

พฤติกรรมด้านกำลังและการกัดเซาะของทรายปนดินเหนียวต่อการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นการอิ่มตัวด้วยน้ำ:
กรณีศึกษาลาดดินที่ปกคลุมด้วยวัสดุใยธรรมชาติ

Strength and erosion behavior of clayey sand with changing degree of saturation: a case study of slope
covered with natural geotextile

ปฏิพัฒน์ บุญเจริญพานิช และ อภินิติ โชติสังกาต

Patipat Booncharoenpanich and Apiniti Jotisankasa

ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

โทร. 02-9428555 ต่อ 1312 โทรสาร 02-5792265

E-mail: fengatj@ku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาด้านกำลังและการกัดเซาะของทรายปนดินเหนียว โดยการทดสอบเฉือนตรงทั้งในสภาวะอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ, เส้นโค้งอุ้มน้ำ และการทดสอบพินโฮล โดยศึกษาตัวอย่างดินคงสภาพจากแปลงทดสอบสองแปลง คือ แปลงที่ 1 ติดตั้งหมอนกันดินและผ้าห่มดินร่วมกับการปลูกหญ้ารูซี่คลุมทั้งพื้นที่ และแปลงที่ 2 ติดตั้งหมอนกันดินร่วมกับการปลูกหญ้าแฝกเฉพาะแถว ผลการทดสอบพบว่าในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ที่ช่วงแรงดูดประมาณ 0-30 กิโลปาสกาล กำลังรับแรงเฉือนของดินแปลงที่ 1 มีค่ามากกว่าแปลงที่ 2 เนื่องจากขนาดอนุภาคของดินในแปลงที่ 1 มีขนาดเม็ดละเอียดมากกว่า ก่อให้เกิดการเชื่อมแน่นเนื่องจากสภาวะแรงดูด มากตามไปด้วย สภาพแรงดันน้ำในสนามและการทดสอบพินโฮลยืนยันว่า ดินที่ปราศจากวัสดุปกคลุมในแปลงที่ 2 มีลักษณะแห้งกว่ามาก ทำให้สามารถถูกกัดเซาะได้ง่ายกว่าดินในแปลงที่ 1 สรุปได้ว่าการปกคลุมดินช่วยรักษาอนุภาคดินเม็ดละเอียดและคงความชื้นของดินในระดับที่เหมาะสมต่อการต้านทานการกัดเซาะ

Abstract

This paper reports studies on strength, and erodibility of clayey sand from the direct shear test with suction measurement, Pinhole test as well as field measurement. The

undisturbed samples were taken from two test plots, which are covered with two different bio-stabilization systems, namely, plot 1) Erosion control log – Erosion control blanket (natural geotextile)- with Ruzi grass; and plot 2) Erosion control log with rows of Vetiver grass. At suction range of 0-30 kPa, the soil from plot 1 exhibits higher shear strength than plot 2, due to the greater fine contents. A higher suction has been observed in the uncovered plot 2 which appears to be more prone to erosion. This is due to its excessively low degree of saturation. This trend is also observed in the pinhole tests. It is concluded that the soil blankets help prevent the migration of fine particles from the soil, maintain its suction cohesion and appropriate moisture condition, thus increasing its erosion resistance.

1. บทนำ

การกัดเซาะลาดดินเนื่องจากน้ำก่อให้เกิดปัญหาต่างๆหลายด้านเช่น เกิดการสูญเสียดินโดยถูกน้ำพัดพาไปตกตะกอนในแหล่งน้ำหรืออ่างเก็บน้ำ เป็นผลให้อ่างตื้นเขินและเก็บกักน้ำได้ลดลง ในระยะยาวถ้าลาดดินถูกกัดเซาะรุนแรงจนมีความชันมากขึ้น ลาดจะสูญเสียเสถียรภาพ และเกิดการไถลตัวของมวลดินในเวลาต่อมาได้ ซึ่งสร้างความเดือดร้อนต่อชีวิตและ

ทรัพย์สินของประชาชนและเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมรอบด้าน

วิธีป้องกันการกัดเซาะที่ผิวดินนั้นมีด้วยกันหลายวิธี แบ่งเป็น Inorganic และ Organic [1] วิธี Inorganic เช่นการทำ Shotcrete, rock rip rap และ gabion เป็นต้น วิธีเหล่านี้มีประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดเซาะเมื่อเลือกใช้อย่างเหมาะสมแต่มีค่าใช้จ่ายสูงอีกทั้งยังต้องทำระบบระบายน้ำออกจากมวลดินควบคู่ตามไปด้วย ถ้าเกิดการอุดตันของระบบระบายน้ำจะทำให้เกิดแรงดันน้ำสูงขึ้น อาจส่งผลให้โครงสร้างต่างๆเกิดความเสียหายขึ้น

สำหรับวิธี Organic เช่นการปลูกพืชคลุมดิน และการใช้วัสดุจำพวกเส้นใยคลุมดินร่วมกับการปลูกพืชเป็นวิธีที่ยั่งยืนกว่าในระยะยาว แต่ก็จะต้องรอให้ระบบของรากพืชเจริญเติบโตช่วงเวลาหนึ่งก่อนถึงจะเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดเซาะและการพิบัติในระดับต้นได้ [2] ได้อธิบายแนวทางการใช้วัสดุจากเส้นใยธรรมชาติ (ฟ้ามัดดิน, หมอนกันดิน) ร่วมกับการปลูกพืชเพื่อป้องกันการกัดเซาะในวิศวกรรมทางดินเบื้องต้น สำหรับงานวิจัยนี้ในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเพิ่มเติมคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ของดินโดยละเอียดโดยเฉพาะอย่างยิ่งกำลังเฉือนในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำและไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ, ความชุ่มชื้นและการต้านทานการกัดเซาะเพื่ออธิบายพฤติกรรมการต้านทานการกัดเซาะของดินที่ทำการปกคลุมด้วยวัสดุธรรมชาติ อีกทั้งยังนำเสนอผลการตรวจวัดแรงดันน้ำในแปลงทดสอบพร้อมทั้งเปรียบเทียบการเกิดการกัดเซาะที่เกิดขึ้นจริงในสนาม

2. วัสดุสำหรับป้องกันการกัดเซาะและพื้นที่ทดสอบ

ฟ้ามัดดินคือ วัสดุจำพวกเส้นใย (โยมะพร้าวและใยปาล์ม) นำมาทอจนมีลักษณะเป็นผืนผ้าแล้วประกบด้วยตาข่ายพีพี (Polypropylene) ส่วนหมอนกันดินคือ วัสดุจำพวกเส้นใยที่ถูกอัดตัวในตาข่ายพีพี (Polypropylene) จนมีลักษณะเหมือนหมอนข้าง [3] แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งวัสดุดังกล่าวถูกนำมาติดตั้งเพื่อศึกษาแนวทางการป้องกันการกัดเซาะบนลาดดินตัด

(Cut slope) ในบริเวณโครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษ หมายเลข 7 สายชลบุรี-พัทยา กม. 6+100 ฝั่งขวาทาง โดย อัครพัฒน์และคณะ (2552) [2] แบ่งพื้นที่ศึกษาออกเป็น 2 แปลงทดสอบ แปลงที่ 1 ทำการติดตั้งหมอนกันดินและคลุมลาดด้วยฟ้ามัดดินพร้อมปลูกหญ้ารัฐทั่วบริเวณ สำหรับแปลงที่ 2 ทำการติดตั้งหมอนกันดินและปลูกหญ้าแฝกจำนวน 4 แถวโดยปราศจากวัสดุคลุมดินใดๆ แสดงดังรูปที่ 2 และรูปที่ 3 ทั้งนี้ การติดตั้งวัสดุคลุมดินนี้ได้กระทำวันที่ 7-8 เมษายน 2552 และทำการตรวจวัดแรงดันน้ำในลาดดิน รวมถึงสังเกตลักษณะการกัดเซาะตั้งแต่ 2 มิถุนายน 2552 ถึง 27 กันยายน 2552 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของรูปแบบการคลุมดินทั้ง 2 รูปแบบ

