

การศึกษาการจัดเรียงเข็มพืดในชั้นทรายด้วยแบบจำลอง
A Physical Modeling Study of Arrangements of
Sheet Pile Wall in Sand Bed



ปติญา นิธินันท์
ศิวกกร สร้อยศักดิ์
ศุภวัฒน์ คงพานิชย์กุล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การศึกษาการจัดเรียงเข็มพืดในชั้นทรายด้วยแบบจำลอง
A Physical Modeling Study of Arrangements of
Sheet Pile Wall in Sand Bed



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A PHYSICAL MODELING STUDY OF ARRANGEMENTS OF
SHEET PILE WALL IN SAND BED



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2016




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาการจัดเรียงเข็มพืดในชั้นทรายด้วยแบบจำลอง
A Physical Modeling Study of Arrangements of
Sheet Pile Wall in Sand Bed

นักศึกษา นางสาวปติญา นิธินันท์ รหัสประจำตัว 56010766
นายศิวกร สร้อยศักดิ์ รหัสประจำตัว 56011222
นายศุภวัฒน์ คงพาณิชย์กุล รหัสประจำตัว 56011246

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ขนาดล คงสมบูรณ์

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ขนาดล คงสมบูรณ์	
อ.อุษะ ศิริแก้ว	
ดร.ศลิษา ไชยพุทธ	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 19 เมษายน 2560 เวลา 13.00-16.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้องประชุมภาควิชาวิศวกรรมโยธา

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว



(รศ.ดร.นันทวัฒน์ จรัสโรจน์ธนเดช)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 12 มิ.ย. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการจัดเรียงเข็มพืดในชั้นทรายด้วยแบบจำลอง

นางสาวปิติญา นิธินันท์ รหัสประจำตัว 56010766

นายศิวกร สร้อยศักดิ์ รหัสประจำตัว 56011222

นายศุภวัฒน์ คงพาณิชย์กุล รหัสประจำตัว 56011246

ผศ.ดร.ธนาทล คงสมบูรณ์

ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการพัฒนาเทคนิคทางด้านการก่อสร้างใต้ดินมากขึ้น ทำให้มีความต้องการที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบป้องกันดินพัง ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น วิธีการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินมีหลายวิธี เช่น การเพิ่มระยะฝังของกำแพงกันดิน การใช้สมอยึด การใช้ระบบค้ำยัน การจัดเรียงตัวของกำแพงกันดินชนิดเข็มพืดในรูปแบบต่างๆ เป็นต้น ในศึกษานี้จึงได้ทำการศึกษาการจัดเรียงตัวของกำแพงกันดินชนิดเข็มพืดในรูปแบบ T-shape ด้วยแบบจำลองทางกายภาพในชั้นทรายตัวอย่างที่มีค่ามุมเสียดทานภายในเท่ากับ 29.9° โดยมีการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนแกน (Web) ของกำแพงกันดิน โดยใช้ความยาวเท่ากับ 5, 10 และ 15 เซนติเมตร ด้านหลังกำแพงเข็มพืดซึ่งมีผลต่อพฤติกรรมเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน เนื่องจากการเพิ่มแรงต้านการเคลื่อนตัวและการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยของกำแพงกันดิน ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของส่วนแกน T-shape ของกำแพงกันดินกับความลึกของการขุดดังกล่าว มีผลต่อประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน พบว่าถ้าความยาวแกน T-shape ของเข็มพืด ยาวกว่าพื้นที่การพิบัติแบบ active จะทำให้กำแพงเข็มพืดแบบ T-shape สามารถพัฒนาแรงต้านการเคลื่อนตัวได้เพิ่มขึ้น มีประสิทธิภาพลดการเคลื่อนตัวได้ดีกว่า เข็มพืดแบบที่มีแกน T-shape สั้นที่ความยาวแกนอยู่ใน active zone

A PHYSICAL MODELING STUDY OF ARRANGEMENTS OF SHEET PILE WALL IN SAND BED

Ms. Peetiya Nidhinandana Student ID. 56010766

Mr. Siwakorn Soysak Student ID. 56011222

Mr. Supavat Kongpanickul Student ID. 56011246

Asist.Prof.Dr.Thanadol

Kongsomboon

Academic Year 2016

ABSTRACT

Over the last ten years, the development of underground construction has been increasing. That is the reason why people need to improve the retaining wall system to be more efficient. There are many usages of technics how to reduce wall movement for example, deeper length of sheet piles walls, Anchored sheet pile Wall, Bracing system, various arrangement of sheet pile, etc. This research was the study of T-shape arrangement of sheet pile wall in the physical model using sand as the soil sample which has 29.9° of internal friction angle. We used the different length of web: 5, 10, 15 centimeters installed behind of the excavation side. The increases of soil resistance and area moment of inertia affected the movement behavior in each length of web. Refer to the relationship between the web length of T-shape models and the depth of the excavation, these could decrease the displacement of the retaining wall. We found that the T-shape with the web longer than the failure area of active resisting zone, it could develop more the moving resistance and reduce movement more effectively than the sheet pile with the web placed in the active resisting zone.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทเล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.ธนาตล คงสมบูรณ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำเพื่อปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องอีกทั้งสละเวลาเพื่อให้คำปรึกษากับคณะผู้จัดทำ ตลอดจนให้ความรู้ เอาใจใส่ ให้คำแนะนำช่วยเหลือในการแก้ปัญหา ให้ประสบการณ์ที่ดี อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งกับงานวิจัยนี้ พวกเราผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ในทุกๆรายวิชาที่ศึกษาเพื่อเป็นพื้นฐาน อันเป็นประโยชน์ยิ่งในการทำปริญญาโทเล่มนี้ให้สำเร็จลุล่วง ตลอดจนอาจารย์ประจำภาควิชาท่านต่างๆที่ให้คำแนะนำและกำลังใจอย่างดียิ่ง

ขอขอบพระคุณพี่ๆทีมงานจากบริษัท อิโรเซ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้แนวคิดและคำปรึกษาทางด้านระบบป้องกันดินพัง และ กำแพงเข็มพืด ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการศึกษาเรื่องนี้

ขอขอบพระคุณพี่ศักราช ยศสุวรรณและคณะ ที่ช่วยเหลือด้านข้อมูลงานวิจัย การทำแบบจำลองและการทดลองต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในการทำวิจัยเล่มนี้ และขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่คอยช่วยเหลือในการให้คำแนะนำในการทำโครงการ รวมถึงการให้กำลังใจและความรู้ตลอดระยะเวลาที่ได้ศึกษาในภาควิชาโยธานี้ตลอดมา

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้ความรักและให้กำลังใจ ในการสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนของคณะผู้จัดทำมาโดยตลอด ทำให้คณะผู้จัดทำมีวันนี้ได้ คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างสูง

ปีติญา นิธินันท์

ศิวกร สร้อยศักดิ์

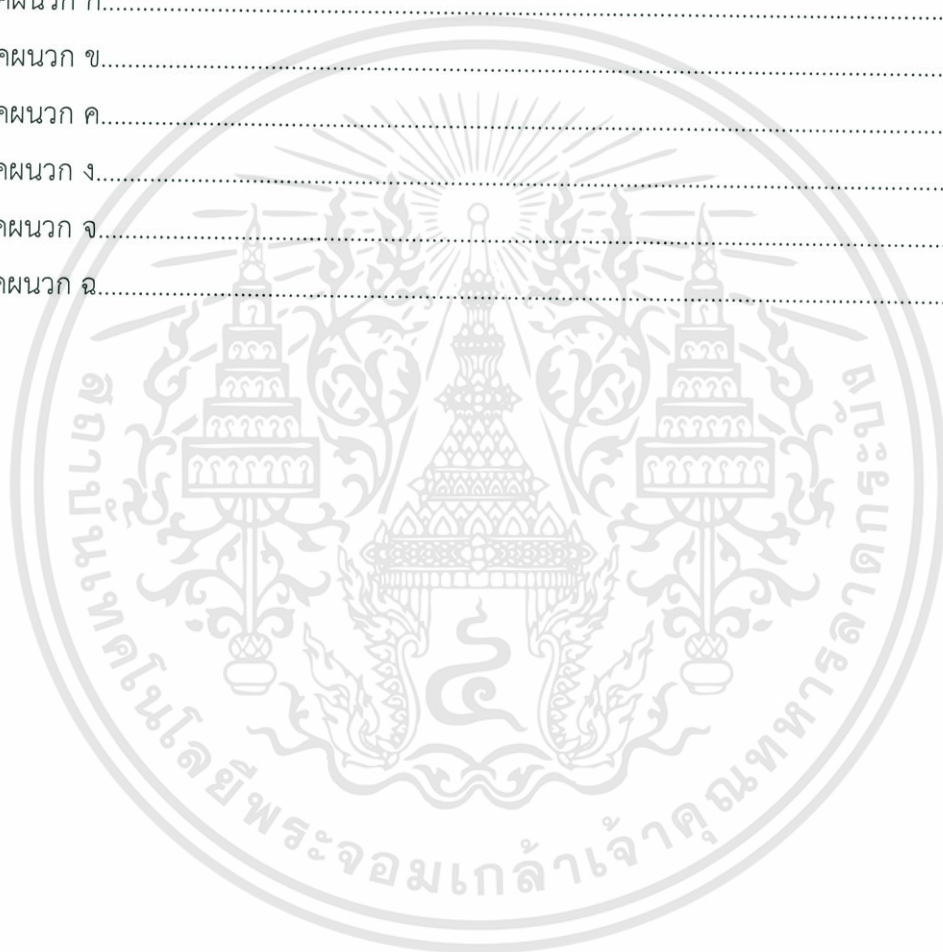
ศุภวัฒน์ คงพาณิชย์กุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แร่งดินดินด้านข้าง.....	4
2.2 โครงสร้างกันดิน.....	12
2.3 เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพโครงสร้างกันดิน.....	22
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	30
3.1 บทนำ.....	30
3.2 คุณสมบัติของดินตัวอย่างในแบบจำลอง.....	29
3.3 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา.....	39
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	47
3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์และการเปรียบเทียบข้อมูล.....	52
บทที่ 4 ผลการศึกษา.....	56
4.1 บทนำ.....	56
4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของทรายที่ใช้ในการศึกษา.....	56
4.3 ผลการทดสอบเพื่อหาค่า Elastic Modulus ของกำแพงตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา.....	60
4.4 ผลการศึกษาจากแบบจำลอง.....	61

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา.....	84
5.1 บทนำ.....	84
5.2 สรุปผลการทดลอง.....	84
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	85
เอกสารอ้างอิง.....	86
ภาคผนวก ก.....	88
ภาคผนวก ข.....	90
ภาคผนวก ค.....	96
ภาคผนวก ง.....	102
ภาคผนวก จ.....	106
ภาคผนวก ฉ.....	109



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนปลอดภัยที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินควรมีน้อยกว่า... 19	
ตารางที่ 3.1 การหาจุดพิบัติของกำแพงเข็มพืด โดย Arthur Casagrande's graphical method,1936.....	53
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลขนาดคละและชนิดของเม็ดดิน.....	56
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบDirect shear.....	57
ตารางที่ 4.3 Calibration of Pycnometer.....	58
ตารางที่ 4.4 ข้อมูลความถ่วงจำเพาะของทราย.....	59
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณเพื่อหาค่า Elastic modulus.....	60
ตารางที่ 4.6 ผลคำนวณของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดแบบจำลองของกำแพงกันดิน....	66
ตารางที่ 4.7 แสดงจุดพิบัติของแบบจำลองทั้ง 4 รูปแบบ.....	71
ตารางที่ 4.8 แสดงค่ามุมเสียดทานภายใน(internal friction angle, ϕ)ของแบบจำลอง.....	72
ตารางที่ ข.1 แสดงค่าแรงคงที่ของวงแหวนวัดแรง.....	94
ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณเพื่อหาค่า Elastic modulus.....	95
ตารางที่ ค.1 ผลการทดลองระยะการเคลื่อนตัวของ แบบจำลองที่1 รูปแบบSingle Wall.....	96
ตารางที่ ค.2 ผลการทดลองระยะการเคลื่อนตัวของ แบบจำลองที่2 T-shape ที่ความยาวแกน 5 เซนติเมตร.....	98
ตารางที่ ค.3 ผลการทดลองระยะการเคลื่อนตัวของ แบบจำลองที่3 T-shape ที่ความยาวแกน 10 เซนติเมตร.....	99
ตารางที่ ค.4 ผลการทดลองระยะการเคลื่อนตัวของ แบบจำลองที่2 T-shape ที่ความยาวแกน 15 เซนติเมตร.....	99
ตารางที่ ฉ.1 แสดงการคำนวณอัตราส่วนของระยะเคลื่อนของกำแพงกันดินต่อความลึกของการขุด.....	109

สารบัญรูป

	หน้า
รูปภาพที่ 2.1	แรงความดันดินด้านข้าง [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553]..... 4
รูปภาพที่ 2.2	ความดันดินที่ความลึก Z [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553]..... 5
รูปภาพที่ 2.3	การกระจายความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่งและ ความดันน้ำ [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553]..... 5
รูปภาพที่ 2.4	ระนาบการพิบัติที่ถูกสมมติขึ้นตามทฤษฎีของ Rankine [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553]..... 7
รูปภาพที่ 2.5	ความดันดินด้านข้างทฤษฎี Rankine [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553]..... 7
รูปภาพที่ 2.6	วงกลมมอร์สสถานะของความเค้นประสิทธิผลที่สภาวะ [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553]..... 8
รูปภาพที่ 2.7	วงกลมมอร์สสถานะของความเค้นประสิทธิผลที่ 3 สภาวะ [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553]..... 9
รูปภาพที่ 2.8	แผนภูมิแรงดัน [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553]..... 10
รูปภาพที่ 2.9	แบบจำลองทฤษฎีของ coulomb [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2553]..... 11
รูปภาพที่ 2.10	แบบการใช้งานโครงสร้างกันดิน [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2553]..... 12
รูปภาพที่ 2.11	กำแพงกันดิน Gravity wall [บรรณาธิการเว็บไซต์บ้านและสวน, 2557]..... 13
รูปภาพที่ 2.12	กำแพงกันดิน Piling wall [บรรณาธิการเว็บไซต์บ้านและสวน, 2557]..... 13
รูปภาพที่ 2.13	กำแพงกันดิน Cantilever wall [บรรณาธิการเว็บไซต์บ้านและสวน, 2557]..... 14
รูปภาพที่ 2.14	กำแพงกันดิน Anchored wall [บรรณาธิการเว็บไซต์บ้านและสวน, 2557]..... 14
รูปภาพที่ 2.15	กำแพงกันดินขาดเสถียรภาพ [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2553]..... 15
รูปภาพที่ 2.16	แรงที่กระทำต่อกำแพงกันดิน [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2553]..... 16
รูปภาพที่ 2.17	การพิบัติของกำแพงกันดิน [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2553]..... 16
รูปภาพที่ 2.18	แรงดันที่กระทำเนื่องจากด้านpassive [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2553]..... 17
รูปภาพที่ 2.19	แรงที่กระทำใต้ฐานกำแพงกันดิน [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2553]..... 19
รูปภาพที่ 2.20	การขาดเสถียรภาพภายนอกของเข็มพิตที่ตั้งอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2553]..... 20

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปภาพที่ 2.21	ความดันดินด้านข้างที่กระทำต่อ Cantilever Sheet Pile Wall [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2553]	20
รูปภาพที่ 2.22	พฤติกรรมที่กระทำต่อเข็มพืด [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2553].....	21
รูปภาพที่ 2.23	การกระจายของการเสียรูปและโมเมนต์ของ Anchored sheet pile wall [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2553].....	21
รูปภาพที่ 2.24	แรงที่กระทำต่อเข็มพืดเมื่อหาโมเมนต์ [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2553].....	22
รูปภาพที่ 2.25	Geotextiles [Research475,2014].....	24
รูปภาพที่ 2.26	Geogrid [Research475,2014].....	24
รูปภาพที่ 2.27	Geonet [Research475,2014].....	24
รูปภาพที่ 2.28	Geomembrane [Research475,2014].....	24
รูปภาพที่ 2.29	Ggeosynthetic clay liners (GCLs) [Research475,2014].....	25
รูปภาพที่ 2.30	Geofoam [Research475,2014].....	25
รูปภาพที่ 2.31	Geocell [Research475,2014].....	25
รูปภาพที่ 2.32	Geocomposites [Research475,2014].....	25
รูปภาพที่ 2.33	ส่วนประกอบของสมอยืด [Engineersdaily,2014].....	27
รูปภาพที่ 2.34	ลักษณะของคานยึดหัวกำแพงกันดิน [ppsgroup ,2546-2550].....	27
รูปภาพที่ 2.35	แบบจำลองโครงสร้างกันดิน.....	28
รูปภาพที่ 3.1	การทดสอบ Grain Size Analysis ของทรายตัวอย่าง.....	32
รูปภาพที่ 3.2	อุปกรณ์ในการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน.....	33
รูปภาพที่ 3.3	ชั่งน้ำหนักเพื่อ calibrate pycnometer ที่ใช้งาน.....	34
รูปภาพที่ 3.4	การชั่งน้ำหนักเพื่อหาความถ่วงจำเพาะ.....	34
รูปภาพที่ 3.5	การทดสอบDirect Shearเพื่อหามุมเสียดทานภายใน.....	38
รูปภาพที่ 3.6	การวัดมุมจากการโรยทรายให้ตกอย่างอิสระ.....	38
รูปภาพที่ 3.7	แบบจำลองกำแพงเข็มพืด แบบSingle wall.....	40
รูปภาพที่ 3.8	แบบจำลองกำแพงเข็มพืด แบบT-shape ที่ความยาวสั้นกว่าระยะระนาบการพิบัติ... 40	
รูปภาพที่ 3.9	แบบจำลองกำแพงเข็มพืด แบบT-shape ที่ความยาวเท่ากับระยะระนาบการพิบัติ... 41	
รูปภาพที่ 3.10	แบบจำลองกำแพงเข็มพืด แบบT-shape ที่ความยาวยาวกว่าระยะระนาบการพิบัติ 41	

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปภาพที่ 3.11 แบบจำลองที่2.....	42
รูปภาพที่ 3.12 แบบจำลองที่3.....	43
รูปภาพที่ 3.13 แบบจำลองที่4.....	43
รูปภาพที่ 3.14 อุปกรณ์ปล่อยทราย(sand dropper) ขนาด 17.5x24x14.5 เซนติเมตร เส้นผ่าน- ศูนย์กลางรู 7 มิลลิเมตร ปล่อยที่ยังสูงจากผิวทราย 25 เซนติเมตร.....	44
รูปภาพที่ 3.15 กล้องแบบจำลอง ขนาด 53x24x40 เซนติเมตร.....	44
รูปภาพที่ 3.16 ชุดอุปกรณ์จำลองการซุด โดยใช้เครื่องดูดฝุ่นตัดแปลง.....	45
รูปภาพที่ 3.17 แผ่นอะคริลิกที่ใส่ทดสอบ.....	46
รูปภาพที่ 3.18 การทดสอบการโค้งตัวของวัสดุ.....	46
รูปภาพที่ 3.19 ระยะการโค้งตัวกดแรงบนแผ่นอะคริลิกที่ทดสอบ.....	46
รูปภาพที่ 3.20 ทรายตัวอย่าง และ ทรายสี.....	47
รูปภาพที่ 3.21 อุปกรณ์การวัดระยะ และวัดมุม.....	47
รูปภาพที่ 3.22 โปรแกรม Adobe illustrator CS6 สำหรับการวัดระยะจากภาพ และ Calibrate scale ของภาพ.....	48
รูปภาพที่ 3.23 โปรแกรม DxO Optics Pro 10.....	48
รูปภาพที่ 3.24 แผ่นอะคริลิก.....	48
รูปภาพที่ 3.25 อุปกรณ์จำลองการซุดดิน.....	48
รูปภาพที่ 3.26 กล้องแบบจำลองสแตนเลส.....	48
รูปภาพที่ 3.27 อุปกรณ์ปล่อยทราย.....	49
รูปภาพที่ 3.28 ติดตั้งแผ่นกำแพงเข็มพืดจำลองบนทรายในระดับที่กำหนด.....	50
รูปภาพที่ 3.29 ทางเททรายให้ตกอย่างอิสระ (Sand Raining).....	50
รูปภาพที่ 3.30 ทาทรายให้เต็มทั้งสองฝั่งของเข็มพืด.....	50
รูปภาพที่ 3.31 ติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัว.....	50
รูปภาพที่ 3.32 ระบุตำแหน่งเริ่มต้นของเข็มพืด.....	51
รูปภาพที่ 3.33 การดูทรายในแบบจำลอง.....	51
รูปภาพที่ 3.34 ภาพความสูงของชั้นทรายที่แตกต่างกันสองด้าน.....	51
รูปภาพที่ 3.35 บันทึกค่ามุมการเฉือนพังที่จุดพิบัติ.....	51

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปภาพที่ 3.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการขุดดิน กับระยะการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด.....	52
รูปภาพที่ 3.37 มุมระนาบการพิบัติด้านActive.....	54
รูปภาพที่ 4.1 กราฟMohr's Diagram จากผลการทดสอบ Direct Shear.....	57
รูปภาพที่ 4.2 แสดงการตกลงอย่างอิสระของทรายตัวอย่าง.....	58
รูปภาพที่ 4.3 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิจับ น้ำหนักรวมระหว่างแก้วกับน้ำ.....	59
รูปภาพที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการขุดดิน กับระยะการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดเฉลี่ย ของแบบจำลองทั้ง 4 แบบ.....	61
รูปภาพที่ 4.5 การขยายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการขุดดินกับระยะการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดเฉลี่ย ของแบบจำลองทั้ง4แบบ.....	62
รูปภาพที่ 4.6 แบบจำลองเข็มพืดแบบ Single wall ที่ระยะการขุด 18 เซนติเมตร.....	63
รูปภาพที่ 4.7 แบบจำลองรูปแบบ T-shape ที่แกน 5 เซนติเมตร ที่ระยะการขุด 22 เซนติเมตร...	63
รูปภาพที่ 4.8 การพังแบบทันทีทันใดของแบบจำลองรูปแบบ T-shape ที่แกน 5 เซนติเมตร ที่ระยะการขุด 23 เซนติเมตร.....	64
รูปภาพที่ 4.9 รูปแบบการเรียงตัวของกำแพงเข็มพืดจำลองแบบ T-shape ที่แกน 10 เซนติเมตร ก่อนทำการขุด.....	64
รูปภาพที่ 4.10 แบบจำลองรูปแบบ T-shape ที่แกน 10 เซนติเมตร ที่ระยะการขุด 28 เซนติเมตร ปลายสุดของกำแพงเข็มพืดจำลอง.....	65
รูปภาพที่ 4.11 รูปแบบการเรียงตัวของกำแพงเข็มพืดจำลองแบบ T-shape ที่แกน 15 เซนติเมตร ก่อนทำการขุด.....	65
รูปภาพที่ 4.12 แบบจำลองรูปแบบ T-shape ที่แกน 15 เซนติเมตร ที่ระยะการขุด 28 เซนติเมตร ผนัง ปลายสุดของกำแพงเข็มพืดจำลอง.....	66
รูปภาพที่ 4.13 บริเวณที่เกิดสภาวะPassiveที่ส่วนปีกของตัวTในแบบจำลองรูปแบบ ความยาวแกน 5 เซนติเมตร.....	67
รูปภาพที่ 4.14 ลักษณะของแรงเนื่องจากสภาวะPassive และ Active เกิดขึ้นในรูปแบบT-shape 5, 10, 15 เซนติเมตรตามลำดับ.....	68

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปภาพที่ 4.15	การวางตำแหน่งสมอช่วยยึดรั้งเพื่อลดการแอ่นตัว (เอกสารการสอน รศ.ดร.วรากร ไหมเรียง).....	68
รูปภาพที่ 4.16	การหาจุดพิบัติ ของแบบจำลองที่1 Single Wall.....	69
รูปภาพที่ 4.17	การหาจุดพิบัติ ของแบบจำลองที่1 T-shape ที่ความกว้างแกน 5 เซนติเมตร.....	69
รูปภาพที่ 4.18	การหาจุดพิบัติ ของแบบจำลองที่3 T-shape ที่ความกว้างแกน 10 เซนติเมตร.....	70
รูปภาพที่ 4.19	การหาจุดพิบัติ ของแบบจำลองที่4 T-shape ที่ความกว้างแกน 15 เซนติเมตร.....	70
รูปภาพที่ 4.20	กราฟเปรียบเทียบระยะการขุดถึงจุดพิบัติของรูปแบบต่างๆ.....	71
รูปภาพที่ 4.21	แสดงตำแหน่งของปีกT-shape เทียบกับ ระบายพิบัติของสภาวะ Active.....	72
รูปภาพที่ 4.22	มุม $45 + \frac{\theta}{2}$ ที่เกิดขึ้น จากระนาบพิบัติ ของแบบจำลอง Single Wall ทดลองครั้งที่1.....	73
รูปภาพที่ 4.23	มุม $45 + \frac{\theta}{2}$ ที่เกิดขึ้น จากระนาบพิบัติ ของแบบจำลอง Single Wall ทดลองครั้งที่2.....	73
รูปภาพที่ 4.24	มุม $45 + \frac{\theta}{2}$ ที่เกิดขึ้น จากระนาบพิบัติ ของแบบจำลอง T-shape (5 เซนติเมตร) ทดลองครั้งที่1.....	74
รูปภาพที่ 4.25	มุม $45 + \frac{\theta}{2}$ ที่เกิดขึ้น จากระนาบพิบัติ ของแบบจำลอง T-shape (5 เซนติเมตร) ทดลองครั้งที่2.....	74
รูปภาพที่ 4.26	แสดงการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน(δ)และระยะการขุด (H).....	76
รูปภาพที่ 4.27	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\frac{\delta}{H}$ กับ H ของระบบกำแพงกันดิน รูปแบบ Single wall.....	77
รูปภาพที่ 4.28	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\frac{\delta}{H}$ กับ H ของระบบกำแพงกันดิน รูปแบบ T-shape (ความยาวแกน 15 เซนติเมตร).....	78
รูปภาพที่ 4.29	การเคลื่อนตัวและแรงดันดินด้านข้าง (เอกสารการสอน รศ.ดร.วรากร ไหมเรียง).....	79
รูปภาพที่ 4.30	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\frac{\delta}{H}$ กับ H ของระบบกำแพงกันดิน รูปแบบ T-shape (ความยาวแกน 10 เซนติเมตร).....	80
รูปภาพที่ 4.31	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\frac{\delta}{H}$ กับ H ของระบบกำแพงกันดิน รูปแบบ Single wall.....	81

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปภาพที่ 4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\frac{\delta}{H}$ กับ H ของระบบกำแพงกันดิน รูปแบบ T-shape (ความยาวแกน 5 เซนติเมตร).....	82
รูปภาพที่ 4.33 พฤติกรรมการเกิดระนาบพิบัติสภาวะ Active และ Passive ในแบบจำลอง รูปแบบ T-shape.....	82
รูปภาพที่ ข.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและจำนวนช่องของ Proving Ring เพื่อหาสมการเส้นตรง.....	94
รูปภาพที่ ง.1 การทดลองระบบกำแพงกันดินจำลอง รูปแบบ Single Wall ครั้งที่1.....	102
รูปภาพที่ ง.2 การทดลองระบบกำแพงกันดินจำลอง รูปแบบ Single Wall ครั้งที่2.....	102
รูปภาพที่ ง.3 การทดลองระบบกำแพงกันดินจำลอง รูปแบบ T-shape ที่ความยาวแกน 5 เซนติเมตร ครั้งที่1.....	103
รูปภาพที่ ง.4 การทดลองระบบกำแพงกันดินจำลอง รูปแบบ T-shape ที่ความยาวแกน 5 เซนติเมตร ครั้งที่2.....	103
รูปภาพที่ ง.5 การทดลองระบบกำแพงกันดินจำลอง รูปแบบ T-shape ที่ความยาวแกน 10 เซนติเมตร ครั้งที่1.....	104
รูปภาพที่ ง.6 การทดลองระบบกำแพงกันดินจำลอง รูปแบบ T-shape ที่ความยาวแกน 10 เซนติเมตร ครั้งที่2.....	104
รูปภาพที่ ง.7 การทดลองระบบกำแพงกันดินจำลอง รูปแบบ T-shape ที่ความยาวแกน 15 เซนติเมตร ครั้งที่1.....	105
รูปภาพที่ ง.8 การทดลองระบบกำแพงกันดินจำลอง รูปแบบ T-shape ที่ความยาวแกน 15 เซนติเมตร ครั้งที่2.....	104
รูปภาพที่ จ.1 แบบจำลองกำแพงกันดินแบบเข็มพืด แบบ Single Wall.....	106
รูปภาพที่ จ.2 แบบจำลองกำแพงกันดินแบบเข็มพืด แบบ T-Shape.....	106

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอัตราของการก่อสร้างเพิ่มขึ้นมาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ในอดีต ในขณะที่เดียวกันพื้นที่ในการก่อสร้างน้อยลง ทำให้การก่อสร้างส่วนใหญ่ต้องเป็นการก่อสร้างแบบตึกสูงหรือสูงสูในชั้นใต้ดิน เพื่อเพิ่มพื้นที่ใช้สอยให้ตอบสนองความต้องการของประชากร ปัญหาหนึ่งในงานก่อสร้างคือปัญหาด้านวิศวกรรมฐานรากและระบบป้องกันดินพัง เนื่องจากความซับซ้อนของคุณสมบัติของดิน ที่มีคุณสมบัติไม่แน่นอนในสภาพธรรมชาติ ดังนั้น จึงมีผู้นำเสนอทฤษฎีต่างๆ ขึ้นมาเพื่อคาดเดาพฤติกรรมของดิน กับสภาพปัญหาที่แตกต่างออกไป วิศวกรจึงต้องใช้ทั้งความรู้ ประสบการณ์ และวิจารณญาณ แก้ไขปัญหาอย่างเหมาะสม

ในทางปฏิบัติ การคำนวณเพื่อหาค่าตอบว่าโครงสร้างกันดินพังจะมีการเคลื่อนตัวเท่าไร ไม่สามารถคำนวณได้ผลที่แม่นยำ หรือ ยังไม่สามารถเข้าใจถึงพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวที่แน่ชัด จึงต้องมีการติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัว ขณะทำการก่อสร้างและหลังจากก่อสร้าง การใช้แบบจำลองจึงมีบทบาทสำคัญต่อการศึกษาทางวิศวกรรมธรณีเทคนิค เพื่อศึกษาพฤติกรรมและลักษณะการพิบัติของดินได้

การออกแบบระบบการป้องกันดินพังโดยใช้เข็มพืดและเพื่อให้ดินมีความมั่นคง คือ การลดการเคลื่อนตัวของเข็มพืด ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การขุดดินด้านหลังเข็มพืด(Slope Cutting) การใช้สมอยึด การใช้ระบบค้ำยัน(strut) การใช้ระบบค้ำยัน2เท่า(Double strut) เป็นต้น วิธีที่กล่าวมาข้างต้นจำเป็นต้องเพิ่มค่าใช้จ่าย ระยะเวลา และเสียบริเวณพื้นที่ก่อสร้าง อย่างไรก็ตาม หากในกรณีที่มีพื้นที่โดยรอบบ่อขุดที่เพียงพอที่จะจัดเรียงตัวเข็มพืดแบบอื่น งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาเชิงเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของเข็มพืด ในการจัดเรียงตัวรูปแบบปกติ และ แบบ T-shape ที่ระยะแตกต่างกัน เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมการเคลื่อนตัว และประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวของเข็มพืด สามารถใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์และเลือกใช้รูปแบบที่มีความเหมาะสมในอนาคตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะการขุดที่ระดับชั้นต่างๆ ที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของเข็มพืดจำลอง ในชั้นทราย
- 2) เพื่อศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนตัวของเข็มพืดและการพิบัติของดินบริเวณรอบข้างเข็มพืดจำลอง
- 3) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวของเข็มพืดที่เรียงตัวรูปแบบ T-shape ที่ระยะความกว้างของครีบแตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1) การศึกษาโดยใช้แบบจำลองขนาด 24x53x44 เซนติเมตร
- 2) ดินตัวอย่างเป็นทรายที่ผ่านการอบเพื่อกำจัดน้ำในเม็ดทรายและมีขนาดคละ ผ่านตะแกรงเบอร์ 10 และค้ำบนตะแกรงเบอร์ 50
 - 2.1) ใช้วิธีร่อนผ่านตะแกรง (sieve analysis) ASTM D442-63 เพื่อหาขนาดคละของทราย
 - 2.2) ใช้วิธีการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (direct shear test) ASTM 3080 เพื่อหาค่ามุมเสียดทานภายใน
 - 2.3) ใช้วิธีหาค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity of soil) ASTM D854-00 เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดทราย
 - 2.4) การปล่อยทรายลงในแบบจำลอง ใช้อุปกรณ์ปล่อยทรายเพื่อให้ทรายตกอย่างอิสระและสม่ำเสมอตลอดหน้าตัด
- 3) ใช้แผ่นอะคริลิกหนา 1.5 มิลลิเมตร ขนาด 30x23.2 เซนติเมตร เป็นแบบจำลองกำแพงเข็มพืด และมีส่วนด้านบน ขนาด 15x18.2 เซนติเมตร ไว้สำหรับการติดตั้งและการวัดระยะการเคลื่อนตัว
- 4) ตัวแผ่นจำลองเข็มพืด วางอยู่บนผิวทรายที่ระดับ 5 เซนติเมตร จากฐานแบบจำลอง
- 5) ใช้โปรแกรม Adobe illustrator CS6 เป็นเครื่องมือวัดระยะการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดจากภาพถ่าย และใช้ โปรแกรม DxO Optics Pro 10 สำหรับการปรับแก้ Distortion จากความโค้งของเลนส์
- 6) ไม่ศึกษาผลของแรงดันน้ำ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เรียนรู้วิธีการสร้างแบบจำลองทางกายภาพ และการกำหนดตัวแปรที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด
- 2) ได้ศึกษาและเข้าใจถึงพฤติกรรมของดิน ทฤษฎีแรงดันด้านข้าง และการพิบัติของกำแพงเข็มพืด
- 3) เข้าใจถึงรูปแบบการเรียงตัวของกำแพงเข็มพืดที่สามารถเสริมการรับแรง รวมทั้งการลดแรงดันด้านข้าง
- 4) ฝึกฝนการวางแผนการทำงาน และการทำงานร่วมกันเป็นกลุ่ม
- 5) สามารถนำหลักการนี้ไปพัฒนาต่อเพื่อใช้ในการก่อสร้างจริง ซึ่งจะสามารถลดค่าใช้จ่ายของค่ายันได้



บทที่ 2

เอกสารที่เกี่ยวข้อง

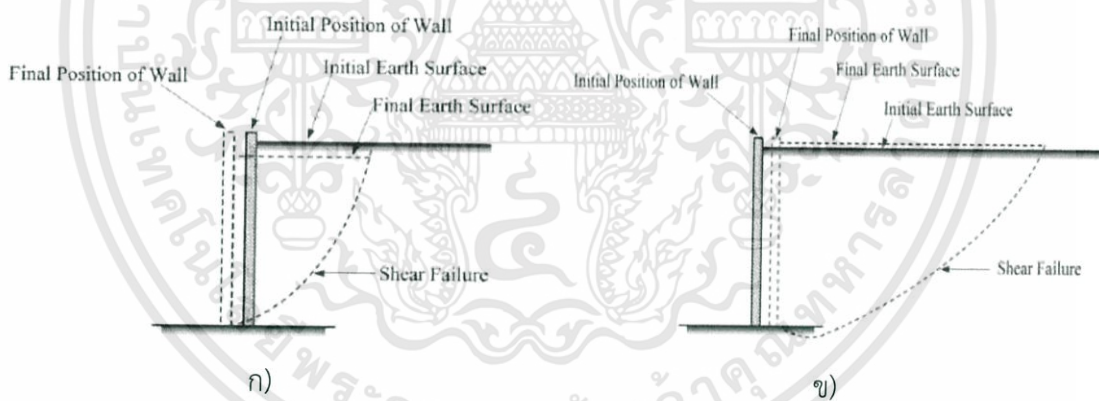
2.1 แรงดันดินด้านข้าง (Lateral Earth Pressure)

2.1.1 การวิเคราะห์และการหาค่าแรงดันด้านข้างของดิน

การวิเคราะห์และการหาค่าแรงดันด้านข้างของดินเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการออกแบบกำแพงกันดินที่รับแรงด้านข้างจากชั้นดิน เช่น ผนังชั้นใต้ดิน อ่างเก็บน้ำ เป็นต้น ดังนั้นขนาดและทิศทางของแรงดันด้านข้างเป็นข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการใช้ออกแบบกำแพงกันดินหรือโครงสร้าง กันดินต่างๆ ให้มีอัตราส่วนปลอดภัยมากเพียงพอ

ประเภทของแรงดันดินด้านข้างแบ่งออกได้ 3 ประเภท

- 1) ความดันดินที่สถานะอยู่นิ่ง (at rest earth pressure)
- 2) ความดันดินที่สถานะ active (active earth pressure)
- 3) ความดันดินที่สถานะ passive (passive earth pressure)



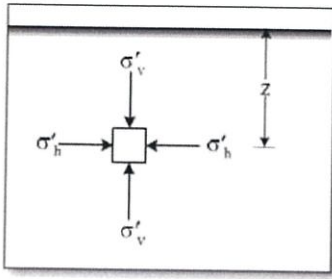
รูป 2.1 แรงความดันดินด้านข้าง [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553]

ก) แรงความดันดินด้านข้างในสถานะ active

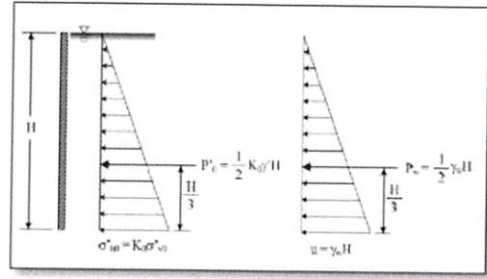
ข) แรงความดันดินด้านข้างในสถานะ passive

ความดันดินที่สถานะอยู่นิ่ง หมายถึง ความดันด้านข้างที่กระทำต่อผนังโครงสร้างของดิน โดยที่ผนังและมวลดินไม่มีการเคลื่อนตัว ความดันดินในกรณีเช่นนี้อาจเกิดขึ้นกับมวลดินถม ด้านหลังกำแพงดินที่มีความหนาแน่นมากและแทบจะไม่เกิดการเคลื่อนตัวของกำแพง ดินที่สัมผัสกับ กำแพงจะไม่เกิดความเครียดด้านข้าง ในกรณีเช่นนี้ ความดันดินด้านข้างจะมีขนาดอยู่ระหว่างความดันดินที่สถานะ active และ passive

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.2 ความดันดินที่ความลึก Z
[รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553]



รูป 2.3 การกระจายความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่งและ
ความดันน้ำ [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553]

พิจารณาคำถามบนชั้นส่วนเล็กๆ ในชั้นดินที่ความลึก z ถ้ามวลดินอยู่ที่สภาวะอยู่นิ่ง (at rest) แม้ว่ามวลดินนี้จะเกิดการทรุดตัวในแนวดิ่งเมื่อมีน้ำหนักกระทำ แต่จะไม่เกิดการเคลื่อนตัวในแนวนอน สภาพเช่นนี้เปรียบเสมือนดินที่อยู่ในสภาวะสมดุลด้านหลังกำแพงกันดินที่หนาและเรียบ และไม่มีการเคลื่อนตัว ความดันดินประสิทธิผล (effective lateral earth pressure) ที่ฐานของกำแพง และแรงลัพธ์ ประสิทธิภาพต่อความยาว 1 หน่วย สามารถหาได้จากสมการที่ (2.1), (2.2) และ (2.3)

$$\sigma'_h = K_0 \sigma'_v \quad (2.1)$$

$$\sigma'_h = K_0 \gamma' H \quad (2.2)$$

$$P'_o = K_0 \gamma' H \quad (2.3)$$

เมื่อ σ'_h คือ ความดันประสิทธิผลที่ฐานของกำแพง

P_o คือ แรงลัพธ์เนื่องจากความดันดินประสิทธิผล ที่สภาวะอยู่นิ่งต่อความยาว 1 หน่วย

K_0 คือ สัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่ง (coefficient of earth pressure at rest)

γ' คือ หน่วยน้ำหนักประสิทธิผล (submerged unit weight)

H คือ ความสูงของกำแพง H คือ ความสูงของกำแพง

ความดันดินด้านข้างรวม (total lateral earth pressure, σ_h) ที่กระทำต่อกำแพงเท่ากับผลรวมของความดันดินด้านข้างประสิทธิผล (effective lateral earth pressure, σ'_h) และความดันน้ำ (Pore pressure, u)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_h = \sigma'_h + u \quad (2.4)$$

ความเค้นรวมที่กระทำต่อกำแพงก็จะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามความลึกเช่นเดียวกัน และแรงดันรวมที่กระทำต่อกำแพงก็จะเป็นผลรวมของแรงดันเนื่องจากแรงดันประสิทธิผลและแรงดันน้ำ

$$P_h = P'_o + P_w \quad (2.5)$$

เมื่อ P_h คือแรงดันดินด้านข้างรวมที่กระทำต่อกำแพง

P_w คือแรงดันน้ำ

ค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่ง (K_0) คืออัตราส่วนระหว่างความดันดินด้านข้างต่อความดันดินในแนวตั้งในพจน์ของความเค้นประสิทธิผล โดยทั่วไป K_0 จะมีค่าน้อยกว่า 1.0 สำหรับดินเหนียวอัดตัวปกติ ยกเว้นในกรณีของดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติ ซึ่งค่า K_0 อาจมีค่าสูงถึงประมาณ 3.0 สำหรับทราย K_0 จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.4 สำหรับทรายแน่น และ 0.5 สำหรับ ทรายหลวม

การหาค่าสัมประสิทธิ์ความดันดินด้านข้างที่สภาวะอยู่นิ่งในสนามกระทำได้ยาก Jaky (1944) ได้เสนอสมการสำหรับหาค่า K_0 ในดินเหนียวอัดตัวปกติ และดินทรายตามสมการที่ (2.6)

