

## การอัดตัวคาน้ำของดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์

### CONSOLIDATION BEHAVIOR OF COMPOSITE SOFT CLAY GROUND

อาหนนท์ ชลภัสสรณ์<sup>1</sup>, สุขสันต์ หอพิบูลสุข<sup>2</sup>, อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์<sup>3</sup>

<sup>1</sup> นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี [arnon.ce18@gmail.com](mailto:arnon.ce18@gmail.com)

<sup>2</sup> ศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี [suksun@g.sut.ac.th](mailto:suksun@g.sut.ac.th)

<sup>3</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี [avirut@sut.ac.th](mailto:avirut@sut.ac.th)

#### บทคัดย่อ

การเสริมเสาเข็มเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและใช้กันอย่างแพร่หลายในการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อน บทความนี้ศึกษาพฤติกรรมการทรุดตัวและความเค้นที่เกิดขึ้นในชั้นดินเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยแบบจำลองกายภาพย่อยส่วนแบบสมมาตรรอบแกนและเปรียบเทียบผลทดสอบที่ได้กับผลวิเคราะห์ทางไฟไนท์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D จากการศึกษพบว่าถึงแม้ว่ากำลังอัดแกนเดี่ยวของเสาเข็มดินซีเมนต์จะแปรผันตามปริมาณปูนซีเมนต์ แต่ค่าสติฟเนสของเสาเข็มดินซีเมนต์ไม่แปรผันตามปริมาณปูนซีเมนต์ 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 การปรับปรุงดินด้วยการเสิมเสิมดินซีเมนต์เป็นเทคนิคที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติของ Terzaghi (1925) ไม่สามารถใช้ในการประมาณการทรุดตัว สถานะความเค้น (stress) สถานะความเค้น (strain) และความดันน้ำ (pore water pressure) ของชั้นดินเสิมเสิมดินซีเมนต์ การเสียมรูปและความดันน้ำส่วนเกินขณะรับน้ำหนักบรรทุกมีความสำคัญอย่างยิ่งในการพิจารณาเฝ้าระวังโครงสร้างเพื่อป้องกันจากการพังทลายของดิน การทำนายสถานะความเครียด ความเค้น และค่าความดันน้ำในดินสามารถคำนวณโดยวิธีเชิงตัวเลข เช่น วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ เป็นต้น ความแม่นยำของการคำนวณโดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้แบบจำลองพฤติกรรมของดิน (soil model) และทางเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ (Potts et al., 2001) ซึ่งจะต้องมีการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้เหมาะสม โดยการเปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการสอบวัดที่ติดตั้งในสนาม แต่การติดตั้งเครื่องวัดในสนามนั้นมีความค่าใช้จ่ายสูงและยุ่งยาก โครงสร้างแบบจำลองกายภาพจึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถใช้ในการศึกษาพฤติกรรมอัดตัวคายน้ำ

Yin and Fang (2006) ทำการศึกษาการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนเสิมเสิมดินซีเมนต์แบบ (End Bearing) โดยสร้างแบบจำลองกายภาพย่อส่วนแบบสมมาตรรอบแกน (axisymmetric) เสิมเสิมดินซีเมนต์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร เครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำจะถูกติดตั้งในจุดต่างๆ จากการศึกษาพบว่าการระบายความดันน้ำจะเกิดขึ้นเร็วตรงบริเวณจุดที่ใกล้เสิมเสิมเสิมดินซีเมนต์จึงเปรียบเสมือนแผ่นระบายน้ำแนวตั้ง ซึ่งช่วยลดระยะเวลาการทรุดตัวของดินเหนียว

