

พฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวเมื่อได้รับแรงกระทำด้านข้างเมื่อทำนายด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์และวิธีเชิงตัวเลข

Behaviors of a Single Pile Subjected to Lateral Loading Predicted by Analytical and Numerical Methods

ภณ พงศ์สุวรรณ¹ สุทธิวิธ นาคศรี¹ สิบปภาส สุวรรณชล¹ และ วรัช ก้องกัญญา^{1,*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพฯ

*Corresponding author; E-mail address: warat.kon@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

เสาเข็มเป็นองค์ประกอบสำคัญส่วนหนึ่งในองค์อาคารต่าง ๆ ซึ่งมีหน้าที่รับน้ำหนักโครงสร้างส่วนต่าง ๆ และถ่ายเทลงสู่ดิน โดยปกติน้ำหนักที่ถ่ายเทลงมาจากโครงสร้างส่วนใหญ่มักเป็นแรงในแนวตั้ง (Vertical load) แต่ในความเป็นจริงแล้วเสาเข็มยังต้องรับแรงกระทำทางด้านข้าง (Lateral load) ด้วย ซึ่งก็เป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาออกแบบเสาเข็มเช่นกัน งานวิจัยนี้สนใจการวิเคราะห์เสาเข็มเดี่ยวซึ่งติดตั้งอยู่ในชั้นดินทรายเมื่อรับแรงด้านข้างทิศทางเดียวด้วย Non-dimensional method (NDM), Finite element method (FEM) และ Finite difference method (FDM) ซึ่งให้ผลลัพธ์เป็นแรงภายในและการโก่งตัวตามตำแหน่งต่าง ๆ ของเสาเข็ม รวมไปถึง Poulos's method (Poulos's) และ Characteristic load method (CLM) ซึ่งให้ผลลัพธ์เป็นการโก่งตัวที่ผิวดินและโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นในเสาเข็ม ผลการวิเคราะห์เหล่านี้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพจากงานวิจัยก่อนหน้า จากการเปรียบเทียบพบว่า NDM และ Poulos's ให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำเมื่อแรงกระทำด้านข้างที่หัวเสาเข็มมีค่าต่ำ เช่นเดียวกับกับ FEM และ FDM อนึ่งในการวิเคราะห์ด้วย FDM การใช้ค่าโมดูลัสของดินคงที่ตามความลึกให้ความแม่นยำของผลลัพธ์น้อยกว่าการใช้ค่าโมดูลัสของดินแบบแปรผันตามความลึก อย่างไรก็ตาม CLM ให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำมากกว่าวิธีการอื่น ๆ เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้ยังคงมีความแม่นยำแม้แรงกระทำที่หัวเสาเข็มเพิ่มมากขึ้น เพราะในวิธีนี้พิจารณาพฤติกรรมไม่เชิงเส้นของดินรอบเสาเข็ม ซึ่งแตกต่างจากวิธีการอื่น ๆ ที่ไม่พิจารณาพฤติกรรมไม่เชิงเส้นของดินรอบเสาเข็ม

คำสำคัญ: ทราย, วิธีเชิงตัวเลข, วิธีเชิงวิเคราะห์, เสาเข็มเดี่ยว, แรงด้านข้าง

Abstract

Pile is one of the key elements of a building, which is responsible for supporting the weight of a structure and transferring it into the ground. Usually, the weight is the vertical force. In fact, the pile also must transfer the lateral force, which is important to consider. This research is interested in the analysis of behaviours of a single pile installed in sand when subjected to lateral load using non-dimensional method (NDM),

finite element method (FEM) and finite difference method (FDM), of which the outcomes are internal force and deflection along the pile. The analysis also included Poulos's method (Poulos's) and characteristic load method (CLM), of which the outcomes are deflection at the ground level and maximum bending moment in the pile. The results of these analyzes were compared with the results obtained from a physical modeling test from previous research. By comparison, it is found that NDM and Poulos's gave accurate results when the lateral load on the pile head is low. Similar result could be observed with FEM and FDM. For FDM, using of soil modulus constant with depth resulted in less accuracy than using of soil modulus varied with depth. Nonetheless, CLM gave the most accurate result comparing to the other methods as the results remained accurate despite the increased load on the pile head, because the non-linear behaviours of soil are taken into consideration. This is different from the other methods in that the non-linear behaviours of soil around the pile are not considered.

Keywords: Sand, Numerical Method, Analytical Method, Single Pile, Lateral Loading

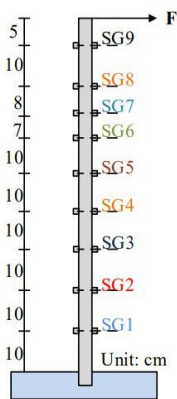
1. บทนำ

เสาเข็มถือเป็นองค์ประกอบสำคัญที่สุดส่วนหนึ่งของอาคาร โดยทำหน้าที่ในการถ่ายเทน้ำหนักของตัวอาคารลงสู่พื้นดิน ซึ่งแรงที่เกิดมาจากการถ่ายเทน้ำหนักข้างต้น ล้วนแล้วแต่เป็นแรงกระทำในแนวตั้ง แต่ในความเป็นจริงแล้วเสาเข็มยังต้องรับแรงกระทำทางด้านข้าง ซึ่งก็เป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาออกแบบเสาเข็มเช่นกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวรับแรงด้านข้างด้วยวิธีการต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นวิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical method) หรือวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) ที่เป็นที่ยอมรับและได้รับการยอมรับในการแก้ปัญหาสำหรับเสาเข็มเดี่ยวรับแรงด้านข้าง รวมไปถึงเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการเหล่านี้ กับพฤติกรรมจริงของเสาเข็มที่ได้จากการทดสอบทางกายภาพของงานวิจัยก่อนหน้า โดย