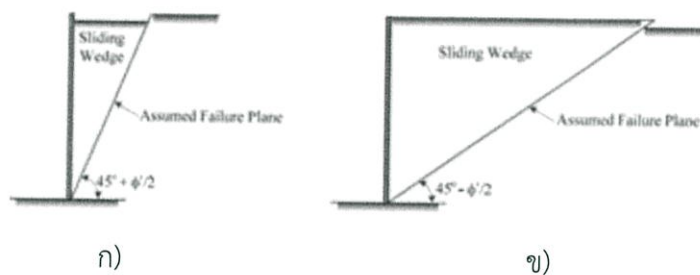
$$K_0 = 1 - \sin \phi' \quad (2.6)$$

เมื่อ ϕ' คือมุมเสียดทานภายในของดิน

2.1.2 ทฤษฎีแรงดันดินด้านข้างของ Rankine (Rankine Earth Pressure)

ทฤษฎีของ Rankine สำหรับหาความดันดินด้านข้างตั้งอยู่บนสมมติฐานหลักสามข้อ ดังนี้

- 1) ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว (adhesion) หรือความเสียดทาน (friction) ระหว่างดินกับผนัง (ผนังเรียบ)
- 2) ความดันดินด้านข้าง ใช้ได้เฉพาะกับกำแพงที่ตั้งอยู่ในแนวตั้ง การพิบัติของดินถูกสมมติให้เป็นการไหลของลิ่มตลอดแนวระนาบพิบัติ ซึ่งอยู่ในรูปของมุมเสียดทานภายในของดิน (internal friction angle, ϕ')

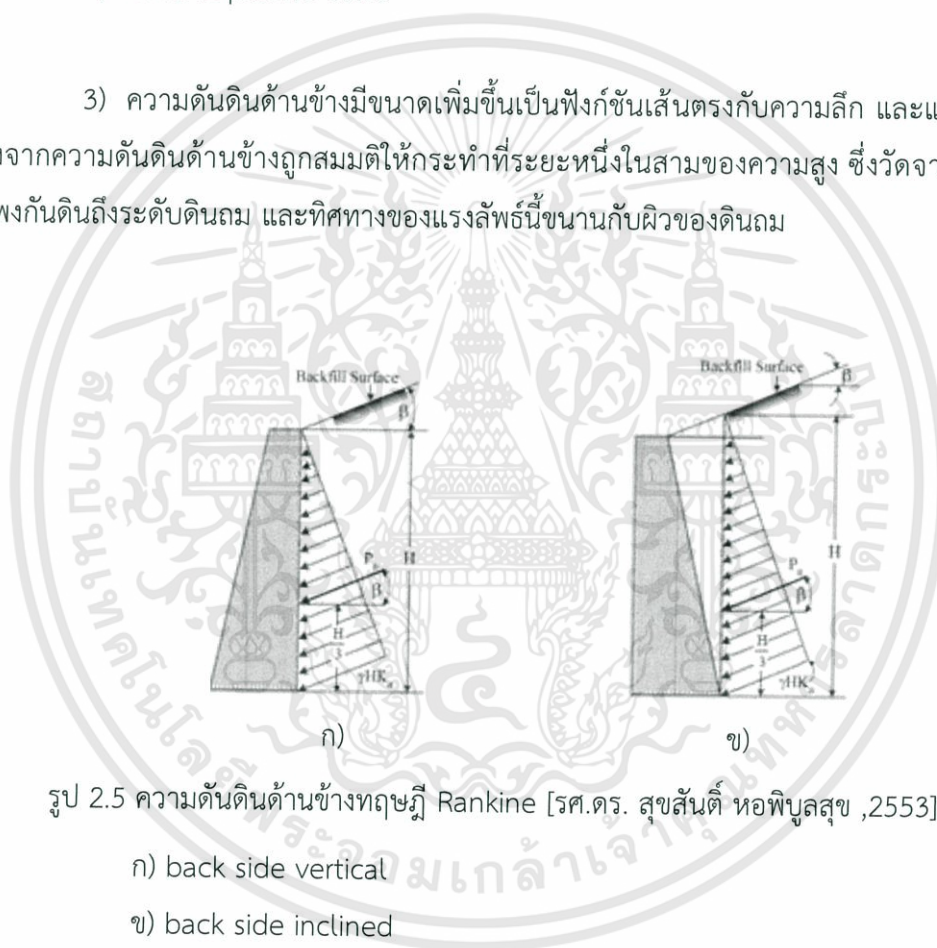


รูป 2.4 ระบายการพิบัติที่ถูกสมมติขึ้นตามทฤษฎีของ Rankine [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553]

ก) Rankine active state

ข) Rankine passive state

3) ความดันดินด้านข้างมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็นฟังก์ชันเส้นตรงกับความลึก และแรงผลลัพธ์เนื่องจากความดันดินด้านข้างถูกสมมติให้กระทำที่ระยะหนึ่งในสามของความสูง ซึ่งวัดจากฐานของกำแพงกันดินถึงระดับดินถม และทิศทางของแรงลัพธ์นั้นขนานกับผิวของดินถม



รูป 2.5 ความดันดินด้านข้างทฤษฎี Rankine [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553]

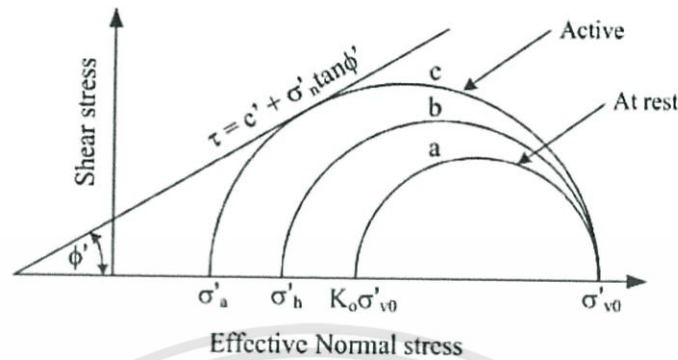
ก) back side vertical

ข) back side inclined

สำหรับดินเม็ดหยาบด้านหลังกำแพงกันดิน ที่สภาวะเริ่มต้น ดินจะอยู่ในสภาวะอยู่นิ่ง (at rest) สถานะของความเค้นประสิทธิผลแสดงได้ดังวงกลม a (รูป 2.6) เมื่อกำแพงกันดินเริ่มเคลื่อนตัวออกจากมวลดิน ความเค้นประสิทธิผลในแนวนอนจะมีค่าน้อยลง ขณะที่ ความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งมีค่าประมาณคงที่ ทำให้วงกลมมอร์มีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ ตามการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน และสัมผัสเส้นขอบเขตความแข็งแรง (failure envelope) โดยมีค่าความดันดินด้านข้างประสิทธิผลเท่ากับ σ'_u ค่าความดันนี้ถูกนิยามว่าเป็นความดันประสิทธิผลที่สภาวะ active ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rankine (Rankine effective active pressure) ระบายพิบัติที่เกิดขึ้นในมวลดินจะทำมุม $45^\circ + \frac{\phi}{2}$ องศา กับแนวนอน



รูป 2.6 วงกลมมอร์สสถานะของความเค้นประสิทธิผลที่รสภาพ [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูล สุข ,2553]

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นหลักใหญ่และความเค้นหลักเล็กประสิทธิผลที่จุดพิบัติคือ

$$\sigma'_a = \sigma'_v \tan^2\left(45^\circ - \frac{\phi'}{2}\right) - 2c' \tan\left(45^\circ - \frac{\phi'}{2}\right) \quad (2.7)$$

ความเค้นหลักใหญ่ประสิทธิผล (σ'_1) เท่ากับ σ'_v และความเค้นหลักเล็กประสิทธิผล (σ'_3) เท่ากับ σ'_a

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \tan^2\left(45^\circ + \frac{\phi'}{2}\right) + 2c' \tan\left(45^\circ + \frac{\phi'}{2}\right) \quad (2.8)$$

$$\sigma'_a = \sigma'_v K_a - 2c' \sqrt{K_a} \quad (2.9)$$

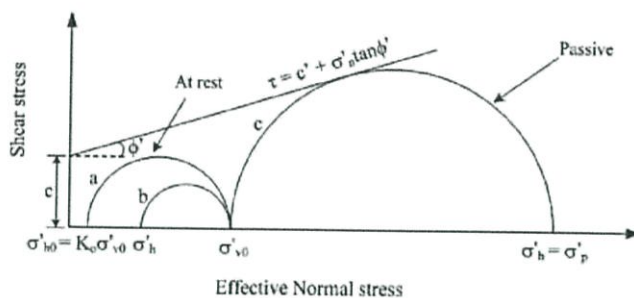
เมื่อ $K_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)$ คือสัมประสิทธิ์ความดันดินประสิทธิผลที่รสภาพ active ของ Rankine

ถ้ากำแพงกันดินเคลื่อนที่เข้าหามวลดิน มวลดินจะเกิดการอัดตัวและมีค่าความดันในแนวนอนเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งเกิดสภาวะพลาสติก (plastic state) ที่สภาวะนี้ความดันดินด้านข้างประสิทธิผลจะมีค่ามากที่สุดซึ่งเท่ากับความดันด้านข้างประสิทธิผลที่รสภาพ passive (σ'_p) ในขณะที่ความดันในแนวดิ่งจะมีค่าประมาณคงที่

$$\sigma'_p = \sigma'_v K_p - 2c' \sqrt{K_p} \quad (2.10)$$

เมื่อ $K_p = \tan^2\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right)$ คือสัมประสิทธิ์ความดันดินประสิทธิผลที่รสภาพ passive ของ Rankine

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.7 วงกลมมอร์สถานะของความเค้นประสิทธิผลที่ 3 สถานะ [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553]

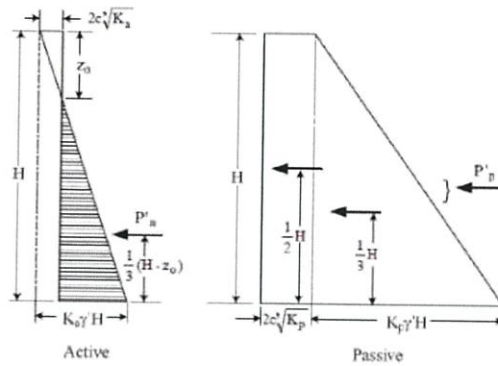
สำหรับกรณีของดินเหนียวอิ่มตัวในสถานะไม่ระบายน้ำ ความดันด้านข้างรวม (total lateral earth pressure) สามารถคำนวณได้โดยอาศัยขอบเขตความแข็งแรงรวม ซึ่งมุมเสียดทานภายในมีค่าเท่ากับศูนย์ ($\phi = 0$) ดังนั้น ความดันดินด้านข้างรวมที่สถานะ active และ passive สามารถคำนวณได้จาก

$$\sigma'_a = \sigma'_v - 2S_u \quad (2.11)$$

$$\sigma'_p = \sigma'_v + 2S_u \quad (2.12)$$

เห็นว่าความดันดินประสิทธิผลที่สถานะ active และ passive มีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึกใน ฟังก์ชันเส้นตรง (linear function) ถ้า $c = 0$ การกระจายของความดันดินที่สถานะ active จะมีรูปร่าง เป็นสามเหลี่ยมที่มีจุดยอด ($\sigma'_a = 0$) อยู่ที่ผิวดิน แต่เมื่อ c มีค่ามากกว่า 0 ค่าของ σ'_a จะมีค่าเป็นลบ ที่ผิวดินและมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเป็นศูนย์ที่ความลึก z_0 ระยะจากผิวดินจนถึง z_0 เรียกว่าโซนแรงดึง (tension zone) เมื่อ $\sigma'_a = 0$ จะได้

$$Z_0 = \frac{2c'}{\gamma' \sqrt{K_a}} \quad (2.13)$$



รูป 2.8 แผนภูมิแรงดัน [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553]

สำหรับดินถมที่เป็นดินเหนียวในสถานะไม่ระบายน้ำ ($\phi = 0$) โชนแรงดึงสามารถเขียนในรูปของพารามิเตอร์กำลังรวมได้ดังนี้

$$Z_0 = \frac{2c'}{\gamma' \sqrt{K_a}} \quad (2.14)$$

สัมประสิทธิ์ความดันดินด้านข้างเมื่อผิวของดินถมทำมุม β กับแนวนอนสามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

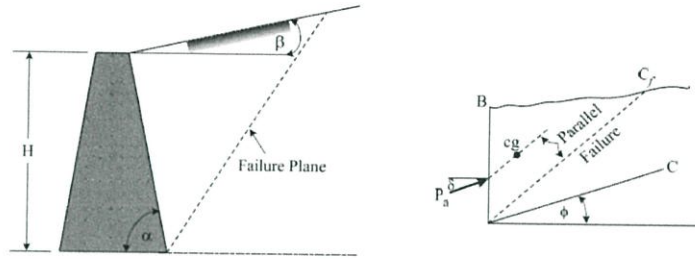
$$K_a = \cos \beta \frac{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi'}}{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi'}} \quad (2.15)$$

$$K_p = \cos \beta \frac{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi'}}{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi'}} \quad (2.16)$$

2.1.3 ทฤษฎีของ Coulomb

ทฤษฎีของ Coulomb สำหรับการหาความดันดินด้านข้างได้ถูกพัฒนาขึ้นก่อนทฤษฎีของ Rankine ซึ่งสามารถใช้ได้กับกำแพงกันดินที่มีความเสียดทาน ระบายการพิบัติเริ่มจากฐานของกำแพงกันดิน ตำแหน่งของแรงลัพธ์เนื่องจากความดันดินที่สภาวะ active หาได้จากการลากเส้นตรงจากจุดศูนย์กลางมวลของลิ่มขนานกับระนาบพิบัติ จุดตัดของเส้นตรงนี้กับผนังกำแพงกันดินคือตำแหน่งของแรงลัพธ์ทิศทางของแรงลัพธ์ทำมุม δ กับเส้นซึ่งตั้งฉากกลับด้านหลังของผนัง เมื่อ δ คือมุมเสียดทานระหว่างผนังกำแพงและดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.9 แบบจำลองทฤษฎีของ coulomb [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2553]

สมการสำหรับการคำนวณความดันดินด้านข้างประสิทธิผลของ Coulomb มีดังต่อไปนี้

$$P'_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a \quad (2.17)$$

$$K_a = \frac{\sin(\alpha + \phi)}{\sin^2 \alpha \sin(\alpha - \beta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\sin(\alpha - \delta) \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (2.18)$$

เมื่อ α คือมุมด้านหลังกำแพงกันดินที่กระทำกับแนวราบ

δ คือมุมเสียดทานระหว่างผนังกำแพงและดิน

β คือมุมระหว่างผิวของดินถมกับแนวราบ

$$P'_p = \frac{1}{2} \gamma' H^2 K_p \quad (2.19)$$

$$K_p = \frac{\sin(\alpha + \phi)}{\sin^2 \alpha \sin(\alpha + \beta) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi + \beta)}{\sin(\alpha + \delta) \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (2.18)$$

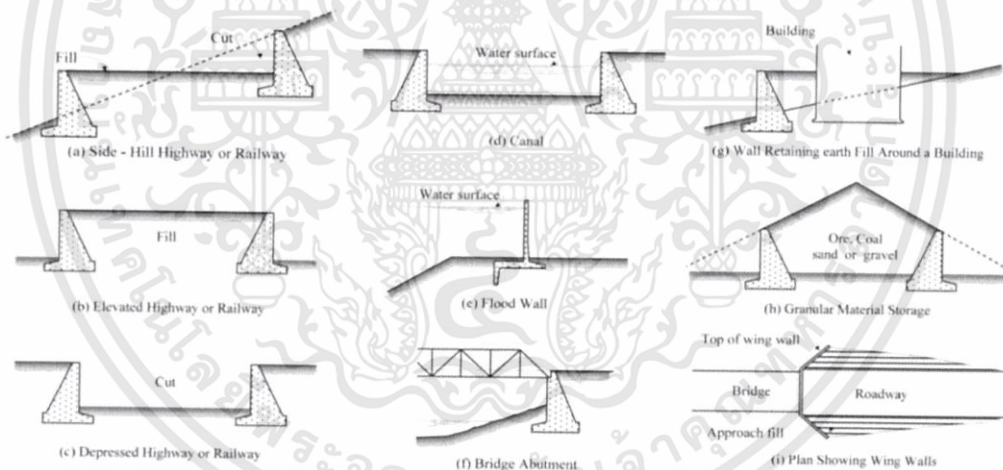
เนื่องจากทฤษฎีของ Coulomb เป็นวิธีที่ใช้หาความดันดินด้านข้างโดยใช้สัมประสิทธิ์ ความดันดินด้านข้าง ดังนั้น วิธีการนี้จึงไม่สามารถใช้กับดินถมที่มีน้ำหนักภายนอกกระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีของ Rankine และ Coulomb สมมติว่าระนาบพิบัติเป็นแนวเส้นตรง สมมติฐานนี้ มิได้เป็นจริงเสมอไปที่สภาวะ active ความดันดินที่คำนวณมีความแตกต่างจากความเป็นจริงไม่มากนัก แต่ที่สภาวะ passive ผลคำนวณมีความแตกต่างค่อนข้างสูง และให้ผลคำตอบที่ไม่ปลอดภัย (ผลคำนวณมีค่าสูงกว่าความเป็นจริงมาก) Terzaghi (1954) พบว่าที่สภาวะ active ระนาบพิบัติมีลักษณะเกือบเป็นแนวเส้นตรงก็ต่อเมื่อมุมเสียดทานภายในระหว่างดินและกำแพงกันดิน (δ) มีค่าน้อยกว่า $\phi/3$ แต่อย่างไรก็ตามระนาบพิบัติที่สภาวะ passive จะมีความแตกต่างจากสมมติฐาน ของ Rankine และ Coulomb อย่างมาก เมื่อมุม δ มีค่ามากกว่า $\phi/3$ [1]

2.2 โครงสร้างกันดิน (Retaining Structure)

กำแพงกันดิน (retaining wall) คือ กำแพงที่ใช้ต้านทานแรงดันทางด้านข้างของดินหรือของไหล เช่น น้ำและต้านทานแรงจากน้ำหนักกดทับจากผิวบน เช่น น้ำหนักของยอดยานพาหนะ บางครั้งยังทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้น้ำใต้ดินซึมเข้าสู่ชั้นใต้ดินของอาคาร การประยุกต์ใช้โครงสร้างกันดินในงานวิศวกรรมมีมากมาย เช่น งานดินถม งานดินขุดงานสะพาน และโครงสร้างกันน้ำท่วมโครงสร้างกันดินส่วนมากจะเป็นกำแพงกันดินที่สร้างจากคอนกรีต

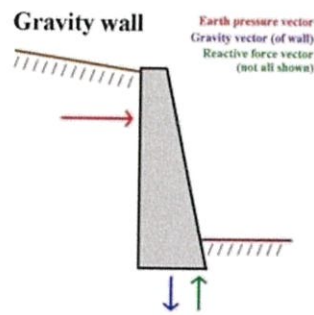


รูป 2.10 แบบการใช้งานโครงสร้างกันดิน [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 2553]^[2]

2.2.1 รูปแบบกำแพงกันดิน

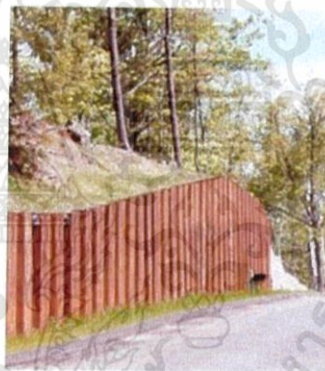
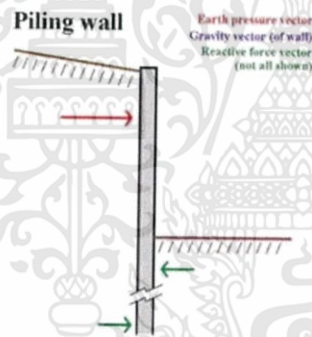
กำแพงกันดินมีหลากหลายลักษณะ แต่สามารถแบ่งประเภทตามลักษณะการก่อสร้างได้ดังนี้

1) Gravity wall เป็นต้นแบบและรูปแบบมาตรฐานของกำแพงกันดิน โดยจะใช้น้ำหนักของตัวกำแพงในการต้านแรงดันของดิน ถือว่าเป็นรูปแบบของกำแพงกันดินที่เก่าแก่ที่สุดเหมาะสำหรับกันดินในงานจัดสวนกันดินริมตลิ่งหรือเชิงเขาเพื่อป้องกันดินถล่มหรือดินสไลด์



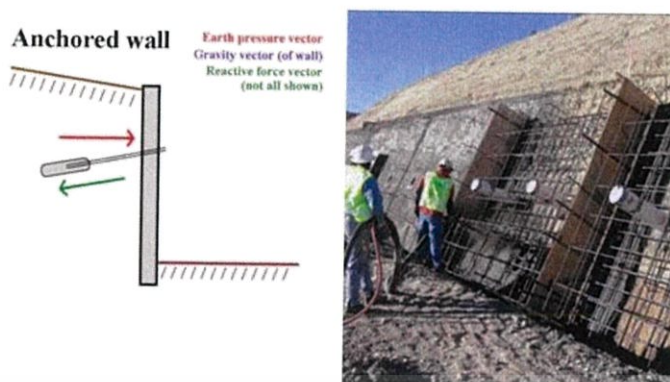
รูป 2.11 กำแพงกันดิน Gravity wall [บรรณาธิการเว็บไซต์บ้านและสวน, 2557]^[2]

2) Piling wall เป็นกำแพงกันดินที่ต้องใช้เสาเข็มยาวตกลงไปเป็นระยะตามแนวกำแพงกันดิน และใช้แรงดันจากดินใต้ระดับดินด้านที่ต่ำกว่าทั้งสองฝั่งในการรับแรงดันจากดินด้านที่สูงกว่า เหมาะสำหรับสร้างกำแพงกันดินในกรณีที่มีการจำกัดพื้นที่สำหรับทำงาน ไม่สามารถเข้าไปทำการก่อสร้างบริเวณฝั่งตรงข้ามได้



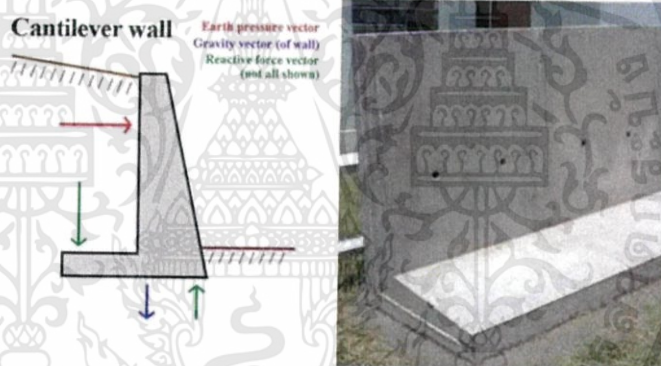
รูป 2.12 กำแพงกันดิน Piling wall [บรรณาธิการเว็บไซต์บ้านและสวน, 2557]^[2]

3) Cantilever wall เป็นรูปแบบที่พัฒนามาจากหลักการของกำแพงกันดินแบบ gravity wall แต่เพิ่มคานด้านล่างยื่นเข้าไปในดินฝั่งที่มีระดับสูงกว่า เพื่อให้สามารถรับแรงดันได้ดียิ่งขึ้น เหมาะสำหรับป้องกันดินริมตลิ่งหรือเชิงเขาที่ต้องการความมั่นคงสูง



รูป 2.13 กำแพงกันดิน Cantilever wall [บรรณาธิการเว็บไซต์บ้านและสวน, 2557] ^[2]

4) Anchored wall เป็นกำแพงกันดินที่ใช้สมอยึดกำแพงเพื่อเพิ่มแรงต้านให้กับกำแพง สามารถประยุกต์ไปใช้สำหรับช่วยเพิ่มแรงต้านให้กับกำแพงกันดินรูปแบบอื่นได้เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงดันของกำแพงกันดินโดยเฉพาะกับกำแพงกันดินที่เราสร้างไว้แล้ว



รูป 2.14 กำแพงกันดิน Anchored wall [บรรณาธิการเว็บไซต์บ้านและสวน, 2557]

5) Relieving platform เป็นกำแพงกันดินที่มีลักษณะคล้ายกับกำแพงกันดินข้างต้น แต่มีโครงสร้างพื้นเพิ่มด้านใต้ดินเพื่อช่วยรับแรงจากน้ำหนักที่กระทำด้านบนกำแพงให้กระจายแรงลงสู่เสาเข็ม ช่วยให้กำแพงรูปแบบนี้มีความสามารถรับแรงได้มากแต่อาจมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสูง

2.2.2 เสถียรภาพของกำแพงกันดิน

เสถียรภาพของกำแพงกันดินชนิดนี้ขึ้นอยู่กับน้ำหนักของตัวเอง กำแพงกันดินชนิดนี้ จึงถูกเรียกว่า Gravity wall ในกรณีที่กำแพงกันดินมีความสูงมาก แรงดันดินด้านข้างมีแนวโน้มที่จะทำให้กำแพงกันดินพลิกคว่ำ (overturning) เพื่อความประหยัดอาจเลือกใช้กำแพงกันดินชนิด cantilever wall ซึ่งมีส่วนฐานยื่นออกมาอยู่ใต้ดินม น้ำหนักของดินถมที่อยู่เหนือฐานนี้จะช่วยป้องกันการพลิกคว่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

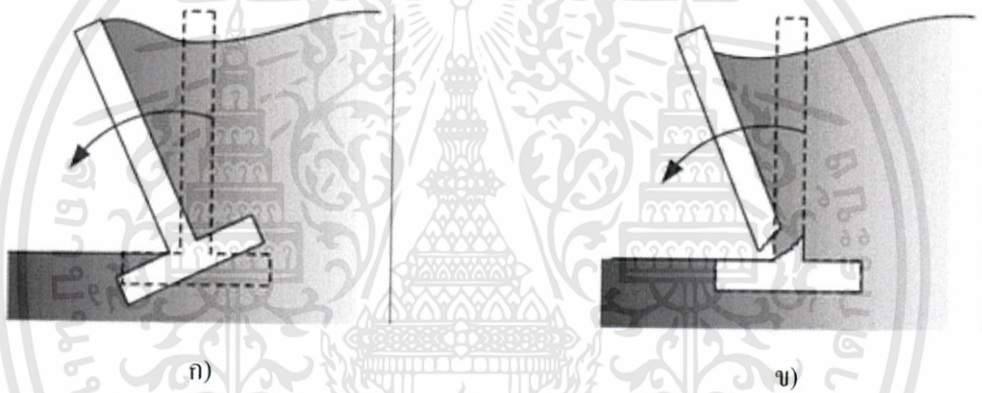
เมื่อมีการถมดินด้านหลังกำแพงกันดิน กำแพงกันดินจะเกิดการเคลื่อนตัว เพื่อป้องกันการพลิกคว่ำของกำแพงกันดิน โดยสร้างให้ด้านหน้าของกำแพงกันดินมีความชันเอียงซึ่งความชันนี้เรียกว่า batter วัสดุที่ใช้ถมด้านหลังกำแพงกันดินเรียกว่า backfill จะต้องเป็นวัสดุเม็ดหยาบที่มีความซึมผ่านสูงเช่น ทราย กรวด หรือหินบด (broken stone)

1) การพิบัติของกำแพงกันดิน

การออกแบบกำแพงกันดินต้องคำนึงถึงสิ่งสำคัญสองประการ ดังนี้

1.1) กำแพงต้องมีเสถียรภาพภายนอก (external stability) ซึ่งหมายความว่ากำแพงกันดินต้องตั้งตั้งในตำแหน่งเดิม

1.2) กำแพงกันดินต้องมีเสถียรภาพภายใน โดยต้องความสามารถต้านความเค้นที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างโดยปราศจากการพังทลาย



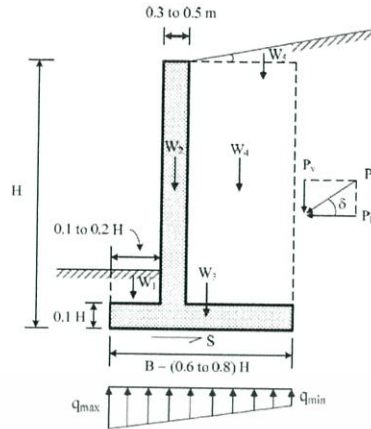
รูป 2.15 กำแพงกันดินขาดเสถียรภาพ [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 2553]

ก) กำแพงกันดินขาดเสถียรภาพภายนอก

ข) กำแพงกันดินขาดเสถียรภาพภายใน

2.2.2.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพภายนอกของกำแพงกันดิน

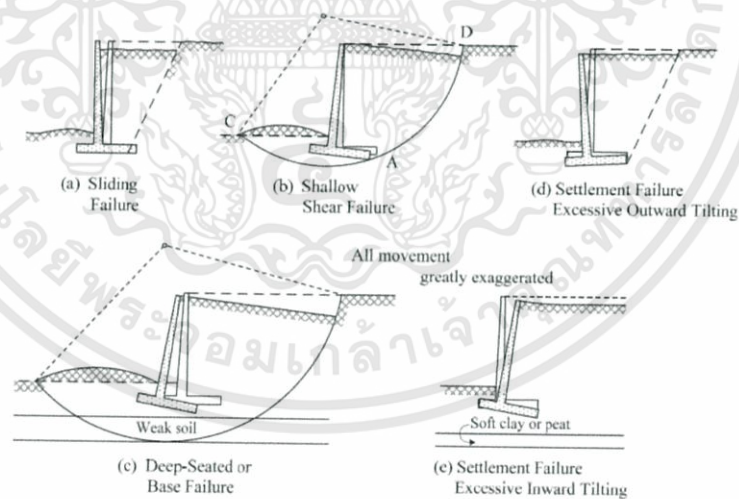
วิธีการออกแบบกำแพงกันดินด้านการพิบัติภายนอก คือ การสมมติขนาดและรูปร่างของกำแพงกันดินตั้งรูป และทำการตรวจสอบเสถียรภาพของกำแพงถ้าพบว่าเสถียรภาพของ กำแพงกันดินมีค่าต่ำหรือไม่เพียงพอก็ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างใหม่และทำการตรวจสอบอีกครั้ง ขั้นตอนนี้จะถูกทำซ้ำๆ จนกระทั่งพบว่ากำแพงกันดินที่ออกแบบมีเสถียรภาพเพียงพอต่อการใช้งาน



รูป 2.16 แรงที่กระทำต่อกำแพงกันดิน [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2553]

กำแพงกันดินจะมีเสถียรภาพภายนอก เมื่อกำแพงกันดินไม่มีการเคลื่อนตัวในสามทิศทางอัน ได้แก่ ในแนวนอน (การเลื่อนไถล) ในแนวตั้ง(การทรุดตัวที่มากกว่าปกติ และการพิบัติ เนื่องจากแรงแบกทานของดินใต้ฐานราก) และการพลิกคว่ำ

การออกแบบเป็นการตรวจสอบเสถียรภาพของการเคลื่อนตัวในสามทิศทางนี้ เพื่อให้ได้อัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสม การตรวจสอบการเคลื่อนตัวในแนวนอนและการพลิกคว่ำ อาศัยหลักการความสถิต (Law of statics) สำหรับการตรวจสอบการเคลื่อนตัวในแนวตั้งนั้นอาศัย ทฤษฎีกำลังรับแรงแบกทานของดิน



รูป 2.17 การพิบัติของกำแพงกันดิน [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2553]

1) อัตราส่วนปลอดภัยด้านการเลื่อนไถล

อัตราส่วนปลอดภัยด้านการเลื่อนไถล คือ อัตราส่วนระหว่างแรงต้านทานการเลื่อนไถล (sliding resistance force) ต่อแรงกระทำ (sliding force) แรงต้านทานการเลื่อนไถล คือผลคูณของแรงลัพธ์ในแนวตั้งที่กระทำต่อฐานของกำแพงกันดินกับสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (coefficient of friction) เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

friction) ระหว่างฐานของกำแพงกันดินและดินด้านใต้ฐาน ส่วนแรงที่กระทำให้เกิดการเลื่อนไถล ส่วนมากจะเป็นแรงในแนวนอนเนื่องจากแรงดันด้านข้างของดิน Backfill แรงต้านทานการเลื่อนไถล (S) สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{สำหรับฐานรากที่เป็นทราย} \quad S = \sum V \tan(0.67\phi) \quad (2.1)$$

$$\text{สำหรับฐานรากที่เป็นดินเหนียว} \quad S = \frac{2}{3} S_u B \quad (2.2)$$

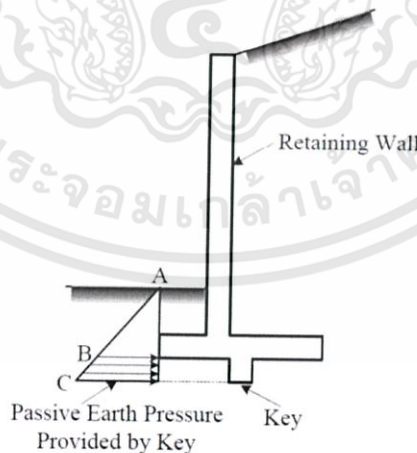
$$\text{เมื่อ } \sum V = W_1 + W_2 + \dots + W_i + P_v$$

S คือ แรงต้านการเลื่อนไถล

S_u คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน

B คือ ความกว้างของฐานราก

ถ้าในการออกแบบพบกำแพงกันดินแบบฐานเรียบ (flat-bottomed wall) มีอัตราส่วนปลอดภัยไม่เป็นไปตามที่ต้องการ อาจทำการสร้างตัวต้านทานการเลื่อนไถลที่เรียกว่า key ที่ฐานของกำแพงกันดิน ดินด้านหน้าของ key ทำหน้าที่ต้านทานการเลื่อนไถลในสถานะของความดันที่สภาวะ passive ดังแสดงโดยโซน BC แต่อย่างไรก็ตาม ดินด้านหน้าของ key อาจจะหายไปเนื่องจากการกัดเซาะ ดังนั้น ตัว key นี้จะมีประสิทธิภาพอย่างมากถ้าถูกสร้างได้ดินแข็งหรือหิน



รูป 2.18 แรงต้านที่กระทำเนื่องจากด้าน passive [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 2553]

2) อัตราส่วนปลอดภัยต้านการพลิกคว่ำ

อัตราส่วนปลอดภัยต้านการพลิกคว่ำหาได้จากอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ ด้านทานการ

พลิกคว่ำทั้งหมด (Total righting moment, M_r) ต่อโมเมนต์ทั้งหมดที่ก่อให้เกิดการพลิก คว่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(total overturning moment, M_o) ที่สภาวะสมดุลและการพลิกคว่ำเริ่มเกิดพอดี แรงปฏิกิริยาระหว่างดินและกำแพงกันดินจะอยู่ที่จุด Toe พอดี ดังนั้น เพื่อความสะดวกในการคำนวณ (ไม่ต้องพิจารณาผลของแรงปฏิกิริยา) โมเมนต์ที่ก่อให้เกิดการพลิกคว่ำ และโมเมนต์ต้านการพลิกคว่ำ ทั้งหมดสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$M_o = P_h \times \frac{H}{3} \quad (2.3)$$

$$\sum M_r = M_{r1} + M_{r1} + \dots + M_{r1} + (P_v \times B) \quad (2.4)$$

เมื่อ $M_{ri} = W_i x_i$

M_r คือโมเมนต์ต้านทานการพลิกคว่ำ

M_o คือโมเมนต์ที่ก่อให้เกิดการพลิกคว่ำ

P_h คือแรงดันดินด้านข้างรวมทั้งกระทำต่อกำแพง

P_v คือแรงกระทำแนวตั้ง

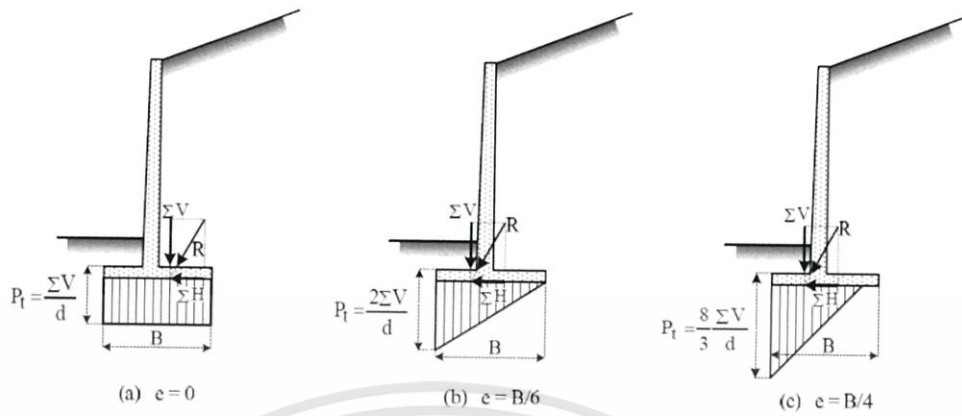
x_i คือระยะในแนวนอนที่วัดจากจุด Toe จนถึง W_i

3) อัตราส่วนปลอดภัยด้านการพิบัติ

อัตราส่วนปลอดภัยด้านการพิบัติเนื่องจากแรงแบกทานของดิน หาได้จาก อัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงแบกทานประลัย (ultimate bearing capacity) ต่อความดันที่มากที่สุด ที่กระทำต่อฐานของกำแพงกันดิน (actual maximum contact pressure) แรงในแนวนอนอื่นเนื่องจากแรงดันด้านข้างของดินมักก่อให้เกิดโมเมนต์ในฐานรากของกำแพงกันดิน ซึ่งอาจส่งผลให้ความเค้นในดินใต้ฐานรากไม่สม่ำเสมอ

4) ระยะเยื้องศูนย์กลางและความดันดินใต้ฐานราก

ระยะเยื้องศูนย์กลาง (e) และความดันดินใต้ฐานราก สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.5) , (2.6) และ(2.7) จากประสบการณ์การออกแบบ ควรทำการตรวจสอบการเสถียรภาพเนื่องจาก การพิบัติของดินฐานรากและระยะเยื้องศูนย์กลางก่อนการตรวจสอบเสถียรภาพด้านอื่น เนื่องจาก เสถียรภาพด้านนี้จะเป็นตัววิกฤติที่สุด



รูป 2.19 แรงที่กระทำใต้ฐานกำแพงกันดิน [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 2553]

$$e = \frac{B}{2} - \left(\frac{\sum M_r - M_o}{\sum V} \right) < \frac{B}{6} \tag{2.5}$$

$$q_{\max} = \left(\frac{\sum V}{B} \right) \left(1 + \frac{6e}{B} \right) < q_{\text{all}} \tag{2.6}$$

$$q_{\min} = \left(\frac{\sum V}{B} \right) \left(1 - \frac{6e}{B} \right) > 0 \tag{2.7}$$

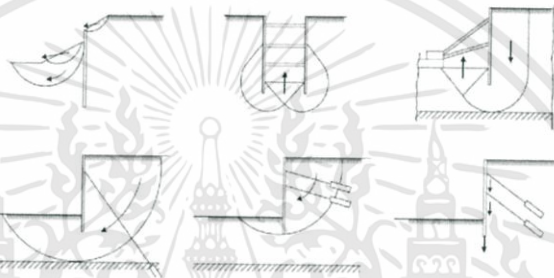
ตาราง 2.1 อัตราส่วนปลอดภัยที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินควรไม่น้อยกว่าค่าคงที่แสดง

กรณี	อัตราส่วนความปลอดภัย	หมายเหตุ	อ้างอิง
การเลื่อนไถล	1.5	สำหรับกรณีที่ไม่พิจารณาความดันดินด้านข้างที่สภาวะ passive ที่ด้านหน้าของกำแพงกันดิน	Goodman and Karol (1968)
	2.0	สำหรับกรณีที่พิจารณาความดันดินด้านข้างที่สภาวะ passive ที่ด้านหน้าของกำแพงกันดิน	Goodman and Karol (1968)
การพลิกคว่ำ	1.5	สำหรับ Backfill ที่เป็นดินเม็ดหยาบ	Teng (1962)
	2.0	สำหรับ Backfill ที่เป็นดินเม็ดละเอียด	Teng (1962)
พิบัติแบบกำลังรับแรงเสียดทาน	3.0	-	Teng (1962)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 เสถียรภาพของเข็มพืด (Sheet Pile)

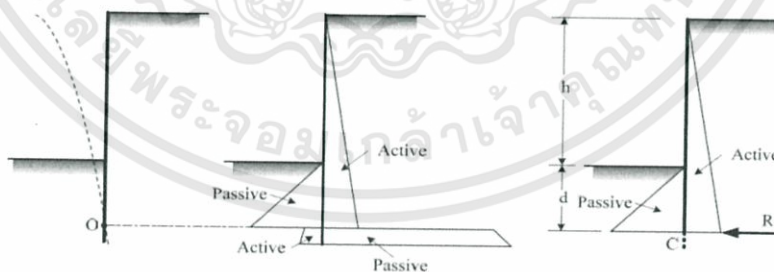
เข็มพืดเป็นแผ่นเหล็กยาวที่มีความกว้างประมาณ 30 เซนติเมตร ถึง 50 เซนติเมตร เข็มพืดจะถูกนำมาต่อกันเป็นแนวยาวตามแนวดินเพื่อใช้เป็นโครงสร้างกันดินและน้ำ เข็มพืดยังสามารถใช้ร่วมกับระบบค้ำยัน (ซึ่งอาจเป็นไม้หรือเหล็ก) เป็นโครงสร้างชั่วคราวสำหรับงานก่อสร้างใต้ดิน เช่น งานวางท่อน้ำ โครงสร้างกันดิน และงานโครงสร้างใต้ดิน แต่ถึงแม้ว่าระบบค้ำยันจะมีความแข็งแรงเพียงใดก็ตาม เข็มพืดเป็นแผ่นเหล็กที่มีความหนาไม่มาก หากใช้เป็นโครงสร้างกันดินในงานดินชนิดที่มีความลึกมาก หรือใช้เป็นโครงสร้างกันการเคลื่อนตัวของอาคารข้างเคียงที่มีขนาดใหญ่อาจก่อให้เกิดการเสียรูปของเข็มพืดและส่งผลให้เกิดเคลื่อนตัวของดินอย่างมาก เพื่อหลีกเลี่ยงการเคลื่อนตัวที่มาก เราอาจใช้เสาเข็มเจาะหรือเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นโครงสร้างกันดินได้



รูป 2.20 การขาดเสถียรภาพภายนอกของเข็มพืดที่ตั้งอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน
[รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 2553]

