



## รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

การพิจารณาความสามารถในการต้านทานการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินเสาเข็มเจาะ (Pile wall) กับความลึกของงานขุดดิน ในเขตพื้นที่ดินเหนียวอ่อน สำหรับงานใต้ดิน

Consideration of the ability to resist movement of the pile wall and the depth of the excavation work. in the soft clay area for underground work

นายจิรวุฒน์ นิธิสันถวะคุปต์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มี 

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศลิษา ไชยพุทฺธ)

โครงการนักศึกษา	การพิจารณาความสามารถในการต้านทานการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน Pile wall กับความลึกของงานขุดดิน ในเขตพื้นที่ดินเหนียวอ่อน สำหรับงานใต้ดิน	
นักศึกษา	นายจิรวัดน์ นิธิสันถวะคุปต์	รหัสประจำตัว 62010122
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)	
อาจารย์นิเทศ	รศ.ดร.ศลิษา ไชยพุทธ	
ผู้นิเทศงาน	นายอักรวัฒน์ อรรถประจง	
สถานประกอบการ	บริษัท นันทวัน จำกัด	

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าใต้ดินเกิดขึ้นมากในประเทศไทย ทางบริษัท นันทวัน จำกัด ได้ให้โอกาสผู้วิจัยได้ทำโครงการสหกิจศึกษาที่โครงการ Cloud 11 ซึ่งโครงการดังกล่าวมีการออกแบบกำแพงรับแรงดันของดินเป็นกำแพง Pile wall และค้ำยัน โดยใช้ Strut เป็นส่วนใหญ่ โดยกำแพงกันดิน Pile wall ที่ความลึกที่แตกต่างกัน มักจะเกิดการเคลื่อนตัวที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่ระดับความลึกของงานขุดดิน ดังนั้นการทราบถึงความสามารถในการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน Pile wall ช่วยให้ผู้รับเหมาสามารถประเมินประสิทธิภาพการต้านทานการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน Pile wall เส้นผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตรได้อย่างมีหลักการในเบื้องต้น งานวิจัยเล่มนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักคือ ต้องการให้ผู้สนใจสามารถทราบถึงความเหมาะสมของความลึกของงานขุดดินที่ใช้ในงานก่อสร้าง กรณีใช้กำแพงกันดิน Pile wall เส้นผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตร อย่างไรก็ตามการพิจารณาการเลือกใช้ระบบค้ำยันกำแพงกันดินที่จะทำให้เกิดผลกระทบทางด้านความปลอดภัยภายในโครงการและโครงสร้างข้างเคียงน้อยลง

**คำสำคัญ :** Pile wall , กำแพงกันดิน , ความลึกของงานขุดดิน

<b>Research</b>	Consideration of the ability to resist movement of the pile wall and the depth of the excavation work. in the soft clay area for underground work	
<b>Student</b>	Mr.Jirawat Nitisantavakup	ID 62010122
<b>Curriculum</b>	Bachelor of Engineering Program in Civil Engineering	
<b>Advisor</b>	Dr.Salisa Chaiyaput	
<b>Supervisor</b>	Mr.Akkarawat Attaprajong	
<b>Enterprise</b>	THAI OBAYASHI CORPORATION LIMITED	

### ABSTRACT

Nowadays, there are a lot of subway construction projects in THAI OBAYASHI CORPORATION LIMITED. gave the researcher an opportunity to do a cooperative study project at Cloud 11 project. The project has designed a wall to support soil pressure. It is a Pile wall and is mostly supported by Struts and retaining walls.

Pile walls at different depths There are often different movements. This research will focus on the depth of the excavation work. Therefore, knowing the mobility of the pile wall helps the contractor to fundamentally assess the efficiency of the resistance to movement of the 80-centimeter diameter pile wall. This research therefore has the main objectives of Want people who are interested to be able to know the suitability of the depth of the excavation work used in construction work. In the case of using a Pile wall with a diameter of 80 centimeters, however, considering the selection of a good retaining wall bracing system will cause less impact on safety within the project and neighboring structures.

**Keyword :** Pile wall , retaining wall , excavation depth

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้จัดทำในช่วงระหว่างที่ข้าพเจ้าได้มาปฏิบัติงานสหกิจศึกษา ณ บริษัท นันทวัน จำกัด ตั้งแต่วันที่ 8 เดือนสิงหาคม พ.ศ.2565 ถึง วันที่ 30 เดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2565 ทำให้ตัวของข้าพเจ้าได้มี ประสบการณ์ในการเรียนรู้ในการทำงานด้านวิศวกรรมมากขึ้น ได้มีประสบการณ์ในการทำงานจริงมากขึ้น และได้มีโอกาสในการเรียนรู้องค์ความรู้ด้านใหม่ๆที่ตัวของข้าพเจ้าไม่เคยรู้และเป็นประโยชน์ต่อบริษัท นันทวัน จำกัด อีกด้วย สำหรับรายงานวิชาสหกิจศึกษานี้สำเร็จลงได้ด้วยดีจากความร่วมมือและสนับสนุนจากหลายฝ่าย ดังนี้

- |                        |                         |
|------------------------|-------------------------|
| 1. รศ.ดร.ศลิษา ไชยพุทธ | อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ |
| 2. จักรา พรประสิทธิ์   | รองผู้จัดการ โครงการ    |
| 3. อัครวัฒน์ อรรถประจง | วิศวกร โยธา             |
| 4. อัยฎาฐ โสรินทร์     | วิศวกร โยธา             |

และบุคคลอื่นๆที่ข้าพเจ้าไม่ได้กล่าวถึงที่สนับสนุนข้าพเจ้าในการทำรายงานฉบับนี้ทุกท่าน

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณทุกๆท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการให้การสนับสนุนและช่วยเหลือในการทำ รายงานฉบับนี้ให้สำเร็จเสร็จสมบูรณ์ไปได้ด้วยดี ตลอดจนจนถึงการให้คำปรึกษา แนะนำในการทำงานภายใน บริษัทแห่งนี้ว่าบริษัทรับเหมาก่อสร้างนั้น การทำงานจริงนั้นเป็นอย่างไร และทำงานอย่างไรให้ประสบความสำเร็จได้ ข้าพเจ้าขอพระคุณไว้ ณ ที่นี้

นาย จิรวัฒน์ นิธิสันถวะคุปต์

ผู้จัดทำรายงาน

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII

### บทที่ 1 บทนำ

1.1	ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2	วัตถุประสงค์	2
1.3	ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4	วิธีดำเนินงานวิจัย	2
1.5	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3

### บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม

2.1	แรงดันดินด้านข้าง	4
2.1.1	ทฤษฎีแรงดันน้ำและแรงดันดินด้านข้าง	5
-	ทฤษฎีแรงดันของน้ำ (Pore Water Pressure)	5
-	แรงดันดินแบบอยู่กับที่ (At rest case)	7
-	แรงดันดินด้านข้างสภาวะเชิงรุก (Active case)	9
-	แรงดันดินด้านข้างสภาวะเชิงรับ (Passive case)	11
2.2	กำแพงกันดินและระบบค้ำยัน	14
2.2.1	พฤติกรรมการถ่าย รับแรงของระบบค้ำยัน	14
2.2.2	ชนิดของกำแพงกันดิน (Type of Retaining Wall)	15
-	ระบบกำแพงกันดินแบบฝังปลาย	16
2.2.3	ระบบค้ำยัน	18
-	คานขวาง Wale	20
-	ค้ำยัน Struts	21

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
- ข้อเสนอแนะในการออกแบบระบบค้ำยัน (Horiba and Ishizuka 1995)	22
- ลักษณะการพิบัติของระบบค้ำยัน	23
- แผนภูมิของแรงดันดินด้านข้าง	24
2.2.4 การตรวจสอบเสถียรภาพของกำแพงกันดิน	25
2.2.5 เสถียรภาพของดินก้นหลุม (Heaving)	27
- การหาเสถียรภาพของก้นหลุมโดย Geometry of Slip Circle method	27
- การหาเสถียรภาพของก้นหลุมโดย Terzaghi's Theory	29
- การหาเสถียรภาพของก้นหลุมโดย Bjerrum and Eide	30
2.2.6 การเคลื่อนตัวของระบบค้ำยัน	31
2.2.7 การก่อสร้างระบบค้ำยัน	34
2.3 การวิเคราะห์แบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	38
2.3.1 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	39
2.3.2 ขอบเขตแบบจำลอง	39
2.3.3 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรวมเดือน	41
2.3.4 การวิเคราะห์เสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบ 2 มิติ	42
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย</b>	
3.1 ขอบเขตการวิจัยและข้อตกลงเบื้องต้น	45
3.1.1 ปัญหาการวิจัย	45
3.1.2 คำถามการวิจัย	45
3.1.3 สมมุติฐานเบื้องต้น	46
3.1.4 เงื่อนไขเบื้องต้นของงานวิจัย	46
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา	46
3.3 กำลังของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบ	47
3.4 สำนวนลักษณะการทำงานเบื้องต้นของโครงการ	47
3.4.1 สภาพชั้นดิน	47
3.4.2 กำแพงกันดินประเภท Pile wall	47
3.4.3 ระบบค้ำยันกำแพงกันดิน (Strut)	49
3.5 โปรแกรม Finite Element (Plaxis)	50
3.5.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	50

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.5.2 ลำดับการจำลองการก่อสร้างในโปรแกรม Finite Element (Plaxis)	51
3.6 การตรวจสอบเสถียรภาพ	65
3.6.1 การตรวจสอบเสถียรภาพของดินกำแพง (Moment Balance)	65
3.6.2 การตรวจสอบเสถียรภาพของกันหลุม (Base heave)	71
3.7 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	73
<b>บทที่ 4 ผลงานวิจัย</b>	
4.1 การเคลื่อนตัวของกำแพงกันในขณะที่ขุดลึกขึ้น ระหว่าง Strut 1 Layer และ Strut 2 Layer	76
4.2 ผลการตรวจสอบเสถียรภาพดินกำแพง (Moment Balance)	78
4.3 ผลการตรวจสอบการปูดของดินเหนียวที่ระดับกันหลุม (Heaving)	79
<b>บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย และข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปผลงานวิจัย	81
5.2 ตารางสรุปการพิจารณาความลึกของงานขุดดิน โดยใช้กำแพงกันดิน Pile wall เส้นผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตร ในเขตพื้นที่ดินเหนียวอ่อน สำหรับงานใต้ดิน	83
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	87
<b>ภาคผนวก ก.</b> ข้อมูลทั้งหมดที่นำมาวิเคราะห์	89
<b>ภาคผนวก ข.</b> ข้อมูลเกี่ยวกับการตรวจสอบเสถียรภาพดินกำแพง	104
<b>ภาคผนวก ค.</b> ข้อมูลเกี่ยวกับการตรวจสอบเสถียรภาพของดินกันหลุม	146
<b>ประวัติผู้เขียน</b>	167

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 รูปสมการที่ใช้คำนวณแรงดันดินด้านข้าง	14
2.2 หน้าตัดเหล็กรูปพรรณที่ใช้เป็น Strut และ Wale	21
2.3 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรวมเดือน	42
3.1 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	51
3.2 ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบในสนามและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	74
4.1 การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินและความลึกของงานขุดดิน	77
4.2 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Safety factor) ของเสถียรภาพดินกำแพง และความลึกของงานขุดดิน	78
4.3 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Safety factor) การปูดของดินเหนียวที่ระดับกั้นหลุม และความลึกของงานขุดดิน	79
5.1 รูปผลตัวแปรที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน กรณีติดตั้ง Sturt 1 Layer	82
5.2 รูปผลตัวแปรที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน กรณีติดตั้ง Sturt 2 Layer	82
5.3 รูปผลปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน ที่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด	83
5.4 รูปการพิจารณาความลึกของงานขุดดินโดยใช้กำแพงกันดิน Pile wall เส้นผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตร ในเขตพื้นที่ดินเหนียวอ่อน สำหรับงานใต้ดิน กรณีติดตั้ง Sturt 1 Layer	84
5.5 รูปการพิจารณาความลึกของงานขุดดินโดยใช้กำแพงกันดิน Pile wall เส้นผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตร ในเขตพื้นที่ดินเหนียวอ่อน สำหรับงานใต้ดิน กรณีติดตั้ง Sturt 2 Layer	85

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การขุดเปิดหน้าดิน	4
2.2 ระบบกำแพงกันดิน (a) ระบบกำแพงกันดินชั่วคราวเพื่อก่อสร้างประตูละบายน้ำลึก 6 เมตร ; (b) ระบบกำแพงกันดินเข็มพืดเหล็กเพื่อก่อสร้างบ่อน้ำใต้ดิน	5
2.3 หลักการคำนวณแรงดันของน้ำ	6
2.4 หลักการคำนวณแรงดันดินด้านข้าง	6
2.5 ลักษณะการเคลื่อนที่ของแรงดันดินแบบ Active และ Passive	7
2.6 หลักการคำนวณแรงดันด้านข้างในดินที่สถานะอยู่กับที่ กรณีไม่มีแรงดันน้ำใต้ดิน และน้ำหนัก บรรทุกภายนอก q	8
2.7 หลักการคำนวณแรงดันด้านข้างในดินที่สถานะอยู่กับที่กรณีมีน้ำหนักบรรทุกภายนอก q และมี แรงดันน้ำใต้ดิน	9
2.8 หลักการ Mohr's circle ของ Active earth pressure	11
2.9 หลักการ Mohr's circle ของ Passive earth pressure	12
2.10 ขนาดและทิศทางการเคลื่อนตัวเมื่อเกิดแรงดันดินด้านข้างทั้งสามสถานะ	13
2.11 ภาพถ่ายจากแบบจำลอง Centrifuge แสดงการพิบัติแบบ Passive ด้านหน้ากำแพงและแบบ Active ด้านหลังกำแพง	13
2.12 แรงดันดินที่กระทำกับ Wale และ Moment Diagram ของ Wale	15
2.13 ชนิดของกำแพงกันดิน	16
2.14 Flowchart ในการตัดสินใจเลือกใช้วิเคราะห์ ออกแบบ ก่อสร้าง และทำงานวิจัย สำหรับระบบ กำแพงกันดินแบบฝังปลาย	17
2.15 ภาพอธิบายชิ้นส่วนที่ใช้ในระบบค้ำยันของโครงการ	18
2.16 โครงสร้างค้ำยันที่ใช้ในงานขุดดินลึก	19
2.17 ภาพถ่ายการขุดดินโดยใช้ระบบป้องกันดินพังเป็น sheet pile และค้ำยันชั่วคราว	19
2.18 การคำนวณ โมเมนต์ค้ำยันใน Wale เพื่อนำมาใช้ออกแบบ	20
2.19 การคำนวณแรงอัดในค้ำยัน	21
2.20 การใช้ค้ำยันทแยงเพื่อลดโมเมนต์ค้ำยันและการ โกงของ wale	22
2.21 การใช้คอนกรีตเทลงในบริเวณที่รับแรงอัดของ Wale	22
2.22 ลักษณะการพิบัติของกำแพงกันดินที่มีค้ำยัน	23

2.23 แรงดันดินด้านข้างของหลุมขุดในชั้นดินเหนียวอ่อนและแข็งปานกลาง	24
2.24 แรงดันดินด้านข้างของหลุมขุดในชั้นทราย	24
2.25 แรงดันดินด้านข้างของหลุมขุดในชั้นดินเหนียวแข็ง	24
2.26 Active and Passive earth pressure	26
2.27 รูปภาพประกอบอธิบายทฤษฎีของ Geometry of Slip Circle method	28
2.28 การหาค่า F.S. ด้วยวิธี Terzaghi (a) ชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีชั้นดินแข็งมารองรับ (b) ชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีความหนามาก	29
2.29 การหาค่า F.S. ด้วยวิธี Bjerrum and Eide	31
2.30 ความสัมพันธ์ระหว่าง ( $\delta H(max)$ ) กับ F.S. ของงานขุดในดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลาง	32
2.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง S, กับประเภทของดิน	33
2.32 รูปแบบการเคลื่อนตัวของกำแพงและการทรุดตัวของผิวดิน	34
2.33 การติดตั้งเสา Kingpost (a) กานนำร่อง (b) การหย่อน H-Beam ด้วย Collar crane (c) การใช้ Vibro Hammer ไดรฟ์กด H-Beam	35
2.34 Single Strut	35
2.35 การติดตั้งสาย Hydraulic (a) การติดตั้งสาย Hydraulic กับ Control Pump (b) การติดตั้งสาย Hydraulic กับ Universal Jack 400	36
2.36 (a) การเติมน้ำมันเข้า Control Pump (b) Pressure Gauge	36
2.37 (a) ตรวจสอบการทำงานก่อน Pre-loading (b) วัดระยะห่างเกลียวของ Universal Jack 400 (c) Universal Jack 400	37
2.38 (a) Pre-loading 10 t (b) Pre-loading 25 t (c) Pre-loading 40 t	37
2.39 (a) การลดแรงดันที่ Control Pump (b) การถอดสาย Hydraulic	38
2.40 การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลอง	39
2.41 อิทธิพลของขอบเขตของแบบจำลอง (a) ขอบเขตของแบบจำลองขนาดเล็กเกินไป (b) ..... ขอบเขตของแบบจำลองที่มีขนาดเหมาะสม	40
2.42 ขอบเขตของแบบจำลองการก่อสร้างกำแพงกันดิน	41
2.43 ขอบเขตของแบบจำลองการก่อสร้างห้องใต้ดิน	41
3.1 หน้าตัด Top view ของ Pile wall Diameter 80 cm.	47
3.2 Strut ประเภท Single Strut	49

3.3 แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ 2 มิติ	50
3.4 การตั้ง Title	51
3.5 การตั้งค่า Project properties	52
3.6 การใส่ข้อมูลดิน	52
3.7 Material set สำหรับ Soil and interfaces	53
3.8 การใส่ข้อมูลดินที่ได้จาก Boring Log , General	54
3.9 การใส่ข้อมูลดินที่ได้จาก Boring Log , Parameters	54
3.10 Material set สำหรับ Plates	55
3.11 การใส่ข้อมูล Pile wall ที่ได้จากการคำนวณ	55
3.12 Material set สำหรับ Anchors	56
3.13 การใส่ข้อมูล Strut ที่ได้จากการคำนวณ	56
3.14 การใส่ข้อมูลดิน 10 ชั้น	57
3.15 การเลือกเครื่องมือ Create line	57
3.16 การสร้าง Pile wall และปรับขนาด	58
3.17 การสร้าง Surcharge Load	58
3.18 การสร้าง Strut ด้วยเครื่องมือ Create fixed end anchor	59
3.19 การแบ่งชั้นดินที่จะทำการขุดในแต่ละ Stage	59
3.20 การ Mesh แบบจำลอง	60
3.21 การ Add Phase ในกระบวนการสร้าง Stage Construction	60
3.22 การ ตั้ง ID Stage Construction ในแต่ละ Phase	61
3.23 การจำลองการติดตั้ง Pile wall	61
3.24 การจำลองการขุดดินครั้งที่ 1	62
3.25 การจำลองการติดตั้ง Strut	62
3.26 การจำลองการขุดดินครั้งที่ 2	63
3.27 การ Calculate และ View Calculation Result (PLAXIS 2D)	63
3.28 การเลือกรูปแบบการแสดงผลภาพ	64
3.29 การแสดงผลภาพการเคลื่อนตัวของแบบจำลอง	64
3.30 การแสดงผลภาพการเคลื่อนตัวของแบบ Pile wall	64
3.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Level และ Active Pressure	68

3.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Level และ Passive Pressure	69
3.33 แสดงภาพหน้าตัดชั้นดินของกำแพงกันดิน Pile wall	71
3.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ Load and Settlement Curves	74
3.35 แบบโครงสร้างกันดินจำลองด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ (Finite Element Method)	75
4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน Pile wall และความลึกของงานขุด	77



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันการก่อสร้างชั้นใต้ดินได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เช่นการก่อสร้างรถไฟฟ้าใต้ดิน การก่อสร้างอาคารจอดรถใต้ดิน โดยการก่อสร้างชั้นใต้ดินทำให้พื้นที่ใช้สอยของอาคารมีมากขึ้น รวมไปถึงจนถึงการช่วยลดจำนวนชั้นของอาคาร ดังนั้นในงานด้านวิศวกรรม งานระบบค้ำยันและกำแพงกันดินจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการก่อสร้างชั้นใต้ดิน ให้มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะสามารถรับน้ำหนักกระทำและแรงดันดินด้านข้างที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การทำการก่อสร้างใตดินนั้น สิ่งที่สำคัญเป็นอย่างมากในการก่อสร้างโครงสร้างใตดิน คือ ระบบค้ำยันและระบบกำแพงกันดิน เพราะ การก่อสร้างที่มีกำแพงกันดินที่ไม่สามารถต้านทานแรงดันดินด้านข้างที่เกิดขึ้นได้ ดินพื้นที่นั้นจะเกิดการวิบัติและพังทลายลงมาได้ ซึ่งทำให้เกิดผลกระทบต่อทางด้านความปลอดภัยภายในโครงการและโครงสร้างข้างเคียง ส่งผลไปถึงค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น ในการออกแบบองค์ประกอบต่างๆของกำแพงกันดินและระบบค้ำยันนั้น หนึ่งในปัจจัยที่สำคัญคือการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นของกำแพงกันดิน Pile wall โดยการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน Pile wall เป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการรับน้ำหนักกระทำและแรงดันดินด้านข้างที่เกิดขึ้น งานวิจัยนี้จะทำการจำลองโมเดลกำแพงกันดิน Pile wall เส้นผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตร และมีทั้งกรณีการติดตั้งระบบค้ำยัน Strut 1 Layer และการติดตั้งระบบค้ำยัน Strut 2 Layer ที่ระดับความลึกของงานขุด 4 , 5 , 6 , 7 และ 8 โดยผ่านการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Finite Element (Plaxis) ทั้งนี้ผู้วิจัยได้สังเกตเห็นถึงความปลอดภัยจึงมีการตรวจสอบเสถียรภาพดินกำแพงและเสถียรภาพของดินกันหลุม จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ผลการจำลอง แล้วสรุปออกมาเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน Pile wall และความลึกของงานขุด เพื่อให้ทราบถึงความเหมาะสมของความลึกของงานขุดดินที่ใช้ในงานก่อสร้าง กรณีใช้กำแพงกันดินประเภท Pile wall เส้นผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตร

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อทราบถึงความสามารถการต้านทานการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินเสาเข็ม ในกรณีของความลึกของงานขุดดินที่เพิ่มขึ้น สำหรับกรณีใช้กำแพงกันดินเสาเข็ม เส้นผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตร เขตพื้นที่ดินเหนียว
- 1.2.2 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน และแรงดันดินด้านข้าง

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 ใช้ดินที่ได้จากการสำรวจเขตพระโขนง กทม.
- 1.3.2 ศึกษากรณีขุดดินลึก 4 เมตร ถึง 8 เมตร โดยจะเพิ่มทุกๆ 1 เมตร
- 1.3.3 ใช้กำแพงกันดินประเภท Pile wall เส้นผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตร โดยปลายเข็มอยู่ลึกจากปากบ่อขุด -20.00 เมตร
- 1.3.4 ใช้โปรแกรม Finite Element (Plaxis) ในการวิเคราะห์
- 1.3.5 ระบบค้ำยันใช้ Sturt เหล็กรูปพรรณ H 350 โดย Strut Span อยู่ที่ 6 เมตร
- 1.3.6 กรณีการติดตั้ง Strut 1 Layer ระดับการติดตั้ง Sturt อยู่ที่ -1.00 เมตร  
กรณีการติดตั้ง Strut 2 Layer ระดับการติดตั้ง Strut Layer 1 อยู่ที่ -1.00 เมตร  
ส่วนระดับการติดตั้ง Strut Layer 2 จะอยู่ที่ -3.00 เมตร

## 1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 สำรวจลักษณะการทำงานเบื้องต้นของโครงการ
- 1.4.2 กำหนดวัตถุประสงค์ ขอบเขตการวิจัยและแนวทางดำเนินการวิจัย
- 1.4.3 ศึกษาทฤษฎีแรงดันดิน และขั้นตอนการการติดตั้งค้ำยัน การตรวจสอบเสถียรภาพดินกำแพง (Moment Balance) และเสถียรภาพของดินกั้นหลุม (Heaving)
- 1.4.4 จัดทำ Boring Log ทำการตรวจสอบ
- 1.4.5 ศึกษาโปรแกรม Finite Element (Plaxis)
- 1.4.6 ตรวจสอบตรวจสอบเสถียรภาพดินกำแพง (Moment Balance) และเสถียรภาพของดินกั้นหลุม (Heaving)
- 1.4.7 วิเคราะห์ผลจากการใช้โปรแกรม Finite Element (Plaxis) ในแต่ละกรณี
- 1.4.8 เปรียบเทียบผล
- 1.4.9 สรุปผลการวิจัยและรับฟังข้อเสนอแนะ

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถประยุกต์ใช้ความรู้จากวิชาปฐพีกลศาสตร์และวิศวกรรมปฐพีในการทำงานได้
- 1.5.2 สามารถวิเคราะห์ความเหมาะสมของความลึกของงานขุดดิน กรณีกำแพงกันดินประเภท Pile wall เส้นผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตร
- 1.5.3 ได้เรียนรู้งานกับวิศวกรมืออาชีพจากบริษัทชั้นนำของประเทศไทย
- 1.5.4 มีโอกาสที่จะได้เรียนรู้และสร้างปฏิสัมพันธ์กับบุคลากรหลากหลายหน้าที่
- 1.5.5 เพื่อเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจและเกี่ยวข้องกับงานวิจัยชิ้นนี้ สำหรับทำการศึกษาและอ้างอิงต่อไปในอนาคต



## บทที่ 2

### ทบทวนวรรณกรรม

#### 2.1 แรงดันดินด้านข้าง

ในการก่อสร้างที่จะต้องมีการขุดหรือถมดิน จนเกิดความต่างระดับของผิวดินมากกว่าความสูงที่มวลดินจะสมดุลอยู่ได้ด้วยตนเอง วิศวกรจำเป็นต้องมีการก่อสร้างโครงสร้างกันดิน เพื่อช่วยพยุงป้องกันการพังทลายหรือการเคลื่อนตัวที่มากเกินไปของมวลดิน ซึ่งจะต้องศึกษาพฤติกรรมและคำนวณแรงดันดินด้านข้างของดิน โดยขนาดของแรงที่กระทำด้านข้างนี้ขึ้นอยู่กับน้ำหนักในแนวตั้งที่กดทับลงมา ชนิดของดิน และที่สำคัญยังขึ้นอยู่กับลักษณะการเคลื่อนที่ของดินอีกด้วย ความเข้าใจในพฤติกรรมของแรงดันดินด้านข้างอย่างถูกต้อง มีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบโครงสร้างกันดิน ได้อย่างปลอดภัย และเหมาะสม (ชนาคล กงสมบูรณ์ , 2547)

ในการออกแบบและก่อสร้างกำแพงกันดินนั้นจำเป็นต้องอาศัยทฤษฎีทางด้านกลศาสตร์ของดินและหลักการทางกลศาสตร์ในการคำนวณแรงดันและแรงต้านที่ดินกระทำต่อกำแพง ในบางกรณีในพื้นที่กว้างมากผู้ก่อสร้างมักจะใช้ระบบกำแพงกันดินชนิดตามยถากรรมดังรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นกำแพงกันชั่วคราว (พรพจน์ ต้นเส็ง , 2554)



(a) ชั้นดินลูกรังขุดดิน (b) ชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพขุดลึกประมาณ 3

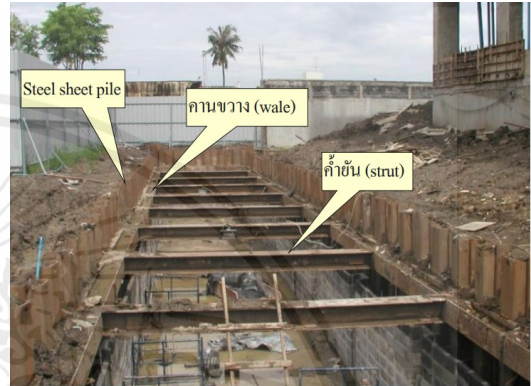
รูปที่ 2.1 การขุดเปิดหน้าดิน (พรพจน์ ต้นเส็ง , 2554)

เพื่อก่อสร้างประตูละบายน้ำที่ติดกับอ่างเก็บน้ำ กำแพงกันดินที่ใช้เป็นท่อนไม้กระดินสัดที่ตัดจากในบริเวณพื้นที่ก่อสร้างแล้วนำมาคดลงในดินเพื่อใช้เป็นโครงสร้างกันดิน และได้ใช้ไม้กระดานเช่นกันในการทำค้ำยัน ปัญหาที่เกิดขึ้นคือการไหลของดินผ่านเสาเข็ม ไม้และการเคลื่อนตัวของดิน โดยรอบจนเกิดการวิบัติ การก่อสร้างในกรณีเช่นนี้ใช้ได้กับพื้นที่กว้างที่การขุดเปิดหน้าดินไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งปลูกสร้างหรือระบบสาธารณูปโภคที่อยู่โดยรอบ แต่ในกรณีที่การขุดเปิด

หน้าดินอยู่ติดกับโครงสร้างที่อาจเกิดความชำรุดเสียหายได้ถ้าเกิดการเคลื่อนตัวของดินเนื่องจากการขุดดินจำเป็นจะต้องใช้กำแพงกันดินที่มีกำลังต้านทานต่อแรงดันดินเพียงพอที่จะไม่ก่อให้เกิดการวิบัติของดินและโครงสร้าง (Ultimate limit state) หรือก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวที่สูงจนสิ่งปลูกสร้างโดยรอบชำรุด (Serviceability limit state) รูปที่ 2.2 เป็นตัวอย่างของกำแพงกันดินชั่วคราวสำหรับก่อสร้างบ่อน้ำใต้ดิน โดยใช้กำแพงเข็มพืดเหล็ก (Steel sheet pile wall) และใช้ระบบค้ำยัน โดยมีคานขวางและค้ำยัน



(a)



(b)

รูปที่ 2.2 ระบบกำแพงกันดิน (a) ระบบกำแพงกันดินชั่วคราวเพื่อก่อสร้างบ่อน้ำลึก 6 เมตร ; (b) ระบบกำแพงกันดินเข็มพืดเหล็กเพื่อก่อสร้างบ่อน้ำใต้ดิน (พรพจน์ ดันเส็ง , 2554)

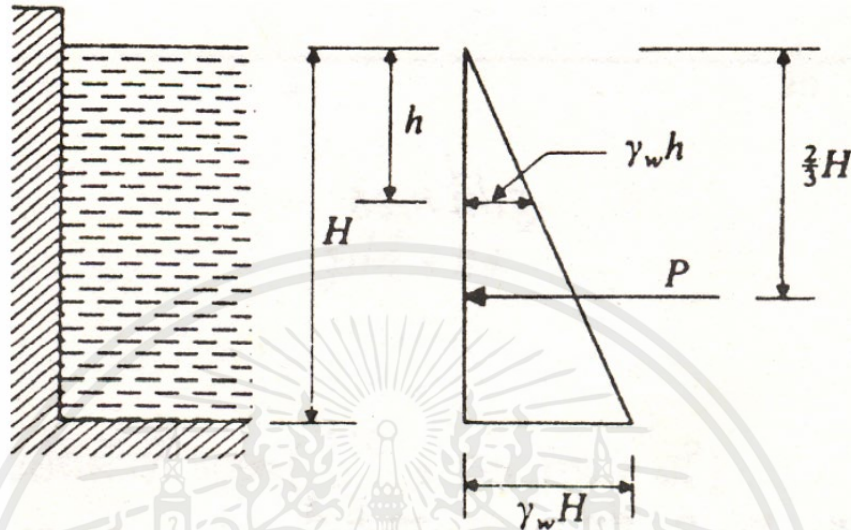
จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์และออกแบบกำแพงกันดินให้สามารถต้านทานแรงดันดินได้เป็นสิ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งสำหรับงานวิศวกรรมฐานรากในปัจจุบันสาเหตุหนึ่งอาจเกิดจากความจำกัดของพื้นที่ ทำให้จำเป็นต้องใช้พื้นที่ใต้ดินให้เกิดประโยชน์มากที่สุด และด้วยความจำกัดของพื้นที่เองทำให้ไม่สามารถขุดเปิดหน้าดิน โดยไม่ใช้ระบบกำแพงกันดินได้ ในบทนี้จึงจะได้กล่าวถึงทฤษฎีและวิธีที่ใช้ในการคำนวณแรงดันดินที่กระทำต่อกำแพง และจะได้กล่าวถึงวิธีการคำนวณแรงดันดินที่พัฒนาขึ้นมาจากการวัดแรงที่เกิดขึ้นในสนามและนำมาพัฒนาเป็นแรงดันดินเชิงประสบการณ์ และได้กล่าวถึงการประมาณการเคลื่อนตัวของดินที่อาจจะส่งผลกระทบต่อสิ่งปลูกสร้างข้างเคียงไว้ด้วย(พรพจน์ ดันเส็ง , 2554)

### 2.1.1 ทฤษฎีแรงดันน้ำและแรงดันดินด้านข้าง (Water Pressure and Lateral Earth Pressure)

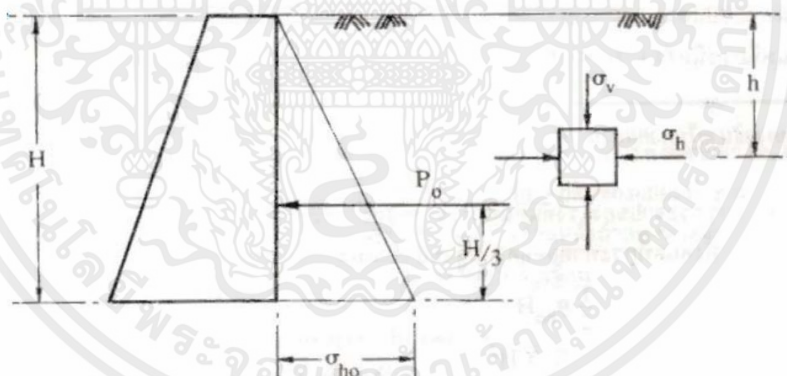
#### - ทฤษฎีแรงดันของน้ำ (Pore Water Pressure)

การทำความเข้าใจวิธีคำนวณแรงดันดินด้านข้างภายในมวลดินสามารถทำความเข้าใจได้อย่างง่ายจากการศึกษาแรงดันน้ำที่จุดใด ๆ ในของเหลว แต่พึงระลึกไว้เสมอว่าแรงดันน้ำจะเท่ากันทุกทิศทาง แต่แรงดันดินจะไม่เท่ากันในแต่ละทิศทาง ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดินและทิศทางการ

เคลื่อนตัวของมวลดินนั้นด้วย โดยแรงดันน้ำที่กั้นบ่อมีค่าเท่ากับ  $\gamma_w h$  เมื่อ  $h$  คือความสูงของระดับน้ำเหนือจุดที่พิจารณา เพราะฉะนั้นแรงดันน้ำ  $P$  คำนวณได้จากพื้นที่สามเหลี่ยมความดัน เท่ากับ  $\frac{1}{2} \gamma_w H^2$  กระทำกับผนังบ่อด้านข้างที่จุดศูนย์กลางของสามเหลี่ยมความดัน



รูปที่ 2.3 หลักการคำนวณแรงดันของน้ำ (มณฑิธร,2533)



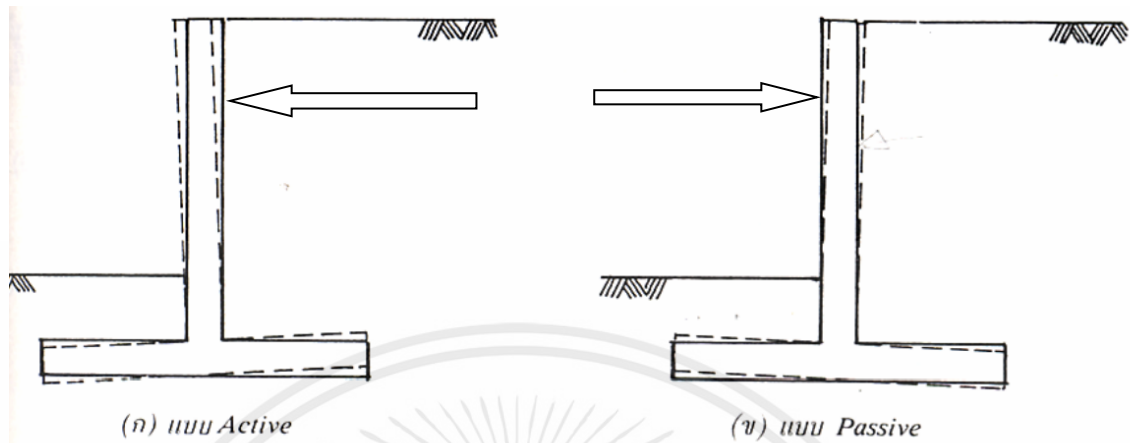
รูปที่ 2.4 หลักการคำนวณแรงดันดินด้านข้าง (มณฑิธร,2533)

- ทฤษฎีแรงดันดินด้านข้าง (Lateral Earth Pressure)

ในการวิเคราะห์แรงดันนี้จะใช้ทฤษฎี Plastic equilibrium ซึ่งเป็นแรงดันที่จุดพังทลายของมวลดิน สามารถแบ่งชนิดของแรงดันด้านข้างของดินเป็น 3 ประเภท คือ

1. แรงดันดินแบบอยู่กับที่ (At rest case) เป็นแรงดันด้านข้างของดิน โดยที่มวลดินไม่เคลื่อนที่
2. แรงดันดินเชิงรุก (Active case) เป็นแรงดันด้านข้างของดินที่กระทำต่อโครงสร้างกั้นดิน แล้วทำให้ผนังกั้นดินเคลื่อนที่ออกไปจากกั้นดินหลังโครงสร้างกั้นดิน

3. แรงดันดินเชิงรับ (Passive case) เป็นแรงดันด้านข้างของดินที่กระทำต่อโครงสร้างกันดิน แล้วทำให้ผนังกันดินเคลื่อนที่เข้าหากันดินหลังโครงสร้างกันดิน



รูปที่ 2.5 ลักษณะการเคลื่อนที่ของแรงดันดินแบบ Active และ Passive (มณเฑียร, 2533)

- แรงดันดินแบบอยู่กับที่ (At rest case)

เมื่อมวลดินอยู่ในสภาพ Elastic equilibrium มีแรงดันดินในแนวดิ่งกระทำต่อมวลดิน ไม่ว่าจะ เป็นน้ำหนักของมวลดินเองหรือจากแรงกระทำภายนอก พบว่ามวลดินนี้จะมีแรงดันดินด้านข้างที่เป็นสัดส่วนกับ  $k_0$  กับแรงในแนวดิ่งนี้ ซึ่งเราเรียกค่า  $k_0$  นี้ว่า สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างที่สถานะอยู่กับที่ (coefficient of at-rest earth pressure) จึงสามารถคำนวณแรงดันดินด้านข้างที่สถานะไม่เคลื่อนที่ได้ดังสมการ

$$\sigma'_v = \gamma' Z$$

$$\sigma'_h = k_o \cdot \sigma'_v$$

$k_o$  = coefficient of at – rest earth pressure

$\sigma'_{v0}$  = Effective over-burden pressure

Z = ระดับความลึกที่พิจารณา

ได้มีผู้ให้สมการในการหาค่า  $k_o$  ของดินแบบต่างๆ ดังนี้

For normally consolidated soil (Jaky , 1944)

$$k_o \approx 1 - \sin \phi$$

For normally consolidated clay (Brooker and Ireland , 1965)

$$k_o \approx 0.95 - \sin \phi$$

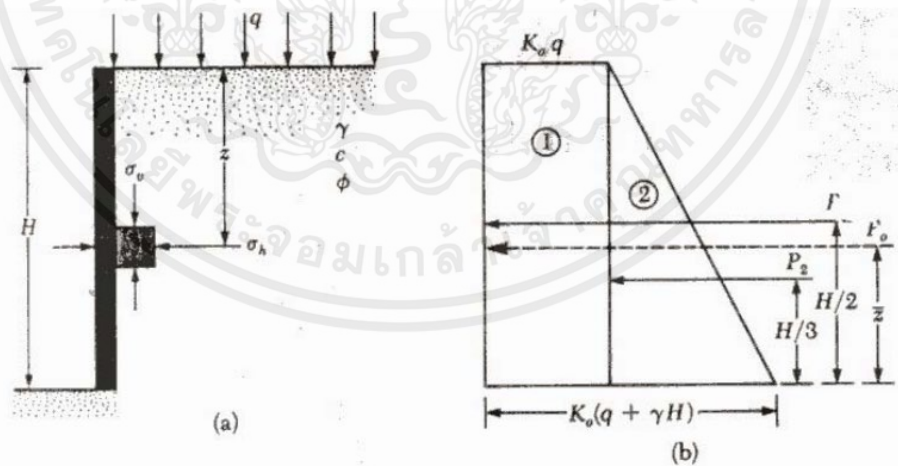
Base on Brooker and Ireland's 1965 experimental results

$$k_o = 0.4 + 0.007(PI) \quad (\text{for } PI \text{ between } 0 \text{ and } 40)$$

$$k_o = 0.64 + 0.001(PI) \quad (\text{for } PI \text{ between } 40 \text{ and } 80)$$

For over consolidated clays

$$K_{o(OC)} \approx K_{o(NC)} \sqrt{OCR}$$

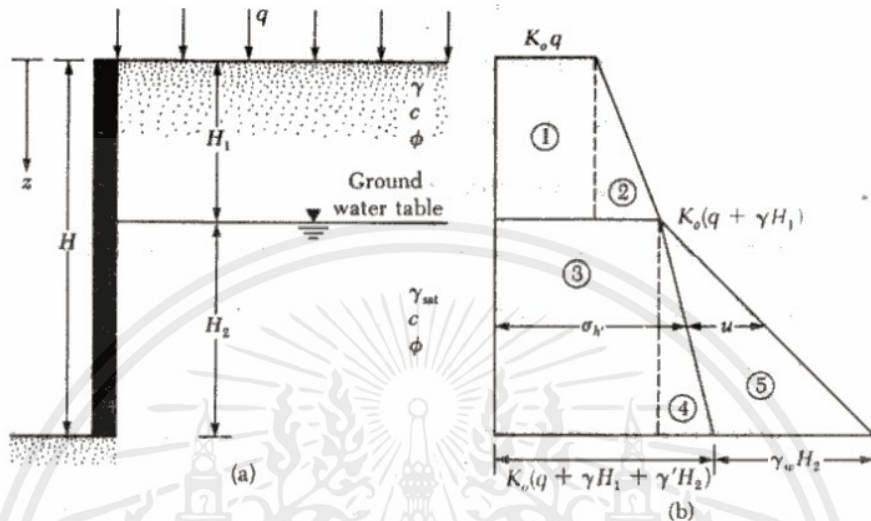


รูปที่ 2.6 หลักการคำนวณแรงดันด้านข้างในดินที่สภาวะอยู่กับที่ กรณีไม่มีแรงดันน้ำใต้ดิน และ น้ำหนักบรรทุกภายนอก q (วรรณิ,2539)

สามารถคำนวณหาความดันดินด้านข้างที่ความลึก H กรณีไม่มีน้ำใต้ดิน และมีน้ำหนักบรรทุกภายนอก q ได้จากสมการ

$$\sigma'_v = q + \gamma Z$$

$$\sigma'_h = k_0 \cdot \sigma'_v + k_0 \cdot q$$



รูปที่ 2.7 หลักการคำนวณแรงดันดินด้านข้างในดินที่สภาวะอยู่กับที่กรณีมีน้ำหนักบรรทุกภายนอก q และมีแรงดันน้ำใต้ดิน (วรรณิ,2539)

ถ้ากรณีที่มีน้ำใต้ดินอยู่ในชั้นดิน และน้ำหนักบรรทุกภายนอก q ก็สามารถคำนวณความดันน้ำผนวกเข้าไปได้ ตามสมการนี้

$$\sigma'_v = q + \gamma Z \quad (1)$$

$$\sigma'_h = k_0 \cdot \sigma'_v + k_0 \cdot q \quad (2)$$

$$\sigma'_h = k_0 \cdot \sigma'_v + k_0 \cdot q + u \quad (3)$$

- แรงดันดินด้านข้างสภาวะเชิงรุก (Active case)

เมื่อผนังกันดินมีการเอนหรือขยับออกมาด้านหน้า โครงสร้างกันดิน (ด้านดินระดับต่ำ) แรงดันดินจะมีขนาดค่อยๆ ลดลงจากสภาพอยู่กับที่ (At rest) ค่า k จะค่อยๆ ลดลง แรงดันดินที่น้อยที่สุด ณ จุดพังทลาย เรียกว่า แรงดันดินแบบ active และมีค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างที่จุดพิบัตินี้เรียกว่า k<sub>0</sub>

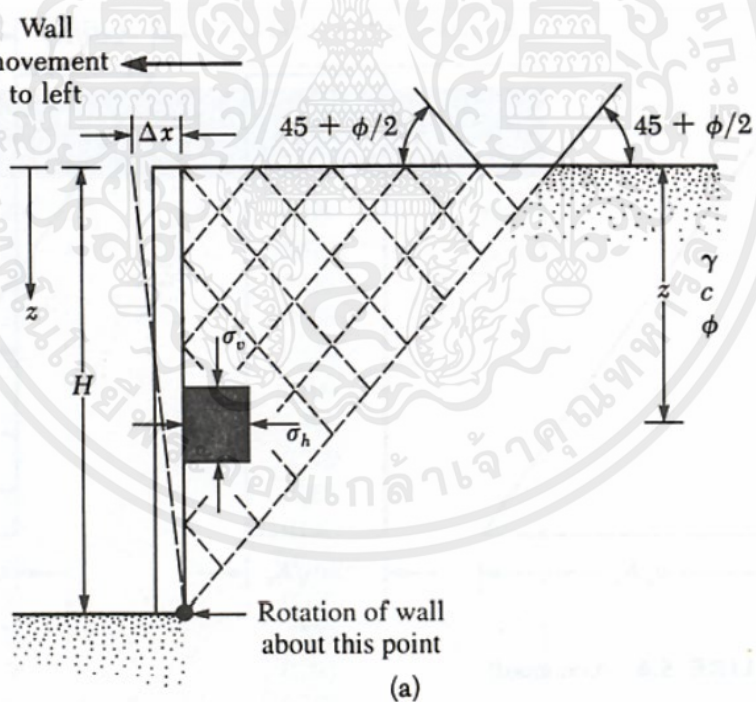
$$\text{โดยมี } k_0 = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \quad \text{or} \quad \tan^2(45 - \frac{\phi}{2})$$

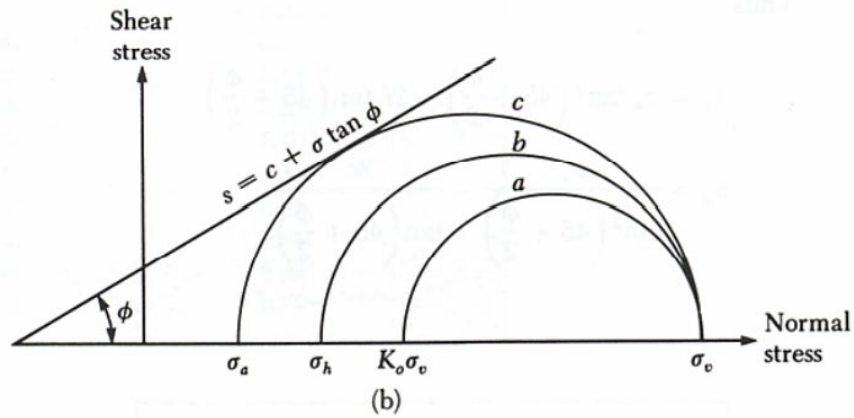
Rankine (1857) ได้เสนอหลักการคำนวณแรงดันดินบนผนังกันดินภายใต้สมมติฐานดังนี้

1. มวลดินเป็นเนื้อเดียวกัน และมีคุณสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง
2. เป็นดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว (cohesionless soil)
3. ผิวของผนังกันดินเรียบ ไม่มีความฝืด และอยู่ในแนวตั้ง
4. มวลดินอยู่ในสภาพเคลื่อนตัวจนถึงพลาสติก หรือถึงจุดพิบัติแล้ว

ทฤษฎีแรงดันดินของ Rankine ได้ใช้หลักการ Mohr's circle อธิบายแรงดันดินแบบเชิงรุกนี้ ได้ว่า เมื่อให้ความดันในแนวตั้งคงที่เท่ากับ  $\sigma_v$  ดังในรูปที่ 5.10 ในสภาวะของ Elastic equilibrium จะมีแรงดันดินสภาวะอยู่กับที่เท่ากับ  $k_0\sigma_v$  และเมื่อให้ความดันในแนวตั้งนี้คงที่แล้วค่อยๆลดความดันในแนวราบลงทีละน้อย จะเห็นว่า Mohr's circle มีขนาดโตขึ้นมาทางด้านซ้ายจนถึงจุดๆหนึ่ง ซึ่งความดันในแนวราบไม่ลดลงกว่านี้แล้วเพราะเกิดการพิบัติขึ้นแล้ว นั่นคือวงกลม C ของ Mohr สัมผัสเส้นการพิบัติหรือ Line of Rupture ความดันที่จุดนี้ เรียก  $\sigma_a$  ว่า Active pressure หรือความดันเชิงรุก ซึ่งทำให้เกิดการยุบตัวในแนวตั้ง

โดยที่ Active failure plane ในมวลดิน ทำมุม  $45 + \frac{\phi}{2}$  กับแนวนอน





รูปที่ 2.8 หลักการ Mohr's circle ของ Active earth pressure (Das,B.J.1990)