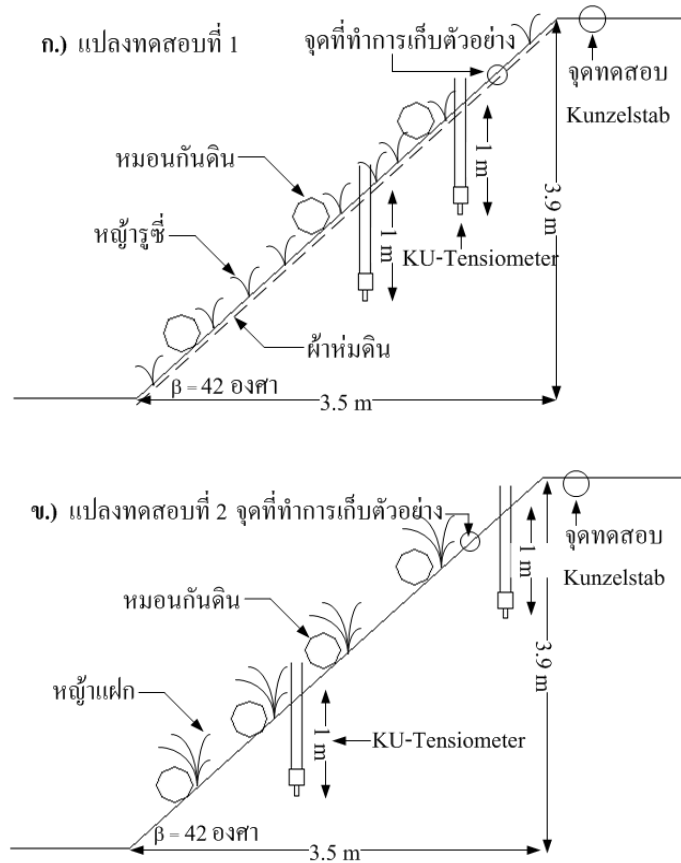


รูปที่ 1 ฟ้ามัดดิน (ซ้าย) และ หมอนกันดิน (ขวา)



รูปที่ 2 แปลงทดสอบที่ 1 (ฟ้ามัดดิน) และแปลงทดสอบที่ 2 (หญ้าแฝก) ภายหลังติดตั้งเสร็จ 1 วัน (9 เมษายน 2552)

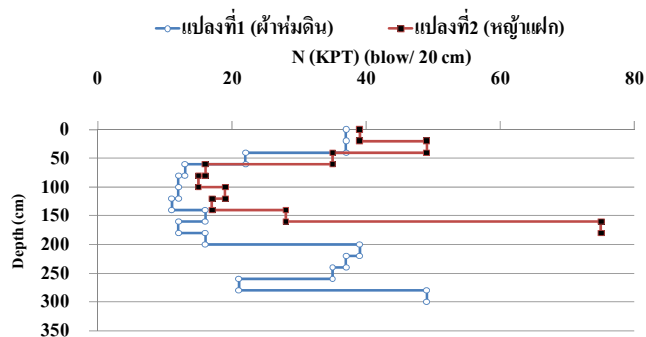
ในบริเวณพื้นที่ทดสอบมีลักษณะทางธรณีวิทยาเป็นดินตะกอนทรายและหินผุอยู่กับที่ซึ่งมีต้นกำเนิดเป็นหินแกรนิตปนกับหินปูน ประกอบไปด้วยกรวดทราย ทรายแป้ง และเศษหิน โดยดินทรายมีลักษณะการเชื่อมประสานเล็กน้อย (Lightly cemented) ในบางตำแหน่ง



รูปที่ 3 รูปตัดแปลงทดสอบ ก.) แปลงทดสอบที่ 1, ข.) แปลงทดสอบที่ 2

ในการศึกษานี้ได้ทดสอบ Kunzelstab penetration test บริเวณ
ด้านบนของแปลงทดสอบในวันที่ 27 พฤศจิกายน 2552 ซึ่งอยู่
ในช่วงฤดูแล้งภายหลังการติดตั้งฝ้ายห่มดินได้นาน 5 เดือน ผล
การทดสอบในรูปจำนวนครั้งในการตอก (N (KPT)) เทียบกับ
ความลึกของชั้นดินแสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งพบว่าในระดับลึกกว่า

1.5 ม. ชั้นดินแปลงที่ 2 แนวมันมีความแข็งแรงมากกว่าชั้น
ดินแปลงที่ 1

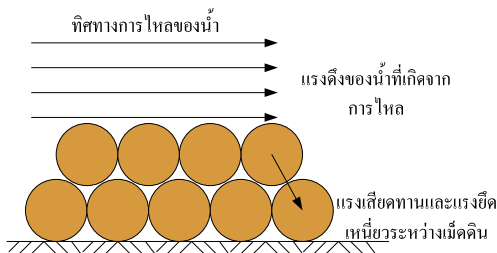


รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง N (KPT) กับความลึกต่างๆ

3. ทฤษฎีพื้นฐาน

3.1 การเกิดการกัดเซาะ

การกัดเซาะพัฒนาเม็ดดินโดยน้ำเกิดขึ้นเมื่อแรงดึงที่เกิดจากการไหลของน้ำที่กระทำกับอนุภาคเม็ดดิน (Drag force) มีค่ามากกว่าแรงต้านของเม็ดดิน (แรงเชื่อมแน่น, แรงเสียดทาน) [1] ดังรูปที่ 5 ดังนั้นแนวทางการลดการกัดเซาะทำได้โดยการลดความเร็วของกระแส่น้ำรวมถึงการเพิ่มแรงเสียดทานและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินนั่นเอง



รูปที่ 5 แสดงแรงต่างๆที่กระทำกับอนุภาคเม็ดดิน

ในงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นการศึกษาไปที่พฤติกรรมแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับแรงดันน้ำด้านลบในดิน (Suction)

3.2 แรงดันน้ำในดินด้านลบและเครื่องมือวัด

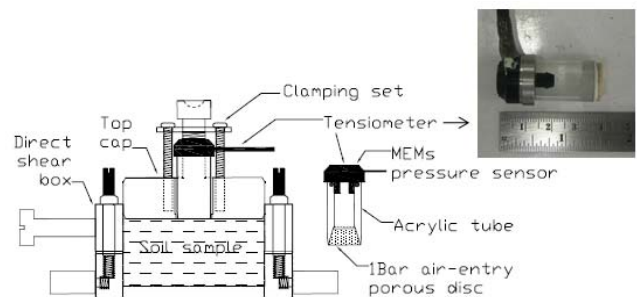
ในธรรมชาติ ลาดดินอยู่ในทั้งสภาวะอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ลาดดินบริเวณต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดินมักจะอยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ แต่ถ้าอยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินจะอยู่ในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ดินที่อยู่เหนือระดับน้ำจะเกิดแรงดูด (suction) ขึ้นหรือแรงดันน้ำมีค่าติดลบ น้ำจะทำหน้าที่เปรียบเสมือนแรงเชื่อมแน่นยึดเม็ดดินไว้ ทำให้กำลังรับแรงเฉือนของดินเพิ่มขึ้นโดยสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นในดิน วิธีการวัดแรงดันน้ำในดินด้านลบที่นิยมใช้กันคือ Tensiometer อภินิติและวิษณุพงศ์ (2551) และ Jotisankasa et al. (2010) [4,5] ได้พัฒนา KU-Tensiometer ขึ้นซึ่งมีส่วนประกอบหลัก คือ แผ่นดินเผา ซึ่งมีความทึบน้ำเพียงพอ วัดเป็นหน่วยแรงดัน Air-entry value เท่ากับ 1 บาร์ กะเปาะน้ำและเซนเซอร์วัดแรงดัน โดยจะต้องเติมน้ำเต็มช่องว่างทุกส่วนของ KU-Tensiometer จึงจะสามารถวัดแรงดูดได้ในช่วงประมาณ 0-90 kPa. นอกจากนี้

