

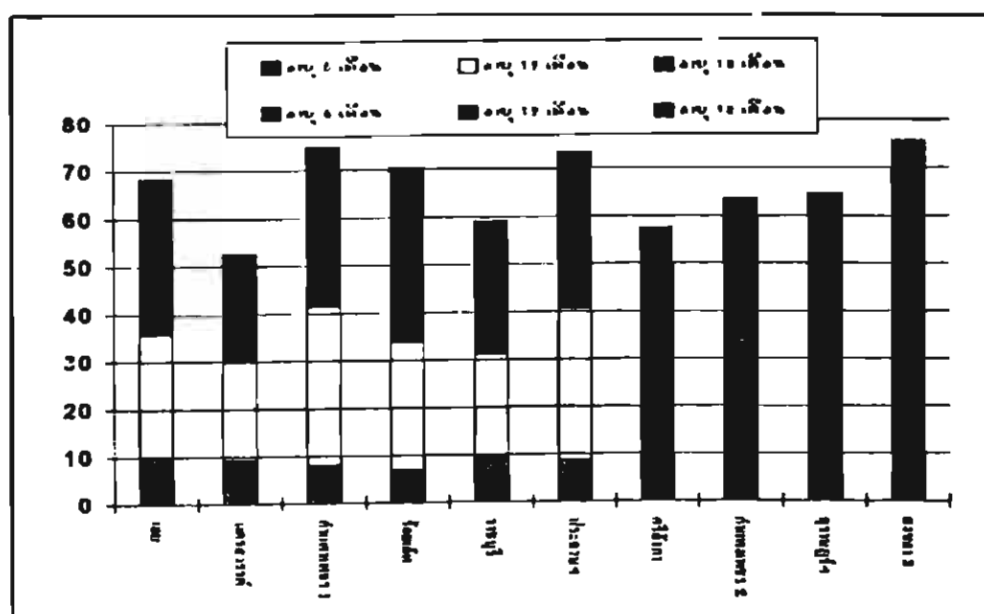
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้แยกออกมาเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

1. งานวิจัยของหญ้าแฝกในเชิงเกษตรกรรม
2. งานวิจัยของการทดสอบแรงดึงของรากพืช
3. งานวิจัยของการทดสอบการดึงรากพืชออกจากดิน
4. งานวิจัยของการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงของดินที่เสริมรากพืช

2.8.1 งานวิจัยของหญ้าแฝกในเชิงเกษตรกรรม

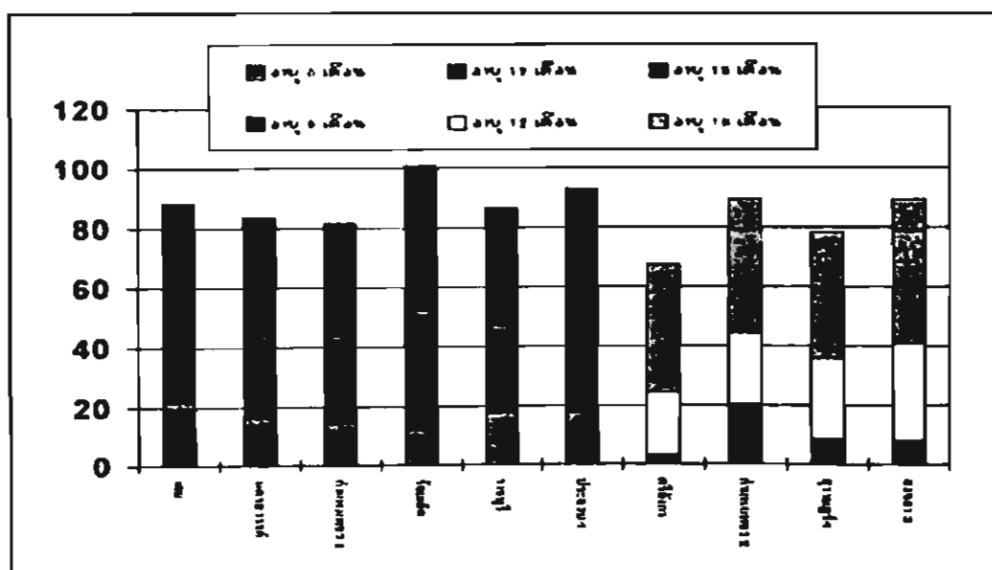
สุเมธ และ ปรีชา [4] ศึกษาผลการเจริญเติบโตของหญ้าแฝกสายพันธุ์ต่างๆบนดินชุดมาบบอน โดยวิเคราะห์ข้อมูลการเจริญเติบโตของหญ้าแฝกที่อายุการปลูก 6, 12 และ 18 เดือน ของเส้นผ่านศูนย์กลางกอ จำนวนหน่อต่อกอ และความสูง ของหญ้าแฝกคอน 6 สายพันธุ์ และหญ้าแฝกกลุ่ม 4 สายพันธุ์ ปรากฏผลดังนี้



กราฟที่ 2-1 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกอ (เซนติเมตร) ของสายพันธุ์หญ้าแฝก 6 สายพันธุ์ และหญ้าแฝกกลุ่ม 4 สายพันธุ์ (สุเมธ และ ปรีชา [4])

ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางกอ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกอของหญ้าแฝกสายพันธุ์ต่างๆ ดังกราฟที่ 2-1 พบว่า ในกลุ่มสายพันธุ์หญ้าแฝกคอน 6 สายพันธุ์ นั้น สายพันธุ์ร้อยเอ็ดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกอน้อยกว่าสายพันธุ์อื่นในระยะ 6 เดือนแรก แต่จะสามารถปรับตัวเจริญเติบโตให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกอขึ้นไปทันสายพันธุ์อื่นๆ จนมีขนาด

ใหญ่กว่าเมื่อมีอายุถึง 18 เดือน สายพันธุ์ที่มีการเจริญเติบโตปรับตัวได้ดีตั้งแต่ระยะเวลา 6 เดือนแรก คือ สายพันธุ์เลข มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกอ 10.2 เซนติเมตร เมื่อถึงระยะอายุ 1 ปีหรือ 12 เดือนนั้น สายพันธุ์กำแพงเพชร 1 และประจวบคีรีขันธ์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกอมากถึง 33.5 และ 31.9 เซนติเมตรตามลำดับมากกว่ากลุ่มสายพันธุ์อื่นๆเด่นชัด โดยที่สายพันธุ์อื่นๆต้องใช้ระยะเวลาในการเจริญเติบโตถึงระดับนี้เมื่อมีอายุถึง 18 เดือน ส่วนสายพันธุ์หญ้าแฝกกลุ่ม 4 สายพันธุ์นั้น ในระยะเวลา 6 เดือนแรก นับว่าสายพันธุ์กำแพงเพชร 2 ขยายตัวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกอมากกว่าสายพันธุ์อื่น รองลงไปคือ สุราษฎร์ธานี และสงขลา 3 แต่เมื่อถึงระยะเวลา 12 เดือนแล้ว สายพันธุ์สงขลา 3 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกอมากที่สุด รองลงไปคือ กำแพงเพชร 2 และ สุราษฎร์ธานี และผลเป็นเช่นเดียวกันเมื่ออายุถึง 18 เดือน



