

การปรับปรุงกำลังรับแรงเฉือนของดินลูกรังด้วยพรรณพืช  
SHEAR STRENGTH IMPROVEMENT OF LATERITIC SOIL  
REINFORCED WITH VEGETATION



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SHEAR STRENGTH IMPROVEMENT OF LATERITIC SOIL  
REINFORCED WITH VEGETATION



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การปรับปรุงกำลังรับแรงเฉือนของดินลูกรังด้วยพรณพีช

นายกิตติภักดิ์ ตั้งควัฒนา รหัสนักศึกษา 59010127

นายณัฐภัทร วัฒนพานิช รหัสนักศึกษา 59010464

นายพรวิษฐ์ ปัจจันตวิวัฒน์ รหัสนักศึกษา 59010919

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.วิรุฬห์ คำชุม

ปีการศึกษา 2562

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองเพื่อศึกษาความแข็งแรงเชิงกลของดินลูกรังที่เสริมรากหญ้าแฝกกลุ่มพันธุ์สงขลา 3 ในห้องปฏิบัติการ ด้วยการปลูกหญ้าแฝกตัวอย่างลงในท่อพีวีซีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 9 เซนติเมตร ซึ่งใช้ความสูงท่อ 25 เซนติเมตร โดยที่ควบคุมให้หญ้าแฝกเจริญเติบโตอย่างอิสระ จากนั้นพิจารณาผลกระทบเนื่องจากอายุของการปลูกที่แตกต่างกันของหญ้าแฝกที่มีต่อดินลูกรังภายในท่อพีวีซี ด้วยการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงของดินที่เสริมรากหญ้าแฝก และที่ไม่ได้เสริมรากหญ้าแฝก โดยมีระยะเวลาในการปลูก 2 เดือน ที่น้ำหนักกดทับ 45.78 กิโลปาสคาล เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ ความเชื่อมั่น และความล้มเหลวของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝก และการหาค่ามวลของรากพืชต่อปริมาตรดิน (Root dry biomass per soil volume) ผลการทดสอบพบว่ารากต้นไม้สามารถเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของดินลูกรังได้และมีพฤติกรรมแบบเหนียว (Ductile) และผลการทดสอบยังพบอีกว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนรากหญ้าแฝกโดยปริมาตรกับกำลังรับแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นจากรากหญ้าแฝก เท่ากับ 30.83 kPa/%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# SHEAR STRENGTH IMPROVEMENT OF LATERITIC SOIL REINFORCED WITH VEGETATION

Kittipath Tangkawattana Student ID. 59010127

Nattapat Wattanapanich Student ID. 59010464

Parit Patjantawiwat Student ID. 59010919

Advisor Asst.Prof.Dr.Viroon Kamchoom

Academic Year 2019

## Abstract

This thesis is an experimental research to study the mechanical strength of lateritic soils reinforced with vetiver grass in laboratory by planting into a PVC pipe with a diameter of 9 centimeters and a height of 25 centimeters which controls the vetiver to grow freely. consider the effects due to the different planting periods of vetiver grass on lateritic soil in the PVC pipe by testing the direct shear strength of soil that with vetiver grass roots and without vetiver grass roots with a 2 month planting time at 45.78 kPa pressure weight to determine parameters, cohesion and friction angle of the soil supplemented with vetiver grass roots and determining the root dry biomass per soil volume. The results showed that roots can increase shear strength of lateritic soil and promote ductile behavior. The results also showed that the relationship between the ratio of vetiver grass roots by volume and shear strength of the soil that increased from vetiver grass roots is 30.83 kPa per percent

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ. ดร.วิรุฬห์ คำชุม ที่กรุณาให้คำแนะนำเพื่อปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง อีกทั้งสละเวลาเพื่อให้คำปรึกษา กับ คณะผู้จัดทำตลอดจนให้ความรู้ เอาใจใส่ ให้คำแนะนำช่วยเหลือในการแก้ปัญหา ให้ประสบการณ์ ที่ดี อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งกับงานวิจัยนี้ พวกเราผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ในหลายๆรายวิชาที่ศึกษาเพื่อเป็นพื้นฐาน อันเป็นประโยชน์ยิ่งในการทำ ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ให้สำเร็จลุล่วง ตลอดจนอาจารย์ประจำภาควิชาท่านต่างๆที่ให้คำแนะนำและกำลังใจอย่างดียิ่ง

ขอขอบคุณเพื่อนๆที่ คอยช่วยเหลือในการให้คำแนะนำในการทำโครงการรวมถึงการให้กำลังใจ และความรู้ตลอดระยะเวลา ที่ได้ศึกษาในภาควิชาวิศวกรรมโยธาที่ตลอดมา

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้ความรักและให้กำลังใจ ในการสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนของคณะผู้จัดทำมาโดยตลอด ทำให้คณะผู้จัดทำวันนี้ได้คณะ ผู้จัดทำ รู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างสูง

นายกิตติภฏ ตั้งควัฒนา  
นายณัฐภัทร วัฒนพานิช  
นายพิรัชต์ ปัจจันตวิวัฒน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญ (ต่อ).....	V-VI
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญรูป (ต่อ).....	VIII-IX
สารบัญตาราง.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	3
2.1 หญ้าแฝก.....	3
2.1.1 ถิ่นกำเนิดและการกระจาย.....	3
2.1.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์.....	4
2.1.3 ประเภทของหญ้าแฝกที่ค้นพบในประเทศไทย.....	9
2.1.4 การนำหญ้าแฝกมาใช้ประโยชน์ในระบบอนุรักษ์ดินและน้ำ.....	11
2.2 หลักของการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง.....	13
2.3 พื้นฐานของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ.....	13
2.4 แบบจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและราก.....	17
2.4.1 การยืดของราก (Stretching Roots).....	19
2.4.2 การเลื่อนไถลของราก (Slipping Roots).....	20
2.4.3 การฉีกขาดของราก (Breaking Roots).....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ IV อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	30
3.1 กรณีที่ใช้ศึกษา.....	30
3.1.1 รูปแบบของกรณีศึกษา.....	30
3.1.2 ขนาดของอุปกรณ์ทดสอบ.....	30
3.1.3 เรือนเพาะชำ.....	31
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	31
3.2.1 การเตรียมตัวอย่างหญ้าแฝก.....	31
3.2.2 การเตรียมตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบ.....	32
3.2.3 วิธีการปลูกหญ้าแฝกลงในท่อพีวีซี.....	33
3.3 การทดสอบคุณสมบัติของดินตัวอย่าง.....	34
3.3.1 การหาขนาดเม็ดดิน (Grain Size Analysis).....	34
3.3.2 การบดอัดดิน (Compaction).....	37
3.3.3 การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test).....	40
บทที่ 4 ผลการศึกษา.....	48
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของดินที่ใช้ในการศึกษา.....	48
4.1.1 ขนาดคละและชนิดของเม็ดดิน (Grain Size and Soil Classification).....	48
4.1.2 การบดอัดดินและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับความหนาแน่น (Compaction and Moisture-Density Relation).....	49
4.2 ผลการศึกษาปริมาณหญ้าแฝก.....	51
4.2.1 ผลการศึกษาอัตราส่วนรากหญ้าแฝกโดยปริมาตร (Bulk Root Ratio).....	51
4.3 ผลการทดสอบหากล้างรับแรงเฉือนของดินลูกรังในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ.....	55
4.3.1 ผลการทดสอบหากล้างรับแรงเฉือนโดยตรงของดินลูกรังที่ไม่เสริมกำลังด้วยราก.....	55
4.3.2 ผลการทดสอบหากล้างรับแรงเฉือนโดยตรงของดินลูกรังที่เสริมกำลังด้วยรากหญ้าแฝกที่อายุการปลูก 2 เดือน.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา.....	61
5.1 บทนำ.....	61
5.2 สรุปผลการทดลอง.....	61
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	62
บรรณานุกรม.....	64
ภาคผนวก ก.....	66
ภาคผนวก ข.....	84



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ลักษณะรากหญ้าแฝกซึ่งมีระบบรากฝอยและเป็นเสมือนกำแพงกันดิน ธรรมชาติ (สำนักงาน กปร. [2]).....	4
รูปที่ 2.2 ระบบรากของพีช (Wu [1]).....	5
รูปที่ 2.3 รูปแบบของราก (Wilde 1958 [3]).....	6
รูปที่ 2.4 ลักษณะลำต้นของหญ้าแฝก (กรมพัฒนาที่ดิน [4]).....	6
รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของใบหญ้าแฝก (กรมพัฒนาที่ดิน [4]).....	7
รูปที่ 2.6 ลักษณะช่อดอกของหญ้าแฝก (สำนักงาน กปร. [2]).....	7
รูปที่ 2.7 ลักษณะของดอกหญ้าแฝก (สำนักงาน กปร. [2]).....	8
รูปที่ 2.8 และ 2.9 ลักษณะของเมล็ดและต้นกล้าหญ้าแฝก (สำนักงาน กปร. [2]).....	9
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างกลุ่มพันธุ์หญ้าแฝกหอม (กรมพัฒนาที่ดิน [4]).....	10
รูปที่ 2.11 ตัวอย่างกลุ่มพันธุ์หญ้าแฝกดอน (กรมพัฒนาที่ดิน [4]).....	11
รูปที่ 2.12 ระบบที่ใช้พีชในการอนุรักษ์ดิน (ธนาคารโลก [5]).....	12
รูปที่ 2.13 แนวตัดขวางของร้วหญ้าแฝก (ธนาคารโลก [5]).....	12
รูปที่ 2.14 ตัวอย่างดินในคลองการเหือนโดยตรง (Bardet [6]).....	13
รูปที่ 2.15 รูปแสดงส่วนประกอบของดินไม่อุ้มน้ำด้วยน้ำ (Fredlund and Rahardjo (1993) [7]).....	14
รูปที่ 2.16 ผลการทดสอบซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ $\chi$ กับ ดัชนีความอุ้มน้ำด้วยน้ำ.....	16
รูปที่ 2.17 แบบจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและรากพีช (Wu [1]).....	18
รูปที่ 2.18 ค่าของ $(\sin\theta + \cos\theta \tan\phi)$ กับมุมการบิดตัวแบบเหือน (Wu [1]).....	22
รูปที่ 2.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงกับขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางของราก (ดิถี แห่งเชาวนิช [9]).....	23
รูปที่ 2.20 เปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดของรากที่มีผลต่อการเพิ่มกำลังต้านทาน แรงเหือนของดินที่ระดับความลึกต่างกัน (ดิถี แห่งเชาวนิช [9]).....	25
รูปที่ 2.21 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงเหือนของดิน Wu [1] และคณะ.....	26
รูปที่ 2.22 เครื่องทดสอบ fiber pullout tests ของ Chunling Li & Jorge G. Zornberg (2013) [12].....	28
รูปที่ 2.23 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงเหือนทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ VII อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.1 Saturated soil.....	30
รูปที่ 3.2 ท่อพีวีซีใส่ตัวอย่างดิน.....	30
รูปที่ 3.3 และ 3.4 เรือนเพาะชำ.....	31
รูปที่ 3.5 หย้าแฝกที่เพาะในดินปลูก.....	31
รูปที่ 3.6 การเตรียมตัวอย่างดินก่อนการบดอัด.....	32
รูปที่ 3.7 การบดอัดดินใส่ท่อพีวีซี.....	32
รูปที่ 3.8 อุปกรณ์ที่ใช้ในการบดอัด.....	32
รูปที่ 3.9 ตัวอย่างดินที่ทำการบดอัดเสร็จแล้ว.....	32
รูปที่ 3.10 ต้นกล้าหย้าแฝก ความยาวราก 10 เซนติเมตร.....	33
รูปที่ 3.11 การปลูกหย้าแฝกในกระบอกพีวีซี.....	33
รูปที่ 3.12 ตัวอย่างทดสอบที่ปลูกหย้าแฝก.....	34
รูปที่ 3.13 (a) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาขนาดเม็ดดิน ด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรง (Sieve Analysis).....	35
รูปที่ 3.13 (b) เครื่องเขย่าตัวอย่างดิน (Sieve Shaker).....	35
รูปที่ 3.14 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการบดอัดดิน.....	38
รูปที่ 3.15 รูปแคลิเบรตกราฟแคลิเบรต Proving Ring.....	41
รูปที่ 3.16 Direct shear test .....	42
รูปที่ 3.17 ก่อนตัวอย่างหลังการฉีกทดสอบ.....	46
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลขนาดผลของดิน.....	48
รูปที่ 4.2 แสดงผลขนาดผลของเม็ดดินตามมาตรฐาน มยผ.....	49
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง ( $g/cm^3$ ) กับ ปริมาณความชื้น (%).....	50
รูปที่ 4.4 น้ำหนักรากแห้งต่อปริมาตรดิน ที่ระดับความลึกต่างๆ ของตัวอย่างที่ 1.....	52
รูปที่ 4.5 น้ำหนักรากแห้งต่อปริมาตรดิน ที่ระดับความลึกต่างๆ ของตัวอย่างที่ 2.....	53
รูปที่ 4.6 น้ำหนักรากแห้งต่อปริมาตรดิน ที่ระดับความลึกต่างๆ ของตัวอย่างที่ 3.....	54
รูปที่ 4.7 กราฟหน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวราบ และกราฟการเคลื่อนที่ ในแนวตั้งกับการเคลื่อนที่ในแนวราบของดินที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วยราก.....	55

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress (kPa) – Normal Stress (kPa) ของดินลูกรังไม่เสริมกำลังด้วยราก.....	56
รูปที่ 4.9 กราฟหน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวราบ และกราฟการเคลื่อนที่ ในแนวตั้งกับการเคลื่อนที่ในแนวราบของดินที่เสริมกำลังด้วยรากหญ้าแฝก ของตัวอย่างที่ 1 (normal stress of 45.780 kPa).....	57
รูปที่ 4.10 กราฟหน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวราบ และกราฟการเคลื่อนที่ ในแนวตั้งกับการเคลื่อนที่ในแนวราบของดินที่เสริมกำลังด้วยรากหญ้าแฝก ของตัวอย่างที่ 2 (normal stress of 45.780 kPa).....	58
รูปที่ 4.11 กราฟหน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวราบ และกราฟการเคลื่อนที่ ในแนวตั้งกับการเคลื่อนที่ในแนวราบของดินที่เสริมกำลังด้วยรากหญ้าแฝก ของตัวอย่างที่ 2 (normal stress of 45.780 kPa).....	59
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนรากต่อปริมาตรกับกำลังรับแรงเฉือนที่ เพิ่มขึ้นจากราก.....	60
รูปที่ 5.1 กำลังต้านทานแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของทฤษฎีและการทดสอบในห้องปฏิบัติการ	62

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 กำลังรับแรงดึงของรากพืชชนิดต่างๆ (ดีลี แห่งเขาวนิช [9]).....	24
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง.....	33
ตารางที่ 3.2 น้ำหนักดินแห้งในการร่อนผ่านตะแกรง.....	36
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลขนาดคละและชนิดของเม็ดดิน.....	48
ตารางที่ 4.2 Density Determination.....	49
ตารางที่ 4.3 Water Content.....	50
ตารางที่ 4.4 น้ำหนักรากต่อปริมาตรและอัตราส่วนรากโดยปริมาตรของ ตัวอย่างทดสอบ.....	51
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบ Direct Shear Test.....	55
ตารางที่ 4.6 กำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของดินที่เสริมรากหญ้าแฝก.....	60
ตารางที่ ก-1 ดินเปล่า (แรงกดแนวตั้ง 15.26 kpa).....	67
ตารางที่ ก-2 ดินเปล่า (แรงกดแนวตั้ง 45.78 kpa).....	69
ตารางที่ ก-3 ดินเปล่า (แรงกดแนวตั้ง 76.30 kpa).....	72
ตารางที่ ก-4 หญ้าแฝก 2 เดือน ตัวอย่างที่ 1 (แรงกดแนวตั้ง 45.78 kpa).....	75
ตารางที่ ก-5 หญ้าแฝก 2 เดือน ตัวอย่างที่ 2 (แรงกดแนวตั้ง 45.78 kpa).....	78
ตารางที่ ก-6 หญ้าแฝก 2 เดือน ตัวอย่างที่ 3 (แรงกดแนวตั้ง 45.78 kpa).....	81
ตารางที่ ข-1 ตารางการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนของดินลูกรังเสริมกำลังด้วย รากหญ้าทางทฤษฎี.....	85

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย

ปัญหาที่ก่อให้เกิดสภาพความเสื่อมโทรมของทรัพยากรดินตามธรรมชาติส่วนใหญ่คือปัญหาในการพังทลายและการกัดเซาะจากฝนที่ตกลงมาและน้ำที่ไหลบ่าหน้าดินเป็นจำนวนมากทำให้สูญเสียหน้าดินที่สมบูรณ์ไป บางครั้งยังก่อให้เกิดความเสียหายต่อพื้นที่อยู่อาศัย พื้นที่ทำการเกษตรส่งผลให้ได้ผลผลิตทางการเกษตรลดลง นับเป็นปัญหาที่สำคัญซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินเป็นอย่างมาก

พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวรัชกาลที่ 9 ทรงตระหนักถึงปัญหาที่เกิดขึ้น จึงมีพระราชดำริให้ดำเนินการศึกษาทดลองเกี่ยวกับหญ้าแฝก ซึ่งเป็นพืชพื้นบ้านของไทยที่ช่วยป้องกันการชะล้างพังทลายของหน้าดินและอนุรักษ์ความชุ่มชื้นใต้ดินได้ และเป็นเทคโนโลยีที่สามารถดำเนินการได้เอง ค่าใช้จ่ายไม่สูงมาก จึงได้มีพระมหากษัตริย์คุณพระราชทานพระราชดำริต่างๆเกี่ยวกับหญ้าแฝกต่อเนื่องตลอดมา

หญ้าแฝกเป็นพืชที่มีระบบรากยาวแผ่กระจายลึกลงไปใต้ดินตรงๆ และสานต่อกันเสมือนกำแพงใต้ดินช่วยรักษาหน้าดินได้เป็นอย่างดี ทำให้หญ้าแฝกเป็นพืชที่เหมาะสมในการปลูกเพื่อยึดดินไว้เพื่อป้องกันการพังทลายของดิน ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้คณะผู้วิจัยจึงได้แนวทางในการวิจัยหญ้าแฝกในเชิงวิศวกรรม โดยการจำลองรูปแบบตามแนวทางของ Wu [1] ซึ่งศึกษาความแข็งแรงต่อการรับแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นจากดินที่มีรากต้นไม้อยู่ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนางานป้องกันลาดดินต่อไปในอนาคต

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบของรากหญ้าแฝกกลุ่ม กลุ่มพันธุ์สงขลา 3 ต่อกำลังรับแรงเฉือนของดินลูกรัง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนรากหญ้าแฝกโดยปริมาตร (Bulk Root Ratio) กับกำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้น
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการทำนายค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินลูกรังที่เสริมรากหญ้าแฝก

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ตรวจสอบคุณสมบัติเบื้องต้นทางวิศวกรรมของดินที่ใช้ปลูก มีรายละเอียดดังนี้
- 1.3.1.1 การหาพิกัดของอัตราเบอร์ก ตามมาตรฐาน ASTM D4318 และ ASTM D427
  - 1.3.1.2 การหาขนาดคละเม็ดดิน ตามมาตรฐาน ASTM D422
  - 1.3.1.3 การทดสอบการบดอัดดิน ตามมาตรฐาน ASTM D698-91
- 1.3.2 ใช้พันธุ์หญ้าแฝก ชนิดแฝกกลุ่ม กลุ่มพันธุ์สงขลา 3 จากต้นกล้าที่มีอายุ 2 เดือน มีความยาวลำต้น 20 เซนติเมตร และความยาวราก 10 เซนติเมตร
- 1.3.3 ปลูกหญ้าแฝกในเรือนเพาะชำ โดยปลูกในกระบอกตัวอย่างที่ทำจากท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร ความยาว 25 เซนติเมตร
- 1.3.4 ศึกษาการเจริญเติบโตของรากหญ้าแฝกที่อายุการปลูก 2 เดือน
- 1.3.5 การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง ในห้องปฏิบัติการ ตามมาตรฐาน ASTM D3080

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 กำหนดหัวข้อของโครงการที่สนใจจะศึกษา
- 1.4.2 กำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตของการทำโครงการ
- 1.4.3 ค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.4 เปรียบเทียบเครื่องมือ และเตรียมวัสดุ อุปกรณ์ต่างๆที่จำเป็นต่อการวิจัย
- 1.4.5 ทดสอบหาแรงเฉือนของดินที่เสริมรากและไม่ได้เสริมราก
- 1.4.6 ประมวลผลจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ
- 1.4.7 สรุปผลการวิจัย

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถนำงานวิจัยดังกล่าวไปใช้ได้จริงในชีวิตจริง เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของลาดดิน
- 1.5.2 เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมและคุณสมบัติของระบบเสริมแรงด้วยราก
- 1.5.3 เพื่อทราบกำลังรับแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากและไม่ได้เสริมด้วยราก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### วรรณกรรมปริทัศน์

ในการวิจัยเรื่อง การประเมินผลกระทบจากการเจริญเติบโตของรากต่อสมบัติทางกลของดิน ผู้วิจัยได้ศึกษา ทฤษฎีและเอกสารต่างๆ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. หญ้าแฝก
2. หลักการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct shear)
3. พื้นฐานของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ
4. แบบจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและราก
5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 หญ้าแฝก

##### 2.1.1 ถิ่นกำเนิดและการกระจาย (Origin and distribution)

หญ้าแฝก (Vetiver grass) เป็นพืชตระกูลหญ้าชนิดหนึ่งเช่นเดียวกับ ข้าวโพด ข้าวฟ่าง อ้อย และ ตะไคร้ พบกระจายทั่วไปได้ในพื้นที่ที่มีการใช้ประโยชน์และรู้จักกันดีโดยเฉพาะหญ้าแฝกหอมหรือแฝกลุ่ม แฝกส้ม หรือแฝกทองขาวนั้นมีการนำไปปลูกและใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลาย สันนิษฐานว่าแหล่งเดิม อยู่บริเวณตอนกลางและตอนใต้ของประเทศอินเดีย และได้แพร่กระจายลงมาครอบคลุมตลอดภูมิภาค เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ต่อมาได้มีการนำไปปลูกในหลายเขตของโลกโดยเฉพาะประเทศในแถบบริเวณเส้น ศูนย์สูตรของทวีปเอเชีย หมู่เกาะในมหาสมุทรอินเดียและแปซิฟิก ทวีปแอฟริกา ออสเตรเลีย อเมริกากลาง อเมริกาใต้และตอนใต้ของทวีปอเมริกาเหนือ

ในประเทศอินเดีย ได้มีการบันทึกถึงการใช้หญ้าแฝกหอมมาแต่โบราณ โดยเฉพาะการนำไปใช้ใน พิธีกรรมต่างๆและการนำรากไปใช้เป็นเครื่องหอม แต่เดิมหญ้าแฝกได้รับการปลูกในลักษณะเป็นพืช พื้นบ้านของชาวบ้านในประเทศอินเดียและได้มีการคัดเลือกและปรับปรุงพันธุ์สืบต่อกันมาจนเป็นที่รู้จัก อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน การใช้ประโยชน์ในด้านการอนุรักษ์ดินและน้ำได้เริ่มทวีความสำคัญขึ้น ในระยะ หลังแต่ไม่เป็นที่แพร่หลายเท่าที่ควร เพราะประโยชน์ในด้านนี้เป็นไปอย่างช้าๆจึงยังไม่เป็นที่ยอมรับของ ประชาชนในท้องถิ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

### 2.1.2.1 ราก (Roots)

หญ้าแฝก มีระบบรากที่มีขนาดใหญ่และมีความพิเศษต่างจากรากของหญ้าทั่วไป จึงถูกนำมาใช้ ในการป้องกันหน้าดินได้อย่างดีกล่าวคือ ระบบรากของหญ้าทั่วไป เป็นลักษณะระบบรากฝอย (fibrous roots) แตกออกจากส่วนลำต้นใต้ดินกระจายออกแผ่กว้างเพื่อยึดพื้นดินตามแนวนอน (horizontal) ส่วน ระบบรากในที่ เจริญในแนวตั้ง (vertical) นั้นไม่ลึกมาก ขณะที่ระบบรากหญ้าแฝก เป็นระบบรากฝอย มี 2 ขนาด คือ เส้นโตและเส้นเล็กฝอยขนาดเล็ก เส้นโตจะเหนียวและแข็งแรงลงไปดินได้ลึก เส้นขนาดเล็ก จะแตกแขนงออกมาจากเส้นใหญ่สานกัน คล้ายร่างแหช่วยยึดเกาะดินได้มั่นคง

เป็นส่วนสำคัญและเป็นลักษณะพิเศษของหญ้าแฝกที่นำ มาไปใช้ประโยชน์เป็นหลักรากของหญ้า ส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นรากฝอย (Fibrous roots) แตกจากส่วนลำ ต้นใต้ดินกระจายออกแผ่กว้างเพื่อยึด พื้นดินตามแนวนอน และระบบรากในแนวตั้งไม่ลึกมาก แต่ระบบรากของหญ้าแฝกจะแตกต่างจากรากหญ้า ส่วนใหญ่ทั่วไป คือมีรากที่สานกันแน่นยังลึกแนวตั้งลงใต้ดินมีรากแกน รากแขนง โดยเฉพาะมีรากฝอย มาก ดังแสดงในรูปที่ 2.1

เมื่อหญ้าแฝกมีอายุประมาณ 18 เดือน รากจะเจริญเติบโตเต็มที่ แกนรากที่ส่วนโคนกอกจะมีเส้น ผ่านศูนย์กลางโตประมาณ 2 - 3 มิลลิเมตร ผนังด้านนอกจะแข็งตัว มีลักษณะอวบคล้ายนม เมื่อรากแก่ มากก็จะตายไป และถูกแทนที่ด้วยเซลล์ผิวถัดไป จะทำหน้าที่เพิ่มความหนาความแข็งแรงดูดซึมน้ำและ ความชื้นโดยเฉพาะป้องกันส่วนลำเลียงและอาหารที่อยู่ภายใน



รูปที่ 2.1 ลักษณะรากหญ้าแฝกซึ่งมีระบบรากฝอยและเป็นเสมือนกำแพงกันดินธรรมชาติ

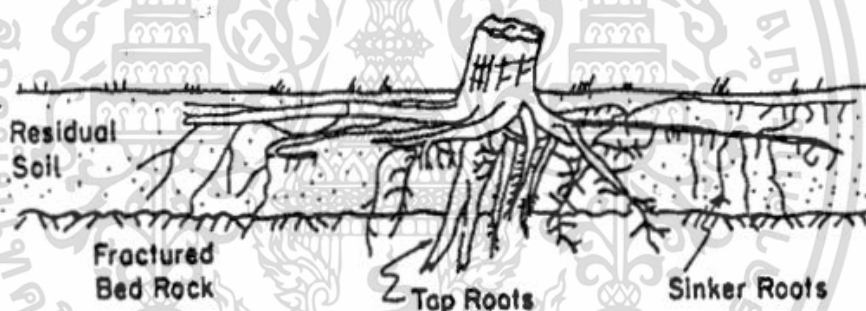
(สำนักงาน กปร. [2])

