

การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เสาเข็มรับแรงด้านข้างในชั้นดินเหนียวอัดตัว
เกินปกติด้วยวิธีการที่ต่างกัน: กรณีศึกษาเสาเข็มรับกำแพงกันดิน
คอนกรีตเสริมเหล็กชนิดยื่นรูปตัว T

The COMPARATIVE STUDY OF LATERAL LOADED PILE ANALYSIS IN
OVERCONSOLIDATED CLAY WITH VARIOUS ANALYSIS METHOD:
CASE STUDY OF RC CANTILEVER RETAINING WALL ON PILES

เอกพิสิษฐ์ บรรจงเกลี้ยง^{1*}

^{1*}อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมบริหารงานก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์

Eakphisit Banjongklian^{1*}

^{1*}Lecturer, Construction Management Engineering Program, Faculty of Industrial Technology,
Uttaradit Rajabhat University

*Corresponding author e-mail: eakphisit@hotmail.com

บทคัดย่อ

การออกแบบกำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดยื่นรูปตัว T ในพื้นที่ที่ดินมีกำลังรับแรงแบกทานไม่เพียงพอ จำเป็นต้องออกแบบให้วางอยู่บนเสาเข็ม ซึ่งต้องคำนึงถึงทั้งการรับน้ำหนักในแนวแกนและการรับแรงด้านข้างของเสาเข็มด้วย งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แรงด้านข้างที่ยอมให้และโมเมนต์ดัดประลัยในเสาเข็มรับแรงด้านข้างในชั้นดินเหนียวอัดตัวเกินปกติ ด้วยวิธีวิเคราะห์แบบต่างๆ ที่ใช้สมมติฐานการต้านแรงกดของดิน ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์แรงด้านข้างที่ยอมให้ในเสาเข็มด้วยวิธีการของ Broms วิธีการของ Davisson and Gil และวิธีผลต่างสืบเนื่อง FDM ให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกัน ต่างกันไม่เกินร้อยละ 3.85 ทั้งนี้เป็นเพราะการวิเคราะห์ด้วยวิธีการของ Broms และวิธีการของ Davisson and Gil ซึ่งได้เลือกใช้พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ที่เหมาะสม ใช้ค่า k_h บริเวณด้านบนของเสาเข็มที่มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์เสาเข็มรับแรงด้านข้างมากกว่าดินที่อยู่ลึกลงไป จึงให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีการ FDM ที่ใช้ค่า k_h ที่แตกต่างกันตลอดความลึกของเสาเข็ม สำหรับผลการวิเคราะห์โมเมนต์ดัดประลัยสูงสุดจากแรงทางข้างประลัยด้วยวิธี Davisson and Gil และวิธี FDM ให้ผลที่ใกล้เคียงกัน ต่างกันไม่เกินร้อยละ 9.4 นอกจากนี้ งานวิจัยยังได้นำผลการวิเคราะห์แรงอัดประลัยและโมเมนต์ดัดประลัยไปใช้ออกแบบเหล็กเสริมในเสาเข็มคอนกรีตรับแรงด้านข้างที่มีกำลังต้านทานแรงประลัยของหน้าตัดปลอดภัยเพียงพอ เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน ACI318

คำสำคัญ: กำแพงกันดิน, เสาเข็มรับแรงด้านข้าง, ชั้นดินเหนียว, แรงด้านข้างที่ยอมให้, โมเมนต์ดัดประลัย

Abstract

Deep foundation of RC cantilever retaining wall should be designed to resist both axial loads and lateral loads. The objective of research papers aimed to compare the results of lateral loaded pile analysis in overconsolidated clay calculated by various analysis method based on Subgrade Reaction Analysis including Broms's method, Davisson and Gil method, and Finite Difference Method (FDM). The research found that allowable lateral load calculated by Broms's method, Davisson and Gil method, and Finite Difference Method (FDM) were closed with less than 3.81% difference. The research also found the same results in ultimate moment analysis that ultimate moment analysis calculated by Davisson and Gil method and Finite Difference Method were closed with less than 9.40% difference. Finally, the research analyzed and design reinforcement in lateral loaded pile with ultimate compression load and ultimate moment from previous analysis.

Keywords: Retaining Wall, Lateral Loads, Overconsolidated Clay, Allowable Lateral Load, Ultimate Moment

1. บทนำ

ปกติในงานก่อสร้างต่างๆ ที่มีการขุดหรือถมดินจนเกิดความต่างระดับของผิวดินมากกว่าความสูงที่มวลดินจะสมดุลอยู่ได้ด้วยตนเอง จำเป็นต้องมีโครงสร้างกันดินช่วยพยุงป้องกันการทลายหรือการเคลื่อนตัวของมวลดินมากเกินไป (สิริัญญา ทองชาติ และวรารกร ไม้เรียง, 2563) กำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดยื่นรูปตัว T เป็นแบบที่ใช้กันมาก ปกติมีความสูงประมาณ 3.00–7.50 เมตร และมีส่วนประกอบ 3 ส่วน คือ (1) ส่วนตัวกำแพง (Stem) ที่ยื่นขึ้นมาจากฐานราก สำหรับต้านทานแรงดันทางข้างของดิน (2) ส่วนฐานรากด้านหน้าเขื่อน (Toe) และ (3) ส่วนฐานรากด้านหลังเขื่อน (Heel) ซึ่งส่วนของฐานรากทั้งสองด้านจะทำหน้าที่รับน้ำหนักของกำแพงกันดินทั้งหมด น้ำหนักของดินที่อยู่บนฐานทั้งด้านหลังและด้านหน้าเขื่อน และรวมถึงน้ำหนักกดทับอื่นๆ (วินิต ช่อวิเชียร และวรนิติ ช่อวิเชียร, 2560) ในกรณีที่กำลังแบกทานที่ยอมให้ของดินได้ฐานรากไม่เพียงพอ จะใช้เสาเข็มเพื่อรับแรงต่างๆ ที่ถ่ายมาจากกำแพงกันดิน ได้แก่ แรงในแนวตั้ง (Vertical Load) และแรงดันด้านข้าง (Lateral Load) โดยนำแรงดังกล่าวไปใช้วิเคราะห์และออกแบบเสาเข็มต่อไป อย่างไรก็ตาม มีผู้เสนอวิธีการวิเคราะห์เกี่ยวกับเสาเข็มรับแรงด้านข้าง (Laterally Loaded Pile) หลากหลายวิธี ได้แก่ วิธีการของ Broms วิธีการของ Matlock and Reese วิธีการของ Davisson and Gil วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference: FDM) เป็นต้น

