



การศึกษาพฤติกรรมของไดอะแฟรมวอลล์ในพื้นที่กรุงเทพมหานครด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

THE BEHAVIOR OF DIAPHRAGM WALL IN BANGKOK USING FINITE ELEMENT
SIMULATION

เอกพิศฐ์ จันทรง^{1*} บารเมศ วรธนะภูติ² และ ก่อโชค จันทวารังกุล³

¹นิสิตปริญญาโท, ²ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ³รองศาสตราจารย์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

*Corresponding author, E-mail: aekphisit.c@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้จำลองพฤติกรรมของกำแพงกันดินประเภทไดอะแฟรมวอลล์ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งมีขนาดความหนาและความยาวต่างๆ โดยแบบจำลองแบบ 2 มิติถูกพัฒนาขึ้น มีลำดับขั้นตอนการขุดดินที่มีการติดตั้งค้ำยันและก่อสร้างจากล่างขึ้นบน ลึก 3 ถึง 18 เมตร และติดตั้งค้ำยันที่ระดับต่างๆ แบบจำลองดินเป็นประเภทมอร์-คูลอมบ์ และค่าโมดูลัสของชั้นดินเหนียว (E_u) มีค่าเท่ากับ $350s_u$ และ $500s_u$ ผลการศึกษาพบว่าความยาวกำแพงขั้นต่ำที่สามารถรองรับงานขุด มีค่าระหว่าง 8 ถึง 21 เมตร สำหรับค่าความลึกการขุด 3 ถึง 18 เมตร และขึ้นกับความหนากำแพง พฤติกรรมของกำแพงกันดินไดอะแฟรมวอลล์สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะการเคลื่อนตัว ได้แก่ พฤติกรรมกำแพงปลายเคลื่อนที่อิสระ และ พฤติกรรมกำแพงปลายยึดแน่น โดยความยาวกำแพงกันดินที่แบ่งระหว่างพฤติกรรมปลายเคลื่อนที่อิสระและปลายยึดแน่นสัมพันธ์กับระยะการขุดความหนากำแพง และมีค่าระหว่าง 21 ถึง 27 เมตร พฤติกรรมของกำแพงกันดินส่งผลให้ลักษณะการเกิดหน่วยแรงในแนวราบ การเกิดแรงปฏิกิริยาของค้ำยัน รวมทั้งแรงเฉือน และ โมเมนต์ในกำแพงแตกต่างกัน ผลการศึกษาได้จัดทำเป็นแผนภูมิแสดงการเคลื่อนตัวสูงสุดในแนวราบ แรงเฉือนและโมเมนต์สูงสุดในกำแพงกันดิน รวมทั้งการยุบตัวของผิวดิน

คำสำคัญ: ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์; งานขุดดินลึก; ไดอะแฟรมวอลล์; การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน

ABSTRACT

This research is mainly focused on the behavior of diaphragm wall in Bangkok area using finite element model simulation with various wall thickness and length. The 2-D FEM model had been generated for each stage of bottom-up construction and excavation depth ranging from 3 to 18 m. The Mohr-Coulomb model is assigned for soil foundation and Young's modulus of clay layers is $350s_u$ and $500s_u$. The results show that the minimum wall length that can support the underground construction depends on excavation depth and wall thickness. The observed D-wall model behavior could be divided into 2 types according to the wall

Aekphisit Chanthong^{1*} Barames Vardhanabhuti² and Korchoke Chantawarangul³

¹*Master Student, ²Assistant Professor, ³Associate Professor

¹⁻³ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand.

movement. These include Free-End Behavior and Restrain-End Behavior. The retaining wall length that divided between these behaviors is between 21 and 27 m, and depends on excavation depth and wall thickness. The wall movement behavior also influences the total horizontal stress acting on the wall, reaction force of strut, induced shear force and moment of the wall. Finally, the D-wall construction charts in Bangkok subsoil had been developed for an estimation of maximum wall movement, maximum shear force and maximum moment in the wall and ground surface deformation.

KEYWORDS: Finite Element Method; Deep excavation; Bottom-up construction; Diaphragm wall; Wall deformation

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	สัญลักษณ์	คำอธิบาย
c'	หน่วยแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพ	t	ความหนาของกำแพงกันดิน
D	ความลึกในการขุด	$[u_x]_{bottom}$	ระยะเคลื่อนตัวของปลายกำแพงในแนวราบ
E	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น	$[u_x]_{max}$	ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดในแนวราบของกำแพงกันดิน
E_u	โมดูลัสยืดหยุ่นในสภาวะไม่ระบายน้ำ	W	ความกว้างของหลุมขุด
F_n	แรงปฏิกิริยาของค้ำยัน	$Z_{M(max)}$	ตำแหน่งที่เกิดโมเมนต์สูงสุด
$(EA)_{strut}$	สติเฟนสแนวแกนของค้ำยัน	Δ	ขอบเขตการยุบตัวของผิวดินหลังกำแพง
L	ความยาวกำแพงกันดิน	δ_y	ระยะยุบตัวของผิวดินหลังกำแพง
L_{cri}	ค่าความยาวต่ำสุดของกำแพงกันดินที่สามารถใช้รองรับการขุดดิน	$[\delta_y]_{max}$	ระยะการยุบตัวสูงสุดของผิวดินหลังกำแพง
L_f	ความยาวของกำแพงที่แบ่งระหว่างพฤติกรรมปลายอิสระและปลายยึดแน่น	v	อัตราส่วนปัวซอง
s_u	กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ	σ_h	หน่วยแรงรวมในแนวราบ
ST_n	ค้ำยันลำดับที่ n	ϕ'	มุมเสียดทานประสิทธิภาพ
		ψ	มุมดilatancy

1. บทนำ

ในปัจจุบัน พื้นที่ในเขตกรุงเทพมหานครมีการก่อสร้างอาคารและระบบสาธารณูปโภคใต้ดินที่มีความลึกมากกว่า 10 เมตร เพิ่มขึ้น จึงมีการใช้กำแพงกันดินที่มีความแข็งแรง อาทิ ไคอะแฟรมวอลล์ (Diaphragm Wall) เป็นโครงสร้างป้องกันดิน เพื่อลดการเคลื่อนตัวของดินบริเวณรอบพื้นที่ก่อสร้าง ที่อาจส่งผลกระทบต่อความเสียหายของสิ่งปลูกสร้างข้างเคียง การวิเคราะห์แรงภายในและการเคลื่อนตัวของไคอะแฟรมวอลล์นั้น วิศวกรนิยมประยุกต์ใช้แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ 2 มิติ โดยเงื่อนไขระนาบความเครียด (Plane Strain Condition) และจำลองพฤติกรรมดินด้วยแบบจำลองมอร์-คูลอมบี้ โดยสมมุติให้ค่าโมดูลัส (E_u) ของดินเหนียวกรุงเทพฯ มีความสัมพันธ์กับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (s_u) และพบว่าผลการจำลองพฤติกรรมไคอะแฟรมวอลล์โดยไฟไนต์อีลิเมนต์ 2 มิติ สอดคล้องกับผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของไคอะแฟรมวอลล์ในขั้นตอนสุดท้ายของงานขุด [1-4]

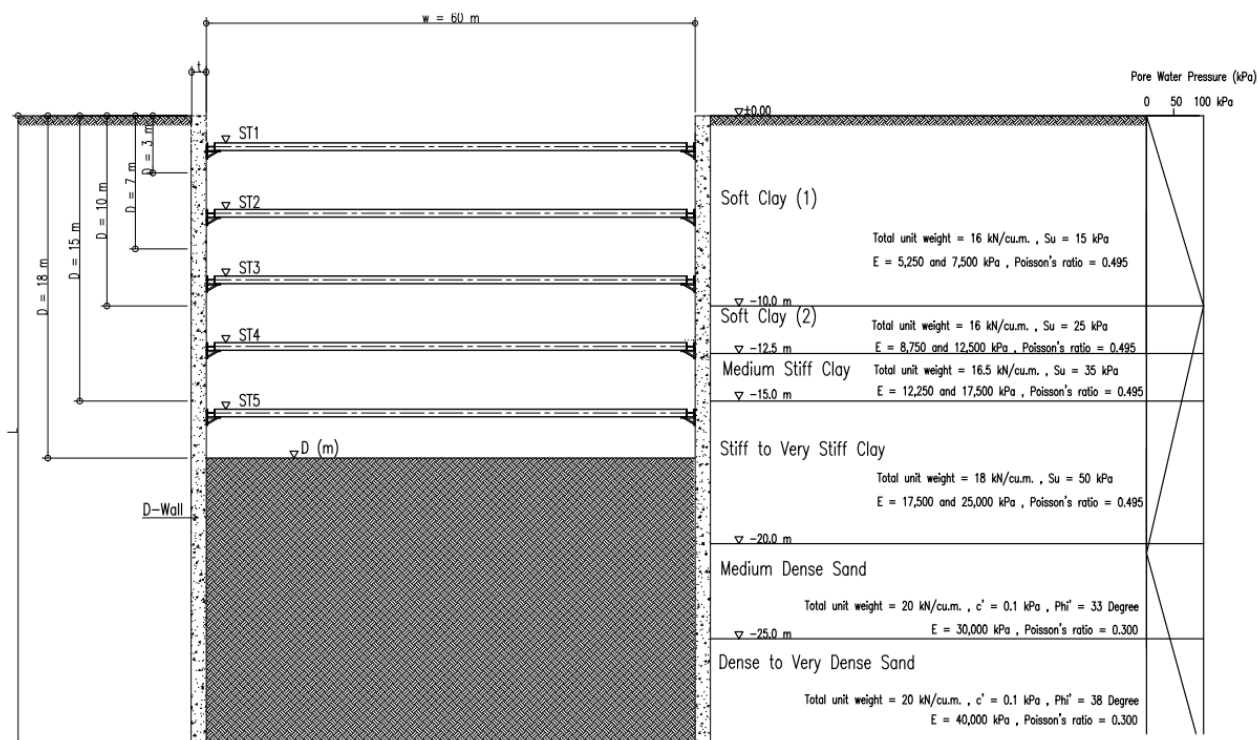
อย่างไรก็ตาม นักวิจัย พบว่า ขนาดการเคลื่อนตัวของแบบจำลองไคอะแฟรมวอลล์ระหว่างก่อสร้างนั้น ยังมีความคลาดเคลื่อนจากผลการตรวจวัดในสนาม จึงแนะนำให้ปรับค่าโมดูลัสของดินเหนียวในแบบจำลองมอร์-คูลอมป์ ในทุกๆขั้นตอนการก่อสร้างให้สอดคล้องกับความเครียดของดิน [5-7] หรือให้ใช้แบบจำลองพฤติกรรมดินฮาร์ดเคนนิง แทนแบบจำลองมอร์-คูลอมป์ สำหรับชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ [7-8] นอกจากนี้ Chheng and Likitlersuang [9] และ Likitlersuang et al. [10] ได้มีการศึกษาวิจัยแบบจำลองงานชุดไคอะแฟรมวอลล์ 3 มิติ ในชั้นดินกรุงเทพฯ โดยใช้แบบจำลองพฤติกรรมดินฮาร์ดเคนนิง และเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดในสนาม พบว่า ค่าการเคลื่อนตัวของแบบจำลองไคอะแฟรมวอลล์ 3 มิติ ให้ผลลัพธ์การเคลื่อนตัวแม่นยำโดยเฉพาะฝั่งกำแพงด้านสั้นและบริเวณมุมของกำแพง อย่างไรก็ดี นักวิจัย [10-11] ได้เสนอแนะว่า การวิเคราะห์โดยแบบจำลอง 2 มิติ สามารถยอมรับได้ ในกรณีที่อัตราส่วนความยาว ต่อความกว้างหลุมขุดไม่น้อยกว่า 6 และยังช่วยลดระยะเวลาในการประมวลผล และ Likitlersuang et al. [11] กล่าวว่า การวิเคราะห์ไคอะแฟรมวอลล์ในชั้นดินกรุงเทพฯ โดยแบบจำลอง 2 มิติ และจำลองพฤติกรรมดินเหนียวแบบมอร์-คูลอมป์ โดยใช้ความสัมพันธ์ E_u/s_u ที่เหมาะสม สามารถลดความซับซ้อนของการป้อนค่าพารามิเตอร์ของดิน และให้ผลการทำนายการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงได้เหมาะสม อย่างไรก็ดี ไม่แนะนำให้ใช้ในการทำนายค่าการยุบตัวของดินหลังกำแพง

