

การวิเคราะห์กำลังรับแรงของฐานรากเสาเข็มฝังในดินเหนียวด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ Bearing capacity analysis of embedded piles in cohesive soils with 2D FEM

ชลดา กาญจนกุล¹, ทักษกร พรบุญญานนท์^{1*}, ธนันท์ ชูอุปการ²

¹ ศูนย์วิจัยด้านเทคโนโลยีและนวัตกรรมทางวิศวกรรมโยธา สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.นครศรีธรรมราช

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา

*Corresponding author; E-mail address: thaksakom.p@rmutsv.ac.th.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์กำลังรับแรงแบกทานและพฤติกรรมทางทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มสำหรับอาคารบ้านเรือนของชุมชนขนาดใหญ่ที่ตั้งอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อน โดยใช้ข้อมูลพารามิเตอร์จากรายงานผลการเจาะสำรวจดิน (Boring log) วิเคราะห์เพื่อหาค่า Young's modulus (E') และ Poisson's ratio (ν') เพื่อใช้ในวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 2 มิติสำหรับการกำหนดลักษณะชั้นดิน (Create borehole) โดยผู้วิจัยทำการจำลองสภาพดินด้วยวัสดุแบบ Mohr-coulomb และไม่ระบายน้ำ (Undrained) สำหรับดินเหนียว ในส่วนของเสาเข็มจะมีคุณสมบัติของวัสดุแบบอีลาสติกโดยสามารถทำการแสดงค่าแรงเชื่อมต่อระหว่างดินและโครงสร้างตลอดความยาวระหว่างผิวสัมผัสของเสาเข็มหลังทำการวิเคราะห์เสร็จสิ้นได้ ทั้งนี้ความแตกต่างของแรงจะขึ้นอยู่กับชนิด รูปร่าง และความลึกของเสาเข็มที่ใส่ค่าพารามิเตอร์ (Input parameters) ตั้งต้นลงไป โดยผู้วิจัยนำเสนอผลสรุปเป็นรูปแบบชาร์ตความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ชนิด, รูปร่างและความลึกของเสาเข็มที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังนำเสนอค่าการทรุดตัวจากแรงกระทำ (load) ที่แตกต่างกันเพื่อเป็นกรณีศึกษาตั้งต้นต่อยอดงานวิจัยเพื่อเป็นประโยชน์ต่อชุมชนของผู้อยู่อาศัยในความร่วมมือระหว่าง สถาบันพัฒนาชุมชน (องค์การมหาชน) กับ ศูนย์วิจัยด้านเทคโนโลยีและนวัตกรรมทางวิศวกรรมโยธา

คำสำคัญ: ฐานรากเสาเข็ม, ไฟไนต์อีลิเมนต์, กำลังรับแรงแบกทาน, ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

Abstract

This article presents the research on the bearing capacity and settlement behavior of pile foundations on community building in coastal areas. Laboratory test data from the borehole log were used in terms of shear strength parameters (Young's modulus, E' and Poisson's ratio, ν') for two-dimensional plane strain finite element analysis (2D FEM). In addition, the clay is modeled as the Mohr-coulomb material in

an undrained condition. The pile is modeled as the elastic material. Finally, axial and shear forces between soil and structure were shown around the surfaces of the pile. The authors present a relationship between soil settlement and different load for the site engineer. This article aims to determine the bearing capacity of the pile to the user who lives in community building and research cooperation between the research unit technology and innovation on civil engineering (RICE) and community organizations development institute (CODI).

Keywords: Pile Foundation, Finite Element, Bearing Capacity, Numerical Analysis

1. คำนำ

ในการออกแบบเสาเข็มรองรับโครงสร้างบ้านในชุมชน บริเวณที่มีสภาพชั้นดินเป็นดินอ่อน (Soft clay) จะทำให้เสาเข็มมีพฤติกรรมในการรับน้ำหนักบรรทุกอันเนื่องมาจากอาคารที่ปกอาศัยได้น้อยกว่าดินที่มีกำลังรับแรงสูงหรือดินแข็ง เนื่องจากดินเหนียวอ่อนมีกำลังรับแรงน้อยและมีการยุบอัดตัวค่อนข้างสูงเมื่อน้ำหนักโครงสร้างมากระทำ จึงมักจะพบเจอปัญหาการทรุดตัวและการพังทลายของโครงสร้าง ผู้วิจัยมีความจำเป็นที่จะต้องมีการตรวจสอบ วิเคราะห์ และคำนวณอย่างถี่ถ้วนไม่ว่าจะเป็นกำลังรับน้ำหนักหรือการทรุดตัวของเสาเข็มก็ตาม เพื่อการสร้างความรู้สำหรับนำไปใช้งานได้จริง แต่ทั้งนี้ต้องปลอดภัยตามหลักวิศวกรรมและมีงานวิชาการรองรับเพื่อให้เกิดความปลอดภัยสูงสุดต่อผู้อยู่อาศัย

งานวิจัยในอดีตที่ได้วิเคราะห์การรับแรงของเสาเข็มในดินเหนียวอ่อนมีการนำเสนออย่างแพร่หลายไม่ว่าจะเป็น [1] ยืนยันถึงประสิทธิภาพในการลดการทรุดตัวที่ไม่เท่ากันของเสาเข็มและดินรอบๆ หากทำการเสริมกำลังเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยไม้อยูคาลิปัส (Stiffened deep cement mixing) ในชั้นดินเหนียวเขตกรุงเทพฯ ด้วยการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มดินซีเมนต์ภายใต้พื้นถ่ายแรงแบบแกร่งรองรับ ตลอดจนติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่า การทรุดตัวแรงดันน้ำ ส่วนเกิน และการเคลื่อนตัวใน