2.2.3.1 Cantilever Sheet Pile Wall

เข็มพืดมักถูกนำมาใช้เมื่อดินถมด้านหลังเข็มพืดมีความสูงไม่มากนักเสถียรภาพของเข็มพืดชนิดนี้ขึ้นอยู่กับความต้านทานที่สภาวะ passive ของดินใต้ระดับผิวดิน (dredge line)

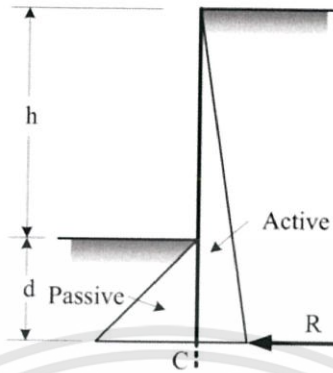


รูป 2.21 ความต้านทานด้านข้างที่กระทำต่อ Cantilever Sheet Pile Wall

[รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 2553]

การออกแบบเข็มพืดโดยทั่วไปมักทำโดยวิธีที่เรียกว่า simplification ซึ่งแทนแรงลัพธ์ที่สภาวะ passive ใต้จุด O ด้วยแรง R กระทำที่จุด C (อยู่ต่ำกว่าจุด O เล็กน้อย) ซึ่ง จุด C นี้อยู่ที่ความลึก d ใต้ระดับดินชุด ความลึก d สามารถหาได้โดยอาศัยหลักสมมูลของโมเมนต์รอบจุด C โดยพิจารณาค่าแรงต้านทานด้านหน้าเข็มพืดเท่ากับแรงต้านทานที่สภาวะ passive (P_p) หากด้วยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

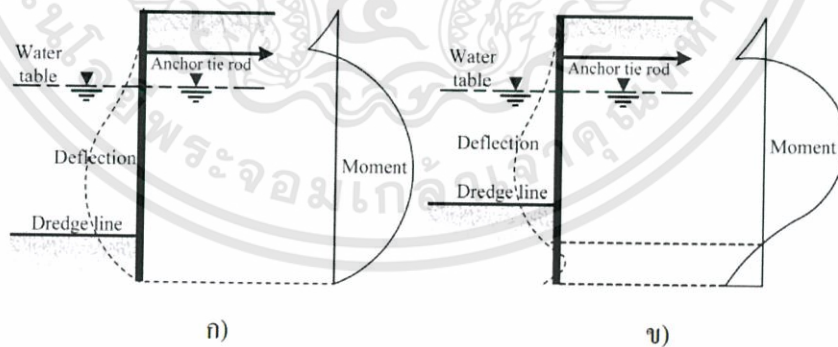
อัตราส่วนปลอดภัย ดังนั้นค่าระยะฝัง (depth of embedment) ของเข็มพืดที่ต้องการจึงควรมีค่าไม่น้อยกว่า $1.2d$ แรง R สามารถหาได้โดยอาศัยหลักสมดุลในแนวนอน



รูป 2.22 พฤติกรรมที่กระทำต่อเข็มพืด [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2553]

2.2.3.2 Anchored Sheet Pile Wall

เมื่อ Backfill หลังกำแพงเข็มพืดมีความสูงมาก (เกินกว่า 6 เมตร) อาจมีการติดตั้งตัวเพิ่มความมั่นคงซึ่งเรียกว่าตัวค้ำ (tie-back or prop) ที่ด้านบนของเข็มพืดเป็นช่วงๆ การทำเช่นนี้จะเป็นการประหยัดกว่าการใช้ cantilever sheet pile wall กำแพงกันดินระบบนี้เรียกว่า anchored sheet pile วิธีการคำนวณหาเสถียรภาพของกำแพงกันดินชนิดนี้มีด้วยกัน 2 วิธีคือ Free earth support method และ fixed earth support method วิธี free earth support method จะเป็นวิธีที่หาระยะฝังที่น้อยที่สุดที่ไม่ทำให้เกิดการหมุนในตัวเข็มพืดดังนั้นจุดรองรับที่ปลายเข็มพืดถูกพิจารณาเป็นแบบหมุด (pin)



รูป 2.23 การกระจายของการเสียรูปและโมเมนต์ของ Anchored sheet pile wall

[รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 2553]

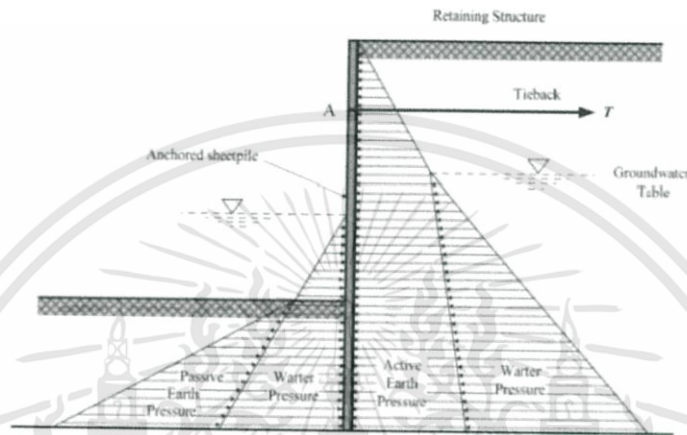
ก) free earth support method

ข) fixed earth support method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3.3 Free earth support method

วิธีการนี้จะสมมติว่าความลึกของระยะฝังใต้ระดับการขุดออกของดิน (excavation level or Dredge line) ไม่มากเพียงพอที่จะทำให้เกิดสถานะอยู่กับที่ (fixity) ที่จุดปลายของเข็มพืด ดังนั้นเข็มพืดจะอิสระต่อการหมุนที่จุดปลาย ลักษณะการพิบัติจะเป็นการหมุนรอบจุดต่อของตัวค้ำ (tie) กับเข็มพืดที่จุด A



รูป 2.24 แรงที่กระทำต่อเข็มพืดเมื่อหาโมเมนต์ [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 2553]

สิ่งที่สำคัญที่สุดในการออกแบบคือโมเมนต์ต้านการหมุนรอบจุด A ต้องมากกว่าโมเมนต์ที่ทำให้เกิดการหมุน ระยะฝังที่ต้องการ (d) สามารถหาได้โดยหลักการที่ว่าผลรวมของโมเมนต์รอบจุด A ต้องเท่ากับศูนย์การวิเคราะห์ลักษณะนี้จะเกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาของตัวแปรยกกำลังสอง หลังจากได้ค่า d แรงที่กระทำในตัวค้ำ (T) สามารถคำนวณได้โดยอาศัยหลักสมดุลของแรงในแนวนอน (ผลรวมของแรงทั้งหมดในแนวนอนต้องเท่ากับศูนย์) และท้ายสุดการออกแบบ หน้าตัดของเข็มพืดสามารถกระทำได้โดยอาศัยแผนภาพการกระจายโมเมนต์ระยะฝังควรเป็นค่าที่เพิ่มขึ้นจากรยะ d อีก 20 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้ได้ระยะฝังที่เพียงพอสำหรับสถานะอยู่กับที่ (fixity) ระยะฝังควรมีค่าไม่น้อยกว่า 1.2 ^[3]

2.3 เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพโครงสร้างกันดิน

ดินทั่วไปมีคุณสมบัติต่างกันจึงได้มีการศึกษาเพื่อช่วยเสริมประสิทธิภาพให้กับดินในบริเวณที่เป็นดินอ่อนหรือดินที่มีเสถียรภาพต่ำสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

2.3.1 Geosynthetics

geosynthetics คือ วัสดุที่ประกอบด้วยสิ่งต่างๆที่มนุษย์คิดขึ้นเพื่อประโยชน์ในงานด้าน geotechnical engineering รวมทั้งนำมาใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างในงานดิน เช่น กำแพงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดินเชื่อมดิน เป็นต้น หรือใช้ในงานระบบระบายน้ำ และงานกรองวัสดุงานแยกชั้นวัสดุ งานป้องกันการกัดเซาะของชายฝั่งทะเลหรือริมฝั่งแม่น้ำโดยส่วนมากแล้ววัสดุที่ใช้ในการผลิต geosynthetics จะเป็นวัสดุประเภท plastic เช่น polymer, rubber, fiberglass เป็นต้น

หน้าที่หลักๆของ geosynthetics สำหรับงานก่อสร้างมีดังนี้

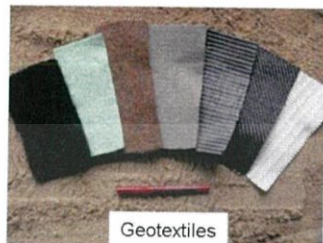
1) การแยกชั้นวัสดุ (separation) ในระหว่างการก่อสร้างบริเวณที่เป็นดินอ่อนมักพบปัญหาวัสดุจมลงไปในชั้นดินอ่อน ทำให้จะต้องเพิ่มวัสดุถมให้เพียงพอเพื่อทดแทนวัสดุที่สูญเสียลงไปในชั้นดินอ่อน การเลือกใช้วัสดุสังเคราะห์สำหรับการแยกชั้นวัสดุที่เหมาะสมจะทำหน้าที่แยกชั้นวัสดุระหว่างวัสดุถมกับดินเดิมป้องกันไม่ให้อายุวัสดุจมลงปะปนรวมกับชั้นดินเดิมซึ่งเป็นดินอ่อน จึงช่วยลดปริมาณของวัสดุถมและประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง นอกเหนือจากนี้การแยกวัสดุถมใหม่ที่มีคุณสมบัติออกจากดินเดิม ยังทำให้พฤติกรรมของวัสดุถมทำงานเป็นลักษณะ platform ช่วยกระจายแรงอย่างสม่ำเสมอลงสู่ชั้นดินเดิม วัสดุสังเคราะห์สำหรับการแยกชั้นวัสดุที่มีประสิทธิภาพจะต้องไม่เกิดความเสียหายหรือถูกเจาะทะลุในระหว่างการถมดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อวัสดุถมมีขนาดใหญ่และแหลมคม

2) การเสริมกำลังดิน (reinforcement) การใช้วัสดุสังเคราะห์เพื่อเสริมกำลังดินมีลักษณะการนำไปใช้ได้หลากหลายลักษณะงาน เช่น การก่อสร้างกำแพงกันดิน คอสะพาน หรือการก่อสร้างคันดินสูงๆ ซึ่งมีน้ำหนักบรรทุกและแรงดันจากน้ำหนักดินถมที่มากจนทำให้เกิด slip failure เนื่องจากความเครียดในแนวราบ (lateral strain) ที่เกิดขึ้น ด้วยการใส่แผ่นใยสังเคราะห์เสริมแรงเป็นชั้นๆ ระหว่างชั้นดินที่บดอัดแน่นเพื่อรับแรงในแนวราบที่เกิดขึ้นในโครงสร้างกำแพงกันดินจะทำให้คันดินมีเสถียรภาพดีขึ้น การแก้ไขลาดดินพังทลายและลาดดินที่มีความชันสูง ด้วยการใส่วัสดุเสริมกำลังดินเข้าไปเสริมกำลังในชั้นดินที่พังทลายโดยการเสริมเป็นชั้นๆแล้วบดอัดแน่น

3) การระบายน้ำออกจากดิน (drainage) โดยมีความสามารถให้มีการไหลผ่านของน้ำในแนวแกนแผ่นได้สูง และมีความสามารถในการเป็นตัวกรองที่ดี ซึ่งโดยปกติแล้วระบบระบายน้ำ ของโครงสร้างงานดินต่างๆ มักใช้ท่อเจาะรูพรุนร่วมกับชั้นระบายน้ำแต่ก็มักเกิดปัญหามีเศษดินรอบๆ หินระบายมาอุดตัน ทำให้ระบบไม่ทำงานส่งผลให้โครงสร้างมีความเสียหายจากแรงดันน้ำใต้ดินที่ไม่ระบายออกหรือเกิดน้ำเจิ่งนองบนผิวดิน แต่การใช้แผ่นใยสังเคราะห์สำหรับการระบายน้ำปูระหว่างชั้นหินระบายน้ำกับชั้นดินถม จะช่วยป้องกันการอุดตัน รวมทั้งช่วยดูดน้ำจากเม็ดดินโดยจะแยกกันกับอนุภาคเม็ดดิน ในขณะที่ยอมให้น้ำไหลผ่านได้ ซึ่งการใช้งานแผ่นใยสังเคราะห์ สำหรับระบายน้ำจะมีประโยชน์กับการก่อสร้างร่องระบายน้ำขอบถนน การก่อสร้างชั้นระบายน้ำ หลังกำแพงกันดิน การปูรองชั้นทรายระบายน้ำของแผ่นพื้นสำเร็จรูป

ชนิดของ geosynthetics

1) geotextiles คือวัสดุใยสังเคราะห์ที่มีความสามารถในการซึมผ่านของน้ำที่สูง ใช้งานร่วมกับดินซึ่งมีความสามารถในการแยกชั้น การกรอง การเสริมกำลัง การป้องกันการชะของหน้าดินและการระบาย

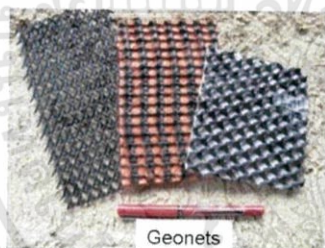


รูป 2.25 Geotextiles [Research475,2014]



รูป 2.26 Geogrid [Research475,2014]

2) geogrid คือวัสดุใยสังเคราะห์ที่ใช้สำหรับเสริมแรงในดินหรือในวัสดุที่ใกล้เคียงกัน วัสดุ geogrid ใช้งานทั่วไปสำหรับการเสริมแรงในกำแพงกันดิน ตลอดจนการเสริมแรงในชั้นทาง หรือชั้นดินใต้ถนน ซึ่งดินบดอัดใต้ถนนจะเกิดหน่วยแรงดึงขึ้นเมื่อน้ำหนักจากยานพาหนะเข้ามากระทำ geogrid จะช่วยรับแรงดึงที่เกิดขึ้นซึ่ง geogrid เป็นวัสดุที่รับแรงดึงได้สูง



รูป 2.27 Geonet [Research475,2014]



รูปที่ 2.28 Geomembrane
[Research475,2014]

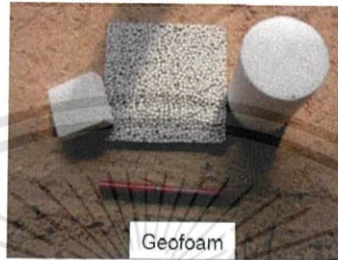
3) geonet คือวัสดุใยสังเคราะห์ที่ประกอบไปด้วยโครงตาข่ายที่เชื่อมต่อกันวางเป็นแนวเรียงกันที่มุมต่างๆ ใช้สำหรับสำหรับการระบายในแนวระนาบของของเหลวหรือแก๊ส วัสดุ geonet มักจะถูกเคลือบกับวัสดุ geotextiles บนพื้นผิวด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้านซึ่งใช้ในการระบายน้ำอีกทั้งยังสามารถรองรับวัสดุที่มีขนาดเล็กไปได้พร้อมๆกันซึ่งจะเรียกว่าวัสดุ geocomposites

4) geomembrane เป็นวัสดุใยสังเคราะห์มีคุณสมบัติการซึมผ่านน้ำต่ำมาก ซึ่งส่วนมากใช้เป็นวัสดุที่ป้องกัน กักเก็บ ในทางด้านธรณีวิศวกรรม เช่น งานควบคุมของเหลว แก๊ส หรือสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เป็นต้น วัสดุ geomembrane ทำขึ้นรูปจากแผ่นพอลิเมอร์ แต่ก็สามารถที่จะทำได้จากวัสดุ geotextiles แล้วทำให้ชุ่มด้วย asphalt, elastomer หรือ polymer sprays เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



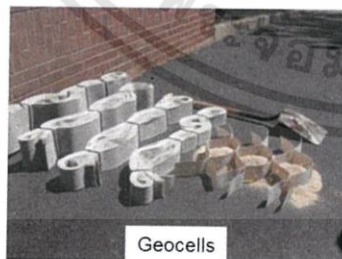
รูป 2.29 Geosynthetic clay liners (GCLs) [Research475,2014]



รูป 2.30 Geofoam [Research475,2014]

5) geosynthetic clay liners (GCLs) คือวัสดุ geocomposites ที่ประกอบไปด้วยชั้นดิน bentonite ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ระหว่างวัสดุ geotextile หรือ geotextile bentonite โดยติดกับแผ่น geomembrane อีกชั้นหรือมีเพียงแค่วัสดุ geotextile ก็ได้ซึ่ง GCLs มักจะถูกเย็บหรือใช้เข็มเจาะเย็บ ทะลุชั้น bentonite ตรงกลางเพื่อเพิ่มเสถียรภาพภายในเนื่องจากแรงเฉือนของวัสดุ GCLs ซึ่งเมื่อวัสดุ GCLs ถูกน้ำจะทำให้ bentonite บวมตัวและเป็นกำแพงป้องกันสำหรับของเหลวหรือแก๊ส และนิยมใช้ในงานก่อสร้างบ่อทิ้งขยะซึ่งมักใช้งานร่วมกับวัสดุ geocomposites

6) geofoam บล็อกหรือแผ่น geofoam สร้างขึ้นโดยการขยายตัวของ polystyrene foam ซึ่ง geofoam ใช้ในงานฉนวนกันความร้อน เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา นิยมใช้เป็นวัสดุ back fill ซึ่งช่วยลดแรงดันดินที่กระทำต่อกำแพงกันดินได้



รูป 2.31 Geocell [Research475,2014]



รูป 2.32 Geocomposites

[Research475,2014]

7) geocell เป็นวัสดุที่ค่อนข้างหนา มีลักษณะการเชื่อมต่อเป็นแบบสามมิติ สร้างขึ้นจาก แผ่น polymeric ซึ่งจะทำให้การเชื่อมแผ่น polymeric เข้าด้วยกันให้เป็นรูปแบบของเซลล์ที่เชื่อมต่อกัน มีช่องว่างสำหรับเติมดินลงไปในช่วงหรือบางที่อาจจะเป็นคอนกรีตซึ่งขึ้นอยู่กับการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

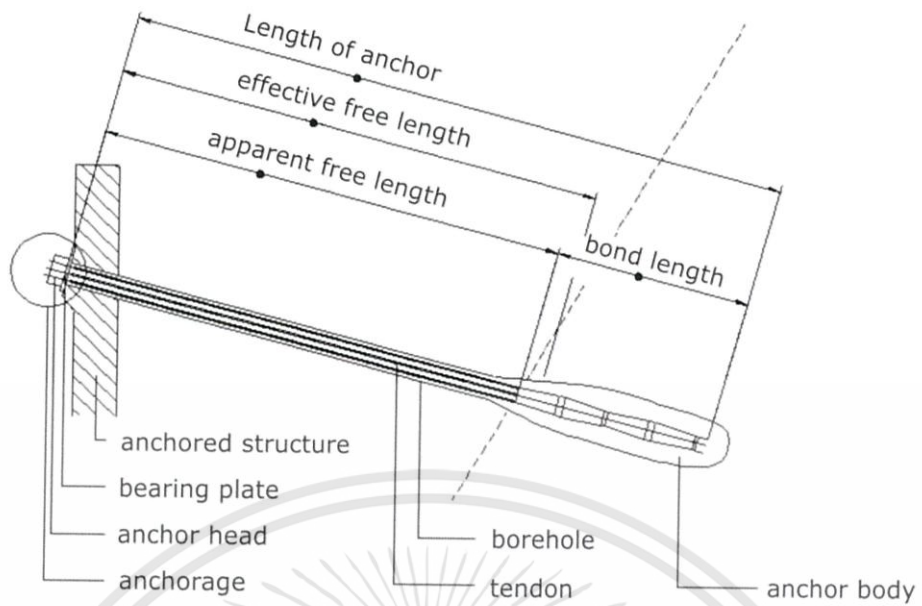
8) geocomposites คือวัสดุสังเคราะห์ที่สร้างขึ้นจากการรวมกันของวัสดุใยสังเคราะห์สองชนิดขึ้นไป ตัวอย่างเช่น geotextile-geonet; geotextile-geogrid; geonet-geomembrane; หรือ geosynthetic clay liner (GCL) ซึ่ง Prefabricated geocomposite drains or prefabricated vertical drains (PVDs) ก็จัดได้ว่าเป็นวัสดุ geocomposites ซึ่ง PVDs ทำขึ้นจากการรวมกันของไส้กลางเป็นพลาสติกซึ่งทำหน้าที่เป็นรูระบายน้ำและวัสดุ geotextile ทำหน้าที่เป็นที่กรองซึ่งติดไว้รอบๆไส้กลาง เป็นต้น^[4]

2.3.2 สมอยึดสำหรับกำแพงกันดิน

สมอยึดที่นิยมใช้งานโครงสร้างกันดินมีหลายชนิดแบ่งตามลักษณะการใช้งานของสมอยึด หรือตามรูปร่างของสมอยึดเช่น tie backs , anchor plate , vertical anchor piles และ anchor beam with batter piles นอกจากนี้ยังแบ่งตามลักษณะของแรงต้านทานที่เกิดขึ้นในสมอยึด คือ สมอยึดแบบอาศัยแรงเสียดทานที่ผิว สมอยึดแบบอาศัยแรงต้านทานด้านหน้าแผ่นสมอยึด และสมอยึดแบบอาศัยทั้งแรงเสียดทานและแรงต้านทานร่วมกัน

2.3.2.1 tieback

ground anchor หรือบางครั้งเรียกว่า tieback เป็นระบบงานก่อสร้างด้านโครงสร้างแบบใหม่ที่มีความสำคัญสามารถถ่ายแรงจากภายนอกผ่านส่วนประกอบของระบบไปสู่ดินชั้นที่ลึกลงไป โดยใช้ส่วนประกอบหลักคือ Anchor ซึ่งฝังแน่นอยู่ในดินคล้ายสมอยึดทำหน้าที่หลักในการถ่ายทอดแรงระหว่าง tieback กับดินโดยรอบ เบื้องต้น tieback ได้รับการพัฒนามาใช้งานอย่างกว้างขวางในกลุ่มผู้รับเหมางานก่อสร้างโดยนำมาใช้เป็นโครงสร้างชั่วคราวซึ่งมีอายุการใช้งานไม่เกิน 2 ปี เพื่อเป็นองค์ประกอบสำคัญของกำแพงกันดินในงานดินชุดที่มีพื้นที่จำกัด และมีความลึกของการขุดตั้งแต่ปานกลางขึ้นไปจนถึงลึกมาก ผลสำเร็จจากการนำระบบงานก่อสร้างแบบ tieback มาใช้งานทำให้มีผู้ประกอบการเกี่ยวกับงานก่อสร้างด้านอื่นๆ นำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง พร้อมกับการพัฒนาเทคนิคในการก่อสร้างระบบ tieback ที่ได้เคยก่อสร้างมาแล้วให้เหมาะสมกับสภาพ พื้นที่ของการก่อสร้าง และสะดวกแก่การใช้งานมากขึ้นจนกลายเป็นเทคนิคเฉพาะของตัวเอง จนเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปในปัจจุบัน



รูป 2.33 ส่วนประกอบของสมอยึด [Engineersdaily,2014]

2.3.2.2 Spacer

spacer ในระบบ tieback ในกรณีที่ต้องใช้งาน bar , wire หรือ strand จำนวนมากกว่า ตัว spacer จะทำหน้าที่จัดระยะห่างระหว่าง bar , wire หรือ strand ให้มีระยะห่าง เท่าๆกันและ เพียงพอต่อการแทรกตัวของวัสดุ Groutเข้าไปโดยรอบ Bar, Wire หรือ Strand ช่วยให้ เกิดการยึดเกาะที่ดีระหว่าง bar , wire หรือ strand กับสาร grout ช่วยให้การถ่ายทอดแรงภายใน bar ,wire หรือ strand เป็นไปอย่างถูกต้อง และไม่ก่อให้เกิดการสูญเสียแรงเนื่องจากการวางแนวของbar , wire หรือ strand ผิดพลาดไปจากที่ได้ออกแบบไว้แต่สำหรับ tieback บางประเภทอาจไม่จำเป็นต้องใช้ spacer ในการจัดเรียงแนวของ bar, wire หรือ strand

2.3.3 capping beam

capping beam หรือคานรัดหัวเสาเข็ม ทำหน้าที่ยึดเสาเข็มแต่ละต้นไว้ไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวออกจากกัน อันเนื่องมาจากแรงดันดินด้านข้าง



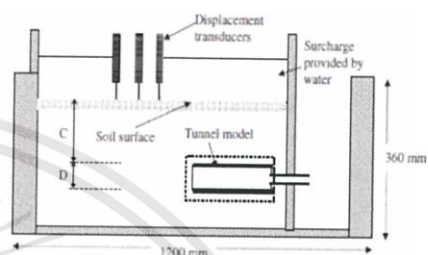
รูป 2.34 ลักษณะของคานยึดหัวกำแพงกันดิน [ppsgroup ,2546-2550] [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 M.A. Meguid, o. Saada 1, M.A. Nunes 1, J. Mattar (2007)

M.A. Meguid , o. Saada 1, M.A. Nunes 1, J. Mattar (2007) ใช้แบบจำลองวิเคราะห์งานชุดเพื่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินอ่อนเพื่อทำเป็นข้อมูลทางสถิติเกี่ยวกับการเคลื่อนตัวของอุโมงค์การพิบัติของชั้นดินอ่อนบริเวณข้างเคียงโดยใช้ท่อเหล็กจำลองเป็นอุโมงค์ฝังไปในชั้นดินอ่อนและใช้น้ำหนักกดทับเพื่อศึกษาพฤติกรรมทรุดตัวของอุโมงค์



ก)

ข)

รูป 2.35 แบบจำลองโครงสร้างกันดิน^[5]

ก) แบบจำลองของ Meguid and Saada ,2007

ข) แบบจำลองของ Anne , Morela , Garnier ,2009

2.4.2 Anne-Sophie Colas a, Jean-Claude Morela, Denis Garnier (2009)

Anne-Sophie Colas a , Jean-Claude Morela , Denis Garnier(2009) ได้ทำการทดสอบพฤติกรรมทรุดของดินทราย และลักษณะการพังของกำแพงกันดิน โดยใช้หินก่อสูง 2.5 เมตร ติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวทุกๆความสูง 25 เซนติเมตร จากนั้นปล่อยทรายเข้าบริเวณกำแพงและวัดการเคลื่อนตัวจนกำแพงพัง พบว่าลักษณะการพังของกำแพงจะขึ้นกับกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุและความแข็งแรงของข้อต่อระหว่างกำแพงกับฐานรากของกำแพงซึ่งจะทำให้เกิดมุมของการพังที่แตกต่างกัน^[6]

2.4.3 B. Villemus, J.c. Morel, c. Boutin (2014)

B. Villemus, J.c. Morel, c. Boutin (2014) ได้สร้างแบบจำลองการพังของโครงสร้างกันดิน 5 แบบจำลอง โดยใช้หินซีสต์และหินปูน สร้างแบบกำแพงโดยเปลี่ยนความสูงตั้งแต่ 2 เมตร ถึง 4 เมตร และมีการจัดเรียงต่างกัน เช่น การเรียงหินขนาดใหญ่ไว้ด้านนอกและขนาดเล็กไว้ด้านใน รวมทั้งมุมลาดเอียงกำแพง และใช้กล้องวิดีโอถ่าย พร้อมกับใช้เซนเซอร์เป็นตัววัดค่าการเคลื่อนตัว ซึ่งพบว่าผลที่ได้คือแต่ละแบบจำลองมีประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน มีน้ำหนักกระทำที่กำแพงต่างกันและมีมุมการพังที่แตกต่างกัน^[7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 A study physical modeling of retaining wall system in sand bed (2014)

A study physical modeling of retaining wall system in sand bed (2014) ได้สร้างแบบจำลองโครงสร้างกันดินแบบ 3 แบบจำลอง คือ แบบ single wall, buttress wall และ relieving wall แต่ละแบบจำลองทำการศึกษาโดยการเปลี่ยนความลึกในการฝังของกำแพงกันดินที่ 2, 4 และ 6 เซนติเมตร และใช้การวัดโดย dial gage พบว่าการกระจายแรงดันดินด้านข้างลงสู่แนวตั้งมีประสิทธิภาพในการลดการ เคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินสูงที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

การศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างกันดินในงานขุดดินจริงๆในสนามเป็นการศึกษาที่มีค่าใช้จ่ายสูงมาก ใช้เวลานานและบางครั้งมีความเสี่ยงต่ออันตรายสูง ยิ่งไปกว่านั้นการก่อสร้างจริงนั้นอาจจะเรียกได้ว่าไม่สามารถควบคุมพารามิเตอร์ที่ต้องการได้ เป็นการศึกษาที่ไม่สามารถทำซ้ำเพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่สนใจได้^[8] ดังนั้นการศึกษาด้วยแบบจำลองจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมาก

สวัสดี สุคนธ์รังสี (2520: 206) กล่าวว่า แบบจำลองหมายถึงตัวแทนที่สร้างขึ้นเพื่ออธิบายพฤติกรรม หรือลักษณะบางประการของสิ่งที่เป็นจริงอย่างหนึ่ง^[9]

Bardo and Hartman (1982: 70-71) กล่าวว่า แบบจำลองเป็นสิ่งที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อบรรยายคุณลักษณะที่สำคัญของปรากฏการณ์อย่างใดอย่างหนึ่ง เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจแบบจำลองจึงมิใช่การบรรยายหรืออธิบายปรากฏการณ์อย่างละเอียดทุกแง่ทุกมุม เพราะการกระทำเช่นนั้นจะทำให้แบบจำลองนั้นต้อยลงไป ส่วนการที่จะระบุว่าแบบจำลองใดๆจะต้องประกอบด้วยรายละเอียดมากน้อยเพียงใดจึงจะเหมาะสมและแบบจำลองนั้นๆ ควรมีองค์ประกอบอะไรบ้าง ไม่ได้มีการกำหนดตายตัว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์แต่ละอย่างและวัตถุประสงค์ของผู้สร้างแบบจำลองนั้นว่าต้องการจะอธิบายปรากฏการณ์นั้นๆ อย่างไร^[10]

ในการศึกษาดังต่อไปนี้ เป็นการจำลองแบบจำลองทางกายภาพ(Physical Model) ภายใต้สภาวะแรงโน้มถ่วง 1-G (Gravitational) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการพิบัติทางวิศวกรรมปฐพีของกำแพงกันดินแบบเข็มพืด โดยใช้ดินทรายอบแห้งเป็นดินตัวอย่าง

3.2 คุณสมบัติของดินตัวอย่างในแบบจำลอง

ก่อนทำการศึกษาแบบจำลอง ต้องมีการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของดินตัวอย่างที่ใช้ ได้มีการทดสอบ หาขนาดคละ ของดินตัวอย่าง (grain size analysis) ให้น้ำหนักของดินตัวอย่าง และค่ามุมเสียดทานภายใน (internal friction angle, ϕ) เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ผลการทดลองจากแบบจำลอง โดยมี รายละเอียดดังนี้

3.2.1 Grain Size Analysis ขนาดผลของดินตัวอย่าง

(มาตรฐานอ้างอิง: ASTM D 422) ^[11]

มวลดินอาจประกอบด้วยเม็ดดินหลายขนาด ซึ่งขนาดของเม็ดดินนี้จะมีผลต่อคุณสมบัติต่างๆ ของมวลดินอย่างมาก เช่น มีผลต่อค่าความซึมน้ำ (Permeability) อัตราการทรุดตัว (Rate of Settlement) และความสามารถในด้านกำลัง (Strength) ของมวลดิน เป็นต้น เพราะฉะนั้นเราจึงต้องทราบขนาดผลของเม็ดดินเพื่อให้ทราบคุณสมบัติของดินตัวอย่างที่จะใช้ในการศึกษาด้วยแบบจำลอง

การหาขนาดและการกระจายตัวของเม็ดดินทำได้หลายวิธี ตามความเหมาะสมของขนาดเม็ดดินและตาม ชนิดของดิน ดังนี้

1. วิธีร่อนผ่านตะแกรง (Sieve Analysis) สำหรับเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่กว่าตะแกรงเบอร์ 200 เป็นส่วนใหญ่ (0.075 มม.)

2. วิธีตกตะกอนโดยไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer Analysis) สำหรับดินที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 200 เป็นส่วนใหญ่ (ขนาดเล็กกว่า 0.075 มม.) เช่น ดินเหนียว (Clay) ดินเหนียวปนตะกอน (Silty Clay)

ทั้งสองวิธีดังกล่าวอาจใช้ร่วมกันในการวิเคราะห์ขนาดของตัวอย่างเดียวกันได้ โดยในการศึกษาค้างนี้ใช้ทรายเป็นดินตัวอย่าง จึงหาขนาดผลของเม็ดดินด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรง (Sieve Analysis) เท่านั้น

อุปกรณ์

- 1) ถาดใส่ตัวอย่าง (mixing pan)
- 2) ตะแกรงร่อน (sieve)
- 3) เครื่องเขย่าตะแกรง (sieve shaker)
- 4) เครื่องชั่งขนาด 2 กิโลกรัม อ่านละเอียด 0.1 กรัม
- 5) แพลงทำความสะอาดตะแกรง
- 6) ค้อนยาง ช้อนตักดิน (soil scoop)

วิธีการทดลอง

- 1) ชั่งตะแกรงทุุกๆขนาดที่ใช้ โดยตาชั่งอ่านได้ถึง 0.1 กรัม โดยตะแกรงชุดหนึ่งไม่ควรเกิน 7 ใบ โดยมีขนาดละเอียดถึงเบอร์ 200 อยู่ด้วยทุกครั้ง
- 2) ในกรณีที่ตัวอย่างดินเกาะเป็นก้อนใหญ่ให้ทุบ แยกดินออกเป็นเม็ดอิสระด้วยค้อนยาง แต่ต้องระวังอย่าให้แรงมากจนเม็ดดินแตก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) นำตัวอย่างดินที่อบชั่งน้ำหนักแล้วใส่ลงในตะแกรงที่เรียงลำดับจากหยาบไปหาละเอียด โดยมีฝาปิดด้านบนและมีถาด (pan) รองด้านล่าง รวมเป็นถาดของตะแกรงนำไปเข้าเครื่องเขย่า (sieve shaker) เขย่านานอย่างน้อย 10 นาที

4) ชั่งทั้งดินที่ค้างอยู่ในแต่ละตะแกรงรวมทั้งน้ำหนักตะแกรง แล้วนำไปคำนวณหาค่า %F



รูป 3.1 การทดสอบ Grain Size Analysis ของทรายตัวอย่าง

วิธีการคำนวณ

- 1) เปอร์เซ็นต์ของดินที่ค้างบนตะแกรง = $\frac{\text{น้ำหนักดินที่ค้างบนแต่ละตะแกรง}}{\text{น้ำหนักดินทั้งหมด}} \times 100\%$
- 2) เปอร์เซ็นต์การค้างสะสม = ผลบวกสะสมของเปอร์เซ็นต์ของดินที่ค้างบนตะแกรงที่
หยาบกว่า
- 3) เปอร์เซ็นต์ของดินที่ผ่านตะแกรง (% finer) = 100 - เปอร์เซ็นต์ค้างสะสม

3.2.2 Specific Gravity of Soil: ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน

(มาตรฐานอ้างอิง: ASTM D 854 - 00) ^[11]

มวลดินจะมีส่วนประกอบของแร่ธาตุสารต่างๆ อาจมีแร่ธาตุชนิดเดียวหรือต่างชนิดกันหลายอย่าง ดังนั้นความถ่วงจำเพาะในมวลดิน G_s ก็คือ ค่าเฉลี่ยของความถ่วงจำเพาะของแร่ธาตุสารเหล่านั้น และโดยทั่วไปค่าความถ่วงจำเพาะของ มวลดินจะมีค่าประมาณ 2.60 ถึง 2.80 แล้วแต่แร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบ เช่นดินลูกรังบางชนิดมีธาตุเหล็กอยู่มากจะมีค่า ความถ่วงจำเพาะสูงถึง 3.00 หรือมากกว่า แต่หากดินมีสารอินทรีย์อยู่มากจะทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะต่ำลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวทช. ผลิตขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถ่วงจำเพาะเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของมวลดิน สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าอัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio) ความพรุน (Porosity) ความอิ่มตัว (Degree of Saturation) หน่วยน้ำหนัก (Unit Weight) และค่าอื่นๆ ได้ รวมทั้งใช้คาดคะเนแร่ธาตุซึ่งเป็นองค์ประกอบของมวลดินนั้น เช่น ดินที่มี iron อยู่มากจะมีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่าดิน ที่มี silica เป็นส่วนประกอบ หรือดินเหนียวจะมีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่าทราย เนื่องจากดินเหนียวมีส่วนประกอบของ แร่ธาตุซึ่งหนักกว่า (Quartz) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของทราย

อุปกรณ์

- 1) Pycnometer แบบขวดแก้วคอยาวก้นป่อง (Volumetric flask)
- 2) เตابุนเส้น หรือ เตาด้านร้อน (hotplate) หรือ หม้อต้มน้ำ
- 3) สามขา (tripod) และแผ่นตะแกรงแอสเบสโตส (asbestos gauze) ใช้ค้ำเตาบุนเส้น
- 4) พรอท 0-100°C อ่านละเอียด 0.5-1.0°C
- 5) เครื่องกวนดิน (Stirring Apparatus)
- 6) แท่งแก้วคน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 มิลลิเมตร ยาว 30 เซนติเมตร
- 7) กรวย ขนาดปากประมาณ 10 เซนติเมตร แบบรูกว้าง
- 8) ตู้อบ
- 9) อ่างแก้วดูอุณหภูมิ
- 10) เครื่องชั่งอ่านละเอียด 0.1 g
- 11) ภาชนะ - ชั้นอลูมิเนียม



รูป 3.2 อุปกรณ์ในการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการทดสอบ

n) Calibration of Pycnometer

จุดประสงค์เพื่อหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของขวด Pycnometer ซึ่งมีน้ำเต็มถึงขีดที่กำหนด ที่อุณหภูมิต่างๆ ระหว่าง 20°C ถึง 40°C เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการหาค่าถ.พ. ของดินต่อไป โดยทำได้ดังนี้

- 1) ล้างขวด ความถ่วงจำเพาะ ให้สะอาดเติมน้ำกลั่นลงไปจนถึงขีดที่คอขวด (อ่านที่ระดับห้องน้ำ)
- 2) ต้มไล่ฟองอากาศหรือดูดโดยปั๊มสุญญากาศประมาณ 10 นาทีจนฟองอากาศหมด
- 3) เติมน้ำปรับระดับน้ำจนเสมอระดับที่คอขวดพอดี เช็ดภายนอกขวดให้แห้ง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก
- 4) วัดอุณหภูมิของน้ำภายในขวดให้ละเอียด โดยวัดที่หลายระดับ ถ้าอุณหภูมิต่างกัน มาก ให้ตะแคง ขวดแล้วกลิ้งไปมาเพื่อให้ผสมเข้ากันดีทำให้อุณหภูมิสม่ำเสมอแล้วจึงบันทึกอุณหภูมิที่ถูกต้อง
- 5) ทำเช่นเดียวกับข้อ 3 และ 4 โดยให้ความร้อนหรือทำให้เย็นลงในช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน (20 ถึง 40°C) ประมาณ 4-5 จุด เช่นที่ 20°C , 25°C , 30°C , 35°C และ 40°C เป็นต้น
- 6) เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักขวดที่มีน้ำเต็มและอุณหภูมิ



รูป 3.3 ชั่งน้ำหนักเพื่อ calibrate pycnometer ที่ใช้งาน



รูป 3.4 การชั่งน้ำหนักเพื่อหาความถ่วงจำเพาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข) การทดลองหาความถ่วงจำเพาะของดิน

1) นำดินตัวอย่างที่แห้งประมาณ 50 กรัม (ถ้าเป็นดินชั้นต้องเผื่อน้ำหนักความชื้น) ผสมน้ำกลั่นแล้วกวนให้เข้ากัน โดยใช้เครื่องปั่น (mixer machine) โดยให้ส่วนผสมไม่เกิน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร

2) เทส่วนผสมน้ำดินลงในขวดหา ความถ่วงจำเพาะ ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วใช้น้ำกลั่นล้างดินที่ติดในภาชนะผสมลงในขวด ความถ่วงจำเพาะให้หมดระวังอย่าให้ระดับน้ำ เกินขีดวัดปริมาตรที่คอขวด

3) ใส่ฟองอากาศโดยการตัมหรือดูดโดยปั๊มสุญญากาศประมาณ 10 นาที จน ฟองอากาศหมด แล้วเติมน้ำกลั่นให้ถึงระดับขีดที่คอขวด แล้วปล่อยให้เย็นถึงอุณหภูมิห้องทดลอง

4) ถ้าระดับน้ำลดลงอีก ให้เติมให้เต็มถึงขีด แล้วนำไปชั่งให้ละเอียดถึง 0.1 กรัม แล้ว วัดอุณหภูมิของน้ำในขวด

5) เทแล้วล้างส่วนผสมในขวด ความถ่วงจำเพาะ ลงในถาด นำไปอบให้แห้งเพื่อชั่ง หาน้ำหนักดินที่แน่นอนอีกครั้ง

วิธีการคำนวณ

จากสมการดังนี้(เมื่อมีปริมาตรเท่ากัน)

$$G = \frac{W_s}{W_w(4^\circ c)} \quad (3.1)$$

$$G = \frac{W_s}{[(W_s + W_2) - W_1] \cdot \frac{1}{G_T}} \quad (3.2)$$

$$G = \frac{W_s \cdot G_T}{[(W_s + W_2) - W_1]} \quad (3.3)$$

- เมื่อ :
- W_s = น้ำหนักดินอบแห้ง, กรัม
 - W_2 = น้ำหนักขวดที่มีน้ำเต็มที่อุณหภูมิที่ทดลอง ($T^\circ c$), กรัม
 - W_1 = น้ำหนักขวดที่มีน้ำผสมดินที่อุณหภูมิที่ทดลอง ($T^\circ c$)
 - G_T = ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำที่อุณหภูมิที่ทดลอง ($T^\circ c$)

3.2.3 Direct Shear Test (มาตรฐานอ้างอิง: ASTM D 3080) ^[11]

เนื่องจากดินตัวอย่างเป็นดินทราย จึงได้ทำการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง(direct shear) ในการหาค่ามุมเสียดทานภายใน(internal friction angle, ϕ)