เพื่อทำความเข้าใจพฤติกรรมของไคอะแฟรมวอลล์ ที่ก่อสร้างในกรุงเทพมหานคร จึงได้สร้างสถานการณ์จำลองงานชุดด้วยแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ 2 มิติ ที่มีความหนา ความยาวกำแพง และความลึกการขุดต่าง ๆ รวมทั้งสิ้น 196 กรณี ผลการศึกษาทำให้สามารถจำแนกชนิดของไคอะแฟรมวอลล์ตามลักษณะการเคลื่อนตัว และทราบตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของงานชุด และจัดทำแผนภูมิการเคลื่อนตัวของดินและกำแพง รวมทั้งแรงเฉือน และโมเมนต์ที่เกิดขึ้น เพื่อประโยชน์ในการประเมินผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการก่อสร้าง และการออกแบบเสริมเหล็กโครงสร้างไคอะแฟรมวอลล์

2. แบบจำลอง 2 มิติของไคอะแฟรมวอลล์ในชั้นดินกรุงเทพฯ

แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ 2 มิติ ได้ถูกพัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม Plaxis V20 และได้ตรวจสอบผลลัพธ์ของแบบจำลองด้วยผลการตรวจวัดในสนามจากกรณีศึกษา [6,9] และพัฒนาแบบจำลองเพื่อสร้างสถานการณ์จำลองงานชุด และก่อสร้างไคอะแฟรมวอลล์ต่าง ๆ ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร อาทิ ทางลอดใต้ทางแยก อาคารและสถานีรถไฟฟ้าวัดใต้ดิน ที่มีความลึกงานขุดตั้งแต่ 3 เมตร ถึง 18 เมตร และจำลองไคอะแฟรมวอลล์ ที่มีความยาว (L) ตั้งแต่ 8 เมตร ถึง 40 เมตร ความหนา (z) 0.8 และ 1.2 เมตร [12] แบบจำลองได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยใช้โปรแกรม Plaxis 2 มิติ (V20) ที่มีขอบเขตแบบจำลองกว้าง 260 เมตร ลึก 60 เมตร ระยะความกว้างหลุมขุด (H) เท่ากับ 60 เมตร และค้ำยัน (ST) ติดตั้งในระดับต่าง ๆ โดยมีระยะห่างประมาณ 3.5 เมตร เพื่อหลีกเลี่ยงระดับที่จะทับซ้อนกับโครงสร้างถาวร ดังแสดงในรูปที่ 1 และ ตารางที่ 1 การขุดและติดตั้งค้ำยันได้ถูกจำลองขึ้น มีขั้นตอนทั้งสิ้น 3 ถึง 11 ลำดับ ซึ่งขึ้นกับระยะการขุด [9]

ลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯในแบบจำลองนั้น ได้อ้างอิงพื้นที่โซน D จากฐานข้อมูลชั้นดินทางวิศวกรรมบริเวณที่ราบภาคกลางตอนล่างของประเทศไทย โดยแบ่งออกเป็น 6 ชั้น [13] โดยใช้แบบจำลองดินมอร์-คูลอมป์ พารามิเตอร์ของแบบจำลองวัสดุประกอบด้วย หน่วยน้ำหนักรวม (Total Unit Weight, γ), หน่วยแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล (Cohesion, c') หรือแทนค่าด้วย กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, s_u) ในกรณีที่เป็นดินเหนียว, มุมเสียดทานประสิทธิผล (Effective Friction Angle, ϕ') และมุมดilatancy (Dilatancy Angle, ψ), ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) และอัตราส่วนปัวซอง (ν) ดังสรุปในตาราง



รูปที่ 1 แบบจำลอง D-wall ในชั้นดินบริเวณกรุงเทพมหานคร

ตารางที่ 1 ระดับติดตั้งถ้ำยัน ในแต่ละความลึกงานขุด

ความลึกของงานขุด (m)	ST1 (m)	ST2 (m)	ST3 (m)	ST4 (m)	ST5 (m)
3	-1.5	-	-	-	-
7	-1.5	-5.0	-	-	-
10	-1.5	-5.0	-8.0	-	-
15	-1.5	-5.1	-8.8	-12.4	-
18	-1.5	-5.1	-8.8	-12.4	-16.0

การศึกษานี้กำหนดให้ชั้นดินเหนียวอยู่ในสภาวะไม่ระบายน้ำ และชั้นดินทรายอยู่ในสภาวะระบายน้ำ ดังสะท้อนได้จากค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และอัตราส่วนปัวซอง, และ กำลังรับแรงเฉือน สำหรับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินเหนียวในสภาวะไม่ระบายน้ำ (E_u) นั้น กำหนดให้เท่ากับ $350s_u$ และ $500s_u$ ซึ่งเป็นสมการเชิงประจักษ์การันต์ ที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับ และนิยมใช้ในแบบจำลองไดอะแฟรมวอลล์ในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ [1-2,5-8,11,14-16] ค่ามุมดilatancy ของดิน (ψ) กำหนดให้เท่ากับศูนย์ และการจำลองแรงดันน้ำใต้ดินนั้น กำหนดให้ได้รับอิทธิพลจากระดับน้ำผิวดิน และชั้นดินเหนียวซึ่งน้ำซึมผ่านยาก และการสูบน้ำบาดาลทำให้แรงดันน้ำลดลง [14-16]

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของชั้นดินซึ่งใช้แบบจำลองมอร์-คูลอมป์

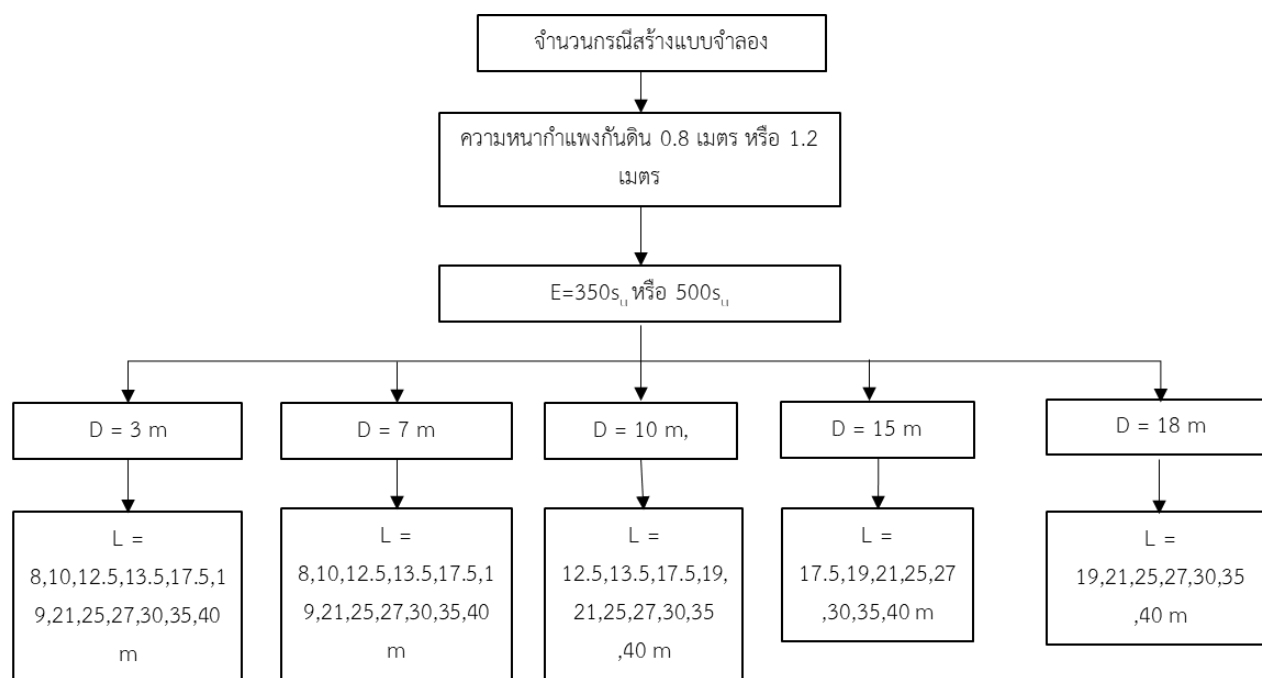
ลำดับ	ชั้นดิน	ความลึก (m)		γ_r (kN/m ³)	c' or s_u (kN/m ²)	ϕ' (Degree)	E (kN/m ²)	ν
		จาก	ถึง					
1	Very Soft to Soft Clay (1)	0.00	-10.00	16.0	15.0	0	5,250 และ 7,500	0.495
2	Very Soft to Soft Clay (2)	-10.00	-12.50	16.0	25.0	0	8,750 และ 12,500	0.495
3	Medium Stiff Clay	-12.50	-15.00	16.5	35.0	0	12,250 และ 17,500	0.495
4	Stiff to Very Stiff Clay	-15.00	-20.00	18.0	50.0	0	17,500 และ 25,000	0.495
5	Medium Dense Sand	-20.00	-25.00	20.0	0.1	33	30,000	0.300
6	Dense to Very Dense Sand	-25.00	-30.00	20.0	0.1	38	40,000	0.300

