

การศึกษาเสถียรภาพภายในของกำแพงกันดินในชั้นทราย
A PHYSICAL MODELING STUDYING THE INTERNAL STABILITY
OF A RETAINING WALL



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2561

การศึกษาเสถียรภาพภายในของกำแพงกันดินในชั้นทราย
A PHYSICAL MODELING STUDYING THE INTERNAL STABILITY
OF A RETAINING WALL



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A PHYSICAL MODELING STUDYING THE INTERNAL STABILITY
OF A RETAINING WALL



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 2018


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาเสถียรภาพภายในของกำแพงกันดินในชั้นทราย
A Physical Model Studying the Internal Stability of a Sand Retaining Wall

นักศึกษา นายณภัทร เกษหอม รหัสนักศึกษา 58010339
นางสาวพัชรนันท์ ทิพรัตน์ รหัสนักศึกษา 58010855
นางสาวพัชรพร สุขอรุณ รหัสนักศึกษา 58010858

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ธนาตล คงสมบูรณ์

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ธนาตล	คงสมบูรณ์	
อ.อุษะ	ศิริแก้ว	
ดร.ศลิษา	ไชยพุทธ	
ดร.ประทีป	หล่อประเสริฐ	
ดร.วิรุฬห์	คำชุม	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว



(ผศ.ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่.....

การศึกษาเสถียรภาพภายในของกำแพงกันดินในชั้นทราย

นายณภัทร เกษหอม รหัสประจำตัว 58010339

นางสาวพัชรนันท์ ทิพารัตน์ รหัสประจำตัว 58010855

นางสาวพัชรพร สุขอรุณ รหัสประจำตัว 58010858

ผศ.ดร. ชนาดล คงสมบูรณ์

ปีการศึกษา 2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของชั้นทรายและการวิบัติของกำแพงกันดินขณะที่ใช้แผ่นวัสดุเสริมกำลัง Geotextile โดยในแบบจำลองนี้ได้ใช้กระดาษหนังสือพิมพ์แทน Geotextile รวมทั้งศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องแล้วนำไปคำนวณหาอัตราส่วนความปลอดภัยจากการสมมติความยาวของหนังสือพิมพ์และความสูงของชั้นทราย โดยได้แบ่งการทดสอบเป็น 2 กรณี ที่ความสูงของชั้นทราย 4 เซนติเมตรเท่ากัน แต่ความยาวของหนังสือพิมพ์เป็น 6 และ 8 เซนติเมตรตามลำดับ แล้วเปรียบเทียบจำนวนชั้นทรายที่เกิดการวิบัติรวมทั้งสังเกตลักษณะการเกิดการวิบัติของทราย

A PHYSICAL MODELING STUDYING THE INTERNAL STABILITY OF A SAND RETAINING WALL

Mr. Napat Kethom Student ID. 58010339

Ms. Patcharanan Tiparat Student ID. 58010855

Ms. Patcharaporn Sukaroon Student ID. 58010858

Asst.Prof.Dr.Thanadol Kongsomboon

Academic Year 2018

Abstract

This study aims to investigate the interval failure of the sand retaining wall. Newspaper is used instead of using geotextile as the reinforcement. The physical model is a steel box with 23.5 cm width, 35 cm length and 40 cm height. The experiment is done by varying the reinforcement a spacing and length. Related parameters is also studied to determine the factor of safety (FS). Varied by newspaper lengths is done in 2 cases. One is at 4 cm spacing and 6 cm length. Another is 4 cm spacing and and 8 cm length. The result compares the number of collapsed sand layers and collapsed sand patterns.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.ธนาตล คงสมบูรณ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ รวมทั้งสละเวลาให้ความช่วยเหลือและให้ความรู้ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่การทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้นี้ คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ในทุกๆรายวิชาซึ่งเป็นความรู้พื้นฐานในการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อให้ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี รวมทั้งให้ความรู้เพิ่มเติม ให้คำแนะนำ และให้กำลังใจเป็นอย่างดีแก่คณะผู้จัดทำ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้การสนับสนุนด้านการศึกษา ตลอดจนให้ความรัก ความเอาใจใส่ และให้กำลังใจแก่คณะผู้จัดทำเป็นอย่างดีตลอดมา คณะผู้จัดทำซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างสูง

ณภัทร

พัชรนันท์

พัชรพร

เกษหอม

ทิพารัตน์

สุชอรุณ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แรงดันดินด้านข้าง.....	4
2.2 โครงสร้างกันดิน.....	11
2.3 เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพโครงสร้างกันดิน.....	31
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	37
3.1 บทนำ.....	37
3.2 คุณสมบัติของดินตัวอย่างและกระดาษหนังสือพิมพ์ในแบบจำลองในแบบจำลอง.....	37
3.3 Geotextile ในแบบจำลอง.....	46
3.4 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา.....	46
3.5 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย.....	48
บทที่ 4 ผลการศึกษา.....	50
4.1 บทนำ.....	50
4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของทรายที่ใช้ในการศึกษา.....	50

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลการทดสอบเพื่อหาค่า Maximum Tensil Stress ของแผ่นกระดาษหนังสือพิมพ์ ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา.....	53
4.4 ผลการทดสอบเพื่อหาค่ามุมเสียดทานภายในระหว่างดินถมบดอัดและวัสดุเสริมกำลัง...	54
4.5 ผลการศึกษาจากแบบจำลอง.....	56
4.6 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการพังของกำแพงกันดิน.....	63
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา.....	65
5.1 บทนำ.....	65
5.2 สรุปผลการทดลอง.....	65
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	66
เอกสารอ้างอิง.....	67
ภาคผนวก ก.....	68
ภาคผนวก ข.....	69
ภาคผนวก ค.....	76
ภาคผนวก ง.....	77
ภาคผนวก จ.....	78

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	คุณสมบัติของดินที่เหมาะสมในการบดอัด.....	15
ตารางที่ 4.1	ข้อมูลขนาดคละและชนิดของเม็ดดิน.....	52
ตารางที่ 4.2	ผลการทดสอบ Direct shear.....	53
ตารางที่ 4.3	ข้อมูล Calibration of Pycnometer.....	54
ตารางที่ 4.4	ข้อมูลความถ่วงจำเพาะของทราย.....	55
ตารางที่ 4.5	ผลการทดสอบ Maximum tensile stress.....	56
ตารางที่ 4.6	ผลการทดสอบเพื่อหาแรงดึงสูงสุดที่ทำให้กระดาษหนังสือพิมพ์เกิดการวิบัติ.....	57
ตารางที่ 4.7	ผลการทดสอบค่ามุมเสียดทานภายในระหว่างดินถมบดอัดและวัสดุเสริมกำลัง.....	58
ตารางที่ 4.8	ความยาวของวัสดุเสริมกำลังกับความสูงของกำแพงกันดินที่ทำให้เกิดการวิบัติ.....	59
ตารางที่ 4.9	ผลการทดสอบของแบบจำลองที่ 1.....	60
ตารางที่ 4.10	ภาพการทดสอบของแบบจำลองที่ 1.....	61
ตารางที่ 4.11	ผลการทดสอบของแบบจำลองที่ 2.....	62
ตารางที่ 4.12	ภาพการทดสอบของแบบจำลองที่ 2.....	63
ตารางที่ 4.13	ผลการทดสอบของแบบจำลองที่ 3.....	64
ตารางที่ 4.14	ภาพการทดสอบของแบบจำลองที่ 3.....	64
ตารางที่ 4.15	อัตราส่วนความปลอดภัยของแต่ละแบบจำลอง.....	66
ตารางที่ ข.1	ค่าแรงคงที่ของวงแหวนวัดแรง.....	71
ตารางที่ ข.2	ผลการทดสอบและการคำนวณเพื่อหาค่า Elastic modulus.....	73
ตารางที่ ค.1	แสดงผลการทดสอบของแบบจำลองที่ 1 ระยะ 6 : 4 : 5.....	78
ตารางที่ ค.2	แสดงผลการทดสอบของแบบจำลองที่ 2 ระยะ 8 : 4 : 5.....	78
ตารางที่ ค.3	แสดงผลการทดสอบของแบบจำลองที่ 3 ระยะ 6 : 2 : 5.....	78

สารบัญรูป

	หน้า
รูปภาพที่ 2.1 แรงดันดินด้านข้างในสภาวะ Active [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553].....	4
รูปภาพที่ 2.2 แรงดันดินด้านข้างในสภาวะ Passive [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553].....	4
รูปภาพที่ 2.3 ความดันดินที่ความลึก Z [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553].....	5
รูปภาพที่ 2.4 การกระจายความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่งและความดันน้ำ [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553].....	5
รูปภาพที่ 2.5 Rankine active state [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553].....	6
รูปภาพที่ 2.6 รูปภาพที่ 2.6 Rankine passive state [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553].....	6
รูปภาพที่ 2.7 Back side vertical [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553].....	7
รูปภาพที่ 2.8 Back side inclined [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553].....	7
รูปภาพที่ 2.9 วงกลมมอร์สสถานะของความเค้นประสิทธิผลที่รสภาวะ [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553].....	7
รูปภาพที่ 2.10 วงกลมมอร์สสถานะของความเค้นประสิทธิผลที่ 3 สภาวะ [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553].....	8
รูปภาพที่ 2.11 แผนภูมิแรงดัน [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553].....	9
รูปภาพที่ 2.12 แบบจำลองทฤษฎีของ coulomb [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2553].....	10
รูปภาพที่ 2.13 กำแพงกันดิน [Das, 1999].....	12
รูปภาพที่ 2.14 กำแพงเข็มพืด [Das, 1999].....	12
รูปภาพที่ 2.15 เติมทรายแห้งให้เต็มถึง ABCD [Gulhati and Datta, 2005].....	13
รูปภาพที่ 2.16 เปิดฝา AB ดินจะพังทลาย [Gulhati and Datta, 2005].....	13
รูปภาพที่ 2.17 ใส่วัสดุเสริมกำลังในถัง ABCD [Gulhati and Datta, 2005].....	13
รูปภาพที่ 2.18 เปิดฝา AB ดินจะไม่พังทลายเนื่องจากการใส่วัสดุเสริมกำลัง [Gulhati and Datta, 2005].....	13
รูปภาพที่ 2.19 ตัวอย่างที่ไม่เสริมกำลัง [Gulhati and Datta, 2005].....	14
รูปภาพที่ 2.20 ตัวอย่างที่เสริมกำลัง [Gulhati and Datta, 2005].....	14
รูปภาพที่ 2.21 ความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกน.....	14
รูปภาพที่ 2.22 ส่วนประกอบของกำแพงกันดิน [ดร.ศลิษา ไชยพุทธ].....	15

สารบัญญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปภาพที่ 2.23	ดินถมที่ควบคุมคุณภาพการบดอัด [http://www.overpassaran.com].....	15
รูปภาพที่ 2.24	ผิวหน้าของกำแพงกันดิน [http://www.mseplus.com/].....	16
รูปภาพที่ 2.25	แถบวัสดุเสริมกำลัง [https://www.geosynthetica.net].....	16
รูปภาพที่ 2.26	แสดงวัสดุเสริมกำลังที่มีการค่าการยึดต่ำ [http://www.dot.state.oh.us].....	17
รูปภาพที่ 2.27	แสดงวัสดุเสริมกำลังที่มีการค่าการยึดต่ำ [https://www.fhwa.dot.gov].....	17
รูปภาพที่ 2.28	แสดงวัสดุเสริมกำลังที่ยึดตัวได้ [http://www.bostd.com].....	17
รูปภาพที่ 2.29	แสดงการตรวจสอบการลื่นไถล [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2556].....	18
รูปภาพที่ 2.30	แสดงการตรวจสอบการพลิกคว่ำ [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2556].....	18
รูปภาพที่ 2.31	แสดงการตรวจสอบกำลังรับแรงแบกทาน [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2556].....	19
รูปภาพที่ 2.32	แสดงการตรวจสอบเสถียรภาพทั้งระบบ [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2556].....	19
รูปภาพที่ 2.33	แสดงแรงที่กระทำต่อกำแพงกันดินเสริมกำลัง [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2556].....	20
รูปภาพที่ 2.34	แสดงลักษณะการกระจายความเค้นในดินใต้ฐานราก เมื่อ $e = 0$ [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2556].....	21
รูปภาพที่ 2.35	แสดงลักษณะการกระจายความเค้นในดินใต้ฐานราก เมื่อ $e = B/6$ [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2556]	22
รูปภาพที่ 2.36	แสดงลักษณะการกระจายความเค้นในดินใต้ฐานราก เมื่อ $(e = B/4)$ [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2556].....	22
รูปภาพที่ 2.37	แสดงการวิบัติจากการฉีกขาด [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2556].....	23
รูปภาพที่ 2.38	แสดงการวิบัติจากแรงฉุด [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2556].....	24
รูปภาพที่ 2.39	แสดงระนาบการวิบัติของกำแพงกันดินเสริมกำลังด้วยวัสดุที่มีความยืดหยุ่น [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2556].....	25
รูปภาพที่ 2.40	แสดงระนาบการวิบัติของกำแพงกันดินเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมกำลังที่มีค่า การยึดตัวต่ำ [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2556].....	25
รูปภาพที่ 2.41	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างกับความลึก สำหรับเหล็กเสริมชนิดต่างๆ (Christopher et al., 1989).....	26
รูปภาพที่ 2.42	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความดันดินด้านข้างกับความลึกสำหรับ เหล็กเสริมทุกชนิด (AASHTO's Standard Specifications Highway Bridge Section 5.8).....	27

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปภาพที่ 2.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความดันดินด้านข้างกับความลึกสำหรับเหล็กเสริมทุก [ดร.ศลิษา ไชยพุทธ].....	29
รูปภาพที่ 2.44 แสดงชนิดที่ผลิตจาก Polypropylene.....	32
รูปภาพที่ 2.45 แสดงชนิดที่ผลิตจาก Polyester.....	32
รูปภาพที่ 2.46 แสดง Woven geotextile.....	33
รูปภาพที่ 2.47 แสดง geogrids.....	33
รูปภาพที่ 2.48 แสดง Geonets.....	33
รูปภาพที่ 2.49 แสดง Geomembrane.....	34
รูปภาพที่ 2.50 แสดง GCL.....	35
รูปภาพที่ 2.51 แสดง Geofoam.....	35
รูปภาพที่ 2.52 แสดง Geocells.....	35
รูปภาพที่ 2.53 แสดง Geocomposites.....	36
รูปภาพที่ 3.1 การทดสอบ Grain Size Analysis ของทรายตัวอย่าง.....	40
รูปภาพที่ 3.2 อุปกรณ์ในการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน.....	41
รูปภาพที่ 3.3 แสดงการ calibrate pycnometer.....	42
รูปภาพที่ 3.4 แสดงการหาความถ่วงจำเพาะที่ใช้งาน.....	42
รูปภาพที่ 3.5 การทดสอบ Direct Shear เพื่อหามุมเสียดทานภายใน.....	46
รูปภาพที่ 3.6 การวัดมุมจากการโรยทรายให้ตกอย่างอิสระ.....	46
รูปภาพที่ 3.7 การออกแบบระยะของแบบจำลองที่ 1 6-4-5 เซนติเมตร.....	48
รูปภาพที่ 3.8 การออกแบบระยะของแบบจำลองที่ 2 8-4-5 เซนติเมตร.....	48
รูปภาพที่ 3.9 การออกแบบระยะของแบบจำลองที่ 3 6-2-5 เซนติเมตร.....	48
รูปภาพที่ 3.10 แสดงอุปกรณ์ปล่อยทราย (Sand Dropper).....	49
รูปภาพที่ 3.11 แสดงกล่องแบบจำลอง ขนาด 53x24x40 เซนติเมตร.....	49
รูปภาพที่ 3.12 ทรายตัวอย่าง และทรายสี.....	50
รูปภาพที่ 3.13 ฉากกัน.....	50
รูปภาพที่ 3.14 กล่องแบบจำลองแสดนเลส.....	50
รูปภาพที่ 3.15 กระดาษหนังสือพิมพ์.....	50
รูปภาพที่ 3.16 การเททรายลงในแบบจำลองบริเวณผิวหน้าของกำแพงกันดิน.....	51
รูปภาพที่ 4.1 แสดงกราฟ Mohr's Diagram จากผลการทดสอบ Direct Shear.....	53
รูปภาพที่ 4.2 แสดงการตกลงอย่างอิสระของทรายตัวอย่าง.....	54

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปภาพที่ 4.3	แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ กับ น้ำหนักมวลระหว่างแก้วกับน้ำ..... 55
รูปภาพที่ 4.4	ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความยาวหนังสือพิมพ์ และ แรงดึงสูงสุด..... 56
รูปภาพที่ 4.5	แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและการเคลื่อนตัวของ กระดาษหนังสือพิมพ์..... 58
รูปภาพที่ 4.6	กราฟ Mohr's Diagram จากผลการทดสอบหาค่ามุมเสียดทานภายในระหว่าง ดินถมบดอัดและวัสดุเสริมกำลัง..... 58
รูปภาพที่ 4.7	แสดงมุมระนาบการวิบัติของกำแพงกันดิน..... 65
รูปภาพที่ ข.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและจำนวนช่องของ Proving Ring เพื่อหาสมการเส้นตรง..... 71
รูปภาพที่ ง.1	แสดงการทดสอบแบบจำลองกำแพงกันดิน กรณีที่ 1 สูง 4 เซนติเมตร..... 79
รูปภาพที่ ง.2	แสดงการทดสอบแบบจำลองกำแพงกันดิน กรณีที่ 2 สูง 8 เซนติเมตร..... 79
รูปภาพที่ ง.3	แสดงการทดสอบแบบจำลองกำแพงกันดิน กรณีที่ 2 สูง 12 เซนติเมตร..... 80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการวิบัติของลาดดินในงานก่อสร้างนั้นมีหลายรูปแบบ อาทิ การพังทลายของลาดคันดิน ลาดเชิงเขา การทรุดตัวของฐานรากที่วางบนดิน ฯลฯ มีสาเหตุมาจากหลายๆปัจจัย ได้แก่ คุณสมบัติทางธรณีวิทยาของดินแต่ละชนิด คุณสมบัติการต้านทานแรงเฉือน และการซึมผ่านของน้ำในชั้น ซึ่งส่งผลให้เสถียรของดินลดลง นำไปสู่การวิบัติของดิน เนื่องจากความซับซ้อนของคุณสมบัติของดิน ที่มีคุณสมบัติไม่แน่นอนในสภาพธรรมชาติ ดังนั้น จึงมีผู้นำเสนอทฤษฎีต่างๆ ขึ้นมาเพื่อคาดเดาพฤติกรรมของดินกับสภาพปัญหาที่แตกต่างออกไป วิศวกรจึงต้องใช้ทั้งความรู้ประสบการณ์ และ วิจารณ์ญาณ แก้ไขปัญหาอย่างเหมาะสม

การเสริมกำลังของดินเพื่อแก้ไขปัญหาวินิจฉัยการวิบัติของดินโดยใช้กำแพงกันดินเสริมกำลัง (Mechanically Stabilized Earth หรือ MSE) ประกอบกับการใช้วัสดุเสริมกำลังวางแทรกระหว่างชั้นดิน เพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลดิน และช่วยถ่ายแรงที่เกิดจากน้ำหนักมวลดินกดทับ ซึ่งในปัจจุบันมีผู้ที่มีความรู้และเชี่ยวชาญพัฒนาการคำนวณและออกแบบกำแพงกันดินเสริมกำลังเพื่อลดปัญหาดังกล่าว แต่ในทางปฏิบัติ การคำนวณเพื่อหาค่าตอบว่าโครงสร้างกันดินพึงจะมีการเคลื่อนตัวเท่าไร ไม่สามารถคำนวณได้ผลที่แม่นยำ หรือ ยังไม่สามารถเข้าใจถึงพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวที่แน่ชัด จึงนำไปสู่การศึกษาด้วยแบบจำลองการวิบัติของกำแพงกันดินเสริมกำลัง เพื่อศึกษาการวิบัติของดินที่เกิดขึ้นในแต่ละรูปแบบ ศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความยาวของแผ่นวัสดุเสริมกำลัง ระยะห่างของวัสดุเสริมกำลัง และ ระดับความสูงของคันดิน ซึ่งนำมาพิจารณาหาความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับระนาบการวิบัติ เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมเคลื่อนตัว และการวิบัติของกำแพงกันดิน การใช้แบบจำลองจึงมีบทบาทสำคัญต่อการศึกษาทางวิศวกรรมธรณีเทคนิค เพื่อศึกษาพฤติกรรมและลักษณะการวิบัติของดินได้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาหาความยาวของแผ่นวัสดุเสริมกำลัง Geotextile และความสูงของชั้นทรายที่ส่งผลให้เกิดการวิบัติของกำแพงกันดิน
- 2) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของชั้นทรายและการวิบัติของกำแพงกันดินขณะที่ใช้แผ่นวัสดุเสริมกำลัง Geotextile
- 3) เพื่อศึกษากระบวนการวิบัติของกำแพงกันดินขณะที่ใช้แผ่นวัสดุเสริมกำลัง Geotextile
- 4) เพื่อศึกษาเสถียรภาพภายในของกำแพงกันดิน ได้แก่ การทดสอบกำลังต้านทานการฉีกขาด (Rupture Resistance) และการตรวจสอบกำลังต้านทานแรงฉุด (Pullout Resistance) ของแผ่นวัสดุเสริมกำลัง Geotextile

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1) การศึกษาโดยใช้แบบจำลองขนาด 24x53x44 เซนติเมตร
- 2) ดินตัวอย่างเป็นทรายที่ผ่านการอบเพื่อกำจัดน้ำในเม็ดทรายและมีขนาดคละ ผ่านตะแกรงเบอร์ 10
 - 2.1) ใช้วิธีร่อนผ่านตะแกรง (sieve analysis) ASTM D442-63 เพื่อหาขนาดคละของทราย
 - 2.2) ใช้วิธีการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (direct shear test) ASTM 3080 เพื่อหาค่ามุมเสียดทานภายใน
 - 2.3) ใช้วิธีหาค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity of soil) ASTM D854-00 เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดทราย
 - 2.4) การปล่อยทรายลงในแบบจำลอง ใช้อุปกรณ์ปล่อยทรายเพื่อให้ทรายตกอย่างอิสระและสม่ำเสมอตลอดหน้าตัด
- 3) ใช้กระดาษหนังสือพิมพ์ ยี่ห้อไทยรัฐ เป็นแบบจำลองแผ่น Geotextile
- 4) ใช้ฉากกั้น เพื่อกันผิวหน้าของกำแพงกันดิน
- 5) ไม่ศึกษาผลของแรงดันน้ำ และน้ำหนักกดทับ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เรียนรู้วิธีการสร้างแบบจำลองทางกายภาพ และการกำหนดตัวแปรที่มีผลต่อการวิบัติของกำแพงกันดิน
- 2) ได้วิเคราะห์และเข้าใจถึงพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของทราย และการวิบัติของกำแพงกันดินขณะที่ใช้แผ่นวัสดุเสริมกำลัง Geotextile
- 3) เข้าใจถึงความสัมพันธ์ของความยาวของแผ่นวัสดุเสริมกำลัง Geotextile และความสูงของชั้นทรายที่ส่งผลให้เกิดการวิบัติของกำแพงกันดิน
- 4) ฝึกฝนการวางแผนการทำงาน และการทำงานร่วมกันเป็นกลุ่ม
- 5) สามารถนำหลักการนี้ไปพัฒนาต่อเพื่อใช้ในการก่อสร้างจริง ซึ่งจะสามารถลดค่าใช้จ่ายของกำแพงกันดินได้



บทที่ 2

เอกสารที่เกี่ยวข้อง

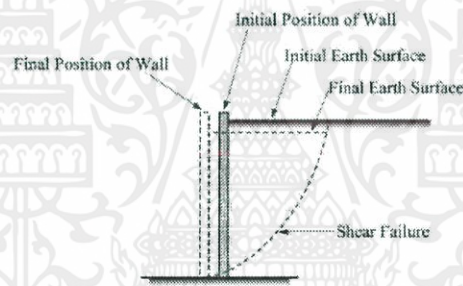
2.1 แรงดันดินด้านข้าง (Lateral Pressure)

2.1.1 การวิเคราะห์และการหาค่าแรงดันด้านข้างของดิน

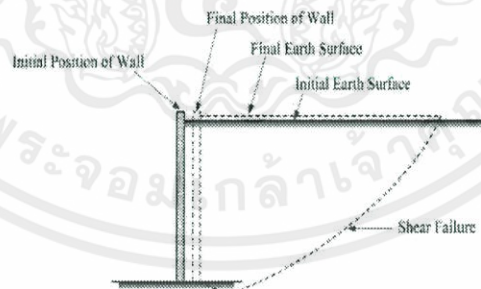
การวิเคราะห์และการหาค่าแรงดันด้านข้างของดินเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากสำหรับการออกแบบกำแพง กั้นดินและโครงสร้างกั้นดินต่างๆ ขนาดและทิศทางของแรงดันด้านข้างเป็นข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการออกแบบกำแพงกั้นดินหรือโครงสร้างกั้นดินต่างๆ ใหม่อัตราสวนปลอดภัยมากเพียงพอ

โดยแรงดันดินด้านข้างแบ่งเป็น 3 ประเภท

1. ความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่ง (At rest earth pressure)
2. ความดันดินที่สภาวะ Active (Active earth pressure)
3. ความดันดินที่สภาวะ Passive (Passive earth pressure)

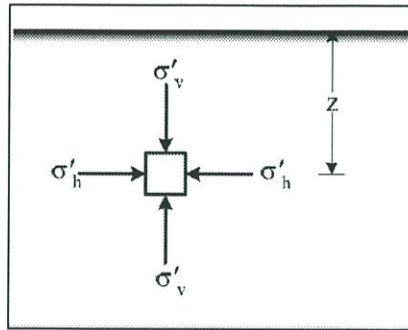


รูปที่ 2.1 แสดงแรงดันดินด้านข้างในสภาวะ Active [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553]

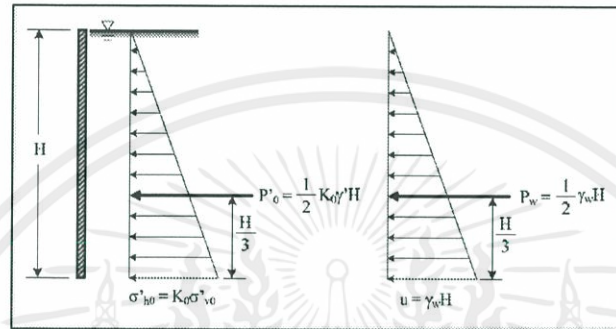


รูปที่ 2.2 แสดงแรงดันดินด้านข้างในสภาวะ Passive [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553]

ความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่ง หมายถึง ความดันด้านข้างที่กระทำต่อผนังโครงสร้างของดิน โดยที่ผนังและมวลดินไม่มีการเคลื่อนตัว ความดันดินในกรณีเช่นนี้อาจเกิดขึ้นกับมวลดินถมด้านหลังกำแพงดินที่มีความหนาแน่นมากและแทบจะไม่เกิดการเคลื่อนตัวของกำแพง ดินที่สัมผัสกับกำแพงจะไม่เกิดความเครียดด้านข้าง ในกรณีเช่นนี้ ความดันดินด้านข้างจะมีขนาดอยู่ระหว่างความดันดินที่สภาวะ Active และ Passive



รูปที่ 2.3 แสดงความดันดินที่ความลึก Z [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553]



รูปที่ 2.4 แสดงการกระจายความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่งและความดันน้ำ
[รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553]

พิจารณาคำเค้นบนชิ้นส่วนเล็กๆ ในชั้นดินที่ความลึก z ถ้ามวลดินอยู่ที่สภาวะอยู่นิ่ง (At rest) แม้ว่ามวลดินนี้จะเกิดการทรุดตัวในแนวดิ่งเมื่อมีน้ำหนักกระทำ แต่จะไม่เกิดการเคลื่อนตัวในแนวนอน สภาพเช่นนี้เปรียบเสมือนดินที่อยู่ในสภาวะสมดุลด้านหลังกำแพงกันดินที่หนาและเรียบ และไม่มีการเคลื่อนตัว ความดันดินประสิทธิผล (Effective lateral earth pressure) ที่ฐานของกำแพงและแรงลัพธ์ประสิทธิผลต่อความยาว 1 หน่วย สามารถหาได้สมการที่ (2.1), (2.2) และ (2.3)