Chai et al (2010) ทำการศึกษาการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนเสิมเสิมดินซีเมนต์แบบ Floating ที่เมืองฟูกูโอกะ ประเทศญี่ปุ่น ด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (FEM) เปรียบเทียบกับวิธีของสถาบันวิศวกรรมโยธาแห่งประเทศไทย (JICE) โดยพิจารณาถึงอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ทั้งหมดต่อพื้นที่หน้าตัดเสิมเสิม ( $\alpha$ ) อัตราส่วนความลึกเสิมเสิมต่อความลึกทั้งหมด ( $\beta$ ) และความลึกของปลายเสิมเสิมที่อยู่ในชั้นดินที่ไม่ได้ปรับปรุง ( $H_c$ ) ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์สามารถประมาณค่าการทรุดตัวได้ใกล้เคียงกับผลตรวจวัดในสนาม

บทความนี้จะศึกษาพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของชั้นดินเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ End Bearing ด้วยการสร้างแบบจำลองกายภาพย่อส่วนแบบสมมาตรรอบแกน และศึกษาความเค้นที่เกิดขึ้นในเสาเข็มดินซีเมนต์และการทรุดตัวเปรียบเทียบผลทดสอบที่ได้กับผลการวิเคราะห์ทางไฟไนท์เอลิเมนต์

## 2. พฤติกรรมของการอัดตัวคายน้ำในแบบจำลองกายภาพ

### 2.1 การเก็บและเตรียมตัวอย่างดิน

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

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่าง

G <sub>s</sub>	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

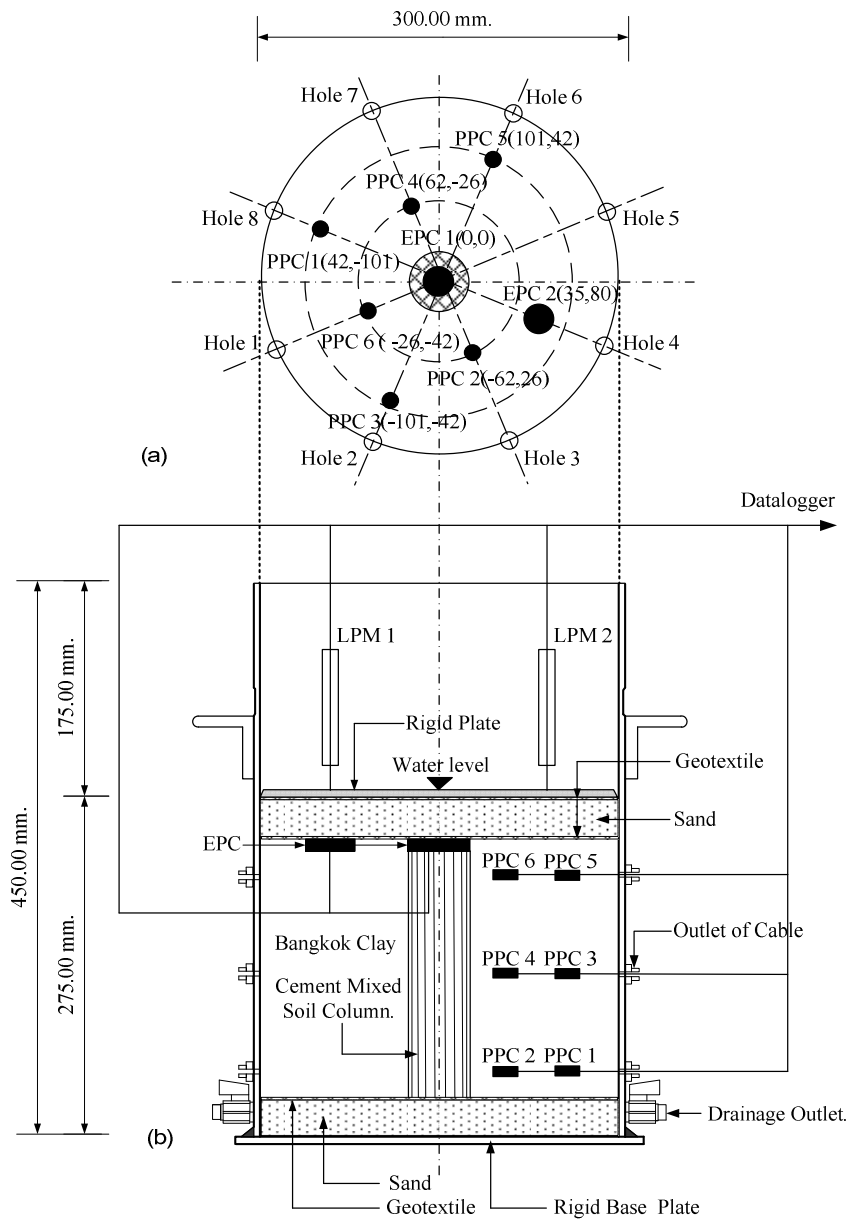
การจำลองชั้นดินในถังทดสอบเริ่มต้นด้วยการเททรายรองพื้นหนา 30 มิลลิเมตร และใส่ท่อพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 400 มิลลิเมตร ตรงจุดศูนย์กลางของถังทดสอบ ต่อจากนั้นเทดินเหนียวกรุงเทพฯ ซึ่งได้จากการผสมกับน้ำและปั้นให้เข้ากันที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 2 เท่าของขีดจำกัดเหลว ดินตัวอย่างจะถูกใส่ลงในถังทดสอบ 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 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกในแบบจำลองกายภาพ

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

## 2.4 การเตรียมตัวอย่างเสาเข็มดินซีเมนต์

ดินเหนียวที่ได้จะถูกผสมกับน้ำให้มีปริมาณความชื้นเท่ากับ 2 เท่าของขีดจำกัดเหลว และผสมกับปูนซีเมนต์ปริมาณร้อยละ 40 และ 60 ของน้ำหนักดินแห้ง ด้วยเครื่องผสมเป็นเวลา 10 นาที ดินซีเมนต์จะถูกเทลงในแบบ โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น และใส่ฟองอากาศออกแต่ละชั้นในการเท ดินซีเมนต์จะ



- เมื่อ EPC คือ หน่วยวัดความดันขนาดเล็ก (Earth Pressure Cell)  
 PPC คือ หน่วยวัดความดันน้ำขนาดเล็ก (Pore Pressure Cell)  
 LPM คือ มาตราวัดระยะ (Linear potentialmeter)

ภาพที่ 1 ภาพแผนผังตำแหน่งของอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ (a) รูปตัดตามขวาง (b) รูปตัดตามแนวตั้ง

จะถูกเทลงในแบบ โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น และใส่ฟองอากาศออกแต่ละชั้นของการเท ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ ร้อยละ 40 และ 60 มีค่ากำลังอัดแกนเดียวเท่ากับ 500 และ 1,200 กิโลปาสคาล หน่วยน้ำหนักเท่ากับ 13 และ 14 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร และปริมาณความชื้นร้อยละ 90 และ 84 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบ

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

### 2.5 วิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis)

พฤติกรรมการอัดตัวของหน้าของชั้นดินที่เสริมเสาเข็มดินซีเมนต์จำลอง โดยการวิเคราะห์เชิงตัวเลข แบบสมมาตรรอบแกน ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D Version 8 โมดูลัสประสิทธิผล ( $E'$ ) ของเสาเข็มดินซีเมนต์ประมาณได้จากผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียวประมาณได้ด้วยสมการของ D'Appolonia et al (1971) จะเห็นได้ว่า  $E'$  ไม่แปรผันตามปริมาณซีเมนต์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Horpibulsuk et al (2004) ตารางที่ 3 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองกายภาพย่อส่วน

