วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.
UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

กำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝกและดินเสริมกำลังด้วยรากหญ้าแฝกเพื่อเพิ่มเสถียรภาพลาดดิน

Assessing the Tensile Strength of Vetiver [*Vetiveria Zizanioides*] Root and Soil Reinforcement by Vetiver Roots in Slope Stabilization

ฐิติพร พันธุ์ท่าช้าง[1]* ดิลกรัตน์ กวาวทอง[2] พันธกานต์ รู้งาน[2] สุภชัย นวลวงค์อิน[2]

[1] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

[2] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย 57120

Thitibhorn Phantachang[1]* Dilokrut Kwawtong[2] Punthakran Roongan[2] Supachai Nuanwongin[2]

[1] Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Muang, Chiang Mai 50300

[2] Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Phan, Chiang Rai 57120

* Corresponding author.

E-mail: thitibhorn@rmutl.ac.th; Telephone: 0 5392 1444.

วันที่รับบทความ 19 พฤษภาคม 2561; วันแก้ไขบทความ 24 กรกฎาคม 2561; วันที่ตอบรับบทความ 14 สิงหาคม 2561

บทคัดย่อ

ปัญหาการชะล้างพังทลายของเชิงลาดในพื้นที่ภาคเหนือ ทำให้เกิดสูญเสียผิวหน้าดิน เสียแร่ธาตุที่หน้าดิน ลดคุณภาพผลผลิตและเพิ่มต้นทุนการบำรุงดิน บทความนี้ได้กล่าวถึงการนำชีววิศวกรรมธรณีเทคนิค คือการใช้รากหญ้าแฝกมาเสริมกำลังผิวดิน เพื่อลดการชะล้างพังทลายของเชิงลาด โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝกลุ่มพันธุ์ศรีลังกา อายุ 2 4 และ 6 เดือน ปลูกในพื้นที่ จังหวัดเชียงราย ผลการศึกษาพบว่าค่ากำลังรับแรงดึงของหญ้าแฝกมีค่าเท่ากับ 59.74 ถึง 199.12 kPa ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 102.06 kPa สำหรับรากอายุ 2 เดือน และ 104.41 ถึง 241.19 kPa ค่ากำลังรับแรงดึงเฉลี่ยคือ 154.86 kPa สำหรับรากหญ้าอายุ 6 เดือน สรุปได้ว่า การพัฒนากำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝกสำหรับหญ้าแฝกพันธุ์ศรีลังกามีค่าหน่วยแรงเฉือน และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูก แต่มีค่ากำลังลดลงตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของรากหญ้าแฝก การทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินกับรากหญ้าแฝกด้วยการทดสอบแรงเฉือนตรงในห้องปฏิบัติการด้วยตัวอย่างดินเสริมกำลังด้วยหญ้าแฝกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตัวอย่าง 6.30 cm พบว่าค่ากำลังมีค่าเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับอายุการปลูก

คำสำคัญ

รากหญ้าแฝก เสถียรภาพเชิงลาด กำลังรับแรงดึง ทดสอบแรงเฉือนตรง เกษตร

Abstract

Soil erosion problems and shallow slope instability in the north Thailand have been studied. The loss of soil by erosion in highland areas results in reduced nutrients, organic matter and crop production potential. This paper investigates the use of vetiver grass in erosion and shallow soil movement control. The natural vetiver ecotype: Sri-Lanka (*vetiveria*

zizanioides) was used in this study. Vetiver root tensile strength and field direct shear tests were conducted at 2, 4 and 6 months of the vetiver growing period. The results showed that tensile strength of vetiver roots at 2, 4 and 6 months old were 59.74-199.12 kPa (102.06 kPa average), and 104.74-241.19 kPa (154.86 kPa average) respectively. Shear strengths of vetiver roots are in proportion to the growing period but in indirect proportion to root diameter as well as elastic modulus properties. The laboratory direct shear tests of 6.30 cm (Dia.) were conducted to measure the shear strength of vetiver roots with soil at 2, 4 and 6 moths. Testing results shown that shear stress are in proportion to the growing period.

Keywords

vetiver root; slope stability; tensile strength; direct shear test; agriculture

1. บทนำ

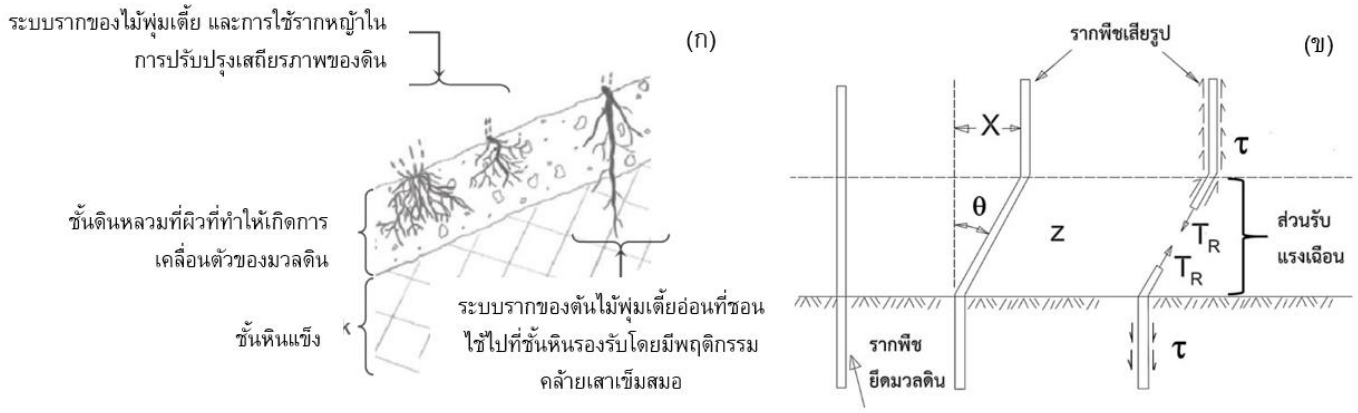
ปัญหาการชะล้างพังทลายของเชิงลาดในพื้นที่สูงเกิดขึ้นในหลายพื้นที่ในประเทศไทย เป็นเรื่องที่ได้รับสนใจจากนักวิจัยทางเกษตรและวิศวกร พบว่าในประเทศไทยพื้นที่ภาคเหนือมีการสูญเสียจากการชะล้างพังทลายของหน้าดินในพื้นที่สูงที่ลาดชันมากกว่า 38 ตันต่อไร่ต่อปี [1] การพังทลายของเชิงลาดในระดับตื้น ที่นำไปสู่สาเหตุดินขาดสารอาหารและแร่ธาตุในการปลูกพืช กระทบไปถึงต้นทุนในการปรับปรุงบำรุงดิน และลดคุณภาพของดินในระยะยาวเช่นพื้นที่เกษตรที่สูงในเชียงใหม่ (รูปที่ 1) การชะล้างพังทลายของเชิงลาด ในพื้นที่เพาะปลูกที่สูงแถบภาคเหนือ จึงเป็นที่มาของการศึกษาใช้หญ้าแฝกมาช่วยในลดการชะล้างพังทะลาย และการเสริมเสถียรภาพของลาด การใช้ประโยชน์ของหญ้าแฝกเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ และมีราคาถูก สามารถปลูกได้ในหลายสภาพดิน ที่มีความแตกต่างทางภูมิอากาศ และสภาพแวดล้อม หญ้าแฝกมีข้อดีในด้านระบบรากฝอยที่แข็งแรง และยึดสานกันแน่นระหว่างรากหญ้าแฝก มีทิศทางการเจริญเติบโตของรากในแนวดิ่งลดการรบกวนรากของพืชอื่น ๆ อีกทั้งยังทำหน้าที่เกาะยึดระหว่างเม็ดดิน รักษาความชุ่มชื้นที่ผิวดิน ลดมลภาวะ ลดการชะล้างพังทลายของดินและการความเร็วของน้ำที่ไหลที่ผิวดิน เกิดเป็นประโยชน์ในด้านการรักษาดินและน้ำ ปัจจุบันมีการนำหญ้าแฝกไปใช้ในการป้องกันการชะล้างดินมากกว่า 120 ประเทศ ได้มีการศึกษาเรื่องการลดการชะล้างพังทลายของหน้าดินด้วยการใช้พืช เช่น หญ้าแฝกเพื่อช่วยในการอนุรักษ์ดิน และลดความเร็วของน้ำในพื้นที่บริเวณที่ลาดชัน [2–6] อีกทั้งมีการประยุกต์ใช้ในด้านอื่น ๆ เช่นการปรับปรุงเสถียรภาพเชิงลาด [7] การฟื้นฟูสภาพเหมือง ใช้ในพื้นที่ดินมีการปนเปื้อน รวมถึงใช้ในการบำบัดน้ำเสีย [8] และบำบัดในพื้นที่น้ำเค็ม [9] โดยทั้งหมดที่กล่าวมานี้จึงเป็นวิถีที่การพัฒนาที่ยั่งยืนด้วยการใช้วิถีทางธรรมชาติ

