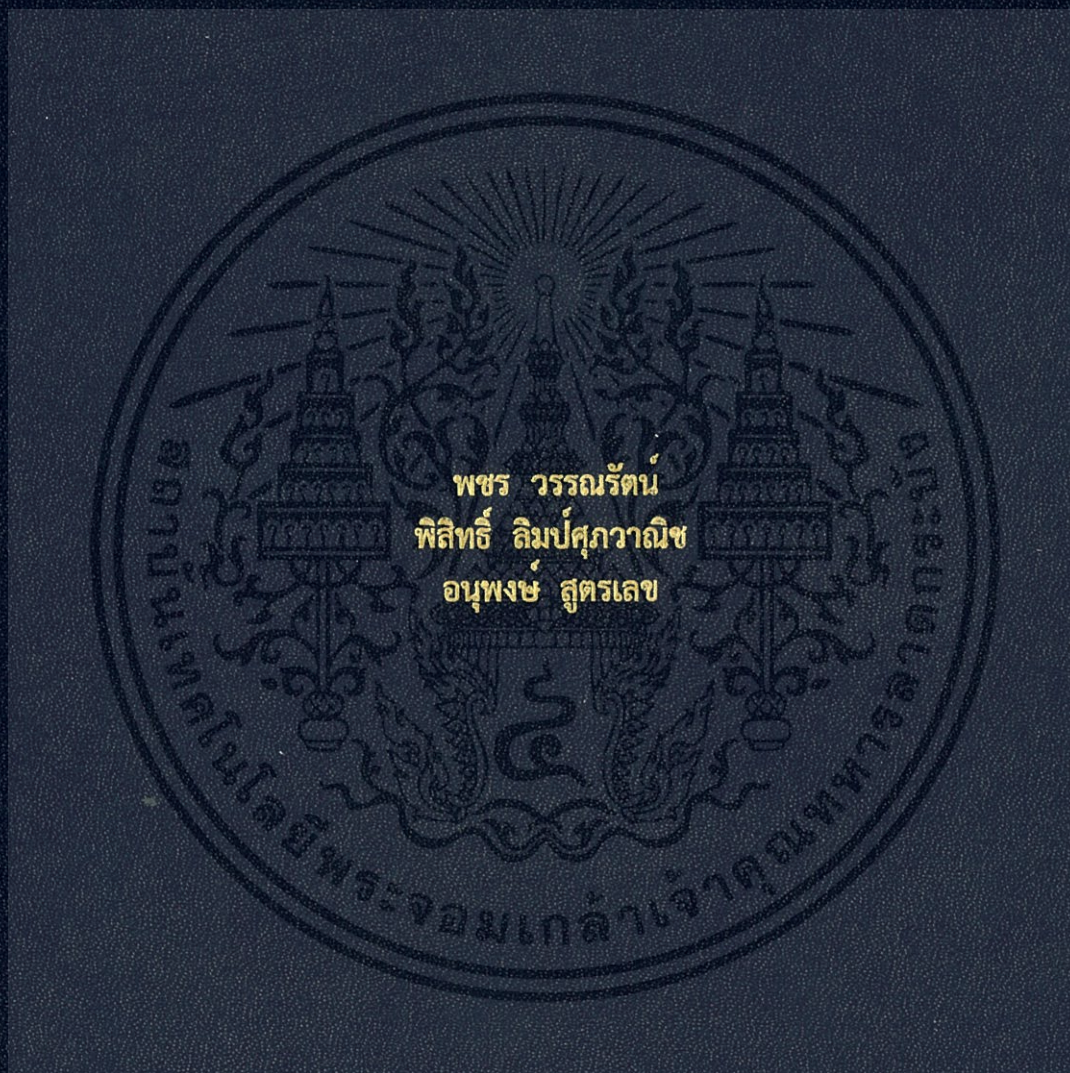


การศึกษาการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเสริมเสถียรภาพกำลังเข็มพืด
ในชั้นทรายด้วยแบบจำลอง
STUDY OF SOIL-CEMENT COLUMN TO IMPROVE STABILITY
OF SHEET PILE USING PHYSICAL MODEL



พชร วรรณรัตน์
พิสิทธิ์ ลิ้มปัสกุลวณิช
อนุพงษ์ สุตรเลข

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การศึกษาการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเสริมเสถียรภาพกำลังเข็มพืด
ในชั้นทรายด้วยแบบจำลอง

STUDY OF SOIL-CEMENT COLUMN TO IMPROVE STABILITY
OF SHEET PILE USING PHYSICAL MODEL



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF SOIL-CEMENT COLUMN TO IMPROVE STABILITY
OF SHEET PILE USING PHYSICAL MODEL



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 การศึกษาการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเสริมเสถียรภาพกำลังเข็มพืด
ในชั้นทรายด้วยแบบจำลอง

นักศึกษา นายพชร วรรณรัตน์ รหัสประจำตัว 56010797
นายพิสิทธิ์ ลิมป์ศุภวานิช รหัสประจำตัว 56010875
นายอนุพงษ์ สุตรเลข รหัสประจำตัว 56011402

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 13.30-17.30 น.
สถานที่สอบ ณ อาคารภาควิชาวิศวกรรมโยธาชั้น 1 (ห้องประชุมภาควิชา)

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว



(รศ.ดร.นันทวัฒน์ จรัสโรจน์จนเดช)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 12 มิ.ย. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเสริมเสถียรภาพกำลัง เข็มพีตในชั้นทรายด้วยแบบจำลอง

นายเพชร	วรรณรัตน์	รหัสประจำตัว	56010797
นายพิสิทธิ์	ลิมป์ศุภวานิช	รหัสประจำตัว	56010875
นายอนุพงษ์	สูตรเลข	รหัสประจำตัว	56011402

ผศ.ดร. ธนาตล คงสมบูรณ์
ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

เนื่องในปัจจุบันมีการก่อสร้างใต้ดินเพิ่มมากขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาเทคนิคการก่อสร้างเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโครงสร้างกันดิน โดยวิธีการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินมีหลายวิธี เช่น การเพิ่มระยะฝังของกำแพงกันดิน การใช้สมอยัด การใช้ระบบค้ำยัน เป็นต้น ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของกำแพงเข็มพีต ศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน และการพิบัติของดินบริเวณโดยรอบ ทำการศึกษารูปแบบของการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ 3 รูปแบบ ได้แก่ การเรียงเสาเข็มดินซีเมนต์แนบไปกับกำแพงเข็มพีต การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ปักเว้นระยะทั้งทางด้านดินเชิงรุกและเชิงรับ การเรียงเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นแถวตั้งฉากกับกำแพงกันดิน ทำการศึกษาด้วยแบบจำลองทางกายภาพในชั้นทรายตัวอย่างที่มีค่า $\Phi = 29.9^\circ$ จากการทดลอง การติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์เรียงแถวตั้งฉากกับกำแพงกันดินในด้านแรงดันดินเชิงรุกเป็นการเพิ่มแรงต้านทานแบบแรงเสียดทานด้านข้างแนวเสาเข็มดินซีเมนต์ ทำให้กำแพงเข็มพีตมีแรงต้านทานการเคลื่อนตัวจากแรงดันดินได้เพิ่มขึ้น และมีประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวได้ดีกว่าการติดตั้งในรูปแบบอื่น

คำสำคัญ – กำแพงกันดิน; เสาเข็มดิน-ซีเมนต์; แรงดันดินด้านข้าง; แบบจำลองทางกายภาพ

STUDY OF SOIL-CEMENT COLUMN TO IMPROVE STABILITY OF SHEET PILE USING PHYSICAL MODEL

Phachara Wannarat Student ID. 56010797

Pisit Limsupawanich Student ID. 56010875

Anupong Sootlek Student ID. 56011402

ASST.PROF.DR.Thanadol Kongsomboon

Academic Year 2016

ABSTRACT

At this time, there is a great increase in underground constructions. Therefore, it is necessary to develop technical construction to increase efficiency of soil protection system. Movement of soil protection system can be decreased by many ways such as increasing depth of retaining wall, using an anchor, and bracing. This research aims to study the use of soil cement column to increase the stability of sheet pile by focusing on the movement of soil protection system and soil failure. Three types of soil cement columns are installed: soil cement columns which attached to the sheet pile wall, soil cement columns which were perpendicular with the sheet pile wall, and soil cement columns which located on both active side and passive side of the sheet pile wall. This research is conducted by using physical sand model ($\Phi = 29.9^\circ$). The result shows that installing the soil cement columns which were perpendicular with sheet pile in active side increase resistance around the soil cement column, and the movement can be resisted by sheet pile wall from earth pressure and this installation type can decrease more movement than others.

Keywords—retaining wall; soil-cement column; lateral earth pressure; physical model

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ!!ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.ขนาดล คงสมบุรณ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษาปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องอีกทั้งยังจัดหาเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนให้ความรู้ เอาใจใส่ ให้คำแนะนำช่วยเหลือในการแก้ปัญหา ให้ประสบความสำเร็จดี อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งกับโครงการนี้ พวกเราผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธาสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ในทุกๆรายวิชาที่ศึกษาเพื่อเป็นพื้นฐาน อันเป็นประโยชน์ยิ่งในการทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้ให้สำเร็จลุล่วง ตลอดจนอาจารย์ประจำภาควิชาท่านต่างๆที่ให้คำแนะนำอย่างดียิ่ง

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่คอยให้คำแนะนำ ช่วยเหลือในการให้คำแนะนำในการทำโครงการ รวมถึงการให้ความรู้ตลอดระยะเวลาที่ได้เรียนรู้ ศึกษาในภาควิชาโยธานี้ตลอดมา

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดาอันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้ความรักและให้กำลังใจในการสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนของคณะผู้จัดทำมาโดยตลอด ทำให้คณะผู้จัดทำมีวันนี้ได้ คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างสูง

พชร วรรณรัตน์
พิสิทธิ์ ลิ้มปัสสุภาณิช
อนุพงษ์ สุตรเลข

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 วิธีการศึกษา.....	3
บทที่ 2 เอกสารที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 แรงดันดินด้านข้าง (Lateral Earth Pressure).....	5
2.2 โครงสร้างกำแพงกันดิน (Retaining Structure).....	12
2.3 เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพโครงสร้างกันดิน.....	21
2.4 การปรับปรุงคุณภาพดินชั้นลึก (Soft Ground with Deep Mixing Method).....	22
2.5 กลไกการปรับปรุงคุณสมบัติของดินโดยผสมซีเมนต์.....	23
2.6 การออกแบบและการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์.....	24
2.7 การพัฒนากำลังของวัสดุผสมดินซีเมนต์.....	29
2.8 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผสมดินซีเมนต์.....	29
2.9 แนวทางการประยุกต์ใช้ประโยชน์จาก Cement Column.....	30
2.10 การทดสอบคุณภาพเสาเข็มดินซีเมนต์.....	34
2.11 องค์ประกอบที่มีผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์.....	37
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	38
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	42
3.1 บทนำ.....	42
3.2 คุณสมบัติของดินตัวอย่างในแบบจำลอง.....	43
3.3 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	57
3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์และเปรียบเทียบข้อมูล	62
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	67
4.1 บทนำ.....	67
4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของทรายที่ใช้ในการศึกษา	67
4.3 ผลการทดสอบเพื่อหาค่า Elastic modulus ของกำแพงตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา.....	70
4.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดเสาเข็มดินซีเมนต์จำลอง	72
4.5 ผลการศึกษาจากแบบจำลอง.....	72
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	96
5.1 บทนำ.....	96
5.2 สรุปผลการทดลอง	96
5.3 ข้อเสนอแนะ	97
เอกสารอ้างอิง	98
ภาคผนวก ก.....	100
ภาคผนวก ข.....	102
ภาคผนวก ค.....	109
ภาคผนวก ง.....	116
ภาคผนวก จ.....	121
ภาคผนวก ฉ.....	123

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ตารางแสดงระยะเวลาดำเนินงาน	4
ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนปลอดภัยที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินควรมากกว่าค่าที่แสดง	18
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของดินที่ผ่านการปรับปรุงกำลัง.....	29
ตารางที่ 3.1 การหาจุดพิบัติของกำแพงเข็มพีดีโดย Arthur Casagrande's graphical method ,1936	64
ตารางที่ 3.2 การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินที่ทำให้เกิดสถานะActive	66
ตารางที่ 3.3 การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินที่ทำให้เกิดสถานะPassive	66
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลขนาดคละและชนิดของเม็ดดิน	67
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบ Direct shear	68
ตารางที่ 4.3 ข้อมูล Calibration of Pycnometer	69
ตารางที่ 4.4 ข้อมูลความถ่วงจำเพาะของทราย	70
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าแรงคงที่ของวงแหวนวัดแรง.....	70
ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณเพื่อหาค่า Elastic modulus.....	67
ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดเสาเข็มดินซีเมนต์	68
ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงผลคำนวณของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดแบบจำลอง	76
ตารางที่ 4.9 ตารางแสดงจุดพิบัติของแบบจำลองทั้ง 6 รูปแบบ	81
ตารางที่ 4.10 ตารางแสดงค่ามุมที่เกิดขึ้น(Experiment angle, ϕ)ของแบบจำลอง.....	83
ตารางที่ ข.1 ค่าแรงคงที่ของวงแหวนวัดแรง	106
ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณเพื่อหาค่า Elastic modulus	107
ตารางที่ ข.3 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดเสาเข็มดินซีเมนต์	108
ตารางที่ ค.1 ผลการทดลองระยะการเคลื่อนตัวของแบบจำลองที่ 1 รูปแบบ Single wall.....	110
ตารางที่ ค.2 ผลการทดลองระยะการเคลื่อนตัวของแบบจำลองที่ 2 รูปแบบ Parallel	111
ตารางที่ ค.3 ผลการทดลองระยะการเคลื่อนตัวของแบบจำลองที่ 3 รูปแบบ Spacing at active	112
ตารางที่ ค.4 ผลการทดลองระยะการเคลื่อนตัวของแบบจำลองที่ 4 รูปแบบ Perpendicular at active.....	113
ตารางที่ ค.5 ผลการทดลองระยะการเคลื่อนตัวของแบบจำลองที่ 5 รูปแบบ Spacing at passive.....	114

สารบัญตาราง(ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ค.6 ผลการทดลองระยะการเคลื่อนตัวของแบบจำลองที่ 6	
รูปแบบ Perpendicular at passive.....	115
ตารางที่ ฉ.1 แสดงการคำนวณอัตราส่วนของระยะเคลื่อนของกำแพงกันดินต่อความลึก	
ของการขุด	122



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 วิธีการศึกษางานวิจัย	3
รูปที่ 2.1 แรงความดันดินด้านข้าง	5
รูปที่ 2.2 ความดันดินที่ความลึก Z	6
รูปที่ 2.3 การกระจายความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่งและความดันน้ำ	6
รูปที่ 2.4 ระนาบการพิบัติที่ถูกลมมติขึ้นตามทฤษฎีของ Rankine	7
รูปที่ 2.5 ความดันดินด้านข้างทฤษฎี Rankine	8
รูปที่ 2.6 วงกลมมอร์สถานะของความเค้นประสิทธิผลที่ 3 สภาวะ	8
รูปที่ 2.7 วงกลมมอร์สถานะของความเค้นประสิทธิผลที่ 3 สภาวะ	9
รูปที่ 2.8 แผนภูมิแรงดัน	10
รูปที่ 2.9 แบบจำลองทฤษฎีของcoulomb	11
รูปที่ 2.10 แบบการใช้งานโครงสร้างกันดิน	12
รูปที่ 2.11 กำแพงกันดิน Gravity Wall	12
รูปที่ 2.12 กำแพงกันดิน Piling Wall	13
รูปที่ 2.13 กำแพงกันดิน Cantilever Wall	13
รูปที่ 2.14 กำแพงกันดิน Anchored Wall	13
รูปที่ 2.15 กำแพงกันดินขาดเสถียรภาพ	14
รูปที่ 2.16 แรงที่กระทำต่อกำแพงกันดิน	15
รูปที่ 2.17 การพิบัติของกำแพงกันดิน	15
รูปที่ 2.18 แรงด้านที่กระทำเนื่องจากด้าน passive	16
รูปที่ 2.19 แรงที่กระทำได้ฐานกำแพงกันดิน	17
รูปที่ 2.20 การขาดเสถียรภาพภายนอกของเข็มพืดที่ต้องอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน	19
รูปที่ 2.21 ความดันดินด้านข้างที่กระทำต่อ Cantilever sheet pile wall	19
รูปที่ 2.22 พฤติกรรมที่กระทำต่อเข็มพืด	20
รูปที่ 2.23 การกระจายของการเสียรูปและโมเมนต์ของ Anchored sheet pile wall	20
รูปที่ 2.24 แรงที่กระทำต่อเข็มพืดเมื่อหาโมเมนต์	21
รูปที่ 2.25 รูปแบบของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ตอกแบบตามความหนาของชั้นดินอ่อน	24
รูปที่ 2.26 Type of Soil Cement Column Construction	26
รูปที่ 2.27 Jet Grouting	27
รูปที่ 2.28 เครื่องจักรในการทำ Jet Grouting	28

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.29 Dry Jet Mixing	28
รูปที่ 2.30 เครื่องจักรในการทำ Dry Jet Grouting	28
รูปที่ 2.31 งานฉีดปูนทาสองชั้นน้ำต้านแรงกัดเซาะของน้ำบริเวณริมตลิ่ง	31
รูปที่ 2.32 งานปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้ดินรอบอุโมงค์ป้องกันไม่ให้ดิน ยุบตัวลงมาในขณะที่ขุดและสามารถทำผนังอุโมงค์ถาวรที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าปกติ	31
รูปที่ 2.33 สร้างกำแพงป้องกันดินพังทลายในขณะที่ปฏิบัติงานขุดลึก	31
รูปที่ 2.34 งานกำแพงป้องกันการรั่วซึมผ่านคันดินแม่น้ำ คลองส่งน้ำและอ่างเก็บน้ำ	32
รูปที่ 2.35 งานซ่อมแซมฐานรากที่มีการทรุดตัวของโบราณสถาน	32
รูปที่ 2.36 งานปรับปรุงดินใต้ฐานรากเพื่อเสริมความแข็งแรงของอาคาร	32
รูปที่ 2.37 งานสมอยึดรั้งกำแพงกันดินตามไหล่เขาที่มีความชันมาก	33
รูปที่ 2.38 งานสร้างผนังซีเมนต์เพื่อเป็นเขื่อนเก็บกักน้ำใต้ดินไว้ในฤดูแล้ง	33
รูปที่ 2.39 ทำแนวกำแพงรอบฐานรากของสะพานเพื่อป้องกันการกัดเซาะของน้ำที่จะเกิดกับ ฐานรากของสะพาน	33
รูปที่ 2.40 การใช้เสาเข็มดิน-ซีเมนต์เสริมกำลังของลาดดิน	34
รูปที่ 2.41 ตัวอย่างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ทดสอบ	34
รูปที่ 2.42 การเก็บตัวอย่างเสาเข็มซีเมนต์มาทดสอบในห้องปฏิบัติการ	35
รูปที่ 2.43 การทดสอบหาค่ารับน้ำหนักของเสาเข็ม-ซีเมนต์โดยวิธี Static Pile Load Test	35
รูปที่ 2.44 การทดสอบหาขนาดความลึกและขนาดหัวเสาเข็มดินซีเมนต์	35
รูปที่ 2.45 การถอนเสาเข็มดินซีเมนต์ขึ้นมาวัดความยาวและผ่าตัวอย่างออก	36
รูปที่ 2.46 วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพิจารณาความสม่ำเสมอของเนื้อดินซีเมนต์	36
รูปที่ 2.47 การทดสอบแบบ 4 Holes Coring	36
รูปที่ 2.48 ข้อมูลของเสาเข็มซีเมนต์ที่ระดับความลึกต่างๆ	37
รูปที่ 2.49 ไดอะแกรม Schematic ของอุปกรณ์การทดสอบ	38
รูปที่ 2.50 แบบจำลองสำหรับการเสริมแรงในดินตัวอย่าง	38
รูปที่ 2.51 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกระทำและการเคลื่อนตัวสำหรับการเสริมแรงใน ดินตัวอย่างด้วยรูปแบบที่แตกต่างกัน	39
รูปที่ 2.52 เสาเข็มโดยการผสมลิก (a) โดยใช้ความลึกที่แตกต่างกัน (b) โดยใช้ การกระจายแบบ Rhombic	39

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.53 การเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงที่วัดได้และค่าการเคลื่อนตัว ของกำแพงจากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	40
รูปที่ 2.54 ข้อมูลการเคลื่อนตัวของกำแพง สำหรับชั้นดินที่มีการ grout และไม่มีกรout	41
รูปที่ 3.1 การทดสอบ Grain Size Analysis ของทรายตัวอย่าง	44
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ในการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน	45
รูปที่ 3.3 ชั่งน้ำหนักเพื่อ Calibrate Pycnometer ที่ใช้งาน	46
รูปที่ 3.4 การชั่งน้ำหนักเพื่อหาความถ่วงจำเพาะ	46
รูปที่ 3.5 การทดสอบ Direct Shear เพื่อหามุมเสียดทานภายใน	49
รูปที่ 3.6 การวัดมุมจากการโรยทรายให้ตกอย่างอิสระ	49
รูปที่ 3.7 แบบจำลองกำแพงเข็มพืด แบบ Single Wall.....	50
รูปที่ 3.8 แบบจำลองกำแพงเข็มพืด แบบ Single Wall โดยมีการจัดเรียงเสาเข็มดินซีเมนต์ ขนานตัวไปกับกำแพงเข็มพืด.....	50
รูปที่ 3.9 แบบจำลองกำแพงเข็มพืดแบบ Single Wall โดยติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ เรียงตัวตั้งฉากทางด้าน Active	51
รูปที่ 3.10 แบบจำลองกำแพงเข็มพืดแบบ Single Wall โดยติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์เรียงตัว ตั้งฉากทางด้าน Passive	51
รูปที่ 3.11 แบบจำลองกำแพงเข็มพืดแบบ Single Wall และมีการปักกระจายตัวของเสาเข็ม ดินซีเมนต์ทางด้าน Active.....	52
รูปที่ 3.12 แบบจำลองกำแพงเข็มพืดแบบ Single Wall และมีการปักกระจายตัวของเสาเข็ม ดินซีเมนต์ทางด้าน Passive.....	52
รูปที่ 3.13 แบบจำลองที่ 1	53
รูปที่ 3.14 แบบจำลองที่ 2	53
รูปที่ 3.15 แบบจำลองที่ 3	54
รูปที่ 3.16 แบบจำลองที่ 4	54
รูปที่ 3.17 แบบจำลองที่ 5	55
รูปที่ 3.18 แบบจำลองที่ 6	55
รูปที่ 3.19 อุปกรณ์ปล่อยทราย (Sand Dropper) ขนาดเนผ่านศูนย์กลาง 8.05 cm ความยาว 27.36 cm ขนาดของรูปปล่อยทราย 0.85 x 18.05 cm.....	55
รูปที่ 3.20 กล่องแบบจำลอง ขนาด 53x24x40 เซนติเมตร	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.21 ชุดอุปกรณ์จำลองการชูดโดยใช้เครื่องวัดฝุ่นดัดแปลง.....	56
รูปที่ 3.22 แผ่นอะคริลิกที่ใส่ทดสอบ.....	57
รูปที่ 3.23 การทดสอบการโก่งตัวของวัสดุ.....	57
รูปที่ 3.24 ระยะเวลาการโก่งตัวกวดแรงบนแผ่นอะคริลิกที่ทดสอบ.....	57
รูปที่ 3.25 อุปกรณ์การวัดระยะและวัด.....	58
รูปที่ 3.26 ทราจตัวอย่างและทราจสี.....	58
รูปที่ 3.27 โปรแกรม ImageJ สำหรับการวัดระยะจากภาพ และ Calibrate Scale ของภาพ.....	58
รูปที่ 3.28 โปรแกรม DxO Optics Pro 10.....	59
รูปที่ 3.29 แผ่นอะคริลิก.....	59
รูปที่ 3.30 อุปกรณ์จำลองการชูดดิน.....	59
รูปที่ 3.31 กล้องแบบจำลองสแตนเลส.....	59
รูปที่ 3.32 อุปกรณ์ปล่อยทราจ.....	59
รูปที่ 3.33 ตัวอย่างแท่งดินซีเมนต์จำลอง.....	59
รูปที่ 3.34 ติดตั้งแผ่นกำแพงเข็มพืดและเสาเข็มดินซีเมนต์จำลองบนทราจในระดับที่กำหนด.....	60
รูปที่ 3.35 เททราจให้ตกอย่างอิสระ (Sand Rain).....	60
รูปที่ 3.36 เททราจให้เต็มทั้งสองฝั่งของเข็มพืด.....	61
รูปที่ 3.38 ระบุตำแหน่งเริ่มต้นของเข็มพืด.....	61
รูปที่ 3.39 การดูทราจในแบบจำลอง.....	61
รูปที่ 3.40 ภาพความสูงของชั้นทราจที่แตกต่างกันสองด้าน.....	61
รูปที่ 3.41 บันทึกค่ามุมการเลื่อนพังที่จุดพิบัติ.....	62
รูปที่ 3.42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการชูดดินกับระยะเวลาเคลื่อนตัวของ กำแพงเข็มพืด.....	63
รูปที่ 3.43 พื้นที่การพิบัติของแบบจำลอง Active.....	65
รูปที่ 3.44 มุมระนาบการพิบัติด้าน Active.....	65
รูปที่ 4.1 กราฟ Mohr's Diagram จากผลการทดสอบ Direct Shear.....	68
รูปที่ 4.2 ผลการปล่อยทราจลงอย่างอิสระ พบว่าได้มุมเสียดทานภายใน $(\phi) = 31.5^\circ$	68
รูปที่ 4.3 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ กับ น้ำหนักมวลระหว่างแก้วกับน้ำ.....	69
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและจำนวนช่องของ Proving Ring เพื่อหาสมการเส้นตรง.....	71

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการขุดดินกับระยะเวลาเคลื่อนตัวของ กำแพงเข็มพืดเฉลี่ยของแบบจำลองทั้ง 6รูปแบบ	73
รูปที่ 4.6	การขยายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการขุดดินกับระยะเวลาเคลื่อนตัว ของกำแพงเข็มพืดเฉลี่ยของแบบจำลองทั้ง 6 รูปแบบ	73
รูปที่ 4.7	แบบจำลองเข็มพืดแบบ Single wall ที่ระยะเวลาขุด 18 เซนติเมตร	74
รูปที่ 4.8	รูปแบบการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเรียงต่อเนื่องขนานติดกับกำแพงเข็มพืด	74
รูปที่ 4.9	แบบจำลองรูปแบบ การติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเรียงต่อเนื่องขนานติดกับ กำแพงเข็มพืดที่ระยะเวลาขุด 21.5 เซนติเมตร	75
รูปที่ 4.10	รูปแบบการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ปักเว้นระยะทั้งทางด้านแรงดันดินเชิงรุก ก่อนทำการขุด.....	75
รูปที่ 4.11	แบบจำลองรูปแบบการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ปักเว้นระยะทั้งทางด้านแรงดันดินเชิงรุก ที่ระยะเวลาขุด 22 เซนติเมตร	75
รูปที่ 4.12	รูปแบบการติดตั้งเสาดินซีเมนต์เป็นแถวตั้งฉากกับกำแพงเข็มพืดทางด้าน แรงดันดินเชิงรุกก่อนทำการขุด	76
รูปที่ 4.13	แบบจำลองการติดตั้งเสาดินซีเมนต์เป็นแถวตั้งฉากกับกำแพงเข็มพืดทางด้านแรงดันดิน เชิงรุกที่ระยะเวลาขุด 27 เซนติเมตร.....	76
รูปที่ 4.14	การพังแบบทันทีทันใดของแบบจำลองการติดตั้งเสาดินซีเมนต์เป็นแถวตั้งฉากกับ กำแพงเข็มพืดทางด้านแรงดันดินเชิงรุกที่ระยะเวลาขุด 28 เซนติเมตร ณ ปลายสุดของ กำแพงเข็มพืดจำลอง.....	77
รูปที่ 4.15	รูปแบบการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ปักเว้นระยะทางด้านแรงดันดินเชิงรับ ก่อนทำการขุด.....	73
รูปที่ 4.16	แบบจำลองรูปแบบการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ปักเว้นระยะทางด้านแรงดันดินเชิงรับ ที่ระยะเวลาขุด 16 เซนติเมตร.....	78
รูปที่ 4.17	แบบจำลองรูปแบบการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ปักเว้นระยะทางด้านแรงดันดินเชิงรับ ที่ระดับความลึก 16 เซนติเมตร.....	78
รูปที่ 4.18	รูปแบบการติดตั้งเสาดินซีเมนต์เป็นแถวตั้งฉากกับกำแพงเข็มพืดทางด้านแรงดันดิน เชิงรับก่อนทำการขุด.....	79

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.19 แบบจำลองรูปแบบการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นแถวตั้งฉากกับกำแพงเข็มพืดทางด้านแรงดันดินเชิงรับที่ระยะการขุดถึงหัวเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยมีระดับความลึก 16 เซนติเมตร	79
รูปที่ 4.20 การพังแบบทันทีทันใดของแบบจำลองการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นแถวตั้งฉากกับกำแพงเข็มพืดทางด้านแรงดันดินเชิงรับที่ระยะการขุด 22.5 เซนติเมตร.....	79
รูปที่ 4.21 ลักษณะของแรงเนื่องจากสภาวะ Active และแรงต้านจากแรงเสียดทานด้านข้างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เกิดขึ้นในรูปแบบ Perpendicular ทางด้านแรงดันดินเชิงรุกและรับ	80
รูปที่ 4.22 ลักษณะของแรงเนื่องจากสภาวะ Active และบริเวณที่เสริมกำลังรับแรงของดินทางด้านแรงดันดินเชิงรุกและเชิงรับ	81
รูปที่ 4.24 การหาจุดพิบัติของแบบจำลองที่ 1 Single Wall.....	82
รูปที่ 4.25 การหาจุดพิบัติของแบบจำลองที่ 2 การติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเรียงต่อเนื่องขนานติดกับกำแพงเข็มพืด	82
รูปที่ 4.26 การหาจุดพิบัติของแบบจำลองที่ 3 การติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ปักเว้นระยะทั้งทางด้านแรงดันดินเชิงรุก.....	83
รูป 4.27 การหาจุดพิบัติของแบบจำลองที่ 4 การติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นแถวตั้งฉากกับกำแพงเข็มพืดทางด้านแรงดันดินเชิงรุก.....	83
รูปที่ 4.28 การหาจุดพิบัติของแบบจำลองที่ 5 การติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ปักเว้นระยะทั้งทางด้านแรงดันดินเชิงรับ.....	84
รูปที่ 4.29 การหาจุดพิบัติของแบบจำลองที่ 6 การติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นแถวตั้งฉากกับกำแพงเข็มพืดทางด้านแรงดันดินเชิงรับ	84
รูปที่ 4.30 กราฟเปรียบเทียบระยะการขุดถึงจุดพิบัติของรูปแบบต่างๆ	85
รูปที่ 4.31 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระยะการเคลื่อนตัวกับระยะการขุดถึงจุดพิบัติกับปริมาตรเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้	86
รูปที่ 4.32 มุม $45 + \frac{\phi}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง Single Wall ทดลองครั้งที่ 1	87
รูปที่ 4.33 มุม $45 + \frac{\phi}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง Single Wall ทดลองครั้งที่ 2	88
รูปที่ 4.34 มุม $45 + \frac{\phi}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง parallel ทดลองครั้งที่ 1	88
รูปที่ 4.35 มุม $45 + \frac{\phi}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง parallel ทดลองครั้งที่ 2.....	89

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.36 มุม $45 + \frac{\emptyset}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง spacing at active ทดลองครั้งที่ 1.....	89
รูปที่ 4.37 มุม $45 + \frac{\emptyset}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง spacing at active ทดลองครั้งที่ 2.....	90
รูปที่ 4.38 มุม $45 + \frac{\emptyset}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง spacing at passive ทดลองครั้งที่ 1.....	90
รูปที่ 4.39 มุม $45 + \frac{\emptyset}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง spacing at passive ทดลองครั้งที่ 2.....	91
รูปที่ 4.40 มุม $45 + \frac{\emptyset}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง perpendicular at passive ทดลองครั้งที่ 1.....	91
รูปที่ 4.41 มุม $45 + \frac{\emptyset}{2}$ ที่เกิดขึ้น จากระนาบพิบัติของแบบจำลอง perpendicular at passive ทดลองครั้งที่ 2.....	92
รูปที่ 4.42 การเปรียบเทียบมุมที่ได้จากการทดลองของรูปแบบต่างๆ	92
รูปที่ 4.43 แสดงการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน (δ) และระยะการขุด (H)	93
รูปที่ 4.44 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\frac{\delta}{H}$ กับ H ของระบบกำแพงกันดินรูปแบบต่างๆ ...	94
รูปที่ 4.45 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\frac{\delta}{H}$ กับ H ของระบบกำแพงกันดินช่วง $\frac{\delta}{H}$ ตั้งแต่ 0-0.1	94
รูปที่ ข.1 มุมเสียดทานภายในของทรายตัวอย่าง	102
รูปที่ ข.2 มุมเสียดทานภายในของทรายตัวอย่าง	103
รูปที่ ข.3 ความถ่วงจำเพาะของทรายตัวอย่าง	104
รูปที่ ข.4 ขนาดคละและชนิดขอดินตัวอย่าง.....	105
รูปที่ ข.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและจำนวนช่องของ Proving Ring เพื่อหาสมการเส้นตรง	106
รูปที่ ง.1 มุม $45 + \frac{\emptyset}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง Single Wall ทดลองครั้งที่ 1	116
รูปที่ ง.2 มุม $45 + \frac{\emptyset}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง Single Wall ทดลองครั้งที่ 2	116
รูปที่ ง.3 มุม $45 + \frac{\emptyset}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง parallel ทดลองครั้งที่ 1	117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สละส่วนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ง.4 มุม $45 + \frac{\theta}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง parallel ทดลองครั้งที่ 2.....	117
รูปที่ ง.5 มุม $45 + \frac{\theta}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง spacing at active ทดลองครั้งที่ 1	118
รูปที่ ง.6 มุม $45 + \frac{\theta}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง spacing at active ทดลองครั้งที่ 2	118
รูปที่ ง.7 มุม $45 + \frac{\theta}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง spacing at passive ทดลองครั้งที่ 1	119
รูปที่ ง.8 มุม $45 + \frac{\theta}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง spacing at passive ทดลองครั้งที่ 2	119
รูปที่ ง.9 มุม $45 + \frac{\theta}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง perpendicular at passive ทดลองครั้งที่ 1	120
รูปที่ ง.10 มุม $45 + \frac{\theta}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง perpendicular at passive ทดลองครั้งที่ 2.....	120
รูปที่ จ.1 แบบจำลองรูปแบบ Single wall.....	121
รูปที่ จ.2 แบบจำลองรูปแบบ Parallel.....	121
รูปที่ จ.3 แบบจำลองรูปแบบ Perpendicular.....	122

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน การก่อสร้างอาคารสูง และ โครงสร้างพื้นฐานใต้ดินได้เพิ่มมากขึ้นตามการขยายตัวของเศรษฐกิจ โดยเฉพาะในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ซึ่งเป็นพื้นที่ดินอ่อนและมีขอบเขตจำกัดในการก่อสร้างจำกัด เพื่อลดผลกระทบต่อบริเวณโดยรอบ การขุดดินที่ระดับความลึกต่างๆ จึงใช้ระบบโครงสร้างกันดินเข้ามาช่วย ดังนั้นการออกแบบโครงสร้างกันดินจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาและการวิเคราะห์พฤติกรรม เพราะการเคลื่อนตัว และการพิบัติของโครงสร้างกันดินนั้นเป็นปัญหาที่สำคัญ เนื่องจากดินเป็นวัสดุที่มีพฤติกรรมไม่แน่นอน การคำนวณว่าโครงสร้างกันดินจะมีการเคลื่อนตัวเท่าไรนั้นยังไม่สามารถคำนวณให้ได้ผลที่แม่นยำ หรือยังไม่สามารถเข้าถึงพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวได้ จึงต้องมีการติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวขณะทำการก่อสร้างและหลังจากก่อสร้าง รวมถึงการทดสอบที่หน้างานนั้นมีพื้นที่จำกัด เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษา การใช้แบบจำลองได้เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการศึกษาพฤติกรรมและวิเคราะห์ลักษณะการพิบัติของดิน อีกทั้งสามารถประยุกต์ใช้ได้หลายรูปแบบ รวมถึงการลดขั้นตอนและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานได้

การออกแบบระบบเพื่อป้องกันการพิบัติและเพิ่มเสถียรภาพของดินคือ การลดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเพิ่มความแข็งแกร่ง(stiffness)ของกำแพงกันดิน การเพิ่มแรงเสียดทาน และเพิ่มความแข็งแรงของดินด้าน active และ passive ซึ่งแต่ละวิธีมีประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน ในรูปแบบต่างๆเพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินแต่ละรูปแบบ และประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน เพื่อสามารถใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์และเลือกใช้รูปแบบที่มีความเหมาะสมกับการใช้งานจริงได้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบโครงสร้างกันดินกับความสูงชั้นทรายซูด ที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน
- 2) เพื่อศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน และการพิบัติของดินบริเวณด้านหน้าและด้านหลังโครงสร้างกันดิน
- 3) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินแต่ละรูปแบบ

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1) การศึกษาโดยใช้แบบจำลองขนาด 24x53x44 เซนติเมตร
- 2) ดินตัวอย่างเป็นทรายที่ผ่านการอบเพื่อกำจัดน้ำในเม็ดทรายและมีขนาดคละอยู่ระหว่างตะแกรงเบอร์ 10 ถึง เบอร์ 50

2.1) ใช้วิธีการร่อนผ่านตะแกรง (sieve analysis) หาขนาดคละของทรายหาค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ) จากการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (direct shear test) และหาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดทราย (specific gravity of soil)

2.2) ในการปล่อยทรายลงในแบบจำลองจะใช้อุปกรณ์ปล่อยทรายเพื่อให้ทรายตกอย่างอิสระและสม่ำเสมอตลอดหน้าตัด

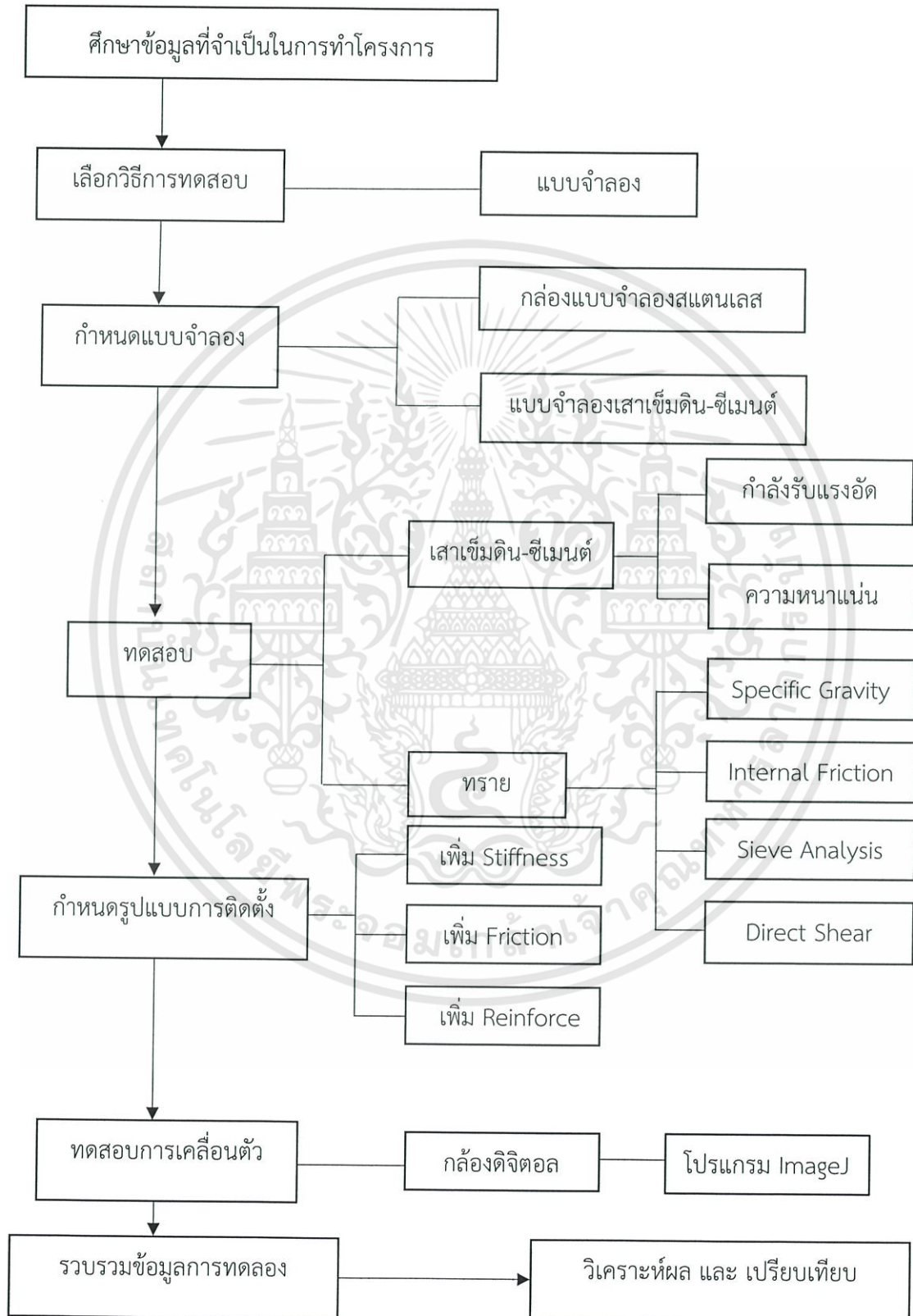
- 3) ใช้แบบหล่อทรายผสมซีเมนต์เป็นโครงสร้างกำแพงกันดิน โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง ½ นิ้ว ยาว 12 และ 28 เซนติเมตร
- 4) ใช้กล้องดิจิตอลและโปรแกรมวัด Pixel เป็นเครื่องมือวัดระยะการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน
- 5) ไม่ศึกษาผลของแรงดันน้ำ
- 6) ไม่ศึกษาการทรุดตัวของโครงสร้างกันดินในแนวตั้ง
- 7) ศึกษาคุณสมบัติการรับกำลังของแบบหล่อโครงสร้างกันดินแต่นำมาพิจารณา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถนำข้อมูลการทดลองจากแบบจำลองไปประยุกต์ใช้ที่หน้างานจริงได้
- 2) เรียนรู้วิธีการสร้างแบบจำลองทางกายภาพ และการกำหนดตัวแปรที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน
- 3) ศึกษาและเข้าใจถึงพฤติกรรมของโครงสร้างกันดิน ทฤษฎีแรงดันด้านข้าง และการพิบัติของโครงสร้างกันดินได้
- 4) เข้าใจรูปแบบโครงสร้างกันดิน และวิธีการเสริมการรับแรงของโครงสร้างกันดิน

1.5 วิธีการศึกษา

วิธีการศึกษาของการวิจัยนี้มีรายละเอียดและสามารถสรุปเป็นผังขั้นตอนการศึกษาแสดงได้ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 วิธีการศึกษางานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัยแสดงได้ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ตารางแสดงระยะเวลาดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	2559					2560					
	ส.ค.	ก.ย..	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.
1.ศึกษาข้อมูลที่เป็นในการทำโครงการ	←→										
2.เลือกวิธีการทดสอบที่เหมาะสม	←										
3.กำหนดแบบจำลองที่ใช้ทดสอบ	←→										
4.ทดสอบคุณสมบัติ		←→									
5.กำหนดรูปแบบการติดตั้งเสาเข็มดิน-ซีเมนต์			←→								
6.ดำเนินการทดสอบการเคลื่อนตัวแต่ละรูปแบบ				←→		→					
7.รวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทดลอง				←→		→					
8.วิเคราะห์ผล และ เปรียบเทียบ				←→		→					
9.ทำรายงานฉบับโครงร่าง ส่งรายงานฉบับโครงร่าง				←				→			
10. การปรับปรุงแก้ไข และเก็บข้อมูลรายงานเพิ่มเติม						←		→			
11.ส่งรายงานฉบับสมบูรณ์									←→		

บทที่ 2

เอกสารที่เกี่ยวข้อง

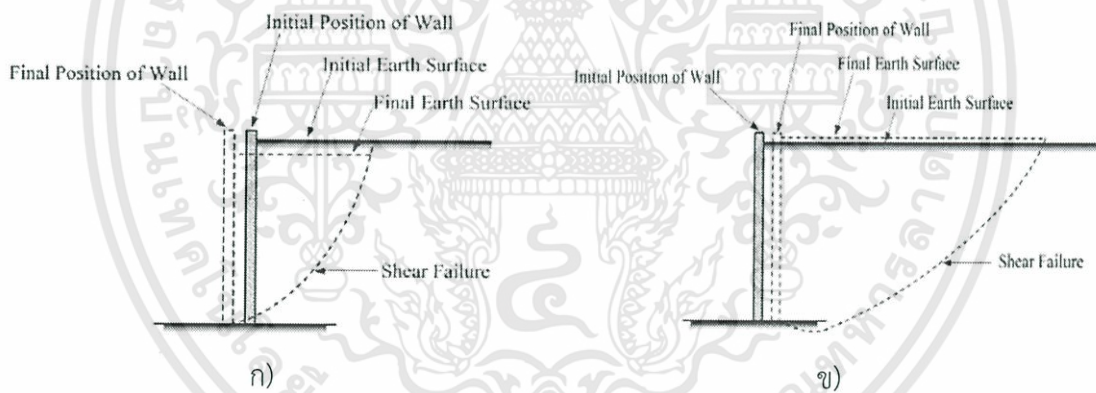
2.1 แรงดันดินด้านข้าง (Lateral Earth Pressure)

2.1.1 การวิเคราะห์และการหาค่าแรงดันด้านข้างของดิน

การวิเคราะห์และการหาค่าแรงดันด้านข้างของดินเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการออกแบบกำแพงกันดินที่รับแรงด้านข้างจากชั้นดิน เช่น ผนังชั้นใต้ดิน อ่างเก็บน้ำ เป็นต้น ดังนั้นขนาดและทิศทางของแรงดันด้านข้างเป็นข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการใช้ออกแบบกำแพงกันดินหรือโครงสร้างกันดินต่างๆ ให้มีอัตราส่วนปลอดภัยมากเพียงพอ

ประเภทของแรงดันดินด้านข้างแบ่งออกได้ 3 ประเภท

- 1) ความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่ง (at rest earth pressure)
- 2) ความดันดินที่สภาวะ active (active earth pressure)
- 3) ความดันดินที่สภาวะ passive (passive earth pressure)

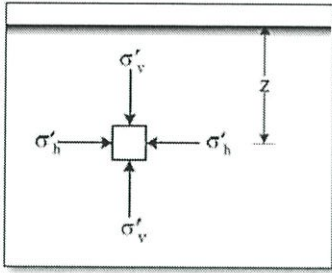


รูปที่ 2.1 แรงความดันดินด้านข้าง [7]

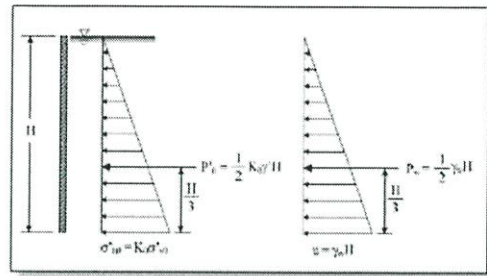
ก) แรงดันดินด้านข้างในสภาวะ active

ข) แรงดันดินด้านข้างในสภาวะ passive

ความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่ง หมายถึง ความดันด้านข้างที่กระทำต่อผนังโครงสร้างของดิน โดยที่ผนังและมวลดินไม่มีการเคลื่อนตัว ความดันดินในกรณีเช่นนี้อาจเกิดขึ้นกับมวลดินถมด้านหลังกำแพงดินที่มีความหนาแน่นมากและแทบจะไม่เกิดการเคลื่อนตัวของกำแพงดินที่สัมผัสกับกำแพงจะไม่เกิดความเครียดด้านข้าง ในกรณีเช่นนี้ ความดันดินด้านข้างจะมีขนาดอยู่ระหว่างความดันดินที่สภาวะ active และ passive



