

พฤติกรรมการรับแรงเฉือนของดินที่มีรากพืชในช่วงเติบโตและเสื่อมสภาพ

Shearing behaviour of vegetated soils with growing and decaying roots

ฐาปกรณ์ สากลปัญญา¹ และ วิรุฬห์ คำชุม^{1*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย

*Corresponding author; E-mail address: viroon.ka@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันวิธีชีววิศวกรรมดินโดยใช้วัสดุธรรมชาติได้รับความนิยมมากขึ้นเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพลาดดิน อย่างไรก็ตามการศึกษาล่าสุดมุ่งเน้นศึกษารากพืชเมื่อมีการเจริญเติบโตเต็มที่ ซึ่งตามความเป็นจริงนั้นรากพืชมีทั้งการเจริญเติบโตและเสื่อมสภาพ ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้วิศวกรยังไม่มั่นใจในการนำพืชไปประยุกต์ใช้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษารากพืชเจริญเติบโตและเสื่อมสภาพของรากพืชที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของดิน โดยมีการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อวัดผลของการเจริญเติบโตของรากและการเสื่อมสภาพของรากต่อพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของดินที่ปลูกด้วยหญ้าแพรง (Cynodon dactylon) ซึ่งมีการตรวจวัดในช่วงเจริญเติบโตและเสื่อมสภาพจากการเผาไหม้และการใช้สารกำจัดวัชพืช โดยจะทำการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง ผลการศึกษพบว่ารากพืชเจริญเติบโตของหญ้า มีการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของดินที่ปลูกพืชตามระยะเวลาการเจริญเติบโต และในช่วงเสื่อมสภาพของรากเมื่อเผาไหม้ กำลังรับแรงเฉือนมีการลดลงอย่างค่อยเป็นค่อยไป และช้ากว่าการใช้สารกำจัดวัชพืช เหตุผลหลักมาจากการใช้สารกำจัดวัชพืชทำให้วัชพืชตายและสลายเร็วขึ้น โดยกำลังรับแรงเฉือนมีค่าลดลงเทียบเท่ากับดินที่ไม่มีรากพืชภายใน 2 เดือนหลังการได้รับสารกำจัดวัชพืช และ 4 เดือนหลังการเผาไหม้

คำสำคัญ: กำลังรับแรงเฉือนในดิน, การเจริญเติบโตของรากพืช, การเสื่อมสภาพของรากพืช

Abstract

Nowadays Soil-bioengineering has been recognized as a green and eco-friendly slope protection alternative for shallow slope failure. However, Most of studies mainly consider strong and mature plants. In fact, natural and anthropogenic activities would lead to plant death and decomposition of root, This is another important factor that makes engineers still not confident in applying plants to improve soil slopes. In order to develop better and more sustainable mitigation strategies, the effects of root decomposition on soil properties will be considered in this study. Laboratory tests were conducted to

measure effects of root growth and decay (i.e. by burning and herbicides) on the properties of soil vegetated with Cynodon dactylon. The direct shear tests were performed to observe Shear strength and Shearing behavior. The results showed that the growth of grass can increase the shear strength of the vegetated soils during growth period. Root decay also resulted in the changes of shear strength. Upon burning, the shear strength were gradually decreased. However, with herbicides, the strength of the roots were significantly reduced. Because the herbicides cause plant to death and decay faster. The maximum shear strength of the soils was also reduced. The decrease was equivalent to soil without plants for 2 months after herbicide application and 4 months after burning.

