

พฤติกรรมของเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่แบบเดี่ยวและแบบกลุ่มที่รับแรงกระทำทางด้านข้าง ในชั้นดินกรุงเทพ

Behavior of Large Bored Single and Group Piles under Lateral Loads in Bangkok Subsoils

พรพจน์ ตันเส่ง^{1,*}, กิตติศักดิ์ แดงทอง² และ ฮาซัน คอแต๊ะ²

^{1,2} สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา

*Corresponding author; E-mail address: pompot@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงพฤติกรรมของเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ในชั้นดินกรุงเทพที่รับแรงกระทำด้านข้างของเสาเข็มกลุ่มแบบ 2 ต้น, เสาเข็มกลุ่มแบบ 3 ต้น, เสาเข็มเดี่ยว, เสาเข็มแบบเรีตรับแรงด้านแคบและด้านกว้าง, และเสาเข็มแบบเรีตรูปตัว T ในงานวิจัยได้ศึกษาประสิทธิภาพในการรับแรงด้านข้างของเสาเข็ม และหาสตีฟเนสที่เหมาะสมของแบบจำลองดิน Hardening soil model ด้วยการวิเคราะห์หากล้าจากการจำลองเสาเข็มและดินด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ ในการวิเคราะห์หากล้าใช้ข้อมูลการโค้งตัวของเสาเข็มที่รับแรงกระทำจากการทดสอบเสาเข็มขนาดจริงในสนาม โดยเสาเข็มในงานวิจัยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร และ 1.65 เมตร ส่วนเสาเข็มแบบเรีตรับแรงด้านแคบหน้าตัด 0.8 เมตร x 2 เมตร เสาเข็มแบบเรีตรูปตัว T ขนาดปีก 1 เมตร x 3 เมตร ขนาดเวบ 1 เมตร x 2 เมตร ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าเสาเข็มเจาะกลุ่มแบบ 2 ต้น, 3 ต้น และเสาเข็มแบบเรีตรูปตัว T มีประสิทธิภาพสูงสุด รองลงมาเป็นเสาเข็มแบบเรีตรับแรงด้านแคบและเสาเข็มเดี่ยว ส่วนเสาเข็มแบบเรีตรับแรงด้านกว้างมีประสิทธิภาพต่ำสุด ผลวิเคราะห์หากล้าหาสตีฟเนสในเทอมของหน่วยแรงรวมที่แปลงมาจากหน่วยแรงประสิทธิภาพเพื่อใช้สำหรับออกแบบเสาเข็มที่สภาวะใช้งาน คือ E_u / S_u อยู่ในช่วง 200 – 300 และสามารถให้ความละเอียดแบบ medium mesh ที่ให้ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมที่สภาวะยังไม่วิบัติได้

คำสำคัญ: เสาเข็มเจาะ, แรงกระทำด้านข้าง, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, ชั้นดินกรุงเทพ

Abstract

This study examines the lateral load behavior of large bored piles in Bangkok subsoils, focusing on two-pile groups, three-pile groups, single piles, barrettes loaded along the narrow and wide sides, and T-shaped barrettes. The objective is to assess the lateral load performance of different pile configurations and to calibrate appropriate stiffness parameters for the Hardening Soil model through back-analysis, using three-dimensional finite element simulations. The back-analysis was conducted based on full-scale lateral load test data, with the test piles having diameters of 1.5 m and 1.65 m. The barrettes had cross-sectional dimensions of 0.8 m x 2 m, while the T-shaped barrettes had flange dimensions of 1 m x 3 m and web dimensions of 1 m x 2 m. Results show that two-pile groups, three-pile groups, and T-shaped barrettes achieve the highest lateral load efficiencies, followed by barrettes loaded along the

narrow side and single piles. Barrettes loaded along the wide side exhibited the lowest efficiency. The calibrated stiffness, expressed in terms of the total stress for E_u / S_u which is suitable for serviceability limit state design, ranged between 200 and 300. Moreover, the findings suggest that a medium-mesh resolution provides a sufficient balance between computational efficiency and accuracy in capturing pre-failure pile behavior.

Keywords: Bored pile, Lateral load, Finite element method, Bangkok subsoils

1. คำนำ

ปัจจุบันความต้องการใช้โครงสร้างพื้นฐานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นของประชากรในเมืองที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้มีการขยายระบบขนส่งมวลชนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเดินทาง ได้แก่ การสร้างถนนและระบบขนส่งทางราง โดยเฉพาะในเมืองขนาดใหญ่ เช่น กรุงเทพมหานครและปริมณฑล การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานในพื้นที่เหล่านี้มักมีลักษณะเป็นทางยกระดับสำหรับเป็นถนนหรือระบบขนส่งทางราง เช่น รถไฟฟ้า ทางด่วน เพื่อให้เกิดการใช้พื้นที่ซึ่งมีอยู่จำกัดให้เกิดความคุ้มค่าสูงสุด โครงสร้างดังกล่าวจะต้องคำนึงถึงแรงกระทำด้านข้างที่เกิดจากแรงเฉื่อยและแรงเบรกของยานพาหนะ นอกจากนี้ยังมีแรงกระทำด้านข้างที่เกิดจากแรงลมและแผ่นดินไหวต่ออาคารสูง ซึ่งเห็นได้ชัดจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวในต่างประเทศที่ส่งผลถึงอาคารสูงในพื้นที่กรุงเทพมหานครเมื่อวันที่ 28 มีนาคม 2568 ที่ผ่านมา โดยแรงเหล่านี้จะถูกถ่ายโอนผ่านโครงสร้างและต่อมอลงสู่ฐานราก ก่อนที่จะส่งต่อไปยังเสาเข็ม การออกแบบฐานรากเสาเข็มมักไม่พิจารณาแรงกระทำด้านข้าง เนื่องจากมีผลกระทบต่อพฤติกรรมของโครงสร้างน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงกระทำในแนวตั้ง โดยพฤติกรรมของเสาเข็มที่รับแรงด้านข้างนั้นขึ้นอยู่กับโครงสร้างเสาเข็มและดินที่รองรับ ดังนั้น เสาเข็มกับดินจึงเป็นปฏิสัมพันธ์กัน โดยพฤติกรรมการรับแรงกระทำด้านข้างของเสาเข็มนั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความขรุขระของเสาเข็มและการยึดรั้งหัวเสาเข็มเข้ากับฐานราก ซึ่งอัตราส่วนความขรุขระของเสาเข็มสามารถจำแนกได้เป็นสองรูปแบบ ได้แก่ เสาเข็มสั้นและเสาเข็มยาว โดยกรณีของเสาเข็มสั้นนั้นดินที่ด้านแรงกระทำจากเสาเข็มจะเกิดการวิบัติก่อนที่เสาเข็มจะวิบัติ และสำหรับกรณีของเสาเข็มยาว หากดินส่วนบนเกิดการวิบัติเสาเข็มยาวจะทำหน้าที่กระจายแรงกระทำด้านข้างลงไปในดินส่วนที่ลึกออกไป เมื่อโครงสร้างเสาเข็มรับแรงกระทำด้านข้างที่สูงจะทำให้เกิดโมเมนต์ดัดที่สูงขึ้นและทำให้โครงสร้างเสาเข็มเกิดการวิบัติในเวลาต่อมา

ลักษณะทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพ มีชั้นดินเหนียวที่ความลึกจากผิวดินประมาณ 10 – 18 เมตร ซึ่งเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีกำลังรับแรงเฉือนต่ำ

ดังนั้นเสาเข็มที่ใช้ในการรับแรงด้านข้างในชั้นดินกรุงเทพฯจึงจำเป็นต้องใช้เสาเข็มยาวเพื่อให้มีกำลังต้านทานแรงด้านข้างสูงขึ้น ลักษณะของเสาเข็มที่นิยมใช้นั้นมีทั้งเสาเข็มเจาะแบบกลม และเสาเข็มเจาะแบบเหลี่ยม(แบนเรต) ซึ่งมีผู้ทำการวิจัยพฤติกรรมของเสาเข็มรับแรงด้านข้างแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การทดสอบเสาเข็มขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ และการทดสอบเสาเข็มขนาดใหญ่ในสนาม

การทดสอบเสาเข็มขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ (small-scale test) ได้มีผู้ทำวิจัยไว้ในชั้นดินต่างประเทศของ [1-3] ผลการวิจัยพบว่าเสาเข็มในกลุ่มที่จัดเรียงกลุ่มเสาเข็มตามแนวแรง (in-line) และตั้งฉากแนวแรง (side-by-side) ต้องมีระยะห่างระหว่างเสาเข็มอย่างน้อย 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง จึงจะทำให้พฤติกรรมของเสาเข็มกลุ่มใกล้เคียงกับเสาเข็มเดี่ยว ซึ่งงานวิจัยในห้องปฏิบัติการมีข้อจำกัดในการนำไปใช้เนื่องจากผลของการย่อส่วนที่มีต่อหน่วยแรงในวัสดุทำเสาเข็ม