ข้อกำหนดในการออกแบบฐานรากเสาเข็มรับแรงทางข้างจะเป็นการกำหนดการเคลื่อนตัวทางข้าง (Lateral or Horizontal Movement) หรือการโก่งตัวทางข้าง (Lateral Deflection) สูงสุดของเสาเข็ม ซึ่งในบางกรณีจะยอมให้เกิดการเคลื่อนตัวได้น้อยมากเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้าง (พัลลภ วิสุทธิ์เมธานุกุล,

2563) ข้อกำหนด IBC2018 ระบุว่า แรงด้านข้างใช้งานที่กระทำต่อเสาเข็มจะต้องไม่เกินครึ่งหนึ่งของแรงด้านข้างที่ยอมให้ที่ทำให้เกิดการโก่งตัวทางข้าง 25 มิลลิเมตร (International Code Council, 2018) วิธีที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ดังกล่าว ได้แก่ การใช้สัมประสิทธิ์การต้านแรงกดของดิน (Coefficient of Subgrade Reaction: k_n) (อมร พิมานมาศ, 2558; พัลลภ วิสุทธิ์เมธานุกุล, 2563; Das, B. M., 2004) เช่น วิธีการของ Broms ในการวิเคราะห์หาการเคลื่อนตัวทางข้างของหัวเสาเข็มที่อยู่ในชั้นทรายหรือชั้นดินเหนียว (Broms, B. B., 1964; Das, B. M., 2004) วิธีการของ Matlock and Reese ที่ได้สร้างกราฟไว้มิติสำหรับหาการโก่งตัวของเสาเข็มรับแรงทางข้าง สำหรับดินที่มีค่า k_n เป็นศูนย์ที่ผิวดินและเพิ่มขึ้นตามความลึก ได้แก่ ทรายหรือดินเหนียวอัดตัวปกติ (NC) (พัลลภ วิสุทธิ์เมธานุกุล, 2563) วิธีการของ Davisson and Gil ที่นำเสนอกราฟไว้มิติสำหรับหาการโก่งตัวและโมเมนต์สูงสุดที่เกิดในเสาเข็มรับแรงทางข้างในดินที่มีค่า k_n คงที่ ซึ่งเป็นลักษณะของดินเหนียวอัดตัวเกินปกติ (Overconsolidated Clay: OC) (อมร พิมานมาศ, 2558; พัลลภ วิสุทธิ์เมธานุกุล, 2563) และวิธี FDM ที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์หาการโก่งตัวและโมเมนต์สูงสุดที่เกิดในเสาเข็มรับแรงทางข้างในชั้นดินที่มีค่า k_n ไม่สม่ำเสมอ (พัลลภ วิสุทธิ์เมธานุกุล, 2563) งานวิจัยฉบับนี้สนใจการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสาเข็มตอรับแรงด้านข้างในชั้นดินเหนียวอัดตัวเกินปกติด้วยวิธีการที่แตกต่างกันที่ใช้สัมประสิทธิ์การต้านแรงกดของดินสำหรับกำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดยื่นรูปตัว T สูง 5.90 เมตร วางบนเสาเข็ม

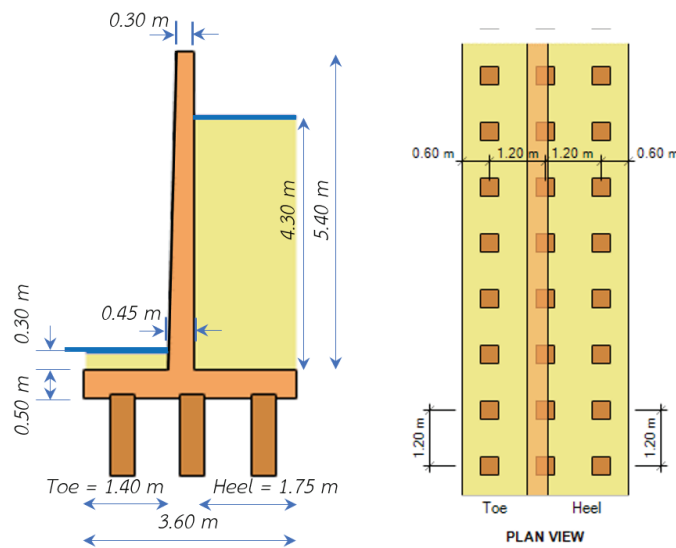
2. วัตถุประสงค์การวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แรงด้านข้างที่ยอมให้ และโมเมนต์ดัดประลัยในเสาเข็มตอรับแรงด้านข้างในชั้นดินเหนียวอัดตัวเกินปกติด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบต่างๆ ที่ใช้สัมประสิทธิ์การต้านแรงกดของดินสำหรับกำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดยื่นรูปตัว T วางบนเสาเข็ม

3. ขอบเขตของการวิจัย

3.1 แรงใช้งาน (Service Load) และแรงประลัย (Factored Load) ที่นำมาใช้วิเคราะห์เสาเข็มรับแรงด้านข้าง ได้มาจากการวิเคราะห์กำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดยื่นรูปตัว T ด้วยโปรแกรม Asdip Retain Version 5.2.1.5 (ASDIP Structural Software, 2022) มีความสูงวัดจากใต้ฐานราก 5.90 เมตร โดยกำหนดลักษณะ (Geometry) และพารามิเตอร์ ดังภาพที่ 1 ประกอบด้วย ดินถม (Backfill) ที่ได้รับการออกแบบให้มีการระบายน้ำดี ไม่มีแรงดันน้ำหลังกำแพงกันดิน ความชันของผิวดินถม (Slope) เป็น 0° มุมเสียดทานประสิทธิผลของดินถม (ϕ) เป็น 34° หน่วยน้ำหนักดินถม (γ) เป็น 1,920 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความสูงกำแพงเหนือฐานราก (Stem Height) 5.40 เมตร ความสูงดินถม (Backfill Height) เป็น 4.30 เมตร มีความกว้างของฐานราก 3.60 เมตร ความหนาฐานราก (FT) 0.45 เมตร ความกว้างฐานหน้ากำแพงกันดิน (Toe) และหลังกำแพงกันดิน (Heel) เป็น 1.40 และ 1.75 เมตร ตามลำดับ เสาเข็มตอในแนวตั้ง Batter Angle เท่ากับ 0°

มีน้ำหนักบรรทุกทุกตายตัวและน้ำหนักบรรทุกจรแบบสม่ำเสมอบนดินถม (Uniform Surcharge) เป็น 360 และ 1,000 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ การวิเคราะห์ไม่พิจารณาแรงแผ่นดินไหว