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หญ้าแฝก (Vetiver grass หรือชื่อวิทยาศาสตร์ *Vetiveria zizanioides*) หรือรู้จักในนาม *Chrysopogon zizanioides* [10] พบในเขตร้อนและกึ่งเขตร้อนอินเดีย ความสูงของต้น 0.5–1.50 m เป็นพืชที่มีระบบรากลึก แผ่กระจายลงดิน ลักษณะเป็นกอแน่นใบมีขนาดแคบ ปลายแหลมคมมีความยาว 35–80 cm

อารี และคณะ [6] กล่าวถึงหญ้าแฝกว่า เป็นพืชในตระกูลหญ้าเช่นเดียวกับ ข้าวโพด ข้าวฟ่าง อ้อย ตะไคร้ ที่เป็นพืช

รูปที่ 1 ปัญหาการชะล้างพังทลายในพื้นที่เกษตรที่สูง อ.แม่แจ่ม จ.เชียงใหม่



รูปที่ 2 (ก) พฤติกรรมการรับกำลังและเสริมเสถียรภาพเชิงลาดในระดับตื้น โดยการใช้รากหญ้าและรากไม้พุ่มเตี้ย (ข) โมเดลสำหรับรากหญ้าแบบตั้งฉากไปในดิน

ล้มลุก สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ หญ้าแฝกลุ่ม (*Vetiveria zizanioides (L.) Nash*) และหญ้าแฝกดอน (*Vetiveria nemoralis A. Camus*)

Truong [11] แนะนำการใช้เทคโนโลยีด้านหญ้าแฝกที่ได้ถูกนำมาใช้ในอินเดียโดยธนาคารโลก เนื่องจากมีประโยชน์ มีประสิทธิภาพ ราคาถูก และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สามารถนำไปใช้ทั้งด้านการเกษตร การฟื้นฟูสภาพดินที่มีความกรดและดินเค็ม งานด้านภัยพิบัติเช่นไต้ฝุ่น แผ่นดินถล่ม รวมถึงงานด้านสิ่งแวดล้อม

พาณิช วุฒิพฤกษ์ และคณะ [12] ทำการทดสอบความแข็งแรงของดินทรายตะกอนที่เสริมรากหญ้า โดยทำการทดสอบแรงดึงของรากหญ้าแฝก 2 สายพันธุ์ คือ กลุ่มพันธุ์สงขลา 3 และกลุ่มพันธุ์นครสวรรค์ ผลการศึกษาพบว่า ค่าแรงดึงของหญ้าแฝกมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการปลูกและขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น ค่าแรงดึงเปลี่ยนไปตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยผลทดสอบที่ได้ พบว่า ค่าแรงดึงของกลุ่มพันธุ์สงขลา 3 เท่ากับ 994.42 ถึง 26,682 มิลลินิวตัน

ในด้านการประยุกต์ใช้เชิงวิศวกรรมในการป้องกันการกัดเซาะเชิงลาด อภินิติ [13] กล่าวถึงความแตกต่างระหว่างกัดเซาะชะล้าง (surface erosion) และการพังทลายของมวลดิน (mass movement) ว่า การกัดเซาะชะล้างเกิดในระดับตื้นจากปัจจัยของเม็ดฝน ทำให้เม็ดดินหลุดไปตามความเร็วของน้ำที่ไหลผิวหน้า ในขณะที่การพังทลายของมวลดิน เกิดจากการเคลื่อนตามแนวการเคลื่อนพังที่มีความรุนแรงที่กระทบต่อชีวิตและทรัพย์สินได้สูง กล่าวได้ว่าการชะล้างเป็นจุดเริ่มต้นของการพังทลายของมวลดินหรือการเสียเสถียรภาพของเชิงลาดได้

Burylo, Hudek และ Rey [14] ทำการศึกษาการใช้รากพืชในการปรับปรุงเสถียรภาพเชิงลาด และการชะล้างพังทลายในพื้นที่ภูเขาในฝรั่งเศส โดยทำการศึกษากำลังรับแรงดึงของราก และสัดส่วนของรากที่ทำให้เกิดการเสริมกำลังในดินโดยเปรียบเทียบจากพืชหลักจำนวน 6 ชนิดที่อยู่ในพื้นที่ผลการศึกษาพบว่ารากพืชกลุ่ม Herbaceous species A. monspeliensis และ Hrubby species G. cinerea เพิ่มกำลังรับแรงเฉือนในมวลดิน โดยรากของหญ้าช่วยเสริมกำลังในมวลดินระดับตื้น รากของไม้พุ่มเตี้ยขนาดเล็กที่ชอนไชไปยึดระหว่างชั้นดิน หรือหินแข็ง มีพฤติกรรมคล้ายเสาเข็มสมอทำหน้าที่เสริมแรงระหว่างชั้นรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 2

Teerawattanasuk และคณะ [15] ทำการศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลของรากหญ้าสองชนิดหญ้าแฝกและหญ้ารูซีในด้านการกำลังรับแรงดึง และลักษณะการขยาย โดยทดสอบแรงดึงในห้องปฏิบัติการ และทดสอบแรงเฉือนตรงในสนาม ผลการศึกษาบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่าน

(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 3 (ก) และ (ข) การคัดเลือกต้นกล้าในการปลูกและการเตรียมพื้นที่การปลูกหญ้าแฝกในพื้นที่ศึกษา (ค) การเตรียมหญ้าแฝกอายุ 6 เดือนสำหรับใช้ในการทดสอบแรงดึง

ศูนย์กลางของ รากหญ้าและกำลังรับแรงดึง และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ผลทดสอบแรงเฉือนตรง พบว่าการใช้หญ้าแฝกร่วมกับหญ้ารูซีจะส่งผลดีกว่าปลูกพืชชนิดเดียว โดยหญ้าแฝกช่วยเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนในมวลดิน และหญ้ารูซีช่วยในด้านการควบคุมป้องกันการกัดเซาะผิวหน้าของดิน

