฟกเตอร์เวลา เมื่อ Δu_0 มีค่าต่าง ๆ 17
2.10 ลักษณะการกระจายความดันน้ำส่วนเกินเริ่มต้น 17
2.11 สัมประสิทธิ์การทรุดตัว Δu_c 19
2.12 การคำนวณหาพารามิเตอร์การอัดตัวทุติยภูมิ 20
2.13 รูปแบบการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคผสมลึก 21
2.14 ลักษณะการวิบัติของฐานรากเสาเข็มดินซีเมนต์ 24
2.15 การคำนวณการทรุดตัวทั้งหมดเมื่อน้ำหนักบรรทุกก่อให้เกิดความคืบในเสาเข็มดินซีเมนต์ 25
2.16 การคำนวณการทรุดตัวทั้งหมด 26
2.17 ค่าเฉลี่ยดีกรีการอัดตัวคายน้ำของ composite ground ที่ $n = 1.5$ 34
2.18 ค่าเฉลี่ยดีกรีการอัดตัวคายน้ำของ composite ground ที่ $n = 2$ 35
2.19 ค่าเฉลี่ยดีกรีการอัดตัวคายน้ำของ composite ground ที่ $n = 3$ 35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.20	แบบถังทดสอบ (a) รูปตัดถังทดสอบ (b) แปลนถังทดสอบ Yin and Fang (2006)	36
2.21	(a) การเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำในแต่ละจุดโดยพล็อต ในสเกล log (time) ภายใต้แรงรวมที่ 10 กิโลปาสคาล	37
2.22	(b) การเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำในแต่ละจุดโดยพล็อต ในสเกล log (time) ภายใต้แรงรวมที่ 20 กิโลปาสคาล	37
2.23	(c) การเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำในแต่ละจุดโดยพล็อต ในสเกล log (time) ภายใต้แรงรวมที่ 40 กิโลปาสคาล	38
2.24	(d) การเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำในแต่ละจุดโดยพล็อต ในสเกล log (time) ภายใต้แรงรวมที่ 60 กิโลปาสคาล (เสาเข็มเกิดการวิบัติ)	38
2.25	(a) ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความเค้นและระดับของการอัดตัวคายน้ำ กับเวลาภายใต้น้ำหนักกดทับ 10 กิโลปาสคาล	39
2.26	(b) ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความเค้นและระดับของการอัดตัวคายน้ำ กับเวลาภายใต้น้ำหนักกดทับ 20 กิโลปาสคาล	39
2.27	(c) ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความเค้นและระดับของการอัดตัวคายน้ำ กับเวลาภายใต้น้ำหนักกดทับ 40 กิโลปาสคาล	40
2.28	(d) ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความเค้นและระดับของการอัดตัวคายน้ำ กับเวลาภายใต้น้ำหนักกดทับ 60 กิโลปาสคาล (เสาเข็มเกิดการวิบัติ)	40
3.1	แผนงานดำเนินงานวิจัย	41
3.2	แผนที่ตำแหน่งสถานที่เก็บตัวอย่างดินเหนียวที่ใช้ในการทดสอบ	42
3.3	แบบถังทดสอบ (a) แปลนถังทดสอบ (b) รูปด้านถังทดสอบ	43
3.4	ภาพแผนผังของแบบจำลองและตำแหน่งของอุปกรณ์ตรวจวัดต่าง ๆ (a) รูปตัดตามขวาง (b) รูปตัดตามแนวดิ่ง	45
4.1	แบบถังทดสอบ (a) แปลนถังทดสอบ (b) รูปด้านถังทดสอบ	48
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงกับความเค้นกดทับในแนวดิ่ง	48
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับเวลา	49
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา	49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยดีกรีการอัดตัวคายน้ำกับเวลา 50

4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในเสาเข็มและความเค้นในดิน 51

4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง stress concentration ratio, *n* กับเวลา 51

4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับเวลา ที่น้ำหนักบรรทุก 20 กิโลปาสคาล 52

4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับเวลา ที่น้ำหนักบรรทุก 40 กิโลปาสคาล 52

4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับเวลา ที่น้ำหนักบรรทุก 60 กิโลปาสคาล 53

4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับเวลา ที่น้ำหนักบรรทุก 80 กิโลปาสคาล 53

4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับระยะทาง ตามแนวรัศมีที่น้ำหนักบรรทุก 40 กิโลปาสคาล 54

4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับระยะทาง ตามแนวรัศมีที่น้ำหนักบรรทุก 80 กิโลปาสคาล 55

4.14 การวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์หลังจากทดสอบ 56

4.15 แบบจำลองสำหรับวิเคราะห์ดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ 57

4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวกับเวลา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 60 59

4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวกับเวลา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตรปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 60 60

4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวกับเวลา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตรปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 40 61

4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มดินซีเมนต์ และดินเหนียวล้อมรอบกับเวลาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 60 62

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มดินซีเมนต์และดินเหนียวล้อมรอบกับเวลาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 60 62
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มดินซีเมนต์และดินเหนียวล้อมรอบกับเวลาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 40 63
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง stress concentration ratio, *n* กับเวลา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 60 63
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง stress concentration ratio, *n* กับเวลา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 60 64
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง stress concentration ratio, *n* กับเวลา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 40 64
4.25 ความสัมพันธ์ของความดันน้ำส่วนเกินกับเวลาที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 60 65
4.26 ความสัมพันธ์ของความดันน้ำส่วนเกินกับเวลาที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 60 66
4.27 ความสัมพันธ์ของความดันน้ำส่วนเกินกับเวลาที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 40 67
4.28 การเปลี่ยนแปลงความดันน้ำส่วนเกินกับระยะทางในแนวรัศมีที่เวลาใด ๆ เมื่อปริมาณร้อยละซีเมนต์เท่ากัน ค่า a ไม่เท่ากัน 68
4.29 การเปลี่ยนแปลงความดันน้ำส่วนเกินกับระยะทางในแนวรัศมีที่เวลาใด ๆ เมื่อปริมาณร้อยละซีเมนต์เท่ากัน ค่า a เท่ากัน 69
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินตามความลึกที่เวลาต่าง ๆ ของตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 60 70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินตามความลึกที่เวลาต่าง ๆ
ของตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 60 70
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินตามความลึกที่เวลาต่าง ๆ
ของตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 40 71
4.33 แบบจำลองสำหรับวิเคราะห์ทั้งกรณีระบายน้ำทางเดียวและสองทาง 72
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินที่มีการระบายน้ำทางเดียว
และสองทางกับระยะทางในแนวรัศมี ณ เวลาใด ๆ 73
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินที่มีการระบายน้ำทางเดียว
และระบายน้ำสองทางตามความลึกที่เวลาต่าง ๆ 74
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลาทั้งกรณีระบายน้ำทางเดียว
และสองทาง 75
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำกับน้ำหนักบรรทุก 76
4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลาของตัวอย่าง
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เมตร ความลึก 15 เมตร กรณีระบายน้ำทางเดียว 76
4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลาของตัวอย่าง
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 เมตร ความลึก 15 เมตร กรณีระบายน้ำทางเดียว 77
4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลาของตัวอย่าง
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เมตร ความลึก 15 เมตร กรณีระบายน้ำสองทาง 77
4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลาของตัวอย่าง
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 เมตร ความลึก 15 เมตร กรณีระบายน้ำสองทาง 78

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	พื้นที่หน้าตัด
A_{col}	=	พื้นที่หน้าตัดเสาเข็มดินซีเมนต์
ASTM	=	American Society for Testing Material
a	=	อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง Unit cell
a_v	=	ดัชนีการยุบตัว
B	=	ความกว้างของฐานราก
B_g	=	ความกว้างของชั้นดินปรับปรุง
C_c	=	ดัชนีการอัดตัว
C_s	=	ดัชนีการบวมตัว
C_α	=	สัมประสิทธิ์การอัดตัวขั้นที่สอง
c_v	=	สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ
$c_{v,p}$	=	สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ
D_{10}	=	ขนาดของเม็ดดินที่เล็กกว่าร้อยละ 10 ของน้ำหนักดินทั้งหมด
D_{30}	=	ขนาดของเม็ดดินที่เล็กกว่าร้อยละ 30 ของน้ำหนักดินทั้งหมด
D_{60}	=	ขนาดของเม็ดดินที่เล็กกว่าร้อยละ 60 ของน้ำหนักดินทั้งหมด
d_{col}	=	เส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มดินซีเมนต์
E	=	ค่ายังโมดูลัสของดิน
EPC	=	หน่วยวัดความดันดินขนาดเล็ก (Earth Pressure Cell)
e	=	อัตราส่วนช่องว่าง
e_0	=	อัตราส่วนช่องว่าง
e_i	=	อัตราส่วนช่องว่างของดินเมื่อสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำ
e_{100}	=	อัตราส่วนโพรงที่เกิดการอัดตัวคายน้ำปฐมภูมิ 100 เปอร์เซ็นต์
F_n	=	แฟคเตอร์ระยะห่างระหว่างแผ่นระบายน้ำแนวดิ่ง
F_s	=	แฟคเตอร์การรบกวนดินเนื่องจากการติดตั้งแผ่นระบายน้ำแนวดิ่ง
F_r	=	แฟคเตอร์ความต้านทานการระบายน้ำ
G_s	=	ความถ่วงจำเพาะของดิน
F_n	=	แฟคเตอร์ระยะห่างระหว่างแผ่นระบายน้ำแนวดิ่ง

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

F_s	=	แฟคเตอร์การรบกวนดินเนื่องจากการติดตั้งแผ่นระบายน้ำแนวดิ่ง
F_r	=	แฟคเตอร์ความต้านทานการระบายน้ำ
H	=	ความหนาของดินเหนียว
H_g	=	ความสูงของชั้นดินปรับปรุง
H_{dr}	=	ความหนาของชั้นดิน
H_c	=	ความลึกของปลายเสาเข็มที่อยู่ในชั้นดินที่ไม่ได้ปรับปรุง
H_{col}	=	ความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์
I	=	ตัวประกอบการเสียรูปในแนวดิ่ง
k	=	ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านดิน
k_h	=	ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของดินรอบเสาดินซีเมนต์
k_{col}	=	ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของเสาดินซีเมนต์
L_g	=	ความยาวของชั้นดินปรับปรุง
LI	=	Liquid index
LL	=	Liquid limit
LPM	=	มาตรวัดระยะ (Linear potentionmeter)
M	=	ค่าความชันของเส้นกราฟ
M_{av}	=	ค่าโมดูลัสการอัดตัวเฉลี่ย
M_{col}	=	ค่าโมดูลัสการอัดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์
M_{soil}	=	ค่าโมดูลัสการอัดตัวของดิน
m	=	ปริมาณความชื้น
m_v	=	สัมประสิทธิ์การอัดตัวของปริมาตร
$m_{v,p}$	=	สัมประสิทธิ์การอัดตัวของปริมาตรของเสาเข็ม
$m_{v,c}$	=	สัมประสิทธิ์การอัดตัวของปริมาตรของดินรอบเสาเข็ม
n	=	อัตราส่วนความเค้นในเสาเข็มต่อความเค้นในมวลดิน
N_{col}	=	จำนวนเสาเข็มดินซีเมนต์
OC clay	=	ดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติ
PI	=	Plastic index
PL	=	Plastic limit

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

PPC	=	หน่วยวัดความดันน้ำขนาดเล็ก (Pore Pressure Cell)
S_i	=	การทรุดตัวทันที
S_c	=	การทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ
S_{col}	=	กำลังต้านทานแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์
S_s	=	การทรุดตัวทุติยภูมิ
S_t	=	การทรุดตัวที่เวลาใด ๆ
S_u	=	กำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน
S_{av}	=	กำลังต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ยตามระนาบวิบัติสมมติ
T_v	=	แฟคเตอร์เวลา
t_{50}	=	ระยะเวลาที่เกิดการอัดตัวคายน้ำที่ร้อยละ 50
$U_{(t)}$	=	ค่าเฉลี่ยระดับการอัดตัวคายน้ำของดินที่เวลาใด ๆ
U	=	ค่าเฉลี่ยระดับการอัดตัวคายน้ำ และ อัตราการทรุดตัว
U_h	=	ค่าเฉลี่ยระดับการอัดตัวคายน้ำในแนวนอน
U_v	=	ค่าเฉลี่ยระดับการอัดตัวคายน้ำในแนวดิ่ง
U_z	=	ค่าเฉลี่ยระดับการอัดตัวคายน้ำที่ความลึกใด ๆ
USCS	=	การจำแนกระบบเอกภาพ
u	=	ความดันน้ำ
u_c	=	สัมประสิทธิ์การทรุดตัว
V	=	ปริมาตรทั้งหมดของก้อนดิน
V_s	=	ปริมาตรของเม็ดดิน
V_v	=	ปริมาตรของช่องว่างระหว่างเม็ดดิน
V_0	=	ปริมาตรของดินเริ่มแรก
V_1	=	ปริมาตรของดินสุดท้าย
Z_d	=	ระยะจากจุดที่สนใจถึงขอบเขตการระบายน้ำ
q_u	=	กำลังอัดแกนเดียว
q_{uf}	=	กำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์
q_{col}	=	กำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์
q_{net}	=	ความดันสุทธิที่กระจายฐานราก
q_w	=	ความสามารถในการระบายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

q_w	=	ความสามารถในการระบายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์
α	=	อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ทั้งหมดต่อพื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม
β	=	อัตราส่วนความลึกเสาเข็มต่อความลึกทั้งหมด
γ	=	หน่วยน้ำหนัก
τ_{av}	=	กำลังต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ยรอบเส้นรอบรูปของบล็อกปรับปรุง
γ_w	=	หน่วยน้ำหนักน้ำ
μ_0	=	สัมประสิทธิ์การเสียรูปของดินใต้ฐานรากดัดตัวความลึกของฐานราก ต่อความกว้างของฐานราก
μ_1	=	สัมประสิทธิ์การเสียรูปของดินใต้ฐานรากดัดตัวความหนาของชั้นดิน ใต้ฐานรากต่อความกว้างของฐานราก
σ	=	ความเค้นในแนวตั้งฉาก
σ'	=	ความเค้นประสิทธิผล
$\sigma_{creep,col}$	=	ความเค้นที่ก่อให้เกิดความคืบในเสาเข็มดินซีเมนต์
$\sigma_{ult,group}$	=	ความเค้นประลัยของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบกลุ่ม
$\sigma_{ult,soil}$	=	ความเค้นประลัยของเสาเข็มดินซีเมนต์
σ_{soil}	=	ความเค้นประลัยของดินรอบเสาเข็มดินซีเมนต์
σ'_p	=	ความเค้นกดทับในอดีต
σ'_y	=	ความเค้นคราก
σ'_{vo}	=	ความเค้นกดทับปัจจุบันในแนวดิ่ง
$\Delta\sigma_v$	=	ความเค้นที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกกระทำ
Δu	=	ความดันน้ำส่วนเกิน
Δu_0	=	ความดันน้ำส่วนเกินเริ่มต้น
Δu_z	=	ความดันน้ำส่วนเกินที่ความลึกใด ๆ
Δe	=	อัตราส่วนช่องว่างที่ลดลง
ΔH	=	การทรุดตัวทั้งหมดของมวลดิน
Δh_1	=	การทรุดตัวในชั้นดินปรับปรุง
Δh_2	=	การทรุดตัวในชั้นดินที่ไม่ได้ปรับปรุง
ΔV	=	ปริมาตรของตัวอย่างดินที่เปลี่ยนแปลงไป
ΔV_v	=	ปริมาตรของช่องว่างดินที่เปลี่ยนแปลงไป

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

ν	=	อัตราส่วนโพซอง
v_z	=	อัตราการไหลของน้ำในทิศทางแนวดิ่ง
v_u	=	อัตราส่วนโพซองในสภาวะไม่ระบายน้ำ
ε	=	ค่าความเครียด
ε_a	=	ค่าความเครียดตามแกนในแนวดิ่ง
ε_h	=	ค่าความเครียดทางด้านข้าง
ε_v	=	ค่าความเครียดรวมในแนวดิ่ง

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การออกแบบโครงสร้างสาธารณูปโภคพื้นฐาน เช่น ทางหลวง สนามบิน และท่าเรือ เป็นต้น บนชั้นดินเหนียวอ่อนต้องคำนึงถึงปัจจัยสองส่วนที่สำคัญคือ กำลังรับแรงแบกทาน และการทรุดตัว ดินเหนียวอ่อนมีกำลังรับแรงแบกทานที่ต่ำและการทรุดตัวที่สูงจึงจำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมก่อนการก่อสร้าง เพื่อเพิ่มกำลังแบกทานและลดการทรุดตัว การปรับปรุงดินด้วยการเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นเทคนิคที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติของ Terzaghi (1925) ไม่สามารถใช้ในการประมาณการทรุดตัว สถานะความเค้น (stress) สถานะความเค้น (strain) และความดันน้ำ (pore water pressure) ของชั้นดินเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ การเสียรูปและความดันน้ำส่วนเกินขณะรับน้ำหนักบรรทุกมีความสำคัญอย่างยิ่งในการพิจารณาเฝ้าระวังโครงสร้างเพื่อป้องกันจากการพังทลายของดิน การทำนายสถานะความเครียด ความเค้น และค่าความดันน้ำ สามารถทำได้โดยวิธีเชิงตัวเลข เช่น วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ เป็นต้น ความแม่นยำของการคำนวณโดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการเลือกใช้แบบจำลองพฤติกรรมของดิน (soil model) และการเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ Potts and Zdravkovic (2001) ซึ่งจะต้องมีการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้เหมาะสม โดยการเปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการสอบวัดที่ติดตั้งในสนาม แต่การติดตั้งเครื่องวัดในสนามนั้นมีค่าใช้จ่ายสูงและยุ่งยาก โครงสร้างแบบจำลองกายภาพจึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำ

Yin and Fang (2006; 2007) ทำการศึกษาการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ End Bearing โดยสร้างแบบจำลองกายภาพย่อส่วนแบบสมมาตรรอบแกน (axisymmetric) เสาเข็มดินซีเมนต์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร เครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำถูกติดตั้งในจุดต่าง ๆ จากการศึกษาพบว่าการระบายความดันน้ำจะเกิดขึ้นเร็วตรงบริเวณจุดที่ใกล้เสาเข็มเสาเข็มดินซีเมนต์ พวกเขาจึงสรุปว่าเสาเข็มทำหน้าที่เสมือนแผ่นระบายน้ำแนวดิ่ง ซึ่งช่วยลดระยะเวลาการทรุดตัวของดินเหนียว

Chai et al. (2010) ทำการศึกษาการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Floating ที่เมืองฟูกูโอกะ ประเทศญี่ปุ่น ด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (FEM) เปรียบเทียบกับวิธีของสถาบันวิศวกรรมโยธาแห่งประเทศญี่ปุ่น (JICE) โดยพิจารณาถึงอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ทั้งหมด ลึกของปลายเสาเข็มที่อยู่ในชั้นดินที่ไม่ได้ปรับปรุง (H_c) ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ สามารถประมาณค่าการทรุดตัวได้ใกล้เคียงกับผลตรวจวัดในสนาม

บทความนี้จะศึกษาพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของชั้นดินเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ End Bearing ด้วยการสร้างแบบจำลองกายภาพย่อส่วนแบบสมมาตรรอบแกน และศึกษาความเค้นที่เกิดขึ้นในเสาเข็มดินซีเมนต์ และการทรุดตัวเปรียบเทียบผลทดสอบที่ได้กับผลการวิเคราะห์ทางไฟไนท์เอลิเมนต์

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 สร้างแบบจำลองกายภาพย่อส่วนแบบสมมาตรรอบแกน ที่เป็นต้นแบบสำหรับใช้จำลองพฤติกรรมโครงสร้างทางวิศวกรรมปฐพีในห้องทดสอบ

1.2.2 ศึกษาพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์

1.2.3 ศึกษาสถานะความเค้น (stress) ความเครียด (strain) และความดันน้ำ (pore water pressure) ที่เกิดขึ้นในดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์

1.2.4 เปรียบเทียบผลทดสอบแบบจำลองกายภาพย่อส่วนในห้องปฏิบัติการกับผลวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบสมมาตรรอบแกน ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D Version 8.2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ดินเหนียวที่ใช้ในการทดสอบเป็นดินเหนียวกรุงเทพ (Bangkok clay) เก็บจากบริเวณการไฟฟ้านครหลวงชิดลม กรุงเทพมหานคร ทำการปั้นใหม่ภายในห้องปฏิบัติการปฐพีวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี การทดสอบเป็นแบบสมมาตรรอบแกน แบบจำลองกายภาพย่อส่วนทำจากท่อเหล็ก ซึ่งมีความหนา 6 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 300 มิลลิเมตร และความสูง 450 มิลลิเมตร ผิวด้านในกลึงเรียบ พร้อมรูระบายน้ำด้านล่างชนิดมีวาล์วเปิดปิด และช่องสอดสายอุปกรณ์ตรวจวัด เครื่องมือตรวจวัดประกอบด้วย อุปกรณ์วัดความดันน้ำ (pore pressure transducer) อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง (linear potentiometers) อุปกรณ์วัดความเค้นในดิน (pressure cells) และเปรียบเทียบผลทดสอบที่ได้กับผลการวิเคราะห์ทางไฟไนท์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D Version 8.2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์

1.4.2 ทราบถึงพฤติกรรมของสถานะความเค้น (stress) ความเครียด (strain) และความดันน้ำ (pore water pressure) ที่เกิดขึ้นในดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกกระทำ

1.4.3 เข้าใจและสามารถประยุกต์ใช้วิธีทางไฟไนท์เอลิเมนต์ทำนายสถานะ ความเค้น ความเครียด และความดันน้ำ ที่เกิดขึ้นในชั้นดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

พฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนได้รับการศึกษาโดยนักวิจัยหลายท่าน พฤติกรรมต่าง ๆ ของดินเหนียวมีหลายทฤษฎี เช่น ทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำหนึ่งมิติของ Terzaghi (1925) ทฤษฎีการอัดคายน้ำสามมิติของ Skempton and Bjerruu (1957) และทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำของชั้นดินเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ (Carillo, 1942; Lorenzo and Bergado, 2003) งานวิจัยในบทนี้จะกล่าวถึง พฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อน การทรุดตัวและการอัดตัวคายน้ำ รูปแบบของการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคผสมลึก การออกแบบฐานรากเสาเข็มดินซีเมนต์ การทรุดตัวทั้งหมดและพฤติกรรมของ Composite Ground ในแบบจำลองกายภาพย่อส่วน ที่มีส่วนคล้ายคลึงกับงานวิจัยที่กำลังศึกษาอยู่นี้

2.2 การทรุดตัวและการอัดตัวคายน้ำ

ความเค้นที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกบนฐานราก หรือน้ำหนักอื่น ๆ ที่กระทำต่อผิวดินก่อให้เกิดการทรุดตัวในชั้นดิน การทรุดตัวเป็นสาเหตุเนื่องมาจากการจัดเรียงตัวใหม่ของเม็ดดินและการไหลออกของน้ำหรืออากาศจากช่องวางระหว่างเม็ดดิน ซึ่งสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ส่วน ดังนี้

1) การทรุดตัวทันที (immediate settlement) เป็นการยุบตัวแบบยืดหยุ่นของเม็ดดินโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในดิน การคำนวณหาการคำนวณหาการทรุดตัวทันทีนี้อาศัยทฤษฎียืดหยุ่น

2) การอัดตัวคายน้ำปฐมภูมิ (primary consolidation settlement) เป็นการทรุดตัวที่เกิดกับดินเม็ดละเอียดที่อิ่มตัวด้วยน้ำ เนื่องจากการไหลออกของน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน

3) การอัดตัวคายน้ำทุติยภูมิ (secondary consolidation settlement) เป็นการทรุดตัวที่เกิดขึ้นกับดินเม็ดละเอียด การทรุดตัวนี้จะเกิดหลังสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำปฐมภูมิแล้ว การทรุดตัวนี้เป็นผลเนื่องจากการจัดเรียงตัวใหม่ของกลุ่มดิน (soil fabric) โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความเค้นประสิทธิผล

2.2.1 การทรุดตัวทันที (immediate settlement) ในชั้นดินที่หนามาก

ในชั้นดินมีความหนาไม่จำกัด (infinite depth) การทรุดตัวทันทีหรือการทรุดตัวแบบยืดหยุ่นเนื่องจากน้ำหนักการกระจายสม่ำเสมอสามารถคำนวณได้ โดยสมมติว่าดินใต้ฐานรากเป็นวัตถุยืดหยุ่นดังสมการข้างล่างนี้

$$S_i = \frac{q_{net} B}{E}\left(1 - \nu^2\right) I \tag{2.1}$$

เมื่อ q_{net} คือความดันสุทธิที่กระจายฐานราก

B คือความกว้างของฐานราก

ν คืออัตราส่วนโพซอง

E คือค่าโมดูลัสยัง

I คือตัวประกอบการเสียรูปในแนวดิ่ง

สมการนี้ใช้ในการประมาณการทรุดตัวของฐานรากที่ออกแบบโดยใช้อัตราส่วนปลอดภัยมากกว่า 3.0

2.2.2 การทรุดตัวทันทีในชั้นดินบาง

ปัญหาทั่วไปที่มักพบ คือชั้นดินมีความหนาที่จำกัดและมักวางตัวอยู่เหนือชั้นดินแข็งในกรณีเช่นนี้การทรุดตัวทันทีโดยอาศัยสมการที่ 2.1 (เหมาะสำหรับชั้นดินที่มีความหนาเกิน 2 เท่า ของความกว้างฐานราก) จะให้ค่าการทรุดตัวที่มากเกินจริง

สำหรับกรณีที่ชั้นดินอัดตัวได้ (compressible soil) ใต้ฐานรากมีความหนาน้อยกว่า 2 เท่า ของความกว้างฐานราก (Janbu et al., 1985) เสนอสมการคำนวณการทรุดตัว ดังนี้

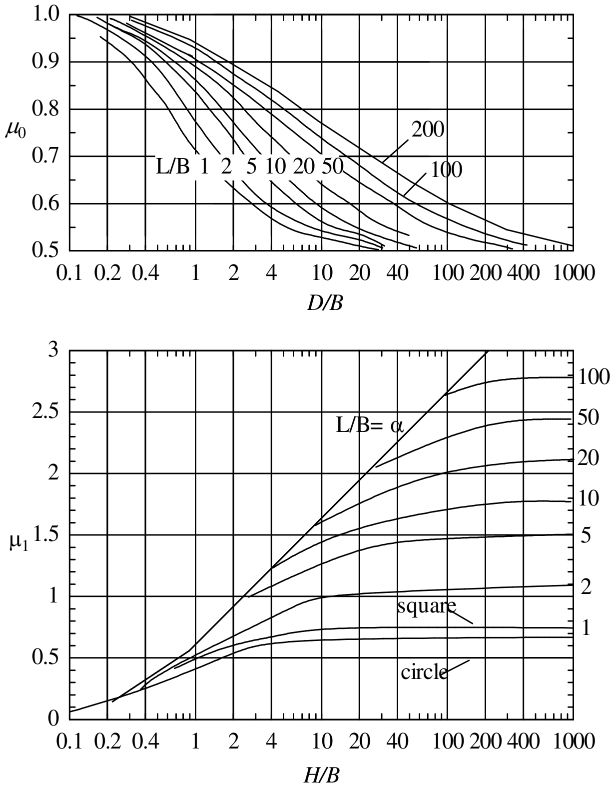
$$S_i = \frac{q_{net} B}{E}\mu_0 \mu_1\left(1 - \nu^2\right) I \tag{2.2}$$

เมื่อ μ_0 คือสัมประสิทธิ์ซึ่งขึ้นอยู่กับความกว้างและความลึกของฐานราก

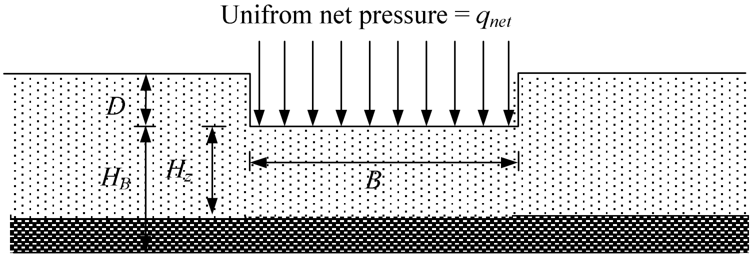
μ_1 คือสัมประสิทธิ์ซึ่งขึ้นอยู่กับความกว้างและความหนาของชั้นดินใต้ฐานราก

รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ μ_0 และ μ_1 ซึ่งขึ้นอยู่ความกว้างและความลึกของฐานราก และความหนาของชั้นดินใต้ฐานราก

ในกรณีที่มีดินใต้ฐานรากสองชั้น ชั้นแรกเป็นชั้นดินแข็งและชั้นล่างเป็นชั้นดินอ่อน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ลักษณะเช่นนี้มีความคล้ายคลึงกับชั้นดินในแถบกรุงเทพฯ ชั้นบนจะเป็นชั้นดินที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและปริมาณความชื้น (weathered crust) และชั้นด้านล่างเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนมาก การทรุดตัวทันทีของดินชั้นล่างสามารถคำนวณได้โดยทำการหาค่า $\mu_{1(B)}$ สำหรับดินที่หนามาก H_B และต่อมาหาค่า $\mu_{1(T)}$ สำหรับดินหนามาก H_T การทรุดตัวทันทีในชั้นดินเหนียวอ่อนคำนวณได้โดยการแทนค่า $\mu_1 = \mu_{1(B)} - \mu_{1(T)}$



รูปที่ 2.1 สัมประสิทธิ์การเสียรูปของดินใต้ฐานรากดัดตัว (Janbu et al., 1956)

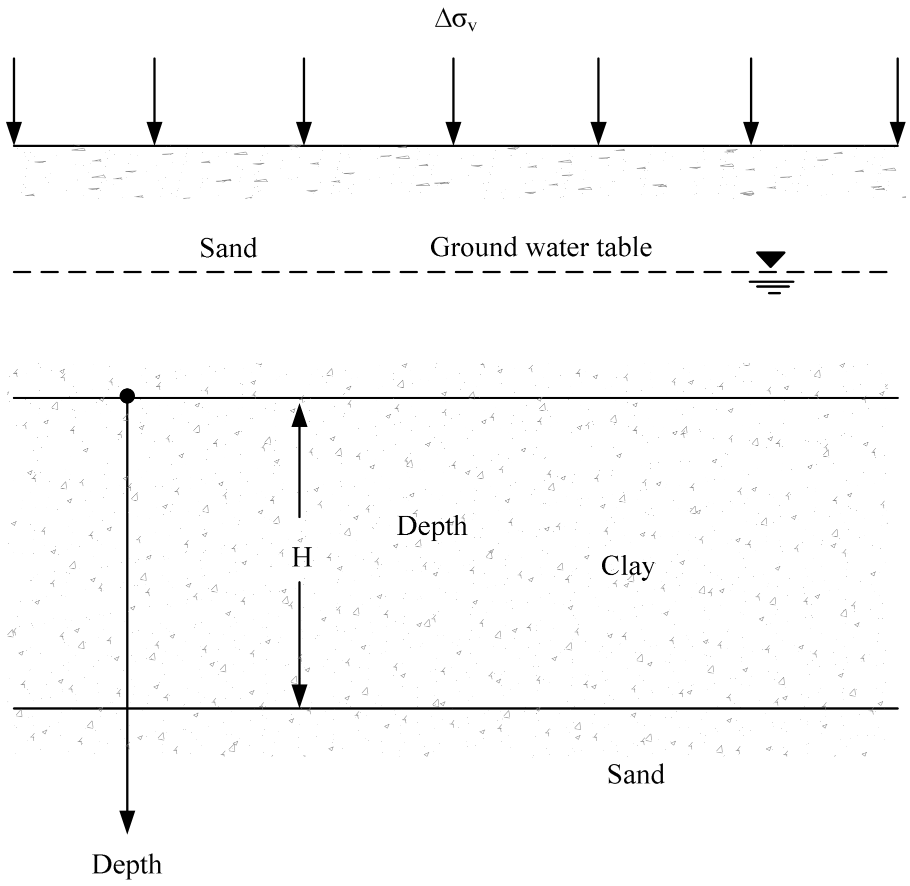


รูปที่ 2.2 ลักษณะของฐานรากที่ตั้งอยู่บนดินสองชั้น

2.2.3 การอัดตัวคายน้ำ (Consolidation)

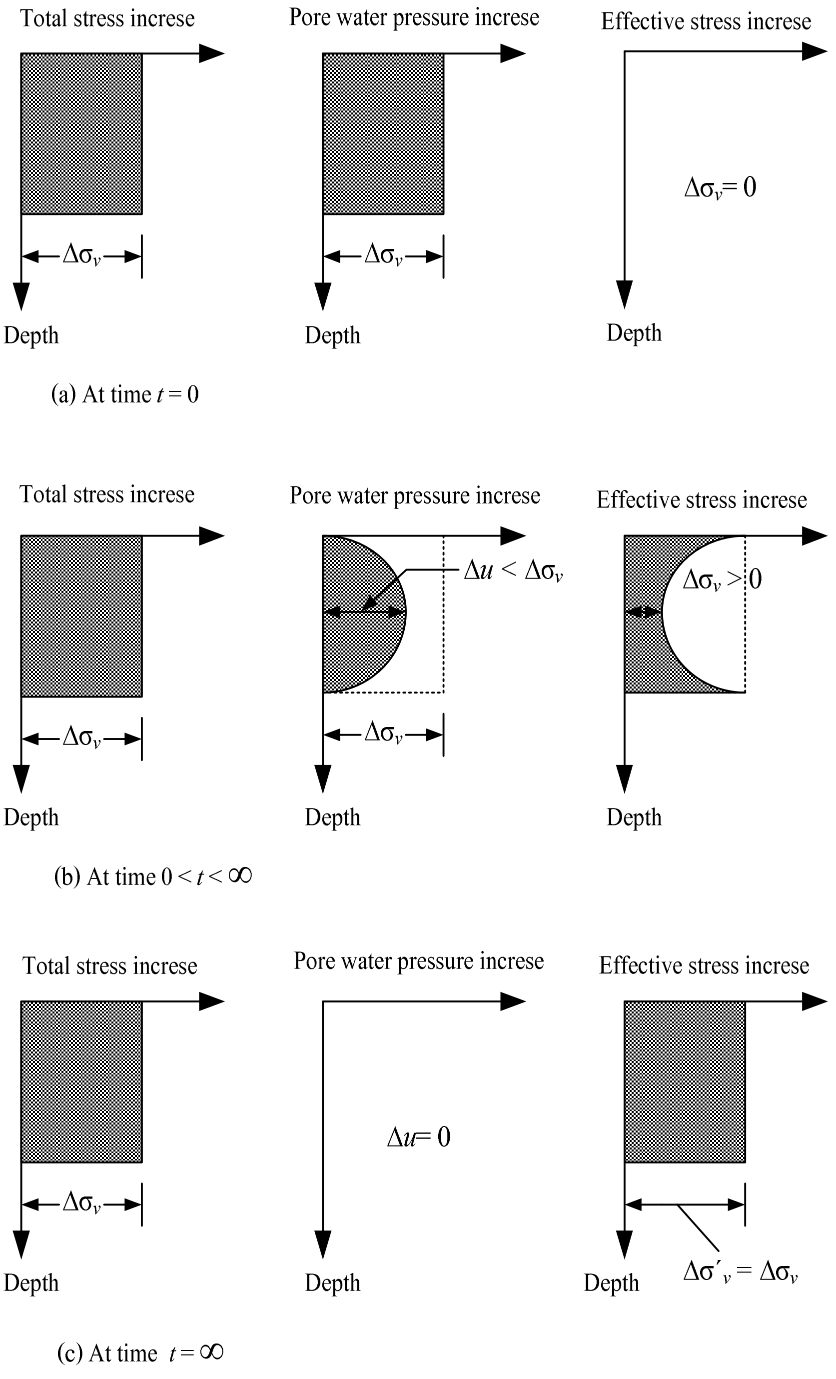
เมื่อมีน้ำหนักกดทับบนชั้นดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำจะเกิดความดันน้ำส่วนเกิน (excess pore water pressure, Δu) ระยะที่ใช้ในการระบายความดันน้ำส่วนเกินจะแปรผันตามสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน สำหรับดินเหนียวซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านต่ำ การระบายความดันน้ำส่วนเกินจะกินเวลานานในขณะที่ดินทรายซึ่งมีสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านสูง การไหลของน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินจะเกิดขึ้นและเสร็จสิ้นในเวลาอันสั้น ดังนั้น การทรุดตัวทันที และการอัดตัวคายน้ำจะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กันทันทีที่มีน้ำหนักกระทำบนชั้นดินประเภทนี้

