

# การประมาณน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มกดในชั้นดินเหนียวแข็งมาก โดยใช้วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์

## PREDICTION OF ULTIMATE JACKED PILE CAPACITY IN HARD CLAY BY USING FINITE ELEMENT METHOD

อภิชาติ คำภาหล้า (Apichit Kumpala)<sup>1</sup>  
สุขสันต์ หอพิบูลสุข (Suksun Horpibulsuk)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี *apc\_kum@hotmail.com*

<sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี *suksun@sut.ac.th*

**บทคัดย่อ :** ชั้นดินภายในจังหวัดนครราชสีมาเป็นดินที่ก่อกำเนิดในที่ มีดินเหนียว ดินตะกอนและทรายเป็นส่วนประกอบหลัก ในปัจจุบันยังไม่ปรากฏงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลักษณะทางวิศวกรรมและแนวทางออกแบบเสาเข็มในชั้นดินนี้มากนัก บทความนี้นำเสนอลักษณะทางวิศวกรรมและแนวทางในการประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มกดในชั้นดินเหนียวแข็งมากภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ จากการศึกษาพบว่า ชั้นดินนี้จัดเป็นดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสานอัดตัวมากกว่าปกติ สำหรับการทดสอบแบบอัดตัวผิวครากของดินสามารถจำลองได้ด้วยฟังก์ชันวงรี (แบบจำลอง Modified Cam Clay และ Soft Soil) ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าการทรุดตัวของผลทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มสามารถทำนายด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์โดยใช้แบบจำลอง Modified Cam Clay

**ABSTRACT :** Soil in Nakhon Ratchasima provinces in Thailand is mainly residual soil consisting clay, silt and sand. There are few researches related to engineering properties and design of pile capacity. An attempt has been made to bring out engineering characteristics of Korat clay in Suranaree University of Technology and to predict ultimate jacked pile capacity by finite element method in the present paper. It has been found that the soil is uncemented overconsolidation clay. The yield surface of the soil can be simulated by ellipse function for compression test. Using the modified cam clay model the prediction of ultimate jacked pile capacity by finite element method is done. The model is verified as an appropriate model for predicting load-settlement curve.

**KEYWORDS :** Modified Cam Clay model, Engineering characteristics, Jacked pile.

### 1. บทนำ

ชั้นดินในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ที่ระดับความลึกเกินกว่า 2.5 เมตร จากระดับผิวดิน ส่วนใหญ่เป็นชั้นดินเหนียวที่แข็งมาก (Hard clay) [1] ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเสาเข็มธรรมดาจะไม่สามารถตอกทะลุชั้นดินนี้ได้ แต่เสาเข็มเหล็กขนาดเล็ก (Steel micro-pile) สามารถถูกติดตั้งในชั้นดินดังกล่าวโดยวิธีการกดด้วยแม่แรงไฮดรอลิกจนกระทั่งถึงความลึกที่ต้องการหรือจนกระทั่งเกิดการครากของเสาเข็มได้ แนวทางการออกแบบ

เสาเข็มเหล็กขนาดเล็กในชั้นดินเหนียวแข็งยังมีอยู่อย่างจำกัด เนื่องจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม และแนวทางในการประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในชั้นดินนี้มีอยู่ไม่มากนัก

อภิชาติ [1] นำเสนอลักษณะทางวิศวกรรม และแนวทางประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มด้วยวิธีสถิตศาสตร์ร่วมกับการประมาณกำลังต้านทานแรงเฉือนในสภาพไม่ระบายน้ำของดินเหนียวแข็งมาก ในมหาวิทยาลัย ด้วยวิธี

SHANSEP และผลทดสอบทะลุทะลวงมาตรฐาน (Standard penetration test) ดังสมการ  $S_u / \sigma'_{vc} = 0.278OCR^{0.8}$  และ  $S_u = N/1.1$  ตามลำดับ วิธีดังกล่าวเป็นวิธีดั้งเดิม (Classical method) ซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของเสาเข็มและความคืบหน้า การแก้ปัญหาดังกล่าวทำได้โดยการวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างมากระหว่างกันได้แก่ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element) วิธีนี้ทำการวิเคราะห์ปัญหาโดยแบ่งโครงสร้างเป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ ที่เรียกว่า อิลลิเมนต์ (Element) ผูกกับคุณสมบัติของดินและแบบจำลองดิน (Soil model) แบบจำลองดินที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ได้แก่ แบบจำลองดิน Cam Clay, (CC) [2] Modified Cam Clay, (MCC) [3] และ Soft Soil, (SS) [4] เป็นต้น แบบจำลองดินแต่ละแบบจำลองจะมีลักษณะฟังก์ชันคราก (Yield function) และเกณฑ์กำหนดการวิบัติ (Failure criteria) แตกต่างกัน ดังนั้น ความถูกต้องของการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะขึ้นอยู่กับ การเลือกชนิดของแบบจำลองดิน

