การศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มที่รับแรงด้านข้างแบบสถิตในชั้นดินกรุงเทพด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ

Studying of the Behavior of Single Pile and Group Pile Under Static Laterally Load in Bangkok Subsoils with 3D Finite Element Method

กิติศักดิ์ แดงทอง (Kitisak Daengthong)[1]* ดร.พรพจน์ ตันเส็ง (Dr.Pornpot Tanseng)**

(Received: *January 17, 2025*; Revised: *April 28, 2025*; Accepted: *April 30, 2025*)

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มที่รับแรงด้านข้างแบบสถิตในชั้นดินกรุงเทพ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มที่รับแรงด้านข้างขนาดใหญ่ ทั้งเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มจากการทดสอบเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพ [1] และหาสติฟเนสของแบบจำลองดิน Hardening soil model ที่เหมาะสมโดยเทียบกับผลทดสอบในสนาม การจำลองเสาเข็มใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติด้วยซอฟต์แวร์ PLAXIS 3D ผลการศึกษาพบว่าสติฟเนสของหน่วยแรงรวมที่แปลงมาจากหน่วยแรงประสิทธิผลของดินสำหรับใช้ในเชิงวิศวกรรมสำหรับการออกแบบเสาเข็มในช่วงการใช้งานที่ยังไม่วิบัติ คือ E_u / S_u อยู่ในช่วง 200 - 300 การจำลองเสาเข็มด้วยแบบจำลอง elastoplastic โดยใช้โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแตกร้าวร่วมกับโมเมนต์ดัดประลัยทำให้ตำแหน่งที่เกิดโมเมนต์ดัดในเสาเข็มสูงสุดเท่ากับโมเมนต์ดัดประลัยในกรณีของเสาเข็มเดี่ยวซึ่งสอดคล้องกับการโก่งตัวของเสาเข็มที่ได้จากการวัดด้วย inclinometer และอิทธิพลของความละเอียดของ FEM mesh ที่ใช้ในการวิเคราะห์ยังส่งผลต่อพฤติกรรมของเสาเข็มในการจำลองอีกด้วย

ABSTRACT

This article discusses the behavior of single piles and pile groups under static lateral loading in Bangkok subsoils. The objective is to investigate the behavior of piles subjected to large lateral loads, focusing on single piles and pile groups based on pile test data in Bangkok subsoils [1]. The study also aims to identify the appropriate stiffness parameters for the hardening soil model, referencing field test results. A 3D finite element method using PLAXIS 3D software. The findings reveal that the total stiffness equivalent to the effective stress stiffness of the soil in geotechnical engineering for engineering design of piles under service load conditions without failure is E_u / S_u in the range of 200 –300. Pile simulations using an elastoplastic model, incorporating the cracked-section moment of inertia and the ultimate bending moment, indicate that the location of the maximum bending moment in the pile matches the ultimate bending moment for single piles. This is consistent with pile deflection measured from inclinometer data. Additionally, the resolution of the FEM mesh used in the simulations significantly affects the pile behavior in the modeling.

คำสำคัญ: วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เสาเข็มรับแรงด้านข้าง ชั้นดินกรุงเทพ

Keywords: Finite element method, Lateral loaded pile, Bangkok subsoils

[1] *Corresponding author: Kitisak.D@grad.sut.ac.th*

**นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี*
Student, Master of Engineering Program in Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

***ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี*
Assistant Professor, School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

บทนำ

ปัจจุบันความต้องการโครงสร้างสาธารณูปโภคและที่อยู่อาศัยในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลมากขึ้นเนื่องจากการขยายตัวของเมืองในพื้นที่อันจำกัด ตัวอย่างโครงสร้างเหล่านี้ได้แก่ อาคารสูง ทางยกระดับสำหรับรถไฟและรถยนต์ และสะพาน เป็นต้น โครงสร้างเหล่านี้นอกจากจะต้องรับแรงในแนวดิ่งได้แล้วจะต้องออกแบบให้รับแรงกระทำด้านข้างที่อาจเกิดจากแรงลม แรงแผ่นดินไหว และแรงเนื่องจากการเบรกของยานพาหนะได้ด้วย ซึ่งแรงที่กระทำต่อโครงสร้างส่วนบนนี้ต้องถ่ายลงสู่ฐานรากที่เป็นเสาเข็ม เนื่องจากสภาพชั้นดินเหนียวกรุงเทพส่วนบนลึกประมาณ 10-18 เมตร เป็นชั้นดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนต่ำจึงต้องใช้เสาเข็มยาวเพื่อถ่ายแรงกระทำไปสู่ชั้นดินลึกที่มีกำลังสูงกว่า ฐานรากส่วนใหญ่ที่ใช้เป็นฐานรากเสาเข็มกลุ่มและยึดรั้งไว้ด้วย pile cap การคำนวณกำลังต้านทานแรงกระทำด้านข้างของเสาเข็มในอดีตใช้สมการเชิงทฤษฎี [2] ที่ต้องใช้สมมติฐานบางประการ เช่น ชั้นดินต้องเป็นชนิดเดียวกันซึ่งไม่ตรงกับสภาพความเป็นจริงและไม่สามารถคำนวณการเคลื่อนตัวของเสาเข็มที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงได้ งานวิจัยกำลังรับแรงกระทำด้านข้างของเสาเข็มส่วนใหญ่ใช้การทดสอบกับแบบจำลองย่อส่วนกับเสาเข็มที่ทำจากเหล็กและพลาสติกในห้องปฏิบัติการ ผลวิจัยพบว่าเสาเข็มในกลุ่มที่จัดเรียงกลุ่มเสาเข็มตามแนวแรง (in-line) และตั้งฉากแนวแรง (side-by-side) ต้องมีระยะห่างระหว่างเสาเข็มอย่างน้อย 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง จึงจะทำให้พฤติกรรมของเสาเข็มกลุ่มใกล้เคียงกับเสาเข็มเดี่ยว [3-5] งานวิจัยในห้องปฏิบัติการมีข้อจำกัดในการนำไปใช้เนื่องจากผลของการย่อส่วนที่มีต่อหน่วยแรงในวัสดุ ซึ่งนำไปสู่งานวิจัยพฤติกรรมของเสาเข็มจริงในสนามที่ส่วนใหญ่เป็นการทดสอบเสาเข็มเดี่ยว เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการทดสอบที่ค่อนข้างสูง มีงานวิจัยการทดสอบเสาเข็มรับแรงด้านข้างในชั้นดินกรุงเทพที่เป็นเสาเข็มเจาะกลมและเสาเข็มแบบเร็ตภาพตัวทีขนาดใหญ่ [6] และมีการรายงานพฤติกรรมของการรับแรงด้านข้างของเสาเข็มแบบเร็ตขนาดใหญ่ที่ใช้รับเสาสถานีรถไฟฟ้าสายสีเขียวในชั้นดินกรุงเทพ [7] สำหรับการทดสอบฐานรากเสาเข็มกลุ่มที่เป็นเสาเข็มขนาดใหญ่ในชั้นดินกรุงเทพมีเพียงงานวิจัยพฤติกรรมการรับแรงด้านข้างของเสาเข็มเจาะเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ในชั้นดินกรุงเทพ โดยทำการทดสอบเสาเข็มกลุ่มแบบ 2 ต้น (F2) ออกแรงดันโดยใช้เสาเข็มกลุ่มแบบ 3 ต้น (F3) ทำให้เกิดแรงปฏิกิริยาซึ่งกันและกัน ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวยังได้ทดสอบเสาเข็มเจาะเดี่ยวเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตรจนกระทั่งถึงสภาวะวิบัติด้วย [1] และยังมีงานวิจัยอีกแนวทางหนึ่งเป็นการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มโดยการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้ซอฟต์แวร์ PLAXIS 3D ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงด้านข้างของเสาเข็มกลมและแบบเร็ตรูปตัวทีกับแบบจำลองดิน Mohr-Coulomb และได้พิจารณาถึงการแตกร้าวของหน้าตัดเมื่อโมเมนต์ดัดเกินโมเมนต์แตกร้าว โดยใช้การลดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของ volume element ที่ใช้จำลองเสาเข็ม [6] มีงานวิจัยเสนอค่า p-y curve ของเสาเข็ม โดยใช้การคำนวณจากสมการที่เสนอโดย Matlock [8], [1] และมีการเสนอ p-y curve ของชั้นดินเหนียวกรุงเทพโดยการวิเคราะห์กลับจากการเคลื่อนตัวของเสาเข็มจากผลทดสอบในสนามโดยใช้ซอฟต์แวร์ Lpile [7] จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่าการทดสอบเสาเข็มรับแรงด้านข้างในชั้นดินเหนียวกรุงเทพนั้นพบได้น้อยมากเมื่อเทียบกับการทดสอบเสาเข็มรับแรงในแนวดิ่ง เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการทดสอบสูง และการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มในอดีตนิยมใช้วิธี p-y curve ซึ่งเป็นการศึกษาเสาเข็มเหล็กเดี่ยวในชั้นดินเหนียว [8] โดยวัสดุดังกล่าวไม่เกิดการแตกร้าวเหมือนคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงกระทำสูงมาก และในทางปฏิบัติเสาเข็มนิยมใช้งานในลักษณะเป็นเสาเข็มกลุ่ม ส่งผลให้วิธี p-y curve ไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมที่มีความซับซ้อนดังกล่าวได้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งไปที่การศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ที่เป็นเสาเข็มกลุ่มและเสาเข็มเดี่ยวโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ และใช้แบบจำลองดินที่มีความสามารถจำลองสติฟเนสของดินที่ขึ้นกับระดับความเค้นได้ อีกทั้งยังใช้แบบจำลองเสาเข็มที่ลดเวลาในการคำนวณตามงานวิจัยเปรียบเทียบการจำลองเสาเข็มในซอฟต์แวร์ PLAXIS 3D โดยใช้ embedded beam element (EBE) และ volume element (VE) [9] ซึ่ง EBE

