



รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

การประเมินการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงเข็มพืดในงานขุดดินลึก
ใกล้โครงสร้างอาคารเดิม

Lateral Movement's Evaluation of The Sheet Pile Wall in Deep
Excavation Close to Adjacent Building

นายพงศ์ศิริ สุนัตติ
นางสาวสกวาดเดือน ถึงอินทร์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560



รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

การประเมินการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงเข็มพืดในงานขุดดินลึก

ใกล้โครงสร้างอาคารเดิม

Lateral Movement's Evaluation of The Sheet Pile Wall in Deep
Excavation Close to Adjacent Building

นายพงศ์ศิริ สุนัฒิ

นางสาวสกวเดือน ถึงอินทร์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

ชื่อโครงการสหกิจศึกษา การประเมินการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงเข็มพืดในงานขุดดินลึก ใกล้
โครงสร้างอาคารเดิม

ชื่อ-สกุล นักศึกษา นายพงศ์ศิริ สุนันติ นางสาวสกวเดือน ถึงอินทร์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ชื่อ-สกุล อาจารย์นิเทศ ดร.ศลิษา ไชยพุท

ชื่อ-สกุล ผู้นิเทศงาน คุณสะอาด สมนา

ชื่อสถานประกอบการ บริษัท เจ ดับบลิว เอส คอนสตรัคชั่น จำกัด

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันกรุงเทพมหานครมีการก่อสร้างอาคารใต้ดินเพิ่มมากขึ้น แต่ปัญหาหนึ่งของการก่อสร้าง
อาคารใต้ดิน คือ การเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินที่อาจก่อให้เกิดผลกระทบโดยตรงกับโครงการก่อสร้าง หรือ
อาคารข้างเคียง ซึ่งสาเหตุและปัญหาดังกล่าวอาจเกิดจากหลายๆปัจจัย อาทิเช่น สภาพแวดล้อม และลักษณะ
ของอาคารข้างเคียงที่อาจไม่ได้คำนึงถึง และนำมาวิเคราะห์ โดยเฉพาะในขั้นตอนการออกแบบ จากปัญหา
ดังกล่าวข้างต้น จึงนำมาสู่งานวิจัยนี้ โดยวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ
โครงสร้างกันดิน (Sheet Pile) และอาคารข้างเคียง ด้วยวิธี 2D Finite Element Method (2D FEM) เพื่อหา
ความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะห่างจากตำแหน่งซีทไพล์ (Sheet Pile) ถึงอาคารข้างเคียง น้ำหนักของอาคาร
ข้างเคียง ความยาวของเสาเข็มของอาคารข้างเคียงโดยเฉพาะกรณีเสาเข็มสั้นที่เหมาะสม เพื่อนำไปสู่การหา
ข้อเสนอแนะ และ แนวทาง ในการควบคุมงานก่อสร้างโครงสร้างใต้ดิน ซึ่งในขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการเคลื่อน
ตัวในแนวราบ (Lateral Movement) ของ sheet pile จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี 2D FEM ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบ
(Validate) กับผลการเคลื่อนตัวในแนวราบที่ได้จากการตรวจวัดจากในสนาม ด้วยการวิเคราะห์ย้อนกลับ (Back
Analysis) ได้ผลคุณสมบัติของดิน E_u/S_u เท่ากับ 150, 500, 1200 ของดินเหนียวอ่อน, ดินเหนียวแข็งปานกลาง
และดินเหนียวแข็ง ตามลำดับ จากการวิเคราะห์พบว่า อาคารข้างเคียงมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง
กันดิน ค่าความปลอดภัย (Factor of Safety) มากขึ้น ในกรณีที่ อาคารข้างเคียงมีน้ำหนักน้อย, เสาเข็มของ
อาคารข้างเคียงยาว, และระยะห่างจากตำแหน่งซีทไพล์ (Sheet Pile) ถึงอาคารข้างเคียงเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : กำแพงเข็มพืด, ซีทไพล์, วิถีไฟไนต์เอลิเมนต์2มิติ, ค่าความปลอดภัย, การเคลื่อนตัวทางด้านข้าง

Co-operative Title: Lateral Movement's Evaluation of The Sheet Pile Wall in Deep Excavation Close to Adjacent Building

Student Intern Name: Pongsiri Sunath

Sakawduen thuengain

Faculty: Engineering

Department: Civil Engineering

Advisor Name: Salisa Chaiyaput

Mentor Name: Saard Summana

Company: JWS Construction Co., Ltd.

Abstract

Nowadays, Underground building has been increasing in Bangkok. But underground building's problem is lateral movement of retaining wall that have an affect on construction site or adjacent building. There are some variables such as environment around construction site and the appearance of adjacent buildings that are not analyzed in the design phase. From the above problems lead to this research that has purposes to analyze factors that affect adjacent buildings with 2D Finite Element Method by PLAXIS program to find the appropriate relationship between the distance from sheet pile wall to the adjacent building, the weight of the adjacent building. And the pile's depth of adjacent buildings particularly short pile lead to guidelines for controlling the construction of underground structures. In sheet pile lateral movement analysis with 2D Finite Element Method was validate with the result of field's lateral movement by Back analysis has E_u/S_u are 150, 500, 1200 for soft clay, medium clay and stiff clay respectively. Summary adjacent buildings influence the movement soil protection. Factor of Safety will increase if the distance from sheet pile wall to the adjacent building increase, the weight of the adjacent building decrease and the pile's depth of adjacent buildings increase.

Keyword: Sheet Pile Wall, 2D Finite Element Method, Factor of Safety, Lateral Movement

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาวิจัยเรื่อง การประเมินการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงเข็มพืด ในงานชุดดินลึกใกล้โครงสร้างอาคารเดิม ในครั้งนี้ คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร อาจารย์ดูแลรายวิชา สหกิจศึกษา และ ดร.ศลิษา ไชยพุทธ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำ ในการทำวิจัยด้วยดีมาตลอด รวมทั้ง บริษัท เจ ดับบลิว เอส คอนสตรัคชั่น จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์รับนักศึกษาสหกิจ เข้าไปศึกษาเรียนรู้ในสายงานวิศวกรรมโยธา คุณสะอาด สมณา วิศวกรโครงการ และบุคลากรทุกๆท่าน ที่ให้ข้อมูลและคำปรึกษาการก่อสร้างอาคารใต้ดินของโครงการ VTARA สุขุมวิท 36 บริษัท STS ที่สนับสนุนข้อมูล ค่า Inclinator และข้อมูลการสำรวจความเสียหายของอาคารข้างเคียงโครงการ บริษัท Real testing consultant จำกัด สำหรับข้อมูลการเจาะสำรวจดินของโครงการ

และขอขอบคุณบิดามารดาและเพื่อนๆที่ให้กำลังใจให้การทำวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้

พงศ์ศิริ สุนด์ิ

สภาคเดือน ถึงอินทร์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐาน.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
บทที่ 3 ข้อมูลและวิธีการดำเนินการวิจัย.....	34
3.1 ข้อมูลโครงการ.....	34
3.2 สภาพชั้นดินและข้อมูลการเจาะสำรวจดิน (Soil Investigation)	34
3.3 ระดับค้ำยันซีทไพล์ (Sheet Pile)	37
3.4 ค่าการเคลื่อนตัวแนวราบจาก Inclinator	39
3.5 ผลการสำรวจอาคารข้างเคียง	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 คุณสมบัติของดินทางด้านการออกแบบและผลความสัมพันธ์	49
4.1 ขั้นตอนการศึกษา.....	49
4.2 การใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ(S_u) ของดินที่ชั้นความลึกต่าง ๆ.....	49
4.3 โมดูลัสของดิน (Undrained Young's Modulus, E_u) ที่ใช้ในการประมาณค่าการเคลื่อนตัวของ กำแพงกันดินชนิดเข็มพีต	51
4.4 ผลการวิเคราะห์.....	52
บทที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ.....	67
5.1 สรุปผลการวิเคราะห์.....	67
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการควบคุมงานก่อสร้าง	68
เอกสารอ้างอิง	72

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่า Coefficient of earth pressure at rest	7
2.2 ค่า Coefficient of earth pressure	13
2.3 แรงดันดินปรากฏจากประสบการณ์ Peck (Peck 1969).....	17
2.4 หน้าตัดเหล็กรูปพรรณที่นิยมใช้เป็น Strut และ Wale	20
2.5 ค่าจำกัดของ Distortion และ Deflections ของโครงสร้าง	28
3.1 แสดง Design Summary ระบบป้องกันดินพังของโครงการ VTARA36	38
3.2 แสดงค่าการเคลื่อนตัวแนวราบของดินสูงสุด ณ วันที่ทำการตรวจวัด	40
3.3 สรุปผลการเคลื่อนตัวแนวราบ	44
4.1 แสดงคุณสมบัติของกำแพงกันดินชนิดเข็มพืด $E_{steel} = 2 \times 10^8$ kPa	50
4.2 แสดงคุณสมบัติของกำแพงกันดินชนิดเสาเข็มคอนกรีต เมื่อ $E_{concrete} = 28 \times 10^6$ kPa	50
4.3 แสดงคุณสมบัติของค้ำยัน $E_{steel} = 2 \times 10^8$ kPa	51
4.4 แสดงคุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ในโปรแกรม PLAXIS.....	52
4.5 แสดงค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	56
4.6 แสดงผลการประมาณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างและ Factor of Safety ด้วยโปรแกรม PLAXIS	58
5.1 แสดงคุณสมบัติดิน.....	67
5.2 แสดงชนิดกำแพงในงานขุดดินลึก	70

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้างค้ำยันที่ใช้ในงานขุดดินลึก	5
2.2 แรงดันดินด้านข้างซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการเคลื่อนตัวของดิน	6
2.3 แรงดันดินด้านข้างในสภาวะแอคทีฟ.....	7
2.4 การวิบัติของดินในสภาวะแอคทีฟ.....	8
2.5 Mohr Circle แสดงสถานะของหน่วยแรงเมื่อดินวิบัติในสภาวะแอคทีฟ	8
2.6 การกระจายของแรงดันดินด้านข้างในสภาวะแอคทีฟ	10
2.7 ตัวอย่างการก่อสร้างที่ก่อให้เกิดแรงดันดินแบบแพชซีฟ	10
2.8 การวิบัติของดินในสภาวะแพชซีฟ.....	11
2.9 Mohr Circle แสดงสถานะของหน่วยแรงเมื่อดินวิบัติในสภาวะแพชซีฟ	11
2.10 การกระจายของแรงดันดินด้านข้างในสภาวะแพชซีฟ.....	12
2.11 เปรียบเทียบของขนาดกำแพงซีทไพล์ (Sheet Pile) และกำแพง Diaphragm Wall.....	14
2.12 เปรียบเทียบสติฟเนสของกำแพงชนิด Rigid Wall และ Flexible Wall.....	14
2.13 เปรียบเทียบการแอ่นตัวของกำแพง Sheet Pile และ Diaphragm Wall ซึ่งมีสติฟเนสแตกต่างกันมาก	14
2.14 แรงดันดินที่กระทำต่อกำแพง	15
2.15 การแอ่นตัวของกำแพงที่มีสติฟเนสต่ำทำให้แรงดันดินที่กระทำต่อกำแพงลดลง	15
2.16 แรงดันดินที่ได้จากการตรวจวัดจริง เทียบกับแรงดันดินแบบ Empirical ที่เสนอไว้โดย Peck	17
2.17 การคำนวณโมเมนต์ดัดใน Wale เพื่อนำมาใช้ออกแบบ.....	18
2.18 การคำนวณแรงอัดในค้ำยัน Strut	19
2.19 รายละเอียดการอัดแรงในค้ำยันโดยใช้แม่แรง	21
2.20 การอัดแรงในค้ำยันที่เอียง (Goldberg et al. 1976)	22
2.21 การวิบัติของดินใต้บ่อขุด (a)ดินใต้บ่อขุดบวมตัวขึ้น (b)Failure Mechanism ของ Bolton(1993) (Charles,Simons et al. 2004).....	23
2.22 กลไกการวิบัติที่เสนอโดย Terzaghi (a)เมื่อชั้นดินแข็งอยู่ตื้น (b)เมื่อชั้นดินแข็งอยู่ลึก	24

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.23 ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อโครงสร้างข้างเคียงเมื่อมีการขุดดินลึก.....	25
2.24 การทุดตัวที่ไม่เท่ากันของฐานรากอาคาร	25
2.25 การประมาณการแอนตัวของกำแพง Sheet Pile Wall ด้วยวิธี Empirical.....	27
2.26 การประมาณการแอนตัวของกำแพง Diaphragm Wall ด้วยวิธี Empirical.....	27
2.27 การประมาณการทรุดตัวที่ผิวดินและระยะแนวราบที่มีผลกระทบ (Peck 1969)	28
3.1 คุณสมบัติดินและรูปตัดชั้นดินที่ใช้วิเคราะห์ด้วยวิธี 2D Finite element.....	35
3.2 ตำแหน่งกำแพง Pile Wall Ø800 mm. @900mm. และ Sheet Pile Wall.....	36
3.3 แสดงรูปตัดระดับการขุด ระดับค้ำยันของกำแพงซีทีไพล์ (Sheet Pile Wall) และ กำแพงเสาเข็ม (Pile Wall).....	37
3.4 แสดงตำแหน่งการติดตั้ง Inclinometer.....	39
3.5 ค่าการเคลื่อนตัวแนวราบของ Inclinometer Tube No. IS-1	41
3.6 ค่าการเคลื่อนตัวแนวราบของ Inclinometer Tube No. IS-2.....	42
3.7 ค่าการเคลื่อนตัวแนวราบของ Inclinometer Tube No. IS-3.....	43
3.8 ตัวอย่างรายละเอียดการพินิจด้วยสายตาของอาคารข้างเคียง.....	47
3.9 ฐานรากของอาคารข้างเคียงที่ตรวจพบ.....	47
3.10 เกณฑ์พิจารณาความมั่นคงของอาคารโดย Burland et ,al 2001 และสมาคมคอนกรีตไทยร่วมกับ ACI Thailand chapter ,2551	48
4.1 แสดงNodeจำนวน 15 Nodeในแต่ละ Element	54
4.2 แสดงElementในโปรแกรมPLAXIS ของโครงการVTARA Sukhumvit36	54
4.3 กราฟเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวทางด้านข้างระหว่างงานขุดจริงกับการประมาณโดยใช้โปรแกรม Plaxis ของโครงการ VTARA สุขุมวิท36	56
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Pile’s Depth, Spacing และ Factor of Safety ที่ Load 10 kN/m ²	64
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Pile’s Depth, Spacing และ Factor of Safety ที่ Load 15 kN/m ²	65
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Pile’s Depth, Spacing และ Factor of Safety ที่ Load 20 kN/m ²	65

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Pile's Depth, Spacing และ Factor of Safety ที่ Load 25 kN/m ²	66
4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Pile's Depth , Spacing และ Factor of Safety ที่ Load 30 kN/m ²	66
5.1 แสดงการแยก Platform ออกจากระบบค้ำยัน.....	69

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

งานก่อสร้างอาคารใต้ดิน ถือเป็นงานที่เข้ามามีส่วนเกี่ยวข้องกับงานก่อสร้างมากขึ้นโดยเฉพาะการก่อสร้างอาคารสูง เนื่องจากปัจจุบันอัตราการก่อสร้างในกรุงเทพมหานครเพิ่มขึ้นมากจากอดีต ทำให้พื้นที่ที่มีอยู่อย่างจำกัดลดจำนวนลง ส่งผลกระทบให้ราคาที่ดินพุ่งสูงขึ้น เพื่อการใช้พื้นที่อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดและตอบสนองความต้องการของประชากรที่เพิ่มขึ้นนั้นจึงมีการก่อสร้างโครงสร้างลงใต้ดิน ปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นในการก่อสร้างใต้ดิน คือ ระบบป้องกันดิน ที่จะส่งผลกระทบต่ออาคารข้างเคียง

ระบบป้องกันดิน ที่นิยมใช้ในกรุงเทพมหานคร เป็นแบบกำแพงเข็มพืดแบบมีค้ำยัน(Sheet Pile Bracing System) เนื่องจากมีราคาที่ไม่สูงมาก ใช้เวลาในการก่อสร้างไม่มาก ผู้รับเหมาส่วนใหญ่มีความชำนาญมากกว่า แต่มีข้อเสีย คือ ทำให้มีค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างที่สูงกว่ากำแพงแบบอื่น เนื่องจากในตัวของกำแพงเข็มพืด ทำให้ไม่เหมาะสมในงานขุดดินลึก จึงควรเลือกกำแพงชนิดอื่น ๆ เช่น กำแพงคอนกรีตเสาเข็ม หรือ กำแพงไดอะแฟรมต่อไป

โครงการ VTARA 36 ตั้งอยู่บนซอย สุขุมวิท 36 บนพื้นที่ 4 ไร่ ประกอบด้วย 5 อาคาร แต่ละอาคารสูง 8 ชั้น มีการก่อสร้างอาคารใต้ดินเพื่อเป็นอาคารจอดรถ ลึกสุดถึง 5 ชั้น ทำให้ต้องมีการขุดเปิดพื้นที่เต็มบริเวณ โดยการใช้ระบบป้องกันการเคลื่อนตัวของดิน Pile Wall แบบมีค้ำยัน 3 ชั้น และซีทไพล์ (Sheet Pile) แบบมีค้ำยัน 2 ชั้น แม้ว่าจะมีการออกแบบระบบค้ำยันเรียบร้อยแล้ว แต่ก็ยังคงมีพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันในสถานะของการออกแบบกับสิ่งที่มีอยู่ในสนามจริง ยกตัวอย่างเช่น น้ำหนักของอาคารข้างเคียง , ระยะห่างจากระบบป้องกันดินจนถึงอาคารข้างเคียง, ระดับฐานรากของอาคารข้างเคียงและระดับของค้ำยัน ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ เป็นสิ่งที่จะส่งผลกระทบต่ออาคารข้างเคียงเป็นอย่างมาก โดยที่ค่าการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นจริงในสนามจะไม่ได้มีค่าสูงเกินจากการออกแบบ แต่ก็ยังคงเกิดความเสียหายต่ออาคารข้างเคียงได้ จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น จึงจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ปัจจัยและค่าพารามิเตอร์ที่จะส่งผลทำให้อาคารข้างเคียงเกิดการวิบัติ เพื่อเป็นแนวทางในการควบคุมแก้ไขงานก่อสร้างอาคารใต้ดินต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออาคารข้างเคียง
2. เพื่อหาแนวทางในการควบคุมงานก่อสร้างใต้ดิน
3. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของซีทไพล์ (Sheet Pile)
4. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากตำแหน่งซีทไพล์(Sheet Pile)ถึงอาคารข้างเคียง (Spacing), น้ำหนักของอาคารข้างเคียง (Distributed Load), ความยาวเสาเข็มสั้นของอาคารข้างเคียง (Depth of Pile) ที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของซีทไพล์ (Sheet Pile) โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธี 2D Finite Element

1.3 สมมติฐาน

การเคลื่อนที่ของโครงสร้างกันดิน และอาคารข้างเคียง อาจมีสาเหตุจากปัจจัยดังต่อไปนี้ คือ

1. ระยะห่างจากตำแหน่งซีทไพล์(Sheet Pile)ถึงอาคารข้างเคียง (Spacing)
2. น้ำหนักของอาคารข้างเคียง (Distributed Load)
3. ความยาวของเสาเข็มสั้นของอาคารข้างเคียง (Depth of Pile)

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาระบบป้องกันดินของอาคาร VTARA Sukhumvit36 8 ชั้น 5 อาคาร แบ่งเป็น
 - โครงสร้างใต้ดิน 1 ชั้น ที่ความลึก 3.10 เมตร จำนวน 3 อาคาร
 - โครงสร้างใต้ดิน 2 ชั้น ที่ความลึก 5.80 เมตร จำนวน 2 อาคาร
 - โครงสร้างใต้ดิน 5 ชั้น ที่ความลึก 11.35 เมตร จำนวน 1 อาคาร
2. ผลการสำรวจความเสียหายของอาคารข้างเคียงโดยรอบโครงการ VTARA Sukhumvit36
3. วิเคราะห์ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างด้วย 2D Finite element Method โดยใช้โปรแกรม PLAXIS2D
4. รวบรวมข้อมูลการเจาะสำรวจดินของโครงการ VTARA Sukhumvit 36
5. Validate โดยใช้ค่าการเคลื่อนตัวจากในสนามเปรียบเทียบกับผลจาก 2D Finite Element
6. ระยะห่างจากตำแหน่งซีทไพล์(Sheet Pile)ถึงอาคารข้างเคียง (Spacing) ตั้งแต่ 2 - 5 เมตร
7. น้ำหนักของอาคารข้างเคียง (Distributed Load) 10 ถึง 30 kN/m²
8. ความยาวของเสาเข็มสั้นของอาคารข้างเคียง (Depth of Pile) 0 ถึง -15 เมตร จากระดับผิวดิน

9. ค่าความปลอดภัย(Factor of Safety)ที่ยอมให้จากโปรแกรม2D Finite Element มากกว่า 1.3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

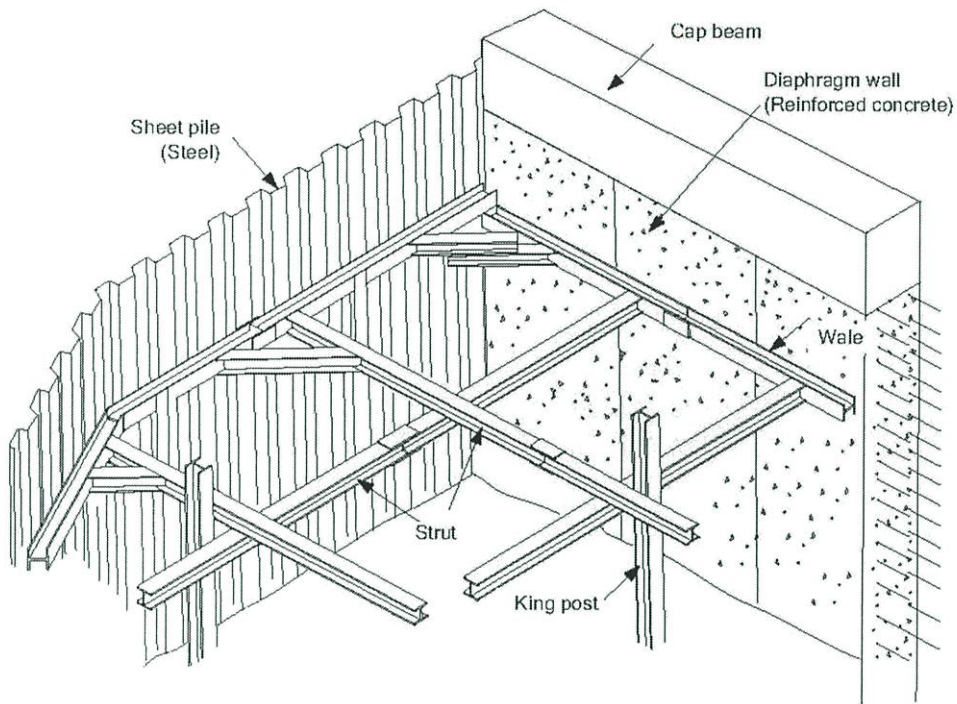
- 1.สามารถวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออาคารข้างเคียงได้
- 2.สามารถใช้เป็นแนวทางในการควบคุมงานก่อสร้างได้ดิบได้
- 3.สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากตำแหน่งซีทไพล์(Sheet Pile)ถึงอาคารข้างเคียง (Spacing), น้ำหนักของอาคารข้างเคียง (Distributed Load),ความยาวของเสาเข็มสั้นของอาคารข้างเคียง ที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของซีทไพล์ (Sheet Pile) ได้
- 4.มีความรู้เกี่ยวกับปัจจัยในงานก่อสร้างใต้ดินที่ส่งผลต่ออาคารข้างเคียง เพื่อนำไปใช้ในอนาคตต่อไปหลังจบการศึกษา

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ระบบป้องกันดินในงานขุดดินลึก



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างค้ำยันที่ใช้ในงานขุดดินลึก

2.1.1.1 ระบบกำแพงแบบยืดหยุ่น (Flexible Wall)

1. ซีทไพล์ (Sheet Pile)

ระบบซีทไพล์ (Sheet Pile) จัดเป็นระบบกำแพงแบบยืดหยุ่น (Flexible Wall) อาจมีความเหมาะสมต่องานก่อสร้างใต้ดินที่ลึกไม่เกิน 8 เมตร เนื่องจากราคาประหยัดเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้งานระบบกำแพงแข็ง (Rigid Wall) ซึ่งได้แก่ Diaphragm Wall หรือ Pile Wall

เนื่องจาก Sheet Pile เป็นระบบกำแพงแบบยืดหยุ่น ดังนั้นในงานขุดดินที่ใช้ซีทไพล์ (Sheet Pile) ดินจะเกิดการเคลื่อนตัวสูง ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนตัวและทรุดตัวรอบบ่อขุด

ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างโดยรอบได้มาก การออกแบบและควบคุมงานที่ดีจึงมีความจำเป็นเพื่อให้งานขุดดินเกิดผลกระทบข้างเคียงน้อยที่สุด

2.1.1.2 ระบบกำแพงแบบแข็ง (Rigid Wall)

1. Pile Wall

ระบบกันดินแบบ CP-Wall มีสองรูปแบบที่ถูกนำมาใช้ในประเทศไทย ได้แก่แบบที่มีการขบกัน และแบบเรียงต่อเนื่องโดยเว้นระยะห่างระหว่างเสาเข็ม ซึ่งรูปแบบหลังเป็นที่นิยมใช้ในประเทศไทยมากกว่าเนื่องจากใช้วิธีการก่อสร้างเสาเข็มแบบปกติโดยไม่ต้องใช้เครื่องจักรที่สามารถเจาะคอนกรีตได้ อีกทั้งงานขุดส่วนใหญ่ที่ใช้วิธีขุดวิธีนี้เป็นงานขุดในเขตกรุงเทพฯ ซึ่งเป็นดินเหนียวที่มีน้ำไหลซึมผ่านยากจึงไม่มีปัญหาการไหลของน้ำใต้ดิน อย่างไรก็ตามหากใช้ระบบกำแพง Contiguous Pile Wall ในชั้นดินทรายที่กั้นบ่อขุดอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดินอาจมีการไหลของน้ำใต้ดินและทำให้ทรายไหลมากับน้ำได้ วิธีการป้องกันที่ได้ผลวิธีหนึ่งคือการอุดช่องว่างระหว่างเสาเข็มด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ หรือเสาเข็มเจาะที่ใช้ Cement Bentonite เป็นเสาเข็ม

สำหรับระยะห่างระหว่างเสาเข็มเจาะที่นิยมใช้เพื่อป้องกันการไหลของดินเหนียวระหว่าง CP-Wall นั้นโดยทั่วไปนิยมกำหนดให้มีช่องว่างระหว่างเสาเข็มเป็น 100 mm. เพื่อใช้เป็นระยะเผื่อสำหรับบล็อกเหล็กเสาเข็มและเผื่อระยะเยื้องศูนย์ ในบางกรณีระยะช่องว่างที่เผื่อไว้อาจเพิ่มขึ้นเป็น 150 mm. ในกรณีที่เครื่องจักรเจาะเสาเข็มเป็นเครื่องเจาะสามขา ในเชิงทฤษฎีระยะห่างระหว่างผิวเสาเข็มขึ้นอยู่กับขนาดเสาเข็มและกำลังรับแรงเฉือนของดินโดย วรายุทธ ไชยสุขและคณะ (วรายุทธ ไชยสุขและคณะ ,2559) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเสาเข็มกับกำลังต่อการต้านทานการไหลของดินเหนียวระหว่างผิวเสาเข็มไว้ดังรูปที่ 12 ซึ่งแสดงให้เห็นกำลังต้านทานต่อการไหลของดินที่อยู่ระหว่างผิวเสาเข็มแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างผิวเสาเข็ม