Chok และคณะ [16] กล่าวถึงทฤษฎีการเพิ่มกำลังของมวลดินเมื่อเสริมกำลังด้วยรากพืช จากกำลังดึงของรากพืช (tensile strength) ร่วมกับคุณสมบัติความเชื่อมแน่น (adhesional properties) ซึ่งการเสริมกำลังของแรงเฉือนของมวลดินจากรากพืช โดยพิจารณาเป็นการเพิ่มของความเชื่อมแน่นในมวลดิน C_r โดยกำลังรับแรงเฉือนของมวลดินตามทฤษฎีของ Mohr-Coulomb ได้ในสมการที่ (1)

$$\tau = C' + C_r + (\sigma_n - U)\tan\phi' \qquad (1)$$

เมื่อ τ คือ กำลังรับแรงเฉือนของมวลดิน C' คือ ค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิผล C_r = ค่าความเชื่อมแน่นเสมือนจากรากพืช คำนวณจากสมการที่ (2) σ_n คือ ค่าน้ำหนักกระทำในแนวดิ่ง U คือค่าแรงดันน้ำ และ ϕ' คือ ค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผล

$$C_r = a\sum_{i=1}^{N} T_{ri}\left(\frac{A_{ri}}{A_s}\right) \qquad (2)$$

เมื่อ $$a = \sin\theta + \cos\theta\tan\phi' \qquad (3)$$

เมื่อ a คือค่า mobilized tensile resistance ของรากหญ้า หรือมุมที่รากหญ้าเคลื่อนพังเมื่อเทียบกับแนวดิ่ง θ มุมการเคลื่อนของรากหญ้าเทียบกับแนวดิ่ง และ ϕ' คือมุมเสียดทานภายในของดิน และระยะ T_{ri} คือ กำลังรับแรงดึงของรากหญ้า A_{ri}/A_s สัดส่วนของ area ratio หรือสัดส่วนของพื้นที่หน้าตัดรากหญ้าต่อหน้าตัดของดิน (รูปที่ 2(ข)) [17] โดยจะเห็นได้ว่าจากสมการ (1)–(3) มีความจำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติรากหญ้าในด้านวิศวกรรม เพื่อใช้เป็นคุณสมบัติในการวิเคราะห์ เช่น กำลังรับแรงดึง ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และความแข็งแรงของรากหญ้าแฝก รวมไปถึงค่ากำลังรับแรงเฉือนของมวลดิน (soil shear strength) ที่เปลี่ยนไปของมวลดินเสริมด้วยรากหญ้าแฝก ที่ยังมีปัจจัยขึ้นอยู่กับ พื้นที่ในการปลูก ชนิด และลักษณะชนิดคุณสมบัติของดินในพื้นที่ บทความนี้ได้ทำศึกษาการใช้กำลังรับแรงดึงของหญ้าแฝก และกำลังรับแรงเฉือนของดิน เพื่อศึกษาคุณสมบัติในการเสริมเสถียรภาพเชิงลาด โดยทำการศึกษากำลัง และความแข็งแรงของรากหญ้าแฝก และดินที่เสริมกำลังด้วยรากหญ้าแฝกด้วยการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนตรงในสนาม และในห้องปฏิบัติการ

3. วิธีการดำเนินการศึกษา

การดำเนินงานทดสอบแบ่งเป็นสองส่วนคือ ในห้องปฏิบัติการ และการทดสอบในสนาม ต้นกล้าหญ้าแฝกสาย

พันธุ์ศรีลังกา ที่ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานพัฒนาที่ดินจังหวัดเชียงราย เป็นพันธุ์ที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่เพาะปลูกที่ดอน ดินลูกรัง และในสภาพอากาศเย็น ต้นกล้าที่ใช้มีความสูงประมาณ 25–30 cm มีการคัดเลือกต้นกล้าที่สภาพแข็งแรงสมบูรณ์เพื่อใช้ในการปลูก แบ่งเป็นสองส่วนคือ ปลูกในกระถางในห้องปฏิบัติการสำหรับใช้ทดสอบคุณสมบัติราก และปลูกในแปลงทดสอบในพื้นที่ลาดดินเพื่อทดสอบแรงเฉือนตรง โดยการปลูกหญ้าแฝก ได้คัดเลือกต้นที่สมบูรณ์และตัดต้นหญ้าแฝกที่คัดเลือกเหลือเพียง 10 cm ก่อนนำลงปลูกในสนาม โดยให้มีระยะห่างระหว่างแถวในแนวนอนและแนวดิ่ง 1 m ดำเนินการปลูกช่วงเดือนมิถุนายนเป็นช่วงฤดูฝนเพื่อให้ต้นหญ้าเจริญเติบโตได้อย่างเต็มที่ แล้วทำการทดสอบที่อายุการปลูกที่ 2 4 และ 6 เดือน คือที่เดือน สิงหาคม ตุลาคมและธันวาคม รูปการเตรียมแปลงปลูก และติดตั้งกล่องทดสอบแรงเฉือนในสนามแสดงในรูปที่ 3(ก) และ 3(ข) ตามลำดับ

3.1 ระเบียบวิธีการทดสอบ

ในการดำเนินงานทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

1) การทดสอบหาค่าแรงดึง (tensile strength test) หน่วยแรงดึง tensile strength และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (elastic modulus) ของรากหญ้าแฝกตามอายุการปลูก ของรากหญ้าแฝกที่ 2 4 และ 6 เดือน ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมปฐพี โดยการนำหญ้าแฝกที่ปลูกในกระถางเตรียมการทดสอบที่ทำจากแผ่นสังกะสีม้วนเป็นทรงกลม เมื่อครบอายุการปลูกจึงนำหญ้าแฝกออกจากกระถาง โดยใช้ความระมัดระวังในการแกะเพื่อป้องกันความเสียหายกับราก นำก้อนดินพร้อมต้นหญ้าล้างทำความสะอาดเศษดินที่เกาะที่รากหญ้าออกจนเหลือเพียงแต่รากที่สะอาด ในรูปที่ 3(ค) รูปรากหญ้าหลังการล้างทำความสะอาดก่อนคัดเลือกเพื่อนำไปทดสอบ โดยคัดเลือกรากที่อยู่ในสมบูรณ์ แล้วนำมาวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากหญ้าแฝกเพื่อหาค่าเฉลี่ย

2) แล้วนำรากหญ้าแฝกไปติดตั้งในชุดการทดสอบหาค่าแรงดึงของรากหญ้าแฝกโดยให้แผ่นทดสอบห่างกัน 10 cm ทำการเพิ่มน้ำหนักเพิ่มน้ำหนักทุก ๆ 2 min วัดระยะการยืดตัวจนกระทั่งตัวอย่างรากหญ้าแฝกเกิดการฉีกขาดแล้วบันทึกผลการทดลองสำหรับสมการคำนวณกำลังรับแรงดึง (tensile strength of grass root, T_R) และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของรากหญ้า (elastic modulus of grass root, E_R) ด้วยสมการที่ (4) และ (5)

$$T_R = \frac{F_{\max}}{\pi\left(\frac{D}{2}\right)^2} \tag{4}$$

$$E_R = \frac{\sigma_R}{\varepsilon_R} \tag{5}$$

เมื่อ $F_{\max}$ คือ แรงดึงสูงสุดหน่วย (kN), D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางรากหญ้าแฝกหน่วยเมตร (m), σ_R คือความเค้นดึงหน่วยกิโลปาสคาล (kPa) และ ε_R คือความเครียดของรากหญ้าแฝกคำนวณจาก $\Delta L/L$ เมื่อ ΔL คือความยาวที่เปลี่ยนไปของรากหญ้าหลังการดึงทดสอบหน่วยมิลลิเมตร (mm) และ L คือความยาวเริ่มต้นหน่วยมิลลิเมตร (mm)

3. นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงและเส้นผ่านศูนย์กลางของราก และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและเส้นผ่านศูนย์กลางราก

4. การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนในมวลดินด้วยวิธีทดสอบแรงเฉือนตรง (direct shear test) ในห้องปฏิบัติการ ใช้ตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.30 cm และทดสอบแรงเฉือนตรงในสนาม (field direct shear test) ด้วยการปลูกหญ้าแฝกในสนาม

(ก) การติดตั้งชุดทดสอบแรงเฉือนตรงในสนาม

(ข) สภาพการพิบัติของตัวอย่างดินและรากหญ้าอายุ 2 เดือน

รูปที่ 4 การติดตั้งชุดการทดสอบหาค่าแรงเฉือนโดยตรงในสนาม และสภาพการพิบัติของตัวอย่างดิน