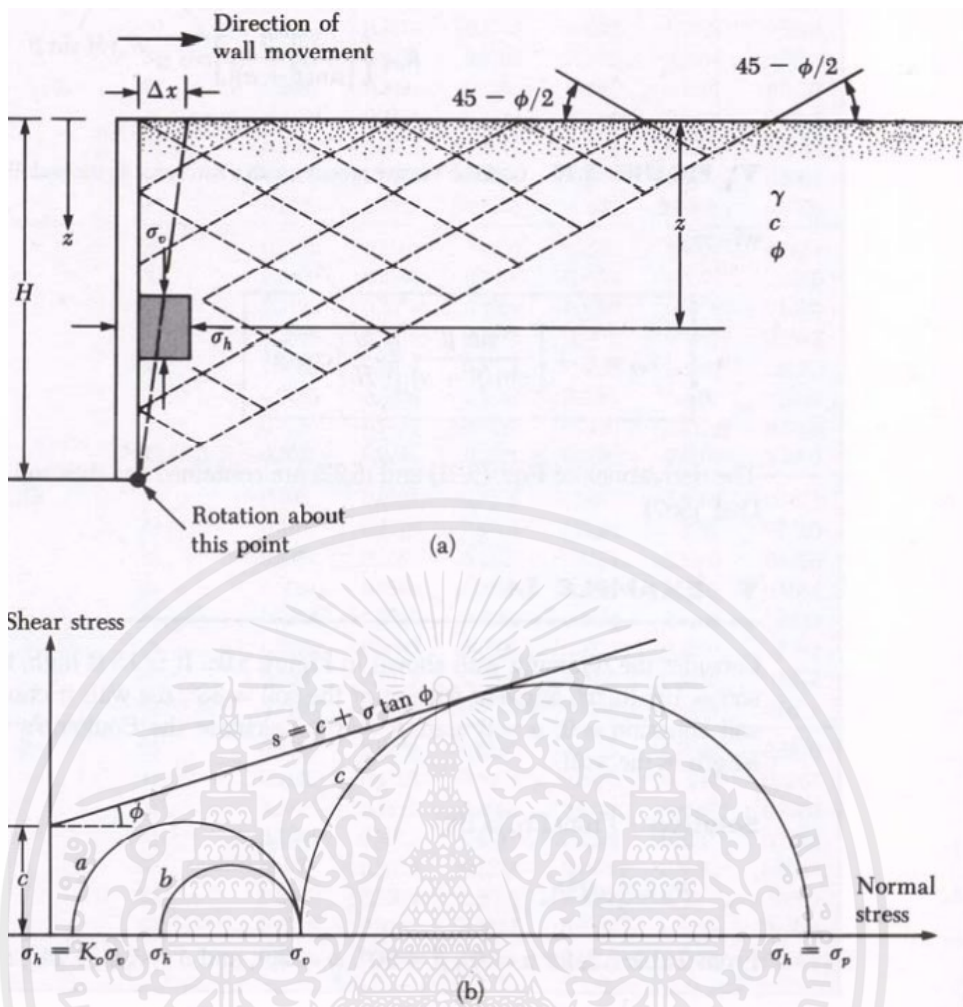
- แรงดันดินด้านข้างสถานะเชิงรับ (Passive case)

เมื่อมีแรงมากระทำผนังกันดินให้เคลื่อนที่เข้าหามวลดินด้านหน้าโครงสร้างกันดิน (ด้านดินระดับสูง) ก็จะต้องใช้แรงดันเพิ่มมากขึ้น ค่า  $k$  จะค่อย ๆ สูงขึ้น จนกระทั่งมวลดินด้านหน้ากำแพงเกิดการพิบัติ แรงดันดินที่มากที่สุด ณ จุดพังทลาย เรียกว่า แรงดันดินแบบ passive และมีค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างในสถานะเชิงรับที่จุดพิบัตินี้เรียกว่า  $k_p$

$$\text{โดยมี } k_0 = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad \text{or} \quad \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)$$

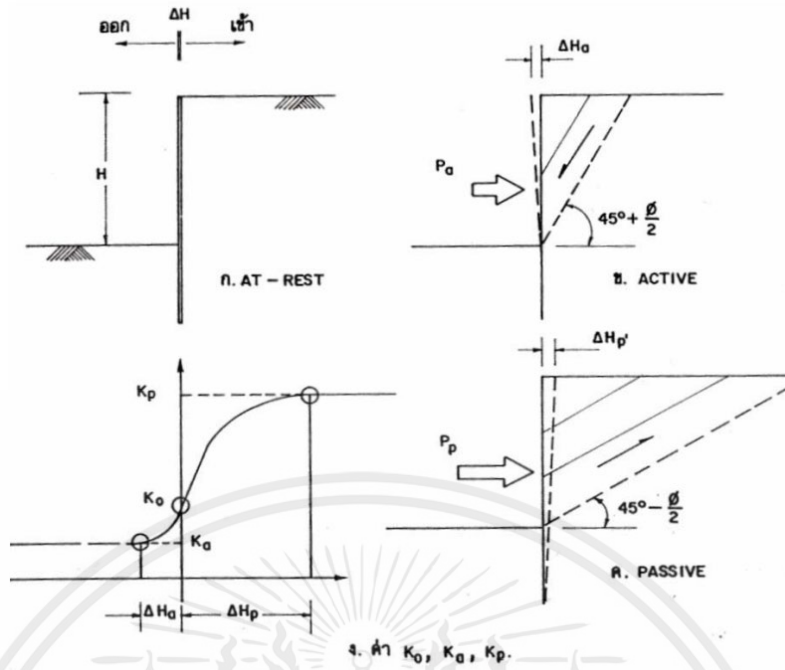
ทฤษฎีแรงดันดินของ Rankine ได้ใช้หลักการ Mohr's circle ดังรูปที่ 2.10 อธิบายแรงดันดินแบบเชิงรับนี้ได้ว่า เมื่อให้ความดันในแนวราบขณะที่ให้ความดันในแนวตั้งคงที่ จะเพิ่มความดันได้จุดสูงสุดจุดหนึ่ง ซึ่งไม่สามารถเพิ่มได้มากกว่านี้เพราะดินถึงจุดพิบัติแล้ว หรือวงกลมของ Mohr ได้สัมผัส Line of rupture แล้ว ความดันสูงสุดนี้  $\sigma_p$  เรียกว่า Passive earth pressure ซึ่งทำให้เกิดการขยายตัวในแนวตั้ง กับแนวนอน

$$\text{โดยที่ Passive failure plane ในมวลดิน ทำมุม } 45 - \frac{\phi}{2}$$

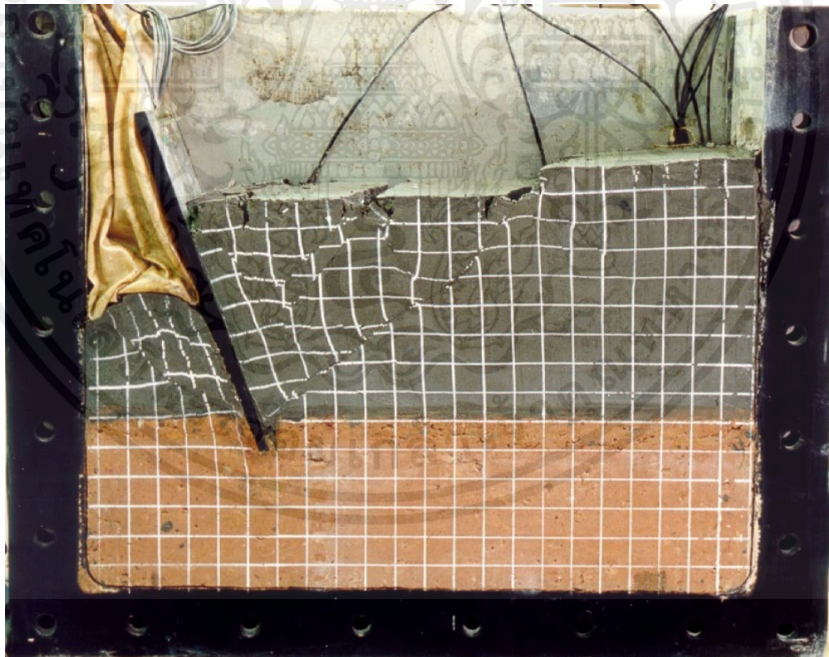


รูปที่ 2.9 หลักการ Mohr's circle ของ Passive earth pressure (Das,B.J.1990)

แรงดันดินด้านข้างทั้งสภาวะอยู่กับที่ เจริญ และเจริญรับ มีพฤติกรรมเคลื่อนที่ของมวลดินที่แตกต่างกัน โดยสภาวะแรงดันดินเจริญรับ กำแพงกันดินดังรูปที่ 2.11 จะเคลื่อนที่ออกจากมวลดินไปทางด้านหน้ากำแพง ค่าส.ป.ส.แรงดันดินด้านข้างแบบเจริญรับ  $k_a$  จะมีค่าค้อยๆลดน้อยลงกว่าค่า  $k_0$  ตามการเคลื่อนที่ของมวลดิน ผิวเคลื่อนที่พีบีจะทำมุม  $45 + \frac{\phi}{2}$  กับแนวนอน แต่เมื่อมีแรงดันดินให้เคลื่อนที่เข้าหามวลดินไปด้านหลังกำแพง ค่าส.ป.ส.แรงดันดินด้านข้างแบบเจริญรับ  $k_p$  จะมีค่าค้อยๆเพิ่มขึ้นมากกว่าค่า  $k_p$  ตามการเคลื่อนที่ของมวลดิน ผิวเคลื่อนที่พีบีจะทำมุม  $45 - \frac{\phi}{2}$  กับแนวนอน ซึ่งจะสังเกตได้ว่าการเคลื่อนที่ของมวลดินแบบเจริญรับ ณ จุดพีบี จะเคลื่อนที่มากกว่ามวลดินแบบเจริญรับ ( $AH, \gg AH.$ )



รูปที่ 2.10 ขนาดและทิศทางการเคลื่อนตัวเมื่อเกิดแรงดันดินด้านข้างทั้งสามสถานะ (ดร.วรากร)



รูปที่ 2.11 ภาพถ่ายจากแบบจำลอง Centrifuge แสดงการพิบัติแบบ Passive ด้านหน้ากำแพงและแบบ Active ด้านหลังกำแพง (ดร.ธนาคล)

ตารางที่ 2.1 สูตรสมการที่ใช้คำนวณแรงดันดินด้านข้าง (พรพจน์ ต้นเส็ง , 2554)

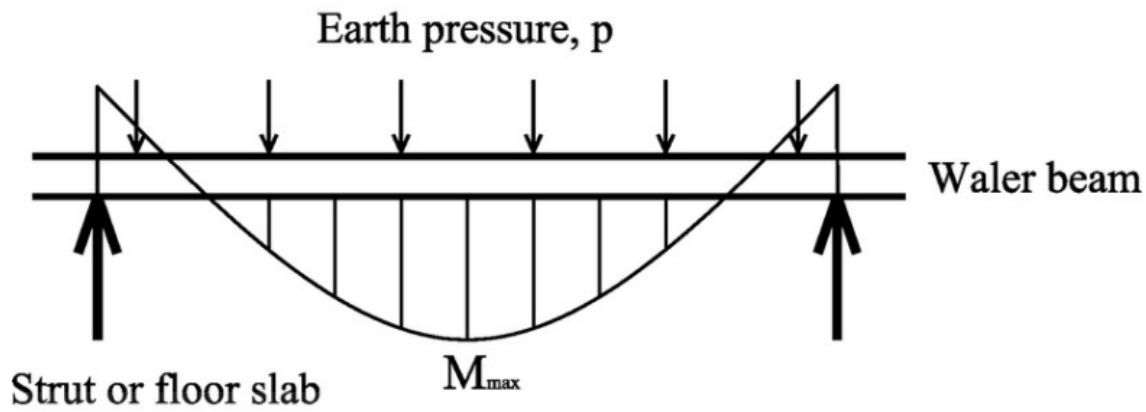
สถานะของดิน	สมการ
สถานะนิ่ง (At rest)	$\sigma'_h = K_0 \sigma'_v$
สถานะแอคทีฟ (Active) Rankine (1857)	$\sigma'_h = \sigma'_v K_a - 2c\sqrt{K_a}$ $K_a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi}$
สถานะแพสซีฟ (Passive) Rankine (1857)	$\sigma'_h = \sigma'_v K_p + 2c\sqrt{K_p}$ $K_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$

## 2.2 กำแพงกันดินและระบบค้ำยัน

### 2.2.1 พฤติกรรมการถ่าย รับแรงของระบบค้ำยัน

เมื่อทำการขุดดินและมีการก่อสร้างระบบค้ำยัน ดินที่อยู่ด้านข้างจะพยายามเคลื่อนตัวและอาจเกิดการพังทลายเนื่องจากการเสียดสมคูลเนื่องจากการขุดดิน ตัว Sheet Pile หรือ Pile Wall จะทำหน้าที่ค้ำยันดินด้านข้างไม่ให้พังทลายลงมา ดังนั้น Sheet Pile หรือ Pile Wal จะรับแรงดันดินด้านข้างที่เกิดขึ้น แรงดันนี้จะส่งผลให้ตัวกำแพงเกิดการเอียง เหล็กค้ำยันจะทำหน้าที่ค้ำยัน ไม่ให้กำแพงเอียงและล้ม

แรงดันดินด้านข้างที่กระทำกับกับตัว Sheet Pile หรือ Pile Wall จะมีการถ่ายแรงเข้าสู่ Wale โดยแรงที่กระทำกับเหล็กค้ำยัน โดยรอบนั้นจะเป็นแรงชนิด Uniform Load ซึ่ง Wale แต่ละระดับจะมีแรงที่มากกระทำไม่เท่ากัน และในสภาพพื้นที่ขุดดินเป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมก็จะส่งผลให้ Wale รับแรงในแนวแกนเพิ่มเข้าไปพฤติกรรมขอ Wale จะทำหน้าที่เสมือนคานต่อเนื่องที่จะรับแรง Bending Moment และ Shear Stress แรงดันดินที่กระทำต่อกำแพงและตัวคานรัด (Wale) จะมีลักษณะเป็นแรงดันแบบแผ่กระจายและจะถ่ายแรงเข้าสู่ค้ำยัน โดยจะเป็นแรงในแนวแกนของค้ำยันเป็นหลัก ก่อนที่จะถ่ายแรงจากตัว Strut ไปยังตัว King Post ซึ่ง King Post นี้ นอกจากรับแรงที่ถ่ายจาก Strut แล้ว ก็ต้องรับแรงจาก platform ก่อนแรงที่กระทำทั้งหมดจะถ่ายลงสู่ดินด้านล่างต่อไป



รูปที่ 2.12 แรงดันดินที่กระทำกับ Waler และ Moment Diagram ของ Waler (ภคพันธ์เกียรติพร โภกาส , 2563)

### 2.2.2 ชนิดของกำแพงกันดิน (Type of Retaining Wall)

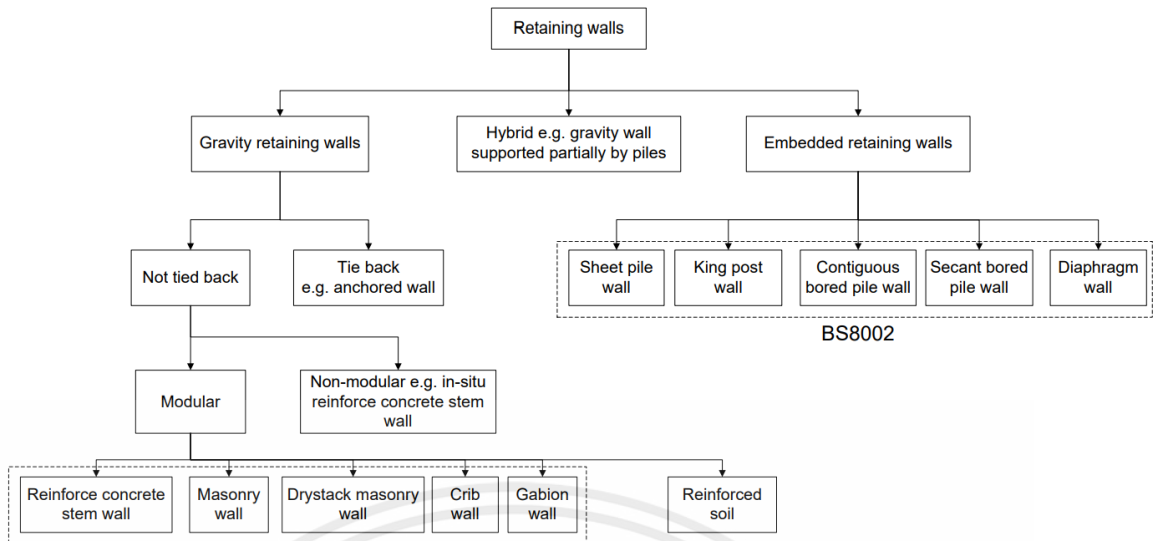
การจำแนกชนิดของกำแพงกันดินสามารถจำแนกได้หลากหลายชนิด โดย Gaba, Simpson et al. (2003) ได้จำแนกกำแพงกันดินจำแนกตามลักษณะของโครงสร้างและการเกิดแรงต้านทานแรงดันดินเป็น 2 ประเภทหลักๆ ได้แก่

#### 1. Earth retaining wall (Gravity retaining walls)

เป็นกำแพงกันดินใช้สำหรับรับแรงที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ที่ผิวดิน หรือใกล้กับผิวดิน

#### 2. Embedded retaining wall

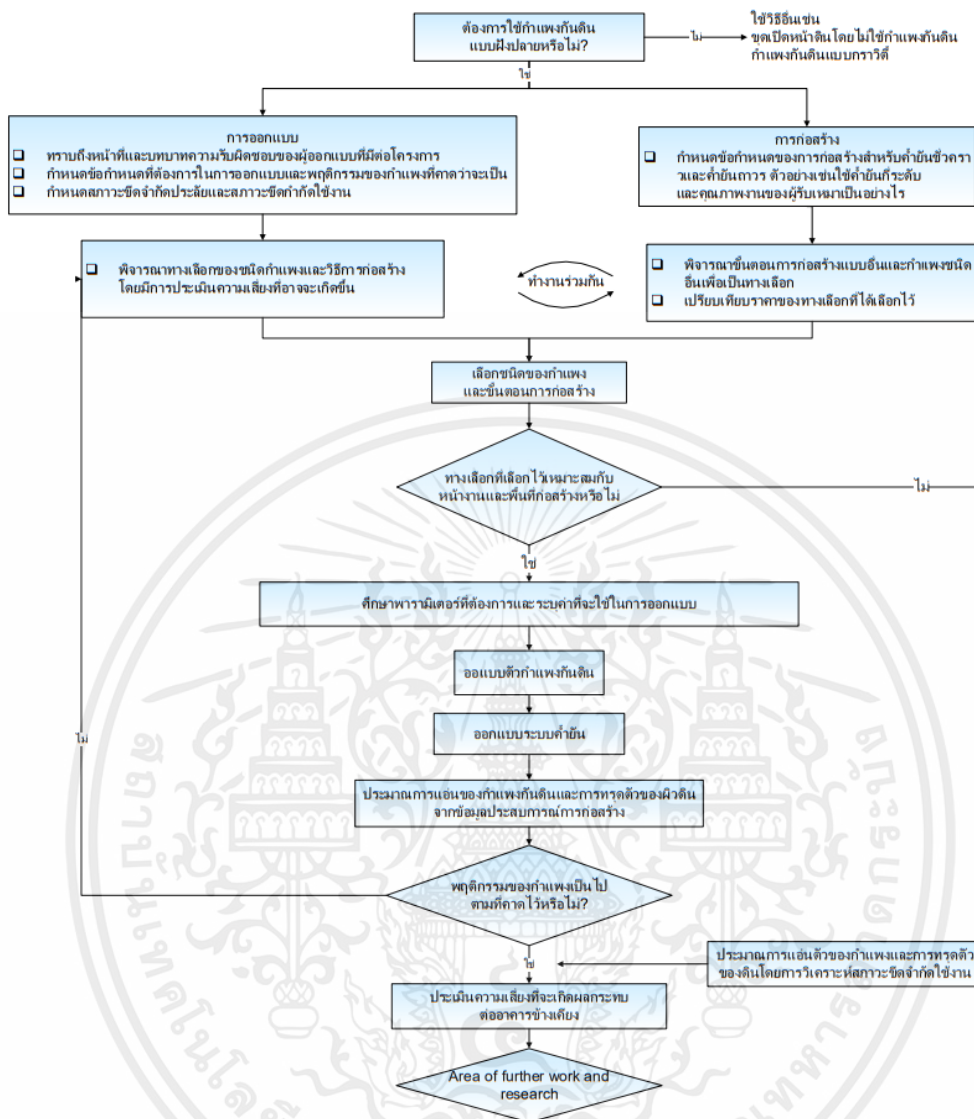
เป็นกำแพงฝังลงในดิน ที่มีบางส่วนของกำแพงฝังลงในดินเพื่อที่จะใช้แรงต้านทานแรงดันดินด้านข้างจากส่วนที่ฝังลงในดิน กำแพงอาจจะมีโครงสร้างมาช่วยรองรับแรงดันดิน ตัวอย่าง โครงสร้างรองรับได้แก่ คานขวาง กันดิน สมอรั้ง หรือ แผ่นพื้น เป็นต้น กำแพงชนิดนี้อาจไม่ต้องใช้ค้ำยัน (freestanding) ก็ได้ รูปที่ 2.13 จะแสดงถึงแผนภาพการแบ่งประเภทกำแพงกันดินแบบต่างๆ ของ Gaba, Simpson et al. (2003)



รูปที่ 2.13 ชนิดของกำแพงกันดิน (Gaba, Simpson et al. 2003)

- ระบบกำแพงกันดินแบบฝังปลาย

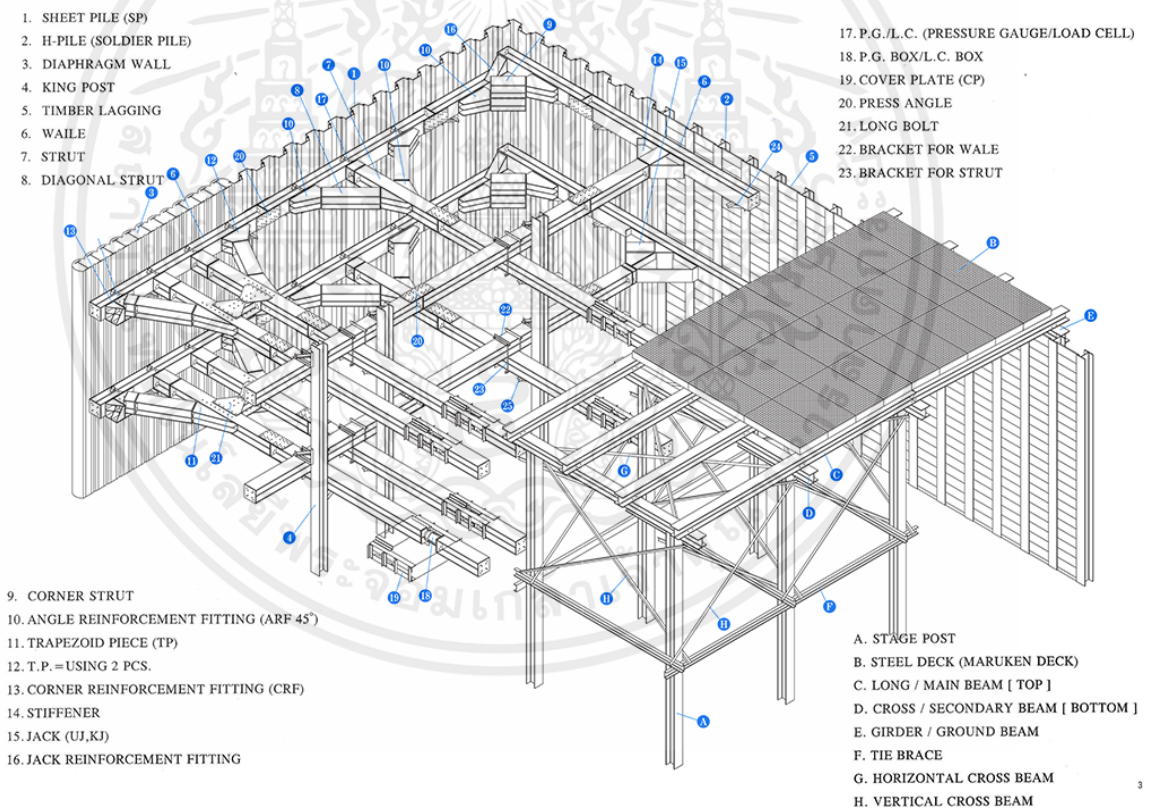
พรพจน์ ต้นเส็ง , 2542 ได้กล่าวในหนังสือวิศวกรรมฐานรากว่างานขุดเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดินหรือโครงสร้างใต้ดินนั้นประกอบไปด้วยหลายขั้นตอน และเกี่ยวข้องกับหลายส่วนงานด้วยกัน โดยงานระบบกำแพงกันดิน เพื่องานขุดนี้แตกต่างจากการออกแบบโครงสร้างโดยทั่วไป เนื่องจากในการออกแบบจำเป็นจะต้องพิจารณาประเด็นด้านการก่อสร้างไปพร้อมกัน หรือในบางกรณี ในขณะที่ก่อสร้างพบว่าพฤติกรรมของระบบกำแพงกันดินแตกต่างไปจากพฤติกรรมที่ได้ประเมินไว้ในขั้นตอนการวิเคราะห์และออกแบบก็จำเป็นจะต้องมีการปรับปรุงหรือแก้ไข ซึ่งงานลักษณะนี้ส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นการออกแบบและก่อสร้างที่ต้องมีการทำงานร่วมกันระหว่างผู้วิเคราะห์ออกแบบและผู้ที่ทำกรก่อสร้าง โดยอาจมีแนวทางเป็น flowchart ดังรูปที่ 2.13



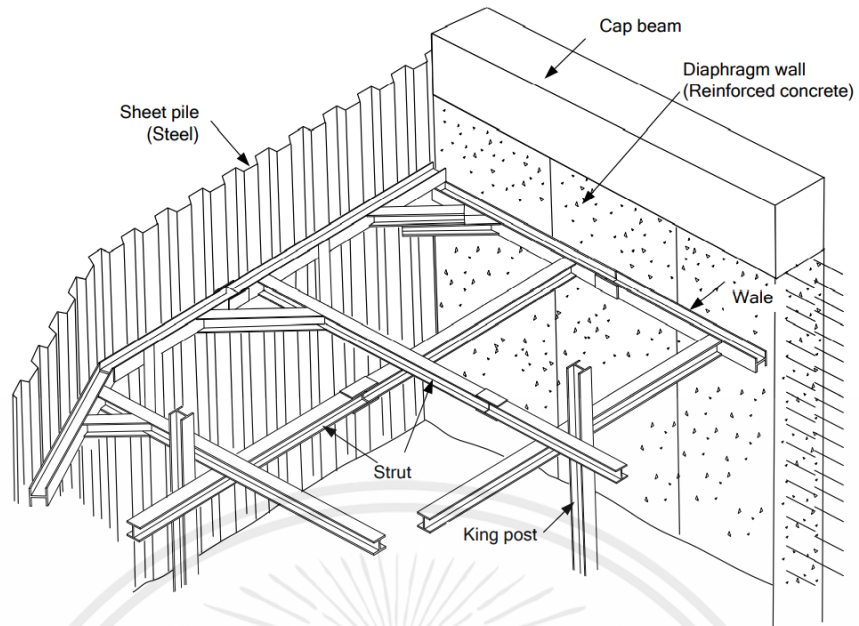
รูปที่ 2.14 Flowchart ในการตัดสินใจเลือกใช้วิธีการที่ ออกแบบ ก่อสร้าง และทำงานวิจัย สำหรับ ระบบกำแพงกันดินแบบฝังปลาย (พรพจน์ ต้นเส็ง , 2554)

### 2.2.3 ระบบค้ำยัน

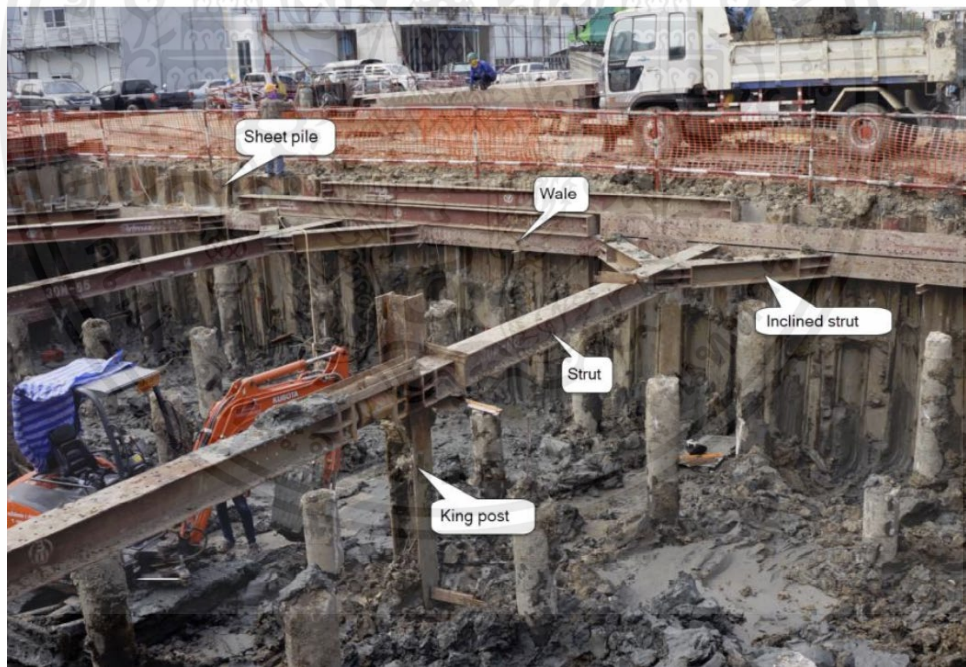
พรพจน์ ต้นเส็ง , 2542 ได้กล่าวในหนังสือวิศวกรรมฐานรากว่าในการขุดดินโดยใช้ค้ำยันภายในจะมีส่วนโครงสร้างที่มักจะนิยมใช้ดังแสดงในรูปที่ 2.15 โดยกำแพงกันดินที่มีพฤติกรรมเหมือนแผ่นพื้นทำหน้าที่ต้านทานแรงดันดินด้านข้าง และใช้คานเพื่อถ่ายน้ำหนักจากกำแพง คานนี้โดยทั่วไปเรียกทับศัพท์ว่า Wale (เวล) โดย Wale มีจุดรองรับเป็นค้ำยันแนวนอนเรียกว่า Strut (สตรัท) ค้ำยันแนวนอนนี้ทำหน้าที่รับแรงอัดเหมือนเสา ในบางกรณีบ่อขุดมีความกว้างมากทำให้ความยาวประสิทธิผลของ Strut มากจนกลายเป็น โครงสร้างที่มีความชะลุดและมีกำลังรับแรงอัดได้ต่ำ ดังนั้นจึงต้องมีการใช้ค้ำยันด้านข้างเพื่อลดความชะลุด ค้ำยันด้านข้างนี้ส่วนใหญ่แล้วเป็น strut ที่ขวางในทิศทางตั้งฉาก ตรงจุดตัดระหว่าง Strut ต้องใช้เสา Kingpost เพื่อรองรับน้ำหนัก Strut และถ่ายน้ำหนักลงสู่ชั้นดินแข็ง



รูปที่ 2.15 ภาพอธิบายชิ้นส่วนที่ใช้ในระบบค้ำยันของโครงการ ( Maruken. , 2528. , ชิ้นส่วนประกอบโครงสร้างกำแพงกันดิน. , <https://maruken.co.th> )



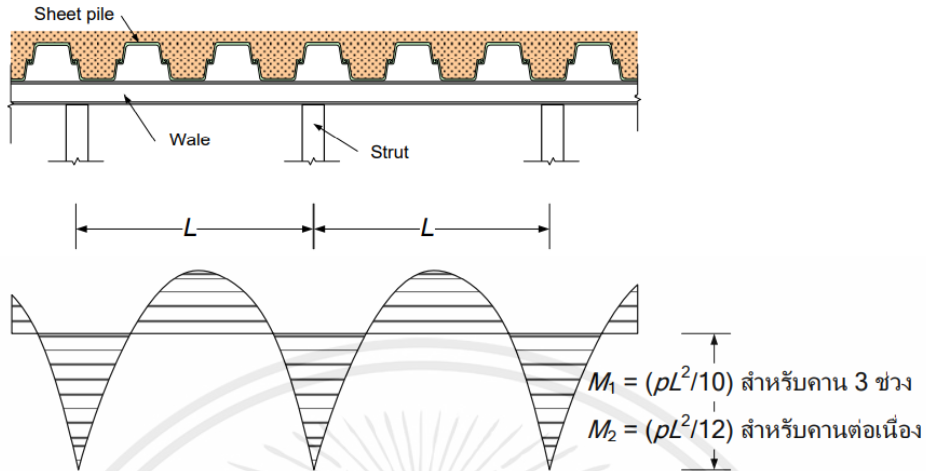
รูปที่ 2.16 โครงสร้างค้ำยันที่ใช้ในงานขุดดินลึก (พรพจน์ ต้นเส็ง , 2554)



รูปที่ 2.17 ภาพถ่ายการขุดดิน โดยใช้ระบบป้องกันดินพังเป็น sheet pile และค้ำยันชั่วคราว (พรพจน์ ต้นเส็ง , 2554)

- คานขวาง *Wale*

ในการออกแบบ *Wale* จะมีขั้นตอนดังนี้ คือ



รูปที่ 2.18 การคำนวณ โมเมนต์คัตใน *Wale* เพื่อนำมาใช้ออกแบบ (พรพจน์ ต้นเส็ง , 2554)

1. คำนวณ โมเมนต์คัต
2. ทดลองเลือกหน้าตัดจากนั้นคำนวณหน่วยแรงคัตที่เกิดขึ้น
3. คำนวณหน่วยแรงอัด และค่า  $KL / r$  ของแกนหลักและแกนรอง
4. คำนวณค่า  $F_a$  โดยใช้สมการ AISC
5. ตรวจสอบหน่วยแรงรวม (หน่วยแรงอัด + หน่วยแรงคัต) ว่าไม่เกินหน่วยแรงที่ขอมให้ โดยใช้ AISC
6. ถ้าหน่วยแรงเกินกว่าหน่วยแรงที่ขอมให้ให้คำนวณข้อ 2-5 อีกครั้ง

แรงที่เกิดขึ้นใน *Wale* ที่สำคัญประการหนึ่งก็คือแรงในแนวแกนซึ่งเกิดขึ้นที่มุมของกำแพง แสดงในรูป โดยปกติขั้นเหล่านี้จะได้รับผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิซึ่งทำให้หน่วยแรงในถ้ำขึ้นเพิ่มขึ้นซึ่งต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบด้วย

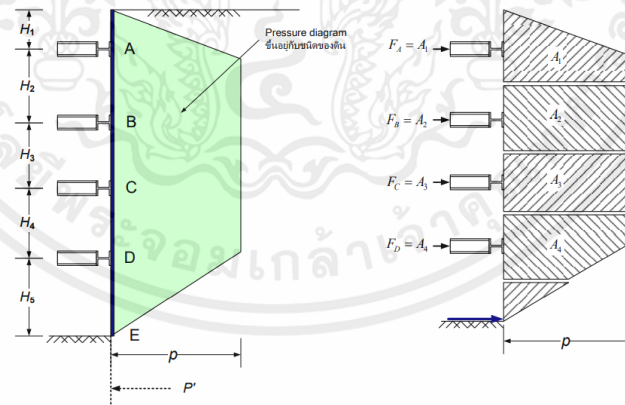
ตารางที่ 2.2 หน้าตัดเหล็กรูปพรรณที่ใช้เป็น Strut และ Wale ( Maruken. , 2528. , ชิ้นส่วนประกอบ  
โครงสร้างกำแพงกันดิน. , <https://maruken.co.th> )

Size (mm)	Weight (kg/m)	Area of Section (cm <sup>2</sup> )	Moment of Inertia (cm <sup>4</sup> )		Radius of Gyration (cm)		Moment of Section (cm <sup>3</sup> )	
			I <sub>x</sub>	I <sub>y</sub>	i <sub>x</sub>	i <sub>y</sub>	Z <sub>x</sub>	Z <sub>y</sub>
A x B x t <sub>1</sub> x t <sub>2</sub> x r	W	A	I <sub>x</sub>	I <sub>y</sub>	i <sub>x</sub>	i <sub>y</sub>	Z <sub>x</sub>	Z <sub>y</sub>
*200x200x8x12x13	49.9	63.53	4,720	1,600	8.62	5.02	472	160
*250x250x9x14x16	72.4	92.18	10,800	3,650	10.80	6.29	867	292
300x350x10x15x18	94.0	119.80	20,400	6,750	13.10	7.51	1,360	450
350x350x12x19x20	137.0	173.90	40,300	13,650	15.20	8.84	2,300	776
400x400x13x21x22	172.0	218.70	66,600	22,400	17.50	10.10	3,330	1,120
594x302x14x23x28	175.0	22.40	137,000	10,600	24.90	6.90	4,620	701

Note: \* Subject to negotiation

- ค้ำยัน Struts

1. คำนวณแรงที่ถ่ายลงค้ำยัน ด้วยวิธีดังรูปที่ 2.18
  2. ทดลองเลือกขนาดหน้าตัดเหล็ก WF และคำนวณค่า  $L/r$
  3. คำนวณแรงอัดที่ข้อมให้ของหน้าตัด  $F_d$  โดยใช้สมการของ AISC (ดูสมการที่ใช้ในภาคผนวก)
3. ตรวจสอบว่าแรงที่คำนวณได้ในข้อ 1 น้อยกว่าหน่วยแรงที่ข้อมให้ในข้อ 3 หรือไม่ ถ้าไม่ให้ ทดลองเลือกขนาดหน้าตัดให้ใหญ่ขึ้นจนกระทั่งแรงที่เกิดขึ้นน้อยกว่าแรงที่ข้อมให้

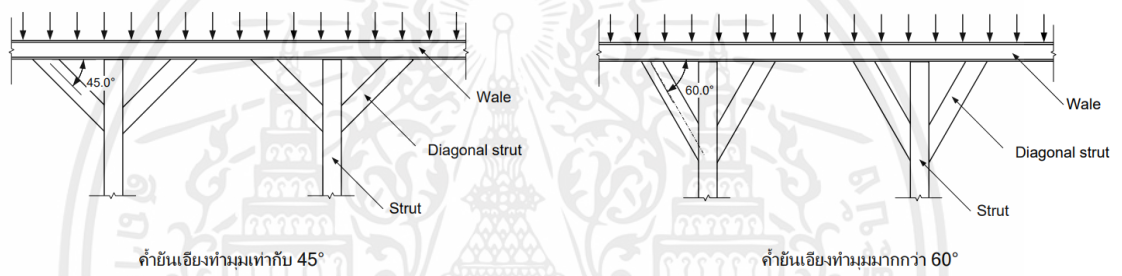


รูปที่ 2.19 การคำนวณแรงอัดในค้ำยัน (พรพจน์ ดันเส็ง , 2554)

ในการออกแบบ strut นั้นสิ่งที่ต้องให้ความระมัดระวังเป็นพิเศษคือการเกิด buckling ของ strut เนื่องจาก strut เป็นชิ้นส่วนที่ชะลูดมากเมื่อมีแรงอัดมากจะทำให้อาจก่อให้เกิดการวิบัติแบบ buckling ซึ่งเป็นการวิบัติแบบฉับพลัน และการวิบัติของชิ้นเพียงตัวเดียวอาจทำให้ระบบน้ำขึ้นทั้งหมดพังทลายลง ซึ่งเมื่อไม่มีค้ำยันทางด้านข้างแล้วกำแพงกันดินก็จะพังทลายตามลงมา

- ข้อเสนอแนะในการออกแบบระบบค้ำยัน (Horiba and Ishizuka 1995)

โดยทั่วไป wale มักจะถูกออกแบบโดยพิจารณาว่าเป็นคานที่มีความต่อเนื่อง และรองรับด้วย strut โดยในระบบค้ำยันมักจะนำคานเหล็กรูปพรรณมาเชื่อมต่อกัน สำหรับค้ำยันโดย strut ที่มีช่วงห่างระหว่างค้ำยันมากทำให้เกิดโมเมนต์ค้ดใน wale สูงและเกิดการ โกงของคานในปริมาณมาก จึงมักจะลดระยะห่างของจุดรองรับลงด้วยการเพิ่มน้ำขึ้นทแยงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การใช้ค้ำยันทแยงเพื่อลดโมเมนต์ค้ดและการ โกงของ wale (พรพจน์ ต้นเล็ง , 2554)

ในกรณีที่ค้ำยันเอียงทำมุมทแยงมากกว่า 60 องศา นั้นจะต้องเสริมบริเวณจุดต่อด้วย stiffener ที่แผ่น web ของ wale เพื่อป้องกันการวิบัติของ web หรืออาจจะใช้คอนกรีตเทลงในบริเวณที่รับแรงอัดก็ได้ เพื่อให้คอนกรีตช่วยถ่ายแรงอัดที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 2.20



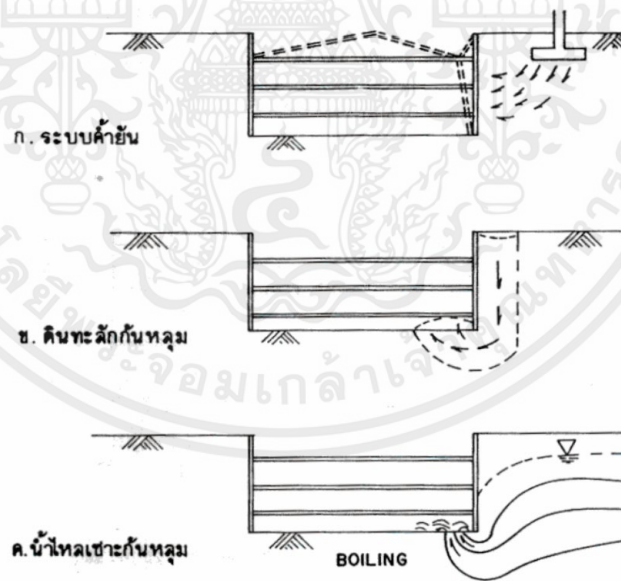
รูปที่ 2.21 การใช้คอนกรีตเทลงในบริเวณที่รับแรงอัดของ Wale

- ลักษณะการพิบัติของระบบค้ำยัน

การก่อสร้างกำแพงกันดินแบบมีค้ำยันนี้ มีลักษณะการพิบัติที่ตรวจพบได้บ่อย 3 ลักษณะ คือการพิบัติของระบบค้ำยัน เกิดจากโครงสร้างค้ำยันซึ่งส่วนใหญ่เป็น โครงเหล็กรับแรงดันจากดิน ไม้ไผ่ เกิดการโก่งงอตัว หลายครั้งพบว่าเกิดจากรอยเชื่อมต่อที่ไม่ได้คุณภาพ การออกแบบ โครงสร้างค้ำยันชั้นบนสุดนอกจากต้องรับแรงดันจากดินแล้วอาจต้องออกแบบเพื่อให้รับน้ำหนักจร ของรถขนส่งวัสดุที่วิ่งอยู่ด้านบนโครงสร้างอีกด้วย

การพิบัติของดินทะลักกันหลุม (Heaving) เกิดจากการขุดดินออกจากบ่อที่ทำการก่อสร้าง ทำให้มวลดินเสียดมคลุไป มวลดินด้านบนนอกกำแพงจึงไหลดันผ่านใต้กำแพงเข้าแทนที่ดินที่ถูกขุด ออกไป สังเกตการพิบัติได้จากการบวมตัว หรือดันปูดขึ้นมาของดินกันหลุมขุด สามารถป้องกันการ ปูดขึ้นมาได้โดยการหยั่งกำแพงกันดินให้ถึงชั้นดินที่แข็งแรงเพียงพอ

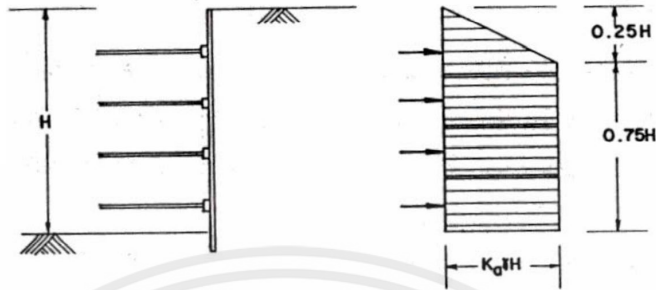
การพิบัติที่เกิดจากน้ำไหลเซาะที่กันหลุม (Seepage) เกิดจากแรงดันน้ำใต้ดินภายนอกหลุม ขุดที่สูงพยายามดันเข้ามาจากด้านใต้หลุมขุด ทำให้ชั้นดินสูญเสียกำลัง ส่วนมากเป็นการขุดดินใกล้ ถ้ำน้ำหรือแหล่งน้ำตามธรรมชาติ สามารถป้องกันได้โดยหยั่งให้กำแพงกับดินลึกลงไปมากขึ้นเพื่อ เพิ่มระยะการไหลของน้ำ ทำให้น้ำมีแรงดันลดลง หรือการใช้การสูบน้ำเข้าช่วยขณะทำการขุด (ดร. ษนาคล)



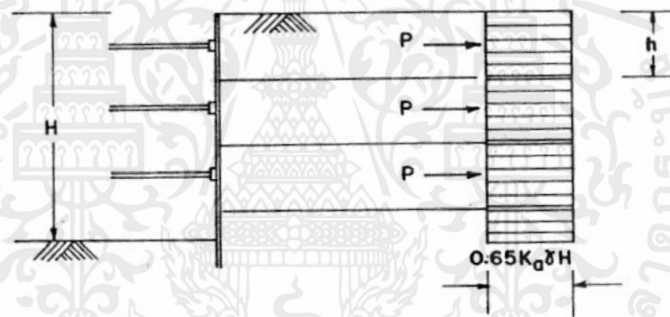
รูปที่ 2.22 ลักษณะการพิบัติของกำแพงกันดินที่มีค้ำยัน (ดร. วรากร, 2553)

- แผนภูมิของแรงดันดินด้านข้าง

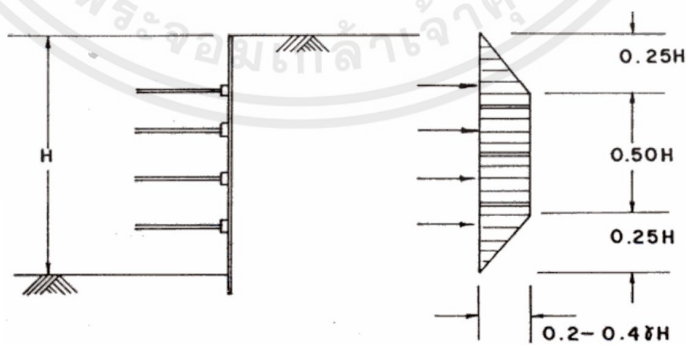
แผนภูมิของแรงดันดินด้านข้างที่ใช้ในการวิเคราะห์หาแรงที่ถ่ายสูงกำแพงกันดินแบบมีค้ำยัน ซึ่งแผนภูมิลำดับนี้ได้จากการตรวจวัดแรงดันที่เกิดขึ้นจริงประสบการณ์ในสนามในชั้นดินชนิดต่างๆ (ดร.ชนาดล)



รูปที่ 2.23 แรงดันดินด้านข้างของหลุมขุดในชั้นดินเหนียวอ่อนและแข็งปานกลาง (ดร.วารากร,2553)



รูปที่ 2.24 แรงดันดินด้านข้างของหลุมขุดในชั้นทราย (ดร.วารากร,2553)



รูปที่ 2.25 แรงดันดินด้านข้างของหลุมขุดในชั้นดินเหนียวแข็ง (ดร.วารากร,2553)

## 2.2.4 การตรวจสอบเสถียรภาพของกำแพงกันดิน

งานขุดดินโดยใช้ค้ำยันหลายระดับ จำเป็นต้องออกแบบให้ดินกำแพงต่ำกว่าระดับกันหลุม ในหลายกรณี ได้แก่

1. อัตราส่วนความปลอดภัยต่อการปูดของดินกันหลุมไม่เพียงพอ
2. ต้องการลดปริมาณการไหลซึมของน้ำใต้ดินเข้าสู่บริเวณงานขุด
3. ต้องการลดการโก่งตัวของกำแพงให้อยู่ในพิสัยที่ยอมรับได้เพื่อป้องกันการทรุดตัวของดินหลังกำแพงซึ่งจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างใกล้เคียง

( ดร.พัลลภ วิสุทธิ์เมธาณุกูล,2558 )

ดังนั้นในการออกแบบกำแพงกันดินจะต้องตรวจสอบด้วยว่ากำแพงกันดินที่ออกแบบลึกเพียงพอ หรือไม่ ที่กำแพงกันดินจะไม่ล้มลงมา กำแพงกันดินที่ยาว จะต้องมีการสร้าง Strut หลายระดับขึ้นเพื่อต้านแรงจากดินหลังกำแพงแทนเพื่อลดความยาวกำแพงกันดิน ในการหาค่าความปลอดภัย (Safety factor) สามารถหาได้จาก อัตราส่วนของโมเมนต์ต้านทานกับโมเมนต์กระทำโดยที่ค่า ความปลอดภัยต้องมีค่ามากกว่า 1.2 แต่ไม่ควรเกิน 1.5 เพื่อความประหยัดในการก่อสร้าง

ในการใช้วิธี Finite Element ในการวิเคราะห์และออกแบบระบบค้ำยัน จะมีการนำปัจจัยต่างๆ เช่น ค่า Stiffness ของกำแพงกันดิน โมดูลัสของดิน และระดับความลึกของชั้นดินมาคิดคำนวณ ซึ่งค่า Stiffness ของกำแพงมีผลต่อการเอียงของกำแพงกันดินทำให้ค่าโมดูลัสของดินที่ใช้คำนวณเปลี่ยนแปลงไป ในการนำแรงดันดินด้านข้างมาคำนวณนั้น จะต้องมีการปรับปรุงแรงดันดินให้เหมาะสมต่อการ นำมาใช้ในการออกแบบ สำหรับแรงดันดินแบบ Active Rankine Pressure ถ้าใช้แรงดันดินโดยไม่มีปรับปรุงแล้วนำมาออกแบบ จะมีโอกาสที่จะเกิดอันตรายต่อระบบค้ำยันดินได้ เนื่องจากแรงดันดินที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงแรงแบบ ค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงแรงแบบ Active Rankine Pressure ซึ่งการปรับปรุงนั้นมีทั้งหมด 3 วิธี ได้แก่

1. ให้แรงดันดินด้านข้างที่กระทำมีค่าเท่ากับ 0 ที่ผิวดิน และสร้างเส้น Pressure Diagram ใหม่โดยให้เส้นที่สร้างใหม่นี้ขนานกับเส้น Pressure Diagram เดิม