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อตัดรากตามขวางและศึกษาดูภายใต้กล้องจุลทรรศน์จะเห็นลักษณะการเรียงตัวของเนื้อเยื่อราก ด้านนอกประกอบไปด้วยเซลล์ผิว (Outer Epidermis) อยู่ชั้นนอกสุด ใต้เซลล์ชั้นผิวจะเป็นเซลล์ที่มีผนังหนาสะสมตามมุม (Sclerenchyma) เรียงตัวอยู่เป็นชั้นๆ ที่มีลิกนิน (lignin) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงและความยืดหยุ่นแก่ราก อยู่ร่วมกับเซลลูโลส (cellulose) และ เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) เป็นส่วนประกอบของเปลือก หรือส่วนที่เป็นเยื่อใยของราก ชั้นถัดไปจะเป็นกลุ่มเซลล์ผนังบางที่เชื่อมต่อกันแบบหลวมๆ ทำหน้าที่กักเก็บน้ำ ในชั้นนี้จะมีช่องว่างขนาดใหญ่อยู่มากมายจะช่วยรากกักเก็บน้ำ

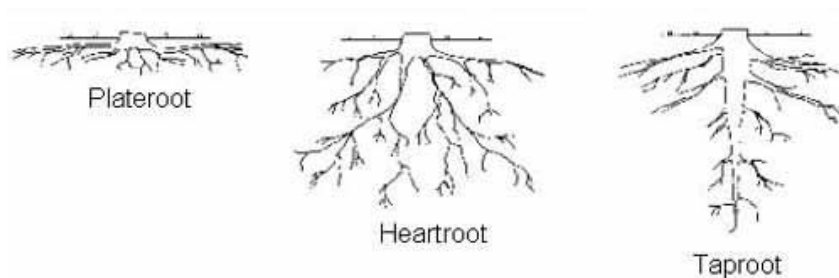
### ลักษณะของรากพืช

รากพืชจะช่วยเพิ่มเสถียรภาพต่อลาดดินโดยเสริมความแข็งแรงแก่ดิน ความสำคัญของระบบรากนั้นขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของตัวราก ปฏิสัมพันธ์ระหว่างรากกับดิน ลักษณะการกระจายตัวของรากในดิน และสภาพของดิน รูปที่ 2.2 แสดงส่วนต่างๆของระบบรากพืช



รูปที่ 2.2 ระบบรากของพืช (Wu [1])

รากพืชส่วนใหญ่สามารถแบ่งลักษณะรูปแบบพื้นฐานได้ 3 แบบ คือ แบบเป็นแผ่น (Plate root) แบบทรงหัวใจ (Heart root) และแบบรากแก้ว (Tap root) ลักษณะของรากนั้นถูกควบคุมโดยพันธุกรรม และสภาพแวดล้อม โดยทั่วไปรากจะหยั่งลึกลงดินช่วยเพิ่มเสถียรภาพของลาดดินได้ ซึ่งหากพืชมีระบบรากฝอยหนาแน่นมากจะช่วยเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือนได้สูงกว่าระบบรากที่มีเพียงรากขนาดใหญ่อยู่เพียงเล็กน้อย



รูปที่ 2.3 รูปแบบของราก (Wilde 1958 [3])

#### 2.1.2.2 ลำต้น (Culm)

หญ้าแฝกเป็นหญ้าที่ขึ้นเป็นกอ มีลักษณะเป็นพุ่มใบยาวตั้งตรง ขึ้นสูง มักพบขึ้นอยู่เป็นกลุ่มใหญ่หรือกระจายกันอยู่ไม่ไกลมาก กอแฝกจะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ โคนกอเบียดกันแน่น ส่วนโคนของลำต้นจะแบนซึ่งเกิดจากส่วนของโคนใบที่จัดเรียงทับซ้อนกัน ลำต้นแท้จะมีขนาดเล็กซ่อนอยู่ในกอใบบริเวณคอติดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะลำต้นของหญ้าแฝก (กรมพัฒนาที่ดิน [4])

#### 2.1.2.3 ใบ (Leaf)

ใบของหญ้าแฝกจะแตกต่างจากโคนกอ มีลักษณะแคบยาว ขอบขนานปลายสอบแหลมแผ่นใบกว้างคายโดยเฉพาะใบแก่ขอบใบและเส้นกลางใบมีหนามละเอียด (Spinulose) หนามบนใบส่วนที่เป็นโคนกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นใบจะมีน้อย แต่จะมีมากที่บริเวณปลายใบมีลักษณะตั้งทแยงปลายแหลมชี้ไปทางปลายใบ ด้านหลังใบเป็นด้านที่มีสีเขียวเข้ม ส่วนด้านท้องใบจะมีสีจางกว่าด้านหลังใบ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของใบหญ้าแฝก (กรมพัฒนาที่ดิน [4])

#### 2.1.2.4 ช่อดอก (Inflorescence)

ช่อดอกหญ้าแฝกมีช่อดอกตั้งมีลักษณะเป็นรวงก้านช่อดอก(Main axis) กลมยาวประมาณ 100 ถึง 150 เซนติเมตร แต่ในต้นที่สมบูรณ์จะสูงจากพื้นดินเกินกว่า 200 เซนติเมตร เฉพาะส่วนช่อดอกหรือรวงสูงประมาณ 20 ถึง 30 เซนติเมตร แฉกกว้างเต็มที่ 10 ถึง 15 เซนติเมตร ช่อของหญ้าแฝกหอมส่วนใหญ่มีสีม่วง ซึ่งเป็นลักษณะปกติประจำ แต่ละชนิดพันธุ์ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะช่อดอกของหญ้าแฝก (สำนักงานกปร. [2])

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2.5 ดอกหญ้าแฝก (Spikelet vetiver grass)

หญ้าแฝกจะมีดอกเรียงตัวกันเป็นคู่ๆมีลักษณะคล้ายคลึงกันและขนาดใกล้เคียงกัน แต่ละคู่ประกอบด้วยดอกชนิดที่ไม่มีก้าน (Sessile spikelet) และดอกชนิดมีก้าน (Pedicel spikelet) ยกเว้นที่ส่วนปลายของก้านช่อย่อยมักจัดเรียงเป็น 3 ดอกอยู่ด้วยกัน ดอกที่ไม่มีก้านจะอยู่ด้านกลางส่วนดอกที่มีก้านจะชวยอยู่ด้านบนดอกที่ไม่มีก้านที่สมบูรณ์จะมีทั้งเกสรตัวผู้และเกสรตัวเมียอยู่ด้วยกัน (Hermaphrodite spikelet) ส่วนดอกมีก้านจะเป็นดอกตัวผู้ (Male spikelet) มีแต่เกสรตัวผู้อยู่ภายใน ในแต่ละดอกจะประกอบไปด้วยดอกย่อย (Floret) อีก 2 ดอก แต่ส่วนมากจะมีการลดรูปหรือไม่สมบูรณ์ โดยจะเหลือดอกย่อยเพียงดอกเดียวกับดอกเปล่าๆที่มีกาบคลุม

ดอกหญ้าแฝกที่มีลักษณะคล้ายกระสวย ขอบขนานรูปไข่ปลายสอบขนาดของดอกกว้าง 1.5 ถึง 2.5 มิลลิเมตร ยาว 2.5 ถึง 3.5 มิลลิเมตร ผิวบนด้านหลังขรุขระมีหนามแหลมขนาดเล็ก (Spinulose) โดยเฉพาะที่บริเวณขอบเห็นได้ชัดเจน เมื่อส่องดูด้วยแว่นขยายด้านล่างผิวเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



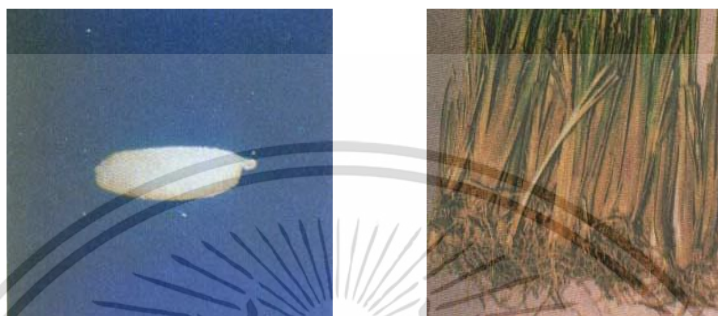
รูปที่ 2.7 ลักษณะของดอกหญ้าแฝก (สำนักงาน กปร. [2])

### 2.1.2.6 เมล็ดและต้นกล้าของหญ้าแฝก (Seed and seeding vetiver grass)

เมื่อดอกหญ้าแฝกได้รับการผสมแล้ว ดอกที่ไม่มีก้านถือเป็นดอกที่สมบูรณ์ก็จะติดเมล็ด เมล็ดจะมีสีน้ำตาลอ่อน เป็นรูปกระสวยผิวเรียบหัวท้ายมนขนาดโตกว้าง 1 ถึง 1.5 มิลลิเมตรยาว 2.5 ถึง 3 มิลลิเมตร เมล็ดมีผนังบางเนื้ออ่อนแบบเมล็ดสาคุ ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งมีส่วนประกอบของแป้งและน้ำมันอยู่มาก เมล็ดหญ้าแฝกมีความสามารถในการงอก (Vitality) อยู่ในช่วงระยะเวลาจำกัด เพียงช่วงสั้นๆเมื่อดอกหญ้าได้รับการผสมแล้วรังไข่จะพัฒนาไปเป็นเมล็ด ในช่วงระยะเวลาที่เมล็ดมีการพัฒนาใกล้เต็มที่แล้วจะสังเกตได้จากการห่อตัวของรวงที่มีการรัดตัวเป็นก้อนเป็นรูปกระสวย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้นกล้าของหญ้าแฝกจะมีการเจริญเติบโตโดยเริ่มจากมีรากแรก (Radicle) แทงออกมาจากเมล็ด จากนั้นใบเลี้ยง (Cotyledon) ก็จะค่อยแทงออกมาในทางตรงกันข้ามกับรากต้นอ่อนและจะยึดตัวอย่างรวดเร็วตั้งตัวสูงได้ประมาณ 2 เซนติเมตร ภายใน 3 วัน และจะเริ่มมีใบแท้สีเขียวและมีหนามบนขอบใบปรากฏให้เห็นชัดเจนในช่วงสัปดาห์แรกซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 และ 2.9 ลักษณะของเมล็ดและต้นกล้าหญ้าแฝก (สำนักงาน กปร. [2])

### 2.1.3 ประเภทของหญ้าแฝกที่ค้นพบในประเทศไทย

หญ้าแฝกที่พบในประเทศไทยจำแนกออกได้เป็น 2 ชนิดด้วยกันได้แก่ หญ้าแฝกหอม (*Vetiveria Zizanioides*) และหญ้าแฝกดอน (*Vetiveria Nemoralis*)

#### 2.1.3.1 หญ้าแฝกหอมหรือแฝกลุ่ม (*Vetiveria Zizanioides* Nash)

หญ้าแฝกหอมหรือแฝกลุ่ม มีถิ่นกำเนิดบริเวณตอนกลางของทวีปเอเชีย สันนิษฐานว่าอยู่ในประเทศอินเดีย หญ้าแฝกหอมมีเป็นพืชที่มีความสามารถในการปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมได้ดีและค่อนข้างรวดเร็ว

หญ้าแฝกหอมหรือแฝกลุ่ม กระจายขึ้นอยู่ในสภาพแวดล้อมต่างๆ มีการปรับตัวเองให้เหมาะสมที่จะขึ้นอยู่กับพื้นที่นั้นๆ ให้ช่อดอกหลายช่อ และเกิดการผสมข้ามต้นทุกปี การผสมข้ามต้นก็ทำให้พืชมีความแข็งแรงมากขึ้นในลักษณะต่าง ๆ โดยเฉพาะในด้านพันธุกรรม ทนทานต่อเชื้อโรคและปัจจัยวิกฤติของภูมิอากาศในท้องถิ่นนั้นๆ แต่ในขณะเดียวกันก็ทำให้เกิดการกลายพันธุ์ได้ โดยเฉพาะสายพันธุ์ที่ปลูกเพื่อใช้รากสกัดน้ำมันหอมระเหย จะทำให้สารหอมระเหยในรากมีปริมาณลดลงหรือมีปริมาณไม่คงที่

หญ้าแฝกหอมหรือแฝกลุ่ม มีใบยาว 45 ถึง 90 เซนติเมตร กว้าง 0.6 ถึง 0.9 เซนติเมตร หลังใบโค้งปลายใบแบนมีสีเขียวเข้ม เนื้อใบค่อนข้างเนียน มีไขเคลือบ (Wax) มากทำให้ดูมัน ท้องใบจะออกสีขาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชี้ดีกว่าด้านหลังใบและเมื่อนำใบส่องดูกับแดดจะเห็นรอยกันขวางในเนื้อใบ (Septum) ค่อนข้างชัดเจน โดยเฉพาะพื้นใบบริเวณส่วนโคนและกลางใบ เส้นกลางใบ (Midrib) ฝังอยู่ในตัวแผ่นไมโทหรือโดดเด่นชัดเจน เนื้อใบค่อนข้างเนียนมีไขเคลือบมากทำให้ดูนุ่มมัน ซ่อดอกสูงประมาณ 150 ถึง 250 เซนติเมตร ส่วนใหญ่มีสีอมม่วง เมล็ดของหญ้าแฝกหอมมีขนาดโตกว่าหญ้าแฝกดอนเล็กน้อย สีไม่แตกต่างกัน รากแฝกหอมจะมีความหอมเย็น มีน้ำมันหอมระเหยอยู่เฉลี่ยร้อยละ 1.4 ถึง 1.6 ของน้ำหนักแห้งโดยทั่วไปรากจะแห้งลึกได้ประมาณ 100 ถึง 130 เซนติเมตร ตัวอย่างกลุ่มพันธุ์หญ้าแฝกหอม ดังแสดงในรูปที่ 2.10 หญ้าแฝกหอมยังสามารถนำรากมาใช้ทำน้ำมันหอม สบู่ เครื่องประดับ เช่น กระจเป่า พัด ไม้แขวนเสื้อ และเป็นยากันแมลงในเสื้อผ้า

กลุ่มพันธุ์หญ้าแฝกหอม มี 5 สายพันธุ์ คือ กลุ่มพันธุ์ศรีลังกา (V4) กลุ่มพันธุ์กำแพงเพชร 2 (V9) กลุ่มพันธุ์สุราษฎร์ธานี (V23) กลุ่มพันธุ์สงขลา 3 (V28) และ กลุ่มพันธุ์พระราชทาน หรือหญ้าแฝกหอมพันธุ์อินเดีย (DLD EXT.09)



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างกลุ่มพันธุ์หญ้าแฝกหอม (กรมพัฒนาที่ดิน [4])

#### 2.1.3.2 หญ้าแฝกดอน (*Vertiveria Nemoralis* A. Camus)

หญ้าแฝกดอนหรือที่เรียกว่าหญ้าแฝกบ้านนั้น มีการกระจายพันธุ์อยู่ในวงแคบๆ ตามธรรมชาติเฉพาะในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ คือ ประเทศไทย ลาว เขมร เวียดนาม และมาเลเซียเท่านั้น ไม่พบบันทึกหลักฐานว่านำไปใช้ประโยชน์ทางใด พบได้ทั่วไปในที่ค่อนข้างแห้งแล้งหรือดินที่ระบายน้ำได้ดี โดยเฉพาะในป่าเต็งรัง แต่จะมีน้อยในภาคใต้ของประเทศไทย ขึ้นได้ดีในที่แดดจัดและแดดปานกลาง ยอดกอส่วนปลายจะแผ่โค้งลงคล้ายกอดตะไคร้ไม่ตั้งมากเหมือนหญ้าแฝกหอม ในบางพื้นที่พบว่าขึ้นอยู่หนาแน่นในลักษณะเป็นพืชร่มพื้นล่างคลุมดินเป็นบริเวณกว้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หญ้าแฝกตอนมีใบยาว 35 ถึง 60 เซนติเมตร กว้าง 0.4 ถึง 0.6 เซนติเมตร ใบสีเขียวซีด หลังใบพับเป็นสันสามเหลี่ยม เนื้อใบหยาบสาก มีไขเคลือบน้อย ทำให้ดูก้านไม่เหลือบมัน ท้องใบสีเขียวกับด้านหลังใบ แต่มีสีซีดกว่า แผ่นใบเมื่อส่องกับแดดไม่เห็นรอยกั้นในเนื้อใบ ข้อดอกสูง 100 ถึง 150 เซนติเมตร มีได้หลายสีตั้งแต่สีขาวครีมม่วง ดอกมีระยางค์แข็ง เมล็ดของหญ้าแฝกตอนจะมีขนาดเล็กกว่า เมล็ดของหญ้าแฝกหอม รากของหญ้าแฝกตอนจะไม่มีกลิ่นหอมและรากจะมีขนาดสั้นกว่าหญ้าแฝกหอม โดยทั่วไปจะหยั่งลึกประมาณ 80 ถึง 100 เซนติเมตร

กลุ่มพันธุ์หญ้าแฝกตอนมี 6 กลุ่มพันธุ์ คือ กลุ่มพันธุ์เลย (V6) กลุ่มพันธุ์นครสวรรค์ (V7) กลุ่มพันธุ์กำแพงเพชร 1 (V8) กลุ่มพันธุ์ร้อยเอ็ด (V13) กลุ่มพันธุ์ราชบุรี (V20) และ กลุ่มพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ (V22)

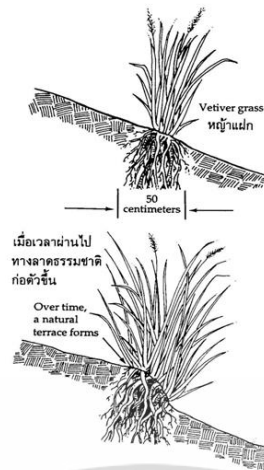


รูปที่ 2.11 ตัวอย่างกลุ่มพันธุ์หญ้าแฝกตอน (กรมพัฒนาที่ดิน [4])

#### 2.1.4 การนำหญ้าแฝกมาใช้ประโยชน์ในระบบอนุรักษ์ดินและน้ำ

สภาพความเสื่อมโทรมของดินส่วนมากเกิดจากการสูญเสียหน้าดินซึ่งก่อให้เกิดปัญหาดินพังทลาย และสร้างความเสียหายต่อพื้นที่เกษตรกรรมและพื้นที่ทั่วไป ส่งผลให้พื้นที่เกษตรกรรมได้ผลผลิตลดลง จึงมีการนำหญ้าแฝกซึ่งเป็นพืชที่ช่วยป้องกันการพังทลายของหน้าดินและอนุรักษ์ความชุ่มชื้นในดินได้ มาใช้ในการอนุรักษ์ดินและน้ำ ได้มีการนำหญ้าแฝกมาปลูกในสภาพพื้นที่ลาดชัน ทำให้สภาพพื้นที่นั้นปรับสภาพเป็นพื้นที่ขั้นบันไดดิน (Bench terraced) เนื่องจากหญ้าแฝกสามารถแตกกอได้ โดยจะแตกหน่อบริเวณข้อต่อของลำต้น เมื่อตะกอนมาทับถมบริเวณหญ้าแฝก หญ้าแฝกจึงแตกกอใหม่อยู่ระดับผิวดิน อีกทั้งหญ้าแฝกเป็นพืชที่ไวต่อแสงจึงสามารถเจริญเติบโตได้ตลอดและรากฝอยหยั่งลึกลงตามความลึกของดิน รากจึงยึดติดกับดินได้ ทำให้เกิดความมั่นคงแข็งแรง สรุปได้ว่าหญ้าแฝกเป็นตัวทำให้เกิดการสร้างขั้นบันไดดิน โดยจะสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกว่าความลาดชันถูกปรับให้อยู่ในแนวระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



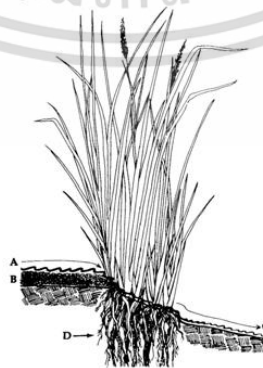
รูปที่ 2.12 ระบบที่ใช้พืชในการอนุรักษ์ดิน (ธนาคารโลก [5])

หญ้านวลมีคุณสมบัติในการอนุรักษ์ดินและน้ำ ดังนี้

ก. หญ้านวลมีการแตกกอตั้งตรงแข็งจำนวนมากและเบียดเสียดอย่างหนาแน่น จึงสามารถปลูกติดต่อกันให้เป็นแถวกระดานเรียงหนึ่งได้ง่าย เหมือนกำแพงด้านทานตะกอนดินที่ถูกน้ำกัดเซาะและพัดพามาที่บถมด้านหน้าแนวหญ้านวล และช่วยลดความเร็วของกระแสน้ำที่ไหลซึมลงไปในดิน

ข. ต้นและใบของหญ้านวลใช้เป็นวัสดุคลุมดินเพื่อรักษาความชุ่มชื้นในดินและเมื่อย่อยสลายแล้ว จะเพิ่มแร่ธาตุอาหารพืชให้กับดินได้เช่นเดียวกับปุ๋ยหมัก

ค. เมื่อปลูกหญ้านวลติดต่อกัน รากจะเจริญเติบโตหยั่งลึกลงไปในดินและแตกแขนงเป็นรากฝอยประสานกันเหมือนตาข่ายที่ยึดเกาะกันจนแข็งแรง ช่วยชะลอการไหลซึมของน้ำในดิน ทำให้รักษาความชุ่มชื้นในดิน และป้องกันการกัดเซาะของน้ำ



รูปที่ 2.13 แนวตัดขวางของร้วหญ้านวล (ธนาคารโลก [5])

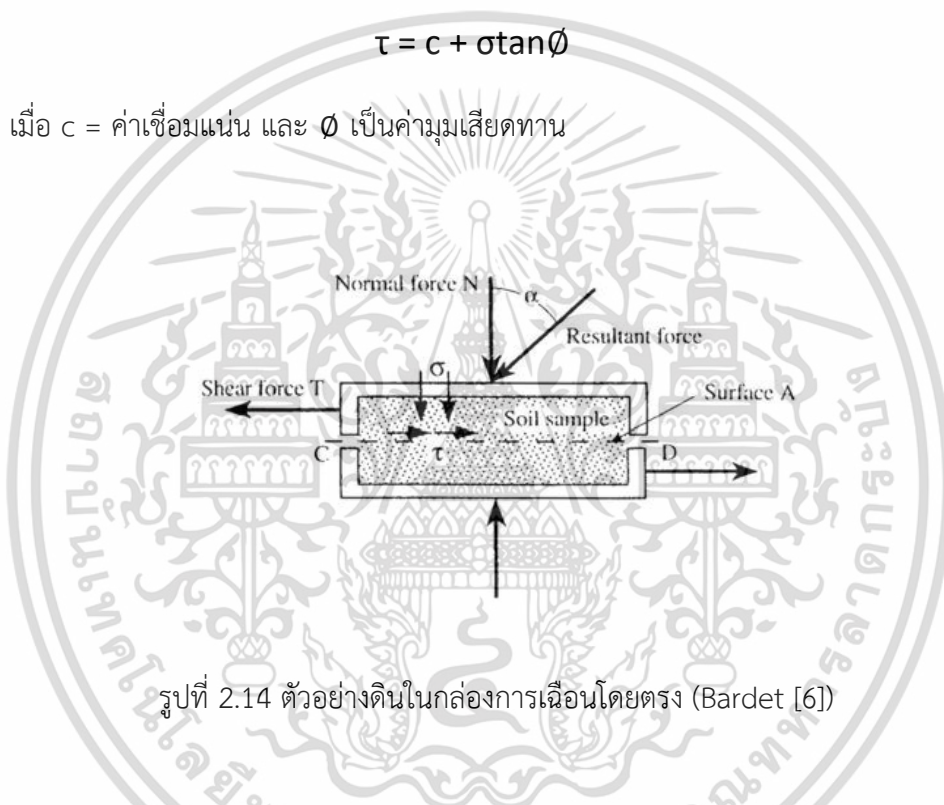
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 หลักของการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง

การทดสอบการเฉือนโดยตรงถูกนำมาใช้เพื่อที่จะหาค่าแรงเฉือนของดินบนพื้นที่ผิวที่พิบัติ หลักการของการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงถูกแสดงในรูปที่ 2.14 ตัวอย่างดินถูกจำกัดให้อยู่ภายในกล่องที่มีความแข็งแรงซึ่งแบ่งออกเป็นส่วนบนและส่วนล่างถูกกระทำ ด้วยน้ำหนักตั้งฉาก  $N$  และถูกเฉือนโดยแรงเฉือน  $T$  ถ้า  $A$  เป็นพื้นที่ของพื้นที่ผิว  $CD$  ความเค้นเฉือนที่กระทำ บนผิว  $CD$  จะเท่ากับ  $T/A$  และความเค้นตั้งฉากจะมีค่าเท่ากับ  $N/A$  ความแข็งแรงเฉือนของดินคือความเค้นเฉือน  $\tau$  ซึ่งเป็นสาเหตุให้ดินเกิดการเลื่อนบนพื้นที่ผิว  $CD$  ซึ่งสามารถนิยามได้โดยทฤษฎีของ มอร์ – คูลอมบ์

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

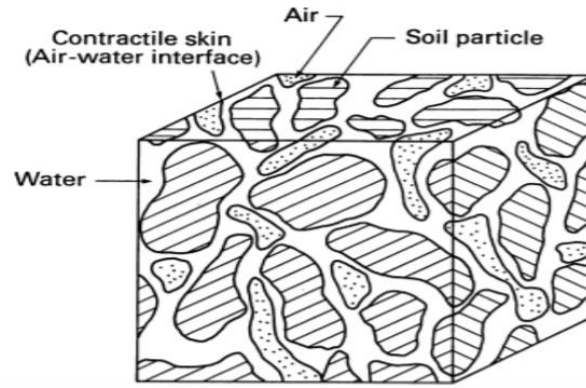
เมื่อ  $c$  = ค่าเชื่อมแน่น และ  $\phi$  เป็นค่ามุมเสียดทาน



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างดินในกล่องการเฉือนโดยตรง (Bardet [6])

## 2.3 พื้นฐานของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

โดยทั่วไปในหนึ่งหน่วยปริมาตร ดินจะประกอบด้วยสองส่วน ได้แก่ อนุภาคของตัวเม็ดดินเอง และช่องว่างภายในดิน ในกรณีที่ช่องว่างของดินเต็มไปด้วยน้ำ เรียกดินนี้ว่าดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated Soil) กรณีในช่องว่างของดินมีความชื้นบางส่วน และในช่องว่างนั้นมีส่วนที่เป็นอากาศอยู่ด้วย จะเรียก ดินส่วนนี้ว่าดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ



รูปที่ 2.15 รูปแสดงส่วนประกอบของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Fredlund and Rahardjo (1993) [7])

