

อิทธิพลของคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ในดินถมและวัสดุระบายน้ำ
ใยสังเคราะห์ต่อการระบายน้ำในกำแพงกันดินเสริมกำลัง



นางสาวไอริน ลิ้มรัตน์

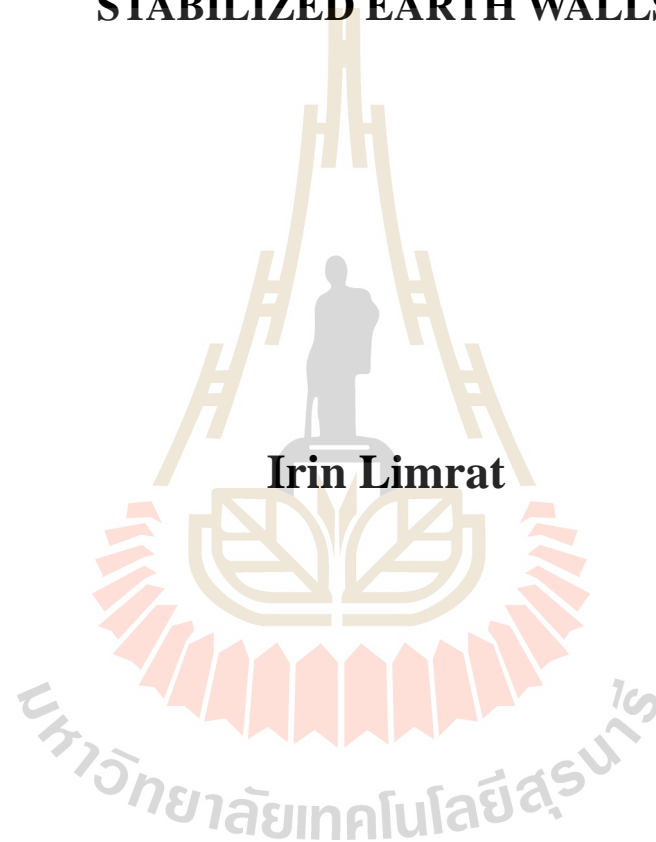
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2559

**EFFECT OF HYDRAULIC PROPERTIES OF BACKFILL
AND GEOCOMPOSITE DRAINAGE MATERIALS ON
SEEPAGE RESPONSE IN MECHANICALLY
STABILIZED EARTH WALLS**

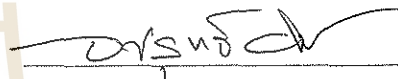


**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2016**

อิทธิพลของคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ในดินถมและวัสดุระบายน้ำใยสังเคราะห์
ต่อการระบายน้ำในกำแพงกันดินเสริมกำลัง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์




(รศ. ดร. อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

ประธานกรรมการ



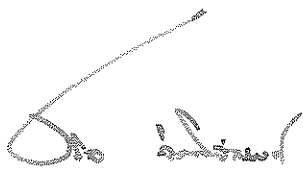
(ศ. ดร. สุขสันต์ หอพูลสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร. พรพจน์ ตันเส็ง)

กรรมการ



(ศ. ดร. ชุกิจ ลิ้มปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ไอริน ลิ้มรัตน์ : อิทธิพลของคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ในดินถมและวัสดุระบายน้ำใยสังเคราะห์ต่อการระบายน้ำในกำแพงกันดินเสริมกำลัง (EFFECT OF HYDRAULIC PROPERTIES OF BACKFILL AND GEOCOMPOSITE DRAINAGE MATERIALS ON SEEPAGE RESPONSE IN MECHANICALLY STABILIZED EARTH WALLS)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 74 หน้า

กำแพงกันดินเสริมกำลัง (Mechanically Stabilized Earth Wall, MSE Wall) เป็นสิ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อเสริมเสถียรภาพในกำแพงแนวตั้งที่มีความสูงชัน การออกแบบโครงสร้างเหล่านี้จำเป็นต้องมีระบบระบายน้ำ (drainage) เพื่อป้องกันการลดลงของหน่วยแรงประสิทธิผลในพื้นที่เสริมกำลัง การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการตอบสนองเชิงกลศาสตร์ของกำแพงที่มีการติดตั้งระบบระบายน้ำ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการศึกษาคือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านและลักษณะการอุ้มน้ำของวัสดุที่เกี่ยวข้อง (วัสดุถม วัสดุเส้นใยสังเคราะห์ และวัสดุใยสังเคราะห์) แบบจำลองเชิงตัวเลขที่ผ่านการสอบเทียบถูกนำมาใช้ในการศึกษา จากผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขพบว่าพารามิเตอร์เชิงกลศาสตร์ของดินนอกพื้นที่เสริมกำลัง ไม่ส่งผลกระทบต่อตอบสนองเชิงกลศาสตร์ภายในพื้นที่เสริมกำลัง ยกเว้นค่าความซึมผ่านได้ของดินนอกพื้นที่เสริมกำลัง ซึ่งส่งผลกระทบต่อระดับน้ำในดินในพื้นที่เสริมกำลัง โดยเมื่อค่าความซึมผ่านได้ของดินนอกพื้นที่เสริมกำลังมีค่าสูงกว่าความจุของระบบระบายน้ำ ทำให้ความสามารถในการระบายน้ำน้อยลง ส่งผลระดับน้ำในพื้นที่เสริมกำลังสูงขึ้น ดังนั้นในการออกแบบระบบระบายน้ำจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินนอกพื้นที่เสริมกำลัง เทียบกับความสามารถในการระบายน้ำของวัสดุวัสดุใยสังเคราะห์

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนักศึกษา ไอริน ลิ้มรัตน์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข

IRIN LIMRAT : EFFECT OF HYDRAULIC PROPERTIES OF
BACKFILL AND GEOCOMPOSITE DRAINAGE MATERIALS ON
SEEPAGE RESPONSE IN MECHANICALLY STABILIZED EARTH
WALLS. THESIS ADVISOR : PROF. SUKSUN HORPIBULSUK,
Ph.D., 74 PP.

MECHANICAL STABILIZED EARTH WALL/ GEOCOMPOSITE/ DRAINAGE
SYSTEM/ NUMERICAL MODELING/ HYDRAULIC PARAMETERS

Mechanically stabilized earth (MSE) wall is widely used to enhance stability of a wall placed in steep vertical cut. The prospered design of these structures requires a drainage system to prevent the reduction of effective stress in the reinforced zone. This research aimed to investigate the hydraulic responses of the wall with installed drainage system. Influence factors being investigated were coefficient of permeability and the water retention characteristic of the relevant materials (soil, geotextile, and geocomposite). A welled calibrated numerical model was used for this purpose. Results from the parametric study shows that the water retention characteristic of the soil outside the reinforced zone plays no role in the hydraulic response of the soil inside the reinforced zone. However, the coefficient of permeability of the soil outside the reinforced zone plays an important role to the level of the phreatic surface inside the reinforced zone when the capacity of the drainage system is not enough to collect the whole water flowing from the upstream side. Hence, the coefficient of permeability of the soil outside the reinforced zone must be taken into account when designing drainage system.

School of Civil Engineering

Academic Year 2016

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลทุกท่านที่มีส่วนในการช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้การสนับสนุนเป็นอย่างดี ทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัย ให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ ที่ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือด้านวิชาการ ให้คำแนะนำ ให้ความรู้ และตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ดันเส็ง กรรมการ ที่กรุณาถ่ายทอดวิชาความรู้ทางด้านวิชาการเกี่ยวกับงานวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ผู้ดูแลศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาเอื้อเฟื้อเครื่องมือการทดสอบ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการจัดทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในงานวิจัยครั้งนี้

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีและให้กำลังใจอย่างดีเสมอมา

ไอริน ลิ้มรัตน์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
2 บริบทสนั้วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ส่วนประกอบของกำแพงกันดินเสริมกำลัง.....	4
2.2 การวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างกันดินเสริมกำลัง.....	4
2.2.1 การตรวจสอบเสถียรภาพภายนอก.....	6
2.2.2 การตรวจสอบเสถียรภาพภายใน.....	9
2.3 พฤติกรรมเชิงกลของกำแพงกันดินเสริมแรง.....	15
2.3.1 พฤติกรรมของกำแพงกันดินเสริมกำลังจากการออกแบบโดยวิธีพื้นฐาน.....	16
2.3.2 พฤติกรรมของกำแพงกันดินเสริมกำลังจากการวัดค่าในสนาม.....	16
2.4 คุณสมบัติด้านความชื้นและการไหลของน้ำในดิน.....	18
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	28
3.1 แบบจำลองกำแพงกันดิน.....	29
3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....	30
3.2.1 มาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน.....	30
3.2.2 มาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม.....	30

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.3	คุณสมบัติของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์.....	31
3.2.4	คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุถม.....	32
3.3	การดำเนินการทดสอบแบบจำลองเชิงกายภาพ.....	33
3.4	แบบจำลองเชิงตัวเลข.....	35
3.4.1	ข้อมูลการวิเคราะห์แบบจำลองเชิงตัวเลขของกำแพงกันดินเสริมกำลัง.....	36
3.5	การศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์.....	38
3.6	เงื่อนไขการทดสอบ.....	39
4	การทดสอบและวิเคราะห์ผล.....	40
4.1	การสอบเทียบแบบจำลอง.....	40
4.1.1	พฤติกรรมเชิงพลศาสตร์.....	40
4.1.2	พฤติกรรมเชิงกล.....	44
4.2	กำแพงกันดินที่ใช้วัสดุใยสังเคราะห์เป็นระบบระบายน้ำ : แบบจำลองเชิงตัวเลข.....	51
4.2.1	พฤติกรรมเชิงพลศาสตร์.....	51
4.3	การศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์เชิงพลศาสตร์.....	55
4.3.1	ผลกระทบของตัวแปร Van Genuchten ในดิน.....	56
4.3.2	ผลกระทบของอัตราส่วนการซึมผ่าน.....	65
5	บทสรุป.....	67
5.1	สรุปผลงานวิจัย.....	67
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	68
	รายการอ้างอิง.....	69
	ประวัติผู้เขียน.....	74

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความหนาของลึงกะสีเคลือบ ตามมาตรฐาน ASTM A123.....	13
3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองกายภาพย่อยส่วน : แบบจำลอง.....	37
3.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองกายภาพย่อยส่วน : วัสดุผสมและวัสดุไฮสังเคราะห์.....	37
3.3 รายละเอียดของการทดสอบ.....	39
4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง: ดินลูกรัง.....	51
4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง: ดินเดิมเป็นดินลูกรังพื้นที่เสริมกำลังเป็นดินทราย.....	51
4.3 ช่วงของตัวแปร : ดินลูกรัง.....	55
4.4 ช่วงของตัวแปร : ดินเดิมเป็นดินลูกรัง พื้นที่เสริมกำลังเป็นดินทราย.....	56

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ส่วนประกอบของกำแพงกันดินเสริมกำลัง..... 4
2.2	เสถียรภาพภายนอกของกำแพงกันดินเสริมกำลัง..... 5
2.3	การตรวจสอบเสถียรภาพภายในของกำแพงกันดินเสริมกำลัง..... 5
2.4	แรงที่กระทำต่อกำแพงกันดินเสริมกำลัง..... 7
2.5	ลักษณะการกระจายความเค้นในดินใต้ฐานราก..... 9
2.6	ระนาบการวิบัติของดินเสริมกำลัง..... 10
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความดันดินด้านข้างกับความลึก สำหรับเหล็กเสริมชนิดต่างๆ..... 12
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความดันดินด้านข้างกับความลึก สำหรับเหล็กเสริมทุกชนิด..... 12
2.9	ลักษณะการวิบัติของโครงสร้างกันดินเสริมกำลัง..... 14
2.10	พฤติกรรมการต้านทานแรงคูดของเหล็กแผ่น..... 15
2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงคูดและการเคลื่อนตัวของเหล็กตะแกรง..... 16
2.12	การทรุดตัวของกำแพงกันดินเสริมเหล็กแบกทาน..... 17
2.13	การเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงกันดินเสริมเหล็กแบกทาน..... 18
2.14	โค้งการกระจายตัวความชื้นเหนือระดับน้ำใต้ดิน และ CMDC..... 21
2.15	แบบจำลองความไม่สม่ำเสมอของช่วงคาพิลลารีเพื่ออธิบาย CMDC..... 21
2.16	ปรากฏการณ์ความไม่ซ้ํารอยของโค้งลักษณะความชื้นของดิน..... 23
2.17	ผลของขวดน้ำหมึกและผลของเครือข่าย..... 23
2.18	อัตราการไหลเข้าและออกจากปริมาตรควบคุม..... 25
2.19	แผนภาพสำหรับเส้นโค้งลักษณะอุ้มน้ำ..... 27
3.1	แผนการดำเนินงานวิจัย..... 28
3.2	รูปแบบถังทดสอบ (a) แปลนถังทดสอบ (b) รูปตัดถังทดสอบ..... 29
3.3	วิธีการหาคุณลักษณะการอุ้มน้ำของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์โดยการทดสอบแบบ capillary rise test..... 31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 ขนาดคละของดินทราย.....	32
3.5 ขนาดคละของดินลูกรัง.....	33
3.6 รูปแบบถังจำลองและแผนผังตำแหน่งของอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ.....	34
3.7 แบบจำลองเชิงตัวเลขของกำแพงกันดินเสริมกำลัง.....	36
3.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงคาพิลลารีกับความชื้นของดิน.....	38
4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นระดับน้ำกับระยะการติดตั้งกำแพงของกรณีที่ 1.....	41
4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นระดับน้ำกับระยะการติดตั้งกำแพงของกรณีที่ 2.....	43
4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับระยะจากต้นน้ำถึงผนังกำแพงของกรณีที่ 1.....	45
4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวด้านข้างกับความสูงของกำแพงของกรณีที่ 1.....	46
4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับระยะจากต้นน้ำถึงผนังกำแพงของกรณีที่ 2.....	48
4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวด้านข้างกับความสูงของกำแพงของกรณีที่ 2.....	49
4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวด้านข้างกับความสูงของกำแพง ของกรณีที่ 1 และ 2.....	50
4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นระดับน้ำกับระยะการติดตั้งกำแพงของกรณีที่ 3.....	53
4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นระดับน้ำกับระยะการติดตั้งกำแพงของกรณีที่ 4.....	54
4.10 แสดงรูปแบบของระดับความอิ่มตัวประสิทธิผลตามแนวตัด a-a และ b-b ตามลำดับ สำหรับกรณีที่ 3.....	58
4.11 แสดงรูปแบบของระดับความอิ่มตัวประสิทธิผลตามแนวตัด a-a และ b-b ตามลำดับ สำหรับกรณีที่ 4.....	59
4.12 แสดงเส้นโค้งลักษณะการอุ้มน้ำของค่า g_n	59
4.13 แสดงเส้นระดับน้ำและเส้นชั้นความชื้นในแบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลัง สำหรับขนาดของ g_n ในกรณีที่ 3 และกรณีที่ 4.....	61
4.14 แสดงเส้นโค้งลักษณะการอุ้มน้ำสำหรับค่า g_n ที่ต่ำและสูง.....	62
4.15 แสดงเส้นระดับน้ำและเส้นชั้นความชื้นในแบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลัง สำหรับ S_{res} กรณีที่ 3.....	63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 แสดงเส้นระดับน้ำและเส้นชั้นความชื้นในแบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลัง สำหรับ S_{sat} กรณีที่ 3.....	63
4.17 แสดงเส้นระดับน้ำและเส้นชั้นความชื้นในแบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลัง สำหรับ S_{res} กรณีที่ 4.....	64
4.18 แสดงเส้นระดับน้ำและเส้นชั้นความชื้นในแบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลัง สำหรับ S_{sat} กรณีที่ 4.....	64
4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมสะท้อนและค่าความซึมผ่านของวัสดุถม.....	65



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A_s	=	พื้นที่แรงเสียดทาน
B	=	ความกว้างของกำแพงกันดิน
c	=	หน่วยแรงเหนียว
C_a	=	หน่วยแรงยึดเกาะ
C_c	=	สัมประสิทธิ์ความโค้ง
C_u	=	สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ
D_{50}	=	ขนาดเฉลี่ยของเม็ดดิน
e	=	ระยะเยื้องศูนย์กลาง
g_a	=	พารามิเตอร์ที่เหมาะสมแสดงค่าอากาศข้างของดิน
g_n	=	อัตราการดึงน้ำออกจากดิน
G_s	=	ความถ่วงจำเพาะของดิน
H	=	ความสูงของกำแพงกันดิน
i	=	ความลาดเชิงชลศาสตร์
k	=	สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของดิน
k_r	=	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน
k_{lat}, k_{long}	=	สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของวัสดุใยสังเคราะห์
K, K_a, K_0	=	สัมประสิทธิ์แรงดันดิน
k_u	=	สภาพนำชลศาสตร์
M_0	=	โมเมนต์ที่ก่อให้เกิดการพลิกคว่ำทั้งหมด
M_r	=	โมเมนต์ต้านทานการพลิกคว่ำทั้งหมด
P_f	=	แรงเสียดทาน
P_h	=	แรงต้านทานการลื่นไถล
q	=	น้ำหนักบรรทุกจร
q_{min}	=	ความเค้นน้อยที่สุด
q_{max}	=	ความเค้นมากที่สุด
S	=	ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ
S_e	=	ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำประสิทธิภาพ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

S_h, S_v	=	ระยะห่างในแนวราบและแนวดิ่ง
S_{res}	=	ความอึดตัวที่เหลือของการดูดที่มีค่าสูงมาก
S_{sat}	=	ความอึดตัวของดินอึดตัว
S_u	=	กำลังต้านทานแรงเฉือน
T	=	แรงดึงในวัสดุเสริมกำลัง
T_{max}	=	แรงดึงสูงสุดในวัสดุเสริมกำลัง
u_a	=	แรงดันอากาศในช่องว่างดิน
u_w	=	แรงดันน้ำในดิน
V_w	=	ปริมาตรน้ำ
V_t	=	ปริมาตรทั้งหมด
w	=	ความชื้นโดยน้ำหนัก
W	=	น้ำหนักบรรทุกทุกในแนวดิ่ง
W_w	=	น้ำหนักน้ำ
W_s	=	น้ำหนักดินแห้ง
ψ	=	แรงดึงดูดเมตริกหรือแรงคาพิลลารี
β	=	มุมการวิบัติของดิน
δ	=	มุมเสียดทานรอบผิวสัมผัส
ε	=	ความเครียด
ϕ, ϕ'	=	มุมเสียดทานของดิน
$\gamma_{d,max}$	=	หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด
θ	=	ความชื้นโดยปริมาตร
$\sigma_h, \sigma'_s, \sigma_n, \sigma_v$	=	หน่วยแรงตั้งฉาก
ρ_b	=	ความหนาแน่นของดินรวม
ρ_w	=	ความหนาแน่นของน้ำ
π	=	แรงดึงออสโมติก

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

ADR	=	amplitude domain reflectometer method
AEV	=	air - entry value
BRE	=	bearing reinforcement earth
FDR	=	frequency domain reflectometer method
FEM	=	finite element method
MSE	=	mechanically stabilized earth
OWC	=	optimum water content
SWCC	=	soil water retention characteristic curve
TDR	=	time-domain reflectometry
USCS	=	unified soil classification system
VG	=	van Genuchten
VGM	=	van Genuchten – Mualem
WEV	=	water - entry value
WRC	=	water retention characteristic

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

เพื่อรองรับการเจริญเติบโตของประเทศไทย โครงข่ายระบบคมนาคมทางบกจึงมีการพัฒนาอย่างเป็นระบบทั่วทุกภาคของประเทศ ทั้งระบบรถยนต์และระบบราง ซึ่งการพัฒนาระบบคมนาคมขนส่งทางบกจำเป็นต้องมีการตัดผ่านพื้นที่ลาดชัน ต้องมีการระบบสะพานหรือทางยกระดับ เพื่อช่วยการจราจรทางแยก ฯลฯ ซึ่งบริเวณพื้นที่ดังกล่าวจำเป็นต้องมีระบบกำแพงกันดินที่สามารถลดพื้นที่ในการขยายลาดดินออกทางด้านข้างได้อย่างมาก นั่นหมายถึงการลดปริมาณงานดินและลดการใช้พื้นที่โดยไม่จำเป็น การใช้ระบบกำแพงกันดินเสริมแรง (Reinforced Earth Retaining Wall) สามารถทำได้รวดเร็ว และประหยัดกว่าการใช้กำแพงกันดินแบบดั้งเดิม Elias and Christopher (2001) แสดงให้เห็นว่าสำหรับพื้นที่ที่มีสภาพดินฐานรากไม่ดีนัก การเลือกใช้กำแพงกันดินเสริมแรง จะประหยัดกว่าการใช้กำแพงกันดินแบบดั้งเดิมถึง 50% ข้อดีอีกประการหนึ่งของกำแพงกันดินแบบนี้คือการทรุดตัวของกำแพงกันดินเสริมกำลังมีความสม่ำเสมอ (การทรุดตัวที่แตกต่างกันมีค่าน้อยมาก) ทำให้ลดปัญหาการแตกร้าวของผิวถนน เหล็กเสริมแรงตั้งที่ฐานของกำแพงกันดินเสริมกำลังช่วยด้านการเคลื่อนตัวในแนวนอนของดินถมและเพิ่มกำลังรับแรงเบกทานของดินฐานราก (Jewell, 1986)

ในประเทศไทยกรมทางหลวงแห่งประเทศไทยกำหนดให้ใช้ดินเม็ดหยาบที่มีกำลังต้านทานแรงเฉือนและความชื้นผ่านน้ำสูงเป็นวัสดุดินถมสำหรับกำแพงกันดินเสริมกำลัง โดยดินเม็ดหยาบนี้ต้องมีปริมาณดินเม็ดละเอียดปนอยู่ไม่เกินร้อยละ 15 ดังนั้นเพื่อผลทั้งในแง่ของกำลังของดินถม และผลในแง่ของการระบายน้ำด้วย สำหรับกำแพงกันดินในงานถนนตามไหล่เขา ก็มีการใช้กำแพงกันดินเสริมแรงในหลายๆ โครงการ เช่น โครงการก่อสร้างถนนเส้นทาง 11 (อุตรดิตถ์-เด่นชัย) ซึ่งการออกแบบกำแพงกันดินตามไหล่เขา จะทำได้เช่นเดียวกับกำแพงกันดินสำหรับ Bridge abutment คือการตรวจสอบเสถียรภาพภายนอกและภายใน ซึ่งสามารถอ้างอิงได้จากมาตรฐาน/คู่มือการออกแบบต่างๆ เช่น มาตรฐานของ American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO) เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม มาตรฐานการออกแบบส่วนใหญ่ไม่ได้ระบุวิธี/แนวทางการติดตั้งระบบระบายน้ำให้กับกำแพงกันดินเสริมกำลัง สำหรับการก่อสร้างกำแพงกันดินเสริมกำลังตามไหล่เขา ซึ่งระบบระบายน้ำในดินหลังกำแพงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง

เนื่องจากน้ำจากพายุฝนอาจซึมผ่านเข้าไปยังกำแพงกันดินเสริมกำลัง ทำให้กำลังต้านทานแรงเฉือนและความต้านทานการเสียดรูปของดินลดต่ำลง มีผลให้กำลังต้านทานแรงจุดของเหล็กเสริมและเสถียรภาพของกำแพงกันดินเสริมกำลังลดลง Shibuya et al. (2007) แสดงสาเหตุความเสียหายของกำแพงกันดินเสริมกำลังที่ก่อสร้างในพื้นที่ภูเขาในเมือง Yabu ตอนเหนือของจังหวัด Hyogo ประเทศญี่ปุ่น การวิบัติเกิดขึ้นในปี ค.ศ. 2004 หลังจากการเกิดพายุไต้ฝุ่น สาเหตุการวิบัติสาเหตุหนึ่งคือการติดตั้งระบบระบายน้ำในกำแพงกันดินไม่เหมาะสม สำหรับในประเทศไทยซึ่งเป็นพื้นที่ในเขตรมรสุมเราจะได้อินเรื่องการวิบัติตามลาดเขาในลักษณะใกล้เคียงกับที่เกิดขึ้นตามรายงานของ Shibuya et al. (2007) อยู่เกือบทุกปีในช่วงฤดูมรสุมได้ตามปกติ

สำหรับงานก่อสร้างกำแพงกันดินเสริมกำลัง (Mechanically Stabilized Earth Wall, MSE Wall) ในเขตพื้นที่ภูเขาที่ประยุกต์ใช้ในงานเสริมเสถียรภาพตามไหล่เขา เช่น งานโครงสร้างกันดิน (retaining wall) ที่มีความชันสูงหรือตั้งค้ำ การออกแบบโครงสร้างเหล่านี้จึงจำเป็นต้องมีระบบระบายน้ำ (drainage) ในมวลดินหลังโซนเสริมกำลัง เพื่อป้องกันการลดลงของหน่วยแรงประสิทธิผลและเสถียรภาพในโซนเสริมกำลัง Koerner et al. (2001) ทำการรวบรวม 26 กรณีการวิบัติของกำแพงกันดินแบบกำแพงกันดินเสริมกำลังในสหรัฐอเมริกา พบว่ามีถึง 17 กรณีที่เกิดจากผลของการระบายน้ำไม่เหมาะสม เนื่องจากวัสดุถมมีการซึมผ่านต่ำ

