

# ผลกระทบของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ต่อพฤติกรรมตอบสนองของกลไก ระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกและดินบริเวณรอบเสาเข็ม

## Effect of Cement Stabilized Slab on the Interaction Behavior between Floating Soil Cement Column and Surrounding Soil

สุธี ปิยะพิพัฒน์<sup>1</sup> พันศักดิ์ จิตรสุวรรณ<sup>2</sup> และศุภลลิตี พงศ์ศิweiseสธิตย์<sup>3</sup>

### บทคัดย่อ

การนำแบบจำลองหนึ่งหน่วยแกนสมมาตร มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขโดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาพฤติกรรมตอบสนองของกลไก ระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกกับดินบริเวณรอบๆ เสาเข็ม และค่าความเข้มข้นของหน่วยแรง อันเนื่องมาจากผลกระทบของความแข็งแกร่งและความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์บนผิวดิน โดยผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ได้จะใช้เป็นฐานข้อมูลและแนวทางในการปรับปรุงวิธีการคำนวณหาเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวปฐมภูมิกับเวลาของ Pongsivasathit et al. (2012) ที่เกิดขึ้นในชั้นดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก จากผลการวิเคราะห์พบว่า การเพิ่มขึ้นของความหนาแผ่นพื้นดินซีเมนต์ทำให้ระยะจมน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกกับดินเหนียวที่อยู่รอบๆ เสาเข็มลดน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของแผ่นพื้นดินซีเมนต์มีผลต่อการจมน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์กับดินเหนียวที่อยู่รอบๆ เสาเข็มน้อย ค่าความเข้มข้นของหน่วยแรงที่ทุกระดับความลึกจะลดลงเมื่อความหนาของแผ่นพื้นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และการเปลี่ยนแปลงของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ส่งผลกระทบต่อค่าความเข้มข้นของหน่วยแรงไม่มาก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงวิธีการหาเส้นโค้งการทรุดตัวกับเวลาของชั้นดินที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกโดย Pongsivasathit et al. (2012) เพื่อให้สามารถพิจารณาผลกระทบอันเนื่องมาจากความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ได้

**คำสำคัญ:** วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ พฤติกรรมตอบสนองของกลไก แผ่นพื้นดินซีเมนต์ การจมน้ำ

<sup>1</sup>อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

<sup>2</sup>อาจารย์ประจำสาขาวิชาช่างก่อสร้าง วิทยาลัยเทคนิคคูคต

<sup>3</sup>อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

## Abstract

Numerical analysis technique by the finite element method (FEM) using a symmetric unit cell model was conducted to investigate the interaction behaviors between the floating column and the surrounding soft soil and the stress concentration focusing on the effect of strength and stiffness and thickness of slab on the ground surface. The FEM results can be used as the database and guideline for improving the method of consolidation settlement-time curve by Pongsivasathit et al. (2012). As results, the increasing thickness of cement stabilized slab decreases significantly the relative penetration of floating soil-cement column with the surrounding soil. The undrained shear strength of slab slightly effects on the relative penetration. The stress concentration at any depth decreases with increasing of slab thickness and the change of undrained shear strength of the slab slightly effects on the stress concentration. So, it is necessary to improve the method of settlement-time curve calculation by Pongsivasathit et al. (2012) in order to be able to take the effect of slab thickness.

**Keywords:** finite element method, interaction behavior, cement stabilized slab, relative penetration.

## 1. บทนำ

ในการก่อสร้างคันดินถมบนชั้นดินเหนียวอ่อน มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องปรับปรุงความแข็งแรงและเพิ่มค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของชั้นดินเหนียวก่อนก่อสร้างเพื่อให้สามารถรับน้ำหนักของคันดินถมได้ โดยเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพชั้นดินเหนียวอ่อนที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายคือ การใช้ปูนซีเมนต์เข้าไปผสมลึกลงกับชั้นดินเหนียวอ่อนเพื่อเป็นเสาเข็มดินซีเมนต์ในชั้นดิน (Broms and Boman, 1979; Bergado et al., 1994) ทำให้ชั้นดินเหนียวอ่อนมีค่าการทรุดตัวลดลงและมีความสามารถในการรับน้ำหนักที่สูงขึ้นในปัจจุบันมีความพยายามที่ลดราคาค่าก่อสร้างและลดผลกระทบอันเนื่องจากความยาวเสาเข็มไปรับกวนระดับน้ำใต้ดิน โดยการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก (Floating Soil-Cement