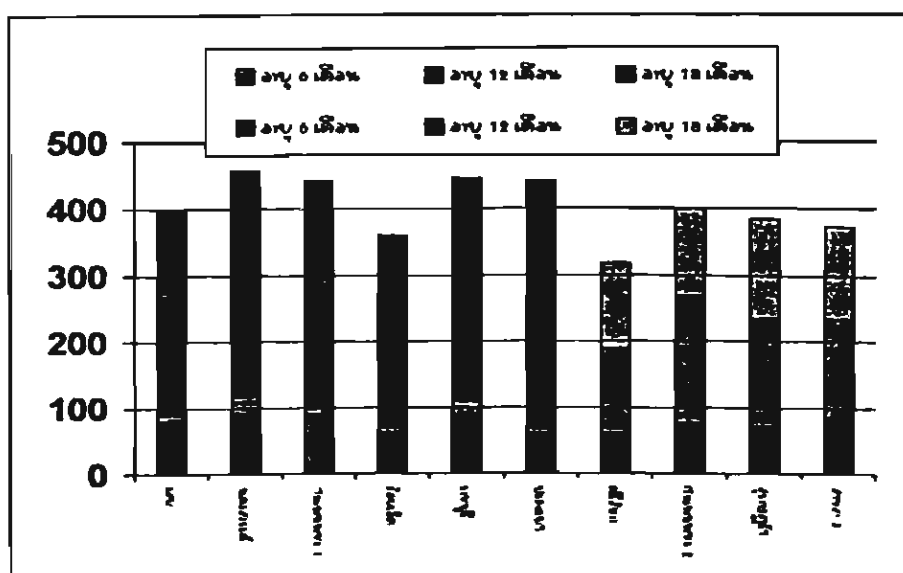
กราฟที่ 2-2 เปรียบเทียบจำนวนหน่อตอของสายพันธุ์หญ้าแฝก 6 สายพันธุ์ และหญ้าแฝกกลุ่ม 4 สายพันธุ์ (สุเมธ และ ปรีชา [4])

จำนวนหน่อตอ ซึ่งแสดงในกราฟที่ 2-2 พบว่าในกลุ่มหญ้าแฝกคอนจำนวน 6 สายพันธุ์นั้น เลขเป็นสายพันธุ์ที่มีการแตกกอไวที่สุดตั้งแต่ระยะเวลา 6 เดือนแรก มีจำนวนหน่อตอเฉลี่ยเท่ากับ 21.8 ในขณะที่กลุ่มรองลงไปคือ สายพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ ราชบุรี และนครสวรรค์ มีจำนวนหน่อตอเท่ากับ 17.8, 17.6 และ 16.5 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกอ อย่างไรก็ตาม เมื่ออายุถึง 12 เดือนขึ้นไปจนถึง 18 เดือนนั้น สายพันธุ์ร้อยเอ็ดจะมีจำนวนการแตกกอหรือจำนวนหน่อตอมากที่สุดคือที่อายุ 12 เดือน มีการแตกกอเท่ากับ 39.0 หน่อตอ และที่อายุ 18 เดือน เท่ากับ 49.7 หน่อตอสายพันธุ์ที่มีการแตกกอดีรองลงไปคือ ประจวบคีรีขันธ์ มีการแตกกอที่ถือว่าอยู่ในกลุ่มสูงอย่างสม่ำเสมอตั้งแต่อายุ 6 เดือนจนถึง 18 เดือน

ในกลุ่มสายพันธุ์หญาแฝกลุ่ม 4 สายพันธุ์นั้น สายพันธุ์กำแพงเพชร 2 นับว่าเป็นสายพันธุ์ที่มีการตั้งตัวเจริญเติบโตได้เร็วที่สุด โดยที่ในระยะอายุ 6 เดือนนั้น มีจำนวนการแตกกอเฉลี่ยเท่ากับ 20.4 หน่อต่อกอมากกว่าเกือบ 3 เท่าของกลุ่มสายพันธุ์รองลงไป คือ สุราษฎร์ธานี และสงขลา 3 มีการแตกกอเฉลี่ยเพียง 8.7 และ 8.2 หน่อต่อกอตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อถึงระยะอายุ 18 เดือน ก็เป็นเช่นเดียวกัน คือ พันธุ์สงขลา 3 มีอัตราการแตกกอสูงสุดเฉลี่ยถึง 48.6 หน่อต่อกอ และนับว่าเทียบเท่ากับพันธุ์หญาแฝคตอนที่มีพันธุ์ร้อยเอ็ดแตกกอมากที่สุด

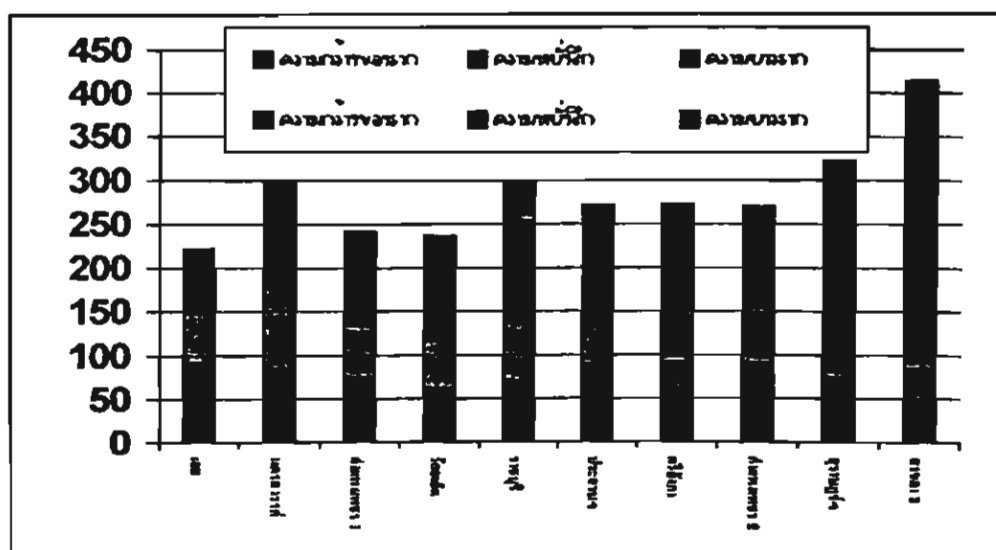
ความสูงถึงปลายใบ ดังกราฟที่ 2-3 พบว่า กลุ่มสายพันธุ์หญาแฝคตอน มีอัตราการเจริญเติบโต คือความสูงจะตรงกันข้ามกับจำนวนการแตกกอ หรือจำนวนหน่อต่อกอ โดยพบว่าสายพันธุ์ร้อยเอ็ดจะมีความสูงเฉลี่ยที่อายุ 6 เดือนเพียง 70 เซนติเมตร และเมื่ออายุ 12 เดือนหรือ 1 ปี มีความสูงเฉลี่ยต่ำสุดเพียง 162.2 เซนติเมตร ในขณะที่สายพันธุ์นครสวรรค์ และประจวบคีรีขันธ์ จะมีความสูงเฉลี่ย 204.2 และ 213.3 เซนติเมตรตามลำดับเมื่อมีอายุ 1 ปี