แนวด้านข้างพบว่าความแข็งแรงของเสาเข็มมีค่าเพิ่มขึ้น ช่วยทำให้หน้าหนักบรรทุกลดลงเสาเข็มเพิ่มมากขึ้น และช่วยให้การเสียดทานข้างลดลงอันนำมาซึ่งความดันน้ำส่วนเกินและการทรุดตัวในดินที่น้อยลง

[2] ได้ศึกษาแรงวิบัติของเสาเข็มรับแรงด้านข้างในดินเหนียว ด้วยวิธีระเบียบเชิงตัวเลขโดยแบ่งเสาเข็มออกเป็น 2 หน้าตัด คือ หน้าตัดแนวตั้งแสดงการประมาณของกำแพงฝังในดินซึ่งรับแรงด้านข้างและโมเมนต์ที่จุดบนสุดและหน้าตัดแนวราบแสดงการประมาณของเสาเข็มรูปวงกลมหรือท่อรับแรงด้านข้างที่จุดศูนย์กลาง ผลการวิเคราะห์พบว่าชิ้นส่วนเชื่อมต่อระหว่างดินและโครงสร้างถูกใช้ที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวและเสาเข็มของทั้งสองหน้าตัด นอกจากนั้นชิ้นส่วนเชื่อมต่อระหว่างดินและโครงสร้างถูกจำลองเป็นสองแบบคือ การเชื่อมต่อ แบบแรงดึงสมบูรณ์ และ การเชื่อมต่อแบบไม่มีแรงดึง กรณีแรกจำลองสภาพไม่เกิดการแยกตัวระหว่างดินและโครงสร้าง แต่กรณีสองจำลองสภาพการแยกตัวระหว่างดินและโครงสร้าง ผลเฉลยแรงวิบัติของเสาเข็มรับแรงด้านข้างถูกนำเสนอในรูปของตัวแปรไร้มิติ และเปรียบเทียบผลของงานวิจัยกับผลการศึกษาในอดีตและในปี 2559 [3] นำเสนอการวิเคราะห์กำลังรับแรงเฉียงของเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสฝังลึกมากในดินเหนียว ผลที่ได้ถูกนำเสนอในรูปของตัวแปรไร้มิติระหว่างอัตราส่วนแรงวิบัติแบบเฉียงที่กระทำต่อเสาเข็มที่มุมเอียงองศาต่างๆหารด้วยกำลังรับแรงเฉียงแบบไม่ระบายน้ำ และความกว้างของเสาเข็ม

เท็ดคักดี เลไธสง และ พงศกร พวงชมพู [4] ศึกษาความสัมพันธ์การต้านแรงกดของดินโดยการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มแบบ Static pile load test, ASTM D 1143 กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างสะพานข้ามทางรถไฟในทางหลวงหมายเลข 226 โดยเข็มเจาะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร ยาว 20 เมตร แรงอัดที่ออกแบบ 428.28 ตัน โดยการวิเคราะห์ Finite element ใช้ข้อมูลชั้นดินจากผลการสำรวจหลุมเจาะ ผลการวิจัยพบว่าภาพการกระจายความเค้นและการกระจายจะทำให้ทราบขอบเขตที่ได้รับผลกระทบจากโครงการ นอกจากนี้การทรุดตัวและค่าสัมประสิทธิ์การต้านแรงกดทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกันจัดเป็นดินเหนียวแข็งตรงตามผลเจาะสำรวจ [5] ใช้ Finite element analysis แบบ PLAXIS 3D วิเคราะห์พฤติกรรมทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแบบแผ่สำหรับอาคารสูงทั้งนี้ยังใช้วิธีแบบวิเคราะห์กลับ Back analysis เพื่อหาค่า Young's modulus และยังทำการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบการจัดเรียงเสาเข็มต่อการทรุดตัวและโมเมนต์ดัดใน Mat โดยใช้วิธีวิเคราะห์ร่วมกันระหว่าง ETABS และ PLAXIS 3D พบว่าการจัดเรียงเสาเข็มโดยมีการเปลี่ยนแปลงความยาวเสาเข็มสามารถลดการทรุดตัวที่แตกต่างกันภายใน Mat และลดโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นได้

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของชนิด รูปร่างและความลึกของเสาเข็มฝังในดินเหนียวต่อพฤติกรรมรับน้ำหนักและการทรุดตัวโดยใช้วิธีวิเคราะห์ร่วมกันระหว่างหลักการ Static pile capacity กับ PLAXIS 2D และใช้ข้อมูลการนำเข้าไปในโปรแกรมจากผลเจาะสำรวจของหลุมเจาะ BH-1 ซึ่งประกอบด้วยดิน 5 ชนิด เพื่อเสนอแนะแนวทางและเกณฑ์การออกแบบก่อสร้างที่เหมาะสมและปลอดภัยในรูปแบบของชาร์ตการเลือกใช้งานตามความสะดวกและเหมาะสมของช่างก่อสร้างและวิศวกรหน้างาน

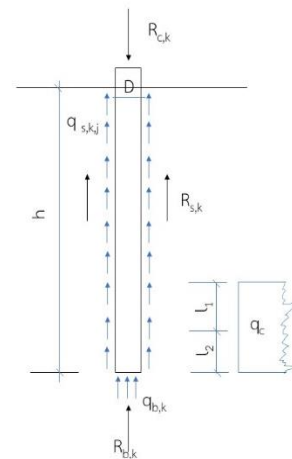
นอกจากนี้ยังสามารถนำผลที่ได้จากกรณีศึกษาไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบและการก่อสร้างต่อชุมชนของผู้อยู่อาศัยในความร่วมมือระหว่างสถาบันพัฒนาชุมชน (องค์การมหาชน) กับ ศูนย์วิจัยด้านเทคโนโลยีและนวัตกรรมทางวิศวกรรมโยธาในลำดับถัดไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยขอทำการแบ่งทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเป็น 2 ส่วนหลักๆ ได้แก่ การประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกลดลงของเสาเข็มจากข้อมูลการเจาะสำรวจดิน และ วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับการกำหนดวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มในการรับแรง