ส่วนการทดสอบเสาเข็มขนาดใหญ่ในสนามที่ฝังลงในดินลึกในชั้นดินกรุงเทพฯ มีงานวิจัยของ [4] ได้รวบรวมข้อมูลการทดสอบเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มรับแรงด้านข้างในชั้นดินกรุงเทพฯ โดยเสาเข็มที่ใช้ในการทดสอบเป็นเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ลึก 37 เมตร เป็นการทดสอบเสาเข็มเดี่ยว (F1) ดันกัน และการทดสอบเสาเข็มกลุ่ม 2 ต้น (F2) ดันกับเสาเข็มกลุ่ม 3 ต้น (F3) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ [5] ได้ทำการเสนอผลทดสอบเสาเข็มแบนเรตขนาด 0.8 เมตร x 2 เมตร ที่ใช้รับเสาสถานีรถไฟฟ้าสายสีเขียวในชั้นดินกรุงเทพฯ และยังมีผลการทดสอบเสาเข็มเจาะกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.65 เมตร ลึก 56 เมตร และเสาเข็มแบนเรตรูปตัวที ขนาดปีก 3 เมตร x 1 เมตร และขนาดเอว 2 เมตร x 1 เมตร ลึก 56 เมตร ซึ่งรายงานไว้ในงานวิจัยของ [6]

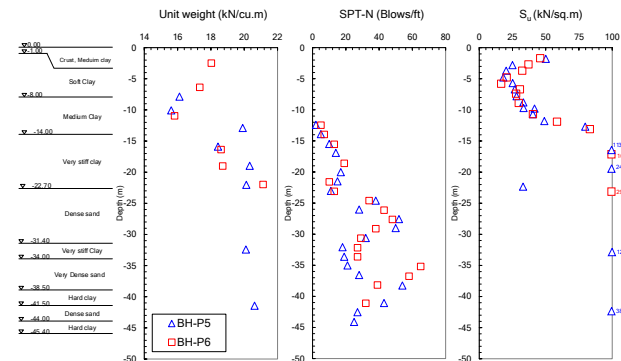
สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเสาเข็มรับแรงกระทำด้านข้าง มีงานวิจัยของ [6] ได้ใช้ซอฟต์แวร์ PLAXIS 3D เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มเจาะกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.65 เมตร และเสาเข็มแบนเรตรูปตัวทีซึ่งมีขนาดของปีก 3 เมตร x 1 เมตร และขนาดเอว 2 เมตร x 1 เมตร จำลองเสาเข็มโดยใช้ volume element (VE) กับแบบจำลองดิน Mohr-Coulomb (MC) และพิจารณาการแตกร้าวของหน้าตัดโดยการลดสทิพเนสของเสาเข็มในแบบจำลอง และยังมีงานวิจัยของ [5] ได้เสนอ p-y curve ของเสาเข็มแบนเรตขนาด 0.8 เมตร x 2 เมตร ในชั้นดินเหนียวอ่อนโดยการวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์ Lpile จะเห็นได้ว่างานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นนั้น เสาเข็มที่รับแรงด้านข้างในชั้นดินกรุงเทพฯมีการทดสอบในสนามน้อยมากเมื่อเทียบกับเสาเข็มรับแรงในแนวตั้ง เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการทดสอบสูงมาก และการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มในอดีตนิยมใช้วิธี p-y curve ในการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยว ต่างจากการก่อสร้างเสาเข็มในปัจจุบันที่นิยมใช้งานในรูปแบบเสาเข็มกลุ่ม ทำให้วิธี p-y curve ไม่สามารถอธิบายความซับซ้อนดังกล่าว

งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวซึ่งประกอบไปด้วยเข็มเจาะกลมและเสาเข็มเจาะแบบเรต และพฤติกรรมของเสาเข็มกลุ่ม ส่วนการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์กลับหาค่าสทิพเนสของดินโดยแบบจำลองดิน Hardening soil model (HSM) และจำลองโครงสร้างเสาเข็มด้วย embedded beam element (EBE) ซึ่งเป็นเอลิเมนต์ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาในซอฟต์แวร์ PLAXIS 3D

2. การทดสอบเสาเข็มรับแรงทางด้านข้างในชั้นดินกรุงเทพฯ

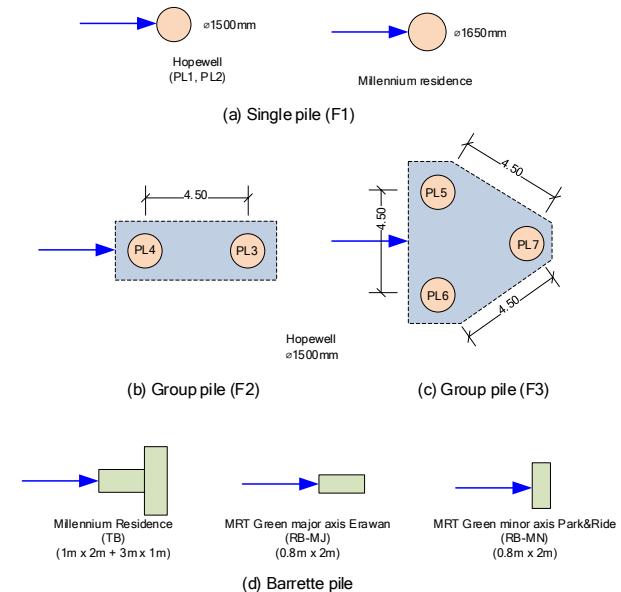
ลักษณะทั่วไปของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯนั้นเป็นดินที่ถูกพัฒมาโดยกระแสจากตอนบนของพื้นที่ จึงมีขนาดอนุภาคเล็กมาก โดยมีคุณสมบัติทางวิศวกรรม คือ มีปริมาณความชื้นสูงและมีกำลังรับแรงเฉือนต่ำ

โดยรูปที่ 1 เป็นคุณสมบัติชั้นดินบริเวณตำแหน่งการทดสอบเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มบริเวณสถานีกลางบางซื่อ เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร



รูปที่ 1 ภาพตัดชั้นดินกรุงเทพฯ [4]

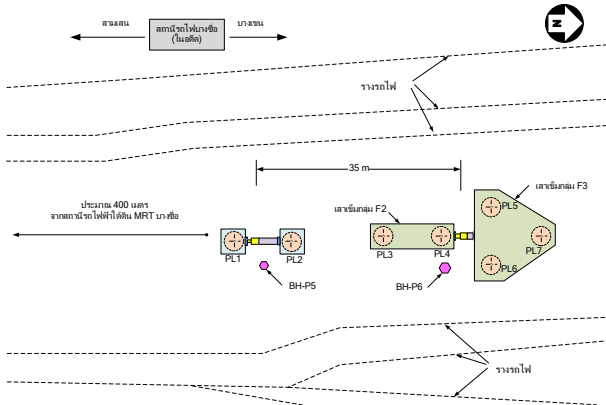
สำหรับเสาเข็มที่ทำการทดสอบรับแรงกระทำด้านข้างในชั้นดินกรุงเทพฯนั้นมีหลายหน้าตัด ได้แก่ เสาเข็มเจาะเดี่ยว (F1) เสาเข็มเจาะกลุ่ม 2 ต้น (F2) และกลุ่ม 3 ต้น (F3) เสาเข็มแบนเรตรับแรงด้านแคบ (RB-MJ), เสาเข็มแบนเรตรับแรงด้านกว้าง (RB-MN) และเสาเข็มแบนเรตรูปตัวที (TB) รูปที่ 2 เป็นหน้าตัดเสาเข็มที่ทดสอบในชั้นดินกรุงเทพฯที่รวบรวมไว้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 2 หน้าตัดเสาเข็มที่ทดสอบรับแรงด้านข้างในชั้นดินกรุงเทพฯ

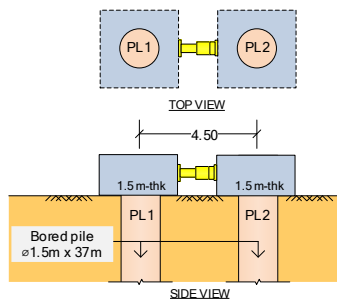
การทดสอบเสาเข็มรับแรงกระทำด้านข้างในสนามในชั้นดินกรุงเทพฯนั้น ทำโดยการหล่อเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กในพื้นที่ที่ทดสอบ ให้แรงกระทำโดย hydraulic jack วัดขนาดแรงกระทำโดย load cell และมีการติดตั้ง steel plate เพื่อลดความเข้มข้นของแรงกระทำไม่ให้เกิดขึ้นเพียงจุดใดจุดหนึ่งที่ผิวของ pile cap และวัดการโก่งตัวโดยการติดตั้ง inclinometer ตามแนวยาวของเสาเข็มที่ทำการทดสอบ รูปที่ 3, รูปที่ 4 และรูปที่ 5 เป็นผังทดสอบและภาพตัดการทดสอบเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มตามลำดับ โดยรวบรวมไว้ในงานวิจัยของ [4] เสาเข็มที่ทดสอบเป็นเสาเข็มเจาะขนาด

เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 เมตร ลึก 37 เมตร ตำแหน่งทดสอบอยู่บริเวณ
สถานีกลางบางซื่อ เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร

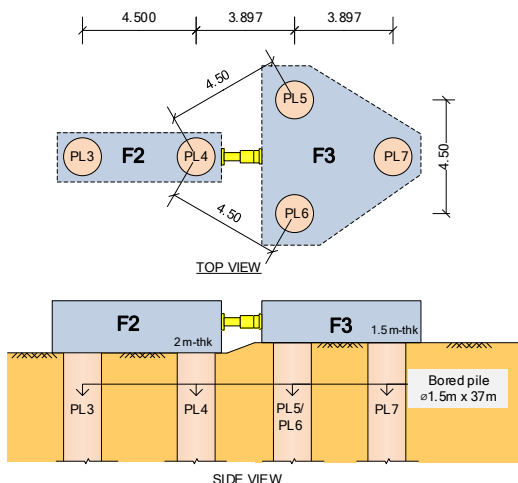


รูปที่ 3 ผังทดสอบเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่ม [4]

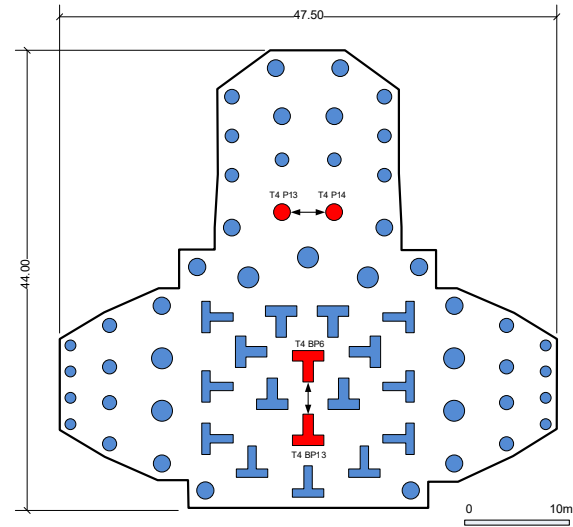
การทดสอบเสาเข็มเจาะเดี่ยวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.65 เมตร ลึก
56 เมตร และการทดสอบเสาเข็มแบบเรีตูปตัวที่ขนาดปีก 3 เมตร x 1 เมตร
และเอวขนาด 2 เมตร x 1 เมตร ลึก 56 เมตร ได้รายงานไว้ในงานวิจัยของ
[6] โดยรูปที่ 6, รูปที่ 7 และรูปที่ 8 เป็นผังการทดสอบและภาพตัดการ
ทดสอบเข็มเจาะและเสาเข็มแบบเรีตูปตัวที่ของโครงการ Millennium
Residence มีตำแหน่งทดสอบอยู่บริเวณซอยสุขุมวิท 20 เขตคลองเตย
กรุงเทพมหานคร



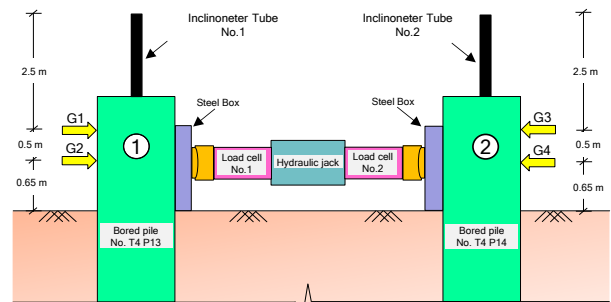
รูปที่ 4 ภาพตัดการทดสอบเสาเข็มเดี่ยว [4]



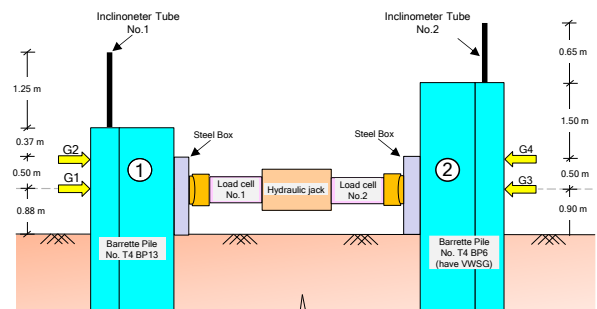
รูปที่ 5 ภาพตัดการทดสอบเสาเข็มกลุ่ม [4]



รูปที่ 6 ผังการทดสอบเสาเข็มฐานรากของอาคาร Millennium Residence [6]



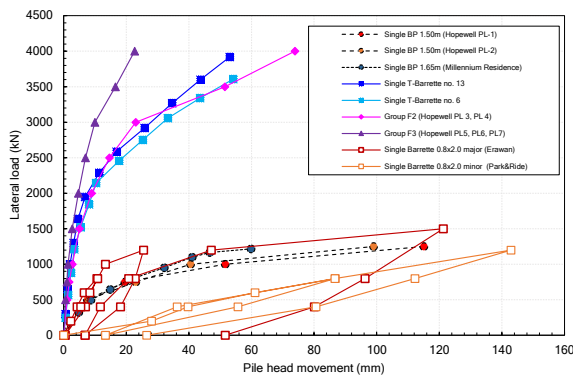
รูปที่ 7 ภาพตัดการทดสอบเสาเข็มเจาะเดี่ยว [6]



รูปที่ 8 ภาพตัดการทดสอบเสาเข็มรูปตัวที่ [6]

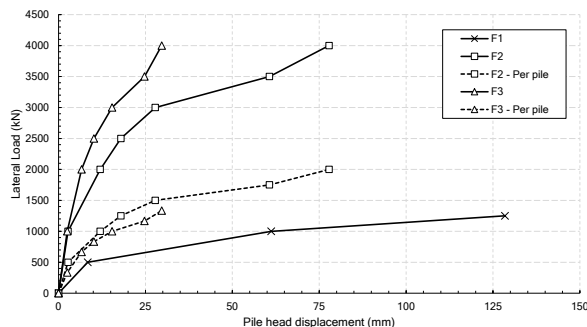
3. ประสิทธิภาพของเสาเข็มรับแรงด้านข้างจากผลทดสอบ เสาเข็มในสนาม

เปรียบเทียบผลทดสอบในสนามของเสาเข็มรับแรงด้านข้างในชั้นดิน
กรุงเทพ ในรูปที่ 9 เป็นการเปรียบเทียบแรงกระทำกับการเคลื่อนตัวของหัว
เสาเข็มหน้าตัดต่าง ๆ ที่รวบรวมข้อมูลผลทดสอบไว้ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเสาเข็ม
กลุ่มแบบ F2, F3 และเสาเข็มแบบเรีตูปตัวที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด
รองลงมาเป็นเสาเข็มแบบเรีตูปรับแรงด้านแคบและเสาเข็มเดี่ยว ส่วนเสาเข็ม
แบบเรีตูปรับแรงด้านกว้างมีประสิทธิภาพต่ำที่สุด

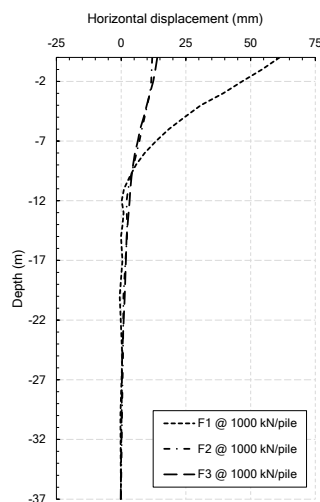


รูปที่ 9 ผลทดสอบเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพ

สำหรับผลทดสอบเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 เมตร ลึก 37 เมตร ในรูปที่ 10 เป็นการเปรียบเทียบเสาเข็มกลุ่มแบบ F2 และ F3 ที่มีแรงกระทำต่อต้นเฉลี่ยเท่ากับเสาเข็มเดี่ยว F1 เท่ากับ 1000 กิโลนิวตัน/ต้น ในรูปที่ 11 เป็นการโค้งตัวของเสาเข็มเดี่ยว F1 ซึ่งประมาณเป็นแรงกระทำเสาเข็มต่อต้นในเสาเข็มกลุ่ม F2 ที่ 2000 กิโลนิวตัน/pile cap และเสาเข็มกลุ่ม F3 ที่ 3000 กิโลนิวตัน/pile cap โดยผลจากการเปรียบเทียบชี้ให้เห็นว่าเสาเข็มกลุ่ม F2 และ F3 มีความแข็งแรงสูงกว่าเสาเข็มเดี่ยว F1 ที่แรงกระทำด้านข้างต่อเสาเข็มหนึ่งต้นเฉลี่ยเท่ากัน เนื่องจากผลของการยึดรั้งหัวเสาเข็มกับ pile cap ที่ลดการหมุนและการโค้งตัวของหัวเสาเข็มในกลุ่ม ทำให้เสาเข็มแต่ละต้นมีพฤติกรรมไม่อิสระเหมือนกับเสาเข็มเดี่ยว