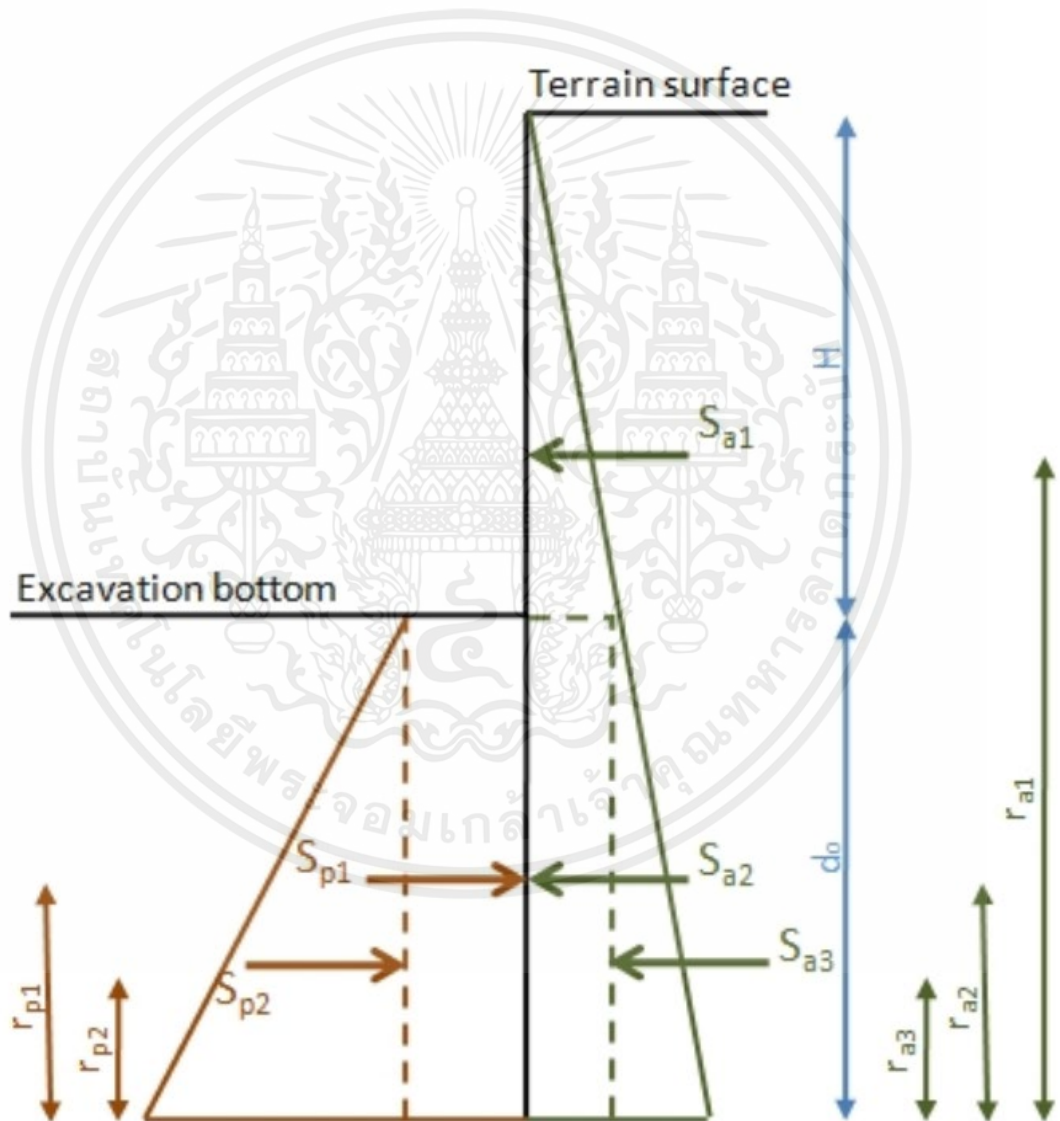
2. ให้แรงดันดินด้านข้างที่กระทำมีค่าเท่ากับ 0 ที่ผิวดิน และสร้างเส้น Pressure Diagram ใหม่ โดยที่พื้นที่สุทธิของ Pressure Diagram ที่ปรับปรุงใหม่ ต้องเท่ากับ พื้นที่สุทธิ Pressure Diagram เดิม

3. ให้แรงดันดินด้านข้างที่กระทำมีค่าเท่ากับ 0 ที่ผิวดิน และสร้างเส้น Pressure Diagram ใหม่ โดยที่เส้นที่สร้างใหม่จะมีค่าของแรงดันดินด้านข้างที่ระดับความลึกที่ขุด เท่ากับ แรงแบบ Active Rankine Pressure ที่ตำแหน่งเดียวกัน

โดยในงานขุดดินที่ทำกันอยู่ในปัจจุบันนั้น นิยมใช้การปรับปรุง Pressure Diagram แบบที่ 3 ในการนำมาคำนวณ

แรงดันดินด้านข้างที่กระทำกับกำแพงกันดินทั้งแรงแบบ Active Pressure และ Passive Pressure สามารถเขียนเป็น Diagram ได้ ตามรูปที่ 2.9 ในการคำนวณหาคู่โมเมนต์ทั้ง โมเมนต์กระทำ และ โมเมนต์

ต้านทานนั้น ค่าวนได้จากการแบ่งพื้นที่ของ Diagram เป็นหลายๆพื้นที่แล้วแปลงเป็นแรงเดี่ยวเพื่อนำแรงเหล่านี้ไปหาเป็นค่าของโมเมนต์โดยกำหนดจุดหมุนอยู่ตรงตำแหน่ง Sturt ที่อยู่ในระดับสูงสุดโดยที่ไม่นำแรงที่อยู่เหนือตำแหน่งจุดหมุนมาค่า



รูปที่ 2.26 Active and Passive earth pressure (ภคินันท์เกียรติพร โอภาส , 2563)

โมเมนต์ที่กระทำ (Acting Moments) หาได้จาก

$$M_a = \sum(\text{พื้นที่ใต้กราฟของ}\sigma_{ha} \times \text{จุดศูนย์กลางของพื้นที่ใต้กราฟของ}\sigma_{ha})$$

โมเมนต์ต้านแรงกระทำ (Resisting Moment) หาได้จาก

$$M_r = \sum(\text{พื้นที่ใต้กราฟของ}\sigma_{hp} \times \text{จุดศูนย์กลางของพื้นที่ใต้กราฟของ}\sigma_{hp})$$

ค่าความปลอดภัย (factor safety) หาได้จาก

$$F.S. = \frac{M_r}{M_a}$$

เมื่อ  $M_r =$  โมเมนต์ต้านแรงกระทำ ( $T - m/m$ )

$M_a =$  โมเมนต์กระทำ ( $T - m/m$ )

### 2.2.5 เสถียรภาพของดินก้นหลุม (Heaving)

ในขณะที่ทำการก่อสร้างงานใต้ดิน เมื่อมีการทำการขุดหลุมลงไปใต้ดิน ขณะที่สร้างระบบค้ำยันป้องกันดินพัง ดินที่อยู่หลังกำแพงจะมีพฤติกรรมเหมือนน้ำหนักที่กดทับกระทำกับดินที่ก้นหลุม ถ้าดินที่ก้นหลุมมีแรงต้านแรงกระทำกับดินหลังกำแพงไม่เพียงพอ ดินที่ก้นหลุมจะเกิดการปูดขึ้นมา ทำให้เสถียรภาพของระบบค้ำยันดินพังสูญเสียไป ดังนั้นในการออกแบบระบบค้ำยันนอกจากป้องกันจากแรงดันดินด้านข้างแล้ว จึงต้องออกแบบเพื่อป้องกันไม่ให้เสถียรภาพของดินก้นหลุมสูญเสียไปในการหาเสถียรภาพของดินก้นหลุมนั้น มีวิธีการพิจารณาได้หลายวิธีดังนี้

#### - การหาเสถียรภาพของก้นหลุมโดย Geometry of Slip Circle method

หลักการของ โดย Geometry of Slip Circle method นั้นจะพิจารณาให้ดินที่อยู่หลังกำแพงเป็นมวลดินสี่เหลี่ยมและกระทำกับดินที่อยู่ก้นหลุม ซึ่งถ้าแรงที่กระทำกับดินที่ก้นหลุมมีค่ามากกว่าแรงต้านทานของดินที่ก้นหลุมดินที่ก้นหลุมก็จะปูดขึ้นจนดินด้านล่างพังทลาย วิธีการนี้พัฒนาหลักคิดมาจากวิธีการของ Teng หลักการของ โดย Geometry of Slip Circle method นั้นมีวิธีในการหาค่า Factor Safety หาได้จากอัตราส่วนของสมการสมดุลของโมเมนต์ที่กระทำกับโมเมนต์ที่ต้านแรงกระทำ ดังรูปที่ 2.27 โมเมนต์ที่กระทำ (Acting Moments) หาได้จาก

$$M_a = \frac{WR^2}{2}$$

เมื่อ  $M_a =$  โมเมนต์กระทำ ( $T - m/m$ )

$W$  = หน่วยแรงในแนวตั้งรวมของดินหลังกำแพงจนถึงระดับดินที่ขุด ( $T - m^2$ )

$R$  = รัศมีในแนวของวิบัติจากการไถลของดิน โดยมีความยาวตั้งแต่ Strut ตัวล่างสุดไปจนถึงปลายสุดของกำแพงกันดิน ( $m$ )

โมเมนต์ที่ต้านแรงกระทำ (Resisting Moments) หาได้จาก

$$M_r = \sum (S_u \theta) \times R^2$$

เมื่อ  $M_r$  = โมเมนต์ต้านแรงกระทำ ( $T - m/m$ )

$S_u$  = หน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินแต่ละชั้น ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าความเชื่อมแน่นของเม็ดดิน ( $T - m/m$ )

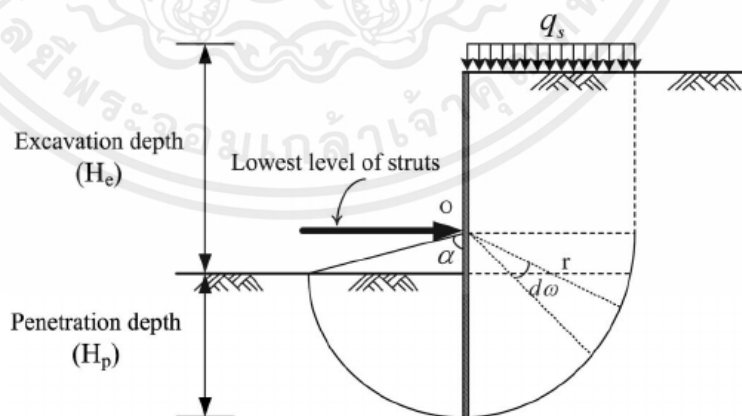
$\theta$  = มุมของดินแต่ละชั้น ( $^\circ$ )

$R$  = รัศมีในแนวของวิบัติจากการไถลของดิน โดยมีความยาวตั้งแต่ Strut ตัวล่างสุดจนถึงปลายสุดของกำแพงกันดิน ( $m$ )

ค่าความปลอดภัยของเสถียรภาพความปลอดภัยของดินกันหลุมหาได้จาก

$$F.S. = \frac{M_r}{M_a}$$

ซึ่งค่า F.S. จะต้องมีค่าเกิน 1 เพื่อความปลอดภัย แต่ไม่ควรมีค่าเกิน 1 มากเกินไปเนื่องจากราคาการก่อสร้างจะสิ้นเปลือง (แนะนำให้ใช้ค่า F.S. = 1.2 แต่สามารถให้ F.S. มีค่าเกินกว่านี้ได้)



รูปที่ 2.27 รูปภาพประกอบอธิบายทฤษฎีของ Geometry of Slip Circle method (Shih-Hsuan Wu, Chang-Yu Ou, Jianye Ching, Hsein Juang, , 2012.)

- การหาเสถียรภาพของก้นหลุมโดย Terzaghi's Theory

หลักการของ Terzaghi นั้นจะพิจารณาโดยใช้หลักการในแนวความคิดของฐานรากตื้น สำหรับงานขุดดินที่มีอัตราส่วนระหว่างความลึกในการขุดกับความกว้างในการขุด ( $H < B$ ) น้อยกว่า 1 ค่าของ *factor safety* หาได้จาก

$$F.S. = \frac{5.7S_{u1}B_1}{(\gamma HB_1 - S_uH + q)}$$

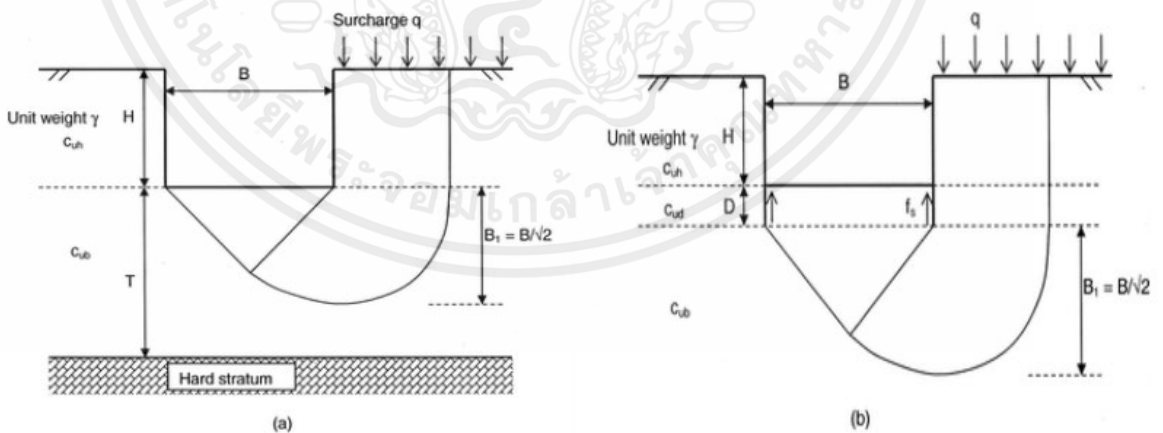
ในการหาค่า *Factor Safety* นั้นจะแบ่งเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่มีชั้นดินเหนียวที่มีความหนามากจนไม่สามารถระบุความหนาได้ อีกกรณีหนึ่งคือกรณีที่ชั้นดินเหนียวอ่อนอยู่ข้างตัวอยู่เหนือชั้นดินแข็ง ซึ่งทั้ง 2 กรณีมีการหาค่า *factor safety* ที่แตกต่างกัน

กรณีที่ชั้นดินเป็นดินเหนียวอ่อนที่มีความหนามาก

$$F.S. = \frac{C_{ub}N_c}{H(\gamma - \frac{C_{uh}}{B})\sqrt{2}}$$

กรณีที่ชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีชั้นดินแข็งรองรับ

$$F.S. = \frac{C_{ub}N_c}{H(\gamma - \frac{C_{uh}}{T})}$$



รูปที่ 2.28 การหาค่า F.S. ด้วยวิธี Terzaghi (a) ชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีชั้นดินแข็งรองรับ (b) ชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีความหนามาก (A.T.C.Goh , F.H.Kulhawy , K.S.Wong , 2008)

เมื่อ  $C_{ub}, C_{uh}$  = หน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวและใต้ระดับดินชุดตามลำดับ ( $T/m^2$ )

$B$  = ความกว้างระหว่างกำแพงกันดินทั้ง 2 ฝั่ง ( $T - m^2$ )

$N_c$  = Bearing Capacity Factor

$H$  = ความสูงของระดับดินชุด ( $m$ )

$\gamma$  = หน่วยน้ำหนักของดิน ( $T/m^3$ )

$q$  = น้ำหนักกระทำกับขอบกำแพง ( $T/m^2$ )

$D$  = ความสูงจากผิวดินชุดถึงผิวดินแข็ง ( $m$ )

- การหาเสถียรภาพของกันหลุม โดย Bjerrum and Eide

หลักการของ Bjerrum and Eide นั้นจะพิจารณาโดยใช้หลักการในแนวความคิดของฐานรากลึกสำหรับงานชุดดินที่มีอัตราส่วนระหว่างความลึกในการชุดกับความกว้างในการชุด ( $H > B$ ) มากกว่า 1 และพิจารณาว่าพื้นที่งานชุดดินเป็นลักษณะรูปสี่เหลี่ยม หรือ รูปวงกลม โดยการกาค่าของ Factor Safety นั้นสามารถหาได้จาก

$$F.S. = N_c \frac{c}{\gamma H + q}$$

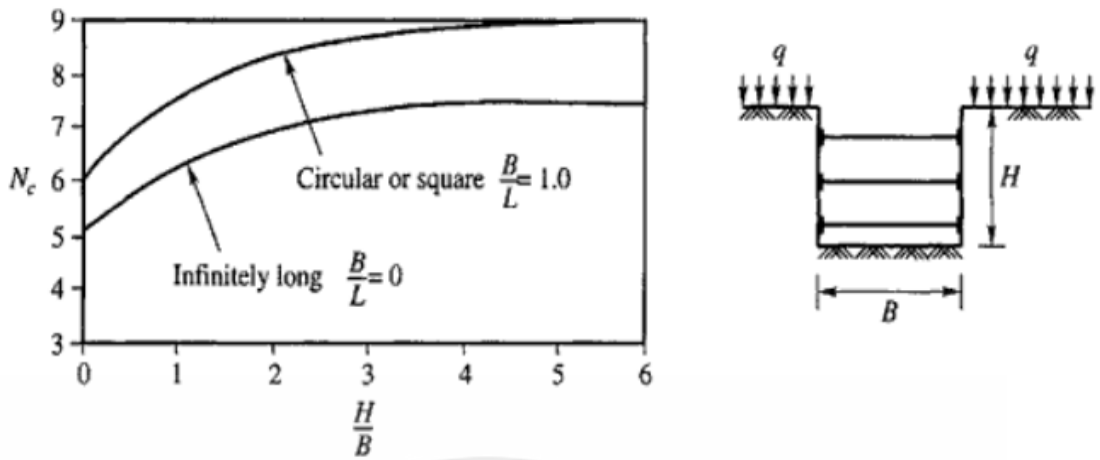
เมื่อ  $N_c$  = Bearing Capacity Factor

$H$  = ความสูงของระดับดินชุด ( $m$ )

$\gamma$  = หน่วยน้ำหนักของดิน ( $T/m^3$ )

$q$  = น้ำหนักกระทำกับขอบกำแพง ( $T/m^2$ )

$c$  = ค่าความเชื่อมั่นแน่นของเม็ดดิน ( $T/m^2$ )



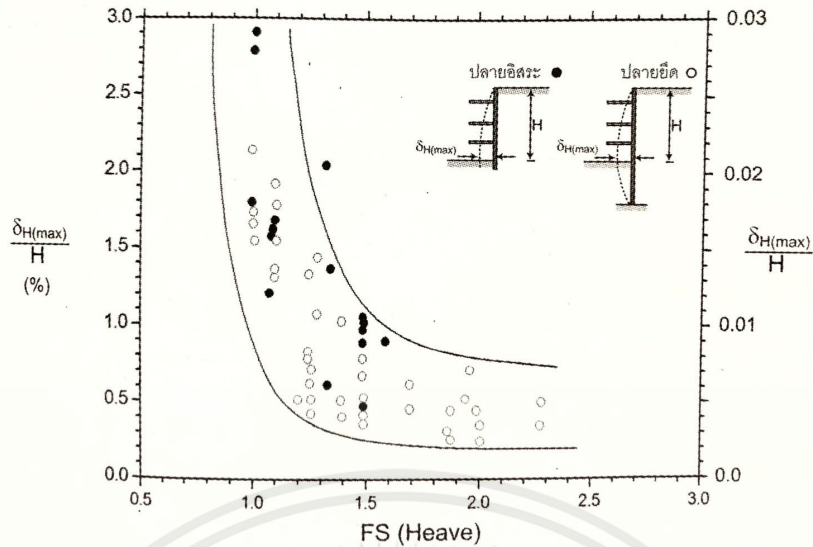
รูปที่ 2.29 การหาค่า F.S. ด้วยวิธี Bjerrum and Eide (Bjerrum and Eide, 1956)

### 2.2.6 การเคลื่อนตัวของระบบค้ำยัน

การเคลื่อนตัว (Movement) ของระบบค้ำยันขึ้นอยู่กับเทคนิคการก่อสร้างเป็นหลัก หากการก่อสร้างระบบค้ำยันทำโดยดินจะเคลื่อนตัวทางข้างในลักษณะบีบระบบค้ำยันทำให้เกิดการทรุดตัวบริเวณผิวดิน ใกล้กับกำแพงด้วย ได้ดีและรวดเร็ว การเคลื่อนตัวจะเกิดน้อย โดยที่ขนาด (Magnitude) การเคลื่อนตัวนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน (Soil Type) ความลึกงานขุด (H) ความกว้างของงานขุด (B) ระยะจากท้องงานขุดถึงชั้นดินแข็งที่อยู่ลึกลงไป ระยะฝังของดินกำแพง สติฟเนสของระบบค้ำยัน (EI) ระยะห่างของค้ำยันในแนวดิ่ง การอัดแรงในค้ำยัน (Prestress) และการปรับปรุงคุณภาพดิน (Soil Improvement)

Mana and Clough (1981) ได้รวบรวมกรณีศึกษาของงานขุดใช้กำแพงเข็มพืดและค้ำยันหลายระดับในดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลาง (ส่วนใหญ่  $c$  น้อยกว่า 50 kPa) 11 กรณี ซึ่งมีขั้นตอนการก่อสร้างแบบปกติกล่าวคือ ไม่มีการอัดแรงในค้ำยัน ค้ำยันระดับแรกอยู่ลึกไม่เกินความลึกของรอยแยกดินเหนียว ( $2c_u/\gamma_t$ ) และไม่รวมถึงผลกระทบเนื่องจากการลดระดับน้ำใต้ดินและผลกระทบจากการตอกเสาเข็ม

Mana and Clough กำหนดอัตราส่วนปลอดภัย (FS) ด้วยวิธีของ Terzaghi (1943) แล้วพล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง FS และการเคลื่อนตัวทางข้างสูงสุด ( $\delta_{H(max)}$ ) ดังในรูปที่ 2.31 จะเห็นว่า เมื่อ  $FS > 1.5$  อัตราส่วน ( $\delta_{H(max)}/H$ ) จะมีค่าเฉลี่ยคงที่ประมาณ 0.5% แต่เมื่อ FS ลดต่ำกว่า 1.5 ค่าการเคลื่อนตัวทางข้างจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากดินมีพฤติกรรมพ้นช่วงอีลาสติกไปแล้ว นอกจากนี้ยังพบว่า การเคลื่อนตัวทางข้างสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณท้องงานขุด (Bottom of Excavation) หรือต่ำกว่าเล็กน้อย โดยระยะฝังของเข็มพืดใต้ท้องงานขุดจะมากหรือน้อยก็แทบไม่มีผลต่อขนาดการเคลื่อนตัวทางข้างสูงสุด



รูปที่ 2.30 ความสัมพันธ์ระหว่าง ( $\delta_{H(max)}$ ) กับ F.S. ของงานชุดดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลาง (Mana and Clough, 1981)

ในงานชุดดินใช้ค้ำยันหลายระดับ ควรให้อัตราส่วน ( $\delta_{H(max)}/H$ ) มีค่าไม่เกิน 0.5% ถึง 0.7% หากบริเวณใกล้เคียงมีโครงสร้างสำคัญ การออกแบบอาจจำเป็นต้องควบคุมให้ ( $\delta_{H(max)}/H$ ) น้อยกว่า 0.5% ในทางตรงข้ามหากบริเวณใกล้งานชุดเป็นพื้นที่โล่งปราศจากอาคาร การออกแบบอาจยอมให้ ( $\delta_{H(max)}/H$ ) มากกว่า 0.7% สำหรับการทรุดตัวของผิวดิน ( $\delta_v$ ) Mana and Clough เสนอความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวของผิวดินสูงสุด ( $\delta_{v(max)}$ ) และการเคลื่อนตัวทางข้างสูงสุด ( $\delta_{H(max)}$ ) ดังนี้

$$\delta_{v(max)} = 0.5\delta_{H(max)} \text{ to } 1.0\delta_{H(max)}$$

โดยที่  $\delta_{v(max)}$  = การเคลื่อนตัวในแนวตั้งสูงสุด

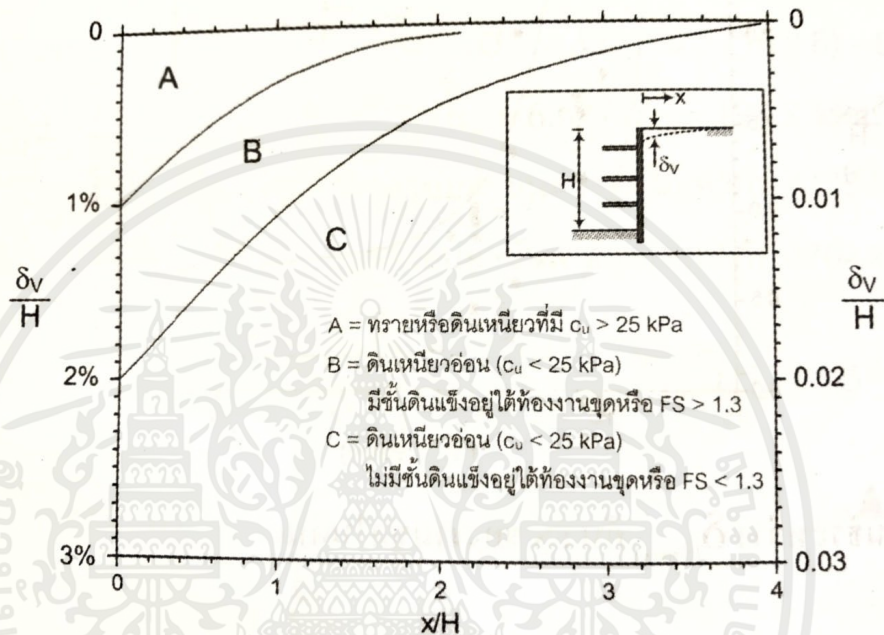
$\delta_{H(max)}$  = การเคลื่อนตัวทางข้างสูงสุด

Raymond (1997) อธิบายว่า กรณีดินเม็ดหยาบ ( $c' = 0$ ) หากค้ำยัน (Struts) ได้รับการติดตั้งอย่างรวดเร็วทันทีที่ชุดดินถึงระดับที่ต้องติดตั้งค้ำยันและทำการอัดแรงในค้ำยันเท่ากับ 100% ของแรงที่ได้จากการออกแบบ การเคลื่อนตัวทางข้างจะมีค่าประมาณ 0.2%H

สำหรับดินเหนียวที่มีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำไม่เกิน 50 kPa (อ่อนถึงแข็งปานกลาง) การรวมตัวจะเกิดขึ้นค่อนข้างมาก ถึงแม้การก่อสร้างระบบค้ำยันจะทำให้ดีและรวดเร็วก็

ตาม ประสบการณ์ชี้ให้เห็นว่า การเคลื่อนตัวส่วนใหญ่เกิดขึ้นบริเวณท้องงานชุดเนื่องจากดินมี  
แนวโน้มที่จะปูด การติดตั้งค้ำยันและอัดแรงในค้ำยัน จึงควรทำให้รวดเร็วที่สุดโดยควรอัดแรง  
100% ของแรงออกแบบ แม้กระนั้น การเคลื่อนตัวทางข้างสูงสุดของระบบค้ำยันยังสูงถึง 1%H ถึง  
2%H

(ดร.พัลลภ วิสุทธิเมธานุกุล, 2557)

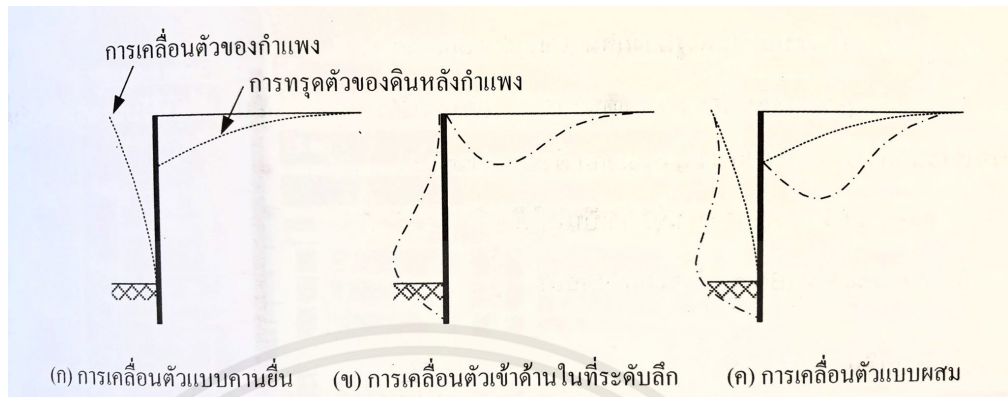


รูปที่ 2.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง S, กับประเภทของดิน (after Peck, 1969)

สำหรับดินเหนียวแข็ง ( $C_u > 50$  kPa) ยิ่งดินมีค่า  $C_u$  มากเท่าใด การเคลื่อนตัวยิ่งน้อย  
เท่านั้น หากติดตั้งค้ำยันได้รวดเร็วโดยอัดแรง 100% ของแรงออกแบบ การเคลื่อนตัวทางข้างมักไม่  
เกิน 0.1%H

ในการที่จะลดการเคลื่อนตัวลงให้น้อยที่สุดผู้ออกแบบควรกำหนดค้ำยันระดับแรกไม่เกิน  
ความลึกของรอยแยกกรณีดินเหนียว และใช้ระยะห่างแนวค้ำยันไม่เกิน 3 ถึง 4 เมตรเมื่อ  
กำแพงเป็นเข็มพืดเหล็ก (ระยะห่างแนวค้ำยันอาจมากกว่านี้ ถ้ากำแพงมีสติเฟนสูงเช่น  
กำแพงไดอะแฟรม) โดยเฉพาะถ้าเป็นกรณีที่การเคลื่อนตัวอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อ  
โครงสร้างบนดินที่อยู่ใกล้เคียงได้ควรพิจารณาใช้ระยะห่างแนวค้ำยัน 2.5 เมตร ซึ่งเป็นระยะห่างน้อย  
ที่สุดที่คนสามารถทำงานได้สะดวก ฟังดินกำแพงลงไปใต้ระดับขุดคอนกรีตหยาบ (Lean) ที่ระดับ

จุดสุดท้ายให้เร็วที่สุด นอกจากนั้นอาจใช้วิธีขุดดินโดยเหลือคันดิน (Berm) ไว้รอบๆที่องงานขุด เพื่อลดโอกาสที่ดินจะปูดและลดการเคลื่อนตัวของข้างของกำแพงส่วนล่าง



รูปที่ 2.32 รูปแบบการเคลื่อนตัวของกำแพงและการทรุดตัวของผิวดิน (ดร.พัลลภ วิสุทธิ์เมธานุกูล, 2557)

### 2.2.7 การก่อสร้างระบบค้ำยัน

- การติดตั้งเสา Kingpost

เสาเหล็กหลัก (Kingpost) เป็นส่วนที่รับแรงจากเหล็กค้ำยัน (Strut) ในแนวตั้งแล้ว ถ่ายลงสู่ดินทำหน้าที่เหมือนเสาในอาคารขนาดใหญ่ ยังสามารถใช้เป็นฐานรากในการรับป็นจันเสาสสูง (Tower Crane) ในการลำเลียงวัสดุและสิ่งต่างๆ ได้อีกด้วย หมายเหตุ แผ่นเหล็กพื้น (Platform) เป็น โครงสร้างที่ประกอบด้วยตงเหล็กและแผ่นเหล็กที่นำมาเชื่อมติดกันทำหน้าที่เหมือนพื้นวางอยู่บนเหล็กค้ำยัน (Strut) เพื่อใช้ประโยชน์ในการขุดดิน การขนส่งวัสดุ และอื่นๆ

โดยวิธีการก่อสร้างโดยสังเขป คือ ติดตั้งคานนำร่องชั่วคราวให้มีพิกัดตรงตามที่ต้องการแบบ ทำการหย่อนเหล็ก H-Beam ตรวจวัดตั้ง ในระยะแรกจะใช้ Collar crane ยกและปล่อย H-Beam ให้ตรงตามช่องของคานนำร่อง (Guide) หลังจากนั้นจะใช้ Vibro Hammer ทุบปัก H-Beam ให้ได้ระดับที่กำหนด



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 2.33 การติดตั้งเสา Kingpost (a) คานนำร่อง (b) การหย่อน H-Beam ด้วย Collar crane (c) การใช้ Vibro Hammer ไดรฟ์กด H-Beam

- การติดตั้ง Sturt

เหล็กค้ำยัน (Strut) เป็นส่วน โครงสร้างที่รับแรงแนวแกนที่ถ่ายจากเหล็กค้ำยันรอบ (Wale) และรับแรงแนวตั้งที่ถ่ายจากแผ่นเหล็กพื้น (Platform) ซึ่งนำมาวางบนเหล็กค้ำยัน (Strut) เพื่อให้ประโยชน์ต่างๆ



รูปที่ 2.34 Single Strut

จากรูปที่ 2.35 เป็น Strut ประเภท Single Strut โดยวิธีการก่อสร้างโดยสังเขป คือ ติดตั้งหูช้าง (Normal Bracket) เพื่อใช้เป็น Support ของ Wale ลำดับถัดมาเชื่อมติดเหล็ก C-Channel ด้านล่างกับเสา King Post ทำการวาง Strut ให้ตรงตามตำแหน่งที่ถูกต้องแบบไว้ ติดตั้ง Universal Jack เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการ Pre Load เชื่อมติดเหล็ก C-Channel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านบนกับเสา King Post และทำการเชื่อมติดเหล็กฉาก (Angle Steel) เพื่อป้องกันการเกิดการโก่งเดาะ (Buckling) ของ Strut ใช้คอนกรีตเทบริเวณที่รับแรงอัดของ Wale และช่องว่างระหว่าง Wale กับ Pile wall เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงอัด หลังจากนั้นทำการ Pre Load ด้วย Electric Pump

- การ Pre-loading

การทำ Pre-loading ในตัวค้ำยันจะช่วยลดการเคลื่อนตัวของคานข้างและลดการเสียรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) ของค้ำยันได้ รวมทั้งยังช่วยลดช่องว่างจากการติดตั้ง Bolt และ Nut ในตัวค้ำยัน ค่าการอัดแรงควรอยู่ระหว่าง 40 – 50 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักออกแบบ (Design load) ขั้นตอนการ Pre-loading แบ่งได้ดังนี้ (เอกสารประกอบ การบรรยาย รองศาสตราจารย์ ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

ขั้นตอนที่ 1 : ทำการติดตั้งสาย Hydraulic กับ Universal Jack 400 และตู้ Control Pump เพื่อให้ตู้ Control Pump อัดน้ำมันไปยัง Universal Jack 400 ได้



(a)

(b)

รูปที่ 2.35 การติดตั้งสาย Hydraulic (a) การติดตั้งสาย Hydraulic กับ Control Pump (b) การติดตั้งสาย Hydraulic กับ Universal Jack 400

ขั้นตอนที่ 2 : เติมน้ำมันเข้า Control Pump และทำการตรวจสอบการทำงานของเครื่อง โดยสังเกตค่า Pressure Gauge ไม่มีการลดลง เมื่อเราเดินเครื่อง Control Pump เพื่อตรวจสอบว่าสาย Hydraulic ต่อกันสนิทไม่มีรอยรั่ว



(a)

(b)

รูปที่ 2.36 (a) การเติมน้ำมันเข้า Control Pump (b) Pressure Gauge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 3 : เมื่อตรวจสอบการทำงานของเครื่องเรียบร้อยแล้ว จะเริ่มทำการ Pre Load 3 รอบ 10 25 40 ตัน ระยะเวลาระหว่างรอบ 10 นาที ตามลำดับ โดยจะทำการวัดระยะห่างเกลียวของ Universal Jack 400 ก่อน-หลัง ที่จะให้ Load การเว้นระยะเวลา และการ Pre Load ที่แบ่งเป็นรอบๆ มีจุดประสงค์เพื่อจะช่วยให้ทราบถึงความผิดปกติของ Sturt เนื่องจากในกรณีนี้ Strut เกิดการเสถียรรูปค่าผลต่างที่ได้จากการวัดก่อน-หลัง Pre Load จะมีค่ามากกว่า 3 เซนติเมตร



(a)

(b)

(c)

รูปที่ 2.37 (a) ตรวจสอบการทำงานก่อน Pre-loading (b) วัดระยะห่างเกลียวของ Universal Jack 400 (c) Universal Jack 400



(a)

(b)

(c)

รูปที่ 2.38 (a) Pre-loading 10 t (b) Pre-loading 25 t (c) Pre-loading 40 t

ขั้นตอนที่ 4 : หลังจาก Pre Load เสร็จจะทำการหมุนเกลียวรอบ Universal Jack 400 เพื่อเป็นการล็อกไม่ให้เกิดการผ่อนของ Load ใน Universal Jack 400 ขึ้น

ขั้นตอนที่ 5 : ขันปิดวาล์วบริเวณ Universal Jack 400 เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำมันไหลทะลักออกมา ถัดมาทำการลดแรงดัน และปลดสาย Hydraulic ที่ต่อกับ Control Pump ออก และนำภาชนะบรรจุไปเก็บน้ำมันที่ยังค้างอยู่ในสาย



(a)



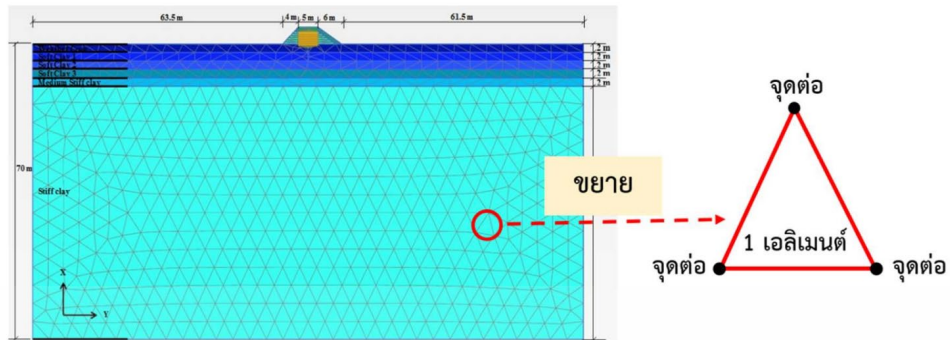
(b)

รูปที่ 2.39 (a) การลดแรงดันที่ Control Pump (b) การถอดสาย Hydraulic

### 2.3 การวิเคราะห์แบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ปัจจุบัน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ห้ออกแบบและแก้ปัญหาทางวิศวกรรมที่มีความยุ่งยากและซับซ้อน เพื่อให้เกิดความถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์วิธีการปรับปรุงคุณภาพชั้นดิน โดยการสร้างแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method; FEM) และวิธีสมดุลจำกัด (Limit Equilibrium Method; LEM) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ห้ออกแบบและแก้ปัญหาทางวิศวกรรมปฐพีหรือธรณีเทคนิค เนื่องจากวิธีดังกล่าวสามารถสร้างแบบจำลองได้เหมือนกับโครงสร้างที่อยู่ในโครงการก่อสร้างจริง ยิ่งไปกว่านั้นการสร้างแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ยังสามารถจำลองขั้นตอนการก่อสร้างได้อีกด้วย ข้อดีของการประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สร้างแบบจำลอง คือสามารถใช้แบบจำลองเพื่อทำนายพฤติกรรมของโครงสร้างช่วยลดความเสี่ยงของการพิบัติ และความง่ยในการสร้างแบบจำลอง ในทางตรงกันข้ามการประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ยังคงมีข้อเสีย เนื่องจากผู้วิเคราะห์จำเป็นต้องมีความรู้ เข้าใจในหลักการ และทฤษฎีของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธี สมดุลจำกัด เพื่อช่วยให้ผู้วิเคราะห์ มั่นใจว่าผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือตามหลักการและเหตุผล ดังนั้นผู้วิเคราะห์หรือผู้ใช้โปรแกรมควรศึกษาทำความเข้าใจคู่มือ (Manual) ของแต่ละ โปรแกรมอย่างละเอียด สามารถสร้างแบบจำลองที่ถูกต้อง เพื่อนำไปสู่กระบวนการวิเคราะห์และได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ แต่อย่างไรก็ตามผู้วิเคราะห์ยังคงจำเป็นต้องตรวจสอบความสมเหตุสมผลของแบบจำลองทุกครั้ง เพื่อช่วยยืนยันความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ และ 3 มิติ และวิธีสมดุลจำกัดประยุกต์ใช้ในการออกแบบและแก้ปัญหาในงานทางวิศวกรรมปฐพีโดยเฉพาะประยุกต์ใช้กับการปรับปรุงคุณภาพชั้นดินด้วยวิธีต่าง ๆ

### 2.3.1 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



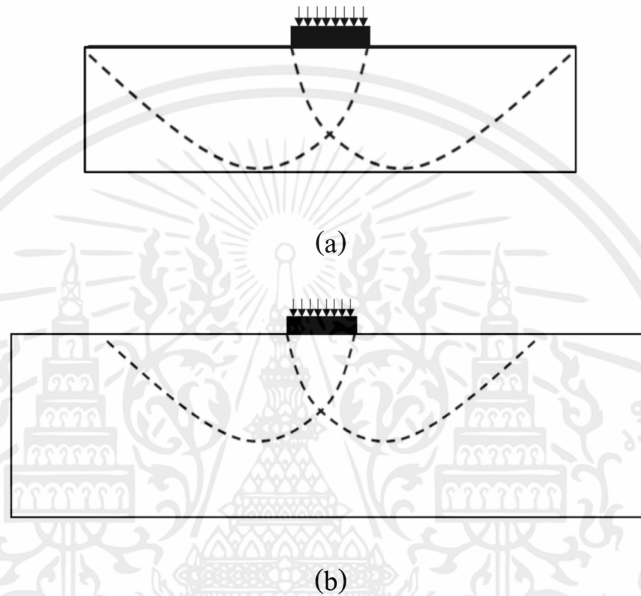
รูปที่ 2.40 การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลอง (ศศิธา ไชยพุทธ , 2565)

การวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นการวิเคราะห์ด้วยวิธีการเชิงตัวเลข (Numerical Method) หาผลเฉลยทางคณิตศาสตร์ในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมให้ได้ผลลัพธ์โดยประมาณ ประกอบด้วยสมการควบคุมระบบและเงื่อนไขขอบเขต การวิเคราะห์จะแบ่งแบบจำลองหรือโดเมนของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ เรียกว่า เอลิเมนต์ (Element) โดยเอลิเมนต์จะเชื่อมต่อกันด้วยจุดต่อหรือโหนด (Node) (รูปที่ 9.1) ซึ่งบางครั้งจุดต่ออาจอยู่ภายในเอลิเมนต์ เพื่อความละเอียดในการคำนวณ สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของแต่ละเอลิเมนต์บนโดเมนจะสร้างจากสมการควบคุมระบบเพื่อให้ได้ผลลัพธ์โดยประมาณ นำไปสู่การแก้ปัญหาและผลเฉลยของปัญหาที่จุดต่อบนโดเมนไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบและแก้ปัญหาต่าง ๆ ทางวิศวกรรมปฐพี เช่น การทรุดตัวของดิน การเคลื่อนตัวในแนวราบ และ ค่าความปลอดภัยหรืออัตราส่วนความปลอดภัย เป็นต้น ยิ่งไปกว่านั้นการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมปฐพีอาจมีข้อพิจารณาเพิ่มเติมนอกเหนือจากการพิจารณาทฤษฎีพื้นฐาน เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมโดยทั่วไป เช่น พฤติกรรมของชั้นดินอาจขึ้นอยู่กับความเค้นประสิทธิผลไม่ใช่ความเค้นรวม หรือการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในระยะเวลาสั้น ๆ จำเป็นต้องวิเคราะห์แบบความเค้นรวม จึงนับเป็นวิธีที่มีความน่าเชื่อถือและแม่นยำกว่าวิธีการวิเคราะห์อื่น ๆ

### 2.3.2 ขอบเขตแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองมีผู้วิเคราะห์จำนวนมากไม่ได้คำนึงถึงขอบเขตที่เหมาะสมของแบบจำลองที่สร้างขึ้น เพื่อออกแบบหรือวิเคราะห์ปัญหาจากการก่อสร้างจริง การสร้างแบบจำลองขนาดใหญ่จะใช้เวลาาน และอาจต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการวิเคราะห์ ในทางตรงกันข้ามหากผู้วิเคราะห์กำหนดขอบเขตของแบบจำลองน้อยไป จะทำให้ผลการวิเคราะห์ไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงที่ชั้นดินมีขอบเขตไม่จำกัด ตัวอย่างเช่น หากผู้วิเคราะห์สร้างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองที่มีขอบเขตขนาดเล็กเกินไป ดังรูปที่ 9.2(ก) น้ำหนักของโครงสร้างที่วางอยู่บนชั้นดิน อาจส่งผลถึงชั้นดินในระดับที่ลึกกว่าความลึกของชั้นดินที่แสดงในแบบจำลอง ซึ่งถูกกำหนดให้อยู่ภายในขอบเขตที่ผู้วิเคราะห์กำหนด ในเดียวกันหากผู้วิเคราะห์กำหนดขอบเขตของแบบจำลองที่มีขนาดเหมาะสมพฤติกรรมของชั้นดินที่ศึกษาในแบบจำลอง เช่น การรับแรงของชั้นดิน การเคลื่อนตัว และการทรุดตัว เป็นต้น จะแสดงอย่างอิสระไม่ถูกบังคับด้วยขอบเขตของแบบจำลองสอดคล้องกับสภาพปัญหาจริงดังรูปที่ 2.41(b)



รูปที่ 2.41 อิทธิพลของขอบเขตของแบบจำลอง (a) ขอบเขตของแบบจำลองขนาดเล็กเกินไป (b) ขอบเขตของแบบจำลองที่มีขนาดเหมาะสม (ศลิษา ไชยพุทธ , 2565 )

การสร้างแบบจำลองงานขุดดิน แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การก่อสร้างกำแพงกันดิน และก่อสร้างห้องใต้ดิน ตามลำดับ

- 1.) การก่อสร้างกำแพงกันดิน (รูปที่ 2.42) มีขอบเขตดังนี้
  - ความลึกขั้นต่ำของแบบจำลอง ควรเท่ากับ 2 เท่าของความสูงของโครงสร้างกำแพงกันดิน
  - ความกว้างขั้นต่ำของแบบจำลอง ควรเท่ากับ 2 เท่าของระยะฝังบวกับ 2 เท่าของความสูงของโครงสร้างกำแพงกันดิน

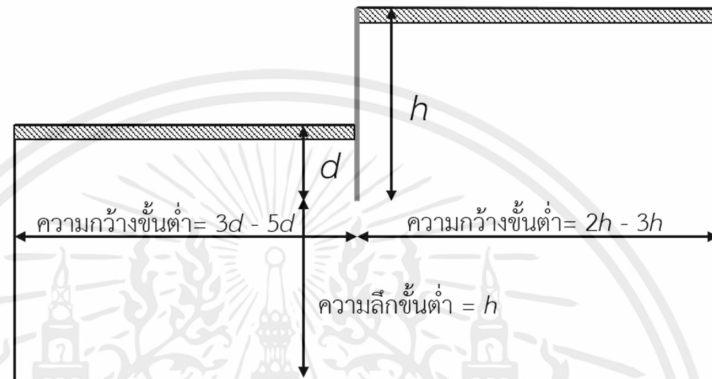
2.) การก่อสร้างห้องใต้ดิน (รูปที่ 2.43) การสร้างขอบเขตขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการวิเคราะห์ ดังนี้

- การวิเคราะห์เสถียรภาพ (Stability Analysis)  $a > l$  และ  $a \geq 2d$

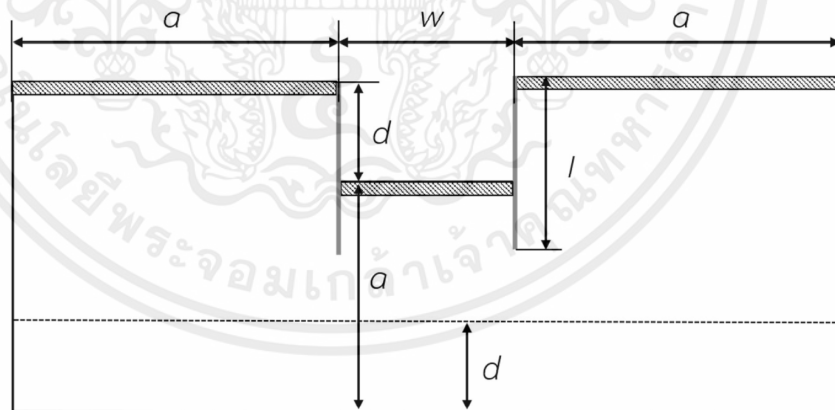
- การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงลักษณะของดิน (Deformation Analysis)

แนะนำโดย Meißner H. (2002);  $a = 2d - 3d$  หรือ  $2w - 3w$  (เลือกใช้ค่ามาก)

แนะนำโดย Vermeer และ Wehnert (2005);  $a \geq 2d$



รูปที่ 2.42 ขอบเขตของแบบจำลองการก่อสร้างกำแพงกันดิน (ที่มา : PLAXIS Vietnam Seminar , 2008)



รูปที่ 2.43 ขอบเขตของแบบจำลองการก่อสร้างห้องใต้ดิน (ที่มา : PLAXIS Vietnam Seminar, 2008)

### 2.3.3 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือน

การสร้างแบบจำลองที่ประกอบด้วยวัสดุที่มีความแตกต่างกัน 2 ชนิด ต้องกำหนดค่าสัมประสิทธิ์

กำลังร่วมเฉือนระหว่างผิวสัมผัสที่แตกต่างกันของวัสดุ 2 ชนิด ในแบบจำลอง คู่มือของโปรแกรม แพคซิส(PLAXIS) แนะนำการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือน ( $R_{inter}$ ) ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือน (ที่มา : คู่มือของโปรแกรมแพคซิส)

วัสดุ	ค่าสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือน
ทรายและเหล็ก	0.7 – 0.6
ดินเหนียวและเหล็ก	0.5
ทรายและคอนกรีต	1.0 - 0.8
ดินเหนียวและคอนกรีต	1.0 - 0.7
ดินและแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน	1.0
ดินและแผ่นใยสังเคราะห์	0.9 - 0.5

### 2.3.4 การวิเคราะห์เสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีไฟไนเอลิเมนต์ แบบ 2 มิติ

เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนเอลิเมนต์ แบบ 3 มิติ มีความซับซ้อนในการสร้างแบบจำลองใช้เวลานานในการวิเคราะห์ และจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีศักยภาพสูง ทำให้วิธีไฟไนเอลิเมนต์แบบ 2 มิติ ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบและแก้ปัญหาทางวิศวกรรมปฐพีอย่างกว้างขวาง

วิธีไฟไนเอลิเมนต์ แบบ 2 มิติ ถูกวิเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขระนาบความเครียด และเงื่อนไขสมมาตรรอบแกน (Axis-Symmetry) เงื่อนไขดังกล่าวเหมาะสมกับปัญหาที่โครงสร้างมีลักษณะยาวต่อเนื่องในทิศทางหนึ่ง (ทิศทางในแนวแกน 2 เช่น ถนน และ เขื่อน แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างต่าง ๆ ในหลาย ๆ โครงการก่อสร้าง มีลักษณะที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยเฉพาะการวิเคราะห์เสาเข็มและเสาเข็มดินซีเมนต์ ที่มีลักษณะเป็นแท่งไม่มีความต่อเนื่องในแนวแกน 2

การวิเคราะห์เสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีไฟไนเอลิเมนต์ แบบ 2 มิติ โปรแกรมจะจำลองโครงสร้าง

ของเสาเข็มดินซีเมนต์ให้มีลักษณะเป็นกำแพงยาวต่อเนื่อง เรียกว่า "กำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ 2 มิติ" (Chai และคณะ 2014) ทำให้โครงสร้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ในแบบจำลองมีความแข็งแรงมากกว่าโครงสร้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ก่อสร้างภายในโครงการก่อสร้างจริง ดังนั้นในการสร้างแบบจำลอง

เสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีไฟไนเอลิเมนต์ แบบ 2 มิติ จำเป็นต้องแปลงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีรูปร่างเป็น 3 มิติ

ให้เป็นกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ 2 มิติ ซึ่งนิยมใช้ 2 วิธี ได้แก่

- 1) วิธี 2 มิติ - B เท่ากัน (2D - Equal B) คือ การกำหนดให้ความกว้างประสิทธิภาพของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ ( $B_{wall}$ ) มีค่าเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มดินซีเมนต์ ( $D_{col}$ ) และสมบัติของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ ได้แก่ ค่ามอดุลัสยืดหยุ่น และ ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน คำนวณจากค่าเฉลี่ยของพื้นที่ของเสาเข็มดินซีเมนต์ และ ดินเหนียวรอบ ๆ เสาเข็มดินซีเมนต์ ในแต่ละแถว ดังแสดงในสมการที่ 2.3.4.1 และ 2.3.4.2

$$E_{wall} = E_{col}a_r + E_{soil}(1 - a_r) \quad (2.3.4.1)$$

$$E_{wall} = E_{col}a_r + E_{soil}(1 - a_r) \quad (2.3.4.2)$$

โดยที่  $E_{wall(equal)}$  คือ ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ (มอดุลัสยืดหยุ่นเทียบเท่า)

$E_{col}$  คือ ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของเสาเข็มดินซีเมนต์แต่ละต้น

$E_{soil}$  คือ ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของดินเหนียวอ่อน

$C_{wall(equal)}$  คือ ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์

$C_{col}$  คือ ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินของเสาเข็มดินซีเมนต์แต่ละต้น

$C_{soil}$  คือ ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินของดินเหนียวอ่อน

$a_r$  คือ อัตราส่วนพื้นที่ที่ปรับเทียบจากพื้นที่เสาเข็มในแต่ละแถว

- 2) วิธี 2 มิติ - เท่ากัน (2D - Equal) คือ การสมมติให้สมบัติของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่จำลองเป็นกำแพงยาวต่อเนื่องมีสมบัติเท่ากับเสาเข็มดินซีเมนต์แต่ละต้น โดยกำหนดให้ค่าความแข็งแรงแนวแกน (EA) หรือ ค่าความแข็งแรงเชิงคด (EI) เท่ากัน เรียกว่า วิธี 2 มิติ - EA เท่ากัน (2D - Equal EA) และ วิธี 2 มิติ - EI เท่ากัน (2D - Equal EI) ตามลำดับ ดังนั้นความกว้างประสิทธิภาพของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ จึงมีค่าไม่เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มดินซีเมนต์ การแปลงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีรูปร่างเป็น 3 มิติให้เป็นกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ 2 มิติ ดังแสดงในสมการที่ 2.3.4.3 และ 2.3.4.4

วิธี 2 มิติ - EA เท่ากัน;  $E_{wall}A_{wall} = n_{col}(E_{col}A_{col})/n_{col} - 1)s \quad (2.3.4.3)$

วิธี 2 มิติ - EI เท่ากัน;  $E_{wall}I_{wall} = n_{col}(E_{col}I_{col})/n_{col} - 1)s \quad (2.3.4.4)$

โดยที่  $n_{col}$  คือ จำนวนเสาเข็มดินซีเมนต์ในทิศทางตามแนวระนาบ

s คือ ระยะห่างระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์สองต้นในทิศทางตามแนวระนาบ



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัย เป็นส่วนที่แสดงรายละเอียดต่างๆเกี่ยวกับการดำเนินการวิจัย อาทิเช่น การเลือกกลุ่มตัวอย่างของผู้วิจัย เครื่องมือในการวิจัย การเก็บรวบรวมข้อมูล และการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดในการวิจัย เป็นต้น ซึ่งงานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาเชิงปริมาณ เนื้อหาของการวิจัยจะมุ่งเน้นและศึกษาเกี่ยวข้องกับ การพิจารณาความสามารถในการต้านทานการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน Pile wall กับความลึกของงานขุดดิน ในเขตพื้นที่ดินเหนียวอ่อน สำหรับงานใต้ดิน

ซึ่งปัจจัยที่สำคัญ คือ การเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นของกำแพงกันดิน Pile wall โดยการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน Pile wall เป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของการรับน้ำหนักกระทำและแรงดันดินด้านข้างที่เกิดขึ้น โดยมีกระบวนการวิจัยตั้งแต่เริ่มต้น วิจัยจนถึงสิ้นสุดการวิจัย ดังนี้

#### 3.1 ขอบเขตการวิจัยและข้อตกลงเบื้องต้น

##### 3.1.1 ปัญหาการวิจัย

การทำการก่อสร้างใต้ดินนั้น สิ่งที่สำคัญเป็นอย่างมากในการก่อสร้างโครงสร้างใต้ดิน คือ ระบบค้ำยันและระบบกำแพงกันดิน เพราะ การก่อสร้างที่มีกำแพงกันดินที่ไม่สามารถต้านทานแรงดันดินด้านข้างที่เกิดขึ้นได้ ดินพื้นดินนั้นจะเกิดการวิบัติและพังทลายลงมาได้ ซึ่งทำให้เกิดผลกระทบต่อทางด้านความปลอดภัยภายในไซท์งานและ โครงสร้างข้างเคียง ส่งผลไปถึงค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นมากขึ้น

##### 3.1.2 คำถามการวิจัย

1. คำถามหลัก : การเพิ่มความลึกในงานขุดดินสำหรับงานก่อสร้างใต้ดิน ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางของ Pile wall เท่ากัน ตามที่วิศวกร ได้พิจารณางานก่อสร้างใต้ดินจะสามารถขุดลึกได้เท่าใด ?