วัสดุกำแพงกันดินในแบบจำลอง ได้กำหนดให้เป็นคอนกรีตเสริมเหล็กโดยมีหน่วยน้ำหนัก 24 kN/m³ และมีค่ากำลังรับแรงอัดประลัย (f_c') เท่ากับ 320 ksc และมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) เท่ากับ 2.63×10^7 kN/m² (ACI318-95) วัสดุค้ำยันที่นำมาประกอบการทำโมเดล เลือกใช้เหล็กรูปพรรณขนาด 2×H-Section 350×350×137 kg/m [$(EA)_{strut} = 6.99 \times 10^6$ kN] (TIS 1227-2558)

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของงานชุด พิจารณา 4 ตัวแปรสำคัญ ได้แก่ ความหนาของกำแพงกันดิน (t), ค่าโมดูลัสของชั้นดินเหนียว (E_u), ความลึกการขุด (D) และ ความยาวของกำแพง (L) ด้วยเหตุนี้ เงื่อนไขการวิเคราะห์แบบจำลองจึงมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2

3. พัฒนาการวิบัติของดินรอบไคอะแฟรมวอลล์

ผลการประมวลแบบจำลองงานชุดหลังไคอะแฟรมวอลล์ที่มีระบบค้ำยัน พบว่าก่อนเริ่มการขุดดิน แบบจำลองแสดงให้เห็น Plastic Point เกิดขึ้นในชั้นดินเหนียว Very Soft Clay, Medium Stiff Clay และ Stiff Clay ที่มีความลึกตั้งแต่ -4.0 เมตร จนถึง -20.0 เมตร เนื่องจากกำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength) ต่ำกว่าค่าแรงเฉือนในมวลดิน (Shear Stress) ผลการประมวลแบบจำลองพบว่าการเกิดการพิบัติของกำแพงกันดินเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ คือ (1) การพิบัติเนื่องจากกำลังแบกทานของดิน (Bearing Failure) ซึ่งจะเกิดขึ้นสำหรับกำแพงกันดินที่หนา และมีน้ำหนักมาก เมื่อเริ่มงานขุดดิน ระยะฝั่งของกำแพงกันดินลดลง ทำให้สูญเสียแรงพุงจากเสียดทานผิว (Skin Friction) กำแพงกันดินจึงทรุดตัวลง และเกิดการพิบัติของดินที่รองรับกำแพง และ(2) การพิบัติเนื่องจากการปูดของดินที่ก้นหลุม (Heave Failure) เมื่อทำการขุดและติดตั้งค้ำยัน กำแพงมีการเคลื่อนตัวด้านข้าง และเกิด Plastic Point มากขึ้นและต่อเนื่องเป็นระนาบ เมื่อระดับการขุด (D) เข้าใกล้ระดับปลายของกำแพงกันดิน (L) Plastic Point จะเพิ่มขึ้นและพัฒนาต่อเนื่องจากด้านหลังกำแพงถึงก้นหลุม และเกิดการพิบัติในที่สุด รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างการเกิด Plastic Point และการเคลื่อนตัวของกำแพง D-Wall ในแต่ละขั้นตอนการขุด

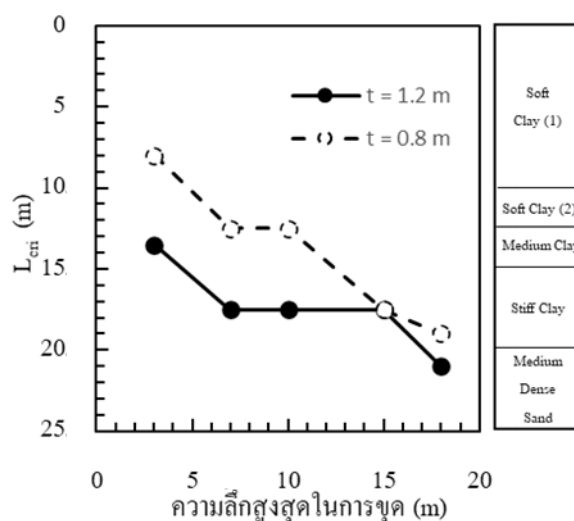


รูปที่ 2 เงื่อนไขการวิเคราะห์แบบจำลอง รวมทั้งสิ้น 196 กรณี

	Initial Phase	ขั้นตอนงานชุด 2 เมตร	ขั้นตอนงานชุด 4 เมตร	ขั้นตอนงานชุด 5 เมตร
Plastic Point				
Displacement				
$[u_x]_{\text{bottom}}$	0.00 cm	7.87 cm	13.96 cm	55.9 cm

รูปที่ 3 ตัวอย่างพัฒนาการวิบัติของดินและการเคลื่อนตัวของไคอะแฟรมวอลล์ในชั้นดินกรุงเทพ (L = 10 เมตร, t = 0.8 เมตร)

ผลการจำลองการก่อสร้างไคอะแฟรมวอลล์ในชั้นดินกรุงเทพฯ และติดตั้งระบบค้ำยันตามเงื่อนไขการวิเคราะห์ รูปที่ 2 พบว่าความลึกสูงสุดในการขุด (D_{max}) นั้นขึ้นกับความยาวของกำแพงกันดิน (L), ความหนาของกำแพง (t) ดังแสดงในรูปที่ 4 โดย L_{cri} คือค่าความยาวต่ำสุดของไคอะแฟรมวอลล์ที่สามารถใช้รองรับการขุดดินในบริเวณกรุงเทพฯ ที่ความลึก D_{max}



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง L_{cri} ของ D-Wall และ ความลึก (D_{max}) ในการขุดดินในบริเวณกรุงเทพฯ

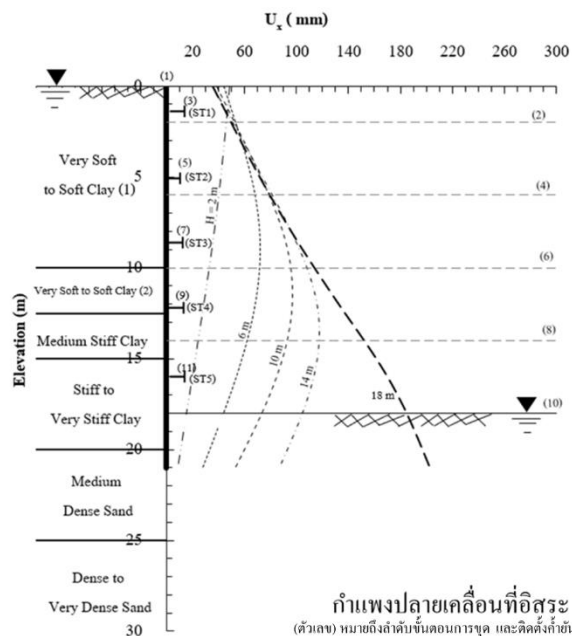
4. การจำแนกพฤติกรรมของ D-Wall ในชั้นดินกรุงเทพฯ

ปัจจัยสำคัญที่ควบคุมพฤติกรรมของไคอะแฟรมวอลล์ในชั้นดินกรุงเทพฯ คือ ความยาวของกำแพง (L) ความหนาของชั้นดินเหนียวและความลึกของชั้นดินทรายแน่น ซึ่งจะส่งผลต่อการเคลื่อนตัว (Displacement and Rotation) ที่ปลายกำแพงและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในกำแพง การผลการศึกษสามารถจำแนกพฤติกรรมของไคอะแฟรมวอลล์ในชั้นดินกรุงเทพฯ ได้ออกเป็น 2 ประเภท คือ (1) กำแพงปลายเคลื่อนที่อิสระ (Free End Behavior) และ (2) กำแพงปลายยึดแน่น (Restrained End Behavior) ดังแสดงในรูปที่ 5 รูปที่ 5(ก) แสดงตัวแทนพฤติกรรมกำแพงกันดินปลายเคลื่อนที่อิสระของแบบจำลองที่มีค่า $L = 21$ เมตร, $t = 0.8$ เมตร, $E = 350s_u$, $D = 18$ เมตร และรูปที่ 5(ข) แสดงตัวแทนพฤติกรรมกำแพงกันดินปลายยึดแน่น $L = 30$ เมตร, $t = 0.8$ เมตร, $E = 350s_u$, $D = 18$ เมตร ซึ่งจะใช้อธิบายในหัวข้อ 4, 6 และ 7

พฤติกรรมปลายเคลื่อนที่อิสระจะเกิดขึ้นกับกำแพงที่ปลายอยู่ในชั้นดินเหนียว (Soft Clay, Medium Clay และ Stiff Clay, $L \leq 20$ เมตร) ซึ่งการเคลื่อนตัวที่ปลายกำแพง (u_{bottom}) เกิดขึ้นค่อนข้างมาก และระหว่างเริ่มต้นก่อสร้าง กำแพงเกิดการโก่งงอและไม่พบจุดดัดกลับ (Inflection Point) และโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในกำแพง มีทิศทางเดียว สำหรับพฤติกรรมปลายยึดแน่นนั้น จะพบในกำแพงที่ปลายอยู่ในชั้นดินทรายแน่น (Dense Sand, $L > 20$ เมตร) ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวที่ปลายกำแพงน้อย และกำแพงเกิดการโก่งงอ 2 ทิศทาง สามารถสังเกตเห็นจุดดัดกลับ บริเวณก้นหลุมขุด และเกิดโมเมนต์ในกำแพง 2 ทิศทาง

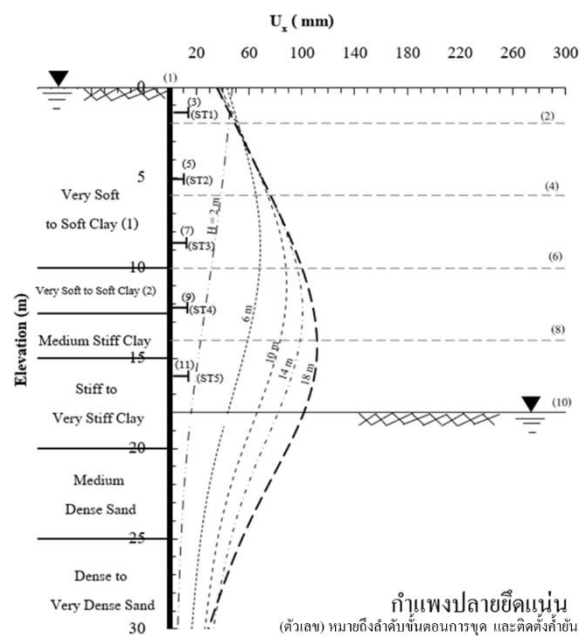
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของปลายกำแพงในแกน x , $[u_x]_{bottom}$, และความยาวของไคอะแฟรมวอลล์ (L) ในชั้นดินกรุงเทพฯ ในการขุดดินที่ความลึกต่าง ๆ (D) พบว่าเมื่อกำแพงมีความยาวเพิ่มขึ้น ค่า $[u_x]_{bottom}$ จะลดลง และมีแนวโน้มที่เมื่อกำแพงมีความยาวมากกว่า L_f โดย กำหนดให้ L_f คือจุดที่แสดงค่าการโค้งมากที่สุด (Maximum Curvature) ของกราฟ $[u_x]_{bottom}$ และ L หรืออีกนัยหนึ่ง คือ ความยาวของกำแพงที่แบ่งระหว่างพฤติกรรมปลายอิสระและปลายยึดแน่น กำแพงกันดินที่มีความยาวไม่น้อยกว่า L_f จะมีลักษณะการดัด 2 ทิศทาง และสามารถควบคุมการเคลื่อนตัวทางข้างสูงสุดของกำแพงกันดิน และการยุบตัวของผิวดินหลังกำแพงกันดินได้ ค่า L_f นั้นสัมพันธ์กับความลึกของการขุด (D) และความหนาของกำแพง (t) ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยกำแพง

D-Wall ในชั้นดินกรุงเทพ จะมีพฤติกรรมแบบปลายยึดแน่น เมื่อความยาวของกำแพงมีค่ามากกว่า 20 เมตร (ปลายอยู่ในชั้นดินทราย)



(ก) กำแพงปลายเคลื่อนที่อิสระ

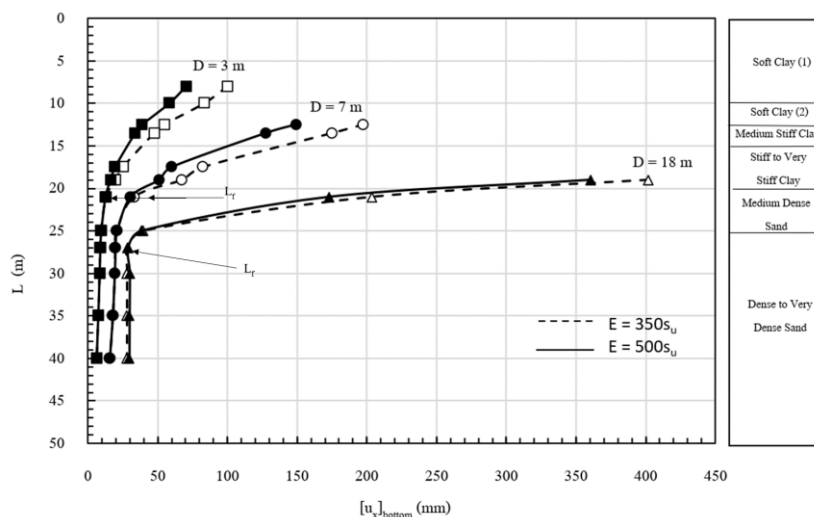
กรณี $L = 21$ เมตร, $t = 0.8$ เมตร, $E = 350s_u$, $D = 18$ เมตร



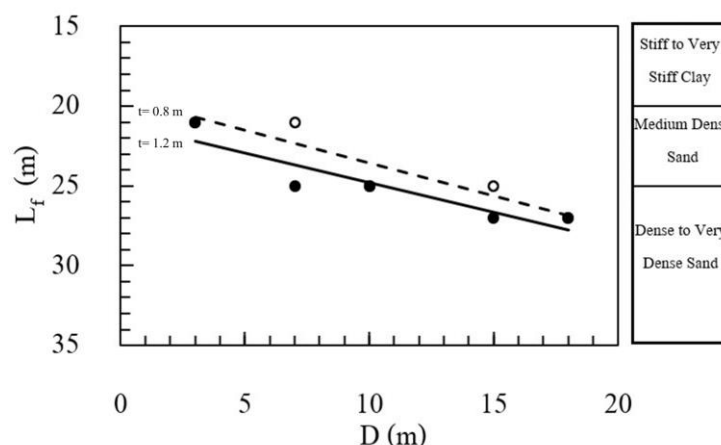
(ข) กำแพงปลายยึดแน่น

กรณี $L = 30$ เมตร, $t = 0.8$ เมตร, $E = 350s_u$, $D = 18$ เมตร

รูปที่ 5 พฤติกรรมกำแพง D-Wall ในชั้นดินกรุงเทพ (ก) กำแพงปลายเคลื่อนที่อิสระ และ (ข) กำแพงปลายยึดแน่น



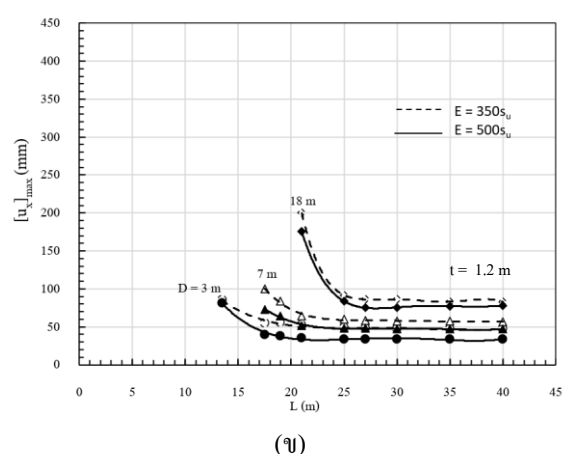
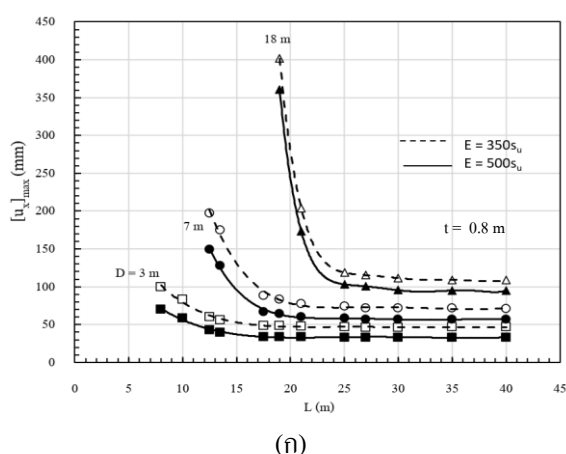
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง L และ $[u_x]_{bottom}$ สำหรับกำแพงหนา 0.8 เมตร



รูปที่ 7 ค่า L_f ของกำแพงหนา 0.8 เมตร และ 1.2 เมตร

5. การเคลื่อนตัวสูงสุดของกำแพงกันดิน

ปริมาณการเคลื่อนตัวสูงสุดและตำแหน่งที่เกิดการเคลื่อนตัวสูงสุดของ ไคโอแฟรมวอลลั่นั้น ขึ้นกับขั้นตอนการติดตั้งค้ำยัน และพฤติกรรมของกำแพงกันดินเป็นสำคัญ ในกรณีที่ความลึกการขุดน้อยกว่า 3 เมตรและมีการติดตั้งค้ำยันที่ -1.5 เมตร กำแพงจะมีการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ปลายด้านบน แต่เมื่อความลึกของการขุดมีค่ามากขึ้น ($D > 3$ เมตร) ตำแหน่งการเคลื่อนตัวสูงสุดขึ้นกับพฤติกรรมของกำแพง โดยกำแพงปลายเคลื่อนที่อิสระจะเกิดการเคลื่อนตัวสูงสุดบริเวณปลายด้านล่างของกำแพง ส่วนกำแพงปลายยึดแน่น จะเกิดการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ตำแหน่งใกล้กับความลึกของการขุด วิศวกรสามารถประมาณค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดในแนวราบของไคโอแฟรมวอลลั่นั้นในชั้นดินกรุงเทพฯ, $[u_x]_{max}$ ได้จากค่าความยาวกำแพง (L) ความลึกการขุด (D) ค่าโมดูลัสของดินเหนียว (E) และความหนาของกำแพง (t) ดังแสดงในรูปที่ 8 เมื่อเปรียบเทียบ รูปที่ 8(ก) และ 8(ข) พบว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่า $[u_x]_{max}$ คือ ความยาวกำแพง (L) และความลึกการขุด (D) สำหรับค่าความหนาของกำแพงดินนั้น จะมีผลต่อค่า $[u_x]_{max}$ เมื่อกำแพงมีความยาวไม่น้อยกว่า L_f



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง D และ $[u_x]_{max}$ สำหรับ (ก) กำแพงหนา 0.8 เมตร และ (ข) กำแพงหนา 1.2 เมตร

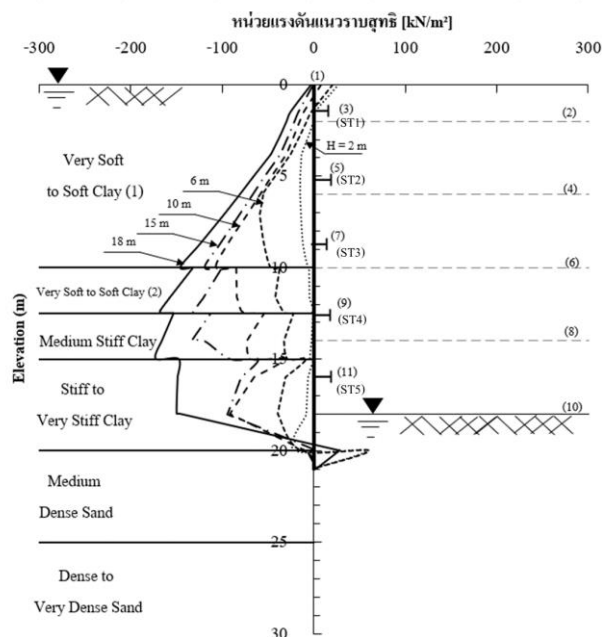
6. แรงดันดินและแรงปฏิกิริยาของค้ำยัน

หน่วยแรงรวมในแนวราบ (Total Horizontal Stress, σ_h) ที่กระทำกับกำแพงกันดิน และแรงปฏิกิริยาของค้ำยัน (F_h) จะมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งขึ้นกับขั้นตอนการก่อสร้างและพฤติกรรมของกำแพงกันดิน ก่อนการก่อสร้าง แบบจำลองแสดงให้เห็น Plastic Point ในมวลดินที่ระดับความลึก -3.8 เมตร ถึง -20.0 เมตร ส่งผลให้ผลลัพธ์ของแบบจำลองแสดงค่า σ_h เท่ากับแรงดันดินเชิงรุก (Active Earth Pressure) และมวลดินส่วนอื่นซึ่งอยู่ในสภาวะยืดหยุ่น (Elastic) นั้น มีค่า σ_h เท่ากับ $K_o \sigma_v$ ($K_o = 1 - \sin \phi'$) เมื่อเริ่มกระบวนการขุด ดินด้านหน้าและหลังกำแพงจะเกิดการเคลื่อนตัวและส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบ ($\Delta \sigma_h$) ในแต่ละชั้นดิน ซึ่ง $\Delta \sigma_h$ เป็นฟังก์ชันกับค่าโมดูลัสและความเครียดของดิน