รูปที่ 10 ผลทดสอบเสาเข็มเจาะ F1, F2 และ F3

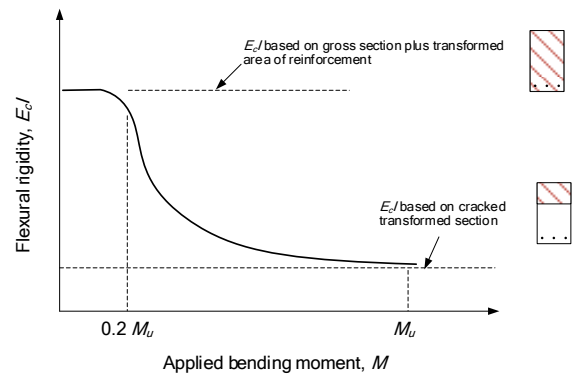


รูปที่ 11 การโค้งตัวของเสาเข็มที่แรงกระทำเฉลี่ย 1000 กิโลนิวตันต่อต้น

นอกจากนี้ในกรณีเสาเข็มแบบรีดขนาด 0.8 เมตร x 2 เมตร ทดสอบให้แรงกระทำในทิศทางที่แตกต่างกันนั้น พบว่าการให้แรงกระทำต่อต้านที่มีโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดสูง คือ ด้านแคบ 0.8 เมตร (RB-MJ) จะมีการเคลื่อนตัวน้อยกว่าการให้แรงกระทำต่อต้านกว้าง 2 เมตร (RB-MN)

4. การวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ

การวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยซอฟต์แวร์ PLAXIS 3D ใช้เอลิเมนต์แบบ 10-node tetrahedral ใช้แบบจำลองดิน HSM สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลาง เนื่องจากชั้นดินส่วนนี้มีการโค้งตัวที่วัดได้ในสนามมาก ซึ่งแบบจำลองดิน HSM มีการแปรผันสมบัติพลาสติกของดินจากการเปลี่ยนแปลงความเค้นในดิน และพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองดินนี้ใช้ตามแนวทางของ [7] ส่วนความลึกถัดจากนั้นลงมาพิจารณาใช้แบบจำลองดิน MC เนื่องจากการโค้งตัวของเสาเข็มในชั้นดินนี้มีค่าน้อยมาก โดยการวิเคราะห์เป็นแบบไม่ระบายน้ำ เนื่องจากการทดสอบเสาเข็มอยู่ในช่วงระยะเวลาสั้นมาก ส่งผลให้แรงดันน้ำส่วนเกินในชั้นดินเหนียวยังอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน โดยเสาเข็มใช้การจำลองเอลิเมนต์แบบ EBE ที่เป็นเอลิเมนต์พัฒนาขึ้นสำหรับการจำลองเสาเข็ม ซึ่งประกอบด้วย beam element ที่ทำให้ดินล้อมรอบเสาเข็มนั้นมีปริมาตรเป็นขอบเขตอิสระเป็นปริมาตรที่เทียบเท่ากับหน้าตัดวงกลม ส่งผลให้เสาเข็มที่จำลองด้วย EBE มีพฤติกรรมเหมือน VE และในแบบจำลองใช้ interface element เพื่อจำลองการแยกหรือการเคลื่อนไถลออกจากกันระหว่างจุดต่อของ EBE และเอลิเมนต์ที่ใช้จำลองดิน สำหรับพฤติกรรมของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กจะเกิดการแตกร้าว โดย [8] ระบุว่าหน้าตัดของคอนกรีตจะเริ่มแตกร้าวเมื่อโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นเท่ากับร้อยละ 20 ของโมเมนต์ดัดประลัยของหน้าตัด หลังจากนั้นความแข็งแรงจะแปรผกผันกับโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดจนกระทั่งเมื่อโมเมนต์ดัดเท่ากับโมเมนต์ประลัยดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างสติฟเนสกับโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็ก [8]

สำหรับหน้าตัดแตกร้าวของเสาเข็มจะกำหนดโดยใช้แบบจำลองวัสดุแบบ elastoplastic ซึ่งจะส่งผลให้พฤติกรรมของเสาเข็มเกิดการร้าว เมื่อโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นสูงกว่าโมเมนต์ร้าวของหน้าตัด ส่วนการคำนวณหน่วยแรงร้าว (yield stress, σ_y) ของเสาเข็มในแบบจำลองดังสมการที่ 1

$$\sigma_y = \frac{M_p c}{I_{cr}} \quad (1)$$

โดยโมเมนต์พลาสติก (M_p) ของหน้าตัดสำหรับเสาเข็มกลมและเสาเข็มแบนที่นั้นสามารถหาได้จากแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ของเสาเข็มกริดเสริมเหล็กซึ่งพิจารณาใช้เท่ากับโมเมนต์ประลัยของหน้าตัดหรือหาได้จากโมเมนต์ที่ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้ง (curvature) ที่จุดสิ้นสุดพฤติกรรมเชิงเส้นตรง ตามแนวทางของ [6] ส่วนโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแตกร้าว (I_{cr}) คำนวณโดยการแปลงหน้าตัดเหล็กเสริมเป็นคอนกรีตโดยอัตราส่วนโมดูลาร์ จากนั้นใช้หลักการความสมดุลระหว่างพื้นที่รับแรงอัดจากคอนกรีตและพื้นที่รับแรงดึงจากเหล็กเสริม และระยะจากผิวรับแรงอัดถึงแกนสะเทิน (c) สำหรับเสาเข็มเจาะเดี่ยวและกลุ่มจะใช้การจำลอง pile cap โดยเอลิเมนต์ VE แบบ 10-node tetrahedral ใช้แบบจำลองวัสดุแบบ linear elastic ในการให้แรงกระทำแก่เสาเข็มนั้นใช้เอลิเมนต์แบบ node-to-node anchor แล้วกำหนดแรงกระทำเป็นแรงอัด prestress และใช้ point load สำหรับเสาเข็มแบนเรีต จากนั้นกำหนดขนาดของแรงมีค่าเท่ากับแรงที่อ่านได้จาก load cell และใช้ plate element เพื่อกระจายแรงกระทำให้ทั่ว pile cap สำหรับข้อมูลคอนกรีตและแผ่นเหล็กกระจายแรงเป็นไปตามตารางที่ 1 ในการพิจารณาวัสดุในของแบบจำลองดิน HSM ที่เป็นหน่วยแรงประสิทธิผล E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} และ E_{ur}^{ref} เป็นสติเฟนในของหน่วยแรงรวม E_u นั้นจะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสเฉือน (G) กับโมดูลัสยืดหยุ่นประสิทธิผล (E') และโมดูลัสยืดหยุ่นแบบไม่ระบายน้ำ (E_u) ดังสมการที่ 2

$$G = \frac{E'}{2(1+\nu')} = \frac{E_u}{2(1+\nu_u)} \quad (2)$$

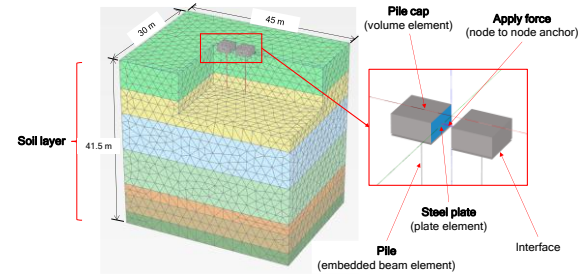
โดยพิจารณาที่อัตราส่วนปัวซองแบบไม่ระบายน้ำ (ν_u) เท่ากับ 0.5 และอัตราส่วนปัวซองประสิทธิผล (ν') เท่ากับ 0.2 จะได้ความสัมพันธ์สำหรับสติเฟนสำหรับแบบจำลองดิน HSM ในของหน่วยแรงรวมคือ $E_{50}^{ref} = E_{oed}^{ref} = 0.8E_u$ ส่วนค่าสติเฟนของ $E_{ur}^{ref} = 8E_u$ สำหรับดินเหนียวอ่อน และ $E_{ur}^{ref} = 2.4E_u$ สำหรับดินเหนียวแข็งปานกลางและดินเหนียวแข็งมาก ซึ่งพิจารณาใช้ตามแนวทางของ [7]