ความดันน้ำส่วนเกิน (excess pore water pressure, Δu) ในชั้นดินเหนียวอ่อนจะค่อย ๆ ลดลงตามเวลา ส่งผลให้เกิดการอัดตัวคายน้ำที่กินเวลา



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการทรุดตัวของดินเหนียวที่ถูกประกบด้วยดินทราย

รูปที่ 2.3 และ 2.4 แสดงชั้นดินที่รับน้ำหนักบรรทุกกระจายสม่ำเสมอ และการเปลี่ยนแปลงความเค้นและความดันน้ำส่วนเกินในมวลดินกับเวลา ตามลำดับ ซึ่งเป็นกรณีชั้นดินเหนียวความหนา H



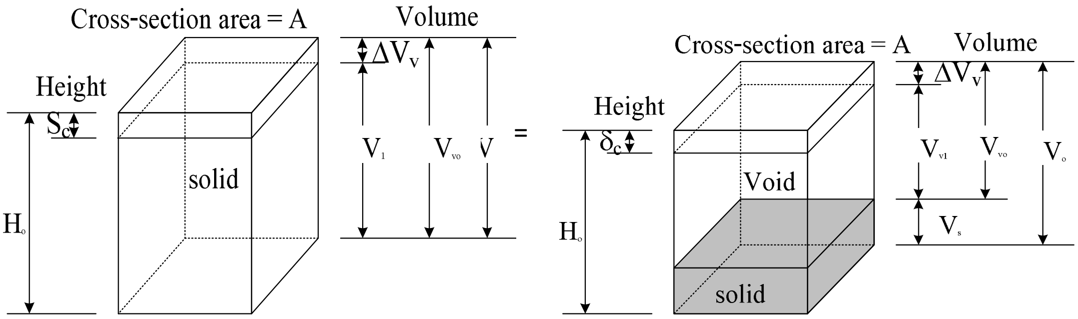
รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงของความเค้นรวมที่เกิดขึ้น ความดันน้ำส่วนเกิน และความเค้น

ประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้นกับเวลา

2.2.4 การคำนวณการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำปฐมภูมิ

พิจารณามวลดินเหนียวที่มีความหนาเท่ากับ H และพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ A และรับความเค้นกดทับที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ $\Delta\sigma_v$ ความเค้นนี้ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาตร และส่งผลให้

เกิดการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำเท่ากับ S_c (รูปที่ 2.5) ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงคำนวณได้ดังนี้



รูปที่ 2.5 การทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ

$$\Delta V = V_0 - V_1 = HA - (H - S_c)A = S_c A \tag{2.4}$$

เมื่อ V_0 คือปริมาตรเริ่มต้น

V_1 คือปริมาตรสุดท้าย

$$\Delta V = S_c A = V_{v0} - V_{v1} = \Delta V_v \tag{2.5}$$

เมื่อ V_{v0} คือปริมาตรของช่องว่างระหว่างเม็ดดินเริ่มต้น

V_{v1} คือปริมาตรของช่องว่างระหว่างเม็ดดินสุดท้าย

จากคำนิยามของช่องว่างระหว่างเม็ดดิน จะได้

$$\Delta V_v = \Delta e V_s \tag{2.6}$$

เมื่อ Δe คือการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนโพรง

การเปลี่ยนแปลงของปริมาตรทั้งหมดเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (ΔV_v) ดังนั้น

$$V_s = \frac{V_0}{1+e_0} = \frac{AH}{1+e_0} \quad (2.7)$$

เมื่อ e_0 คืออัตราส่วนโพรงเริ่มต้นที่ปริมาตร V_0

ดังนั้นจากสมการที่ (2.4) ถึง (2.7) จะได้

$$\Delta V = S_c A = \Delta e V_s = \frac{AH}{1+e_0}\Delta e \quad (2.8)$$

$$S_c = H\frac{\Delta e}{1+e_0} = \varepsilon H \quad (2.9)$$

สมการที่ (2.9) เป็นสมการหลักที่ใช้ในการคำนวณการทรุดตัวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนโพรงหรือความเครียด แต่อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงความเครียดจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความเค้นประสิทธิผล ดังนั้น การทรุดตัวหาได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเครียดและความเค้น ดังนั้น สมการที่ (2.9) สามารถเขียนใหม่ได้ ดังนี้

$$S_c = m_v \Delta\sigma_v H \quad (2.10)$$

เมื่อ m_v คือสัมประสิทธิ์การอัดตัวของปริมาตร (Coefficient of compressibility)

แต่อย่างไรก็ตาม m_v เป็นค่าที่ไม่คงที่และแปรผันอย่างมากกับความเค้นในแนวดิ่ง (σ'_v) ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการคำนวณ เราอาจวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $e-\log\sigma'_v$ จากความสัมพันธ์นี้ เราสาสามารถคำนวณการอัดตัวคายน้ำที่ความเค้นต่าง ๆ โดยอาศัยพารามิเตอร์แค่สองตัว ซึ่งคือความชันของกราฟ $e-\log\sigma'_v$ ในช่วงก่อนและหลังความเค้นคราก (C_s และ C_c)

โดยสมมติว่าความชันทั้งสองนี้ที่ค่าคงที่ไม่แปรผันตามความเค้นในแนวดิ่ง การคำนวณการทรุดตัวโดยใช้พารามิเตอร์ทั้งสองตัวนี้แสดงดังสมการข้างล่าง

สำหรับดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสานอัดตัวปกติ

$$S_c = \frac{C_c H}{1+e_0}\log\left(\frac{\sigma'_{v0}+\Delta\sigma_v}{\sigma'_{v0}}\right) \tag{2.11}$$

สำหรับดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสานอัดตัวมากกว่าปกติ ดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานอัดตัวมากกว่าปกติ และดินเหนียวพันธะเชื่อมประสาน Meta-stable

$$S_c = \frac{C_s H}{1+e_0}\log\left(\frac{\sigma'_{v0}+\Delta\sigma_v}{\sigma'_{v0}}\right) \quad \text{เมื่อ } \sigma'_{v0}+\Delta\sigma_v < \sigma'_y \tag{2.12}$$

$$S_c = \frac{C_s H}{1+e_0}\log\frac{\sigma'_y}{\sigma'_{v0}} + \frac{C_c H}{1+e_0}\log\left(\frac{\sigma'_{v0}+\Delta\sigma_v}{\sigma'_y}\right) \quad \text{เมื่อ } \sigma'_{v0}+\Delta\sigma_v > \sigma'_y \tag{2.13}$$

เมื่อ C_c คือความชันของ $e-\log\sigma'_v$ ในช่วงหลังความเค้นคราก และเรียกว่าดัชนีการอัดตัว (Compression index)

C_s คือความชันของกราฟ $e-\log\sigma'_v$ ในช่วงก่อนความเค้นคราก และเรียกดัชนีการพองตัว (Swell index)

$\Delta\sigma_v$ คือความชันที่เพิ่มขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำหนักบรรทุกและพื้นที่รับน้ำหนัก

2.2.5 อัตราส่วนการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำปฐมภูมิ

Terzaghi (1925) เป็นคนแรกที่เสนอทฤษฎีในการคำนวณอัตราการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำ การคำนวณตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า

1) ดินมีคุณสมบัติสม่ำเสมอและเหมือนกันทุกทิศทาง (Homogenous and isotropic)

2) ดินอยู่สภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ

3) ดินและน้ำมีคุณสมบัติอัดตัวไม่ได้

4) การระบายน้ำอยู่ในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นการอัดตัวคายน้ำเกิดขึ้นในทิศทางเดียว

5) การไหลของน้ำในดินเป็นไปตามกฎของดาร์ซี่

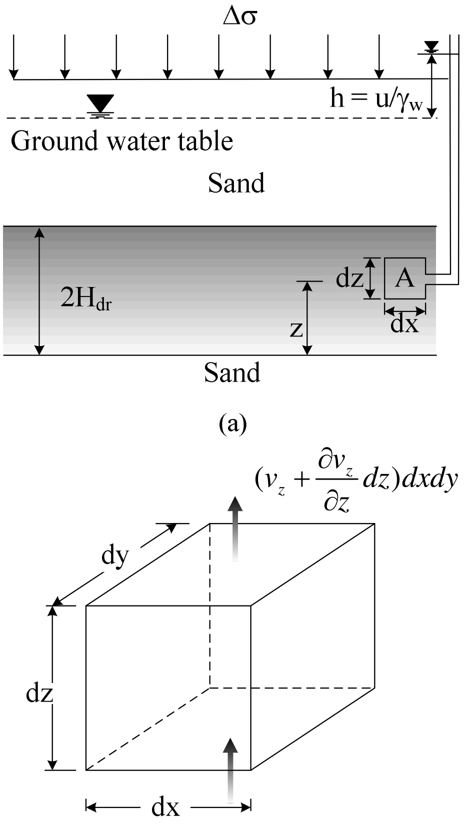
6) สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินมีค่าคงที่

รูปที่ 2.6a แสดงชั้นดินที่มีความหนา $2H_{dr}$ ที่อยู่ระหว่างชั้นทรายที่มีสัมประสิทธิ์ที่ซึมผ่านสูง ถ้าชั้นดินนี้ถูกกดทับด้วยความเค้นที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ $\Delta\sigma_v$ ความดันน้ำที่จุดใด ๆ ในชั้นดินจะเพิ่มขึ้น สำหรับการอัดตัวในทิศทางเดียว น้ำจะไหลพุ่งขึ้นในแนวดิ่งสู่ชั้นทราย

รูปที่ 2.6b แสดงการไหลของน้ำผ่านมวลดินเล็ก ๆ ที่ระยะ z ใด ๆ จะได้ว่าการเปลี่ยนปริมาตรที่เวลาใด ๆ เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกมีค่าเท่ากับอัตราการไหลออกเท่ากับอัตราการไหลเข้า และเขียนในรูปของสมการได้ดังนี้

$$\left(v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz\right) dxdy - v_z dxdy = \frac{\partial V}{\partial t} \tag{2.14}$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} dxdydz = \frac{\partial V}{\partial t} \tag{2.15}$$



รูปที่ 2.6 (a) ชั้นดินที่เกิดการอัดตัวคายน้ำ (b) การไหลของน้ำในก้อนดินเล็ก ๆ ระหว่างการอัดตัวคายน้ำ

เมื่อ V คือปริมาตรของมวลดินเล็ก ๆ

v_z คืออัตราการไหลของน้ำในทิศทาง z

จากสมการของดาร์ซี่

$$v_z = ki = -k\frac{\partial h}{\partial z} = -\frac{k}{\gamma}\frac{\partial \Delta u}{\partial z} \tag{2.16}$$

เมื่อ Δu คือความดันน้ำส่วนเกินเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเค้น

จากสมการที่ (2.15) และสมการที่ (2.14ข) จะได้

$$-\frac{k}{\gamma_w}\frac{\partial^2 \Delta u}{\partial z^2} = \frac{1}{dxdydz}\frac{\partial V}{\partial t} \tag{2.17}$$

ระหว่างการอัดตัวคายน้ำ อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของมวลดินเล็ก ๆ เท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ดังนั้น

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial V_v}{\partial t} = \frac{\partial (V_v + eV_s)}{\partial t} = \frac{\partial V_s}{\partial t} + V_s\frac{\partial e}{\partial t} + e\frac{\partial V_s}{\partial t} \tag{2.18}$$

เมื่อ V_s คือปริมาตรของมวลดิน

V_v คือปริมาตรของช่องว่างระหว่างเม็ดดิน แต่เนื่องจากว่าดินมีคุณสมบัติอัดตัวไม่ได้

จะได้ $\frac{\partial V_s}{\partial t} = 0$ และ $V_s = \frac{V}{1+e_0} = \frac{dxdydz}{1+e_0}$ ดังนั้น

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{dxdydz}{1+e_0}\frac{\partial e}{\partial t} \tag{2.19}$$

เมื่อ e_0 คืออัตราส่วนโพรงเริ่มต้น

จากสมการที่ (2.17) และ (2.19) จะได้

$$-\frac{k}{\gamma_w}\frac{\partial^2 \Delta u}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e_0}\frac{\partial e}{\partial t} \tag{2.19}$$

การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนโพรงจะเกิดได้ก็ต่อเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเค้นประสิทธิผล ถ้าสมมติว่าความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโพรงและความเค้นประสิทธิผลเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นตรง จะได้ว่า

$$\partial e = a_v \partial(\Delta\sigma'_v) = -a_v \partial \Delta u \tag{2.21}$$

เมื่อ a_v คือดัชนีการยุบตัว (Compressibility index)

โดยการรวมสมการที่ (2.19) และสมการที่ (2.20) จะได้

$$-\frac{k}{\gamma_w}\frac{\partial^2 \Delta u}{\partial z^2} = -\frac{a_v}{1+e_0}\frac{\partial \Delta u}{\partial t} = -m_v \frac{\partial \Delta u}{\partial t} \tag{2.22}$$

$$\frac{\partial \Delta u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 \Delta u}{\partial z^2} \tag{2.23}$$

เมื่อ m_v คือสัมประสิทธิ์การอัดตัวของปริมาตร (Coefficient of volume compressibility)

c_v คือสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ $= k/(\gamma_w m_v)$

สมการที่ (2.23) คือสมการพื้นฐานของทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำ และเราสามารถที่จะแก้สมการโดยมี Boundary condition ดังนี้

$z = 0, \quad \Delta u = 0$

$z = 2H_{dr}, \quad \Delta u = 0$

$t = 0, \quad \Delta u = \Delta u_0$

คำตอบของสมการคือ

$$\Delta u = \sum_{m=0}^{m=\alpha} \left[\frac{2\Delta u_0}{M} \sin\left(\frac{M_z}{H_{dr}} \right) \right] e^{-M^2 T_v} \qquad (2.24)$$

เมื่อ $M = \frac{\pi}{2}(2m+1)$

Δu_0 ท= ความดันน้ำส่วนเกินเริ่มต้น ($t = 0$)

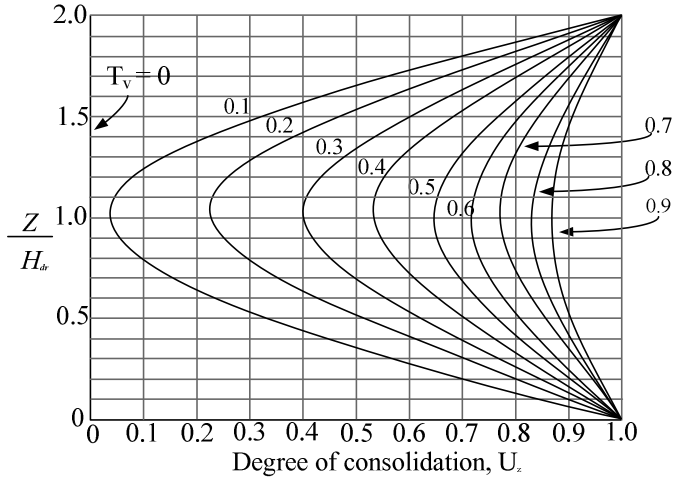
$T_v = \frac{c_v t}{H_{dr}^2}$ ซึ่งเรียกว่าแฟคเตอร์เวลา (Time factor) เป็นตัวแปรไร้หน่วย

ระดับดีกรีการอัดตัวคายน้ำ (Degree of consolidation, U_z) ที่ความลึก z และที่เวลาใด ๆ คือ

$$U_z = \frac{\Delta u_0 - \Delta u_z}{\Delta u_0} = 1 - \frac{\Delta u_z}{\Delta u_0} \qquad (2.25)$$

เมื่อ Δu_z คือความดันน้ำส่วนเกินที่ความลึกและเวลาใด ๆ

จากการรวมสมการที่ (2.24) และ (2.25) เข้าด้วยกัน ระดับดีกรีการอัดตัวคายน้ำที่ความลึกใด ๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง U_z และ T_v

ค่าเฉลี่ยระดับการอัดตัวคายน้ำ (Average degree of consolidation, U) ตลอดความลึกของชั้นดินเหนียวที่เวลาใด ๆ สามารถหาได้ดังนี้ จากสมการที่ 2.25 สามารถเขียนได้เป็น

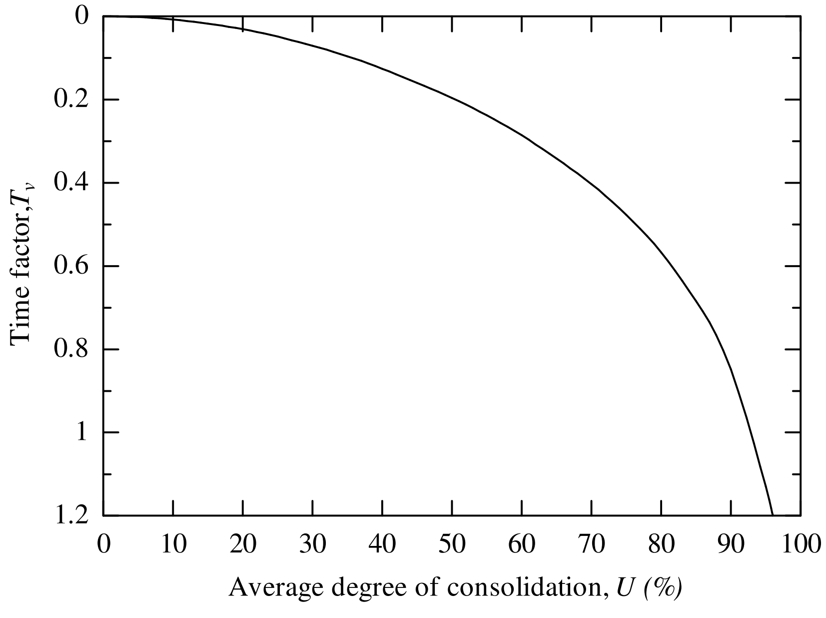
$$U = 1 - \frac{\left(\frac{1}{2H_{dr}^2}\right)\int_0^{2H_{dr}} \Delta u_z dz}{\Delta u_0} = \frac{S_t}{S_c} \tag{2.26}$$

เมื่อ S_t คือการทรุดตัวที่เวลาใด ๆ

แทนค่า Δu_z จากสมการที่ (2.22) ลงในสมการที่ (2.24) จะได้

$$U_z = 1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v} \tag{2.27}$$

ในกรณีที่ Δu_z มีค่าเท่ากันตลอดความลึกของชั้นดิน ผลของคำตอบของสมการที่ (2.27) แสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการอัดตัวคายน้ำและแฟคเตอร์เวลา เมื่อ Δu_0 มีค่าคงที่ตลอดความลึก

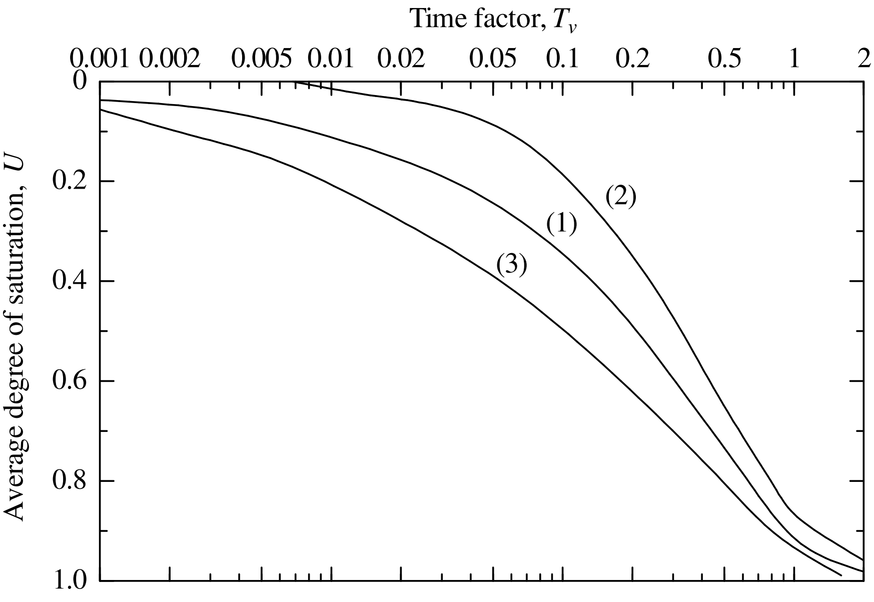
Sivaram and Swamee (1977) เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง U และ T_v สำหรับ U ที่มีค่าระหว่างร้อยละ 0 ถึง 100 ดังนี้

$$\frac{U\%}{100} = \frac{(4T_v / \pi)^{0.5}}{\left[1 + (4T_v / \pi)^{2.8}\right]^{0.179}} \tag{2.28}$$

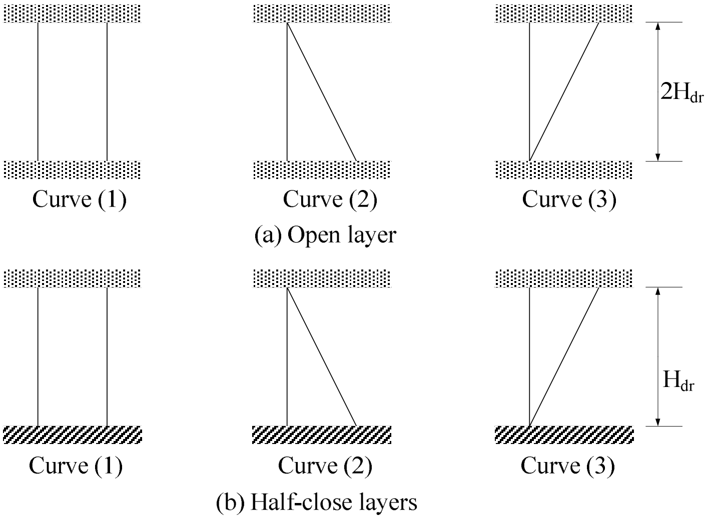
ในกรณีที่ค่า Δu_0 มีค่าไม่คงที่ตลอดความลึกของชั้นดิน ระดับการอัดตัวคายน้ำเฉลี่ย สามารถคำนวณได้จาก

$$U = 1 - \frac{\int_0^{2H_{dr}} \Delta u_z}{\int_0^{2H_{dr}} \Delta u_0} \tag{2.29}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการอัดตัวคายน้ำเฉลี่ยและแฟคเตอร์ เวลาแสดง ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งจะมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะการกระจายของความดันน้ำส่วนเกินเริ่มต้น และลักษณะการระบายน้ำ (ระบายน้ำทางเดียวหรือสองทาง) ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการอัดตัวคายน้ำเฉลี่ยและแฟกเตอร์เวลา เมื่อ Δu_0 มีค่าต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.10



รูป 2.10 ลักษณะการกระจายความดันน้ำส่วนเกินเริ่มต้น

2.2.6 การอัดตัวคายน้ำปฐมภูมิในสามทิศทาง (3-D Consolidation)

Skempton and Bjerruum (1957) กล่าวว่าควรมีการปรับแก้การทรุดตัวที่คำนวณจากทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำในหนึ่งทิศทาง และได้แสดงว่าค่าปรับแก้นี้มีค่าเป็นฟังก์ชันของรูปร่างของพื้นที่รับน้ำหนัก และตัวแปรความดันน้ำ A วิธีการปรับแก้อธิบายได้ดังนี้ ภายใต้สภาวะการอัดตัวคายน้ำในหนึ่งทิศทาง

$$S_{c(1-D)} = \int_0^H m_v \Delta u dz \qquad (2.30)$$

เมื่อ $\Delta u = \Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)$ ดังนั้น การทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำในสามทิศทางเท่ากับ

$$S_{c(3-D)} = \int_0^H m_v \Delta\sigma_1 \left(A + \frac{\Delta\sigma_3}{\Delta\sigma_1}(1-A) \right) dz \qquad (2.31)$$

สัมประสิทธิ์การทรุดตัว (Settlement coefficient) สามารถคำนวณได้ดังนี้

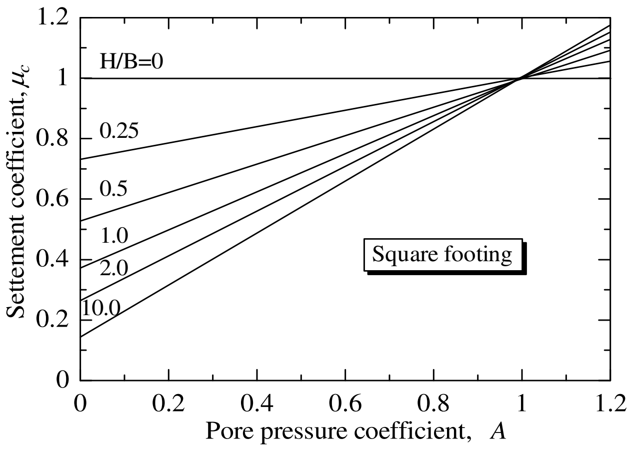
$$\mu_c = \frac{S_{c(3-D)}}{S_{c(1-D)}} = \frac{\int_0^H m_v \Delta\sigma_1 \left(A + \frac{\Delta\sigma_3}{\Delta\sigma_1}(1-A) \right) dz}{\int_0^H m_v \Delta\sigma_1 dz} \tag{2.32}$$

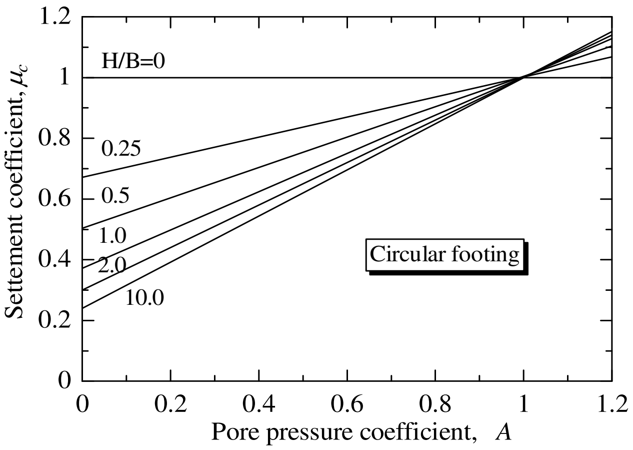
เพื่อความสะดวกในการคำนวณ สมมติให้ m_v และ A มีค่าคงที่ ดังนั้น สัมประสิทธิ์การทรุดตัวแสดงได้ดังนี้

$$\mu_c = A + (1-A)\alpha \tag{2.33}$$

$$\alpha = \frac{\int_0^H \Delta\sigma_3 dz}{\int_0^H \Delta\sigma_1 dz} \tag{2.34}$$

ค่าของ α อาจคำนวณโดยใช้ทฤษฎียืดหยุ่น จากการแทนค่าอัตราส่วนโพซองในสภาวะไม่ระบายน้ำ (ν_u) ด้วย 0.5 จะได้ค่าของ μ_c ดังแสดงในรูปที่ 2.11





รูปที่ 2.11 สัมประสิทธิ์การทรุดตัว Δu_c (Skempton and Bjerruum, 1957)

2.2.7 การอัดตัวคายน้ำทุติยภูมิ

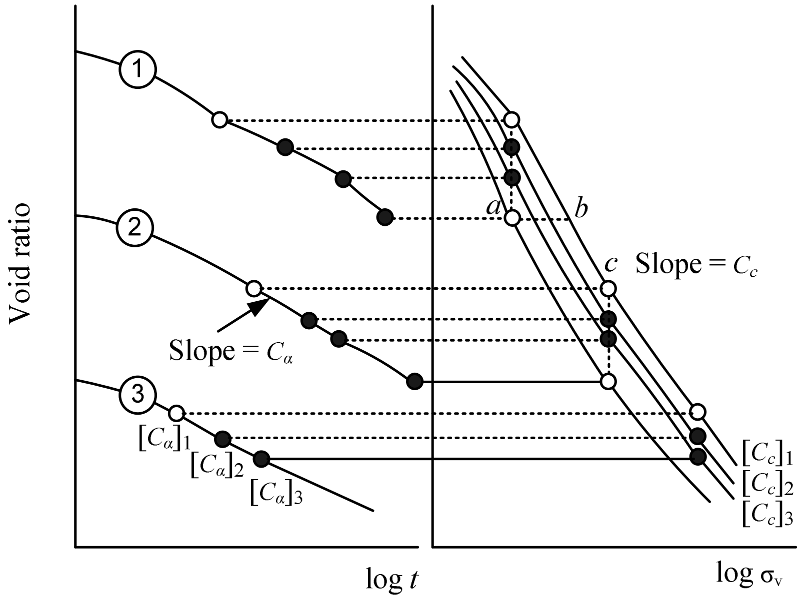
การทดสอบในสนาม (Lo, 1961; Mesri, 1973) แสดงให้เห็นว่าถึงแม้ว่าความดันน้ำส่วนเกินจะระบายไปหมดแล้วก็ตาม แต่การทรุดตัวก็ยังไม่สิ้นสุด กลับพบว่าการทรุดตัวยังเกิดอย่างต่อเนื่องภายใต้ความเค้นประสิทธิผลคงที่ การทรุดตัวประเภทนี้เรียกว่าการทรุดตัวทุติยภูมิ

ขั้นตอนการคำนวณแสดงดังรูปที่ 2.12 ที่ความเค้นในแนวดิ่งสามค่า ค่าพารามิเตอร์การทรุดตัวทุติยภูมิในแต่ละความเค้นในแนวดิ่งคำนวณได้จากความชันของกราฟ $e-\log t$ ในช่วงหลังจุดเปลี่ยนผันจากการอัดตัวคายน้ำปฐมภูมิเป็นการอัดตัวคายน้ำ ทุติยภูมิ พารามิเตอร์การอัดตัวทุติยภูมิ (Secondary compression index, C_α) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับดัชนีการอัดตัว (Compression index) โดยที่พารามิเตอร์การอัดตัวทุติยภูมิสามารถคำนวณได้จาก

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\Delta \log t} \tag{2.35}$$

Mesri and Godlewski (1977) กล่าวว่าอัตราส่วนระหว่าง C_α และ C_c มีค่าอยู่ระหว่าง 0.025 ถึง 0.10 (Sridharan et al., 1986) เสนอความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทั้งสองดังนี้

$$\log C_\alpha = 0.7847 \log C_c - 2.0431 \tag{2.36}$$



รูปที่ 2.12 การคำนวณหาพารามิเตอร์การอัดตัวทุติยภูมิ

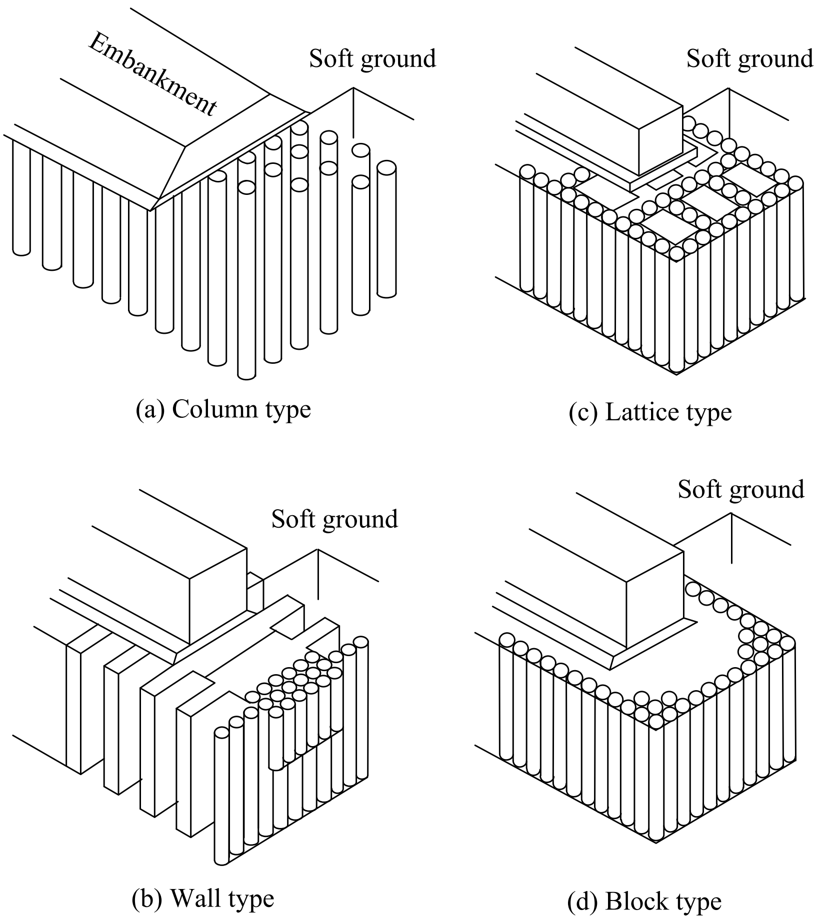
การทรุดตัวทุติยภูมิสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$S_s = C_\alpha \frac{\Delta \log t}{(1 + e_{100})} \tag{2.37}$$

เมื่อ e_{100} คืออัตราส่วนโพรงที่เกิดการอัดตัวคายน้ำปฐมภูมิร้อยละ 100

2.3 รูปแบบของการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคผสมลึก

รูปแบบของการจัดวางกลุ่มเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อสร้างชั้นดินประกอบด้วยเสาเข็ม (Composite ground) สามารถแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบเสาเข็ม (Column type pattern) รูปแบบบล็อก (Block type pattern) รูปแบบกำแพง (Wall type pattern) และรูปแบบโครงถัก (lattice type pattern) ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 รูปแบบการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคผสมลึก (DJM group, 2000)

2.4 การออกแบบฐานรากเสาเข็มดินซีเมนต์

2.4.1 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยว

การวิบัติของเสาเข็มเดี่ยวจะเกิดขึ้นได้ในสองกรณีคือการวิบัติในดิน (Soil failure) และการวิบัติในตัวเสาเข็มดินซีเมนต์ (Material failure) การวิบัติในดินจะแปรผันตามความเสียดทานระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์และดินรอบข้างเสาเข็ม และกำลังรับแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็ม ในขณะที่ การวิบัติในตัวเสาเข็มจะแปรผันตามกำลังอัดของเสาเข็มดินซีเมนต์ น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสภาวะไม่ระบายในกรณีที่เกิดการวิบัติในดิน ($\sigma_{ult,soil}$) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\sigma_{ult,soil} = \left(\pi d_{col} H_{col} + 2.25\pi d_{col}^{2}\right) S_u \tag{2.38}$$

เมื่อ d_{col} คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มดินซีเมนต์

H_{col} คือความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์

S_u คือกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินรอบเสาเข็ม

สมการนี้สมมติว่าความเสียดทานระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์และดินรอบเสาเข็มดินซีเมนต์มีค่าเท่ากับกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินรอบเสาเข็ม (สัมประสิทธิ์การยึดเกาะมีค่าเท่ากับ 1) ละกำลังรับแบกทานที่ปลายเสาเข็มมีค่าเท่ากับ $9S_u$ ตัวแปรที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบก็คือกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินรอบเสาเข็ม ซึ่งจะมีค่าลดลงทันทีหลังจากติดตั้งเสาเนื่องจากการรบกวนดิน

(Shen, 1998; Miura et al., 1998) ได้ทำการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินรอบเสาเข็มดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการและในสนาม พวกเขาพบว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินจะมีค่าลดลงอย่างมากทันทีหลังการผสม แต่อย่างไรก็ตาม กำลังต้านทานแรงเฉือนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาเนื่องจากปรากฏการณ์ Thixotropy การอัดตัวคายน้ำ และขบวนการทางเคมี ขบวนการอัดตัวคายน้ำและขบวนการทางเคมีเป็นขบวนการระบายความดันน้ำส่วนเกิน และน้ำปูนซีเมนต์ไปยังดินที่อยู่รอบข้างตามแนวรอยแยกในดินที่เกิดจากการพ่นน้ำปูนซีเมนต์ ด้วยความดันสูง (Shan and Miura, 1999) ด้วยเหตุนี้เอง กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินล้อมรอบเสาเข็มหลังจากอายุบ่ม 28 วัน มีค่าประมาณร้อยละ 70 ถึง 120 ของกำลังต้านทานแรงเฉือนเริ่มต้น และอาจพิจารณาได้ว่า กำลังต้านทานแรงเฉือนที่อายุบ่มเกิน 28 วัน มีค่าเท่ากับกำลังต้นทานแรงเฉือนเริ่มต้น