เพื่อให้เกิดความถูกต้องในการแก้ปัญหาดังกล่าว บทความนี้จะนำเสนอ การเลือกแบบจำลองดิน และเกณฑ์กำหนดการวิบัติ ในการประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มเหล็กในชั้นดินเหนียวแข็งมาก ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

## 2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การทดสอบแบ่งเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกคือ การทดสอบแรงอัดสามแกนกับตัวอย่างดินเหนียวปั้นใหม่และตัวอย่างคงสภาพขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและสูง เท่ากับ 50 และ 100 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยทดสอบในสถานะที่มีการอัดตัวคายน้ำและมีการระบายน้ำขณะเฉือน (Isotropically consolidated drained triaxial compression test, CIDC test) และสถานะที่มีการอัดตัวคายน้ำแต่ไม่มีการระบายน้ำขณะเฉือน (Isotropically consolidated undrained triaxial compression test, CIUC test)

ส่วนที่สองคือ การเลือกแบบจำลองดินที่เหมาะสม ผลทดสอบแรงอัดสามแกนจะถูกนำมาใช้สำหรับการจำลองลักษณะด้านการเฉือน (Shear behavior) โดยอาศัยโปรแกรม SIGMA/W สำหรับการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองดิน CC และ MCC และ โปรแกรม PLAXIS สำหรับการจำลองดิน SS

ส่วนสุดท้ายคือ การทำนายกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มเหล็ก เพื่อเป็นการประยุกต์ใช้แบบจำลองดินในงาน

วิศวกรรม และเป็นการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองดินร่วมกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำนายกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มเหล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.0, 12.5 และ 15.0 เซนติเมตร เปรียบเทียบกับการผลทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มในสนาม

## 3. แบบจำลองดิน

การทดสอบแรงอัดสามแกนของตัวอย่างดินอัดตัวปกติ นอกจากจะทำเพื่อหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแล้ว ยังทำการทดสอบเพื่อหาพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองดิน ซึ่งผลทดสอบจะแสดงในรูปของ Cambridge stress path [5] ความเค้นเบี่ยงเบน (Deviator stress,  $q$ ) ความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย (Mean effective stress,  $p'$ ) ความเครียดเฉือนบนระนาบวิบัติ (Shear strain,  $\epsilon_s$ ) และความเครียดเชิงปริมาตร (Volumetric strain,  $\epsilon_v$ ) จำนวนได้ ดังสมการต่อไปนี้

$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3 \quad (1)$$

$$p' = (1/3)(\sigma'_1 + 2\sigma'_3) \quad (2)$$

$$\epsilon_s = (2/3)(\epsilon_1 - \epsilon_3) \quad (3)$$

$$\epsilon_v = \epsilon_1 + 2\epsilon_3 \quad (4)$$

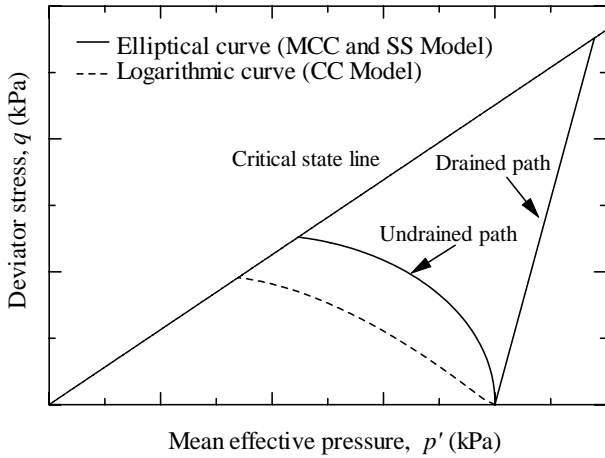
เมื่อ  $\sigma'_1$  คือความเค้นในแนวตั้งประสิทธิผล  $\sigma'_3$  คือความเค้นในแนวนอนประสิทธิผล  $\epsilon_1$  คือความเครียดตามแนวแกน และ  $\epsilon_3$  คือความเครียดตามแนวนอน