Keywords: Soil shear strength, Root growth, Root decay

1. คำนำ

พืชถูกนำมาใช้งานด้านชีววิศวกรรมเพื่อป้องกันลาดดินดินถล่ม และการกัดเซาะ [1] โดยรากพืช ขณะเจริญเติบโตจะทำให้รากและดินยึดเกาะกัน มีกำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับดินเปล่า เนื่องจากมีความเสียดทานระหว่างรากพืชกับดิน ดังแสดงในผลการทดสอบของการศึกษาต่างๆ เช่น การทดสอบแรงดึงทิศทางเดียว (Uniaxial tensile test) [2-4] การทดสอบแรงถอนราก (pull-out tests) [5-6] การทดสอบหาค่าแรงเฉือนโดยวิธีตรง (direct shear tests) [7-11] การทดสอบหาค่ากำลังดินในแบบสามแกน (triaxial tests) [12-13] แต่การศึกษาที่ได้กล่าวไปเหล่านี้ไม่ได้พิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของรากพืช ที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติระหว่างช่วงการเจริญเติบโตรวมถึงช่วงการเสื่อมสภาพของรากพืช โดยคาดการณ์ว่าการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของรากพืชในช่วงระหว่างการเจริญเติบโตและเสื่อมสภาพจะส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างรากพืชกับดิน และพฤติกรรมกำลังรับแรงเฉือนของดินที่มีรากพืชจะมีการเปลี่ยนแปลงตามช่วงอายุของพืชที่เพิ่มขึ้นรวมถึงการเสื่อมสภาพของรากพืชจากสาเหตุที่แตกต่างกัน อาทิเช่น การเสื่อมสภาพของรากพืชจากการเผาไหม้ หรือการได้รับสารเคมีกำจัดวัชพืช

2. วัตถุประสงค์การศึกษา

ศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของรากพืชในช่วงระหว่างการเจริญเติบโตและช่วงการเสื่อมสภาพของรากจากสาเหตุที่แตกต่างกัน (การเผาไหม้ และการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืช) ต่อความสามารถการรับแรงเฉือนของดินที่มีรากพืช

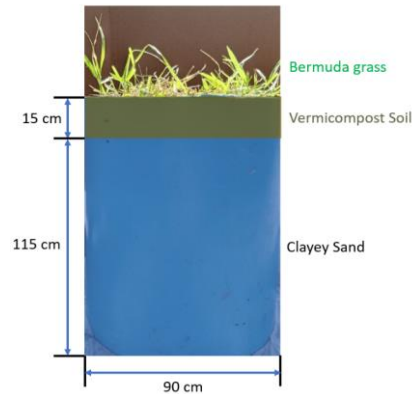
3. วัสดุอุปกรณ์ และการทดสอบหาค่าแรงเฉือน

3.1 ชนิดพืชและดินที่ใช้ในการทดสอบ

ในการศึกษานี้ เลือกหญ้าเบอร์มิวด้า หรือ หญ้าแพรง (Cynodon dactylon) สำหรับการทดสอบ เนื่องจากหญ้านชนิดนี้เจริญเติบโตได้ดีในภูมิภาคที่มีอากาศร้อนและอากาศอบอุ่น [14] ซึ่งการแผ่กระจายจะแผ่กระจายด้วยลำต้นใต้ดิน (rhizomes) และลำต้นที่อยู่เหนือพื้นดินในแนวนอน (Stolons) โดยหญ้าแพรงนี้ถูกจัดเป็นหนึ่งในวัชพืชที่มีความสำคัญชนิดหนึ่งต่อโลก [15] และสามารถแพร่กระจายเข้าไปในพื้นที่ต่างๆได้อย่างรวดเร็ว ทำการกำจัดให้หมดยาก ซึ่งข้อมูลจะถูกรวบรวมอยู่ในฐานข้อมูล Global Invasive Species Database [16] และหญ้านชนิดนี้มีระบบรากที่หนาแน่นอยู่ในชั้นดินตื้น จึงมักถูกใช้สำหรับการป้องกันการกัดเซาะของหน้าดิน [17-18]

โดยในการศึกษานี้ ได้ทำปลูกหญ้าแพรงลงบนดินมูลไส้เดือนที่อุดมไปด้วยสารอาหาร เป็นระยะเวลาประมาณ 1 เดือนเพื่ออนุบาลให้รากเจริญเติบโตแล้วจึงย้ายไปปลูกลงในตัวอย่างทดสอบดังแสดงในรูปที่ 1