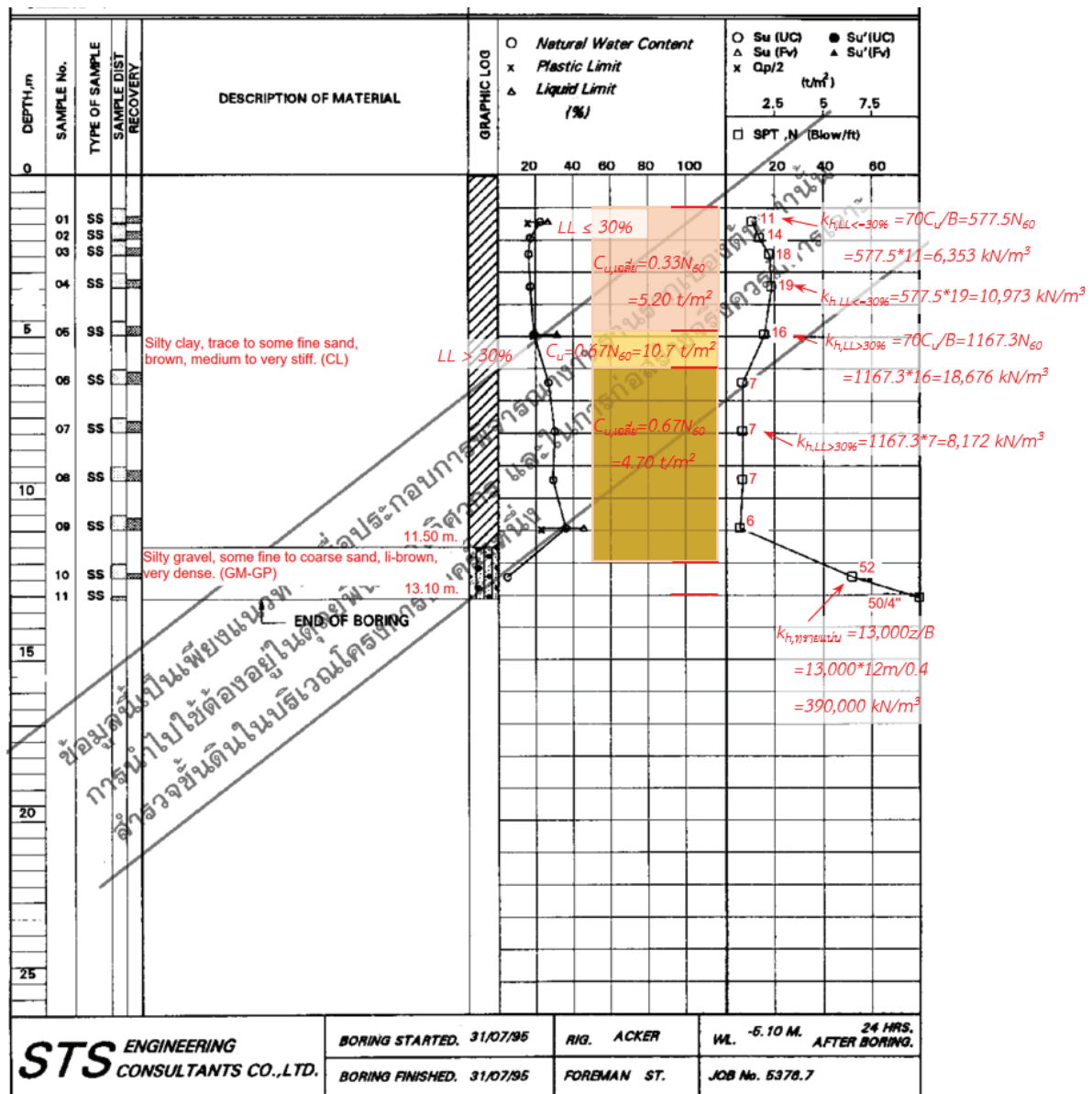
ภาพที่ 1 ลักษณะเบื้องต้นของกำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดยื่นรูปตัว T วางบนเสาเข็มในงานวิจัย (ปรับปรุงจาก Asdip Retain Version 5.2.1.5 (2022))

3.2 งานวิจัยใช้ข้อมูลจากผลการเจาะสำรวจดิน (Boring Log) ณ ตำบลเวียง อำเภอเชียงแสน จังหวัดเชียงราย (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2565) ดังภาพที่ 2 ในการคำนวณกำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็ม กำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็ม และการวิเคราะห์แรงด้านข้างที่ยอมให้และโมเมนต์ดัดประลัยในเสาเข็ม คอนกรีต แบ่งประเภทชั้นดินเป็น Medium Stiff to Very Stiff Clay (CL) (N_{60} อยู่ระหว่าง 6–30) และ Very Dense Sand (SM-GP) (SPT > 50)

3.3 เสาเข็มตอก (Driven Pile) เป็นเสาเข็มคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมตัน ขนาด 0.40 x 0.40 เมตร ($B = 0.40$ เมตร) ยาว 12.00 เมตร วางบนชั้นทราย มีกำลังรับแรงอัดคอนกรีต 350 ksc (ทรงกระบอก) เสริมด้วยเหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SD40 ($f_y = 4,000$ ksc) กำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็มคำนวณจากผลเจาะสำรวจดินเป็น 159 ตัน/ตัน คิดเป็นกำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็ม (Axial Capacity: F.S. = 3) 53 ตัน/ตัน (ไม่เกินกำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของหน้าตัด 60–80 ตัน โดยประมาณ)

3.4 การวิเคราะห์หาแรงด้านข้างที่ยอมให้และโมเมนต์ดัดในเสาเข็มรับแรงด้านข้างในงานวิจัยนี้ ได้จัดเสาเข็มเป็นเสาเข็มยาว ($L/R = 5.95 \geq 5$) โดยที่แรงด้านทานทางข้างประลัยของเสาเข็มยาวถูกจำกัดโดยโมเมนต์ประลัยของเสาเข็ม (ไม่ได้ถูกจำกัดโดยกำลังของดินเหมือนในกรณีของเสาเข็มสั้น) ในชั้นดินเหนียวในสภาพอัดตัวเกินปกติ (OC Clay: $OCR = 4.69 > 2$) ที่หัวเสาเข็มอยู่ในสภาพยึดรั้ง (Fixed Head) มีการเรียงตัวของเสาเข็ม 2 แถว ตั้งฉากกับแนวแรงทางข้าง ดังภาพที่ 1