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

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

$$P'_0 = K_0 \gamma' H \quad (2.3)$$

เมื่อ	σ'_h	คือ ความดันประสิทธิผลที่ฐานของกำแพง
	P_0	คือ แรงลัพธ์เนื่องจากความดันดินประสิทธิผล
	K_0	คือ สัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่ง (Coefficient of earth pressure at rest)
	γ'	คือ หน่วยน้ำหนักประสิทธิผล (Submerged unit weight)
	H	คือ ความสูงของกำแพง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันดินด้านข้างรวม (Total lateral earth pressure, σ_h) ที่กระทำต่อกำแพงเท่ากับ ผลรวมของความดันดินด้านข้างประสิทธิภาพ (Effective lateral earth pressure, σ'_h) และความดันน้ำ (Pore pressure, u)

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

ความเค้นรวมที่กระทำต่อกำแพงก็จะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามความลึกเช่นเดียวกัน และแรงดันรวมที่กระทำต่อกำแพงก็จะเป็นผลรวมของแรงดันเนื่องจากแรงดันประสิทธิภาพและแรงดันน้ำ

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

เมื่อ P_h คือ แรงดันดินด้านข้างรวมที่กระทำต่อกำแพง

P_w คือ แรงดันน้ำ

ค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่ง (K_0) คืออัตราส่วนระหว่างความดันดินด้านข้างต่อความดันดินในแนวตั้งในพจน์ของความเค้นประสิทธิภาพ โดยทั่วไป K_0 จะมีค่าน้อยกว่า 1.0 สำหรับดินเหนียวอัดตัวปกติ ยกเว้นในกรณีของดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติ ซึ่งค่า K_0 อาจมีค่าสูงถึงประมาณ 3.0 สำหรับทราย K_0 จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.4 สำหรับทรายแน่น และ 0.5 สำหรับทรายหลวม การหาค่าสัมประสิทธิ์ความดันดินด้านข้างที่สภาวะอยู่นิ่งในสนามกระทำได้ยาก Jaky (1944) ได้เสนอสมการสำหรับหาค่า K_0 ในดินเหนียวอัดตัวปกติ และดินทรายดังนี้

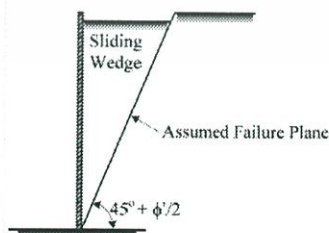
$$K_0 = 1 - \sin \phi' \quad (2.6)$$

เมื่อ ϕ' คือ มุมเสียดทานภายในของดิน

2.1.2 ทฤษฎีแรงดันดินด้านข้างของ Rankine

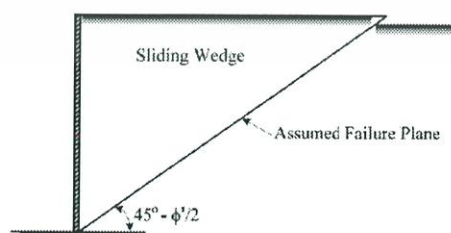
ทฤษฎีของ Rankine สำหรับหาความดันดินด้านข้างตั้งอยู่บนสมมติฐานหลักสามข้อ ดังนี้

- 1) ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว (Adhesion) หรือความเสียดทาน (Friction) ระหว่างดินกับผนัง (ผนังเรียบ)
- 2) ความดันดินด้านข้าง ใช้ได้เฉพาะกับกำแพงที่ตั้งอยู่ในแนวตั้ง การวิบัติของดินถูกสมมติให้เป็นการไหลของลิ่มตลอดแนวระนาบวิบัติ ซึ่งอยู่ในรูปของมุมเสียดทานภายในของดิน (Internal friction angle, ϕ)



รูปที่ 2.5 แสดง Rankine active state

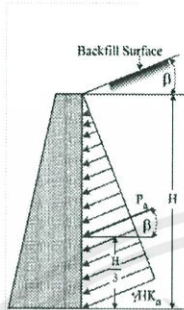
[รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553]



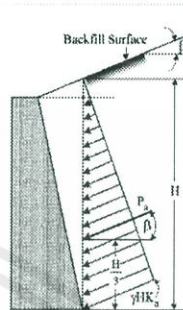
รูปที่ 2.6 แสดง Rankine passive state

[รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553]

3) ความดันดินด้านข้างมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็นฟังก์ชันเส้นตรงกับความลึก และแรงผลักร์ เนื่องจากความดันดินด้านข้างถูกสมมติให้กระทำที่ระยะหนึ่งในสามของความสูง ซึ่งวัดจากฐานของ กำแพงกันดินถึงระดับดินถม และทิศทางของแรงลักร์นี้ขนานกับผิวของดินถม

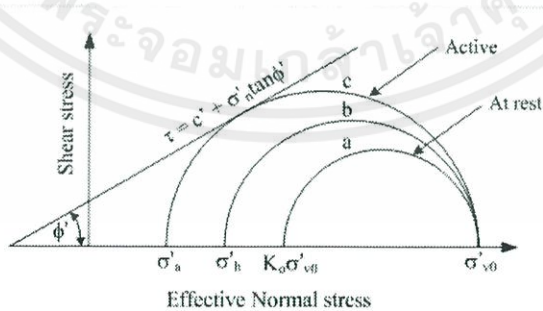


รูปที่ 2.7 Back side vertical
[รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553]



รูปที่ 2.8 Back side inclined
[รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553]

สำหรับดินเม็ดหยาบด้านหลังกำแพงกันดิน ที่สภาวะเริ่มต้น ดินจะอยู่ในสภาวะอยู่นิ่ง (At rest) สถานะของความเค้นประสิทธิผลแสดงได้ดังวงกลม a เมื่อกำแพงกันดินเริ่มเคลื่อนตัวออกจากมวลดิน ความเค้นประสิทธิผลในแนวนอนจะมีค่าน้อยลง ขณะที่ ความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งมีค่าประมาณคงที่ ทำให้วงกลมมอร์มีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ ตามการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน และสัมผัสเส้นขอบเขตความแข็งแรง (Failure envelope) โดยมีค่าความดันดินด้านข้างประสิทธิผลเท่ากับ σ'_a ค่าความดันนี้ถูกนิยามว่าเป็นความดันประสิทธิผลที่สภาวะ Active ของ Rankine (Rankine effective active pressure) ระบายวิถีที่เกิดขึ้นในมวลดินจะทำมุม $45 + \frac{\phi}{2}$ องศา กับแนวนอน



รูปที่ 2.9 วงกลมมอร์สถานะของความเค้นประสิทธิผลที่สภาวะ
[รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553]

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นหลักใหญ่และความเค้นหลักเล็กประสิทธิผลที่จุดวิบัติคือ

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

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

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

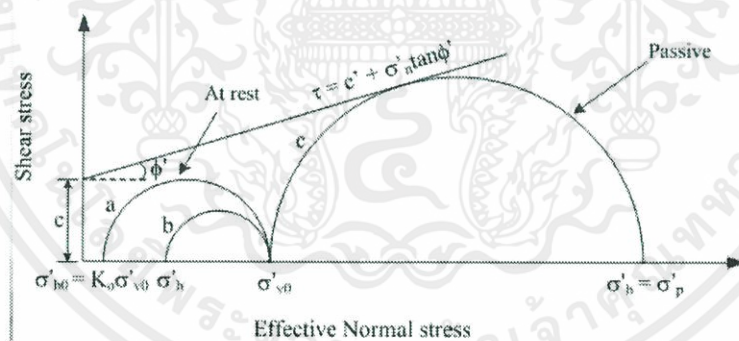
$$\sigma'_a = \sigma'_v K_a - 2c' \sqrt{K_a} \quad (2.9)$$

เมื่อ $K_a = \tan^2(45^\circ - \frac{\phi'}{2})$ เรียกว่าสัมประสิทธิ์ความดันดินประสิทธิผลที่สภาวะ Active ของ Rankine

ถ้ากำแพงกันดินเคลื่อนที่เข้าหามวลดิน มวลดินจะเกิดการอัดตัวและมีค่าความดันในแนวนอนเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งเกิดสภาวะพลาสติก (Plastic state) ที่สภาวะนี้ความดันดินด้านข้างประสิทธิผลจะมีค่ามากที่สุดซึ่งเท่ากับความดันด้านข้างประสิทธิผลที่สภาวะ Passive (σ'_p) ในขณะที่ความดันในแนวตั้งจะมีค่าประมาณคงที่

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

เมื่อ $K_p = \tan^2(45^\circ + \frac{\phi'}{2})$ เรียกว่าสัมประสิทธิ์ความดันดินประสิทธิผลที่สภาวะ Passive ของ Rankine



รูปที่ 2.10 วงกลมมอร์สสถานะของความเค้นประสิทธิผลที่ 3 สภาวะ

[รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข ,2553]

สำหรับกรณีของดินเหนียวอิ่มตัวในสภาวะไม่ระบายน้ำ ความดันด้านข้างรวม (Total lateral earth pressure) สามารถคำนวณได้โดยอาศัยขอบเขตความแข็งแรงรวม ซึ่งมุมเสียดทานภายในมีค่าเท่ากับศูนย์ ($\phi_u = 0$) ดังนั้น ความดันดินด้านข้างรวมที่สภาวะ Active และ Passive สามารถคำนวณได้จาก

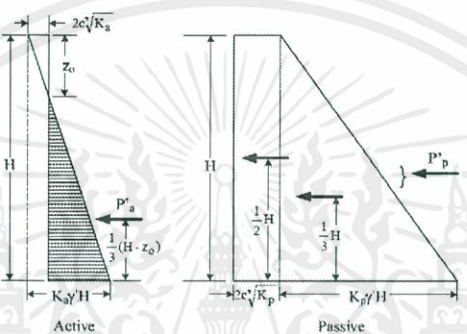
$$\sigma'_a = \sigma'_v - 2S_u \quad (2.11)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าความดันดินประสิทธิผลที่สภาวะ Active และ Passive มีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึกในฟังก์ชันเส้นตรง (Linear function) ถ้า $c' = 0$ การกระจายของความดันดินที่สภาวะ Active จะมีรูปร่างเป็นสามเหลี่ยมที่มีจุดยอด ($\sigma'_a = 0$) อยู่ที่ผิวดิน แต่เมื่อ c' มีค่ามากกว่า 0 ค่าของ σ'_a จะมีค่าเป็นลบที่ผิวบนและมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเป็นศูนย์ที่ความลึก z_0 ระยะจากผิวดินจนถึง z_0 เรียกว่า โซนแรงดึง (Tension zone) เมื่อ $\sigma'_a = 0$ จะได้

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



รูปที่ 2.11 แผนภูมิแรงดัน [รศ.ดร. สุขสันต์ ทอพิบูลสุข, 2553]

สำหรับดินถมที่เป็นดินเหนียวในสภาวะไม่ระบายน้ำ ($\phi = 0$) โซนแรงดึงสามารถเขียนในรูปของพารามิเตอร์กำลังรวมได้ดังนี้

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

สัมประสิทธิ์ความดันดินด้านข้างเมื่อผิวของดินถมทำมุม β กับแนวนอนสามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

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

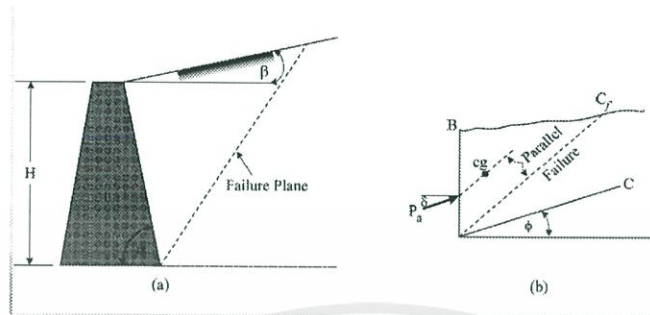
$$K_p = \cos\beta \frac{\cos\beta + \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\theta'}}{\cos\beta - \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\theta'}} \quad (2.16)$$

2.1.3 ทฤษฎีแรงดันดินของ Coulomb

ทฤษฎีของ Coulomb สำหรับการหาความดันดินด้านข้างได้ถูกพัฒนาขึ้นก่อนทฤษฎีของ Rankine ซึ่งสามารถใช้ได้กับกำแพงกันดินที่มีความเสียดทาน ระบายการวิบัติเริ่มจากฐานของกำแพงกันดิน ตำแหน่งของแรงลัพธ์เนื่องจากความดันดินที่สภาวะ Active หาได้จากการลากเส้นตรงจากจุดศูนย์กลางมวลของลิ่มขนานกับระนาบวิบัติ จุดตัดของเส้นตรงนี้กับผนังกำแพงกันดินคือตำแหน่งของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงลัพธ์ ทิศทางของแรงลัพธ์ทำมุม δ กับเส้นซึ่งตั้งฉากกับด้านหลังของผนัง เมื่อ δ คือมุมเสียดทานระหว่างผนังกำแพงและดิน



รูปที่ 2.12 แบบจำลองทฤษฎีของ coulomb [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2553]

สมการสำหรับการคำนวณความดันดินด้านข้างประสิทธิผลของ Coulomb มีดังต่อไปนี้

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

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

เมื่อ α คือ มุมด้านหลังกำแพงกันดินที่กระทำกับแนวราบ

δ คือ มุมเสียดทานระหว่างผนังกำแพงและดิน

β คือ มุมระหว่างผิวของดินถมกับแนวราบ

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

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

เนื่องจากทฤษฎีของ Coulomb เป็นวิธีที่ใช้หาความดันดินด้านข้างโดยใช้สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง ดังนั้น วิธีการนี้จึงไม่สามารถใช้กับดินถมที่มีน้ำหนักภายนอกมากกระทำ

ทฤษฎีของ Rankine และ Coulomb สมมติว่าระนาบวิบัติเป็นแนวเส้นตรง สมมติฐานนี้มีได้เป็นจริงเสมอไป ที่สภาวะ Active ความดันดินที่คำนวณมีความแตกต่างจากความเป็นจริงไม่มากนัก แต่ที่สภาวะ Passive ผลคำนวณมีความแตกต่างค่อนข้างสูง และให้ผลคำตอบที่ไม่ปลอดภัย (ผลคำนวณมีค่าสูงกว่าความเป็นจริงมาก) Terzaghi (1954) พบว่าที่สภาวะ Active ระนาบวิบัติมีลักษณะเกือบเป็นแนวเส้นตรง ก็ต่อเมื่อมุมเสียดทานภายในระหว่างดินและกำแพงกันดิน (δ) มีค่า

น้อยกว่า $\frac{\phi}{3}$ แต่อย่างไรก็ตาม ระบายวิถีที่สภาวะ Passive จะมีความแตกต่างจากสมมติฐานของ Rankine และ Coulomb อย่างมาก เมื่อมุม δ มีค่ามากกว่า $\frac{\phi}{3}$

2.2 โครงสร้างกันดิน

โครงสร้างกันดินใช้สำหรับป้องกันการเลื่อนไถลของดินหรือวัสดุอื่นในบริเวณที่ไม่ยอมให้เกิดการเคลื่อนตัวของมวลดิน ไม่ว่าจะเป็กรณของความลาดชันตามธรรมชาติซึ่งอาจเป็นโครงสร้างกันดินถาวรหรือเป็นความลาดชันระหว่างการก่อสร้างโดยเป็นโครงสร้างกันดินชั่วคราว โดยทั่วไปการใช้โครงสร้างกันดินจะใช้สำหรับถนนบนเนินเขา คลอง ทะเลสาบ โครงสร้างกันน้ำ คอสะพาน ชั้นใต้ดิน หรือการป้องกันการกัดเซาะของหน้าดิน

2.2.1 รูปแบบกำแพงกันดิน

การออกแบบโครงสร้างกันดินจำเป็นจะต้องพิจารณาแรงดันดินด้านข้างและแรงดันน้ำ โครงสร้างกันดินแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามค่าความแข็งของโครงสร้าง คือ

1. กำแพงกันดิน (Rigid retaining structure หรือ Retaining wall) โครงสร้างกันดินหรือกำแพงกันดินมักจะเป็นคอนกรีตซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 6 ชนิดหลัก ๆ คือ

1.1 Gravity Walls เป็นคอนกรีตหรือแท่งยาวที่ไม่สามารถรับแรงดึงได้ เป็นโครงสร้างที่ไม่ประหยัดหากต้องการสร้างกันดินสูง ๆ

1.2 Semi-gravity Walls เป็นคอนกรีตที่มีการเสริมเหล็กเล็กน้อยเพื่อให้สามารถลดปริมาณคอนกรีตลงได้

1.3 Cantilever walls เป็นโครงสร้างคล้ายรูปตัว T คว่า ซึ่งแต่ละส่วนของกำแพงเป็นลักษณะคานยื่น โดยส่วนใหญ่จะเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก โครงสร้างชนิดนี้ค่อนข้างประหยัด

1.4 Counterfort Walls มีส่วนค้ำยันระหว่างกำแพงและฐาน โครงสร้างชนิดนี้เหมาะสำหรับความลาดชันสูง ๆ มากกว่า 7 เมตรขึ้นไป

1.5 Buttressed Walls ลักษณะคล้ายกับ Counterfort walls แต่ส่วนค้ำยันอยู่ทางด้านหน้าของกำแพง ทำให้ไม่ค่อยได้รับความนิยมเนื่องจากส่วนค้ำยันอยู่ด้านนอกมองเห็นได้

1.6 Crib Walls สร้างด้วยไม้ หรือคอนกรีต หรือเหล็กเสริมนำมาสานกันเป็นกล่อง โดยใส่ดินลงในกล่องนั้นด้วย โครงสร้างประเภทนี้เหมาะสำหรับความลาดชันที่ไม่สูงนักและมีแรงดันดินไม่มากนัก ไม่มีน้ำหนักกระทำบนส่วนบนของกำแพง

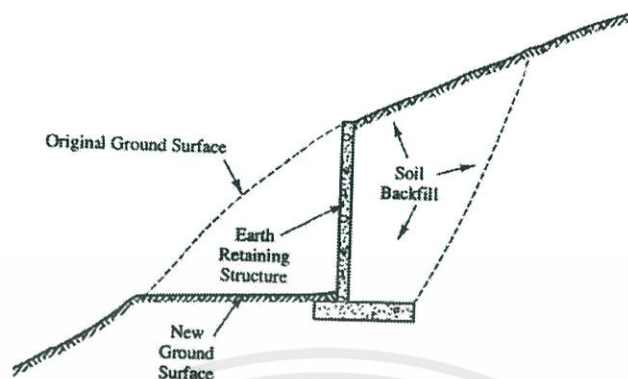
2. กำแพงเข็มพีต (Flexible retaining structure or Sheet pile structure) นั้นประกอบด้วยกลุ่มเสาเข็มหรือไม้หรือคอนกรีตเสริมเหล็กหรือเหล็กที่ตอกตามแนวดิ่งลงไปในพื้นที่ดิน

2.1 กำแพงเข็มพีตไม้ (Wood sheet piles)

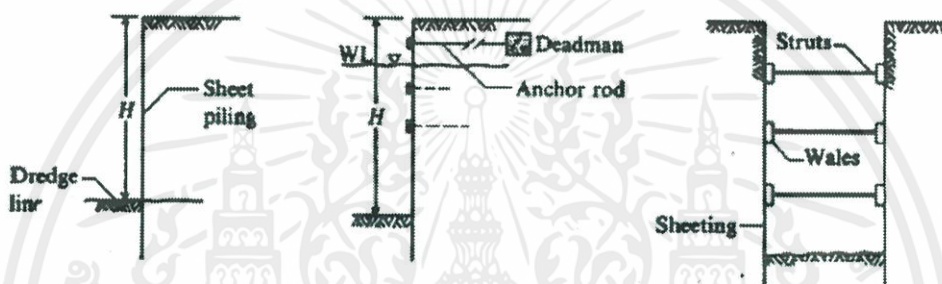
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 กำแพงเข็มพืดคอนกรีต (Concrete sheet piles)

2.3 กำแพงเข็มพืดเหล็ก (Steel sheet piles)



รูปที่ 2.13 กำแพงกันดิน [Das, 1999]

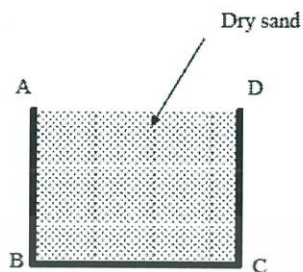


รูปที่ 2.14 กำแพงเข็มพืด [Das, 1999]

2.2.2 การเสริมกำลังของลาดคันดิน

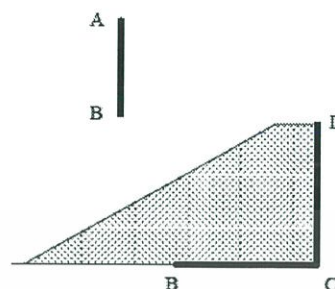
การเสริมกำลังของลาดคันดิน คือ การใส่แถบวัสดุเสริมกำลังเข้าไปในแต่ละชั้นของลาดคันดิน ในระหว่างการบดอัด วัสดุเสริมกำลังจะทำหน้าที่ส่งถ่ายแรงกระทำที่เกิดจากน้ำหนักของมวลดินที่กดทับมายังแถบวัสดุเสริมกำลังในลักษณะของแรงเสียดทาน เป็นพฤติกรรมที่เกิดระหว่างผิวสัมผัสของดินถมและวัสดุเสริมกำลัง ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลดินมีมากขึ้น มีผลให้ลาดคันดินมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และมีความลาดชันที่สูงขึ้น

เพื่อให้เข้าใจกลไกการปรับปรุงดินด้วยวัสดุเสริมกำลัง พิจารณาผลทดสอบดังต่อไปนี้ โดยการทดสอบเต็มทรายแห้งในถัง ABCD จนเต็ม เมื่อเปิดฝา AB ออก ทรายจะไม่สามารถตั้งในแนวตั้งได้ และจะจัดเรียงตัวใหม่โดยมีผิวหน้าที่มีความชันดังแสดงในรูปที่ จึงทำการทดสอบใหม่อีกครั้งโดยใส่วัสดุเสริมกำลังในแนวนอนและม้วนปลายของวัสดุเสริมกำลังเพื่อทำเป็น Facing กันดินถล่ม ดังแสดงในรูปที่ เมื่อเปิดฝา AB ออก ทรายจะไม่พังทลาย เพราะเมื่อมวลดินในโซนที่ไม่เสถียร (Active zone) เริ่มเคลื่อนตัว มวลดินในโซนนี้จะพยายามดึงเหล็กเสริมกำลังไปด้วย แต่มวลดินในโซนต้านทาน (Resistant zone) จะจับยึดวัสดุเสริมกำลังอย่างแน่น และรั้งไม่ให้มวลดินในโซนที่ไม่เสถียรเคลื่อนตัว



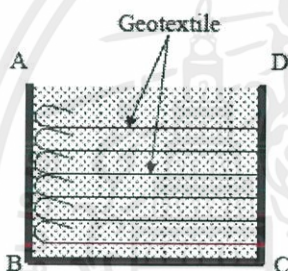
รูปที่ 2.15 เติมทรายแห้งให้เต็มถัง ABCD

[Gulhati and Datta, 2005]



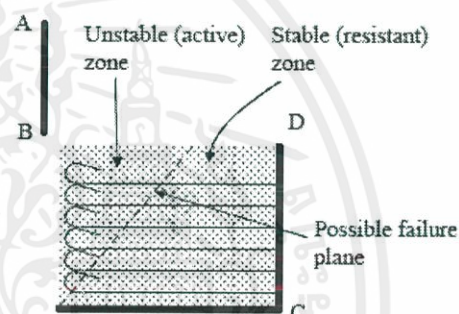
รูปที่ 2.16 เปิดฝา AB ดินจะพังทลาย

[Gulhati and Datta, 2005]



รูปที่ 2.17 ใส่วัสดุเสริมกำลังในถัง ABCD

[Gulhati and Datta, 2005]

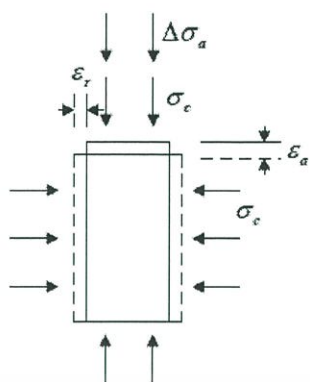


รูปที่ 2.18 เปิดฝา AB ดินจะไม่พังทลาย

เนื่องจากการใส่วัสดุเสริมกำลัง

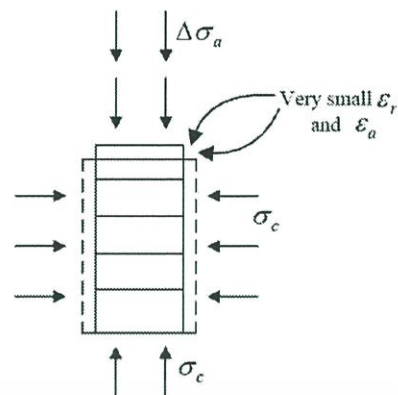
[Gulhati and Datta, 2005]

เมื่อศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมของดินที่ไม่ได้รับการเสริมกำลังและได้รับการเสริมกำลังด้วยวัสดุใยสังเคราะห์ ด้วยการทดสอบแรงอัด 3 แกน ภายใต้เงื่อนไขมวลดินมีพฤติกรรมการเฉือนแบบระบายน้ำ และถูกกระทำด้วยความเค้นรอบข้าง ซึ่งพบว่าดินที่ไม่ได้รับการเสริมกำลัง ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจะมากกว่าดินที่ได้รับการเสริมกำลัง ไม่ว่าจะเป็ความเครียดตามแนวแกน (ϵ_a) และความเครียดตามแนวรัศมี (ϵ_r) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด พบว่าจุดวิกฤติของมวลดินที่ได้รับการเสริมกำลังจะมากกว่าจุดวิกฤติของมวลดินที่ไม่ได้รับการเสริมกำลัง



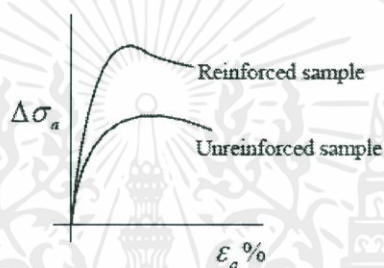
รูปที่ 2.19 ตัวอย่างที่ไม่เสริมกำลัง

[Gulhati and Datta, 2005]



รูปที่ 2.20 ตัวอย่างที่เสริมกำลัง

[Gulhati and Datta, 2005]

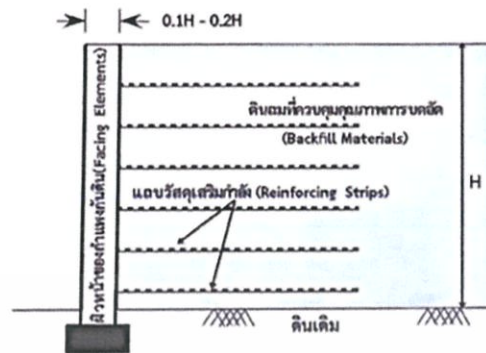
รูปที่ 2.21 ความเค้นแนวแกนและ
ความเครียดแนวแกน

ในงานก่อสร้างจริงนั้น มีปัจจัยต่างๆอีกหลายข้อที่ผู้ออกแบบต้องคำนึงถึง เพื่อนำมาพิจารณาในการเลือกประเภทของวัสดุที่จะนำมาเสริมกำลังของดินถม ความลาดชันของกำแพงกันดินที่ต้องออกแบบ รวมทั้งประเภทของกำแพงกันดิน เป็นต้น ซึ่งปัจจัยต่างๆนั้น ได้แก่

- 1) พื้นที่ และสถานที่ก่อสร้าง
- 2) คุณสมบัติของวัสดุเสริมกำลัง และดินถม
- 3) งบประมาณ
- 4) ความปลอดภัย

2.2.2 ส่วนประกอบของกำแพงกันดินเสริมกำลัง

ระบบกำแพงกันดินเสริมกำลัง ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ



รูปที่ 2.22 ส่วนประกอบของกำแพงกันดิน [ดร.ศลิษา ไชยพุทธ]