Column) ทั้งแบบที่มีและไม่มีแผ่นพื้นดินผสมซีเมนต์ (Cement Stabilized Slab) บนผิวดินหรือหัวเสาเข็มดินซีเมนต์ (Shen et al., 2001; Chai et al., 2009) การออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ประเภทนี้จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคำนวณหาค่าการทรุดตัวชั้นปฐมภูมิ แต่เนื่องจากพฤติกรรมการยุบอัดตัวของหัวเสาเข็มดินซีเมนต์ประเภทนี้จะมีผลซับซ้อนมากกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีความยาวแบบปกติ ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติม

Pongsivasathit et al. (2012) ได้ทำการศึกษาทดลองในระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกกับดินที่อยู่บริเวณรอบๆ ทั้งแบบมีและไม่มีแผ่นพื้น ด้วยการทดลองแบบจำลองในห้องปฏิบัติการควบคุมไปกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์โดยใช้แบบจำลองหนึ่งหน่วยสมมาตร (Axisymmetric

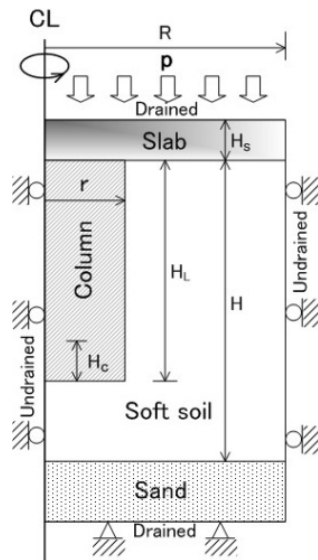
Unit Cell Model) นำผลการศึกษาที่ได้มาปรับปรุงวิธีการคำนวณหาเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวกับเวลาของ Chai and Pongsivasathit (2010) โดยวิธีนี้จะคำนวณหาค่าระยะ  $H_c$  ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1 เมื่อค่า  $H_c$  เป็นค่าที่ใช้ในการพิจารณาหาค่าการทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกที่ใช้ปรับปรุงชั้นดินเหนียวอ่อน (Chai et al., 2009) ชั้นดินจะถูกแบ่งออกเป็นสองชั้นคือชั้นดินที่ถูกปรับปรุง ได้แก่ชั้นดินที่หนาเท่ากับความยาวเสาเข็มหักลบระยะ  $H_c$  ออก และชั้นดินที่มีความหนาเท่ากับความหนาของชั้นดินเหนียวจากปลายเสาเข็มถึงชั้นทรายรวมกับระยะ  $H_c$  จากนั้นคำนวณค่าการทรุดตัวกับเวลาของดินทั้งสองชั้นโดยใช้สูตรที่นำเสนอ โดยที่  $H$  เป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนการปรับปรุงพื้นที่ (Area improvement ratio,  $\alpha$ ), อัตราส่วนการปรับปรุงความลึก (Depth improvement ratio,  $\beta$ ), น้ำหนักที่กระทำ (Loading intensity,  $p$ ) และค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength,  $s_u$ ) ของดินเหนียวบริเวณปลายเสาเข็ม สำหรับอัตราการทรุดตัว Chai and Pongsivasathit (2010) ได้เสนอวิธีการหาค่าระดับการยุบอัดตัวคายน้ำโดยใช้สมการของ Zhu and Yin (1999) เนื่องจากมองว่าชั้นดินที่เสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นชั้นดินแบบระบบ 2 ชั้น (Two layers system) ส่วนค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการคำนวณได้ถูกนำเสนอบนพื้นฐานของผลวิเคราะห์แบบจำลองหนึ่งหน่วยสมมาตรแนวแกนด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

อย่างไรก็ตามกรณีที่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์วางบนเสาเข็มเพื่อช่วยลดความเข้มข้นของหน่วยแรง (Stress concentration,  $n$ ) บนเสาเข็มนั้นพบว่าความยืดหยุ่นของแผ่นพื้นดินซีเมนต์จะลดลงเมื่อมีความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์