สำหรับกรณีการวิบัติในตัวเสาเข็มดินซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2004b) ได้แสดงให้เห็นว่ากำลังของดินเหนียวซีเมนต์ไม่แปรผันตามความเค้นประสิทธิผล เมื่อความเค้นประสิทธิผลมีค่าต่ำกว่าความเค้นครากมาก ในทางปฏิบัติ กำลังอัดของเสาเข็มดินซีเมนต์มักไม่เกิน 400 กิโลปาสคาล (Miura et al., 1986) ส่งผลให้ความเค้นครากมีค่าสูงประมาณ 500 ถึง 800 กิโลปาสคาล (σ'_y มีค่าระหว่าง 1.3 ถึง 2.2 เท่าของกำลังแกนเดียว)

Horpibulsuk et al. (2004a) โดยทั่วไปแล้ว เสาเข็มดินซีเมนต์จะมีความยาวประมาณ 10 ถึง 20 เมตร ที่ระดับความลึกดังกล่าว ความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่งจะมีค่าประมาณ 100 ถึง 200 กิโลปาสคาล ซึ่งมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับความเค้นคราก ดังนั้นเราจึงใช้ค่ากำลังกัดแกนเดียวในการประมาณน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่วิบัติในตัวเสาเข็ม ($\sigma_{ult,soil}$) ได้ดังนี้

$$\sigma_{ult,soil} = A_{col}\left(q_{uf}\right) \qquad (2.39)$$

เมื่อ q_{uf} คือกำลังอัดของเสาเข็มดินซีเมนต์ ซึ่งมีค่าแปรผันตามสภาวะการผสม

ที่สภาวะทำงานได้ (Workable state)

กำลังอัดของเสาเข็มดินซีเมนต์มีค่าเท่ากับ 0.5 และ 0.33 เท่าของกำลังอัดของตัวอย่างดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ สำหรับเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ผสมปูนซีเมนต์ในปริมาณต่ำและสูง ตามลำดับ

Bergado et al. (1996) กล่าวว่ากำลังเสาเข็มดินซีเมนต์ในสภาวะใช้งานนาน ๆ อาจมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดในสภาวะไม่ระบายน้ำประมาณร้อยละ 65 ถึง 85 เนื่องจากความคืบ (Creep) ของวัสดุ

2.4.2 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของกลุ่มเสาเข็ม

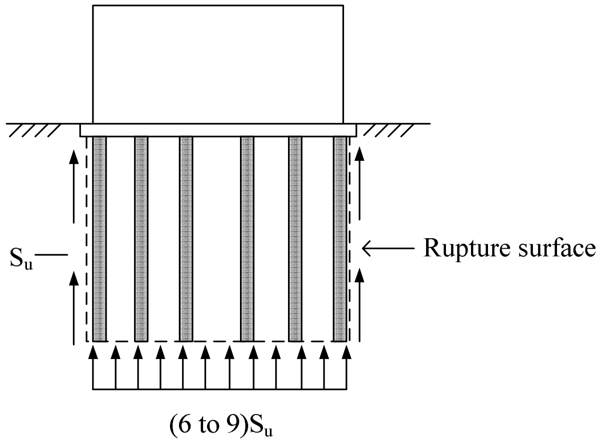
น้ำหนักบรรทุกประลัยของกลุ่มเสาเข็มขึ้นอยู่กับกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินรอบเสาเข็มดินซีเมนต์ และกำลังต้านทานแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์ การวิบัติมีด้วยกันสองลักษณะคือ การวิบัติแบบบล็อกเสาเข็ม (Block failure) ดังแสดงในรูปที่ 2.14a และการวิบัติแบบส่วน (Local shear failure) ดังแสดงในรูปที่ 2.15b เมื่อเสาเข็มดินซีเมนต์มีระยะระหว่างกันมาก น้ำหนักบรรทุกประลัยแบบบล็อกสามารถประมาณได้ดังนี้

$$\sigma_{ult,group} = 2S_u H\left(B_g + L_g\right) + (6-9)S_u B_g L_g \tag{2.40}$$

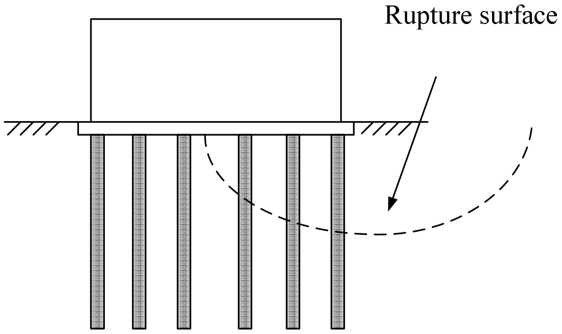
เมื่อ B_g คือความกว้างของกลุ่มเสาเข็มดินซีเมนต์
L_g คือความยาวของกลุ่มเสาเข็มดินซีเมนต์
H คือความสูงของกลุ่มเสาเข็มดินซีเมนต์

แฟคเตอร์ 6 ใช้สำหรับฐานรากสี่เหลี่ยมพื้นผ้า ซึ่งมีความยาวกว้างกว่าความกว้างมาก และแฟคเตอร์ 9 ใช้สำหรับฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัสผู้ออกแบบต้องใช้อัตราส่วนปลอดภัยสำหรับกำลังรับแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มที่สูงเพื่อป้องกันการทรุดตัว โดยทั่วไปการทรุดตัวที่ให้กำลังรับแรงแบกทานประลัยจะเกิดที่การทรุดตัวประมาณร้อยละ 5 ถึง 10 ของความกว้างฐานราก

บางครั้ง การวิบัติอาจเกิดที่กรอบของฐานราก ซึ่งเป็นการวิบัติแบบบางส่วน (Local failure) กำลังแบกทานของการวิบัติแบบนี้ขึ้นอยู่กับกำลังต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ยของดินตามระนาบวิบัติ ซึ่งเป็นส่วนโค้งของวงกลม ดังแสดงในรูปที่ 2.14b



a) Block failure



b) Local shear failure

รูปที่ 2.14 ลักษณะการวิบัติของฐานรากเสาเข็มดินซีเมนต์ (Broms and Boman, 1975)

กำลังรับแรงแบกทานในกรณีเช่นนี้สามารถ ประมาณได้จาก

$$q_{ult} = 5.5 S_{av}\left(1 + 0.2\frac{b_1}{l_1}\right) \tag{2.41}$$

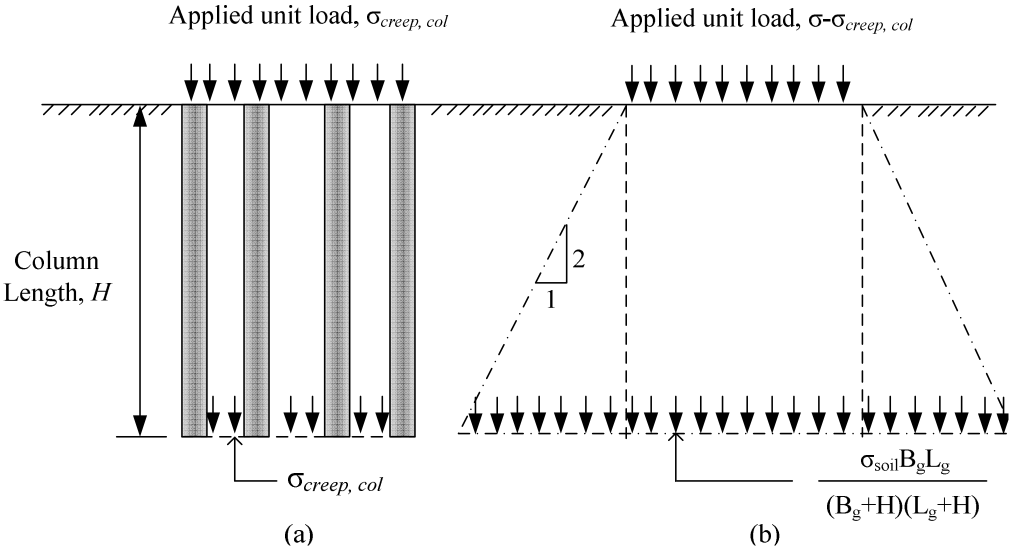
เมื่อ b_1 คือความกว้างของพื้นที่รับน้ำหนัก (Loaded area)

l_1 คือความยาวของพื้นที่รับน้ำหนัก

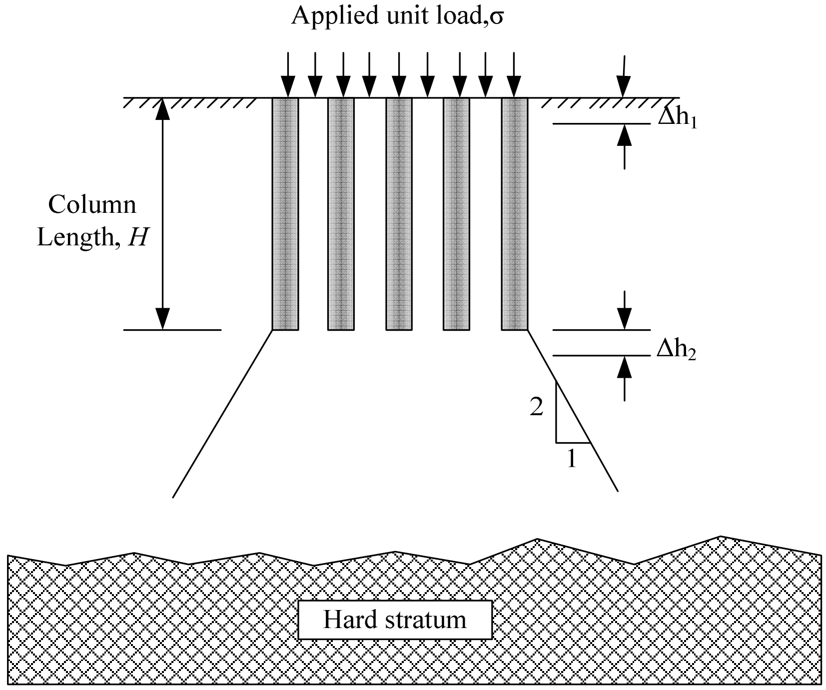
S_{av} คือกำลังต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ยตามระนาบวิบัติสมมติ ซึ่งขึ้นอยู่กับกำลังต้านทานแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์และพื้นที่เสาเข็ม อัตราส่วนปลอดภัยสำหรับการคำนวณกำลังรับแรงแบกทานยอมให้ควรมีค่าไม่น้อยกว่า 2.5

2.5 การทรุดตัวทั้งหมด

การทรุดตัวทั้งหมดของโครงสร้างที่วางอยู่บนเสาเข็มดินซีเมนต์สามารถคำนวณได้ โดยการพิจารณารูปที่ 2.15 การทรุดตัวทั้งหมดเท่ากับผลรวมของการทรุดตัวในชั้นดินปรับปรุง Δh_1 และการทรุดตัวในชั้นดินที่ไม่ได้รับการปรับปรุงใต้ชั้นดินปรับปรุง Δh_2 ในการคำนวณผู้ออกแบบต้องตรวจสอบการทรุดตัวสองกรณี คือกรณีแรก น้ำหนักบรรทุกไม่ก่อให้เกิดการคืบในเสาเข็มดินซีเมนต์และกรณีที่สอง น้ำหนักบรรทุกก่อให้เกิดความคืบในเสาเข็มดินซีเมนต์



รูปที่ 2.15 การคำนวณการทรุดตัวทั้งหมดเมื่อน้ำหนักบรรทุกก่อให้เกิดความคืบในเสาเข็มดินซีเมนต์ (Broms and Boman, 1979)



รูปที่ 2.16 การคำนวณการทรุดตัวทั้งหมด (Broms and Boman, 1975)

กรณีแรก น้ำหนักบรรทุกไม่ก่อให้เกิดการคืบในเสาเข็มดินซีเมนต์

กรณีนี้ สติฟเนสของเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นตัวควบคุมลักษณะกระจายน้ำหนักระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์และดินรอบเสาเข็ม ความสัมพันธ์ $M_{col} = (25-50)q_{col}$ นิยมใช้ในการประมาณการทรุดตัว เมื่อ M_{col} คือค่าโมดูลัสการอัดตัว และ q_{col} คือกำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ โมดูลัสการอัดตัวเฉลี่ย M_{av} สามารถประมาณได้ดังนี้

$$M_{av} = (1-a)M_{soil} + aM_{col} \tag{2.42}$$

การทรุดตัว Δh_1 (รูปที่ 2.17) สามารถประมาณได้ดังนี้

$$\Delta h_1 = \frac{\sigma \times H}{aM_{col} + (1-a)M_{soil}} \tag{2.43}$$

เมื่อ $a = \dfrac{N_{col} \times A_{col}}{BL}$ คืออัตราส่วนเทียบเท่าพื้นที่หน้าตัดเสาเข็มต่อพื้นที่ปรับปรุง

A_{col} คือพื้นที่หน้าตัดเสาเข็มดินซีเมนต์

N_{col} คือจำนวนเสาเข็มดินซีเมนต์

M_{soil} คือค่าโมดูลัสการอัดตัวของดินเหนียวที่ไม่ได้รับการปรับปรุง

M_{col} คือโมดูลัสการอัดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์

σ คือความเค้นที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถสมมติให้มีค่าคงที่ตลอดความยาวเสาเข็มการลดลงตามความลึก

การทรุดตัว Δh_2 ใต้บล็อกปรับปรุงสามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับการคำนวณการทรุดตัวของดินฐานราก โดยความเค้นในแนวดิ่งที่ปลายเสาเข็มเท่ากับความเค้นที่ผิวดิน และความเค้นที่ระดับความลึกต่าง ๆ สามารถประมาณโดยวิธี 2:1 ดังแสดงในรูปที่ 2.16

กรณีที่สอง น้ำหนักบรรทุกก่อให้เกิดความคืบในเสาเข็มดินซีเมนต์

กรณีนี้ น้ำหนักที่กระทำมีค่าสูงมาก จนทำให้ความคืบในเสาเข็มดินซีเมนต์ การทรุดตัว Δh_1 สามารถคำนวณ โดยพิจารณารูปที่ 2.15 น้ำหนักบรรทุกแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ $\sigma_{creep,col}$ ซึ่งรับโดยเสาเข็มดินซีเมนต์ σ_{soil} ซึ่งรับโดยดินรอบเสาเข็มดินซีเมนต์ เช่นเดียวกับในกรณี ก) น้ำหนักบรรทุกในส่วนของ $\sigma_{creep,col}$ ควบคุมโดยน้ำหนักความคืบ (Creep load) ของเสาเข็มดินซีเมนต์และประมาณได้ดังนี้

$$\sigma_{creep,col} = \frac{N_{col}\sigma_{creep,col}}{BL} \tag{2.44}$$

เมื่อ N_{col} คือจำนวนเสาเข็มดินซีเมนต์

น้ำหนักบรรทุกที่รับโดยดินรอบเสาเข็มดินซีเมนต์และดินใต้บล็อกปรับปรุงที่ใช้ในการประมาณการทรุดตัว Δh_2 คำนวณได้จาก $\sigma_{soil} = \sigma - \sigma_{creep,col}$ การทรุดตัวทั้งสองส่วนนี้สามารถคำนวณได้โดยการแบ่งชั้นดินออกเป็นหลายชั้น และใช้พารามิเตอร์การอัดตัวของดินเดิม การทรุดตัวทั้งหมดในโซนปรับปรุง Δh_1 ทั้งหมดเกิดผลรวมของการทรุดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์และการทรุดตัวของดินรอบข้างเสาเข็ม การทรุดตัว Δh_1 ใต้บล็อกปรับปรุงสามารถประมาณได้โดยการสมมติว่าความเค้นในแนวดิ่งมีค่าลดลงแบบ 2:1 ดังแสดงในรูป 2.17b

2.5.1 อัตราการทรุดตัว

อัตราการทรุดตัว U ของแต่ละชั้นดินย่อยภายในโซนปรับปรุงสามารถคำนวณได้โดยอาศัยสมการต่อไปนี้ (Carillo, 1942)

$$U = 1 - (1 - U_h)(1 - U_v) \tag{2.45}$$

เมื่อ U_v คือระดับการอัดตัวคายน้ำในแนวดิ่ง

U_h คือระดับการอัดตัวคายน้ำในแนวนอน

ระดับการอัดตัวคายน้ำในแนวนอน U_h สามารถประมาณได้จากสมการของ (Honbo, 1979) เช่นเดียวกับการระบายน้ำของแผ่นระบายน้ำในแนวดิ่ง ดังนี้

$$U_h = -\exp\left[\frac{-8T_h}{F}\right] \quad (2.46)$$

$$F = F_n + F_s + F_r \quad (2.47)$$

$$F_n = \ln\left(\frac{D_e}{d_{col}}\right) - 0.75 \quad (2.48)$$

$$F_s = 0 \quad (2.49)$$

$$F_r = \pi Z(2H_{col} - Z_d)\left(\frac{k_h}{q_w}\right) \quad (2.50)$$

เมื่อ Z_d คือระยะจากจุดที่สนใจถึงขอบเขตการระบายน้ำ

H_{col} คือความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์

k_h คือสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินรอบเสาเข็มดินซีเมนต์

q_w คือความสามารถระบายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $k_{col}\dfrac{\pi d^2}{4}$

เมื่อ k_{col} คือสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์

ดังนั้น แฟคเตอร์ความต้านทานการระบายน้ำสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$F_r = \frac{4Z(H_{col} - Z_d)}{\pi d_{col}^2} \quad (2.51)$$

Bargado et al. (1999) ได้ใช้ค่า (k_{col}/k_h) เท่ากับ *2* สำหรับการคำนวณการทรุดตัวของชั้นดินที่ปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ใต้ดินถมของโครงการทางหลวงบางนา–บางประกง กรุงเทพมหานคร การทรุดตัวของชั้นดินปรับปรุงที่เวลาใด ๆ (S_t) สามารถประมาณได้จาก

$$S_t = U \times S_c \quad (2.52)$$

เมื่อ S_c คือการทรุดตัวทั้งหมดของชั้นดินปรับปรุง

Lorenzo and Bergado (2003) ได้เสนอการประมาณการทรุดตัวของ composite ground โดยวิธี analytical method ซึ่งเป็นทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ สมการที่ (2.53) เป็นสมการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินเฉลี่ยดินรอบเสาเข็มและค่าความดันน้ำส่วนเกินเฉลี่ยของเสาเข็มที่มีความลึก z และเวลา t

$$\left[\left(\frac{\partial \bar{u}_{up}}{\partial t}\right)+\left(n^2-1\right)\left(\frac{m_{v,c}}{m_{v,p}}\right)\left(\frac{C_c}{C_c}\right)_p\left(\frac{\partial \bar{u}_c}{\partial t}\right)\right]=c_{v,p}\left(\frac{\partial^2 \bar{u}_{up}}{\partial z^2}\right) \qquad (2.53)$$

เมื่อ C_c/C_s คืออัตราส่วนของดัชนีการอัดตัวและดัชนีการบวมตัวของเสาเข็มที่ระดับความเครียดที่สอดคล้องกับสภาพน้ำหนักที่กระทำ

$m_{v,p}$ คือค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวของปริมาตรของเสาเข็ม ซึ่งเท่ากับ $\frac{k_{h,c}}{c_{h,c}\gamma_w}$

$c_{v,p}$ คือค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำของเสาเข็ม

$m_{v,c}$ คือค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวของปริมาตรของดินรอบเสาเข็ม ซึ่งเท่ากับ $\frac{k_{h,c}}{c_{h,c}\gamma_w}$

สมการที่ (2.53) สามารถจัดรูปใหม่ภายใต้สองเงื่อนไข ดังต่อไปนี้

1. สำหรับ Equal stress condition $\left(\bar{\sigma}'_{v,p}=\bar{\sigma}'_{v,c}\right)$ ซึ่ง $\bar{\sigma}'_{v,p}$ และ $\bar{\sigma}'_{v,c}$ เป็นค่าเฉลี่ยความเค้นประสิทธิผลของเสาเข็มและดินล้อมรอบ ตามลำดับ ดังนั้น

$$\frac{\partial \bar{u}_{up}}{\partial t}=\frac{\partial \bar{u}_c}{\partial t} \qquad (2.54)$$

จะได้

$$\frac{\partial^2 \bar{u}_{up}}{\partial z^2}=\frac{\partial^2 \bar{u}_c}{\partial z^2} \qquad (2.55)$$

ดังนั้น สมการที่ (2.51) ภายใต้ equal stress condition จะกลายเป็น

$$\frac{\partial \bar{u}_x}{\partial t} = \left[\frac{\left(\dfrac{m_{v,p}}{m_{v,c}} \right)}{\left(\dfrac{m_{v,p}}{m_{v,c}} \right) + \left(n^2 - 1 \right) \left(\dfrac{C_c}{C_s} \right)} \right] \left(c_{v,p} \right) \left(\frac{\partial^2 \bar{u}_x}{\partial z^2} \right) \tag{2.56}$$

ซึ่ง

$$\left(\frac{m_{v,p}}{m_{v,c}} \right) = \left(\frac{k_{v,p}}{k_{v,c}} \right) \left(\frac{c_{h,c}}{c_{v,p}} \right) \approx \left(\frac{k_{v,p}}{k_{v,c}} \right) \left(\frac{c_{h,c}}{c_{v,p}} \right) \tag{2.57}$$

ตัวแปร x ที่ห้อยท้ายสามารถเปลี่ยนไปเป็น "up" หรือ "c" ได้ตามต้องการ ขึ้นอยู่ว่าเป็นกรณีของการอัดตัวคายน้ำของเสาเข็มหรือเป็นการอัดตัวคายน้ำของดินรอบข้าง

2. สำหรับ Equal strain condition

$$\frac{\delta s_p}{dz} = \frac{\delta \bar{s}_c}{dz} \tag{2.58}$$

เมื่อความเครียดของเสาเข็มและดินรอบเสาเข็มเท่ากัน จะกลายเป็น

$$m_{v,p} \left(\frac{\partial \bar{u}_{up}}{\partial t} \right) = m_{v,c} \left(\frac{\partial \bar{u}_{uc}}{\partial t} \right) \tag{2.59}$$

ดังนั้น

$$m_{v,p} \frac{\partial^2 \bar{u}_{up}}{\partial z^2} = m_{v,c} \frac{\partial^2 \bar{u}_{uc}}{\partial z^2} \tag{2.60}$$

ดังนั้น สมการที่ (2.56) ภายใต้ equal strain condition จะกลายเป็น

$$\frac{\partial \bar{u}_x}{\partial t} = \left[\frac{c_{v,p}}{1 + \left(n^2 - 1\right)\left(\frac{C_c}{C_s}\right)} \right] \left(\frac{\partial^2 \bar{u}_x}{\partial z^2} \right) \tag{2.61}$$

ตัวแปร x ที่ห้อยท้าย ในสมการที่ (2.56) และสมการ (2.61) ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขต ดังต่อไปนี้

$z = 0$, สำหรับ $t > 0$: $\bar{u}_{up}$ (0, t) = 0, และ $\bar{u}_c$ (0, t) = 0

$z = H$, สำหรับ $t > 0$: $\left(\frac{\partial \bar{u}_{up}}{\partial t}\right)=0$, และ $\left(\frac{\partial \bar{u}_c}{\partial t}\right)=0$

จากสมการความเค้น (2.54) เมื่อ $\bar{u}_{up}(z,t) = \bar{u}_c(z,t)$ เมื่อ $\bar{u}_c$ เป็นค่าเฉลี่ยที่ใช้กับความเค้นใน Composite ground ทั้งหมด เงื่อนไขเบื้องต้นจะสมบูรณ์ เมื่อกรณีที่สภาพความเครียดเท่ากับสมการ (2.61) สำหรับดินรอบเสาเข็มและเสาเข็มตามลำดับ ดังนั้น

ที่ $t = 0$ สำหรับดินเหนียว

$$\bar{u}_{0,c} = \left[\frac{\left(\frac{m_{v,p}}{m_{v,c}}\right) n^2}{1 + \left(\frac{m_{v,p}}{m_{v,c}}\right)\left(n^2 - 1\right)} \right] \bar{u}_0 \tag{2.62}$$

ที่ $t = 0$ สำหรับเสาเข็ม

$$\bar{u}_{0,p} = \left[\frac{n^2}{1 + \left(\frac{m_{v,p}}{m_{v,c}}\right)\left(n^2 - 1\right)} \right] \bar{u}_0 \tag{2.63}$$

สมการ (2.56) และ (2.61) จะให้คำตอบคล้ายกับการแก้ปัญหาของสมการการอัดตัวคายน้ำหนึ่งมิติของ (Terzaghi, 1925) ที่ได้กล่าวมาแล้วในต้อนต้น สมการที่ (2.24) และ (2.27) เพียงแต่แฟคเตอร์เวลาที่ใช้ในการคำนวณมีค่าแตกต่างกัน

เงื่อนไขสมการความเค้น (Equal Stress Condition)

เพื่อหาค่าเฉลี่ยการอัดตัวคายน้ำของเสาเข็มซีเมนต์ ภายใต้ Equal stress condition ของสมการ (2.54) แฟคเตอร์เวลาที่ได้จะนำไปปรับแก้แทนในสมการ (หรือกราฟ) ของสมการที่ (2.27) การอัดตัวคายน้ำหนึ่งมิติของ Terzaghi แสดงได้ดังนี้

$$T_{v,\sigma} = \left[\frac{\left(\frac{m_{v,p}}{m_{v,c}} \right)}{\left(\frac{m_{v,p}}{m_{v,c}} \right) \left(n^2 - 1 \right) \left(\frac{C_c}{C_s} \right)_p} \right] \left(\frac{c_{v,p} t}{H_p^2} \right) \tag{2.64}$$

ระดับการอัดตัวคายน้ำเฉลี่ยของดินรอบเสาเข็มที่เกิดจากการระบายน้ำแบบทุกทิศทางภายใต้ Equal stress condition สามารถคำนวณหาได้ ดังนี้

$$\overline{U}_{v,\sigma c} = \overline{U}_v \left(T_{v,\sigma} \right) \tag{2.65}$$

ระดับการอัดตัวคายน้ำเฉลี่ยสำหรับเสาเข็ม เท่ากับ

$$\overline{U}_{v,\sigma p} = \overline{U}_v \left(T_{v,\sigma} \right) \tag{2.66}$$

เมื่อ H_p คือเส้นทางระบายน้ำประสิทธิพลของการอัดตัวคายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์

t คือเวลาเฉพาะของดีกรีการอัดตัวคายน้ำที่เวลานั้น ๆ

$T_{v,\sigma}$ คือแฟคเตอร์เวลาสำหรับเสาเข็มดินซีเมนต์ภายใต้ equal stress condition ในองค์ประกอบทั้งสอง

$\overline{U}_{v,\sigma c}$ คือค่าเฉลี่ยดีกรีการอัดตัวคายน้ำของดินล้อมรอบภายใต้ equal stress condition (สมการที่ 2.61 2.65 และ 2.66) เนื่องจากรัศมีการระบายน้ำต่อการอัดตัวคายน้ำของเสาเข็ม

$\overline{U}_{v,\sigma p}$ คือค่าเฉลี่ยดีกรีการอัดตัวคายน้ำของเสาเข็มภายใต้ equal stress condition (สมการที่ 2.56 2.60 และ 2.62)

$\overline{U}_v$ คือฟังก์ชันค่าเฉลี่ยดีกรีการอัดตัวคายน้ำของ (Terzaghi, 1925)

เงื่อนไขสมการความเครียด (Equal Strain Condition)

เพื่อหาค่าระดับการอัดตัวคายน้ำเฉลี่ยของเสาเข็มดินซีเมนต์ ภายใต้ Equal strain condition ของสมการ (2.61) แฟคเตอร์เวลาที่ได้จะนำไปปรับแก้แทนในสมการ (หรือกราฟ) ของสมการที่ (2.27) การอัดตัวคายน้ำหนึ่งมิติของ Terzaghi แสดงดังนี้

$$T_{v,\varepsilon} = \left[\frac{1}{1+\left(n^2-1\right)\left(\dfrac{C_c}{C_s}\right)_p}\right]\left(\frac{c_{v,p}t}{H_p^2}\right) \tag{2.67}$$

ระดับการอัดตัวคายน้ำเฉลี่ยของดินรอบเสาเข็มที่เกิดจากการระบายน้ำแบบทุกทิศทางภายใต้ Equal strain condition สามารถคำนวณหาได้ ดังนี้

$$\overline{U}_{v,\varepsilon c} = \overline{U}_v\left(T_{v,\varepsilon}\right) \tag{2.68}$$

ค่าระดับการอัดตัวคายน้ำเฉลี่ยสำหรับเสาเข็ม เท่ากับ

$$\overline{U}_{v,\varepsilon p} = \overline{U}_v\left(T_{v,\varepsilon}\right) \tag{2.69}$$

เมื่อ $T_{v,\varepsilon}$ คือแฟคเตอร์เวลาสำหรับเสาเข็มดินซีเมนต์ภายใต้ equal strain condition ในองค์ประกอบทั้งสอง

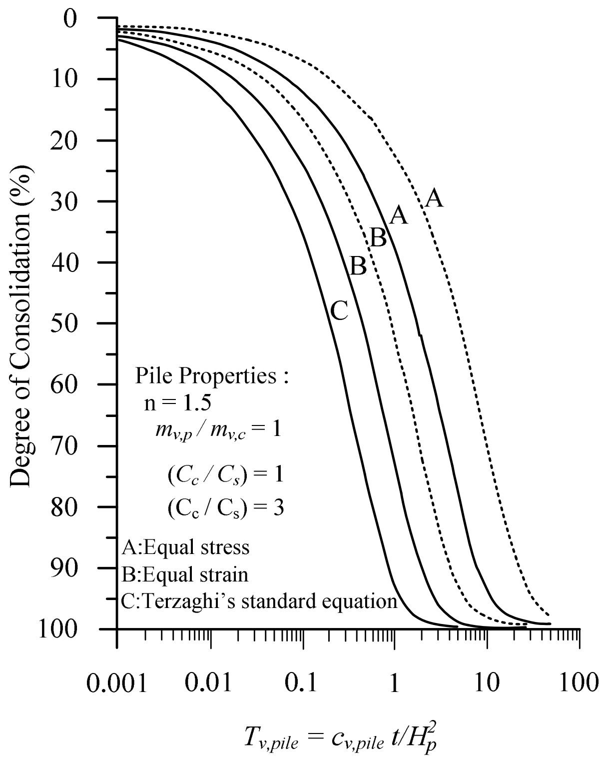
$\overline{U}_{v,\varepsilon c}$ คือค่าเฉลี่ยดีกรีการอัดตัวคายน้ำของดินล้อมรอบภายใต้ equal strain condition (สมการที่ 2.61 2.68 และ 2.69) เนื่องจากรัศมีการระบายน้ำต่อการอัดตัวคายน้ำของเสาเข็ม

$\overline{U}_{v,\varepsilon p}$ คือค่าเฉลี่ยดีกรีการอัดตัวคายน้ำของเสาเข็มภายใต้ equal strain condition เท่ากับ (สมการที่ 2.61 2.68 และ 2.69)

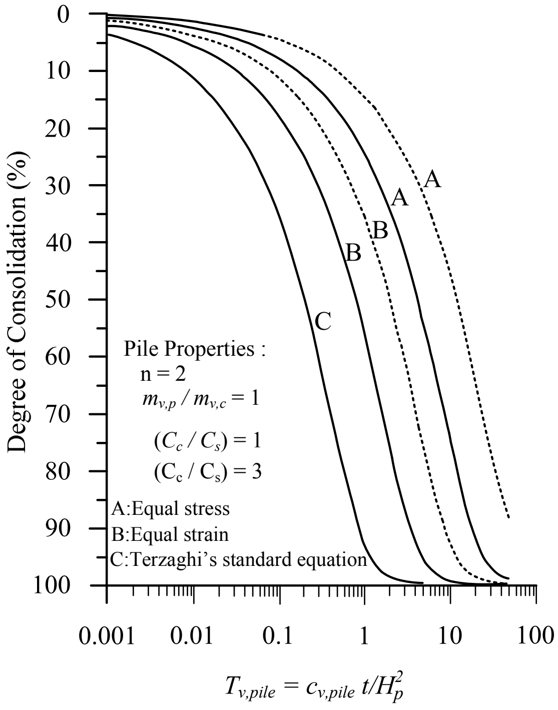
กราฟสำหรับการประมาณค่าเฉลี่ยดีกรีการอัดตัวคายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์โดยวิธีของ Lorenzo and Bergado แสดงในรูปที่ 2.17 2.18 และ 2.19 ตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการหาค่าดีกรีการอัดตัวคายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์ ได้แก่ $c_{v,p}$ C_c/C_s $n = D_e/d_p$ และ $m_{v,p}/m_{v,c}$

นอกจากนี้การหาค่าดีกรีการอัดตัวคายน้ำของดินล้อมรอบเสาเข็มดินซีเมนต์เนื่องจากการระบายน้ำตามแนวนอนและแนวดิ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.43)

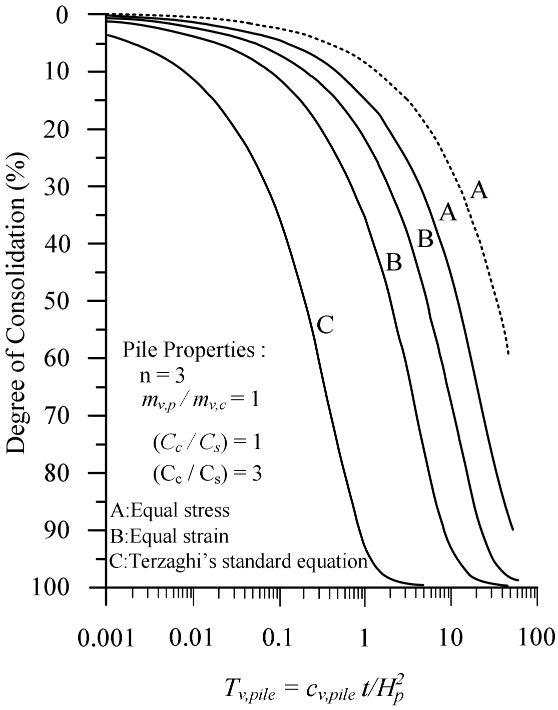
รูปที่ 2.17 ถึง 2.19 แสดงกราฟประมาณดีกรีการอัดตัวคายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์สำหรับค่าตัวแปร n = 1.55 ถึง 3.0 C_c/C_s = 1 และ 3 และ $m_{v,p}/m_{v,c}$ = 0.15