2. Diaphragm Wall

ระบบกำแพงกันดิน Diaphragm Wall ถือเป็นระบบที่ทันสมัย และกำลังเป็นที่นิยมมากในประเทศไทย ซึ่งเหมาะสำหรับงานของการขุดดินลึกเพื่อทำห้องใต้ดิน (Basement) หรือทำสถานีรถไฟใต้ดิน โดยสามารถทำได้ในทุกสภาวะ กำแพงกันดินชนิดนี้โดยทั่วไปแล้วจะออกแบบเพื่อเป็นโครงสร้างรับแรงด้านข้าง ซึ่งเกิดจากแรงดันดิน แรงดันน้ำ และแรงจาก Surchage ต่างๆ โดยเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรง (Stiffness) สูงกว่าระบบกำแพงเข็มพืดมาก ซึ่งมีผลดีในการป้องกันการโก่งตัวและการเคลื่อนตัว และสามารถรับโมเมนต์ดัดได้มาก

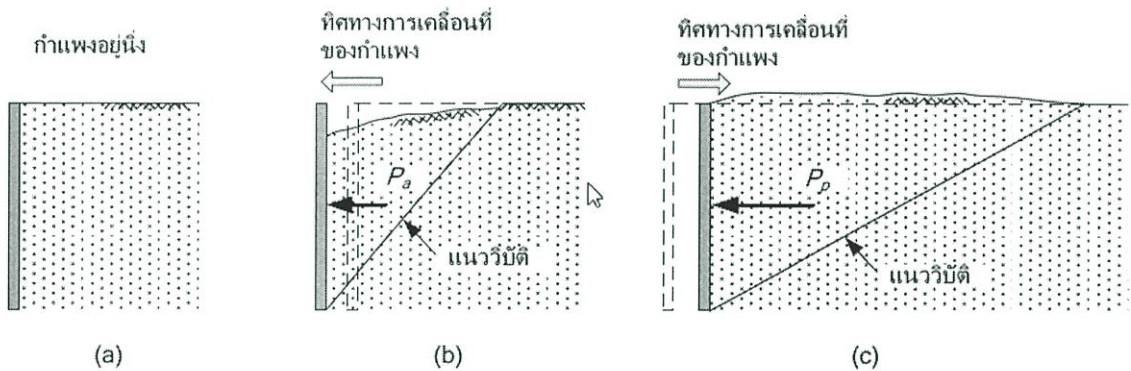
นอกจากนี้กำแพงกันดิน Diaphragm Wall จะเป็นโครงสร้างที่รับแรงด้านข้างแล้วยังสามารถรับน้ำหนักในแนวตั้งได้ด้วย เปรียบเสมือนเสาที่มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือเรียกว่า Barrette Pile หรือเรียกง่าย ๆ ว่า Legs Diaphragm Wall ซึ่งกำแพงกันดิน Diaphragm Wall เป็นได้ทั้งโครงสร้างชั่วคราว และโครงสร้างถาวร

2.1.2 การคำนวณแรงดันดินด้านข้าง

2.1.2.1 ทฤษฎีแรงดันดินด้านข้างของ Rankine

แรงดันดินด้านข้างของดินขึ้นอยู่กับทิศทางการเคลื่อนตัวของกำแพง แบ่งเป็นสามกรณี ได้แก่

- แรงดันดินด้านข้างในสภาพนิ่ง (At rest lateral earth pressure)
- แรงดันดินด้านข้างเมื่อดินเคลื่อนตัวดันกำแพง (Active earth pressure)
- แรงดันดินด้านข้างเมื่อกำแพงเคลื่อนตัวดันดิน (Passive earth pressure)



ภาพที่ 2.2 แรงดันดินด้านข้างซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการเคลื่อนตัวของดิน

1. แรงดันดินด้านข้างในสภาพนิ่ง (At rest lateral earth pressure)

ค่า σ_h คำนวณได้จากสมการ

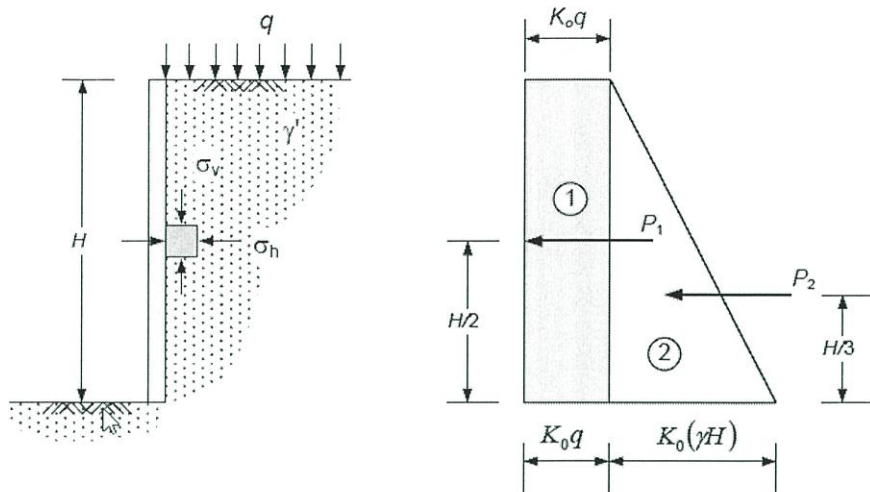
$$\sigma_h = K_0 \sigma_v' + u$$

K_0 = Coefficient of at rest earth pressure at rest

ตารางที่ 2.1 ค่า Coefficient of earth pressure at rest

ชนิดของดิน	สมการ
Normally consolidated soil; Jaky (1944)	$K_0 = 1 - \sin \phi$
Normally consolidated clay; Brooker and Ireland's (1965)	$K_0 = 0.04 + 0.007(PI)$; $PI = 0-40\%$ $K_0 = 0.64 + 0.001(PI)$; $PI = 40-80\%$

Over consolidated clay; Alpan (1967)	$(K_0)_{oc} = (K_0)_{nc}(\text{OCR})^n$ $\text{PI} < 40\%, n = 0.42$ $\text{PI} > 40\%, n = 0.32$
--------------------------------------	---



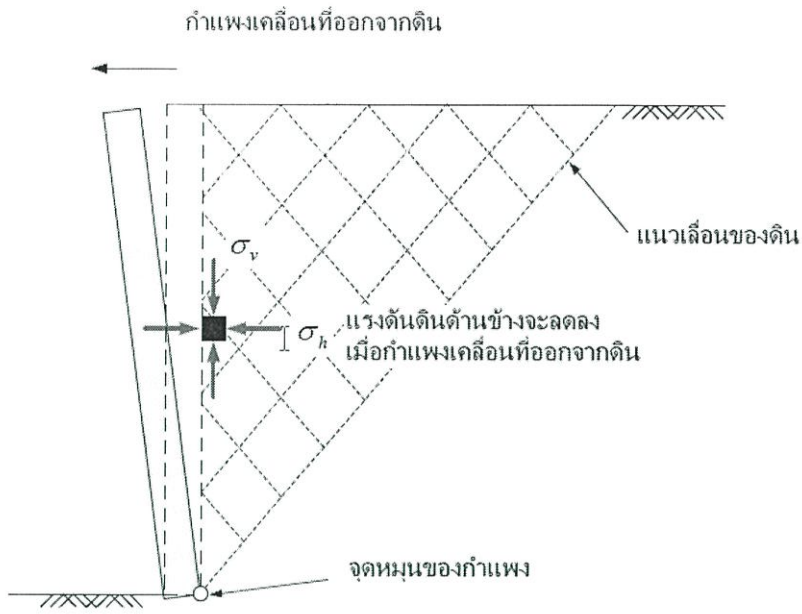
ภาพที่ 2.3 แรงดันดินด้านข้างในสภาวะแอคทีฟ

2. แรงดันดินด้านข้างเมื่อดินเคลื่อนตัวดันกำแพง (Active earth pressure)

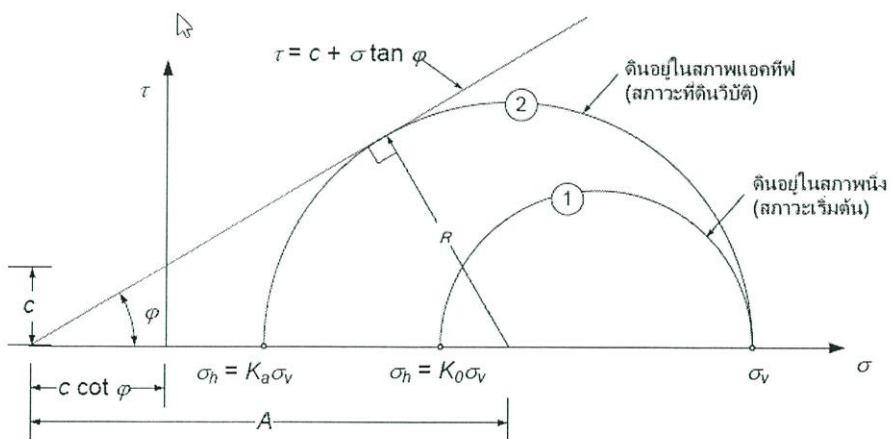
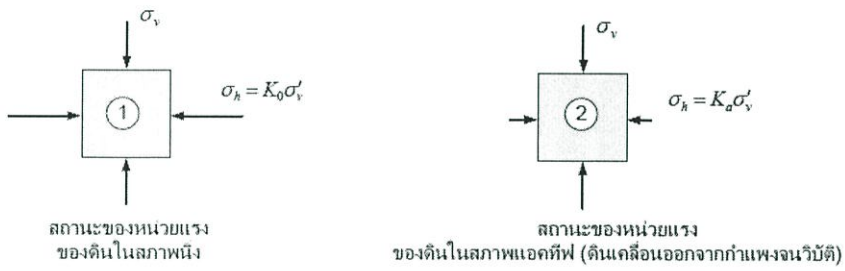
เมื่อผนังกันดินมีการแอนหรือขยับออกมาด้านหน้าโครงสร้างกันดิน(ด้านดินระดับต่ำ) แรงดันดินจะมีขนาดค้อยๆลดลงจากสภาพอยู่กับที่ (At rest) ค่า k จะค้อย ๆ ลดลง แรงดันดินที่น้อยที่สุด ณ จุดพังทลาย เรียกว่า แรงดันดินแบบ Active และมีค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างที่จุดพิบัตินี้เรียกว่า K_a

แรงดันดินด้านข้างในสภาวะแอคทีฟ และแพชชีฟที่เสนอโดย Rankine (1857)

- กำแพงอยู่ในแนวตั้ง
- ไม่มีแรงเสียดทานระหว่างดินกับกำแพง
- ดินถมหลังกำแพงอยู่ในแนวราบและไม่มีหน่วยแรงเฉือนเกิดขึ้นในระนาบราบและระนาบตั้ง
- กำแพงแข็งและยาวไม่สิ้นสุดโดยดินเป็นดินที่มีเนื้อสม่ำเสมอ (Homogeneous) และมีคุณสมบัติเหมือนกันในทุกๆ แกนที่พิจารณา (Isotropic)
- สภาวะของดินเริ่มแรกจะต้องอยู่ในสภาพนิ่ง (At-rest state)



ภาพที่ 2.4 การวิบัติของดินในสภาวะแอคทีฟ



ภาพที่ 2.5 Mohr Circle แสดงสถานะของหน่วยแรงเมื่อดินวิบัติในสภาวะแอคทีฟ

จากภาพที่ 2.5 เขียนความสัมพันธ์ได้

$$\sin\phi = \frac{R}{A} = \frac{(\sigma_v - \sigma_h)/2}{(\sigma_v + \sigma_h + 2c \cot\phi)/2}$$

เมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\sigma_h(1 + \sin\phi) = \sigma_v(1 - \sin\phi) - 2c \cos\phi$$

หน่วยแรงดันดินด้านข้างในสถานะแอกทีฟคำนวณได้จาก

$$\sigma_h = \sigma_v \frac{(1 - \sin\phi)}{(1 + \sin\phi)} - 2c \sqrt{\frac{(1 - \sin\phi)}{(1 + \sin\phi)}}$$

ถ้าให้

$$K_a = \frac{(1 - \sin\phi)}{(1 + \sin\phi)}$$

จะได้

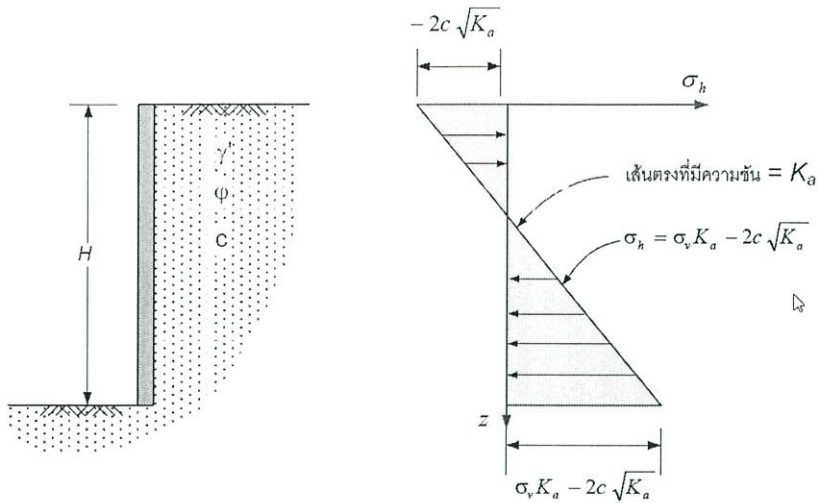
$$\sigma'_h = \sigma'_v K_a - 2c \sqrt{K_a}$$

K_a = Coefficient of active lateral earth pressure

c = Cohesion of Soil

ϕ = Friction Angle

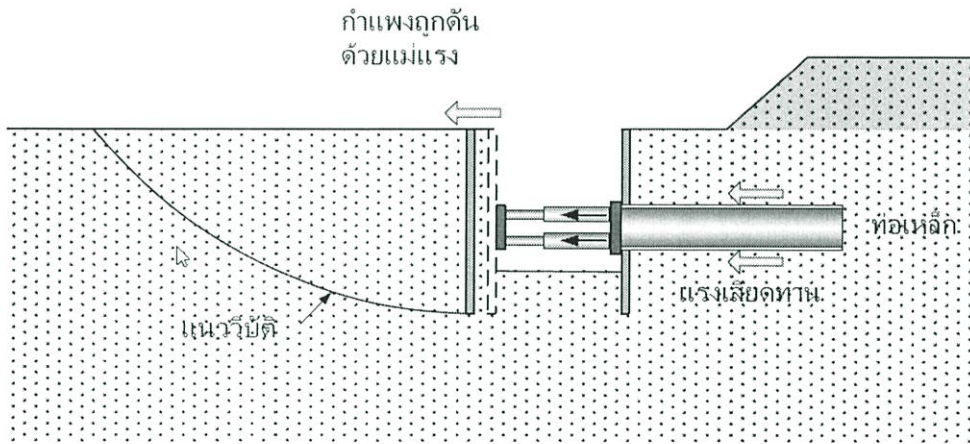
จากสมการของแรงดันดินด้านข้างในสถานะแอกทีฟสามารถนำไปเขียนเป็น Stress Profile ได้
ดังภาพที่ 2.6



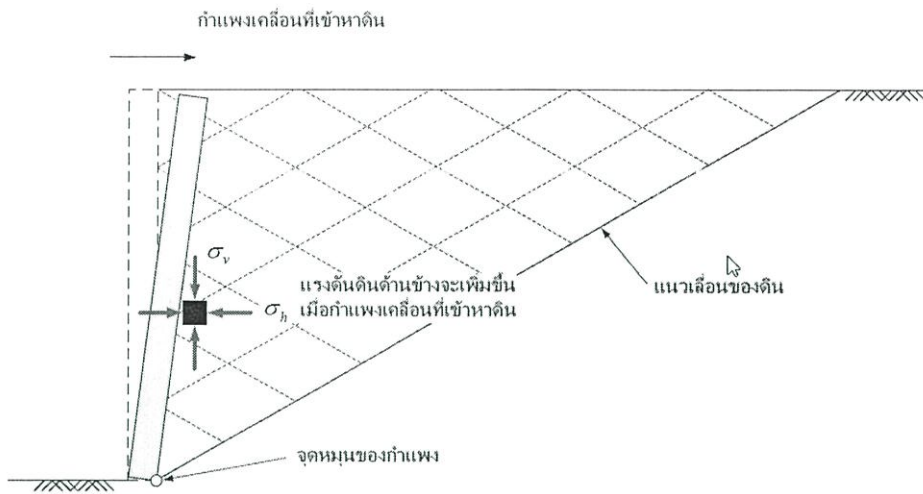
ภาพที่ 2.6 การกระจายของแรงดันดินด้านข้างในสภาวะแอกทีฟ

3. แรงดันดินเมื่อกำแพงเคลื่อนตัวดันดิน (Passive earth pressure)

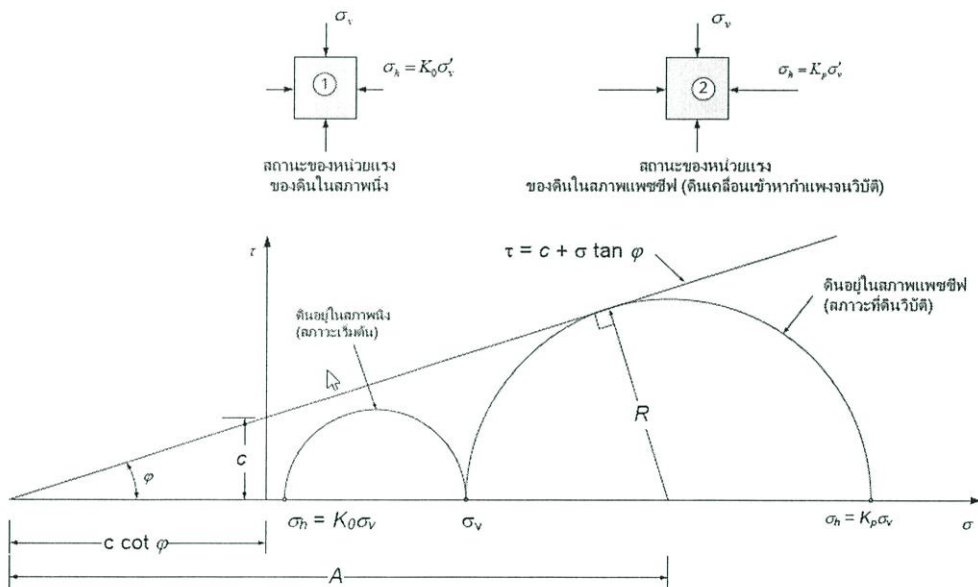
เมื่อมีแรงมากระทำผนังกันดินให้เคลื่อนที่เข้าหามวลดินด้านหน้าโครงสร้างกันดิน (ด้านดินระดับสูง) ก็จะต้องใช้แรงดันเพิ่มมากขึ้น ค่า k จะค่อย ๆ สูงขึ้น จนกระทั่งมวลดินด้านหน้ากำแพงเกิดการพิบัติ แรงดันดินที่มากที่สุด ณ จุดพังทลาย เรียกว่า แรงดัน ดินแบบ Passive และมีค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างในสภาวะเชิงรับที่จุดพิบัตินี้เรียกว่า K_p



ภาพที่ 2.7 ตัวอย่างการก่อสร้างที่ก่อให้เกิดแรงดันดินแบบแพสซีฟ



ภาพที่ 2.8 การวิบัติของดินในสภาวะแพชซีฟ



ภาพที่ 2.9 Mohr Circle แสดงสถานะของหน่วยแรงเมื่อดินวิบัติในสภาวะแพชซีฟ

จากภาพที่ 2.9 เขียนความสัมพันธ์ได้

$$\sin \phi = \frac{R}{A} = \frac{(\sigma_v - \sigma_h)/2}{(\sigma_v + \sigma_h + 2c \cot \phi)/2}$$

เมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\sigma_h(1 + \sin \phi) = \sigma_v(1 - \sin \phi) - 2c \cos \phi$$

หน่วยแรงดันดินด้านข้างในสภาวะแพชซีฟคำนวณได้จาก

$$\sigma_v = \sigma_h \frac{(1+\sin\phi)}{(1-\sin\phi)} + 2c \sqrt{\frac{(1+\sin\phi)}{(1-\sin\phi)}}$$

ถ้าให้

$$K_p = \frac{(1+\sin\phi)}{(1-\sin\phi)}$$

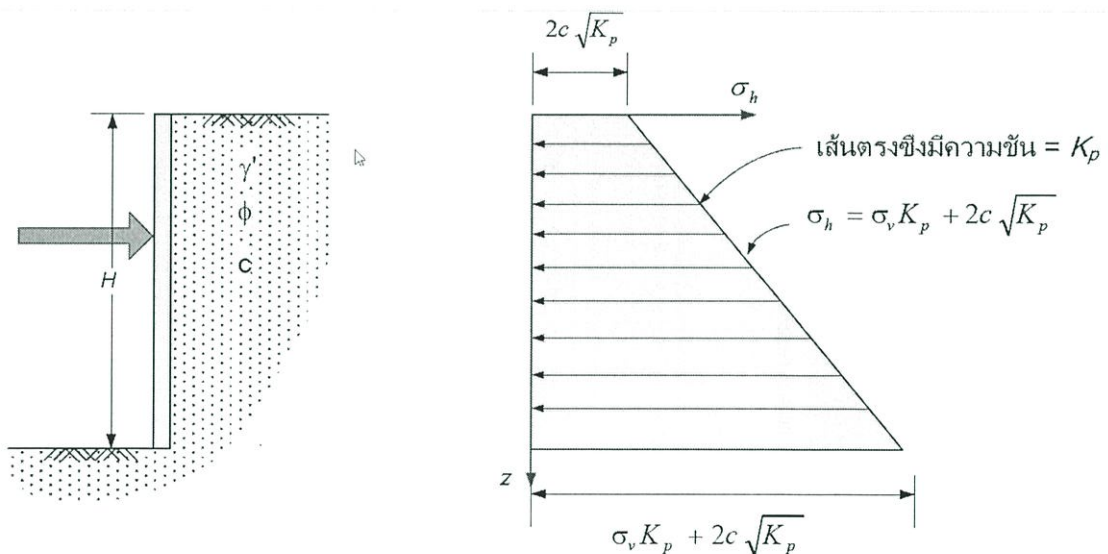
จะได้

$$\sigma'_h = \sigma'_v K_p + 2c \sqrt{K_p}$$

K_p = Coefficient of passive lateral earth pressure

c = Cohesion of Soil

ϕ = Friction Angle



ภาพที่ 2.10 การกระจายของแรงดันดินด้านข้างในสภาวะแพชซีฟ

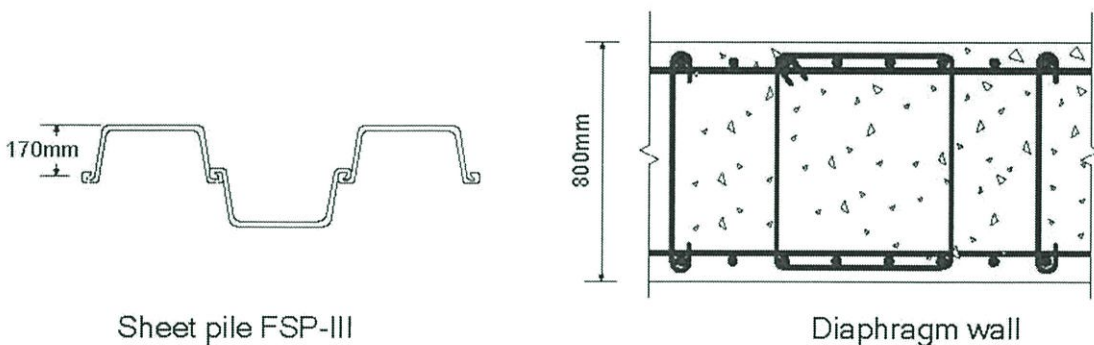
ตารางที่ 1 ค่า Coefficient of earth pressure

สภาวะของดิน	สมการ
สภาวะนิ่ง (At rest)	$\sigma'_h = K_0 \sigma'_v$
สภาวะแอคทีฟ (Active) Rankine (1857)	$\sigma'_h = \sigma'_v K_a - 2c\sqrt{K_a}$

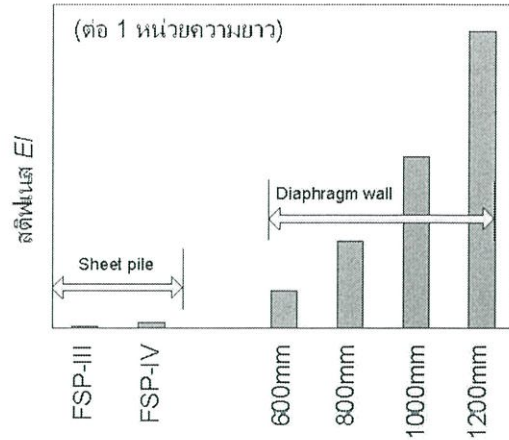
	$K_a = \frac{(1 - \sin\phi)}{(1 + \sin\phi)}$
สภาวะแพชซีฟ (Passive) Rankine (1857)	$\sigma'_h = \sigma'_v K_p + 2c\sqrt{K_p}$ $K_p = \frac{(1 + \sin\phi)}{(1 - \sin\phi)}$

2.1.3 ทฤษฎีแรงดันดินที่กระทำต่อการขุดดินลึกโดยใช้ซีทไพล์ (Sheet Pile) ของ Peck (Peck 1969)

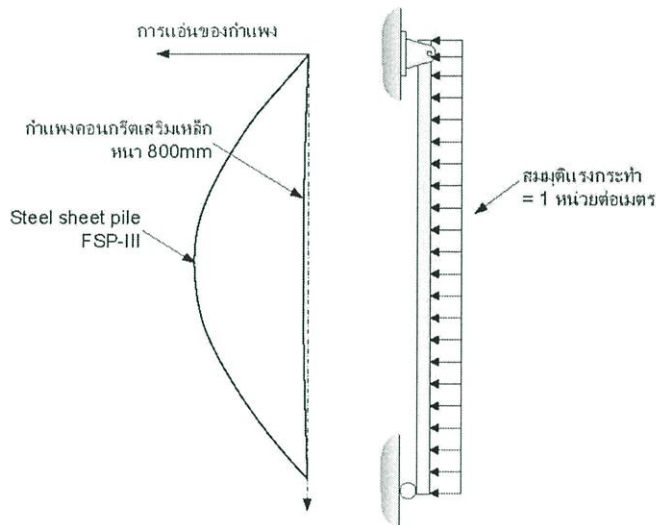
กำแพงกันดินแบบซีทไพล์ (Sheet Pile) นั้นเป็นที่นิยมใช้เป็นกำแพงกันดินสำหรับงานก่อสร้างห้องใต้ดินลึกซึ่งจำเป็นจะต้องมีค้ำยันมากกว่า 1 ชั้นเพื่อถ่ายแรงดันดินจากกำแพงฝั่งหนึ่งไปสู่กำแพงอีกฝั่งหนึ่ง สำหรับแรงดันดินที่กระทำต่อซีทไพล์ (Sheet Pile) นั้นจะแตกต่างจากกำแพงกันดินที่เรียกว่า Retaining Wall ในความเป็นจริง ซีทไพล์ (Sheet Pile) นั้นจะมีสติฟเนสที่ต่ำกว่า Retaining Wall เนื่องจากขนาดความหนาของกำแพงดังรูปที่ 9 เมื่อเปรียบเทียบสติฟเนส ของซีทไพล์ (Sheet Pile) กับ Retaining Wall ที่นิยมใช้ รูปที่ 10 จะเห็นว่าสติฟเนส ของ Retaining wall คอนกรีตเสริมเหล็กหนา 800 มิลลิเมตร สติฟเนสสูงกว่าซีทไพล์ (Sheet Pile) เหล็ก FSP-III ถึง 13 เท่า ซึ่งถ้าทดลองนำกำแพงมาทำเป็นคานรับน้ำหนักแผ่ 1 หน่วยต่อเมตรจะเห็นว่าซีทไพล์ (Sheet Pile) จะมีค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน มากกว่า Retaining Wall ประมาณ 32 เท่า