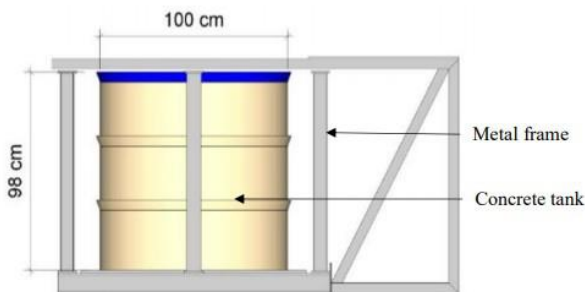
มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบกับผลการทดสอบด้วยวิธีการวิเคราะห์เสาเข็มเดี่ยวรับแรงด้านข้าง ได้แก่ 1. Non-Dimensional Method (NDM) 2. Poulos's Method (Poulos's) 3. Finite Element Method (FEM) 4. Finite Difference Method (FDM) และ 5. Characteristic Load Method (CLM) งานวิจัยนี้มีขอบเขตการศึกษาดังต่อไปนี้ 1. การวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวจะทำได้ด้วยวิธีการต่าง ๆ ดังที่กล่าวไปข้างต้นเท่านั้น 2. แรงกระทำต่อเสาเข็มเพิ่มขึ้นต่อเนื่องในทิศทางเดียวเท่านั้น โดยเงื่อนไขที่หัวเสาเข็มเป็นแบบยึดแน่น (Fixed) 3. ชั้นดินที่ใช้วิเคราะห์เป็นดินทราย (Sand) และ 4. ผลการวิเคราะห์จะนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากการวิจัยของ Suebthawinkul [1] เท่านั้น

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

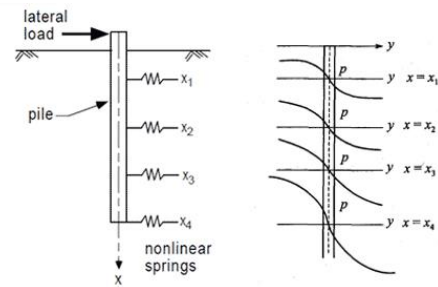
งานวิจัยของ Suebthawinkul [1] ทำการทดสอบกับเสาเข็มเดี่ยวจำลอง โดยที่ติดตั้งอยู่กับถังทราย แสดงในรูปแบบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 1 เสาเข็มจำลองของงานวิจัยของ Suebthawinkul [1]



รูปที่ 2 ถังทรายสำหรับติดตั้งเสาเข็ม (Suebthawinkul [1])



รูปที่ 3 สมมติฐานของ Winkler [2]

2.1 Finite Difference Method

2.1.1 สมมติฐานของ Winkler

สมมติฐานของ Winkler [2] หรือก็คือการใช้ค่าโมดูลัสการต้านแรงกดของดิน (Modulus of subgrade reaction, k'_h) หรือในบางครั้งจะเรียกว่า โมดูลัสของดิน (Soil modulus, E_s) ซึ่ง Winkler [2] ได้สมมติให้ดินมีพฤติกรรมเป็นเหมือนสปริง ที่ระดับความลึกต่าง ๆ โดยค่าความชันของ Soil reaction (p) – pile deflection (y) ก็คือค่าโมดูลัสการต้านแรงกดของดิน ซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 3

โดยที่ Terzaghi [3] กล่าวว่า สำหรับดินทรายมักจะสมมติให้ค่าโมดูลัสของดินเป็นศูนย์ที่ผิวดิน และเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามความลึกดังสมการที่ 1

$$K'_h = E_s = n_h \cdot x \quad (1)$$

โดยที่ K'_h คือ โมดูลัสต้านทางแรงกดของดิน (kN/m^2)

E_s คือ โมดูลัสของดิน (kN/m^2)

n_h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงโมดูลัสของดิน (kN/m^3)

x คือ ระดับความลึก (m)

2.1.2 สมการเชิงอนุพันธ์สำหรับเสาเข็มเดี่ยวรับแรงด้านข้าง

Palmer and Thompson [4] เสนอวิธี FDM ซึ่งสมการสำหรับเสาเข็มเดี่ยวรับแรงด้านข้างแสดงได้ดังสมการที่ 2

$$\frac{d^4 y}{dx^4} + \frac{E_s}{EI} y = 0 \quad (2)$$

โดยที่ y คือ การโก่งตัว (m)

E คือ โมดูลัสของเสาเข็ม (kPa)

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (m^4)

จากการประมาณสมการเชิงอนุพันธ์ จะได้สมการสำหรับเสาเข็มเดี่ยวรับแรงด้านข้างดังสมการที่ 3

$$y_{i-2} - 4y_{i-1} + 6y_i - 4y_{i+1} + y_{i+2} = -\frac{E_s h^4}{EI} y_i \quad (3)$$

โดยที่ y_i คือ การโก่งตัวที่จุดต่อใด ๆ (m)
 E_{si} คือ โมดูลัสของดินที่จุดต่อใด ๆ (kN/m²)
 h คือ ความยาวของชั้นส่วนระหว่างจุดต่อ (m)

โดยสามารถหาค่าแรงภายในอื่น ๆ ได้จากสมการที่ 4, 5 และ 6

$$M = \frac{EI}{h^2} (y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1}) \quad (4)$$

$$V = \frac{EI}{2h^3} (y_{i-2} - 2y_{i-1} + 2y_{i+1} - y_{i+2}) \quad (5)$$

$$p = E_{si} y_i \quad (6)$$

2.2 Non-Dimensional Method

Matlock and Reese [5] ได้สร้างกราฟไร้มิติสำหรับเสาเข็มที่ถูกกระทำด้านข้างและตัวแปรไร้มิติ (Z) โดย Z เท่ากับ $\sqrt{X/T}$ และ T สามารถหาได้จากสมการที่ 7

$$T = \left(\frac{EI}{n_h} \right)^{0.2} \quad (7)$$

ใช้ค่า Z เพื่อนำค่ามาหาสัมประสิทธิ์ซึ่งรายงานใน Matlock and Reese [5]

โดยที่ A_y, B_y คือ สัมประสิทธิ์การโก่งตัว
 A_m, B_m คือ สัมประสิทธิ์โมเมนต์
 A_v, B_v คือ สัมประสิทธิ์แรงเฉือน
 A_p, B_p คือ สัมประสิทธิ์แรงปฏิกิริยาของดิน