รูปที่ 2.17 ค่าเฉลี่ยดีกรีการอัดตัวคายน้ำของ composite ground ที่ n = 1.5



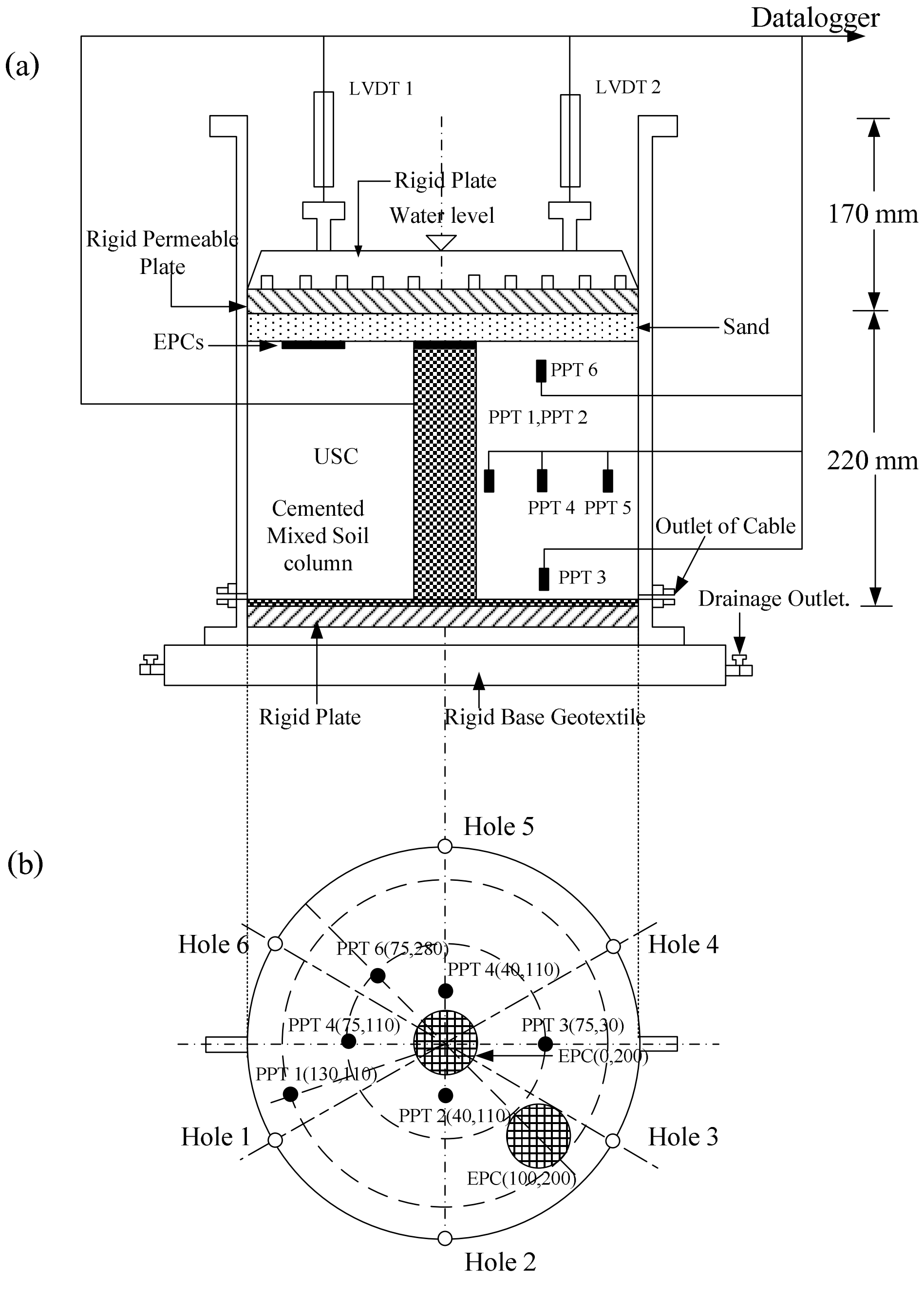
รูปที่ 2.18 ค่าเฉลี่ยดีกรีการอัดตัวคายน้ำของ composite ground ที่ $n = 2$



รูปที่ 2.19 ค่าเฉลี่ยดีกรีการอัดตัวคายน้ำของ composite ground ที่ $n = 3$

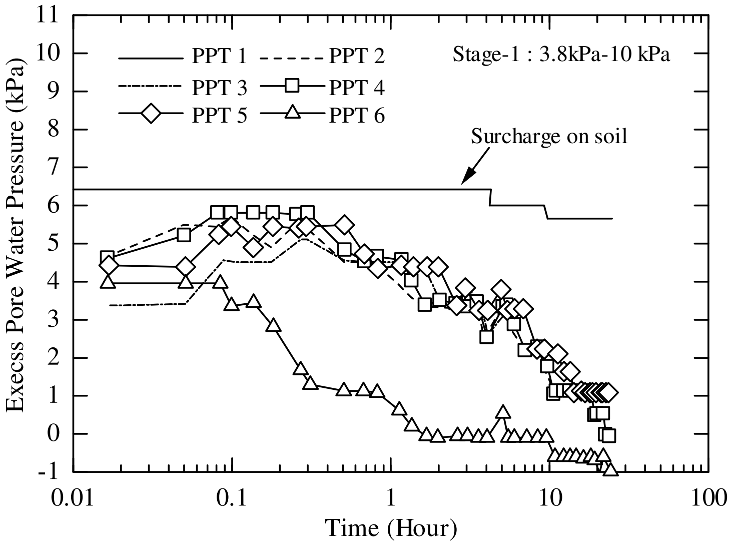
2.6 พฤติกรรมของ Composite Ground ในแบบจำลองกายภาพ

Yin and Fang (2006) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองทางกายภาพเพื่อศึกษาพฤติกรรม การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนที่มีการเสริมแรงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ (รูปที่ 2.20) พบว่าความดันน้ำจะสามารถสลายได้เร็วเมื่ออยู่ใกล้กับขอบเขตที่น้ำระบายออกได้ เมื่อเทียบกับจุด ที่ติดตั้งอยู่ตรงกึ่งกลางความสูงของแบบจำลอง

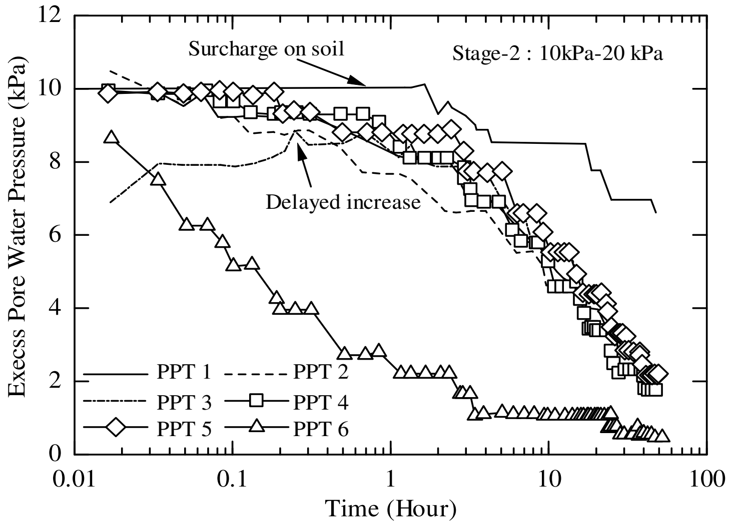


รูปที่ 2.20 แบบถังทดสอบ (a) รูปตัดถังทดสอบ (b) แปลนถังทดสอบ (Yin and Fang, 2006)

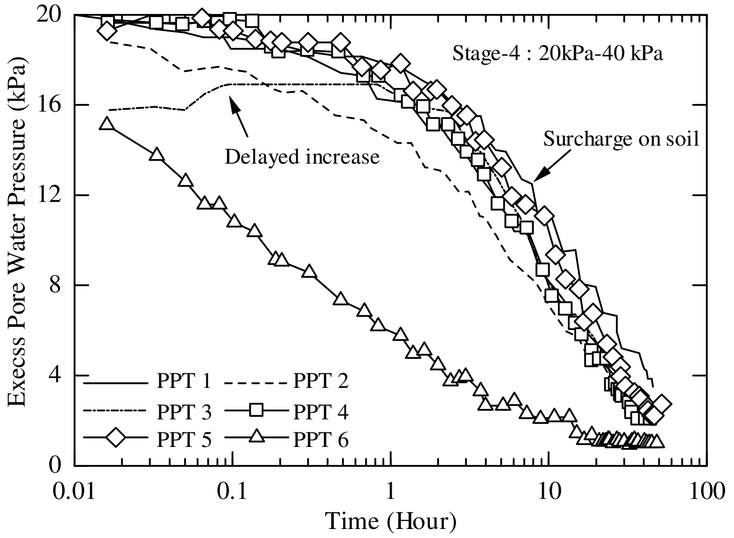
รูปที่ 2.21 ถึง 2.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินและเวลา การเพิ่มขึ้นของความดันน้ำส่วนเกินจะเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักบรรทุกที่กระทำและจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเกิดการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ สาเหตุเกิดจากการถ่ายส่งแรงของ composite ground สู่ดินเหนียวที่บริเวณรอบข้างและการขยายออกทางด้านข้างเนื่องจากการวิบัติของเสาเข็ม



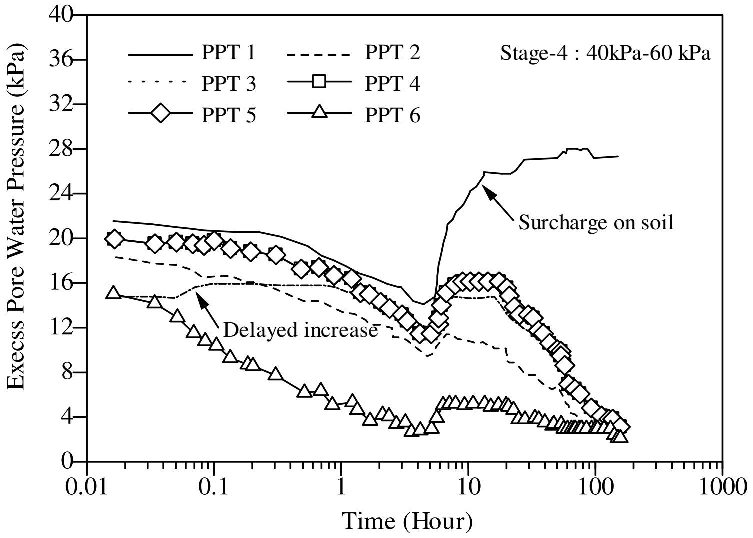
รูปที่ 2.21 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำในแต่ละจุดโดยพล็อตในสเกล log (time) ภายใต้แรงรวมที่ 10 กิโลปาสคาล



รูปที่ 2.22 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำในแต่ละจุดโดยพล็อตในสเกล log (time) ภายใต้แรงรวมที่ 20 กิโลปาสคาล



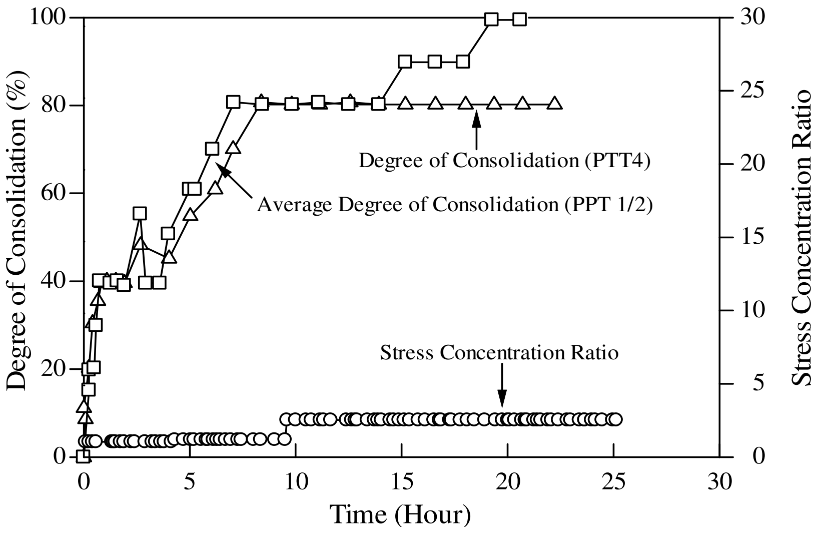
รูปที่ 2.23 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำในแต่ละจุดโดยพล็อตในสเกล log (time) ภายใต้แรงรวมที่ 40 กิโลปาสคาล



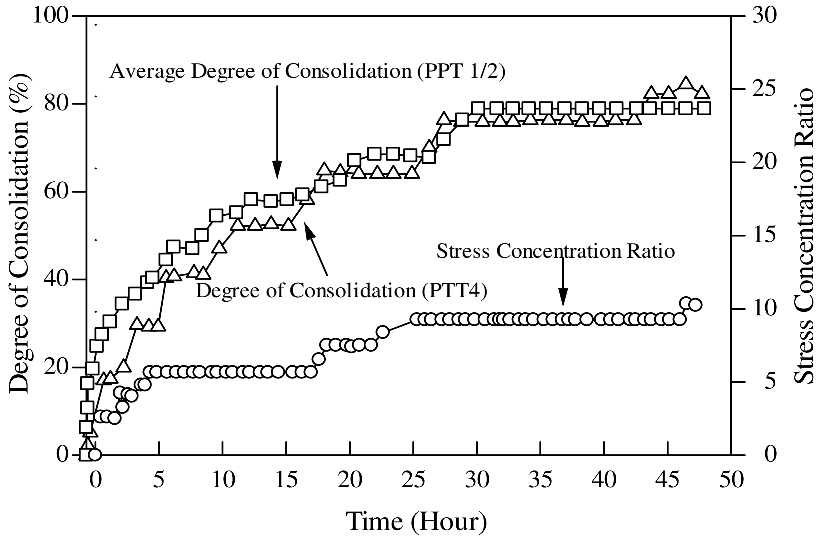
รูปที่ 2.24 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำในแต่ละจุดโดยพล็อตในสเกล log (time) ภายใต้แรงรวมที่ 60 กิโลปาสคาล (เสาเข็มเกิดการวิบัติ)

รูปที่ 2.25 ถึง 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างดีกรีการอัดตัวคายน้ำ และ stress concentration ratio, *n* เมื่อ (*n* คืออัตราส่วนระหว่างความเค้นที่ถ่ายลงเสาเข็มดินซีเมนต์ ต่อความเค้นที่ถ่ายลงดินเหนียวอ่อน USC) ที่จุดกึ่งกลางความสูงของดินเหนียวในถังแบบจำลอง การอัดตัวคายน้ำของดินบริเวณล้อมรอบเสาเข็มจะเกิดเร็วกว่าดินเหนียวที่ไม่มีเสาเข็มดินซีเมนต์ อัตราการอัดตัวคายน้ำ

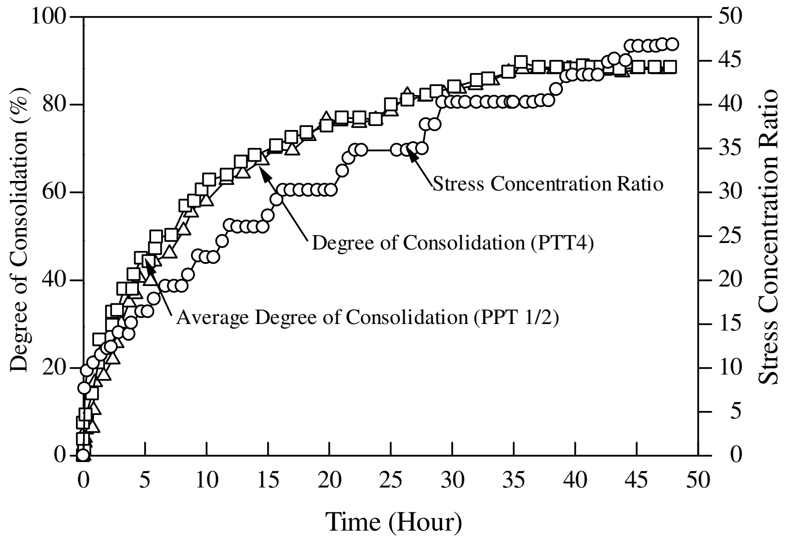
ขึ้นอยู่กับ stiffness และ permeability ของเสาเข็มดินซีเมนต์ เมื่อมีการให้น้ำหนักบรรทุก stress concentration ratio, *n* จะมีการเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเสาเข็มเกิดการวิบัติ (failure) และค่าของ stress concentration ratio, *n* จะลดลง เนื่องจากความเค้นในแนวดิ่งจะถูกส่งถ่ายมายัง ดินเหนียวบริเวณรอบข้าง



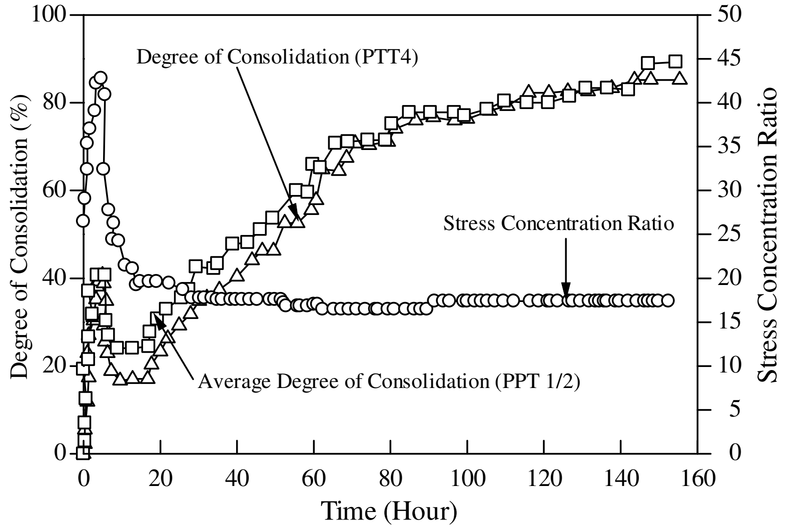
รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความเค้นและระดับของการอัดตัวคายน้ำกับเวลา ภายใต้น้ำหนักกดทับ 10 กิโลปาสคาล



รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความเค้นและระดับของการอัดตัวคายน้ำกับเวลา ภายใต้น้ำหนักกดทับ 20 กิโลปาสคาล



รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความเค้นและระดับของการอัดตัวคายน้ำกับเวลา ภายใต้น้ำหนักกดทับ 40 กิโลปาสคาล

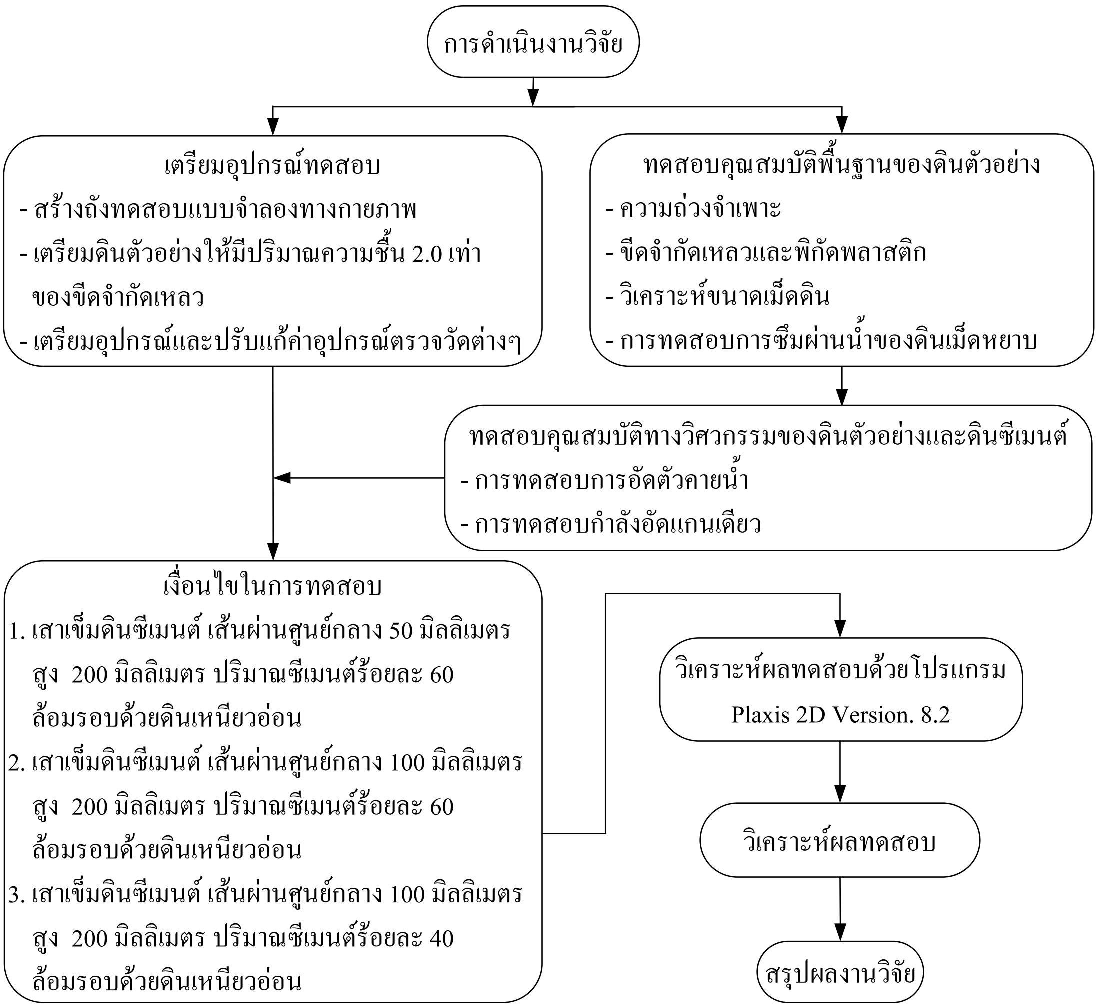


รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความเค้นและระดับของการอัดตัวคายน้ำกับเวลา ภายใต้น้ำหนักกดทับ 60 กิโลปาสคาล (เสาเข็มเกิดการวิบัติ)

บทที่ 3
วิธีการดำเนินการ

3.1 บทนำ

บทนี้กล่าวถึงขั้นตอนและวิธีการดำเนินการทดสอบ ตั้งแต่ขั้นตอนการสร้างถังทดสอบ การเตรียมตัวอย่างดินเหนียว สถานที่เก็บตัวอย่าง การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน การเตรียม การทดสอบในแบบจำลองกายภาพ การติดตั้งเครื่องมือวัด และการเพิ่มความเค้นกดทับ เป็นต้น ขั้นตอนในการดำเนินงานแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนงานดำเนินงานวิจัย

3.2 สถานที่ทำการทดลองและเก็บข้อมูล

การทดสอบและเก็บข้อมูลจะทำในห้องปฏิบัติการปฐพีวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพ (Bangkok clay) ได้จากบริเวณการไฟฟ้านครหลวงชิดลม กรุงเทพมหานคร (รูปที่ 3.2)

รูปที่ 3.2 แผนที่ตำแหน่งสถานที่เก็บตัวอย่างดินเหนียวที่ใช้ในการทดสอบ

3.3 การทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐาน

ทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินตัวอย่าง ดังต่อไปนี้

3.3.1 ความถ่วงจำเพาะของดิน (specific gravity) ตามมาตรฐาน ASTM D 854

3.3.2 ทดสอบขีดจำกัดเหลว (liquid limit) และพิกัดพลาสติก (plastic limit) ตามมาตรฐาน ASTM D 4318

3.3.3 การวิเคราะห์ขนาดเม็ดดินโดยใช้แกรง (sieve analysis) ทดสอบโดยการร่อนผ่านตะแกรงแบบล้าง ตามมาตรฐาน ASTM D 422

3.3.4 การวิเคราะห์ขนาดเม็ดดินโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์ (hydrometer) ตามมาตรฐาน ASTM D 422-63

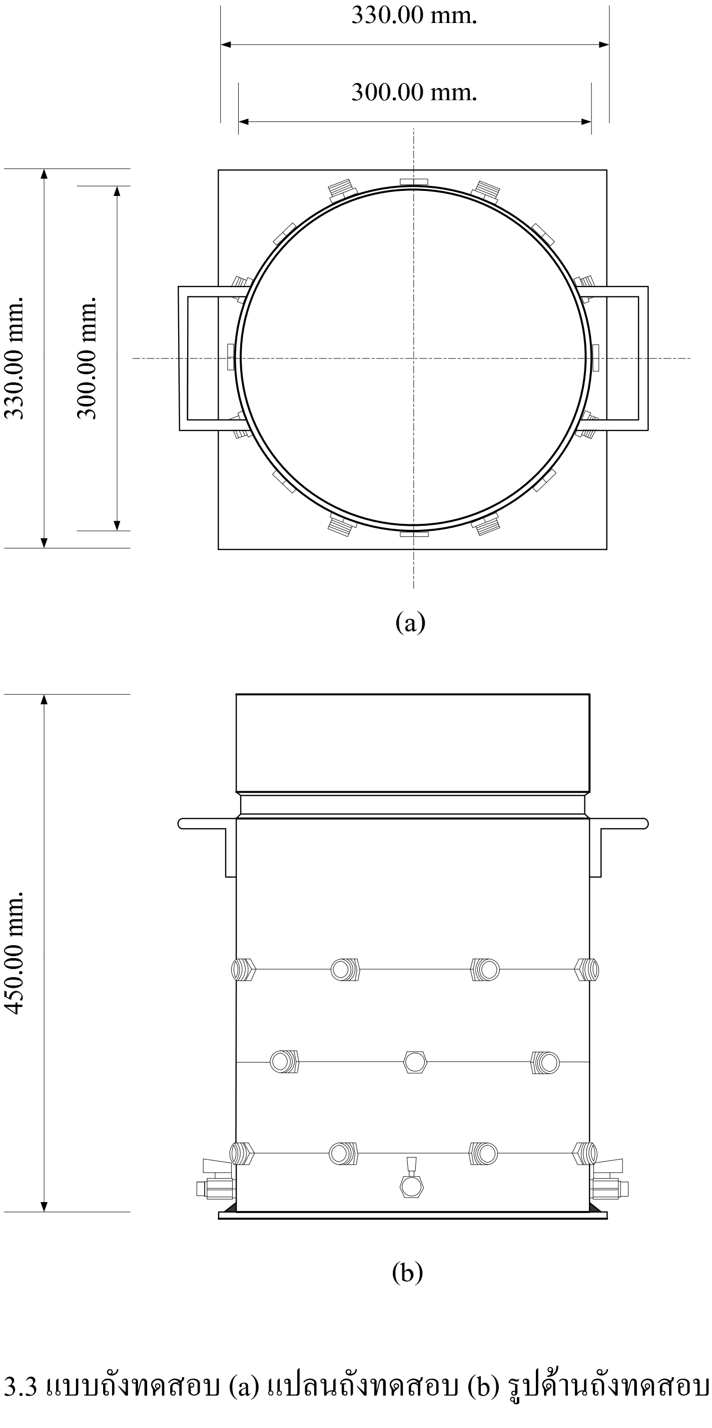
3.3.5 ทดสอบการซึมผ่านน้ำสำหรับดินเม็ดหยาบ ตามมาตรฐาน ASTM D 2434

3.3.6 ทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (consolidation test) ตามมาตรฐาน ASTM D 2435

3.3.7 ทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (unconfined compression test) ตามมาตรฐาน ASTM D 2938

3.4 การสร้างถังทดสอบแบบจำลอง

รูปที่ 3.3 (a) และ (b) แสดงรูปแบบและขนาดของถังทดสอบ โดยถังแบบทดสอบจำลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 300 มิลลิเมตร และความสูง 450 มิลลิเมตร มีหูหิ้วสำหรับยก มีช่องระบายน้ำที่ก้นถัง 4 รู และมีช่องสำหรับสอดสายอุปกรณ์ตรวจวัดชั้นละ 8 รู ทั้งหมดแบ่งเป็น 3 ชั้น



รูปที่ 3.3 แบบถังทดสอบ (a) แปลนถังทดสอบ (b) รูปด้านถังทดสอบ

3.5 การเก็บและเตรียมตัวอย่างดิน

ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้เป็นดินเหนียวกรุงเทพ (Bangkok clay) ซึ่งเก็บตัวอย่างแบบรบกวนตัวอย่าง (Disturbed sample) โดยการเปิดหน้าดินเก็บที่ระดับความลึก 2-3 เมตร ดินตัวอย่างถูกนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 เพื่อแยกส่วนที่เป็นกรวดและทรายทิ้งไป แล้วเก็บไว้ในถังพลาสติกปิดฝามิดชิด ทรายที่ใช้ทดสอบเป็นทรายแม่น้ำร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ค้างเบอร์ 30 เพื่อให้ได้ทรายที่มีความหนาแน่นสูงและปริมาตรเปลี่ยนแปลงน้อย

3.6 การเตรียมตัวอย่างเสาเข็มดินซีเมนต์

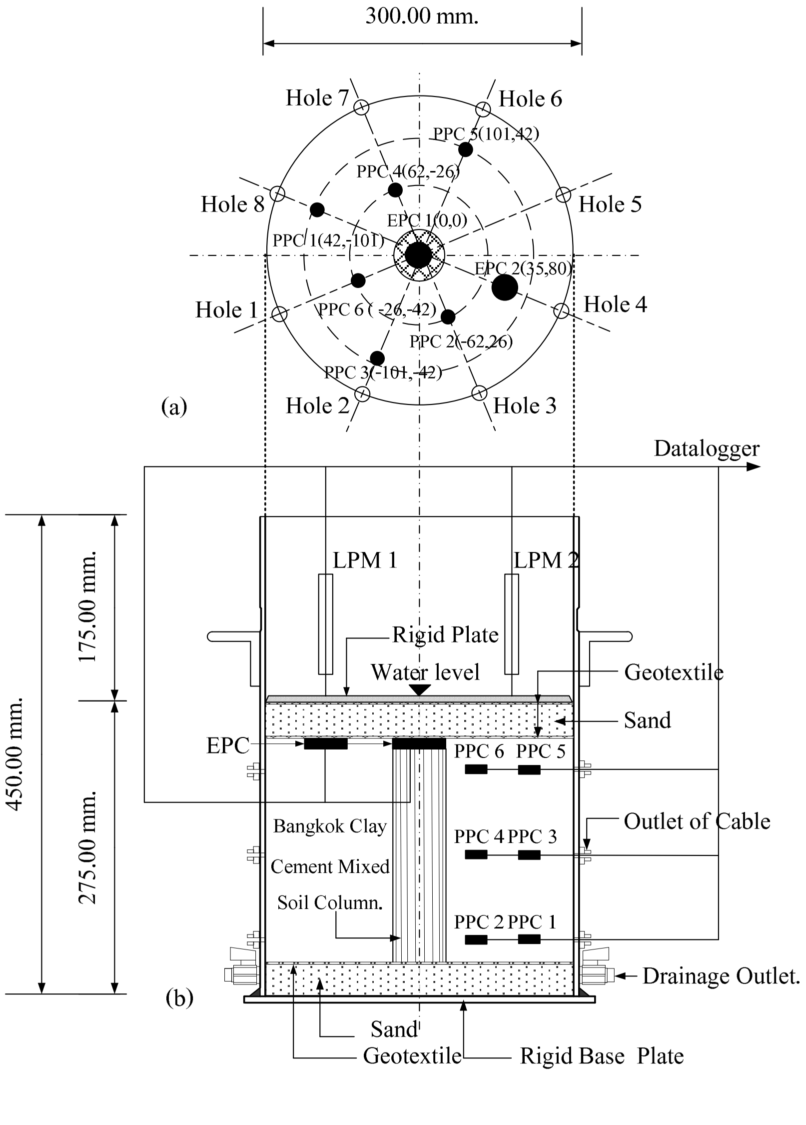
ดินเหนียวที่ได้จะถูกผสมกับน้ำให้มีปริมาณความชื้นเท่ากับ 2 เท่าของขีดจำกัดเหลว และผสมกับปูนซีเมนต์ปริมาณร้อยละ 40 และ 60 ของน้ำหนักดินแห้ง ด้วยเครื่องผสมเป็นเวลา 10 นาที ดินซีเมนต์จะถูกเทลงในแบบ โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น และไล่ฟองอากาศออกแต่ละชั้นของการเท ด้วยวิธีการเคาะที่ข้างแบบหล่อ กำลังอัดของดินซีเมนต์ (q_u) ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 40 และ 60 มีค่าเท่ากับ 500 และ 1,200 กิโลปาสคาล ค่า E_u เท่ากับ 129,230 และ 138,462 กิโลปาสคาล หน่วยน้ำหนักและปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์สำหรับปูนซีเมนต์ร้อยละ 40 และ 60 เท่ากับ 13 และ 14 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร 90 และ 84 ตามลำดับ ดินซีเมนต์สำหรับปูนซีเมนต์ร้อยละ 40 และ 60 มีค่า c' เท่ากับ 200 และ 500 กิโลปาสคาล และมีค่า ϕ' เท่ากับ 25 และ 27 องศา

3.7 การจำลองชั้นดินในถังทดสอบแบบจำลอง

การจำลองชั้นดินในถังทดสอบเริ่มต้นด้วยการเททรายรองพื้นหนา 30 มิลลิเมตร เพื่อสมมุติเป็นชั้นทรายแน่น และใส่ท่อพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และสูง 400 มิลลิเมตร ตรงจุดศูนย์กลางของถังทดสอบ ต่อจากนั้นเทดินเหนียวกรุงเทพ ซึ่งได้จากการผสมกับน้ำและปั่นให้เข้ากันที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 2 เท่าของขีดจำกัดเหลว ดินตัวอย่างจะถูกใส่ลงในถังทดสอบ และวางทับด้วยแผ่น Acrylic หนา 8 มิลลิเมตร ที่มีรูตรงกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 55 มิลลิเมตร เพื่อขึ้นรูปด้วยน้ำหนักกดทับเท่ากับ 20 กิโลปาสคาล เมื่อสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำ (ดินตัวอย่างมีความสูงประมาณ 200 มิลลิเมตร และปริมาณความชื้นประมาณร้อยละ 170) ทำการถอดแผ่น Acrylic และท่อพลาสติกออกเพื่อใส่เสาเข็มดินซีเมนต์ ชั้นบนสุดรองพื้นด้วยทรายหนา 30 มิลลิเมตร เพื่อให้น้ำสามารถระบายออกได้ และวางแผ่นเหล็กหนา 6 มิลลิเมตร เพื่อเป็นฐานวางน้ำหนักบรรทุก ชั้นทรายและดินเหนียวปูด้วยวัสดุสังเคราะห์ป้องกันไม่ให้ดินทั้งสองชนิดผสมกัน

3.8 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกในแบบจำลองกายภาพ

รูปที่ 3.3 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความดันน้ำ ความเค้นรวมในดิน และเครื่องมือวัดการทรุดตัว ดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์จะถูกทดสอบ โดยเพิ่มความเค้นกดทับ ทีละ 20 กิโลปาสคาล จนกระทั่งเสาเข็มตัวอย่างวิบัติ ระหว่างการทดสอบทำการบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของความดันน้ำ ความเค้นกดทับในแนวดิ่ง และการทรุดตัวที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.4 ภาพแผนผังตำแหน่งของอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ (a) รูปตัดตามขวาง (b) รูปตัดตามแนวดิ่ง

เมื่อ EPC คือหน่วยวัดความดันขนาดเล็ก (Earth Pressure Cell)

PPC คือหน่วยวัดความดันน้ำขนาดเล็ก (Pore Pressure Cell)

LPM คือมาตรวัดระยะ (Linear Potentionmeter)

3.9 เงื่อนไขในการทดสอบ

การทดสอบในห้องปฏิบัติการกระทำภายใต้เงื่อนไข 3 เงื่อนไข ดังแสดงในตารางที่ 3.1 เพื่อให้ได้ค่า a ต่างกัน (1/3 และ 1/6) และมีค่า q_u ต่างกัน (500 และ 1200 กิโลปาสคาล)

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างการทดสอบ

Case.	Diameter (mm)	High (mm)	Cement (%)
1	50	200	60
2	100	200	60
3	100	200	40

บทที่ 4
การทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอผลทดสอบการอัดตัวคายน้ำและการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนท์เอลิเมนต์ของดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ End Bearing ในแบบจำลองกายภาพย่อส่วนสมมาตรรอบแกน งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของ Unit cell และค่าสติฟเนส (Stiffness) ของเสาเข็มดินซีเมนต์ ต่อการทรุดตัวสุดท้าย ระยะเวลาการทรุดตัว ความเค้นที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มดินซีเมนต์และดินล้อมรอบ อัตราส่วนความเค้น (stress concentration ratio, *n*) และความดันน้ำที่เกิดขึ้น

4.2 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียว

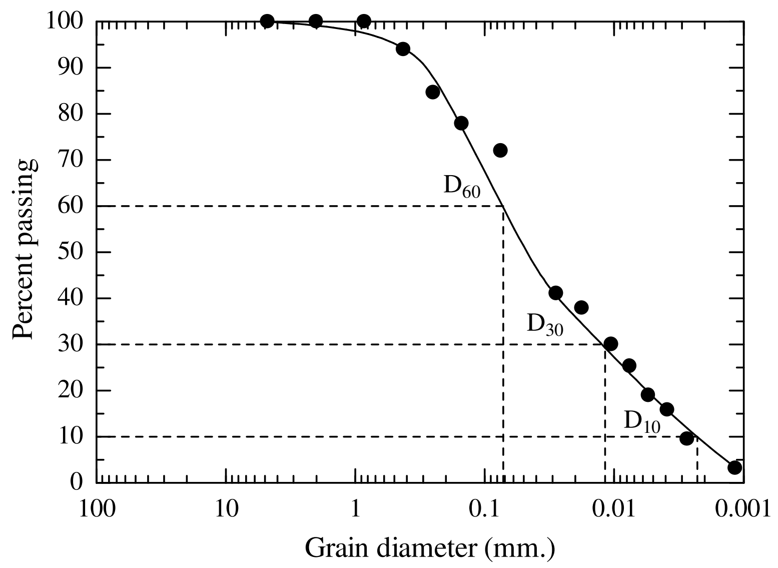
ดินเหนียวที่ใช้ในการทดสอบเป็นดินเหนียวกรุงเทพ (Bangkok clay) จากบริเวณสำนักงานไฟฟ้านครหลวงชิดลม จังหวัดกรุงเทพมหานคร เก็บดินที่ความลึกประมาณ 2 ถึง 3 เมตร จากผิวดินโดยใช้วิธีขุดเปิดหน้าดิน และดินตัวอย่างจะถูกเก็บใส่ถังพลาสติกมิดชิด หลังจากนั้นนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 เพื่อแยกส่วนที่เป็นกรวด แล้วนำมาขึ้นรูปปั้นใหม่ในห้องทดสอบ

ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติพื้นฐาน (Basic properties) ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.70 ค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติก เท่ากับร้อยละ 81 และ 34 ตามลำดับ รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะการกระจายขนาดของเม็ดดิน ดินมีส่วนผสมของดินเหนียวร้อยละ 71.7 ดินตะกอนร้อยละ 17.1 และทรายร้อยละ 11.2 ซึ่งจัดเป็นดินเหนียวมีสภาพเป็นพลาสติกสูง (CH) ตามการจำแนกระบบเอกภาพ (Unified Soil Classification System : USCS)

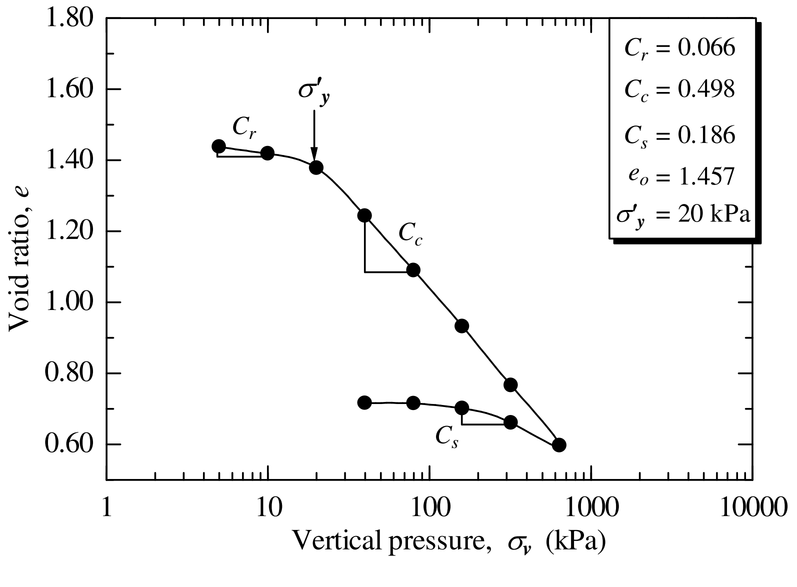
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่าง

G_s	*LL* %	*PL* %	*PI* %	USCS	Particle size distribution: %		
					Clay	Silt	Sand
2.70	81	34	47	CH	71.7	17.1	11.2

รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงกับความเค้นกดทับในแนวดิ่งของดินเหนียวปั่นใหม่ ดัชนีการอัดตัว (C_c) ดัชนีการขยายตัว (C_s) ดัชนีการอัดตัวซ้ำ (C_r) และความเค้นคราก (σ'_y) มีค่าเท่ากับ 0.498 0.186 0.066 และ 20 กิโลปาสคาล ตามลำดับ และดินตัวอย่างมีค่ามุม ϕ เท่ากับ 21 องศา กำลังอัดแกนเดียวหลังจากาการสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำ (σ'_v = 20 กิโลปาสคาล) มีค่าเท่ากับ 25 กิโลปาสคาล



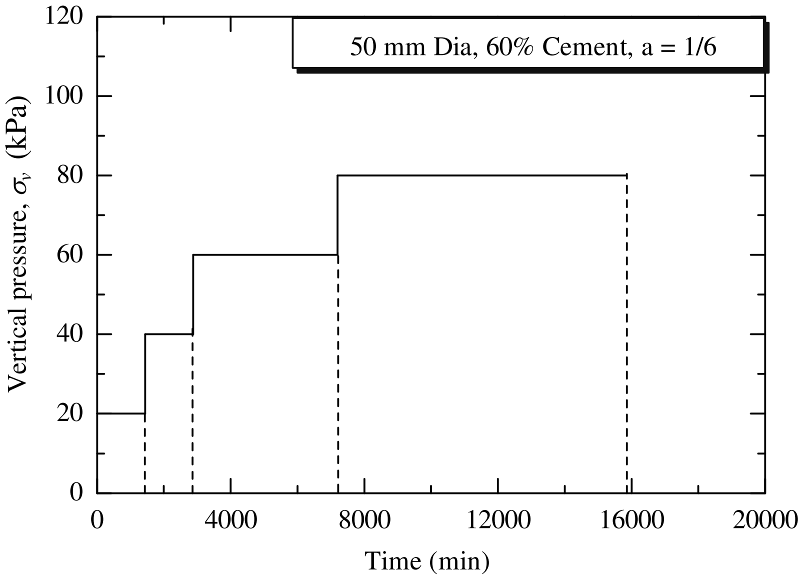
รูปที่ 4.1 ขนาดคละของเม็ดดินตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดสอบ



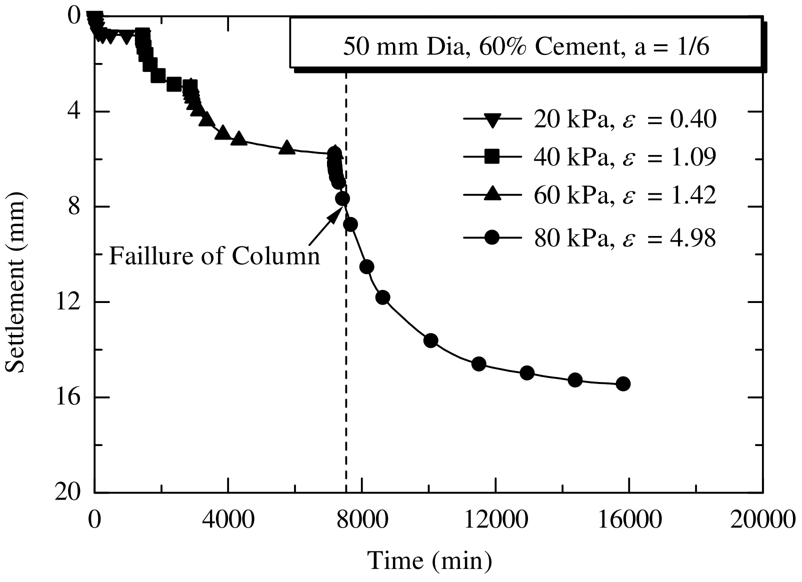
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงกับความเค้นกดทับในแนวดิ่ง

4.3 พฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์

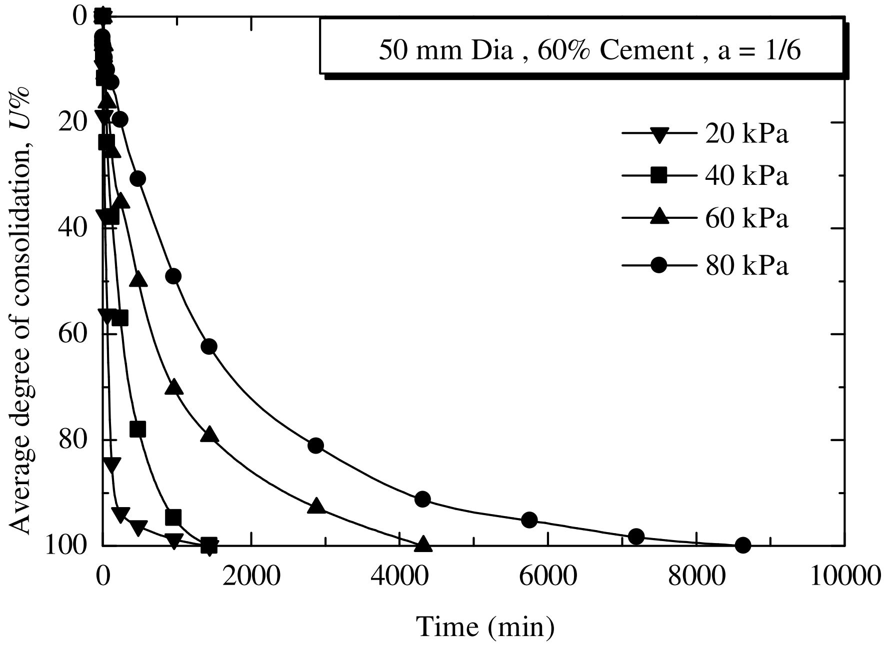
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับเวลา การเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจะเพิ่มแบบขั้นบันได โดยจะกระทำหลังจากสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำในแต่ละลำดับ การเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแบ่งเป็น 4 ลำดับ คือ 20 40 60 และ 80 กิโลปาสคาล



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับเวลา



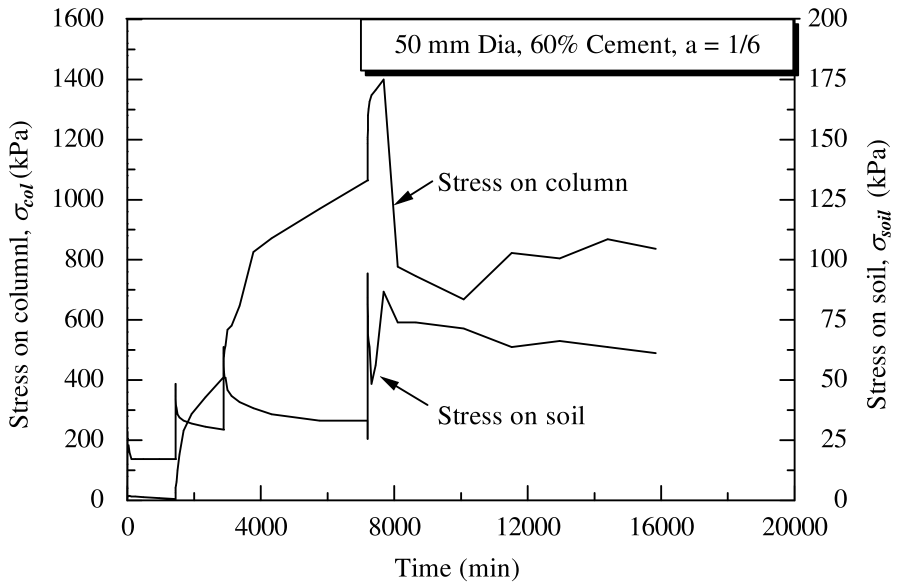
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา



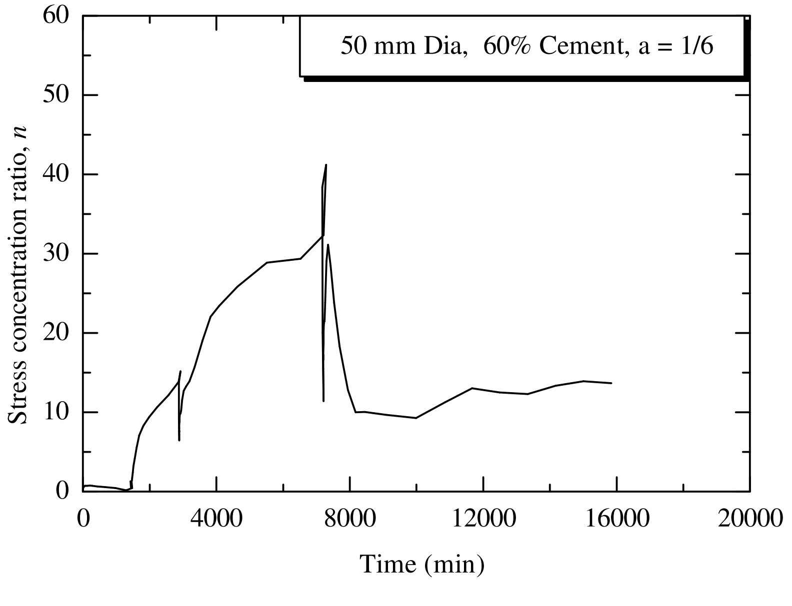
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยดีกรีการอัดตัวคายน้ำกับเวลา

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา การทรุดตัวสุดท้ายของแต่ละน้ำหนักบรรทุกจะเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ จนกระทั่งเสาเข็มเกิดการวิบัติ (Failure) ซึ่งค่าการทรุดตัวสุดท้ายที่เกิดขึ้นทั้งหมดประมาณเท่ากับ 15 มิลลิเมตร และค่าความเครียด (ε) ที่น้ำหนักบรรทุก 20 40 60 และ 80 กิโลปาสคาล มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.40 1.09 1.42 และ 4.98 ตามลำดับ รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยดีกรีการอัดตัวคายน้ำกับเวลา พบว่าการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุกจะส่งผลให้ค่าเฉลี่ยดีกรีการอัดตัวคายน้ำเพิ่มขึ้นตาม และจะเพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเกิดการวิบัติของเสาเข็ม

รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในเสาเข็ม ความเค้นในดิน และรูปที่ 4.7 stress concentration ratio, n กับเวลา จะเห็นได้ว่าทั้งความเค้นในเสาเข็ม (σ_{col}) และความเค้นในมวลดิน (σ_{soil}) เพิ่มขึ้นตามน้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่ง แต่ σ_{soil} จะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ σ_{col} ที่น้ำหนักบรรทุกค่าหนึ่ง σ_{col} จะเพิ่มขึ้นตามเวลา แต่ σ_{soil} จะลดลง จึงทำให้ค่า stress concentration ratio, n เพิ่มขึ้นตามเวลา ก่อนการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ σ_{col} จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่หลังจากที่เสาเข็มเกิดการวิบัติ แรงเกือบทั้งหมดจากน้ำหนักบรรทุกจะถ่ายลงสู่ ดินรอบข้าง ที่จุดวิบัติ σ_{col} มีค่าประมาณ 1400 กิโลปาสคาล ซึ่งมีค่ามากกว่าผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียวเล็กน้อย (q_u เท่ากับ 1200 กิโลปาสคาล) เนื่องจากผลของการเกิดแรงดันทางด้านข้างของดินเหนียวล้อมรอบ



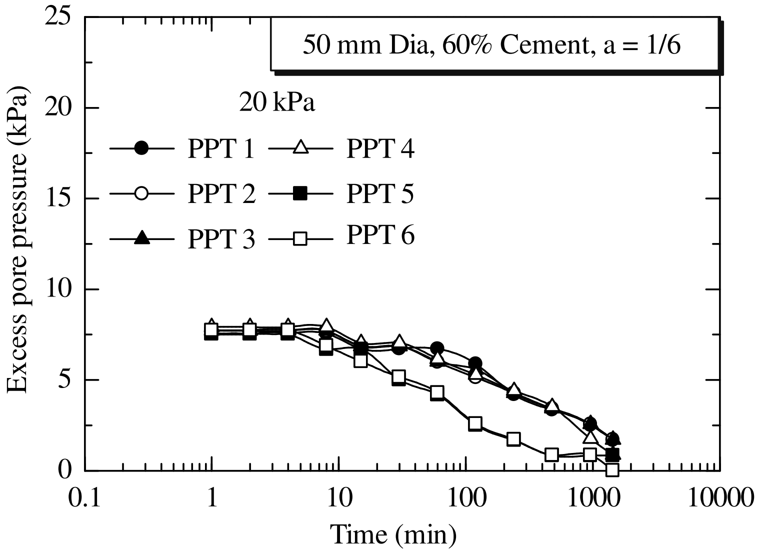
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในเสาเข็มและความเค้นในดิน



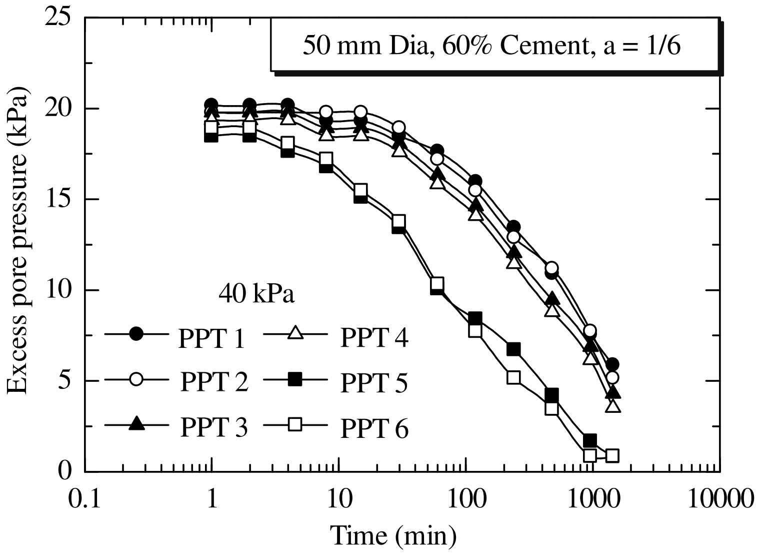
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง stress concentration ratio, *n* กับเวลา

รูปที่ 4.8 ถึง รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับเวลา ความดันน้ำส่วนเกินในมวลดินตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับขอบเขตที่ระบายน้ำได้ ดังแสดงให้เห็นด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดความดันน้ำ PPT5 และ PPT6 จะระบายได้เร็ว ความดันน้ำส่วนเกินที่ด้านล่างถังทดสอบ (PPT1 และ PPT2) จะระบายได้ช้าที่สุด ความดันน้ำส่วนเกินจะมีค่าลดลงตามเวลา

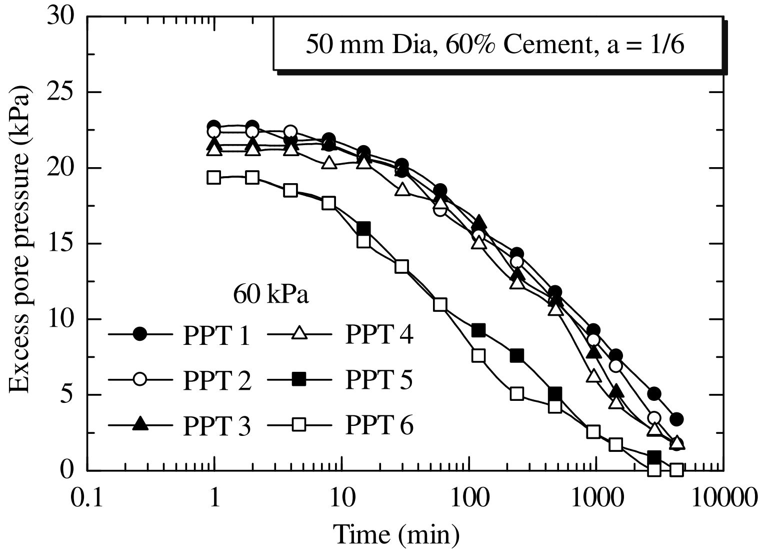
เนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ แต่เมื่อให้น้ำหนักกดทับจนเสาเข็มเกิดการวิบัติ ความดันน้ำส่วนเกินจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (รูปที่ 4.11) เนื่องจาก σ_{soil} เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน รวมทั้งอาจเกิดการขยายออกทางด้านข้างของเสาเข็มเนื่องจากการวิบัติ ส่งผลให้เกิดแรงผลักทางด้านข้าง แต่เมื่อเวลาผ่านไปความดันน้ำจะลดลงเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำเข้าสู่เสาเข็มตามรอยแตกของเสาเข็ม



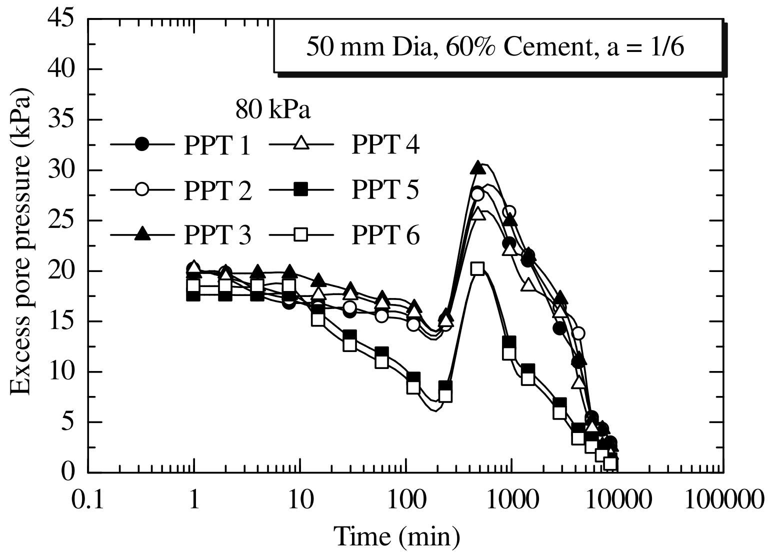
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับเวลา ที่น้ำหนักบรรทุก 20 กิโลปาสคาล



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับเวลา ที่น้ำหนักบรรทุก 40 กิโลปาสคาล

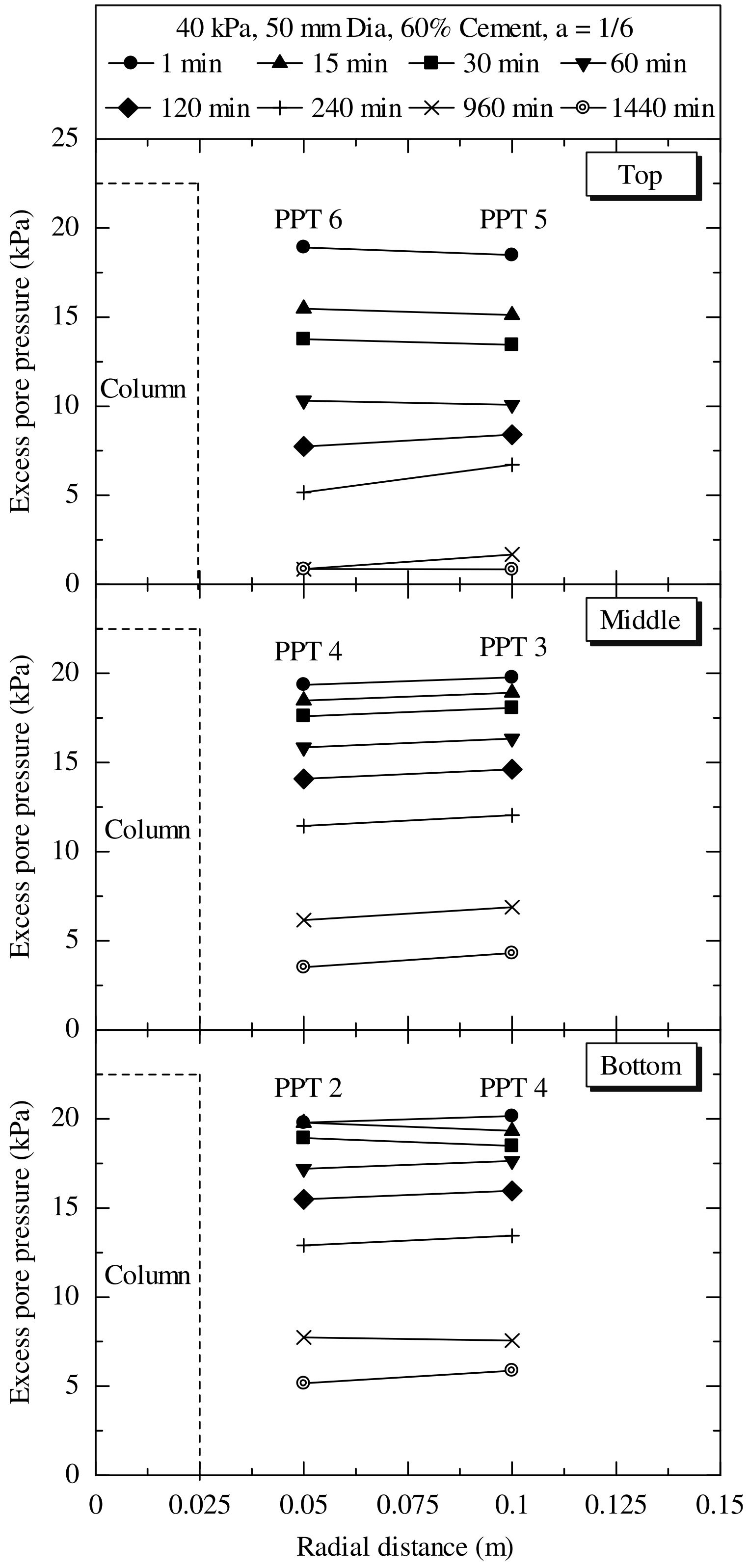


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับเวลา ที่น้ำหนักบรรทุก 60 กิโลปาสคาล

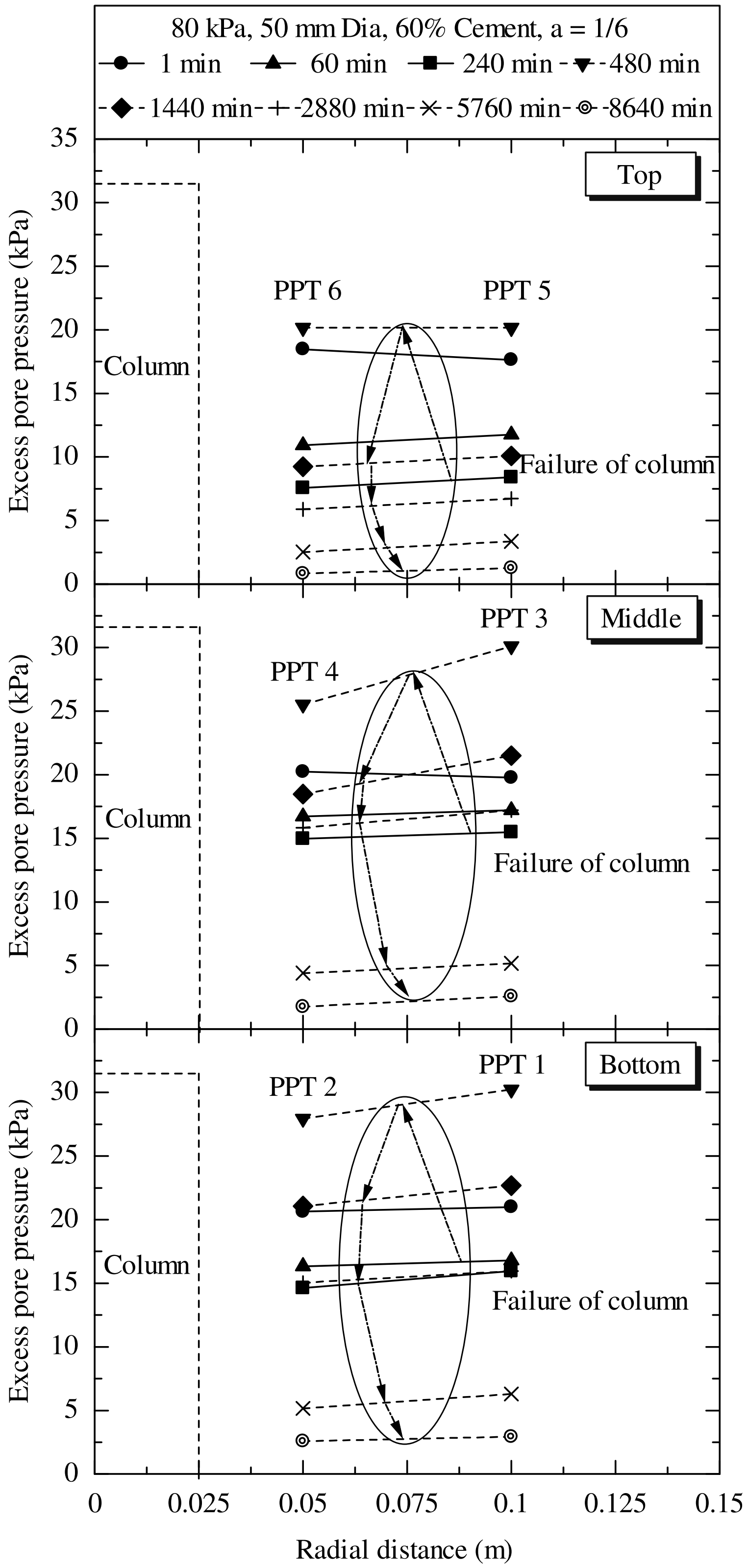


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับเวลา ที่น้ำหนักบรรทุก 80 กิโลปาสคาล

รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับระยะทางตามแนวรัศมี ที่น้ำหนักบรรทุก 40 กิโลปาสคาล ที่ตำแหน่งต่าง ๆ เริ่มแรกที่มีการให้น้ำหนักบรรทุก ความดันน้ำส่วนเกินจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นความดันน้ำส่วนเกินจะลดลงตามเวลา ความดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นที่เวลาใด ๆ มีค่าลดลงตามระยะทางจากขอบถังสู่เสาเข็ม แต่อย่างไรก็ตามความแตกต่างของความดันน้ำส่วนเกินมีไม่มากนัก



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับระยะทางตามแนวรัศมี
ที่น้ำหนักบรรทุก 40 กิโลปาสคาล



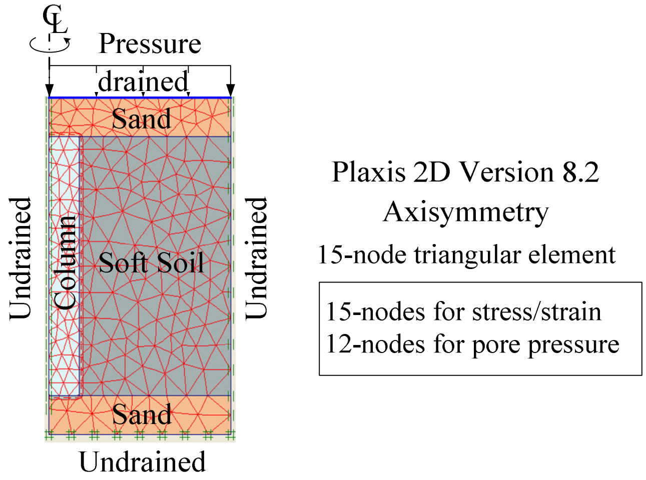
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับระยะทางตามแนวรัศมี ที่น้ำหนักบรรทุก 80 กิโลปาสคาล

รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับระยะทางตามแนวรัศมีที่น้ำหนักบรรทุก 80 กิโลปาสคาล (เสาเข็มเกิดการวิบัติ) ที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อเสาเข็มดินซีเมนต์เกิดการวิบัติ (240 นาที) ความดันน้ำส่วนเกินจะเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน ความดันน้ำส่วนเกินที่ใกล้เสาเข็มมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการวิบัติของเสาเข็มทำให้เกิดช่องว่างตามรอยแตกหักเสาเข็มที่สภาวะนี้จึงทำหน้าที่เสมือนเสาระบายน้ำในแนวดิ่ง (รูปที่ 4.14) และการวิบัติของเสาเข็มทำให้ความเค้นในแนวดิ่ง (σ_v) ส่งถ่ายมายังดินเหนียวอ่อนทั้งหมด สังเกตได้จาก stress concentration ratio, n ที่ลดลง ซึ่งทำให้ดีกรีการอัดตัวคายน้ำหลังจากเสาเข็มวิบัติลดลงอย่างมาก (รูปที่ 4.5)

รูปที่ 4.14 การวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์หลังจากทดสอบ

4.4 วิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis)

พฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของชั้นดินที่เสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ (ก่อนการวิบัติของเสาเข็ม) จำลองโดยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบสมมาตรรอบแกน ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D Version 8.2 โดยใช้เอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยมประกอบด้วย 15 โหนด โดยแบ่งเป็น 15 โหนด สำหรับความเค้นกับความเครียด และ 12 โหนด สำหรับความดันน้ำ (รูปที่ 4.15) ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองกายภาพย่อส่วน โมดูลัสประสิทธิผล (E') ของเสาเข็มดินซีเมนต์ประมาณได้จากผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียวประมาณได้ด้วยสมการ $E_u = 1.5(E'/1+\upsilon)$ ของ D'Appolonia et al. (1971) และประมาณค่า $v' = 0.3$ เนื่องจาก E_u มีค่าประมาณคงที่จะเห็นได้ว่า E' ไม่แปรผันตามปริมาณซีเมนต์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Horpibulsuk et al. (2004b)



รูปที่ 4.15 แบบจำลองสำหรับวิเคราะห์ดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองกายภาพย่อส่วน

Material model	Sand Mohr-Coulomb	Bangkok clay Soft soil	Soil-cement column Mohr-Coulomb	Unit
Type	Drained	Undrained	Undrained	-
γ_{unsat}	17	16	13 (C=40%) 14 (C=60%)	(kN/m^3) (kN/m^3)
γ_{sat}	20	18	13 (C=40%) 14 (C=60%)	(kN/m^3) (kN/m^3)
k_v	3.43×10^{-4}	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-6}	(m/min)
k_h	3.43×10^{-4}	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-6}	(m/min)
E'	13,000 (Top) 52,000 (Bottom)	- -	120,000 (C=60%) 112,000 (C=40%)	(kN/m^2) (kN/m^2)
ν'	0.3	0.3	0.3	-
λ^*	-	0.095	-	-
κ^*	-	0.0095	-	-
c'	1	1	500 (C=60%) 200 (C=40%)	(kN/m^2) (kN/m^2)
ϕ'	37	21	27 (C=60%) 25 (C=40%)	o o

4.4.1 การทรุดตัวสุดท้ายและระยะเวลาการทรุดตัว

รูปที่ 4.16 ถึง 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแนวดิ่ง (σ_v) และการทรุดตัวกับเวลาที่ได้จากผลทดสอบและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Plaxis ค่าการทรุดตัว และระยะเวลาการทรุดตัวแปรผันอย่างมากกับอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มค่า a ($a = d_p / D_e$ เมื่อ d_p คือเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม และ D_e คือเส้นผ่านศูนย์กลางของ Unit cell) ชั้นดินเสริมเสาเข็ม ที่มีค่า a สูงจะมีการทรุดตัวต่ำ แม้ว่าปริมาณปูนซีเมนต์จะมีค่าต่างกัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าปริมาณปูนซีเมนต์ไม่มีผลต่อค่าการทรุดตัวสุดท้ายและระยะเวลาการทรุดตัว เนื่องจากค่า E' ไม่แปรผันตามปริมาณปูนซีเมนต์

4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มดินซีเมนต์และดินล้อมรอบ

รูปที่ 4.19 ถึง 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับเวลา จะเห็นได้ว่าเมื่อชั้นดินรับน้ำหนักบรรทุก ความเค้นในดิน (σ_{soil}) จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนความเค้นในเสาเข็ม (σ_{col}) จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นกับเวลา ตามการตอบสนองของ σ_{soil} เพื่อปรับสมดุลของแรงในแนวดิ่ง สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าเสาเข็มทำหน้าที่รับแรงเกือบทั้งหมดจากน้ำหนักบรรทุก ความเค้นที่เกิดขึ้นในเสาเข็มแปรผันอย่างมากกับ a และน้ำหนักบรรทุก ซึ่งค่า a ยิ่งต่ำ σ_{col} ยิ่งมีค่ามาก