2.1 การประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกลดลงของเสาเข็ม (Pile capacity in cohesive soil)

การรับน้ำหนักของเสาเข็มในกรณีที่เป็นดินอ่อนจะมีพฤติกรรมการถ่ายแรงของดินแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ แรงเสียดทานผิว (Skin friction, $R_{s,k}$) และแรงแบกทานที่ปลายเข็ม (End point bearing, $R_{b,k}$) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การรับน้ำหนักของเสาเข็ม (Adjust from [6])

การคำนวณหาค่ารับน้ำหนักของฐานรากเสาเข็มตามหลักการ Static pile capacity และผลจาก Boring log มีสูตรดังนี้ [6]

$$R_{c,k} = R_{b,k} + R_{s,k} - W_p = A_b \cdot q_{b,k} + \sum_i A_{si} \cdot q_{s,k,i} - W_p \quad (1)$$

เมื่อ

$R_{c,k}$ คือ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกลดลงของเสาเข็ม (Ultimate bearing capacity, tons)

$R_{b,k}$ คือ แรงต้านที่ปลายเข็ม (Ultimate soil resistance under pile base, tons)

$R_{s,k}$ คือ แรงเสียดทานเข็ม (Ultimate soil resistance on pile side, tons)

W_p คือ น้ำหนักของเสาเข็ม (Weight of pile, tons)

A_b คือ พื้นที่บริเวณปลายเข็ม (Surface area of the pile base, m²)

A_{si} คือ พื้นที่ผิวรับแรงเสียดทานของเข็ม (Surface area of the pile side with in the ith layer of soil, m²)

$q_{b,k}$ คือ หน่วยแรงย่อยการหาแรงต้านที่ปลายเข็ม (Unit ultimate resistance under pile base, t/m²)

$q_{s,k,j}$ คือ หน่วยแรงย่อยการหาแรงเสียดทานที่ผิวของเข็ม (Unit ultimate resistance on pile side with in the i^{th} layer of soil, t/m²)

เมื่อการหาค่า $q_{s,k,j}$ โดยวิธี α -method ของ Tomlison (2008) มีสูตรดังนี้ [7]

$$q_{s,k,j} = \alpha S_u + K_s \cdot \sigma'_{vo} \cdot \tan \delta \quad (2)$$

เมื่อ

α คือ Adhesion factor

S_u คือ Undrained shear strength หรือกำลังรับแรงเฉือนของดิน

K_s คือ Lateral pressure coefficient และจะขึ้นอยู่กับชนิดของดินและเข็ม

σ'_{vo} คือ Effective overburden pressure

δ คือ Interface friction angle และจะขึ้นอยู่กับชนิดของดินและเข็ม

2.2 วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite element method)

เป็นการจำลองรูปร่างของเสาเข็มและดินเพื่อใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงและทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มโดยแบ่งรูปร่างของเสาเข็มและดินออกเป็นโครงร่างตาข่ายหรือชิ้นส่วนย่อยๆที่ต่อเนื่องกัน โดยต้องมีขั้นตอนตามลำดับได้แก่ การกำหนดขอบเขตในการจำลองโมเดล, การกำหนดคุณสมบัติของชั้นดิน (create borehole) จากการแปลผลการขุดเจาะสำรวจดิน (boring log), การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในการตรวจสอบพฤติกรรมของฐานรากเสาเข็ม (Flow conditions) จากนั้นทำการสรุปและวิเคราะห์หาผลเฉลย โดยผู้วิจัยขออธิบายขั้นตอนแต่ละส่วนอย่างละเอียดในหัวข้อ Methodology เป็นลำดับถัดไป

ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์โดยเลือกใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือกว่าวิธีอื่น ๆ ที่มีขอบเขตจำกัดโดยสามารถหาผลเฉลยได้เพียงปัญหาพื้นฐานทั่วไป [2] เนื่องจากการจำลองปัญหาในการวิเคราะห์กำลังรับแรงของฐานรากเสาเข็มฝังในดินเหนียวซึ่งสภาพดินเป็นวัสดุแบบ mohr-coulomb และไม่ระคายน้ำจะมีความซับซ้อนกว่า นอกจากนี้ยังจำลองให้เสาเข็มมีค่าแรงเชื่อมต่อระหว่างดินและโครงสร้างตลอดความยาวระหว่างผิวสัมผัสของเสาเข็ม