รูปที่ 2.2 ความดันดินที่ความลึก Z [7]



รูปที่ 2.3 การกระจายความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่งและความดันน้ำ [7]

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

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

$$P'_o = \frac{1}{2} K_o \gamma' H \quad (2.3)$$

พิจารณาความเค้นบนชิ้นส่วนเล็กๆ ในชั้นดินที่ความลึก ถ้ามวลดินอยู่ที่สภาวะอยู่นิ่ง (at rest) แม้ว่ามวลดินนี้จะเกิดการทรุดตัวในแนวตั้งเมื่อมีน้ำหนักกระทำ แต่จะไม่เกิดการเคลื่อนตัวในแนวนอน สภาพเช่นนี้เปรียบเสมือนดินที่อยู่ในสภาวะสมดุลด้านหลังกำแพงกันดินที่หนาและเรียบ และไม่มีการเคลื่อนตัว ความดันดินประสิทธิผล (effective lateral earth pressure) ที่ฐานของกำแพง และแรงลัพธ์ประสิทธิผลต่อความยาว 1 หน่วย สามารถหาได้จากสมการที่ (2.1), (2.2) และ (2.3)

เมื่อ σ'_h คือ ความดันประสิทธิผลที่ฐานของกำแพง

P'_o คือ แรงลัพธ์เนื่องจากความดันดินประสิทธิผลที่สภาวะอยู่นิ่งต่อความยาว 1 หน่วย

K_o คือ สัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่ง (coefficient of earth pressure at rest)

γ' คือ หน่วยน้ำหนักประสิทธิผล (submerged unit weight)

H คือ ความสูงของกำแพง

ความดันดินด้านข้างรวม (total lateral earth pressure, σ_h) ที่กระทำต่อกำแพงเท่ากับ ผลรวมของความดันดินด้านข้างประสิทธิผล (effective lateral earth pressure, σ'_h) และความดันน้ำ (pore pressure, u)

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

ความเค้นรวมที่กระทำต่อกำแพงก็จะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามความลึกเช่นเดียวกัน และแรงดันรวมที่กระทำต่อกำแพงก็จะเป็นผลรวมของแรงดันเนื่องจากแรงดันประสิทธิผลและแรงดันน้ำ

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

เมื่อ P_h คือ แรงดันดินด้านข้างรวมที่กระทำต่อกำแพง

P_w คือ แรงดันน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

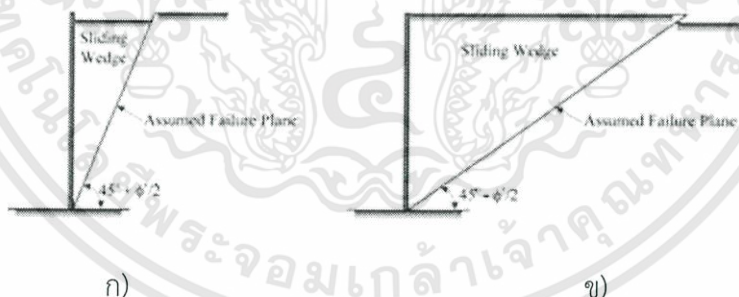
$$K_0 = 1 - \sin(\phi) \quad (2.6)$$

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 การพิบัติของดินถูก สมมติให้เป็นการไหลของลิ่มตลอดแนวระนาบพิบัติซึ่งอยู่ในรูปของมุมเสียดทานภายในของดิน (internal friction angle, ϕ')



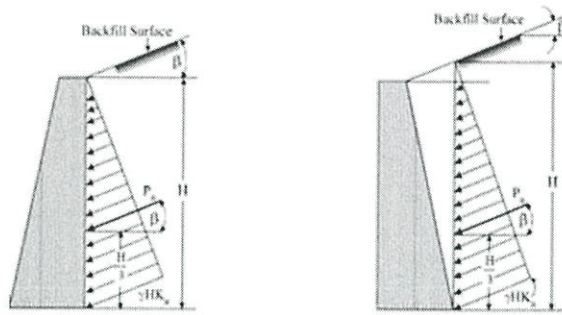
รูปที่ 2.4 ระบายการพิบัติที่ถูกสมมติขึ้นตามทฤษฎีของ Rankine [7]

ก) Rankine active state

ข) Rankine passive state

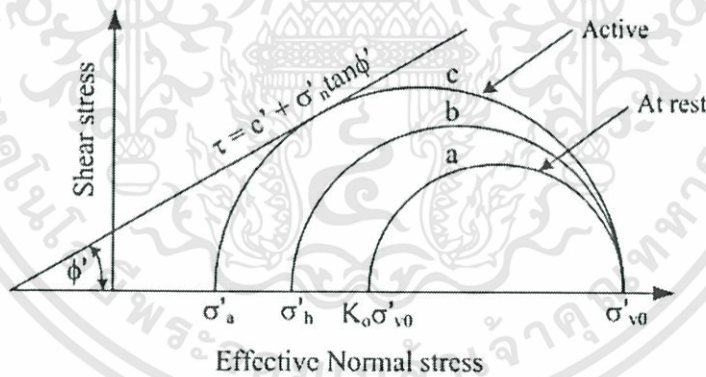
- 3) ความดันดินด้านข้างมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็นฟังก์ชันเค้นตรงกับความลึก และแรงผลักร์ เนื่องจากความดันดินด้านข้างถูกสมมติให้กระทำที่ระยะหนึ่งในสามของความสูง ซึ่งวัดจากฐานของ กำแพงกันดินถึงระดับดินถม และทิศทางของแรงลักร์นี้ขนานกับผิวของดินถม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) back side vertical ข) back side inclined
รูปที่ 2.5 ความดันดินด้านข้างทฤษฎี Rankine [7]

สำหรับดินเม็ดหยาบด้านหลังกำแพงกันดิน ที่สภาวะเริ่มต้น ดินจะอยู่ในสภาวะอยู่นิ่ง (at rest) สถานะของความเค้นประสิทธิผลแสดงได้ดังวงกลม a (รูป 2.6) เมื่อกำแพงกันดินเริ่มเคลื่อนตัวออกจากมวลดิน ความเค้นประสิทธิผลในแนวนอนจะมีค่าน้อยลง ขณะที่ความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งมีค่าประมาณคงที่ ทำให้วงกลมมอร์มีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ ตามการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน และสัมผัสเส้นขอบเขตความแข็งแรง (failure envelope) โดยมีค่าความดันดินด้านข้างประสิทธิผลเท่ากับ σ'_a ค่าความดันนี้ถูกนิยามว่าเป็นความดันประสิทธิผลที่สภาวะ active ของ Rankine (Rankine effective active pressure) ระบายพิบัติที่เกิดขึ้นในมวลดินจะทำมุม $45 + \frac{\phi}{2}$ องศา กับแนวนอน



7รูปที่ 2.6 วงกลมมอร์สถานะของความเค้นประสิทธิผลที่ 3 สภาวะ [7]

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นหลักใหญ่และความเค้นหลักเล็กประสิทธิผลที่จุดพิบัติคือ

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

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

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

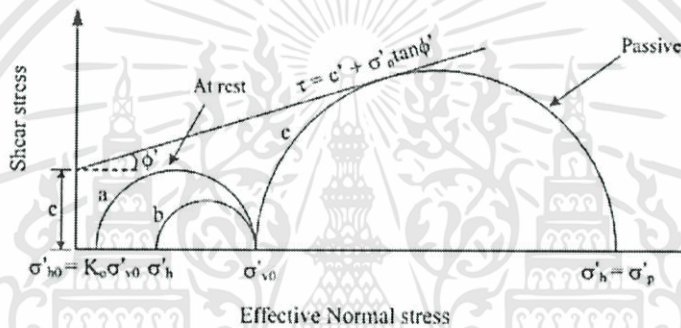
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ $K_a = \tan^2(45^\circ - \frac{\phi}{2})$ คือสัมประสิทธิ์ความดันดินประสิทธิผลที่สภาวะ active ของ Rankine ถ้ากำแพงกันดินเคลื่อนที่เข้าหามวลดิน มวลดินจะเกิดการอัดตัวและมีค่าความดันในแนวนอนเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งเกิดสภาวะพลาสติก (plastic state) ที่สภาวะนี้ความดันดินด้านข้างประสิทธิผลจะมีค่ามากที่สุดซึ่งเท่ากับความดันด้านข้างประสิทธิผลที่สภาวะ passive (σ'_p) ในขณะที่ความดันในแนวดิ่งจะมีค่าประมาณคงที่

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

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



รูป 2.7 วงกลมมอร์สสถานะของความเค้นประสิทธิผลที่ 3 สภาวะ [7]

สำหรับกรณีของดินเหนียวอิ่มตัวในสภาวะไม่ระบายน้ำ ความดันด้านข้างรวม (total lateral earth pressure) สามารถคำนวณได้โดยอาศัยขอบเขตความแข็งแรงรวม ซึ่งมุมเสียดทาน ภายในมีค่าเท่ากับศูนย์ ($\phi = 0$) ดังนั้น ความดันดินด้านข้างรวมที่สภาวะ active และ passive สามารถคำนวณได้จาก

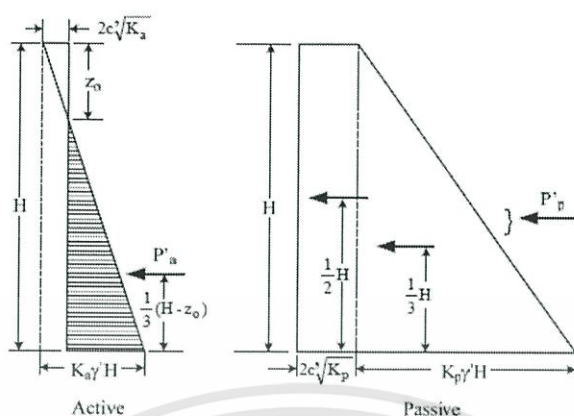
$$\sigma'_p = \sigma'_v - 2S_u \quad (2.11)$$

$$\sigma'_a = \sigma'_v - 2S_u \quad (2.12)$$

เห็นว่าความดันดินประสิทธิผลที่สภาวะ active และ passive มีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึกในฟังก์ชันเส้นตรง (linear function) ถ้า $c' = 0$ การกระจายของความดันดินที่สภาวะ active จะมีรูปร่าง เป็นสามเหลี่ยมที่มีจุดยอด ($\sigma'_a = 0$) อยู่ที่ผิวดิน แต่เมื่อ c' มีค่ามากกว่า 0 ค่าของ σ'_a จะมีค่าเป็นลบ ที่ผิวบนและมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเป็นศูนย์ที่ความลึก z_0 ระยะจากผิวดินจนถึง z_0 เรียกว่า โซนแรงดึง (tension zone) เมื่อ $\sigma'_a = 0$ จะได้

$$z_0 = \frac{2c'}{\gamma'\sqrt{K_a}} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แผนภูมิแรงดัน [7]

สำหรับดินถมที่เป็นดินเหนียวในสถานะไม่ระบายน้ำ ($\phi = 0$) โชนแรงดึงสามารถเขียน ในรูปของพารามิเตอร์กำลังรวมได้ดังนี้

สัมประสิทธิ์ความดันด้านข้าง

$$Z_0 = \frac{2S_u}{\gamma} \quad (2.14)$$

เมื่อผิวของดินถมทำมุม β กับแนวนอนสามารถหาได้ดัง สมการต่อไปนี้

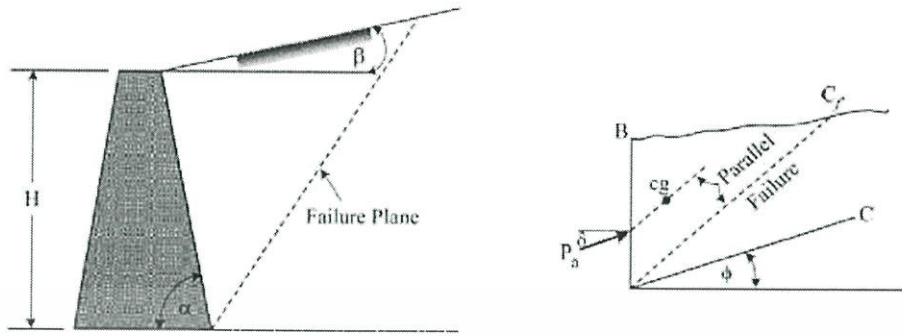
$$K_a = \cos\beta \frac{\cos\beta - \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\phi'}}{\cos\beta + \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\phi'}} \quad (2.15)$$

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

2.1.3 ทฤษฎีของ Coulomb

ทฤษฎีของ Coulomb สำหรับการหาความดันดินด้านข้างได้ถูกพัฒนาขึ้นก่อนทฤษฎีของ Rankine ซึ่งสามารถใช้ได้กับกำแพงกันดินที่มีความเสียดทาน ระบายการพิบัติเริ่มจากฐานของกำแพงกันดิน ตำแหน่งของแรงลัพธ์เนื่องจากความดันดินที่สภาวะ active หาได้จากการลากเส้นตรงจากจุดศูนย์กลางมวลของลิมนานกับระนาบพิบัติ จุดตัดของเส้นตรงนี้กับผนังกำแพงกันดิน คือ ตำแหน่งของแรงลัพธ์ทิศทางของแรงลัพธ์ทำมุม ϕ กับเส้นซึ่งตั้งฉากกับด้านหลังของผนัง เมื่อ ϕ คือ มุมเสียดทานระหว่างผนังกำแพงและดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แบบจำลองทฤษฎีของcoulomb [7]

สมการสำหรับการคำนวณความดันดินด้านข้างประสิทธิผลของ Coulomb มีดังต่อไปนี้

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

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

เมื่อ α คือ มุมด้านหลังกำแพงดินที่กระทำกับแนวราบ

δ คือ มุมเสียดทานระหว่างผนังกำแพงและดิน

β คือ มุมระหว่างผิวของดินถล่มกับแนวราบ

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

$$K_a = \frac{\sin(\alpha + \phi)}{\sin^2 \alpha \sin(\alpha + \beta) \left[1 - \frac{\sin(\alpha + \delta) \sin(\phi + \beta)}{\sin(\alpha + \delta) \sin(\alpha + \beta)} \right]} \quad (2.20)$$

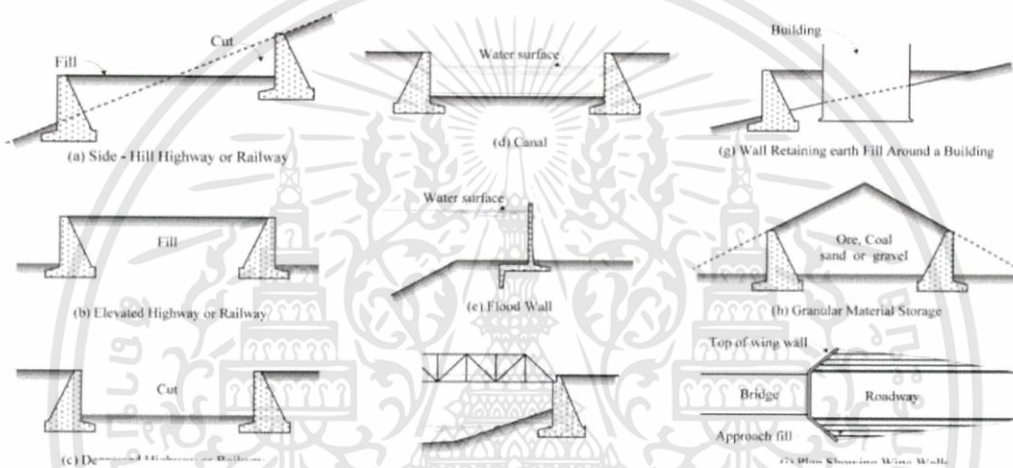
เนื่องจากทฤษฎีของ Coulomb เป็นวิธีที่ใช้หาความดันดินด้านข้างโดยใช้สัมประสิทธิ์ ความดันดินด้านข้าง ดังนั้น วิธีกรนี้จึงไม่สามารถใช้กับดินถมที่มีน้ำหนักภายนอกมากระทำ

ทฤษฎีของ Rankine และ Coulomb สมมติว่าระนาบพิบัติเป็นแนวเส้นตรง สมมติฐานนี้มีได้เป็นจริงเสมอไป ที่สภาวะ active ความดันดินที่คำนวณมีความแตกต่างจากความเป็นจริงไม่มากนัก แต่ที่สภาวะ passive ผลคำนวณมีความแตกต่างค่อนข้างสูง และให้ผลคำตอบที่ไม่ปลอดภัย (ผลคำนวณมีค่าสูงกว่าความเป็นจริงมาก) Terzaghi (1954) พบว่าที่สภาวะ active ระนาบพิบัติมีลักษณะเกือบเป็นแนวเส้นตรง ก็ต่อเมื่อมุมเสียดทานภายในระหว่างดินและกำแพงกันดิน (δ) มีค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้อยกว่า $\frac{\sigma}{3}$ แต่อย่างไรก็ตาม ระบายพิบัติที่สภาวะ passive จะมีความแตกต่างจากสมมติฐาน ของ Rankine และ Coulomb อย่างมาก เมื่อมุม δ มีค่ามากกว่า $\frac{\sigma}{3}$

2.2 โครงสร้างกันดิน (Retaining Structure)

กำแพงกันดิน (retaining wall) คือ กำแพงที่ใช้ต้านทานแรงดันทางด้านข้าง ของดินหรือของไหล เช่น น้ำ และต้านทานแรงจากน้ำหนักกดทับจากผิวบน เช่น น้ำหนักของยวดยานพาหนะ บางครั้งยังทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้น้ำใต้ดินซึมเข้าสู่ชั้นใต้ดินของอาคาร การประยุกต์ใช้โครงสร้างกันดินในงานวิศวกรรมมีมากมาย อาทิเช่น งานดินถม งานดินขุดงานสะพาน และโครงสร้างกันน้ำท่วม โครงสร้างกันดินส่วนมากจะเป็นกำแพงกันดินที่สร้างจากคอนกรีต

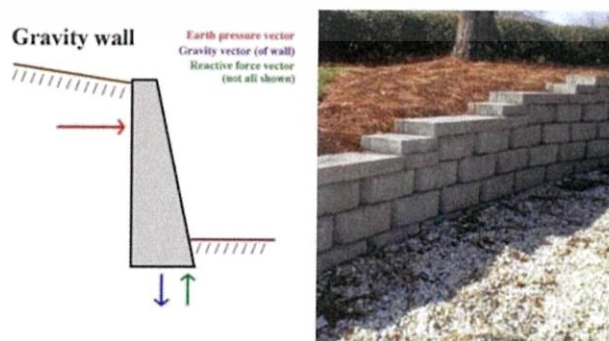


รูปที่ 2.10 แบบการใช้งานโครงสร้างกันดิน [7]

2.2.1 รูปแบบกำแพงกันดิน

กำแพงกันดินมีหลากหลายลักษณะ แต่สามารถแบ่งประเภทตามลักษณะการก่อสร้างได้ ดังนี้

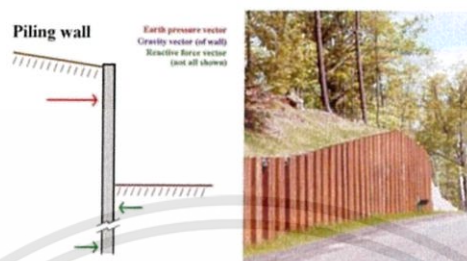
1) gravity wall เป็นต้นแบบและรูปแบบมาตรฐานของกำแพงกันดินโดยจะใช้น้ำหนักของตัวกำแพงในการต้านแรงดันของดินถือว่าเป็นรูปแบบของกำแพงกันดินที่เก่าแก่ที่สุดเหมาะสมสำหรับกันดินในงานจัดสวนกันดินริมตลิ่งหรือเชิงเขาเพื่อป้องกันดินถล่มหรือดินสไลด์



รูปที่ 2.11 กำแพงกันดิน Gravity Wall [3]

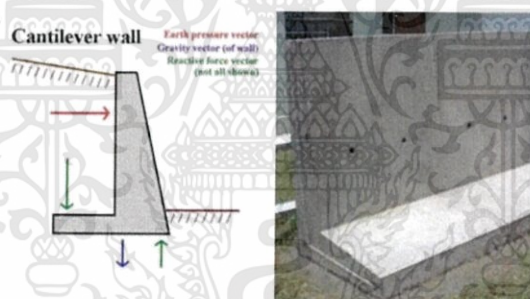
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) piling wall เป็นกำแพงกันดินที่ต้องใช้เสาเข็มยาวตอกลงไปเป็นระยะตามแนวกำแพงกันดิน และใช้แรงดันจากดินใต้ระดับดินด้านที่ต่ำกว่าทั้งสองฝั่งในการรับแรงดัน จากดินด้านที่สูงกว่า เหมาะสำหรับสร้างกำแพงกันดิน ในกรณีที่มีการจำกัดพื้นที่สำหรับทำงาน ไม่สามารถเข้าไปทำการก่อสร้างบริเวณฝั่งตรงข้ามได้



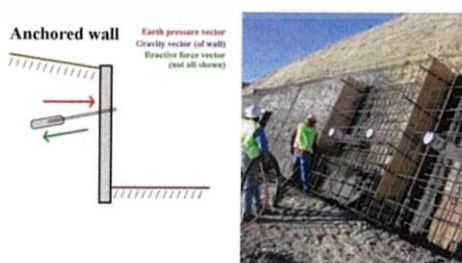
รูปที่ 2.12 กำแพงกันดิน Piling Wall [3]

3) cantilever wall เป็นรูปแบบที่พัฒนามาจากหลักการของกำแพงกันดินแบบ gravity wall แต่เพิ่มคานด้านล่างยื่นเข้าไปในดินฝั่งที่มีระดับสูงกว่า เพื่อให้สามารถรับแรงดันได้ดียิ่งขึ้น เหมาะสำหรับป้องกันดินริมตลิ่งหรือเชิงเขาที่ต้องการความมั่นคงสูง



รูปที่ 2.13 กำแพงกันดิน Cantilever Wall [3]

4) anchored wall เป็นกำแพงกันดินที่ใช้สมอยึดกำแพงเพื่อเพิ่มแรงต้านให้กับกำแพง สามารถประยุกต์ไปใช้สำหรับช่วยเพิ่มแรงต้านแทนให้กับกำแพงรูปแบบอื่นได้เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงดันของกำแพงกันดินโดยเฉพาะกับกำแพงกันดินที่เราสร้างไว้แล้ว



รูปที่ 2.14 กำแพงกันดิน Anchored Wall [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสถียรภาพของกำแพงกันดินชนิดนี้ขึ้นอยู่กับน้ำหนักของตัวมันเอง กำแพงกันดินชนิดนี้ จึงถูกเรียกว่า Gravity wall ในกรณีที่กำแพงกันดินมีความสูงมาก แรงดันดินด้านข้างมีแนวโน้มที่จะ ทำให้ กำแพงกันดินพลิกคว่ำ (overturning) เพื่อความประหยัด อาจเลือกใช้กำแพงกันดินชนิด cantilever wall ซึ่งมีส่วนฐานยื่นออกมาอยู่ใต้ดินถม น้ำหนักของดินถมที่อยู่เหนือฐานนี้จะช่วย ป้องกันการพลิกคว่ำ

เมื่อมีการถมดินด้านหลังกำแพงกันดิน กำแพงกันดินจะเกิดการเคลื่อนตัว เพื่อป้องกันการพลิกคว่ำของกำแพงกันดิน โดยสร้างให้ด้านหน้าของกำแพงกันดินมีความชันเอียง ซึ่งความชันนี้ เรียกว่า batter วัสดุที่ใช้ถมด้านหลังกำแพงกันดินเรียกว่า backfill จะต้องเป็นวัสดุเม็ดหยาบที่มีความ ชิมผ่านสูงเช่น ทราย กรวด หรือหินบด (broken stone)

1) การพิบัติของกำแพงกันดิน

การออกแบบกำแพงกันดินต้องคำนึงถึงสิ่งสำคัญสองประการดังนี้

1.1) กำแพงต้องมีเสถียรภาพภายนอก (external stability) ซึ่งหมายความว่ากำแพงกันดินต้องตั้งตั้งในตำแหน่งเดิม



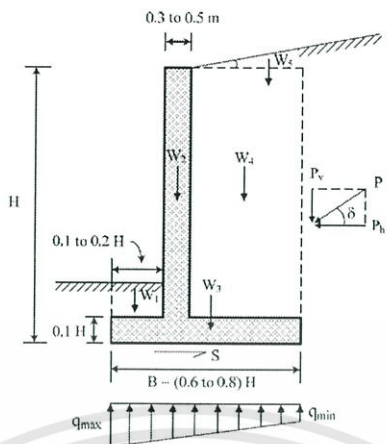
รูปที่ 2.15 กำแพงกันดินขาดเสถียรภาพ [7]

ก) กำแพงกันดินขาดเสถียรภาพภายนอก

ข) กำแพงกันดินขาดเสถียรภาพภายใน

2.2.2.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพภายนอกของกำแพงกันดิน

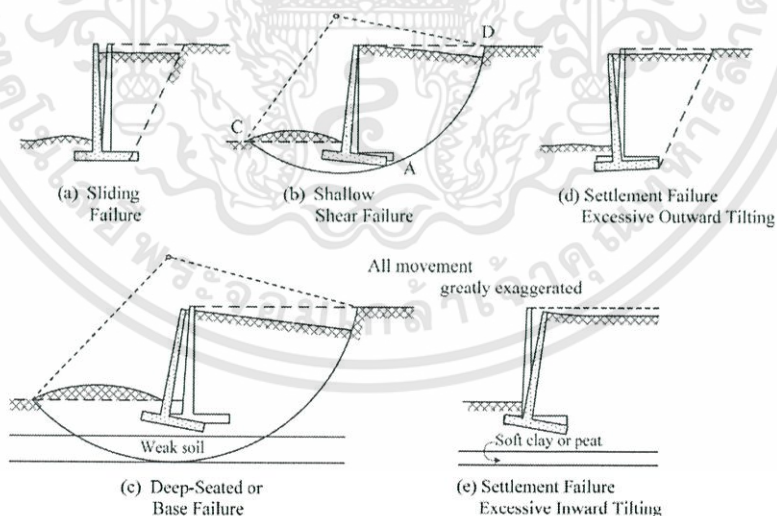
วิธีการออกแบบกำแพงกันดินด้านการพิบัติภายนอก คือ การสมมติขนาดและรูปร่างของกำแพงกันดินดังรูปที่ 2.16 และทำการตรวจสอบเสถียรภาพของกำแพงถ้าพบว่าเสถียรภาพของกำแพงกันดินมีค่าต่ำหรือไม่เพียงพอ ก็ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างใหม่และทำการ ตรวจสอบอีกครั้ง ขั้นตอนนี้จะถูกทำซ้ำๆจนกระทั่งพบว่ากำแพงกันดินที่ออกแบบมีเสถียรภาพเพียงพอต่อการใช้งาน



รูปที่ 2.16 แรงที่กระทำต่อกำแพงกันดิน [7]

กำแพงกันดินจะมีเสถียรภาพภายนอก เมื่อกำแพงกันดินไม่มีการเคลื่อนตัวในสามทิศทาง อันได้แก่ ในแนวนอน (การเลื่อนไถล) ในแนวตั้ง (การทรุดตัวที่มากกว่าปกติ และการพลิกคว่ำ) เนื่องจากแรงแบกทานของดินใต้ฐานราก) และการพลิกคว่ำ

การออกแบบเป็นการตรวจสอบเสถียรภาพของการเคลื่อนตัวในสามทิศทางนี้เพื่อให้ได้อัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสม การตรวจสอบการเคลื่อนตัวในแนวนอนและการพลิกคว่ำ อาศัยหลักการความสถิตย์ (Law of statics) สำหรับการตรวจสอบการเคลื่อนตัวในแนวตั้งนั้นอาศัยทฤษฎีกำลังรับแรงแบกทานของดิน (bearing capacity theory)



รูปที่ 2.17 การพิบัติของกำแพงกันดิน [7]

อัตราส่วนปลอดภัยด้านการเลื่อนไถล คืออัตราส่วนระหว่างแรงต้านทานการเลื่อนไถล (sliding resistance force) ต่อแรงกระทำ (sliding force) แรงต้านทานการเลื่อนไถล คือผลคูณของแรงลัพธ์ในแนวตั้งที่กระทำต่อฐานของกำแพงกันดินกับสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (coefficient of friction) ระหว่างฐานของกำแพงกันดินและดินด้านใต้ฐาน ส่วนแรงที่กระทำให้เกิดการเลื่อนไถล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนมากจะเป็นแรงในแนวนอนเนื่องจากแรงดันด้านข้างของดิน Backfill แรงต้านทานการลื่นไถล (s) สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{สำหรับฐานรากที่เป็นทราย} \quad S = \sum V \tan(0.67\phi) \quad (2.21)$$

$$\text{สำหรับฐานรากที่เป็นดินเหนียว} \quad S = \frac{2}{3} S_u B \quad (2.22)$$

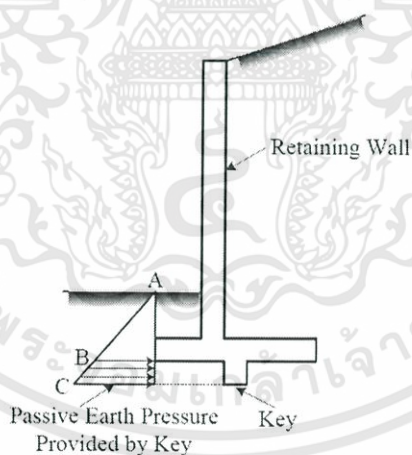
เมื่อ $\sum V = W_1 + W_2 + \dots + W_i + P_v$

S คือ แรงต้านทานการลื่นไถล

S_u คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน

B คือ ความกว้างของฐานราก

ถ้าในการออกแบบพบว่ามีกำแพงกันดินแบบฐานเรียบ (flat-bottomed wall) มีอัตราส่วนปลอดภัยไม่เป็นไปตามที่ต้องการ อาจทำการสร้างตัวต้านทานการลื่นไถลที่เรียกว่า key ที่ฐานของกำแพงกันดิน ดินด้านหน้าของ key ทำหน้าที่ต้านทานการลื่นไถลในฐานะของความดันที่สถานะ passive ดังแสดงโดยโซน BC แต่อย่างไรก็ตาม ดินด้านหน้าของ key อาจจะหายไป เนื่องจากการกัดเซาะ ดังนั้น ตัว key นี้จะมีประสิทธิภาพอย่างมากถ้าถูกสร้างใต้ดินแข็งหรือหิน



รูป 2.18 แรงดันที่กระทำเนื่องจากด้าน passive [7]

2) อัตราส่วนปลอดภัยด้านการพลิกคว่ำ

อัตราส่วนปลอดภัยด้านการพลิกคว่ำหาได้จากอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ต้านทานการพลิกคว่ำทั้งหมด (total righting moment, M_r) ต่อโมเมนต์ทั้งหมดที่ก่อให้เกิดการพลิกคว่ำ (total overturning moment, M_o) ที่สถานะสมดุลและการพลิกคว่ำเริ่มเกิดพอดี แรงปฏิกริยาระหว่างดินและกำแพงกันดินจะอยู่ที่จุด Toe พอติ ดังนั้น เพื่อความสะดวกในการคำนวณ (ไม่ต้องพิจารณาผลของแรงปฏิกริยา) โมเมนต์ที่ก่อให้เกิดการพลิกคว่ำ และโมเมนต์ต้านทานการพลิกคว่ำทั้งหมดสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณได้จากสมการดังนี้

$$M_o = P_h \times H/3 \quad (2.23)$$

$$\sum M_r = M_{r1} + M_{r2} + \dots + M_{r5} + (P_v \times B) \quad (2.24)$$

เมื่อ $M_{ri} = W_i \times x_i$

M_r คือ โมเมนต์ต้านทานการพลิกคว่ำ

M_o คือ โมเมนต์ที่ก่อให้เกิดการพลิกคว่ำ

P_h คือ แรงดันดินด้านข้างรวมที่กระทำต่อกำแพง

P_v คือ แรงกระทำแนวตั้ง

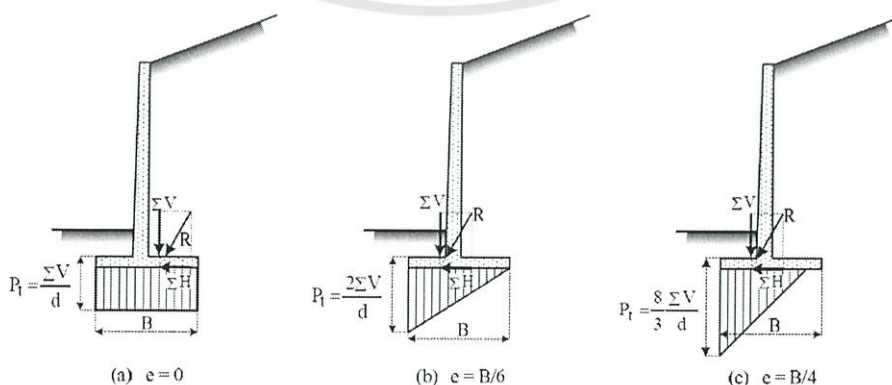
x_i คือ ระยะในแนวนอนที่วัดจากจุด Toe จนถึง W_i

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 ควรทำการตรวจสอบการเสถียรภาพเนื่องจากการพิบัติของดินฐานรากและระยะเยื้องศูนย์กลางก่อนการตรวจสอบเสถียรภาพด้านอื่น เนื่องจาก เสถียรภาพด้านนี้จะเป็นตัววิกฤตที่สุด



รูปที่ 2.19 แรงที่กระทำใต้ฐานกำแพงกันดิน [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$e = \frac{B}{2} - \left(\frac{\sum M_r - M_o}{\sum V} \right) < \frac{B}{6} \quad (2.25)$$

$$q_{\max} = \frac{\sum V}{B} \left(1 + \frac{6e}{B} \right) < q_{all} \quad (2.26)$$

$$q_{\min} = \frac{\sum V}{B} \left(1 - \frac{6e}{B} \right) > 0 \quad (2.27)$$

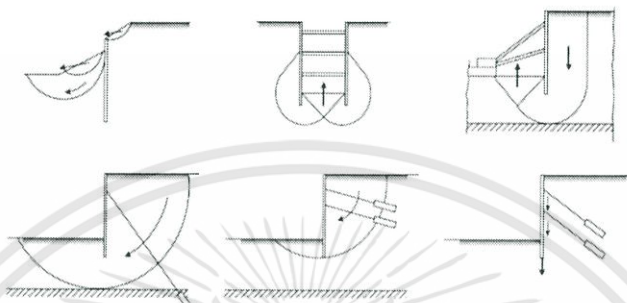
ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนปลอดภัยที่ใช้ ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินควรมีน้อยกว่าค่าที่แสดง[7]

กรณี	อัตราส่วน ความปลอดภัย	หมายเหตุ	อ้างอิง
การสั่นไถล	1.5	สำหรับกรณีที่ไม่พิจารณาความดิน ด้านข้างที่สภาวะ Passive ที่ ด้านหน้าของกำแพงกันดิน	Goodman and Karol (1968)
	2.0	สำหรับกรณีที่ไม่พิจารณาความดิน ด้านข้างที่สภาวะ Passive ที่ ด้านหน้าของกำแพงกันดิน	Goodman and Karol (1968)
การพลิกคว่ำ	1.5	สำหรับ Backfill ที่เป็นดินเม็ดหยาบ	Teng (1962)
	2.0	สำหรับ Backfill ที่เป็นดินเม็ด ละเอียด	Teng (1962)
การพิบัติแบบ กำลังรับแรง เสียดทาน	3.0		Teng (1962)

2.2.3 เสถียรภาพของเข็มพืด (Sheet Pile)

เข็มพืดเป็นแผ่นเหล็กยาวที่มีความกว้างประมาณ 30 เซนติเมตรถึง 50 เซนติเมตร เข็มพืดจะถูกนำมาต่อกันเป็นแนวยาวตามแนวดินเพื่อใช้เป็นโครงสร้างกันดินและเข็มพืดยังสามารถใช้ร่วมกับระบบค้ำยัน (ซึ่งอาจเป็นไม้หรือเหล็ก) เป็นโครงสร้างชั่วคราวสำหรับงานก่อสร้างใต้ดิน เช่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

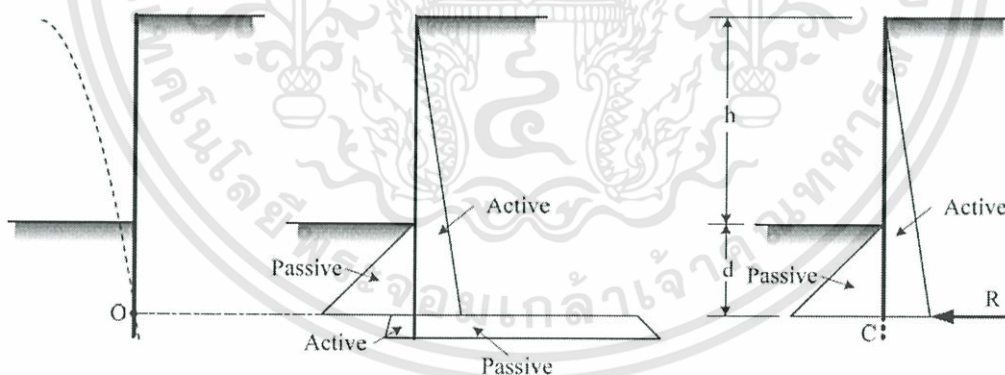
งานวางท่อน้ำโครงสร้างกันดิน และงานโครงสร้างใต้ดิน แต่ถึงแม้ว่าระบบค้ำยัน จะมีความแข็งแรง เพียงใดก็ตาม เข็มพืดเป็นแผ่นเหล็กที่มีความหนาไม่มาก หากใช้เป็นโครงสร้างกันดินในงานดินขุดที่มีความลึกมากหรือใช้เป็นโครงสร้างกันการเคลื่อนตัวของอาคารข้างเคียงที่มีขนาดใหญ่อาจก่อให้เกิด การเสีรูปร่างของเข็มพืดและส่งผลให้เกิดเคลื่อนตัวของดินอย่างมากเพื่อหลีกเลี่ยงการเคลื่อนตัวที่มาก เราอาจใช้เสาเข็มเจาะหรือเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นโครงสร้างกันดินได้



รูปที่ 2.20 การขาดเสถียรภาพภายนอกของเข็มพืดที่ต้องอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน[7]

2.2.3.1 Cantilever Sheet Pile Wall

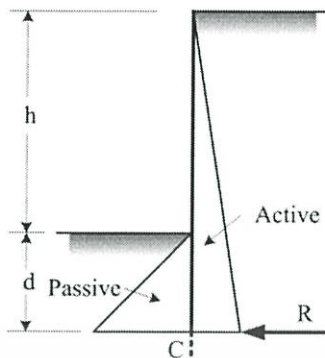
เข็มพืดมักถูกนำมาใช้เมื่อดินถมด้านหลังเข็มพืดมีความสูงไม่มากนัก เสถียรภาพของเข็มพืดชนิดนี้ขึ้นอยู่กับ ความต้านทานที่สภาวะ passive ของดินใต้ระดับผิวดิน (dredge line)



รูปที่ 2.21 ความดันดินด้านข้างที่กระทำต่อ Cantilever sheet pile wall [7]

การออกแบบเข็มพืดโดยทั่วไปมักทำโดยวิธี ที่เรียกว่า simplification ซึ่งแทน แรงลัพธ์ที่สภาวะ passive ได้จุด O ด้วยแรง R กระทำที่จุด C (อยู่ต่ำกว่าจุด O เล็กน้อย) ซึ่งจุด C นี้ อยู่ที่ความลึก d ใต้ระดับดินขุดความลึก d สามารถหาได้โดยอาศัยหลักสมดุลของโมเมนต์รอบจุด C โดยพิจารณาค่าแรงต้านทานด้านหน้าเข็มพืดเท่ากับแรงต้านทานที่สภาวะ passive (P_p)หารด้วย อัตราส่วนปลอดภัย ดังนั้นค่าระยะฝัง (depth of embedment) ของเข็มพืดที่ต้องการจึงควรมีค่าไม่น้อยกว่า $1.2d$ แรง R สามารถหาได้โดยอาศัยหลักสมดุลในแนวนอน

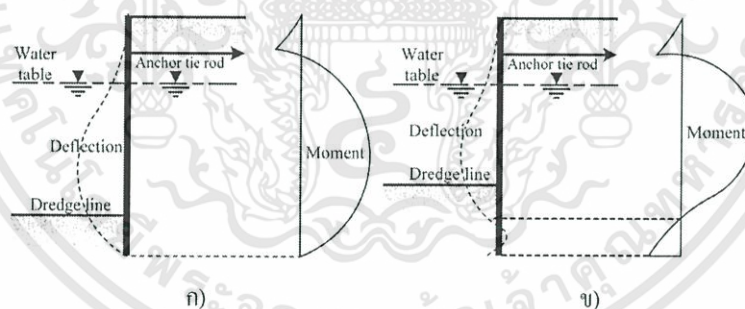
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 พฤติกรรมที่กระทำต่อเข็มพืด [7]

2.2.3.2 Anchored Sheet Pile Wall

เมื่อ Backfill หลังกำแพงเข็มพืดมีความสูงมาก (เกินกว่า 6 เมตร) อาจมีการติดตั้งตัวเพิ่มความมั่นคงซึ่งเรียกว่าตัวค้ำ (tie-back or prop) ที่ด้านบนของเข็มพืดเป็นช่วงๆ การทำเช่นนี้ จะเป็นการประหยัดกว่าการใช้ cantilever sheet pile wall กำแพงกันดินระบบนี้ เรียกว่า anchored sheet pile wall วิธีการคำนวณหาเสถียรภาพของกำแพงกันดินชนิดนี้มีด้วยกัน 2 วิธี คือ Free earth support method และ fixed earth support method วิธี free earth support method จะเป็นวิธีที่หาระยะฝังที่น้อยที่สุดที่ไม่ทำให้เกิดการหมุนในตัวเข็มพืด ดังนั้นจุดรองรับที่ปลายเข็มพืดถูกพิจารณาเป็นแบบหมุน (pin)



รูปที่ 2.23 การกระจายของการเสียรูปและโมเมนต์ของ Anchored sheet pile wall [7]

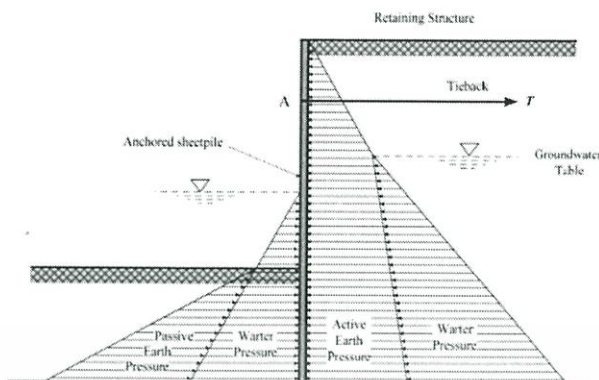
ก) free earth support method

ข) fixed earth support method

2.2.3.3 Free Earth Support Method

วิธีการนี้จะสมมติว่าความลึกของระยะฝังใต้ระดับการขุดออกของดิน (excavation level or Dredge line) ไม่มากเพียงพอที่จะทำให้เกิดสภาวะอยู่กับที่ (fixity) ที่จุดปลายของเข็มพืด ดังนั้น เข็มพืดจะอิสระต่อการหมุนที่จุดปลายลักษณะการพิบัติจะเป็นการหมุนรอบจุดต่อของตัวค้ำ (tie) กับเข็มพืดที่จุด A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 แรงที่กระทำต่อเข็มพืดเมื่อหาโมเมนต์ [7]

สิ่งที่สำคัญที่สุดในการออกแบบคือโมเมนต์ต้านการหมุนรอบจุด A ต้องมากกว่าโมเมนต์ที่ทำให้เกิดการหมุน ระยะฝังที่ต้องการ (d) สามารถหาได้โดยหลักการที่ว่าผลรวมของโมเมนต์รอบจุด A ต้องเท่ากับศูนย์การวิเคราะห์ลักษณะนี้จะเกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาค่าของตัวแปรยกกำลังสอง หลังจากได้ค่า d แรงที่กระทำในตัวค้ำ (T) สามารถคำนวณได้โดยอาศัยหลักสมดุลของแรงในแนวนอน (ผลรวมของแรงทั้งหมดในแนวนอนต้องเท่ากับศูนย์) และท้ายสุดการออกแบบหน้าตัดของเข็มพืดสามารถกระทำได้โดยอาศัยแผนภาพการกระจายโมเมนต์ระยะฝังควรเป็นค่าที่เพิ่มขึ้นจากระยะ d อีก 20 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้ได้ระยะฝังที่เพียงพอสำหรับสภาวะอยู่กับที่ (fixity) ระยะฝังควรมีค่าไม่น้อยกว่า 1.2

2.3 เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพโครงสร้างกันดิน

ดินทั่วไปมีคุณสมบัติต่างกันจึงได้มีการศึกษาเพื่อช่วยเสริมประสิทธิภาพให้กับดินในบริเวณที่เป็นดินอ่อนหรือดินที่มีเสถียรภาพต่ำสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

2.3.1 geosynthetics

geosynthetics คือ วัสดุที่ประกอบด้วยสิ่งต่างๆที่มนุษย์คิดขึ้นเพื่อประโยชน์ในงานด้าน geotechnical engineering รวมทั้งนำมาใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างในงานดิน เช่น กำแพงกันดิน เขื่อนดิน เป็นต้น หรือใช้ในงานระบบระบายน้ำ และงานกรองวัสดุงานแยกชั้นวัสดุงานป้องกันการกัดเซาะของชายฝั่งทะเลหรือริมฝั่งแม่น้ำโดยส่วนมากแล้ววัสดุที่ใช้ในการผลิต geosynthetics จะเป็นวัสดุประเภท plastic เช่น polymer, rubber, fiberglass เป็นต้น

หน้าที่หลักๆของ geosynthetics สำหรับงานก่อสร้างมีดังนี้

- 1) การแยกชั้นวัสดุ (separation) ในระหว่างการก่อสร้างบริเวณที่เป็นดินอ่อนมักพบปัญหาวัสดุถมจมลงไปในชั้นดินอ่อน ทำให้จะต้องเพิ่มวัสดุถมให้เพียงพอเพื่อทดแทนวัสดุถมที่ สูญเสียลงไปในชั้นดินอ่อน การเลือกใช้วัสดุสังเคราะห์สำหรับการแยกชั้นวัสดุที่เหมาะสม จะทำหน้าที่แยกชั้นวัสดุระหว่างวัสดุถมกลับดินเดิมป้องกันไม่ให้วัสดุถมจมลงไปกับชั้นดินเดิมซึ่งเป็นดินอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงช่วยลดปริมาณของวัสดุถมและประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง นอกเหนือจาก นี้การแยกวัสดุถมใหม่ที่มีคุณสมบัติออกจากดินเดิม ยังทำให้พฤติกรรมของวัสดุถมทำงานเป็น ลักษณะ platform ช่วยกระจายแรงอย่างสม่ำเสมอลงสู่ชั้นดินเดิม วัสดุสังเคราะห์สำหรับการแยกชั้น วัสดุที่มีประสิทธิภาพจะต้องไม่เกิดความเสียหายหรือถูกเจาะทะลุในระหว่างการถมดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อวัสดุถมมีขนาดใหญ่และแหลมคม

2) การเสริมกำลังดิน (reinforcement) การใช้วัสดุสังเคราะห์เพื่อเสริมกำลังดินมีลักษณะ การนำไปใช้ได้หลากหลายลักษณะงาน เช่น การก่อสร้างกำแพงกันดิน คอสะพาน หรือ การ ก่อสร้างคันดินสูงๆ ซึ่งมีน้ำหนักบรรทุกและ แรงดันจากน้ำหนักดินถมที่มากจนทำให้เกิด slip failure เนื่องจากความเครียดในแนวราบ (lateral strain) ที่เกิดขึ้น ด้วยการใช้แผ่นใยสังเคราะห์เสริมแรงเป็นชั้นๆระหว่างชั้นดินที่บดอัดแน่นเพื่อรับแรงในแนวราบที่เกิดขึ้นในโครงสร้างกำแพงกันดินจะทำให้คันดินมีเสถียรภาพดีขึ้น การแก้ไขลาดดินพังทลายและลาดดินที่มีความชันสูง ด้วย การใช้วัสดุเสริมกำลังดิน เข้าไปเสริมกำลังในชั้นดินที่พังทลายโดยทำการเสริมเป็นชั้นๆ แล้วบดอัด