เพิ่มขึ้น ยิ่งความหนาของแผ่นพื้นมาก ๆ ยิ่งกลายเป็นวัสดุแข็งเกร็ง แต่ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ถูกตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าแผ่นพื้นดินซีเมนต์เป็นวัสดุยืดหยุ่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากการศึกษาของ Pongsivasathit et al. (2012) ได้กำหนดให้ความหนาของแผ่นพื้นไม่เกิน 1 เมตร ที่ความหนานี้แผ่นพื้นสามารถยืดหยุ่นได้เมื่อรับน้ำหนักกระทำ ดังนั้นในการศึกษานี้ จะทำการตรวจสอบพฤติกรรมตอบสนององกลไก (Interaction behavior) ระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกที่นำมาเสริมความแข็งแรงของชั้นดินเหนียวอ่อนกับดินเหนียวที่ล้อมรอบเสาเข็มด้วยแบบจำลองหนึ่งหน่วยสมมาตรแนวแกน (Axisymmetric unit cell Model) โดยใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ เน้นศึกษาถึงผลกระทบของแผ่นพื้นดินซีเมนต์บนเสาเข็ม ในทอมของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่มีความหนาของแผ่นพื้นมาก ๆ นอกจากนั้นยังศึกษาถึงค่าความเข้มข้นของหน่วยแรงกับความลึกของชั้นดินเนื่องจากผลกระทบของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ดังกล่าว สุดท้ายหาข้อสรุปผลการศึกษา

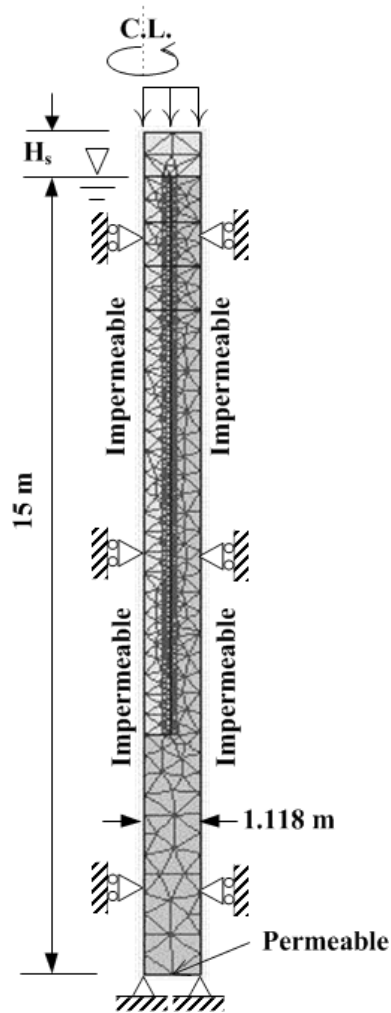
## 2. แบบจำลองหนึ่งหน่วยสมมาตร

รูปที่ 1 แสดงถึงลักษณะของแบบจำลองหนึ่งหน่วยสมมาตรแนวแกนที่ถูกใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์โดยการวิเคราะห์จะใช้โปรแกรม Plaxis 2D version 2012 มีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังนี้ แบบจำลองหนึ่งหน่วยจะถูกยึดแบบจุดหมุนที่บริเวณฐานของแบบจำลอง ส่วนด้านข้างจะถูกยึดแบบฐานกลิ้ง ดังแสดงในรูปที่ 2 ในขณะที่ด้านบนและด้านล่างของแบบจำลองถูกตั้งให้สามารถระบายน้ำได้ ส่วนที่ด้านซ้ายและด้านขวาของแบบจำลองถูกตั้งให้ไม่สามารถระบายน้ำได้



รูปที่ 1 แบบจำลองหนึ่งหน่วยสำหรับเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก

พฤติกรรมดินเหนียวอ่อนจำลองด้วย Soft Soil Model ส่วนพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์จำลองให้เป็นวัสดุ Linear Elastic และส่วนพฤติกรรมของแผ่นพื้นดินซีเมนต์จำลองด้วย Mohr-Coulomb Failure Criterion โดยส่วนสัมผัส (Interface) ระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์กับดินบริเวณรอบๆ เสาเข็มดินจำลองเป็นแบบ ส่วนประกอบร่วมกัน (Joint Element) ที่มีค่า  $R_{inter} = 0.9$  จากนั้นอ้างอิงการศึกษาของ Pongsivasathit et al. (2012) โดยสมมติให้ความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน ( $H$ ) เท่ากับ 15 เมตร และความหนาเริ่มต้นของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ ( $H_s$ ) เท่ากับ 1 เมตร ส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มสมมติให้มีขนาดเท่ากับ 1 เมตร สำหรับพารามิเตอร์อื่นๆ และคุณสมบัติของดินเหนียวกับดินซีเมนต์ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1