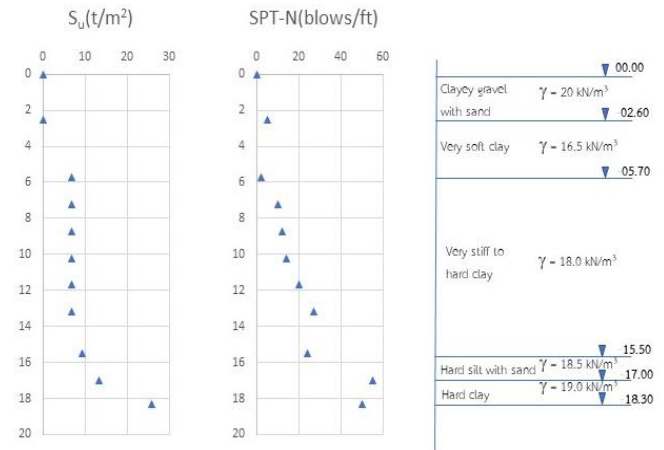
3. Methodology

วิธีทำการวิจัยได้ทำการรวบรวมข้อมูลการออกแบบเสาเข็ม, ผลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดินของพื้นที่กรณีศึกษา และข้อมูลในการทดสอบดิน จากนั้นทำการวิเคราะห์พฤติกรรมทรุดตัวและการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มสองประเภท ได้แก่ เสาเข็มคอนกรีตและเสาเข็มไม้โดยต้องใช้โปรแกรม Plaxis 2D เพื่อใช้ในการพิจารณาตามรายละเอียดดังนี้

3.1 ข้อมูลชั้นดินและคุณสมบัติทางกำลังของดิน

ผู้วิจัยได้เลือกใช้ข้อมูลหลุมเจาะ BH-1 ดังรูปที่ 2 ซึ่งเป็นบริเวณที่จะทำการวิจัย ก่อสร้างอาคารบ้านเรือนโดยประกอบไปด้วย ชั้นผิวหน้าดิน (เป็น

ดินถม) หนา 2.6 เมตร ถัดไปเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนมาก และมีค่าความเป็นพลาสติกซีตัสสูง หนา 3.1 เมตร จากนั้นเป็นดินเหนียวค่าพลาสติกซีตัสต่ำลึกไปจนถึง 9.8 เมตร หลังจากนั้นเป็นชั้นดินตะกอนหนา 1.5 เมตร จนถึงชั้นหลุมเป็นชั้นดินเหนียวโดยมีค่าพลาสติกซีตัส 59% หนา 1.3 เมตร โดยตารางที่ 1 เป็นการสรุประดับของชั้นดิน, ค่าพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ในโปรแกรม (ค่า Young's modulus (E') และ Poisson's ratio (ν') โดยคำนวณจากวิธี Empirical Method), คุณสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของดินสำหรับใช้ในการจำลอง [8]



รูปที่ 2 รูปตัดชั้นดิน

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลที่ใช้ในการจำลอง

Material	Depth (m)	E' (kN/m ²)	ν'	Unit weight (kN/m ³)	ϕ' (°)	S_u (kN/m ²)	α
Clayey gravel with sand	00.0-2.6	28,000	0.3	20	37	-	-
Very soft clay	2.6-5.7	16,675	0.20	16.5	-	66.7	0.5
Very stiff to hard clay	5.7-15.5	46,650	0.35	18.0	-	93.3	0.4
Hard silt with sand	15.5-17	66,650	0.30	18.5	-	133.3	0.4
Hard clay	17-18.3	133,350	0.5	19.0	-	266.7	0.35

3.2 แบบจำลองของดินเหนียวและเสาเข็ม (Base case)

ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์เป็นแบบจำลองแบบแนวระนาบ ความเครียด (Plane strain) และจำลองให้ดินเหนียวมีการวิบัติแบบมอร์-คูลอมบ์ในสภาพไม่ระบายน้ำ (Undrained type C) ซึ่งบอกถึงพฤติกรรมการรับแรงของดินเหนียวช่วงระยะสั้น (Short term) ค่า

Young's modulus, E' และ Poisson's ratio, ν' คำนวณจากวิธี Empirical Method และอ้างอิงตาม Choudhury (2016) ค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ') = 0 โดยดินเหนียวมีหน่วยน้ำหนัก (γ) ดังตารางที่ 1

ในการวิเคราะห์เสาเข็มจะพิจารณาทั้งชนิดที่เป็นไม้และคอนกรีตแต่กรณีศึกษา Base case ขึ้นต้นเป็นเสาเข็มคอนกรีต ซึ่งจะมีคุณสมบัติค่าหน่วยน้ำหนัก (γ_c) = 24 kN/m³ ค่า Poisson's ratio (ν) = 0.15 และโมดูลัสของยัง (E) = 26X10⁶ kPa โดยกำหนดให้เสาเข็มเป็นวัสดุแบบอิลาสติกและเป็นแบบแข็งเกร็งหรือมีความแข็งแรงมากพอที่จะไม่เกิดการวิบัติใดๆ ก่อนที่ดินจะวิบัติ

3.3 ตัวแปรที่ศึกษา

ตัวแปรสำหรับการวิเคราะห์กำลังรับแรงแบกทานของฐานรากเสาเข็ม ดังรูปที่ 3 และพฤติกรรมรับแรงมีดังนี้

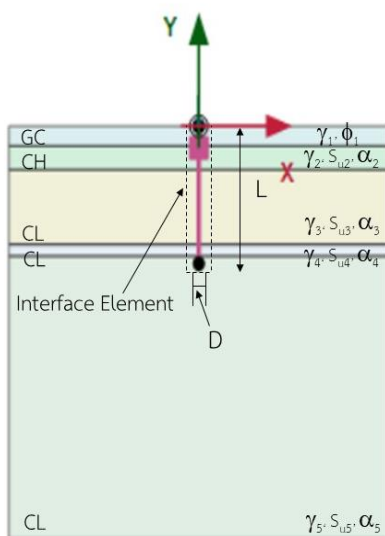
ดินชั้นที่1 เป็นดินประเภท GC (Clayey gravel with sand) มีค่า หน่วยน้ำหนักของดิน (γ_1) = 2 t/m³, ค่ามุมเสียดทานภายในของมวลดิน (ϕ_1) = 37°