นี้สามารถกำหนดพฤติกรรมการครากของวัสดุเสาเข็มได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของฐานรากที่รับแรงด้านข้างในโครงการที่มีความซับซ้อนต่อไป

วัตถุประสงค์การวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มที่รับแรงด้านข้างจากข้อมูลผลทดสอบเสาเข็มจริง และศึกษาหาค่าสติฟเนสของแบบจำลองดิน Hardening soil model ของชั้นดินเหนียวกรุงเทพที่เหมาะสมที่จะใช้ในการวิเคราะห์ฐานรากที่รับแรงกระทำด้านข้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ

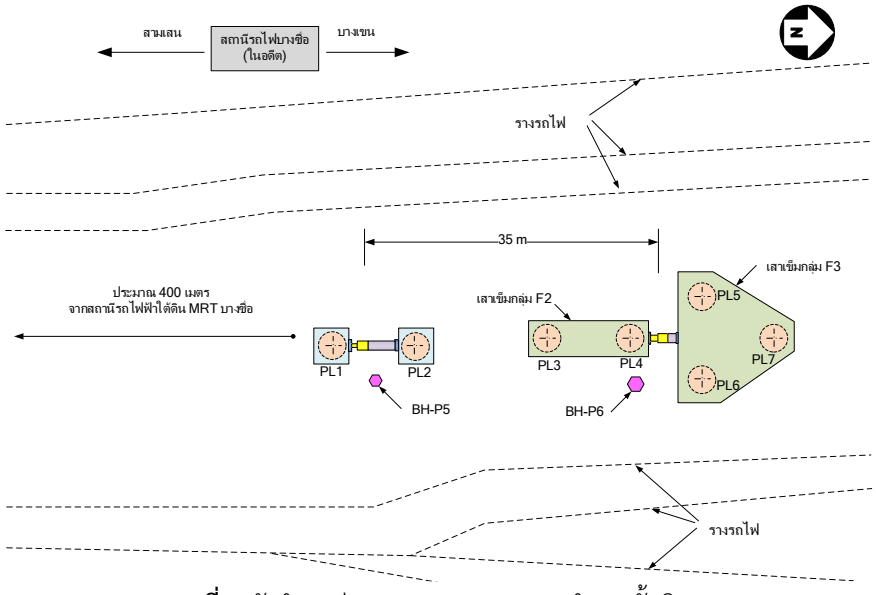
วิธีการวิจัย

1) รวบรวมข้อมูลการทดสอบเสาเข็มในสนามและข้อมูลชั้นดินจากงานวิจัยที่ผ่านมา

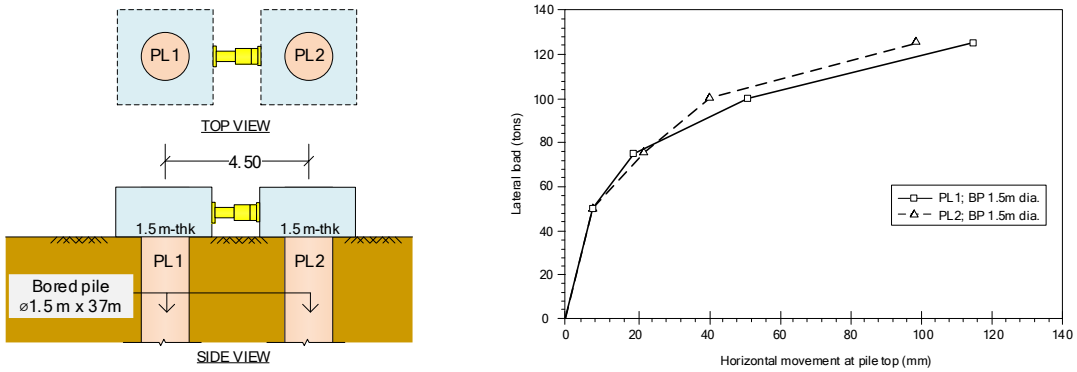
งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจากงานวิจัยที่ได้รายงานผลทดสอบฐานรากเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่รับแรงด้านข้างในสนามเมื่อปี ค.ศ. 1993 [1] ตำแหน่งการทดสอบนี้ตั้งอยู่ที่เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร ซึ่งอยู่ในพื้นที่ชุมทางรถไฟบางซื่อในอดีตก่อนที่จะกลายมาเป็นสถานีกลางบางซื่อในปัจจุบัน สำหรับตำแหน่งโดยประมาณของการทดสอบนั้นอยู่ห่างจากสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน MRT บางซื่อประมาณ 400 เมตรไปทางทิศเหนือดังภาพที่ 1 ในขณะทดสอบนั้นพื้นที่เป็นพื้นที่โล่งอยู่ระหว่างรางรถไฟ ซึ่งในงานวิจัยมีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ยาว 37 เมตร จำนวน 7 ต้น โดยเสาเข็มหมายเลข PL1 และ PL2 ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยว (F1) เสาเข็ม PL3 และ PL4 เป็นฐานรากเสาเข็มกลุ่ม 2 ต้น (F2) ส่วนเสาเข็ม PL5, PL6 และ PL7 เป็นฐานรากเสาเข็มกลุ่ม 3 ต้น (F3) ก่อนการก่อสร้างเสาเข็มทดสอบมีการเจาะสำรวจสภาพชั้นดินจำนวน 2 หลุม โดยหลุมเจาะ BH-P5 อยู่ใกล้กับจุดทดสอบเสาเข็มเดี่ยว และหลุมเจาะ BH-P6 อยู่ใกล้กับจุดทดสอบเสาเข็มกลุ่ม การทดสอบแบ่งเป็น 2 กรณี ได้แก่ (1) เสาเข็มเดี่ยว PL1 ดันกับ PL2 และ (2) เสาเข็มกลุ่ม F2 ดันกับเสาเข็มกลุ่ม F3 โดยการทดสอบให้แรงกระทำต่อเฟรมทดสอบโดยใช้ hydraulic jack ที่วัดแรงกระทำโดย load cell ค่าเคลื่อนตัวของเสาเข็มวัดโดย dial gauge โดยเสาเข็มได้ติดตั้งท่อ inclinometer ไว้ตลอดความยาวเสาเข็มเพื่อวัดการโก่งตัวในระหว่างให้แรงกระทำ เสาเข็มทดสอบทุกต้นใช้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดประลัย 40 เมกะปาสคัลที่อายุ 28 วัน ใช้เหล็กเสริมกำลังคราก 390 เมกะปาสคัล โดยเหล็กเสริมตามยาวใช้ DB32 จำนวน 44 เส้น คิดเป็นร้อยละ 2 ของหน้าตัดเสาเข็ม และใช้เหล็ก DB10 เป็นปลอกเกลียว

การทดสอบเสาเข็มเดี่ยวให้แรงกระทำระหว่างเสาเข็ม PL1 และ PL2 เท่ากับ 500, 750, 1000, และ 1250 กิโลนิวตัน ภาพที่ 2(a) เป็นภาพตัดขวางของการทดสอบ และภาพที่ 2(b) เป็นผลทดสอบที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของเสาเข็มและแรงกระทำ ส่วนการทดสอบเสาเข็มกลุ่ม F2 ดันกับเสาเข็มกลุ่ม F3 มีการให้แรงกระทำขนาดขนาด 500, 700, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 และ 4000 กิโลนิวตัน ภาพที่ 3(a) เป็นภาพตัดการทดสอบและภาพที่ 3(b) เป็นผลทดสอบที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของเสาเข็มและแรงกระทำ