Jotisankasa and Mairaing (2009) [6] ยังได้พัฒนา KU-Tensiometer เพื่อใช้ในการทดสอบแรงเฉือนตรงแสดงดังรูปที่ 6

วิธีการตรวจวัดแรงดันน้ำด้านลบ Tensiometer ด้านบนของตัวอย่างดินดังกล่าว ได้รับการยอมรับว่าสามารถเป็นตัวแทนของแรงดันน้ำในระหว่างการทดสอบ ดังได้อธิบายไว้ใน [6] และ Tarantino & Tombolato (2005) [16]

ทั้งนี้ Jotisankasa & Mairaing (2010) ได้ทดสอบโดยมีการหยุดการเฉือนเป็นระยะๆ และตรวจวัดแรงดูดตามระยะเวลาในขณะที่หยุดการเฉือนไว้ชั่วคราว เพื่อประเมินว่าค่าแรงดูดเป็นตัวแทนที่ดีระหว่างทดสอบหรือไม่ ก็พบว่ามีความคล่องที่ซึ่งแสดงถึงความสม่ำเสมอของแรงดูดทั่วทั้งตัวอย่าง (ถ้ามีความแตกต่างระหว่างแรงดูดตรงกลางตัวอย่างและด้านบน เมื่อหยุดการเฉือนก็ควรจะพบว่าแรงดูดมีการเปลี่ยนแปลงไปมาก)

สำหรับการวัดแรงดูดที่มีค่ามากกว่า 1000kPa จะนิยมวัดในลักษณะของแรงดูดรวม (Total suction) สามารถใช้เครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์อากาศในช่องว่างดิน ดังได้อธิบายไว้โดยละเอียดโดย อภินิติและวิษณุพงศ์ (2551) [4]

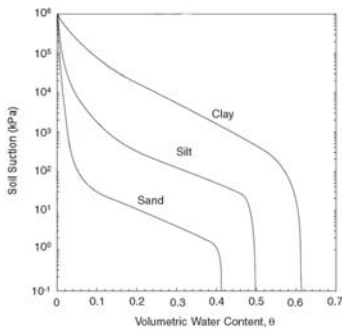


รูปที่ 6 แสดงการติดตั้ง KU-Tensiometer บน direct shear box. [6]

3.3 เส้นโค้งอุ้มน้ำ (Soil Water Characteristic Curve, SWCC)

เส้นโค้งอุ้มน้ำคือความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ (θ , Volumetric Water Content มีค่าเท่ากับปริมาตรน้ำในดินต่อปริมาตรทั้งหมดของดิน) และแรงดูด (แรงดันน้ำในดินด้านลบ) ซึ่งสามารถแสดงเส้นโค้งอุ้มน้ำของตัวอย่างดินชนิดต่างๆ ได้ดังรูปที่ 7 ประโยชน์ของเส้นโค้งอุ้มน้ำประการหนึ่งคือสามารถนำไปใช้ประมาณกำลังรับแรงเฉือนของดินและความ

ซึมผ่านของน้ำในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ สำหรับการวิเคราะห์ การไหลซึมขั้นสูง อาทิเช่น บรรพต (2548) เป็นต้น ซึ่งเป็น พื้นฐานในการพัฒนาระบบเตือนภัยดินถล่มได้



รูปที่ 7 แสดงเส้นโค้งอุ้มน้ำของดินชนิดต่างๆ [7]

3.4 กำลังรับแรงเฉือนของดินและการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

กำลังรับแรงเฉือนของดินสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$\tau = c' + c^s + (\sigma - u_a) \tan \phi' \tag{1}$$

โดยที่ c' คือ แรงเชื่อมแน่นประสิทธิผล, σ คือหน่วยแรงกดตั้งฉาก, u_a คือ แรงดันอากาศซึ่งปกติมีค่าเท่ากับ 0, u_w คือ แรงดันน้ำในดิน, ϕ' คือ มุมเสียดทานภายในประสิทธิผล, c^s คือ แรงเชื่อมแน่นเนื่องจากแรงดันน้ำในดินด้านลบ หรือแรงดูด ตามสมการที่ (2) [8]

$$c^s = (u_a - u_w) \tan \phi^b \tag{2}$$

โดยที่ $(u_a - u_w)$ เท่ากับค่าแรงดูด (suction), ϕ^b คือ มุมของแรงเฉือนเนื่องจากแรงดันน้ำในดินด้านลบ มีค่าเท่ากับ ϕ' เมื่อดินอยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ

สำหรับเสถียรภาพของลาดดินอนันต์ (Infinite slope) แสดงออกมาในรูปแบบสมการอัตราส่วนความปลอดภัยได้ดังนี้

$$F.S. = \frac{c' + c^s + (\gamma \cdot z \cdot \cos^2 \beta) \tan \phi'}{\gamma \cdot z \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} \tag{3}$$

Jotisankasa and Mairaing (2009) [6] ได้ทำการทดสอบหาค่า c^s จากการทดสอบแรงเฉือนตรงชนิดวัดแรงดันน้ำในดินด้านลบโดยติดตั้ง KU-Tensiometer บน direct shear box และผลจากการทดสอบกับดินจากพื้นที่ดินถล่มในประเทศไทยพบว่าค่า c^s สามารถทำนายได้โดยใช้เส้นโค้งอุ้มน้ำหรือใช้ความชื้นที่จุด Field capacity ในการศึกษาครั้งนี้จะได้ใช้รูปแบบสมการกำลังเฉือนดังกล่าวในการประมาณแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินหรือความต้านทานการกัดเซาะดินต่อไป

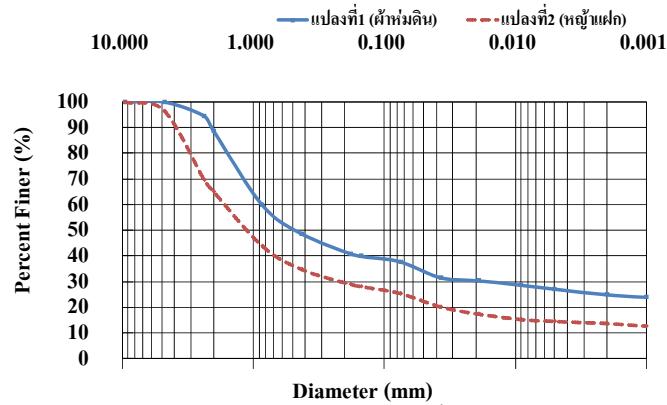
4. การทดสอบในห้องปฏิบัติการและผล

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพ

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพตามมาตรฐาน ASTM D 423-66, 424-59, 854-58 ของตัวอย่างดินคงสภาพที่ทำการเก็บตัวอย่าง โดยกระบอกเปลือกบาง [9] บริเวณด้านบนของลาด ดังแสดงในรูปที่ 3 ในวันที่ 27 พฤศจิกายน 2552 ซึ่งเป็นช่วงฤดูแล้งหรือฝนทิ้งช่วงเป็นเวลานาน สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 ทั้งนี้ดินตัวอย่างมีความเป็นตัวแทนของลาดดินได้ในระดับหนึ่งเนื่องจากไม่มีการเก็บตัวอย่างในระดับลึก เมื่อทำการหาลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดิน แสดงดังรูปที่ 8 สามารถจำแนกประเภทดินตามระบบ Unified Soil Classification System (USCS) ได้โดยดินจากทั้ง 2 แปลงทดสอบ เป็นดินทรายปนดินเหนียว (SC) มีลักษณะของเส้นการกระจายตัวคล้ายกัน แต่แปลงที่ 1 มีขนาดอนุภาคเม็ดดินที่เล็กกว่าแปลงที่ 2 อาจเป็นผลเนื่องจากแปลงที่ 2 มีช่วงที่ไม่มีสิ่งใดปกคลุมลาดดินอยู่ เมื่อมีน้ำไหลผ่าน อนุภาคของดินเม็ดละเอียดจะถูกพัดพาไปกับน้ำได้ง่ายกว่าแปลงที่ 1 และยังคงอาจเป็นผลมาจากรากของหญ้าที่ปกคลุมดินเป็นบริเวณกว้างกว่าหญ้าแฝกทำให้รากแทรกไปในดินจนมีความร่วนหรือละเอียดกว่าในขณะที่รากของหญ้าแฝกยังไม่เจริญเติบโตเต็มที่ การแทรกตัวของรากจึงยังมีไม่มากนักและหญ้าแฝกไม่ได้ปกคลุมดินเป็นบริเวณกว้างเท่าหญ้าชู้ดินจึงมีขนาดเม็ดใหญ่กว่าแปลงที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติต่างๆของดินที่ทดสอบ