เดิมวัสดุที่ใช้ในระบบระบายเป็นกรวดที่มีขนาดละเอียดดี แต่มีราคาแพงและการติดตั้งในแนวค้ำเป็นเรื่องยาก Koerner et al. (2000) เสนอทางเลือกที่จะใช้วัสดุโพลิเมอร์สังเคราะห์ (geocomposite) เป็นระบบระบาย ซึ่งระบบระบายน้ำที่ทำจากวัสดุโพลิเมอร์สังเคราะห์ยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลายในประเทศไทย เนื่องจากยังไม่มียานวิจัย/องค์ความรู้พื้นฐาน รวมทั้งมาตรฐานการออกแบบสำหรับการก่อสร้างในประเทศไทย Shibuya et al. (2009) ได้แนะนำให้ใช้วัสดุโพลิเมอร์สังเคราะห์ในการทำระบบระบายน้ำให้กับกำแพงกันดินเสริมกำลัง เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่สูง (สูงกว่าดินถมประมาณ 10 ถึง 200 เท่า) ระบบระบายน้ำที่ทำจากวัสดุโพลิเมอร์สังเคราะห์มีข้อดีกว่าระบบระบายน้ำแบบดั้งเดิม (ทรายคละขนาด) คือการระบายน้ำมีประสิทธิภาพแม้ว่าจะเกิดการเสียดรูปของกำแพงกันดินอันเนื่องมาจากน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่และน้ำหนักบรรทุกทุกจร นอกจากนี้ระบบระบายน้ำที่ทำจากวัสดุโพลิเมอร์สังเคราะห์ยังมีราคาต่ำก่อสร้างง่ายและติดตั้งง่ายกว่าระบบระบายน้ำแบบดั้งเดิมอย่างมาก

แม้ว่าจะมีรายงานจำนวนมากเกี่ยวกับการใช้วัสดุโพลิเมอร์สังเคราะห์เป็นระบบระบายน้ำของกำแพงกันดินเสริมกำลัง แต่การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของระบบระบายน้ำในกำแพงกันดินเสริมกำลังมีอย่างจำกัด (Koerner et al., 2005, Yoo et al., 2007) นอกจากนี้วิธีการออกแบบที่ผ่านมาตรฐานการเฉพาะค่าการส่งผ่าน (transmissivity) ของวัสดุโพลิเมอร์สังเคราะห์เท่านั้น แต่ในความเป็นจริงวัสดุโพลิเมอร์สังเคราะห์มีวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ (geotextile) เป็นส่วนประกอบ ซึ่งวัสดุเส้นใยสังเคราะห์มี

คุณสมบัติเกี่ยวกับการระบายน้ำที่สำคัญคือคุณลักษณะการอุ้มน้ำ (Water retention characteristic, WRC) ซึ่งคล้ายคลึงกับดินเหนียวบางเช่นกรวดและทราย ดังที่กล่าวถึงในรายงานวิจัยหลายฉบับ (Stormont et al., 1997; Stormont and Morris, 2000; Morris, 2000; Lafleur et al., 2000; Ho, 2000; Knight and Kotha, 2001; Iryo and Rowe, 2003 and 2004, Bouazza et al., 2006; Nahlawi et al., 2007) นอกจากนี้ได้มีนักวิจัยหลายท่านเสนอวิธีในการหาคุณลักษณะการอุ้มน้ำของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ แสดงให้เห็นว่าคุณลักษณะการอุ้มน้ำเป็นคุณสมบัติสำคัญของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์แต่ปัจจุบันการออกแบบวัสดุใยสังเคราะห์ช่วยในการระบายน้ำยังไม่สนใจคุณสมบัติด้านการอุ้มน้ำของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำและพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ในกำแพงกันดินเสริมกำลังที่มีวัสดุใยสังเคราะห์เป็นระบบระบายน้ำ โดยใช้ดินลูกรังและดินทรายเป็นวัสดุถมเพื่อให้สอดคล้องกับสภาพภูมิประเทศตามไหล่เขา ผลการศึกษาการไหลในแบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลังจะถูกนำมาไปใช้ในการศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ (parametric study) ผลการศึกษาทั้งหมดจะนำมาวิเคราะห์และสรุปเพื่อให้เป็นแนวทางการออกแบบระบบระบายน้ำหลังกำแพงกันดินเสริมกำลัง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของกำแพงกันดินเสริมกำลังที่มีการติดตั้งระบบระบายน้ำแบบวัสดุใยสังเคราะห์

1.2.2 ศึกษาอิทธิพลเนื่องจากคุณสมบัติด้านการอุ้มน้ำของดิน และวัสดุองค์ประกอบของวัสดุใยสังเคราะห์ กับการตอบสนองต่อการไหลของน้ำในกำแพงกันดินเสริมแรงที่มีการติดตั้งระบบระบายน้ำแบบวัสดุใยสังเคราะห์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

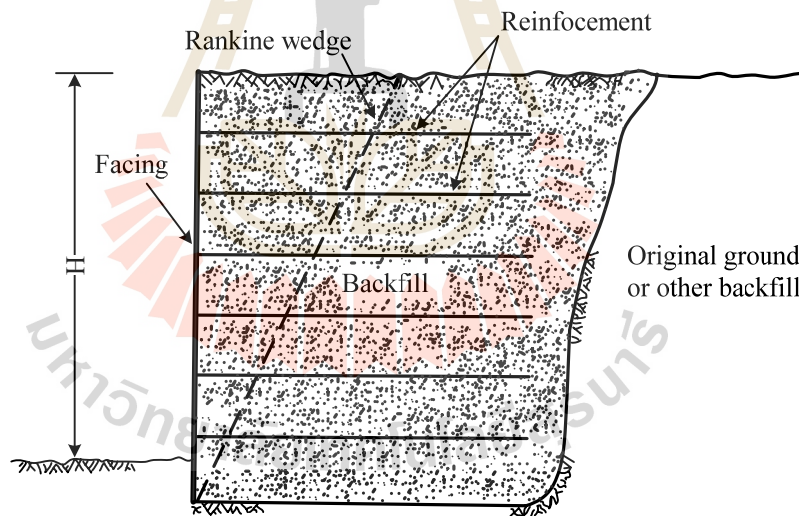
ใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ โปรแกรม PLAXIS 2D โดยการจำลองเป็นระนาบ 2 มิติ (plane strain) เพื่อศึกษาการไหลของน้ำผ่านดินหลังกำแพงที่มีระบบระบายน้ำที่ทำจากวัสดุใยสังเคราะห์ดินที่ใช้เป็นดินถมหลังกำแพง เป็นดินที่ผ่านมาตรฐานกรมทางหลวงสำหรับก่อสร้างกำแพงกันดินเสริมแรง คุณลักษณะการอุ้มน้ำแทนด้วยสมการ van Genuchten (van Genuchten, 1980) หรือสมการ VG และสมการ van Genuchten-Mualem (Mualem, 1976) หรือสมการ VGM เท่านั้น

บทที่ 2

ปริทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ส่วนประกอบของกำแพงกันดินเสริมกำลัง

กำแพงกันดินมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน ได้แก่ วัสดุถม วัสดุเสริมกำลัง และวัสดุปิดผิวหน้ากำแพง (รูปที่ 2.1) วัสดุถม (Backfill) ทำหน้าที่เป็นน้ำหนักถ่วงไม่ให้กำแพงเกิดการเคลื่อนตัวเนื่องจากแรงดันดินด้านหลังกำแพง วัสดุเสริมกำลัง (Reinforcement) ทำหน้าที่ช่วยลดแรงเฉือนในมวลดินถม ส่งผลให้ดินถมมีเสถียรภาพมากขึ้น วัสดุปิดผิวหน้ากำแพง (Facing) ทำหน้าที่ป้องกันการกัดเซาะที่ผิวด้านหน้าของวัสดุถม และช่วยให้กำแพงมีความสวยงาม ในกรณีที่วัสดุเสริมกำลังเป็นพลาสติก เช่น แผ่นตาข่าย (Geogrid) วัสดุปิดผิวหน้ากำแพงจะช่วยป้องกันไม่ให้วัสดุเสริมกำลังบริเวณผิวหน้ากำแพงถูกแสงแดดซึ่งจะส่งผลให้วัสดุเสริมกำลังเสื่อมคุณภาพได้

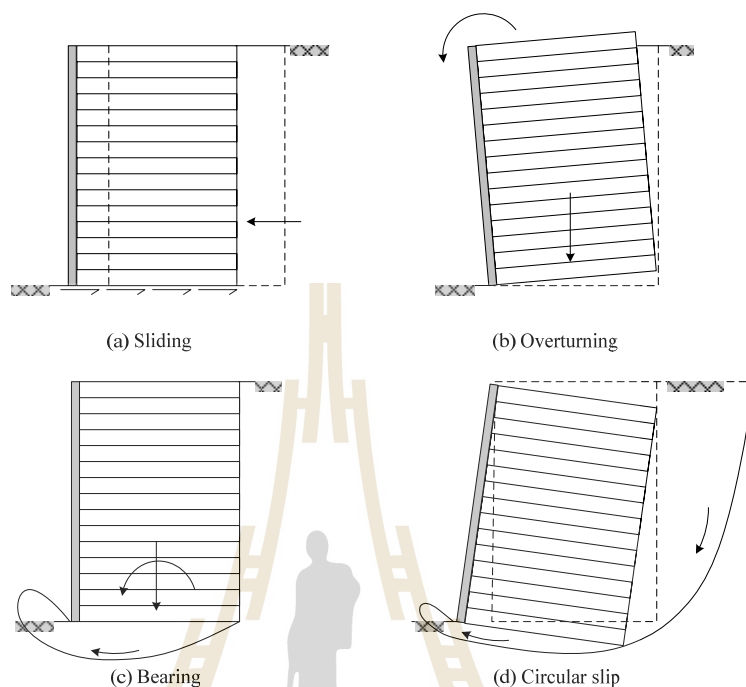


รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของกำแพงกันดินเสริมกำลัง (Bowles, 1996)

2.2 การวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างกันดินเสริมกำลัง

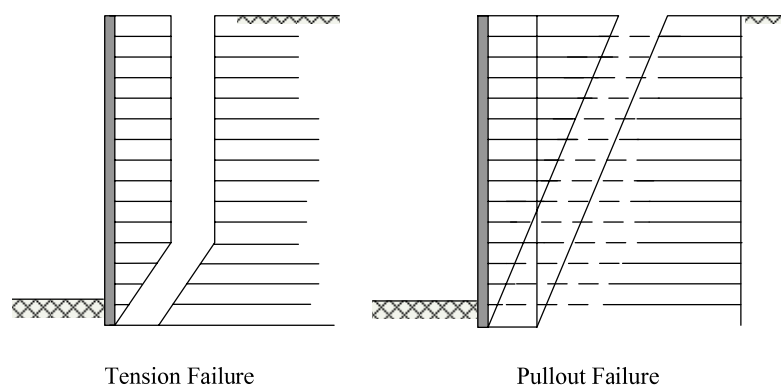
มาตรฐานการออกแบบกำแพงกันดินเสริมกำลัง (Mechanically stabilized earth wall, MSE wall) จะต้องวิเคราะห์ทั้งเสถียรภาพภายนอก (External Stability) และเสถียรภาพภายใน (Internal Stability) (Lee et al., 1973; Anderson et al., 1985; Mitchell and Villet, 1987) การตรวจสอบเสถียรภาพภายนอกสามารถทำเช่นเดียวกับวิธีดั้งเดิม ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งประกอบด้วย การ

ดิน ไถล (Sliding) การพลิกคว่ำ (Overturning) การวิบัติของดินฐานราก (Bearing capacity failure) และ เสถียรภาพของลาดดิน (Circular slip)



รูปที่ 2.2 เสถียรภาพภายนอกของกำแพงกันดินเสริมกำลัง

นอกจากเสถียรภาพภายนอกแล้วกำแพงกันดินเสริมกำลังต้องมีเสถียรภาพในกล่าวคือวัสดุเสริมกำลังต้องมีกำลังต้านทานการฉีกขาด (Rupture failure) และกำลังต้านทานแรงฉุด (Pullout failure) เพียงพอ ดังแสดงในรูปที่ 2.3

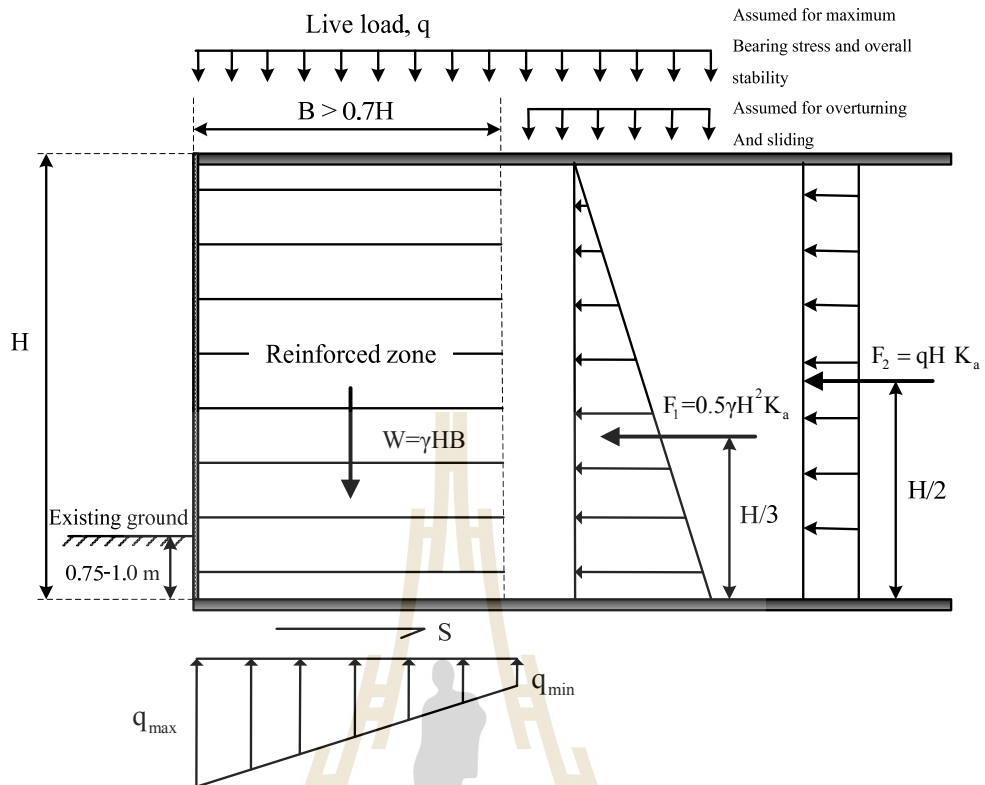


รูปที่ 2.3 การตรวจสอบเสถียรภาพภายในของกำแพงกันดินเสริมกำลัง

2.2.1 การตรวจสอบเสถียรภาพภายนอก

วิธีการออกแบบกำแพงกันดินเสริมกำลังด้านการวิบัติภายนอกโดยทั่วไปคือการสมมติขนาดและรูปร่างของกำแพงกันดินและทำการตรวจสอบเสถียรภาพภายนอก ถ้าพบว่าเสถียรภาพภายนอกของกำแพงกันดินมีค่าต่ำหรือไม่เพียงพอ ก็ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างใหม่และทำการตรวจสอบอีกครั้ง ขั้นตอนนี้จะถูกทำซ้ำ ๆ จนกระทั่งพบว่ากำแพงกันดินที่ออกแบบมีเสถียรภาพเพียงพอต่อการใช้งาน ความยาวของเหล็กเสริมกำลังควรมีค่าไม่น้อยกว่า 0.7 เท่าของความสูงกำแพงกันดิน

กำแพงกันดินจะมีเสถียรภาพภายนอก ก็ต่อเมื่อกำแพงกันดินไม่มีการเคลื่อนตัว ในสามทิศทางอันได้แก่ ในแนวนอน (การลื่นไถล) ในแนวตั้ง (การทรุดตัวที่มากกว่าปกติ และการวิบัติเนื่องจากแรงแบกทานของดินฐานราก) และการพลิกคว่ำ การออกแบบจะเป็นการตรวจสอบเสถียรภาพของการเคลื่อนตัวในสามทิศทางนี้ เพื่อให้ได้อัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสม การตรวจสอบการเคลื่อนตัวในแนวนอนและการพลิกคว่ำอาศัยหลักสถิตยศาสตร์ (Law of statics) ส่วนการตรวจสอบการเคลื่อนในแนวตั้งอาศัยทฤษฎีกำลังรับแรงแบกทานของดิน (Bearing capacity theory) ในการตรวจสอบเสถียรภาพ (รูปที่ 2.4) ผู้ออกแบบต้องพิจารณาน้ำหนักบรรทุกทุกจรในสองกรณี คือ 1) น้ำหนักบรรทุกทุกจรเกิดขึ้นทั้งในโซนเสริมกำลัง (Reinforced zone) และในโซนไม่เสริมกำลัง (Unreinforced zone) และ 2) น้ำหนักบรรทุกทุกจรเกิดขึ้นเฉพาะในโซนไม่เสริมกำลัง น้ำหนักบรรทุกทุกจรในโซนเสริมกำลังจะช่วยเพิ่มเสถียรภาพด้านการลื่นไถลและการพลิกคว่ำแต่จะลดเสถียรภาพด้านการวิบัติ เนื่องจากแรงแบกทานของดินฐานราก ดังนั้น น้ำหนักจรในกรณีที่ 2) จะใช้ในการตรวจสอบอัตราส่วนปลอดภัยด้านการลื่นไถลและด้านการพลิกคว่ำ ส่วนน้ำหนักบรรทุกทุกจรในกรณีที่ 1) จะใช้ในการตรวจสอบอัตราส่วนปลอดภัยด้านการวิบัติเนื่องจากแรงแบกทาน น้ำหนักบรรทุกทุกจร (Live load, q) ที่นิยมใช้กันในการออกแบบกำแพงกันดินเสริมกำลังควรมีค่าไม่น้อยกว่า 20 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ตามข้อแนะนำของ AASHTO's Standard Specifications Highway Bridge Section 5.8 กำหนดว่ากำแพงกันดินเสริมกำลังต้องมีค่าอัตราส่วนปลอดภัยด้านการลื่นไถล การพลิกคว่ำ และการวิบัติเนื่องจากแรงแบกทานไม่น้อยกว่า 1.5 2.0 และ 2.5 ตามลำดับ เมื่ออยู่ในสภาวะสถิต



รูปที่ 2.4 แรงที่กระทำต่อกำแพงกันดินเสริมกำลัง

อัตราส่วนปลอดภัยด้านการลื่นไถล คืออัตราส่วนระหว่างแรงต้านทานการลื่นไถล (Sliding resistance force, P_h) ต่อแรงที่ทำให้เกิดการลื่นไถล (Sliding force) แรงต้านทานการลื่นไถล (S) เท่ากับ ผลคูณของน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวตั้ง (W) กับสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Coefficient of friction) ระหว่างฐานของกำแพงกันดินและดินด้านใต้ฐาน สำหรับดินเม็ดหยาบและเท่ากับผลคูณของกำลังต้านทานแรงเฉือน (S_u) กับความกว้างของกำแพงกันดิน (B) สำหรับดินเม็ดละเอียด ส่วนแรงที่ทำให้เกิดการลื่นไถลจะเป็นแรงในแนวนอนเนื่องจากแรงดันด้านข้างของดินถม (Backfill) และน้ำหนักบรรทุกจร (Live load) สำหรับการพิจารณาน้ำหนักจรในกรณีนี้ (2) แรงทั้งสองสามารถหาได้จาก

$$S = W \tan \phi \quad \text{สำหรับฐานรากที่เป็นดินเม็ดหยาบ} \quad (2.1)$$

$$S = S_u B \quad \text{สำหรับฐานรากที่เป็นดินเม็ดละเอียด} \quad (2.2)$$

$$P_h = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a + qH K_a \quad (2.3)$$

เมื่อ K_u คือสัมประสิทธิ์ความดันดินด้านข้างที่สภาวะ Active และ H คือความสูงของกำแพงกันดิน อัตราส่วนปลอดภัยด้านการพลิกคว่ำ หาได้จากอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ด้านทานการพลิกคว่ำทั้งหมด (Total righting moment, M_r) ต่อโมเมนต์ที่ก่อให้เกิดการพลิกคว่ำทั้งหมด (Total overturning moment, M_o) ที่สภาวะสมดุลและการพลิกคว่ำเริ่มเกิดพอดี แรงปฏิกิริยาระหว่างดินและกำแพงกันดินจะอยู่ที่จุด Toe พอดี ดังนั้น เพื่อความสะดวกในการคำนวณ (ไม่ต้องพิจารณาผลของแรงปฏิกิริยา) นิยมหาอัตราส่วนปลอดภัยที่สภาวะนี้ พิจารณาสมดุลการหมุนรอบจุด Toe (รูปที่ 2.4) และพิจารณาน้ำหนักจรในกรณีที่ 2) โมเมนต์ที่ก่อให้เกิดการพลิกคว่ำ และโมเมนต์ด้านการพลิกคว่ำสามารถคำนวณได้จาก

$$M_o = \left(F_1 \times \frac{H}{3} \right) + \left(F_2 \times \frac{H}{2} \right) \quad (2.4)$$

$$M_r = W \times \frac{B}{2} \quad (2.5)$$

อัตราส่วนปลอดภัยด้านการวิบัติเนื่องจากแรงแบกทานของดิน หาได้จากอัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงแบกทานประลัย (Ultimate bearing capacity) ต่อความดันที่มากที่สุดที่กระทำต่อฐานของกำแพงกันดิน (Actual maximum contact pressure) แรงในแนวนอนอันเนื่องจากแรงดันดินด้านข้างมักก่อให้เกิดโมเมนต์ในฐานรากของกำแพงกันดิน ซึ่งอาจส่งผลให้การกระจายความเค้นใต้ฐานรากไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ในกรณีที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง (e) มีค่าเท่ากับศูนย์ ความเค้นใต้ฐานรากจะกระจายสม่ำเสมอ (รูปที่ 2.5a) ความเค้นที่กระจายใต้ฐานรากจะมีความแตกต่างกันเมื่อระยะเยื้องศูนย์กลางมีค่ามากกว่าศูนย์ และจะก่อให้เกิดความเค้นมากที่สุด (q_{max}) และน้อยที่สุด (q_{min}) ความเค้นที่น้อยที่สุดจะมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อระยะเยื้องศูนย์กลางมีค่าเท่ากับหนึ่งในหกของความกว้างฐานราก ($B/6$) (รูปที่ 2.5b) วิศวกรผู้ออกแบบไม่ควรออกแบบให้ระยะเยื้องศูนย์กลางมีค่ามากกว่าหนึ่งในหกของความกว้างฐานรากเนื่องจากจะเกิดการทรุดตัวอย่างมากในด้านที่เกิดความเค้นมากที่สุด (รูปที่ 2.5c)

ระยะเยื้องศูนย์กลางและความดันดินใต้ฐานราก (รูปที่ 2.5) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.6) ถึง (2.9)

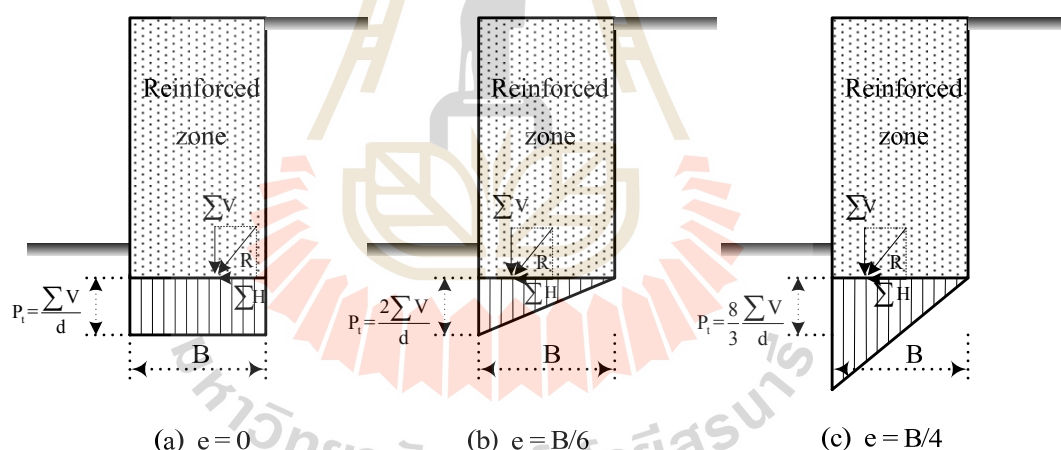
$$e = \frac{B}{2} - \left(\frac{M_r - M_o}{\sum V} \right) < \frac{B}{6} \quad (2.6)$$

$$q_{\max} = \left(\frac{\sum V}{B} \right) \left(1 + \frac{6e}{B} \right) \quad (2.7)$$

$$q_{\min} = \left(\frac{\sum V}{B} \right) \left(1 - \frac{6e}{B} \right) > 0 \quad (2.8)$$

$$q_{av} = \frac{\sum V}{(B - 2e)} < q_{all} \quad (2.9)$$

เมื่อ $\sum V$ คือน้ำหนักกดทับในแนวตั้ง ซึ่งเท่ากับ W สำหรับการพิจารณาน้ำหนักบรรทุกจรกรณี 2) และเท่ากับ $W+qB$ สำหรับการพิจารณาน้ำหนักบรรทุกจรกรณี 1) และ M_r มีค่าเท่ากับ $W \times \frac{B}{2}$ สำหรับการพิจารณาน้ำหนักบรรทุกจรกรณี 2) และเท่ากับ $\left(W \times \frac{B}{2} \right) + \left(q \times \frac{B^2}{2} \right)$ สำหรับการพิจารณาน้ำหนักบรรทุกจรกรณี 1)