ดินชั้นที่2 เป็นดินประเภท CH (Very soft clay) มีค่า หน่วยน้ำหนักของดิน (γ_2) = 1.65 t/m³, ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_{u2}) = 6.67 t/m² และค่า Adhesion factor (α_2) = 0.5

ดินชั้นที่3 เป็นดินประเภท CL (Very stiff to hard clay) มีค่า หน่วยน้ำหนักของดิน (γ_3) = 1.80 t/m³, ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_{u3}) = 9.33 t/m² และค่า Adhesion factor (α_3) = 0.4

ดินชั้นที่4 เป็นดินประเภท CL (Hard silt with sand) มีค่า หน่วยน้ำหนักของดิน (γ_4) = 1.85 t/m³, ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_{u4}) = 13.3 t/m² และค่า Adhesion factor (α_4) = 0.4

ดินชั้นที่5 เป็นดินประเภท CL (Hard clay) มีค่า หน่วยน้ำหนักของดิน (γ_4) = 1.85 t/m³, ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_{u4}) = 13.3 t/m² และค่า Adhesion factor (α_4) = 0.4

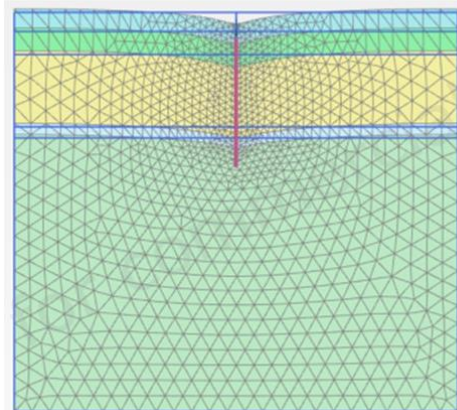


รูปที่ 3 แบบจำลองเสาเข็ม

โดยตัวแปรเพิ่มเติมที่นำมาใช้สำหรับจัดทำชาร์ตความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ชนิด, รูปปร่างและความลึกของเสาเข็มที่แตกต่างกันเพื่อเป็นประโยชน์ต่อวิศวกรและผู้รับเหมานำงานสำหรับนำไปใช้งานได้จริงได้แก่

- 1) ค่าความยาว (L) ของเสาเข็มกำหนดอยู่ในช่วง 1.3-17.65 m
- 2) ค่าขนาดความกว้าง (B) ของหน้าตัดเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมอยู่ในช่วง 0.22-0.40 m
- 3) ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัดเสาเข็ม (D) รูปวงกลมอยู่ในช่วง 0.25-0.45 m

สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงโดยทำการประยุกต์ใช้ไฟไนท์อีลิเมนต์ Plaxis 2D ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์ค่า Young's modulus, E' และ Poisson's ratio, ν' ที่ต้องการใส่เป็นข้อมูลของคุณสมบัติในเสาเข็มและดินแต่ละชั้นเพิ่มเติม [8] จากนั้นกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้ขอบล่างของแบบจำลองไม่มีการเคลื่อนที่ทั้งในแกน x และแกน y ขอบซ้ายและขอบขวาไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวราบตามหลักการวิเคราะห์ของไฟไนท์อีลิเมนต์ตามหลักวิศวกรรมเทคนิค [2] มีการแบ่งโครงข่ายออกเป็นชั้นส่วนย่อยแบบละเอียดสูงสุด (Very fine) และกำหนดเงื่อนไขสมการย่อย (Flow conditions) แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนได้แก่ การตั้งค่าแบบจำลองเริ่มต้น (Initial phase), การตั้งค่าแรงกระทำเสาเข็ม (Install bored pile) และการกำหนดโหลดกระทำเสาเข็ม (Load) เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการทรุดตัวของเสาเข็ม ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 โครงข่ายไฟไนท์อีลิเมนต์ของแบบจำลองเสาเข็มฝังในดินเหนียว

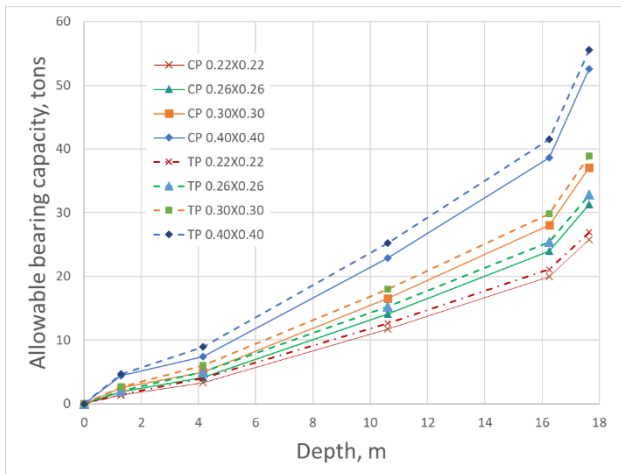
4. ผลการวิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์ถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนเพื่อเป็นประโยชน์ทางวิชาการต่อผู้ที่ต้องการนำองค์ความรู้ไปใช้ในการออกแบบฐานรากเสาเข็มในทางปฏิบัติ โดยส่วนแรกในหัวข้อ 4.1 จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักของเสาเข็มไม้และเสาเข็มคอนกรีตที่มีความแตกต่างกันทั้งรูปปร่างหน้าตัด (สี่เหลี่ยมและวงกลม) และความลึก (1.3-17.65 m) ของเสาเข็ม ส่วนในหัวข้อ 4.2 จะเป็นการประเมินค่าการทรุดตัวของดินโดยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์เทียบกับการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มแบบสถิตย์ศาสตร์ (Static pile load test) ภาคสนาม