ดินที่ใช้ในการศึกษานี้คือดินทรายปนดินเหนียว (Clayey Sand) เป็นดินที่สามารถพบได้ในหลายส่วนของประเทศไทย โดยเฉพาะพื้นที่ลาดชันตามธรรมชาติและที่มนุษย์สร้างขึ้น โดยดินที่ใช้ทดสอบมีค่า D_{60} , D_{30} และ D_{10} เท่ากับ 1.90, 0.62 และ 0.15 mm ตามลำดับ (เป็นค่าขนาดเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่าค่านั้นเป็นจำนวน 60, 30 และ 10 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น ดินทรายที่มีการกระจายตัวที่ดี (well-graded sand) ตามมาตรฐานสากล ASTM D2487 โดยคุณสมบัติอื่นของดินจะถูกสรุปไว้ในตารางที่ 1 และดินนี้จะถูกบดอื่นที่ความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1520 kg/m^3 ในกระบอกพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 90 mm กระบอกมีความลึก 130 mm โดยก่อนทำการบดอัดดินจะเลือกใช้ดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 mm นำดินนั้นไปผสมเข้ากับน้ำที่เปอร์เซ็นต์น้ำเหมาะสมเท่ากับ 13% โดยน้ำหนัก (optimum water content) และทำการบดอัดเป็นจำนวน 5 ชั้นที่ความหนาแน่นทุกชั้น (23 mm) เพื่อให้ได้ตัวอย่างดินที่สม่ำเสมอ โดยพื้นผิวระหว่างแต่ละชั้นจะถูกขูดเพื่อให้พื้นผิวระหว่างชั้นสัมผัสเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างชั้นดินบดอัด โดยชั้นดินบดอัดทั้งหมดจะสูง 115 mm และมีชั้นหญ้ารวมไปถึงดินมูลไส้เดือนที่มีความลึก 15mm ปกคลุมผิวหน้าอยู่ด้านบนชั้นดินที่ถูกบดอัดดังรูปที่ 1 ซึ่งแสดงลักษณะชั้นดินและขนาดของตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 1 ลักษณะชั้นดินของตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ 1 สรุปคุณสมบัติของดิน

Parameter	Value	Unit
Specific gravity (G_s)	2.59	-
Maximum dry density	1870	kg/m^3
Target dry density	1520	kg/m^3
Optimum moisture content	13	%
D_{60}	1.9	mm
D_{30}	0.62	mm
D_{10}	0.15	mm
Coefficient of uniformity (C_u)	12.67	-
Coefficient of curvature (C_c)	1.35	-
Effective cohesion (c')	1.43	kPa
Peak friction angle (ϕ'_p)	28.2	degree
Saturated hydraulic conductivity (k_s)	1×10^{-7}	m/s

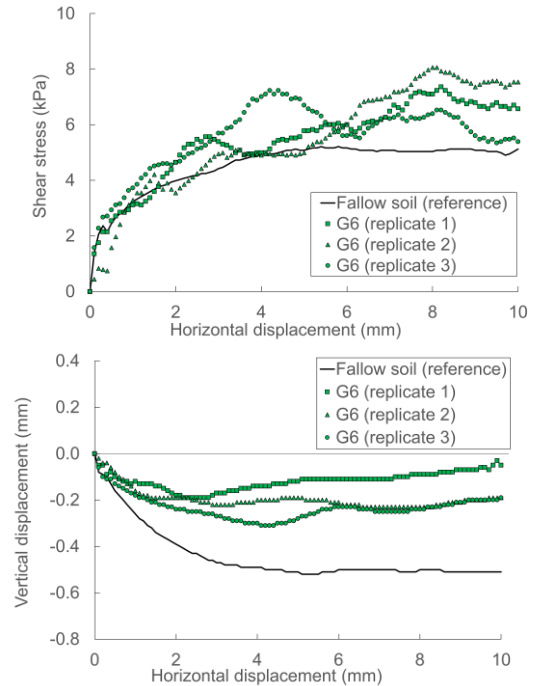
3.2 แผนการทดสอบ

การศึกษานี้จะทำการศึกษาถึงผลกระทบจากการเจริญเติบโตของรากพืช และการเสื่อมสภาพของรากจากสาเหตุที่แตกต่างกัน (จากการถูกเผาไหม้ และการใช้สารเคมี) ดังแผนการทดสอบที่แสดงในตารางที่ 2