การวิเคราะห์หาค่ากลับเพื่อกำหนดค่าสติเฟนที่เหมาะสมของเสาเข็มเดี่ยว (F1) นั้นจะทำการแปรผันสติเฟนในของหน่วยแรงรวม E_u/S_u เท่ากับ 100, 112.5, 200, 300 และ 400 โดยตารางที่ 3, ตารางที่ 4, และตารางที่ 5 เป็นข้อมูลคุณสมบัติชั้นดินสำหรับเสาเข็มเดี่ยวกับเสาเข็มกลุ่ม, เสาเข็มแบนเรีต RB-MJ และเสาเข็มแบนเรีต RB-MN ส่วนเสาเข็มแบนเรีต TB จะใช้สติเฟนของดินที่แปลงมาจากแบบจำลองดิน MC ของงานวิจัย [6] จากค่าของ E_u ในตารางที่ 6 โดยรูปที่ 13, รูปที่ 14, รูปที่ 15 และรูปที่ 16 เป็น FEM mesh ที่ใช้ในการจำลองเสาเข็มเดี่ยว, เสาเข็มกลุ่ม, เสาเข็มแบนเรีต และเสาเข็มแบนเรีตรูปตัววีตามลำดับ

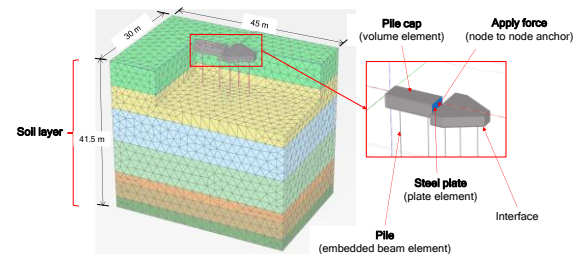
สำหรับตารางที่ 2 เป็นผลการคำนวณคุณสมบัติสำหรับการใช้ในการจำลองเสาเข็มด้วย EBE ที่ประกอบไปด้วยโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแตกร้าว, ความลึกจากแกนสะเทินถึงผิวรับแรงอัด, โมเมนต์พลาสติก และหน่วยแรงคราก

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของคอนกรีตเสาเข็มและแผ่นเหล็กกระจายแรง

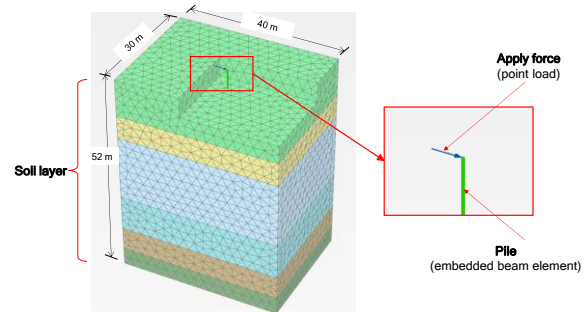
Material	γ (kN/m ³)	E (kN/m ²)	ν
Concrete	24	25×10^6	0.2
Steel plate	78.5	200×10^6	0.3



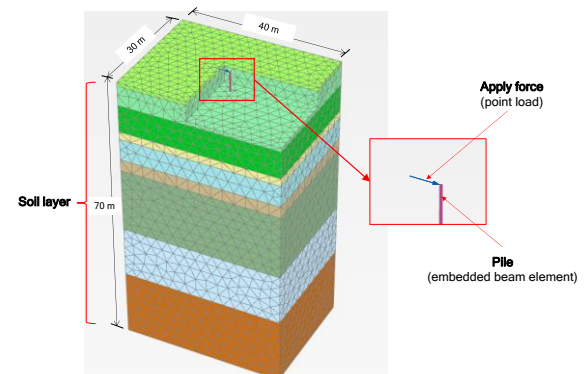
รูปที่ 13 FEM mesh ที่ใช้ในการจำลองเสาเข็มเดี่ยว F1



รูปที่ 14 FEM mesh ที่ใช้ในการจำลองเสาเข็มกลุ่ม F2 และ F3



รูปที่ 15 FEM mesh ที่ใช้ในการจำลองเสาเข็มแบนเรีตรูป 0.8m x 2m



รูปที่ 16 FEM mesh ที่ใช้ในการจำลองเสาเข็มแบนเรีตรูปตัววี

ตารางที่ 2 คุณสมบัติเสาเข็มของ EBE

Barrette type	I_{gross} (m ⁴)	I_{crack} (m ⁴)	compression depth (m)	M_p (kN·m)	σ_y (kN/m ²)
RB-MJ	0.5333	0.10676	0.46	5050	21760

0.8m x 2.0m					
RB-MN 0.8m x 2.0m	0.0853	0.01826	0.18	2056	20262
TB (1x3)m x (1x2)m	3.1617	0.40325	0.42	10400	10832

ตารางที่ 3 ข้อมูลชั้นดินของการทดสอบเสาเข็ม F1, F2 และ F3

Soil (depth)	γ_t (kN/m ³)	S_u (kPa)	SPT-N (N/ft)	ϕ' (degree)
Soft Clay (-1 m to -8 m)	17	20	-	-
Medium Clay (-8 m to -14 m)	16.5	40	-	-
Very Stiff Clay (-14 m to -22.7 m)	18.5	165	20	-
Dense Sand (-22.7 m to -31.4 m)	20	-	45	34
Very Stiff Clay (-31.4 m to -34 m)	18.5	150	30	-
Very Dense Sand (-31.4 m to -38.5 m)	21	-	50	36
Hard Clay (-38.5 m to -41.5 m)	20.50	380	50	-

ตารางที่ 4 ข้อมูลชั้นดินของการทดสอบเสาเข็มแบบเรต RB-MJ

Soil (depth)	γ_t (kN/m ³)	S_u (kPa)	SPT-N (N/ft)	ϕ' (degree)
Soft Clay (-0.5 m to -10 m)	17	18	-	-
Medium Clay (-10 m to -16 m)	17.5	33	-	-
Very Stiff Clay (-16 m to -32.5 m)	21.5	175	30	-
Hard Clay (-32.5 m to -41.5 m)	20	272	40	-
Very Dense Sand (-41.5 m to -47.5 m)	21.4	-	55	35
Hard Clay (-47.5 m to -52 m)	21	312	60	-

ตารางที่ 5 ข้อมูลชั้นดินของการทดสอบเสาเข็มแบบเรต RB-MN

Soil (depth)	γ_t (kN/m ³)	S_u (kPa)	SPT-N (N/ft)	ϕ' (degree)
Soft Clay (-0.5 m to -11.5 m)	18	13	20	-
Medium Clay (-11.5 m to -18.5 m)	18	35	40	-
Very Stiff Clay (-18.5 m to -20.5 m)	20	136	20	-
Hard Clay (-20.5 m to -40 m)	21	230	45	-
Very Dense Sand (-40 m to -47.5 m)	20	-	50	35
Very Stiff Clay (-47.5 m to -52 m)	21.5	170	20	-

5. ผลการวิจัย

5.1 ประสิทธิภาพของเสาเข็มขนาดใหญ่จากการทดสอบในสนาม

สำหรับผลทดสอบในสนามของเสาเข็มเจาะเดี่ยว เสาเข็มเจาะแบบเรต เสาเข็มแบบเรตรูปตัวที และเสาเข็มเจาะกลุ่มแบบ F2, F3 เมื่อเปรียบเทียบ

เป็นความสัมพันธ์ของผลการเคลื่อนตัวในแนวนอนกับแรงกระทำด้านข้าง พบว่าเสาเข็มกลุ่มแบบ F2, F3 และเสาเข็มแบบเรตรูปตัวทีมีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากผลการยึดรั้งที่หัวเสาเข็มด้วย pile cap ในเสาเข็มกลุ่มและโมเมนต์ความเฉื่อยที่สูงมากของเสาเข็มแบบเรตรูปตัวที รองลงมา คือ เสาเข็มเจาะเดี่ยว และเสาเข็มแบบเรตรับแรงด้านแคบ ส่วนเสาเข็มเจาะแบบเรตรับแรงด้านกว้างมีประสิทธิภาพในการรับแรงด้านข้างต่ำสุด

ตารางที่ 6 ข้อมูลชั้นดินของการทดสอบเสาเข็มแบบเรต TB [6]

Soil (depth)	γ_t (kN/m ³)	S_u (kPa)	E_u (kPa)
Crust, Medium Clay (-0 m to -1 m)	18	35	59500
Very Soft Clay (-1 m to -6 m)	16	18	32000
Soft Clay (-6 m to -13 m)	16.5	22	39000
Medium Clay (-13 m to -15 m)	18	35	55500
Stiff Clay (-15 m to -20.5 m)	17.5	100	280000
Medium Dense Sand (-20.5 m to -23.5 m)	18	-	500000
Very Stiff Clay (-23.5 m to -40 m)	18	110	308000
Hard Clay (-40 m to -53 m)	19	200	560000
Very Dense Sand (-53 m to -70 m)	19.5	-	990000