รูปที่ 2 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์และคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์

| Depth<br>(m) | Soil<br>layer | $\nu$ | E<br>(kPa) | $\kappa$ | $\lambda$ | c<br>(kPa) | $\phi$<br>(°) | $K_0^{NC}$ | OCR   | $e_0$                                      | $k_h$                          | $k_v$ |
|--------------|---------------|-------|------------|----------|-----------|------------|---------------|------------|-------|--------------------------------------------|--------------------------------|-------|
|              |               |       |            |          |           |            |               |            |       |                                            | $(\times 10^{-8} \text{ m/s})$ |       |
| 0-4.0        | Clay-1        | 0.3   | -          | 0.065    | 0.65      | 1          | 30            | 0.5        | 4-1.1 | 3.3                                        | 3.0                            | 2.0   |
| 4.0-16.0     | Clay-1        | 0.3   | -          | 0.065    | 0.65      | 1          | 30            | 0.5        | 1     | 2.9                                        | 3.0                            | 2.0   |
| Column       |               | 0.2   | 55,000     | -        | -         | -          | -             | -          | -     | มีค่าเท่ากับดินที่ระดับ<br>ความลึกเดียวกัน |                                |       |
| Slab         |               | 0.2   | $100q_u$   | -        | -         | 50-750     | 0             | -          | -     |                                            |                                |       |

เมื่อค่า  $K_0^{NC}$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันด้านข้างของดินที่มีการยุบอัดตัวแบบปกติ;  $\nu$  คือค่าอัตราส่วนปริมาตรของ; E คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของยังค์;  $\lambda$  คือค่าความชันของเส้นตรง virgin compression ในการพล็อตค่าระหว่าง  $e-\ln p'$ ;  $\kappa$  คือค่าความชันของเส้นตรง unloading-reloading ในการพล็อตค่าระหว่าง  $e-\ln p'$ ;  $\psi$  คือค่า องศาไดเลแทนซี (Dilatancy angle);  $\phi$  คือค่ามุมเสียดทานภายใน; c คือค่าแรงยึดเกาะ; OCR คือค่าอัตราส่วนการยุบอัดตัวเกินปกติ;  $\gamma_t$  คือค่าหน่วยน้ำหนักดินอิ่มตัว;  $e_0$  คือค่าอัตราส่วนช่องว่างตอนเริ่มต้น;  $k_h$  และ  $k_v$  คือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในแนวนอนและแนวตั้งตามลำดับ

### 3. ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมกลไกภายใน

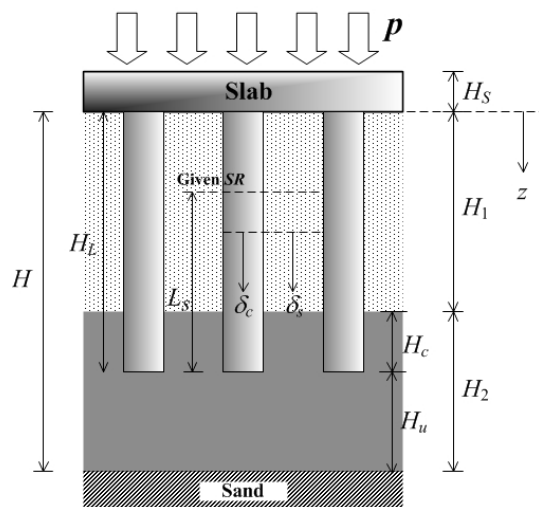
เพื่อให้ง่ายต่อการอธิบายพฤติกรรมตอบสนองกลไก จะใช้พารามิเตอร์ได้แก่ อัตราส่วนการทรุดตัว (Settlement ratio, SR) และอัตราส่วนความยาว (Length ratio, LR) มาทำการอธิบายพฤติกรรมดังกล่าว โดยที่

$$SR = \frac{\delta_s}{\delta_c} \quad (1)$$

$$LR = \frac{L_s}{(H_L + H_s)} \quad (2)$$

เมื่อค่า  $\delta_c$  คือค่าการทรุดตัวของเสาเข็มบริเวณจุดที่ต้องการพิจารณา, ค่า  $\delta_s$  คือค่าการทรุดตัวของดินที่ระดับเดียวกับกับจุดที่วัดค่า  $\delta_c$ ,  $\delta_s$  คือความยาวของเสาเข็มจากปลายเสาเข็มถึงจุดที่มีค่า SR เท่ากับค่าที่ต้องการ และ  $H_L$  คือความยาวของเสาเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งค่า LR ใช้เป็นดัชนีตัวชี้วัดของระดับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของเสาเข็มดินซีเมนต์เทียบกับดินบริเวณรอบเสาเข็ม และเป็นค่าที่สามารถ