สำหรับในกลุ่มหญาแฝกลุ่ม พบว่าสายพันธุ์สงขลา 3 ที่อายุ 6 เดือน จะมีความสูงเพียง 56 เซนติเมตร ต่ำกว่าทุกสายพันธุ์ที่ดำเนินการทดลอง แต่เมื่ออายุถึง 12 เดือน หรือ 1 ปี กลับพบว่าสายพันธุ์สงขลา 3 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกอและมีจำนวนการแตกกอสูงกว่าแฝกลุ่มพันธุ์อื่น มีความสูงเพิ่มขึ้นมากถึง 178.5 เซนติเมตร ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับสายพันธุ์กำแพงเพชร 2 ซึ่งสูงที่สุดถึง 190.3 เซนติเมตร อย่างไรก็ตาม เมื่อครบอายุ 1 ปี ได้ทำการตัดใบหญ้าจนมีความสูงเท่ากัน แล้วทำการวัดความสูงใหม่เมื่ออายุ 18 เดือน ยังคงพบความแตกต่างค่อนข้างเป็นไปในทำนองเดียวกันกับเมื่ออายุ 12 เดือน



กราฟที่ 2-3 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความสูงถึงใบ(เซนติเมตร) ของหญาแฝคตอน 6 สายพันธุ์ และหญาแฝกลุ่ม 4 สายพันธุ์ (สุเมธ และ ปรีชา [4])

การศึกษาการเจริญเติบโตของระบบรากหญ้าแฝก โดยศึกษาความกว้างของราก, ความยัง
 ลึก และความยาวของรากซึ่งได้แสดงดังกราฟที่ 2-4 เมื่อหญ้าแฝกมีอายุได้ 18 เดือน พบว่า ในกลุ่ม
 หญ้าแฝกดอน สายพันธุ์เลย, นครสวรรค์ และประจวบคีรีขันธ์ มีความกว้างของรากหรือการแผ่
 กระจายของรากเท่ากับ 92.2, 84.9 และ 83.6 เซนติเมตร มากกว่ากลุ่มรองลงไปคือพันธุ์กำแพงเพชร
 1 และ ราชบุรี ซึ่งความกว้างของรากเท่ากับ 75.4 และ 70.7 เซนติเมตรตามลำดับ โดยสายพันธุ์
 ร้อยเอ็ดมีความกว้างของราก 62.9 เซนติเมตร ส่วนในกลุ่มหญ้าแฝกกลุ่ม สายพันธุ์สงขลา 3 ซึ่งที่
 ผ่านมาพบว่าการเจริญเติบโตดีกว่าสายพันธุ์อื่น การแผ่กระจายหรือความกว้างของรากยังพบว่า
 อยู่ในกลุ่มสายพันธุ์ดีเช่นเดียวกับพันธุ์กำแพงเพชร 2 กล่าวคือมีความกว้างของรากเท่ากับ 86.2 และ
 92.7 เซนติเมตร



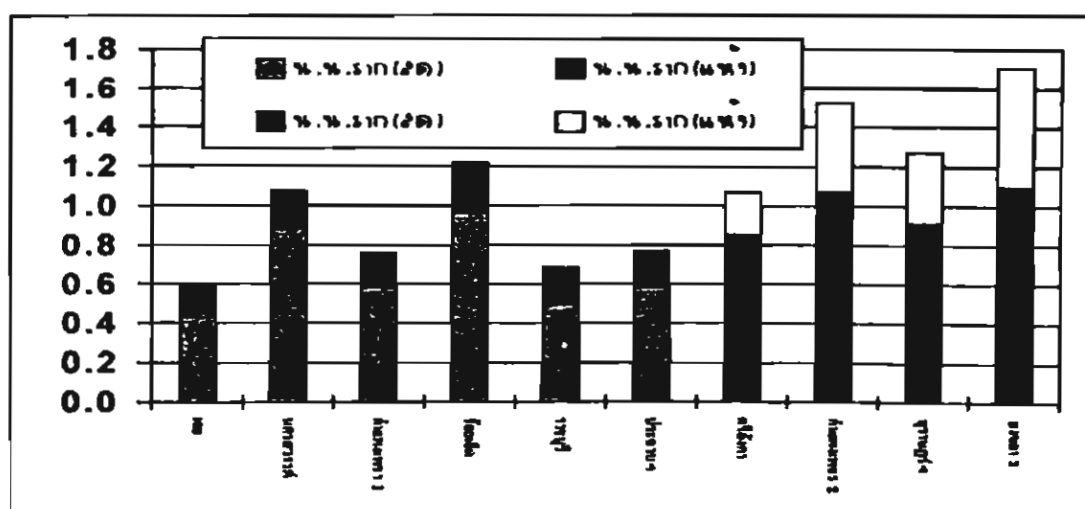
กราฟที่ 2-4 การเจริญเติบโตเฉลี่ยของระบบรากหญ้าแฝก(หน่วย:เซนติเมตร)ของหญ้าแฝกดอน
 6 สายพันธุ์ และหญ้าแฝกกลุ่ม 4 สายพันธุ์เมื่ออายุ 18 เดือน (สุเมธ และ ปรีชา [4])

ด้านความยังลึกของราก กลุ่มหญ้าแฝกดอน พบว่าสายพันธุ์นครสวรรค์มีการหยั่งลึกของ
 รากมากที่สุดถึง 90.5 เซนติเมตร แตกต่างจากกลุ่มสายพันธุ์อื่นที่มีการหยั่งลึกของรากใกล้เคียงกัน
 คือประมาณ 52 – 65 เซนติเมตร หญ้าแฝกกลุ่ม ยังคงพบว่า พันธุ์สงขลา 3 ซึ่งมีความกว้างของรากที่
 ดีแล้วยังมีการหยั่งลึกของรากดีที่สุดถึง 140.1 เซนติเมตร รองลงไปคือ สุราษฎร์ธานี เท่ากับ 105.5
 เซนติเมตร กำแพงเพชร 2 เท่ากับ 57.6 เซนติเมตร

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาความยาวของรากแล้ว กลุ่มสายพันธุ์หญ้าแฝกดอนมี ราชบุรี ให้
 ความยาวรากมากที่สุดถึง 162.4 เซนติเมตร รองลงไปคือ นครสวรรค์, ร้อยเอ็ด และประจวบคีรีขันธ์
 มีความยาวรากใกล้เคียงกันประมาณ 122 – 126 เซนติเมตร หญ้าแฝกกลุ่ม สายพันธุ์สงขลา 3 ยังคงมี