### ประเภทและนิยามของแรงดูด

#### 1. แรงดูดเมทริกซ์

แรงดูดเมทริกซ์ (Matrix Suction) คือ ค่าที่แสดงถึงพลังงานที่ใช้ในการดึงน้ำจากมวลดิน ในสถานะที่ไม่มีภาวะระเหยของน้ำ เป็นการดึงน้ำจากมวลดินในสถานะของเหลว โดยแรงดูดเมทริกซ์ มีความสัมพันธ์กับขนาดของช่องว่าง และค่าความอึดตัว ในการตรวจวัดจะต้องมีการส่งผ่านหน่วยแรง ของน้ำในช่องว่างดิน และแรงดันน้ำในช่องว่างของ sensor อย่างดี ดังนั้นหินพรุนที่บ่งน้ำจะต้องอึดตัว ด้วยน้ำและสัมผัสกับตัวอย่างดินอย่างดี สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2

$$S = u_a - u_w \quad (2)$$

เมื่อ  $S$  = แรงดูดเมทริกซ์ (Matrix suction)

$u_a$  = แรงดันอากาศ (Pore air pressure)

$u_w$  = แรงดันน้ำ (Pore water pressure)

#### 2. แรงดูดรวม (Total Suction)

แรงดูดรวม (Total Suction) คือ พลังงานที่ใช้ในการดึงน้ำจากมวลดิน ในสถานะที่มีการระเหยของน้ำ เป็นการดึงน้ำออกจากมวลดินในสถานะไอน้ำ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$\psi = \pi + s \quad (3)$$

$$\psi = \pi + u_a - u_w \quad (4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Richard (1965) อธิบายว่าแรงดูดรวมจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิของอากาศที่อยู่ในช่องว่างดิน ตามหลักของเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic) ดังสมการที่ 5

$$\psi = - \left[ \frac{RT}{V_{w0} \omega_v} \right] \ln(R_h) \quad (5)$$

เมื่อ  $\psi$  = แรงดูดรวม, kPa

$R$  = ค่าคงที่ของก๊าซ (Universal gas constant) มีค่าเท่ากับ 8.314 J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

$V_{w0}$  = ปริมาตรจำเพาะของน้ำหรือส่วนกลับของค่าความหนาแน่นของน้ำ  
( $1/ \rho_w$ ), (m<sup>3</sup>/kg)

$\omega_v$  = Molecular Mass ของไอน้ำ มีค่าเท่ากับ 18.016 kg/kmol

$T$  = อุณหภูมิ (K)

$R_h$  = ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ อัตราส่วนระหว่างแรงดันไอในสภาวะปรกติ  
ต่อแรงดันไอในสภาวะอิ่มตัว (P/P<sub>0</sub>)

$P$  = ความดันไอน้ำ, kPa

$P_0$  = ความดันไอน้ำของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน (kPa)

เนื่องจากแรงดูดรวม (Total Suction) คือ พลังงานที่ใช้ในการดึงน้ำจากมวลดิน ในสภาวะที่มีการระเหยของน้ำ ดังนั้นในการวัดจึงไม่จำเป็นต้องให้เครื่องมือสัมผัสกับน้ำในดินโดยตรง (non-contact via liquid phase) แต่จะอาศัยการส่งผ่านความชื้นอากาศในช่องว่างดินกับช่องว่างในเครื่องมือวัดเท่านั้น (Moisture transfer through gaseous phase)

หน่วยแรงประสิทธิผลในมวลดินของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

Terzaghi (1936) พิจารณาถึงหลักการสมดุลระหว่างหน่วยแรง โดยพิจารณาว่าเมื่อมีหน่วย แรงภายนอกกระทำ หน่วยแรงจะส่งผ่านในเนื้อดินผ่านผิวสัมผัสของเม็ดดิน ซึ่งมีผลต่อความแข็งแรงของมวลดินโดยตรง อีกส่วนหนึ่งรับโดยน้ำและอากาศในรูปของความดันน้ำในโพรงดิน ซึ่งเป็นหน่วย แรงที่ไม่มีผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของมวลดิน ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงดังกล่าวแสดงได้ดัง สมการที่ 6

$$\sigma = \sigma' + u \quad (6)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือ หน่วยแรงรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\sigma'$  คือ หน่วยแรงประสิทธิผล

$u$  คือ ความดันน้ำในโพรง

Bishop (1959) ดัดแปลงสมการหน่วยแรงประสิทธิผลในดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำของ Terzaghi โดยเพิ่มเติมค่าแรงดันน้ำด้านลบ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อมวลดินอิ่มตัวด้วยน้ำจะเกิดแรงดันน้ำ ด้านบวกขึ้น ทำให้ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลลดลง ในทางตรงกันข้าม เมื่อมวลดินเกิดการระบายน้ำ จะทำให้แรงดันน้ำด้านลบสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้ค่าแรงตึงผิวที่เกิดขึ้นจึงเพิ่มค่าแรงประสิทธิผลและตึงให้เม็ดดิน grains ขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งสมการสำหรับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ แสดงดังนี้

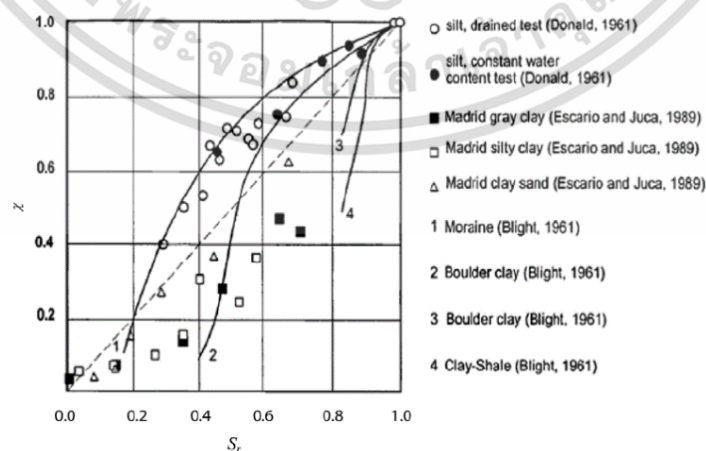
$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (7)$$

เมื่อ  $u_a$  คือ แรงดันอากาศในช่องว่าง (สภาวะธรรมชาติ  $u_a$  มีค่าเป็น 0)

$u_w$  คือ แรงดันน้ำในช่องว่าง

$\chi$  คือ Effective stress parameter ซึ่งขึ้นอยู่กับตึกรีความอิ่มตัวด้วยน้ำหรือแรงดูดเมทริกซ์

พจน์ของ  $(\sigma - u_a)$  แทนของหน่วยแรงตั้งฉากสุทธิ และพจน์  $\chi(u_a - u_w)$  แทนหน่วยแรงระหว่างเม็ดดินที่เกิดจากค่าแรงดูด สำหรับการหาค่า  $\chi$  คือการวัด ค่าแรงดูดเมทริกซ์และหน่วยแรงรวมในการทดสอบ Triaxial หรือการเฉือนโดยตรง ภาพที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\chi$  และตึกรีความอิ่มตัวด้วยน้ำ ดินแต่ละชนิด ค่า  $\chi$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0 (เมื่อดินอยู่ในสภาวะแห้งอย่างสมบูรณ์) ถึง 1 (เมื่อดินอิ่มตัวด้วยน้ำ)



รูปที่ 2.16 ผลการทดสอบซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์  $\chi$  กับตึกรีความอิ่มตัวด้วยน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 แบบจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและราก

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและรากมีพื้นฐานมาจากสมการของ Coulomb โดยความสามารถต้านทานการเฉือนของดิน,  $S$  เกิดจากค่าความเค้นแน่นและแรงเสียดทาน

$$S = c + \sigma_N \tan \phi \quad (8)$$

โดยที่  $\sigma_N$  คือ ความเค้นตั้งฉากบนระนาบการเฉือน,  $\phi$  คือ ค่ามุมเสียดทานภายในของดิน และ  $c$  คือค่าความเค้นแน่นของดิน หลายสมมุติฐานถูกนำมาใช้ในการแก้ไขสมการที่ (8) สำหรับดินที่เสริมรากซึ่งมีดังต่อไปนี้

1. รากยึดตัวตามแนวตั้งที่ยังลึกผ่านแนวการเฉือนตามแนวราบที่หนา  $z$  ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 2.17 และความหนา  $z$  นี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเฉือน
2. รากของชั้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน,  $d_i$  ซึ่งจะสามารถบิดงอและยึดหยุนเชิงเส้นได้ด้วยค่าโมดูลัสของยึดหยุน  $E$  ซึ่งมีอยู่ในรากแต่ละเส้น
3. มุมเสียดทานของดิน,  $\phi$  จะไม่มีผลกระทบต่อราก ดังนั้น สมการของคูลอมบ์สำหรับดินที่เสริมรากจะเป็น

$$S_R = c + \Delta S_R + \sigma_N \tan \phi \quad (9)$$

ซึ่งจากสมการที่ 9 จะมีความสอดคล้องกับการประเมินค่าความแข็งแรงเฉือนของดินที่เสริมรากที่ได้ทำ การศึกษาโดย Wu [1] โดยมีค่าเท่ากับค่าความแข็งแรงเฉือนของดินที่ไม่มีการเสริมรากบวกกับความแข็งแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นด้วยราก

Wu [1] ศึกษาการคาดคะเนความแข็งแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นด้วยรากมีค่าเท่ากับผลต่างของความแข็งแรงเฉือนของดินที่เสริมรากกับความแข็งแรงเฉือนของดินที่ไม่มีการเสริมด้วยราก ดังสมการ

$$\Delta S_R = S_R - S \quad (10)$$

เมื่อ  $\Delta S_R$  คือ ความแข็งแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นด้วยราก

$S_R$  คือ ความแข็งแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยราก

$S$  คือ ความแข็งแรงเฉือนของดินที่ไม่มีการเสริมราก

4. ความเครียดเนื่องจากแรงดึงในรากจะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นความยาวของรากที่ถูกกระทำเนื่องจากแรงดึงจะมีเท่ากับค่าความยาวของรากที่ไม่ได้ถูกกระทำ เนื่องจากแรงดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ดินกระทำต่อรากด้วยแรงดึงโดยความเค้นในแนวสัมผัส  $\tau$  ที่พื้นผิวภายในดิน และราก และความเค้นนี้มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ  $\tau'$  เกิดขึ้นขณะที่การเลื่อนไถลที่จะเริ่มเกิดขึ้น

6. ค่าเคลื่อนตัวตามยาวทั้งหมดของดินมีความสัมพันธ์กับรากซึ่งประกอบด้วยความเครียดเนื่องจากแรงดึงแบบยืดหยุ่น และการเลื่อนไถลโดยทำให้เกิดค่าความเค้นแนวสัมผัสสูงสุดได้สมมุติฐานทั้งหมดเหล่านี้ได้ใช้ในการพัฒนาแบบดั้งเดิม (Waldron) ซึ่งได้ถูกดัดแปลงที่นี้เพื่อที่จะขยายแบบจำลองให้กว้างขวางไปยังแถบของชั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางราก

สำหรับรากทั้งหมดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงขนาดเดียว ความต้านทานแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นด้วยรากถูกแสดงให้เห็นก่อนหน้า คือ (Waldron [8])

$$\Delta S_R = a_r T_R \delta \quad (11)$$

โดยที่

$$a_r = A_r / A_s$$

$A_s$  คือ พื้นที่หน้าตัดการเฉือนดินทั้งหมด

$A_r$  คือ พื้นที่หน้าตัดรากทั้งหมดที่ระนาบการเฉือน



รูปที่ 2.17 แบบจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและรากพืช (Wu [1])

$$\delta = (\sin \theta + \cos \theta \tan \phi) \quad (12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\theta$  คือ มุมของการเอียงตัวจากแนวตั้งของรากที่เกิดขึ้นโดยการเคลื่อนตัวแบบเฉือนตาม แนวราบของดินที่เสริมราก (ดูรูปที่ 2.17)  $T_R$  เป็นค่าความเค้นดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นในการเคลื่อนตัวเนื่องจากการเฉือนใดๆรากในแบบจำลองจะตอบสนองต่อการให้น้ำหนักไปยังรากซึ่งอาจจะเกิดการยืดของราก การเลื่อนไถลของรากที่หัวดินหรือการฉีกขาดของรากอย่างใดอย่างหนึ่ง

รากในแบบจำลองจะตอบสนองต่อน้ำหนักซึ่งอาจจะเกิดการยืดของราก การเลื่อนไถลของรากหรือการฉีกขาดของรากอย่างใดอย่างหนึ่ง

#### 2.4.1 การยืดของราก (Stretching Roots)

ให้  $\Delta S_{R1}$  เป็นส่วนความแข็งแรงแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากรากซึ่งถูกรับน้ำหนักแล้วเกิดการยืด โดยรากไม่มีการเลื่อนไถลหรือการฉีกขาดเกิดขึ้น ถ้าในแต่ละชั้นมีรากขนาดเดียวกันทั้งหมดโดยถูกแสดง (Waldron [8]) ว่า

$$T_R = k\gamma \quad (13)$$

โดยที่  $k = (4\tau'EZ/d)^{1/2}$

และ  $\gamma = (\sec\theta - 1)^{1/2}$

$E$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่นด้วยแรงดึงของรากที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ  $d$

$\tau'$  เป็นความเค้นในแนวสัมผัสที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวภายในดิน - ราก ณ การเลื่อนไถลเริ่มแรก

ดังนั้น สมการที่ 11 จะเป็น

$$\Delta S_{R1} = a_r k\gamma\delta \quad (14)$$

และส่วนค่าพื้นที่หน้าตัดรากที่กำหนดให้ ( $a_r$ ) และการเคลื่อนตัวแบบเฉือน ( $x$ ) ,  $\Delta S_{R1}$  แปรผันตาม  $d^{-1/2}$  นั่นคือ  $\Delta S_{R1}$  สำหรับหน้าตัดรากทั้งหมดที่กำหนดให้จะมีค่ามากกว่าสำหรับรากที่มีขนาดเล็กกว่า

ส่วนที่เพิ่มขึ้นของการเสริมแรง ได้แสดงในเทอมของจำนวนราก ,  $n$  คือ

$$\Delta S_{R1} = \left[ \frac{\pi(\tau'EZ)^{1/2}\gamma\delta}{2A_s} \right] nd^3 \quad (15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ 15 นี้ แสดงให้เห็นว่าสำหรับรากที่มีขนาดเดียวกันทั้งหมดค่า  $\Delta S_{R1}$  จะเพิ่มขึ้นพร้อมค่า  $d^{3/2}$

แบบจำลองสามารถใช้ให้ครอบคลุมรากชั้นที่  $m$  กับ จำนวนของรากในแต่ละชั้น  $n_i$  ดังสมการ

$$\Delta S_{R1} = \left[ \frac{\pi(\tau'EZ)^2\gamma\delta}{2A_s} \right] \sum_{i=1}^m (E_i^2 n_i d_i^3) \quad (16)$$

รากในชั้นที่ 1 จนถึงชั้นที่  $m$  ซึ่งรากมีการยึดโดยปราศจากการเลื่อนไถลหรือเกิดการฉีกขาดด้วย ซึ่งโมดูลัสยืดหยุ่นอาจขึ้นอยู่กับค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของราก

#### 2.4.2 การเลื่อนไถลของราก (Slipping Roots)

เมื่อการเค้นดินที่มีผลต่อรากซึ่งทำให้รากเกิดการเลื่อนไถลผ่านดิน การเค้นได้ดำเนินต่อไป เพื่อที่จะสนับสนุนส่วนที่ทำการเสริมแรง ลักษณะนี้ถูกแสดงโดยการสังเกตว่า ณ การเลื่อนไถลเริ่มแรก ค่าแรงดึงสูงสุดในรากจะเป็น (Waldron)

$$T_N = 2\tau' \frac{L}{d} \quad (17)$$

ซึ่ง  $L$  เป็นความยาวของราก การแทรกสมการที่ 17 ลงไปสมการที่ 11 และการสังเกตว่า  $a_r = \pi n d^2 / 4A_s$  ซึ่งเราได้รับส่วนเสริมแรงจากการเลื่อนไถลของรากที่มีขนาดเดียวกันทั้งหมด

$$\Delta S_{R2} = \pi \tau' \frac{n L d \delta}{2A_s} \quad (18)$$

สมการที่ 18 ได้ขยายไปยังชั้นรากที่  $j$  กับจำนวนรากในแต่ละชั้น  $n_j$  จะได้

$$\Delta S_{R2} = \pi \tau' \frac{\delta}{2A_s} \sum_{i=1}^j n_i L_i d_i \quad (19)$$

ค่าความยาวของรากที่ต้องการต่ำที่สุดที่จะป้องกันการดึงรากออกจากดินและความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้น (Gray) คือ

$$L \geq \frac{T_R D}{2\tau_{max}} \quad (20)$$

เมื่อ  $L$  คือ ความยาวรากที่มีค่าต่ำที่สุดที่จะป้องกันการพิบัติเนื่องจากการดึงออก

$D$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\tau_{max}$  คือ ค่าความต้านทานแรงเฉือนสูงสุดหรือค่าความต้านทานการดึงออกระหว่างราก และดิน

ในกรณีของรากที่มีการจัดเรียงตัวตามแนวตั้งในเมตริกซ์ของดินที่ถูกกระทำด้วยความเค้นแบบจำกัดตามแนวตั้ง ( $\sigma_v$ ) และค่าความต้านทานแรงเฉือนของการดึงออก ถูกกำหนดโดย

$$\tau_{max} = K_0 \sigma_v \tan(\mu) \quad (21)$$

เมื่อ  $\sigma_v$  คือ ค่าความเค้นแบบจำกัดตามแนวตั้งที่กระทำบนพื้นผิวการเฉือนตามแนวราบ

$K_0$  คือ สัมประสิทธิ์ของความดันดินด้านข้างที่สภาวะหยุดนิ่ง

$\tan(\mu)$  คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างรากและดิน

#### 2.4.3 การฉีกขาดของราก (Breaking Roots)

ในรูปที่ 2.17 ในสภาพปกติ เส้นของรากจะตั้งฉากกับระนาบการเฉือนที่มีแรงเฉือนเกิดขึ้นเส้นรากจะเอียงตัวไปตามทิศทางการเฉือนและยืดยาวขึ้น การยืดของรากส่งผลให้เกิดแรงดึงขึ้นภายใน หากพิจารณาองค์ประกอบของแรงพบว่าแรงส่วนหนึ่งทำหน้าที่ต้านทานการเฉือน แรงอีกส่วนเพิ่มความเค้นกดทับบนระนาบการเฉือน มีค่าเท่ากับ  $t_R \cos\theta$  และ  $t_R \sin\theta$  ตามลำดับ ความต้านทานแรงดึงของราก ( $T_R$ ) และความเค้นดึงที่เกิดขึ้นในรากต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ( $t_R$ ) หาได้จากสมการที่ 22

$$t_R = T_R \left( \frac{A_R}{A} \right) \quad (22)$$

เมื่อ  $A_R$  คือ พื้นที่หน้าตัดของรากที่อยู่ในพื้นที่หน้าตัดของดิน

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของดิน

$t_R$  คือ ความเค้นดึงที่เกิดขึ้นในรากต่อพื้นที่ต่อพื้นที่หน้าตัดของดินสามารถคำนวณได้จากความสามารถรับแรงดึงโดยเฉลี่ยของราก

$T_R$  คือ ความต้านทานแรงดึงของราก

ดังนั้น

$$\sigma_R = t_R \cos\theta \quad (23)$$

$$\tau_R = t_R \sin\theta \quad (24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\sigma_R$  คือ หน่วยแรงตั้งฉากของราก

$\tau_R$  คือ หน่วยแรงเฉือนของราก

อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของรากที่อยู่ในพื้นที่หน้าตัดของดินต่อพื้นที่หน้าตัดของดิน สามารถหาได้จากสมการที่ 2.18

$$\frac{A_R}{A} = \frac{\sum n_i a_i}{A} \quad (25)$$

เมื่อ  $n_i$  คือ จำนวนของรากในชั้นที่  $i$

$a_i$  คือ พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยของรากในชั้นที่  $i$

ดังนั้น

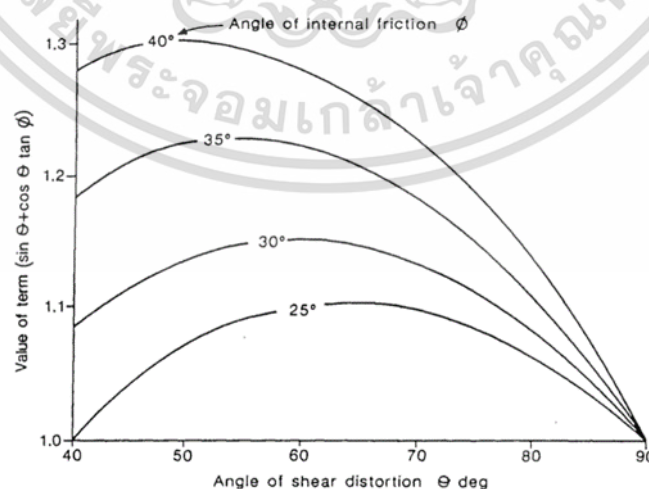
$$t_R = \frac{\sum T_i n_i a_i}{\sum n_i a_i} \quad (26)$$

เมื่อ  $T_i$  คือ กำลังของรากในชั้นที่  $i$

จากสมการที่ 22 แทนค่าจะได้

$$\Delta S_R = \left(\frac{A_R}{A}\right)(\sin\theta + \cos\theta \tan\phi) \quad (27)$$

ค่าของ  $(\sin\theta + \cos\theta \tan\phi)$  หรือค่า  $\delta$  สามารถหาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ  $(\sin\theta + \cos\theta \tan\phi)$  กับ  $\theta$  มีค่าอยู่ระหว่าง 40-90 องศา โดยที่ค่า  $\phi$  มีค่าอยู่ระหว่าง 25 ถึง 40 องศา ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ค่าของ  $(\sin\theta + \cos\theta \tan\phi)$  กับมุมการบิดตัวแบบเฉือน (Wu [1])

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

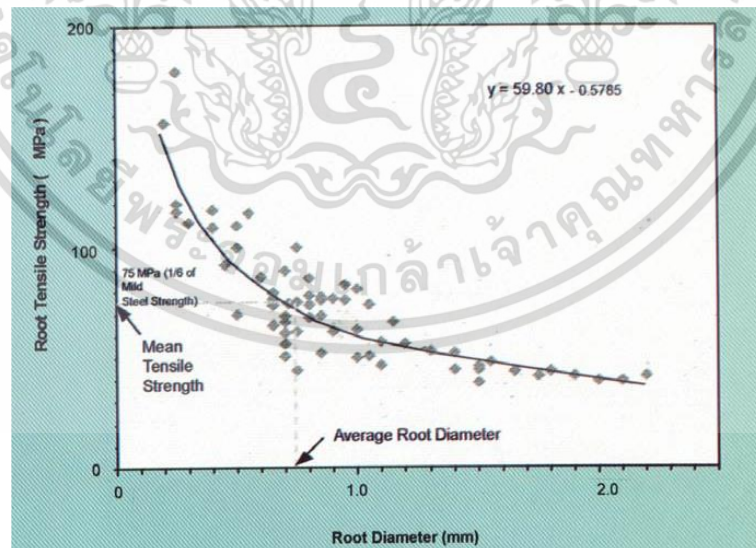
Wu; Mckinnel; Swanston ได้เสนอค่าเฉลี่ย 1.2 สำหรับพจน์  $(\sin\theta + \cos\theta \tan\phi)$  ในสมการที่ 28 ซึ่งสามารถทำให้เป็นสมการอย่างง่ายคือ

$$\Delta S_{R3} = 1.2 T_R \left( \frac{A_R}{A} \right) \quad (28)$$

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.5.1 งานวิจัยการทดสอบกำลังรับแรงดึงของรากพืช

ดิถี แห่งเขาวนิช [9] ได้ศึกษาการเสริมความแข็งแรงของดินด้วยรากหญ้าแฝก (Vetiveria zizanioides) โดยศึกษาการรับแรงดึงของราก พิจารณาอายุการเจริญเติบโตของหญ้าแฝกที่อายุ 2 ปี โดยการทดลองจะต้องไม่เกิน 2 ชั่วโมง และรากต้องอยู่ในสภาพที่สด จากการทดลองพบว่า ความแข็งแรงดึงของรากอยู่ในช่วงระหว่าง 40 – 180 เมกะปาสคาล โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากอยู่ในช่วงระหว่าง 0.2 - 2.2 มิลลิเมตร และมีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึงของรากเท่ากับ 75 เมกะปาสคาล (ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากเท่ากับ 0.7 - 0.8 มิลลิเมตร) ซึ่งมีค่าประมาณ 1/6 เท่าของเหล็กกล้าละมุน และยังพบว่าความแข็งแรงดึงของรากมีแนวโน้มลดลง เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.19 และเปรียบเทียบกับรากต้นไม้ชนิดอื่นพบว่าสูงกว่ามาก แสดงในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก (ดิถี แห่งเขาวนิช [9])

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

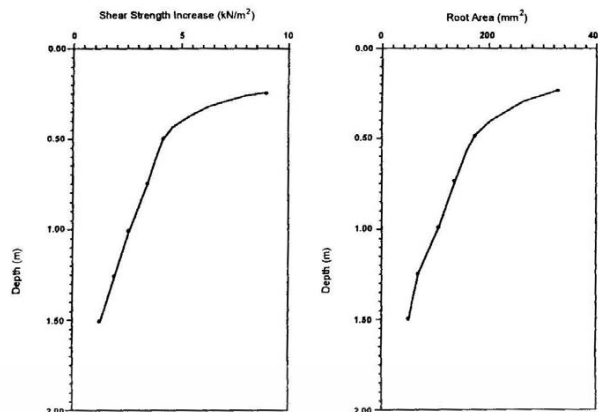
ตารางที่ 2.1 กำลังรับแรงดึงของรากพืชชนิดต่างๆ (ดิถี แห่งเขาวนิช [9])

ชื่อทางพฤกษศาสตร์	ชื่อสามัญ	ความแข็งแรงดึง (MPa)
<i>Salix sp.</i>	Willow	9-36 *
<i>Populus sp.</i>	Poplars	5-38 *
<i>Alnus sp.</i>	Alders	4-74 *
<i>Pseudotsuga sp.</i>	Douglas fir	19-61 *
<i>Acer sacharinum</i>	Silver maple	15-30 *
<i>Tsuga heterophylla</i>	Western hemlock	27 *
<i>Vaccinum sp.</i>	Huckleberry	16 *
<i>Hordeum vulgare</i>	Barley	15-31 *
-	Grass ,forbs	2-20 *
-	Moss	0.002-0.007 *
<i>Vetiveria zizanioides</i>	Vetiver grass	40-120 **

\* Wu (1995)    \*\* Hengchaovanich และ Nilaweera (1996)

#### 2.5.2 งานวิจัยการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนโดยตรงของดินที่เสริมรากพืช

1.) ดิถี แห่งเขาวนิช [9] ได้ศึกษาการเสริมความแข็งแรงเฉือนของดินด้วยรากหญ้าแฝกกลุ่ม (*Vetiveria zizanioides*) โดยศึกษาความแข็งแรงเฉือนโดยตรงในสนามของดินซึ่งเสริมรากหญ้าแฝกกลุ่ม และไม่ได้เสริมรากหญ้าแฝกกลุ่ม จากการทดลองพบว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ระดับความลึก 25 เซนติเมตร จากผิวดินจะมีค่ามากที่สุด และลดลงตามระดับความลึกของการทดสอบโดยค่าของกำลังรับแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงจะขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดของรากหญ้าแฝกกลุ่มที่มีอยู่ในพื้นที่หน้าตัดการเฉือน ดังแสดงในรูปที่ 2.20