รูปที่ 2.5 ลักษณะการกระจายความเค้นในดินใต้ฐานราก

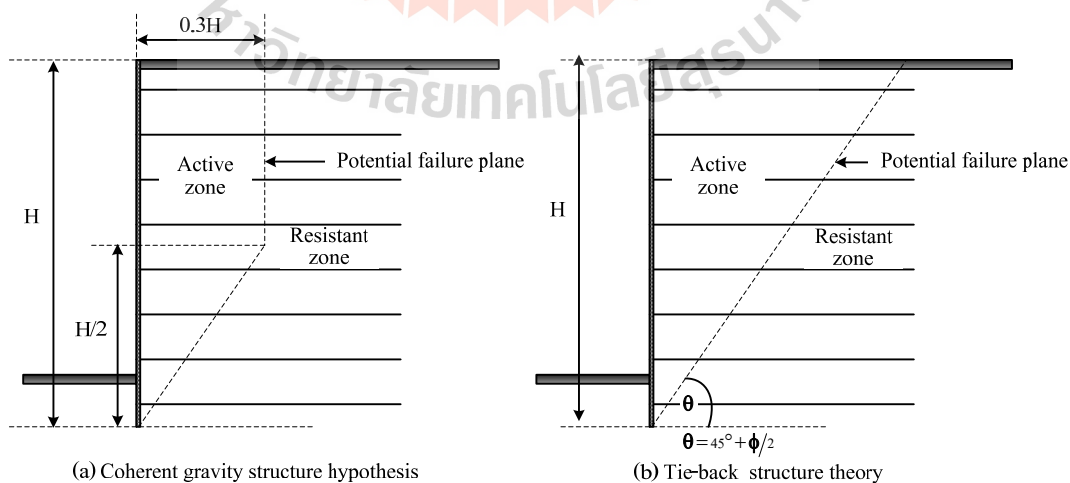
2.2.2 การตรวจสอบเสถียรภาพภายใน

เสถียรภาพภายในของกำแพงกันดินเสริมกำลังประกอบด้วยเสถียรภาพด้านการฉีกขาดของวัสดุ (Rupture resistance) และเสถียรภาพด้านการขูดวัสดุเสริมกำลังออกจากดินถม (Pullout resistance) ในการหาอัตราส่วนปลอดภัยด้านการฉีกขาดและด้านการขูดออก กำแพงกันดินเสริมกำลังต้องมีอัตราส่วนปลอดภัยด้านการฉีกขาดไม่น้อยกว่า 2.0 และอัตราส่วนปลอดภัยด้านการขูดเนื่องจากขูดออกไม่น้อยกว่า 1.5 ในสถานะสถิต (AASHTO, 2002)

ผู้ออกแบบจำเป็นต้องมีความสามารถในการคำนวณหาแรงจุดสูงสุดและตำแหน่งของแรงจุดสูงสุดซึ่งแปรผันตามชนิดของวัสดุเสริมกำลัง

ก) ตำแหน่งของแรงจุดสูงสุดและระนาบวิบัติ

มวลดินภายในกำแพงกันดินเสริมกำลังถูกแบ่งออกเป็นสองโซน ได้แก่ โซนเคลื่อนตัว (Active zone) และ โซนต้านการเคลื่อนตัว (Resistant zone) มวลดินในโซนเคลื่อนตัวดินพยายามเคลื่อนตัวออกจากกำแพงกันดิน แต่จะถูกต้านด้วยกำลังต้านทานแรงจุดที่เกิดขึ้นตลอดแนวของวัสดุเสริมกำลัง ดังนั้น แรงจุดที่เกิดขึ้นในวัสดุเสริมกำลังจะมีทิศทางพุ่งเข้าสู่ Facing ในขณะที่แรงต้านทานการจุดออกของวัสดุเสริมกำลังในโซนต้านการเคลื่อนตัว เพิ่มขึ้น โดยมีทิศทางพุ่งออกจาก Facing ดังนั้น แรงจุดสูงสุดในวัสดุเสริมกำลังจึงเกิดขึ้นที่จุดเปลี่ยนโซนจากโซนเคลื่อนตัว (Active zone) เป็นโซนต้านการเคลื่อนตัว (Resistant zone) จุดเชื่อมต่อระหว่างแรงดึงสูงสุดในวัสดุเสริมกำลังนี้จะเป็นระนาบวิบัติของกำแพงกันดินเสริมกำลังด้วยระนาบวิบัตินี้จะมีความแตกต่างกันตามแต่สตีเฟนสของวัสดุเสริมกำลัง รูปที่ 2.6 แสดงระนาบวิบัติที่ได้จาก Coherent gravity structure hypothesis และ Tie-back theory Anderson et al. (1987) แสดงให้เห็นว่าระนาบการวิบัติของกำแพงกันดินเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมกำลังที่ไม่สามารถยึดได้สามารถประมาณได้จาก Coherent gravity structure hypothesis ขณะที่ Juran and Christopher (1989) กล่าวว่าระนาบวิบัติของกำแพงกันดินเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมกำลังที่สามารถยึดได้สามารถประมาณได้จาก Tie-back theory ซึ่งมีลักษณะเป็นแนวเส้นตรงทำมุม $45 + \phi/2$ องศา เมื่อ ϕ คือมุมเสียดทานภายในของดินถมในโซนเสริมกำลัง



รูปที่ 2.6 ระนาบการวิบัติของดินเสริมกำลัง

ข) แรงดึงสูงสุดในวัสดุเสริมกำลัง

ในกรณีที่กำลังต้านทานแรงจุดในโซนด้านการเคลื่อนตัวมีค่าสูงมากพอ (วัสดุเสริมกำลังอยู่ในสถานะสมดุล) แรงจุดที่เกิดขึ้นจะเท่ากับแรงดึงที่เกิดขึ้นในวัสดุที่เสริมกำลัง ซึ่งจะสมดุลกับความดันดินด้านข้างที่เกิดขึ้นในโซนเสริมกำลัง (Reinforced zone) ความดันดินด้านข้างที่กระทำต่อวัสดุเสริมกำลังในแต่ละชั้นจะเท่ากับความเค้นในแนวตั้งคูณด้วยสัมประสิทธิ์ความดันดินด้านข้าง (สถานะอยู่นิ่งหรือ Active) ซึ่งจะแปรผันตามสถิติเบนของวัสดุเสริมกำลัง ในกรณีของวัสดุเสริมกำลังที่สามารถยึดได้ การเคลื่อนตัวด้านข้างจะเกิดขึ้นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณด้านบนของกำแพงกันดิน ส่งผลให้ความดันดินด้านข้างในวัสดุเสริมกำลังทุกชั้นอยู่ในสถานะ Active ดังนั้น แรงดึงและแรงจุดสูงสุดที่เกิดขึ้นในวัสดุเสริมกำลังที่สามารถยึดได้จะเท่ากับ

$$T = K_a \sigma_v S_h S_v \quad (2.10)$$

เมื่อ K_a คือสัมประสิทธิ์ความดันดินด้านข้างในสถานะ Active ซึ่งเท่ากับ $\tan^2(45^\circ - \phi/2)$ และ S_h และ S_v คือระยะห่างระหว่างวัสดุเสริมกำลังในแนวนอนและแนวตั้ง ตามลำดับ

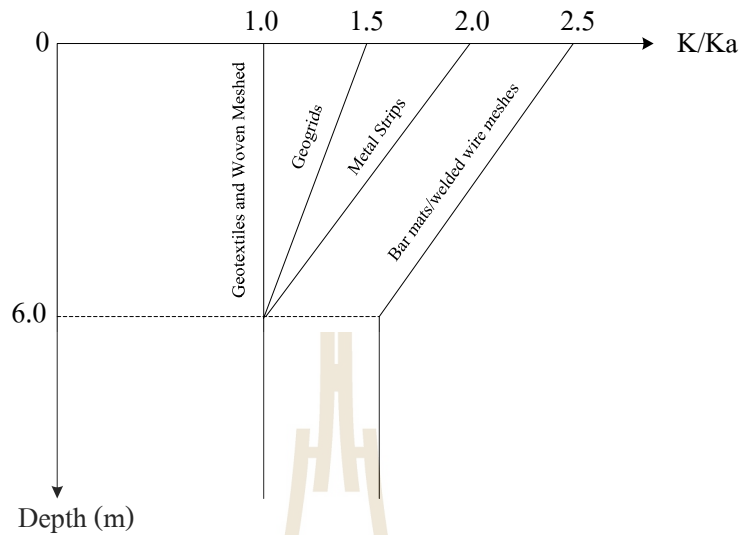
สำหรับวัสดุเสริมกำลังแบบไม่สามารถยึดได้ ความดันดินด้านข้างมีแนวโน้มจะอยู่ในสถานะนิ่ง (At rest) ที่ส่วนบนของกำแพงกันดิน และมีค่าลดลงตามความลึก ดังนั้น แรงดึงและแรงจุดสูงสุดที่เกิดขึ้นในวัสดุเสริมกำลังที่ไม่สามารถยึดได้จะเท่ากับ

$$T = K \sigma_v S_h S_v \quad (2.11)$$

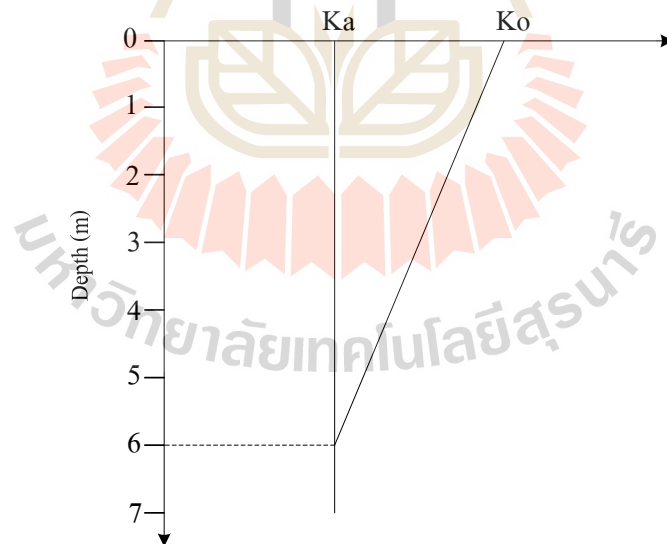
เมื่อ K คือสัมประสิทธิ์ความดันดิน ซึ่งแปรผันตามความลึกและประเภทของวัสดุเสริมกำลัง

รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความดันดินด้านข้างกับความลึกของเหล็กเสริมชนิดต่าง ๆ จะเห็นว่าที่ระดับความลึก 6.0 เมตร วัสดุเสริมกำลังที่ไม่สามารถยึดได้ทุกชนิดจะมีสัมประสิทธิ์ความดันดินด้านข้างเท่ากับ K_a ยกเว้นตะแกรงเหล็กซึ่งจะมีค่าประมาณ 1.5 เท่าของ K_a (Christopher et al., 1989)

รูปที่ 2.8 แนะนำให้ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความดันดินด้านข้างกับความลึก ในการตรวจสอบเสถียรภาพภายในสำหรับเหล็กเสริมกำลังทุกชนิด โดยกำหนดให้ใช้ค่า $K = K_0$ ที่ระดับผิวดิน เมื่อ $K_0 = 1 - \sin \phi$ และ $K = K_a$ ที่ระดับความลึกมากกว่า 6.0 เมตร ความเปลี่ยนแปลงของ K ในช่วง 6 เมตร ให้สมมติเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (AASHTO 1996)



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความดันดินด้านข้างกับความลึกสำหรับเหล็กเสริมชนิดต่าง ๆ (Christopher et al., 1989)



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความดันดินด้านข้างกับความลึกสำหรับเหล็กเสริมทุกชนิด (AASHTO's Standard Specifications Highway Bridge Section 5.8)

ค) กำลั้งต้านทานการฉีกขาด (Rupture resistant)

อัตราส่วนปลอดภัยด้านการฉีกขาดของวัสดุเสริมกำลังแต่ละชั้นสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างแรงดึงครากของวัสดุเสริมกำลังต่อแรงดึงสูงสุด อัตราส่วนปลอดภัยด้านการฉีกขาดควรมีค่าไม่น้อยกว่า 2.0 ตลอดอายุการใช้งาน (ไม่น้อยกว่า 75 ปี) ในกรณีของวัสดุเสริมกำลังที่ไม่สามารถยืดได้ (Inextensible reinforcement) กำลั้งต้านทานการฉีกขาดสามารถประมาณได้เท่ากับความเค้นครากของวัสดุคูณด้วยพื้นที่หน้าตัดของวัสดุเสริมกำลัง ดังนั้น พื้นที่หน้าตัดจึงเป็นตัวแปรหลักที่ควบคุมเสถียรภาพต้านทานการฉีกขาด พื้นที่หน้าตัดนี้จะลดลงตามการกัดกร่อนของวัสดุเสริมกำลังเนื่องจากสนิม หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เสถียรภาพการต้านทานการฉีกขาดจะมีค่าลดลงตามเวลา ในทางปฏิบัติเพื่อให้กำแพงกันดินมีเสถียรภาพไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยกับเวลา การกัดกร่อนของวัสดุเสริมกำลังสามารถกระทำได้ด้วยการเคลือบสังกะสี (Galvanized) สังกะสีควรมีความหนาตามมาตรฐาน ASTM A123 ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความหนาของสังกะสีเคลือบ ตามมาตรฐาน ASTM A123

วัสดุ	ความหนาของสังกะสีเคลือบ (ไมโครเมตร)				
	สำหรับความหนาของเหล็ก (มิลลิเมตร)				
	<1.6	1.6 – <3.2	3.2 – 4.8	>4.8 – 6.4	>6.4
วัสดุโครงสร้าง (Structural shapes)	45	65	85	85	100
เหล็กแถบ (Strip)	45	65	85	85	100
ท่อ (Pipe)	-	-	75	85	75
ลวด (Wire)	45	45	65	65	85

AASHTO's Standard (2002) กล่าวว่าเหล็กเสริมกำลังควรเคลือบสังกะสี มีความหนาพอตามมาตรฐาน สำหรับอายุการใช้งาน 75 ถึง 100 ปี โดยแนะนำให้ใช้อัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate) ในการคำนวณหาหน้าตัดเหล็กที่อายุการใช้งานใด ๆ ดังนี้

- อัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.015 มิลลิเมตรต่อปี สำหรับช่วงอายุการใช้งาน 2 ปีแรก
- อัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.004 มิลลิเมตรต่อปี สำหรับช่วงอายุการใช้งานหลังจาก 2 ปี
- อัตราการกัดกร่อนของเหล็ก (หลังจากสังกะสีถูกกัดกร่อนหมด) เท่ากับ 0.012 มิลลิเมตรต่อปี

ง) กำลังต้านทานแรงฉุด (Pullout resistant)

ถ้าวัสดุเสริมกำลังมีกำลังต้านทานการฉีกขาดสูงมากพอ เสถียรภาพภายในของโครงสร้างเสริมกำลังจะขึ้นอยู่กับปฏิริยาร่วมระหว่างดินและวัสดุเสริมกำลัง กลไกหลักที่ควบคุมปฏิริยาร่วมระหว่างดินและวัสดุเสริมกำลังคือการเลื่อนไถลของดินบนวัสดุเสริมกำลัง (กลไกแรงเฉือนตรง) และการฉุดวัสดุเสริมกำลังออกจากมวลดิน (กลไกแรงฉุด) รูปที่ 2.9 แสดงกำแพงกันดินเสริมกำลังซึ่งเส้นประในรูปแสดงระนาบวิบัติ วัสดุเสริมกำลังด้านหลังระนาบวิบัติ (ตำแหน่ง A) จะเกิดกลไกปฏิริยาร่วมแบบแรงฉุด (Pullout interaction mechanism) ขณะที่ (ตำแหน่ง B) จะเกิดกลไกปฏิริยาร่วมแบบแรงเฉือนตรง (Direct shear mechanism) การทดสอบแรงเฉือนตรง (Direct shear) และการทดสอบแรงฉุด (Pullout) สามารถใช้จำลองพฤติกรรมทั้งสองได้ โดยปกติแล้วกลไกปฏิริยาร่วมแบบแรงฉุดจะเป็นตัวควบคุมเสถียรภาพของกำแพงกันดินเสริมกำลัง

สำหรับเหล็กแถบ (Strip) เหล็กแผ่น (Sheet) เหล็กกลม (Bar) และเหล็กเสริมมีสัน (Rib) ปฏิริยาร่วมระหว่างดินและเหล็กเสริมกำลังเป็นแรงเสียดทานระหว่างดินและผิวสัมผัสของเหล็กเสริมกำลัง ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ดังนั้นกำลังต้านทานแรงฉุดเสียดทาน (P_f) สามารถประมาณได้จาก

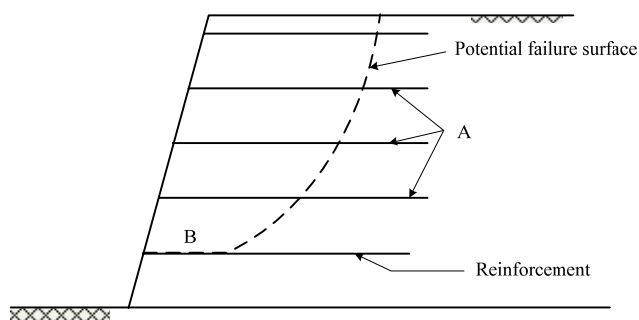
$$P_f = (c_a + \sigma_v \tan \delta) A_s \quad (2.10)$$

เมื่อ c_a คือ หน่วยแรงยึดเกาะ (Cohesion)

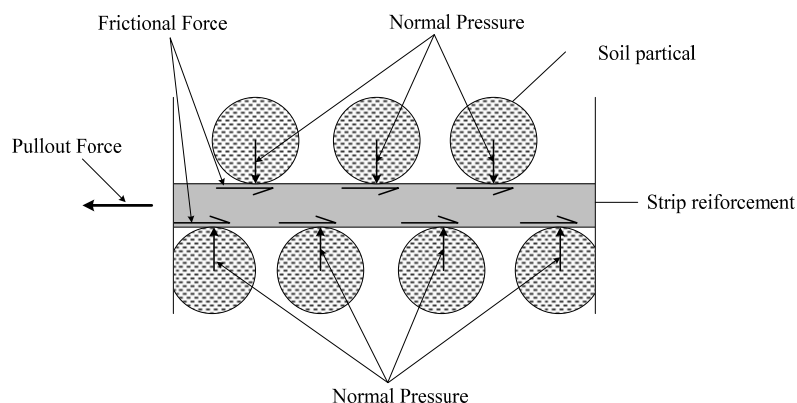
δ คือ มุมเสียดทานภายในระหว่างดินและเหล็กเสริมกำลัง

σ_v คือ ความเค้นกดทับในแนวตั้ง

A_s คือ พื้นที่ผิวของเหล็กเสริมกำลังซึ่งมีค่าเท่ากับ $2bL_e$ สำหรับเหล็กแผ่น และเท่ากับ πbL_e สำหรับเหล็กกลม



รูปที่ 2.9 ลักษณะการวิบัติของโครงสร้างกันดินเสริมกำลัง



รูปที่ 2.10 พฤติกรรมการต้านทานแรงดึงของเหล็กแผ่น

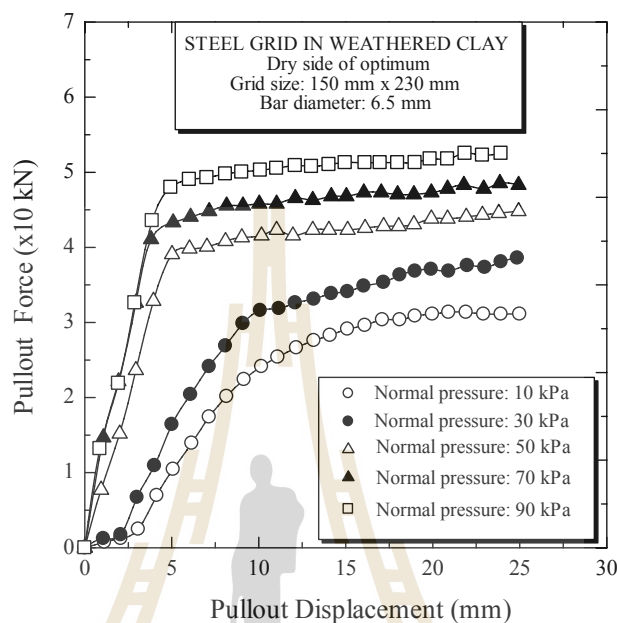
ในกรณีที่ไม่มีผลการทดสอบแรงดึง หน่วยแรงยึดเกาะสามารถประมาณได้จากหน่วยแรงเหนี่ยวนำของดิน (Cohesion) ของดินซึ่งอาจมีค่าประมาณ 0.5 ถึง 0.7 เท่าของหน่วยแรงเหนี่ยวนำ มุมเสียดทานระหว่างดินและเหล็กเสริมกำลังมีค่าขึ้นอยู่กับความขรุขระของเหล็กเสริมกำลังและมุมเสียดทานภายในของดินโดยทั่วไป $\tan \delta$ มีค่าประมาณ $0.5 \tan \phi$ ถึง $\tan \phi$ AASHTO's Standard แนะนำให้ใช้ $\tan \delta$ ไม่เกิน 0.4

สำหรับตะแกรงเหล็ก (Grid steel reinforcing system) เป็นเหล็กเสริมกำลังที่ประกอบด้วยเหล็กตามยาว (Longitudinal bars) และเหล็กตามขวาง (Transverse bars) กลไกต้านแรงดึงมีความแตกต่างจากเหล็กแถบและเหล็กแผ่น เมื่อช่องเปิดมีขนาดเล็ก ตะแกรงเหล็กจะแสดงพฤติกรรมเหมือนเหล็กแผ่น (Sheet) แต่เมื่อช่องเปิดมีขนาดใหญ่ เหล็กตามขวาง (Transverse bars) จะช่วยเพิ่มแรงแบกทาน (Bearing resistance) Chang et al. (1977) กล่าวว่าตะแกรงเหล็ก (Steel grid) ให้กำลังต้านทานแรงดึงสูงกว่าเหล็กแถบ (Steel strip) ประมาณ 5 ถึง 6 เท่า เมื่อพิจารณาพื้นที่หน้าตัดที่เท่ากัน โดยประมาณร้อยละ 85 ถึง 90 ของกำลังต้านทานแรงดึงเกิดจากแรงต้านทาน Passive ด้านหน้าเหล็กตามขวาง (Transverse bars)

2.3 พฤติกรรมเชิงกลของกำแพงกันดินเสริมแรง

Bergado et al. (1993) ได้ศึกษากำลังต้านแรงดึงออกทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนามของดินเหนียวแน่นและดินเสียดทาน (Cohesive-frictional soil) 3 ชนิด ซึ่งได้แก่ ดินเหนียว (Weathered clay) ดินลูกรัง (Lateritic soil) และดินทรายปนดินเหนียว (Clayey sand) ดินทั้งสามชนิดถูกเสริมกำลังด้วยเหล็กตะแกรง (Steel grid) ที่ระดับการบดอัดไม่น้อยกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงออกและการเคลื่อนตัวของเหล็กเสริมในดินเหนียวบดอัดด้านหนึ่งของปริมาณความชื้นเหมาะสมที่ทดสอบใน

ห้องปฏิบัติการ จากผลการทดสอบพบว่า แรงต้านทานการดึงออกจะมีค่าสูงสุดเมื่อเหล็กเสริมเคลื่อนตัวออกประมาณ 20 มิลลิเมตร นอกจากนี้ยังพบว่าแรงต้านทานการดึงออกสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเค้นในแนวตั้งหรือความสูงของดินถมด้านหลังกำแพง



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดและการเคลื่อนตัวของเหล็กตะแกรง (Bergado et al., 1993)

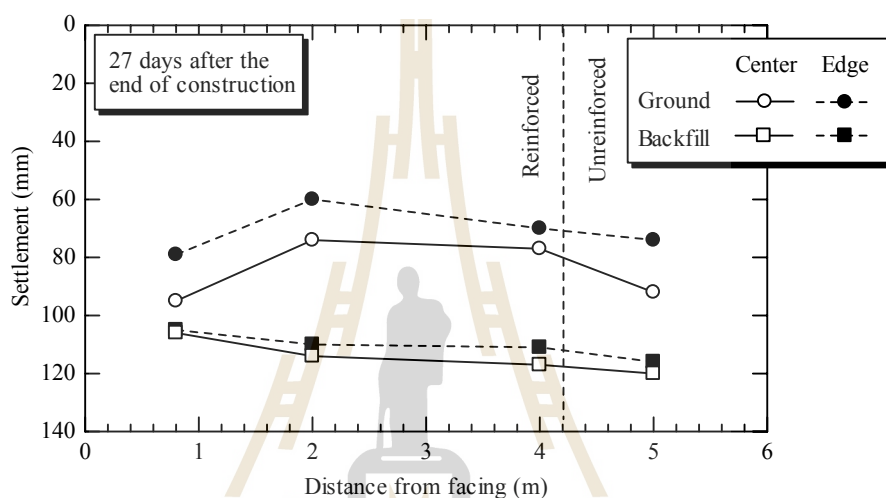
2.3.1 พฤติกรรมของกำแพงกันดินเสริมกำลังจากการออกแบบโดยวิธีพื้นฐาน

Fishman et al. (1993) ได้ตรวจวัดพฤติกรรมของกำแพงกันดินเสริมกำลังที่ก่อสร้างขึ้นในสนามโดยใช้แผ่นตาข่ายจีโอกริด (Geogrid) เป็นวัสดุเสริมกำลัง ใช้ดินทรายเป็นวัสดุถม และใช้ Facing เป็นแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ แล้วนำข้อมูลจากการตรวจวัดในสนามไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ห่ออกแบบโดยวิธีพื้นฐาน โดยคำนวณแรงดันดินด้านข้างด้วยทฤษฎีของ Rankine จากการศึกษาพบว่า ค่าความเครียดในวัสดุเสริมกำลังที่วัดได้ในสนามมีค่าเพียงร้อยละ 0.3-0.8 และแรงดึงในวัสดุเสริมกำลังที่วัดได้มีค่าเพียงประมาณร้อยละ 4-11 ของค่ากำลังแรงดึงประลัย (Ultimate tensile strength) ที่ใช้ในการออกแบบ จากการศึกษาดังกล่าวจึงสรุปได้ว่า ค่าความเครียดและค่าแรงดึงที่เกิดขึ้นจริงในวัสดุเสริมกำลังมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณออกแบบโดยวิธีพื้นฐาน