ภาพที่ 2.11 เปรียบเทียบของขนาดกำแพงซีทไพล์ (Sheet Pile) และกำแพง Diaphragm Wall



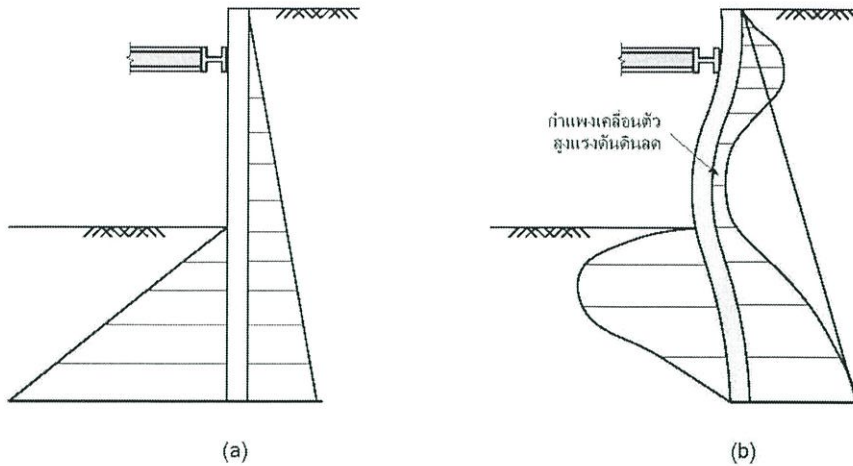
ภาพที่ 2.12 เปรียบเทียบสติฟเนสของกำแพงชนิด Rigid Wall และ Flexible Wall



ภาพที่ 2.13 เปรียบเทียบการแอ่นตัวของกำแพง Sheet Pile และ Diaphragm Wall

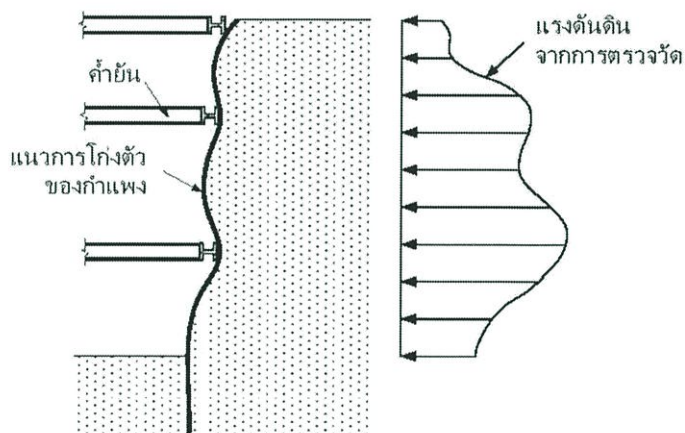
ซึ่งมีสติฟเนสแตกต่างกันมาก

จากจุดนี้เองที่ทำให้แรงดันดินที่กระทำต่อกำแพง Sheet Pile แตกต่างไปจากแรงดันดินทางทฤษฎีของ Rankine ซึ่งถ้าพิจารณาจากผลของการแอ่นตัวของกำแพงจะพบว่าเมื่อกำแพงมีการแอ่นตัวแรงดันดินที่กระทำต่อกำแพงจะลดลง (สภาวะแอกทีฟ) และในจุดที่กำแพงไม่มีการแอ่นตัวตัวอย่างเช่นตำแหน่งของแรงค้ำยันแรงดันดินจะมีค่าใกล้เคียงกับสภาวะอยู่นิ่ง ดังรูปที่ 2.14 และในกรณีที่มีค้ำยันหลายจุดแสดงดังรูปที่ 2.15



ภาพที่ 2.14 แรงดันดินที่กระทำต่อกำแพง a) กรณีที่กำแพงเป็น Rigid Wall

b) กรณีที่กำแพงเป็น Flexible Wall

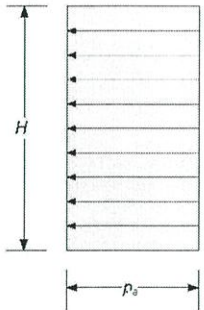
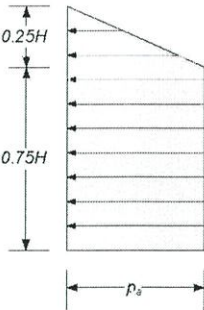
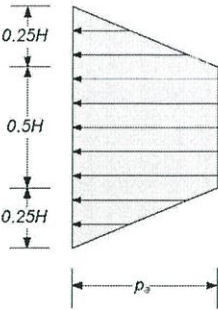


ภาพที่ 2.15 การแอ่นตัวของกำแพงที่มีสติเฟเนสต่ำทำให้แรงดันดินที่กระทำต่อกำแพงลดลง

(Sowers and Sowers 1995)

ด้วยเหตุนี้ในการออกแบบกำแพงกันดินแบบ Flexible Wall จึงได้ใช้แรงดันดินที่ไม่ได้มาจากทฤษฎีโดยตรง โดยจะจะใช้แรงดันดินที่ได้วัดได้จากสนามที่เสนอโดย Peck ในปี 1969 (Peck 1969) ซึ่งได้เสนอและสรุปค่าแรงดันดินที่วัดได้จากการก่อสร้างห้องใต้ดินจากการขุดสำหรับดินแต่ละประเภทดังแสดงในตารางที่ 2

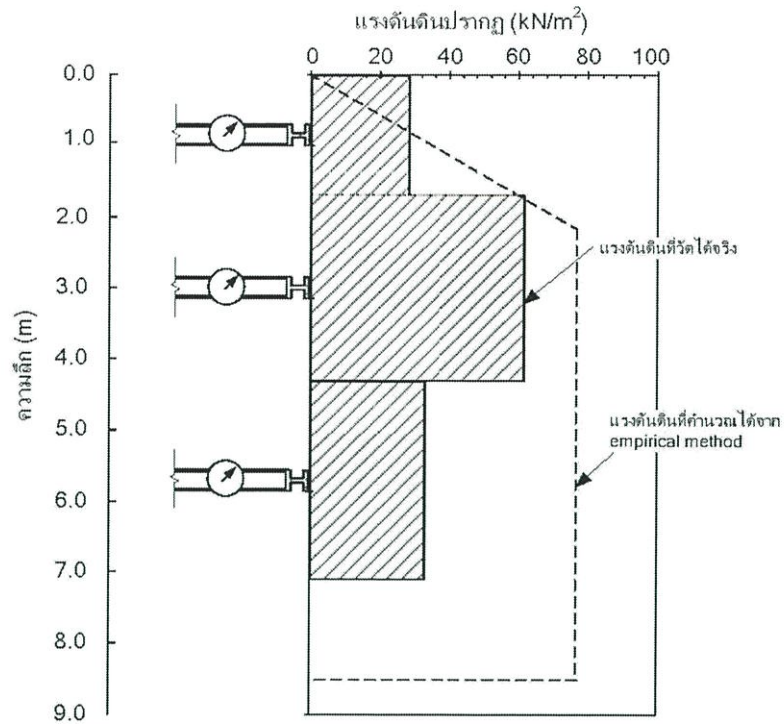
ตารางที่ 2.2 แรงดันดินปรากฏจากประสบการณ์ Peck (Peck 1969)

		
<p>ทราย</p>	<p>ดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลาง</p>	<p>ดินเหนียวแข็ง</p>
<p>$P_a = 0.65\gamma HK_a$ $K_a = \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)$</p>	<p>ใช้ค่าที่มากกว่าระหว่าง</p> $P_a = \gamma H \left[1 - \left(\frac{4S_u}{\gamma H} \right) \right]$ <p>$P_a = 0.3\gamma H$ และ $\gamma H / s_u$ จะต้องมากกว่า 4.0</p>	<p>$P_a = 0.2\gamma H$ ถึง $0.4\gamma H$</p>

ข้อจำกัดของการใช้งานแรงดันดินที่เสนอโดย Peck (1969)

- แรงดันดินที่ใช้จะเป็นแรงดันดินที่เกิดขึ้นจากการวัดแรงใน strut จากหลายโครงการ ดังนั้นแรงดันดินที่เกิดขึ้นอาจไม่ใช่แรงดันจริง ขึ้นอยู่กับ Flexibility ของกำแพง และขึ้นกับขั้นตอนการก่อสร้าง
- ใช้กับการขุดดินด้วยการใช้ค้ำยัน โดยมีความลึกในการขุดมากกว่า 6 เมตร
- แรงดันนี้สมมุติว่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าระดับการขุดของการขุด
- ทรายระบายน้ำได้ดีและไม่มีแรงดันน้ำในดิน (ไม่คิดแรงดันน้ำ)
- ดินเหนียวอยู่ในสภาวะไม่ระบายน้ำ (Undrained Condition) และไม่ต้องคิดแรงดันน้ำเนื่องจากได้รวมอยู่ในแรงดันดินแล้ว

สำหรับการใช้แรงดันดินในตารางที่ 1 สำหรับงานก่อสร้างห้องใต้ดินในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ นั้น ได้มีผลการยืนยันว่าสามารถใช้ได้โดยมีแรงดันดินที่เกิดขึ้นจริงต่ำกว่าค่าที่เสนอไว้ดังรูปที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 แรงดันดินที่ได้จากการตรวจวัดจริง เทียบกับแรงดันดินแบบ Empirical ที่เสนอไว้โดย Peck (Tanseng 1997)

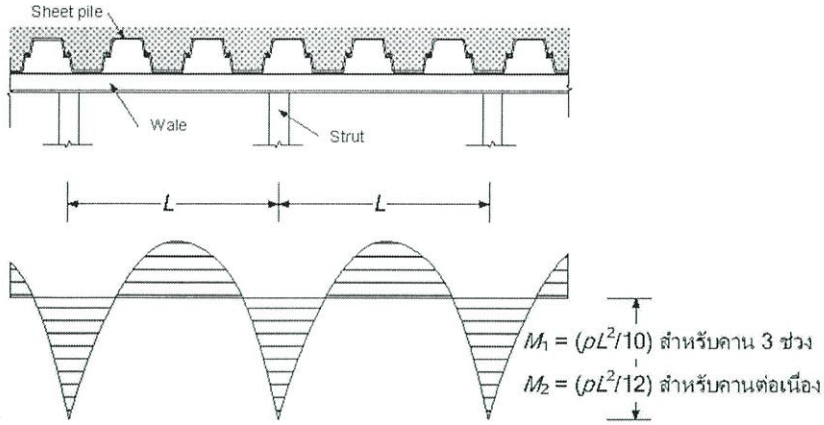
2.1.4 การออกแบบระบบค้ำยันชั่วคราว

ระบบค้ำยันในการขุดดิน ทำหน้าที่รองรับแรงดันจากดินสู่ซีทไพล์ (Sheet Pile) การจัดและออกแบบค้ำยันที่เหมาะสมต้องจัดวางเพื่อให้เกิดการถ่ายแรงและลดการเคลื่อนตัวของดินรอบๆกำแพงกันดิน ไม่กีดขวางการขุดดินและการก่อสร้างโครงสร้างใต้ดิน ค้ำยันที่ใช้หากเป็นเหล็กก็ออกแบบหน้าตัดตามข้อกำหนดของการออกแบบโครงสร้างเหล็ก การใช้ Sheet Pile Wall สามารถเลือกระยะห่างค้ำยันได้ตั้งแต่ 1.0 – 3.0 เมตร ขึ้นอยู่กับความแกร่งของชนิดซีทไพล์ (Sheet Pile) ที่ใช้

2.1.4.1 Wale

Wale ทำหน้าที่เปรียบเสมือนคานต้านทานแรงดันดินเข้าสู่ Strut แรงที่เกิดขึ้นใน Wale คือแรงดันดินต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่ระดับ Strut แต่ละชั้น ซึ่งจะเกิดโมเมนต์ใน Wale แล้วจึงทำการเลือกหน้าตัดเหล็กที่เหมาะสมมาใช้

ในการออกแบบ Wale จะมีขั้นตอนดังนี้คือ



ภาพที่ 2.17 การคำนวณโมเมนต์ดัดใน Wale เพื่อนำมาใช้ออกแบบ

1. คำนวณโมเมนต์ดัด
2. ทดลองเลือกหน้าตัดจากนั้นจากนั้นคำนวณหน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้น
3. คำนวณหน่วยแรงอัด และค่า KL/r ของแกนหลักและแกนรอง
4. คำนวณค่า F_a โดยใช้สมการ AISC
5. ตรวจสอบหน่วยแรงรวม (หน่วยแรงอัด + หน่วยแรงดัด) ว่าไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้โดยใช้ AISC
6. ถ้าหน่วยแรงเกินกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ให้คำนวณข้อ 2-5 อีกครั้ง

แรงที่เกิดขึ้นใน Wale ที่สำคัญประการหนึ่งก็คือแรงในแนวแกนซึ่งเกิดขึ้นที่มุมของกำแพงดังแสดงในรูป โดยปกติค้ำยันเหล็กจะได้รับผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิซึ่งทำให้หน่วยแรงในค้ำยันเพิ่มขึ้นซึ่งต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบด้วย

ตารางที่ 2.3 หน้าตัดเหล็กรูปพรรณที่นิยมใช้เป็น Strut และ Wale

ขนาด	Area (cm^2)	S_x (cm^3)	S_y (cm^3)	r_x (cm)	r_y (cm)
W300×94 kg/m	119.8	1360	450	13.1	7.51
W350×137 kg/m	173.9	2300	776	15.2	8.84
W400×172 kg/m	218.7	3330	1120	17.5	10.10

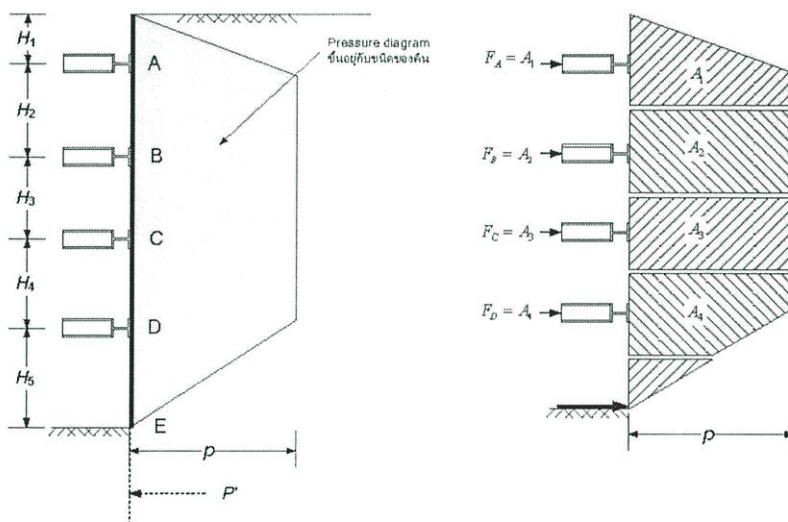
2.4.1.2 Strut

Strut ทำหน้าที่เปรียบเสมือนเสา / อาคารรับแรงอัด ในการออกแบบ Strut นั้น นอกจากจะคำนวณหาหน้าตัดเหล็กในการรับแรงใน Strut แล้วต้องพิจารณาการเกิด Buckling ของ Strut เนื่องจาก Strut เป็นชิ้นส่วนที่ชะลูดมากเมื่อมีแรงอัดมากกระทำอาจก่อให้เกิดการวิบัติแบบ Buckling

โดยปกติการคำนวณค้ำยันเหล็กจะได้รับผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ซึ่งทำให้หน่วยแรงในค้ำยันเพิ่มขึ้นซึ่งต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบด้วย และการคิด Over Stress ใน Strut จะยอมให้ Over Stress 30%

การคิด Over Stress ใน Strut นั้น จะให้คิด Over Stress เฉพาะในแรงอัดเท่านั้น ไม่รวมถึง Bending Stress และพิจารณาเฉพาะในแกน Y เท่านั้น

- 1.คำนวณแรงที่ถ่ายลงค้ำยัน ด้วยวิธีการดังรูปที่ 18
- 2.ทดลองเลือกขนาดหน้าตัดเหล็ก WF และคำนวณค่า L/r
- 3.คำนวณแรงอัดที่ยอมให้ของหน้าตัด F_a โดยใช้สมการของ AISC
- 4.ตรวจสอบว่าแรงที่คำนวณได้ในข้อ 1 น้อยกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ในข้อ 3 หรือไม่ ถ้าไม่ ให้ทดลองเลือกขนาดหน้าตัดที่ใหญ่ขึ้นจนกระทั่งแรงที่เกิดขึ้นน้อยกว่าแรงที่ยอมให้



ภาพที่ 2.18 การคำนวณแรงอัดในค้ำยัน Strut

ในการออกแบบ Strut นั้นสิ่งที่ต้องให้ความระมัดระวังเป็นพิเศษคือการเกิด Buckling ของ Strut เนื่องจาก Strut เป็นชิ้นส่วนที่ชะลูดมากเมื่อมีแรงอัดมากกระทำอาจก่อให้เกิดการวิบัติแบบ Buckling ซึ่งเป็นการวิบัติแบบฉับพลัน และการวิบัติของค้ำยันเพียงตัวเดียวอาจทำให้ระบบค้ำยันทั้งหมดพังทลายลง ซึ่งเมื่อไม่มีค้ำยันทางด้านข้างแล้วกำแพงกันดินก็จะพังทลายตามลงมา

2.1.4.3 Platform

ระบบ Platform คือ แนวสะพานที่เป็นทางสัญจรขอรอดิน รถBackhoe หรือรถปูน ระบบ Platform จะประกอบด้วยพื้น Platform , คานรับ (Cross Beam/Sleeper) และเสา Kingpost การออกแบบพื้นและคานรับ Platform จะคิดตามน้ำหนักบรรทุกต่างๆที่กระทำ โดยพื้น Platform จะทำหน้าที่รับน้ำหนักบรรทุกทุกถ่ายลงสู่คาน Sleeper แล้วสู่ Cross beam ซึ่งรองรับด้วยเสา Kingpost กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกปลอดภัยของ Kingpost จะพิจารณาเฉพาะส่วนจมใต้ดินชุด ที่จะรับน้ำหนักบรรทุกจาก Platform ได้ โดยทั่วไปพบว่าน้ำหนักบรรทุกบน Platform (Surcharge = q) สำหรับงานชุดดินลึกในกรุงเทพฯ ด้วยระบบค้ำยัน Sheet Pile สามารถใช้เท่ากับ 2 ตัน/ตร.ม.

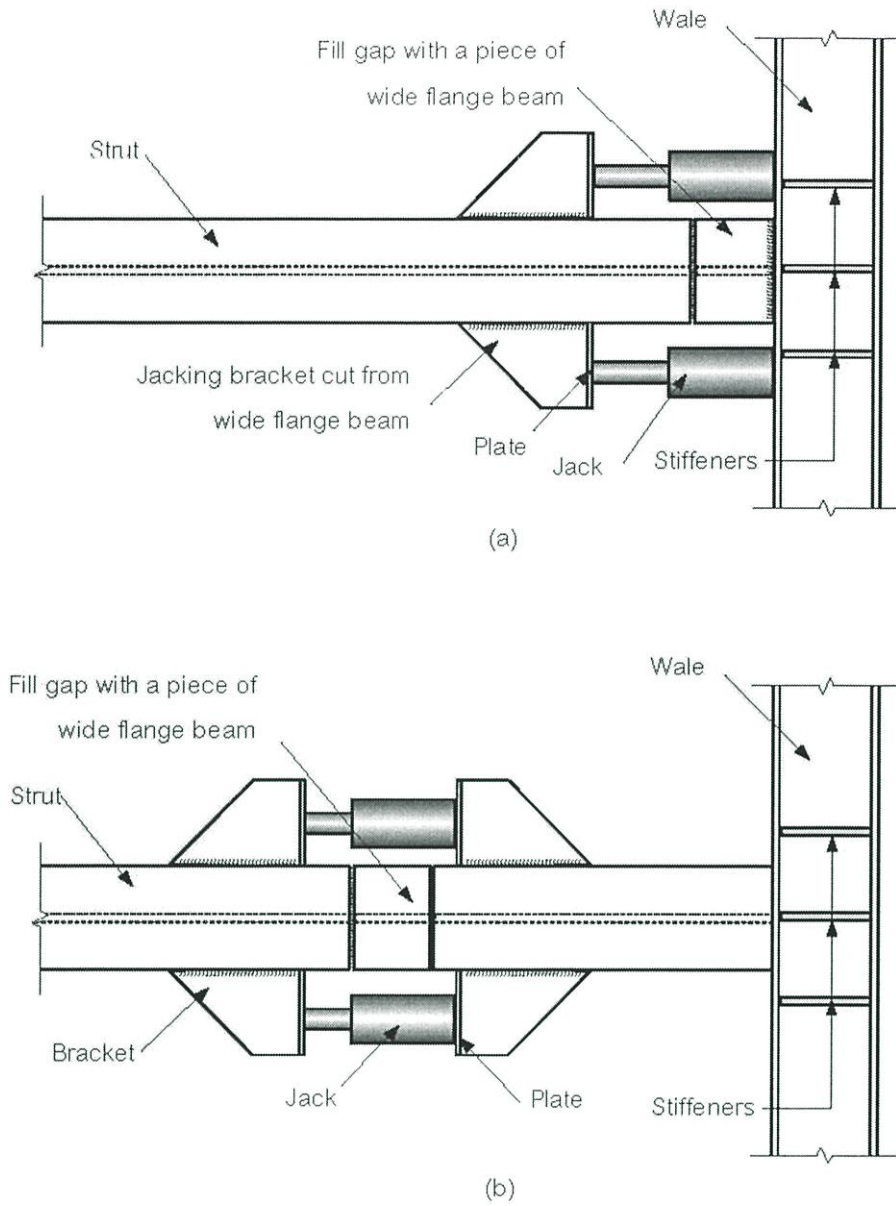
2.1.4.4 การอัดแรงระบบค้ำยันชั่วคราว (Preloading)

การอัดแรงระบบค้ำยันชั่วคราว (Preloading) เพื่อให้ช่องว่างระหว่างค้ำยันกับกำแพงและช่องว่างระหว่างรอยต่อต่างๆ แนบสนิทกัน ซึ่งจะเพิ่มความแข็งแรงของระบบค้ำยัน และช่วยลดค่าการเคลื่อนตัวของซีทไพล์(Sheet Pile)

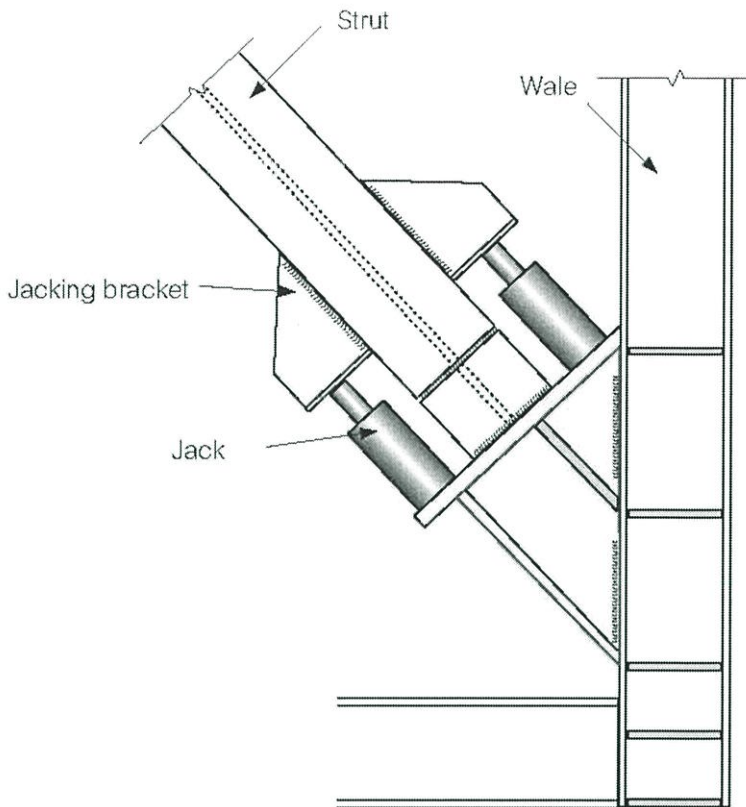
การอัดแรง (Preload) จะใช้แม่แรงไฮดรอลิกส์ติดตั้งไว้ในส่วนของ Strut แล้วทำการอัดแรงเข้าไปในระบบ โดยปกติแล้วแรงที่อัดใน Strut จะมีค่าประมาณ 10 – 20 เปอร์เซ็นต์ของแรงกระทำออกแบบ

ในการชุดดินที่ใช้ระบบกำแพงกันดินที่มีค้ำยันนั้นจำเป็นต้องชุดเปิดหน้าดินลงไปบางส่วนก่อนการติดตั้งค้ำยัน ซึ่งการชุดเปิดหน้าดินโดยไม่มีค้ำยันเพื่อต้านแรงดันด้านข้างนั้นก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวของกำแพงและดินที่กำแพงต้านไว้ อีกทั้งในการติดตั้งค้ำยันและกำแพงมักจะเกิดช่องว่างระหว่างรอยต่อ ซึ่งช่องว่างนี้จะถูกดันให้ชิดโดยแรงดันดินที่กระทำต่อกำแพงและค้ำยัน ในทางปฏิบัติจึงจำเป็นต้องลดช่องว่างเหล่านี้โดยใช้วิธีการอัดแรงในค้ำยันก่อนการชุดดิน

ตัวอย่างรายละเอียดของการอัดแรงในค้ำยันแสดงดังรูปที่ 2.19 และรูปที่ 2.20 การอัดแรงจะใช้ แม่แรงไฮดรอลิกส์ ดันให้เกิดแรงอัดในค้ำยันที่ต้องการตามด้วยการเสริมค้ำยันส่วนที่ถูกอัดที่ถ่างออกและเชื่อมให้ติดกัน การอัดแรงในค้ำยันที่สูงมากนั้นอาจทำให้เกิดหน่วยแรงในค้ำยันสูงเกินกำลังของค้ำยัน เนื่องจากคุณภาพของค้ำยันหรือผลเนื่องจากอุณหภูมิ โดยปกติแล้วแรงที่อัดใน Strut จะมีค่าประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ของแรงกระทำออกแบบ แต่ในบางกรณีการอัดแรงในปริมาณสูง (50 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ของแรงใน Strut ที่ได้ออกแบบไว้) จะใช้ในกรณีที่ต้องการทำให้ระบบค้ำยันมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เพื่อลดการเคลื่อนตัวของกำแพงและทำให้การทรุดตัวที่ผิวดินลดลงด้วยการอัดแรงจะดันให้ช่องว่างแนบสนิท และในขณะเดียวกันยังช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดหน่วยแรงเกินในค้ำยันด้วย



ภาพที่ 2.19 รายละเอียดการอัดแรงในค้ำยันโดยใช้แม่แรง (a)อัดแรงที่คานควางกำแพง (b)อัดแรงในค้ำยัน



ภาพที่ 2.20 การอัดแรงในค้ำยันที่เอียง (Goldberg et al. 1976)

2.1.4.5 การพิจารณาระดับของชั้นดินและการจัดเรียงค้ำยัน

ในการออกแบบเริ่มด้วยการศึกษารูปตัดขวางของชั้นใต้ดินเพื่อให้ได้ความลึกของการขุด โดยความลึกของการขุดได้จากระดับพื้นชั้นใต้ดิน และความหนาของฐานรากที่จะต้องขุด โดยทั่วไปการขุดเพื่อก่อสร้างฐานรากแบ่งเป็น ฐานรากเดี่ยว ฐานรากแบบ Mat Foundation สำหรับฐานรากแบบเดี่ยวที่มีระยะห่างระหว่างฐานรากมากกว่าความกว้างของฐานราก การขุดอาจใช้วิธีขุดเปิดที่ละฐาน ซึ่งทำให้ความลึกของการขุดลดลง แต่ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างฐานรากไม่เกินความกว้างของฐานราก อาจจำเป็นต้องขุดดินจนถึงระดับกันฐานรากทำให้ความลึกของการขุดเพิ่มขึ้น