4.1 ชาร์ตสำหรับการออกแบบฐานรากเสาเข็มในดินเหนียวอ่อน

4.1.1 ชาร์ตออกแบบฐานรากเสาเข็มแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส

สำหรับฐานรากเสาเข็มหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่จะใช้ในการก่อสร้าง ผู้วิจัยเลือกขนาดที่เหมาะสมขนาดกว้างและยาว 4 รูปแบบได้แก่ 0.22 เมตร, 0.26 เมตร, 0.30 เมตร และ 0.40 เมตร ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ (Allowable bearing capacity, Q_{all}) ทั้งในเสาเข็มไม้ (TP) และเสาเข็มคอนกรีต (CP) ที่ความลึกแตกต่างกันตามคุณสมบัติของชั้นดินแต่ละชั้นที่ปลายเสาเข็มถูกวางไว้ที่ความลึกตั้งแต่ 1.3 ถึง 17.65 เมตร จากชาร์ตสำหรับการออกแบบที่แสดงไว้ดังรูปที่ 4 สามารถวิเคราะห์ได้ว่า ขนาดและความลึกของเสาเข็มที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของฐานรากเสาเข็มที่มากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งถ้าอธิบายตามหลักวิชาการดังสมการ Static pile capacity ก็จะเห็นได้ว่า ความลึกของชั้นดินและขนาดของเสาเข็มที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการสะสมรวมของแรงเสียดทานที่ผิวของเข็ม ($R_{s,k}$) ของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u), ความเค้นประสิทธิผล (σ'_{vo}) และพื้นที่บริเวณปลายเข็ม (A_b) ที่เกิดขึ้นในดินแต่ละชั้นสะสมกันไปเรื่อยๆ ดังสมการที่ 1 และ 2 เช่นหากพิจารณาเสาเข็มคอนกรีตหน้าตัดกว้าง 0.22 เมตร (CP 0.22X0.22) ที่ความลึก 1.3 เมตรในรูปที่ 4 จะให้ค่าน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 1.36 ตัน แต่เมื่อต้องการออกแบบเสาเข็มขนาดหน้าตัดเดิมแต่ให้มีความลึกหรือความยาวของเสาเข็มเพิ่มขึ้นเป็น 17.65 เมตรจะพบว่าค่าน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้เพิ่มขึ้นเป็น 25.79 ตัน และในขณะเดียวกันหากเลือกขนาดของเสาเข็มให้มีความกว้างเพิ่มขึ้นเป็น 0.30 เมตร (CP 0.30X0.30) ที่ความลึก 17.65 เมตรเท่าเดิมก็จะเห็นว่าค่าน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 37.06 ตัน

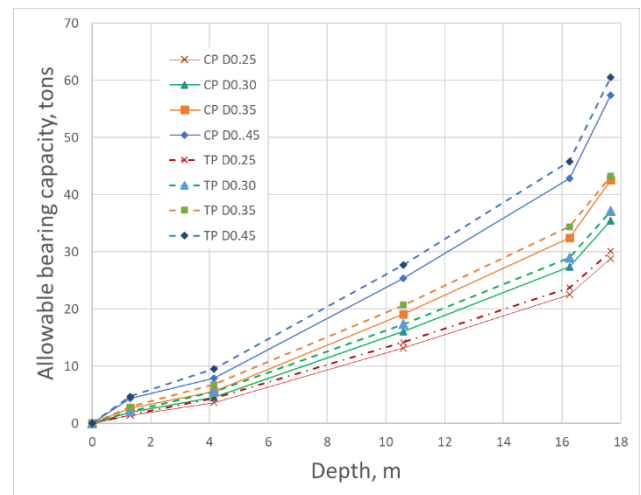


รูปที่ 4 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยสำหรับฐานรากเสาเข็มแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส (CP:เสาเข็มคอนกรีต และ TP:เสาเข็มไม้)

4.1.2 ชาร์ตออกแบบฐานรากเสาเข็มแบบวงกลม

ฐานรากเสาเข็มดังรูปที่ 5 เหมาะสมกับเสาเข็มไม้และคอนกรีตที่รูปร่างหน้าตัดเป็นวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 เมตร, 0.30 เมตร, 0.35 เมตร และ 0.45 เมตร โดยความลึกและขนาดที่เพิ่มขึ้นของเสาเข็มแปรผันตามกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ของเสาเข็มเช่นเดียวกับชาร์ต