ใช้ประกอบเป็นส่วนสำคัญในการคำนวณค่าระยะ  $H_c$  ค่า LR มากขึ้นหมายถึงมีค่าการทรุดตัวสัมพัทธ์ระหว่างเสาเข็มกับดินบริเวณรอบเสาเข็มที่มากขึ้น และค่าที่มากขึ้นนี้นำมาเป็นเสมือนชั้นดินที่ไม่ได้ปรับปรุงเพื่อคำนวณหาค่าการทรุดตัว



รูปที่ 3 นิยามของตัวแปรอื่นๆ

สำหรับค่าความเข้มของหน่วยแรง ( $n$ ) ที่ระดับความลึก  $z$  ใดๆ วัดจากใต้แผ่นพื้นดินซีเมนต์ลงมาดังแสดงในรูปที่ 3 อ้างอิงการศึกษาของ Chai et al. (2009) ค่า  $n$  สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$n = \frac{\sigma_c}{\sigma_s} \quad (3)$$

เมื่อ  $\sigma_c$  คือค่าหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยในเสาเข็มดินซีเมนต์ และ  $\sigma_s$  คือค่าหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยในดินที่ล้อมรอบเสาเข็มดินซีเมนต์

#### 4. ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์

เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ จึงจำเป็นต้องทำการคงที่ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ได้แก่  $\alpha = 20\%$ ,  $\beta = 70\%$  และ  $p = 100\%$  โดยที่

$$\alpha = \frac{d_c^2}{d_e^2} \quad (4)$$

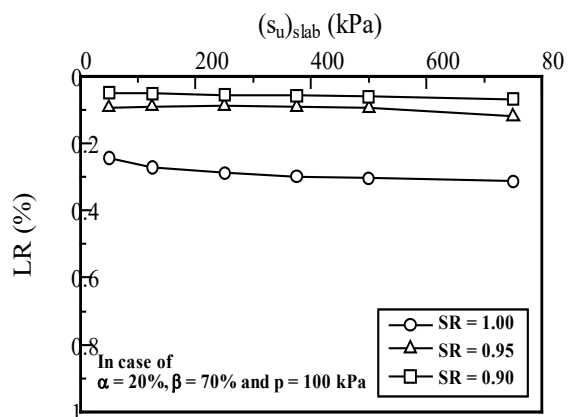
$$\beta = \frac{H_L}{H} \quad (5)$$

เมื่อ  $d_c$  และ  $d_e$  คือเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มดินซีเมนต์และของทรงกระบอกหนึ่งหน่วยของดินที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ ตามลำดับ

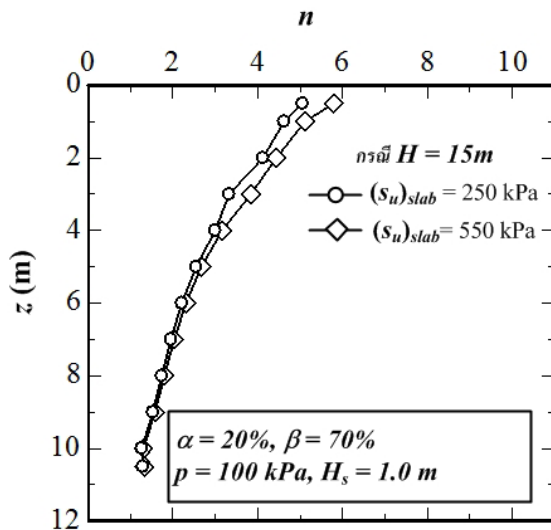
สำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาผลกระทบของแผ่นพื้นดินซีเมนต์บนผิวดินที่อยู่บนเสาเข็ม ในทอมของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและความหนาของแผ่นพื้น ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมตอบสนองกลไกระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์และดินบริเวณล้อมรอบเสาเข็ม และค่าความเข้มข้นของหน่วยแรง เพื่อหาข้อสรุปเป็นแนวทางในการปรับปรุงวิธีการหาค่า  $H_c$  ของ Pongsivasathit et al. (2012).