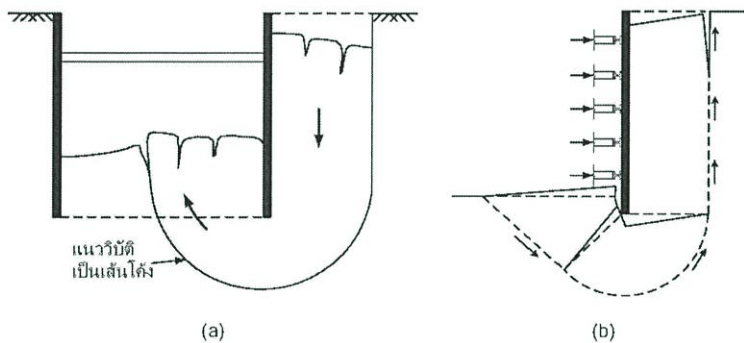
ระบบค้ำยันในระหว่างการก่อสร้างที่ใช้อยู่มีสองลักษณะได้แก่

- 1) ระบบค้ำยันในระหว่างการก่อสร้างชนิดชั่วคราว เป็นระบบค้ำยันที่ทำหน้าที่ต้านทานแรงดันดินในระหว่างก่อสร้าง และจะต้องรื้อออกเมื่อก่อสร้างโครงสร้างถาวรขึ้นมาต้านทานแรงดันดินแล้วระบบค้ำยันชั่วคราวได้แก่โครงสร้างเหล็กรูปพรรณชนิด Wide Flange เนื่องจากเป็นโครงสร้างชั่วคราว หน้าตัดเหล็กรูปพรรณจึงมีใช้เลือกใช้อย่างขนาดเพื่อให้สะดวกต่อการบริหารจัดการ

- 2) ระบบค้ำยันในระหว่างการก่อสร้างขندقถาวร ส่วนใหญ่เป็นพื้นชั้นใต้ดินที่ถูกออกแบบให้สามารถต้านทานแรงดันดินในระหว่างการก่อสร้างได้ด้วย ดังนั้นผู้ออกแบบโครงสร้างพื้นชั้นใต้ดิน ต้องออกแบบแผ่นพื้นให้สามารถต้านทานแรงดันดินในระหว่างการก่อสร้างได้ด้วย ซึ่งแรงดันดินในระหว่างการก่อสร้างนี้สูงกว่าแรงดันดินเมื่อสิ้นสุดการก่อสร้าง เนื่องจากระหว่างขุดดินช่วงความยาวของแผ่นกำแพงที่ไม่ได้รองรับนั้นสูงกว่าช่วงความยาวเมื่อก่อสร้างเสร็จแล้วมาก โดยการก่อสร้างโดยใช้พื้นถาวรเป็นค้ำยันใช้ร่วมกับการก่อสร้างแบบ Top-Down Construction ซึ่งทำให้สามารถก่อสร้างพื้นชั้นเหนือดินพร้อมกับการก่อสร้างพื้นชั้นใต้ดินและฐานรากของอาคาร การก่อสร้างด้วยวิธี Top-Down นี้ถูกใช้ในโครงการก่อสร้างพื้นชั้นใต้ดินในกรุงเทพฯหลายโครงการ อาทิเช่นโครงการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน (Teparaksa ,1999) โครงการก่อสร้างอาคารจอดรถใต้ดินโรงพยาบาลกลาง (ณรงค์ และคณะ 2549) สาเหตุที่ต้องใช้ระบบการก่อสร้างแบบ Top-Down ที่กล่าวไว้โดย ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ (Thasnanipan et al 2006) คือเพื่อลดปริมาณการขนย้ายวัสดุสำหรับใช้ในงานชั่วคราวและลดขั้นตอนการก่อสร้างซึ่งทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างลดลง และเพื่อลดปัญหาการเคลื่อนตัวของดินเนื่องจากการขุดดินที่ต้องก่อสร้างชิดพื้นที่ข้างเคียง

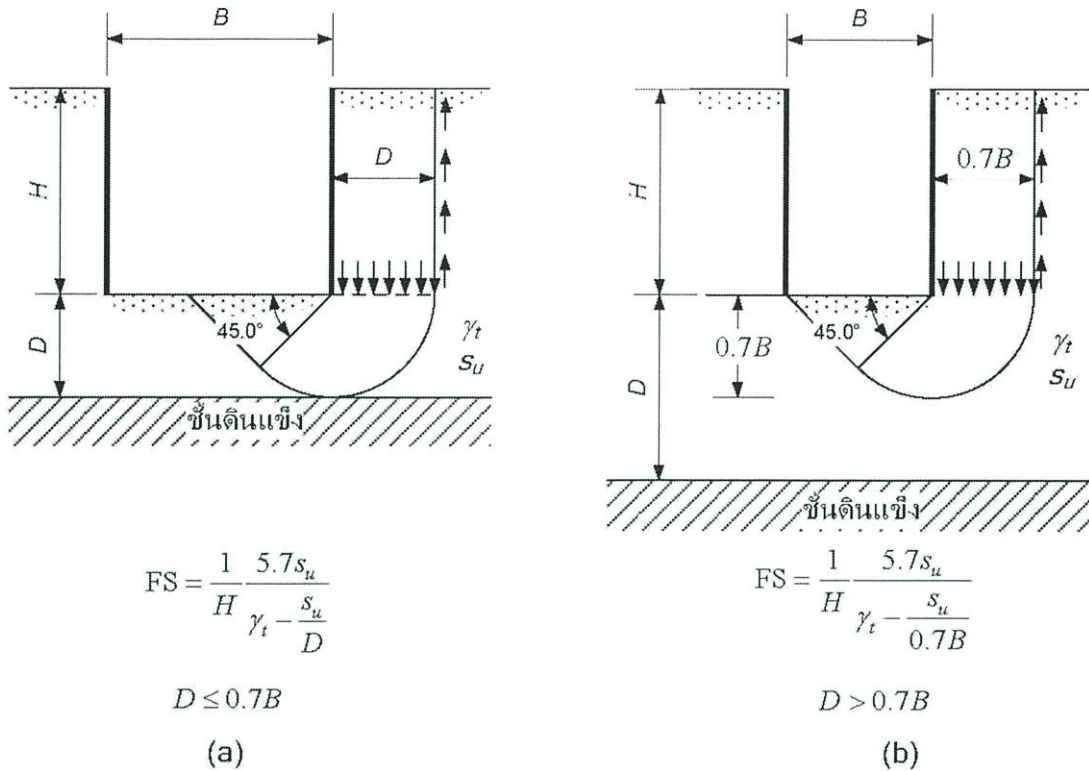
2.1.5 การบวมขึ้นของดินเหนียวใต้บ่อขุด (Base Heave)

ในการขุดดินในชั้นดินเหนียวซึ่งมีกำลังรับแรงเฉือนต่ำนั้น อาจเกิดการวิบัติที่ก้นของบ่อเนื่องจาก Bearing Capacity ซึ่งจะก่อให้เกิดการรูด (Heave) ของดินบริเวณก้นบ่อดังรูปที่ 2.21



ภาพที่ 2.21 การวิบัติของดินใต้บ่อขุด (a)ดินใต้บ่อขุดบวมตัวขึ้น (b)Failure Mechanism ของ Bolton(1993) (Charles,Simons et al. 2004)

สำหรับการคำนวณดินเหนียวในระดับลึกมาก Terzaghi (1943) ได้เสนอกฎการวิบัติ (Failure Mechanism) ของดินใต้บ่อขุดเพื่อใช้คำนวณ Factor of Safety ไว้ดังรูปที่ 2.22

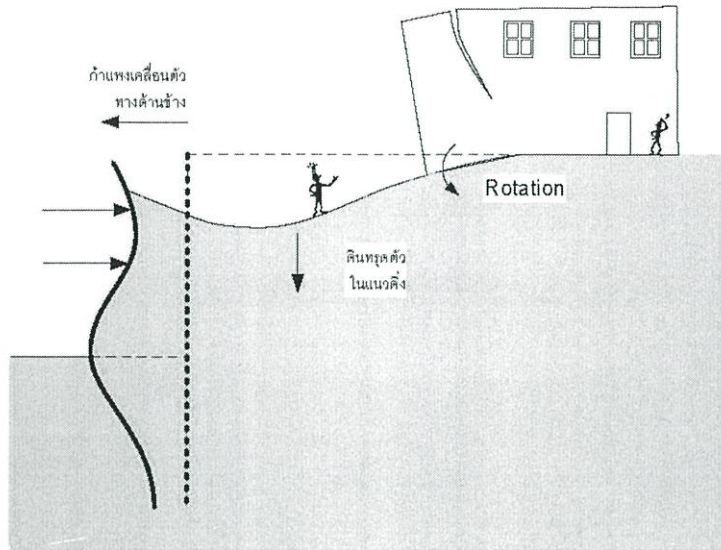


ภาพที่ 2.22 กลไกการวิบัติที่เสนอโดย Terzaghi (a)เมื่อชั้นดินแข็งอยู่ตื้น (b)เมื่อชั้นดินแข็งอยู่ลึก

2.1.6 การประมาณการแอนตัวของกำแพงและการทรุดตัวของผิวดิน

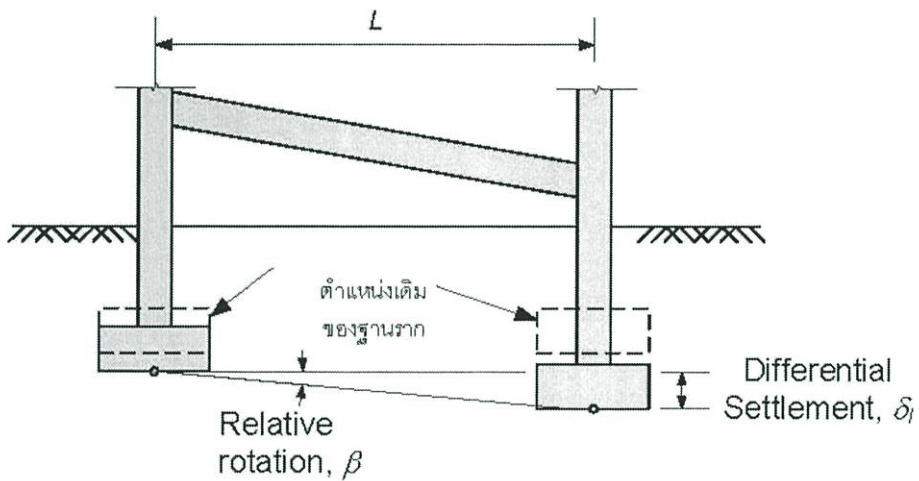
2.1.6.1 ลักษณะการเคลื่อนตัวและเกณฑ์ประเมินเสถียรภาพ

เนื่องจากการก่อสร้างกำแพงกันดินชั่วคราวแบบมีค้ำยันเพื่อการขุดดินนั้นมักจะก่อสร้างในพื้นที่ซึ่งมีอาคารบ้านเรือนปลูกสร้างอยู่ก่อนแล้ว (เนื่องจากราคาที่ดินแพงจึงจำเป็นต้องใช้ประโยชน์จากพื้นที่ให้มากที่สุด) ในทางปฏิบัติโครงสร้างกันดินมักจะมีเสถียรภาพเพียงพอ แต่ทว่าถ้าการเคลื่อนตัวของกำแพงสูงมากจนทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินในบริเวณปากบ่อ อาจทำให้เกิดการวิบัติของอาคารที่อยู่ใกล้เคียงได้



ภาพที่ 2.23 ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อโครงสร้างข้างเคียงเมื่อมีการขุดดินลึก

ในการประเมินเสถียรภาพของอาคารอาจใช้เกณฑ์ที่มีผู้แนะนำไว้ดังตารางที่ 2.4 โดยรูปที่ 2.24 เป็นลักษณะการทรุดตัวที่ไม่เท่ากันของฐานรากซึ่งก่อให้เกิดปัญหาให้กับโครงสร้าง



ภาพที่ 2.24 การทรุดตัวที่ไม่เท่ากันของฐานรากอาคาร

ตารางที่ 2.4 ค่าจำกัดของ Distortion และ Deflections ของโครงสร้าง

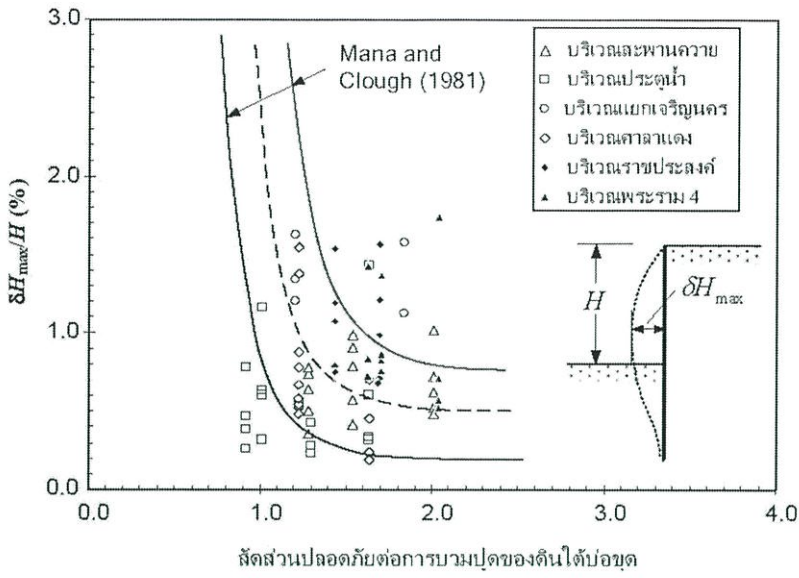
ชนิดโครงสร้าง	ลักษณะความเสียหาย	ค่าจำกัดของ Relative rotation (angular distortion)			
		Skempton and MacDonald	Meyerhof	Polshin and Tokar	Bjerrum
อาคารที่ใช้ โครงสร้างแบบเฟรม และกำแพงรับแรง กด คสล.	รอยร้าวในกำแพงและ ผนัง	1/300 (ควรใช้ 1/500)	1/500	1/500 (7/10000 ถึง 1/1000 สำหรับคานช่วงนอก สุด)	1/500
	โครงสร้างเสียหาย	1/150	1/250	1/200	1/150

ค่าในตารางใช้ในกรณีที่เป็นอาคารที่มีรูปร่างปกติ แต่ถ้าเป็นคานหรือเสาที่ใหญ่กว่าปกติจะต้องใช้การวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อหาค่าจำกัดของ Distortion และ Deflections ของโครงสร้าง

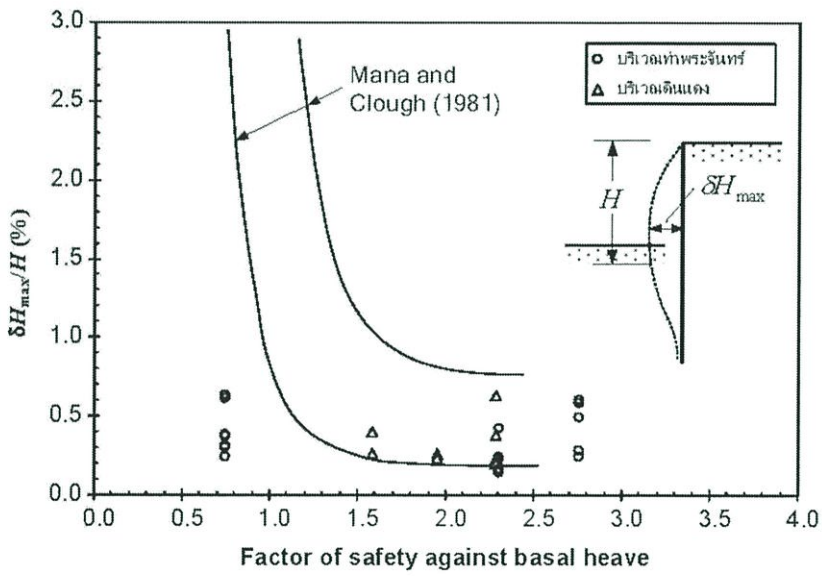
2.1.6.2 การประมาณการโก่งของกำแพง

ในการประมาณการแอ่นตัวของกำแพงนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องจากมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายประการเช่น ความไม่สม่ำเสมอของชั้นดิน ความแปรปรวนจากผลที่ได้จากการทดสอบดิน หรือปัจจัยที่เกิดขึ้นเนื่องจากฝีมือในการก่อสร้าง เป็นต้น ดังนั้นในการประมาณการแอ่นตัวของกำแพงมักจะใช้วิธีเชิงประสบการณ์ โดยการรวบรวมเอาข้อมูลการแอ่นตัวของกำแพงที่มากที่สุด ที่ได้จากการขุดดินในหลายๆโครงการมาสร้างความสัมพันธ์กับสิ่งที่คำนวณได้ง่ายๆ ซึ่งได้แก่สัดส่วนปลอดภัยต่อการขุดของดินใต้บ่อขุด (Factor of Safety Against Base Heave) ดังแสดงในรูปที่ 2.22 ซึ่งการคำนวณ Factor of Safety นี้ถึงแม้ว่าจะมีกลไกการวิบัติที่อาจไม่ตรงกับสภาพที่เกิดขึ้นจริง (เช่นในสภาพจริงกำแพงจะถูกฝังลึกลงไปต่ำกว่าระดับกันบ่อขุด เป็นต้น) แต่ค่า Factor of Safety ที่คำนวณด้วยวิธีนี้จะเป็นครรชนที่ใช้ในการทำนายปริมาณการเคลื่อนตัวของกำแพงที่ใช้ได้ผลดีกลับหลายกรณี

สำหรับการขุดดินสำหรับสร้างห้องใต้ดินลึกมากโดยใช้กำแพงกันดินเข็มเหล็กพืดและใช้ค้ำยันได้มีการสร้างความสัมพันธ์เชิงประสบการณ์ไว้ดังรูปที่ 2.25 สำหรับกรณีของกำแพงกันดินชนิดซีทไพล์ (Sheet Pile) ซึ่งเป็นกำแพงที่มีสติฟเนสไม่สูงมาก และรูปที่ 2.26 สำหรับกำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็ก Diaphragm Wall ซึ่งเป็นกำแพงที่มีสติฟเนสสูง



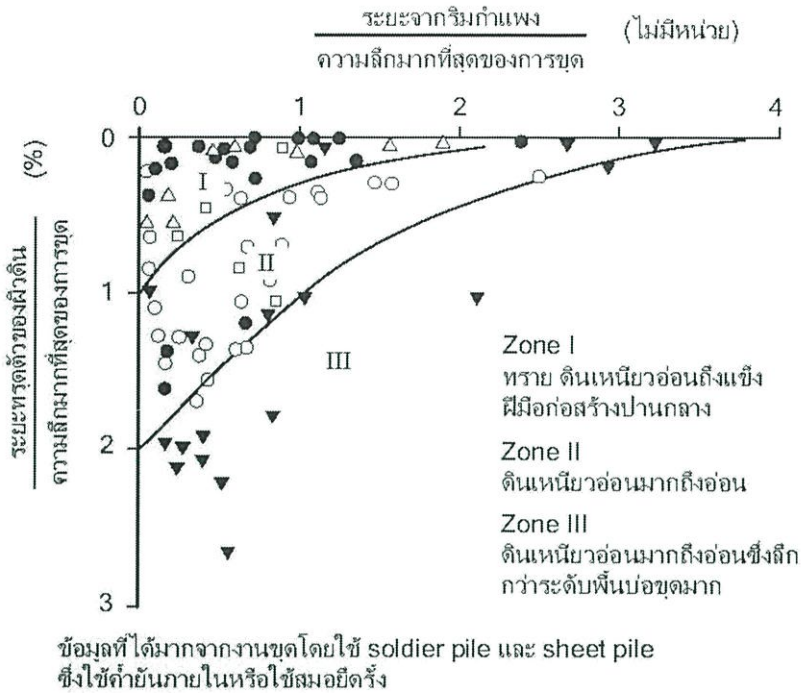
ภาพที่ 2.25 การประมาณการแอนตัวของกำแพง Sheet Pile Wall ด้วยวิธี Empirical



ภาพที่ 2.26 การประมาณการแอนตัวของกำแพง Diaphragm Wall ด้วยวิธี Empirical

2.1.6.3 การประมาณการทรุดตัวของดินปากบ่อ

การประมาณการทรุดตัวของดินรอบๆบ่อขุด โดยใช้ข้อมูลจากประสบการณ์ (Peck 1969)



ภาพที่ 2.27 การประมาณการทรุดตัวที่ผิวดินและระยะแนวราบที่มีผลกระทบ (Peck 1969)

ผลลัพธ์ที่ได้เป็นการประมาณการเพื่อใช้ในการศึกษาผลกระทบที่อาจจะมีต่อโครงสร้างข้างเคียง ซึ่งการทรุดตัวจริงๆในขณะทำการก่อสร้างอาจแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆอีกมาก โดยปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวมากที่สุดคือ วิธีการก่อสร้าง ขั้นตอนการก่อสร้าง และฝีมือของผู้รับเหมา

2.1.7 พฤติกรรมการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของซีทไฟล์ (Sheet Pile)

2.1.7.1 รูปแบบการเสีรूपของซีทไฟล์ (Sheet Pile)

งานขุดดินโดยใช้ซีทไฟล์ (Sheet Pile) เป็นกำแพงกันดิน ซึ่งเป็นกำแพงแบบ Flexible นั้นการเสีรूपเกิดขึ้นได้ 4 แบบดังนี้

1. Translation เป็นลักษณะการเสีรूपที่ปลายล่างของซีทไฟล์ (Sheet Pile) มีการเคลื่อนตัวเนื่องจากปลายซีทไฟล์ (Sheet Pile) ไม่หยั่งถึงชั้นดินแข็ง

2. Rotational about Bottom เป็นลักษณะการเสีรूपที่เกิดขึ้นโดยปลายล่างของซีทไฟล์ (Sheet Pile) ไม่เกิน Translation แต่มี Rotation เกิดขึ้น ในกรณีที่ปลายล่างของ

ซีทไพล์ (Sheet Pile) หยั่งถึงชั้นดินแข็ง การเสียรูปแบบนี้รวมทั้งการเสียรูปแบบคานยื่น (Cantilever Type) ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงแรกของการขุดก่อนที่จะใช้ Strut

3. Rotation about Top การเสียรูปที่เกิดขึ้นโดยปลายซีทไพล์ (Sheet Pile) ไม่เกิดการเคลื่อนตัว (Translation) แต่มี Rotation เกิดขึ้น มักจะเกิดในงานที่มีการขุดค้ำยันใกล้เคียงกับระดับดินเดิมหลังซีทไพล์ (Sheet Pile) โดยมีปลายล่างอยู่ในชั้นดินอ่อน

4. Fixed เป็นการเสียรูปที่เกิดขึ้นโดยทั้งปลายบนและปลายล่างของซีทไพล์ (Sheet Pile) ไม่เกิดการเคลื่อนตัว (Translation) แต่มี Rotation เกิดขึ้นทั้งสองปลาย มักจะเกิดกับงานขุดที่มีระดับค้ำยันใกล้เคียงกับระดับดินเดิมหลัง (Sheet Pile) และมีปลายล่างอยู่ในชั้นดินแข็ง

การเสียรูปทั้ง 4 แบบของซีทไพล์ (Sheet Pile) จะเกิดการป่องเข้า (Inward Bulging) ด้วย ซึ่งมีปริมาณมากขึ้นอยู่กับค่าสติเฟเนสของซีทไพล์ (Sheet Pile)

2.1.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง N กับค่ากำลังรับแรงเฉือนของชั้นดินกรุงเทพฯ

วีรนนท์(2526) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง N กับ S_u ของดินเหนียวแข็งชั้นแรก ซึ่งความสัมพันธ์นี้มีความใกล้เคียงกับความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Terzaghi และ Peck (1948), Sower et al (1961) สำหรับดินเหนียวชนิด CH และ CL ตามลำดับดังแสดงรายละเอียดดังนี้

สำหรับดินเหนียวซึ่งมีความเป็นพลาสติกสูง (CH)

$$S_u = 0.678N \text{ t/m}^2$$

สำหรับดินเหนียวซึ่งมีความเป็นพลาสติกต่ำถึงปานกลาง (CL)

$$S_u = 0.5175N \text{ t/m}^2$$

โดยค่า N คือค่าการทดสอบการทะลุทะลวงมาตรฐาน (ครึ่ง/ฟุต) ที่ไม่มีการปรับแก้ ส่วนชนิดของดินเหนียวแบ่งประเภทโดยอาศัยหลักการตาม Unified Soil Classification

2.1.9 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างและการทรุดตัวของผิวดิน

2.1.9.1 คุณสมบัติของดิน

1. กำลังรับแรงเฉือนของดิน (Undrained Shear Strength)

กำลังรับแรงเฉือนของดินในสภาพไม่ระบายน้ำ (S_u) มีผลต่อการเคลื่อนตัวสูงสุดของซีทไพล์ (Sheet Pile) ถ้าดินมีค่า S_u ต่ำ จะทำให้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างมีค่าสูง

2. Factor of Safety Against Basal Heave (F.S.)

ค่า F.S. เป็นค่าที่แสดงเสถียรภาพของหลุมขุด ยิ่งค่า F.S. มากแสดงว่าหลุมขุดมีเสถียรภาพาก การเคลื่อนตัวของดินน้อย

3. โมดูลัสของดิน (Soil Modulus)

โมดูลัสของดินเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลโดยตรงต่อการเคลื่อนตัวของดิน เช่น ในงานขุดดินแบบใช้ค้ำยัน ในดินดินเหนียวแข็งปานกลาง ถ้าระบบโครงสร้างค้ำยันเป็น Linear Elastic แล้วเมื่อค่าโมดูลัสของดินเปลี่ยนแปลงเนื่องจากระดับของหน่วยแรงเปลี่ยนแปลงไป จะทำให้ค่าการเคลื่อนตัวของดินเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นสัดส่วนผกผัน ในการใช้ Finite Element Analysis ในการคาดคะเนค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดิน และการเคลื่อนตัวของดิน จำเป็นต้องใช้ค่าโมดูลัสของดิน ซึ่งหาค่าโมดูลัสของดินอยู่ในเทอมของกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบ Empirical ได้ดังนี้

$$E_u = M \times S_u$$

เมื่อ E_u = โมดูลัสของดินแบบไม่ระบายน้ำในช่วง Elastic ก่อนที่จะถึงสภาพ Plastic Yielding

$$S_u = \text{กำลังรับแรงเฉือนของดิน}$$

$$M = \text{Modulus Multiplier}$$

ค่า E_u ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติพื้นฐานของดิน ระดับของหน่วยแรงเฉือน ก่อนที่จะถึง Yield และค่าหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำหรือ OCR ของดินเหนียว

ค่า M ขึ้นอยู่กับชนิดของการก่อสร้าง การเคลื่อนตัวทางด้านข้างเนื่องจากการขุดเอาดินออก ค่า M ควรมีค่าแตกต่างกันในกรณีการทรุดตัว โดยปกติค่า M สำหรับการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง ควรสูงกว่าค่า M ในกรณีการทรุดตัวในแนวตั้ง และค่า M จะลดลงเรื่อยๆกับ Stress Level ที่เกิดขึ้น

2.1.10 การใช้วิธี Finite-Element ในการวิเคราะห์ระบบกำแพงกันดิน (Finite-Element Analysis of Retaining Wall)

วิธี Finite Element ที่เสนอโดย Turner et al เป็นหนึ่งในหลายวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความเค้นในรูปแบบอีลาสติก (Elastic Bodies) ซึ่งวิธีการนี้สามารถวิเคราะห์ความเค้นและการเคลื่อนที่ (Displacement) ในสภาพ Non-Homogenous ได้ดีเท่ากับสภาพ Homogenous ประโยชน์ของไฟไนต์เอลิเมนต์ ถ้าเปรียบเทียบกับวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) อื่นๆ แล้วมีจำนวนมากมาย เช่น สามารถประยุกต์ใช้ได้กับวัสดุที่มีรูปร่างและคุณสมบัติต่างๆ สามารถกำหนดให้แต่ละเอลิเมนต์มีคุณสมบัติต่างกันได้ สามารถกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการเคลื่อนตัว แรงดันน้ำ และความเค้นเบื้องต้น (Initial Insitu Stress) ได้ในแต่ละเอลิเมนต์ได้ สามารถที่จะกำหนดความแม่นยำ ในการคำนวณให้อยู่ในขอบเขตที่ต้องการได้ และสามารถประเมินผลของปัญหาที่วัสดุมีคุณสมบัติเป็นแบบไรเชิงเส้น (Non-Linear) อีลาสติก หรืออีลาสติกโพลอสติก