โดยตัวอย่างทั้งหมดจะนำไปวางไว้ในสถานที่ซึ่งมีอากาศถ่ายเทและได้รับแสงแดดในช่วงกลางวัน มีการรดน้ำให้แก่ตัวอย่างสัปดาห์ละ 2 ครั้ง และตัวอย่างจะถูกปลูกให้มีอายุ 6 เดือน หลังอายุครบ 6 เดือน ตัวอย่างบางส่วนจะได้รับสารเคมีกำจัดวัชพืช (Propanil 36% W/V) ซึ่งเป็นสูตรของสารเคมีกำจัดวัชพืชทั่วไป ปริมาณครั้งละ 500 mg จำนวน 2 ครั้ง หลังจากนั้นตัวอย่างจะถูกปล่อยให้รากพืชเกิดการเสื่อมสภาพเป็นระยะเวลา 0.5, 1 และ 2 เดือน และสำหรับกรณีการเผาไหม้ หญ้าเหนือผิวดินทั้งหมดจะถูกเผาไหม้ด้วยหัวแก๊สทังไฟเป็นระยะเวลา 15 นาทีและปล่อยให้ความร้อนระอุต่ออีกเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะปล่อยให้ตัวอย่างให้รากพืชเกิดการเสื่อมสภาพเป็นระยะเวลา 1, 2, 4, 6 และ 12 เดือน โดยตัวอย่างทั้งหมดจะยังคงมีการให้น้ำสัปดาห์ละ 2 ครั้ง เพื่อให้อยู่ในสถานะเดียวกันทั้งหมด

ตารางที่ 2 แผนการทดสอบ

Treatment	ID	Grass	Growth duration (month)	Decay treatment	Decay duration (month after killing)
Fallow soil	F1	-	-	-	-
Growth	G2	Bermuda	2	-	-
	G4		4	-	-
	G6		6	-	-
Herbicide	H0.5		6	Herbicide	0.5
	H1		6		1
	H2		6		2
Burning	B1	6	Burning	1	
	B2	6		2	
	B4	6		4	
	B6	6		6	
	B12	6		12	



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับระยะการเคลื่อนที่ของรากพืช ในช่วงการเจริญเติบโตที่อายุ 6 เดือน

3.3 การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง Direct shear test

การทดสอบหาค่าแรงเฉือนโดยตรง ตัวอย่างดินจะถูกนำไปใส่ในเครื่องทดสอบแรงเฉือน และมีน้ำหนักกระทำในแนวตั้งกดตัวอย่างดินภายใต้สภาวะความเค้นปกติ (normal stress) เพื่อลดขนาดช่องว่างระหว่างเม็ดดินข้างกับตัวอย่างดิน นำตัวอย่างดินไปแช่น้ำเพื่อให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จึงนำตัวอย่างไปทดสอบหาค่าแรงเฉือน ด้วยอัตราการเคลื่อนที่แนวราบคงที่ 0.1 mm/min เพื่อให้มีความชื้นเพียงพอสำหรับการให้น้ำไหลออก (fully drained condition)

4. ผลการทดสอบ

4.1 ช่วงการเจริญเติบโตของรากพืช

การเปรียบเทียบพฤติกรรมรับแรงเฉือนของดินที่มีรากพืชในช่วงเจริญเติบโต (2, 4 และ 6 เดือน) กับพฤติกรรมของดินเปล่า พบว่ากำลังรับแรงเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งมีการเปลี่ยนแปลง เนื่องมาจากรากพืชในช่วงการเจริญเติบโตและคุณสมบัติทางชีวกลศาสตร์ที่แตกต่างกันในแต่ละตัวอย่าง แม้ว่าทุกตัวอย่างเจริญเติบโตภายใต้สภาพแวดล้อมที่เหมือนกัน โดยเมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ยในช่วงการเจริญเติบโตที่อายุ 6 เดือนกับดินเปล่าที่ไม่มีรากพืช พบว่ามีกำลังรับแรงเฉือนเพิ่มมากขึ้น 20% และเมื่อพิจารณาลักษณะของเส้นกราฟระหว่างแรงเฉือนและการเคลื่อนที่แนวราบของตัวอย่างทดสอบมักจะมีลักษณะเป็นคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 2 (ซึ่งไม่เกิดขึ้นในกรณีของดินเปล่า) และการค้นพบลักษณะของเส้นกราฟระหว่างแรงเฉือนและการเคลื่อนที่แนวราบที่เป็นลักษณะเส้นคลื่นนี้อาจบ่งชี้ถึงการพังทลายของรากแบบต่อเนื่อง (progressive root failure) หลังจากการสิ้นสุดหรือการขาดของรากพืชขณะรับแรงเฉือน ซึ่งมีส่วนทำให้เกิดความแปรปรวนของข้อมูล