จากนั้น จะสามารถหาค่าการโก่งตัว โมเมนต์ตัด แรงเฉือน และแรงปฏิกิริยาของดินได้จากสมการที่ 8, 9, 10 และ 11

$$X_z = A_y - 0.927B_y \left(\frac{H_t T^3}{EI} \right) \quad (8)$$

$$M_z = A_m - 0.927B_m (H_t T) \quad (9)$$

$$V_z = A_v - 0.927B_v (H_t) \quad (10)$$

$$p_z = A_p - 0.927B_p (H_t) \quad (11)$$

โดย H_t คือ แรงเฉือนที่กระทำที่ผิวดิน (N)

2.3 Characteristic Load Method

Duncan และ คณะ [6] ได้เสนอ Characteristic Load Method ซึ่งพัฒนามาจากการวิเคราะห์ที่ไม่เชิงเส้นของ p-y curve โดยมีสมการสำคัญที่ใช้ดังสมการที่ 12 และ 13 ตามลำดับ

$$H_c = 1.57B^2 (E_p R_t) \left(\frac{\gamma' B \phi' k_p}{E_p R_t} \right)^{0.57} \quad (12)$$

$$M_c = 1.33B^2 (E_p R_t) \left(\frac{\gamma' B \phi' k_p}{E_p R_t} \right)^{0.40} \quad (13)$$

โดยที่ R_t คือ $I_p / I_{circular}$
 γ' คือ หน่วยน้ำหนักประสิทธิผล (kN/m³)
 B คือ ขนาดของเสาเข็ม (m)
 ϕ' คือ มุมเสียดทานประสิทธิผล (Degree)
 k_p คือ สัมประสิทธิ์ความต้านดินเชิงรับของ Rankine

ในกรณีที่เสาเข็มยาวสามารถหาค่าการโก่งตัวที่ระดับผิวดินโดยใช้สมการที่ 14

$$\frac{X_t}{B} = 28.8 \left(\frac{H_t}{H_c} \right)^{1.5} \quad (14)$$

หาโมเมนต์ตัดสูงสุดที่ระดับผิวดินโดยใช้สมการที่ 15

$$\frac{M_{max}}{M_c} = 2.64 \left(\frac{H_t}{H_c} \right)^{1.3} \quad (15)$$

2.4 Poulos's Method

Poulos และ Davis [7] ได้เสนอวิธีสำหรับการวิเคราะห์หาค่าการโก่งตัวที่ผิวดินและโมเมนต์สูงสุดในเสาเข็ม โดยการโก่งตัวหาได้จากสมการที่ 16

$$y_{fg} = \frac{P_t}{n_h L^2} I'_{yf} \quad (16)$$

โดยที่ y_{fg} คือ การโก่งตัวที่ผิวดิน (m)
 P_t คือ แรงดันข้างกระทำที่ผิวดิน (N)
 L คือ ความยาวของเสาเข็ม (m)
 I'_{yf} คือ ค่าสัมประสิทธิ์หัวยึด

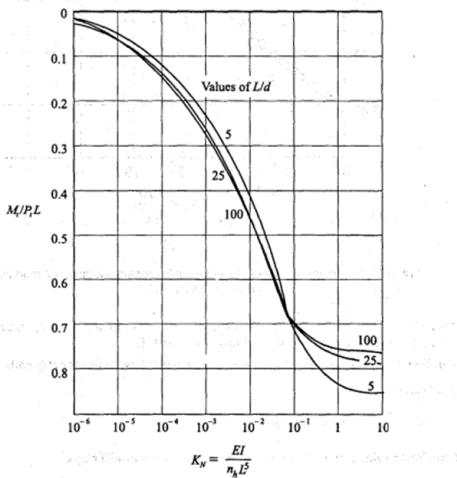
I'_{yf} จะสามารถหาได้ เมื่อทราบค่า K_N และค่า L/d และจะสามารถหาค่า y_{fg} ได้ต่อไป ซึ่งค่า K_N สามารถหาได้จากสมการที่ 17

$$K_N = \frac{EI}{n_s L^5} \quad (17)$$

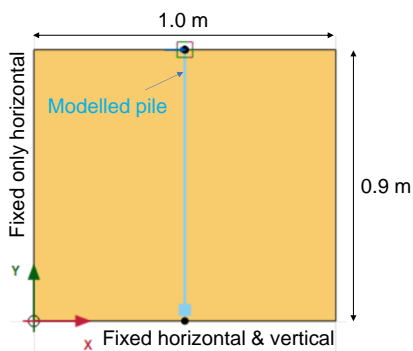
โดยที่ K_N คือค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และที่ค่าโมเมนต์สูงสุดสามารถหาได้จากรูปที่ 4 เมื่อทราบค่า K_N และ L/d เช่นกัน

2.5 Finite Element Method

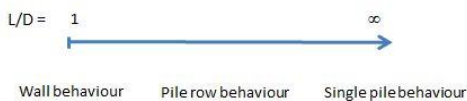
งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ PLAXIS 2D ในการจำลองและวิเคราะห์ โดยกำหนดลักษณะของปัญหาเป็นแบบ Plane strain ซึ่งแสดงในรูปที่ 5 โดยที่ PLAXIS 2D ในเวอร์ชันที่สูงกว่า 2013 มีโครงสร้างที่ชื่อว่า Embedded beam row ซึ่งสามารถจำลองให้มีพฤติกรรมใกล้เคียงกับเสาเข็มเดี่ยวได้ โดยพฤติกรรมของโครงสร้างนี้จะขึ้นอยู่กับค่า L/D ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 4 โมเมนต์สูงสุดในเสาเข็ม (Poulos และ Davis [7])



รูปที่ 5 ลักษณะปัญหาแบบ Plane strain



รูปที่ 6 Embedded beam row (PLAXIS 2D [8])