แบบจำลองดิน CC, MCC และ SS เป็นแบบจำลอง Elastic-plastic และ Strain-hardening สมการพื้นฐานสำหรับฟังก์ชันครากเป็นพีชคณิต แบบจำลองดิน CC มีรูปแบบสมการเป็นแบบ ล็อกกาธิมิก (Logarithmic curve) ส่วนแบบจำลองดิน MCC และ SS มีรูปแบบสมการเป็นวงรี (Ellipse curve) รูปแบบของฟังก์ชันครากแสดงดังสมการ

$$q + Mp' \ln \left( \frac{p'}{p'_o} \right) = 0 \quad : \text{Logarithmic curve} \quad (5)$$

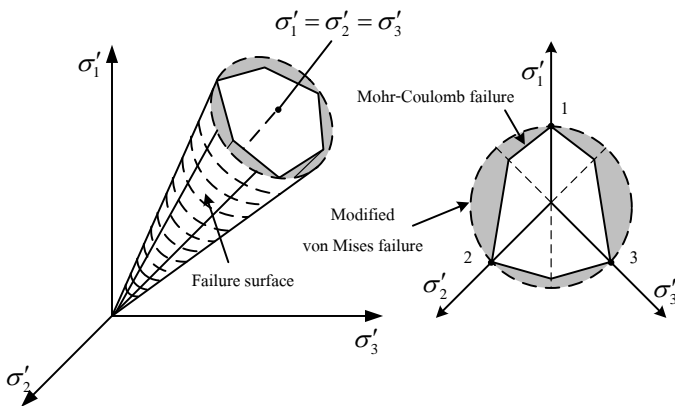
$$p^2 + \frac{q^2}{M^2} - p'p'_o = 0 \quad : \text{Ellipse curve} \quad (6)$$

เมื่อ  $p'_o$  คือความเค้นสูงสุดที่เคยกดทับในอดีต หรือเป็นจุดเริ่มต้นของผิวคราก (Yield surface) และ  $M$  คือ ความชัน Critical State Line ในกรณีที่เหมาะสมกำหนดการวิบัติเหมือนกัน ฟังก์ชันครากของแต่ละแบบจำลองจะแสดงเส้นทางของความเค้น (Stress paths) ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 เส้นทางของความเค้นของ Logarithmic curve และ Ellipse curve

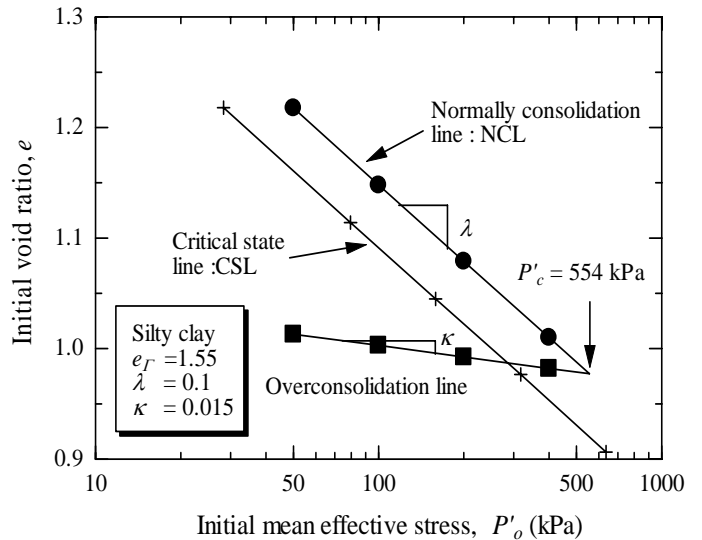
เกณฑ์กำหนดการวิบัติของแบบจำลอง CC และ MCC เป็นแบบ Modified von Mises ภายใต้สมมติฐานที่ว่า  $M$  มีค่าที่ทั้งการวิบัติแบบอัดตัว (Compression failure) และขยายตัว (Extension failure) ส่วนแบบจำลอง SS เกณฑ์กำหนดการวิบัติจะเป็นแบบ Mohr-Coulomb failure ซึ่งพิจารณาว่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผล (Effective angle of internal friction,  $\phi'_{cs}$ ) มีค่าคงที่ทั้งกรณีการวิบัติแบบอัดตัวและขยายตัว ดังแสดงรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าจุดวิบัติของเกณฑ์การวิบัติ (Modified von Mises และ Mohr-Coulomb failure) จะเป็นจุดเดียวกัน (จุด 1, 2 และ 3) เมื่อการวิบัติเป็นแบบอัดตัว