1. ดินถมที่ควบคุมคุณภาพการบดอัด (Backfill Materials) ทำหน้าที่เพิ่มน้ำหนักกดทับลงบนวัสดุเสริมกำลัง ลดการเคลื่อนตัวของวัสดุเสริมกำลังและดินบริเวณด้านหลังของกำแพงกันดินทำให้ลดแรงดันดินกระทำกับกำแพงกันดิน เนื่องจากการบดอัด จะลดช่องว่างภายในดินและเพิ่มความหนาแน่นของดิน มีแรงเสียดทานสูง ซึมผ่านน้ำได้ง่าย ได้แก่กรวด และ ดินทราย

National Concrete Masonry Association แนะนำคุณสมบัติของดินที่เหมาะสมในการบดอัดดังแสดงในตาราง

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของดินที่เหมาะสมในการบดอัด

Sieve Size	% Passing
4 in	100 - 75
No.4	100 - 20
No.40	0 - 60
No.200	0 - 35

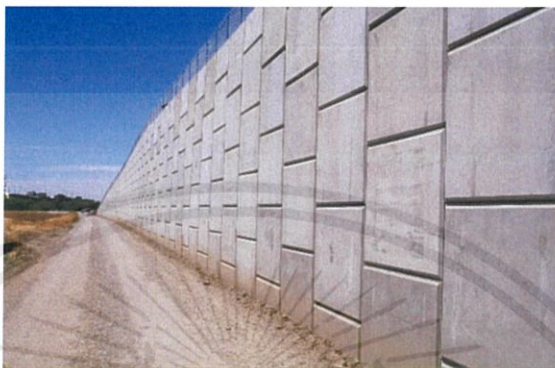
ดัชนีความเหนียวของดิน (Plasticity Index หรือ PI) ของเศษมวลรวมขนาดเล็ก < 20



รูปที่ 2.23 ดินถมที่ควบคุมคุณภาพการบดอัด [http://www.overpassaran.com]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ผิวหน้าของกำแพงกันดิน (Facing Elements) ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้โครงสร้างกำแพงกันดิน ป้องกันการพังทลาย การเลื่อนไถล การถูกกัดเซาะของดินถมเสริมกำลังและลดการเสื่อมคุณภาพของวัสดุเสริมกำลัง ผิวหน้าของกำแพงกันดิน ควรมีความหนา 0.1 – 0.2 ของความสูงของกำแพงกันดินโดยประมาณ การพิจารณาเลือกวัสดุใช้เป็นผิวหน้าของกำแพงกันดินขึ้นอยู่กับค่าความลาดชันที่ใช้ในการออกแบบ ดังนี้



รูปที่ 2.24 ผิวหน้าของกำแพงกันดิน [<http://www.mseplus.com/>]

2.1 กรณีที่กำแพงเสริมกำลังมีความลาดชัน น้อยกว่า 70 องศา วัสดุผิวหน้าของกำแพง ได้แก่ แผ่นวัสดุใยสังเคราะห์ (ผนังแบบ Wrap Around) และกล่องหินทิ้ง (Rock Gabion)

2.2 กรณีที่กำแพงเสริมกำลังมีความลาดชัน มากกว่า 70 องศา วัสดุผิวหน้าของกำแพง ได้แก่ แผ่นคอนกรีตสำเร็จ (Segmental Precast Concrete Panels) คอนกรีตบล็อกแบบ (Dry Cast Modular Block Wall: MBW) ผิวหน้าโลหะ (Metallic) ตะแกรงลวดเชื่อม (Welded Wire Grids) กล่องหินทิ้ง (Rock Gabion) และวัสดุใยสังเคราะห์ (Geosynthetics) เป็นต้น

3. แถบวัสดุเสริมกำลัง (Reinforcing Strips) เป็นแถบวัสดุที่วางแทรกอยู่ระหว่างชั้นดินถมบดอัดทำหน้าที่เพิ่มแรงเสียดทานระหว่างดินถมและวัสดุเสริมกำลังรับแรงภายในกำแพงกันดินทำให้ถมบดอัดหลังกำแพงกันดินเสถียรภาพเพิ่มมากขึ้น วัสดุเสริมกำลังควรออกแบบให้มีความยาวไม่น้อยกว่า 0.7 เท่าของความสูงกำแพงกันดิน



รูปที่ 2.25 แถบวัสดุเสริมกำลัง [<https://www.geosynthetica.net/>]

จากความสัมพันธ์ความเค้น และความเครียด (Stress – strain Behaviour) ที่เกิดขึ้นในวัสดุเสริมกำลังรับแรงของดิน พบว่าวัสดุเสริมกำลัง สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

3.1 วัสดุเสริมกำลังที่มีการยืดตัวต่ำ (Inextensible Reinforcement) เป็นวัสดุที่มีค่าโมดูลัสสูง ในขณะที่ความเค้นต่ำ เนื่องจากเป็นวัสดุที่ผลิตจากเหล็ก (Steel Reinforcement) ได้แก่ แถบเหล็ก (Steel Strip) เหล็กเส้น (Steel Bar) และตะแกรง (Steel Grid) เป็นต้น

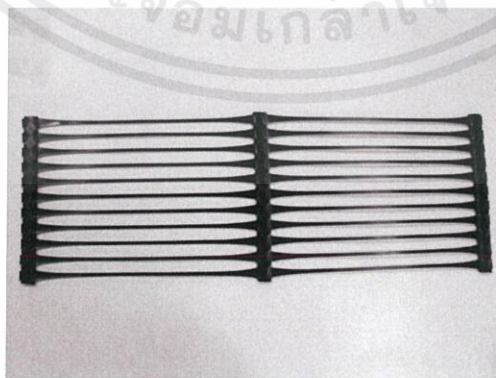


รูปที่ 2.26 แสดงวัสดุเสริมกำลังที่มีการค่าการยืดตัวต่ำ [<http://www.dot.state.oh.us>]



รูปที่ 2.27 แสดงวัสดุเสริมกำลังที่มีการค่าการยืดตัวต่ำ [<https://www.fhwa.dot.gov>]

3.2 วัสดุเสริมกำลังยืดตัวได้ (Extensible Reinforcement) ซึ่งแรงยึดเกาะระหว่างมวลดิน และวัสดุเสริมกำลังมีมาก ได้แก่ วัสดุสังเคราะห์ (Geosynthetics)



รูปที่ 2.28 แสดงวัสดุเสริมกำลังที่ยืดตัวได้ [<http://www.bostd.com>]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดิน

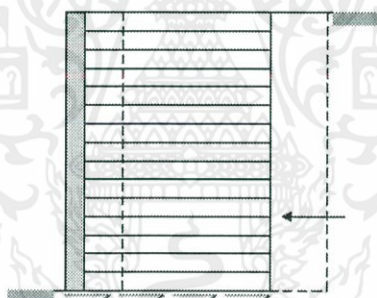
เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับกำแพงกันดินเสริมกำลัง ควรพิจารณาตรวจสอบเสถียรภาพของโครงสร้างกำแพงกันดิน ซึ่งประกอบไปด้วย เสถียรภาพภายนอก และเสถียรภาพในของกำแพงกันดิน

2.2.3.1.เสถียรภาพภายนอก (External stability)

กำแพงกันดินจะมีเสถียรภาพภายนอก และความปลอดภัยเพียงพอ เมื่อกำแพงกันดินไม่มีการเคลื่อนตัวในสามทิศทาง อันได้แก่ ในแนวนอน (การเลื่อนไถล) ในแนวตั้ง (การทรุดตัว) ที่มากกว่าปกติและการวิบัติเนื่องจากแรงแบกทานของดินในฐานราก) และการพลิกคว่ำ เป็นต้น

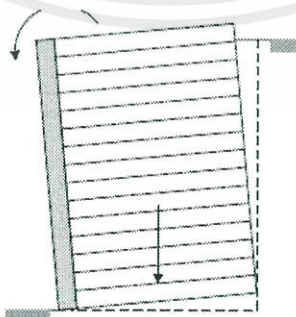
การตรวจสอบเสถียรภาพภายนอก ประกอบไปด้วย

1. การตรวจสอบการเลื่อนไถล (Sliding) การเลื่อนไถลของกำแพงกันดินเกิดขึ้นเนื่องจากแรงดันดินด้านข้างของดินถมด้านหลังกำแพงกันดิน (Active Pressure) มีมากกว่าด้านหน้ากำแพงกันดิน (Passive Pressure) โดยแรงกระทำที่เกิดขึ้นเป็นแรงกระทำในแนวนอน เมื่อตรวจสอบพบว่ากำแพงกันดินขาดเสถียรภาพด้านการเลื่อนไถล สามารถแก้ไขด้วยการเพิ่มแรงดันดินด้านหน้ากำแพงให้มากขึ้น หรือออกแบบให้กำแพงกันดินมีขนาดใหญ่ขึ้น



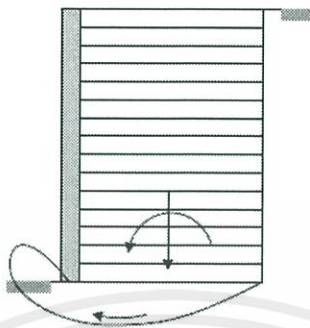
รูปที่ 2.29 แสดงการตรวจสอบการเลื่อนไถล [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2556]

2. การตรวจสอบการพลิกคว่ำ (Overturning) การวิบัติเกิดขึ้นเนื่องจาก แถบวัสดุเสริมกำลังมีความยาวไม่เพียงพอที่จะทำให้น้ำหนักของมวลดินกดทับหรือยึดรั้งแถบวัสดุเสริมกำลังไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัว



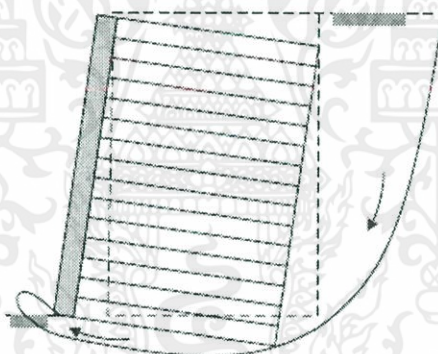
รูปที่ 2.30 แสดงการตรวจสอบการพลิกคว่ำ [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2556]

3. การตรวจสอบการวิบัติเนื่องจากแรงแบกทานของดินฐานราก (Bearing) การวิบัติเกิดขึ้นเนื่องจากดินไม่สามารถรับน้ำหนักของโครงสร้างที่วางบนดินได้ ทำให้โครงสร้างของกำแพงกันดินทรุดตัวในแนวดิ่ง โดยความเสียหายที่เกิดไม่ทำลายโครงสร้างของกำแพงกันดินให้ได้รับความเสียหาย



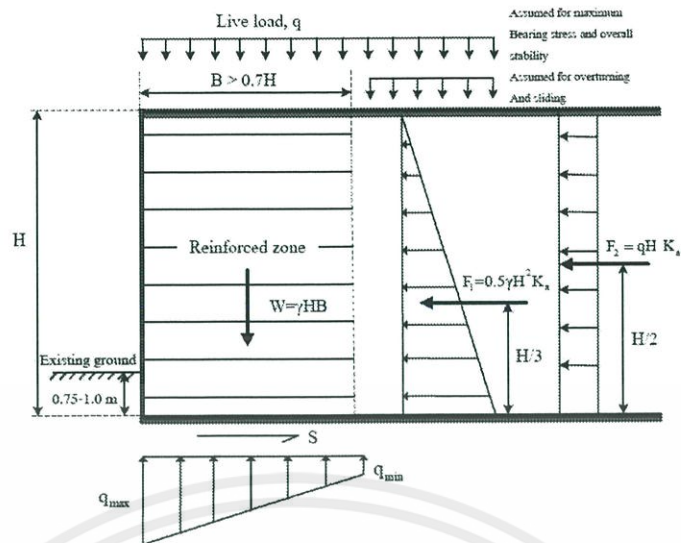
รูปที่ 2.31 แสดงการตรวจสอบกำลังรับแรงแบกทาน [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2556]

4. การตรวจสอบเสถียรภาพทั้งระบบ (Global Failure) เนื่องจากดินที่มีอยู่ในธรรมชาติหรือดินถมบริเวณลาดคันดินแข็งแรงไม่เพียงพอ ทำให้ลาดดินไม่สามารถรับน้ำหนักของโครงสร้างที่วางอยู่ได้ การวิบัติที่เกิดขึ้นพบในลักษณะการพังทลายแบบเคลื่อนหมุน ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความเสียหายต่อโครงสร้างกำแพงกันดินที่วางอยู่บนลาดคันดิน



รูปที่ 2.32 แสดงการตรวจสอบเสถียรภาพทั้งระบบ [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2556]

การตรวจสอบค่าความปลอดภัยด้านการเลื่อนไถลและด้านการพลิกคว่ำ จะถูกตรวจสอบโดยหลักสถิตศาสตร์ (Law of Statics) โดยพิจารณาน้ำหนักบรรทุกจรที่เกิดขึ้นเฉพาะในโซนไม่เสริมกำลัง (Unreinforced Zone) เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรที่เกิดในโซนเสริมกำลังจะช่วยเพิ่มเสถียรภาพด้านการเลื่อนไถลและการพลิกคว่ำแต่จะลดเสถียรภาพด้านการวิบัติเนื่องจากแรงแบกทานของดินฐานราก การตรวจสอบค่าความปลอดภัยด้านการวิบัติเนื่องจากการทรุดตัวที่เกินกว่าค่าที่ยอมรับได้ และการวิบัติเนื่องการแรงแบกทานของดินฐานราก ซึ่งสามารถวิเคราะห์จากทฤษฎีกำลังรับแรงแบกทานของดิน (Bearing capacity Theory) โดยพิจารณาน้ำหนักบรรทุกจรที่เกิดขึ้นทั้งหมดในกำแพงกันดิน ทั้งที่เกิดในโซนเสริมกำลัง (Reinforced Zone) และโซนไม่เสริมกำลัง (Unreinforced Zone) ดังรูป



รูปที่ 2.33 แสดงแรงที่กระทำต่อกำแพงกันดินเสริมกำลัง [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 2556]

AASHTO's Standard Specifications Highway Bridge กำหนดมาตรฐานการตรวจสอบ อัตราส่วนความปลอดภัยไว้ดังนี้

1. อัตราส่วนความปลอดภัยต้านทานการลื่นไถล คือ อัตราส่วนระหว่างแรงต้านทานการลื่นไถล (Sliding Resistance Force: S) ต่อแรงกระทำ (Sliding Resistance Force: Ph) ควรมีค่ามากกว่า 1.5

แรงต้านทานการลื่นไถล (S)

$$S = W \tan \phi = \gamma H B \tan \phi \quad \text{สำหรับฐานรากที่เป็นดินเม็ดหยาบ} \quad (2.21)$$

$$S = S_u B \quad \text{สำหรับฐานรากที่เป็นดินเม็ดละเอียด} \quad (2.22)$$

แรงกระทำ (Ph)

$$F_1 = 0.5 \gamma H^2 K_a, \quad F_2 = q H K_a \quad (2.23)$$

$$Ph = F_1 + F_2 = 0.5 \gamma H^2 K_a + q H K_a \quad (2.24)$$

ดังนั้น อัตราส่วนความปลอดภัยต้านทานการลื่นไถล = $\frac{S}{Ph} > 1.5$

เมื่อ F_1 คือ แรงดันดินด้านข้างจากน้ำหนักของดินถม

F_2 คือ แรงดันดินด้านข้างจากน้ำหนักบรรทุก

W คือ น้ำหนักของดินถม

q คือ น้ำหนักบรรทุก

γ คือ ความหนาแน่นของดินถม

S_u คือ กำลังต้านทานแรงเฉือน

B คือ ความกว้างของกำแพงกันดิน

K_a คือ สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง ที่สภาวะเคลื่อนตัว (Active)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

H คือ ความสูงของกำแพงกันดิน

2. อัตราส่วนปลอดภัยด้านการพลิกคว่ำ คือ อัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ต้านทานการพลิกคว่ำทั้งหมด (Total Righting Moment) ต่อโมเมนต์ที่ก่อให้เกิดการพลิกคว่ำทั้งหมด (Total Overturning Moment) ที่สภาวะสมดุลและการพลิกคว่ำเริ่มเกิดพอดี แรงปฏิกิริยาระหว่างดินและกำแพงกันดินจะอยู่ที่จุด Toe พอดี ดังนั้น เพื่อความสะดวกในการคำนวณ (ไม่ต้องพิจารณาผลของแรงปฏิกิริยา) นิยมหาอัตราส่วนปลอดภัยที่สภาวะนี้ พิจารณาสมดุจการหมุนรอบจุดToe (อ้างอิงรูปที่ 2.24) คำนวณได้จาก

โมเมนต์ต้านทานการพลิกคว่ำทั้งหมด (Total Righting Moment : M_r)

$$M_r = W \times \frac{B}{2} \quad (2.25)$$

โมเมนต์ที่ก่อให้เกิดการพลิกคว่ำทั้งหมด (Total Overturning Moment : M_o)

$$M_o = \left(F_1 \times \frac{H}{3} \right) + \left(F_2 \times \frac{H}{2} \right) \quad (2.26)$$

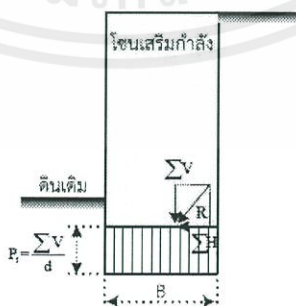
$$\text{โดยที่ } F_1 = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a \text{ และ } F_2 = qHK_a$$

$$\text{ดังนั้นอัตราส่วนปลอดภัยด้านการพลิกคว่ำ } FS_o = \frac{M_r}{M_o} > 2.0$$

3. อัตราส่วนความปลอดภัยด้านการวิบัติเนื่องจากแรงแบกทานของดิน คือ อัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงแบกทานประลัย (Ultimate Bearing Capacity) ต่อแรงที่มากที่สุดที่กระทำต่อฐานของกำแพงกันดิน (Actual Maximum Contact Pressure) โดยที่โมเมนต์ใต้ฐานของกำแพงกันดินเสริมกำลังเกิดจากแรงดันดินด้านข้างของกำแพง ซึ่งเป็นแรงแนวนอน ซึ่งมีผลต่อการกระจายความเค้นของดินใต้ฐานราก

การกระจายความเค้นขึ้นอยู่กับระยะเยื้องศูนย์กลาง แบ่งออกเป็น 3 กรณีคือ

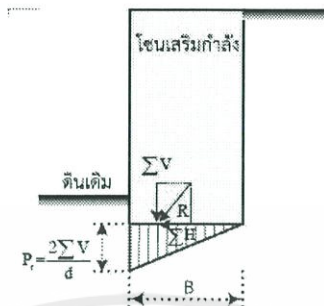
กรณีที่ 1 ความเค้นใต้ฐานรากกระจายสม่ำเสมอ เนื่องจากระยะเยื้องศูนย์กลาง (e) มีค่าเท่ากับ ศูนย์ (e = 0)



รูปที่ 2.34 แสดงลักษณะการกระจายความเค้นในดินใต้ฐานราก เมื่อ e = 0

[รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2556]

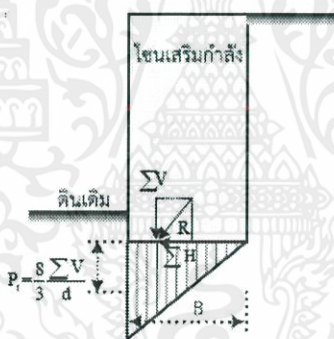
กรณีที่ 2 ความเค้นที่กระจายใต้ฐานรากมีความแตกต่างกัน เนื่องจากระยะเยื้องศูนย์กลางมีค่ามากกว่าศูนย์กลางมีค่ามากกว่าศูนย์กลาง ก่อให้เกิดความเค้นมากที่สุด (q_{max}) และน้อยที่สุด (q_{min}) ความเค้นที่น้อยที่สุดจะมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อระยะเยื้องศูนย์กลางมีค่าเท่ากับหนึ่งในหกของความกว้างฐานราก ($B/6$)



รูปที่ 2.35 แสดงลักษณะการกระจายความเค้นในดินใต้ฐานราก เมื่อ $e = B/6$

[รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2556]

กรณีที่ 3 ความเค้นที่กระจายใต้ฐานรากจะมีความแตกต่างกันมาก ทำให้เกิดการทรุดตัวอย่างมากในด้านที่เกิดความเค้นมากที่สุด เนื่องจากระยะเยื้องศูนย์กลางมีค่ามากกว่าหนึ่งในหกของความกว้างฐานราก ($B/6$)



รูปที่ 2.36 แสดงลักษณะการกระจายความเค้นในดินใต้ฐานราก เมื่อ ($e = B/4$)

[รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2556]

ระยะเยื้องศูนย์กลางและแรงดันดินใต้ฐานราก สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$e = \frac{B}{2} - \left(\frac{M_r - M_o}{\Sigma V} \right) < \frac{B}{6} \quad (2.27)$$

$$q_{max} = \left(\frac{\Sigma V}{B} \right) \left(1 + \frac{6e}{B} \right) < q_{all} \quad (2.28)$$

$$q_{min} = \left(\frac{\Sigma V}{B} \right) \left(1 - \frac{6e}{B} \right) > q_{all} \quad (2.29)$$

เมื่อ ΣV คือน้ำหนักกดทับในแนวตั้ง พิจารณาจากโซนที่มีน้ำหนักบรรทุกจรที่มากกระทำเป็น

2 กรณี คือ

1. กรณีพิจารณาน้ำหนักบรรทุกจรที่เกิดขึ้นเฉพาะโซนไม่เสริมกำลัง

$$\Sigma V = W \quad (2.30)$$

2. กรณีพิจารณาน้ำหนักบรรทุกทุกจรที่เกิดขึ้นทั้งหมดในกำแพงกันดิน ทั้งในโซนเสริมกำลัง (Reinforced Zone) และในโซนไม่เสริมกำลัง (Unreinforced Zone)

$$\Sigma V = W + qB \quad (2.31)$$

2.2.3.2. เสถียรภาพภายใน (Internal stability)

การตรวจสอบเสถียรภาพภายใน คือการตรวจสอบคุณสมบัติของแถบคุณสมบัติของแถบวัสดุเสริมกำลังที่ทำหน้าที่เพิ่มแรงเสียดทาน ยึดมวลดินในโซนที่ไม่มีเสถียรภาพ และป้องกันการรบกวนของกำแพงกันดิน

การตรวจสอบเสถียรภาพภายใน ประกอบด้วย

1. การตรวจสอบกำลังต้านทานการฉีกขาด (Rupture Resistance) คือ อัตราส่วนระหว่างกำลังต้านทานแรงฉีกขาดของวัสดุเสริมกำลัง ต่อแรงดึงที่เกิดขึ้นในวัสดุเสริมกำลัง

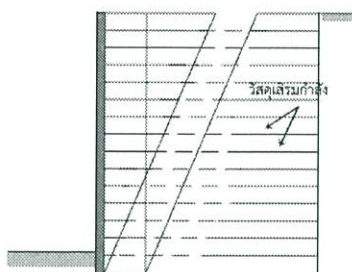
การตรวจสอบอัตราส่วนปลอดภัยต้านทานการฉีกขาดของวัสดุเสริมกำลังในแต่ละชั้น จะพิจารณาจากอัตราส่วนระหว่างแรงดึงครากของวัสดุเสริมกำลังต่อแรงดึงสูงสุด อัตราส่วนปลอดภัยต้านทานการฉีกขาดควรมีค่าไม่น้อยกว่า 2.0 ตลอดอายุการใช้งาน (ไม่น้อยกว่า 75 ปี)



รูปที่ 2.37 แสดงการวิบัติจากการฉีกขาด [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 2556]

2. การตรวจสอบกำลังต้านทานแรงฉุด (Pullout Resistance) คือ อัตราส่วนระหว่างกำลังต้านทานแรงฉุดของวัสดุเสริมกำลังในโซนต้านทานการเคลื่อนตัว (หลังระนาบวิบัติ) ต่อแรงฉุดสูงสุดที่กระทำให้วัสดุเสริมกำลังเคลื่อนออกจากดินถม

การตรวจสอบอัตราส่วนปลอดภัยกำลังต้านทานแรงฉุด ถ้าวัสดุเสริมกำลังมีกำลังต้านทานการฉีกขาดสูงมากพอเกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด เสถียรภาพภายในของโครงสร้างเสริมกำลังจะขึ้นอยู่กับ การสั่นไถลของดินถมต่ออัดบนวัสดุเสริมกำลัง (กลไกแรงเฉือนตรง) และการฉุดวัสดุเสริมกำลังออกจากมวลดิน (กลไกแรงฉุด)



รูปที่ 2.38 แสดงการวิบัติจากแรงเฉด [รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข,2556]

AASHTO's Standard Specifications Highway Bridge กำหนดมาตรฐานการตรวจสอบความปลอดภัยไว้ดังนี้ คือ

อัตราส่วนความปลอดภัยด้านการฉีกขาด > 2.0

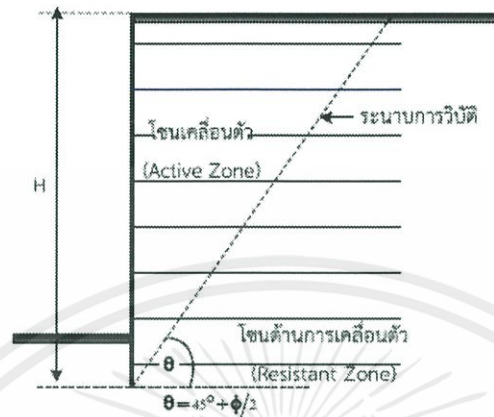
อัตราส่วนความปลอดภัยด้านทานแรงเฉด > 1.5

การวิเคราะห์หาอัตราส่วนความปลอดภัยด้านการฉีกขาด (Rupture Resistance) และด้านการถอดออก (Pullout Resistance) ของกำแพงกันดินเสริมกำลัง จะสมมติโดยแบ่งมวลดินภายในกำแพงกันดินเสริมกำลังออกเป็นสองโซน ได้แก่ โซนเคลื่อนตัว (Active zone) และโซนต้านการเคลื่อนตัว (Resistant zone) โดยต้องพิจารณาตำแหน่งของแรงเฉดสูงสุดและระนาบการวิบัติที่เกิดขึ้นภายในกำแพงกันดินเสริมกำลัง แรงดึงสูงสุดในวัสดุเสริมกำลัง และกำลังต้านทานการฉีกขาด (Rupture Resistance)

2.1 การพิจารณาตำแหน่งของแรงเฉดสูงสุดและระนาบวิบัติ

ระนาบการวิบัติของมวลดินและวัสดุเสริมกำลังหลังกำแพงกันดิน เป็นระนาบที่แสดงจุดที่เกิดแรงเฉดสูงสุดบริเวณด้านหลังของกำแพงกันดินเสริมกำลัง ระนาบวิบัตินี้สามารถเกิดขึ้นกับกำแพงกันดินเสริมกำลังทั้งที่เสริมด้วยวัสดุเสริมกำลังที่ยึดตัวได้และวัสดุเสริมกำลังที่มีค่าการยึดตัวต่ำ โดยระนาบการวิบัติของวัสดุเสริมกำลังแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้เป็นวัสดุเสริมกำลัง โดยเฉพาะค่าความแข็งแรงของวัสดุ (Stiffness)

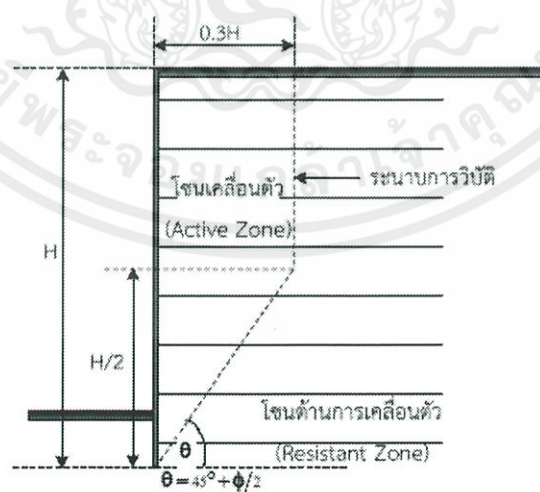
ระนาบการวิบัติของกำแพงกันดินเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมกำลังที่มีความยืดหยุ่น วิเคราะห์ได้จากทฤษฎี “Tie-Back Theory” (Juran and Christopher, 1989) มีลักษณะแนววิบัติเป็นแนวเส้นตรงทำมุม $45 + \phi / 2$ องศา เมื่อ ϕ คือมุมเสียดทานภายในของดินถมในโซนเสริมกำลัง