3.5 วิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบแรงด้านข้างที่ยอมให้ และโมเมนต์ดัดประลัยในเสาเข็มแบบต่างๆ เป็นไปตามตารางที่ 1



ภาพที่ 2 ผลการเจาะสำรวจดิน (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2565)

ตารางที่ 1 วิธีการต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์เสารับแรงทางช้างโดยใช้สัมประสิทธิ์การต้านแรงกดของดิน

วิธีการต่างๆ ที่ใช้วิเคราะห์และเปรียบเทียบ แรงต้านช้างที่ยอมให้ในเสาเข็ม	วิธีการต่างๆ ที่ใช้วิเคราะห์และเปรียบเทียบ โมเมนต์ดัดประลัยในเสาเข็ม
1. วิธีการของ Broms	1. วิธีการของ Broms
2. วิธีการของ Davisson and Gil	2. วิธีการของ Davisson and Gil
3. วิธี FDM	3. วิธี FDM

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 กำหนดลักษณะของกำแพงกันดินและระยะห่างของเสาเข็มเบื้องต้น คำนวณหาแรงในแนวดิ่งและแรงด้านข้างที่กระทำต่อเสาเข็ม จากผลการรวมแรงใช้งาน (Service Load) ตามข้อกำหนด ASCE7-10/16 (American Society of Civil Engineers, 2016) ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การรวมแรง (Load Combination) ตาม ASCE7-10/16 (American Society of Civil Engineers, 2016)

กรณีรวมแรง (Combination Load Case)	
แรงใช้งาน (Serviced Load)	แรงประลัย (Factored Load)
1) $D + L + H$	1) $1.4D + 0.9H$
2) $D + H + 0.6W$	2) $1.2D + 1.6L + 1.6H$
3) $D + L + H + 0.6W$	3) $1.2D + 0.9H + 0.5W$
4) $D + H + 0.7E$	4) $1.2D + L + 0.9H + W$
5) $D + L + H + 0.7E$	5) $1.2D + L + 0.9H + E$
-	6) $0.9D + 1.6H + W$
-	7) $0.9D + 1.6H + E$

4.2 คำนวณและวิเคราะห์เปรียบเทียบแรงด้านข้างที่ยอมให้ในเสาเข็มด้วยวิธีการต่างๆ ดังตารางที่ 1 ทั้งนี้แรงในแนวดิ่งและแรงด้านข้างที่กระทำต่อเสาเข็มจากแรงใช้งาน (Service Load) ในข้อ 4.1 ต้องไม่เกินกำลังรับน้ำหนักปลอดภัยและแรงด้านข้างที่ยอมให้ในเสาเข็ม หากเกินกว่าค่าที่ยอมให้ต้องทำการปรับแก้ลักษณะของกำแพงกันดินใหม่

งานวิจัยจะแสดงการวิเคราะห์หาแรงที่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวทางข้าง 25 มิลลิเมตรของหัวเสาเข็มยาวที่อยู่ในชั้นดินเหนียวอัดตัวเกินปกติ และหัวเสาเข็มแน่น พอสั่งเขยด้วยวิธีการของ Broms เป็นวิธีหนึ่งซึ่งง่าย ทำได้โดยการอ่านกราฟไร้มิติระหว่าง Dimensionless Length (βL) และ Dimensionless Lateral Deflection (y) จึงได้แรงทางข้าง ($H_{a@25mm}$) (Broms, B. B., 1964; Das, B. M., 2004) ดังสมการที่ (1)

$$H_{a@25mm} = \frac{\text{ระยะไถ่งที่ยอมให้} \times k_H BL}{\text{ค่า } y \text{ ที่อ่านได้จากกราฟ}} = \frac{0.025 \times (8925) \times 0.40 \times 12}{4.30} = 249 \text{ kN} \approx 25 \text{ ตัน} \quad (1)$$

4.3 จากนั้นคำนวณหาแรงตามแนวแกนประลัย (Ultimate Axial Load: P_u) และแรงด้านข้างประลัย (Ultimate Lateral Load) ที่กระทำต่อเสาเข็มจากผลการรวมแรง ตามข้อกำหนด ASCE7-10/16 ดังตารางที่ 2 ทั้งนี้ $P_u \leq 159$ ตัน/ต้น

4.4 นำแรงด้านข้างประลัยที่ได้ไปใช้คำนวณและวิเคราะห์เปรียบเทียบโมเมนต์ดัดประลัยสูงสุดในเสาเข็มด้วยวิธีการต่างๆ ดังตารางที่ 1

4.5 นำค่าแรงตามแนวแกนประลัยและโมเมนต์ดัดประลัยจากผลการรวมแรง ไปใช้ในการออกแบบเสาเข็มรับแรงด้านข้าง