3. วิธีการวิเคราะห์

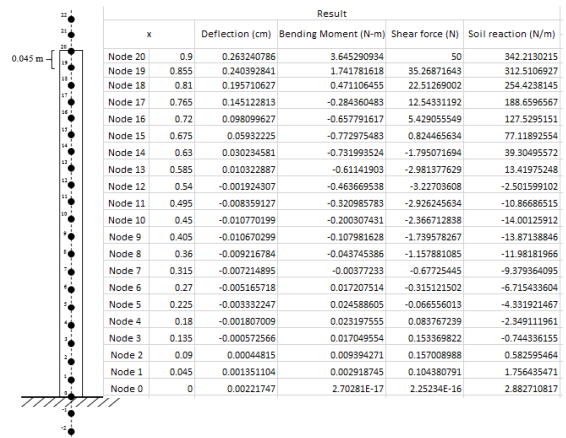
พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่จำเป็นสำหรับการจำลองเสาเข็มด้วยวิธีการวิเคราะห์ต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุต่างๆ สำหรับการวิเคราะห์

Material	Parameter	Value
Pile	Length of pile, L (m)	0.9
	Diameter of pile, B (m)	0.02
	Modulus of Elastic, E_p (kN/m ²)	4.1×10^6
	Moment of inertia, I_p (m ⁴)	3.94×10^{-9}
	Moment of inertia of circular area, $I_{circular}$ (m ⁴)	7.9×10^{-9}
	$I_p / I_{circular}$	5.01×10^{-1}
Sand	Friction angle, ϕ' (Deg.)	30
	Dilatancy angle, ψ' (Deg.)	10
	Unit weight, γ' (kN/m ³)	15.38
	Passive Rankine's earth pressure, K_p	3
	Poisson's ratio, ν	0.3
	Cohesion, c (kN/m ²)	5
	Young's modulus, E_{50} (kN/m ²)	2748

3.1 Finite Difference Method

1. ทำการแบ่งจุดต่อออกเป็น 20 จุด และจากสมการที่ 3 จะสามารถสร้างสมการได้ทั้งหมด 21 สมการ
2. Apply boundary condition เพื่อเพิ่มสมการ สำหรับปลายเสาเข็มให้แรงเฉือนและโมเมนต์ตัดเท่ากับศูนย์ โดยที่ความชันและแรงเฉือนหัวเสาเข็มมีค่าเท่ากับศูนย์และ P_t ตามลำดับ
3. เขียนสมการต่าง ๆ ข้างต้นให้อยู่ในรูป $[A][X] = [B]$ และทำการอินเวอร์สเมทริกซ์โดยใช้ฟังก์ชันใน Microsoft Excel จากวิธีเมทริกซ์อินเวอร์ส $[X] = [A]^{-1}[B]$ จะสามารถแก้ระบบสมการได้ จะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ตำแหน่งของ Node และผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม MS Excel

การวิเคราะห์ด้วยวิธี FDM ได้แบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 2 รูปแบบดังนี้

1. กรณีที่ค่า k คงที่เท่ากันทุกจุดต่อ (k constant) มีค่าเท่ากับ 130 kN/m^2
2. กรณีที่ค่า k ไม่คงที่เท่ากันทุกจุดต่อ (k vary) โดยมีค่าเท่ากับ 120 kN/m^2 ที่ผิวดินและเพิ่มขึ้นจะมีค่าเท่ากับ 130 kN/m^2 ที่ปลายเสาเข็ม

3.2 Non-Dimensional Method

การวิเคราะห์ด้วยวิธี NDM มีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการแบ่งจุดสำหรับหาค่าต่าง ๆ โดยกำหนดระยะระหว่างจุดตามความยาวของเสาเข็มเท่ากับร้อยละ 5 ของความยาวเสาเข็ม
2. หาค่า T จากสมการที่ 7 และหาค่า Z จาก x/T ตามตำแหน่ง x ต่าง ๆ ที่กำหนด
3. นำค่า Z ไปหาค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งรายงานใน Matlock & Reese [5] คำนวณหาค่าการโก่งตัว, โมเมนต์ดัด, แรงเฉือน และแรงปฏิกิริยาของดินจากสมการที่ 8, 9, 10 และ 11

3.3 Characteristic Load Method

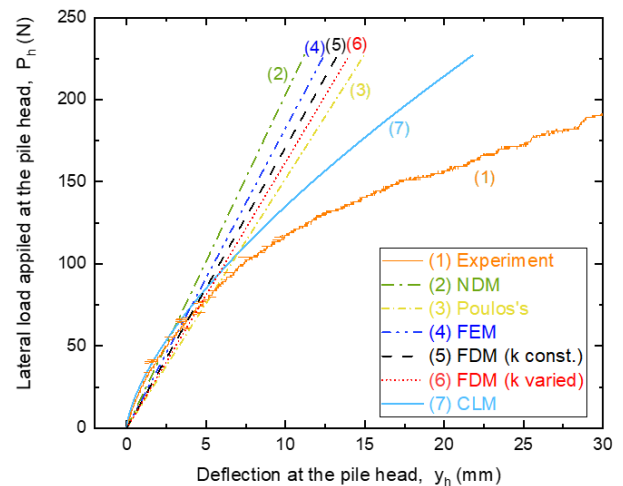
1. คำนวณค่าแรงลักษณะเฉพาะและคำนวณโมเมนต์ลักษณะเฉพาะจากสมการที่ 12 และ 13 ตามลำดับ
2. คำนวณการโก่งตัวที่ผิวดินจากสมการที่ 14
3. คำนวณโมเมนต์ดัดสูงสุดในเสาเข็มจากสมการที่ 15

3.4 Poulos's Method

1. หาค่า K_w จากสมการที่ 17 และหาค่า L/d จะสามารถหาค่า I'_{yf} ได้ และหาค่า y_{fg} จากสมการที่ 16
2. หาค่า M_p/P_L จากรูปที่ 4 และแก้สมการหาค่า M_c

