



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษากลไกการป้องกันการกัดเซาะลาดโดยการคลุมดินด้วยวัสดุผสมเคโอลิน
และวัสดุใยธรรมชาติร่วมกับการปลูกพืช

Investigation of the Erosion Protection Mechanisms for Soil Slope Covered with Kaolin
Mixtures and Vegetated Natural Geotextile

نامผู้วิจัย นายปฏิพัฒน์ บุญเจริญพานิช

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์อภินิติ โชติสังกาศ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงกูร, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสีทจี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษากลไกการป้องกันการกัดเซาะลาดโดยการคลุมดินด้วยวัสดุผสมเคโอลิน
และวัสดุใยธรรมชาติร่วมกับการปลูกพืช

Investigation of the Erosion Protection Mechanisms for Soil Slope Covered with
Kaolin Mixtures and Vegetated Natural Geotextile

โดย

นายปฏิพัฒน์ บุญเจริญพานิช

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2553

ปฏิพนธ์ ฃญเจริญพานิช 2553: การศึกษาผลกระทบจากการป้องกันการกัดเซาะลาดโดยการคลุมดินด้วยวัสดุผสมเคโอลินและวัสดุธรรมชาติร่วมกับการปลูกพืช ฃริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์อภินิธิ โชติสังกาศ, Ph.D. 107 หน้า

งานวิจัยนี้ได้แบ่งเป็น 2 ส่วน ซึ่งส่วนแรกทำการศึกษาดินทรายแ่งที่ผู้พังจากหินแกรนิตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแร่ดินเหนียวเคโอลินเพื่อป้องกันการกัดเซาะ และส่วนที่สองทำการศึกษาดินที่ป้องกันการกัดเซาะโดยใช้วิธีปลูกหญ้าร่วมกับผ้าห่มดินและหมอนกันดินเปรียบเทียบกับวิธีปลูกหญ้าแ่งร่วมกับหมอนกันดิน ซึ่งทั้ง 2 ส่วนจะทำการศึกษาพฤติกรรมทางด้านกลศาสตร์ทั้งในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำและไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ, ความเป็นไปได้ในการกัดเซาะและเสถียรภาพของลาดดิน

จากการศึกษาในส่วนแรกของงานวิจัย ได้นำดินทรายแ่งที่ผู้พังจากหินแกรนิตมาทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยแร่ดินเหนียวเคโอลิน โดยทำการผสมเคโอลินที่อัตราส่วน 0, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนัก พบว่า กำลังรับแรงเฉือนของดินที่อัตราส่วนผสมเคโอลิน 10% โดยน้ำหนักมีค่ามากที่สุดทั้งในสภาวะอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในช่วงแรงดุด 0 ถึง 32 kPa. และความเป็นไปได้ในการกัดเซาะจะมีค่าลดลงตามปริมาณเคโอลินที่เพิ่มขึ้น ส่วนเสถียรภาพของลาดดินที่อัตราส่วนผสมเคโอลิน 10% โดยน้ำหนักจะมีค่ามากที่สุดในช่วงแรงดุดมากกว่า 4 kPa. เมื่อแรงดุดมีค่าต่ำกว่า 4 kPa. และเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำเสถียรภาพของลาดดินที่ผสมเคโอลิน 20% โดยน้ำหนักจะมีค่าสูงสุด ส่วนงานวิจัยในส่วนที่ 2 เมื่อทำการปลูกหญ้าร่วมกับผ้าห่มดินและหมอนกันดิน พบว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในช่วงแรงดุด 0 ถึง 30 kPa. มีค่ามากกว่า แต่ในทางกลับกันกำลังรับแรงเฉือนในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำจะมีค่าลดลง ส่วนความเป็นไปได้ในการกัดเซาะและเสถียรภาพของลาดดินพบว่าดินที่ป้องกันการกัดเซาะด้วยวิธีการปลูกหญ้าร่วมกับผ้าห่มดินและหมอนกันดิน จะมีความเป็นไปได้ในการเกิดการกัดเซาะน้อยกว่าและมีเสถียรภาพของลาดดินมากกว่าวิธีปลูกหญ้าแ่งร่วมกับหมอนกันดิน

Patipat Booncharoenpanich 2010: Investigation of the Erosion Protection Mechanisms for Soil Slope Covered with Kaolin Mixtures and Vegetated Natural Geotextile.

Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Mr. Apiniti Jotisankasa, Ph.D. 107 pages.

This research is divided into two parts. The first part is the study about mechanical behavior of decomposed-granite silty soil that was improved by mixing with kaolin for the purpose of erosion protection. The second part is the study about behavior of soil protected by using Erosion Control Blanket - Erosion Control Log with ruzi grass compared with the Erosion Control Log with vetiver grass. These studies focus on the mechanics behavior both in saturated and unsaturated condition, their erodibility and application to slope stability.

As for the first part of this study, the range of kaolin percentage used to improve the decomposed-granite silty soil was 0, 10, 15 and 20% by weight. At 10% by weight of kaolin, shear strength has the highest value in both saturated and unsaturated conditions (matric suction range of 0 to 32 kPa.). Erodibility appeared to decrease with increasing kaolin quantity. As for slope stability, mixture of 10% kaolin has the highest value of F.S. for matric suction more than 4 kPa. But for matric suction lower than 4 kPa and in saturated condition, F.S. for slope stability has the highest value at 20% kaolin. Regarding the second part of this study, the use of Erosion Control Blanket - Erosion Control Log with ruzi grass, yields a highest shear strength at unsaturated condition in matric suction 0 to 30 kPa. On the contrary, saturated shear strength of this method is lower. Nevertheless, by using Erosion Control Blanket and Erosion Control Log with ruzi grass, the possibility of erosion is lower, and slope tended to be more stable than using Erosion Control Log with vetiver grass.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร.อภินิติ โชติสังกาศ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่อบรมสั่งสอน ให้คำปรึกษาแก้ไขปัญหา และแนะนำแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์นี้จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์ กรรมการที่ปรึกษาร่วมและขอขอบพระคุณ ดร.อัศคพัฒน์ สว่างสุริย์ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ให้ความกรุณาให้ความรู้คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี อีกทั้งยังขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้อบรมสั่งสอนอันเป็นประโยชน์ต่อการทำงานและดำเนินชีวิตต่อไป

ขอขอบพระคุณบิดาและมารดา ที่ได้เลี้ยงดูอบรมสั่งสอน และพร้อมที่จะให้การสนับสนุนอย่างเต็มที่ในทุกๆด้าน จนทำให้การเรียนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมปฐพี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์บางเขน ที่ได้ให้ความรู้และแนะนำแนวทางในการทดสอบ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ห้องปฏิบัติการนวัตกรรมทางวิศวกรรมปฐพี เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยฯ ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ สนับสนุนในการทำวิจัยครั้งนี้เสมอ รวมทั้งผู้ที่ไม่ได้เอ่ยถึงในที่นี้ทุกท่าน ที่มีส่วนร่วมในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุกท่านอย่างยิ่ง

ปฏิพัฒน์ บุญเจริญพานิช

เมษายน 2553

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(9)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	35
อุปกรณ์	35
วิธีการ	39
ผลและวิจารณ์	54
สรุปและข้อเสนอแนะ	99
สรุป	99
ข้อเสนอแนะ	102
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	103
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	107

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงการจำแนกการผุพังของหิน	5
2	สรุปวิธีการวัดแรงคูเมตริกและแรงคูรวม	8
3	แสดงสาเหตุและประเภทของการเกิดการกัดเซาะ	19
4	แสดงคุณสมบัติของดัชนีการกัดเซาะ	23
5	แสดงการจำแนกประเภทดินจากการทดสอบ Pinhole test	33
6	แสดงการจำแนกดินกระจายตัวจากการทดสอบ Double hydrometer test	34
7	แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของดินทั้ง 4 อัตราส่วนผสม	55
8	แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของดินทั้ง 2 แปลงทดสอบ	55
9	แสดงอัตราส่วนผสมระหว่างทรายแป้งกับเคโอลินที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ	57
10	ตัวแปลที่ได้จากการ Fitting เส้นโค้งอุ้มน้ำของดินทั้ง 4 อัตราส่วนผสม	60
11	ตัวแปลที่ได้จากการ Fitting เส้นโค้งอุ้มน้ำของดินทั้ง 2 แปลงทดสอบ	62
12	แสดงตัวแปรที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนตรงของดินส่วนผสม ต่างๆ	66
13	แสดงตัวแปรที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนตรงของดินทั้ง 2 แปลง	72
14	แสดงผลการทดสอบ Kunzelstab penetration test ของแปลงที่1 (ฟ้าห่มดิน)	92
15	แสดงผลการทดสอบ Kunzelstab penetration test ของแปลงที่2 (หญ้าแฝก)	92

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงรูปตัดระดับการฝังของหินแกรนิต	5
2	แสดงปรากฏการณ์การยกตัวของน้ำในหลอดคาปิลลารี	6
3	แสดง KU-Tensiometer ชนิดต่างๆ	8
4	แสดง Shear box ดัดแปลงสำหรับวัดแรงดูดโดย Tensiometer	9
5	แสดงเส้นโค้งอุ้มน้ำของทราย, ทรายแป้งหรือตะกอนทราย (Silt) และ ดินเหนียว	10
6	เส้นการพิบัติ Mohr Coulomb ของดินอัดตัวแน่นปกติและอัดตัวแน่นเกินตัว	13
7	เส้นการพิบัติ Mohr Coulomb ของดินไม่อัดตัวด้วยน้ำ	14
8	แสดงชนิดของการเคลื่อนตัวของมวลดินและหิน	16
9	แสดงสาเหตุและประเภทของการเกิดการกัดเซาะในประเทศจีน	18
10	แสดงแรงต่างๆที่กระทำกับอนุภาคเม็ดดิน	20
11	ประเภทของการกัดเซาะพัฒนาเม็ดดินโดยน้ำ	21
12	ความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณน้ำ, ระดับของความอิ่มตัวของน้ำ, ดัชนีการกัดเซาะ	23
13	ประเภทของวัสดุกลุ่มผิวดินสำหรับป้องกันการกัดเซาะ	24
14	Geotextile ชนิดต่างๆที่ใช้ในการป้องกันการกัดเซาะและใช้ร่วมกับการปลูกพืช	27
15	ค่าความปลอดภัยของลาดดินกับค่าแรงดูดน้ำในดิน (Matric suction)	28
16	ค่าแรงดูดน้ำในดินก่อนที่จะอิ่มตัวด้วยน้ำกับค่าความหนาแน่นของตัวอย่าง	29
17	แสดงค่าความปลอดภัยของลาดดินที่ความชันต่างๆกับค่าแรงดูดน้ำในดินก่อนที่จะอิ่มตัวด้วยน้ำ	30
18	แสดงเส้นโค้งอุ้มน้ำของดินเม็ดละเอียดและเม็ดหยาบ (ด้านซ้าย) และความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นน้ำกับแรงดูดน้ำในดิน (ด้านขวา)	31
19	ลักษณะของเครื่องมือทดสอบ Pinhole test และหน้าตัดตามยาวของตัวอย่าง	33
20	แสดงลักษณะดินทรายแป้งที่ฝังจากหินแกรนิต (ด้านซ้าย) และ ดินเคโอลิน (Kaolin) (ด้านขวา)	35
21	แสดงลักษณะของตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบในงานวิจัยส่วนที่ 2	36
22	แสดงผลิตภัณฑ์ผ้าห่มดินและหมอนดิน	36

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
23	แสดงอุปกรณ์สำหรับบดอัดตัวอย่างในงานวิจัยส่วนที่ 1	37
24	แสดง KU-Tensiometer รุ่นต่างๆ	38
25	แสดง Relative humidity sensor	38
26	แสดงอุปกรณ์ ATT handheld	39
27	แสดงแผนในการวิจัยในส่วนที่ 1	41
28	แสดงแผนในการวิจัยในส่วนที่ 2	42
29	แสดงอุปกรณ์สำหรับบดอัดดินและตัวอย่างดินที่จะทำการบดอัด	43
30	แสดงการบดอัดดินในแบบหล่อตัวอย่าง	44
31	แสดงเครื่องมือการทดสอบแรงเฉือนตรงชนิดวัดแรงดูด	45
32	แสดงการวัดแรงดูดน้ำในดินโดยใช้ KU-Tensiometer	46
33	แปลงทดสอบที่ 1 (ผ้าห่มดิน) และแปลงทดสอบที่ 2 (หญ้าแฝก)	48
34	ชุดเก็บตัวอย่าง KU-Miniature sampler	49
35	ตัวอย่างดินที่เก็บจาก KU-Miniature sampler	49
36	แสดงการวัดแรงดูดน้ำในดินโดยใช้ Relative humidity sensor	51
37	แสดงการติดตั้ง KU-Tensiometer ในสนาม	53
38	แสดงการทดสอบ Kunzelstab penetration test	53
39	แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคเม็ดดินทั้ง 4 อัตราส่วนผสม	54
40	แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคเม็ดดินทั้ง 2 แปลงทดสอบ	56
41	เส้นโค้งบดอัดดินแบบมาตรฐานที่อัตราส่วนผสมต่างๆ	57
42	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณเคโอลิน (Kaolin) ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ	58
43	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นที่เหมาะสม (%Optimum water content) กับปริมาณเคโอลิน (Kaolin) ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ	58
44	เส้นโค้งอุ้มน้ำของดินที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ก.) Wetting และ ข.) Drying	59
45	เส้นโค้งอุ้มน้ำของดินที่อัตราส่วนผสมต่างๆจากการวัดจริงเทียบกับการ Fitting	60
46	เส้นโค้งอุ้มน้ำของดินจากแปลงทดสอบที่ 1 และ 2	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
47	เส้นโค้งอุ้มน้ำของดินแต่ละแปลงทดสอบจากการวัดจริงเทียบกับการ Fitting	62
48	กราฟหน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวนอนที่น้ำหนักกดในแนวดิ่ง 15.5 kPa	63
49	กราฟหน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวนอนที่น้ำหนักกดในแนวดิ่ง 31 kPa	63
50	กราฟหน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวนอนที่น้ำหนักกดในแนวดิ่ง 62 kPa	64
51	กราฟหน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวนอนที่น้ำหนักกดในแนวดิ่ง 124 kPa	64
52	กราฟกำลังรับแรงเฉือนสูงสุด (Peak shear strength) กับหน่วยแรงตั้งฉาก ของดินที่ส่วนผสมต่างๆ	65
53	กราฟกำลังรับแรงเฉือนสุดท้าย (Ultimate shear strength) กับหน่วย แรงตั้งฉากของดินที่ส่วนผสมต่างๆ	65
54	กราฟกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกับปริมาณเคโอลิน (Kaolin) ที่อัตราส่วนผสม ต่างๆ	66
55	หน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวนอนของดินแปลงที่1 (ผ้าห่มดิน) อัตราการเฉือน 0.5 มม./นาทึ	67
56	หน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวนอนของดินแปลงที่1 (ผ้าห่มดิน) อัตราการเฉือน 0.05 มม./นาทึ	67
57	หน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวนอนของดินแปลงที่2 (หญ้าแฝก) อัตราการเฉือน 0.5 มม./นาทึ	68
58	หน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวนอนของดินแปลงที่2 (หญ้าแฝก) อัตราการเฉือน 0.05 มม./นาทึ	68
59	กราฟเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนกับหน่วยแรงตั้งฉากที่อัตราการเฉือน ที่ 0.5 และ 0.05 มม./นาทึ ของดินแปลงที่1	69

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
60	แสดงการเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่มีรากพืชกับไม่มีรากพืช	69
61	กราฟเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกับหน่วยแรงตั้งฉากที่อัตรา การเฉือนที่ 0.5 และ 0.05 มม./นาท ของดินแปลงที่2	70
62	กราฟเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกับหน่วยแรงตั้งฉากที่อัตรา การเฉือนที่ 0.5 มม./นาท ของดินแปลงที่1 และ 2	71
63	กราฟเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกับหน่วยแรงตั้งฉากที่อัตรา การเฉือนที่ 0.05 มม./นาท ของดินแปลงที่1 และ 2	71
64	กราฟการเคลื่อนที่ในแนวนอนของดิน SM กับ ก.) หน่วยแรงเฉือน ข.) การเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเฉือน ค.) แรงดูดของน้ำ (Metric suction)	73
65	กราฟการเคลื่อนที่ในแนวนอนของดิน SM+K 10 กับ ก.) หน่วยแรงเฉือน ข.) การเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเฉือน ค.) แรงดูดของน้ำ (Metric suction)	74
66	กราฟการเคลื่อนที่ในแนวนอนของดิน SM+K 15 กับ ก.) หน่วยแรงเฉือน ข.) การเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเฉือน ค.) แรงดูดของน้ำ (Metric suction)	75
67	กราฟการเคลื่อนที่ในแนวนอนของดิน SM+K 20 กับ ก.) หน่วยแรงเฉือน ข.) การเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเฉือน ค.) แรงดูดของน้ำ (Metric suction)	76
68	กราฟกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกับแรงดูดของน้ำในดินที่อัตราส่วนผสมต่างๆ	77
69	กราฟการเคลื่อนที่ในแนวนอนของดินแปลงที่1 กับ ก.) หน่วยแรงเฉือน ข.) การเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเฉือน ค.) แรงดูดของน้ำ (metric suction)	79
70	กราฟการเคลื่อนที่ในแนวนอนของดินแปลงที่2 กับ ก.) หน่วยแรงเฉือน ข.) การเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเฉือน ค.) แรงดูดของน้ำ (metric suction)	80

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
71	กราฟกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกับแรงดันของน้ำในดินทั้ง 2 แปลงทดสอบ	81
72	แสดงอัตราส่วนความปลอดภัยกับแรงดันน้ำในดินของดินที่อัตราส่วนผสมต่างๆ	82
73	แสดงอัตราส่วนความปลอดภัยกับแรงดันน้ำในดินของดินทั้ง 2 แปลงทดสอบ	82
74	ผลการทดสอบ Crumb Test ของดินแต่ละอัตราส่วนผสมในช่วงเวลาต่างๆ	84
75	แสดงการทลายตัวของดินประเภทต่างๆ ก.) ดินที่มีแรงเชื่อมแน่น ข.) ดินที่ไม่มีแรงเชื่อมแน่น ค.) ดินกระจายตัว	84
76	แสดงการกระจายตัวของเม็ดดินทั้ง 4 อัตราส่วนผสมจากการทดสอบ Double hydrometer test	85
77	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเชื่อมแน่นรวมกับการเปลี่ยนแปลง แรงดันของน้ำในดิน	87
78	ผลการทดสอบ Crumb test ของดินแปลงที่ 1 และ 2 ในช่วงเวลาต่างๆ	88
79	ลักษณะของตัวอย่างหลังจากทดสอบ Pinhole Test เสร็จของดินแปลงที่ 1 และ 2 ระดับความอิ่มตัวของน้ำ (Sr) ต่างๆ	89
80	แสดงการกระจายตัวของเม็ดดินทั้ง 2 แปลงทดสอบจากการทดสอบ Double hydrometer test	90
81	แสดงการทดสอบ Kunzelstab penetration test	91
82	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง N (KPT) กับความลึกต่างๆ	93
83	กราฟแรงดันน้ำในดิน, ปริมาณน้ำฝนกับเวลาของแปลงทดสอบที่ 1 และ 2 ด้าน บนของแปลงทดสอบ	94
84	กราฟแรงดันน้ำในดิน, ปริมาณน้ำฝนกับเวลาของแปลงทดสอบที่ 1 และ 2 ตรงกลางของแปลงทดสอบ	95
85	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเชื่อมแน่นรวมกับการเปลี่ยนแปลง แรงดันของน้ำในดิน	96
86	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเชื่อมแน่นรวมกับการเปลี่ยนแปลง แรงดันของน้ำในดินช่วง 0 ถึง 100 kPa	96

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
87	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเชื่อมแน่นรวมกับการเปลี่ยนแปลงแรงดูดของน้ำในดินช่วง 0 ถึง 14700 kPa	97
88	การเปรียบเทียบการกักเซาะที่เกิดขึ้นจริงในสนามของทั้ง 2 แปลงทดสอบ วันที่ 7 มีนาคม 2553 ภายหลังการติดตั้งผ้าห่มดินและหมอนก้นดินร่วมกับการปลูกพืช	98
89	รูปแบบในการป้องกันการกักเซาะวิธีต่างๆ	102

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Clay(U.S.)	=	เปอร์เซ็นต์ของดินเม็ดละเอียดที่มีค่าน้อยกว่า 0.005 มิลลิเมตร
c'	=	ค่าแรงยึดเหนี่ยวของเม็ดดิน
c^s	=	แรงเชื่อมแน่นเนื่องจากแรงดูดของน้ำในดิน
Fine	=	เปอร์เซ็นต์ของดินเม็ดละเอียดที่มีค่าน้อยกว่า 0.075 มิลลิเมตร
F.S.	=	อัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดิน
I_{HET}	=	ค่าดัชนีอัตราการกัดเซาะ
I_p	=	ดัชนีความเหนียว
LL	=	ดัชนีความเหลว
n	=	fitting parameter
m	=	fitting parameter มีค่าเท่ากับ $1-1/n$
Pinhole	=	ดัชนีการจำแนกดินโดยการทดสอบแบบ pinhole test เช่น $D1=1, D2=2, \dots, ND=6$
R	=	ค่าคงที่ของก๊าซ ($8.314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
R_h	=	ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างแรงดันไอน้ำในสภาวะปกติต่อแรงดันไอน้ำในสภาวะอิ่มตัว
S_r	=	ระดับของความอิ่มตัวด้วยน้ำ
S_u	=	กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ
s	=	แรงดูดเมตริก
T	=	อุณหภูมิองศาเคลวิน
t	=	เวลา
u_a	=	คือแรงดันอากาศในช่องว่างดินมีค่าเป็น 0 ในสภาวะธรรมชาติ
u_w	=	แรงดันน้ำในช่องว่างดิน
V_{mol}	=	molecular volume ของไอน้ำ (0.01802 เมตร^3)
w	=	น้ำหนักของมวลดิน
z	=	ความหนาของผิวลาดดินจนถึงชั้นการพิบัติ
α	=	fitting parameter
χ	=	ตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับระดับความอิ่มตัวของน้ำ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

ϕ^b	=	มุมของแรงเฉือนเนื่องจากแรงดูด
ϕ_u	=	มุมเสียดทานภายในสภาวะไม่ระบายน้ำ
ϕ'	=	มุมเสียดทานภายในประสิทธิผล
γ	=	หน่วยน้ำหนักของมวลดิน
β	=	มุมเอียงของลาดดินหรือมุมภายในวงกการพังของลาดดิน
θ	=	ปริมาณน้ำในมวลดิน
ρ_d	=	ค่าความหนาแน่นแห้งของดิน
$\rho_{d_{max}}$	=	ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดิน
σ, σ_n	=	หน่วยแรงรวมตั้งฉากบนระนาบการบีบอัด
σ_1	=	หน่วยแรงในแนวดิ่ง
σ_3	=	หน่วยแรงในแนวนอน
σ'	=	หน่วยแรงประสิทธิผล
τ	=	กำลังรับแรงเฉือน
ω	=	ค่าเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำต่อน้ำหนักของดิน
$\Delta\omega_r$	=	คือ $(\omega - \omega_{opt}) / \omega_{opt}$, ω_{opt} คือ ค่าความชื้นที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าความหนาแน่นของดินสูงสุด
ψ	=	ค่าแรงดูดเมตริก
Ψ	=	แรงดูดรวม
ψ_a	=	ค่าแรงดูดเมตริกที่อากาศเริ่มเข้ามาในมวลดิน (Air entry suction)

การศึกษากลไกการป้องกันการกัดเซาะลาดโดยการคลุมดินด้วยวัสดุผสมเคโอลิน และวัสดุใยธรรมชาติร่วมกับการปลูกพืช

Investigation of the Erosion Protection Mechanisms for Soil Slope Covered with Kaolin Mixtures and Vegetated Natural Geotextile

คำนำ

เนื่องจากปัจจุบันเกิดภาวะโลกร้อนทำให้สภาพภูมิอากาศเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งนับวันยิ่งทวีความรุนแรงมากขึ้น รูปแบบการตกของฝนมีการเปลี่ยนแปลงไป อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมและระบบนิเวศต่างๆ รวมถึงการเกิดดินถล่มลงสู่พื้นที่ใช้ประโยชน์ของประชาชนเช่น ถนน, บ้านและพื้นที่ทางการเกษตร เป็นต้น ซึ่งส่งผลกระทบทางเศรษฐกิจและสังคมอย่างยิ่งในแต่ละปี ในบริเวณภูเขาหินแกรนิตในประเทศไทยมักจะพบดินจำพวกทรายแป้งหรือตะกอนทราย (Silt) ที่พัดพามาจากหินแกรนิตอยู่ใกล้ผิวดินเป็นจำนวนมาก ในการทำงานการบดอัดลาดดินหรือคันทาง วิศวกรอาจจะนำวัสดุบริเวณนั้นมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง และเมื่อลาดดินหรือคันทางได้รับปริมาณน้ำจากฝนโดยไม่มีสิ่งใดปกคลุมอยู่จะสามารถซึมผ่านได้อย่างรวดเร็ว ทำให้แรงดันน้ำในช่องว่างดินเพิ่มขึ้นและกำลังของดินลดลง ในธรรมชาติดินมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นอยู่ตลอดเวลาเนื่องจากสภาพภูมิประเทศโดยทั่วไปดินมักจะอยู่ในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ในสภาวะนี้จะเกิดแรงดูดของน้ำในมวลดิน หรือแรงดันน้ำที่มีค่าเป็นลบซึ่งมีอิทธิพลในการเพิ่มเสถียรภาพของลาดดิน แต่เมื่อเกิดฝนตกหนักแรงดูดนี้จะถูกทำลายลงและลาดดินมีเสถียรภาพที่ลดลง นอกจากนั้นสิ่งที่ปรากฏเด่นชัดอีกประการคือ เมื่อเกิดฝนตกบนลาดดินบดอัดโดยที่ไม่มีสิ่งใดปกคลุมจะเกิดการกัดเซาะที่ผิวลาดดิน นอกจากนี้การกัดเซาะยังทำให้เกิดการสูญเสียดินโดยน้ำจะพัดพาดินไปตกตะกอนยังที่ต่างๆเช่น พัดพาลงไปในแหล่งน้ำหรืออ่างเก็บน้ำในปริมาณที่มากและเป็นเวลานานสามารถส่งผลเสียทำให้ แหล่งน้ำหรืออ่างเก็บน้ำตื้นเขินและเก็บกักน้ำได้ในปริมาณที่ลดลง ซึ่งจะต้องเสียงบประมาณในการขุดลอกแหล่งน้ำ ยิ่งกว่านั้นในบริเวณลาดดินเมื่อปล่อยให้เกิดการกัดเซาะที่ผิวดินโดยไม่มีการซ่อมบำรุงจะทำให้ลาดดินมีความชันมากขึ้นมวลดินอาจสูญเสียเสถียรภาพจนเป็นสาเหตุให้เกิดการพังทลายของลาดดินตามมา การป้องกันการกัดเซาะที่ผิวลาดดินนั้นมีด้วยกันหลายวิธีเช่นการทำ Shotcrete, การใช้ดินเหนียวปูทับผิวหน้าของลาดดินและการปลูกพืชคลุมดิน เป็นต้น การทำ Shotcrete นั้นเป็นวิธีการป้องกันการกัดเซาะที่ดีแต่มีค่าใช้จ่ายสูงอีกทั้งยังต้องทำระบบระบายน้ำออกจากมวลดินควบคู่กันไปด้วย ถ้าเกิดการอุดตันของระบบระบายน้ำจะทำ

ให้เกิดแรงดันน้ำขึ้นด้านหลังคอนกรีต อาจส่งผลให้โครงสร้างต่างๆเกิดความเสียหายขึ้น การใช้ดินเหนียวปูทับผิวลาดดินเป็นวิธีที่ง่ายและประหยัด (แต่ถ้าไม่มีดินเหนียวในพื้นที่อาจไม่เป็นการประหยัด) พอถึงช่วงฤดูแล้งการระเหยของน้ำจะทำให้ดินเหนียวเกิดการหดตัวจนเกิดรอยแตกและร่อนออกเป็นแผ่น และเมื่อเข้าสู่ฤดูฝนน้ำจะซึมเข้าสู่รอยแตกทำให้เสถียรภาพของลาดดินลดลง อีกทั้งน้ำจะพัดพานำดินเหนียวที่หดตัวเป็นแผ่นออกไปจนทำให้เกิดการกัดเซาะตามมา ส่วนการปลูกพืชคลุมดินนั้นเป็นวิธีที่ยั่งยืนกว่าในระยะยาว แต่ก็ต้องรอให้ระบบของรากพืชเจริญเติบโตช่วงเวลาหนึ่งก่อนถึงจะเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดเซาะและการพัดดินในระดับต้นได้ จึงได้มีการใช้ Geotextile คลุมดินโดยเฉพาะผ้าห่มดินเป็นการใช้วัสดุธรรมชาติที่เหลือใช้จากการเกษตร

การผสมดินทรายแป้งหรือตะกอนทราย (Silt) ที่ผุดงจากหินแกรนิตกับอนุภาคของเม็ดละเอียดจำพวกแร่ดินเหนียวเป็นแนวทางหนึ่งในการป้องกันการกัดเซาะผิวลาดดิน และเพิ่มเสถียรภาพของลาดดินโดยอาศัยหลักการที่ดินเหนียวจะมีความต้านทานการกัดเซาะมากกว่าดินทรายแป้งหรือตะกอนทราย (Silt) และการผสมดินทรายแป้งหรือตะกอนทราย (Silt) กับดินเหนียวจะยังเป็นการลดปัญหาการหดตัวของดินเหนียว หรืออาจนำไปใช้ในการถมเป็นคันดินเพื่อใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ส่วนการใช้ผ้าห่มดินผสมผสานรวมกับการปลูกพืชนั้นเป็นการช่วยป้องกันการกัดเซาะในระยะสั้นและเมื่อรากพืชเจริญเติบโตขึ้นจะเป็นการป้องกันการกัดเซาะในระยะยาวและเป็นการเพิ่มเสถียรภาพของลาดดินในระดับต้นอีกด้วย

ดังนั้นในการทำวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของดินซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างดินทรายแป้ง ที่ผุดงจากหินแกรนิตกับเคโอลิน (Kaolin) และดินที่ป้องกันการกัดเซาะโดยการปลูกหญ้าร่วมกับผ้าห่มดินและหมอนกั้นดินว่าเมื่อทำการป้องกันในวิธีดังกล่าวแล้วพฤติกรรมจะเปลี่ยนแปลงไปเช่นไร เช่นพฤติกรรมทางด้านกลศาสตร์ทั้งในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำและไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ, ความเป็นไปได้ในการเกิดการกัดเซาะและเสถียรภาพของลาดดิน

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางด้านกลศาสตร์ของดินซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างดินทรายแป้งที่ผุพังจากหินแกรนิตกับเคโอลิน (Kaolin) และดินที่เลือกใช้วิธีการป้องกันการกัดเซาะโดยการปลูกพืชร่วมกับผ้าห่มดินและหมอนก้นดินทั้งในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำและไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ
2. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเกิดการกัดเซาะ (Erodibility) ของดินที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างดินทรายแป้งที่ผุพังจากหินแกรนิตกับเคโอลิน (Kaolin) ต่างๆกันและดินที่เลือกใช้วิธีการป้องกันการกัดเซาะโดยการปลูกพืชร่วมกับผ้าห่มดินและหมอนก้นดิน
3. ศึกษาเสถียรภาพของลาดดินของวิธีป้องกันการกัดเซาะด้วยวิธีผสมเคโอลินและวิธีปลูกพืชร่วมกับผ้าห่มดินและหมอนก้นดิน

ขอบเขตงานวิจัย

1. ดินเหนียวเคโอลินได้จากการทำเหมืองดินขาว จังหวัดอุดรดิตถ์ ส่วนวัสดุดินทรายแป้งที่ผุพังจากหินแกรนิตที่นำมาทำการศึกษาอยู่ในบริเวณ โครงการก่อสร้างเจดีย์บูรพาจิตวิริยาประชาสามัคคี วัดเขาสุกิม จังหวัดจันทบุรี และดินที่เลือกใช้วิธีการป้องกันการกัดเซาะโดยการปลูกพืชร่วมกับผ้าห่มดินและหมอนก้นดิน ในบริเวณทางหลวงพิเศษหมายเลข 7 สายชลบุรี-พัทยา กม. 6+100
2. ศึกษาพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินดังกล่าวในสถานะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ทำการวัดแรงดูดน้ำในดินโดยใช้ KU-Tensiometer และ Relative humidity sensor
3. ประเมินความเป็นไปได้ในการเกิดการกัดเซาะของดินที่นำมาศึกษานี้จากการทดสอบ Crumb test, Pinhole test และ Double hydrometer test
4. ลาดดินที่จำลองเพื่อหาเสถียรภาพกำหนดให้มีการบีบอัดแบบลาดดินอนันต์, มีหน่วยแรงในแนวดิ่งคงที่และทำการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำในดิน ในการวิเคราะห์เสถียรภาพจะไม่พิจารณาการซึมผ่านของน้ำในลาดดินที่ช่วงเวลาต่างๆ

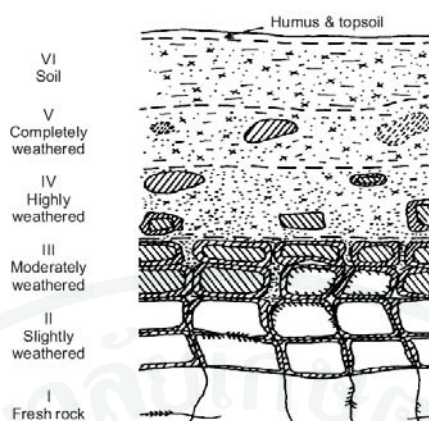
การตรวจเอกสาร

ลักษณะของดินเคโอลิน

ดินเคโอลิน (Kaolin) สามารถหาตามแหล่งจัดจำหน่ายทั่วไปและมีความสะดวกที่จะทำการผสมกับดินที่สุ่งจากหินแกรนิตมากกว่าดินเหนียวตามธรรมชาติ ดินเคโอลิน (Kaolin) เป็นดินที่มีลักษณะเป็นสีขาวซึ่งมีแร่เคโอลิน (Kaolin) ผสมอยู่เป็นหลัก ดินชนิดนี้มีหลายคุณภาพขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด โดยแหล่งกำเนิดที่พบดินชนิดนี้แบ่งเป็น 2 แหล่งกำเนิดคือ พบในแหล่งต้นกำเนิดที่มีแร่หินฟันม้า (Feldspar) เป็นส่วนมาก และพบในแหล่งสะสมในที่ลุ่ม (พลยุทธ์, 2539) คุณสมบัติเกี่ยวกับความเหนียวของดินเคโอลิน (Kaolin) โดยทั่วไปจะมีค่าดัชนีความเหนียว (Plasticity index) อยู่ในช่วงระหว่าง 25-40 % (วรารช, 2551) ในประเทศไทยแหล่งที่มักพบดินเคโอลิน (Kaolin) คือ จังหวัดเชียงราย, ลำปาง, อุตรดิตถ์, ปราจีนบุรี, ระนอง, นครศรีธรรมราช เป็นต้น

ลักษณะการสุ่งของหินแกรนิต

หินอัคนีเกิดจากแมกมาหรือลาวาที่เย็นตัวและแข็งตัวจนกลายเป็นหิน ซึ่งหินอัคนีสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักๆคือ หินอัคนีที่เย็นตัวในเปลือกโลกและหินอัคนีที่เย็นตัวนอกเปลือกโลก หินแกรนิตเป็นหินชนิดหนึ่งของหินอัคนีซึ่งในธรรมชาติของหินทั่วไปจะเกิดกระบวนการสุ่งตามธรรมชาติ (Weathering process) และลักษณะการสุ่งนี้จะมีระดับที่แตกต่างกันไป ขึ้นกับปัจจัยการสุ่งตามธรรมชาติคือลม, น้ำ, การเปื่อยสลับแห้ง หรือสุ่งด้วยปฏิกิริยาเคมี จนหินมีการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นดิน Little (1969) ได้ทำการแบ่งลักษณะการสุ่งของหินแกรนิตเป็น 6 ระดับดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งแต่ละระดับของการสุ่งจะมีลักษณะที่แตกต่างกันอธิบายรายละเอียดตามตารางที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงรูปตัดระดับการผุพังของหินแกรนิต

ที่มา: Little (1969)

ตารางที่ 1 แสดงการจำแนกการผุพังของหิน

ระดับของการผุพัง	สัญลักษณ์	รายละเอียด
Residual soil	VI	เป็นดินโดยสมบูรณ์
Completely weathered	V	หินทั้งหมดผุพังกลายเป็นดินแต่การจับตัวของโครงสร้างยังคงเหมือนเดิม
Highly weathered	IV	หินเกิดการผุพังกลายเป็นดินมากกว่า 50% และไม่มี ความต่อเนื่องของหินสด
Moderately weathered	III	หินเกิดการผุพังน้อยกว่า 50% และ ไม่มีความต่อเนื่อง ของหินสด
Slightly weathered	II	ที่ผิวหินเริ่มมีการเปลี่ยนสีหรือเริ่มมีการผุ
Fresh rock	I	ไม่มีการผุพังของหิน

ที่มา: Little (1969)

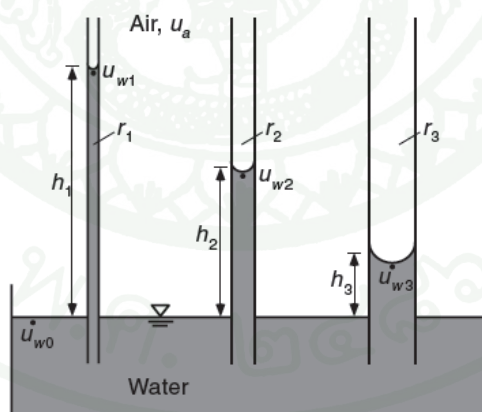
แรงดันน้ำในดิน

สภาพทั่วไปของดินในธรรมชาติซึ่งมีการระเหยของน้ำ การซึมของน้ำด้วยน้ำฝนหรือน้ำผิวดินและการไหลซึมลงในระดับลึกทำให้ปริมาณความชื้นของดินเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

ในหลักการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของดินทั่วไปจะเป็นแบบอึดตัวด้วยน้ำ แต่ในสภาพจริงที่เกิดขึ้นตามธรรมชาตินั้นเป็นดินที่ถูกเปลี่ยนแปลงความชื้นอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในสนามทำให้ต้องมีการศึกษากลศาสตร์ของดินไม่อึดตัวด้วยน้ำ ดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินจะมีสภาวะไม่อึดตัวด้วยน้ำ สภาวะดังกล่าวจะประกอบไปด้วยเฟสของดิน, น้ำ และอากาศ ซึ่งน้ำจะมีแรงดันน้ำน้อยกว่าแรงดันอากาศทำให้เกิดแรงดูดของน้ำในดินขึ้น โดยเรียกแรงดูดน้ำในดินนี้ว่า แรงดูดเมทริก อภินิติ (2551) ได้อธิบายปรากฏการณ์การเกิดแรงดูดเมทริกไว้ว่า แรงดูดในดินเกิดจากน้ำในช่องว่างดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินจะอยู่ภายใต้สภาวะแรงดึง แรงดูดเมทริกเกิดจากแรงดึงผิวคาปิลลารี และ Surface adsorption ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากประจุไฟฟ้าลบที่ผิวของอนุภาคดินเหนียว แรงดูดเมทริกสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1

$$s = u_a - u_w \quad (1)$$

แรงดูดเมทริกหรือแรงคาปิลลารีสามารถอธิบายปรากฏการณ์ได้จากการยกตัวของน้ำในหลอดคาปิลลารี แสดงดังภาพที่ 2 ขนาดของหลอดคือ r_1 , r_2 และ r_3 เปรียบเสมือนช่องว่างของเม็ดดิน ส่วนระดับน้ำที่ยกตัวคือ h_1 , h_2 และ h_3 เปรียบเสมือนแรงดูดเมทริกซึ่งยิ่งช่องว่างของเม็ดดินมีขนาดเล็กจะมีโอกาสที่น้ำจะยกตัวขึ้นสูงกว่าช่องว่างของเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่



ภาพที่ 2 แสดงปรากฏการณ์การยกตัวของน้ำในหลอดคาปิลลารี

ที่มา: Lu and Likos (2004)