การวิเคราะห์ปัญหาทางปฐพีกลศาสตร์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นการประเมินรูปแบบของปัญหา โดยทำการแบ่งมวลดินเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ที่ต่อเนื่องกัน ในเอลิเมนต์หนึ่งๆจะมี Stress-Strain Law และ Failure Criteria ที่กำหนดให้(โดยทั่วไปใช้ทฤษฎีอีลาสติก) จุดต่อของเอลิเมนต์ที่ต่อกับเอลิเมนต์ข้างเคียง เรียกว่า Nodal Point ในด้านปฐพีกลศาสตร์จะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาค่าหน่วยแรง ความเครียด และการเคลื่อนที่ในมวลดิน

ส่วนสำคัญของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คือ สติฟเนส (Stiffness) ของแต่ละเอลิเมนต์ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนบัพของ (V) และโมดูลัสยืดหยุ่นของดิน (E_u) และเนื่องจากมี Nodal Points เป็นจำนวนมาก จึงมีสมการการเคลื่อนที่ของ Nodal Point มากด้วย การแก้สมการเหล่านี้จะต้องใช้วิธี Matrix Algebra และ Compatibility ของ Deformation between Element

คำตอบของระบบไฟไนต์เอลิเมนต์ จะอยู่ในรูปของการสมดุล และ Compatibility ของแต่ละ Nodal Point ซึ่งจะได้สมการต่างๆรวมอยู่ในรูปแบบของ Matrix คือ

$$\{F\} = \{K\}\{\delta\}$$

โดย F = แรงกระทำ (Vector of Applied Nodal Forces)

K = Stiffness Matrix

δ = Unknown Nodal Displacement Vector

สำหรับการวิจัยนี้ จะใช้โปรแกรม PLAXIS ซึ่งใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในการวิเคราะห์การคาดคะเนการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเข็มพีตสามารถเลือกได้หลายรูปแบบ เช่น Modified Cam-Clay , Drucker-Prager Model , Mohr-Coulomb Model เป็นต้น แต่ในการศึกษาได้เลือกใช้ Mohr-Coulomb Model โดยสมมุติฐานของการใช้โปรแกรม PLAXIS คือ

- 1.) Soil เป็น Nonlinear Elastic Parameter ที่ต้อง Input คือ E_u และ ν
- 2.) Yield ถูกกำหนดขึ้นโดยอาศัยกฎการวิบัติของ Mohr-Coulomb โดยใช้ค่า ϕ, c
- 3.) ซีทไพล์ (Sheet Pile) จะใช้เป็น Beam Element โดย input ค่า EI
- 4.) รูปที่ 2.6 แสดง Yield Function (f) สำหรับ Mohr-Coulomb Model โดยโปรแกรม PLAXIS กำหนดให้

$$F = r - s \sin \phi - c \cos \phi \leq 0$$

r = Radius of Mohr's Stress Circle

s = Centre of Mohr's Stress Circle

กรณีที่ $f \leq 0$ โปรแกรมจะคิดเป็น Elastic Point

กรณีที่ $f > 0$ โปรแกรมจะคิดเป็น Plastic Point

ค่า Parameter ที่ใช้จริงประกอบด้วย E_u , ν , EI , K_0 และ Stress-Strain Curve ใน Bilinear อยู่ในรูปของ Elastic Perfectly Plastic

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(ศิริมาศ,2541) ศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของเข็มพืดสำหรับงานชุดค้ำยันในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยใช้โปรแกรม PLAXIS ของโครงการโรงพยาบาลเปาโล โครงการโบหยก 2 โครงการเพนินซูลา และโครงการศาลาแดง

การวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างโดยใช้โปรแกรม PLAXIS ซึ่งใช้ Soil Model ชนิด Elasto Plastic ประเภท Elastic-Perfectly Plastic ใช้พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์คือ ค่าโมดูลัสของดิน ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างแบบสถิต ในรูปของหน่วยแรงรวม

ผลการศึกษาพบว่า จากการคาดคะเนการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเข็มพืดของโครงการที่ศึกษาจะเกิดการเคลื่อนตัวที่ปลายของเข็มพืด แต่เมื่อพิจารณาข้อมูลที่เกิดจากการวัดในสนามพบว่าที่ปลายเข็มพืดไม่เกิดการเคลื่อน ตัวเนื่องจากการติดตั้ง Inclinometer ลึกเท่าระดับปลายเข็มพืด จึงทำให้ที่ปลายของเข็มพืดอยู่กับที่ ไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัว จึงเป็นสาเหตุให้ผลการคาดคะเนการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเข็มพืดต่างจากการวัดจริงในสนาม

ผลการคาดคะเนการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของแต่ละโครงการจาก โปรแกรม PLAXIS กับการวัดจริงในสนามพบว่าการประมาณค่าในช่วงแรกของแต่ละโครงการจะให้ค่าที่แตกต่างจากการวัดจริงในสนาม เพราะพารามิเตอร์ ที่ใช้จะได้ค่าการเคลื่อนตัวสุดท้าย เนื่องจาก E_u จะขึ้นกับ Stress Level แต่เมื่อถึงการชุดในระยะท้ายๆ โปรแกรม PLAXIS ก็จะประมาณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างได้ใกล้เคียงกับการวัดจริงเพิ่มขึ้น

บทที่ 3

ข้อมูลและวิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 ข้อมูลโครงการ

โครงการ VTARA Sukhumvit 36 ตั้งอยู่บนถนนสุขุมวิท 36 แขวงพระโขนง เขตคลองเตย กรุงเทพมหานคร บนพื้นที่ 4 ไร่ ประกอบด้วยอาคารพักอาศัยคอนกรีตเสริมเหล็ก 5 อาคาร สูง 8 ชั้น พร้อมชั้นใต้ดินเพื่อเป็นอาคารจอดรถ และอาคารใต้ดินชุด Auto Parking ที่มีชั้นใต้ดินถึง 5 ชั้น รวมพื้นที่ก่อสร้างทั้งหมด 42,000 ตารางเมตร

3.2 สภาพชั้นดินและข้อมูลการเจาะสำรวจดิน (Soil Investigation)

สภาพชั้นดินของที่ตั้งโครงการ มีการเจาะสำรวจลึก 25 เมตร ชั้นดินประกอบด้วย

1) ชั้นดินเปลือก (Crust) มีความหนาจากระดับผิวดินประมาณ 2.00 เมตร ความหนาแน่น 18 kN/m^2 กำลังรับแรงเฉือน 40 KPa

2) ชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) พบที่ระดับความลึกจากผิวดินประมาณ 2.00 ถึง 10.00 เมตร โดยแบ่งชั้น Soft Clay ออกเป็น 3 ชั้น คือ

- Soft Clay 1 มีความลึกอยู่ที่ 2.00 ถึง 5.00 เมตร ความหนาแน่น 16 kN/m^2 กำลังรับแรงเฉือน 12 KPa

- Soft Clay 2 มีความลึกอยู่ที่ 5.00 ถึง 8.00 เมตร ความหนาแน่น 16 kN/m^2 กำลังรับแรงเฉือน 15 KPa

- Soft Clay 3 มีความลึกอยู่ที่ 8.00 ถึง 10.00 เมตร ความหนาแน่น 16 kN/m^2 กำลังรับแรงเฉือน 16 KPa

3) ชั้นดินเหนียวปานกลาง (Medium Clay) พบที่ระดับ 10.00 ถึง 14.00 เมตร ความหนาแน่น 17 kN/m^2 กำลังรับแรงเฉือน 37 KPa

4) ชั้นดินเหนียวแข็งถึงแข็งมาก (Stiff to Very Stiff Clay) พบที่ระดับตั้งแต่ 14.00 เมตร ถึงระดับสิ้นสุดการเจาะสำรวจ มีความหนาแน่น 18 kN/m^2 กำลังรับแรงเฉือน 90 KPa โดยมีค่า SPT-N เฉลี่ย 17 blows/ft

โดยแสดงสภาพชั้นดินของโครงการ VTARA Sukhumvit36 ที่นำไปใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธี 2D Finite Element ดังรูปที่ 3.1

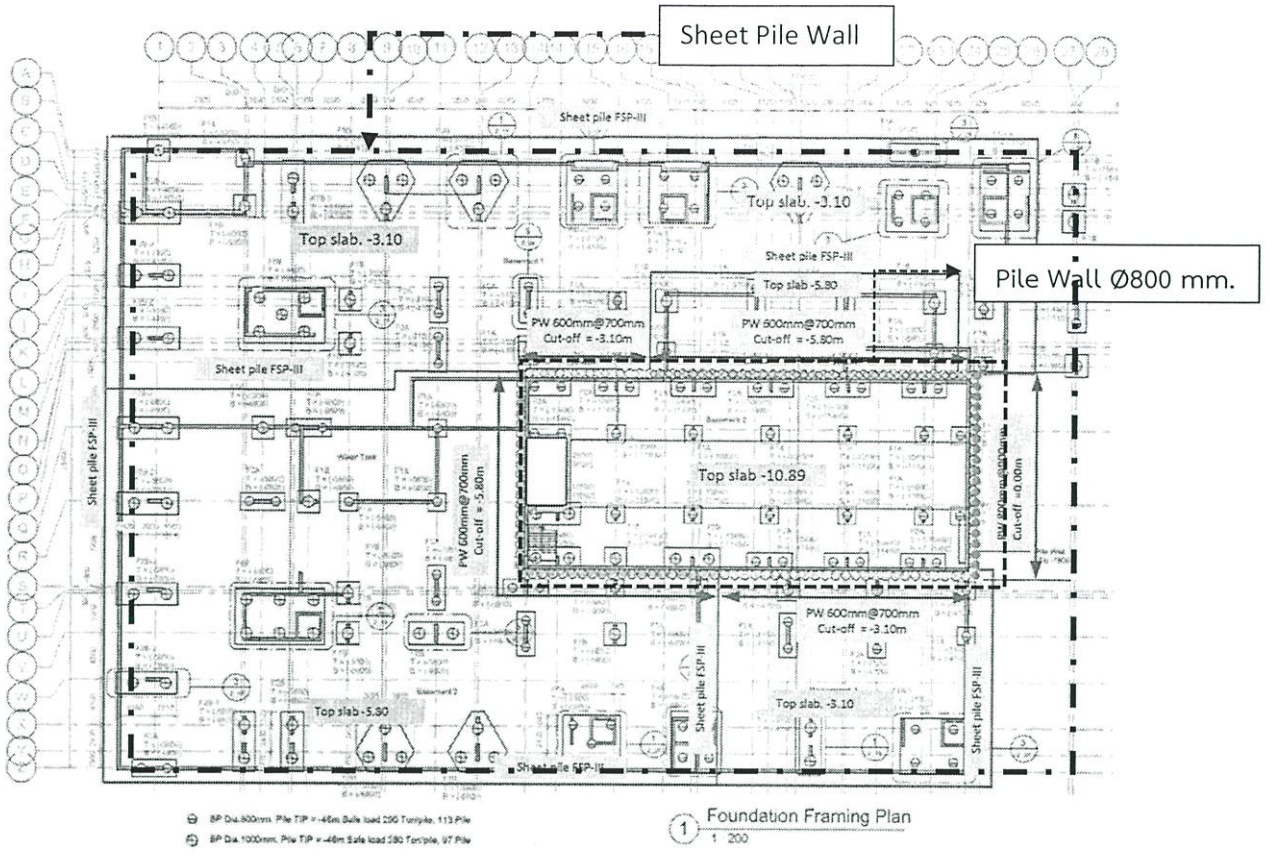
Depth	Description	Su (t/m ²)	SPT-N (Blow/ft.)	γ (t/m ³)
0.00	Top Soil			
2.00 m				
5.00	Soft Clay	1.2		1.5
10.00		1.5		1.6
10.00 m		1.6		
15.00	Medium Clay	3.7		1.7
14.00 m				
20.00	Stiff Clay	13		1.8
25.00				

0.00			
-1.50 water level	Top Soil	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^2$ $S_u = 40 \text{ kPa}$	$E_u = 20000 \text{ kPa (500S}_u)$ $\nu = 0.35$
-2.00			
	Soft Clay 1	$\gamma = 16 \text{ kN/m}^2$ $S_u = 12 \text{ kPa}$	$E_u = 1800 \text{ kPa (150S}_u)$ $\nu = 0.35$
-5.00			
	Soft Clay 2	$\gamma = 16 \text{ kN/m}^2$ $S_u = 15 \text{ kPa}$	$E_u = 2250 \text{ kPa (150S}_u)$ $\nu = 0.35$
-8.00			
	Soft Clay 3	$\gamma = 16 \text{ kN/m}^2$ $S_u = 16 \text{ kPa}$	$E_u = 2400 \text{ kPa (150S}_u)$ $\nu = 0.35$
-10.00			
	Medium Clay	$\gamma = 17 \text{ kN/m}^2$ $S_u = 37 \text{ kPa}$	$E_u = 18500 \text{ kPa (500S}_u)$ $\nu = 0.35$
-14.00			
	Stiff Clay	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^2$ $S_u = 90 \text{ kPa}$	$E_u = 108000 \text{ kPa (1200S}_u)$ $\nu = 0.35$

ภาพที่ 3.1 คุณสมบัติดินและรูปตัดชั้นดินที่ใช้วิเคราะห์ด้วยวิธี 2D Finite element

(ข้อมูลผลการเจาะสำรวจชั้นดิน โดยบริษัท เอส ที เอส อินสตรูमेंท์ จำกัด)

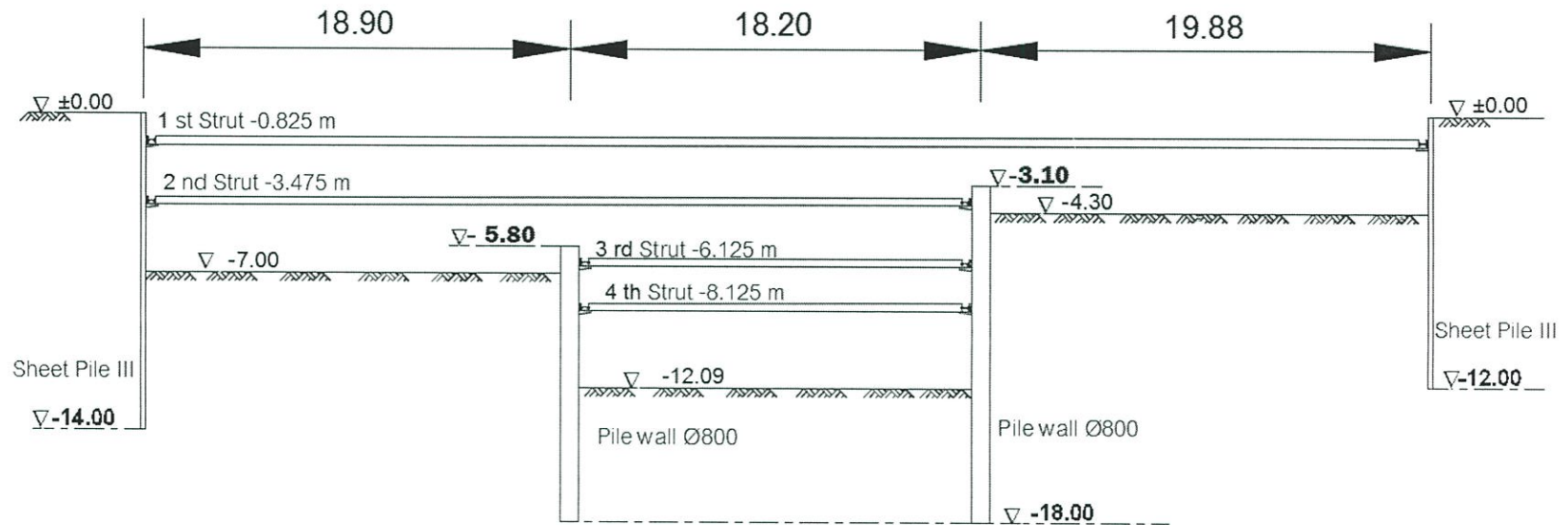
โครงการ VTARA Sukhumvit36 มีการใช้ระบบป้องกันดินในงานขุดดิน 2 แบบคือกำแพงเสาเข็ม (Pile Wall) ในบริเวณที่มีการขุดดินลึก -12.09 เมตร และ กำแพงซีทไพล์ (Sheet Pile Wall) โดยรอบโครงการ ดังแสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ฝั่งตำแหน่งกำแพง Pile Wall Ø800 mm. @900mm. และ Sheet Pile Wall

3.3 ระดับค้ำยันซีทไพล์ (Sheet Pile)

โครงการ VTARA Sukhumvit36 ประกอบไปด้วย 5 อาคารในพื้นที่ใกล้เคียงกันและมีการขุดดินเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดินของแต่ละอาคารไม่เท่ากัน ทางคณะผู้จัดทำจึงเลือกหน้าตัดจากแบบก่อสร้างที่แสดงระดับการขุด ระดับค้ำยัน ความกว้างของบ่อขุด ในแต่ละอาคารตาม ดังแสดงในภาพที่ 3.3 และใกล้กับตำแหน่ง Inclinometer เพื่อนำมาสร้างโมเดลจำลองการขุดในโปรแกรม PLAXIS2D



ภาพที่ 3.3 แสดงรูปตัดระดับการขุด ระดับค้ำยันของกำแพงซีทไพล์ (Sheet Pile Wall) และ กำแพงเสาเข็ม (Pile Wall)

3.3.1 ขั้นตอนการขุดดิน

- 1.ก่อสร้าง Pile Wall และกวด Sheet Pile รอบนอก
- 2.ขุดดินถึงระดับ -1.40 เมตร และติดตั้งค้ำยันที่ระดับ -0.825 เมตร
- 3.ขุดดินถึงระดับ -4.05 เมตร และติดตั้งค้ำยันที่ระดับ -3.475 เมตร และอัดแรงในค้ำยัน 10 t/m
- 4.ขุดดินถึงระดับ -4.30 เมตร
- 5.ขุดดินถึงระดับ -6.70 เมตร และติดตั้งค้ำยันที่ระดับ -6.125 เมตร และอัดแรงในค้ำยัน 10 t/m
- 5.ขุดดินถึงระดับ -8.70 เมตร และติดตั้งค้ำยันที่ระดับ -8.125 เมตร และอัดแรงในค้ำยัน 20 t/m
- 6.ขุดดินถึงระดับสุดท้าย -12.09 เมตร เท lean Concrete ชน Pile Wall และขุดเพื่อก่อสร้าง Pile Cap ที่ละหลุม

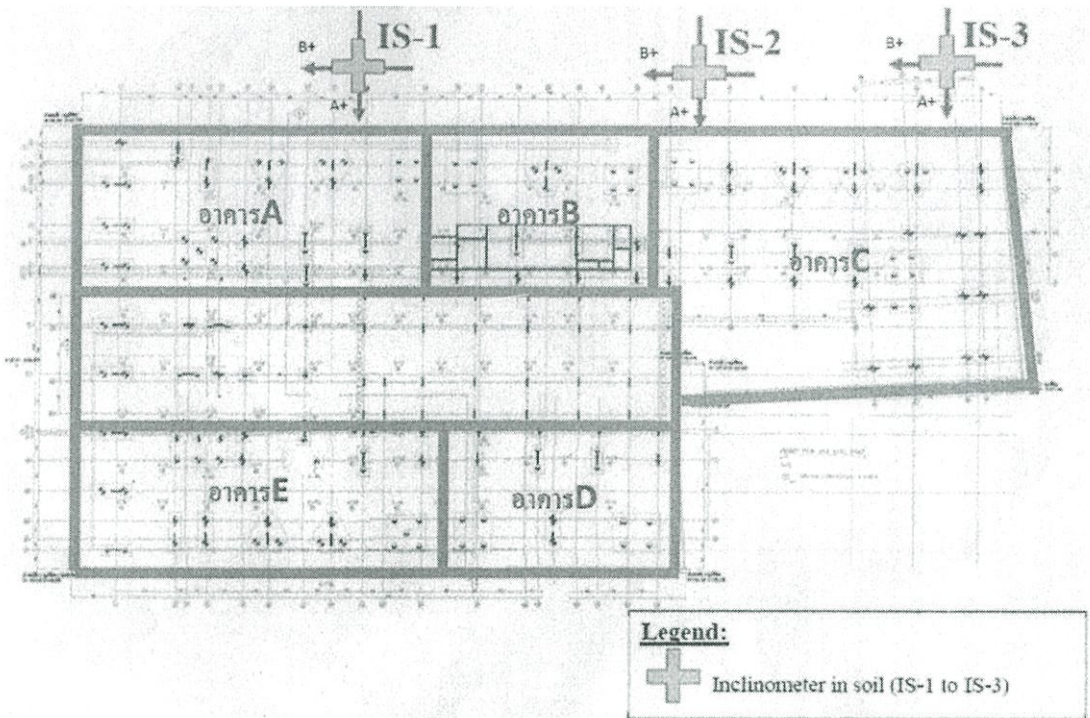
ตารางที่ 3.1 แสดง Design Summary

Bracing	Maximum Force in Strut (Ton/m)	Steel Section Required	Remark
First level	22.4	Wale W350×137 kg/m Strut W350×137 kg/m	Span length, $L_w = 2.00$ m Strut spacing, $L_s = 6.00$ m
Second level	23.9	Wale W350×137 kg/m Strut W350×137 kg/m	Span length, $L_w = 2.00$ m Strut spacing, $L_s = 6.00$ m
Third level	26.9	Wale W350×137 kg/m Strut W350×137 kg/m	Span length, $L_w = 2.00$ m Strut spacing, $L_s = 6.00$ m
Fourth level	24.6	Wale W350×137 kg/m Strut W350×137 kg/m	Span length, $L_w = 2.00$ m Strut spacing, $L_s = 6.00$ m

(ข้อมูลการออกแบบระบบค้ำยัน โดยบริษัท อาจารย์พรพจน์ ต้นเส็ง)

3.4 ค่าการเคลื่อนตัวแนวราบจาก Inclinometer

โครงการ VTARA Sukhumvit36 มีการติดตั้ง Inclinometer เพื่อวัดค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของ กำแพงซีทีไพล์ (Sheet Pile Wall) ด้านที่ติดกับอาคารข้างเคียง 3 จุด ได้แก่ IS1 IS2 และ IS3 ดังแสดงในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 แสดงตำแหน่งการติดตั้ง Inclinometer

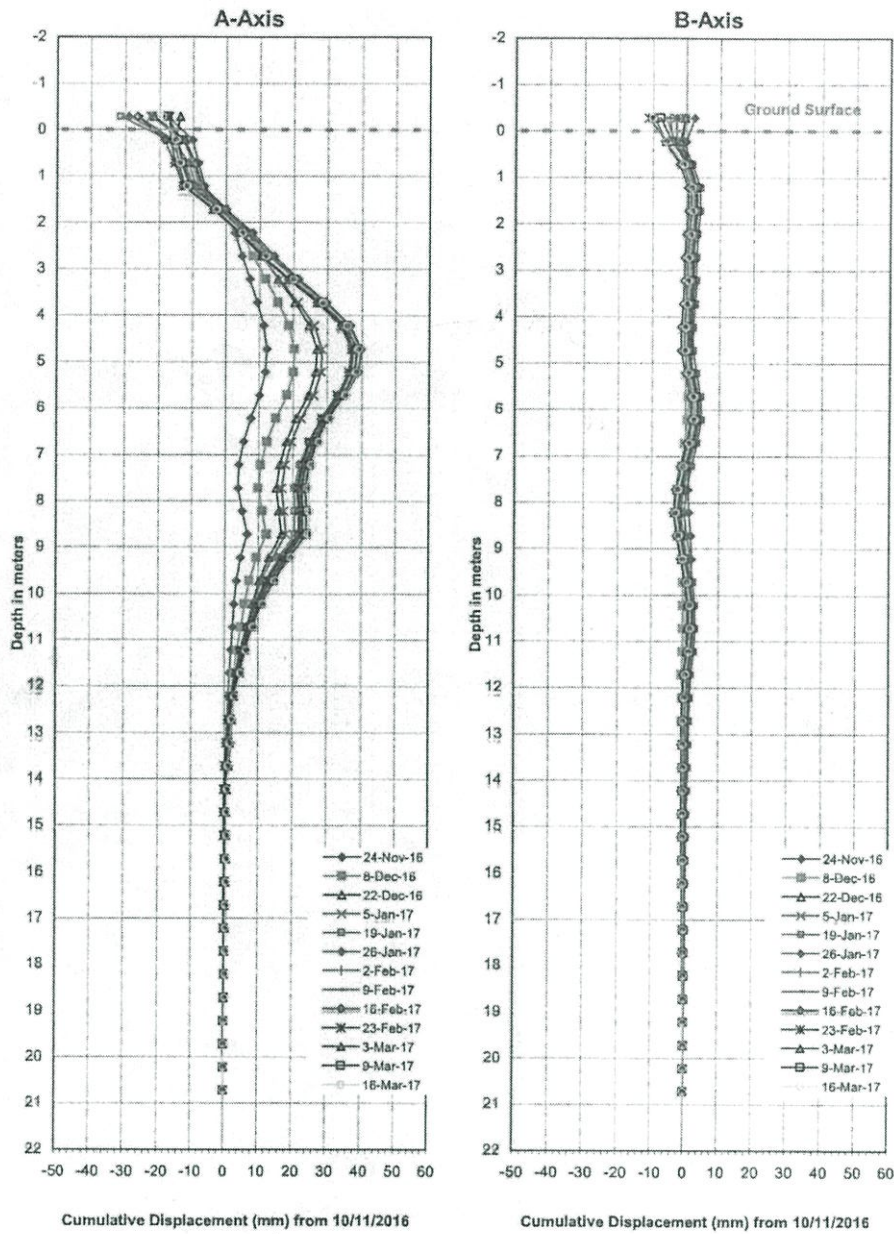
ทางโครงการได้มีการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวของทางด้านข้างทุก 1 เดือน แต่เมื่อวันที่ 7 ธันวาคม 2559 มีการถอนซีทไพล์ ทางด้านที่ติดกับอาคารข้างเคียง และพบว่าอาคารข้างเคียงได้รับความเสียหาย ค่าการเคลื่อนตัวของด้านข้างของซีทไพล์ (Sheet Pile) มีค่าเพิ่มขึ้น จึงได้เปลี่ยนการวัดค่าใหม่เป็น ทุก 2 สัปดาห์ มีการวัดค่าการเคลื่อนตัวของแนวราบของดินสูงสุด ณ วันที่ทำการวัด ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ค่าการเคลื่อนตัวของด้านข้างของซีทไพล์ (Sheet pile) ทุกระดับความลึกของ Inclinometer IS1 IS2 และ IS3 ดังภาพที่ 3.5 3.6 3.7 ตามลำดับ และสรุประดับความระมัดระวังในการทำงาน ดังแสดงใน ตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าการเคลื่อนตัวของแนวราบของดินสูงสุด ณ วันที่ทำการตรวจวัด

จุด ทิศทาง		ครั้งที่ / (mm.)										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	A	12.18	20.24	26.77	28.33	37.72	39.83	38.77	39.16	37.02	36.87	37.48
	B	2.58	-1.99	2.87	-2.96	4.85	4.11	-4.05	3.89	-6.54	-5.87	-6.23
2	A	-22.89	-40.7	41.63	42.21	43.41	43.72	44.24	43.94	44.13	44.4	44.33
	B	10.64	33.19	35.85	36.29	35.38	36.29	36.85	38.39	37.04	38.68	37.85
3	A	17.54	21.33	20.1	19.91	21.33	21.39	21.39	18.60	22.67	20.65	21.10
	B	2.80	5.37	5.03	5.83	10.56	13.21	13.21	12.10	15.19	13.9	11.71
วันที่ตรวจสอบ		24/11/2016	8/12/2016	22/12/2016	1/5/2017	19/1/2017	26/1/2017	2/2/2017	2/9/2017	16/2/2017	23/2/2017	3/3/2017

(ข้อมูลการวัดการเคลื่อนตัวของแนวราบโดยบริษัท STS Engineering consultant Co.LTD)