3) การระบายน้ำออกจากดิน (drainage) โดยมีความสามารถให้มีการไหลผ่านของน้ำในแนวแกนแผ่นได้สูง และมีความสามารถในการเป็นตัวกรองที่ดี ซึ่งโดยปกติแล้วระบบระบายน้ำของโครงสร้างงานดินต่างๆ มักใช้ท่อเจาะรูพรุนร่วมกับชั้นระบายน้ำ แต่มักเกิดปัญหามีเศษดิน รอบๆ หิน ระบายมาอุดตัน ทำให้ระบบไม่ทำงาน ส่งผลให้โครงสร้างมีความเสียหายจากแรงดัน น้ำ ใต้ดินที่ไม่ระบายออก หรือเกิดน้ำเจิ่งนองบนผิวดิน แต่การใช้แผ่นใยสังเคราะห์สำหรับการระบาย น้ำปูนระหว่างชั้นหินระบายน้ำกับชั้นดินถม จะช่วยป้องกันการอุดตัน รวมทั้งช่วยดูดน้ำจากเม็ดดิน โดยจะแยกกักกับอนุภาคเม็ดดิน ในขณะที่ยอมให้น้ำไหลผ่านได้ ซึ่งการใช้งานแผ่นใยสังเคราะห์ สำหรับระบายน้ำจะมีประโยชน์กับการก่อสร้างร่องระบายน้ำขอบถนน การก่อสร้างชั้นระบายน้ำหลังกำแพงกันดิน การปูรองชั้นทรายระบายน้ำของแผ่นพื้นสำเร็จรูป

2.4 การปรับปรุงคุณภาพดินชั้นลึก (Soft Ground with Deep Mixing Method)

ในประเทศไทยโดยเฉพาะในกรุงเทพฯซึ่งประกอบด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีความหนามากซึ่งคุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนจะมีความแข็งแรงต่ำมีค่าการยุบตัวสูงและความสามารถในการซึมผ่านน้ำต่ำ การปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนมีหลายวิธีด้วยกัน แต่ละวิธีก็มีหลักการพื้นฐานคือ พยายามเพิ่มความหนาแน่นของดินโดยการอัดแน่น (Compaction) การใช้น้ำหนักกดทับล่วงหน้า (Preloading) การระบายน้ำออกจากดิน (Dewatering) เพื่อเพิ่มกำลังของดิน โดยใช้วัสดุชนิด Sand Drained และ Prefabricate Vertical Drained (PVD) การเสริมแรงในดิน (Soil Reinforcement) โดยใช้ Geogrid หรือ Geotextile การเติมหรือฉีดสารเคมี (Admixture) เพื่อปรับปรุงคุณภาพของชั้นดินให้คงตัวมากขึ้น โดยใช้ซีเมนต์ในการเพิ่มเสถียรภาพให้กับดิน

ในปัจจุบันวิธีการผสมลึก ได้นำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในงานต่างๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดการทรุดตัวและเพิ่มความแข็งแรงของเขื่อน และโครงสร้างอื่นๆป้องกันการเกิด Slope Failure เพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของคันดินและทำหน้าที่เสมือนฐานราก เพิ่มแรงเสียดทานในแนวราบ ป้องกันความเสียหายที่เกิดจากการก่อสร้างบริเวณข้างเคียงที่เชื่อมต่อกันตลอดจนป้องกันการทรุดตัวและเลื่อนตัวของโครงสร้างใต้พื้นดิน เช่น อุโมงค์ เป็นต้น

2.5 กลไกการปรับปรุงคุณสมบัติของดินโดยผสมซีเมนต์

การปรับปรุงคุณภาพดิน (Soil Stabilization) ที่มีคุณภาพต่ำกว่ามาตรฐานให้มีคุณภาพดีขึ้น โดยการเพิ่มสารผสม (Stabilizing Agent) โดยการหาปริมาณและชนิดของสารผสมเพิ่มให้เหมาะสมกับประเภทของดิน เช่น ซีเมนต์โดยจะทำการผสมซีเมนต์กับดิน

เสาเข็มดิน-ซีเมนต์เป็นดินผสมที่ออกแบบให้มิกำลังรับแรงอัดหรือความแข็งแรงตามมาตรฐานของ Portland Cement Association (PCA) หรือ AASHTO หรือ ASTM ปริมาณซีเมนต์ที่ผสมกับดินจะต้องสูงพอที่จะทำให้กำลังรับแรงอัดหรือกำลังแบกทานได้ตามที่กำหนด ปริมาณซีเมนต์จะสูงร้อยละ 5-7% สำหรับดินที่มีขนาดคละติ และปริมาณซีเมนต์จะสูงขึ้นอีกถ้าดินมีขนาดคละไม่ตี กรณีดินที่มีดรชนีความเป็นพลาสติกสูง (PI) การทำเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ อาจจะต้องผสมปูนขาวลงไปก่อนเพื่อลดค่า (PI) ของดินลง สาเหตุที่ใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพดินเพราะว่าซีเมนต์หาได้ง่ายมีการผลิตจำนวนมากทำให้ราคาถูก สามารถนำไปใช้ปรับปรุงคุณภาพดินได้ทุกประเภทหากมีการใช้ปูนซีเมนต์ น้ำ การบดอัดและระยะเวลาการบ่มที่เหมาะสม

การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์ทำให้ดินมีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีการแลกเปลี่ยนหรือรวมตัวกันของประจุไฟฟ้ารอบอนุภาคของเม็ดดินทำให้มีแรงดึงดูดระหว่างเม็ดดินกับซีเมนต์ และซีเมนต์กับซีเมนต์เอง มีทั้งเม็ดละเอียดและเม็ดหยาบ

การผสมซีเมนต์กับดินเม็ดละเอียดดินเหนียวและดินทรายต้องใช้ซีเมนต์สูงกว่าดินชนิดเม็ดหยาบ เนื่องจากดินชนิดเม็ดละเอียดมีพื้นที่ผิวและจุดสัมผัสมากกว่าเม็ดหยาบ ลักษณะการยึดเกาะแบบเชิงกลและเคมี โดยซีเมนต์จะช่วยในการเกาะตัวของเม็ดดินให้แข็งแรงขึ้น ดังสมการที่ 2.1 CSH และ CAH ช่วยลดค่าความเหนียว (Plasticity) เพิ่มค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength) ของดิน ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาเคมีของซีเมนต์เนื่องจากการแลกเปลี่ยนไอออนโดย Ca^{++} จากซีเมนต์เข้าไปแทนที่ Na^+ และ H_2O รอบอนุภาคของดินเหนียวทำให้มีขนาดเล็กลงเสมือนไล่น้ำออกจากอนุภาคดินเหนียวจากนั้นจะจับตัวอยู่ในรูป Flocculate ซึ่งเรียกขบวนการนี้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ตามรายงานดังนี้ ดังแสดงในสมการที่ 2.29 และ 2.30



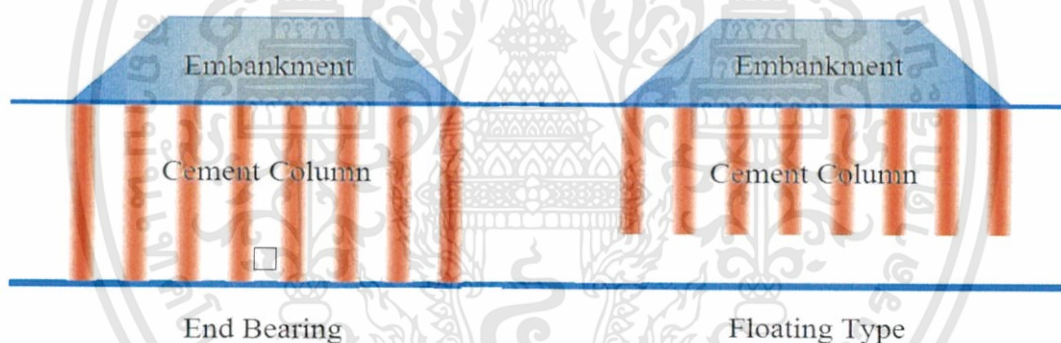
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2.6 การออกแบบและการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์

2.6.1 หลักการออกแบบเสาเข็มดิน-ซีเมนต์

การปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ มักจะก่อสร้างให้มีความตลอดชั้นดินอ่อน เสาเข็มดิน ซีเมนต์ทำหน้าที่คล้ายกับเสาเข็มกลุ่มรองรับน้ำหนักของโครงสร้างสำหรับถนน เสาเข็มดิน-ซีเมนต์จะช่วยลดการทรุดตัวของคันทางโดยการแทนที่ดินอ่อนใต้ฐานรากด้วยวัสดุที่แข็งกว่าซึ่งสามารถต้านทานการยุบตัวได้มากซึ่งมี 2 ลักษณะ คือ เสาเข็มดิน-ซีเมนต์แบบเสายาว (End Bearing Type) เป็นเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ที่ใช้ปรับปรุงชั้นดินอ่อนโดยให้ปลายของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์วางอยู่ที่ชั้นดินแข็ง และเสาเข็มดิน-ซีเมนต์แบบเสาสั้น (Floating Type) เป็นเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ที่ใช้ปรับปรุงดินอ่อน โดยเสาเข็มดินซีเมนต์ไม่ยาวตลอดความหนาของชั้นดินอ่อน และปลายเสาเข็มดินซีเมนต์ยังวางอยู่บนชั้นดินอ่อน และปลายเสาเข็มดินซีเมนต์ยังวางอยู่บนชั้นดินอ่อนดังรูปที่ 2.25 Broms and Boman เสนอวิธีการคำนวณและการออกแบบไว้



รูปที่ 2.25 รูปแบบของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ออกแบบตามความหนาของชั้นดินอ่อน[2]

การวิเคราะห์ด้านกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (Ultimate Bearing Capacity) กรณีเกิดการวิบัติของดินรอบๆ เสาเข็มดิน-ซีเมนต์ (Soil Failure) เนื่องจากแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ (Skin Friction Resistance) ตลอดความยาวซึ่งมีค่าเท่ากับ Undrained Shear Strength (S_u) ของดินรอบๆเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ และที่ End Bearing มีค่าประมาณ 6 ถึง 9 เท่าของ Undrained Shear Strength ของดินที่รองรับปลายเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ก็คือ Bearing Capacity Factor (N_c) กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของดินรอบๆเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.31

$$Q_{ult, soil} = \left(\pi D H_{col} + 6t_0 \frac{\pi D^2}{4} \right) S_u \quad (2.31)$$

เมื่อ $Q_{ult, soil}$ = กำลังน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของดินรอบเสาเข็มดิน-ซีเมนต์
 D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

H_{col} = ความยาวของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์

S_u = กำลังรับแรงเฉือนของดินรอบๆ

กรณีเกิดการวิบัติที่เสาเข็มดิน-ซีเมนต์ เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุในแท่งเสาและแรงต้านทานเนื่องจากแรงดันด้านข้างที่กระทำต่อเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ ไม่สามารถต้านทานน้ำหนักที่แบกรับได้กำลังน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยคำนวณได้จากสมการ Mohr-Coulomb ดังสมการที่ 2.32,2.33,2.34 ดังนี้

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) + 2C \tan(45^\circ + \frac{\phi}{2}) \quad (2.32)$$

สมมติให้ เสาเข็มดิน-ซีเมนต์ มีคุณสมบัติดังนี้ $\phi = 30^\circ$, $\sigma_1 = \sigma_v$, $\sigma_3 = \sigma_h$

ดังนั้น $\sigma_1 = 3.5C_{col} + 3\sigma_h$ (2.33)

$$Q_{ult,col} = A_{col}(3.5C_{col} + 3\sigma_h) \quad (2.34)$$

เมื่อ $Q_{ult,soil}$ = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของดินรอบเสาเข็มดิน-ซีเมนต์

σ_3 = Minor Principal Stress

σ_1 = Major Principal Stress

C_{col} = Cohesion Of Cement Column

σ_h = Total Lateral Stress

$$= \sigma_v + 5S_u$$

σ_v = Total Vertical Stress

A_{col} = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์

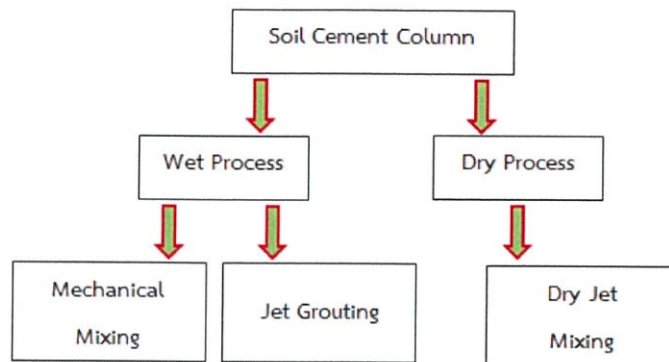
เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็ม (Ultimate Bearing Capacity, $Q_{ult,col}$) จะลดลงเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุในเสาเข็มเกิดการล้า (Creep) ทำให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มมีค่า 0.65-0.80 ของ $Q_{ult,soil}$ ดังสมการที่ 2.35

$$Q_{ult, creep, col} = (0.65 \text{ to } 0.80)Q_{ult, soil} \quad (2.35)$$

เมื่อ $Q_{ult, creep, col}$ = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มเมื่อเกิดการล้า (Creep)

2.6.2 การก่อสร้าง Cement Column

การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์สามารถทำได้ 2 วิธีหลักคือ การผสมระบบแห้ง (Dry Process) และ การผสมระบบเปียก (Wet Process)



รูปที่ 2.26 Type of Soil Cement Column Construction[2]

โดยทั้ง 2 วิธีนี้ จะมีข้อแตกต่างกันเฉพาะสถานะของปูนซีเมนต์ที่ถูกลำเลียงลงไปผสมกับดิน สำหรับการผสมระบบแห้งจะใช้ปูนซีเมนต์ผสมกับดินเดิมโดยตรง ส่วนการผสมระบบเปียกจะใช้ปูนซีเมนต์ ผสมน้ำแล้วจึงฉีดเข้าผสมกับดินเดิมจึงทำให้แต่ละวิธีมีข้อได้เปรียบ ข้อด้อยที่แตกต่างกัน ดังนี้

ข้อได้เปรียบของการผสมด้วยวิธี Wet Process

- 1) การกวนผสมให้ดินเข้ากับสารผสมทำได้ง่ายกว่าวิธีผสมแห้ง จึงทำให้เนื้อดินผสมซีเมนต์ที่ได้มีความสม่ำเสมอกว่า
- 2) สามารถใช้ผสมได้กับดินทุกชนิดโดยไม่ต้องปรับสัดส่วนผสม และขบวนการกวนผสมให้เหมาะสมกับดินแต่ละชนิด
- 3) การควบคุมคุณภาพทำได้ง่ายกว่าการผสมแห้ง เพราะสามารถกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้คงที่

ข้อด้อยของการผสมด้วยวิธี Wet Process

- 1) ในกรณีที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากันจะมีกำลังต่ำกว่าระบบแห้งเนื่องจากการเพิ่มน้ำให้เนื้อดิน ทำให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูง และที่กำลังของเสาเข็มเดียวกันจะใช้ปูนซีเมนต์มากกว่าวิธีผสมแห้ง
- 2) โดยปกติพื้นที่ก่อสร้างจะสกปรกกว่า เนื่องจากจะมีเศษน้ำปูนบริเวณปากหลุมเจาะ โดยเฉพาะ วิธีการผสมเปียกที่ใช้ระบบความดันสูง ส่วนระบบความดันต่ำจะมีปัญหาน้อยกว่า
- 3) โดยทั่วไปแล้วจะมีอัตราการก่อสร้างช้ากว่าวิธีการผสมแห้ง

ข้อได้เปรียบของการผสมด้วยวิธี Dry Process

- 1) ในกรณีที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากัน กำลังของเสาเข็มระบบแห้งจะสูงกว่าเพราะไม่มีการเติมน้ำในระหว่างการผสมทำให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำหรือในกรณีที่กำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์เท่ากัน วิธีการผสมแบบแห้งจะใช้ปูนซีเมนต์น้อยกว่าวิธีผสมเปียก โดยแบบผสมแห้งจะใช้ปูนซีเมนต์ไม่น้อยกว่า 150 กก.ต่อ ลบ.ม. ขณะที่แบบผสมเปียกจะใช้ปูนซีเมนต์ไม่น้อยกว่า 175 กก.ต่อ ลบ.ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ไม่จำเป็นต้องจัดหาน้ำในการผสม และเหมาะสำหรับชั้นดินเหนียวที่มีเนื้อสมำเสมอและมีความชื้นในดินสูงกว่า 60 - 70% ตลอดทั้งชั้นดิน

3) ในสภาพหน้างานปกติเครื่องจักรจะทำงานได้ในอัตราที่เร็วกว่าวิธีการผสมเปียก (สำหรับเสาเข็มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 ซม. ความยาว 16 เมตร ระบบผสมแห้งจะก่อสร้างได้ที่ความเร็วประมาณ 6 ต้นต่อชั่วโมง ขณะที่ระบบผสมเปียกจะก่อสร้างได้ที่ความเร็วประมาณ 3 ต้นต่อชั่วโมง)

4) พื้นที่ก่อสร้างสะอาดกว่าเนื่องจากไม่มีเศษน้ำปูนหลงเหลือบริเวณปากหลุมเจาะ ข้อดีของการผสมด้วยวิธี Dry Process

1) การกวนผสมผงซีเมนต์ให้เข้ากับเนื้อดินทำให้ได้ยากกว่าซึ่งอาจส่งผลต่อความสม่ำเสมอของเสาเข็ม

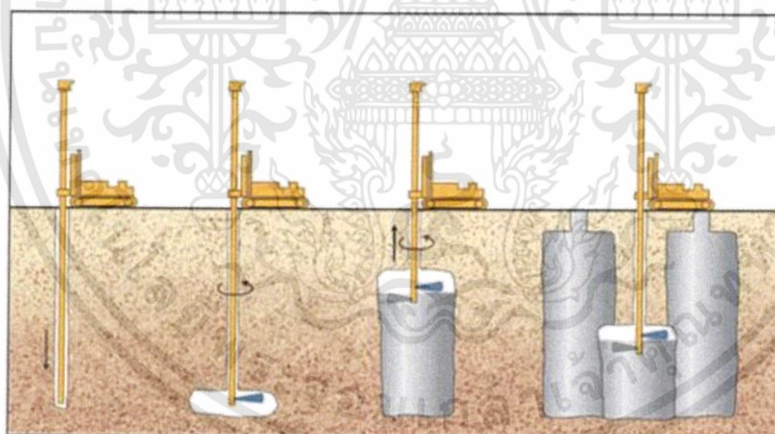
2) การควบคุมปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ให้คงที่ทำได้ยากกว่า ซึ่งอาจส่งผลต่อกำลังของเสาเข็ม

3) เหมาะสมเฉพาะกับการก่อสร้างพื้นที่ที่มีปริมาณความชื้นในดินสูง

2.6.2.1 การก่อสร้างแบบ Wet Process

หลักการก่อสร้างของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Mechanical Mixing

ใช้ใบพัดทาหน้าตัดดินและผสมดินให้เข้ากับน้ำปูน ขนาดของเสาเข็มดินซีเมนต์จะถูกควบคุมด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดผสมดิน และตำแหน่งที่ปล่อยน้ำปูนนั้นอาจอยู่ปลายท่อ หรือ ด้านข้างหลักการก่อสร้างของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Jet Grouting



After Hayward Baker [online]

รูปที่ 2.27 Jet Grouting[2]

Jet Grouting Technique เป็นวิธีการฉีดน้ำปูนซีเมนต์เข้าไปผสมรวมกับเนื้อดินด้วยความดันสูง มากในระดับ 200 - 400 บาร์ ผ่านทางหัวฉีด (Nozzle) ซึ่งมีขนาดประมาณ 1.4-3.0 มม. เรียงตัวอยู่ในแนวรอบส่วนปลายล่างของก้านเจาะจำนวน 1-8 หัวฉีด ในขณะที่ทำงานเครื่องเจาะจะหมุนก้านเจาะเจาะแหวกดินลงไปช้าๆ พร้อมทั้งฉีดน้ำตัดดินด้วยความดันสูง เมื่อถึงระดับความลึกที่กำหนดจะหมุนก้านเจาะด้วยอัตราความเร็ว 6-15 รอบต่อนาที พร้อมทั้ง ยกตั้งขึ้นเป็นจังหวะประมาณ 2-30 ซม. ในขณะเดียวกันจะอัดฉีดน้ำปูนซีเมนต์ความดันสูง ที่มีพลังงานจลน์ความเร็วประมาณ 200 ม./วินาที หรือสูงกว่า แหวกทะลุทะลวงตัดย่อยดินให้ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

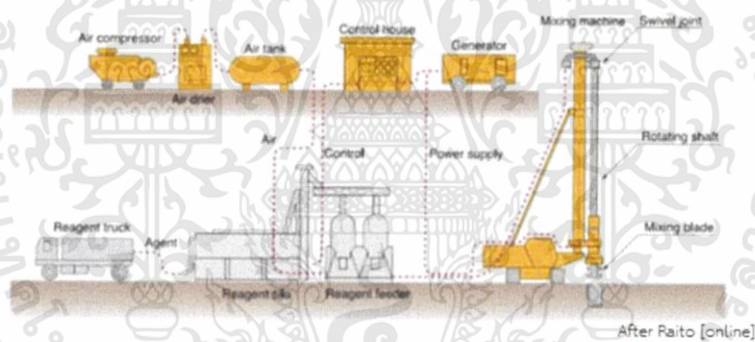
ทำงานจะควบคุม ด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติอย่างต่อเนื่อง จนถึงระดับความลึกของชั้นดินที่ต้องการปรับปรุง วัสดุผสมดิน-ซีเมนต์จะก่อรูปทรงกระบอกในลักษณะเหมือนเสาเข็ม ซึ่งเรียกว่า Cement Column



รูปที่ 2.28 เครื่องจักรในการทำ Jet Grouting[2]

2.6.2.2 การก่อสร้างแบบ Dry Process

หลักการก่อสร้างของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Dry jet mixing



รูปที่ 2.29 Dry Jet Mixing[2]

ใช้ใบพัดทำหน้าที่ตัดดินและสร้างช่องว่างให้ดินเพื่อฟุ้งปูนซีเมนต์ผสมกับดินขณะทำการถอนก้าน ส่วนขนาดของเสาเข็มดินซีเมนต์จะถูกควบคุมด้วยใบพัด



รูปที่ 2.30 เครื่องจักรในการทำ Dry Jet Grouting[2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การพัฒนากำลังของวัสดุผสมดินซีเมนต์

การผสมดินกับปูนซีเมนต์ จะมีขบวนการเกิดขึ้น 2 อย่างคือ

1. ขบวนการปฏิกิริยาประกอบด้วย ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ที่ก่อให้เกิดสาร Calcium Silicate Hydrate (CSH), Calcium Aluminate Hydrate (CAH) และ Calcium Hydroxide (CaOH₂) สาร CSH และ CAH จะมีคุณสมบัติเป็นตัวเกาะยึดให้มวลดินเข้าด้วยกันทำให้รวมตัวกันเป็นมวลขนาดใหญ่ที่มีความแข็งแรงสูงขึ้น

2. ขบวนการหุติยภูมิจะเกิดจากส่วน CaOH₂ ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยาปอสโซลานิกกับ Soil Silica และ Soil Alumina ในดิน ทำให้เกิดสาร CSH และ CAH เพิ่มเติมจากปฏิกิริยาที่เกิดจากซีเมนต์โดยตรง ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมกับดินขึ้นอยู่กับชนิดของดินและความแข็งแรงของวัสดุผสมที่ต้องการ ส่วนใหญ่ปริมาณปูนซีเมนต์จะอยู่ระหว่าง 200-300 กก./ลบ.ม. ของดินเดิม ในกรณีที่ต้องการได้เสาเข็มดิน-ซีเมนต์ที่มีความแข็งแรงมากในระยะเวลานาน อาจใช้ปริมาณซีเมนต์สูงถึง 500 กก./ลบ.ม. หรือมากกว่านี้

2.8 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผสมดินซีเมนต์

ผลจากการก่อสร้าง Cement Column ในระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมา เช่น การนำ Jet Grouting Technique ไปประยุกต์ใช้ในที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาประมาณ 100 โครงการ ได้มีการสุ่มเจาะเก็บตัวอย่างวัสดุผสมอย่างต่อเนื่องเพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มในแต่ละงาน และได้นำตัวอย่างที่เป็นตัวแทนไปทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมดินเดิมซึ่งอ่อนในระดับ very soft clay ($q_u \sim 0.6-2$ ตัน/ตร.ม.) ได้เปลี่ยนคุณสมบัติเป็น hard clay ($q_u > 40-250$ ตัน /ตร.ม.) ภายในระยะเวลาเพียง 1 เดือน และ tangent modulus of elasticity (E_t) ที่ 50% q_u จะสูงกว่า 5,000 ตัน /ตร.ม. ส่วนค่า strain ที่กำลังอัดสูงสุดจะอยู่ประมาณ 0.8-1.0 % และหน่วยน้ำหนักแห้งมีค่าต่ำในระดับเพียง 0.5-0.7 ตัน/ลบ.ม. (Low dry unit weight) ในขณะที่ปริมาณน้ำในวัสดุผสมสูงถึงระดับ 90-170% วัสดุผสมดินซีเมนต์จะมีลักษณะแข็งเปราะกว่าวัสดุดินเดิมที่มีคุณสมบัติเป็น plastic

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของดินที่ผ่านการปรับปรุงกำลัง[2]

หมวด	คุณสมบัติดิน	แนวโน้มของคุณสมบัติดินที่ผ่านการปรับปรุงกำลัง*
คุณสมบัติทั่วไป (index)	ปริมาณน้ำในดิน	ลดลงประมาณ 20%
	ความหนาแน่น	เพิ่มขึ้น 3-15%
	การซึมผ่านของน้ำ	เท่าเดิมหรือลดลง
คุณสมบัติด้านกำลัง (Strength)	กำลังรับแรงเฉือนในห้องปฏิบัติการ ($S_{u(lab)}$)	(เพิ่มขึ้น) มีค่าประมาณ 500-2000 kPa

ตารางที่ 2.2(ต่อ) คุณสมบัติของดินที่ผ่านการปรับปรุงกำลัง[2]

คุณสมบัติด้านกำลัง (Strength)	กำลังรับแรงเฉือนในสนาม ($S_{u(lab)}$)	(เพิ่มขึ้น) มีค่าประมาณ 0.3-0.6 $S_{u(lab)}$
	โมดูลัสของดิน E_u	(เพิ่มขึ้น) มีค่าประมาณ 30 ถึง 100 S_u
	Poisson's ratio	(เท่าเดิมหรือเพิ่มขึ้น) มีค่าระหว่าง 0.25-0.45
คุณสมบัติด้านการ อัดตัวคายน้ำ (Consolidation)	CR&RR	มีค่าเท่ากับดินเดิม
	σ'/q_u	มีค่าประมาณ 1.3

หมายเหตุ* : แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินที่ผ่านการผสมเมื่อเทียบกับดินเดิม

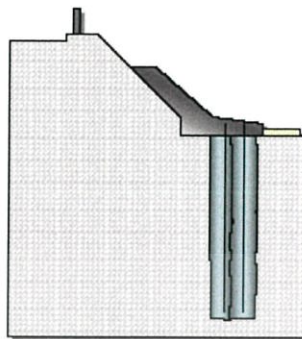
2.9 แนวทางการประยุกต์ใช้ประโยชน์จาก Cement Column

แนวทางการประยุกต์ใช้ประโยชน์จาก Cement Column สามารถดัดแปลงออกแบบให้เหมาะสมกับแต่ละงานได้หลากหลายวิธี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และเงื่อนไขต่างๆ ที่เป็นข้อจำกัดของงานซึ่งต้องมีความเข้าใจเป็นอย่างดีในคุณสมบัติของวัสดุผสมดิน-ซีเมนต์ และพฤติกรรมระหว่างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์กับ ดินโดยรวมงานที่ได้นำ Cement Column ไปประยุกต์ใช้สามารถจัดแบ่งได้ตามลักษณะงานดังนี้

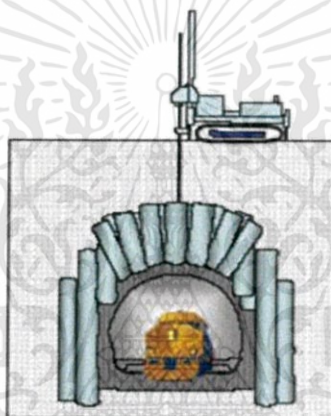
- 1) ใช้ปรับปรุงดินฐานรากเพื่อเพิ่ม bearing capacity ของชั้นดินอ่อน และเพื่อลดการทรุดตัวของคันดินถมที่จะก่อสร้างบนชั้นดินอ่อนนั้น
- 2) ใช้ปรับปรุงดินที่มีคุณภาพต่ำเพื่อเพิ่มความมั่นคงให้ผนังบ่อชุดหรือเพื่อเสริมความแข็งแรงให้ผนังกำแพงกันดินริมน้ำที่เริ่มชำรุดเสียหาย
- 3) ใช้กำแพงเสาเข็มดิน-ซีเมนต์เป็นกำแพงกั้นน้ำ (Cut Off Wall) ป้องกันการรั่วซึมของน้ำไม่ให้ ไหลเข้าสู่บริเวณที่ต้องการป้องกัน
- 4) งานปรับปรุงดินบริเวณหลังผนังสถานี (Diaphragm Wall) ขณะเริ่มขุดเจาะอุโมงค์ และขณะ ขุดเจาะไปบรรจบกับสถานีปลายทาง
- 5) งานปรับปรุงดินบริเวณอุโมงค์เข้า-ออกอุโมงค์ (Intervention Shaft) และอุโมงค์เชื่อมต่อ (Passenger Adit)
- 6) งานปรับปรุงดินบริเวณพื้นบ่อชุดเพื่อป้องกันปัญหาการแยกตัว (Heave) ของพื้นขณะขุดดิน
- 7) งานปรับปรุงดินบริเวณเครื่องขุดอุโมงค์ (TBM) ในงานซ่อมแซมเครื่องขุดเจาะ
- 8) งานปรับปรุงดินเพื่อซ่อมรอยแตกของท่อใต้ดิน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่า 1 เมตรขึ้นไป
- 9) งานเสริมความแข็งแรงให้กับฐานรากเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10) งานป้องกันการเคลื่อนไถและการพังทลายของตลิ่งริมแม่น้ำ
การประยุกต์ใช้ Cement Column ในงานก่อสร้างต่างๆ



รูปที่ 2.31 งานฉีดปูนทามผนัง กั้นน้ำต้านแรงกัดเซาะของน้ำบริเวณริมตลิ่ง[2]

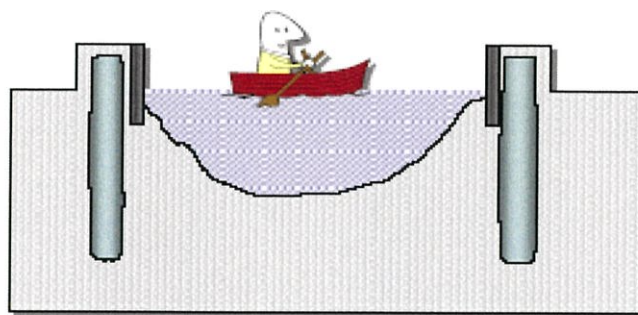


รูปที่ 2.32 งานปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้ดินรอบอุโมงค์ป้องกันไม่ให้ดินยุบตัวลงมาในขณะขุดและสามารถทำผนังอุโมงค์ถาวรที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าปกติ[2]

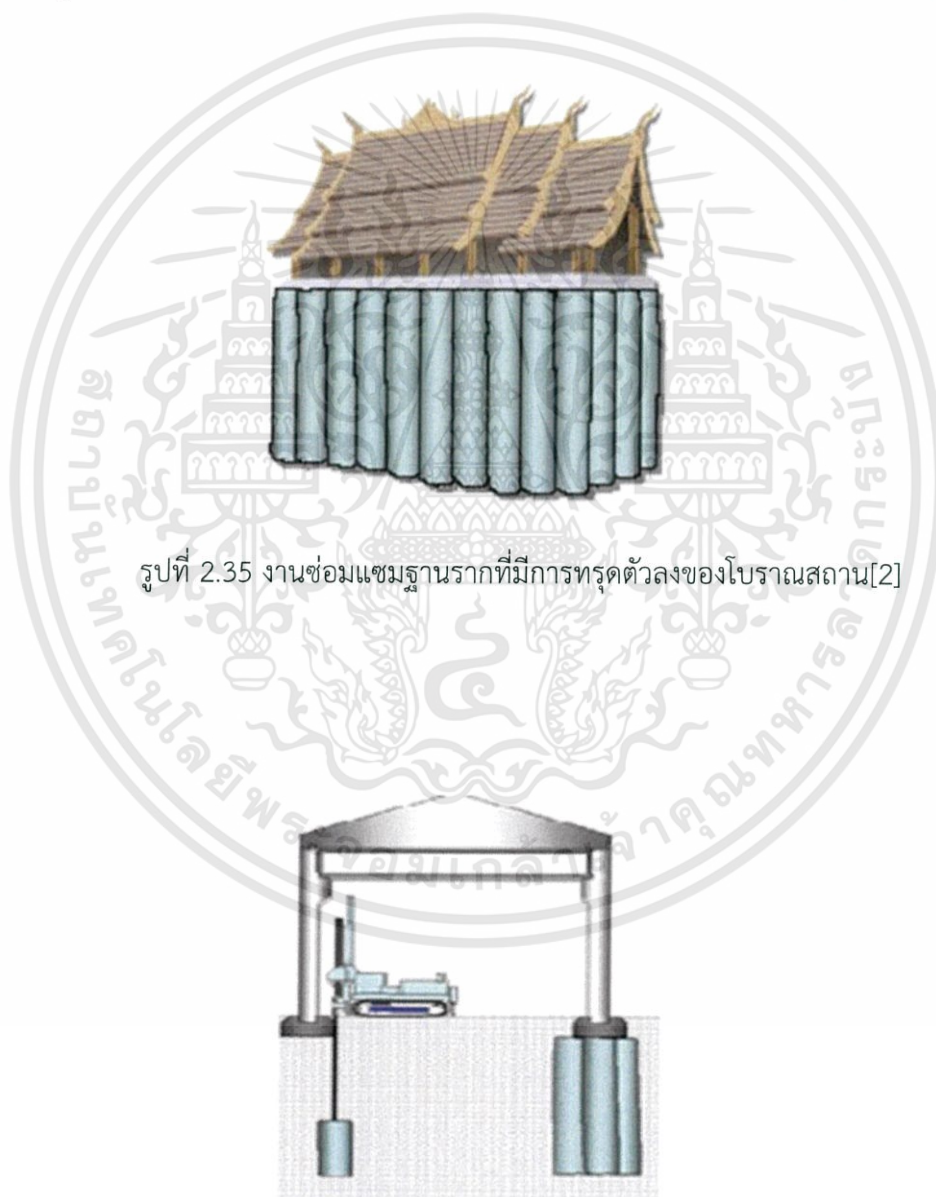


รูปที่ 2.33 สร้างกำแพงป้องกันดินพังทลายในขณะปฏิบัติงานขุดลึก[2]

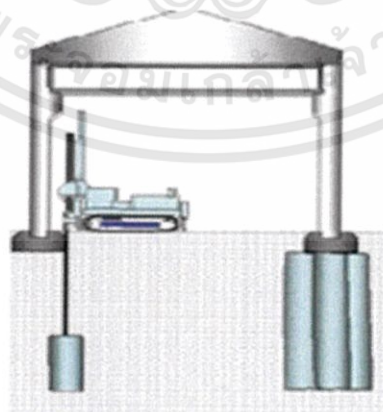
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.34 งานกำแพงป้องกันการรั่วซึมผ่านคันดินแม่น้ำ คลองส่งน้ำและอ่างเก็บน้ำ[2]

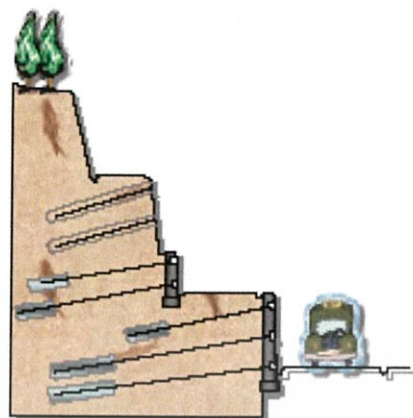


รูปที่ 2.35 งานซ่อมแซมฐานรากที่มีการทรุดตัวของโบราณสถาน[2]

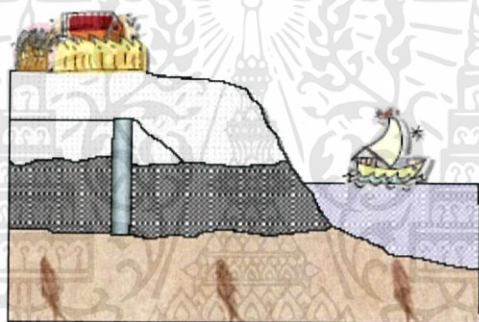


รูปที่ 2.36 งานปรับปรุงดินใต้ฐานรากเพื่อเสริมความแข็งแรงของอาคาร[2]

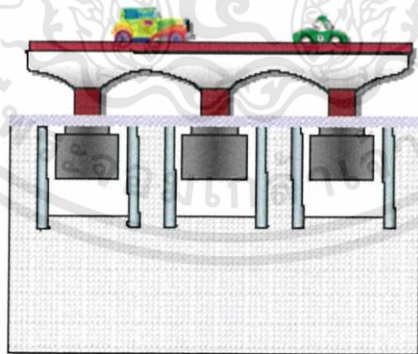
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.37 งานสมอยึดรั้งกำแพงกันดินตามไหล่เขาที่มีความชันมาก[2]



รูปที่ 2.38 งานสร้างผนังดินซีเมนต์เพื่อเป็นเขื่อนเก็บกักน้ำใต้ดินไว้ในฤดูแล้ง[2]



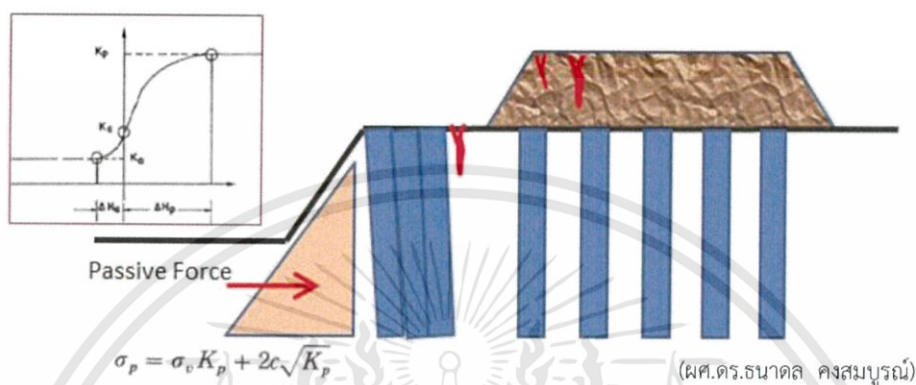
รูปที่ 2.39 ทำแนวกำแพงรอบฐานรากของสะพานเพื่อป้องกันการกัดเซาะของน้ำที่จะเกิดกับฐานรากของสะพาน[2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.1 การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เสริมกำลังของลาดดิน

ผู้ออกแบบจะต้องเข้าใจว่าจุดอ่อนของเสาเข็มดินซีเมนต์คือรับโมเมนต์และแรงดึงได้น้อยมากๆ แต่สามารถรับแรงอัดได้สูง

บางครั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ต้องรับแรงดันดินด้านข้าง แต่แรงต้านทานดินด้านข้างจากเสาเข็มดินซีเมนต์ จำเป็นต้องมีการเคลื่อนที่สูงเพื่อพัฒนา Passive Force ซึ่งจะทำให้ค่าโมดูลัสของดินลดลง



รูปที่ 2.40 การใช้เสาเข็มดิน-ซีเมนต์เสริมกำลังของลาดดิน[5]

2.10 การทดสอบคุณภาพเสาเข็มดินซีเมนต์

2.10.1 การเก็บตัวอย่างดินซีเมนต์เพื่อ ทำการทดสอบ

- Cored sample เก็บตัวอย่างดินซีเมนต์ที่แข็งแล้ว
- Wet grab sample เก็บตัวอย่างดินซีเมนต์ทันทีหลังก่อสร้างเสร็จ
- Pull out sample เก็บตัวอย่างดินซีเมนต์จากการทำการถอนทั้งต้น

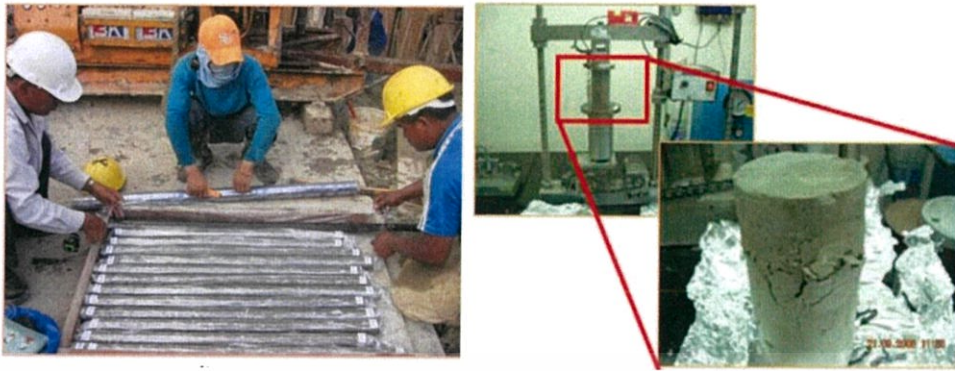


รูปที่ 2.41 ตัวอย่างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ทดสอบ[2]

2.10.2 การทดสอบคุณสมบัติของกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์

ทดสอบหากำลังรับแรงอัดของเสาเข็มดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการโดย UCS test ใช้การเก็บตัวอย่างโดยวิธี Coring

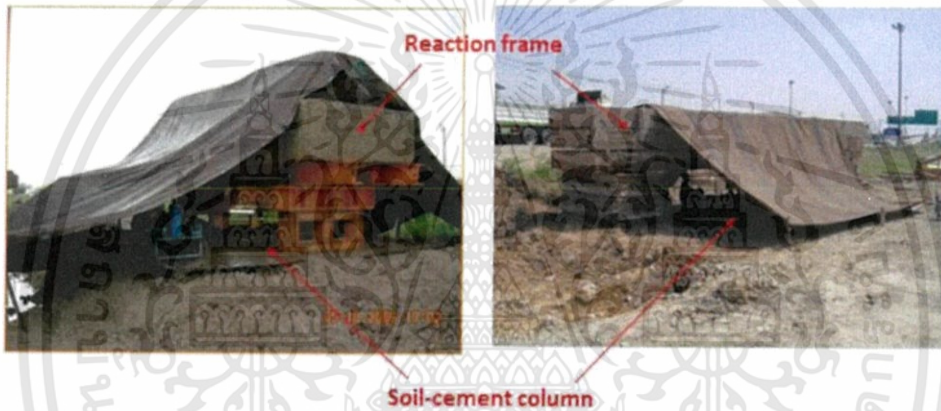
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.42 การเก็บตัวอย่างเสาเข็มดินซีเมนต์มาทดสอบในห้องปฏิบัติการ[2]

2.10.3 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์

ทดสอบหากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์โดยวิธี Static Pile Load Test



รูปที่ 2.43 การทดสอบหากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์โดยวิธี Static Pile Load Test[2]

- ทดสอบหาขนาดความลึกและความสม่ำเสมอในการผสมปูนซีเมนต์โดยขุดดินลงไปรอบๆ หัวเสาเข็มดินซีเมนต์แล้วทำการวัดขนาดเสาเข็มดินซีเมนต์



รูปที่ 2.44 การทดสอบหาขนาดความลึกและขนาดหัวเสาเข็มดินซีเมนต์[2]

- หลังจากทำการถอนเสาเข็มดินซีเมนต์ ให้วัดความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์ตลอดต้นแล้ว ฝ่าตัวอย่างออกทั้งแนวยาวและแนวขวางเสาเข็มดินซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.45 การถอนเสาเข็มดินซีเมนต์ขึ้นมาวัดความยาวและผ่าตัวอย่างออก[2]
-วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพิจารณาความสม่ำเสมอของเนื้อดินซีเมนต์ทั้งแนวยาว



รูปที่ 2.46 วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพิจารณาความสม่ำเสมอของเนื้อดินซีเมนต์[2]
ในกรณีที่เสาเข็มดินซีเมนต์มีขนาดใหญ่ (>1.0 m) หรือมีความลึกเกินกว่าปลอกเหล็กจะลง
ไปได้ ให้ทำการทดสอบแบบ 4 Holes Coring โดยเจาะตามขอบของเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อ พิจารณา
ความยาว และความสม่ำเสมอ หากเสาเข็มดินซีเมนต์มีขนาดใหญ่อาจเจาะ Coring มากกว่า 4 รู



รูปที่ 2.47 การทดสอบแบบ 4 Holes Coring[2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับความลึก ของตัวอย่าง (ม.)	รูเจาะที่	ความยาวตัวอย่าง ตัวอย่าง (ซม.)	Log of Coring				ความสม่ำเสมอ ของตัวอย่าง	หมายเหตุ
			25	50	75	100		
0-1.0	1	100					มีความสม่ำเสมอ	
1.0-2.0		100					มีความสม่ำเสมอ	
2.0-3.0		99					มีความสม่ำเสมอ	
3.0-4.0		100					มีความสม่ำเสมอ	
4.0-5.0		95					มีความสม่ำเสมอ	
5.0-6.0		100					มีความสม่ำเสมอ	
6.0-7.0		98					มีความสม่ำเสมอ	
7.0-8.0		100					มีความสม่ำเสมอ	
8.0-9.0		98					มีความสม่ำเสมอ	
9.0-10.0		98					มีความสม่ำเสมอ	
10.0-11.0		100					มีความสม่ำเสมอ	
11.0-12.0		95					มีความสม่ำเสมอ	

รูปที่ 2.48 ข้อมูลของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ระดับความลึกต่างๆ[2]

2.11 องค์ประกอบที่มีผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์

การควบคุมคุณภาพเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ ให้มีคุณภาพมาตรฐานใกล้เคียงกัน ควรพิจารณาองค์ประกอบดังนี้

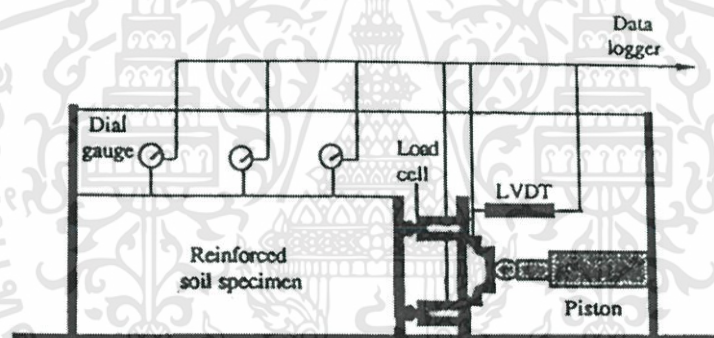
1. ชนิดของดินที่ทำก็ปรับปรุงแร่ธาตุองค์ประกอบในดินความชื้นและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในการเลือกสารผสม
2. ปริมาณของซีเมนต์ที่ใช้จะต้องสัมพันธ์กับระบบการปรับปรุงดินจะกำหนดจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ และการทำเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ ทดสอบในสนาม
3. ชนิดของใบกวนผสมในระบบ Mechanical Mixing ต้องเหมาะสมที่จะผสมดินให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียวกัน Cement Slurry หรือ Cement Powder
4. การหมุนและอัตราการตั้งขึ้นของหัวเจาะที่เหมาะสม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องจักร ชนิดของดินและกรรมวิธีการก่อสร้าง เช่น การทำ Pre Cut ก่อนทำการผสมซีเมนต์
5. แรงดันของ Cement Slurry หรือ Cement Powder หรือน้ำ/อากาศ ในการทำ Pre Cut โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบ Slurry Jet Mixing Column ซึ่งจะมีผลต่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง Column และการผสมให้เนื้อดินมีความสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