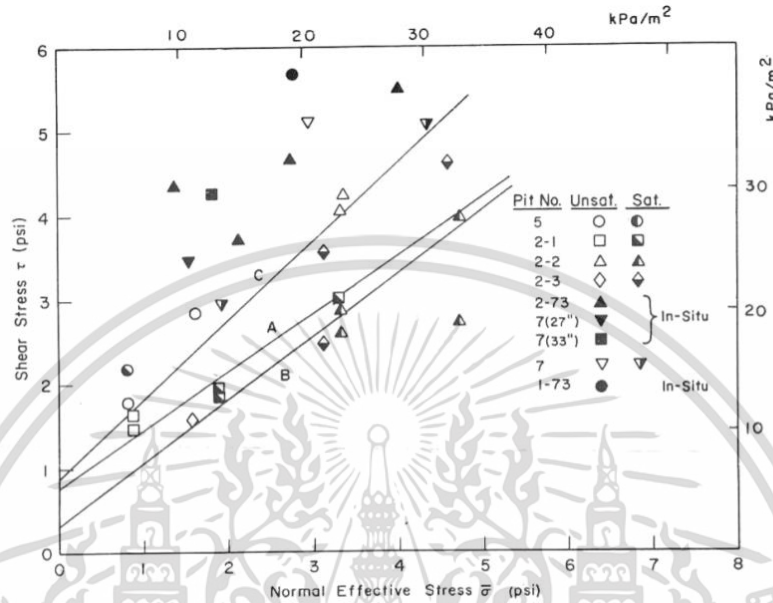
รูปที่ 2.20 เปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดของรากที่มีผลต่อการเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือน  
ของดินที่ระดับความลึกต่างกัน (ดิถี แห่งเชาวนิช [9])

2.) นายสุรเทพ ธนะทรัพย์ชูศักดิ์ [10] ได้ศึกษากำลังต้านทานแรงเฉือนโดยตรงของดินซึ่งเสริมรากหญ้าแฝกและไม่ได้เสริมรากหญ้าแฝก ในกรณีการทดสอบในสนามและในห้องปฏิบัติการ โดยพิจารณาผลกระทบเนื่องจากปัจจัยของอายุการปลูกที่ต่างกัน คือ 2, 4, 6, 8 และ 10 เดือนตามลำดับ ศึกษากำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝกซึ่งมีผลต่อการเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของดิน โดยพิจารณาจากผลกระทบเนื่องจากปัจจัยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากและอายุของการปลูกที่ต่างกัน ศึกษาการเจริญเติบโตของรากหญ้าแฝก โดยพิจารณาผลกระทบเนื่องจากอายุการปลูกที่แตกต่างกันและศึกษาค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดินพรุที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกและที่ไม่ได้เสริมด้วยรากหญ้าแฝก

3.) Wu [1] และคณะ ได้ศึกษาเสถียรภาพของดินก่อนและหลังการถางป่า หาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแรงดันน้ำ ตลอดจนคุณสมบัติต่างๆของดิน โดยการทำการทดลองในห้องปฏิบัติการและการทดสอบในสนาม ศึกษาผลกระทบของการตัดไม้ทำลายป่าที่มีผลกระทบต่อเสถียรภาพของลาดดิน ได้มีการวัดแรงดันน้ำและอัตราการคืบตัวของดินในบริเวณที่มีดินถล่ม และในบริเวณที่ไม่เกิดดินถล่ม ซึ่งเป็นส่วนที่มีการปลูกต้นไม้ทดแทน

จากรูปที่ 2.21 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดิน ซึ่งตัวอย่างดินเก็บมาแบบไม่ถูกรบกวน การทดสอบในห้องปฏิบัติการมีการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงแบบระบายน้ำซึ่งทดสอบทั้งในสภาพดินที่อิ่มตัวและไม่อิ่มตัว ต่างจากผลการทดสอบในสนามที่ทดสอบได้เฉพาะในสภาพที่ไม่อิ่มตัวเท่านั้น ซึ่งจากรูปที่ พบว่าการกระจายตัวของข้อมูลทำให้ไม่สามารถที่จะสรุปได้อย่างแน่นอนในการเลือกใช้ค่าความเชื่อมแน่น ( $c'$ ) และค่ามุมเสียดทานภายใน ( $\phi'$ ) และเนื่องจากในขณะที่เกิดการเคลื่อนตัวของ

ระนาบจะเกิดในสภาพที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน ดังนั้นในการวิเคราะห์ เสถียรภาพความลาดจะใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนในสภาพที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำ



รูปที่ 2.21 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดิน Wu [1] และคณะ

4.) Operstein & Frydman (2000) [11] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของรากพืชที่มีต่อกำลังรับแรงของดิน โดยทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนโดยตรงของดินที่เสริมรากต้น Alfalfa, Rosemary, Pistacia Lentiscus และ Cistus ปลูกในดินที่เรียกว่า Chalky ในประเทศอิสราเอล พิจารณาการปลูกที่อายุ 1 และ 2 ปี อีกทั้งยังทดสอบแรงดึงของรากพืชโดยใช้การทดสอบถอนตัวอย่าง (Pull-out test) ที่อายุ 2, 4, 6, 8 และ 10 เดือน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.2 – 15 มม. และความยาว 40 – 500 มม.

และจากการศึกษาครั้งนี้พบว่า การเพิ่มค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเสริมกำลัง เป็นค่าหลักที่ช่วยต้านแรงดึงของราก และค่ามุมเสียดทานภายในของดินจะมีค่าคงที่ เมื่อค่าความชื้นแน่นเพิ่มขึ้นพร้อมกับค่า relative roots area,  $A_r$  และ relative root tensile strength contribution,  $T_r$  ในส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนและกำลังรับแรงดึงของราก ค่า  $T_r$  จะเป็นเชิงเส้น และได้เส้นลาดชันที่มีมุมเท่ากับ 14 องศา โดยค่า shear strength ของรากสามารถหาได้จากสมการ

$$\tau_{max} = (c_0 + 0.25 T_r) + \sigma \tan \phi$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.) Chunling Li & Jorge G. Zornberg (2013) [12] ได้ศึกษาวิธีการทำนายความต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยเส้นใย พบว่าความต้านทานแรงเฉือนขึ้นอยู่กับคุณสมบัติอิสระของเส้นใยและดิน เช่น ปริมาณของเส้นใย (fiber content), อัตราส่วนของความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (fiber aspect ratio) และกำลังของดินที่ไม่ได้เสริมเส้นใย โดยทำการทดสอบการบีบอัดสามแกน (triaxial compression tests) และการทดสอบกำลังรับแรงถอนของเส้นใย (fiber pullout tests) เพื่อประเมินผลของแรงดึงในเส้นใยเป็นฟังก์ชันของแรงเฉือน ดังสมการ

$$S_{eq,p} = c_{eq,p} + (\tan \phi)_{eq,p} \cdot \sigma_n$$

$$c_{eq,p} = (1 + \alpha \cdot \eta \cdot \chi \cdot c_{i,c}) \cdot c$$

$$(\tan \phi)_{eq,p} = (1 + \alpha \cdot \eta \cdot \chi \cdot c_{i,\phi}) \cdot \tan \phi$$

เมื่อ

$S$	=	กำลังรับแรงเฉือน
$\sigma_n$	=	ความเค้นปกติเฉลี่ยที่กระทำต่อเส้นใย
$c$	=	ค่าความเชื่อมแน่นของดิน
$c_{i,c}$	=	ค่าองค์ประกอบความเชื่อมแน่น
	=	$\frac{\text{ค่าความเชื่อมแน่นระหว่างดินกับเส้นใย}(a)}{\text{ค่าความเชื่อมแน่นของดิน}(C)}$
$c_{i,\phi}$	=	ค่าองค์ประกอบความเสียดทาน = $\frac{\tan(\text{มุมเสียดทานของดินกับเส้นใย})}{\tan(\text{มุมเสียดทานของดิน})}$
$\alpha$	=	ค่าสัมประสิทธิ์เชิงประจักษ์ที่ใช้อธิบายการวางตัวของเส้นใย = 1
$\eta$	=	fiber aspect ratio = $\frac{\text{ความยาวของเส้นใย}}{\text{เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย}}$
$\chi$	=	gravimetric fiber content = $\frac{\text{น้ำหนักของเส้นใย}}{\text{น้ำหนักของดินแห้ง}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

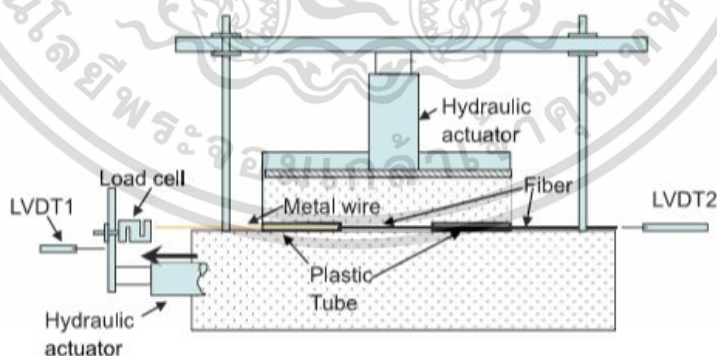
### การทดสอบ Triaxial compression tests

ทดสอบโดยใช้เส้นใยโพลีโพรพิลีนความยาว 25 และ 50 มิลลิเมตร โดยแบ่งออกเป็น 2 ชุดการทดสอบ ชุดการทดสอบที่ 1 เพื่อวัดผลกระทบของปริมาณเส้นใยและ aspect ratio ที่มีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของดินผสมเส้นใย ตัวอย่างทดสอบถูกเตรียมโดยใช้ค่า  $\chi$  2 ค่าคือ 0.2 และ 0.4% ตัวอย่างทดสอบมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 71 มม. และสูง 142 มม. และถูกทดสอบโดยใช้แรงกดต้นจำกัด ที่ 35, 70 และ 140 kPa การทดสอบดำเนินการภายใต้เงื่อนไขการระบายน้ำออก (CD) ชุดทดสอบ 2 ออกแบบมาเพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของดินเสริมเส้นใยเสริมความหนาแน่นของดินที่แตกต่างกันสองแบบคือ 48 และ 65% โดยเฉพาะตัวอย่างดิน 2 ถูกเตรียมโดยใช้ความหนาแน่นสัมพัทธ์สองตัวและใช้ค่า  $\chi$  เท่ากับ 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4% ตัวอย่างทดสอบมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 152 มม. และสูง 304 มม. ทดสอบภายใต้สภาพแห้งโดยใช้แรงกด 60, 115 และ 210 kPa โดยอนุญาตให้ใช้อากาศไหลอย่างอิสระเข้าและออกจากตัวอย่างทดสอบ (เช่นการเปลี่ยนแปลงปริมาตร)

ดินที่ใช้ในชุดการทดสอบ 1 จัดเป็นทรายคุณภาพต่ำ (SP) ตามระบบการจำแนกดิน USCS มีค่า  $c$  เท่ากับ 6.1 กิโลปาสคาล และมุมเสียดทานภายใน 34.3 องศา ดินที่ใช้ในชุดการทดสอบที่ 2 เป็นทรายที่สะอาดขนาดสม่ำเสมอ (SP) ตามระบบการจำแนกดิน USCS

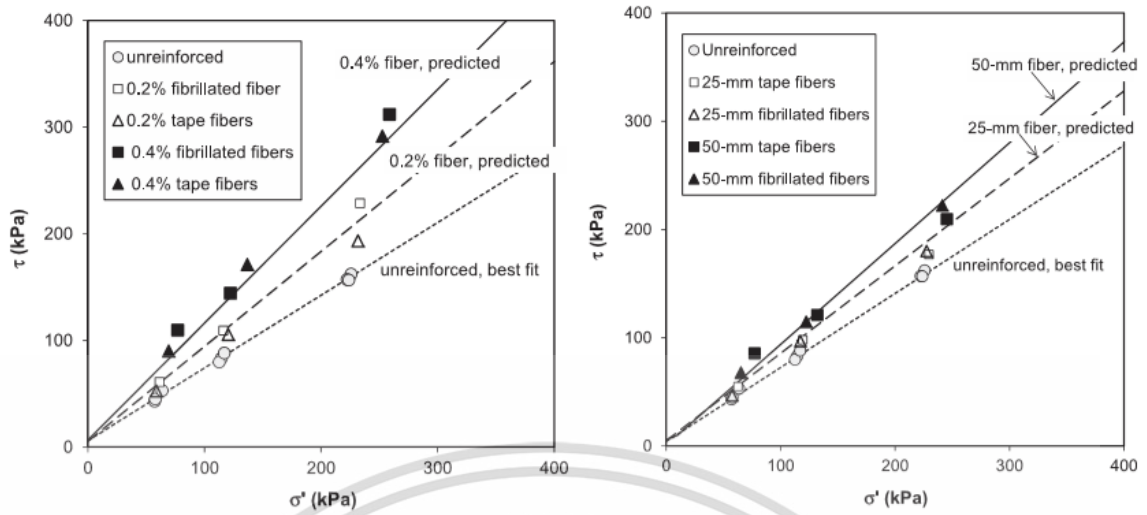
### การทดสอบ Fiber pullout tests

ทดสอบโดยใช้เส้นใยโพลีโพรพิลีนความยาว 152 มิลลิเมตร เพื่อทดสอบแรงดึงของเส้นใยเดี่ยว



รูปที่ 2.22 เครื่องทดสอบ fiber pullout tests ของ Chunling Li & Jorge G. Zornberg (2013) [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 กรณีที่ใช้ในการศึกษา

##### 3.1.1 รูปแบบของกรณีศึกษา

การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test) ในดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated soil)



รูปที่ 3.1 Saturated soil (<http://www.terragis.bees.unsw.edu.au>)

##### 3.1.2 ขนาดของอุปกรณ์ทดสอบ

ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร หนา 8.5 มิลลิเมตร ความสูง 25 เซนติเมตร จำนวน ตัวอย่างท่อพีวีซีทั้งหมด 6 ตัวอย่าง ทำการตัดแบ่งกึ่งกลางด้านยาวของท่อพีวีซี นำปลอกรัด (Hose Clamp) มาสวมบริเวณส่วนบนและส่วนล่างของท่อเพื่อให้อันส่วนท่อประกบกัน และเจาะรูบริเวณกึ่งกลางของท่อพีวีซี ซึ่งจะทำให้การเจาะรูจำนวน 1 รู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร เพื่อใส่เครื่องวัดแรงดึงน้ำของดิน (Tensiometer)

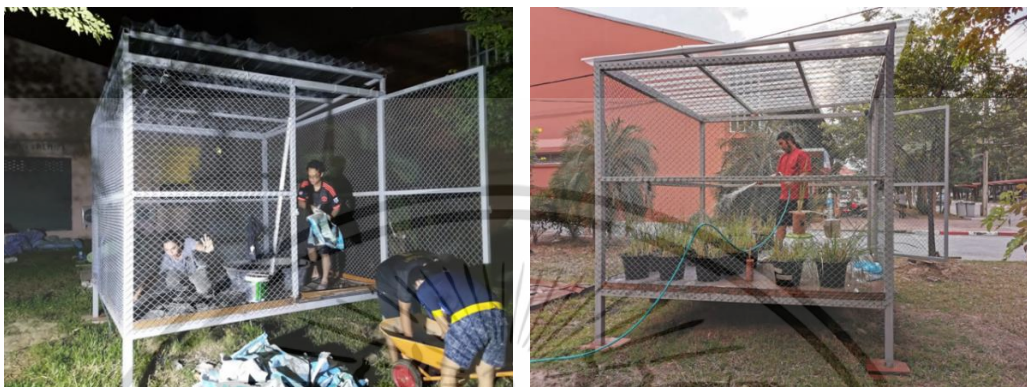


รูปที่ 3.2 ท่อพีวีซีใส่ตัวอย่างดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 เรือนเพาะชำ

เรือนเพาะชำขนาด 3 ม. x 3 ม. ตั้งอยู่ข้างตึกภาควิชาวิศวกรรมโยธา เป็นที่เก็บรักษาต้นไม้ให้ปลอดภัยจากสัตว์นักทำลาย และเหล่าศัตรูพืช สร้างจากเหล็กกล่องและปิดรอบด้านด้วยลวดตาข่ายถัก มุงหลังคาด้วยแผ่นหลังคาโปร่งใส อุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือน  $35^{\circ}/25^{\circ}$  ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 80%



รูปที่ 3.3 และ 3.4 เรือนเพาะชำ

## 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.2.1 การเตรียมตัวอย่างหญ้าแฝก

หญ้าแฝกที่นำมาใช้ในการทดสอบคือสายพันธุ์สงขลา 3 ขั้นตอนแรกเตรียมกล้าหญ้าแฝก นำมาเพาะเลี้ยงในดินปลูกมูลไส้เดือน เพื่อช่วยให้หญ้าแฝกมีโอกาสรอดตายสูง และมีการเจริญเติบโตอย่างสม่ำเสมอ ในขั้นตอนนี้จำเป็นต้องรดน้ำอย่างต่อเนื่องจนกว่าหญ้าแฝกจะแข็งแรง หลังจากเพาะตัวอย่างหญ้าแฝกจนโตได้ขนาดแล้ว จึงแบ่งนำมาเพาะไว้ในท่อพลาสติก (PVC) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 นิ้ว หลังจากเลี้ยงหญ้าแฝกตัวอย่างจนได้เวลาที่ต้องการแล้ว นำตัวอย่างไปทดสอบในห้องทดสอบ



รูปที่ 3.5 หญ้าแฝกที่เพาะในดินปลูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 การเตรียมตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบ

ดินที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติเชิงกลของดินโดยใช้ดินลูกรังซึ่งนำมาจากจังหวัด ฉะเชิงเทรา การเก็บตัวอย่างดินเก็บตัวอย่างดินแบบสุกอบกวน จำนวนทั้งสิ้น 30 ถังปุ๋ย น้ำหนักประมาณ 500 กิโลกรัม ขั้นตอนมีดังนี้

1. นำตัวอย่างดินไปร่อนผ่านตะแกรงโดยให้ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และค้ำที่ตะแกรงเบอร์ 200 จากนั้นนำตัวอย่างดินไปอบเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง
2. ชั่งตัวอย่างน้ำหนักดิน 2.128 กิโลกรัม ต่อ 1 ตัวอย่าง นำไปผสมกับน้ำกลั่น 12.31 % ของ น้ำหนักตัวอย่างดิน
3. ทำการบดอัดดินและจำนวน 5 ชั้น ชั้นละ 5 เซนติเมตร



รูปที่ 3.6 การเตรียมตัวอย่างดินก่อนการบดอัด



รูปที่ 3.7 การบดอัดดินใส่ท่อพีวีซี



รูปที่ 3.8 อุปกรณ์ที่ใช้ในการบดอัด



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างดินที่ทำการบดอัดเสร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 วิธีการปลูกหญ้าแฝกลงในท่อพีวีซี

มีวิธีการดำเนินการดังนี้

1. เตรียมหญ้าแฝกมัดมัดพันธุ์สงขลา 3 ที่ตัดให้มีความยาวรากเหลือเพียง 10 เซนติเมตรและส่วนต้นยาว 20 เซนติเมตร
2. นำท่อพีวีซีที่ทำการตัดแล้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร โดยรอยต่อระหว่างท่อจะใช้เข็มขัดรัดท่อ (Hose Clamps) ยึดไว้
3. ทำการเตรียมตัวอย่างท่อพีวีซีให้ได้ตามจำนวน
4. กรอกดินลงในท่อที่เตรียมไว้ โดยควบคุมความหนาแน่นของดินให้มีความสม่ำเสมอตลอดทั้งตัวอย่าง แล้วทำการปลูกหญ้าแฝกจากต้นกล้าที่เตรียมไว้ แบ่งเป็นตัวอย่างการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนโดยตรงกรณีไม่ได้เสริมกำลังด้วยรากจำนวน 3 ตัวอย่าง และกรณีเสริมกำลังด้วยราก 9 ตัวอย่าง



รูปที่ 3.10 ต้นกล้าหญ้าแฝก ความยาวราก 10 เซนติเมตร รูปที่ 3.11 การปลูกหญ้าแฝกในกระบอกพีวีซี

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

อายุการปลูก (เดือน)	จำนวนตัวอย่างท่อพีวีซี (ตัวอย่าง)	จำนวนตัวอย่างสำหรับ กรณีดินเปล่า	จำนวนตัวอย่างสำหรับ กรณีหญ้าแฝกพันธุ์ สงขลา 3
2		3	3
รวม	6	3	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 ตัวอย่างทดสอบที่ปลูกหญ้าแฝก

### 3.3 การทดสอบคุณสมบัติของดินตัวอย่าง

ในการศึกษาครั้งนี้ จำเป็นต้องหาคุณสมบัติของดินที่ใช้ทดลอง ซึ่งได้แก่ การหาขนาดของเม็ดดิน (Grain Size Analysis), การบดอัดดิน (Compaction), และการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test) เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.3.1 การหาขนาดเม็ดดิน (Grain Size Analysis)

(มาตรฐาน: ASTM D-422)

ในมวลดินอาจประกอบด้วยเม็ดดินหลายขนาด ซึ่งขนาดของเม็ดดินนี้จะมีผลต่อคุณสมบัติต่างๆ ของมวลดินอย่างมาก เช่น มีผลต่อค่าความซึมน้ำ (Permeability) อัตราการทรุดตัว (Rate of Settlement) และความสามารถในด้านกำลัง (Strength) ของมวลดิน เป็นต้น เพราะฉะนั้นเราจึง ต้องทราบขนาดคละของเม็ดดินเพื่อให้ทราบคุณสมบัติของดินตัวอย่างที่จะใช้ในทดลอง

การหาขนาดและการกระจายตัวของเม็ดดินสามารถทำได้หลายวิธี ตามความเหมาะสมของ ขนาด เม็ด ดินและตามชนิดของดิน ดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ดินลูกรังเป็นดินตัวอย่าง จึงเลือกการทดสอบด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรง (Sieve Analysis) เนื่องจากดินตัวอย่างที่ใช้มีขนาดใหญ่กว่าตะแกรงเบอร์ 200 เป็นส่วนใหญ่

### Sieve Analysis

เป็นการวิเคราะห์ดินเม็ดหยาบ คือ ดินที่มีขนาดเม็ดใหญ่การตะแกรงเบอร์ 200 สามารถหาขนาดเม็ดดินได้โดยการร่อนดินผ่านตะแกรงเบอร์ต่างๆ ซึ่งวางเรียงลำดับโดยให้ตะแกรงหยาบที่สุดอยู่ข้างบนและตะแกรงละเอียดที่สุดอยู่ข้างล่างแล้วหาเปอร์เซ็นต์ของดินที่ข้างบนตะแกรง แต่วิธีนี้เป็นเพียงค่าประมาณเท่านั้น เพราะรูปร่างขนาดเม็ดดินมีความแตกต่างกันไม่ใช่กลม หรือลูกบาศก์ แต่จะ เป็นเหลี่ยมแหลมไปตามธรรมชาติ

### อุปกรณ์

1. ถาดใส่ตัวอย่างดิน (Mixing Pan)
2. ตะแกรงร่อน (Sieve)
3. เครื่องเขย่าตัวอย่างดิน (Sieve Shaker)
4. เครื่องชั่งขนาด 2 กิโลกรัม อ่านได้ละเอียด 0.1 กรัม
5. แปลงทำความสะอาดตะแกรง



(a)



(b)

รูปที่ 3.13 (a) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาขนาดเม็ดดิน ด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรง (Sieve Analysis)

(b) เครื่องเขย่าตัวอย่างดิน (Sieve Shaker)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วิธีการทดลอง

ก.) การเตรียมตัวอย่างดิน

ตารางที่ 3.2 น้ำหนักดินแห้งในการร่อนผ่านตะแกรง

ขนาดเม็ดดินใหญ่สุด , นิ้ว	3/8	3/4	1	1 1/2	2	3
น้ำหนักตัวอย่างอย่างน้อย , กรัม	500	1000	2000	3000	4000	5000

พิจารณตาราง แล้วนำตัวอย่างดินแห้งมาตามจำนวนที่กำหนดไว้ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดเม็ดดินใหญ่สุด

ข.) ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำการเลือกตะแกรงจากใหญ่ไปหาตะแกรงขนาดเล็กลงไปประมาณครึ่งเท่า ซึ่งอาจจะเป็นตะแกรงเบอร์ 3/8 นิ้ว เบอร์ 4 เบอร์ 10 เบอร์ 40 เบอร์ 100 เบอร์ 200 และถาดรับ-ฝาปิด ตามลำดับ

2. ใช้แปรงทำความสะอาดตะแกรงขนาดหยาบ และตะแกรงขนาดละเอียดด้วยแปรงขนอ่อน เพื่อป้องกันน้ำหนักผิดพลาด นำตะแกรงแต่ละอันซึ่งน้ำหนักไว้

3. นำตัวอย่างที่เตรียมไว้ มีขนาดเพียงพอ ควรมีความแห้งพอประมาณที่ระหว่างการทดสอบ จะได้ไม่เปลี่ยนน้ำหนัก

4. ใส่ตัวอย่างดินลงในตะแกรงที่เรียงลำดับจากหยาบไปละเอียด ปิดฝาบนและรองด้วยถาด (Pan) ด้านล่าง แล้วเครื่องเขย่า (Sieve Shaker) ประมาณ 15 นาที

5. แยกตะแกรงแต่ละอันออกมาจากเครื่องเขย่าแล้วทำการชั่งจะเป็นน้ำหนักตะแกรง + น้ำหนักดินที่ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาด

6. เพราะนั้นจะได้น้ำหนักของดินที่ค้างแต่ละตะแกรงโดยนำ ( น.น.ตะแกรง + น.น.ดินที่ค้าง ) - น.น.ตะแกรง

**การคำนวณผลการทดสอบ**

$$1. \text{เปอร์เซ็นต์ของดินที่ค้างบนตะแกรง} = \frac{\text{น้ำหนักดินที่ค้างบนตะแกรง}}{\text{น้ำหนักดินทั้งหมด}} \times 100\%$$

2. เปอร์เซ็นต์ค้ำสะสม = ผลบวกสะสมของเปอร์เซ็นต์ของดินที่ค้างบนตะแกรงที่หยาบกว่า

3. เปอร์เซ็นต์ของดินที่ผ่านตะแกรง , %Finer = 100 - เปอร์เซ็นต์ค้ำสะสม

จากกราฟการกระจายตัวของเม็ดดิน (Grain Size Distribution Curve) หาสัมประสิทธิ์การกระจายของเม็ดดิน

$$ก) \text{สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Coefficient of Uniformity) } C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$ข) \text{สัมประสิทธิ์ความโค้ง (Coefficient of Curvature) } C_C = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 การบดอัดดิน (Compaction)

(มาตรฐาน: ASTM D 698-78 และ ASTM D 1557-78)