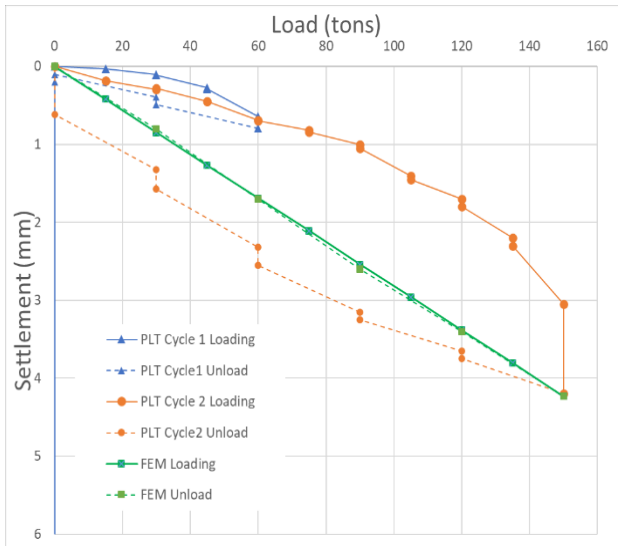
เสาเข็มแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยค่าเริ่มต้นของเสาเข็มไม้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 เมตร (TP D0.25) ที่ความลึก 1.3 เมตรให้ค่าน้ำหนักบรรทุกที่ยอมของเสาเข็มเท่ากับ 1.51 ตันและเมื่อความลึกเพิ่มขึ้นเป็น 17.65 เมตรค่าน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ของเสาเข็มจะเพิ่มเป็น 30.07 ตัน และหากเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 0.45 เมตร (TP D0.45) ที่ความลึก 17.65 เมตรเท่าเดิมจะเห็นได้ว่าค่าน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ของเสาเข็มเพิ่มขึ้นเป็น 60.56 ตัน ซึ่งเป็นไปตามการการสะสมค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) เวลาคำนวณแรงเสียดทานที่ผิวของเข็มในแต่ละชั้นดิน จากชาร์ตฐานรากเสาเข็มทั้งแบบสี่เหลี่ยมและวงกลมจะสังเกตได้ว่าค่าน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ของเสาเข็มไม่มีค่าที่แตกต่างจากฐานรากเสาเข็มคอนกรีตเพิ่มขึ้นไม่มากเพราะในการวิเคราะห์หมีแค่ความแตกต่างของค่า Lateral pressure coefficient (K_s), ผลคูณของค่า Interface friction angle (δ) ในการคำนวณแรงเสียดทาน (Skin friction) เสาเข็ม และค่าหน่วยน้ำหนัก (γ_s) ของไม้ที่ส่งผลต่อค่าน้ำหนักของเสาเข็ม (W_p) ซึ่งมีอิทธิพลน้อยมากต่อการคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มเมื่อเทียบกับค่าแรงต้านที่ปลายเข็ม (End bearing capacity) และแรงเสียดทานเสาเข็ม (Ultimate soil resistance on pile side)



รูปที่ 5 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยสำหรับฐานรากเสาเข็มแบบวงกลม (CP:เสาเข็มคอนกรีต และ TP:เสาเข็มไม้)

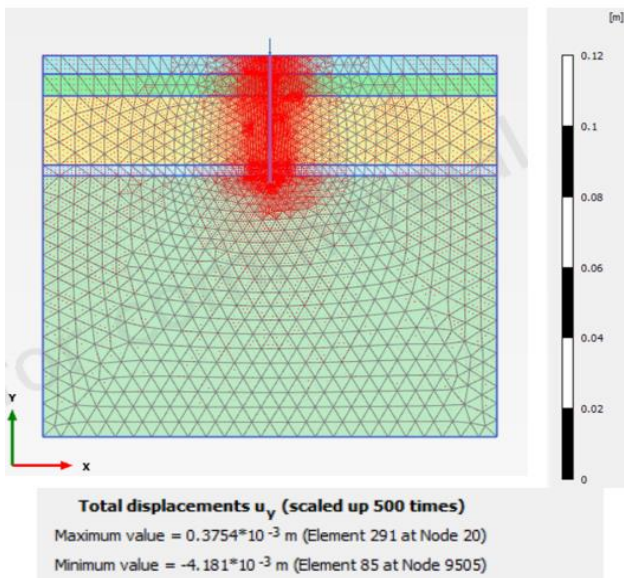
4.2 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าการทรุดตัวของเสาเข็มจากการทดสอบ Static pile load test ภาคสนามและ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

โดยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จาก Plaxis 2D ผู้วิจัยจะทำการจำลองพฤติกรรมของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 เมตร ยาว 17.65 เมตรโดยให้น้ำหนักบรรทุกแบบวงรอบช้าโดยเพิ่มแรงครั้งละ 25 เปอร์เซ็นต์ จนถึง 250 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบไว้ (60 ตัน) โดยมีค่าอัตราส่วนปลอดภัย (F.S. = 2.5) และลดแรงครั้งละ 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักบรรทุกออกแบบ จึงมีแรงอัดทดสอบสูงสุดอยู่ที่ 150 ตัน ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาเข็มจากการทดสอบแบบสถิตยศาสตร์และวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์

จากรูปที่ 6 จะเห็นว่าน้ำหนักบรรทุกรอบที่ 1 (Cycle 1 loading) ที่น้ำหนักบรรทุก 60 ตัน การทรุดตัวที่หัวเสาเข็มมีค่า 0.79 มิลลิเมตร น้ำหนักบรรทุกรอบที่ 2 (Cycle 2 loading) ที่น้ำหนักบรรทุก 150 ตัน การทรุดตัวที่หัวเสาเข็มมีค่า 4.2 มิลลิเมตร และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาเข็มด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ (Plaxis 2D) พบว่าการทรุดตัวมีค่าใกล้เคียงกันโดยที่น้ำหนักบรรทุก 150 ตัน การทรุดตัวที่หัวเสาเข็มมีค่า 4.18 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การกระจายอัตราส่วน 500

จากนั้นเมื่อลดน้ำหนักจนถึงศูนย์ดินจะแสดงพฤติกรรมฮิสเทติก พลาสติกสอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุ [4] และภาพการกระจายตัวของความเค้นและการกระจัดที่ได้จากโปรแกรม Plaxis 2D ทำให้สามารถประมาณขอบเขตพื้นที่ที่จะได้รับผลกระทบจากการก่อสร้างได้

5. อภิปรายและสรุปผลวิจัย

ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดินเพื่อจะนำมาวิเคราะห์พฤติกรรมการทรุดตัวและกำลังรับแรงแบกทานของเสาเข็มโดยนำเสนอเป็นชาร์ตความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักของเสาเข็มไม้และเสาเข็มคอนกรีตที่แตกต่างกันโดย รูปร่าง (วงกลม,สี่เหลี่ยม) และ ความลึก (1.3-17.65 เมตร) ทั้งนี้ยังทำการสอบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกด้วยโปรแกรม Plaxis 2D กับการทดสอบ Static pile load test ภาคสนามเพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมของดินที่ซับซ้อนเพื่อนำมาเป็นประโยชน์ในการออกแบบและก่อสร้างหน้างานจริง สรุปได้ดังนี้