ความยาวของรากมากที่สุดถึง 189 เซนติเมตร รองลงไปที่คือ สุราษฎร์ธานี และกำแพงเพชร เท่ากับ 142.3 และ 120.8 เซนติเมตรตามลำดับ

มวลชีวภาพของหญ้าแฝกคอน และหญ้าแฝกลุ่ม เป็นการศึกษาน้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งของรากและส่วนที่อยู่เหนือดินดังกราฟที่ 2-5 เมื่อหญ้าแฝกมีอายุ 18 เดือน ซึ่งปรากฏว่ารากของหญ้าแฝกในกลุ่มหญ้าแฝกคอนนั้น สายพันธุ์ร้อยเอ็ดให้น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของรากเท่ากับ 0.964 และ 0.254 กิโลกรัมต่อกอตามลำดับ รองลงไปที่คือสายพันธุ์นครสวรรค์ได้เท่ากับ 0.884 และ 0.194 กิโลกรัมต่อกอ โดยสายพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ ได้น้ำหนักเท่ากับสายพันธุ์นครสวรรค์ ส่วนในกลุ่มหญ้าแฝกลุ่ม สายพันธุ์สงขลา 3 ได้น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของรากเท่ากับ 1.100 และ 0.608 กิโลกรัมต่อกอ รองลงไปที่คือ กำแพงเพชร 2 ได้เท่ากับ 1.072 และ 0.452 กิโลกรัมต่อกอ

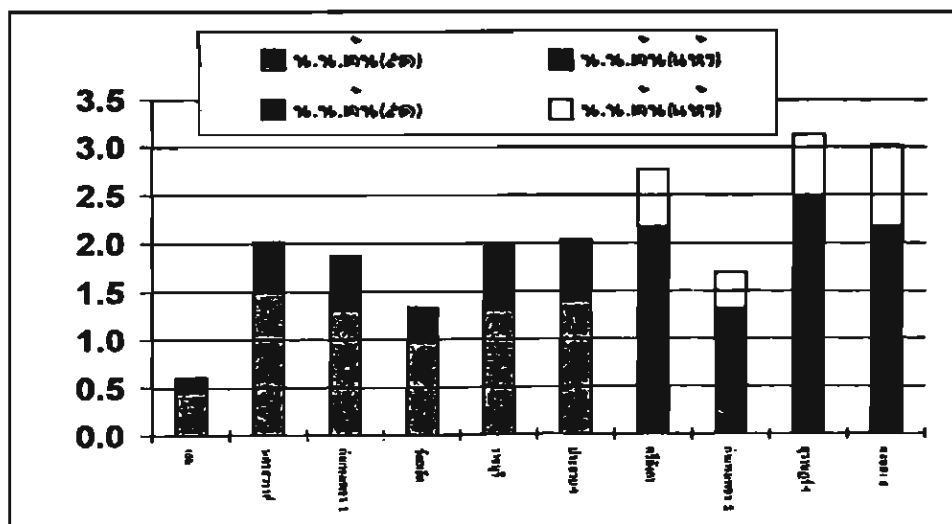


กราฟที่ 2-5 ค่าเฉลี่ยของรากหญ้าแฝก (กิโลกรัม) ของหญ้าแฝกคอน 6 สายพันธุ์ และหญ้าแฝกลุ่ม 4 สายพันธุ์เมื่ออายุ 18 เดือน (สุเมธ และ ปรีชา [4])

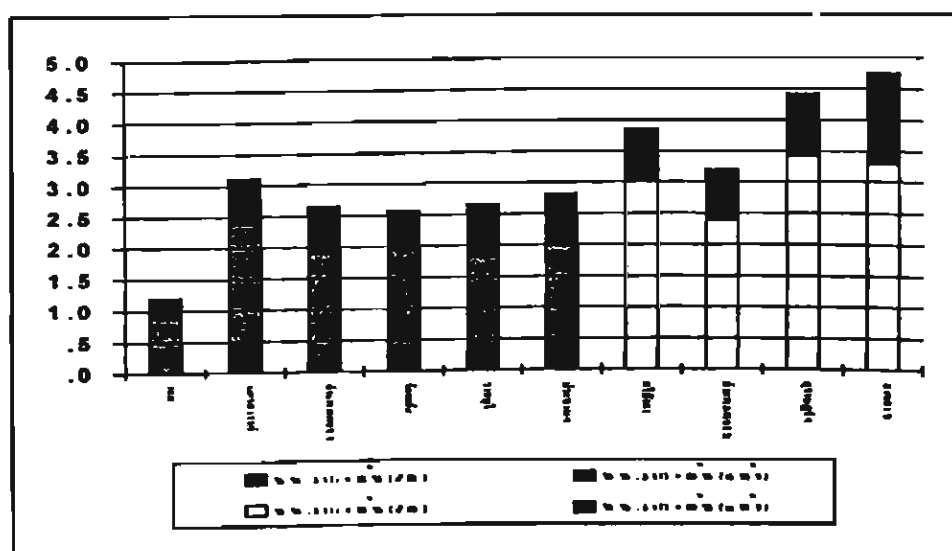
มวลชีวภาพของหญ้าแฝก ค่าเฉลี่ยน้ำหนักรากและส่วนที่อยู่เหนือผิวดิน คือ ดิน และ ใบ ซึ่งแสดงดังกราฟที่ 6 โดยการชั่งน้ำหนักแห้ง พบว่าในกลุ่มหญ้าแฝกคอน 6 สายพันธุ์นั้น ราชบุรี และประจวบคีรีขันธ์ ได้น้ำหนักมวลชีวภาพมากที่สุด 0.835 และ 0.850 กิโลกรัมต่อกอตามลำดับ รองลงไปที่คือ กำแพงเพชร 1 และร้อยเอ็ด ได้เท่ากับ 0.760 และ 0.640 กิโลกรัมต่อกอตามลำดับ ส่วนในกลุ่มหญ้าแฝกลุ่ม 4 สายพันธุ์ พบว่า พันธุ์สงขลา 3 และสุราษฎร์ธานีได้น้ำหนักแห้งของมวลชีวภาพมากถึง 1.470 และ 1.010 กิโลกรัมต่อกอ

ส่วนที่อยู่เหนือดิน คือ น้ำหนักของดินและใบของหญ้าแฝกในกลุ่มหญ้าแฝกคอน สายพันธุ์นครสวรรค์ให้น้ำหนักสดประมาณ 1.5 กิโลกรัมต่อกอสูงกว่าประจวบคีรีขันธ์เล็กน้อย แต่สายพันธุ์ร้อยเอ็ดให้น้ำหนักสดต่ำกว่า 1 กิโลกรัมต่อกอ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาน้ำหนักแห้งของ