รูปที่ 2.39 แสดงระนาบการวิบัติของกำแพงกันดินเสริมกำลังด้วยวัสดุที่มีความยืดหยุ่น

[รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 2556]

ระนาบการวิบัติของกำแพงกันดินเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมกำลังที่มีความยืดหยุ่น วิเคราะห์ได้จากทฤษฎี “Coherent gravity structure hypothesis” (Anderson et al., 1987) กล่าวว่าแนววิบัติที่เปลี่ยนไปตามความสูงของกำแพงกันดิน (H) เมื่อความสูงของกำแพงกันดินมีค่ามากกว่าเท่ากับ $1/2$ เท่าของความสูงกำแพงจากพื้นดิน ($\leq H/2$) แนววิบัติจะเป็นเส้นตรงทำมุม $45 + \phi / 2$ องศา และเมื่อความสูงของกำแพงกันดินมีค่ามากกว่าครึ่งหนึ่งของความสูงกำแพงจากพื้นดิน แนววิบัติจะเปลี่ยนไปเป็น $3/10$ เท่าของความสูงกำแพง ($0.3H$) จากกำแพงกันดิน



รูปที่ 2.40 แสดงระนาบการวิบัติของกำแพงกันดินเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมกำลังที่มีค่าการยึดตัวต่ำ

[รศ.ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 2556]

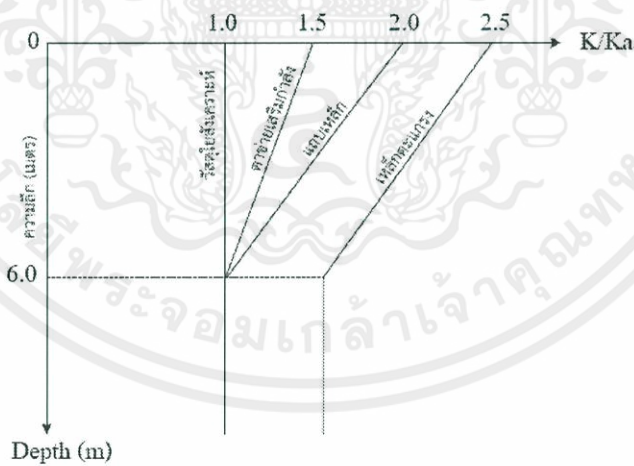
ระนาบวิบัติ (Failure Plane) เป็นระนาบที่กำหนดพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของมวลดิน ดังนั้นมวลดินถูกแบ่งออกเป็นสองโซน ได้แก่

1. โซนการเคลื่อนตัว (Active Zone) เป็นการเคลื่อนตัวของมวลดินด้านหน้าบริเวณที่อยู่ติดชิดกับกำแพงกันดิน เนื่องจากแรงดันของมวลดินที่ถูกกดอัดอยู่ภายในโครงสร้างของกำแพงกันดิน ส่งผลให้มวลดินและผิวหน้าของกำแพงกันดิน (Facing) เกิดการเคลื่อนตัว ในขณะที่วัสดุเสริมกำลังระหว่างชั้นดินถูกอัดทำหน้าที่เป็นวัสดุยึดรั้งไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัว ช่วยเสริมกำลังต้านทานแรงจุดในทิศทางตรงข้าม

2. โซนต้านการเคลื่อนตัว (Resistant Zone) เป็นบริเวณที่มวลดินถูกอัดด้านหลังกำแพงกันดินมีระยะห่างจากผิวหน้าของกำแพงกันดินเพิ่มมากขึ้น ทำให้โซนดังกล่าวได้รับอิทธิพลจากการเคลื่อนตัวของมวลดินลดลง และเป็นโซนที่วัสดุเสริมกำลังมีกำลังต้านทานการจุดที่เกิดขึ้นในโซนการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้น ช่วยเพิ่มเสถียรภาพและลดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน

2.2 การพิจารณาแรงดึงสูงสุดในวัสดุเสริมกำลัง

ในกรณีที่กำลังต้านทานแรงจุดในโซนต้านการเคลื่อนตัวมีค่าสูงมากพอ (วัสดุเสริมกำลังอยู่ในสถานะสมดุล) แรงจุดที่เกิดขึ้นจะเท่ากับแรงดึงที่เกิดขึ้นในวัสดุที่เสริมกำลังซึ่งจะสมดุลกับความดันดินด้านข้างที่เกิดขึ้นในโซนเสริมกำลัง (Reinforced zone) ความดันดินด้านข้างที่กระทำต่อวัสดุเสริมกำลังในแต่ละชั้นจะเท่ากับค่าความเค้นในแนวตั้งคูณด้วยสัมประสิทธิ์ ความดันดินด้านข้าง ที่สถานะนิ่ง (At Rest) หรือ สถานะเคลื่อนตัว (Active) ซึ่งจะแปรผันตามค่าความแข็งแรงของวัสดุ (Stiffness)



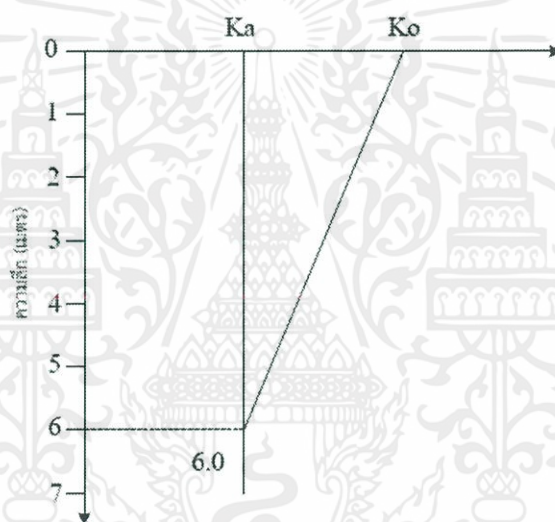
รูปที่ 2.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างกับความลึก สำหรับเหล็กเสริมชนิดต่างๆ (Christopher et al., 1989)

ในกรณีของวัสดุเสริมกำลังที่สามารถยึดตัวได้ การเคลื่อนตัวด้านข้างจะเกิดขึ้นสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณด้านบนของกำแพงกันดิน ส่งผลให้ความดันความดันดินด้านข้างอยู่ในสถานะเคลื่อนตัว

(Active) เช่น การประยุกต์ใช้วัสดุใยสังเคราะห์ในการเสริมกำลัง จะมีสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง (K) เท่ากับ แรงดันดินด้านข้างอยู่ในสภาวะเคลื่อนตัว (Ka)

สำหรับวัสดุเสริมกำลังที่มีค่าการยึดตัวต่ำ การเคลื่อนตัวด้านข้างจะเกิดขึ้นน้อย เนื่องจากแรงดันดินด้านข้างมีแนวโน้มจะอยู่ในสภาวะนิ่ง (At rest) การเคลื่อนตัวจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยที่ส่วนบนของกำแพงกันดิน (ในช่วงความลึกน้อยกว่า 6.0 เมตร) และมีค่าลดลงตามความลึกที่เพิ่มขึ้น เช่น การใช้เหล็กตะแกรง เป็นวัสดุเสริมกำลัง จะมีสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง (K) ประมาณ 2.5 เท่าของแรงดันดินด้านข้างอยู่ในสภาวะเคลื่อนตัว (Ka)

ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง เพื่อพิจารณาเสถียรภาพภายในของวัสดุเสริมกำลัง โดยพิจารณาระดับความลึกที่ผิวดิน $K = K_0(K_0 = 1 - \sin\phi)$ และที่ระดับความลึกมากกว่า 6 เมตร $K = K_a$ (AASHTO, 1996)



รูปที่ 2.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความดันดินด้านข้างกับความลึกสำหรับเหล็กเสริมทุกชนิด (AASHTO's Standard Specifications Highway Bridge Section 5.8)

2.3 การพิจารณากำลังต้านทานการฉีกขาด (Rupture resistant)

กำลังต้านทานการฉีกขาด (Rupture resistant : T_d) หมายถึงอัตราส่วนระหว่างแรงดึงครากของวัสดุเสริมกำลังแต่ละชั้นต่อแรงดึงสูงสุด ในกรณีของวัสดุเสริมกำลังเส้นใย การประมาณกำลังต้านทานการฉีกขาดที่อายุการใช้งานใดๆ สามารถประมาณได้ตามมาตรฐานสำนักงานทางหลวงแห่งรัฐ (FHWA) มาตรฐานของประเทศอังกฤษ (BS8006 : 1995) และมาตรฐานของออสเตรเลีย ดังนี้

$$T_d = \frac{T_c}{FS_c \times FS_d \times FS_e \times FS_m} \quad (2.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	T_d	คือ	กำลังต้านทาน การฉีกขาดของวัสดุที่อายุใช้งาน
	T_c	คือ	กำลังต้านทานฉีกขาดของวัสดุ (หลังการผลิต)
	FS_c	คือ	แฟคเตอร์ความคืบ
	FS_d	คือ	แฟคเตอร์ความเสียหายที่เกิดระหว่างการก่อสร้าง
	FS_e	คือ	แฟคเตอร์สภาพแวดล้อม
	FS_m	คือ	แฟคเตอร์มาตรฐานการผลิต

แฟคเตอร์ความคืบ (FS_c) คือ อิทธิพลของความคืบต่อกำลังต้านทานการฉีกขาดของวัสดุเสริมกำลังที่อายุการใช้งาน ตัวอย่างเช่น เมื่อพิจารณาวัสดุใยสังเคราะห์ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 120 ปี พบว่าค่ากำลังรับแรงดึงลดลงเหลือร้อยละ 6.5 แสดงว่าแฟคเตอร์ความคืบมีค่าเท่ากับ 1.5 ($1.00 / 0.65$)

แฟคเตอร์ความเสียหายที่เกิดระหว่างการก่อสร้าง (FS_d) พิจารณาการสูญเสียกำลังของวัสดุเสริมกำลังจากผลทดสอบในสนาม เนื่องจากความเสียหายระหว่างขั้นตอนการบดอัดดินในกระบวนการติดตั้ง และขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้ คือ ลักษณะของวัสดุของเสริมกำลังลักษณะของดินถมบดอัด และพลังงานการบดอัด ขนาดของเม็ดดินจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อค่าการเพิ่มขึ้นของแฟคเตอร์ เนื่องจากวัสดุเสริมกำลังมีแนวโน้มที่จะได้รับความเสียหายจากการก่อสร้างโดยใช้ดินหยาบมากกว่าดินเม็ดละเอียด ในขณะที่กำลังต้านทานแรงดึงที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้แฟคเตอร์ความเสียหายที่เกิดระหว่างการก่อสร้างมีค่าลดลง โดยทั่วไปจะมีค่า 1.1 – 3.0

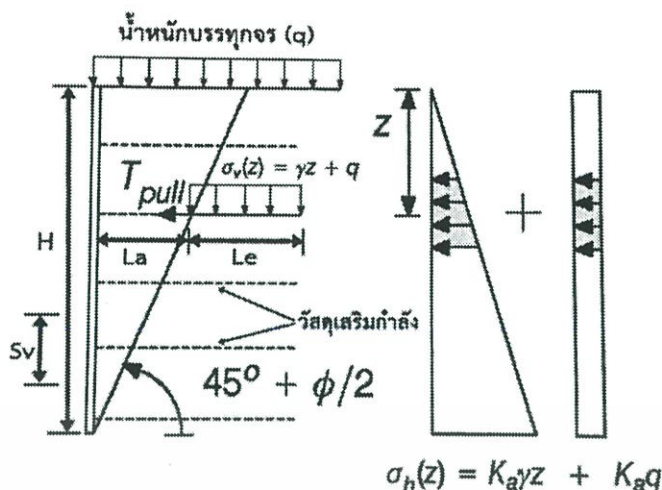
แฟคเตอร์สภาพแวดล้อม (FS_e) พิจารณาจากความทนทานของวัสดุเสริมกำลังต่อสภาพเคมีและชีวภาพ แฟคเตอร์นี้ขึ้นอยู่กับค่า PH ของดิน โดยทั่วไปจะมีค่า 1.1 – 2.0

แฟคเตอร์มาตรฐานการผลิต (FS_m) พิจารณาจากความไม่สม่ำเสมอของเนื้อวัสดุ ในกระบวนการผลิตตามมาตรฐานคุณภาพผลิตภัณฑ์ ISO 9001 : 2000 และ มาตรฐานควบคุมการผลิต ISO / IEC 17025 โดยทั่วไปมีค่า ≥ 1.5

2.4 การพิจารณากำลังต้านทานแรงฉุด (Pullout resistant)

กำลังต้านทานแรงฉุด (Pullout resistant: T_{pull}) เกิดจากความเสียดทานระหว่างวัสดุเสริมกำลังและดินถมบดอัด กลไกที่เกิดขึ้นช่วยลดการเกิดการลื่นไถลระหว่างวัสดุเสริมกำลังและชั้นดินถมที่เกิดจากแรงเฉือนตรง (Direct Shear) และแรงฉุด (Pullout)

การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่เกิดขึ้นบริเวณส่วนบนของกำแพงกันดิน มีผลจากแรงดันดินด้านข้างเกิดการเคลื่อนตัวอยู่ในสภาวะรุก (Active) หรือเรียกว่าแรงฉุด (T) เมื่อกำลังต้านทานแรงฉุดที่เกิดขึ้นจากวัสดุเสริมกันดินมีเสถียรภาพ ไม่เกิดการเคลื่อนตัว โดยสมมุติที่เกิดขึ้นจะเกิดในโซนที่เสริมกำลัง (Reinforced Zone)



รูปที่ 2.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความดันดินด้านข้างกับความลึกสำหรับ

เหล็กเสริมทุก [ดร.ศลิษา ไชยพุทธ]

แรงดูดสูงสุด (T) ที่เกิดขึ้นกับกำแพงกันดินเสริมกำลังประมาณได้จาก แรงดินด้านข้างที่กระทำต่อวัสดุเสริมกำลังในแต่ละชั้นจะมีค่าเท่ากับความเค้นในแนวตั้ง (σ_v) คูณด้วยสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างที่สถานะอยู่ในสภาวะรูก (K_a)

กรณีไม่พิจารณาน้ำหนักบรรทุก

$$T = (K_a \gamma z) S_v = (K_a \sigma_v) S_v = \sigma_h S_v \quad (2.33)$$

กรณีพิจารณาน้ำหนักบรรทุก

$$T = (K_a \gamma z + K_a q) S_v = (K_a \sigma_v + K_a q) S_v = (\sigma_h + K_a q) S_v \quad (2.34)$$

การวิเคราะห์กำลังต้านทานแรงดูดของวัสดุเสริมกำลังที่ยึดตัวได้ ได้แก่ วัสดุในสังเคราะห์

$$T_{\text{pull}} = 2L_e \sigma_v \tan \delta \quad (2.35)$$

โดยที่ ความยาวของวัสดุเสริมกำลัง $L = L_a + L_e$

$$L_a = (H - z) \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.36)$$

Task Force 27, FHWA 1989 กำหนดการตรวจสอบอัตราส่วนความปลอดภัยไว้ดังนี้ คือ

$$FS = \frac{T_{\text{pull}}}{T} \geq 1.5 \quad (2.37)$$

เมื่อ L คือ ความยาววัสดุเสริมกำลัง

L_a คือ ความยาวของวัสดุเสริมกำลังในโซนการเคลื่อนตัว

L_e คือ ความยาวของวัสดุเสริมกำลังในโซนต้านทานการเคลื่อนตัว

σ_v คือ ความเค้นกดทับในแนวตั้ง

δ คือ มุมเสียดทานภายในระหว่างดินถมบดอัดและวัสดุเสริมกำลัง

S_v คือ ระยะห่างของวัสดุเสริมกำลังในแต่ละชั้นของดินถมบดอัด

σ_h คือ แรงดันดินในแนวราบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Z คือ ระดับความลึกที่พิจารณา

q คือ น้ำหนักบรรทุกจร

การพิจารณาตรวจสอบเสถียรภาพภายใน ของกำแพงกันดินที่เสริมกำลังด้วยวัสดุทุกระเภท ค่ากำลังต้านทานการฉีกขาดของวัสดุเสริมกำลัง และค่ากำลังต้านทานแรงฉุดด้านหลังระนาบวิบัติ จะต้องมีค่าสูงกว่าแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้น (AASHTO,1996)

การหาความยาวส่วนที่ห่อหุ้มผิวหน้าของกำแพงกันดินเสริมกำลัง (Overlap : L_o) ทำได้โดยการสมมุติให้แรงดันดินด้านข้างที่พิจารณา มีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันดินด้านข้างทั้งหมดตั้งนั้น

$$L_o = \frac{(0.5\sigma_n)(S_v)(FS)}{2(c+\sigma_v \tan(\frac{\phi}{3}))} \quad (2.38)$$

เมื่อ C_a คือระยะห่างระหว่างวัสดุเสริมกำลังในแนวดิ่ง

F_s คือ อัตราส่วนปลอดภัย ซึ่งมีค่าไม่น้อยกว่า 1.5

ความยาวส่วนที่ห่อหุ้มผิวหน้าของกำแพงกันดินเสริมกำลัง (Overlap) ควรมีค่าไม่น้อยกว่า 1.0 ถึง 1.5 เมตร เนื่องจากขั้นตอนก่อสร้างในบริเวณหน้างานจริง การควบคุมคุณภาพการบดอัดดินเป็นไปได้ยากโดยเฉพาะบริเวณผิวหน้าของกำแพงกันดิน (Facing) ทำให้คุณภาพในการบดอัดดินต่ำ การเคลื่อนตัวของบริเวณดังกล่าวมีมาก และส่งผลให้วัสดุเสริมกำลังบริเวณส่วนที่ห่อหุ้มผิวหน้าของกำแพงกันดิน (Overlap) เกิดการเคลื่อนตัวออก ตั้งนั้นเพื่อเพิ่มค่าความปลอดภัยให้มากขึ้น ความยาวของวัสดุที่นำมาห่อหุ้มผิวหน้าของกำแพงกันดินเสริมกำลังควรมากเพียงพอ

2.3 เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพโครงสร้างกันดิน

2.3.1 วัสดุสังเคราะห์ (Geosynthetics)

วัสดุสังเคราะห์ เป็นเส้นใยที่ได้จากพอลิเมอร์สังเคราะห์ ซึ่งในทางวิศวกรรมนิยมใช้เพิ่มประสิทธิภาพและความแข็งแรงของดิน ประกอบด้วยโมเลกุลที่มีการเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบ และโมเลกุลส่วนใหญ่ต้องเรียงตัวตามแนวแกนของเส้นใย โดยทั่วไปความยาวของเส้นใยต้องไม่น้อยกว่า 100 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยนั้น เส้นใยสังเคราะห์บางชนิดมีสมบัติดีกว่าเส้นใยธรรมชาติ เช่น มีความทนทานต่อจุลินทรีย์ เชื้อรา แบคทีเรีย ไม่ยับง่าย ไม่ดูดน้ำ ทนทานต่อสารเคมี แข็งแรง ตัวอย่างเส้นใยที่นำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย เช่น ไนลอน และโอรอน (พอลิอะคริไลน ไตรด์) เส้นใยสังเคราะห์เป็นเส้นใยที่มีสมบัติหลายอย่างที่แตกต่างกันไปจากเส้นใยธรรมชาติ เช่น ทนทานต่อสารเคมี ยับยาก ไม่ดูดซับน้ำ ซักง่าย แข็งแรง และยังสามารถผลิตเป็นจำนวนมากได้ นอกจากนี้เส้นใยสังเคราะห์ยังมีข้อดีที่สามารถควบคุมเส้นใยให้มีคุณภาพสม่ำเสมอเท่าเทียมกัน ซึ่งต่างจากเส้นใยธรรมชาติที่คุณภาพของเส้นใยอาจมีความแตกต่างกันได้ตามแหล่งผลิต

หน้าที่หลักของวัสดุสังเคราะห์ ได้แก่

1. Separation (การแยกชั้น) โดยมากจะเป็นการปูเพื่อแยกวัสดุมวลรวม 2 ชนิดที่ต่างกัน ออกจากกัน เพื่อเป็นการควบคุมการรวมตัวของวัสดุที่ไม่เท่ากัน เช่น เป็นการปูรองชั้นดินก่อนถมวัสดุมวลรวมใหม่เพื่อทำเป็นวัสดุรองพื้น ก่อนทำผิวหน้าเป็นคอนกรีตหรือแอสฟัลท์
2. Reinforcement (การเสริมกำลัง) ช่วยในการเสริมกำลังให้กับดินเพื่อเพิ่มกำลังในวัสดุ และลดการเสียรูปในดิน ตัวอย่าง geogrids ใช้ในการเพิ่มกำลังในการรับแรงดึงในดินหรือการเสริมกำลังในกำแพงกันดิน หรือการเสริมกำลังในคันดินถมที่สร้างอยู่บนดินเหนียวอ่อนและมีความลาดชัน ด้านข้างที่สูงโดยดินที่บดอัดธรรมดาและไม่เสริมกำลังไม่สามารถก่อสร้างได้เป็นต้น
3. Drainage (การระบายน้ำ) ช่วยระบายน้ำสำหรับดินที่มีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำ เช่น geotextile ใช้ในการกระจายแรงดันน้ำใต้ฐานของคันดินถมถนน หรือ geocomposite ใช้ช่วยในการระบายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งวัสดุเหล่านี้ถูกนำมาใช้ในการช่วยระบายน้ำตามขอบลาดเอียง คอสะพาน หรือในกำแพงกันดิน Prefabricated vertical drains (PVDs) ได้ถูกนำมาใช้ในการเร่งอัตราการทรุดตัวของดินเหนียวอ่อนใต้คันดินถม เป็นต้น
4. Filtration (การกรอง) วัสดุสังเคราะห์จะทำหน้าที่คล้ายกับเครื่องกรองทรายโดยจะปล่อยให้ น้ำเคลื่อนตัวผ่านกรองขณะที่เม็ดดินจะค้างอยู่ไม่สามารถผ่านออกไปได้ ตัวอย่างเช่น geotextiles ใช้สำหรับป้องกันเม็ดดินที่ถูกพัดพามาในการระบบการระบายน้ำ เป็นต้น
5. Containment (การบรรจุ) ทำหน้าที่เป็นชั้นที่บเพื่อป้องกันของเหลวและแก๊สผ่าน ตัวอย่างเช่น geomembranes, geosynthetic clay liners (GCLs) และ field-coated geotextiles จะถูกใช้เป็นผนังกั้นน้ำเพื่อขวางกั้นการไหลผ่านไปของของเหลวหรือแก๊ส ซึ่งการใช้งานประเภทนี้ยังนำไปใช้ในการซ่อมผิวถนนโดยใช้วิธี overlays หรือ การนำไปห่อหุ้มดินบวมตัว หรือ การบรรจุของเสียได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดของวัสดุใยสังเคราะห์

1) Geotextiles มีลักษณะเป็นแผ่นใยสังเคราะห์ผืนใหญ่น้ำหนักเบา ทำให้เป็นผืนโดยการนำเส้นใยมาผลิตโดยตรง ไม่ต้องผ่านการทำให้เป็นเส้นด้ายก่อน เส้นใยสามารถยึดติดกันและทำให้แข็งแรงด้วยกระบวนการเชิงกล กระบวนการทางเคมี และกระบวนการทางความร้อน เส้นใยที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นเส้นใยประดิษฐ์ เช่น Polyester Polypropylene

ชนิดของ Geotextiles

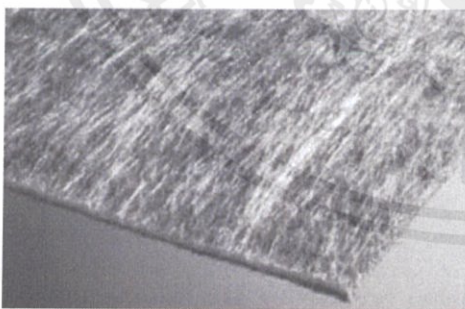
1. แผ่นใยสังเคราะห์ชนิดไม่ถักทอ (Non-woven) มีความยาวของเส้นใยที่ต่อเนื่องและใส่สารป้องกันแสงแดด เพื่อป้องกันการเสียหายจากแสง UV ในขั้นตอนการนำไปใช้งาน อีกทั้งยังมีความยืดหยุ่นสูงควบคู่ไปกับการซึมผ่านของน้ำที่ดี ควบคู่ไปกับการกรองที่มีประสิทธิภาพสูงใช้สำหรับเป็นวัสดุแยกชั้นดิน กรองดิน และเพิ่มเสถียรภาพให้กับชั้นดินอ่อน เหมาะสำหรับงานดังต่อไปนี้

1. งานถนนที่มีผิวทางและไม่มีผิวทาง หรือชั้นดินเพิ่มเสถียรภาพ (Platform)
2. งานถมพื้นที่หนองน้ำเดิมเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่
3. งานลานกองเก็บวัสดุหรือวางตู้สินค้า
4. งานก่อสร้างรางรถไฟและงานระบบระบายน้ำข้างทางหรือใต้ชั้นทาง
5. งานก่อสร้างจัดสวนบนหลังคาและงานภูมิสถาปัตยกรรม

แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ

1. กลุ่มที่ใช้เส้นใยยาว มักมีสีเทา
2. กลุ่มที่ใช้เส้นใยสั้น มักมีสีขาว

โดยกลุ่มที่ใช้เส้นใยยาวจะให้ค่าผลการทดสอบสูงกว่ากลุ่มที่ใช้เส้นใยสั้นทุกรายการผลการทดสอบเมื่อมีหน่วยน้ำหนักเท่าๆกัน



รูปที่ 2.44 แสดงชนิดที่ผลิตจาก
Polypropylene

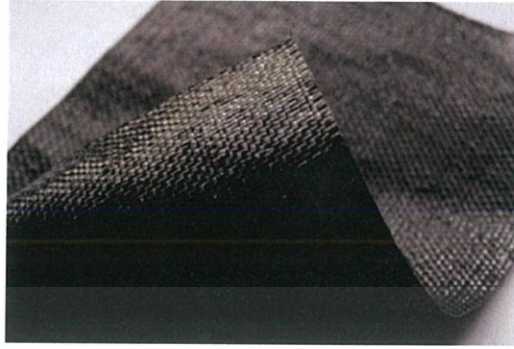


รูปที่ 2.45 แสดงชนิดที่ผลิตจาก
Polyester

2. แผ่นใยสังเคราะห์ชนิดถักทอ (Woven) ทำจากวัสดุ Polypropylene และ Polyester นำมาถักทอ แผ่นใยชนิดนี้มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นสูง ทนทานต่อสารเคมีต่างๆที่มีอยู่ในดินธรรมชาติสูง ช่วยในการซึมผ่านของน้ำได้ดี เหมาะสำหรับการป้องกันการขยฝั้ทะเล ราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รถไฟ และเพิ่มความแข็งแรงของงานดิน โดยการเชื่อมต่อกันของแผ่นใช้วิธีเย็บตาม SEWING SEAM STANDARD (BS 8006: 1995)



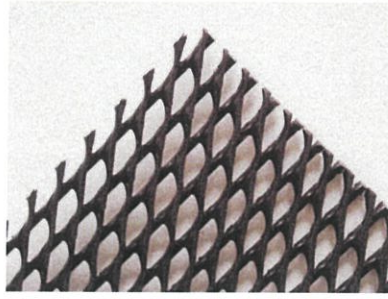
รูปที่ 2.46 แสดง Woven geotextile

2) Geogrids (ตาข่ายเสริมกำลังดิน) มีลักษณะคล้ายแผ่นตารางที่มีช่องขนาดใหญ่ ผลิตจากเส้นใย Polyester ชนิดรับแรงดึงได้สูงและเคลือบด้วยสารโพลีเมอร์ ทนทานต่อแสงแดดในระหว่างการใช้งาน มีความล้าและการยืดตัวที่ต่ำ สามารถต้านทานความเสียหายในระหว่างการก่อสร้างได้ดี ติดตั้งได้ง่าย เหมาะสำหรับการเสริมกำลังในกำแพงกันดิน เสริมระหว่างชั้นรองพื้นทาง ซ่อมแซมทางลาดดินที่พังทลาย รวมทั้งเสริมแรงและกระจายน้ำหนักเหนือโครงสร้างเข็มกลุ่ม