2.3.2 พฤติกรรมของกำแพงกันดินเสริมกำลังจากการวัดค่าในสนาม

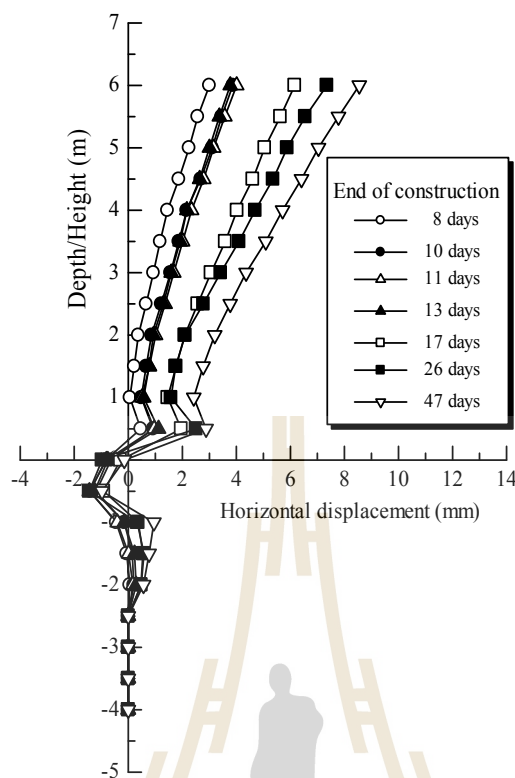
Horpibulsuk et al. (2011) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของกำแพงกันดินเสริมเหล็กแบกทานที่ก่อสร้างขึ้นภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เหล็กเสริมกำลังเป็นเหล็กเสริมแบก

ทาน Facing เป็นแผ่นคอนกรีตหล่อในที่หนา 0.14 เมตร และวัสดุถมเป็นทรายขนาดสม่ำเสมอ ผลการศึกษาพบว่าการทรุดตัวด้านหน้ากำแพงมีค่าสูงสุดเท่ากับ 95 มิลลิเมตร และบริเวณด้านหลังมีค่าเท่ากับ 77 มิลลิเมตร ที่ขอบด้านข้าง (Edge) ของกำแพง บริเวณหน้ากำแพงมีการทรุดตัวสูงสุดเท่ากับ 79 มิลลิเมตร และบริเวณด้านหลังมีการทรุดตัวเท่ากับ 70 มิลลิเมตร การทรุดตัวที่ตรงกลาง (Center) มีค่ามากกว่าที่ขอบด้านข้าง (Edge) เนื่องจากดินฐานรากที่ตรงกลาง (Center) ได้รับน้ำหนักบรรทุกที่สูงกว่าที่ขอบด้านข้าง (Edge) ของกำแพง ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การทรุดตัวของกำแพงกันดินเสริมเหล็กแบกทาน (Horpibulsuk et al., 2011)

การทรุดตัวด้านหน้ามีค่าสูงกว่าด้านหลังเนื่องจากน้ำหนักเยื้องศูนย์กลาง (Eccentric load) และน้ำหนักของแผ่นกำแพง รูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงค่าการทรุดตัวอย่างทันทีระหว่างการทรุดตัวในโซนเสริมกำลัง และโซนไม่เสริมกำลัง (5 เมตรจากแผ่นกำแพง) การทรุดตัวมีค่าลดลงในช่วงเสริมกำลังและมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันในโซนไม่เสริมกำลัง แสดงให้เห็นว่ากำแพงกันดิน และดินถมหลังกำแพงเป็นโครงสร้างคนละส่วนกัน และกำแพงกันดินแสดงพฤติกรรมเป็นวัสดุแข็งเกร็ง ค่าการทรุดตัวที่กึ่งกลางชั้นดินถม (Backfill) มีค่ามากกว่าการทรุดตัวในชั้นฐานราก (Ground) เนื่องจากสติฟเนสในชั้นดินถมมีค่าน้อยกว่าสติฟเนสในชั้นดินฐานราก (Ground) การทรุดตัวในชั้นดินถมมีลักษณะการทรุดตัวคล้ายคลึงกัน



รูปที่ 2.13 การเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงกันดินเสริมเหล็กแบกทาน
(Horpibulsuk et al., 2011)

รูปที่ 2.13 แสดงการเคลื่อนตัวในแนวราบหลังสิ้นสุดการก่อสร้าง ซึ่งตรวจวัดโดย Inclinator อย่างต่อเนื่องหลังสิ้นสุดการก่อสร้างเป็นเวลา 47 วัน พบว่าการเคลื่อนตัวเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยที่ค่าสูงสุดเกิดที่ด้านบนของกำแพงและมิต่ำกว่า 9 มิลลิเมตร ที่ 47 วันหลังสิ้นสุดการก่อสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.12 อัตราส่วนระหว่างการเคลื่อนตัวต่อความสูงมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 0.15 ชั้นใต้ดินเกิดการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดที่ความลึกระหว่าง 1.5 ถึง 2.5 เมตร จากผิวดิน ซึ่งเกิดขึ้นในชั้นทรายปนตะกอนแน่นปานกลาง ความดันดินสถานะแพชซีฟ (Passive earth pressure) เกิดขึ้นในชั้นใต้ดินที่ความลึกระหว่าง 0 ถึง 1.0 เมตรจากผิวดิน ซึ่งเกิดในชั้นดินผุกร่อน (Weathered crust) เนื่องจากความต้านทานของ Lean leveling pad

2.4 คุณสมบัติด้านความชื้นและการไหลของน้ำในดิน

ความชื้นดิน หมายถึง น้ำทั้งที่อยู่ในสถานะของเหลวและไอน้ำในดิน ส่วนคำว่าน้ำในดิน (soil water) หมายถึง เฉพาะน้ำในสถานะของเหลวในดิน การแสดงปริมาณความชื้นดินโดยน้ำหนัก เป็นการแสดงโดยการเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักของความชื้นในดินกับน้ำหนักของดินอบแห้ง วิธี

ตรงที่สุดที่จะหาน้ำหนักของความชื้นและน้ำหนักดินอบแห้ง คือการชั่งน้ำหนักดินขณะชื้นและหลังอบแห้ง ความแตกต่างของน้ำหนักที่ได้จากการชั่งทั้งสองครั้งนี้ คือน้ำหนักความชื้นดินน้ำหนักดินอบแห้งคือน้ำหนักดินที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักคงที่ ปริมาณความชื้นดินโดยน้ำหนัก สามารถแสดงเป็นสัดส่วนของน้ำหนักความชื้นต่อน้ำหนักดินอบแห้ง โดยตรงเช่น กรัม/กรัม อาจแสดงเป็น ร้อยละโดยน้ำหนัก (gravimetric moisture content, w) ก็ได้ ร้อยละโดยน้ำหนักคือสัดส่วนของน้ำหนักความชื้น คิดเป็น ร้อยละของน้ำหนักดินอบแห้ง

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (2.11)$$

เมื่อ w คือ ความชื้นดินโดยน้ำหนัก, %

W_w คือ น้ำหนักน้ำ

W_s คือ น้ำหนักดินแห้ง

นอกจากจะคิดความชื้นดินโดยน้ำหนักแล้ว ยังสามารถคิดเป็นร้อยละของปริมาตรน้ำได้ด้วย เรียกว่าความชื้นโดยปริมาตร (volumetric moisture content, θ) หมายถึงปริมาตรน้ำที่มีอยู่ในดิน ต่อปริมาตรทั้งหมดของดิน ตัวอย่างดินที่นำมาหาความชื้นโดยปริมาตรเป็นตัวอย่างชุดเดียวกันกับ ตัวอย่างดินที่ใช้หาความชื้นโดยน้ำหนัก โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.12 (Scott, 2000)

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \times 100 = w \frac{\rho_b}{\rho_w} \quad (2.12)$$

เมื่อ θ คือ ความชื้นดินโดยปริมาตร, %

V_w คือ ปริมาตรน้ำ

V_t คือ ปริมาตรทั้งหมดของตัวอย่างดิน

ρ_b คือ ความหนาแน่นของดินรวม

ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ

ความชื้นโดยปริมาตรยังสามารถวัดผลแบบเป็นปัจจุบัน (real time) ได้ด้วยหัววัดความชื้น ซึ่งใช้วิธีวัดค่าความชื้นทางไฟฟ้า ด้วยการวัดค่า dielectric constant ซึ่งแบ่งวิธีการหาความชื้นออกเป็น 3 วิธี คือ

(1) Time Domain Reflectometer method : TDR

(2) Frequency Domain Reflectometer method : FDR และ

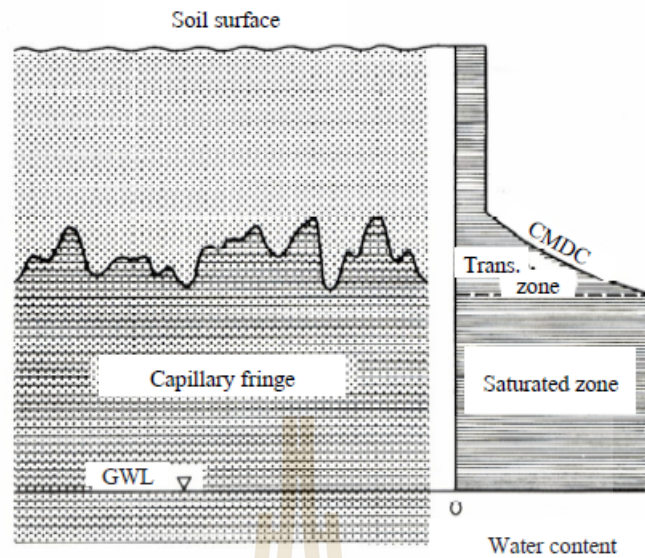
(3) Amplitude Domain Reflectometer method : ADR

ในดินที่ความระดับความชื้นในดินมีค่าไม่ถึง 100% จะเกิดแรงดันน้ำติดลบ หรือที่เรียกว่าแรงดึงน้ำในดิน (suction) ซึ่งประกอบด้วยแรงดึงเมทริกหรือแรงคาพิลลารี (matric or capillary suction, $u_a - u_w$) คือแรงยึดที่เกิดขึ้นระหว่างเม็ดดินกับน้ำที่อยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความชื้นในดินลดลง และเมื่อช่องว่างระหว่างอนุภาคดินมีขนาดเล็กลง และแรงดึงออสโมติก (osmotic suction, π) คือความสามารถในการดูดน้ำเข้าหาตัวเองของดิน ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของสารละลายเกลือของน้ำในดินด้วย โดยดินที่มีสารละลายเกลือปนอยู่ในน้ำมาก ความสามารถในการดูดน้ำหาตัวเองด้วยได้มากด้วย (Fredlund and Rahardjo, 1993) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.13 โดยที่ u_a คือแรงดันอากาศในช่องว่างดิน และ u_w คือแรงดันน้ำในดิน

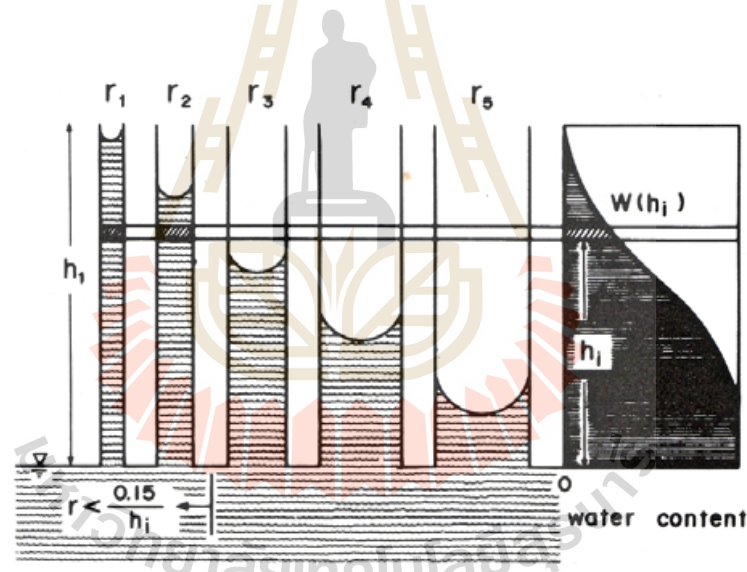
$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (2.13)$$

โดยสามารถหาแรงดึงเมทริกหรือแรงคาพิลลารีได้ด้วยหม้อแรงดัน (Pressure plate) ตามมาตรฐาน ASTM D6836-02 ทดสอบหาค่าแรงคาพิลลารี เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและแรงคาพิลลารี (Soil Water retention Characteristic Curve : SWCC)

กระบวนการคาพิลลารี (Shingo et al., 1988) ในดินเกิดขึ้นเหนือระดับน้ำใต้ดินเป็นปรากฏการณ์ที่รู้จักกันเป็นอย่างดี โดยจะอธิบายในรูปของโค้งการกระจายตัวของความชื้นแสดงดังรูปที่ 2.14 ซึ่งถูกเรียกว่า Capillary Moisture Distribution Curve : CMDC สังเกตได้ว่าเหนือระดับน้ำใต้ดินจะมีช่วงอิทธิพลของแรงคาพิลลารีทำให้เกิดความชื้นเคลื่อนที่ขึ้น และยังแบ่งเป็นส่วนอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated zone) และส่วนเปลี่ยนผ่าน (transition zone)



รูปที่ 2.14 โฉมการกระจายตัวความชื้นเหนือระดับน้ำใต้ดิน และ CMDC (Shingo et al., 1988)



รูปที่ 2.15 แบบจำลองความไม่สม่ำเสมอของช่วงคาพิลลารีเพื่ออธิบาย CMDC (Shingo et al., 1988)

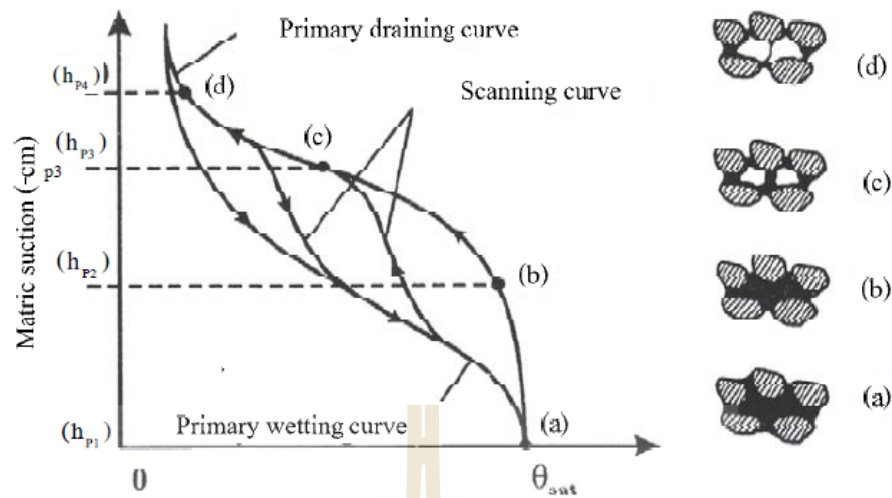
ดินในส่วนที่อิ่มตัวด้วยน้ำ และส่วนเปลี่ยนผ่านถูกเชื่อมต่อกันน้ำใต้ดินและมีการเปลี่ยนแปลงระดับที่อยู่กับความผันผวนของระดับน้ำใต้ดิน โดยเรียกทั้งสองส่วนว่า ช่วงคาพิลลารี (capillary fringe) ซึ่งกระบวนการนี้มีการแปรผันตามขนาดของช่องว่างตามแบบจำลองที่แสดงดังรูปที่ 2.15 และสามารถอธิบายถึงการยกเนื่องจากแรงดึงคาพิลลารี (capillary rise) ในส่วนไม่อิ่มตัวด้วยน้ำได้จากสมการดังนี้

$$h = \frac{0.3}{d} \quad (2.14)$$

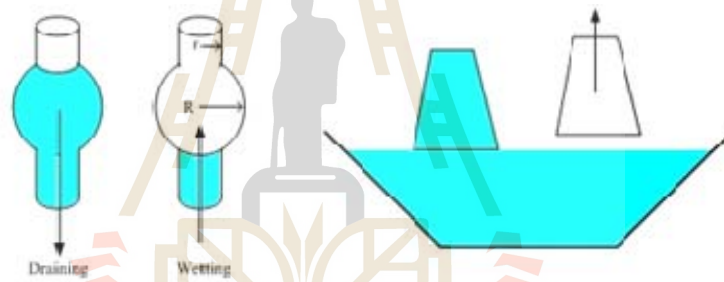
เมื่อ d คือขนาดของท่อ (cm) ที่ทุก ๆ ความสูง h_i ระดับความสูงคาพิลลารีของน้ำในดิน h_c มีความสัมพันธ์แปรผกผันกับขนาดของอนุภาคเม็ดดิน (ϕ) ซึ่งจะถูกละเลยด้วยความไม่ซ้่ารอย (hysteresis) ของโค้งลักษณะความชื้นของดิน ซึ่งเป็นโค้งที่เขียนขึ้นจากความสัมพันธ์ของเสดความดัน (metric suction) กับความชื้นที่เกิดขึ้นจากดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ แสดงดังรูปที่ 2.16

ดินมีความชื้นลดลงหรือเรียกว่ากระบวนการแห้งลง (drying process) คือ ดินจะเริ่มต้นจากสภาพที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (a) แล้วความชื้นเริ่มลดลงเรื่อย ๆ จาก (b) (c) จนถึง (d) ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มความชื้นอีกครั้ง การลดลงของเสดความดันเทียบกับความชื้นจะไม่สัมพันธ์กันเหมือนกับตอนลดความชื้นสาเหตุหลักในการเกิดปรากฏการณ์ความไม่ซ้่ารอย เนื่องมาจากขนาดของโพรงช่องว่างในดินจะเป็นต้นเหตุที่มีอิทธิพลต่อผลการเกิดปรากฏการณ์ความไม่ซ้่ารอย ถ้าโพรงช่องว่างในดินมีขนาดใหญ่จะเป็นตัวกำหนดหรือควบคุมการเคลื่อนที่ของน้ำในดิน (water moment) และในทางตรงกันข้ามถ้าโพรงช่องว่างในดินมีขนาดเล็กก็จะเป็นตัวกำหนดหรือควบคุมกระบวนการระบายน้ำ (draining processes) ในดินเช่นกัน

ผลกระทบที่ส่งผลต่อปรากฏการณ์ความไม่ซ้่ารอยหลัก ๆ ที่สำคัญได้แก่ผลของขวดน้ำหมึก (ink bottle effect) ในความแตกต่างของขนาดโพรงช่องว่างในดิน เมื่อดินแห้งลงน้ำยังคงค้างอยู่ในโพรงขนาดเล็ก ทำให้น้ำในดินไม่สามารถระบายออกมาได้ ส่วนเมื่อดินชื้นขึ้นโพรงที่มีขนาดใหญ่ จะเป็นตัวสกัดกั้นไม่ยอมให้น้ำในดินเคลื่อนที่ขึ้นตามแรงคาพิลลารีและผลของรอยต่อเครือข่าย (network effects) คือ ลักษณะของการเคลื่อนที่เข้าออกของน้ำในโพรงช่องว่างของดิน ยกตัวอย่างเช่นเวลาเรายกแก้วน้ำที่คว่ำจมอยู่ในน้ำเต็มขึ้น น้ำจะตามแก้วขึ้นมาด้วย จนกว่าปากแก้วจะพ้นจากผิวน้ำ ในทำนองเดียวกันเมื่อระบายน้ำออกจากดินโพรงขนาดใหญ่ในดินก็จะระบายน้ำออกได้จนกว่าอากาศจะไหลเข้าไปในโพรงนั้นก่อนดังแสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 ปรากฏการณ์ความไม่ซึ่ร่ายของโค้งลักษณะความชื้นของดิน (สุกสิทธิ์ คนใหญ่, 2552)



รูปที่ 2.17 ผลของขุดน้ำหมักและผลของเครื่องถ่าย (สุกสิทธิ์ คนใหญ่, 2552)

คุณสมบัติสำคัญอีกประการหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการไหลของน้ำในดิน คือความสามารถในการซึมผ่านได้ของน้ำผ่านมวลดิน หรือที่เรียกว่า ค่าความซึมผ่านได้ (Permeability) ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุพอรุน ที่ยอมให้น้ำหรือของเหลวไหลผ่านไปในช่วงว่างที่ติดต่อกันได้ภายในวัสดุพอรุนนั้น

การไหลซึมของน้ำผ่านดินที่มีขนาดเท่ากับหรือเล็กกว่าทรายสามารถอธิบายได้โดยกฎของดาร์ซี (Darcy's Law) Darcy (1856) กล่าวว่าอัตราการไหลซึม (Rate of seepage, q) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่หน้าตัด (A) และความลาดชันศาสตร์ (Hydraulic gradient, i)

กฎของดาร์ซีใช้สำหรับการไหลในทิศทางเดียว (One-dimensional flow) และมวลดินอยู่ในสภาพอิ่มตัว โดย

$$q \propto Ai \quad (2.15)$$

$$q = k \frac{h}{L} A = kiA = vA \quad (2.16)$$

เมื่อ q คือปริมาณการไหลของน้ำผ่านมวลดินในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง k คือสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของดิน (Coefficient of permeability) i คือความลาดชันเชิงชลศาสตร์ (Hydraulic gradient) ซึ่งเท่ากับ $\frac{h}{L}$ A คือพื้นที่หน้าตัดของดินซึ่งตั้งฉากกับทิศทางการไหล v คือความเร็วของการไหล (Discharge capacity) และ h คือพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการไหลซึมระหว่างจุดสองจุดซึ่งเท่ากับผลต่างของระดับน้ำทั้งสองจุด

ความเร็วของการไหล (Discharge capacity) ที่ใช้ในสมการที่ (2.15) เป็นความเร็วของการไหลผ่านหน้าตัดทั้งหมดของดิน แต่ในความเป็นจริงน้ำจะไหลผ่านไปตามโพรงระหว่างเม็ดดิน ดังนั้นค่าความเร็วของการไหลผ่านดินที่แท้จริง (Actual velocity of seepage through soil, v_s) สามารถหาได้โดยการพิจารณาว่า

$$q = vA = v_s A_v \quad (2.17)$$

$$v_s = \frac{vA}{A_v} = \frac{(vA)L}{A_v L} = v \frac{V}{V_v} = \frac{v}{n} \quad (2.18)$$

เมื่อ A_v คือพื้นที่ของช่องทางการไหล (Flow channel) และ n คือความพรุน (Porosity) ในทางปฏิบัติ ค่าความเร็วของการไหล (Discharge capacity) เป็นค่าที่ง่ายและสะดวกในการศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรม

จากกฎของดาร์ซี (Darcy's law) ซึ่งใช้กับการไหลในตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำ กรณีการไหลในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ Buckingham (1907) ได้ประยุกต์ใช้กฎของดาร์ซีสำหรับการไหลในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำมีรูปสมการ คือ

$$q = -k_u i \quad (2.19)$$

เมื่อ i คือ ความลาดชันเชิงชลศาสตร์ (Hydraulic gradient) ซึ่งเท่ากับ $\frac{h}{L}$ และ k_u คือสภาพนำชลศาสตร์ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความชื้นของดิน (θ) หรือเฮดแรงดัน (h_p) เขียนได้เป็น

$$k_u = k(\theta) \quad (2.20)$$

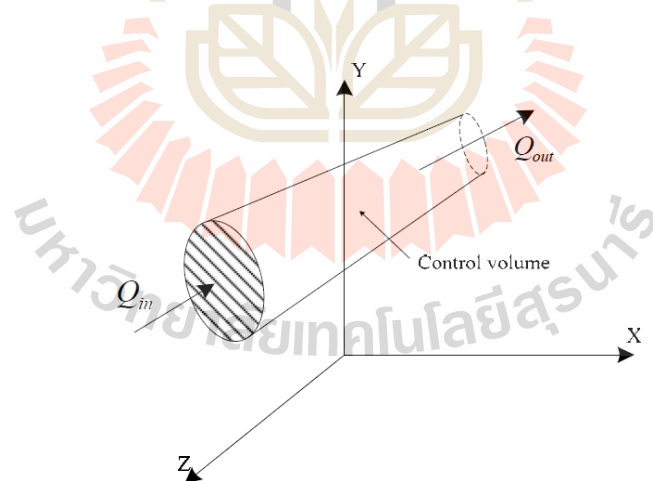
หรือ

$$k_u = k(h_p) \quad (2.21)$$

สมการริชาร์ด (Richards equation) จากกฎทรงมวลซึ่งกล่าวว่าสสารยอมไม่สูญหายนั้น ในปริมาตรควบคุม (control volume) อัตราไหลเข้าของมวลของน้ำลบด้วยอัตราการไหลออก ต้องเท่ากับอัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในปริมาตรควบคุม ถ้าพิจารณาว่ามวลนี้ คือน้ำซึ่งเป็นของเหลวที่กดอัดไม่ได้ (incompressible fluid) พิจารณาปริมาตรแทนมวล ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ดังรูปที่ 2.18 ในช่วงระยะเวลา Δt สมการริชาร์ดเป็นสมการสำหรับการเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางพรุนหรือดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำเมื่ออยู่ในสถานะไม่คงตัว (unsteady flow) และเป็นสมการอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation) ลำดับที่สอง (second-order) แบบพาราโบลา (parabolic) ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) เมื่อเขียนในรูปการไหลใน 3 มิติจะได้

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial H}{\partial z} \right) \quad (2.22)$$

เมื่อ θ คือ Volumetric water content t คือเวลา k คือฟังก์ชันของความชื้นหรือเสดความดัน และ H คือเสดทางชลศาสตร์