สภาพชั้นดินของโครงการทดสอบเสาเข็มประกอบไปด้วยเปลือกดินหนา 1 เมตร วางอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 7 เมตร ถัดลงไปเป็นชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางหนา 6 เมตร จากนั้นเป็นชั้นดินเหนียวแข็งมากสลับกับชั้นดินทรายจนถึงความลึก 50 เมตร กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวได้จากการทดสอบกำลังรับเฉือนแบบ unconsolidated undrained triaxial test (UU) และ field vane shear test (FV) ส่วนทรายได้ทำการทดสอบ standard penetration test (SPT-N) ดังในภาพที่ 4

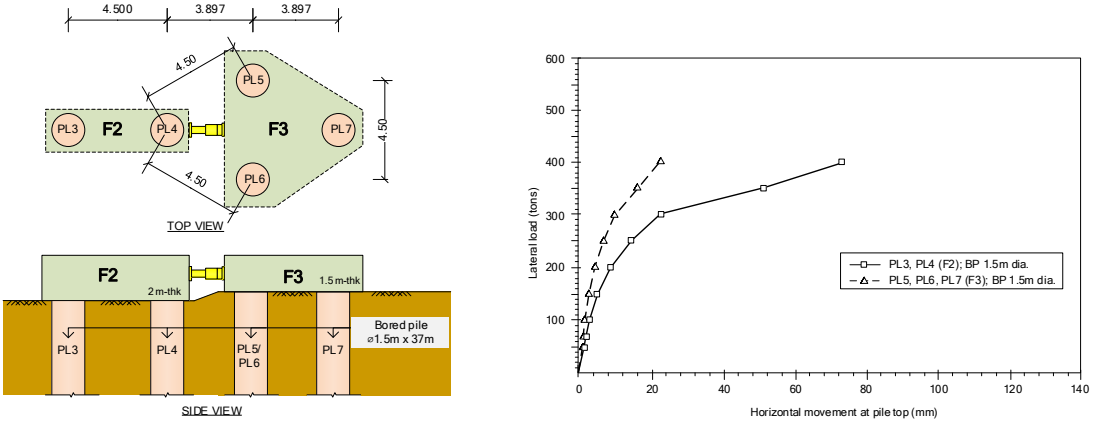


ภาพที่ 1 ผังตำแหน่งทดสอบและหลุมเจาะสำรวจชั้นดิน [1]



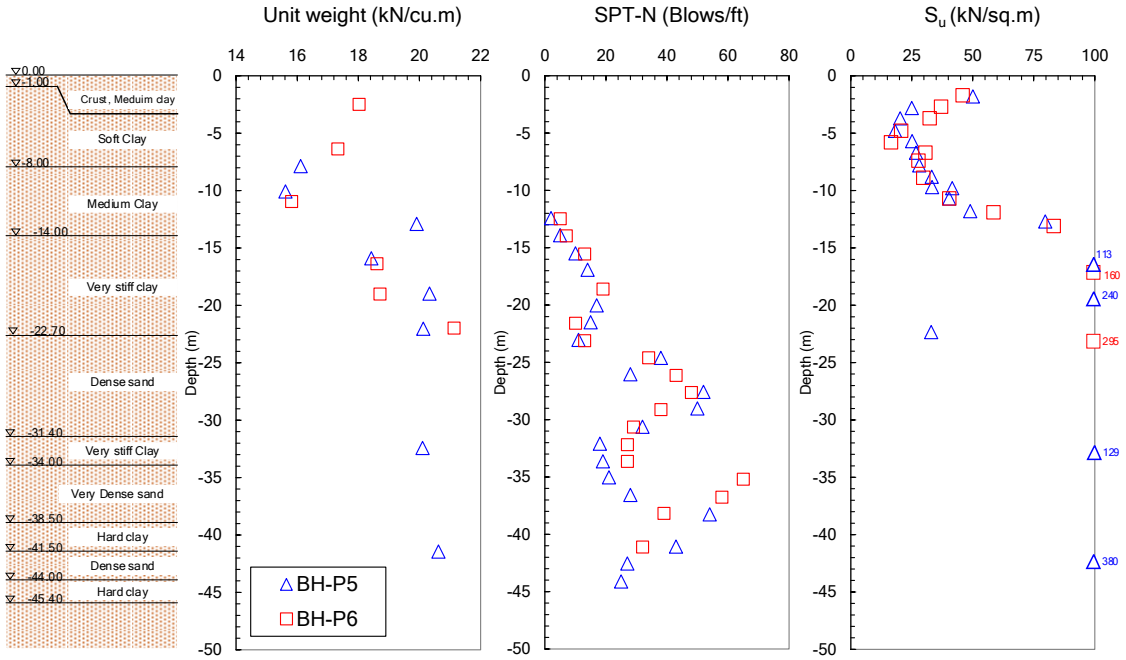
(a) (b)

ภาพที่ 2 การทดสอบเสาเข็มเดี่ยว PL1 ดันกับ PL2 **(a)** ภาพตัดการทดสอบ และ **(b)** ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็มกับแรงกระทำ [1]



(a) (b)

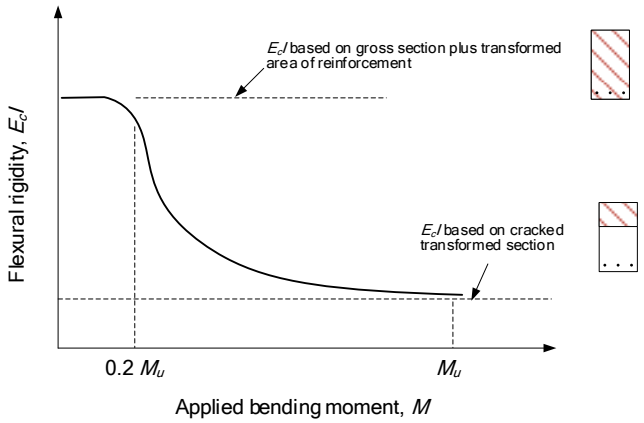
ภาพที่ 3 การทดสอบเสาเข็มกลุ่ม F2 ดันกับ F3 **(a)** ภาพตัดการทดสอบ และ **(b)** ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็มกับแรงกระทำ [1]



ภาพที่ 4 สภาพชั้นดินและสมบัติของชั้นดินบริเวณพื้นที่ทดสอบเสาเข็ม [1]

2) การจำลองเสาเข็มรับแรงด้านข้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติ

การจำลองเสาเข็มที่รับแรงกระทำด้านข้างโดยใช้ซอฟต์แวร์ PLAXIS 3D ทำการจำลองชั้นดินโดยใช้เอลิเมนต์แบบ 10-node tetrahedral โดยแบบจำลองดิน Hardening soil model (HSM) สำหรับชั้นดินส่วนบนที่เป็นชั้นดินเหนียวอ่อนถึงชั้นดินแข็งลึก 22.7 เมตร เนื่องจากแบบจำลองดิน HSM สามารถแปรผันสติฟเนสของดินตามความเค้นที่เกิดขึ้นในดินซึ่งมีความสอดคล้องกับพฤติกรรมของเสาเข็มที่รับแรงกระทำแตกต่างกัน และการวิเคราะห์เป็นแบบไม่ระบายน้ำ เนื่องจากระยะเวลาทดสอบสั้นทำให้แรงดันน้ำส่วนเกินในชั้นดินเหนียวยังคงอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ส่วนการจำลองชั้นดินส่วนที่ลึกกว่า 22.7 เมตร ใช้แบบจำลองดิน Mohr-Coulomb (MC) โดยโครงสร้างเสาเข็มใช้เอลิเมนต์แบบ EBE ซึ่งเป็นเอลิเมนต์ที่พัฒนาขึ้นสำหรับเสาเข็มที่ประกอบไปด้วย beam element ที่ทำให้ดินรอบเอลิเมนต์มีปริมาตรคิดเป็นขอบเขตอิลาสติกที่มีรัศมีเทียบเท่าเป็น $R_{eq} = \max\{\sqrt{A/\pi}, \sqrt{2(I_2+I_3)/A}\}$ ที่ทำให้พฤติกรรมของ EBE เหมือนกับ VE และในแบบจำลองใช้ interface element ที่เป็น contact model แบบ Coulomb friction เพื่อจำลองการแยกหรือเลื่อนไถลออกจากกันระหว่างจุดต่อของ EBE กับเอลิเมนต์ที่ใช้จำลองดิน โดยกำหนด strength reduction factor ด้วย interface reduction factor (R_{inter}) เท่ากับ 0.7 สำหรับชั้นดินกรุงเทพ [10] โดยคำนวณร่วมกับ cohesion (c') และ internal friction angle (φ') ในแต่ละชั้นดิน และกำหนด axial skin resistance ใน EBE เป็นแบบ layer dependence เหตุผลที่เลือกใช้การจำลอง interface นั้นเพื่อให้ EBE มีปฏิสัมพันธ์กับดินเหมือนกัน VE และเพื่อให้ผลวิเคราะห์สอดคล้องกับความเป็นจริง หากไม่มีการจำลอง interface element จะทำให้ผลวิเคราะห์จุดต่อของ soil element เคลื่อนไปกับจุดต่อของ pile element ซึ่งไม่ตรงกับลักษณะกายภาพความเป็นจริง นอกจากนี้พฤติกรรมของเสาเข็มทดสอบที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็กจะเกิดการแตกร้าวเมื่อโมเมนต์ดัดเกินกว่าโมเมนต์แตกร้าวของคอนกรีต โดยการแตกร้าวจะเริ่มเมื่อโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นเท่ากับร้อยละ 20 ของโมเมนต์ดัดประลัยของหน้าตัด จากนั้นความแกร่งจะแปรผกผันกับโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดจนคงที่เมื่อโมเมนต์ดัดถึงจุดประลัย [11] ดังในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแกร่งกับโมเมนต์ดัดของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็ก [11]