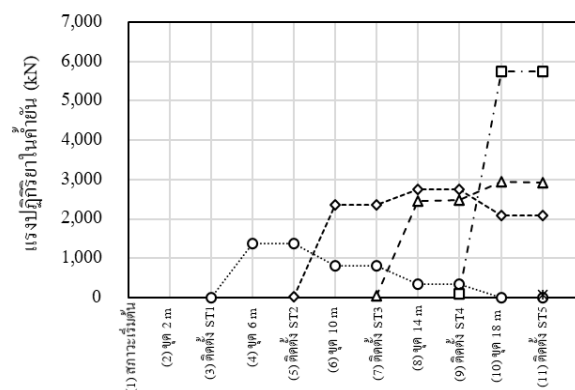
เมื่อเริ่มงานขุดและติดตั้งค้ำยัน พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของกำแพงแบบปลายเคลื่อนที่อิสระ ($L < L_f$) และ ปลายยึดแน่น ($L \geq L_f$) จะส่งผลต่อผลลัพธ์หน่วยแรงรวมในแนวราบ และแรงปฏิกิริยาของค้ำยัน รูปที่ 9 และ รูปที่ 10 แสดงตัวอย่างพฤติกรรม σ_h และ F_h ของที่กระทำกับกำแพงกันดินที่มีพฤติกรรมปลายกำแพงเคลื่อนที่อิสระ และปลายกำแพงยึดแน่น โดยขั้นตอนการก่อสร้างในแบบจำลองประกอบด้วย (1) สภาวะก่อนก่อสร้าง, (2) ขุดดิน -2.0 เมตร, (3) ติดตั้งค้ำยัน ST1 ที่ระดับ -1.5 เมตร, (4) ขุดดิน -6.0 เมตร, (5) ติดตั้ง ST2 ที่ระดับ -5.1 เมตร, (6) ขุดดิน -10.0 เมตร, (7) ติดตั้ง ST3 ที่ระดับ -8.75 เมตร, (8) ขุดดิน -14.0 เมตร, (9) ติดตั้ง ST4 ที่ระดับ -12.38 เมตร, (10) ขุดดิน -18.0 เมตร และ (11) ติดตั้ง ST5 ที่ระดับ -16.0 เมตร

ผลการศึกษาพบว่า ในกรณีกำแพงกันดินมีพฤติกรรมปลายเคลื่อนที่อิสระ ดังรูปที่ 9 หน่วยแรงสุทธิตาม σ_h ที่กระทำกับกำแพงกันดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความลึกของการขุด และมีค่าลดลงที่ปลายกำแพงกันดิน ในขั้นตอนงานขุดดิน -2.0 เมตร แรงดันสุทธิมีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึก และมีขนาดสูงในชั้น Very Soft to Soft Clay และ ชั้น Stiff to Very Stiff Clay ภายหลังจากติดตั้ง ST1 แล้วขุดดินต่อไปถึงระดับ -6.0 เมตรจะเกิดการพัฒนาระบบปฏิกิริยาในค้ำยัน ST1 เพื่อรองรับแรงดันสุทธิที่เกิดขึ้น หลังจากติดตั้งค้ำยัน ST2 แล้วขุดดินต่อไปถึง -10.0 เมตร แรงภายใน ST1 จะลดลง และจะเกิดแรงภายใน ST2 ขึ้น เมื่อติดตั้ง ST3 แล้วขุดดินต่อไปจนถึง -14.0 เมตร แรงภายใน ST2 มีแนวโน้มคงที่ และแรงใน ST3 เกิดขึ้นใกล้เคียง ST2 หลังจากติดตั้ง ST4 แล้วขุดต่อไปจนถึงระดับ -18.0 เมตร แรงภายใน ST4 จะเกิดขึ้นสูงเนื่องจากแรงดันดินทางข้างเกิดขึ้นมากในบริเวณชั้น Medium Clay และตำแหน่งของ ST4 อยู่ระดับใกล้เคียงกับจุดศูนย์กลางของแรงกระทำ (Centroid)

รูปที่ 10 แสดงพฤติกรรมหน่วยแรงสุทธิ และแรงปฏิกิริยาในค้ำยัน สำหรับกรณีกำแพงกันดินมีพฤติกรรมปลายยึดแน่น เมื่อเริ่มงานขุดดิน -2.0 เมตร หน่วยแรงสุทธิ σ_h เกิดขึ้น 2 ทิศทาง โดย σ_h มีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึก และมีขนาดสูงสุดในชั้น Very Soft to Soft Clay และมีแนวโน้มลดลง และเกิดหน่วยแรงสุทธิ σ_h ในทิศตรงกันข้ามในชั้น Medium Dense Sand และ Dense to Very Sand ภายหลังจากติดตั้ง ST1 แล้วขุดดินต่อไปถึงระดับ -6.0 เมตรจะเกิดการพัฒนาระบบปฏิกิริยาในค้ำยัน ST1 และแรงสุทธิจะมีค่าเพิ่มขึ้น หลังจากติดตั้งค้ำยัน ST2 แล้วขุดดินต่อไปถึง -10.0 เมตร แรงภายใน ST1 จะลดลง และจะเกิดแรงภายใน ST2 เพิ่มขึ้น เมื่อติดตั้ง ST3 แล้วขุดดินต่อไปจนถึง -14.0 เมตร แรงภายใน ST2 มีแนวโน้มคงที่ และแรงใน ST3 เกิดขึ้นใกล้เคียง ST2 หลังจากติดตั้ง ST4 แล้วขุดต่อไปจนถึงระดับ 18 เมตร แรงภายใน ST2, ST3 และ ST4 มีขนาดใกล้เคียงกัน และแรงดันสุทธิบริเวณปลายกำแพงกันดินมีทิศทางด้านการเคลื่อนตัวของปลายกำแพง

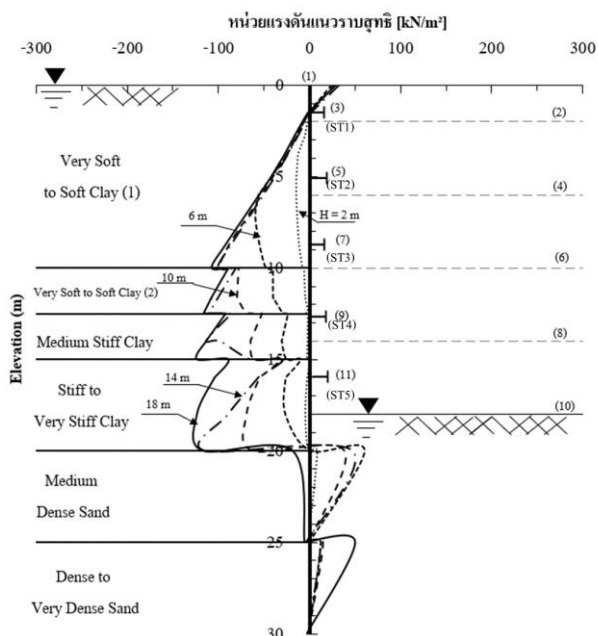


(ก) หน่วยแรงรวมสุทธิที่กระทำกับกำแพงกันดิน

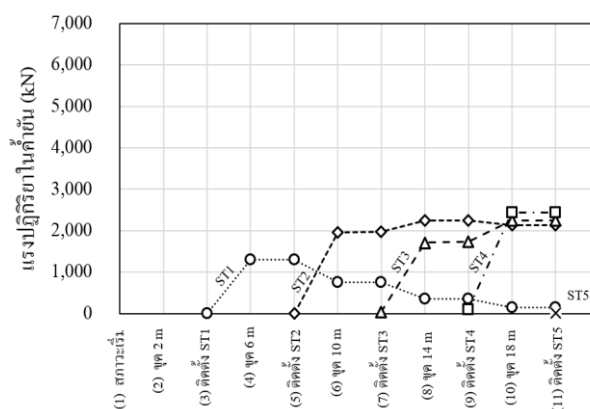


(ข) การพัฒนาแรงปฏิกิริยาภายในค้ำยัน

รูปที่ 9 รูปแบบการพัฒนาหน่วยแรงดันสุทธิ และแรงปฏิกิริยาในค้ำยัน ขณะก่อสร้างของกำแพงพฤติกรรมปลายเคลื่อนที่อิสระ



(ก) หน่วยแรงรวมสุทธิที่กระทำกับกำแพงกันดิน



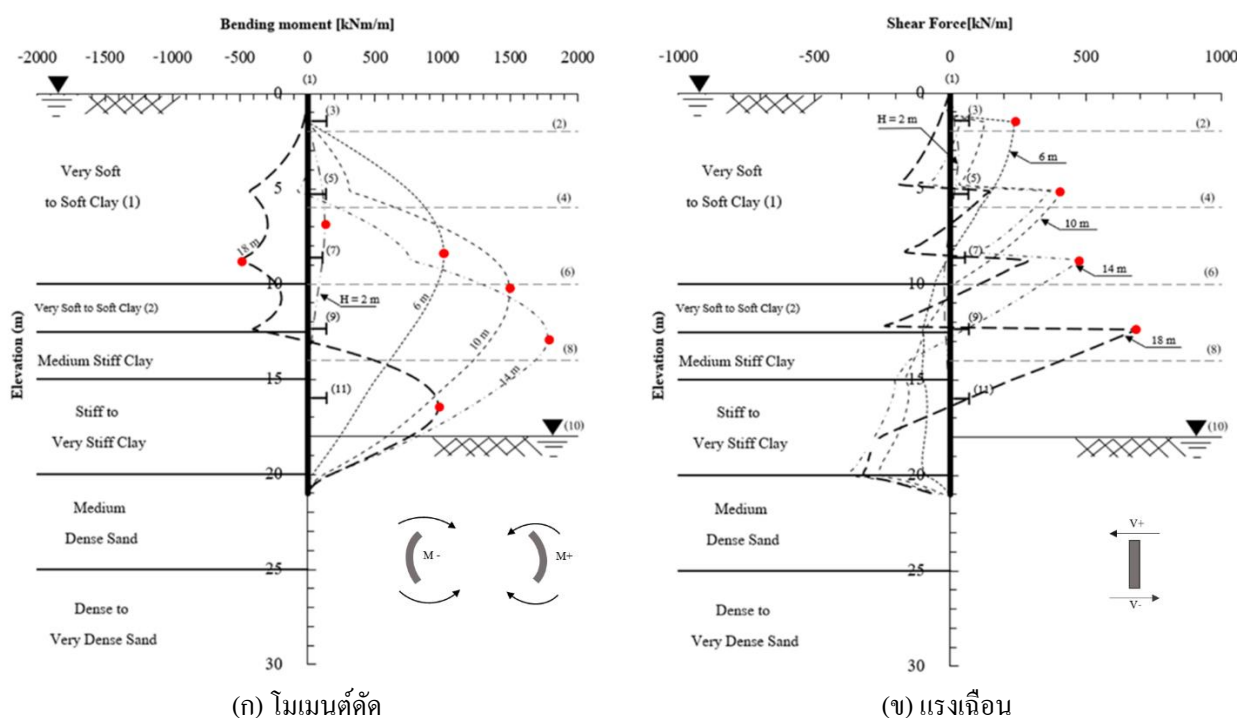
(ข) การพัฒนาแรงปฏิกิริยาภายในค้ำยัน

รูปที่ 10 รูปแบบการพัฒนาหน่วยแรงดันสุทธิ และแรงปฏิกิริยาในค้ำยัน ขณะก่อสร้างของกำแพงพฤติกรรมปลายยึดแน่น