ส่วนที่อยู่เหนือดินพบว่าสายพันธุ์ราชบุรีมีน้ำหนักแห้งมากที่สุด 0.660 กิโลกรัมต่อกอ รองลงไปได้แก่ ประจวบคีรีขันธ์ และกำแพงเพชร 1 แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ในกลุ่มหญ้าแฝกพบว่า สายพันธุ์สงขลา 3 แม้จะมีน้ำหนักสดของส่วนที่อยู่เหนือดินน้อยกว่าพันธุ์สุราษฎร์ธานี แต่มีน้ำหนักแห้งเท่ากับ 0.862 กิโลกรัมต่อกอมากกว่าพันธุ์สุราษฎร์ธานีซึ่งมีน้ำหนักแห้งเท่ากับ 0.650 กิโลกรัมต่อกออย่างเห็นได้ชัด กล่าวได้ว่าพันธุ์สงขลา 3 มีมวลในระดับผิวดินสูงกว่าสายพันธุ์อื่นมากดังกราฟที่ 2-7



กราฟที่ 2-6 ค่าเฉลี่ยของดินหญ้าแฝก (กิโลกรัม) ของหญ้าแฝกคอน 6 สายพันธุ์ และหญ้าแฝกกลุ่ม 4 สายพันธุ์เมื่ออายุ 18 เดือน (สุเมธ และ ปรีชา [4])



กราฟที่ 2-7 ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักสดและมวลชีวภาพหรือน้ำหนักแห้ง (กิโลกรัม) ของหญ้าแฝกคอน 6 สายพันธุ์ และหญ้าแฝกกลุ่ม 4 สายพันธุ์เมื่ออายุ 18 เดือน (สุเมธ และ ปรีชา [4])

2.8.2 งานวิจัยของการทดสอบแรงดึงของรากพืช

Burroughs และ Thomas [15], Gray [18] และ Turmanina [32] ได้ทำการศึกษาหาค่าความแข็งแรงดึงของรากต้นไม้แสดงในตารางที่ 2-2 พบว่ารากต้น Rocky Mountain Douglas fir, Coastal Douglas และ Spruce-Hemlock เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรากเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงของรากมีค่าที่ลดลงยกเว้นรากของต้น Birch

ตารางที่ 2-2 ค่าความแข็งแรงดึงของรากต้นไม้

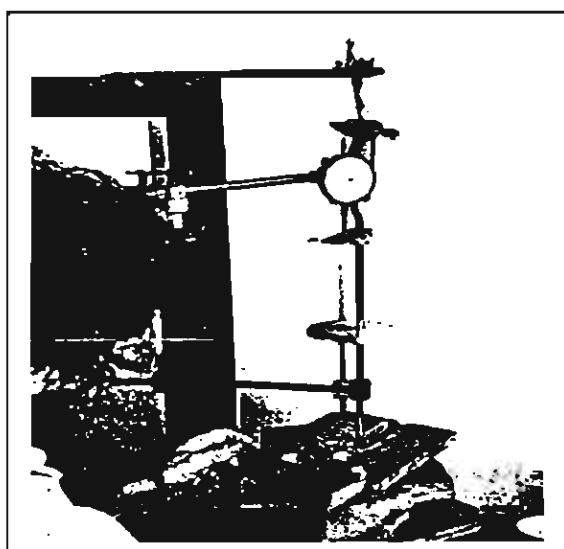
ประเภทต้นไม้	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก (มม.(นิ้ว))	ความแข็งแรงดึง (ปอนด์ต่อนิ้ว)	ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึง ทุกประเภทขนาด (ปอนด์ต่อนิ้ว)
Rocky Mountain Douglas fir	2 (0.08)	3,285	2,653
	4 (0.16)	3,226	
	6 (0.23)	2,579	
	8 (0.31)	2,349	
	10 (0.39)	2,152	
Coastal Douglas fir	2 (0.08)	8,214	7,083
	4 (0.16)	8,504	
	6 (0.23)	6,846	
	8 (0.31)	6,482	
	10 (0.39)	6,243	
Spruce-Hemlock	2 (0.08)	1,450	1,375
	4 (0.16)	1,390	
	6 (0.23)	1,380	
Birch	2 (0.08)	6,600	5,305
	2-7 (0.08-0.27)	3,170	
	>15 (0.59)	6,560	

ที่มา : Burrough, E.R. and Thomas, R.R.. Root Strength of Douglas fir as a factor in Slope Stability. USAD Forest Services Review, Draft, INT, 1976,1600-1612.

Gray D.H.. "Role of Woody Vegetation in Reinforcing Soils and Stability Slope." Symposium on Soils Reinforcing and Stabilizing Techniques. Sydney, Australia : 1978, 253-306.

Turmanina Turmanina, V.I.. "The Strength of Tree Roots." Bullertin of the Moscow Society of Naturalists, Biological Section 70 (1965) : 36-45.

รากจำนวนทั้งหมด 145 รากของพืชที่แตกต่างกัน 4 ชนิด ถูกทดสอบด้วยแรงดึงโดย Operstien and Fryman [28] : รากของต้น alfalfa, rosemary, pisticia lentacia และ Citus ที่อายุ 2, 4, 6, 8, 10 เดือนและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.2 - 15 มิลลิเมตร และความยาว 40 - 500 มิลลิเมตร โดยการใส่น้ำหนักต่อเนื่องจนสำเร็จโดยลำดับของการเพิ่มน้ำหนักที่คงที่จนกระทั่งแตกหักและค่าการยืดตัวของรากจะถูกวัดโดยการอ่านค่าจากมาตรวัดที่ติดไว้ที่เครื่องทดสอบดังภาพที่ 2-45 ซึ่งตัวอย่างรากพืชจะมีการฉีกขาดดังภาพที่ 2-46 ก็ถือว่าการสิ้นสุดในแต่ละครั้งของการทดสอบ



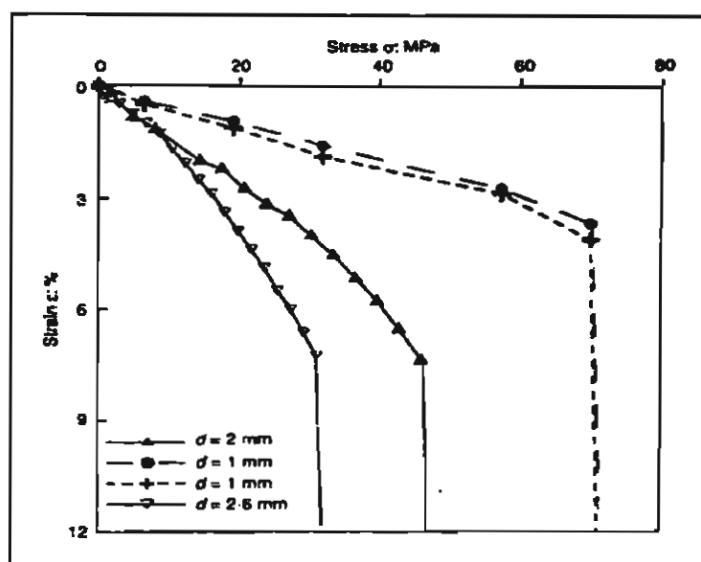
ภาพที่ 2-45 การทดสอบแรงดึงของรากพืช (Operstien and Fryman [28])