4.6 สรุปผลการวิจัย

5. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

5.1 ผลวิเคราะห์เปรียบเทียบแรงด้านข้างที่ยอมให้ในเสาเข็มด้วยวิธีการต่างๆ

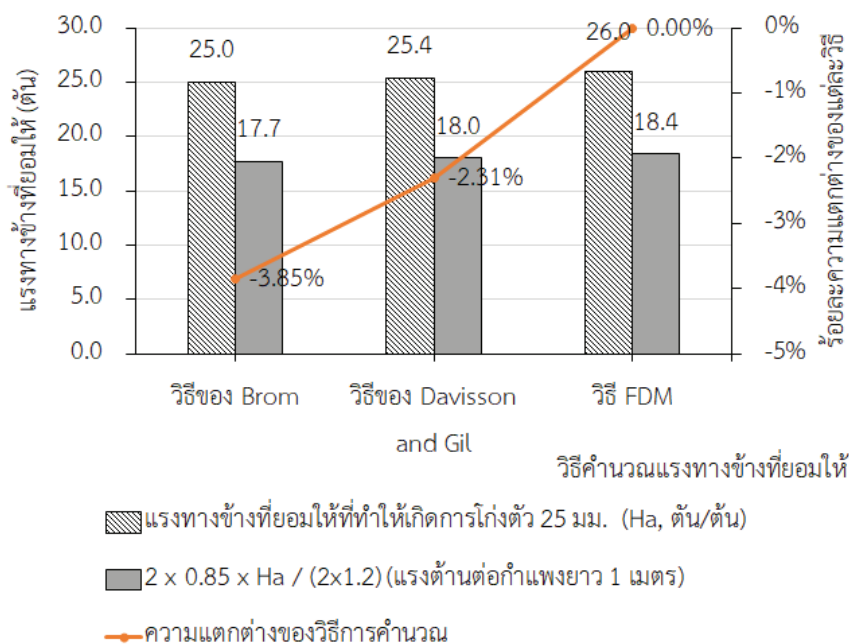
ผลการวิจัยดังแสดงในภาพที่ 3 พบว่า แรงทางข้างที่ยอมให้ที่ทำให้เกิดการโก่งตัวของหัวเสาเข็ม 25 มิลลิเมตร ($H_{a@25mm}$) ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธีการของ Broms, Davisson and Gil และวิธี FDM มีค่า 25.0, 25.4 และ 26.0 ตัน ตามลำดับ คิดเป็นค่าความแตกต่างเมื่อเทียบกับวิธี FDM เพียงร้อยละ 3.85, 2.31 และ 0.00 ตามลำดับเท่านั้น โดยวิธีการของ Broms มีความแตกต่างจากวิธี FDM มากที่สุด เพียงร้อยละ 3.85 เท่านั้น ทั้งนี้การวิเคราะห์แรงทางข้างที่ยอมให้ที่ทำให้เกิดการโก่งตัวของหัวเสาเข็ม 25 มิลลิเมตร ด้วยวิธีการ FDM ได้คำนึงถึงค่า k_n ตลอดความลึกของเสาเข็ม เหมาะสมกับการวิเคราะห์ชั้นดินที่มีค่า k_n ไม่สม่ำเสมอ จึงให้ค่าที่มีความถูกต้องเหมาะสมมากที่สุด ในขณะที่วิธีการของ Broms และ Davisson and Gil ต้องกำหนดใช้ค่า k_n ค่าเดียว ซึ่งคำนวณจากค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเฉลี่ย (c_u) ในช่วงความลึก 8B คือ 3.20 เมตร ผลการวิจัยสอดคล้องกับพัลลภ วิสุทธิ์เมธานุกูล (2563) ที่กล่าวว่า ดินส่วนที่อยู่บริเวณด้านบนของเสาเข็มมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์เสาเข็มรับแรงด้านข้างมากกว่าดินที่อยู่ลึกลงไป และสอดคล้องกับตันแคนและคณะ (Duncan, J. M. et al., 1994) ที่เสนอให้ใช้ค่าเฉลี่ยของ c_u ในช่วงความลึก 8B จากผิวดิน

ตามที่สัดส่วนระยะห่างเสาเข็มต่อความกว้างเสาเข็ม (S/B) ทั้งในแนวตั้งฉากกับแรงทางข้างและแนวขนานกับแรงทางข้างเท่ากับ 3 จึงใช้ค่าตัวคูณลดกำลังสำหรับเสาเข็มกลุ่มในชั้นดินเหนียวสำหรับกำลังและการเคลื่อนตัวเป็น 0.40 และ 0.25 ตามลำดับ (Sharma, P. and Hari, D. S., 1990; อมร พิมานมาศ, 2558)

งานวิจัยได้เลือกใช้ผลการคำนวณแรงทางข้างที่ยอมให้ที่ทำให้เกิดการโก่งตัวของหัวเสาเข็ม 25 มิลลิเมตร ของเสาเข็มกลุ่ม ($H_{allow, pile group}$) จากวิธีการของ Broms ซึ่งมีค่าต่ำสุดเป็น 7.8 ตันต่อแถวรับพิชชอยยาว 1 เมตร ดังสมการที่ (2) เพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงด้านข้างใช้งาน (Service Lateral Load) ของกำแพงกันดิน

$$\frac{\text{จำนวนต้น} \times \text{ตัวคูณลดค่า} \times (H_{a@25mm} / 2)}{\text{แถวรับพิชชอยของเสาเข็ม}} = \frac{[3 \times 0.25 \times (25 / 2)]}{1.2} = 7.8 \text{ ตัน/เมตร} \quad (2)$$

พบว่า การจัดขนาดและสัดส่วน (Geometry) ของกำแพงกันดินเบื้องต้นนั้นมีความเหมาะสม มีเสถียรภาพเพียงพอ ดังภาพที่ 4(ก) และ 4(ข) แสดงผลวิเคราะห์จากการรวมแรงที่ 2: $D + H + 0.6W$ เกิดแรงอัดในเสาเข็ม (Axial Force) 9.3, 10.7 และ 12.1 ตัน ไม่เกินกำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็ม (Axial capacity = 53 ตัน/ตัน) และแรงทางข้างรวมที่เกิดขึ้น ($R_h = 7.0$ ตัน/เมตร) ไม่เกินแรงทางข้างที่ยอมให้ (Horizontal Capacity = 7.8 ตัน/เมตร) ดังภาพที่ 4(ก) และ 4(ข) และในการตรวจสอบเบื้องต้น พบว่า แรงเฉือนที่ยอมให้ในหน้าตัดเสาเข็มคอนกรีต ($0.29 \times \sqrt{350} \times 40 \times \frac{35}{1000} = 7.59$ ตัน) มีค่ามากกว่าแรงเฉือนใช้งานที่เกิดในเสาเข็มแต่ละต้น ($7.0 \times 1.2 / 3 = 2.8$ ตัน) ถือว่าปลอดภัย (สมพร อรรถเศรษฐพงศ์, 2561)



ภาพที่ 3 ผลการคำนวณแรงทางข้างที่ยอมให้ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธีการต่างๆ

5.2 ผลการคำนวณและวิเคราะห์เปรียบเทียบโมเมนต์ดัดประลัยสูงสุดในเสาเข็มด้วยวิธีการต่างๆ

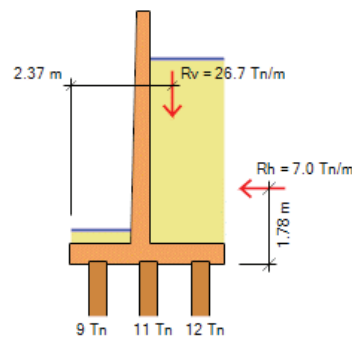
ผลการวิเคราะห์หาแรงตามแนวแกนประลัย (Ultimate Axial Load: P_u) และแรงด้านข้างประลัย (Ultimate Lateral Load: H_u) ที่กระทำต่อเสาเข็มจากผลการรวมแรงต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4(ค) และตารางที่ 3 โดยภาพที่ 4(ค) แสดงค่า P_u และ M_u เฉพาะกรณีการรวมแรงที่ 2: $1.2D + 1.6L + 1.6H$ พบว่า P_u มีค่า 13, 14 และ 15 ตัน/ตัน ตามลำดับ มีผลรวมเท่ากับแรงในแนวดิ่ง ($R_v \times$ แถบ 1.20 ม. = $35.5 \times 1.2 \approx 42$ ตัน) ส่วน H_u มีค่า 4.48 ตัน/ตัน ($H_u = \frac{11.2 \text{ ตัน/ม.}}{3 \text{ ตัน}} \times$ แถบความยาวรับผิวดชอบ 1.20 ม. = 4.48 ตัน/ตัน) ทั้งนี้จะนำแรงด้านข้างประลัยที่ได้พิจารณาเพิ่มค่าจากผลของเสาเข็มกลุ่มแล้ว (เช่น $4.48 / 0.40 = 11.2$ ตัน) ไปคำนวณเปรียบเทียบโมเมนต์ดัดประลัยที่เกิดในเสาเข็มด้วยวิธีการต่างๆ กัน