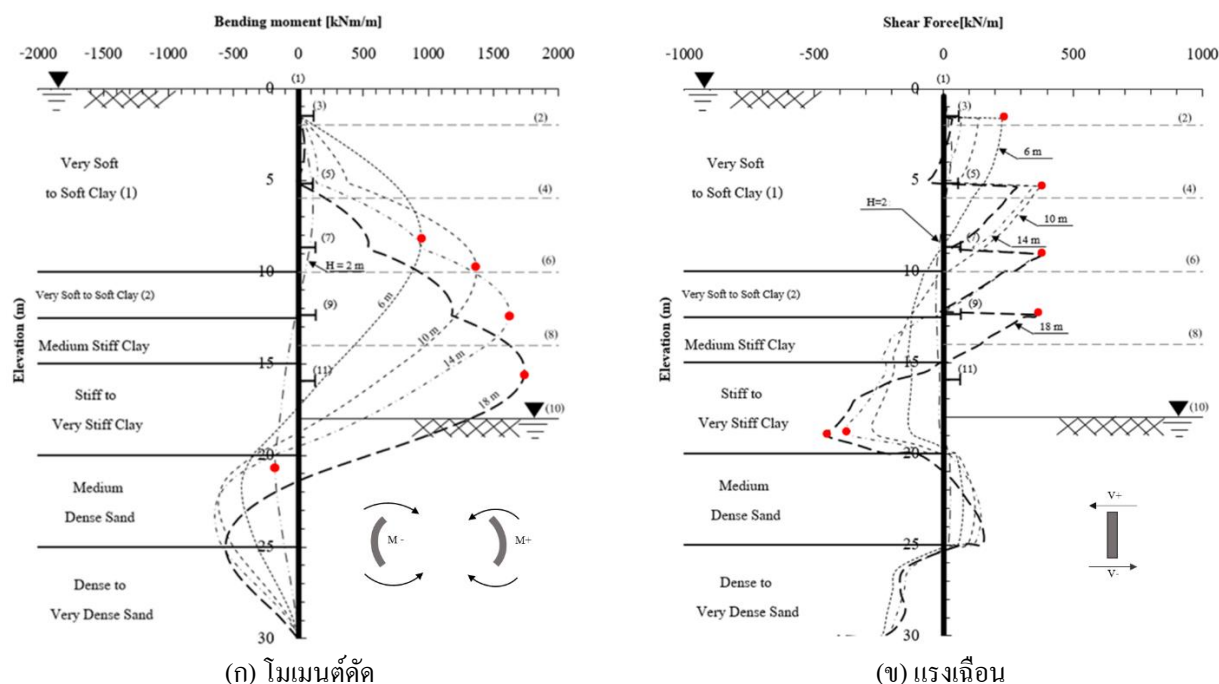
7. โมเมนต์ดัดและแรงเฉือนในกำแพงกันดิน

ลักษณะการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน ส่งผลต่อพฤติกรรมการกระจายของโมเมนต์และแรงเฉือนในกำแพง ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 11 และ 12 สำหรับกำแพงปลายเคลื่อนที่อิสระ และกำแพงปลายยึดแน่น ตามลำดับ เมื่อพิจารณากำแพงกันดินที่มีพฤติกรรมการเคลื่อนที่อิสระ ($L < L_p$) โมเมนต์ในกำแพงกันดินมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะการขุด (D) และมีทิศทางเป็น (+) เมื่อเริ่มขุดที่ระดับ -2.0 เมตร ตำแหน่งโมเมนต์สูงสุด [$Z_{M(max)}$] จะเกิดขึ้นที่ ประมาณ -7.0 เมตร และ ค่า $Z_{M(max)}$ จะเพิ่มขึ้น ตามความลึกการขุด (D) เมื่อขุดดินลึกถึง -18.0 เมตรและติดตั้ง $ST5$ ลักษณะการกระจายตัวโมเมนต์ในกำแพงจะเปลี่ยนแปลง โดยมีโมเมนต์เกิดขึ้น 2 ทิศทาง และมีขนาดลดลง เมื่อสังเกตลักษณะการกระจายของแรงเฉือน พบว่าตำแหน่งแรงเฉือนสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งค้ำยันที่ติดตั้งก่อนค้ำยันตัวสุดท้าย

กรณีกำแพงกันดินที่มีพฤติกรรมการเคลื่อนที่แน่น ($L \geq L_p$) ลักษณะการกระจายโมเมนต์จะเกิดขึ้น 2 ทิศทางตั้งแต่เริ่มขุดดินที่ระดับ -2.0 เมตร โดยมีทิศ (+) บริเวณด้านบนซึ่งกำแพงเคลื่อนตัวเข้าหาหลุมขุด และ เกิดโมเมนต์ในทิศ (-) ที่ความลึก $> D$ ในชั้นดิน Medium Dense Sand และ Dense to Very Dense Sand เนื่องจากปลายกำแพงถูกยึดแน่น ค่า $Z_{M(max)}$ จะเพิ่มขึ้นตามความลึกการขุด (D) กำแพงจะมีค่าแรงเฉือนสูงบริเวณตำแหน่งค้ำยัน และชั้น Stiff to Very Stiff Clay นอกจากนี้ยังเกิดแรงเฉือนที่ปลายกำแพงกันดินในชั้น Dense to Very Dense Sand



รูปที่ 11 รูปแบบการพัฒนานหน่วยแรงภายในกำแพงกันดินปลายเคลื่อนที่อิสระ (ก) โมเมนต์ดัด (ข) แรงเฉือน

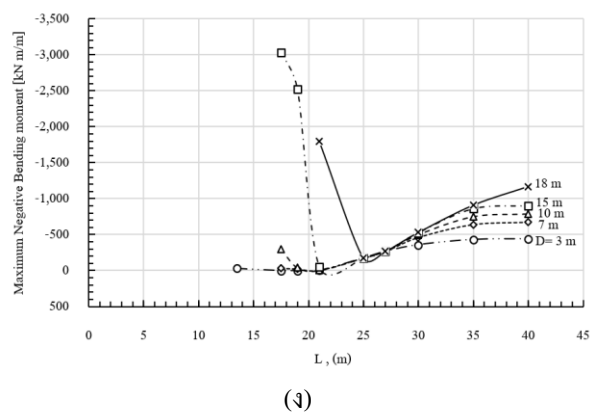
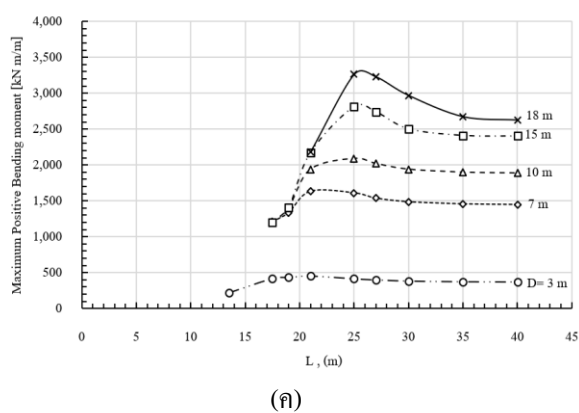
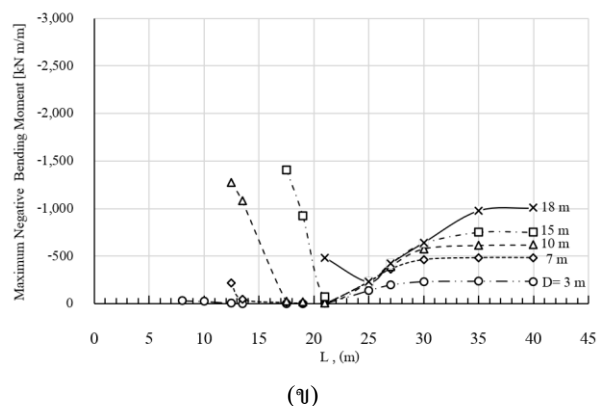
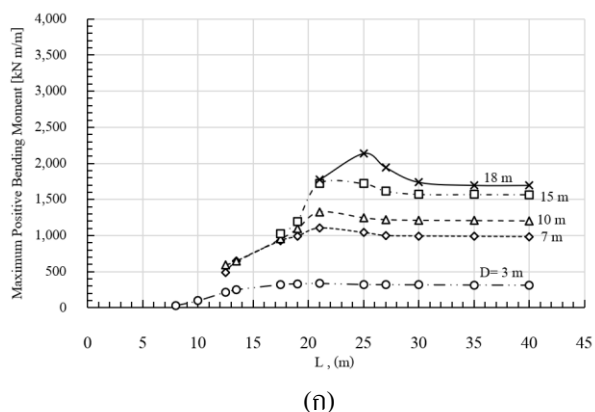


รูปที่ 12 รูปแบบการพัฒนาหน่วยแรงภายในกำแพงกันดินปลายยึดแน่น (ก) โมเมนต์ดัด (ข) แรงเฉือน

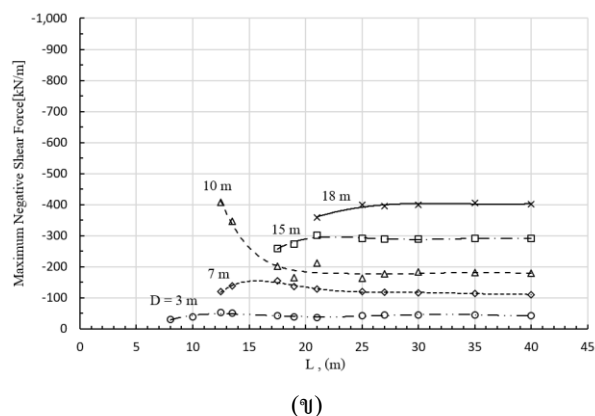
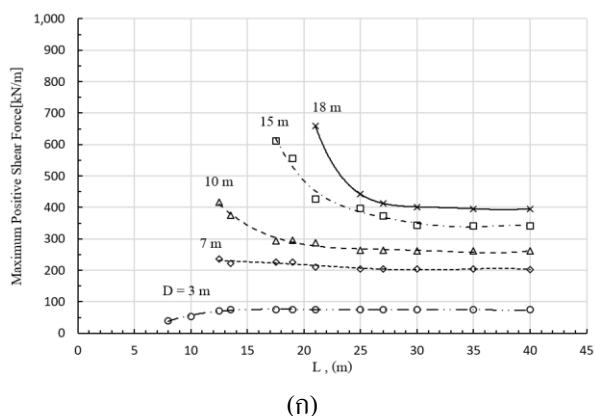
วิศวกรสามารถประมาณ ค่าโมเมนต์สูงสุดและแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในกำแพงกันดินก่อสร้างในพื้นที่กรุงเทพฯ ที่มีความหนา (t) 0.8 และ 1.2 เมตร, ความยาวกำแพง (L) ระหว่าง 8 ถึง 40 เมตร และความลึกการขุด (D) ระหว่าง 3 ถึง 18 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 13 และ 14