ในกล่องเฉือนดินขนาด 0.30×0.30 m เพื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนของดินและหญ้าแฝกที่อายุการปลูก 2 4 และ 6 เดือน และดินที่ไม่มีรากหญ้า เมื่อครบอายุการปลูกทำปรับพื้นที่บริเวณรอบกล่องทดสอบแรงเฉือนให้เรียบที่ระดับประมาณ 0.20 m จากระดับดินเดิม แล้วติดตั้งชุดการทดสอบรูปที่ 4(ก) โดยใช้น้ำหนักก้อนดินเป็นน้ำหนักกระทำในแนวดิ่ง (normal load) เท่ากับ 30 kg ในแนวดิ่งแล้ว ใช้กระบอกไฮดรอลิกดันกับกล่องเฉือนดินจนเกิดการวิบัติ ดังรูปที่ 4(ข) ทำการบันทึกค่าการเคลื่อนตัวในแนวนอน ค่าแรงเฉือนที่ได้จากเกจของวงแหวนวัดแรงตามลำดับ ทำการเก็บตัวอย่างดินแปรสภาพในกล่องทดสอบเพื่อคำนวณหาปริมาณความชื้นในสนาม โดยทำการทดสอบจำนวน 10 ตัวอย่างที่ช่วงอายุต่าง ๆ

5. นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนและการเคลื่อนที่ในแนวนอน และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดและน้ำหนักกระทำในแนวดิ่ง

4. ผลการศึกษา

4.1 ผลการทดสอบแรงดึงของรากหญ้าแฝกด้วยการทดสอบกำลังรับแรงดึง

ผลการทดสอบแรงดึงของรากหญ้าแฝกด้วยการทดสอบกำลังรับแรงดึง (tensile strength test) จากหญ้าแฝกที่อายุ 2 4 และ 6 เดือนตามลำดับ โดยสรุปผลการทดสอบในตารางที่ 1 ผลการทดสอบค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของหญ้าแฝกเท่ากับ 0.140 0.146 และ 0.160 mm และมีค่าหน่วยแรงดึงเฉลี่ยที่คำนวณจากสมการที่ (4) เท่ากับ 102.06 136.16 และ 154.86 kPa สำหรับรากหญ้าแฝกที่อายุการปลูก 2 4 และ 6 เดือน ตามลำดับ

รูปที่ 5(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรากหญ้าแฝกตามอายุการปลูก จะเห็นว่าค่าหน่วยแรงดึงแปรผกผันกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางราก และค่ากำลังรับหน่วยแรงดึงเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุของรากหญ้าแฝก โดยมีความสัมพันธ์ของเส้นแนวโน้มแบบยกกำลัง มี R-squared (R^2) เท่ากับ 0.855 0.972 และ 0.971 สามารถ

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบการรับแรงดึงและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของหญ้าแฝกอายุ 2 4 และ 6 เดือน

ลำดับ	รากหญ้าแฝกอายุ 2 เดือน			รากหญ้าแฝกอายุ 4 เดือน			รากหญ้าแฝกอายุ 6 เดือน		
	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางราก (cm)	หน่วยแรงดึง (kPa)	ค่าโมดูลัส (kPa)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางราก (cm)	หน่วยแรงดึง (kPa)	ค่าโมดูลัส (kPa)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางราก (cm)	หน่วยแรงดึง (kPa)	ค่าโมดูลัส (kPa)
1	0.152	63.72	1,593.69	0.215	75.26	495.60	0.160	172.38	862.32
2	0.100	199.12	1,992.25	0.182	91.43	482.98	0.212	109.74	439.17
3	0.205	59.74	747.08	0.123	178.86	496.85	0.153	210.69	810.75
4	0.132	89.39	596.22	0.128	166.36	665.77	0.208	114.00	422.43
5	0.140	79.46	722.76	0.136	140.34	520.06	0.203	119.68	412.91
6	0.135	99.70	498.76	0.132	148.98	512.25	0.197	113.71	669.21
7	0.125	116.29	387.84	0.134	144.56	664.25	0.147	204.21	928.72
8	0.110	150.17	1,001.64	0.136	140.34	468.05	0.143	241.19	893.74
9	0.145	86.42	617.63	0.151	111.92	522.36	0.167	158.23	728.79
10	0.154	76.62	294.83	0.126	163.50	564.10	0.217	104.74	374.26
ค่าเฉลี่ย	**0.140**	**102.06**	**845.27**	**0.146**	**136.16**	**539.23**	**0.160**	**154.86**	**654.23**

สรุปเป็นสมการความสัมพันธ์ในสมการที่ (6–8) สำหรับอายุการปลูกที่ 2 4 และ 6 เดือนตามลำดับ

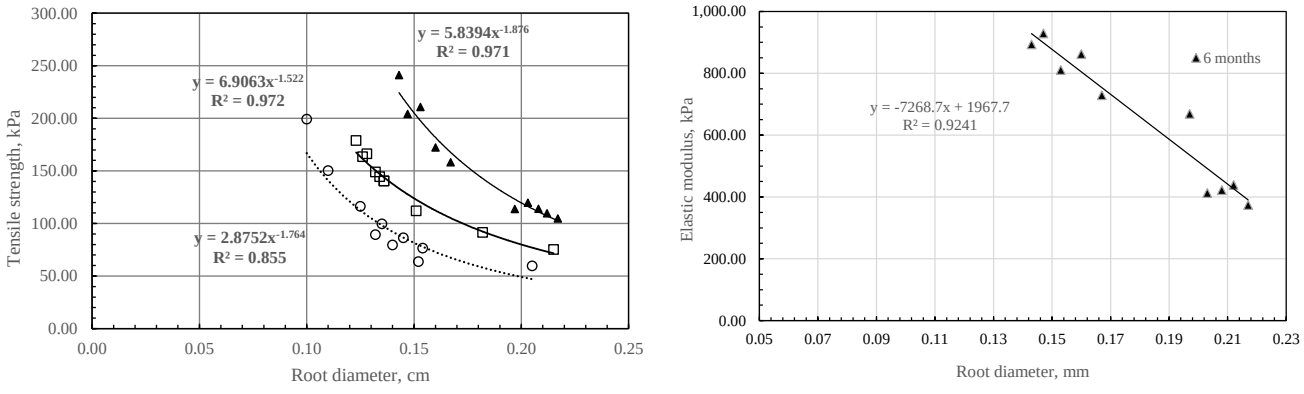
$$y = 2.8752x^{-1.764};\ R^2 = 0.855 \quad (6)$$

$$y = 6.9063x^{-1.522};\ R^2 = 0.972 \quad (7)$$

$$y = 5.8394x^{-1.876};\ R^2 = 0.971 \quad (8)$$

เมื่อ x คืออายุในการปลูกหญ้าแฝกหน่วยเดือน และ y คือค่าหน่วยแรงดึงของรากหญ้าแฝกหน่วย kPa

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของหญ้าแฝกอายุ 2 4 และ 6 เดือน มีค่าเฉลี่ย 845.27 539.23 และ 654.23 kPa คำนวณจากสมการที่ (4) พบว่ารากหญ้าแฝกอายุน้อยมีแนวโน้มให้ค่าความ



(ก) (ข)

รูปที่ 5 (ก) ผลการทดสอบค่าหน่วยแรงดึง (ข) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรากหญ้าแฝก

ตารางที่ 2 ผลทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินในพื้นที่ศึกษา