PILE FOUNDATION (Comb. D+H+0.6W)

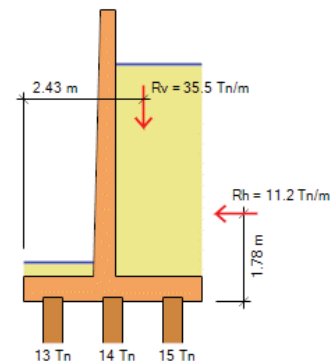
Use 40-cm Square Piles, Embedment = 7.5 cm

	Toe	Center	Heel	
Dist from Toe	0.60	1.80	3.00	m
Pile Spacing ...	1.20	1.20	1.20	m
Batter Angle	0.0	0.0	0.0	deg
Axial Force	9.3	10.7	12.1	Tn
Axial Capacity	53.0	53.0	53.0	Tn
Axial Ratio	0.17	0.20	0.23	✓
Hor. Capacity = 7.8 Tn/m > 7.0 Tn/m				✓

(ก)



(ข)



(ค)

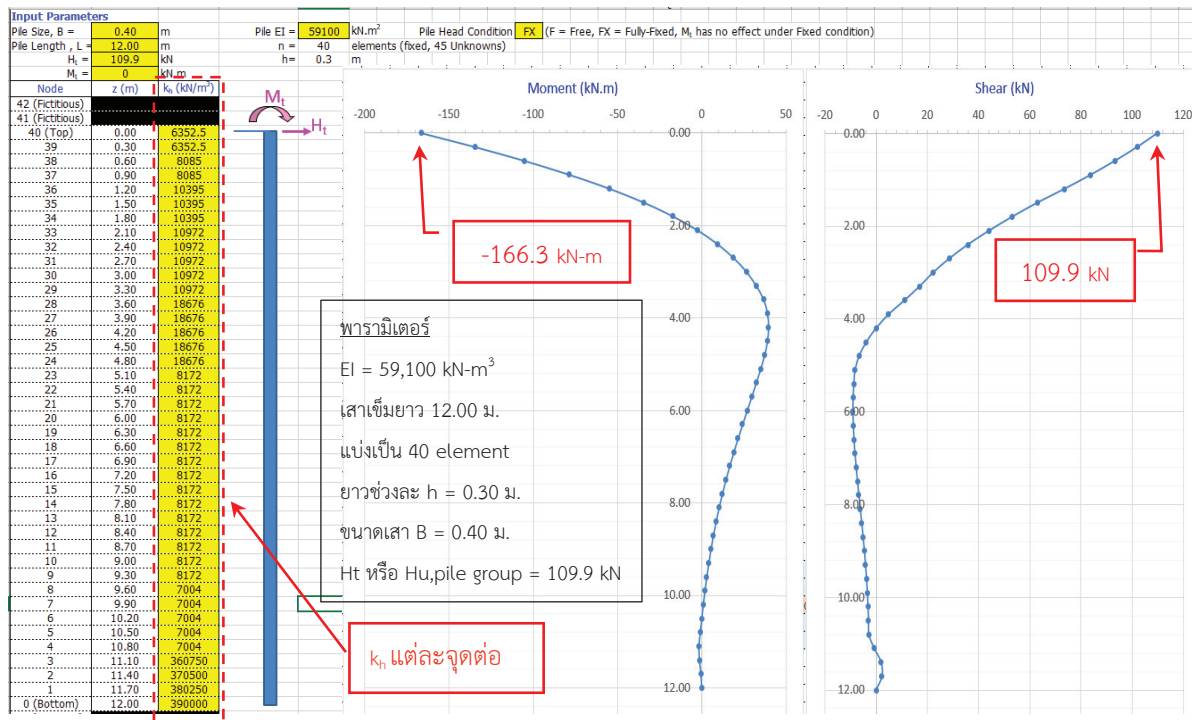
ภาพที่ 4 (ก), (ข) ผลการวิเคราะห์แรงใช้งานที่เกิดขึ้นน้อยกว่าแรงที่ยอมให้ในเสาเข็มทั้งแรงอัดและแรงทางข้าง กรณีการรวมแรง $D + H + 0.6W$, และ (ค) ตัวอย่างผลการวิเคราะห์หา P_u และ M_u จากกรณีการรวมแรงที่ 2: $1.2D + 1.6L + 1.6H$ (ASDIP Structural Software, 2022)

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบแรงอัดประลัย แรงด้านข้างประลัย และโมเมนต์ดัดประลัยในเสาเข็มที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการต่างๆ

กรณีรวมแรง (Combination load case)	แรงอัดประลัย เสาเข็มแถวที่ 1 (P_u แถวซ้าย)		แรงอัดประลัย เสาเข็มแถวที่ 2 (P_u แถวกลาง)		แรงอัดประลัย เสาเข็มแถวที่ 2 (P_u แถวขวา)		แรงด้านข้าง ประลัย (H_u , ตัน/ตัน)	แรงด้านข้างประลัย เมื่อพิจารณาจาก เสาเข็ม $H_u/0.4$		โมเมนต์ดัดประลัยในเสาเข็มคำนวณ ด้วยวิธีต่างๆ (M_u , kN-m)			ร้อยละความแตกต่างของ M_u ***	
	หน่วย ตัน/ตัน	หน่วย Kn/ตัน	หน่วย ตัน/ตัน	หน่วย Kn/ตัน	หน่วย ตัน/ตัน	หน่วย Kn/ตัน		หน่วย ตัน/ตัน	หน่วย Kn/ตัน	Brom's (1)	Davisson and Gill (2)	FDM (3)	$\Delta M_{u,1}$	$\Delta M_{u,2}$
1) $1.4D+0.9H$	10	98.1	15	147.1	19	186.4	2.5	6.3	61.8	23.8	84.8	93.5	-74.6	-9.4
2) $1.2D+1.6L+1.6H$	13	127.5	14	137.3	15	147.1	4.5	11.2	109.9	49.4	150.8	166.3	-70.3	-9.4
3) $1.2D+0.9H+0.5W$	9	88.3	13	127.5	16	157	2.5	6.3	61.8	23.8	84.8	93.5	-74.6	-9.4
4) $1.2D+L+0.9H+W$	9	88.3	13	127.5	17	166.8	2.5	6.3	61.8	23.8	84.8	93.5	-74.6	-9.4
5) $1.2D+L+0.9H+E$	9	88.3	13	127.5	17	166.8	2.5	6.3	61.8	23.8	84.8	93.5	-74.6	-9.4
6) $0.9D+1.6H+W$	12	117.7	10	98.1	8	78.5	4.5	11.2	109.9	49.4	150.8	166.3	-70.3	-9.4
7) $0.9D+1.6H+E$	12	117.7	10	98.1	8	78.5	4.5	11.2	109.9	49.4	150.8	166.3	-70.3	-9.4
*** $\Delta M_{u,1} = [(1) - (3)] \times 100/(3)$ และ $\Delta M_{u,2} = [(2) - (3)] \times 100/(3)$													เฉลี่ย	-72.8