สำหรับหน้าตัดแตกร้าวของเสาเข็มที่แปรผกผันกับโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจะกำหนดโดยใช้แบบจำลองวัสดุแบบ elastoplastic โดยเสาเข็มจะมีพฤติกรรมแบบอิลาสติกเมื่อหน่วยแรงในเสาเข็มต่ำกว่าหน่วยแรงคราก (yield stress, σ_y) และจะมีพฤติกรรมเป็นพลาสติกอย่างสมบูรณ์ (perfectly plastic) เมื่อหน่วยแรงในเสาเข็มเท่ากับหน่วยแรงคราก การคำนวณหน่วยแรงครากใช้โมเมนต์พลาสติกของหน้าตัด (M_p) ซึ่งใช้ค่าเท่ากับโมเมนต์ดัดประลัย, ระยะของผิวรับแรงอัดถึงแกนสะเทิน (c) และโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแตกร้าว (I_{cr}) ดังสมการ $\sigma_y = M_p c / I_{cr}$ ซึ่งการคำนวณโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแตกร้าว (I_{cr}) สามารถคำนวณโดยการแปลงหน้าตัดเหล็กเสริมเป็นคอนกรีตโดยอัตราส่วนโมดูลาร์ เนื่องจากเหล็กเสริมจัดเรียงกระจายรอบรูปวงกลม จึงพิจารณาการจัดเรียงเหล็กเสริมเป็นเส้นวงแหวน จากนั้นใช้หลักการความสมดุลระหว่างพื้นที่รับแรงอัดจากคอนกรีตกับพื้นที่รับแรงดึงจากเหล็กเสริม อัตราส่วนของโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดที่แตกร้าวต่อหน้าตัดที่ไม่แตกร้าวเท่ากับร้อยละ 47.5 และโมเมนต์ครากของเสาเข็มทดสอบมีค่าเป็น 7200 กิโลนิวตัน-เมตร ดังนั้นหน่วยแรงครากสำหรับใช้กับ EBE มีค่าเท่ากับ 12900 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร สำหรับ pile cap จำลองโดยใช้เอลิเมนต์ VE แบบ 10-node tetrahedral ใช้แบบจำลองวัสดุแบบ linear elastic การให้แรงกระทำทดสอบใช้เอลิเมนต์แบบ node-to-node anchor (N-N anchor) แล้วกำหนดแรงกระทำเป็นแรงอัด prestress ที่มีค่าเท่ากับแรงที่อ่านได้จาก load cell และเพื่อไม่ใช้เกิดหน่วยแรงเข้มข้นตรงจุดต่อระหว่าง N-N anchor กับ pile cap จึงได้จำลองแผ่นรองเหล็กที่ใช้จริงโดยใช้เอลิเมนต์ชนิด plate element เชื่อมระหว่าง pile cap กับ N-N anchor สำหรับตารางที่ 1 เป็นคุณสมบัติของคอนกรีตเสาเข็มและแผ่นเหล็ก ตารางที่ 2 เป็นพารามิเตอร์ของแบบจำลองดิน HSM สำหรับใช้ในการจำลองชั้นดินที่มีความลึกตั้งแต่ผิวดินจนถึง 22.7 เมตร และตารางที่ 3 เป็นพารามิเตอร์ของแบบจำลองดิน MC สำหรับใช้ในการจำลองชั้นดินที่มีความลึกมากกว่า 22.7 เมตรลงไป สำหรับภาพที่ 6 และภาพที่ 7 เป็น FEM mesh ที่ใช้จำลองการทดสอบเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มตามลำดับ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของคอนกรีตเสาเข็มและแผ่นเหล็กกระจายแรง

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

สำหรับสติฟเนสที่ใช้กับแบบจำลองดิน HSM ดังตารางที่ 2 สำหรับดินเหนียวอ่อนและเหนียวปานกลางเป็นสัดส่วนสติฟเนสในเทอมของหน่วยแรงรวม E_u / S_u เท่ากับ 100 และแปรผันสัดส่วนดังกล่าวเพิ่มเป็น 112.5, 200, 300 และ 400 เพื่อการวิเคราะห์กลับหาสติฟเนสของชั้นดินเหนียวที่เหมาะสม ส่วนสติฟเนสของดินเหนียวแข็งคงไว้ที่ E_u / S_u เท่ากับ 125 เพื่อลดตัวแปรในการศึกษาในชั้นดินที่เสาเข็มมีการโก่งตัวน้อยมาก โดยสติฟเนสสำหรับชั้นดินเหนียวกรุงเทพในงานวิจัยนี้จะใช้แนวทางจากงานวิจัยของ [12] ซึ่งได้จากการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของกำแพง diaphragm wall โครงการรถไฟฟ้าใต้ดินในชั้นดินกรุงเทพ เนื่องจากไม่มีการทดสอบดินบริเวณทดสอบเสาเข็มเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองดิน HSM โดยตรง

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของแบบจำลองดิน HSM ที่ความลึกจากผิวดินถึง 22.7 เมตร

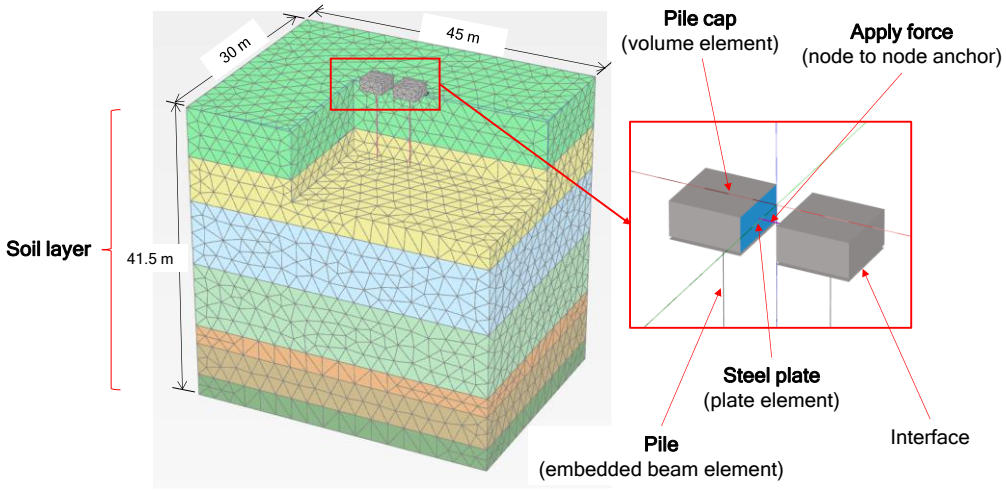
Soil	γ_t (kN/m^3)	c' (kN/m^2)	φ' (degree)	E_{50}^{ref} (kN/m^2)	E_{oed}^{ref} (kN/m^2)	E_{ur}^{ref} (kN/m^2)	m	ν_{ur}
Soft clay	17	1*	23*	1600	1600	16000	1	0.2
Medium clay	16.5	10*	25*	3200	3200	9600	1	0.2
Very stiff clay	18.5	25*	26*	16500	16500	49500	1	0.2

หมายเหตุ * คือ ค่าพารามิเตอร์ประสิทธิผลของ [12]

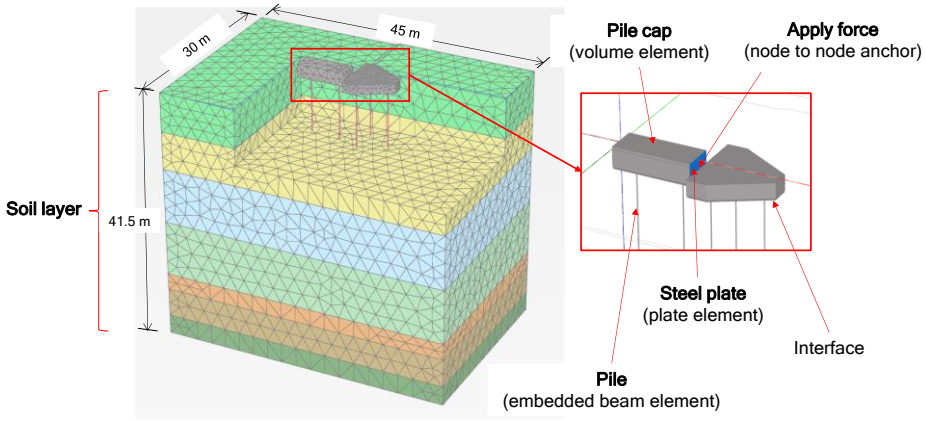
ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของแบบจำลองดิน MC ที่ความลึก 22.7 เมตรลงไป