อุปกรณ์

- 1) Direct Shear Testing Machine เป็นแบบหมุนทดสอบด้วยมือ หรือแบบ อิเล็กทรอนิกส์
- 2) Shear Box พร้อมอุปกรณ์เตรียมตัวอย่าง
- 3) Proving Ring วัดขนาดของแรง
- 4) Dial Gauge วัดการเคลื่อนตัวในแนวราบ อ่านละเอียดได้ถึง 0.0001 นิ้ว (0.0025 มม.)
- 5) Plate Loading (แผ่นน้ำหนัก)
- 6) เครื่องชั่ง และอุปกรณ์หาความชื้น
- 7) เวอร์เนีย

วิธีการทดสอบ

ก) การเตรียมตัวอย่างดินทราย (granular soil)

- 1) วัดขนาดของความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของ Cutting Ring พร้อมชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำตัวอย่างทรายมาใส่ลงใน Shear Box ใช้ไม้กดทำการบดอัด จำนวนชั้นในการใส่ตัวอย่าง และจำนวนการบดอัดขึ้นอยู่กับความหนาแน่นที่ต้องการ จากนั้นแต่งตัวอย่างให้เรียบพอดีขอบแบบ หลังจากนั้นก็ทำความสะอาดขอบแบบ
- 2) จากนั้นนำ Cutting Ring ที่บรรจุตัวอย่างดินทรายมาทำการชั่งน้ำหนัก
- 3) ชั้นสกรูประกอบ Shear Box บนและล่าง วางแผ่นฐานล่าง (Retaining Plate) ลงเข้าไปใน Shear Box โดยให้แนวร่องวางในแนวขวางกับทิศทางของการเฉือนตัวอย่าง
- 4) วาง Cutting Ring ที่บรรจุตัวอย่างดินบนขอบของ Shear Box ใช้ไม้กด (Wooden pusher) ทำการกดนำตัวอย่างดินให้เข้าไปอยู่ใน Shear Box
- 5) วางแผ่นเหล็กด้านบน (Loading Pad) ให้ร่องขวางทิศทางเฉือนตัวอย่างดินทราย

ข) การเฉือนตัวอย่าง (shearing)

- 1) กดตัวอย่างดินด้วยน้ำหนัก (normal load) ที่ต้องการแล้วรอให้การทรุดตัวทาง แนวตั้งหยุด ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 2-10 นาที
- 2) เริ่มแรงเฉือนให้ตัวอย่าง โดยให้อัตราการเคลื่อนที่ตามแนวราบประมาณ 0.05 นิ้ว / นาที ถึง 0.10 นิ้ว / นาที โดยสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) อ่านค่าแรงเฉือนจาก proving ring dial, ค่าการเคลื่อนตัวทางแนวตั้ง จาก vertical dial gage ทุกๆ การเคลื่อนที่ตามแนวราบ 0.01 นิ้ว จนกระทั่งตัวอย่างดินไม่สามารถรับแรงเฉือนได้อีก โดยค่าจาก proving ring dial จะลดลง

4) เตรียมตัวอย่างเหมือนๆ กันอีก อย่างน้อย 3 ตัวอย่าง โดยใช้น้ำหนัก (normal load) แตกต่างกัน แล้วทำการทดสอบ เหมือนข้อ 1 ถึงข้อ 4

การคำนวณและรายงานผลการทดสอบ

1) หาค่าความหนาแน่นของตัวอย่างที่ทดสอบ (3 ค่า) (1 ค่าต่อการให้ normal load และการเฉือน 1 ครั้ง)

$$\rho_t = \frac{\text{มวลของตัวอย่าง (กรัม)}}{\text{ปริมาตรของตัวอย่าง (ซม}^3\text{)}}, \text{ กรัม/ซม}^3$$

ρ_t = ความหนาแน่นของดินเปียก

2) ความเค้นแนวตั้งฉาก (Normal Stress) (3 ค่า)

$$\sigma_n = \frac{\text{น้ำหนักกด (กิโลกรัม)}}{\text{พื้นที่หน้าตัด shear box (ซม}^2\text{)}}, \text{ ksc}$$

3) แรงเฉือน (Shear Stress, τ) (3 ค่า)

$$\tau = \frac{\text{แรงต้านตัวอย่างดิน (กิโลกรัม)}}{\text{พื้นที่หน้าตัด shear box (ซม}^2\text{)}}, \text{ ksc}$$

เมื่อ R = proving ring reading

K = proving ring
constant

A = shearing area

4) เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง τ กับค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบ และหาค่า τ_{\max} จากจุด peak ของกราฟ

5) เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งกับการเคลื่อนตัวในแนวราบ

6) เขียน Mohr's Diagram ระหว่าง σ และ τ_{\max} แล้วลากเส้นผ่านจุดเป็นเส้น Strength Envelope และหาค่า c และ ϕ จากกราฟ ($\tau = c + \sigma \tan \phi$)



รูป 3.5 การทดสอบDirect Shearเพื่อหามุมเสียดทานภายใน

3.2.4 การวัดมุมจากการปล่อยทรายให้ตกลงอย่างอิสระตามแรงโน้มถ่วง ^[12]

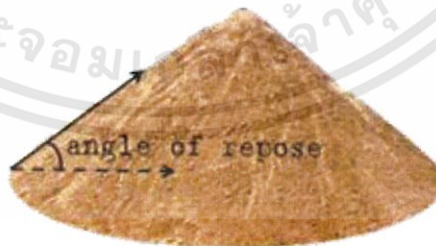
ในการหาค่ามุมเสียดทานภายใน(internal friction angle, ϕ)ของดินทรายที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวภายใน(Cohesion) โดยใช้ทฤษฎี Slope Stability สามารถทำการหามุมเสียดทานภายในได้โดยวิธีกองทรายให้เกิดการไหลลงอย่างอิสระตามแรงโน้มถ่วงได้

อุปกรณ์

- 1) ตัวอย่างดิน
- 2) ไม้วัดมุม

วิธีทำการทดลอง

นำตัวอย่างดินทรายมาทำการโรยให้เป็นกอง โดยพยายามโรยให้กองทรายสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เมื่อสังเกตว่าทรายที่โรยไปเกิดการไหลลงอย่างอิสระแล้ว ให้วัดมุมที่กองทรายทำกับมุมราบ ดังรูป



รูป 3.6 การวัดมุมจากการโรยทรายให้ตกอย่างอิสระ

จากสมการ Slope stability ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธีลาดอนันต์ (Infinite Slope) ^[14]

$$F.S. = \frac{cL + w \cos \beta \cdot \tan \phi}{w \sin \beta}$$

โดย c คือ ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (Cohesion)

L คือ ความยาวที่เกิดทางเฉือนพัง

w คือ น้ำหนักของมวลที่พังลง

β คือ มุมของลาดความชัน

ϕ คือ มุมเสียดทานภายในของดิน

เมื่อพิจารณากรณีของทราย ที่ c เท่ากับ 0 และเป็นการตกอย่างอิสระ ค่า F.S. จึงเป็น 1

$$1 = \frac{w \cos \beta \cdot \tan \phi}{w \sin \beta}$$

$$1 = \frac{\tan \phi}{\tan \beta}$$

$$\tan \beta = \tan \phi$$

$$\beta = \phi$$

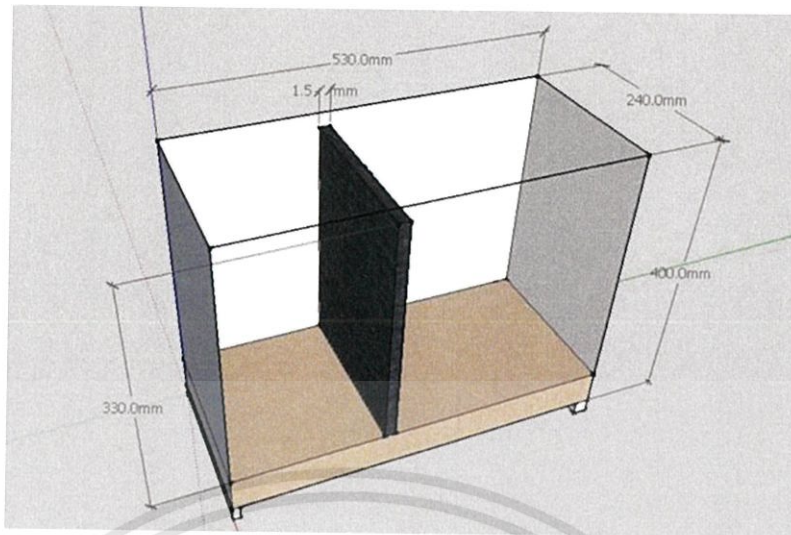
ดังนั้นมุมของลาดความชันของทรายที่ตกอิสระ จะเท่ากับ มุมเสียดทานภายในของทราย

3.3 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

3.3.1 รูปแบบของแบบจำลอง

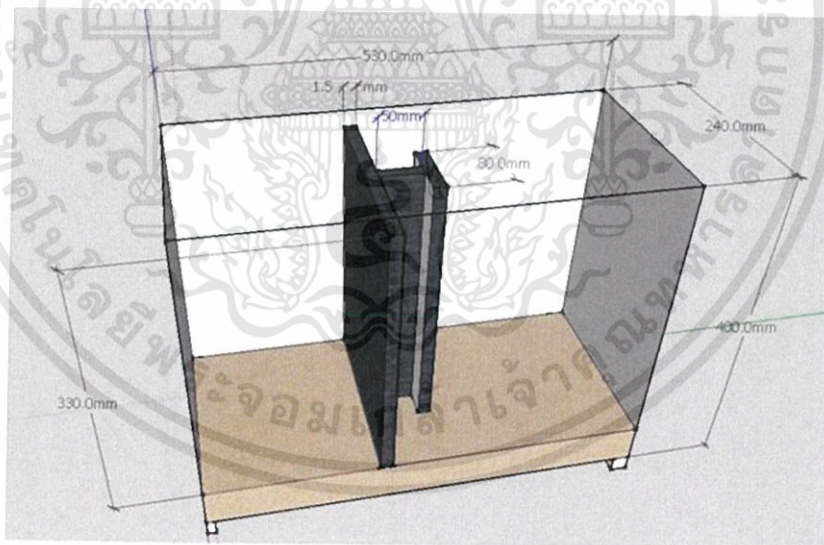
ในการศึกษาครั้งนี้มีอยู่ 3 แบบจำลอง

แบบจำลองที่ 1 กำแพงเข็มพืดแบบแผงเดี่ยว Single wall เป็นการจำลองโครงสร้างกำแพงเข็มพืดเหล็กรูปพรรณแผงเดี่ยวที่วางเรียงต่อกันด้วยการเกี่ยวของข้อต่อ เพื่อใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวกำแพงเข็มพืดกับระยะการขุดที่ระดับชั้นต่างๆ มุมที่เกิดขึ้นจากระนาบการพืดและใช้เป็นตัวเปรียบเทียบข้อมูลกับแบบจำลองอื่นๆ



รูป 3.7 แบบจำลองกำแพงเข็มพืด แบบSingle wall

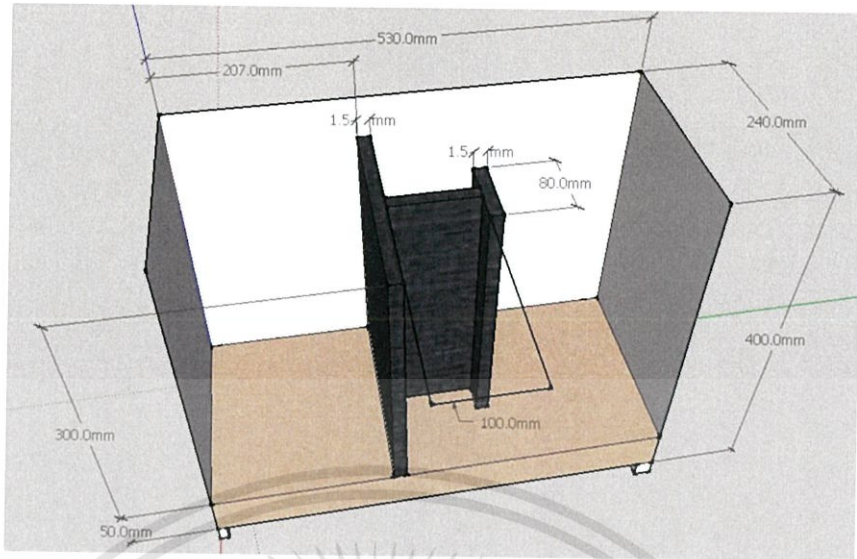
แบบจำลองที่ 2 กำแพงเข็มพืดแบบ T-shape wall เป็นการจำลองกำแพงเข็มพืดที่เสริมครีบทั้งฉากกับแนวเดิมที่มีความยาว 5 เซนติเมตร และมีส่วนปักติดกับครีบบนโดยขนานกับแนวเดิม กว้าง 1 ใน 3 เท่าของความกว้างของแบบจำลอง เพื่อใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวกำแพงเข็มพืดกับระยะการขุดที่ระดับชั้นต่างๆ และมุมที่เกิดขึ้นจากระนาบการพิบัติ เมื่อความแข็งแรงของกำแพงเข็มพืดเพิ่มขึ้น โดยเปรียบเทียบข้อมูลกับแบบจำลองที่ 1



รูป 3.8 แบบจำลองกำแพงเข็มพืด แบบT-shape ที่ความยาวสั้นกว่าระยะระนาบการพิบัติ

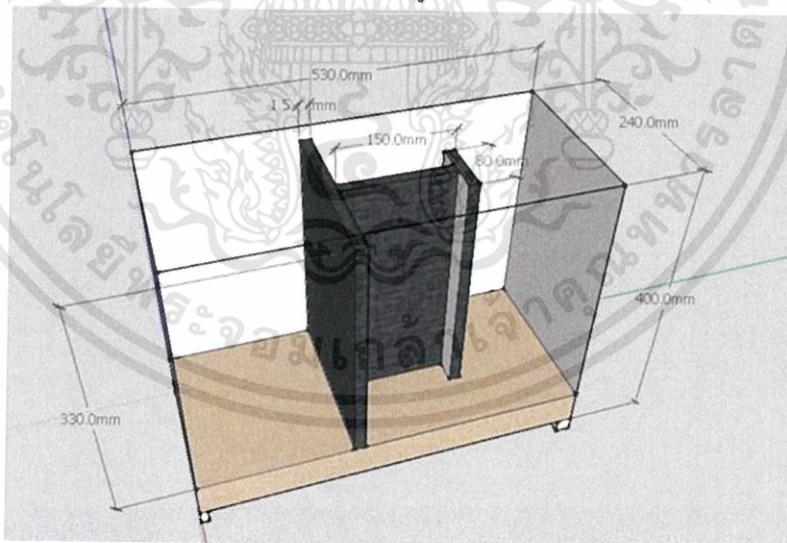
แบบจำลองที่ 3 กำแพงเข็มพืดแบบ T-shape wall เป็นการจำลองกำแพงเข็มพืดที่เสริมครีบทั้งฉากกับแนวเดิมที่มีความยาว 10 เซนติเมตร และมีส่วนปักติดกับครีบบนโดยขนานกับแนวเดิม กว้าง 1 ใน 3 เท่าของความกว้างของแบบจำลอง เพื่อใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวกำแพงเข็มพืดกับระยะการขุดที่ระดับชั้นต่างๆ และมุมที่เกิดขึ้นจากระนาบการพิบัติ เมื่อความแข็งแรงของกำแพงเข็มพืดเพิ่มขึ้น โดยเปรียบเทียบข้อมูลกับแบบจำลองที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.9 แบบจำลองกำแพงเข็มพืด แบบT-shape ที่ความยาวเท่ากับระยะระนาบการพิบัติ

แบบจำลองที่ 4 กำแพงเข็มพืดแบบ T-shape wall เป็นการจำลองกำแพงเข็มพืดที่เสริมครีบทั้งฉากกับแนวเดิมที่มีความยาว 15 เซนติเมตร และมีส่วนปีกติดกับครีบทันโดยขนานกับแนวเดิม กว้าง 1 ใน 3 เท่าของความกว้างของแบบจำลอง เพื่อใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวกำแพงเข็มพืดกับระยะการขูดที่ระดับชั้นต่างๆ และมุมที่เกิดขึ้นจากระนาบการพิบัติ เมื่อความแข็งแรงของกำแพงเข็มพืดเพิ่มขึ้น โดยเปรียบเทียบข้อมูลกับแบบจำลองที่ 1



รูป 3.10 แบบจำลองกำแพงเข็มพืด แบบT-shape ที่ความยาวยาวกว่าระยะระนาบการพิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ขนาดของกำแพงเข็มพืดจำลอง

แบบจำลองที่1

แผ่นอะคริลิกหนา 1.5 มิลลิเมตร ขนาด 30x23.2 เซนติเมตร มีส่วนด้านบน ขนาด 15x18.2 เซนติเมตร อยู่ติดกัน

แบบจำลองที่2

แผ่นอะคริลิกหนา 1.5 มิลลิเมตร ขนาด 30x23.2 เซนติเมตร มีส่วนด้านบน ขนาด 15x18.2 เซนติเมตร อยู่ติดกัน ครีบทั้งฉากขนาด 29x5 เซนติเมตร ส่วนปีกติดกับครีบทั้งขนาด 8 เซนติเมตร ข้อต่อที่ให้ในการต่อแต่ละส่วนเข้าด้วยกัน ใช้แผ่นอะคริลิกหนา 4.0 มิลลิเมตร ขนาด 5x2.5 เซนติเมตร จำนวนจุดต่อละ 3 คู่ และใส่น็อตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร ร้อยต่อกัน

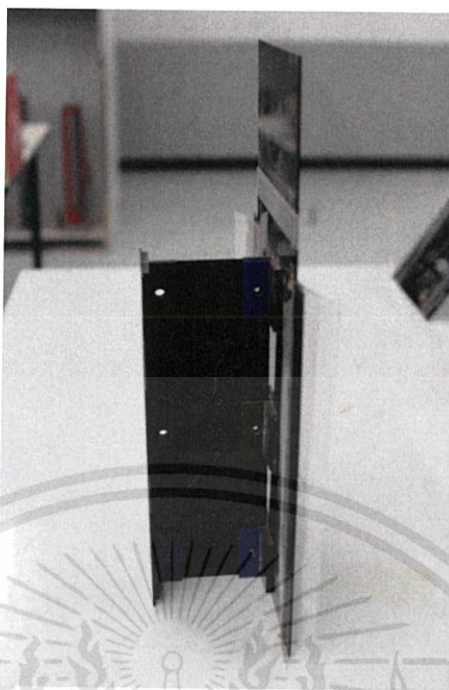


รูป 3.11 แบบจำลองที่2

แบบจำลองที่3

แผ่นอะคริลิกหนา 1.5 มิลลิเมตร ขนาด 30x23.2 เซนติเมตร มีส่วนด้านบน ขนาด 15x18.2 เซนติเมตร อยู่ติดกัน ครีบทั้งฉากขนาด 29x10 เซนติเมตร ส่วนปีกติดกับครีบทั้งขนาด 8 เซนติเมตร ข้อต่อที่ให้ในการต่อแต่ละส่วนเข้าด้วยกัน ใช้แผ่นอะคริลิกหนา 4.0 มิลลิเมตร ขนาด 5x2.5 เซนติเมตร จำนวนจุดต่อละ 3 คู่ และใส่น็อตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร ร้อยต่อกัน

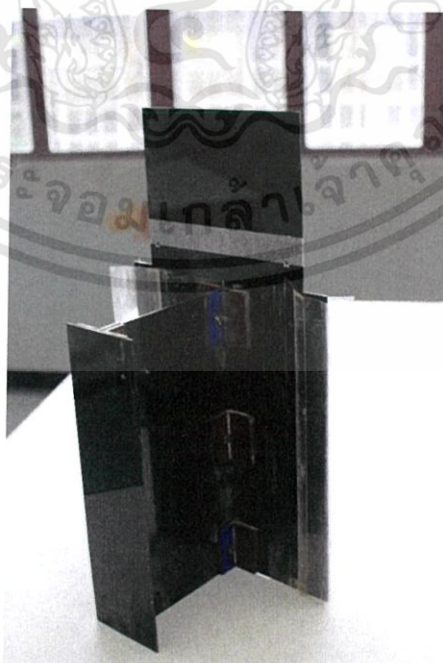
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.12 แบบจำลองที่ 3

แบบจำลองที่ 4

แผ่นอะคริลิกหนา 1.5 มิลลิเมตร ขนาด 30x23.2 เซนติเมตร มีส่วนด้านบน ขนาด 15x18.2 เซนติเมตร อยู่ติดกัน ครีบทึ่ตั้งฉากขนาด 29x15 เซนติเมตร ส่วนปีกติดกับครีบทึ่ขนาด 8 เซนติเมตร ข้อต่อที่ให้การต่อแต่ละส่วนเข้าด้วยกัน ใช้แผ่นอะคริลิกหนา 4.0 มิลลิเมตร ขนาด 5x2.5 เซนติเมตร จำนวนจุดต่อละ 3 คู่ และใส่ร่องขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร ร้อยต่อกัน

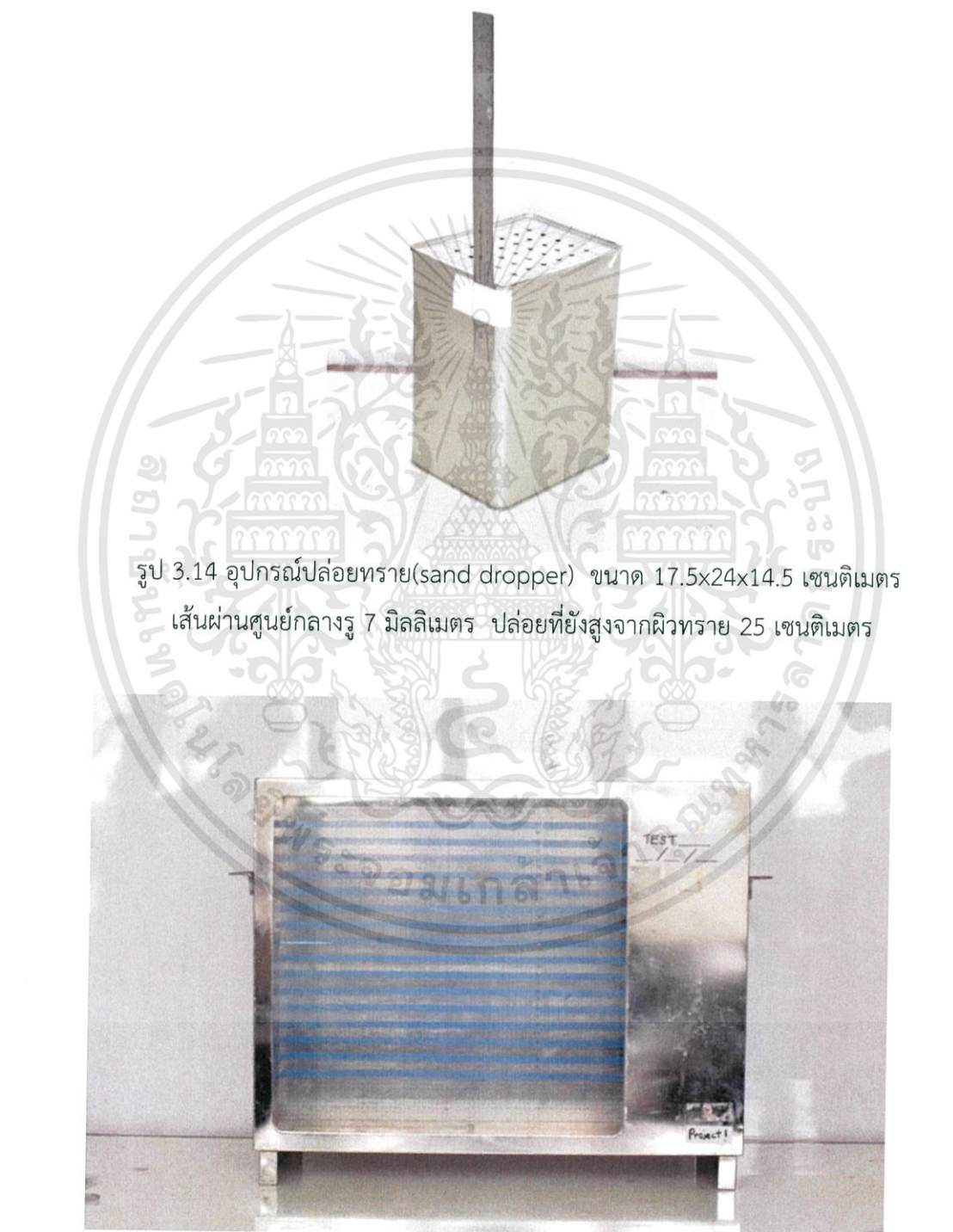


รูป 3.13 แบบจำลองที่ 4

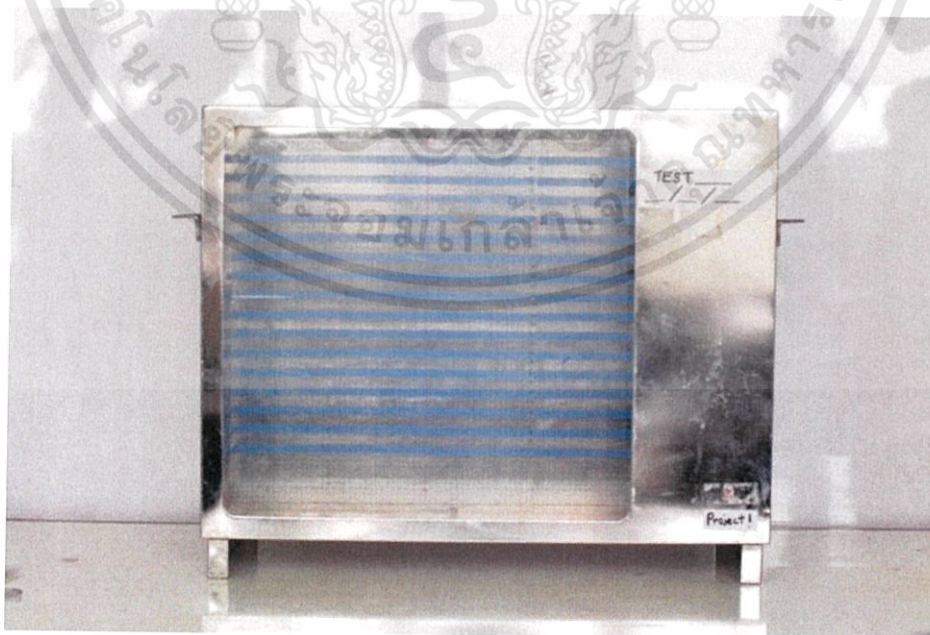
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 ขนาดของแบบจำลองและคุณสมบัติของวัสดุ

เพื่อให้สามารถควบคุมความแน่นของชั้นทรายตัวอย่างได้อย่างสม่ำเสมอในทุกครั้งของการจำลองทดลอง จึงต้องกำหนดวิธีการเตรียมตัวอย่างชั้นทรายด้วยอุปกรณ์ปล่อยทราย(sand dropper) ลักษณะของกล่องจำลองแบบจำลองและวัสดุที่ใช้ในการทดลองดังนี้

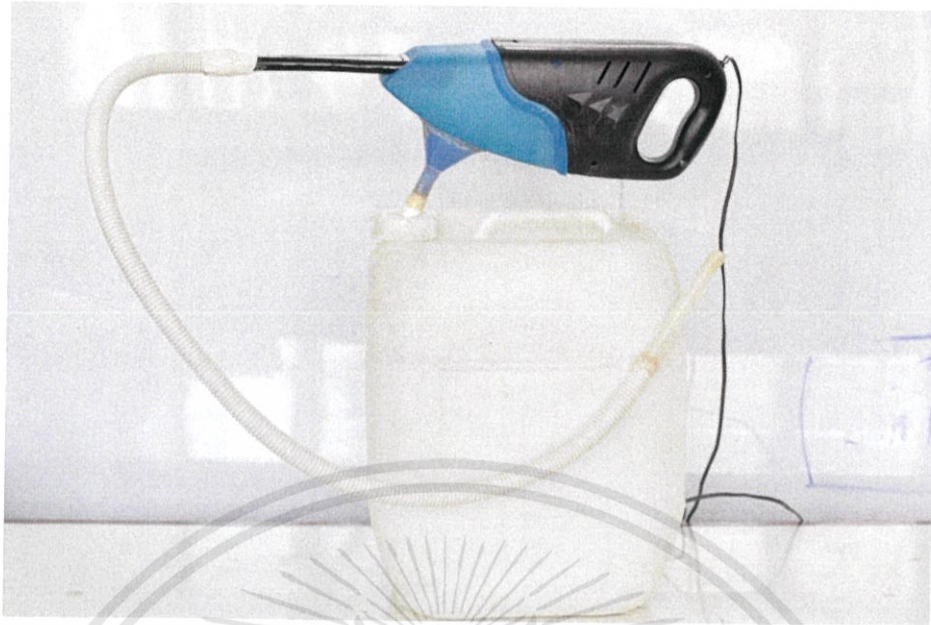


รูป 3.14 อุปกรณ์ปล่อยทราย(sand dropper) ขนาด 17.5x24x14.5 เซนติเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางรู 7 มิลลิเมตร ปล่อยที่ยังสูงจากผิวทราย 25 เซนติเมตร



รูป 3.15 กล่องแบบจำลอง ขนาด 53x24x40 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.16 ชุดอุปกรณ์จำลองการขุด โดยใช้เครื่องดูดฝุ่นดัดแปลง

3.3.4 คุณสมบัติของแผ่นอะคริลิกที่ใช้ในการจำลองกำแพงเข็มพืด

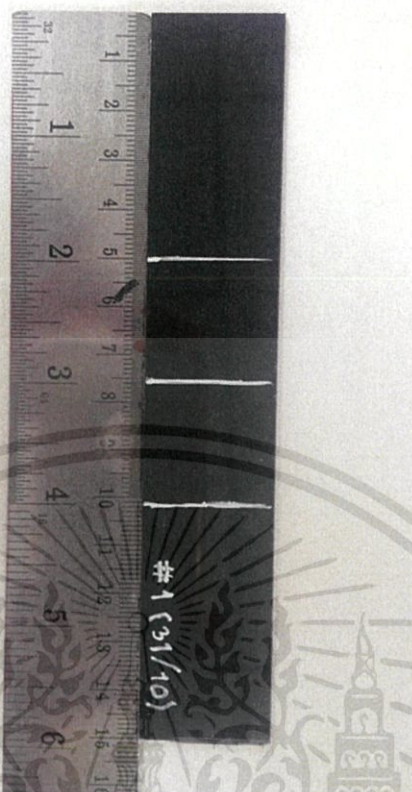
การทดสอบหาค่า Modulus of Elasticity (E) จาก Bending test

- 1) นำแผ่นอะคริลิกขนาด 2.5x15 เซนติเมตร หนา 1.5 มิลลิเมตร มาติดตั้งกับ Proving Ring ที่ระยะ span 10 เซนติเมตร
- 2) ติดตั้ง Dial gauge ให้วัดระยะการโก่งตัวของแผ่นอะคริลิกตรงกลาง
- 3) เริ่มกดแผ่นที่ตรงกลาง บันทึกค่าจาก Proving Ring และ Dial gauge
- 4) นำค่าที่ได้จาก Proving Ring เป็นหน่วยกิโลกรัม
- 5) หาค่า Modulus of Elasticity จากสูตรระยะการโก่งตัวมากที่สุด ที่ตรงกลางคานแบบ Simple Beam

$$\delta_{max} = \frac{PL^3}{48EI}, E = \frac{PL^3}{48\delta_{max}I}$$

- 6) หาค่า E เฉลี่ย ที่ได้ในแต่ละระยะการโก่งตัวและแรงที่กดที่แตกต่างกัน

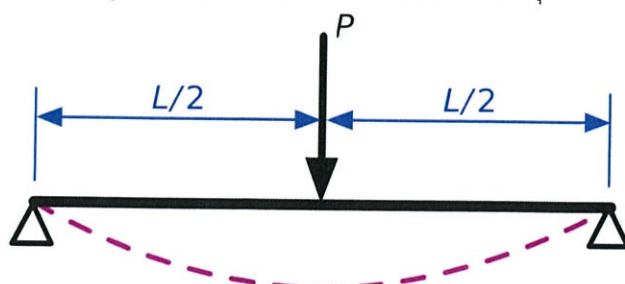
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.17 แผ่นอะคริลิกที่ใส่ทดสอบ



รูป 3.18 การทดสอบการโก่งตัวของวัสดุ



รูป 3.19 ระยะการโก่งตัวกดแรงบนแผ่นอะคริลิกที่ทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในแบบจำลอง

- 1) ดินตัวอย่าง
- 2) กำแพงเข็มพืดจำลอง
- 3) อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัว

3.1.) กล้องถ่ายรูป

3.2.) โปรแกรม DxO Optics Pro 10 สำหรับการปรับแก้ Distortion จากความโค้งงอของเลนส์

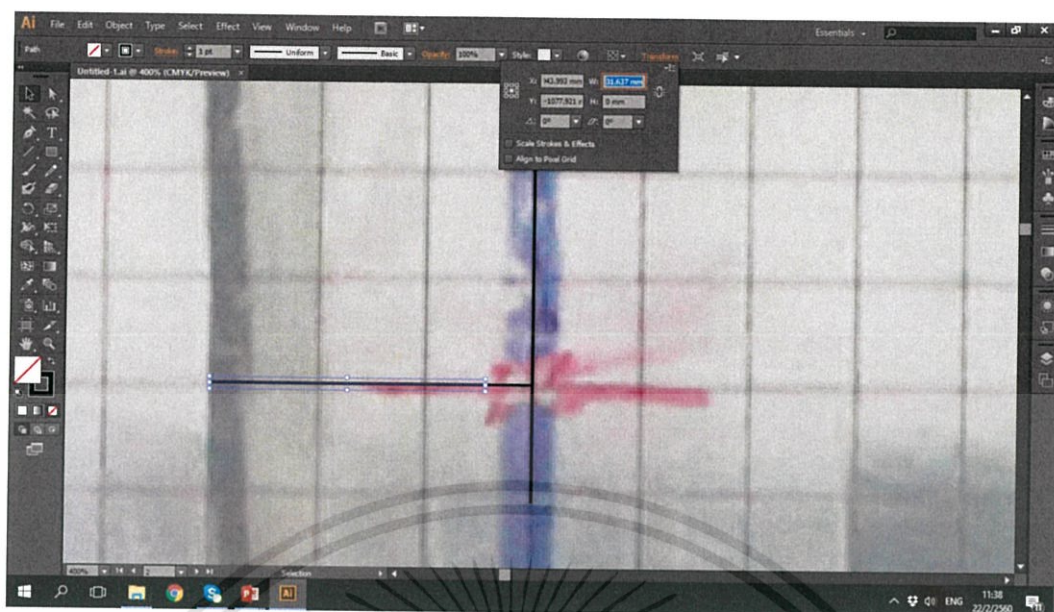
3.3.) โปรแกรม Adobe illustrator CS6 สำหรับการวัดระยะจากภาพ และ Calibrate scale ของภาพ

- 4) อุปกรณ์ปล่อยทราย (sand dropper)
- 5) ผงทรายสีใช้โรยเพื่อสังเกตระนาบการพิบัติ
- 6) ไม้บรรทัด และอุปกรณ์วัดมุม
- 7) ชุดอุปกรณ์จำลองการขุดดิน
- 8) แผ่นพลาสติกใส ใช้ติดด้านข้างเพื่อป้องกันดินตัวอย่างรั่ว และลดแรงเสียดทาน
- 9) กล่องแบบจำลอง ขนาด 24x53x40 เซนติเมตร
- 10) ไม้บรรทัด และวงกลมวัดมุม

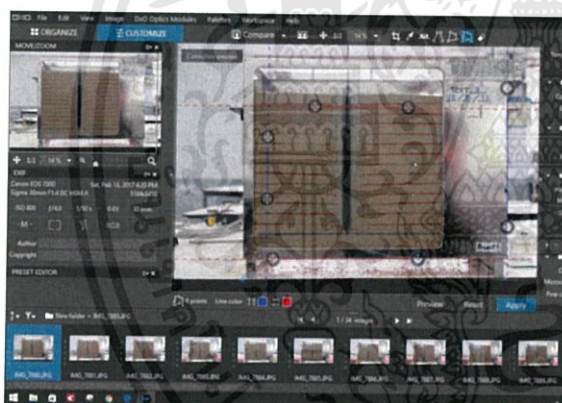


รูป 3.20 ทรายตัวอย่าง และ ทรายสี

รูป 3.21 อุปกรณ์การวัดระยะ และวัดมุม



รูป 3.22 โปรแกรม Adobe Illustrator CS6 สำหรับการวัดระยะจากภาพ
และ Calibrate scale ของภาพ



รูป 3.23 โปรแกรม DxO Optics Pro 10



รูป 3.24 แผ่นอะคริลิก

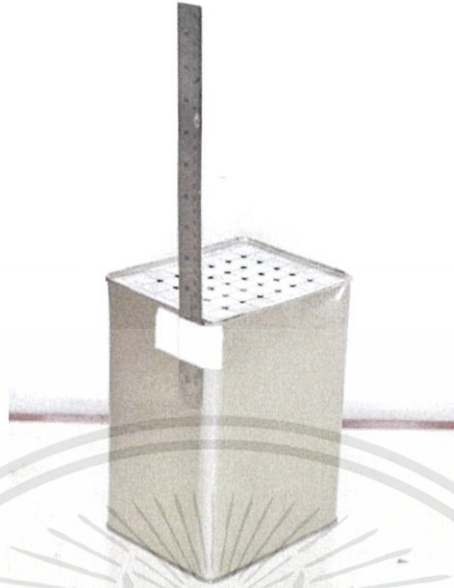


รูป 3.25 อุปกรณ์จำลองการขุดดิน



รูป 3.26 กล่องแบบจำลองสแตนเลส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

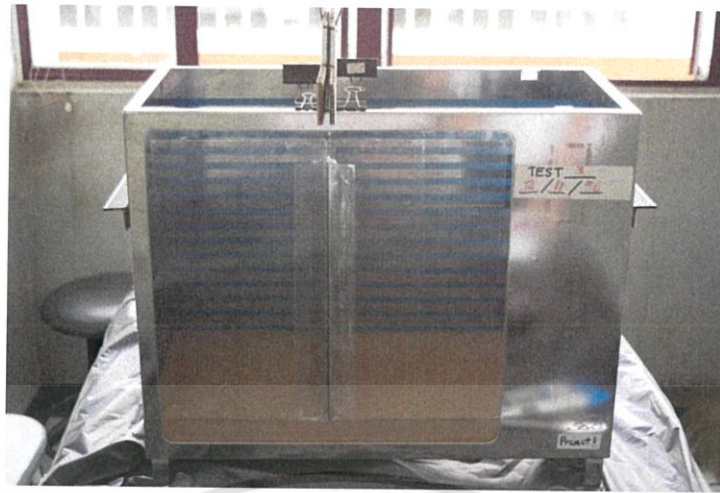


รูป 3.27 อุปกรณ์ปล่อยทราย

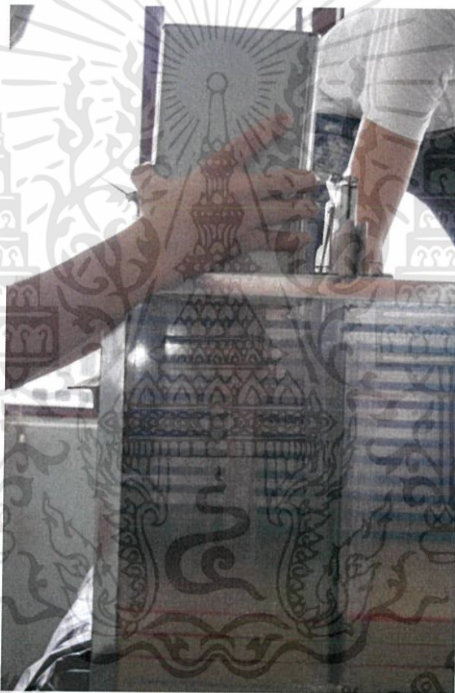
3.4.2 วิธีเตรียมและติดตั้งอุปกรณ์การทดลองในแบบจำลอง

- 1) คำนวณค่า parameter ของทราย เช่น มุมเสียดทานภายใน ความถ่วงจำเพาะ แรงยึดเหนี่ยว ระหว่างเม็ดดิน(ทราย $c=0$) และหาระยะของระนาบการพังทลายจากแรงดันดินแบบ active และ passive ที่เหมาะสมกับแบบจำลองโครงสร้างพร้อมสมมติระยะฝังที่ต้องการศึกษา
- 2) เตรียมแบบจำลอง พร้อมอุปกรณ์ปล่อยทราย
- 3) เตรียมชุดอุปกรณ์จำลองการขุดดิน
- 4) เตรียมดินทรายตัวอย่างโดยการนำไปอบเพื่อกำจัดความชื้น
- 5) นำทรายไปจำแนกขนาดให้อยู่ระหว่างตะแกรงเบอร์ 10 ถึงเบอร์ 50
- 6) เททรายลงในแบบจำลองให้ได้ระดับดินตามที่กำหนดไว้
- 7) นำกำแพงเข็มพีตจำลองแบบที่กำหนด ติดตั้งปรับให้ได้ระดับในแนวตั้ง
- 8) ปล่อยทรายโดยกำหนดระยะความสูง 25 เซนติเมตรเหนือผิวทราย ให้ตกอย่างอิสระลงในแบบจำลองเป็นชั้น โดยใช้ทรายสีแสดงถึงระดับ ทุกๆ 2 เซนติเมตร จนได้ระดับทรายที่ 28 เซนติเมตร
- 9) ติดตั้งกล้องให้ได้ระดับและต้องเป็นระนาบเดียวกับแบบจำลอง เพื่อวัดการเคลื่อนตัวของแบบจำลองเข็มพีต
- 10) บันทึกภาพแรกก่อนการขุดเพื่อเป็นการอ้างอิงค่าศูนย์

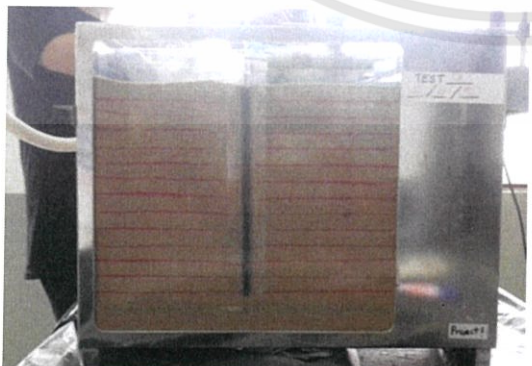
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.28 ติดตั้งแผ่นกำแพงเข็มพืดจำลองบนทรายในระดับที่กำหนด