รูปที่ 2.47 แสดง geogrids

3) Geonets คือ วัสดุใยสังเคราะห์ที่ประกอบไปด้วยโครงตาข่ายที่เชื่อมต่อกันวางเป็นแนวเรียงกันที่มุมต่างๆ ใช้สำหรับสำหรับการระบายในแนวระนาบของของเหลวหรือแก๊ส วัสดุ geonet มักจะถูกเคลือบกับวัสดุ geotextiles บนพื้นผิวด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้านซึ่งใช้ในการระบายน้ำอีกทั้งยังสามารถรองวัสดุที่มีขนาดเล็กไปได้พร้อมๆกันซึ่งจะเรียกว่าวัสดุ geocomposites



รูปที่ 2.48 แสดง Geonets

4) Geomembranes เป็นวัสดุสังเคราะห์ที่มีคุณสมบัติการซึมผ่านน้ำต่ำมาก มักใช้เป็นวัสดุที่ป้องกัน กักเก็บในทางด้านธรณีวิศวกรรม เช่น งานควบคุมของเหลว แก๊ส หรือสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เป็นต้น วัสดุ geomembrane ทำขึ้นรูปจากแผ่นพอลิเมอร์ แต่ก็สามารถที่จะทำได้จากวัสดุ geotextiles แล้วทำให้ชุ่มด้วย asphalt, elastomer หรือ polymer sprays เป็นต้น



รูปที่ 2.49 แสดง Geomembrane

5) Geosynthetic Clay Liner (GCL) คือ วัสดุ geocomposites ที่ประกอบไปด้วยชั้นดิน bentonite ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ระหว่างวัสดุ geotextile หรือ geotextile bentonite โดยติดกับแผ่น geomembrane อีกชั้นหรือมีเพียงแค่วัสดุ geotextile ก็ได้ ซึ่ง GCLs มักจะถูกเย็บหรือใช้เข็มเจาะเย็บทะลุชั้น bentonite ตรงกลางเพื่อเพิ่มเสถียรภาพภายในเนื่องจากแรงเฉือนของวัสดุ GCLs ซึ่งเมื่อวัสดุ GCLs ถูกน้ำจะทำให้ bentonite บวมตัวและเป็นกำแพงป้องกันสำหรับของเหลวหรือแก๊สและนิยมใช้ในงานก่อสร้างบ่อทิ้งขยะซึ่งมักใช้งานร่วมกับวัสดุ geocomposites



รูปที่ 2.50 แสดง GCL

6) Geofom สร้างขึ้นโดยการขยายตัวของ polystyrene foam ซึ่ง Geofom ใช้ในงานฉนวนกันความร้อน เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา นิยมใช้เป็นวัสดุ back fill ซึ่งในช่วยลดแรงดันดินที่กระทำต่อกำแพงกันดิน



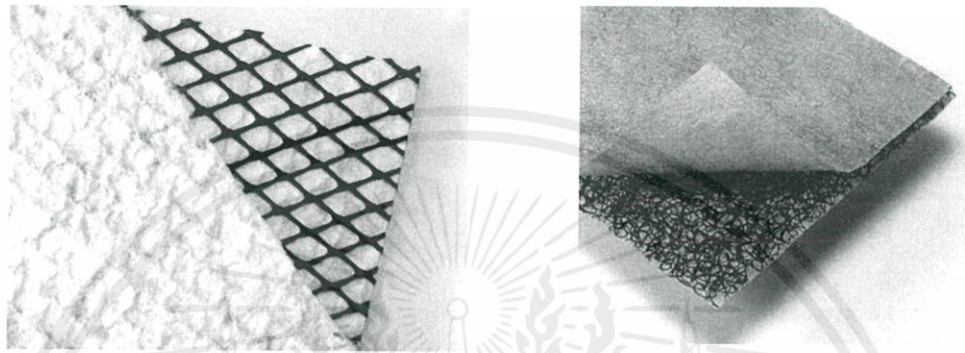
รูปที่ 2.51 แสดง Geofom

7) Geocell เป็นวัสดุที่ค่อนข้างหนา มีลักษณะการเชื่อมต่อเป็นแบบสามมิติ สร้างขึ้นจากแผ่น polymeric ซึ่งจะทำให้การเชื่อมแผ่น polymeric เข้าด้วยกันให้เป็นรูปแบบของเซลล์ที่เชื่อมต่อกันมีช่องว่างสำหรับเติมดินลงไป ในช่องหรือบางที่อาจจะเป็นคอนกรีตซึ่งขึ้นอยู่กับการใช้งาน



รูปที่ 2.52 แสดง Geocells

8) Geocomposites คือ วัสดุใยสังเคราะห์ที่สร้างขึ้นจากการรวมกันของวัสดุใยสังเคราะห์สองชนิดขึ้นไป ตัวอย่างเช่น geotextile-geonet; geotextile-geogrid; geonet-geomembrane; หรือ geosynthetic clay liner (GCL) ซึ่ง Prefabricated geocomposite drains or prefabricated vertical drains (PVDs) ก็จัดได้ว่าเป็นวัสดุ Geocomposites ซึ่ง PVDs ทำขึ้นจากการรวมกันของไส้กลางเป็นพลาสติกซึ่งทำหน้าที่เป็นรูระบายน้ำและวัสดุ geotextile ทำหน้าที่เป็นที่กรองซึ่งติดไว้รอบๆไส้กลาง เป็นต้น



รูปที่ 2.53 แสดง Geocomposites

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 Richard Bathurst (2014)

Richard Bathurst (2014) ได้ทำการจำแนกประเภทของกำแพงกันดินที่ใช้กันอยู่ทั่วไปแบบย่อๆ และอธิบายการออกแบบของกำแพงกันดินแต่ละประเภท โดยกำแพงกันดินสามารถจำแนกตามวัสดุที่ใช้ได้ 2 ประเภท คือ โลหะ ได้แก่ steel strips, steel bar mats, ladder และวัสดุใยสังเคราะห์ ได้แก่ Geotextiles, Geogrids, Straps ซึ่งวัสดุใยสังเคราะห์มักผลิตจาก Polypropylene (PP), High Density Polyethylene (HDPE) และ Polyester

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

การศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างกันดินในงานชุดดินจริงๆในสนามเป็นการศึกษาที่มีค่าใช้จ่ายสูงมาก ใช้เวลานานและบางครั้งมีความเสี่ยงต่ออันตรายสูง ยิ่งไปกว่านั้นการก่อสร้างจริงนั้นอาจจะเรียกได้ว่าไม่สามารถควบคุมพารามิเตอร์ที่ต้องการได้ เป็นการศึกษาที่ไม่สามารถทำซ้ำเพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่สนใจได้ ดังนั้นการศึกษาด้วยแบบจำลองจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมาก

สวัสดี สุคนธรังสี (2520: 206) กล่าวว่า แบบจำลองหมายถึงตัวแทนที่สร้างขึ้นเพื่ออธิบายพฤติกรรม หรือลักษณะบางประการของสิ่งที่เป็จริงอย่างหนึ่ง

Bardo and Hartman (1982: 70-71) กล่าวว่า แบบจำลองเป็นสิ่งที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อบรรยายคุณลักษณะที่สำคัญของปรากฏการณ์อย่างใดอย่างหนึ่ง เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจแบบจำลองจึงมิใช่การบรรยายหรืออธิบายปรากฏการณ์อย่างละเอียดทุกแง่มุม เพราะการกระทำเช่นนั้นจะทำให้แบบจำลองนั้นด้อยลงไป ส่วนการที่จะระบุว่าแบบจำลองใดจะต้องประกอบด้วยรายละเอียดมากน้อยเพียงใดจึงจะเหมาะสมและแบบจำลองนั้นๆ ควรมีองค์ประกอบอะไรบ้าง ไม่ได้มีการกำหนดตายตัว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์แต่ละอย่างและวัตถุประสงค์ของผู้สร้างแบบจำลองนั้นว่าต้องการจะอธิบายปรากฏการณ์นั้นๆ อย่างไร

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

3.2 คุณสมบัติของดินตัวอย่างและกระดาษหนังสือพิมพ์ในแบบจำลอง

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

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

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

จึงต้องทราบขนาดคละของเม็ดดินเพื่อให้ทราบคุณสมบัติของดินตัวอย่างที่จะใช้ในการศึกษาด้วยแบบจำลอง

การหาขนาดและการกระจายตัวของเม็ดดินทำได้หลายวิธี ตามความเหมาะสมของขนาดเม็ดดินและตาม ชนิดของดิน ดังนี้

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

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

ทั้งสองวิธีดังกล่าวอาจใช้ร่วมกันในการวิเคราะห์ขนาดของตัวอย่างเดียวกันได้ โดยในการศึกษาครั้งนี้ใช้ทรายเป็นดินตัวอย่าง จึงหาขนาดคละของเม็ดดินด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรง (Sieve Analysis) เท่านั้น

อุปกรณ์

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

วิธีการทดลอง

- 1) ชั่งตะแกรงทุกขนาดที่ใช้ โดยตาชั่งอ่านได้ถึง 0.1 กรัม โดยตะแกรงชุดหนึ่งไม่ควรเกิน 7 ใบ โดยมีขนาดละเอียดถึงเบอร์ 200 อยู่ด้วยทุกครั้ง
- 2) ในกรณีที่ตัวอย่างดินเกาะเป็นก้อนใหญ่ให้ทุบ แยกดินออกเป็นเม็ดอิสระด้วยค้อนยาง แต่ต้องระวังอย่าให้แรงมากจนเม็ดดินแตก
- 3) นำตัวอย่างดินที่อบชั่งน้ำหนักแล้วใส่ลงในตะแกรงที่เรียงลำดับจากหยาบไปหาละเอียด โดยมีฝาปิดด้านบนและมีถาด (Pan) รองด้านล่าง รวมเป็นถาดของตะแกรงนำไปเข้าเครื่องเขย่า (sieve shaker) เขย่านานอย่างน้อย 10 นาที
- 4) ชั่งทั้งดินที่ค้างอยู่ในแต่ละตะแกรงรวมทั้งน้ำหนักตะแกรง แล้วนำไปคำนวณหาค่า %F



รูปที่ 3.1 การทดสอบ Grain Size Analysis ของทราย

วิธีการคำนวณ

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

2) เปอร์เซ็นต์การค้างสะสม = ผลบวกสะสมของเปอร์เซ็นต์ของดินที่ค้างบนตะแกรงที่
หยาบกว่า

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

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

มวลดินประกอบด้วยแร่ธาตุต่างๆ อาจประกอบด้วยชนิดเดียวหรือหลากหลายชนิด ดังนั้นความถ่วงจำเพาะในมวลดิน G_s คือ ค่าเฉลี่ยของความถ่วงจำเพาะของแร่ธาตุเหล่านั้น โดยทั่วไปค่าความถ่วงจำเพาะของมวลดินจะมีค่าประมาณ 2.60 ถึง 2.80 แล้วแต่แร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบ เช่นดินลูกรังบางชนิดมีธาตุเหล็กอยู่มากจะมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงถึง 3.00 หรือมากกว่า แต่หากดินมีสารอินทรีย์อยู่มากจะทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะต่ำลง

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

อุปกรณ์

- 1) Pycnometer แบบขวดแก้วคอยาวก้นป่อง (Volumetric flask)
- 2) เตาบุนเส้น หรือ เตาแผ่นร้อน (hot plate) หรือ หม้อต้มน้ำ
- 3) พรอท 0-100°C อ่านละเอียด 0.5 - 1.0°C
- 4) เครื่องกวนดิน (Stirring Apparatus)
- 5) แท่งแก้วคน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 มิลลิเมตร ยาว 30 เซนติเมตร
- 6) กรวย ขนาดปากประมาณ 10 เซนติเมตร แบบรูกว้าง
- 7) ตู้อบ
- 8) อ่างแก้วดูความร้อน
- 9) เครื่องชั่งอ่านละเอียด 0.1 g
- 10) ภาชนะ - ชันอลูมิเนียม



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ในการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน

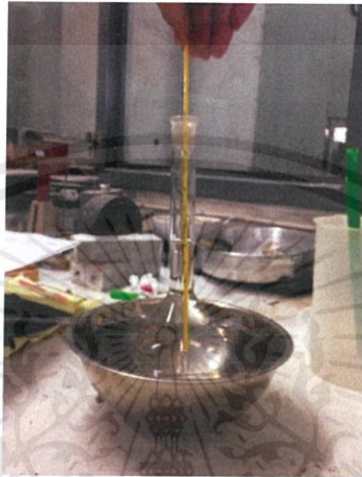
วิธีการทดสอบ

ก) Calibration of Pycnometer

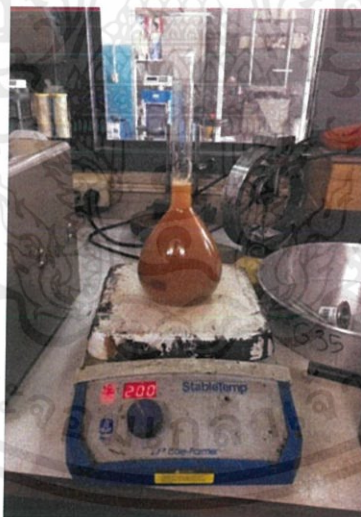
จุดประสงค์เพื่อหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของขวด Pycnometer ซึ่งมีน้ำเต็มถึงขีดที่กำหนด ที่อุณหภูมิต่างๆ ระหว่าง 20°C ถึง 40°C เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการหาค่าถ.พ. ของดินต่อไป โดยทำได้ดังนี้

- 1) ล้างขวด ความถ่วงจำเพาะ ให้สะอาดเติมน้ำกลั่นลงไปจนถึงขีดที่คอขวด (อ่านที่ระดับท้องน้ำ)
- 2) ต้มไล่ฟองอากาศหรือดูดโดยปั๊มสุญญากาศประมาณ 10 นาทีจนฟองอากาศหมด
- 3) เติมน้ำปรับระดับน้ำจนเสมอระดับที่คอขวดพอดี เช็ดภายนอกขวดให้แห้ง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก

- 4) วัดอุณหภูมิของน้ำภายในขวดให้ละเอียด โดยวัดที่หลายระดับ ถ้าอุณหภูมิต่างกัน มาก ให้ตะแคง ขวดแล้วลှ้าไปมาเพื่อให้ผสมเข้ากันดีทำให้อุณหภูมิสม่ำเสมอแล้วจึงบันทึกอุณหภูมิที่ถูกต้อง
- 5) ทำเช่นเดียวกับข้อ 3 และ 4 โดยให้ความร้อนหรือทำให้เย็นลงในช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน (20 ถึง 40°C) ประมาณ 4-5 จุด เช่นที่ 20°C, 25°C, 30°C, 35°C และ 40°C เป็นต้น
- 6) เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักขวดที่มีน้ำเต็มและอุณหภูมิ



รูปที่ 3.3 แสดงการ calibrate pycnometer



รูปที่ 3.4 แสดงการหาความถ่วงจำเพาะที่ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข) การทดลองหาความถ่วงจำเพาะของดิน

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

2) เทส่วนผสมน้ำดินลงในขวดหาความถ่วงจำเพาะ ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วใช้น้ำกลั่นล้างดินที่ติดในภาชนะผสมลงในขวด ความถ่วงจำเพาะให้หมดระว่างอย่าให้ระดับน้ำเกินขีดวัดปริมาตรที่คอขวด

3) ไล่ฟองอากาศโดยการต้มหรือดูดด้วยปั๊มสุญญากาศประมาณ 10 นาที จนฟองอากาศหมด แล้วเติมน้ำกลั่นให้ถึงระดับขีดที่คอขวด แล้วปล่อยให้เย็นถึงอุณหภูมิห้องทดลอง

4) ถ้าระดับน้ำลดลงอีก ให้เติมให้เต็มถึงขีด แล้วนำไปชั่งให้ละเอียดถึง 0.1 กรัม แล้ววัดอุณหภูมิของน้ำในขวด

5) เทแล้วล้างส่วนผสมในขวด ความถ่วงจำเพาะ ลงในภาชนะ นำไปอบให้แห้งเพื่อชั่งน้ำหนักดินที่แน่นอนอีกครั้ง

วิธีการคำนวณ

จากสมการดังนี้ (เมื่อมีปริมาตรเท่ากัน)

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

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

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

เมื่อ : W_s = น้ำหนักดินอบแห้ง, กรัม
 W_2 = น้ำหนักขวดที่มีน้ำเต็มที่อุณหภูมิที่ทดลอง (T_c), กรัม
 W_1 = น้ำหนักขวดที่มีน้ำผสมดินที่อุณหภูมิที่ทดลอง (T_c)
 G_T = ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำที่อุณหภูมิที่ทดลอง (T_c)

3.2.3 Direct Shear Test (มาตรฐานอ้างอิง: ASTM D 3080)

เนื่องจากดินตัวอย่างเป็นดินทราย จึงได้ทำการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (direct shear) ในการหาค่ามุมเสียดทานภายใน (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) เวอร์เนีย

วิธีการทดสอบ

ก) การเตรียมตัวอย่างดินทราย (granular soil)

1) วัดขนาดของความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของ Cutting Ring พร้อมชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำตัวอย่างทรายมาใส่ลงใน Shear Box ใช้ไม้กดทำการบดอัด จำนวนชั้นในการใส่ตัวอย่างและจำนวนการบดอัดขึ้นอยู่กับความหนาแน่นที่ต้องการ จากนั้นแต่งตัวอย่างให้เรียบพอดีขอบแบบ หลังจากนั้นก็ทำความสะอาดขอบแบบ

2) จากนั้นนำ Cutting Ring ที่บรรจุตัวอย่างดินทรายมาทำการชั่งน้ำหนัก

3) ชั้นสกรูประกอบ Shear Box บนและล่าง วางแผ่นฐานล่าง (Retaining Plate) ลงเข้าไปใน Shear Box โดยให้แนวร่องวางในแนวขวางกับทิศทางของการเฉือนตัวอย่าง

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

5) วางแผ่นเหล็กด้านบน (Loading Pad) ให้ร่องขวางทิศการเฉือนตัวอย่างดินทราย

ข) การเฉือนตัวอย่าง (shearing)

1) กดตัวอย่างดินด้วยน้ำหนัก (normal load) ที่ต้องการแล้วรอให้การทรุดตัวทางแนวตั้งหยุด ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 2-10 นาที

2) เริ่มแรงเฉือนให้ตัวอย่าง โดยให้อัตราการเคลื่อนที่ตามแนวราบประมาณ 0.05 นิ้ว/นาที ถึง 0.10 นิ้ว/นาที โดยสม่ำเสมอ

3) อ่านค่าแรงเฉือนจาก proving ring dial, ค่าการเคลื่อนตัวทางแนวตั้งจาก vertical dial gage ทุกๆการเคลื่อนที่ตามแนวราบ 0.01 นิ้ว จนกระทั่งตัวอย่างดินไม่สามารถรับแรงเฉือนได้ โดยค่าจาก proving ring dial จะลดลง

4) เตรียมตัวอย่างหลายๆ กันอีก อย่างน้อย 3 ตัวอย่าง โดยใช้น้ำหนัก (normal load) แตกต่างกัน แล้วทำการทดลองเหมือนข้อ 1 ถึงข้อ 4

การคำนวณและรายงานผลการทดสอบ

- 1) หาค่าความหนาแน่นของตัวอย่างที่ทดสอบ (3 ค่า) (1 ค่าต่อการให้ normal load และการเหวี่ยง 1 ครั้ง)

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

ρ_t = ความหนาแน่นของดินเปียก

- 2) ความเค้นแนวตั้งฉาก (Normal Stress) (3 ค่า)

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

- 3) แรงเฉือน (Shear Stress, τ) (3 ค่า)

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

เมื่อ R = proving ring reading

K = proving ring constant

A = shearing area

- 4) เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง τ กับค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบ และหาค่า τ_{\max} จากจุด peak ของกราฟ
- 5) เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งกับการเคลื่อนตัวในแนวราบ
- 6) เขียน Mohr's Diagram ระหว่าง σ และ τ_{\max} แล้วลากเส้นผ่านจุดเป็นเส้น Strength Envelope และหาค่า c และ ϕ จากกราฟ ($\tau = c + \sigma \tan \phi$)



รูปที่ 3.5 การทดสอบ Direct Shear เพื่อหามุมเสียดทานภายใน

3.2.4 การวัดมุมจากการปล่อยทรายให้ตกลงอย่างอิสระตามแรงโน้มถ่วง

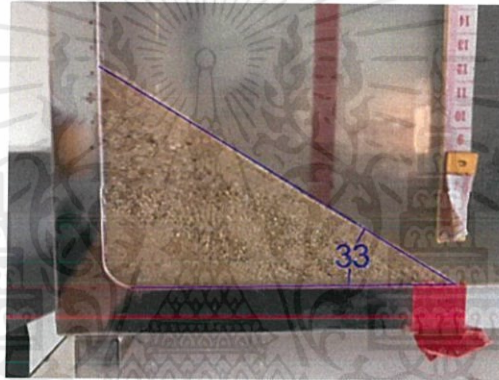
ในการหาค่ามุมเสียดทานภายใน (internal friction angle, ϕ) ของดินทรายที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวภายใน (Cohesion) โดยใช้ทฤษฎี Slope Stability สามารถทำการหามุมเสียดทานภายในได้โดยวิธีกองทรายให้เกิดการไหลลงอย่างอิสระตามแรงโน้มถ่วงได้

อุปกรณ์

- 1) ตัวอย่างดิน
- 2) ไม้วัดมุม

วิธีการทดลอง

นำตัวอย่างดินทรายมาทำการโรยให้เป็นกอง โดยพยายามโรยให้กองทรายสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เมื่อสังเกตว่าทรายที่โรยไปเกิดการไหลลงอย่างอิสระแล้ว ให้วัดมุมที่กองทรายทำกับมุมราบดังรูป



รูปที่ 3.6 การวัดมุมจากการโรยทรายให้ตกอย่างอิสระ

จากสมการ Slope stability ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธีลาดอนันต์ (Infinite Slope)

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

โดย c คือ ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (Cohesion)

L คือ ความยาวที่เกิดทางเขื่อนพัง

w คือ น้ำหนักของมวลที่พังลง

β คือ มุมของลาดความชัน

ϕ คือ มุมเสียดทานภายในของดิน

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$\beta = \phi$$

ดังนั้นมุมของลาดความชันของทรายที่ตกอิสระ จะเท่ากับ มุมเสียดทานภายในของทราย

3.3 Geotextile ในแบบจำลอง

3.3.1 การทดสอบการฉีกขาด (Tear Test)

การทดสอบการฉีกขาด สามารถทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D751 โดยการตัดต่อตัวอย่างกว้าง 4 , 6 , 8 , 10 , 12 , 16 , 20 และ 24 เซนติเมตร นำเข้าเครื่องทดสอบ ใช้ปากกาจับปลายทั้ง 2 ข้าง เพิ่มแรงดึงจนกระทั่งทำให้เส้นใยขาด

3.3.2 การทดสอบการดึงออกจากดิน (Pullout (Anchorage) Test)

Geotextile ในลักษณะการใช้งานเป็นสมอ คือมีลักษณะซึ่งถูกประกบด้วยดินทั้งสองข้าง การวัดความต้านทานสามารถทำได้ในห้องทดสอบโดยวิธี Pullout Test

3.4 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

3.4.1 รูปแบบของแบบจำลอง

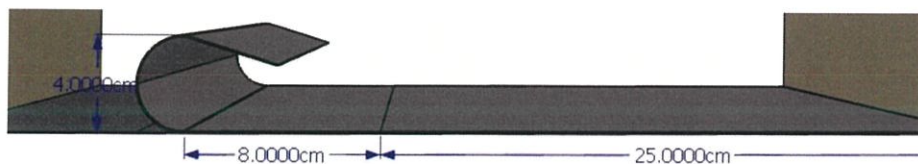
ในการศึกษาครั้งนี้มีอยู่ 3 แบบจำลอง

แบบจำลองที่ 1 กำแพงกันดินที่มีความยาวของวัสดุเสริมกำลังเท่ากับ 6 เซนติเมตร ระยะห่างของวัสดุเสริมกำลังในแต่ละชั้นของทราย 4 เซนติเมตร และความยาวส่วนที่ห่อหุ้มผิวหน้าของกำแพงกันดินเสริมกำลัง 5 เซนติเมตร กระดาษหนังสือพิมพ์ที่ใช้ กว้าง 24 เซนติเมตร ยาว 19 เซนติเมตร โดยโรยทรายสีเพื่อให้เห็นระนาบชัดเจน



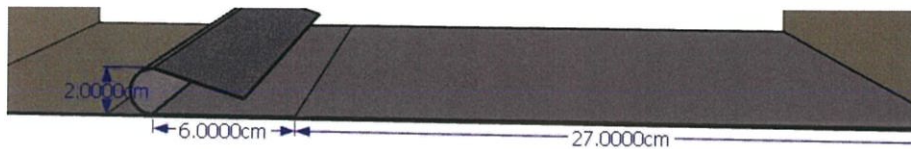
รูปที่ 3.7 การออกแบบระยะของแบบจำลองที่ 1 6-4-5 เซนติเมตร

แบบจำลองที่ 2 กำแพงกันดินที่มีความยาวของวัสดุเสริมกำลังเท่ากับ 8 เซนติเมตร ระยะห่างของวัสดุเสริมกำลังในแต่ละชั้นของทราย 4 เซนติเมตร และความยาวส่วนที่ห่อหุ้มผิวหน้าของกำแพงกันดินเสริมกำลัง 5 เซนติเมตร กระดาษหนังสือพิมพ์ที่ใช้ กว้าง 24 เซนติเมตร ยาว 17 เซนติเมตร โดยโรยทรายสีเพื่อให้เห็นระนาบชัดเจน



รูปที่ 3.8 การออกแบบระยะของแบบจำลองที่ 2 8-4-5 เซนติเมตร

แบบจำลองที่ 3 กำแพงกันดินที่มีความยาวของวัสดุเสริมกำลังเท่ากับ 6 เซนติเมตร ระยะห่างของวัสดุเสริมกำลังในแต่ละชั้นของทราย 2 เซนติเมตร และความยาวส่วนที่ห่อหุ้มผิวหน้าของกำแพงกันดินเสริมกำลัง 5 เซนติเมตร กระดาษหนังสือพิมพ์ที่ใช้ กว้าง 24 เซนติเมตร ยาว 13 เซนติเมตร โดยโรยทรายสีเพื่อให้เห็นระนาบชัดเจน



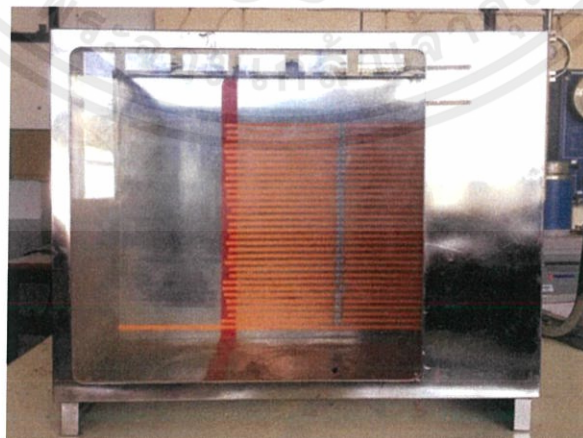
รูปที่ 3.9 กากอกแบบระยะของแบบจำลองที่ 3 6-2-5 เซนติเมตร

3.4.3 ขนาดของแบบจำลองและคุณสมบัติของวัสดุ

เพื่อให้สามารถควบคุมความแน่นของชั้นทรายตัวอย่างได้อย่างสม่ำเสมอในทุกครั้งของการจำลองทดลอง จึงต้องกำหนดวิธีการเตรียมตัวอย่างชั้นทรายด้วยอุปกรณ์ปล่อยทราย (Sand Dropper) ลักษณะของกล่องจำลองแบบจำลองและวัสดุที่ใช้ในการทดลองดังนี้



รูปที่ 3.10 แสดงอุปกรณ์ปล่อยทราย (Sand Dropper)



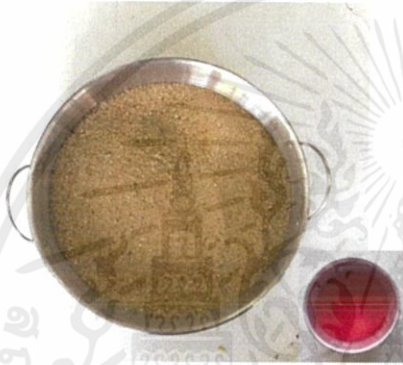
รูปที่ 3.11 แสดงกล่องแบบจำลอง ขนาด 53x24x40 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.5.1) อุปกรณ์ที่ใช้ในแบบจำลอง