3.5 Finite Element Method

1. สร้างแบบจำลอง Plane strain
2. สร้างแบบจำลองของดินทราย โดยใช้แบบจำลองดินมอร์-คู ลอมป์ ใส่ค่าพารามิเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 1
3. Model แบบจำลองของเสาเข็ม โดยใช้การวิเคราะห์แบบ Linear elastic model เลือกใช้แบบจำลอง Embedded beam row โดยที่ใส่ $L_{spacing}$ เท่ากับ 1 เมตร และค่าพารามิเตอร์ดังแสดงใน ตารางที่ 1
4. Generate mesh เป็นแบบระนาบความเครียด ชิ้นส่วนของดิน เป็นชิ้นส่วนรูปสามเหลี่ยมแบบมี 15 จุดต่อ การแบ่งโครงข่าย ออกเป็นชิ้นส่วนย่อยใช้แบบละเอียดสูง
5. ทำการใส่แรงที่หัวเสาเข็มแบบ Point load
6. Run โปรแกรม Plaxis2D
7. Output ค่า Deflection (y) Shear (V) และ Bending moment (M) ที่ได้หลังจากโปรแกรมวิเคราะห์เสร็จสิ้น



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างที่กระทำที่หัวเสาเข็ม (P_h) กับ การโก่งตัวที่หัวเสาเข็ม (y_h)

4. ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

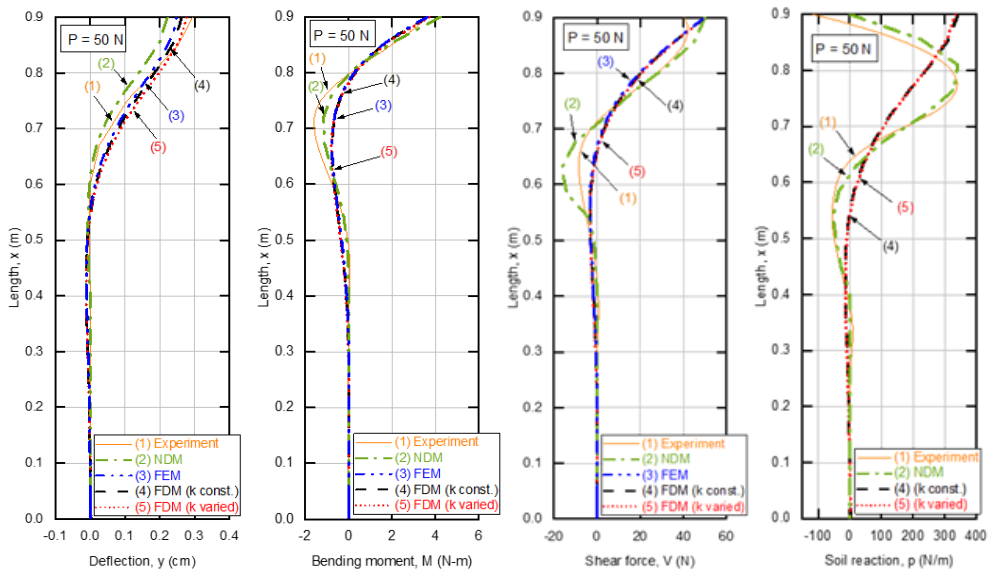
4.1 แรงด้านข้างที่หัวเสาเข็ม (P_h) - การโก่งตัวที่หัวของเสาเข็ม (y_h)

จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น NDM, Poulos's, FEM, FDM และ CLM จะสามารถสร้าง P_h - y_h curve ที่ได้จากการวิเคราะห์ เพื่อเปรียบเทียบกับ P_h - y_h curve ที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 8 จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่า ลักษณะของ P_h - y_h curve ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี NDM, วิธี Poulos's, วิธี FEM และวิธี FDM มีลักษณะเชิงเส้น ซึ่งแตกต่างจากผลที่ได้จากการทดสอบที่มีลักษณะไม่เชิงเส้น ในช่วงที่ P_h ต่ำกว่า 50 N ความสัมพันธ์ P_h - y_h ที่ได้จากการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกันกับ P_h - y_h ที่ได้จากการทดสอบ และจะไม่สอดคล้องมากขึ้นเรื่อย ๆ กับค่า P_h ที่มากขึ้น จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมจริงจะมีค่า y_h มากกว่าพฤติกรรมที่ได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งแตกต่างกับลักษณะของ P_h - y_h curve ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี CLM ที่มีลักษณะไม่เชิงเส้นเหมือนกันกับผลการทดสอบ ความสัมพันธ์ P_h - y_h ที่ได้จากการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกันกับ P_h - y_h ที่ได้จากการทดสอบมากกว่าวิธีการอื่น ๆ

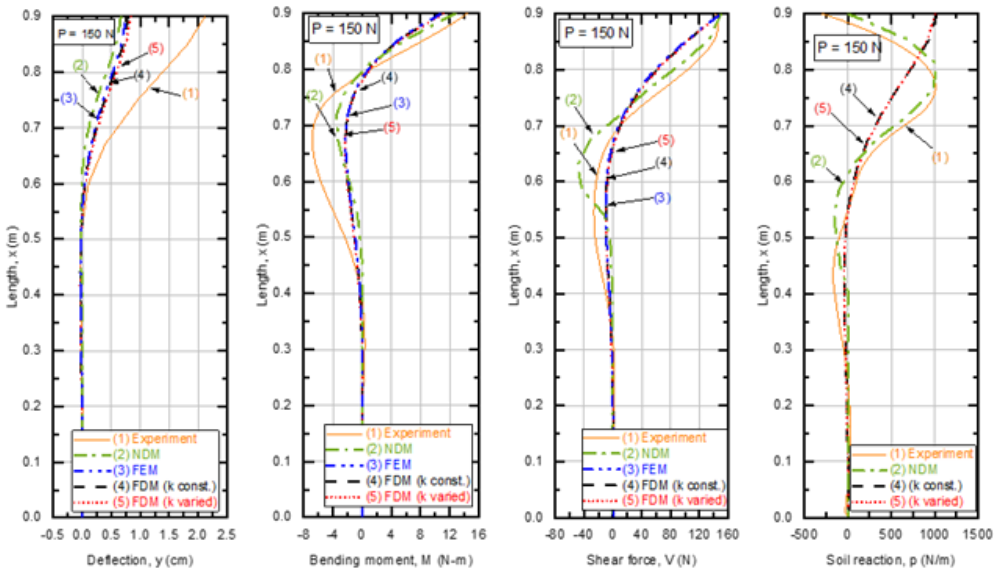
4.2 แรงภายในและการโก่งตัวตามตำแหน่งต่าง ๆ ของเสาเข็ม

จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี NDM, FEM, FDM ซึ่งได้ผลลัพธ์เป็นแรงภายในและการโก่งตัวตามตำแหน่งต่าง ๆ ของเสาเข็ม เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ โดยจะแสดงที่ค่าแรงเท่ากับ 50 N และ 150 N ซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 9 และ 10 ตามลำดับ อนึ่ง Poulos's method และ CLM ไม่สามารถคำนวณแรงภายในและการโก่งตัวตามความยาวของเสาเข็ม

จากรูปที่ 9 กรณีที่มีแรงกระทำเท่ากับ 50 N จะเห็นได้ว่า ลักษณะของโค้งต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี NDM, FEM, FDM มีความใกล้เคียงกันกับลักษณะโค้งที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งหากพิจารณาในกรณีที่แรงเท่ากับ 150 N ซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 10 จะเห็นได้ชัดเจนว่าความสอดคล้องของผลลัพธ์ที่ได้นั้นน้อยลง

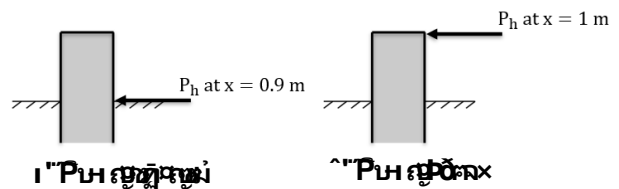


รูปที่ 9 การเปรียบเทียบแรงภายในและการโค้งตัวตามตำแหน่งต่างๆ ของเสาเข็มที่ได้จากการวิเคราะห์และการทดสอบเมื่อ $P = 50$ N

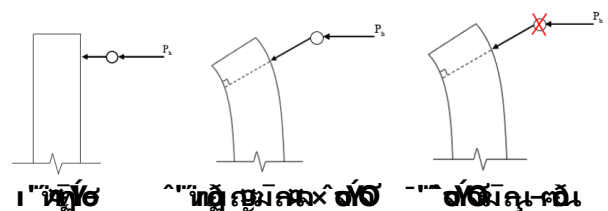


รูปที่ 10 การเปรียบเทียบแรงภายในและการโค้งตัวตามตำแหน่งต่างๆ ของเสาเข็มที่ได้จากการวิเคราะห์และการทดสอบเมื่อ $P = 150$ N

เมื่อพิจารณาที่แรงปฏิกริยาของดินที่วิเคราะห์ด้วยวิธี FDM พบว่า ลักษณะของโค้งค่อนข้างแตกต่างจากผลการทดสอบจริงไปมาก ซึ่งมีความเป็นไปได้จากความแตกต่างของเงื่อนไขต่าง ๆ ในการวิเคราะห์กับการทดสอบ ในการวิเคราะห์แรงที่กระทำที่หัวของเสาเข็มอยู่ที่ระดับผิวดินดังรูปที่ 11ก ซึ่งแตกต่างกับแรงที่กระทำในการทดสอบที่สูงขึ้นมาจากผิวดินดังแสดงในรูปที่ 11ข และอีกส่วนหนึ่งลักษณะของหัวเสาเข็มนั้นมีการใส่ข้อต่อเอาไว้ (รูปที่ 12ก) เพื่อให้เกิดการหมุนได้ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดโมเมนต์ขึ้น (รูปที่ 12ข) แต่เนื่องจากเมื่อเกิดการโค้งตัวของเสาเข็มไประยะหนึ่งข้อต่อหมุนจนสุด (รูปที่ 12ค) จึงทำให้เกิดการตรึงหลังจากนั้นมีลักษณะเป็น Fixed จึงทำให้สมมติได้ว่าลักษณะของหัวเสาเข็มในการทดสอบนั้นเป็น Partially fixed รวมไปถึงแรงที่กระทำนั้นจะมีลักษณะตั้งฉากกับผิวเสาเข็มเสมอซึ่งแตกต่างจากการวิเคราะห์ที่มีลักษณะอยู่ในแนวราบ



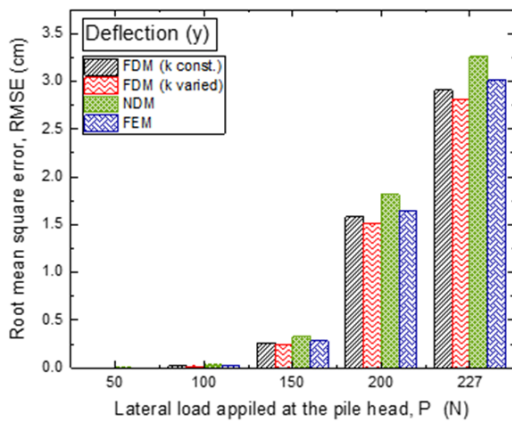
รูปที่ 11 ตำแหน่งของแรงที่กระทำในการวิเคราะห์และการทดสอบ



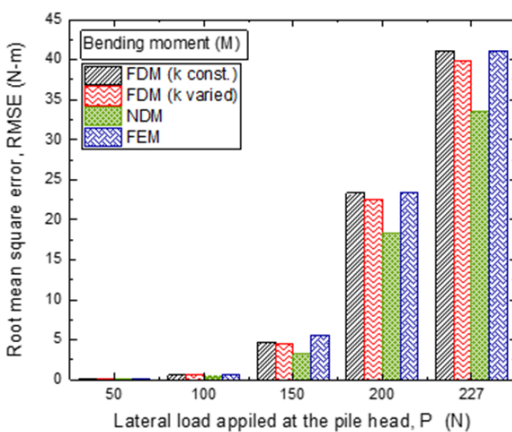
รูปที่ 12 ลักษณะของหัวเสาเข็มในการทดสอบจริง