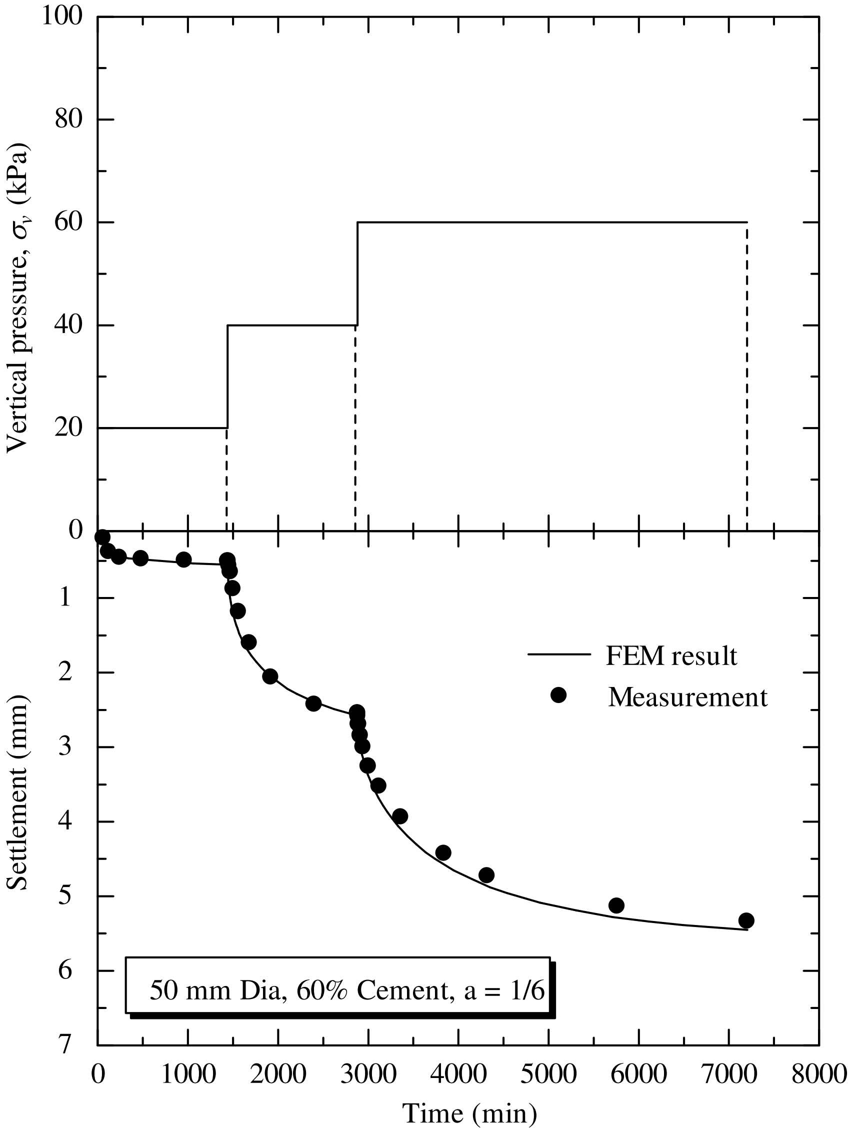
4.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress Concentration Ratio, *n* กับเวลา

รูปที่ 4.22 ถึง 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง stress concentration ratio, n กับเวลาเริ่มแรกที่มีการให้น้ำหนักบรรทุก stress concentration ratio, n จะเพิ่มขึ้นตามเวลาเนื่องจาก σ_{col} เพิ่มขึ้นตามเวลา โดยที่ σ_{soil} ลดลงตามเวลา stress concentration ratio, n จะมีการเพิ่มขึ้นตามความเค้นที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก σ_{soil} หลังสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำของแต่ละความเค้นกดทับมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก (รูปที่ 4.19 ถึง 4.21) ภายใต้ความเค้นในแนวดิ่งที่เท่ากัน ค่า stress concentration ratio, n ะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าของ a ($n = 35$ สำหรับ $a = 1/6$ และ $n = 15$ สำหรับ $a = 1/3$) และปริมาณปูนซีเมนต์ไม่มีผลต่อ stress concentration ratio, n

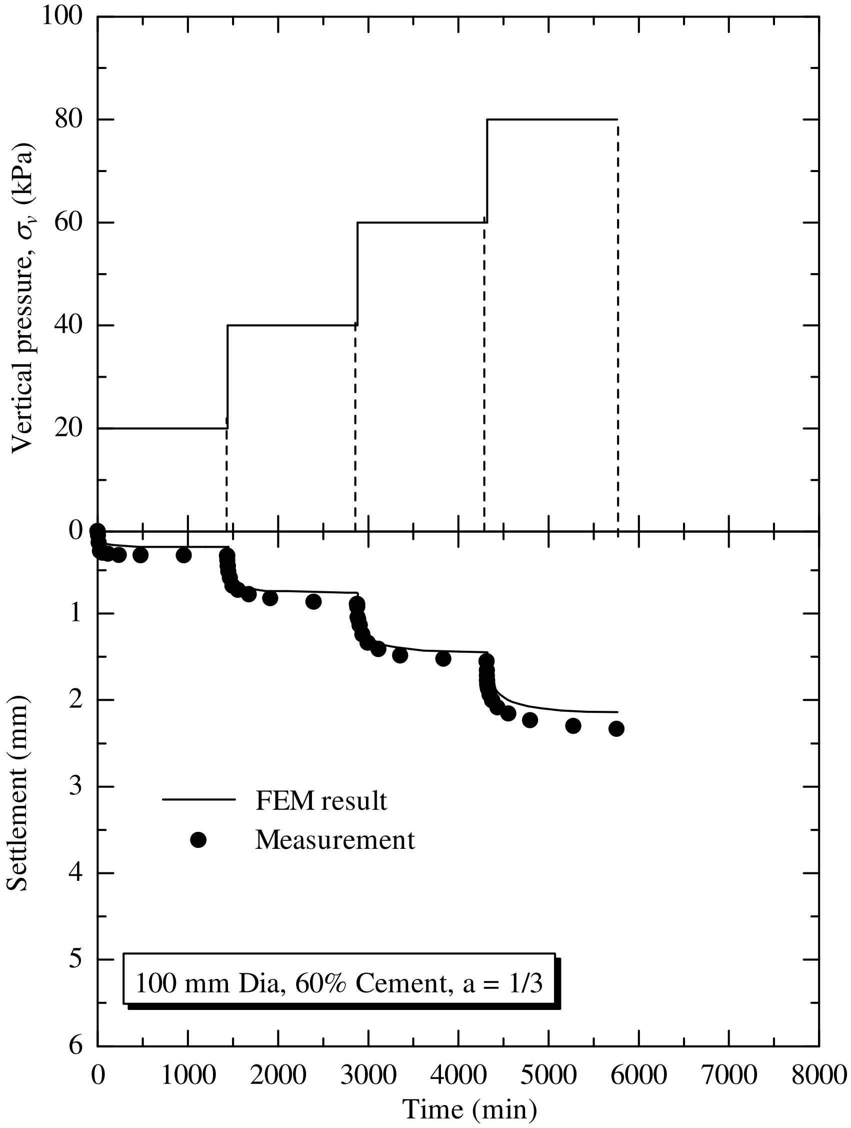
4.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับเวลา

รูปที่ 4.25 ถึง 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความดันน้ำส่วนเกินกับเวลาที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อชั้นดินรับน้ำหนักบรรทุก ความดันน้ำส่วนเกินเริ่มต้นจะมีค่าใกล้เคียงค่าความเค้นรวมที่เปลี่ยนแปลง และความดันน้ำส่วนเกินจะมีค่าลดลงตามเวลา รูปที่ 4.28 ถึง 4.29 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความดันน้ำส่วนเกินกับตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวรัศมีที่เวลาใด ๆ จะเห็นได้ว่าที่ระดับความลึกเดียวกัน ความดันน้ำส่วนเกินบริเวณด้านบนของเสาเข็มจะระบายได้เร็วกว่า

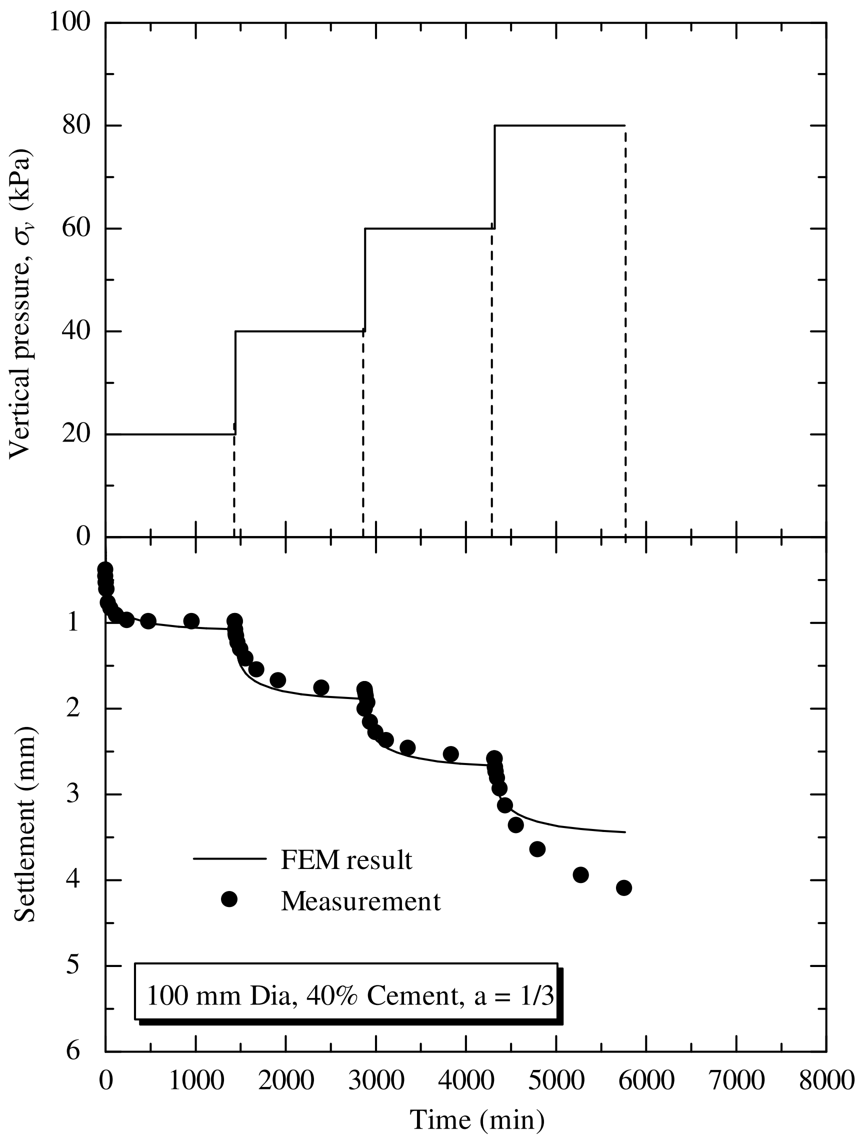
ดินเหนียวรอบข้าง เนื่องจาก σ'_y มีค่าสูงกว่า σ'_v ที่กระทำ พฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์จึงเปรียบเสมือนดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติ (OC clay) การระบายความดันน้ำส่วนเกินในเสาเข็มตรงกึ่งกลางและด้านล่างจะต่ำกว่าดินเหนียวอ่อนล้อมรอบเล็กน้อย สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าในช่วงกลางของเสาเข็มดินซีเมนต์ อัตราส่วนการอัดตัวคายน้ำมีอิทธิพลต่อการระบายออกของความดันน้ำส่วนเกินน้อยกว่าระยะทางระบายน้ำ ความดันน้ำส่วนเกินในมวลดินจะระบายได้เร็วเมื่อค่า a สูง ถึงแม้ปริมาณปูนซีเมนต์จะต่างกัน แต่ถ้าค่า a เท่ากัน อัตราการระบายความดันน้ำส่วนเกินในมวลดินจะใกล้เคียงกัน



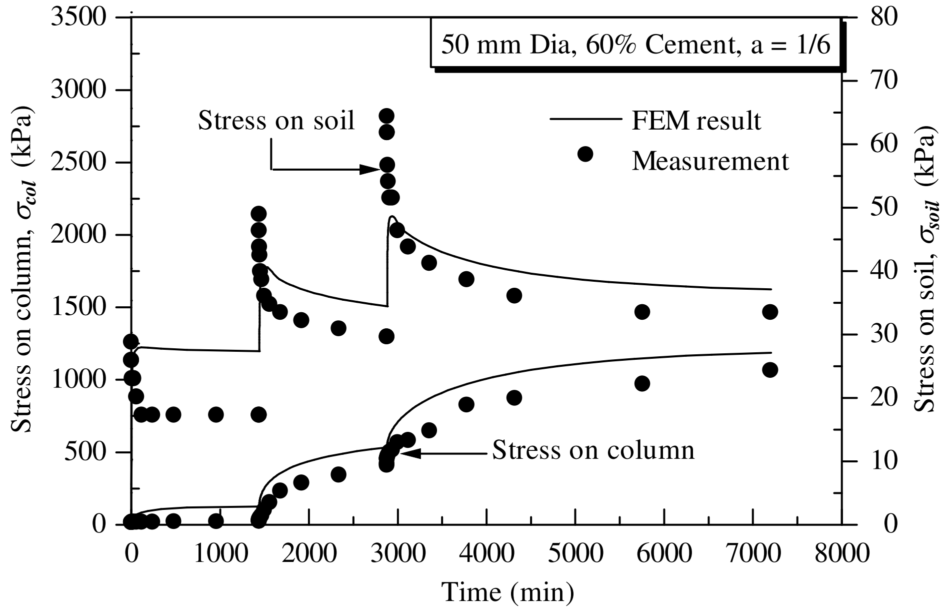
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวกับเวลา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 60



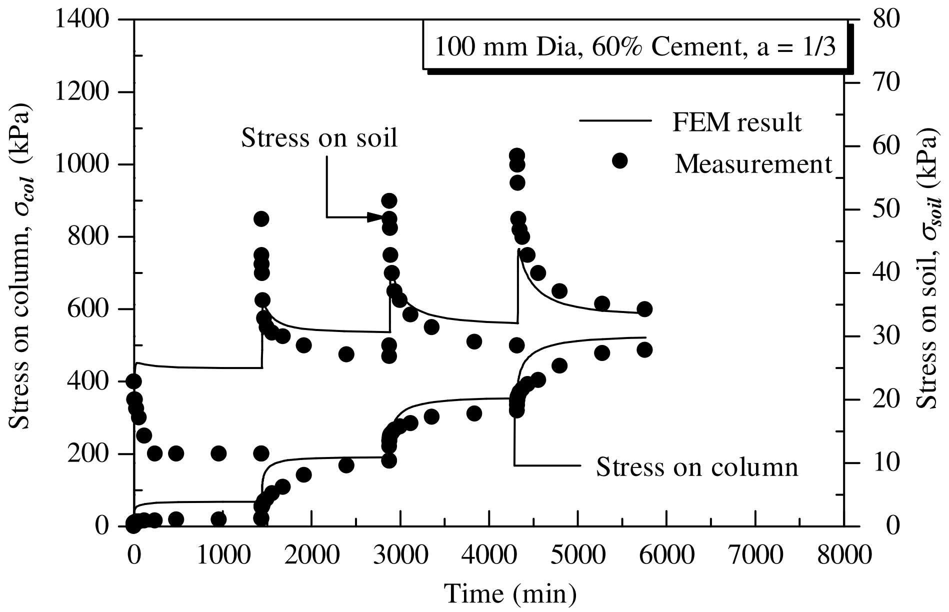
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวกับเวลา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตรปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 60



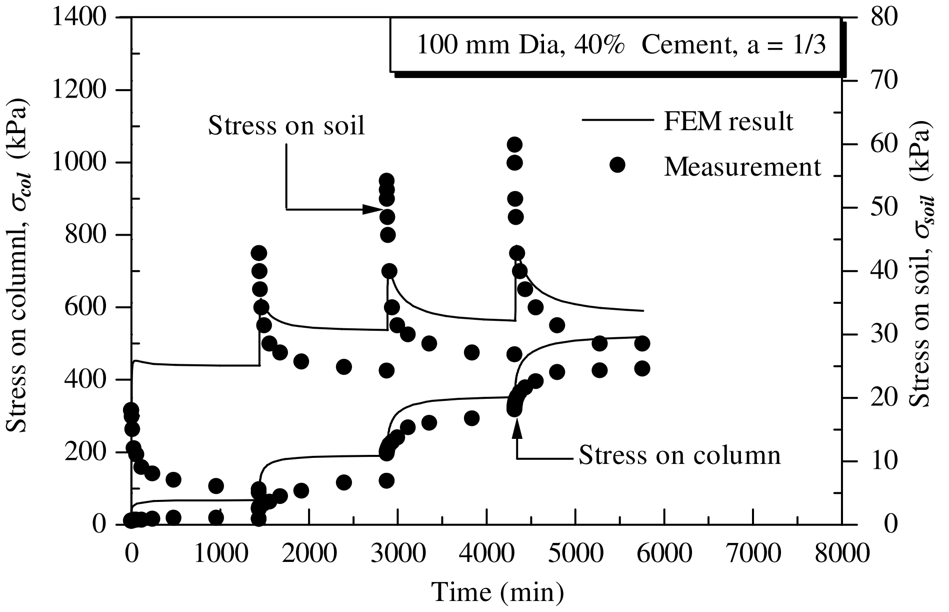
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวกับเวลา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตรปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 40



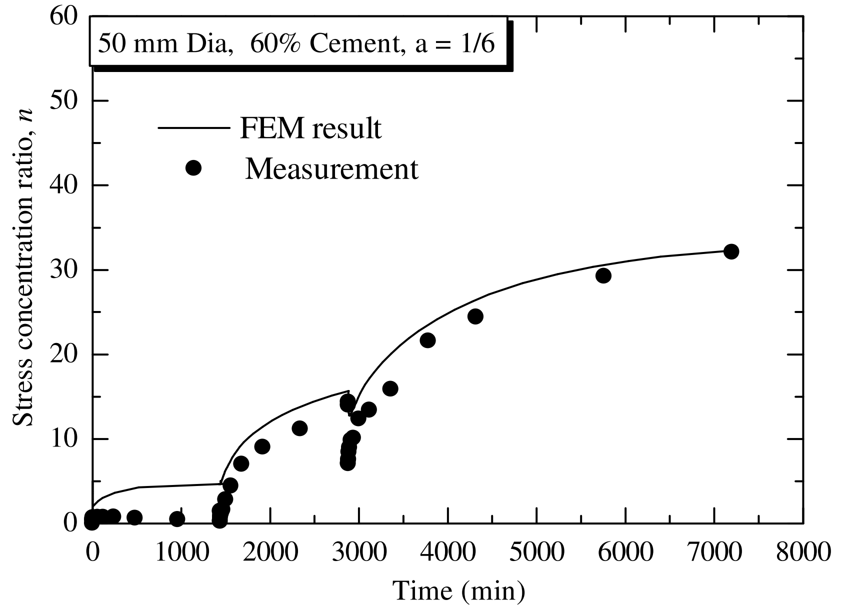
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มดินซีเมนต์และดินเหนียวล้อมรอบกับเวลา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 60



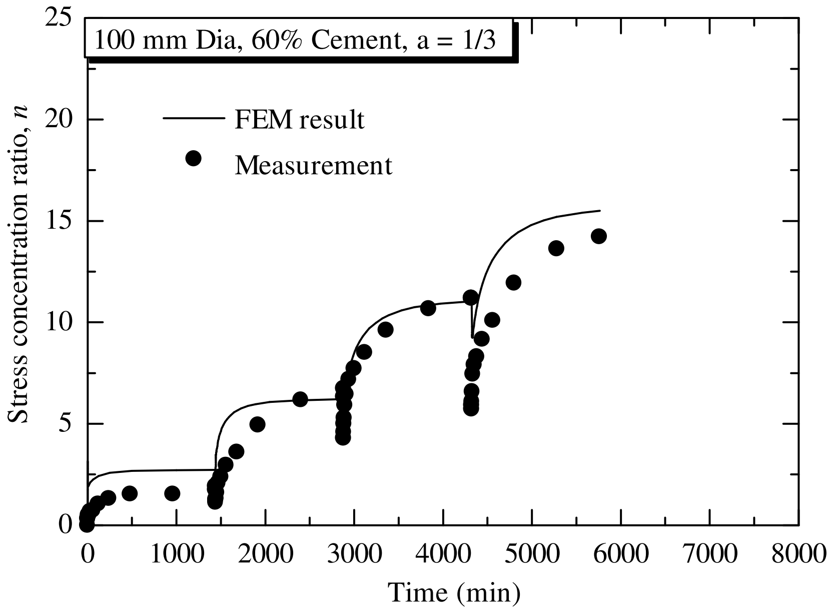
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มดินซีเมนต์และดินเหนียวล้อมรอบกับเวลา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 60



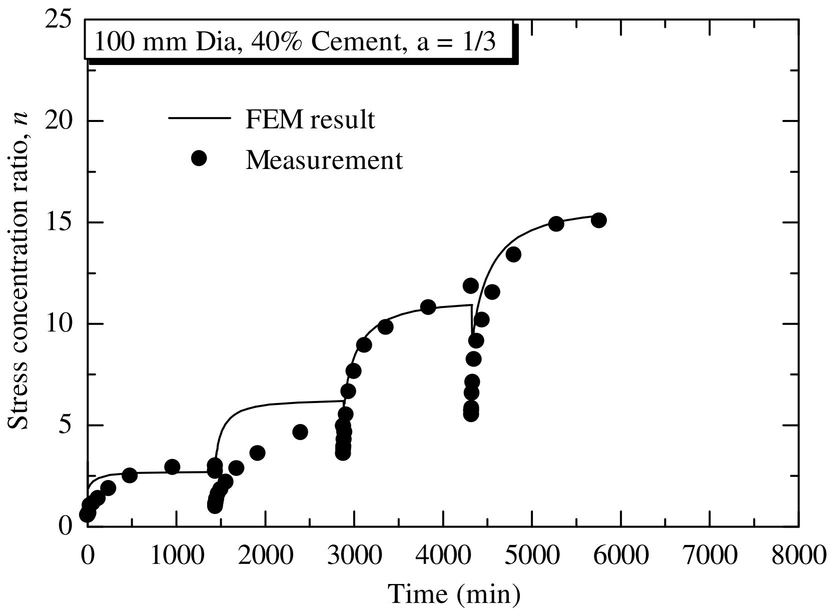
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มดินซีเมนต์และดินเหนียวล้อมรอบกับเวลา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 40



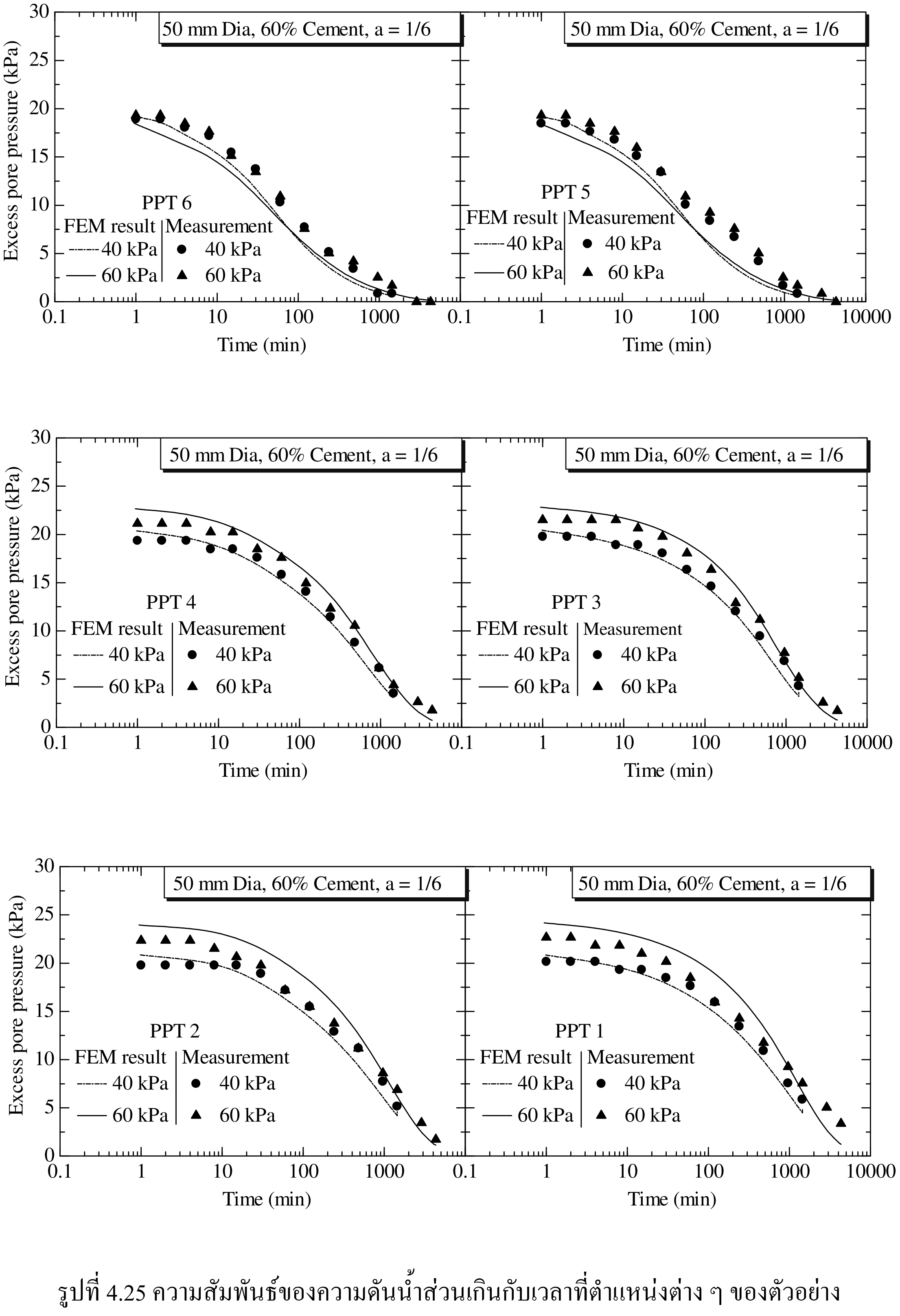
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง stress concentration ratio, n กับเวลา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 40



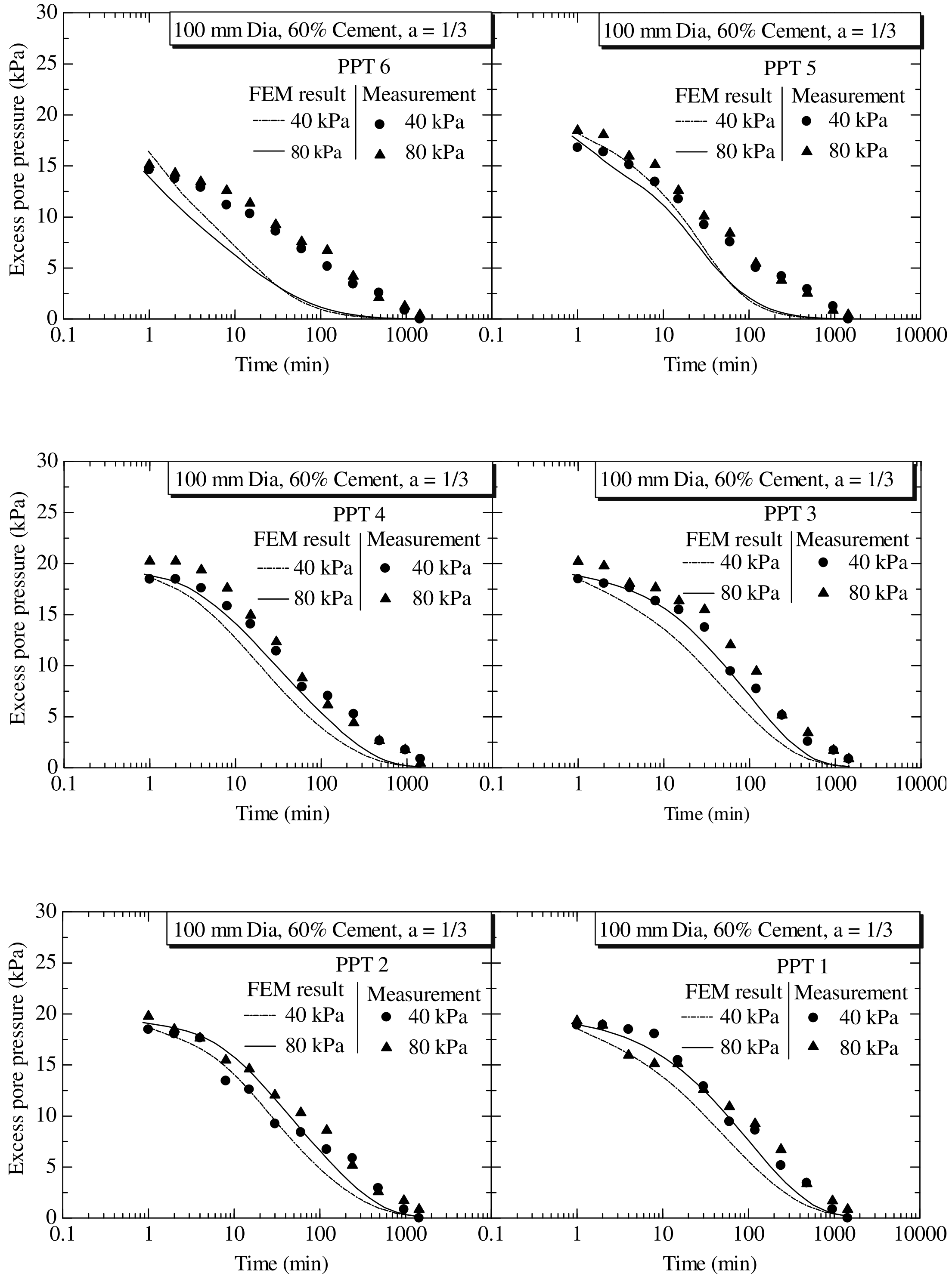
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง stress concentration ratio, *n* กับเวลาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 40



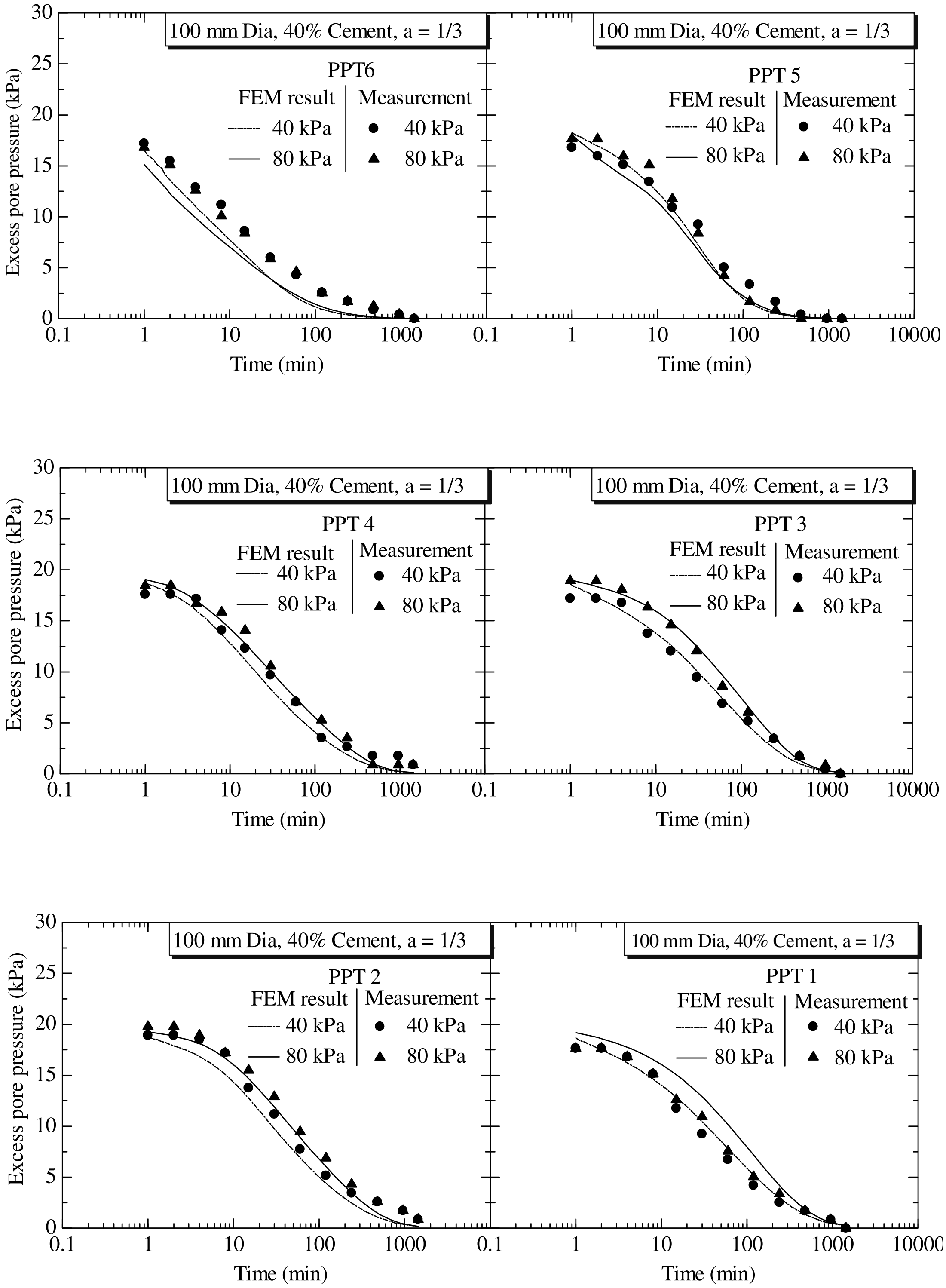
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง stress concentration ratio, *n* กับเวลา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 40



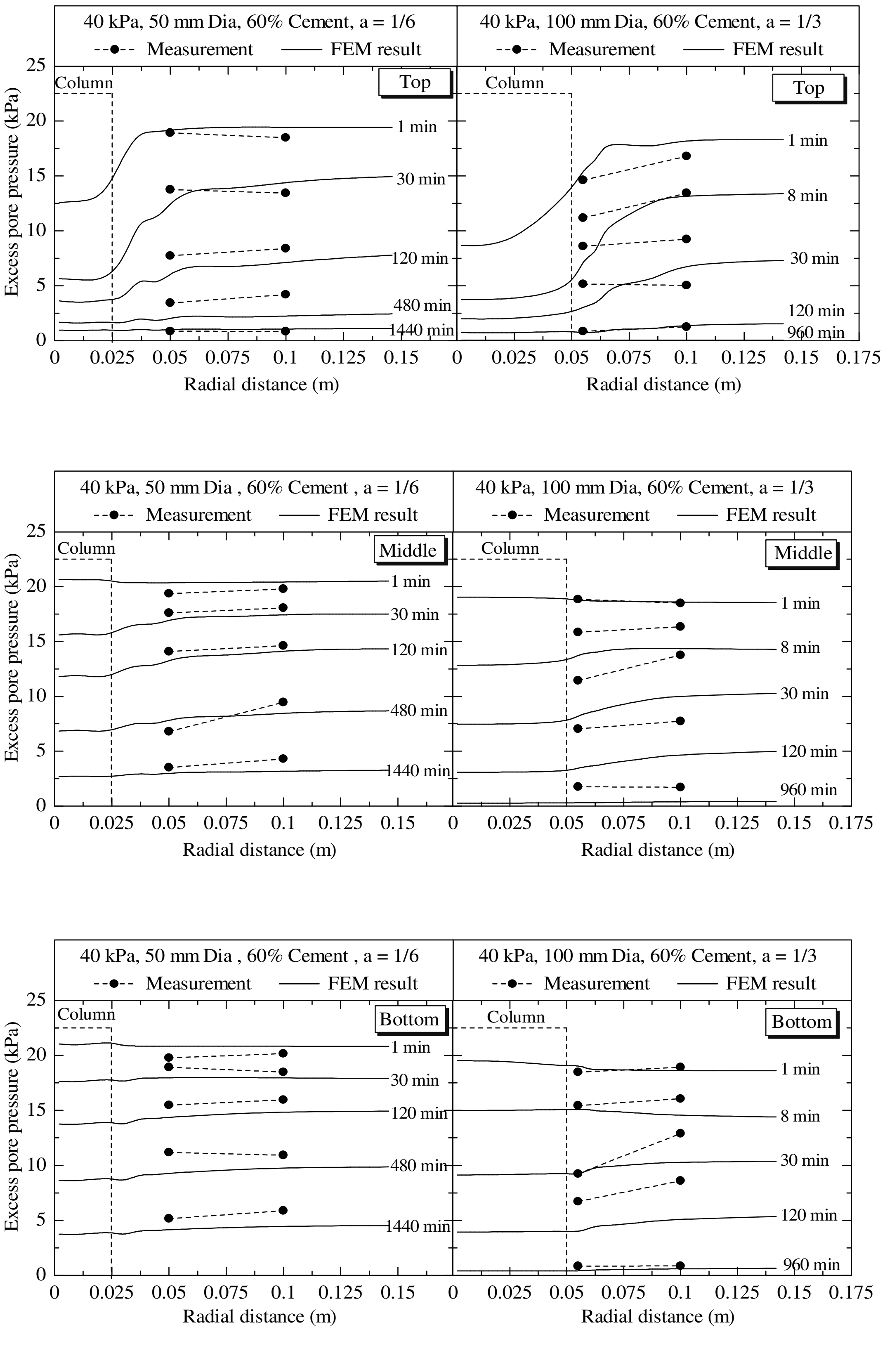
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ของความดันน้ำส่วนเกินกับเวลาที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของตัวอย่าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 60