ความสามารถในการดูดน้ำเข้าหาตัวของดินก็ยังขึ้นอยู่กับปริมาณของสารละลายเกลือของน้ำในดิน แรงดูดที่เกิดจากการดูดเนื่องจากสารละลายเกลือเรียกว่าแรงดูดออสโมติก (Osmotic suction, π) แรงดูดเมทริกกรวมกับแรงดูดออสโมติกจะมีค่าเท่ากับแรงดูดรวม (Total suction, Ψ) แรงดูดรวมนั้นอาจพิจารณาว่าเป็นพลังงานที่ใช้ในการดึงน้ำออกจากมวลดินในสภาวะที่มีการระเหยของน้ำ ซึ่งเป็นการดูดน้ำออกจากมวลดินในสภาวะไอน้ำ ค่า Ψ (Total suction) นี้ขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิ ดังสมการที่ 2

$$\psi = -\left(\frac{RT}{V_{mol}}\right) \cdot \ln(R_h) \quad (2)$$

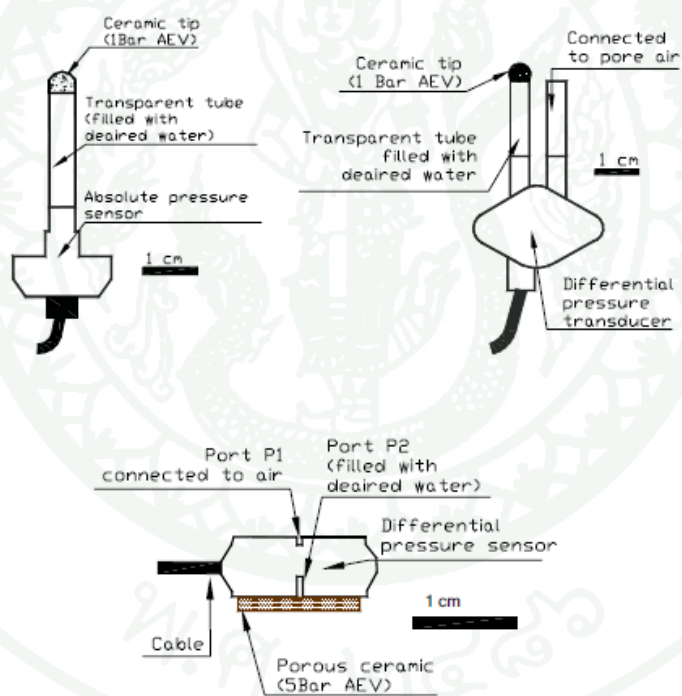
วิธีการวัดแรงดูดน้ำในดิน

วิธีการวัดแรงดูดน้ำในดินมีด้วยกันหลายวิธีเช่นวิธีการวัดแรงดูดเมทริกโดยใช้ Tensiometer, Axis Translation Technique, Filter Paper, Thermal Dissipation Sensor เป็นต้น การวัดแรงดูดรวมโดยใช้ Thermocouple Psychrometer, Filter Paper เป็นต้น ตารางที่ 2 สรุปวิธีการวัดแรงดูดเมทริกและแรงดูดรวม วิธีการวัดแรงดูดน้ำในดินที่กล่าวมามีวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือการใช้ Tensiometer เนื่องจากในสภาพจริงตามธรรมชาติส่วนมากค่าแรงดูดน้ำในดินจะอยู่ในช่วง 0-100 kPa ซึ่งการใช้ Tensiometer นั้นจึงมีความเหมาะสมและสะดวกในการนำไปใช้งานกว่าวิธีการวัดแรงดูดน้ำในดินชนิดอื่นๆ

การใช้ Tensiometer ในประเทศไทยเริ่มแรกใช้เพื่อการเกษตรโดยวัดความชื้นของดินเพื่อการใช้งานของพืช (อิทธิสุนทร, 2532) ซึ่ง วรากรและคณะ (2550) ได้ประยุกต์ใช้เครื่องมือดังกล่าวในการศึกษาดินถล่มในพื้นที่จังหวัด ภูเก็ต ต่อมา อภินิติและวิญญพงศ์ (2551) ได้มีการพัฒนา KU-Tensiometer วัดแรงดันน้ำด้านลบเพื่อใช้ในงานวิศวกรรมปฐพี ภาพที่ 3 แสดง KU-Tensiometer ที่ได้ทำการพัฒนาซึ่งมีส่วนประกอบหลักๆ คือ ปลายดินเผาที่มีค่าแรงดันที่อากาศสามารถแทรกเข้าไป (Air-entry value) ขนาดต่างๆ, กะเปาะน้ำและอุปกรณ์วัดแรงดันหรือเกจสุญญากาศ KU-Tensiometer ที่พัฒนาสามารถวัดแรงดูดเมทริกอยู่ในช่วงประมาณ 0-90 kPa. ไม่เหมาะสมในการนำไปวัดตัวอย่างดินที่มีความแห้งมากๆ ถ้าแรงดูดมากกว่า 90 kPa. จะต้องใช้ Tensiometer ชนิดวัดแรงดูดสูงเช่น Ridley and Burland (1993)

ตารางที่ 2 สรุปวิธีการวัดแรงดูดเมทริกและแรงดูดรวม

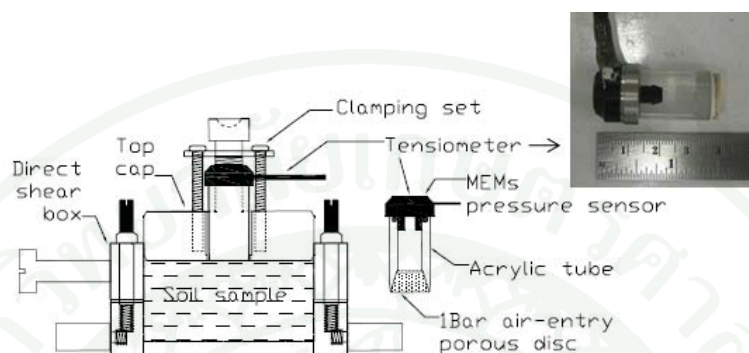
Type of Measurement	Method	Practical Suction Range (kPa.)
Matric suction	Tensiometer	<100
	Axistranslation techniques	<1500
	Thermal dissipation sensor	Entire Range
	Filter paper (contact)	Entire Range
Total suction	Thermocouple psychrometer	1000-8000
	Chilled mirror hygrometer	1000-8000
	Filter paper (noncontact)	1000-80000



ภาพที่ 3 แสดง KU-Tensiometer ชนิดต่างๆ

ที่มา: อภินิติ และ วิษณุพงศ์ (2551)

นอกจากนี้ Jotisankasa and Mairaing (2010) ยังได้ดัดแปลง Shear box เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนตรงสำหรับวัดแรงดูดโดย Tensiometer ซึ่งเครื่องมือดังกล่าวจะถูกติดตั้งผ่านช่องเปิดของฝาครอบ (Top cap) แล้วถูกยึดด้วยแผ่นเหล็กและสกรู แสดงดังภาพที่ 4

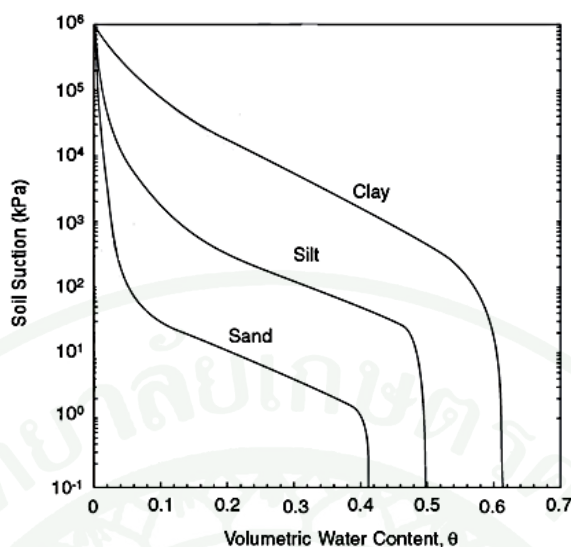


ภาพที่ 4 แสดง Shear box ดัดแปลงสำหรับวัดแรงดูดโดย Tensiometer

ที่มา: Jotisankasa and Mairaing (2010)

เส้นโค้งอุ้มน้ำ

แรงดูดของน้ำเปรียบเสมือนแรงที่กระทำให้มวลดินเชื่อมติดกันโดยเกิดจากแรงดูดเมทริก รวมกับแรงดูดออสโมติก อิทธิพลที่จะทำให้แรงดูดของน้ำในดินเปลี่ยนไป (เฉพาะแรงดูดเมทริก) คือปริมาณน้ำในช่องว่างดิน ถ้าดินสูญเสียหรือได้รับน้ำจากสาเหตุใดก็ได้แล้วจะทำให้แรงดูดน้ำในดินเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในมวลดินกับแรงดูดน้ำในดินถูกเรียกว่า เส้นโค้งอุ้มน้ำ (Soil water characteristic curve, SWCC) สามารถทดสอบได้จากเครื่องมือวัดแรงดูดน้ำในดินชนิดต่างๆตามที่กล่าวมาข้างต้น เส้นโค้งอุ้มน้ำของดินแต่ละชนิดจะมีลักษณะไม่เหมือนกัน เดิมใช้ในการเกษตรเพื่อหาความสามารถในการกักเก็บน้ำของดินที่ค่าแรงดูดใดๆ และบอกถึงชนิดดินว่าสามารถเก็บน้ำได้อย่างไร ภาพที่ 5 แสดงเส้นโค้งอุ้มน้ำของดินชนิดต่างๆ ประโยชน์ของเส้นโค้งอุ้มน้ำก็สามารถนำไปใช้ประมาณกำลังรับแรงเฉือนของดินและความชื้นผ่านของน้ำในสถานะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำได้



ภาพที่ 5 แสดงเส้นโค้งอุ้มน้ำ ของทราย, ทรายแป้งหรือตะกอนทราย (Silt) และ ดินเหนียว

ที่มา: Lu and Likos (2004)

หน่วยแรงในมวลดิน

หน่วยแรงของตัวมวลดินเองในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำจะประกอบไปด้วยหน่วยแรงประสิทธิผล, หน่วยแรงรวมและแรงดันน้ำในช่องว่างดินโดยจะสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 3

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (3)$$

หน่วยแรงประสิทธิผลจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงนั้นมีสาเหตุมาจากการเพิ่มหรือลดของระดับน้ำใต้ดิน, การไหลของน้ำออกจากมวลดินโดยเกิดการยุบอัดตัวของดิน, ขึ้นอยู่กับแรงดูดของน้ำในดิน และขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของน้ำ เป็นต้น ในธรรมชาติดินจะอยู่ในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำซึ่งจะมีแรงดูดของน้ำในดินและมีผลต่อหน่วยแรงประสิทธิผล Bishop (1959) ได้หาความสัมพันธ์ของหน่วยแรงประสิทธิผล ดังสมการที่ 4

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (4)$$

ค่า χ เป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับระดับความอิ่มตัวของน้ำมีค่าแตกต่างกันตามชนิดของดิน ค่า χ มีค่าเป็น 1 ที่ระดับความอิ่มตัวของน้ำเป็น 100 % และมีค่าเป็น 0 ที่ระดับความอิ่มตัวของน้ำเป็น 0 % ซึ่งถึงแม้ค่าแรงดูดของน้ำในดินจะมีค่าสูงแต่ถ้าระดับความอิ่มตัวของน้ำมีค่าเข้าใกล้ 0 แรงดูดของน้ำในดินนี้อาจจะไม่ใช่ตัวช่วยเพิ่มหน่วยแรงประสิทธิผล

กำลังรับแรงเฉือนของดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

กำลังรับแรงเฉือนของดินคือ ความต้านทานในการเคลื่อนที่ของมวลดิน ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญคือ

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินหรือความเชื่อมั่น เกิดจากแรงทางประจุไฟฟ้า, แรงตึงผิว และการเชื่อมประสานระหว่างเม็ดดิน (Cementation) เป็นต้น

แรงเสียดทานภายในเม็ดดินขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิวของเม็ดดิน, การกระจายตัวของเม็ดดิน และหน่วยแรงตั้งฉากที่กระทำต่อเม็ดดิน เป็นต้น

แรงดันน้ำในช่องว่างดินเมื่อมีแรงกระทำจากภายนอกกระทำกับมวลดินที่มีสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำจะเกิดแรงดันน้ำเพิ่มขึ้นทำให้กำลังของมวลดินมีค่าลดลงแต่เมื่อแรงดันน้ำถูกระบายออกจากมวลดิน จะเกิดการยุบอัดตัว (Consolidation) แรงกระทำจากภายนอกจะถูกส่งถ่ายสู่เม็ดดินทำให้กำลังของมวลดินเพิ่มขึ้น และจากสมการของ Bishop (1959) แรงดันน้ำด้านลบจะช่วยเพิ่มกำลังของมวลดินแต่ก็จะขึ้นอยู่กับระดับความอิ่มตัวของน้ำ

กำลังรับแรงเฉือนของมวลดินแบ่งออกเป็น

1. กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในสถานะนี้การเปลี่ยนแปลงของแรงที่กระทำกับมวลดินจะทำให้เกิดแรงดันน้ำในช่องว่างดิน ซึ่งน้ำในมวลดินไม่สามารถไหลเข้าหรือออกจากมวลดินได้อย่างอิสระ โดยทั่วไปดินที่มีความตึงน้ำเช่น ดินเหนียวและดินทรายแป้ง เมื่อได้รับแรงกระทำจะเกิดแรงดันน้ำในช่องว่างดินเพราะฉะนั้นในดินที่มีความตึงน้ำกำลังรับแรงเฉือนจึงเป็นแบบไม่ระบายน้ำ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการ Mohr Coulomb ดังสมการที่ 5

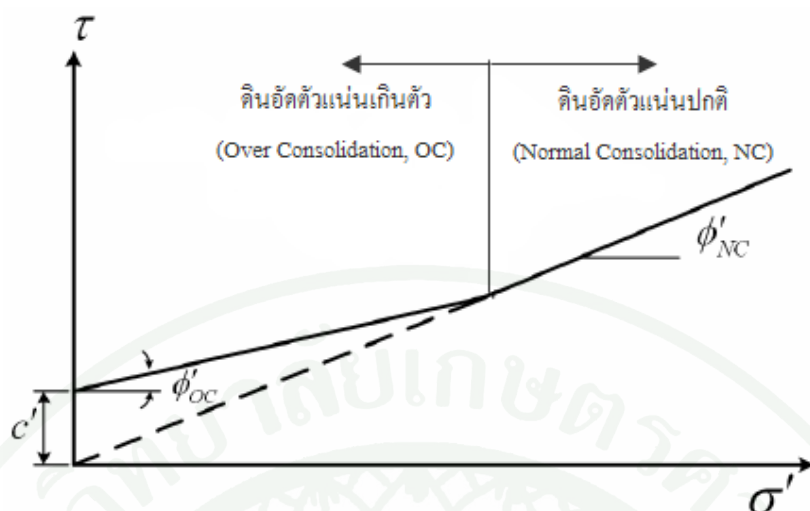
$$\tau = c_u + \sigma \cdot \tan \phi_u \quad (5)$$

สำหรับดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำสามารถหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินในรูปแบบ ϕ เท่ากับ 0 ซึ่งเป็นเพียงหลักการหนึ่งที่ใช้สำหรับการออกแบบที่ไม่สามารถทราบค่าแรงดันน้ำในช่องว่างดิน ค่า ϕ มีค่าเท่ากับ 0 ไม่ได้เป็นพฤติกรรมที่แท้จริงของดินเหนียว โดยที่ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) นี้สามารถหาได้จากสมการที่ 6

$$S_u = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (6)$$

2. กำลังรับแรงเฉือนแบบระบายน้ำในสภาวะนี้การเปลี่ยนแปลงของแรงที่กระทำกับมวลดินจะไม่ทำให้เกิดแรงดันน้ำในช่องว่างดิน ซึ่งน้ำในมวลดินสามารถไหลเข้าหรือออกจากมวลดินได้อย่างอิสระ ดินเม็ดหยาบเช่น กรวด ทราย มีความโปร่งน้ำเมื่อได้รับแรงกระทำจะไม่เกิดแรงดันน้ำในช่องว่างดินขึ้น สำหรับดินเม็ดละเอียดเช่น ดินเหนียวซึ่งมีความทึบน้ำก็สามารถหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบระบายน้ำได้จากการทดสอบ Direct Shear Test และ Triaxial Test โดยการใส่อัตราในการเฉือนตัวอย่างดินซ้ำพอที่น้ำจะสามารถไหลเข้าหรือออกจากมวลดินได้อย่างอิสระซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการ Mohr Coulomb ดังสมการที่ 7 กำลังรับแรงเฉือนของดินเม็ดหยาบเป็นดินที่ไม่มีค่าดัชนีความเหนียว (Plasticity Index) กำลังรับแรงเฉือนจึงขึ้นอยู่กับแรงเฉียทานภายในเม็ดดิน ค่า c' จึงมีค่าเท่ากับ 0 ส่วนดินเหนียวแบ่งเป็นดินสภาวะอัดตัวแน่นปกติ (Normal Consolidation, NC) เป็นดินที่เกิดการตกตะกอนใหม่ๆยังไม่มี การเชื่อมประสานกันของดิน ค่า c' จึงมีค่าเท่ากับ 0 ส่วนดินสภาวะอัดตัวแน่นเกินตัว (Over Consolidation, OC) กำลังรับแรงเฉือนของดินจะมีทั้งค่า c' และ ϕ' สามารถแสดงเส้นการพิบัติ Mohr Coulomb ดังภาพที่ 6

$$\tau = c' + (\sigma - u_w) \cdot \tan \phi' \quad (7)$$



ภาพที่ 6 เส้นการพิบัติ Mohr Coulomb ของดินอัดตัวแน่นปกติและอัดตัวแน่นเกินตัว

กำลังรับแรงเฉือนของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

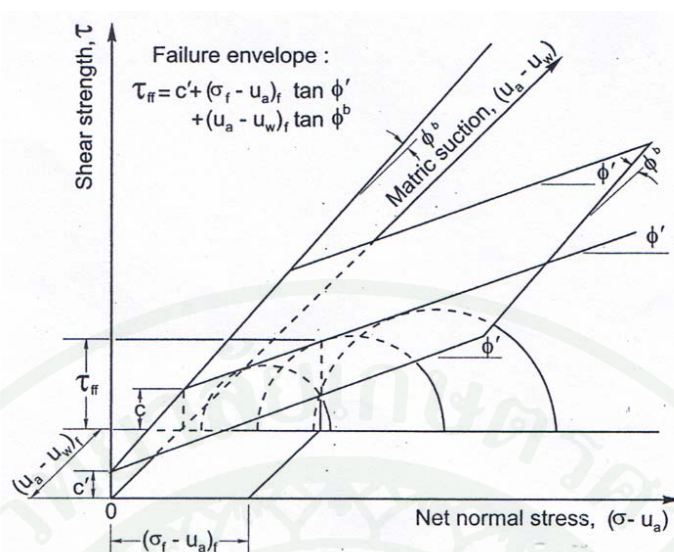
กำลังรับแรงเฉือนของดินในสถานะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำสามารถแสดงในรูปแบบสมการของ Bishop (1959) ได้ดังสมการที่ 8

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \cdot \tan \phi' + \chi \cdot (u_a - u_w) \cdot \tan \phi' \quad (8)$$

Fredlund and Morgenstern (1993) อธิบายการใช้สถานะของหน่วยแรงที่เป็นอิสระต่อการเปลี่ยนแปลงสำหรับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ การเสนอการเปลี่ยนแปลงของสถานะของหน่วยแรงดังนี้ หน่วยแรงรวมตั้งฉาก ($\sigma_n - u_a$) และ แรงดูดเมทริก ($u_a - u_w$) เป็นแรงดันน้ำ แนวคิดนี้นำไปสู่ทฤษฎีของเกณฑ์การพิบัติ Mohr Coulomb ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำแสดงดังสมการที่ 9 ตามหลักการทั่วไป Failure envelope มี 2 ทิศทาง สำหรับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะเพิ่มเป็น 3 ทิศทางแสดงในภาพที่

7

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \cdot \tan \phi' + (u_a - u_w) \cdot \tan \phi^b \quad (9)$$



ภาพที่ 7 เส้นการพิบัติ Mohr Coulomb ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

ที่มา: Fredlund and Morgenstern (1993)

ทฤษฎีความมั่นคงของลาดดิน

หินแกรนิตเป็นหินชนิดหนึ่งที่พบมากในประเทศไทย รวมหินแกรนิตที่เป็นตัวแทนในการกำเนิดหินในยุคต่างๆ เป็นพื้นที่ 7.13% ของพื้นที่ทั้งหมดของประเทศ หินแกรนิตเมื่อเกิดการผุพังจนกลายเป็นดิน จะได้ส่วนประกอบของเม็ดดินคือทรายแป้งหรือตะกอนทราย (Silt) เป็นส่วนใหญ่ เมื่อได้รับอิทธิพลจากน้ำฝนดินประเภทนี้มีค่าความเชื่อมแน่นต่ำหรือไม่มีความเชื่อมแน่นเลยจะถูกน้ำพัดพาเม็ดดินไปทำให้เกิดเป็นร่องของการกัดเซาะถ้าปล่อยทิ้งไว้โดยไม่มีการซ่อมแซมอาจเป็นต้นเหตุจนทำให้เกิดการพิบัติของลาดดินได้ หรือดินเกิดการอิ่มตัวด้วยน้ำทำให้กำลังรับแรงเฉือนลดลงจึงทำให้เกิดการพิบัติของลาดดินขึ้น อีกทั้งการพิบัติของลาดดินสามารถเกิดจากปัจจัยอื่นๆ เช่น ลักษณะทางธรณีวิทยา, แรงกระทำจากแผ่นดินไหว, น้ำหนักจากการก่อสร้างบนลาดดิน เป็นต้น การพิบัติของลาดดิน ก่อให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน อีกทั้งยังสร้างความเสียหายต่อสภาวะแวดล้อมอีกด้วย ภาพที่ 8 แสดงลักษณะการเกิดการพิบัติของดินและหิน (U.S. Geological Survey, 2004) ดังนี้

การเคลื่อนตัวของมวลดินเป็นแบบวงกลม (Rotational landslide)

การเคลื่อนพังแบบการไถลตัว (Translational landslide)

การเคลื่อนพังแบบการไถลตัวแบบเป็นแท่ง (Block slide)

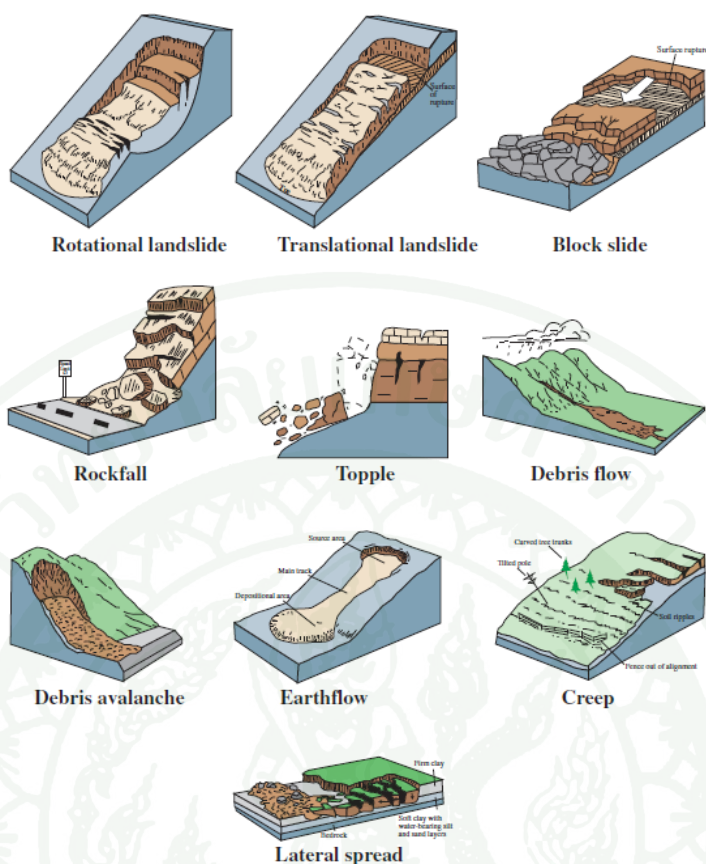
การร่วงหล่น (Rock fall)

การพลิกคว่ำของหิน (Topping)

การเคลื่อนตัวแบบการไหลตัวสามารถแบ่งเป็น 5 ชนิดคือ

1. ไคลนไหล (Mud Flow หรือ Debris Flow)
2. แผ่นดินไหล (Earth Flow)
3. ลาดหินผาถล่ม (Earth Avalanche)
4. ดินคืบ (Soil Creep)
5. มวลดินไหลตัวในแนวราบ (Lateral Spread)

สำหรับดินจากหินแกรนิตจะมีรูปแบบการพังถล่มแบบการเคลื่อนตัวของมวลดินเป็นแบบวงกลม, การเคลื่อนพังแบบการไถลตัว, ไคลนไหล, แผ่นดินไหล, ลาดหินผาถล่มและดินคืบ



ภาพที่ 8 แสดงชนิดของการเคลื่อนตัวของมวลดินและหิน

ที่มา: U.S. Geological Survey (2004)

การวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดิน

หลักในการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดินมีหลักการว่า กำลังต้านทานของมวลดินต้องมีค่ามากกว่าแรงที่กระทำที่ทำให้เกิดการพังถล่ม ซึ่งอัตราส่วนของแรงทั้ง 2 นี้จะแสดงออกมาเป็นค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดิน (Factor of safety, F.S.) กำลังต้านทานของมวลดินขึ้นอยู่กับตัวแปรหลักต่างๆคือ แรงยึดเหนี่ยวของมวลดิน, แรงคูดน้ำหรือแรงดันน้ำในช่องว่างดิน, มุมเสียดทานภายในเม็ดดิน เป็นต้น ส่วนแรงที่กระทำให้เกิดการพังถล่มคือ น้ำหนักของมวลดินเอง, แรงกระทำจากภายนอก เป็นต้น อิทธิพลที่มีผลกระทบต่อความปลอดภัยของลาดดินมากที่สุดคือแรงดันน้ำ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในมวลดินจะมีผลต่อแรงดันน้ำและกำลังของมวลดินโดยถ้ามวลดินมีแรงดันน้ำด้านบวกมากจะทำให้ค่าความปลอดภัยของลาดดินมีค่าลดลง แต่ถ้ามวลดินมีแรงดันน้ำ

ด้านลบก็จะช่วยเพิ่มความปลอดภัยของลาดดินในระดับหนึ่ง วิธีการหาค่าความปลอดภัยของลาดดินสามารถหาได้จากวิธีต่างๆหลายวิธีเช่น

กรณีลาดมีการเคลื่อนตัวแบบไถลตัว (Translational landslide) ของลาดที่อึดตัวและไม่อึดตัวด้วยน้ำ

$$F.S. = \frac{c' + c^s + \gamma.z.\cos^2 \beta \cdot \tan \phi'}{\gamma.z.\sin \beta \cdot \cos \beta} \quad (18)$$

กรณีลาดมีการเคลื่อนตัวแบบวงกลม (Rotational landslide) ของลาดที่อึดตัวและไม่อึดตัวด้วยน้ำ

$$F.S. = \frac{\sum c' + \sum c^s + \sum (w.\cos \beta) \cdot \tan \phi'}{\sum (w.\sin \beta)} \quad (19)$$

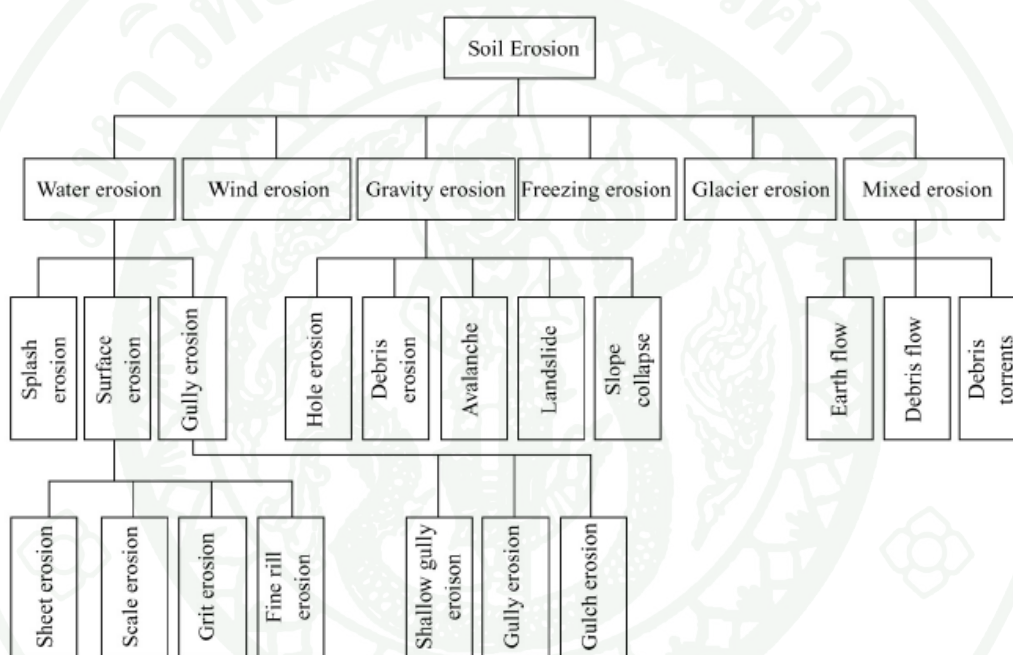
Jotisankasa and Mairaing (2010) ได้ทำการทดสอบหาค่า c^s ของดินจากพื้นที่ดินถล่มหลายแห่งในประเทศไทย โดยวิธีทดสอบแรงเฉือนตรงชนิดวัดแรงดูดน้ำในดิน ดังภาพที่ 4 ผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างดินที่มีแรงดูดมากจะมีการเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคเม็ดดินเนื่องจากน้ำผิวโค้ง (water menisci) ได้มากตามไปด้วย อีกทั้งแรงดูดจะไม่ถูกทำลายลงเนื่องจากการพองตัวของตัวอย่างดิน และสามารถประมาณค่า ได้โดยง่ายโดยใช้เส้นโค้งอุ้มน้ำหรือค่าความชื้นที่จุด Field capacity, หรือที่ค่า Suction เท่ากับ 33kPa, $c^s = \frac{\theta_{33}}{\theta_s} (u_a - u_w) \tan \phi'$

การกัดเซาะของดิน

Agri-science Resources for High School Sciences ได้ให้นิยามการกัดเซาะของดินคือการเสื่อมลงของดินเนื่องจากการเคลื่อนตัวทางกายภาพของเม็ดดิน แหล่งที่สามารถเกิดการกัดเซาะได้แก่ บริเวณธรรมชาติ, บริเวณที่มีการทำการเกษตร, บริเวณที่มีการสร้างที่พักอาศัยและ บริเวณเส้นทางคมนาคม การกัดเซาะเหล่านี้ส่วนมากเป็นการกระทำจากมนุษย์ที่เร่งทำให้เกิดการกัดเซาะขึ้น

สาเหตุและประเภทของการกัดเซาะ

Aimin *et al.* (2002) ได้ทำการแบ่งสาเหตุของการเกิดการกัดเซาะในประเทศจีนไว้ 6 สาเหตุ คือ การกัดเซาะพัดพาเม็ดดินโดยน้ำ, การกัดเซาะพัดพาเม็ดดินโดยลม, การกัดเซาะพัดพาเม็ดดินโดยแรงโน้มถ่วงของโลก, การกัดเซาะพัดพาเม็ดดินโดยน้ำแข็ง, การกัดเซาะพัดพาเม็ดดินโดยธารน้ำแข็ง, การกัดเซาะพัดพาเม็ดดินหลายชนิดรวมกัน ซึ่งแต่ละสาเหตุก็จะมีประเภทของการกัดเซาะที่แตกต่างกันไป แสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 แสดงสาเหตุและประเภทของการเกิดการกัดเซาะในประเทศจีน

ที่มา: Aimin *et al.* (2002)

Gray and Sotri (1996) ได้สรุปสิ่งที่ทำให้เกิดการกัดเซาะโดยมีสาเหตุมาจากน้ำ, น้ำแข็ง, ลม และแรงโน้มถ่วงของโลก แต่ละสาเหตุจะมีรูปแบบการเกิดการกัดเซาะที่แตกต่างกันสรุปดังตารางที่ 3

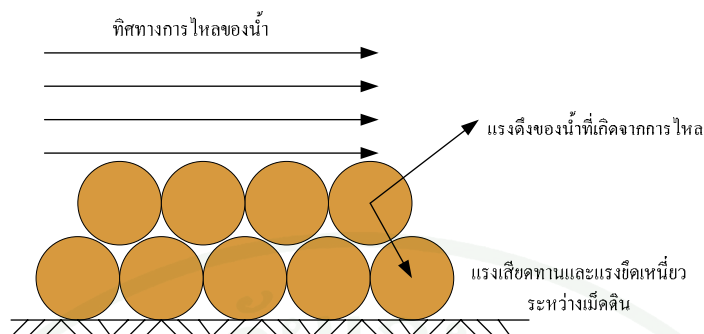
ตารางที่ 3 แสดงสาเหตุและประเภทของการเกิดการกัดเซาะ

Agent	Type of Erosion
Water	Raindrop splash
	Sheet erosion
	Rilling
	Gullying
	Stream channel erosion
	Wave action
	Piping and sapping
Ice	Solifluction
	Glacial scour
	Ice plucking
Wind	Wind erosion cannot be subclassified into "types"
Gravity	Creep
	Earth flow
	Avalanche
	Debris slide

ที่มา: Gray and Sotir (1996)

การกัดเซาะพัฒนาเม็ดดินโดยน้ำ

ในประเทศไทยซึ่งเป็นเขตร้อนชื้นส่วนมากการกัดเซาะจะเป็นแบบการกัดเซาะพัฒนาเม็ดดินโดยน้ำ ในการศึกษาครั้งนี้จะกล่าวถึงการกัดเซาะพัฒนาเม็ดดินโดยน้ำเป็นหลัก Gray and Sotir (1996) ได้อธิบายกลไกของการเกิดการกัดเซาะโดยน้ำโดยมีแรงที่กระทำบนอนุภาคเม็ดดินดังนี้ แรงดึงดูดของน้ำที่บริเวณรอยต่อของน้ำและเม็ดดิน (Drag force), แรงเสียดทานและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินแสดงดังภาพที่ 10 ถ้าแรงดึงดูดที่เกิดจากน้ำมีค่ามากกว่าแรงเสียดทานและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินก็จะทำให้เกิดการพัฒนาเม็ดดินขึ้น



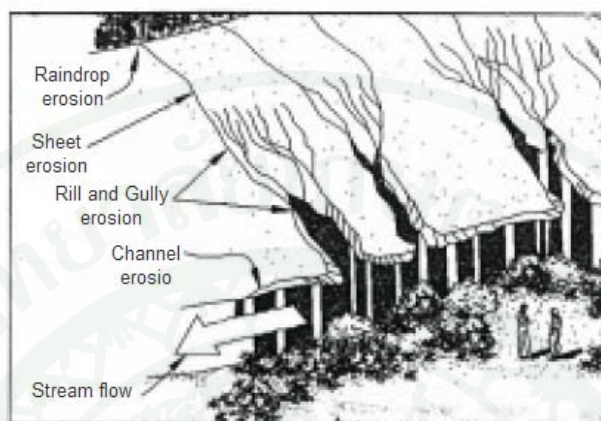
ภาพที่ 10 แสดงแรงต่างๆที่กระทำกับอนุภาคเม็ดดิน

ที่มา: Gray and Sotir (1996)

Ministry of transportation and highways (1997) เป็นหน่วยงานของประเทศโครัมเบีย ซึ่งได้ทำการจำแนกรูปแบบของการเกิดการกัดเซาะพัฒนาเม็ดดินโดยน้ำ ดังภาพที่ 11 แสดงรายละเอียดดังนี้คือ

1. Raindrop erosion เกิดจากฝนที่ตกลงมาซึ่งน้ำฝนจะทำให้อนุภาคเม็ดดินฟุ้งกระจายในอากาศ
2. Sheet erosion เกิดจากการไหลของน้ำบนพื้นดินในระดับต้นและมีช่วงของการไหลกว้างจึงเกิดเป็นร่องของการกัดเซาะมีลักษณะเป็นแผ่น
3. Rill erosion การกัดเซาะที่ผิวดินหลายๆรอยรวมทั้งรอยของการกัดเซาะแบบ Sheet erosion มารวมกันจนเป็นร่องของการกัดเซาะ ซึ่งมีความเร็วของการไหลของน้ำสูงและปั่นป่วน
4. Gully erosion เกิดขึ้นเมื่อร่องของ Rill erosion ที่ไหลมารวมกันมีการพัฒนาจนมีขนาดใหญ่และลึก

5. Channel erosion เกิดการกัดเซาะบริเวณริมตลิ่งหรือที่ฐานของลาดดินจากการไหลของแม่น้ำ



ภาพที่ 11 ประเภทของการกัดเซาะพัฒนาเม็ดดินโดยน้ำ

ที่มา: Ministry of Transportation and Highways (1997)

และได้สรุปปัจจัยที่เป็นไปได้ในการเกิดการกัดเซาะดังนี้คือ

1. Rainfall and Runoff การไหลบ่าของน้ำผิวดินเป็นปัจจัยหลักในการเกิดการพัดพาเม็ดดิน ซึ่งน้ำผิวดินที่เกิดจากน้ำฝนนั้นจะมีปริมาณมากน้อยจะขึ้นอยู่กับ ความเข้ม, ความถี่และความยาวนานของฝนที่ตก ฝนที่ตกมีความเข้มมากย่อมมีพลังงานและการพัดพาเม็ดดินมากกว่าฝนที่ตกแบบมีความเข้มน้อย ซึ่งฝนที่ตกลงมาไม่ได้ก่อให้เกิดน้ำที่ผิวดินเพียงอย่างเดียวแต่ยังเป็นการเพิ่มความชื้นในดินจนเป็นสาเหตุทำให้เสถียรภาพของลาดดินลดลง

2. Topography ความยาว, ความชันและพื้นที่ผิวดินของลาดดินมีอิทธิพลอย่างมากในการเกิดการกัดเซาะ ซึ่งยิ่งลาดดินที่มีความยาวและชันมากย่อมมีพลังงานและความเร็วในการไหลของน้ำมาก เป็นผลให้เกิดการกัดเซาะได้ง่าย สำหรับพื้นที่ผิวดินที่มีความเรียบอาจมีการกัดเซาะมากกว่าพื้นที่ผิวดินที่มีความขรุขระเพราะ พื้นที่ที่มีความขรุขระช่วยลดความเร็วในการไหลของน้ำได้มากกว่า

3. Cohesionless soil ความเป็นไปได้ในการเกิดการกัดเซาะของดินเม็ดหยาบหรือดินที่ไม่มี ความเชื่อมแน่น คือจะเกิดการกัดเซาะได้เมื่อขนาดของเม็ดดินมีค่าลดลง ตะกอนทรายและทราย ละเอียดจะมีความสามารถในการเกิดการกัดเซาะได้สูงซึ่งจะถูกน้ำพัดพาได้ง่ายกว่าทรายหยาบและ กรวด

4. Cover condition การปลูกพืชคลุมผิวดินจะช่วยลดผลกระทบจากน้ำฝนที่ตกลงมาอีกทั้ง ยังช่วยลดความเร็วในการไหลของน้ำ และเพิ่มการซึมของน้ำลงสู่ผิวดิน ทำให้เกิดการกัดเซาะ ผิวดินมีค่าลดลง

Wan and Fell (2004) ได้ทำการศึกษาการกัดเซาะในตัวเชื่อมซึ่งได้พัฒนาการทดสอบ Hole erosion test (HET) และ Slot erosion test (SET) การทดสอบเป็นการจำลองการเกิดการกัดเซาะ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงของน้ำ จากการทดสอบสามารถหาตัวบ่งชี้ในการเกิดการกัดเซาะ โดยดัชนีการกัดเซาะได้ดังสมการที่ 20 และ 21 ได้จำแนกอัตราการกัดเซาะดังตารางที่ 4

สำหรับดินเม็ดหยาบ

$$I_{HET} = 6.62 - 0.016\rho_d - \frac{0.1 \cdot \rho_d}{\rho_{d\max}} - 0.044 \cdot \omega - 0.074 \cdot \Delta\omega_r + 0.11 \cdot S_r + 0.061 \cdot \text{Clay(U.S.)} \quad (20)$$

สำหรับดินเม็ดละเอียด

$$I_{HET} = 10.2 + 9.576\rho_d - \frac{0.042 \cdot \rho_d}{\rho_{d\max}} + 0.1 \cdot \omega + 0.097 \cdot \Delta\omega_r - 0.0056 \cdot \text{Fine} + 0.042 \cdot \text{Clay(U.S.)} - 0.09LL + 0.11I_p + 0.44 \cdot \text{Pinhole} \quad (21)$$

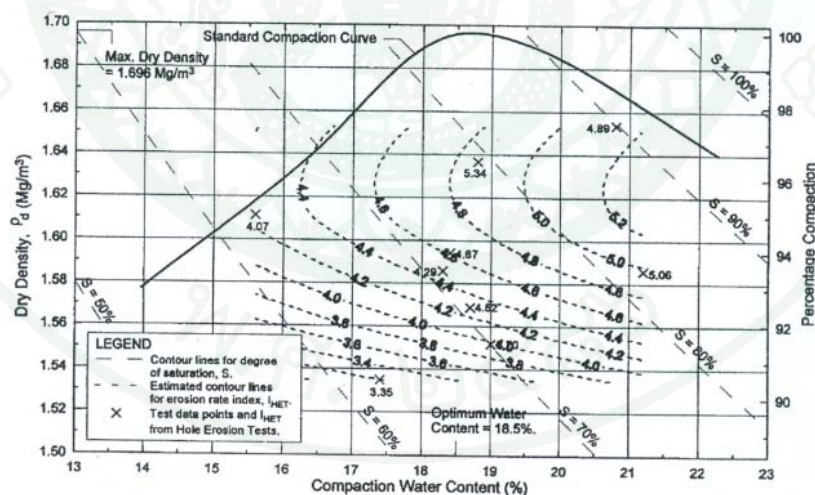
หมายเหตุ Clay(U.S.) คือ เปอร์เซ็นต์ของดินเม็ดละเอียดที่มีค่าน้อยกว่า 0.005 มิลลิเมตร ตามระบบ Unified, Fines คือ เปอร์เซ็นต์ของดินเม็ดละเอียดที่มีค่าน้อยกว่า 0.075 มิลลิเมตร, Pinhole คือ ค่าดัชนีการจำแนกดิน โดยการทดสอบแบบ pinhole test เช่น D1 = 1, D2 = 2, ..., ND = 6

ตารางที่ 4 แสดงคุณสมบัติของดัชนีการกัดเซาะ

กลุ่ม	ดัชนีการกัดเซาะ (IHET)	รายละเอียด
1	<2	การกัดเซาะเร็วมาก
2	2-3	การกัดเซาะเร็ว
3	3-4	การกัดเซาะเร็วปานกลาง
4	4-5	การกัดเซาะช้าปานกลาง
5	5-6	การกัดเซาะช้ามาก
6	>6	ไม่เกิดการกัดเซาะ

ที่มา: Wan and Fell (2004)

Wan and Fell (2004) ยังได้ทดสอบบดอัดดินหลากหลายตัวอย่างพบว่าค่าดัชนีการกัดเซาะมีค่าสูง (มีความต้านทานในการเกิดการกัดเซาะสูง) ทางด้านเปียกมากกว่าทางด้านแห้ง ดังแสดงในภาพ 12