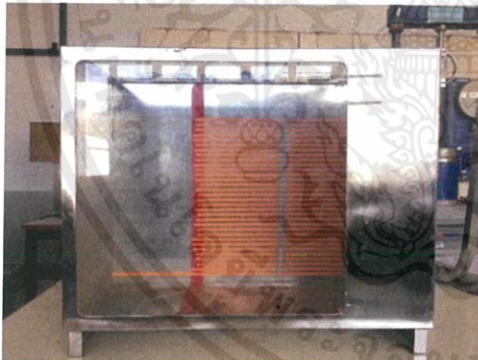
- 1) ทรายตัวอย่าง
- 2) กระดาษหนังสือพิมพ์
- 3) อุปกรณ์ปล่อยทราย (Sand Dropper)
- 4) ผงทรายสีใช้โรยเพื่อสังเกตระนาบการพิบัติ
- 5) ไม้บรรทัด และตลับเมตร
- 6) กล่องแบบจำลอง ขนาด 24x53x40 เซนติเมตร
- 7) ฉากกั้น



รูปที่ 3.12 ทรายตัวอย่าง และทรายสี



รูปที่ 3.13 ฉากกั้น



รูปที่ 3.14 กล่องแบบจำลองแสดงตนเลส



รูปที่ 3.15 กระดาษหนังสือพิมพ์

3.5.2) วิธีเตรียมอุปกรณ์การทดลองในแบบจำลอง

1) คำนวณค่า parameter ของทราย และกระดาษหนังสือพิมพ์ เช่น มุมเสียดทาน ภายใน ความถ่วงจำเพาะ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (ทราย $c=0$) แรงต้านแรงดึงสูงสุด แรงต้านการดึงออกจากทรายของกระดาษหนังสือพิมพ์ และหาระยะของรนาบการพังทลายจากแรงดันดินแบบ active ที่เหมาะสมกับแบบจำลองโครงสร้างพร้อมสมมติระยะความสูงจากพื้นดินที่ต้องการศึกษา

- 2) เตรียมแบบจำลอง พร้อมอุปกรณ์ปล่อยทราย
- 3) เตรียมดินทรายตัวอย่างโดยการนำไปอบเพื่อกำจัดความชื้น
- 4) นำทรายไปจำแนกขนาดให้อยู่ผ่านตะแกรงเบอร์ 10

3.5.3) วิธีทดลองแบบจำลองกำแพงกันดิน

- 1) วาง Bracket กันตรงตำแหน่งที่ต้องการ
- 2) วางกระดาษหนังสือพิมพ์ให้ระยะ L แนบที่พื้นทราย และให้ระยะ S_v กับ L_0 ให้แนบกับฉากกัน
- 3) เททรายลงในแบบจำลองบริเวณผิวหน้าของกำแพงกันดิน
- 4) ทบกระดาษหนังสือพิมพ์
- 5) ปล่อยทรายโดยกำหนดระยะความสูง 25 เซนติเมตร เหนือผิวทรายให้ตกอย่างอิสระลงในแบบจำลองเป็นชั้น โดยใช้ทรายสีแสดงถึงระดับทุกชั้นที่มีกระดาษหนังสือพิมพ์ จนได้ระดับทรายตามที่กำหนด
- 6) ทำซ้ำให้ครบจำนวนชั้นที่ได้คำนวณไว้ว่าจะวิต
- 7) ตั้งกล้องบันทึกการพังในชั้นที่คาดว่าจะวิต
- 8) บันทึกผลจำนวนชั้นที่พัง แล้วนำข้อมูลไปทำการวิเคราะห์ต่อ



รูปที่ 3.16 การเททรายลงในแบบจำลองบริเวณผิวหน้าของกำแพงกันดิน

บทที่ 4

ผลการศึกษา

4.1 บทนำ

ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการวิบัติของมวลดินที่เสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมกำลังจำลอง โดยมีความยาวของวัสดุเสริมกำลังและระยะระหว่างชั้นของทรายที่ต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาค่าคุณสมบัติต่างๆ ที่เกี่ยวกับการวิบัติทั้งในกระดาดและทราย ซึ่งมีการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง และการวิบัติของมวลดินซึ่งมีผลการศึกษาดังนี้

4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของทรายที่ใช้ในการศึกษา

4.2.1 ขนาดคละและชนิดของเม็ดดิน (grain size and soil classification)

จากผลการทดสอบพบว่า ดินมีคุณสมบัติเป็น SP

ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลขนาดคละและชนิดของเม็ดดิน

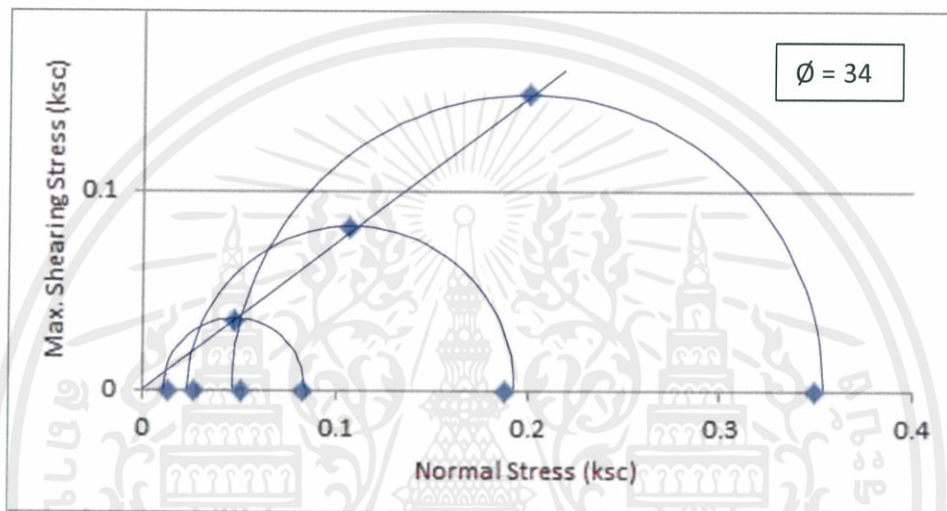
Sieves NO.	Sieve Opening ,mm	Weight of Sieve ,g	Weight of Sieve + Soil ,g	Weight of Soil Retained ,g	Cumulative Retained ,g	Cumulative Retained ,%	Percent Finer ,%
3/8"	9.50	553.82	553.82	0	0	0	100
4	4.75	762.10	764.68	2.58	2.58	0.25821	99.7418
10	2.00	689.16	698.70	9.54	12.12	1.21299	98.7870
20	0.85	597.98	852.10	254.12	266.24	26.6458	73.3542
30	0.60	595.34	720.80	125.46	391.70	39.2021	60.7979
40	0.43	573.28	921.84	348.56	740.26	74.0868	25.9132
50	0.30	556.45	729.58	173.13	913.39	91.4140	8.58604
100	0.15	332.45	414.88	82.43	995.82	99.6637	0.33628
200	0.08	301.97	303.60	1.63	997.45	99.8269	0.17314
Pan	0.00	356.87	358.60	1.73	999.18	100	0

4.2.2 มุมเสียดทานภายใน (internal friction angle)

จากผลการทดสอบ Direct shear พบว่าทรายมีค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ) = 30°

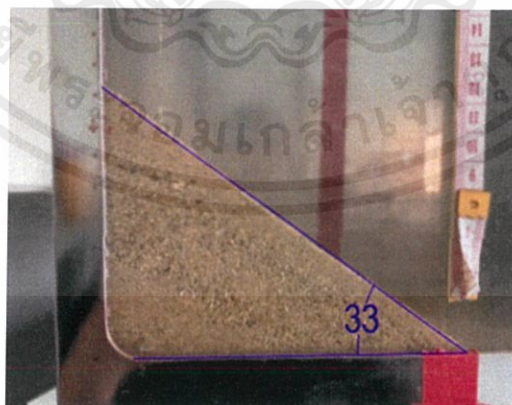
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบ Direct shear

TEST NO.	Normal Stress (ksc)	Max. Shearing stress (ksc)
1	0.013	0.028
2	0.026	0.076
3	0.051	0.143



รูปที่ 4.1 แสดงกราฟ Mohr's Diagram จากผลการทดสอบ Direct Shear

จากผลการปล่อยทรายลงอย่างอิสระโดยใช้ทฤษฎี Limit Equilibrium ทำการศึกษาความมั่นคงของลาดทรายที่กองอิสระ พบว่าได้มุมเสียดทานภายใน (ϕ) = 33°



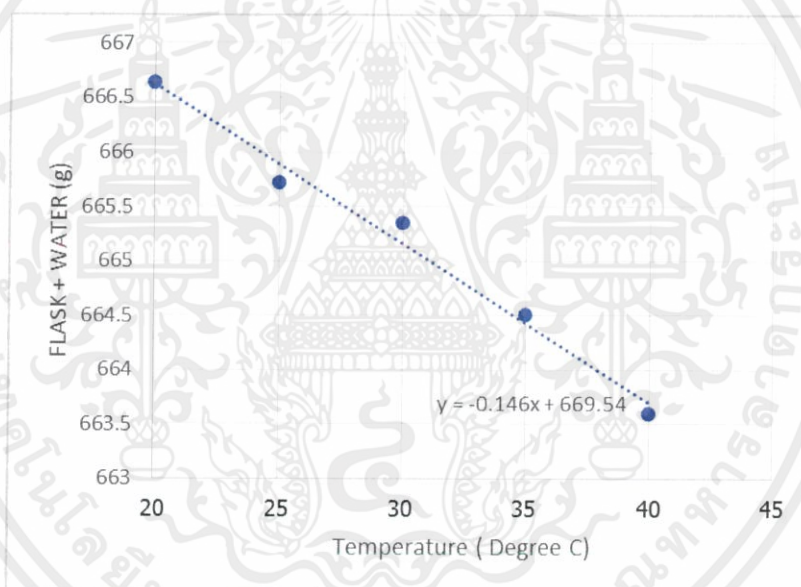
รูปที่ 4.2 แสดงการตกลงอย่างอิสระของทรายตัวอย่าง

4.2.3 ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)

จากผลการทดลองตัวอย่างทรายมีข้อมูลดังนี้

ตารางที่ 4.3 แสดงข้อมูล Calibration of Pycnometer

Calibration of Pycnometer	
Temperature (°C)	FLASK + WATER (g)
40	663.59
35	664.50
30	665.35
25	665.72
20	666.63



รูปที่ 4.3 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ กับ น้ำหนักรวมระหว่างแก้วกับน้ำ

ตารางที่ 4.4 แสดงข้อมูลความถ่วงจำเพาะของทราย

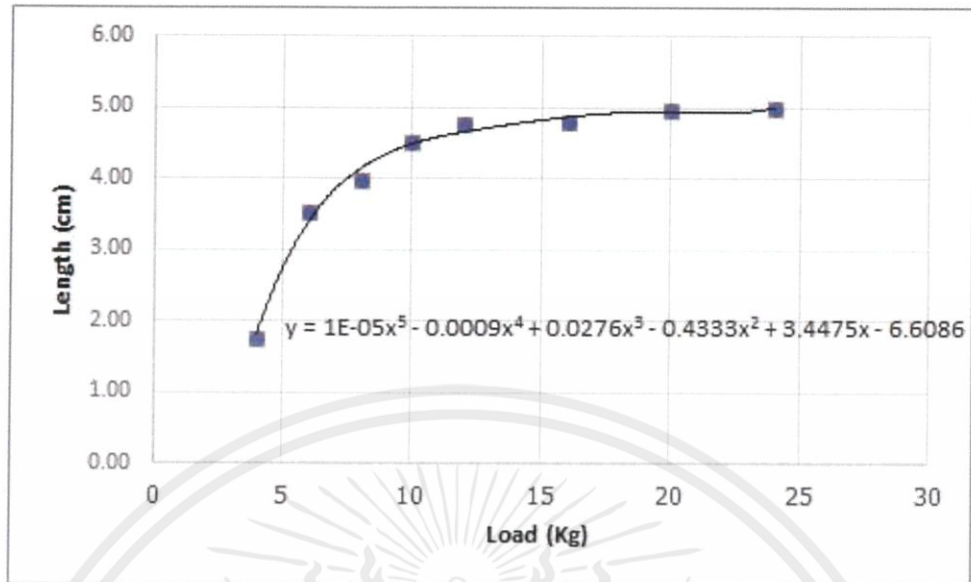
Soil description	sand	sand	sand
Trial NO.	1	2	3
1. Temperature °C	25	26	25
2. Flask + water ,g	665.33	665.33	665.33
3. Flask + water + soil ,g	758.54	758.96	758.79
4. Container NO.	1	2	3
5. Dry soil + Container,g	265.92	265.65	269.72
6. WT. Of Container,g	116.45	116.36	120.81
7. Dry soil (A) ,g	149.47	149.29	148.91
8. GT	0.9971	0.9968	0.9971
9. G.S.	2.6491	2.6736	2.6777
Average G.S.	2.6668		

4.3 ผลการทดสอบเพื่อหาค่า Maximum tensile stress ของแผ่นเสริมกำลังที่จำลองด้วยกระดาษหนังสือพิมพ์ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา

ทำการทดสอบโดยการนำแผ่นกระดาษหนังสือพิมพ์ติดกับอุปกรณ์ กำหนดขนาดหนังสือพิมพ์ ความยาว 4 – 24 เซนติเมตร แล้วค่อยๆเพิ่มแรงดึงทุกๆ 0.1 กิโลกรัม จนกระทั่งกระดาษหนังสือพิมพ์เกิดการวิบัติ และบันทึกค่าแรงดึงสูงสุด (Maximum tensile stress) ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบ Maximum tensile stress

Width (cm)	Load (Kg/cm)			Average (Kg/cm)
	Trial NO.1	Trial NO.2	Trial NO.3	
4	1.5	1.8	2	1.77
6	3.5	3.6	3.5	3.53
8	3.9	4	4	3.97
10	4.5	4.5	4.5	4.50
12	4.5	5	4.8	4.77
16	4.5	5	4.9	4.80
20	5.4	5	4.5	4.97
24	5	4.8	5.2	5.00



รูปที่ 4.4 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความยาวหนังสือพิมพ์ และ แรงดึง

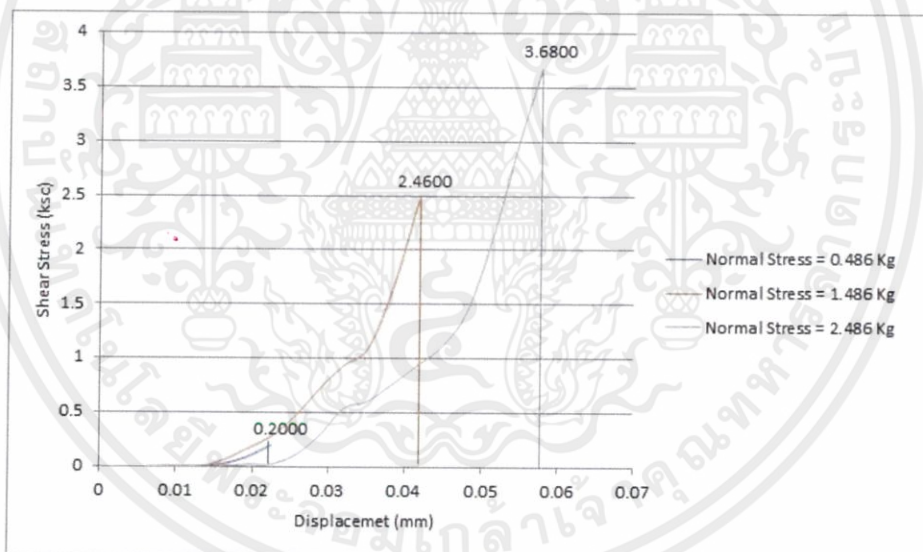
4.4 ผลการทดสอบเพื่อหาค่ามุมเสียดทานภายในระหว่างดินถมบดอัดและวัสดุเสริมกำลัง (Pullout Test)

ทำการทดสอบโดยการวางแผ่นกระดาษหนังสือพิมพ์และประกบด้วยทรายระหว่างด้านบนและล่าง กำหนดขนาดหน้าตัดหนังสือพิมพ์ 6.3×16 ตารางเซนติเมตร พื้นที่หน้าตัดส่วนที่รับการทดสอบเท่ากับ 31.185 ตารางเซนติเมตร ค่อยๆเพิ่มแรงดึงทุกๆ 0.1 กิโลกรัม จนกระทั่งกระดาษหนังสือพิมพ์เกิดการฉีกขาด และบันทึกค่าการเคลื่อนตัวของกระดาษหนังสือพิมพ์ ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบเพื่อหาแรงดึงสูงสุดที่ทำให้กระดาษหนังสือพิมพ์เกิดการฉีกขาด

Shear Stress (ksc)	Displacement (mm)		
	Trial NO.1	Trial NO.2	Trial NO.3
0	0	0	0
0.0032	0.0000	0.0000	0.0000
0.0064	0.0000	0.0020	0.0000
0.0096	0.0030	0.0020	0.0050
0.0128	0.0050	0.0020	0.0060
0.0160	0.0250	0.0550	0.0090
0.0192	0.0900	0.1650	0.0200
0.0224	0.2000	0.2800	0.0250

0.0257	Fail	0.4700	0.1100
0.0289		0.7200	0.2900
Shear Stress(ksc)	Displacement (mm)		
	Trial NO.1	Trial NO.2	Trial NO.3
0.0353		1.1000	0.6100
0.0385		1.6700	0.7700
0.0417		2.4600	0.9400
0.0449		Fail	1.1150
0.0481			1.4400
0.0513			2.1000
0.0545			2.9400
0.0577			3.6800
0.0609			Fail

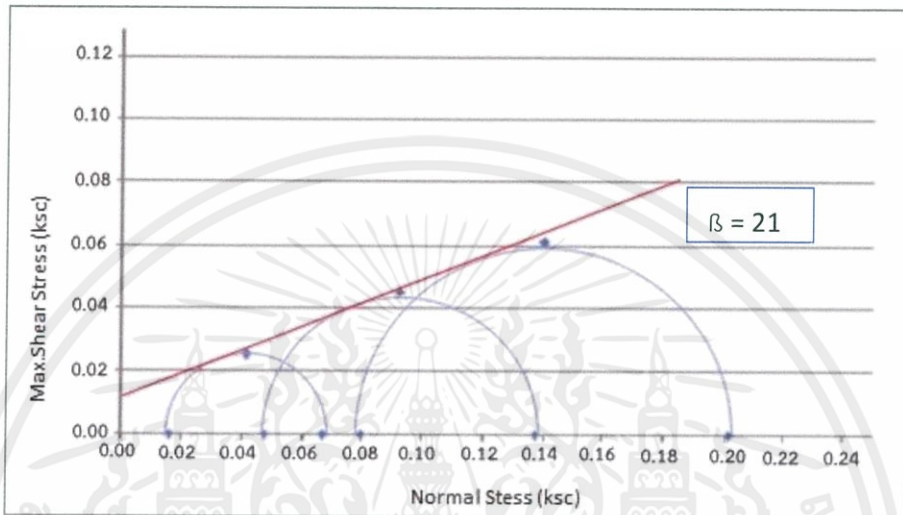


รูปที่ 4.5 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและการเคลื่อนตัวของกระดาษหนังสือพิมพ์

จากผลการทดสอบหาค่ามุมเสียดทานภายในระหว่างดินถมบดอัดและวัสดุเสริมกำลัง พบว่าทรายมีค่ามุมเสียดทานภายใน $(\phi) = 21^\circ$ โดยมีพฤติกรรมค่อนข้างสั้นหลุดจากทราย ไม่มีแรงยึดเกาะกันเลย

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบค่ามูเสียตทานภายในระหว่างดินถมบดอัดและวัสดุเสริมกำลัง

TEST NO.	Normal Stess (ksc)	Max.Shear Stress (ksc)
1	0.0156	0.0257
2	0.0477	0.0449
3	0.0797	0.0609



รูปที่ 4.6 กราฟ Mohr's Diagram จากผลการทดสอบค่ามูเสียตทานภายในระหว่างดินถมบดอัดและวัสดุเสริมกำลัง

4.5 ผลการศึกษาจากแบบจำลอง

4.5.1 การศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของแบบจำลองระบบกำแพงกันดิน

4.5.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของวัสดุเสริมกำลังและระดับความสูงของมวลดินที่ทำให้เกิดการวิบัติ

จากผลการทดลองการจำลองการวิบัติของมวลดิน กำหนดให้ความยาวของวัสดุเสริมกำลัง (L) = 6 เซนติเมตร และ 8 เซนติเมตร ทำให้ได้ค่าระดับความสูงของมวลดินที่เริ่มเกิดการวิบัติในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งได้ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของวัสดุเสริมกำลังกับระดับความสูงของมวลดินที่ทำให้เกิดการวิบัติ ดังตารางในการแสดงข้อมูล

ตารางที่ 4.8 แสดงความยาวของวัสดุเสริมกำลังกับระดับความสูงของกำแพงกันดินที่ทำให้เกิดการวิบัติ

ความยาวของวัสดุเสริมกำลัง (cm)	ระดับความสูงที่ทำให้เริ่มเกิดการวิบัติ(cm)
6	4 ถึง 8
8	20 ถึง 24

จากตารางที่ 4.8 พบว่าระดับความสูงที่ทำให้เริ่มให้เกิดการวิบัติจะแปรผันตรงกับความยาวของวัสดุเสริมกำลัง พบว่าการทดลองที่ 1 กำหนดให้ความยาวของวัสดุเสริมกำลัง (L) = 6 เซนติเมตร จะเริ่มเกิดการวิบัติของดินเมื่อถมทรายจำนวน 2 ชั้น ที่ระดับความสูงของกำแพงกันดิน 4 - 8 เซนติเมตร และ การทดลองที่ 2 กำหนดความยาวของวัสดุเสริมกำลัง (L) = 8 เซนติเมตร จะเริ่มเกิดการวิบัติของดินเมื่อถมทรายจำนวน 5 ชั้น ที่ระดับความสูงของกำแพงกันดิน 20 - 24 เซนติเมตร โดยแต่ละแบบจำลองมีพฤติกรรมที่แตกต่างกัน โดยสามารถอธิบายพฤติกรรมการเคลื่อนตัวได้ดังนี้

แบบจำลองที่ 1 กำแพงกันดินเสริมกำลัง โดยใช้แผ่นกระดาษหนังสือพิมพ์แทนวัสดุเสริมกำลัง กำหนดให้ความยาวของวัสดุเสริมกำลัง (L) = 6 เซนติเมตร ระยะห่างของวัสดุเสริมกำลังในแต่ละชั้นของทราย (S_v) = 4 เซนติเมตร และ ความยาวของส่วนที่ห่อหุ้มผิวหน้าของกำแพงกันดิน (L_0) = 5 เซนติเมตร

แบบจำลองที่ 2 กำแพงกันดินเสริมกำลัง โดยใช้แผ่นกระดาษหนังสือพิมพ์แทนวัสดุเสริมกำลัง กำหนดให้ความยาวของวัสดุเสริมกำลัง (L) = 8 เซนติเมตร ระยะห่างของวัสดุเสริมกำลังในแต่ละชั้นของทราย (S_v) = 4 เซนติเมตร และ ความยาวของส่วนที่ห่อหุ้มผิวหน้าของกำแพงกันดิน (L_0) = 5 เซนติเมตร

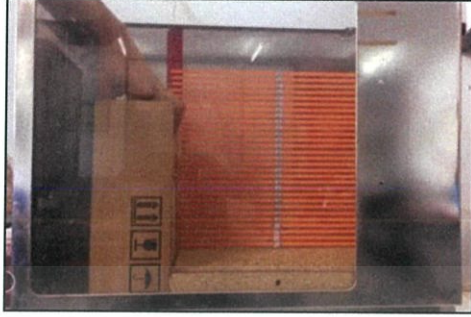
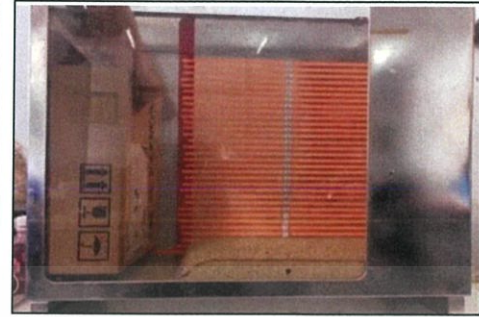

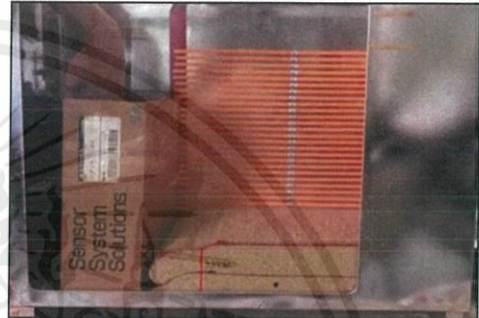

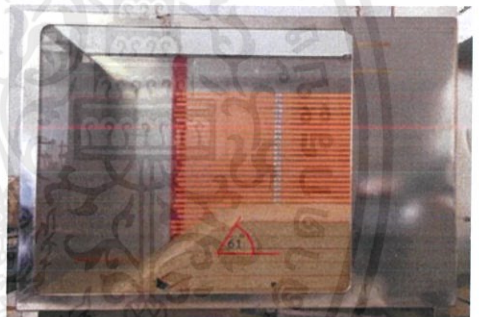


แบบจำลองที่ 3 กำแพงกันดินเสริมกำลัง โดยใช้แผ่นกระดาษหนังสือพิมพ์แทนวัสดุเสริมกำลัง กำหนดให้ความยาวของวัสดุเสริมกำลัง (L) = 6 เซนติเมตร ระยะห่างของวัสดุเสริมกำลังในแต่ละชั้นของทราย (S_v) = 2 เซนติเมตร และ ความยาวของส่วนที่ห่อหุ้มผิวหน้าของกำแพงกันดิน (L_0) = 5 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบจากแบบจำลองที่ 1

กรณีที่	ความสูง กำแพงกัน ดิน	มุมระนาบ การวิบัติ (°)	การเปลี่ยนแปลง หลังดึงจากกันออก
1	4	-	- ไม่เกิดการวิบัติและการเคลื่อนตัวของส่วนที่ห่อหุ้ม ผิวหน้า - เกิดการทรุดตัวเล็กน้อยระหว่างชั้นทราย
2	8	-	- เกิดการวิบัติและการเคลื่อนตัวของส่วนที่ห่อหุ้ม ผิวหน้าที่ชั้นบนสุด - เกิดการทรุดตัวเล็กน้อยระหว่างชั้นที่ 1 - ปรากฏระนาบการวิบัติที่ความสูงทราย 7.5 cm
3	12	62	- เกิดการวิบัติและการเคลื่อนตัวของส่วนที่ห่อหุ้ม ผิวหน้าที่ชั้นบนสุด - เกิดการทรุดตัวเล็กน้อยระหว่างชั้นที่ 1 และเกิดการเคลื่อนตัวของทรายชั้นที่ 2 - ปรากฏระนาบการวิบัติที่ความสูงทราย 7.5 cm
4	16	62	- เกิดการวิบัติและการเคลื่อนตัวของส่วนที่ห่อหุ้ม ผิวหน้าที่ชั้นบนสุด - เกิดการเคลื่อนตัวของทรายชั้นที่ 2-3 และเกิดการทรุดตัวเล็กน้อยระหว่างชั้นที่ 1 - ปรากฏระนาบการวิบัติที่ความสูงทราย 7.5 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 แสดงภาพการทดสอบของแบบจำลองที่ 1




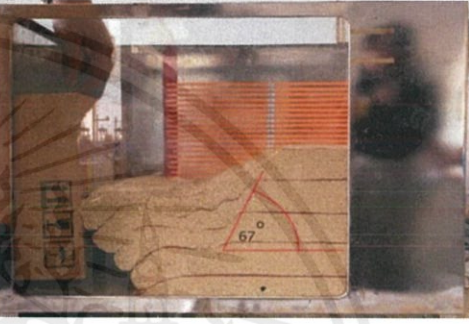

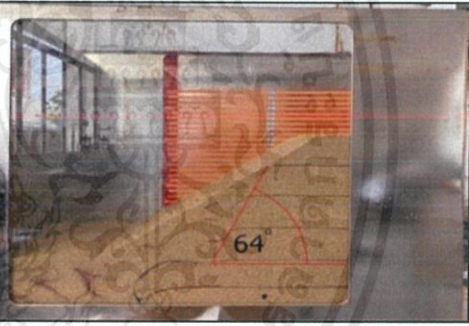
กรณี	ก่อนดึงฉากร์ออก	หลังดึงฉากร์ออก
1		
2		
3		
4		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 แสดงผลการทดสอบของแบบจำลองที่ 2