และถึงแม้จะมีความแปรปรวนในข้อมูล แต่พฤติกรรมการรับแรงเฉือนของดินที่มีรากพืชก็เป็นไปตามพฤติกรรมการแข็งตัวเนื่องจากความเครียดหรือ strain hardening โดยค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของดินที่มีรากพืชในช่วงการเจริญเติบโตจะมีค่าสูงขึ้นตามระยะเวลาการเจริญเติบโต และมีค่ามากกว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของดินเปล่าเสมอ

4.2 ช่วงการเสื่อมสภาพของรากพืช

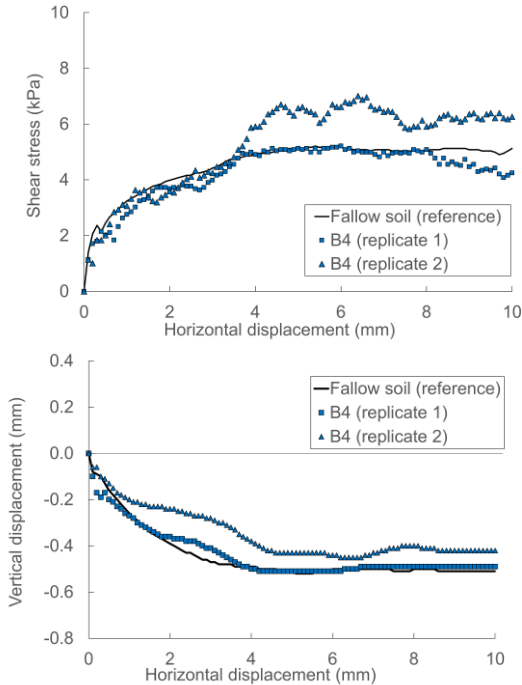
หลังจากการเผาไหม้และการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืช เมื่อไม่พิจารณาถึงระยะเวลาการเสื่อมสภาพ ดินที่มีรากพืชทุกตัวอย่างจะมีพฤติกรรมการแข็งตัวเนื่องจากความเครียดเช่นเดียวกับดินเปล่า และเส้นกราฟระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่แนวราบจะมีลักษณะเป็นคลื่นดังแสดงในรูปที่ 3 และรูปที่ 4 โดยการเสื่อมสภาพทั้งสองแบบ ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของดินที่มีรากพืช จะมีค่าไม่สูงกว่าค่าจากดินเปล่าเสมอไป และมีแนวโน้มลดลงดังแสดงในรูปที่ 5

4.2.1 การเสื่อมสภาพของรากพืชเนื่องจากการเผาไหม้

ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินในช่วงเริ่มต้นจะยังคงมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากการเผาไหม้ 2 เดือน โดยสาเหตุการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนในช่วงการเผาไหม้ คาดว่าเกิดจากสาเหตุที่รากพืชได้รับความร้อนจากการเผาไหม้จึงเกิดการสูญเสียความชื้น ทำให้รากพืชมีกำลังรับแรงดึงสูงขึ้น และส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนของดินเพิ่มสูงขึ้น

แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไป 4 เดือนหลังจากการเผาไหม้ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ตรวจวัดได้จะมีค่าลดลงจนกระทั่งมีค่าใกล้เคียงกับกำลังรับแรงเฉือนของดินเปล่า เนื่องจากการเสื่อมสภาพของรากพืช ดังรูปที่ 3 ซึ่งแสดงถึง

กำลังรับแรงเฉือนและระยะการเคลื่อนที่แนวราบจะมีค่าใกล้เคียงกับดินเปล่า และหลังจากการเผาไหม้ 1 ปี ค่ากำลังรับแรงเฉือนจะลดลง เหลือกำลังรับแรงเฉือนเพียง 80% เมื่อเปรียบเทียบกับดินเปล่า หรือลดลงประมาณ 40% เมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด และมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 5