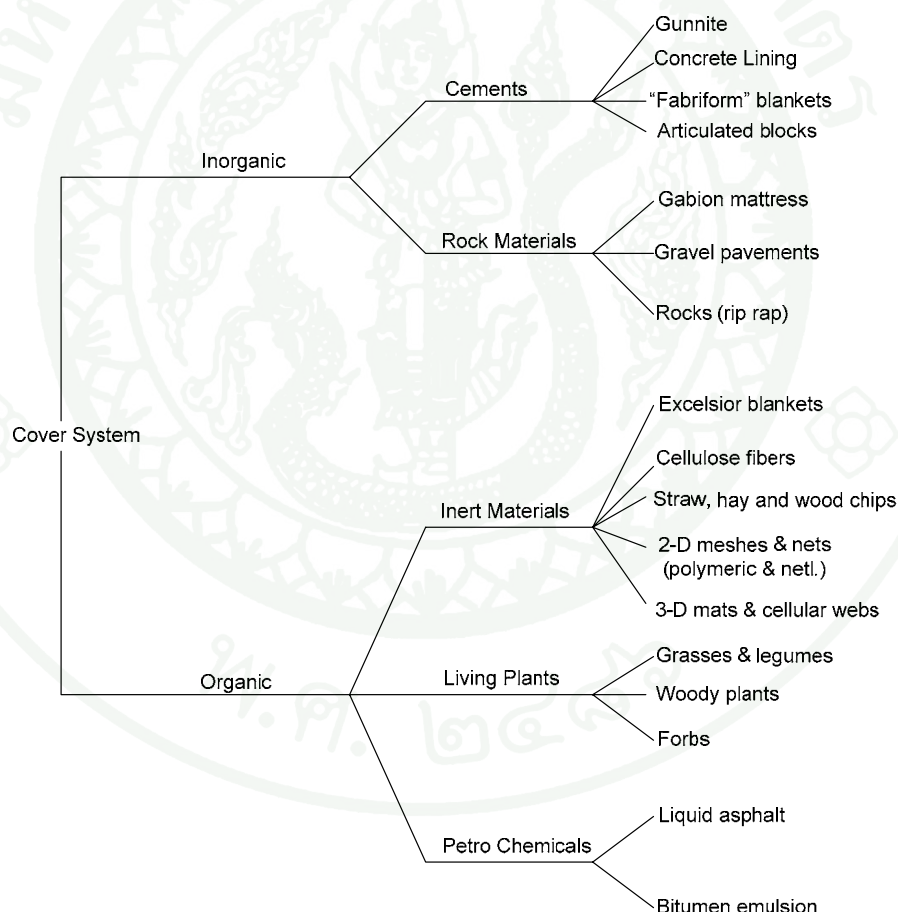


ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณน้ำ, ระดับของความอิ่มตัวของน้ำ, ดัชนีการกัดเซาะ

ที่มา: Wan and Fell (2004)

แนวทางการป้องกันการกัดเซาะ

การป้องกันการกัดเซาะพัฒนาเมื่อดินโดยน้ำมีหลักการที่ว่าจะต้องลดแรงดึงที่เกิดจากการไหลของน้ำโดยลดความเร็วในการไหลของน้ำที่ผิวดินและ เพิ่มแรงต้านทานต่อการกัดเซาะ โดยป้องกันหรือเสริมแรงที่ผิวดินร่วมกับการหาวัสดุคลุมดินหรือเพิ่มแรงยึดระหว่างเม็ดดิน Gray and Sotir (1996) ได้สรุปการใช้วัสดุคลุมผิวดินหรือเพิ่มแรงยึดระหว่างเม็ดดินเพื่อป้องกันการกัดเซาะดังนี้เช่น การใช้ซีเมนต์หรือหินคลุมผิวดิน, การใช้หญ้าแห้ง, เศษไม้, เศษฟาง คลุมผิวดิน และการปลูกพืชคลุมผิวดิน เป็นต้น ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของการใช้วัสดุคลุมผิวดินสำหรับป้องกันการกัดเซาะที่แตกต่างกันได้แสดงดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ประเภทของวัสดุคลุมผิวดินสำหรับป้องกันการกัดเซาะ

ที่มา: Gray and Sotir (1996)

แนวทางการป้องกันการกัดเซาะด้วยการปลูกพืช, Geotextile และการผสมดินเหนียวกับดินคันทางหรือลาดดินมีรายละเอียดดังนี้

การปลูกพืชป้องกันการกัดเซาะที่ผิวดินโดยใช้ระบบรากพืช รากพืชนั้นทำให้กำลังของดินเพิ่มขึ้นเนื่องจากรากจะยึดประสานเม็ดดิน นอกจากนั้นผลของการดูดน้ำของพืชยังช่วยลดแรงดันน้ำภายในช่องว่างดิน (รัฐธรรม, 2002) และรากพืชยังสามารถลดความเร็วในการไหลของน้ำทำให้เกิดโอกาสเกิดการกัดเซาะลดลงตามไปด้วย นอกจากการปลูกพืชทั่วไปในการป้องกันการกัดเซาะแล้ว ยังมีการนำหญ้าแฝกเพื่อเสริมเสถียรภาพเชิงลาดและควบคุมการชะล้างพังทลาย ดิถี (2000) ได้ทำการศึกษาพบว่าระบบรากของหญ้าแฝกสามารถลดปริมาณน้ำในโพรงดินและทำให้เกิดสภาวะแรงดูด ในสภาพไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะส่งผลดีต่อเสถียรภาพของลาดดิน และได้อ้างถึงงานวิจัยของ Kon และ Lim ได้ทดลองทำการเปรียบเทียบหน้าดินที่ปลูกหญ้าแฝกกับหน้าดินที่ไม่มีอะไรปกคลุม พบว่าหญ้าแฝกสามารถลดการไหลบ่าของน้ำและดินที่ถูกชะล้างออกไปได้ถึง 73 และ 95% ตามลำดับ

ในช่วงที่พืชยังเป็นต้นกล้าระบบของรากพืชยังไม่เจริญเต็มโตเต็มที่ ดินจะยังคงถูกกัดเซาะ ผลจากการกัดเซาะทำให้รากพืชไม่สามารถยึดเกาะดินจนพืชได้รับสารอาหารไม่เพียงพอหรืออาจตายในที่สุด จึงต้องมีการใช้วัสดุจำพวกเส้นใยในการคลุมผิวดินจะช่วยลดการเกิดการกัดเซาะจากน้ำฝน, น้ำผิวดินและลม อีกทั้งวัสดุจำพวกเส้นใยจะป้องกันความร้อนจากแสงอาทิตย์และเก็บความชื้นได้ดี วัสดุเส้นใยจากธรรมชาติหรือวัสดุสังเคราะห์ที่สานถักทอรวมกันในทางวิศวกรรม ปฐพีเรียกวัสดุจำพวกนี้ว่า Geotextile ซึ่งการใช้ Geotextile กับงานวิศวกรรมปฐพีมีหลากหลายประเภทเช่น ใช้เป็นชั้นกรองดิน, ใช้เป็นชั้นป้องกันน้ำชะขยะ, ใช้เพิ่มเสถียรภาพให้กับลาดดิน เป็นต้น Morgan and Rickson (1995) ได้รวมชนิดของวัสดุสิ่งทอ (Geotextile) ในการป้องกันการกัดเซาะและใช้ร่วมกับการปลูกพืชไว้ดังนี้และแสดงชนิดของวัสดุสิ่งทอ (Geotextile) ดังภาพที่ 14

Geojute ทำจากปอกระเจาถักทอเป็นแบบตาข่าย

Bachbettgewebe ทำจากใยจากเปลือกมะพร้าวสานกันเป็นแบบตาข่าย

Cocomat ทำจากใยจากเปลือกมะพร้าวถักทอเป็นแบบผ้าห่ม

Enviromat ทำจากเศษไม้หรือเศษฟางอัดทอเป็นแบบผ้าห่ม

Eromat ทำจากใยจากเปลือกมะพร้าวและเศษฟางอัดทอเป็นแบบผ้าห่ม

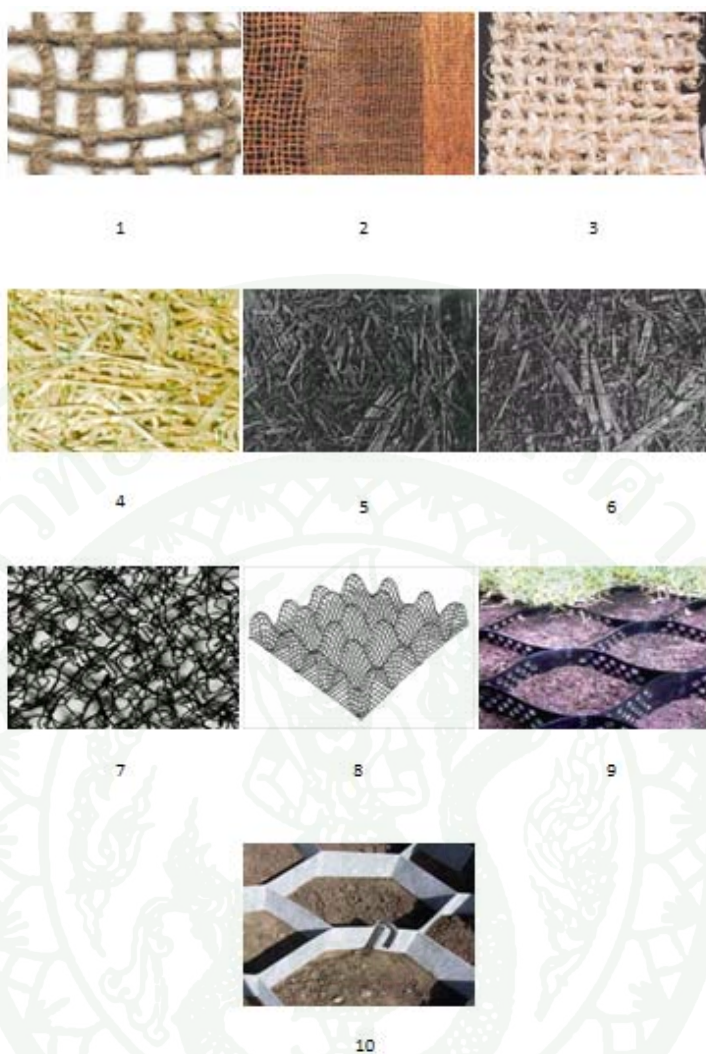
Covamat ทำจากใยจากเปลือกมะพร้าวอัดทอเป็นแบบผ้าห่ม

Enkamat ทำจากวัสดุใยสังเคราะห์ในลอนทอเป็นแบบผ้าห่ม

Tensarmat ทำจากวัสดุใยสังเคราะห์โพลีเอทที่ลื่นสานกันเป็นแบบตาข่าย

Geoweb ทำจากวัสดุใยสังเคราะห์โพลีเอทที่ลื่นที่มีความหนาแน่นสูง สานกันเป็นแบบเชล

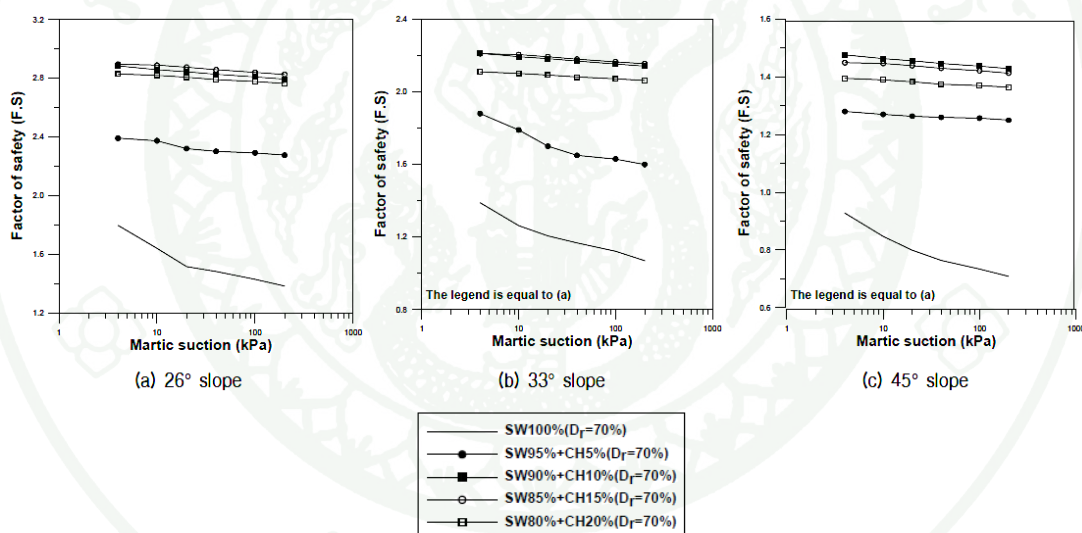
Armater ทำจากวัสดุใยสังเคราะห์ซึ่งมีโครงสร้างที่แข็ง สานกันเป็นแบบเชล



ภาพที่ 14 Geotextile ชนิดต่างๆที่ใช้ในการป้องกันการกัดเซาะและใช้ร่วมกับการปลูกพืช

ในประเทศไทยได้มีการใช้วัสดุสิ่งทอจากเส้นใยธรรมชาติหรือที่เรียกว่าผ้าห่มดินและหมอนกันดินในการป้องกันการกัดเซาะที่บริเวณเขาอานม้า อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ ผ้าห่มดินคือวัสดุจำพวกเส้นใยที่นำมาทอจนมีลักษณะเป็นผืนผ้าแล้วประกบด้วยตาข่ายเสริมแรงทำให้สามารถเพิ่มกำลังรับแรงดึงในพื้นที่ลาดชัน และหมอนกันดินคือเส้นใยที่ถูกอัดตัวในตาข่ายเสริมแรงจนมีลักษณะเหมือนหมอนข้าง ทำหน้าที่ลดความเร็วในการไหลของน้ำพร้อมกับกักเก็บตะกอนที่ถูกชะล้างหรือใช้ในการฟื้นฟูปทนาการไหลของน้ำฝนเพื่อลดการเกิดร่องการกัดเซาะของลาดดิน ที่อาจส่งผลต่อการพังทลายของดิน (อรอนันต์, 2008)

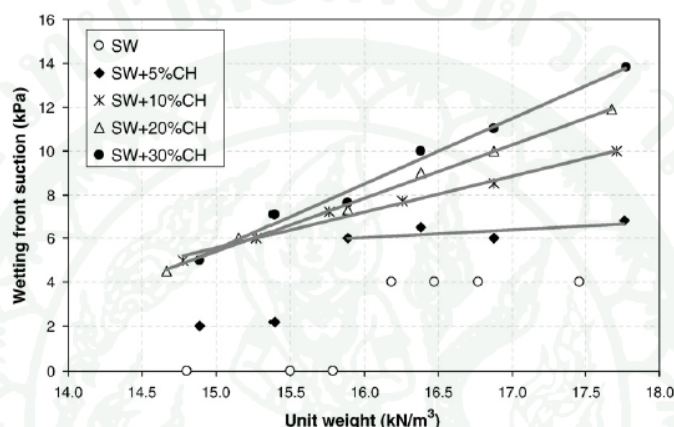
การผสมแร่ดินเหนียวลงไปดินที่มีค่าความเข้มน้นน้อย ซึ่งเป็นที่ทราบกันอยู่ว่าดินที่มีความเหนียวน้อยย่อมมีโอกาศเกิดการกัดเซาะได้ง่าย ดินประเภทนี้ก็คือ ทราย และทรายแป้ง การผสมแร่ดินเหนียวลงไปดินที่มีค่าความเข้มน้นน้อยนั้น ได้มีผู้ทำการศึกษาหาคุณสมบัติด้านต่างๆเช่น Kyu-Hyun *et al.* (2007) ได้ทำการศึกษาอนุภาคของดินเม็ดละเอียดที่มีผลต่อเสถียรภาพของลาดดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ การทดสอบโดยการนำดินที่สุ้งจากหินแกรนิตมาผสมกับดินเม็ดละเอียดหรือ ดินเหนียวที่มีค่าความเหนียวสูง ทำการทดสอบหาค่าตัวแปรต่างๆ เช่น c' , c^s หรือ $(u_s - u_w)\tan\phi^b$, ϕ' และค่าความชื้นน้ำ ทำการวิเคราะห์ความปลอดภัยของลาดดิน โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความชันพบว่าความปลอดภัยของลาดดินมีค่าเพิ่มขึ้นแล้วจึงลดลงตามปริมาณดินเหนียวที่เพิ่มขึ้นและค่าความปลอดภัยของลาดดินมีค่าลดลงเมื่อค่าความชันเพิ่มขึ้นดังแสดงดังภาพที่ 15 และได้สรุปว่าดินที่สุ้งจากหินแกรนิตที่ผสมกับดินเหนียวในปริมาณ 10-15% มีค่าความเหมาะสมในการนำไปใช้งานที่สุด



ภาพที่ 15 ค่าความปลอดภัยของลาดดินกับค่าแรงดูดน้ำในดิน (Matric suction)

ที่มา: Kyu-Hyun *et al.* (2007)

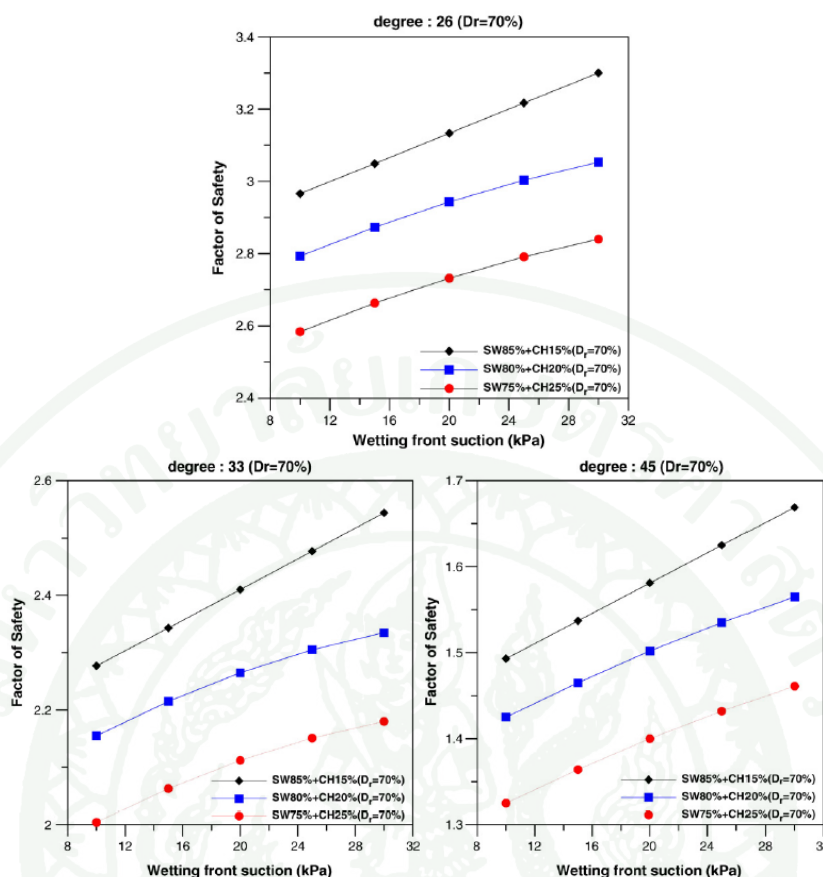
Jeong *et al.* (2008) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของดินเหนียวที่มีผลต่อดินทรายที่มีขนาดละกัณดีกับการไหลซึม การทดสอบนำดินทรายที่มีขนาดละกัณดีซึ่งเกิดจากการผสมจากหินแกรนิตมาผสมกับดินเหนียวที่มีค่าความเหนียวสูง จากนั้นทำการบดอัดดินที่ผสมแล้วทำการเพิ่มน้ำลงในตัวอย่างบดอัดพร้อมกับการวัดค่าแรงดูดน้ำในดินก่อนที่ดินจะอิ่มตัวด้วยน้ำ (Air entry suction หรือ Wetting front suction) ภาพที่ 16 แสดงค่าแรงดูดน้ำในดินก่อนที่ดินจะอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของดินเหนียวเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 16 ค่าแรงดูดน้ำในดินก่อนที่ดินจะอิ่มตัวด้วยน้ำกับค่าความหนาแน่นของตัวอย่าง

ที่มา: Jeong *et al.* (2008)

จากการทดสอบหาค่าตัวแปรต่างๆ เช่น c' , c^s หรือ $(u_a - u_w) \tan \phi^b$, ϕ' , ค่าความชื้นน้ำและค่าแรงดูดของน้ำในดินก่อนที่ดินจะอิ่มตัวด้วยน้ำไปทำการวิเคราะห์หาค่าความปลอดภัยของลาดดินพบว่าในช่วงที่ปริมาณดินเหนียวผสมอยู่ในปริมาณที่น้อย (5-15%) ค่าแรงดูดน้ำในดินก่อนที่ดินจะอิ่มตัวด้วยน้ำจะมีผลกับค่าความปลอดภัยของลาดดินมากกว่าค่า c' และ ϕ' สำหรับปริมาณดินเหนียวที่ผสมมากกว่า 15% พบว่าค่าความปลอดภัยของลาดดินจะขึ้นอยู่กับค่า c' และ ϕ' มากกว่าค่าแรงดูดน้ำในดินก่อนที่ดินจะอิ่มตัวด้วยน้ำ ภาพที่ 17 แสดงค่าความปลอดภัยของลาดดินที่ความชันของลาดดินต่างๆ กับค่าแรงดูดน้ำในดินก่อนที่ดินจะอิ่มตัวด้วยน้ำ

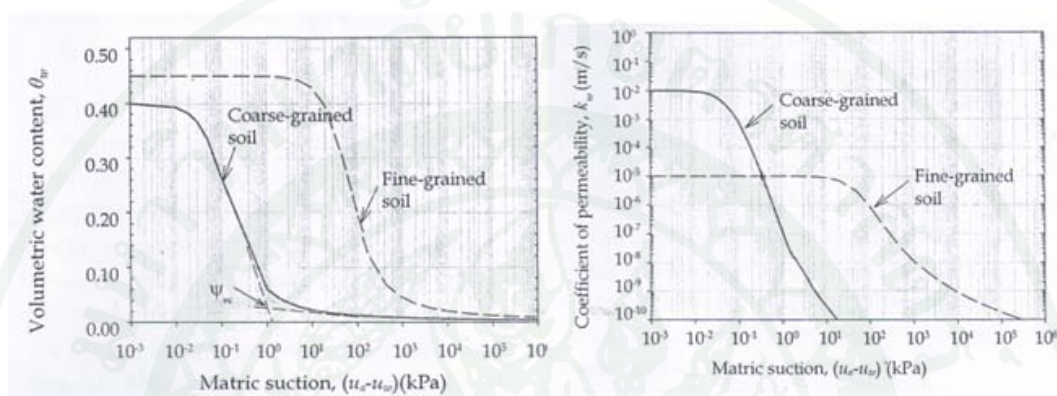


ภาพที่ 17 แสดงค่าความปลอดภัยของลาดดินที่ความชันต่างๆกับค่าแรงดูดน้ำในดินก่อนที่จะอิ่มตัวด้วยน้ำ

ที่มา: Jeong *et al.* (2008)

การใช้ดินเม็ดละเอียดปูทับผิวลาดดินเม็ดหยาบในการป้องกันน้ำซึมมีการใช้อย่างแพร่หลายเช่นในงานป้องกันน้ำซึมเข้าสู่ลาดดินในบริเวณที่ฝนตกมีความเข้มข้นสูงในงานถนนหรืองานลาดดินทั่วไป อีกทั้งยังใช้ในงานบ่อฝังกลบขยะเพื่อป้องกันน้ำซึมลงสู่ชั้นขยะหรือป้องกันน้ำชะขยะไหลซึมออกมา การใช้ดินเม็ดละเอียดปูทับผิวลาดดินเม็ดหยาบนี้เรียกว่า Capillary Barrier Rahardjo *et al.* (2007) ได้อธิบายกลไกโดยใช้เส้นโค้งอุ้มน้ำ (SWCC) และความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกับแรงดูดน้ำในดิน แสดงดังภาพที่ 18 มีหลักการที่ว่า ชั้นดินเม็ดหยาบจะสูญเสียน้ำได้ง่ายกว่าชั้นดินเม็ดละเอียดเป็นผลทำให้มีแรงดูดน้ำในดินมากกว่าซึ่งทำให้ชั้นดินเม็ดหยาบมีค่าความชื้นน้ำลดลงได้เร็วกว่าชั้นดินเม็ดละเอียด เมื่อมีน้ำไหลซึมลงสู่ชั้นดินน้ำจะไหลไปในชั้นดินเม็ดละเอียดมากกว่าชั้นดินเม็ดหยาบและในเวลาต่อมาเมื่อน้ำซึมลงสู่ชั้นดินเม็ดหยาบ

มากขึ้นจะทำให้ค่าความชื้นน้ำเริ่มมีค่าสูงขึ้น ซึ่งถ้าค่าความชื้นน้ำเพิ่มขึ้นจนเลยจุดตัดระหว่างค่าความชื้นน้ำของดินเม็ดหยาบกับดินเม็ดละเอียดดังภาพที่ 18 (ด้านขวา) น้ำจะไหลซึมสู่ชั้นดินเม็ดหยาบมากขึ้นดินเม็ดละเอียด Capillary Berrier นี้จะมีประสิทธิภาพเมื่อแรงดูดเมตริกที่รอยต่อระหว่างดินเม็ดละเอียดและดินเม็ดหยาบมีค่ามากกว่าแรงดูดที่น้ำเริ่มเข้ามาแทนที่อากาศในดิน (Ψ_w)



ภาพที่ 18 แสดงเส้นโค้งอุ้มน้ำของดินเม็ดละเอียดและเม็ดหยาบ (ด้านซ้าย) และความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นน้ำกับแรงดูดน้ำในดิน (ด้านขวา)

ที่มา: Rahardjo *et al.* (2007)

การประเมินดินที่มีโอกาสเกิดการกัดเซาะในห้องปฏิบัติการ

การที่จะทราบว่าดินมีโอกาสดเกิดการกัดเซาะได้ง่ายหรือยากนั้นสามารถทดสอบในห้องปฏิบัติการได้เช่นเดียวกับการทดสอบหาดินกระจายตัว (Dispersive soil) ในการทดสอบดินกระจายตัวนั้นมีทั้งหมด 8 วิธีแต่ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบเพียง 3 วิธีคือ Crumb test, Pinhole test และ Double hydrometer test โดยมีรายละเอียดในการทดสอบดังนี้

Crumb test

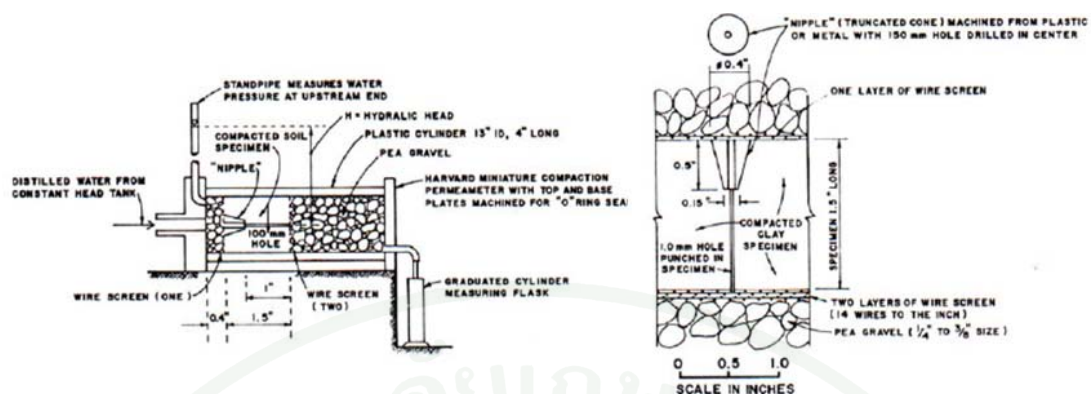
Crumb test (Emerson, 1967 ทำการปรับปรุงโดย Sherard *et. al.*, 1977) ทำการทดสอบโดยเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 0.04 กรัม ในน้ำกลั่น 1 ลิตร

แล้วนำก้อนดินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6-10 มม. ใส่ลงในสารละลาย หลังจากนั้นสังเกตความขุ่นของน้ำที่ช่วงเวลา 1-3, 4-6 และ 7-10 นาที โดยทำการแบ่งระดับของการเกิดปฏิกิริยาได้ 4 ระดับดังนี้

ระดับที่ 1 ไม่มีปฏิกิริยา	ดินแตกออกเล็กน้อยไม่มีความขุ่นอยู่ในน้ำ จำแนกเป็น Non-Dispersive
ระดับที่ 2 มีปฏิกิริยาเล็กน้อย	มีความขุ่นเล็กน้อยที่ผิวของก้อนดิน ไม่สามารถ เห็นความขุ่นได้ชัดเจนด้วยตาเปล่า จำแนกเป็น Slightly Dispersive
ระดับที่ 3 มีปฏิกิริยาปานกลาง	สามารถเห็นความขุ่นได้ชัดเจน เมื่อเอาก้อนดิน ใส่ลงไปใต้น้ำจะมีความขุ่นเกิดขึ้นบางๆ ที่ ภาชนะใต้น้ำจำแนกเป็น Moderately dispersive
ระดับที่ 4 มีปฏิกิริยาอย่างมาก	ก้นภาชนะใต้น้ำมีความขุ่นเกิดขึ้นทั่วไป น้ำใน ภาชนะเมื่อตั้งทิ้งไว้จะมีความขุ่นทั่วถึงกันหมด จำแนกเป็น Highly dispersive

Pinhole test

การทดสอบ Pinhole test (Sherard et. al., 1976) เป็นการทดสอบที่ประเมินการกระจายตัวของเม็ดดินหรือการกัดเซาะในลักษณะ Piping erosion โดยทำการบดอัดดินตาม Standard compaction test ในแบบหล่อตัวอย่างสำหรับการทดสอบนี้ และทำการเจาะรูขนาด 1 มม. ผ่านตัวอย่างแล้วปล่อยน้ำให้ไหลผ่านที่ Head เท่ากับ 2, 7, 15 และ 40 นิ้ว ตามช่วงเวลา 5, 10 และ 15 นาที ภาพที่ 19 แสดงลักษณะของเครื่องมือทดสอบจะต้องพิจารณาขนาดของรูหลังจากการทดสอบ, ความขุ่นของน้ำที่ไหลออกมาและอัตราการไหลของน้ำที่ Head ต่างๆ ผลจากการทดสอบสามารถจำแนกการกระจายตัวของเม็ดดินได้ดังตารางที่ 5



ภาพที่ 19 ลักษณะของเครื่องมือทดสอบ Pinhole test และหน้าตัดตามยาวของตัวอย่าง

ที่มา: Sherard *et al.* (1976)

ตารางที่ 5 แสดงการจำแนกประเภทดินจากการทดสอบ Pinhole test

ประเภทดิน	สัญลักษณ์	เฮดของน้ำ (นิ้ว)	เวลา (นาทีก)	อัตราการ ไหลของน้ำ (มล./วินาที)	สี, ตะกอน และ ความขุ่นของ น้ำ	ขนาดรูเจาะ หลัง ทดสอบ (มม.)
กระจายตัว	D1	2	5	>1.5	ขุ่นมาก	>2
	D2	2	10	>1	ขุ่น, มีสี เล็กน้อย	>2
	ND4	2	10	<0.8	มีสีเล็กน้อย มองเห็นได้ ง่าย	<1.5
ไม่กระจาย ตัว	ND3	7	5	>2.5	มีสีเล็กน้อย มองเห็นได้ ง่าย	>2
		15	5	>3.5	มีสีเล็กน้อย	2
	ND2	40	5	>5	ใส, เกือบไม่ มีสี	2
	ND1	40	5	<4	ใส	1

Double hydrometer test

Double hydrometer test มีหลักในการทดสอบเหมือนกับวิธีมาตรฐาน (ASTM D442-63) ซึ่งทำการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของดินที่มีขนาดเม็ดดินน้อยกว่า 0.05 มม. ระหว่างดินที่ใส่สาร Dispersing agent กับดินที่ไม่ใส่สาร ซึ่งผลการทดสอบสามารถประเมินความไวต่อการกีดเซาะได้จาก Degree of Dispersion ดังสมการที่ 22 และสามารถแสดงผลการจำแนกดินกระจายตัวได้ดังตารางที่ 6

$$\text{Degree of Dispersion} = \frac{\% \text{fine than 0.005 mm. with chemical dispersion}}{\% \text{fine than 0.005 mm. without chemical dispersion}} \quad (22)$$

ตารางที่ 6 แสดงการจำแนกดินกระจายตัวจากการทดสอบ Double hydrometer test

เปอร์เซ็นต์การกระจายตัว	ผลการจำแนกดิน
0-33	ไม่มีปัญหาการกระจายตัวของเม็ดดิน (Non dispersive)
34-67	เริ่มมีปัญหาการกระจายตัวของเม็ดดิน (Moderate dispersive)
68-100	มีปัญหาการกระจายตัวของเม็ดดิน (Highly dispersive)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

ในการศึกษานี้ได้แบ่งส่วนของการวิจัยออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกศึกษาคุณสมบัติของดินที่ผสมระหว่างดินทรายแป้งที่ผุพังจากหินแกรนิตผสมกับดินเหนียวเคลโอลินที่อัตราส่วนผสมต่างๆ และส่วนที่สองศึกษาคุณสมบัติของดินที่ป้องกันการกัดเซาะด้วยวิธีปลูกพืชร่วมกับผ้าห่มดินและหมอนก้นดินซึ่งทั้ง 2 ส่วนจะทำการศึกษาทั้งทางด้านกลศาสตร์, ความเป็นไปได้ในการเกิดการกัดเซาะและเสถียรภาพของลาดดิน โดยทั้ง 2 ส่วนมีวัสดุที่นำมาทดสอบดังนี้

ส่วนแรกของการศึกษานี้ได้นำดินเหนียวเคลโอลินที่ได้จากการทำเหมืองดินขาว จังหวัดอุดรดิตถ์ โดยมีขนาดอนุภาคเม็ดดินผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 400 เท่ากับ 100 % และดินทรายแป้งนำมาจากบริเวณโครงการก่อสร้างเจดีย์บูรพาวิจิตรวิทยาประชาสามัคคี วัดเขาสุกิมซึ่งตั้งอยู่ที่ตำบลเขาบายศรี อำเภอท่าใหม่ จังหวัดจันทบุรี มาผสมที่อัตราส่วนต่างๆกัน ซึ่งดินทั้ง 2 ชนิดเป็นตัวอย่างดินแปลงสภาพ (Disturbed sample) ภาพที่ 20 แสดงลักษณะของดินที่นำมาทำการทดสอบ



ภาพที่ 20 แสดงลักษณะดินทรายแป้งที่ผุพังจากหินแกรนิต (ด้านซ้าย) และ ดินเคโอลิน (Kaolin) (ด้านขวา)

ส่วนที่สองดินที่นำมาทดสอบแสดงดังภาพที่ 21 ซึ่งอยู่ในบริเวณโครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษหมายเลข 7 สายชลบุรี-พัทยา กม.6+100 ด้านขวาทาง ซึ่งเป็นลาดดินตัด (Cut slope) อยู่ในช่วงการก่อสร้าง ดินบริเวณนี้เป็นจำพวกทรายหยาบและทรายแป้งปนอยู่มากเมื่อถูกการพัดพาเม็ดดินโดยน้ำฝนจะทำให้เกิดร่องของการกัดเซาะขึ้น ในบางบริเวณมีขนาดของร่องที่ลึกและใหญ่มาก สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวงและบริษัท ไพร์ม ซีเล็คชั่น จำกัด จึงได้มีการทำแปลงทดลองใช้ผลิตภัณฑ์ผ้าห่มดินและหมอนก้นดินแสดงดังภาพที่ 22 ซึ่งได้ติดตั้งร่วมกับการปลูกหญ้าเพื่อป้องกันการกัดเซาะ และภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ได้เข้าร่วมการศึกษว่าเมื่อมีการใช้ผ้าห่มดินและหมอนก้นดินร่วมกับการปลูกหญ้าพฤติกรรมด้านกำลังและการกัดเซาะของลาดดินจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร



ภาพที่ 21 แสดงลักษณะของตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบในงานวิจัยส่วนที่ 2



ภาพที่ 22 แสดงผลิตภัณฑ์ผ้าห่มดินและหมอนดิน

ที่มา: บริษัท ไพร์ม ซีเล็คชั่น จำกัด (2007)

อุปกรณ์การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

เครื่องทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานของดินเช่น เครื่องทดสอบหาลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดิน, พิกัดแอตเตอร์เบิร์ก, ความถ่วงจำเพาะ

เครื่องทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน

แบบหล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.25 ซม. สูง 8 ซม., แท่งกดตัวอย่างเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.25 ซม. สูง 4 ซม., ฐานรองเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.2 ซม. สูง 1.92 ซม. และ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.38 ซม. สูง 5.33 ซม. สำหรับบดอัดตัวอย่างเพื่อทดสอบหาลำดับรับแรงเฉือนตรงและเส้นโค้งอุ้มน้ำของงานวิจัยในส่วนที่ 1 แสดงดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 แสดงอุปกรณ์สำหรับบดอัดตัวอย่างในงานวิจัยส่วนที่ 1

เครื่องทดสอบหาลำดับรับแรงเฉือนตรง

เครื่องทดสอบหาเส้นโค้งอุ้มน้ำ, KU-Tensiometer แสดงดังภาพที่ 24, Relative humidity sensor แสดงดังภาพที่ 25 และ ATT handheld แสดงดังภาพที่ 26

เครื่องทดสอบ Pinhole test, Crumb test และ Double hydrometer test
เครื่องมือทั่วไป เช่น เวอร์เนีย, เครื่องชั่งและตุ้มน้ำ เป็นต้น

อุปกรณ์การทดสอบในสนาม

ส่วนเจาะดินและชุดเก็บตัวอย่าง KU-Miniature sampler

KU-Tensiometer สำหรับติดตั้งในสนามและ ATT handheld แสดงดังภาพที่ 26

ท่อ PVC กันหลุมพังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.25 เซนติเมตร, ยาว 0.3 และ 1 เมตร

ชุดการทดสอบ Kunzelstab penetration test และเครื่องมือทั่วไป



ภาพที่ 24 แสดง KU-Tensiometer รุ่นต่างๆ



ภาพที่ 25 แสดง Relative humidity sensor



ภาพที่ 26 แสดงอุปกรณ์ ATT handheld

วิธีการ

แผนการวิจัยของดินทรายแป้งที่สุฟ้งจากหินแกรนิตเมื่อผสมกับเคโอลินที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

ภาพที่ 27 แสดงแผนการวิจัยของดินทรายแป้งที่สุฟ้งจากหินแกรนิตเมื่อผสมกับเคโอลินที่อัตราส่วนผสมต่างๆ โดยจะทำการทดสอบต่างๆดังนี้

ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของดิน โดยนำดินทรายแป้งที่สุฟ้งจากหินแกรนิต ผสมกับเคโอลิน (Kaolin) ที่อัตราส่วนผสมต่างๆหาการกระจายตัวของเม็ดดิน, พิกัดแอดเตอร์เบิร์ก, ความถ่วงจำเพาะ

ศึกษาหาค่าความชื้นที่เหมาะสมที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด โดยนำดินทรายแป้ง ผสมกับเคโอลิน (Kaolin) ที่อัตราส่วนผสมต่างๆมาทำการบดอัดตามมาตรฐาน Standard compaction test

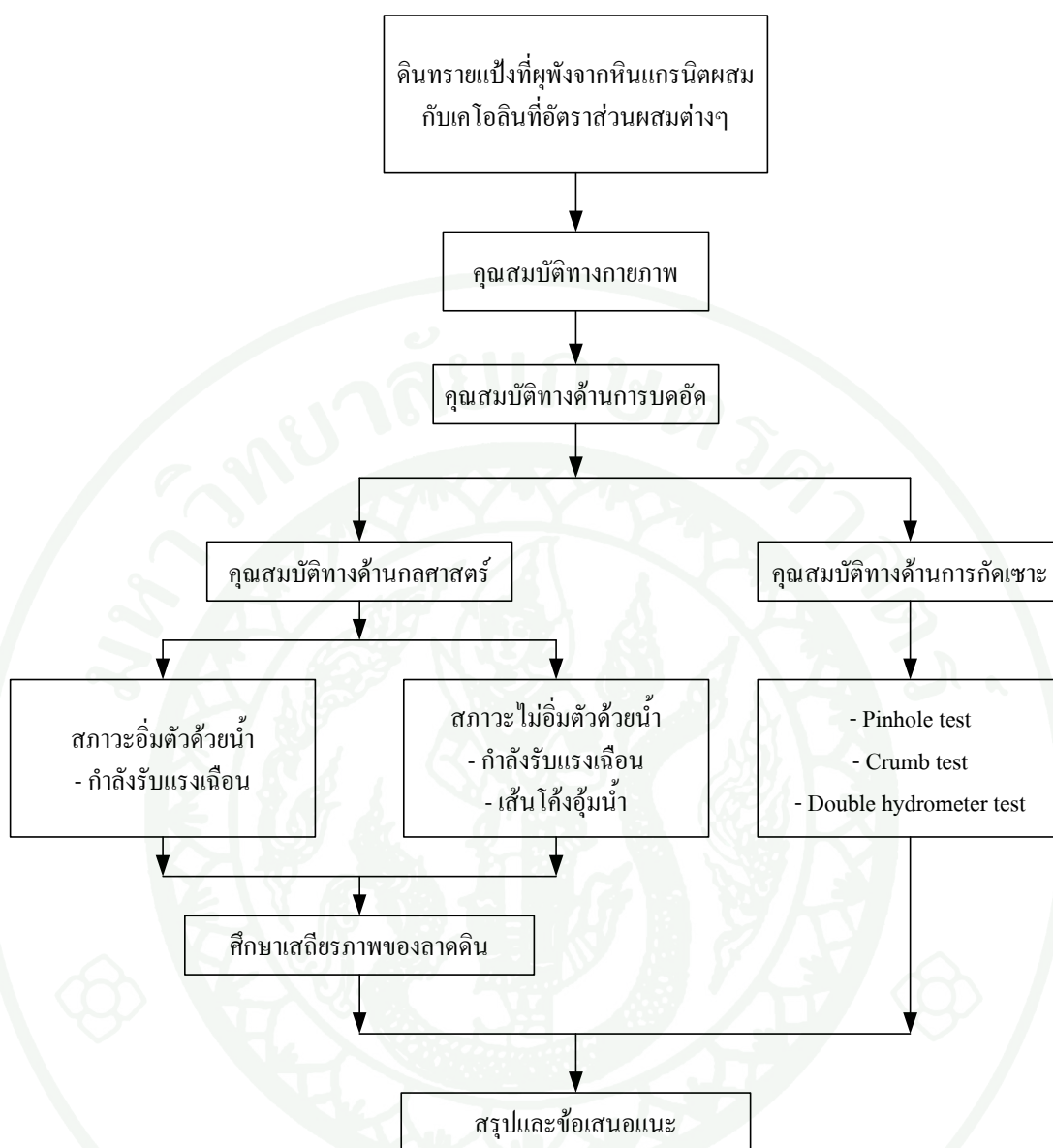
ศึกษาคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำทำการทดสอบหาค่าลึงรับแรงเฉือนตรง ส่วนในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำทำการทดสอบหาค่าลึงรับแรงเฉือนตรง และหาเส้นโค้งอุ้มน้ำของดินแต่ละส่วนผสมซึ่งทำการวัดแรงดันน้ำด้านลบหรือแรงดูดน้ำในดินโดยใช้ KU-Tensiometer