#### 4.1 ผลกระทบของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของแผ่นพื้นดินซีเมนต์

พิจารณาผลกระทบของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ ( $(s_u)_{slab}$ ) ที่มีผลต่อพฤติกรรมของกลไกภายในระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์กับดินบริเวณรอบเสาเข็ม สามารถทำได้โดยเปลี่ยนแปลงค่า  $(s_u)_{slab}$  เริ่มตั้งแต่ 50 ถึง 750 kPa เพื่อดูผลกระทบที่เกิดกับค่า  $LR$  โดยจะคงที่ค่า  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $p$  และ  $H_s$  เท่ากับ 20%, 70%, 100 kPa และ 1 m ตามลำดับ ในการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์ การที่เปลี่ยนแปลงค่า  $(s_u)_{slab}$  จะทำโดยเปลี่ยนพารามิเตอร์รับแรงเฉือน ได้แก่ ค่า  $c'$  และ  $E$  ( $E = 100$ ) ของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ ส่วนคุณสมบัติอื่นให้คงไว้เหมือนเดิมพบว่า การเปลี่ยนแปลงค่า  $(s_u)_{slab}$  ส่งผลต่อค่า  $LR$  น้อย ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4 ซึ่งหมายถึงการจมน้ำของเสาเข็มไม่ขึ้นกับค่า  $(s_u)_{slab}$  นั้นเอง



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $LR$  กับ  $(s_u)_{slab}$



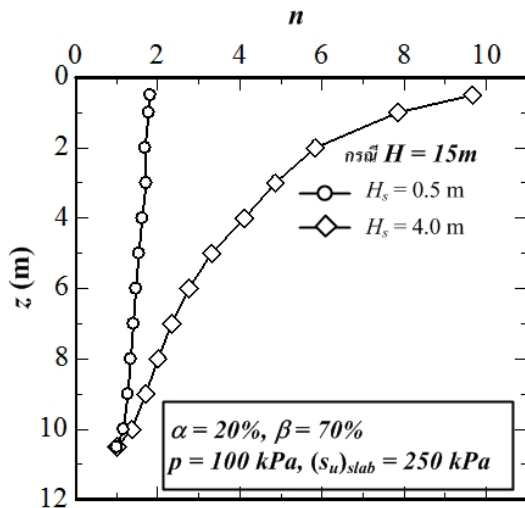
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $n$  กับความลึก ในกรณีที่มี  $(s_u)_{slab}$  ต่างกัน

ในการพิจารณาผลกระทบของค่า  $(s_u)_{slab}$  ที่มีผลต่อค่า  $n$  สามารถทำได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ที่ใช้ใน Mohr Coulomb Model ได้แก่ ค่า  $E$  และค่า  $c$  โดยให้ค่า  $\phi = 0^\circ$ , ค่า  $c = s_u$  (เนื่องจากเป็นสภาพแบบ Undrained) และ  $E = 100q_u$  ในบทความนี้จะสมมติค่า  $s_u$  เท่ากับ 250 kPa และ 550 kPa ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ กำหนดให้คงที่ ดังนี้  $\alpha = 20\%$ ,  $\beta = 70\%$  และ  $p = 100$  kPa ส่วนชั้นดินกำหนดให้มีความหนาเท่ากับ 15 เมตร สำหรับผลวิเคราะห์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5 พบว่าที่ระดับความลึกจากใต้แผ่นพื้นดินซีเมนต์ลงมาตั้งแต่ 0 – 7 เมตร การเพิ่มขึ้นของค่า  $(s_u)_{slab}$  ส่งผลกระทบท่อค่า  $n$  เพียงเล็กน้อย และค่า  $(s_u)_{slab}$  จะไม่ส่งผลต่อค่า  $n$  ในกรณีที่ระดับความลึกจากใต้แผ่นพื้นดินซีเมนต์ลงมามากกว่า 7 เมตรขึ้นไป เนื่องจากไม่มีความแตกต่างกันของค่า  $n$  ในทั้งสองกรณีที่ระดับความลึกนี้ลงไป