Soil	γ_t (kN/m^3)	S_u (kN/m^2)	φ' (degree)	E (kN/m^2)	ν_u
Dense sand	20	-	34	60000	0.495
Very stiff clay	18.5	150	-	75000	0.495
Very dense sand	21	-	36	77500	0.495
Hard clay	20.5	380	-	190000	0.495

หมายเหตุ ค่า E แบ่งตามชนิดของดิน คือ E' สำหรับดินทราย และ E_u สำหรับดินเหนียว



ภาพที่ 6 FEM mesh ที่ใช้ในการจำลองเสาเข็มเดี่ยว

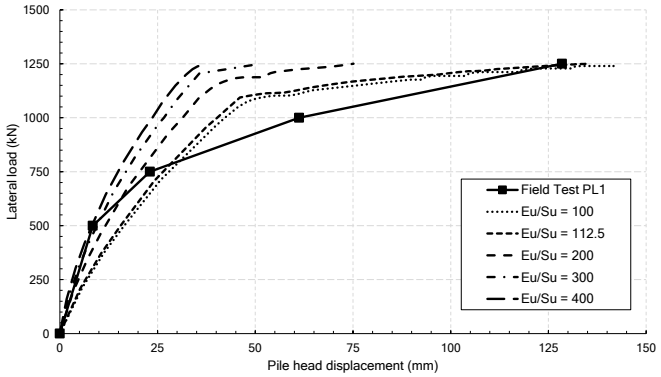


ภาพที่ 7 FEM mesh ที่ใช้ในการจำลองเสาเข็มเสาเข็มกลุ่ม F2 และ F3

ผลการวิจัย

1) การวิเคราะห์กลับเพื่อหาสติฟเนสของดินสำหรับแบบจำลองดิน HSM

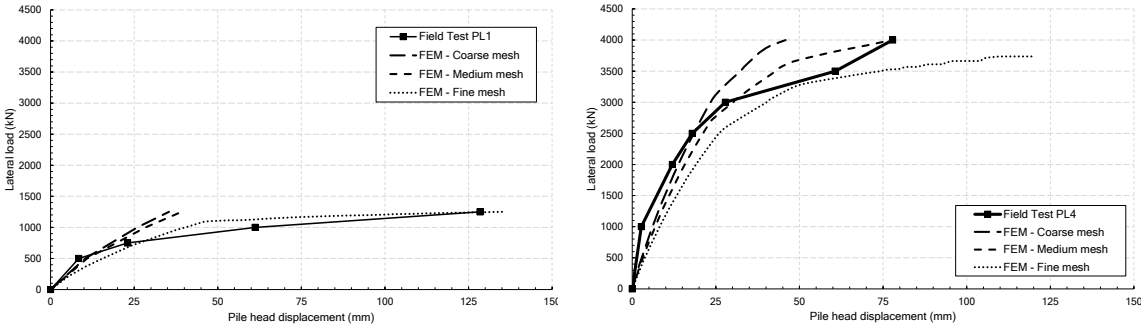
การวิเคราะห์กลับเพื่อเลือกสติฟเนสที่เหมาะสมสำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนซึ่งมีอิทธิพลต่อการจำลองมากที่สุด ได้ทำการแปรผันสติฟเนสของดินสำหรับแบบจำลองดิน HSM ซึ่งสติฟเนสที่ใช้สำหรับแบบจำลอง HSM อยู่ในรูปของหน่วยแรงรวม เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการให้เป็นประโยชน์กับวิศวกรที่เป็นผู้ออกแบบ จึงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่น (E) กับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือน (G) กับโมดูลัสยืดหยุ่นเป็น $G = E'/2(1+\nu') = E_u/2(1+\nu_u)$ เมื่ออัตราส่วนปัวซองแบบไม่ระบายน้ำ $\nu_u = 0.5$ และอัตราส่วนปัวซองประสิทธิผล $\nu' = 0.2$ ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นแบบหน่วยแรงประสิทธิผลกับโมดูลัสยืดหยุ่นแบบหน่วยแรงรวมเป็น $E_{50}^{ref} = 0.8E_u$ และ $E_{ur}^{ref} = 8E_u$ ในภาพที่ 8 เป็นผลวิเคราะห์กลับโดยใช้ข้อมูลการทดสอบเสาเข็มเดี่ยว PL1 เพื่อเปรียบเทียบ ผลวิเคราะห์กลับชี้ให้เห็นว่าโมดูลัสยืดหยุ่นแบบหน่วยแรงรวมที่เหมาะสมสำหรับจำลองพฤติกรรมของเสาเข็มในช่วงการใช้งานที่แรงกระทำไม่เกินร้อยละ 40 ของแรงกระทำประลัยหรือสัดส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 2.5 คือ E_u/S_u มีค่าอยู่ในช่วง 200 –300 ส่วนกรณีของ E_u/S_u เท่ากับ 112.5 นั้นให้ผลวิเคราะห์การเคลื่อนตัวที่ครอบคลุมกับผลทดสอบในสนาม งานวิจัยนี้จึงได้ใช้ค่าดังกล่าวนี้ในการจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่ม



ภาพที่ 8 ผลวิเคราะห์กลับโดยใช้ผลทดสอบเสาเข็มเดี่ยว PL1 เพื่อกำหนดสติฟเนสของชั้นดินเหนียวอ่อน

2) อิทธิพลของความละเอียดของตาข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์

การจำลองเสาเข็มที่รับแรงด้านข้างที่มีพฤติกรรมเข้าสู่สภาวะประลัย ผลวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของเสาเข็มจะขึ้นอยู่กับความละเอียดตาข่ายวิเคราะห์ (mesh dependency) สำหรับการจำลองเสาเข็ม F1 ที่แรงกระทำต่อต้นสูงสุด 1250 กิโลนิวตัน ดังภาพที่ 9(a) พบว่า ผลวิเคราะห์ด้วย fine mesh ให้ผลการเคลื่อนตัวใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนาม ส่วนการวิเคราะห์ด้วย coarse mesh และ medium mesh ให้ผลการเคลื่อนตัวต่างจากผลทดสอบในสนามมาก ส่วนการจำลองเสาเข็มกลุ่ม F2 ซึ่งมีแรงกระทำต่อต้นสูงสุด 2000 กิโลนิวตัน ดังภาพที่ 9(b) พบว่าผลวิเคราะห์ด้วย medium mesh มีความใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนาม ส่วนกรณีวิเคราะห์ด้วย fine mesh ให้ผลวิเคราะห์มากกว่าผลทดสอบในสนาม โดยอิทธิพลของความละเอียด mesh มีผลต่อการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [13-14] ในงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่า fine mesh สำหรับเสาเข็มกลุ่ม F2 ให้ค่าเคลื่อนตัวสูงกว่าค่าในสนาม เนื่องจากมีตำแหน่งของ stress point ที่ไม่ตรงกับตำแหน่งที่มีความเค้นสูงมากในสนาม การคำนวณจึงสามารถดำเนินอย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดการวิบัติ งานวิจัยนี้จึงแนะนำว่าควรพิจารณาใช้ความละเอียด mesh โดยคำนึงถึงพฤติกรรมของเสาเข็ม เมื่อเปรียบเทียบผลวิเคราะห์ด้วย medium mesh กับ fine mesh ของเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มชี้ให้เห็นว่า medium mesh มีความเหมาะสมในการใช้ในการออกแบบเสาเข็มเชิงวิศวกรรมในช่วงที่ไม่เกิดการวิบัติหรือมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงที่เป็นเชิงเส้นตรง

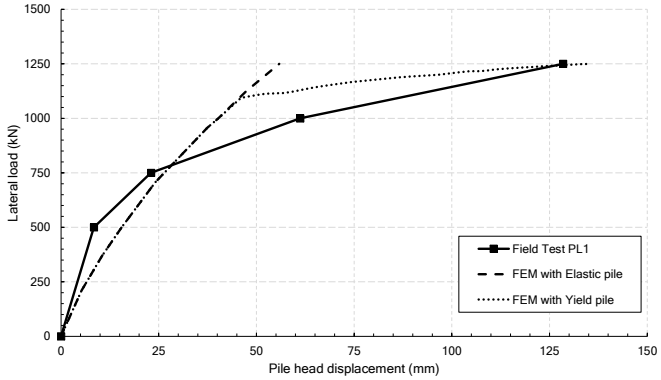


(a) (b)