5.2 การวิเคราะห์หาค่าสลิปในสที่ที่เหมาะสม

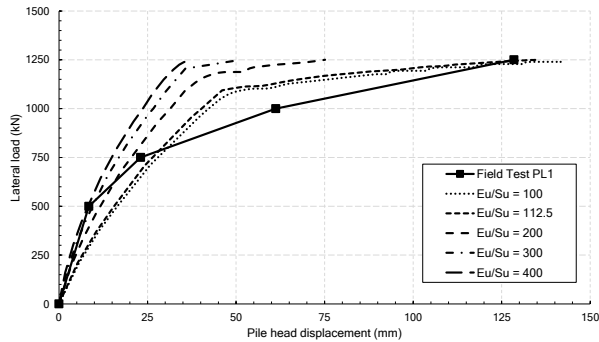
สำหรับสลิปในสที่ที่เหมาะสมสำหรับเสาเข็มเจาะเดี่ยวและเสาเข็มเจาะกลุ่มด้วยแบบจำลองดิน HSM ในรูปที่ 16 นั้นจะพบว่า ผลของการแปรผันสลิปในสของดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งปานกลางของแบบจำลองดิน HSM โดยใช้ fine mesh ได้ผลวิเคราะห์ในรูปของหน่วยแรงรวมแบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่ใช้ในเชิงวิศวกรรมออกแบบเสาเข็มในช่วงใช้งานที่ยังไม่เกิดการวิบัติ คือ E_u / S_u อยู่ในช่วงระหว่าง 200 – 300 ซึ่งอยู่ในช่วงเสาเข็มมีพฤติกรรมเชิงเส้นตรง ส่วนอีกกรณีใช้สำหรับศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มในภาพรวม คือ E_u / S_u เท่ากับ 112.5 ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้สลิปในสนี้ศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มต่อไป

5.3 พฤติกรรมเสาเข็มจากการวิเคราะห์โดย FEM

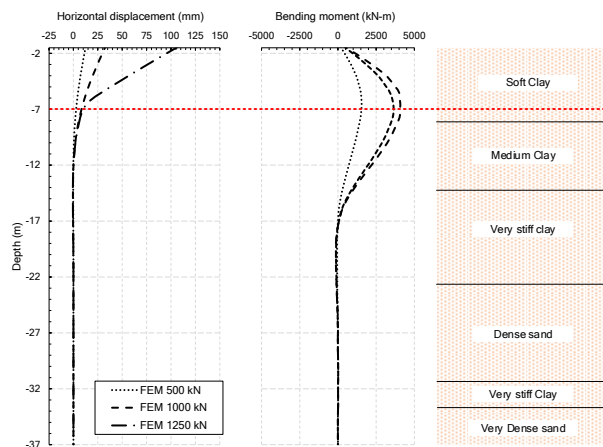
พฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยว เมื่อพิจารณาการโก่งตัวที่แปรผันกับความลึกในรูปที่ 17 ชี้ให้เห็นว่า การโก่งตัวของเสาเข็มจะเกิดขึ้นมากในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงดินเหนียวแข็งปานกลาง โมเมนต์ดัดสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ความลึกจากผิวดินลงไปประมาณ 7 เมตรและมีค่าเท่ากับ 4090 กิโลนิวตันที่แรงกระทำ 1250 กิโลนิวตัน

ส่วนพฤติกรรมของเสาเข็มกลุ่มแบบ F2 และ F3 โดยพิจารณาการโก่งตัวที่แปรผันตามความลึกในรูปที่ 18 สำหรับเสาเข็มกลุ่ม F2 และรูปที่ 19 สำหรับเสาเข็มกลุ่ม F3 ผลวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่าการโก่งตัวของเสาเข็มจะเกิดขึ้นมากในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงดินเหนียวแข็งปานกลางเช่นเดียวกับเสาเข็มเดี่ยว แต่โมเมนต์ดัดสูงสุดจะเกิดขึ้นสูงสุดจำนวน 2 ตำแหน่ง คือ บริเวณใต้ pile cap เนื่องจากหัวเสาเข็มในกลุ่มถูกยึดรั้งด้วย pile cap และอีกจุด คือ บริเวณความลึก 10 เมตรจากผิวดิน ตามลำดับ โดยขณะให้แรงกระทำด้านข้างเท่ากับ 4000 กิโลนิวตันนั้น เสาเข็มกลุ่ม F2 จะมีโมเมนต์ดัด

เกิดขึ้นสูงสุดเท่ากับ 3880 กิโลนิวตัน-เมตร ในขณะที่เสาเข็มกลุ่ม F3 จะมีโมเมนต์ดัดเกิดขึ้นสูงสุดเท่ากับ 2205 กิโลนิวตัน-เมตร สำหรับผลต่างของโมเมนต์ที่ต่างกันของเสาเข็มกลุ่ม F2 และ F3 ยังชี้ให้เห็นว่าเสาเข็มกลุ่ม F2 จะเข้าสู่ภาวะประลัยก่อนเสาเข็มในกลุ่ม F3



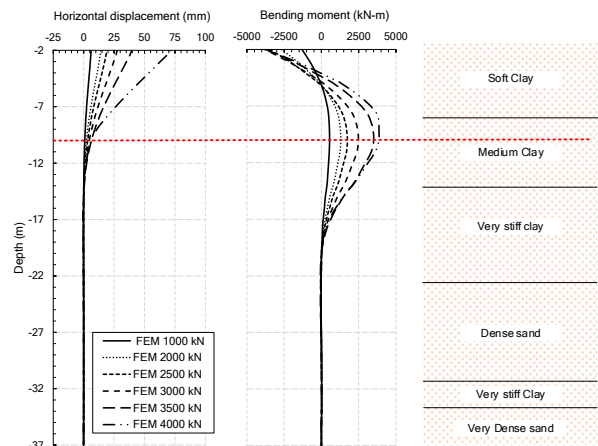
รูปที่ 16 ผลวิเคราะห์หาค่าสลิปในสของดินเหนียวอ่อนของ F1



รูปที่ 17 ผลวิเคราะห์การโก่งตัวและโมเมนต์ดัดของ F1

สำหรับพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มในชั้นดินกรุงเทพภายใต้แรงกระทำต่อเสาเข็มหนึ่งต้นสูงมากนั้น ผลวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับผลทดสอบในสนามนั้นยังขึ้นกับความละเอียดของ FEM mesh ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ในรูปที่ 20 และรูปที่ 21 ชี้ให้เห็นถึงผลของการเลือกใช้ความละเอียด FEM mesh สำหรับเสาเข็มเดี่ยว F1 และเสาเข็มกลุ่ม F2 ซึ่งผลของแรงกระทำที่สภาวะประลัยของเสาเข็มส่งผลถึงความละเอียด FEM mesh ที่ใช้ โดย fine mesh กับ medium mesh ให้ผลวิเคราะห์ที่เหมาะสมกับผลทดสอบในสนาม นอกจากนี้ในรูปที่ 21 จะเห็นได้ว่า fine mesh ให้ผลการจำลองการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม F1 สูงกว่าผลทดสอบในสนาม เนื่องจากมีตำแหน่งของ stress point ที่ไม่ตรงกับตำแหน่งที่มีความเค้นสูงสุดใสนาม การคำนวณจึงดำเนินไปอย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดการวิบัติซึ่งอิทธิพลของความละเอียด FEM mesh ที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้เสนอไว้ในงานวิจัยของ [9-11] สำหรับตารางที่ 7 และตารางที่ 8 ยังชี้ให้เห็นถึงความแตกต่างของผลวิเคราะห์ด้วยความละเอียด FEM mesh ที่แตกต่างกัน โดยผลวิเคราะห์ด้วย coarse mesh และ medium mesh สำหรับเสาเข็ม F1 ให้ผลวิเคราะห์ที่น้อยกว่าผลทดสอบในสนามประมาณ 100 มิลลิเมตร ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วย fine mesh ให้ผลวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนาม ส่วนเสาเข็มกลุ่ม F2 ให้ผลวิเคราะห์ด้วย fine mesh ที่มีแนวโน้มการเคลื่อนตัวสูงกว่าผลทดสอบในสนามมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วย coarse mesh ให้ผลวิเคราะห์ที่น้อยกว่าผลทดสอบในสนาม 32 มิลลิเมตร ส่วนการวิเคราะห์ด้วย medium mesh ให้ผลวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนามมากที่สุด จากผลของความแตกต่างของ FEM mesh ที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มนั้น ผู้วิจัยจึงได้เสนอแนะทางเลือกใช้ FEM mesh ในการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ผลวิเคราะห์ที่เหมาะสม โดย medium mesh นั้นมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์พฤติกรรมเสาเข็มที่อยู่ในช่วงที่เป็นเส้นตรงหรือเสาเข็มที่อยู่ในสภาวะใช้งาน ซึ่งควรมีแรงกระทำในสภาวะนี้ไม่เกินร้อยละ 40 ของแรงกระทำประลัยซึ่งเป็นการพิจารณาที่สัดส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 2.5