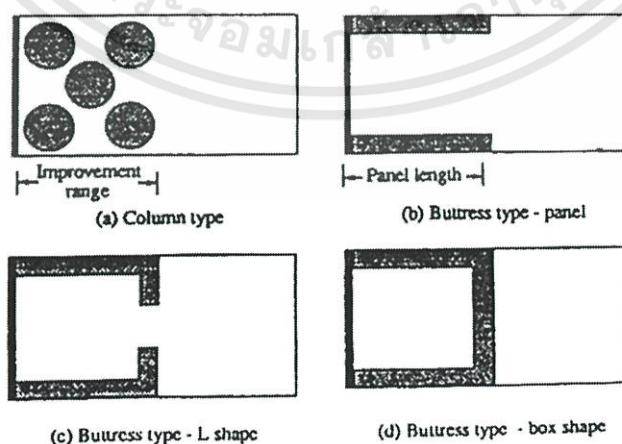
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.12.1 Lioa and Tsai. (1993)[9]

Lioa and Tsai. (1993) ศึกษาถึงแรงต้านเชิงรับ (passive resistance) ของชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีการปรับปรุงบางส่วน การศึกษาดังกล่าว ศึกษาการเสริมกำลัง 2 รูปแบบ กล่าวคือ เสา (column) และค้ำยัน (buttress) จะถูกจำลองในกล่องตัวอย่างดินแสดงดังรูปที่ 2.49 แล้วทำการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.50 การเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงจะใช้น้ำหนัก (Load) กระทำที่ตัวอย่างดินจนถึงจุดพิบัติ และมีการวัดการเคลื่อนตัวของกำแพงตลอดช่วงเวลาที่ได้รับแรงกระทำ จากการทดสอบที่มีรูปแบบการเสริมกำลังที่แตกต่างกัน ชั้นดินที่มีการเสริมแรงด้วยเสา เกิดการคราก ในจุดที่มีแรงต้านเชิงรับต่อการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินสูงกว่าการเสริมแรงด้วยค้ำยัน แสดงดังรูปที่ 2.51 เนื่องจากการเสริมแรงด้วยเสามีพื้นที่ผิวสัมผัสของการ grouting ระหว่างมวลดินที่มีการ grouting และไม่ grouting มากกว่า ปัจจุบันนี้ ชั้นดินที่มีการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธี jet grouting หรือ การผสมลิก มีการนำเข้ามาใช้บ้างแล้ว โดยใช้กับบริเวณใต้การขุดชั้นสุดท้ายในงานขุด

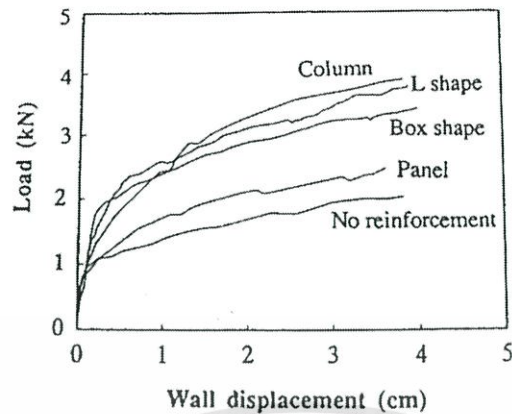


รูปที่ 2.49 ไดอะแกรม Schematic ของอุปกรณ์การทดสอบ[9]



รูปที่ 2.50 แบบจำลองสำหรับการเสริมแรงในดินตัวอย่าง[9]

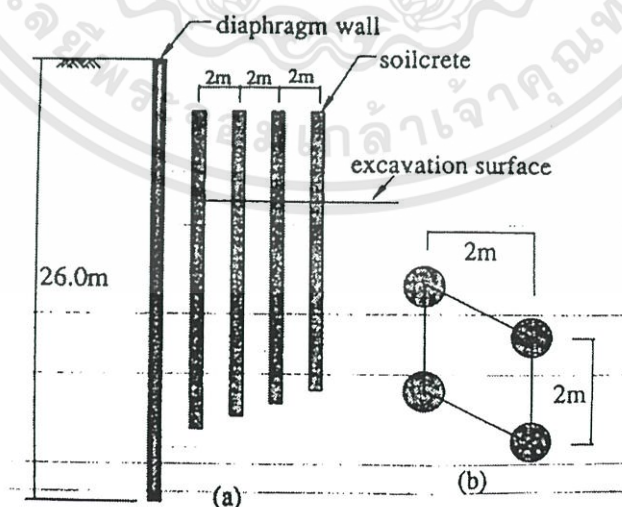
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.51 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกระทำและการเคลื่อนตัวสำหรับการเสริมแรงในดินตัวอย่าง ด้วยรูปแบบที่แตกต่างกัน[9]

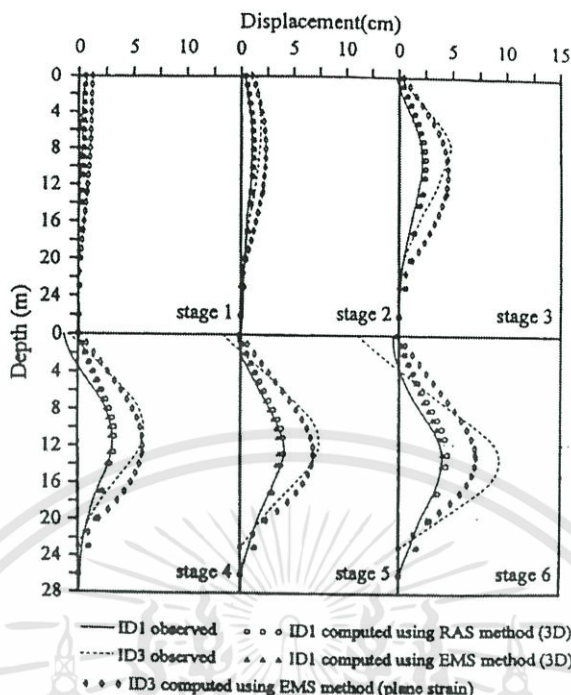
2.12.2 Ou et al. (1996)[9]

Ou et al. (1996) ได้ทำรายงานการศึกษาข้อมูลการขุดดิน ที่ Kon-Her Building ในกรุงเทพฯ โดยกำแพงของห้องใต้ดิน เป็นกำแพงโคอะแฟรมหนา 60 เซนติเมตร ทะลุหิน ชั้นสุดท้ายของการขุด ลึก 12.75 เมตร อยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน ที่แสดงในรูปที่ 2.52 คือเสาเข็มแบบผสมลึกลงผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างเสา 2 เมตร ซึ่งอยู่ข้างกำแพงโคอะแฟรม ในบริเวณขุด Inclinometer ID1 และ ID3 แสดงการเคลื่อนตัวของกำแพงเทียบกับค่าที่ทำนายได้จากการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ ในรูปที่ 2.53 ซึ่งรายงานนี้สรุปได้ว่า ค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) มีค่าใกล้เคียงกับค่าตรวจวัดจริงในสนาม



รูปที่ 2.52 เสาเข็มโดยการผสมลึกลง (a) โดยใช้ความลึกที่แตกต่างกัน (b) โดยใช้ การกระจายแบบ Rhombic[9]

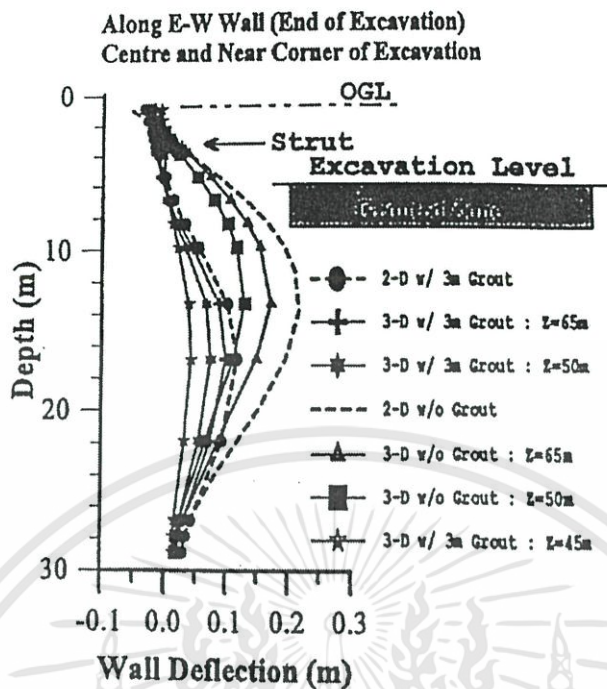
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.53 การเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงที่วัดได้และค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงจากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์[9]

2.12.3 Yong et al. (1998)[9]

Yong et al. (1998) ศึกษาอิทธิพลของ grouted layer จำลองการขุดโดยใช้กำแพงพืด (sheet pile) ด้วยคุณสมบัติของชั้นดินที่ Kallang ที่ก่อสร้างแบบมีเสถียรภาพ และไม่มีเสถียรภาพ โดยที่ grouted layer ใต้บริเวณก่อสร้างวิเคราะห์โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 และ 3 มิติ โดยทั่วไปรูปร่างของ grouted zone มีลักษณะเป็นบล็อคอหรือเป็นแพ ที่มีความหนา 3 เมตร ติดตั้งขวางตลอดพื้นที่การขุด โดยใช้วิธี JGP หรือ DCM ซ้อนทับกับ grout column ซึ่ง grouted layer ทำหน้าที่เสมือนค้ำยัน ในชั้นดินเหนียวอ่อน ถ่ายแรงด้านข้างไปยังกำแพงพืด ชั้นดินที่ถูก grout ใต้บริเวณก่อสร้าง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนตัวของกำแพง ดังรูป 2.54 ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของกำแพง อยู่ที่ระดับลึก 17 เมตร จากผิวดิน สำหรับดินที่ไม่มี grouted layer จะอยู่ที่ระดับลึก 12 เมตรจากผิวดิน เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นดินที่ไม่มี grouted layer พบว่า grouted layer ลดการเคลื่อนตัวสูงสุดของกำแพงประมาณ 45% และ 38% สำหรับ 2 มิติ และ 3 มิติ ตามลำดับ



รูปที่ 2.54 ข้อมูลการเคลื่อนตัวของกำแพง สำหรับชั้นดินที่มีการ groute และไม่มีกร groute[9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

แบบจำลองโครงสร้างกันดิน เป็นการจำลองขั้นตอนเชิงวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อแสดงให้เห็นถึงลักษณะการวิบัติของโครงสร้างกันดิน เนื่องจากการก่อสร้างทางวิศวกรรมโยธาจำเป็นจะต้อง คำนึงถึงความปลอดภัยของสิ่งก่อสร้างเป็นสิ่งสำคัญ โดยศึกษาจากพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของ โครงสร้างกันดิน รูปแบบของโครงสร้างกันดินและพฤติกรรมการวิบัติของโครงสร้างกันดิน ให้ เข้าใจและถูกต้องแม่นยำ ทั้งนี้เพื่อให้ได้สิ่งก่อสร้างที่สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถูกต้อง ตามหลักวิศวกรรม

ในการศึกษาพฤติกรรมดินเป็นสิ่งที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าจนกว่าจะถึงจุดที่ดินเกิดการวิบัติ จึงจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองที่เป็นวัสดุจริง แต่ย่อสัดส่วนวางดลงบนกระดาษหรือวาดด้วยคอมพิวเตอร์ หรือจากการคำนวณเชิงตัวเลข (finite element method , FEM) เป็นเทคนิควิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการหาคำตอบโดยประมาณ ของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยพร้อมกับสมการ ปริพันธ์ ผลลัพธ์ที่ได้จากระเบียบวิธีนี้มีพื้นฐานมาจากการกำจัดสมการเชิงอนุพันธ์อย่างสมบูรณ์ (สำหรับปัญหาที่อยู่ในสถานะคงที่) หรือการปรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ให้กลายเป็นระบบ โดยประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญซึ่งเป็นปริพันธ์ทางคณิตศาสตร์ด้วยการใช้เทคนิค มาตรฐานทางคณิตศาสตร์ ซึ่งสิ่งที่จำลองมาจากของจริงเรียกว่า แบบจำลอง (model) วิธีให้ได้มาซึ่ง แบบจำลองเรียกว่า การจำลองแบบจำลอง (modeling) การจำลองแบบเป็นการสร้างจินตนาการของ ภาพ เพื่อเลียนแบบพฤติกรรมดินที่เกิดขึ้นจริงที่พบตามธรรมชาติ โดยใช้วิธีที่ตั้งอยู่บนกฎการค้นพบทางวิศวกรรม

ชนิดของแบบจำลองสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ชนิด ได้แก่

- 1) แบบจำลองเชิงแนวคิด (conceptual model)
- 2) แบบจำลองเชิงกายภาพ (physical model)
- 3) แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์และสถิติ (mathematical and statistical model)
- 4) แบบจำลองเชิงภาพเคลื่อนไหว (visualization model)
- 5) แบบจำลองเชิงซิสเต็มไดนามิกส์ (system dynamics model)

ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นการศึกษาโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ (physical model) ขนาด 1-g เพื่อศึกษาการพิบัติของโครงสร้างกันดิน ซึ่งดินตัวอย่างที่ลู่นำมาใช้ คือ ดินทรายที่ผ่านการอบแห้ง เพื่อให้ง่ายต่อการทดลอง ดังนั้นก่อนทำการการศึกษาแบบจำลอง ต้องมีการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของดินตัวอย่าง

3.2 คุณสมบัติของดินตัวอย่างในแบบจำลอง

ก่อนทำการศึกษาแบบจำลอง ต้องมีการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของดินตัวอย่างที่ใช้ ได้มีการทดสอบ หาขนาดคละ ของดินตัวอย่าง (grain size analysis) หน่วยน้ำหนักของดินตัวอย่าง และ คำนวณเสียดทานภายใน (internal friction angle, ϕ) เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ผลการทดลอง จากแบบจำลอง โดยมี รายละเอียดดังนี้

3.2.1 Grain Size Analysis ขนาดคละของดินตัวอย่าง (มาตรฐานอ้างอิง: ASTM D 422) [6]

ในมวลดินอาจประกอบด้วยเม็ดดินหลายขนาด ซึ่งขนาดของเม็ดดินนี้จะมีผลต่อคุณสมบัติต่างๆ ของมวลดินอย่างมาก เช่น มีผลต่อค่าความซึมผ่าน (Permeability) อัตราการทรุดตัว (Rate of Settlement) และความสามารถในด้านกำลัง (Strength) ของมวลดิน เป็นต้น เพราะฉะนั้นเราจึงต้องทราบขนาดคละของเม็ดดินเพื่อให้เหมาะกับงานก่อสร้าง เช่น งานเขื่อน ถนน สนามบิน มวลดินที่มีขนาดเม็ดหยาบอยู่มากจะทำให้น้ำไหลซึมผ่านได้ง่าย มวลดินที่มีขนาดเม็ดละเอียด อยู่มากดินจะแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ง่ายเมื่อผสมน้ำและจะตกตะกอนช้ากว่าดินที่มีขนาดเม็ดใหญ่กว่า

การหาขนาดและการกระจายตัวของเม็ดดินทำได้หลายวิธี ตามความเหมาะสมของขนาดเม็ดดินและตาม ชนิดของดิน ดังนี้

- 1) วิธีร่อนผ่านตะแกรง (Sieve Analysis) สำหรับเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่กว่าตะแกรงเบอร์ 200 เป็นส่วนใหญ่ (0.075 มม.)
- 2) วิธีตกตะกอนโดยไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer Analysis) สำหรับดินที่มีขนาดเล็กกว่า ตะแกรงเบอร์ 200 เป็นส่วนใหญ่ (ขนาดเล็กกว่า 0.075 มม.) เช่น ดินเหนียว (Clay) ดินเหนียวปนตะกอน (Silty Clay)

ทั้งสองวิธีดังกล่าวอาจใช้ร่วมกันในการวิเคราะห์ขนาดของตัวอย่างเดียวกันได้ โดยในการศึกษาครั้งนี้ใช้ทรายเป็นดินตัวอย่าง จึงหาขนาดคละของเม็ดดินด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรง (Sieve Analysis)

อุปกรณ์

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

วิธีการทดลอง

- 1) ชั่งตะแกรงทุกๆขนาดที่ใช้ โดยตาชั่งอ่านได้ถึง 0.1 กรัม โดยตะแกรงชุดหนึ่งไม่ควร เกิน 7

ใบ โดยมีขนาดละเอียดถึงเบอร์ 200 อยู่ด้วยทุกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ในกรณีที่ตัวอย่างดินเกาะเป็นก้อนใหญ่ให้ทุบ แยกดินออกเป็นเม็ดอิสระด้วยค้อน ยาง แต่ต้องระวังอย่าให้แรงมากจนเม็ดดินแตก

3) นำตัวอย่างดินที่บดซังน้ำหนักแล้วใส่ลงในตะแกรงที่เรียงลำดับจากหยาบไปหาละเอียด โดยมีฝาปิดด้านบนและมีถาด (pan) รองด้านล่าง รวมเป็นถาดของตะแกรงนำไปเข้าเครื่อง เขย่า (sieve shaker) เขย่านานอย่างน้อย 10 นาที

4) ชั่งทั้งดินที่ค้างอยู่ในแต่ละตะแกรงรวมทั้งน้ำหนักตะแกรง แล้วนำไปคำนวณหาค่า %F



รูปที่ 3.1 การทดสอบ Grain Size Analysis ของทรายตัวอย่าง

วิธีการคำนวณ

$$1) \text{เปอร์เซ็นต์ของดินที่ค้างบนตะแกรง} = \frac{\text{น้ำหนักดินที่ค้างบนแต่ละตะแกรง}}{\text{น้ำหนักดินทั้งหมด}} \times 100\%$$

$$2) \text{เปอร์เซ็นต์การค้างสะสม} = \text{ผลบวกสะสมของเปอร์เซ็นต์ของดินที่ค้างบนตะแกรงที่}$$

หยาบกว่า

$$3) \text{เปอร์เซ็นต์ของดินที่ผ่านตะแกรง (\% finer)} = 100 - \text{เปอร์เซ็นต์ค้างสะสม}$$

3.2.2 Specific Gravity of Soil: ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (มาตรฐานอ้างอิง: ASTM D 854 - 00)[6]

ในมวลดินจะมีส่วนประกอบของแร่ธาตุสารต่างๆ อาจจะมีชนิดเดียวหรือต่างชนิดกันหลายอย่าง ดังนั้นความถ่วงจำเพาะในมวลดิน G_s ก็คือ ค่าเฉลี่ยของความถ่วงจำเพาะของแร่ธาตุสารเหล่านั้น และโดยทั่วไปค่าความถ่วงจำเพาะของ มวลดินจะมีค่าประมาณ 2.60 ถึง 2.80 แล้วแต่แร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบ เช่นดินลูกรังบางชนิดมีธาตุเหล็กอยู่มากจะมีค่า ความถ่วงจำเพาะสูงถึง 3.00 หรือมากกว่า แต่หากดินมีสารอินทรีย์อยู่มากจะทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะต่ำลง

ความถ่วงจำเพาะเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของมวลดิน สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาค่า อัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio) ความพรุน (Porosity) ความอิ่มตัว (Degree of Saturation) หน่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก (Unit Weight) และค่าอื่นๆ ได้ รวมทั้งใช้คาดคะเนแร่ธาตุซึ่งเป็นองค์ประกอบของมวลดินนั้น เช่น ดินที่มี iron อยู่มากจะมีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่าดิน ที่มี silicas เป็นส่วนประกอบ หรือดินเหนียวจะมีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่าทราย เนื่องจากดินเหนียวมีส่วนประกอบของ แร่ธาตุซึ่งหนักกว่า (Quartz) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของทราย

อุปกรณ์

- 1) Pycnometer แบบขวดแก้วคอยาวก้นป่อง (Volumetric flask)
- 2) เตาบุนเส้น หรือ เตาแผ่นร้อน (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) อ่างแก้วดูความร้อน
- 10) เครื่องชั่งอ่านละเอียด 0.1 g
- 11) ภาชนะ - ชั้นอลูมิเนียม



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ในการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน

วิธีการทดสอบ

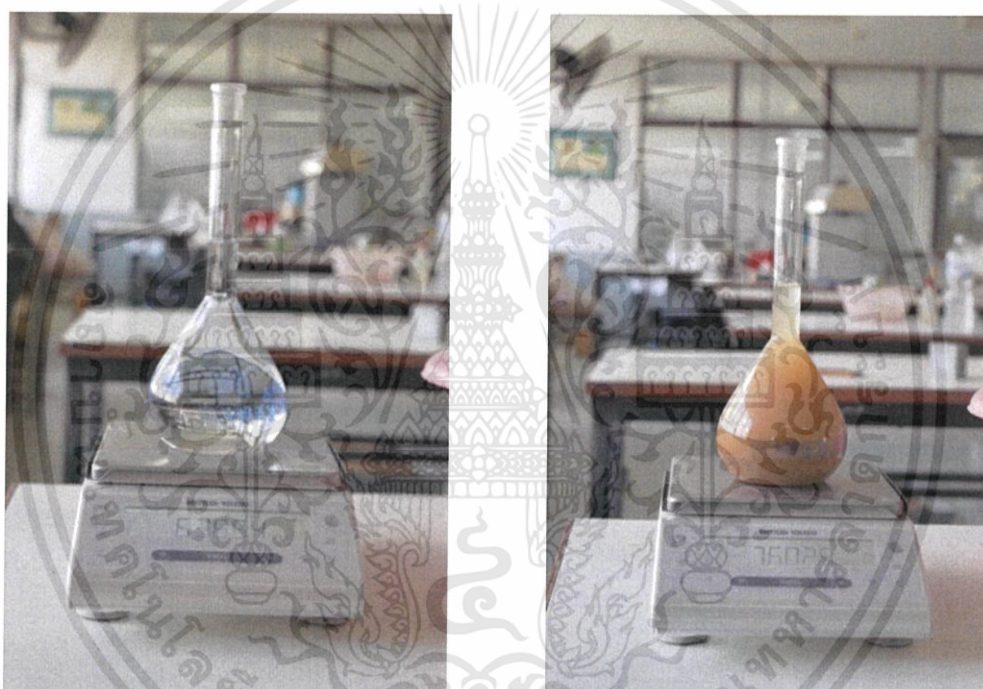
ก) Calibration of Pycnometer

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

- 1) ล้างขวด ความถ่วงจำเพาะ ให้สะอาดเติมน้ำกลั่นลงไปจนถึงขีดที่คอขวด (อ่านที่ระดับท้องถิ่น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) ต้มไล่ฟองอากาศหรือดูดโดยปั๊มสุญญากาศประมาณ 10 นาทีจนฟองอากาศหมด
- 3) เติมน้ำปรับระดับน้ำจนเสมอระดับที่คอขวดพอดี เช็ดภายนอกขวดให้แห้ง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก
- 4) วัดอุณหภูมิของน้ำภายในขวดให้ละเอียด โดยวัดที่หลายระดับ ถ้าอุณหภูมิต่างกัน มาก ให้ตะแคง ขวดแล้วลှึ่งไปมาเพื่อให้ผสมเข้ากันดีทำให้อุณหภูมิสม่ำเสมอแล้วจึงบันทึก อุณหภูมิที่ถูกต้อง
- 5) ทำเช่นเดียวกับข้อ 3 และ 4 โดยให้ความร้อนหรือทำให้เย็นลงในช่วงอุณหภูมิที่ใช้ งาน (20 ถึง 40°C) ประมาณ 4-5 จุด เช่นที่ 20°C, 25°C, 30°C, 35°C และ 40°C เป็นต้น
- 6) เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักขวดที่มีน้ำเต็ม และอุณหภูมิ



รูปที่ 3.3 ชั่งน้ำหนักเพื่อ calibrate pycnometer ที่ใช้งาน รูปที่ 3.4 การชั่งน้ำหนักเพื่อหาความถ่วงจำเพาะ

ข) การทดลองหาความถ่วงจำเพาะของดิน

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

2) เทส่วนผสมน้ำดินลงในขวดหา ความถ่วงจำเพาะ ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วใช้น้ำกลั่นล้างดินที่ติดในภาชนะผสมลงในขวด ความถ่วงจำเพาะให้หมดระวังอย่าให้ระดับน้ำ เกินขีดวัดปริมาตรที่คอขวด

3) ไล่ฟองอากาศโดยการต้มหรือดูดโดยปั๊มสุญญากาศประมาณ 10 นาที จน ฟองอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมด แล้วเติมน้ำกลั่นให้ถึงระดับขีดที่คอขวด แล้วปล่อยให้เย็นถึงอุณหภูมิห้องทดลอง

4) ถ้าระดับน้ำลดลงอีก ให้เติมให้เต็มถึงขีด แล้วนำไปชั่งให้ละเอียดถึง 0.1 กรัม แล้ว วัด อุณหภูมิของน้ำในขวด

5) เทแล้วล้างส่วนผสมในขวด ความถ่วงจำเพาะ ลงในภาต นำไปอบให้แห้งเพื่อชั่ง หา น้ำหนักดินที่แน่นอนอีกครั้ง

วิธีการคำนวณ

จากสมการดังนี้ (เมื่อมีปริมาตรเท่ากัน)

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

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

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

เมื่อ : W_s = น้ำหนักดินอบแห้ง, กรัม

W_2 = น้ำหนักขวดที่มีน้ำเต็มที่อุณหภูมิที่ทดลอง ($T^\circ\text{C}$), กรัม

W_1 = น้ำหนักขวดที่มีน้ำผสมดินที่อุณหภูมิที่ทดลอง ($T^\circ\text{C}$)

G_T = ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำที่อุณหภูมิที่ทดลอง ($T^\circ\text{C}$)

3.2.3 Direct Shear Test (มาตรฐานอ้างอิง: ASTM D 3080) [5]

เนื่องจากดินตัวอย่างเป็นดินทราย จึงได้การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง(direct shear)ใน การหาค่ามุมเสียดทานภายใน (internal friction angle, ϕ)

อุปกรณ์

- 1) Direct Shear Testing Machine เป็นแบบหมุนทดสอบด้วยมือ หรือแบบอิเล็กทรอนิกส์
- 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) เวอร์เนียร์

วิธีการทดสอบ

ก) การเตรียมตัวอย่างดินทราย (granular soil)

1) วัดขนาดของความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของ Cutting Ring พร้อมชั่งน้ำหนัก จากนั้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำตัวอย่างทรายมาใส่ลงใน Shear Box ใช้ไม้กดทำการบดอัด จำนวนชั้นในการใส่ตัวอย่างและจำนวนการบดอัดขึ้นอยู่กับความหนาแน่นที่ต้องการ จากนั้นแต่งตัวอย่างให้เรียบพอดีขอบแบบ หลังจากนั้นก็ทำความสะอาดขอบแบบ

2) จากนั้นนำ Cutting Ring ที่บรรจุตัวอย่างดินทรายมาทำการชั่งน้ำหนัก

3) ชั้นสกรูประกอบ Shear Box บนและล่าง วางแผ่นฐานล่าง (Retaining Plate) ลงเข้าไปใน Shear Box โดยให้แนว ร่องวางในแนวขวางกับทิศทางของการเฉือนตัวอย่าง

4) วาง Cutting Ring ที่บรรจุตัวอย่างดินบนขอบของ Shear Box ใช้ไม้กด (Wooden pusher) ทำการกดนำตัวอย่างดินให้เข้าไปอยู่ใน Shear Box

5) วางแผ่นเหล็กด้านบน (Loading Pad) ให้ร่องขวางทิศการเฉือนตัวอย่างดินทราย

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

3) อ่านค่าแรงเฉือนจาก proving ring dial, ค่าการเคลื่อนที่ทางแนวตั้ง จาก vertical dial gage ทุกๆ การเคลื่อนที่ตามแนวราบ 0.01 นิ้ว จนกระทั่งตัวอย่างดินไม่สามารถรับแรงเฉือนได้ ออกโดยค่าจาก proving ring dial จะลดลง

4) เตรียมตัวอย่างหลายๆ กันอีก อย่างน้อย 3 ตัวอย่าง โดยใช้น้ำหนัก (normal load) แตกต่างกันไป แล้วทำการทดลอง เหมือนข้อ 1 ถึงข้อ 4

การคำนวณและรายงานผลการทดสอบ

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

$$\rho_t = \frac{\text{มวลของตัวอย่าง (กรัม)}}{\text{ปริมาตรของตัวอย่าง (ซม}^3\text{)}}, \text{ กรัม/ซม}^3 \quad (3.4)$$

ρ_t = ความหนาแน่นของดินเปียก

2) ความเค้นแนวตั้งฉาก (Normal Stress) (3 ค่า)

$$\sigma_n = \frac{\text{น้ำหนักกด (กิโลกรัม)}}{\text{พื้นที่หน้าตัด shear box (ซม}^2\text{)}}, \text{ ksc} \quad (3.5)$$

3) แรงเฉือน (Shear Stress, τ) (3 ค่า)

$$\tau = \frac{\text{แรงต้านตัวอย่างดิน (กิโลกรัม)}}{\text{พื้นที่หน้าตัด shear box (ซม}^2\text{)}}, \text{ ksc} \quad (3.6)$$

เมื่อ R = proving ring reading

K = proving ring constant

A = shearing area

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 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 ($\tau = c + \sigma \tan \phi$)



รูปที่ 3.5 การทดสอบ Direct Shear เพื่อหามุมเสียดทานภายใน

3.2.4 การวัดมุมจากการปล่อยทรายให้ตกลงอย่างอิสระตามแรงโน้มถ่วง [6]

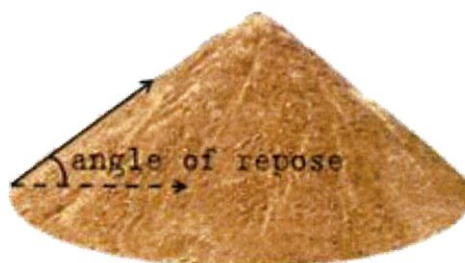
ในการหาค่ามุมเสียดทานภายใน (internal friction angle, ϕ) ของดินทรายแบบคร่าวๆ ในหน้าสนาม สามารถทำการหาได้โดยวิธีกองทรายให้เกิดการไหลลงอย่างอิสระตามแรงโน้มถ่วงได้

อุปกรณ์

- 1) ตัวอย่างดิน
- 2) ไม้วัดมุม

วิธีทำการทดลอง

นำตัวอย่างดินทรายมาทำการโรยให้เป็นกอง โดยพยายามโรยให้กองทรายสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เมื่อสังเกตว่าทรายที่โรยไปเกิดการไหลลงอย่างอิสระแล้ว ให้วัดมุมที่กองทรายทำกับมุมราบ แสดงได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การวัดมุมจากการโรยทรายให้ตกอย่างอิสระ

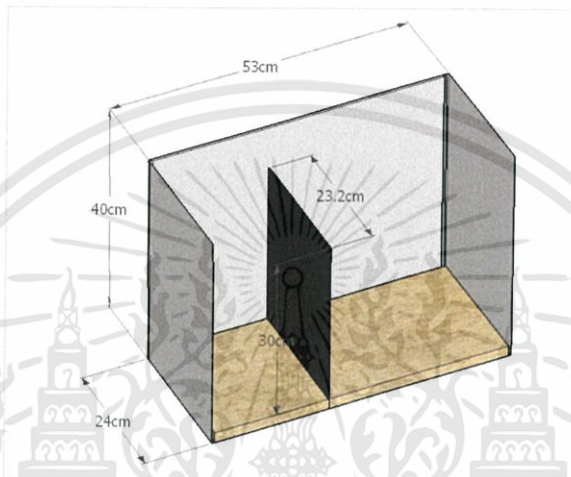
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

3.3.1 รูปแบบของแบบจำลอง

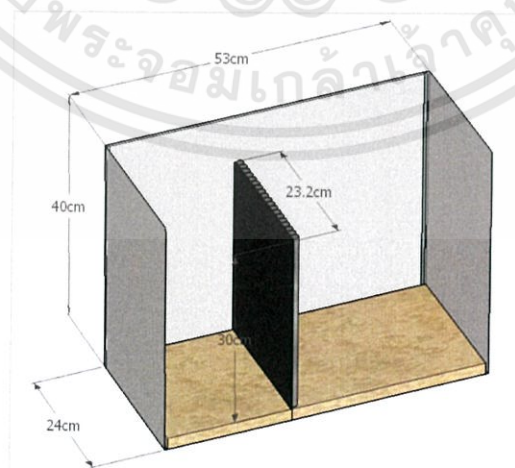
ในการศึกษาครั้งนี้มีอยู่ 6 แบบจำลอง

แบบจำลองที่ 1 กำแพงเชื่อมพืดแบบ Single wall เป็นการจำลองกำแพงเชื่อมพืด แสดงได้ดังรูปที่ 3.7 สร้างจากแผ่นเหล็กรูปพรรณที่วางเรียงต่อกันด้วยการเกี่ยวของข้อต่อ เพื่อใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวกำแพงเชื่อมพืดกับระยะเวลาชุดที่ระดับชั้นต่างๆ มุมที่เกิดขึ้นจากระนาบการพิบัติ และใช้เป็นตัวเปรียบเทียบข้อมูลกับแบบจำลองอื่นๆ



รูปที่ 3.7 แบบจำลองกำแพงเชื่อมพืด แบบ Single wall

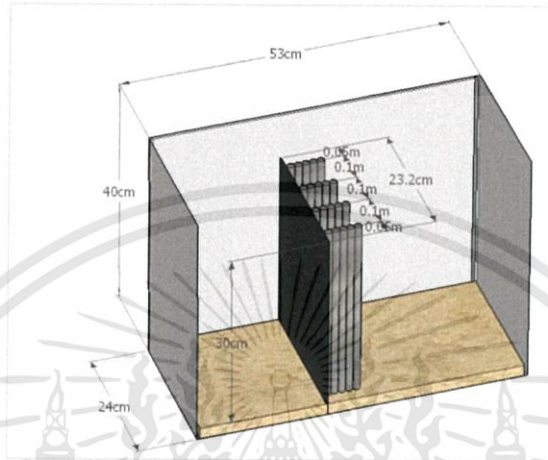
แบบจำลองที่ 2 กำแพงเชื่อมพืดแบบ Single wall และมีการเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นการจำลองกำแพงเชื่อมพืดและเสาเข็มดินซีเมนต์โดยมีการจัดเรียงเสาเข็มดินซีเมนต์ขนานตัวไปกับกำแพงเชื่อมพืด แสดงได้ดังรูปที่ 3.8 เพื่อใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวกำแพงเชื่อมพืดกับระยะเวลาชุดที่ระดับชั้นต่างๆ และมุมที่เกิดขึ้นจากระนาบการพิบัติ เมื่อความแข็งแรงของกำแพงเชื่อมพืดเพิ่มขึ้น โดยเปรียบเทียบข้อมูลกับแบบจำลองที่ 1



รูป 3.8 แบบจำลองกำแพงเชื่อมพืด แบบ Single wall โดยมีการจัดเรียงเสาเข็มดินซีเมนต์ขนานตัวไปกับกำแพงเชื่อมพืด

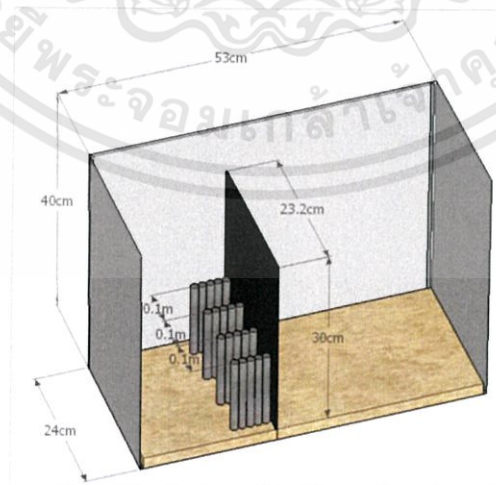
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองที่ 3 กำแพงเข็มพืดแบบ Single wall และมีการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ทางด้าน active เป็นการจำลองกำแพงเข็มพืดที่ติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์โดยเรียงตัวตั้งฉากกับกำแพงเข็มพืด แสดงได้ดังรูปที่ 3.9 เพื่อใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวกำแพงเข็มพืดกับระยะ การขุดที่ระดับชั้นต่างๆ และมุมที่เกิดขึ้นจากระนาบการพิบัติ เมื่อมีแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นระหว่าง เสาเข็มดินซีเมนต์กับชั้นทราย โดยเปรียบเทียบข้อมูลกับแบบจำลองที่ 1



รูป 3.9 แบบจำลองกำแพงเข็มพืดแบบ Single wall โดยติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์เรียงตัวตั้งฉาก ทางด้าน active

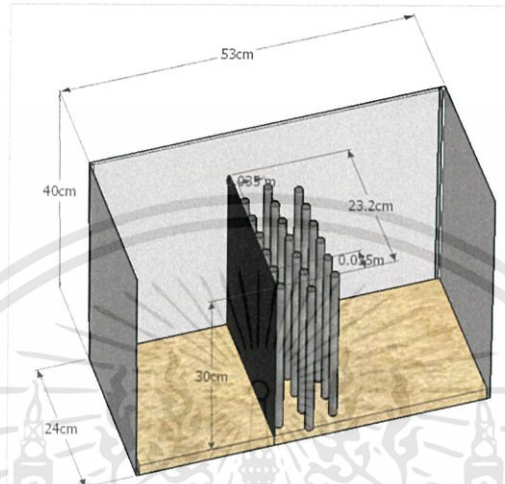
แบบจำลองที่ 4 กำแพงเข็มพืดแบบ Single wall และมีการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ทางด้าน passive เป็นการจำลองกำแพงเข็มพืดที่ติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์โดยเรียงตัวตั้งฉากกับกำแพงเข็มพืด แสดงได้ดังรูปที่ 3.10 เพื่อใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวกำแพงเข็มพืดกับระยะ การขุดที่ระดับชั้นต่างๆ และมุมที่เกิดขึ้นจากระนาบการพิบัติ เมื่อมีแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นระหว่าง เสาเข็มดินซีเมนต์กับชั้นทราย โดยเปรียบเทียบข้อมูลกับแบบจำลองที่ 1



รูป 3.10 แบบจำลองกำแพงเข็มพืดแบบ Single wall โดยติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์เรียงตัวตั้ง ฉากทางด้าน passive

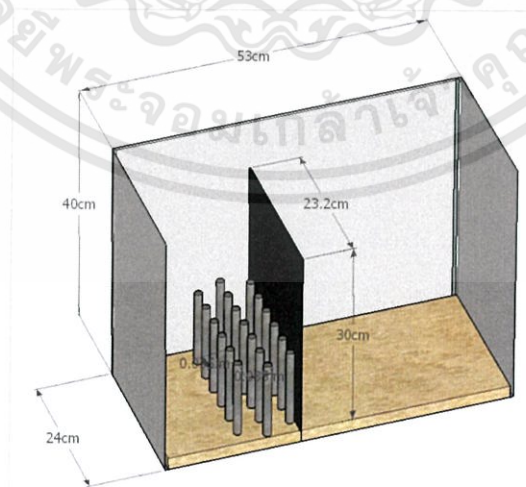
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองที่ 5 กำแพงเข็มพืดแบบ Single wall และมีการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ทางด้าน active เป็นการจำลองกำแพงเข็มพืดและมีการปฏิกิริยาตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์ แสดงได้ดังรูปที่ 3.11 เพื่อใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวกำแพงเข็มพืดกับระยะการขุดที่ระดับชั้นต่างๆ และมุมที่เกิดขึ้นจากระนาบการพิบัติ เมื่อมีการเพิ่มกำลังรับแรงดันของดินทางด้าน active โดยเปรียบเทียบข้อมูลกับแบบจำลองที่ 1



รูป 3.11 แบบจำลองกำแพงเข็มพืดแบบ Single wall และมีการปฏิกิริยาตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์ทางด้าน active

แบบจำลองที่ 6 กำแพงเข็มพืดแบบ Single wall และมีการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ทางด้าน passive เป็นการจำลองกำแพงเข็มพืดและมีการปฏิกิริยาตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์ แสดงได้ดังรูปที่ 3.12 เพื่อใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวกำแพงเข็มพืดกับระยะการขุดที่ระดับชั้นต่างๆ และมุมที่เกิดขึ้นจากระนาบการพิบัติ เมื่อมีการเพิ่มกำลังรับแรงดันของดินทางด้าน passive โดยเปรียบเทียบข้อมูลกับแบบจำลองที่ 1



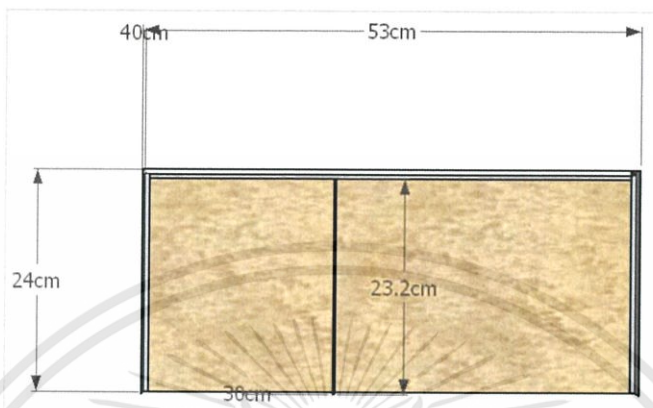
รูป 3.12 แบบจำลองกำแพงเข็มพืดแบบ Single wall และมีการปฏิกิริยาตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์ทางด้าน passive

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ขนาดของกำแพงเข็มพืดและเสาเข็มดินซีเมนต์จำลอง

แบบจำลองที่ 1

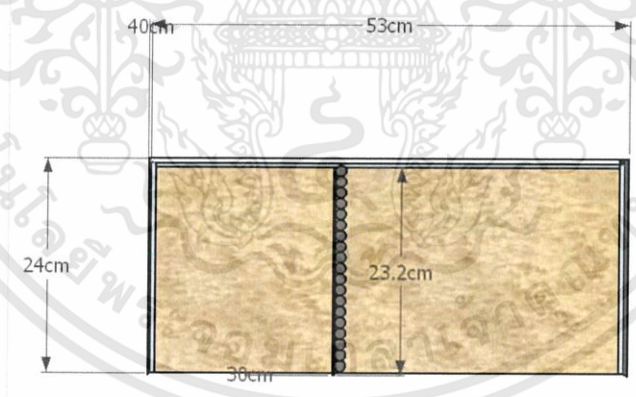
แผ่นอะคริลิกหนา 1.5 มิลลิเมตร ขนาด 30x23.2 เซนติเมตร มีส่วนด้านบน ขนาด 15x18.2 เซนติเมตร อยู่ติดกัน แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แบบจำลองที่ 1

แบบจำลองที่ 2

แผ่นอะคริลิกหนา 1.5 มิลลิเมตร ขนาด 30x23.2 เซนติเมตร มีส่วนด้านบน ขนาด 15x18.2 เซนติเมตร อยู่ติดกัน แท่งดินซีเมนต์จำลองขนาด \varnothing 1/2 นิ้ว ยาว 28 เซนติเมตร จำนวน 19 แท่ง เรียงตัวขนานไปกับแผ่นอะคริลิก แสดงดังรูปที่ 3.14

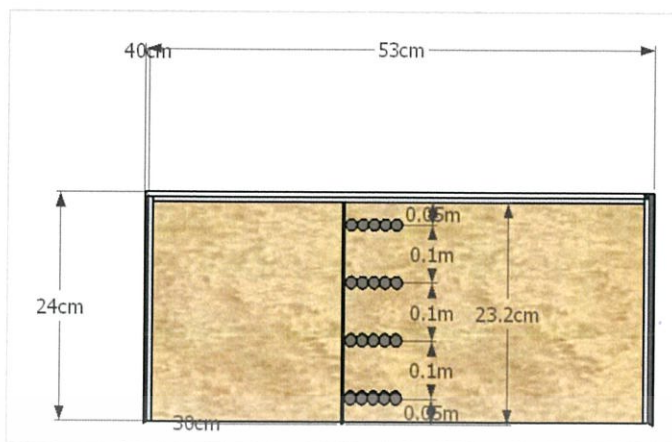


รูปที่ 3.14 แบบจำลองที่ 2

แบบจำลองที่ 3

แผ่นอะคริลิกหนา 1.5 มิลลิเมตร ขนาด 30x23.2 เซนติเมตร มีส่วนด้านบน ขนาด 15x18.2 เซนติเมตร อยู่ติดกัน แท่งดินซีเมนต์จำลองขนาด \varnothing 1/2 นิ้ว ยาว 28 เซนติเมตร จำนวน 20 แท่ง เรียงแถวตั้งฉากกับแผ่นอะคริลิกทางด้าน active โดยมีจำนวนแถว 4 แถว แถวละ 5 แท่ง แสดงดังรูปที่ 3.15

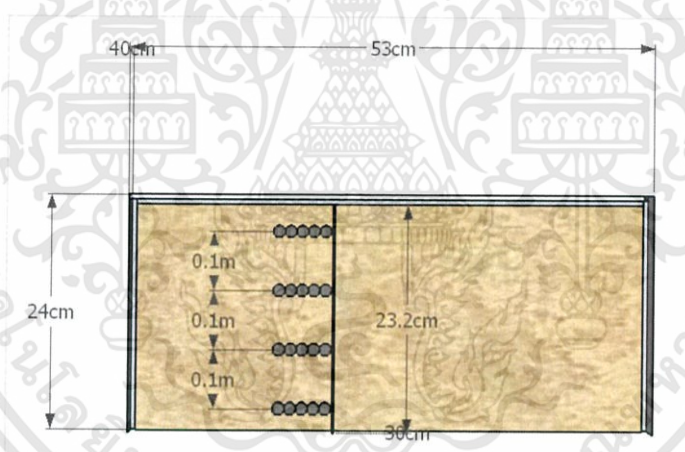
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 แบบจำลองที่ 3

แบบจำลองที่ 4

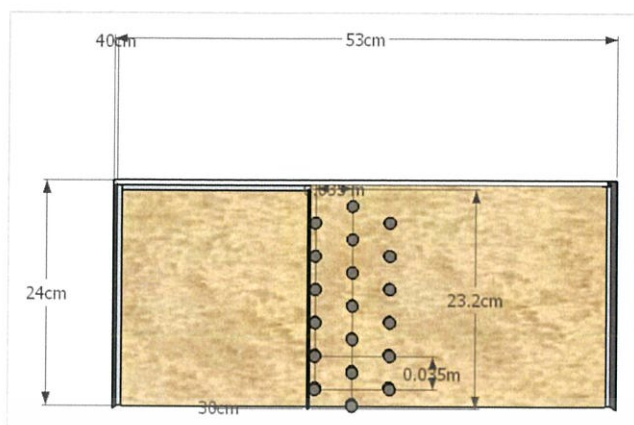
แผ่นอะคริลิกหนา 1.5 มิลลิเมตร ขนาด 30x23.2 เซนติเมตร มีส่วนด้านบน ขนาด 15x18.2 เซนติเมตร อยู่ติดกัน แท่งดินซีเมนต์จำลองขนาด \varnothing 1/2 นิ้ว ยาว 12 เซนติเมตร จำนวน 20 แท่ง เรียงแถวตั้งฉากกับแผ่นอะคริลิกทางด้าน passive โดยมีจำนวนแถว 4 แถว แถวละ 5 แท่ง แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แบบจำลองที่ 4