Test results	Soil 1	Soil 2	Soil 3	Soil 4	Soil 5
% Passing #200	63.0	70.7	73.9	81.3	72.9
Specific Gravity, Gs	2.68	2.70	2.68	2.88	2.88
W_{LL} (%)	33.3	43.8	48.8	49.2	48.8
W_{PL} (%)	24.0	35.5	39.7	16.0	12.5
PI (%)	9.30	8.30	9.10	33.3	36.3
Total Unit Weight (kN/m^3)	15.50	15.40	15.70	15.89	16.09
USCS	ML	ML	ML	CH	CH

ยืดหยุ่นที่สูงกว่ารากหญ้าแฝกที่มีอายุสูงขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรากหญ้าแฝกดังรูปที่ 5(ข) ผลศึกษาพบว่าการพัฒนาค่าหน่วยแรงดึงและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของรากหญ้าแฝก จะมีค่าลดลงตามอายุการปลูก เนื่องจากขนาดพื้นที่หน้าตัดในการคำนวณพื้นที่รับแรงที่ใช้ในการคำนวณคือเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก แต่เมื่อรากหญ้าแฝกเจริญมีอายุเพิ่มขึ้นทำให้ส่วนเปลือกผิวภายนอก (sponge shell) ของรากมีขนาดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ส่วนที่รับแรงคือแกนของเนื้อรากภายใน (fiber core) จะมีขนาดพื้นที่หน้าตัดลดลง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลายภายนอกที่วัดจึงเป็นส่วนเปลือกที่มีขนาดความหนาเพิ่มขึ้นตามอายุ จึงเป็นเหตุผลที่ค่ากำลังรับแรงดึงของรากหญ้ามีค่าที่ลดลง [15]

4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินในพื้นที่ศึกษา (Soil Basic Properties)

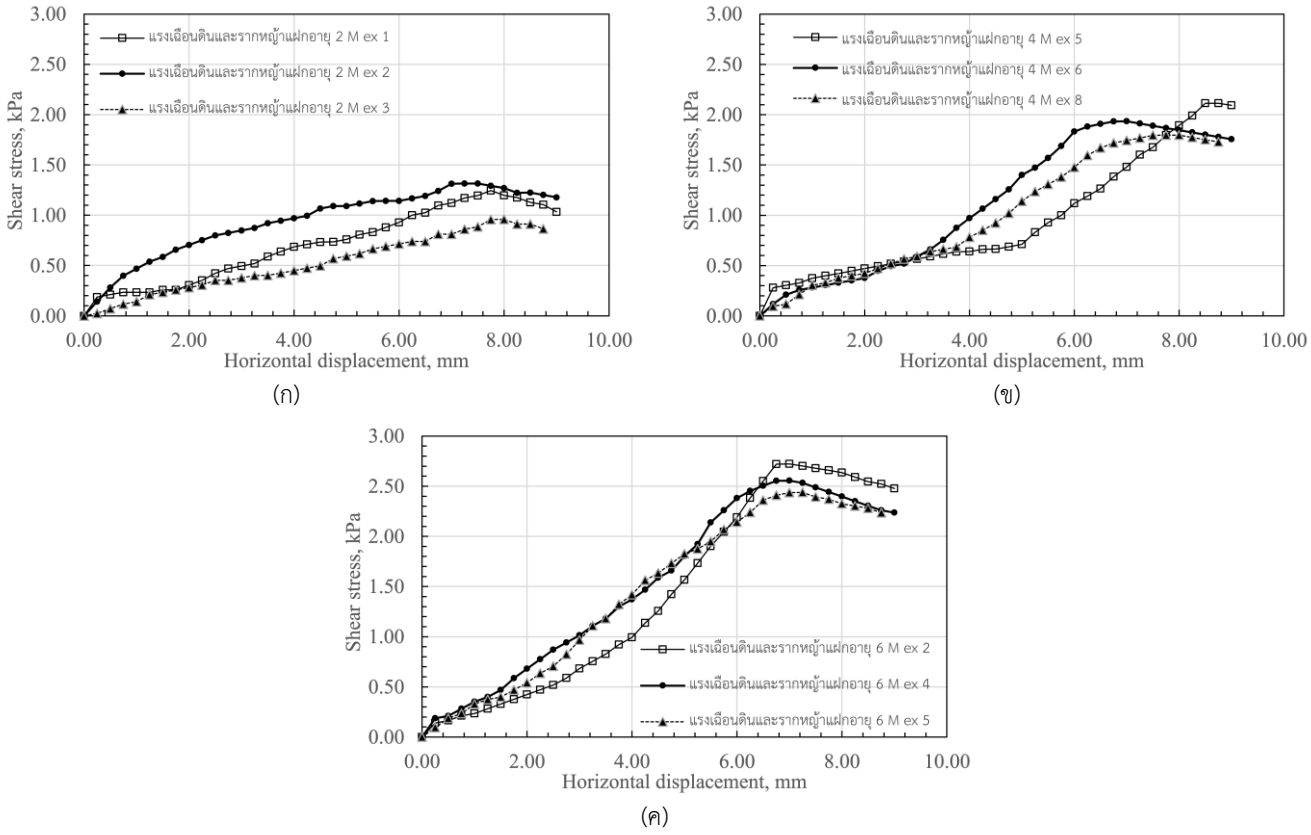
พื้นที่ทำการศึกษา ณ ลาดดินตัดหลังอาคารปฏิบัติการทดสอบวัสดุภายในมหาวิทยาลัย เป็นเนินเขาสูงประมาณ 25 m โดยมีการปรับลาดเขาบริเวณถนนเข้าอาคารปฏิบัติการโดยมีความลาดชันของลาดดิน 1:1.73 (V:H) ผ่านการเสริมเสถียรภาพด้วยการใช้กำแพงกันดินและดาดผิวหน้าด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กที่บริเวณลาดดินตัดชั้นล่าง ด้านบนใช้การปลูกหญ้าแฝกเพื่อป้องกันการกัดเซาะหน้าดินและเสริมเสถียรภาพ [17]

ลักษณะทั่วไปของดินในพื้นที่ศึกษามีหินต้นกำเนิดเป็นหินทราย (sandstone) และหินทรายแป้ง (siltstone) มีหินดินดาน (shale) และหินกรวดมน (conglomerate) แทรกสลับชัน สำหรับลักษณะทางกายภาพเป็นดินลูกรังสีแดงเข้มดินตะกอนทรายสีเหลืองอ่อน และสีส้มสลับกับสีดำ เมื่ออยู่ในสภาพชื้นค่ากำลังรับแรงเฉือนมีค่าต่ำ

ในการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานได้ทำการเก็บตัวอย่างจำนวน 5 ตำแหน่งครอบคลุมพื้นที่ทั่วบริเวณลาดดิน โดยมีผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดิน (ดูตารางที่ 2) พบว่าดินกลุ่มใหญ่ในพื้นที่ศึกษาเมื่อจำแนกในระบบ Unified Soil Classification System (USCS) เป็นสองกลุ่มคือ 1 เป็นดินตะกอนทรายที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (ML) มีค่าเฉลี่ย Gs=2.69 W_N=42.7% W_{LL}=42.0% W_{PL}=33.1% PI=8.9% และ γ_t =15.53 kN/m^3 สำหรับดินกลุ่มที่ 2 เป็นดินเหนียวมีความเป็นพลาสติกต่ำ (CL) มีค่าเฉลี่ย Gs=2.88 W_N=48.1% W_{LL}=49.0% W_{PL}=14.5% PI=34.8% และ γ_t =15.99 kN/m^3 โดยพื้นที่ทดสอบโดยส่วนใหญ่มีดินตะกอนทรายเป็นตัวแทนส่วนใหญ่ในพื้นที่