ศึกษาคุณสมบัติทางการกัดเซาะจากการทดสอบ Pinhole test, Crumb test และ Double hydrometer test

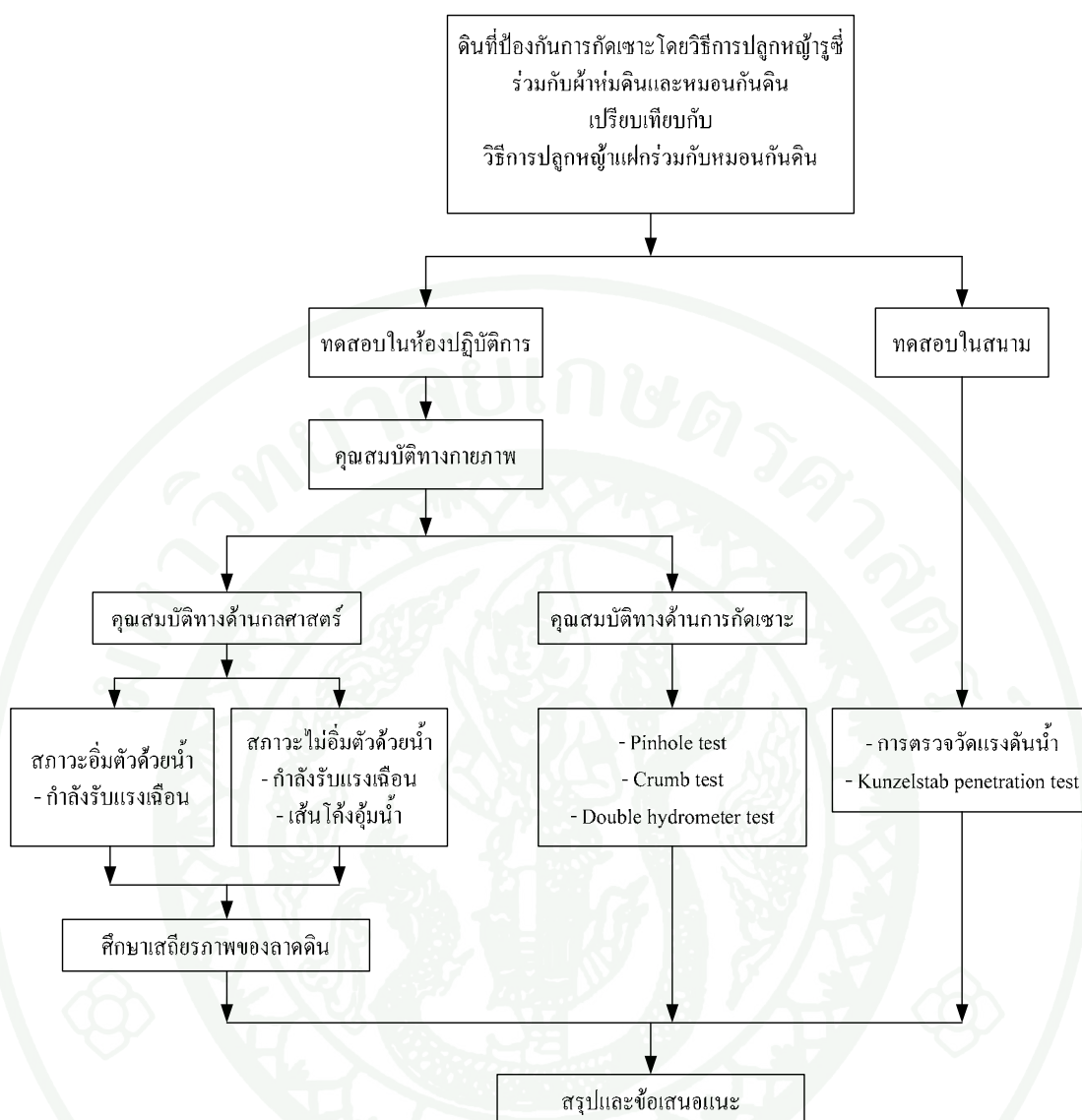
ศึกษาเสถียรภาพของลาดดิน โดยวิธีการจำลองลาดดินอนันต์ที่ส่วนผสมต่างๆของลาดดินเดิม จากนั้นนำตัวแปรด้านกำลังเฉือนต่างๆเช่น c' , c^s หรือ $(u_s - u_w)\tan\phi^b$, ϕ' ที่ได้จากการทดสอบทำการวิเคราะห์หาค่าความปลอดภัยของลาดดิน

แผนการวิจัยของดินที่ป้องกันการกัดเซาะด้วยการปลูกหญ้าร่วมกับผ้าห่มดินและหมอนกันดิน

ภาพที่ 28 แสดงแผนการวิจัยของแปลงทดสอบที่ป้องกันการกัดเซาะด้วยการปลูกหญ้าร่วมกับผ้าห่มดินและหมอนกันดิน โดยจะทำการทดสอบต่างๆเหมือนกับงานวิจัยในส่วนแรกคือ ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ, คุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ทั้งในสภาวะอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวด้วยน้ำซึ่งในสภาวะนี้การทดสอบเส้นโค้งอุ้มน้ำจะทำการวัดแรงดูดน้ำในดินโดยใช้ KU-Tensiometer และ Relative humidity sensor, คุณสมบัติทางการกัดเซาะและศึกษาค่าความปลอดภัยของลาดดิน ซึ่งส่วนที่เพิ่มเข้ามาในงานวิจัยส่วนที่ 2 คือการทดสอบในสนามโดยมีการตรวจวัดแรงดันน้ำในสนามโดยใช้ KU-Tensiometer และการทดสอบ Kunzelstab penetration test



ภาพที่ 27 แสดงแผนในการวิจัยในส่วนที่ 1



ภาพที่ 28 แสดงแผนในการวิจัยในส่วนที่ 2

งานวิจัยในส่วนที่ 1

การทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพ

ทดสอบหาการกระจายตัวของเม็ดดิน, พิกัดแอดเตอร์เบิร์กส์และความถ่วงจำเพาะของดินทรายแป้งที่ผุพังจากหินแกรนิตผสมกับเคโอลิน (Kaolin) โดยมีอัตราส่วนผสม 0, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนัก

การทดสอบหาคุณสมบัติด้านการบดอัด

ทดสอบบดอัดดินแบบมาตรฐาน (Standard compaction test) โดยมีอุปกรณ์และตัวอย่างดินสำหรับบดอัดแสดงดังภาพที่ 29 ตัวอย่างดินที่ทำการทดสอบจะนำดินทรายแป้งที่ผุพังจากหินแกรนิตผสมกับเคโอลิน (Kaolin) โดยมีอัตราส่วนผสม 0, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนักเพิ่มปริมาณน้ำให้กับตัวอย่างแล้วทำการบดอัด พร้อมทั้งหาความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสม (%Optimum water content)



ภาพที่ 29 แสดงอุปกรณ์สำหรับบดอัดดินและตัวอย่างดินที่จะทำการบดอัด

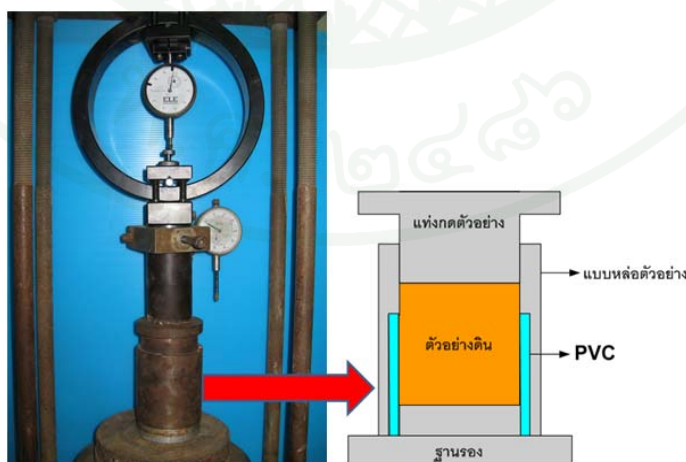
การทดสอบคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์

สภาวะดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

การทดสอบหากล้างรับแรงเฉือนตรง

ทำการเตรียมตัวอย่างโดย ผสมดินทรายแป้งที่สุ่งจากหินแกรนิตผสมกับเคโอลิน (Kaolin) ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ จากนั้นนำดินผสมกับน้ำ ปริมาณน้ำที่ผสมมีค่าเท่ากับค่าความชื้นที่เหมาะสม (%Optimum water content) ที่ได้จากการทดสอบการบดอัดตามมาตรฐาน Standard compaction test และนำดินบางส่วนไปหาปริมาณน้ำในมวลดิน (Water content) จากนั้นหาปริมาตรของกระบอก PVC เพื่อนำไปคำนวณหาน้ำหนักดินที่ต้องใช้สำหรับบดอัดดินลงในแบบหล่อตัวอย่าง จากนั้นประกอบแบบหล่อตัวอย่างกับกระบอก PVC แล้วจึงนำดินที่ผสมกับน้ำไว้แล้วใส่ลงในแบบหล่อตัวอย่างตามน้ำหนักที่คำนวณและนำแท่งกด กดตัวอย่างดังแสดงดังภาพที่ 30 ซึ่งทำการกดตัวอย่างโดยการควบคุมปริมาตรของตัวอย่างเพื่อให้ได้ความหนาแน่นที่มีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบการบดอัดดินแต่ละส่วนผสม

เมื่อทำการบดอัดดินเสร็จสิ้นทำการกดแท่งดินบดอัดจากกระบอก PVC ลง Shear box และนำ Shear box แขน้าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำ Shear box ติดตั้งกับเครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือนตรงและทำการเฉือนตัวอย่างโดยมีอัตราการเฉือนเท่ากับ 0.05 มม./นาที โดยมีแรงกดในแนวตั้งเท่ากับ 15.5, 31, 62 และ 124 kPa

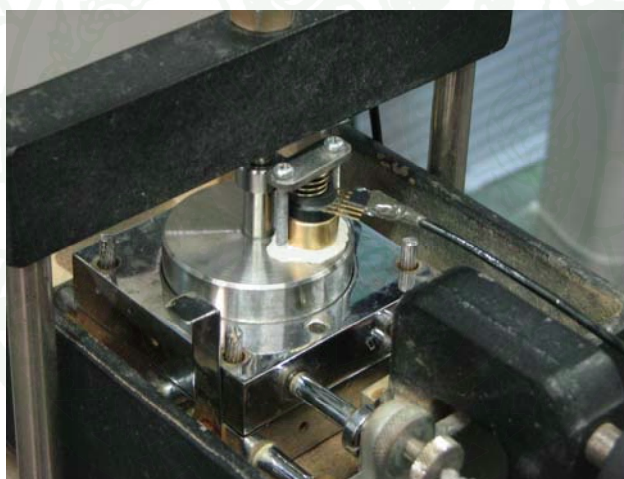


ภาพที่ 30 แสดงการบดอัดดินในแบบหล่อตัวอย่าง

สถานะดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนตรง

ทำการเตรียมตัวอย่างเหมือนกับ สถานะดินอิ่มตัวด้วยน้ำ แต่ก่อนที่จะนำตัวอย่างดินกลงสู่ Shear box จะต้องทำการเปลี่ยนแปลงความชื้นในตัวอย่างที่บดอัดเสร็จแล้วจนกว่าจะได้ค่าแรงกดต่างๆกันตามที่ต้องการก่อนเริ่มทดสอบ หลังจากเมื่อได้ค่าแรงคูดน้ำในดินตามที่ต้องการ ทำการกดตัวอย่างอย่างดินลงสู่ Shear box และนำ Shear box ติดตั้งกับเครื่องทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนตรง และทำการเฉือนตัวอย่างโดยมีอัตราการเฉือนเท่ากับ 0.05 มม./นาทิจ และมีแรงกดในแนวดิ่งเท่ากับ 15.5 kPa. ในขณะที่ทำการเฉือนตัวอย่างทำการวัดแรงคูดน้ำในดินโดยใช้ KU-Tensiometer ดังแสดงในภาพที่ 31



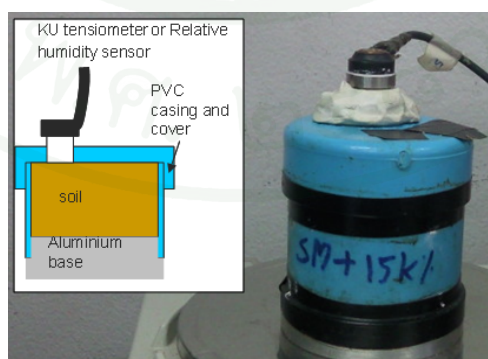
ภาพที่ 31 แสดงเครื่องมือการทดสอบแรงเฉือนตรงชนิดวัดแรงคูด

การทดสอบหาค่าเส้นโค้งอุ้มน้ำของดิน

การทดสอบหาเส้นโค้งอุ้มน้ำของดินจะแบ่งเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงแรกทำจากด้านแห้งไปด้านเปียก (Wetting) และช่วงที่สองจะทำจากด้านเปียกไปด้านแห้ง (Drying) ซึ่งมีการทดสอบดังนี้คือ

ช่วงแรกทำจากด้านแห้งไปด้านเปียก (Wetting) เตรียมตัวอย่างเหมือนกับการทดสอบหาค่ารับแรงเฉือน หลังจากบดอัดดินเสร็จสิ้นแล้วจึงนำตัวอย่างที่อยู่ในกระบอก PVC ประกอบเข้ากับฐานรองและฝา PVC ที่เจาะรูสำหรับวัดแรงดูดน้ำในดินพร้อมปิตรูและรอยต่อต่างๆ เพื่อกันน้ำระเหยออกจากตัวอย่าง นำตัวอย่างไว้ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 2-3 วัน เพื่อให้ได้ความชื้นสม่ำเสมอเท่ากันทั้งตัวอย่าง เมื่อครบเวลาที่กำหนดนำเทปกาออกจากรูที่ฝา PVC ออกและทำการวัดแรงดูดน้ำในดินโดยใช้ KU-Tensiometer แสดงดังภาพที่ 32 วัดแรงดูดน้ำในดินจนมีค่าคงที่ คำนวณแรงดูดน้ำในดินและปริมาณน้ำในดิน จากนั้นทำการเพิ่มปริมาณน้ำให้กับตัวอย่างประมาณ 1-2 กรัม แล้วจึงปิตรูและรอยต่อต่างๆ นำตัวอย่างที่เพิ่มปริมาณน้ำไว้ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 2-3 วัน แล้วทำการวัดแรงดูดน้ำในดินเหมือนเดิมทำซ้ำจนดินมีค่าแรงดูดน้ำในดินเข้าใกล้ศูนย์หรือมีค่าเท่ากับศูนย์

ช่วงที่สองทำจากด้านเปียกไปด้านแห้ง (Drying) เมื่อตัวอย่างมีค่าแรงดูดน้ำในดินเข้าใกล้ศูนย์หรือมีค่าเท่ากับศูนย์นำตัวอย่างดินแช่น้ำเป็นเวลา 4 วัน โดยถอดฝา PVC และนำเทปที่ฐานรองออกเมื่อครบ 4 วันแล้วนำตัวอย่างประกอบเข้ากับฐานรองและฝา PVC พร้อมทั้งทำการปิตรูและรอยต่อต่างๆ จากนั้นนำตัวอย่างไว้ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 2-3 วัน เพื่อให้ได้ความชื้นสม่ำเสมอเท่ากันทั้งตัวอย่าง เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดทำการวัดแรงดูดน้ำในดินจนมีค่าคงที่ คำนวณแรงดูดน้ำในดินและปริมาณน้ำในดิน หลังจากนั้นจึงนำดินไปตากเพื่อให้น้ำระเหยออกจากมวลดินโดยมีน้ำหนักลดลงประมาณ 1-2 กรัม จากนั้นปิตรูที่ฝา PVC และรอยต่อต่างๆ นำตัวอย่างไว้ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 2-3 วัน ทำซ้ำจนไม่สามารถวัดค่าแรงดูดน้ำในดินโดยใช้ KU-Tensiometer ได้



ภาพที่ 32 แสดงการวัดแรงดูดน้ำในดิน โดยใช้ KU-Tensiometer

การทดสอบหาคุณสมบัติด้านการกัดเซาะ

Crumb test นำก้อนดินของแต่ละอัตราส่วนผสมที่มีขนาด 6-10 มม. ใส่ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นดูความชุ่มชื้นของน้ำที่เวลาต่างๆกัน พร้อมทั้งทำการจำแนกประเภทการกระจายตัวของดินแต่ละอัตราส่วนผสม

Pinhole test นำดินแต่ละอัตราส่วนผสมบดอัดให้มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณน้ำที่ผสมมีปริมาณเท่ากับค่าความชื้นที่เหมาะสม (%Optimum water content) ที่ได้จากการทดสอบบดอัดแบบมาตรฐาน จากนั้นทำการเจาะรู แล้วจึงปล่อยให้ น้ำไหลผ่านตัวอย่างที่ Head ต่างๆ พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์และจำแนกประเภทของการกระจายตัวของดินแต่ละอัตราส่วนผสม

Double hydrometer test นำดินแต่ละอัตราส่วนผสมทำการทดสอบ Hydrometer test เหมือนกับวิธีมาตรฐานซึ่งทำการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของขนาดเม็ดดิน 0.05 มม. ระหว่างดินที่ใส่สาร Dispersing agent กับดินที่ไม่ใส่สาร หลังจากทดสอบเสร็จทำการจำแนกเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของดินแต่ละอัตราส่วนผสม

การศึกษาความปลอดภัยของลาดดิน

ในการศึกษาความปลอดภัยของลาดดินนั้นจะนำค่าตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบ เช่น c' , c^s หรือ $(u_a - u_w)\tan\phi^b$ และ ϕ' มาทำการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัยโดยกำหนดให้ลาดดินมีรูปแบบการพิบัติแบบลาดดินอนันต์ ซึ่งในการวิเคราะห์จะทำการหาอัตราส่วนความปลอดภัยโดยเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำในดิน

งานวิจัยในส่วนที่ 2

ในงานวิจัยส่วนที่ 2 จะแบ่งการทดสอบเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกการเก็บตัวอย่างคงสภาพ (Undisturbed sample) มาทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการและส่วนที่สองจะทำการทดสอบในสนาม โดยมีรายละเอียดวิธีการทดสอบดังนี้

การเก็บตัวอย่าง

ลักษณะของแปลงทดสอบจะทำการติดตั้งด้วยวัสดุที่แตกต่างกันบนลาดดินตัด (Cut slope) เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดเซาะ ภาพที่ 33 แสดงแปลงทดสอบที่ทำการติดตั้งผ้าห่มดินและหมอนกันดินร่วมกับการปลูกพืชแบ่งออกเป็น 2 แปลงโดยแปลงที่ 1 ทำการติดตั้งผ้าห่มดิน หมอนกันดินและปลูกหญ้ารูซี่ แปลงที่ 2 ทำการติดตั้งหมอนกันดินและปลูกหญ้าแฝก



ภาพที่ 33 แปลงทดสอบที่ 1 (ผ้าห่มดิน) และแปลงทดสอบที่ 2 (หญ้าแฝก)

โดยบริเวณที่ทำการเก็บตัวอย่างดินเป็นบริเวณด้านบนของแปลงทดสอบ โดยใช้ KU-Miniature sampler (กระบอกเก็บตัวอย่างมีอัตราส่วนพื้นที่ (Area ratio) ประมาณ 18% วรากรและคณะ, 2546, 2548) แสดงดังภาพที่ 34 ซึ่งเป็นชุดเก็บตัวอย่างที่ออกแบบสำหรับทดสอบ Direct shear test ทำการเก็บตัวอย่างได้โดยประกอบ PVC กับเหล็กทรงกระบอกเปลือกบาง วางกระบอกเหล็กตรงจุดที่จะทำการเก็บตัวอย่าง ยกค้อนน้ำหนักตามแกนเหล็กแล้วตอกกระบอกเหล็กลงไปในดิน แล้วจึงหมุนกระบอกเพื่อให้ตัวอย่างดินขาดออกจากดินด้านล่างในตอนนี้ดินจะเข้าไปเต็มกระบอก PVC แสดงดังภาพที่ 35 จากนั้นนำกระบอก PVC ออกจากกระบอกเหล็กเปลือกบาง ห่อพลาสติกใสและฟอยล์พร้อมแวชตัวอย่างดินด้วยพาราฟินเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นต่อไป



ภาพที่ 34 ชุดเก็บตัวอย่าง KU-Miniature sampler



ภาพที่ 35 ตัวอย่างดินที่เก็บจาก KU-Miniature sampler

วิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพ

ทดสอบหาการกระจายตัวของเม็ดดิน, พิกัดแอดเตอร์เบกส์และความถ่วงจำเพาะของดิน
ในแปลงทดสอบที่ 1 และ 2

การทดสอบคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์

สภาวะดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

การทดสอบหาค่าลึรับแรงเฉือนตรง

ทำการเตรียมตัวอย่างโดย Trimming ตัวอย่างดินในกระบอก PVC ที่ได้จากชุดเก็บตัวอย่าง KU-Miniature sampler พร้อมทั้งนำดินบางส่วนไปหาปริมาณน้ำในมวลดิน (Water content) เมื่อทำการ Trimming ได้ขนาดและความสูงตามที่ต้องการแล้วกดแท่งดินจากกระบอก PVC ลง Shear box และนำ Shear box แช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำ Shear box ติดตั้งกับเครื่องทดสอบค่าลึรับแรงเฉือนตรงและทำการเฉือนตัวอย่างโดยมีอัตราการเฉือนเท่ากับ 0.5 และ 0.05 มม./นาที่ เพื่อศึกษาอิทธิพลจากการระบายน้ำต่อค่าลึรับแรงเฉือนและมีแรงกดในแนวดิ่งเท่ากับ 15.5, 31 และ 62 kPa

สภาวะดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

การทดสอบหาค่าลึรับแรงเฉือนตรง

ทำการเตรียมตัวอย่างเหมือนกับสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ แต่ก่อนที่จะนำตัวอย่างดินกดลงสู่ Shear box จะต้องทำการเปลี่ยนแปลงความชื้นในตัวอย่างที่ Trimming เสร็จจนได้ค่าแรงดูดต่างๆ ตามที่ทำการก่อนเริ่มทดสอบ เมื่อได้แรงดูดน้ำในดินตามที่ต้องการแล้ว ทำการกดตัวอย่างอย่างดินลงสู่ Shear box และนำ Shear box ติดตั้งกับเครื่องทดสอบหาค่าลึรับแรงเฉือนตรง ซึ่งทำการเฉือนตัวอย่างโดยมีอัตราการเฉือนเท่ากับ 0.05 มม./นาที่ และมีแรงกดในแนวดิ่งเท่ากับ 15.5 kPa. ในขณะที่ทำการเฉือนตัวอย่างทำการวัดแรงดูดน้ำในดินโดยใช้ KU-Tensiometer

การทดสอบหาค่าเส้นโค้งอุ้มน้ำของดิน

เตรียมตัวอย่างเหมือนกับการทดสอบหาค่าลึรับแรงเฉือนและวิธีการทดสอบเหมือนกับงานวิจัยในส่วนที่ 1 หัวข้อการทดสอบเส้นโค้งอุ้มน้ำที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นแต่ที่เพิ่มมาคือจะทำการวัดแรงดูดน้ำในดินที่มีค่ามากกว่า 100 kPa. โดยใช้ Relative humidity sensor จะสามารถวัดแรง

ดินที่มีความมากกว่า 1500 kPa. ขึ้นไป ซึ่งมีวิธีการทดสอบดังนี้คือ ด้าน Drying เมื่อไม่สามารถวัดแรงดูดน้ำในดินโดย KU-Tensiometer ได้แล้ว นำดินไปตากเพื่อให้ น้ำระเหยออกจากมวลทำให้ น้ำหนักของมวลดินมีค่าลดลงซึ่งจะต้องทำการประมาณหรือทดลองว่าน้ำหนักดินที่ลดลงพอที่จะสามารถวัดแรงดูดน้ำในดินโดยใช้ Relative humidity sensor ได้ จากนั้นนำตัวอย่างปิดด้วยฝา PVC และ เทปกาวเพื่อกันน้ำระเหยออกจากตัวอย่างแล้วจึงนำตัวอย่างไว้ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 3-4 วัน เพื่อให้ได้ความชื้นสม่ำเสมอเท่ากันทั้งตัวอย่างเมื่อครบตามเวลาที่กำหนดทำการวัดแรงดูดน้ำในดินโดยนำเทปกาวออกจากรูที่ฝา PVC ออกและทำการวัดแรงดูดน้ำในดินโดยใช้ Relative humidity sensor แสดงดังภาพที่ 36 จนมีค่าคงที่ คำนวณแรงดูดน้ำในดินและปริมาณน้ำในดิน หลังจากนั้นจึงนำดินไปตากเพื่อให้ น้ำระเหยออกจากมวลดินจน น้ำหนักมีค่าลดลงประมาณ 1-2 กรัม จากนั้นปิดรูที่ฝา PVC และรอยต่อต่างๆ นำตัวอย่างไว้ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 3-4 วัน ทำซ้ำประมาณ 2-3 ครั้งแล้วจึงหยุดการทดสอบ สำหรับด้าน Wetting หลังจากทำการทดสอบในด้าน Drying เสร็จสิ้นทำการเติมน้ำให้กับตัวอย่างดินประมาณ 1-2 กรัม จากนั้นนำตัวอย่างปิดด้วยฝา PVC และ เทปกาวเพื่อกันน้ำระเหยออกจากตัวอย่างแล้วจึงนำตัวอย่างไว้ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 3-4 วัน เพื่อให้ได้ความชื้นสม่ำเสมอเท่ากันทั้งตัวอย่าง เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดนำเทปกาวออกจากรูที่ฝา PVC ออกและทำการวัดแรงดูดน้ำในดินโดยใช้ Relative humidity sensor จนมีค่าคงที่ แล้วจึงคำนวณแรงดูดน้ำในดินและปริมาณน้ำในดิน หลังจากนั้นทำการเติมน้ำให้กับตัวอย่างดินประมาณ 1-2 กรัม แล้วปิดรูที่ฝา PVC และรอยต่อต่างๆ นำตัวอย่างไว้ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 3-4 วัน ทำซ้ำประมาณ 2-3 ครั้งแล้วจึงหยุดการทดสอบ



ภาพที่ 36 แสดงการวัดแรงดูดน้ำในดินโดยใช้ Relative humidity sensor

การทดสอบหาคุณสมบัติด้านการกัดเซาะ

Crumb test นำก้อนดินที่ได้จากการ Trimming โดยก้อนดินมีขนาด 6-10 มม. ใส่ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นดูความขุ่นของน้ำที่เวลาต่างๆ กัน พร้อมทั้งทำการจำแนกประเภทการกระจายตัวของดินทั้ง 2 แปลงทดสอบ

Pinhole test จะนำดินที่เหลือจากการ Trimming มาทำการบดอัดโดยทำการกำหนดความหนาแน่นแห้งและอัตราส่วนช่องว่างตามความหนาแน่นที่เก็บได้จากในสนาม ซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนแปลงระดับความอิ่มตัวของน้ำ (S_r) ที่ 25, 50 และ 75% จากนั้นทำการเจาะรูแล้วจึงปล่อยให้ให้น้ำไหลผ่านตัวอย่างที่ Head ต่างๆ พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์และจำแนกประเภทของการกระจายตัวของดินทั้ง 2 แปลงทดสอบ

Double hydrometer test นำดินของทั้ง 2 แปลงทำการทดสอบ Hydrometer test เหมือนกับวิธีมาตรฐานซึ่งทำการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของขนาดเม็ดดิน 0.05 มม. ระหว่างดินที่ใส่สาร Dispersing agent กับดินที่ไม่ใส่สาร หลังจากการทดสอบเสร็จทำการจำแนกเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของดินทั้ง 2 แปลงทดสอบ

การศึกษาความปลอดภัยของลาดดิน

ในการศึกษาความปลอดภัยของลาดดินนั้นจะนำค่าตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบเช่น c' , c^s หรือ $(u_a - u_w)\tan\phi^b$ และ ϕ' มาทำการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัยโดยกำหนดให้ลาดดินมีรูปแบบการพิบัติแบบลาดดินอนันต์ ซึ่งในการวิเคราะห์จะทำการหาอัตราส่วนความปลอดภัยโดยเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำในดิน

วิธีการทดสอบในสนาม

การตรวจวัดแรงดันน้ำในดิน

เลือกตำแหน่งในการติดตั้ง KU-Tensiometer บนแปลงทดสอบที่ 1 และ 2 ซึ่งทำการติดตั้งบริเวณด้านบนกับกลางของแต่ละแปลงทดสอบ หลังจากนั้นจะหลุมด้วยสว่านจนถึงระดับ

ความลึกที่ 1 เมตร แล้วจึงใส่ท่อ PVC กันหลุมพังแล้วติดตั้ง KU-Tensiometer แสดงดังภาพที่ 37 หลังจากนั้นทำตรวจวัดค่าแรงดันน้ำในดินโดยใช้ ATT handheld เป็นตัวอ่านค่าและทำการตรวจสอบปริมาณน้ำฝนจากพื้นที่ใกล้เคียงควบคู่ไปกับการวัดแรงดันน้ำในดิน

Kunzelstab Penetration Test

ตำแหน่งที่ทำการทดสอบเป็นบริเวณด้านบนของแปลงทดสอบ ซึ่งทดสอบดอกโดยนำหัวเจาะรูปกรวยวางตรงตำแหน่งที่ต้องการทดสอบแล้วกดน้ำหนัก 10 กก. ระยะยก 50 ซม. และนับจำนวนครั้ง (N) ของการตอกทุกความลึก 20 ซม. จนกระทั่งถึงความยาวของก้านตอกหรือตอกให้ได้ 75 ครั้ง/20 ซม.จึงถอนชุดทดสอบออกไปจุดอื่นต่อไป ภาพที่ 38 แสดงการทดสอบ Kunzelstab penetration test



ภาพที่ 37 แสดงการติดตั้ง KU-Tensiometer ในสนาม

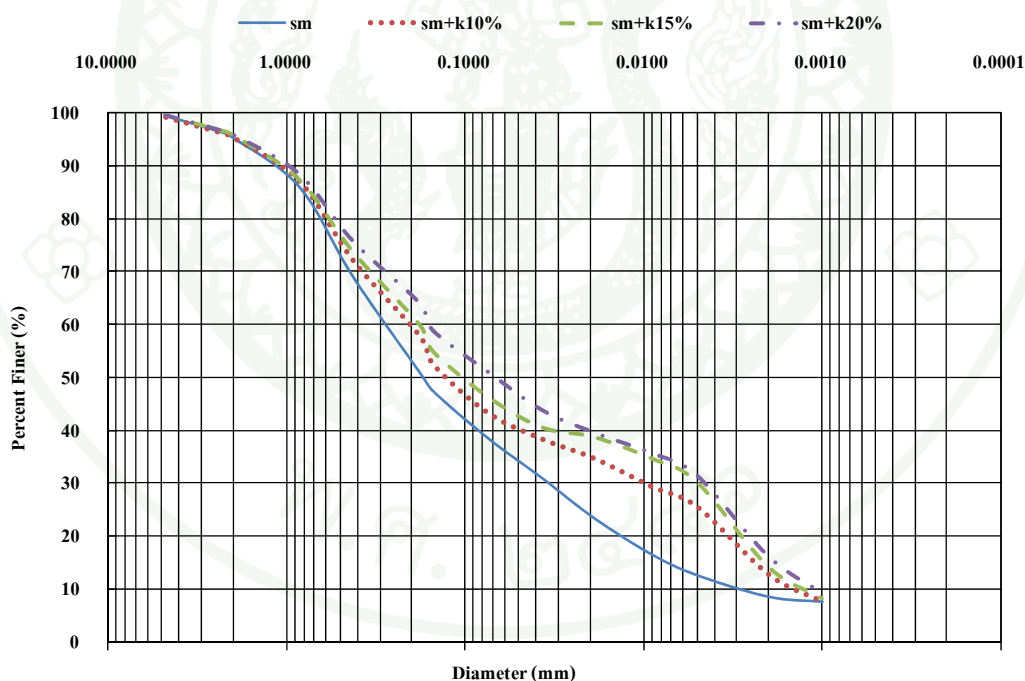


ภาพที่ 38 แสดงการทดสอบ Kunzelstab penetration test

ผลและวิจารณ์

คุณสมบัติทางกายภาพของดินที่ทำการทดสอบ

การทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพได้แก่ ขนาดอนุภาคเม็ดดิน, พิกัดแอดเตอร์เบิร์กส์และความถ่วงจำเพาะ ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญที่ทำให้ทราบคุณสมบัติเบื้องต้นของดิน สำหรับงานวิจัยในส่วนที่ 1 ผลจากการทดสอบการกระจายตัวของดินที่ผุพังจากหินแกรนิตที่ผสมกับเคโอลิน (Kaolin) ในอัตราส่วนผสม 0, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนัก พบว่าลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดินที่ผุพังจากหินแกรนิตเป็นดิน SM คือมีทรายปนทรายแป้ง ส่วนดินที่ผสมกับเคโอลิน (Kaolin) 10 และ 15% โดยน้ำหนักยังคงเป็นดิน SM แต่ดินที่ผสมเคโอลิน (Kaolin) 20% โดยน้ำหนัก เป็นดิน SC คือมีทรายปนดินเหนียวที่มีค่าความเหนียว (PI) ต่ำ แสดงดังภาพที่ 39 และค่าคุณสมบัติต่างๆของดินที่ทดสอบแสดงตามตารางที่ 7



ภาพที่ 39 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคเม็ดดินทั้ง 4 อัตราส่วนผสม

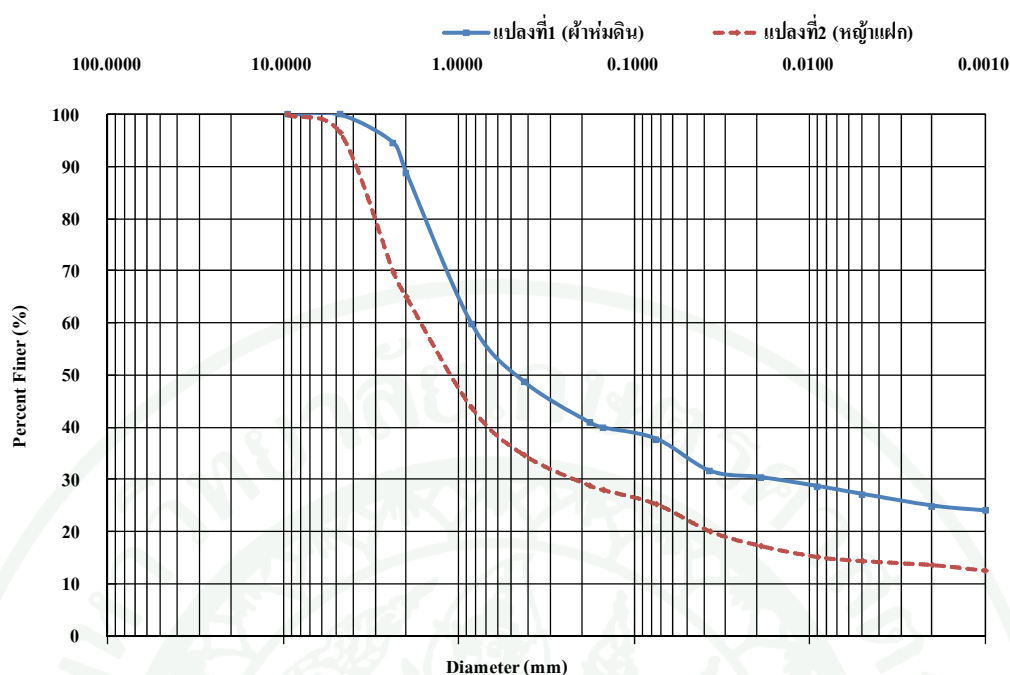
ตารางที่ 7 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของดินทั้ง 4 อัตราส่วนผสม

สัญลักษณ์	Soil type (USCS)	Atterberg's limits			Gs
		LL	PL	PI	
SM	SM	-	-	-	2.63
SM+K10	SM	36.01	28.34	7.67	2.64
SM+K15	SM	33.58	25.06	8.52	2.64
SM+K20	SC	33.65	22.6	13.05	2.66

สำหรับงานวิจัยในส่วนที่ 2 มีผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดินคงสภาพที่ทำการเก็บตัวอย่างเมื่อวันที่ 27 พฤศจิกายน 2552 ซึ่งเป็นช่วงฤดูแล้งหรือฝนทิ้งช่วงเป็นเวลานาน สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 8 จากตารางจะเห็นได้ว่าแปลงทดสอบที่ 1 (ผ้าห่มดิน) มีความชื้น (w%) มากกว่าแปลงที่ 2 (หญ้าแฝก) เนื่องจากที่ผิวหน้าดินมีผ้าห่มดินช่วยในการป้องกันการสูญเสียน้ำความชื้นได้ดีกว่าดินที่มีหญ้าแฝกปกคลุมเพียงอย่างเดียวและอาจเป็นผลมาจากลักษณะเนื้อดินซึ่งมีปริมาณอนุภาคดินเม็ดละเอียดที่มีมากกว่าแปลงที่ 2 ซึ่งจะได้นำกล่าวต่อไป

ตารางที่ 8 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของดินทั้ง 2 แปลงทดสอบ

แปลงทดสอบ	Atterberg's limits			Gs	w%	e	γ_t (t/m ³)	γ_d (t/m ³)
	LL	PL	PI					
แปลงที่ 1 (ผ้าห่มดิน)	38.31	16.61	21.7	2.65	7.14-7.77	0.478-0.494	1.95-1.98	1.82-1.84
แปลงที่ 2 (หญ้าแฝก)	33.39	17.16	16.23	2.62	4.66-5.1	0.397-0.419	2.02-2.06	1.93-1.96



ภาพที่ 40 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคเม็ดดินทั้ง 2 แปลงทดสอบ

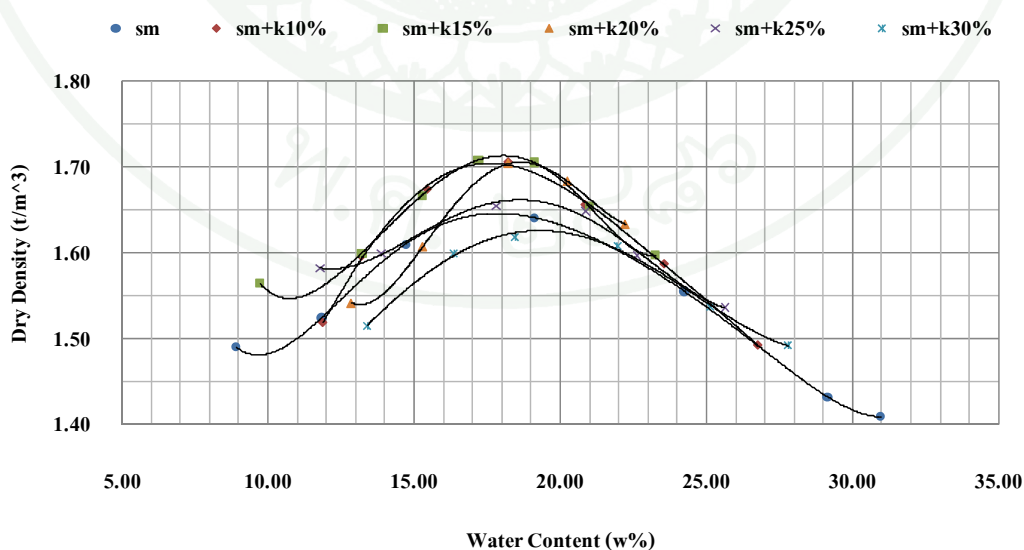
ผลจากการทดสอบหาการกระจายตัวของเม็ดดินดังภาพที่ 40 สามารถจำแนกประเภทดินตามระบบ Unified Soil Classification System (USCS) ได้โดยดินจากทั้ง 2 แปลงทดสอบ เป็นดิน SC โดยที่แปลงที่ 1 (ผ้าห่มดิน) มีลักษณะของเส้นการกระจายตัวคล้ายกับแปลงที่ 2 แต่แปลงที่ 1 มีขนาดอนุภาคเม็ดดินที่เล็กกว่าแปลงที่ 2 (หญ้าแฝก) อาจเป็นผลมาจากแปลงที่ 2 (หญ้าแฝก) มีช่วงที่ไม่มีสิ่งใดปกคลุมลาดดินอยู่เมื่อน้ำไหลผ่านอนุภาคของดินเม็ดละเอียดจะถูกพัดพาไปกับน้ำได้ง่ายกว่าแปลงที่ 1 (ผ้าห่มดิน) ทำให้เมื่อทำการหาการกระจายตัวของเม็ดดิน แปลงที่ 1 (ผ้าห่มดิน) จึงมีขนาดอนุภาคเม็ดดินที่เล็กกว่าแปลงที่ 2 (หญ้าแฝก) และยังเป็นผลมาจากรากของหญ้ารัฐซ์ที่เจริญเติบโตได้ดีกว่าหญ้าแฝกทำให้รากแทรกไปในดินจนมีความร่วมหรือละเอียดกว่าในขณะที่รากของหญ้าแฝกยังไม่เจริญเติบโตเต็มที่การแทรกตัวของรากจึงยังมีไม่มากนักดินจึงมีขนาดเม็ดใหญ่กว่าแปลงที่ 1 (ผ้าห่มดิน)