รูปที่ 2.18 อัตราการไหลเข้าและออกจากปริมาตรควบคุม (ศุภสิทธิ์ คนใหญ่, 2552)

สมการที่นำมาใช้ในการอธิบายคุณสมบัติด้านการอุ้มน้ำของวัสดุพรุนที่นิยมใช้กันคือสมการ van Genuchten (van Genuchten, 1980) หรือสมการ VG และสมการที่นิยมใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นผ่านได้ของดินตามความชื้นหรือตามเสดแรงดึงน้ำคือสมการ van Genuchten-Mualem (Mualem, 1976) หรือสมการ VGM แสดงดังสมการที่ 2.23 และ 2.24 ตามลำดับ

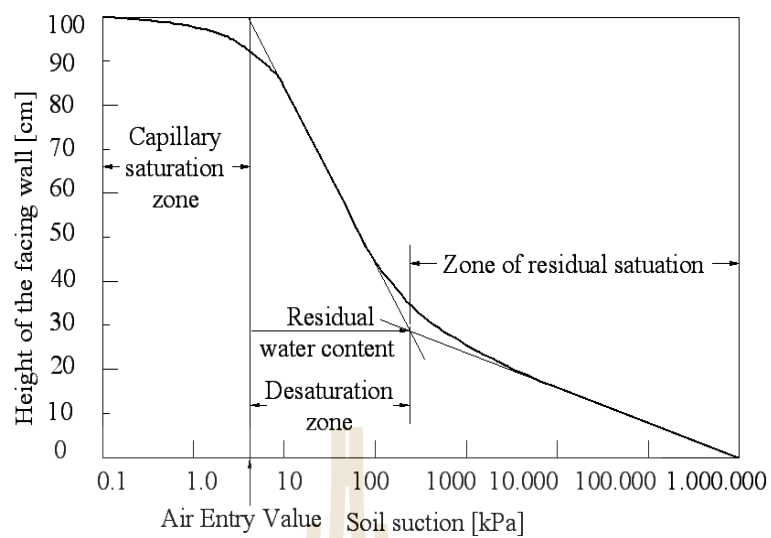
$$S_e = \frac{S - S_{res}}{S_{sat} - S_{res}} = \left[1 + (g_a |h_p|)^{g_n} \right]^{g_c} \quad (2.23)$$

$$k_r(S_e) = S_e^{0.5} [1 - (1 - S_e^{-1/g_c})^{-g_c}]^2 \quad (2.24)$$

เมื่อ S_e คือระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำประสิทธิผล S คือระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ S_{res} คือระดับความอิ่มตัวที่เหลือของการดูดที่มีค่าสูงมาก S_{sat} คือระดับความอิ่มตัวของดินอิ่มตัว h_p คือ matric suction head k_r คือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน g_a [m^{-1}] และ g_n คือพารามิเตอร์ที่เหมาะสมซึ่งแสดงถึงค่าอากาศเข้าของดินและอัตราการดึงน้ำออกจากดินที่ครั้งหนึ่งเคยอากาศเข้าที่ได้เกินกว่าตามลำดับและเป็นไปตาม Mualem hypothesis (Mualem, 1976) , g_c มีค่าเท่ากับ $1/g_n - 1$

รูปที่ 2.19 แสดงแผนภาพสำหรับเส้นโค้งลักษณะการกักเก็บน้ำ และการทำงานของการซึมผ่านที่เกิดโดยสมการ 2.23 และ 2.24 สำหรับช่วงแห่งน้ำที่อยู่ในรูพรุนมีแนวโน้มที่ขยายตามการเพิ่มของการดูดและเมื่อค่าถึงค่าอากาศเข้า (air-entry value, AEV) น้ำจำนวนมากเริ่มที่จะระบายออก AEV แสดงให้เห็นขนาดรูพรุนขนาดใหญ่และขนาดรูพรุนที่ใหญ่ขึ้นมีขนาดเล็กลง เมื่อดินเปียกขึ้นระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำก็เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อการดูดลดลงถึงค่าการดูดที่เรียกว่า ค่าน้ำเข้า (water-entry value, WEV) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแนวทางเปียกหรือแห้ง g_n แสดงให้เห็นถึงการผกผันของ AEV หรือ WEV อย่างใดอย่างหนึ่งในหน่วยของความสูง g_n จะมีความสัมพันธ์กับการกระจายของขนาดรูพรุน ขนาดรูพรุนที่มีความสม่ำเสมอมากขึ้นในดิน จะมีค่า g_n ขนาดใหญ่ขึ้น ขนาดของ g_n แสดงให้เห็นถึงความชันของ WRC ในโซนไม่อิ่มตัวด้วยน้ำและค่าที่น้อยลงของ g_n ส่งผลให้เส้นโค้ง WRC มีความชันเพิ่มขึ้นในโซนไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

จากการศึกษาของ Iryo and Rowe (2003, 2004) บ่งชี้ว่าสมการ VG และสมการ VGM สามารถนำมาใช้อธิบายคุณลักษณะการอุ้มน้ำ และการเปลี่ยนแปลงค่าความซึมผ่านได้ของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ได้

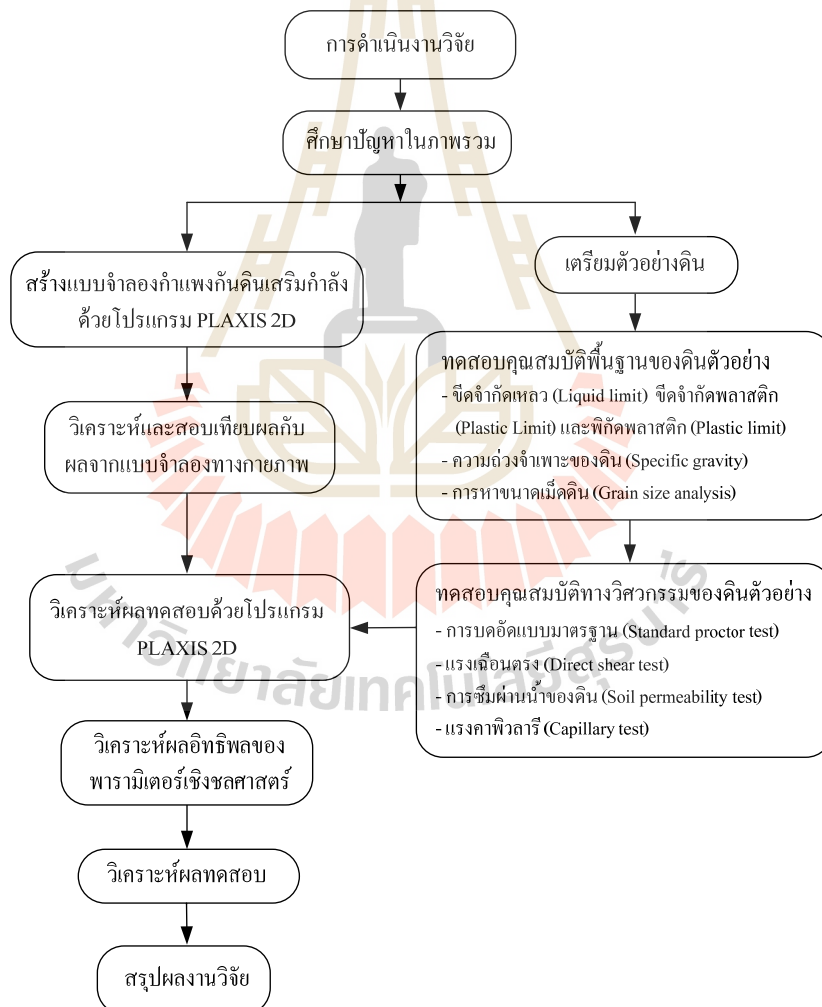


รูปที่ 2.19 แผนภาพสำหรับเส้นโค้งลักษณะการอุ้มน้ำ (Siller et al., 2001)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

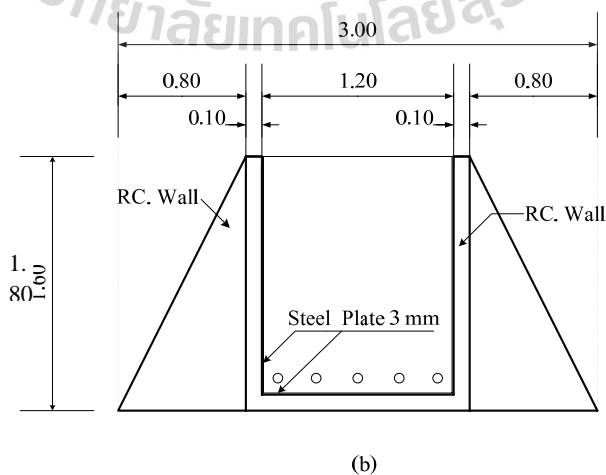
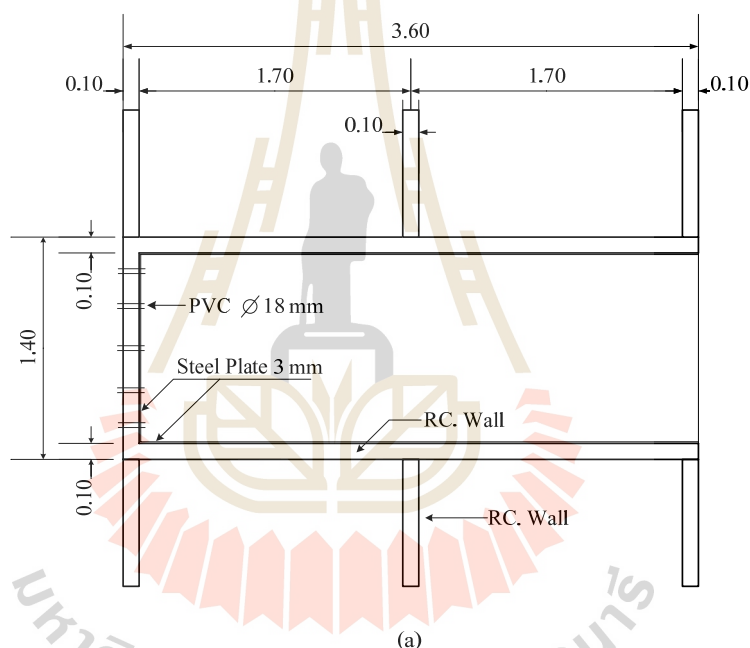
งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำและอิทธิพลของคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของกำแพงกันดินเสริมกำลังผ่านแบบจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D โดยทำการสอบเทียบแบบจำลอง และนำแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ได้ไปศึกษาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ขั้นตอนการดำเนินงานแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

3.1 แบบจำลองกำแพงกันดิน

จากการจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลังทางกายภาพ (อาทิตย์ อุดมชัย, 2556) รูปที่ 3.2 แสดงรูปแบบและขนาดของถังทดสอบ ทำจากคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาดกว้าง 1.4 เมตร ยาว 3.6 เมตร และสูง 1.8 เมตร ผิวด้านในของถังคอนกรีตเสริมเหล็กกรุด้วยแผ่นเหล็กหนา 3 มิลลิเมตร เพื่อลดการดูดซึมของน้ำในเนื้อคอนกรีต คอนกรีตพูนหนา 0.1 เมตร ความสูง 1.6 เมตร ถูกติดตั้งด้านหลังถังทดสอบ เพื่อเป็นผนังกันทรายและระบายน้ำเข้าในดินถม และคอนกรีตพูนหนา 0.1 เมตร ความสูง 0.2 เมตร จะติดตั้งเพื่อเป็นผนังกันทรายและระบายน้ำออกจากดินถม ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 มิลลิเมตร จำนวน 5 ท่อน ถูกติดตั้งที่พื้นด้านหลังถังทดสอบเพื่อเพิ่มระดับน้ำในแบบจำลอง



รูปที่ 3.2 รูปแบบถังทดสอบ (a) แปลนถังทดสอบ (b) รูปตัดถังทดสอบ

3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.2.1 มาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน

ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดิน ดังนี้ ก) ชีดจำกัดเหลว (Liquid limit) ชีดจำกัดพลาสติก (Plastic limit) และพิคติกพลาสติก (Plasticity index) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 4318 ข) ความถ่วงจำเพาะของดิน (Specific gravity) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 854 ค) การหาขนาดเม็ดดิน (Grain size analysis) โดยการร่อนผ่านตะแกรง (Sieve analysis) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 422

3.2.2 มาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม

ทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน ดังนี้

ก) ทดสอบความแน่น (Compaction test) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 698 โดยทำการบดอัดดินตัวอย่างด้วยพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard proctor test) ใช้แบบหล่อ (mold) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.12 มิลลิเมตร และสูง 117.47 มิลลิเมตร เพื่อหาค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ($\gamma_{d,max}$) และปริมาณความชื้นเหมาะสม (OWC)

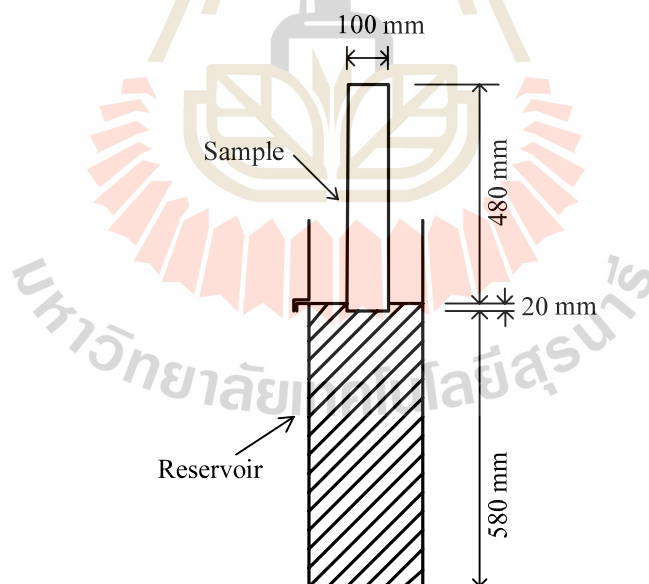
ข) ทดสอบแรงเฉือนตรง (Direct shear test) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 3080 ดินตัวอย่างใช้ที่หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดจากการทดสอบบดอัดแบบมาตรฐาน กล่องบรรจุดินสำหรับทดสอบแรงเฉือน (Shear box) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 เซนติเมตร และสูง 3.5 เซนติเมตร เมื่อเตรียมตัวอย่างดินบรรจุในกล่องแล้วปล่อยให้ดินตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ จากนั้นให้น้ำหนักในแนวตั้งกระทำต่อดินตัวอย่างผ่านเครื่องกด โดยรักษาให้ความเค้นมีค่าคงที่ตลอดการเฉือนดินตัวอย่าง ในขณะที่ดินตัวอย่าง กล่องบรรจุดินส่วนล่างจะถูกดันให้เคลื่อนที่ในแนวราบด้วยอัตราความเครียดในการเฉือนคงที่ (constant rate of strain) แรงที่ใช้ในการเฉือน (shear force) จะทำให้ตัวอย่างดินที่บรรจุในกล่องทดสอบแรงเฉือนเกิดการเฉือนบนระนาบที่เป็นรอยต่อระหว่างกล่องด้านบนและกล่องด้านล่าง แรงที่กระทำนี้วัดได้โดยใช้วงแหวนวัดแรง (proving ring) ส่วนการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินตัวอย่างและการเคลื่อนที่ในแนวราบของกล่องทดสอบแรงเฉือนสามารถวัดได้โดยการติดตั้งมาตรวัด (dial gauge) การทดสอบจะดำเนินไปจนได้ค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุด

ค) ทดสอบความซึมผ่านได้ (Soil permeability test) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2434 โดยนำดินบรรจุลงในกระบอกทดสอบ ให้ได้ความแน่นที่ต้องการ จากนั้นให้น้ำไหลผ่านตัวอย่างดินที่ระดับความต่างระหว่างเขตต้นและท้ายน้ำคงที่ วัดเขตความดันที่เกิดขึ้นระหว่างจุดสองจุด พร้อมกับวัดอัตราการไหลของน้ำผ่านตัวอย่างดิน บันทึกผลที่วัดได้เพื่อนำไปคำนวณค่าความซึมผ่านได้ของดิน

ง) ทดสอบคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดินเมื่อลดความชื้นลง (drying path) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 6836 โดยใช้วิธีหม้อแรงดัน (pressure plate method) และทดสอบคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดินเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น (wetting path) โดยใช้ชุดทดสอบแรงอัดสามแกนแบบเซลล์ผนังคู่ (double wall cell)

3.2.3 คุณสมบัติของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ (geotextile)

คุณสมบัติของวัสดุใยสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยวัสดุสังเคราะห์โครงตาข่าย (geonet) และวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ (geotextile) ข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุใยสังเคราะห์ได้จากผู้ผลิตระบุมาพร้อมผลิตภัณฑ์ แต่อย่างไรก็ตามคุณลักษณะการอุ้มน้ำของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ไม่มีการระบุมาจึงต้องทำการทดสอบ โดยการทดสอบหาคุณลักษณะการอุ้มน้ำของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ใช้วิธีที่เรียกว่า capillary rise test ซึ่งเสนอโดย (Lafleur et al. 2000) ซึ่งสำหรับคุณลักษณะการอุ้มน้ำโดยการเพิ่มความชื้นทำได้โดยนำวัสดุเส้นใยสังเคราะห์จุ่มลงในน้ำแล้วรอนความชื้นในวัสดุเส้นใยสังเคราะห์เข้าสู่สภาวะคงตัว แล้วจึงตัดวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ที่ระดับความสูงต่างๆไปหาความชื้น รูปที่ 3.3 แสดงวิธีการทดสอบ capillary rise test

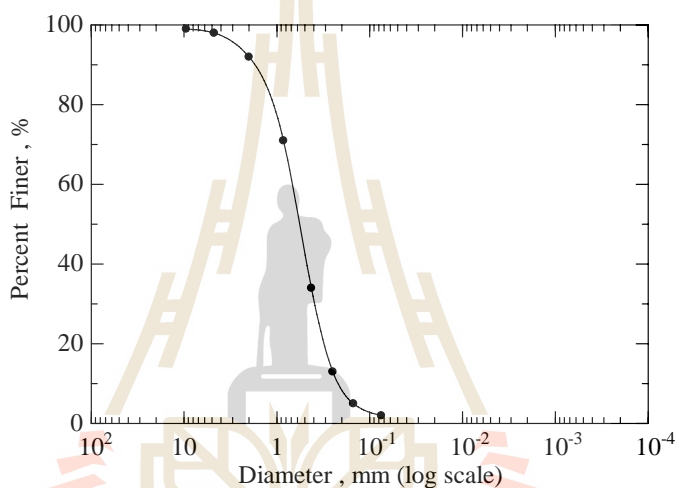


รูปที่ 3.3 วิธีการหาคุณลักษณะการอุ้มน้ำของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์
โดยการทดสอบแบบ capillary rise test (Lafleur et al. 2000)

3.2.4 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุถม

ก. ดินทราย

รูปที่ 3.4 แสดงขนาดคละของดินตัวอย่าง ซึ่งประกอบด้วยกรวดร้อยละ 0.3 ทรายร้อยละ 97 ดินตะกอนและดินเหนียวขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร ร้อยละ 2.7 การกระจายของเม็ดดินพบว่าดินตัวอย่างมีขนาดเฉลี่ย (D_{50}) เท่ากับ 0.53 มิลลิเมตร สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (C_u) เท่ากับ 3.08 และสัมประสิทธิ์ความโค้ง (C_c) เท่ากับ 0.82 จากการจำแนกตามระบบเอกภาพ (USCS) ดินตัวอย่างเป็นดินทรายที่มีขนาดคละไม่ดี (SP) มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.72 และมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเท่ากับ 0.023 เซนติเมตรต่อวินาที



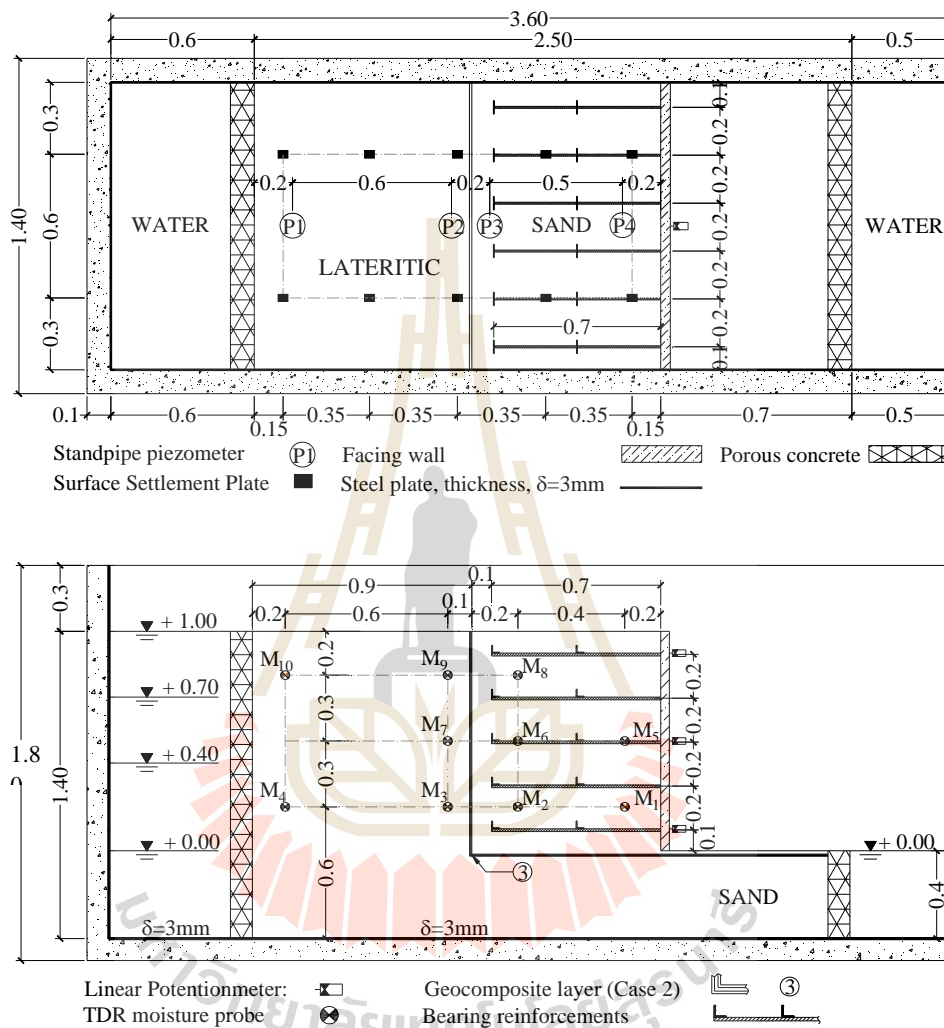
รูปที่ 3.4 ขนาดคละของดินทราย

ผลทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพบว่ามีความชื้นน้ำหนักร้อยละสูงสุดเท่ากับ 17 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร และปริมาณความชื้นเหมาะสมเท่ากับร้อยละ 6.3 เมื่อนำดินตัวอย่างมาทดสอบแรงเฉือนตรงเพื่อหาพารามิเตอร์กำลัง (strength parameters) ในห้องปฏิบัติการ ขอบเขตความแข็งแรงสร้างขึ้นจากความเค้นในแนวตั้งสามค่าได้แก่ 30 50 และ 90 กิโลปาสคาล พารามิเตอร์กำลังด้านทานแรงเฉือนที่ได้จากผลการทดสอบ มีค่าหน่วยแรงยึดเกาะเท่ากับ 0 กิโลปาสคาล และมุมเสียดทานภายในเท่ากับ 40 องศา

ข. ดินลูกรัง

รูปที่ 3.5 แสดงขนาดคละของดินตัวอย่าง ผลการทดสอบพบว่าดินตัวอย่างประกอบด้วยอนุภาคของดินเม็ดละเอียดร้อยละ 27.8 ทรายและกรวด (ทรายลักษณะเป็นเม็ดสีน้ำตาลขนาดเล็ก

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้น การทรุดตัวในแนวดิ่ง และการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของ
 กำแพง จะทำทุกๆ 24 ชั่วโมง



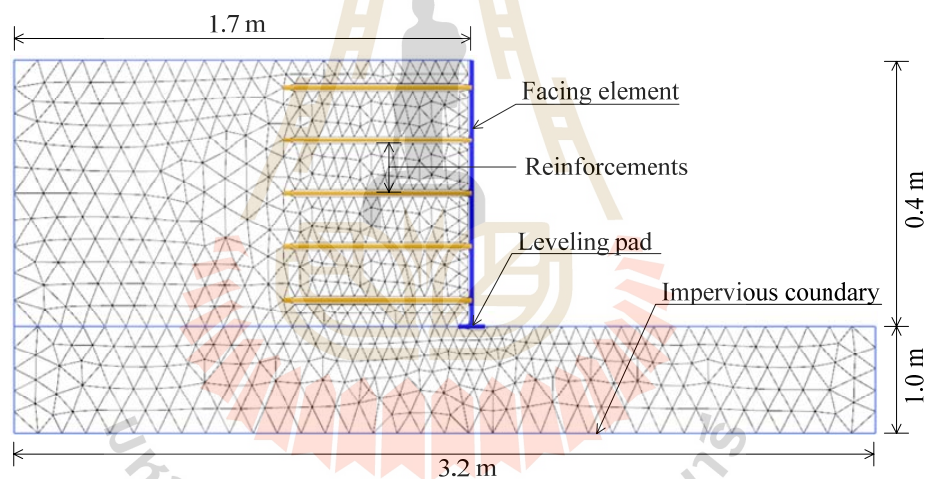
รูปที่ 3.6 รูปแบบถังจำลองและแผนผังตำแหน่งของอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ

ถังจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลังทางกายภาพ มีวัสดุใยสังเคราะห์เป็นระบบระบาย โดยระดับชั้น Base ของกำแพงกันดินเสริมกำลังไม่ควรน้อยกว่า 0.4 เมตร ดังนั้นในการศึกษานี้เลือกใช้ชั้น Base 0.4 เมตร วัสดุถมที่ใช้ในถังทดสอบสูง 1.4 เมตร การบดอัดดินทำทุก 0.2 เมตร ที่ 90 เปอร์เซ็นต์ของความหนาแน่นที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เหล็กเสริมกำลังเป็นเหล็กกลมผิวเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ความยาวของเหล็กเสริมเท่ากับ $0.7H$ ของกำแพง

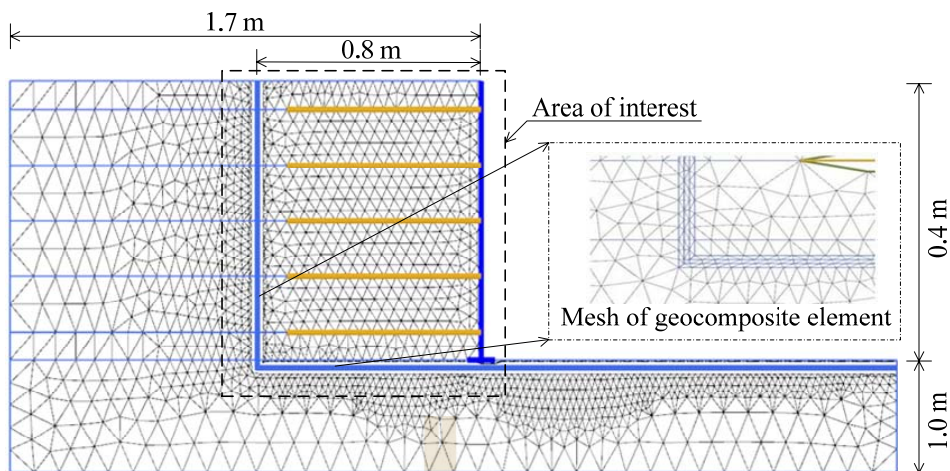
กันดิน หรือ ประมาณ 0.7 เมตร การจัดวางเหล็กเสริมกำลังในแนวดิ่งและแนวนอนเท่ากับ 0.2 และ 0.25 เมตร ตามลำดับ

3.4 แบบจำลองเชิงตัวเลข

แบบจำลองเชิงตัวเลขของกำแพงกันดินเสริมกำลังสร้างด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D โดยการจำลองเป็นระนาบ 2 มิติ (plane strain) รูปที่ 3.7 ดินถมจำลองด้วยอิทธิพลสามเหลี่ยมชนิด 15 จุดต่อ เหล็กเสริมกำลังจำลองด้วย geogrid element ซึ่งแนะนำโดย Suksiripattanapong et al. (2013) ผิวสัมผัสระหว่างดินถมและเหล็กเสริมกำลังจำลองด้วย interface element ซึ่งใช้จำลองการเลื่อนตามยาวบริเวณผิวสัมผัสระหว่างเหล็กเสริมกำลังกับดินถม กำแพงอะคริลิกและคอนกรีตฐานรากรับกำแพงจำลองด้วย plate element ดินถมใช้แบบจำลองของ Mohr-Coulomb เพื่อใช้วิเคราะห์พฤติกรรมการไหลและพฤติกรรมเชิงกล



(a) Mesh สำหรับการวิเคราะห์ของกรณีที่ 1 (ไม่เสริมวัสดุยึดเกาะ)



(b) Mesh สำหรับการวิเคราะห์ของกรณีที่ 2 (เสริมวัสดุใยสังเคราะห์)

รูปที่ 3.7 แบบจำลองเชิงตัวเลขของกำแพงกันดินเสริมกำลัง

3.4.1 ข้อมูลการวิเคราะห์แบบจำลองเชิงตัวเลขของกำแพงกันดินเสริมกำลัง

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองกายภาพย่อส่วน คอนกรีตฐานราก กำแพงอะคริลิก และวัสดุเสริมกำลังสมมติให้มีพฤติกรรมแบบอีลาสติก (elastic) โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตฐานรากประมาณจากกำลังอัดประลัยตามสมการ $E_c = 15100\sqrt{f'_c}$ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ACI, 1989) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของกำแพงอะคริลิกหาได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638

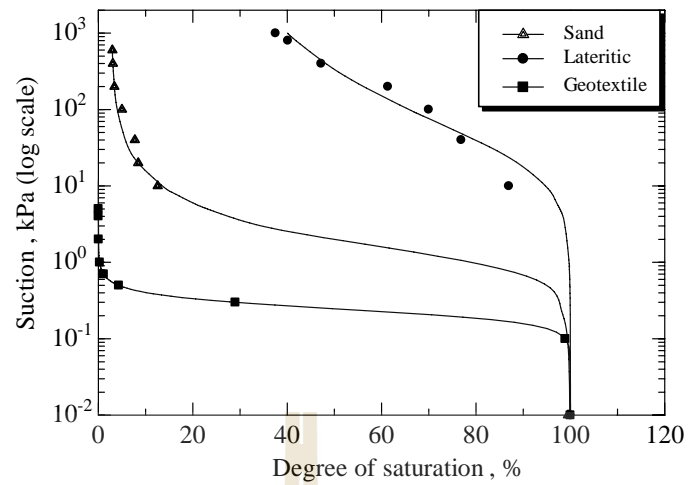
ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของวัสดุใยสังเคราะห์หาได้จากผลคูณระหว่างค่าการส่งผ่าน (จากรายงานของผู้ผลิต) กับความหนาของวัสดุใยสังเคราะห์ พารามิเตอร์การดูดซึมน้ำของวัสดุถม หาได้จากการทดสอบค่าแรงคาพิลลารีโดยใช้วิธีหม้อแรงดัน (Pressure plate method) โดยเตรียมดินตัวอย่างที่ความชื้นที่เหมาะสมที่ได้จากห้องปฏิบัติการลงในวงแหวนยางวางบนแผ่นวัสดุพรุน (pressure plate) ผลการทดสอบสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างแรงคาพิลลารีกับความชื้น แสดงในรูปที่ 3.8

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองกายภาพย่อยส่วน : แบบจำลอง

Parameter	Symbol	Steel reinforcement	Lean concrete	Acrylic facing	Unit
Material model	Model	Elastic	Elastic	Elastic	-
Young's modulus	E'	2.04×10^8	25.5×10^6	3.3×10^6	kN/m^2
Area	A	3.53×10^{-5}	0.05	0.02	m^2/m
Moment of inertia	I	-	1.04×10^{-5}	6.7×10^{-7}	m^4
Poisson's ratio	ν'	-	0.2	0.3	-
Density	γ	-	23.5	12	kN/m^3

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองกายภาพย่อยส่วน : วัสดุถมและวัสดุใยสังเคราะห์

Parameter	Symbol	Sand	Lateritic	Geotextile	Geonet	Unit
Material model	Model	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	-
Type of behavior	Type	Drained	Drained	Drained	Drained	-
Unsaturated weight	γ_{unsat}	16.7	18.30	5	5	kN/m^3
Saturated weight	γ_{sat}	20.4	21.33	12	12	kN/m^2
Lateral permeability	k_{lat}	17	0.3456	320	69120	m/day
Longitudinal - permeability	k_{long}	17	0.3456	2,000	69,120	m/day
Young's modulus	E'	20,000	50,000	50,000	50,000	kN/m^2
Poisson's ratio	ν'	0.3	0.328	0.3	0.3	-
Cohesion	c'	1	19	1	1	$^\circ$
Friction angle	ϕ'	40	30.75	40	40	$^\circ$
Dilatancy angle	ω	0	0	0	0	$^\circ$
Initial void ratio	e_{mi}	0.6	0.45	0.98	0.98	-
Flow data set	-	van Genuchten	van Genuchten	van Genuchten	van Genuchten	-
Later earth pressure	K_0	0.36	0.49	0.36	0.36	-



รูปที่ 3.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงคาพิวลาไรกับความชื้นของดิน

3.5 การศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์

ขั้นตอนการศึกษา

1. จากข้อมูลแบบจำลองทางกายภาพของกำแพงกันดินเสริมกำลัง (อาทิตย์ อุดมชัย ,2556) ทำการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของกำแพงกันดินเสริมกำลังด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D
2. วิเคราะห์ทางวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ นำผลพฤติกรรมการไหลและพฤติกรรมเชิงกลที่ได้มา ทำการสอบเทียบหาความสอดคล้องกับผลการจำลองทางกายภาพ
3. ศึกษาพฤติกรรมการไหล จากแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ผ่านการสอบเทียบ
4. ศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติการไหลและการอุ้มน้ำของดิน และวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ ซึ่งตัวแปรที่เกี่ยวข้องประกอบไปด้วย ตัวแปร van Genuchten (g_a g_n S_{res} S_{sat}) และตัวแปรการซึมผ่านได้ (k) โดยศึกษาตัวแปรที่ค่าต่างๆ

3.6 เงื่อนไขการทดสอบ

การทดสอบกระทำภายใต้เงื่อนไข 4 เงื่อนไข ดังแสดงในตารางที่ 3.4 เพื่อศึกษาอิทธิพลของวัสดุถมต่อพฤติกรรมการไหลของกำแพงกันดินเสริมกำลัง โดยกรณี 1 และกรณี 2 ใช้ในการสอบเทียบแบบจำลองโดยใช้ดินทรายเป็นวัสดุถม ในการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์และศึกษาอิทธิพลเนื่องจากคุณสมบัติด้านการอุ้มน้ำของดิน โดยกรณีที่ 3 ใช้ดินลูกรังเป็นวัสดุถม และกรณีที่ 4 ดินเดิมเป็นดินลูกรังพื้นที่เสริมกำลังเป็นดินทราย

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดของการทดสอบ

Case No.	Inside Protection zone	Outside Protection zone	Geocomposite	Drainage direction (deg.)	Remark
I	Sandy Soil	Sandy Soil	-	-	Calibration
II	Sandy Soil	Sandy Soil	Use	90	Calibration
III	Lateritic Soil	Lateritic Soil	Use	90	Parametric study
IV	Sandy Soil	Lateritic Soil	Use	90	Parametric study

บทที่ 4

การทดสอบและวิเคราะห์ผล

บทนี้นำเสนอการสอบเทียบแบบจำลองจากผลการตรวจวัดและผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม PLAXIS และศึกษาพารามิเตอร์ผ่านแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับศึกษาอิทธิพลของคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ผ่านการวิเคราะห์พฤติกรรมไหลของน้ำ

4.1 การสอบเทียบแบบจำลอง

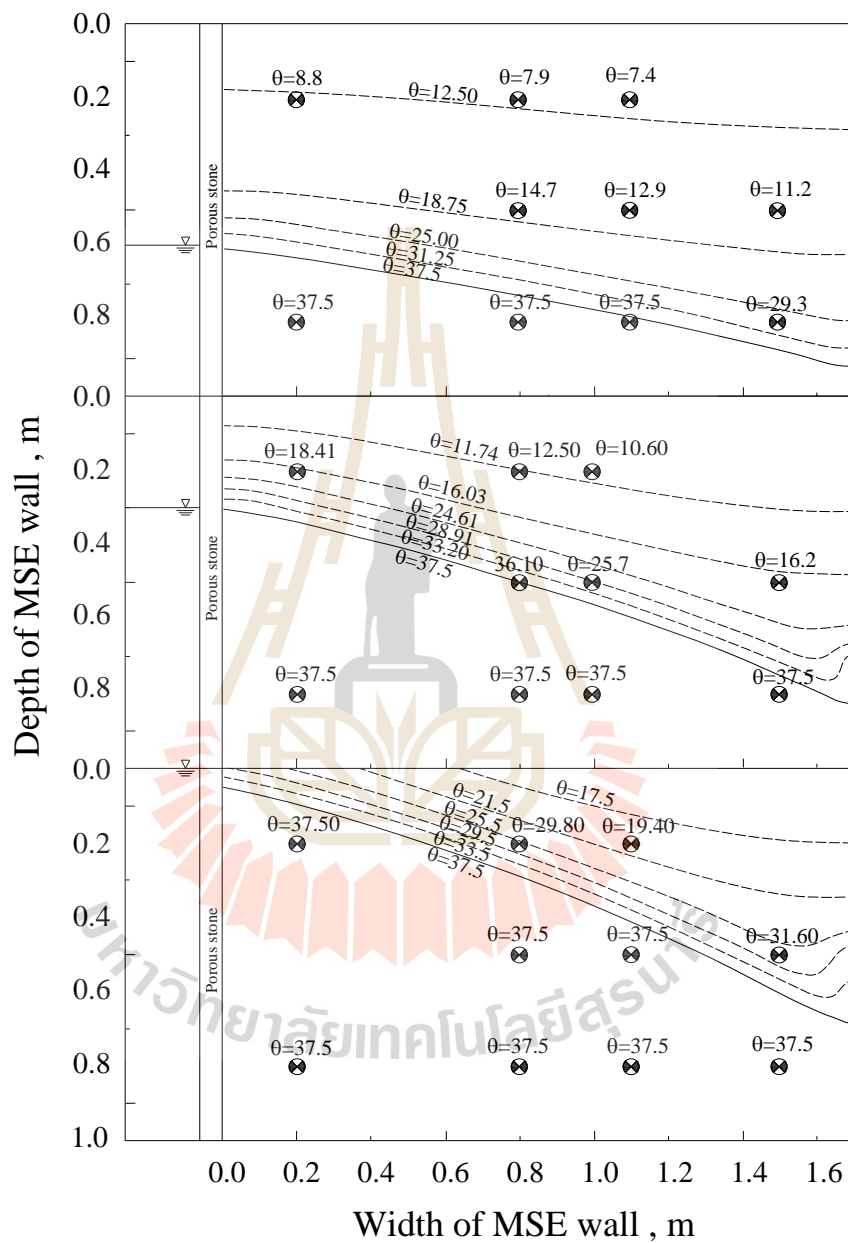
จากการสอบเทียบแบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลังทั้ง 2 กรณี (กรณีเสริมและไม่เสริมวัสดุสังเคราะห์) แสดงให้เห็นว่า การติดตั้งระบบระบายน้ำวัสดุสังเคราะห์จะช่วยลดระดับผิวน้ำในพื้นที่เสริมกำลัง ซึ่งมีผลให้ขนาดการทรุดตัวของวัสดุถม ความดันน้ำด้านหน้ากำแพงกันดินและการเสียรูปด้านข้างลดลง

4.1.1 พฤติกรรมเชิงกลศาสตร์

ก. กำแพงกันดินเสริมกำลัง : ไม่เสริมระบบระบายน้ำวัสดุสังเคราะห์

รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นระดับน้ำกับระยะทางจากค้ำน้ำถึงผนังกำแพงในกรณีที่ 1 ที่เวลาการทดสอบต่างๆ จากการวิเคราะห์แบบจำลองเชิงตัวเลข พบว่า เส้นระดับน้ำเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของระดับค้ำน้ำ สำหรับระดับค้ำน้ำ 40 70 และ 100 เซนติเมตร ระดับน้ำที่ด้านหน้ากำแพงมีค่าเท่ากับ 8.66 17.76 และ 31.54 เซนติเมตร ตามลำดับ และมีการลดลงตามระยะจากค้ำน้ำถึงผนังกำแพงกันดิน โดยการลดลงของระดับน้ำเกิดจากการสูญเสียหน้าเมื่อไหลผ่านดินถมหลังกำแพงกันดิน และนอกจากจะแสดงเส้นระดับน้ำแล้วยังแสดงเส้นชั้น (contour) ความชื้นโดยปริมาตร ที่ผลการตรวจวัดเมื่อระดับค้ำน้ำเพิ่มขึ้นถึง 100 เซนติเมตร จะเห็นได้ว่า ความชื้นโดยปริมาตรที่ระดับ EL.20 cm ตำแหน่ง M_1 M_2 M_3 และ M_4 (ระยะ 20 80 110 และ 150 เซนติเมตรตามลำดับจากกำแพงกันดิน) มีค่าเท่ากับร้อยละ 37.5 ทุกตำแหน่ง ความชื้นโดยปริมาตรที่ระดับ EL.50 cm ตำแหน่ง M_6 และ M_7 มีความชื้นโดยปริมาตรเท่ากับร้อยละ 37.5 และตำแหน่ง M_5 มีความชื้นโดยปริมาตรเท่ากับร้อยละ 31.60 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่ห่างจากค้ำน้ำมากที่สุด และความชื้นโดยปริมาตรที่ระดับ EL.80 cm (M_8 M_9 และ M_{10}) มีค่าเท่ากับร้อยละ 19.40 29.80 และ 37.50 ตามลำดับ เมื่อนำผลเส้นชั้นความชื้นโดยปริมาตรจากการวิเคราะห์แบบจำลองเชิงตัวเลขเปรียบเทียบกับผลจากการตรวจวัด แสดงให้เห็นว่า ความชื้นโดยปริมาตรที่ได้จากการวิเคราะห์

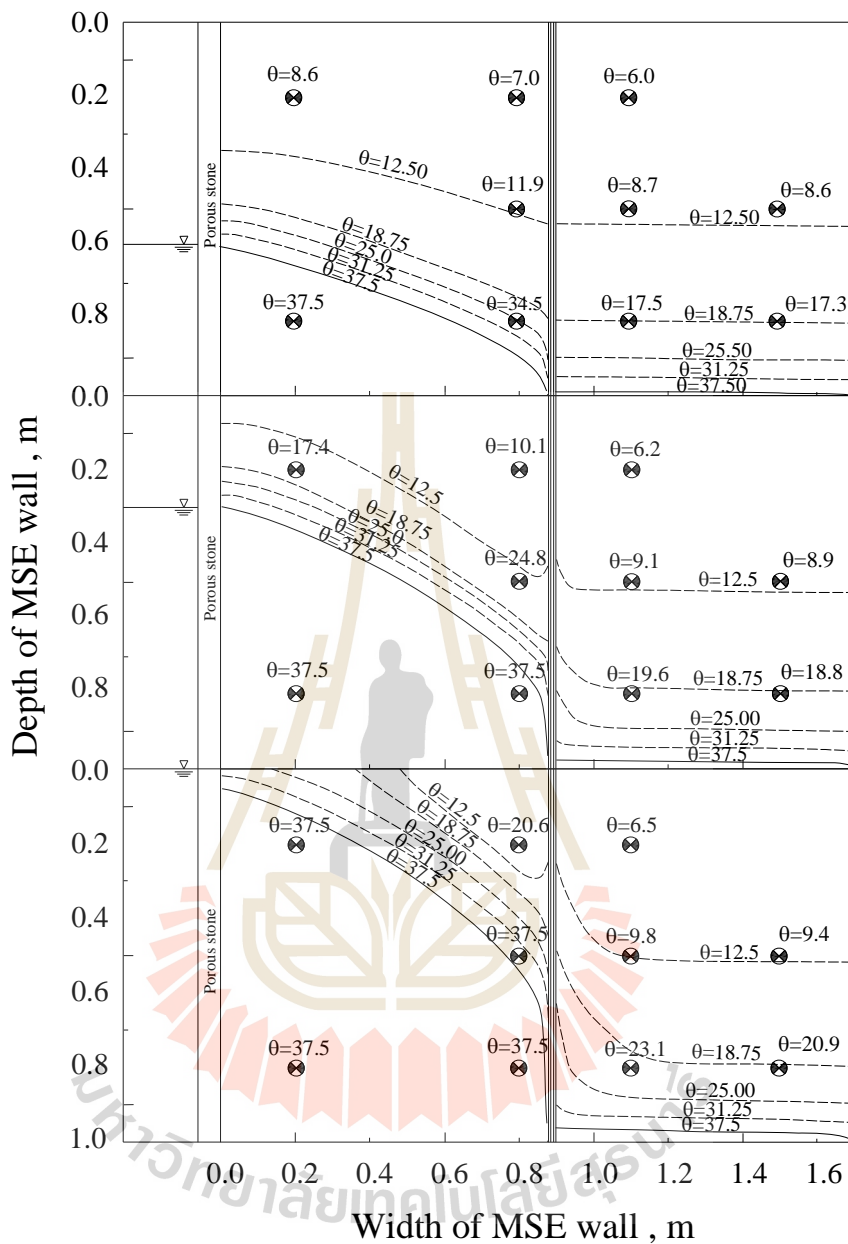
แบบจำลองเชิงตัวเลขมีค่าสูงต่ำกว่าผลการตรวจวัดเล็กน้อย โดยความชื้นโดยปริมาตรที่ตำแหน่งต่ำกว่าเส้นระดับน้ำจะมีค่าเท่ากับร้อยละ 37.5 ซึ่งอาจกล่าวได้ว่ามวลดินอยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ



รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นระดับน้ำกับระยะการติดตั้งกำแพงของกรณีที่ 1

ข. กำแพงกันดินเสริมกำลัง : เสริมระบบระบายน้ำวัสดุใยสังเคราะห์

รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นระดับน้ำกับระยะทางจากคั่นน้ำถึงผนังกำแพงในกรณีที่ 2 ที่เวลาการทดสอบต่างๆ จากผลการตรวจวัดความชื้น โดยปริมาตร พบว่า เมื่อระดับคั่นน้ำเพิ่มขึ้นถึง 100 เซนติเมตร จะมีค่าความชื้นโดยปริมาตรมากที่สุด โดยที่ระดับ EL.20 cm ตำแหน่ง M_1 , M_2 , M_3 และ M_4 (ระยะ 20 80 110 และ 150 เซนติเมตร ตามลำดับจากกำแพงกันดิน) มีค่าความชื้นโดยปริมาตรเท่ากับร้อยละ 20.9 23.1 37.5 และ 37.5 ตามลำดับ ที่ระดับ EL.50 cm ตำแหน่ง M_5 , M_6 และ M_7 มีความชื้นโดยปริมาตรเท่ากับร้อยละ 9.4 9.8 และ 37.5 ตามลำดับ และความชื้นโดยปริมาตรที่ระดับ EL.80 cm (M_8 , M_9 และ M_{10}) มีค่าเท่ากับร้อยละ 6.5 10.6 และ 37.5 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในเขตโซนป้องกัน (ตำแหน่ง M_1 , M_2 , M_3 , M_6 และ M_8) มีค่าความชื้นโดยปริมาตรต่ำกว่าในกรณีที่ 1 ถึงร้อยละ 44.27 38.40 70.25 73.87 และ 66.49 ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์แบบจำลองเชิงตัวเลข พบว่า เส้นระดับน้ำค่อยๆ ลดลงตามระยะทางจากคั่นน้ำจนถึงหน้าวัสดุใยสังเคราะห์ พอผ่านเข้าสู่โซนเสริมกำลังเส้นระดับน้ำค่อนข้างต่ำ ระดับน้ำที่หน้ากำแพงมีค่าต่ำมากใกล้เคียง 0 สำหรับทุกระดับคั่นน้ำ (40 70 และ 100 เซนติเมตร) เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบกรณีที่ 1 แสดงให้เห็นว่าเส้นระดับน้ำด้านหน้ากำแพงมีค่าลดลง โดยระดับน้ำที่บริเวณหน้าวัสดุใยสังเคราะห์มีค่าเท่ากับ 2.39 6.52 และ 10.13 เซนติเมตร สำหรับระดับคั่นน้ำ 40 70 และ 100 เซนติเมตรตามลำดับ และระดับน้ำที่บริเวณหลังวัสดุใยสังเคราะห์ มีค่าเท่ากับ 1.85 4.28 และ 7.73 เซนติเมตรสำหรับระดับคั่นน้ำ 40 70 และ 100 เซนติเมตรตามลำดับ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลทดสอบกรณีที่ 1 พบว่า การลดของระดับน้ำแสดงถึงประสิทธิภาพของวัสดุใยสังเคราะห์ในด้านการระบายน้ำ สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่สูงของวัสดุใยสังเคราะห์ ช่วยป้องกันน้ำให้อยู่เพียงนอกพื้นที่เสริมกำลังและระบายน้ำออกบริเวณหน้ากำแพง ซึ่งจะช่วยลดแรงดันน้ำที่กระทำต่อกำแพงกันดินและลดความชื้นในมวลดินในโซนเสริมกำลังได้



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นระดับน้ำกับระยะการติดตั้งกำแพงของกรณี 2