2. คำถามรอง : การพิจารณาความสามารถในการต้านทานกำแพงกันดินต้องศึกษาจากปัจจัยอะไรบ้าง ?

### 3.1.3 สมมุติฐานเบื้องต้น

ในการขุดที่มีความลึกน้อย Pile wall เกิดการ โกงตัวในขอบเขตที่ยอมรับได้ หากเกิดการขุดที่มีความลึกเพิ่มขึ้นอาจมีความจำเป็นในการเพิ่ม Layer ของ Strut เพื่อต้านทางแรงดันดินด้านข้างที่กระทำกับ Pile wall และเป็นการควบคุมการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินให้ลดลง ดังนั้นการติดตั้งระบบค้ำยัน Strut 2 Layer จะสามารถควบคุมการเคลื่อนตัวได้ดีกว่า การติดตั้งระบบค้ำยัน Strut 1 Layer ทั้งนี้การตรวจสอบเสถียรภาพของกำแพงกันดินก็เช่นเดียวกัน เมื่อความลึกในการขุดดินมีมากขึ้น ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพของกำแพงกันดินจะลดลง

### 3.1.4 เงื่อนไขเบื้องต้นของงานวิจัย

ข้อมูลที่ผู้วิจัยทำการศึกษาและรวบรวมนั้น เป็นข้อมูลที่ได้จากโครงการแห่งหนึ่ง เขตพระโขนง กทม.เท่านั้น แต่อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่ได้จากการวิจัยนั้น สามารถนำไปใช้อ้างอิงเพื่อประกอบการตัดสินใจในโครงการอื่นได้ถ้าหากโครงการนั้นมีความคล้ายคลึงกับ โครงการข้างต้น โดยมีเงื่อนไขเบื้องต้นของโครงการดังนี้

1. ดินที่ได้จากการสำรวจของโครงการแห่งหนึ่งเขตพระโขนง กทม. ในการศึกษา
2. บ่อขุดดินมีความยาว 50 เมตร
3. ใช้กำแพงกันดิน ประเภท Pile wall ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตร
4. มีน้ำหนักกระทำบนปากบ่อขุดชนิดแผ่สม่ำเสมอที่มีขนาด 20 kN/m

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

- 1) โปรแกรม Microsoft Excel สำหรับการคำนวณคุณสมบัติวัสดุ Pile Wall ตรวจสอบ Balance Moment และ Heaving Effect จำนวนชั้น และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน Pile wall และความลึกของงานขุด
- 2) โปรแกรม Plaxis สำหรับคำนวณหาค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน Pile wall

### 3.3 กำลังของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบ

- 1) เหล็กข้ออ้อย SD50 หน่วยแรงดึงที่จุดคราก = 5000 ksc สำหรับเสริมใน Pile Wall
- 2) กำลังอัดของคอนกรีตสำหรับทำ Pile Wall ที่ 28 วัน = 280 ksc (Cylinder)
- 3) เหล็กเกรด SS400 ตามมาตรฐาน JIS G3101 สำหรับทำ Wales และ Strut โดยมี หน่วยแรงดึงที่จุดครากต่ำสุด = 2400 ksc และ หน่วยแรงดึงประลัย = 4000 ksc

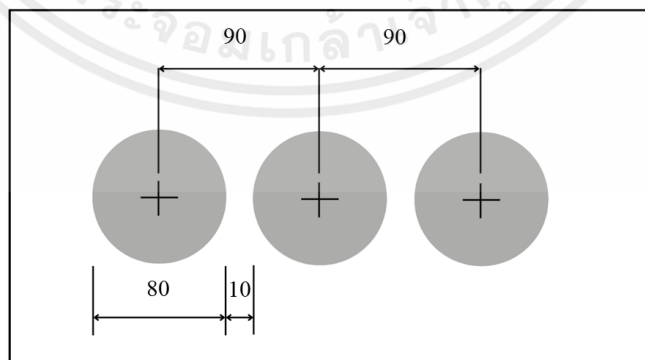
### 3.4 ตำรวลักษณะการทำงานเบื้องต้นของโครงการ

#### 3.4.1 สภาพชั้นดิน

พื้นที่ที่ทำการศึกษาดังอยู่เขตพระโขนง กทม. ซึ่งเป็นพื้นที่เศรษฐกิจใจกลางกรุงเทพมหานคร เป็นการก่อสร้างอาคารแบบผสม ข้อมูลจากการเจาะสำรวจชั้นดินจนถึงระดับความลึก 100 เมตร ชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) 2 ชั้น ชั้นดินเหนียวแข็งถึงดินเหนียวแข็งมาก (Stiff Clay to Very Stiff Clay) 4 ชั้น ชั้นดินทราย (Sand) ทั้งหมด 4 ชั้น มีการใช้กำแพงกันดินประเภท Pile wall มีการใช้ระบบค้ำยันเป็น Steel Strut H-Beam 350 x 350

#### 3.4.2 กำแพงกันดินประเภท Pile wall

Pile Wall มีลักษณะเป็นเสาคอนกรีตที่มีเหล็กเสริมฝังอยู่ในคอนกรีต ฝังอยู่ในดินทำหน้าที่เป็นผนัง คอนกรีตอยู่ใต้ดิน กำแพงกันดินประเภท Pile wall ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตร มีช่องว่างระหว่าง Pile wall แต่ละต้นอยู่ที่ 10 เซนติเมตร Concrete Covering อยู่ที่ 10 cm. สามารถคำนวณหาคุณสมบัติของวัสดุได้ดังนี้



รูปที่ 3.1 หน้าตัด Top view ของ Pile wall Diameter 80 cm.

**Pile wall Ø 80 cm.**

1) Original Properties

$$\begin{aligned} \text{Diameter } \varnothing &= 80.0 \text{ cm.} \\ \text{Concrete Covering} &= 7.5 \text{ cm.} \\ D_s = 80.0 - (2 \times 7.5) &= 65.00 \text{ cm.} \\ \text{Gab between Pile Wall} &= 10.0 \text{ cm.} \end{aligned}$$

2) Cross Section

$$\begin{aligned} A &= \frac{\pi \varnothing^2}{4} \\ &= \frac{\pi \times 80^2}{4} \\ &= 5,027 \text{ cm}^2 \\ EA &= E_c \times A \\ &= 2.53\text{E}+05 \times 5,027 \\ &= 1.27\text{E}+09 \text{ kg / nos} \\ &= 7.14\text{E}+08 \times 100.0 / 90.0 \\ &= 1.41\text{E}+09 \text{ kg / 1m} \\ &= 1.38\text{E}+07 \text{ kN / 1m} \\ W &= 9.81 \times 0.8 \times 5,027 / 10,000 \\ &= 3.9 \text{ kN / m – nos} \\ &= 3.9 \times 100.0 / 90.0 \\ &= 4.38 \text{ kN / m – m} \end{aligned}$$

3) Moment of Inertia

$$\begin{aligned} I &= \frac{\pi \varnothing^4}{64} \\ &= \frac{\pi 80^4}{64} \end{aligned}$$

$$= 2.01E+06 \quad \text{cm}^4$$

$$EI = E_c \times I$$

$$= 252,671 \times 2,010,619$$

$$= 5.08E+11 \quad \text{kg - cm}^2 / \text{nos}$$

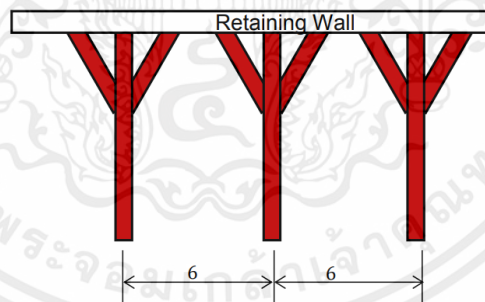
$$= 5.08E+11 \times 100 / 90.0$$

$$= 5.64E+11 \quad \text{kg - cm}^2 / 1\text{m}$$

$$= 5.54E+05 \quad \text{kg - m}^2 / 1\text{m}$$

### 3.4.3 ระบบค้ำยันกำแพงกันดิน (Strut)

ระบบค้ำยัน (Strut) ของ Pile wall เป็นประเภท Single Strut วัสดุที่ใช้เป็น Steel Strut H-Beam 350 x 350 mm. เป็นส่วน โครงสร้างที่รับแรงแนวแกนที่ถ่ายจากเหล็กค้ำยันรอบ Wale สามารถคำนวณหาคุณสมบัติของวัสดุได้ดังนี้



รูปที่ 3.2 Strut ประเภท Single Strut

#### **Strut H 350 x 350**

$$\text{Spacing between Strut} = 6 \quad \text{m.}$$

$$A = 173.9 \quad \text{cm}^3$$

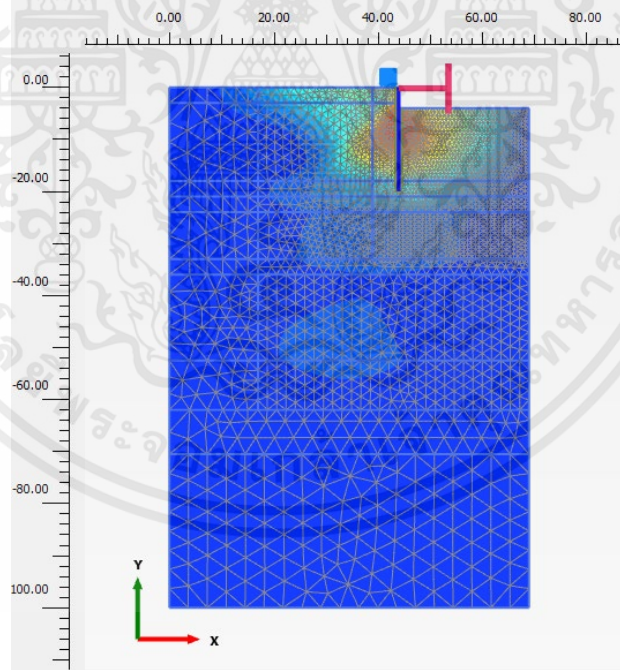
$$EA = \frac{(2.04E+06) \times 173.9 \times 9.81}{1,100}$$

$$= 3.48E+06 \quad \text{kN}$$

### 3.5 โปรแกรม Finite Element (Plaxis)

#### 3.5.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

พฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของกำแพงกัน Pile wall และแรงในค้ำยัน (Strut) ถูกนำมาศึกษา และวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ (2D Finite Element Method) บนราบความเครียด (Plane Strain) กำหนดให้ 1 ซีนส่วนรูปสามเหลี่ยม (Triangular Element) ประกอบไปด้วย 15 จุดต่อ (Nodes) และกำหนดอิเลเมนต์ที่มีความละเอียดมาก (Very Fine Mesh) เพื่อมาใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองขอบเขตของแบบจำลอง มีขนาด 69 เมตร ในแนวแกน x สูงสุดและมีขนาด 44 เมตร ในแนวแกน y ต่ำสุด ซึ่งขนาดของแบบจำลองดังกล่าวมีขนาดเพียงพอ ทำให้ไม่ได้รับอิทธิพลจากขอบเขตของแบบจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ข้อมูลที่ได้จากการเจาะสำรวจสภาพชั้นดินในบริเวณก่อสร้างนำมาเป็นค่าตัวแปรเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สภาพชั้นดินที่จำลองดังแสดงในตารางที่ 1 เสมือนจริงตามข้อมูลที่ได้จากการเจาะสำรวจ พบว่าดินเหนียวอ่อนมีความลึกอยู่ที่ 18 เมตร โดยระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ความลึก 1.0 เมตร จากผิวดิน



รูปที่ 3.3 แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ

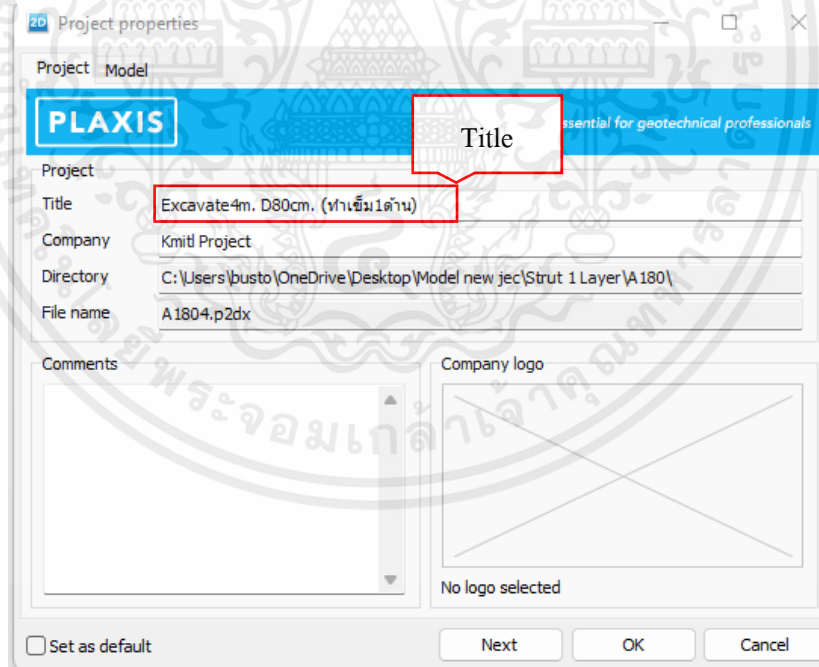
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

Layer	DEPTH (m.)		TYPE OF SOIL	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	C kN/m <sup>2</sup>	O (°)	E <sub>s</sub> kN/m <sup>2</sup>	$\nu$	Material Model	Material Type	Interfaces
	FROM	TO									
1	0	3	Soft Clay	15.4	12.4		6,200.00	0.495		Undrained C	0.95
2	3	18	Soft Clay	15.7	20.1		10,040.00	0.495		Undrained C	0.95
3	18	21	Stiff Clay	19.1	100		80,000.00	0.495		Undrained C	0.95
4	21	24	Medium Sand	19.9	3	30	21,375.00	0.400		Drained	0.95
5	24	33	Very Stiff Clay	18	168.6		168,600.00	0.495	Mohr-Coulomb	Undrained C	0.95
6	33	36	Dense Sand	19	3	34	78,500.00	0.400		Drained	0.95
7	36	52.5	Hard Clay	20.8	195.4		253,998.00	0.495		Undrained C	0.95
8	52.5	62	Very Dense Sand	20	5	34.5	115,833.33	0.400		Drained	0.95
9	62	70.5	Hard Clay	21.1	189.7		246,610.00	0.495		Undrained C	0.95
10	70.5	100	Very Dense Sand	21.9	5	35.5	157,000.00	0.400		Drained	0.95

การวิเคราะห์กำหนดให้พฤติกรรมของดินอยู่ภายใต้เงื่อนไขการวิบัติของมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb Failure Criteria) โดยมีพฤติกรรมแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Condition) สำหรับดินเหนียว และมีพฤติกรรมแบบระบายน้ำ (Drained) สำหรับดินทราย

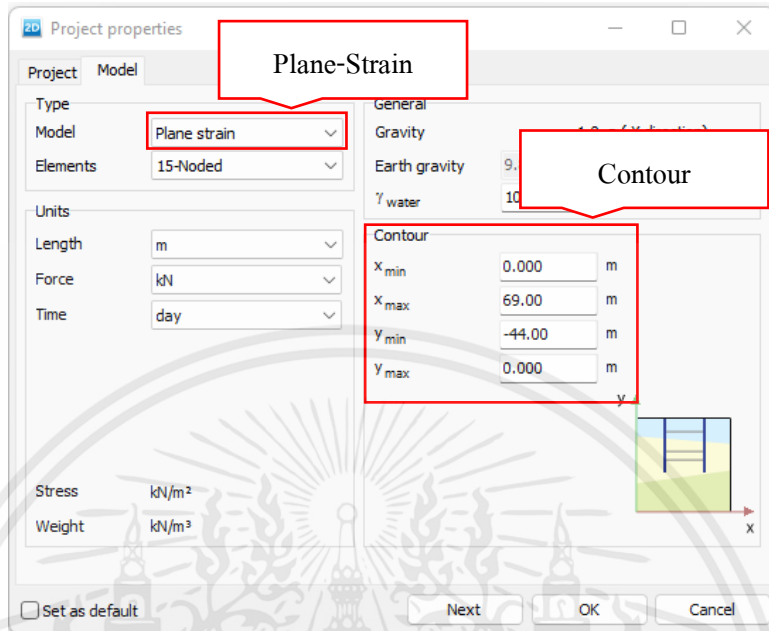
### 3.5.2 ลำดับการจำลองการก่อสร้างในโปรแกรม Finite Element (Plaxis)

- ตั้งชื่อ Title เลือกลงชื่อของไฟล์เพื่อความสะดวกต่อการเรียกใช้ข้อมูล



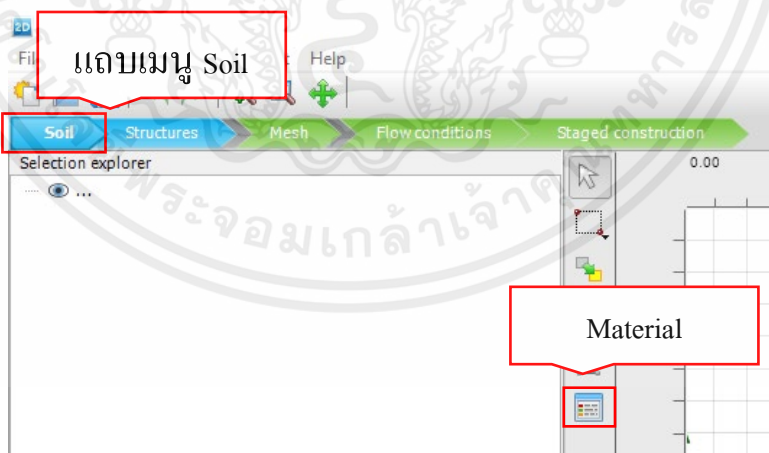
รูปที่ 3.4 การตั้ง Title (Plaxis 2D)

- ตั้งค่า Model โดยเลือกเป็น Plane strain กำหนด Contour



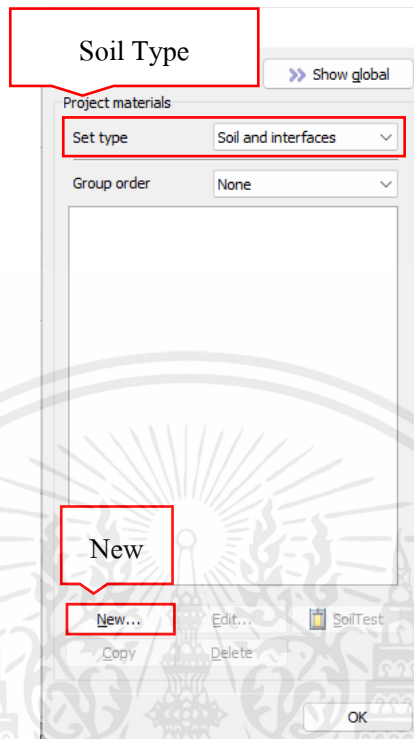
รูปที่ 3.5 การตั้งค่า Project properties

- เลือกเมนู Soil แถบขบวน และทำการเลือก Material เพื่อทำการใส่ข้อมูลดินลงแบบจำลอง



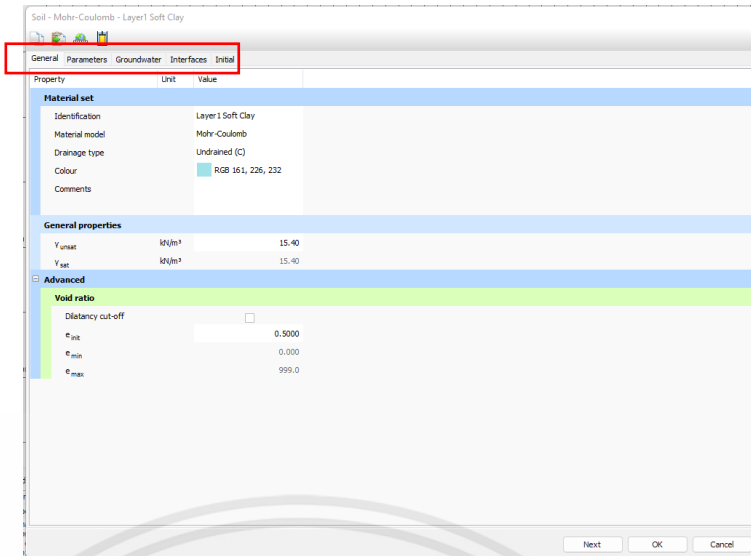
รูปที่ 3.6 การใส่ข้อมูลดิน (Plaxis 2D)

4. กดที่แถบ Set Type เลือก Soil and interfaces และกดปุ่ม New เพื่อสร้างข้อมูลชุดใหม่ในไฟล์จำลอง

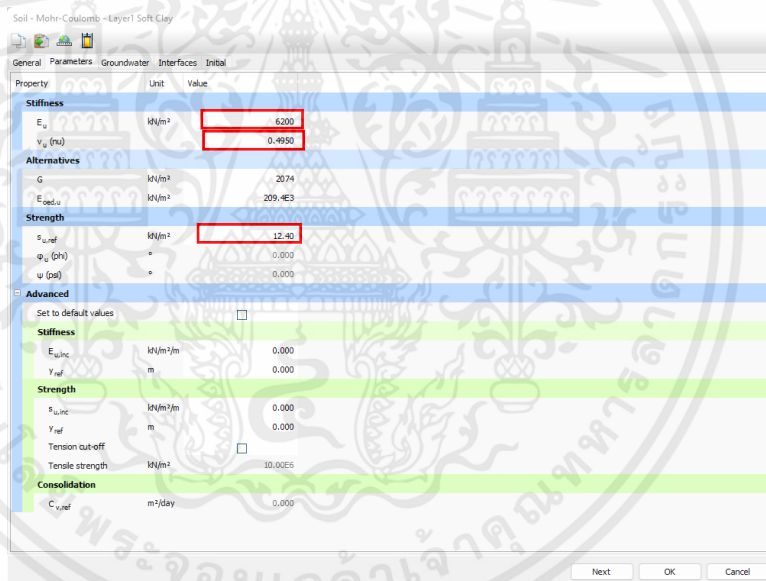


รูปที่ 3.7 Material set สำหรับ Soil and interfaces (Plaxis 2D)

5. คลิกไปที่ปุ่มตามแถบด้านบนซ้ายมือ General และใส่ค่า Parameter ต่างๆที่ทราบค่าลงไป (ส่วนที่ไม่ทราบค่า โปรแกรม จะคำนวณให้โดยอัตโนมัติ) และใส่กรอกข้อมูลจาก General > Parameters > Groundwater > Interfaces > Initial ตามลำดับ

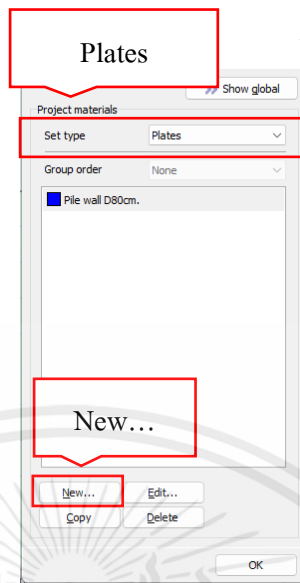


รูปที่ 3.8 การใส่ข้อมูลดินที่ได้จาก Boring Log , General (Plaxis 2D)



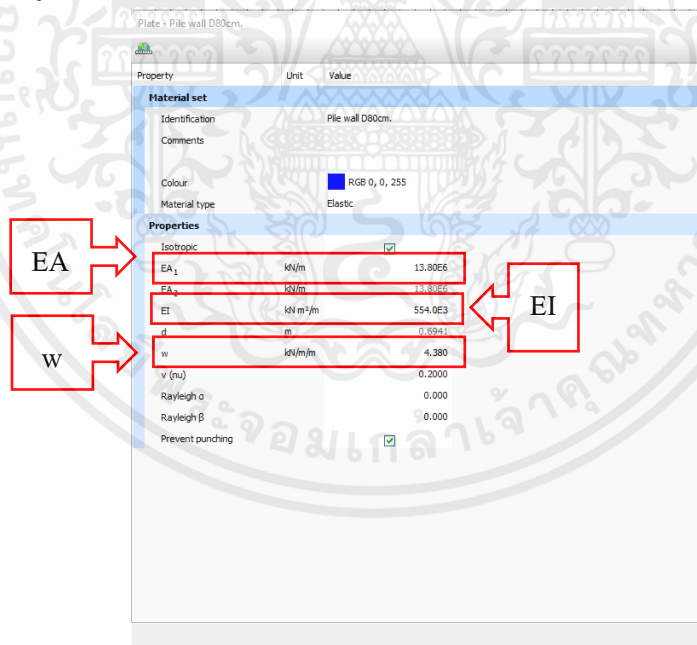
รูปที่ 3.9 การใส่ข้อมูลดินที่ได้จาก Boring Log , Parameters (Plaxis 2D)

6. กดที่แถบ Set Type เลือก Plates และกดปุ่ม New เพื่อสร้างข้อมูลกำแพงกันดิน Pile wall



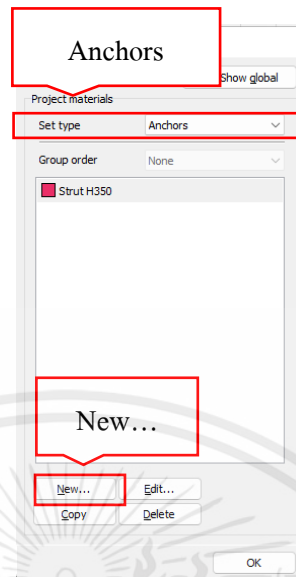
รูปที่ 3.10 Material set สำหรับ Plates (Plaxis 2D)

7. ใส่ข้อมูลที่ได้จากรายการคำนวณ ค่า EA , EI และ w



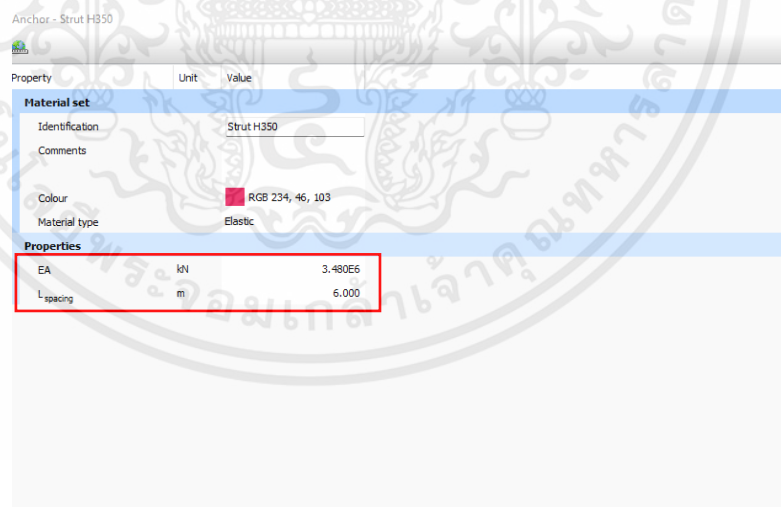
รูปที่ 3.11 การใส่ข้อมูล Pile wall ที่ได้จากกรคำนวณ (Plaxis 2D)

8. กดที่แถบ Set Type เลือก Anchors และกดปุ่ม New เพื่อสร้างข้อมูลของ Strut



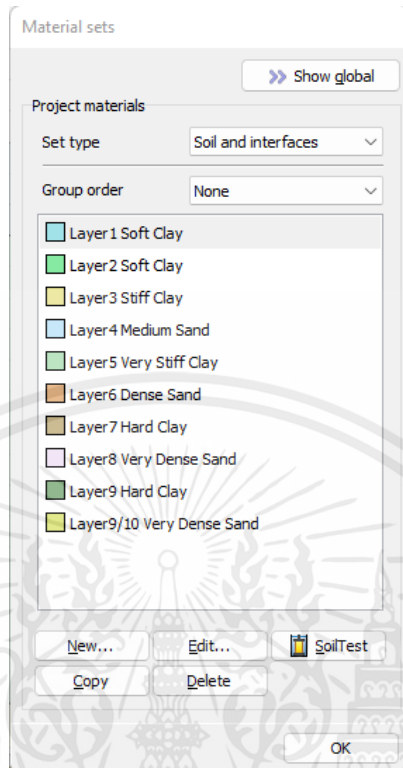
รูปที่ 3.12 Material set สำหรับ Anchors (Plaxis 2D)

9. ใส่ข้อมูลที่ได้จากรายการคำนวณ ค่า EA และค่าระยะห่างระหว่าง Strut (L,spacing)



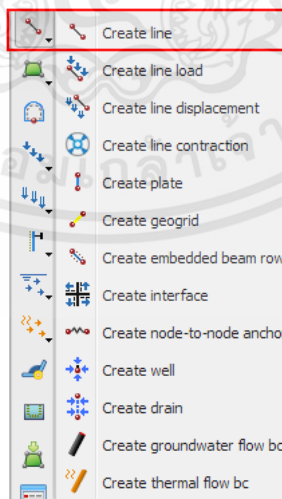
รูปที่ 3.13 การใส่ข้อมูล Strut ที่ได้จากการคำนวณ (Plaxis 2D)

10. ทำการใส่ข้อมูลชั้นดิน เสริม และ Strut จนครบถ้วน และลากข้อมูลดินลงตาม Layer



รูปที่ 3.14 การใส่ข้อมูลดิน 10 ชั้น

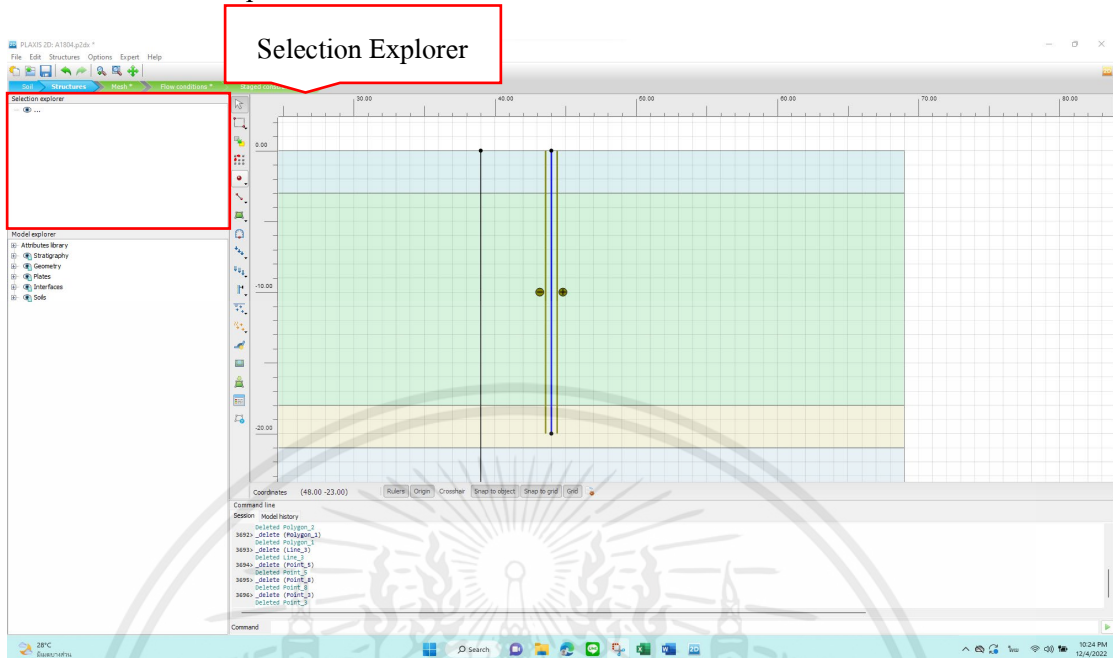
11. ลากเมาส์ไปที่ Create line เพื่อทำการสร้างแบบจำลอง Pile wall



รูปที่ 3.15 การเลือกเครื่องมือ Create line

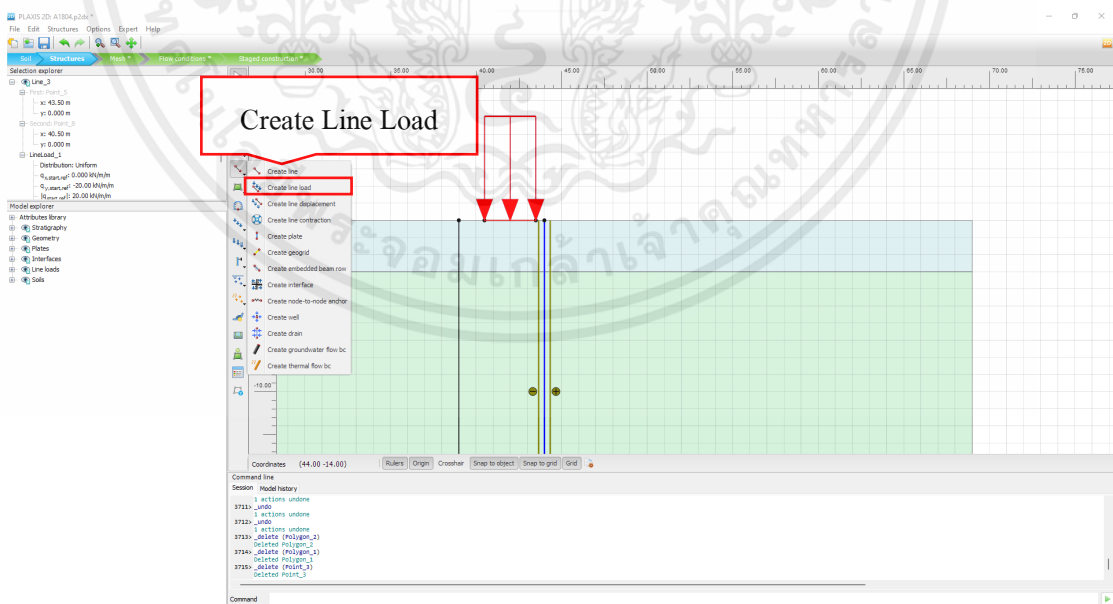
## 12. ทำการสร้าง Pile wall และคลิกที่ Line ที่สร้างไว้ เพื่อทำการกำหนดความลึกตำแหน่งที่

### Selection Explorer ของ Pile wall



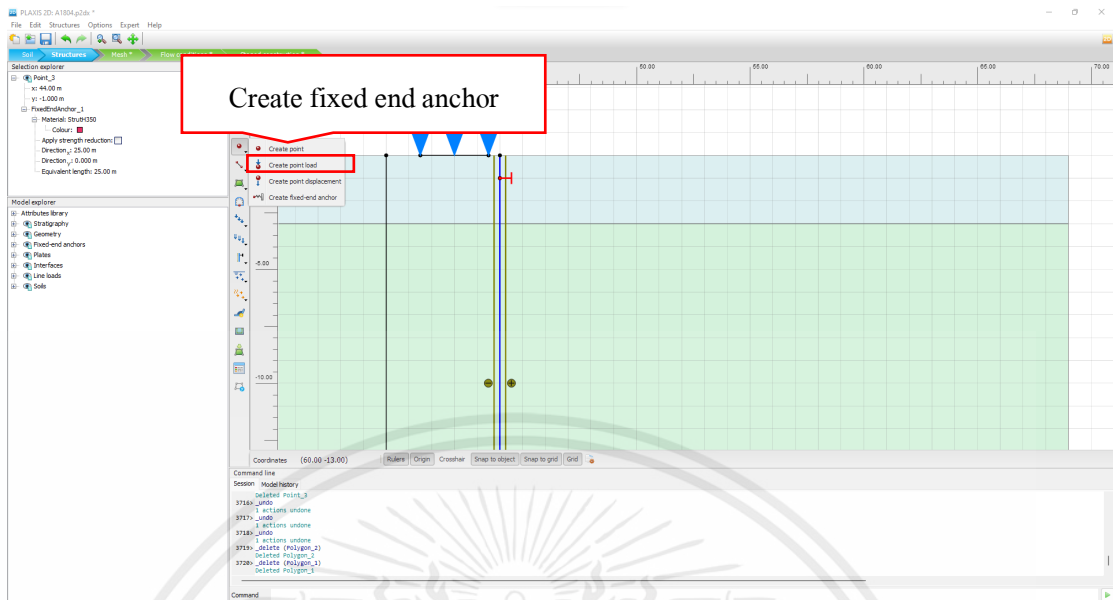
รูปที่ 3. 16 การสร้าง Pile wall และปรับขนาด

## 13. สร้าง Surcharge Load ด้วยคำสั่ง Create Line Load



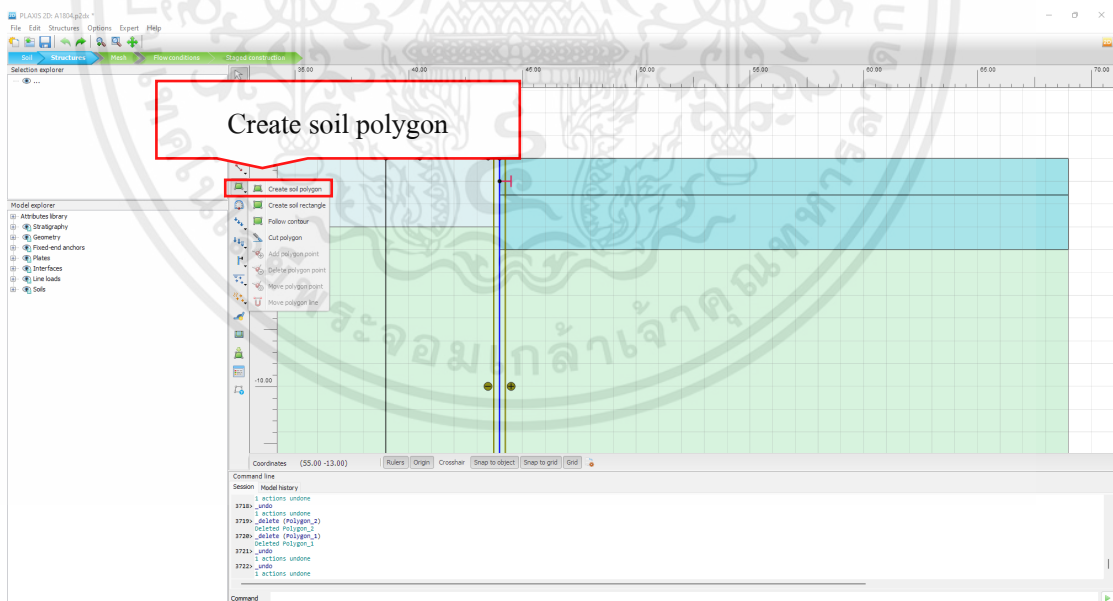
รูปที่ 3.17 การสร้าง Surcharge Load

## 14. สร้าง Strut ด้วยคำสั่ง Create fixed end anchor



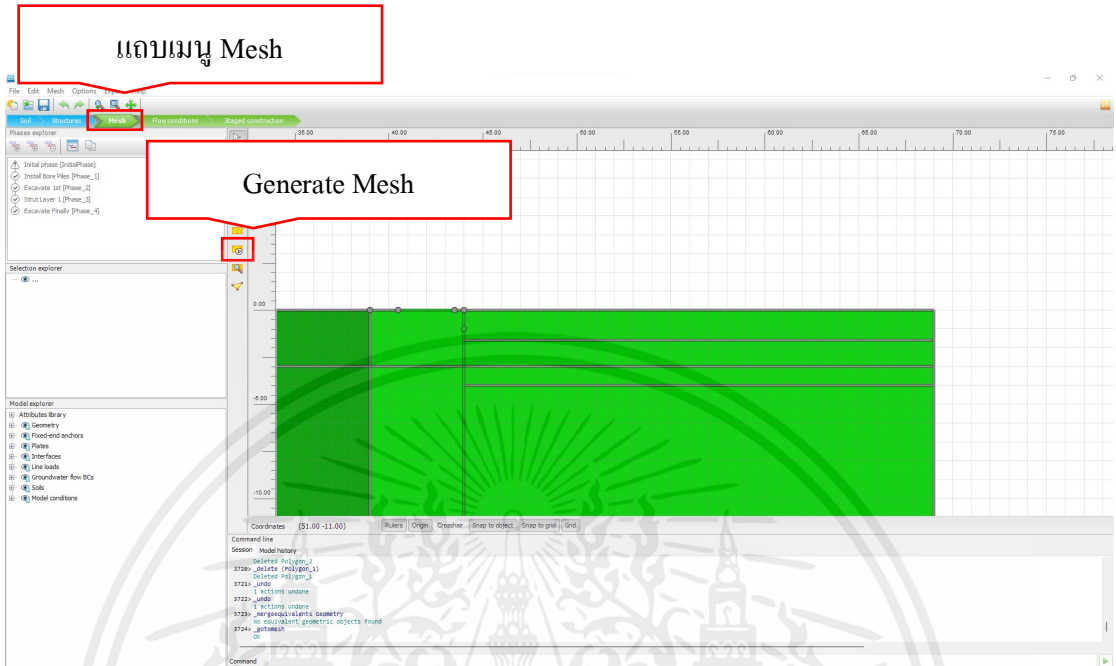
รูปที่ 3.18 การสร้าง Strut ด้วยเครื่องมือ Create fixed end anchor

## 15. เลือกไปที่คำสั่ง Create soil polygon เพื่อทำการแบ่งชั้นดินที่จะทำการขุดในแต่ละ Stage



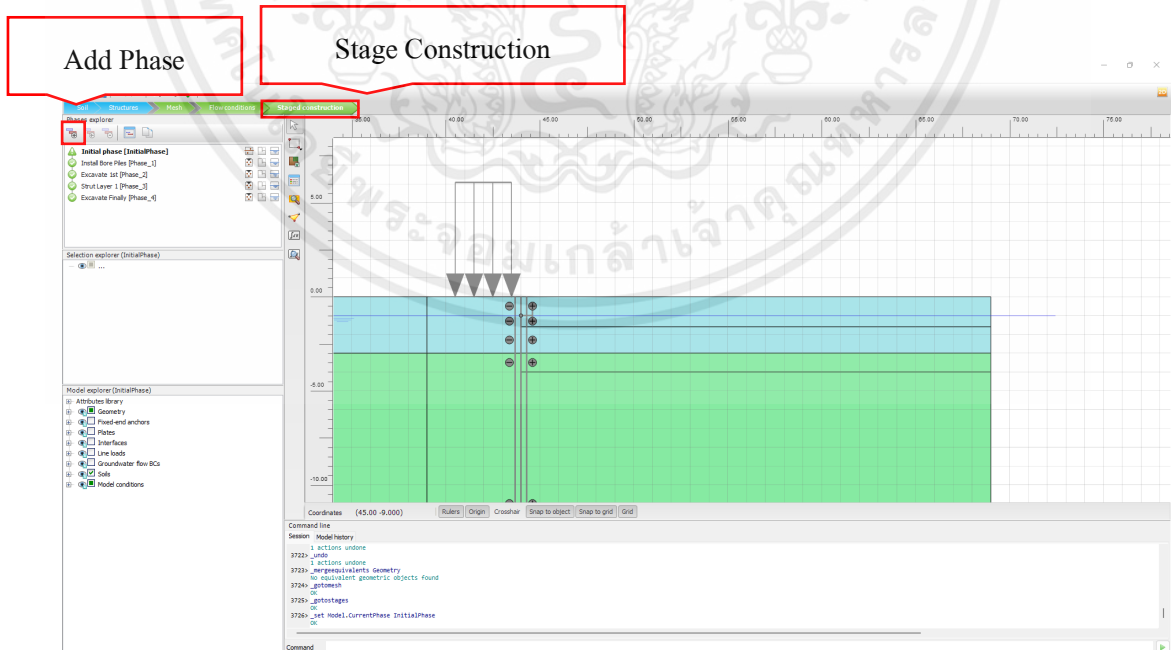
รูปที่ 3.19 การแบ่งชั้นดินที่จะทำการขุดในแต่ละ Stage