รูปที่ 2 เกณฑ์กำหนดการวิบัติของ Modified von Mises และ Mohr-Coulomb (Atkinson, 1978) [9]

#### 4. ผลการทดสอบแรงอัดสามแกนและการตรวจสอบแบบจำลองดิน

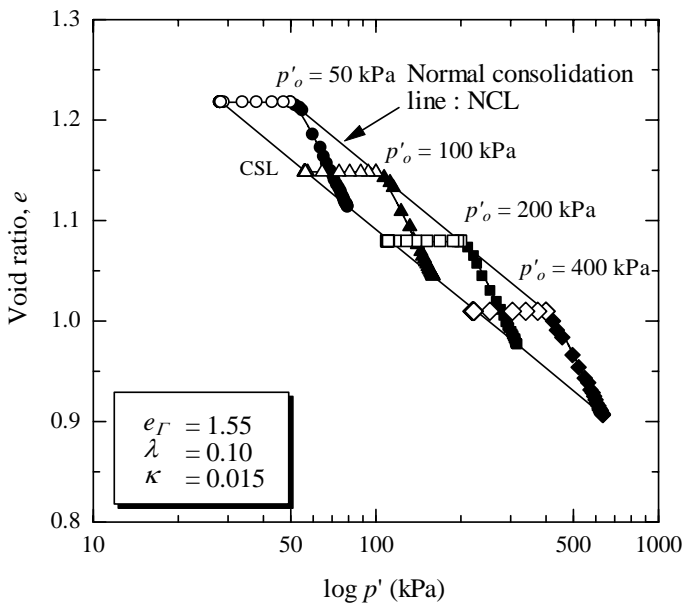
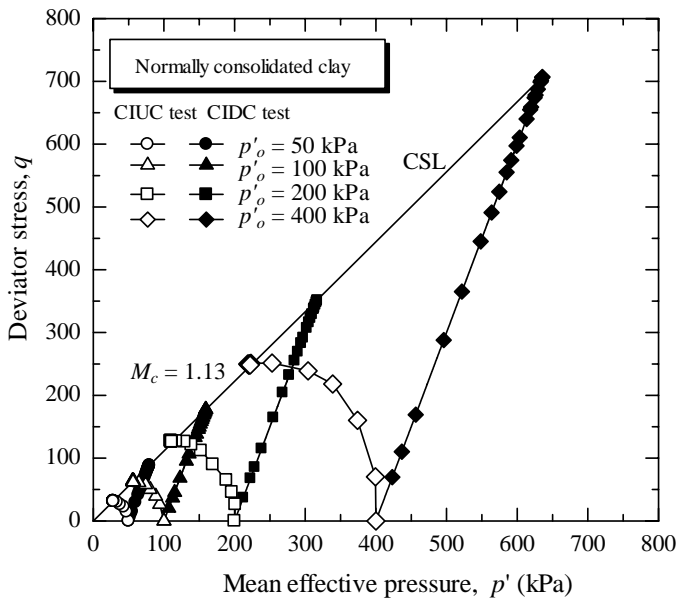
รูปที่ 3 แสดงลักษณะการอัดตัวคายน้ำด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic consolidation) ดัชนีการอัดตัว ( $\lambda$ ), ดัชนีการคืนตัว ( $\kappa$ ) และอัตราส่วน โพรงของ Critical State Line ที่  $\ln p = 1$  ( $e_r$ ) มีค่าเท่ากับ 0.10, 0.015 และ 1.55 ตามลำดับ