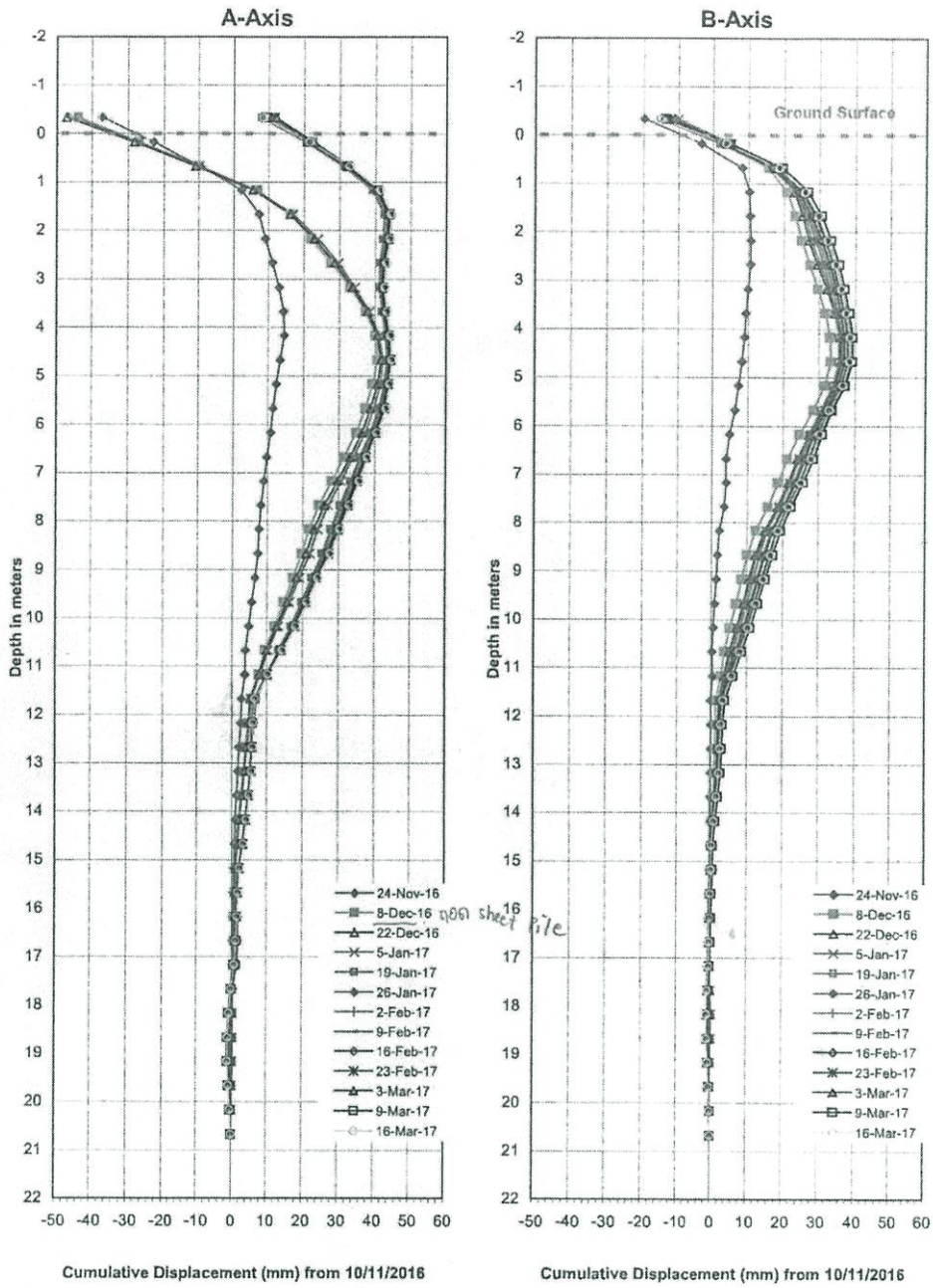
VTARA 36
Inclinometer Tube No. IS-1



ภาพที่ 3.5 ค่าการเคลื่อนตัวแนวราบของ Inclinometer Tube No. IS-1

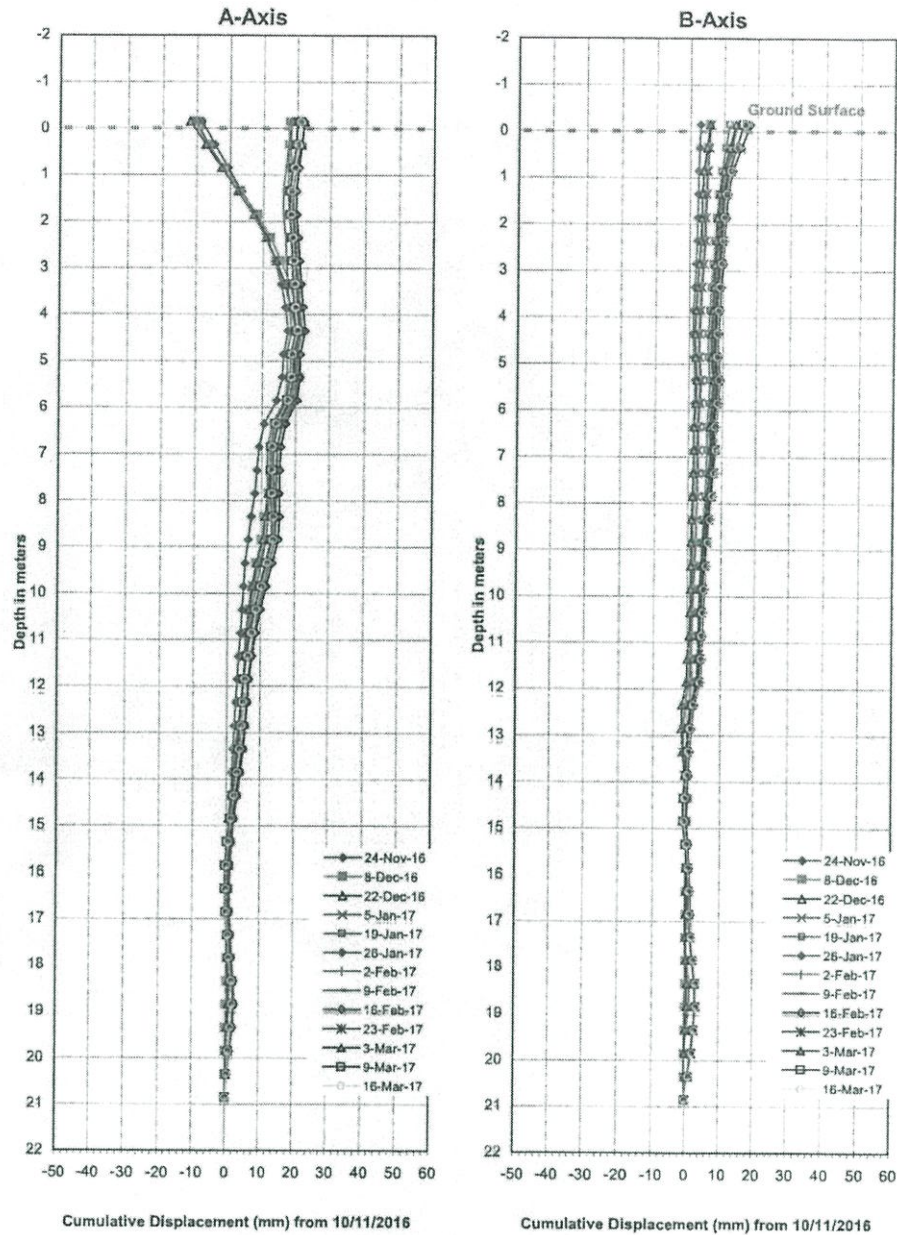
(ข้อมูลการวัดการเคลื่อนตัวแนวราบโดยบริษัท STS Engineering consultant Co.LTD)

VTARA 36
Inclinometer Tube No. IS-2



ภาพที่ 3.6 ค่าการเคลื่อนตัวแนวราบของ Inclinometer Tube No. IS-2
(ข้อมูลการวัดการเคลื่อนตัวแนวราบโดยบริษัท STS Engineering consultant Co.LTD)

VTARA 36
Inclinometer Tube No. IS-3



ภาพที่ 3.7 ค่าการเคลื่อนตัวแนวราบของ Inclinometer Tube No. IS-3
(ข้อมูลการวัดการเคลื่อนตัวแนวราบโดยบริษัท STS Engineering consultant Co.LTD)

ตารางที่ 3.3 สรุปผลการเคลื่อนตัวแนวราบ

Summary of surrounding impact monitoring caused by excavation works

VTARA 36, BANGKOK

Report No. 13

Monitoring dated: 16/03/2017

Item	Instruments	Monitoring Date	No.of Monitoring Point	Maximum measured value			Warning		Com ment	Remark
				Location	Value	Unit or Direction	Level	Value		
1	Inclinometer [SITE AREA]	16/03/2017	1 (IS-1)	IS-1(A)	39.05	mm	Alert level	[Lateral Movement] -mm		
				IS-1(B)	-5.99	mm	Alarm level	-mm		
		16/03/2017	1 (IS-2)	IS-2(A)	44.78	mm	Alert level	[Lateral Movement] -mm		
				IS-2(B)	38.48	mm	Alarm level	-mm		
		16/03/2017	1 (IS-3)	IS-3(A)	20.45	mm	Alert level	[Lateral Movement] -mm		
				IS-3(B)	14.08	mm	Alarm level	-mm		

(ข้อมูลการวัดการเคลื่อนตัวแนวราบโดยบริษัท STS Engineering consultant Co.LTD)

3.4 ผลการสำรวจอาคารข้างเคียง

3.4.1 สภาพโครงสร้างทางกายภาพ


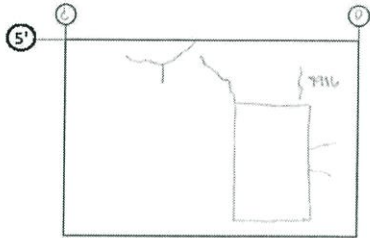
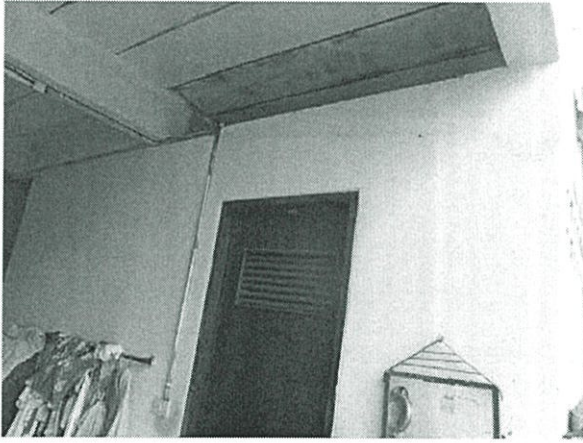
สภาพโครงสร้างทางกายภาพโดยรวม ประเมินด้วยวิธีพินิจด้วยสายตาพบว่าอยู่ในเกณฑ์พอใช้ (Fair) (ตัวอย่างรายละเอียดผลการพินิจด้วยสายตา ดังภาพที่ 3.8)ไม่พบความเสียหายในระดับรุนแรงในลักษณะที่โครงสร้างเกิดการวิบัติ และ/หรือ หมุดสภาพการใช้งาน ตำแหน่งและขนาดองค์อาคารเป็นปกติ ไม่พบการเสื่อมสภาพของวัสดุโครงสร้าง และไม่พบการทรุดตัว/เอียงตัวผิดปกติ (เมื่อสังเกตจากสายตา) อย่างไรก็ตามสังเกตเห็นความเสียหาย/ข้อบกพร่องจำนวนมากตามองค์อาคารต่างๆ ซึ่งส่วนใหญ่ เป็นการแตกกะเทาะของคอนกรีตตามแนวเหล็กเสริมซึ่งพบที่เสาชั้น 1 และคานและพื้นชั้น 2 และพบรอยร้าวที่คานชั้น 2 และผนังชั้น 1-2

3.4.2 รายละเอียดฐานราก

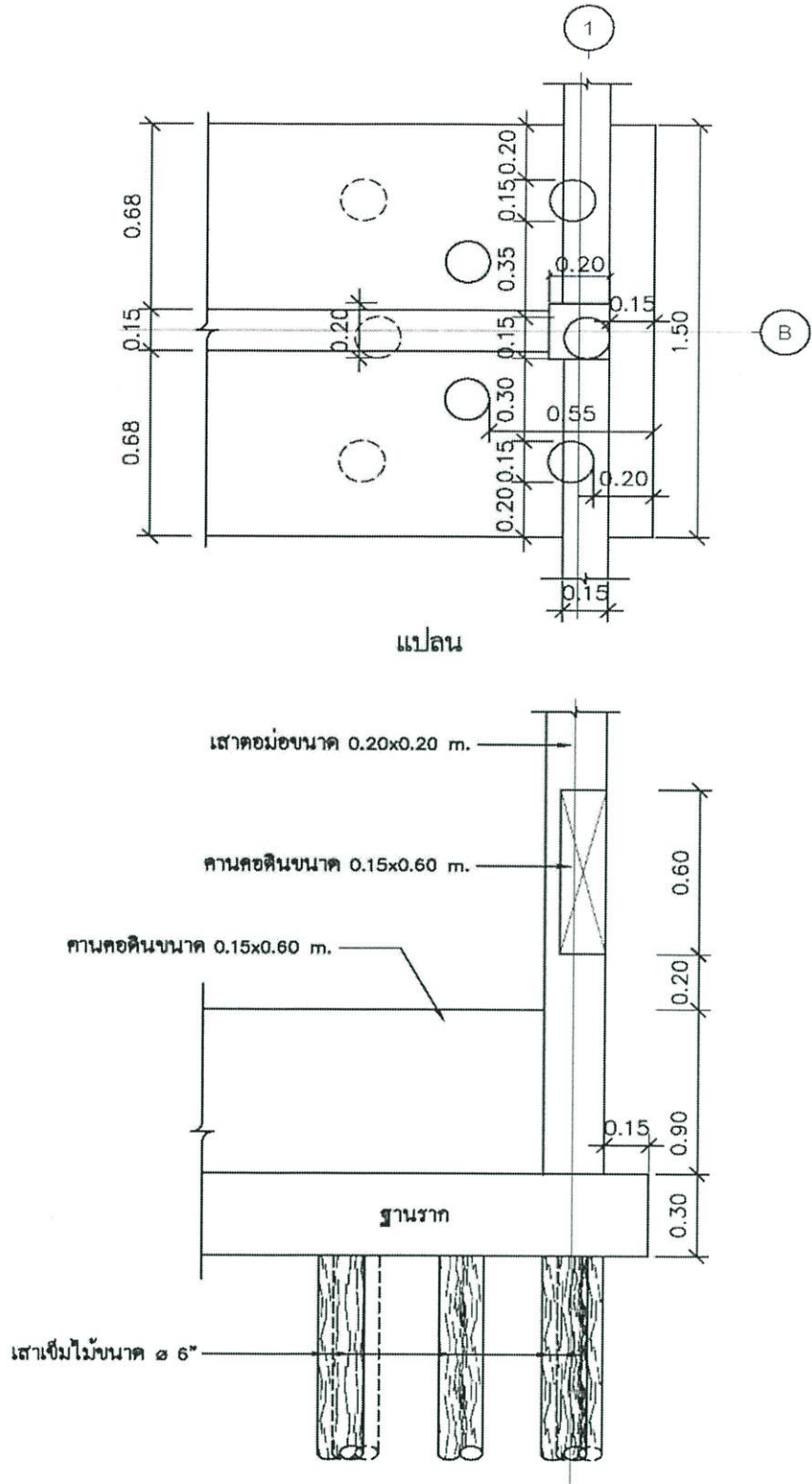
ฐานรากที่สุ่มขุดสำรวจเปิดดูฐานรากของอาคาร เป็นฐานรากเสาเข็มไม้ชนิด Strip footing ตามความลึกของอาคาร เสาเข็มไม้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6 นิ้ว มีจำนวนประมาณ 8 ต้น/ม. สภาพความสมบูรณ์ ของ Footing เสาตอม่อ และเสาเข็ม ที่สุ่มขุดสำรวจพบว่ายังอยู่ในสภาพดี (ข้อมูลการสำรวจความเสียหายของฐานรากโดย บริษัท STS Engineering consultant Co.LTD)

3.4.3 ระดับความเสียหายของโครงสร้าง

ระดับความเสียหายของโครงสร้างอาคารประเมินในเบื้องต้นตามเกณฑ์พิจารณาที่พัฒนาจากเกณฑ์กำหนดความเสียหายของอาคารที่แนะนำไว้โดย Burland et ,al 2001 และสมาคมคอนกรีตไทยร่วมกับ ACI Thailand chapter ,2551 แสดงไว้ในภาพที่ 3.10 ข้างท้าย การประเมินตามเกณฑ์ข้างต้นอาศัยข้อมูลสภาพทางกายภาพของโครงสร้าง ผลสำรวจระนาบอาคาร และผลสำรวจและทดสอบคุณสมบัติและค่ากำลังวัสดุด้วยวิธีการต่างๆ พบว่าอาคารข้างเคียง มีความเสียหายตั้งแต่ เล็กน้อย - รุนแรง (ข้อมูลการสำรวจความเสียหายของโครงสร้างโดย บริษัท STS Engineering consultant Co.LTD)

	STS ENGINEERING CONSULTANTS CO., LTD.
196/10-12 Pradipat 14, Pradipat Rd, Samsennai, Phayathai, Bangkok 10400 Tel: 0-2618-4288 Fax: 0-2618-4288	
<u>VISUAL INSPECTION</u>	
Project/Building : อาคารข้างเคียง V-TARA 36 (346-352)	Structure : ผนัง
Date of Survey : 16-17/5/2560	Floor : 3
Time of Survey : 1	Position : C-D/5'
Picture of Distresses	
	
Sketch No.9	
	
Picture No.9	
Type of Defect :	รอยร้าวแนวเฉียง และแนวนอนรอบวงกบ ขนาดความกว้างประมาณ 0.1-0.15 มม.
Picture ID :	DSCF7916

ภาพที่ 3.8 ตัวอย่างรอยร้าวการพินิจด้วยสายตาของอาคารข้างเคียง (บริษัท STS Engineering consultant Co.LTD)



ภาพที่ 3.9 ฐานรากของอาคารข้างเคียงที่ตรวจพบ

(ข้อมูลการสำรวจความเสียหายของฐานรากโดย บริษัท STS Engineering consultant Co.LTD)

BUILDING DAMAGE CLASSIFICATION
(after burland et al, 2001)

Description of Typical damage	Approx. Crack Width (mm)	Max. Tensile Strain %	Inclination H : V	Degree of Damage	Risk Category
Hairline cracks	-	Less than 0.05	< 1:1000	Negligible	0
Fine cracks easily treated during normal redecoration. Perhaps isolated slight fracture in building. Cracks in exterior brickwork visible upon close inspection.	0.1 to 1.0	0.05 to 0.075	1:1000 - 1:500	Very slight	1
Cracks easily filled. Redecoration probably required. Several slight fractures inside the building. Exterior cracks visible. Some repairing may be required for weather tightness. Doors and windows may be stick slightly.	1.0 to 5.0	0.075 to 0.15	1:500 - 1:300	Slight	2
Cracks may require cutting out and patching. Recurrent cracks can be masked by suitable linings. Tuck-pointing and possible replacement of a small amount exterior brickwork may be required. Doors and windows sticking. Utility services may be interrupted. Weather tightness often impaired.	5.0 to 15.0 or a number of cracks greater than 3.0	0.15 to 0.3	1:300 - 1:200	Moderate	3
Extensive repair involving removal and replacement of sections of walls, especially over doors and windows required. Windows and doors frames distorted. Floor slopes noticeably. Some loss of bearing in beams. Utility services disrupted.	15.0 to 25.0 (depend on number of cracks also)	Greater than 0.3	1:200 - 1:100	Severe	4
Major repair required involving partial or complete reconstruction. Beams lose bearing, walls lean badly and require shoring. Windows broken by distortion. Danger of instability.	> 25.0 (depend on number of cracks also)	-	> 1:200 > 1:100	Very Severe	5

Note: - This table is based on the work of Burland et. al (2001) except the inclinations (by STS experience).

ภาพที่ 3.10 เกณฑ์พิจารณาความมั่นคงของอาคารโดย Burland et ,al 2001 และสมาคมคอนกรีตไทย ร่วมกับ ACI Thailand chapter ,2551

บทที่ 4

คุณสมบัติของดินทางด้านการออกแบบและผลความสัมพันธ์

4.1 ขั้นตอนการศึกษา

1.รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทำวิจัย เช่น ค่าการวัดการเคลื่อนตัวทางแนวราบของ Sheet Pile (Inclinometer), รายงานการคำนวณการออกแบบระบบค้ำยัน, รายงานการสำรวจลักษณะทางกายภาพของอาคารข้างเคียงหลังเกิดการวิบัติจากบริษัท STS

2.วิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออาคารข้างเคียง

3.ทำการตรวจสอบย้อนกลับ Model การออกแบบ และเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัว(validate) กับการเคลื่อนตัวในสนาม

4.วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะห่างจากตำแหน่งซีทไพล์ (Sheet Pile) ถึงอาคารข้างเคียง (Spacing) น้ำหนักของอาคารข้างเคียง (Distributed Load) ความยาวของเสาเข็มสั้นของอาคารข้างเคียง (Pile's Depth)

5.เสนอกราฟความสัมพันธ์ความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะห่างจากตำแหน่งซีทไพล์ (Sheet Pile) ถึงอาคารข้างเคียง (Spacing) น้ำหนักของอาคารข้างเคียง (Distributed Load) ความยาวของเสาเข็มสั้นของอาคารข้างเคียง (Pile's Depth)

6.เสนอระบบ Plat form (service road) เพื่อลดแรงสั่นสะเทือน

4.2 การใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ(S_u) ของดินที่ชั้นความลึกต่าง ๆ

โดยทั่วไปข้อมูลจากการเจาะสำรวจดินนั้นสามารถให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนได้ 3 ชนิด คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจากการทดสอบแรงเฉือนแบบเวนในสนาม (Field Vane Shear Test: $S_{u(FV)}$), ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดในห้องปฏิบัติการ (Unconfined Compressive Test: $S_{u(UC)}$) และค่าทดสอบทะลุทะลวงแบบมาตรฐาน (N : SPT) ซึ่งค่าทั้งสามมีความเหมาะสมขึ้นอยู่กับนำไปใช้

(ศิริมาส,2541) ค่า S_u ที่เหมาะสมที่สุดในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลาง (Soft to Medium Clay) คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบแบบเวนในสนาม ($S_{u(FV)}$) หลังจากทำการปรับแก้แล้ว เนื่องจากดินเหนียวอ่อน กรุงเทพฯ มีความไวสูง ดินที่ทดสอบในสนามจะถูกรบกวนน้อยกว่าดินที่นำไปทดลองในห้องปฏิบัติการ แต่มีข้อเสีย คือ ถ้ามีค่ามากกว่า $4-5 \text{ t/m}^2$ ค่าการทดสอบแบบ $S_{u(FV)}$ จะมีค่าสูงกว่าความเป็นจริง

(ศิริมาส,2541) ในชั้นดินเหนียวแข็งถึงแข็งมาก (Stiff to very Stiff Clay) ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดในห้องปฏิบัติการ (Unconfined Compressive Test: $S_{u(UC)}$) ให้ค่า S_u ที่เหมาะสมที่สุด และค่าทดสอบทะลุทะลวงแบบมาตรฐาน (N : SPT) ให้ค่า S_u ที่เหมาะสมรองลงมา แต่การเก็บตัวอย่างดินเหนียวแข็งที่อยู่ในระดับความลึก มีความยากลำบากในการเก็บตัวอย่างดินเพื่อนำมาทดสอบ

ความสัมพันธ์ระหว่าง N และค่า S_u ของชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรกที่น่ามาใช้ เสนอโดย วีรนนท์ (2531) มีรายละเอียด ดังนี้

สำหรับดินเหนียวที่มีพลาสติกสูง (CH)

$$S_u = 0.687N \text{ (t/m}^2\text{)}$$

สำหรับดินเหนียวที่มีพลาสติกต่ำถึงปานกลาง (CL)

$$S_u = 0.5175N \text{ (t/m}^2\text{)}$$

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน เพื่อใช้ประมาณค่าการเคลื่อนตัวใน Soil Model ชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลางใช้ค่า S_u จากการทดสอบ Field Vane Shear ส่วนค่า S_u ของชั้นดินเหนียวแข็งได้มาจากค่าทดสอบทะลุทะลวงแบบมาตรฐาน (N : SPT)

4.3 คุณสมบัติของกำแพงกันดินชนิดเข็มพืด, กำแพงเสาเข็มคอนกรีต และค้ำยัน

ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติของกำแพงกันดินชนิดเข็มพืด $E_{\text{steel}} = 2 \times 10^8 \text{ kPa}$

ชนิด	EA (kN/m)	EI (kN·m ² /m)	d_{eg} (m)	W (kN/m/m)
SP-III A	3.72×10^6	4.56×10^4	0.3835	1.43
SP-III	3.82×10^6	3.18×10^4	0.3306	1.47
SP-IV	4.85×10^6	7.72×10^4	0.4370	1.86

ตารางที่ 4.2 แสดงคุณสมบัติของกำแพงกันดินชนิดเสาเข็มคอนกรีต เมื่อ $E_{\text{concrete}} = 28 \times 10^6 \text{ kPa}$

ตัวผู้ (mm.)	ตัวเมีย (mm.)	ระยะห่าง c/c (mm.)*	EA (kN/m)	EI (kN·m ² /m)
450	450	600	7422013	93935
600	600	800	9896017	222660
750	750	1000	12370021	434884
900	600	1100	16193482	819795
1200	600	1400	22619467	2035752
1200	750	1450	21839485	1965554

ตารางที่ 4.3 แสดงคุณสมบัติของค้ำยัน $E_{\text{steel}} = 2 \times 10^8$ kPa

ขนาดของค้ำยัน	พื้นที่หน้าตัด (cm^2)	Moment of inertia (cm^4)	น้ำหนัก (kN/m)
W 300×300	119.8	20400	0.94
W 350×350	173.9	40300	1.37

4.3 โมดูลัสของดิน (Undrained Young's Modulus, E_u) ที่ใช้ในการประมาณค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินชนิดเข็มพืด

จากการวิเคราะห์ย้อนกลับ (Back Analysis) เพื่อหาคุณสมบัติของดินที่แท้จริงโดยการเปรียบเทียบกับค่าการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นจริงในสนาม (Inclinometer) ด้วย Finite Element Method โดยโปรแกรม PLAXIS Material Model แบบ Mohr-Columb ที่มี parameter ที่สำคัญในการวิเคราะห์อยู่ 5 ตัว ได้แก่ ค่าโมดูลัสของดิน (E_u), อัตราส่วนปัวซอง (ν), c , ϕ และ ψ ซึ่งค่าที่มีผลมากในการวิเคราะห์คือ ค่า E_u และ ν

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้มีการอ้างอิงการใช้ค่า E_u จากการเสนอค่า E_u/S_u ของ วันชัย(2539) ซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

ค่า E_u/S_u ที่ใช้กับการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของ Sheet Pile คือ

$$E_u/S_u = 150 \text{ for Soft Clay}$$

$$E_u/S_u = 250 \text{ for Medium Clay}$$

$$\text{And } E_u/S_u = 1000 \text{ for Stiff Clay}$$

แต่เนื่องจากการหาค่าคุณสมบัติที่แท้จริงของดินในสนาม จึงมีการปรับเปลี่ยนค่าโดยการ trial & error ค่า E_u เรื่อย ๆ จนเป็นค่าที่ให้ค่าการเคลื่อนตัวของ Sheet Pile ใกล้เคียงกับค่าการเคลื่อนตัวในสนามที่วัดได้จาก Inclinometer ซึ่งหลังจากการ trial & error จนได้ค่า E_u ที่คาดว่าเป็นคุณสมบัติที่แท้จริงของดินในสนาม ดังนี้

$$\text{Soft Clay : } E_u = 150 S_u$$

$$\text{Medium Clay : } E_u = 500 S_u$$

$$\text{Stiff Clay : } E_u = 1200 S_u$$

และคุณสมบัติอื่น ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ในโปรแกรม PLAXIS ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงคุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ในโปรแกรม PLAXIS