งานส่วนใหญ่ทางด้านวิศวกรรมโยธา เช่น งานเขื่อน งานถนน งานสนามบิน จะใช้ดินเป็นวัสดุถม (Fill Material) ทั้งสิ้น ส่วนใหญ่จะทำการบดอัดดินเพื่อให้ดินแน่นขึ้น โดยมีจุดประสงค์หลัก 3 ประการ คือ 1. ช่วยลดการทรุดตัวของชั้นดินในระยะยาว (Decrease future settlement) 2. เพิ่มความสามารถทางด้านกำลังของดิน (Increase shear strength) ทำให้ดินรับน้ำหนักบรรทุก ได้มากขึ้น และ 3. ลดการซึมน้ำของดิน (Decrease permeability) การบดอัดดินจะใช้เครื่องจักร ขนาดใหญ่จำพวกรถบด ส่วนการควบคุมคุณภาพการบดอัดดินในสนามถือว่าเป็นสิ่งสำคัญ ดังนั้นจึงมีการทดลองการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำไปใช้ในการควบคุมและเปรียบเทียบกับการบดอัดดินในสนาม

การทดลองการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ มีด้วยกัน 2 วิธี คือ Standard Proctor Test และ Modified Proctor test ซึ่งทั้งสองวิธีแตกต่างกันที่พลังงานที่ใช้ในการบดอัด วิธี Modified Proctor test จะใช้พลังงานในการบดอัดดินที่สูงกว่า เนื่องจากเป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นมาจากวิธี Standard Proctor Test เพื่อตอบสนองความต้องการในการพัฒนาประเทศ ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เลือกใช้การทดสอบแบบ Standard Proctor Test เพื่อหาความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) ของดินตัวอย่าง

#### อุปกรณ์

1. แบบอัดดิน (Compaction Mold)  $\varnothing 4" \times 4.6"$  พร้อมปลอก (Collar) และแผ่นฐาน (Base Plate) ตุ่มบดอัด (Drop Rammer หรือ Compaction Hammer)  $\varnothing 2"$  น้ำหนัก 5.5 lb ระยะ ตก 12"
2. แปรงอ่อนใช้ปัดดิน
3. ช้อนตักดิน (Soil Scoop)
4. ไม้บรรทัดเหล็กปาดดิน (Straight Edge) ขนาด 30 cm.
5. ถาดผสมดิน (Mixing Pan)
6. ขวดฉีดน้ำ (Wash Bottle)
7. กระบอกตวง (Measuring Cylinder)
8. ตาชั่งขนาด 20 กิโลกรัม อ่านได้ละเอียด 0.1 กรัม

#### การหาความชื้น (Water Content)

1. ครอบใส่ตัวอย่างดิน (Can)
2. ตู้อบ (Drying oven)
3. ตาชั่งอ่านได้ละเอียด 0.01 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการบดอัดดิน

### วิธีการทดลอง

#### การเตรียมตัวอย่างดิน

1. ตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบความแห้งพอดี แต่ถ้าดินตัวอย่างชื้นเกินไปให้ผึ่งให้แห้งในห้องปฏิบัติการหรืออบที่อุณหภูมิไม่เกิน  $140^{\circ}\text{F}$  ( $60^{\circ}\text{C}$ ) จากนั้นใช้ช้อนขุดดินที่เกาะกันให้แยกออก หากเป็นพวกดินลูกรังหรือกรวดพยายามอย่าทุบก้อนดินจนเม็ดดินแตก ถ้าเป็นดินเหนียวควรผึ่งให้แห้งแล้วทุบดินให้แตกละเอียดหรือใช้เครื่องบด
2. แบ่งตัวอย่างดินโดยวิธี Quartering หรือแยกด้วยกลองแยกดินเพื่อเป็นตัวแทนของตัวอย่างดิน
3. พิจารณาขนาดเม็ดดิน เพื่อเลือกตัวอย่างดินที่จะทดสอบกับ Mold คนละขนาดเนื่องจากไม่เป็นการเหมาะสม หากใช้ดินขนาดเม็ดใหญ่บดอัดใน Mold เล็กๆ
  - กรณีใช้ Mold ขนาด  $\text{Ø}4" \times 4.6"$ 
    - เตรียมตัวอย่างโดยนำดินที่แห้งพอดีมาผ่านตะแกรงเบอร์ 4(4.75 มม.) แล้ว นำส่วนดินที่ผ่านนี้ไปทดสอบ
    - การทดสอบจะใช้ได้กับดินที่ข้างบนตะแกรงขนาด  $\frac{3}{4}"$  นี้ว ไม่เกิน 30% โดย น้ำหนักเท่านั้น
4. แบ่งตัวตัวอย่างดินประมาณ 5 kg สำหรับทดสอบกับ Mold ขนาด  $\text{Ø}4" \times 4.6"$
5. ประมาณปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (O.M.C.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ขั้นตอนการทดสอบ (Standard Proctor Test ใช้ Mold ขนาด $\varnothing 4" \times 4.6"$ )

1. วัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงของ Mold ด้วยเวอร์เนียแล้วนำไปคำนวณหาปริมาตรของ Mold
2. ชั่งน้ำหนักของ Mold ให้ละเอียดถึง 0.1 กรัม
3. ประกอบ Mold, Collar และ base plate เข้าด้วยกัน แล้วนำไปวางบนพื้นคอนกรีตที่แข็งแรงและเรียบ
4. นำตัวอย่างดินที่เตรียมไว้มาอย่างน้อย 4 kg มาผสมน้ำให้มีความชื้นห่างจากค่าความชื้นที่เหมาะสมที่เราประมาณ 5-6 เปอร์เซ็นต์ หรือหากเราไม่ได้ประมาณค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมไว้ก็ให้ผสมน้ำลงไปประมาณ 3-4 เปอร์เซ็นต์ของตัวอย่างดิน จากนั้นคลุกเคล้าให้ เข้ากันพยายามให้ทุกส่วนในดินมีปริมาณความชื้นที่เท่ากัน
5. ใช้ช้อนตักดินใส่ใน Mold ทีละชั้น โดยประมาณดินที่จะใส่ให้ได้จำนวน 3 ชั้นเท่าๆกัน แล้วใช้ Hammer ขนาด 5.5 lb บดอัดดินแต่ชั้นๆ ละ 25 ครั้ง การยกตุ้มให้ยกก้านตุ้มขึ้นจนแตะฝาปิดแล้วจึงปล่อยตุ้มอย่างอิสระ แต่ละครั้งในการปล่อยตุ้มให้เคลื่อนตำแหน่งตุ้มวน ไปทั่วๆ Mold ในชั้นสุดท้ายให้บดอัดดินเหลือพื้นส่วนบนของ Mold เล็กน้อย (ไม่เกิน 13 มม.)
6. ถอด collar ของ Mold ออก ใช้บรรทัดเหล็กปาดดินส่วนที่สูงเกินขอบ Mold ออกและอุด แต่งผิวดินให้เรียบเสมอบนขอบ Mold ใช้แปรงปัดทำความสะอาดด้านนอก Mold แล้วถอด base plate ออก นำ Mold บรรจุดินไปชั่งให้ละเอียดถึง 0.1 กรัม
7. ดันตัวอย่างดินออกจาก Mold ด้วยเครื่องดันดินหรือกระทกแรงๆ ด้วยตุ้ม นำตัวอย่างดิน บริเวณกลางตัวอย่าง อย่างน้อย 100 กรัม ไปหาปริมาณความชื้น โดยการนำไปชั่ง แล้วนำไป อบให้แห้งในตู้อบ (ถ้าเป็นไปได้ควรเก็บตัวอย่างทั้ง บริเวณ บน กลาง ล่าง ไปหาปริมาณ ความชื้น)
8. นำตัวอย่างดินที่เหลือมาทุบให้ร่วนแล้วผสมกับตัวอย่างดินที่เหลือ แล้วผสมน้ำเพิ่มอีกประมาณ 2-3% คลุกเคล้าให้เข้ากัน แล้วทำการทดสอบตามข้อ 3-7 จนกระทั่งน้ำหนักดินใน Mold ที่ชั่งลดลงแล้วทำการทดสอบอีก 1-2 จุดซึ่งจำนวนครั้งในการทดสอบทั้งหมดไม่ควร เกิน 5-6 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การคำนวณผลการทดสอบ

$$1. \text{ ความหนาแน่นเปียกของดิน (Wet density)} = \frac{\text{น้ำหนักดินเปียก}}{\text{ปริมาตร Mold}} = \frac{W}{V} \quad \text{lb/ft}^3, \text{ g/cm}^3$$

$$2. \text{ ความหนาแน่นแห้งของดิน (Dry density)}, \gamma_d = \frac{w}{v(1+w)} \quad \text{lb/ft}^3, \text{ g/cm}^3$$

เมื่อ  $W$  = น้ำหนักดินเปียก (Wet weight) ใน Mold lb, g

$V$  = ปริมาตรของ Mold ft<sup>3</sup>, cm<sup>3</sup>

$w$  = ความชื้นของดิน (water content), เปอร์เซ็นต์/100

### 3.3.3 Direct Shear Test การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง

(มาตรฐานอ้างอิง ASTM D 3080)

การทดสอบแบบ Direct shear เป็นการทดสอบหาค่าคงตัวแรงเฉือนของวัสดุ ทั้งทรายและดินเหนียวคงสภาพ (Angle of Friction,  $\phi$  และ Cohesion,  $c$ ) ตัวอย่างดินจะถูกบังคับให้บีบอัดในแนวที่คาดการณไว้ ซึ่งจะอยู่ที่ประมาณกึ่งกลางตัวอย่างดิน ในการทดสอบ จะกระทำโดยใส่ตัวอย่างดินไว้ใน shear box และใส่ normal load กระทำในแนวตั้งกับตัวอย่าง และทำการเฉือนตัวอย่างดินใน shear box พร้อมทั้งตรวจสอบการเคลื่อนตัวของตัวอย่างดินทั้งในทางแนวตั้งและแนวนอน

ประเภทของการทดสอบ Direct Shear Test

1. Stress-controlled ทำได้โดยการใส่ load เพื่อเฉือนตัวอย่างดินอย่างสม่ำเสมอ ในขณะที่ทำเฉือนตัวอย่างดินก็ค่อยๆเพิ่ม load เพื่อเฉือนตัวอย่างดินอย่างคงที่

2. Strain-controlled ทำได้โดยการควบคุมให้ shear box มีการเคลื่อนตัวด้วยอัตราคงที่สม่ำเสมอ

ซึ่งเราใช้การทดสอบแบบ Strain-controlled

#### อุปกรณ์

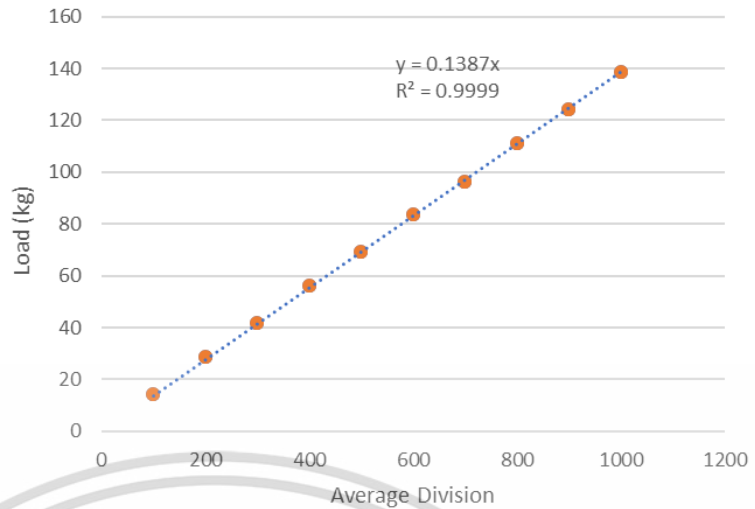
1) เครื่องทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Testing Machine) ที่มีแรงดันพอสำหรับตัวอย่างและมีอัตราเร่งพอเหมาะ

2) กล่องใส่ตัวอย่างดิน (Shear Box) และอุปกรณ์เตรียมตัวอย่าง

3) วงแหวนวัดแรง (Proving Ring) ขนาด 2 kN

ทำการแคลิเบรต Proving Ring ได้ค่า  $K = 0.1387$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 รูปแคลิเบรตและกราฟแคลิเบรต Proving Ring

4) มาตรฐานปิด (Dial Gauge) วัดการเคลื่อนตัวในแนวราบ อ่านได้ละเอียด 0.001 นิ้ว (0.025 มม.) และวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง อ่านได้ละเอียด 0.0001 นิ้ว (0.0025 มม.)

5) แผ่นน้ำหนัก (Plate Loading)

การคำนวณน้ำหนักถ่วงทำได้ดังนี้

$$\text{น้ำหนักถ่วง (Kg)} = \frac{(\gamma_{\text{ดิน}} \times H \times A)}{10} - n$$

เมื่อ  $\gamma_{\text{ดิน}}$

คือ ความหนาแน่นของดิน ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )

H

คือ ความลึกของดินที่พิจารณา (m)

A

คือ พื้นที่หน้าตัดของ Shear Box ( $\text{m}^2$ )

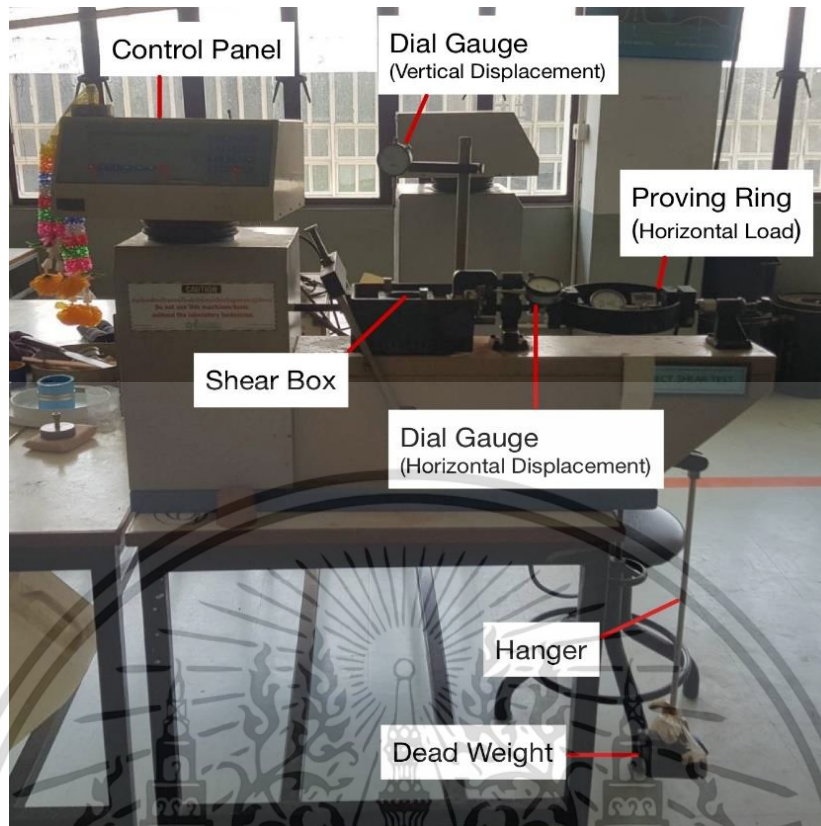
n

คือ น้ำหนักของ Load Pad (Kg)

6) เวอร์เนีย

7) เครื่องชั่งน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 Direct shear test

### วิธีการทดสอบ

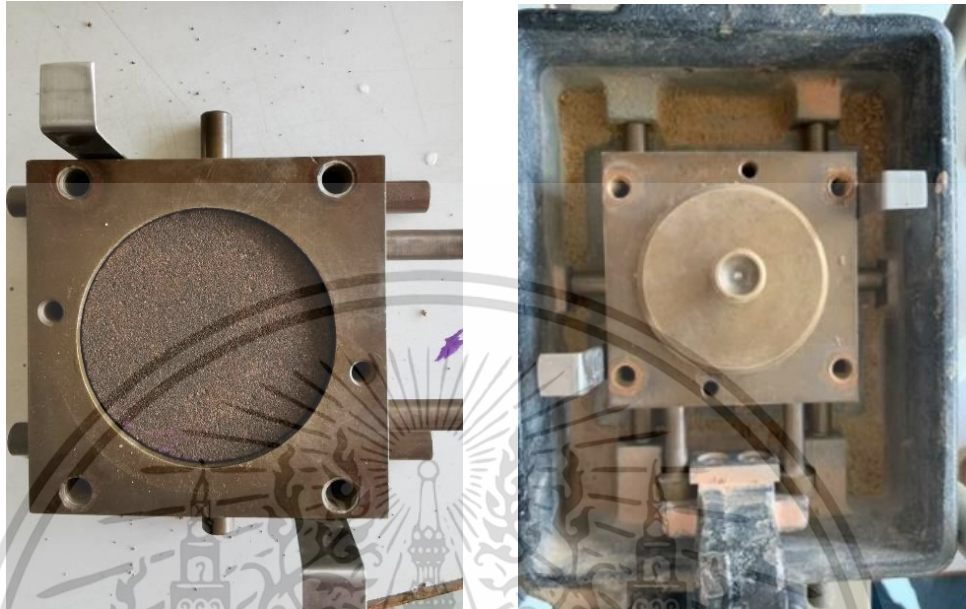
การเตรียมตัวอย่างดินและการติดตั้งเครื่องมือกรณีไม่เสริมราก ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ

1. ประกอบ Shear Box ท่อนบนและล่างเข้าด้วยกัน วางหินพรุนลงใน Shear Box แล้วทำการบดอัดดินให้ได้ความหนาแน่นตามที่ต้องการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วาดหินพรุนอีกแผ่นปิดทับด้านบน และวาง Load Pad โดยให้ร่องอยู่ในแนวขวางทิศทางการ  
เฉือน



3. เติมน้ำให้ท่วมตัวอย่างดินเพื่อให้ดินอยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมตัวอย่างดินและการติดตั้งเครื่องมือกรณีเสริมราก ในสภาวะอิมมัลชันด้วยน้ำ

1. ทำการชั้นนื้อตของแหวนรัดท่อพีวีซีออก อย่างระมัดระวังไม่ให้ก้อนดินแตก



2. ใช้มีดผ่าก้อนตัวอย่างให้ได้ความสูงตามที่ต้องการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการตัดแต่งก้อนดินให้ได้ขนาดพอดีกับ Shear Box นำก้อนดินที่ได้ไปใส่ใน Shear Box แล้วนำเข้าเครื่อง Direct Shear Test วางหินพรุนปิดด้านบนก่อนตัวอย่าง และวาง Load Pad ให้ร่องขวางกับทิศของการเฉือน



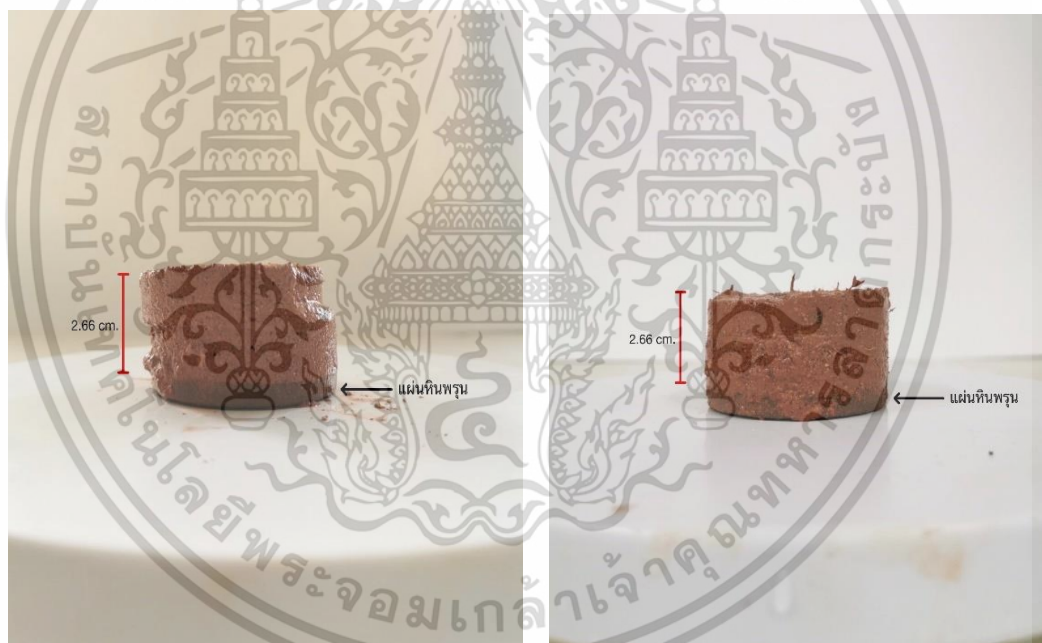
4. เติมน้ำให้ท่วมตัวอย่างเพื่อให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การกระทำการเฉือนตัวอย่างดิน

1. ถอดสกรูล็อก Shear Box ออก ปรับ Dial Gauge วัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและในแนวราบให้อยู่ที่ศูนย์
2. ทำการทดสอบโดยตั้งค่าอัตราการให้ Strain บนหน้าปัดที่อัตราเร็ว 0.200 มม./นาที
3. อ่านค่าวงแหวนวัดแรงและการเคลื่อนตัวแนวตั้ง ทุกๆการเคลื่อนตัวในแนวราบ 10 ซิต ( $\times 0.01$  ม.ม.) โดยการอ่านจาก Dial Gauge อ่านจนค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบเท่ากับ 1,000 ซิต หรือ 10 มม.
4. ถอดกล่องตัวอย่าง Shear Box ออก ส่วนตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบ แยกเทลงในภาชนะอย่าให้ตกลง หล่น สำหรับใช้ในการทดสอบครั้งต่อไป (Normal Load อื่นๆ)
5. ทำการทดสอบใหม่ตามวิธีการดังกล่าวทั้งหมดอีก 2 ครั้ง พยายามเตรียมตัวอย่างดินให้มีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน การทดสอบแต่ละครั้งให้เปลี่ยนน้ำหนักแขวนตามที่ได้คำนวณไว้ เพื่อให้ได้ Normal Load และค่า Shear Max อีก 2 ค่า



รูปที่ 3.17 ก่อนตัวอย่างหลังการเฉือนทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การคำนวณผลการทดสอบ

1. แรงเฉือน (Shear Stress,  $\tau$ )

จาก 
$$\tau = \frac{R \times K}{A}$$
 ksc

เมื่อ R = Proving Ring Reading ชีด

K = Proving Constant kg/ชีด

A = Shearing Area  $\text{cm}^2$

2. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\tau$  กับค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบ และหาค่า  $\tau_{\max}$  จากจุด peak ของกราฟ

3. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งกับการเคลื่อนตัวในแนวราบ

6. เขียนกราฟ Mohr's Diagram ระหว่าง  $\sigma_n$  และ  $\tau_{\max}$  แล้วลากเส้นตรงผ่านจุดเหล่านั้นเป็นเส้น "Mohr – Coulomb Failure Envelope" ซึ่งจะได้ค่าความเชื่อมแน่นของดิน (cohesion, c) และค่ามุมเสียดทานภายใน (internal friction angle,  $\phi$ )

## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

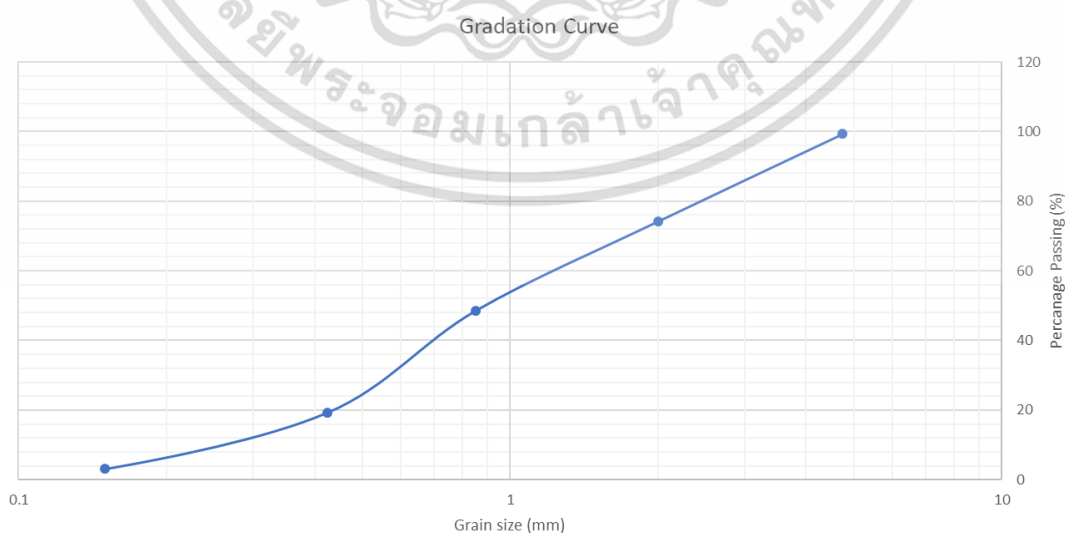
#### 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของดินที่ใช้ในการศึกษา

##### 4.1.1 ขนาดคละและชนิดของเม็ดดิน (grain size and soil classification)

จากผลการทดลองพบว่า หากจำแนกตามระบบ Unified Soil Classification System (USCS) ดินมีคุณสมบัติเป็นดินทรายปนดินเหนียว (Clayey Sand, SC)

ตาราง 4.1 ข้อมูลขนาดคละและชนิดของเม็ดดิน

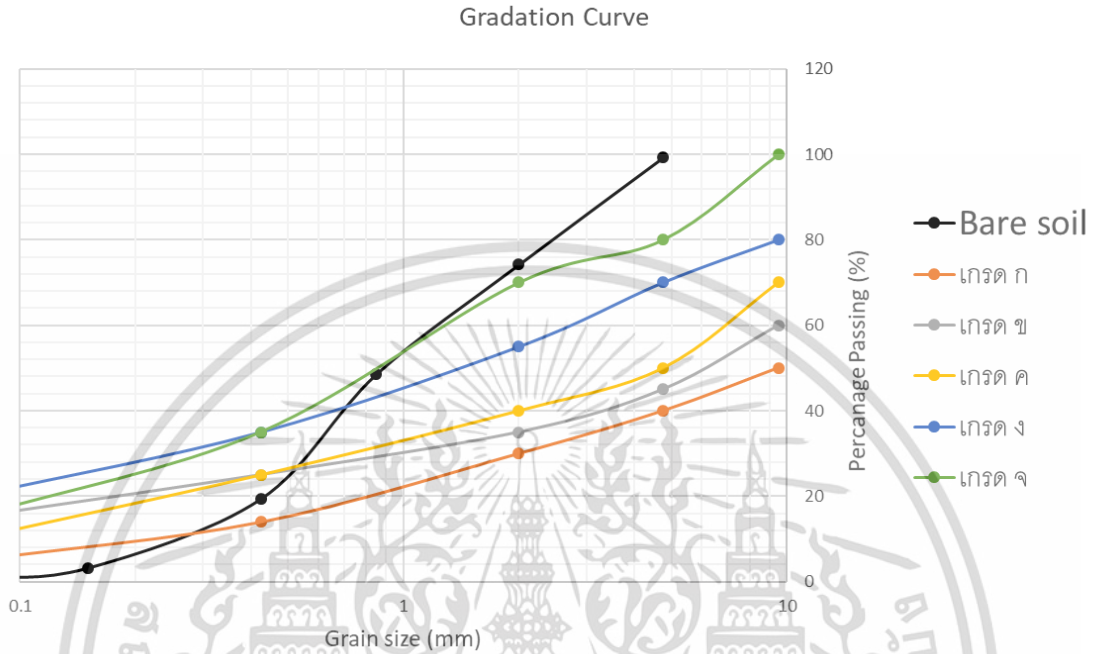
Seive No.	Sieve Opening (mm)	Weight of Sieve (kg)	Weight of Sieve+Soil Retained (kg)	Retained (kg)	Cumulative retained (kg)	Passing (kg)	Percentage Passing (%)
4	4.75	0.514	0.528	0.014	0.014	1.985	99.2996
10	2	0.667	1.168	0.501	0.515	1.484	74.2371
20	0.85	0.397	0.910	0.513	1.028	0.971	48.5743
40	0.425	0.376	0.960	0.584	1.612	0.387	19.3597
100	0.15	0.320	0.644	0.324	1.936	0.063	3.1516
200	0.075	0.325	0.374	0.049	1.985	0.014	0.7004
Pan	-	0.318	0.332	0.014	1.999	0	0



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลขนาดคละของดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการแบ่งเกรดของดินลูกรังที่ใช้ทำชั้นรองพื้นทาง (Subbase) ตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ. 2208 - 57: มาตรฐานการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ (Sieve Analysis) เป็นเกรด ก , ข , ค , ง และ จ พบว่าดินลูกรังที่นำมาทดสอบจัดเป็น ดินเกรด จ.