4.3 การเปรียบเทียบความแม่นยำของการพยากรณ์

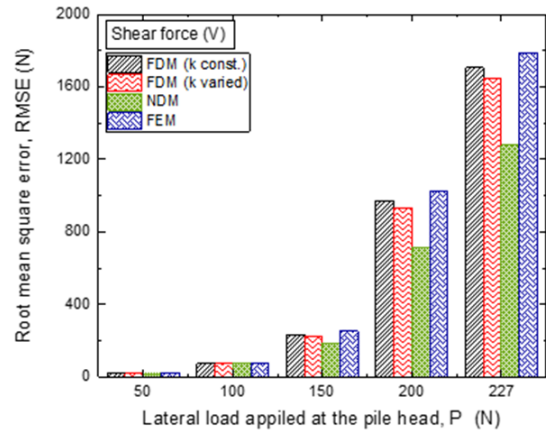
ในหัวข้อนี้จะทำการเปรียบเทียบความแม่นยำระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์และการทดสอบ โดยสำหรับวิธีการที่ให้ผลเป็นแรงภายในและการโก่งตัวตามตำแหน่งของเสาเข็ม จะใช้ค่า Root Mean Square Error (RMSE) ในการเปรียบเทียบดังรูปที่ 13 จะพบว่าผลจากการวิเคราะห์สำหรับทุกวิธีที่ให้ผลลัพธ์เป็นแรงภายในและการโก่งตัวตามตำแหน่งต่าง ๆ ของเสาเข็ม เมื่อแรงกระทำที่หัวเสาเข็มเพิ่มมากขึ้น ค่า RMSE ก็จะมีมากขึ้นด้วยทั้งสำหรับการโก่งตัว โมเมนต์ดัด แรงเฉือน และแรงปฏิกิริยาของดิน ซึ่งหมายความว่าเมื่อมีแรงกระทำที่หัวเสาเข็มเพิ่มมากขึ้น ก็จะส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์นั้นมีความสอดคล้องน้อยลงเมื่อเทียบกับผลจากการทดสอบ โดยอีกประเด็นหนึ่งที่น่าสนใจได้แก่ ความแม่นยำของวิธี FDM ในกรณีที่ใช้ค่า k แตกต่างกัน พบว่า การใช้ค่า k เพิ่มขึ้นตามความลึกให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำมากกว่าการใช้ค่า k คงที่ และหากพิจารณาถึงวิธีการที่ให้ผลลัพธ์เป็นการโก่งตัวและโมเมนต์สูงสุดที่สอดคล้องกับการทดสอบมากที่สุด เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับวิธีการที่ได้ผลเพียงแค่การโก่งตัวที่ผิวดินและโมเมนต์สูงสุดที่เกิดในเสาเข็ม ได้แก่ FDM (k vary) และ NDM ตามลำดับ



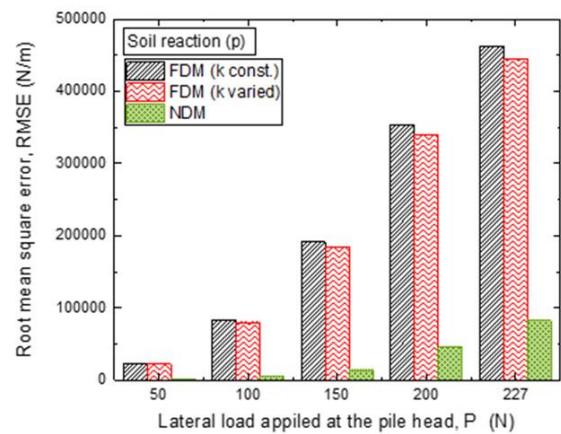
(น) Deflection



(ข) Bending moment



(ค) Shear force



(ง) Soil reaction

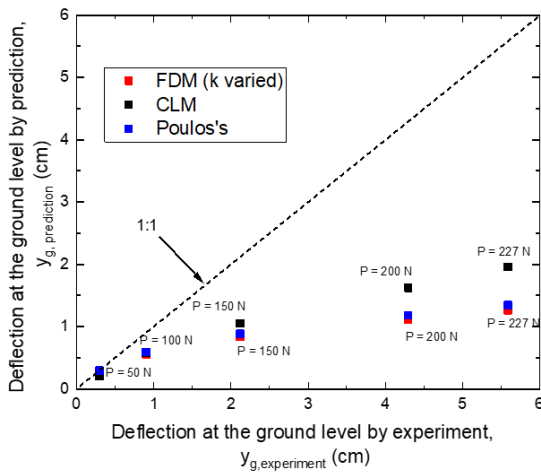
รูปที่ 13 การเปรียบเทียบค่า RMSE

4.4 การโก่งตัวที่ผิวดินและโมเมนต์ดัดสูงสุดในเสาเข็ม

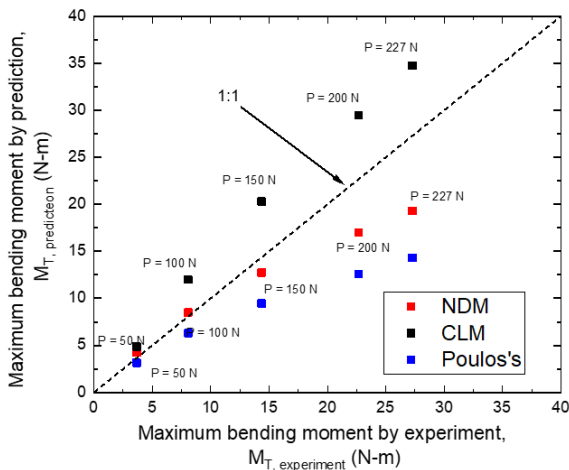
สำหรับวิธีการที่ให้ผลลัพธ์เป็นการโก่งตัวที่ผิวดินและโมเมนต์ดัดสูงสุดในเสาเข็ม ได้แก่ Poulos's และ CLM พบว่าหากนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ โดยจะนำผลที่แม่นยำที่สุด จากวิธีที่ให้ผลลัพธ์เป็นแรงภายในและการโก่งตัวที่เสาเข็มตามตำแหน่งของเสาเข็มมาเปรียบเทียบกับ ได้ผลดังรูปที่ 14 และ 15 ตามลำดับ อนึ่ง เส้น 1:1 ที่แสดงในสองรูปนี้หมายถึงค่าที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าเท่ากับค่าที่ได้จากการทดสอบ