16. เลือกแถบเมนู Mesh และคลิกไปที่ Generate Mesh



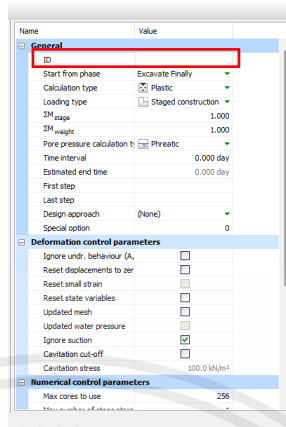
รูปที่ 3.20 การ Mesh แบบจำลอง

17. เลือกแถบเมนู Stage Construction และสร้าง Stage เพิ่มด้วยคำสั่ง Add Phase



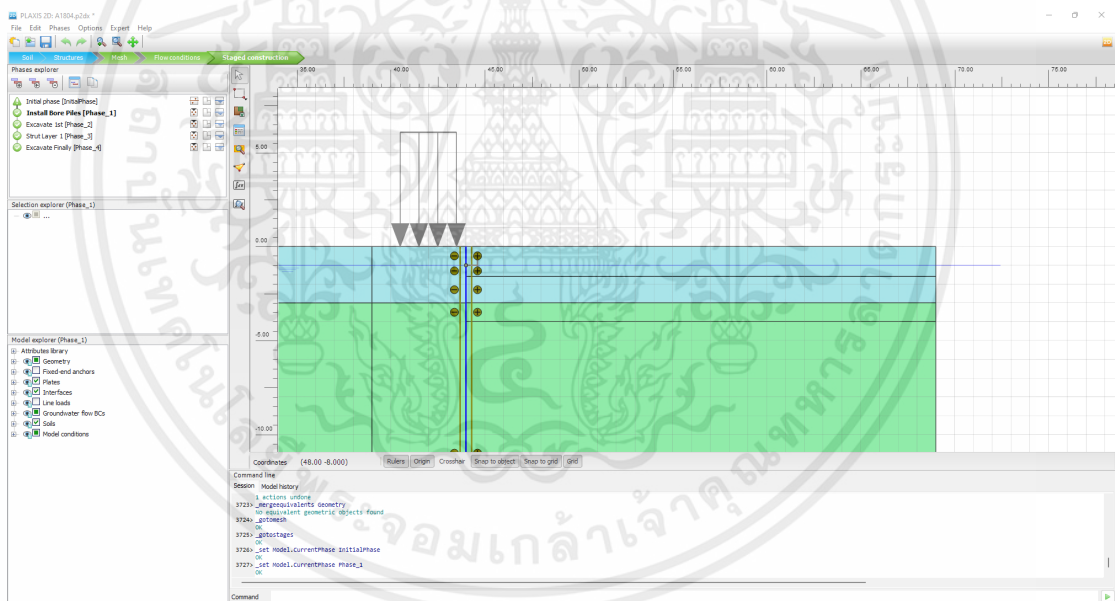
รูปที่ 3.21 การ Add Phase ในกระบวนการสร้าง Stage Construction

## 18. ตั้ง ID Stage Construction ในแต่ละ Phase



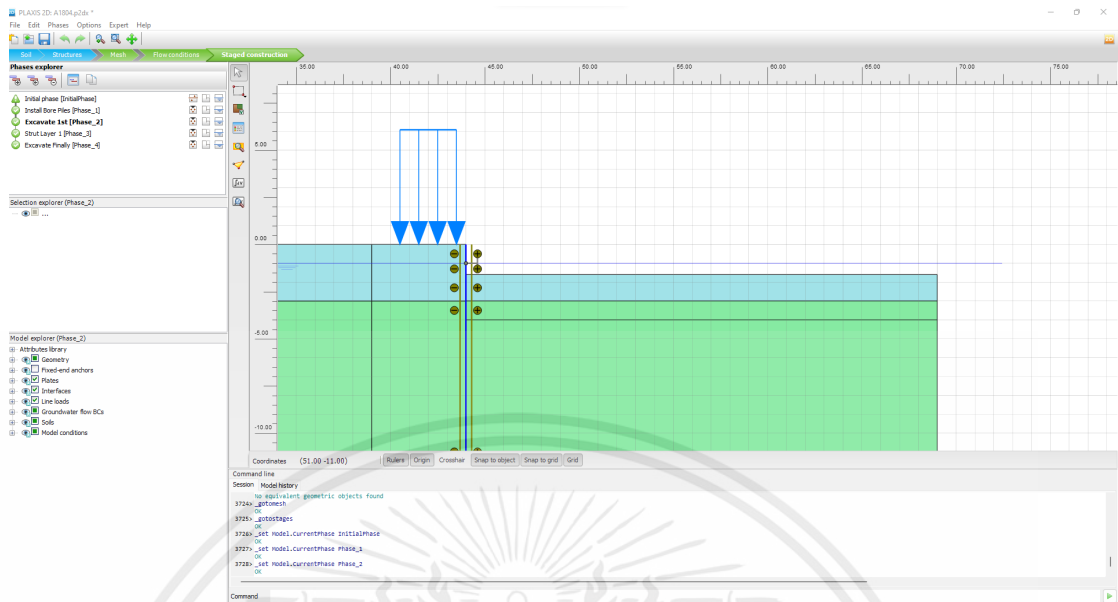
รูปที่ 3.22 การ ตั้ง ID Stage Construction ในแต่ละ Phase

## 19. Add Phase เพื่อสร้าง Stage ทำการจำลองการติดตั้ง Pile wall



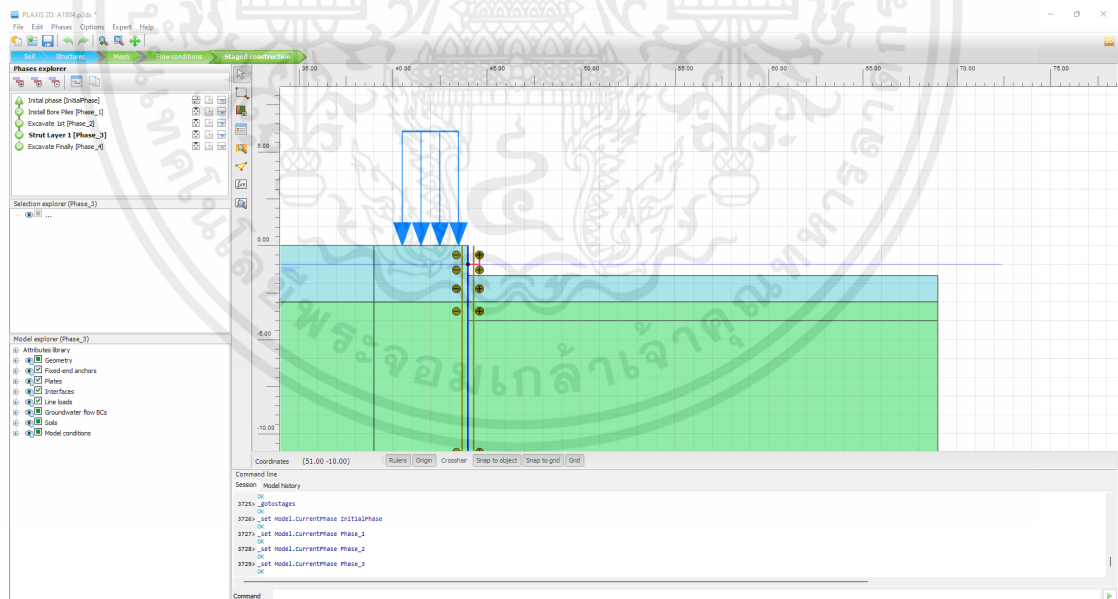
รูปที่ 3. 23 การจำลองการติดตั้ง Pile wall

## 20. Add Phase เพื่อสร้าง Stage ทำการจำลองการขุดดินครั้งที่ 1



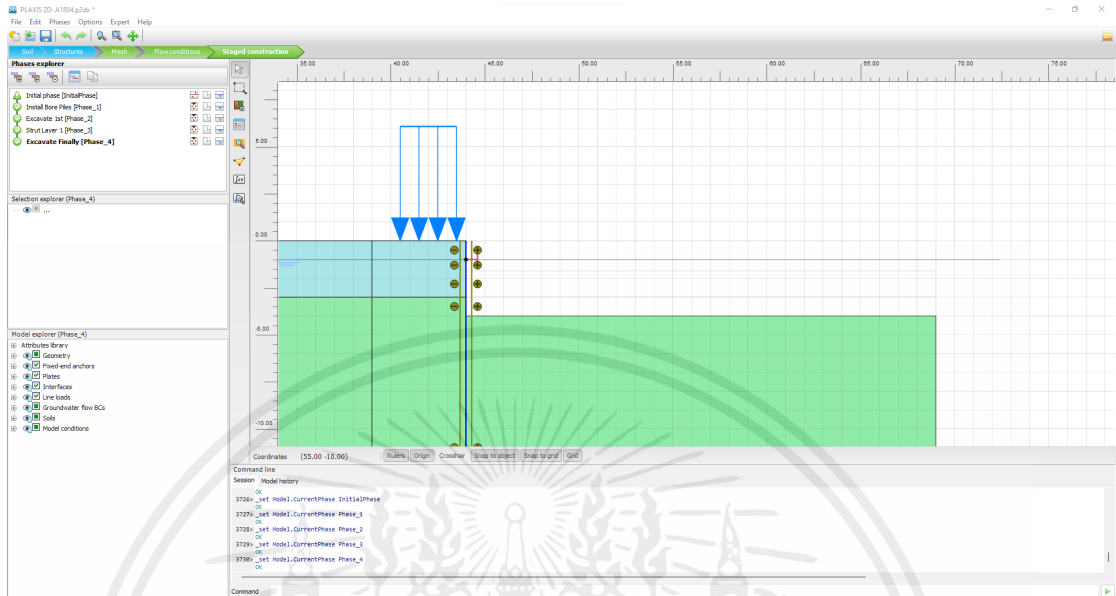
รูปที่ 3.24 การจำลองการขุดดินครั้งที่ 1

## 21. Add Phase เพื่อสร้าง Stage ทำการจำลองการติดตั้ง Strut



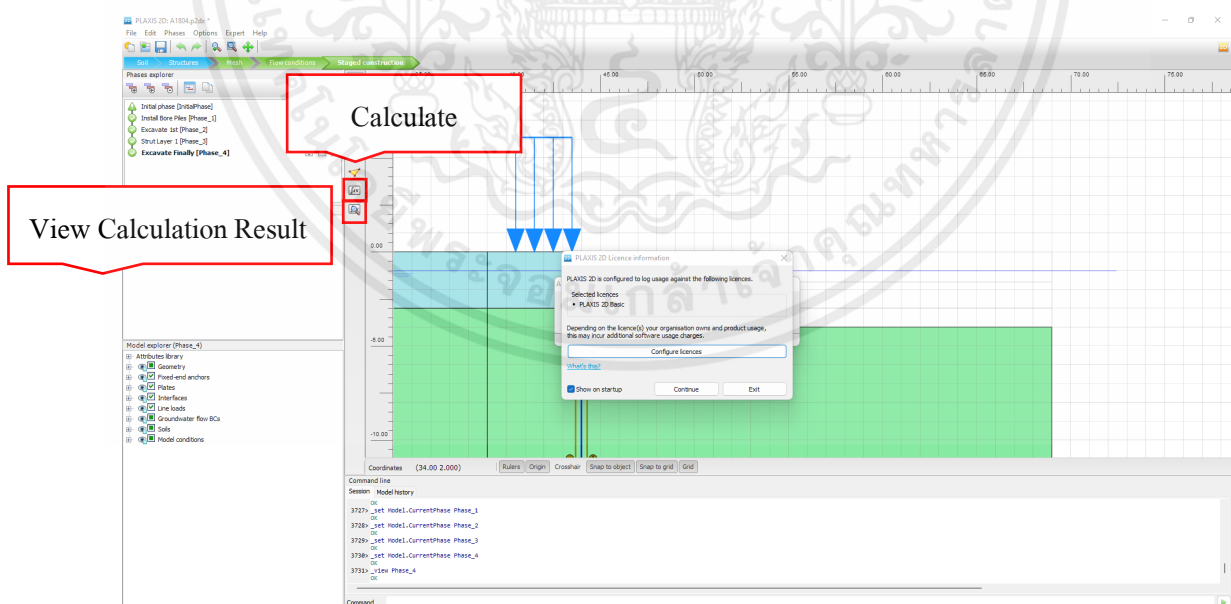
รูปที่ 3.25 การจำลองการติดตั้ง Strut

## 22. Add Phase เพื่อสร้าง Stage ทำการจำลองการขุดดินครั้งที่ 2



รูปที่ 3.26 การจำลองการขุดดินครั้งที่ 2

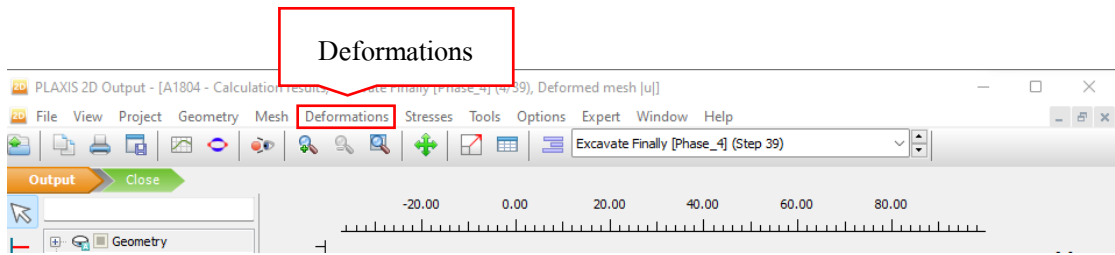
## 23. เลือกไปที่ Calculate > Continue เมื่อโปรแกรม Calculate เสร็จให้เลือกไปที่ View Calculation Result



รูปที่ 3.27 การ Calculate และ View Calculation Result (PLAXIS 2D)

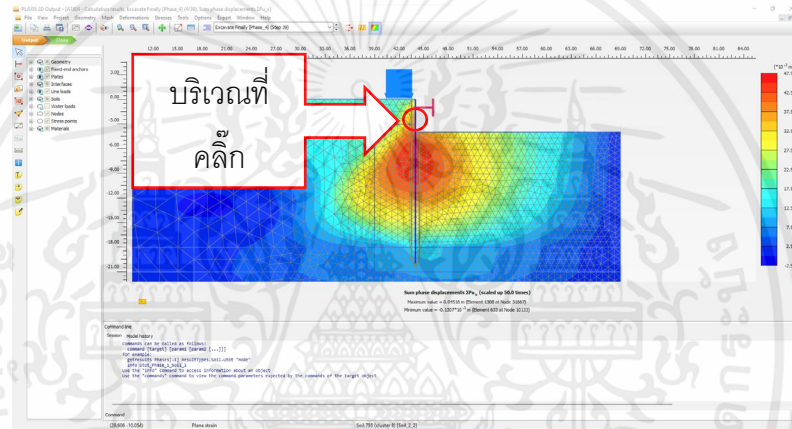
24. เลือกไปที่ Deformations ที่แถบบนของ PLAXIS 2D Output เลือกไปที่ Sum Phase

$$\text{displacements} > \sum Pu_x$$



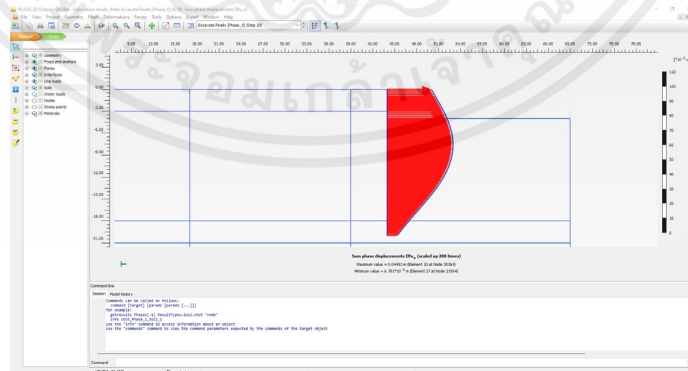
รูปที่ 3.28 การเลือกรูปแบบการแสดงผลลัพธ์

25. คลิกไปที่ Pile wall เพื่อทำการอ่านผลลัพธ์การเคลื่อนตัวของ Pile wall



รูปที่ 3.29 การแสดงผลลัพธ์การเคลื่อนตัวของแบบจำลอง

26. บันทึกผลการเคลื่อนตัวที่ได้จากแบบจำลอง



รูปที่ 3.30 การแสดงผลลัพธ์การเคลื่อนตัวของแบบ Pile wall

ขั้นตอนและลำดับการวิเคราะห์ในแบบจำลองสำหรับการก่อสร้างกำแพงกันดิน Pile wall และการติดตั้ง Strut ได้กำหนดขึ้นตามขั้นตอนการก่อสร้างจริงดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กรณีติดตั้งค้ำยัน (Strut) 1 Layer

- 1) Initial Phase - สภาวะที่ดินยังไม่ถูกรบกวน
- 2) Install Bore Piles – ดินโดยรอบถูกรบกวนจากการติดตั้งเสาเข็ม
- 3) First Excavate – ดินโดยรอบถูกนำออกเพื่อไว้สำหรับการเตรียมพื้นที่ในการติดตั้งค้ำยัน
- 4) Install Strut – ติดตั้งค้ำยัน (Strut)
- 5) Finally Excavate – นำดินออกจนถึงระดับที่พิจารณา

### กรณีติดตั้งค้ำยัน (Strut) 2 Layer

- 1.) Initial Phase - สภาวะที่ดินยังไม่ถูกรบกวน
- 2.) Install Bore Piles – ดินโดยรอบถูกรบกวนจากการติดตั้งเสาเข็ม
- 3.) First Excavate – ดินโดยรอบถูกนำออกเพื่อไว้สำหรับการเตรียมพื้นที่ในการติดตั้งค้ำยัน
- 4.) Install Strut First Layer – ติดตั้งค้ำยัน (Strut) Layer 1
- 5.) Second Excavate – ดินโดยรอบถูกนำออกเพื่อไว้สำหรับการเตรียมพื้นที่ในการติดตั้งค้ำยัน (Strut) Layer 2
- 6.) Install Strut Second Layer – ติดตั้งค้ำยัน (Strut) Layer 2
- 7.) Finally Excavate – นำดินออกจนถึงระดับที่พิจารณา

### 3.6 การตรวจสอบเสถียรภาพ

จากข้อมูลดินที่ได้จากการเจาะสำรวจพบว่าชั้นดินเหนียวมีกำลังรับแรงเฉือนที่ต่ำ กำแพงกันดินมีโอกาสเกิดการ โกงตัวเกินพิกัดที่ยอมรับได้ และอาจเกิดการวิบัติของดินที่ก้นของบ่อ ดังนั้นการตรวจสอบเสถียรภาพของกำแพงกันดินที่ผู้วิจัยดำเนินการมีดังนี้

#### 3.6.1 การตรวจสอบเสถียรภาพของดินกำแพง (Moment Balance)

การตรวจสอบเสถียรภาพของดินกำแพง หรือการตรวจสอบเสถียรภาพของกำแพงกันดิน ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบโดยใช้ทฤษฎีแรงดันดินด้านข้างที่มีการพิจารณาถึง แรงดันดินเชิงรุก (Active case) และแรงดันดินเชิงรับ (Passive case) โดยมีประสงค์เพื่อตรวจสอบค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Safety Factor) ให้มีค่ามากกว่า 1.2 ดังตัวอย่างข้างต้นดังนี้

### Balance Moment

Excavation Level : 4 m.

Last Strut Level : 1 m.

Surcharge Load : 2 t/m<sup>2</sup>

Pile wall Length : 20 m.

### Soil Properties

Layer	Soil Class	Level	Depth	$\gamma$ total	c	$\phi$	Ka.	Kp.
1	Clay	1	1	1.54	1.24	0	1	1
2	Clay	3	2	1.54	1.24	0	1	1
3	Clay	4	1	1.57	2.01	0	1	1
4	Clay	18	14	1.57	2.01	0	1	1
5	Clay	20	2	1.91	10	0	1	1

### Note

Find Ka , K :  $Ka = (1 - \sin\phi) / (1 + \sin\phi)$  (Coefficient Active Earth Pressure)  
:  $Kp = (1 + \sin\phi) / (1 - \sin\phi)$  (Coefficient Passive Earth Pressure)  
; Rankine's Theory

Find Pa , Pp :  $Pa = (q + \gamma_h \cdot h)Ka - 2c\sqrt{Ka + \text{Pore Pressure}}$   
( Active Earth Pressure )  
:  $Pp = (q + \gamma_h \cdot h)Ka + 2c\sqrt{Ka + \text{Pore Pressure}}$   
( Passive Earth Pressure )

Find F.S. : F.S. = Mp/Ma ; F.S. not less than 1.2 ( OK )

## 1. Calculation Active Pressure

### 1.1 Vertical Stress (Active)

Level (m.)	Vertical Stress	Unit
0.00	$2.00 + 0 \times 0 = 2.00$	$t/m^2$
1.00	$2.00 + 1.54 \times 1 = 3.54$	$t/m^2$
1.00	$2.00 + 1.54 \times 1 = 3.54$	$t/m^2$
3.00	$3.54 + 1.54 \times 2 = 6.62$	$t/m^2$
3.00	$3.54 + 1.54 \times 2 = 6.62$	$t/m^2$
4.00	$6.62 + 1.57 \times 1 = 8.19$	$t/m^2$
4.00	$6.62 + 1.57 \times 1 = 8.19$	$t/m^2$
18.00	$8.19 + 1.57 \times 14 = 30.17$	$t/m^2$
18.00	$8.19 + 1.57 \times 14 = 30.17$	$t/m^2$
20.00	$30.17 + 1.91 \times 2 = 33.99$	$t/m^2$

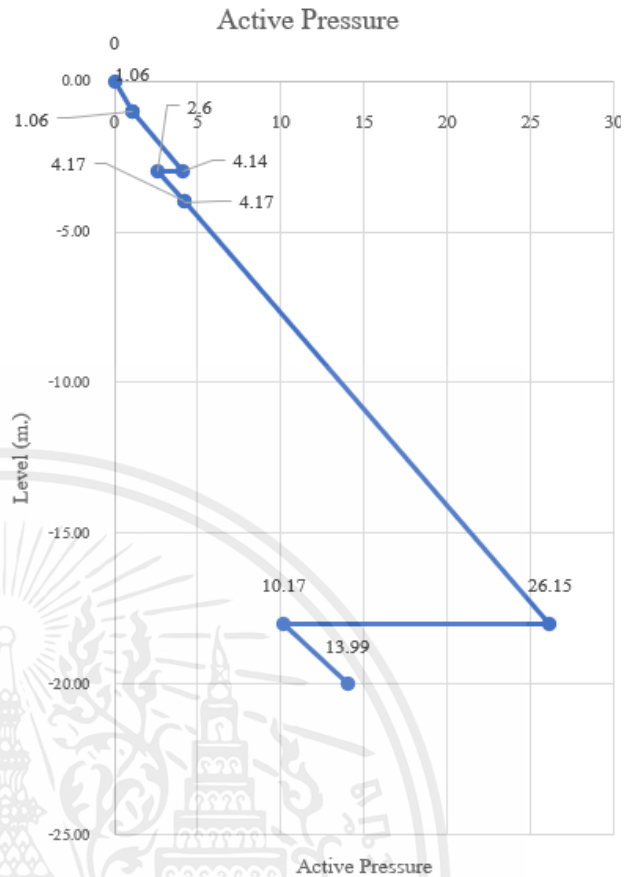
### 1.2 Active Pressure

Level (m.)	$\sigma_a$ (Active Pressure)	Unit
0.00	$2.00 - 2 \times 1.24 = -0.48$	$t/m^2$
1.00	$3.54 - 2 \times 1.24 = 1.06$	$t/m^2$
1.00	$3.54 - 2 \times 1.24 = 1.06$	$t/m^2$
3.00	$6.62 - 2 \times 1.24 = 4.14$	$t/m^2$
3.00	$6.62 - 2 \times 2.01 = 2.6$	$t/m^2$

Level (m.)	$\sigma_a$ (Active Pressure)	Unit
4.00	$8.19 - 2 \times 2.01 = 4.17$	$t/m^2$
4.00	$8.19 - 2 \times 2.01 = 4.17$	$t/m^2$
18.00	$30.17 - 2 \times 2.01 = 26.15$	$t/m^2$
18.00	$30.17 - 2 \times 10 = 10.17$	$t/m^2$
20.00	$33.99 - 2 \times 10 = 13.99$	$t/m^2$

### 1.3 Adjust Active Pressure

Level (m.)	Active Pressure	
	Cal.	Adjust
0.00	-0.48	0
-1.00	1.06	1.06
-1.00	1.06	1.06
-3.00	4.14	4.14
-3.00	2.6	2.6
-4.00	4.17	4.17
-4.00	4.17	4.17
-18.00	26.15	26.15
-18.00	10.17	10.17
-20.00	13.99	13.99



รูปที่ 3.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Level และ Active Pressure

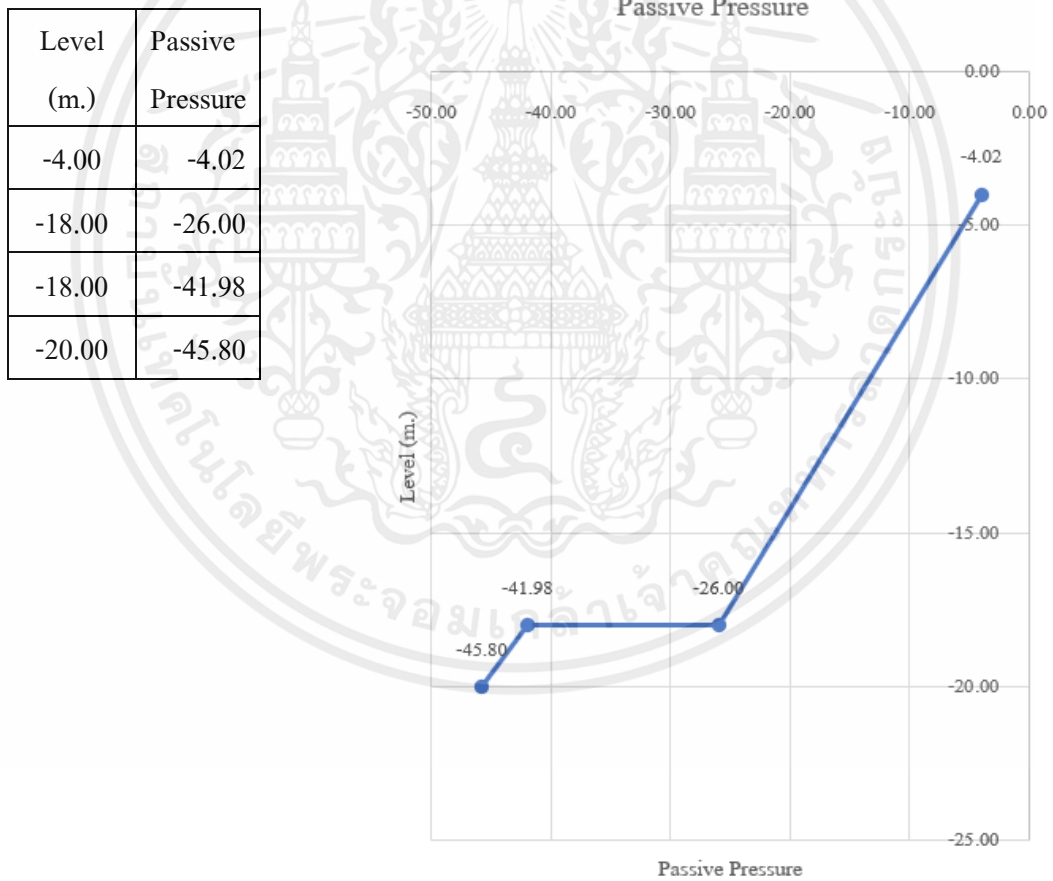
## 2. Calculation Passive Pressure

### 2.1 Vertical Stress (Passive)

Level (m.)	$\sigma_v$ (Vertical stress)					Unit
4	0	+	1.57	x	0	= 0 $t/m^2$
18	0	+	1.57	x	14	= 21.98 $t/m^2$
18	0	+	1.57	x	14	= 21.98 $t/m^2$
20	21.98	+	1.91	x	2	= 25.8 $t/m^2$

## 2.2 Passive Pressure

Level (m.)	$\sigma_p$ (Passive Pressure)						Unit	
4.00	0	+	2	x	2.01	=	4.02	t/m <sup>2</sup>
18.00	21.98	+	2	x	2.01	=	26.00	t/m <sup>2</sup>
18.00	21.98	+	2	x	10.00	=	41.98	t/m <sup>2</sup>
20.00	25.8	+	2	x	10.00	=	45.80	t/m <sup>2</sup>



รูปที่ 3.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Level และ Passive Pressure

### 3. Calculation Moment Active & Passive

F (ton)						Moment Arm (m.)	
1	1.06	x	2	=	2.12	1	
2	0.5	x	3.08	x 2	=	3.08	1.33
3	2.6	x	1	=	2.6	2.5	
4	0.5	x	1.57	x 1	=	0.785	2.66
5	4.17	x	14	=	58.38	10	
6	0.5	x	21.98	x 14	=	153.86	12.33
7	10.17	x	2	=	20.34	18	
8	0.5	x	3.82	x 2	=	3.82	18.33
9	4.02	x	14	=	56.28	10	
10	0.5	x	21.98	x 14	=	153.86	12.33
11	41.98	x	2	=	83.96	18	
12	0.5	x	3.82	x 2	=	3.82	18.33

#### 3.1 Active Moment

F		Moment Arm m	Moment t-m
No	ton		
1	2.12	1	2.12
2	3.08	1.33	4.10
3	2.60	2.5	6.50
4	0.79	2.66	2.09
5	58.38	10	583.80
6	153.86	12.33	1897.09
7	20.34	18	366.12
8	3.82	18.33	70.02

$$M_a = 2931.84 \text{ t-m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 Passive Moment

F		Moment Arm m	Moment t-m
No	ton		
9	56.28	10	562.80
10	153.86	12.33	1897.09
11	83.96	18	1511.28
12	3.82	18.33	70.02

$$M_p = 4041.19 \text{ t-m}$$

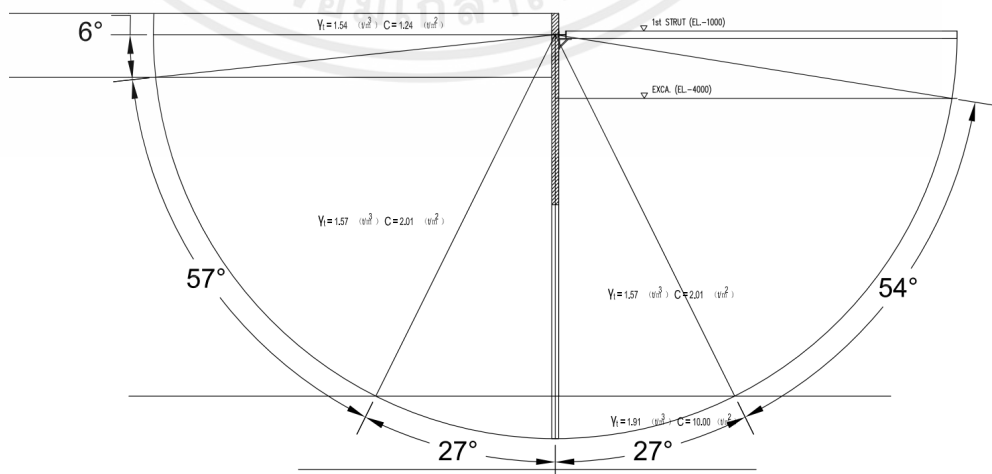
$$FS = \frac{M_p}{M_a} = 1.38 > 1.2 \quad \text{OK}$$

### 3.6.2 การตรวจสอบเสถียรภาพของกันหลุม (Base heave)

การตรวจสอบเสถียรภาพของกันหลุม หรือการตรวจสอบการบวมขึ้นของดินเหนียวใต้บ่อขุด (Base heave) ผู้วิจัยใช้หลักการของ Geometry of Slip Circle method โดยมีประสงค์เพื่อตรวจสอบค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Safety Factor) ให้มีค่ามากกว่า 1.2 ดังตัวอย่างข้างต้นดังนี้

#### Heaving Checking

#### Soil Properties



รูปที่ 3.33 แสดงภาพหน้าตัดชั้นดินของกำแพงกันดิน Pile wall

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Excavation Level : 4 m.

Surcharge Load : 2 t/m<sup>2</sup>

Pile wall Length : 20 m.

Ground water EL.: 2.9 m.

1. Active Moment ,  $M_D$

$$M(D) = W \times l \times l/2 \quad W = q + [(\gamma_1 h_1) + (\gamma_2 h_2) + \dots + (\gamma_n h_n) ]$$

Layer	$\gamma_n$	$h_n$	$\gamma_n h_n$
	(t / m <sup>3</sup> )	(m.)	(t / m <sup>2</sup> )
1	1.54	3.00	4.62
2	1.57	1.00	1.57
			<b>6.19</b>

$$L = 16.00 \text{ m.}$$

$$W = 2 + 6.19 = 8.19 \text{ t/m}^2$$

$$M_D = 8.19 \times 16 \times 16 / 2 = 1,048.32 \text{ ton}$$

2. Resistant Moment ,  $M_R$

$$M(R) = \sum(c \times \theta) \times l \times l$$

Layer	$c$	$\theta$		$c \theta$
	t/m <sup>2</sup>	Degree	Radian	t/m <sup>2</sup>
1	1.24	6	0.10	0.13
2	2.01	57	0.99	2.00
3	10.00	27	0.47	4.71
4	10.00	27	0.47	4.71
5	2.01	54	0.94	1.89
				<b>13.45</b>

$$M_R = 13.45 \times 16 \times 16$$

$$= 3,442.85 \text{ ton}$$

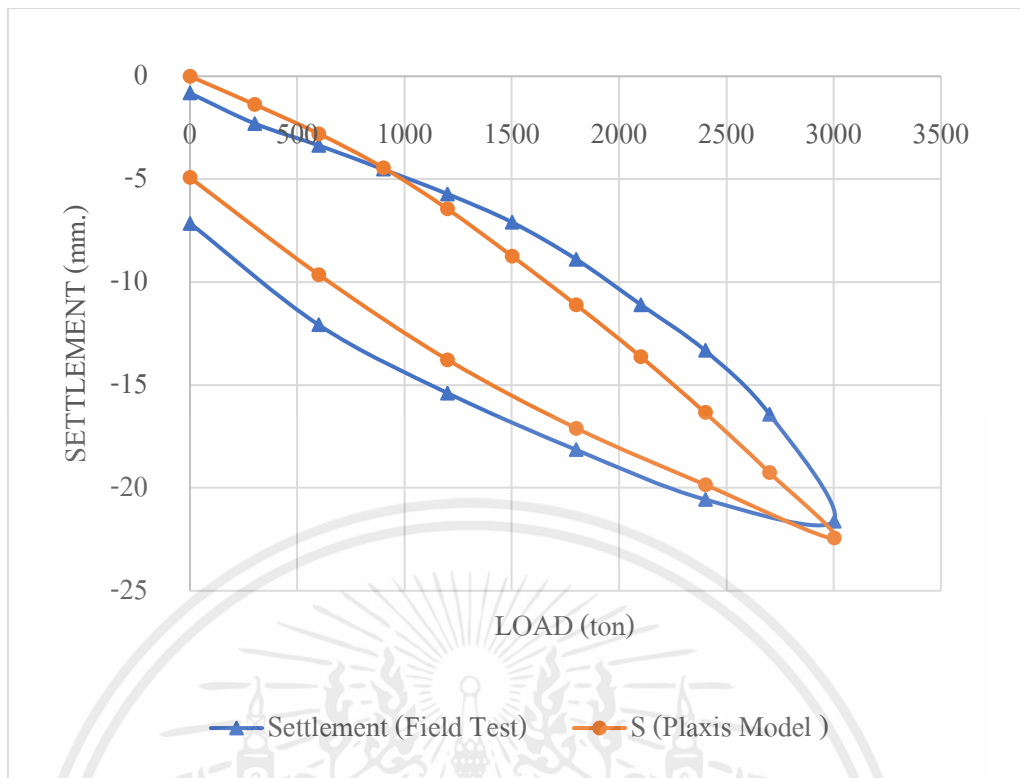
$$F.S. = (\Sigma MR) / (\Sigma MD)$$

$$= 3.82 > 1.20 \quad \text{OK.}$$

### 3.7 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

บริเวณก่อสร้างมีการทดสอบ Static Load Test เพื่อทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 ซม. โดยการทดสอบเป็นไปตาม ASTM D 1143 / D 1143M- 07 เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของตัวแปรที่แสดงคุณสมบัติของชั้นดินในแบบจำลองที่สร้างขึ้น ให้มีค่าใกล้เคียงกับคุณสมบัติของชั้นดินในบริเวณก่อสร้าง ด้วยวิธีการวิเคราะห์ย้อนกลับ (Back Analysis) จึงเป็นขั้นตอนสำคัญ เพื่อเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นจริงของกำแพงกันดิน (Pile wall) ในบริเวณก่อสร้าง และค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากแบบจำลอง โดยวิธีไฟไนท์อิเลเมนต์ (Finite Element Method) การสร้างแบบจำลองภายใต้เงื่อนไข มอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb) ซึ่งประกอบด้วย Soil Strength Parameter ที่สำคัญ 5 ตัวแปร ได้แก่ ค่าหน่วยน้ำหนัก ( $\gamma$ ) , ค่าโมดูลัสของดิน ( $E_u$ ) , อัตราส่วนปัวซอง ( $\nu$ ) , ค่าแรงยึดเหนี่ยวของเม็ดดิน และค่ามุมเสียดทานภายใน( $\phi$ ) ค่าโมดูลัสของดิน ( $E_u$ )

เพื่อเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของแบบจำลอง (Validate) ด้วยค่าการทรุดตัวของเสาเข็มที่ได้จากการทดสอบ Static Load Test และค่าการทรุดตัวของเสาเข็มที่ได้จากการทำนายด้วยวิธีไฟไนท์อิเลเมนต์ ในระดับน้ำหนักกระทำต่างๆ ดังรูปที่ 3.35 จากกราฟค่าการทรุดตัวในแนวตั้งของเสาเข็มในแบบจำลองมีการทรุดตัวมากกว่าความเป็นจริง เนื่องจากดินบริเวณก่อสร้างเคยอยู่ในสภาพอัดแน่นบางส่วน เนื่องจากมีการก่อสร้างไปบางส่วนแล้วจึงทำให้ดินได้รับอิทธิพลจากน้ำหนักกระทำระหว่างก่อสร้าง และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวของเสาเข็มที่ได้จากการทำนายด้วยวิธีไฟไนท์อิเลเมนต์ และค่าการทรุดตัวของเสาเข็มจากการทดสอบ Static Load Test ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน สามารถวิเคราะห์ได้ว่าแบบจำลองการทดสอบ Static Load Test ที่สร้างขึ้น และตัวแปรที่นำมาจากข้อมูลการสำรวจมีความน่าเชื่อถือ เนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลการเคลื่อนตัวที่วัดได้จากสภาพจริงในบริเวณก่อสร้าง ดังนั้นแบบจำลองและตัวแปรดังกล่าวสามารถนำมาใช้เพื่อศึกษาพฤติกรรมของกำแพงกันดิน (Pile wall) และค้ำยัน (Strut) ต่อไป

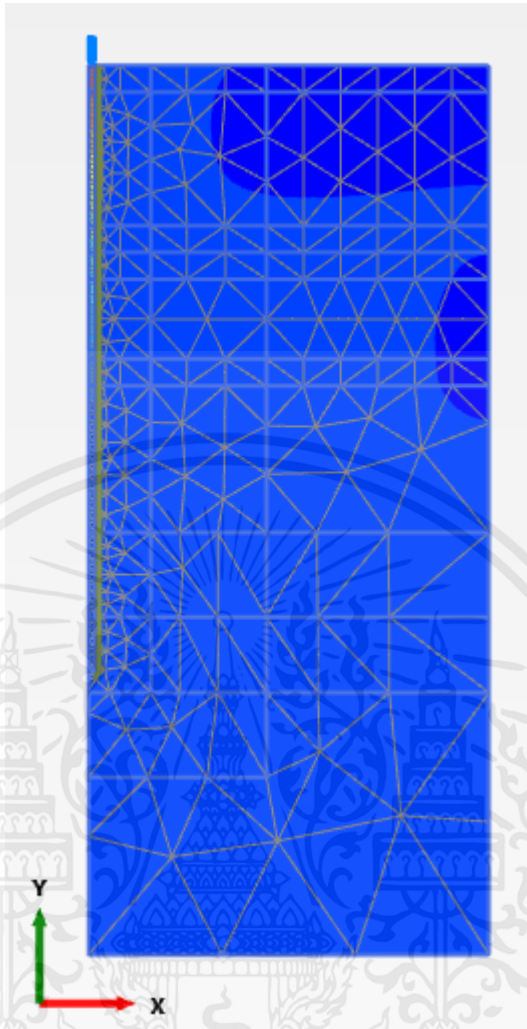


รูปที่ 3.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ Load and Settlement Curves

ตารางที่ 3.2 ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบในสนามและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

Pile Information									
Stage	Dia m	A m <sup>2</sup>	P			q KN/m/m	S (Field Test) mm	S (Plaxis Model) mm.	
			Ton	KN	KN/rad				
Load Stage	1.5	1.77	0	0	0.00	0	-0.82	0.00	
	1.5	1.77	300	3000	477.46	1698	-2.29	-1.37	
	1.5	1.77	600	6000	954.93	3395	-3.36	-2.79	
	1.5	1.77	900	9000	1432.39	5093	-4.52	-4.44	
	1.5	1.77	1200	12000	1909.86	6791	-5.72	-6.45	
	1.5	1.77	1500	15000	2387.32	8488	-7.09	-8.73	
	1.5	1.77	1800	18000	2864.79	10186	-8.89	-11.11	
	1.5	1.77	2100	21000	3342.25	11884	-11.09	-13.62	
	1.5	1.77	2400	24000	3819.72	13581	-13.32	-16.34	
	1.5	1.77	2700	27000	4297.18	15279	-16.41	-19.25	
Unloading Stage	1.5	1.77	3000	30000	4774.65	16977	-21.61	-22.44	
	1.5	1.77	2400	24000	3819.72	13581	-20.56	-19.84	
	1.5	1.77	1800	18000	2864.79	10186	-18.15	-17.10	
	1.5	1.77	1200	12000	1909.86	6791	-15.39	-13.77	
	1.5	1.77	600	6000	954.93	3395	-12.08	-9.64	
	1.5	1.77	0	0	0.00	0	-7.14	-4.93	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.35 แบบโครงสร้างกันดินจำลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method)

## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินขึ้นอยู่กับเทคนิคการก่อสร้างเป็นหลัก โดยขนาดของการเคลื่อนตัวนั้น จะขึ้นอยู่กับชนิดของดิน (Soil Type) ความลึกของงานขุด (H) ความกว้างของงานขุด (B) ระยะจากท้องงานขุดถึงชั้นดินแข็งที่ลึกลงไป ระยะฝังตีนกำแพง สติฟเนสของระบบค้ำยัน (EI) ระยะห่างของค้ำยันในแนวดิ่ง การอัดแรงในค้ำยัน (Prestress) และการปรับปรุงคุณภาพดิน โดยความสามารถในการต้านทานการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินสำหรับพื้นที่ดินเหนียว สำหรับความลึกของงานขุดดินมักมีผลต่อแรงดันดินที่กำแพงกันดินถูกกระทำ ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวที่แตกต่างกันในระดับความลึกของงานขุดดินที่ระดับต่างกัน , เสถียรภาพดินกำแพง , เสถียรของดินก้นหลุม (Heaving) ทั้งนี้จำทำให้เราทราบถึงความลึกของงานขุดดินที่ใช้สำหรับดินเหนียวเบื้องต้น สำหรับกรณีใช้กำแพงกันดิน Pile wall เส้นผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตร ผู้วิจัยจึงได้ทำการรวบรวมข้อมูล และศึกษาดังนี้

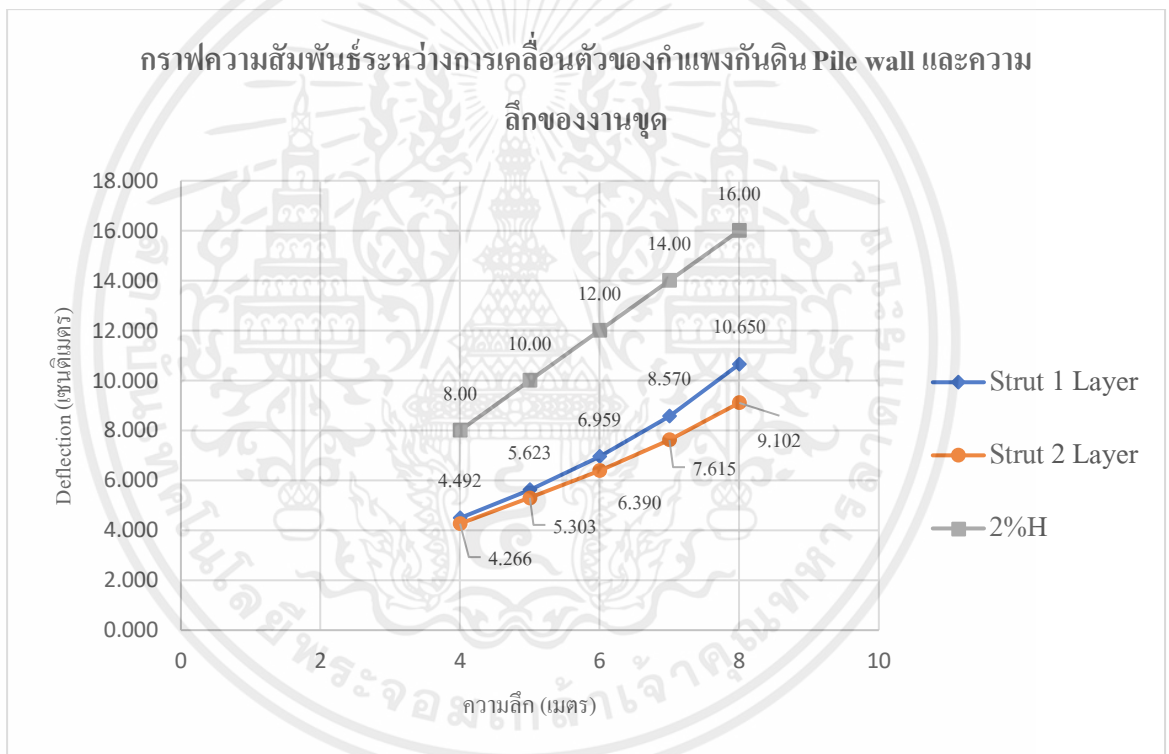
#### 4.1 การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินในขณะขุดลึกขึ้น ระหว่าง Strut 1 Layer และ Strut 2 Layer

โดยทั่วไปการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นสำหรับพื้นที่ที่มีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเกิน 50 kPa (อ่อนถึงแข็งปานกลาง) การเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นค่อนข้างมาก ถึงแม้ว่าการก่อสร้างระบบค้ำยันจะทำได้ดีและรวดเร็วก็ตาม แม้กระนั้น การเคลื่อนตัวในแนวแกน x ของกำแพงกันดินควรอยู่ในขอบเขต  $1\%H$  ถึง  $2\%H$  โดยที่ H คือ ความลึกของงานขุด

จากการศึกษาผู้วิจัยพบว่า Pile wall เส้นผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตร การติดตั้ง Strut 2 Layer มีความสามารถที่จะต้านทานการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินได้มากกว่าการติดตั้ง Strut 1 Layer เนื่องจากการติดตั้ง Strut 2 Layer เป็นการเพิ่มสติฟเนสของระบบค้ำยัน การเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นจึงมีค่าที่น้อยกว่าการติดตั้ง Strut 1 Layer แต่เมื่อเทียบผลต่างการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินในความลึกของงานขุดที่เท่ากัน ทั้ง 2 กรณี พบว่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินที่งานขุด 4 เมตร 5 เมตร 6 เมตร 7 เมตร และ 8 เมตร มีค่า 0.226 เซนติเมตร 0.320 เซนติเมตร 0.569 เซนติเมตร 0.955 เซนติเมตร และ 1.548 เซนติเมตร ตามลำดับ และยังเห็นได้ชัดถึงการเคลื่อนตัวที่มากขึ้นเมื่องานขุดมีความลึกที่มากขึ้น โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินและความลึกของงานขุดดิน

Depth m.	Deflection cm.	
	Strut 1 Layer	Strut 2 Layer
4	4.492	4.266
5	5.623	5.303
6	6.959	6.390
7	8.570	7.615
8	10.650	9.102



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน Pile wall และความลึกของงานขุด

ผู้วิจัยจึงได้ทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน Pile wall และความลึกของงานขุด โดยแกน x คือ ความลึกของงานขุดที่เกิดขึ้น มีหน่วยเป็นเมตร แกน y คือ การเคลื่อนตัว (Deflection) ของกำแพงกันดินที่เกิดขึ้น มีหน่วยเป็นเซนติเมตร จากกราฟความสัมพันธ์จะเห็นได้ชัดถึงการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน ที่มีค่ามากขึ้นเมื่องานขุดมีความลึกที่มากขึ้นทั้งกรณีการติดตั้ง Strut 1 Layer และกรณีการติดตั้ง Strut 2 Layer แต่ทั้งนี้

การเคลื่อนตัวที่มากขึ้นดังกล่าวที่ความลึกของงานขุด 4 เมตร 5 เมตร 6 เมตร 7 เมตร และ 8 เมตร ยังคงไม่เกินกว่า 2%H ที่ผู้วิจัยได้กล่าวไปข้างต้น

#### 4.2 ผลการตรวจสอบเสถียรภาพดินกำแพง (Moment Balance)

งานขุดดินโดยใช้ค้ำยัน จำเป็นต้องออกแบบให้มีดินกำแพงต้านว่าระดับกันหลุม เพื่อต้องการลดการโค้งตัวของกำแพงกันดินให้อยู่ในพิสัยที่ยอมรับได้ เพื่อป้องกันการทรุดตัวของดินหลังกำแพงกันดิน ซึ่งจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างใกล้เคียง ดังนั้นในการออกแบบกำแพงกันดินจะต้องตรวจสอบด้วยว่ากำแพงกันดินที่ออกแบบมีความลึกเพียงพอ หรือไม่ที่จะทำให้กำแพงกันดินไม่ล้มลงมา กำแพงกันดินที่ยาวเกินไปที่จะขนส่งมาหรือก่อสร้างได้นั้น จะต้องมีการสร้าง Strut หลายระดับชั้นเพื่อต้านทานแรงจากดินหลังกำแพง ในการหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Safety factor) สามารถหาได้จาก อัตราส่วนของโมเมนต์ต้านทานกับโมเมนต์กระทำ โดยที่ค่าความปลอดภัยต้องมีค่ามากกว่า 1.2 แต่ไม่เกินกว่า 1.5 เพื่อความประหยัดในการก่อสร้าง โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Safety factor) ของเสถียรภาพดินกำแพงและความลึกของงานขุดดิน

Excavation m.	Moment Balance (FS) > 1.2			
	Strut 1 Layer		Strut 2 Layer	
4	1.38	OK	1.41	OK
5	1.28	OK	1.3	OK
6	1.18	Not OK	1.27	OK
7	-	-	1.12	Not OK
8	-	-	-	-