4.1.2 พฤติกรรมเชิงกล

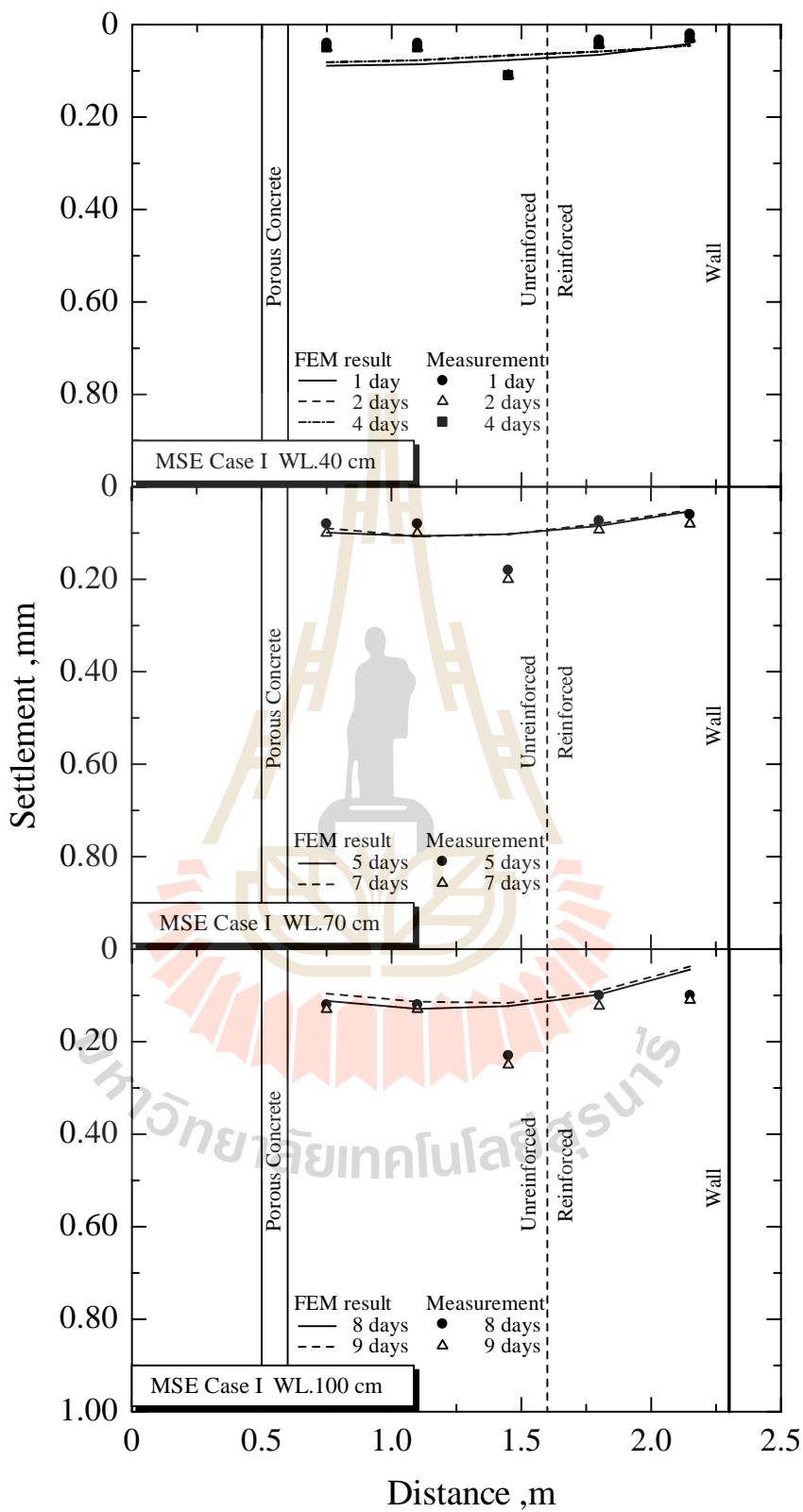
ก. กำแพงกันดินเสริมกำลัง : ไม่เสริมระบบระบายน้ำวัสดุโดยสังเคราะห์

ก.1 การทรุดตัวของดินถม (Surface settlement)

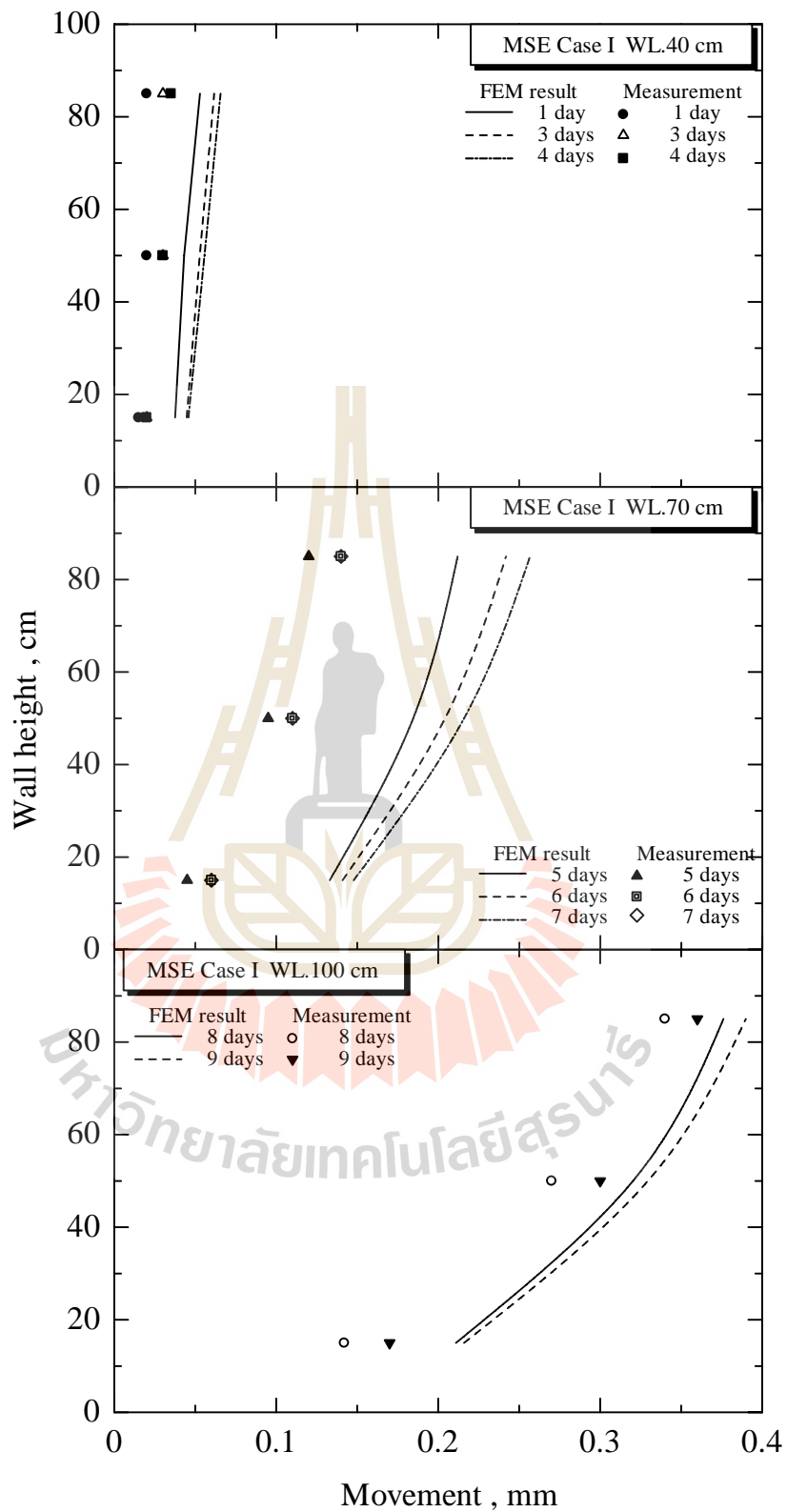
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าทรุดตัวกับระยะจากต้นน้ำถึงผนังกำแพงกันดินของการทดสอบในกรณีที่ 1 ที่ระดับต้นน้ำ 40 70 และ 100 เซนติเมตร ผลการตรวจวัดพบว่า บริเวณจุดต่อระหว่างพื้นที่เสริมกำลังและไม่เสริมกำลังมีการทรุดตัวมากกว่าจุดอื่น ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากบริเวณนี้เป็นรอยต่อระหว่างวัสดุที่มีคุณสมบัติความแตกต่างกัน จึงทำให้สตีเฟนส์ในบริเวณดังกล่าวต่ำกว่าบริเวณอื่นส่งผลให้เกิดการทรุดตัวที่สูง และจากผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า ที่ระดับต้นน้ำอยู่ที่ 100 เซนติเมตร มีค่าทรุดตัวสูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.250 มิลลิเมตร และการทรุดตัวด้านนอกพื้นที่เสริมกำลังมีความใกล้เคียงกันในพื้นที่เสริมกำลัง เมื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกันพบว่า ผลจากการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสอดคล้องกับผลการตรวจวัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ระดับต้นน้ำ 100 เซนติเมตร แต่ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีขนาดการทรุดตัวต่ำกว่าผลจากการตรวจวัด โดยผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า การทรุดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับน้ำที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของการเพิ่มขึ้นของความชื้นโดยปริมาตร ส่งผลให้ความเค้นประสิทธิผลในมวลดินลดลง

ก.2 การเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพง (Horizontal displacement)

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวด้านข้างกับความสูงกำแพง สำหรับการทดสอบในกรณีที่ 1 พบว่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงกันดินมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา เมื่อมีการเพิ่มระดับต้นน้ำ การเคลื่อนตัวทางด้านข้างจะมีการเคลื่อนตัวอย่างฉับพลันและค่อยๆเข้าสู่ภาวะสมดุลในที่สุด ที่ระดับต้นน้ำเท่ากับ 100 เซนติเมตร การเคลื่อนตัวสูงสุดที่ได้จากการตรวจวัดมีค่าเท่ากับ 0.360 0.300 และ 0.170 มิลลิเมตร ที่ด้านบน กึ่งกลาง และด้านล่างของผนังกำแพงตามลำดับ และการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าเท่ากับ 0.390 0.329 และ 0.216 มิลลิเมตร ที่ด้านบน กึ่งกลาง และด้านล่างของผนังกำแพงตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวค่าที่ได้จากการตรวจวัดและจากการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะเห็นได้ว่า การเคลื่อนตัวด้านข้างมีความสอดคล้องกันและผลจากการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่ามากกว่าผลจากการตรวจวัดเล็กน้อย



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับระยะจากต้นน้ำถึงผนังกำแพงของกรณี 1



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวด้านข้างกับความสูงของกำแพงของกรณีที่ 1

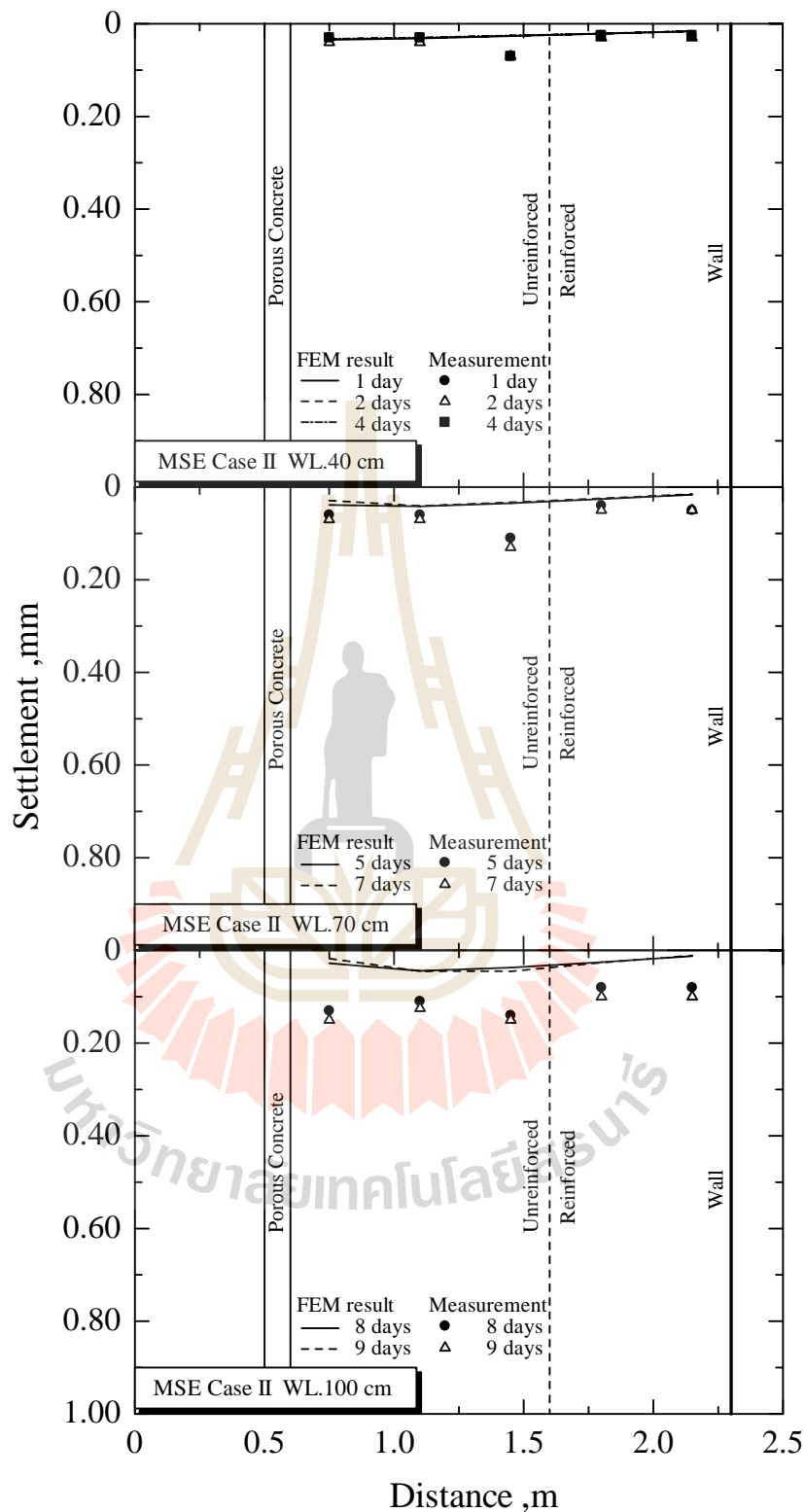
ข. กำแพงกันดินเสริมกำลัง : เสริมระบบระบายน้ำวัสดุใยสังเคราะห์

ข.1 การทรุดตัวของดินถม (Surface settlement)

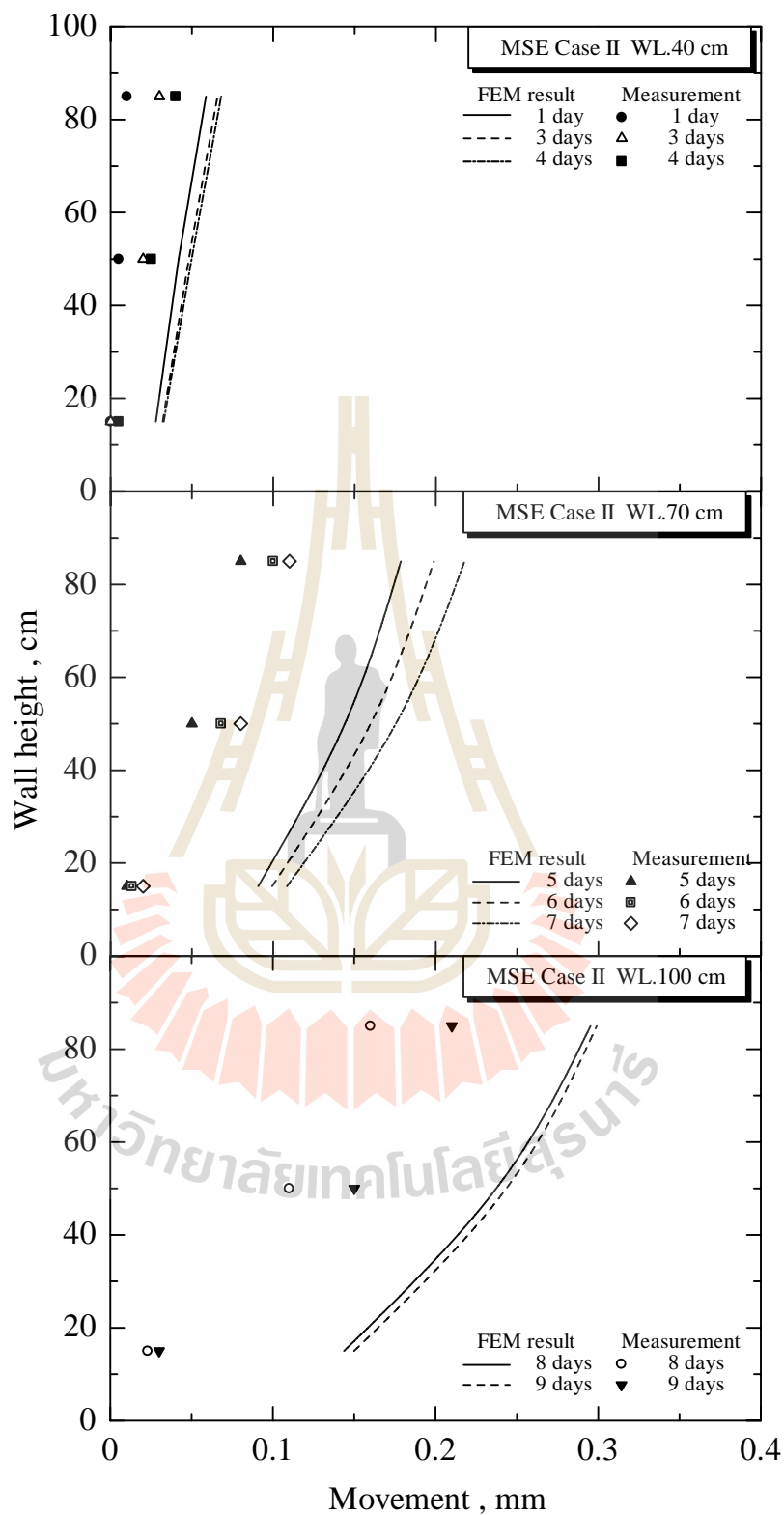
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าทรุดตัวกับระยะจากต้นน้ำถึงผนังกำแพงกันดินของการทดสอบในกรณีที่ 2 โดยมีระบบระบายน้ำวัสดุใยสังเคราะห์ ผลการตรวจวัดพบว่า ที่ระดับต้นน้ำเท่ากับ 100 เซนติเมตร บริเวณหน้าวัสดุใยสังเคราะห์มีการทรุดตัวมากที่สุด ซึ่งมีค่าทรุดตัวเท่ากับ 0.150 มิลลิเมตร และผลจากการวิเคราะห์ทางไฟไนท์อิลลิเมนต์มีค่าทรุดตัวมากที่สุด เท่ากับ 0.045 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อนำผลที่ได้จากการตรวจวัดมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ทางไฟไนท์อิลลิเมนต์พบว่าการทรุดตัวมีลักษณะที่สอดคล้องกัน และเมื่อนำผลการวิเคราะห์ทางไฟไนท์อิลลิเมนต์ของการทดสอบทั้ง 2 กรณีนำมาเปรียบเทียบกัน จะเห็นได้ว่า การทรุดตัวสูงสุดในพื้นที่เสริมกำลังในกรณีที่ 2 มีค่าลดลงถึงร้อยละ 62.08 67.97 และ 88.75 ที่ระดับต้นน้ำเท่ากับ 40 70 และ 100 เซนติเมตรตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการลดลงของเส้นระดับน้ำและความชื้นโดยปริมาตรในพื้นที่เสริมกำลัง ทำให้ความเค้นประสิทธิผลในกรณีที่ 2 เปลี่ยนแปลงน้อยกว่าในกรณีที่ 1

ข.2 การเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพง (Horizontal displacement)

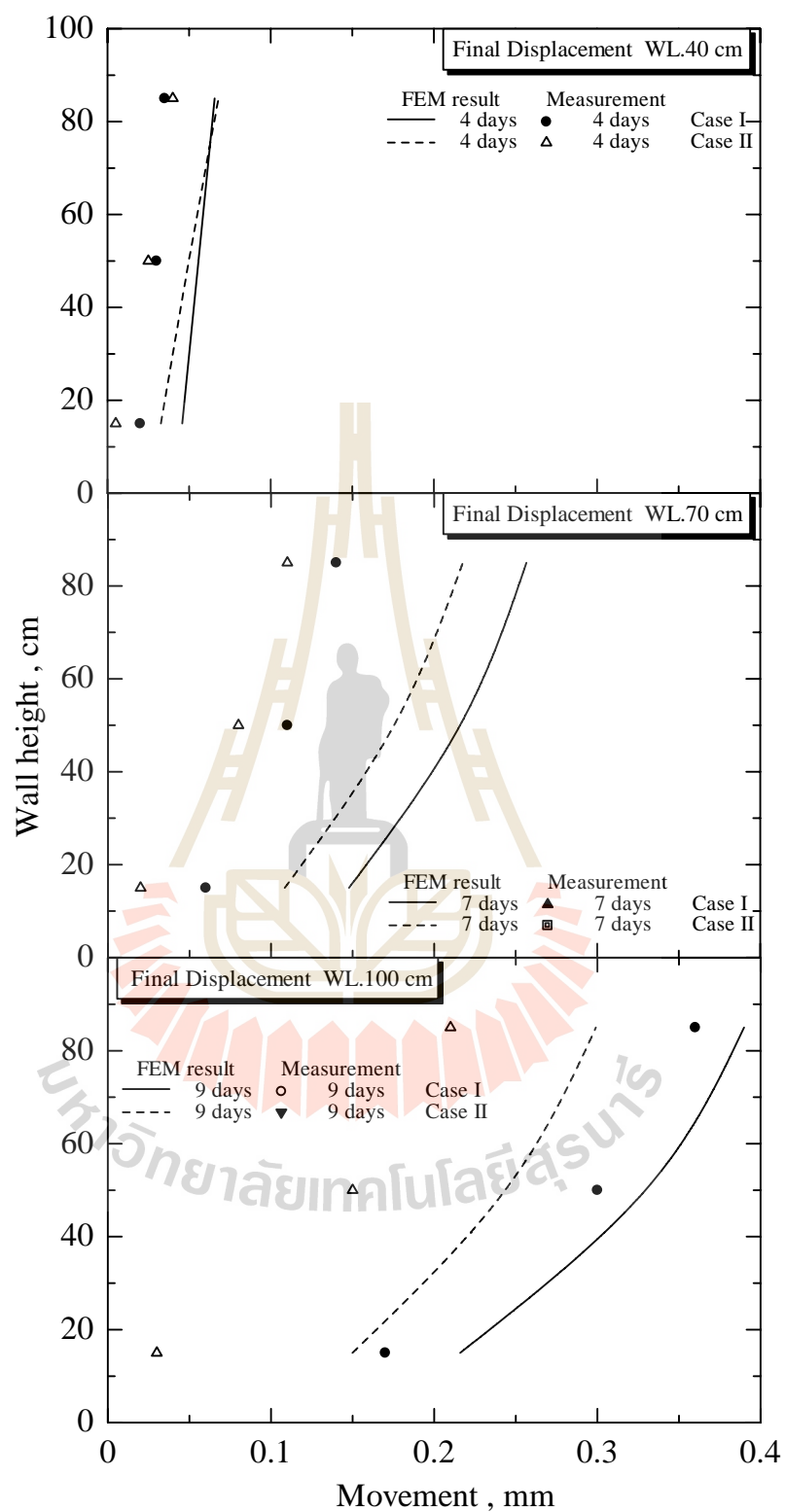
รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวด้านข้างกับความสูงกำแพงสำหรับการทดสอบในกรณีที่ 2 พบว่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงกันดินมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับกรณีที่ 1 ที่ระดับต้นน้ำ 100 เซนติเมตร การเคลื่อนตัวสูงสุดที่ได้จากการตรวจวัดมีค่าเท่ากับ 0.210 0.150 และ 0.030 มิลลิเมตร ที่ด้านบน กึ่งกลาง และด้านล่างของผนังกำแพงตามลำดับ และการเคลื่อนตัวที่ได้จากการวิเคราะห์ทางไฟไนท์อิลลิเมนต์มีค่าเท่ากับ 0.299 0.243 และ 0.150 มิลลิเมตร ที่ด้านบน กึ่งกลาง และด้านล่างของผนังกำแพง ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน และผลจากการวิเคราะห์ทางไฟไนท์อิลลิเมนต์มีการเคลื่อนตัวมากกว่าการตรวจวัด เนื่องจากโมดูลัสยึดหยุ่นของดินต่ำ เมื่อนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางไฟไนท์อิลลิเมนต์จากการทดสอบทั้ง 2 กรณีมาเปรียบเทียบกัน พบว่าผลการเคลื่อนตัวสำหรับการทดสอบในกรณีที่ 2 มีค่าการเคลื่อนตัวต่ำกว่าถึงร้อยละ 23.33 26.14 และ 30.56 ตามลำดับ ที่บริเวณด้านบน ตรงกึ่งกลาง และด้านล่างของกำแพง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การติดตั้งระบบระบายน้ำวัสดุใยสังเคราะห์ช่วยลดความดันน้ำด้านหน้ากำแพงกันดิน และส่งผลให้การเสยรูปด้านข้างลดลง



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับระยะจากต้นน้ำถึงผนังกำแพงของกรณีที่ 2



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวด้านข้างกับความสูงของกำแพงของกรณีที่ 2



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวด้านข้างกับความสูงของกำแพงของกรณีที่ 1 และ 2

4.2 กำแพงกันดินที่ใช้วัสดุใยสังเคราะห์เป็นระบบระบายน้ำ : แบบจำลองเชิงตัวเลข

ส่วนนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมชลศาสตร์ โดยศึกษา 2 กรณี คือกรณีที่ 3 ดินเดิมและพื้นที่เสริมกำลังมีวัสดุถมเป็นดินลูกรัง (L-L) มีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองแสดงในตารางที่ 4.1 และกรณีที่ 4 ดินเดิมเป็นดินลูกรัง พื้นที่เสริมกำลังเป็นดินทราย (L-S) มีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง: ดินลูกรัง (L-L)

Material	VG-VGM model parameters				
	g_a [m^{-1}]	g_n [-]	S_{res} [-]	S_{sat} [-]	k [-]
Lateritic	0.8	1.4	0.2	1	0.3456
Geotextile	20	1.5	0.03	0.8	2000 (320) ¹
Geonet	600	40	0	1	69120

¹ ค่าความซึมผ่านได้ทางขวาง (k_{lat})

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง: ดินเดิมเป็นดินลูกรังพื้นที่เสริมกำลังเป็นดินทราย (L-S)

Material	VG-VGM model parameters				
	g_a [m^{-1}]	g_n [-]	S_{res} [-]	S_{sat} [-]	k [-]
Sandy	20	1.5	0.03	1	17
Lateritic	0.8	1.4	0.2	1	0.3456
Geotextile	20	1.5	0.03	0.8	2000(320) ¹
Geonet	600	40	0	1	69120

¹ ค่าความซึมผ่านได้ทางขวาง (k_{lat})