ภาพที่ 2-46 ตัวอย่างรากทดสอบเกิดการฉีกขาด (Operstien and Fryman [28])

ซึ่งพบว่าผลของการทดสอบแสดงดังนี้

ก. ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแบบแรงดึง และความเครียดก่อนข้างจะเป็นเส้นตรงจนกระทั่งถึงขีด ซึ่งแสดงโดยโค้งตัวอย่างในภาพที่ 2-47



ภาพที่ 2-47 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการเสียรูปที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรากที่ต่างกัน (Operstien and Fryman [28])

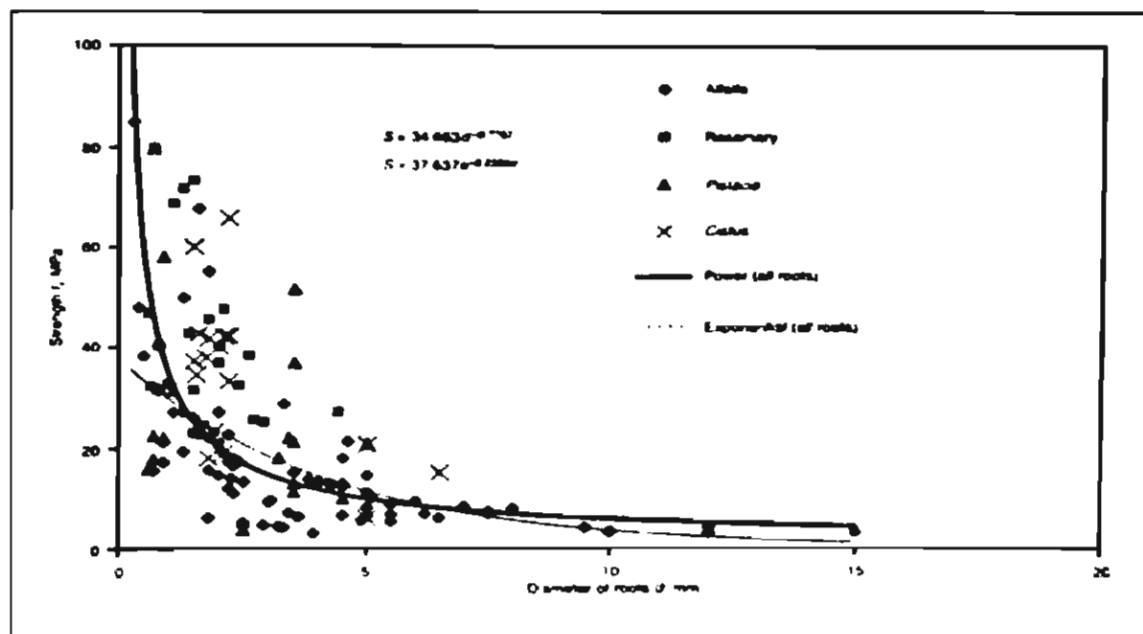
ข. ความแข็งแรงดึงประลัย t_t และ โมดูลัสยืดหยุ่น E ของรากทั้งสองลดลงพร้อมๆกับการเพิ่มขึ้นของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d (ภาพที่ 2-48, 2-49) ความสัมพันธ์เชิงเอ็กโพเนนเชียลและเชิงยกกำลังถูกทำให้เหมาะสมกับข้อมูล ความสัมพันธ์เชิงเอ็กโพเนนเชียลจะเหมาะกว่าสำหรับรากที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อย และถูกนำมาใช้สำหรับการประมาณความแข็งแรงดึงความสัมพันธ์เชิงเอ็กโพเนนเชียลเฉลี่ยถูกสร้างขึ้นดังนี้ :

ตารางที่ 2-3 แสดงค่าความแข็งแรงเฉือนและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสำหรับรากพืช

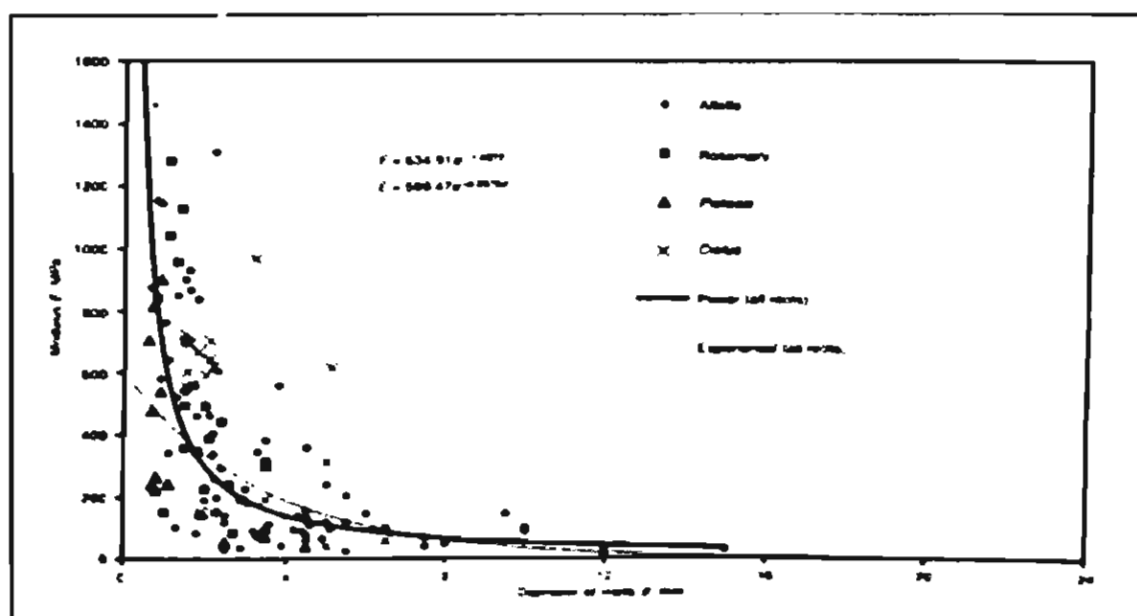
ชนิดพืช	ความแข็งแรงดึง	โมดูลัสยืดหยุ่น
Rosemary	$t_t = 53e^{-0.214d}$	$E = 946.6e^{-0.489d}$
Alfalfa	$t_t = 25.5e^{-0.193d}$	$E = 460e^{-0.243d}$
Pistacia Lentiscus	$t_t = 32.5e^{-0.222d}$	$E = 718.7e^{-0.594d}$
Cistus	$t_t = 58.3e^{-0.268d}$	$E = 1082.3e^{-0.377d}$
Average	$t_t = 37.6e^{-0.238d}$	$E = 599.5e^{-0.288d}$

ที่มา : Operstein, V. and Frydman, S.. "The Influence of Vegetation on Soil Strength." Ground Improvement 4 No.2 (2000) : 81-89.