จากรูปที่ 14 พบว่าวิธี CLM ให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบมากที่สุด รองลงมาเป็น Poulos's และ FDM ตามลำดับ ถึงแม้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์จะยังแตกต่างกับผลลัพธ์จากการทดสอบอยู่มาก แต่จากพฤติกรรมของหัวเสาเข็มในการวิเคราะห์เป็นแบบ Fixed หนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์ โดยที่พฤติกรรมของหัวเสาเข็มในการทดสอบจริงเป็นแบบ Partially fixed ซึ่งมีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดการโก่งตัวมากกว่าในกรณีที่เป็น Fixed หนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์ ดังนั้นหากสามารถกำหนดหัวเสาเข็มในการทดสอบเป็น Fixed หนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์ได้ก็จะส่งผลให้การโก่งตัวที่เกิดขึ้นน้อยลงและมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย CLM มากขึ้น และจากรูปที่ 15 พบว่าวิธีที่ให้ผลสอดคล้องกับการทดสอบมากที่สุด ได้แก่ NDM โดยที่วิธี Poulos's กับวิธี FDM ให้ผลที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน

แต่จะสังเกตได้ว่าผลจาก CLM ให้ค่าที่มากกว่าผลจากการทดสอบเสมอ แตกต่างจากวิธี Poulos's และวิธี FDM ที่ให้ค่าที่น้อยกว่า หากพิจารณาจากประเด็นเดียวกับที่กล่าวไปข้างต้น พฤติกรรมที่แตกต่างกันของหัวเสาเข็มในการวิเคราะห์และทดสอบ หัวเสาเข็มในการทดสอบมีลักษณะเป็น Partially fixed ซึ่งมีแนวโน้มที่จะเกิดโมเมนต์ดัดน้อยกว่ากรณีที่เป็นแบบ Fixed หนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์ ดังนั้นหากสามารถกำหนดหัวเสาเข็มในการทดสอบเป็น Fixed หนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์ได้ก็จะส่งผลให้โมเมนต์มีค่ามากขึ้น ซึ่งก็จะมีผลสอดคล้องกับ CLM มากขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 14 การเปรียบเทียบการโก่งตัวที่ผิวดินระหว่างการทดสอบกับ การวิเคราะห์



รูปที่ 15 การเปรียบเทียบโมเมนต์สูงสุดในเสาเข็มระหว่างการทดสอบ กับการวิเคราะห์

5. บทสรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอเกี่ยวกับการวิเคราะห์เสาเข็มเดี่ยวรับแรงด้านข้าง แบบต่อเนื่อง ซึ่งถูกติดตั้งอยู่ในทรายด้วย 1. วิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical method) ซึ่งประกอบไปด้วย 1.1 NDM, 1.2 Poulos's และ 1.3 CLM และ 2. วิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) ซึ่งประกอบไปด้วย 2.1 FEM ซึ่งวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D และ 2.2 FDM รวมทั้งหมด 5 วิธี

โดยผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ที่ได้จากวิธีการต่าง ๆ เหล่านี้จะถูกนำไป เปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบทางกายภาพจากงานวิจัยก่อนหน้า [1] จากผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบในงานวิจัยนี้ สามารถสรุปผล การศึกษาได้ดังต่อไปนี้

1. จากวิธี NDM, วิธี FEM และวิธี FDM พบว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบเมื่อแรงกระทำด้านข้างที่หัวเสาเข็มน้อย และเริ่มสอดคล้องน้อยลงเมื่อแรงกระทำด้านข้างที่หัวเสาเข็มมากขึ้น
2. จากวิธี Poulos's และวิธี CLM พบว่า วิธี Poulos's ให้ผลที่มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบเมื่อแรงกระทำด้านข้างที่หัวเสาเข็มน้อย และเริ่มสอดคล้องน้อยลงเมื่อแรงกระทำด้านข้างที่หัวเสาเข็มมากขึ้น ซึ่งแตกต่างกับวิธี CLM ที่มีความสอดคล้อง ทั้งในช่วงที่แรงกระทำด้านข้างที่หัวเสาเข็มน้อยและแรงกระทำด้านข้างที่หัวเสาเข็มมากขึ้นด้วย
3. สำหรับ FDM ที่แบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ 1. กรณีที่ค่า k คงที่เท่ากันทุกจุดต่อ และ 2. กรณีที่ค่า k ไม่คงที่โดยเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามความลึก พบว่า แรงภายในและการโก่งตัวของเสาเข็มรวมไปถึง P_h-y_h curve ที่ได้จากการวิเคราะห์ ด้วยค่า k ที่ไม่คงที่ให้ผลลัพธ์ที่มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบมากกว่าการวิเคราะห์ด้วยค่า k คงที่

เอกสารอ้างอิง

- [1] Suebthawinkul, P. (2019). Effects of lateral cyclic loading directions on p-y curve of single pile in groups. *M.Eng. Thesis*, King Mongkut's University of Technology Thonburi.
- [2] Winkler, E. (1867). *Die Lehre von der Elastizität und Festigkeit*, Dominicus, Prague.
- [3] Terzaghi, K. (1955). Evaluation of coefficients of subgrade reaction. *Geotechnique*, 5(4), pp. 297-326.
- [4] Palmer, L.A. and Thompson, J.B. (1948). The earth pressure and deflection along embedded lengths of piles subjected to lateral thrusts. *Proc. 2nd Int. Conf. SM and FE*, Rotterdam, 5.
- [5] Matlock, H. and Reese, L.C. (1960). Generalized solution for laterally loaded piles. *J. of Soil Mech and Found. Div., ASCE*, 86(5), pp. 63-91.
- [6] Duncan, J.M., Evans Jr., L.T., and Ooi, P.S.K. (1994). Lateral load analysis of single piles and drilled shafts. *J. of Geotech. Eng., ASCE*, 120(5), pp. 1018-1033.
- [7] Poulos, H.G. and Davis, E.H. (1980). *Pile Foundation Analysis and Design*, John Wiley and Sons, New York.
- [8] PLAXIS 2D. *Reference Manual*, CONNECT Edition V20.