คุณสมบัติด้านการบดอัด

ผลจากการทดสอบบดอัดดินแบบมาตรฐานโดยนำทรายแป้งผสมกับเคโอลิน (Kaolin) 0, 10, 15, 20, 25 และ 30% โดยน้ำหนักดินแห้ง แสดงดังตารางที่ 9 และภาพที่ 41 จะเห็นได้ว่าอิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่อยู่ในดินมีผลกระทบต่อค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสม (%Optimum water content) อย่างมาก

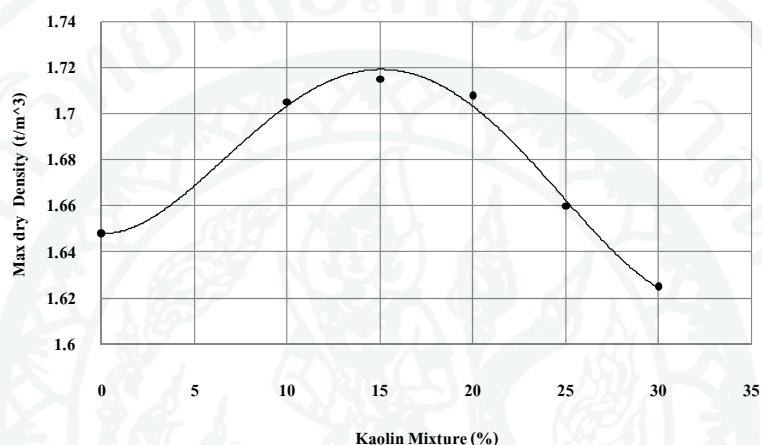
ตารางที่ 9 แสดงอัตราส่วนผสมระหว่างทรายแป้งกับเคโอลินที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ

สัญลักษณ์	ดินทรายแป้ง % น้ำหนักดินแห้ง (105 °C)	แร่ดินเหนียวเคโอลิน % น้ำหนักดินแห้ง (จากถุง)
SM	100	0
SM+K10	90	10
SM+K15	85	15
SM+K20	80	20
SM+K25	75	25
SM+K30	70	30

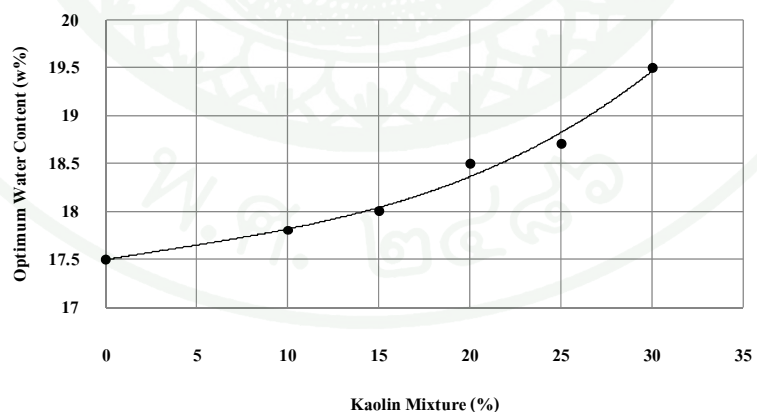


ภาพที่ 41 เส้นโค้งบดอัดดินแบบมาตรฐานที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

ซึ่งปริมาณเคโอลิน (Kaolin) ที่เพิ่มขึ้นทำให้อนุภาคของแร่ดินเหนียวเพิ่มขึ้น อนุภาคของแร่ดินเหนียวจะเข้าไปแทรกในช่องว่างของดินเม็ดหยาบทำให้ดินมีช่องว่างระหว่างเม็ดดินลดลง จึงเป็นผลทำให้ความหนาแน่นแห้งเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณเคโอลิน (Kaolin) เพิ่มขึ้นในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้ความหนาแน่นแห้งเริ่มลดลงแสดงดังภาพที่ 42 อีกทั้งเมื่อปริมาณเคโอลิน (Kaolin) เพิ่มขึ้นจะทำให้ความชื้นที่เหมาะสม (%Optimum water content) เพิ่มขึ้นตามไปด้วยแสดงดังภาพที่ 43



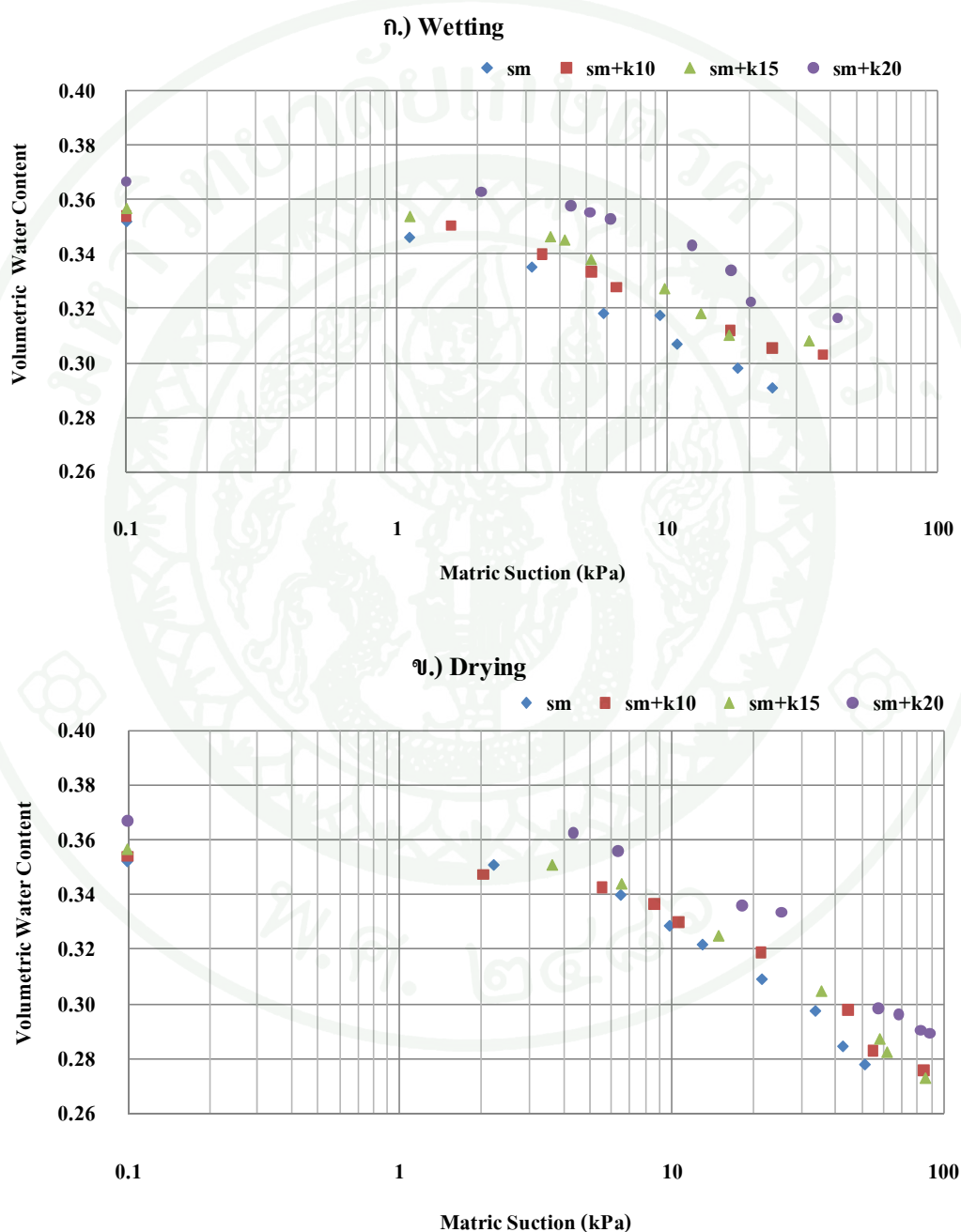
ภาพที่ 42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับปริมาณเคโอลิน (Kaolin) ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ



ภาพที่ 43 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นที่เหมาะสม (%Optimum water content) กับปริมาณเคโอลิน (Kaolin) ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

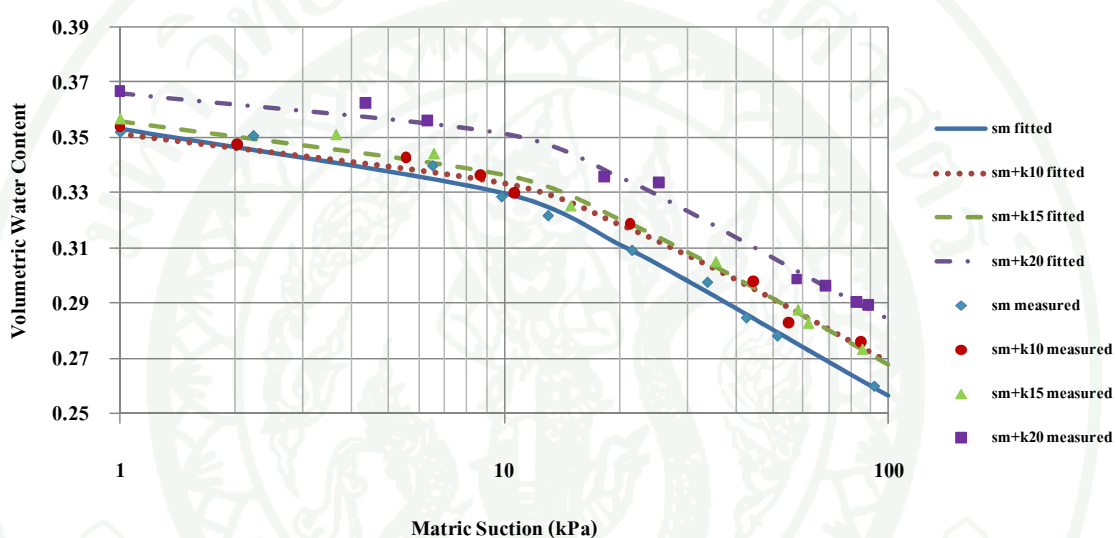
คุณสมบัติด้านการอุ้มน้ำของดิน

งานวิจัยในส่วนที่ 1 ผลจากการทดสอบเส้นโค้งอุ้มน้ำของดินทั้ง 4 อัตราส่วนผสมในช่วงแรงดูดของน้ำ 0-100 kPa. แสดงดังภาพที่ 44 ก.) และ ข.)



ภาพที่ 44 เส้นโค้งอุ้มน้ำของดินที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ก.) Wetting และ ข.) Drying

และเมื่อทำการ Fitting เส้นโค้งอุ้มน้ำในด้าน Drying จากสมการของ Van Genuchten (1980) เทียบกับผลที่ได้จากการวัดจริงแสดงดังภาพที่ 45 พบว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกันและเส้นโค้งอุ้มน้ำของดินทั้ง 4 อัตราส่วนผสมมีลักษณะคล้ายกันแต่เมื่อเทียบแรงดูดน้ำในดินที่ θ (Volumetric water content) เท่ากันของดินแต่ละอัตราส่วนผสม ดินที่มีอัตราส่วนผสมเคโอลินมากจะมีค่าแรงดูดน้ำในดินมากกว่าดินที่มีอัตราส่วนผสมเคโอลินน้อย เคโอลินที่ผสมไปนี้จะดูดซับน้ำไว้กับตัวและจะเป็นตัวช่วยเพิ่มแรงดูดน้ำในดิน และจากการ Fitting จะสามารถหาค่าตัวแปรต่างๆ ได้ดังตารางที่ 10

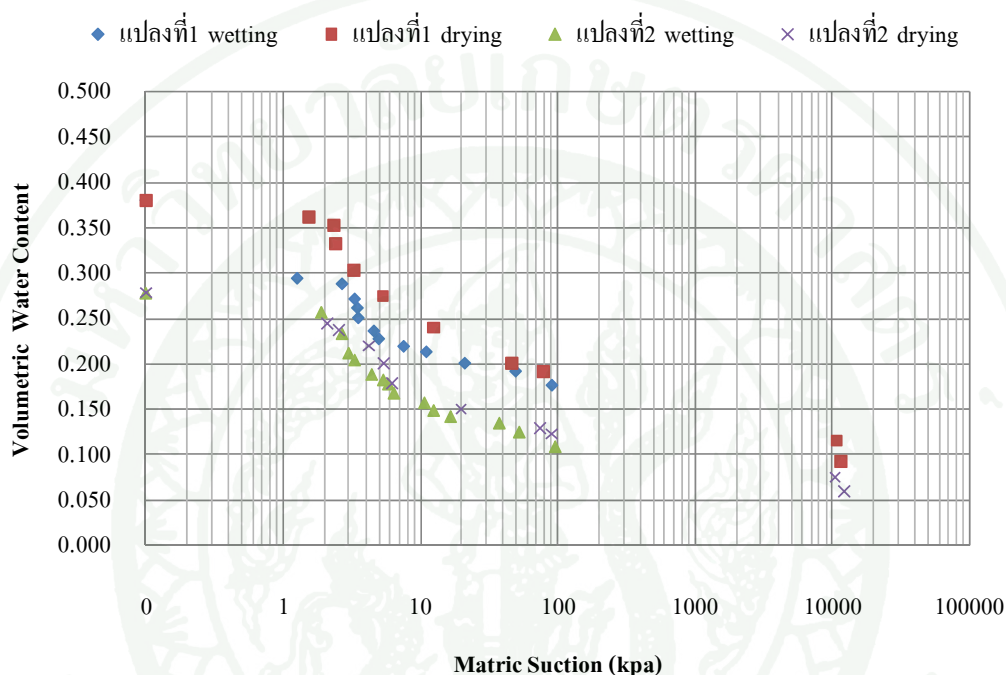


ภาพที่ 45 เส้นโค้งอุ้มน้ำของดินที่อัตราส่วนผสมต่างๆจากการวัดจริงเทียบกับการ Fitting

ตารางที่ 10 ตัวแปรที่ได้จากการ Fitting เส้นโค้งอุ้มน้ำของดินทั้ง 4 อัตราส่วนผสม

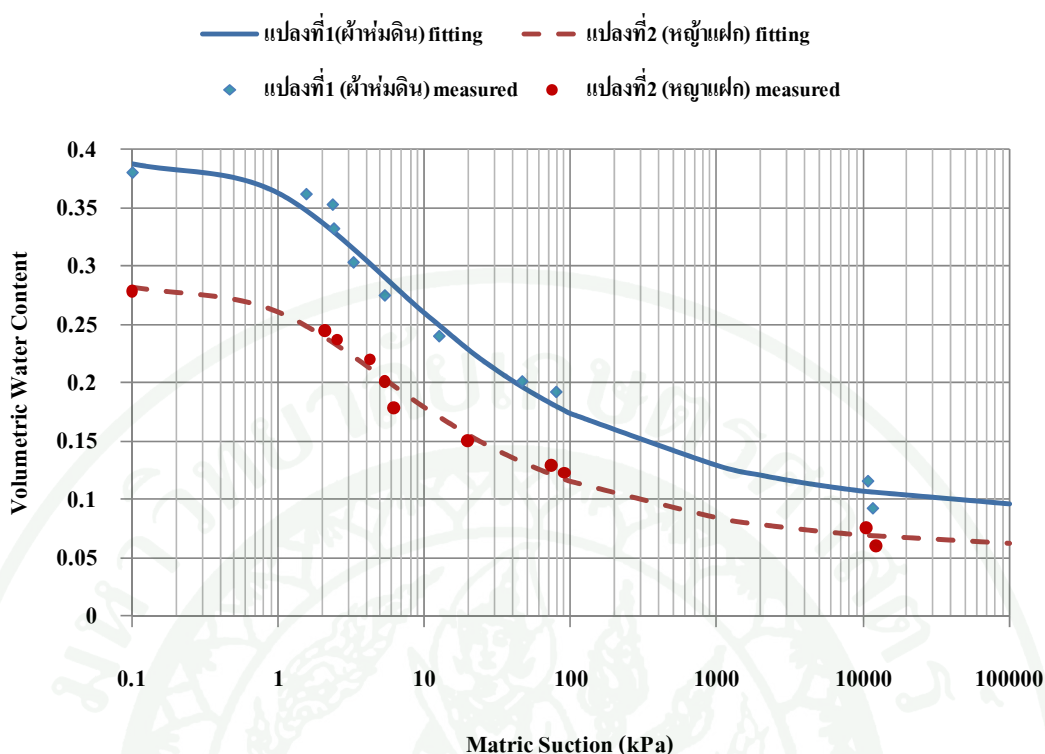
สัญลักษณ์	θ_r	θ_s	α	n	m
SM	0.087	0.355	0.074	1.268	0.211
SM+K10	0.181	0.353	0.064	1.149	0.13
SM+K15	0.158	0.358	0.066	1.154	0.134
SM+K20	0.202	0.367	0.052	1.404	0.288

สำหรับงานวิจัยในส่วนที่ 2 ผลจากการทดสอบเส้นโค้งอุ้มน้ำของดินทั้ง 2 แปลงทดสอบ แสดงดังภาพที่ 46 ซึ่งลักษณะของเส้นโค้งอุ้มน้ำของแปลงที่ 1 มีลักษณะคล้ายกับแปลงที่ 2 แต่เส้นโค้งอุ้มน้ำของแปลงที่ 1 จะอยู่สูงกว่าแปลงที่ 2 เนื่องจากมีอนุภาคของดินเม็ดละเอียดมากกว่าทำให้ดินอุ้มน้ำและเกิดแรงดูดของน้ำได้มากกว่าแปลงที่ 2



ภาพที่ 46 เส้นโค้งอุ้มน้ำของดินจากแปลงทดสอบที่ 1 และ 2

และเมื่อทำการ Fitting เส้นโค้งอุ้มน้ำในด้าน Drying จากสมการของ Van Genuchten (1980) เทียบกับผลที่ได้จากการวัดจริงแสดงดังภาพที่ 47 พบว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกันและจากการทำการ Fitting จะสามารถหาค่าตัวแปรต่างๆได้ดังตารางที่ 11



ภาพที่ 47 เส้นโค้งอุ้มน้ำของดินแต่ละแปลงทดสอบจากการวัดจริงเทียบกับการ Fitting

ตารางที่ 11 ตัวแปรที่ได้จากการ Fitting เส้นโค้งอุ้มน้ำของดินทั้ง 2 แปลงทดสอบ

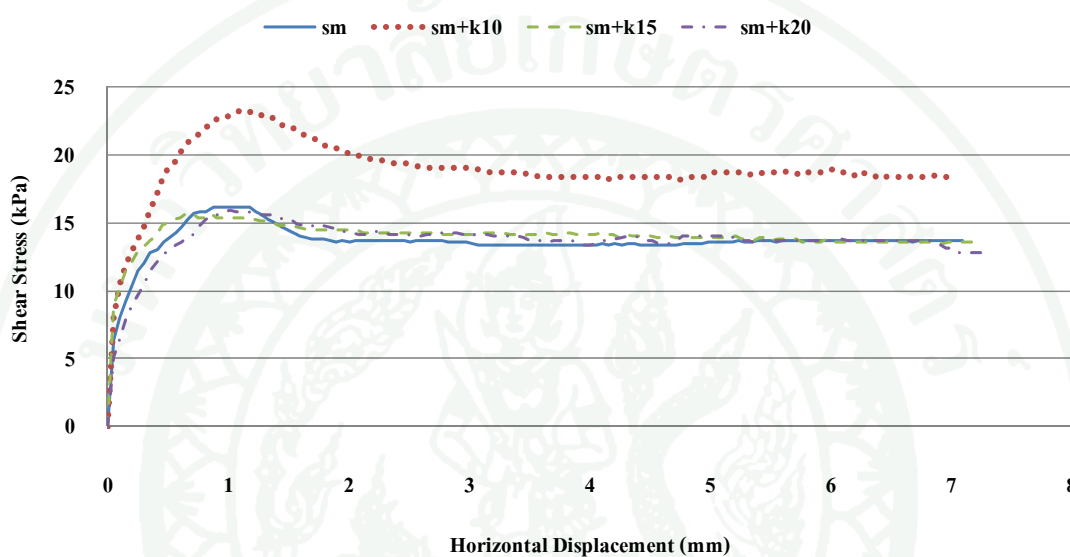
สัญลักษณ์	θ_r	θ_s	α	n	m
แปลงที่1 (ผ้าห่มดิน)	0.085	0.39	0.574	1.306	0.234
แปลงที่2 (หญ้าแฝก)	0.056	0.283	0.63	1.324	0.245

คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือน

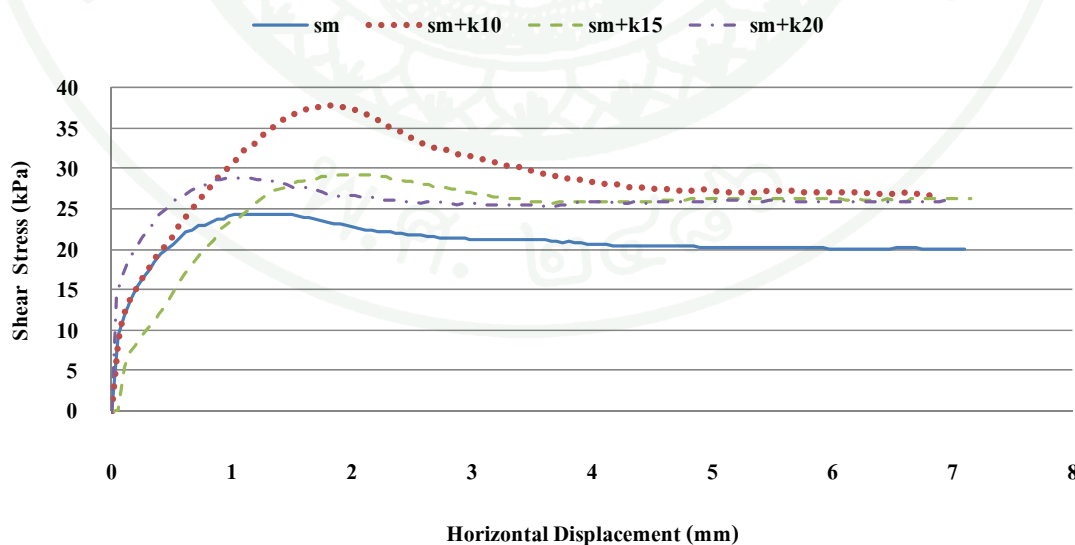
สภาวะอิมตัวด้วยน้ำ

งานวิจัยในส่วนที่ 1 ผลจากการทดสอบหาลำดับรับแรงเฉือนแบบ Consolidated drain test ด้วยอัตราการเฉือน 0.05 มม./นาที ภายใต้สภาวะแรงกดในแนวดิ่งเท่ากับ 15.5, 31, 62 และ 124 kPa สามารถหาเส้นความสัมพันธ์ระหว่าง หน่วยแรงเฉือน (shear stress) กับ การเคลื่อนที่ในแนวนอน (Horizontal displacement) ได้ดังภาพที่ 48, 49, 50 และ 51

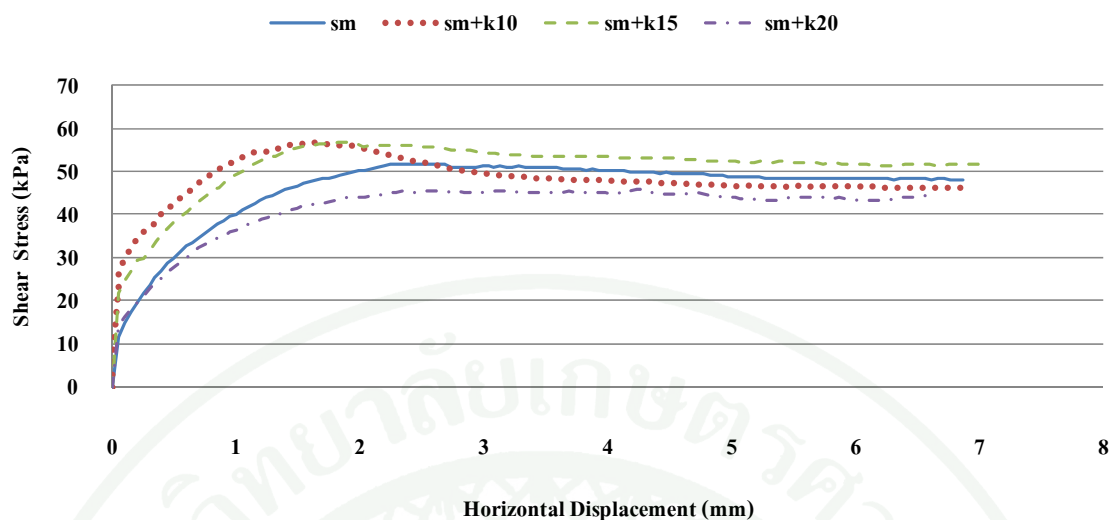
เมื่อพิจารณาลักษณะของกราฟหน่วยแรงเฉือน (Shear stress) กับ การเคลื่อนที่ในแนวนอน (Horizontal displacement) สิ่งที่ปรากฏเด่นชัดก็คือหน่วยแรงเฉือนที่ผสมระหว่างทรายแป้งกับเคโอลิน (Kaolin) เท่ากับ 10% โดยน้ำหนัก จะให้ค่ามากกว่าดินอัตราส่วนผสมอื่นๆ ส่วนค่าหน่วยแรงเฉือนที่ผสมระหว่างทรายแป้งกับเคโอลินเท่ากับ 0 และ 15 % โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน และยังพบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนเริ่มมีค่าลดลงที่ 20 % โดยน้ำหนัก



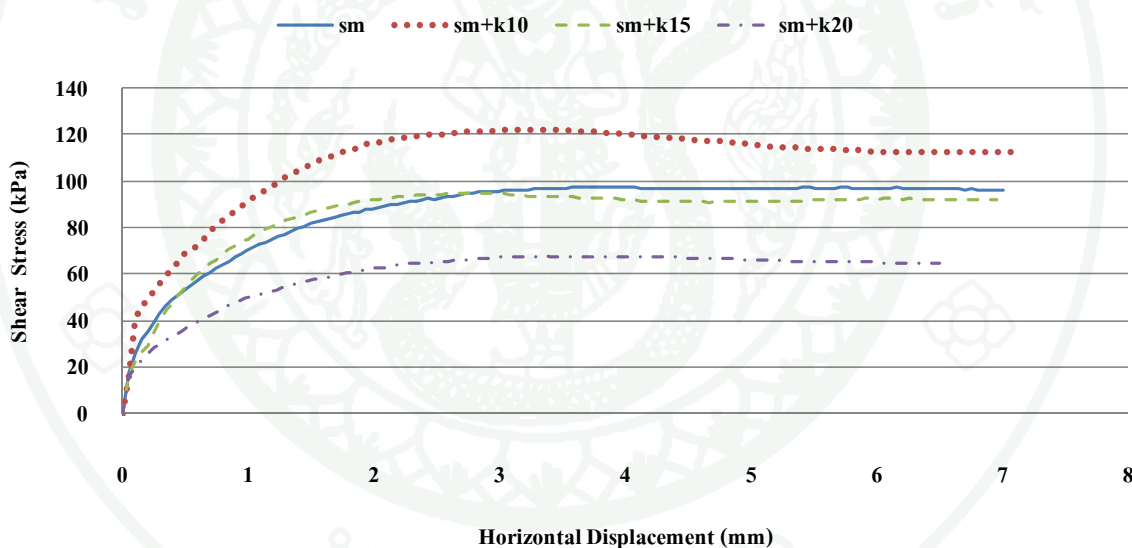
ภาพที่ 48 กราฟหน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวนอนที่น้ำหนักกดในแนวดิ่ง 15.5 kPa



ภาพที่ 49 กราฟหน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวนอนที่น้ำหนักกดในแนวดิ่ง 31 kPa

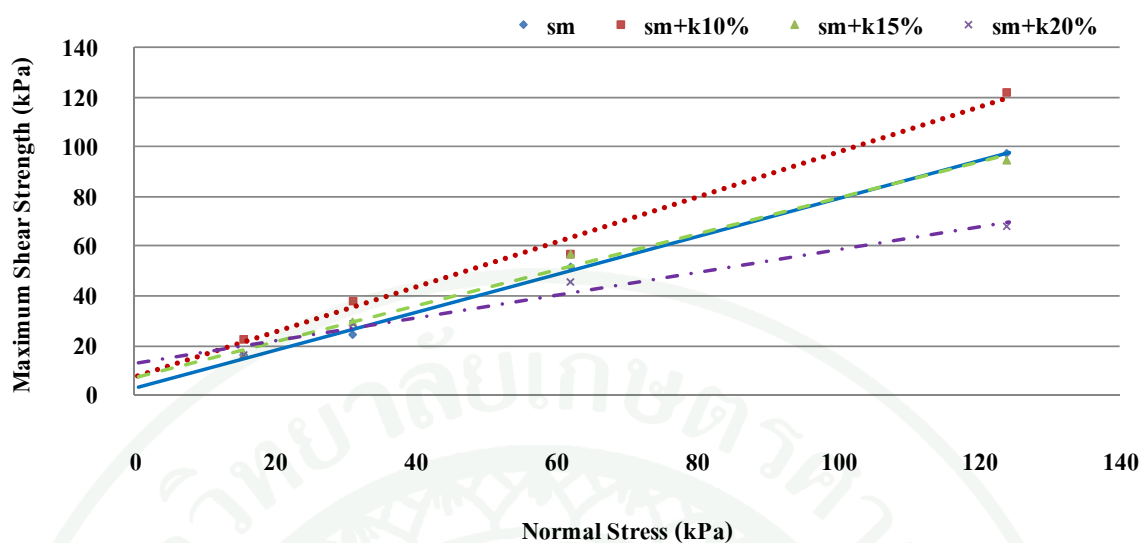


ภาพที่ 50 กราฟหน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวนอนที่น้ำหนักกดในแนวดิ่ง 62 kPa

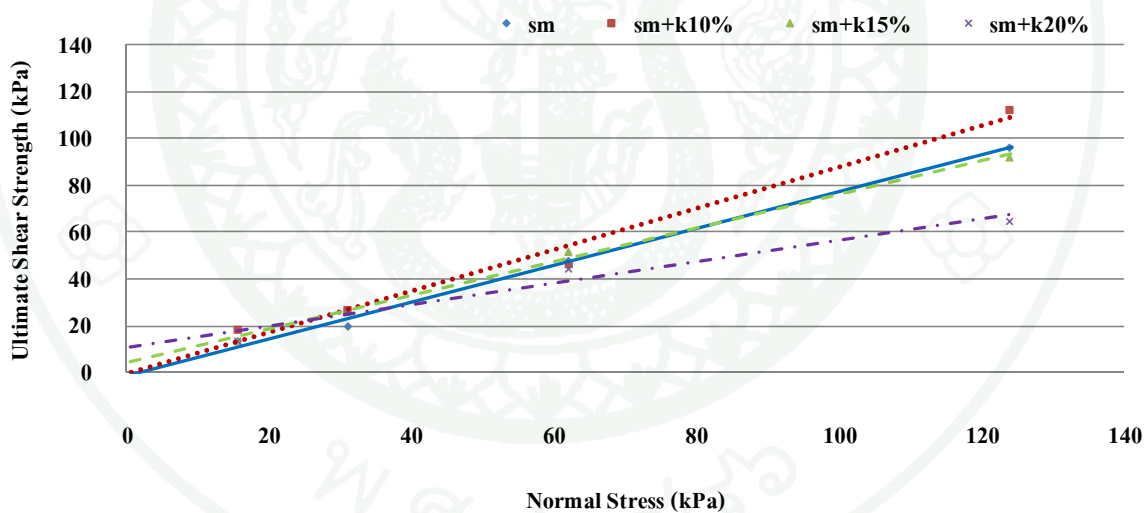


ภาพที่ 51 กราฟหน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวนอนที่น้ำหนักกดในแนวดิ่ง 124 kPa

ผลจากการทดสอบสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับหน่วยแรงตั้งฉากที่กำลังสูงสุดและกำลังสุดท้ายของดินที่ผสมระหว่างทรายแป้งที่สุ่งจากหินแกรนิตกับเคโอลิน (Kaolin) ที่อัตราส่วนผสมต่างๆแสดงดังภาพที่ 52 และ 53



ภาพที่ 52 กราฟกำลังรับแรงเฉือนสูงสุด (Peak shear strength) กับหน่วยแรงตั้งฉากของดินที่ส่วนผสมต่างๆ



ภาพที่ 53 กราฟกำลังรับแรงเฉือนสุดท้าย (Ultimate shear strength) กับหน่วยแรงตั้งฉากของดินที่ส่วนผสมต่างๆ

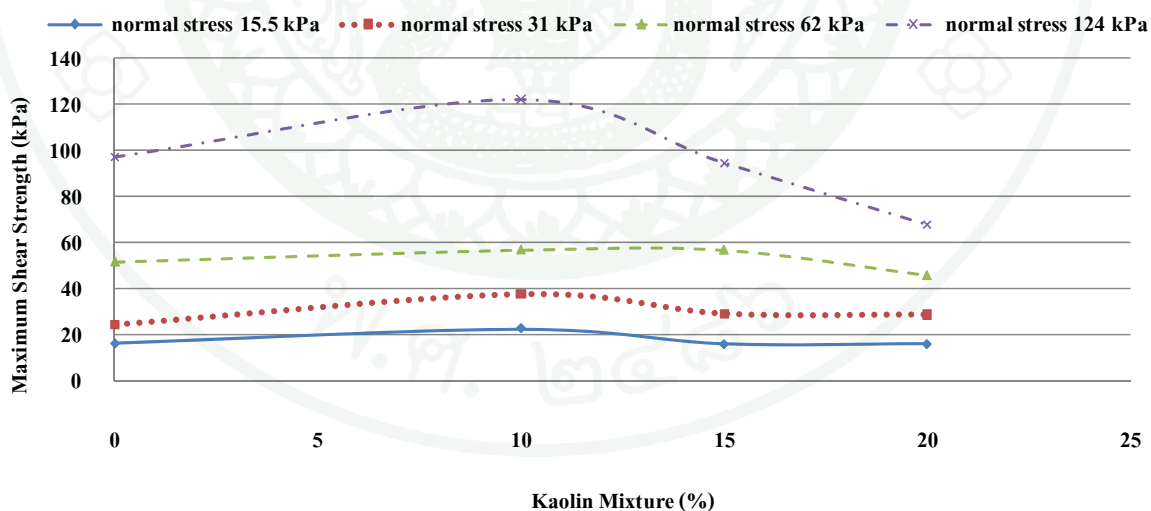
ผลจากการทดสอบพบว่าค่าแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผลของดินแต่ละส่วนผสมที่กำลังสูงสุดและกำลังสุดท้ายมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเคโอลิน (Kaolin) ส่วนค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผลที่กำลังสูงสุดและกำลังสุดท้ายพบว่ามีค่ามากที่สุดสำหรับดินที่ส่วนผสมเคโอลิน

(Kaolin) 10% โดยน้ำหนักแล้วมีค่าลดลงตามปริมาณเคโอลินที่ผสม ซึ่งค่าแรงยึดเหนี่ยวของดิน, มุมเสียดทานภายในของกำลังสูงสุดและกำลังสุดท้ายแสดงดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 แสดงตัวแปรที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนตรงของดินส่วนผสมต่างๆ

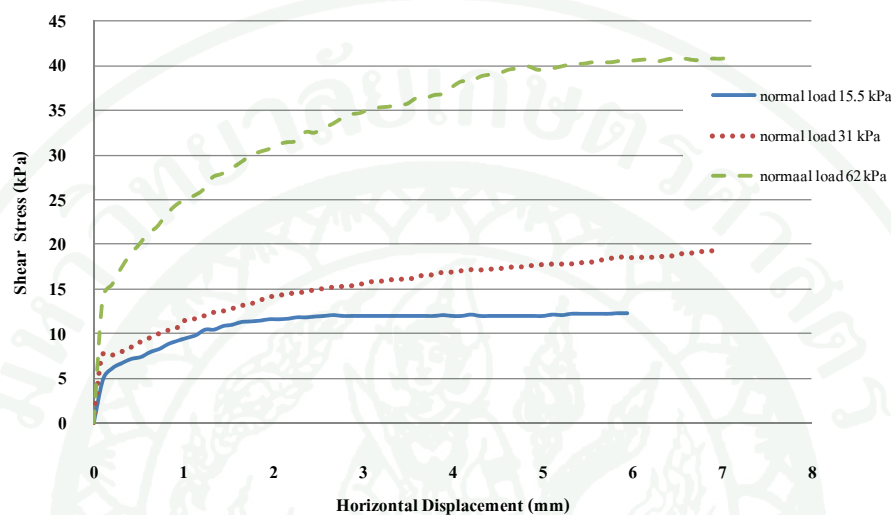
สัญลักษณ์	Maximum		Ultimate		Maximum
	c' (kPa)	ϕ'	c'_{ult} (kPa)	ϕ'_{ult}	ϕ^b
SM	0	36.8	0	36.8	33.2
SM+K10	7	41.8	0	40.8	39.6
SM+K15	7.2	35.8	4	35.7	34.4
SM+K20	12.8	24.9	11.2	24.4	29.6

และจากผลการทดสอบที่ได้สามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกับปริมาณเคโอลิน (Kaolin) ที่อัตราส่วนผสมต่างๆแสดงดังภาพที่ 54 พบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดจะเพิ่มขึ้นที่อัตราส่วนผสม 0-10% โดยน้ำหนัก เมื่อผสมเคโอลิน (Kaolin) ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นแล้วค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดจะมีค่าลดลง

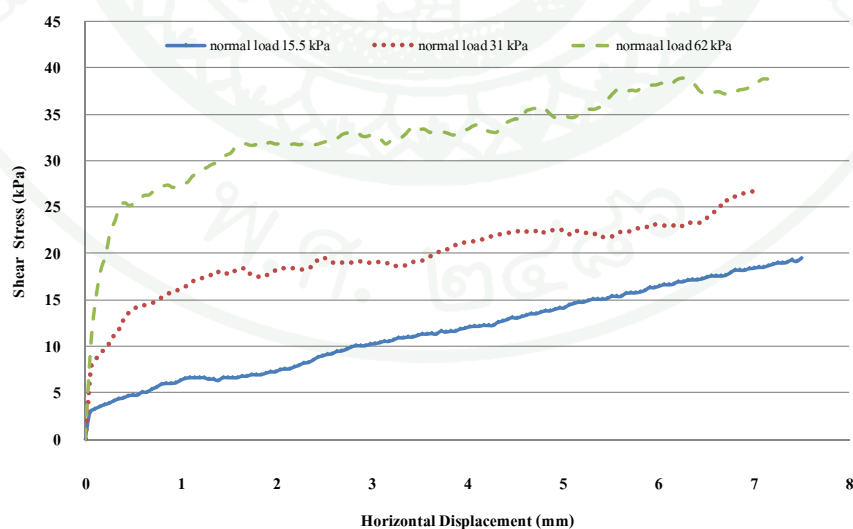


ภาพที่ 54 กราฟกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกับปริมาณเคโอลิน (Kaolin) ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

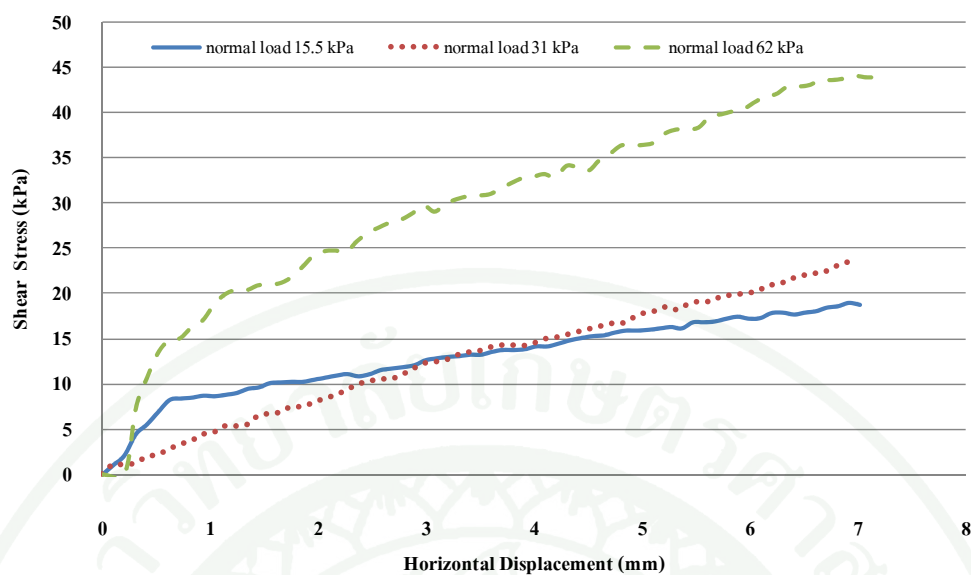
งานวิจัยในส่วนที่ 2 การทดสอบหาค่ารับแรงเฉือนตรงในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ มีอัตรา
การเฉือน 0.5 มม./นาที และ 0.05 มม./นาที ภายใต้สภาวะแรงกดในแนวดิ่งเท่ากับ 15.5, 31, และ 62
kPa. สามารถแสดงผลจากการทดสอบได้ดังภาพที่ 55, 56, 57 และ 58 พบว่าลักษณะของกราฟ
จะแสดงพฤติกรรมแบบ Strain hardening ซึ่งจะไม่พบการลดลงของกำลังหลังจากจุด Peak