รูป 3.29 ทางทรายให้ตกอย่างอิสระ (Sand Raining)

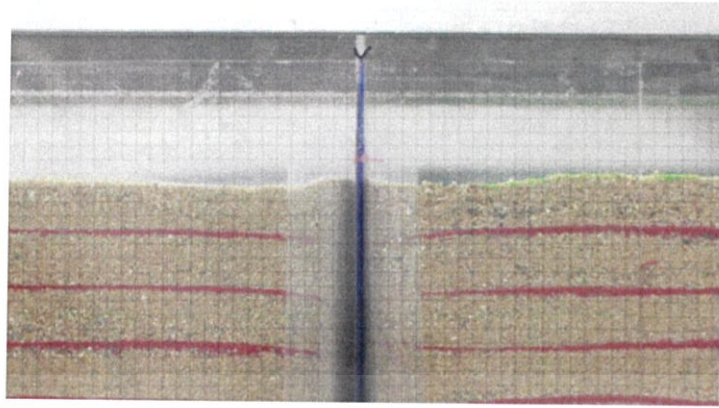


รูป 3.30 ทาทรายให้เต็มทั้งสองฝั่งของเข็มพืด



รูป 3.31 ติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.32 ระบุตำแหน่งเริ่มต้นของเข็มพีต

3.4.3 วิธีทดลองแบบจำลองเข็มพีต

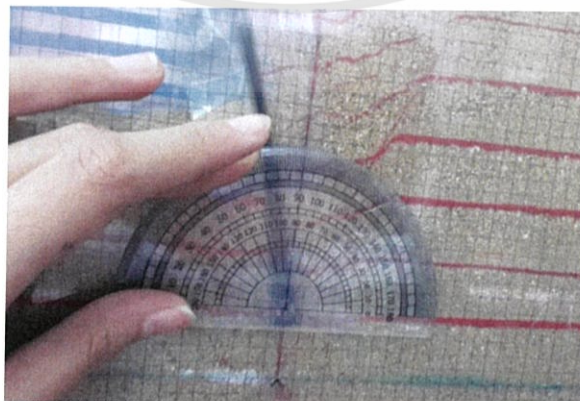
- 1) จำลองการขุดดินด้วยด้วยการดูทรายในแบบจำลอง
- 2) บันทึกภาพผลการเคลื่อนตัวของก้ำแกงเข็มพีตที่ระยะความสูงทุกๆ 1 เซนติเมตร
- 3) ดูทรายจนพบว่าเกิดระนาบการพังที่ชั้นทรายด้านหลังก้ำแกง
- 4) บันทึกค่ามุมการเฉือนพังที่จุดพิบัติและการเคลื่อนตัวสุดท้าย
- 5) ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-5 โดยทำการเปลี่ยนรูปแบบการเรียงตัวที่กำหนด



รูป 3.33 การดูทรายในแบบจำลอง



รูป 3.34 ภาพความสูงของชั้นทรายที่แตกต่าง
กันสองด้าน



รูป 3.35 บันทึกค่ามุมการเฉือนพังที่จุดพิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4 วิธีการอ่านค่าจากภาพโดยการใช้โปรแกรม

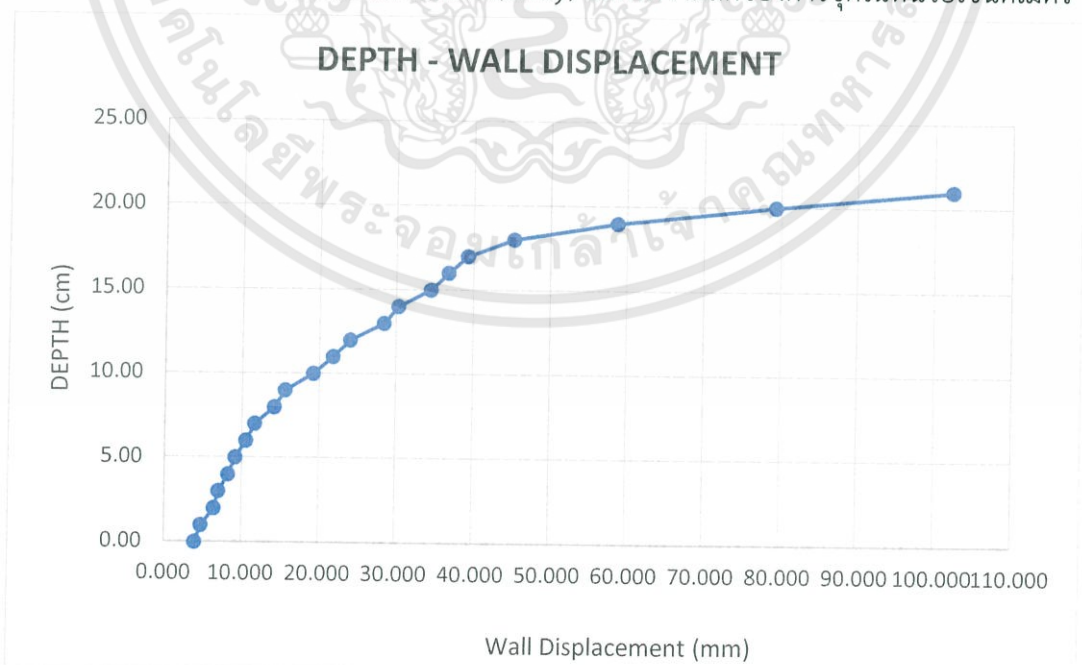
- 1) นำภาพที่ได้จากการบันทึกทุกๆ 1 เซนติเมตร ปรับแก้ความโค้งของภาพเนื่องจากเลนส์ของกล้อง ด้วยโปรแกรม DxO Optics Pro 10
- 2) แทรกภาพในโปรแกรม Adobe illustrator CS6 ทำการวัดระยะไม้บรรทัด 1 มิลลิเมตร เพื่อหาอัตราส่วนของภาพ
- 3) ทำการวัดระยะของภาพ และบันทึกค่า เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์และการเปรียบเทียบข้อมูล

ในทางวิศวกรรมได้กำหนดค่าอัตราส่วนของความปลอดภัย (factor of safety) เพื่อป้องกันความปลอดภัยในการทำงาน (serviceability) รวมทั้งความประหยัด (economic) ในการก่อสร้าง หลังจากทำการเก็บข้อมูลจากแบบจำลอง ผลการทดลองที่ได้คือระยะการเคลื่อนตัว เมื่อมีระยะขุดเพิ่มขึ้น และค่ามุมจากระนาบการพิบัติ เพื่อให้เห็นผลต่างระหว่างรูปแบบการเรียงตัวที่ต่างกัน จึงต้องนำข้อมูลมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบพฤติกรรมของกำแพงเข็มพืด มีดังนี้

3.5.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการขุดดิน กับระยะการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้มีการหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะความลึกของการขุดกับการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด โดยใช้กราฟในการแสดงข้อมูล ตั้งแต่ยังไม่มีการขุดดิน จนถึงความลึกที่กำแพงเข็มพืดเกิดการพิบัติ แกนนอน (แกน x) แสดงข้อมูลการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด ในหน่วยมิลลิเมตร และแกนตั้ง (แกน y) แสดงความลึกของการขุดในหน่วยเซนติเมตร



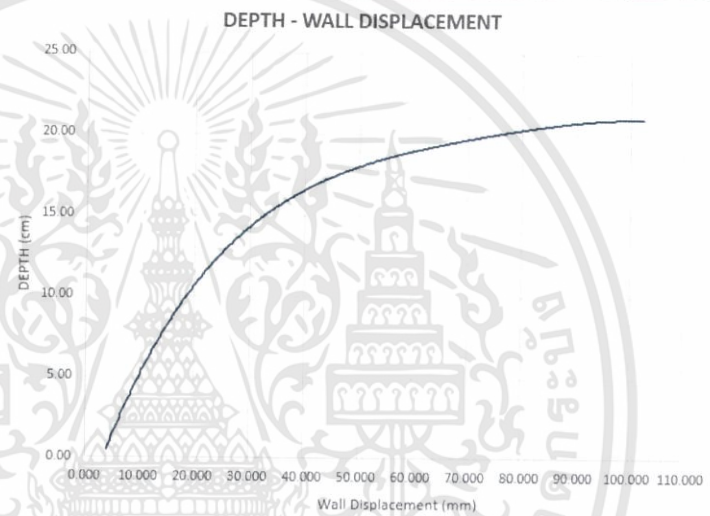
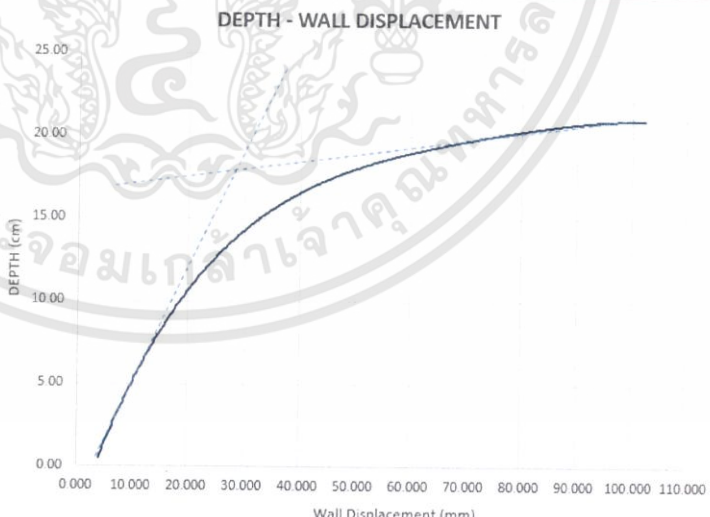
รูป 3.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการขุดดิน กับระยะการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

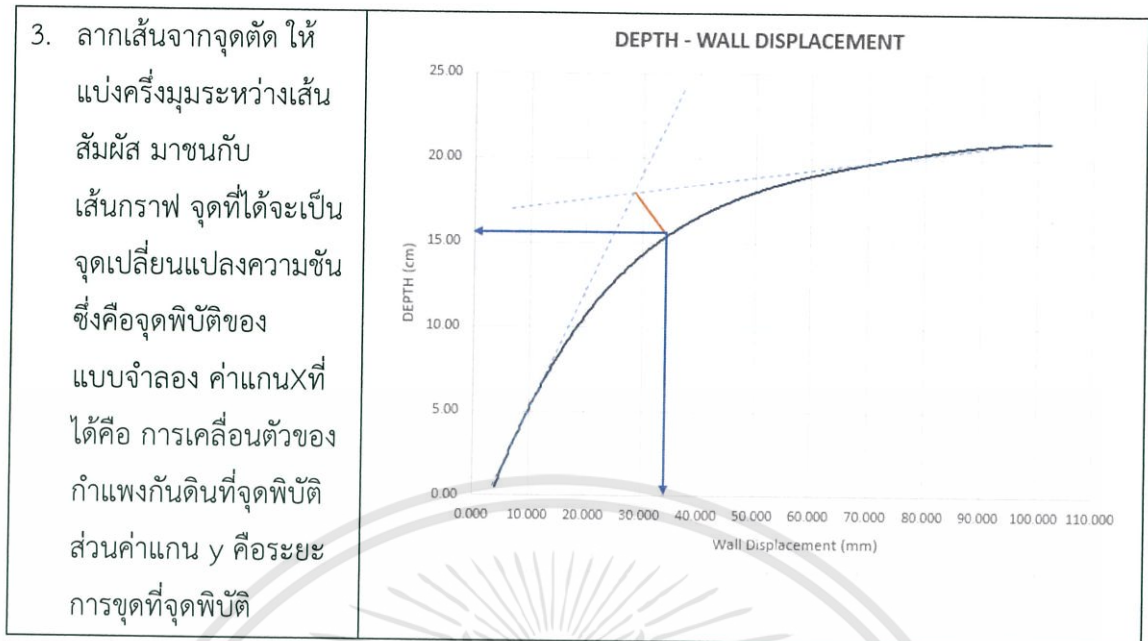
3.5.2 วิธีการหาจุดพิบัติของกำแพงเข็มพืดจากกราฟด้วยวิธี graphical method ของ Arthur Casagrande , 1936

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการขุดดิน กับระยะการเคลื่อนตัวของ กำแพงเข็มพืด หาจุดพิบัติของกำแพงเข็มพืด โดยใช้หลักการเดียวกันกับการหาจุด preconsolidation pressure บนกราฟ Void ratio และ Effective stress (KPa) ซึ่งเป็น จุดที่เปลี่ยนแปลงความชันของกราฟ มีวิธีดังนี้

ตารางที่ 3.1 การหาจุดพิบัติของกำแพงเข็มพืด โดย Arthur Casagrande's graphical method, 1936^[13]

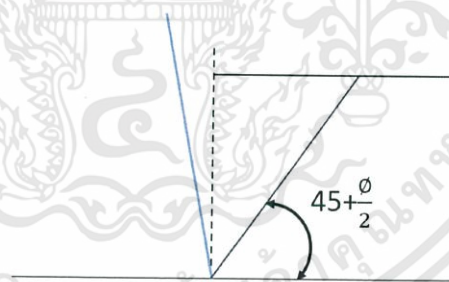
<p>1. นำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการขุดดิน กับระยะการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด</p>	
<p>2. ลากเส้นสัมผัสกราฟที่ความชันช่วงแรกให้ตัดกับความชันของกราฟช่วงที่สอง</p>	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



3.5.3 เปรียบเทียบมุมที่เกิดขึ้นที่จุดพิบัติกับมุมตามทฤษฎี

การเปรียบเทียบมุมที่เกิดจากกระบวนการพิบัติ ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้ทฤษฎีของ Rankine มุมระนาบการพิบัติที่ฝั่ง Active ดังรูป 3.37 ซึ่งมุมระนาบการพิบัติด้าน passive ไม่สามารถทำการวัดได้ เนื่องจากทำการขุดอย่างต่อเนื่อง โดยแสดงการเปรียบเทียบในรูปแบบตาราง ของทั้ง 4 แบบจำลอง ที่ระดับความลึกในการขุดที่ทำให้เกิดระนาบพังชัดเจน



รูป 3.37 มุมระนาบการพิบัติด้าน Active

3.5.4 เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดจำลอง โดยการวิเคราะห์กราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการขุด และ อัตราส่วนของระยะเคลื่อนของกำแพง ก้นดินต่อความลึกของการขุด

เพื่อการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดจำลอง ได้มีการหาความสัมพันธ์ ระหว่างความลึกของการขุด และ อัตราส่วนของระยะเคลื่อนของกำแพงก้นดินต่อความลึก ของการขุด โดยใช้กราฟในการแสดงข้อมูล ตั้งแต่ยังไม่มีการขุดดิน จนถึงความลึกที่กำแพง เข็มพืดเกิดการพิบัติ แกนนอน(แกนx) แสดงข้อมูลความลึกของการขุด ในหน่วยเซนติเมตร และแกนตั้ง(แกนy) แสดงอัตราส่วนของระยะเคลื่อนของกำแพงก้นดินต่อความลึกของการขุด

3.5.5 เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดจำลองเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่า โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ (Area Moment of Inertia)

งานวิจัยนี้ได้มีการเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด เมื่อมีการเพิ่มความ แข็งแรงของกำแพงด้วยการเพิ่มครีรูปร่าง T-shape ในระยะต่างๆ เป็นผลให้ค่าโมเมนต์ ความเฉื่อยของพื้นที่ (Area Moment of Inertia) ของหน้าตัดที่รับโมเมนต์เพิ่มสูงขึ้น ซึ่ง เป็นหลักการ ในการเปรียบเทียบจะใช้กราฟระหว่างความลึกของการขุดดิน กับระยะการ เคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด ที่เฉลี่ยจากการทดลองที่รูปแบบการเรียงตัวเหมือนกัน ทั้ง 2 ครั้ง ดังนั้น การเปรียบเทียบนี้จะมีกราฟที่มีเส้นข้อมูล 4 เส้น จากแบบจำลองที่ 1 แบบจำลอง ที่ 2 แบบจำลองที่ 3 และ แบบจำลองที่ 4

เปรียบเทียบความแตกต่างจุดพิบัติจากกราฟแบบจำลองทั้ง 4 ที่มีระยะความลึกที่ขุด และการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด พร้อมทั้งคำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ (Area Moment of Inertia) ของหน้าตัดแต่ละรูปแบบ

บทที่ 4

ผลการศึกษา

4.1 บทนำ

ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินด้วยการศึกษาแบบจำลองกำแพงกันดินรูปแบบ T-shape ซึ่งเป็นการปรับปรุงรูปแบบเข็มพืดแบบเดิมด้วยการเพิ่มความยาวของแกนแบบจำลอง (web) เป็นการเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างกันดิน โดยใช้แบบจำลอง T-shape ที่ระยะความยาวแกน T 3 ระยะคือ 5,10,15 เซนติเมตร ทำการศึกษาโดยการเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวนี้กับแบบจำลอง single wall เพื่อหาประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัว การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง และการพิบัติของโครงสร้างกันดินซึ่งมีผลการศึกษาดังนี้

4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของทรายที่ใช้ในการศึกษา

4.2.1 ขนาดคละและชนิดของเม็ดดิน (grain size and soil classification)

จากผลการทดสอบพบว่า ดินมีคุณสมบัติเป็น SP

ตาราง 4.1 ข้อมูลขนาดคละและชนิดของเม็ดดิน

Sieves NO.	Sieve Opening ,mm	Weight of Sieve ,g	Weight of Sieve + Soil ,g	Weight of Soil Retained ,g	Cumulative Retained ,g	Cumulative Retained ,%	percent Finer ,%
3/8"	9.50	528.38	528.38	0.00	0	0.000	100.000
4	4.75	471.76	471.76	0.00	0	0.000	100.000
10	2.00	689.16	698.70	9.54	9.54	0.954	99.046
20	0.85	597.98	864.67	266.69	276.23	27.622	72.378
30	0.60	460.63	586.09	125.46	401.69	40.168	59.832
40	0.43	573.28	910.72	337.44	739.13	73.912	26.088
50	0.30	557.19	730.32	173.13	912.26	91.224	8.776
100	0.15	515.37	595.00	79.63	991.89	99.187	0.813
200	0.08	515.85	521.32	5.47	997.36	99.734	0.266
Pan	0.00	357.00	359.02	2.02	999.38	99.936	0.064

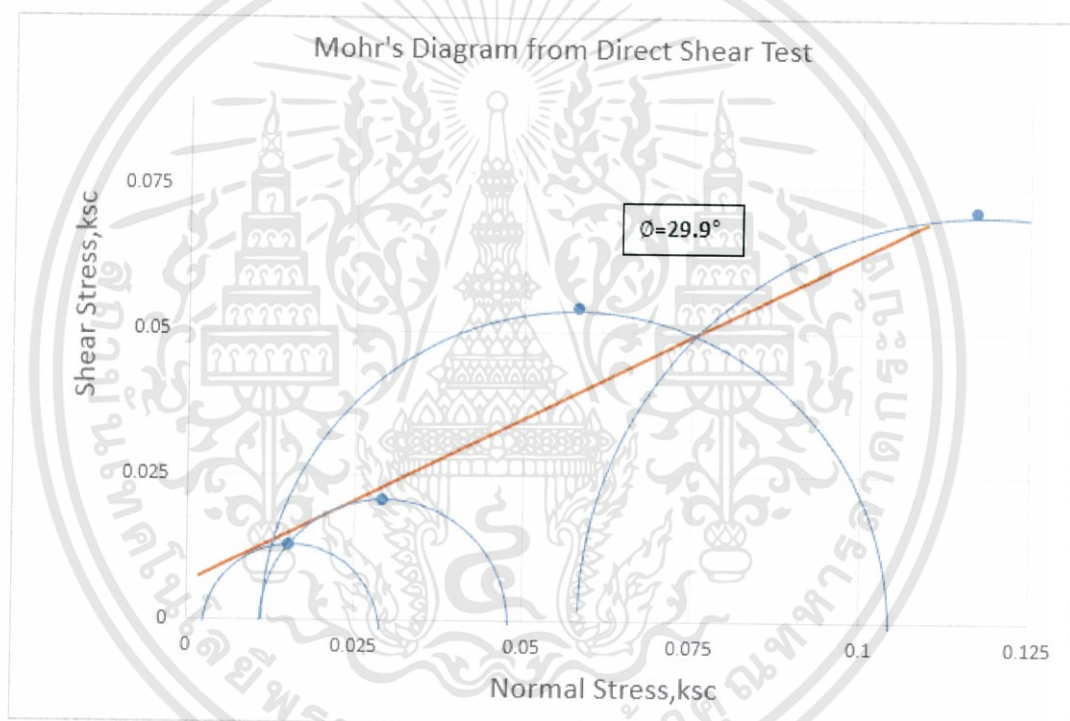
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 มุมเสียดทานภายใน (internal friction angle)

จากผลการทดสอบ Direct shear พบว่าทรายมีค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ) = 29.9°

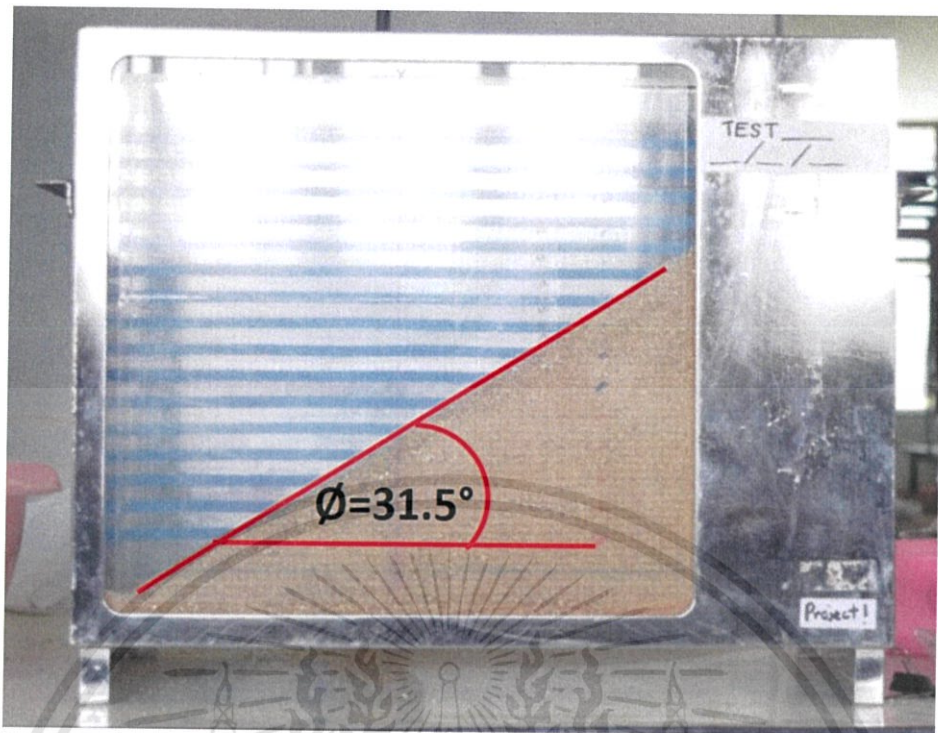
ตาราง 4.2 ผลการทดสอบ Direct shear

TEST NO.	Normal Stress (ksc)	Max. Shearing stress (ksc)
1	0.015	0.013
2	0.029	0.021
3	0.058	0.054
4	0.117	0.071



รูป 4.1 กราฟ Mohr's Diagram จากผลการทดสอบ Direct Shear

จากผลการปล่อยทรายลงอย่างอิสระโดยใช้ทฤษฎี Limit Equilibrium ทำการศึกษา ความมั่นคงของลาดทรายที่กองอิสระ พบว่าได้มุมเสียดทานภายใน (ϕ) = 31.5°



รูป 4.2 แสดงการตกลงอย่างอิสระของทรายตัวอย่าง

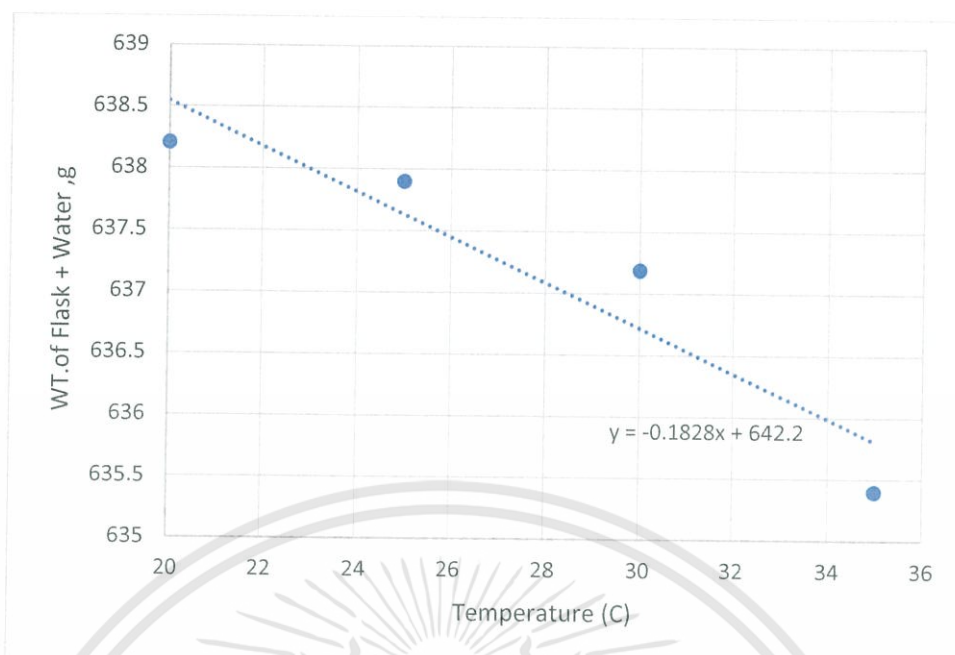
4.2.3 ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)

จากผลการทดลองตัวอย่างทรายมีข้อมูลดังนี้

ตาราง 4.3 ข้อมูล Calibration of Pycnometer

Calibration of Pycnometer	
Temperature (Degree C)	FLASK + WATER (g)
35	635.4
30	637.19
25	637.9
20	638.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.3 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ กับ น้ำหนักรวมระหว่างแก้วกับน้ำ

ตาราง 4.4 ข้อมูลความถ่วงจำเพาะของทราย

Sample NO.	1	1
Soil description	sand	sand
Trial NO.	1	2
1. Temperature °C	29.5	29.5
2. Flask + water ,g	636.8074	636.8074
3. Flask + water + soil ,g	760.22	760.32
4. Container NO.	1	2
5. Dry soil (A) ,g	199.36	199.41
6. Saturated Surface Dry soil (B) ,g	200	200.07
7. G.S.	2.603	2.605
Average G.S.	2.604	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดสอบเพื่อหาค่า Elastic modulus ของกำแพงตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา
ทำการทดลองโดยการกดน้ำหนักลงตรงกลางบนแผ่นอะคริลิกที่เป็นวัสดุที่ใช้ทำกำแพงกันดินจำลอง
โดยบันทึกระยะการโก่งตัวของแผ่นอะคริลิก และแรงจาก Proving Ring ได้ผลดังนี้

ตาราง 4.5 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณเพื่อหาค่า Elastic modulus

Proving Ring	Dial gauge	δ (mm)	load(P)	E(kg/m ²)	E(kg/cm ²)
1	90	0.9	0.3258	1072592593	107259.26
2	120	1.2	0.3911	965679012.3	96567.90
3	163	1.63	0.4564	829629629.6	82962.96
4	209	2.09	0.5217	739606592.2	73960.66
5	268	2.68	0.587	648977335.5	64897.73
6	332	3.32	0.6523	582150825.5	58215.08
7	395	3.95	0.7176	538284106.9	53828.41
8	456	4.56	0.7829	508706952.6	50870.70
9	504	5.04	0.8482	498647854.2	49864.79
10	558	5.58	0.9135	485065710.9	48506.57
11	607	6.07	0.9788	477783879.4	47778.39
12	666	6.66	1.0441	464508953.4	46450.90
13	720	7.2	1.1094	456543209.9	45654.32
14	792	7.92	1.1747	439468761.7	43946.88
15	905	9.05	1.24	405975035.8	40597.50
16	992	9.92	1.3053	389874552	38987.46
17	1040	10.4	1.3706	390484330.5	39048.43
				average	58199.88

คำนวณหาค่า Elastic modulus โดยใช้สูตร

$$\text{การโก่งตัวของคานปกติ เมื่อมีแรง P กระทำตรงกลาง, } \delta = \frac{PL^3}{48EI}$$

$$\text{เพื่อหา Elastic modulus จะได้ } E = \frac{PL^3}{48\delta I} \text{ โดย ค่า } I \text{ ได้จากสูตร } I = \frac{bh^3}{12}$$

โดย h = 0.0015 เมตร, b=0.025 เมตร, L=0.1 เมตร

$$I = \frac{(0.025)(0.0015)^3}{12} = 7.03 \times 10^{-12} \text{ เมตร}^4$$

จากการคำนวณ ได้ค่า Elastic modulus เท่ากับ 58199.88 กิโลกรัม ต่อ ตารางเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

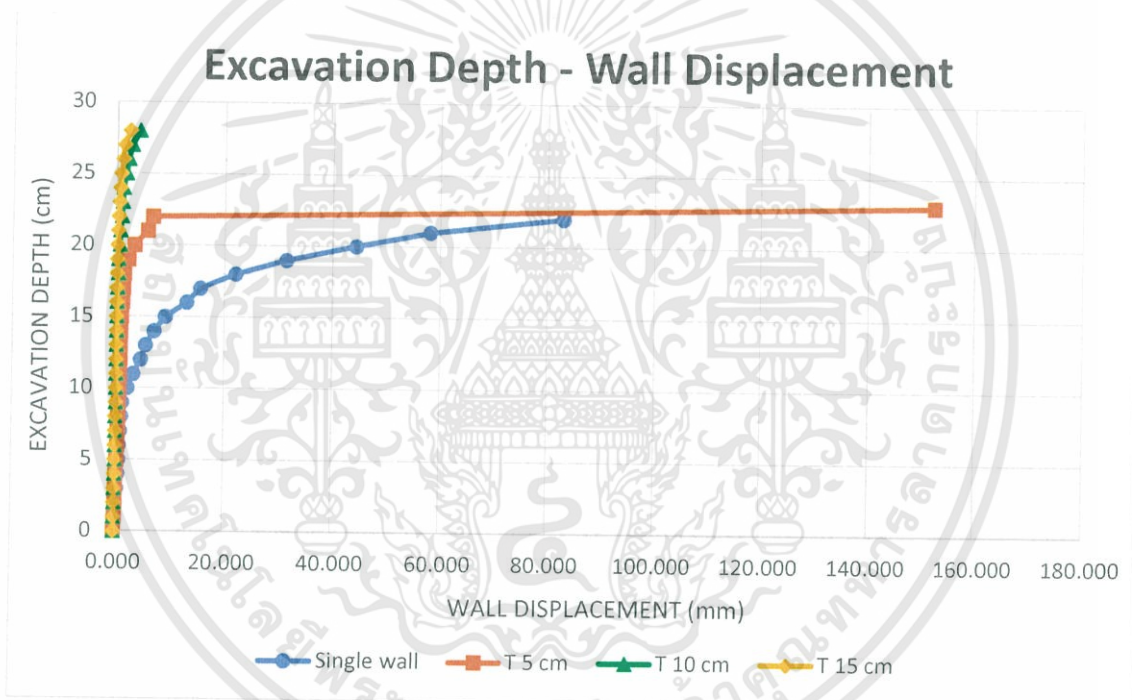
4.4 ผลการศึกษาจากแบบจำลอง

4.4.1 การศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนตัวของกำแพงกั้นดิน

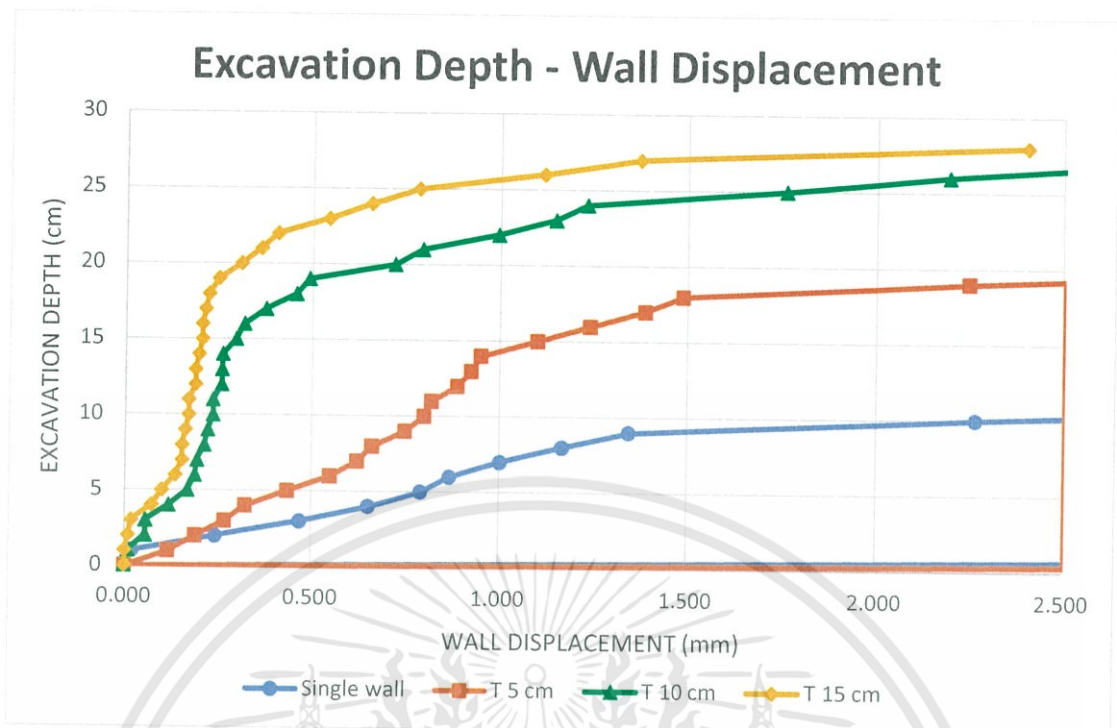
4.4.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกในการขุดและระยะการเคลื่อนตัวของกำแพง

จากผลการทดลองการจำลองการขุดในแบบจำลองทุกๆ 1 เซนติเมตร ทำให้ได้ค่าระยะการเคลื่อนตัวในแนวราบที่ปลายกำแพงเหนือผิวทราย ในการศึกษาครั้งนี้ ได้มีการหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะความลึกของการขุดกับการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด โดยใช้กราฟในการแสดงข้อมูล ตั้งแต่ยังไม่มีการขุดดิน จนถึงความลึกที่กำแพงล้มและไม่สามารถขุดต่อได้

แกนนอน(แกนx) แสดงข้อมูลการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด ในหน่วยมิลลิเมตร และแกนตั้ง(แกนy) แสดงความลึกของการขุดในหน่วยเซนติเมตร



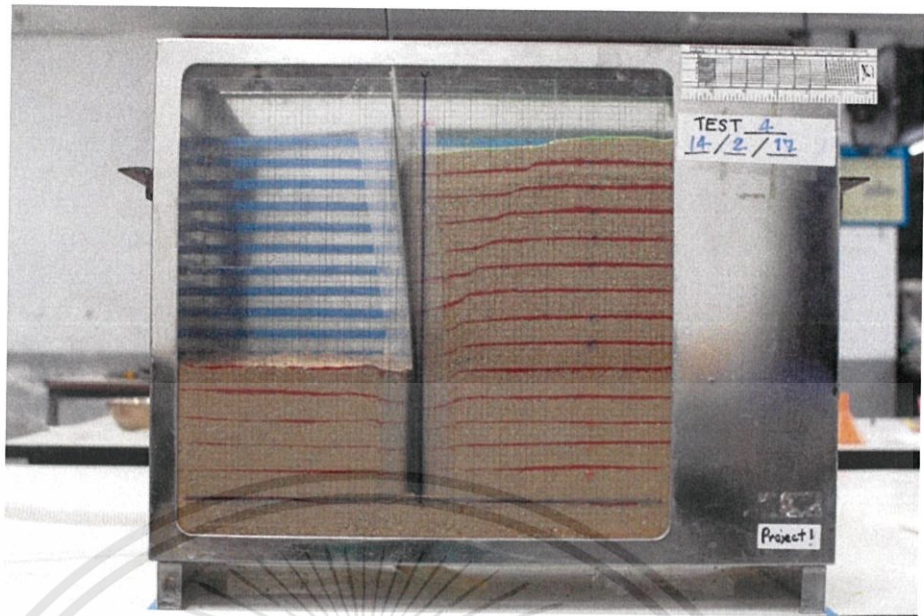
รูป 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการขุดดินกับระยะการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดเฉลี่ยของแบบจำลองทั้ง4แบบ



รูป 4.5 การขยายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการขุดดิน
กับระยะการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดเฉลี่ยของแบบจำลองทั้ง 4 แบบ

จากกราฟในรูป 4.4 และ รูป 4.5 พบว่าการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับความลึกในการขุด ในการช่วงแรกการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และเมื่อผ่านจุดความลึกหนึ่ง การเคลื่อนตัวต่อการขุด 1 เซนติเมตรเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ลักษณะของเส้นกราฟเปลี่ยนความชันไป โดยแต่ละแบบจำลองมีพฤติกรรมที่แตกต่างกัน โดยสามารถอธิบายพฤติกรรมการเคลื่อนตัวได้ดังนี้

แบบจำลองที่ 1 กำแพงเข็มพืดจำลองแบบ Single wall ปรากฏระนาบพิบัติชุดครั้งแรกที่ตำแหน่งห่างจากกำแพงเข็มพืด ณ จุดเริ่มต้น 10 เซนติเมตร ที่ความลึกในการขุด 18 เซนติเมตร การเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นจนทำให้ไม่สามารถขุดต่อไปได้ ที่ความลึกการขุด ที่ 22 เซนติเมตร



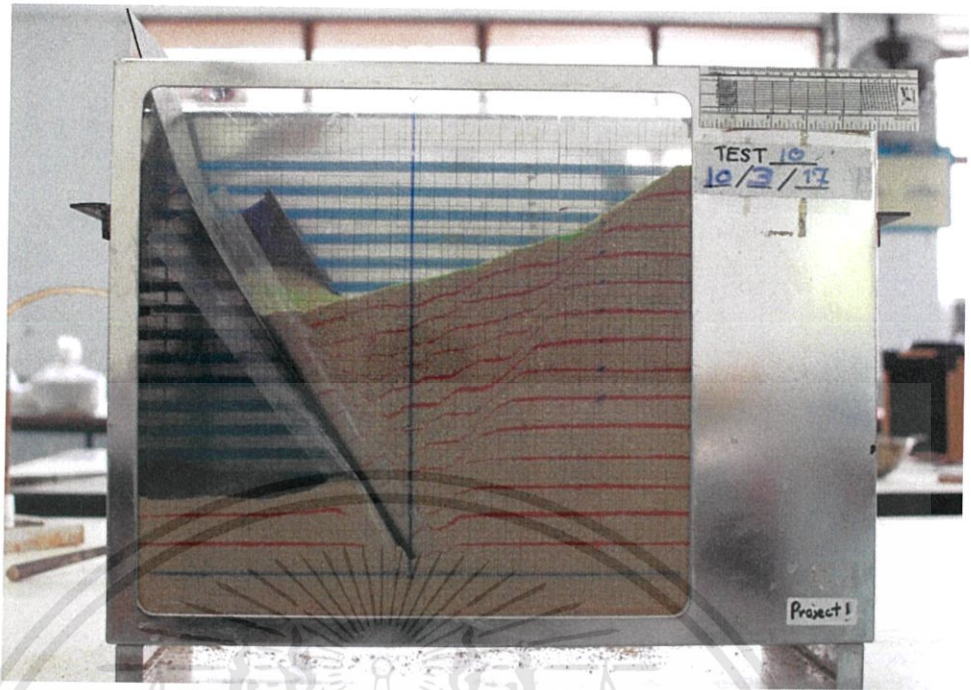
รูป 4.6 แบบจำลองเข็มพืดแบบ Single wall ที่ระยะการขุด 18 เซนติเมตร

แบบจำลองที่ 2 กำแพงเข็มพืดแบบ T-shape เป็นการจำลองกำแพงเข็มพืด ที่ความยาวแกน 5 เซนติเมตร ซึ่งเป็นความยาวสั้นกว่าระยะระนาบการพิบัติ จากแบบจำลองที่ 1 พบว่า การเคลื่อนตัวเกิดขึ้นน้อยกว่า แบบจำลองที่ 1 เทียบกับที่ระยะขุดเดียวกัน เมื่อเริ่มขุดที่ระยะ 22 ถึง 23 เซนติเมตร กำแพงล้มอย่างทันทีทันใด จนไม่สามารถขุดต่อได้



รูป 4.7 แบบจำลองรูปแบบ T-shape ที่แกน 5 เซนติเมตร ที่ระยะการขุด 22 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