ซึ่งค่า σ และ E มีหน่วย MPa และ d มีหน่วย มิลลิเมตร Waldron และ Dakessian [35] ได้ค้นพบความสัมพันธ์ส่วนกลับระหว่างความแข็งแรงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรากซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์ของพวกเขาในรูป $\sigma = ad^b$ และ $E = cd^f$ ที่ซึ่งค่า a b c และ f เป็นค่าคงที่ที่แตกต่างกัน

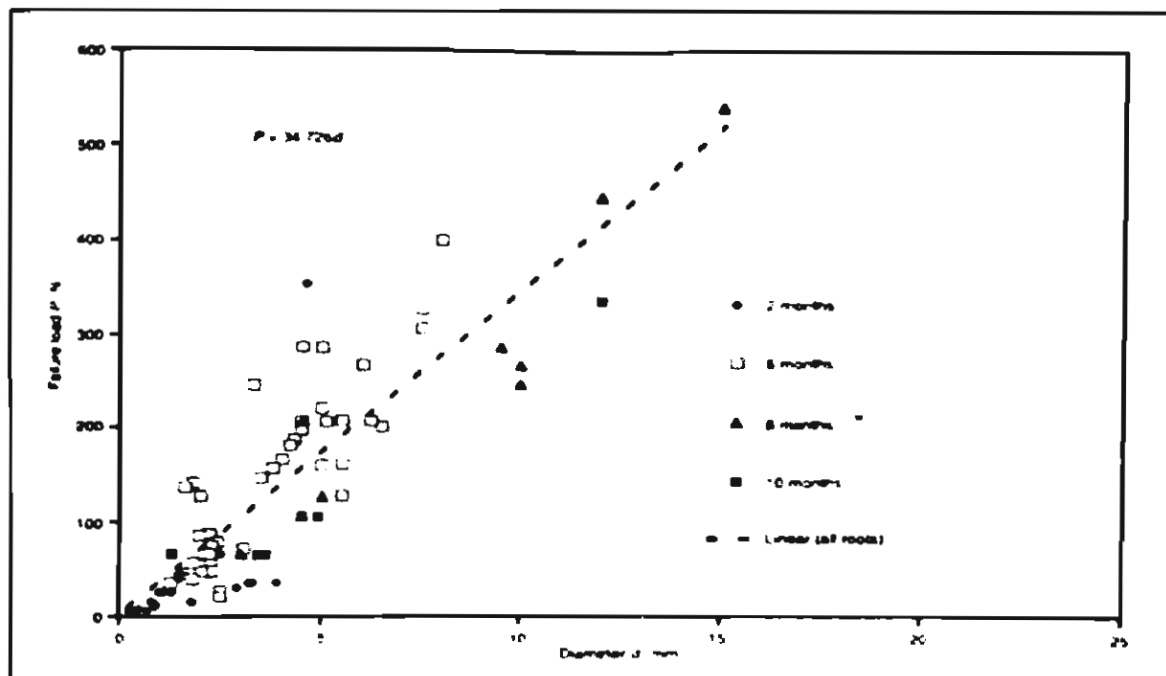


ภาพที่ 2-48 อิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึง (Operstien and Fryman [25])



ภาพที่ 2-49 อิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากที่มีต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Operstien and Fryman [25])

ค. ความแข็งแรงดึงประลัยและโมดูลัสของรากที่ได้ทดสอบไม่ถูกกระทบกระเทือนโดยอายุของรากโดยเทียบเคียงและยังขึ้นกับเส้นผ่านศูนย์กลางของรากเป็นหลัก (ภาพที่ 2-50) Gray [18] ข้อมูลที่ถูกอ้างจาก Bourtrough และ Thomas [15] จากการทดสอบรากของ *Dusglas firs* ซึ่งได้ชี้ว่าความแข็งแรงได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญกับการล้มตายของอายุต้นไม้

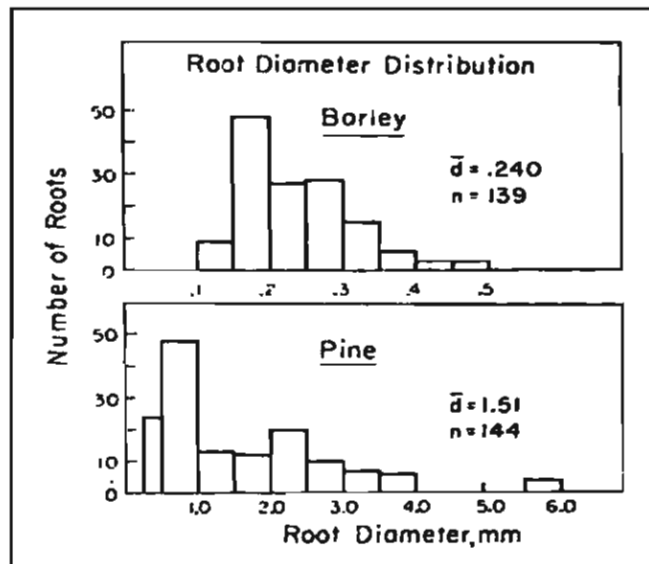


ภาพที่ 2-50 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักพิบัติกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก
(Operstien and Fryman [28])

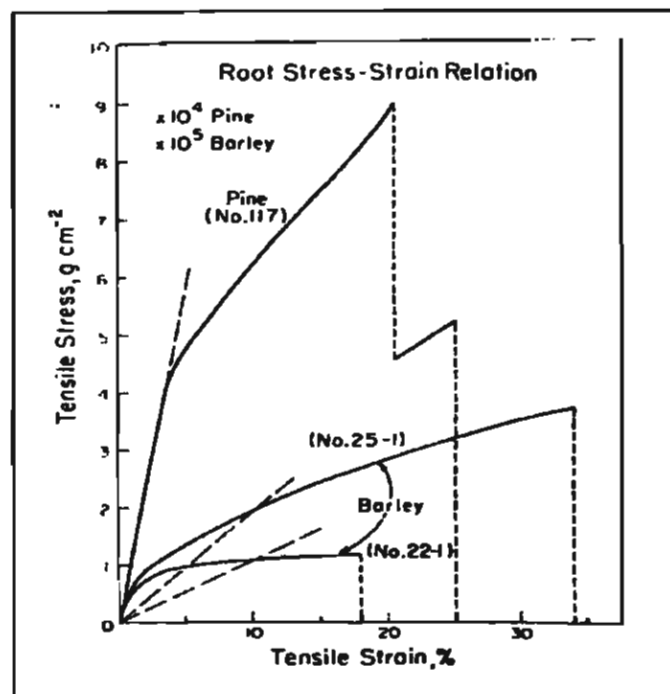
Waldron and Dakessian [35] ได้ศึกษาการกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากข้าวบาร์เลย์ 139 เส้น และรากต้นสน 144 เส้น ได้เอามาจากแท่งดินทดสอบประเภทดินเหนียวปนทรายละเอียด (clay loam) ซึ่งถูกแสดงในภาพที่ 2-51 เส้นผ่านศูนย์กลางรากข้าวบาร์เลย์อยู่ในช่วง 0.1 – 0.5 มิลลิเมตร และรากต้นสนที่ได้แสดงช่วงที่กว้างกว่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจาก 0.25 – 6.0 มิลลิเมตร และทำการวัดแรงดึงของรากซึ่งตัวอย่างตัวแทนของการทดสอบแรงดึงของรากต้นสนและข้าวบาร์เลย์ถูกแสดงในภาพที่ 2-52 โดยแสดงในเทอมของความเค้นและความเครียด โดยที่ความเค้นหมายถึงน้ำหนักแรงดึงหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของรากที่ไม่ถูกกระทำ ความเครียดหมายถึง ส่วนที่ขยายหารด้วยความยาวที่ไม่ได้เกิดความเครียดของตัวอย่างทดสอบ