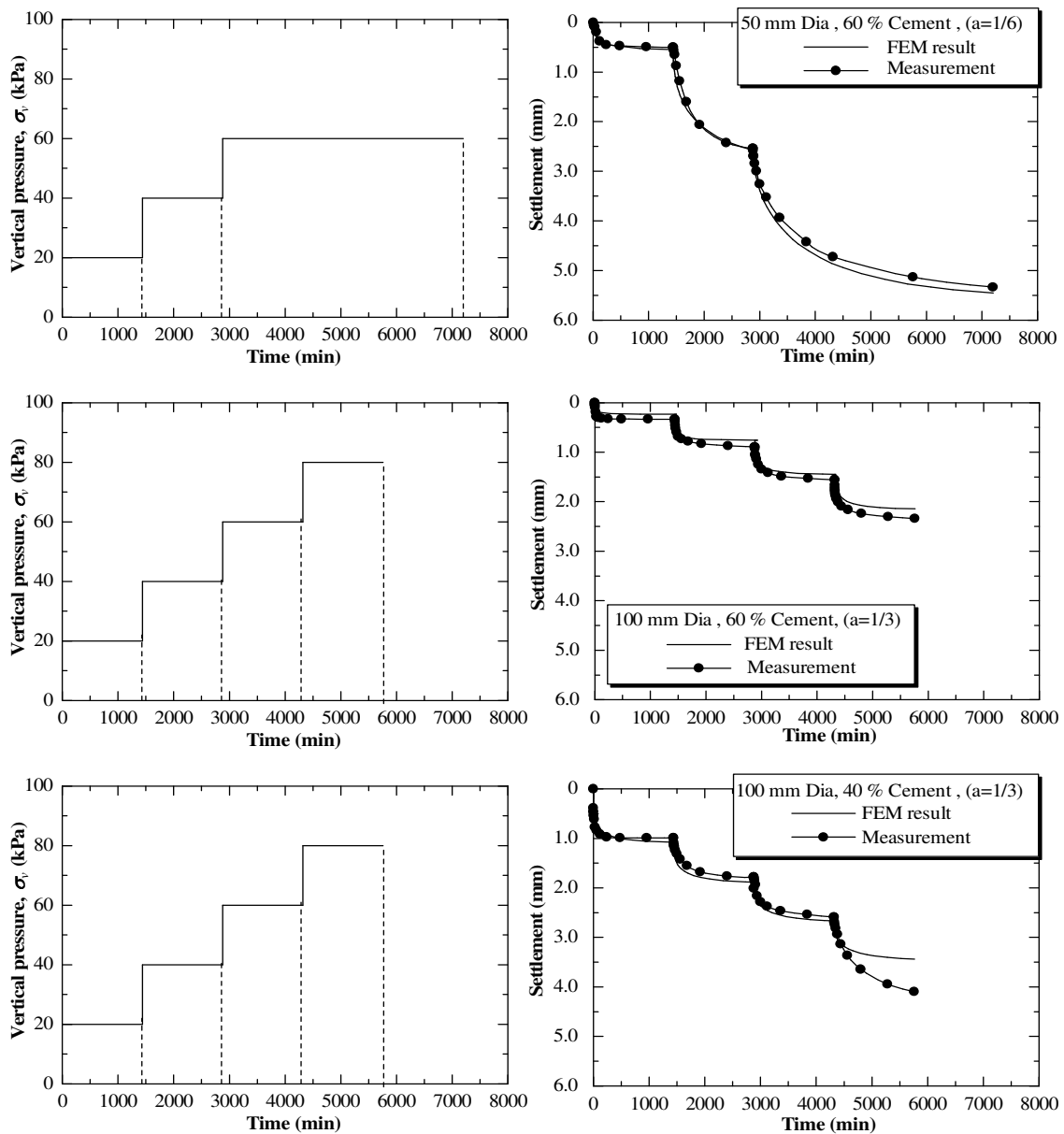
ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองกายภาพย่อส่วน

Material model	Sand Mohr-Coulomb	Bangkok clay Soft soil	Soil-cement column Mohr-Coulomb	Unit
Type	Drained	Undrained	Undrained	-
$\gamma_{unsat}$	17	16	13 (C=40%) 14 (C=60%)	(kN/m <sup>3</sup> ) (kN/m <sup>3</sup> )
$\gamma_{sat}$	20	18	13 (C=40%) 14 (C=60%)	(kN/m <sup>3</sup> ) (kN/m <sup>3</sup> )
$k_v$	$3.43 \times 10^5$	$2.0 \times 10^{-8}$	$9.0 \times 10^{-5}$	(m/min)
$k_h$	$3.43 \times 10^5$	$2.0 \times 10^{-8}$	$9.0 \times 10^{-5}$	(m/min)
$E'$	1.30	-	120,000 (C=60%) 112,000 (C=40%)	(kN/m <sup>2</sup> ) (kN/m <sup>2</sup> )
$\nu'$	0.3	0.3	0.3	-
$\lambda^*$	-	0.095	-	-
$\kappa^*$	-	0.0095	-	-
$c'$	1	1	600	(kN/m <sup>2</sup> )
$\phi'$	37	21	25	o