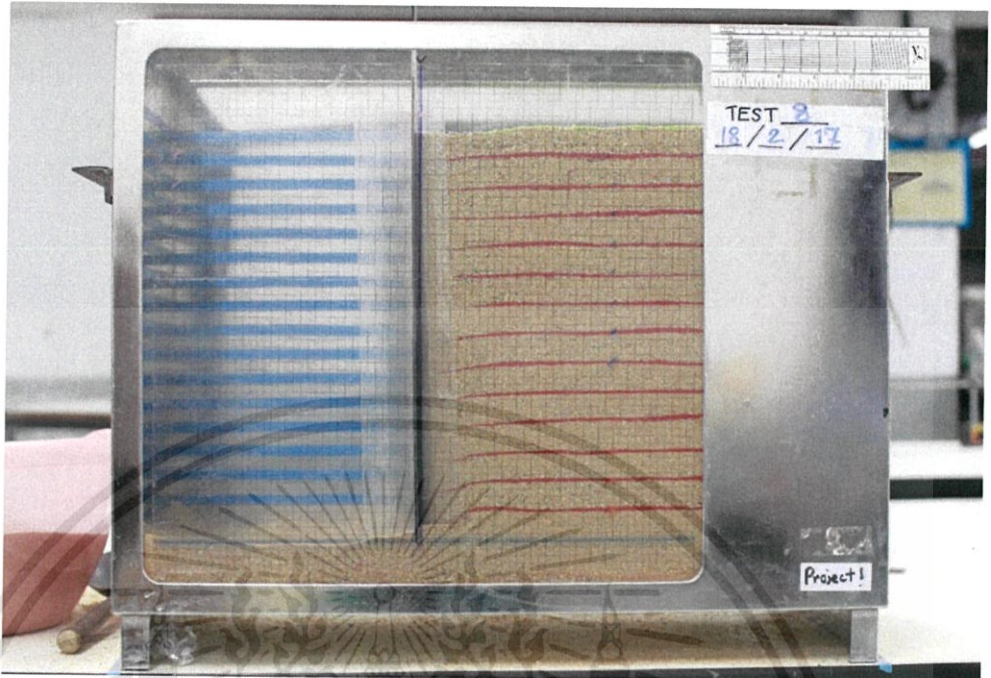
รูป 4.8 การพียงแบบทันทีทันใดของแบบจำลองรูปแบบ T-shape ที่แกน 5 เซนติเมตร
ที่ระยะการขุด 23 เซนติเมตร

แบบจำลองที่ 3 กำแพงเข็มพืดแบบ T-shape เป็นการจำลองกำแพงเข็มพืดที่เสริม
ครีบทั้งฉากกับแนวเดิมที่ความยาวเท่ากับ 10 เซนติเมตร เท่ากับระนาบการพิบัติบนผิวทราย พบว่า
กำแพงเข็มพืดจำลองเคลื่อนตัวน้อยกว่า แบบจำลองที่ 1 และ 2 มาก และสามารถขุดต่อได้จนถึง
ปลายของกำแพงเข็มพืดที่ความลึก 28 เซนติเมตร แบบจำลองนี้ไม่ปรากฏระนาบพิบัติให้เห็น



รูป 4.9 รูปแบบการเรียงตัวของกำแพงเข็มพืดจำลองแบบ T-shape
ที่แกน 10 เซนติเมตรก่อนทำการขุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.10 แบบจำลองรูปแบบ T-shape ที่แกน 10 เซนติเมตร ที่ระยะการชุด 28 เซนติเมตร ณ ปลายสุดของกำแพงเข็มพืดจำลอง

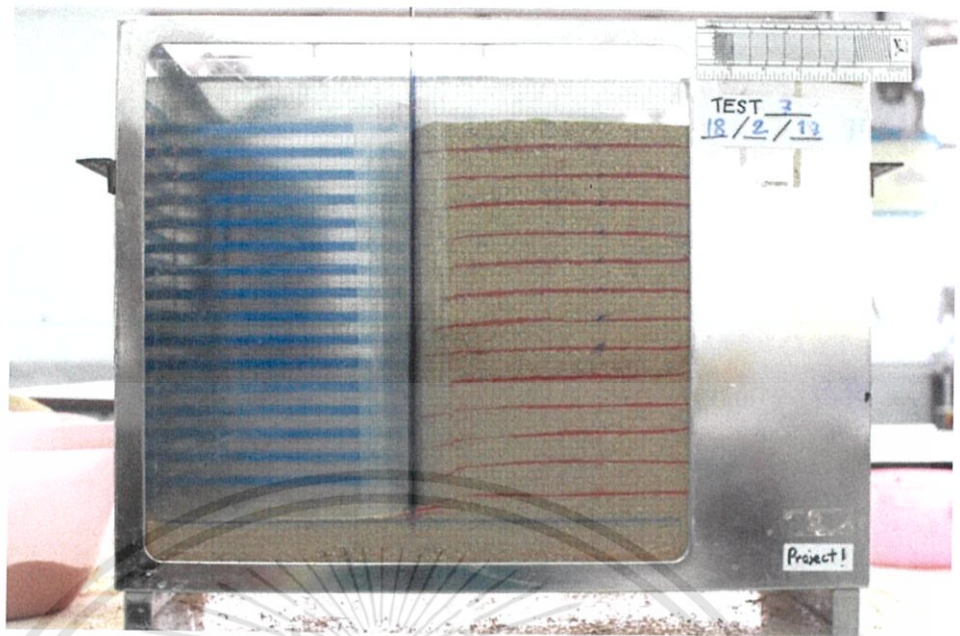
แบบจำลองที่ 4 กำแพงเข็มพืดแบบ T-shape เป็นการจำลองกำแพงเข็มพืดที่เสริมคريب ตั้งฉากกับแนวเดิมที่มีความยาวเป็น 15 เซนติเมตร ยาวกว่าระยะนาบการพิบัติ พบว่าพฤติกรรมค่อนข้างคล้ายกับ แบบจำลองที่ 3 แต่การเคลื่อนตัวเกิดขึ้นน้อยกว่าแบบจำลองที่ 3 และกำแพงไม่ล้มพังเมื่อชุด ที่ระยะปลายสุดของกำแพงเข็มพืด ไม่ปรากฏระยะนาบพิบัติให้เห็น



รูป 4.11 รูปแบบการเรียงตัวของกำแพงเข็มพืดจำลองแบบ T-shape

ที่แกน 15 เซนติเมตร ก่อนทำการชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.12 แบบจำลองรูปแบบ T-shape ที่แกน 15 เซนติเมตร
ที่ระยะการขุด 28 เซนติเมตร ณ ปลายสุดของกำแพงเข็มพืดจำลอง

4.4.1.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของกำแพงรูปแบบ T-shape

ในขณะที่ทำการทดลองแบบจำลองและผลที่ออกมา ทำให้สามารถวิเคราะห์ปัจจัย ที่ทำให้เกิดพฤติกรรมเคลื่อนตัวที่แตกต่างกันของทั้ง 4 รูปแบบ

- ❖ การเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (Area Moment of Inertia) ของกำแพงกันดิน ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงผลคำนวณของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดแบบจำลองของกำแพงกันดิน

แบบจำลองที่	รูปแบบ	ความยาวของ ส่วนแกน	ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย ของพื้นที่หน้าตัด (เซนติเมตร ⁴)	ระยะการเคลื่อน ตัวที่จุดพิบัติ (มิลลิเมตร)
1	Single Wall	-	0.006525	8.4
2	T-shape	5 เซนติเมตร	26.256	5.4
3	T-shape	10 เซนติเมตร	111.382	0.84
4	T-shape	15 เซนติเมตร	278.181	0.62

เมื่อทำการวิเคราะห์การเคลื่อนตัว ของกำแพงรูปแบบ Single Wall และ T-shape ความยาวแกน 5 เซนติเมตรที่มีพฤติกรรมของกราฟการเคลื่อนตัวคล้ายกัน ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่เพิ่มขึ้น ทำให้กำแพงสามารถคงอยู่ได้อยู่ในระยะหนึ่ง ทำให้การเคลื่อนตัวน้อยกว่า

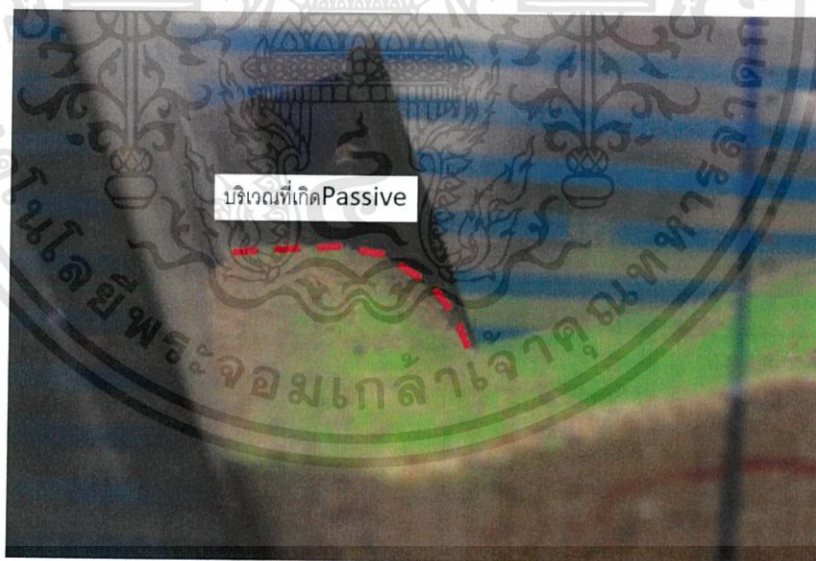
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบSingle Wall แต่เมื่อแรงเนื่องจากสภาวะActive เพิ่มมากขึ้นเพียงพอ กำแพงล้มลงอย่างทันทีทันใด เนื่องจาก ความแข็ง(rigid)ที่เพิ่มขึ้น เป็นเพียงความแข็งของกำแพงที่ทำให้กำแพงไม่เกิดการดัด(Bending) แต่เป็นการพลิกคว่ำ(OVERTURNING) เหมือนกับGravity Wall แทน

ในส่วนของรูปแบบT-shape ที่ความยาวแกน 10 เซนติเมตร และ 15 เซนติเมตร มีค่าการเคลื่อนตัวที่ลดลงจากSingle Wallมาก ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกำแพง เป็นเพียงส่วนหนึ่งที่ช่วยลดการเคลื่อนตัว อาจจะมีแรงต้านอื่นที่ช่วงด้านทานการเคลื่อนตัวของกำแพง

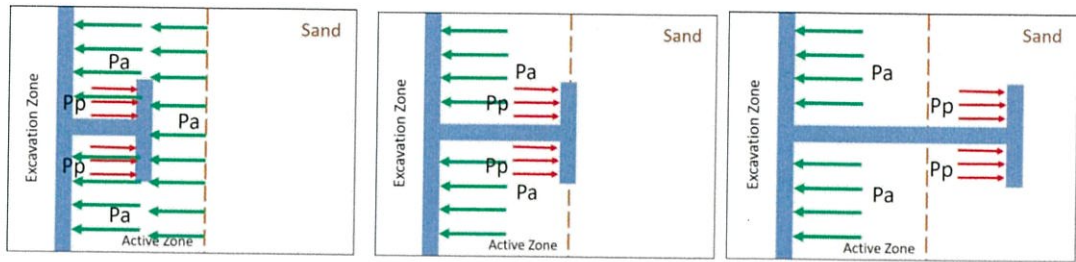
❖ แรงเนื่องจากสภาวะPassive ที่กำแพงที่ปีกของตัวT

เมื่อกำแพงกั้นดินรูปแบบตัว T-shape ส่วนแกน 5 เซนติเมตร ล้มพังที่จุดพิบัติพบว่า ดินตัวอย่างบริเวณด้านในปีกของตัวT เกิดการพิบัติเป็นลักษณะของสภาวะ Passive แต่เนื่องจากแรงของPassive ที่จะต้านแรงจากกำแพง ไม่เพียงพอ และเกิดขึ้นภายในบริเวณของแนวพิบัติActive ทำให้สามารถต้านทานการพิบัติได้เพียงระยะขุดช่วงแรก ที่การเคลื่อนตัวด้านActive ยังน้อย แต่เมื่อการเคลื่อนตัวของActiveเพิ่มขึ้นจนแรงPassiveในปีกตัว T ไม่สามารถพัฒนาแรงต้านทานได้ จึงเกิดการเคลื่อนตัวจนพิบัติ



รูป 4.13 บริเวณที่เกิดสภาวะPassiveที่ส่วนปีกของตัวTในแบบจำลองรูปแบบ ความยาวแกน5 เซนติเมตร

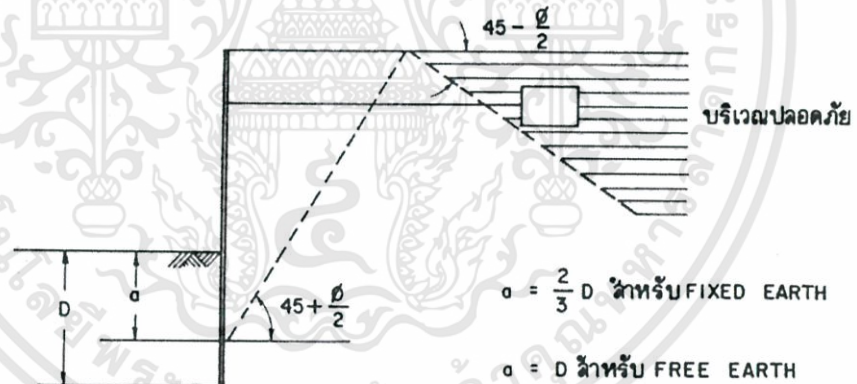
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวจนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.14 ลักษณะของแรงเนื่องจากสภาวะ Passive และ Active เกิดขึ้นในรูปแบบ T-shape 5, 10, 15 เซนติเมตรตามลำดับ

ในส่วนรูปแบบจำลอง ที่ความยาวแกน 10 เซนติเมตร ซึ่งแนว T อยู่ตรงกับ บริเวณของแนวพิบัติ Active (Active Zone) แรง Passive จะพัฒนาแรงต้านที่ขอบของ Active Zone เป็นเหตุให้มีการต้านทาง Passive ของส่วนตัว T ของกำแพงดิน

เมื่อเปลี่ยนความยาวแกนให้อยู่นอก Active Zone เป็น 15 เซนติเมตร แรง Passive ของกำแพงส่วนตัว T เกิดด้านนอก Active Zone จึงสามารถพัฒนาแรงต้านทานแรงจาก Active ได้เต็มที่ซึ่งเป็นหลักการเดียวกับการวางตำแหน่งสมอยืด จึงทำให้เกิดการเคลื่อนตัวที่น้อยมากและน้อยกว่าแบบจำลองอื่นๆ



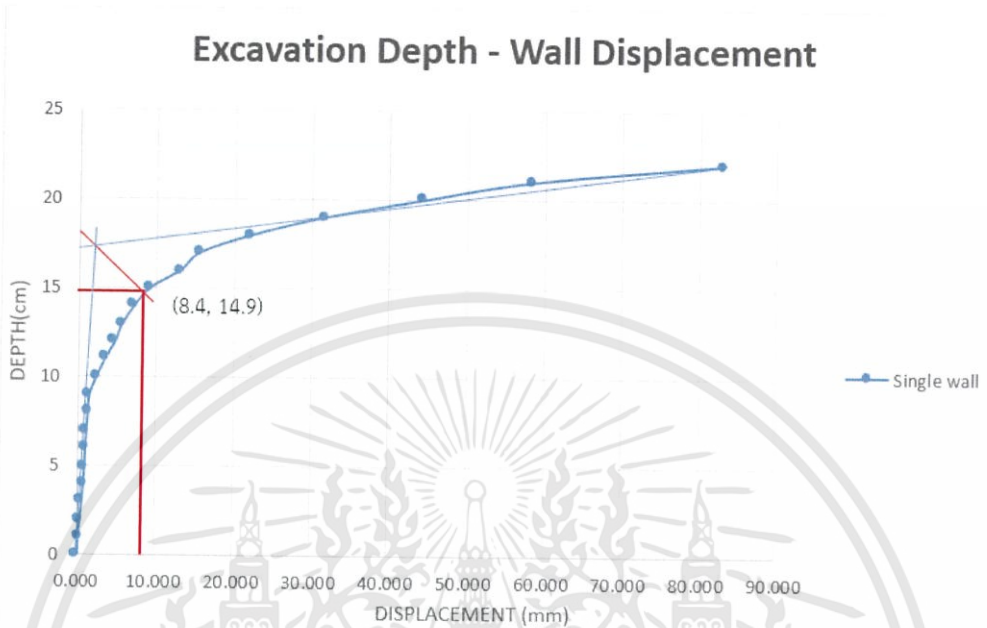
รูป 4.15 การวางตำแหน่งสมอยืดตั้งเพื่อลดการแอ่นตัว

(เอกสารการสอน รศ.ดร.วรการ ไม้เรียง)

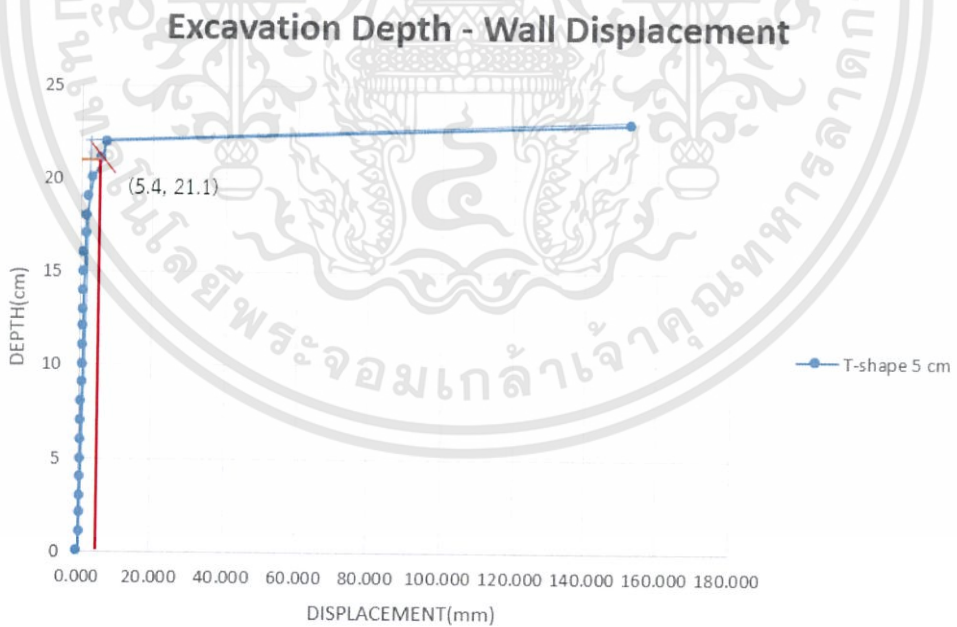
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ผลการศึกษาแบบจำลองของการพัง ถน จุดพิบัติ

4.4.2.1 การหาจุดพิบัติของกำแพงเข็มพืดจากกราฟด้วยวิธี graphical method



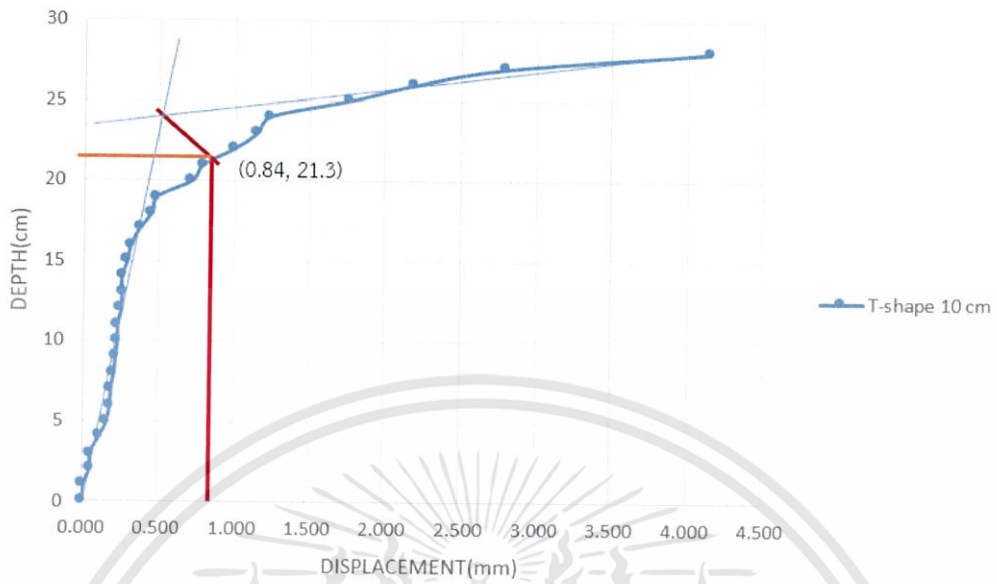
รูป 4.16 การหาจุดพิบัติ ของแบบจำลองที่1 Single Wall



รูป 4.17 การหาจุดพิบัติ ของแบบจำลองที่1 T-shape ที่ความกว้างแกน 5 เซนติเมตร

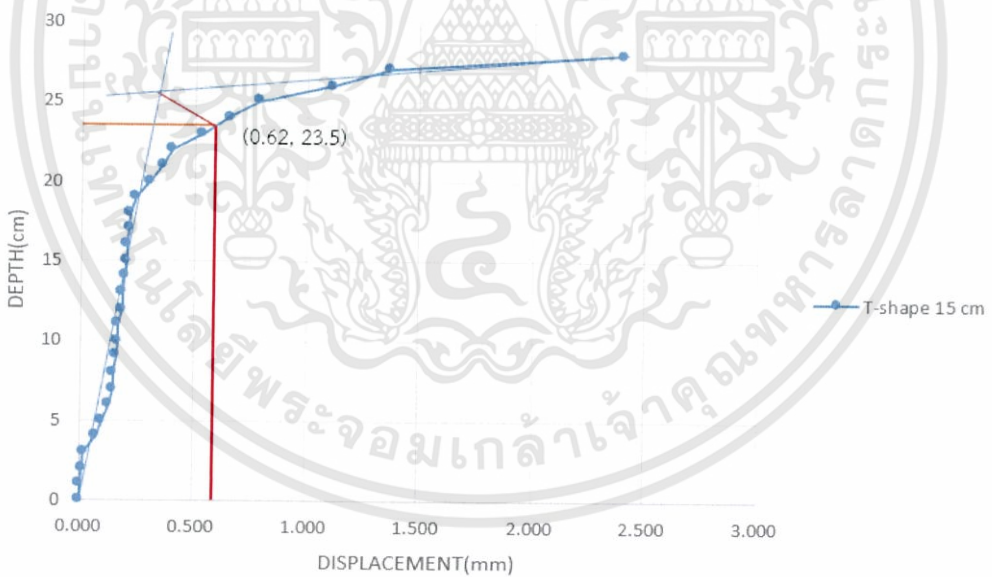
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Excavation Depth - Wall Displacement



รูป 4.18 การหาจุดพิบัติ ของแบบจำลองที่3 T-shape ที่ความกว้างแกน 10 เซนติเมตร

Excavation Depth - Wall Displacement



รูป 4.19 การหาจุดพิบัติ ของแบบจำลองที่4 T-shape ที่ความกว้างแกน 15 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2.2 เปรียบเทียบจุดพิบัติของแบบจำลองกำแพงกันดินรูปแบบต่าง ๆ

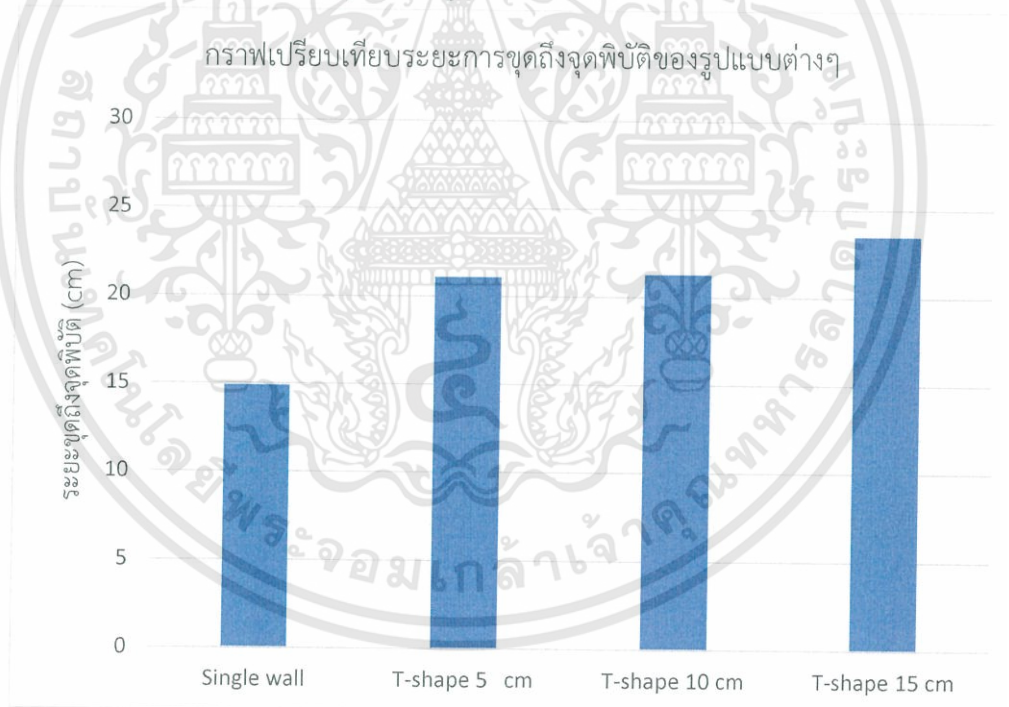
ตาราง 4.7 แสดงจุดพิบัติของแบบจำลองทั้ง 4 รูปแบบ

รูปแบบ	ระยะขูดถึงจุดพิบัติ (cm)	การเคลื่อนตัวถึงจุดพิบัติ (cm)
Single wall	14.9	8.4
T-shape 5 cm	21.1	5.4
T-shape 10 cm	21.3	0.84
T-shape 15 cm	23.5	0.62

4.4.2.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองกันดินรูปแบบต่างๆ โดยเทียบกับ single wall

❖ การเปรียบเทียบระยะขูดจนถึงจุดพิบัติ

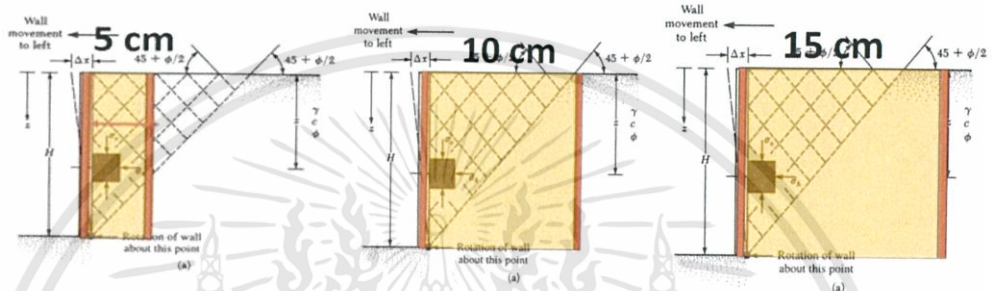
กราฟเปรียบเทียบระยะการขูดถึงจุดพิบัติของรูปแบบต่างๆ



รูป 4.20 กราฟเปรียบเทียบระยะการขูดถึงจุดพิบัติของรูปแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟจะสังเกตเห็นว่า แบบจำลอง T-shape 5 cm กับ T-shape 10 cm มีค่าระยะขูดที่จุดพิบัติใกล้เคียงกันเนื่องจากแบบจำลองทั้งสองมีการถูกรบกวนจากระนาบพิบัติของสภาวะ Active ส่วนแบบจำลอง T-shape 15 cm มีการติดตั้งปีก T นอกระนาบการพิบัติ (failure Zone) ส่งผลให้มีการถูกรบกวนจากระนาบพิบัติของสภาวะ Active น้อยกว่าแบบจำลอง T-shape 5 cm กับ T-shape 10 cm ทำให้แบบจำลอง T-shape 15 cm สามารถขูดได้ลึกกว่าแบบจำลองรูปแบบอื่น ๆ



รูป 4.21 แสดงตำแหน่งของปีก T-shape เทียบกับ ระนาบพิบัติของสภาวะ Active

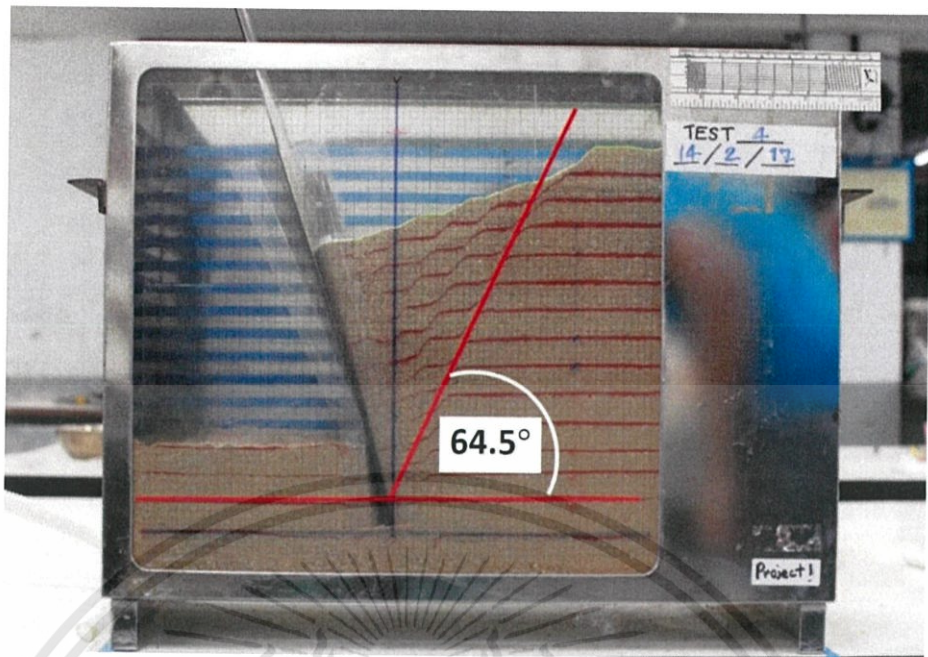
4.4.2.4 การเปรียบเทียบมุมที่เกิดขึ้นที่จุดพิบัติกับมุมตามทฤษฎี

จากทดสอบคุณสมบัติของทรายที่เป็นดินตัวอย่าง ได้ค่ามุมเสียดทานภายใน (internal friction angle, ϕ) เท่ากับ 29.9° จากการทดสอบ Direct Shear และ 31.5° จากทฤษฎี Slope Stability ที่ของกองทราย ให้ตกอย่างอิสระ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ มุมที่เกิดขึ้นจากระนาบที่ปรากฏในการทดลองแบบจำลอง ทั้ง 4 แบบ ได้ผลดังตารางต่อไปนี้

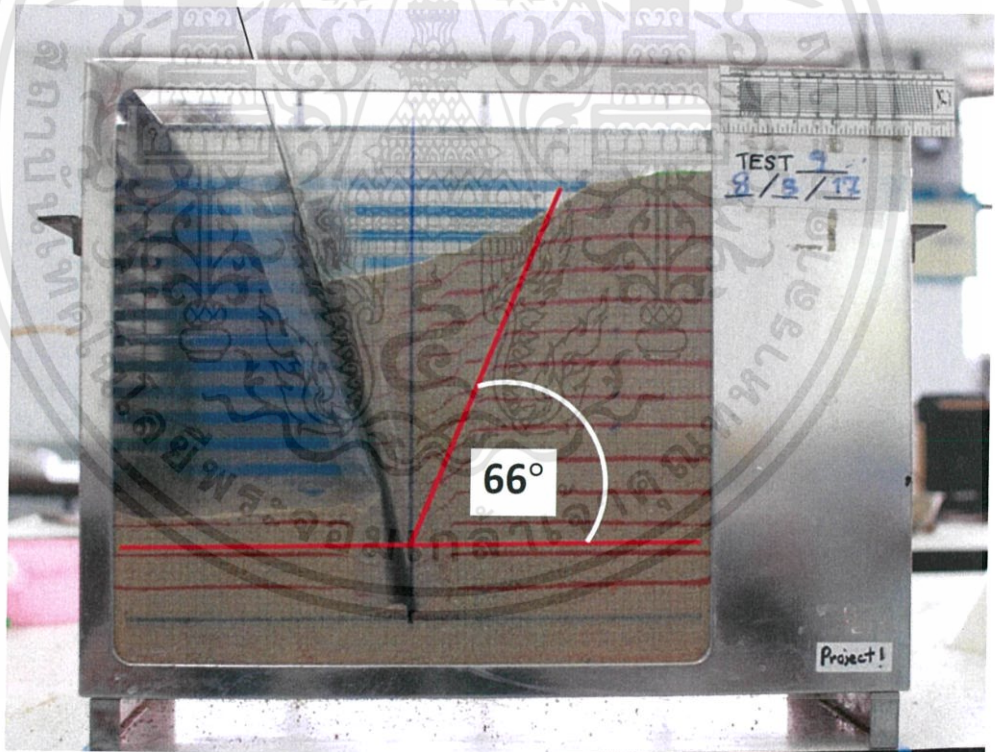
ตาราง 4.8 แสดงค่ามุมเสียดทานภายใน (internal friction angle, ϕ) ของแบบจำลอง

แบบจำลองที่	รูปแบบ	มุม $45 + \frac{\phi}{2}$ ที่เกิดขึ้น (องศา)		มุม ϕ (องศา)	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1	Single Wall	64.5	66	39	42
2	T-shape (5 เซนติเมตร)	62.5	60	35	30
3	T-shape (10 เซนติเมตร)	ไม่ปรากฏระนาบพิบัติ			
4	T-shape (15 เซนติเมตร)	ไม่ปรากฏระนาบพิบัติ			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

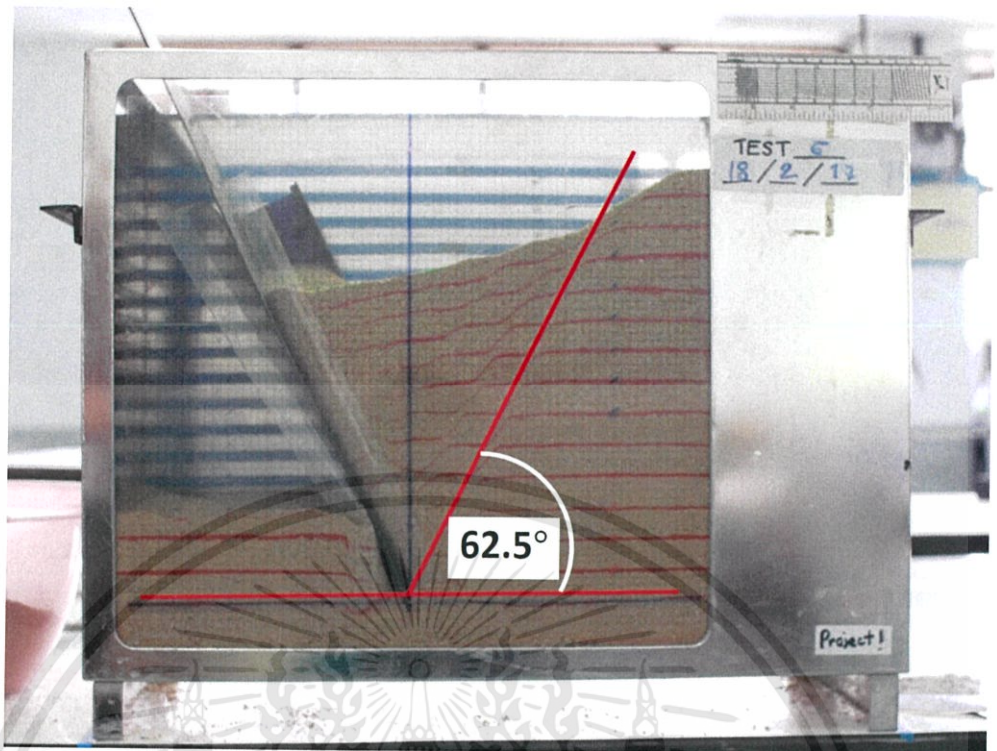


รูป 4.22 มุม $45 + \frac{\phi}{2}$ ที่เกิดขึ้น จากระนาบพิบัติ ของแบบจำลอง Single Wall ทดลองครั้งที่ 1

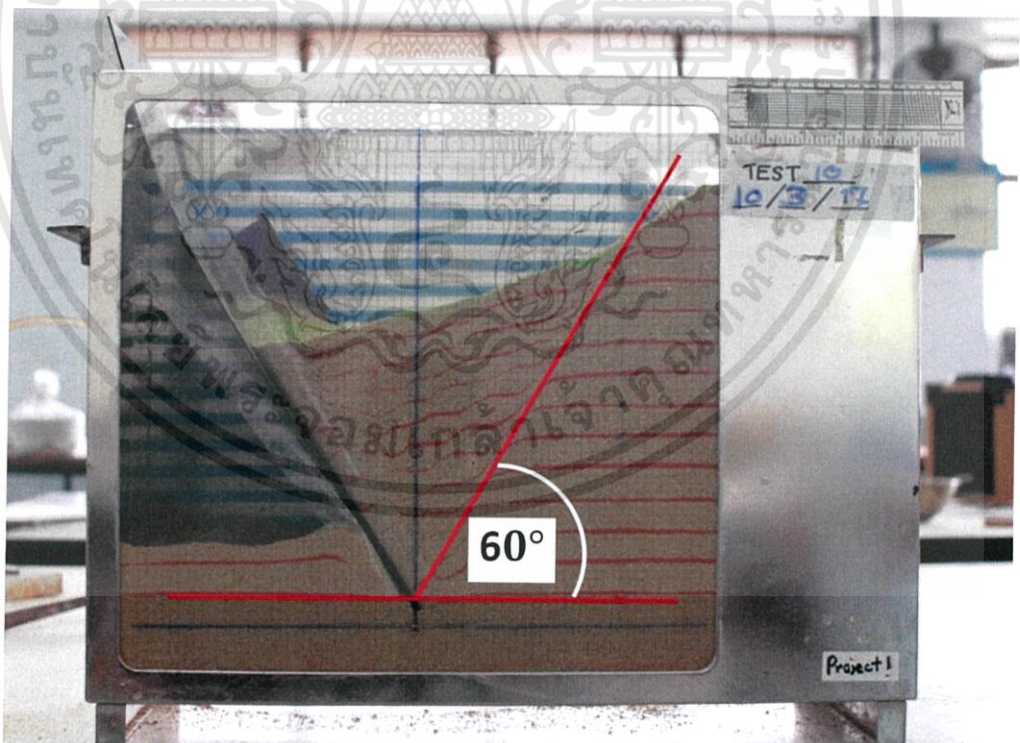


รูป 4.23 มุม $45 + \frac{\phi}{2}$ ที่เกิดขึ้น จากระนาบพิบัติ ของแบบจำลอง Single Wall ทดลองครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.24 มุม $45 + \frac{\phi}{2}$ ที่เกิดขึ้น จากระนาบพิบัติ ของแบบจำลอง T-shape
(5 เซนติเมตร) ทดลองครั้งที่ 1



รูป 4.25 มุม $45 + \frac{\phi}{2}$ ที่เกิดขึ้น จากระนาบพิบัติ ของแบบจำลอง T-shape
(5 เซนติเมตร) ทดลองครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองแบบจำลองรูปแบบต่าง ๆ สังเกตได้ว่า

1. แบบจำลอง T-shape 10 เซนติเมตร และ T-shape 15 เซนติเมตร ไม่เกิดระนาบพิบัติ เนื่องจากการขุดดินในแบบจำลองไม่ถึงจุดพิบัติ จึงไม่เกิดระนาบเฉือน
2. แบบจำลอง Single wall และ T-shape 5 เซนติเมตร มีค่ามุม $45 + \frac{\phi}{2}$ ใกล้เคียงกัน เนื่องจากแบบจำลอง T-shape 5 เซนติเมตร มีการเพิ่ม web เป็น 5 เซนติเมตร ซึ่งยังอยู่ในระนาบพิบัติ อาจน้อยเกินไปทำให้ยังคงได้ผลการทดลองใกล้เคียงกับ Single wall แต่กำแพงกันดินรูปแบบ T-shape 5 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น
3. การพังของลาดดินในแบบจำลองกำแพงกันดิน แบบ T-shape 5 เซนติเมตร เป็นการพังแบบทันทีทันใดจึงส่งผลให้มุมน้อยลงและเปลี่ยนแปลงรูปแบบการพิบัติ

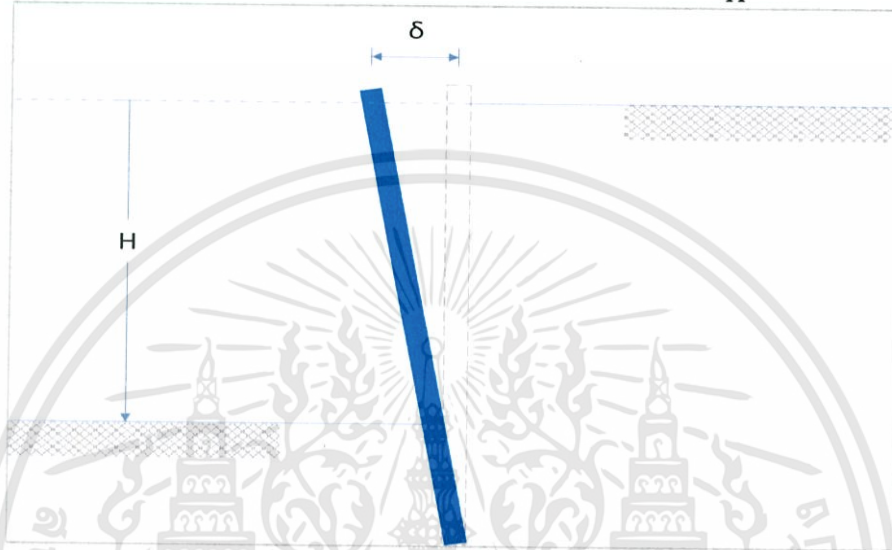


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 การศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมของระบบกำแพงกันดินด้วยอัตราส่วน $\frac{\delta}{H}$

เมื่อนำค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน ทหารด้วยความลึกของการขุดในแต่ละช่วง ($\frac{\delta}{H}$) มาสร้างกราฟกับความลึกของการขุด(H) จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\delta}{H}$ กับ H