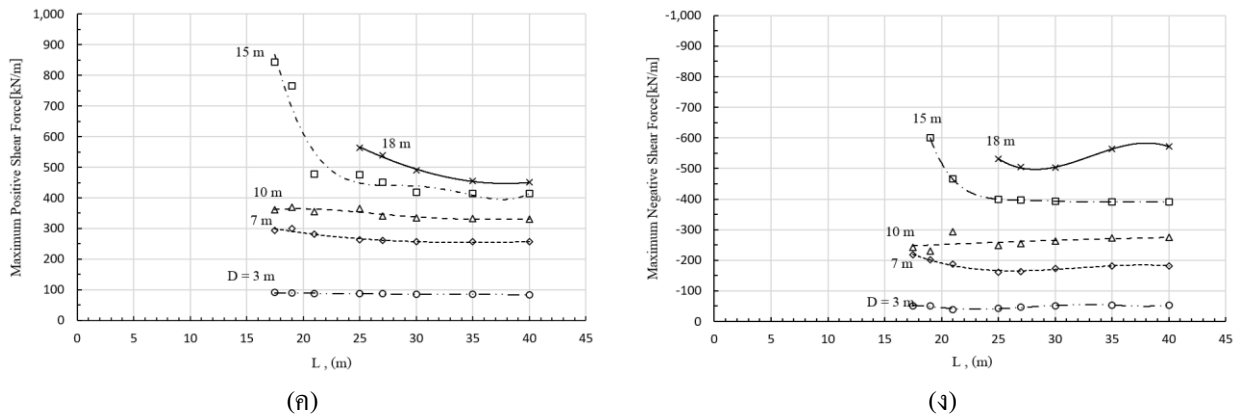
8. การขุดตัวของผิวดินหลังกำแพง

รูปร่างการขุดตัวของผิวดินหลังไคอะแฟรมวอลจะสอดคล้องกับพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของกำแพง ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 4 ตัวอย่างลักษณะการขุดตัวของผิวดินหลังไคอะแฟรมวอล ($t = 0.8$ เมตร, $D = 10$ เมตร, $E_{clay} = 350s_u$) 3 รูปแบบที่มีความยาว (L) ต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 15 ในกรณีกำแพงมีพฤติกรรมปลายเคลื่อนที่อิสระและความยาวกำแพง (L) มากกว่าค่า L_{crit} เล็กน้อย ลักษณะการขุดตัวจะแสดงดังเส้น (1) กำแพงจะทรุดตัวลง และทำให้ดินบริเวณหลังกำแพงเคลื่อนตัวลงมากในแนวตั้ง (δ_v) แต่ขอบเขตการเคลื่อนตัวในแนวราบ (Δ) มีระยะสั้น เมื่อกำแพงมีความยาวเพิ่มขึ้น แต่ยังไม่เกินกว่า L_f กำแพงยังคงมีพฤติกรรมปลายเคลื่อนตัวอิสระ แต่การทรุดตัวของกำแพงน้อยลง ทำให้ค่า δ_v น้อยลง แต่ค่า Δ มีระยะกว้างขึ้น ดังแสดงด้วยเส้น (2) เมื่อกำแพงมีความยาวมากกว่า L_f กำแพงจะมีพฤติกรรมปลายยึดแน่น ส่งผลให้ค่าการขุดตัวของผิวดิน δ_v มีค่าน้อยมาก และ ค่า Δ กว้างขึ้น ดังแสดงด้วยเส้น (3) นอกจากนี้รูปที่ 15 ยังแสดงผลการการขุดตัวของผิวดินหลังไคอะแฟรมวอลที่ตรวจวัดในสนาม ที่ก่อสร้างในพื้นที่กรุงเทพมหานครจากกรณีศึกษา [1, 8] ที่มีค่า L ใกล้เคียงกับ L_f และพบว่าพฤติกรรมสอดคล้องกับรูปแบบที่ 3

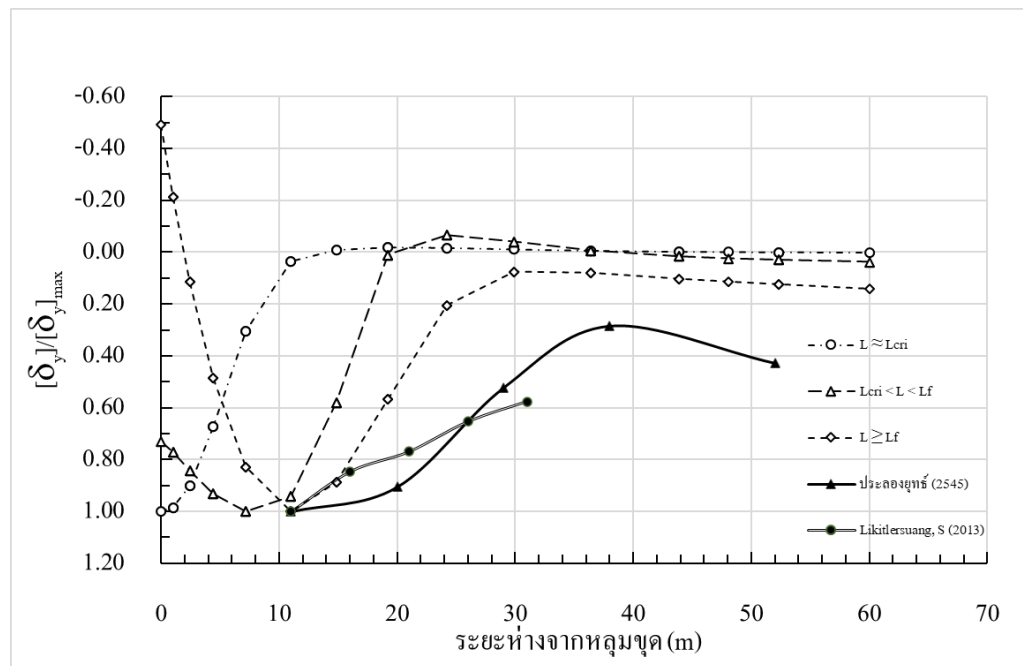


รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์สูงสุดที่เกิดขึ้นในกำแพง กับความลึกการขุดเมื่อ (ก) โมเมนต์บวก และ (ข) โมเมนต์ลบเมื่อ
กำแพงหนา 0.8 เมตร และ (ค) โมเมนต์บวก และ (ง) โมเมนต์ลบเมื่อกำแพงหนา 1.2 เมตร



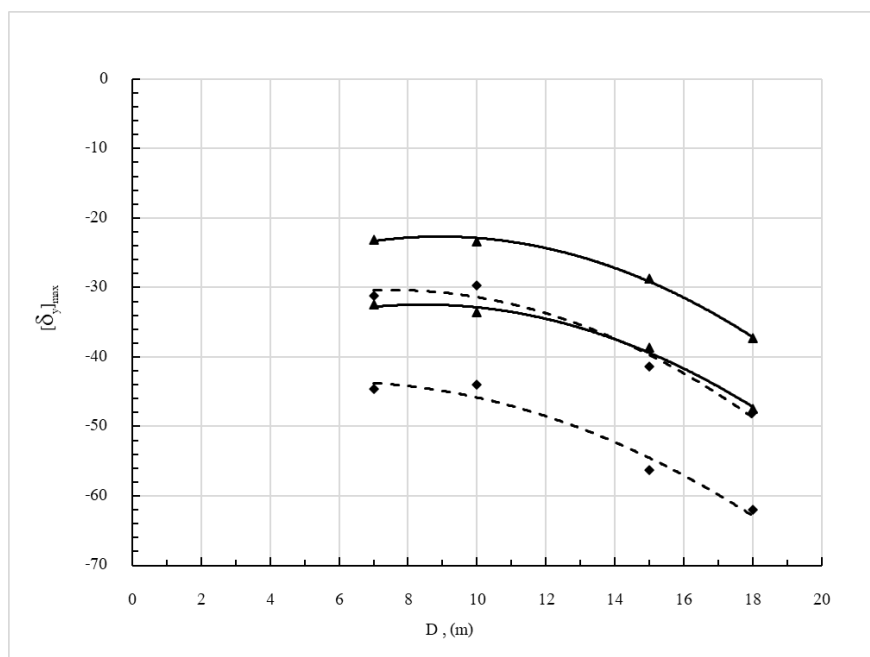


รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในกำแพง กับความลึกการขุดเมื่อ (ก) แรงเฉือนบวก และ (ง) แรงเฉือนลบเมื่อ
กำแพงหนา 0.8 เมตร (ค) แรงเฉือนบวก และ (ง) แรงเฉือนลบเมื่อกำแพงหนา 1.2 เมตร

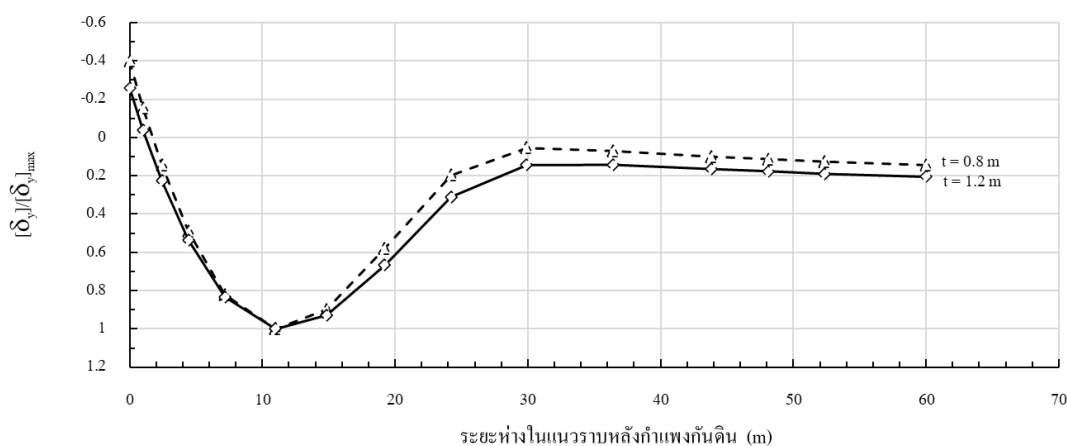


รูปที่ 15 รูปร่างการขยับตัวของผิวดินหลังกำแพง D-Wall ที่สอดคล้องกับพฤติกรรมเคลื่อนตัวของกำแพง