ภาพที่ 9 ผลของ mesh dependency ของการวิเคราะห์เสาเข็ม **(a)** F1 และ **(b)** F2

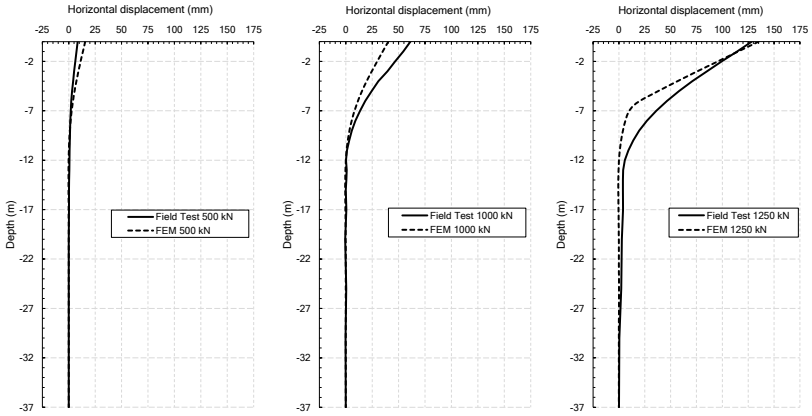
3) ผลการจำลองเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มภายใต้แรงกระทำด้านข้าง

ความสัมพันธ์ของแรงกระทำและการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็มของเสาเข็มเดี่ยว (F1) จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกถึงแรงกระทำ 1200 กิโลนิวตัน เสาเข็มจะมีพฤติกรรมเชิงเส้นตรงเมื่อเปรียบเทียบกับเสาเข็มยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง หลังจากนั้นเสาเข็มเกิดการครากแล้วมีพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้นตรง และผลวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนาม ดังภาพที่ 10



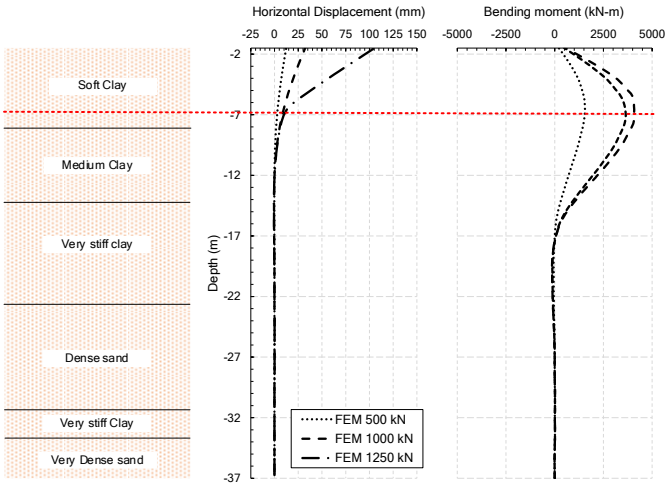
ภาพที่ 10 เปรียบเทียบผลวิเคราะห์กับผลทดสอบในสนามของเสาเข็ม F1

สำหรับผลวิเคราะห์การโก่งตัวของเสาเข็มแปรผันตามความลึกที่แรงกระทำ 500, 1000 และ 1250 กิโลนิวตัน โดยใช้ fine mesh ชี้ให้เห็นว่าที่แรงกระทำ 500 กิโลนิวตัน ผลวิเคราะห์โก่งตัวมีค่ามากกว่าผลทดสอบในสนามประมาณ 7 มิลลิเมตรอยู่ในช่วงพฤติกรรมที่เสาเข็มยังไม่เกิดการวิบัติ หลังจากนั้นผลวิเคราะห์ให้ค่าน้อยกว่าผลทดสอบใน 20 มิลลิเมตรที่แรงกระทำ 1000 กิโลนิวตัน ซึ่งชี้ให้เห็นถึงเสาเข็มเริ่มเกิดการครากและเข้าสู่สภาวะประลัย นอกจากนี้ยังพบว่าผลวิเคราะห์ด้วย FEM แสดงจุดดัดกลับที่ใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนาม ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ผลวิเคราะห์การโก่งตัวเทียบกับผลทดสอบในสนามของเสาเข็มเดี่ยว F1

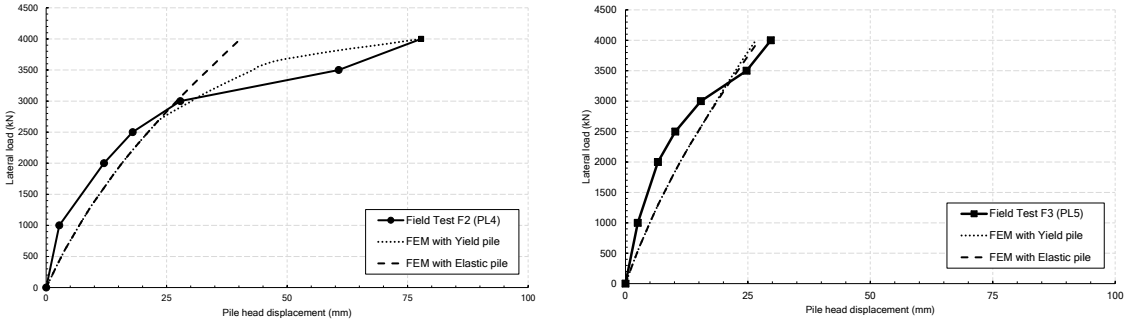
เมื่อพิจารณาโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นกับการโก่งตัวของเสาเข็มเดี่ยว F1 ในภาพที่ 12 จะเห็นได้ว่าโมเมนต์ดัดมากที่สุดจะเกิดที่ตำแหน่งความลึกประมาณ 7 เมตรจากผิวดินที่อยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนและเป็นตำแหน่งที่เสาเข็มเริ่มเกิดการโก่งตัว โดยมีโมเมนต์ดัดสูงสุด 4090 กิโลนิวตัน-เมตร ที่แรงกระทำ 1250 กิโลนิวตัน



ภาพที่ 12 เปรียบเทียบผลวิเคราะห์การโก่งตัวและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นของเสาเข็มเดี่ยว F1

สำหรับเสาเข็มกลุ่ม F2 และ F3 ที่ให้แรงกระทำ 1000, 2000, 2500, 3000, 3500 และ 4000 กิโลนิวตัน ผลวิเคราะห์เป็นกราฟความสัมพันธ์ของแรงกระทำและการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็ม โดยจำลองเสาเข็มที่มีพฤติกรรมยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงเทียบด้วย สำหรับเสาเข็มกลุ่ม F2 ดังภาพที่ 13(a) จะเห็นได้ว่าเสาเข็มในช่วงแรกมีพฤติกรรมเชิงเส้นตรงไปถึงแรงประมาณ 3000 กิโลนิวตัน เมื่อแรงเพิ่มขึ้นจะพบว่าเสาเข็มมีพฤติกรรมไม่เชิงเส้นตรง เนื่องจากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นสูงกว่าหน่วยแรกครากของวัสดุเสาเข็มจนเสาเข็มมีพฤติกรรมเข้าสู่สภาวะประลัย ส่วนผลวิเคราะห์เสาเข็มกลุ่ม F3 ดังภาพที่ 13(b) พบว่าเสาเข็มมีพฤติกรรมทุกแรงเป็นเชิงเส้นตรง หากพิจารณาที่แรงกระทำ 4000 กิโลนิวตันต่อ pile cap นั้นเป็นแรงกระทำต่อต้นเฉลี่ยจะพบว่าเสาเข็มกลุ่ม F2 มีแรงกระทำต่อต้นประมาณ 2000 กิโลนิวตันซึ่งสูงกว่าเสาเข็มกลุ่ม