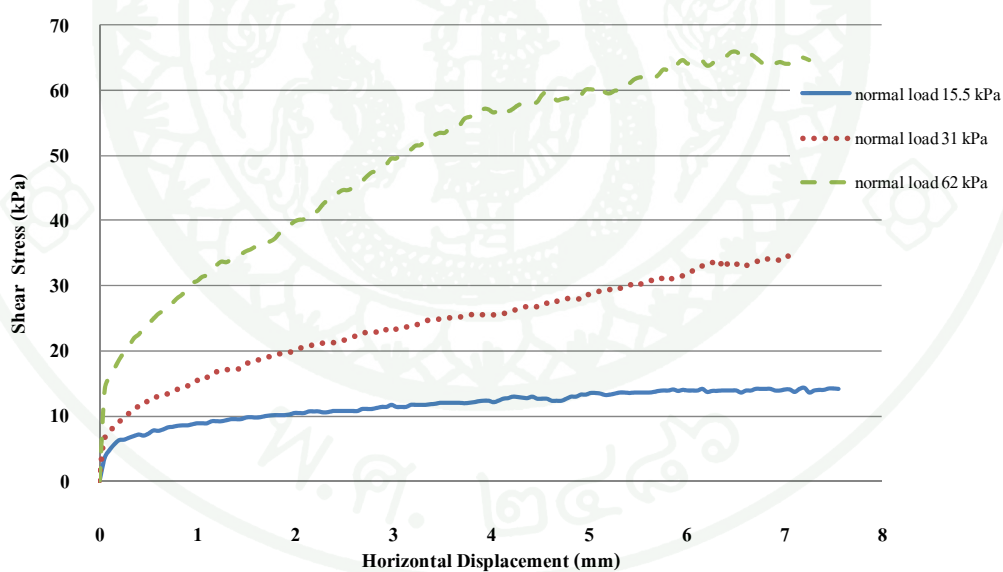
ภาพที่ 55 หน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวนอนของดินแปลงที่ 1 (ฟ้าห่มดิน) อัตราการเฉือน
0.5 มม./นาที



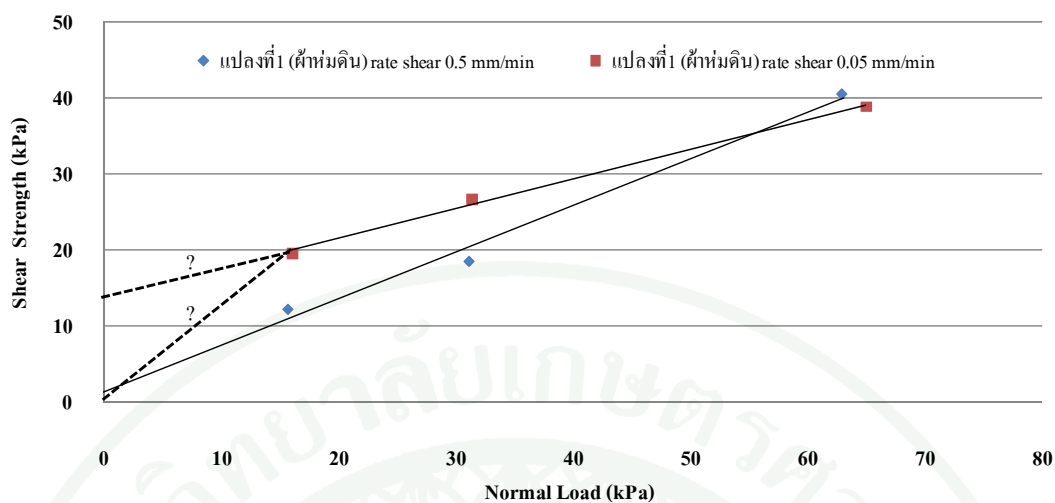
ภาพที่ 56 หน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวนอนของดินแปลงที่ 1 (ฟ้าห่มดิน) อัตราการเฉือน
0.05 มม./นาที



ภาพที่ 57 หน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวนอนของดินแปลงที่ 2 (หญ้าแฝก) อัตราการเฉือน 0.5 มม./นาที



ภาพที่ 58 หน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวนอนของดินแปลงที่ 2 (หญ้าแฝก) อัตราการเฉือน 0.05 มม./นาที

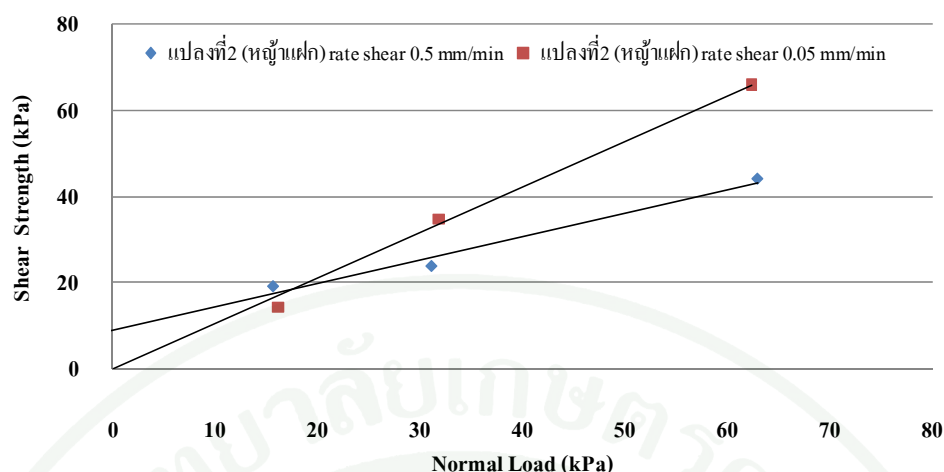


ภาพที่ 59 กราฟเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนกับหน่วยแรงตั้งฉากที่อัตราการเฉือนที่ 0.5 และ 0.05 มม./นาที่ ของดินแปลงที่1

เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการเฉือนที่ 0.5 และ 0.05 มม./นาที่ ของดินแปลงที่1 (ผ้าห่มดิน) แสดงดังภาพที่ 59 พบว่าที่อัตราการเฉือน 0.05 มม./นาที่ เส้น Failure envelope อาจเป็นแบบ Bilinear (Gray and Sotir, 1990) ซึ่งช่วงของเส้น Failure envelope ที่หน่วยแรงในแนวดิ่งมีค่าต่ำๆ (เส้นปะ) ช่วงแรกจะมีความชันมากจากนั้นเมื่อมีหน่วยแรงในแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้น Failure envelope มีค่าความชันลดลง (เส้นทึบ) ทั้งนี้อาจมีอิทธิพลจากรากของหญ้าวัชพืชซึ่งสอดคล้องกับการสังเกตตัวอย่างที่ได้ทดสอบดังภาพที่ 60 หรืออาจเป็นผลจากการเชื่อมประสานระหว่างเม็ดดินที่เกิดจากอินทรีย์สาร (Muir Wood et al., 1995) เนื่องจากการย่อยสลายของผ้าห่มดินและรากของหญ้าวัชพืชทำให้ค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิผล (c') มีค่าเพิ่มขึ้น



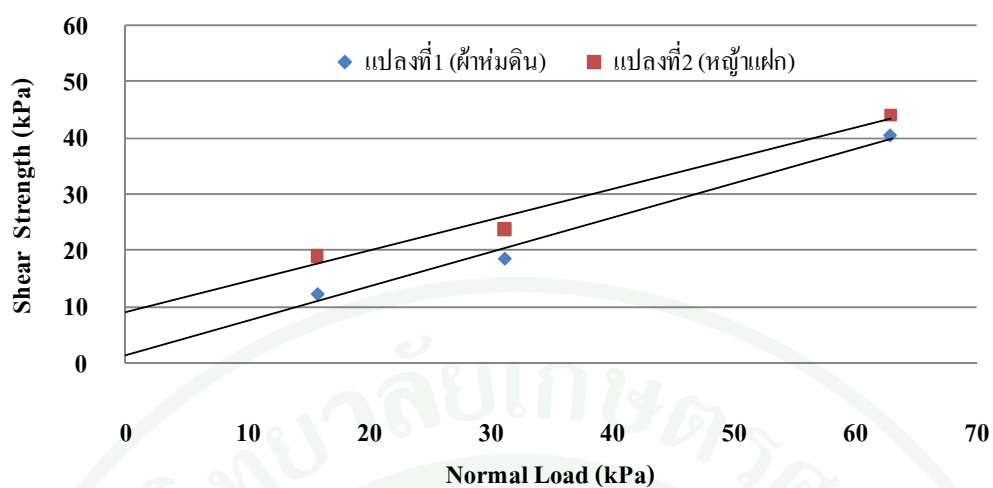
ภาพที่ 60 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่มีรากพืชกับไม่มีรากพืช



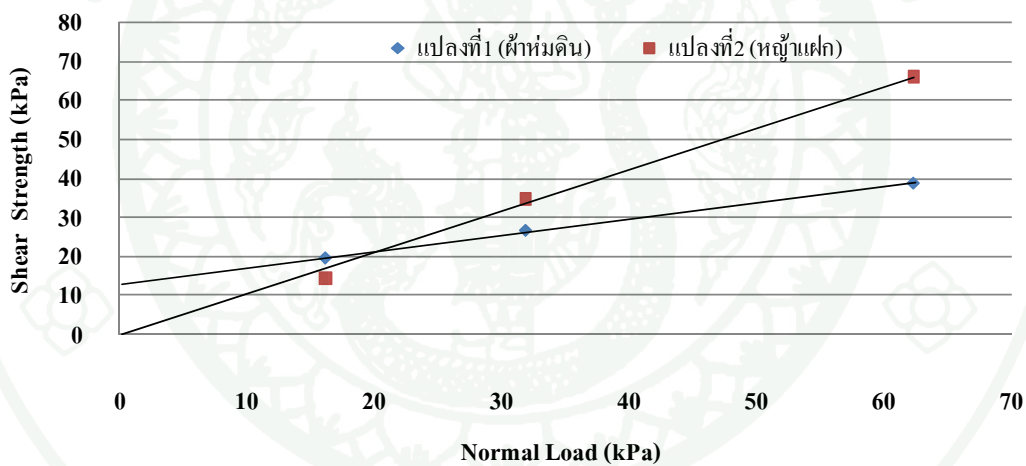
ภาพที่ 61 กราฟเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกับหน่วยแรงตั้งฉากที่อัตราการเฉือนที่ 0.5 และ 0.05 มม./นาที่ ของดินแปลงที่ 2

เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการเฉือนที่ 0.5 และ 0.05 มม./นาที่ ของดินแปลงที่ 2 (หญาแฝก) แสดงดังภาพที่ 61 ซึ่งไม่พบรากของหญาแฝกในตัวอย่างดินและที่อัตราการเฉือน 0.05 มม./นาที่ มีเส้น Failure envelope มีความชันมากกว่าที่อัตราการเฉือน 0.5 มม./นาที่ เพราะที่อัตราการเฉือน 0.5 มม./นาที่ เกิดแรงดันน้ำระหว่างการเฉือนทำให้กำลังรับแรงเฉือนมีค่าลดลงเป็นผลทำให้เส้น Failure envelope ชันน้อยกว่าที่อัตราการเฉือน 0.05 มม./นาที่

จากภาพที่ 62 นำกำลังรับแรงเฉือนของทั้ง 2 แปลงทดสอบเปรียบเทียบกันที่อัตราการเฉือน 0.5 มม./นาที่ พบว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแปลงที่ 2 มีค่ามากกว่าแปลงที่ 1 เพราะระหว่างทำการเฉือนแปลงที่ 1 เกิดแรงดันน้ำได้มากกว่าแปลงที่ 2 เนื่องจากแปลงที่ 1 มีอนุภาคของดินเม็ดละเอียดมากกว่าแปลงที่ 2 เป็นผลทำให้กำลังรับแรงเฉือนมีค่าลดลง ส่วนภาพที่ 63 เป็นการเปรียบเทียบที่อัตราการเฉือน 0.05 มม./นาที่ ซึ่งจะมีผลตรงกันข้ามกับที่อัตราการเฉือน 0.5 มม./นาที่ โดยกำลังรับแรงเฉือนของดินแปลงที่ 1 จะมีค่ามากกว่าแปลงที่ 2 สำหรับช่วงแรงกดในแนวตั้ง 15.5 kPa เท่านั้นและสามารถสรุปตัวแปรที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนตรงได้ดังตารางที่ 13



ภาพที่ 62 กราฟเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกับหน่วยแรงตั้งฉากที่อัตราการเฉือนที่ 0.5 มม./นาที ของดินแปลงที่ 1 และ 2



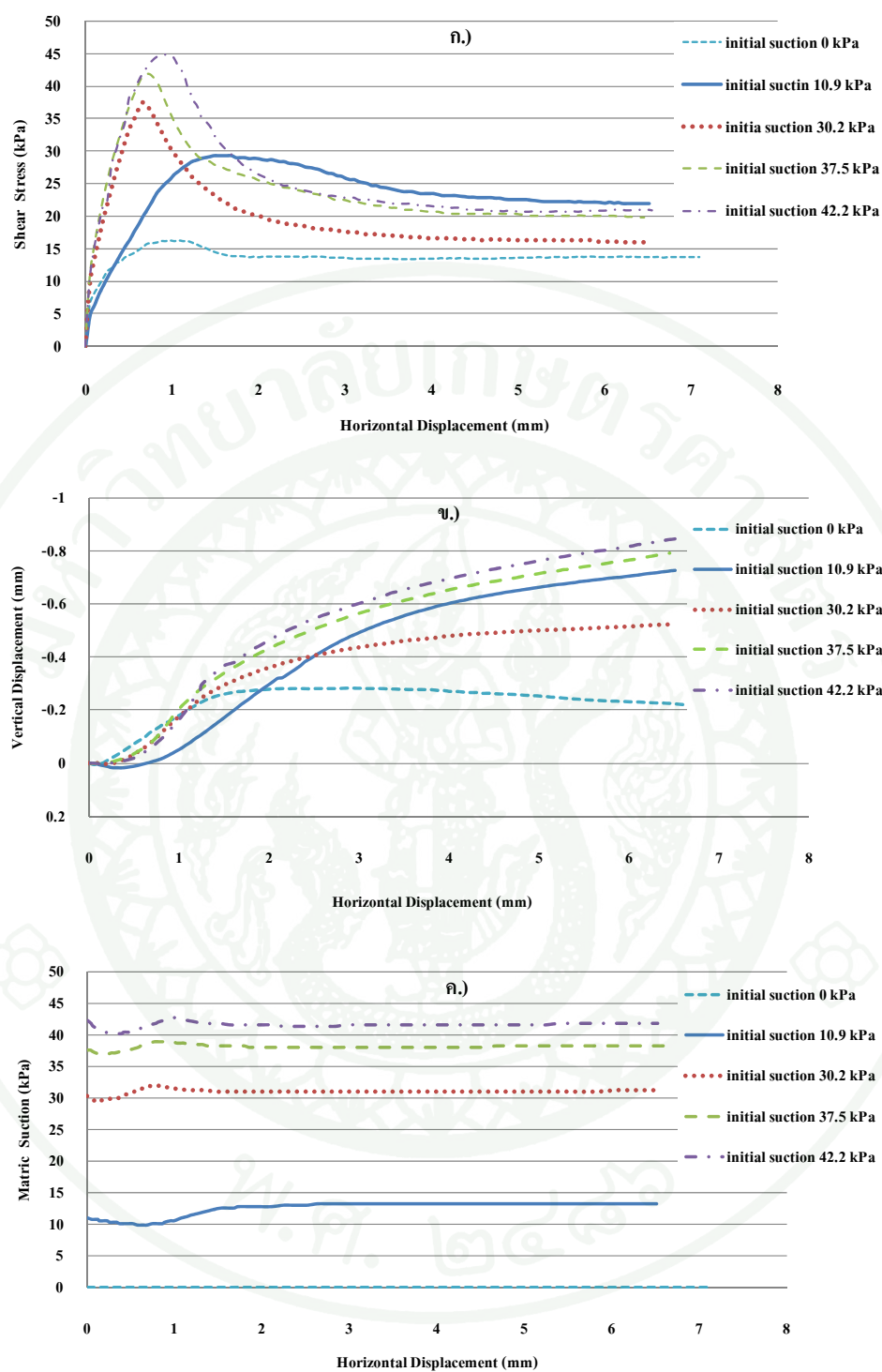
ภาพที่ 63 กราฟเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกับหน่วยแรงตั้งฉากที่อัตราการเฉือนที่ 0.05 มม./นาที ของดินแปลงที่ 1 และ 2

ตารางที่ 13 แสดงตัวแปรที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนตรงของดินทั้ง 2 แปลง

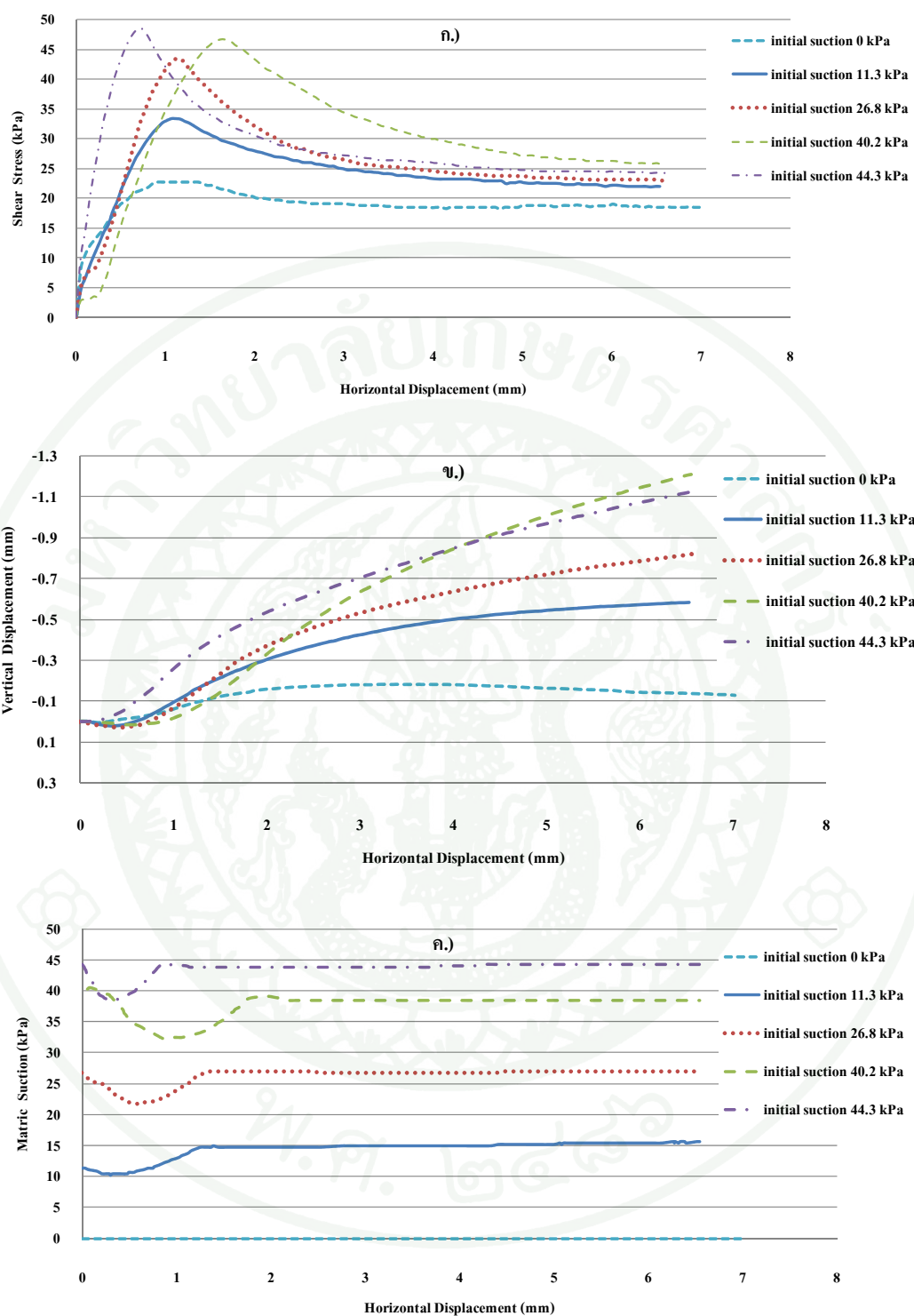
แปลงทดสอบ	Rate shear 0.5		Rate shear 0.05		Rate shear 0.05
	mm/min		mm/min		mm/min
	c (kPa)	ϕ	c' (kPa)	ϕ'	ϕ^b
แปลงที่ 1 (ฟ้าห่มดิน)	1.37	31.47	13.71	21.3	19.9
แปลงที่ 2 (หญ้าแฝก)	8.96	28.59	0	46.5	22

สถานะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

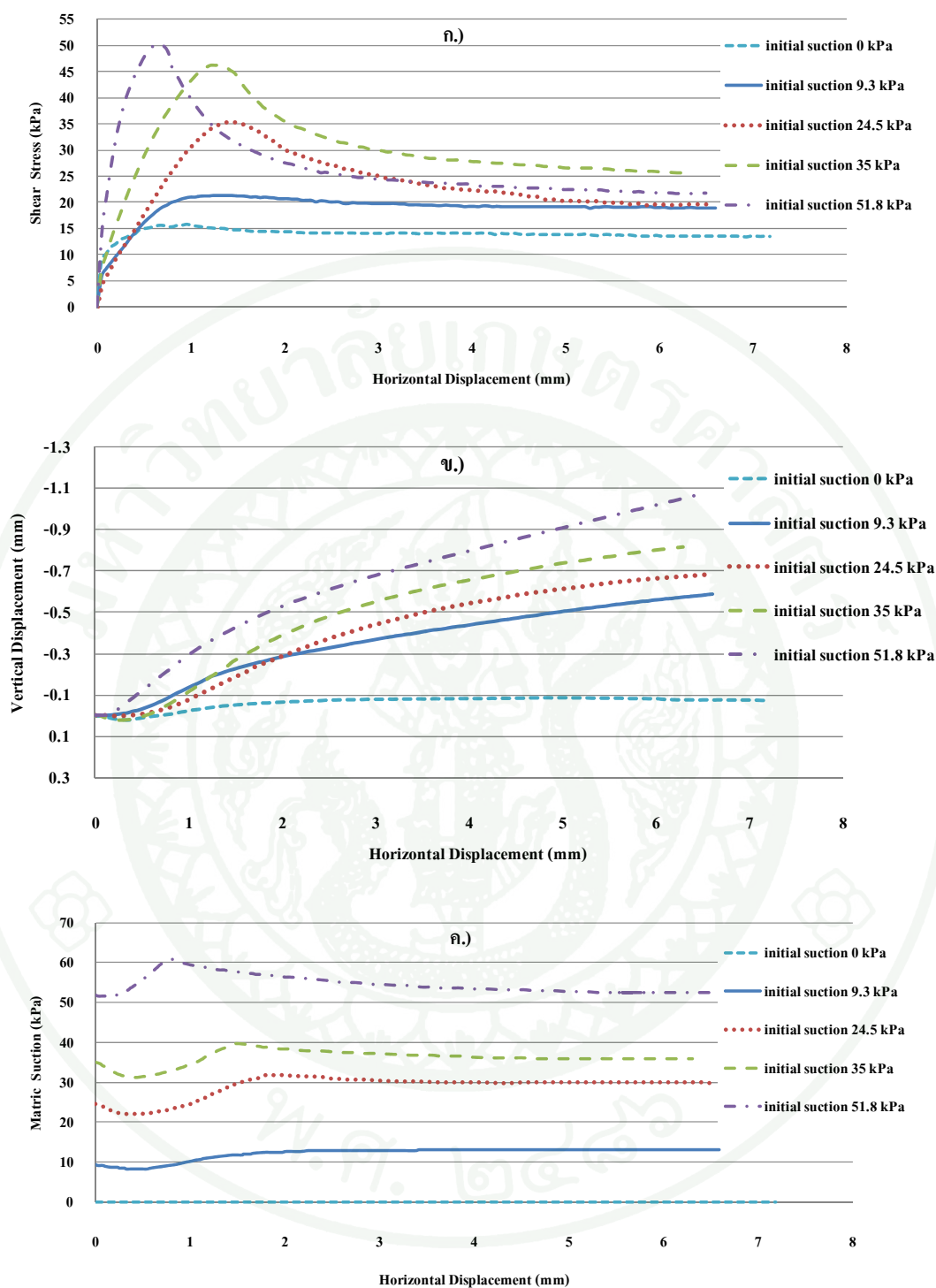
งานวิจัยในส่วนที่ 1 กำลังรับแรงเฉือนตรงในสถานะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำทำการทดสอบด้วยอัตราความเร็ว 0.05 มม./นาที่ และติดตั้ง KU-Tensiometer บน Direct shear box ภายใต้อุณหภูมิแรงกดในแนวดิ่งเท่ากับ 15.5 kPa เตรียมตัวอย่างดินโดยทำการเปลี่ยนแปลงความชื้นในตัวอย่างที่บดอัดเสร็จแล้วจนได้ค่าแรงดูดต่างๆกันก่อนเริ่มทดสอบ จากการทดสอบสามารถหาเส้นความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวนอน (Horizontal displacement) กับ หน่วยแรงเฉือน (shear stress), การเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเฉือน (Vertical displacement) และแรงดูดของน้ำ (Matric suction) ของดินที่ส่วนผสมต่างๆได้ดังภาพที่ 64, 65, 66 และ 67



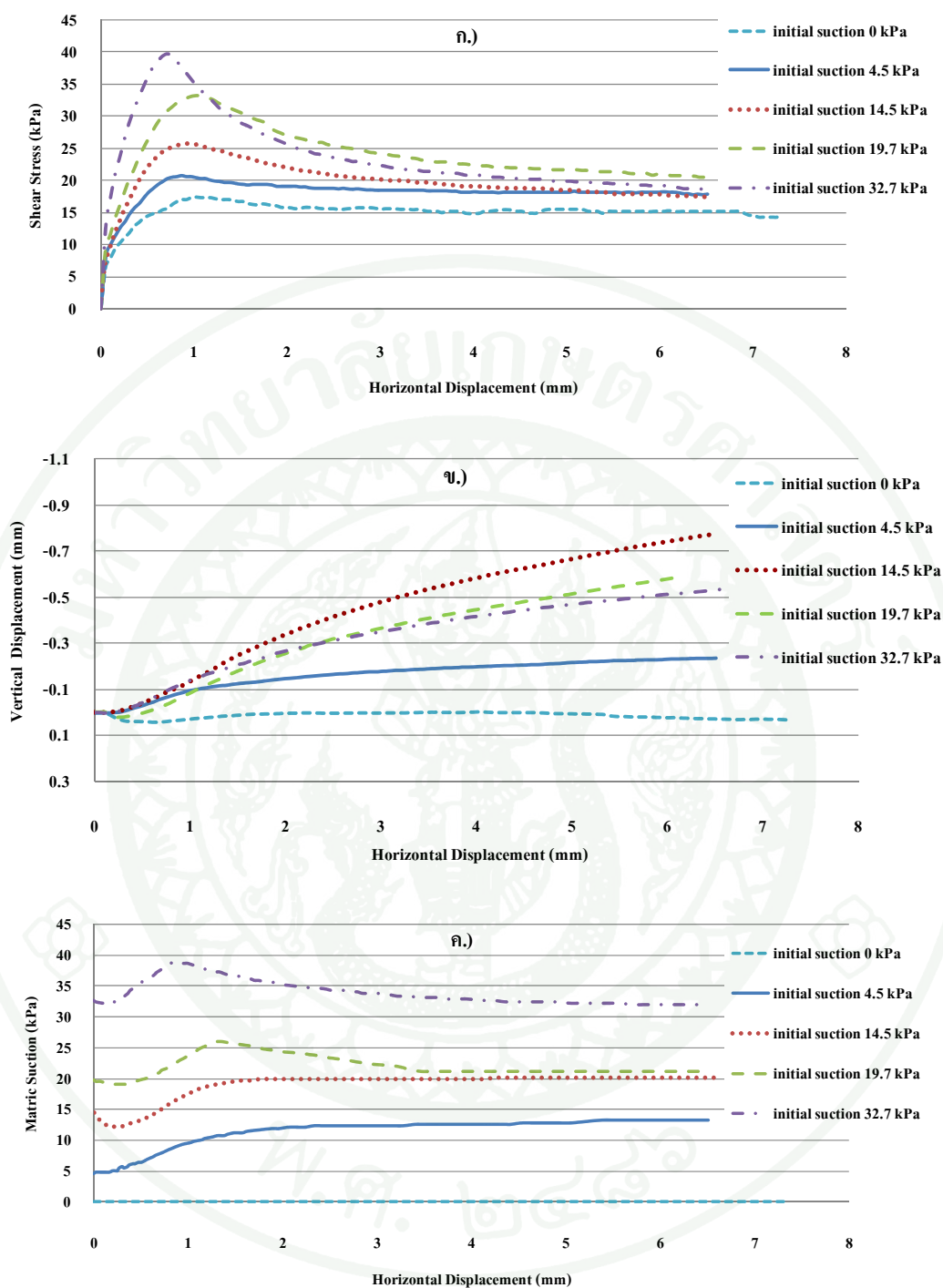
ภาพที่ 64 กราฟการเคลื่อนที่ในแนวนอนของดิน SM กับ ก.) หน่วยแรงเฉือน ข.) การเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเฉือน ค.) แรงดูดของน้ำ (Matric suction)



ภาพที่ 65 กราฟการเคลื่อนที่ในแนวนอนของดิน SM+K 10 กับ ก.) หน่วยแรงเฉือน ข.) การเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเฉือน ค.) แรงดูดของน้ำ (Matric suction)

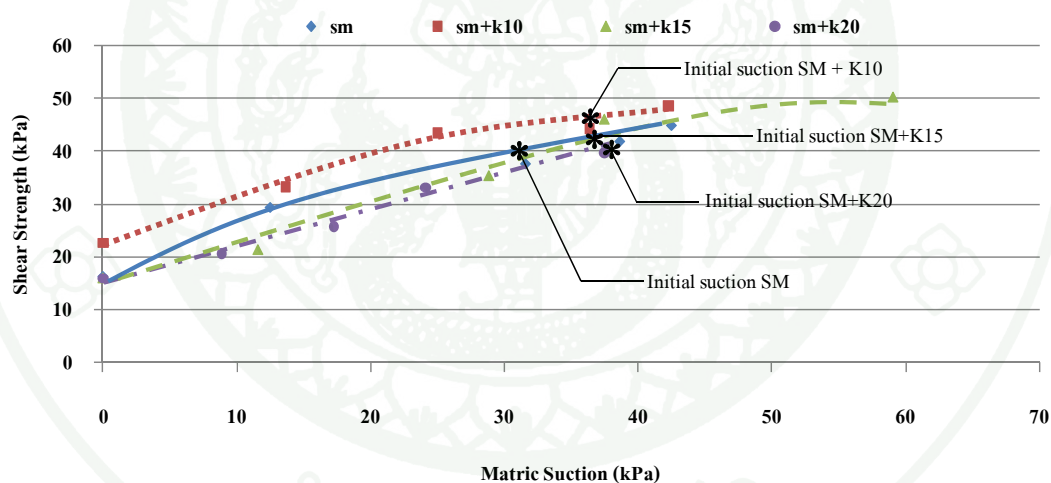


ภาพที่ 66 กราฟการเคลื่อนที่ในแนวนอนของดิน SM+K 15 กับ ก.) หน่วยแรงเฉือน ข.) การเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเฉือน ค.) แรงดูดของน้ำ (Matric suction)



ภาพที่ 67 กราฟการเคลื่อนที่ในแนวนอนของดิน SM+K 20 กับ ก.) หน่วยแรงเฉือน ข.) การเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับทิศทาง การเฉือน ค.) แรงดูดของน้ำ (Matric suction)

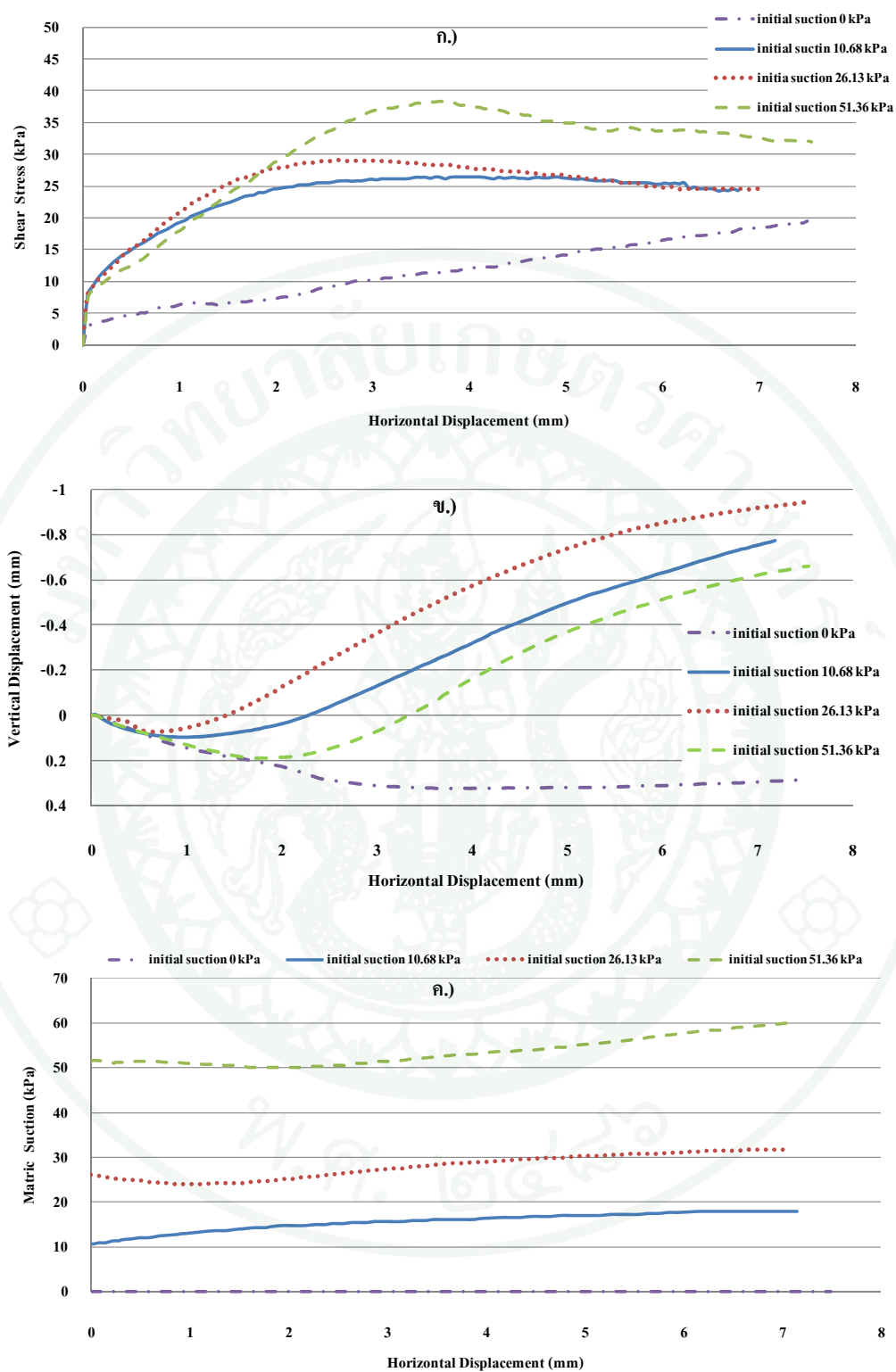
ผลจากการทดสอบพบว่าช่วงแรกของการเฉือนแรงดูดของน้ำจะมีค่าลดลงเนื่องจากดินมีการยุบตัวทำให้เกิดแรงดันน้ำสูงขึ้น แต่เมื่อทำการเฉือนต่อมาค่าแรงดูดของน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่กำลังรับแรงเฉือนบริเวณจุด Peak และเมื่อเฉือนดินจนกำลังรับแรงเฉือนเข้าสู่จุด Ultimate ค่าแรงดูดของน้ำจะมีค่าคงที่ และสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกับแรงดูดของน้ำที่ส่วนผสมต่างๆแสดงดังภาพที่ 68 พบว่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน SM+K10 มีค่ามากกว่าดินชนิดอื่นๆในช่วงแรงดูดของน้ำ 0 ถึง 45 kPa และลักษณะของเส้น Envelope (Wetting) ของดินทั้ง 4 ชนิดไม่เป็นเส้นตรง (Non-linear) สอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต (Jotisankasa and Mairaing, 2010, Gan and Fredlund, 1988) ส่วนมุม ϕ^b (มุมของแรงเฉือนเนื่องจากแรงดูดของน้ำ) แสดงดังตารางที่ 12 เป็นมุมในช่วงแรงดูดของน้ำ 0 ถึง 32 kPa ซึ่งพบว่ามุม ϕ^b มีค่าใกล้เคียงกับมุม ϕ' ซึ่งมีส่วนคล้ายกับผลของ Gan and Fredlund (1988) ที่ว่ามุม ϕ^b มีค่าเท่ากับมุม ϕ' ที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำและจะมีค่าลดลงเมื่อถึงจุดที่ดินเริ่มไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Air-entry value)



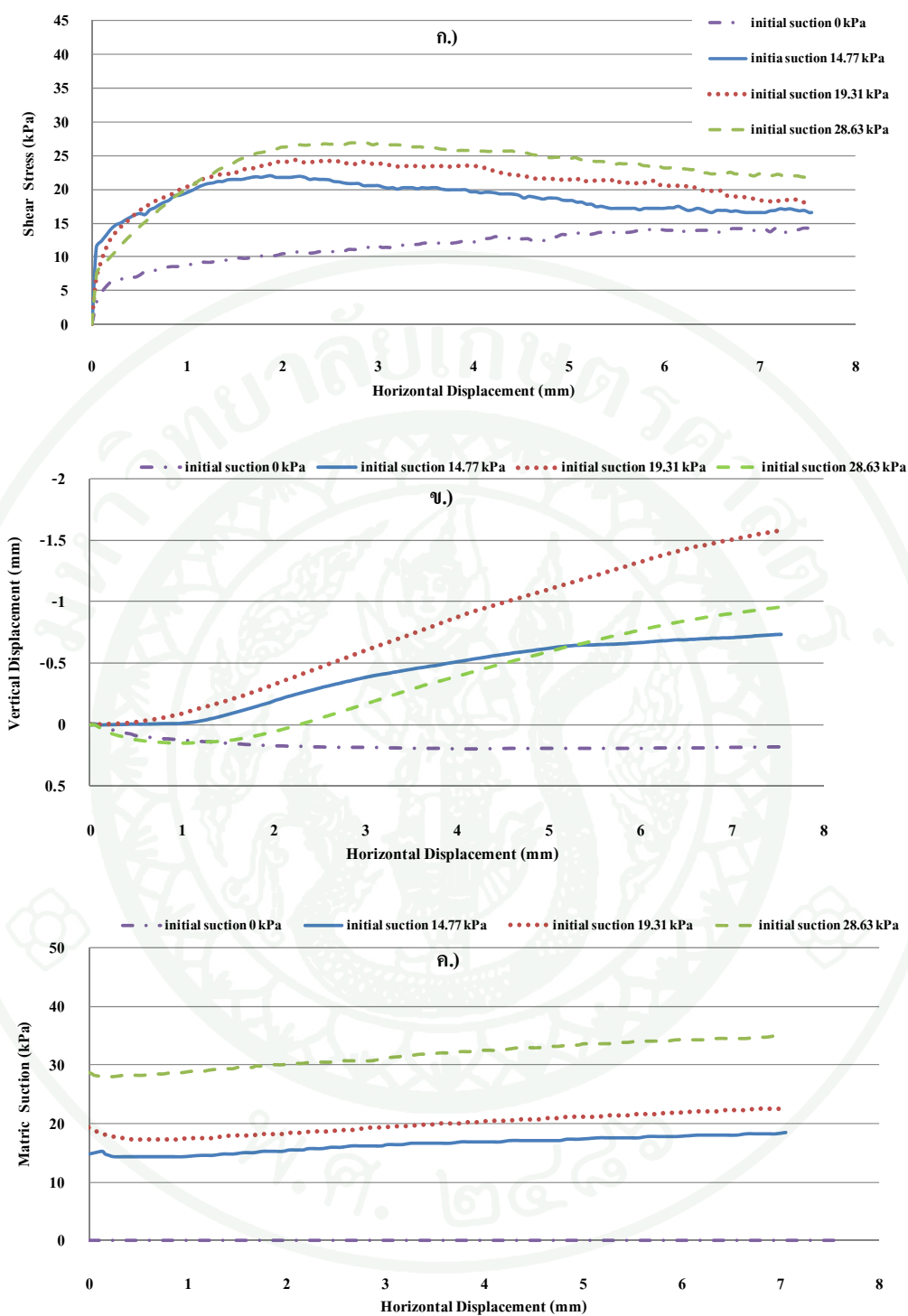
ภาพที่ 68 กราฟกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกับแรงดูดของน้ำในดินที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

สำหรับงานวิจัยในส่วนที่ 2 กำลังรับแรงเฉือนตรงในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำมีวิธีการทดสอบเหมือนกับงานวิจัยในส่วนที่ 1 ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น จากการทดสอบสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง การเคลื่อนที่ในแนวนอน (Horizontal displacement) กับ หน่วยแรงเฉือน (shear stress), การเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเฉือน (Vertical displacement) และแรงดูดของน้ำ (matric suction) ของทั้ง 2 แปลงทดสอบได้ดังภาพที่ 69 และ 70