แปลงทดสอบ	Atterberg's limits			Gs	w%	e	γt (t/m ³)	γd (t/m ³)
	LL	PL	PI					
แปลงที่1 (ค้ำห่มดิน)	38.31	16.61	21.70	2.7	7.14-7.77	0.478-0.494	1.95-1.98	1.82-1.84
แปลงที่2 (หญ้าแฝก)	33.39	17.16	16.23	2.6	4.66-5.10	0.373-0.419	2.02-2.06	1.93-1.96



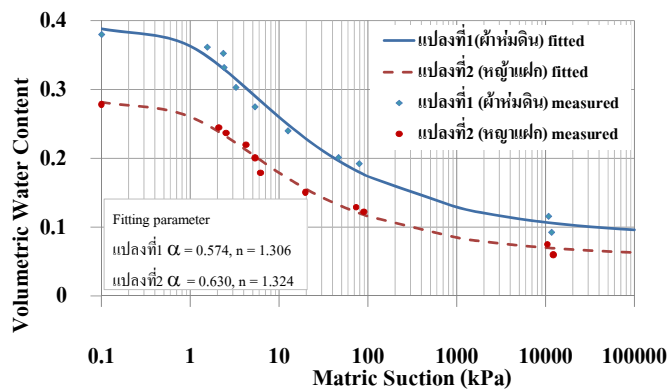
รูปที่ 8 ลักษณะการกระจายตัวของดินทั้ง 2 แปลงทดสอบ

4.2 ผลการทดสอบเส้นโค้งอุ้มน้ำ

รูปที่ 9 แสดงเส้นโค้งอุ้มน้ำด้านแห้ง (Drying) ที่ได้จากการทดสอบจริงและการประมาณโดยวิธีของ Van Genuchten (1980) [10] ดังสมการที่ 4

โดยที่ n และ α คือ fitting parameter ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน จากรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าเส้นโค้งอุ้มน้ำของแปลงที่ 1 จะอยู่สูงกว่าแปลงที่ 2 เนื่องจากมีอนุภาคของดินเม็ดละเอียดมากกว่า ทำให้ดินอุ้มน้ำและเกิดการเชื่อมแน่น มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินเนื่องจากแรงดูดได้มากกว่าแปลงที่ 2

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{(1 + (\alpha(u_a - u_w))^n)^{1-1/n}} \tag{4}$$



รูปที่ 9 กราฟเส้นโค้งอุ้มน้ำด้านแห้ง (Drying) ของดินทั้ง 2 แปลงทดสอบ

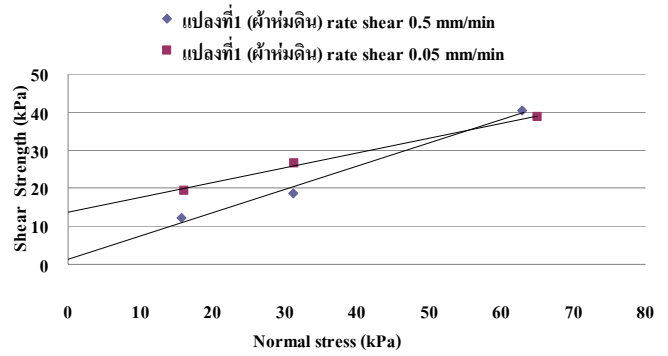
4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนตรงในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ ได้ทำการทดสอบที่อัตราการเฉือน 0.5 และ 0.05 มม./นาที ตามมาตรฐาน ASTM D 3080 ภายใต้สภาวะความเค้นแนวดิ่ง เท่ากับ 15.5, 31 และ 62 kPa โดยได้เลือกอัตราการเฉือนสอง อัตราเพื่อเปรียบเทียบผลจากอัตราการเฉือนต่อกำลังเฉือน และได้ตรวจวัดแรงดันน้ำด้านลบเฉพาะกับตัวอย่างดินไม่อิ่มตัว ด้วยน้ำเท่านั้น สำหรับการทดสอบแบบแช่น้ำนั้นผู้เขียนไม่ได้ ทำการวัดแรงดันน้ำ เพราะคาดไว้แล้วว่า ถึงแม้จะมีการวัด แรงดันน้ำก็ยังไม่สามารถยืนยันสภาวะการระบายน้ำได้อยู่ดี เนื่องจากการทดสอบ Direct shear ไม่มีการห่อหุ้มตัวอย่าง ได้อย่างดีเยี่ยมเหมือนการใช้ปลอกยาง (Rubber membrane) ในการทดสอบ Triaxial test

ท้ายนี้ผู้เขียนได้ตรวจสอบสมมุติฐานการระบายน้ำโดยใช้ค่าแนะนำของ Gibson & Henkel (1954) [11] อ้างอิงใน Head (1994) [12] โดยความสัมพันธ์

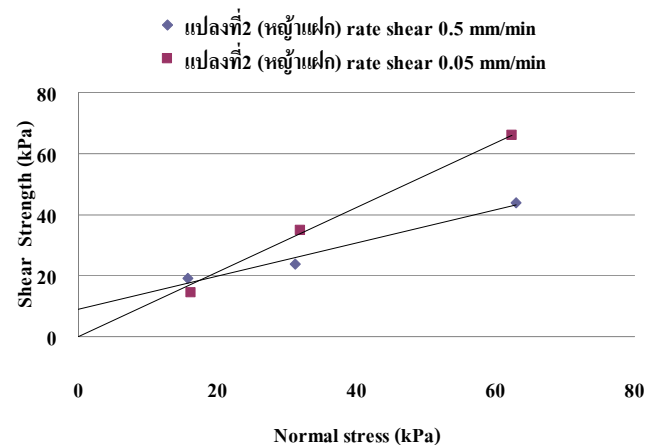
$$t_f = 12.7t_{100} \tag{5}$$

เมื่อ t_f คือค่า เวลานั้นน้อยที่สุดสำหรับเนื้อตัวอย่างถึงจุด พับติ และ ค่า t_{100} ได้จากการทดสอบในช่วง consolidation ซึ่งมีค่าประมาณ 1.2- 4.8 นาที และค่าการเคลื่อนตัวแนวราบที่จุด พับติประมาณ 7 มม.จะได้ค่าอัตราการเฉือนสำหรับสภาวะ ระบายน้ำเท่ากับ 0.1-0.45 มม./นาที จะเห็นได้ว่า อัตราการ เฉือนที่ 0.05 มีค่าที่ช้ากว่าและทำให้เชื่อได้ว่า ความดันน้ำใน โพรงดินส่วนเกินได้มีการระบายออกไปหมดในระหว่างเฉือน และยืนยันได้ว่าสภาวะการเฉือนที่ 0.05 มม./นาที เป็นสภาวะ ระบายน้ำ ผลจากการทดสอบดินแปลงที่ 1 แสดงดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนกับหน่วยแรงตั้งฉากที่อัตราการเฉือน 0.5 และ 0.05 มม./นาที ของดินแปลงที่ 1