แบบจำลองที่ 5

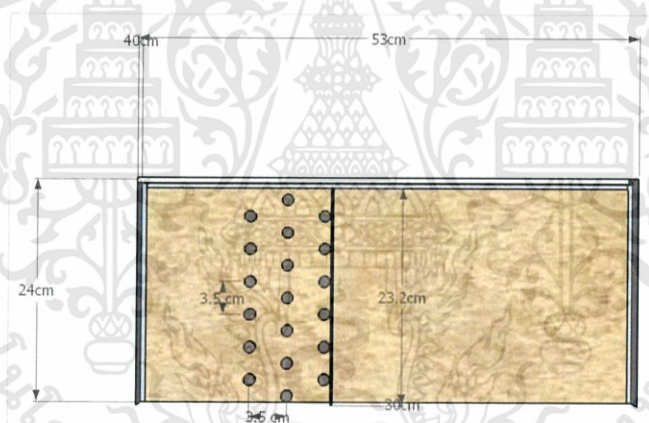
แผ่นอะคริลิกหนา 1.5 มิลลิเมตร ขนาด 30x23.2 เซนติเมตร มีส่วนด้านบน ขนาด 15x18.2 เซนติเมตร อยู่ติดกัน แท่งดินซีเมนต์จำลองขนาด \varnothing 1/2 นิ้ว ยาว 28 เซนติเมตร จำนวน 19 แท่ง โดยปักกระจายทางด้าน active ด้านหลังแผ่นอะคริลิก ทั้งหมด 3 แถว แถวที่ 1 จำนวน 6 แท่ง แถวที่ 2 จำนวน 7 แท่ง แถวที่ 3 จำนวน 6 แท่ง แสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 แบบจำลองที่ 5

แบบจำลองที่ 6

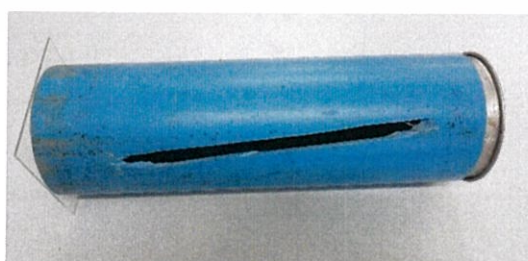
แผ่นอะคริลิกหนา 1.5 มิลลิเมตร ขนาด 30x23.2 เซนติเมตร มีส่วนด้านบน ขนาด 15x18.2 เซนติเมตร อยู่ติดกัน แท่งดินซีเมนต์จำลองขนาด \varnothing 1/2 นิ้ว ยาว 28 เซนติเมตร จำนวน 19 แท่ง โดยปักกระจายทางด้าน active ด้านหลังแผ่นอะคริลิก ทั้งหมด 3 แถว แถวที่ 1 จำนวน 6 แท่ง แถวที่ 2 จำนวน 7 แท่ง แถวที่ 3 จำนวน 6 แท่ง แสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แบบจำลองที่ 6

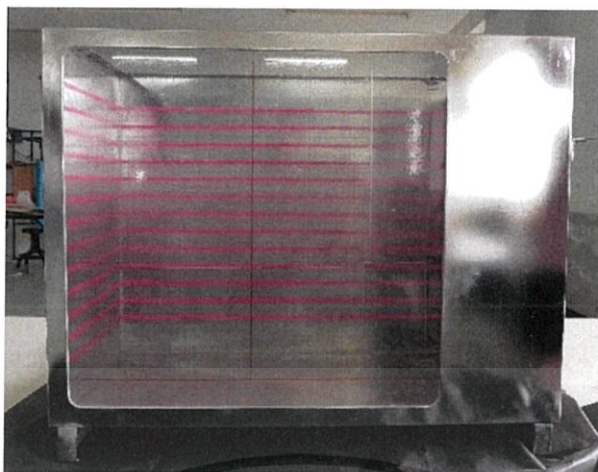
3.3.3 ขนาดของแบบจำลองและคุณสมบัติของวัสดุ

เพื่อให้สามารถควบคุมพารามิเตอร์ที่ต้องการในทุกครั้งของการทดลอง จึงต้องกำหนดลักษณะของตัวแบบจำลองและวัสดุที่ใช้ในการทดลองดังนี้



รูปที่ 3.19 อุปกรณ์ปล่อยทราย(sand dropper) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.05 cm ความยาว 27.36 cm ขนาดของรูปปล่อยทราย 0.83 x 18.05 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 กล้องแบบจำลอง ขนาด 53x24x40 เซนติเมตร



รูปที่ 3.21 ชุดอุปกรณ์จำลองการชูด โดยใช้เครื่องดูดฝุ่นดัดแปลง

3.3.4 คุณสมบัติของแผ่นอะคริลิกที่ใช้ในการจำลองกำแพงเข็มพืด

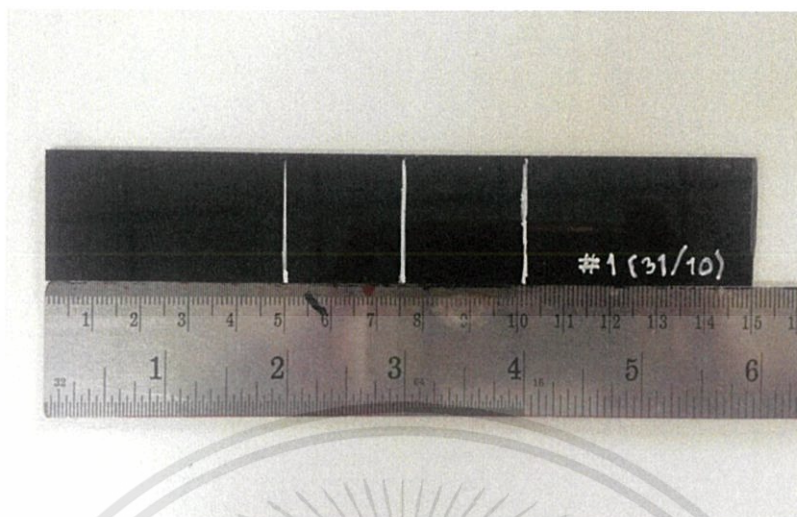
การทดสอบหาค่า Modulus of Elasticity (E) จาก Bending test

- 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

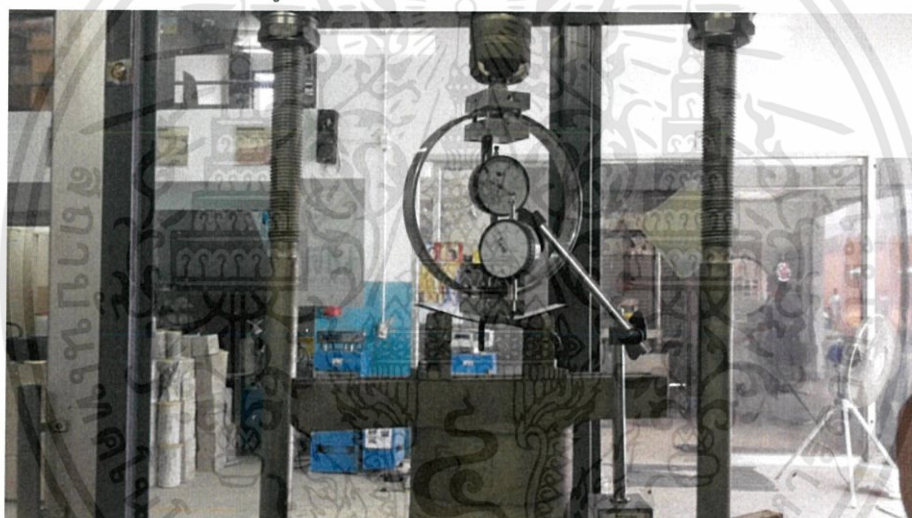
$$\delta_{max} = \frac{PL^3}{48EI}, E = \frac{PL^3}{48\delta_{max}I}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

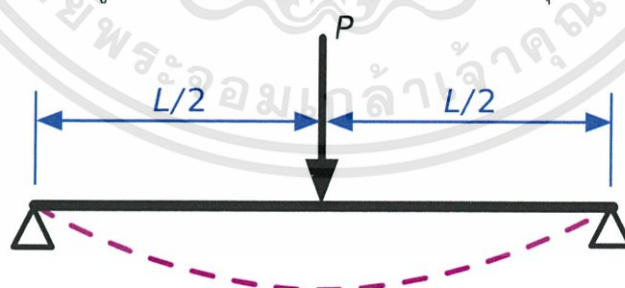
6) หาค่า E เฉลี่ย ที่ได้ในแต่ละระยะการโก่งตัวและแรงที่เกิดที่แตกต่างกัน



รูปที่ 3.22 แผ่นอะคริลิกที่ใส่ทดสอบ



รูปที่ 3.23 การทดสอบการโก่งตัวของวัสดุ



รูปที่ 3.24 ระยะการโก่งตัวกดแรงบนแผ่นอะคริลิกที่ทดสอบ

3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในแบบจำลอง

1) ดินตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

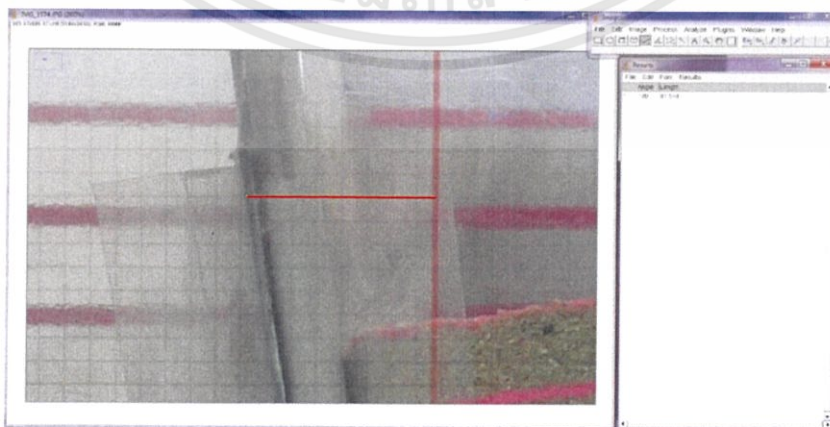
- 2) กำแพงเข็มพืดจำลอง
- 3) แท่งดินซีเมนต์จำลอง
- 4) อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัว
 - 4.1) กล้องถ่ายรูป
 - 4.2) โปรแกรม DxO Optics Pro 10 สำหรับการปรับแก้ Distortion จากความโค้งของเลนส์
 - 4.3) โปรแกรม ImageJ สำหรับการวัดระยะจากภาพ และ Calibrate scale ของภาพ
- 5) อุปกรณ์ปล่อยทราย (sand dropper)
- 6) ผงทรายสีใช้โรยเพื่อสังเกตระนาบการพิบัติ
- 7) ไม้บรรทัด และอุปกรณ์วัดมุม
- 8) ชุดอุปกรณ์จำลองการขุดดิน
- 9) แผ่นพลาสติกใส ใช้ติดด้านข้างเพื่อป้องกันดินตัวอย่างรั่ว และลดแรงเสียดทาน
- 10) กล้องแบบจำลอง ขนาด 24x53x40 เซนติเมตร
- 11) ไม้บรรทัด และวงกลมวัดมุม



รูปที่ 3.25 อุปกรณ์การวัดระยะและวัด



รูปที่ 3.26 ทรายตัวอย่างและทรายสี



รูปที่ 3.27 โปรแกรม ImageJ สำหรับการวัดระยะจากภาพ และ Calibrate scale ของภาพ

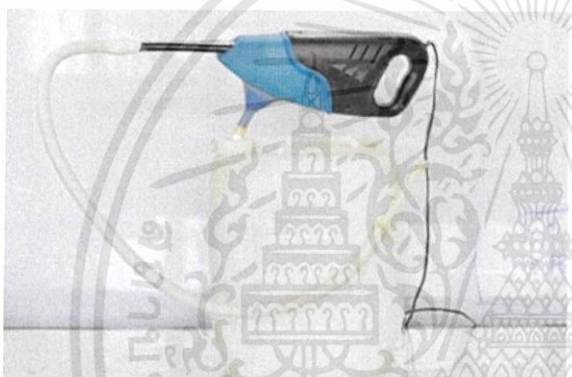
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 โปรแกรม DxO Optics Pro 10



รูปที่ 3.29 แผ่นอะคริลิก



รูปที่ 3.30 อุปกรณ์จำลองการชูดิน



รูปที่ 3.31 กล่องแบบจำลองสแตนเลส



รูปที่ 3.32 อุปกรณ์ปล่อยทราย



รูปที่ 3.33 ตัวอย่างแท่งดินซีเมนต์จำลอง

3.4.2 วิธีเตรียมและติดตั้งอุปกรณ์การทดลองในแบบจำลอง

1) คำนวณค่า parameter ของทราย เช่น มุมเสียดทานภายใน ความถ่วงจำเพาะ แรงยึดเหนี่ยว ระหว่างเม็ดดิน(ทราย $c=0$) และหาระยะของระนาบการพังทลายจากแรงดันดินแบบ active และ passive ที่เหมาะสมกับแบบจำลองโครงสร้างพร้อมสมมติระยะฝังที่ต้องการศึกษา

2) เตรียมแบบจำลอง พร้อมอุปกรณ์ปล่อยทราย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) เตรียมชุดอุปกรณ์จำลองการขุดดิน
- 4) เตรียมดินทรายตัวอย่างโดยการนำไปอบเพื่อกำจัดความชื้น
- 5) นำทรายไปจำแนกขนาดให้อยู่ระหว่างตะแกรงเบอร์ 10 ถึงเบอร์ 50
- 6) เททรายลงในแบบจำลองให้ได้ระดับดินตามที่กำหนดไว้
- 7) นำกำแพงเข็มพืดและเสาเข็มดินซีเมนต์จำลองแบบที่กำหนด ติดตั้งปรับให้ได้ระดับ

ในแนวตั้ง

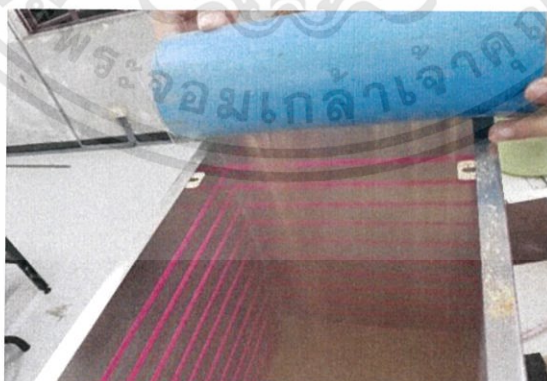
8) ปลอ่ยทรายให้ตกอย่างอิสระลงในแบบจำลองเป็นชั้น โดยใช้ทรายสีแสดงถึงระดับ
ทุกๆ 2 เซนติเมตร จนได้ระดับทรายที่ 28 เซนติเมตร

9) ติดตั้งกล่องให้ได้ระดับและต้องเป็นระนาบเดียวกับแบบจำลอง เพื่อวัดการเคลื่อนตัวของแบบจำลองเข็มพืด

10) บันทึกภาพแรกก่อนการขุดเพื่อเป็นการอ้างอิงค่าศูนย์

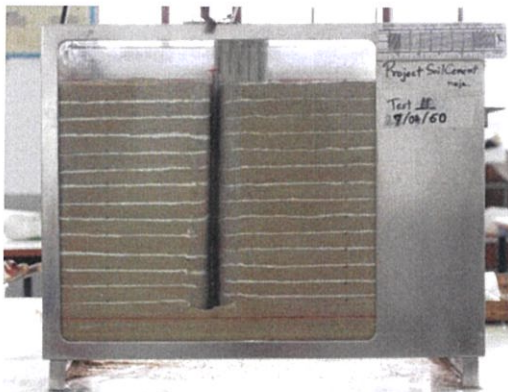


รูปที่ 3.34 ติดตั้งแผ่นกำแพงเข็มพืดและเสาเข็มดินซีเมนต์จำลองบนทรายในระดับที่กำหนด



รูปที่ 3.35 เททรายให้ตกอย่างอิสระ (Sand Rain)

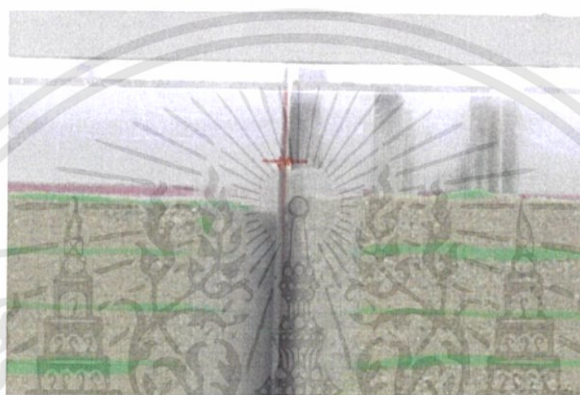
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.36 เททรายให้เต็มทั้งสองฝั่งของเข็มพืด



รูปที่ 3.37 ติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัว



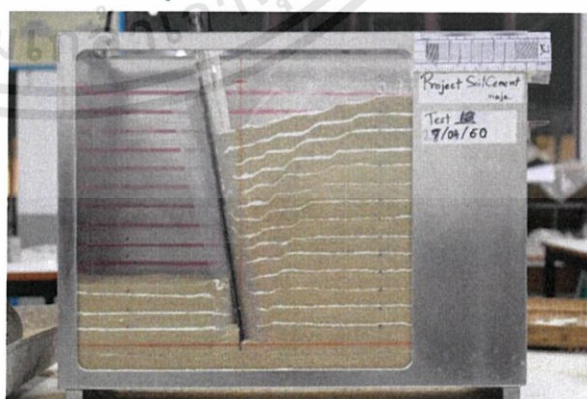
รูปที่ 3.38 ระบุตำแหน่งเริ่มต้นของเข็มพืด

3.4.1 วิธีทดลองแบบจำลองเข็มพืด

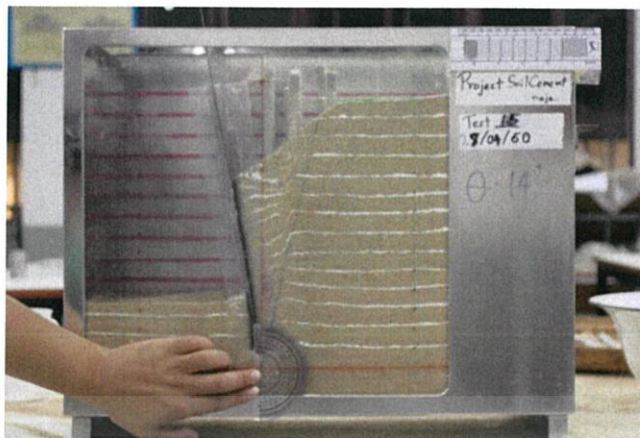
- 1) จำลองการขุดดินด้วยการดูทรายในแบบจำลอง
- 2) บันทึกภาพผลการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดที่ระยะความสูงทุกๆ 1 เซนติเมตร
- 3) ดูทรายจนพบว่าเกิดระนาบการพังทลายที่ชั้นทรายด้านหลังกำแพง
- 4) บันทึกค่ามุมการเฉือนพังทลายที่จุดพิบัติและการเคลื่อนตัวสุดท้าย
- 5) ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-5 โดยทำการเปลี่ยนรูปแบบการเรียงตัวที่กำหนด



รูปที่ 3.39 การดูทรายในแบบจำลอง

รูปที่ 3.40 ภาพความสูงของชั้นทรายที่แตกต่างกัน
สองด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.41 บันทึกค่ามุมการเฉือนพังที่จุดพิบัติ

3.4.2 วิธีการอ่านค่าจากภาพโดยการใช้โปรแกรม

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

3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์และการเปรียบเทียบข้อมูล

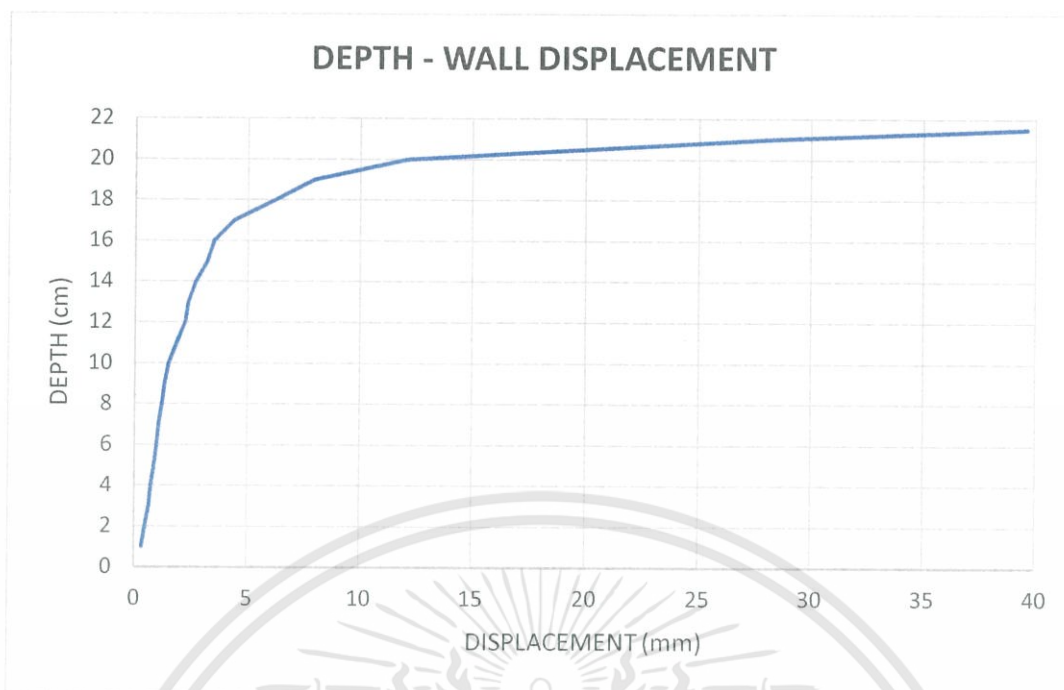
ในทางวิศวกรรมได้กำหนดค่าอัตราส่วนของความปลอดภัย (factor of safety) เพื่อป้องกันถึงความปลอดภัยในการใช้งาน (serviceability) รวมทั้งความประหยัด (economic) ในการก่อสร้าง

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 แสดงดังรูปที่ 3.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการขุดดิน กับระยะการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด

3.5.2 วิธีการหาจุดพิบัติของกำแพงเข็มพืดจากกราฟด้วยวิธี graphical method ของ Arthur Casagrande , 1936 [8]

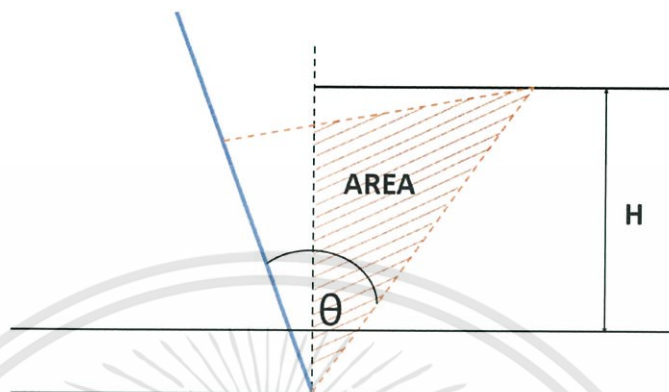
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการขุดดิน กับระยะการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด หาจุดพิบัติของกำแพงเข็มพืด โดยใช้หลักการเดียวกันกับการหาจุด preconsolidation pressure บนกราฟ Vold ratio และ Effiective stress (KPa) ซึ่งเป็นจุดที่เปลี่ยนแปลงความชันของกราฟ มีวิธีดังนี้

ตารางที่ 3.1 การหาจุดพิบัติของกำแพงเข็มพืด โดย Arthur Casagrande's graphical method, 1936 [8]

<p>1. นำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการขุดดินกับระยะการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด</p>	
<p>2. ลากเส้นสัมผัสกราฟที่ความชันช่วงแรกให้ตัดกับความชันของกราฟช่วงที่สอง</p>	
<p>3. ลากเส้นจากจุดตัดให้แบ่งครึ่งมุมระหว่างเส้นสัมผัส มาชนกับเส้นกราฟ จุดที่ได้จะเป็นจุดเปลี่ยนแปลงความชัน ซึ่งคือจุดพิบัติของแบบจำลอง ค่าแกน X ที่ได้คือ การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินที่จุดพิบัติ ส่วนค่าแกน y คือระยะการขุดที่จุดพิบัติ</p>	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

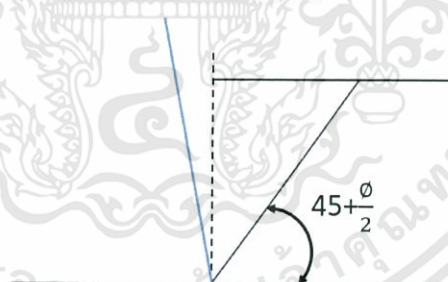
3.5.3 เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด เนื่องจากการแรงดันด้านข้างที่ลดลง การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดเนื่องจากการแรงดันด้านข้างที่ลดลง โดยใช้พื้นที่การพิบัติด้านactiveอย่างเดียว เป็นตัวเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองทั้ง 6 แบบ ที่ระดับความลึกในการขุดเท่ากัน



รูปที่ 3.43 พื้นที่การพิบัติของแบบจำลองด้านActive

3.5.4 เปรียบเทียบมุมที่เกิดขึ้นที่จุดพิบัติกับมุมตามทฤษฎี

การเปรียบเทียบมุมที่เกิดจากระนาบการพิบัติ ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้ทฤษฎีของ Rankine มุมระนาบการพิบัติที่ฝั่ง Active ดังรูป 3.37 ซึ่งมุมระนาบการพิบัติด้าน passive ไม่สามารถทำการวัดได้ เนื่องจากทำการขุดอย่างต่อเนื่อง โดยแสดงการเปรียบเทียบในรูปแบบตาราง ของทั้ง 5 แบบจำลอง ที่ระดับความลึกในการขุดที่ทำให้เกิดระนาบพังชัดเจน



รูปที่ 3.44 มุมระนาบการพิบัติด้านActive

3.5.5 เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดจำลองกับค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ทำให้เกิดสภาวะActive และ Passive

จากตารางที่ 3.2 และ 3.3 การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินที่จะทำให้เกิดสภาวะ Active และ Passive ได้ถูกกำหนดออกมาค่าอัตราส่วนระหว่างการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินกับความลึกในการขุด(H) โดยมีความแตกต่างกันตามชนิดของดิน จากผลการทดลองเคลื่อนตัวที่ได้ จึงสามารถหาจุดที่แบบจำลองเกิดสภาวะ Active และ Passive ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินที่ทำให้เกิดสภาวะActive (ปรับปรุงจาก CGS, 1992)

ประเภทของดิน	การเคลื่อนตัวในแนวราบที่ทำให้เกิดสภาวะ Active
Dense cohesion less	0.001H
Loose cohesion less	0.004H
Stiff cohesive	0.010H
Soft cohesive	0.020H

ตารางที่ 3.3 การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินที่ทำให้เกิดสภาวะPassive (ปรับปรุงจาก CGS, 1992)

ประเภทของดิน	การเคลื่อนตัวในแนวราบที่ทำให้เกิดสภาวะ Passive
Dense cohesion less	0.020H
Loose cohesion less	0.060H
Stiff cohesive	0.020H
Soft cohesive	0.040H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการศึกษา

4.1 บทนำ

ในการศึกษาค้างนี้เป็นการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างดินด้วยการศึกษาแบบจำลองรูปแบบต่างๆ ด้วยการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ เป็นการเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างกันดินและเพิ่มกำลังรับแรงของดิน ประสิทธิภาพจากการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเรียงต่อเนื่องขนานติดกับกำแพงเข็มพีค สำหรับการเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างกันโดยการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโครงสร้างกันดิน การติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ปักเว้นระยะทั้งทางด้านแรงดันดินเชิงรุกและเชิงรับ สำหรับการเพิ่มกำลังรับแรงของดินในระนาบพิบัติ และการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นแถวตั้งฉากกับกำแพงเข็มพีคทั้งทางด้านแรงดันดินเชิงรุกและเชิงรับ สำหรับการเพิ่มทางด้านทานการเคลื่อนตัวจากแรงดันดิน จากแรงเสียดทานด้านข้างแนวเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยเปรียบเทียบการเคลื่อนตัว และ มุมที่เกิดขึ้นจากระนาบการพิบัติ ทั้งหมดนี้กับแบบจำลอง single wall เพื่อหาประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัว นอกจากนี้ในบทนี้มีการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง และการพิบัติของโครงสร้างกันดินซึ่งมีผลการศึกษา ดังนี้

4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของทรายที่ใช้ในการศึกษา

4.2.1 ขนาดคละและชนิดของเม็ดดิน (grain size and soil classification)

จากผลการทดสอบพบว่า ดินมีคุณสมบัติคือ SP

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลขนาดคละและชนิดของเม็ดดิน

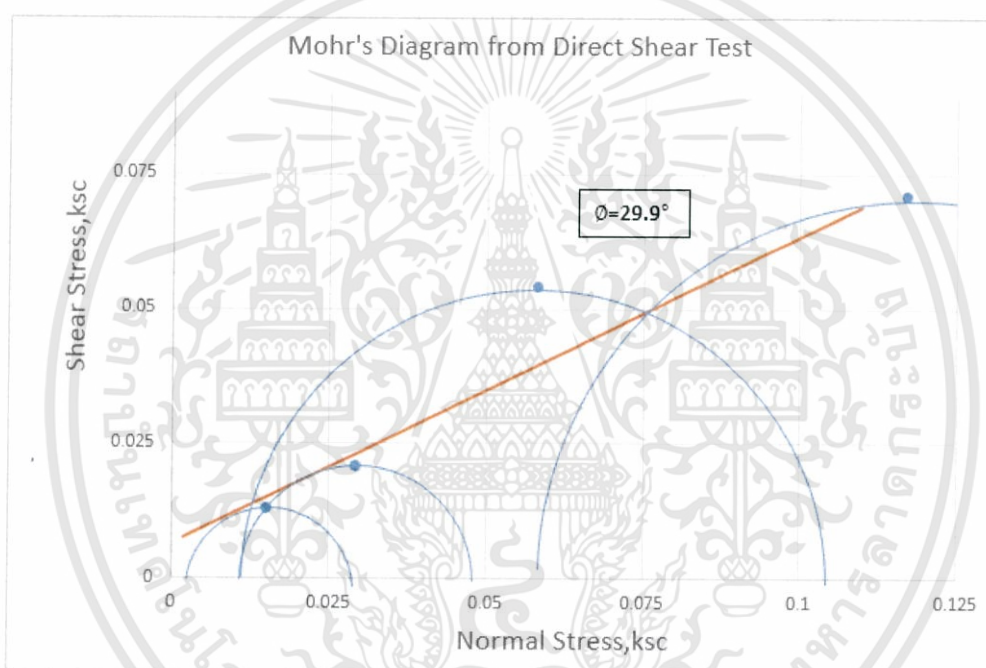
ตะแกรง ขนาด เบอร์	ช่องเปิดของ ตะแกรง มม.	น้ำหนัก ของ ตะแกรง กรัม	น้ำหนักของ ตะแกรง + ดิน กรัม	น้ำหนัก ของดินที่ ค้างสะสม กรัม	น้ำหนัก ของดินที่ ค้างสะสม กรัม	น้ำหนัก ของดินที่ ค้างสะสม %	ส่วนที่ ผ่าน ตะแกรง %
3/8"	9.510	797.6	797.6	0	0	0.000	100.000
4	4.750	775.64	775.64	0	0	0.000	100.000
10	2.000	610.91	687.76	76.85	76.85	15.367	84.633
40	0.425	370.7	659.55	288.85	365.7	73.124	26.876
50	0.300	561.86	679.21	117.35	483.05	96.589	3.411
200	0.075	310.1	326.1	16	499.05	99.788	0.212
Pan	0.000	400.15	400.33	0.18	499.23	99.824	0.176

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

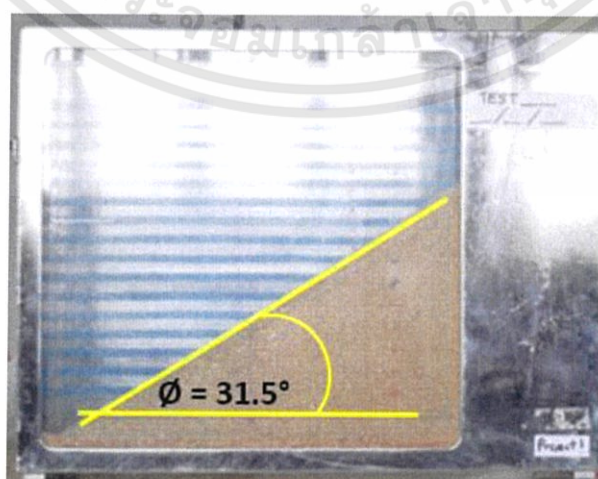
4.2.2 มุมเสียดทานภายใน (internal friction angle)

จากผลการทดสอบ Direct shear พบว่าทรายมีค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ) = 29.9°
 ตารางที่ 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



รูปที่ 4.1 กราฟ Mohr's Diagram จากผลการทดสอบ Direct Shear



รูปที่ 4.2 ผลการปล่อยทรายลงอย่างอิสระ พบว่าได้มุมเสียดทานภายใน (ϕ) = 31.5°

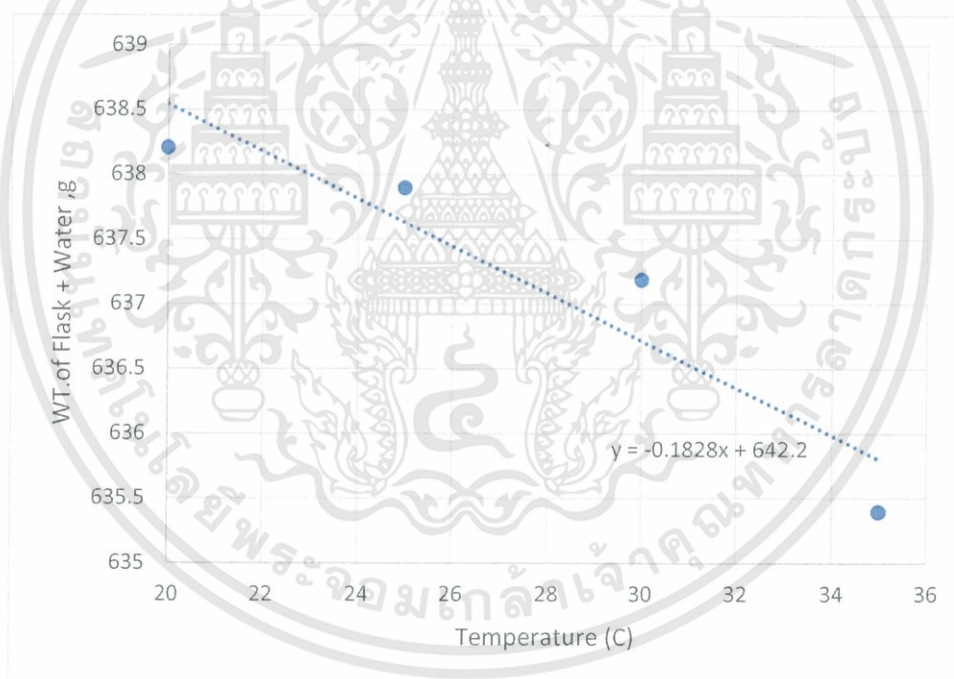
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)

จากผลการทดลองตัวอย่างทรายมีข้อมูลดังนี้

ตารางที่ 4.3 ข้อมูล Calibration of Pycnometer

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



รูปที่ 4.3 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ กับ น้ำหนักรวมระหว่างแก้วกับน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลความถ่วงจำเพาะของทราย

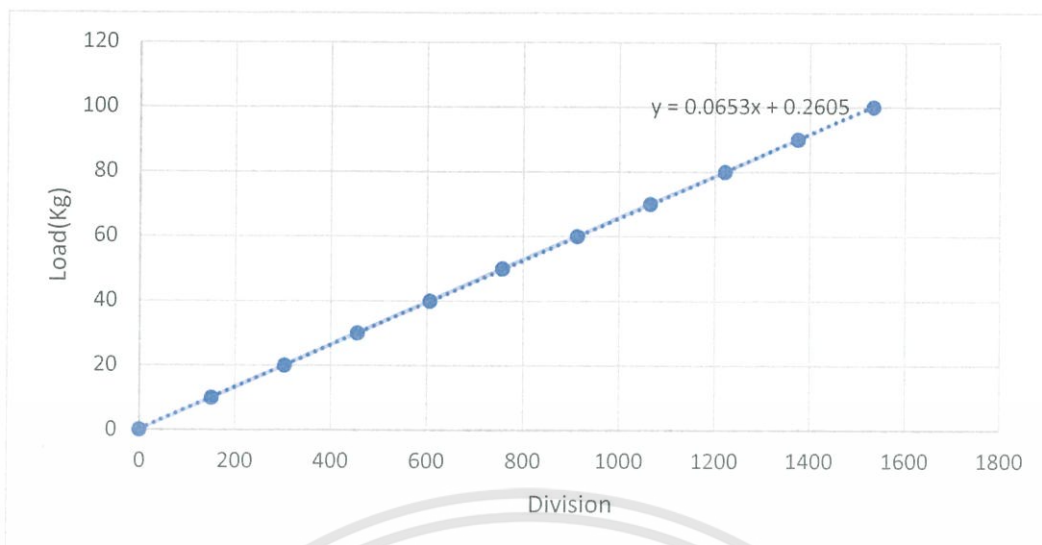
Sample NO.	1	1
Soil description	sand	sand
Trial NO.	1	2
1. Temperature °C	29.5	29.5
2. Flask + water ,g	636.8074	636.8074
3. Flask + water + soil ,g	760.22	760.32
4. Container NO.	1	2
5. Dry soil (A) ,g	199.36	199.41
6. Saturated Surface Dry soil (B) ,g	200	200.07
7. G.S.	2.603039142	2.604712
Average G.S.	2.603875712	

4.3 ผลการทดสอบเพื่อหาค่า Elastic modulus ของกำแพงตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา

ทำการทดลองโดยการกดน้ำหนักลงตรงกลางบนแผ่นอะคริลิกที่เป็นวัสดุที่ใช้ทำกำแพงกันดินจำลอง โดยบันทึกระยะการโก่งตัวของแผ่นอะคริลิก และแรงจากProving Ring ได้ผลดังนี้ ตารางที่ 4.5 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและจำนวนช่องของ Proving Ring
เพื่อหาสมการเส้นตรง

ตารางที่ 4.6 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

4.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดเสาเข็มดินซีเมนต์จำลอง

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดเสาเข็มดินซีเมนต์

อายุ บ่ม วัน	ตัวอย่างที่	ปริมาณ ซีเมนต์ %	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ซม.	พื้นที่หน้าตัด ซม. ²	กำลังรับแรงอัด		
					kN	ksc	ค่าเฉลี่ย ksc
7	1	15	5.535	24.062	4.44	18.810	17.864
	2	15	5.535	24.062	3.88	16.438	
	3	15	5.535	24.062	4.33	18.344	
14	1	15	5.535	24.062	6.56	27.791	26.986
	2	15	5.535	24.062	6.24	26.436	
	3	15	5.535	24.062	6.31	26.732	
28	1	15	5.535	24.062	7.32	31.011	30.672
	2	15	5.535	24.062	7.39	31.308	
	3	15	5.535	24.062	7.01	29.698	

4.5 ผลการศึกษาจากแบบจำลอง

4.5.1 การศึกษาพฤติกรรมและการเคลื่อนตัวของแบบจำลองระบบกำแพงกันดิน

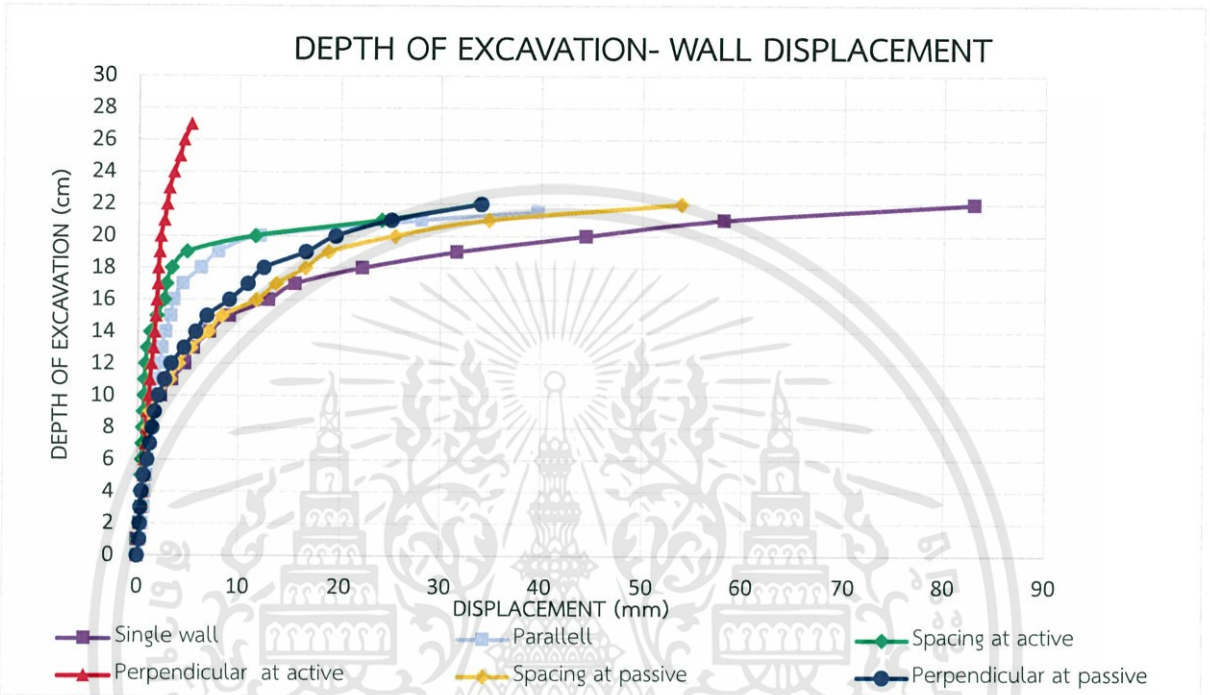
4.5.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกในการขุดและระยะการเคลื่อนตัวของกำแพง

จากการทดลอง โดยการขุดชั้นทรายในแบบจำลองทุกๆ 1 เซนติเมตร ทำให้สามารถวัดค่าระยะการเคลื่อนตัวในแนวราบที่ปลายกำแพงกันดินเหนือผิวทราย ในการศึกษาครั้งนี้ ได้มีการหา

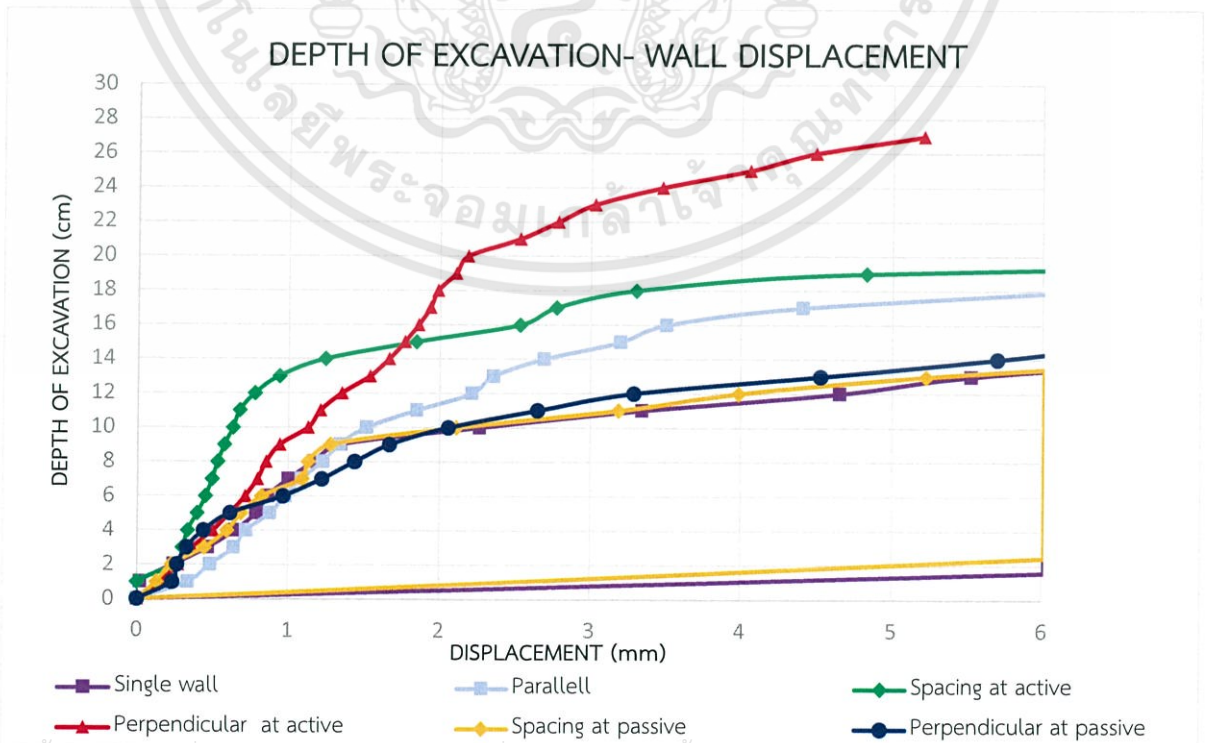
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการขุดกับการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด โดยใช้กราฟในการแสดงข้อมูล ตั้งแต่ยังไม่มีการขุดดิน จนถึงระดับความลึกที่สามารถสังเกตระนาบการพิบัติของชั้นดิน หรือ ระดับความลึกที่ไม่สามารถขุดต่อได้

แกนนอน(แกนx) แสดงข้อมูลการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด ในหน่วยมิลลิเมตร และ แกนตั้ง(แกนy) แสดงความลึกของการขุดในหน่วยเซนติเมตร



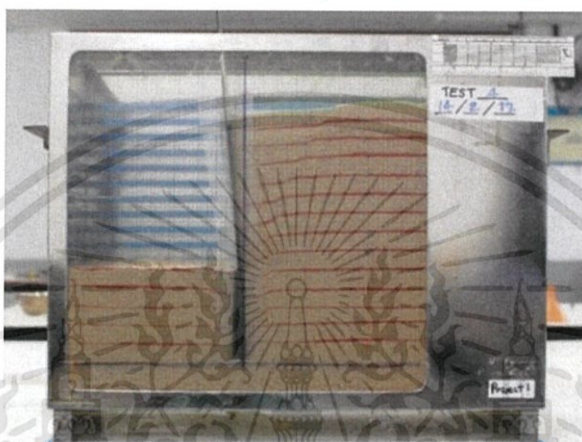
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการขุดดินกับระยะการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด เฉลี่ยของแบบจำลองทั้ง 6 รูปแบบ



รูปที่ 4.6 การขยายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการขุดดินกับระยะการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด เฉลี่ยของแบบจำลองทั้ง 6 รูปแบบ

จากกราฟในรูป 4.5 และ รูป 4.6 พบว่าการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับความลึกในการขุด ในการช่วงแรกการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และเมื่อผ่านจุดความลึกหนึ่ง การเคลื่อนตัวต่อการขุด 1 เซนติเมตรเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ลักษณะของเส้นกราฟเปลี่ยนความชันไป โดยแต่ละแบบจำลองมีพฤติกรรมที่แตกต่างกัน โดยสามารถอธิบายพฤติกรรมการเคลื่อนตัวได้ดังนี้

แบบจำลองที่ 1 กำแพงเข็มพืดจำลองแบบ Single wall ปรากฏระนาบพิบัติชัดเจนครั้งแรกที่ความลึกในการขุด 18 เซนติเมตร อยู่ที่ตำแหน่งห่างจากกำแพงเข็มพืด ณ จุดเริ่มต้น 10 เซนติเมตร การเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นจนทำให้ไม่สามารถขุดต่อไปได้ ที่ความลึกการขุด ที่ 22 เซนติเมตร



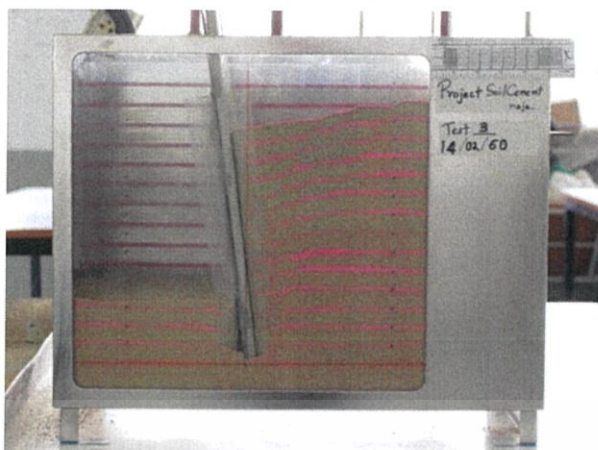
รูปที่ 4.7 แบบจำลองเข็มพืดแบบ Single wall ที่ระยะการขุด 18 เซนติเมตร