จากการตรวจสอบเสถียรภาพดินกำแพงเมื่องานขุดดินมีความลึกมากขึ้นพบว่า ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะมีค่าที่ลดลง เนื่องจากในขณะที่ทำการขุดดิน ดินที่อยู่หลังกำแพงกันดินจะพยายามที่จะดันกำแพงกันดินให้ล้มลงมา ในขณะที่ดินที่อยู่หน้ากำแพงจะพยายามต้านไว้ทำให้กำแพงกันดินยังอยู่ในเสถียรภาพ แต่ถ้าเราขุดดินมากเกินไปหรือกำแพงกันดินไม่ลึกเพียงพอ ดินที่อยู่หน้ากำแพงก็ไม่สามารถต้านแรงจากดินหลังกำแพงได้ทำให้กำแพงสูญเสียเสถียรภาพและล้มลงมา จากตารางที่ 4.2 กรณีติดตั้ง Strut 1 Layer งานขุดดินสามารถขุดได้ 5 เมตร เนื่องจากเมื่องานขุด

ดินอยู่ที่ 6 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะน้อยกว่า 1.2 สำหรับกรณีติดตั้ง Strut 2 Layer งานขุดดินสามารถขุดได้ 6 เมตร เนื่องจากเมื่องานขุดดินอยู่ที่ 7 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะน้อยกว่า 1.2

#### 4.3 ผลการตรวจสอบการปูดของดินเหนียวที่ระดับกันหลุม (Heaving)

โดยทั่วไปดินเหนียวไม่มีปัญหาเรื่องการไหลของน้ำในดินเพราะค่าการซึมน้ำต่ำ แต่ระบบค้ำยันในดินเหนียวอาจเกิดความไม่เสถียรได้หากเกิดการปูดของดินที่ระดับกันหลุมโดยการไหลของดินเกิดจากการปรับแรงดันดินให้เท่ากัน การปูดจะปูดจากด้านที่มีแรงดันมากไปด้านที่มีแรงดันน้อย หรือไหลจากกรอบ Pile wall ด้านนอก ไปด้านใน Pile wall ทำให้ดินรอบนอก Pile wall ทรุคตัว และดินด้านใน Pile wall ปูดขึ้น ผลที่ตามมาทำให้สิ่งก่อสร้างบริเวณรอบ Pile wall เกิดความเสียหาย ซึ่งจะเกิดในกรณีของดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลาง ดังนั้นผู้วิจัยจึงเล็งเห็นถึงความสำคัญของการปูดของดินเหนียว เนื่องจากพื้นที่ กทม. ลักษณะดินส่วนใหญ่ที่พบเห็นมักเป็นดินเหนียวที่มีลักษณะอ่อนถึงแข็งปานกลาง จึงทำการตรวจสอบการปูดของดินเหนียวที่ระดับกันหลุมที่งานขุดดินความลึก 4 เมตร 5 เมตร 6 เมตร 7 เมตร และ 8 เมตร ตามลำดับ โดยค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Safety factor) จะต้องมีค่าเกิน 1 เพื่อความปลอดภัย แต่ไม่ควรมีค่าเกิน 1 มากเกินไป เนื่องจากราคาก่อสร้างจะสิ้นเปลือง (แนะนำให้ใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย = 1.2) แต่สามารถให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Safety factor) มีค่าเกินกว่านี้ได้ โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.3

**ตารางที่ 4.3** ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Safety factor) การปูดของดินเหนียวที่ระดับกันหลุมและความลึกของงานขุดดิน

Excavation m.	Heaving (FS) > 1.2			
	Strut 1 Layer		Strut 2 Layer	
4	3.28	OK	3.42	OK
5	2.73	OK	2.84	OK
6	2.34	OK	2.43	OK
7	2.04	OK	2.11	OK
8	1.8	OK	1.87	OK

จากการตรวจสอบการปูดของดินเหนียวที่ระดับก้นหลุมพบว่า ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะมีค่าที่ลดลง เนื่องจากการขุดดินที่ลึกขึ้นเป็นการลดแรงดันดินด้านใน Pile wall ในขณะที่แรงดันดินบริเวณรอบนอกของ Pile wall ยังคงเท่าเดิม ดังนั้นดินบริเวณรอบนอกของ Pile wall จึงต้องการที่จะปรับแรงดันดินให้เท่ากับบริเวณด้านในของพื้นที่ขุด แต่ทั้งนี้ด้วยความลึกของกำแพงกันดินที่มีความลึกมากเพียงพอที่จะเพิ่มระยะทางการปูดของดินเหนียว จึงทำให้การตรวจสอบการปูดของดินเหนียวที่ระดับก้นหลุมอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย (Safety factor) โดยที่ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Safety factor) ที่ได้จากการคำนวณยังคงมีค่ามากกว่า 1.2 ทุกกรณีที่ขุดดินลึกตามที่ผู้วิจัยได้ศึกษา



## บทที่ 5

### สรุปผลงานวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน 3 ตัวแปร พบว่าการขุดดินที่มีความลึกเพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อการเคลื่อนตัว เสถียรภาพดินกำแพง (Moment Balance) และการปูดของดินเหนียวที่ระดับก้นหลุม (Heaving) ของกำแพงกันดินในการคำนวณพบว่า Pile wall เส้นผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตร ในส่วนของเสถียรภาพดินกำแพง (Moment Balance) การขุดดินมีความลึกมากขึ้นเป็นการลดแรงดันดินเชิงรับ (Passive case) ที่มีหน้าที่ต้านทาน โมเมนต์ของดินฝั่งปากบ่อขุด จึงทำให้โมเมนต์ต้านทานแรงกระทำมีค่าลดลง แต่ในขณะนั้นดินที่ปากบ่อขุดยังคงอยู่ในระดับเดิม ส่งผลให้อัตราส่วนความปลอดภัย (Safety factor) มีค่าอัตราส่วนลดลงตามความลึกของงานขุดดิน สำหรับการปูดของดินที่ระดับก้นหลุม (Heaving) จากผลงานวิจัยทำให้ทราบได้ชัดถึงการขุดดินที่ลึกขึ้นส่งผลให้แรงดันดินด้านใน Pile wall ลดลง ในขณะเดียวกันที่แรงดันดินบริเวณรอบนอกของ Pile wall ยังคงเท่าเดิม ดังนั้นดินบริเวณรอบนอกของ Pile wall จึงต้องการที่จะปรับแรงดันดินให้เท่ากับดินบริเวณด้านในของพื้นที่ขุด โดยค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Safety factor) ที่มีค่าเกินกว่า 1.2 อย่างเห็นได้ชัด มีสาเหตุมาจากความลึกของกำแพงกันดินที่มีความลึกมากเพียงพอที่จะเพิ่มระยะทางการปูดของดินเหนียว

กรณีที่ตั้ง Strut 1 Layer เหมาะสำหรับการขุดดินลึก 5 เมตร เนื่องจากการเคลื่อนตัวยังอยู่ในเกณฑ์ 1%H ถึง 2%H เสถียรภาพดินกำแพง (Moment Balance) และ การปูดของดินเหนียวที่ระดับก้นหลุม (Heaving) ยังคงมีอัตราส่วนความปลอดภัยที่อยู่ในเกณฑ์ (F.S. = 1.2) แต่เมื่อการขุดดินมีความลึกที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลทำให้เสถียรภาพดินกำแพง (Moment Balance) มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่มากกว่า 1.2 ดังตารางที่ 5.1

สำหรับกรณีที่ตั้ง Strut 2 Layer เหมาะสำหรับการขุดดินลึก 6 เมตร และงานขุดดินที่มีความลึกเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้เสถียรภาพดินกำแพง (Moment Balance) มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่มากกว่า 1.2 เช่นเดียวกับกรณีที่ตั้ง Strut 1 Layer ดังตารางที่ 5.1 และ ตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 สรุปผลตัวแปรที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน 3 ตัวแปร กรณีติดตั้ง Sturt 1 Layer

Excavation m.	Deflection cm.	2%H cm.	Check $\delta_x < 2H$	Moment Balance		Heaving	
				FS	FS	FS	FS
4	4.492	8.00	OK	1.38	OK	3.28	OK
5	5.623	10.00	OK	1.28	OK	2.73	OK
6	6.959	12.00	OK	1.18	Not OK	2.34	OK
7	8.570	14.00	OK	-	-	2.04	OK
8	10.650	16.00	OK	-	-	1.8	OK

ตารางที่ 5.2 สรุปผลตัวแปรที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน 3 ตัวแปร กรณีติดตั้ง Sturt 2 Layer

Excavation m.	Deflection cm.	2%H cm.	Check $\delta_x < 2H$	Moment Balance		Heaving	
				FS	FS	FS	FS
4	4.266	8.00	OK	1.41	OK	3.42	OK
5	5.303	10.00	OK	1.3	OK	2.84	OK
6	6.390	12.00	OK	1.27	OK	2.43	OK
7	7.615	14.00	OK	1.12	Not OK	2.11	OK
8	9.102	16.00	OK	-	-	1.87	OK

การพิจารณาความสามารถในการต้านทานการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน Pile wall กับ ความลึกของงานขุดดินจึงควรพิจารณาตัวแปรที่กล่าวมาข้างต้นและสรุปผลที่ผ่านเกณฑ์กำหนด กรณีติดตั้ง Strut 1 Layer และ กรณีติดตั้ง Strut 2 Layer ได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 สรุปผลปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน 3 ตัวแปร ที่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด

Excavation (m.)	N Layer	Deflection	Moment Balance	Heaving
4	1	✓	✓	✓
	2	✓	✓	✓
5	1	✓	✓	✓
	2	✓	✓	✓
6	1	✓	✗	✓
	2	✓	✓	✓
7	1	✓	✗	✓
	2	✓	✗	✓
8	1	✓	✗	✓
	2	✓	✗	✓

ทั้งนี้ผู้วิจัยได้พบว่าในการพิจารณาระดับของงานขุดดินสำหรับการใช้ Pile wall ควรพิจารณาชนิดของดิน (Soil Type) ความลึกของงานขุด (H) ความกว้างของงานขุด (B) ระยะจากท้องงานขุดถึงชั้นดินแข็งที่ลึกลงไป ระยะฝังดินกำแพง สติเฟนสของระบบค้ำยัน (EI) ระยะห่างของค้ำยันในแนวตั้ง การอัดแรงในค้ำยัน (Prestress) การปรับปรุงคุณภาพดิน ซึ่งข้อพิจารณาเบื้องต้นที่ผู้วิจัยได้กล่าวถึง ส่งผลต่อระยะเวลา ราคาในการก่อสร้าง และความปลอดภัยในโครงการ เพื่อความเหมาะสมการพิจารณาระดับความลึกในงานขุดดินควรพิจารณาให้มีความสอดคล้องตามลักษณะการทำงานในแต่ละโครงการ

5.2 ตารางสรุปการพิจารณาความลึกของงานขุดดินโดยใช้กำแพงกันดิน Pile wall เส้นผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตร ในเขตพื้นที่ดินเหนียวอ่อน สำหรับงานใต้ดิน

กำแพงกันดิน Pile wall เส้นผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตร กรณีติดตั้ง Strut 1 Layer และ Strut 2 Layer มีความเหมาะสมในระดับความลึกที่ทำการขุดดังตารางที่ 5.4 และ ตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.4 สรุปการพิจารณาความลึกของงานขุดดิน โดยใช้กำแพงกันดิน Pile wall เส้นผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตร ในเขตพื้นที่ดินเหนียวอ่อน สำหรับงานใต้ดิน กรณีติดตั้ง Sturt 1 Layer

ความลึกของงานขุดดิน (เมตร)	ลักษณะการส่งผล	ความสามารถในการดำเนินงานขุดดิน
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน 5.623 เซนติเมตร &gt; 8 เซนติเมตร <u>OK</u></li> <li>- เสถียรภาพดินกำแพง (Moment Balance) FS = 1.38 &gt; 1.2 <u>OK</u></li> <li>- การปูดของดินเหนียวที่ระดับก้นหลุม (Heaving) FS = 3.28 &gt; 1.2 <u>OK</u></li> </ul>	ดำเนินงานได้ปกติ
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน 5.623 เซนติเมตร &gt; 10 เซนติเมตร <u>OK</u></li> <li>- เสถียรภาพดินกำแพง (Moment Balance) FS = 1.28 &gt; 1.2 <u>OK</u></li> <li>- การปูดของดินเหนียวที่ระดับก้นหลุม (Heaving) FS = 2.73 &gt; 1.2 <u>OK</u></li> </ul>	ดำเนินงานได้ปกติ
6	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน 6.959 เซนติเมตร &gt; 12 เซนติเมตร <u>OK</u></li> <li>- เสถียรภาพดินกำแพง (Moment Balance) FS = 1.18 &lt; 1.2 <u>NOT OK</u></li> <li>- การปูดของดินเหนียวที่ระดับก้นหลุม (Heaving) FS = 2.34 &gt; 1.2 <u>OK</u></li> </ul>	ควรระมัดระวัง
7	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน 8.570 เซนติเมตร &gt; 16 เซนติเมตร <u>OK</u></li> <li>- เสถียรภาพดินกำแพง (Moment Balance) <u>NOT OK</u></li> <li>- การปูดของดินเหนียวที่ระดับก้นหลุม (Heaving) FS = 2.04 &gt; 1.2 <u>OK</u></li> </ul>	ควรระมัดระวัง

ความลึกของงานขุดดิน (เมตร)	ลักษณะการส่งผล	ความสามารถในการดำเนินงานขุดดิน
8	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน 10.650 เซนติเมตร &gt; 16 เซนติเมตร <u>OK</u></li> <li>- เสถียรภาพดินกำแพง (Moment Balance) <u>NOT OK</u></li> <li>- การปูดของดินเหนียวที่ระดับกันหลุม (Heaving) FS = 1.8 &gt; 1.2 <u>OK</u></li> </ul>	ควรระมัดระวัง

ตารางที่ 5.5 สรุปการพิจารณาความลึกของงานขุดดิน โดยใช้กำแพงกันดิน Pile wall เส้นผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตร ในเขตพื้นที่ดินเหนียวอ่อน สำหรับงานใต้ดิน กรณีติดตั้ง Sturt 2 Layer

ความลึกของงานขุดดิน (เมตร)	ลักษณะการส่งผล	ความสามารถในการดำเนินงานขุดดิน
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน 4.266 เซนติเมตร &gt; 8 เซนติเมตร <u>OK</u></li> <li>- เสถียรภาพดินกำแพง (Moment Balance) FS = 1.41 &gt; 1.2 <u>OK</u></li> <li>- การปูดของดินเหนียวที่ระดับกันหลุม (Heaving) FS = 3.42 &gt; 1.2 <u>OK</u></li> </ul>	ดำเนินงานได้ปกติ
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน 5.303 เซนติเมตร &gt; 10 เซนติเมตร <u>OK</u></li> <li>- เสถียรภาพดินกำแพง (Moment Balance) FS = 1.3 &gt; 1.2 <u>OK</u></li> <li>- การปูดของดินเหนียวที่ระดับกันหลุม (Heaving) FS = 2.84 &gt; 1.2 <u>OK</u></li> </ul>	ดำเนินงานได้ปกติ

ความลึกของงานขุดดิน (เมตร)	ลักษณะการส่งผล	ความสามารถในการดำเนินงานขุดดิน
6	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน 6.390 เซนติเมตร &gt; 12 เซนติเมตร <u>OK</u></li> <li>- เสถียรภาพดินกำแพง (Moment Balance) FS = 1.27 &gt; 1.2 <u>OK</u></li> <li>- การปูดของดินเหนียวที่ระดับกันหลุม (Heaving) FS = 3.28 &gt; 1.2 <u>OK</u></li> </ul>	ดำเนินงานได้ปกติ
7	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน 7.615 เซนติเมตร &gt; 14 เซนติเมตร <u>OK</u></li> <li>- เสถียรภาพดินกำแพง (Moment Balance) FS = 1.12 &lt; 1.2 <u>NOT OK</u></li> <li>- การปูดของดินเหนียวที่ระดับกันหลุม (Heaving) FS = 2.11 &gt; 1.2 <u>OK</u></li> </ul>	ควรระมัดระวัง
8	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน 9.102 เซนติเมตร &gt; 16 เซนติเมตร <u>OK</u></li> <li>- เสถียรภาพดินกำแพง (Moment Balance) <u>NOT OK</u></li> <li>- การปูดของดินเหนียวที่ระดับกันหลุม (Heaving) FS = 1.87 &gt; 1.2 <u>OK</u></li> </ul>	ควรระมัดระวัง

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ระดับความลึกของงานขุดดินในงานวิจัยนี้ ข้อมูลดิน ระบบค้ำยัน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Pile wall ต้องมีลักษณะการก่อสร้างตรงกับเงื่อนไข / ขอบเขตของงานวิจัยเท่านั้น
2. ระดับความลึกของงานขุดดิน เป็นเพียงการพิจารณาจาก 3 ตัวแปรที่กล่าวไปข้างต้น คือ การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินที่ได้จากแบบจำลอง เสถียรภาพดินกำแพง (Moment Balance) เสถียรภาพการปูดของดินเหนียวที่ระดับกันหลุม (Heaving) แต่อย่างไรก็ตามถ้าในการก่อสร้างจริงควรคำนึงถึงระยะเวลา ราคาการก่อสร้าง และความปลอดภัย ให้สอดคล้องกับโครงการที่ทำการก่อสร้าง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ภคนันท์ เกียรติพร โอภาส. (2563). การเปรียบเทียบความเหมาะสมในการเลือกใช้ ระบบ กำแพงกันดิน โดย Sheet Pile และ Pile Wall ในเขตพื้นที่ดินเหนียวอ่อน. Comparison of sheet wall and pile wall for soft clay area.
- [2] พงศ์ศิริ สุนดี และสทาวเดือน ถึงอินทร์. (2561). พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพีค จากอิทธิพลของอาคารข้างเคียง
- [3] ศลิษา ไชยพุทธ. (2565). เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพชั้นดิน (Ground Improvement Techniques). พิมพ์ครั้งที่ 3.
- [4] Architechno Study Group. (1997). การคำนวณการออกแบบโครงสร้างชั่วคราว ปรับปรุง ครั้งที่ 2.
- [5] พัลลภ วิสุทธิเมธานุกูล. (2557). คู่มือวิศวกรรมาตรฐานราก ฉบับปรับปรุง.
- [6] พรพจน์ ตัสเส็ง. (2560) เอกสารประกอบการสอนวิชา วิศวกรรมฐานราก. มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี. กรุงเทพมหานคร.
- [7] ธนาตล คงสมบูรณ์. (2547) เอกสารประกอบการสอนวิชา วิศวกรรมฐานราก (วศย.334) ปรับปรุงครั้งที่ 2 .มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กรุงเทพมหานคร.
- [8] วรณิ สุขศาสตร์. (2539). วิศวกรรมฐานราก. สำนักพิมพ์โพธิ์เพส. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัย รังสิต. กรุงเทพมหานคร

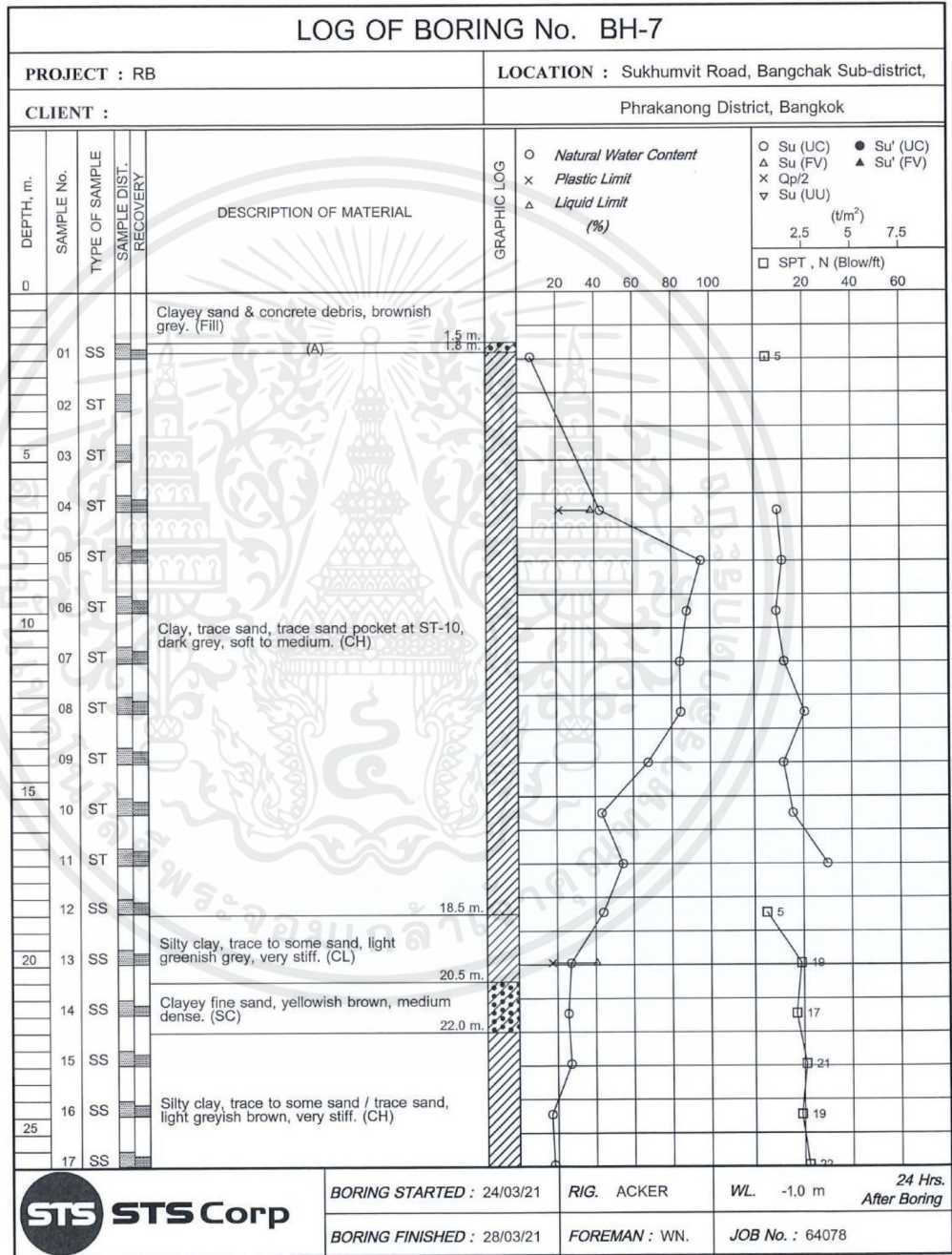
[9] Shih-Hsuan Wu, Chang-Yu Ou, Jianye Ching, Hsein Juang. 2012. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Reliability-Based Design for Basal Heave Stability of Deep Excavations in Spatially Varying Soils. 138(5):594-603

[10]มณเฑียร กังคศิเทียม. (2533). กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม. สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรมชลประทานใน พระราชูปถัมภ์

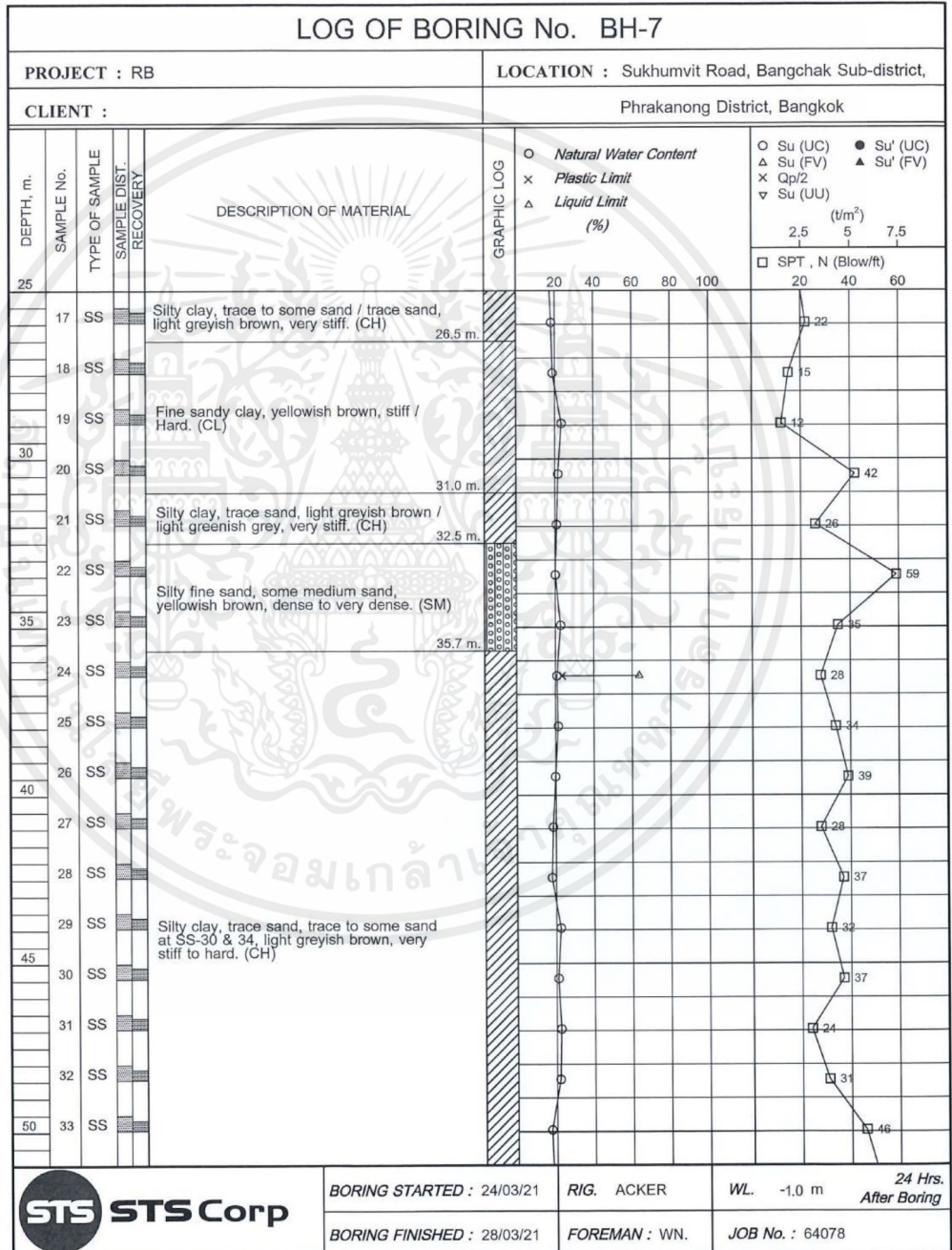




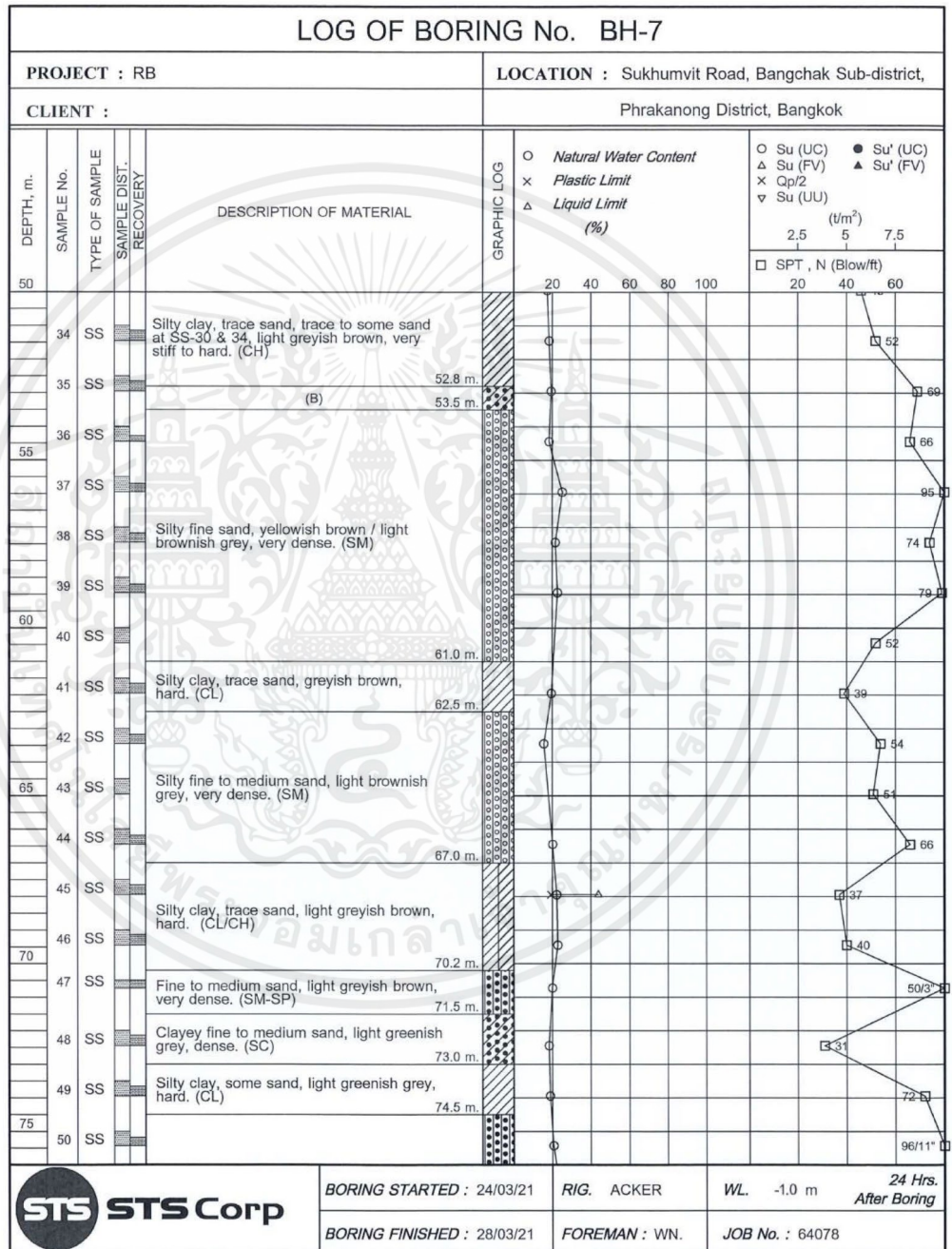
ภาคผนวก ก.  
ข้อมูลทั้งหมดที่นำมาวิเคราะห์



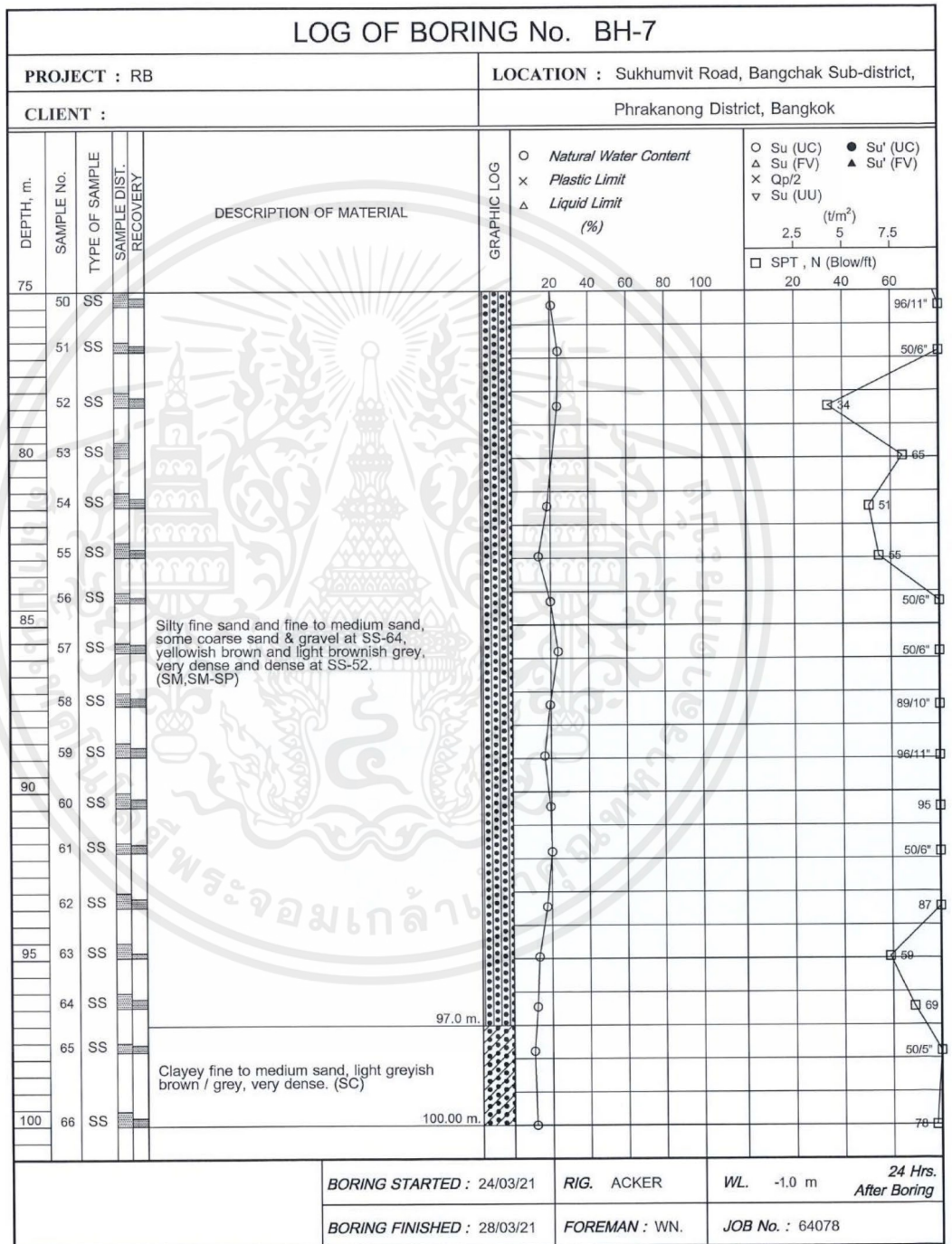
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



PROJECT : CLOUD 11

DESIGN LOAD : 1200 Ton

PILE SIZE : Bored Pile Dia 1500 mm.

TEST PILE NO. : #PAA272 (Line 23-23" A-B)

CONTRACTOR : PYLON PCL

MAX. TEST LOAD : 3000 Ton

LOCATION : Sukhumvit 64, Bangkok

TEST BY : Saksit

DATE (d/m/y)	TIME	ELAP TIME	LOADING		SETTLEMENT GAUGE				AVG. READING x 0.01 mm	RATE (mm./hr.)	ACTUAL MOVEMENT (mm.)	LEVEL x 0.1 mm.				REF. BEAM	TEST PILE	PIANO WIRE	BM	°C	REMARKS	
			READING (PSI)	Ton	G1	G2	G3	G4				No.1	No.2	No.3	No.4							
18/08/22	11:00	0	0	0	100	100	100	100	100.00	-	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	
18/08/22	11:00	0	749	300	209	217	219	212	214.25	-	1.14	5	8	8	5	0	12	10	0	-	Cycle 1	
18/08/22	11:05	5	749	300	209	218	219	212	214.50	-	1.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
18/08/22	11:10	10	749	300	210	218	220	213	216.25	-	1.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
18/08/22	11:20	20	749	300	211	219	221	214	216.25	-	1.16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
18/08/22	11:40	40	749	300	211	220	222	215	217.00	-	1.17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
18/08/22	12:00	60	749	300	212	221	223	216	218.00	0.038	1.18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
18/08/22	12:00	0	1222	600	305	324	332	320	320.25	-	2.20	10	12	10	10	0	28	30	0	-	-	
18/08/22	12:05	5	1222	600	305	325	333	320	320.75	-	2.21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
18/08/22	12:10	10	1222	600	306	326	334	322	322.00	-	2.22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
18/08/22	12:20	20	1222	600	307	328	335	324	323.50	-	2.24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
18/08/22	12:40	40	1222	600	308	329	336	325	324.50	-	2.25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
18/08/22	13:00	60	1222	600	310	331	337	327	326.25	0.080	2.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
18/08/22	13:00	0	1696	900	410	425	456	451	435.50	-	3.36	15	18	15	12	0	36	35	0	-	-	
18/08/22	13:05	5	1696	900	410	426	456	452	436.00	-	3.36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
18/08/22	13:10	10	1696	900	410	426	457	453	436.50	-	3.37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
18/08/22	13:20	20	1696	900	412	428	459	454	438.25	-	3.38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
18/08/22	13:40	40	1696	900	413	430	460	456	439.75	-	3.40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
18/08/22	14:00	60	1696	900	415	433	463	460	442.75	0.073	3.43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
18/08/22	14:00	0	2169	1200	550	578	621	611	590.00	-	4.90	20	28	23	20	0	50	50	0	-	-	Jack up
18/08/22	14:05	5	2169	1200	551	590	624	613	592.00	-	4.92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
18/08/22	14:10	10	2169	1200	552	592	626	615	593.75	-	4.94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
18/08/22	14:20	20	2169	1200	553	594	628	617	595.50	-	4.96	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
18/08/22	14:40	40	2169	1200	560	598	631	620	599.75	-	5.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PROJECT : CLOUD 11		DESIGN LOAD : 1200 Ton		PILE SIZE : Bored Pile Dia 1500 mm.		TEST PILE NO. : #PAA272 (Line 23-23* A-B)																
CONTRACTOR : PYLON PCL		MAX. TEST LOAD : 3000 Ton		LOCATION : Sukhumvit 64, Bangkok		TEST BY : Saksit																
DATE	TIME	ELAP TIME	LOADING		SETTLEMENT GAUGE				AVG. READING x 0.01 mm	RATE (mm/hr.)	ACTUAL MOVEMENT (mm.)	REACTION PILE				REF. BEAM	TEST PILE	PIANO WIRE	BM	°C	REMARKS	
			READING (PSI)	Ton	READING x 0.01 mm.							LEVEL x 0.1 mm.										
(dmyy)					G1	G2	G3	G4	x 0.01 mm	(mm/hr.)	(mm.)	No.1	No.2	No.3	No.4							
19/08/22	15:00	60	2169	1200	565	592	635	625	604.25	0.143	5.04	20	28	23	20	0	52	50	0	-	-	Jack up
19/08/22	15:20	80	2169	1200	570	600	642	632	611.00	0.155	5.11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	15:40	100	2169	1200	574	604	654	640	618.00	0.163	5.16	-	-	-	-	-	52	50	0	-	-	-
19/08/22	16:00	120	2169	1200	576	610	660	642	622.00	0.178	5.22	20	28	23	20	0	53	50	0	-	-	-
19/08/22	17:00	180	2169	1200	582	620	673	648	630.75	0.088	5.31	20	28	23	20	0	53	50	0	-	-	-
19/08/22	18:00	240	2169	1200	587	623	676	655	635.25	0.045	5.35	20	28	23	20	0	53	50	0	-	-	-
19/08/22	19:00	300	2169	1200	593	625	690	659	639.25	0.040	5.39	20	28	23	20	0	53	50	0	-	-	-
19/08/22	20:00	360	2169	1200	595	626	692	663	641.50	0.023	5.42	20	28	23	20	0	53	50	0	-	-	-
19/08/22	21:00	420	2169	1200	598	627	693	665	643.25	0.018	5.43	20	28	23	20	0	53	50	0	-	-	-
19/08/22	22:00	480	2169	1200	598	628	693	667	644.00	0.008	5.44	20	28	23	20	0	54	50	0	-	-	-
19/08/22	23:00	540	2169	1200	601	629	694	670	646.00	0.020	5.46	20	28	23	20	0	54	55	0	-	-	-
19/08/22	00:00	600	2169	1200	603	630	696	671	647.25	0.013	5.47	20	28	23	20	0	54	55	0	-	-	-
19/08/22	01:00	660	2169	1200	604	631	696	672	648.25	0.010	5.48	20	28	23	20	0	54	55	0	-	-	-
19/08/22	02:00	720	2169	1200	605	632	697	673	649.25	0.010	5.49	20	28	23	20	0	54	55	0	-	-	-
19/08/22	02:00	0	1182	600	489	460	534	528	507.75	-	4.08	15	20	15	12	0	42	40	0	-	-	-
19/08/22	02:05	5	1182	600	489	460	534	528	507.75	-	4.08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	02:10	10	1182	600	488	479	532	527	506.50	-	4.07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	02:20	20	1182	600	487	478	531	526	505.50	-	4.06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	02:40	40	1182	600	485	476	530	525	504.00	-	4.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	03:00	60	1182	600	483	475	529	524	502.75	0.050	4.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	03:00	0	710	300	361	363	404	402	382.50	-	2.83	10	15	10	9	0	34	35	0	-	-	-
19/08/22	03:05	5	710	300	360	361	401	400	380.50	-	2.81	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	03:10	10	710	300	358	359	400	400	378.25	-	2.79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	03:20	20	710	300	356	357	397	398	377.00	-	2.77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	03:40	40	710	300	354	354	395	394	374.25	-	2.74	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	04:00	60	710	300	352	352	392	391	371.75	0.108	2.72	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

PROJECT : CLOUD 11		DESIGN LOAD : 1200 Ton		PILE SIZE : Bored Pile Dia 1500 mm.		TEST PILE NO. : #PAA272 (Line 23-23' A- B)																	
CONTRACTOR : PYLON PCL		MAX. TEST LOAD : 3000 Ton		LOCATION : Sukhumvit 64, Bangkok		TEST BY : Saksi																	
DATE	TIME	ELAP TIME	LOADING		SETTLEMENT GAUGE				AVG. READING x 0.01 mm	RATE (mm/hr.)	ACTUAL MOVEMENT (mm.)	LEVEL x 0.1 mm.				REF. BEAM	TEST PILE	PIANO WIRE	BM	°C	REMARKS		
			READING (PSI)	Ton	G1	G2	G3	G4				No.1	No.2	No.3	No.4								
19/08/22	04:00	0	0	0	188	188	210	205	197.75	-	0.98	4	3	0	1	0	10	10	0	-	-	-	-
19/08/22	04:05	5	0	0	186	186	207	203	195.50	-	0.95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	04:10	10	0	0	183	184	204	200	192.75	-	0.93	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	04:20	20	0	0	181	180	201	197	189.75	-	0.90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	04:40	40	0	0	179	179	200	195	188.25	-	0.88	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	05:00	60	0	0	179	178	197	193	186.75	0.110	0.87	4	3	0	1	0	10	10	0	-	-	-	-
19/08/22	05:20	80	0	0	178	177	195	192	185.50	0.043	0.86	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	05:40	100	0	0	178	178	194	191	184.75	0.035	0.85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	06:00	120	0	0	178	175	193	190	184.00	0.028	0.84	4	3	0	1	0	10	10	0	-	-	-	-
19/08/22	07:00	180	0	0	177	174	183	190	183.50	0.005	0.84	4	3	0	1	0	10	10	0	-	-	-	-
19/08/22	08:00	240	0	0	175	173	182	189	182.25	0.013	0.82	4	3	0	1	0	10	10	0	-	-	-	-
19/08/22	09:00	300	0	0	175	173	182	188	182.00	0.003	0.82	4	3	0	1	0	10	10	0	-	-	-	-
19/08/22	10:00	360	0	0	175	173	182	188	182.00	0.000	0.82	4	3	0	1	0	10	10	0	-	-	-	-
19/08/22	10:00	0	749	300	309	320	344	333	326.50	-	2.27	10	10	9	5	0	25	25	0	-	-	-	-
19/08/22	10:05	5	749	300	309	320	345	333	326.75	-	2.27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	10:10	10	749	300	309	321	346	334	327.50	-	2.28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	10:20	20	749	300	310	322	347	335	328.50	-	2.29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	10:40	40	749	300	311	322	347	335	328.75	-	2.29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	11:00	60	749	300	312	322	347	335	329.00	0.025	2.29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	11:00	0	1222	600	409	422	455	445	432.75	-	3.33	12	19	12	10	0	35	35	0	-	-	-	-
19/08/22	11:05	5	1222	600	409	422	456	446	433.25	-	3.33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	11:10	10	1222	600	410	423	457	447	434.25	-	3.34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	11:20	20	1222	600	410	423	458	447	434.50	-	3.35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	11:40	40	1222	600	410	423	459	450	435.50	-	3.36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	12:00	60	1222	600	410	423	459	450	435.50	0.028	3.36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	12:00	0	1696	900	517	534	577	565	548.25	-	4.48	17	25	15	15	0	48	45	0	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PROJECT : CLOUD 11      DESIGN LOAD : 1200 Ton      PILE SIZE : Bored Pile Dia 1500 mm      TEST PILE NO. : #PAA272 (Line 23-23', A- B)

CONTRACTOR : PYLON PCL.      MAX. TEST LOAD : 3000 Ton      LOCATION : Sukhumvit 64, Bangkok      TEST BY : Sakait

DATE	TIME	ELAP <sup>1</sup> TIME	LOADING		SETTLEMENT GAUGE READING x 0.01 mm.				AVG. READING x 0.01 mm	RATE (mm/hr.)	ACTUAL MOVEMENT (mm.)	REACTION PILE LEVEL x 0.1 mm.				REF. BEAM	TEST PILE	PIANO WIRE	BM	°C	REMARKS			
			READING (PSI)	Ton	G1	G2	G3	G4				No.1	No.2	No.3	No.4									
19/08/22	12:05	5	1696	900	516	534	578	566	548.00	-	4.48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	12:10	10	1696	900	519	535	579	567	550.00	-	4.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	12:20	20	1696	900	520	535	590	568	550.75	-	4.51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	12:40	40	1696	900	521	536	581	569	551.75	-	4.52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	13:00	60	1696	900	521	537	592	569	552.25	0.040	4.52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	13:00	0	2169	1200	624	651	703	684	665.50	-	6.66	21	30	21	21	0	60	55	0	-	-	-	-	-
19/08/22	13:05	5	2169	1200	625	652	704	686	666.75	-	6.67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	13:10	10	2169	1200	626	653	706	688	668.25	-	6.68	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	13:20	20	2169	1200	627	654	708	691	670.00	-	6.70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	13:40	40	2169	1200	628	655	709	693	671.25	-	6.71	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	14:00	60	2169	1200	628	655	710	693	671.50	0.060	6.72	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	14:00	0	2643	1500	748	785	840	825	799.50	-	7.00	28	40	30	30	0	70	70	0	-	-	-	-	-
19/08/22	14:05	5	2643	1500	750	787	842	827	801.50	-	7.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	14:10	10	2643	1500	753	789	845	830	804.25	-	7.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	14:20	20	2643	1500	755	791	847	832	806.25	-	7.06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	14:40	40	2643	1500	757	793	849	834	808.25	-	7.08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	15:00	60	2643	1500	758	794	850	835	809.25	0.098	7.09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	15:00	0	3117	1800	910	962	1030	998	975.00	-	8.75	42	55	38	40	0	92	90	0	-	-	-	-	-
19/08/22	15:05	5	3117	1800	912	964	1032	999	976.75	-	8.77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	15:10	10	3117	1800	914	966	1035	1002	979.25	-	8.79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	15:20	20	3117	1800	918	970	1039	1006	983.25	-	8.83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	15:40	40	3117	1800	921	973	1043	1010	986.75	-	8.87	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	16:00	60	3117	1800	923	975	1046	1013	989.25	0.143	8.89	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/22	16:00	0	3590	2100	1190	1160	1230	1190	1192.50	-	10.83	50	70	55	45	0	112	120	0	-	-	-	-	-
19/08/22	16:05	5	3590	2100	1192	1162	1232	1192	1194.50	-	10.85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



PROJECT : CLOUD 11		DESIGN LOAD : 1200 Ton		PILE SIZE : Bored Pile Dia 1500 mm.		TEST PILE NO. : #PAA272 (Line 23-23" , A- B)															
CONTRACTOR : PYLON PCL.		MAX. TEST LOAD : 3000 Ton		LOCATION : Sukhumvit 64, Bangkok		TEST BY : Sakel															
DATE	TIME	ELAP <sup>2</sup> TIME	LOADING		SETTLEMENT GAUGE				AVG. READING x 0.01 mm	RATE (mm./hr.)	ACTUAL MOVEMENT (mm.)	REACTION PILE				REF. BEAM	TEST PILE	PIANO WIRE	BM	°C	REMARKS
			READING (PSI)	Ton	G1	G2	G3	G4				No.1	No.2	No.3	No.4						
2008/22	23:00	240	5011	3000	2065	2211	2318	2238	2208.00	0.063	21.08	155	170	160	162	0	213	210	0	-	-
2008/22	00:00	300	5011	3000	2071	2218	2326	2244	2214.75	0.068	21.15	155	175	165	165	0	213	210	0	-	-
2008/22	01:00	360	5011	3000	2078	2224	2334	2250	2221.00	0.063	21.21	155	175	165	165	0	213	210	0	-	-
2008/22	02:00	420	5011	3000	2082	2230	2342	2256	2227.50	0.065	21.28	160	175	170	165	0	213	210	0	-	-
2008/22	03:00	480	5011	3000	2087	2237	2349	2263	2234.00	0.066	21.34	160	180	170	165	0	213	210	0	-	-
2008/22	04:00	540	5011	3000	2092	2244	2357	2270	2240.75	0.068	21.41	160	180	170	170	0	220	215	0	-	-
2008/22	05:00	600	5011	3000	2098	2251	2364	2275	2247.00	0.063	21.47	160	180	173	170	0	220	215	0	-	-
2008/22	06:00	660	5011	3000	2105	2259	2371	2282	2254.25	0.073	21.54	160	180	173	170	0	220	215	0	-	-
2008/22	07:00	720	5011	3000	2110	2268	2379	2287	2261.00	0.068	21.61	160	180	173	170	0	220	215	0	-	-
2008/22	07:00	0	4018	2400	2026	2134	2270	2209	2159.75	-	20.60	150	160	160	160	0	210	205	0	-	-
2008/22	07:05	5	4018	2400	2024	2133	2270	2207	2158.50	-	20.59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2008/22	07:10	10	4018	2400	2024	2133	2269	2206	2158.00	-	20.58	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2008/22	07:20	20	4018	2400	2023	2132	2268	2206	2157.25	-	20.57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2008/22	07:40	40	4018	2400	2023	2131	2268	2205	2156.75	-	20.57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2008/22	08:00	60	4018	2400	2022	2131	2268	2204	2156.25	0.035	20.56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2008/22	08:00	0	3072	1800	1804	1895	2020	1969	1921.75	-	18.22	123	140	124	130	0	165	160	0	-	-
2008/22	08:05	5	3072	1800	1802	1892	2019	1967	1920.00	-	18.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2008/22	08:10	10	3072	1800	1802	1892	2016	1965	1918.75	-	18.19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2008/22	08:20	20	3072	1800	1801	1891	2014	1962	1917.00	-	18.17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2008/22	08:40	40	3072	1800	1800	1890	2011	1960	1915.25	-	18.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2008/22	09:00	60	3072	1800	1800	1890	2011	1960	1915.25	0.055	18.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2008/22	09:00	0	2127	1200	1552	1625	1728	1694	1647.25	-	15.47	93	110	90	100	0	155	155	0	-	-
2008/22	09:05	5	2127	1200	1549	1622	1726	1678	1643.75	-	15.44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2008/22	09:10	10	2127	1200	1548	1620	1725	1677	1642.50	-	15.43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2008/22	09:20	20	2127	1200	1547	1619	1724	1675	1641.25	-	15.41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2008/22	09:40	40	2127	1200	1547	1617	1722	1674	1640.00	-	15.40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

PROJECT : CLOUD 11

DESIGN LOAD : 1200 Ton

PILE SIZE : Bored Pile Dia 1500 mm.