กรณีที่	ความสูง กำแพงกัน ดิน (cm)	มุมระนาบ การวิบัติ ($^{\circ}$)	การเปลี่ยนแปลง หลังดึงจากกันออก
1	16	-	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่เกิดการวิบัติแต่เกิดการเคลื่อนตัวของส่วนที่ห่อหุ้มผิวหน้าที่ชั้นบนสุด - เกิดการทรุดตัวเล็กน้อยระหว่างชั้นที่ 1-4 - ไม่ปรากฏระนาบการวิบัติ
2	20	67	<ul style="list-style-type: none"> - เกิดการวิบัติแต่เกิดการเคลื่อนตัวของส่วนที่ห่อหุ้มผิวหน้าที่ชั้นบนสุด - เกิดการเคลื่อนตัวของทรายชั้นที่ 2-4 และเกิดการทรุดตัวเล็กน้อยระหว่างชั้นที่ 1 - ปรากฏระนาบการวิบัติที่ความสูงทราย 7.5 cm
3	24	64	<ul style="list-style-type: none"> - เกิดการวิบัติแต่เกิดการเคลื่อนตัวของส่วนที่ห่อหุ้มผิวหน้าที่ชั้นบนสุด - เกิดการเคลื่อนตัวของทรายชั้นที่ 2-4 และเกิดการทรุดตัวเล็กน้อยระหว่างชั้นที่ 1 - ปรากฏระนาบการวิบัติที่ความสูงทราย 7.5 cm

ตารางที่ 4.12 แสดงภาพการทดสอบของแบบจำลองที่ 2

กรณีที่	ก่อนดึงจากก้นออก	หลังดึงจากก้นออก
1		
2		
3		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 แสดงผลการทดสอบของแบบจำลองที่ 3

กรณีที่	ความสูง กำแพงกัน ดิน (cm)	มุมระนาบ การวิบัติ ($^{\circ}$)	การเปลี่ยนแปลง หลังดึงจากกันออก
1	20	-	- ไม่เกิดการวิบัติและการเคลื่อนตัวของส่วนห่อหุ้ม ผิวหน้า - เกิดการทรุดตัวน้อยมาก
2	24	-	- ไม่เกิดการวิบัติและการเคลื่อนตัวของส่วนห่อหุ้ม ผิวหน้า - เกิดการทรุดตัวน้อยมาก

ตารางที่ 4.14 แสดงภาพการทดสอบของแบบจำลองที่ 3

กรณีที่	ก่อนดึงจากกันออก	หลังดึงจากกันออก
1		
2		

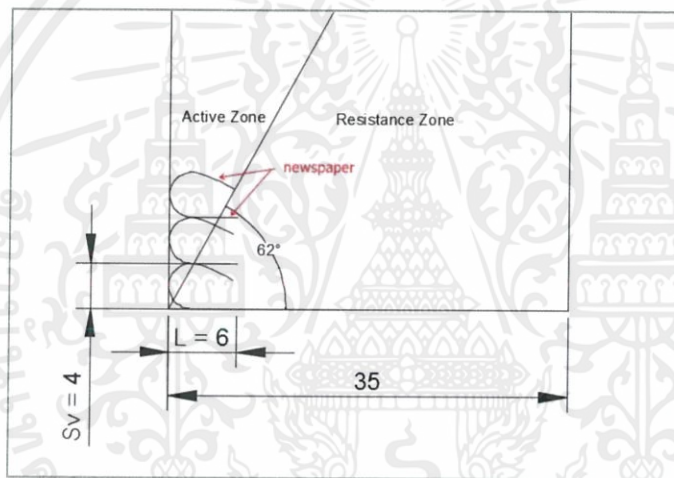
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการพังของกำแพงกันดิน

จากผลการทดลองด้วยแบบจำลองและผลการทดสอบด้วยแบบจำลองทั้งสามที่ออกมา ทำให้สามารถวิเคราะห์ผลลัพธ์ต่างๆดังนี้

4.6.1 ความยาวของวัสดุเสริมกำลังมีผลต่อระดับความสูงรวมของกำแพงกันดินที่จะเกิดการวิบัติ

เนื่องจากระนาบการวิบัติจะเกิดเป็นมุม $45 + \frac{\phi}{2}$ องศา ซึ่งส่วนที่อยู่ด้านหน้าของระนาบจะเป็นบริเวณที่เรียกว่า Active Zone ทำให้ความยาวของวัสดุเสริมกำลังที่อยู่บริเวณนี้ไม่มีผลต่อการเสริมกำลังให้กับกำแพงกันดิน ซึ่งส่วนที่มีผลคือส่วนที่ยาวเหลือจากบริเวณนั้นออกมา เรียกว่า “Resistant Zone” หรือ “โซนเสริมกำลัง” โดยที่วัสดุเสริมกำลังจะถูกยึดไว้กับทรายในโซนเสริมกำลังด้วยแรงเสียดทานระหว่างทรายกับวัสดุเสริมกำลัง (Pullout) เมื่อกำแพงกันดินมีความสูงมากขึ้น ทำให้ความยาวของวัสดุเสริมกำลังที่อยู่ในโซนเสริมกำลังมีน้อยลง แรงเสียดทานที่วัสดุเสริมกำลังกระทำกับทรายก็น้อยลงไปด้วย ในขณะที่แรงกระทำของทรายเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนมาถึงจุดที่แรงต้านทานน้อยกว่าแรงที่กระทำต่อกำแพงกันดิน กำแพงกันดินจึงเกิดการวิบัติขึ้น



รูปที่ 4.7 แสดงมุมระนาบการวิบัติของกำแพงกันดิน

4.6.2 ระยะระหว่างชั้นของทรายมีผลต่อความสูงรวมของกำแพงกันดินที่จะเกิดการพัง

จากการทดลองเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่ 1 และ 3 ซึ่งมีความยาวของวัสดุเสริมกำลังเท่ากัน แต่แบบจำลองที่ 1 มีระยะระหว่างชั้นเท่ากับ 4 เซนติเมตร ส่วนแบบจำลองที่ 3 มีระยะระหว่างชั้นเท่ากับ 2 เซนติเมตร ซึ่งจำนวนชั้นที่เกิดการพังของระยะ 4 เซนติเมตร คือ 2 ชั้น แต่ที่ระยะ 2 เซนติเมตรนั้นสามารถก่อสร้างไปถึง 12 ชั้นโดยที่ยังไม่วิบัติ หากเปรียบเทียบเป็นความสูงรวมจะได้ 8 เซนติเมตรและ 24 เซนติเมตรตามลำดับ จึงนำข้อมูลจากแบบจำลองที่ 3 ใส่ลงตารางการคำนวณ ได้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ -1.02 หมายความว่าไม่มีแรงต้านทานจากแรงเสียดทานแล้ว แต่กำแพงกันดินสามารถอยู่ได้โดยไม่เกิดการเคลื่อนตัวใดๆ เราจึงสรุปได้ว่าระยะระหว่างชั้นทรายมีผลต่อความสูงรวมของกำแพงกันดิน เนื่องจากแรงที่กระทำต่อกำแพงกันดินในแต่ละชั้นจะขึ้นอยู่กับระยะระหว่างชั้นของทรายด้วย เมื่อระยะระหว่างชั้นน้อยลงทำให้แรงกระทำในแต่ละชั้นก็น้อยลงไปด้วย จากแบบจำลองที่ 3 ทำให้สามารถยืนยันผลลัพธ์นี้ได้

4.6.3 อัตราส่วนความปลอดภัย (Safety Factor)

ในการทดสอบนี้จะพูดถึงอัตราส่วนความปลอดภัยจากแรงฉุดเนื่องจากไม่เกิดการฉีกขาดในทุกแบบจำลอง จากตารางการคำนวณจะเห็นว่าในแบบจำลองที่ 1 และ 2 นั้นอัตราส่วนความปลอดภัยของ ความสูงก่อนที่จะเกิดการพังมีค่าประมาณ 2.5 ขึ้นไป แต่ในแบบจำลองที่ 3 อัตราส่วนความปลอดภัยที่ชั้น 12 มีค่าติดลบหรือก็คือแรงต้านทานแรงฉุดนั้นไม่มีแล้ว แต่ตัวกำแพงนั้นก็ยังสามารถคงสภาพนั้นอยู่ได้ โดยที่อาจสรุปได้ว่า แบบจำลองที่ 1 กับ 2 เกิดความคลาดเคลื่อนเป็นอย่างมาก ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการทรุดลงของ ชั้นทรายเนื่องจากไม่ได้บดอัด หรือการเคลื่อนตัวไปข้างหน้าเล็กน้อย เป็นต้น ส่วนในแบบจำลองที่ 3 นั้นเกิดความคลาดเคลื่อนน้อยมาก แต่ยังไม่สามารถสรุปได้แน่ชัดว่าเหตุใดที่ความสูงระดับ 24 เซนติเมตร (12 ชั้น) จึงไม่เกิดการวิบัติขึ้น ซึ่งจากการคำนวณควรเกิดการพังตั้งแต่ระดับความสูงที่ 20 เซนติเมตร (10 ชั้น) โดยมีอัตราส่วนความปลอดภัยอยู่ที่ 0.54

ตารางที่ 4.15 แสดงอัตราส่วนความปลอดภัยของแต่ละแบบจำลอง

แบบจำลองที่	อัตราส่วนความปลอดภัย
1	2.90
2	2.65
3	-1.07
3 (ที่ความสูง 10 ชั้น)	0.54

4.6.4 มุมเสียดทานภายใน (internal friction angle)

จากแบบจำลองใช้วัสดุเสริมกำลังยาว 6 และ 8 เซนติเมตร ปรากฏระนาบการวิบัติชัดเจนที่ความสูงของกำแพงกันดิน 16 เซนติเมตรและ 20-24 เซนติเมตร ตามลำดับ วัดมุมเสียดทานภายในจากระนาบของการวิบัติได้ค่าอยู่ในช่วง 62-67 องศา เปรียบเทียบกับมุมเสียดทานภายในที่ได้จากการคำนวณซึ่งเท่ากับ $45 + \frac{\sigma}{2}$ องศาวัดจากระนาบการวิบัติ ได้ค่าเท่ากับ 61.5 องศา จะเห็นได้ว่าค่าจากการทดสอบและการคำนวณมีความใกล้เคียงกัน

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

5.1 บทนำ

ผลการศึกษาค้นคว้าความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของวัสดุเสริมกำลังและระดับความสูงของกำแพงกันดินที่ทำให้เกิดการวิบัติสามารถศึกษาได้ด้วยแบบจำลองทางกายภาพได้อย่างชัดเจน จากรูปภาพผลการทดลองที่ปรากฏจุดพิบัติ มุมที่ปรากฏลักษณะแนววิบัติ และระดับความสูงของทรายที่เริ่มปรากฏระนาบแนววิบัติ ซึ่งสามารถอธิบายถึงพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของแบบจำลองรูปแบบทั้ง 3 รูปแบบ

5.2 สรุปผลการทดลอง

แบบจำลองที่	1	2	3
ความยาวของวัสดุเสริมกำลัง (เซนติเมตร)	6	8	6
ระยะระหว่างชั้น (เซนติเมตร)	4	4	2
ความสูงรวมก่อนเกิดการวิบัติ (เซนติเมตร)	8	16	24

จากแบบจำลองการวิบัติของกำแพงกันดินจะเห็นว่าที่แบบจำลองที่ 1 และ 2 มีระยะระหว่างชั้นเท่ากัน แต่ความยาวของวัสดุเสริมกำลังต่างกัน ทำให้ได้ผลลัพธ์คือจำนวนชั้น หรือความสูงรวมของกำแพงกันดินก่อนเกิดการวิบัติที่ต่างกัน ส่วนแบบจำลองที่ 1 และ 3 นั้นมีความยาวของวัสดุเสริมกำลังเท่ากัน แต่มีระยะระหว่างชั้นที่ต่างกัน ก็ทำให้ได้จำนวนชั้น หรือความสูงรวมที่ต่างกันเช่นกัน จึงสรุปได้ว่า

1. ความยาวของวัสดุเสริมกำลังมีผลต่อความสูงโดยรวมของกำแพงกันดินที่สามารถก่อกำแพงกันดินได้โดยที่กำแพงกันดินไม่เกิดการวิบัติ โดยที่ความยาวของการวัสดุเสริมกำลังจะต้องมีค่ามากกว่าระยะของ Active Zone ในชั้นนั้นๆ

2. ระยะระหว่างชั้นทรายก็มีผลต่อความสูงรวมเช่นกัน โดยที่ระยะระหว่างชั้นจะแปรผกผันกับความสูงรวมของกำแพงกันดิน ซึ่งระยะระหว่างชั้นของกำแพงกันดินควรมีค่าน้อยกว่า 4 ซม. เพื่อให้กำแพงกันดินมีเสถียรภาพมาก

3. แบบจำลองทั้งหมดมีค่ามุมระนาบที่เกิดการวิบัติประมาณ 61-67 องศาซึ่งค่อนข้างใกล้เคียงกับทฤษฎีที่มีค่าเท่ากับ 61.5 องศา โดยที่การวิบัติที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะเป็นการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน เนื่องจากกระดาษหนังสือพิมพ์มีแรงต้านทานการฉีกขาดค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับแรงต้านทานแรงเฉือน

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการทดสอบคุณสมบัติของกระดาษหนังสือพิมพ์และทรายเป็นอันดับแรก จากนั้นนำผลการทดสอบไปวิเคราะห์กับทฤษฎีการออกแบบกำแพงกันดินเสริมกำลัง แล้วจึงนำข้อมูลจากการวิเคราะห์มาออกแบบเป็นแบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลัง

2. ควรใช้กระดาษหนังสือพิมพ์ด้านที่รับดึงสูงสุดได้น้อยกว่า เป็นด้านที่ห่อหุ้มของกำแพงกันดิน เนื่องจากจะส่งผลต่อการวิบัติของกำแพงกันดินได้ง่ายกว่า

3. เปลี่ยนฉากัน (Bracket) ให้มีขนาดที่เหมาะสมต่อการใช้งานในกรณีที่ต้องการสร้างแบบจำลองกำแพงกันดินในระดับที่สูงขึ้น

4. ควรโรยทรายสีทุกระยะ 1 เซนติเมตร เพื่อให้การสังเกตและการวัดค่าลักษณะแนววิบัติที่ชัดเจนขึ้น

5. เพิ่มกรณีศึกษาของแบบจำลองและเพิ่มจำนวนครั้งในการทดลองแบบจำลอง

6. เปลี่ยนสภาพแวดล้อมของแบบจำลองให้เหมือนกับสภาพหน้างานจริง



เอกสารอ้างอิง

- [1] Colin J F P Jones. (1988). Earth Reinforcement and Soil Structures. (2nd Ed.). London, England: Butterworth.
- [2] ศุภกิจ นนทนานันท์. (2538). เอกสารประกอบการสอนวิชาการปรับปรุงคุณภาพดิน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. (ม.ป.ท.).
- [3] ดร.ศลิษา ไชยพุทธ. (2561). เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพชั้นดิน. (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: มินเซอร์วิศซัพพลาย.
- [4] แผลมทอง เหล่าคงถาวร, สุพจน์ ศรีนิล และชลธิ เร่บ้านเกาะ. (2555). คู่มือปฏิบัติการทดลอง ปรฐพีกลศาสตร์. (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: มิน เซอร์วิส ซัพพลาย.
- [5] Robert M. Koerner. (1997). Designing with geosynthetics. (4th Ed.). New Jersey, USA: Prentice-Hall
- [6] สุข สันต์ หอ พิบูล สุข . (2553) . Foundation Engineering. สืบ ค้น จาก <http://eng.sut.ac.th/ce/oldce/Suksun/Chapter5.pdf>
- [7] จิระ ยุ ท ธ สื่ บ สุ ข . (2554) . แร ง ตั น ดิ น ต้ า น ข้ า ง . สื่ บ ค้ น จ า ก <http://jirayutsu.blogspot.com/2011/10/04-011-304-foundation-engineering.html>
- [8] บรรณาธิการเว็บไซต์บ้านและสวน. (2557). กำแพงกันดิน. สืบค้นจาก <http://www.real-parenting.com/Article.aspx?ArticleID=4578>

ภาคผนวก ก

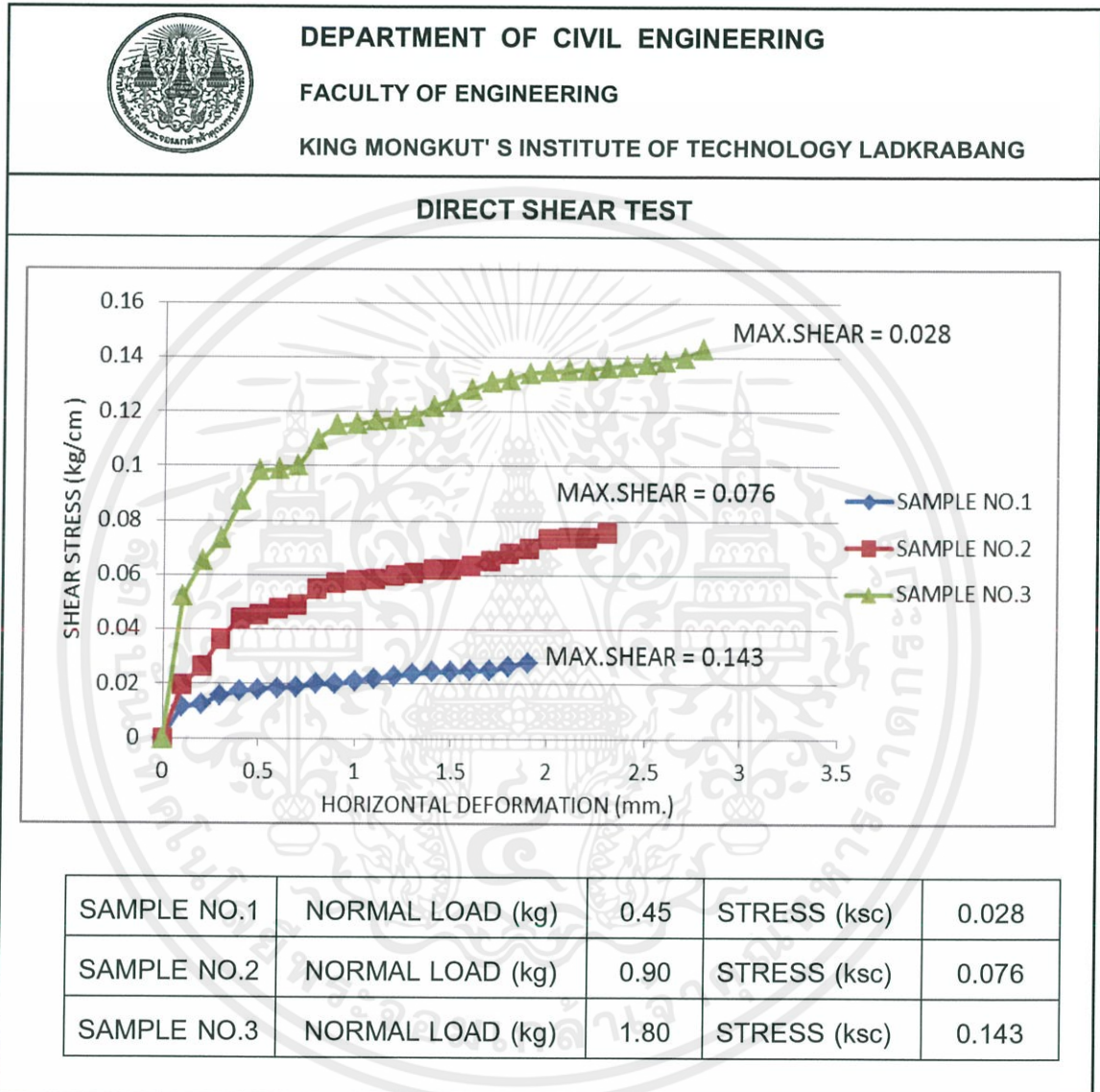
สัญลักษณ์

L	=	ความยาวของวัสดุเสริมกำลัง
L_a	=	ความยาวของวัสดุเสริมกำลังในโซนการเคลื่อนตัว
L_e	=	ความยาวของวัสดุเสริมกำลังในโซนต้านทานการเคลื่อนตัว
σ_v	=	ความเค้นกดทับในแนวตั้ง
δ	=	มุมเสียดทานภายในระหว่างดินถมบดอัดและวัสดุเสริมกำลัง
S_v	=	ระยะห่างของวัสดุเสริมกำลังในแต่ละชั้นของดินถมบดอัด
σ_h	=	แรงดันดินในแนวราบ
Z	=	ระดับความลึกที่พิจารณา
q	=	น้ำหนักบรรทุกทุกจร
L_0	=	ความยาวส่วนที่ห่อหุ้มผิวหน้าของกำแพงกันดินเสริมกำลัง
FS	=	อัตราส่วนปลอดภัย
\emptyset	=	มุมเสียดทานภายในของดิน
K_a	=	สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างของกำแพงกันดินในสภาวะรุก (Active)
F_1	=	แรงดันดินด้านข้างจากน้ำหนักของดินถม
γ	=	หน่วยน้ำหนักประสิทธิผล (submerged unit weight)
H	=	ความสูงรวมของกำแพงกันดิน
M_{01}	=	โมเมนต์ที่ทำให้เกิดการพลิกคว่ำจากน้ำหนักดินถม
W	=	น้ำหนักของดินถม
M_{r1}	=	โมเมนต์ต้านน้ำหนักดินถม
B	=	ความกว้างของฐานกำแพงกันดิน
T	=	ค่าแรงดึงสูงสุดที่ทำให้กระดาษหนังสือพิมพ์เกิดการฉีกขาด
T_{pull}	=	กำลังต้านทานแรงดึงของกระดาษหนังสือพิมพ์

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบคุณสมบัติ

ข.1 มุมเสียดทานภายใน (Internal Friction Angle) ของทรายตัวอย่าง





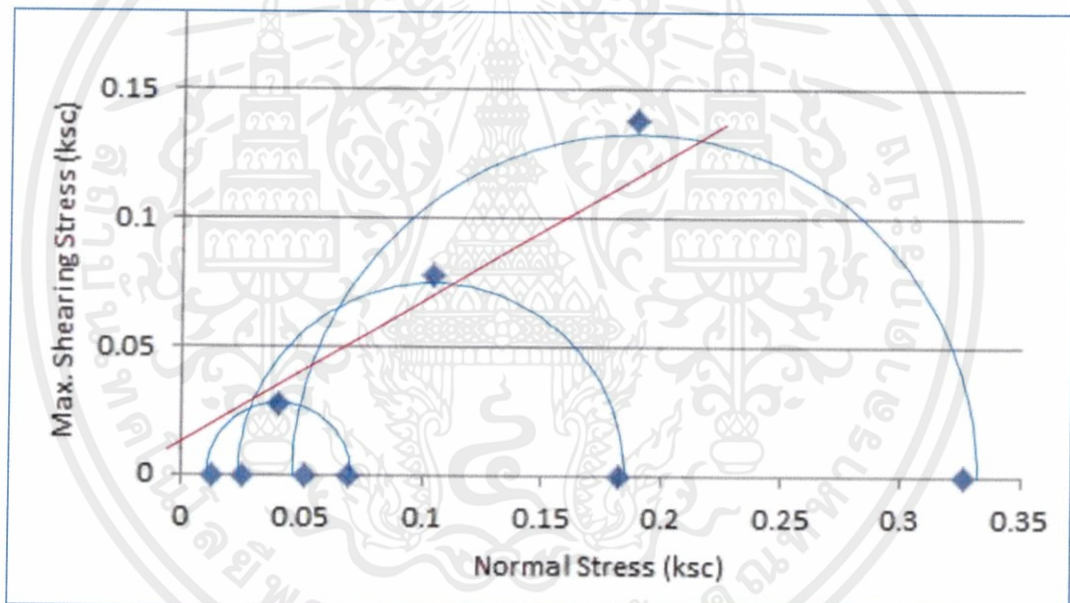
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

DIRECT SHEAR TEST

No.	1	2	3
	$1/4\sigma$	$1/2\sigma$	σ
Load, kg	0.45	0.9	1.8
Normal Stress, ksc	0.013	0.026	0.051
Shear Stress, ksc	0.028	0.076	0.143




Internal Friction Angle

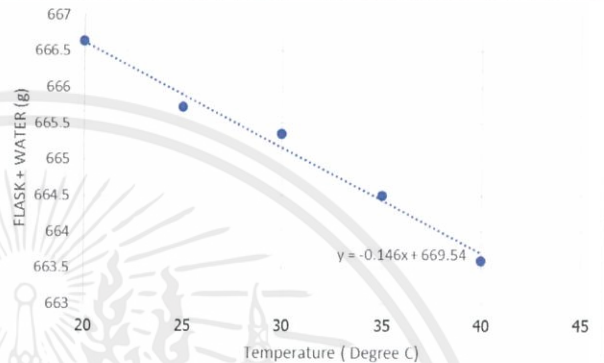
30°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.2 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)ของทรายตัวอย่าง

 DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG	
SPECIFIC GRAVITY TEST	
PYCHOMETER CALIBRATION	
Temperature (Degree C)	FLASK + WATER (g)
40	663.59
35	664.50
30	665.35
25	665.72
20	666.63

Soil description	sand	sand	sand
Trial NO.	1	2	3
1. Temperature °C	25	26	25
2. Flask + water ,g	665.33	665.33	665.33
3. Flask + water + soil ,g	758.54	758.96	758.79
4. Container NO.	1	2	3
5. Dry soil + Container,g	265.92	265.65	269.72
6. WT. Of Container,g	116.45	116.36	120.81
7. Dry soil (A) ,g	149.47	149.29	148.91
8. GT	0.9971	0.9968	0.9971
9. G.S.	2.6491	2.6736	2.6777
Average G.S.	2.6668		



SPECIFIC GRAVITY DETERMINATION

Soil description	sand	sand	sand
Trial NO.	1	2	3
1. Temperature °C	25	26	25
2. Flask + water ,g	665.33	665.33	665.33
3. Flask + water + soil ,g	758.54	758.96	758.79
4. Container NO.	1	2	3
5. Dry soil + Container,g	265.92	265.65	269.72
6. WT. Of Container,g	116.45	116.36	120.81
7. Dry soil (A) ,g	149.47	149.29	148.91
8. GT	0.9971	0.9968	0.9971
9. G.S.	2.6491	2.6736	2.6777
Average G.S.	2.6668		

ข.3 ขนาดคละและชนิดของเม็ดดิน (Grain Size and Soil Classification)



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

Sieve Analysis (ASTM C136) for Coarse Grain Soil

Specific Gravity of Soil

,G.S.