แบบจำลองที่ 2 การติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเรียงต่อเนื่องขนานติดกับกำแพงเข็มพืด พบว่าการเกิดเคลื่อนตัวน้อยกว่า แบบจำลองที่ 1 เมื่อเทียบกับที่ระยะขุดเดียวกัน เมื่อขุดจนถึงที่ระยะ 21.5 ซม. กำแพงกันดินมีการเคลื่อนตัวมาก จนสังเกตเห็นระนาบการพิบัติได้ชัดเจน



รูปที่ 4.8 รูปแบบการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเรียงต่อเนื่องขนานติดกับกำแพงเข็มพืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แบบจำลองรูปแบบการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเรียงต่อเนื่องขนานติดกับกำแพงเข็มพีต
ที่ระยะการขุด 21.5 เซนติเมตร

แบบจำลองที่ 3 การติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ปักเว้นระยะทางด้านแรงดันดินเชิงรุก เป็นการจำลองการเพิ่มกำลังรับแรงของชั้นดินบริเวณระนาบพิบัติ พบว่ากำแพงเข็มพีตจำลองเคลื่อนตัวน้อยกว่า แบบจำลองที่ 1 เมื่อเทียบกับที่ระยะขุดเดียวกัน เมื่อขุดจนถึงที่ระยะ 22 ซม. กำแพงกันดินมีการเคลื่อนตัวมาก จนสังเกตเห็นระนาบการพิบัติได้ชัดเจน



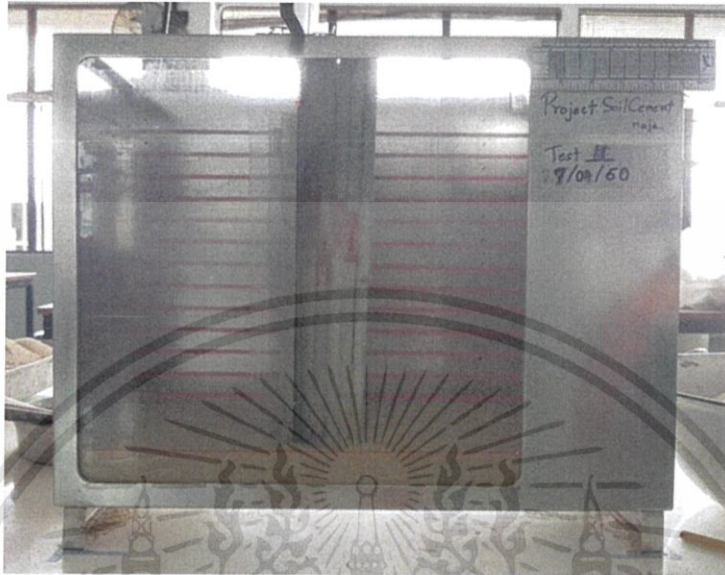
รูปที่ 4.10 รูปแบบการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ปักเว้นระยะทั้งทางด้านแรงดันดินเชิงรุกก่อนทำการขุด



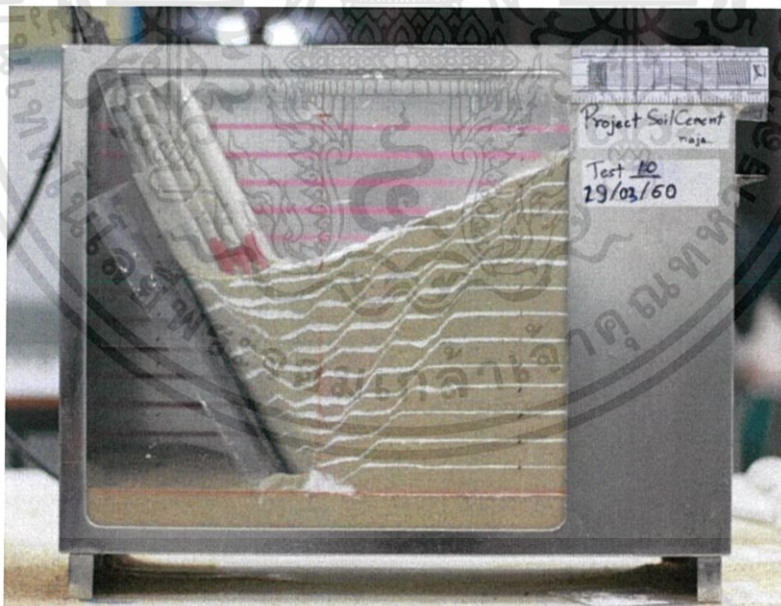
รูปที่ 4.11 แบบจำลองรูปแบบการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ปักเว้นระยะทั้งทางด้านแรงดันดินเชิงรุกที่
ระยะการขุด 22 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองที่ 4 การติดตั้งเสาดินซีเมนต์เป็นแถวตั้งฉากกับกำแพงเข็มพืดทางด้านแรงดันดินเชิงรุก พบว่ากำแพงเข็มพืดจำลองเคลื่อนตัวน้อยกว่า แบบจำลองที่ 1 อย่างมาก เมื่อเทียบกับที่ระยะชุดเดียวกัน

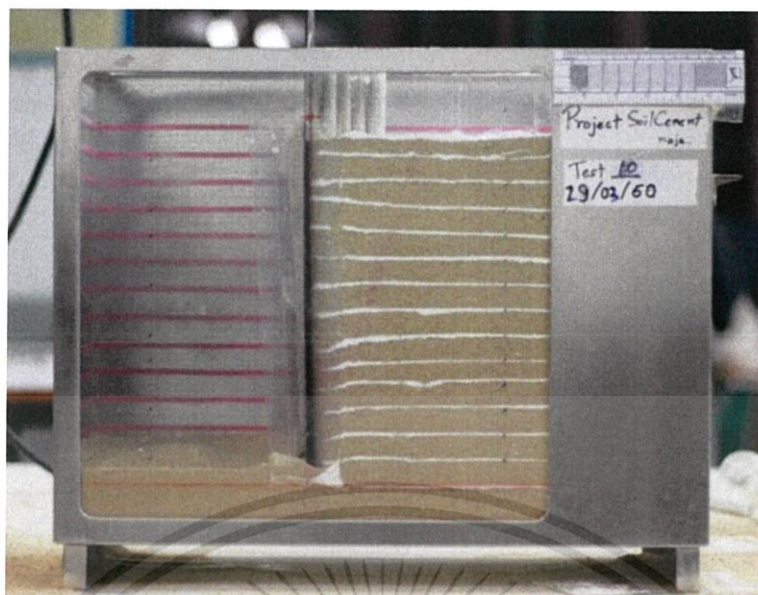


รูปที่ 4.12 รูปแบบการติดตั้งเสาดินซีเมนต์เป็นแถวตั้งฉากกับกำแพงเข็มพืดทางด้านแรงดันดินเชิงรุก ก่อนทำการชุด



รูปที่ 4.13 แบบจำลองการติดตั้งเสาดินซีเมนต์เป็นแถวตั้งฉากกับกำแพงเข็มพืดทางด้านแรงดันดินเชิงรุกที่ระยะการชุด 27 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



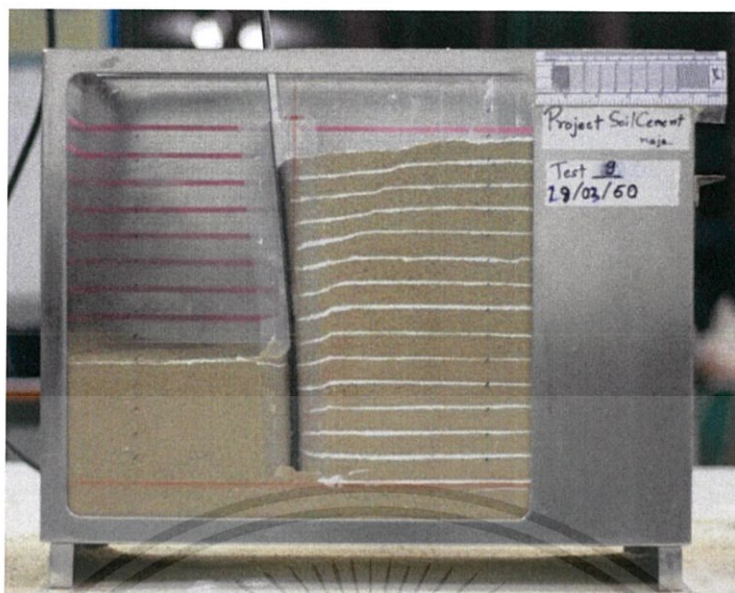
รูปที่ 4.14 การพังแบบทันทีทันใดของแบบจำลองการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นแถวตั้งฉากกับกำแพง
เข็มพืดทางด้านแรงดันดินเชิงรุกที่ระยะการขุด 28 เซนติเมตร ณ ปลายสุดของกำแพง
เข็มพืดจำลอง

แบบจำลองที่ 5 การติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ยาว 12 เซติเมตร ปักเว้นระยะทางด้าน
แรงดันดินเชิงรับ เป็นการจำลองการเพิ่มกำลังรับแรงของชั้นดินบริเวณหน้ากำแพงกันดิน พบว่า
กำแพงเข็มพืดจำลองเคลื่อนตัวน้อยกว่า แบบจำลองที่ 1 ไม่มากนักในช่วงระยะขุดแรก เมื่อเทียบกับ
ที่ระยะขุดเดียวกัน เมื่อขุดจนถึงที่ระยะ 17 ซม. ซึ่งเลยระดับแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์ กำแพงกันเข็มพืด
จำลองมีการเคลื่อนตัวมาก จนสังเกตเห็นระนาบการพิบัติได้ชัดเจน



รูปที่ 4.15 รูปแบบการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ปักเว้นระยะทางด้านแรงดันดินเชิงรับก่อนทำการขุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



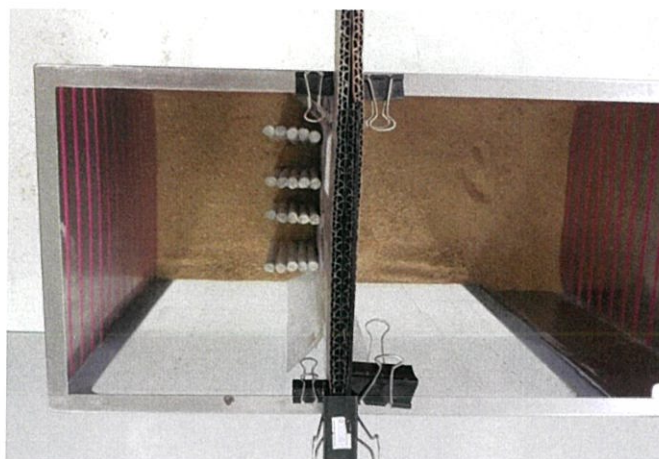
รูปที่ 4.16 แบบจำลองรูปแบบการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ปักเว้นระยะทางด้านแรงดันดินเชิงรับที่ ระยะการขุด 16 เซนติเมตร



รูปที่ 4.17 แบบจำลองรูปแบบการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ปักเว้นระยะทางด้านแรงดันดินเชิงรับ ที่ ระดับความลึก 16 เซนติเมตร

แบบจำลองที่ 6 การติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ยาว 12 เซนติเมตร เป็นแถวตั้งฉากกับกำแพง เข็มพืดทางด้านแรงดันดินเชิงรับ เป็นการเพิ่มแรงเสียดทานระหว่างชั้นดินกับเสาเข็มดินซีเมนต์บริเวณ หน้ากำแพงกันดิน พบว่ากำแพงเข็มพืดจำลองเคลื่อนตัวน้อยกว่า แบบจำลองที่ 1 เมื่อเทียบกับที่ ระยะขุดเดียวกัน เมื่อขุดจนถึงที่ระยะ 22 ซม. ซึ่งเลยระดับหัวเสาเข็มดินซีเมนต์ กำแพงกันเข็มพืด จำลองมีการเคลื่อนตัวมาก จนสังเกตเห็นระนาบการพิบัติได้ชัดเจน

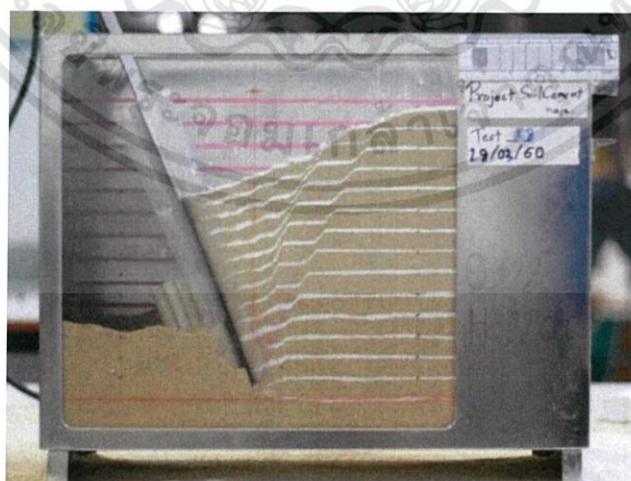
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 รูปแบบการติดตั้งเสาดินซีเมนต์เป็นแถวตั้งฉากกับกำแพงเสริมพืดทางด้านแรงดันดินเชิงรับ
ก่อนทำการชุด



รูปที่ 4.19 แบบจำลองรูปแบบการติดตั้งเสาดินซีเมนต์เป็นแถวตั้งฉากกับกำแพงเสริมพืดทางด้าน
แรงดันดินเชิงรับที่ระยะการชุดถึงหัวเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยมีระดับความลึก 16 เซนติเมตร



รูปที่ 4.20 การพังแบบทันทีทันใดของแบบจำลองการติดตั้งเสาดินซีเมนต์เป็นแถวตั้งฉากกับกำแพง
เสริมพืดทางด้านแรงดันดินเชิงรับที่ระยะการชุด 22.5 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.1.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของกำแพงรูปแบบต่างๆ

ในขณะที่ทำการทดลองแบบจำลองและผลที่ออกมา ทำให้สามารถวิเคราะห์ปัจจัย ที่ทำให้การเกิดพฤติกรรมเคลื่อนตัวที่แตกต่างกันของทั้ง 6 รูปแบบ

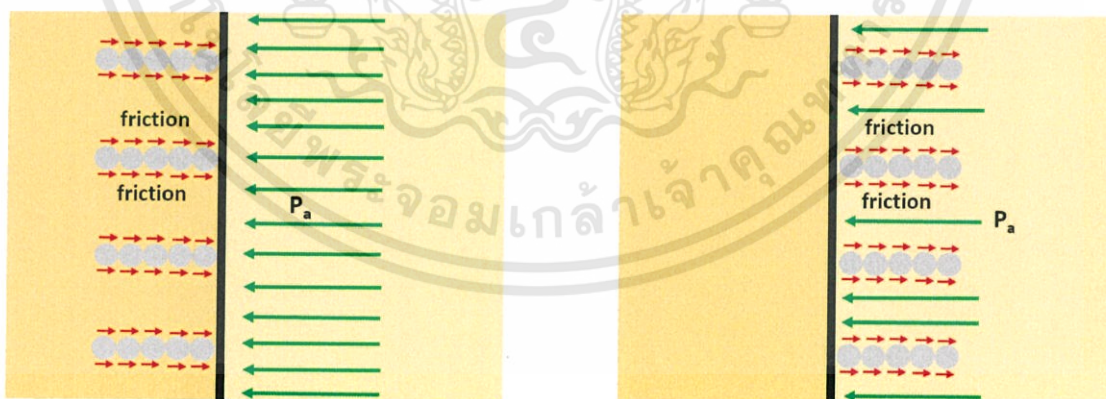
- การเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (Area Moment of Inertia)

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงผลคำนวณของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดแบบจำลอง

แบบจำลอง	ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัด (เซนติเมตร ⁴)	ระยะการเคลื่อนตัวที่จุดพิบัติ (มิลลิเมตร)
Single Wall	0.006525	8.4
Parallel	5.894008	5.7
Perpendicular at active	41.808	2.63
Perpendicular at passive	41.808	6.8

เมื่อทำการวิเคราะห์การเคลื่อนตัว กำแพงเข็มพืดจำลองรูปแบบ Single Wall กับรูปแบบ Parallel และ Perpendicular ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกำแพงที่เพิ่มขึ้น ทำให้กำแพงสามารถคงอยู่ได้อยู่ในระยะหนึ่ง ทำให้การเคลื่อนตัวน้อยกว่ารูปแบบ Single Wall แต่เมื่อทำการขุดลึกขึ้น จนเกิดแรงเนื่องจากสภาวะ Active เพิ่มมากขึ้น ทำให้กำแพงมีการเคลื่อนตัวเพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องจาก เสาเข็มดินซีเมนต์ทำให้ความแข็ง (rigid) เพิ่มขึ้น กำแพงจึงไม่เกิดการดัด (Bending) แต่เป็นการพลิกคว่ำ (Overturning) แทน

- แรงต้านทานแบบแรงเสียดทานด้านข้างแนวเสาเข็มดินซีเมนต์



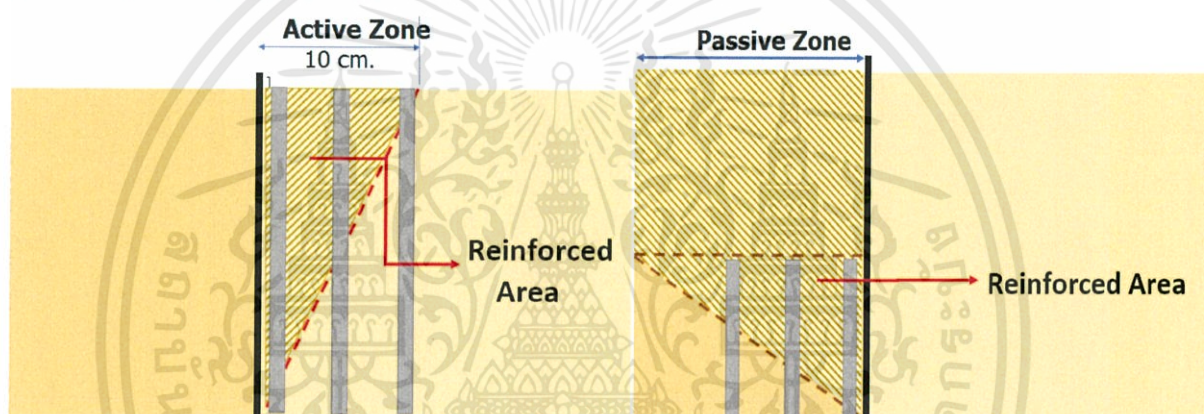
รูปที่ 4.21 ลักษณะของแรงเนื่องจากสภาวะ Active และแรงต้านจากแรงเสียดทานด้านข้างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เกิดขึ้นในรูปแบบ Perpendicular ทางด้านแรงดันดินเชิงรุกและรับ ด้านแรงดันดินเชิงรุก แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นเปรียบเหมือนแรงดึงกำแพง ทำให้กำแพงเกิดการเคลื่อนตัวน้อยมากในช่วงระยะขุดแรก แต่เมื่อที่ระดับการขุดที่ลึกขึ้น แรงเนื่องจากสภาวะ

Active มากกว่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น ทำให้กำแพงเคลื่อนตัวอย่างรวดเร็ว และล้มลงอย่างทันทีทันใด

ด้านแรงดันดินเชิงรับ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นเปรียบเหมือนแรงดันกำแพง แต่เนื่องจากมีแรงเสียดทานเกิดขึ้นน้อยกว่าด้านแรงดันดินเชิงรุก กำแพงเกิดการเคลื่อนตัวอย่างช้าๆ ในช่วงระยะชุดแรก แต่เมื่อชุดจนเลยระดับหัวเสาเข็มดินซีเมนต์ ส่งผลให้แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นทรายเป็นน้อยลง ทำให้กำแพงมีเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นจนพิบัติ

- การเสริมกำลังรับแรงของดิน

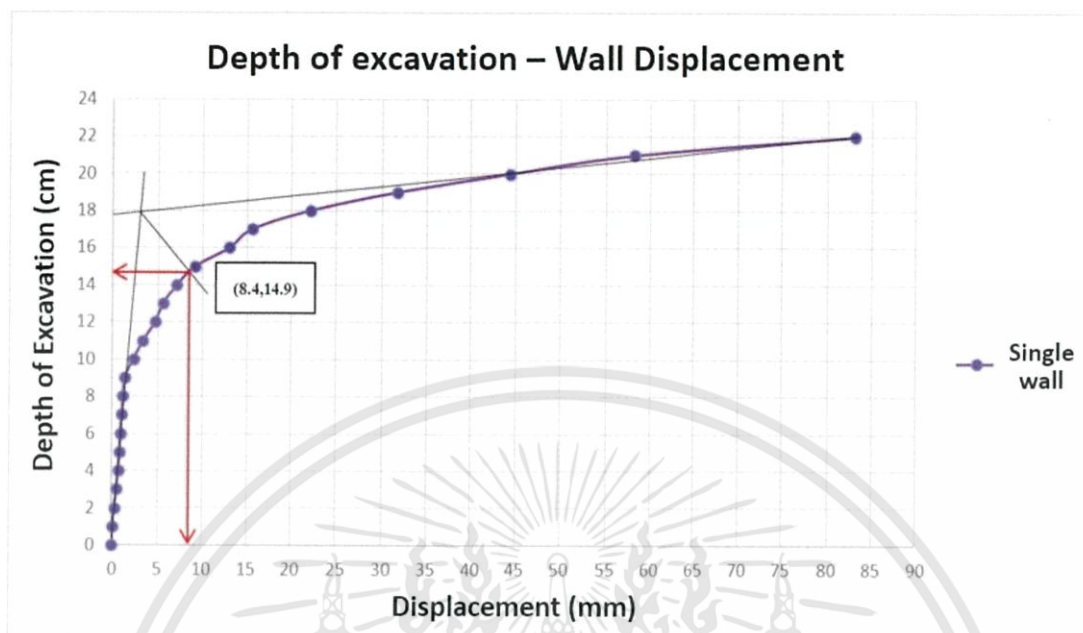
การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ เสริมกำลังรับแรงของดินใน Active Zone ทำให้ชั้นดินสามารถพัฒนาแรงต้านทานจากแรง Active ส่งผลให้กำแพงคงอยู่ได้ในระยะชุดช่วงแรก แต่เมื่อแรงเนื่องจากสภาวะ Active เพิ่มขึ้นและมากกว่ากำลังรับแรงที่ถูกเพิ่มใน Active Zone กำแพงจะเคลื่อนตัวอย่างเห็นได้ชัดเจนเกิดการพิบัติ



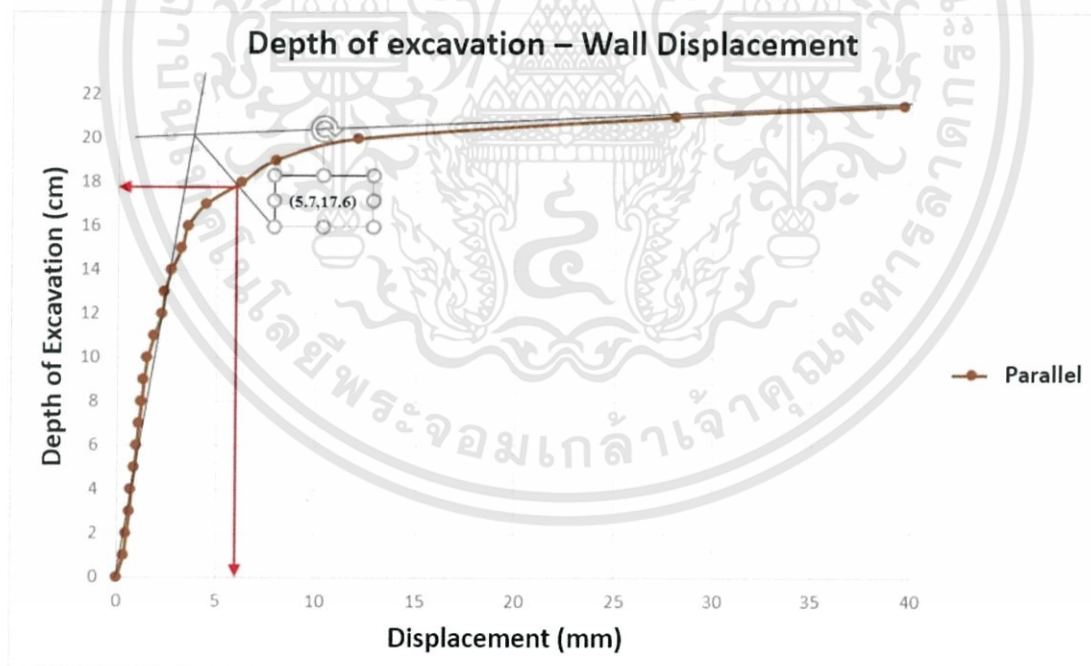
รูปที่ 4.22 ลักษณะของแรงเนื่องจากสภาวะ Active และบริเวณที่เสริมกำลังรับแรงของดินทางด้านแรงดันดินเชิงรุกและเชิงรับ

4.5.2 ผลการศึกษาแบบจำลองของการพัง ณ จุดพิบัติ

4.5.2.1 การหาจุดพิบัติของกำแพงเข็มพืดจากกราฟด้วยวิธี graphical method

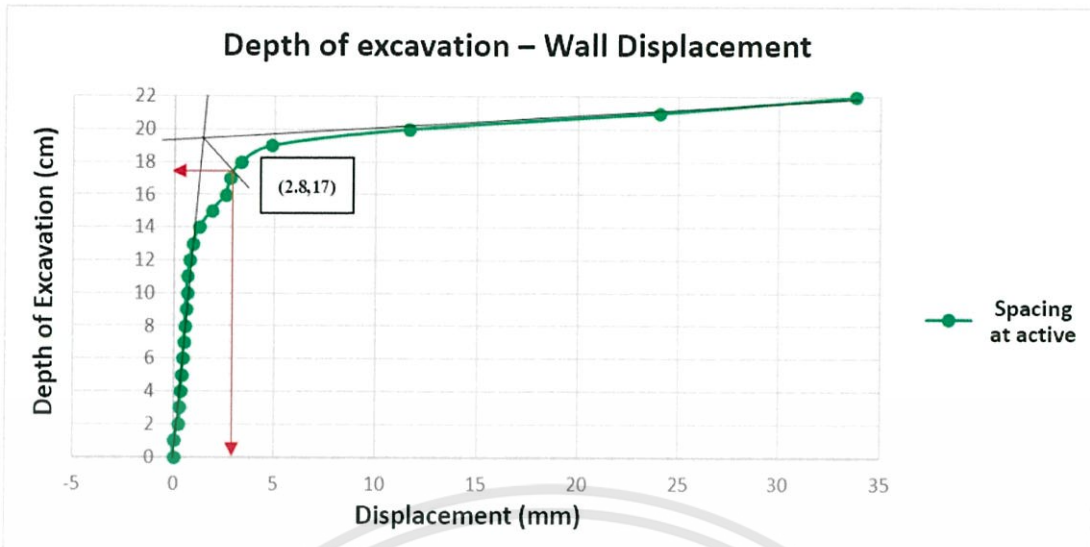


รูปที่ 4.24 การหาจุดพิบัติของแบบจำลองที่ 1 Single Wall

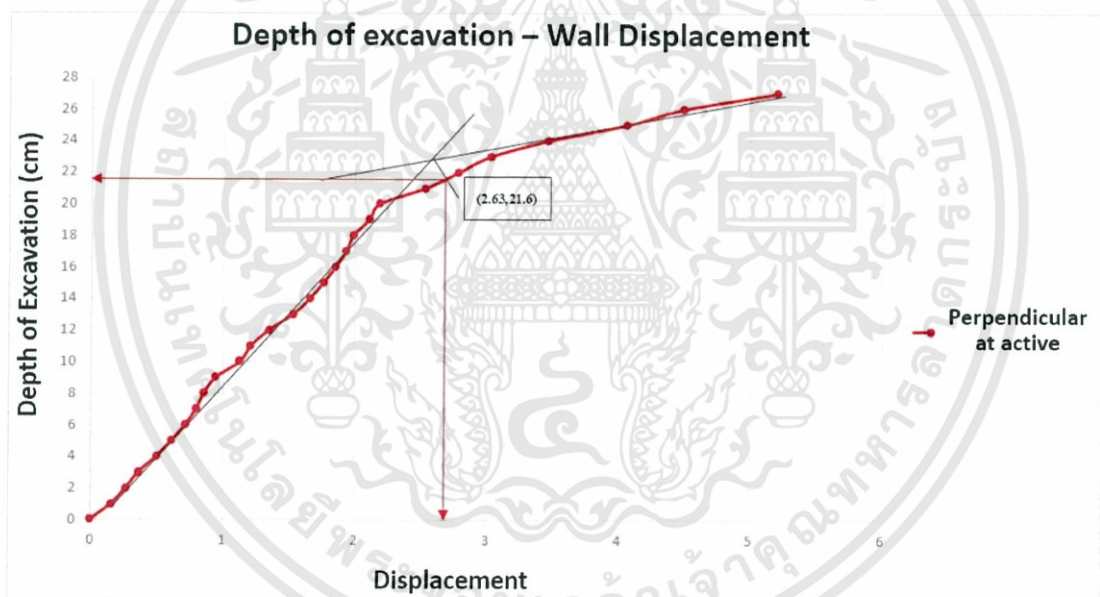


รูปที่ 4.25 การหาจุดพิบัติของแบบจำลองที่ 2 การติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเรียงต่อเนื่องขนานติดกับกำแพงเข็มพืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

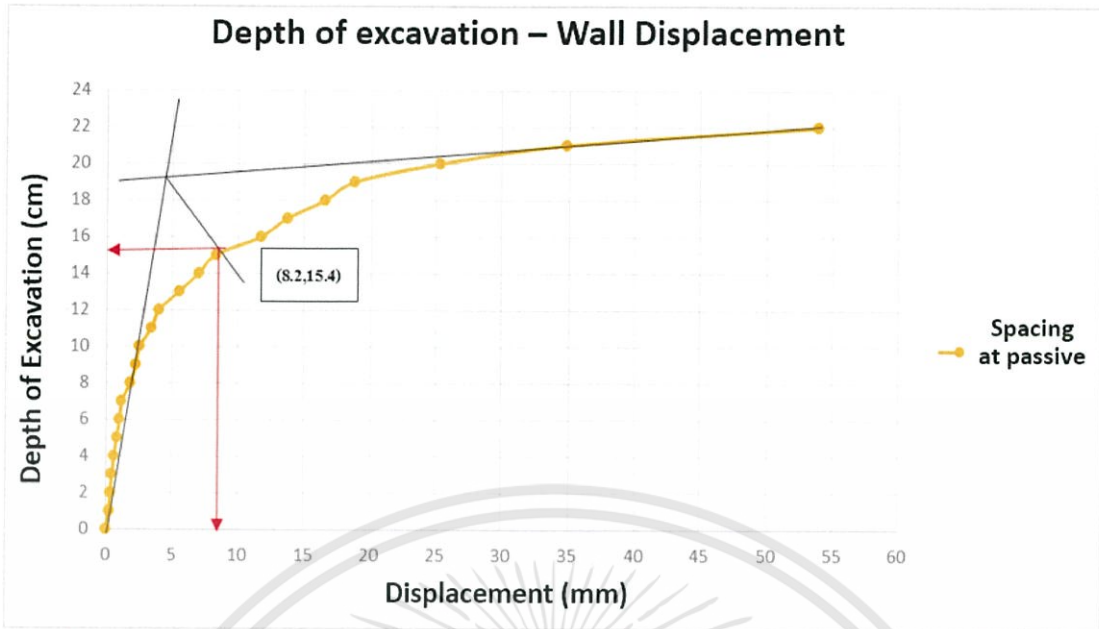


รูปที่ 4.26 การหาจุดพิบัติของแบบจำลองที่ 3 การติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ปักเว้นระยะทั้งทางด้านแรงดันดินเชิงรุก

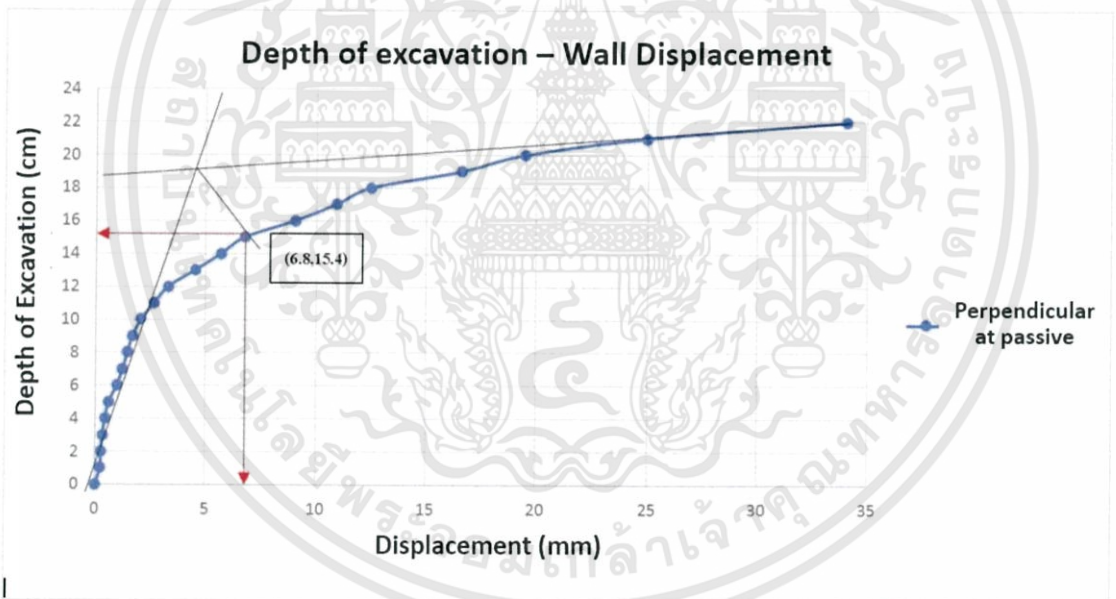


รูป 4.27 การหาจุดพิบัติของแบบจำลองที่ 4 การติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นแถวตั้งฉากกับกำแพงเข็มพืดทางด้านแรงดันดินเชิงรุก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 การหาจุดพิบัติของแบบจำลองที่ 5 การติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ปักเว้นระยะทั้งทางด้านแรงดันดินเชิงรับ



รูปที่ 4.29 การหาจุดพิบัติของแบบจำลองที่ 6 การติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นแถวตั้งฉากกับกำแพงเข็มพืดทางด้านแรงดันดินเชิงรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

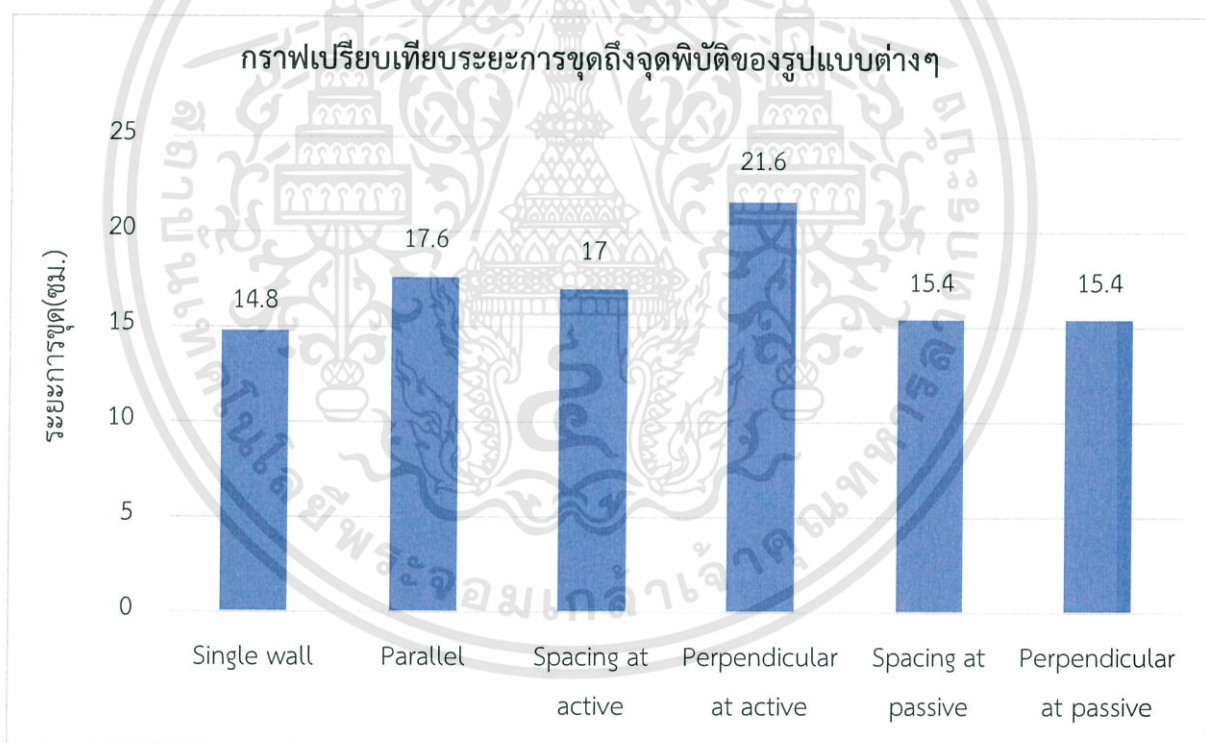
4.5.2.2 เปรียบเทียบจุดพิบัติของแบบจำลองกำแพงกันดินรูปแบบต่าง ๆ

ตารางที่ 4.9 ตารางแสดงจุดพิบัติของแบบจำลองทั้ง 6 รูปแบบ

รูปแบบ	ระยะขุดถึงจุดพิบัติ (cm)	การเคลื่อนตัวถึงจุดพิบัติ (cm)
Single wall	14.9	8.4
Parallel	17.6	5.7
Spacing at active	17	2.8
Perpendicular at active	21.6	2.63
Spacing at passive	15.4	8.2
Friction at passive	15.4	6.8

4.5.2.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองกันดินรูปแบบต่างๆ โดยเทียบกับ

single wall



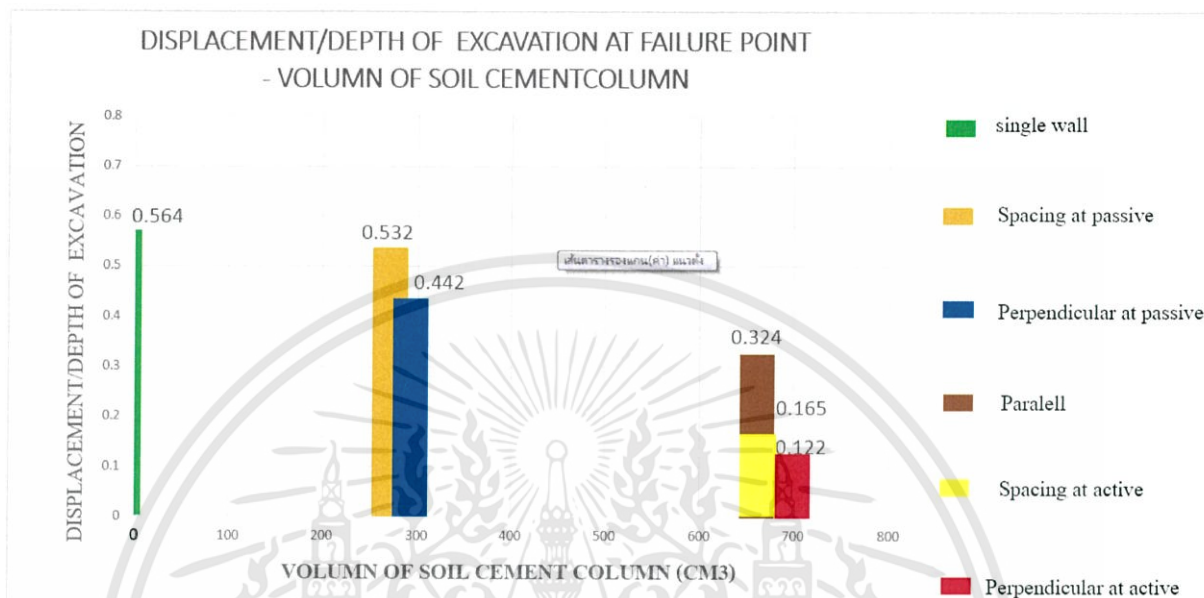
รูปที่ 4.30 กราฟเปรียบเทียบระยะการขุดถึงจุดพิบัติของรูปแบบต่างๆ

จากกราฟจะสังเกตได้ว่า แบบจำลอง Perpendicular at passive กับ Spacing at passive มีค่าระยะขุดที่จุดพิบัติใกล้เคียงกัน และแตกต่างจากรูปแบบ single wall ไม่มากนัก เนื่องจากแบบจำลองทั้งสองอยู่ในด้าน passive ซึ่งพัฒนาแรงต้านการเคลื่อนตัวได้น้อย เพราะต้องจำกัดความสูงของเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเพิ่มความลึกในการขุด ส่วน แบบจำลอง Perpendicular at active มีพื้นที่สัมผัสของเสาเข็มดินซีเมนต์และชั้นทรายมาก ทำให้เกิดแรงต้านการเคลื่อนตัวจากแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียดทานเพิ่มขึ้น และไปรบกวนระนาบพิบัติของสภาวะ Active ทำให้สามารถขุดได้ลึกกว่าแบบจำลองรูปแบบอื่นๆ

4.5.2.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองกันดินรูปแบบต่างๆ โดยเทียบกับปริมาณเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้



รูปที่ 4.31 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระยะการเคลื่อนตัวกับระยะการขุดถึงจุดพิบัติกับปริมาณเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้

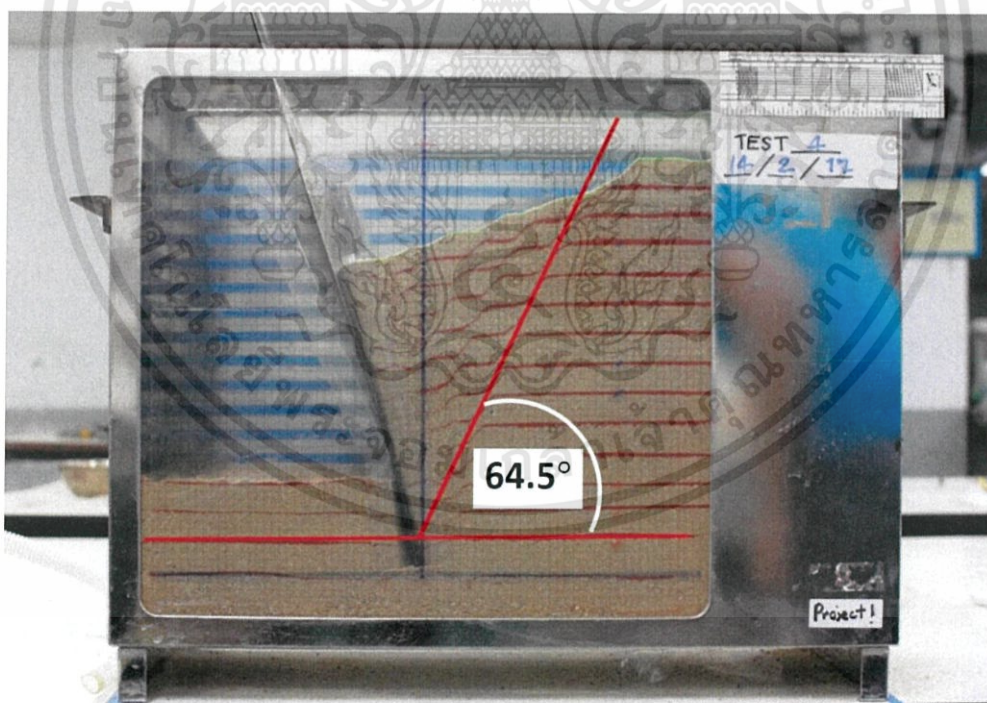
จากกราฟจะเห็นได้ว่าการเพิ่มจำนวนและความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวของกำแพง และเพิ่มระยะขุดจนถึงจุดพิบัติ จุดที่น่าสังเกตคือแบบจำลอง Spacing at active และ Paralell ที่ใช้ปริมาณเสาเข็มดินซีเมนต์เท่ากัน แต่รูปแบบ Spacing at active มีประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวของกำแพงมากกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์นั้นมีความสำคัญต่อพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน สามารถนำไปวิเคราะห์หาค่าความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ เทียบกับประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินได้

4.5.2.5 การเปรียบเทียบมุมที่เกิดขึ้นที่จุดพิบัติกับมุมตามทฤษฎี

จากทดสอบคุณสมบัติของทรายที่เป็นดินตัวอย่าง ได้ค่ามุมเสียดทานภายใน(internal friction angle, ϕ) เท่ากับ 29.9 จากการทดสอบ Direct Shear และ 31.5° จากการปล่อยทรายให้ตกอย่างอิสระ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ มุมที่เกิดขึ้นจากระนาบที่ปรากฏในการทดลองแบบจำลองทั้ง 6 รูปแบบ ได้ผลดังตารางที่ 4.8

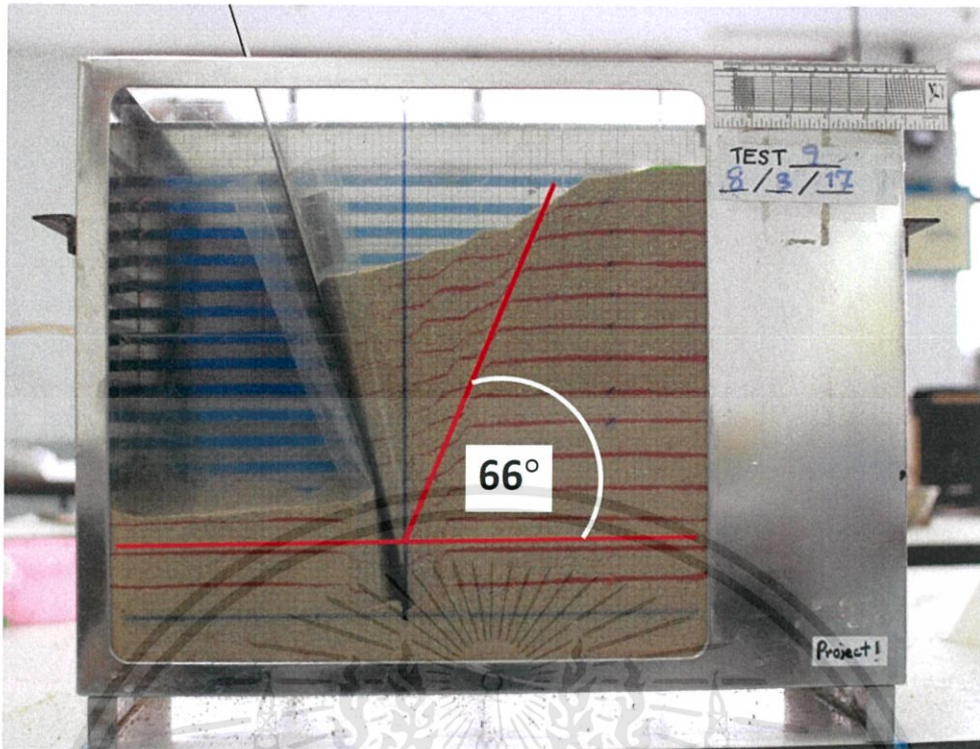
ตาราง 4.10 ตารางแสดงค่ามุมที่เกิดขึ้น(Experiment angle, θ)ของแบบจำลอง

แบบจำลอง ที่	รูปแบบ	มุม $45 + \frac{\theta}{2}$ ที่เกิดขึ้น (องศา)		มุม θ (องศา)	
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่1	ครั้งที่2
1	Single Wall	64.5	66	39	42
2	parallel	62	64	35	30
3	Spacing at active	73	76	56	62
4	Perpendicular at active	ไม่ปรากฏระนาบพิบัติ			
5	Spacing at passive	69	71	48	52
6	Perpendicular at passive	69	66	48	42