Type of Soil	Material Model	Material Type	Interfaces	γ (kN/m ²)	Su (kPa)	Eu (kPa)	ν
Top Soil	Mohr-Colomb	Undrained	0.7	18	40	20000	0.35
Soft Clay 1				16	12	1800	0.35
Soft Clay 2				16	15	2250	0.35
Soft Clay 3				16	16	2400	0.35
Medium Clay				17	37	18500	0.35
Stiff Clay				18	90	108000	0.35

4.4 ผลการวิเคราะห์

4.4.1 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออาคารข้างเคียง

ปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่ออาคารข้างเคียง สาเหตุหนึ่งเกิดการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด อีกสาเหตุหนึ่งเกิดจากกิจกรรมที่เกิดขึ้นในการก่อสร้าง โดย

ปัจจัยกลุ่มที่ 1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด แบ่งออกได้เป็น 2 จำพวก

จำพวกแรก ปัจจัยไม่สามารถควบคุมได้ เป็นปัจจัยพื้นฐานของคุณสมบัติดิน ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงหรือหลีกเลี่ยงได้ ได้แก่

1. คุณสมบัติของมวลดินและสภาพของชั้นดิน
2. ค่าความเค้นของดินที่เกิดการเปลี่ยนแปลง
3. การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดิน

จำพวกที่สอง เป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ไม่ว่าจะในขั้นตอนการออกแบบ หรือในขั้นตอนการก่อสร้าง ได้แก่

1. ความกว้าง, ความยาว และ ความลึกของบ่อขุด
2. ความอ่อนตัวของกำแพงกันดิน
3. วิธีที่ใช้ในการก่อสร้าง
4. ความแข็งแรงของระบบค้ำยัน
5. จำนวนระดับของค้ำยัน
6. การปรับปรุงคุณสมบัติของดิน
7. ระยะห่างของอาคารข้างเคียงจากตำแหน่งของ Sheet Pile

8.น้ำหนักของอาคารข้างเคียง

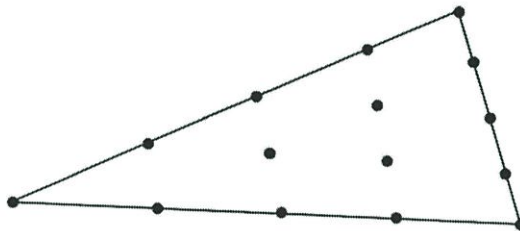
9.ความยาวเสาเข็มของอาคารข้างเคียง

ปัจจัยกลุ่มที่ 2 กิจกรรมที่เกิดขึ้นในการก่อสร้าง สิ่งที่ได้จากกิจกรรมต่าง ๆ ในการก่อสร้างและส่งผลให้อาคารข้างเคียงเกิดความเสียหายได้แก่ แรงสั่นสะเทือน ซึ่งแรงสั่นสะเทือนสามารถเกิดขึ้นได้จากหลากหลายกิจกรรม เช่น แรงสั่นสะเทือนจากการกดและดึง Casing ในการทำ Pile Wall และเสาเข็มเจาะ , แรงสั่นสะเทือนจากการทดสอบเข็มด้วยวิธี Dynamic Pile Load Test , แรงสั่นสะเทือนจากการปักและถอน Sheet Pile , แรงสั่นสะเทือนจากรถที่วิ่งอยู่บน Service Platform , แรงสั่นสะเทือนจากการใช้ Concrete Pumping เป็นต้น

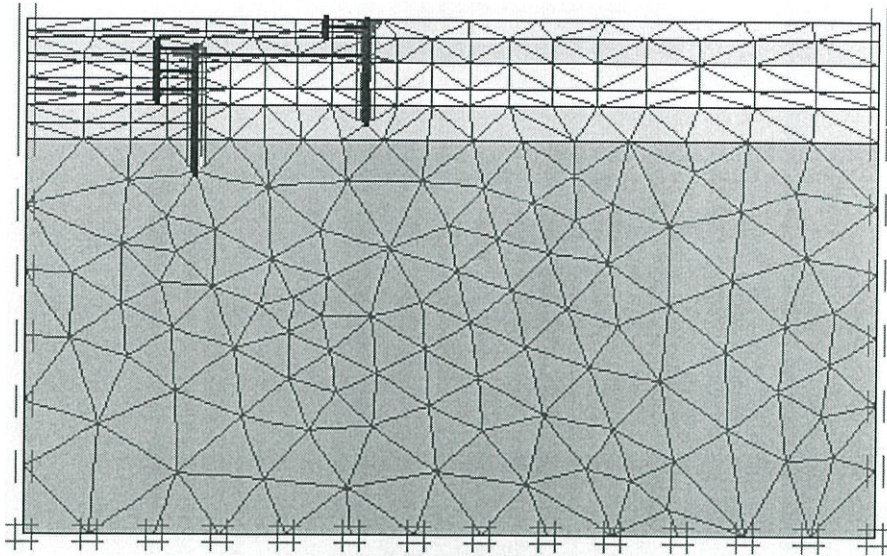
จากปัจจัยข้างต้นสิ่งที่น่าสนใจคือ ความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะห่างจากตำแหน่งซีทไพล์ (Sheet Pile) ถึงอาคารข้างเคียง (Spacing) น้ำหนักของอาคารข้างเคียง (Distributed Load) ความยาวของเสาเข็มสั้นของอาคารข้างเคียง (Pile's Depth) ซึ่งเป็นปัจจัยที่ยังไม่ได้ถูกนำไปวิเคราะห์ในขั้นตอนการออกแบบ

4.4.2 การประมาณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของ Sheet pile จากค่าจริงในสนาม เปรียบเทียบกับการใช้โปรแกรม PLAXIS

การคาดคะเนการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของ Sheet pile จากการวัดจริงในสนามเปรียบเทียบกับการใช้โปรแกรม PLAXIS ของโครงการ VTARA Sukhumvit36 โดยจำลองโมเดลการขุดดินตามขั้นตอนการก่อสร้างจริงในหน้างาน ใช้ Element 15 Node ดังแสดงในภาพที่ 4.1 และ ภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.1 แสดง Node จำนวน 15 Node ในแต่ละ Element

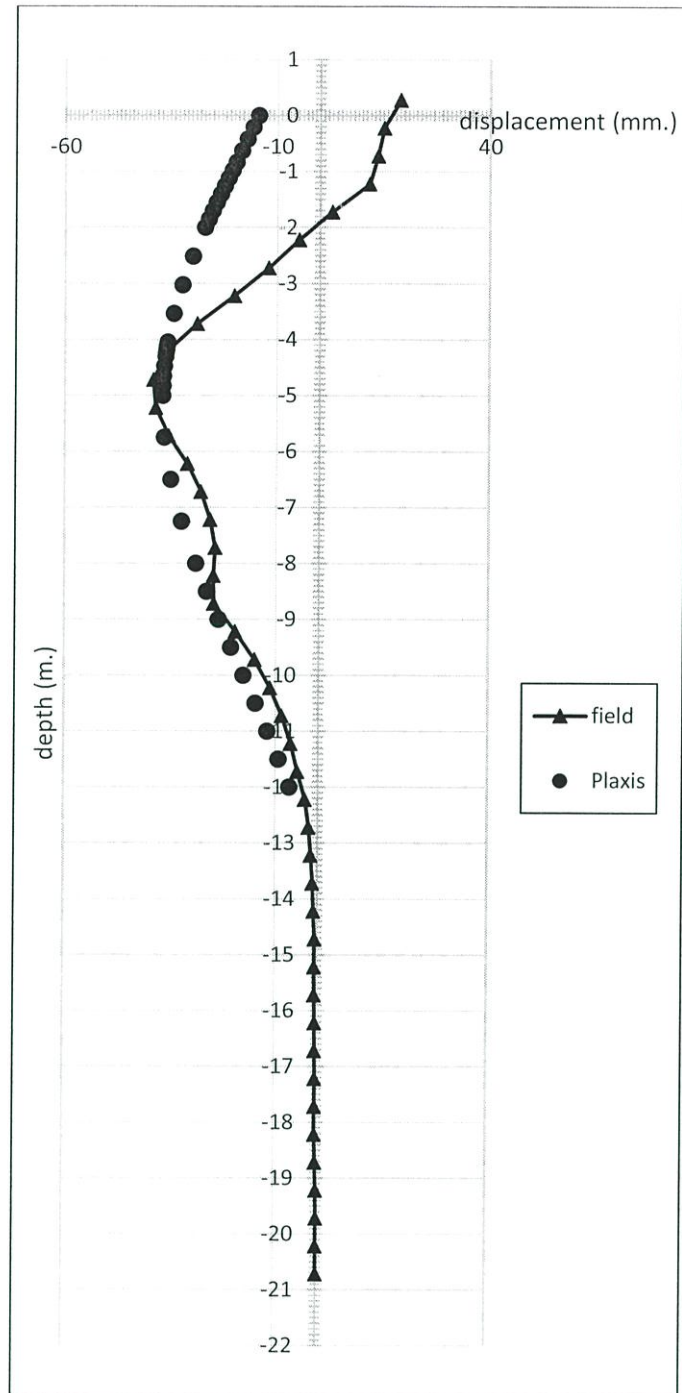


ภาพที่ 4.2 แสดงElementในโปรแกรมPLAXIS ของโครงการVTARA Sukhumvit36

โดยที่ || คือ Roller

⊥ คือ Fixed

จากการวิเคราะห์ย้อนกลับ (Back Analysis) เพื่อเปรียบเทียบ (Validate) ค่าการเคลื่อนตัวของ Sheet Pile จากการวัดด้วย Inclinator กับการประมาณค่าการเคลื่อนตัวด้วยวิธี Finite Element ด้วยโปรแกรม PLAXIS จะสังเกตเห็นว่าในช่วงบนของ Sheet Pile (ระดับความลึก 0 – 4 เมตร) การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวจากโปรแกรม PLAXIS มีค่าการเคลื่อนตัวที่มากกว่าการเคลื่อนตัวในสนาม เนื่องจากข้อสันนิษฐานที่ว่า ดินในส่วน Top Soil น่าจะเป็นดินที่มี OCR สูง โดยการสังเกตจากอาคารข้างเคียงรอบ ๆ โครงการ และ อดีตก่อนการสร้างโครงการ รวมถึงข้อจำกัดของโปรแกรม ที่ไม่สามารถแสดงผลการเคลื่อนตัวไปทางด้าน Passive ได้ แต่ตั้งแต่ระดับความลึก 4 เมตรจนถึงที่ระดับปลาย Sheet Pile ค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากโปรแกรม PLAXIS และค่าการเคลื่อนตัวของ Sheet Pile จาก Inclinator มีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวทางด้านข้างระหว่างงานชุดจริงกับการประมาณโดยใช้โปรแกรม Plaxis ของโครงการ VTARA สุขุมวิท36 (โดยใช้ E_u Soft Clay = $150S_u$, E_u Medium Clay = $500S_u$, E_u Stiff Clay = $1200S_u$)

4.4.3 การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะห่างจากตำแหน่งซีทไพล์ (Sheet Pile) ถึงอาคารข้างเคียง (Spacing) น้ำหนักของอาคารข้างเคียง (Distributed Load) ความยาวของเสาเข็มสั้นของอาคารข้างเคียง (Pile's Depth)

คณะวิจัยได้นำค่า Parameter ที่ได้จากการวิเคราะห์ย้อนกลับ (Back Analysis) ไปทำการวิเคราะห์หา ระยะห่างจากตำแหน่งซีทไพล์ (Sheet Pile) ถึงอาคารข้างเคียง (Spacing) น้ำหนักของอาคารข้างเคียง (Distributed Load) และความยาวของเสาเข็มสั้นของอาคารข้างเคียง (Pile's Depth) ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของระบบป้องกันดิน แสดงดังตารางที่ 4.6 และ ภาพที่ 4.4 ถึง 4.8

ค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์

จากการวิเคราะห์หาปัจจัยที่จะส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดที่นอกเหนือจากการออกแบบเบื้องต้นพบว่า ยังคงปัจจัยอีก 3 ตัว ที่สามารถใส่เข้าไปวิเคราะห์ในขั้นตอนการออกแบบได้ คือ ค่าระยะห่างจากซีทไพล์ (sheet Pile) ถึงอาคารข้างเคียง (Spacing), ค่าน้ำหนักของอาคารข้างเคียง (Distributed Load) และความยาวของเสาเข็มสั้นของอาคารข้างเคียง (Pile's Depth) ซึ่งในการวิเคราะห์ได้เลือกใช้ค่าต่าง ๆ ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์

Spacing (m.)	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	
Distributed Load (kN/m ²)	10	15	20	25	30			
Pile's Depth (m.)	0	2	4	6	8	10	12	15

การเลือกใช้ค่าดังกล่าว

ค่า “Spacing” เนื่องจากอาคารที่ถูกสร้างใหม่ ได้ก่อสร้างใกล้กับตึกแถว จึงใช้ค่าระยะห่างจากกฎกระทรวง ฉบับที่ 55 (พ.ศ.2543) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ.2522 หมวด 4 แนวอาคารและระยะต่าง ๆ ของอาคาร ข้อ 49 ที่ได้บัญญัติไว้ดังนี้

“ข้อ 49 การก่อสร้างอาคารในบริเวณด้านข้างของห้องแถวหรือตึกแถว

- (1) ถ้าห้องแถวหรือตึกแถวนั้นมีจำนวนรวมกันได้ตั้งแต่สิบคูหา หรือมีความยาวรวมกันได้ตั้งแต่ 40 เมตรขึ้นไป และอาคารที่สร้างขึ้นเป็นห้องแถวหรือตึกแถว ห้องแถวหรือตึกแถวที่สร้างขึ้นต้องห่างจากผนังด้านข้างของห้องแถว หรือตึกแถวเดิมไม่น้อยกว่า 4 เมตร แต่ถ้าเป็นอาคารอื่นต้องห่างจากผนังด้านข้างของห้องแถว หรือตึกแถวเดิมไม่น้อยกว่า 2 เมตร

- (2) ถ้าห้องแถว หรือตึกแถวนั้นมีจำนวนไม่ถึงสิบคูหาและมีความยาวรวมกันไม่ถึง 40 เมตร อาคารที่สร้างขึ้นจะต้องห่างจากผนังด้านข้างของห้องแถว หรือตึกแถวไม่น้อยกว่า 2 เมตร”

แต่หลายครั้งที่ระยะห่างที่ใช้ในการก่อสร้างจริงไม่เป็นไปตามกฎกระทรวง คณะผู้วิจัยจึงเลือกใช้ ระยะห่าง ตั้งแต่ 2 เมตรขึ้นไป จนถึงระยะห่าง 5 เมตร

ค่า “Distributed Load” ได้เลือกใช้ Load ตั้งแต่ 10 kN/m^2 แสดงน้ำหนักของอาคารตั้งแต่ 1 ชั้นขึ้นไปจนถึง 2 ชั้น เนื่องจากอาคารที่สูงเกิน 3 ชั้น จะมีเสาเข็มที่ยาวไปถึงชั้นดินแข็ง เพราะฉะนั้นการเคลื่อนตัวของ Sheet Pile จะไม่ส่งผลกระทบต่ออาคารข้างเคียง

ค่า “Pile’s Depth” ในการจำลองการถ่ายแรงของ Load ไปตามเสาเข็มสั้นนั้น จะใช้วิธีการนำ Load ทั้งหมด ไปใส่ไว้ในระดับปลายเสาเข็ม โดยไม่คำนึงถึงแรง Friction รอบ ๆ เสาเข็ม โดยวิธีนี้จะเป็นการเพิ่ม Factor of Safety ให้มากด้วย

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการประมาณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างและ Factor of Safety ด้วยโปรแกรม PLAXIS

Load (kN/m ²)	Spacing (m.)	Depth of Pile	Factor of Safety	Load (kN/m ²)	Spacing (m.)	Depth of Pile	Factor of Safety
0	2	0	1.534	0	4	0	1.534
		2	1.534			2	1.534
		4	1.534			4	1.534
		6	1.534			6	1.534
		8	1.534			8	1.534
		10	1.534			10	1.534
		12	1.534			12	1.534
		15	1.534			15	1.534
0	2.5	0	1.534	0	4.5	0	1.534
		2	1.534			2	1.534
		4	1.534			4	1.534
		6	1.534			6	1.534
		8	1.534			8	1.534
		10	1.534			10	1.534
		12	1.534			12	1.534
		15	1.534			15	1.534
0	3	0	1.534	0	5	0	1.534
		2	1.534			2	1.534
		4	1.534			4	1.534
		6	1.534			6	1.534
		8	1.534			8	1.534
		10	1.534			10	1.534
		12	1.534			12	1.534
		15	1.534			15	1.534
0	3.5	0	1.534				
		2	1.534				
		4	1.534				
		6	1.534				
		8	1.534				
		10	1.534				
		12	1.534				
		15	1.534				

ตารางที่ 4.6 (ต่อ) แสดงผลการประมาณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างและ Factor of Safety ด้วยโปรแกรม PLAXIS

Load (kN/m ²)	Spacing (m.)	Depth of Pile	Factor of Safety	Load (kN/m ²)	Spacing (m.)	Depth of Pile	Factor of Safety
10	2	0	1.341	10	4	0	1.413
		2	1.346			2	1.421
		4	1.358			4	1.43
		6	1.392			6	1.467
		8	1.45			8	1.506
		10	1.521			10	1.556
		12	1.488			12	1.538
		15	1.534			15	1.533
10	2.5	0	1.355	10	4.5	0	1.433
		2	1.358			2	1.432
		4	1.374			4	1.447
		6	1.409			6	1.482
		8	1.47			8	1.517
		10	1.529			10	1.549
		12	1.5			12	1.533
		15	1.534			15	1.535
10	3	0	1.382	10	5	0	1.444
		2	1.382			2	1.448
		4	1.398			4	1.462
		6	1.432			6	1.495
		8	1.484			8	1.529
		10	1.531			10	1.562
		12	1.511			12	-
		15	1.534			15	1.535
10	3.5	0	1.394				
		2	1.4				
		4	1.411				
		6	1.45				
		8	1.487				
		10	1.534				
		12	1.523				
		15	1.534				

ตารางที่ 4.6 (ต่อ) แสดงผลการประมาณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างและ Factor of Safety ด้วยโปรแกรม PLAXIS

Load (kN/m ²)	Spacing (m.)	Depth of Pile	Factor of Safety	Load (kN/m ²)	Spacing (m.)	Depth of Pile	Factor of Safety
15	2	0	1.253	15	4	0	1.345
		2	1.258			2	1.348
		4	1.274			4	1.367
		6	1.319			6	1.419
		8	1.393			8	1.49
		10	1.503			10	1.55
		12	1.488			12	1.538
		15	1.533			15	1.534
15	2.5	0	1.277	15	4.5	0	1.371
		2	1.282			2	1.373
		4	1.298			4	1.388
		6	1.338			6	1.443
		8	1.427			8	1.504
		10	1.521			10	1.544
		12	1.501			12	1.533
		15	1.534			15	1.535
15	3	0	1.304	15	5	0	1.39
		2	1.3			2	1.389
		4	1.323			4	1.411
		6	1.378			6	1.467
		8	1.452			8	1.516
		10	1.528			10	1.559
		12	1.511			12	-
		15	1.533			15	1.533
15	3.5	0	1.323				
		2	1.323				
		4	1.345				
		6	1.398				
		8	1.474				
		10	1.533				
		12	1.525				
		15	1.533				

ตารางที่ 4.6 (ต่อ) แสดงผลการประมาณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างและ Factor of Safety ด้วยโปรแกรม PLAXIS

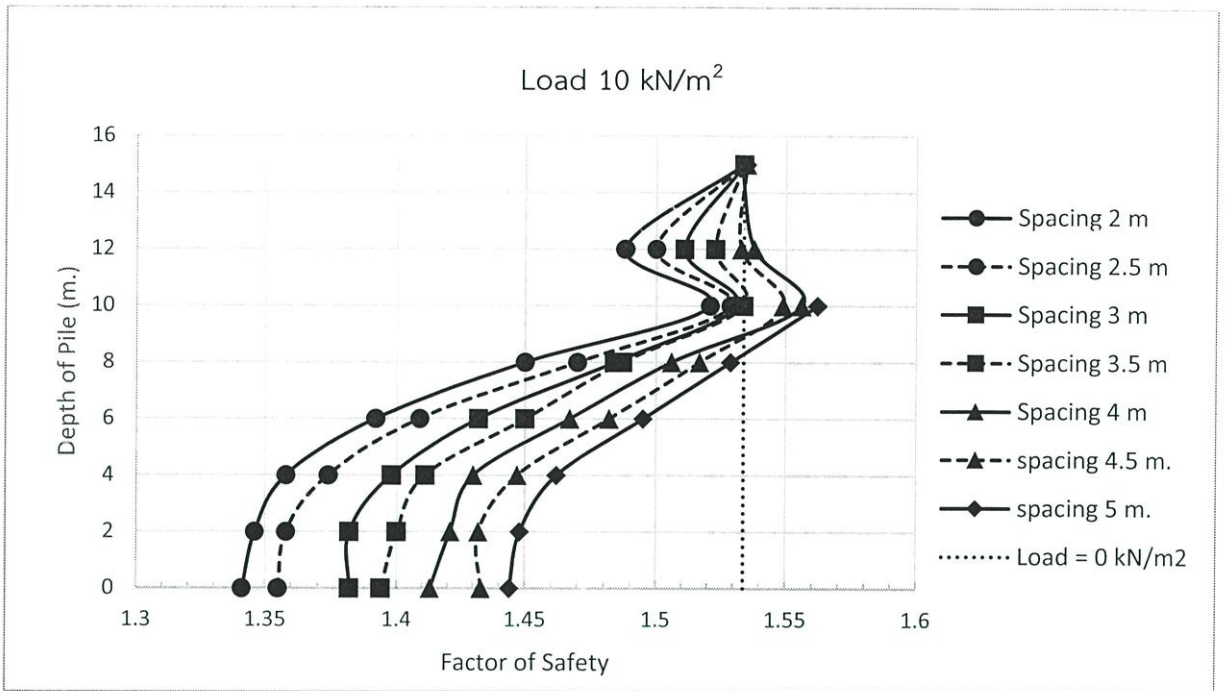
Load (kN/m ²)	Spacing (m.)	Depth of Pile	Factor of Safety	Load (kN/m ²)	Spacing (m.)	Depth of Pile	Factor of Safety
20	2	0	1.181	20	4	0	1.28
		2	1.179			2	1.268
		4	1.203			4	1.307
		6	1.249			6	1.367
		8	1.343			8	1.465
		10	1.491			10	1.546
		12	1.487			12	1.539
		15	1.534			15	1.534
20	2.5	0	1.204	20	4.5	0	1.309
		2	1.206			2	1.306
		4	1.228			4	1.331
		6	1.277			6	1.399
		8	1.382			8	1.485
		10	1.509			10	1.547
		12	1.502			12	1.533
		15	1.533			15	1.534
20	3	0	1.235	20	5	0	1.325
		2	1.228			2	1.333
		4	1.258			4	1.359
		6	1.311			6	1.426
		8	1.412			8	1.502
		10	1.522			10	1.553
		12	1.513			12	-
		15	1.533			15	1.532
20	3.5	0	1.253				
		2	1.257				
		4	1.281				
		6	1.342				
		8	1.441				
		10	1.528				
		12	1.525				
		15	1.533				

ตารางที่ 4.6 (ต่อ) แสดงผลการประมาณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างและ Factor of Safety ด้วยโปรแกรม PLAXIS

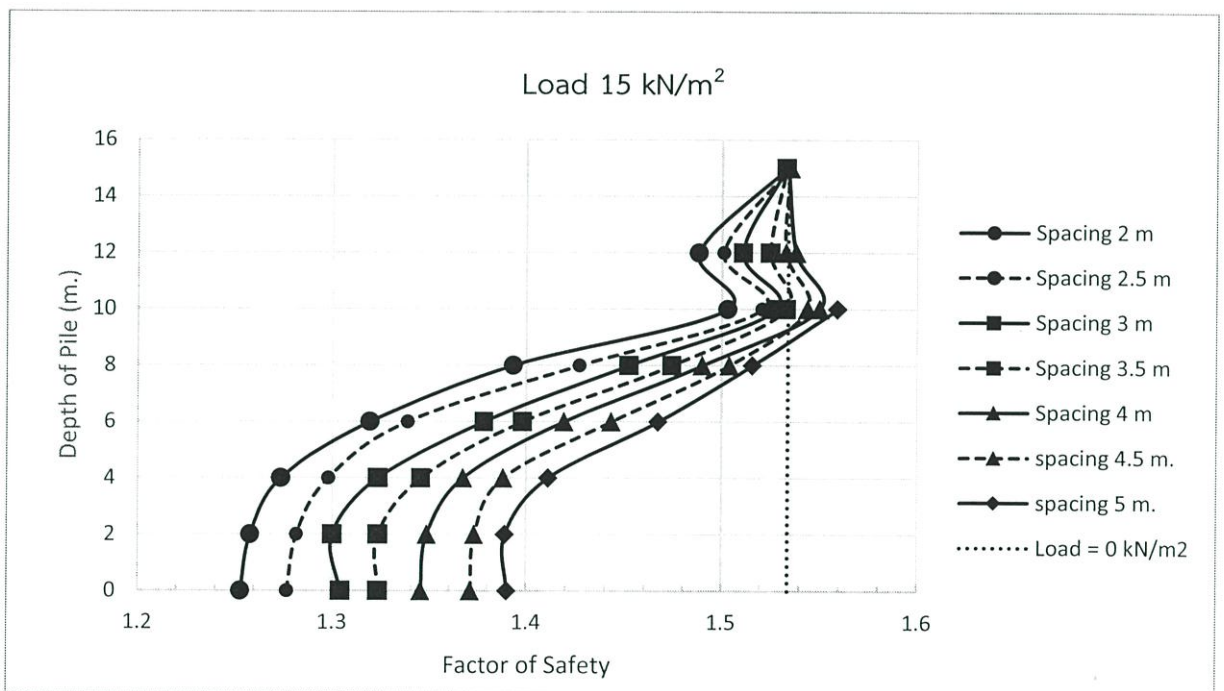
Load (kN/m ²)	Spacing (m.)	Depth of Pile	Factor of Safety	Load (kN/m ²)	Spacing (m.)	Depth of Pile	Factor of Safety
25	2	0	1.118	25	4	0	1.215
		2	1.112			2	1.218
		4	1.134			4	1.251
		6	1.19			6	1.327
		8	1.303			8	1.432
		10	1.471			10	1.543
		12	1.487			12	1.539
		15	1.534			15	1.533
25	2.5	0	1.141	25	4.5	0	1.247
		2	1.139			2	1.238
		4	1.161			4	1.274
		6	1.229			6	1.359
		8	1.336			8	1.454
		10	1.496			10	1.542
		12	1.5			12	1.533
		15	1.533			15	1.533
25	3	0	1.171	25	5	0	1.274
		2	1.162			2	1.269
		4	1.192			4	1.305
		6	1.264			6	1.378
		8	1.362			8	1.476
		10	1.52			10	1.555
		12	1.511			12	-
		15	1.533			15	1.534
25	3.5	0	1.194				
		2	1.183				
		4	1.217				
		6	1.295				
		8	1.403				
		10	1.526				
		12	1.525				
		15	1.534				

ตารางที่ 4.6 (ต่อ) แสดงผลการประมาณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างและ Factor of Safety ด้วยโปรแกรม PLAXIS