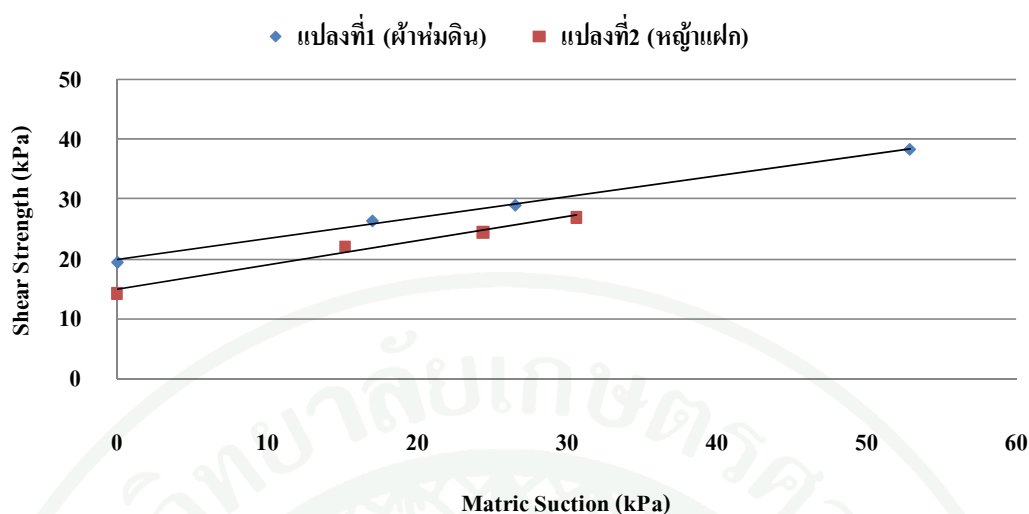
ผลการทดสอบพบว่าช่วงแรกของการเลื่อนตัวอย่างแรงดูดของน้ำในดินมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเนื่องจากตัวอย่างดินมีการยุบตัวทำให้เกิดแรงดันน้ำขึ้นและเมื่อดินถูกเลื่อนผ่านจุด Peak หรือเงื่อนไขดินจนเข้าใกล้จุด Ultimate พบว่าแรงดูดของน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นและไม่ถูกทำลายลงแม้ตัวอย่างดินมีการขยายตัว ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนกับแรงดูดน้ำในดินดังภาพที่ 71 พบว่ากำลังรับแรงเฉือนของแปลงที่ 1 มีค่ามากกว่าแปลงที่ 2 ในช่วงแรงดูดของน้ำในดิน 0 ถึง 30 kPa. ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่อนุภาคเม็ดดินมีขนาดเล็กพอที่ทำให้เกิดความชื้นแน่นที่เกิดขึ้นจากน้ำยึดเม็ดดินไว้ได้ดีกว่าอนุภาคเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่กว่า ส่งผลทำให้กำลังรับแรงเฉือนมากกว่าแปลงที่ 2 และจากการเปรียบเทียบแปลงที่ 2 มีมุม ϕ^b (มุมของแรงเฉือนเนื่องจากแรงดูดของน้ำ) ด้าน Wetting ในช่วงแรงดูดของน้ำ 0 ถึง 30 kPa. มากกว่าแปลงที่ 1 ซึ่งแสดงค่าในตารางที่ 13



ภาพที่ 69 กราฟการเคลื่อนที่ในแนวนอนของดินแปลงที่ 1 กับ ก.) หน่วยแรงเฉือน ข.) การเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเฉือน ค.) แรงดูดของน้ำ (matric suction)



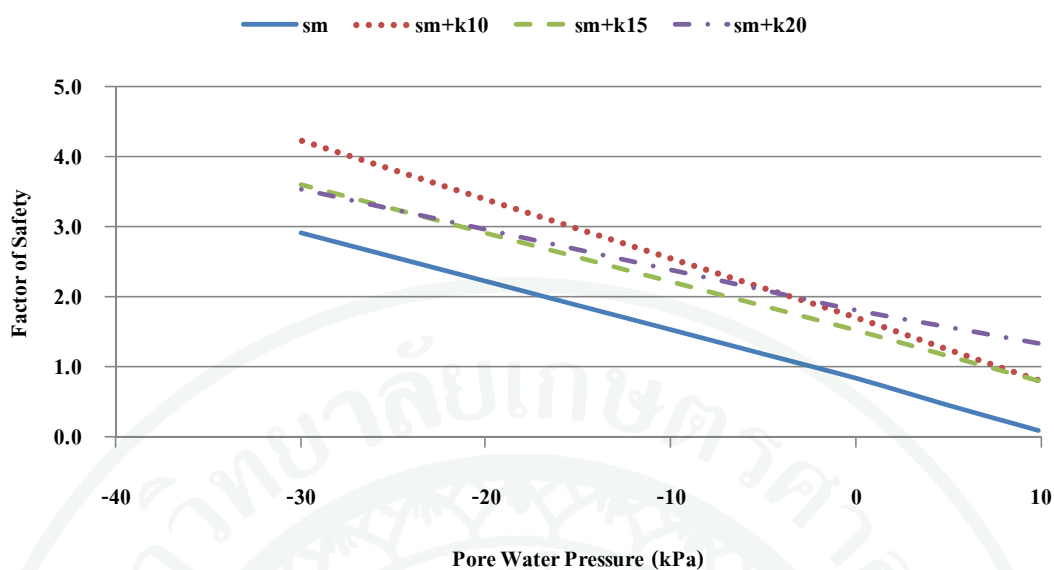
ภาพที่ 70 กราฟการเคลื่อนที่ในแนวนอนของดินแปลงที่ 2 กับ ก.) หน่วยแรงเฉือน ข.) การเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเฉือน ค.) แรงดูดของน้ำ (matric suction)



ภาพที่ 71 กราฟกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกับแรงดูดของน้ำในดินทั้ง 2 แปลงทดสอบ

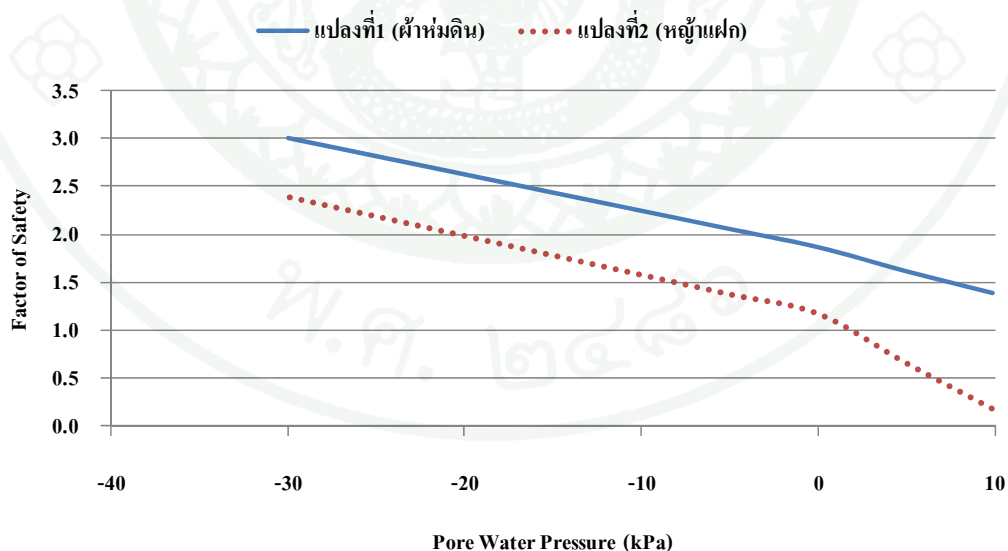
ผลการศึกษาเสถียรภาพของลาดดิน

ในการศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินของงานวิจัยทั้ง 2 ส่วน ซึ่งงานวิจัยส่วนที่ 1 และ 2 มีหน่วยน้ำหนักของดิน $19-19.86 \text{ kN/m}^3$ และ $19.22-20.01 \text{ kN/m}^3$ ตามลำดับ โดยมีข้อกำหนดในการวิเคราะห์ดังนี้คือกำหนดให้มีการปรับแบบลาดดินอนันต์ ความชันของลาดทำมุม 42 องศา กับแนวราบ, จำลองชั้นดินที่มีความหนา 1 ม. และตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณเสถียรภาพของลาดเช่น c' , ϕ^b และ ϕ' แสดงดังตารางที่ 12 และ 13 งานวิจัยในส่วนที่ 1 จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพแสดงดังภาพที่ 72 แสดงออกมาในรูปแบบอัตราส่วนความปลอดภัยกับการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำในดินของดินทั้ง 4 อัตราส่วนผสมพบว่าเมื่อทำการผสมเคโอลินจะทำให้เสถียรภาพของลาดดินดีขึ้นและสิ่งที่ปรากฏเด่นชัดก็คือที่อัตราส่วนผสมเคโอลิน 10% โดยน้ำหนัก จะมีค่าความปลอดภัยสูงสุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสมอื่นๆ ในช่วงแรงดูดมากกว่า 4 kPa. ขึ้นไป แต่เมื่อแรงดูดมีค่าลดลงต่ำกว่า 4 kPa. และเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่อัตราส่วนผสมเคโอลิน 20 % โดยน้ำหนักจะมีค่าสูงสุด



ภาพที่ 72 แสดงอัตราส่วนความปลอดภัยกับแรงดันน้ำในดินของดินที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

สำหรับงานวิจัยในส่วนที่ 2 ผลการวิเคราะห์เสถียรแสดงดังภาพที่ 73 แสดงออกมาในรูปแบบอัตราส่วนความปลอดภัยกับการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำในดิน พบว่าแปลงที่ 1 มีอัตราส่วนความปลอดภัยมากกว่าแปลงที่ 2 ในช่วงแรงดันน้ำ -30 ถึง 10 kPa.



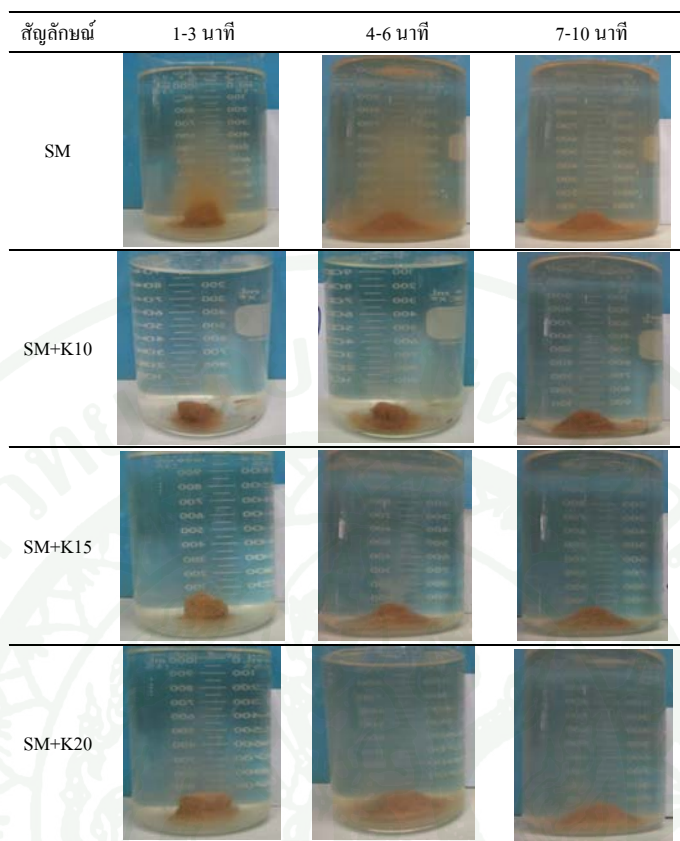
ภาพที่ 73 แสดงอัตราส่วนความปลอดภัยกับแรงดันน้ำในดินของดินทั้ง 2 แปลงทดสอบ

การทดสอบหาคุณสมบัติด้านการกัดเซาะ

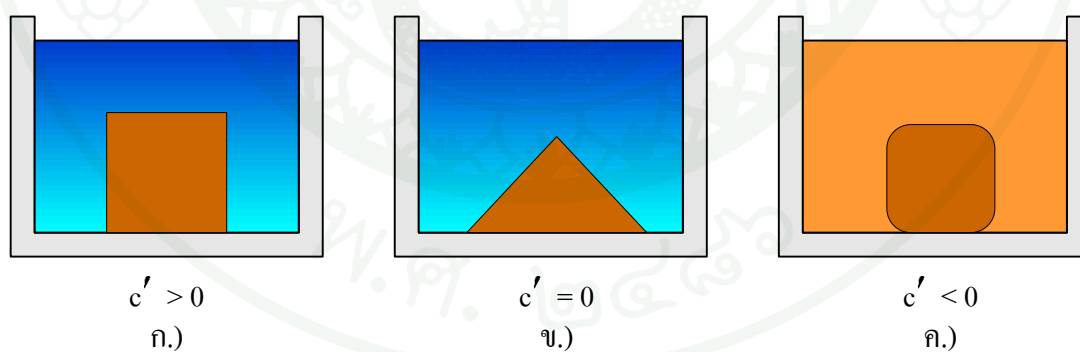
การทดสอบหาคุณสมบัติด้านการกัดเซาะของดินเพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการเกิด การกัดเซาะของงานวิจัยส่วนในส่วนที่ 1 มีผลการทดสอบดังนี้

การทดสอบ Crumb Test

จากการทดสอบ crumb test (Emerson, 1967 ปรับปรุงโดย Sherard et. al.,1977) ของดิน ทั้ง 4 อัตราส่วนผสมแสดงดังภาพที่ 74 การทลายตัวของก้อนดิน SM และ SM+K10 จะทลายตัว หมดในช่วงเวลา 1-3 นาที ส่วน SM+K15 และ SM+K20 ก้อนดินจะทลายตัวหมดในช่วงเวลา 4-6 นาที จากลักษณะของการทลายตัวของดินเมื่ออยู่ในน้ำโดยปราศจากหน่วยแรงกดในแนวดิ่งจะ บ่งบอกว่าดินนั้นมีความเชื่อมแน่นหรือไม่นั้นสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 75 ซึ่งพบว่าดินทั้ง 4 อัตรา ส่วนผสมเป็นแบบ ข.) เป็นดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (c') เนื่องจากเป็นดินที่ทำการบดอัดใหม่จึงยัง ไม่มีการเชื่อมประสานของเม็ดดินมากนักแต่การที่ดิน SM มีการทลายตัวเร็วสุดนั้นอาจเป็นผลมา จากการที่ดิน SM มีปริมาณเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่กว่าดิน SM+K10, SM+K15 และ SM+K20 จึงทำให้มีน้ำหนักของเม็ดดินมากเป็นผลทำให้ทลายตัวเร็วกว่า สำหรับสีของน้ำของดิน SM มีความ ขุ่นมากที่สุด ในขณะที่ความขุ่นของดิน SM+K10, SM+K15 และ SM+K20 ไม่มีความขุ่น จาก การทดสอบสามารถจัดระดับการกระจายตัวของดินทั้ง 4 อัตราส่วนผสมได้โดยดิน SM อยู่ในระดับ ที่ 3 มีปฏิกิริยาปานกลาง (Moderately Dispersive) ส่วนดิน SM+K10, SM+K15 และ SM+K20 อยู่ในระดับที่ 2 มีปฏิกิริยาเล็กน้อย (Slightly Dispersive) ความขุ่นและการทลายตัวของดินนี้มี ลักษณะที่แตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับปริมาณเคโอลินที่ผสม ซึ่งสามารถเรียงลำดับความขุ่นจากมาก ไปน้อยและการทลายตัวของก้อนดินจากเร็วไปช้าได้ดังนี้ $SM > SM+K10 > SM+K15 > SM+K20$ จากการที่เพิ่มปริมาณเคโอลินให้กับทรายแป้งแล้วทำให้ดินมีความขุ่นและการทลายตัวได้ช้าลงนั้น กล่าวได้ว่ายิ่งเพิ่มแร่ดินเหนียวให้กับดินทรายแป้งมากเท่าไรดินจะมีโอกาสเกิดการกระจายตัวหรือ กัดเซาะได้น้อยลง



ภาพที่ 74 ผลการทดสอบ Crumb Test ของดินแต่ละอัตราส่วนผสมในช่วงเวลาต่างๆ



ภาพที่ 75 แสดงการทลายตัวของดินประเภทต่างๆ ก.) ดินที่มีแรงเชื่อมแน่น ข.) ดินที่ไม่มีแรงเชื่อมแน่น ค.) ดินกระจายตัว

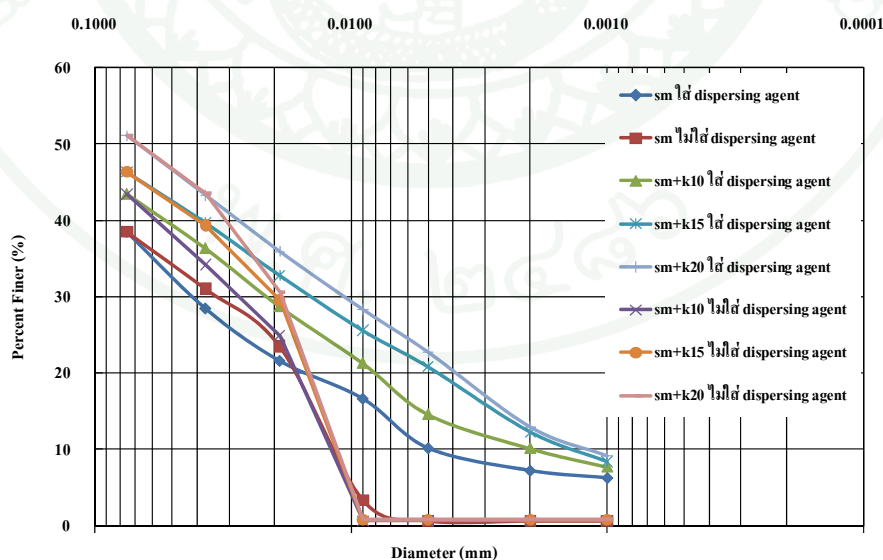
ที่มา: Atkinson *et al.* (1990)

Pinhole Test

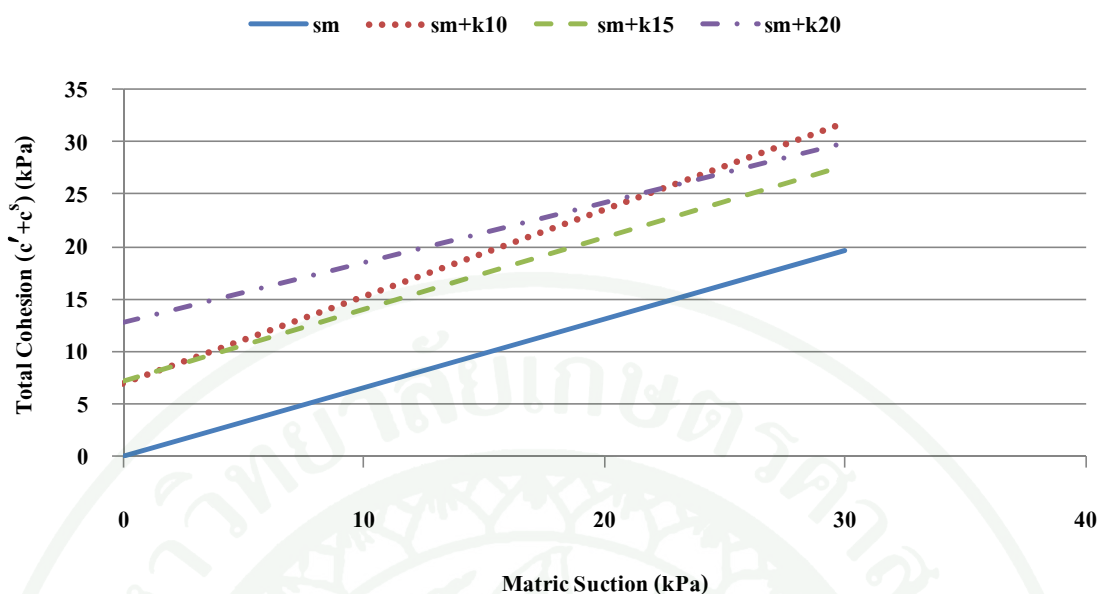
จากการทดสอบ Pinhole Test (Sherard et. al., 1976) ที่เสดแรก (2 นิ้ว) ในช่วงเวลา 5 นาที แรกของดินทั้ง 4 อัตราส่วนผสมจะมีน้ำไหลออกมาจากรูที่เจาะเพียงเล็กน้อยต่อมาน้ำจะหยุดไหล เนื่องจากดินจะถูกน้ำพัดพามาอุดตันรูที่เจาะ ซึ่งไม่สามารถจัดระดับของการกระจายตัวได้ ทั้งนี้ การทดสอบ Pinhole Test อาจไม่มีความเหมาะสมในการทดสอบดินทราย ซึ่งมีลักษณะการกักเซาะทางกลมากกว่าทางเคมีและปราศจากการเชื่อมประสาน (c') ทำให้รูเจาะสำหรับทดสอบทลายลงมาได้ง่าย

การทดสอบ Double hydrometer test

จากการทดสอบ Double hydrometer test ในหลอดทดสอบที่ไม่ได้ใส่สาร Dispersing agent พบว่าดินจะมีการตกตะกอนเร็วขึ้นตามปริมาณเคโอลินที่ผสมและสามารถเรียงลำดับการตกตะกอนจากเร็วไปช้าได้ดังนี้ $SM+K20 > SM+K15 > SM+K10 > SM$ และสามารถแสดงผลการทดสอบดังภาพที่ 76 ซึ่งจากการทดสอบสามารถหาเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของดิน SM, SM+K10, SM+K15 และ SM+K20 โดยมีค่าเท่ากับ 6.15, 4.43, 3.64 และ 3.67% ตามลำดับ และสามารถจำแนกระดับการกระจายตัวของดินทั้ง 4 อัตราส่วนผสมพบว่าเป็นดินที่ไม่มีปัญหาการกระจายตัวของเม็ดดิน



ผลของการทดสอบ Crumb Test, Pinhole Test และ Double hydrometer test เพื่อหาคุณสมบัติด้านการกัดเซาะของดินทั้ง 4 อัตราส่วนผสมพบว่า ไม่มีปัญหาการกัดเซาะทางเคมี แต่เป็นการกัดเซาะทางกลซึ่งเมื่อพิจารณาการกัดเซาะทางกลตามภาพที่ 10 การเพิ่มปริมาณแรดินเหนียวจะช่วยเพิ่มแรงต้านทานต่อแรงดึงที่เกิดจากการไหลของน้ำที่กระทำกับเม็ดดิน (Drag force) ซึ่งจากแรงต้านทานที่เพิ่มขึ้นนี้สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเชื่อมแน่นรวม ($c' + c^s$) กับการเปลี่ยนแปลงแรงดูดของน้ำในดินได้ดังภาพที่ 77 ในกรณีที่ผิวดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ($c^s = 0$) การเพิ่มเคโอลินจะเป็นตัวช่วยเพิ่มค่าแรงเชื่อมแน่นประสิทธิผล (c') เป็นผลทำให้เม็ดดินมีแรงต้านต่อการดึงของน้ำได้มากขึ้นเป็นผลทำให้การเกิดกัดเซาะลดลง สำหรับในสถานะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ จะเกิดแรงเชื่อมแน่นเนื่องจากแรงดูดน้ำในดินขึ้น (c^s หรือ $(u_a - u_w) \tan \phi^b$) เมื่อพิจารณาที่แรงดูดน้ำในดินเท่ากับ 0 ถึง 30 kPa. ที่อัตราส่วนผสมเคโอลิน 20 % โดยน้ำหนักจะมีค่าแรงเชื่อมแน่นรวม ($c' + c^s$) มากสุดในช่วงแรงดูดของน้ำในดิน 0 ถึง 22 kPa. แล้วจึงมีค่าลดลงน้อยกว่าที่อัตราส่วนผสมเคโอลิน 10 % ในช่วงแรงดูดของน้ำในดินมากกว่า 22 kPa นอกจากนั้นดินทรายปนทรายแป้งชนิด SM เป็นดินเม็ดหยาบซึ่งเมื่อน้ำซึมผ่านดินอาจสูญเสียค่า c^s ได้ง่ายแต่เมื่อผสมแรดินเหนียวเคโอลินเข้าไปจะทำให้ดินมีความทึบน้ำมากขึ้นทำให้น้ำไหลซึมสู่ดินได้ในปริมาณที่น้อยลง อีกทั้งเคโอลินจะเป็นตัวช่วยรักษาแรงดูดน้ำในดินและความเชื่อมแน่นไว้ ทั้งนี้ในสถานะที่แรงดูดน้ำในดินมีค่ามากอาจเปลี่ยนสูตร c^s ที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำในดินมาใช้แทน เช่น $c^s = \chi(u_a - u_w) \tan \phi'$ เป็นต้น เนื่องจากที่ค่าแรงดูดน้ำในดินมีค่ามาก แต่ถ้าค่า χ มีค่าน้อยจนเข้าใกล้ศูนย์ ค่า c^s ก็จะมีค่าใกล้ศูนย์เช่นกัน ดังกรณีของปราสาททรายที่แห้งมากก็จะพังทลายได้ง่าย ซึ่งแรงดูดอาจจะไม่เป็นตัวช่วยในการเพิ่มค่าแรงเชื่อมแน่นเป็นผลทำให้ดินมีโอกาสเกิดการกัดเซาะได้ง่ายตามไปด้วย ซึ่งในการวิเคราะห์สูตรดังกล่าวจะแสดงไว้ในงานวิจัยส่วนที่ 2 เนื่องจากงานวิจัยส่วนที่ 1 ยังขาดข้อมูล χ ที่สถานะแรงดูดของน้ำในดินมีค่าสูง จากการทดสอบ Crumb Test, Pinhole Test, Double hydrometer test และการวิเคราะห์ค่าแรงเชื่อมแน่นรวม ($c' + c^s$) สามารถประเมินความเป็นไปได้ในการเกิดการกัดเซาะได้ว่าที่อัตราส่วนผสมเคโอลินที่ 20% โดยน้ำหนักมีความเป็นไปได้ว่าจะเกิดการกัดเซาะได้น้อยกว่าอัตราส่วนผสมอื่นๆ

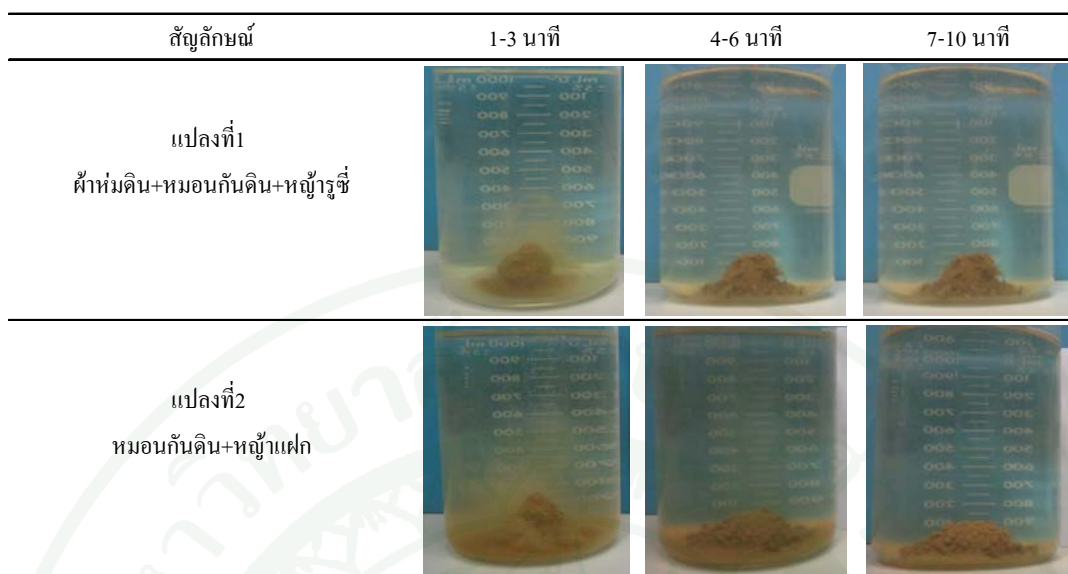


ภาพที่ 77 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเชื่อมแน่นรวมกับการเปลี่ยนแปลงแรงดูดของน้ำในดิน

สำหรับงานวิจัยในส่วนที่ 2 มีคุณสมบัติด้านการกัดเซาะดังนี้

Crumb Test

จากการทดสอบ Crumb test (Emerson, 1967 ทำการปรับปรุงโดย Sherard et. al., 1977) ทั้ง 2 แปลงทดสอบแสดงดังภาพที่ 78 ก่อนดินแปลงที่ 1 ทลายตัวลงเพียงบางส่วนแต่แปลงที่ 2 จะทลายตัวหมดในเวลา 1-3 นาที เนื่องจากดินแปลงที่ 1 มีแรงเชื่อมแน่นประสิทธิผล (c') ซึ่งอาจเกิดจากอินทรีย์สารดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ส่วนดินแปลงที่ 2 ไม่มีแรงเชื่อมแน่นประสิทธิผล (c') แสดงดังตารางที่ 13 และสีของน้ำของทั้ง 2 แปลงทดสอบพบว่าไม่มีความขุ่นจึงสามารถจัดระดับการกระจายตัวอยู่ในระดับที่ 1 ไม่มีปฏิกิริยา (Non-Dispersive)



ภาพที่ 78 ผลการทดสอบ Crumb test ของดินแปลงที่1 และ 2 ในช่วงเวลาต่างๆ

Pinhole Test

ในการทดสอบ Pinhole test (Sherard *et al.*, 1976) ของดินทั้ง 2 แปลงทดสอบจะทำการทดสอบโดยควบคุมความหนาแน่นแห้งให้มีค่าคงที่แต่ทำการเปลี่ยนแปลงระดับความอิ่มตัวของน้ำ (Sr) ที่ 25, 50 และ 75% ซึ่งแปลงที่1 มีความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1.83 t/m^3 และแปลงที่2 มีความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1.945 t/m^3 ผลจากการทดสอบทุกระดับความอิ่มตัวของน้ำของทั้ง 2 แปลงทดสอบ พบว่าสีของน้ำไม่มีความขุ่นและไม่มีเม็ดดินหลุดปนมากับน้ำในทุกระดับของน้ำ (Head) ภาพที่ 79 แสดงลักษณะของตัวอย่างหลังทำการทดสอบเสร็จสิ้นที่ระดับความอิ่มตัวของน้ำ (Sr) ต่างๆกัน ที่ระดับความอิ่มตัวของน้ำ (Sr) 25% น้ำจะพัดพาเม็ดดินไปอุดตันตรง nipple และรูที่เจาะแต่น้ำยังคงไหลอยู่แม้จะทำการเปลี่ยนแปลงระดับของน้ำ (Head) เป็นเพราะน้ำจะไม่ไหลผ่านเฉพาะรูที่เจาะแต่จะไหลหน้าตัดของตัวอย่างดินแทน ส่วนที่ระดับความอิ่มตัวของน้ำ (Sr) 50% รูที่เจาะยังคงมีขนาดเท่าเดิมแต่ตรงบริเวณ nipple ของแปลงที่1 เริ่มมีดินมาอุดตันเป็นบางส่วนแต่แปลงที่2 ดินถูกน้ำพัดพาอุดตัน สุดท้ายที่ระดับความอิ่มตัวของน้ำ (Sr) 75% พบว่าไม่มีการอุดตันของเม็ดดินอีกทั้งตรง nipple และรูที่เจาะมีขนาดเท่าเดิม จากการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าดินแปลงทดสอบที่1 และ 2 อยู่ในระดับ ND1 และเนื่องจากดินมีแรงเชื่อมแน่นประสิทธิผล (c') น้อย (สังเกตจากการทลายตัวในการทดสอบ Pinhole test) การที่ดินจะถูกแรงที่เกิดจากการไหลของน้ำ (Drag force) กระทำกับอนุภาคเม็ดดินทำให้เม็ดดินถูกพัดพาเกิดขึ้นได้ง่ายอยู่แล้วซึ่งเมื่อพิจารณาแรงเชื่อมแน่นที่เกิดขึ้นจากน้ำ (c'') ที่เป็นตัวช่วยในการต้านทานแรงดังกล่าว ที่ระดับความอิ่มตัวของน้ำ (Sr)

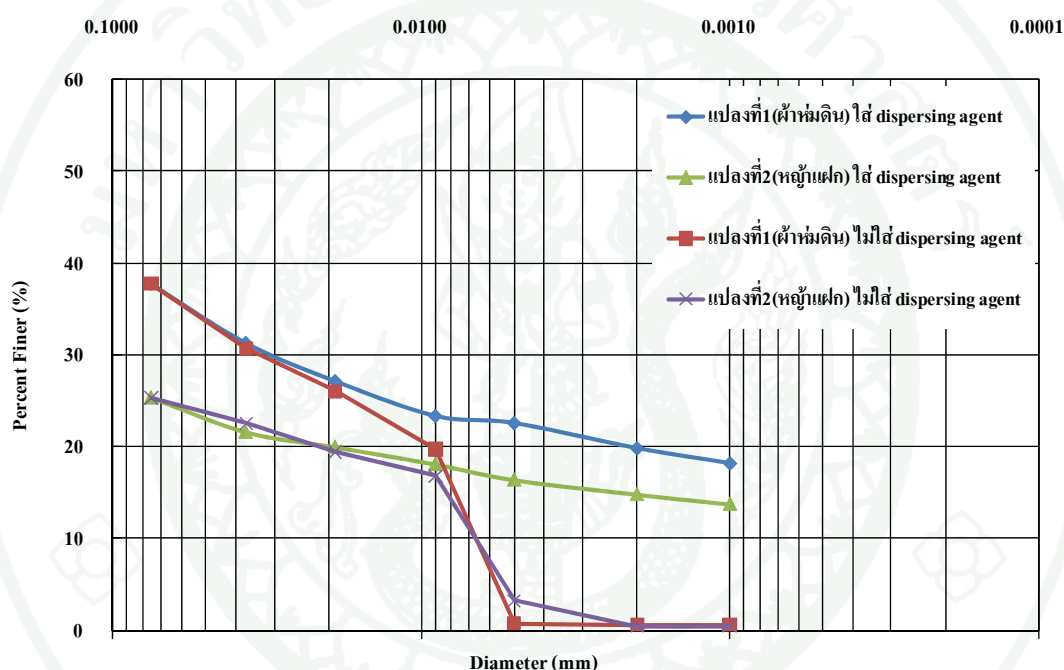
ต่ำๆ ปริมาณน้ำเข้าไปจับตัวกับเม็ดดินได้น้อยทำให้แรงเชื่อมแน่นที่เกิดขึ้นจากน้ำ (c') มีค่าน้อยตามไปด้วย เมื่อรวมแรงเชื่อมแน่นประสิทธิผล (c') และ แรงเชื่อมแน่นที่เกิดขึ้นจากน้ำ (c') ก็ยังมีค่าน้อยกว่าแรงที่เกิดจากการไหลของน้ำ (Drag force) เป็นผลทำให้เม็ดดินถูกพัดพาไปหรือเกิดการกัดเซาะเหมือนเดิม แต่เมื่อพิจารณาในกรณีที่ระดับความอิ่มตัวของน้ำ (S_r) สูงๆ การพัดพาเม็ดดินจะน้อยกว่าดินที่มีระดับความอิ่มตัวของน้ำ (S_r) ต่ำๆ แต่ผลจากการที่ดินมีปริมาณน้ำในมวลดินมากจะทำให้กำลังของดินลดลงอีกทั้งแรงเชื่อมแน่นที่เกิดขึ้นจากน้ำ (c') ก็ยังมีน้อยตามไปด้วย ซึ่งการพัดพาเม็ดดินอาจเปลี่ยนระดับความรุนแรงเพิ่มขึ้นในลักษณะดินไหลตัวแทน ซึ่งการลดอัตราการเกิดการกัดเซาะจึงจำเป็นต้องมีปริมาณน้ำในมวลดินที่เหมาะสมหรืออาจทำการป้องกันหน้าดินด้วยวิธีต่างๆ ควบคู่กันไปดังได้อธิบายไว้โดย อัครพัฒน์ และ คณะ (2552)



ภาพที่ 79 ลักษณะของตัวอย่างหลังจากทดสอบ Pinhole Test เสร็จของดินแปลงที่ 1 และ 2 ที่ระดับความอิ่มตัวของน้ำ (S_r) ต่างๆ

การทดสอบ Double hydrometer test

จากการทดสอบ Double hydrometer test ในหลอดทดสอบที่ไม่ได้ใส่สาร Dispersing agent พบว่าดินแปลงทดสอบที่ 1 มีการตกตะกอนเร็วกว่าแปลงที่ 2 และสามารถแสดงผลการทดสอบ ดังภาพที่ 80 ซึ่งจากการทดสอบสามารถหาเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของดินแปลงที่ 1 และ 2 โดยมีค่าเท่ากับ 3.38 และ 19.48% ตามลำดับ และสามารถจำแนกระดับการกระจายตัวของดินทั้ง 2 แปลง ทดสอบได้ว่าเป็นดินที่ไม่มีปัญหาการกระจายตัวของเม็ดดิน



ภาพที่ 80 แสดงการกระจายตัวของเม็ดดินทั้ง 2 แปลงทดสอบจากการทดสอบ Double hydrometer test

การทดสอบในสนาม

สำหรับงานวิจัยในส่วนที่ 2 จะเพิ่มการทดสอบในสนามเข้ามาโดยมีการทดสอบต่างๆดังนี้

Kunzelstab Penetration Test

ตำแหน่งที่ทำการทดสอบเป็นบริเวณด้านบนของแปลงทดสอบ ซึ่งทดสอบตกโดยนำหัวเจาะรูปกรวยวางตรงตำแหน่งที่ต้องการทดสอบแล้วยกค้อนหนัก 10 กก. ระยะยก 50 ซม. และนับจำนวนครั้ง (N) ของการตกทุกความลึก 20 ซม. จนกระทั่งถึงความยาวของก้านค้อนหรือตกให้ได้ 75 ครั้ง/20 ซม. จึงถอนชุดทดสอบออกไปจุดอื่นต่อไป ภาพที่ 81 แสดงการทดสอบ Kunzelstab penetration test



ภาพที่ 81 แสดงการทดสอบ Kunzelstab penetration test

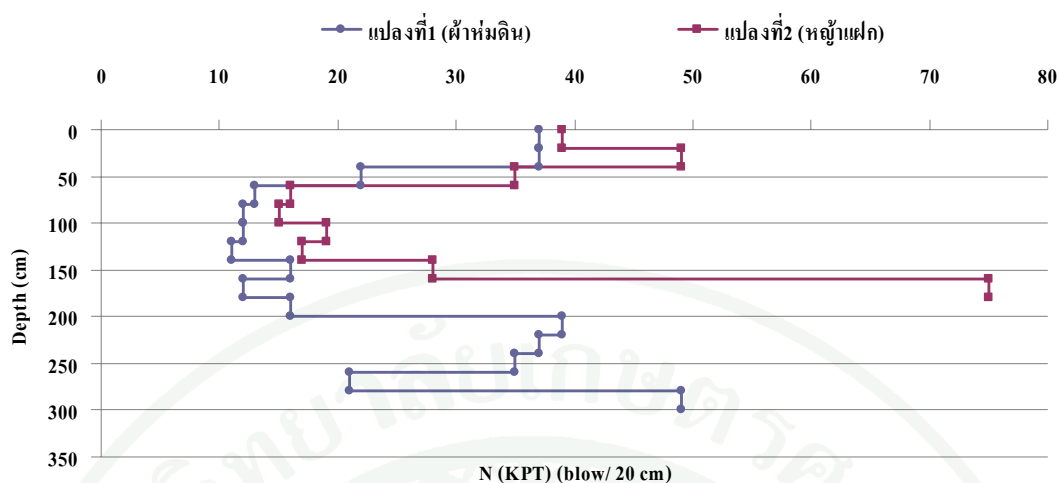
ในการตก Kunzelstab penetration test นั้นสามารถเทียบกับค่า Standard penetration test ได้ตามการวิเคราะห์ของ EGAT. (1980) ทั้งนี้สูตรที่ทำการปรับแก้เป็นเพียง Empirical นำมาคำนวณเพื่อแสดงให้เห็นตัวอย่างเฉยๆซึ่งไม่ได้มีการนำไปใช้งานแต่อย่างใด ทำการเทียบได้โดยนำค่า N, (SPT) ไปปรับแก้ เพื่อแปลงเป็นมอดูลีเซียนทานภายใน (ϕ) ได้จากกราฟของ Peck et al. (1973) ผลจากการทดสอบ Kunzelstab penetration test และผลจากการแปลงค่ามอดูลีเซียนทานภายใน (ϕ) ที่ความลึกต่างๆ ตามตารางที่ 14 และ 15 อีกทั้งยังสามารถแบ่งชั้นดินตามกลุ่มค่า N' ที่มีจำนวนครั้งใกล้เคียงกันและสรุปมอดูลีเซียนทานภายในเฉลี่ย (ϕ) ของทั้ง 2 แปลง จากการแปลงค่า ของดินแต่ละชั้นพบว่ามีการแปลงที่ 2 มีมอดูลีเซียนทานภายในเฉลี่ย (ϕ) มากกว่าแปลงที่ 1

ตารางที่ 14 แสดงผลการทดสอบ Kunzelstab penetration test ของแปลงที่1 (ฟ้าห่มดิน)

Depth (cm)	N (KPT)	N (SPT)	N'	ϕ	Soil Layer	ϕ average
0-20	37	20.5	17.7	32.6	Layer1	32.1
20-40	37	20.5	17.7	32.6		
40-60	22	12.4	12.4	30.9		
60-80	13	7.5	7.5	29.3		
80-100	12	7.0	7.0	29.1	Layer2	29.8
100-120	12	7.0	7.0	29.1		
120-140	11	6.4	6.4	28.9		
140-160	16	9.1	9.1	29.9		
160-180	12	7.0	7.0	29.1	Layer3	32.5
180-200	16	9.1	9.1	29.9		
200-220	39	21.5	18.3	32.8		
220-240	37	20.5	17.7	32.6		
240-260	35	19.4	17.2	32.5		
260-280	21	11.8	11.8	30.8		
280-300	49	26.9	21.0	33.6		

ตารางที่ 15 แสดงผลการทดสอบ Kunzelstab penetration test ของแปลงที่2 (หญ้าแฝก)

Depth (cm)	N (KPT)	N (SPT)	N'	ϕ	Soil Layer	ϕ average
0-20	37	20.5	17.7	32.6	Layer1	33
20-40	37	20.5	17.7	32.6		
40-60	22	12.4	12.4	30.9		
60-80	13	7.5	7.5	29.3	Layer2	30.4
80-100	12	7.0	7.0	29.1		
100-120	12	7.0	7.0	29.1		
120-140	11	6.4	6.4	28.9		
140-160	16	9.1	9.1	29.9	Layer3	35.7
160-180	12	7.0	7.0	29.1		