5.1) ชาร์ตสำหรับการออกแบบฐานรากเสาเข็มในดินเหนียวอ่อนสำหรับเสาเข็มไม้และเสาเข็มคอนกรีตรูปสี่เหลี่ยมมีหน้าตัดที่เหมาะสมน้อยที่สุดคือ 0.22x0.22 เมตร รับน้ำหนักที่ความลึก 1.3-17.65 เมตร ได้ที่ 1.36 และ 25.79 ตัน สำหรับเสาเข็มคอนกรีต ค่ารับน้ำหนักที่ 1.47 และ 26.95 ตัน สำหรับเสาเข็มไม้ หน้าตัดมากที่สุดอยู่ที่ 0.40x0.40 ตัน รับน้ำหนักที่ความลึก 1.3-17.65 เมตร ได้ที่ 4.39 และ 52.58 ตัน สำหรับเสาเข็มคอนกรีต ค่ารับน้ำหนักที่ 4.66 และ 55.58 ตัน สำหรับเสาเข็มไม้ ตามลำดับ

5.2) ในส่วนของชาร์ตรูปร่างวงกลมต้นหน้าตัดน้อยสุดอยู่ที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 เมตร และมากที่สุดที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 เมตร รับน้ำหนักสูงสุดที่ความลึก 17.65 เมตร ได้ที่ 57.44 ตัน สำหรับเสาเข็มคอนกรีตและ 60.56 ตัน สำหรับเสาเข็มไม้

5.3) ขนาดและความลึกที่เพิ่มขึ้นแปรผันตามกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากค่าการสะสมแรงเสียดทานของเสาเข็มในดินแต่ละชั้น

5.4) ผู้วิจัยพบว่าชนิดของเสาเข็มในชาร์ตส่งผลต่อความแตกต่างในกำลังรับน้ำหนักบรรทุกไม่มากเพราะมีการเปลี่ยนแปลงใน K_p , δ และค่าหน่วยน้ำหนัก (γ_s) ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้มีอิทธิพลต่อค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยเพียงเล็กน้อย

5.5) วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์มีประโยชน์ในการอธิบายพฤติกรรมการรับน้ำหนักของดินที่ซับซ้อนสำหรับนำมาประยุกต์ใช้ออกแบบหน้างานจริงได้แต่ควรระวังเรื่องการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่จะใส่ลงไปโปรแกรมเทียบกับข้อมูลภาคสนามเพื่อให้ได้ผลเฉลยที่ใกล้เคียงและสอดคล้องกับความจริง

5.6) สำหรับการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวพบว่าที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุด 150 ตัน ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 2.5 เท่าของน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบไว้ คือ 60 ตัน ทำให้ได้ค่าการทรุดตัวในการทดสอบแบบสถิตยศาสตร์ที่ 4.2 มิลลิเมตรซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์คือ 4.18 มิลลิเมตร ตามลำดับ

เอกสารอ้างอิง

- [1] อนุชา วงษ์เลิศ, พรเกษม จงประดิษฐ์, พิทยา แจ่มสว่าง และ วรพจน์ เพชรเกตุ (2558). ประสิทธิภาพของไม้ยูคาลิปตัสในการเสริมกำลังเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนาม : การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกและพฤติกรรมคั่นดินทดสอบ. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, ปีที่ 38, ฉบับที่ 3, หน้า 225-242.
- [2] สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์ และ บุญชัย อุกฤษฏ์ชน (2558). การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติของเสาเข็มรับแรงดันด้านข้างในดินเหนียว. *วิศวกรรมสารธรรมศาสตร์.*, ปีที่ 3, ฉบับที่ 1, หน้า 3-14.
- [3] สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์ และ บุญชัย อุกฤษฏ์ชน (2559). กำลังรับแรงเฉียงของเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสฝังลึกมากในดินเหนียว. *วิศวกรรมลาดกระบัง.*, ปีที่ 33, ฉบับที่ 1, หน้า 67-71.
- [4] เทิดศักดิ์ เลโอสง และ พงศกร พวงชมพู (2564). การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การต้านแรงกดของดินโดยการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มและการวิเคราะห์เชิงตัวเลข. *วารสารวิจัย มช. (ฉบับบัณฑิตศึกษา).*, ปีที่ 21, ฉบับที่ 1, หน้า 77-87.
- [5] ยอดตะวัน รักขารมย์ และ พรพจน์ ต้นเส็ง (2563). การวิเคราะห์การทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มแบบแผ่สำหรับอาคารสูงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติ. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 25*, ชลบุรี, 15-17 กรกฎาคม 2563, หน้า GTE15.1-GTE15.10.
- [6] Wyjadlowski, M., Baginska I. and Reiner, J. (2018). *Probabilistic assessment of pile capacity based on CPTu probing including random pile foundation depth*. MATEC Web of Conferences 196. 01058(2018). XXVII R-S-P Seminar 2018, Theoretical foundation of civil engineering. pp. 1-8.
- [7] Tomlison, M. and Woodward, J. (2008). *Pile design and construction practice*. 5th ed., Taylor & Francis, 2008.
- [8] Kumar, R., Bhargava, K. and Choudhury, D. (2016). *Estimation of engineering properties of soils from field SPT using random number generation*. INAE Lett (2016). pp.77-84.