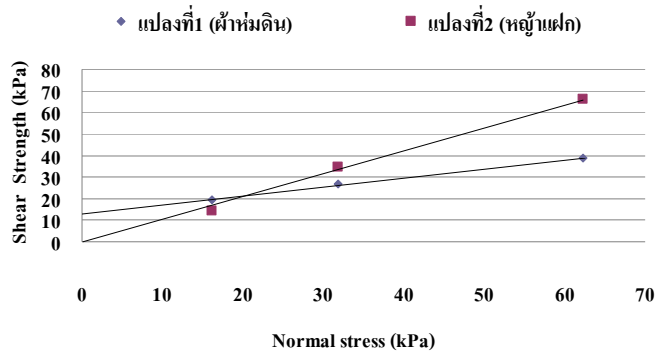
ลักษณะของ Failure envelope เมื่อเฉือนดินแปลงที่ 1 ที่ อัตราเฉือนช้า (0.05 มม./นาที) จะได้กำลังสูงกว่าอัตราเฉือน เร็ว (0.5 มม./นาที) เนื่องจากเกิดแรงดันน้ำส่วนเกินที่อัตราการ เฉือนเร็ว โดยค่าแรงเชื่อมแน่นหรือจุดตัดความเชื่อมแน่น (Cohesion intercept, c) ของดินที่อัตราเฉือนช้ามีค่าสูงกว่าดิน ที่อัตราเฉือนเร็ว สำหรับผลการทดสอบของดินแปลงที่ 2 แสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 กราฟเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนกับหน่วยแรงตั้งฉากที่อัตราการเฉือน 0.5 และ 0.05 มม./นาที ของดินแปลงที่ 2

จากรูปที่ 11 เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราเฉือนที่เร็วและช้าของดินแปลงที่2 (หญ้าแฝก) ซึ่งไม่พบรากของหญ้าแฝกในตัวอย่างดินและที่อัตราเฉือนช้ามีพฤติกรรมที่คล้ายคลึงกัน โดยเส้น Failure envelope มีความชันมากกว่าที่อัตราการเร็ว เพราะที่อัตราเฉือนเร็ว (0.5 มม./นาที่) เกิดแรงคั้นน้ำระหว่างการเฉือน

ทำให้กำลังรับแรงเฉือนมีค่าลดลงเป็นผลทำให้เส้น Failure envelope ชันน้อยกว่าที่อัตราเฉือนช้า ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนของแปลงที่1 และ 2 ที่อัตราเฉือนช้า แสดงดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 กราฟเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนกับหน่วยแรงตั้งฉากที่อัตราการเฉือน 0.05 มม./นาที่ ของดินแปลงที่2

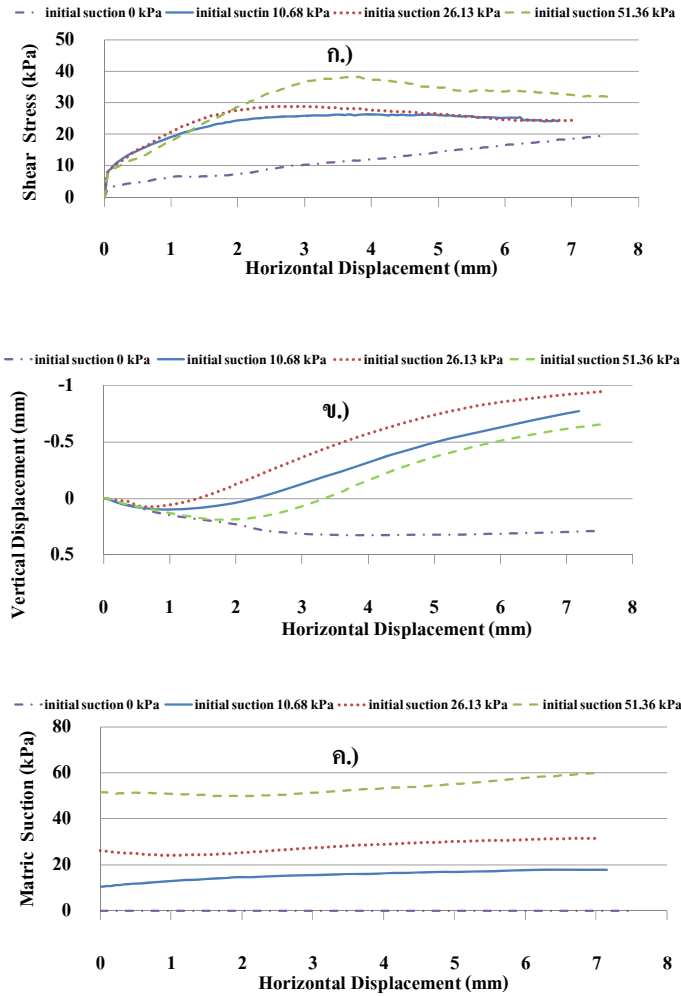
ในสภาวะอัตราเฉือนที่ 0.05 มม./นาที่ นี้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้พิจารณาเป็นค่าสำหรับอธิบายแรงประสิทธิผลเนื่องจากคาดว่าแรงคั้นน้ำระหว่างเฉือนมีค่าเท่ากับศูนย์ โดยพบว่าดินแปลงที่ 1 มีความเชื่อมั่นสูงกว่า ทั้งนี้อาจเป็นผลจากการเชื่อมประสานระหว่างเม็ดดินที่เกิดจากอินทรีย์สาร [13] เนื่องจากการย่อยสลายของฟ้ามุขดินและอาจเกิดจากรากของหญ้ารัฐซึ่งช่วยเสริมแรงทำให้ค่าความเชื่อมั่นประสิทธิผล (c') มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการสังเกตตัวอย่างที่ได้ทดสอบแสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่ไม่มีรากพืช กับมีรากพืช

ข้อสังเกตนี้เป็นการอนุมานบนหลักฐานที่พบได้ เช่นการย่อยสลายของฟ้ามุขดินสามารถเห็นได้โดยสายตาในพื้นที่ทดสอบ และ ปริมาณของรากพืชในแปลงหญ้าแฝกนั้น จะมีก็เฉพาะบริเวณแถวที่ปลูกแฝกเท่านั้น แต่ตัวอย่างที่เก็บเป็นบริเวณดินระหว่างแถวหญ้าแฝก จึงไม่มีรากพืชอยู่เลย และไม่ใช่ว่าความบังเอิญที่ไม่พบรากหญ้าแฝกในตัวอย่างดินแปลงที่ 2 เพราะตัวอย่างดินก็มีความสม่ำเสมอพอสมควร ทั้งนี้ผู้เขียนไม่ได้กล่าวแต่อย่างใดว่า รากหญ้ารัฐสามารถเสริมแรงได้ดีกว่ารากหญ้าแฝก เพียงแต่ชี้แจงว่าแปลงที่ปลูกหญ้ารัฐทั่วทั้งลาดมีรากขึ้นหนาแน่นกว่าแปลงแฝกซึ่งปลูกต้นแฝกเฉพาะแนวแถว

สำหรับการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนตรงในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำทำการทดสอบแบบ consolidated drain test ซึ่งติดตั้ง KU-Tensiometer บน direct shear box (รูปที่ 6) ภายใต้สภาวะแรงกดในแนวตั้งเท่ากับ 15.5 kPa และทำการเปลี่ยนแปลงความชื้น โดยการสเปรย์น้ำโดยตรงสู่ตัวอย่างดิน ทั้งนี้ได้ยกตัวอย่างผลการทดสอบของดินแปลงที่ 1 แสดงดังรูปที่ 14