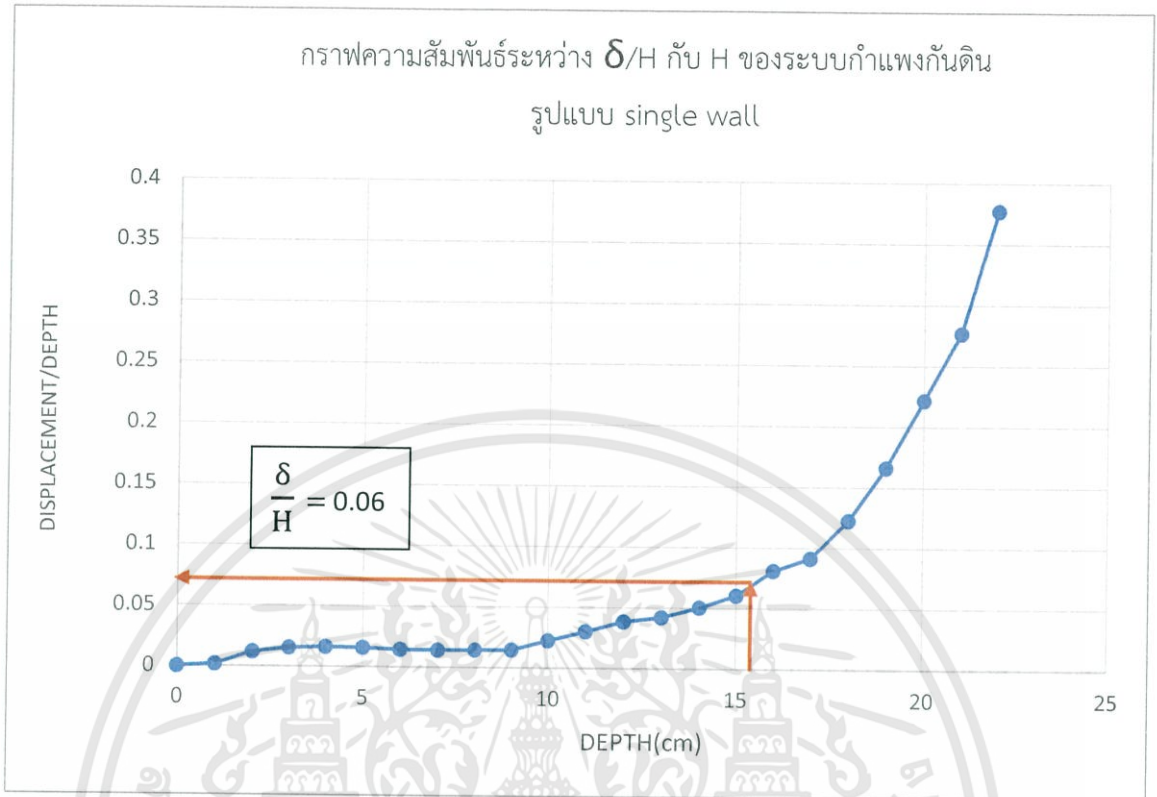
4.4.3.1 การศึกษาการใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วน $\frac{\delta}{H}$ กับ



รูป 4.26 แสดงการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน(δ)และระยะการขุด (H)

การศึกษาอัตราส่วนระหว่าง $\frac{\delta}{H}$ สามารถนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบกันดินในงานขุดดิน และอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเนื่องจากการพัฒนาแรงดันดินเชิงรับ เมื่อเพิ่มส่วนของ T-Shape ได้อย่างชัดเจนดังนี้

4.4.3.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบกำแพงกันดิน



รูป 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\frac{\delta}{H}$ กับ H ของระบบกำแพงกันดิน
รูปแบบ Single wall

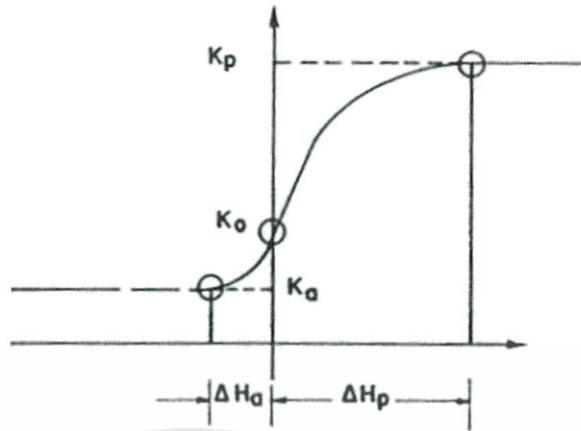
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\frac{\delta}{H}$ กับ H ของระบบกำแพงกันดินรูปแบบ Single wall สามารถอธิบายแนวโน้มของการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินต่อความลึกได้ โดยในช่วงแรกของการขุด ตั้งแต่ระดับผิวทราย จนถึงความลึกของการขุดเท่ากับ 9 เซนติเมตร อัตราของการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ เมื่อเทียบกับความลึกของการขุด และตั้งแต่ 10 เซนติเมตร เป็นต้นไป พบว่าอัตราการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับความลึกของการขุด โดยจุดพิบัติของกำแพงกันดินรูปแบบ Single wall อยู่ที่ความลึกของการขุดเท่ากับ 14.9 เซนติเมตร การเคลื่อนตัวเท่ากับ 8.4 เซนติเมตร (จากวิธี Graphical method)



รูป 4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\frac{\delta}{H}$ กับ H ของระบบกำแพงกันดิน
รูปแบบ T-shape (ความยาวแกน 15 เซนติเมตร)

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\frac{\delta}{H}$ กับ H ของระบบกำแพงกันดินรูปแบบ T-shape ที่มีความยาวส่วนแกน(web) เท่ากับ 15 เซนติเมตร สามารถอธิบายแนวโน้มของการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินต่อความลึกได้โดยการแบ่งช่วงของการขุดได้เป็น 3 ช่วง คือ

1. ช่วง A ถึง B ในช่วงนี้เป็นช่วงพัฒนาแรง passive โดยการพัฒนาแรง passive นั้นจำเป็นต้องเกิดระยะการเคลื่อนตัวระยะหนึ่งก่อนที่จะเกิดแรง passive ซึ่งกระทำต่อระบบกำแพงกันดิน ตามทฤษฎีแรงดันดินด้านข้างในรูป 4.29 โดยที่จุด B เป็นจุดที่แรง passive ได้ถูกพัฒนาจนสามารถต้านทานการเคลื่อนตัวของกำแพงเนื่องจากแรง active ได้ โดยการเคลื่อนตัวต่อระยะขุดที่ใช้ในการพัฒนากำลัง passive (δ/H) ที่ค่าเท่ากับ 0.0023 ที่การเคลื่อนตัวมีค่าเท่ากับ 0.014 เซนติเมตร และระยะขุดมีค่าเท่ากับ 6 เซนติเมตร



รูป 4.29 การเคลื่อนตัวและแรงดันดินด้านข้าง (เอกสารการสอน รศ.ดร.วรารกร ไม้เรียง)

2. ช่วง B ถึง C ในช่วงนี้เป็นช่วงการทำงานของแรง passive ในส่วน T-Shape ของกำแพงโดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนตัว มีค่าน้อยกว่าการเพิ่มขึ้นของความลึกในการขุด ส่งผลให้ค่า $\frac{\delta}{H}$ มีค่าลดลง เนื่องจากเกิดแรง passive ด้านการเคลื่อนที่ โดยที่จุด C เป็นจุดที่เกิดแรง passive สูงสุด ที่ประสิทธิภาพการต้านทานการเคลื่อนตัว (δ/H) มีค่าเท่ากับ 0.0012 ที่ความลึกเท่ากับ 18 เซนติเมตร และ ค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินเท่ากับ 0.0216 เซนติเมตร

3. ช่วง C เป็นต้นไป ในช่วงนี้เป็นช่วงที่แรง active มีค่ามากกว่า passive ที่พัฒนาเต็มที่แล้วในส่วน T-Shape จึงทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนตัวมีค่ามากกว่าการเพิ่มขึ้นของความลึกในการขุด ส่งผลให้ค่า $\frac{\delta}{H}$ มีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้ง ยิ่งอัตราการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินมีค่ามาก ยิ่งทำให้กราฟมีความชันสูงขึ้นด้วยประสิทธิภาพของระบบลดลง

โดยการพิบัติของระบบกำแพงกันดินรูปแบบ T-shape ที่มีความยาวส่วนแกน(web) เท่ากับ 15 เซนติเมตร เกิดขึ้นที่ ความลึกของการขุดเท่ากับ 23.5 เซนติเมตร และมีการเคลื่อนตัวเท่ากับ 0.62 เซนติเมตร (Graphical method)



รูป 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\frac{\delta}{H}$ กับ H ของระบบกำแพงกันดิน
รูปแบบ T-shape (ความยาวแกน 10 เซนติเมตร)

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\frac{\delta}{H}$ กับ H ของระบบกำแพงกันดินรูปแบบ T-shape ที่มีความยาวส่วนแกน(web) เท่ากับ 15 เซนติเมตร สามารถอธิบายแนวโน้มของการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินต่อความลึกได้โดยการแบ่งช่วงของการขุดได้เป็น 3 ช่วง คือ

1. ช่วง A ถึง B ในช่วงนี้เป็นช่วงพัฒนาแรง passive โดยการพัฒนาแรง passive นั้นจำเป็นต้องเกิดระยะการเคลื่อนตัวระยะหนึ่งก่อนที่จะเกิดแรง passive ซึ่งกระทำต่อระบบกำแพงกันดิน ตามทฤษฎีแรงดันดินด้านข้างในรูป 4.29 โดยที่จุด B เป็นจุดที่แรง passive ได้ถูกพัฒนาจนสามารถต้านทานการเคลื่อนตัวของกำแพงเนื่องจากแรง active ได้ โดยการเคลื่อนตัวต่อระยะขุดที่ใช้ในการพัฒนากำลัง passive (δ/H) ที่ค่าเท่ากับ 0.0032 ที่การเคลื่อนตัวมีค่าเท่ากับ 0.016 เซนติเมตร และระยะขุดมีค่าเท่ากับ 5 เซนติเมตร

2. ช่วง B ถึง C ในช่วงนี้เป็นช่วงการทำงานของแรง passive ในส่วน T-Shape ของกำแพงโดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนตัว มีค่าน้อยกว่าการเพิ่มขึ้นของความลึกในการขุด ส่งผลให้ค่า $\frac{\delta}{H}$ มีค่าลดลง เนื่องจากเกิดแรง passive ต้านการเคลื่อนที่ โดยที่จุด C เป็นจุดที่เกิดแรง passive สูงสุด ที่ประสิทธิภาพการต้านทานการเคลื่อนตัว (δ/H) มีค่าเท่ากับ 0.002 ที่ความลึกเท่ากับ 16 เซนติเมตร และ ค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินเท่ากับ 0.032 เซนติเมตร

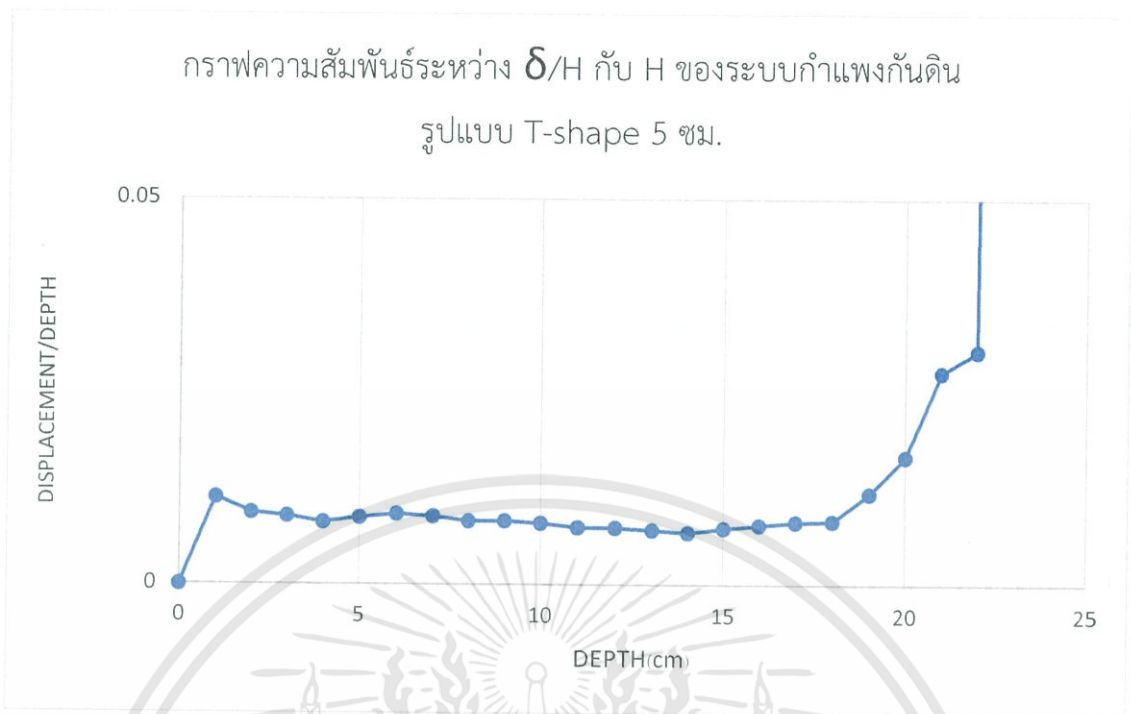
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ช่วง C เป็นต้นไป ในช่วงนี้เป็นช่วงที่แรง active มีค่ามากกว่า passive ที่พัฒนาเต็มที่แล้วในส่วน T-Shape จึงทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนตัวมีค่ามากกว่าการเพิ่มขึ้นของความลึกในการขุด ส่งผลให้ค่า $\frac{\delta}{H}$ มีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้ง ยิ่งอัตราการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินมีค่ามาก ยิ่งทำให้กราฟมีความชันสูงขึ้นด้วยประสิทธิภาพของระบบลดลง

โดยการพิบัติของระบบกำแพงกันดินรูปแบบ T-shape ที่มีความยาวส่วนแกน(web) เท่ากับ 10 เซนติเมตร เกิดขึ้นที่ ความลึกของการขุดเท่ากับ 21.3 เซนติเมตร และมีการเคลื่อนตัวเท่ากับ 0.82 เซนติเมตร (Graphical method)

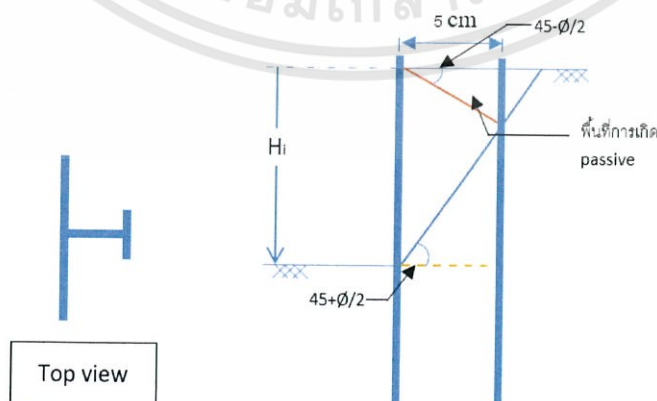


รูป 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\frac{\delta}{H}$ กับ H ของระบบกำแพงกันดิน
รูปแบบ Single wall



รูป 4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\frac{\delta}{H}$ กับ H ของระบบกำแพงกันดิน
รูปแบบ T-shape (ความยาวแกน 5 เซนติเมตร)

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\frac{\delta}{H}$ กับ H ของระบบกำแพงกันดินรูปแบบ T-Shape ที่มีความยาวส่วนแกน(web) เท่ากับ 5 เซนติเมตร โดยพบว่า เกือบตลอดช่วงของการขุด การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อเทียบกับความลึกของการขุด จนถึงความลึกของการขุดเท่ากับ 22 เซนติเมตร กำแพงกันดินมีการล้มอย่างทันทีทันใด โดยจุดพิบัติของกำแพงกันดินรูปแบบ T-Shape ที่มีความยาวส่วนแกน(web) เท่ากับ 5 เซนติเมตร อยู่ที่ความลึกของการขุดเท่ากับ 21.1 เซนติเมตร การเคลื่อนตัวเท่ากับ 5.4 เซนติเมตร



รูป 4.33 พฤติกรรมการเกิดระนาบพิบัติสถานะ Active และ Passive

ในแบบจำลองรูปแบบ T-shape

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการเกิดแรงดันดินเชิงรับ (passive) ที่เกิดขึ้นที่ปีกของส่วนยื่นตัว T คาดว่ามีค่าน้อยเมื่อเทียบกับแรงดันดินเชิงรุก (active) เนื่องจากมีพื้นที่ที่ทับซ้อนของ active และ passive เกิดขึ้นมาก ทำให้เหลือพื้นที่การเกิด passive น้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.33S จึงทำให้ไม่สามารถเห็นการพัฒนา และการทำงานของแรง passive ได้อย่างชัดเจน แต่การที่กราฟมีค่า $\frac{\delta}{H}$ ค่อนข้างคงที่เกือบตลอดช่วงของการขุด อาจเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของรูปแบบกำแพง T-shape จึงทำให้เกิดพฤติกรรมการพิบัติแบบ gravity wall



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

5.1 บทนำ

ผลการศึกษาคือความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน และระดับความลึกของการขุดสามารถศึกษาได้ด้วยแบบจำลองทางกายภาพได้อย่างชัดเจน จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินและความลึกของการขุด รูปภาพผลการทดลองที่ปรากฏจุดพิบัติ รวมทั้งกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกในขุดและอัตราส่วนของการเคลื่อนตัวของกำแพงต่อระยะความลึกในการขุด ซึ่งสามารถอธิบายถึงพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของแบบจำลองรูปแบบทั้ง 4 รูปแบบ

5.2 สรุปผลการทดลอง

การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินจำลองรูปแบบ T-shape เมื่อความยาวแกนอยู่ภายใน Active Zone ที่ระดับผิวทราย ทำให้ระบบถูกรบกวนจากระนาบพิบัติมาก อย่างไรก็ตามยังสามารถต้านแรงดันด้านข้างในช่วงแรกได้เนื่องจากความแข็ง(rigid)ที่เพิ่มขึ้นจากค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกำแพง ทำให้ไม่เกิดการดัด(Bending) และมีการพัฒนาแรงเนื่องจากสภาวะPassive ที่ปีกแต่น้อยมากเมื่อแรงจากสภาวะActive เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มความลึกการขุด กำแพงจึงพังอย่างทันทีทันใดและเกิดรูปแบบการพังด้านActive เปลี่ยนไป

สำหรับแบบจำลองเมื่อความยาวแกนอยู่ตรงกับตำแหน่งของระนาบActive Zone ที่ระดับผิวทราย ซึ่งยังมีการถูกรบกวนจากระนาบพิบัติแต่น้อยกว่า T-shape ที่มีความยาวแกนอยู่ภายในActive Zone และมีการพัฒนาแรงต้านการเคลื่อนตัวเนื่องจากสภาวะPassiveที่ปีกของตัว T ที่การเคลื่อนตัวระยะหนึ่ง ร่วมกับค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกำแพงที่เพิ่มขึ้น ทำให้การเคลื่อนตัวเกิดขึ้นน้อยกว่าT-shapeแบบแรก

เมื่อพิจารณาที่ความยาวแกน T-shape ของแบบจำลอง ยาวกว่าระยะพิบัติแบบ Active ที่ระดับผิวทราย จะทำให้กำแพงเข็มพิตแบบ T-shape สามารถพัฒนาแรงต้านการเคลื่อนตัวได้เพิ่มขึ้นที่ระยะการเคลื่อนตัวที่น้อยกว่า มีการถูกรบกวนจากระนาบพิบติน้อย เป็นแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพลดการเคลื่อนตัวมากที่สุดในรูปแบบT-shape 3 รูปแบบ

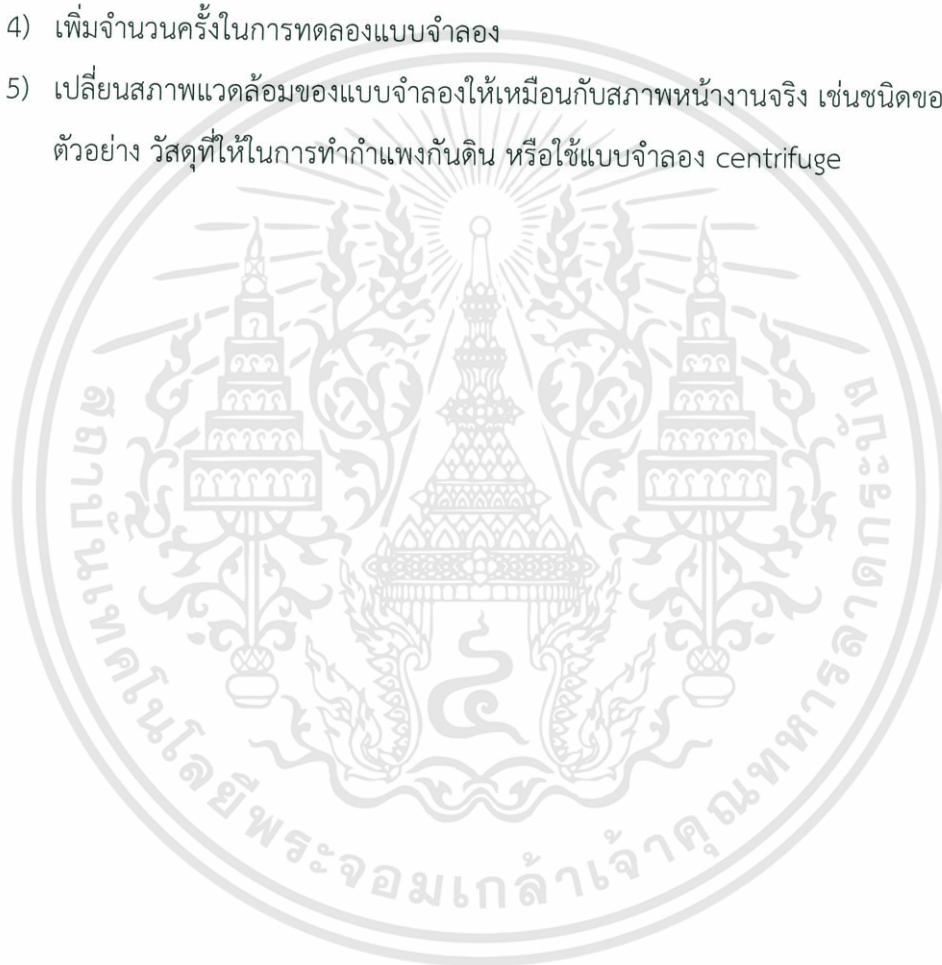
ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าถ้าความยาวแกน T-shape ของเข็มพิต ยาวกว่าพื้นที่การพิบัติแบบ Active จะทำให้กำแพงเข็มพิตแบบ T-shape สามารถพัฒนาแรงต้านการเคลื่อนตัวได้เพิ่มขึ้น มีประสิทธิภาพลดการเคลื่อนตัวได้ดีกว่า เข็มพิตแบบที่มีแกน T-shape สั้นที่ความยาวแกนอยู่ใน Active zone

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตาม แบบจำลองรูปแบบ T-shape ต้องมีการเคลื่อนตัวเริ่มต้นถึงระยะหนึ่งก่อนเพื่อพัฒนาแรงเนื่องจากสภาวะPassive เต็มที่ในส่วน T-shape ของกำแพงก่อน

5.3 ข้อเสนอแนะ

- 1) นำผลที่ได้ ไปศึกษาต่อเพื่อใช้ในการก่อสร้างระบบป้องกันดินพัง
- 2) นำผลทางการศึกษาไปวิเคราะห์ ด้วยวิธี Finite Element
- 3) เพิ่มกรณีศึกษาของแบบจำลองเพื่อให้ได้ผลที่สามารถอธิบายได้เพิ่มขึ้น
- 4) เพิ่มจำนวนครั้งในการทดลองแบบจำลอง
- 5) เปลี่ยนสภาพแวดล้อมของแบบจำลองให้เหมือนกับสภาพหน้างานจริง เช่นชนิดของดิน ตัวอย่าง วัสดุที่ใช้ในการทำกำแพงกันดิน หรือใช้แบบจำลอง centrifuge



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] จิระยุทธ สืบสุข. (2554). *แรงดันดินด้านข้าง*. สืบค้นจาก <http://jirayutsu.blogspot.com/2011/10/04-011-304-foundation-engineering.html>
- [2] บรรณาธิการเว็บไซต์บ้านและสวน. (2557). *กำแพงกันดิน*. สืบค้นจาก <http://www.real-parenting.com/Article.aspx?ArticleID=4578>
- [3] สุขสันต์ หอพิบูลสุข. (2553, มิถุนายน). *Foundation Engineering*. สืบค้นจาก <http://eng.sut.ac.th/ce/oldce/Suksun/Chapter5.pdf>
- [4] Research475. (2014). *Geosynthetics*. Retrieved from <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Geo2.jpg>
- [5] M.A.Meguid, O.Saada, M.A.Nunes, J.Mattar. (2007). *Physical modeling of tunnels in soft ground: A review*. Retrieved from http://www.researchgate.net/profile/Mohamed_Meguid/publication/222025612_Physical_modeling_of_tunnels_in_soft_ground_A_review/links/0c96052588d69020b9000000.pdf
- [6] Anne Sophie Colas, Denis Gamier, Jean Claude MOREL. (2009). *Assessing the two-dimensional behaviour of drystone retaining walls by full-scale experiments and yield design simulation*. Retrieved from <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00942625/document>
- [7] B.Villemus, J.C.Morel, C.Boutin. (2014). *Experimental assessment of dry stone retaining wall stability on a rigid foundation*. Retrieved from https://hal.archives-ouvertes.fr/fde/index/docid/941189/fdename/Experimental_assessment_of_dry_stone_retaining_wall_stability_on_a_rigid_foundation.pdf
- [8] ผศ.ดร.ชนาตล คงสมบุญ, กลุ่มวิจัยด้านแบบจำลองหมุนเหวี่ยงทางวิศวกรรมปฐพีแห่งประเทศไทย. (2007). *Applications of Geotechnical Centrifuge Technique*. Retrieved from <http://www.fiet.kmutt.ac.th/centrifuge/application.html>
- [9] หนังสืออิเล็กทรอนิกส์มหาวิทยาลัยรามคำแหง. (2007). *ความหมายของแบบจำลอง*. Retrieved from http://e-book.ram.edu/e-book/m/mc111/mc111_02_07.html
- [10] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ. (2016). *ความหมายของแบบจำลอง*. Retrieved from http://tairgle.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=7&Itemid=307
- [11] รศ.แหลมทอง เหล่าคณาจารย์ และคณะ. (2555). *คู่มือปฏิบัติการทดลองปฐพีกลศาสตร์*. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.
- [12] ผศ.ดร.ชนาตล คงสมบุญ. (2559). เอกสารประกอบการสอนเรื่อง การวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดิน. *การวิเคราะห์ด้วยวิธีลาดอนันต์*. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[13] Casagrande, Arthur (1936). "The determination of the pre-consolidation load and its practical significance". *Proceedings of the international conference on soil mechanics and foundation engineering*. 3. Harvard University Cambridge. pp. 60–64.

Sakkarach Y., Siwanon C., Supachai J., (2014). *A STUDY PHYSICAL MODELING OF RETAINING WALL SYSTEM IN SANDBED*. Special project. Thailand : Civil engineering, KMITL

Burt G. Lock, (2007). *Handbook of Geotechnical Investigation and design Tables*. 1st ed. Netherland : Taylor & Francis

Donald P. Coduto, (1998). *Geotechnical Engineering Principles and Practices*. United States of America : Prentice Hall

ดร.พัลลภ วิสุทธิ์เมธากุล. (2558). *คู่มือวิศวกรรมฐานราก*. กรุงเทพฯ: บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน)

HIROSE & CO., Ltd. *SCB method (Sheet pile Counterfort-type bracing method)*. Japan
Retrieved from <http://www.hirose-net.com/english/tec/heavy00/heavy05.html>

ภาคผนวก ก

สัญลักษณ์

B	=	ความกว้างของฐานราก
d	=	ระยะฝังเหล็กพืดที่ต้องการ
e	=	ระยะเยื้องศูนย์
G_T	=	ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำที่อุณหภูมิที่ทดลอง ($T^\circ\text{C}$)
H	=	ความสูงของกำแพง และ ความลึกในการขุด
δ	=	ระยะการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดจำลอง
H _{fail}	=	ความลึกของการขุดที่เกิดการพิบัติ
Δ fail	=	ระยะการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดจำลองที่เกิดการพิบัติ
K_a	=	สัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะ active
K_o	=	สัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่ง (coefficient of earth pressure at rest)
K_p	=	สัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะ passive
M_o	=	โมเมนต์ที่ก่อให้เกิดการพลิกคว่ำ
M_r	=	โมเมนต์ต้านทานการพลิกคว่ำ
P_h	=	แรงดันดินด้านข้างรวมที่กระทำต่อกำแพง
P_o	=	แรงลัพท์เนื่องจากความดันดินประสิทธิผล ที่สภาวะอยู่นิ่งต่อความยาว 1 หน่วย
P_v	=	แรงกระทำแนวตั้ง
S	=	แรงต้านทานการเลื่อนไถล
S_u	=	กำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน
u	=	ความดันน้ำ (Pore Pressure)
W_s	=	น้ำหนักดินอบแห้ง, กรัม
W_1	=	น้ำหนักขวดมีน้ำผสมดิน ที่อุณหภูมิที่ทดลอง ($T^\circ\text{C}$)
W_2	=	น้ำหนักขวดมีน้ำเต็มที่อุณหภูมิที่ทดลอง ($T^\circ\text{C}$), กรัม
x_i	=	ระยะในแนวนอนที่วัดจากจุด Toe จนถึง W_i
α	=	มุมด้านหลังกำแพงกันดินที่กระทำกับแนวราบ
β	=	มุมระหว่างผิวของดินถมกับแนวราบ
γ'	=	หน่วยน้ำหนักประสิทธิผล (submerged unit weight)
δ	=	มุมเสียดทานระหว่างผนังกำแพงและดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- σ'_1 = ความเค้นหลักใหญ่ประสิทธิภาพเท่ากับ
 σ'_3 = ความเค้นหลักเล็กประสิทธิภาพ
 σ_h = ความดันดินด้านข้างที่กระทำต่อกำแพง
 σ'_h = ความดันดินด้านข้างประสิทธิภาพที่ฐานของกำแพง
 σ'_p = ความดันดินด้านข้างประสิทธิภาพที่สภาวะ passive
 \emptyset = มุมเสียดทานภายในของดิน

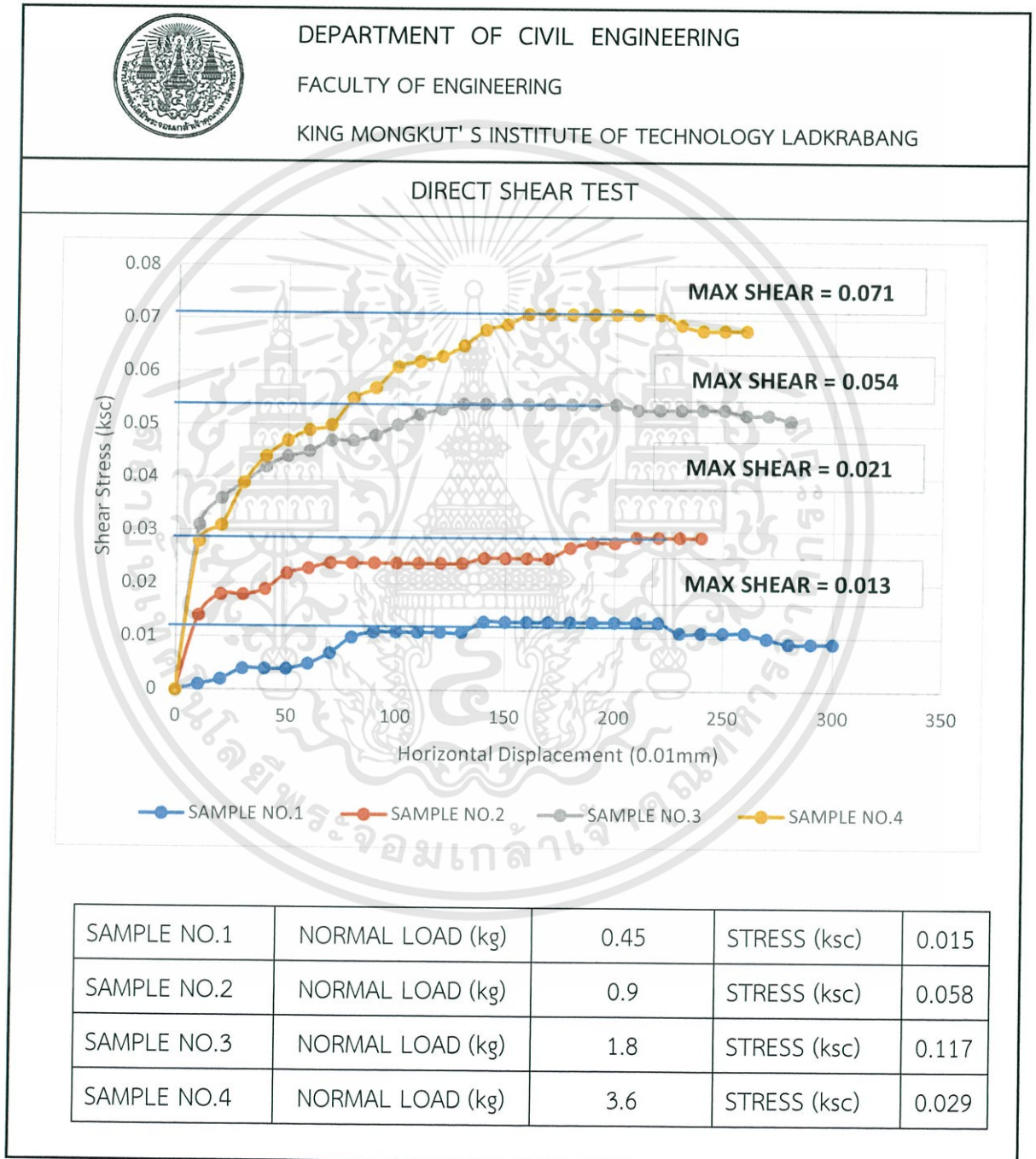


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบคุณสมบัติ

ข.1 มุมเสียดทานภายใน (Internal Friction Angle) ของทรายตัวอย่าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



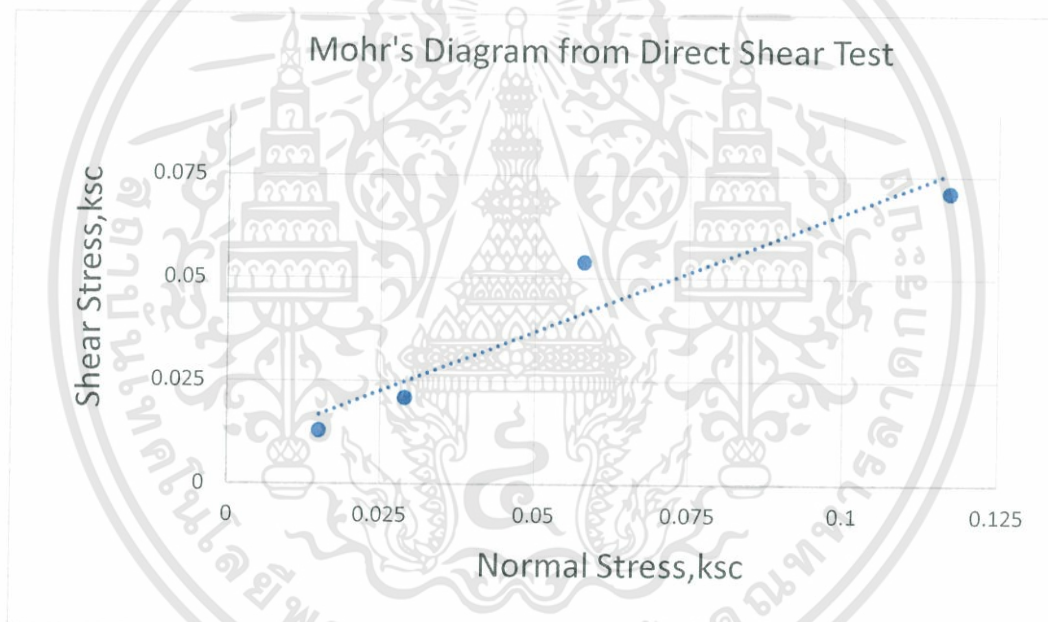
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

DIRECT SHEAR TEST


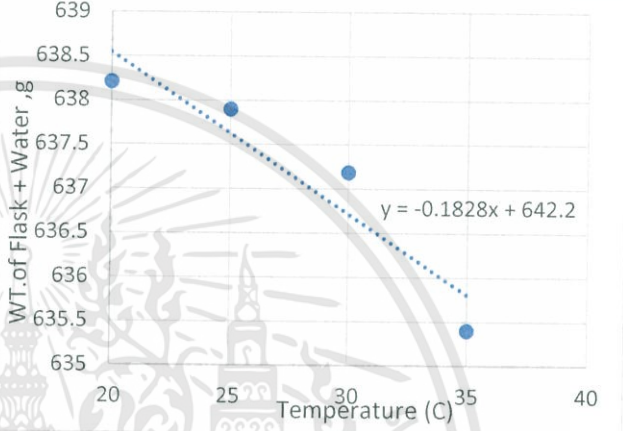
No.	1	2	3	4
	$1/4\sigma$	$1/2\sigma$	σ	2σ
Load, kg	0.45	0.9	1.8	3.6
Normal Stress, ksc	0.015	0.029	0.058	0.117
Shear Stress, ksc	0.013	0.021	0.054	0.071



Internal Friction Angle

 29.9°

ข.2 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)ของทรายตัวอย่าง

 DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG																																		
SPECIFIC GRAVITY TEST																																		
PYCHOMETER CALIBRATION																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Temperature (Degree C)</th> <th>FLASK + WATER (g)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>35</td> <td>635.4</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>637.19</td> </tr> <tr> <td>25</td> <td>637.9</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>638.21</td> </tr> </tbody> </table>	Temperature (Degree C)	FLASK + WATER (g)	35	635.4	30	637.19	25	637.9	20	638.21																								
Temperature (Degree C)	FLASK + WATER (g)																																	
35	635.4																																	
30	637.19																																	
25	637.9																																	
20	638.21																																	
SPECIFIC GRAVITY DETERMINATION																																		
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Sample NO.</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Soil description</td> <td>sand</td> <td>sand</td> </tr> <tr> <td>Trial NO.</td> <td>1</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>1 Temperature °C</td> <td>29.5</td> <td>29.5</td> </tr> <tr> <td>2 Flask + water ,g</td> <td>636.81</td> <td>636.81</td> </tr> <tr> <td>3 Flask + water + soil ,g</td> <td>760.22</td> <td>760.32</td> </tr> <tr> <td>4 Container NO.</td> <td>1</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>5 Dry soil (A) ,g</td> <td>199.36</td> <td>199.41</td> </tr> <tr> <td>6 Saturated Surface Dry soil (B) ,g</td> <td>200</td> <td>200.07</td> </tr> <tr> <td>7 G.S.</td> <td>2.603</td> <td>2.605</td> </tr> <tr> <td>Average G.S.</td> <td colspan="2">2.604</td> </tr> </tbody> </table>	Sample NO.	1	1	Soil description	sand	sand	Trial NO.	1	2	1 Temperature °C	29.5	29.5	2 Flask + water ,g	636.81	636.81	3 Flask + water + soil ,g	760.22	760.32	4 Container NO.	1	2	5 Dry soil (A) ,g	199.36	199.41	6 Saturated Surface Dry soil (B) ,g	200	200.07	7 G.S.	2.603	2.605	Average G.S.	2.604		
Sample NO.	1	1																																
Soil description	sand	sand																																
Trial NO.	1	2																																
1 Temperature °C	29.5	29.5																																
2 Flask + water ,g	636.81	636.81																																
3 Flask + water + soil ,g	760.22	760.32																																
4 Container NO.	1	2																																
5 Dry soil (A) ,g	199.36	199.41																																
6 Saturated Surface Dry soil (B) ,g	200	200.07																																
7 G.S.	2.603	2.605																																
Average G.S.	2.604																																	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.3 ขนาดคละและชนิดของเม็ดดิน (Grain Size and Soil Classification)



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

Sieve Analysis (ASTM C136) for Coarse Grain Soil

Specific Gravity of Soil ,G.S. 2.60387571

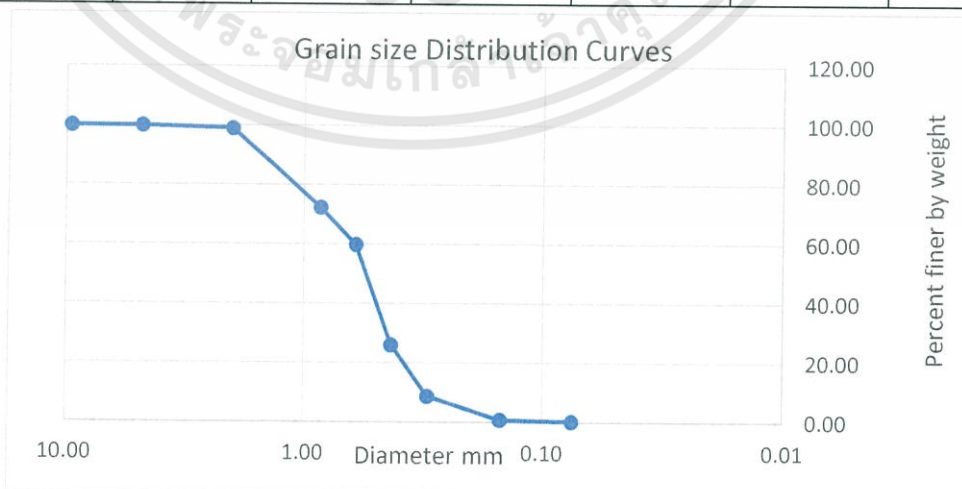
Tray NO. 1

Weight of Dry Soil ,g

1000.02

Sieves Standard ASTM E-11

Sieves NO.	Sieve Opening ,mm	Weight of Sieve ,g	Weight of Sieve + Soil ,g	Weight of Soil Retained ,g	Cumulative Retained ,g	Cumulative Retained ,%	Percent Finer ,%
3/8"	9.50	528.38	528.38	0.00	0.00	0.00	100.00
4	4.75	471.76	471.76	0.00	0.00	0.00	100.00
10	2.00	689.16	698.70	9.54	9.54	0.95	99.05
20	0.85	597.98	864.67	266.69	276.23	27.62	72.38
30	0.60	460.63	586.09	125.46	401.69	40.17	59.83
40	0.43	573.28	910.72	337.44	739.13	73.91	26.09
50	0.30	557.19	730.32	173.13	912.26	91.22	8.78
100	0.15	515.37	595.00	79.63	991.89	99.19	0.81
200	0.08	515.85	521.32	5.47	997.36	99.73	0.27
Pan	0.00	357.00	359.02	2.02	999.38	99.94	0.06