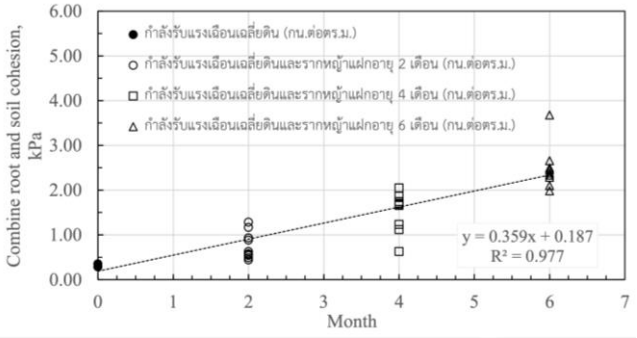
4.3 ผลการทดสอบแรงเฉือนของมวลดินในสนาม (Field Direct Shear Test)

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของมวลดินที่เสริมกำลังด้วยหญ้าแฝกด้วยการทดสอบแรงเฉือนในสนาม การทดสอบได้ทำเมื่อครบอายุการปลูกตามที่กำหนด ในรูปที่ 8 ค่าหน่วยแรงเฉือนของดินและรากหญ้าที่อายุการปลูกต่าง ๆ กับการเคลื่อนตัวในแนวนอน (horizontal displacement) จากกราฟความสัมพันธ์แนวโน้มค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินและรากหญ้าแฝกมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุ ลักษณะการพิบัติของแรงเฉือนดินและรากหญ้าอายุ 2 เดือนในรูปที่ 6(ก) ลักษณะการเพิ่มของแรงเฉือนเพิ่มขึ้นตามการเคลื่อนตัวในแนวนอน โดยมี



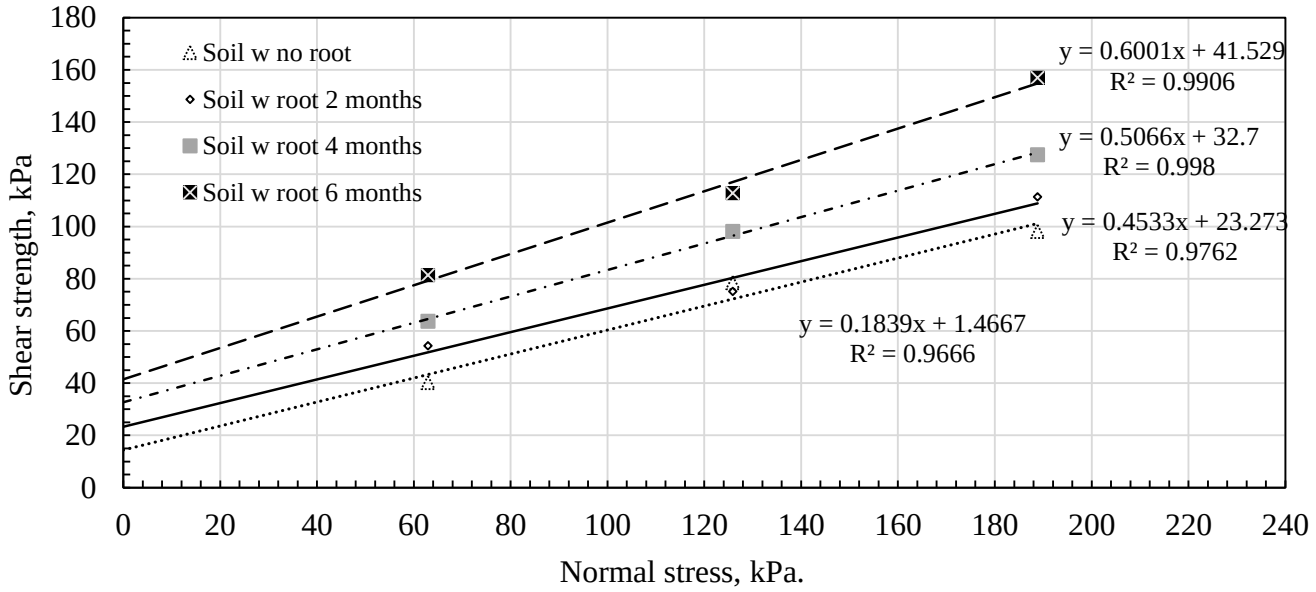
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนของดินเสริมกำลังด้วยรากหญ้าแฝกที่อายุการปลูกต่าง ๆ (ก) 2 เดือน (ข) 4 เดือน และ (ค) 6 เดือน

ค่าสูงสุดที่จุดพิบัติและยังสามารถรับแรงได้อย่างต่อเนื่องโดยค่าหน่วยแรงเฉือนจะมีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่ออายุของหญ้าแฝกเพิ่มขึ้นหน่วยแรงเฉือนร่วมระหว่างดินและรากหญ้าแฝกมีค่าเพิ่มขึ้น ลักษณะกราฟ stress-strain พบว่าเมื่อถึงจุดพิบัติค่ากำลังของดินและรากหญ้ามีการลดกำลังอย่างชัดเจนคล้ายพฤติกรรมวัสดุเปราะ ในรูปที่ 6(ข) และ 6(ค)



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนของดินเสริมกำลังด้วยรากหญ้าแฝกกับอายุการปลูก

ทั้งนี้จากผลการทดสอบมีข้อจำกัดในการปลูกและดูแลหญ้าแฝกในสนาม เนื่องจากการปลูกในพื้นที่เขาและลาดเขาเป็นลักษณะดินตะกอนมีกรวดที่เกิดจากการรวมตัวกันของดินตะกอนทรายมีลักษณะแข็งเมื่ออยู่ในสภาพแห้ง ทำให้รากหญ้าแฝกไม่สามารถแทรกตัวในแนวดิ่งได้ดีนักเมื่อเปรียบเทียบกับการปลูกในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะเห็นได้จากลักษณะการเติบโตของรากไปในแนวด้านข้างทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนในแต่ละช่วงอายุไม่มีความเปลี่ยนแปลงมากนัก ดังแสดงในรูปที่ 4(ข) ทั้งนี้ในการนำเสนอผลจึงเพียงนำเสนอผลการพัฒนากำลังรับแรงเฉือนตามอายุของหญ้าแฝกเพื่อให้เห็นลักษณะของพฤติกรรมของ stress-strain curve ที่เปลี่ยนแปลงไปในรูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงในสนาม ที่เป็นการพัฒนากำลังรับแรงเฉือนร่วมของดินและรากหญ้าตามอายุการปลูก



รูปที่ 8 ผลการทดสอบแรงเฉือนตรง (Direct shear test) ของดินและดินเสริมกำลังด้วยรากหญ้าแฝกตัวอย่างขนาด 6.3 cm (Dia.)

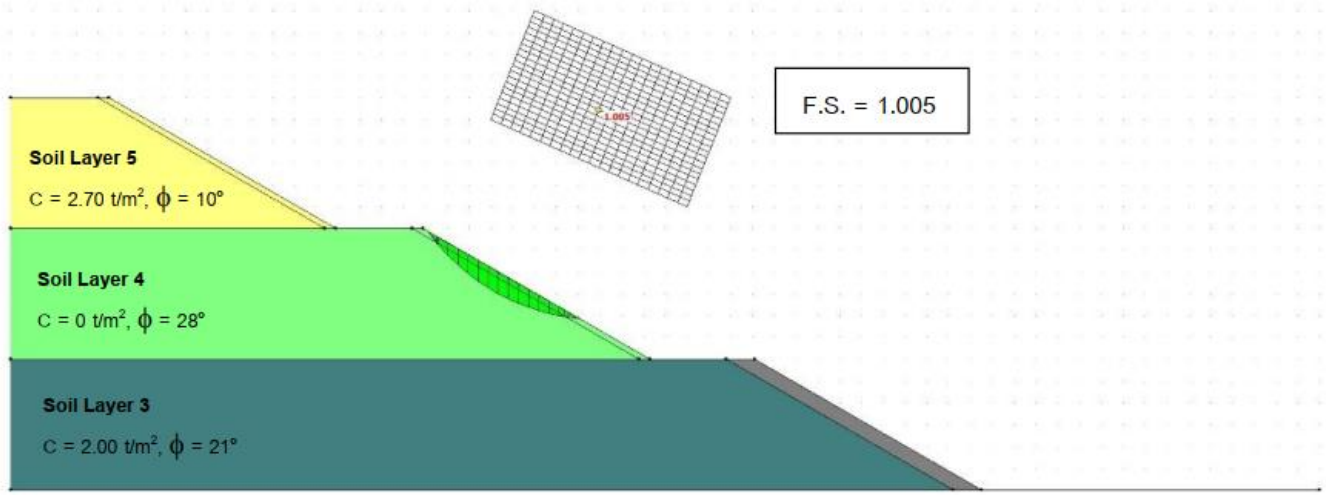
4.4 การทดสอบแรงเฉือนของมวลดินในห้องปฏิบัติการ (Direct Shear Test)