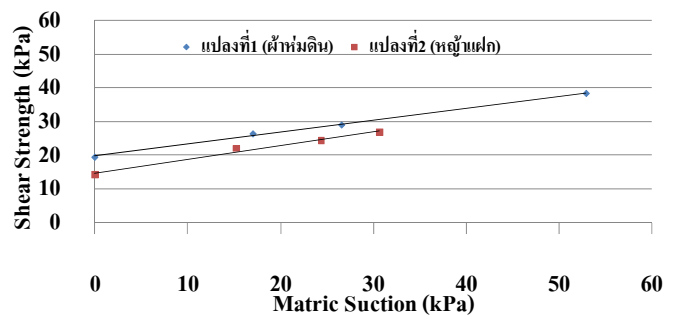


รูปที่ 14 กราฟการเคลื่อนที่ในแนวนอนของดินแปลงที่ 1 กับ ก.) หน่วยแรงเฉือน ข.) การเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับทิศทาง การเฉือน ค.) แรงดูดของน้ำ (matric suction)

จากรูปที่ 14 พบว่าช่วงแรกของการเฉือนตัวอย่าง แรงดูดของน้ำในดินมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเนื่องจากตัวอย่างดินมีการยุบตัวทำให้เกิดแรงดันน้ำขึ้นและเมื่อดินถูกเฉือนผ่านจุด Peak หรือเฉือนดินจนเข้าใกล้จุด Ultimate แรงดูดของน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนกับแรงดูดน้ำในดินดังรูปที่ 15 พบว่ากำลังรับแรงเฉือนของแปลงที่ 1 มีค่ามากกว่าแปลงที่ 2 ในช่วงแรงดูดของน้ำในดิน 0 ถึง 30 kPa. ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่อนุภาคเม็ดดินมีขนาดเล็กพอที่ทำให้เกิดความเชื่อมั่นแน่นที่เกิดขึ้นจากน้ำยึดเม็ดดินไว้ได้ดีกว่า

อนุภาคเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่กว่า ทั้งนี้ได้สรุปตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากทดสอบกำลังรับแรงเฉือนตรง แสดงค่าในตารางที่

2



รูปที่ 15 กราฟกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกับแรงดูดของน้ำในดิน (Suction = $u_a - u_w$) ทั้ง 2 แปลงทดสอบ

ตารางที่ 2 คุณสมบัติด้านกำลังเฉือนจากการทดสอบเฉือนตรง

แปลงทดสอบ	Shearing rate (mm/min)				
	0.5		0.05		0.05
	c (kPa)	ϕ	c' (kPa)	ϕ'	ϕ''
แปลงที่1 (ฟ้าห่มดิน)	1.37	31.47	13.71	21.3	19.9
แปลงที่2 (หญ้าแฝก)	8.96	28.59	0	46.5	22

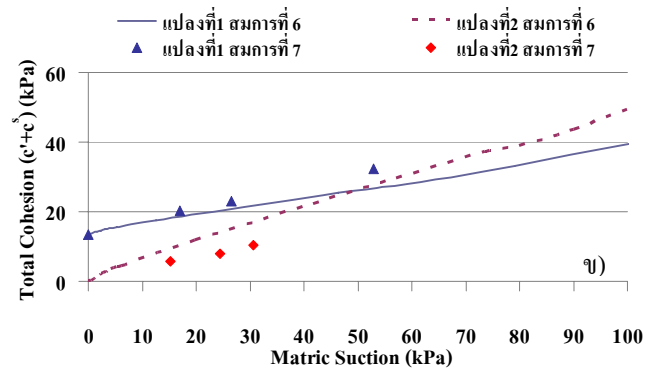
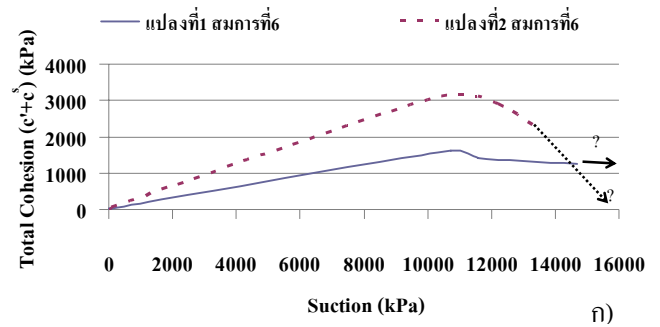
5. ความต้านทานการกัดเซาะของดิน

การประเมินความเป็นไปในการเกิดการกัดเซาะสามารถพิจารณาได้จากสมการกำลังเฉือนดังสมการที่ (1) ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ผิวดินค่าหน่วยแรงกดในแนวตั้งมีค่าเท่ากับศูนย์ แรงที่ต้านทานต่อแรงดึงของน้ำที่ทำให้เกิดการกัดเซาะ (Drag force) จะเหลือแต่แรงเชื่อมแน่นรวม ($c' + c^s$) โดย c^s ในช่วงค่าแรงดูดที่สูงกว่าค่าที่ได้ทำการทดสอบ (0-60 kPa) สามารถประมาณได้โดยใช้เส้นโค้งอุ้มน้ำ [7] ดังนี้

$$c^s = S_r (u_a - u_w) \tan \phi' \tag{6}$$

ดังนั้นจึงสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงเชื่อมแน่นรวมกับแรงดูดของน้ำในดินทั้งสองแปลง จากเส้นโค้งอุ้มน้ำและตัวแปรต่างๆในตารางที่ 1 ได้ดังรูปที่ 16g ซึ่งยังได้เปรียบเทียบกับค่าดังกล่าวกับค่าความเชื่อมแน่นรวม ($c' + c^s$) ที่ได้จากการทดสอบเฉือนตรงโดยคำนวณจากสมการที่ (6) ดังแสดงในรูปที่ 6ข อีกด้วย (ค่า τ_f เป็นค่าแรงเฉือนสูงสุดที่ได้จากการทดสอบเฉือนตรงที่ค่าแรงดูดต่างๆกัน)

$$c^s = \tau_f - c' - \sigma \tan \phi' \tag{7}$$



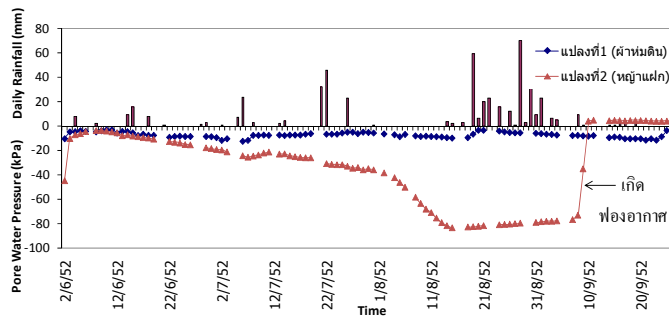
รูปที่ 16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเชื่อมแน่นรวมกับแรงดูด ทำนายจากสมการที่ (6) เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ (สมการที่ 7)

เห็นได้ว่าในช่วงที่แรงดูดสูงเกิน 100 kPa ดินแปลงที่ 2 มีแนวโน้มของแรงเชื่อมแน่นที่สูงกว่าแปลงที่ 1 แต่ทว่าในช่วงที่แรงดูดในดินมีค่ามากกว่า 11000 kPa. (เทียบเท่ากับผิวดินที่ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีค่าต่ำกว่าประมาณ 92%) พบว่าแรงเชื่อมแน่นรวม ($c' + c^s$) สำหรับดินแปลงที่ 2 มีแนวโน้มลดลงและมีโอกาสที่จะเกิดการกัดเซาะมากกว่าแปลงที่ 1 อีกทั้งแรงเชื่อมแน่นรวมมีแนวโน้มลดลงตามทิศทางของลูกศร ซึ่งจะสามารถอธิบายได้ว่าดินแปลงที่ 1 ซึ่งมีอนุภาคของดินเม็ดละเอียดมากกว่าแปลงที่ 2 ทำให้เม็ดดินเก็บความชื้นและรักษา