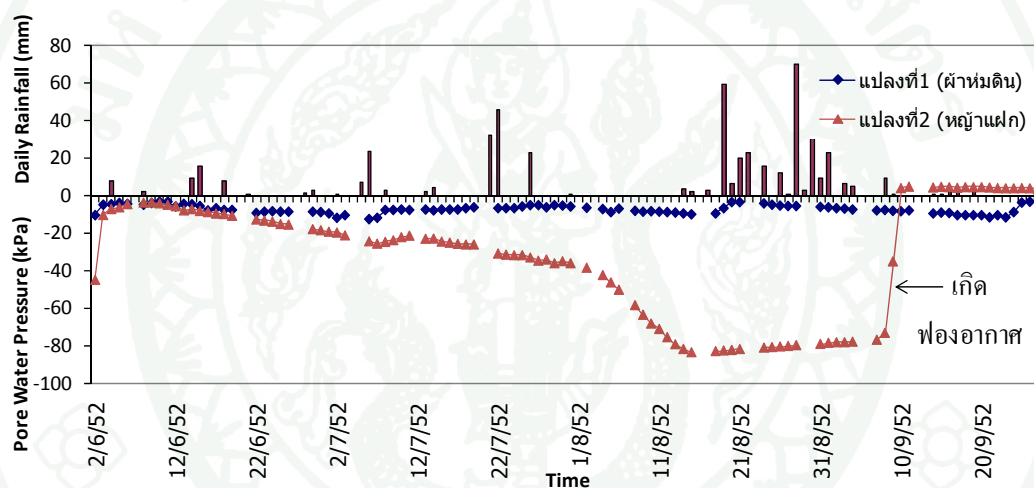
ภาพที่ 82 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง N (KPT) กับความลึกต่างๆ

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า N (จำนวนครั้ง) จากการตอก Kunzelstab penetration test ของ ทั้ง 2 แปลงที่ความลึกต่างๆ ได้ดังภาพที่ 82 ผลจากการเปรียบเทียบบ่งบอกว่าดินแปลงที่ 2 มีความแน่นกว่าแปลงที่ 1 อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบมุมเสียดทานภายใน (ϕ) ที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนตรงในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำที่อัตราการเฉือน 0.5 มม./นาทีกั้นที่ได้จากการแปลงผลจากการทดสอบ Kunzelstab penetration test พบว่า ที่ได้จากการแปลงผลการทดสอบ Kunzelstab penetration test มีค่ามากกว่าเล็กน้อยซึ่งอาจเป็นผลมาจากดินมีสภาพที่แห้งมากเนื่องจากอยู่ในช่วงที่ฝนทิ้งช่วงเป็นเวลานานทำให้ค่า N มากกว่าปกติส่งผลทำให้มุมเสียดทานภายใน (ϕ) ที่ได้จากการแปลงมีค่ามากตามไปด้วย

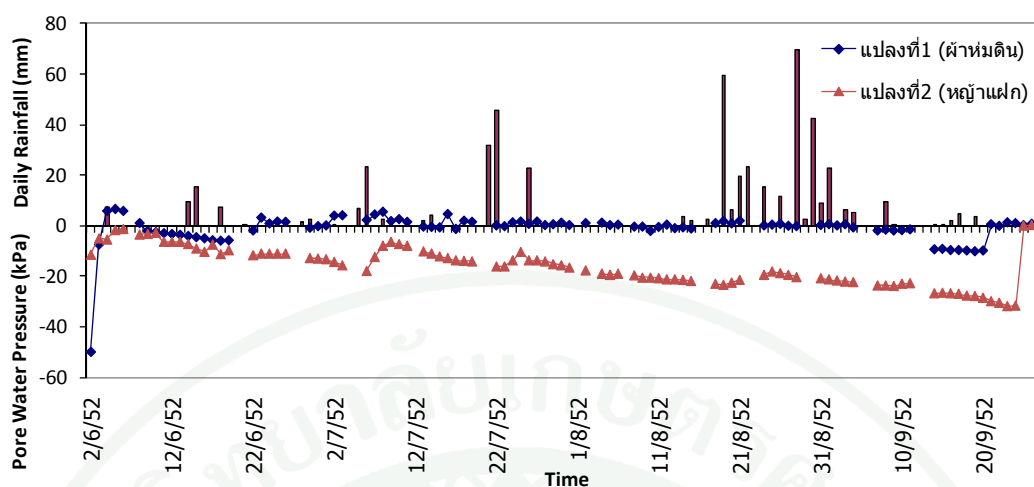
การตรวจวัดแรงดันน้ำในสนาม

แรงดันน้ำในดินในสนามได้ตรวจวัดโดย KU-Tensiometer ซึ่งทำการติดตั้งบริเวณด้านบนกับกลางของลาดคันทาง ซึ่งผลจากการตรวจวัดสามารถแสดงดังภาพที่ 83 และ 84 จากการตรวจวัดแรงดันน้ำในสนามแปลงที่ 1 มีแรงดันน้ำในดินด้านลบมีค่าประมาณ -10 ถึง 0 kPa. แปลงที่ 2 มีแรงดันน้ำในดินด้านลบ -80 ถึง 0 kPa. เนื่องจากแปลงที่ 1 ประกอบด้วยผ้าห่มดิน, หมอนกั้นดิน และหญ้าซึ่งซึ่งคลุมดินและช่วยป้องกันการสูญเสียความชื้นได้ดีกว่าแปลงที่ 2 ที่มีเพียงหญ้าแฝกกับหมอนกั้นดิน เป็นผลทำให้แปลงที่ 1 พืชเจริญเติบโตได้ดีกว่าแปลงที่ 2 และการที่ดินรักษาความชื้นได้จะมีผลดีต่อการป้องกันการกัดเซาะซึ่งอ้างอิงตามผลการทดสอบของ Wan and Fell (2004) เป็นการทดสอบบดอัดดินหลากหลายชนิดพบว่าดินที่บดอัดในด้านแห้งกว่าจุดเหมาะสม (Dry of

optimum) มีโอกาสเกิดการกัดเซาะมากกว่าด้านเปียก (Wet of optimum) การที่ดินมีความชื้นในระดับที่เหมาะสมจะทำให้หน้าไม่พัดพาเมื่อดินจนลาดเกิดความชันอันเป็นสาเหตุทำให้ลาดเสียเสถียรภาพ แต่ลาดดินที่ติดตั้งผ้าห่มดินจะต้องคำนึงถึงเสถียรภาพของลาดดินด้วยเช่นกันในกรณีที่ฝนตกผ้าห่มดินจะเก็บความชื้นได้ดี แต่เมื่อฝนหยุดตกการระเหยของน้ำอาจจะเกิดขึ้นได้ช้าหรือน้ำผิวดิน (Runoff) อาจจะไหลออกจากลาดได้ช้าเนื่องจากมีผ้าห่มดินเป็นตัวลดความเร็วจากการไหลของน้ำ ทำให้น้ำซึมลงสู่ดินมากขึ้นเป็นผลให้ทำให้เกิดการสะสมแรงดันน้ำ ซึ่งถ้าฝนมีช่วงเวลาของการตกห่างกันไม่มาก แรงดันน้ำในดินจะเพิ่มขึ้นกว่าเดิมจนดินเสียกำลังจนเกิดการไถลตัวในเวลาต่อมาได้ ทั้งนี้ข้อสมมุติฐานดังกล่าวจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมโดยการตรวจสอบในสนามเพื่อให้เกิดความเข้าใจมากขึ้น

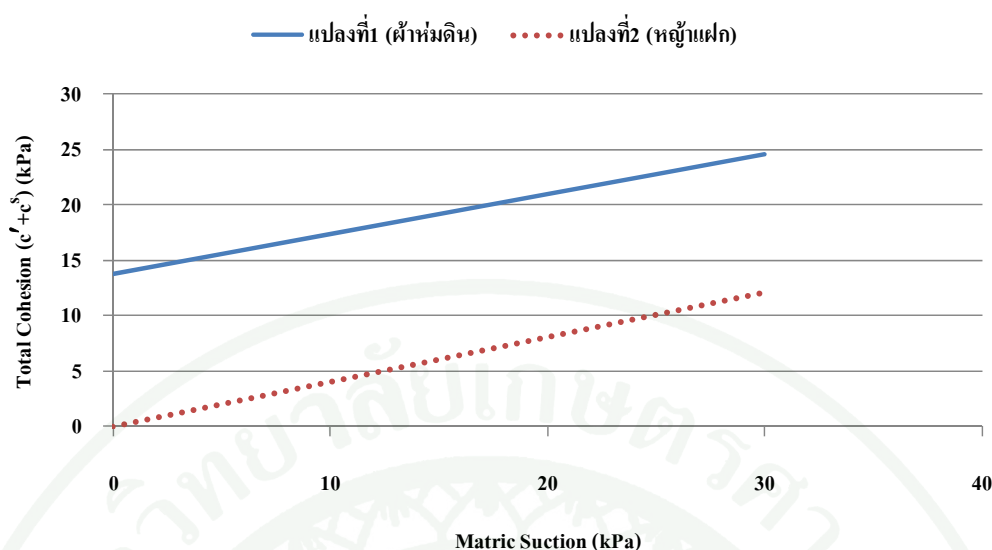


ภาพที่ 83 กราฟแรงดันน้ำในดิน, ปริมาณน้ำฝนกับเวลาของแปลงทดสอบที่ 1 และ 2 ด้านบนของแปลงทดสอบ



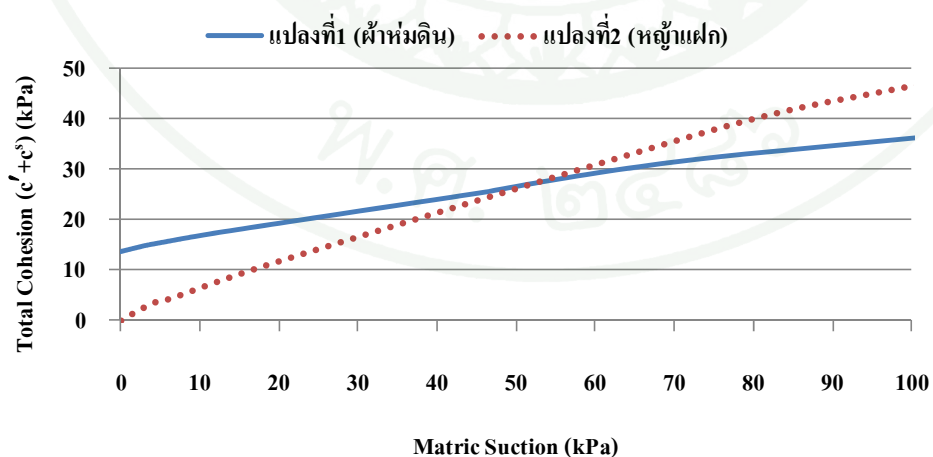
ภาพที่ 84 กราฟแรงดันน้ำในดิน, ปริมาณน้ำฝนกับเวลาของแปลงทดสอบที่ 1 และ 2 ตรงกลางของแปลงทดสอบ

การที่แปลงทดสอบมีความชื้นที่เหมาะสมและผลจากการที่อนุภาคเม็ดดินเปลี่ยนไปเมื่อรากพืชเจริญเติบโตนับว่าเป็นส่วนสำคัญในการป้องกันการกัดเซาะ เนื่องจากในสถานะที่ดินมีความชื้นที่เหมาะสมและเนื้อดินที่มีความละเอียดเพียงพอ น้ำจะก่อให้เกิดแรงเชื่อมแน่นกับเม็ดดินเนื่องจากสถานะแรงดูด (c^s หรือ $(u_a - u_w) \tan \phi^b$) ซึ่งเป็นตัวช่วยเพิ่มแรงเชื่อมแน่นให้กับเม็ดดินทำให้แรงเชื่อมแน่นรวม ($c' + c^s$) เพิ่มขึ้นและเมื่อทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงเชื่อมแน่นรวม ($c' + c^s$) กับการเปลี่ยนแปลงแรงดูดของน้ำในดิน 0 ถึง 30 kPa. แสดงได้ดังภาพที่ 85 พบว่าดินแปลงที่ 1 มีค่าแรงเชื่อมแน่นรวม ($c' + c^s$) มากกว่าแปลงที่ 2 ซึ่งเมื่อพิจารณาการกัดเซาะที่ผิวดินแปลงที่ 1 ย่อมมีแรงต้านทานต่อแรงดึงที่เกิดจากการไหลของน้ำ (Drag force) ได้ดีกว่าแปลงที่ 2

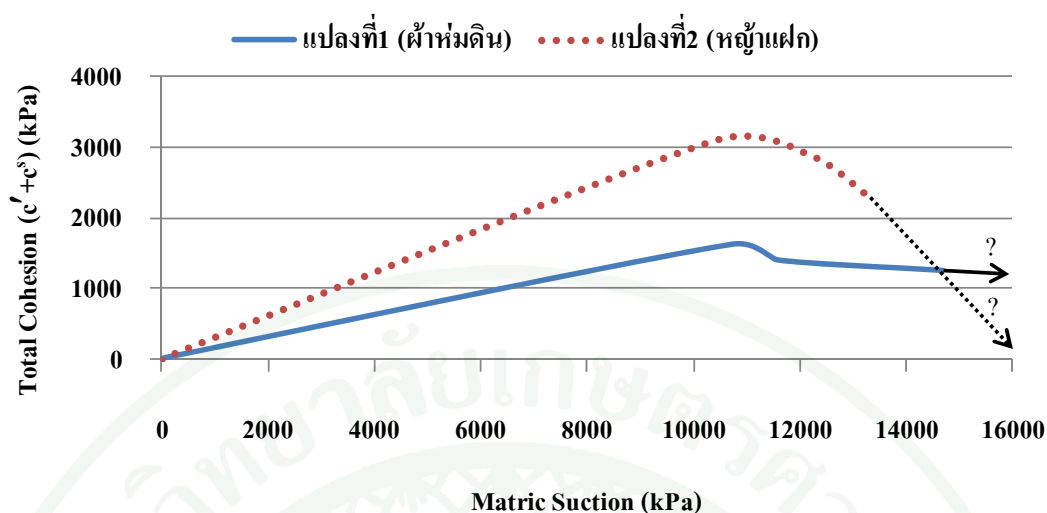


ภาพที่ 85 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเชื่อมแน่นรวมกับการเปลี่ยนแปลงแรงดูดของน้ำในดิน

เมื่อทำการพิจารณาสถานะที่แรงดูดน้ำในดินมีค่ามากอาจเปลี่ยนสูตร c^s ที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำในดินมาใช้แทน เช่น $c^s = \chi(u_a - u_w) \tan \phi'$ เป็นต้น ซึ่งสาเหตุที่ต้องทำการเปลี่ยนแปลงสูตรการวิเคราะห์ได้อธิบายไว้ในงานวิจัยส่วนที่ 1 หัวข้อการทดสอบคุณสมบัติด้านการกัดเซาะ โดยผลจากการหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงเชื่อมแน่นรวมกับการเปลี่ยนแปลงแรงดูดของน้ำในดินแสดงดังภาพที่ 86 และ 87



ภาพที่ 86 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเชื่อมแน่นรวมกับการเปลี่ยนแปลงแรงดูดของน้ำในดินช่วง 0 ถึง 100 kPa



ภาพที่ 87 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเชื่อมแน่นรวมกับการเปลี่ยนแปลงแรงดูดของน้ำในดินช่วง 0 ถึง 14700 kPa

จากภาพที่ 86 และ 87 ช่วงแรงดูดน้ำในดิน 50 kPa. ดินแปลงที่1 เกิดการกัดเซาะได้น้อยกว่า เนื่องจากมีแรงเชื่อมแน่นรวม ($c' + c$) มากกว่าแปลงที่2 แต่เมื่อแรงดูดน้ำในดินมากกว่า 50 kPa. จนถึง 11000 kPa. แปลงที่2 กลับมีการกัดเซาะที่น้อยกว่า จากนั้นที่ช่วงแรงดูดน้ำในดินมีค่ามาก เมื่อแรงดูดน้ำในดินมีค่ามากกว่า 11000 kPa. ดินแปลงที่2 แรงเชื่อมแน่นรวม ($c' + c$) มีแนวโน้มลดลงและมีโอกาสที่จะเกิดการกัดเซาะมากกว่าแปลงที่1 อีกทั้งแรงเชื่อมแน่นรวมอาจมีค่าลดลงตามทิศทางของลูกศร ซึ่งจะสามารถอธิบายได้ว่าดินแปลงที่1 ซึ่งมีอนุภาคของดินมีละเอียดมากกว่าแปลงที่2 ทำให้เม็ดดินเก็บความชื้นและรักษาแรงดูดได้ดีกว่าดินแปลงที่2 เป็นผลทำให้แรงเชื่อมแน่นรวม ($c' + c$) มีแนวโน้มที่ลดลงน้อยกว่าเป็นผลทำให้ที่ช่วงแรงดูดน้ำในดินสูงๆ หรือที่ระดับความชื้นในดินมีค่าน้อยการกัดเซาะของดินแปลงที่2 มีโอกาสที่จะเกิดการกัดเซาะได้มากกว่าแปลงที่1

เมื่อทำการตรวจสอบการกัดเซาะที่เกิดขึ้นจริงในสนามซึ่งเป็นช่วงฤดูแล้งหรือฝนทิ้งช่วงเป็นเวลานาน (ในสถานะนี้ดินจะมีปริมาณความชื้นน้อยหรือมีแรงดูดน้ำในดินที่มีค่ามาก) พบว่าแปลงที่1 มีการกัดเซาะน้อยกว่าแปลงที่2 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ระหว่างแรงเชื่อมแน่นรวมกับการเปลี่ยนแปลงแรงดูดของน้ำในดินตามความสัมพันธ์จากภาพที่ 87 ซึ่งในสภาพจริงในสนามแรงเชื่อมแน่นรวมของดินอาจเป็นไปตามทิศทางของลูกศรจึงทำให้แปลงที่1 มีการกัดเซาะน้อยกว่าแปลงที่2 อีกทั้งดินแปลงที่1 มีผ้าห่มดินปกคลุมซึ่งช่วยลดแรงกระทำจากฝนที่ตกกระทบ

อนุภาคเม็ดดินได้ดีกว่าแปลงที่ 2 ที่มีหมอนกันดิน ทำให้อนุภาคเม็ดดินไม่ฟุ้งกระจายไปในอากาศ และแปลงที่ 1 ฝ้าห่มดินเก็บความชื้นได้ดีกว่าแปลงที่ 2 ทำให้ได้พืชเจริญเติบโตได้ดีกว่า ในช่วงเวลาที่น้ำฝนเปลี่ยนแปลงมาเป็นน้ำผิวดิน (Runoff) ในสภาวะนี้จะมีแรงดึงที่เกิดจากการไหลของน้ำ (Drag force) กระทำกับอนุภาคเม็ดดิน แปลงที่ 1 มีฝ้าห่มดิน, หมอนกันดินและหญ้ารูชี ช่วยลดพลังงานของแรงดึงที่เกิดจากการไหลของน้ำ (Drag force) ทำให้แรงดึงดังกล่าวไม่สามารถเอาชนะแรงต้านทานของเม็ดดิน (แรงเชื่อมแน่น, แรงเสียดทานระหว่างเม็ดดิน) เป็นผลทำให้ไม่เกิดการกัดเซาะ ส่วนแปลงที่ 2 มีหมอนกันดินและหญ้าแฝก ช่วยลดแรงดึงที่เกิดจากการไหลของน้ำ (Drag force) ได้ในระดับหนึ่งแต่ตรงบริเวณที่ไม่มีหญ้าแฝกปกคลุมบริเวณนี้จะเกิดร่องของการกัดเซาะขึ้น สามารถแสดงผลจากการกัดเซาะที่เกิดขึ้นจริงในสนามของทั้ง 2 แปลงได้ดังภาพที่ 88



ภาพที่ 88 การเปรียบเทียบการกัดเซาะที่เกิดขึ้นจริงในสนามของทั้ง 2 แปลงทดสอบ วันที่ 7 มีนาคม 2553 ภายหลังการติดตั้งฝ้าห่มดินและหมอนกันดินร่วมกับการปลูกพืช

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยในส่วนที่ 1 สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. การทดสอบบดอัดที่อัตราส่วนผสมเคโอลินต่างๆพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเคโอลินจะทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคของเคโอลินไปแทรกตามช่องว่างของดินทรายแข็งจึงทำให้ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณเคโอลินเพิ่มขึ้นในปริมาณที่มากเกินไป 15 % โดยน้ำหนัก จะทำให้ความหนาแน่นแห้งเริ่มลดลง เนื่องจากปริมาณแร่ดินเหนียวที่เพิ่มขึ้นนั้นจะดูดซับน้ำไว้กับตัวได้มากทำให้ดินเกิดการบวมตัวมากขึ้นกว่าเดิมซึ่งน้ำจะเข้ามาแทนที่เม็ดดินที่เคยอยู่ชิดกันและน้ำจะเข้าไปแทรกตามช่องว่างของเม็ดดินเป็นผลทำให้หน่วยน้ำหนักของดินลดลง อีกทั้งปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (%Optimum water content) จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเคโอลินที่เพิ่มขึ้น

2. ผลจากการที่เพิ่มปริมาณเคโอลินให้กับดินทรายแข็งพบว่า กำลังรับแรงเฉือนในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนผสม 0-10% โดยน้ำหนัก และเมื่อทำการเพิ่มเคโอลินในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดมีค่าลดลง อีกทั้งเมื่อเพิ่มปริมาณเคโอลินจะทำให้แรงเชื่อมแน่นประสิทธิผลเพิ่มขึ้นตามปริมาณเคโอลินที่ผสมที่หน่วยแรงกดในแนวดิ่งในช่วง 15.5 ถึง 124 kPa. และมุมเสียดทานภายในประสิทธิผลจะมีค่าสูงสุดที่ส่วนผสมเคโอลิน 10% โดยน้ำหนัก แล้วจึงมีค่าลดลงตามปริมาณเคโอลินที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณเคโอลินที่ 10% โดยน้ำหนัก จะเข้าไปแทรกตามช่องว่างในปริมาณที่เหมาะสมที่ทำให้แรงเชื่อมแน่นประสิทธิผลและมุมเสียดทานภายในประสิทธิผลเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเคโอลินมากกว่า 10% โดยน้ำหนัก ดินเหนียวที่เข้าไปแทรกตามช่องว่างในปริมาณที่มากขึ้นนี้จะส่งผลทำให้แรงเสียดทานระหว่างเม็ดดินลดลงจึงเป็นผลทำให้มุมเสียดทานภายในประสิทธิผลมีค่าลดลงแต่ในทางกลับกันแรงเชื่อมแน่นประสิทธิผลจะมีค่าเพิ่มขึ้น

3. จากการทดสอบหาเส้นโค้งอุ้มน้ำพบว่า เส้นโค้งอุ้มน้ำของดินทั้ง 4 อัตราส่วนผสม มีลักษณะที่คล้ายกัน แต่ดินที่มีอัตราส่วนผสมเคโอลินมากจะมีค่าแรงคูดน้ำในดินมากกว่าดินที่มีอัตราส่วนผสมเคโอลินน้อย ซึ่งเคโอลินที่ผสมไปนี้จะดูดซับน้ำไว้กับตัวและจะเป็นตัวช่วยเพิ่มแรงคูดน้ำในดิน

4. ผลจากการที่เพิ่มปริมาณเคโอลินให้กับดินทรายแป้งพบว่า กำลังรับแรงเฉือนในสถานะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนผสม 0-10% โดยน้ำหนัก ในช่วงแรงคูดของน้ำในดิน 0 ถึง 45 kPa. และเส้น Envelope (Wetting) มีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง (Non linear) ทั้ง 4 อัตราส่วนผสม และมุมของแรงเฉือนเนื่องจากแรงคูดของน้ำ (ϕ^b) มีค่าใกล้เคียงกับมุมเสียดทานภายในประสิทธิผล (ϕ') ในช่วงแรงคูดของน้ำในดิน 0 ถึง 32 kPa.

5. จากการที่เพิ่มปริมาณแร่ดินเหนียวเคโอลินให้กับดินทรายแป้งในปริมาณที่มาก (ที่อัตราส่วนผสมเคโอลิน 20% โดยน้ำหนัก) จะช่วยทำให้ดินมีโอกาสเกิดการกัดเซาะได้น้อยลง แต่เมื่อพิจารณาถึงเสถียรภาพของลาดดินที่ผสมเคโอลินในปริมาณที่มากอัตราส่วนความปลอดภัย จะมีแนวโน้มลดลง ซึ่งพบว่าที่อัตราส่วนผสมเคโอลิน 10% โดยน้ำหนักมีอัตราส่วนความปลอดภัยสูงสุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสมอื่นๆ ในช่วงแรงคูดมากกว่า 4 kPa. ขึ้นไป แต่เมื่อแรงคูดมีค่าลดลงต่ำกว่า 4 kPa. และเข้าสู่สถานะอิ่มตัวด้วยน้ำค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่อัตราส่วนผสมเคโอลิน 20 % โดยน้ำหนักจะมีค่าสูงสุด

สำหรับงานวิจัยในส่วนที่ 2 สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. การที่เม็ดดินมีขนาดอนุภาคเล็กลงอาจเป็นผลมาจากแปลงที่ 2 (หญ้าแฝก) มีช่วงที่ไม่มีสิ่งใดปกคลุมลาดดินอยู่เมื่อมีน้ำไหลผ่านอนุภาคของดินเม็ดละเอียดจะถูกพัดพาไปกับน้ำได้ง่ายกว่าแปลงที่ 1 (ผ้าห่มดิน) ทำให้เมื่อทำการหาการกระจายตัวของเม็ดดิน แปลงที่ 1 (ผ้าห่มดิน) จึงมีขนาดอนุภาคเม็ดดินที่เล็กกว่าแปลงที่ 2 (หญ้าแฝก) และยังอาจเป็นผลมาจากรากของหญ้ารัฐชี้ที่เจริญเติบโตได้ดีกว่าหญ้าแฝกทำให้รากแทรกไปในดินจนมีความร่วมหรือละเอียดกว่าในขณะที่รากของหญ้าแฝกยังไม่เจริญเติบโตเต็มที่การแทรกตัวของรากจึงยังมีไม่มากนักดินจึงมีขนาดเม็ดใหญ่กว่าแปลงที่ 1 (ผ้าห่มดิน)

2. จากการที่อนุภาคเม็ดดินมีขนาดลดลงนั้นทำให้ดินมีความอุ้มน้ำมากขึ้น ซึ่งถ้าดินมีความชื้นที่เหมาะสมและเนื้อดินที่มีความละเอียดเพียงพอ น้ำจะก่อให้เกิดแรงเชื่อมแน่นในกับเม็ดดินเนื่องจากสถานะแรงดูด (c^s หรือ $(u_a - u_w) \tan \phi^b$) ซึ่งเป็นตัวช่วยเพิ่มแรงเชื่อมแน่นให้กับเม็ดดิน ทำให้แรงเชื่อมแน่นรวม ($c' + c^s$) เพิ่มขึ้น อีกทั้งในสถานะที่ดินมีแรงดูดน้ำในดินมีค่ามากดินที่มีอนุภาคเม็ดละเอียดมากกว่าเม็ดดินจะเก็บความชื้นและรักษาแรงดูดได้ดีกว่าเป็นผลทำให้เกิดการกัดเซาะได้ลดลงเนื่องจากดินมีแรงต้านทานต่อแรงที่เกิดจากการไหลของน้ำที่กระทำกับอนุภาคเม็ดดิน (Drag force)

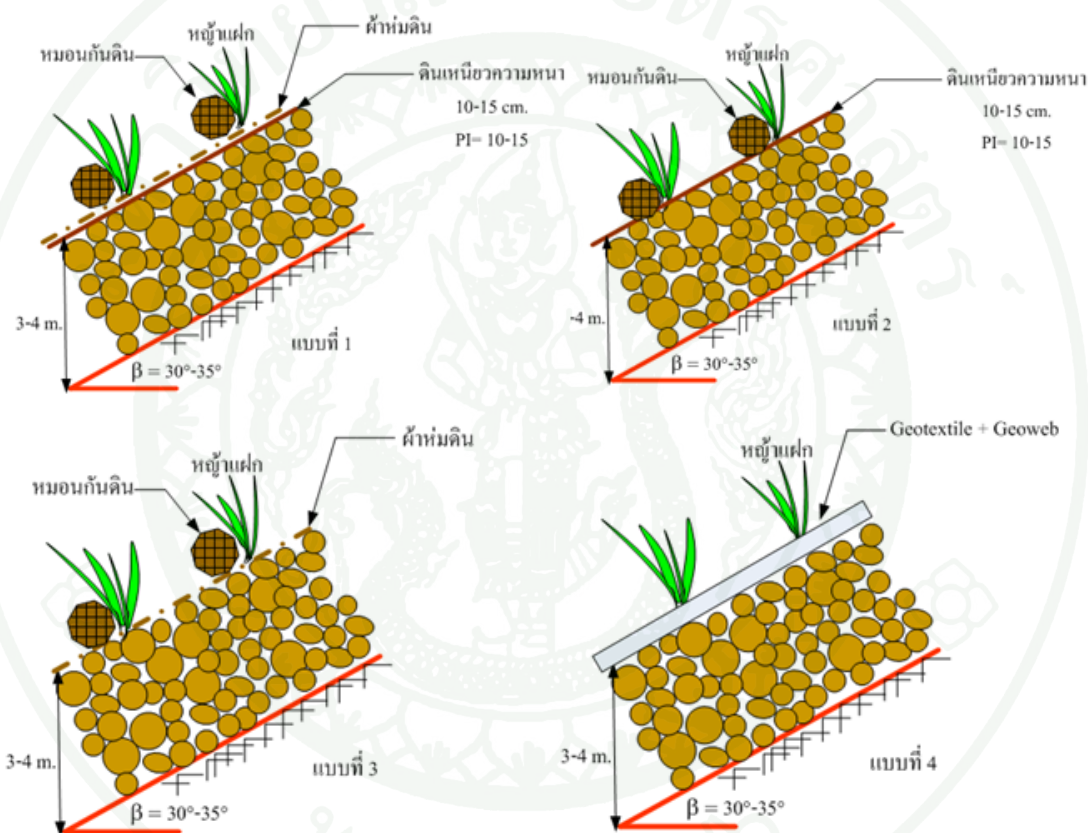
3. จากการที่อนุภาคเม็ดดินมีขนาดลดลงจะทำให้กำลังรับแรงเฉือนในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำของแปลงที่ 1 มีค่าน้อยกว่าแปลงที่ 2 ส่วนในสถานะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำประโยชน์จากการที่ดินมีขนาดลดลงนั้นจะก่อให้เกิดสถานะแรงดูดมากขึ้นเป็นผลทำให้ในสถานะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำกำลังรับแรงเฉือนแปลงที่ 1 มีค่ามากกว่าแปลงที่ 2

4. ส่วนผลจากการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินพบว่าแปลงที่ 1 มีอัตราส่วนความปลอดภัยมากกว่าแปลงที่ 2 ในช่วงแรงดันน้ำจาก -30 ถึง 10 kPa.

5. ความเป็นไปได้ในการเกิดการกัดเซาะของแปลงที่ 1 จะมีความเป็นไปได้ในการเกิดการกัดเซาะน้อยกว่าแปลงที่ 2 เนื่องจากเมื่อทำการติดตั้งผ้าห่มดินร่วมกับการปลูกพืชจะทำให้คุณสมบัติของดินเปลี่ยนไปเช่น ผลจากการปลูกพืชและใช้ผ้าห่มดินซึ่งเป็นวัสดุเส้นใยจากธรรมชาติ เมื่อพืชหรือผ้าห่มดินเกิดการเน่าสลายอาจเป็นตัวช่วยเพิ่มสารอินทรีย์ให้กับดินซึ่งทำให้แรงเชื่อมแน่นประสิทธิผล (c') เพิ่มขึ้น และจากผลสรุปในข้อ 3 ที่ได้กล่าวมาแล้ว เป็นต้น อีกทั้งจากการเปรียบเทียบการกัดเซาะที่เกิดขึ้นในสนามพบว่าแปลงที่ 1 เกิดการกัดเซาะน้อยกว่าแปลงที่ 2 เนื่องจากแปลงที่ 1 มีผ้าห่มดินช่วยลดแรงกระทำจากฝนที่ตกกระทบอนุภาคเม็ดดินได้ดีกว่าแปลงที่ 2 ทำให้อนุภาคเม็ดดินไม่ฟุ้งกระจายไปในอากาศ ในระยะเวลาต่อมาน้ำฝนจะเปลี่ยนแปลงมาเป็นน้ำผิวดิน (Runoff) ในสถานะนี้จะมีแรงดึงที่เกิดจากการไหลของน้ำกระทำกับอนุภาคเม็ดดิน (Drag force) แปลงที่ 1 มีผ้าห่มดิน, หมอนก้นดิน, หญ้าที่ช่วยในการลดพลังงานของแรงดึงที่เกิดจากการไหลของน้ำ (Drag force) ทำให้แรงดึงดังกล่าวไม่สามารถเอาชนะแรงต้านทานของเม็ดดิน (แรงเชื่อมแน่น, แรงเสียดทานระหว่างเม็ดดิน) เป็นผลทำให้ไม่เกิดการกัดเซาะ แปลงที่ 2 มีหมอนก้นดินและหญ้าแฝกซึ่งจะช่วยลดแรงดึงที่เกิดจากการไหลของน้ำ (Drag force) ได้ในระดับหนึ่ง แต่ตรงบริเวณที่ไม่มีหญ้าแฝกปกคลุมบริเวณนี้ก็จะเกิดร่องของการกัดเซาะขึ้น

ข้อเสนอแนะ

1. ทั้งนี้แผนการวิจัยในอนาคตจะมีการประยุกต์ความเข้าใจในพฤติกรรมการป้องกันการกัดเซาะโดยใช้ดินเหนียวและเส้นใยธรรมชาติร่วมกับการปลูกพืช ในเบื้องต้นได้มีการเสนอวิธีการป้องกันการกัดเซาะลาดดินทั้ง 4 แบบ ดังภาพที่ 89 ซึ่งเป็นแบบร่างคร่าวๆที่จะทำการทดสอบจริงในสนามต่อไป



ภาพที่ 89 รูปแบบในการป้องกันการกัดเซาะวิธีต่างๆ

2. ในการวิจัยทั้ง 2 ส่วน ควรมีการศึกษาในด้านการซึมผ่านของน้ำเพิ่มเติมเพื่อทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในสภาวะต่างๆให้มีความถูกต้องเพิ่มขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ดิถี แห่งเชาวนิช. 2000. การใช้หญ้าแฝกเพื่อเสริมเสถียรภาพเชิงลาดและควบคุมการชะล้างพังทลาย. เครือข่ายหญ้าแฝกประเทศไทย เอกสารทางวิชาการหมายเลข 2543/1

บริษัท ไพร้ม ซีเมนต์ จำกัด. 2007. ผลิตภัณฑ์เพื่อพิทักษ์หน้าดิน. ม.ป.ท.

พลยุทธ สุขสมิตติ. 2539. ดินขาวและดินเหนียวดำ. สำนักงานทรัพยากรธรณีเขต 3 เชียงใหม่. แหล่งที่มา: http://www.mne.eng.psu.ac.th/staff/lek_files/ceramic/u21-2.htm, 2 สิงหาคม 2553.

รัฐธรรม อิศโรพาร และ วรากร ไหมเรียง. 2545. การจำลองลักษณะของรากพืชเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน. การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8. 178-183.

วรากร ไหมเรียง. 2542. วิศวกรรมเขื่อนดิน. พิมพ์ครั้งที่ 2 สำนักพิมพ์รุ่งแสงการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

วรากร ไหมเรียง, นงลักษณ์ ไทยเจียมอารีย์ และ บรรพต กุลสุวรรณ. 2548. คุณสมบัติดินทางวิศวกรรมเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ลุ่มน้ำน้ำก้อ ต.น้ำก้อ อ.หล่มสัก จ.เพชรบูรณ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วราธร แก้วแสง. 2551. กำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวของดินขาวผสมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์. การประชุมวิชาการ “ธนบุรีวิจัย ครั้งที่ 1”.

สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์. 2548. วิศวกรรมปฐพี. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.

อัศคพัฒน์ สว่างสุริย์, อภินิติ โชติสังกาศ และ ชวลิต จงวัฒนา. 2552. แนวทางการป้องกันการกัดเซาะหน้าดินและควบคุมตะกอนดินของลาดคันทางโดยวัสดุเส้นใยธรรมชาติ. โยธาสาร ปีที่ 21 ฉบับที่ 6 พฤศจิกายน-ธันวาคม 2552.

- อิทธิสุนทร นันทกิจ. 2532. การใช้วัสดุดินเผาภายในประเทศไทยเพื่อประกอบเครื่องมือวัดความชื้นในดินแบบ **Tensiometer**. รายงานผลการวิจัยสาขาพืช การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 28. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- อภินิติ โชติสังกาศ. 2551. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการการศึกษาพฤติกรรมทางด้านกลศาสตร์ของดินไม้อิ่มน้ำในประเทศไทย.
- _____. และ วิชญพงศ์ พอลิละ. 2551. การพัฒนาเครื่องมือวัดศักย์แรงดูดน้ำในดิน. การประชุมทางวิชาการครั้งที่ 46 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, จัดโดย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, บางเขน, 29 มกราคม-1 กุมภาพันธ์ 2551, จำนวน 8 หน้า
- อรอนันต์ วุฒิเสน. 2551. กระสอบมีปีก ผ้าห่มดิน และหมอนกันดิน ผู้ช่วยพันธุ์ใหม่ป้องกันภัยพิบัติดินถล่ม. แหล่งที่มา: http://chaipat.or.th/chaipat/journal/August_2551/August2551_%5B07-067%5DP038-047.pdf, 15 สิงหาคม 2552.
- Aimin, Y., W. Hao and S. Ge. 2002. **Soil Erosion Characteristics and Control Measures in China**. International Soil Conservation Organization Conference 12th
- Agri-science Resources for High School Sciences. **Soil Erosion**. แหล่งที่มา: www.edu.pe.ca/agriculture/erosion.pdf, June 8, 2009.
- Atkinson, J. H., J. A. Charles and H. K. Mhach. 1990. Examination oh erosion resistance of clay in embankment dam. **Quarterly Journal of Engineering Geology** 23: 103-108.
- Bishop, A.W. 1959. **The Principle of effective stress**. Lecture delivered in Oslo, Norway, in 1955; published in Teknisk Ukeblad, vol. 106, no.39: 859-863.
- Brooks, R.H. and A.T. Corey. 1964. **Hydraulic properties of porous media: Hydrology Papers**. Pap. 3, Colo. State Univ., Fort Collins.

- Donald, H.G. and B.S. Robbin. 1996. **Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization A Practical Guide for Erosion Control.** John Wiley & Sons.
- EGAT. 1980. **Subsoils investigation for 230 KV. Banpong 2 – Srinagarins dam, Transmission line.** n.p.
- Emerson, W.W. 1967. A Classification of Soil Aggregates Based on Their Coherence in Water. **Australian Journal of Soil Research.** Vol. 5: 47-57.
- Fredlund, D.G. and N.R. Morgenstern. 1993. **Soil Mechanics for Unsaturated Soil.** John Wiley & Sons.
- Gan, J.K-M. and Fredlund, D.G. 1988. Multistage direct shear testing of unsaturated soil. **Geotechnical Testing Journal, ASTM.** 11: 132-138.
- Jeong, S., J. Kim and K. Lee. 2008. Effect of Clay Content on Well-Graded Sands due to Infiltration. **Journal of Engineering Geology** 102 (2008): 74-81.
- Jotisankasa, A. and W. Mairaing. 2010. Suction-monitored direct shear testing of residual soils from landslide-prone areas. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE.** 136 (3): 1-10.
- Kyu-Hyun, L., J. Sang-Seom and K. Tae-Hyung. 2007. Effect of Fines on the Stability of Unsaturated Soil Slope. **Journal of the KGS.** 23 (3): 101-109.
- Little, A.L. 1969. **The engineering classification of residual tropical soil.** Proc. Spec. Session on Eng. Props. Lateritic Soil 7th Conf. SMFE, Mexico City : 1-10.
- Lu, N. and W.J. Likos. 2003. **Unsaturated Soil Mechanics.** John Wiley & Sons.

Ministry of Transportation and Highways, British Columbia. 1997. **Manual of Control of Erosion and Shallow Slope Movement.** British Columbia.

Morgan, R.P.C. and R.J. Rickson. 1995. **Slope Stabilization and Erosion Control A Bioengineering Approach.** n.p.

Muir, W., D., A. Meadows and J. H. M. Murray. 1995. **Effect of fungal and bacterial colonies on slope stability: In Vegetation and Slope.** edited by D. H. Barker, Institution of Civil Engineers, Proceedings, International Conference held at the University Museum, Oxford, England, September 29-30: 46-51.

Rahardjo, H., H. Krisdani and E.C. Leong. 2007. **Application of Unsaturated Soil Mechanics in Capillary Barrier System.** n.p.

Sherard, J.L., F. ASCE, L.P. Dunnigan, R.S. Decker and E.F. Steele. 1976. Pinhole Test for Identifying Dispersive Soils. **ASCE Geotechnical Division** 102: 69-87.

Peck, R.B., W.E. Hanson and T. H. Thornburn. 1973. **Foundation Engineering.** John Wiley.

U.S. Geological Survey. 2004. **Landslide Types of Processes.** fact sheet 2004-3072
Available Source: <http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/>, June 20, 2008.

Van Genuchten, M. T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 44 (892–898): 1-10.

Wan, C.F. and R. Fell. 2004. Investigation of Rate of Erosion of Soil in Embankment Dam. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.** 124: 378-380.

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อสกุล	นายปฏิพัฒน์ บุญเจริญพานิช
เกิดวันที่	วันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2527
สถานที่เกิด	จังหวัดสิงห์บุรี
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมชลประทาน) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-