รูปที่ 3 ลักษณะการอัดตัวคายน้ำจากผลทดสอบแรงอัดสามแกน

รูปที่ 4 แสดงเส้นทางของความเค้น และการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน โพรงกับความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยของดินเหนียวอัดตัวปกติในสภาวะการเงื่อนไขแบบระบายน้ำและไม่ระบายน้ำ พบว่า เส้นทางของความเค้นแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained stress paths) มีลักษณะโค้งไปทางซ้ายมือสำหรับทุกความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย ซึ่งแสดงว่าดินตัวอย่างแสดงพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นและพลาสติก (Elastoplastic behavior) จนกระทั่งถึงสภาวะวิกฤติ (Critical state) ถึงแม้ว่าในขณะที่เงื่อนไขตัวอย่างจะมีการเปลี่ยนแปลงของความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย แต่อัตราส่วน โพรงจะมีค่าคงที่จนกระทั่งถึงสภาวะวิกฤติ (เนื่องจากการระบายออกของน้ำ)

ส่วนเส้นทางของความเค้นแบบระบายน้ำ (Drained stress paths) จะเป็นเส้นตรงที่มีความชัน 3:1 จนถึงสภาวะวิกฤติ การลดลงของอัตราส่วน โพรงเกิดขึ้นอย่างมากในขณะที่เงื่อนไข ดังจะเห็นได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง ( $e, \log p'$ ) ดังนั้นสรุปได้ว่าดินตัวอย่างนี้แสดงพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นและพลาสติก (Elastoplastic behavior) ตลอดการเงื่อนไข



รูปที่ 4 เส้นทางของความเค้นและการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนโพรงกับความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยของดินเหนียวอัดตัวปกติ

ความสัมพันธ์ของ  $(e, \log p')$  และ  $(q, p')$  แสดงให้เห็นว่าเส้นสภาวะวิกฤติ (Critical state line, CSL) ของดินเป็นเส้นเดียวกันสำหรับการเหนียวทั้งแบบระบายน้ำและแบบไม่ระบายน้ำ โดยไม่ขึ้นอยู่กับสภาวะการเหนียว นอกจากนี้ยังพบว่า ความชันของเส้นการอัดตัวคายน้ำปกติ (Normal consolidation line, NCL) และเส้นสภาวะวิกฤติมีความชันเท่ากัน ผลทดสอบดังกล่าวสอดคล้องกับสมมติฐานพื้นฐานของทุกแบบจำลอง [6] พารามิเตอร์ที่ได้จากผลทดสอบ สำหรับการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แสดงดังตารางที่ 1

เพื่อเป็นการแสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินเหนียว ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สอดคล้องกับสมมติฐานพื้นฐานของ State boundary surface [6] ซึ่งเป็น

สมมติฐานหลักในการสร้างแบบจำลอง ผู้วิจัยทำการ Normalization ผลทดสอบด้วย Mean equivalent pressure,  $p'_e$  ซึ่งได้จากสมการ [6]

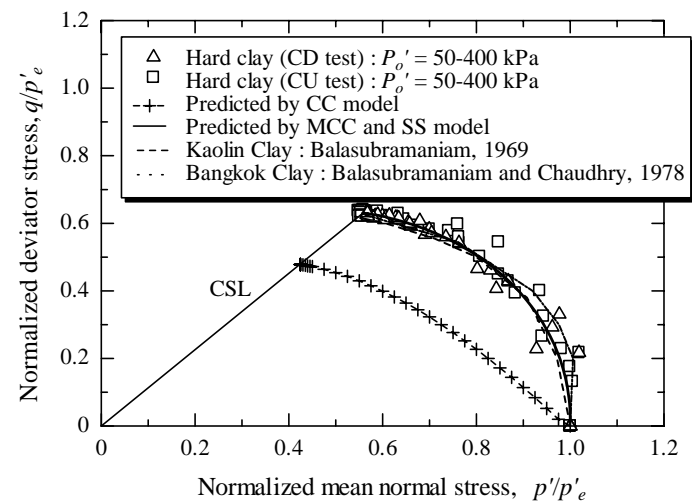
$$p'_e = p'_o \exp\left(\frac{e_o - e}{\lambda}\right) \quad (7)$$