งานวิจัยพบว่า โมเมนต์ดัดประลัยที่เกิดในเสาเข็มด้วยวิธีการวิเคราะห์ที่ต่างกัน คือ วิธีของ Davisson and Gil และวิธี FDM (ภาพที่ 5) ดังตารางที่ 3 ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน มีความแตกต่างกันเฉลี่ยเพียงร้อยละ 9.4 สำหรับวิธีของ Broms และวิธี FDM ดังตารางที่ 3 ให้ค่าที่แตกต่างกันเฉลี่ยถึงร้อยละ 72.8 โดยวิธี FDM ให้ผลการวิเคราะห์โมเมนต์ดัดประลัยที่เกิดในเสาเข็มมากที่สุด ทั้งนี้การวิเคราะห์โมเมนต์ดัดประลัยที่เกิดในเสาเข็มด้วยวิธีการ FDM ได้คำนึงถึงค่า k_h ที่แตกต่างกันตลอดความลึกของเสาเข็มเหมาะสมกับการวิเคราะห์ชั้นดินที่มีค่า k_h ไม่สม่ำเสมอ จึงให้ค่าที่มีความถูกต้องเหมาะสมมากที่สุด ในขณะที่วิธีการของ Davisson and Gil กำหนดใช้ค่า k_h ค่าเดียว ซึ่งคำนวณจากค่า c_u เฉลี่ย ในช่วงความลึก 8B หรือ 3.20 เมตร ผลการวิจัยสอดคล้องกับพัลลภ วิสุทธิ์เมธานุกุล (2563) ที่กล่าวว่าดินส่วนที่อยู่บริเวณด้านบนของ

เสาเข็ม มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์เสาเข็มรับแรงด้านข้างมากกว่าดินที่อยู่ลึกลงไป และสอดคล้องกับ ดัน แคน และคณะ (Duncan, J. M. et al., 1994) ที่เสนอให้ใช้ค่าเฉลี่ยของ c_u ในช่วงความลึก 8B จากผิวดิน

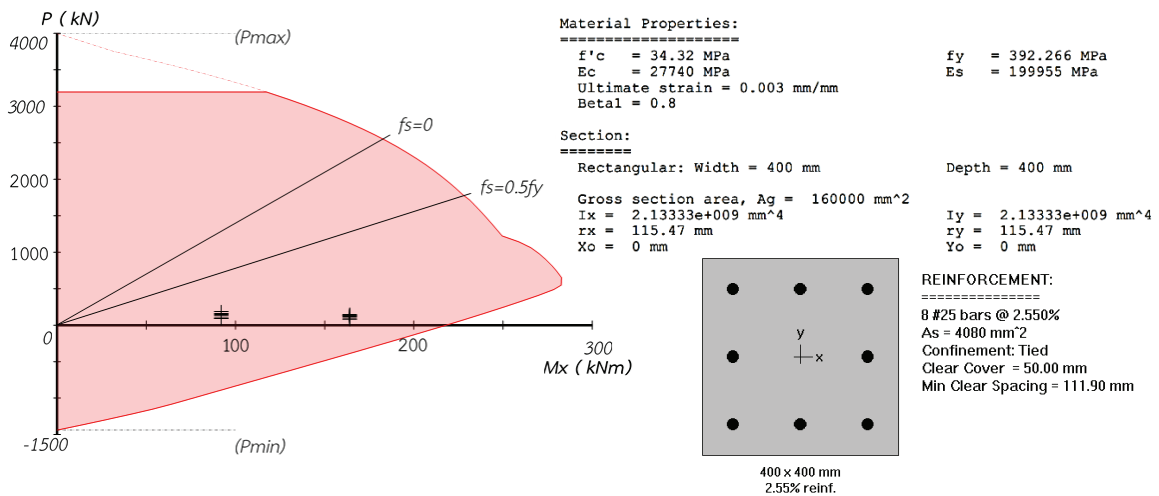


ภาพที่ 5 ผลการวิเคราะห์หาโมเมนต์ดัดประลัย (166.3 kN-m) และแรงเฉือนประลัย (109.9 kN) ในเสาเข็ม ด้วยวิธี FDM เมื่อแรงด้านข้างประลัยเพิ่มค่าจากผลของเสาเข็มกลุ่มแล้ว (H_{u, pile group}) มีค่า 11.2 ตัน หรือ 109.9 kN