การทดสอบแรงเฉือนตรงในห้องปฏิบัติการด้วยโดยทำการเปรียบเทียบตัวอย่างดินธรรมชาติ และดินที่มีรากหญ้าแฝกตามอายุการปลูก ทดสอบแรงเฉือนตรงแบบ undrained test ทดสอบแบบ strain control ด้วยความเร็วในการทดสอบ 0.30 mm/min กำหนดสภาพการทดสอบเป็นดินสภาพธรรมชาติ โดยในใช้น้ำหนักกดทับในแนวดิ่งเท่ากับ 0.2 0.4 และ 0.6 kN ตามลำดับ โดยในการทดสอบควบคุมให้ความชื้นธรรมชาติ (W_N) ของดินมีค่าใกล้เคียงกันที่ประมาณร้อยละ 42

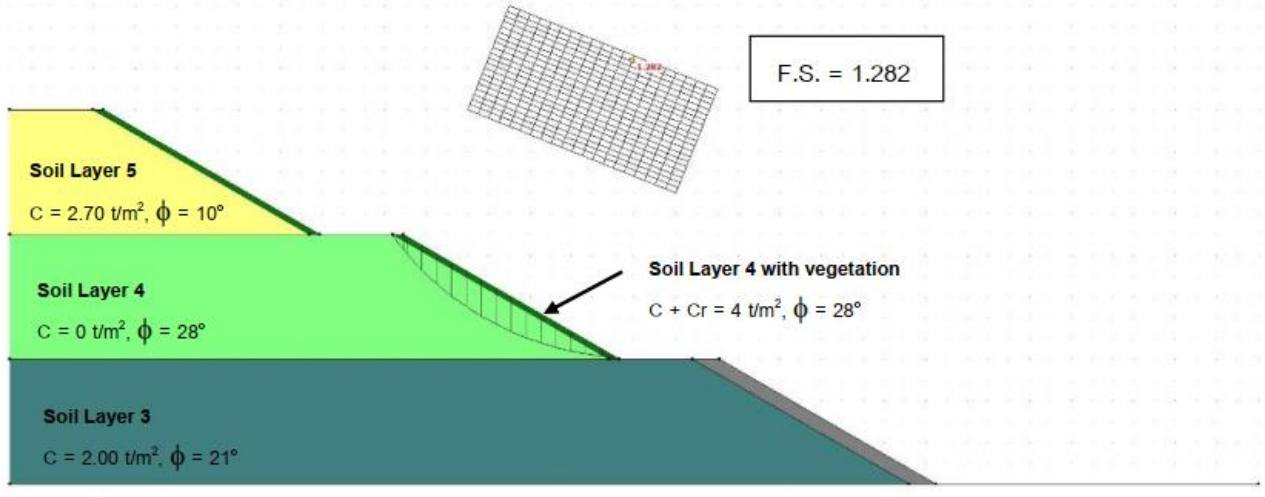
ในรูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนของดินธรรมชาติ และดินเสริมกำลังด้วยรากหญ้าแฝกที่อายุต่าง ๆ พบว่าค่าหญ้าแฝกช่วยเติมกำลังรับแรงเฉือนในมวลดิน จะเห็นได้ค่าความเชื่อมแน่น (cohesion) ของดินธรรมชาติ กับดินเสริมกำลังด้วยหญ้าแฝกที่อายุต่าง ๆ มีค่าเท่ากับ 1.47 kPa (ดินธรรมชาติ) 23.23 kPa (2 เดือน) 32.70 kPa (4 เดือน) และ 41.50 kPa (6 เดือน) โดยมีค่าความเชื่อมแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น 15 22 และ 28 เท่า จากดินธรรมชาติ โดยผลการทดสอบแสดงถึงรากหญ้าแฝกช่วยในการเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนในมวลดินที่เพิ่มขึ้น โดยวิธีธรรมชาติ

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน จากผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินและรากหญ้าในสนาม ประเมินค่าอัตราส่วนปลอดภัย (factor of safety, F.S.) ของลาดดินในสภาพก่อน และหลังการปรับปรุงคุณภาพใช้วิธีการวิเคราะห์แบบขีดจำกัดสมดุลย์ (limit equilibrium) ด้วยโปรแกรม KU Slope 2.0 [19] ในการจำลองโมเดลในการวิเคราะห์เปรียบเทียบคุณสมบัติของดินเดิม และภายหลังการเสริมเสถียรภาพด้วยหญ้าแฝก โดยค่ากำลังรับแรงเฉือนของชั้นดินเดิมอ้างอิงจากผลการศึกษาของวัฒนา ปรีดา และอังกูร [18] และดินเสริมกำลังด้วยรากหญ้าจากผลการทดสอบจากบทความนี้ โดยแสดงรายละเอียดในรูปที่ 9(ก) และ 9(ข)

ผลการวิเคราะห์พบว่าลาดดินก่อนปรับปรุงมีลักษณะการพิบัติที่ผิวของลาด (local failure) ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยด้วยวิธี simplified Bishop เท่ากับ 1.005 ภายหลังการใช้หญ้าแฝกในการปรับปรุงคุณภาพส่งผลในค่าเสถียรภาพของลาดมีค่าสูงขึ้นโดยมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเพิ่มขึ้นเป็น



(ก)



(ข)

รูปที่ 9 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ (ก) ลาดดินธรรมชาติ (ข) ลาดดินเสริมกำลังด้วยรากหญ้าแฝก

1.282 ผลการวิเคราะห์ แสดงให้เห็นถึงผลการเสริมเสถียรภาพผิวหน้าของลาดดินที่พัฒนาขึ้นภายหลังการเสริมกำลัง อีกทั้งรากหญ้าแฝกยังมีประโยชน์ในด้านอื่น เช่น การชะลอความเร็วของน้ำฝนที่ไหลบ่า และยังลดการกัดเซาะที่ผิวหน้าของลาดด้วยรากที่ยึดเกาะมวลดินไว้อีกด้วย

บทความนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของรากหญ้าแฝก ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนตรงทั้งในสนามและห้องปฏิบัติการ เพื่อแสดงถึงผลการประยุกต์เพิ่มเสถียรภาพในลาดดินในพื้นที่ด้วยวิธีชีววิศวกรรมธรณีเทคนิค แต่อย่างไรก็ดีสำหรับในพื้นที่การปลูกในที่สูง เช่นภูเขา หรือลาดดินที่มีหินที่มีสารอาหารในมวลดินต่ำนั้น เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ในการออกแบบ ในขั้นตอนการปลูกควรมีการดูแลบำรุงรักษาให้หญ้าแฝกมีการเติบโตที่สมบูรณ์อย่างต่อเนื่องเพื่อให้เกิดประโยชน์จริงตามความต้องการ และวัตถุประสงค์ของการออกแบบ