4.2.1 พฤติกรรมเชิงชลศาสตร์

ก. กำแพงกันดินเสริมกำลัง : ดินลูกรัง (L-L)

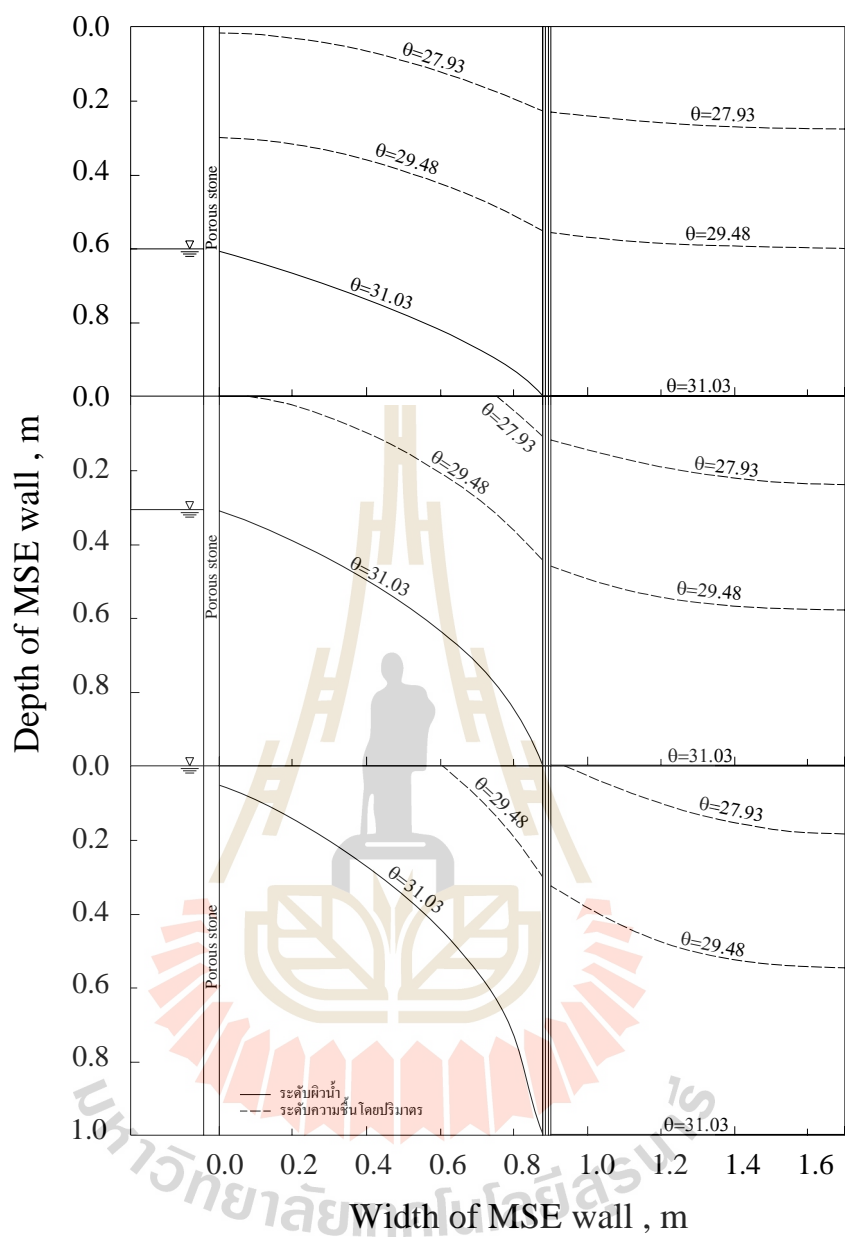
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นระดับน้ำกับระยะการติดตั้งกำแพง สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองเชิงตัวเลขในกรณีที่ 3 พบว่า ระดับน้ำนอกพื้นที่เสริมกำลัง (ดินเดิม) มีระดับที่เพิ่มขึ้นตามระดับต้นน้ำ และระดับน้ำค่อยๆลดลงตามระยะทางจากต้นน้ำจนถึงบริเวณหน้าวัสดุสังเคราะห์ ซึ่งมีระดับค่อนข้างต่ำ พอผ่านเข้าสู่โซนเสริมกำลังระดับน้ำมีค่าต่ำมากใกล้เคียงศูนย์จนถึงหน้ากำแพงทุกระดับต้นน้ำ (40 70 และ 100 เซนติเมตร) นอกจากเส้นระดับน้ำแล้วยังแสดง

เส้นชั้นความชื้นโดยปริมาตร ในการวิเคราะห์ผลทำการแบ่งเส้นชั้นความชื้นโดยปริมาตรออกเป็น 20 เส้นชั้น โดยเส้นชั้นความชื้นโดยปริมาตรที่ปรากฏในผลการวิเคราะห์มีทั้งหมด 3 เส้นชั้น ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 31.03 29.48 และ 27.93 ตามลำดับเส้นชั้นความชื้น

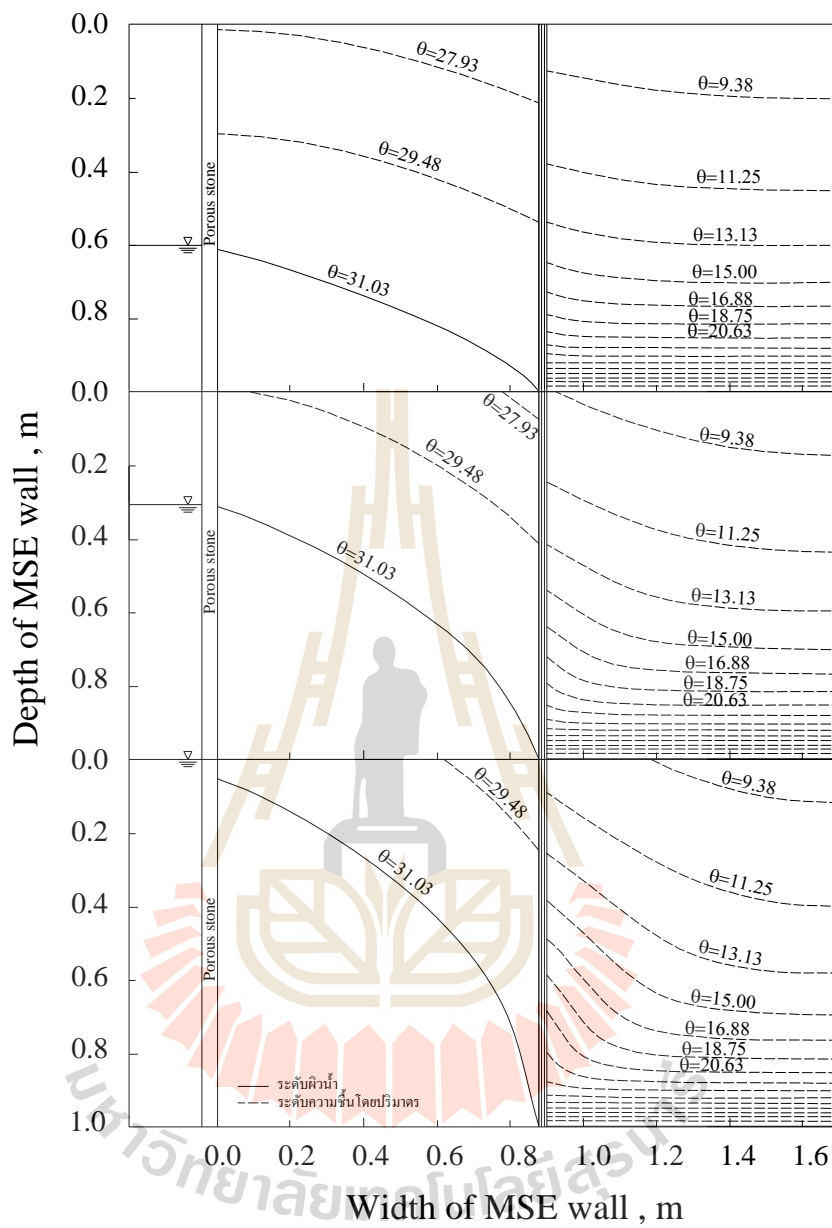
ข. กำแพงกันดินเสริมกำลัง : ดินเดิมเป็นดินลูกรัง พื้นที่เสริมกำลังเป็นดินทราย (L-S)

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นระดับน้ำกับระยะการติดตั้งกำแพง สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองเชิงตัวเลขกรณีที่ 4 พบว่า ระดับน้ำนอกพื้นที่เสริมกำลังมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มระดับต้นน้ำ และค่อยๆลดลงตามระยะทางจนถึงใกล้บริเวณวัสดุโยสักระยะที่ พอผ่านเข้าสู่พื้นที่เสริมกำลัง ระดับน้ำมีค่าต่ำมากใกล้เคียงศูนย์จนถึงหน้ากำแพงทุกระดับต้นน้ำ (40 70 และ 100 เซนติเมตร) เช่นเดียวกับกรณีที่ 3 และยังคงแสดงเส้นชั้นความชื้นโดยปริมาตร ซึ่งทำการแบ่งเส้นชั้นความชื้นโดยปริมาตรออกเป็น 20 เส้นชั้น ในบริเวณนอกพื้นที่เสริมกำลังดินเดิมเป็นดินลูกรังมีเส้นชั้นความชื้นโดยปริมาตรที่กว้าง ความชื้นโดยปริมาตรที่ปรากฏในบริเวณนี้มี 3 เส้นชั้น มีค่าเท่ากับร้อยละ 31.03 29.48 และ 27.93 ตามลำดับเส้นชั้นความชื้น และในบริเวณพื้นที่เสริมกำลัง (โซนป้องกัน) วัสดุถมเป็นดินทรายมีเส้นชั้นความชื้นที่แคบมีความชื้นโดยปริมาตรที่น้อยที่สุดที่ปรากฏในบริเวณนี้มีค่าเท่ากับร้อยละ 9.38 โดยดินลูกรังมีค่าความอิ่มตัวโดยปริมาตรเท่ากับร้อยละ 31.03 และดินทรายมีค่าความอิ่มตัวโดยปริมาตรเท่ากับร้อยละ 37.5

จากผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของกำแพงกันดินเสริมกำลังกรณีที่ 4 ดินเดิมเป็นดินลูกรัง พื้นที่เสริมกำลังเป็นดินทราย แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่า เส้นชั้นความชื้นโดยปริมาตรขึ้นอยู่กับลักษณะการอุ้มน้ำของดิน โดยลักษณะการอุ้มน้ำที่มีความชันของเส้นกราฟ ที่ช่วงของการดูด (suction) เดียวกัน เส้นกราฟที่มีความชันต่ำจะมีค่าความอิ่มตัวที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากดินทรายมีความชันของลักษณะการอุ้มน้ำต่ำส่งผลให้เส้นชั้นความชื้นที่ปรากฏแคบว่าในดินลูกรังที่มีความชันของลักษณะการอุ้มน้ำสูง ซึ่งที่ช่วงของการดูดเดียวกันจะมีค่าความอิ่มตัวที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นระดับน้ำกับระยะการติดตั้งกำแพงของกรณี 3



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นระดับน้ำกับระยะการติดตั้งกำแพงของกรณี 4

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำ และศึกษาอิทธิพลของคุณสมบัติเชิงชลศาสตร์ ด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขของกำแพงกันดินเสริมกำลัง ประเด็นที่สำคัญของงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. พฤติกรรมการไหลของน้ำ ผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า ระดับน้ำนอกพื้นที่เสริมกำลัง (ดินเดิม) มีระดับที่เพิ่มขึ้นตามระดับต้นน้ำ และระดับน้ำค่อยๆลดลงตามระยะทาง จากต้นน้ำจนถึงบริเวณหน้าวัสดุสังเคราะห์ (geocomposite) ซึ่งมีระดับค่อนข้างต่ำ พอผ่านเข้าสู่พื้นที่เสริมกำลังระดับน้ำมีค่าต่ำมากใกล้เคียงศูนย์จนถึงหน้ากำแพง และเส้นชั้นความชื้นโดยปริมาตรขึ้นอยู่กับลักษณะการอุ้มน้ำ (WRC) ของดิน

2. ลักษณะการอุ้มน้ำ (WRC) แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของประสิทธิภาพความอืดตัว ซึ่งมีผลต่อพฤติกรรมเชิงชลศาสตร์ของกำแพงกันดินเสริมกำลัง โดยมี g_a แสดงถึงค่าน้ำเข้า Water Entry Value (WEV) ซึ่งก็คือบริเวณที่เรียกว่า Capillary Saturation Zone และค่า g_n แสดงถึงความชื้นในช่วง 20-80% ของ WRC curve ซึ่งความชื้นหมายถึงว่าช่วงของการเปลี่ยนแปลงการดูดน้ำมีช่วงที่แคบหรือกว้าง

3. พารามิเตอร์เชิงชลศาสตร์ van Genuchten g_a จากผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าที่ความลึกเหนือระดับผิวน้ำ ขนาดของ g_a ผกผันต่อระดับความอืดตัวประสิทธิผล เมื่อขนาด g_a สูงขึ้น ค่าระดับความอืดตัวประสิทธิผลจะลดลง และการเปลี่ยนขนาดของ g_a ของดินถมด้านนอกพื้นที่เสริมกำลังไม่ส่งผลต่อการกระจายความชื้นของดินถมด้านในพื้นที่เสริมกำลัง

4. พารามิเตอร์เชิงชลศาสตร์ van Genuchten g_n จากผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า การกระจายของระดับความอืดตัวประสิทธิผลระหว่างช่วง 20-80% ขึ้นอยู่กับขนาดของ g_n เมื่อขนาด g_n มากขึ้น การกระจายของระดับความอืดตัวประสิทธิผล ในช่วง 20-80% จะแคบลง และการเปลี่ยนขนาด g_n ของดินด้านนอกพื้นที่เสริมกำลังไม่ส่งผลต่อการกระจายของระดับความอืดตัวประสิทธิผลในพื้นที่เสริมกำลังหรือส่งผลเพียงเล็กน้อย

5. พารามิเตอร์เชิงกลศาสตร์ van Genuchten S_{res} และ S_{sat} จากผลการวิเคราะห์ทางไฟไนท์อิลลิเมนต์พบว่า การเปลี่ยนค่าตัวแปรความอิ่มตัว S_{res} และ S_{sat} ของดินด้านนอกพื้นที่เสริมกำลัง หรือเปลี่ยนค่าตัวแปรความอิ่มตัว S_{res} และ S_{sat} ของดินทั้งด้านในและด้านนอกพื้นที่เสริมกำลัง ก็ไม่ได้ส่งผลต่อการกระจายของปริมาณน้ำและระดับน้ำในดินทั้งภายในและภายนอกพื้นที่เสริมกำลัง

6. พารามิเตอร์เชิงกลศาสตร์ ค่าความซึมผ่านได้ k จากผลการวิเคราะห์ทางไฟไนท์อิลลิเมนต์พบว่า ค่าความซึมผ่านของดินในพื้นที่เสริมกำลังไม่มีส่งผลหรือส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อระดับน้ำในพื้นที่เสริมกำลัง เนื่องจากอัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของวัสดุสังเคราะห์ โครงตาข่ายกับค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของดินในพื้นที่เสริมกำลังไม่ส่งผลต่อระดับน้ำในพื้นที่เสริมกำลัง และอัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของวัสดุสังเคราะห์ โครงตาข่ายกับค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของดินด้านนอกพื้นที่เสริมกำลัง (ดินเดิม) ระดับน้ำในพื้นที่เสริมกำลังไม่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการระบายน้ำ และศึกษาอิทธิพลของคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ โดยการจำลองเชิงตัวเลขของกำแพงกันดินเสริมกำลัง ด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ โปรแกรม PLAXIS 2D เพื่อศึกษาพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของกำแพงกันดินที่มีการติดตั้งระบบระบายน้ำวัสดุสังเคราะห์ ผลการศึกษาสามารถเป็นแนวทางการออกแบบ ปรับใช้กับงานกำแพงกันดินเสริมกำลังจริงได้ และควรนำไปต่อยอดในการศึกษาอิทธิพลของคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ที่มีผลต่อพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของกำแพงกันดินเสริมกำลัง

รายการอ้างอิง

ศุภสิทธิ์ คนใหญ่, 2552 การพัฒนาวิธีการวัดค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำและมวลสารในดินเค็มที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ, วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

อาทิตย์ อุดมชัย, 2556 การทดสอบแบบจำลองทางกายภาพของกำแพงกันดินเสริมกำลังที่ใช้วัสดุใยสังเคราะห์เป็นระบบระบายน้ำภายใต้สภาวะการไหล, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

AASHTO (1996), **Standard Specifications for Highway and Bridge**, 1th edition. Washington, D.C., American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO (2002), **Standard Specifications for Highway and Bridge**, 7th edition. Washington, D.C., American Association of State Highway and Transportation Officials.

ACI (1989), **Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-83)**, American Concrete Institute, Detroit, MI.

Anderson, L.R., Sharp, K.K., and Harding, O.T. (1987), Performance of a 50-foot high welded wire wall, **Soil Improvement A Ten year Update, Geotech, Special Publication No. 12**, ASCE, pp. 280-308.

ASTM. (1995) **Annual Book of ASTM Standard**, Philadelphia

Bergado, D.T., Shivashankar, R., Alfaro, M.C., Chai, J.C., and Balasubramanim, A. (1993), "Interaction behavior of steel grid reinforcements in a clayey sand", **Geotechnique**, Vol.43, No.4, pp. 589-603.

Bergado, D.T., Anderson, L.R., Miura, N., and Balasubramniam, A.S. (1996). **Soft Ground Improment in Lowland and Other Environment**. ASCE Press, New York

Bergado, D.T., Shivashankar, R., Alfaro, M.C., Chai, J.C., and Balasubramanim, A. (2003), "The interaction mechanism and behavior of hexagonal wire mesh reinforced embankment with silty sand backfill on soft clay", **Computer and Geotechnics**, Vol.30, pp. 517-534.

Bruce, D. A., & Jewell, R. A. (1986). Soil nailing: application and practice-part 1. **Ground Engineering**, 19(8), 10-15.

- Bouazza, A., Zornberg, J., McCartney, J., Nahlawi, H., (2006a). Significance of unsaturated behavior of geotextiles in earthen structures. **Australian Geomechanics Journal**, Vol.41 (3), pp. 133-142.
- Bouazza, A., Freund, M., Nahlawi, H., (2006b). Water retention of nonwoven polyester geotextiles, **Polymer Testing**, Vol.25(8), 1038-1043.
- Boles, Joseph E. (1996). **Foundation Analysis and Design**, McGraw-Hill.
- Buckingham, E. 1907. Studies on the movement of soil moisture. Bulletin 38. **USDA Bureau of Soils**, Washington, DC.
- Chinkulkijniwat, A., Horpibulsuk, S., Bui Van, D., Udomchai, A., Goodary, R., & Arulrajah, A. (2016). Influential factors affecting drainage design considerations for mechanical stabilised earth walls using geocomposites. **Geosynthetics International**, 1-18.
- Christopher, B.R., Gill, B.S., Giroud, J.P., Juran, I., Schlosser, F., Mitchell, J.K., and Dunicliff, J. (1989), Reinforced soil structure, Vol. 1: Design and Construction Guidelines, **Report Prepared for US Federal Highway Administration**, 287p.
- Darcy, H. (1856), **Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon**, Dalmont, Paris.
- Elias, V., Christopher, B. R. and Berg, R. R. (2001), Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design and Construction Guidelines, FHWA-NHI-00-043, Washington, DC, 395 pages.
- Fishman, K.L., Desai, C.S. and Sogge, R.L (1993). Field Behavior of Instrument Geogrid Soil Reinforced Wall, **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, August, Vol.119, N0.8.
- Fredlund, D.G., and Rahardjo, H. (1993). **Soil mechanics for unsaturated soils**. New York: Wiley.
- Hani Nahlawi., Abdelmalek Bouazza., Jayantha Kodikara., (2007). Characterisation of geotextiles water retention using a modified capillary pressure cell. **Geotextiles and Geomembranes**, Vol.25, pp. 186-193.
- Ho, A.F., (2000). Experimental and numerical investigation of infiltration ponding in one-dimensional sand-geotextile columns. M.Sc. Thesis, Queen's University, Kingston, Ont., Canada.

- Horpibulsuk, S. and Niramitkornburee, A. (2010). Pullout resistance of bearing reinforcement embedded in sand. **Soils and Foundations**, Vol.50, No.2 (2010).
- Horpibulsuk, S., Suksiripattanapong, Ch., Niramitkornburee, A., Chinkulkijniwat, A., Tangsutthinon, T. (2011). Performance of an earth wall stabilized with bearing reinforcement. **Geotextiles and Geomembranes**, Vol.29, pp. 514-524.
- Iryo, T., Rowe, R.K., (2003). On the hydraulic behavior of unsaturated nonwoven geotextiles. **Geotextiles and Geomembranes**, Vol.21, pp. 381-404.
- Iryo, T., Rowe, R.K., (2004). Numerical study of infiltration into a soil-geotextile column. **Geosynthetics International**, Vol.11 (5), pp. 377-389.
- Knight, M.A., Kotha, S.M., (2001). Measurement of geotextile-water characteristic curves using a controlled outflow capillary pressure cell. **Geosynthetics International** Vol.8 (3), pp. 271-282.
- Koerner, R. M., and Bove, J. A., and Martin, J. P., “Water and Air Transmissivity of Geotextiles”, **Journal of Geotextile and Geomembranes**, vol. 1, 1984, pp. 57-73.
- Koerner, R.M., Soong, T-Y., (2000). “Design of drainage systems for segmental retaining walls” **Proceedings of the 18th ASCE/PennDOT Geotechnical Conference**. pp. 1-38
- Koerner, R. M. and Soong, T-Y., (2001). “Geosynthetics Reinforced Segmental Retaining Walls” **Geotextiles and Geomembranes**, Vol.19 (6), pp. 359–386.
- Koerner, R.M., (2005). *Designing with Geosynthetics*. 5th Edition, Prentice Hall Publ. Co., Englewood Cliffs, New Jersey, 796 pages.
- Lafleur, J., Lebeau, M., Faure, Y. Savard, Y., Kehila, Y., (2000). Influence of matric suction on the drainage performance of polyester geotextiles. **The 53rd annual conference of Canadian Geotechnical Society**, Montreal, Canada, Vol.2, pp. 1115-1122.
- Lawrence, C. A., and Koerner, R. M., “Flow behavior of Kinked Strip Drains”, **Proceedings Geosynthetics for Soil Improvement**, ASCE, 1988, pp. 22-39.
- Lee, K.L., Adams, B.D., Vagneron, J.J. (1973). Rienforce earth retaining walls, **Journal of soil Mechanical and foundation Division**, Vol.99, No.3, pp. 69-77.

- McGown, A., Andrawes, K.Z., Pradhan, S. and Khan, A.J. (1998). Limit state analysis of geosynthetics reinforced soil structures. **Proceedings of the 6th International Conference on Geosynthetics**. March, 25-19, 1998, Atlanta, GA, USA, pp. 143-179.
- Mitchell, J.K., and Villet, W.C.B. (1987), **Reinforcement of earth slopes and embankments**, National Cooperative Highway Research Program Report 290, Trans. Research Board, national Research Council, Washington, D.C.
- Morris, C.E., (2000). Unsaturated flow in non-woven geotextiles. **GeoEng 2000: an International conference on Geotechnical and Geological Engineering**, Melbourne, Australia, 19-24 Nov, 2000, Technomic, Lancaster, PA, USA, Vol.2, pp. 322.
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, Vol.12, pp. 513-522.
- Saito. M., Shibuya. S., Mitsui. J., and Hara. K., (2008). L-shaped geodrain in embankment - Model test and numerical simulation. **Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics**, Shanghai, China, pp. 428-433
- Scout, H.D. (2000). **Soil physics : agricultural and environmental applications**. Ames : Iowa State University Press.
- Scott Sillers. W., Delwyn G.Fredlund and Noshin Zakerzadeh., (2001). Mathematical attributes of some soil – water characteristic curve models. **Geotechnical and Geological Engineering**, Vol.19, pp. 243-283.
- Shibuya, S., Kawagushi, T., and Chae, J. (2007), “Failure of reinforced earth as attacked by typhoon no.23 in 2004”, **Soils and Foundations**, Vol.47, No.1, pp. 153-160.
- Shibuya, S., Saito, M., Torii, N., and Hara, K. (2009), “Mitigating embankment failure due to heavy rainfall using L-shaped geosynthetic drain (LGD)”, **Proceedings of Prediction and Simulation Methods for Geohazard Mitigation**, Kyoto, Japan, pp. 229-306.
- Shingo, I., Toshio, T., and Benno, P.W. (1988). **Soil water interactions mechanisms and applications**, ISBN 0-8247-7767-0.
- Stormont, J.C., Henry, K.S., Evans, T.M., (1997). Water retention functions of four nonwoven polypropylene geotextiles. **Geosynthetics International**, Vol.4 (6), pp. 661-672.

- Stormont, J.C., Morris, C.E., (2000). Characterization of unsaturated nonwoven geotextiles. In : Shackelford, C.D., Houston, S.L., Chang, N.Y. (Eds.), **Advances in unsaturated geotechnics**. ASCE, Reston, VA, USA, pp. 153-164
- Van Genuchten, M. Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, pp. 892-898.
- Yoo, C.A, Jung, H.Y (2006). Case study of geosynthetic reinforced segmental retaining wall failure. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, Vol.132 (12), pp. 1538-1150



ประวัติผู้เขียน

นางสาวไอริน ลีรัตน์ เกิดเมื่อวันที่ 2 เดือน เมษายน พ.ศ. 2535 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนมหาไถ่ศึกษาบ้านไผ่ อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น ในปีการศึกษา 2546 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนมารีย์วิทยา อำเภอมือทอง จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2552 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2556 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2557