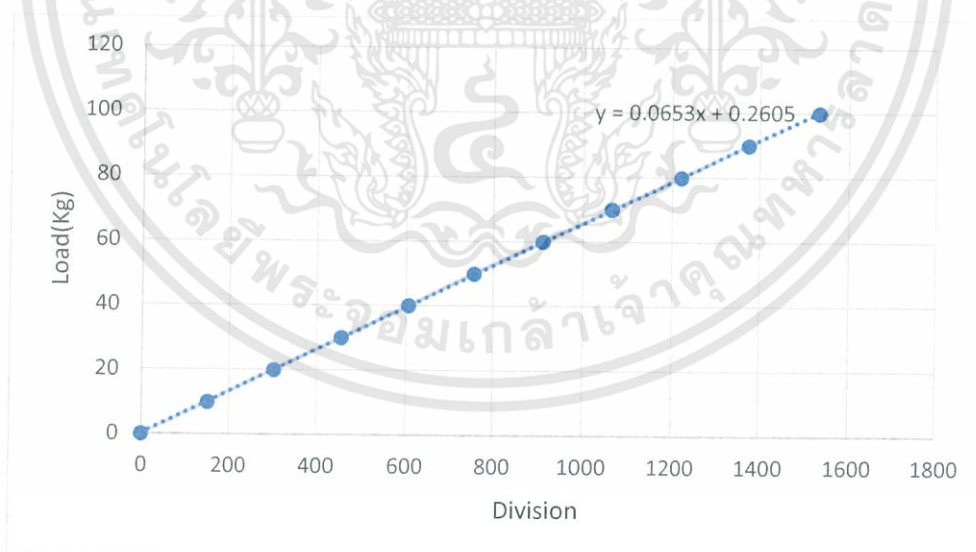


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.4 ค่า Elastic modulus ของกำแพงตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา

ตาราง ข.1 แสดงค่าแรงคงที่ของวงแหวนวัดแรง

Load	Compression
Kilograms Force	Division
0	0
10	151
20	303
30	455
40	606
50	756
60	912
70	1064
80	1221
90	1375
100	1533



รูป ข.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและจำนวนช่องของProving Ring เพื่อหาสมการเส้นตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.2 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณเพื่อหาค่า Elastic modulus

Proving Ring	Dial gauge	δ (mm)	load(P)	E(kg/m ²)	E(kg/cm ²)
1	90	0.9	0.3258	1072592593	107259.26
2	120	1.2	0.3911	965679012.3	96567.90
3	163	1.63	0.4564	829629629.6	82962.96
4	209	2.09	0.5217	739606592.2	73960.66
5	268	2.68	0.587	648977335.5	64897.73
6	332	3.32	0.6523	582150825.5	58215.08
7	395	3.95	0.7176	538284106.9	53828.41
8	456	4.56	0.7829	508706952.6	50870.70
9	504	5.04	0.8482	498647854.2	49864.79
10	558	5.58	0.9135	485065710.9	48506.57
11	607	6.07	0.9788	477783879.4	47778.39
12	666	6.66	1.0441	464508953.4	46450.90
13	720	7.2	1.1094	456543209.9	45654.32
14	792	7.92	1.1747	439468761.7	43946.88
15	905	9.05	1.24	405975035.8	40597.50
16	992	9.92	1.3053	389874552	38987.46
17	1040	10.4	1.3706	390484330.5	39048.43
				average	58199.88

คำนวณหาค่า Elastic modulus โดยใช้สูตร

$$\text{การโก่งตัวของคานปกติ เมื่อมีแรง Pกระทำตรงกลาง, } \delta = \frac{PL^3}{48EI}$$

$$\text{เพื่อหา Elastic modulus จะได้ } E = \frac{PL^3}{48\delta I} \text{ โดย ค่า } I \text{ ได้จากสูตร } I = \frac{bh^3}{12}$$

โดย h = 0.0015 เมตร, b=0.025 เมตร, L=0.1 เมตร

$$I = \frac{(0.025)(0.0015)^3}{12} = 7.03 \times 10^{-12} \text{ เมตร}^4$$

จากการคำนวณ ได้ค่า Elastic modulus เท่ากับ 58199.88 กิโลกรัม ต่อ ตารางเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

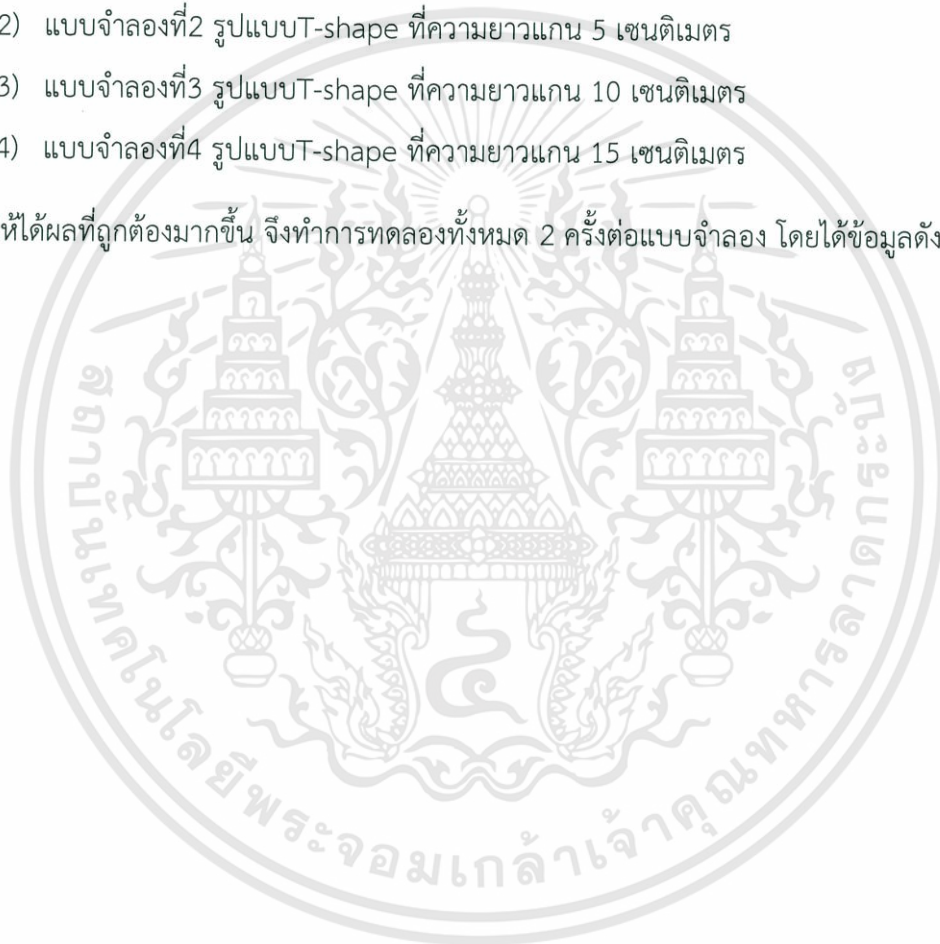
ผลการทดลองจากแบบจำลอง

ค.1 ข้อมูลผลการทดลองจากแบบจำลอง

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดลอง แบบจำลองทั้ง 4 แบบ ได้แก่

- 1) แบบจำลองที่1 รูปแบบSingle Wall
- 2) แบบจำลองที่2 รูปแบบT-shape ที่ความยาวแกน 5 เซนติเมตร
- 3) แบบจำลองที่3 รูปแบบT-shape ที่ความยาวแกน 10 เซนติเมตร
- 4) แบบจำลองที่4 รูปแบบT-shape ที่ความยาวแกน 15 เซนติเมตร

เพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องมากขึ้น จึงทำการทดลองทั้งหมด 2 ครั้งต่อแบบจำลอง โดยได้ข้อมูลดังนี้



ตาราง ค.1 ผลการทดลองระยะการเคลื่อนตัวของ แบบจำลองที่1 รูปแบบSingle Wall

Depth, H (cm)	TEST 1			TEST 2			δ AVERAGE (mm)
	READING Software (mm)	Displacement, δ (mm)		READING Software (mm)	Displacement, δ (mm)		
		Calibrate	Set0		Calibrate	Set0	
0.00	3.52	1.461	0.000	0.82	1.447	0.000	0.000
1.00	3.53	1.465	0.004	0.84	1.482	0.035	0.020
2.00	4.35	1.802	0.341	0.90	1.588	0.141	0.241
3.00	5.41	2.240	0.779	0.91	1.606	0.159	0.469
4.00	5.64	2.337	0.876	1.06	1.871	0.424	0.650
5.00	6.23	2.580	1.119	1.08	1.906	0.459	0.789
6.00	6.60	2.734	1.273	1.08	1.906	0.459	0.866
7.00	6.83	2.830	1.369	1.18	2.082	0.635	1.002
8.00	7.42	3.072	1.611	1.23	2.171	0.724	1.167
9.00	7.58	3.140	1.679	1.39	2.453	1.006	1.342
10.00	10.94	4.531	3.070	1.65	2.912	1.465	2.267
11.00	14.46	5.988	4.527	2.04	3.600	2.153	3.340
12.00	14.70	6.088	4.627	3.47	6.124	4.676	4.652
13.00	15.11	6.258	4.797	4.37	7.712	6.265	5.531
14.00	15.58	6.452	4.991	6.04	10.659	9.212	7.102
15.00	17.29	7.160	5.699	7.91	13.959	12.512	9.106
16.00	29.96	12.408	10.947	9.35	16.500	15.053	13.000
17.00	35.69	14.781	13.320	10.89	19.218	17.771	15.545
18.00	55.65	23.047	21.586	13.64	24.071	22.624	22.105
19.00	77.43	32.067	30.606	19.29	34.041	32.594	31.600
20.00	111.43	46.147	44.686	25.8	45.529	44.082	44.384
21.00	148.34	61.433	59.972	32.75	57.794	56.347	58.159
22.00	200.55	83.055	81.594	48.68	85.906	84.459	83.026

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค.2 ผลการทดลองระยะการเคลื่อนตัวของ แบบจำลองที่2 T-shape
ที่ความยาวแกน 5 เซนติเมตร

Depth, H (cm)	TEST 1			TEST 2			δ AVERAGE (mm)
	READING Software (mm)	Displacement, δ (mm)		READING Software (mm)	Displacement, δ (mm)		
		Calibrate	Set0		Calibrate	Set0	
0.00	3.12	1.367	0.000	0.20	0.347	0.000	0.000
1.00	3.12	1.367	0.000	0.33	0.572	0.225	0.113
2.00	3.14	1.375	0.009	0.41	0.711	0.364	0.186
3.00	3.14	1.375	0.009	0.50	0.870	0.523	0.266
4.00	3.16	1.384	0.018	0.56	0.974	0.627	0.322
5.00	3.20	1.402	0.035	0.68	1.182	0.835	0.435
6.00	3.20	1.402	0.035	0.81	1.408	1.061	0.548
7.00	3.21	1.406	0.039	0.89	1.546	1.199	0.619
8.00	3.23	1.415	0.048	0.93	1.616	1.269	0.658
9.00	3.35	1.467	0.101	1.00	1.737	1.390	0.745
10.00	3.39	1.485	0.118	1.05	1.824	1.477	0.798
11.00	3.40	1.489	0.123	1.07	1.858	1.512	0.817
12.00	3.52	1.542	0.175	1.12	1.945	1.598	0.887
13.00	3.53	1.546	0.180	1.16	2.014	1.668	0.924
14.00	3.53	1.546	0.180	1.19	2.066	1.720	0.950
15.00	4.06	1.778	0.412	1.23	2.136	1.789	1.100
16.00	4.57	2.002	0.635	1.26	2.188	1.841	1.238
17.00	5.12	2.243	0.876	1.29	2.240	1.893	1.385
18.00	5.47	2.396	1.029	1.32	2.292	1.945	1.487
19.00	7.53	3.298	1.932	1.68	2.913	2.566	2.249
20.00	10.05	4.402	3.035	2.29	3.971	3.624	3.330
21.00	14.76	6.465	5.099	3.93	6.815	6.468	5.783
22.00	16.40	7.184	5.817	4.54	7.873	7.526	6.671
23.00	319.96	140.149	138.782	95.94	166.370	166.023	152.403

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค.3 ผลการทดลองระยะการเคลื่อนตัวของ แบบจำลองที่3 T-shape
ที่ความยาวแกน 10 เซนติเมตร

Depth, H (cm)	TEST 1			TEST 2			δ AVERAGE (mm)
	READING Software (mm)	Displacement, δ (mm)		READING Software (mm)	Displacement, δ (mm)		
		Calibrate	Set0		Calibrate	Set0	
0.00	4.028	1.664	0.000	0.460	0.836	0.000	0.000
1.00	4.028	1.664	0.000	0.470	0.855	0.018	0.009
2.00	4.028	1.664	0.000	0.520	0.945	0.109	0.055
3.00	4.030	1.665	0.001	0.520	0.945	0.109	0.055
4.00	4.057	1.676	0.012	0.580	1.055	0.218	0.115
5.00	4.303	1.778	0.114	0.580	1.055	0.218	0.166
6.00	4.351	1.798	0.133	0.590	1.073	0.236	0.185
7.00	4.381	1.810	0.146	0.590	1.073	0.236	0.191
8.00	4.387	1.812	0.148	0.610	1.109	0.273	0.211
9.00	4.388	1.813	0.149	0.620	1.127	0.291	0.220
10.00	4.412	1.823	0.159	0.630	1.145	0.309	0.234
11.00	4.412	1.823	0.159	0.630	1.145	0.309	0.234
12.00	4.435	1.832	0.168	0.650	1.182	0.345	0.257
13.00	4.440	1.834	0.170	0.650	1.182	0.345	0.258
14.00	4.448	1.838	0.174	0.650	1.182	0.345	0.259
15.00	4.490	1.855	0.191	0.680	1.236	0.400	0.295
16.00	4.509	1.863	0.199	0.700	1.273	0.436	0.318
17.00	4.704	1.943	0.279	0.720	1.309	0.473	0.376
18.00	4.741	1.959	0.295	0.800	1.455	0.618	0.456
19.00	4.821	1.992	0.328	0.820	1.491	0.655	0.491
20.00	5.429	2.243	0.579	0.930	1.691	0.855	0.717
21.00	5.439	2.247	0.583	1.010	1.836	1.000	0.791
22.00	5.633	2.327	0.663	1.190	2.164	1.327	0.995
23.00	5.708	2.358	0.694	1.340	2.436	1.600	1.147
24.00	5.799	2.396	0.732	1.410	2.564	1.727	1.229

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

25.00	6.446	2.663	0.999	1.850	3.364	2.527	1.763
26.00	7.746	3.200	1.536	2.030	3.691	2.855	2.195
27.00	9.907	4.093	2.429	2.190	3.982	3.145	2.787
28.00	14.332	5.921	4.257	2.680	4.873	4.036	4.147

ตาราง ค.4 ผลการทดลองระยะการเคลื่อนตัวของ แบบจำลองที่2 T-shape ที่ความยาวแกน 15

เซนติเมตร

Depth, H (cm)	TEST 1			TEST 2			δ AVERAGE (mm)
	READING Software (mm)	Displacement, δ (mm)		READING Software (mm)	Displacement, δ (mm)		
		Calibrate	Set0		Calibrate	Set0	
0.00	0.000	0.000	0.000	0.300	0.529	0.000	0.000
1.00	0.000	0.000	0.000	0.300	0.529	0.000	0.000
2.00	0.000	0.000	0.000	0.310	0.547	0.018	0.009
3.00	0.000	0.000	0.000	0.320	0.565	0.035	0.018
4.00	0.000	0.000	0.000	0.380	0.671	0.141	0.071
5.00	0.000	0.000	0.000	0.410	0.724	0.194	0.097
6.00	0.000	0.000	0.000	0.450	0.794	0.265	0.132
7.00	0.000	0.000	0.000	0.470	0.829	0.300	0.150
8.00	0.000	0.000	0.000	0.470	0.829	0.300	0.150
9.00	0.000	0.000	0.000	0.480	0.847	0.318	0.159
10.00	0.000	0.000	0.000	0.490	0.865	0.335	0.168
11.00	0.000	0.000	0.000	0.490	0.865	0.335	0.168
12.00	0.000	0.000	0.000	0.510	0.900	0.371	0.185
13.00	0.000	0.000	0.000	0.510	0.900	0.371	0.185
14.00	0.000	0.000	0.000	0.520	0.918	0.388	0.194
15.00	0.000	0.000	0.000	0.530	0.935	0.406	0.203
16.00	0.000	0.000	0.000	0.530	0.935	0.406	0.203
17.00	0.000	0.000	0.000	0.540	0.953	0.424	0.212
18.00	0.000	0.000	0.000	0.550	0.971	0.441	0.221
19.00	0.000	0.000	0.000	0.580	1.024	0.494	0.247

20.00	0.000	0.000	0.000	0.650	1.147	0.618	0.309
21.00	0.000	0.000	0.000	0.710	1.253	0.724	0.362
22.00	0.000	0.000	0.000	0.760	1.341	0.812	0.406
23.00	0.441	0.184	0.184	0.810	1.429	0.900	0.542
24.00	0.810	0.337	0.337	0.850	1.500	0.971	0.654
25.00	1.293	0.538	0.538	0.880	1.553	1.024	0.781
26.00	2.270	0.945	0.945	1.030	1.818	1.288	1.117
27.00	3.067	1.277	1.277	1.130	1.994	1.465	1.371
28.00	6.585	2.742	2.742	1.470	2.594	2.065	2.404



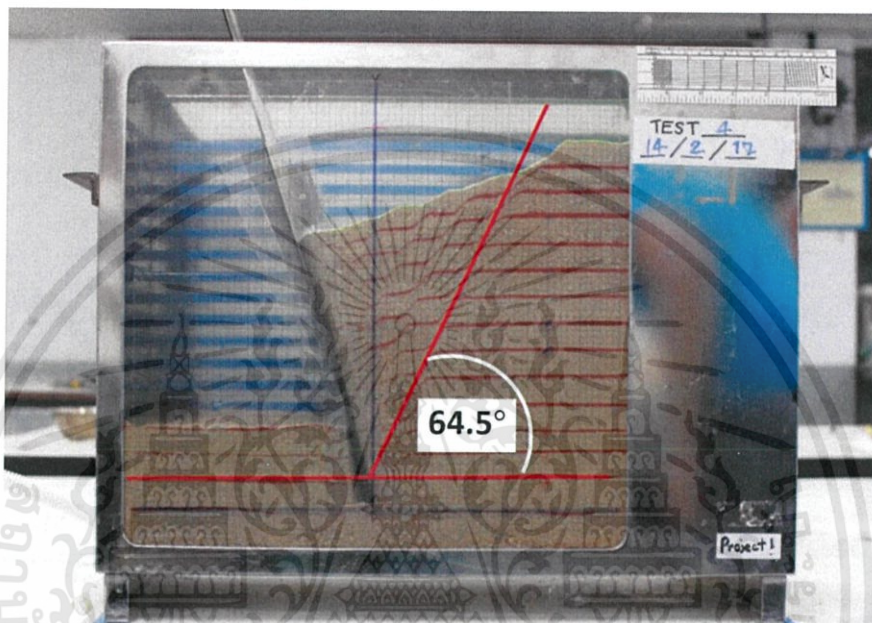
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

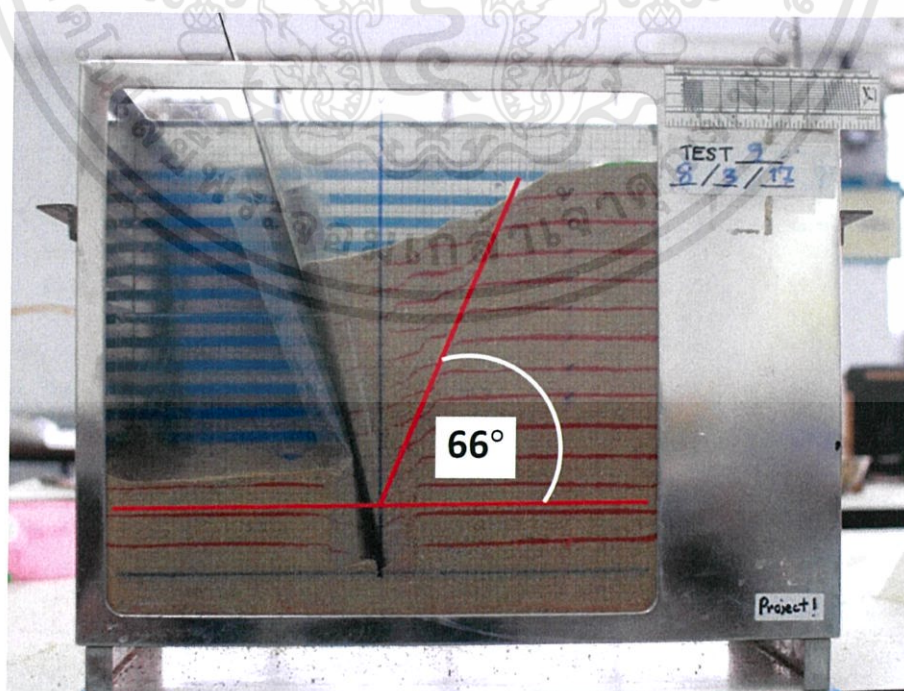
รูปภาพของแบบจำลอง

ง.1 รูปของแบบจำลองหลังเกิดการพิบัติ

ง.1.1 ระบบกำแพงกันดินจำลอง รูปแบบ Single Wall



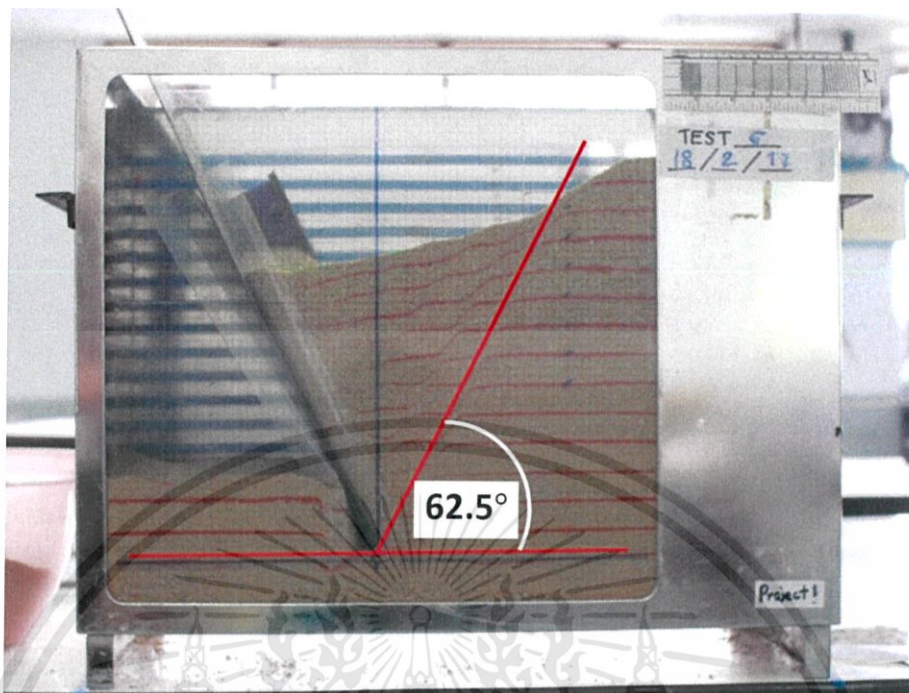
รูป ง.1 การทดลองระบบกำแพงกันดินจำลอง รูปแบบ Single Wall ครั้งที่ 1



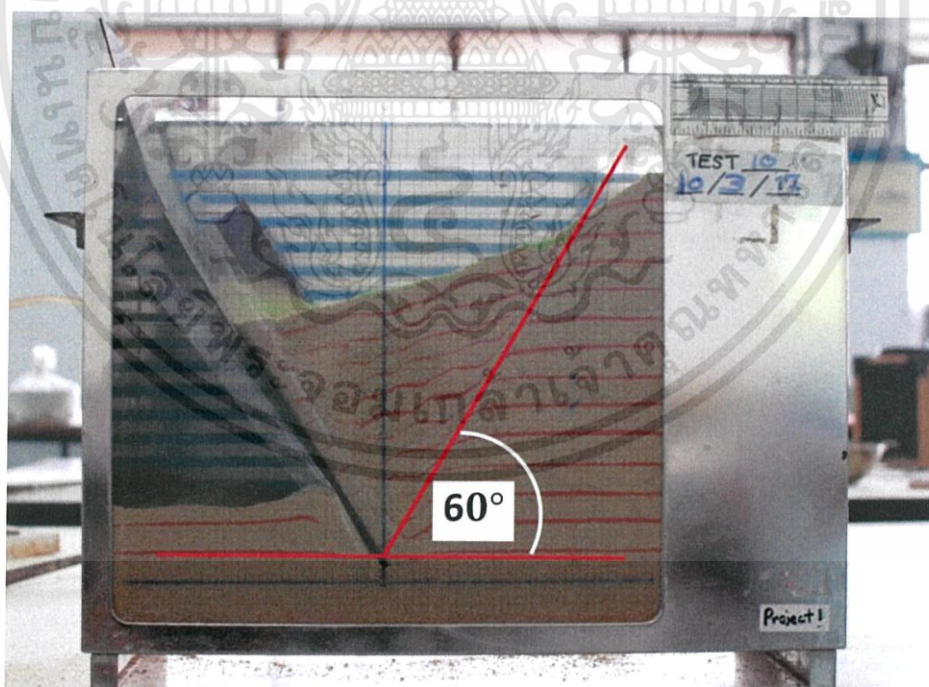
รูป ง.2 การทดลองระบบกำแพงกันดินจำลอง รูปแบบ Single Wall ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง.1.2 ระบบกำแพงกันดินจำลอง รูปแบบ T-shape ที่ความยาวแกน 5 เซนติเมตร



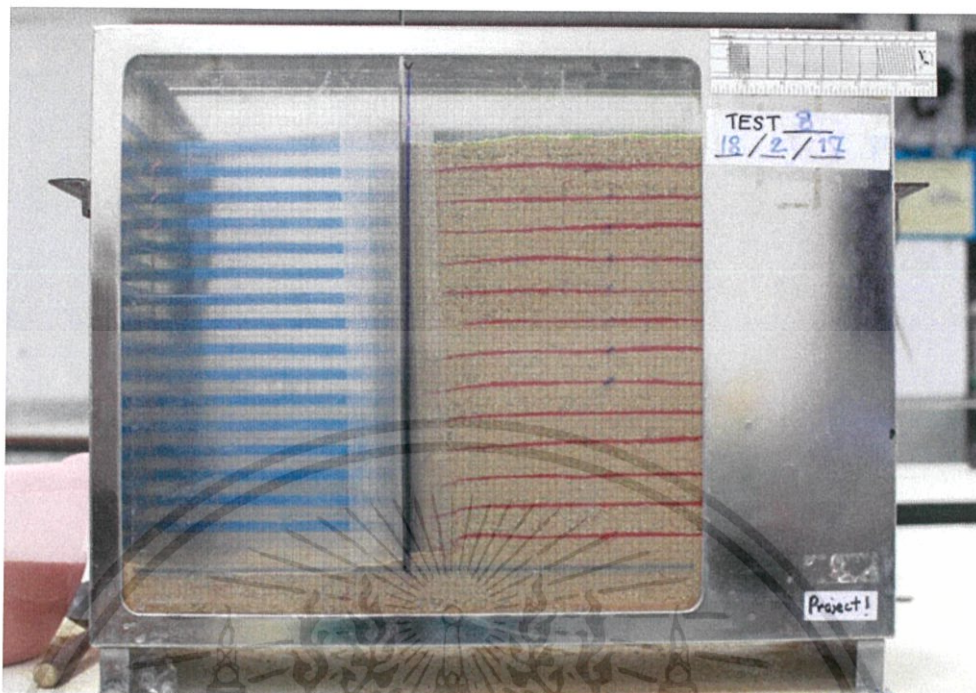
รูป ง.3 การทดลองระบบกำแพงกันดินจำลอง รูปแบบ T-shape ที่ความยาวแกน 5 เซนติเมตร ครั้งที่ 1



รูป ง.4 การทดลองระบบกำแพงกันดินจำลอง รูปแบบ T-shape ที่ความยาวแกน 5 เซนติเมตร ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง.1.3 ระบบกำแพงกันดินจำลอง รูปแบบ T-shape ที่ความยาวแกน 10 เซนติเมตร



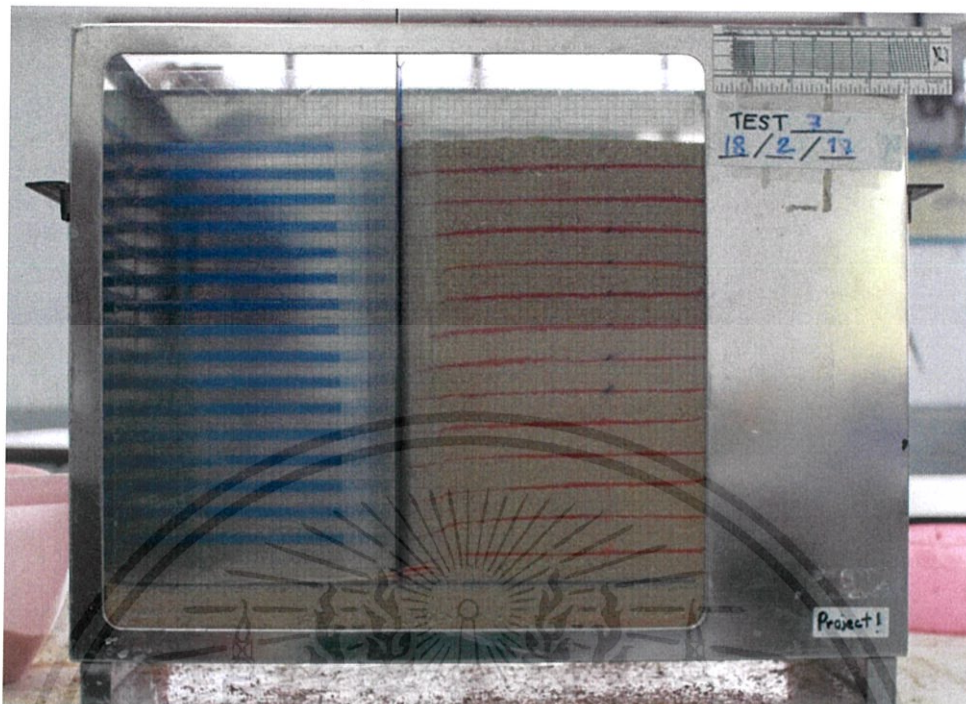
รูป ง.5 การทดลองระบบกำแพงกันดินจำลอง รูปแบบ T-shape ที่ความยาวแกน 10 เซนติเมตร ครั้งที่1



รูป ง.6 การทดลองระบบกำแพงกันดินจำลอง รูปแบบ T-shape ที่ความยาวแกน 10 เซนติเมตร ครั้งที่2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง.1.4 ระบบกำแพงกันดินจำลอง รูปแบบ T-shape ที่ความยาวแกน 15 เซนติเมตร



รูป ง.7 การทดลองระบบกำแพงกันดินจำลอง รูปแบบ T-shape ที่ความยาวแกน 15 เซนติเมตร ครั้งที่1



รูป ง.8 การทดลองระบบกำแพงกันดินจำลอง รูปแบบ T-shape ที่ความยาวแกน 15 เซนติเมตร ครั้งที่2

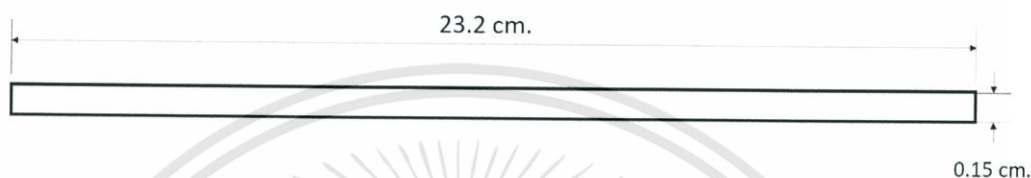
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

การคำนวณโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่

จ.1 การคำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ (Area Moment of Inertia) ของหน้าตัดแต่ละรูปแบบ

ก) วิธีคำนวณค่า I ของกำแพงเข็มพืดแบบ single wall

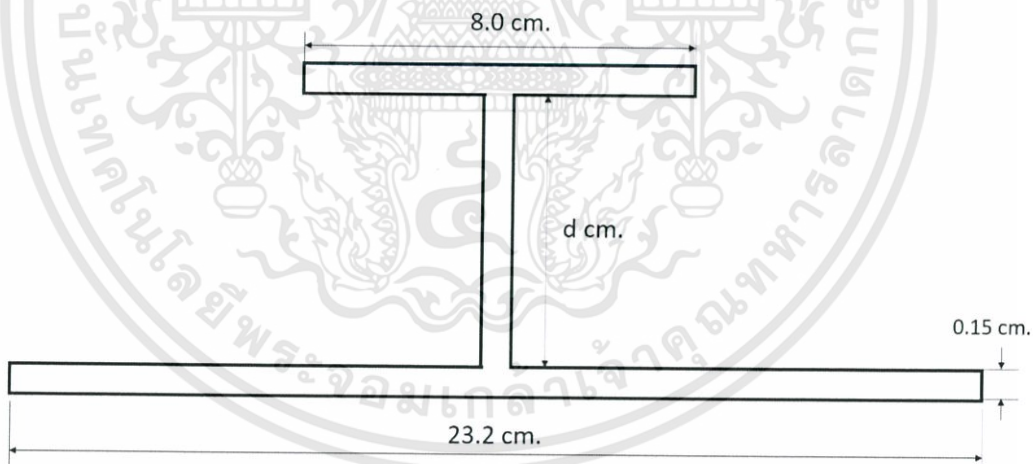


รูป จ.1 แบบจำลองกำแพงกันดินแบบเข็มพืด แบบ Single Wall

จาก $I = \frac{bh^3}{12}$ เมื่อ $b = 23.2$ เซนติเมตร และ $h = 0.15$ เซนติเมตร

$$\text{จะได้ } I = \frac{(23.2)(0.15)^3}{12} = 0.006525 \text{ เซนติเมตร}^4$$

ข) วิธีคำนวณค่า I ของกำแพงเข็มพืดแบบ T-shape แบบจำลองที่ 2 3 และ 4



รูป จ.2 แบบจำลองกำแพงกันดินแบบเข็มพืด แบบ T-Shape

1) แบบจำลองที่ 2

เมื่อค่า $d = 5.0$ เซนติเมตร

$$\text{จาก } I = \frac{bh^3}{12} + Ad^2$$

หาจุดศูนย์กลางของรูปหน้าตัด ด้วยวิธี Moment of Area ที่จุดต่ำสุดของหน้าตัด

โดย ความสูงรวม = $0.15 + 5.0 + 0.15 = 5.3$ เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{x} = \frac{(8.0)(0.15)\left(5.3 - \frac{0.15}{2}\right) + (5.0)(0.15)\left(2.5 + \frac{0.15}{2}\right) + (23.2)(0.15)\left(\frac{0.15}{2}\right)}{(8.0)(0.15) + (5.0)(0.15) + (23.2)(0.15)}$$

$$\bar{x} = 1.558$$

จะได้ $C_b = 1.558$ เซนติเมตร $C_t = 3.742$ เซนติเมตร

$$I_1 = \frac{(8.0)(0.15)^3}{12} + (8.0)(0.15)\left(3.742 - \frac{0.15}{2}\right)^2$$

$$I_1 = 16.139 \text{ เซนติเมตร}^4$$

$$I_2 = \frac{(0.15)(5.0)^3}{12} + (5.0)(0.15)(3.742 - 2.65)^2$$

$$I_2 = 2.457 \text{ เซนติเมตร}^4$$

$$I_3 = \frac{(23.2)(0.15)^3}{12} + (23.2)(0.15)\left(1.558 - \frac{0.15}{2}\right)^2$$

$$I_3 = 7.660 \text{ เซนติเมตร}^4$$

$$I_{\text{รวม}} = 16.139 + 2.457 + 7.660 = 26.256 \text{ เซนติเมตร}^4$$

2) แบบจำลองที่ 3

เมื่อค่า $d = 10.0$ เซนติเมตร

$$\text{จาก } I = \frac{bh^3}{12} + Ad^2$$

หาจุดศูนย์กลางของรูปหน้าตัด ด้วยวิธี Moment of Area ที่จุดต่ำสุดของหน้าตัด

โดย ความสูงรวม = $0.15 + 10.0 + 0.15 = 10.3$ เซนติเมตร

$$\bar{x} = \frac{(8.0)(0.15)\left(10.3 - \frac{0.15}{2}\right) + (10.0)(0.15)\left(5 + \frac{0.15}{2}\right) + (23.2)(0.15)\left(\frac{0.15}{2}\right)}{(8.0)(0.15) + (10.0)(0.15) + (23.2)(0.15)}$$

$$\bar{x} = 3.259$$

จะได้ $C_b = 3.259$ เซนติเมตร $C_t = 7.041$ เซนติเมตร

$$I_1 = \frac{(8.0)(0.15)^3}{12} + (8.0)(0.15)\left(7.041 - \frac{0.15}{2}\right)^2$$

$$I_1 = 58.232 \text{ เซนติเมตร}^4$$

$$I_2 = \frac{(0.15)(10.0)^3}{12} + (10.0)(0.15)(7.041 - 5.15)^2$$

$$I_2 = 17.864 \text{ เซนติเมตร}^4$$

$$I_3 = \frac{(23.2)(0.15)^3}{12} + (23.2)(0.15)\left(3.259 - \frac{0.15}{2}\right)^2$$

$$I_3 = 35.286 \text{ เซนติเมตร}^4$$

$$I_{\text{รวม}} = 58.232 + 17.864 + 35.286$$

$$= 111.382 \text{ เซนติเมตร}^4$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) แบบจำลองที่ 4

เมื่อค่า $d = 15.0$ เซนติเมตร

$$\text{จาก } I = \frac{bh^3}{12} + Ad^2$$

หาจุดศูนย์กลางถ่วงของรูปหน้าตัด ด้วยวิธี Moment of Area ที่จุดต่ำสุดของหน้าตัด

โดย ความสูงรวม = $0.15 + 15.0 + 0.15 = 15.3$ เซนติเมตร

$$\bar{x} = \frac{(8.0)(0.15) \left(15.3 - \frac{0.15}{2}\right) + (15.0)(0.15) \left(7.5 + \frac{0.15}{2}\right) + (23.2)(0.15) \left(\frac{0.15}{2}\right)}{(8.0)(0.15) + (15.0)(0.15) + (23.2)(0.15)}$$

$$\bar{x} = 4.267$$

จะได้ $C_b = 4.268$ เซนติเมตร $C_t = 11.032$ เซนติเมตร

$$I_1 = \frac{(8.0)(0.15)^3}{12} + (8.0)(0.15) \left(11.032 - \frac{0.15}{2}\right)^2$$

$$I_1 = 144.069 \text{ เซนติเมตร}^4$$

$$I_2 = \frac{(0.15)(15.0)^3}{12} + (15.0)(0.15) (11.032 - 7.65)^2$$

$$I_2 = 67.923 \text{ เซนติเมตร}^4$$

$$I_3 = \frac{(23.2)(0.15)^3}{12} + (23.2)(0.15) \left(4.268 - \frac{0.15}{2}\right)^2$$

$$I_3 = 61.189 \text{ เซนติเมตร}^4$$

$$I_{\text{รวม}} = 144.069 + 67.923 + 61.189 \\ = 273.181 \text{ เซนติเมตร}^4$$

ภาคผนวก ฉ

เกี่ยวกับภาคผนวก

ฉ.1 อัตราส่วนของระยะเคลื่อนของกำแพงกันดินต่อความลึกของการขุด

ตาราง ฉ.1 แสดงการคำนวณอัตราส่วนของระยะเคลื่อนของกำแพงกันดินต่อความลึกของการขุด

Depth, H (cm)	Average displacement, δ (mm)				δ/H			
	single	5 cm	10 cm	15 cm	single	5 cm	10 cm	15 cm
0	0.000	0.000	0.000	0.000	-	-	-	-
1	0.020	0.113	0.009	0.000	0.002	0.011	0.0009	0.0000
2	0.241	0.186	0.055	0.009	0.012	0.009	0.0027	0.0004
3	0.469	0.266	0.055	0.018	0.016	0.009	0.0018	0.0006
4	0.650	0.322	0.115	0.071	0.016	0.008	0.0029	0.0018
5	0.789	0.435	0.166	0.097	0.016	0.009	0.0033	0.0019
6	0.866	0.548	0.185	0.132	0.014	0.009	0.0031	0.0022
7	1.002	0.619	0.191	0.150	0.014	0.009	0.0027	0.0021
8	1.167	0.658	0.211	0.150	0.015	0.008	0.0026	0.0019
9	1.342	0.745	0.220	0.159	0.015	0.008	0.0024	0.0018
10	2.267	0.798	0.234	0.168	0.023	0.008	0.0023	0.0017
11	3.340	0.817	0.234	0.168	0.030	0.007	0.0021	0.0015
12	4.652	0.887	0.257	0.185	0.039	0.007	0.0021	0.0015
13	5.531	0.924	0.258	0.185	0.043	0.007	0.0020	0.0014
14	7.102	0.950	0.259	0.194	0.051	0.007	0.0019	0.0014
15	9.106	1.100	0.295	0.203	0.061	0.007	0.0020	0.0014
16	13.000	1.238	0.318	0.203	0.081	0.008	0.0020	0.0013
17	15.545	1.385	0.376	0.212	0.091	0.008	0.0022	0.0012
18	22.105	1.487	0.456	0.221	0.123	0.008	0.0025	0.0012
19	31.600	2.249	0.491	0.247	0.166	0.012	0.0026	0.0013
20	44.384	3.330	0.717	0.309	0.222	0.017	0.0036	0.0015
22	58.159	5.783	0.791	0.362	0.277	0.028	0.0038	0.0017
23	83.026	6.671	0.995	0.406	0.377	0.030	0.0045	0.0018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ฉ.1 แสดงการคำนวณอัตราส่วนของระยะเคลื่อนของกำแพงกันดินต่อความลึกของการขุด(ต่อ)

Depth, H (cm)	Average displacement, δ (mm)				δ/H			
	single	5 cm	10 cm	15 cm	single	5 cm	10 cm	15 cm
24		152.403	1.147	0.542		0.663	0.0050	0.0024
25			1.229	0.654			0.0051	0.0027
26			1.763	0.781			0.0071	0.0031
27			2.195	1.117			0.0084	0.0043
28			2.787	1.371			0.0103	0.0051



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้