วิศวกรสามารถประมาณค่าการขยับตัวสูงสุดของผิวดิน, $[\delta_y]_{max}$, และรูปร่างการขยับตัวของผิวดิน ได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง $[\delta_y]_{max}$ และ D ดังแสดงในรูปที่ 16 และ $[\delta_y]_{max} / \delta_y$ และ ระยะห่างจากกำแพง (x) ดังแสดงในรูปที่ 17 โดยรูปร่างการขยับตัวของผิวดินขึ้นกับค่าความลึกการขุด (D) และ ความหนาของกำแพง (t) และค่า E_u ของดินเหนียว



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่าง D และ $[\delta_y]_{max}$ สำหรับกำแพงหนา t และ ค่าโมดูลัส E ในชั้นดินกรุงเทพ



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่าง D และ $[\delta_y]_{max}$ สำหรับกำแพงหนา 0.8 m และ 1.2 m กรณี $L \geq L_r$

9. สรุป

กำแพงกันดินประเภทไคอะแฟรมวอลล์ในชั้นดินกรุงเทพ ถูกจำลองขึ้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างกำแพงและดินโดยรอบในระหว่างการก่อสร้าง ซึ่งติดตั้งค้ำยันแบบมีค้ำยันและก่อสร้างจากล่างขึ้นบน โดยมีขั้นตอนงานขุดและติดตั้งค้ำยันทั้งสิ้น 3 ถึง 11 ลำดับ ตัวแปรในแบบจำลองประกอบด้วย (1) ความยาวกำแพง ($L = 8$ ถึง 40 เมตร), ความลึก

การขุด ($D = 3$ ถึง 18 เมตร), ความหนาของกำแพงกันดิน ($t = 0.8$ และ 1.2 เมตร) และ ค่าโมดูลัสแบบไม่ระบายน้ำของชั้นดินเหนียว ($E_u = 350s_u$ และ $500s_u$) โดยมีการคำนวณตามระดับที่แสดงไว้มีจำนวนรูปแบบการจำลองทั้งสิ้น 196 กรณี ผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

1) ไคอะแฟรมวอลล์มีโอกาสเกิดการพิบัติที่ก้นหลุม โดยการพัฒนาของ Plastic Point ในชั้นดินหลังกำแพงไปยังก้นหลุมขุด และปลายกำแพงเคลื่อนตัวเข้าหาหลุมขุด สำหรับงานขุดลึก 3-18 เมตร นั้น ความยาวของกำแพงกันดินที่สามารถรองรับงานขุดได้ (L_{cr}) เท่ากับ 8 ถึง 19 เมตร และ 13 ถึง 21 เมตร สำหรับ ค่า t 0.8 เมตร และ 1.2 เมตร ตามลำดับ

2) พฤติกรรมของกำแพงกันดินสามารถจำแนก ได้เป็น 2 ประเภท คือ (1) กำแพงปลายเคลื่อนที่อิสระ (Free End Behavior) จะเกิดขึ้นกับกำแพงที่ปลายอยู่ในชั้นดินเหนียว ซึ่งปลายล่างกำแพงมีการเคลื่อนตัวมาก ส่งผลให้เกิดการยุบตัวของผิวดินสูง และ (2) พฤติกรรมกำแพงปลายยึดแน่น (Restrained End Behavior) จะพบในกำแพงที่ปลายอยู่ในชั้นดินทรายแน่น โดยปลายกำแพงและดินโดยรอบมีการเคลื่อนตัวน้อย ความยาวของกำแพงที่แบ่งระหว่างพฤติกรรมปลายอิสระและปลายยึดแน่น (L_p) นั้นสัมพันธ์กับความลึกของการขุด (D) โดยมีค่าระหว่าง 21 ถึง 27 เมตร สำหรับค่า D ในช่วง 3 ถึง 18 เมตรตามลำดับ

3) หน่วยแรงรวมในแนวราบ (Total Horizontal Stress, σ_h) ที่กระทำกับกำแพงกันดิน ,แรงปฏิกิริยาของค้ำยัน รวมทั้งแรงเฉือน และ โมเมนต์ที่เกิดขึ้นในกำแพง จะมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการก่อสร้าง และขึ้นกับพฤติกรรมของกำแพงกันดินเป็นสำคัญ ในกรณีกำแพงพฤติกรรมปลายเคลื่อนที่อิสระ หน่วยแรงสุทธิ σ_h จะเกิดขึ้นในทิศทางที่ทำให้กำแพงกันดินเคลื่อนเข้าหาหลุมขุด และมีความเข้มสูงบริเวณชั้นดิน Medium Stiff Clay ส่งผลให้ค้ำยันบริเวณดังกล่าว เกิดแรงปฏิกิริยาสูง ลักษณะแรงเฉือนและโมเมนต์ในกำแพงกันดิน จะสอดคล้องกับการเคลื่อนตัวของกำแพง และตำแหน่งติดตั้งค้ำยัน โดยแรงเฉือนมีค่าสูงบริเวณตำแหน่งค้ำยัน และมีโมเมนต์เกิดขึ้นในทิศทางเดียว แต่หากความลึกการขุดเข้าใกล้ L_{cr} เกิดการเคลื่อนตัวของปลายล่างกำแพงกันดินสูง ทำให้เกิดโมเมนต์กลับทิศทางเป็น โมเมนต์ลบ และโมเมนต์บวกมีขนาดลดลง

4) ในกรณีกำแพงพฤติกรรมปลายยึดแน่น จะพบหน่วยแรงสุทธิ σ_h บริเวณปลายล่างกำแพงที่มีทิศทางด้านการเคลื่อนตัวเข้าหาหลุมขุด แรงปฏิกิริยาภายในค้ำยันยังมีลักษณะการกระจายตัวสม่ำเสมอ แรงเฉือนที่เกิดขึ้นภายในกำแพงกันดินมีขนาดสูงบริเวณค้ำยันและในชั้นดิน Medium Dense Sand และ Dense to Very Dense Sand เนื่องจากปลายกำแพงถูกยึดแน่น โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นมีลักษณะสองทิศทาง

5) ผลการศึกษา ได้ถูกประมวล และจัดทำเป็นแผนภูมิสำหรับควบคุมการก่อสร้าง D Wall ในชั้นดินกรุงเทพ ซึ่งประกอบด้วย การเคลื่อนตัวสูงสุดในแนวราบ การยุบตัวของผิวดิน แรงเฉือนและโมเมนต์สูงสุดที่เกิดขึ้นในกำแพงกันดิน ซึ่งสัมพันธ์กับความยาวกำแพง (L) , ความลึกการขุด (D) , ความหนากำแพง (t) และค่าโมดูลัสของชั้นดินเหนียว (E)

6))

7) ควรมีการตรวจสอบเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการก่อสร้างและตรวจวัดในสนามกับผลการศึกษาพฤติกรรมไคอะแฟรมวอลล์จากการสร้างสถานการณ์จำลองนี้ เพื่อเพิ่มความเข้าใจของพฤติกรรมการปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างไคอะแฟรมวอลล์และชั้นดินกรุงเทพฯ และปรับปรุงแบบจำลองในอนาคต

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.พลพงษ์ พงษ์วิทยาภาณุ และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับความอนุเคราะห์โปรแกรม Plaxis V20 ในการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] ประลองยุทธ์ กสิวงศ์, ผลกระทบของการเจาะอุโมงค์ผ่านสถานีรถไฟต่อการเคลื่อนตัวของดินและกำแพงสถานี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [2] ภัทรารุช อาวจำปา, กำแพงไคอะแฟรมในการขุดดินลึกในเขตปลอดภัยของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [3] Teparaksa, W., Thasnanipan, N. and Tanseng, P. Analysis of lateral wall movement for deep braced excavation in Bangkok subsoils. In: *Proceeding of the Civil and Environmental Engineering Conference*, Bangkok, Thailand, November 1999, pp. 67-76.
- [4] Teparaksa, W. and Teparaksa, J. Comparison of diaphragm wall movement prediction and field performance for different construction techniques. *Underground Space*, 2019, 4 (3), pp.225-234.
- [5] ชีรพงษ์ แพนเกาะ, พฤติกรรมของกำแพงกันดินไคอะแฟรมมวลลึกลับสำหรับงานขุดลึกในดินเหนียวกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [6] พงษ์พันธ์ บูรณะกิติ, พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินชนิดเข็มปักและไคอะแฟรมสำหรับงานขุดแบบใช้ค้ำยันในดินเหนียวกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [7] วันปิยะ สานุกูล, พฤติกรรมดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครในงานขุดดินและพารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.
- [8] Likitlersuang, S., Surarak, C., Wanatowski, D., Oh, E. and Balasubramaniam, A. Finite element analysis of a deep excavation: A case study from the Bangkok MRT. *Soils and foundations*, 2013, 53 (5), pp. 756-773.
- [9] เอกพิศิษฐ์ จันทร์ทอง, การจำลองพฤติกรรมเคลื่อนตัวของดินและไคอะแฟรมมวลลึกลับที่ก่อสร้างในพื้นที่กรุงเทพมหานครด้วยไฟไนต์อีลิเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2564.
- [10] Faheem, H., Cai, F. and Ugai, K. Three-dimensional base stability of rectangular excavations in soft soils using FEM. *Computers and Geotechnics*, 2004, 31 (2), pp. 67-74.
- [11] Likitlersuang, S., Chheng, C. and Keawsawasvong, S. Structural modelling in finite element analysis of deep excavation. *Journal of GeoEngineering*, 2019, 14 (3), pp. 121-128.
- [12] Hsiung, B. C. B., Likitlersuang, S., Phan, K. H. and Pisitsopon, P. Impacts of the plane strain ratio on excavations in soft alluvium deposits. *Acta Geotechnica*, 2021, 16 (6), pp. 1923-1938.
- [13] เชิดพันธุ์ อมรกุล, ฐานข้อมูลชั้นดินทางวิศวกรรมบริเวณที่ราบภาคกลางตอนล่างของประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2553.
- [14] ชินวุฒิ ชาญฉายา, การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของชั้นดินกรุงเทพฯ เนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน โดยวิธีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- [15] Phien-wej, N., Giao, P. H. and Nutalaya, P. Land subsidence in Bangkok, Thailand. *Engineering geology*, 2006, 82 (4), pp. 187-201.
- [16] Saowiang, K. and Giao, P. H. Numerical analysis of subsurface deformation induced by groundwater level changes in the Bangkok aquifer system. *Acta Geotechnica*, 2021, 16 (4), pp. 1265-1279.