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลขนาดคละของเม็ดดินตามมาตรฐาน มยผ.

#### 4.1.2 การบดอัดดินและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับความหนาแน่น (Compaction and Moisture-Density Relation)

จากการทดสอบการบดอัดดินโดยการผสมน้ำที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ โดยน้ำหนักดินแห้ง ได้ผลดังนี้

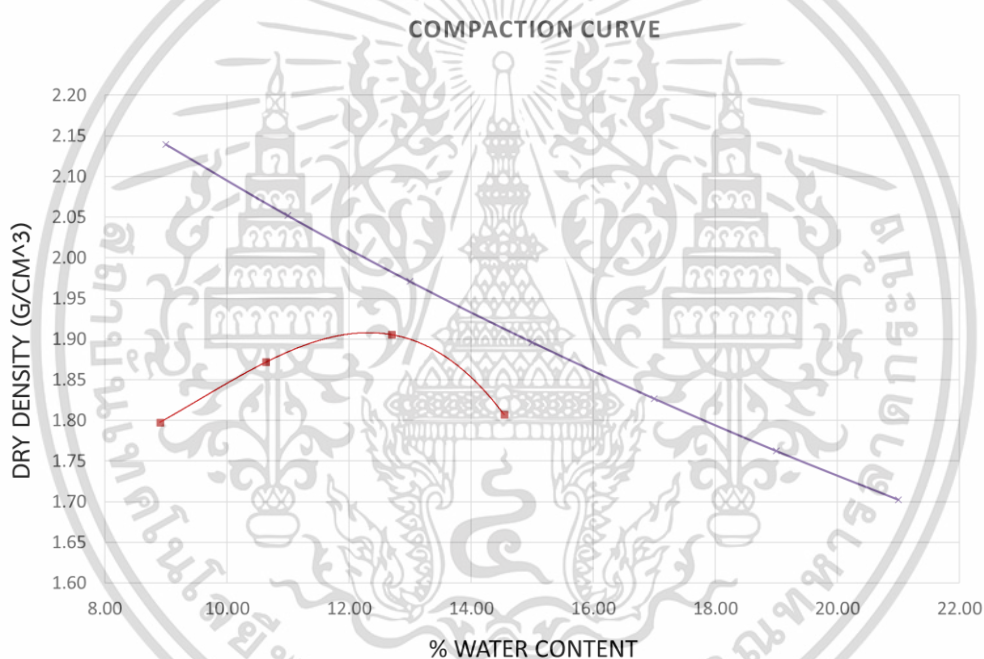
ตารางที่ 4.2 Density Determination

Trail No.	1	2	3	4	5
WT. of soil+mold ,g	9,865	10,108	10,272	10,106	10,038
WT. of mold ,g	5,666	5,666	5,666	5,666	5,666
WT. of soil in mold ,g	4,199	4,442	4,606	4,440	4,372
wet density ,g/cm <sup>3</sup>	1.958	2.071	2.147	2.070	2.038
dry density ,g/cm <sup>3</sup>	1.798	1.872	1.905	1.807	1.753

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 Water Content

wet soil+container ,g	154.439	165.793	195.166	146.293	189.876
dry soil+container ,g	143.124	151.247	175.017	129.764	165.171
WT of container ,g	15.967	14.529	16.296	16.062	13.421
WT of water ,g	11.315	14.546	20.149	16.529	24.705
WT of dry soil ,g	127.157	136.718	158.721	113.702	151.750
% water content	8.898	10.639	12.695	14.537	16.280

รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) กับปริมาณความชื้น (%)

จากกราฟเมื่อดินผสมกับน้ำที่ 9 , 11 , 13 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักดินแห้ง จะมีค่าความหนาแน่นสูงสุดเท่ากับ 1.907 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และความชื้นที่เหมาะสมเท่ากับ 12.31 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการศึกษาปริมาณรากหญ้าแฝก

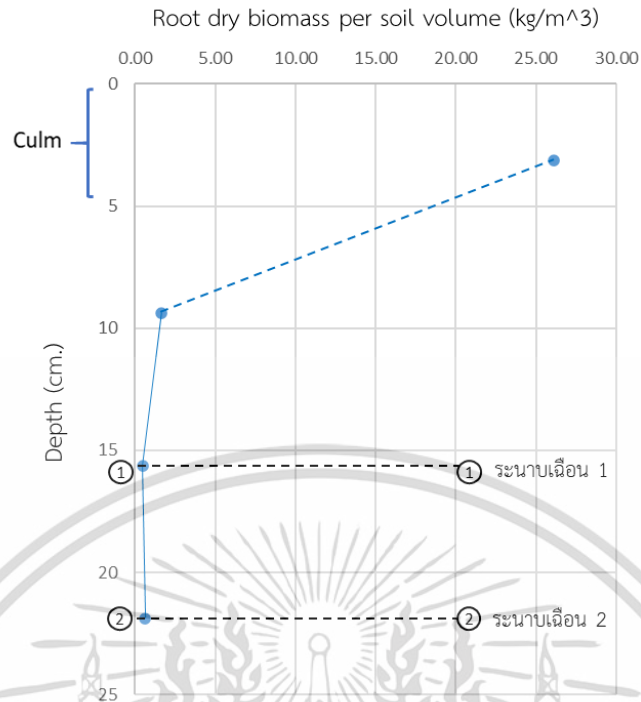
### 4.2.1 ผลการศึกษาอัตราส่วนรากหญ้าแฝกโดยปริมาตร (Bulk Root Ratio)

การศึกษาอัตราส่วนรากหญ้าแฝกโดยปริมาตร (Bulk Root Ratio) เป็น การศึกษาแบบทำลาย โดยล้างดินออกจากรากหญ้าแฝกหลังการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยของดิน ด้วยการซีฟผ่านตะแกรงเบอร์ 10 จากนั้นนำรากหญ้าแฝกที่ล้างได้ไปอบที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสและชั่งน้ำหนัก ทำให้ทราบน้ำหนักรากแห้งต่อปริมาตรดิน (Root Biomass per Soil Volume) และนำค่าที่ได้ นี้ไปหารด้วยหน่วยน้ำหนักของราก กำหนดให้มีค่าประมาณ  $641 \text{ kg/m}^3$  (Gray & Sotir, 1994) ก็จะได้อัตราส่วนรากหญ้าแฝกโดยปริมาตร (Bulk Root Ratio) ดังตารางที่ 4.4 โดยระยะเวลาในการปลูกหญ้าแฝกประมาณ 2 เดือน (63-65 วัน)

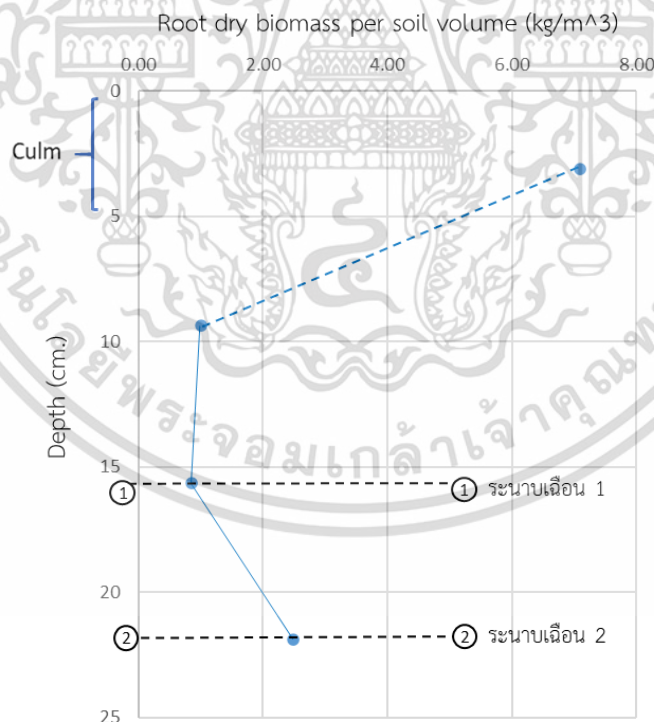
ตารางที่ 4.4 น้ำหนักรากต่อปริมาตรและอัตราส่วนรากโดยปริมาตรของตัวอย่างทดสอบ

Sample	Root Dry Biomass per Soil Volume (in shear box) ( $\text{kg/m}^3$ )	Dried Bulk Root Ratio (in shear box) (%)	Root Dry Biomass per Soil Volume (total) ( $\text{kg/m}^3$ )	Dried Bulk Root Ratio (total) (%)
Soil + root 1 (upper)	0.479	0.075	0.855	0.133
Soil + root 1 (lower)	0.599	0.093	2.490	0.388
Soil + root 2 (upper)	0.635	0.099	0.163	0.025
Soil + root 2 (lower)	1.078	0.168	2.020	0.315
Soil + root 3 (upper)	1.198	0.187	1.283	0.200
Soil + root 3 (lower)	1.797	0.280	6.891	1.075

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



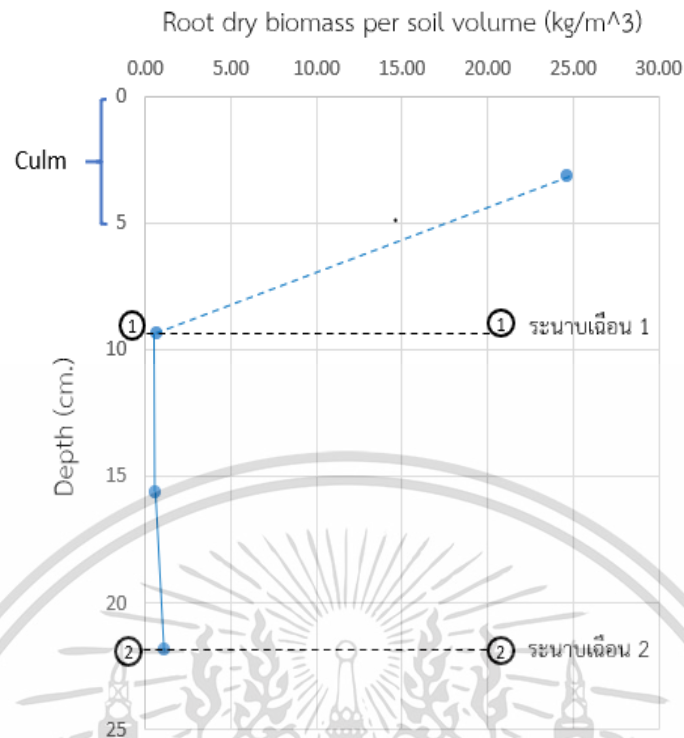
(a) รากใน shear box



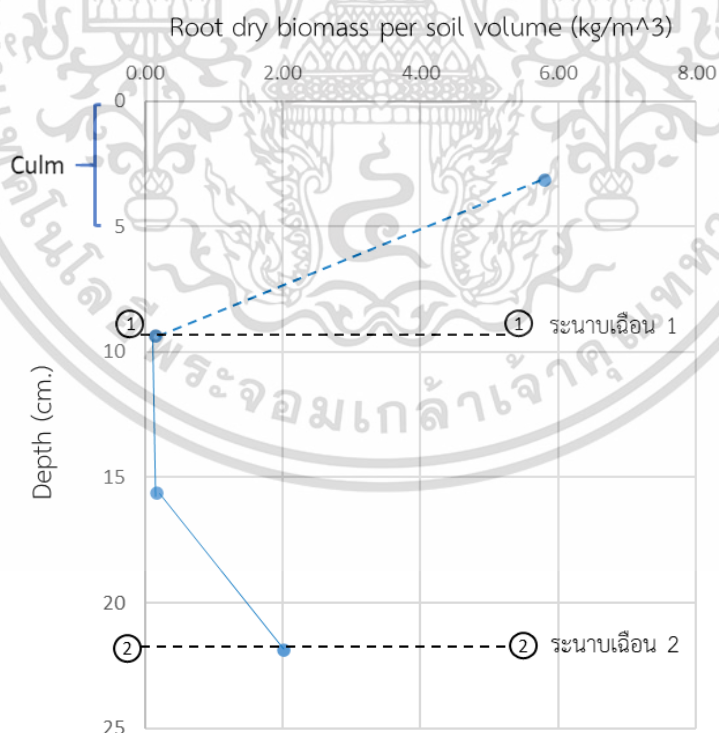
(b) รากรวมทั้งกระบอ

รูปที่ 4.4 นำหนักรากแห้งต่อปริมาตรดิน ที่ระดับความลึกต่างๆ ของตัวอย่างที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) รากใน shear box

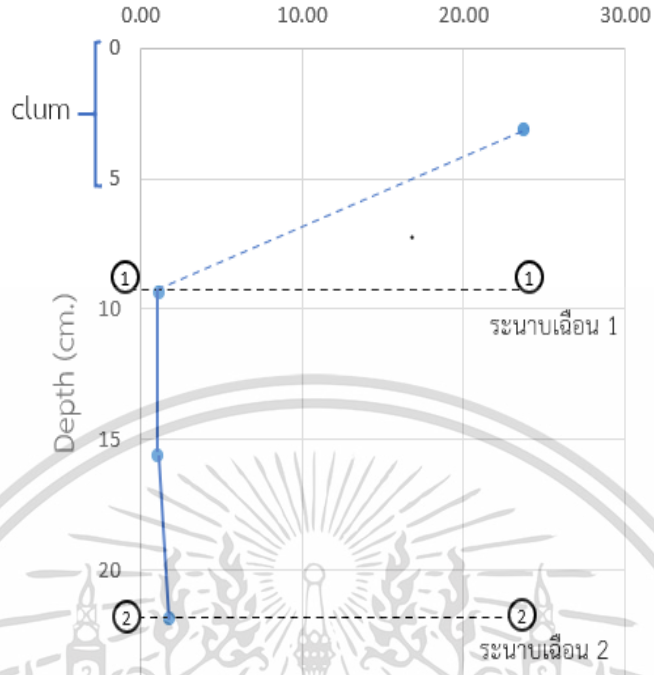


(b) รากรวมทั้งกระบอก

รูปที่ 4.5 น้ำหนักรากแห้งต่อปริมาตรดิน ที่ระดับความลึกต่างๆ ของตัวอย่างที่ 2

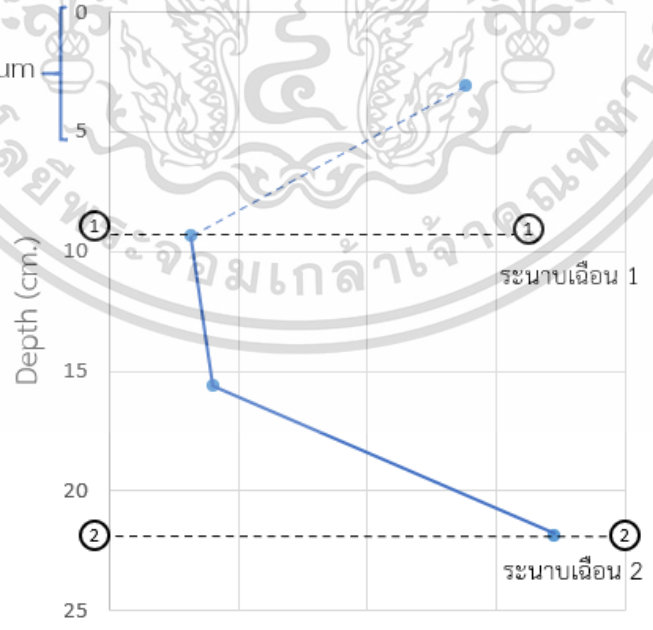
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Root dry biomass per soil volume (kg/m<sup>3</sup>)



(a) รากใน shear box

Root dry biomass per soil volume (kg/m<sup>3</sup>)



(b) รากรวมทั้งกระบอก

รูปที่ 4.6 นำหนักรากแห้งต่อปริมาตรดิน ที่ระดับความลึกต่างๆ ของตัวอย่างที่ 3 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นเข้าเบี่ยงประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

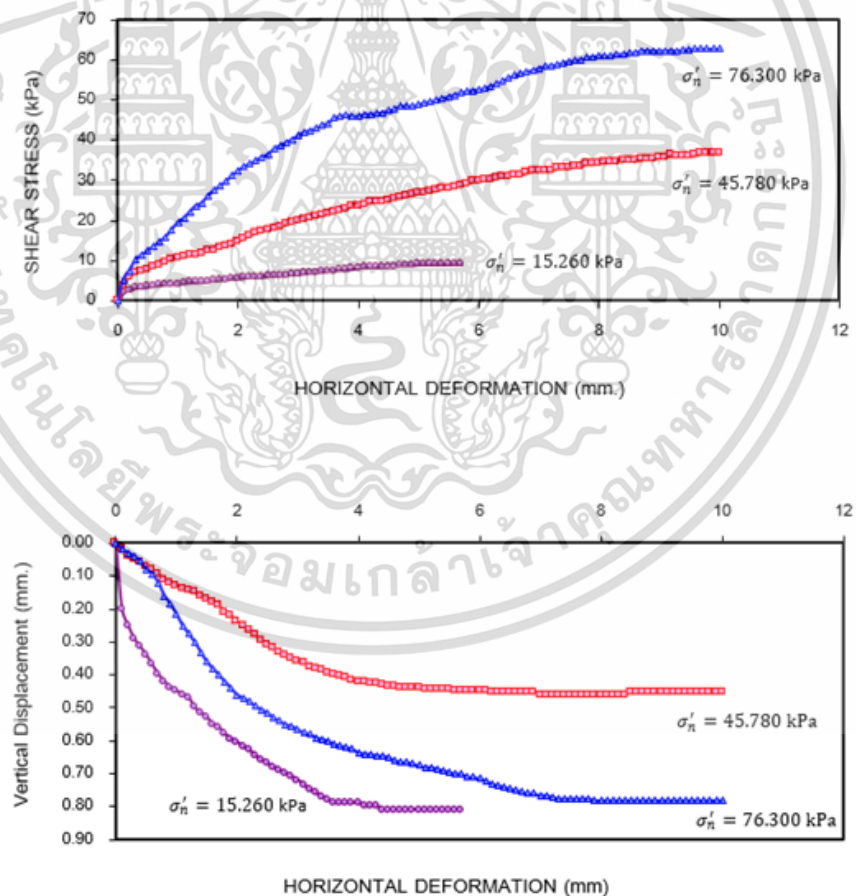
### 4.3 ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินลูกรังในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ

#### 4.3.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงของดินลูกรังที่ไม่เสริมกำลังด้วยราก

ผลการทดสอบคุณสมบัติกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงของดินที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วยราก โดยใช้แรงกดในแนวตั้ง 15.26 45.78 และ 76.30 กิโลปาสกาล อัตราการเฉือนของตัวอย่างใช้อยู่ที่ 0.2 มิลลิเมตร/นาที ได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบ Direct Shear Test

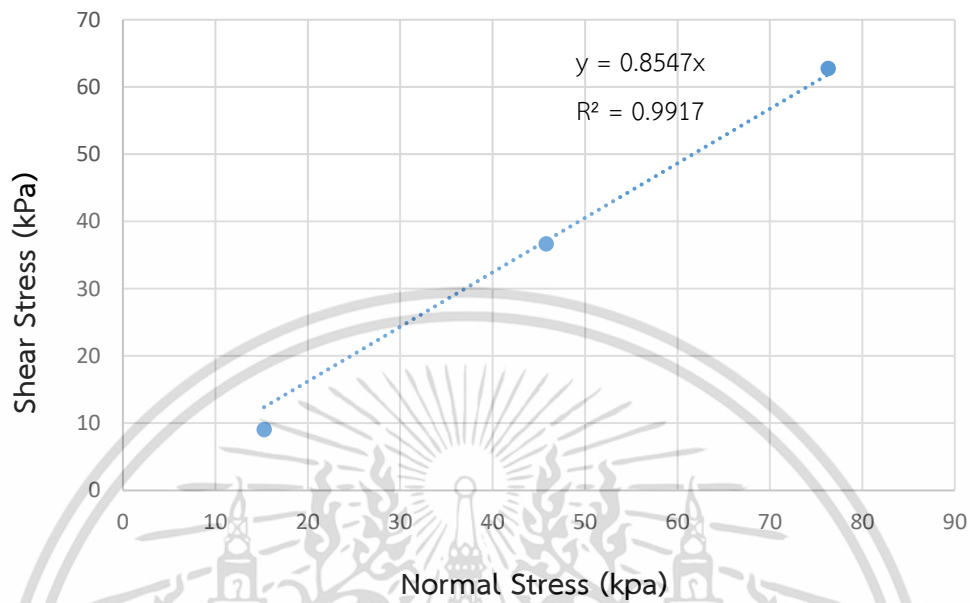
Depth (m.)	Normal Stress (kPa)	Max. Shear Stress (kPa)
1	15.260	9.064
3	45.780	36.697
5	76.300	62.783



รูปที่ 4.7 กราฟหน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวราบ และกราฟการเคลื่อนที่ในแนวตั้งกับการเคลื่อนที่ในแนวราบของดินที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วยราก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของแต่ละความลึกมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Normal Stress (KPa) และ Shear Stress (KPa) เพื่อหามุมเสียดทานภายใน (Internal Friction Angle) ได้ดังนี้

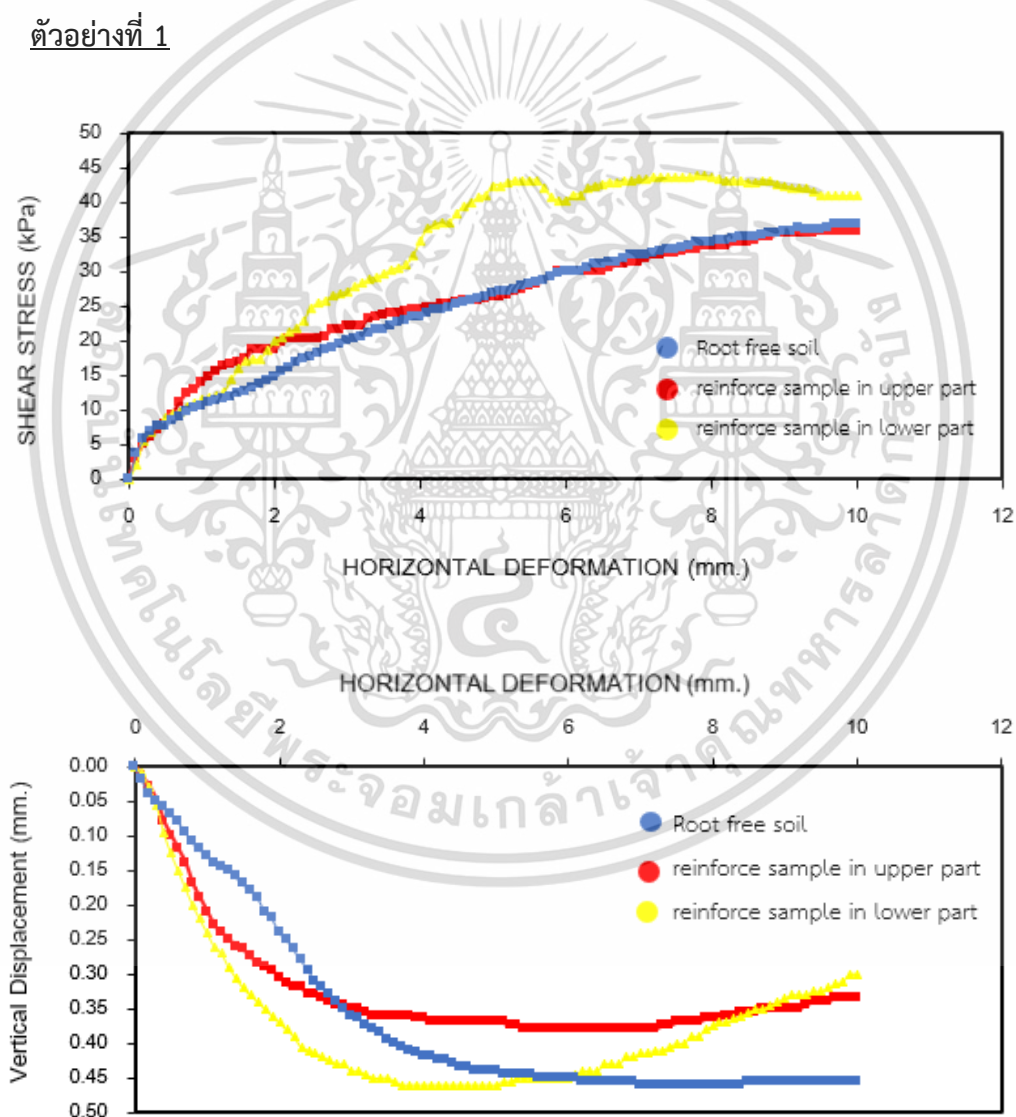


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress (kPa) – Normal Stress (kPa) ของดินลูกรังไม่เสริมกำลังด้วยราก

จากกราฟจะเห็นได้ว่า ดินลูกรังไม่เสริมกำลังด้วยราก มีค่ามุมเสียดทานภายใน (Internal Friction Angle) เท่ากับ  $40.52^\circ$

### 4.3.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงของดินลูกรังที่เสริมกำลังด้วยรากหญ้าแฝกที่อายุการปลูก 2 เดือน

ผลการทดสอบคุณสมบัติกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงของดินที่เสริมกำลังด้วยราก โดยใช้แรงกดในแนวตั้ง 45.78 กิโลปาสคาล อัตราการเฉือนของตัวอย่างขึ้นอยู่กับที่ 0.2 มิลลิเมตร/นาที และระยะเวลาในการปลูกหญ้าแฝกประมาณ 2 เดือน (63-65 วัน) ได้ผลการทดสอบดังแสดงใน รูปที่ 4.9 , 4.10 และ 4.11 ซึ่งจากผลการทดสอบที่ได้นี้ สามารถหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นจากรากหญ้าแฝก (Shear Strength Increase) โดยการนำค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของแต่ละตัวอย่างที่มีรากหญ้าแฝกกลับไปหาค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของดินที่ไม่มีรากหญ้าแฝกดังรูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.6