5.3 ผลการออกแบบเสาเข็มรับแรงด้านข้าง

งานวิจัยเลือกใช้ค่าแรงอัดในแนวแกนประลัย (P_u) และค่าโมเมนต์ดัดประลัย (M_u) ที่คำนวณด้วยวิธี FDM ซึ่งให้ค่าที่แม่นยำและมากที่สุด (ค่าเชิงอนุรักษ์) ในกรณีการรวมแรงทั้ง 7 กรณี จากตารางที่ 1 เพื่อใช้ในการออกแบบเสาเข็มรับแรงด้านข้าง ผลการวิจัยพบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ (Interaction Diagram) ระหว่างกำลังต้านทานแรงอัดประลัยลดค่า (ϕP_n หรือ P ในภาพที่ 6) กับกำลังรับโมเมนต์ดัดประลัยลดค่า (ϕM_n หรือ M_x ในภาพที่ 6) ของเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงขนาดหน้าตัด 0.40 x 0.40 เมตร เสริมเหล็กพิเศษ 8-DB25 เป็นดังภาพที่ 6 และจากการตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักประลัยของหน้าตัดเสาเข็มด้วยเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ ดังภาพที่ 6 พบว่าค่าแรงอัดประลัยและค่าโมเมนต์ดัดประลัยที่เกิดขึ้น (คู่อันดับที่ 1-13 ในภาพที่ 6 จาก 7 กรณีการรวมแรง) อยู่ภายในเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ถือว่าปลอดภัย กำลังรับแรงของหน้าตัดเสาเข็มมีเพียงพอตามมาตรฐาน ACI318 โดยในการคำนวณเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์เสาเข็มในงานวิจัยไม่พิจารณา Slenderness ของเสาเข็ม สอดคล้องกับอมร พิมานมาศ (2556) ซึ่งการจำแนกเป็นเสาเข็มยาวตามขอบเขตงานวิจัยจะใช้เพื่อการวิเคราะห์หาแรงภายในของเสาเข็มรับแรงทางข้างเท่านั้น (อมร พิมานมาศ, 2556; พัลลภ วิสุทธิ์เมธานุกุล,

2563) ในส่วนของกำลังรับแรงเฉือนประลัยของคอนกรีตเสาค้ำ ($0.53 \times \sqrt{350} \times 40 \times \frac{35}{1000} = 13.8$ ตัน) มีค่ามากกว่าแรงเฉือนประลัยสูงสุดที่เกิดในเสาค้ำแต่ละต้นเช่นกัน (11.2 ตัน)



ภาพที่ 6 ผลการวิเคราะห์และออกแบบเสริมเหล็กในเสาค้ำคอนกรีตด้วยเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์

6. บทสรุป

การวิจัยฉบับนี้แสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์เสาค้ำรับแรงด้านข้างจากกำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดยื่นรูปตัว T ในลักษณะดินตามผลสำรวจดิน ด้วยวิธีการวิเคราะห์ที่ต่างกัน 3 วิธี ที่ใช้สัมประสิทธิ์การต้านแรงกดของดิน คือ วิธีการของ Broms, วิธีการของ Davisson and Gil และวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม FDM ให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้การวิเคราะห์แรงด้านข้างที่ยอมให้ด้วยวิธีการของ Broms และวิธีการของ Davisson and Gil ซึ่งเลือกใช้คุณสมบัติของดินที่เหมาะสมด้วยค่า k_n บริเวณด้านบนของเสาค้ำที่มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์เสาค้ำรับแรงด้านข้างมากกว่าดินที่อยู่ลึกลงไป จะให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีการ FDM ที่ใช้คุณสมบัติของดินตลอดความลึกของเสาค้ำ โดยผลการวิเคราะห์แรงทางข้างที่ยอมให้ที่ทำให้เกิดการโก่งตัวของหัวเสาค้ำ 25 มิลลิเมตร ด้วยวิธีการของ Broms, Davisson and Gil และวิธี FDM มีค่าใกล้เคียงกันเป็น 25.0, 25.4 และ 26.0 ตัน ตามลำดับ คิดเป็นค่าความแตกต่างเมื่อเทียบกับวิธี FDM เพียงไม่เกินร้อยละ 3.85 และผลการวิเคราะห์โมเมนต์ดัดประลัยจากแรงทางข้างประลัยด้วยวิธี Davisson and Gil และวิธี FDM ให้ผลที่ใกล้เคียงกัน ต่างกันไม่เกินร้อยละ 9.4 และได้ผลการออกแบบเสาค้ำคอนกรีตรับแรงด้านข้างจากผลการวิเคราะห์ ที่มีกำลังรับแรงประลัยของหน้าตัดเพียงพอและปลอดภัยตามมาตรฐาน ACI

7. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยในอนาคตควรทำการศึกษาอิทธิพลของแรงแผ่นดินไหว (Seismic Load) แรงดันน้ำ และจัดรูปแบบเสาเข็มลักษณะต่างๆ กัน ที่มีผลต่อการออกแบบและต้นทุนการก่อสร้างกำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดยื่นรูปตัว T

8. เอกสารอ้างอิง

- กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2565). *การเจาะสำรวจดิน*. สืบค้น 1 มกราคม 2565, จาก <http://soilgis.dpt.go.th/login.php>
- พัลลภ วิสุทธิ์เมธานุกุล. (2563). *คู่มือวิศวกรรมฐานราก (ฉบับปรับปรุงเพิ่มเติม)*. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- วินิต ช่อวิเชียร และวรนิติ ช่อวิเชียร. (2560). *การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง*. (พิมพ์ครั้งที่ 6). กรุงเทพฯ: ป.สัมพันธ์พาณิชย์.
- สมพร อรรถเศรษฐีวงศ์. (2561). *เอกสารประกอบการบรรยายพิเศษ ครั้งที่ 20 MicroFEAP 6.2 กับตัวอย่างงานโครงสร้างชุดที่ 3*. กรุงเทพฯ: ม.ป.ท.
- สิริัญญา ทองชาติ และวารการ ไหมเรียง. (2563). *การออกแบบฐานราก*. (พิมพ์ครั้งที่ 2). นครปฐม: สำนักพิมพ์กิตติวรรณการพิมพ์.
- อมร พิมานมาศ. (2556). *การวิเคราะห์และการออกแบบโครงสร้างด้วยโปรแกรม ETABS เล่ม 1 และ 2*. กรุงเทพฯ: ซีวิลเอ็นจิเนียริง คอนซัลแตนท์แอนด์เทรนนิ่ง.
- อมร พิมานมาศ. (2558). *การออกแบบแก้ไขฐานราก ฐานรากรับแรงด้านข้างและฐานรากรับเครื่องจักร*. (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: ซีวิลเอ็นจิเนียริง คอนซัลแตนท์แอนด์เทรนนิ่ง.
- American Society of Civil Engineers. (2016). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE7-10/16)*. VA: American Society of Civil Engineers.
- ASDIP Structural Software. (2022). *ASDIP Retain Structural Engineering Software Version 5.4.0.1*. FL: ASDIP Structural Software.
- Broms, B. B. (1964). Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils. *Journal of Soil Mechanical and Foundations Division*, 90(2), 27–64.
- Das, B. M. (2004). *Principle of Foundation Engineering*. (5th ed.). CA: Thomson Learning.
- 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), 1018–1033.
- International Code Council. (2018). *International Building Code 2018 (IBC2018)*. IL: International Code Council, Inc.
- Shamsher, P. and Hari, D. S. (1990). *Pile Foundations in Engineering Practice*. New York: John Wiley & Sons.