### 3. ผลการทดสอบ

#### 3.1 การทรุดตัว

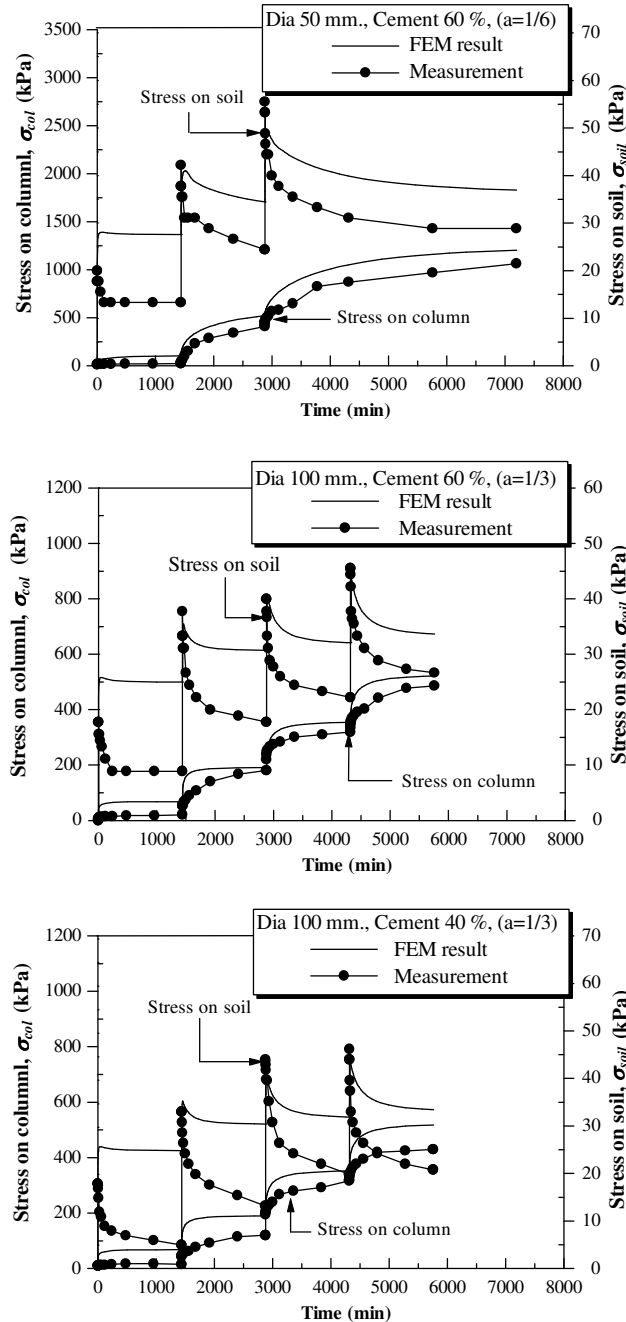
ภาพที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแนวตั้ง ( $\sigma_v$ ) กับเวลาและความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลาที่ได้จากผลทดสอบและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Plaxis ค่าการทรุดตัวและระยะเวลาการทรุดตัวแปรผันอย่างมากกับอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม  $a$  (เมื่อ  $a = d_p / D_e$ ,  $d_p$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม และ  $D_e$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของ Unit cell) ในชั้นดินเสริมเสาเข็ม ที่มีค่า  $a$  สูงจะมีการทรุดตัวต่ำ แม้ว่าปริมาณปูนซีเมนต์จะมีค่าต่างกัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าปริมาณปูนซีเมนต์ไม่มีผลต่อค่าการทรุดตัวสุดท้ายและระยะเวลาการทรุดตัว เนื่องจากค่า  $E'$  ไม่แปรผันตามปริมาณปูนซีเมนต์