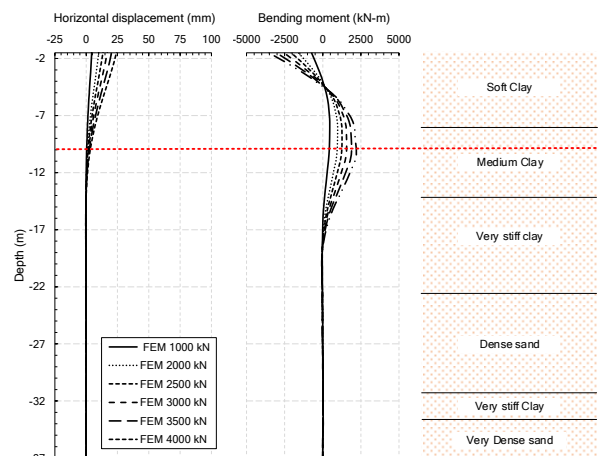


รูปที่ 18 ผลวิเคราะห์การโก่งตัวและโมเมนต์ดัดของเสาเข็ม F2

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบการจำลองความละเอียด mesh ของเสาเข็มเดี่ยว

Mesh type	Number of nodes	Number of elements	Max. horizontal disp. at load 1250 kN (mm)
Coarse	8391	5169	35.41
Medium	17079	10872	39.20
Fine	38299	25249	135.05

ส่วนเสาเข็มกลุ่ม F3 มีการโก่งตัวน้อยกว่าเสาเข็ม F1 และ F2 เนื่องจากแรงกระทำต่อต้นเสาเข็มต่ำมากและการยึดรั้งหัวเสาเข็มด้วย pile cap ในรูปที่ 22 เป็นผลวิเคราะห์เสาเข็ม F3 เห็นได้ว่าผลจากการวิเคราะห์ด้วย FEM นั้นจะให้ผลวิเคราะห์เชิงเส้นตรงเช่นเดียวกับเสาเข็มที่จำลองพฤติกรรมแบบอิลาสติกเนื่องจากเสาเข็มมีหน่วยแรงที่เกิดขึ้นไม่เกินหน่วยแรงครากของวัสดุเสาเข็ม

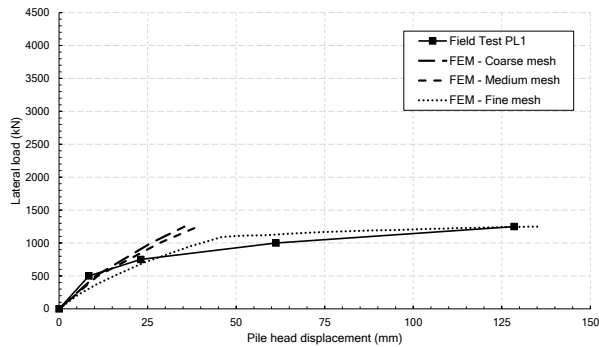


รูปที่ 19 ผลวิเคราะห์การโก่งตัวและโมเมนต์ดัดของเสาเข็ม F3

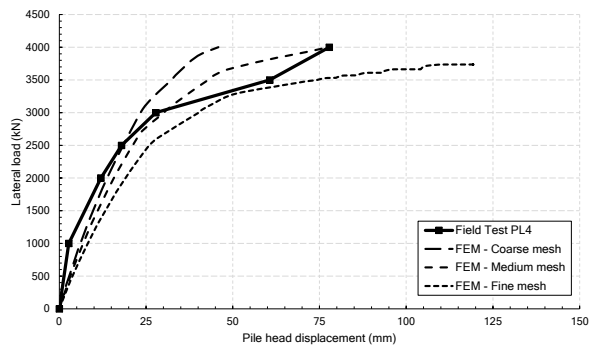
ตารางที่ 8 เปรียบเทียบการจำลองความละเอียด mesh ของเสาเข็มกลุ่ม F2

Mesh type	Number of nodes	Number of elements	Max. horizontal disp. at load 4000 kN (mm)
Coarse	13344	8314	45.85
Medium	22207	14206	77.84
Fine	43451	28585	119.97*

หมายเหตุ * คือ หยุดการคำนวณที่แรงกระทำ 3736 กิโลนิวตัน

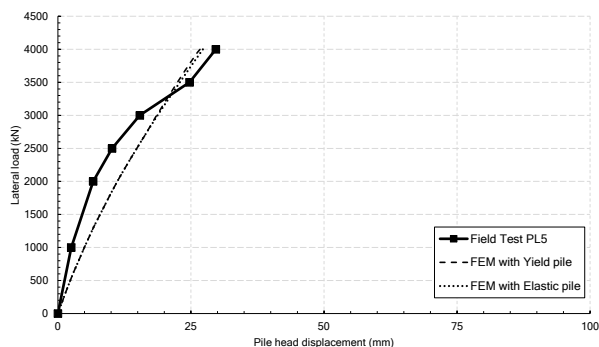


รูปที่ 20 ผลของความละเอียด mesh สำหรับการวิเคราะห์เสาเข็ม F1

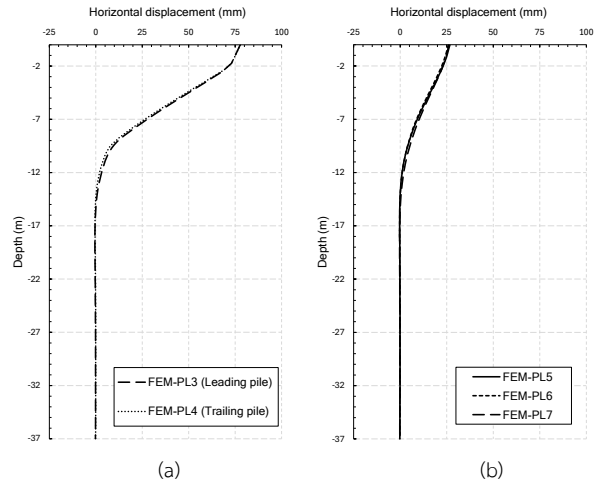


รูปที่ 21 ผลของความละเอียด mesh สำหรับการวิเคราะห์เสาเข็ม F2

สำหรับผลวิเคราะห์ของเสาเข็มกลุ่ม F2 และ F3 ซึ่งให้เห็นว่าอิทธิพลของการยึดรั้งหัวเสาเข็มด้วย pile cap นั้นส่งผลต่อการโก่งตัวของเสาเข็มเช่นเดียวกันกับเสาเข็มที่ทดสอบในสนาม นอกจากนี้ อิทธิพลของระยะห่างของเสาเข็มในกลุ่มที่มีระยะห่างกันเท่ากับ 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนั้น พบว่าผลวิเคราะห์ด้วย FEM สำหรับเสาเข็มกลุ่ม F2 และ F3 ในรูปที่ 23 ซึ่งให้เห็นว่าผลวิเคราะห์การโก่งตัวที่แปรผันกับความลึกนั้นไม่แสดงอิทธิพลของระยะห่างระหว่างเสาเข็มในกลุ่มที่ส่งผลให้เสาเข็มเกิดการโก่งตัวที่แตกต่างกัน

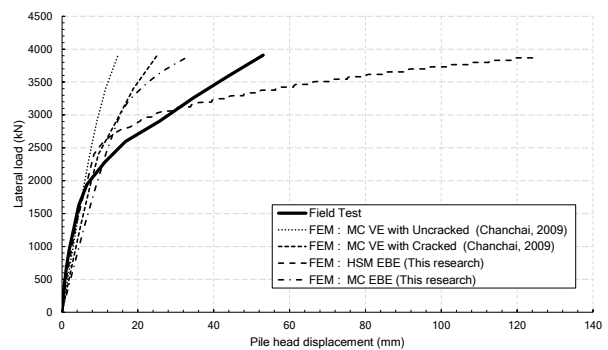


รูปที่ 22 เปรียบเทียบผลวิเคราะห์เสาเข็มกลุ่ม F3



รูปที่ 23 FEM mesh ที่ใช้ในการวิเคราะห์เสาเข็มกลุ่ม (a) F2 และ (b) F2

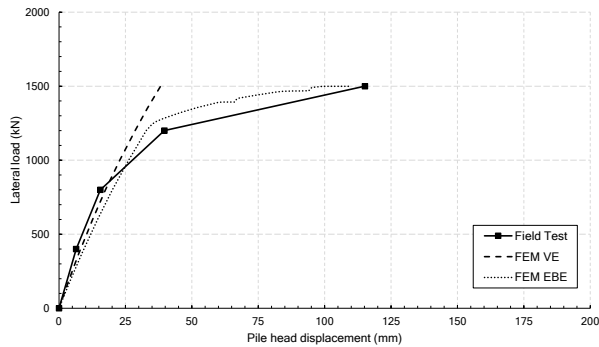
การวิเคราะห์เสาเข็มแบบเรีตรูปตัวที่ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติโดยจำลองเสาเข็มโดยใช้ EBE ที่แปลงพื้นที่จริงเป็นรัศมีเทียบเท่าของหน้าตัดวงกลม เมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบในสนามกับผลวิเคราะห์โดย VE กับแบบจำลองดิน MC ของงานวิจัย [6], และผลวิเคราะห์ด้วย EBE ในงานวิจัยนี้ ดังรูปที่ 24 ซึ่งให้เห็นว่าผลการจำลองเสาเข็มด้วย EBE ให้ผลวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนามมากขึ้นเมื่อเทียบกับงานวิจัยในอดีต [6] แต่เมื่อเสาเข็มรับแรงกระทำสูงมากที่แรงกระทำประมาณ 3000 ถึง 3500 กิโลนิวตันขึ้นไปนั้น ผลวิเคราะห์ให้ค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มที่ต่ำกว่าผลทดสอบในสนามมาก เนื่องจากพฤติกรรมของเสาเข็มที่สภาวะแรงกระทำดังกล่าวเข้าสู่สภาวะประลัย ซึ่งผลวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองดิน HSM นั้นจะให้ผลวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับการคำนวณด้วยแบบจำลองดิน MC ในช่วงที่เสาเข็มมีพฤติกรรมเชิงเส้นตรงในช่วงแรก ผลการกำหนดความเค้นครากใน EBE นั้นส่งผลให้เสาเข็มนั้นสามารถเกิดการครากได้เมื่อหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเกินหน่วยแรงคราก