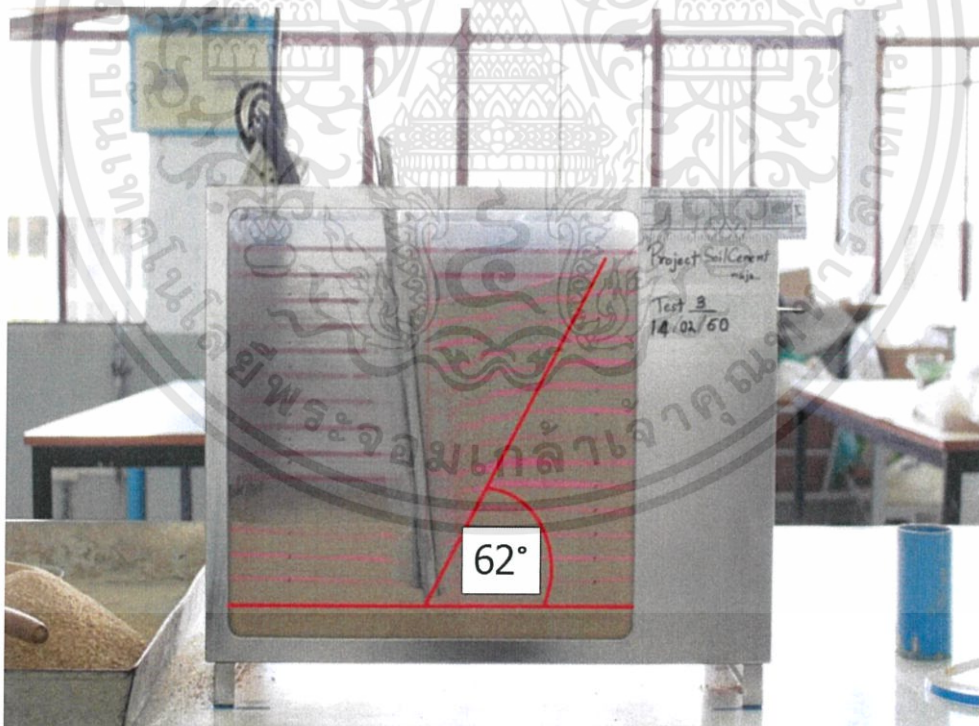


รูปที่ 4.32 มุม $45 + \frac{\theta}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากรนาบพิบัติของแบบจำลอง Single Wall ทดลองครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

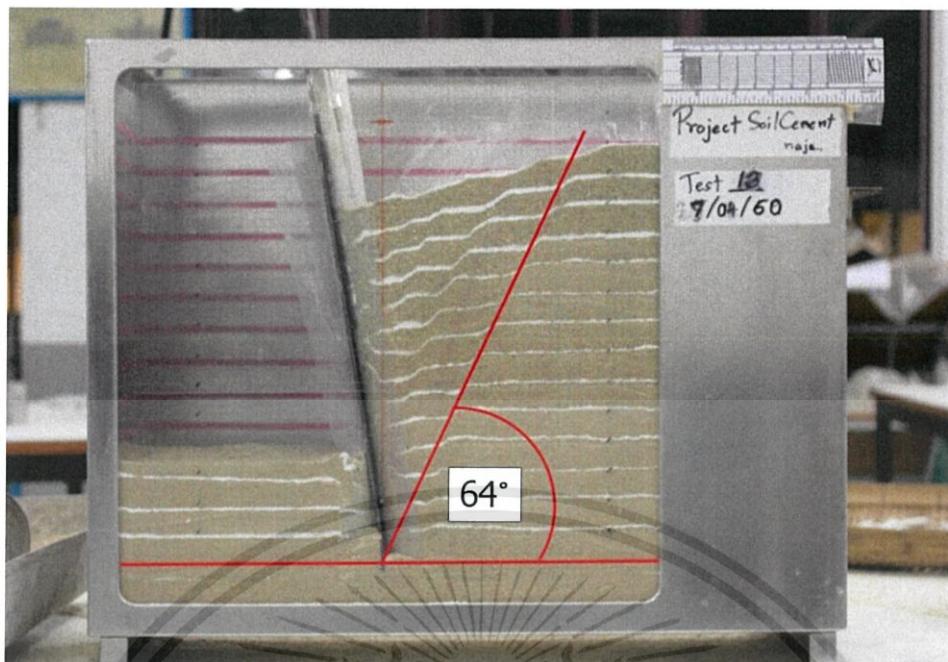


รูปที่ 4.33 มุม $45 + \frac{\phi}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง Single Wall ทดลองครั้งที่ 2

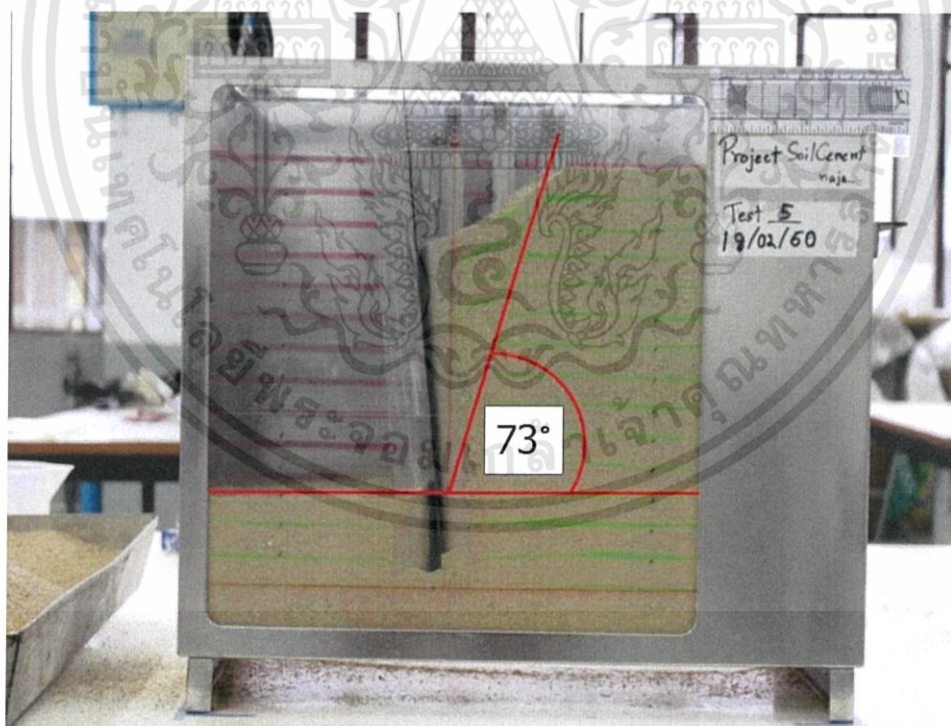


รูปที่ 4.34 มุม $45 + \frac{\phi}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง parallel ทดลองครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

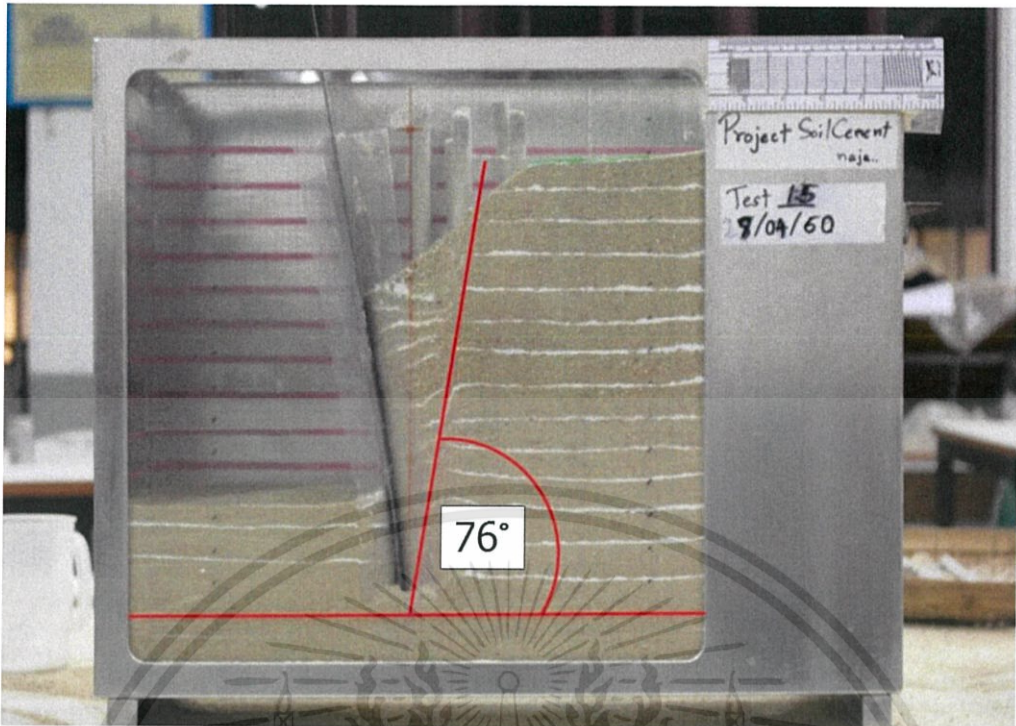


รูปที่ 4.35 มุม $45 + \frac{\phi}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง parallel ทดลองครั้งที่ 2

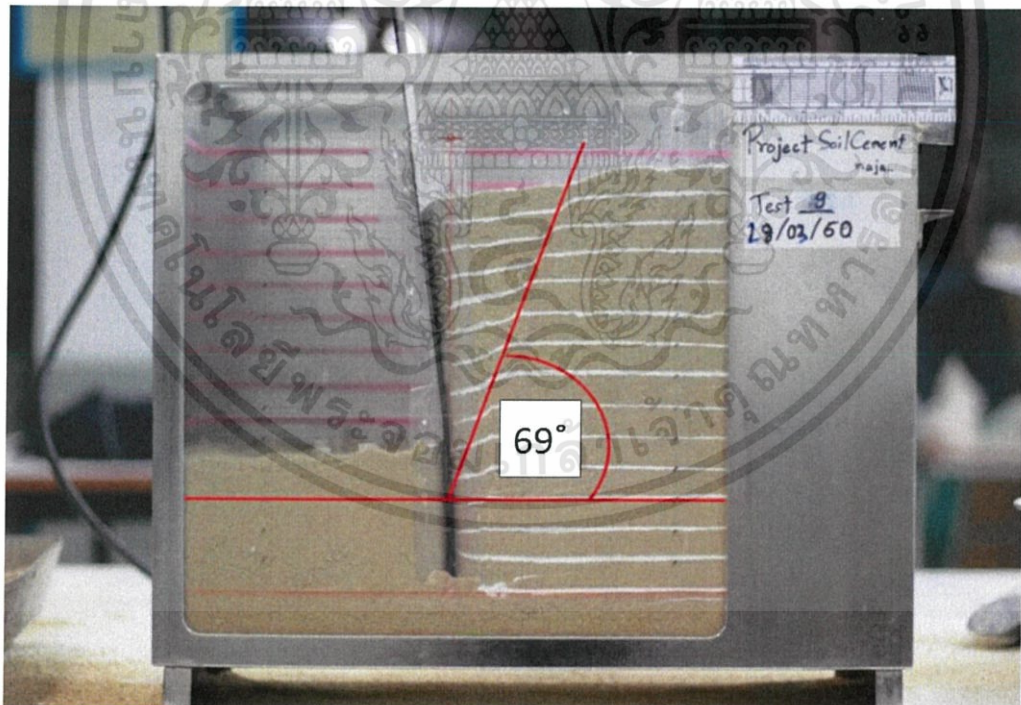


รูปที่ 4.36 มุม $45 + \frac{\phi}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง spacing at active ทดลองครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

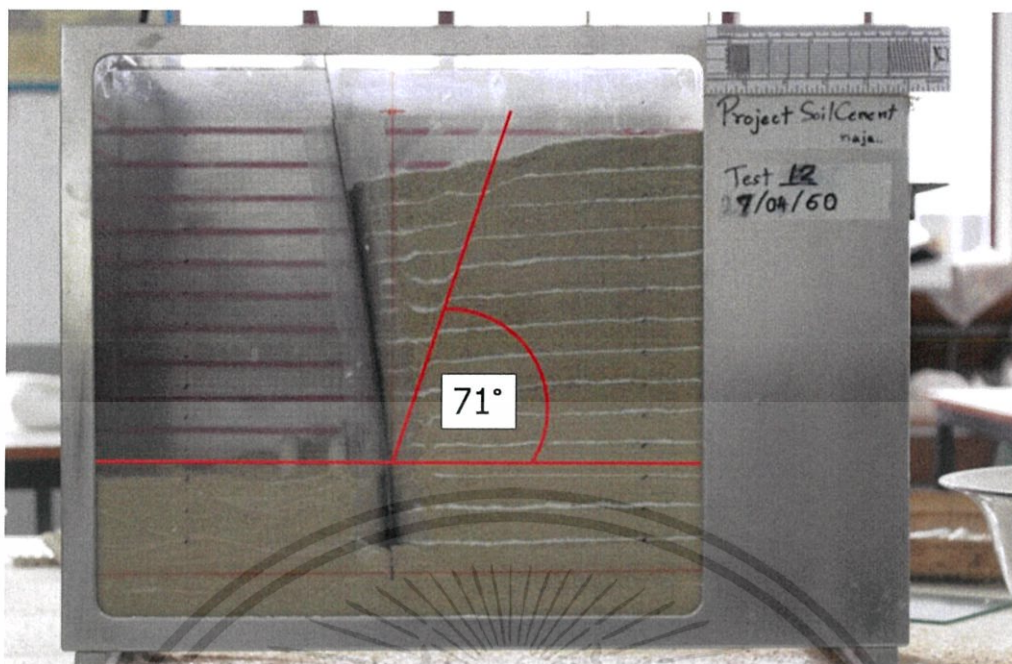


รูปที่ 4.37 มุม $45 + \frac{\phi}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง spacing at active ทดลองครั้งที่ 2

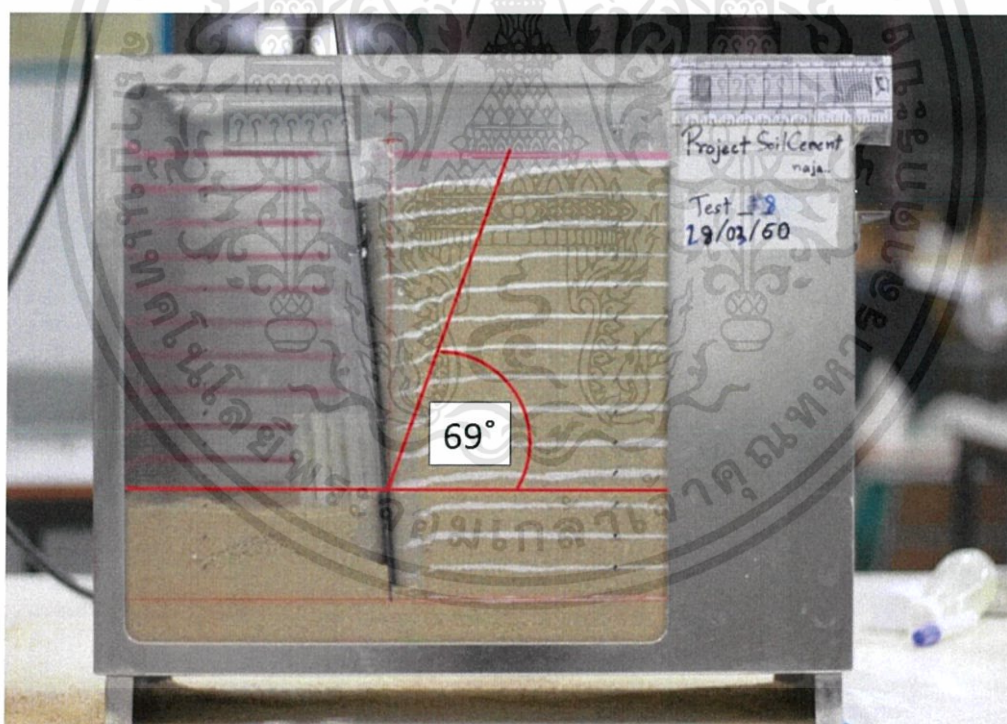


รูปที่ 4.38 มุม $45 + \frac{\phi}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง spacing at passive ทดลองครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

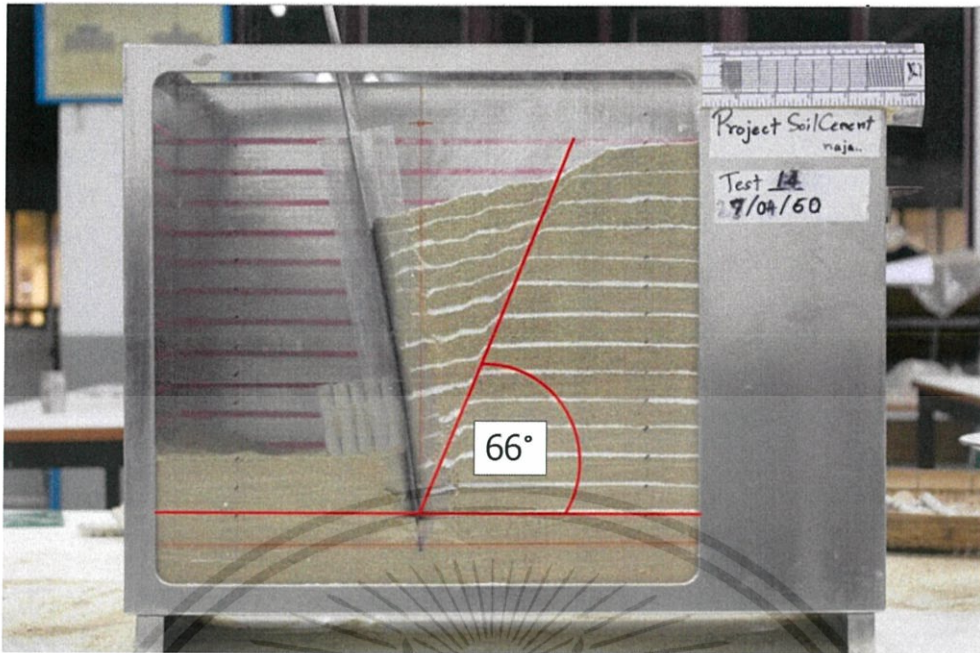


รูปที่ 4.39 มุม $45 + \frac{\phi}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง spacing at passive ทดลองครั้งที่ 2

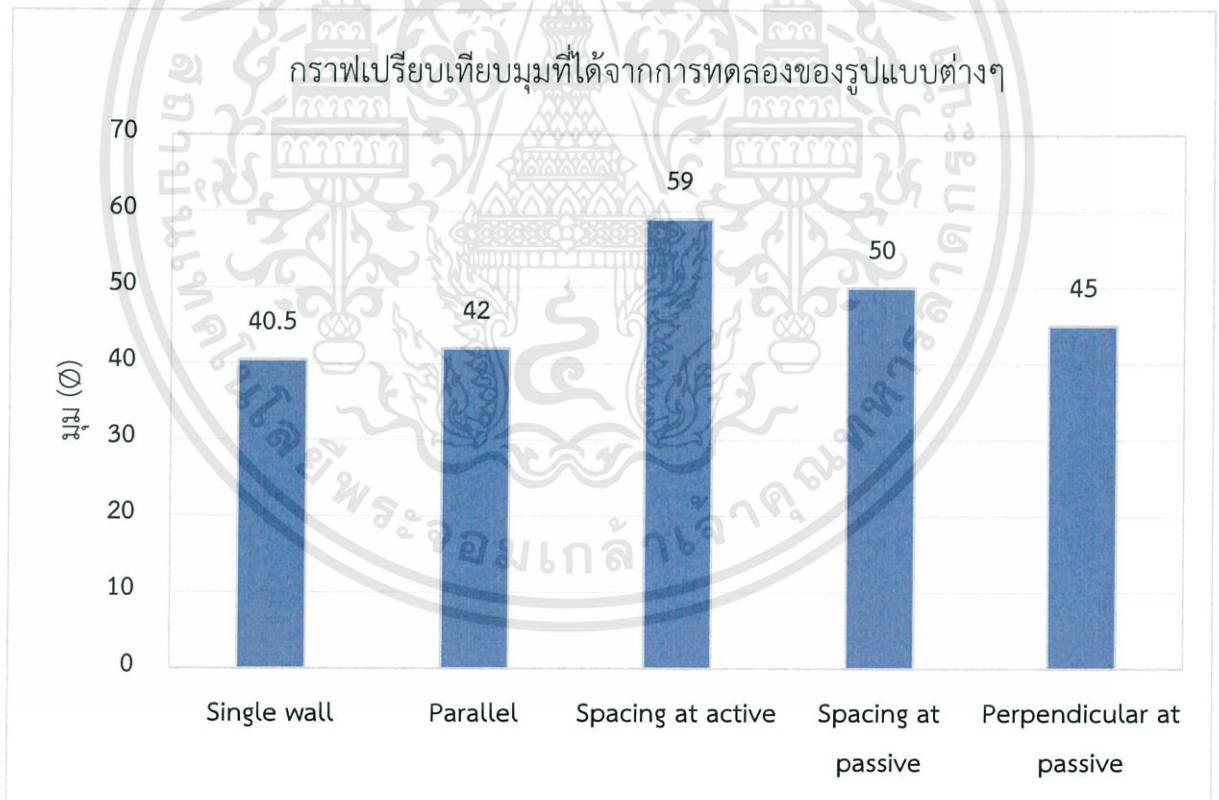


รูปที่ 4.40 มุม $45 + \frac{\phi}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง perpendicular at passive ทดลองครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.41 มุม $45 + \frac{\phi}{2}$ ที่เกิดขึ้น จากระนาบพิบัติของแบบจำลอง perpendicular at passive ทดลองครั้งที่ 2



รูปที่ 4.4.2 การเปรียบเทียบมุมที่ได้จากการทดลองของรูปแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองแบบจำลองรูปแบบต่าง ๆ สังเกตได้ว่า

1. แบบจำลอง Single wall และ parallel มีค่ามุม θ ใกล้เคียงกัน เนื่องจากแบบจำลอง parallel เป็นการเพิ่มเพียงค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกำแพง ซึ่งไม่ได้รับกวนพื้นที่ในระนาบพิบัติ ทำให้ยังคงได้ผลการทดลองใกล้เคียงกับ Single wall แต่กำแพงกันดินรูปแบบ parallel มีประสิทธิภาพเพิ่มการลดการเคลื่อนตัวมากขึ้น

2. แบบจำลอง spacing at active และ perpendicular at active มีค่ามุม θ มากกว่า single wall อย่างมาก เนื่องจากการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้ง 2 รูปแบบ ไปรบกวนการพัฒนากำลังด้าน active ทำให้ไม่สามารถพัฒนากำลังได้เต็มที่ ระยะเวลาการพิบัติที่เกิดขึ้นจึงเปลี่ยนไป โดยพื้นที่ที่เกิดระนาบการวิบัติลดลง เมื่อเทียบกับรูปแบบ single wall

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

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

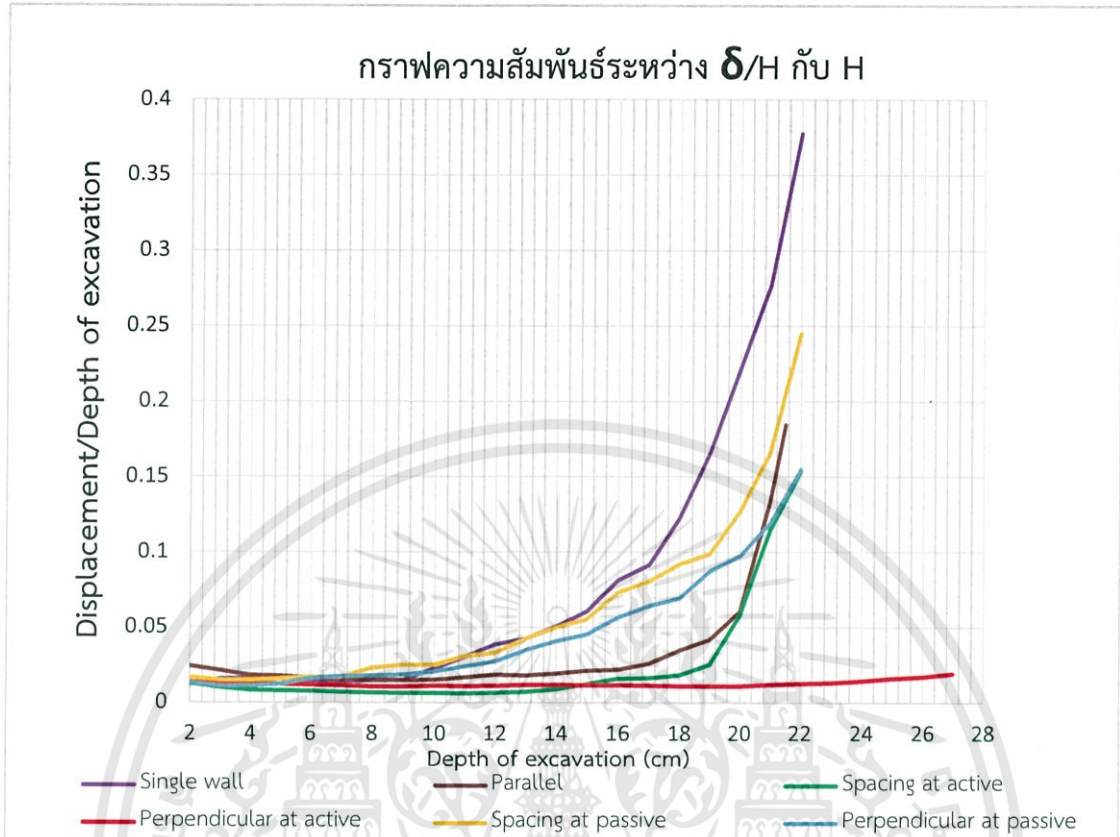
4.5.3.1 การศึกษาการใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วน $\frac{\delta}{H}$ กับ



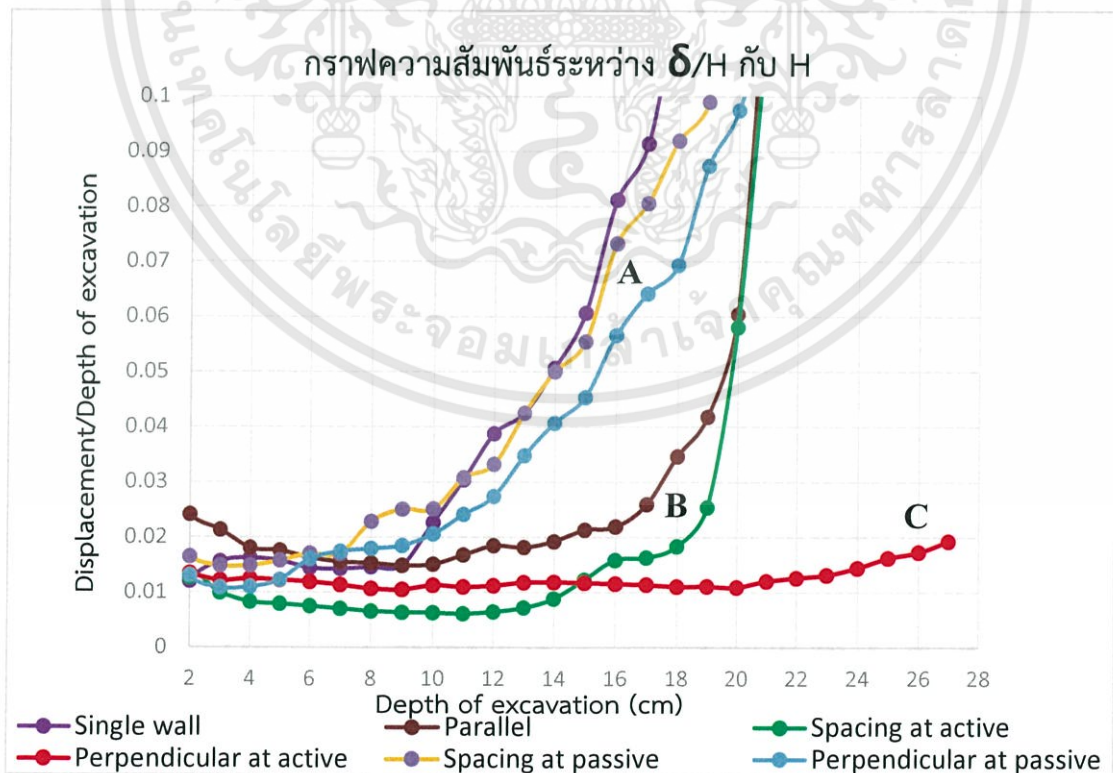
รูปที่ 4.43 แสดงการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน (δ) และระยะการขุด (H)

การศึกษาอัตราส่วนระหว่าง $\frac{\delta}{H}$ สามารถนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบกำแพงกันดิน และอธิบายพฤติกรรมของแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละรูปแบบ ได้อย่างชัดเจนดังนี้

4.5.3.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบกำแพงกันดิน



รูปที่ 4.44 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\frac{\delta}{H}$ กับ H ของระบบกำแพงกันดินรูปแบบต่างๆ



รูปที่ 4.45 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\frac{\delta}{H}$ กับ H ของระบบกำแพงกันดินช่วง $\frac{\delta}{H}$ ตั้งแต่ 0-0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน δ/H กับ H ของระบบกำแพงกันดินแต่ละรูปแบบ สามารถอธิบายพฤติกรรมเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินต่อความลึกได้โดยการแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

1. กลุ่ม A ได้แก่รูปแบบ perpendicular และ spacing at passive โดยในช่วงระยะแรก กำแพงมีการเคลื่อนตัวไม่มากทำให้กราฟมีความชันน้อย โดยที่ประสิทธิภาพการต้านทานการเคลื่อนตัว (δ/H) มีค่าเท่ากับ 0.025 ที่ความลึกเท่ากับ 10 เซนติเมตร ตั้งแต่ระยะขุดที่ 10 เซนติเมตรเป็นต้นไป อัตราการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนตัวมีค่ามากกว่าการเพิ่มขึ้นของความลึกในการขุดส่งผลให้ค่า δ/H มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินมีค่ามาก ยิ่งทำให้กราฟมีความชันสูงขึ้น เนื่องจากประสิทธิภาพของระบบลดลง โดยสามารถอธิบายรูปแบบทั้ง 2 ได้จากแรงต้านฝั่ง passive นั้นยังไม่สามารถพัฒนา เนื่องจากระยะการขุดในช่วงแรกนั้นไม่เพียงพอให้เกิดแรง passive จึงส่งผลให้พฤติกรรมเคลื่อนตัวเหมือนกับ single wall

2. กลุ่ม B ได้แก่รูปแบบ parallel และ spacing at active โดยในช่วงระยะแรก ประสิทธิภาพการต้านทานการเคลื่อนตัว (δ/H) มีค่าลดลง ที่ช่วงความลึก 16 เซนติเมตร ตั้งแต่ระยะขุดที่ 16 เซนติเมตรเป็นต้นไป อัตราการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนตัวมีค่ามากกว่าการเพิ่มขึ้นของความลึกในการขุด ส่งผลให้ค่า δ/H มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากโดยอัตราการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินมีค่ามาก ยิ่งทำให้กราฟมีความชันสูงขึ้น เนื่องจากประสิทธิภาพของระบบลดลง โดยสามารถอธิบายรูปแบบทั้ง 2 ได้จากการเพิ่มค่า stiffness ของกำแพง และการเสริมกำลังของดินในด้าน active zone สามารถต้านแรง active ได้ถึงจุดๆหนึ่ง เมื่อระยะการขุดลึกขึ้น จนเกิดแรง active มีค่ามากกว่า แรงต้านที่เกิด การเคลื่อนตัวของกำแพง จะเพิ่มขึ้นอย่างมาก

3. กลุ่ม C ได้แก่รูปแบบ perpendicular at active ประสิทธิภาพการต้านทานการเคลื่อนตัว (δ/H) มีค่าต่ำมาก และ ความชันของกราฟเปลี่ยนแปลงน้อย เมื่อระดับความลึกในการขุดเพิ่มขึ้น แสดงว่า ค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงน้อยกว่ารูปแบบอื่นมาก แสดงถึงประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวได้ดี สามารถอธิบายได้จาก มีแรงต้านจากแรงเสียดทานเกิดขึ้นที่รอบเสาเข็มดินซีเมนต์ และ ไปรบกวนการพัฒนากำลัง active ทำให้กำแพงมีค่าการเคลื่อนตัวน้อยมาก

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 บทนำ

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน และระดับความลึกของการขุดสามารถศึกษาได้ด้วยแบบจำลองทางกายภาพได้อย่างชัดเจน จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินและความลึกของการขุด รูปภาพผลการทดลองที่ปรากฏจุดพิบัติรวมทั้งกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกในขุดและอัตราส่วนของการเคลื่อนตัวของกำแพงต่อระยะความลึกในการขุด ซึ่งสามารถอธิบายถึงพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของแบบจำลองรูปแบบทั้ง 6 รูปแบบ

5.2 สรุปผลการทดลอง

การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินจำลองของรูปแบบการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ปักเว้นระยะทั้งทางด้านแรงดันดินเชิงรับและรูปแบบการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นแถวตั้งฉากกับกำแพงเข็มพืดทางด้านแรงดันดินเชิงรับมีพฤติกรรมการเคลื่อนตัวที่คล้ายคลึงกันเนื่องจากการพัฒนาแรงจากสภาวะ Passive จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีการขุดถึงระดับของเสาเข็มดินซีเมนต์ซึ่งแรงจากสภาวะ Active เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มความลึกของการขุดส่งผลให้แรงจากสภาวะ Passive ที่เกิดขึ้นต้านทานแรงจากสภาวะ Active ได้น้อยมากทำให้มีประสิทธิภาพลดการเคลื่อนตัวได้น้อยกว่ารูปแบบอื่นๆ

การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินจำลองของรูปแบบการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเรียงต่อเนื่องขนานติดกับกำแพงเข็มพืดและรูปแบบการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ปักเว้นระยะทั้งทางด้านแรงดันดินเชิงรับมีพฤติกรรมการเคลื่อนตัวที่คล้ายคลึงกัน รูปแบบการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเรียงต่อเนื่องขนานติดกับกำแพงเข็มพืด มีประสิทธิภาพลดการเคลื่อนตัวได้เนื่องจากความแข็ง (rigid) ที่เพิ่มขึ้นจากค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกำแพง ทำให้กำแพงไม่เกิดการดัด (Bending) และรูปแบบการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ปักเว้นระยะทั้งทางด้านแรงดันดินเชิงรับ เป็นการรบกวนแรงจากสภาวะ Active ทำให้เกิดการพัฒนากำลังได้อย่างไม่เต็มที่เนื่องจากการปักเสาเข็มดินซีเมนต์ในพื้นที่การพิบัติ

การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินจำลองของรูปแบบการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นแถวตั้งฉากกับกำแพงเข็มพืดทางด้านแรงดันดินเชิงรับมีประสิทธิภาพลดเคลื่อนตัวได้ดีกว่ารูปแบบอื่นๆ เนื่องจากความแข็ง (rigid) ที่เพิ่มขึ้นจากค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกำแพง ทำให้กำแพงไม่เกิดการดัด (Bending) มีการรบกวนแรงจากสภาวะ Active ทำให้เกิดการพัฒนากำลังได้อย่างไม่เต็มที่เพราะอยู่ในพื้นที่การพิบัติ และแรงเสียดทานที่เกิดระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์กับชั้นทรายต้านทานแรงจากสภาวะ Active

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ากำแพงกันดินจำลองของรูปแบบการติดตั้งเสาเข็มซีเมนต์เป็นแถวตั้งฉากกับกำแพงเข็มพืดทางด้านแรงดันดินเชิงรุกมีประสิทธิภาพในการลดเคลื่อนตัวได้ดีกว่ารูปแบบอื่นๆ

5.3 ข้อเสนอแนะ

- 1) นำผลที่ได้ไปศึกษาต่อเพื่อประยุกต์ใช้ในหน่วยงานจริง
- 2) นำผลทางการศึกษาไปวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite element
- 3) เพิ่มจำนวนครั้งในการทดลองแบบจำลองเพื่อความถูกต้อง
- 4) เปลี่ยนชนิดของตัวอย่างดิน เพื่อจำลองให้เหมือนกับสภาพหน่วยงานจริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] จิระยุทธ สืบสุข. (2554). *แรงดันดินด้านข้าง*. (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://jirayutsu.blogspot.com/2011/10/04-011-304-foundation-engineering.html>
- [2] ณัฐธิดา ขวัญลิขิต. (2558). *เสาเข็มดิน-ซีเมนต์*. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] บรรณาธิการเว็บไซต์บ้านและสวน. (2557). *กำแพงกันดิน*. (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www.real-parenting.com/Article.aspx?ArticleID=4578>
- [4] ผศ.ดร.ชนาดล คงสมบูรณ์, กลุ่มวิจัยด้านแบบจำลองหมุนเหวี่ยงทางวิศวกรรมปฐพีแห่งประเทศไทย. (2007). *Applications of Geotechnical Centrifuge Technique*. Retrieved from <http://www.fiet.kmutt.ac.th/centrifuge/application.html>
- [5] ผศ.ดร.ชนาดล คงสมบูรณ์. (2559). เอกสารประกอบการสอนเรื่อง การวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดิน. *การวิเคราะห์ด้วยวิธีลาดอนันต์*. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.
- [6] รศ.แหลมทอง เหล่าคงถาวร และคณะ. (2555). *คู่มือปฏิบัติการทดลองปฐพีกลศาสตร์*. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [7] สุขสันต์ หอพิบูลสุข. (2553, มิถุนายน). *Foundation Engineering*. (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://eng.sut.ac.th/ce/oldce/Suksun/Chapter5.pdf>
- [8] 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.
- [9] Thanadol K., (2000). Behavior of embedded improved soil berm in excavation. A upgrade report submitted for the degree of doctorate of philosophy In Civil Engineering. National University of Singapore, Singapore
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเสาเข็มดินซีเมนต์. (ออนไลน์). แหล่งที่มา: http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2551/enci0454ab_ch2.pdf
- ณรงค์ ทศนนิพันธ์ และคณะ. (2550). การลดการเคลื่อนตัวของดินโดยใช้วิธีการปรับปรุงกำลังโดยวิธีผสมดินเชิงกลแบบลึก. (ออนไลน์). แหล่งที่มา: http://seafco.co.th/src/psf/Research_Development/Thai_Paper_32.pdf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

สัญลักษณ์

B	=	ความกว้างของฐานราก
d	=	ระยะฝังเหล็กพืดที่ต้องการ
e	=	ระยะเยื้องศูนย์กลาง
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	=	แรงลัพธ์เนื่องจากความดันดินประสิทธิผล 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
σ'_1	=	ความเค้นหลักใหญ่ประสิทธิผลเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์(ต่อ)

σ'_3	=	ความเค้นหลักเล็กประสิทธิผล
σ_h	=	ความดันดินด้านข้างที่กระทำต่อกำแพง
σ'_h	=	ความดันดินด้านข้างประสิทธิผลที่ฐานของกำแพง
σ'_p	=	ความดันด้านข้างประสิทธิผลที่สภาวะ passive
\emptyset	=	มุมเสียดทานภายในของดิน

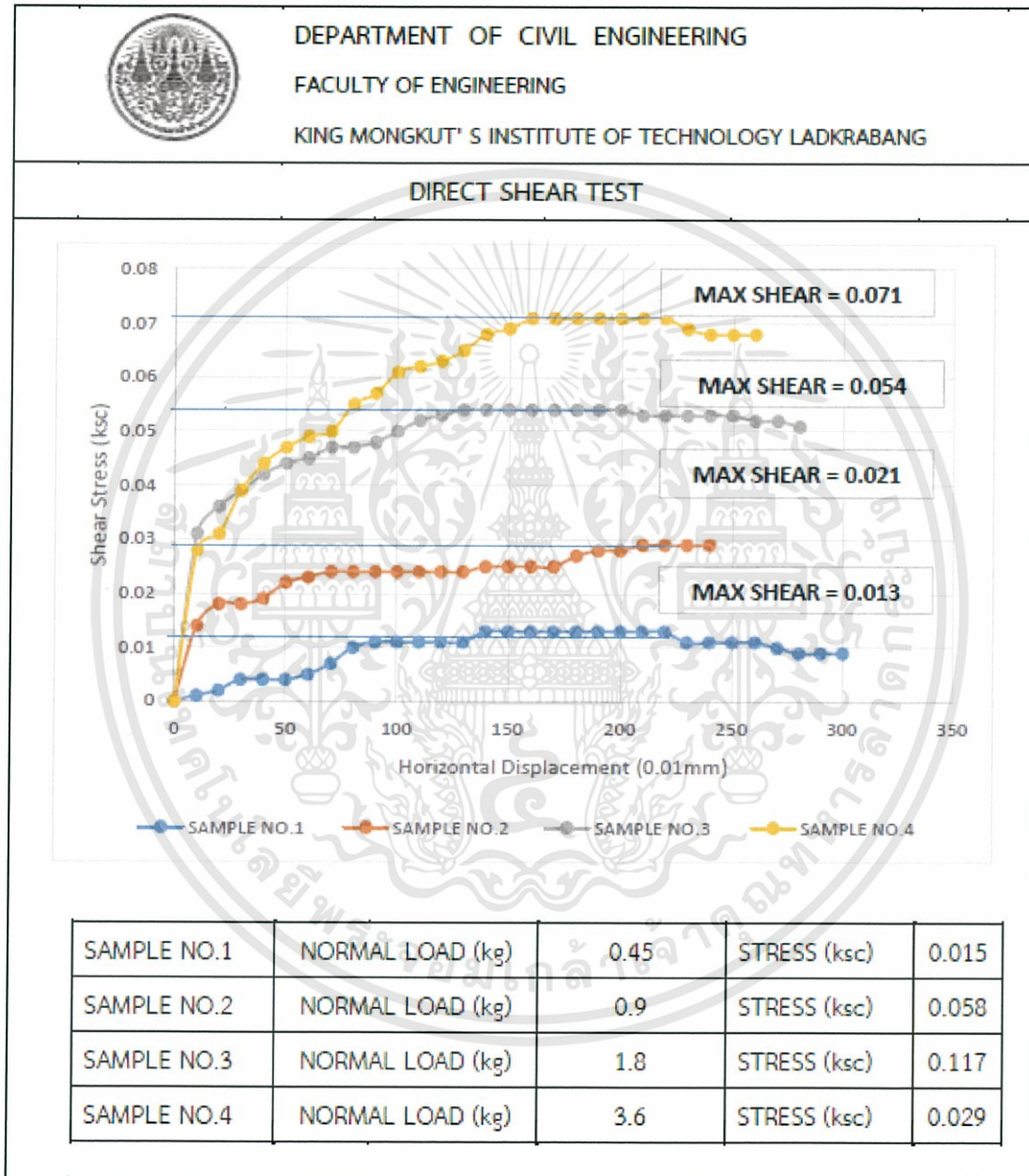
ชื่อเรียกแบบจำลอง

Single wall	=	กำแพงเข็มพืด
Parallel	=	การติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเรียงต่อเนื่องขนานติดกับกำแพงเข็มพืด
Spacing at active	=	การติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ปักเว้นระยะทางด้านแรงดันดินเชิงรุก
Perpendicular at active	=	การติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นแถวตั้งฉากกับกำแพงเข็มพืดทางด้านแรงดันดินเชิงรุก
Spacing at passive	=	การติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ปักเว้นระยะทางด้านแรงดันดินเชิงรับ
Perpendicular at passive	=	การติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นแถวตั้งฉากกับกำแพงเข็มพืดทางด้านแรงดันดินเชิงรับ

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบคุณสมบัติ

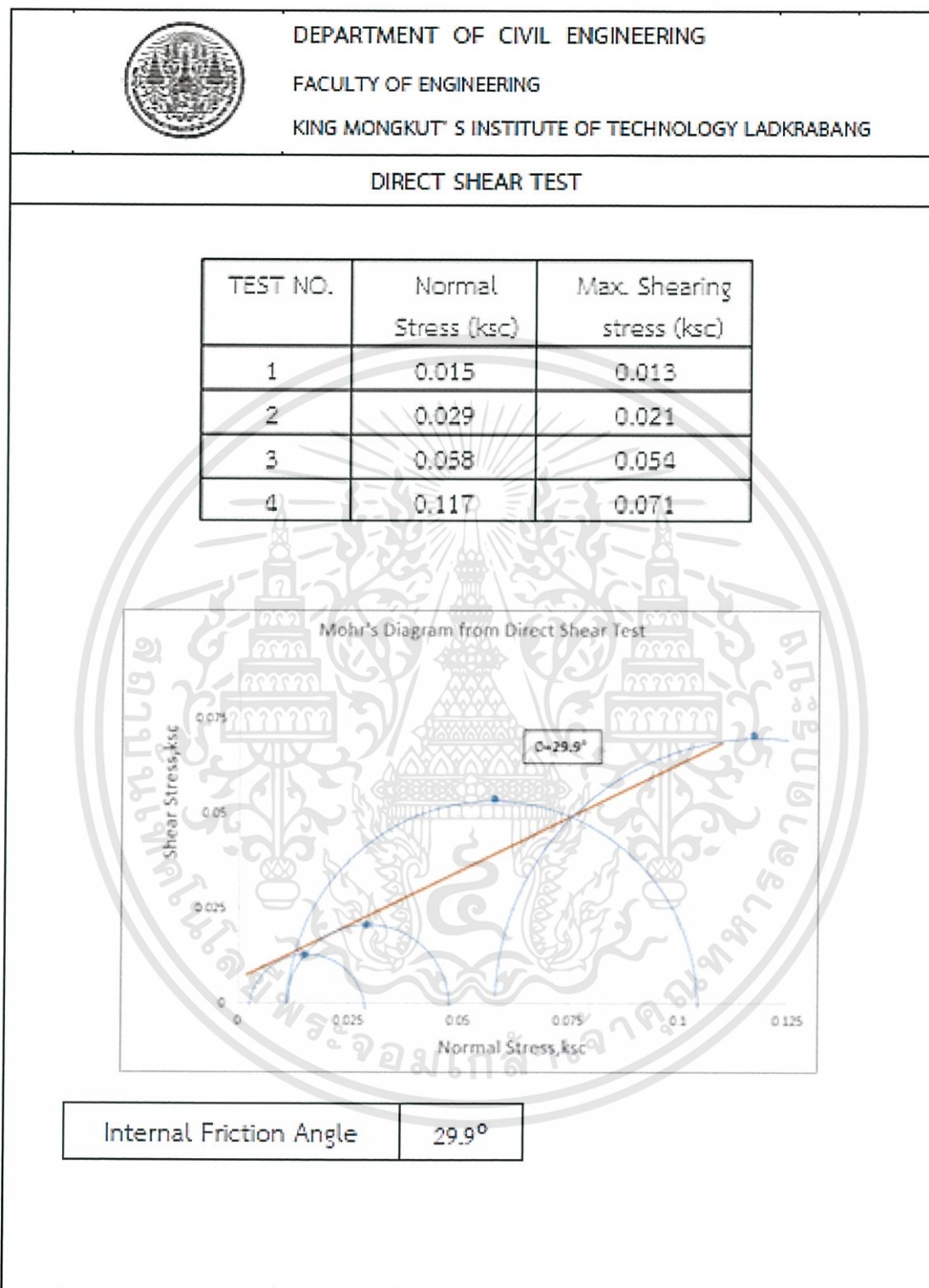
ข.1 มุมเสียดทานภายใน (Internal Friction Angle) ของทรายตัวอย่าง



รูปที่ ข.1 มุมเสียดทานภายในของทรายตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