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่กระทำและอัตราการทรุดตัวกับเวลาที่ได้จากผลการทดสอบ

### 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มดินซีเมนต์และดินล้อมรอบ

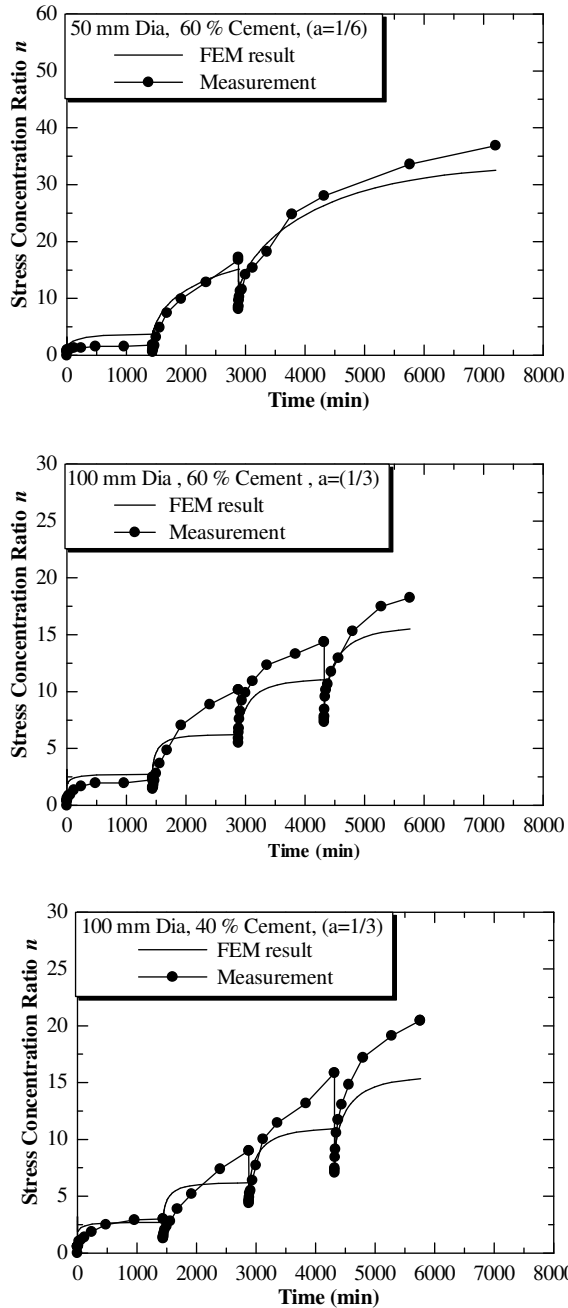
ภาพที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับเวลา จะเห็นได้ว่าเมื่อชั้นดินรับน้ำหนักบรรทุก ความเค้นในดิน ( $\sigma_{soil}$ ) จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนความเค้นในเสาเข็ม ( $\sigma_{col}$ ) จะค่อยๆ เพิ่มขึ้น ตามการตอบสนองของ  $\sigma_{soil}$  เพื่อปรับสมดุลของแรงในแนวตั้ง สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าเสาเข็มทำหน้าที่รับแรงเกือบทั้งหมดจากน้ำหนักบรรทุก ความเค้นที่เกิดขึ้นในเสาเข็มแปรผันอย่างมากกับ  $a$  และน้ำหนักบรรทุก ซึ่งค่า  $a$  ยิ่งต่ำ  $\sigma_{col}$  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  $\sigma_{soil}$  ไม่เปลี่ยนแปลงตามน้ำหนักบรรทุก ดังแสดงในภาพที่ 3 ภายใต้ความเค้นแนวตั้งที่เท่ากัน 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 แต่มีผลต่อความต้านทานน้ำหนักรรทุกของดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็ม
3. ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ สามารถทำนายสถานะความความเค้น ความเครียด การทรุดตัว และระยะเวลาการทรุดตัว 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 Geoenvironmental 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.