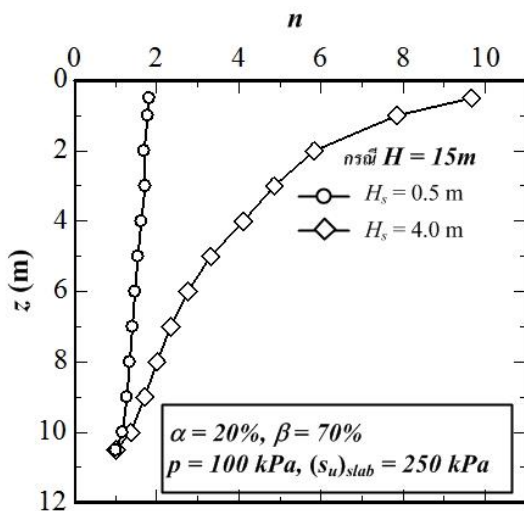
#### 4.2 ผลกระทบของความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์

โดยปกติ ในกรณีความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์มีค่าน้อย หน้าตัดของแผ่นพื้นระหว่างเสาเข็มจะทรุดตัวลงเนื่องจากน้ำหนักกระทำมากกว่าบริเวณหัวเสาเสมอ ความแตกต่างของค่าการทรุดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์กับดินที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างเสาเข็มที่ใกล้กันจะลดลงเมื่อความหนาของแผ่นพื้นเพิ่มขึ้น อันเป็นผลมาจากความยืดหยุ่นที่น้อยลงของแผ่นพื้นที่หนาขึ้นนั่นเอง อย่างไรก็ตามอ้างอิงผลการศึกษาของ Pongsivasathit et al. (2012) พบว่าในการวิเคราะห์พฤติกรรมกลไกภายในด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ซึ่งเป็นที่มาของสูตรการคำนวณหาค่า  $H_c$  จะสมมติแผ่นพื้นเป็นวัสดุยืดหยุ่นเพียงอย่างเดียวเนื่องจากถูกกำหนดให้มีความหนา  $H$  เท่ากับ 1 เมตร เท่านั้น ที่ความหนานี้แผ่นพื้นยังคงมีความยืดหยุ่นได้มากอยู่ ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งเน้นที่จะลดความยืดหยุ่นของแผ่นพื้นลงโดยการเพิ่มความหนาของแผ่นพื้นให้มากขึ้นเพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่มีผลต่อพฤติกรรมตอบสนองของกลไกระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์กับดินที่ล้อมรอบเสาเข็ม

ในการวิเคราะห์ค่า  $H_s$  จะถูกแปรเปลี่ยนตั้งแต่ 1 – 5 เมตร ส่วนพารามิเตอร์อื่นได้แก่  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $p$  และ  $(s_u)_{slab}$  ถูกกำหนดให้คงที่เท่ากับ 20%, 70%, 100 kPa และ 250 kPa ตามลำดับ และพารามิเตอร์และคุณสมบัติอื่นๆ ที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์ถูกนำเสนอไว้ในตารางที่ 1 ระดับน้ำใต้ดินถูกกำหนดให้อยู่ที่ระดับใต้แผ่นพื้นดินซีเมนต์ สำหรับกรณีที่สมมติค่า  $H_s$  มากกว่า 1 เมตร ค่า OCR เหนือระดับน้ำใต้ดินเกิน 1 เมตรถูกกำหนดให้คงที่ไว้เท่ากับ 4 และผลการวิเคราะห์ถูกแสดงในรูปที่ 6 พบว่าการเพิ่มขึ้นของค่า  $H_s$  จะทำให้ค่า  $LR$  น้อยลงในทุกๆ ค่า  $SR$  นั้นหมายความว่ามีการจมทะลุของเสาเข็มดินซีเมนต์น้อยลงถ้าความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $LR$  กับ  $H_s$



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $n$  กับ  $z$  ในกรณีที่มี  $H_s$  ต่างกัน

สำหรับการพิจารณาผลกระทบของค่า  $H_s$  ที่มีผลต่อค่า  $n$  สามารถทำได้จากการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ในแบบจำลองหนึ่งหน่วยสมมาตรแนวแกน ในที่นี้วิเคราะห์ที่ค่า  $H_s$  จำนวน 2 ค่าได้แก่ 0.5 เมตร และ 4.0 เมตร เพื่อดูความแตกต่างของค่า  $n$  เมื่อค่า  $H_s$  เปลี่ยนแปลงไป ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ให้คงที่ไว้ ดังนี้  $\alpha, \beta, p$  และ  $(s_u)_{slab}$  เท่ากับ 20%, 70%, 100 kPa และ 250 kPa ตามลำดับ กำหนดให้ชั้นดินเหนียวอ่อนมีความหนา 15 เมตร