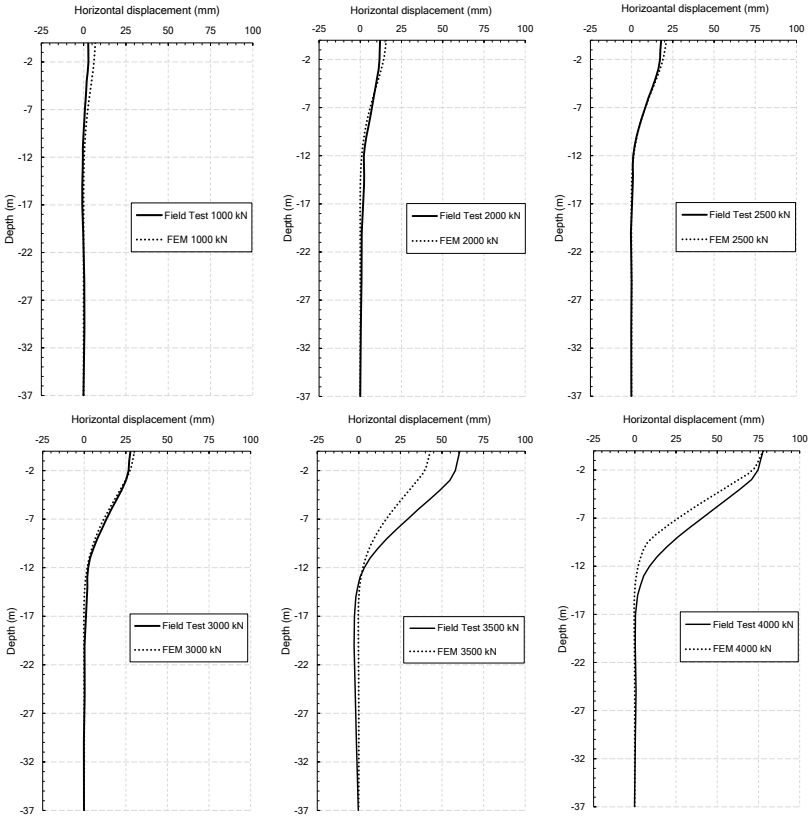
F3 ที่มีแรงกระทำต่อต้นประมาณ 1300 กิโลนิวตัน จะพบว่ามีแรงกระทำต่างกัน 700 กิโลนิวตัน ประกอบกับรูปแบบการจัดเรียงและการยึดรั้งหัวเสาเข็มด้วย pile cap จึงเป็นกลไกทำให้เสาเข็มกลุ่ม F2 เข้าสู่สภาวะประลัยก่อนเสาเข็มกลุ่ม F3



(a) (b)

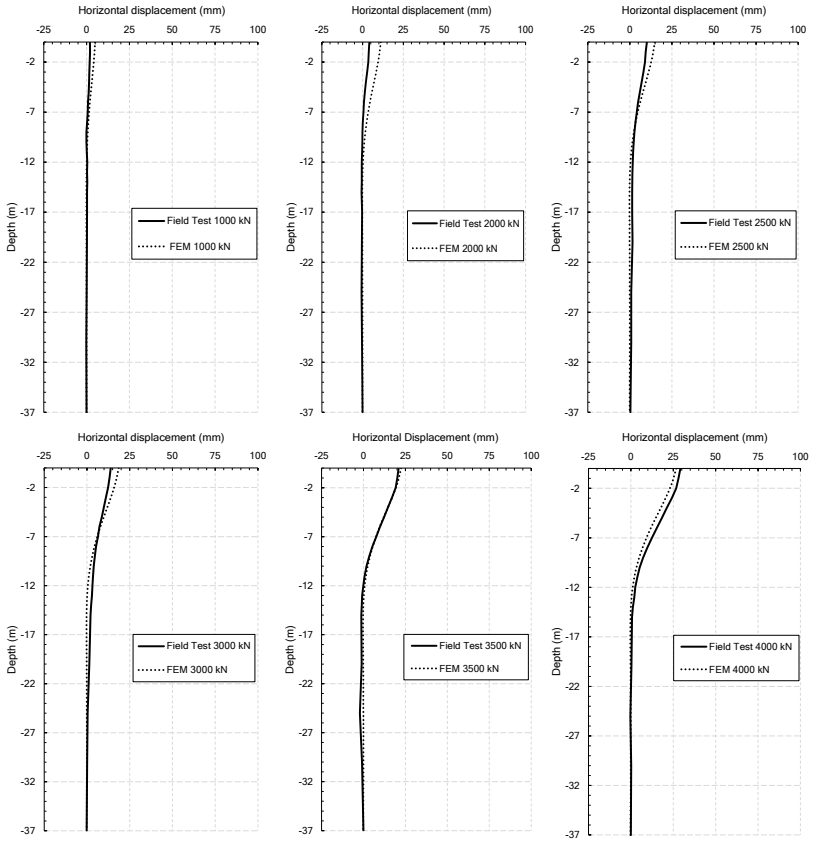
ภาพที่ 13 เปรียบเทียบผลวิเคราะห์กับผลทดสอบในสนามของเสาเข็มกลุ่ม **(a)** F2 และ **(b)** F3

สำหรับผลวิเคราะห์เสาเข็มกลุ่ม F2 โดยใช้ medium mesh เป็นความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวของเสาเข็มแปรผันกับความลึกแต่ละแรงกระทำ ในภาพที่ 14 จะเห็นได้ที่แรงกระทำ 1000 ถึง 3000 กิโลนิวตัน ผลวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนาม ต่างจากที่กระกระทำ 3500 ถึง 4000 กิโลนิวตัน ผลวิเคราะห์มีค่าน้อยกว่าผลทดสอบในสนาม เนื่องจากพฤติกรรมของเสาเข็มเข้าสู่สภาวะประลัย โดยที่แรงกระทำ 3500 กิโลนิวตันให้ค่าการเคลื่อนตัวที่ต่างจากผลทดสอบในสนามประมาณ 18 มิลลิเมตร นอกจากนี้ยังพบว่าผลวิเคราะห์ด้วย FEM แสดงจุดดัดกลับที่ใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนามด้วย



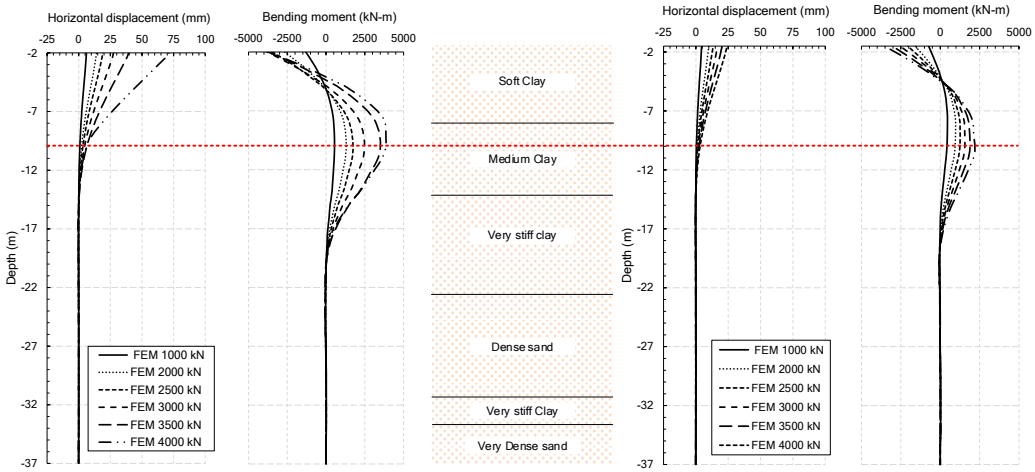
ภาพที่ 14 ผลวิเคราะห์การเคลื่อนตัวเสาเข็มเทียบกับผลทดสอบในสนามของเสาเข็มกลุ่ม F2

สำหรับผลวิเคราะห์เสาเข็มกลุ่ม F3 โดยใช้ medium mesh เป็นความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวแปรผันตามความลึกดังภาพที่ 15 จะเห็นว่าผลวิเคราะห์ที่แรงกระทำ 1000 ถึง 3000 กิโลนิวตัน ผลวิเคราะห์ให้ค่าที่สูงกว่าผลทดสอบในสนามประมาณ 7 มิลลิเมตร ส่วนที่แรงกระทำสูงจากนั้นไปจนถึง 4000 กิโลนิวตัน พบว่าผลวิเคราะห์ให้ค่าที่เท่ากับและต่ำกว่าผลทดสอบในสนามไม่เกิน 5 มิลลิเมตร นอกจากนี้ยังพบว่าผลวิเคราะห์ด้วย FEM แสดงจุดดัดกลับที่ใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนาม



ภาพที่ 15 ผลวิเคราะห์การเคลื่อนตัวเสาเข็มเทียบกับผลทดสอบในสนามของเสาเข็มกลุ่ม F3

ส่วนผลวิเคราะห์การโก่งตัวของเสาเข็มกับโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นแปรผันกับความลึก สำหรับเสาเข็มกลุ่ม F2 และ F3 ดังภาพที่ 16(a) และ 16(b) จะพบว่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นมีลักษณะแตกต่างจากเสาเข็มเดี่ยว โดยเกิดโมเมนต์ดัดสูงอย่างมีนัยสำคัญจำนวน 2 ตำแหน่ง คือ ที่ความลึกประมาณ 10 เมตรจากผิวดินที่เป็นชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เสาเข็มเริ่มเกิดการโก่งตัว และอีกตำแหน่ง คือ บริเวณผิวดินใต้ pile cap จากผลการยึดรั้งของหัวเสาเข็มในกลุ่มด้วย pile cap ซึ่งโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นของเสาเข็มกลุ่ม F2 มีค่าสูงกว่า F3 ประมาณ 1670 กิโลนิวตัน-เมตร