TEST PILE NO. : #PA272 (Line 23-23' A-B)

CONTRACTOR : PYLON PCL

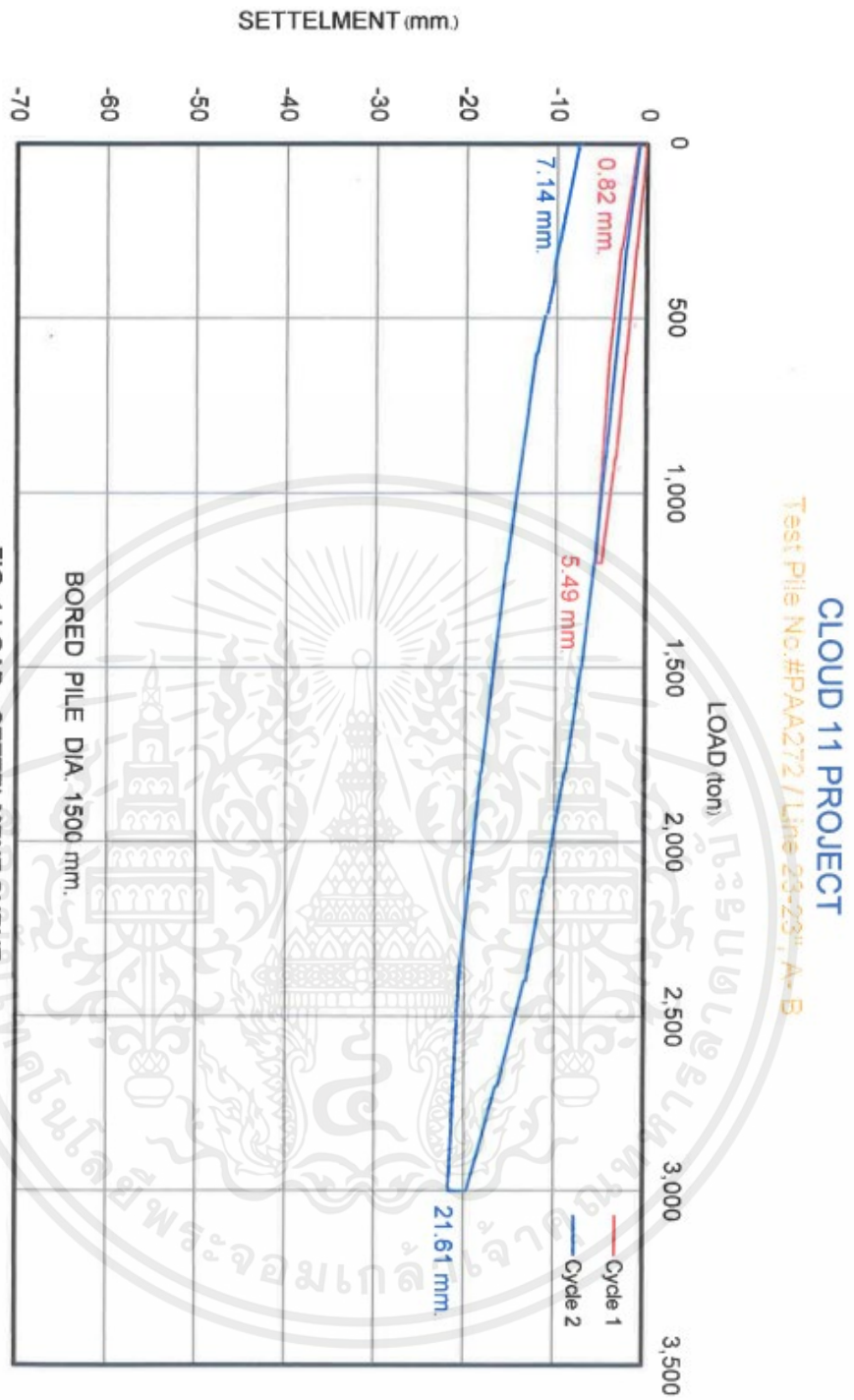
MAX. TEST LOAD : 3000 Ton

LOCATION : Sukhumvit 64, Bangkok

TEST BY : Sakrit

DATE	TIME	ELAP. TIME	LOADING		SETTLEMENT GAUGE				AVG. READING x 0.01 mm	RATE (mm./hr.)	ACTUAL MOVEMENT (mm.)	REACTION PILE				REF. BEAM	TEST PILE	PIANO WIRE	BM	°C	REMARKS
			READING (PSI)	Ton	G1	G2	G3	G4				No.1	No.2	No.3	No.4						
20/08/22	10:00	0	1182	600	1254	1308	1380	1344	1321.50	0.085	12.22	66	74	60	68	0	120	120	0	-	-
20/08/22	10:05	5	1182	600	1252	1305	1376	1340	1318.25		12.13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20/08/22	10:10	10	1182	600	1250	1302	1372	1335	1314.75		12.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20/08/22	10:20	20	1182	600	1248	1300	1370	1332	1312.50		12.13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20/08/22	10:40	40	1182	600	1246	1298	1367	1330	1310.25		12.12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20/08/22	11:00	60	1182	600	1243	1295	1365	1328	1307.75	0.138	12.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20/08/22	11:30	0	0	0	835	838	883	857	853.25	-	7.53	40	42	38	35	0	72	70	0	-	-
20/08/22	11:05	5	0	0	833	836	890	853	850.50	-	7.51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20/08/22	11:10	10	0	0	830	833	876	848	846.75	-	7.47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20/08/22	11:20	20	0	0	826	831	873	845	843.75	-	7.44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20/08/22	11:40	40	0	0	822	825	887	830	836.00	-	7.33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20/08/22	12:00	60	0	0	817	821	861	824	830.75	0.225	7.31	40	42	36	36	0	70	70	0	-	-
20/08/22	12:20	80	0	0	813	816	856	819	826.00	0.178	7.23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20/08/22	12:40	100	0	0	808	812	851	814	821.25	0.148	7.21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20/08/22	13:00	120	0	0	803	810	847	810	817.50	0.133	7.19	40	42	38	35	0	70	70	0	-	-
20/08/22	14:00	180	0	0	801	807	844	807	814.75	0.028	7.15	40	42	38	35	0	70	70	0	-	-
20/08/22	15:00	240	0	0	801	806	843	806	814.00	0.008	7.14	40	42	38	35	0	70	70	0	-	-
20/08/22	16:00	300	0	0	801	806	842	805	813.50	0.005	7.14	40	42	38	35	0	70	70	0	-	-
20/08/22	17:00	360	0	0	801	806	842	805	813.50	0.000	7.14	40	42	38	35	0	70	70	0	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข.

ข้อมูลเกี่ยวกับการตรวจสอบเสถียรภาพดินกำแพง

**Balance Moment , Strur 1 Layer , Exc. 4 m.**

Excavation Level : 4 m.  
Last Strut Level : 1 m.  
Surcharge Load : 2 t/m<sup>2</sup>  
Pile wall Length : 20 m.

**Soil Properties**

Layer	Soil Class	Level	Depth	$\gamma$ total	c	$\phi$	Ka.	Kp.
1	Clay	1	1	1.54	1.24	0	1	1
2	Clay	3	2	1.54	1.24	0	1	1
3	Clay	4	1	1.57	2.01	0	1	1
4	Clay	18	14	1.57	2.01	0	1	1
5	Clay	20	2	1.91	10	0	1	1

**Note**

Find Ka , K :  $Ka = (1-\sin\phi)/(1+\sin\phi)$  (Coefficient Active Earth Pressure)

:  $Kp = (1+\sin\phi)/(1-\sin\phi)$  (Coefficient Passive Earth Pressure)

; Rankine's Theory

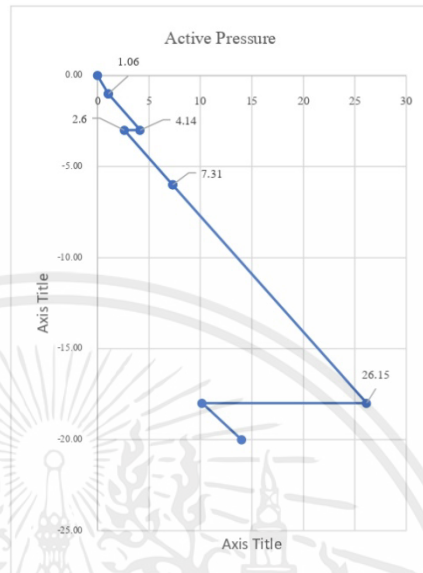
Find Pa , P1 :  $Pa = (q+\gamma'h)Ka - 2c\sqrt{Ka} + \text{PorePressure}$  (Active Earth Pressure)

:  $Pp = (q+\gamma'h)Ka + 2c\sqrt{Ka} + \text{PorePressure}$  (Passive Earth Pressure)

Find F.S. :  $F.S. = Mp/Ma$  ; **F.S. not less than 1.2 (OK)**

### 1.3 Adjust Active Pressure

Level (m.)	Active Pressure	
	Cal.	Adjust
0.00	-0.48	0
-1.00	1.06	1.06
-1.00	1.06	1.06
-3.00	4.14	4.14
-3.00	2.6	2.6
-6.00	7.31	7.31
-6.00	7.31	7.31
-18.00	26.15	26.15
-18.00	10.17	10.17
-20.00	13.99	13.99



### 1. Calculation Active Pressure

#### 1.1 Vertical Stress (Active)

Level (m.)	$\sigma_v$ (Vertical stress)						Unit	
0.00	2.00	+	0	x	0	=	2.00	t/m <sup>2</sup>
1.00	2.00	+	1.54	x	1	=	3.54	t/m <sup>2</sup>
1.00	2.00	+	1.54	x	1	=	3.54	t/m <sup>2</sup>
3.00	3.54	+	1.54	x	2	=	6.62	t/m <sup>2</sup>
3.00	3.54	+	1.54	x	2	=	6.62	t/m <sup>2</sup>
6.00	6.62	+	1.57	x	3	=	11.33	t/m <sup>2</sup>
6.00	6.62	+	1.57	x	3	=	11.33	t/m <sup>2</sup>
18.00	11.33	+	1.57	x	12	=	30.17	t/m <sup>2</sup>
18.00	11.33	+	1.57	x	12	=	30.17	t/m <sup>2</sup>
20.00	30.17	+	1.91	x	2	=	33.99	t/m <sup>2</sup>

#### 1.2 Active Pressure

Level (m.)	$\sigma_a$ (Active Pressure)						Unit	
0.00	2.00	-	2	x	1.24	=	-0.48	t/m <sup>2</sup>
1.00	3.54	-	2	x	1.24	=	1.06	t/m <sup>2</sup>
1.00	3.54	-	2	x	1.24	=	1.06	t/m <sup>2</sup>
3.00	6.62	-	2	x	1.24	=	4.14	t/m <sup>2</sup>
3.00	6.62	-	2	x	2.01	=	2.6	t/m <sup>2</sup>
6.00	11.33	-	2	x	2.01	=	7.31	t/m <sup>2</sup>
6.00	11.33	-	2	x	2.01	=	7.31	t/m <sup>2</sup>
18.00	30.17	-	2	x	2.01	=	26.15	t/m <sup>2</sup>
18.00	30.17	-	2	x	10	=	10.17	t/m <sup>2</sup>
20.00	33.99	-	2	x	10	=	13.99	t/m <sup>2</sup>

**Balance Moment , Strur 1 Layer , Exc. 6 m.**

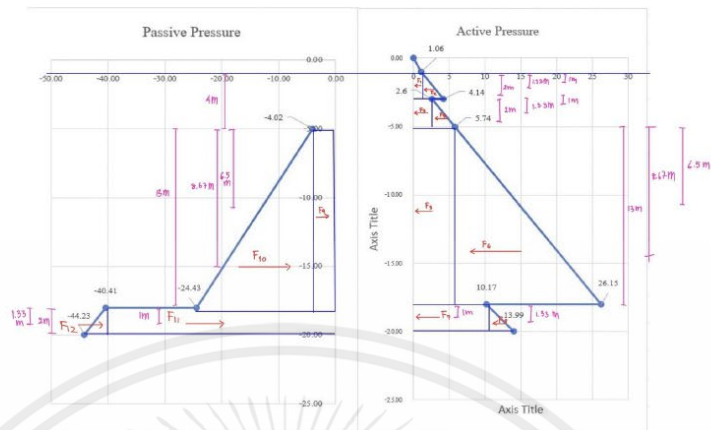
Excavation Level : 6 m.  
Last Strut Level : 1 m.  
Surcharge Load : 2 t/m<sup>2</sup>  
Pile wall Length : 20 m.

**Soil Properties**

Layer	Soil Class	Level	Depth	$\gamma$ total	c	$\phi$	Ka.	Kp.
1	Clay	1	1	1.54	1.24	0	1	1
2	Clay	3	2	1.54	1.24	0	1	1
3	Clay	6	3	1.57	2.01	0	1	1
4	Clay	18	12	1.57	2.01	0	1	1
5	Clay	20	2	1.91	10	0	1	1

**Note**

Find Ka , K :  $Ka = (1-\sin\phi)/(1+\sin\phi)$  (Coefficient Active Earth Pressure )  
                  :  $Kp = (1+\sin\phi)/(1-\sin\phi)$  (Coefficient Passive Earth Pressure )  
                  : Rankine's Theory  
Find Pa , P1 :  $Pa = (q+\gamma'h)Ka - 2c\sqrt{Ka+PorePressure}$  ( Active Earth Pressure )  
                  :  $Pp = (q+\gamma'h)Ka + 2c\sqrt{Ka+PorePressure}$  ( Passive Earth Pressure )  
Find F.S. :  $F.S. = Mp/Ma$  ; **F.S. not less than 1.2 ( OK )**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสูงของดิน1ถึงระดับขุด

F (ton)						Moment Arm (m.)	
1	1.06	x	2	=	2.12	1	
2	0.5	x	3.08	x 2	=	3.08	1.33
3	2.6	x	2	=	5.2	3	
4	0.5	x	3.14	x 2	=	3.14	3.33
5	5.74	x	13	=	74.62	10.5	
6	0.5	x	20.41	x 13	=	132.665	12.67
7	10.17	x	2	=	20.34	18	
8	0.5	x	3.82	x 2	=	3.82	18.33
9	4.02	x	13	=	52.26	10.5	
10	0.5	x	20.41	x 13	=	132.665	12.67
11	40.41	x	2	=	80.82	18	
12	0.5	x	3.82	x 2	=	3.82	18.33

F		Moment Arm		Moment
No	ton	m	t-m	t-m
1	2.12	1		2.12
2	3.08	1.33		4.10
3	5.20	3		15.60
4	3.14	3.33		10.46
5	74.62	10.5		783.51
6	132.67	12.67		1680.87
7	20.34	18		366.12
8	3.82	18.33		70.02
9	52.26	10.5		548.73
10	132.67	12.67		1680.87
11	80.82	18		1454.76
12	3.82	18.33		70.02
				Ma = 2932.79 t-m
				Mp = 3754.38 t-m
FS	=	$\frac{Mp}{Ma}$	=	1.28 > 1.2 OK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.Calculation Passive Pressure

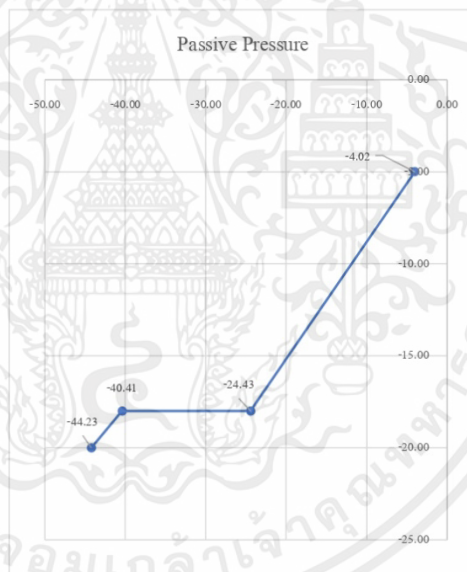
### 1.2 Vertical Stress (Passive)

Level (m.)	$\sigma_v$ (Vertical stress)						Unit	
5	0	+	1.57	x	0	=	0	t/m <sup>2</sup>
18	0	+	1.57	x	13	=	20.41	t/m <sup>2</sup>
18	0	+	1.57	x	13	=	20.41	t/m <sup>2</sup>
20	20.41	+	1.91	x	2	=	24.23	t/m <sup>2</sup>

### 2.2 Passive Pressure

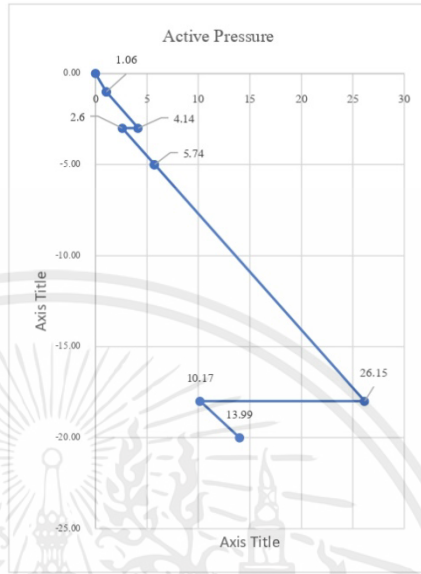
Level (m.)	$\sigma_a$ (Passive Pressure)						Unit	
5.00	0	+	2	x	2.01	=	4.02	t/m <sup>2</sup>
18.00	20.41	+	2	x	2.01	=	24.43	t/m <sup>2</sup>
18.00	20.41	+	2	x	10.00	=	40.41	t/m <sup>2</sup>
20.00	24.23	+	2	x	10.00	=	44.23	t/m <sup>2</sup>

Level (m.)	Passive Pressure
-5.00	-4.02
-18.00	-24.43
-18.00	-40.41
-20.00	-44.23



### 1.3 Adjust Active Pressure

Level (m.)	Active Pressure	
	Cal.	Adjust
0.00	-0.48	0
-1.00	1.06	1.06
-1.00	1.06	1.06
-3.00	4.14	4.14
-3.00	2.6	2.6
-5.00	5.74	5.74
-5.00	5.74	5.74
-18.00	26.15	26.15
-18.00	10.17	10.17
-20.00	13.99	13.99



### 1. Calculation Active Pressure

#### 1.1 Vertical Stress (Active)

Level (m.)	$\sigma_v$ (Vertical stress)						Unit	
0.00	2.00	+	0	x	0	=	2.00	t/m <sup>2</sup>
1.00	2.00	+	1.54	x	1	=	3.54	t/m <sup>2</sup>
1.00	2.00	+	1.54	x	1	=	3.54	t/m <sup>2</sup>
3.00	3.54	+	1.54	x	2	=	6.62	t/m <sup>2</sup>
3.00	3.54	+	1.54	x	2	=	6.62	t/m <sup>2</sup>
5.00	6.62	+	1.57	x	2	=	9.76	t/m <sup>2</sup>
5.00	6.62	+	1.57	x	2	=	9.76	t/m <sup>2</sup>
18.00	9.76	+	1.57	x	13	=	30.17	t/m <sup>2</sup>
18.00	9.76	+	1.57	x	13	=	30.17	t/m <sup>2</sup>
20.00	30.17	+	1.91	x	2	=	33.99	t/m <sup>2</sup>

#### 1.2 Active Pressure

Level (m.)	$\sigma_a$ (Active Pressure)						Unit	
0.00	2.00	-	2	x	1.24	=	-0.48	t/m <sup>2</sup>
1.00	3.54	-	2	x	1.24	=	1.06	t/m <sup>2</sup>
1.00	3.54	-	2	x	1.24	=	1.06	t/m <sup>2</sup>
3.00	6.62	-	2	x	1.24	=	4.14	t/m <sup>2</sup>
3.00	6.62	-	2	x	2.01	=	2.6	t/m <sup>2</sup>
5.00	9.76	-	2	x	2.01	=	5.74	t/m <sup>2</sup>
5.00	9.76	-	2	x	2.01	=	5.74	t/m <sup>2</sup>
18.00	30.17	-	2	x	2.01	=	26.15	t/m <sup>2</sup>
18.00	30.17	-	2	x	10	=	10.17	t/m <sup>2</sup>
20.00	33.99	-	2	x	10	=	13.99	t/m <sup>2</sup>

**Balance Moment , Strur 1 Layer , Exc. 5 m.**

Excavation Level : 5 m.  
Last Strut Level : 1 m.  
Surcharge Load : 2 t/m<sup>2</sup>  
Pile wall Length : 20 m.

**Soil Properties**

Layer	Soil Class	Level	Depth	$\gamma$ total	c	$\phi$	Ka.	Kp.
1	Clay	1	1	1.54	1.24	0	1	1
2	Clay	3	2	1.54	1.24	0	1	1
3	Clay	5	2	1.57	2.01	0	1	1
4	Clay	18	13	1.57	2.01	0	1	1
5	Clay	20	2	1.91	10	0	1	1

**Note**

Find Ka , K :  $Ka = (1 - \sin\phi) / (1 + \sin\phi)$  (Coefficient Active Earth Pressure)  
                  :  $Kp = (1 + \sin\phi) / (1 - \sin\phi)$  (Coefficient Passive Earth Pressure)  
                  : Rankine's Theory  
Find Pa , Pp :  $Pa = (q + \gamma' h) Ka - 2c \sqrt{Ka + \text{Pore Pressure}}$  (Active Earth Pressure)  
                  :  $Pp = (q + \gamma' h) Kp + 2c \sqrt{Kp + \text{Pore Pressure}}$  (Passive Earth Pressure)  
Find F.S. :  $F.S. = Mp / Ma$  ; **F.S. not less than 1.2 (OK)**

F (ton)						Moment Arm (m.)	
1	1.06	x	2	=	2.12	1	
2	0.5	x	3.08	x	2	1.33	
3	2.6	x	1	=	2.6	2.5	
4	0.5	x	1.57	x	1	2.66	
5	4.17	x	14	=	58.38	10	
6	0.5	x	21.98	x	14	12.33	
7	10.17	x	2	=	20.34	18	
8	0.5	x	3.82	x	2	18.33	
9	4.02	x	14	=	56.28	10	
10	0.5	x	21.98	x	14	12.33	
11	41.98	x	2	=	83.96	18	
12	0.5	x	3.82	x	2	18.33	

F		Moment Arm		Moment	
No	ton	m	t-m		
1	2.12	1	2.12		
2	3.08	1.33	4.10		
3	2.60	2.5	6.50		
4	0.79	2.66	2.09		
5	58.38	10	583.80		
6	153.86	12.33	1897.09		
7	20.34	18	366.12		
8	3.82	18.33	70.02	Ma	= 2931.84 t-m
9	56.28	10	562.80		
10	153.86	12.33	1897.09		
11	83.96	18	1511.28		
12	3.82	18.33	70.02	Mp	= 4041.19 t-m
FS		=	$\frac{Mp}{Ma}$	=	1.38 > 1.2 OK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.Calculation Passive Pressure**

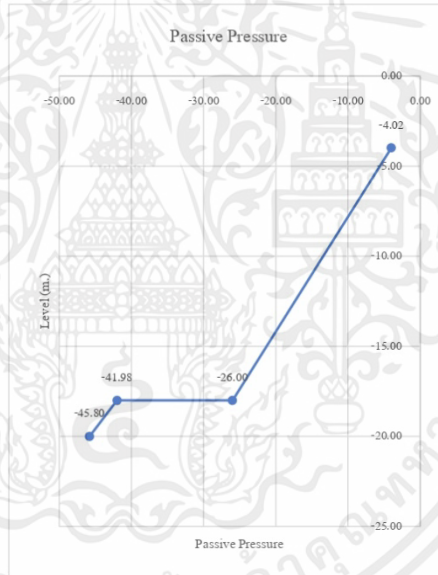
1.2 Vertical Stress (Passive)

Level (m.)	$\sigma_v$ (Vertical stress)					Unit	
4	0	+	1.57	x	0	= 0	t/m <sup>2</sup>
18	0	+	1.57	x	14	= 21.98	t/m <sup>2</sup>
18	0	+	1.57	x	14	= 21.98	t/m <sup>2</sup>
20	21.98	+	1.91	x	2	= 25.8	t/m <sup>2</sup>

2.2 Passive Pressure

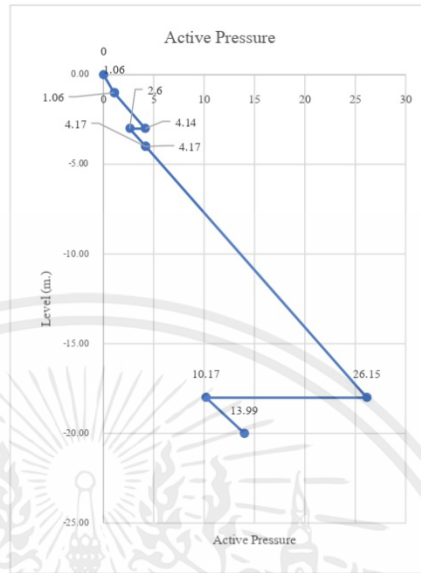
Level (m.)	$\sigma_p$ (Passive Pressure)					Unit	
4.00	0	+	2	x	2.01	= 4.02	t/m <sup>2</sup>
18.00	21.98	+	2	x	2.01	= 26.00	t/m <sup>2</sup>
18.00	21.98	+	2	x	10.00	= 41.98	t/m <sup>2</sup>
20.00	25.8	+	2	x	10.00	= 45.80	t/m <sup>2</sup>

Level (m.)	Passive Pressure
-4.00	-4.02
-18.00	-26.00
-18.00	-41.98
-20.00	-45.80



### 1.3 Adjust Active Pressure

Level (m.)	Active Pressure	
	Cal.	Adjust
0.00	-0.48	0
-1.00	1.06	1.06
-1.00	1.06	1.06
-3.00	4.14	4.14
-3.00	2.6	2.6
-4.00	4.17	4.17
-4.00	4.17	4.17
-18.00	26.15	26.15
-18.00	10.17	10.17
-20.00	13.99	13.99



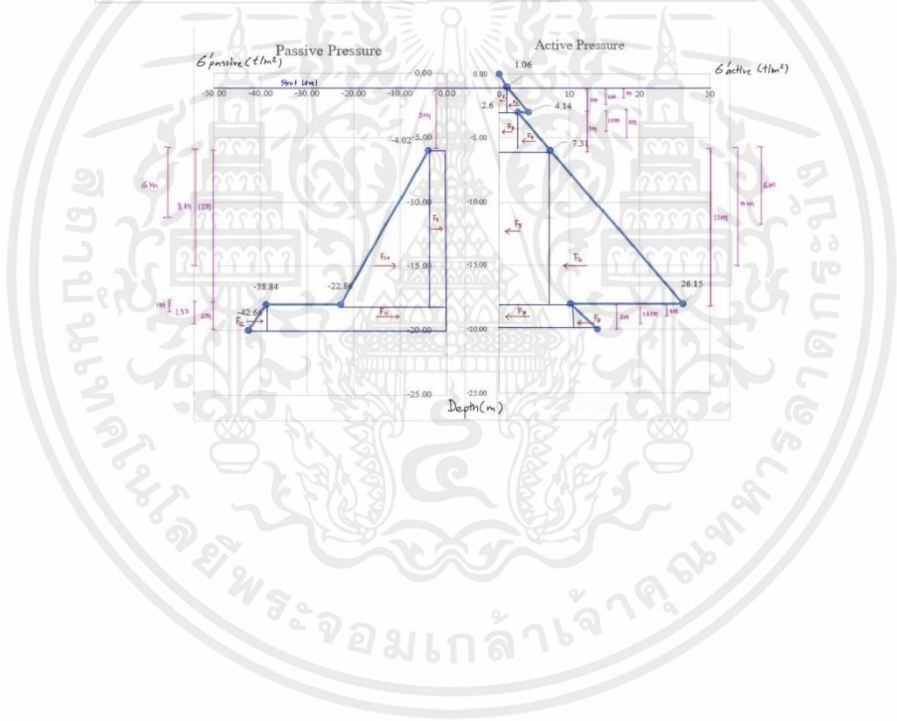
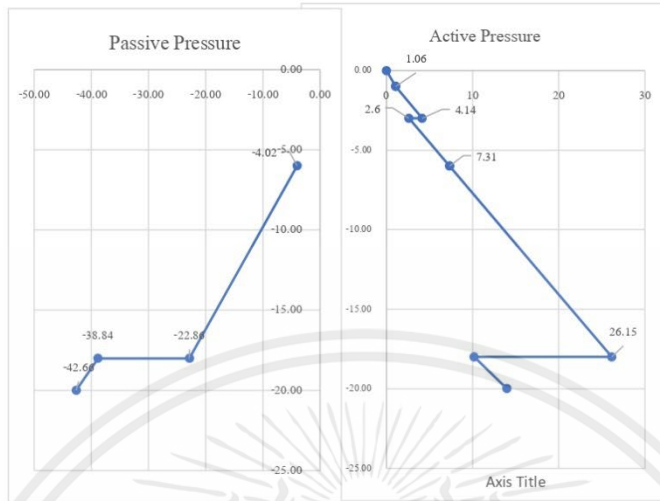
### 1. Calculation Active Pressure

#### 1.1 Vertical Stress (Active)

Level (m.)	$\sigma_v$ (Vertical stress)						Unit	
0.00	2.00	+	0	x	0	=	2.00	t/m <sup>2</sup>
1.00	2.00	+	1.54	x	1	=	3.54	t/m <sup>2</sup>
1.00	2.00	+	1.54	x	1	=	3.54	t/m <sup>2</sup>
3.00	3.54	+	1.54	x	2	=	6.62	t/m <sup>2</sup>
3.00	3.54	+	1.54	x	2	=	6.62	t/m <sup>2</sup>
4.00	6.62	+	1.57	x	1	=	8.19	t/m <sup>2</sup>
4.00	6.62	+	1.57	x	1	=	8.19	t/m <sup>2</sup>
18.00	8.19	+	1.57	x	14	=	30.17	t/m <sup>2</sup>
18.00	8.19	+	1.57	x	14	=	30.17	t/m <sup>2</sup>
20.00	30.17	+	1.91	x	2	=	33.99	t/m <sup>2</sup>

#### 1.2 Active Pressure

Level (m.)	$\sigma_a$ (Active Pressure)						Unit	
0.00	2.00	-	2	x	1.24	=	-0.48	t/m <sup>2</sup>
1.00	3.54	-	2	x	1.24	=	1.06	t/m <sup>2</sup>
1.00	3.54	-	2	x	1.24	=	1.06	t/m <sup>2</sup>
3.00	6.62	-	2	x	1.24	=	4.14	t/m <sup>2</sup>
3.00	6.62	-	2	x	2.01	=	2.6	t/m <sup>2</sup>
4.00	8.19	-	2	x	2.01	=	4.17	t/m <sup>2</sup>
4.00	8.19	-	2	x	2.01	=	4.17	t/m <sup>2</sup>
18.00	30.17	-	2	x	2.01	=	26.15	t/m <sup>2</sup>
18.00	30.17	-	2	x	10	=	10.17	t/m <sup>2</sup>
20.00	33.99	-	2	x	10	=	13.99	t/m <sup>2</sup>



F (ton)						Moment	
						Arm (m.)	
1	1.06	x	2	=	2.12	1	
2	0.5	x	3.08	x 2	=	3.08	1.33
3	2.6	x	3	=	7.8	3.5	
4	0.5	x	4.71	x 3	=	7.065	4
5	7.31	x	12	=	87.72	11	
6	0.5	x	19.02	x 12	=	114.12	13
7	10.17	x	2	=	20.34	18	
8	0.5	x	3.82	x 2	=	3.82	18.33
9	4.02	x	12	=	48.24	11	
10	0.5	x	18.84	x 12	=	113.04	13
11	38.84	x	2	=	77.68	18	
12	0.5	x	3.82	x 2	=	3.82	18.33

F		Moment Arm	Moment
No	ton	m	t-m
1	2.12	1	2.12
2	3.08	1.33	4.10
3	7.80	3.5	27.30
4	7.07	4	28.26
5	87.72	11	964.92
6	114.12	13	1483.56
7	20.34	18	366.12
8	3.82	18.33	70.02
9	48.24	11	530.64
10	113.04	13	1469.52
11	77.68	18	1398.24
12	3.82	18.33	70.02

$$Ma = 2946.40 \text{ t-m}$$

$$Mp = 3468.42 \text{ t-m}$$

$$FS = \frac{Mp}{Ma} = \frac{3468.42}{2946.40} = 1.18 < 1.2 \text{ Not OK}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.Calculation Passive Pressure**

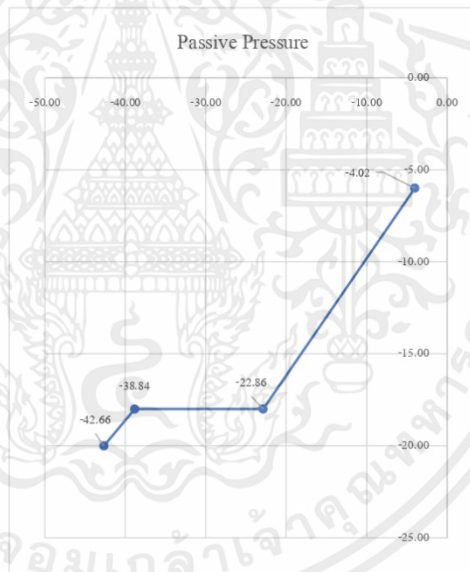
1.2 Vertical Stress (Passive)

Level (m.)	$\sigma_v$ (Vertical stress)						Unit	
6	0	+	1.57	x	0	=	0	t/m <sup>2</sup>
18	0	+	1.57	x	12	=	18.84	t/m <sup>2</sup>
18	0	+	1.57	x	12	=	18.84	t/m <sup>2</sup>
20	18.84	+	1.91	x	2	=	22.66	t/m <sup>2</sup>

2.2 Passive Pressure

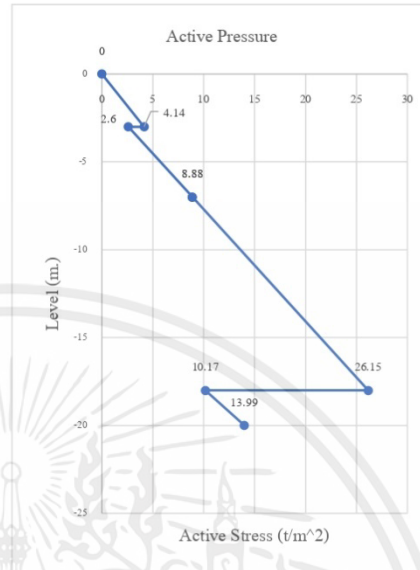
Level (m.)	$\sigma_a$ (Passive Pressure)						Unit	
6.00	0	+	2	x	2.01	=	4.02	t/m <sup>2</sup>
18.00	18.84	+	2	x	2.01	=	22.86	t/m <sup>2</sup>
18.00	18.84	+	2	x	10.00	=	38.84	t/m <sup>2</sup>
20.00	22.66	+	2	x	10.00	=	42.66	t/m <sup>2</sup>

Level (m.)	Passive Pressure
-6.00	-4.02
-18.00	-22.86
-18.00	-38.84
-20.00	-42.66



### 1.3 Adjust Active Pressure

Level (m.)	Active Pressure	
	Cal.	Adjust
0	-0.48	0
-3.00	4.14	4.14
-3.00	2.6	2.6
-7.00	8.88	8.88
-7.00	8.88	8.88
-18.00	26.15	26.15
-18.00	10.17	10.17
-20.00	13.99	13.99



### 1. Calculation Active Pressure

#### 1.1 Vertical Stress (Active)

Level (m.)	$\sigma_v$ (Vertical stress)					Unit	
0.00	2.00	+	0	x	0	= 2.00	t/m <sup>2</sup>
3.00	2.00	+	1.54	x	3	= 6.62	t/m <sup>2</sup>
3.00	2.00	+	1.54	x	3	= 6.62	t/m <sup>2</sup>
7.00	6.62	+	1.57	x	4	= 12.90	t/m <sup>2</sup>
7.00	6.62	+	1.57	x	4	= 12.90	t/m <sup>2</sup>
18.00	12.90	+	1.57	x	11	= 30.17	t/m <sup>2</sup>
18.00	12.90	+	1.57	x	11	= 30.17	t/m <sup>2</sup>
20.00	30.17	+	1.91	x	2	= 33.99	t/m <sup>2</sup>
20.00	30.17	+	1.91	x	2	= 33.99	t/m <sup>2</sup>

#### 1.2 Active Pressure

Level (m.)	$\sigma_a$ (Active Pressure)					Unit	
0.00	2.00	-	2	x	1.24	= -0.48	t/m <sup>2</sup>
3.00	6.62	-	2	x	1.24	= 4.14	t/m <sup>2</sup>
3.00	6.62	-	2	x	2.01	= 2.6	t/m <sup>2</sup>
7.00	12.90	-	2	x	2.01	= 8.88	t/m <sup>2</sup>
7.00	12.90	-	2	x	2.01	= 8.88	t/m <sup>2</sup>
18.00	30.17	-	2	x	2.01	= 26.15	t/m <sup>2</sup>
18.00	30.17	-	2	x	10	= 10.17	t/m <sup>2</sup>
20.00	33.99	-	2	x	10	= 13.99	t/m <sup>2</sup>

**Balance Moment , Strur 2 Layer , Exc. 7 m.**

Excavation Level : 7 m.  
Last Strut Level : 1 m.  
Surcharge Load : 2 t/m<sup>2</sup>  
Pile wall Length : 20 m.

**Soil Properties**

Layer	Soil Class	Level	Depth	$\gamma$ total	c	$\phi$	Ka.	Kp.
1	Clay	3.00	3	1.54	1.24	0	1	1
2	Clay	7.00	4	1.57	2.01	0	1	1
3	Clay	18.00	11	1.57	2.01	0	1	1
4	Clay	20.00	2	1.91	10	0	1	1

**Note**

Find Ka , K :  $Ka = (1-\sin\phi)/(1+\sin\phi)$  (Coefficient Active Earth Pressure)

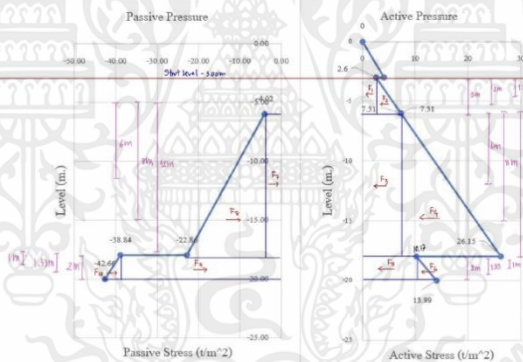
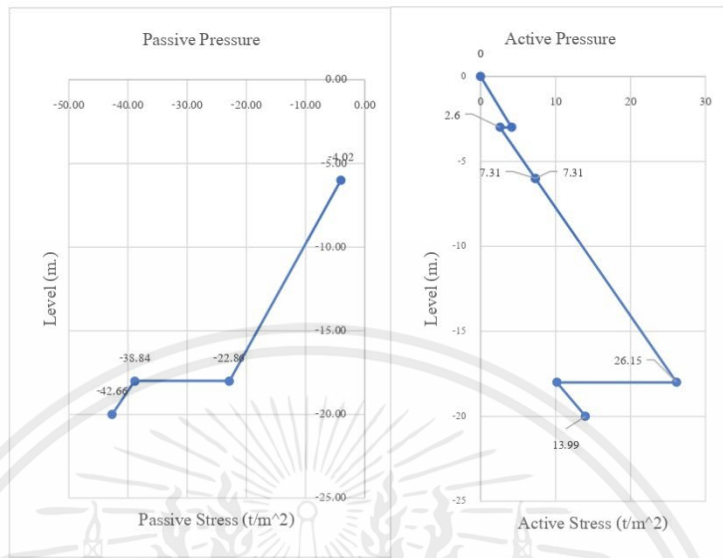
:  $Kp = (1+\sin\phi)/(1-\sin\phi)$  (Coefficient Passive Earth Pressure)

; Rankine's Theory

Find Pa , P1 :  $Pa = (q+\gamma h)Ka - 2c\sqrt{Ka} + \text{Pore Pressure}$  (Active Earth Pressure)

:  $Pp = (q+\gamma h)Kp + 2c\sqrt{Kp} + \text{Pore Pressure}$  (Passive Earth Pressure)

Find F.S. :  $F.S. = Mp/Ma$  ; **F.S. not less than 1.2 (OK)**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสูงของดิน1ถึงระดับชุด

F (ton)						Moment Arm (m.)	
1	2.6	x	3	=	7.8	1	
2	0.5	x	4.53	x	3	= 6.795	1.33
3	7.31	x	12	=	87.72	8.5	
4	0.5	x	18.84	x	12	= 113.04	10.67
5	10.17	x	2	=	20.34	16	
6	0.5	x	3.82	x	2	= 3.82	16.33
7	4.02	x	12	=	48.24	9	
8	0.5	x	18.84	x	12	= 113.04	11
9	38.84	x	2	=	77.68	16	
10	0.5	x	3.82	x	2	= 3.82	16.33

No	F		Moment Arm		Moment
	ton		m		t-m
1	7.80		1		7.80
2	6.80		1.33		9.04
3	87.72		8.5		745.62
4	113.04		10.67		1206.14
5	20.34		16		325.44
6	3.82		16.33		62.38
					Ma = 2356.41 t-m
7	48.24		9		434.16
8	113.04		11		1243.44
9	77.68		16		1242.88
10	3.82		16.33		62.38
					Mp = 2982.86 t-m

$$FS = \frac{Mp}{Ma} = 1.27 > 1.2 \quad \text{OK}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2. Calculation Passive Pressure**

**1.2 Vertical Stress (Passive)**

Level (m.)	$\sigma_v$ (Vertical stress)							Unit
6.00	0	+	1.57	x	0	=	0	t/m <sup>2</sup>
6.00	0	+	1.57	x	0	=	0	t/m <sup>2</sup>
18.00	0	+	1.57	x	12	=	18.84	t/m <sup>2</sup>
18.00	0	+	1.57	x	12	=	18.84	t/m <sup>2</sup>
20.00	18.84	+	1.91	x	2	=	22.66	t/m <sup>3</sup>

**2.2 Passive Pressure**

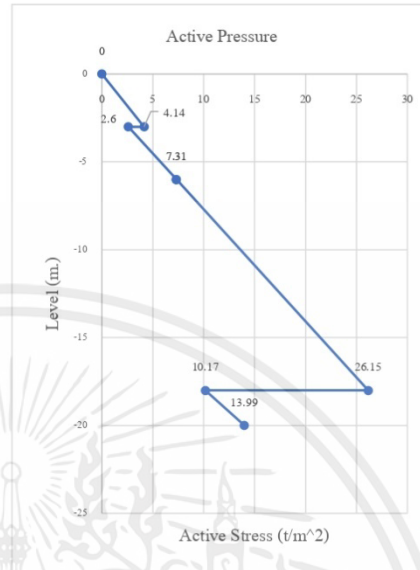
Level (m.)	$\sigma_a$ (Passive Pressure)							Unit
6.00	0	+	2	x	2.01	=	4.02	t/m <sup>2</sup>
18.00	18.84	+	2	x	2.01	=	22.86	t/m <sup>2</sup>
18.00	18.84	+	2	x	10.00	=	38.84	t/m <sup>2</sup>
20.00	22.66	+	2	x	10.00	=	42.66	t/m <sup>2</sup>

Level (m.)	Passive Pressure
-6.00	-4.02
-18.00	-22.86
-18.00	-38.84
-20.00	-42.66



### 1.3 Adjust Active Pressure

Level (m.)	Active Pressure	
	Cal.	Adjust
0	-0.48	0
-3.00	4.14	4.14
-3.00	2.6	2.6
-6.00	7.31	7.31
-6.00	7.31	7.31
-18.00	26.15	26.15
-18.00	10.17	10.17
-20.00	13.99	13.99



### 1. Calculation Active Pressure

#### 1.1 Vertical Stress (Active)

Level (m.)	$\sigma_v$ (Vertical stress)						Unit	
0.00	2.00	+	0	x	0	=	2.00	t/m <sup>2</sup>
3.00	2.00	+	1.54	x	3	=	6.62	t/m <sup>2</sup>
3.00	2.00	+	1.54	x	3	=	6.62	t/m <sup>2</sup>
6.00	6.62	+	1.57	x	3	=	11.33	t/m <sup>2</sup>
6.00	6.62	+	1.57	x	3	=	11.33	t/m <sup>2</sup>
18.00	11.33	+	1.57	x	12	=	30.17	t/m <sup>2</sup>
18.00	11.33	+	1.57	x	12	=	30.17	t/m <sup>2</sup>
20.00	30.17	+	1.91	x	2	=	33.99	t/m <sup>2</sup>
20.00	30.17	+	1.91	x	2	=	33.99	t/m <sup>2</sup>

#### 1.2 Active Pressure

Level (m.)	$\sigma_a$ (Active Pressure)						Unit	
0.00	2.00	-	2	x	1.24	=	-0.48	t/m <sup>2</sup>
3.00	6.62	-	2	x	1.24	=	4.14	t/m <sup>2</sup>
3.00	6.62	-	2	x	2.01	=	2.6	t/m <sup>2</sup>
6.00	11.33	-	2	x	2.01	=	7.31	t/m <sup>2</sup>
6.00	11.33	-	2	x	2.01	=	7.31	t/m <sup>2</sup>
18.00	30.17	-	2	x	2.01	=	26.15	t/m <sup>2</sup>
18.00	30.17	-	2	x	10	=	10.17	t/m <sup>2</sup>
20.00	33.99	-	2	x	10	=	13.99	t/m <sup>2</sup>

**Balance Moment , Strur 2 Layer , Exc. 6 m.**

Excavation Level : 6 m.  
Last Strut Level : 1 m.  
Surcharge Load : 2 t/m<sup>2</sup>  
Pile wall Length : 20 m.