และผลการวิเคราะห์ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 7 พบว่าการเพิ่มขึ้นของค่า  $H_s$  ทำให้ค่า  $n$  ลดน้อยลงทุกความลึก  $z$  และค่าความแตกต่างของค่า  $n$  ต่อค่า  $H_s$  ที่ต่างกันนี้ จะน้อยลงตามความลึก  $z$  ที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าความหนาเพิ่มขึ้นทำให้ความยืดหยุ่นของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ลดน้อยลง ส่งผลให้การกระจายของหน่วยแรงบนเสาเข็มดินซีเมนต์กับดินบริเวณรอบๆ เสาเข็มมีค่าไม่ต่างกันมากตามความหนาของแผ่นพื้นที่เพิ่มขึ้น นั่นคือความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์จะมีผลโดยตรงต่อผลการคำนวณการทรุดตัวกับเวลาของชั้นดินที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกอย่างมีนัยสำคัญ

## 5. สรุปผล

1) ค่า  $LR$  เป็นดัชนีที่ใช้ชี้วัดระดับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของเสาเข็มดินซีเมนต์เทียบกับดินบริเวณรอบเสาเข็ม และเป็นค่าที่สามารถใช้ประกอบเป็นส่วนสำคัญในการหาค่าการทรุดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก

2) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของแผ่นพื้นดินซีเมนต์กับค่า  $LR$  พบว่ามีความสัมพันธ์ต่อกันน้อยมาก นั่นหมายความว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของแผ่นพื้นดินซีเมนต์มีต่อผลการคำนวณหาค่าการทรุดตัวอย่างไม่มีนัยสำคัญ

3) ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ มีผลต่อค่าความเข้มของหน่วยแรงที่กระจายอยู่บนเสาเข็มเพียงเล็กน้อยในช่วงความลึกไม่เกิน 7 เมตร

4) การเพิ่มความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ทำให้ค่า  $LR$  ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นในการคำนวณค่าการทรุดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกที่มีแผ่นพื้นวางบนหัวเสาเข็ม จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องลดทอนค่า  $H_c$  ในวิธีของ Pongsivasathit et al. (2012) อันเนื่อง

มาจากผลของความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์

5) ความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์มีผลต่อค่าความเข้มข้นของหน่วยแรงที่กระจายอยู่บนเสาเข็มอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าความเข้มข้นของหน่วยแรงจะมีค่าน้อยลงเมื่อความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นทุกระดับความลึก

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Bergado, D. T., Chai, J. C., Alfaro, M. C. and Balasubramaniam, A. S., 1994.. **Improvement Techniques of Soft Ground in subsiding and Lowland Environment.** Balkema, Rotterdam, 222 p.
- [2] Broms, B. B., and Boman, P. O., 1979. Lime column a new foundation method. **Journal of Geotechnical Engineering Division.** ASCE. 105(GT4) : 539-556.
- [3] Brinkgreve, R.B.J., Swolfs, W.M. and Engin, E. **PLAXIS 2D User's Manuals (2010)**, Edited by Plaxis BV, Delft, The Netherlands
- [4] Chai, J. C., Miura, N., Kirekawa, T. and Hino, T., 2009. Settlement prediction for soft ground improved by columns. **Ground Improvement, Proceeding of Institute of Civil Engineers.** UK. Vol. 162.
- [5] Chai, J. C., and Pongsivasathit S., 2010. A method for calculating consolidation settlements of floating column improved clayey subsoil. **Frontiers of Architecture and Civil engineering in China.** 4(2) : 241-251.
- [6] Igaya. Y., Hino. T., and Chai. J.C., 2010. Behavior of trial embankments and the results of environmental monitoring for the Ariake sea coastal road project. **Proc.7<sup>th</sup> International Symposium on Lowland Technology.** Japan. : 260-271.
- [7] Pongsivasathit, S., Chai, J. C. and Ding, W. Q., 2012. Consolidation Settlement of floating-column-improved soft clayey deposit. **Ground Improvement, Proceeding of Institute of Civil Engineers.** UK. p.15.
- [8] Shen, S. L., Chai, J. C. and Miura, N., 2001. Stress distribution in composite ground of column-slab system under road pavement. **Proc.1<sup>st</sup> Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics.** Elsevier Science Ltd. : 485-490.