2.6668

Tray NO. 1

Sieves Standard ASTM E-

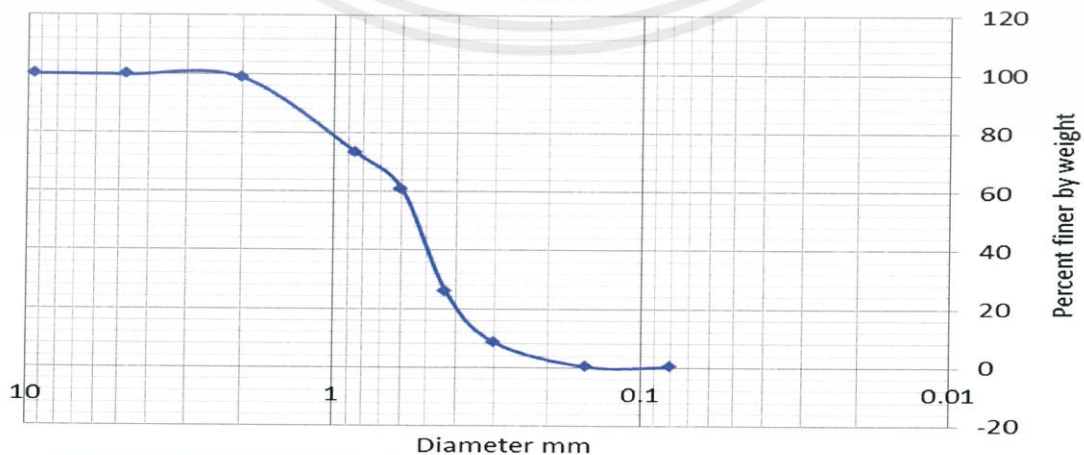
Weight of Dry Soil ,g

1000.02

11

Sieves NO.	Sieve Opening ,mm	Weight of Sieve ,g	Weight of Sieve + Soil ,g	Weight of Soil Retained ,g	Cumulative Retained ,g	Cumulative Retained ,%	Percent Finer ,%
3/8"	9.50	528.38	553.82	0.00	0.00	0.00	100.00
4	4.75	762.10	764.68	2.58	2.58	0.2582	99.742
10	2.00	689.16	698.70	9.54	12.12	1.2130	98.787
20	0.85	597.98	852.10	254.12	266.24	26.6458	73.354
30	0.60	595.34	720.80	125.46	391.70	39.2021	60.798
40	0.43	573.28	921.84	348.56	740.26	74.0868	25.913
50	0.30	556.45	729.58	173.13	913.39	91.4140	8.586
100	0.15	332.45	414.88	82.43	995.82	99.6637	0.336
200	0.08	301.97	303.60	1.63	997.45	99.8269	0.173
Pan	0.00	356.87	358.60	1.73	999.18	99.94	0.000

Grain size Distribution Curves

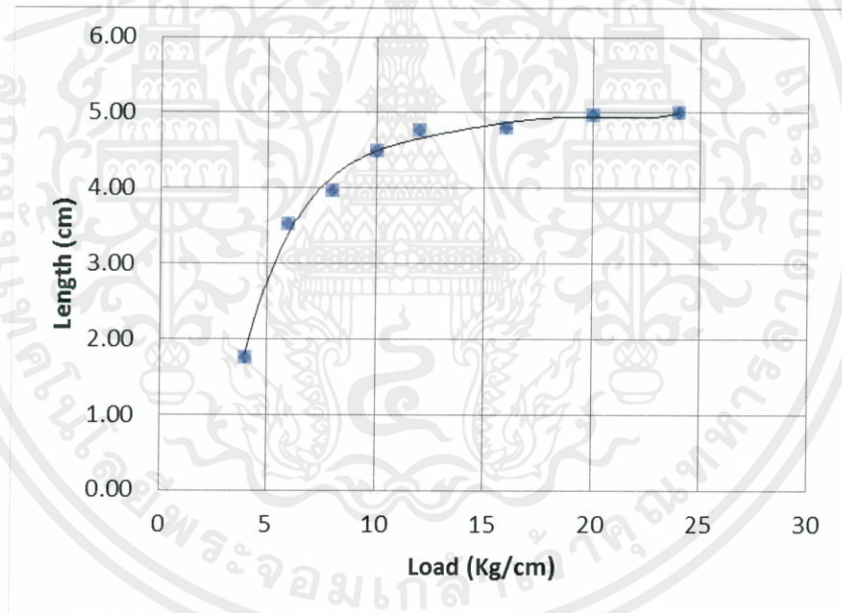


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.4 ค่าแรงดึงสูงสุด (Maximum tensile stress) ของแผ่นกระดาษหนังสือพิมพ์ตัวอย่าง

ตาราง ข.1 แสดงผลการทดสอบ Maximum tensile stress

Length (cm)	Load (Kg/cm)			Average
	Trial NO.1	Trial NO.2	Trial NO.3	
4	1.5	1.8	2	1.77
6	3.5	3.6	3.5	3.53
8	3.9	4	4	3.97
10	4.5	4.5	4.5	4.50
12	4.5	5	4.8	4.77
16	4.5	5	4.9	4.80
20	5.4	5	4.5	4.97
24	5	4.8	5.2	5.00

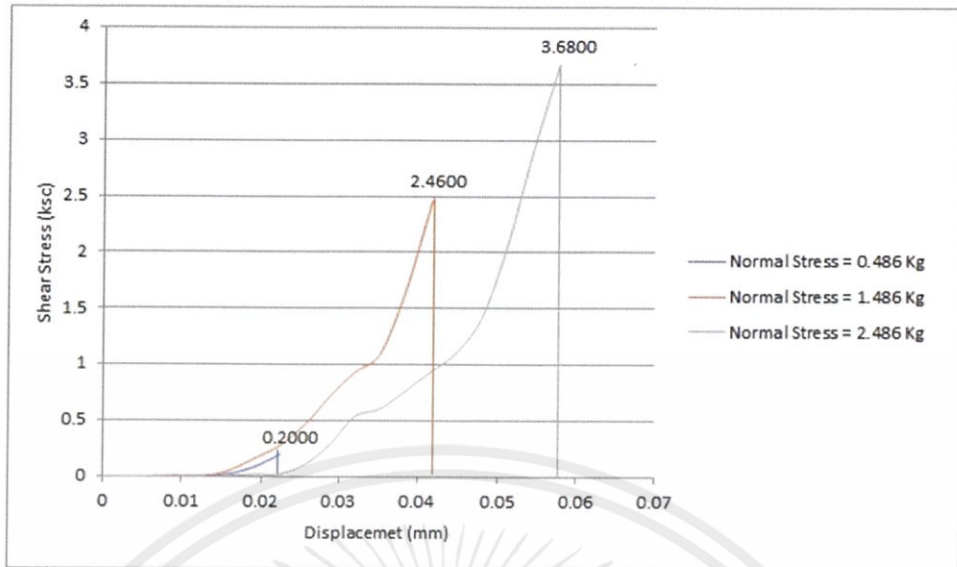


รูป ข.1 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างความยาวหนังสือพิมพ์ และ แรงดึงสูงสุด

ข.5 ค่าผลการทดสอบเพื่อหาค่ามุมเสียดทานภายในระหว่างดินถมบดอัดและวัสดุเสริมกำลัง

ตาราง ข.2 แสดงผลการทดสอบเพื่อหาแรงดึงสูงสุดที่ทำให้กระดาษหนังสือพิมพ์เกิดการวิบัติ

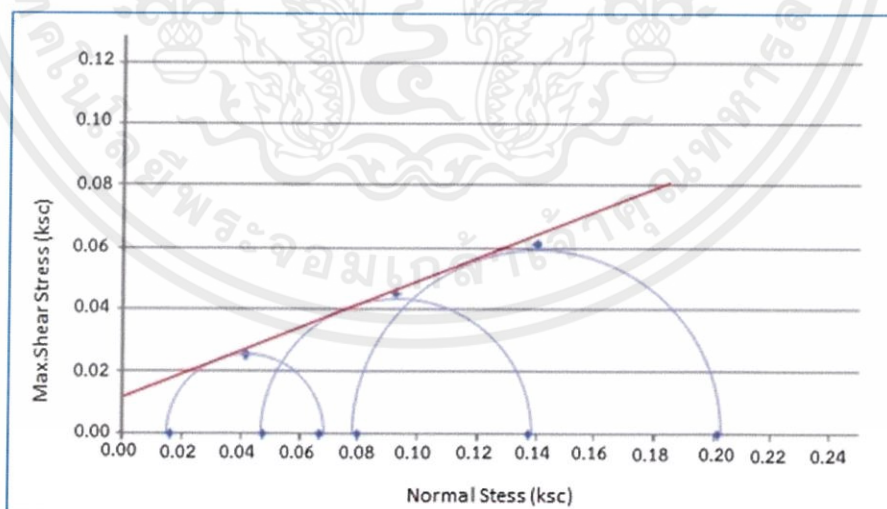
Shear Stress (ksc)	Displacement (mm)		
	Trial NO.1	Trial NO.2	Trial NO.3
0	0	0	0
0.0032	0.0000	0.0000	0.0000
0.0064	0.0000	0.0020	0.0000
0.0096	0.0030	0.0020	0.0050
0.0128	0.0050	0.0020	0.0060
0.0160	0.0250	0.0550	0.0090
0.0192	0.0900	0.1650	0.0200
0.0224	0.2000	0.2800	0.0250
0.0257	Fail	0.4700	0.1100
0.0289		0.7200	0.2900
0.0321		0.9350	0.5400
0.0353		1.1000	0.6100
0.0385		1.6700	0.7700
0.0417		2.4600	0.9400
0.0449		Fail	1.1150
0.0481			1.4400
0.0513			2.1000
0.0545			2.9400
0.0577			3.6800
0.0609			Fail



รูป ข.2 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึง และการเคลื่อนตัวของกระดาษหนังสือพิมพ์

ตาราง ข.3 แสดงผลการทดสอบค่ามุมเสียดทานภายในระหว่างดินถมบดอัดและวัสดุเสริมกำลัง

TEST NO.	Normal Stess (ksc)	Max.Shear Stress (ksc)
1	0.0156	0.0257
2	0.0477	0.0449
3	0.0797	0.0609



รูป ข.2 กราฟ Mohr's Diagram จากผลการทดสอบหาค่ามุมเสียดทานภายในระหว่างดินถมบดอัดและวัสดุเสริมกำลัง

ภาคผนวก ค

ผลการทดลองจากแบบจำลอง

ค.1 ข้อมูลผลการทดลองจากแบบจำลอง

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทดลองโดยสร้างแบบจำลอง 3 แบบ ได้แก่

- 1) แบบจำลองที่ 1 ระยะ 6 : 4 : 5
- 2) แบบจำลองที่ 2 ระยะ 8 : 4 : 5
- 3) แบบจำลองที่ 3 ระยะ 6 : 2 : 5

หมายเหตุ ระยะในแบบจำลองที่กล่าวไว้ข้างต้นคือระยะ ความยาวของวัสดุเสริมกำลัง : ระยะห่างของวัสดุเสริมกำลังในแต่ละชั้นของทราย : ความยาวของส่วนที่ห่อหุ้มผิวหน้าของกำแพงกันดิน ในหน่วยเซนติเมตร

ตาราง ค.1 แสดงผลการทดสอบของแบบจำลองที่ 1 ระยะ 6 : 4 : 5

กรณีที่	ความสูงกำแพงกันดิน (cm)	เกิดการวิบัติ	มุมระนาบการวิบัติ (°)
1	4	✗	-
2	8	✓	-
3	12	✓	62
4	16	✓	62

ตาราง ค.2 แสดงผลการทดสอบของแบบจำลองที่ 2 ระยะ 8 : 4 : 5

กรณีที่	ความสูงกำแพงกันดิน (cm)	เกิดการวิบัติ	มุมระนาบการวิบัติ (°)
1	16	✗	-
2	20	✓	67
3	24	✓	64

ตาราง ค.3 แสดงผลการทดสอบของแบบจำลองที่ 3 ระยะ 6 : 2 : 5

กรณีที่	ความสูงกำแพงกันดิน (cm)	เกิดการวิบัติ	มุมระนาบการวิบัติ (°)
1	20	✗	-
2	24	✗	-

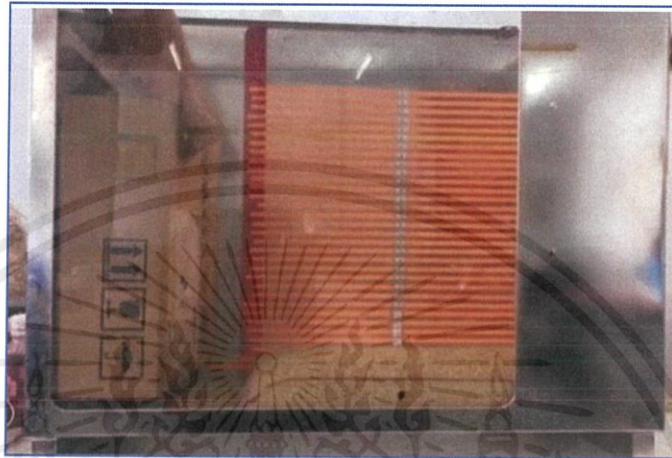
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

รูปภาพของแบบจำลอง

ง.1 รูปของแบบจำลองหลังเกิดการวิบัติ

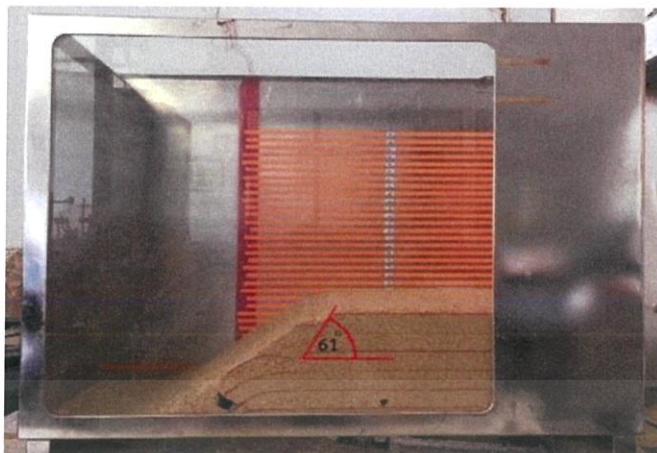
ง.1.1 แบบจำลองที่ 1 ระยะ 6 : 4 : 5 เซนติเมตร



รูปที่ ง.1 แสดงการทดสอบแบบจำลองกำแพงกันดิน กรณีที่ 1 สูง 4 เซนติเมตร



รูปที่ ง.2 แสดงการทดสอบแบบจำลองกำแพงกันดิน กรณีที่ 2 สูง 8 เซนติเมตร



รูปที่ ง.2 แสดงการทดสอบแบบจำลองกำแพงกันดิน กรณีที่ 2 สูง 12 เซนติเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

การคำนวณเสถียรภาพในของกำแพงกันดิน

จ.1 แรงกระทำต่อกำแพงกันดินเสริมกำลัง

1) แบบจำลองที่ 1

เมื่อค่ามุมเสียดทานภายในของดิน (ϕ) = 33 องศา

หน่วยน้ำหนักประสิทธิผล (γ) = 0.0269 N/cm³

ความยาวหนังสือพิมพ์ (L) = 6 เซนติเมตร

ระยะห่างของวัสดุเสริมกำลังในแต่ละชั้น (S_v) = 4 เซนติเมตร

จำนวนชั้น = 3 ชั้น

ความสูงรวมของกำแพงกันดิน (H) = 4 × 3 = 12 เซนติเมตร

ระดับความลึกที่พิจารณา (Z) = $(H - \frac{S_v}{2}) = 12 - 2 = 10$ เซนติเมตร

แรงดึงสูงสุดที่ทำให้กระดาษหนังสือพิมพ์เกิดการวิบัติ (T_c) = 2.0438 N/cm

มุมเสียดทานภายในระหว่างทรายและวัสดุเสริมกำลัง (δ) = 22 องศา

โดยที่

1. ความยาวของวัสดุเสริมกำลังในโซนเคลื่อนตัว

$$L_a = (H - z) \tan^2(45 - \frac{\phi}{2})$$

$$L_a = (12 - 10) \tan^2(45 - \frac{33}{2})$$

$$L_a = 2.9480 \text{ เมตร}$$

2. ความยาวของวัสดุเสริมกำลังในโซนต้านทานการเคลื่อนตัว

$$L_e = 6 - 2.9480 = 3.0520 \text{ เมตร}$$

3. พิจารณาแรงกระทำต่อกำแพงกันดินเสริมกำลัง

3.1 พิจารณานอกโซนเสริมกำลัง

3.1.1 สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างของกำแพงกันดินในสภาวะรุก (Active)

$$K_a = \tan^2(45 - \frac{\phi}{2})$$

$$K_a = \tan^2(45 - \frac{33}{2})$$

$$K_a = 0.29$$

3.1.2 แรงดันดินด้านข้างจากน้ำหนักของดินถม

$$F_1 = 0.5 \gamma H^2 K_a$$

$$F_1 = 0.5(0.0269)(12)^2(0.29)$$

$$F_1 = 0.5710 \text{ นิวตัน}$$

3.1.3 โมเมนต์ที่ทำให้เกิดการพลิกคว่ำจากน้ำหนักดินถม

$$M_o = (F_1 \times \frac{H}{3})$$

$$M_o = (0.5710 \times \frac{12}{3})$$

$$M_o = 2.2839 \text{ นิวตัน - เมตร}$$

3.2 พิจารณาในโซนเสริมกำลัง

3.2.1 น้ำหนักของดินถม

$$W = \gamma HB$$

$$W = (0.0269)(12)(6)$$

$$W = 1.9368 \text{ นิวตัน ต่อ เซนติเมตร}$$

3.2.2 โมเมนต์ต้านน้ำหนักดินถม

$$M_r = W \times \frac{B}{2}$$

$$M_r = 0.0269 \times \frac{6}{2}$$

$$M_r = 5.8104 \text{ นิวตัน - เมตร}$$

4. ตรวจสอบเสถียรภาพภายใน

4.1 ตรวจสอบเสถียรภาพด้านการฉีกขาดแรงดึงสูงสุด (พิจารณาวัสดุเสริมกำลังชั้นที่ 1)

$$T = (K_a \gamma Z) S_v$$

$$T = (0.29)(0.0269)(10)(4)$$

$$T = 0.3172 \text{ นิวตัน - เมตร}$$

4.2 อัตราส่วนปลอดภัยต้านทานการฉีกขาด

$$FS = \frac{T_c}{T}$$

$$FS = \frac{2.0438}{0.3172}$$

$$FS = 6.4430$$

4.3 ตรวจสอบเสถียรภาพต้านทานแรงเฉือน

$$T = (K_a \gamma Z) S_v$$

$$T = (0.29)(0.0269)(10)(4)$$

$$T = 0.0634 \text{ นิวตัน - เมตร}$$

4.3.1 กำลังต้านทานแรงฉุด

$$T_{\text{pull}} = 2L_e \sigma_v \tan \delta$$

$$T_{\text{pull}} = 2(3.0520)(0.0269 \times 2) \tan 22$$

$$T_{\text{pull}} = 0.1327 \text{ นิวตัน - เมตร}$$

4.4 อัตราส่วนปลอดภัยต้านทานแรงฉุด

$$FS = \frac{T_{\text{pull}}}{T}$$

$$FS = \frac{0.1327}{0.0634}$$

$$FS = 2.0914$$

5. ความยาวส่วนที่ห่อหุ้มผิวหน้าของกำแพงกันดินเสริมกำลัง

$$L_0 = \frac{(\sigma_h)(S_v)(FS)}{4(c + \sigma_v \tan(\frac{2}{3}\phi))}$$

$$L_0 = \frac{(0.29)(0.0269)(2)(4)(1.5)}{4(0.0269)(2) \tan(\frac{2}{3}33)}$$

$$L_0 = 1.09 \text{ เซนติเมตร}$$

2) แบบจำลองที่ 2

เมื่อค่ามุมเสียดทานภายในของดิน (ϕ) = 33 องศา

หน่วยน้ำหนักประสิทธิผล (γ) = 0.0269 N/cm³

ความยาวหนังสือพิมพ์ (L) = 8 เซนติเมตร

ระยะห่างของวัสดุเสริมกำลังในแต่ละชั้น (S_v) = 4 เซนติเมตร

จำนวนชั้น = 5 ชั้น

ความสูงรวมของกำแพงกันดิน (H) = 4 × 5 = 20 เซนติเมตร

ระดับความลึกที่พิจารณา (Z) = $(H - \frac{S_v}{2}) = 20 - 2 = 18$ เซนติเมตร

แรงดึงสูงสุดที่ทำให้กระดาษหนังสือพิมพ์เกิดการวิบัติ (T_c) = 2.0438 N/cm

มุมเสียดทานภายในระหว่างทรายและวัสดุเสริมกำลัง (δ) = 22 องศา
โดยที่

1. ความยาวของวัสดุเสริมกำลังในโซนเคลื่อนตัว

$$L_a = (H - z) \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right)$$

$$L_a = (20 - 18) \tan^2 \left(45 - \frac{33}{2} \right)$$

$$L_a = 5.3064 \text{ เมตร}$$

2. ความยาวของวัสดุเสริมกำลังในโซนต้านทานการเคลื่อนตัว

$$L_e = 8 - 5.3064 = 2.6935 \text{ เมตร}$$

3. พิจารณาแรงกระทำต่อกำแพงกันดินเสริมกำลัง

3.1 พิจารณานอกโซนเสริมกำลัง

- 3.1.1 สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างของกำแพงกันดินในสภาวะรุก (Active)

$$K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right)$$

$$K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{33}{2} \right)$$

$$K_a = 0.29$$

- 3.1.2 แรงดันดินด้านข้างจากน้ำหนักของดินถม

$$F_1 = 0.5 \gamma H^2 K_a$$

$$F_1 = 0.5(0.0269)(20)^2(0.29)$$

$$F_1 = 1.5860 \text{ นิวตัน}$$

- 3.1.3 โมเมนต์ที่ทำให้เกิดการพลิกคว่ำจากน้ำหนักดินถม

$$M_o = \left(F_1 \times \frac{H}{3} \right)$$

$$M_o = \left(1.5860 \times \frac{20}{3} \right)$$

$$M_o = 10.5735 \text{ นิวตัน - เมตร}$$

- 3.2 พิจารณาในโซนเสริมกำลัง

- 3.2.1 น้ำหนักของดินถม

$$W = \gamma HB$$

$$W = (0.0269)(12)(8)$$

$$W = 4.3040 \text{ นิวตัน ต่อ เซนติเมตร}$$

- 3.2.2 โมเมนต์ต้านน้ำหนักดินถม

$$M_r = W \times \frac{B}{2}$$

$$M_r = 0.0269 \times \frac{8}{2}$$

$$M_r = 17.2160 \text{ นิวตัน - เมตร}$$

4. ตรวจสอบเสถียรภาพภายใน

4.1 ตรวจสอบเสถียรภาพด้านการฉีกขาดแรงดึงสูงสุด (พิจารณาวัสดุเสริมกำลังชั้นที่ 1)

$$T = (K_a \gamma Z) S_v$$

$$T = (0.29)(0.0269)(18)(4)$$

$$T = 0.5710 \text{ นิวตัน - เมตร}$$

4.2 อัตราส่วนปลอดภัยด้านทานการฉีกขาด

$$FS = \frac{T_c}{T}$$

$$FS = \frac{2.0438}{0.5710}$$

$$FS = 3.5794$$

4.3 ตรวจสอบเสถียรภาพด้านทานแรงฉุด

$$T = (K_a \gamma Z) S_v$$

$$T = (0.29)(0.0269)(18)(4)$$

$$T = 0.0634 \text{ นิวตัน - เมตร}$$

4.3.1 กำลังต้านทานแรงฉุด

$$T_{\text{pull}} = 2L_e \sigma_v \tan \delta$$

$$T_{\text{pull}} = 2(2.6935)(0.0269 \times 2) \tan 22$$

$$T_{\text{pull}} = 0.1170 \text{ นิวตัน - เมตร}$$

4.4 อัตราส่วนปลอดภัยด้านทานแรงฉุด

$$FS = \frac{T_{\text{pull}}}{T}$$

$$FS = \frac{0.1170}{0.0634}$$

$$FS = 1.8458$$

5. ความยาวส่วนที่ห่อหุ้มผิวหน้าของกำแพงกันดินเสริมกำลัง โดยกำหนด $FS = 1.5$

$$L_0 = \frac{(\sigma_h)(S_v)(FS)}{4(c + \sigma_v \tan(\frac{2}{3}\phi))}$$

$$L_0 = \frac{(0.29)(0.0269)(2)(4)(1.5)}{4(0.0269(2)\tan(\frac{2}{3}33))}$$

$$L_0 = 1.09 \text{ เซนติเมตร}$$

3) แบบจำลองที่ 3

เมื่อค่ามุมเสียดทานภายในของดิน (ϕ) = 33 องศา

หน่วยน้ำหนักประสิทธิผล (γ) = 0.0269 N/cm³

ความยาวหนังสือพิมพ์ (L) = 6 เซนติเมตร

ระยะห่างของวัสดุเสริมกำลังในแต่ละชั้น (S_v) = 2 เซนติเมตร

จำนวนชั้น = 10 ชั้น

ความสูงรวมของกำแพงกันดิน (H) = 2 × 10 = 20 เซนติเมตร

ระดับความลึกที่พิจารณา (Z) = $(H - \frac{S_v}{2}) = 20 - 1 = 19$ เซนติเมตร

แรงดึงสูงสุดที่ทำให้กระดาษหนังสือพิมพ์เกิดการวิบัติ (T_c) = 2.0438 N/cm

มุมเสียดทานภายในระหว่างทรายและวัสดุเสริมกำลัง (δ) = 22 องศา

โดยที่

6. ความยาวของวัสดุเสริมกำลังในโซนเคลื่อนตัว

$$L_a = (H - z) \tan^2(45 - \frac{\phi}{2})$$

$$L_a = (20 - 1) \tan^2(45 - \frac{33}{2})$$

$$L_a = 5.6012 \text{ เมตร}$$

7. ความยาวของวัสดุเสริมกำลังในโซนต้านทานการเคลื่อนตัว

$$L_e = 6 - 5.6012 = 0.3987 \text{ เมตร}$$

8. พิจารณาแรงกระทำต่อกำแพงกันดินเสริมกำลัง

3.1 พิจารณานอกโซนเสริมกำลัง

3.1.1 สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างของกำแพงกันดินในสภาวะรุก (Active)

$$K_a = \tan^2(45 - \frac{\phi}{2})$$

$$K_a = \tan^2(45 - \frac{33}{2})$$

$$K_a = 0.29$$

3.1.2 แรงดันดินด้านข้างจากน้ำหนักของดินถม

$$F_1 = 0.5 \gamma H^2 K_a$$

$$F_1 = 0.5(0.0269)(20)^2(0.29)$$

$$F_1 = 1.5860 \text{ นิวตัน}$$

3.1.3 โมเมนต์ที่ทำให้เกิดการพลิกคว่ำจากน้ำหนักดินถม

$$M_o = (F_1 \times \frac{H}{3})$$

$$M_o = (1.5860 \times \frac{20}{3})$$

$$M_o = 10.5735 \text{ นิวตัน - เมตร}$$

3.2 พิจารณาในโซนเสริมกำลัง

3.2.1 น้ำหนักของดินถม

$$W = \gamma HB$$

$$W = (0.0269)(20)(6)$$

$$W = 3.2280 \text{ นิวตัน ต่อ เซนติเมตร}$$

3.2.2 โมเมนต์ต้านน้ำหนักดินถม

$$M_r = W \times \frac{B}{2}$$

$$M_r = 0.0269 \times \frac{6}{2}$$

$$M_r = 9.6840 \text{ นิวตัน - เมตร}$$

9. ตรวจสอบเสถียรภาพภายใน

4.1 ตรวจสอบเสถียรภาพด้านการฉีกขาดแรงดึงสูงสุด (พิจารณาวัสดุเสริมกำลังชั้นที่ 1)

$$T = (K_a \gamma Z) S_v$$

$$T = (0.29)(0.0269)(19)(2)$$

$$T = 0.3013 \text{ นิวตัน - เมตร}$$

4.2 อัตราส่วนปลอดภัยต้านทานการฉีกขาด

$$FS = \frac{T_c}{T}$$

$$FS = \frac{2.0438}{0.3013}$$

$$FS = 6.7820$$

4.3 ตรวจสอบเสถียรภาพต้านทานแรงเฉด

$$T = (K_a \gamma Z) S_v$$

$$T = (0.29)(0.0269)(19)(2)$$

$$T = 0.0159 \text{ นิวตัน - เมตร}$$

4.3.1 กำลังต้านทานแรงเฉด

$$T_{pull} = 2L_e \sigma_v \tan \delta$$

$$T_{pull} = 2(0.3987)(0.0269 \times 1) \tan 22$$

$$T_{pull} = 0.0087 \text{ นิวตัน - เมตร}$$

4.4 อัตราส่วนปลอดภัยต้านทานแรงฉุด

$$FS = \frac{T_{pull}}{T}$$

$$FS = \frac{0.0087}{0.0159}$$

$$FS = 0.5465$$

10. ความยาวส่วนที่ห่อหุ้มผิวหน้าของกำแพงกันดินเสริมกำลัง

$$L_0 = \frac{(\sigma_h)(S_v)(FS)}{4(c + \sigma_v \tan(\frac{2}{3}\phi))}$$

$$L_0 = \frac{(0.29)(0.0269)(1)(2)(1.5)}{4(0.0269(1)\tan(\frac{2}{3}33))}$$

$$L_0 = 0.55 \text{ เซนติเมตร}$$