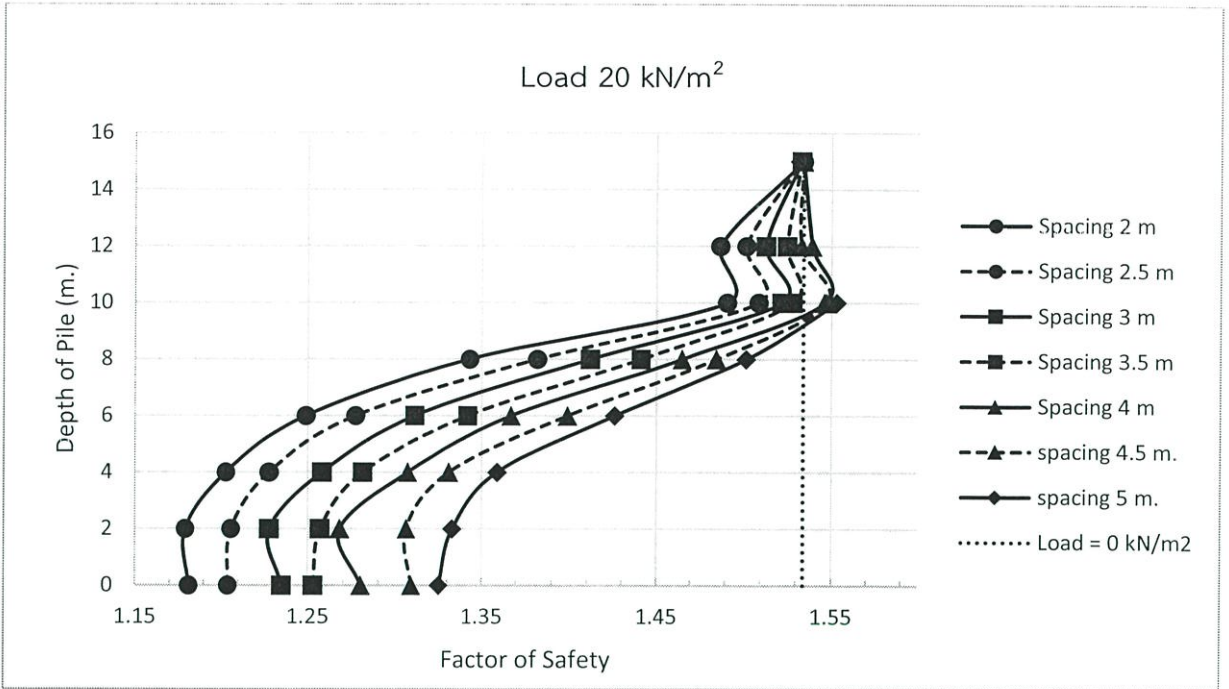
Load (kN/m ²)	Spacing (m.)	Depth of Pile	Factor of Safety	Load (kN/m ²)	Spacing (m.)	Depth of Pile	Factor of Safety
30	2	0	1.064	30	4	0	1.164
		2	1.049			2	1.165
		4	1.073			4	1.192
		6	1.132			6	1.271
		8	1.253			8	1.395
		10	1.452			10	1.542
		12	1.488			12	1.54
		15	1.532			15	1.534
30	2.5	0	1.084	30	4.5	0	1.192
		2	1.079			2	1.194
		4	1.103			4	1.224
		6	1.171			6	1.306
		8	1.295			8	1.424
		10	1.48			10	1.547
		12	1.5			12	1.533
		15	1.533			15	1.533
30	3	0	1.108	30	5	0	1.208
		2	1.11			2	1.213
		4	1.142			4	1.247
		6	1.203			6	1.333
		8	1.332			8	1.447
		10	1.496			10	1.561
		12	1.512			12	-
		15	1.532			15	1.534
30	3.5	0	1.14				
		2	1.137				
		4	1.168				
		6	1.239				
		8	1.37				
		10	1.515				
		12	1.525				
		15	1.533				



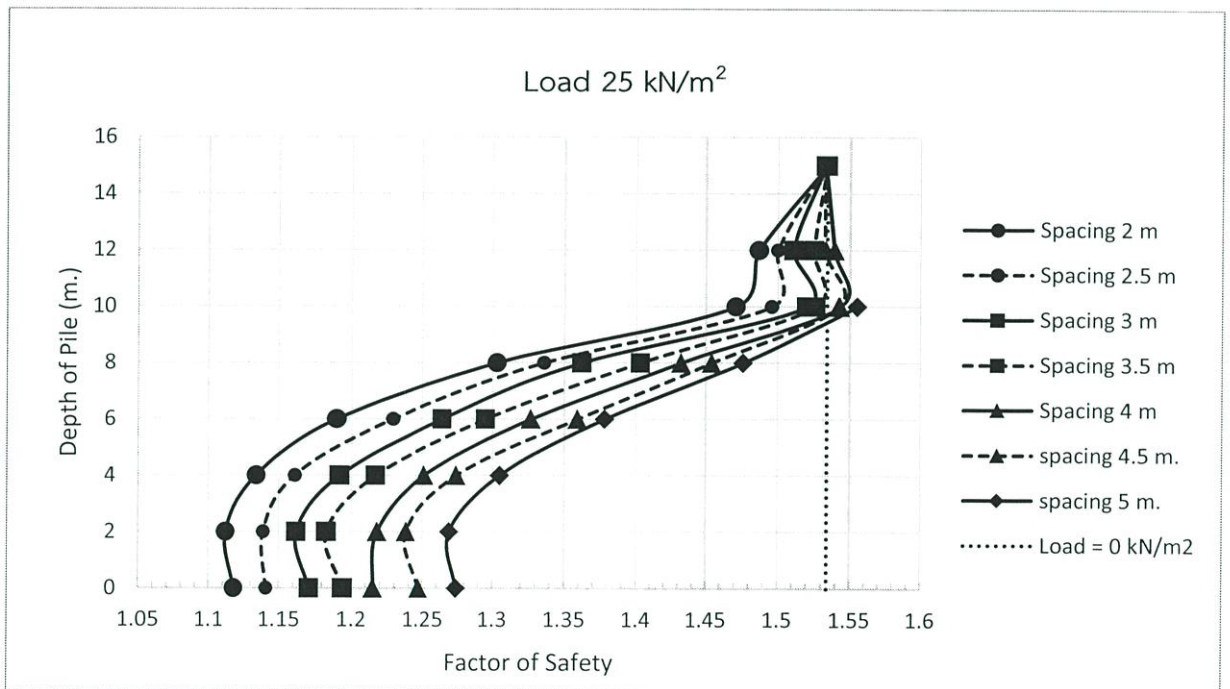
ภาพที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Pile's Depth, Spacing และ Factor of Safety ที่ Load 10 kN/m²



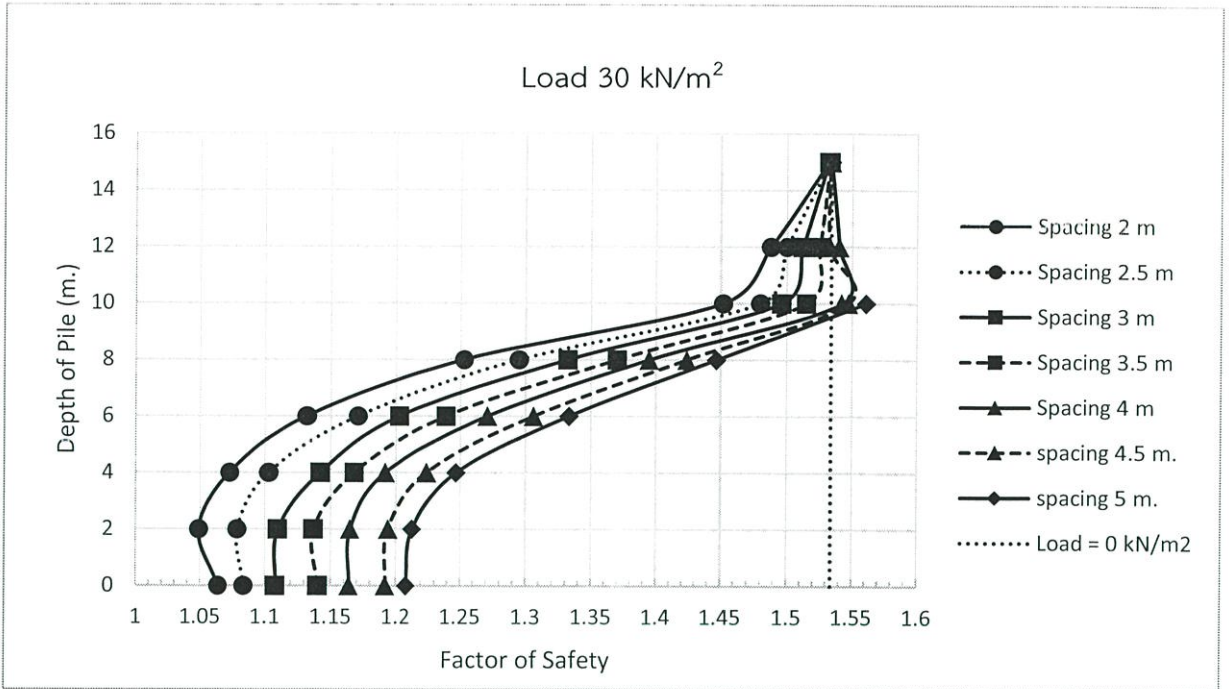
ภาพที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Pile's Depth, Spacing และ Factor of Safety ที่ Load 15 kN/m²



ภาพที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Pile's Depth, Spacing และ Factor of Safety ที่ Load 20 kN/m²



ภาพที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Pile's Depth, Spacing และ Factor of Safety ที่ Load 25 kN/m²



ภาพที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Pile's Depth , Spacing และ Factor of Safety ที่ Load 30 kN/m²

จากผลที่ได้ดังตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.4 ถึงภาพที่ 4.8 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะห่างจากตำแหน่งซีทไพล์ (Sheet Pile) ถึงอาคารข้างเคียง (Spacing) น้ำหนักของอาคารข้างเคียง (Distributed Load) ความยาวของเสาเข็มสั้นของอาคารข้างเคียง (Pile's Depth) มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน จะสังเกตเห็นได้ว่า ค่าความปลอดภัย (Factor of Safety) มากขึ้น ในกรณีที่ อาคารข้างเคียงมีน้ำหนักน้อย, เสาเข็มของอาคารข้างเคียงยาว, และระยะห่างจากตำแหน่งซีทไพล์ (Sheet Pile) ถึงอาคารข้างเคียงเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4.4 ถึงภาพที่ 4.8 ในกรณีที่ค่า Factor of Safety ของความสัมพันธ์ลดลง ที่ความยาวของเสาเข็มสั้นของอาคารข้างเคียง (Pile's Depth) 12 เมตร เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ปลายเสาเข็ม และปลายซีทไพล์อยู่ระดับเดียวกัน ส่วนในกรณีที่ค่า Factor of Safety ของระยะห่างจากตำแหน่งซีทไพล์ (Sheet Pile) ถึงอาคารข้างเคียง (Spacing) 4, 4.5 และ 5 เมตร ที่ความยาวของเสาเข็มสั้นของอาคารข้างเคียง (Pile's Depth) 10 เมตร มีค่ามากกว่าค่า Factor of Safety ในสถานะไม่มีแรงกระทำ เนื่องจากที่ระดับความลึก 10 เมตร เป็นรอยต่อระหว่างชั้นดินเหนียวอ่อน และดินเหนียวแข็งปานกลาง เมื่อมีแรงกระทำ แรงที่กระทำจะทำการถ่ายแรงสู่ชั้นดินที่แข็งกว่าประกอบกับมีระยะห่างที่เพียงพอ จึงทำให้มีค่า Factor of Safety สูงขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิเคราะห์

5.1.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่ออาคารข้างเคียง เกิดจากปัจจัยที่ทำให้กำแพงเข็มเกิดการเคลื่อนตัว และกิจกรรมที่ทำให้เกิดแรงสั่นสะเทือนในขั้นตอนการก่อสร้าง

5.1.2 จากการประเมินการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงเข็มที่เกิดจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี 2D Finite Element Method โดยโปรแกรม PLAXIS พบว่าในช่วงบนของ Sheet Pile (ระดับความลึก 0 – 4 เมตร) การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวจากโปรแกรม PLAXIS มีค่าการเคลื่อนตัวที่มากกว่าการเคลื่อนตัวในสนาม เนื่องจากข้อสันนิษฐานที่ว่า ดินในส่วน Top Soil น่าจะเป็นดินที่มี OCR สูง โดยการสังเกตจากอาคารข้างเคียงรอบ ๆ โครงการ และ อดีตก่อนการสร้างโครงการ รวมถึงข้อจำกัดของโปรแกรม ที่ไม่สามารถแสดงผลการเคลื่อนตัวไปทางด้าน Passive ได้ แต่ตั้งแต่มุมความลึก 4 เมตรจนถึงที่ระดับปลาย Sheet Pile ค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากโปรแกรม PLAXIS และค่าการเคลื่อนตัวของ Sheet Pile จาก Inclinometer มีค่าใกล้เคียงกัน

5.1.3 การเปรียบเทียบ (Validate) จากการวิเคราะห์ย้อนกลับ (Back Analysis) ด้วยวิธี 2D Finite Element Method โดยโปรแกรม PLAXIS ทำให้ได้ค่าคุณสมบัติของดินที่แท้จริงในสนามของโครงการ VTARA Sukhumvit 36 ดังนี้

ตารางที่ 5.1 แสดงคุณสมบัติของดิน

Type of Soil	γ (kN/m ³)	Su (kPa)	Eu (kPa)	ν
Top Soil	18	40	20000	0.35
Soft Clay 1	16	12	1800	0.35
Soft Clay 2	16	15	2250	0.35
Soft Clay 3	16	16	2400	0.35
Medium Clay	17	37	18500	0.35
Stiff Clay	18	90	108000	0.35

5.1.4 จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะห่างจากตำแหน่งซีทไพล์ (Sheet Pile) ถึงอาคารข้างเคียง (Spacing) น้ำหนักของอาคารข้างเคียง (Distributed Load) ความยาวของเสาเข็ม สิ้นของอาคารข้างเคียง (Pile's Depth) พบว่าอาคารข้างเคียงมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน ค่าความปลอดภัย (Factor of Safety) มากขึ้น ในกรณีที่ อาคารข้างเคียงมีน้ำหนักน้อย, เสาเข็มของอาคารข้างเคียงยาว, และระยะห่างจากตำแหน่งซีทไพล์ (Sheet Pile) ถึงอาคารข้างเคียงเพิ่มขึ้น และหาก ระยะห่างจากตำแหน่งซีทไพล์ (Sheet Pile) ถึงอาคารข้างเคียง (Spacing) มีค่าตั้งแต่ 4.00 เมตรขึ้นไปและ

มีความยาวของเสาเข็มของอาคารข้างเคียง (Pile's Depth) 6 เมตรขึ้นไป ไม่ต้องพิจารณาน้ำหนักของอาคาร ในกรณีนี้ คือ 10-30 kN/m²

5.1.5 ที่ Load 10 kN/m² ควรมีระยะ Spacing ตั้งแต่ 2.00 เมตร ขึ้นไป ในทุกความยาวเสาเข็ม

ที่ Load 15 kN/m² ควรมีระยะ Spacing 2.00 เมตร ในกรณีเสาเข็มยาว ตั้งแต่ 6.00 เมตร ขึ้นไป, Spacing 2.50 เมตร ในกรณีเสาเข็มยาว ตั้งแต่ 4.00 เมตร ขึ้นไป และ Spacing ตั้งแต่ 3.00 เมตร ขึ้นไป ในทุกความยาวของเสาเข็ม

ที่ Load 20 kN/m² ควรมีระยะ Spacing 2.00 เมตร ในกรณีเสาเข็มยาว ตั้งแต่ 7.00 เมตร ขึ้นไป, Spacing 2.50 เมตร ในกรณีเสาเข็มยาว ตั้งแต่ 6.00 เมตร ขึ้นไป, Spacing 3.50 เมตร ในกรณีเสาเข็มยาว ตั้งแต่ 5.00 เมตร ขึ้นไป และ Spacing 4.000 เมตร ในกรณีเสาเข็มยาว ตั้งแต่ 4.00 เมตร ขึ้นไป

ที่ Load 25 kN/m² ควรมีระยะ Spacing 2.00 เมตร ในกรณีเสาเข็มยาว ตั้งแต่ 8.00 เมตร ขึ้นไป, Spacing 2.50 เมตร ในกรณีเสาเข็มยาว ตั้งแต่ 7.00 เมตร ขึ้นไป, Spacing 3.00 เมตร ในกรณีเสาเข็มยาว ตั้งแต่ 6.00 เมตร ขึ้นไป และ Spacing 4.000 เมตร ในกรณีเสาเข็มยาว ตั้งแต่ 5.00 เมตร ขึ้นไป

ที่ Load 30 kN/m² ควรมีระยะ Spacing 2.00 เมตร ในกรณีเสาเข็มยาว ตั้งแต่ 8.00 เมตร ขึ้นไป, Spacing 3.00 เมตร ในกรณีเสาเข็มยาว ตั้งแต่ 7.00 เมตร ขึ้นไป, และ Spacing 4.000 เมตร ในกรณีเสาเข็มยาว ตั้งแต่ 6.00 เมตร ขึ้นไป

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการควบคุมงานก่อสร้าง

5.2.1 Inclinator

- ตำแหน่งในการติดตั้ง : ควรทำการติดตั้งอย่างน้อย 1 ตัว ต่อ 1 ด้าน รอบโครงการ
- การติดตั้ง : ในการติดตั้งท่อวัดการเคลื่อนตัว ควรที่จะปักท่อลึกลงไปมากกว่าปลายของ Sheet Pile ระยะหนึ่งเพื่อที่จะสามารถวัดการเคลื่อนตัวที่แท้จริงของปลาย Sheet Pile ได้
- กาวัดผลการเคลื่อนตัว : ควรวัดทุกครั้งหลังจากทำกิจกรรมต่าง ๆ เช่น ขุดดินชั้นที่1 ,ใส่ค้ำยันชั้นที่1, Pre-Loading ครั้งที่1 เป็นต้น เพื่อให้ง่ายกับการวิเคราะห์ สามารถประเมินค่าการเคลื่อนตัวได้ จากค่าการเคลื่อนตัวที่ได้ในขั้นตอนการออกแบบ และสามารถประเมินระดับความระมัดระวังหน้างานได้ ดังนี้

(วันชัย,2545) ได้มีการกำหนดระดับความระมัดระวังออกเป็น 3 ระดับ คือ

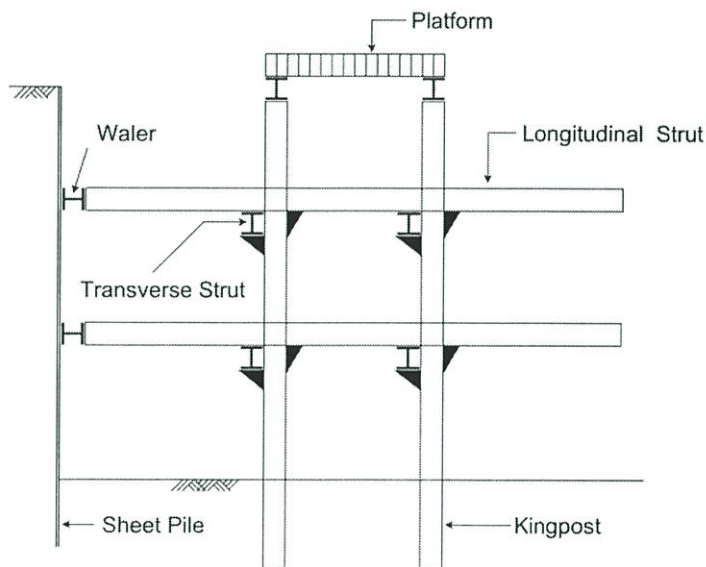
1.Alert Level คือระดับความระมัดระวังเมื่อค่าที่วัดได้จริงมีค่ามากกว่า 70 % ของค่าที่วิเคราะห์ได้ทางทฤษฎี ในระดับนี้ผู้เกี่ยวข้องทุกฝ่ายต้องทำการตรวจสอบขั้นตอนการก่อสร้าง

2.Alarm Level คือระดับความระมัดระวังเมื่อค่าที่วัดได้จริงมีค่ามากกว่า 80 % ของค่าที่วิเคราะห์ได้ทางทฤษฎี ในระดับนี้ผู้เกี่ยวข้องต้องปรึกษาผู้ออกแบบเพื่อความมั่นใจว่าระบบการก่อสร้างมีความปลอดภัยและไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างข้างเคียง

3.Action Level คือระดับความระมัดระวังเมื่อค่าที่วัดได้จริงมีค่ามากกว่า 90 % ของค่าที่วิเคราะห์ได้ทางทฤษฎี ในระดับนี้ต้องหยุดการก่อสร้างเพื่อตรวจสอบความปลอดภัยและผลกระทบต่อพื้นที่ข้างเคียงอย่างละเอียด

5.2.2 การออกแบบระบบค้ำยัน โดยวิธี 2D Finite Element Method ด้วยโปรแกรม PLAXIS ควรมีการคำนึงถึงผลกระทบจาก Boundary ด้วย และก่อนการออกแบบควรตรวจสอบสถานที่จริงเพื่อดูลักษณะหน้างานและอาคารข้างเคียงโดยรอบ เพื่อนำไปวิเคราะห์ในขั้นตอนการออกแบบ เช่น ระยะห่างของอาคารข้างเคียง น้ำหนักของอาคารข้างเคียง รวมถึงความยาวเสาเข็มของอาคารข้างเคียง ซึ่งจะทำให้ลดผลกระทบต่ออาคารข้างเคียงได้

5.2.3 การแยก Platform ออกจากระบบค้ำยัน เพื่อเป็นการลดแรงสั่นสะเทือนที่จะไม่ถ่ายแรงสู่ยันค้ำจนส่งผลกระทบต่ออาคารข้างเคียง ดังแสดงในภาพที่ 5.1



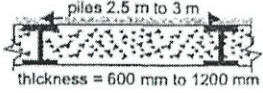
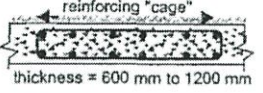
ภาพที่ 5.1 แสดงการแยก Platform ออกจากระบบค้ำยัน (วินชัย เทพรัักษ์, เอกสารประกอบการสอน เรื่องการออกแบบและการใช้งาน Steel Sheet Piles ในงานชุดดินเหนียวอ่อน, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552)

5.2.4 ควรเลือกใช้ชนิดกำแพงป้องกันดินพังที่เหมาะสม

(พัลลภ,2559) ได้เสนอชนิดของกำแพงในงานขุดดินลึก ไว้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5.2 แสดงชนิดกำแพงในงานขุดดินลึก

ระบบ	ความลึก	ข้อดี	ข้อเสีย
 <p>25 mm to 50 mm แผ่นไม้</p>	1.5 ถึง 5 เมตร	ประหยัด, ติดตั้งง่าย, เครื่องมือไม่ซับซ้อน, แรงงานทักษะต่ำ	ไม่ต่อเนื่อง, กำลังต่ำ, การใช้งานขึ้นกับสภาพดิน, ความลึกจำกัด
 <p>20 mm to 310 mm เข็มพืดเหล็ก</p>	5 ถึง 21 เมตร	ต่อเนื่อง, กำลังสูง, หาได้ทั่วไป, ใช้กับดินอ่อนได้	การใช้งานขึ้นกับสภาพดิน, อาจตอกไม่ลง
 <p>75 mm to 150 mm แผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จรูป</p>	3 ถึง 10 เมตร	ทนทาน, ประหยัด, ช่วยลดการไหลซึมของน้ำ	หาไม่ค่อยได้, อาจเสียหายระหว่างติดตั้ง, อาจตอกไม่ลง
 <p>piles 2.5 m to 3 m pre-drilled hole เสาเข็มกันดิน + แผ่นไม้</p>	5 ถึง 25 เมตร	ประหยัด, ติดตั้งง่าย, หาได้ทั่วไป, ประยุกต์ใช้กับดินอ่อนได้	สูญเสียมวลดิน, ต้องเจาะนำร่องในดินแข็ง
 <p>piles 2.5 m to 3 m pre-drilled hole เสาเข็มกันดิน + แผ่นคอนกรีต</p>	5 ถึง 25 เมตร	ประหยัด, ติดตั้งง่าย, หาได้ทั่วไป, ประยุกต์ใช้กับดินอ่อนได้, แข็งแรงกว่าแผ่นไม้	สูญเสียมวลดิน, ต้องเจาะนำร่องในดินแข็ง
 <p>20 mm to 310 mm เสาเข็มกันดิน + เข็มพืดเหล็ก</p>	5 ถึง 25 เมตร	ต่อเนื่อง, กำลังสูง, หาได้ทั่วไป, ประยุกต์ใช้กับดินอ่อนได้, แข็งแรง	การใช้งานขึ้นกับสภาพดิน, อาจตอกไม่ลง, ต้องเจาะนำร่องในดินแข็ง
 <p>300 mm to 900 mm diam. เสาเข็มเจาะผิวสัมผัส</p>	10 ถึง 25 เมตร	ใช้กันทั่วไป, ประยุกต์ใช้กับดินอ่อนได้, สติเฟนสูง, ช่วยลดการไหลซึมของน้ำ	แนวกำแพงคลาดเคลื่อนในช่วงความลึกมาก, ช่องเปิดทำให้สูญเสียมวลดินและน้ำซึมผ่าน
 <p>300 mm to 900 mm diam. เสาเข็มเจาะซ้อน</p>	10 ถึง 18 เมตร	ใช้กันทั่วไป, ประยุกต์ใช้กับดินอ่อนได้, สติเฟนสูง, ช่วยลดการไหลซึมของน้ำดีขึ้น	แนวกำแพงคลาดเคลื่อนในช่วงความลึกมาก, ช่องเปิดทำให้สูญเสียมวลดินและน้ำซึมผ่าน, กำลังคอนกรีตมีผลต่อการเจาะซ้อน
 <p>เสาเข็มเจาะสลัฟพื้นปลา</p>	10 ถึง 18 เมตร	ใช้กันทั่วไป, ประยุกต์ใช้กับดินอ่อนได้, สติเฟนสูง, ช่วยลดการไหลซึมของน้ำ	แนวกำแพงคลาดเคลื่อนในช่วงความลึกมาก, ช่องเปิดทำให้สูญเสียมวลดินและน้ำซึมผ่าน

 <p>pile 2.5 m to 3 m thickness = 600 mm to 1200 mm</p> <p>ไดอะแฟรมคอนกรีต</p>	<p>10 ถึง 30 เมตร</p>	<p>กำลังสูง, ทนทาน, ใช้เป็น โครงสร้างถาวรได้, แนว กำแพงคลาดเคลื่อนน้อย</p>	<p>ราคาสูง, ต้องใช้เครื่องจักร พิเศษ, ต้องควบคุมคุณภาพ งาน</p>
 <p>reinforcing "cage" thickness = 600 mm to 1200 mm</p> <p>ไดอะแฟรมคอนกรีต</p>	<p>10 ถึง 30 เมตร</p>	<p>กำลังสูง, ทนทาน, ใช้เป็น โครงสร้างถาวรได้, แนว กำแพงคลาดเคลื่อนน้อย</p>	<p>ราคาสูง, ต้องใช้เครื่องจักร พิเศษ, ต้องควบคุมคุณภาพ งาน</p>

เอกสารอ้างอิง

กฎกระทรวง ฉบับที่ 55 (พ.ศ.2543),พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ.2522 หมวด 4 แนวอาคารและระยะต่าง ๆ ของอาคาร ข้อที่ 49 [ลงวันที่ 28 กรกฎาคม 2543].

พรพจน์ ต้นเส็ง,เอกสารประกอบการสอนวิชาวิศวกรรมฐานราก,สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2554.

พัลลภ วิสุทธิ์เมธานุกุล, เอกสารประกอบการสอนเรื่องการออกแบบงานขุดดินลึกด้วย Rigid Walls และการก่อสร้างห้องใต้ดิน, โรงแรมรอยัลริเวอร์ กรุงเทพมหานคร, 2559.

วันชัย เทพรักษ์, การประเมินความเสียหายจากการขุดดินลึกด้วยระบบค้ำยันเข็มพืดใกล้โครงการเดิมในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ.การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่8, ขอนแก่น , 2545.

วันชัย เทพรักษ์, การออกแบบระบบค้ำยันเข็มพืดสำหรับงานขุดดินลึกในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ, การสัมมนาและทัศนศึกษาเรื่องประสบการณ์การก่อสร้างห้องใต้ดินลึกในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ, 2539

วันชัย เทพรักษ์, เอกสารประกอบการสอนเรื่องการออกแบบและการใช้งาน Steel Sheet Piles ในงานขุดในดินเหนียวอ่อน, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552

วีรพันธ์ ปิตุปรกรณ์, การคาดคะเนรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยสแตนด์การ์ดเพเนเทรชันเทส ในดินกรุงเทพฯ, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2531.

ศิริมาส วิเศษศรี, พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของเข็มพืดสำหรับงานขุดค้ำยันในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.