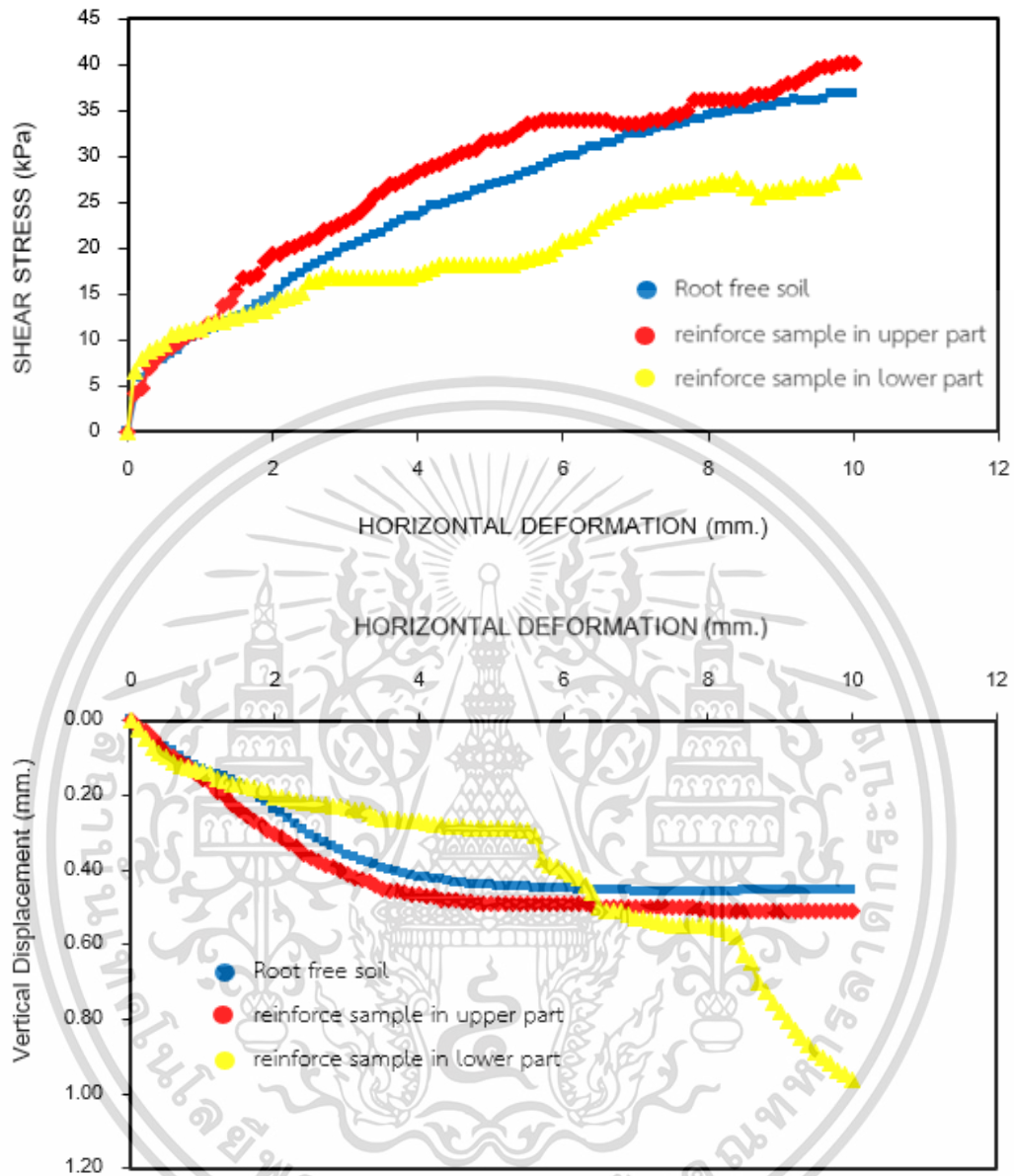


รูปที่ 4.9 กราฟหน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวราบ และกราฟการเคลื่อนที่ในแนวตั้งกับการเคลื่อนที่ในแนวราบของดินที่เสริมกำลังด้วยรากหญ้าแฝก ของตัวอย่างที่ 1

(normal stress of 45.780 kPa)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

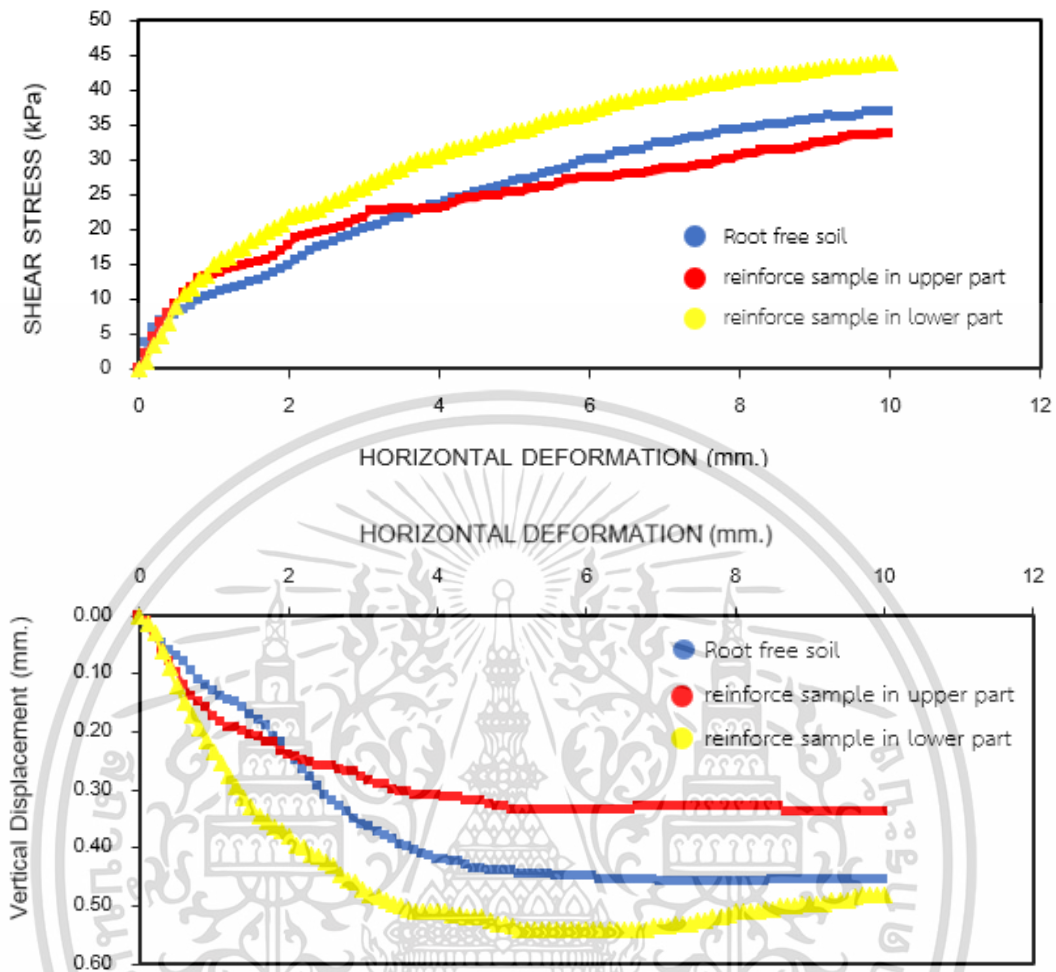
## ตัวอย่างที่ 2



รูปที่ 4.10 กราฟหน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวราบ และกราฟการเคลื่อนที่ในแนวตั้งกับการเคลื่อนที่ในแนวราบของดินที่เสริมกำลังด้วยรากหญ้าแฝก ของตัวอย่างที่ 2 (normal stress of 45.780 kPa)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

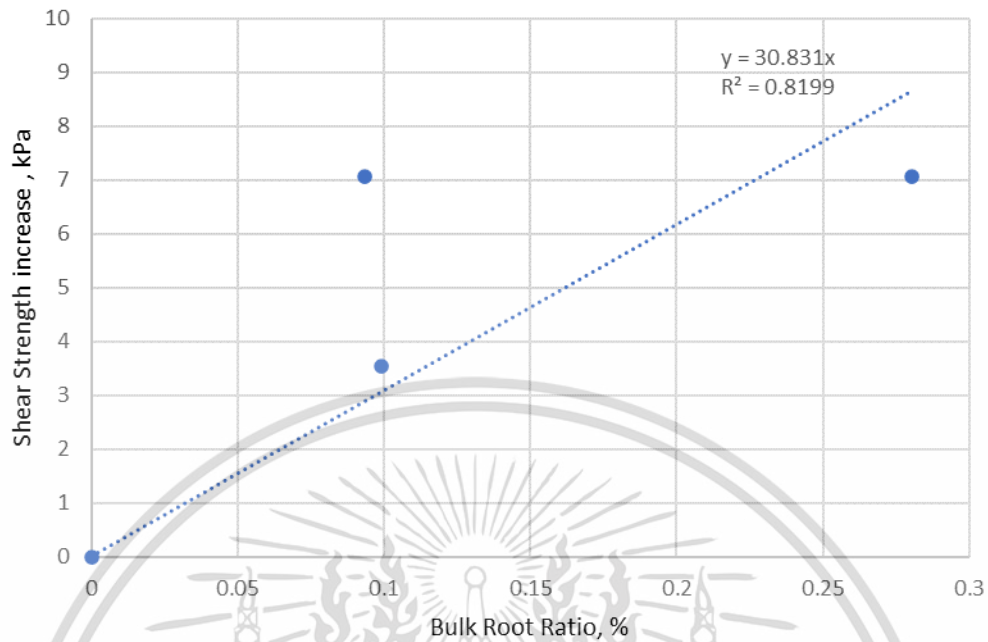
### ตัวอย่างที่ 3



รูปที่ 4.11 กราฟหน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวราบ และกราฟการเคลื่อนที่ในแนวตั้งกับการเคลื่อนที่ในแนวราบของดินที่เสริมกำลังด้วยรากหญ้าแฝก ของตัวอย่างที่ 3 (normal stress of 45.780 kPa)

จากรูปที่ 4.9 4.10 4.11 ได้แสดงผลการทดสอบ direct shear ในระหว่างการทดสอบจะควบคุมการเตรียมตัวอย่างเหมือนกัน แขน้ำให้อิ่มตัวด้วยน้ำด้วยเวลาเท่ากัน ทั้งน้ำหนักกดทับด้วยเวลาที่เท่ากัน จากนั้นนำมาทดสอบ พบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกในก้อนดินส่วนล่างมีการเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับดินที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วยราก เหตุที่เส้นกราฟ shear stress มีค่าขึ้นลงเนื่องจากมีรากช่วยรับแรงทำให้กำลังต้านแรงเฉือนเพิ่มขึ้นจนรากนั้นขาด (Breaking) หรือรากหลุดจากดิน (Slipping) ทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนตกลงจากนั้นแรงจะถูกส่งถ่ายไปยังรากอีกเส้นหนึ่งต่อไป ส่งผลให้ได้กราฟที่ขึ้นๆลงๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนรากต่อปริมาตรกับกำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนรากต่อปริมาตรกับกำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นจากราก

ตารางที่ 4.6 กำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของดินที่เสริมรากหญ้าแฝก

sample	Max. Shear Strength (kPa)	Shear Strength increase at 3 m. Depth (%)
Bare soil	36.697	-
Soil + root 1 (upper)	35.813	-
Soil + root 1 (lower)	43.771	19.277
Soil + root 2 (upper)	40.234	9.638
Soil + root 2 (lower)	28.296	-
Soil + root 3 (upper)	33.602	-
Soil + root 3 (lower)	43.771	19.277

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษา

#### 5.1 บทนำ

จากผลการศึกษาผลกระทบจากการเจริญเติบโตของรากต่อคุณสมบัติเชิงกลของดิน เป็นการศึกษาโดยใช้หญ้าแฝกสายพันธุ์สงขลา 3 ปลูกลงในดินลูกรังแล้วทดสอบด้วยการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง ที่อายุการปลูก 2 เดือน

#### 5.2 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำเพื่อศึกษาการเสริมรากในดินเพื่อเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือนให้กับดินลูกรัง ด้วยการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง ซึ่งให้ข้อสรุปดังนี้

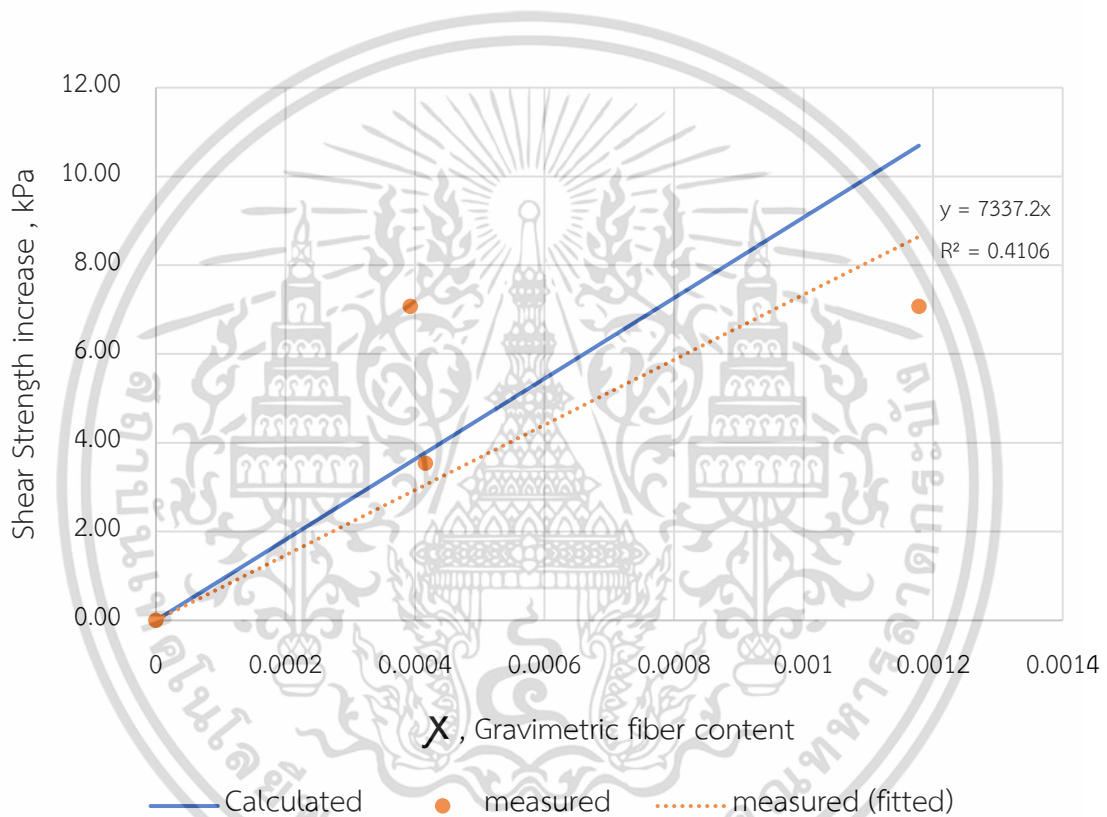
5.2.1 จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบอ้อมตัวด้วยน้ำของดินที่ไม่เสริมกำลังด้วยราก ซึ่งจำแนกตามระบบ Unified Soil Classification System (USCS) พบว่าเป็นดินทรายปนดินเหนียว (Clayey Sand, SC) ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 63.2 มิลลิเมตร สูง 25 มิลลิเมตร พบว่าค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิผล (Effective cohesion,  $c'$ ) มีค่าเท่ากับ 0 กิโลปาสคาล และค่ามุมเสียดทานประสิทธิผล (Effective angle of friction,  $\phi'$ ) มีค่าเท่ากับ 40.52 องศา

5.2.2 จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบอ้อมตัวด้วยน้ำของดินที่เสริมกำลังด้วยรากหญ้าแฝก พบว่าการเสริมกำลังด้วยรากนั้นสามารถช่วยเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของดินโดยประมาณ 9 ถึง 19 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เดียวกันพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินที่เสริมกำลังด้วยรากจะมีพฤติกรรมเคลื่อนตัวมากกว่า ดินที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วยรากเป็นผลมาจากเมื่อรากเจริญเติบโตในดิน จะส่งผลให้ดินมีช่องว่างมากขึ้น และทำให้การเคลื่อนตัวมากขึ้น

5.2.3 จากผลการศึกษาอัตราส่วนรากหญ้าแฝกโดยปริมาตร (Bulk Root Ratio) นั้นพบว่ายังมีปริมาณรากในตัวอย่างดินที่มากก็จะให้กำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นจากรากหญ้าแฝก (Shear Strength Increase) มีค่ามากตามไปด้วย และพบค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนรากหญ้าแฝกโดยปริมาตรแบบแห้ง (Dried Bulk Root Ratio) กับค่ากำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นจากรากหญ้าแฝก (Shear Strength Increase) มีค่าเท่ากับ 30.83 กิโลปาสคาลต่อเปอร์เซ็นต์

5.2.4 จากงานวิจัยของ Chunling Li , M.ASCE and Jorge G. Zonberg , M.ASCE ได้เสนอสมการคาดคะเนกำลังรับแรงเฉือนของดินผสมเส้นใยซึ่งการพังทลายเกิดจากเส้นใยถูกดึงออก (fiber egress) เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษานี้ เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์วิชาการโดยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

pullout) ซึ่งสมการมีดังนี้  $S_{eq,p} = c_{eq,p} + (\tan \phi)_{eq,p} \cdot \sigma_n$  และจากผลการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนในทางทฤษฎี ได้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของทฤษฎีมีค่าเท่ากับ 39.129, 42.693, 42.907 และ 49.8217 กิโลปาสคาล ค่ากำลังรับแรงเฉือนของการทดสอบมีค่า เท่ากับ 36.697, 43.771, 40.234 และ 43.771 กิโลปาสคาล เมื่อนำไปพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นกับอัตราส่วนของน้ำหนักรากต่อน้ำหนักดินดังรูปที่ 5.1 พบว่ากำลังรับแรงเฉือนของการทดสอบในห้องปฏิบัติการมีค่าไม่สูงมากเมื่อเทียบกับค่าทางทฤษฎี ซึ่งอาจมีผลมาจากอนุภาคของดินขนาดเล็ก (fine particle) ได้ตกลงสู่ล่างกระบอกทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 19.175%



รูปที่ 5.1 กำลังต้านทานแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของทฤษฎีและการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 สามารถนำไปศึกษาต่อในการปรับปรุงคุณภาพของดิน

5.3.2 เพิ่มการทดสอบหาลำดับรับแรงเฉือนในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ เพื่อที่จะสามารถจำลองกำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นจากรากหญ้าแฝกได้แม่นยำขึ้นตามสภาวะจริงในสนาม

5.3.3 เพิ่มจำนวนการทดสอบให้มากขึ้นเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของกำลังรับแรงเฉือน

เนื่องจากรากมีขนาด รูปร่าง และการกระจายตัวไม่แน่นอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.4 ตัวอย่างดินปลูกหญ้าแฝกที่ใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ มีอายุในการปลูกประมาณ 2 เดือน ในการศึกษาต่อไปอาจมีการทดสอบที่อายุการปลูกต่างๆเพื่อศึกษาแนวโน้มของปริมาณรากและกำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นตามช่วงอายุการปลูกหญ้าแฝก

5.3.5 ทำการทดสอบ Compressibility เพื่อสังเกตการทรุดตัวของดิน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

1. Wu, T.H, 1976, "Investigation of landslide on Prince of Wale Island Alaska", **Geotechnical Engineering Report**, No. 5, Department of Civil Engineering, Ohio State University, Columbus, 94 p.
2. สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ, 2541, "หญ้าแฝกคืออะไร", **สารนารูเรื่องหญ้าแฝก**, \*รุ่งเพชรการพิมพ์, กรุงเทพฯ, 13 หน้า.
3. Wilde S.A. Forest soil : Their Protection and Relation to Silviculture, **New York : Ronald Press**, 1958, 537 p.
4. กรมพัฒนาที่ดิน. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2541, **ความรู้เรื่องหญ้าแฝก**, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ, 115 หน้า.
5. ธนาคารโลก, 2540, **หญ้าแฝก Vetiver grass แนวริ้วเพื่อป้องกันการพังทลาย**, สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ, กรุงเทพฯ, 63 หน้า.
6. Bardet , J.P., 1977, Experimental Soil Mechanics., **Prentice Hall**, New Jersey, pp 421-427.
7. Fredlund, D.G. and H. Rahardjo. 1993. Soil mechanics for Unsaturated Soils, **John Wiley and Sons, Inc.**, New Jersey.
8. Waldron, L. J. and Dakessian S., 1982, "Effect of Grass, Legume, and Tree Roots on Soil Shearing Resistance," **Soil Science Society of America Journal**, Vol. 46, pp. 894-899.
9. ดิถี แห่งเชาวนิช, 1998, "Vetiver Grass for Slope Stabilization and Erosion Control," **Pacific Rim Vetiver Network Technical Bulletin**, No. 1998/2, pp. 4-16.
10. นายสุรเทพ ธนะทรัพย์ชูศักดิ์, 2002, "Engineering Properties of Peaty Soil Reinforced with Vetiveria Zizanioides Nash Roots Donated by the King and Roy-Ed Vetiveria Nemoralis A. Camus Root for Slope Protection"
11. Operstein, V. and Frydman S., 2000, "The Influence of Vegetation on Soil Strength." **Ground Improvement** ,Vol4, No. 2, pp. 81-89.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. Chunling Li, M.ASCE; and Jorge G. Zornberg, M.ASCE., 2013, “Mobilization of Reinforcement Forces in Fiber-Reinforced Soil.” **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, No. 139(1), pp. 107-115.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.  
ตารางข้อมูลผลการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการทดสอบ Direct Shear Test

ตารางที่ ก-1 ดินเปล่า (แรงกดแนวตั้ง 15.26 kPa)

Horizontal Displacement (mm.)	Vertical Displacement (mm.)	Proving ring reading (Div.)	Shear stress (kPa)
0.00	0.000	0.00	0.000
0.10	0.200	5.00	2.211
0.20	0.250	6.00	2.653
0.30	0.290	7.50	3.316
0.40	0.315	7.50	3.316
0.50	0.340	8.00	3.537
0.60	0.370	8.50	3.758
0.70	0.400	9.00	3.979
0.80	0.420	9.50	4.200
0.90	0.440	9.50	4.200
1.00	0.450	9.50	4.200
1.10	0.460	10.00	4.421
1.20	0.470	10.50	4.642
1.30	0.500	10.50	4.642
1.40	0.515	10.50	4.642
1.50	0.530	11.00	4.863
1.60	0.550	11.50	5.085
1.70	0.560	12.00	5.306
1.80	0.580	12.00	5.306
1.90	0.595	12.50	5.527
2.00	0.605	12.50	5.527
2.10	0.620	13.00	5.748
2.20	0.630	13.50	5.969
2.30	0.645	13.50	5.969
2.40	0.660	13.50	5.969
2.50	0.670	14.00	6.190
2.60	0.680	14.00	6.190
2.70	0.690	14.50	6.411
2.80	0.700	14.50	6.411
2.90	0.710	15.00	6.632
3.00	0.720	15.00	6.632
3.10	0.735	15.50	6.853
3.20	0.750	16.00	7.074
3.30	0.760	16.00	7.074
3.40	0.770	16.50	7.295
3.50	0.780	17.00	7.516
3.60	0.790	17.00	7.516
3.70	0.790	17.50	7.737
3.80	0.790	17.50	7.737
3.90	0.790	18.00	7.958

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 ดินเปล่า (แรงกดแนวตั้ง 15.26 kPa) (ต่อ)

4.00	0.790	18.50	8.179
4.10	0.800	19.00	8.401
4.20	0.800	19.00	8.401
4.30	0.800	19.00	8.401
4.40	0.810	19.00	8.401
4.50	0.810	19.50	8.622
4.60	0.810	19.50	8.622
4.70	0.810	20.00	8.843
4.80	0.810	20.00	8.843
4.90	0.810	20.00	8.843
5.00	0.810	20.50	9.064
5.10	0.810	20.50	9.064
5.20	0.810	20.50	9.064
5.30	0.810	20.50	9.064
5.40	0.810	20.50	9.064
5.50	0.810	20.50	9.064
5.60	0.810	20.50	9.064
5.70	0.810	20.50	9.064

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-2 ดินเปล่า (แรงกดแนวตั้ง 45.78 kPa)

Horizontal Displacement (mm.)	Vertical Displacement (mm.)	Proving ring reading (Div.)	Shear stress (kPa)
0.00	0.000	0.00	0.000
0.10	0.020	8.50	3.758
0.20	0.040	13.00	5.748
0.30	0.050	15.50	6.853
0.40	0.060	17.00	7.516
0.50	0.070	17.50	7.737
0.60	0.080	19.00	8.401
0.70	0.095	20.00	8.843
0.80	0.110	22.00	9.727
0.90	0.120	23.00	10.169
1.00	0.130	24.00	10.611
1.10	0.140	25.00	11.053
1.20	0.145	25.50	11.274
1.30	0.150	26.00	11.495
1.40	0.160	27.00	11.938
1.50	0.170	28.00	12.380
1.60	0.180	28.50	12.601
1.70	0.190	30.00	13.264
1.80	0.210	31.00	13.706
1.90	0.220	32.00	14.148
2.00	0.240	33.00	14.590
2.10	0.250	35.00	15.475
2.20	0.265	36.50	16.138
2.30	0.280	38.00	16.801
2.40	0.295	39.00	17.243
2.50	0.310	40.00	17.685
2.60	0.320	41.00	18.127
2.70	0.330	42.00	18.570
2.80	0.340	43.00	19.012
2.90	0.350	44.00	19.454
3.00	0.360	45.00	19.896
3.10	0.365	45.50	20.117
3.20	0.375	46.50	20.559
3.30	0.380	47.50	21.001
3.40	0.385	48.50	21.443
3.50	0.395	49.00	21.664
3.60	0.400	50.00	22.107
3.70	0.405	51.00	22.549
3.80	0.410	52.00	22.991
3.90	0.415	53.00	23.433
4.00	0.420	53.00	23.433

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-2 ดินเปล่า (แรงกดแนวตั้ง 45.78 kPa) (ต่อ)