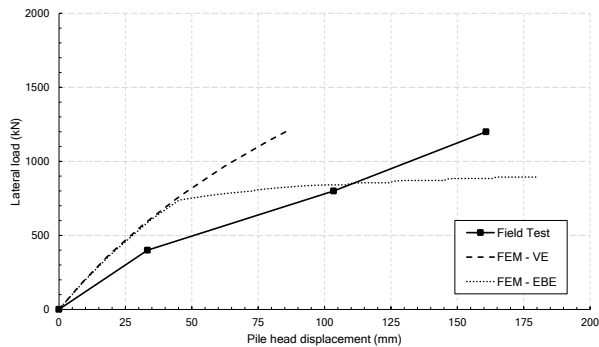
รูปที่ 24 เปรียบเทียบผลวิเคราะห์เสาเข็มแบบเรีตรูปตัวที่

ส่วนการวิเคราะห์เสาเข็มแบบเรีตขนาด 0.8 เมตร x 2 เมตร โดยให้แรงกระทำต่อผิวด้านแคบ 0.8 เมตร (RB-MU) ให้ผลวิเคราะห์ดังรูปที่ 25 และการให้แรงกระทำต่อผิวด้านกว้าง 2 เมตร (RB-MN) ให้ผลวิเคราะห์ดังรูปที่ 26 ซึ่งให้เห็นว่าผลการให้แรงกระทำต่อ RB-MJ จะเกิดการโก่งตัวของเสาเข็มน้อยกว่าการให้แรงกระทำต่อ RB-MN เนื่องจากผลของความแกร่งของหน้าตัดจากการที่มีโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดสูงกว่าการให้แรงกระทำในอีกด้านหนึ่ง โดย RB-MJ เกิดการครากที่แรงกระทำประมาณ 1250 กิโลนิวตัน ในขณะที่ RB-MN เกิดการครากที่แรงกระทำประมาณ 750 กิโลนิวตัน แต่พบว่าผลวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของ RB-MN มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่าง

ต่อเนื่องในขณะที่แรงกระทำเพิ่มขึ้นไม่มาก จึงได้พิจารณาหยุดการคำนวณที่แรงกระทำ 896 กิโลนิวตัน



รูปที่ 25 เปรียบเทียบผลวิเคราะห์เสาเข็มแบบเรีตรับแรงด้านแคบ 0.8 เมตร



รูปที่ 26 เปรียบเทียบผลวิเคราะห์เสาเข็มแบบเรีตรับแรงด้านกว้าง 2 เมตร

นอกจากนี้ผลวิเคราะห์ของ RB-MN ในรูปที่ 26 ยังพบอีกว่าการจำลองโดยให้แรงกระทำต่อ RB-MN นั้นให้ผลวิเคราะห์ที่ต่างจากผลทดสอบในสนาม เมื่อเทียบกับผลวิเคราะห์ของการให้แรงต่อ RB-MJ อาจมีเหตุผลมาจากความผิดปกติของผลทดสอบในสนามหรือผลจากการแปลงหน้าตัดจริงที่เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับ EBE

6. บทสรุป

ประสิทธิภาพของเสาเข็มภายใต้แรงกระทำด้านข้างจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ทั้งเสาเข็มของเสาเข็มในกลุ่ม และโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด ส่งผลให้เสาเข็มกลุ่มแบบ 2 ต้น, กลุ่มแบบ 3 ต้น และเสาเข็มแบบเรีตรูปตัวทีนั้นมีประสิทธิภาพสูงที่สุด ส่วนการวิเคราะห์เสาเข็มโดยวิธี FEM ที่จำลองเสาเข็มด้วย EBE โดยแบบจำลองวัสดุแบบ elastoplastic ที่ให้ผลทดสอบใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนามด้วยแบบจำลองดิน HSM ที่ใช้ในด้านวิศวกรรมการออกแบบในช่วงเสาเข็มยังไม่เกิดการวิบัติที่สัดส่วนลดถัก 2.5 หรือที่แรงกระทำประมาณร้อยละ 40 ของแรงกระทำประลัย คือ E_u / S_u อยู่ระหว่าง 200 – 300 ซึ่งสถิติที่เสนอนี้จะใช้ในกรณีที่ไม่มีการทดสอบหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองดิน HSM ในห้องปฏิบัติโดยตรง ส่วนผลวิเคราะห์เสาเข็มกลุ่มนั้นมีการโก่งตัวของเสาเข็มแต่ละต้นใกล้เคียงกันทุกต้นเนื่องจากมีระยะห่างระหว่างเสาเข็มแต่เพียงพอและผลจากความละเอียดของการจำลองเชิงตัวเลข ส่วนพฤติกรรมของเสาเข็มนั้นจะโก่งตัวมากในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงดินเหนียวแข็งปานกลาง โดยผลวิเคราะห์ด้วย FEM นั้นให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนามในช่วงที่เสาเข็มมีพฤติกรรมเชิงเส้นตรง และผลของความละเอียดของ FEM mesh นั้นมีผลต่อผล

วิเคราะห์ งานวิจัยนี้เสนอว่า medium mesh สามารถใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มในช่วงพฤติกรรมเชิงเส้นตรงที่สัดส่วนลดถักดังที่กล่าวไปก่อนหน้านี้ได้ ส่วนการวิเคราะห์แบบเรีตซึ่งมีใช้หน้าตัดวงกลมที่จำลองด้วย EBE เพื่อนำผลวิเคราะห์ไปใช้ในเชิงวิศวกรรมนั้นอาจต้องมีการศึกษาอิทธิพลจากการแปลงหน้าตัดด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Cox, W.R., Dixon, D.A. and Murphy, B.S., 1984. Lateral-load tests on 25.4-mm (1-in.) diameter piles in very soft clay in side-by-side and in-line groups. In Laterally loaded deep foundations: Analysis and performance. ASTM International.
- [2] Wang, S.T. and Reese, L.C., 1986. Study of design method for vertical drilled shaft retaining walls. Final report (No. FHWA/TX-87/44+ 415-2F).
- [3] Shibata, T., Yashima, A. and Kimura, M., 1989. Model tests and analyses of laterally loaded pile groups. Soils and foundations, 29(1), pp.31-44.
- [4] Wachiraprakarnpong, A., 1993. Performance of grouted and non-grouted bored piles in Bangkok subsoils. Master of Engineering. Thesis, Asian Institute of Technology, Thailand.
- [5] Thipsunontha, S., Sramoon, W. and Submanee Wong, C., 2016. Behavior of Soil-Pile Interaction of Barrette Pile under Lateral Loading. Engineering Transactions: A Research Publication of Mahanakorn University of Technology, 19(1), pp.39-47.
- [6] Submanee Wong, C., 2009. Behavior of vertical and lateral load on T-Shape barrette and bored piles. Doctoral dissertation, Chulalongkorn University, Thailand
- [7] Likitlersuang, S., Chheng, C., Surarak, C. and Balasubramaniam, A., 2018. Strength and stiffness parameters of Bangkok clays for finite element analysis. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, 49(2), pp.150-156.
- [8] Wang, C.K. and Salmon, C.G., 1979. Reinforced concrete design. 6th edition. Wiley.
- [9] Koutsabeloulis, N.C. and Griffiths, D.V., 1989. Numerical modelling of the trap door problem. Geotechnique, 39(1), pp.77-89.
- [10] De Borst, R. and Vermeer, P.A., 1984. Possibilities and limitations of finite elements for limit analysis. Geotechnique, 34(2), pp.199-210.
- [11] Dao, T.P.T., 2011. Validation of PLAXIS embedded piles for lateral loading. Master of Science Thesis, Delft University of Technology, Netherlands.