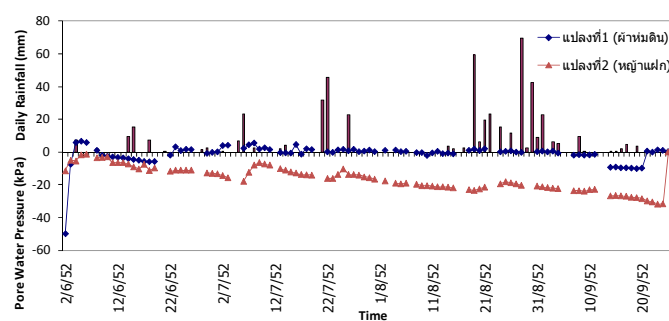
แรงดูดได้ดีกว่าดินแปลงที่ 2 เป็นผลทำให้แรงเชื่อมแน่นรวม ($c' + c^u$) มีแนวโน้มที่ลดลงน้อยกว่าเป็นผลทำให้ที่ช่วงแรงดูดน้ำในดินสูงๆหรือที่บริเวณผิวดินซึ่งระดับความชื้นในดินมีค่าน้อยการกัดเซาะของดินแปลงที่ 2 ซึ่งปราศจากพืชปกคลุมมีโอกาสที่จะเกิดการกัดเซาะได้มากกว่าแปลงที่ 1 ซึ่งมีพืชและวัสดุโยธรรมาชาติปกคลุม

6. การตรวจวัดแรงดันน้ำและการกัดเซาะที่เกิดขึ้นจริงในสนาม

อัครพัฒน์ และ คณะ (2552) [2] ได้รายงานผลการวัดแรงดันน้ำในพื้นที่ทดสอบโดยใช้ KU-Tensiometer ซึ่งทำการติดตั้งบริเวณด้านบนและตรงกลางของทั้ง 2 แปลงทดสอบ (ดังรูปที่ 3) ผลการตรวจวัดแสดงดังรูปที่ 17 และ 18 ซึ่งจากการตรวจวัดแรงดันน้ำในสนามแปลงที่ 1 มีแรงดันน้ำในดินด้านลบมีค่าประมาณ -10 ถึง 0 kPa. แปลงที่ 2 มีแรงดันน้ำในดินด้านลบ -80 ถึง 0 kPa. เนื่องจากแปลงที่ 1 ประกอบด้วยผ้าห่มดิน, หมอนกั้นดินและหญ้าที่คลุมดินและช่วยป้องกันการสูญเสียความชื้นได้ดีกว่าแปลงที่ 2 ที่มีเพียงหญ้าแฝกกับหมอนกั้นดิน



รูปที่ 17 กราฟแรงดันน้ำในดิน, ปริมาณน้ำฝนกับเวลาของแปลงทดสอบที่ 1 และ 2 ด้านบนของแปลงทดสอบ [2]



รูปที่ 18 กราฟแรงดันน้ำในดิน, ปริมาณน้ำฝนกับเวลาของแปลงทดสอบที่ 1 และ 2 ตรงกลางของแปลงทดสอบ [2]

การที่ดินรักษาความชื้นไว้ในระดับที่เหมาะสมได้จะมีผลดีต่อการป้องกันการกัดเซาะ ซึ่งยืนยันโดยงานวิจัยในอดีต อาทิ Wan and Fell (2004) [14] ทดสอบบดอัดดินหลากหลายชนิดพบว่าดินที่บดอัดในด้านแห้งกว่าจุดเหมาะสม (Dry of optimum) มีโอกาสเกิดการกัดเซาะมากกว่าด้านเปียก (Wet of optimum)

และจากการตรวจสอบการกัดเซาะที่เกิดขึ้นจริงในสนามแสดงดังรูปที่ 19 พบว่าแปลงที่ 1 มีการกัดเซาะน้อยกว่าแปลงที่ 2 เนื่องจากดินแปลงที่ 1 รักษาความชื้นได้ดีกว่าแปลงที่ 2 และแปลงที่ 1 มีผ้าห่มดิน, หมอนกันดิน, หญ้ารูซี่ ช่วยในการลดพลังงานของแรงดึงที่เกิดจากการไหลของน้ำ (Drag force) ทำให้แรงดึงดังกล่าวไม่สามารถเอาชนะแรงต้านทานของเม็ดดิน (แรงเชื่อมแน่น, แรงเสียดทานระหว่างเม็ดดิน) เป็นผลทำให้ไม่เกิดการกัดเซาะ ขณะที่แปลงที่ 2 มีหมอนกันดินและหญ้าแฝกซึ่งจะช่วยลดแรงดึงที่เกิดจากการไหลของน้ำ (Drag force) ได้ในระดับหนึ่งแต่ตรงบริเวณที่ไม่มีหญ้าแฝกปกคลุมบริเวณนี้จะเกิดร่องของการกัดเซาะขึ้น

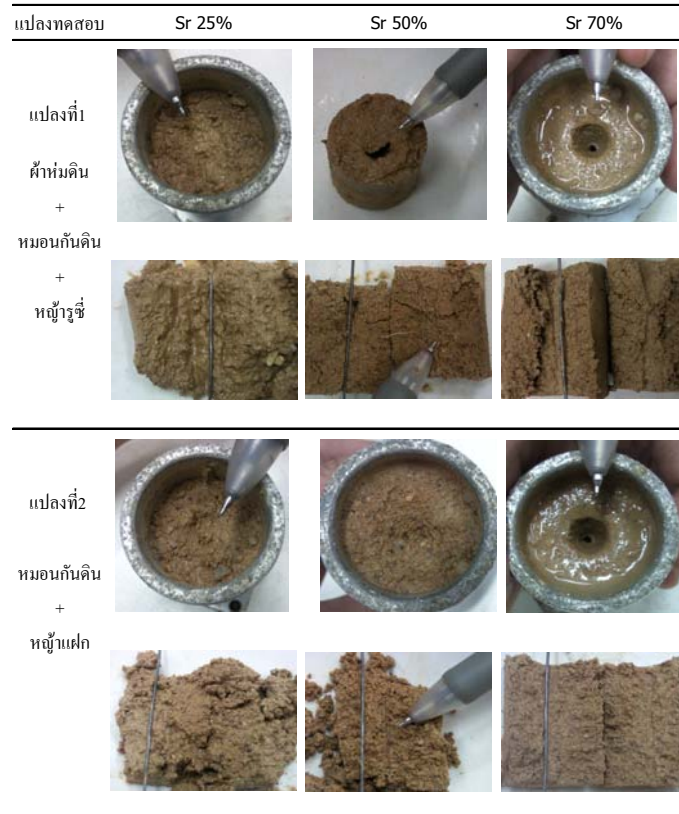


รูปที่ 19 การเปรียบเทียบการกัดเซาะที่เกิดขึ้นจริงในสนามของทั้ง 2 แปลงทดสอบ วันที่ 7 มีนาคม 2553 ภายหลังจากการติดตั้งผ้าห่มดินและหมอนกันดินร่วมกับการปลูกพืช

7. Pinhole test

ในการวิจัยนี้ได้ทดสอบคุณสมบัติด้านการกัดเซาะในลักษณะเดียวกับการทดสอบหาดินกระจายตัว โดยทำการทดสอบ Pinhole test [15] ซึ่งควบคุมความหนาแน่นแห้งของดินให้มีค่าคงที่แต่ทำการเปลี่ยนแปลง Sr (ระดับความอิ่มตัวของน้ำ) ที่ 25, 50 และ 75% ซึ่งแปลงที่ 1 มีความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1.83 t/m^3 และแปลงที่ 2 มีความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1.945 t/m^3 รูปที่ 20 แสดงของตัวอย่างหลังทำการทดสอบเสร็จสิ้น