**Soil Properties**

Layer	Soil Class	Level	Depth	$\gamma$ total	c	$\phi$	Ka.	Kp.
1	Clay	3.00	3	1.54	1.24	0	1	1
2	Clay	6.00	3	1.57	2.01	0	1	1
3	Clay	18.00	12	1.57	2.01	0	1	1
4	Clay	20.00	2	1.91	10	0	1	1

**Note**

Find Ka , K :  $Ka = (1 - \sin\phi) / (1 + \sin\phi)$  (Coefficient Active Earth Pressure)

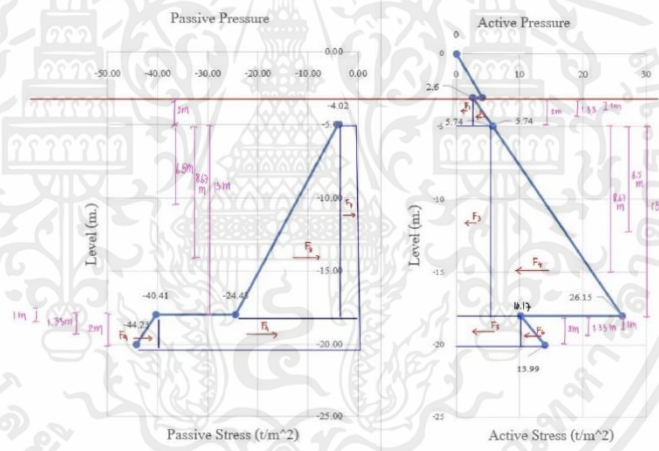
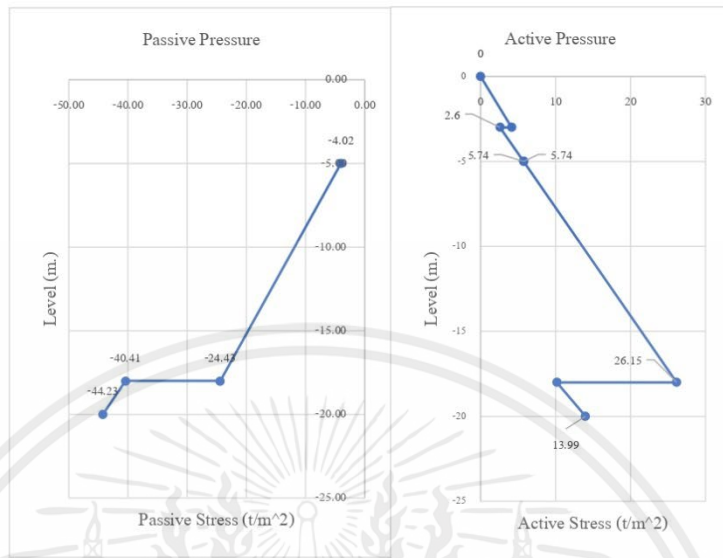
:  $Kp = (1 + \sin\phi) / (1 - \sin\phi)$  (Coefficient Passive Earth Pressure)

; Rankine's Theory

Find Pa , P1 :  $Pa = (q + \gamma h)Ka - 2c\sqrt{Ka} + \text{Pore Pressure}$  (Active Earth Pressure)

:  $Pp = (q + \gamma h)Ka + 2c\sqrt{Ka} + \text{Pore Pressure}$  (Passive Earth Pressure)

Find F.S. :  $F.S. = Mp/Ma$  ; **F.S. not less than 1.2 (OK)**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสูงของดิน1ถึงระดับชุด

F (ton)						Moment Arm (m.)	
1	2.6	x	2	=	5.2	1	
2	0.5	x	3.14	x	2	= 3.14	1.33
3	5.74	x	13	=	74.62	8.5	
4	0.5	x	20.41	x	13	= 132.665	10.67
5	10.17	x	2	=	20.34	16	
6	0.5	x	3.82	x	2	= 3.82	16.33
7	4.02	x	13	=	52.26	8.5	
8	0.5	x	20.41	x	13	= 132.665	10.33
9	40.41	x	2	=	80.82	16	
10	0.5	x	3.82	x	2	= 3.82	16.33

No	F		Moment Arm		Moment	
	ton		m		t-m	
1	5.20		1		5.20	
2	3.14		1.33		4.18	
3	74.62		8.5		634.27	
4	132.67		10.67		1415.54	
5	20.34		16		325.44	
6	3.82		16.33		62.38	
7	52.26		8.5		444.21	
8	132.67		10.33		1370.43	
9	80.82		16		1293.12	
10	3.82		16.33		62.38	
					Ma =	2447.00 t-m
					Mp =	3170.14 t-m

$$FS = \frac{Mp}{Ma} = 1.30 > 1.2 \quad \text{OK}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.Calculation Passive Pressure**

**1.2 Vertical Stress (Passive)**

Level (m.)	$\sigma_v$ (Vertical stress)							Unit
5.00	0	+	1.57	x	0	=	0	t/m <sup>2</sup>
5.00	0	+	1.57	x	0	=	0	t/m <sup>2</sup>
18.00	0	+	1.57	x	13	=	20.41	t/m <sup>2</sup>
18.00	0	+	1.57	x	13	=	20.41	t/m <sup>2</sup>
20.00	20.41	+	1.91	x	2	=	24.23	t/m <sup>3</sup>

**2.2 Passive Pressure**

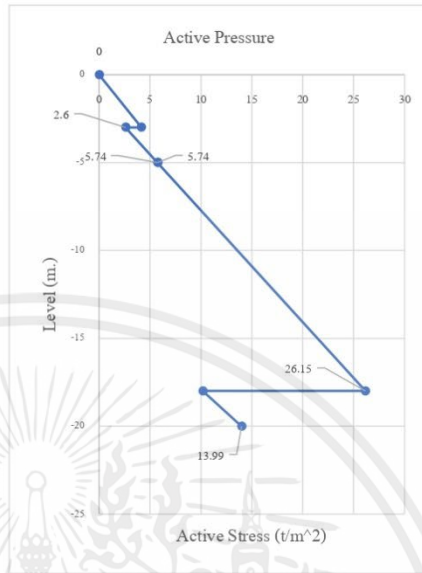
Level (m.)	$\sigma_a$ (Passive Pressure)							Unit
5.00	0	+	2	x	2.01	=	4.02	t/m <sup>2</sup>
18.00	20.41	+	2	x	2.01	=	24.43	t/m <sup>2</sup>
18.00	20.41	+	2	x	10.00	=	40.41	t/m <sup>2</sup>
20.00	24.23	+	2	x	10.00	=	44.23	t/m <sup>2</sup>

Level (m.)	Passive Pressure
-5.00	-4.02
-18.00	-24.43
-18.00	-40.41
-20.00	-44.23



### 1.3 Adjust Active Pressure

Level (m.)	Active Pressure	
	Cal.	Adjust
0	-0.48	0
-3.00	4.14	4.14
-3.00	2.6	2.6
-5.00	5.74	5.74
-5.00	5.74	5.74
-18.00	26.15	26.15
-18.00	10.17	10.17
-20.00	13.99	13.99



### 1. Calculation Active Pressure

#### 1.1 Vertical Stress (Active)

Level (m.)	$\sigma_v$ (Vertical stress)					Unit	
0.00	2.00	+	0	x	0	= 2.00	t/m <sup>2</sup>
3.00	2.00	+	1.54	x	3	= 6.62	t/m <sup>2</sup>
3.00	2.00	+	1.54	x	3	= 6.62	t/m <sup>2</sup>
5.00	6.62	+	1.57	x	2	= 9.76	t/m <sup>2</sup>
5.00	6.62	+	1.57	x	2	= 9.76	t/m <sup>2</sup>
18.00	9.76	+	1.57	x	13	= 30.17	t/m <sup>2</sup>
18.00	9.76	+	1.57	x	13	= 30.17	t/m <sup>2</sup>
20.00	30.17	+	1.91	x	2	= 33.99	t/m <sup>2</sup>
20.00	30.17	+	1.91	x	2	= 33.99	t/m <sup>2</sup>

#### 1.2 Active Pressure

Level (m.)	$\sigma_a$ (Active Pressure)					Unit	
0.00	2.00	-	2	x	1.24	= -0.48	t/m <sup>2</sup>
3.00	6.62	-	2	x	1.24	= 4.14	t/m <sup>2</sup>
3.00	6.62	-	2	x	2.01	= 2.6	t/m <sup>2</sup>
5.00	9.76	-	2	x	2.01	= 5.74	t/m <sup>2</sup>
5.00	9.76	-	2	x	2.01	= 5.74	t/m <sup>2</sup>
18.00	30.17	-	2	x	2.01	= 26.15	t/m <sup>2</sup>
18.00	30.17	-	2	x	10	= 10.17	t/m <sup>2</sup>
20.00	33.99	-	2	x	10	= 13.99	t/m <sup>2</sup>

**Balance Moment , Strur 2 Layer , Exc. 5 m.**

Excavation Level : 5 m.  
Last Strut Level : 1 m.  
Surcharge Load : 2 t/m<sup>2</sup>  
Pile wall Length : 20 m.

**Soil Properties**

Layer	Soil Class	Level	Depth	$\gamma$ total	c	$\phi$	Ka.	Kp.
1	Clay	3.00	3	1.54	1.24	0	1	1
2	Clay	5.00	2	1.57	2.01	0	1	1
3	Clay	18.00	13	1.57	2.01	0	1	1
4	Clay	20.00	2	1.91	10	0	1	1

**Note**

Find Ka , K :  $Ka = (1 - \sin\phi) / (1 + \sin\phi)$  (Coefficient Active Earth Pressure)

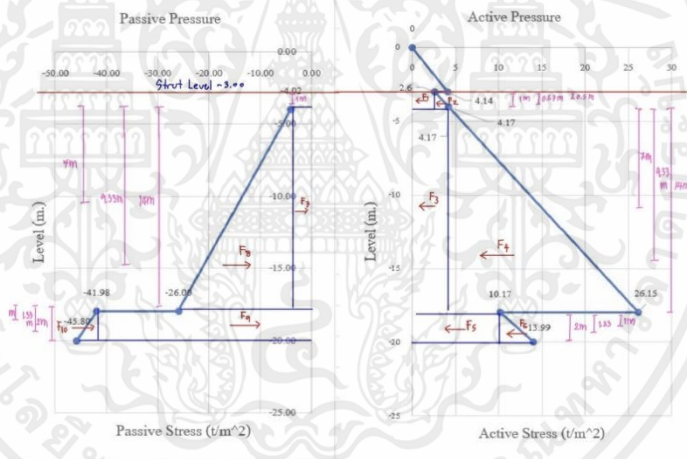
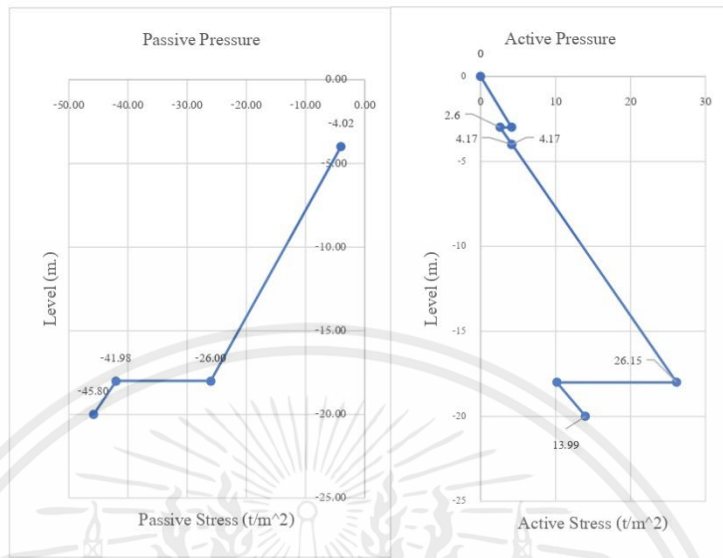
:  $Kp = (1 + \sin\phi) / (1 - \sin\phi)$  (Coefficient Passive Earth Pressure)

; Rankine's Theory

Find Pa , P1 :  $Pa = (q + \gamma h)Ka - 2c\sqrt{Ka} + \text{Pore Pressure}$  (Active Earth Pressure)

:  $Pp = (q + \gamma h)Ka + 2c\sqrt{Ka} + \text{Pore Pressure}$  (Passive Earth Pressure)

Find F.S. :  $F.S. = Mp/Ma$  ; **F.S. not less than 1.2 (OK)**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสูงของดิน1ถึงระดับขุด

	F (ton)					Moment	
						Arm (m.)	
1	2.6	x	1	=	2.6	0.5	
2	0.5	x	1.57	x	1	= 0.785	0.66
3	4.17	x	14	=	58.38	8	
4	0.5	x	21.98	x	14	= 153.86	10.33
5	10.17	x	2	=	20.34	16	
6	0.5	x	3.82	x	2	= 3.82	16.33
7	4.02	x	14	=	56.28	8	
8	0.5	x	21.98	x	14	= 153.86	10.33
9	41.98	x	2	=	83.96	16	
10	0.5	x	3.82	x	2	= 3.82	16.33

No	F		Moment Arm		Moment
	ton		m		t-m
1	2.60		0.5		1.30
2	0.79		0.66		0.52
3	58.38		8		467.04
4	153.86		10.33		1589.37
5	20.34		16		325.44
6	3.82		16.33		62.38
7	56.28		8		450.24
8	153.86		10.33		1589.37
9	83.96		16		1343.36
10	3.82		16.33		62.38

Ma = 2446.05 t-m

Mp = 3445.35 t-m

$$FS = \frac{Mp}{Ma} = 1.41 > 1.2 \quad \text{OK}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.Calculation Passive Pressure**

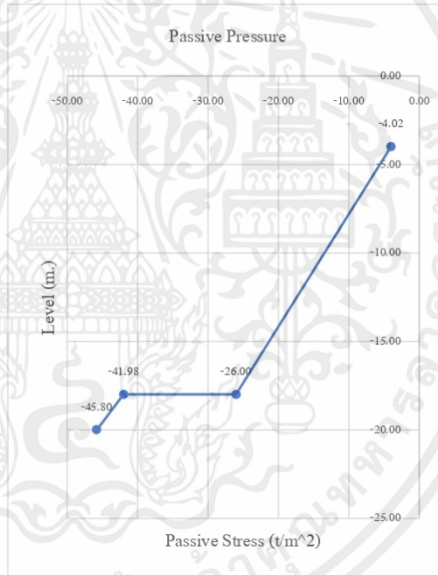
1.2 Vertical Stress (Passive)

Level (m.)	$\sigma_v$ (Vertical stress)							Unit
4.00	0	+	1.57	x	0	=	0	t/m <sup>2</sup>
4.00	0	+	1.57	x	0	=	0	t/m <sup>2</sup>
18.00	0	+	1.57	x	14	=	21.98	t/m <sup>2</sup>
18.00	0	+	1.57	x	14	=	21.98	t/m <sup>2</sup>
20.00	21.98	+	1.91	x	2	=	25.8	t/m <sup>3</sup>

2.2 Passive Pressure

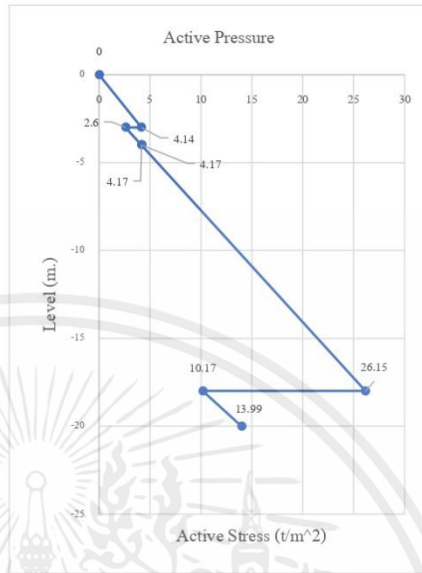
Level (m.)	$\sigma_a$ (Passive Pressure)							Unit
4.00	0	+	2	x	2.01	=	4.02	t/m <sup>2</sup>
18.00	21.98	+	2	x	2.01	=	26.00	t/m <sup>2</sup>
18.00	21.98	+	2	x	10.00	=	41.98	t/m <sup>2</sup>
20.00	25.80	+	2	x	10.00	=	45.80	t/m <sup>2</sup>

Level (m.)	Passive Pressure
-4.00	-4.02
-18.00	-26.00
-18.00	-41.98
-20.00	-45.80



### 1.3 Adjust Active Pressure

Level (m.)	Active Pressure	
	Cal.	Adjust
0	-0.48	0
-3.00	4.14	4.14
-3.00	2.6	2.6
-4.00	4.17	4.17
-4.00	4.17	4.17
-18.00	26.15	26.15
-18.00	10.17	10.17
-20.00	13.99	13.99



### 1. Calculation Active Pressure

#### 1.1 Vertical Stress (Active)

Level (m.)	$\sigma_v$ (Vertical stress)					Unit	
0.00	2.00	+	0	x	0	= 2.00	t/m <sup>2</sup>
3.00	2.00	+	1.54	x	3	= 6.62	t/m <sup>2</sup>
3.00	2.00	+	1.54	x	3	= 6.62	t/m <sup>2</sup>
4.00	6.62	+	1.57	x	1	= 8.19	t/m <sup>2</sup>
4.00	6.62	+	1.57	x	1	= 8.19	t/m <sup>2</sup>
18.00	8.19	+	1.57	x	14	= 30.17	t/m <sup>2</sup>
18.00	8.19	+	1.57	x	14	= 30.17	t/m <sup>2</sup>
20.00	30.17	+	1.91	x	2	= 33.99	t/m <sup>2</sup>
20.00	30.17	+	1.91	x	2	= 33.99	t/m <sup>2</sup>

#### 1.2 Active Pressure

Level (m.)	$\sigma_a$ (Active Pressure)					Unit	
0.00	2.00	-	2	x	1.24	= -0.48	t/m <sup>2</sup>
3.00	6.62	-	2	x	1.24	= 4.14	t/m <sup>2</sup>
3.00	6.62	-	2	x	2.01	= 2.6	t/m <sup>2</sup>
4.00	8.19	-	2	x	2.01	= 4.17	t/m <sup>2</sup>
4.00	8.19	-	2	x	2.01	= 4.17	t/m <sup>2</sup>
18.00	30.17	-	2	x	2.01	= 26.15	t/m <sup>2</sup>
18.00	30.17	-	2	x	10	= 10.17	t/m <sup>2</sup>
20.00	33.99	-	2	x	10	= 13.99	t/m <sup>2</sup>

**Balance Moment , Strur 2 Layer , Exc. 4 m.**

Excavation Level : 4 m.  
Last Strut Level : 1 m.  
Surcharge Load : 2 t/m<sup>2</sup>  
Pile wall Length : 20 m.

**Soil Properties**

Layer	Soil Class	Level	Depth	$\gamma$ total	c	$\phi$	Ka.	Kp.
1	Clay	3.00	3	1.54	1.24	0	1	1
2	Clay	4.00	1	1.57	2.01	0	1	1
3	Clay	18.00	14	1.57	2.01	0	1	1
4	Clay	20.00	2	1.91	10	0	1	1

**Note**

Find Ka , K :  $Ka = (1 - \sin\phi) / (1 + \sin\phi)$  (Coefficient Active Earth Pressure)

:  $Kp = (1 + \sin\phi) / (1 - \sin\phi)$  (Coefficient Passive Earth Pressure)

: Rankine's Theory

Find Pa , P1 :  $Pa = (q + \gamma h) Ka - 2c \sqrt{Ka} + \text{Pore Pressure}$  (Active Earth Pressure)

:  $Pp = (q + \gamma h) Kp + 2c \sqrt{Kp} + \text{Pore Pressure}$  (Passive Earth Pressure)

Find F.S. :  $F.S. = Mp/Ma$  ; **F.S. not less than 1.2 (OK)**

ความสูงของคาน1ถึงระดับขุด

F (ton)						Moment Arm (m.)	
1	2.6	x	4	=	10.4	2	
2	0.5	x	6.28	x	4	= 12.56	2.66
3	8.88	x	11	=	97.68	9.5	
4	0.5	x	17.27	x	11	= 94.985	11.33
5	10.17	x	2	=	20.34	16	
6	0.5	x	3.82	x	2	= 3.82	16.33
7	4.02	x	11	=	44.22	9.5	
8	0.5	x	17.27	x	11	= 94.985	11.33
9	37.27	x	2	=	74.54	16	
10	0.5	x	3.82	x	2	= 3.82	16.33

No	F		Moment Arm		Moment
	ton		m		t-m
1	10.40		2		20.80
2	12.56		2.66		33.41
3	97.68		9.5		927.96
4	94.99		11.33		1076.18
5	20.34		16		325.44
6	3.82		16.33		62.38
7	44.22		9.5		420.09
8	94.99		11.33		1076.18
9	74.54		16		1192.64
10	3.82		16.33		62.38

Ma = 2446.17 t-m

Mp = 2751.29 t-m

$$FS = \frac{M_p}{M_a} = \frac{2751.29}{2446.17} = 1.12 < 1.2 \text{ Not OK}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.Calculation Passive Pressure**

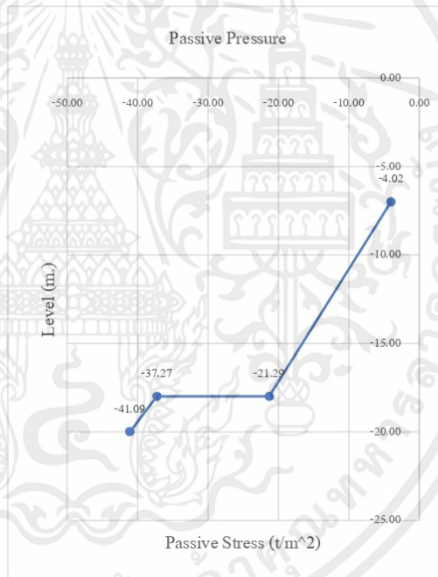
**1.2 Vertical Stress (Passive)**

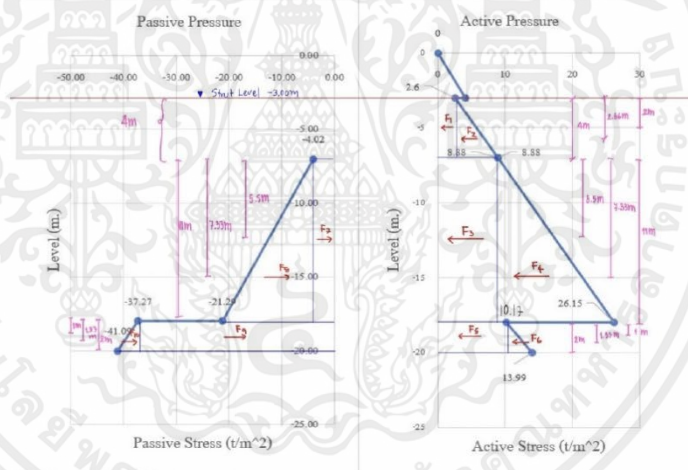
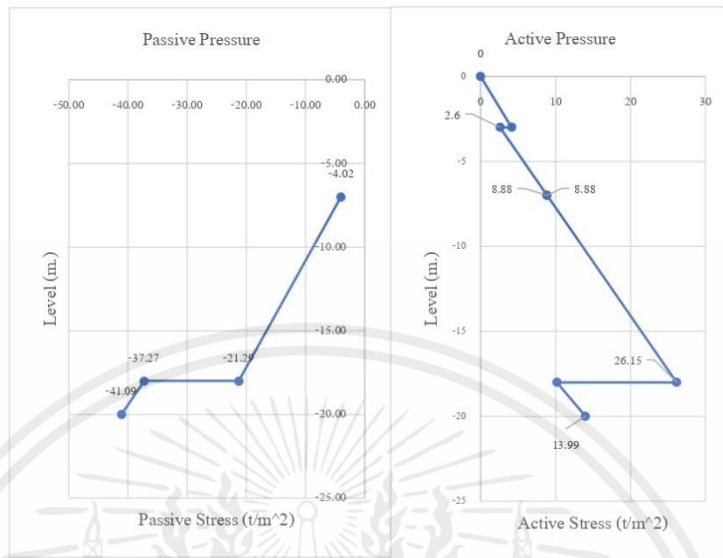
Level (m.)	$\sigma_v$ (Vertical stress)							Unit
7.00	0	+	1.57	x	0	=	0	t/m <sup>2</sup>
7.00	0	+	1.57	x	0	=	0	t/m <sup>2</sup>
18.00	0	+	1.57	x	11	=	17.27	t/m <sup>2</sup>
18.00	0	+	1.57	x	11	=	17.27	t/m <sup>2</sup>
20.00	17.27	+	1.91	x	2	=	21.09	t/m <sup>3</sup>

**2.2 Passive Pressure**

Level (m.)	$\sigma_a$ (Passive Pressure)							Unit
7.00	0	+	2	x	2.01	=	4.02	t/m <sup>2</sup>
18.00	17.27	+	2	x	2.01	=	21.29	t/m <sup>2</sup>
18.00	17.27	+	2	x	10.00	=	37.27	t/m <sup>2</sup>
20.00	21.09	+	2	x	10.00	=	41.09	t/m <sup>2</sup>

Level (m.)	Passive Pressure
-7.00	-4.02
-18.00	-21.29
-18.00	-37.27
-20.00	-41.09





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

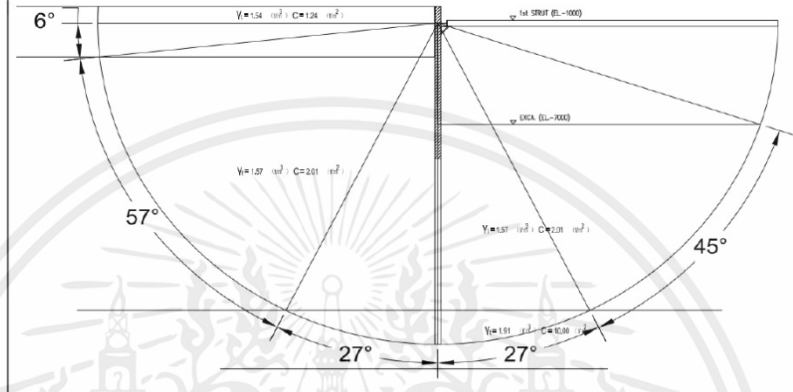
ข้อมูลเกี่ยวกับการตรวจสอบเสถียรภาพของดินกั้นหลุม



**HEAVING CHECKING , Strur 1 Layer , Exc. 7 m.**

Excavation Level	7 m.
Surcharge Load	2.00 t / m <sup>2</sup>
Pile wall Length	20.00 m.
Ground water EL.	2.9 m.

**SOIL PROPERTIES**



**1.) ACTIVE MOMENT, M<sub>D</sub>**

$$M(D) = W \times l \times l/2 \quad W = q + [(y_1 h_1) + (y_2 h_2) + \dots + (y_n h_n) ]$$

Layer	Y <sub>n</sub> (t / m <sup>3</sup> )	h <sub>n</sub> (m.)	Y <sub>n</sub> h <sub>n</sub> (t / m <sup>2</sup> )
1	1.54	3.00	4.62
2	1.57	4.00	6.28
			<b>10.90</b>

$$L = 13.00 \text{ m.}$$

$$W = 2 + 10.9 = 12.90 \text{ t/m}^2$$

$$M_D = 12.9 \times 13 \times 13 / 2 = 1,090.05 \text{ ton}$$

2.) **RESISTANT MOMENT,  $M_R$**

$$M(R) = \sum (c \times \theta) \times |x|$$

Layer	c	$\theta$		$c \theta$
	(t / m <sup>2</sup> )	(Degree)	(Radian)	(t / m <sup>2</sup> )
1	1.24	6	0.10	0.13
2	2.01	57	0.99	2.00
3	10.00	27	0.47	4.71
4	10.00	27	0.47	4.71
5	2.01	48	0.84	1.68
				<b>13.24</b>

$$M_R = 13.24 \times 14 \times 14$$

$$= 2,594.68 \text{ ton}$$

$$F.S. = (\sum MR) / (\sum MD)$$

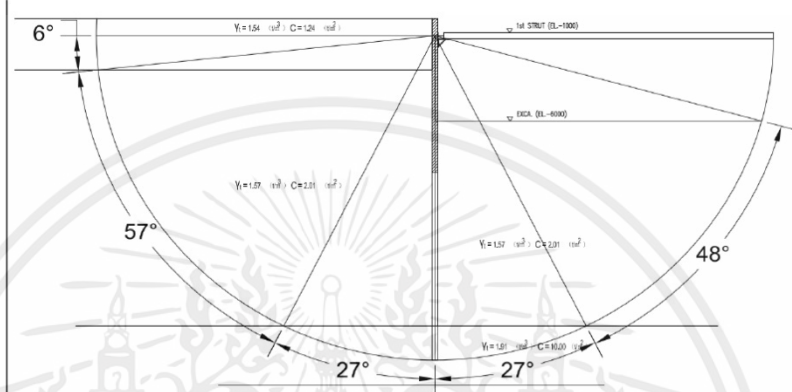
$$= 2.34 > 1.20 \text{ OK.}$$



**HEAVING CHECKING , Strur 1 Layer , Exc. 6 m.**

Excavation Level	6 m.
Surcharge Load	2.00 t / m <sup>2</sup>
Pile wall Length	20.00 m.
Ground water EL.	2.9 m.

**SOIL PROPERTIES**



**1.) ACTIVE MOMENT, M<sub>D</sub>**

$$M(D) = W \times l \times l/2 \quad W = q + [(y_1 h_1) + (y_2 h_2) + \dots + (y_n h_n) ]$$

Layer	Y <sub>n</sub> (t / m <sup>3</sup> )	h <sub>n</sub> (m.)	Y <sub>n</sub> h <sub>n</sub> (t / m <sup>2</sup> )
1	1.54	3.00	4.62
2	1.57	3.00	4.71
			<b>9.33</b>

L = 14.00 m.

W = 2 + 9.33 = 11.33 t/m<sup>2</sup>

M<sub>D</sub> = 11.33 x 14 x 14 / 2 = 1,110.34 ton

2.) **RESISTANT MOMENT,  $M_R$**

$$M(R) = \sum (c \times \theta) \times |x|$$

Layer	c	$\theta$		$c \theta$
	(t / m <sup>2</sup> )	(Degree)	(Radian)	(t / m <sup>2</sup> )
1	1.24	6	0.10	0.13
2	2.01	57	0.99	2.00
3	10.00	27	0.47	4.71
4	10.00	27	0.47	4.71
5	2.01	51	0.89	1.79
				<b>13.34</b>

$$M_R = 13.34 \times 15 \times 15$$

$$= 3,002.26 \text{ ton}$$

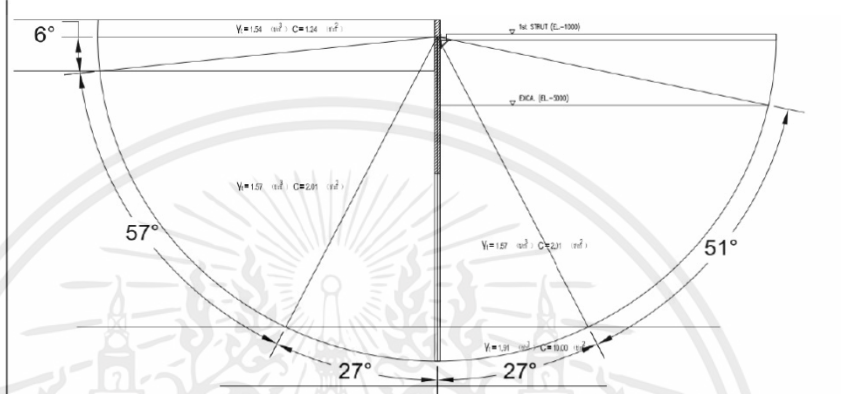
$$F.S. = (\sum MR) / (\sum MD)$$

$$= 2.73 > 1.20 \text{ OK.}$$

**HEAVING CHECKING , Strur 1 Layer , Exc. 5 m.**

Excavation Level            5    m.  
 Surcharge Load            2.00   t / m<sup>2</sup>  
 Pile wall Length            20.00   m.  
 Ground water EL.            2.9    m.

**SOIL PROPERTIES**



**1.) ACTIVE MOMENT , M<sub>D</sub>**

$$M(D) = W \times l \times 1/2 \quad W = q + [(y_1 h_1) + (y_2 h_2) + \dots + (y_n h_n) ]$$

Layer	$\gamma_n$ (t / m <sup>3</sup> )	$h_n$ (m.)	$\gamma_n h_n$ (t / m <sup>2</sup> )
1	1.54	3.00	4.62
2	1.57	2.00	3.14
			7.76

$$L = 15.00 \text{ m.}$$

$$W = 2 + 7.76 = 9.76 \text{ t/m}^2$$

$$M_D = 9.76 \times 15 \times 15 / 2 = 1,098.00 \text{ ton}$$

2.) **RESISTANT MOMENT,  $M_R$**

$$M(R) = \sum (c \times \theta) \times l \times l$$

Layer	c	$\theta$		$c \theta$
	(t / m <sup>2</sup> )	(Degree)	(Radian)	(t / m <sup>2</sup> )
1	1.24	6	0.10	0.13
2	2.01	57	0.99	2.00
3	10.00	27	0.47	4.71
4	10.00	27	0.47	4.71
5	2.01	54	0.94	1.89
				<b>13.45</b>

$$M_R = 13.45 \times 16 \times 16$$

$$= 3,442.85 \text{ ton}$$

$$F.S. = (\sum MR) / (\sum MD)$$

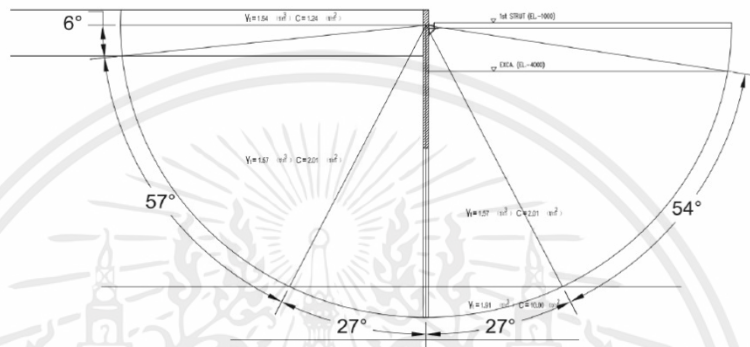
$$= 328 > 120 \quad \text{OK.}$$



**HEAVING CHECKING , Strur 1 Layer, Exc. 4 m.**

Excavation Level 4 m.  
 Surcharge Load 2.00 t / m<sup>2</sup>  
 Pile wall Length 20.00 m.  
 Ground water EL. 2.9 m.

**SOIL PROPERTIES**



**1.) ACTIVE MOMENT, M<sub>D</sub>**

$$M(D) = W \times l \times l/2 \quad W = q + [(\gamma_1 h_1) + (\gamma_2 h_2) + \dots + (\gamma_n h_n) ]$$

Layer	$\gamma_n$ (t / m <sup>3</sup> )	$h_n$ (m.)	$\gamma_n h_n$ (t / m <sup>2</sup> )
1	1.54	3.00	4.62
2	1.57	1.00	1.57
			<b>6.19</b>

L = 16.00 m.

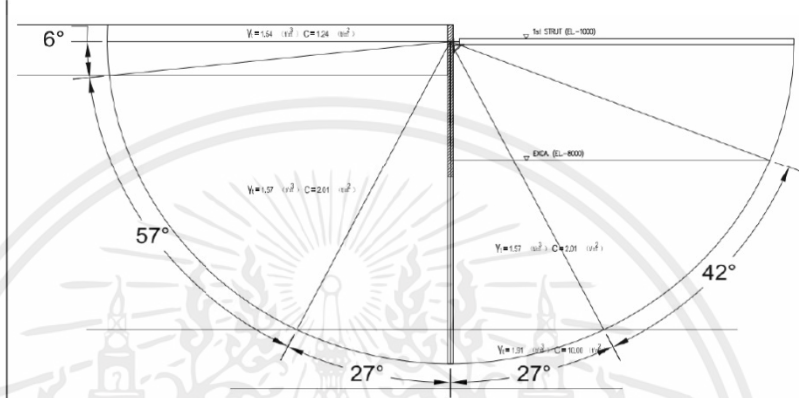
W = 2 + 6.19 = 8.19 t/m<sup>2</sup>

M<sub>D</sub> = 8.19 x 16 x 16 / 2 = 1,048.32 ton

**HEAVING CHECKING , Strur 1 Layer , Exc. 8 m.**

Excavation Level            8    m.  
 Surcharge Load            2.00   t / m<sup>2</sup>  
 Pile wall Length            20.00   m.  
 Ground water EL.            2.9    m.

**SOIL PROPERTIES**



**1.) ACTIVE MOMENT, M<sub>D</sub>**

$$M(D) = W \times l \times l/2 \quad W = q + [(\gamma_1 h_1) + (\gamma_2 h_2) + \dots + (\gamma_n h_n) ]$$

Layer	$\gamma_n$ (t / m <sup>3</sup> )	$h_n$ (m.)	$\gamma_n h_n$ (t / m <sup>2</sup> )
1	1.54	3.00	4.62
2	1.57	5.00	7.85
			<b>12.47</b>

L = 12.00 m.

W = 2 + 12.47 = 14.47 t/m<sup>2</sup>

M<sub>D</sub> = 14.47 x 12 x 12 / 2 = 1,041.84 ton

2.) **RESISTANT MOMENT,  $M_R$**

$$M(R) = \sum (c \times \theta) \times |x|$$

Layer	c	$\theta$		$c \theta$
	(t / m <sup>2</sup> )	(Degree)	(Radian)	(t / m <sup>2</sup> )
1	1.24	6	0.10	0.13
2	2.01	57	0.99	2.00
3	10.00	27	0.47	4.71
4	10.00	27	0.47	4.71
5	2.01	45	0.79	1.58
				<b>13.13</b>

$$M_R = 13.13 \times 13 \times 13$$

$$= 2,219.46 \text{ ton}$$

$$F.S. = (\sum MR) / (\sum MD)$$

$$= 2.04 > 1.20 \text{ OK.}$$

2.) RESISTANT MOMENT,  $M_R$

$$M(R) = \sum (c \times \theta) \times l \times l$$

Layer	c	$\theta$		$c \theta$
	(t / m <sup>2</sup> )	(Degree)	(Radian)	(t / m <sup>2</sup> )
1	1.24	6	0.10	0.13
2	2.01	57	0.99	2.00
3	10.00	27	0.47	4.71
4	10.00	27	0.47	4.71
5	2.01	42	0.73	1.47
				<b>13.03</b>

$$M_R = 13.03 \times 12 \times 12$$

$$= 1,875.98 \text{ ton}$$

$$F.S. = (\sum MR) / (\sum MD)$$

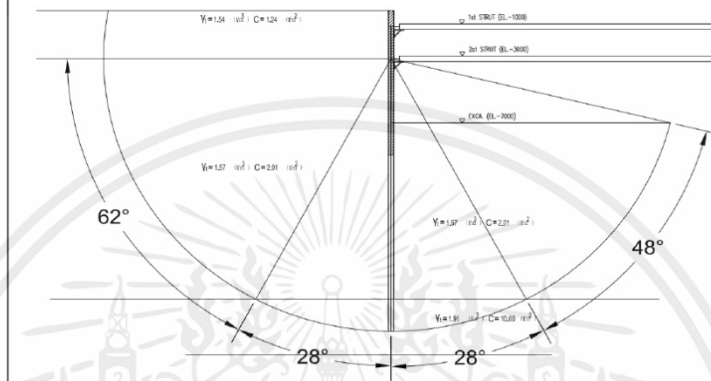
$$= 180 > 120 \text{ OK.}$$



**HEAVING CHECKING , Strur 2 Layer , Exc. 7 m.**

Excavation Level            7    m.  
 Surcharge Load            2.00   t / m<sup>2</sup>  
 Pile wall Length            20.00   m.  
 Ground water EL.            2.9    m.

**SOIL PROPERTIES**



**1.) ACTIVE MOMENT, M<sub>D</sub>**

$$M(D) = W \times l \times l/2 \quad W = q + [(\gamma_1 h_1) + (\gamma_2 h_2) + \dots + (\gamma_n h_n) ]$$

Layer	γ <sub>n</sub> (t / m <sup>3</sup> )	h <sub>n</sub> (m.)	γ <sub>n</sub> h <sub>n</sub> (t / m <sup>2</sup> )
1	1.54	3.00	4.62
2	1.57	4.00	6.28
			<b>10.90</b>

L = 13.00 m.

W = 2 + 10.9 = 12.90 t/m<sup>2</sup>

M<sub>D</sub> = 12.9 x 13 x 13 / 2 = 1,090.05 ton

2.) RESISTANT MOMENT,  $M_R$

$$M(R) = \sum (c \times \theta) \times |x|$$

Layer	c	$\theta$		$c \theta$
	(t / m <sup>2</sup> )	(Degree)	(Radian)	(t / m <sup>2</sup> )
1	2.01	62	1.08	2.18
2	10.00	28	0.49	4.89
3	10.00	28	0.49	4.89
4	2.01	52	0.91	1.82
				<b>13.77</b>

$$M_R = 13.77 \times 14 \times 14$$

$$= 2,699.53 \text{ ton}$$

$$F.S. = (\sum MR) / (\sum MD)$$

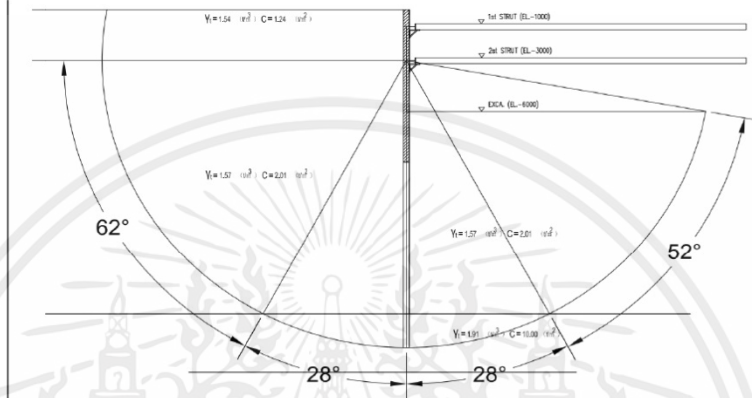
$$= 243 > 120 \text{ OK.}$$



**HEAVING CHECKING , Strur 2 Layer , Exc. 6 m.**

Excavation Level            6    m.  
 Surcharge Load            2.00   t / m<sup>2</sup>  
 Pile wall Length            20.00   m.  
 Ground water EL.            2.9    m.

**SOIL PROPERTIES**



**1.) ACTIVE MOMENT, M<sub>D</sub>**

$$M(D) = W \times l \times l/2 \quad W = q + [(y_1 h_1) + (y_2 h_2) + \dots + (y_n h_n) ]$$

Layer	$\gamma_n$ (t / m <sup>3</sup> )	$h_n$ (m.)	$\gamma_n h_n$ (t / m <sup>2</sup> )
1	1.54	3.00	4.62
2	1.57	3.00	4.71
			<b>9.33</b>

L = 14.00 m.

W = 2 + 9.33 = 11.33 t/m<sup>2</sup>

M<sub>D</sub> = 11.33 x 14 x 14 / 2 = 1,110.34 ton

2.) **RESISTANT MOMENT,  $M_R$**

$$M(R) = \sum (c \times \theta) \times |x|$$

Layer	c	$\theta$		$c \theta$
	(t / m <sup>2</sup> )	(Degree)	(Radian)	(t / m <sup>2</sup> )
1	2.01	62	1.08	2.18
2	10.00	28	0.49	4.89
3	10.00	28	0.49	4.89
4	2.01	55	0.96	1.93
				<b>13.88</b>

$$M_R = 13.88 \times 15 \times 15$$

$$= 3,122.63 \text{ ton}$$

$$F.S. = (\sum MR) / (\sum MD)$$

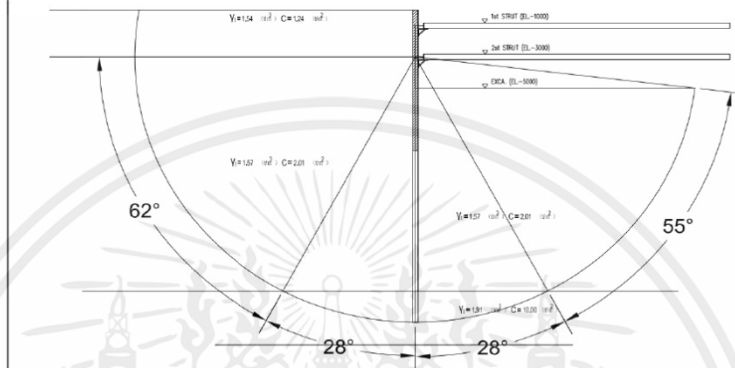
$$= 284 > 120 \quad \text{OK.}$$



**HEAVING CHECKING , Strur 2 Layer , Exc. 5 m.**

Excavation Level            5 m.  
 Surcharge Load            2.00 t / m<sup>2</sup>  
 Pile wall Length            20.00 m.  
 Ground water EL.            2.9 m.

**SOIL PROPERTIES**



**1.) ACTIVE MOMENT, M<sub>D</sub>**

$$M(D) = W \times l \times l/2 \quad W = q + [(\gamma_1 h_1) + (\gamma_2 h_2) + \dots + (\gamma_n h_n) ]$$

Layer	$\gamma_n$ (t / m <sup>3</sup> )	$h_n$ (m.)	$\gamma_n h_n$ (t / m <sup>2</sup> )
1	1.54	3.00	4.62
2	1.57	2.00	3.14
			7.76

L = 15.00 m.

W = 2 + 7.76 = 9.76 t/m<sup>2</sup>

M<sub>D</sub> = 9.76 x 15 x 15 / 2 = 1,098.00 ton

2.) **RESISTANT MOMENT,  $M_R$**

$$M(R) = \sum (c \times \theta) \times |x|$$

Layer	c	$\theta$		$c \theta$
	(t / m <sup>2</sup> )	(Degree)	(Radian)	(t / m <sup>2</sup> )
1	2.01	62	1.08	2.18
2	10.00	28	0.49	4.89
3	10.00	28	0.49	4.89
4	2.01	59	1.03	2.07
				<b>14.02</b>

$$M_R = 14.02 \times 16 \times 16$$

$$= 3,588.78 \text{ ton}$$

$$F.S. = (\sum MR) / (\sum MD)$$

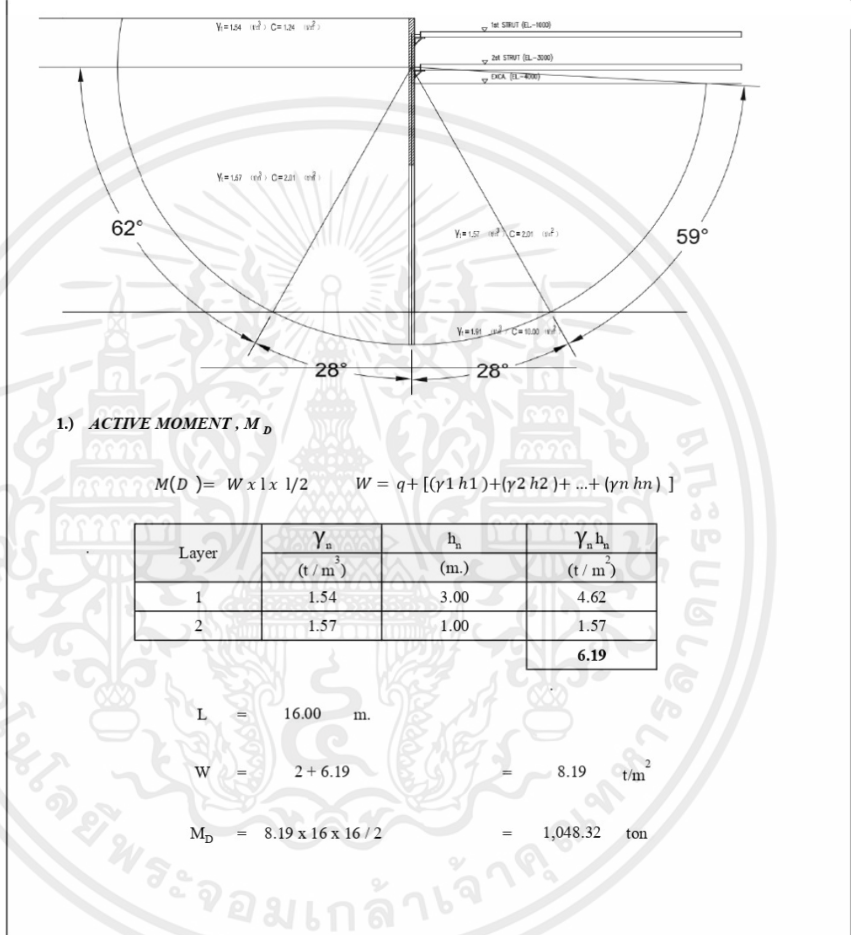
$$= 342 > 120 \text{ OK.}$$



**HEAVING CHECKING , Strur 2 Layer , Exc. 4 m.**

Excavation Level            4    m.  
 Surcharge Load            2.00   t / m<sup>2</sup>  
 Pile wall Length            20.00   m.  
 Ground water EL.            2.9    m.

**SOIL PROPERTIES**



2.) RESISTANT MOMENT,  $M_R$

$$M(R) = \sum (c \times \theta) \times |x|$$

Layer	c	$\theta$		$c \theta$
	(t / m <sup>2</sup> )	(Degree)	(Radian)	(t / m <sup>2</sup> )
1	2.01	62	1.08	2.18
2	10.00	28	0.49	4.89
3	10.00	28	0.49	4.89
4	2.01	45	0.79	1.58
				<b>13.53</b>

$$M_R = 13.53 \times 12 \times 12$$

$$= 1,947.96 \text{ ton}$$

$$F.S. = (\sum MR) / (\sum MD)$$

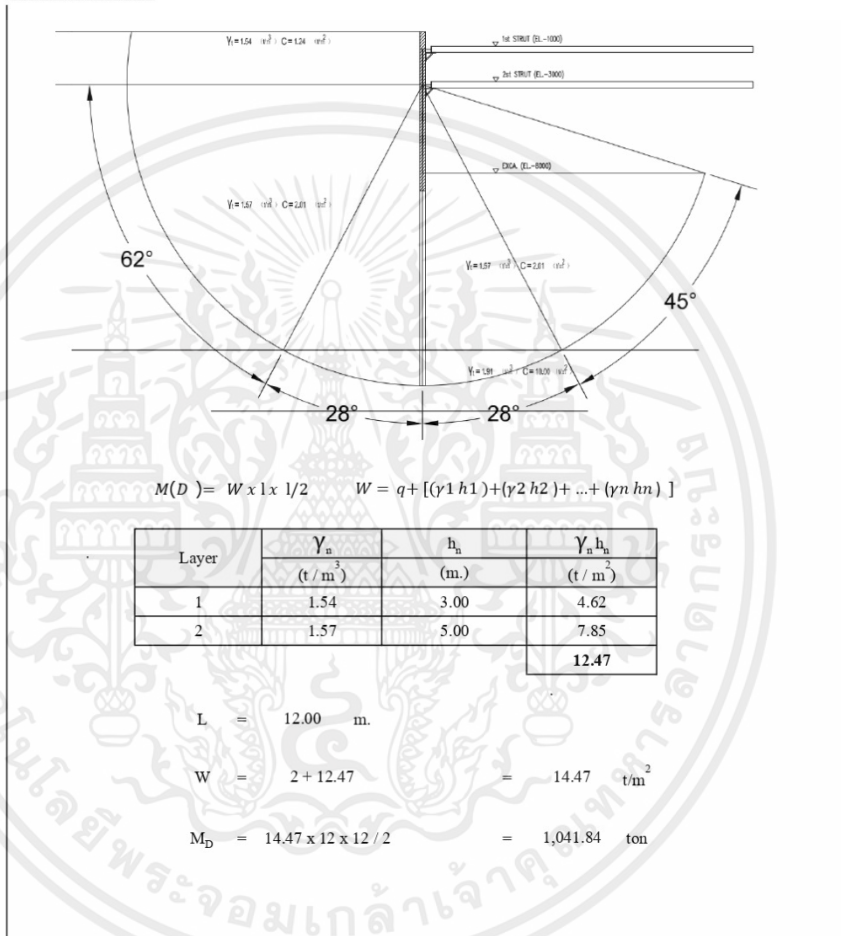
$$= 187 > 120 \text{ OK.}$$



**HEAVING CHECKING , Strur 2 Layer , Exc. 8 m.**

Excavation Level 8 m.  
 Surcharge Load 2.00 t / m<sup>2</sup>  
 Pile wall Length 20.00 m.  
 Ground water EL. 2.9 m.

**SOIL PROPERTIES**



2.) **RESISTANT MOMENT,  $M_R$**

$$M(R) = \sum (c \times \theta) \times |x|$$

Layer	c	$\theta$		$c \theta$
	(t / m <sup>2</sup> )	(Degree)	(Radian)	(t / m <sup>2</sup> )
1	2.01	62	1.08	2.18
2	10.00	28	0.49	4.89
3	10.00	28	0.49	4.89
4	2.01	48	0.84	1.68
				<b>13.63</b>

$$M_R = 13.63 \times 13 \times 13$$

$$= 2,303.94 \text{ ton}$$

$$F.S. = (\sum MR) / (\sum MD)$$

$$= 2.11 > 1.20 \text{ OK.}$$



## ประวัติผู้เขียน

ข้าพเจ้า นายจิรววัฒน์ นิธิสันถวะคุปต์ รหัสนักศึกษา 62010122 ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้ร่วมเข้าฝึกงานสหกิจศึกษา ปีการศึกษา 2565 กับบริษัท นันทวัน จำกัด ซึ่งเป็น บริษัทชั้นนำในวงการก่อสร้างในประเทศไทย ได้รับงานที่เกี่ยวข้องกับกำแพงกันดิน Pile wall และระบบค้ำยัน Strut ของโครงการ โดยบริษัท นันทวัน จำกัด ได้ให้โอกาสผู้วิจัยทำวิจัยโครงการงานสหกิจศึกษาที่โครงการ Cloud 11 ทางบริษัท ได้มอบหมายงานในตำแหน่งผู้ช่วย Site Engineer มีหน้าที่ควบคุมงานก่อสร้าง ตั้งแต่ขุดดินไปจนถึงขั้นตอนการเทคอนกรีต ถือเป็นประสบการณ์การทำงานที่ครั้งหนึ่งในชีวิตของข้าพเจ้า

ข้าพเจ้าหวังว่างานวิจัย การพิจารณาความสามารถในการต้านทานการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน Pile wall กับความลึกของงานขุดดิน ในเขตพื้นที่ดินเหนียวอ่อน สำหรับงานใต้ดิน (Consideration of the ability to resist movement of the pile wall and the depth of the excavation work. in the soft clay area for underground work.) ฉบับนี้จะมีประโยชน์ต่อผู้สนใจ ไม่ว่าจะเป็นนักศึกษา ผู้ประกอบการ หรือผู้ที่ต้องการนำไปศึกษาต่อ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ไม่มากนัก