ภาพที่ 16 เปรียบเทียบผลวิเคราะห์โก่งตัวและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นของเสาเข็มกลุ่ม **(a)** F2 และ **(b)** F3

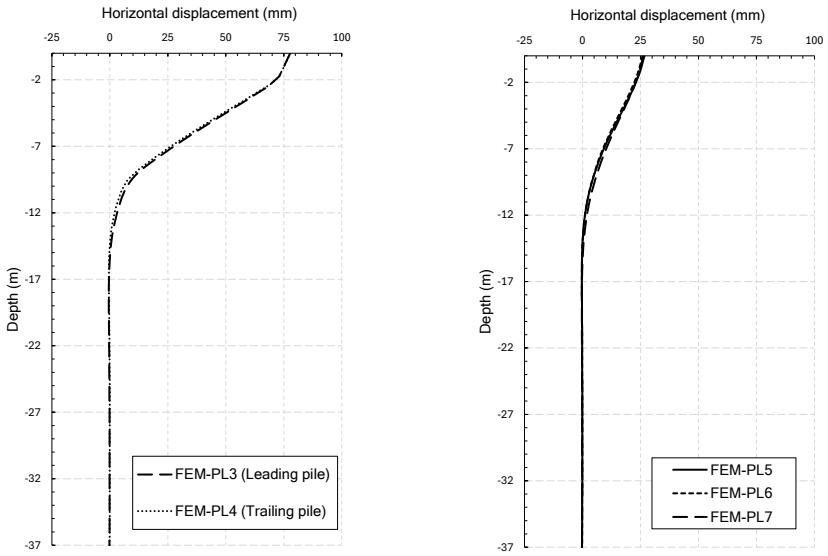
จากผลวิเคราะห์พฤติกรรมเสาเข็มเดี่ยว F1 และเสาเข็มกลุ่ม F2, F3 ดังที่กล่าวมาแล้วนั้นสามารถสรุปผลวิเคราะห์ที่สำคัญ ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สรุปผลวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เสาเข็ม	ความละเอียดของ FEM mesh ที่ใช้	การโก่งตัวสูงสุด (mm)	โมเมนต์ดัดสูงสุด (kN-m)	ความลึกที่เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุด (m)	ผลต่างการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็มจากผลวิเคราะห์เทียบกับผลทดสอบในสนาม (mm)
F1	Fine mesh	135	4090	7	20
F2	Medium mesh	78	3880	10	18
F3	Medium mesh	27	2205	10	7

4) ผลของระยะห่างระหว่างเสาเข็มในกลุ่ม

เมื่อพิจารณาการโก่งตัวของเสาเข็มกลุ่ม F2 และ F3 ที่แรงกระทำ 4000 กิโลนิวตัน เนื่องจากที่แรงกระทำดังกล่าวเสาเข็มมีการเคลื่อนตัวสูงสุด สำหรับผลวิเคราะห์ของเสาเข็มกลุ่ม F2 ที่ประกอบไปด้วยเสาเข็มต้นหน้า (leading pile) และเสาเข็มต้นหลัง (trailing pile) ซึ่งเป็นการจัดเรียงแนวเส้นตรงทิศทางเดียวกับแรงกระทำ (in-line) ส่วนเสาเข็ม F3 เป็นการจัดเรียงรูปแบบผสมระหว่าง side-by-side กับ in-line ซึ่งเสาเข็มทั้งสองกลุ่มมีระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางเสาเข็มแต่ละต้นเท่ากับ 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยผลวิเคราะห์ดังภาพที่ 17(a) และ 17(b) เมื่อพิจารณาตามความยาวเสาเข็มจะพบว่าการโก่งตัวของเสาเข็มแต่ละต้นในกลุ่มไม่มีการโก่งตัวที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากความแข็งแกร่งของ pile cap ที่ยึดรั้งหัวเสาเข็ม, ข้อจำกัดของการวิเคราะห์เชิงตัวเลข และรูปแบบการจัดเรียงเสาเข็มในกลุ่มที่มีระยะห่างเหมาะสมตามงานวิจัย [2 - 4] ส่งผลให้ดินที่ล้อมรอบเสาเข็มนั้นไม่เกิดการทับซ้อนของขอบเขตความเค้นการวิบัติที่จะส่งผลให้ดินมีความสามารถในการต้านทานแรงกระทำลดลงได้



(a) (b)

ภาพที่ 17 ผลวิเคราะห์อิทธิพลของระยะห่างของเสาเข็มในกลุ่ม **(a)** F2 และ **(b)** F3

สรุปผลการวิจัย

การจำลองเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิตินั้นโดยใช้แบบจำลองดิน HSM และจำลองเสาเข็มโดย EBE ที่ใช้แบบจำลองวัสดุ elastoplastic ให้ผลที่มีความใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนาม สำหรับสติฟเนสของชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งปานกลางที่ให้ผลการเคลื่อนตัวครอบคุลมกับผลทดสอบในสนามในเทอมของหน่วยแรงรวมที่แปลงจากหน่วยแรงประสิทธิผล คือ E_u / S_u เท่ากับ 112.5 ส่วนการออกแบบแบบเชิงวิศวกรรมสำหรับเสาเข็มเพื่อใช้งานที่ยังไม่เกิดการวิบัติหรือแรงกระทำไม่เกินร้อยละ 40 ของแรงกระทำประลัยหรือสัดความปลอดภัยเท่ากับ 2.5 พบว่าค่าสติฟเนสที่เหมาะสม คือ E_u / S_u อยู่ในช่วง 200 - 300 ใช้ในกรณีที่ไม่มีผลทดสอบหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองดินในห้องปฏิบัติการโดยตรง ซึ่งพิจารณาที่ค่า $\nu_{ur} = 0.2$ จะได้ $E_{50}^{ref} = 0.8E_u$ และ $E_{ur}^{ref} = 10E_{50}^{ref}$ โดยเสาเข็มจะโก่งตัวมากในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงดินเหนียวแข็งปานกลาง ส่วนกรณีเสาเข็มกลุ่มจะพบว่าเสาเข็มในกลุ่มมีการเคลื่อนตัวใกล้เคียงกันทุกต้น เนื่องจากมีระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่เพียงพอ ประกอบกับความแข็งแกร่งของ pile cap และความละเอียดของการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ส่วนพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มจะเปลี่ยนแปลงไม่เชิงเส้นเมื่อโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นสูงกว่าโมเมนต์ครากของหน้าตัด โดยผลวิเคราะห์ที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับความละเอียดของตาข่ายวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับพฤติกรรมของเสาเข็ม งานวิจัยนี้แนะนำให้ใช้ medium mesh ในการจำลองเสาเข็มที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงใช้งานหรือยังไม่เกิดการวิบัติ

เอกสารอ้างอิง

1. Wachiraprakarnpong A. Performance of grouted and non-grouted bored piles in Bangkok subsoils [MEng thesis]. Pathum Thani: Asian Institute of Technology; 1993.
2. Broms BB. Lateral resistance of piles in cohesive soils. J Soil Mech Found Div. 1964;90(2):27-63.
3. Cox WR, Dixon DA, Murphy BS. 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. West Conshohocken (PA): ASTM International; 1984.
4. Wang ST, Reese LC. Study of design method for vertical drilled shaft retaining walls. Final report. 1986.
5. Shibata T, Yashima A, Kimura M. Model tests and analyses of laterally loaded pile groups. Soils Found. 1989;29(1):31-44.
6. Submaneewong C. Behavior of vertical and lateral load on T-shape barrette and bored piles [doctoral dissertation]. Bangkok: Chulalongkorn University; 2009.
7. Thipsumontha S, Sramoon W, Submaneewong C. Behavior of soil-pile interaction of barrette pile under lateral loading. Eng Trans Mahanakorn Univ Technol. 2016;19(1):39-47.
8. Matlock H. Correlation for design of laterally loaded piles in soft clay. In: Proceedings of the Offshore Technology Conference; 1970; Houston, TX. p. OTC-1204.
9. Dao TP. Validation of PLAXIS embedded piles for lateral loading [MSc thesis]. Delft: Delft University of Technology; 2011 Apr.
10. Surarak C. Geotechnical aspects of the Bangkok MRT Blue Line project [PhD thesis]. Gold Coast (QLD): Griffith University; 2010.
11. Wang C, Salmon GC. Reinforced concrete design. 6th ed. New York: Wiley; 1998.
12. Likitlersuang S, Chheng C, Surarak C, Balasubramaniam A. Strength and stiffness parameters of Bangkok clays for finite element analysis. Geotech Eng. 2018;49(2):150-6.
13. De Borst R, Vermeer PA. Possibilities and limitations of finite elements for limit analysis. Geotechnique. 1984;34(2):199-210.
14. Koutsabeloulis NC, Griffiths DV. Numerical modelling of the trap door problem. Geotechnique. 1989;39(1):77-89.