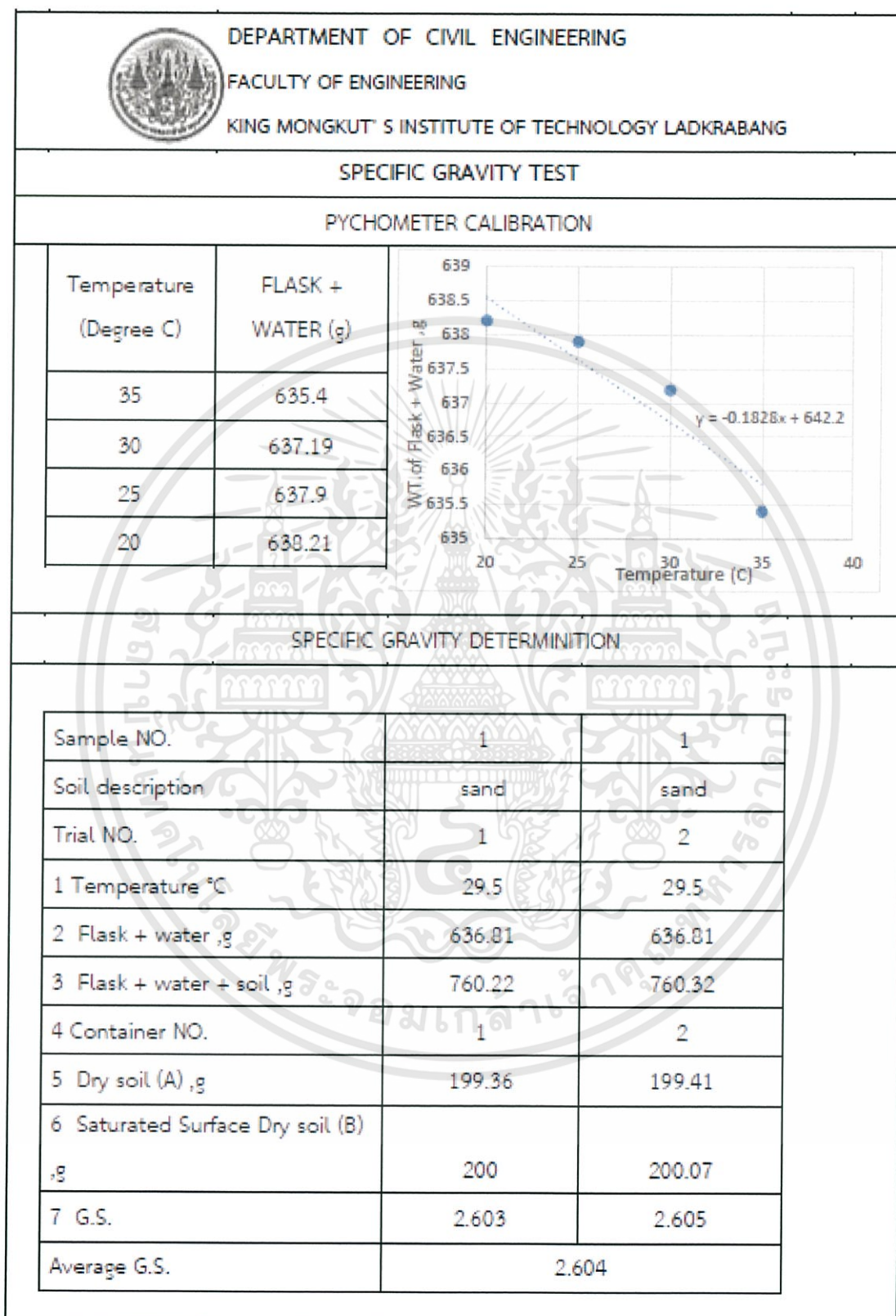
ข.1 มุมเสียดทานภายใน (Internal Friction Angle) ของทรายตัวอย่าง



รูปที่ ข.2 มุมเสียดทานภายในของทรายตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

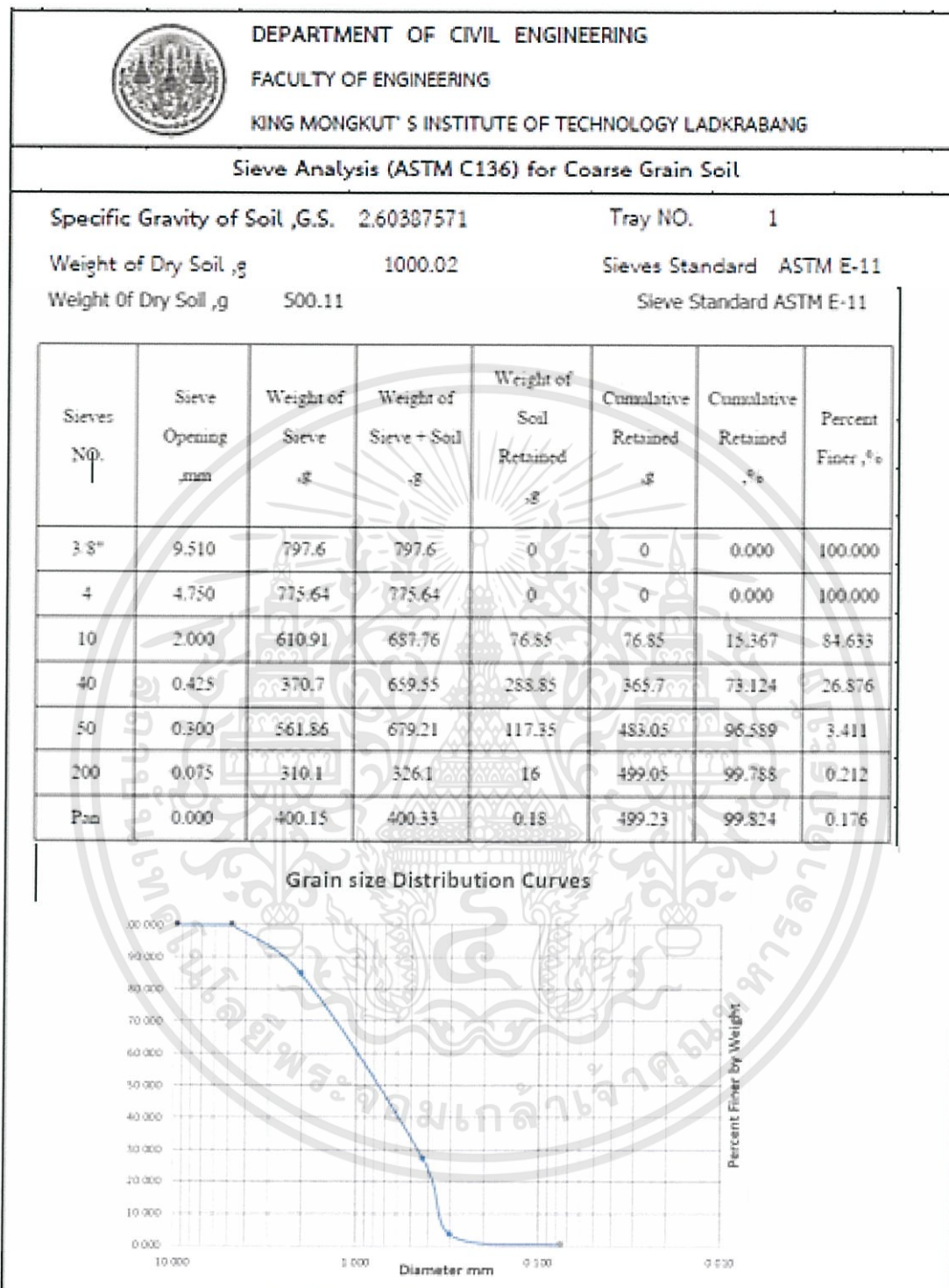
ข.2 ความถ่วงจำเพาะ (Specefic Gravity) ของทรายตัวอย่าง



รูปที่ ข.3 ความถ่วงจำเพาะของทรายตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.3 ขนาดคละและชนิดของดินตัวอย่าง (Grain Size and Soil Classification)



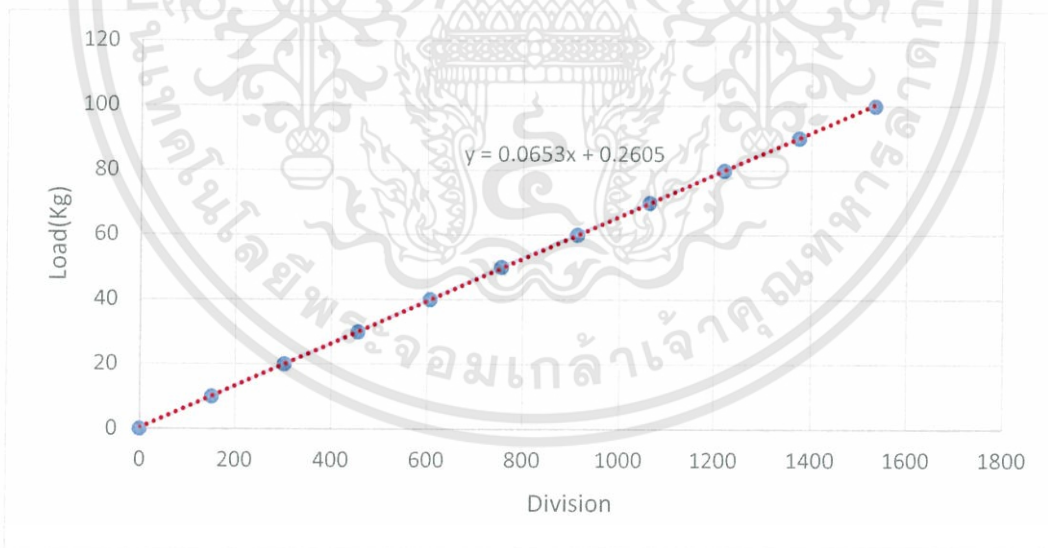
รูปที่ ข.4 ขนาดคละและชนิดของดินตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.4 ค่า Elastic modulus ของกำแพงตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ ข.1 ค่าแรงคงที่ของวงแหวนวัดแรง

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



รูปที่ ข.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและจำนวนช่องของ Proving Ring

เพื่อหาสมการเส้นตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 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

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

เพื่อหา Elastic modulus จะได้ $E = \frac{PL^3}{48\delta I}$ โดยค่า I 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

ข.5 กำลังรับแรงอัดเสาเข็มดินซีเมนต์จำลอง

ตารางที่ ข.3 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดเสาเข็มดินซีเมนต์

Age of Curing (Days)	Test No.	Percent Cement (%)	Diameter (cm ²)	Area (cm ²)	Compressive Strength		
					kN	ksc	Average (ksc)
7	1	15	5.535	24.062	4.44	18.810	17.864
	2	15	5.535	24.062	3.88	16.438	
	3	15	5.535	24.062	4.33	18.344	
14	1	15	5.535	24.062	6.56	27.791	26.986
	2	15	5.535	24.062	6.24	26.436	
	3	15	5.535	24.062	6.31	26.732	
28	1	15	5.535	24.062	7.32	31.011	30.672
	2	15	5.535	24.062	7.39	31.308	
	3	15	5.535	24.062	7.01	29.698	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ผลการทดลองจากแบบจำลอง

ค.1 ข้อมูลผลการทดลองจากแบบจำลอง

ในการทดลองครั้งนี้ได้ทำการทดลอง แบบจำลองทั้ง 6 รูปแบบ ได้แก่

1. แบบจำลองที่ 1 รูปแบบ Single wall
2. แบบจำลองที่ 2 รูปแบบ Parallel
3. แบบจำลองที่ 3 รูปแบบ Spacing at active
4. แบบจำลองที่ 4 รูปแบบ Perpendicular at active
5. แบบจำลองที่ 5 รูปแบบ Spacing at passive
6. แบบจำลองที่ 6 รูปแบบ Perpendicular at passive

เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ถูกต้องมากขึ้น จึงทำการทดลอง 2 ครั้งในแต่ละแบบจำลอง ได้

ข้อมูลการทดลองดังนี้



ตารางที่ ค.1 ผลการทดลองระยะกาเคลื่อนตัวของ แบบจำลองที่1 รูปแบบ

Single wall

ความลึก (มม.)	ครั้งที่1	ครั้งที่2	Δ เฉลี่ย (มม.)	Δ เฉลี่ย (ซม.)
	Δ (มม.)	Δ (มม.)		
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.00	0.02	0.01	0.00
2	0.34	0.24	0.29	0.03
3	0.78	0.47	0.62	0.06
4	0.88	0.65	0.76	0.08
5	1.12	0.79	0.95	0.10
6	1.27	0.87	1.07	0.11
7	1.37	1.00	1.19	0.12
8	1.61	1.17	1.39	0.14
9	1.68	1.34	1.51	0.15
10	3.07	2.27	2.67	0.27
11	4.53	3.34	3.93	0.39
12	4.63	4.65	4.64	0.46
13	4.80	5.53	5.16	0.52
14	4.99	7.10	6.05	0.60
15	5.70	9.10	7.40	0.74
16	10.95	13.00	11.97	1.20
17	13.32	15.54	14.43	1.44
18	21.59	22.10	21.84	2.18
19	30.61	31.60	31.10	3.11
20	44.69	44.38	44.53	4.45
21	59.97	56.35	58.16	5.82
22	81.59	85.46	83.53	8.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 ผลการทดลองระยะกาเคลื่อนตัวของ แบบจำลองที่2 รูปแบบ Parallel

ความลึก (มม.)	ครั้งที่1	ครั้งที่2	Δ เฉลี่ย (มม.)	Δ เฉลี่ย (ซม.)
	Δ (มม.)	Δ (มม.)		
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	1	0.46	0.21	0.02
2	2	0.69	0.28	0.03
3	3	0.92	0.36	0.04
4	4	0.98	0.47	0.05
5	5	1.21	0.55	0.06
6	6	1.32	0.64	0.06
7	7	1.44	0.74	0.07
8	8	1.67	0.79	0.08
9	9	1.78	0.89	0.09
10	10	1.90	1.12	0.11
11	11	2.01	1.68	0.17
12	12	2.36	2.08	0.21
13	13	2.47	2.25	0.22
14	14	2.53	2.86	0.29
15	15	2.87	3.52	0.35
16	16	3.10	3.90	0.39
17	17	3.62	5.20	0.52
18	18	5.35	7.13	0.71
19	19	6.15	9.75	0.98
20	20	8.10	16.09	1.61
21	21	18.16	37.91	3.79
21.5	21.5	39.66	39.66	4.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 ผลการทดลองระยะกาเคลื่อนตัวของ แบบจำลองที่3 รูปแบบ Spacing
at active

ความลึก (มม.)	ครั้งที่1	ครั้งที่2	Δ เฉลี่ย (มม.)	Δ เฉลี่ย (ซม.)
	Δ (มม.)	Δ (มม.)		
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.37	0.14	0.25	0.03
3	0.42	0.18	0.30	0.03
4	0.47	0.20	0.33	0.03
5	0.56	0.24	0.40	0.04
6	0.59	0.31	0.45	0.05
7	0.61	0.38	0.50	0.05
8	0.65	0.42	0.53	0.05
9	0.66	0.49	0.58	0.06
10	0.70	0.57	0.63	0.06
11	0.75	0.61	0.68	0.07
12	0.77	0.79	0.78	0.08
13	0.80	1.08	0.94	0.09
14	1.05	1.44	1.24	0.12
15	1.40	2.29	1.84	0.18
16	2.33	2.75	2.54	0.25
17	2.61	2.95	2.78	0.28
18	3.07	3.53	3.30	0.33
19	4.61	5.05	4.83	0.48
20	8.60	14.65	11.62	1.16
21	11.20	36.88	24.04	2.40
22	33.77	-	33.77	3.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.4 ผลการทดลองระยะกาเคลื่อนตัวของ แบบจำลองที่4 รูปแบบ

Perpendicular at active

ความลึก (มม.)	ครั้งที่1	ครั้งที่2	Δ เฉลี่ย (มม.)	Δ เฉลี่ย (ซม.)
	Δ (มม.)	Δ (มม.)		
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.14	0.33	0.23	0.02
2	0.24	0.42	0.33	0.03
3	0.30	0.59	0.45	0.04
4	0.50	0.69	0.59	0.06
5	0.71	0.87	0.79	0.08
6	1.09	0.96	1.03	0.10
7	1.30	1.09	1.19	0.12
8	2.35	1.30	1.83	0.18
9	2.99	1.52	2.26	0.23
10	3.20	1.83	2.51	0.25
11	4.34	2.44	3.39	0.34
12	5.28	2.70	3.99	0.40
13	6.93	4.13	5.53	0.55
14	7.94	6.09	7.01	0.70
15	9.69	6.96	8.32	0.83
16	12.41	11.04	11.73	1.17
17	14.96	12.46	13.71	1.37
18	17.47	15.65	16.56	1.66
19	19.89	17.74	18.81	1.88
20	29.53	21.20	25.36	2.54
21	35.58	34.11	34.85	3.48
22	-	53.91	53.91	5.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.5 ผลการทดลองระยะกาลเคลื่อนตัวของ แบบจำลองที่5 รูปแบบ Spacing
at passive

ความลึก (มม.)	ครั้งที่1	ครั้งที่2	Δ เฉลี่ย (มม.)	Δ เฉลี่ย (ซม.)
	Δ (มม.)	Δ (มม.)		
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.14	0.33	0.23	0.02
2	0.24	0.42	0.33	0.03
3	0.30	0.59	0.45	0.04
4	0.50	0.69	0.59	0.06
5	0.71	0.87	0.79	0.08
6	1.09	0.96	1.03	0.10
7	1.30	1.09	1.19	0.12
8	2.35	1.30	1.83	0.18
9	2.99	1.52	2.26	0.23
10	3.20	1.83	2.51	0.25
11	4.34	2.44	3.39	0.34
12	5.28	2.70	3.99	0.40
13	6.93	4.13	5.53	0.55
14	7.94	6.09	7.01	0.70
15	9.69	6.96	8.32	0.83
16	12.41	11.04	11.73	1.17
17	14.96	12.46	13.71	1.37
18	17.47	15.65	16.56	1.66
19	19.89	17.74	18.81	1.88
20	29.53	21.20	25.36	2.54
21	35.58	34.11	34.85	3.48
22	-	53.91	53.91	5.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.6 ผลการทดลองระยะกาเคลื่อนตัวของ แบบจำลองที่6 รูปแบบ

Perpendicular at passive

ความลึก (มม.)	ครั้งที่1	ครั้งที่2	Δ เฉลี่ย (มม.)	Δ เฉลี่ย (ซม.)
	Δ (มม.)	Δ (มม.)		
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.14	0.33	0.2305	0.02
2	0.14	0.39	0.262	0.03
3	0.20	0.45	0.3255	0.03
4	0.25	0.63	0.4395	0.04
5	0.48	0.75	0.614	0.06
6	0.59	1.34	0.9655	0.10
7	0.82	1.63	1.221	0.12
8	1.02	1.85	1.435	0.14
9	1.13	2.20	1.6645	0.17
10	1.66	2.46	2.057	0.21
11	2.38	2.93	2.654	0.27
12	3.47	3.11	3.2875	0.33
13	4.29	4.76	4.525	0.45
14	5.51	5.90	5.704	0.57
15	6.51	7.11	6.807	0.68
16	8.64	9.48	9.0615	0.91
17	9.93	11.89	10.912	1.09
18	10.95	14.02	12.488	1.25
19	14.66	18.57	16.6145	1.66
20	16.53	22.48	19.5055	1.95
21	22.20	27.76	24.982	2.50
22	32.40	35.72	34.0595	3.41

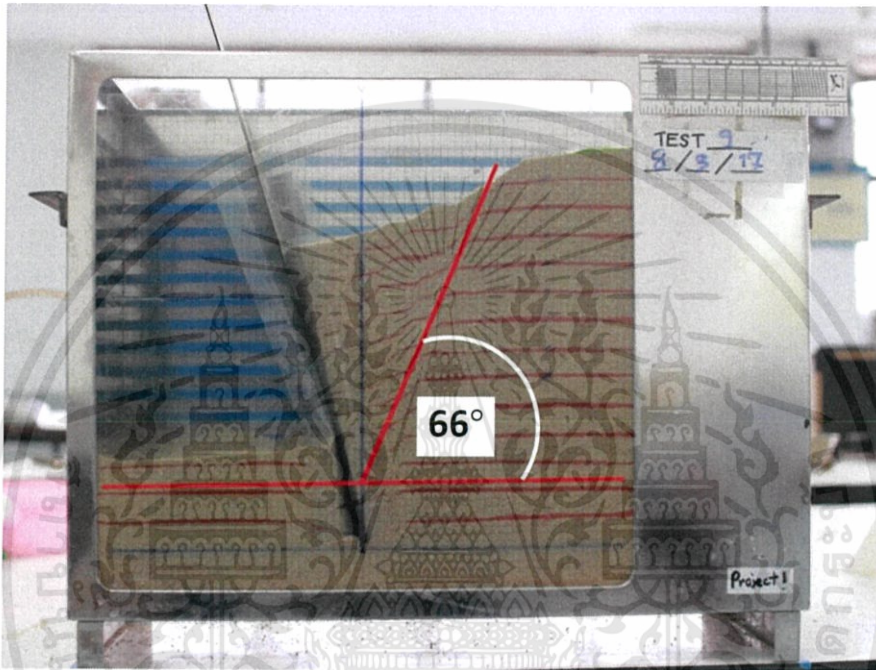
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

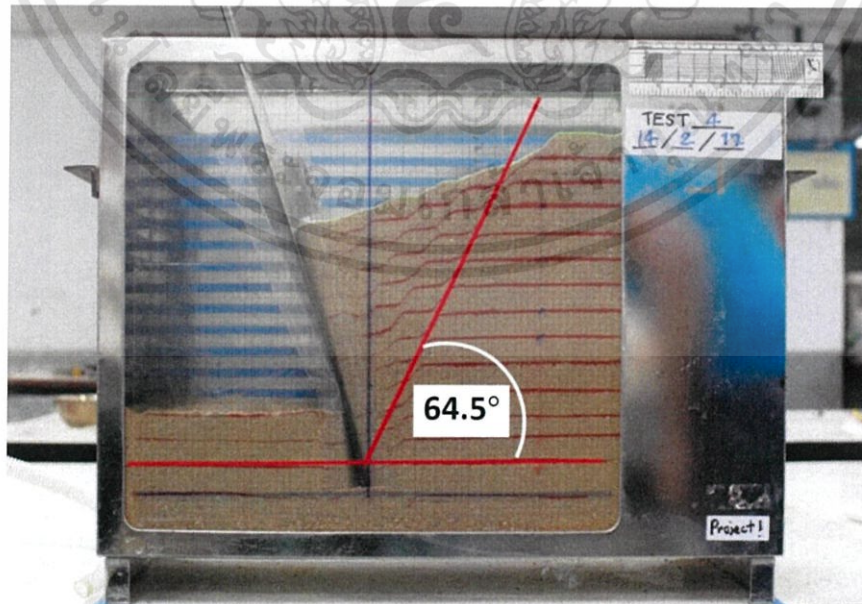
รูปภาพของแบบจำลอง

ง.1 รูปของแบบจำลองหลังเกิดการพิบัติ

ง.1.1 ระบบกำแพงกันดินจำลอง รูปแบบ Single Wall



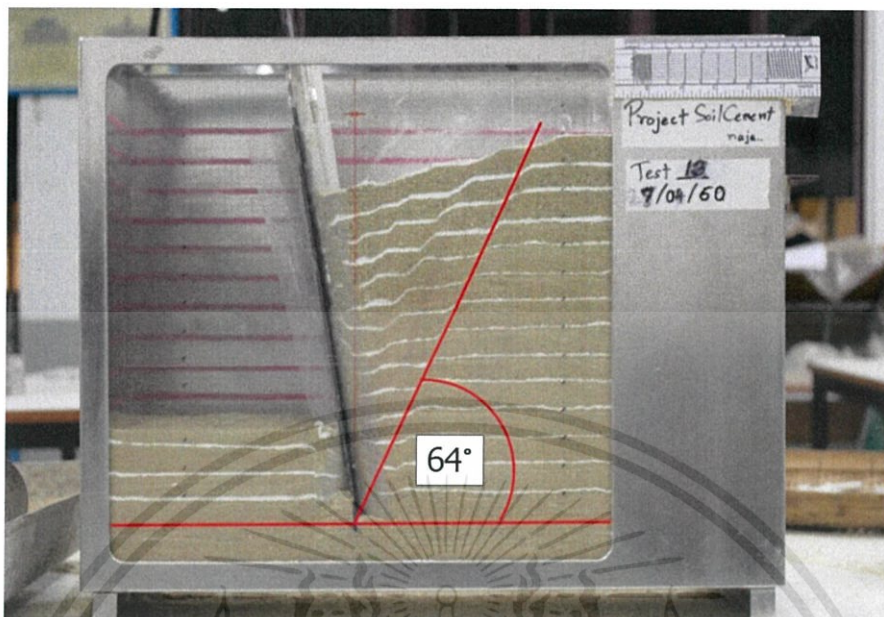
รูปที่ ง.1 มุม $45 + \frac{\phi}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง Single Wall ทดลองครั้งที่ 1



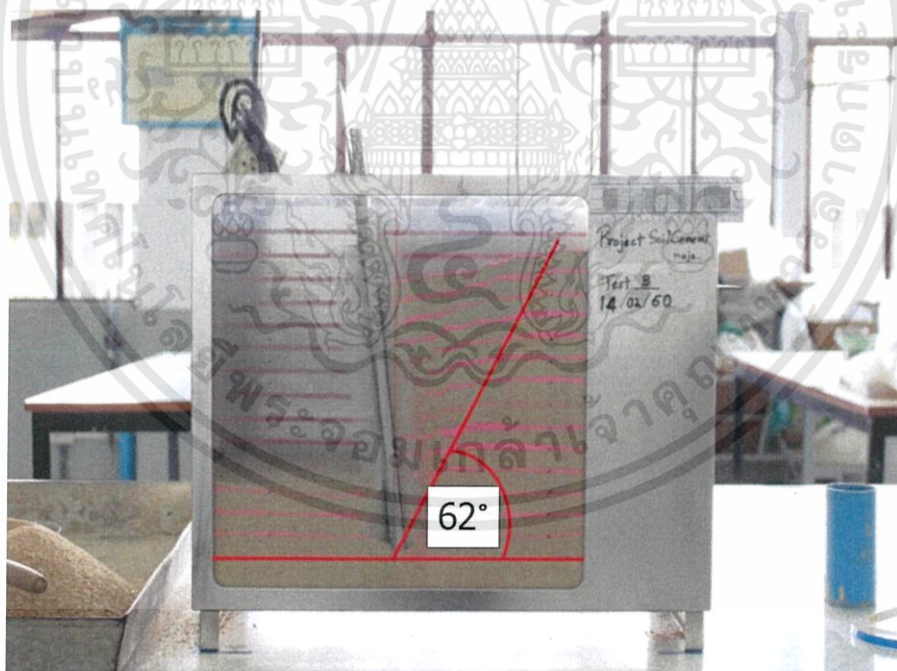
รูปที่ ง.2 มุม $45 + \frac{\phi}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง Single Wall ทดลองครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง.1.2 ระบบกำแพงกันดินจำลอง รูปแบบ Parallel



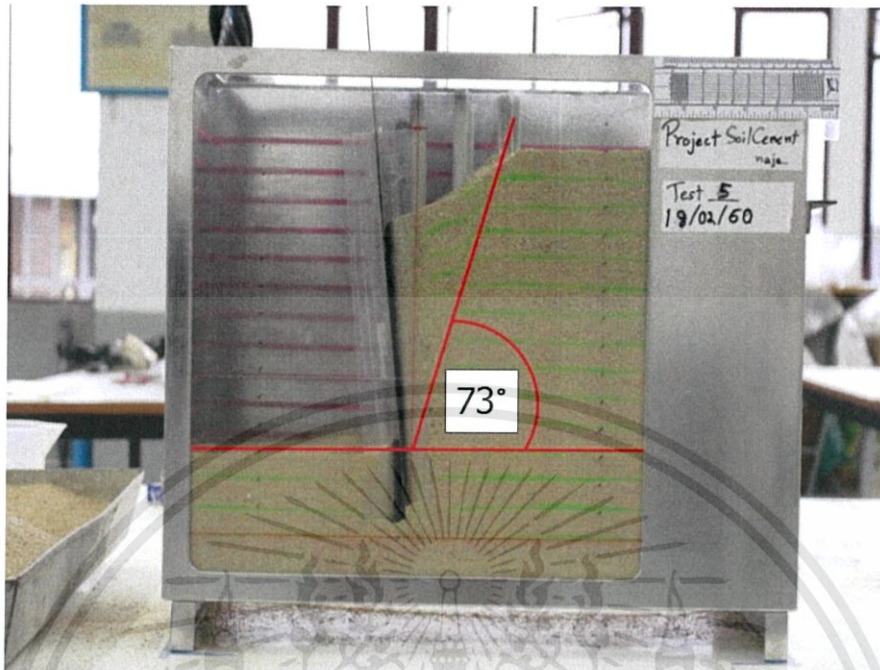
รูปที่ ง.3 มุม $45 + \frac{\phi}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง parallel ทดลองครั้งที่ 1



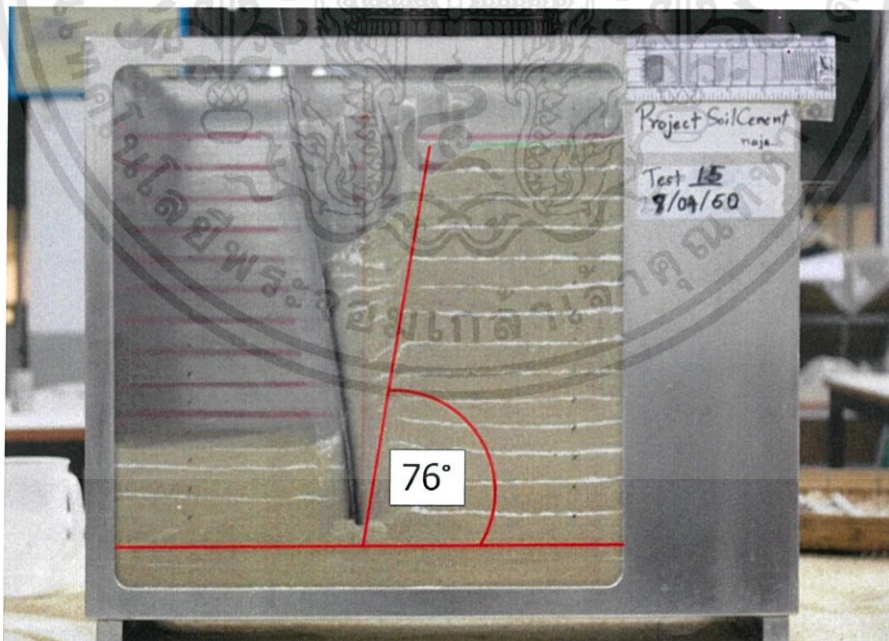
รูปที่ ง.4 มุม $45 + \frac{\phi}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง parallel ทดลองครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง1.3 ระบบกำแพงกันดินจำลอง รูปแบบ spacing at active



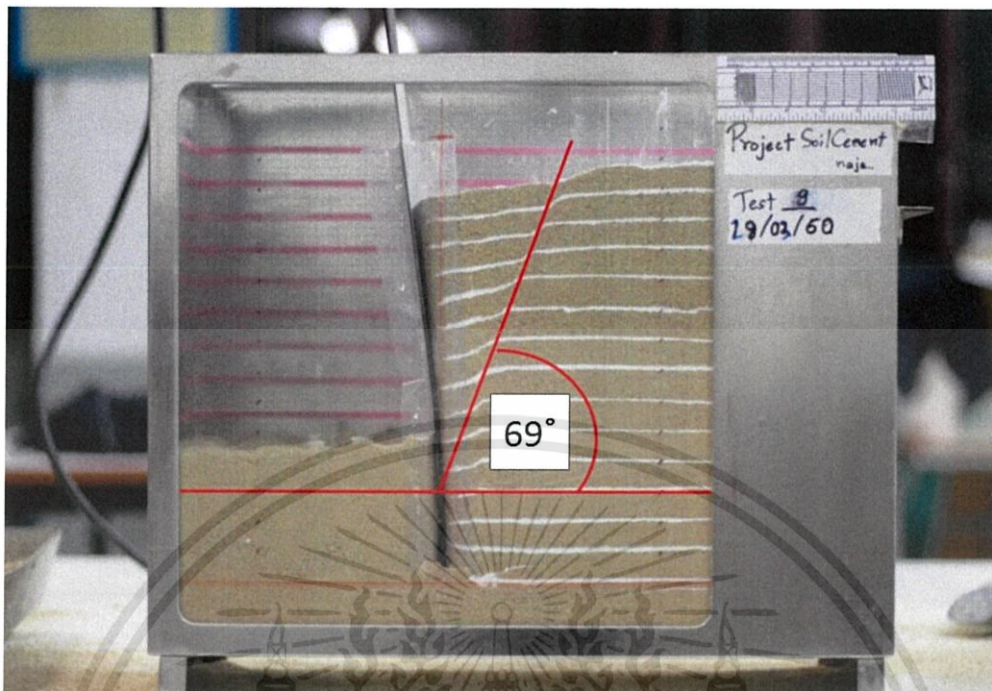
รูปที่ ง.5 มุม $45 + \frac{\phi}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง spacing at active
ทดลองครั้งที่ 1



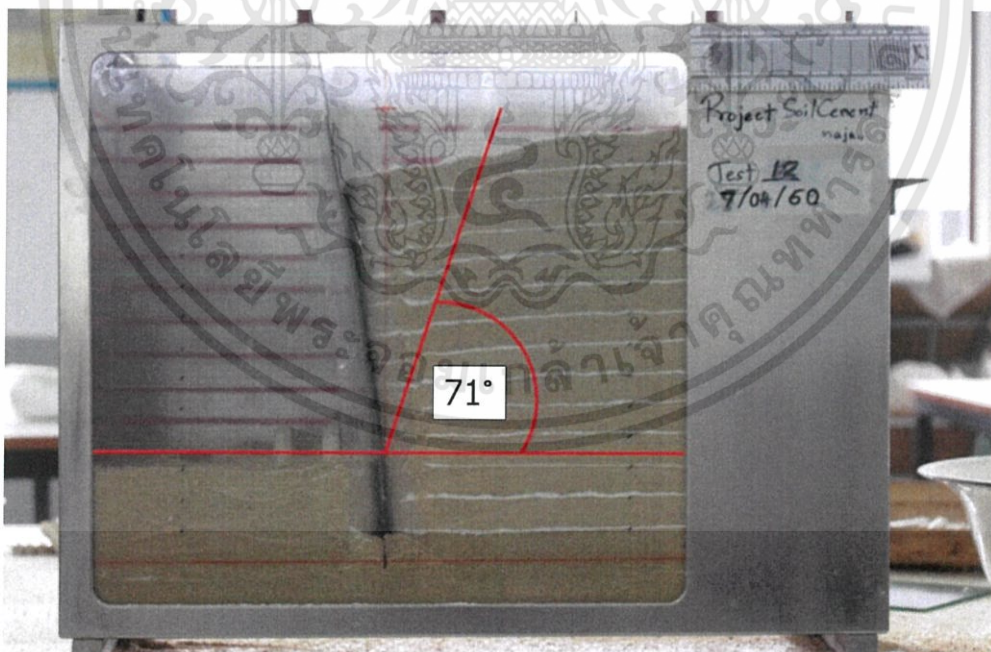
รูปที่ ง.6 มุม $45 + \frac{\phi}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง spacing at active
ทดลองครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง1.4 ระบบกำแพงกันดินจำลอง รูปแบบ spacing at passive



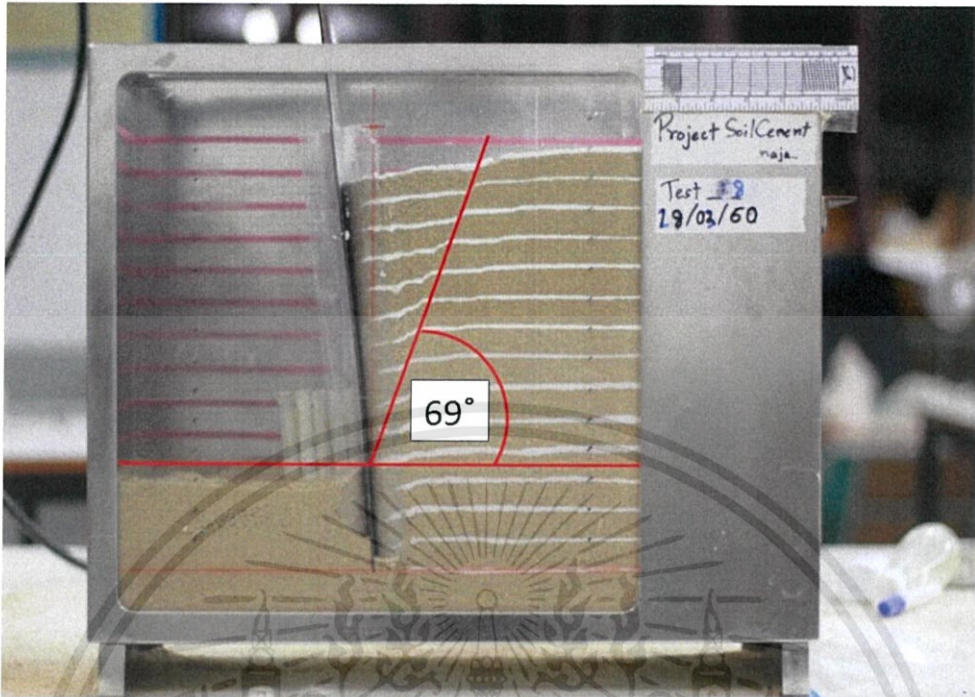
รูปที่ ง.7 มุม $45 + \frac{\phi}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง spacing at passive
ทดลองครั้งที่ 1



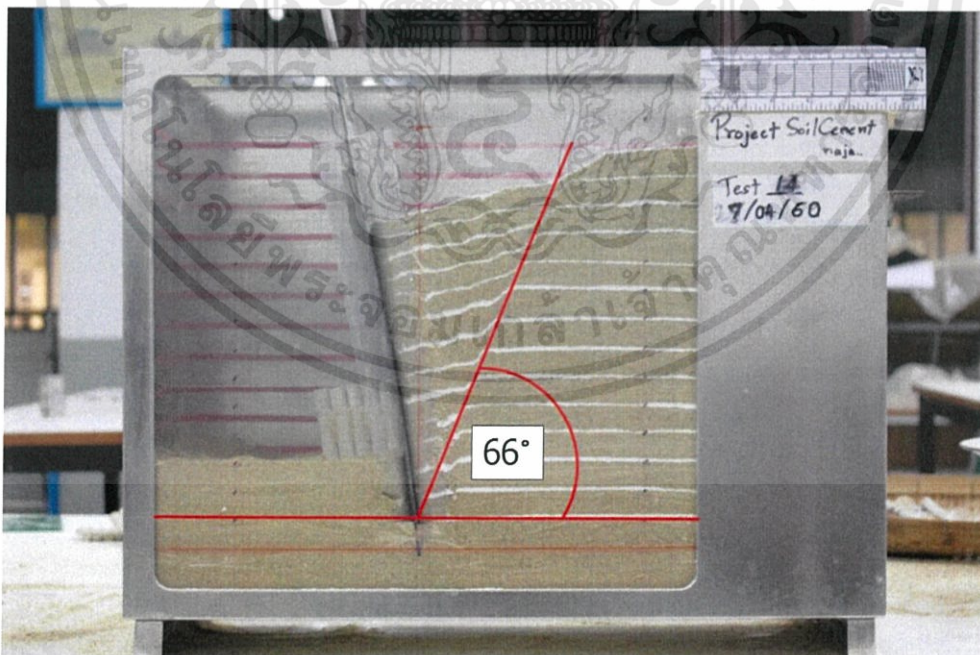
รูปที่ ง.8 มุม $45 + \frac{\phi}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง spacing at passive
ทดลองครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง1.5 ระบบกำแพงกันดินจำลอง รูปแบบ perpendicular at passive



รูปที่ ง.9 มุม $45 + \frac{\phi}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง perpendicular at passive
ทดลองครั้งที่ 1



รูปที่ ง.10 มุม $45 + \frac{\phi}{2}$ ที่เกิดขึ้นจากระนาบพิบัติของแบบจำลอง perpendicular at passive
ทดลองครั้งที่ 2

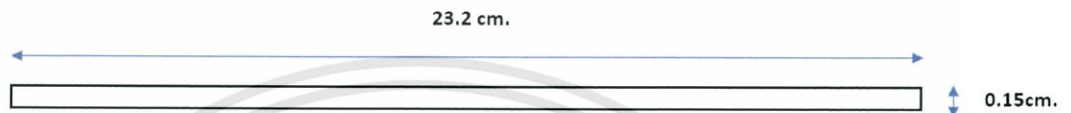
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

การคำนวณโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่

จ.1 การคำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ (Area Moment of inertia) ของหน้าตัดแต่ละรูปแบบ

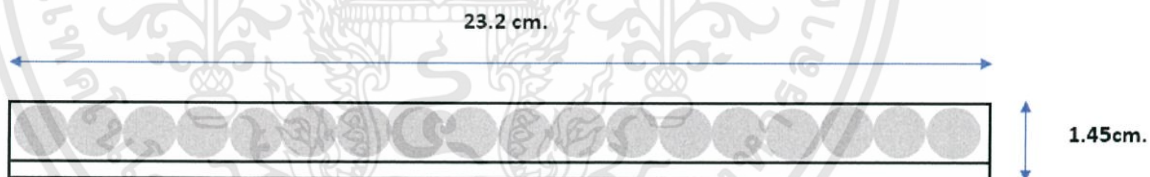
1) รูปแบบ Single wall



รูปที่ จ.1 แบบจำลองรูปแบบ Single wall

จาก $I = \frac{bh^3}{12}$ เมื่อ $b = 23.2$ เซนติเมตร และ $h = 0.15$ เซนติเมตร
จะได้ $I = \frac{(23.2)(0.15)^3}{12} = 0.006525$ เซนติเมตร⁴

2) รูปแบบจำลอง Parallel



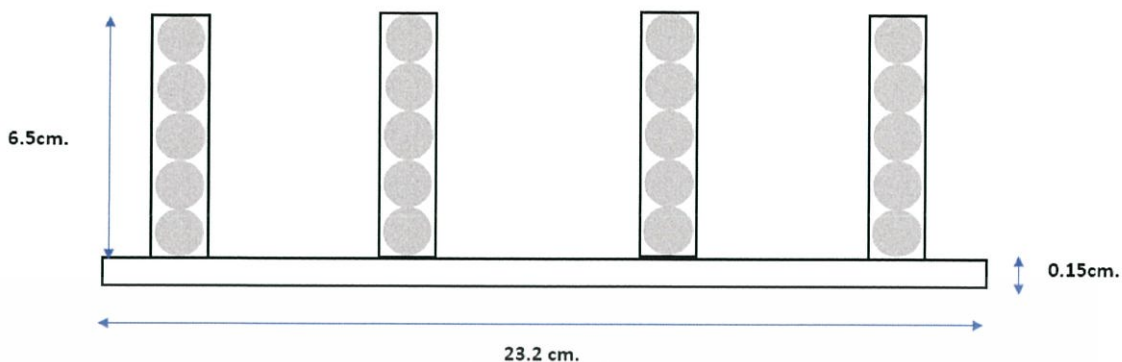
รูปที่ จ.2 แบบจำลองรูปแบบ Parallel

เมื่อ เส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มดินซีเมนต์ $d = 1.3$ เซนติเมตร

จาก $I = \frac{bh^3}{12}$ เมื่อ $b = 23.2$ เซนติเมตร และ $h = 0.15 + 1.3 = 1.45$ เซนติเมตร
จะได้ $I = \frac{(23.2)(1.45)^3}{12} = 5.894$ เซนติเมตร⁴

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) รูปแบบจำลอง Perpendicular



รูปที่ จ.3 แบบจำลองรูปแบบ Perpendicular

$$\bar{y} = \frac{(1.3 \times 6.5) \left(0.15 + \frac{6.5}{2}\right) \times 4 + (23.2)(0.15) \left(\frac{0.15}{2}\right)}{(1.3 \times 6.5) \times 4 + (23.2)(0.15)} = 3.09$$

จะได้ $C_b = 3.09$ เซนติเมตร $C_t = 3.56$ เซนติเมตร

$$I_1 = \frac{(6.5)(1.3)^3}{12} + (6.5)(1.3) \left(3.56 - \frac{6.5}{2}\right)^2$$

$$I_1 = 2.542 \text{ เซนติเมตร}^4$$

$$I_2 = \frac{(23.2)(0.15)^3}{12} + (23.2)(0.15) \left(3.09 - \frac{0.15}{2}\right)^2$$

$$I_2 = 31.640 \text{ เซนติเมตร}^4$$

$$I_{\text{รวม}} = 4 \times 2.542 + 31.640 = 41.808$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ
เกี่ยวกับภาคผนวก

ฉ.1 อัตราส่วนของระยะเคลื่อนของกำแพงกันดินต่อความลึกของการขุด

ตารางที่ ฉ.1 แสดงการคำนวณอัตราส่วนของระยะเคลื่อนของกำแพงกันดินต่อความลึกของการขุด

ความลึก H (มม)	การเคลื่อนตัวเฉลี่ย, δ (มม)						δ/H					
	single	Parallel	Spacing at active	Perpendicular at active	Spacing at passive	Perpendicular at passive	single	Parallel	Spacing at active	Perpendicular at active	Spacing at passive	Perpendicular at passive
0	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	-	-	-	-	-
1	0.012	0.212	0.000	0.157	0.231	0.231	0.212	0.000	0.157	0.231	0.231	0.212
2	0.291	0.276	0.255	0.269	0.330	0.262	0.138	0.127	0.135	0.165	0.131	0.069
3	0.624	0.361	0.298	0.366	0.445	0.326	0.120	0.099	0.122	0.148	0.109	0.040
4	0.763	0.467	0.332	0.500	0.595	0.440	0.117	0.083	0.125	0.149	0.110	0.029
5	0.954	0.551	0.397	0.613	0.788	0.614	0.110	0.079	0.123	0.158	0.123	0.022
6	1.0695	0.636	0.453	0.716	1.025	0.966	0.106	0.075	0.119	0.171	0.161	0.018
7	1.1855	0.742	0.496	0.797	1.191	1.221	0.106	0.071	0.114	0.170	0.174	0.015
8	1.389	0.785	0.532	0.854	1.829	1.435	0.098	0.066	0.107	0.229	0.179	0.012
9	1.5105	0.891	0.577	0.945	2.258	1.665	0.099	0.064	0.105	0.251	0.185	0.011
10	2.6685	1.124	0.633	1.130	2.511	2.057	0.112	0.063	0.113	0.251	0.206	0.011

ตารางที่ ฉ.1(ต่อ) แสดงการคำนวณอัตราส่วนของระยะเคลื่อนของกำแพงกันดินต่อความลึกของการขุด

ความลึก H (มม)	การเคลื่อนตัวเฉลี่ย, δ (มม)						δ/H					
	single	Parallel	Spacing at active	Perpendicular at active	Spacing at passive	Perpendicular at passive	single	Parallel	Spacing at active	Perpendicular at active	Spacing at passive	Perpendicular at passive
11	3.9335	1.676	0.678	1.211	3.387	2.654	0.152	0.062	0.110	0.308	0.241	0.014
12	4.6395	2.078	0.778	1.350	3.988	3.288	0.173	0.065	0.112	0.332	0.274	0.014
13	5.1635	2.248	0.940	1.532	5.529	4.525	0.173	0.072	0.118	0.425	0.348	0.013
14	6.0455	2.863	1.241	1.659	7.012	5.704	0.205	0.089	0.119	0.501	0.407	0.015
15	7.3995	3.521	1.840	1.763	8.322	6.807	0.235	0.123	0.118	0.555	0.454	0.016
16	11.9735	3.902	2.537	1.855	11.727	9.062	0.244	0.159	0.116	0.733	0.566	0.015
17	14.43	5.196	2.776	1.935	13.706	10.912	0.306	0.163	0.114	0.806	0.642	0.018
18	21.843	7.126	3.302	1.987	16.559	12.488	0.396	0.183	0.110	0.920	0.694	0.022
19	31.103	9.753	4.827	2.107	18.814	16.615	0.513	0.254	0.111	0.990	0.874	0.027
20	44.533	16.087	11.622	2.188	25.363	19.506	0.804	0.581	0.109	1.268	0.975	0.040
21	58.1595	37.911	24.038	2.535	34.846	24.982	1.805	1.145	0.121	1.659	1.190	0.086
22	83.527	39.655	33.767	2.785	53.913	34.060	1.803	1.535	0.127	2.451	1.548	0.082
23				3.027					0.132			
24				3.473					0.145			
25				4.060					0.162			
26				4.493					0.173			