โดยที่ Sr=25% พบว่าน้ำจะพัดพาดินมาอุดตันตรงบริเวณจุกยาง และรูที่เจาะเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำ (Head) ส่วนที่ Sr=50% รูที่เจาะยังคงเท่าเดิมแต่ตรงบริเวณจุกยางเริ่มมีดินมาอุดตัน สุดท้ายที่ Sr=70 % ไม่มีดินอุดตันทั้งตรงบริเวณจุกยาง และรูที่เจาะ ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า ที่ระดับความอิ่มตัวของน้ำต่ำๆ ปริมาณน้ำที่เข้าไปจับตัวกับเม็ดดินได้น้อย ทำให้ c' น้อยตามไปด้วยเมื่อรวม c กับ c' ก็ยังมีค่าน้อยกว่าแรงดึงที่เกิดจากการไหลของน้ำ (Drag force) จึงทำให้เกิดการพัดพาเม็ดดินขึ้น ส่วนที่ค่าระดับความอิ่มตัวของน้ำที่สูงกว่าการพัดพาเม็ดดินจะน้อยกว่าดินที่มีระดับความอิ่มตัวของน้ำ (Sr) ต่ำๆ แต่ผลจากการที่ดินมีปริมาณน้ำในมวลดินมากจะทำให้กำลังของดินลดลงอีกทั้งแรงเชื่อมแน่นที่เกิดขึ้นจากน้ำ (c') ก็ยังมีน้อยตามไปด้วย ซึ่งการพัดพาเม็ดดินอาจเปลี่ยนระดับความรุนแรงเพิ่มขึ้นในลักษณะดิน ไถลตัวแทน (Mass slope stability) การลดอัตราการเกิดการกัดเซาะจำเป็นต้องมีปริมาณน้ำในมวลดินที่เหมาะสมหรืออาจทำการป้องกันหน้าดินด้วยวิธีต่างๆควบคู่กันไป [2]



รูปที่ 20 ลักษณะของตัวอย่างหลังจากทดสอบ Pinhole Test เสร็จของดินแปลงที่ 1 และ 2 ที่ระดับความอิ่มตัวของน้ำ (Sr) ต่างๆ

8. สรุป

1. การติดตั้งวัสดุโยธาธรรมชาติกับลาดดินนอกจากจะช่วยลดแรงดึงที่เกิดจากการไหลของน้ำ (Drag force) แล้วยังเป็นตัวช่วยกรองเม็ดละเอียดไม่ให้ถูกพัดพาออกไปได้ง่าย ทำให้ดินยังคงมีปริมาณอนุภาคเม็ดละเอียดอยู่เพียงพอ ซึ่งดินเม็ดละเอียดจะอุ้มน้ำไว้กับตัว แล้วน้ำจะก่อให้เกิดแรงเชื่อมแน่นในกับเม็ดดินเนื่องจากสภาวะแรงดูด (c^s) ซึ่งเป็นตัวช่วยเพิ่มแรงเชื่อมแน่นให้กับเม็ดดิน ทำให้แรงเชื่อมแน่นรวม ($c' + c^s$) เพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้โอกาสเกิดการกัดเซาะลดลงเนื่องจากดินมีแรงต้านทานต่อแรงที่เกิดจากการไหลของน้ำที่กระทำกับอนุภาคเม็ดดิน (Drag force)

2. การติดตั้งวัสดุโยธาธรรมชาติดร่วมกับการปลูกพืชชั้นวัสดุโยธาธรรมชาติ จะช่วยรักษาต้นกล้าในระยะต้น แต่เมื่อพืชเจริญเติบโตก็สามารถป้องกันการกัดเซาะด้วยตัวของมันเอง อีกทั้งเมื่อเส้นโยธาธรรมชาติและรากพืชเกิดการย่อยสลายจะเป็น

ตัวช่วยเพิ่มความเชื่อมแน่นประสิทธิผล (c') ให้กับลาดดินอีกด้วย

3. วัสดุโยธาธรรมชาติจะเป็นตัวกันความชื้นไม่ให้ออกจากลาดดิน ซึ่งเมื่อลาดดินมีความชื้นที่เหมาะสมในระดับหนึ่ง การเกิดการกัดเซาะในลาดดินจะเกิดขึ้นได้น้อยกว่าลาดดินที่ไม่มีสิ่งใดปกคลุมอยู่

9. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ดร.อัศกพัฒน์ สว่างสุริย์ สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง บริษัท ไฟร์ม ซีเล็คชั่น จำกัด รวมถึง ผศ.ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และ นิสิตทุกท่าน ซึ่งให้การสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนบางส่วนจาก สภาวิจัยแห่งชาติ และ สถาบันวิจัยและพัฒนา เกษตรศาสตร์

10. เอกสารอ้างอิง

- [1] Gray, D.H. and Sotir, R.B. 1996. Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization A Practical Guide for Erosion Control. John Wiley & Sons.
- [2] อัครพัฒน์ สว่างสุริย์, อภินิติ โชติสังกัส และ ชาลิต จงวัฒนา. 2552. แนวทางการป้องกันการกัดเซาะหน้าดินและควบคุมตะกอนดินของลาดคันทางโดยวัสดุเส้นใยธรรมชาติ. วิศวกรรม ปีที่ 21 ฉบับที่ 6 พฤศจิกายน-ธันวาคม 2552
- [3] อรอนันต์ วุฒิสาน. 2551. กระสอบมีปีก ฝ้าห่มดิน และ หมอนกันดิน ผู้ช่วยพันธุ์ใหม่ป้องกันการกัดเซาะดินถล่ม. แหล่งที่มา:
http://chaipat.or.th/chaipat/journal/August_2551/August2551_%5B07-067%5DP038-047.pdf
- [4] อภินิติ โชติสังกัส และ วิชญพงษ์ พ้อลิละ. 2551. การพัฒนาเครื่องมือวัดศักย์แรงดูดน้ำในดิน. การประชุมทางวิชาการครั้งที่ 46 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, จัดโดยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, บางเขน
- [5] Jotisankasa, A., Tapparnich, J., Booncharoenpanich, P., Hunsachainan, N. & Soralump, S., 2010 Unsaturated Soil Testing for Slope Studies. International Conference on Slope 2010, Geotechnique and Geosynthetics for Slopes. 27-30 July 2010, Shangri-La Hotel, Chiang Mai, Thailand
- [6] Jotisankasa, A. and Mairaing, W. 2009. Shear Behavior of Residual Soils From Landslide-Prone Areas in Suction-Monitored Direct Shear Test. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,
- [7] Lu, N. and Likos, W.J. 2003. Unsaturated Soil Mechanics. John Wiley & Sons.
- [8] Fredlund, D.G. and Morgenstern, N.R. 1993. Soil Mechanics for Unsaturated Soil. John Wiley & Sons.
- [9] วรากร ไม้เรียง, นงลักษณ์ ไทยเจียมอารีย์ 2546, คุณสมบัติดินทางวิศวกรรมเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ลุ่มน้ำน้ำก้อ ต.น้ำก้อ อ.หล่มสัก จ.เพชรบูรณ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [10] 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.
- [11] Gibson, R.E. & Henkel, D.J. 1954. Influence of duration of tests on “drained” strength. Geotechnique, Vol. 4, No.1
- [12] Head, K.H. 1994. Manual of soil laboratory testing. Vol. 2: permeability, shear strength and compressibility tests. Second Edition.
- [13] Muir Wood, 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, pp. 46-51.
- [14] Wan, C.F. and Fell, R. 2004. Investigation of Rate of Erosion of Soil in Embankment Dam. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 124, No. 2, pp. 378-380.
- [15] 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, Vol. 102: 69-87.
- [16] Tarantino, A. & Tombolato, S. (2005). Coupling of hydraulic and mechanical behaviour in unsaturated compacted clay. Geotechnique 55, No. 4, 307-317