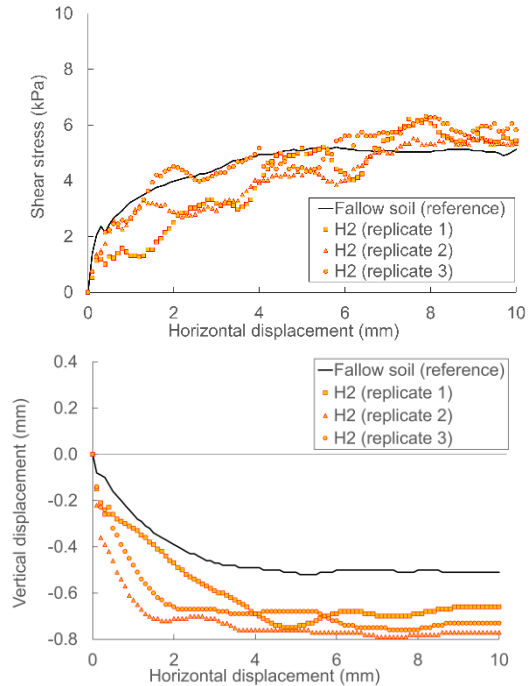


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับระยะการเคลื่อนที่ของรากพืช ในช่วงการเสื่อมสภาพหลังจากการเผาไหม้เป็นเวลา 4 เดือน

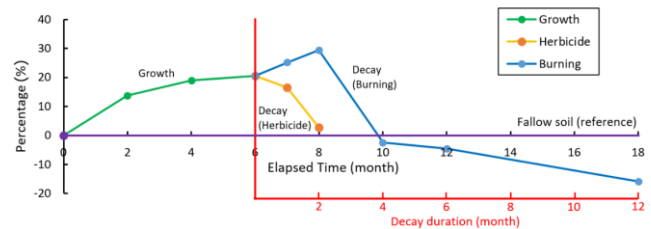
4.2.2 การเสื่อมสภาพของรากพืชเนื่องจากการใช้สารเคมี

การใช้สารเคมีกำจัดวัชพืชจะส่งผลให้รากเกิดการเสื่อมสลาย และส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินลดลงรวดเร็วในระยะเวลา 2 เดือน หลังได้รับสารเคมีดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งมีกำลังรับแรงเฉือนใกล้เคียงกับดินเปล่า แต่ระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งมีค่าสูงกว่าดินเปล่า ซึ่งดินที่มีรากพืชเสื่อมสลายจากการใช้สารเคมีนี้ จะมีค่ากำลังรับแรงเฉือนลดลงเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับกรณีการเผาไหม้ โดยเมื่อเวลาผ่านไป 2 เดือนหลังจากการใช้สารเคมี จะมีค่ากำลังรับแรงเฉือนใกล้เคียงกับกรณีการเผาไหม้เมื่อเวลาผ่านไป 4 เดือน

กำลังรับแรงเฉือนของดินในกรณีรากพืชได้รับสารเคมีจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว โดยสาเหตุที่ลดลงอย่างรวดเร็ว คาดว่าเกิดจากรากพืชที่เสื่อมสภาพและสูญเสียคุณสมบัติทางชีวกลศาสตร์อย่างรุนแรง เช่น กำลังรับแรงดึงของราก และปริมาณส่วนประกอบทางเคมีของราก (เช่นเซลลูโลสหรือลิกนิน ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญที่ทำให้รากมีความแข็งแรง) มีค่าลดลงเนื่องจากได้รับสารเคมี จึงส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนของดินที่มีรากพืชได้รับสารเคมีกำจัดวัชพืชจึงมีค่าลดลง



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับระยะการเคลื่อนที่ของรากพืช ในช่วงการเสื่อมสภาพหลังจากได้รับสารเคมีเป็นเวลา 2 เดือน



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงเฉือนของดิน กับระยะเวลาการเจริญเติบโตและเสื่อมสภาพของรากพืช

5. สรุปผล

ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่มีรากพืชในช่วงการเจริญเติบโตจะมีค่ากำลังรับแรงเฉือนเพิ่มสูงมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับดินเปล่า และจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาการเจริญเติบโต ซึ่งเป็นผลจากรากพืชที่ช่วยเสริมกำลังรับแรงเฉือนในดิน และในทางกลับกันรากที่เกิดเสื่อมสภาพจากการเผาไหม้หรือได้รับสารเคมีกำจัดวัชพืชจะมีความแข็งแรงลดลง ส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนในดินมีค่าลดลง โดยการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืชจะทำให้กำลังรับแรงเฉือนลดลงรวดเร็วกว่าเมื่อเทียบกับการเผาไหม้ เนื่องจากการเสื่อมสภาพและการสูญเสียคุณสมบัติทางชีวกลศาสตร์อย่างรุนแรง โดยผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนโดยรวมจะมีแนวโน้มลดลง และมีค่าลดลงจนกระทั่งมีค่าใกล้เคียงดินเปล่าเมื่อเวลาผ่านไป 4 เดือนในกรณีของการเผาไหม้ และเมื่อเวลาผ่านไป 2 เดือนในกรณีของการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืช

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านรวมถึงคณะผู้ดำเนินการทุกท่านที่ให้ความร่วมมือและช่วยเหลือในการศึกษาครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ng, C., Leung, A. and Ni, J. (2019) Plant-Soil Slope Interaction (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781351052382>
- [2] Genet, M., Stokes, A., Salin, F., Mickovski, S., Fourcaud, T., Dumail, J. and van Beek, R. (2005) The Influence of Cellulose Content on Tensile Strength in Tree Roots. *Plant and Soil*, 278(1), pp.1-9.
- [3] Boldrin, D., Leung, A. K. and Bengough, A. (2017) Root biomechanical properties during establishment of woody perennials. *Ecological Engineering*, 109, pp.196-206.
- [4] Wu, Z., Leung, A. K., Boldrin, D. and Ganesan, S. (2021) Variability in root biomechanics of *Chrysopogon zizanioides* for soil eco-engineering solutions. *Science of The Total Environment*, 776.
- [5] Schwarz, M., Cohen, D. and Or, D. (2011) Pullout tests of root analogs and natural root bundles in soil: Experiments and modeling. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116.
- [6] Kamchoom, V., Leung, A. K. and Ng, C.W.W. (2014) Effects of root geometry and transpiration on pull-out resistance. *Géotechnique Letters*, 4(4), pp.330-336.
- [7] Waldron, L. (1977) The Shear Resistance of Root-Permeated Homogeneous and Stratified Soil. *Soil Science Society of America Journal*, 41(5), pp.843-849.
- [8] Eab, K.H., Likitlersuang, S. and Takahashi, A. (2015) Laboratory and modelling investigation of root-reinforced system for slope stabilisation. *Soils and Foundations*, 55(5), pp. 1270 – 1281.
- [9] Mahannopkul, K. and Jotisankasa, A., (2019) Influence of root suction on tensile strength of *Chrysopogon zizanioides* roots and its implication on bioslope stabilization. *Journal of Mountain Science*, 16, pp.275-284.
- [10] Liang, T., Knappett, J., Leung, A., Carnaghan, A., Bengough, A. and Zhao, R. (2019) A critical evaluation of predictive models for rooted soil strength with application to predicting the seismic deformation of rooted slopes. *Landslides*, 17(1), pp.93-109.
- [11] Phan, T. N., Likitlersuang, S., Kamchoom, V. and Leung, A. K. (2021) Root biomechanical properties of *Chrysopogon zizanioides* and *Chrysopogon nemoralis* for soil reinforcement and slope stabilisation. *Land Degradation & Development*, 32(16), pp.4624-4636.
- [12] Graf, F., Frei, M. and Böll, A. (2009) Effects of vegetation on the angle of internal friction of a moraine. *Forest Snow and Landscape Research*, 82(1), pp. 61–77.
- [13] Karimzadeh, A. A., Leung, A. K., Hosseinpour, S., Wu, Z. and Fardad Amini, P. (2021) Monotonic and cyclic behaviour of root-reinforced sand. *Canadian Geotechnical Journal*. [Doi.org/10.1139/cgj-2020-0626](https://doi.org/10.1139/cgj-2020-0626).
- [14] Skerman, P.J. and Riveros, F. (1990) Tropical grasses (No.23). Food & Agriculture Org.
- [15] Holm, L.G., Plucknett, D.L., Pancho, J.V. and Herberger, J.P. (1977) *The World's Worst Weeds. Distribution and Biology*. Honolulu, Hawaii, USA: University Press of Hawaii
- [16] GISD (2010) Global Invasive Species Database online data sheet. *Cydon dactylon* (glass). www.issg.org/database. Accessed March 2011.
- [17] Faucette, L. B., Risse, L. M., Jordan, C. F., Cabrera, M. L., Coleman, D. C. and West, L. T. (2006). Vegetation and soil quality effects from hydroseed and compost blankets used for erosion control in construction activities. *Journal of Soil and Water Conservation*, 61(6), 355-362.
- [18] Ng, C.W.W., Leung, A.K. and Woon, K.X. (2014) Effects of soil density on grass-induced suction distributions in compacted soil subjected to rainfall. *Can Geotech J* 51:311–321. <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0221>