4.10	0.420	54.00	23.875
4.20	0.425	55.50	24.538
4.30	0.425	55.50	24.538
4.40	0.430	56.00	24.759
4.50	0.435	57.00	25.202
4.60	0.435	57.50	25.423
4.70	0.440	58.00	25.644
4.80	0.440	59.00	26.086
4.90	0.440	59.50	26.307
5.00	0.440	60.50	26.749
5.10	0.445	61.00	26.970
5.20	0.445	61.50	27.191
5.30	0.445	62.00	27.412
5.40	0.445	63.00	27.854
5.50	0.445	63.50	28.075
5.60	0.450	64.00	28.296
5.70	0.450	65.00	28.739
5.80	0.450	66.00	29.181
5.90	0.450	67.00	29.623
6.00	0.450	67.50	29.844
6.10	0.450	68.00	30.065
6.20	0.455	68.00	30.065
6.30	0.455	69.00	30.507
6.40	0.455	70.00	30.949
6.50	0.455	70.00	30.949
6.60	0.455	71.00	31.391
6.70	0.455	71.00	31.391
6.80	0.455	72.00	31.834
6.90	0.455	73.00	32.276
7.00	0.460	73.00	32.276
7.10	0.460	73.00	32.276
7.20	0.460	73.50	32.497
7.30	0.460	74.50	32.939
7.40	0.460	75.00	33.160
7.50	0.460	75.00	33.160
7.60	0.460	75.50	33.381
7.70	0.460	76.00	33.602
7.80	0.460	77.00	34.044
7.90	0.460	77.00	34.044
8.00	0.460	77.50	34.265
8.10	0.460	78.00	34.486
8.20	0.460	78.00	34.486
8.30	0.460	78.50	34.707
8.40	0.460	79.00	34.928

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-2 ดินเปล่า (แรงกดแนวตั้ง 45.78 kPa) (ต่อ)

8.50	0.455	79.00	34.928
8.60	0.455	79.00	34.928
8.70	0.455	79.50	35.150
8.80	0.455	80.00	35.371
8.90	0.455	80.00	35.371
9.00	0.455	81.00	35.813
9.10	0.455	81.00	35.813
9.20	0.455	82.00	36.255
9.30	0.455	81.50	36.034
9.40	0.455	81.50	36.034
9.50	0.455	81.50	36.034
9.60	0.455	82.00	36.255
9.70	0.455	83.00	36.697
9.80	0.455	83.00	36.697
9.90	0.455	83.00	36.697
10.00	0.455	83.00	36.697

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-3 ดินเปล่า (แรงกดแนวตั้ง 76.30 kPa)

Horizontal Displacement (mm.)	Vertical Displacement (mm.)	Proving ring reading (Div.)	Shear stress (kPa)
0.00	0.000	0	0.000
0.10	0.020	12	5.306
0.20	0.030	17	7.516
0.30	0.040	23	10.169
0.40	0.055	25.5	11.274
0.50	0.080	28	12.380
0.60	0.095	30.5	13.485
0.70	0.120	33	14.590
0.80	0.160	36	15.917
0.90	0.185	40	17.685
1.00	0.215	44	19.454
1.10	0.250	46.5	20.559
1.20	0.275	50	22.107
1.30	0.300	53.5	23.654
1.40	0.330	55	24.317
1.50	0.360	59	26.086
1.60	0.380	62	27.412
1.70	0.400	64.5	28.518
1.80	0.420	67	29.623
1.90	0.440	70.5	31.170
2.00	0.460	73	32.276
2.10	0.470	75.5	33.381
2.20	0.480	77	34.044
2.30	0.495	79	34.928
2.40	0.505	81	35.813
2.50	0.515	82.5	36.476
2.60	0.530	85.5	37.802
2.70	0.540	87.5	38.687
2.80	0.550	89	39.350
2.90	0.555	91	40.234
3.00	0.565	93	41.118
3.10	0.575	95	42.003
3.20	0.580	96	42.445
3.30	0.590	97	42.887
3.40	0.595	99	43.771
3.50	0.600	100	44.213
3.60	0.610	103	45.540
3.70	0.615	104	45.982
3.80	0.620	104.5	46.203
3.90	0.625	104	45.982
4.00	0.635	104	45.982

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-3 ดินเปล่า (แรงกดแนวตั้ง 76.30 kPa) (ต่อ)

4.10	0.640	105	46.424
4.20	0.640	105	46.424
4.30	0.645	105.5	46.645
4.40	0.645	106	46.866
4.50	0.650	107	47.308
4.60	0.660	108	47.750
4.70	0.665	109.5	48.414
4.80	0.665	110	48.635
4.90	0.670	109.5	48.414
5.00	0.675	110.5	48.856
5.10	0.680	111.5	49.298
5.20	0.680	112	49.519
5.30	0.685	113	49.961
5.40	0.690	114	50.403
5.50	0.695	115	50.845
5.60	0.700	116	51.287
5.70	0.700	117	51.730
5.80	0.710	118	52.172
5.90	0.710	118.5	52.393
6.00	0.715	119	52.614
6.10	0.720	119.5	52.835
6.20	0.730	121	53.498
6.30	0.735	122	53.940
6.40	0.740	124	54.824
6.50	0.745	125.5	55.488
6.60	0.750	127	56.151
6.70	0.755	128	56.593
6.80	0.760	129	57.035
6.90	0.760	130	57.477
7.00	0.765	131	57.919
7.10	0.765	132	58.361
7.20	0.770	132.5	58.583
7.30	0.775	133	58.804
7.40	0.775	134	59.246
7.50	0.775	134.5	59.467
7.60	0.775	135.5	59.909
7.70	0.775	136	60.130
7.80	0.775	137	60.572
7.90	0.780	137.5	60.793
8.00	0.780	138	61.014
8.10	0.780	138	61.014
8.20	0.780	138	61.014
8.30	0.780	139	61.456
8.40	0.780	139	61.456

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-3 ดินเปล่า (แรงกดแนวตั้ง 76.30 kPa) (ต่อ)

8.50	0.780	139.5	61.677
8.60	0.780	140	61.899
8.70	0.780	141	62.341
8.80	0.780	141	62.341
8.90	0.780	141	62.341
9.00	0.780	141	62.341
9.10	0.780	141	62.341
9.20	0.780	141	62.341
9.30	0.780	141	62.341
9.40	0.780	141.5	62.562
9.50	0.780	141.5	62.562
9.60	0.780	142	62.783
9.70	0.780	142	62.783
9.80	0.780	142	62.783
9.90	0.780	142	62.783
10.00	0.780	142	62.783

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-4 ภูเขาไฟ 2 เดือน ตัวอย่างที่ 1 (แรงกดแนวตั้ง 45.78 kPa)

Horizontal Displacement (mm.)		Vertical Displacement (mm.)		Shear stress (kPa)	
upper	lower	upper	lower	upper	lower
0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000
0.10	0.10	0.015	0.010	2.874	2.211
0.20	0.20	0.030	0.030	4.863	5.527
0.30	0.30	0.050	0.055	5.969	6.853
0.40	0.40	0.080	0.095	7.074	7.958
0.50	0.50	0.100	0.125	7.958	8.843
0.60	0.60	0.120	0.150	9.285	9.506
0.70	0.70	0.140	0.175	11.053	9.727
0.80	0.80	0.170	0.200	12.380	10.611
0.90	0.90	0.190	0.220	12.822	11.053
1.00	1.00	0.210	0.240	13.927	11.495
1.10	1.10	0.230	0.260	14.811	11.938
1.20	1.20	0.240	0.270	15.475	12.159
1.30	1.30	0.250	0.290	16.359	12.601
1.40	1.40	0.260	0.305	16.580	14.369
1.50	1.50	0.265	0.320	16.801	15.917
1.60	1.60	0.275	0.330	17.243	17.022
1.70	1.70	0.285	0.340	18.570	17.243
1.80	1.80	0.290	0.350	18.570	17.464
1.90	1.90	0.295	0.360	18.570	18.570
2.00	2.00	0.305	0.370	18.570	19.896
2.10	2.10	0.315	0.380	19.675	20.559
2.20	2.20	0.320	0.390	20.117	21.222
2.30	2.30	0.320	0.405	20.117	21.886
2.40	2.40	0.330	0.410	20.338	22.991
2.50	2.50	0.330	0.415	20.338	24.759
2.60	2.60	0.335	0.420	20.338	25.423
2.70	2.70	0.340	0.425	20.559	25.865
2.80	2.80	0.345	0.430	21.664	26.528
2.90	2.90	0.345	0.430	21.664	26.749
3.00	3.00	0.350	0.440	22.107	27.191
3.10	3.10	0.350	0.440	22.107	27.854
3.20	3.20	0.355	0.445	22.107	28.296
3.30	3.30	0.360	0.450	23.212	28.960
3.40	3.40	0.360	0.450	23.433	29.181
3.50	3.50	0.360	0.450	23.654	29.623
3.60	3.60	0.360	0.455	23.875	30.286
3.70	3.70	0.360	0.460	23.875	30.507
3.80	3.80	0.360	0.460	24.096	30.949
3.90	3.90	0.365	0.460	24.317	32.276
4.00	4.00	0.365	0.460	24.538	34.486

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-4 ภูเขาไฟ 2 เดือน ตัวอย่างที่ 1 (แรงกดแนวตั้ง 45.78 kPa) (ต่อ)

4.10	4.10	0.370	0.460	24.759	36.255
4.20	4.20	0.370	0.460	24.759	36.697
4.30	4.30	0.370	0.460	25.202	37.139
4.40	4.40	0.370	0.460	25.202	37.139
4.50	4.50	0.370	0.460	25.423	38.466
4.60	4.60	0.370	0.460	25.644	39.350
4.70	4.70	0.370	0.460	25.865	40.013
4.80	4.80	0.370	0.460	25.865	40.676
4.90	4.90	0.370	0.460	26.086	41.118
5.00	5.00	0.370	0.460	26.307	42.445
5.10	5.10	0.370	0.455	26.307	42.445
5.20	5.20	0.375	0.455	26.528	42.887
5.30	5.30	0.375	0.450	27.191	43.108
5.40	5.40	0.380	0.450	27.412	43.108
5.50	5.50	0.380	0.450	27.854	43.108
5.60	5.60	0.380	0.450	28.075	43.108
5.70	5.70	0.380	0.450	28.739	42.003
5.80	5.80	0.380	0.450	29.181	40.676
5.90	5.90	0.380	0.450	29.844	40.234
6.00	6.00	0.380	0.450	30.065	40.234
6.10	6.10	0.380	0.445	30.065	41.118
6.20	6.20	0.380	0.440	30.065	41.118
6.30	6.30	0.380	0.440	30.065	42.003
6.40	6.40	0.380	0.440	30.065	42.445
6.50	6.50	0.380	0.430	30.065	42.666
6.60	6.60	0.380	0.430	30.507	42.887
6.70	6.70	0.380	0.430	30.949	42.887
6.80	6.80	0.380	0.420	30.949	43.108
6.90	6.90	0.380	0.420	31.170	43.108
7.00	7.00	0.380	0.415	31.391	43.329
7.10	7.10	0.380	0.415	31.834	43.329
7.20	7.20	0.380	0.410	32.276	43.550
7.30	7.30	0.375	0.410	32.276	43.550
7.40	7.40	0.375	0.405	32.718	43.550
7.50	7.50	0.370	0.400	32.718	43.550
7.60	7.60	0.370	0.400	32.939	43.550
7.70	7.70	0.370	0.390	33.160	43.550
7.80	7.80	0.370	0.390	33.160	43.771
7.90	7.90	0.365	0.380	33.602	43.771
8.00	8.00	0.365	0.375	33.602	43.550
8.10	8.10	0.365	0.370	33.602	43.329
8.20	8.20	0.360	0.370	33.602	43.108
8.30	8.30	0.360	0.365	34.044	43.108
8.40	8.40	0.355	0.360	34.044	43.108

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-4 ภูเขาแฝก 2 เดือน ตัวอย่างที่ 1 (แรงกดแนวตั้ง 45.78 kPa) (ต่อ)

8.50	8.50	0.355	0.355	34.044	42.887
8.60	8.60	0.355	0.350	34.486	42.887
8.70	8.70	0.350	0.350	34.928	43.108
8.80	8.80	0.350	0.345	34.928	43.108
8.90	8.90	0.350	0.340	35.371	42.666
9.00	9.00	0.350	0.335	35.371	42.445
9.10	9.10	0.350	0.330	35.371	42.003
9.20	9.20	0.350	0.330	35.592	42.003
9.30	9.30	0.345	0.330	35.592	42.003
9.40	9.40	0.340	0.325	35.592	41.560
9.50	9.50	0.340	0.325	35.813	41.118
9.60	9.60	0.340	0.320	35.813	40.897
9.70	9.70	0.335	0.315	35.813	40.897
9.80	9.80	0.335	0.310	35.813	40.897
9.90	9.90	0.335	0.300	35.813	40.897
10.00	10.00	0.335	0.300	35.813	40.897

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-5 ภูเขาไฟ 2 เดือน ตัวอย่างที่ 2 (แรงกดแนวตั้ง 45.78 kPa)

Horizontal Displacement (mm.)		Vertical Displacement (mm.)		Shear stress (kPa)	
upper	lower	upper	lower	upper	lower
0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000
0.10	0.10	0.020	0.025	4.200	6.632
0.20	0.20	0.030	0.050	4.863	7.958
0.30	0.30	0.050	0.070	7.074	8.843
0.40	0.40	0.065	0.085	7.958	9.285
0.50	0.50	0.085	0.095	8.843	9.506
0.60	0.60	0.095	0.110	9.285	10.611
0.70	0.70	0.110	0.120	9.727	10.832
0.80	0.80	0.120	0.125	10.390	11.053
0.90	0.90	0.140	0.130	10.832	11.274
1.00	1.00	0.155	0.135	11.053	11.274
1.10	1.10	0.165	0.140	11.717	11.717
1.20	1.20	0.190	0.155	11.938	11.938
1.30	1.30	0.200	0.160	13.706	11.938
1.40	1.40	0.225	0.170	14.148	12.380
1.50	1.50	0.240	0.170	15.475	12.380
1.60	1.60	0.255	0.175	16.801	12.822
1.70	1.70	0.270	0.180	16.801	12.822
1.80	1.80	0.280	0.185	17.243	13.264
1.90	1.90	0.295	0.190	18.570	13.264
2.00	2.00	0.305	0.205	19.454	13.706
2.10	2.10	0.315	0.205	19.454	14.369
2.20	2.20	0.330	0.210	19.896	14.590
2.30	2.30	0.340	0.215	20.117	14.811
2.40	2.40	0.355	0.220	20.559	15.254
2.50	2.50	0.365	0.220	21.001	16.359
2.60	2.60	0.375	0.225	21.222	16.359
2.70	2.70	0.385	0.225	21.886	16.801
2.80	2.80	0.390	0.230	22.107	17.243
2.90	2.90	0.400	0.230	22.549	16.801
3.00	3.00	0.410	0.235	22.991	16.801
3.10	3.10	0.420	0.240	23.433	16.801
3.20	3.20	0.425	0.240	23.875	16.801
3.30	3.30	0.430	0.250	24.759	16.801
3.40	3.40	0.440	0.260	25.865	16.801
3.50	3.50	0.450	0.265	26.086	16.801
3.60	3.60	0.455	0.265	26.970	16.801
3.70	3.70	0.455	0.265	26.970	16.801
3.80	3.80	0.460	0.270	27.412	17.022
3.90	3.90	0.465	0.270	27.854	16.801
4.00	4.00	0.465	0.270	28.296	17.243

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-5 หญ้าแฝก 2 เดือน ตัวอย่างที่ 2 (แรงกดแนวตั้ง 45.78 kPa) (ต่อ)

4.10	4.10	0.470	0.275	28.518	17.464
4.20	4.20	0.470	0.280	28.960	17.685
4.30	4.30	0.480	0.280	29.181	18.127
4.40	4.40	0.480	0.285	29.623	18.127
4.50	4.50	0.480	0.285	30.065	18.127
4.60	4.60	0.485	0.285	30.286	18.127
4.70	4.70	0.485	0.290	30.507	18.127
4.80	4.80	0.490	0.290	30.728	18.127
4.90	4.90	0.490	0.290	31.612	18.127
5.00	5.00	0.490	0.290	31.834	18.127
5.10	5.10	0.490	0.290	31.834	18.127
5.20	5.20	0.490	0.290	32.055	18.127
5.30	5.30	0.490	0.290	32.276	18.127
5.40	5.40	0.490	0.295	32.939	18.570
5.50	5.50	0.490	0.295	33.602	18.791
5.60	5.60	0.490	0.310	33.602	19.012
5.70	5.70	0.490	0.370	34.044	19.233
5.80	5.80	0.490	0.385	34.044	19.454
5.90	5.90	0.490	0.390	34.044	19.896
6.00	6.00	0.490	0.400	34.044	20.780
6.10	6.10	0.490	0.410	34.044	20.780
6.20	6.20	0.490	0.420	34.044	21.222
6.30	6.30	0.490	0.440	34.044	21.443
6.40	6.40	0.495	0.460	34.044	22.107
6.50	6.50	0.500	0.500	34.044	22.991
6.60	6.60	0.500	0.510	34.044	23.433
6.70	6.70	0.500	0.510	33.602	23.875
6.80	6.80	0.500	0.510	33.602	24.317
6.90	6.90	0.500	0.520	33.602	24.759
7.00	7.00	0.500	0.530	33.602	25.202
7.10	7.10	0.500	0.530	33.602	25.202
7.20	7.20	0.500	0.535	34.044	25.202
7.30	7.30	0.500	0.540	34.044	25.423
7.40	7.40	0.500	0.545	34.044	25.865
7.50	7.50	0.500	0.550	34.486	26.086
7.60	7.60	0.500	0.550	34.486	26.086
7.70	7.70	0.500	0.550	34.928	26.086
7.80	7.80	0.500	0.550	36.255	26.528
7.90	7.90	0.505	0.550	36.255	26.528
8.00	8.00	0.505	0.550	36.255	26.970
8.10	8.10	0.510	0.555	36.255	26.970
8.20	8.20	0.510	0.560	36.255	27.412
8.30	8.30	0.510	0.570	36.255	26.970
8.40	8.40	0.510	0.580	36.255	27.633

เอกสารนี้เป็นเอกสารทงสวนวสําหรับการใชงานเพื่อการศกษาเท่านั้น ไมอนุญาตหนาไปเชบระยชนดานการคา

ไมวากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อิกทั้งห้ามมิใหัดัดแปลงเนื้อหา และตองอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช

ตารางที่ ก-5 ฐานแผก 2 เดือน ตัวอย่างที่ 2 (แรงกดแนวตั้ง 45.78 kPa) (ต่อ)

8.50	8.50	0.510	0.630	36.255	26.528
8.60	8.60	0.510	0.650	36.697	26.528
8.70	8.70	0.510	0.700	36.697	25.644
8.80	8.80	0.510	0.725	36.697	26.086
8.90	8.90	0.510	0.755	36.918	26.086
9.00	9.00	0.510	0.780	37.581	26.528
9.10	9.10	0.510	0.805	38.023	26.086
9.20	9.20	0.510	0.830	38.023	26.528
9.30	9.30	0.510	0.850	38.466	26.970
9.40	9.40	0.510	0.870	38.908	26.528
9.50	9.50	0.510	0.890	39.571	26.528
9.60	9.60	0.510	0.905	39.792	26.970
9.70	9.70	0.510	0.920	39.792	27.191
9.80	9.80	0.510	0.940	40.234	28.296
9.90	9.90	0.510	0.950	40.234	28.296
10.00	10.00	0.510	0.960	40.234	28.296

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-6 ภูเขาแฝก 2 เดือน ตัวอย่างที่ 3 (แรงกดแนวตั้ง 45.78 kPa)

Horizontal Displacement (mm.)		Vertical Displacement (mm.)		Shear stress (kPa)	
upper	lower	upper	lower	upper	lower
0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000
0.10	0.10	0.010	0.015	2.211	1.105
0.20	0.20	0.035	0.030	4.421	3.316
0.30	0.30	0.060	0.060	6.632	4.642
0.40	0.40	0.080	0.090	7.958	6.632
0.50	0.50	0.100	0.120	9.285	9.064
0.60	0.60	0.120	0.150	10.832	10.832
0.70	0.70	0.140	0.170	11.495	11.495
0.80	0.80	0.150	0.195	12.822	12.822
0.90	0.90	0.160	0.215	13.264	13.485
1.00	1.00	0.175	0.235	13.485	15.033
1.10	1.10	0.185	0.255	13.706	15.696
1.20	1.20	0.195	0.275	14.148	16.138
1.30	1.30	0.195	0.295	14.369	17.022
1.40	1.40	0.200	0.315	14.590	17.243
1.50	1.50	0.205	0.330	15.033	18.348
1.60	1.60	0.210	0.345	15.254	18.791
1.70	1.70	0.220	0.355	15.475	19.675
1.80	1.80	0.220	0.365	16.138	20.117
1.90	1.90	0.235	0.370	16.801	20.780
2.00	2.00	0.240	0.380	17.685	21.886
2.10	2.10	0.245	0.395	18.570	22.107
2.20	2.20	0.250	0.400	19.012	22.328
2.30	2.30	0.255	0.410	19.233	22.549
2.40	2.40	0.260	0.415	19.454	22.991
2.50	2.50	0.260	0.425	19.675	23.654
2.60	2.60	0.260	0.430	19.896	24.096
2.70	2.70	0.265	0.445	20.338	24.538
2.80	2.80	0.270	0.455	20.780	25.202
2.90	2.90	0.270	0.460	21.222	25.644
3.00	3.00	0.280	0.470	21.664	26.086
3.10	3.10	0.285	0.480	22.549	26.749
3.20	3.20	0.290	0.485	22.549	27.191
3.30	3.30	0.290	0.490	22.549	27.633
3.40	3.40	0.300	0.495	22.770	28.296
3.50	3.50	0.305	0.500	22.770	28.518
3.60	3.60	0.305	0.505	22.770	29.402
3.70	3.70	0.310	0.510	22.549	29.844
3.80	3.80	0.310	0.510	22.991	30.065
3.90	3.90	0.310	0.510	22.991	30.507
4.00	4.00	0.310	0.510	22.991	30.507

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-6 ภูเขาไฟ 2 เดือน ตัวอย่างที่ 3 (แรงกดแนวตั้ง 45.78 kPa) (ต่อ)

4.10	4.10	0.315	0.510	23.212	31.170
4.20	4.20	0.315	0.515	23.654	31.612
4.30	4.30	0.315	0.515	24.096	31.834
4.40	4.40	0.320	0.520	24.317	31.834
4.50	4.50	0.320	0.520	24.317	32.276
4.60	4.60	0.320	0.520	24.759	32.939
4.70	4.70	0.325	0.525	24.759	33.160
4.80	4.80	0.330	0.530	24.759	33.381
4.90	4.90	0.330	0.530	25.202	33.602
5.00	5.00	0.335	0.535	25.202	34.044
5.10	5.10	0.335	0.540	25.202	34.265
5.20	5.20	0.335	0.540	25.644	34.486
5.30	5.30	0.335	0.540	25.865	34.928
5.40	5.40	0.335	0.540	26.086	35.371
5.50	5.50	0.335	0.540	26.086	35.813
5.60	5.60	0.335	0.540	26.528	36.034
5.70	5.70	0.335	0.540	26.970	36.255
5.80	5.80	0.335	0.540	26.970	36.255
5.90	5.90	0.335	0.540	27.412	36.476
6.00	6.00	0.335	0.540	27.412	36.918
6.10	6.10	0.335	0.540	27.412	37.360
6.20	6.20	0.335	0.540	27.412	37.581
6.30	6.30	0.335	0.540	27.412	38.023
6.40	6.40	0.335	0.540	27.633	38.244
6.50	6.50	0.335	0.540	27.854	38.466
6.60	6.60	0.335	0.540	27.854	38.908
6.70	6.70	0.330	0.540	27.854	39.129
6.80	6.80	0.330	0.540	28.075	39.129
6.90	6.90	0.330	0.535	28.296	39.350
7.00	7.00	0.330	0.535	28.518	39.571
7.10	7.10	0.330	0.535	28.739	39.792
7.20	7.20	0.330	0.530	28.739	39.792
7.30	7.30	0.330	0.530	28.739	40.234
7.40	7.40	0.330	0.530	28.960	40.455
7.50	7.50	0.330	0.525	29.181	40.676
7.60	7.60	0.330	0.525	29.181	40.897
7.70	7.70	0.330	0.520	29.623	40.897
7.80	7.80	0.330	0.520	30.065	41.339
7.90	7.90	0.330	0.515	30.065	41.560
8.00	8.00	0.330	0.510	30.507	41.782
8.10	8.10	0.330	0.510	30.728	41.782
8.20	8.20	0.330	0.510	30.728	42.003
8.30	8.30	0.330	0.510	31.170	42.003
8.40	8.40	0.330	0.505	31.391	42.003

เอกสารนี้เป็นเอกสารทงสวนวสําหรับการใชงานเพื่อการศกษาเท่านั้น ไมอนุญาตหนาไปเชบระยชนดานการคา

ไมวากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อิกทั้งห้ามมิใหัดัดแปลงเนื้อหา และตองอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช

ตารางที่ ก-6 ภูเขาแฝก 2 เดือน ตัวอย่างที่ 3 (แรงกดแนวตั้ง 45.78 kPa) (ต่อ)

8.50	8.50	0.330	0.505	31.391	42.224
8.60	8.60	0.330	0.500	31.391	42.224
8.70	8.70	0.340	0.500	31.391	42.445
8.80	8.80	0.340	0.500	31.612	42.666
8.90	8.90	0.340	0.495	31.834	42.887
9.00	9.00	0.340	0.495	32.276	42.887
9.10	9.10	0.340	0.495	32.276	43.108
9.20	9.20	0.340	0.495	32.497	43.329
9.30	9.30	0.340	0.490	32.718	43.329
9.40	9.40	0.340	0.490	33.160	43.329
9.50	9.50	0.340	0.490	33.381	43.329
9.60	9.60	0.340	0.485	33.381	43.550
9.70	9.70	0.340	0.480	33.381	43.550
9.80	9.80	0.340	0.480	33.381	43.771
9.90	9.90	0.340	0.480	33.602	43.771
10.00	10.00	0.340	0.480	33.602	43.771

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1 ตารางการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนของดินลูกรังเสริมกำลังด้วยรากหญ้าทางทฤษฎี

percent root	Depth (m)	$\sigma_n$ (KPa)	$\alpha$	n	$\chi$	$C_{i,\phi}$	$\phi$	$\tan\phi$	S (kPa)
0.0000	3.00	45.78	1.00	290.00	0.000000	0.80	40.521	0.8547	39.1288
0.0393	3.00	45.78	1.00	290.00	0.000393	0.80	40.521	0.8547	42.6931
0.0416	3.00	45.78	1.00	290.00	0.000416	0.80	40.521	0.8547	42.9070
0.1178	3.00	45.78	1.00	290.00	0.001178	0.80	40.521	0.8547	49.8217

จากสมการ  $S_{eq,p} = (1 + \alpha \cdot \eta \cdot \chi \cdot c_{i,c}) \cdot c + (1 + \alpha \cdot \eta \cdot \chi \cdot c_{i,\phi}) \sigma_n$

$S$  = Shear strength.

$\sigma_n$  = Average normal stress acting on fibers.

$C_{i,c}$  =  $\frac{\text{Adhesive component of interface (a)}}{\text{Adhesive component of soil (c)}}$

$C_{i,\phi}$  =  $\frac{\text{Frictional component of fibers (tan}\delta\text{)}}{\text{Frictional component of soil (tan}\phi\text{)}}$

$\alpha$  = Empirical coefficient

$\eta$  = Aspect ratio =  $\frac{\text{length of fiber}}{\text{diameter of fiber}}$

$\chi$  = gravimetric fiber content

=  $\frac{\text{weight of fiber}}{\text{weight of dry soil}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้