เมื่อ  $e_o$  และ  $e$  คืออัตราส่วนโพรงเริ่มต้น และขณะเหนียวตามลำดับ

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์จากผลทดสอบแรงอัดสามแกน

Parameters	Value
$M_c$	1.13
$\lambda$	0.10
$\kappa$	0.015
$\Gamma$	2.55

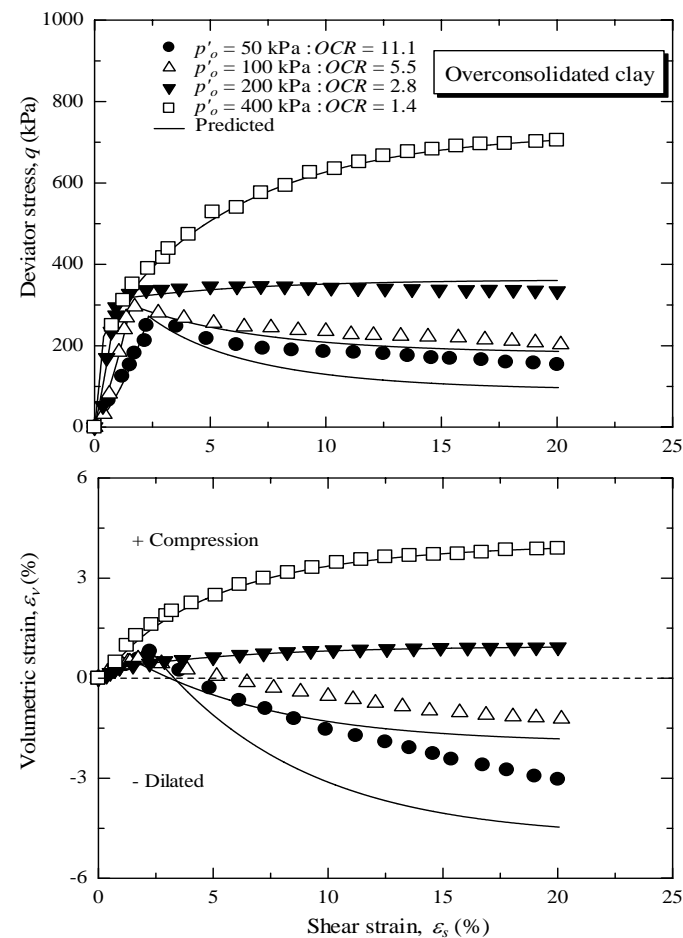
รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง  $(q/p'_e, q/p'_e)$  ของตัวอย่างดินเหนียวอัดตัวปกติในสภาวะการเหนียวแบบระบายน้ำและไม่ระบายน้ำเปรียบเทียบกับผลการทำนายด้วยแบบจำลองดิน และผลทดสอบของนักวิจัยในอดีต จะเห็นได้ว่าถึงแม้เส้นทางของความเค้นจะมีลักษณะแตกต่างกันตามแต่ลักษณะของการระบายน้ำขณะเหนียว (ดูรูปที่ 4) แต่เมื่อทำการ Normalization แล้วจะได้ผิวขอบเขตของ Roscoe (Roscoe surface) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่เป็นเอกภาพสำหรับดินชนิดต่างๆ



รูปที่ 5 Normalized เส้นทางของความเค้น (stress paths) ของดินเหนียวอัดตัวปกติ

จากการทำนายโดยอาศัยแบบจำลองดินพบว่า ผิวขอบเขตของ Roscoe ที่ทำนายด้วยแบบจำลอง MCC และ SS มีค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบ และเมื่อทำการวาดกราฟผิวขอบเขตของ Roscoe ของดินเหนียวคาโอสิน [7] และดินเหนียวกรุงเทพ [8] พบว่าอยู่ระหว่างผิวขอบเขตของดินเหนียวในมหาวิทยาลัย โดยที่ผิวขอบเขตของ Roscoe ของดินเหนียวคาโอสินมีค่าสูงกว่าดินเหนียวกรุงเทพเล็กน้อย ผลทดสอบและเปรียบเทียบนี้เป็นสิ่งยืนยันว่าพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินเหนียว ในมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี เป็นไปตามหลักการของ State boundary surface และสามารถประมาณได้โดยสมการวงรี (แบบจำลองดิน MCC และ SS)

เพื่อเป็นการตรวจสอบความเป็นไปได้ของการใช้ฟังก์ชันครากรูปวงรีในการประมาณพฤติกรรมแรงเฉือนของดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติ ผลทดสอบแรงอัดสามแกนของดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติ แบบมีการอัดตัวคายน้ำและมีการระบายน้ำ เปรียบเทียบกับผลการทำนายความสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองดิน MCC และ SS แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 เส้นทางของความเค้นและการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน โพรงกับความเค้นประสิทธิภาพเฉลี่ยของดินเหนียวอัดตัวปกติ

รูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าผลทำนายด้วยแบบจำลองดินแสดงพฤติกรรมด้านทานแรงเฉือนแตกต่างกับผลทดสอบในสภาวะอัดตัวมากกว่าปกติเพียงเล็กน้อย และพบว่าตัวอย่างที่มีความเค้นรอบข้างประสิทธิภาพสูงๆ (ค่า OCR เข้าใกล้ 1) ผลทำนายกับผลทดสอบมีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้น สามารถสรุปว่าพฤติกรรมแรงเฉือนแบบอัดตัวของดินเหนียว ในมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี สามารถจำลองด้วยแบบจำลองดิน MCC และ SS ได้ แต่อย่างไรก็ตาม การวิบัติของเสาเข็มมิใช่การวิบัติเนื่องจากการอัดตัวเพียงอย่างเดียว ดังนั้นเกณฑ์กำหนดการวิบัติจะมีอิทธิพลต่อการทำนายน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็ม ดังจะอธิบายในหัวข้อต่อไป

### 5. ผลทำนายกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็ม

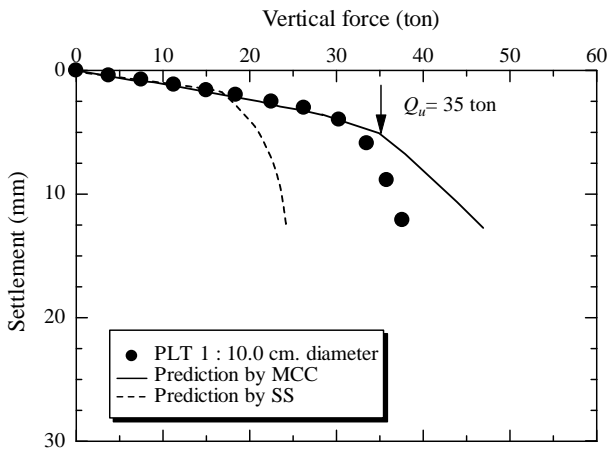
เพื่อเป็นการตรวจสอบเกณฑ์กำหนดการวิบัติ ผู้วิจัยทำการเปรียบเทียบผลการทำนายกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มเหล็กจำนวน 3 ขนาด ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับแบบจำลองดิน MCC และ SS กับผลทดสอบในสนาม คุณสมบัติของชั้นดินและพารามิเตอร์ที่ได้จากผลทดสอบแรงอัดสามแกนแสดงในตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบแสดงในรูปที่ 7 ถึง 9 สำหรับเสาเข็มเหล็กขนาด 10.0, 12.5 และ 15.0 เซนติเมตรตามลำดับ

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม

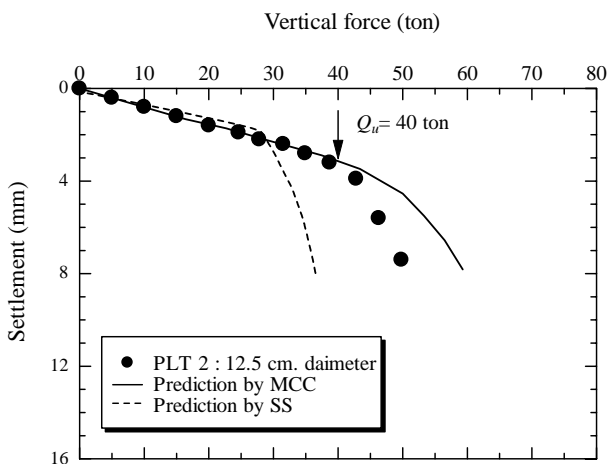
Parameters	Steel Pile	Sandy clay	Silty clay
Model	Linear elastic	Linear elastic	MCC
Depth (m)	0.0-10.5	0-2.5	2.5-12.0
$E_{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )	206 x 10 <sup>9</sup>	250x10 <sup>3</sup>	-
$\mu$	0.33	0.35	0.35
$\gamma_{wet}$ (kN/m <sup>3</sup> )	78.57	18.15	20.06
$\phi'$	-	37°	27.83°
$\lambda$	-	-	0.10
$\kappa$	-	-	0.015
$\Gamma$	-	-	2.55
OCR	-	-	30
$R_{inter}$	Rigid	0.67	0.75