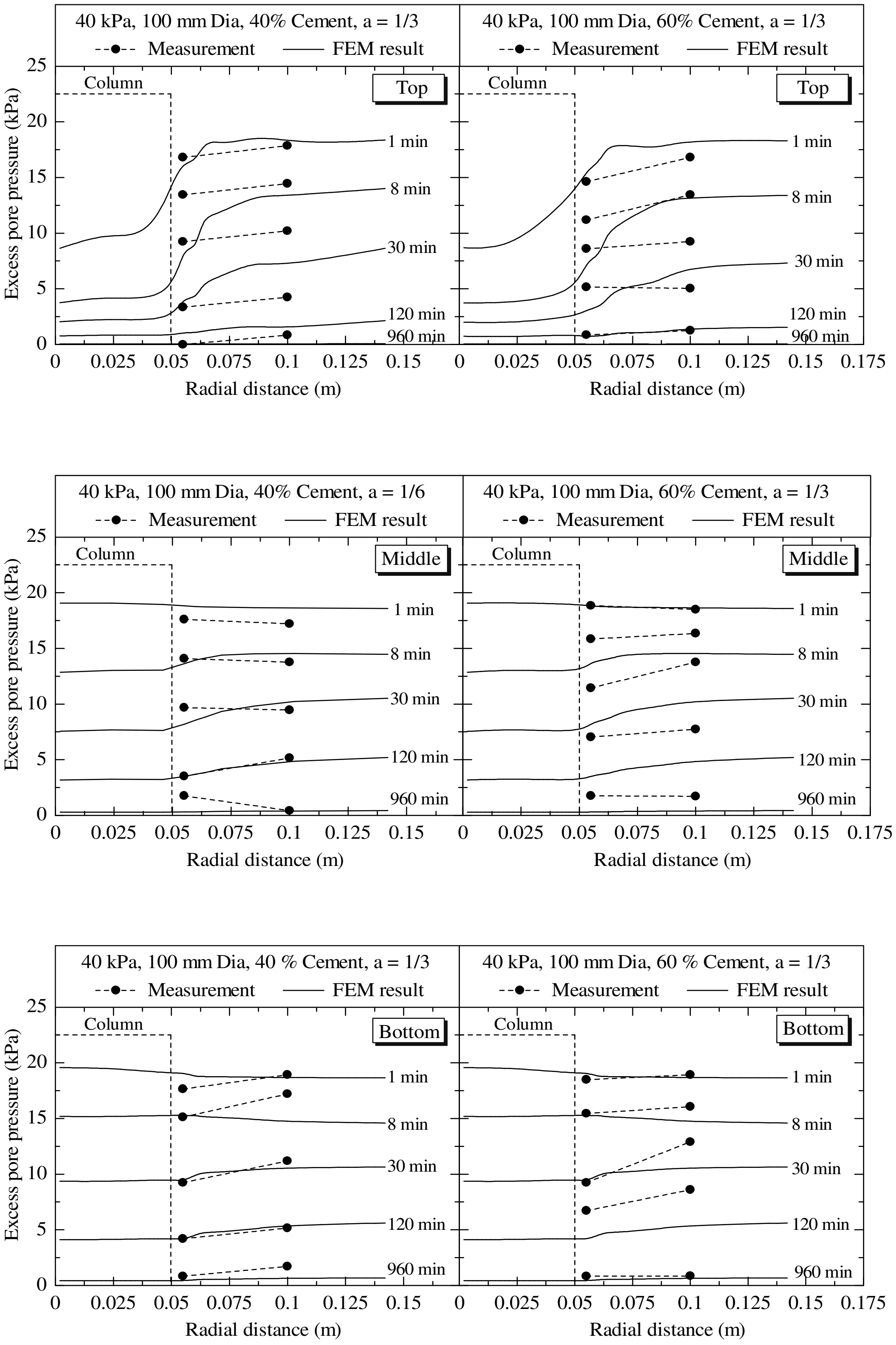
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ของความดันน้ำส่วนเกินกับเวลาที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของตัวอย่าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 60



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ของความดันน้ำส่วนเกินกับเวลาที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของตัวอย่าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 40

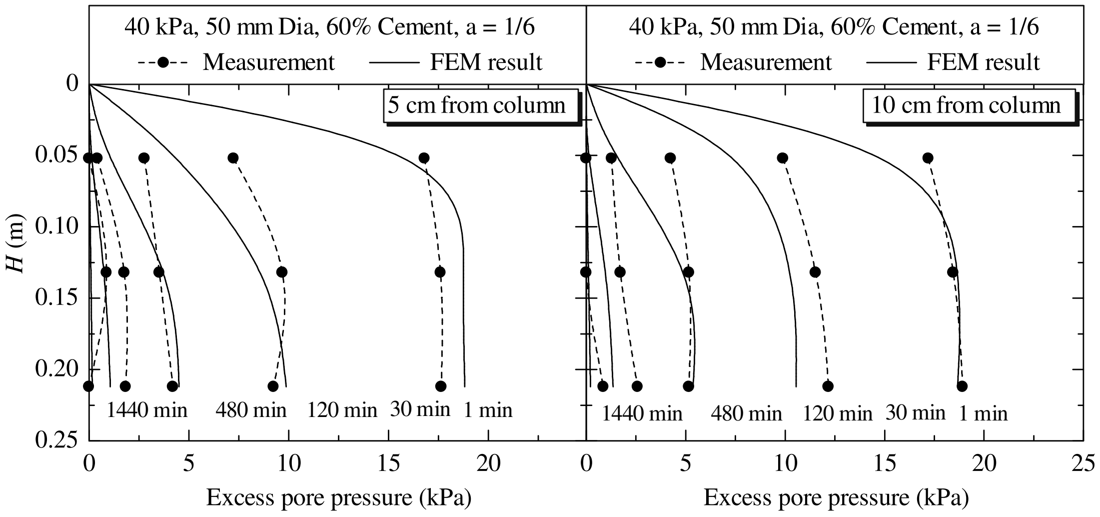


รูปที่ 4.28 การเปลี่ยนแปลงความดันน้ำส่วนเกินกับระยะทางในแนวรัศมีที่เวลาใด ๆ เมื่อปริมาณร้อยละซีเมนต์เท่ากัน ค่า a ไม่เท่ากัน

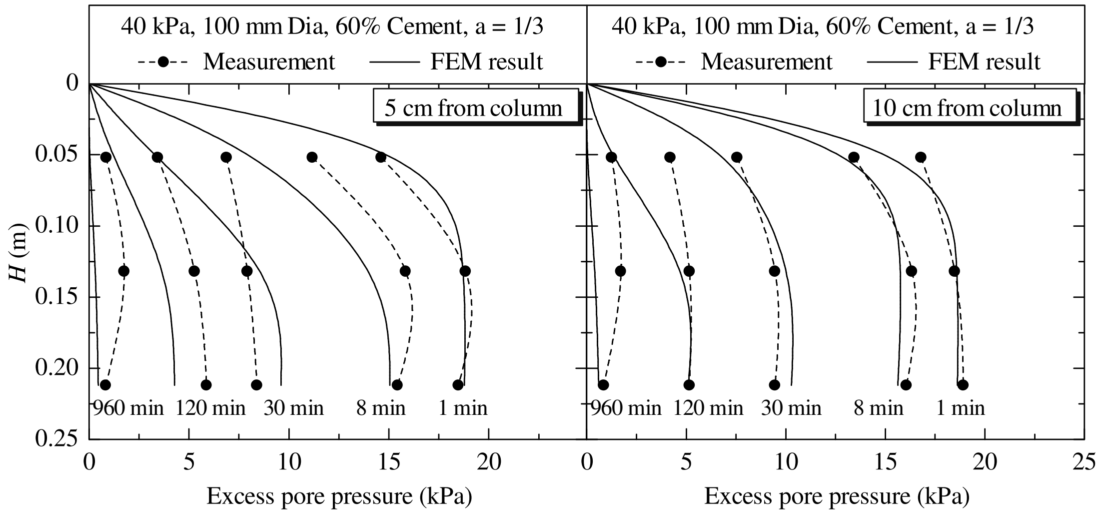


รูปที่ 4.29 การเปลี่ยนแปลงความดันน้ำส่วนเกินกับระยะทางในแนวรัศมีที่เวลาใด ๆ เมื่อปริมาณร้อยละซีเมนต์ไม่เท่ากัน ค่า a เท่ากัน

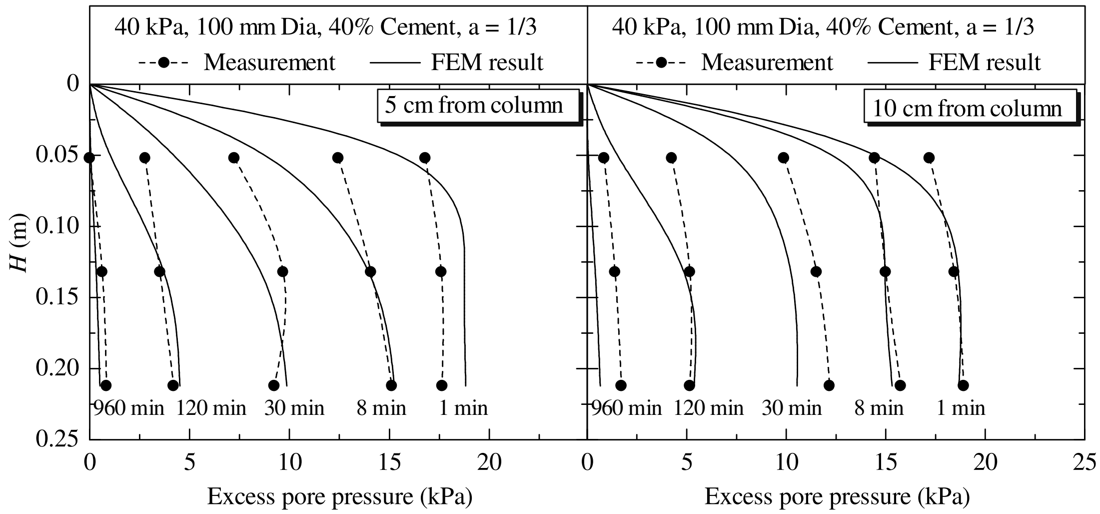
รูปที่ 4.30 ถึง 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันส่วนเกินน้ำกับตามความลึก ที่เวลาต่าง ๆ พบว่าดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ ทั้ง 3 ตัวอย่าง มีพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำคล้ายกับการอัดตัวคายน้ำหนึ่งมิติ (1-D Consolidation) ของ Terzaghi (1925) และมีลักษณะเป็นแบบระบายน้ำทางเดียว ทั้งบริเวณใกล้เสาเข็มและไกลเสาเข็ม



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินตามความลึกที่เวลาต่าง ๆ ของตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 60



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินตามความลึกที่เวลาต่าง ๆ ของตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 60



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินตามความลึกที่เวลาต่าง ๆ ของตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 40

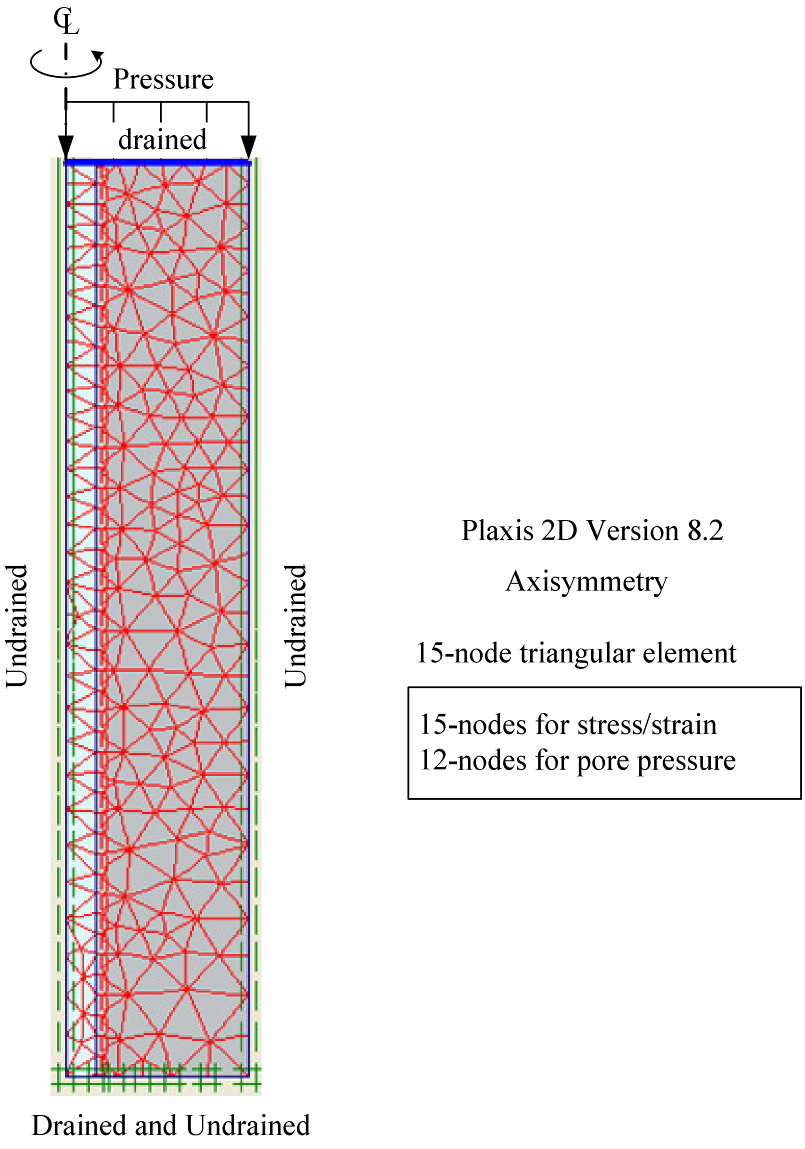
4.5 พฤติกรรมของความดันน้ำส่วนเกินแบบระบายน้ำทางเดียวและสองทางในดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์

การศึกษาพฤติกรรมของความดันน้ำส่วนเกินในดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ แบ่งเป็น 2 กรณี คือ แบบระบายน้ำทางเดียว และแบบระบายน้ำสองทาง โดยวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบสมมาตรรอบแกน ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D Version 8.2 ใช้เอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยมประกอบด้วย 15 โหนด โดยแบ่งเป็น 15 โหนด สำหรับความเค้นกับความเครียด และ 12 โหนด สำหรับความดันน้ำ (รูปที่ 4.33) เสาเข็มดินซีเมนต์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d_p เท่ากับ 1.0 เมตร D_e คือเส้นผ่านศูนย์กลางของ Unit cell เท่ากับ 6.0 เมตร และความลึก 15 เมตร ค่าพารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์แสดงใน ตารางที่ 4.1 ค่า E' ที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่ากับ 120,000 กิโลปาสคาล

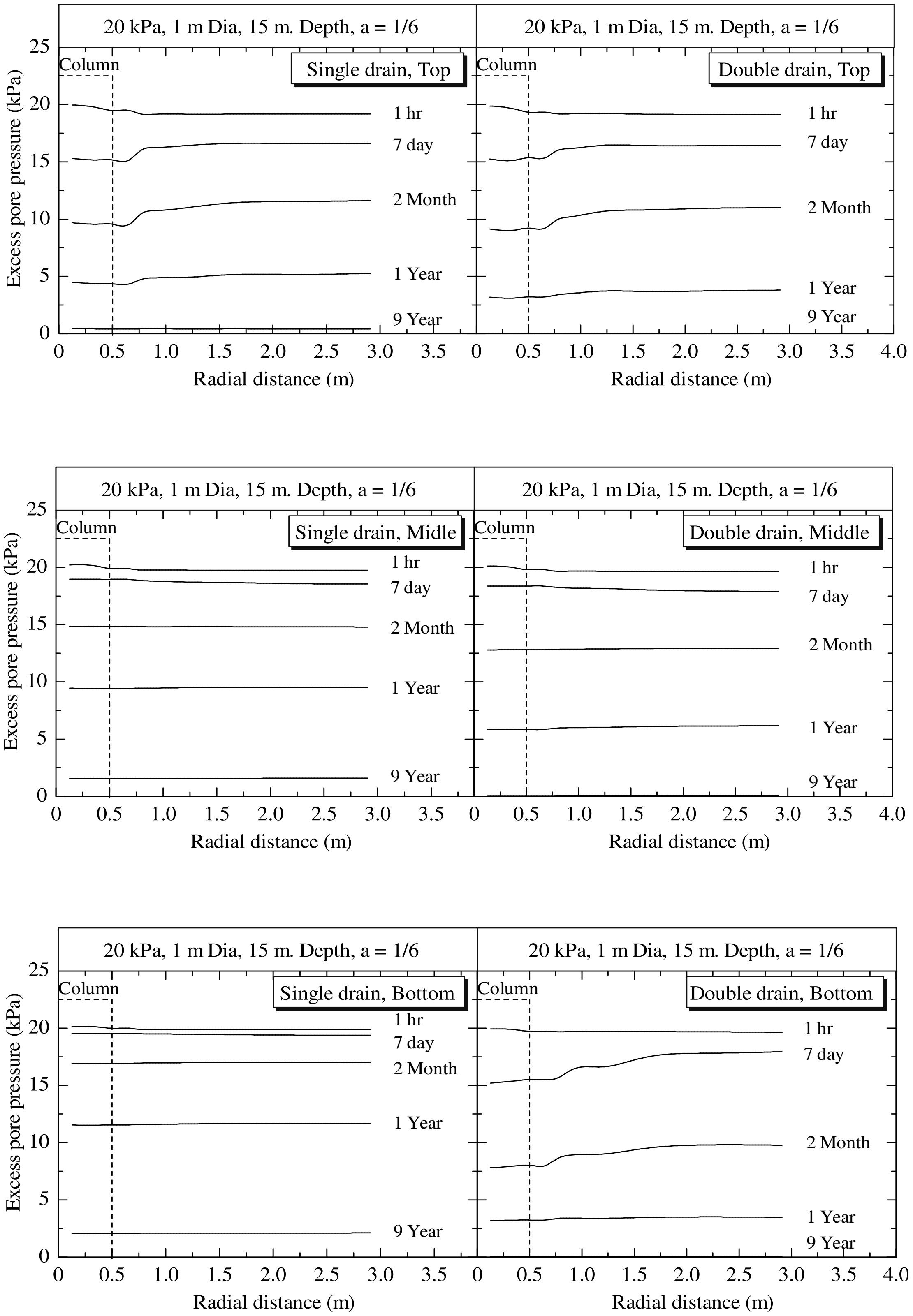
รูปที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินที่มีการระบายน้ำทางเดียวและสองทางกับระยะทางตามแนวรัศมี ที่เวลาใด ๆ จะเห็นได้ว่าความดันน้ำส่วนเกินตรงด้านบนของเสาเข็มทั้งแบบระบายน้ำทางเดียวและสองทางจะระบายได้เร็ว การระบายความดันน้ำส่วนเกินในเสาเข็มตรงกึ่งกลางของทั้งสองกรณีจะต่ำกว่าดินเหนียวอ่อนล้อมรอบเล็กน้อย และการระบายความดันน้ำส่วนเกินตรงด้านล่างของเสาเข็มกรณีการระบายน้ำสองทางจะเกิดขึ้นเร็วกว่ากรณีการระบายน้ำทางเดียว เนื่องจากอยู่ใกล้ขอบเขตการระบายน้ำ

รูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินที่มีการระบายน้ำทางเดียวและระบายน้ำสองทางตามความลึกที่เวลาใด ๆ การระบายของความดันน้ำทั้งสองแบบมีลักษณะคล้ายกับการอัดตัวคายน้ำหนึ่งมิติ ทั้งบริเวณใกล้เสาเข็มและไกลเสาเข็ม และความดันน้ำส่วนเกินจะระบายได้เร็วเมื่ออยู่ใกล้กับขอบเขตระบายน้ำ

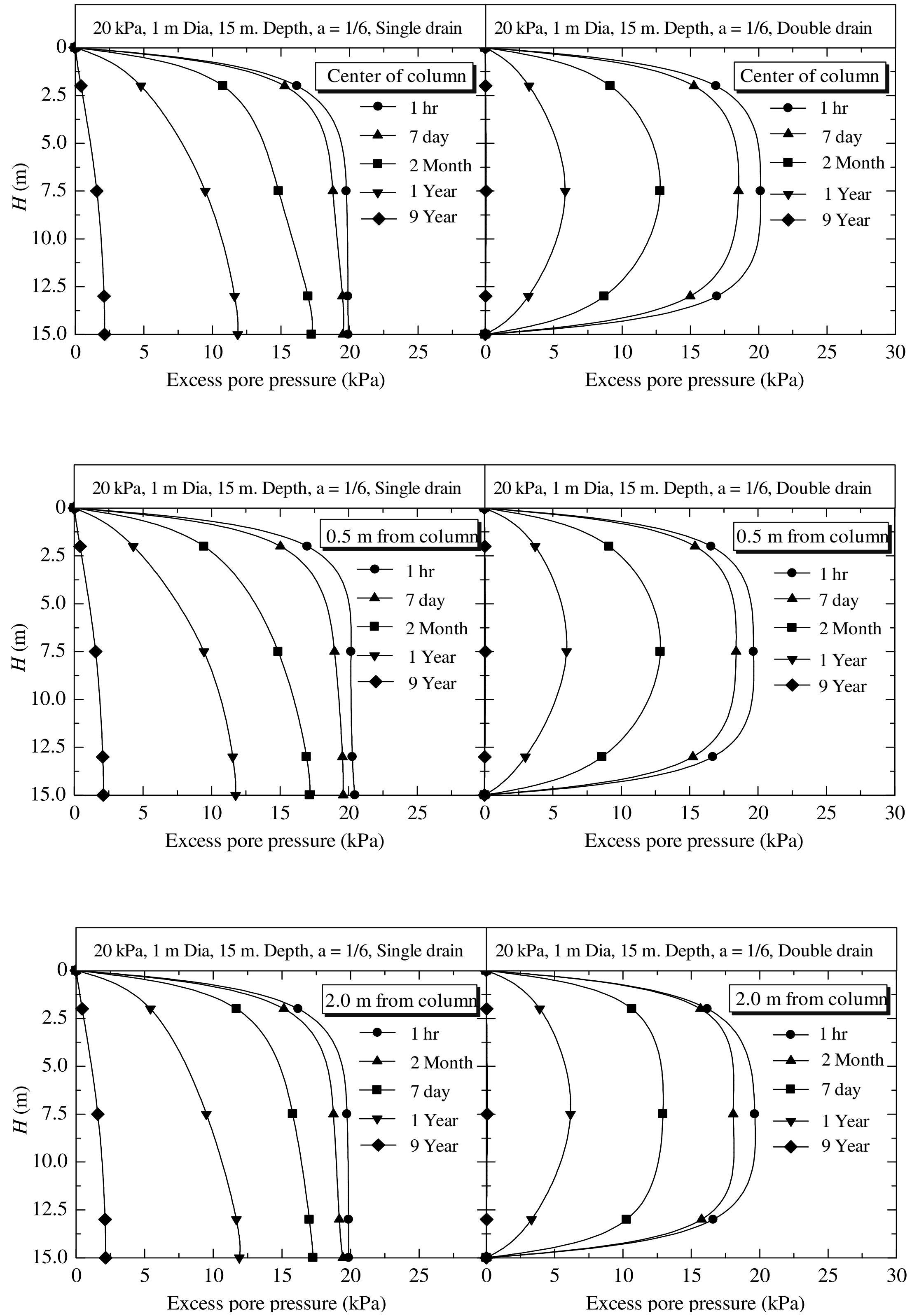
รูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลาทั้งกรณีระบายน้ำทางเดียวและสองทาง พบว่าดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์มีการทรุดตัวสุดท้ายของทั้งสองกรณีเท่ากัน เพียงแต่อัตราการทรุดตัวต่างกัน กล่าวคือ กรณีของระบายน้ำสองทางจะมีอัตราการทรุดตัวที่เร็วกว่ากรณีของระบายน้ำทางเดียว



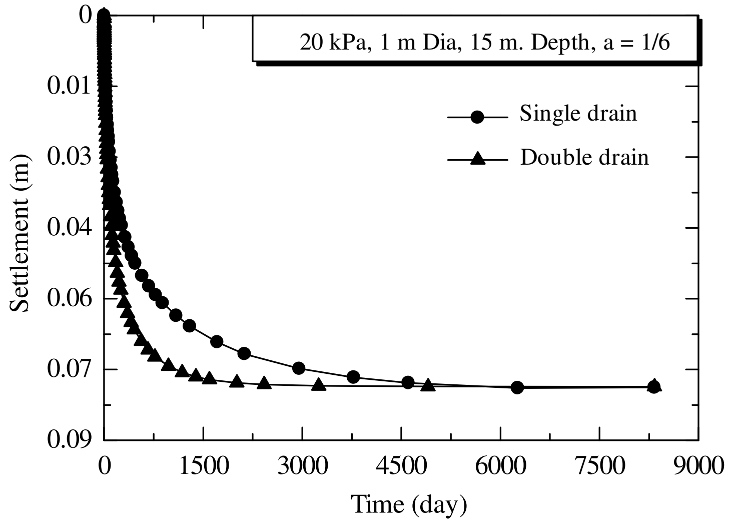
รูปที่ 4.33 แบบจำลองสำหรับวิเคราะห์ทั้งกรณีระบายน้ำทางเดียวและสองทาง



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินที่มีการระบายน้ำทางเดียวและสองทางกับระยะทางในแนวรัศมี ณ เวลาใด ๆ



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินที่มีการระบายน้ำทางเดียวและระบายน้ำสองทางตามความลึกที่เวลาต่าง ๆ



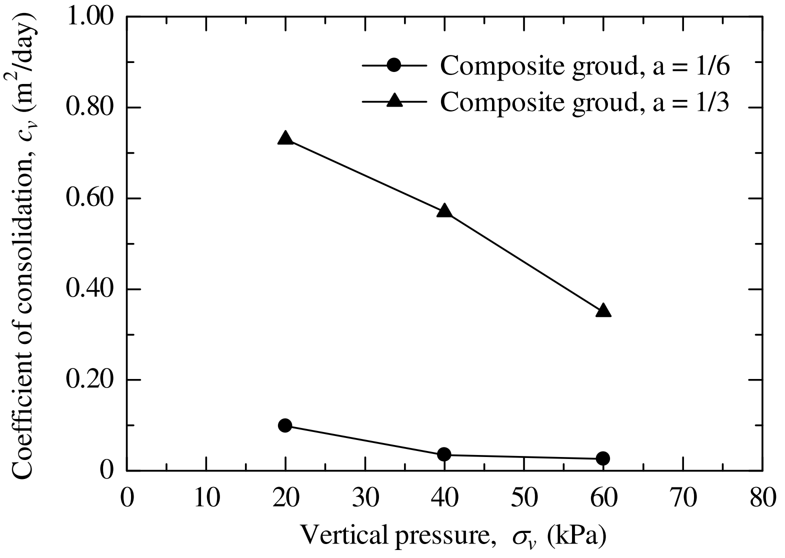
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลาทั้งกรณีระบายน้ำทางเดียวและสองทาง

4.6 การประมาณการทรุดตัวสำหรับดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์

ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในหัวข้อที่ 4.4 พบว่า การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นแบบการอัดตัวคายน้ำหนึ่งมิติ (1-D Consolidation) ด้วยทฤษฎีของ Terzaghi น่าจะนำใช้ในการประมาณการทรุดตัวได้ หากทราบค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (c_v) ของ Composite ground หัวข้อนี้จะเปรียบเทียบผลการประมาณการทรุดตัวจากทฤษฎี Terzaghi กับผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (FEM)

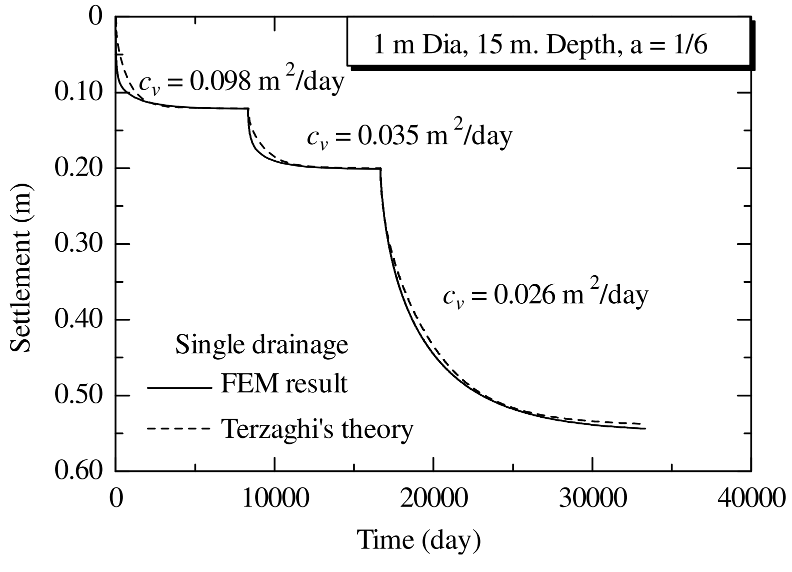
รูปที่ 4.33 แสดงชั้นดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ ที่ใช้วิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบสมมาตรรอบแกน ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D Version 8.2 เอลิเมนต์ที่ใช้เป็นแบบสามเหลี่ยม 15 โหนด โดยแบ่งเป็น 15 โหนด สำหรับความเค้นกับความเครียด และ 12 โหนด สำหรับความดันน้ำ เสาเข็มดินซีเมนต์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d_p เท่ากับ 1.0 และ 2.0 เมตร D_e คือเส้นผ่านศูนย์กลางของ Unit cell เท่ากับ 6.0 เมตร และความลึก 15 เมตร ค่าพารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ แสดงในตารางที่ 4.1 ค่า E' ที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่ากับ 120,000 กิโลปาสคาล การวิเคราะห์เป็นแบบกรณีระบายน้ำทางเดียว (ด้านบน) และระบายน้ำสองทาง โดยเพิ่มความเค้นกดทับ 20 40 และ 60 กิโลปาสคาล ผลการวิเคราะห์จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับทฤษฎีของ Terzaghi

รูปที่ 4.37 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์กับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น ที่หาได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ รูปที่ 4.4 (หน้า 49) เสาเข็มดินซีเมนต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เมตร มีค่า c_v ที่น้ำหนักบรรทุก 20 40 และ 60 กิโลปาสคาลเท่ากับ 0.096 0.035 และ 0.026 ตารางเมตรต่อวัน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 เมตร เท่ากับ 0.73 0.57 และ 0.35 ตารางเมตรต่อวัน

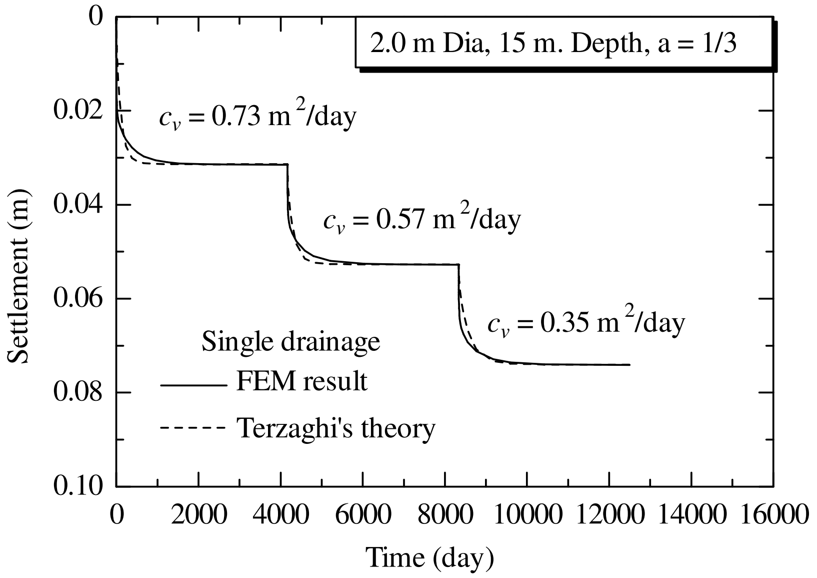


รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำกับน้ำหนักบรรทุก

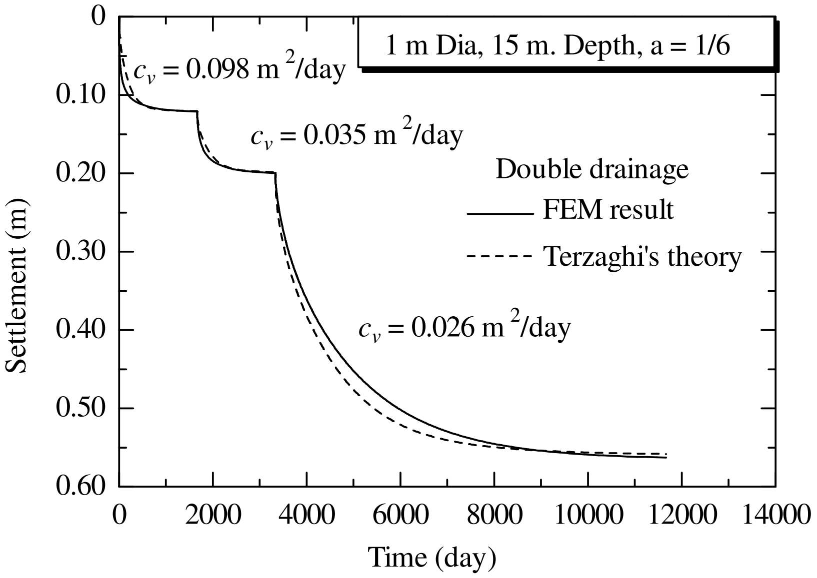
รูปที่ 4.38 ถึง 4.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา โดยใช้รูปที่ 2.8 (หน้า 16) ในการประมาณการทรุดตัวที่เวลาต่าง ๆ การทรุดตัวที่เวลาใด ๆ หาได้จากสมการ $S_t = US_c$ จะเห็นได้ว่าผลการประมาณการทรุดตัวที่เวลาต่าง ๆ มีความใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้ จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข



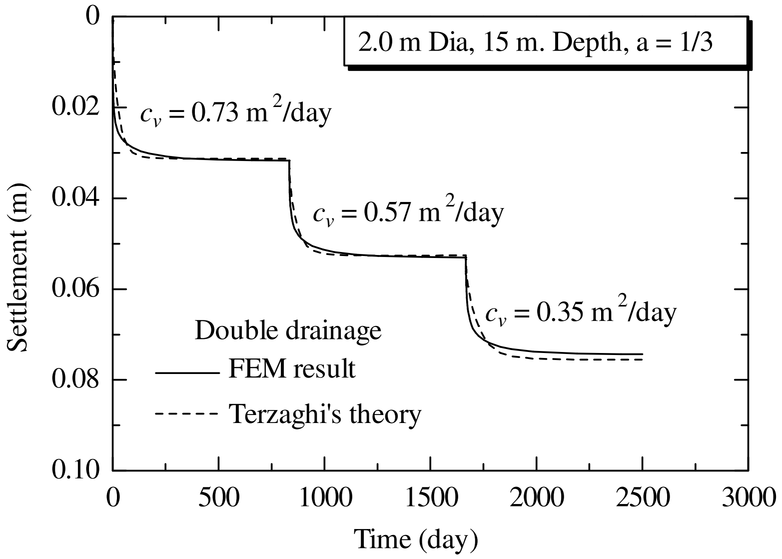
รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลากรณีระบายน้ำทางเดียว
ของตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เมตร ความลึก 15 เมตร



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลากรณีระบายน้ำทางเดียว ของตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 เมตร ความลึก 15 เมตร



รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลากรณีระบายน้ำสองทาง ของตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เมตร ความลึก 15 เมตร



รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลากรณีระบายน้ำสองทาง ของตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 เมตร ความลึก 15 เมตร

บทที่ 5
บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากผลการศึกษาพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยศึกษาอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ของเสาเข็มดินซีเมนต์และอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง a ต่อความเค้นที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มดินซีเมนต์และดินล้อมรอบ stress concentration ratio, n และการระบายความดันน้ำส่วนเกิน ในชั้นดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ End Bearing เปรียบเทียบผลทดสอบที่ได้กับผลการวิเคราะห์ทางไฟไนท์เอลิเมนต์ สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 พฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์

การทรุดตัวสุดท้ายของแต่ละน้ำหนักบรรทุกจะเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ ก่อนที่เสาเข็มดินซีเมนต์เกิดการวิบัติ σ_{col} จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อให้น้ำหนักกดทับจนเสาเข็มเกิดการวิบัติ σ_{soil} และความดันน้ำส่วนเกินจะเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน หลังจากนั้นความดันน้ำส่วนเกิน ที่ใกล้เสาเข็มมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการวิบัติของเสาเข็มทำให้เกิดช่องว่างตามรอยแตกหัก เสาเข็มที่แตกหักจึงทำหน้าที่เสมือนเสาระบายน้ำในแนวดิ่ง

5.1.2 วิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis)

พฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของชั้นดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ในแบบจำลอง โดยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบสมมาตรรอบแกน ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D Version 8.2 โดยใช้เอลิเมนต์ แบบสามเหลี่ยมประกอบด้วย 15 โหนด โดยแบ่งเป็น 15 โหนด สำหรับความเค้นกับความเครียด และ 12 โหนด สำหรับความดันน้ำ สามารถทำนายการทรุดตัว ระยะเวลาการทรุดตัว ความเค้นในเสาเข็ม stress concentration ratio, n และการระบายความดันน้ำส่วนเกิน ที่เกิดขึ้น ได้สอดคล้องกับผลทดสอบแบบจำลองกายภาพย่อส่วนในห้องปฏิบัติการ

อิทธิพลของอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของหน่วยเซลล์ a มีผลอย่างมากต่อการทรุดตัวสุดท้าย ระยะเวลาการทรุดตัว ความเค้นในเสาเข็ม stress concentration ratio, n และการระบายความดันน้ำส่วนเกิน กล่าวคือ เมื่อ a เพิ่มขึ้น การทรุดตัวสุดท้าย ระยะเวลาการทรุดตัว ความเค้นในเสาเข็ม stress concentration ratio, n และ การระบายความดันน้ำส่วนเกินจะมีค่าต่ำ

อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ค่าสติฟเนส E' ไม่แปรผันตามปริมาณปูนซีเมนต์ ดังนั้นปริมาณซีเมนต์จึงไม่มีผลต่อการทรุดตัวสุดท้าย ระยะเวลาการทรุดตัว และการระบายความดันน้ำส่วนเกิน แต่มีผลต่อความต้านทานน้ำหนักบรรทุกของดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็ม

5.1.3 พฤติกรรมของความดันน้ำส่วนเกินแบบระบายน้ำทางเดียวและสองทางในดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์

ดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์มีการทรุดตัวสุดท้ายของทั้งสองกรณีเท่ากัน เพียงแต่อัตราการทรุดตัวต่างกัน โดยกรณีของระบายน้ำสองทางจะมีอัตราการทรุดตัวที่เร็วกว่า และความดันน้ำส่วนเกินตรงด้านบนของเสาเข็มของทั้งสองกรณีจะระบายได้เร็ว ความดันน้ำส่วนเกินตรงกึ่งกลางของทั้งสองกรณีจะต่ำกว่าดินเหนียวอ่อนล้อมรอบเล็กน้อย และการระบายความดันน้ำส่วนเกินตรงด้านล่างของเสาเข็มกรณีระบายน้ำสองทางจะเกิดขึ้นเร็วกว่ากรณีระบายน้ำทางเดียว เนื่องจากอยู่ใกล้ขอบเขตการระบายน้ำ การระบายของความดันน้ำส่วนเกินทั้งสองแบบมีลักษณะคล้ายกับการอัดตัวคายน้ำหนึ่งมิติ ทั้งบริเวณใกล้เสาเข็มและไกลเสาเข็ม

5.1.4 การประมาณการทรุดตัวสำหรับดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์

การประมาณการทรุดตัวสำหรับดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ ด้วยทฤษฎีของ Terzaghi (1925) โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (c_v) ที่หาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลาของดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมาณนี้มีค่าใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ครั้งนี้ศึกษาพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของชั้นดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ End Bearing ด้วยการสร้างแบบจำลองกายภาพย่อส่วนแบบสมมาตรรอบแกนในห้องปฏิบัติการ โดยศึกษาการทรุดตัว ระยะเวลาการทรุดตัว ความเค้นในเสาเข็ม stress concentration ratio, n และความดันน้ำส่วนเกิน เปรียบเทียบผลทดสอบกับผลวิเคราะห์ทางไฟไนท์เอลิเมนต์ (โปรแกรม Plaxis2D) ผู้ที่สนใจอาจนำแนวคิดนี้ไปประยุกต์ศึกษาในกรณีของ Floating

รายการอ้างอิง

American Society of Testing and Materials (ASTM) (1989). Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Construction, Vol. 04.08 Soil and Rock; Building Stones, Philadelphia, Pa.