5. สรุปผลการศึกษา

การศึกษากำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝก และกำลังรับแรงเฉือนในสนามของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝก โดยทดสอบที่อายุของหญ้าแฝกที่ 2 4 และ 6 เดือน โดยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1) กำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝกมีค่าหน่วยแรงดึงแปรผกผันกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางราก โดยที่ค่ากำลังรับแรงดึงเฉลี่ยมีแนวโน้มมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุของรากหญ้าแฝก โดยมีความสัมพันธ์ของเส้นแนวโน้มแบบยกกำลัง มี R-squared (R^2) เท่ากับ 0.855 0.972 และ 0.971
2) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของรากหญ้าแฝกอายุน้อยมีแนวโน้มให้ค่าที่สูงกว่ารากหญ้าแฝกอายุมาก ผลทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นไม่ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก
3) ลักษณะการพิบัติของดินเสริมกำลังด้วยหญ้าแฝกอายุอ่อนมีพฤติกรรมคล้ายดินธรรมชาติ แต่เมื่อรากหญ้าแฝกอายุมากขึ้นและมีจำนวนของรากที่เพิ่มขึ้น ทำให้ดินมีค่ากำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้น และเมื่อพิบัติมีพฤติกรรมคล้ายวัสดุเปราะเนื่องจากการรากหญ้าฉีกขาด
4) ผลการทดสอบแรงเฉือนพบว่าดินเสริมกำลังด้วยรากหญ้าแฝกมีส่วนช่วยในการเพิ่มค่าความเชื่อมแน่นในมวลดิน โดยผลทดสอบพบว่า สามารถเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนได้ 15–28 เท่าจากค่าความเชื่อมแน่นของดินเดิม
5) ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินภายหลังการเสริมเสถียรภาพด้วยการปลูกหญ้าแฝก พบว่าให้อัตราส่วนความปลอดภัยที่สูงขึ้น ทั้งยังเพิ่มคุณสมบัติช่วยการลดความเร็วของน้ำ และลดการกัดเซาะผิวหน้า
6) เพื่อการนำความเชื่อมแน่นเสมือนของรากหญ้าไปใช้ในการวิเคราะห์ ได้จากสมการที่ (1) และ (2) ที่ทำการเปรียบเทียบจากสภาพดินธรรมชาติ (C) และภายหลังการเสริมกำลังด้วยรากหญ้า ($C+C_r$) โดยผลต่างที่ได้คือ ค่าความเชื่อมแน่นเสมือนของรากหญ้า C_r เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์อื่น ๆ ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ศึกษาขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาที่ดินจังหวัดเชียงราย ที่ได้อนุเคราะห์ต้นกล้าหญ้าแฝก ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย ที่อนุเคราะห์พื้นที่ทำการศึกษา และขอขอบคุณข้อแนะนำที่มีค่าจากผู้ประเมินบทความ ที่ทำให้บทความนี้มีความถูกต้องสมบูรณ์และชัดเจนยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมพัฒนาที่ดิน. ข้อมูลการจัดการดิน.เข้าถึงได้จาก: http://www.ldd.go.th/Web_Test/clay.htm [เข้าถึงเมื่อ 15 ธันวาคม 2560].

[2] Eab KH, Likitlersuang S, Takahaxhi A. Laboratory and modelling investigation of root-reinforced system for slope stabilisation. *Soil and Foundations*. 2015; 55(5): 1270–1281.

[3] Cebada DP. Assessment of the role of vegetation as part of ecosystem-based risk reduction measures used for shallow-landslides in Rasuwa district. *Unpublished master thesis*. Nepal: University of Twente, Enschede; 2017.

[4] Mickovski SB, Beek LPHV. Root morphology and effects on soil reinforcement and slope stability of young vetiver (Vetiveria zizanioides) plants grown in semi-arid climate. *Plant Soil*. 2009; 324: 43–56.

[5] กิตติมา ศิวอาทิตย์กุล. 2557. การบริหารจัดการหญ้าแฝกการใช้หญ้าแฝกแบบยั่งยืน. เข้าถึงได้จาก: http://www1.ldd.go.th/WEB_PSD/Employee%20Assessment/wean/pch/pch33/n4.pdf [เข้าถึงเมื่อ 1 ธันวาคม 2560].

[6] อารี สุวรรณจินดา, บัญญัติ ศิริธนาวงศ์, ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. ยุทธศาสตร์การปลูกหญ้าแฝกในการ

ปรับปรุงดินที่แข็งเป็นดานเพื่อการปลูกพืชตามแนวพระราชดำริ. *วารสารสมาคมนักวิจัย.* 2556; 18(2):16–28.

[7] ดิถี แห่งเชาวนิช. การใช้หญ้าแฝกเพื่อเสริมเสถียรภาพเชิงลาดและควบคุมการชะล้างพังทลาย (เพื่อการประยุกต์ในงานวิศวกรรม). เครือข่ายหญ้าแฝกประเทศไทย เอกสารทางวิชากรหมายเลข 2543/1. 2543.

[8] มงคล ตะอุ่น, สันติภาพ ปัญจพรรค์, พัชรี ธีรจินดาขจร และวันเพ็ญ วิโรจน์กูฎ. การเจริญเติบโตของหญ้าแฝกในการปรับปรุงคุณภาพน้ำของหนองน้ำเสียชุมชน. *แก่นเกษตร.*2549; 35(4): 267–273.

[9] เอกรัตน์ ปัญญาเอก. ความสามารถของการทนเค็มน้ำทะเลของสายพันธุ์หญ้าแฝก. *ปริญญานิพนธ์มหาบัณฑิต สถาบันบัณฑิตพัฒนาบริหารศาสตร์*. กรุงเทพฯ; 2547.

[10] Mickovski SB, Beek LPHV, Salin F. Uprooting of vetiver uprooting resistance of vetiver grass (Vetiveria zizanioides). *Plant and Soil*. 2005; 278: 33–41.

[11] Truong P. Vetiver grass technology for mine rehabilitation. *Office of the Royal Development Projects Board*. 1999.

[12] พาณิช วุฒิพฤกษ์, วิชัย สังวรปทานสกุล, จตุรงค์ เสาวภาคย์ไพบูลย์. ความแข็งแรงต่อการรับแรงเฉือนของดินทรายตะกอนที่เสริมรากหญ้าแฝกลุ่มกลุ่มพันธุ์สงขลา 3 และรากหญ้าแฝกดอนกลุ่มพันธุ์นครสวรรค์. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.* 2545; 12(4): 55–64.

[13] อภินิติ โชติสังกาศ. ชีววิศวกรรมปฐพี เพื่อควบคุมการชะล้างพังทลายของลาดและดินถล่ม. หจก. พรี-วัน. กรุงเทพ. 2556.

[14] Burylo M, Hudek C, Rey H. Soil reinforcement by the roots of six dominant species on eroded mountainous marly slopes (Southern Alps, France). Cetena; 2011: 84. 70–78.

[15] Teerawattanasuk C, Maneecharoen J, Bergado DT, Voottipruex P, Le GL. Root strength measurements of vetiver and ruzi grasses. *Lowland Technology International*. 2014; 16(2): 71–80.

[16] Chok YH, Jaksa MB, Kaggwa WS, Griffiths DV. Assessing the influence of root reinforcement on slope stability by finite elements. *International Journal of Geo-Engineering*. 2015; 6(1): 12 pages.

[17] Gray DH, Ohashi H. Mechanics of fiber reinforcement in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1983; 109(3): 335–353.

[18] วัฒนา มกรโรจน์ฤทธิ์, ปรีดา ไชยมหาวัน และอังกูร ว่องตระกูล. งานวิจัยฉบับสมบูรณ์เรื่องเสถียรภาพของดินในระนาบเอียง: กรณีศึกษาสถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตเชียงราย, เชียงราย, สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลเชียงราย 2549.

[19] รัฐธรรม อิสโรหาร. คู่มือการใช้โปรแกรม KUslope version 2.0. ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ 2552.