จากรูปที่ 7 ถึง 9 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกกับค่าทรุดตัวของเสาเข็มมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงก่อนถึงจุดวิบัติ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยในสนามมีค่าอยู่ระหว่างผลการทำนายทั้งสอง โดยมีค่าสูงกว่าผลการทำนายด้วยแบบจำลองดิน SS และมีค่าใกล้เคียงกับผลการทำนายด้วย

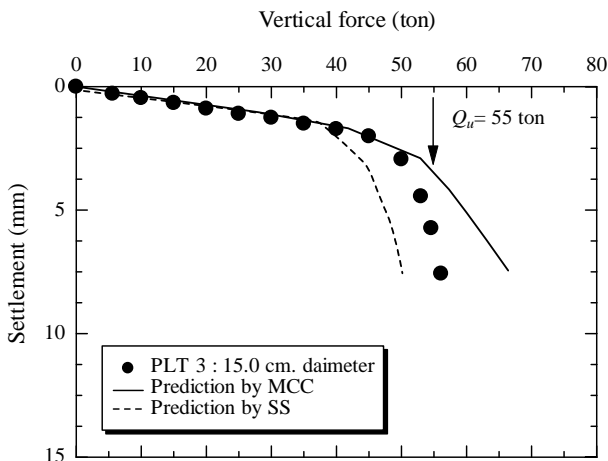
แบบจำลองดิน MCC ดังนั้น สามารถสรุปว่าแบบจำลองดิน MCC เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมกับการประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มในชั้นดินเหนียวแข็งมาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 7 ผลทดสอบและผลทำนายด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ของเสาเข็ม เหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.0 เซนติเมตร



รูปที่ 8 ผลทดสอบและผลทำนายด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ของเสาเข็ม เหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 เซนติเมตร



รูปที่ 9 ผลทดสอบและผลทำนายด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ของเสาเข็ม เหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.0 เซนติเมตร

## 6. สรุป

จากการศึกษาสรุปได้ว่า พฤติกรรมด้านแรงเฉือนของดินเหนียวในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นไปตามหลักการของ State boundary surface ฟังก์ชันครากสามารถประมาณได้ด้วยสมการวงรี (แบบจำลองดิน MCC และ SS) และเกณฑ์การวิบัติของ Modified von Mises (แบบจำลองดิน MCC) เหมาะสำหรับการประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระเจ้าเกล้าธนบุรีที่ให้ความอนุเคราะห์โปรแกรม SIXMA/W และ PLAXIS ในการวิเคราะห์โดยใช้วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] อภิชาติ คำภาหาล้า, (2548). การทำนายกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มกคสำหรับงานเสริมฐานรากอาคารภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [2] Schofield, A.N. and Wroth, C.P. (1968). *Critical State Soil Mechanics*. McGraw-Hill Book Co., London.
- [3] Britto, A.M. and Gunn, M.J. (1987). *Critical State Soil Mechanics via Finite Element*. John Wiley & Sons, p.79.
- [4] Stolle D.F.E., P.G. Bonnier & P.A. Vermeer. (1977). A Soft Soil model and experiences with two integration schemes. *Numerical Model in Geomechanics*. Numog, pp. 123-128.
- [5] Roscoe, K. H., Schofield, A. N. and Wroth, C.P. (1958). On the yielding of soil. *Geotechnique*, Vol. 8 No.1 pp. 22.
- [6] Roscoe, K.H., and Burland, J.B. (1968). On the generalized stress-strain behaviour of wet clay. *Engineering Plastic*. Cambridge University Press, Cambridge: England. pp 535-609.
- [7] Balasubramaiaam, A. S. (1969). *Some Factors Influencing the Stress-Strain Behaviour of Clay*. Thesis presented to Cambridge University, at Cambridge: England.
- [8] Balasubramaiaam, A. S. and Chaudhry A.R. (1978). Deformation and Strength Characteristics of Soft Bangkok Clay. *Journal of The Geotechnical Engineering Division*. GT9, pp. 1153-1167.
- [9] Atkinson J.H. and Bransby P.L., (1978). *The Mechanics of Soils An Introduction to Critical State Soil Mechanics*. McGraw-Hill Company (UK) Limited. 375p.