Bergado, D.T., Anderson, L.R., Miura, N., and Balasubramniam, A.S. (1996). **Soil Ground Improment in LowLand and Other Environment**. ASCE Pass, New York

Broms, B.B., and Boman, P. (1975). **Lime stabilized column**. Proceeding of 5th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore, India, Vol. 1, pp. 227-234

Broms, B.B., and Boman, P. (1979). **Lime column – A new foundation method**. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 105, No. GT4, pp. 540-556.

Casagrand, A., and Fadum, R.E. (1942). **Notes on soil testing for engineering purposes**. Harvard University Graduate School Engineering Publication No 8.

Carillo, N. (1940). **Simple two-and three-dimensional cases in the theory of consolidation of soil.** Journal of Mathematics and Physics, Vol. 21, No 1, pp. 241-251.

Chai, J.C., and Pongsivasathit, S. (2010). **A method for predicting consolidation settlements of floating column improved clayey subsoil**. Civil Engineering China 2010, Vol. 4, No 2, pp. 241-251.

D'Appolonia, D.J., Poulos, H.G., and Ladd, C.C. (1971). **Initial settlement of structures on clay**. Proceedings, ASCE, Vol. 97, No SM10

DJM Research Group. (2000). **The Manual for the Dry Jet Mixing Method**, Japan.

Horpibulsuk, S., Bergado, D.T., and Lorenzo, G.A. (2004a). **Compressibility of cement admixed clays at high water content**. Geotechnical, Vol.54, No 2, pp. 151-154.

Horpibulsuk, S., Miura, N., and Bergado, D.T. (2004b). **Undrained shear behavior of cement admixed clay at high water content**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 130, No. 10, pp. 1096-1105.

Janbu, N., Bjerrum, L., and Kjaernsli, B. (1956). **Veiledring ved losning av fundermentering soppgever**. Norwegian Geotechnical Institute Publication, No 16, Oslo

Lorenzo, G.A., and Bergado, D.T. (2003). **New consolidation equation for soil-cement pile improved ground**. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 40, No. 2, pp. 265-275.

Lo, K.Y. (1961). **Secondaly compression of clay**. Journal of Geotechnical and geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 87, No. 4, pp. 61 - 87.

Miura, N., Chai, J.C., and Toyota, K. (1998). **Investigation on some factors affecting discharge capacity of prefabricated vertical drain**. Proceeding of 6th Internation Conference on Geosynthetics, Internationnal Geosynthetics Society, Atlanta, pp. 33-45

Mesri, G. (1973). **Coefficient of secondary compression**. Journal of Geotechnical and geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 99, No. 1, pp. 123 - 137.

Potts, D.M., and Zdravkovic, L. (2001). **Finite element analysis in geotechnical engineering**. London: Thomas Telford.

Shen, S.L. (1998). **Behavior of Deep Mixing Columns in Composite Clay Ground**. PH.D. Dissertation, Saga University, Saga Japan.

Sivaram, B., and Swamee, P. (1977). **A contribution to the settlement analysis of foundation caly**. Geotechnique. Vol. 7, No. 5.

Skempton, A.W., and Bjerrum, L. (1957). **Rectangular hyperbola method for consolidation analysis**. Geotechnique, Vol. 37, No. 3, pp. 355- 368.

Terzaghi, K. (1925). **Theoretical Soil Mechanics**. Wiley. New York.

Yin, J.H., and Fang, Z. (2006). **Physical modeling of consolidation behavior of a composite foundation consisting of a cement-mixed soil colume and untreated soft ma clay**. Geotechique, Vol. 56, No 1, pp 63-68.

Yin, J.H., and Fang, Z. (2007). **Responses of Excess Pore Water Pressure in Soft Marine Clay around a Soil-Cement Column**. International Journal of Geomechanics, ASCE, pp.167-175

ภาคผนวก ก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16
มหาวิทยาลัยมหิดล | 18 – 20 พฤษภาคม 2554

การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์
CONSOLIDATION BEHAVIOR OF COMPOSITE SOFT CLAY GROUND

อานนท์ ชลภัสสรณ์[1*], สุขสันติ์ หอพิบูลสุข[2], อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์[3]

[1] นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี arnon.ce18@gmail.com
[2] ศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี suksun@g.sut.ac.th
[3] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี avirut@sut.ac.th

บทคัดย่อ

การเสริมเสาเข็มเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและใช้กันอย่างแพร่หลายในการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อน บทความนี้ศึกษาพฤติกรรมการทรุดตัวและความเค้นที่เกิดขึ้นในชั้นดินเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยแบบจำลองกายภาพย่อส่วนแบบสมมาตรรอบแกนและเปรียบเทียบผลทดสอบที่ได้กับผลวิเคราะห์ทางไฟไนท์อิลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D จากการศึกษาพบว่าถึงแม้ว่ากำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์จะแปรผันตามปริมาณปูนซีเมนต์ แต่ค่าสติฟเนส ของเสาเข็มดินซีเมนต์ไม่แปรผันตามปริมาณปูนซีเมนต์ ดังนั้นปริมาณปูนซีเมนต์จึงเพียงแต่เป็นตัวควบคุมความต้านทานแรงกดอัดของชั้นดินเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์เท่านั้น ตัวแปรหลักที่ควบคุมการทรุดตัวสุดท้าย ระยะเวลาการทรุดตัว ความเค้นในเสาเข็ม และ stress concentration ratio *n* ซึ่งคืออัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มต่ออัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นดินเสริมเสาเข็ม ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์สามารถทำนายสถานะความเค้นและความเครียด การทรุดตัว และระยะเวลาการทรุดตัว ได้สอดคล้องกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการ

Abstract

Columnar intrusion is one of the effective and widely accepted means to improve the engineering properties of soil clay deposits. The present paper investigates consolidation behavior and stress on the composite ground using a physical model test. The test results are compared with the finite element simulation ones using PLAXIS 2D program. It is found that even though strength of soil-cement column increases with cement content but stiffness does not. As such, the cement content is only controlled the resistance to compression of the composite ground. An influential factor controlling the final settlement, rate of consolidation, stress on soil cement column and stress concentration is the ratio of column diameter to

[*] ผู้ติดต่อหลัก (Corresponding author)

composite ground diameter. The physical model and finite element simulation results (stress-strain response, final settlement and rate of consolidation) are in very good agreement.

คำสำคัญ: Composite ground; Consolidation; Model; Settlement

1. บทนำ

การออกแบบโครงสร้างสาธารณูปโภคพื้นฐาน เช่น ทางหลวง สนามบิน และท่าเรือ เป็นต้น บนชั้นดินเหนียวอ่อนต้องคำนึงถึงปัจจัยสองส่วนที่สำคัญคือ กำลังรับแรงแบกทานและการทรุดตัว ดินเหนียวอ่อนมีกำลังรับแรงแบกทานที่ต่ำและการทรุดตัวที่สูงจึงต้องมีการปรับปรุงคุณภาพชั้นดินก่อนการก่อสร้างเพื่อเพิ่มกำลังแบกทานและลดการทรุดตัว การปรับปรุงดินด้วยการเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นเทคนิคที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติของ Terzaghi (1925) ไม่สามารถใช้ในการประมาณการทรุดตัว สถานะความเค้น (stress) สถานะความเค้น (strain) และความดันน้ำ (pore water pressure) ของชั้นดินเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ การเสียรูปและความดันน้ำส่วนเกินขณะรับน้ำหนักบรรทุกมีความสำคัญอย่างยิ่งในการพิจารณาเฝ้าระวังโครงสร้างเพื่อป้องกันจากการพังทลายของดิน การทำนายสถานะความเครียด ความเค้น และค่าความดันน้ำในดินสามารถคำนวณโดยวิธีเชิงตัวเลข เช่น วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ เป็นต้น ความแม่นยำของการคำนวณโดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ขึ้นอยู่กับการเลือกใช้แบบจำลองพฤติกรรมของดิน (soil model) และการเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ (Potts et al., 2001) ซึ่งจะต้องมีการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้เหมาะสม โดยการเปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการสอบวัดที่ติดตั้งในสนาม แต่การติดตั้งเครื่องวัดในสนามนั้นมีค่าใช้จ่ายสูงและยุ่งยาก โครงสร้างแบบจำลองกายภาพจึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำ

Yin and Fang (2006) ทำการศึกษาการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ (End Bearing) โดยสร้างแบบจำลองกายภาพย่อส่วนแบบสมมาตรรอบแกน (axisymetric) เสาเข็มดินซีเมนต์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร เครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำจะถูกติดตั้งในจุดต่างๆ จากการศึกษาพบว่าการระบายความดันน้ำจะเกิดขึ้นเร็วตรงบริเวณจุดที่ใกล้เสาเข็มเสาเข็มดินซีเมนต์จึงเปรียบเสมือนแผ่นระบายน้ำแนวดิ่ง ซึ่งช่วยลดระยะเวลาการทรุดตัวของดินเหนียว

Chai et al (2010) ทำการศึกษาการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Floating ที่เมืองฟูกูโอกะ ประเทศญี่ปุ่น ด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (FEM) เปรียบเทียบกับวิธีของสถาบันวิศวกรรมโยธาแห่งประเทศญี่ปุ่น (JICE) โดยพิจารณาถึงอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ทั้งหมดต่อพื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม (α) อัตราส่วนความลึกเสาเข็มต่อความลึกทั้งหมด (β) และความลึกของปลายเสาเข็มที่อยู่ในชั้นดินที่ไม่ได้ปรับปรุง (H_c) ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์สามารถประมาณค่าการทรุดตัวได้ใกล้เคียงกับผลตรวจวัดในสนาม

บทความนี้จะศึกษาพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของชั้นดินเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ End Bearing ด้วยการสร้างแบบจำลองกายภาพย่อส่วนแบบสมมาตรรอบแกน และศึกษาความเค้นที่เกิดขึ้นในเสาเข็มดินซีเมนต์และการทรุดตัวเปรียบเทียบผลทดสอบที่ได้กับผลการวิเคราะห์ทางไฟไนท์เอลิเมนต์

2. พฤติกรรมของการอัดตัวคายน้ำในแบบจำลองกายภาพ

2.1 การเก็บและเตรียมตัวอย่างดิน

ตัวอย่างดินเหนียวที่ใช้ในการทดสอบเป็นดินเหนียวกรุงเทพ (Bangkok clay) จากบริเวณสำนักงานไฟฟ้านครหลวงชิดลม กรุงเทพมหานคร เก็บดินที่ความลึกประมาณ 2-3 เมตร จากผิวดินโดยใช้วิธีขุดเปิดหน้าดิน และดินตัวอย่างจะถูกเก็บใส่ถังพลาสติกมิดชิด หลังจากนั้นนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 เพื่อแยกส่วนที่เป็นกรวด แล้วนำมาขึ้นรูปปั้นใหม่ในห้องทดสอบ ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวตัวอย่างที่นำมาทดสอบ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่าง

G_S	LL (%)	PL (%)	PI (%)	USCS	Particle size distribution (%)		
					Clay	Silt	Sand
2.70	81	34	47	CH	71.7	17.1	11.2

2.2 การจำลองชั้นดินตัวอย่าง

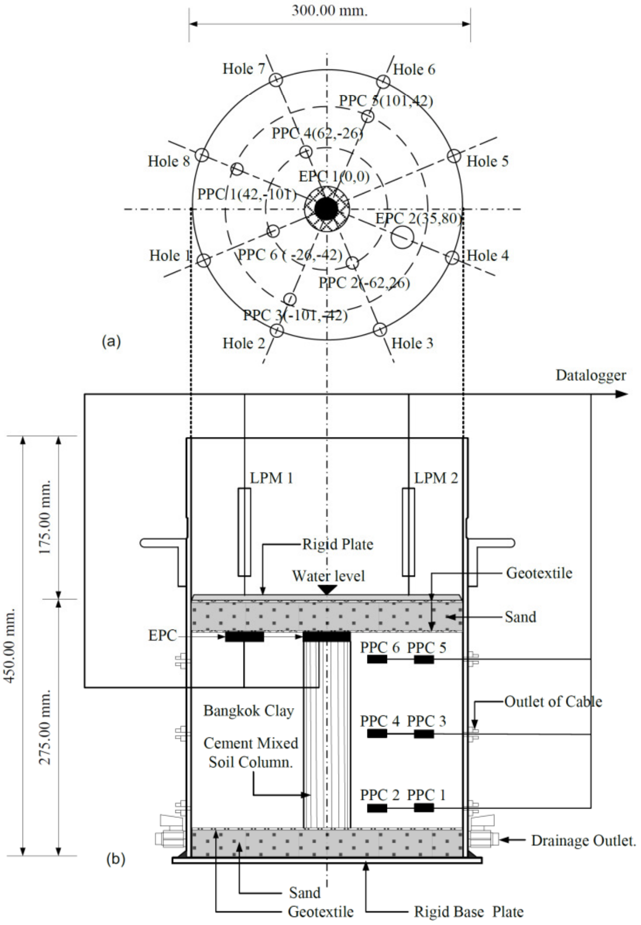
การจำลองชั้นดินในถังทดสอบเริ่มต้นด้วยการเททรายรองพื้นหนา 30 มิลลิเมตร และใส่ท่อพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 400 มิลลิเมตร ตรงจุดศูนย์กลางของถังทดสอบ ต่อจากนั้นเทดินเหนียวกรุงเทพ ซึ่งได้จากการผสมกับน้ำและปั่นให้เข้ากันที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 2 เท่าของขีดจำกัดเหลว ดินตัวอย่างจะถูกใส่ลงในถังทดสอบ และวางทับด้วยแผ่น Acrylic หนา 8 มิลลิเมตร ที่มีรูตรงกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 55 มิลลิเมตร เพื่อขึ้นรูปด้วยน้ำหนักกดทับเท่ากับ 20 กิโลปาสคาล เมื่อสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำ (ดินตัวอย่างต้องมีความสูงประมาณ 200 มิลลิเมตร) ทำการถอดแผ่น Acrylic และท่อพลาสติกออกเพื่อใส่เสาเข็มดินซีเมนต์ ชั้นบนสุดรองพื้นด้วยทรายหนา 30 มิลลิเมตร และวางแผ่นเหล็กหนา 6 มิลลิเมตร ชั้นทรายและดินเหนียวปูด้วยวัสดุสังเคราะห์ (Geotextile) เพื่อป้องกันไม่ให้ดินเหนียวผสมกับชั้นทรายรองพื้น

2.3 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกในแบบจำลองกายภาพ

ภาพที่ 1 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความดันน้ำ ความเค้นรวมในดิน และเครื่องมือวัดการทรุดตัว ดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์จะถูกทำการทดสอบ โดยเพิ่มความเค้นกดทับทีละ 20 กิโลปาสคาล จนกระทั่งเสาเข็มตัวอย่างวิบัติ ระหว่างการทดสอบทำการบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของความดันน้ำ ความเค้นกดทับในแนวดิ่ง และการทรุดตัวที่เกิดขึ้น

2.4 การเตรียมตัวอย่างเสาเข็มดินซีเมนต์

ดินเหนียวที่ได้จะถูกผสมกับน้ำให้มีปริมาณความชื้นเท่ากับ 2 เท่าของขีดจำกัดเหลว และผสมกับปูนซีเมนต์ปริมาณร้อยละ 40 และ 60 ของน้ำหนักดินแห้ง ด้วยเครื่องผสมเป็นเวลา 10 นาที ดินซีเมนต์จะถูกเทลงในแบบ โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น และไล่ฟองอากาศออกแต่ละชั้นในการเท ดินซีเมนต์จะถูกเทลงในแบบ โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น และไล่ฟองอากาศออกแต่ละชั้นของการเท ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 40 และ 60 ที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่ากำลังอัดแกนเดียว (q_u) เท่ากับ 500 และ 1,200 กิโลปาสคาล หน่วยน้ำหนักเท่ากับ13 และ 14 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ปริมาณความชื้นร้อยละ 90 และ 84



เมื่อ EPC คือ หน่วยวัดความดันขนาดเล็ก (Earth Pressure Cell)

PPC คือ หน่วยวัดความดันน้ำขนาดเล็ก (Pore Pressure Cell)

LPM คือ มาตรวัดระยะ (Linear potentionmeter)

ภาพที่ 1 ภาพแผนผังตำแหน่งของอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ (a) รูปตัดตามขวาง (b) รูปตัดตามแนวดิ่ง

ตามลำดับ และตารางที่ 2 แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบในแบบจำลองกายภาพย่อส่วน เพื่อให้ได้ค่า a ต่างกัน (1/3 และ 1/6) และมีค่า q_u ต่างกัน (500 และ 1200 กิโลปาสคาล)

ตารางที่ 2 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองกายภาพย่อส่วน

Case.	Diameter (mm)	High (mm)	Cement (%)
1	50	200	60
2	100	200	60
3	100	200	40

2.5 วิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis)

พฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของชั้นดินที่เสริมเสาเข็มดินซีเมนต์จำลอง โดยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบสมมาตรรอบแกน ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D Version 8 และให้น้ำหนักบรรทุกแบบ stress controlled โมดูลัสประสิทธิผล (E') ของเสาเข็มดินซีเมนต์ประมาณได้จากผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียวประมาณได้ด้วยสมการของ D'Appolonia et al (1971) จะเห็นได้ว่า E' ไม่แปรผันตามปริมาณซีเมนต์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Horpibulsuk et al (2004) ตารางที่ 3 แสดงค่าพารามิเตอร์สำหรับวิเคราะห์เชิงตัวเลขในแบบจำลองกายภาพย่อส่วน

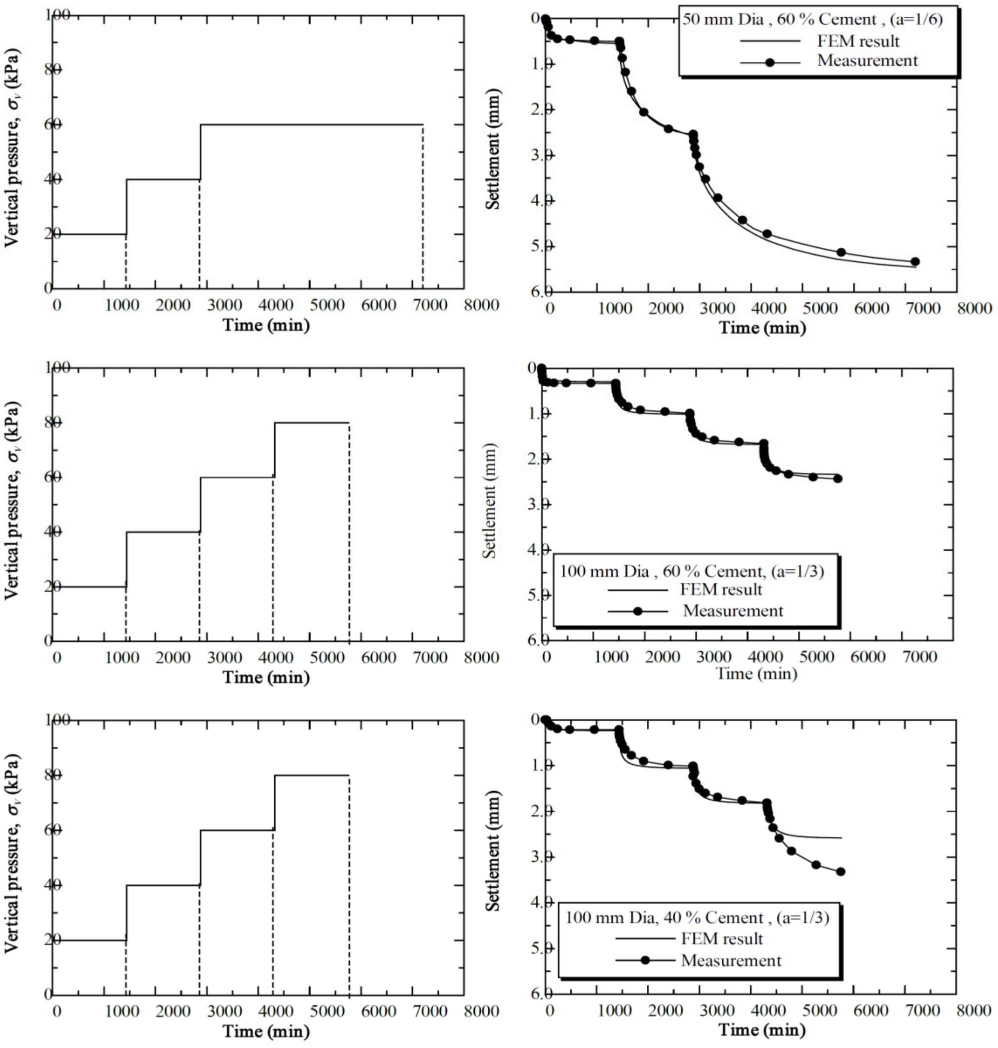
ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์สำหรับวิเคราะห์เชิงตัวเลขในแบบจำลองกายภาพย่อส่วน

Material model	Sand Mohr-Coulomb	Bangkok clay Soft soil	Soil-cement column Mohr-Coulomb	Unit
Type	Drained	Undrained	Undrained	-
γ_{unsat}	17	16	13 (C=40%)	(kN/m^3)
			14 (C=60%)	(kN/m^3)
γ_{sat}	20	18	13 (C=40%)	(kN/m^3)
			14 (C=60%)	(kN/m^3)
k_v	3.43×10^{-4}	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-6}	(m/min)
k_h	3.43×10^{-4}	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-6}	(m/min)
E'	13,000 (Top)	-	120,000 (C=60%)	(kN/m^2)
	56,000 (Bottom)	-	112,000 (C=40%)	(kN/m^2)
ν'	0.3	0.3	0.3	-
λ^*	-	0.095	-	-
κ^*	-	0.0095	-	-
c'	1	1	600	(kN/m^2)
ϕ'	37	21	25	°

3. ผลการทดสอบ

3.1 การทรุดตัว

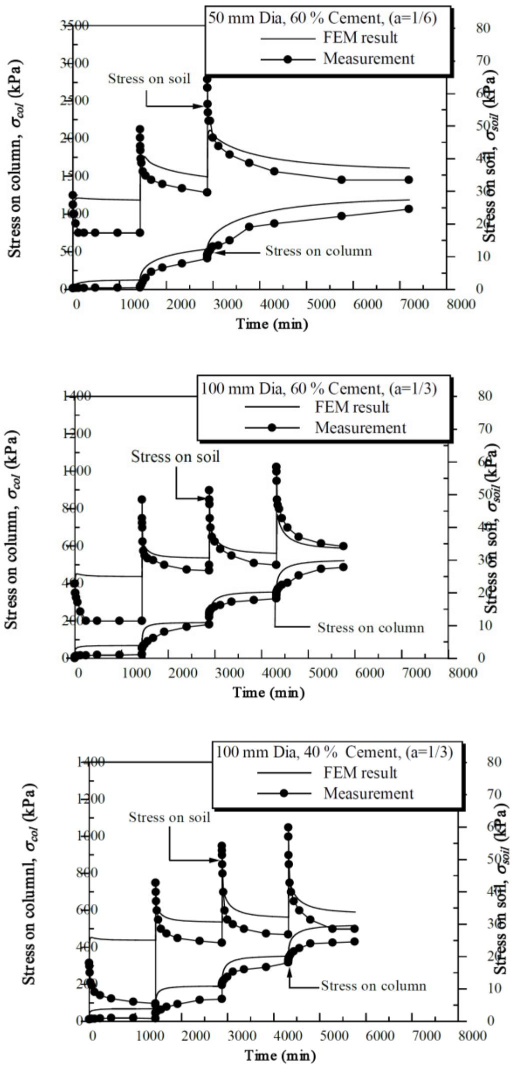
ภาพที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแนวดิ่ง (σ_v) กับเวลาและความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลาที่ได้จากผลทดสอบและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Plaxis ค่าการทรุดตัวและระยะเวลาการทรุดตัวแปรผันอย่างมากกับอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม a (เมื่อ $a = d_p / D_e$, d_p คือเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม และ D_e คือเส้นผ่านศูนย์กลางของ Unit cell) ในชั้นดินเสริมเสาเข็มที่มีค่า a สูงจะมีการทรุดตัวต่ำ แม้ว่าปริมาณปูนซีเมนต์จะมีค่าต่างกัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าปริมาณปูนซีเมนต์ไม่มีผลต่อค่าการทรุดตัวสุดท้ายและระยะเวลาการทรุดตัว เนื่องจากค่า E' ไม่แปรผันตามปริมาณปูนซีเมนต์



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่กระทำและอัตราการทรุดตัวกับเวลาที่ได้จากผลการทดสอบ

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มดินซีเมนต์และดินล้อมรอบ

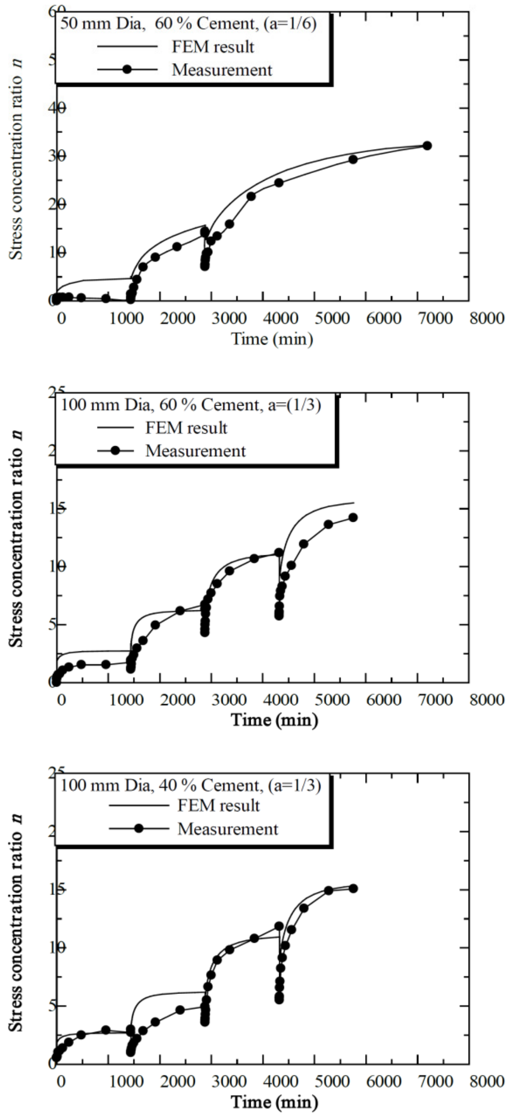
ภาพที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับเวลา จะเห็นได้ว่าเมื่อชั้นดินรับน้ำหนักบรรทุก ความเค้นในดิน (σ_{soil}) จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนความเค้นในเสาเข็ม (σ_{col}) จะค่อยๆ เพิ่มขึ้น ตามการตอบสนองของ σ_{soil} เพื่อปรับสมดุลของแรงในแนวดิ่ง สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าเสาเข็มทำหน้าที่รับแรงเกือบทั้งหมดจากน้ำหนักบรรทุก ความเค้นที่เกิดขึ้นในเสาเข็มแปรผันอย่างมากกับ a และน้ำหนักบรรทุก ซึ่งค่า a ยิ่งต่ำ σ_{col} ยิ่งมีค่ามาก



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มดินซีเมนต์และดินเหนียวล้อมรอบกับเวลา

3.3 Stress Concentration Ratio n

ภาพที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง stress concentration ratio *n* กับเวลา เริ่มแรกที่มีการให้น้ำหนักบรรทุก stress concentration ratio *n* (เมื่อ $n = \sigma_{col}/\sigma_{soil}$) จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ต่อมา stress concentration ratio *n* จะมีการเพิ่มขึ้นตามความเค้นที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก σ_{soil} ไม่เปลี่ยนแปลงตามน้ำหนักบรรทุก ดังแสดงในภาพที่ 3 ภายใต้ความเค้นแนวดิ่งที่เท่ากัน ค่า stress concentration ratio *n* จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าของ a และปริมาณปูนซีเมนต์ไม่มีผลต่อ stress concentration ratio *n*



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง stress concentration ratio n กับเวลา

4.สรุปผล

การศึกษาการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนเสริมแรงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ สรุปผลได้ดังนี้

1.ค่า a มีผลอย่างมากต่อการทรุดตัวสุดท้าย ระยะเวลาการทรุดตัว ความเค้นในเสาเข็มและ stress concentration ratio n กล่าวคือ เมื่อ a สูง การทรุดตัวสุดท้าย ระยะเวลาการทรุดตัว ความเค้นในเสาเข็มและ stress concentration ratio n จะมีค่าต่ำ

2.ค่า E' ไม่แปรผันตามปริมาณปูนซีเมนต์ ดังนั้นปริมาณซีเมนต์จึงไม่มีผลต่อการทรุดตัวสุดท้ายและระยะเวลาการทรุดตัว แต่มีผลต่อความต้านทานน้ำหนักบรรทุกของดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็ม

3.ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ สามารถทำนายสถานะความเค้น ความเครียด การทรุดตัวและระยะเวลาการทรุดตัว ที่เกิดขึ้นได้สอดคล้องกับผลทดสอบแบบจำลองกายภาพย่อส่วนในห้องปฏิบัติการ

5. กิติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผลลัพธ์และความคิดเห็นทั้งหลายทั้งปวงที่ปรากฏในบทความนี้เป็นของผู้เขียนเท่านั้น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

6. บรรณานุกรม

Chai, J.C., Pongsivasathit, S., 2010. A method for predicting consolidation settlements of floating column improved clayey subsoil. Civil Engineering China 2010, Volume 4 Number 2: 241-251.

D'Appolonia, D.J., Poulos, H.G., Ladd, C.C. 1971. Initial settlement of structures on clay. Proceedings, ASCE, Volume 97 Number SM 10.

David M.Potts., Zdrakovic L., 2001. Finite element analysis in geotechnical engineering. London: Thomas Telford.

Horpibulsuk, S., Miura, N., Bergado, D.T. 2004. Undrained shear behavior of cement admixed clay at high water content. Journal of Geotechnical and Geoenvironmentel Engineering, ASCE, Volume 130 Number 10: 1096-1105

Terzaghi, K., 1925. Theoretical Soil Mechanics. Wiley. New York.

Yin, J.H., Fang, Z., 2007. Responses of Excess Pore Water Pressure in Soft Marine Clay around a Soil-Cement Column. International Journal of Geomechanics, ASCE, Paper No.167-175.

ประวัติผู้เขียน

นายอานนท์ ชลภัสสรณ์ เกิดเมื่อวันที่ 2 เดือนเมษายน พ.ศ. 2530 ณ จังหวัดอุบลราชธานี เริ่มการศึกษาชั้นระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนเทศบาล 2 สามัคคีวัฒนา อำเภอเมือง จังหวัดยโสธร ระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนยโสธรพิทยาคม อำเภอเมือง จังหวัดยโสธร ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) จากวิทยาลัยเทคนิคยโสธร จังหวัดยโสธร และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2551 ขณะที่ทำการศึกษาในระดับปริญญาตรี ได้ปฏิบัติหน้าที่เป็นผู้ช่วยงานวิจัยในสาขาวิศวกรรมปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน และได้รับการสนับสนุนจากคณาจารย์ ทำให้เกิดแรงจูงใจที่จะเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโททางด้านวิศวกรรมปฐพี เพื่อเป็นการพัฒนาตนเองในด้านความรู้ความสามารถ และกระบวนการทางด้านความคิดริเริ่มใหม่ ๆ ในงานวิจัย จึงได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2552

ระหว่างการศึกษาระดับปริญญาโท มีผลงานทางวิชาการนำเสนอในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16 (The 16th National Convention on Civil Engineering) ที่โรงแรมเดอะซายน์ เมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี ระหว่างวันที่ 18-20 เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2554 โดยมีรายละเอียดปรากฏดังภาคผนวก ก.