รากต้นสนได้แสดงส่วนของความสัมพันธ์ ความเค้น – ความเครียดเชิงเส้น 2 ส่วน ส่วนแรกการขยายไปที่ 3 – 5% ความเครียด และส่วนที่สองจาก 5 – 6% ความเครียดถึงภาวะพิบัติ

ความชันของเส้นแรกถูกใช้ที่จะคำนวณค่าโมดูลัส E สำหรับรากต้นสน โค้งความเค้น - ความเครียดของรากข้าวบาร์เลย์ได้โค้งออกข้างนอกขึ้นไปข้างบนจาก 0 ถึง 4 หรือ 5% ของความเครียด และเป็นเส้นตรงไปยังภาวะการพื้ติ



ภาพที่ 2-51 การกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรากของต้นข้าวบาร์เลย์และรากของต้นสนที่จะทำการทดสอบแรงดึง (Waldron and Dakessian [35])



ภาพที่ 2-52 ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นดึงของรากและความเครียดสำหรับตัวอย่างที่เป็นตัวแทนของรากข้าวบาร์เลย์และรากต้นสน (Waldron and Dakessian [35])

สมการที่ (2-52) และ (2-53) แสดงค่าความแข็งแรงดึงประลัย, T_r และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น, E โดยจะมีค่าลดลงเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากเพิ่มขึ้น

$$E = ad^b \quad (2-52)$$

และ

$$T_r = cd^f \quad (2-53)$$

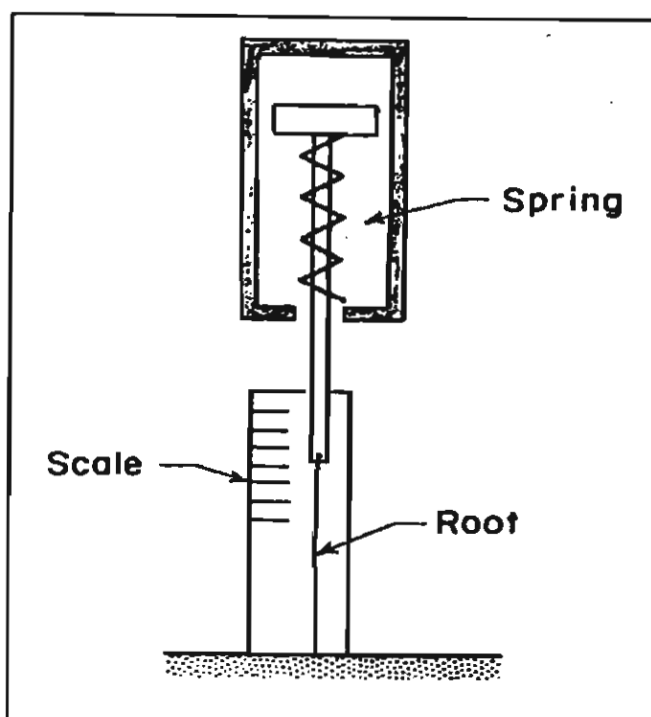
ซึ่ง a , b , c และ f เป็นค่าคงที่ที่แตกต่างกันสำหรับแต่ละชนิด ค่าเหล่านี้ถูกกำหนดไว้ในตารางที่ 2-4 (หมายเหตุ : เลขชี้กำลัง b และ f มีค่าเป็นลบทั้งสองค่า)

ตารางที่ 2-4 ค่าพารามิเตอร์แรงดึงของราก

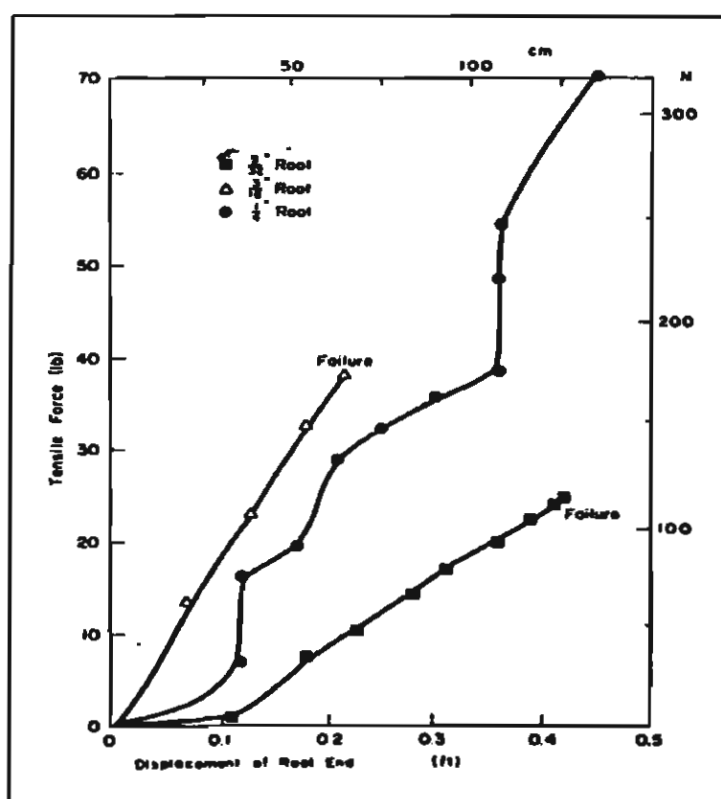
พารามิเตอร์	ข้าวบาร์เลย์	ต้นสน
a	8.32×10^3	5.88×10^5
b	-1.21	-0.389
n	56	44
r^2	0.536	0.257
c	7.85×10^3	6.89×10^4
f	-0.944	-0.116
n	65	49
r^2	0.499	0.160

ที่มา : Waldron L.J. and Dakessian S. . "Soil Reinforcement By Roots : calculation of increased soil shear resistance from root properties." Soil Science 132 No.6 (1981) : 427-435.

Endo และ Tsuruta [17], Kassif และ Lopelovitz [23], Kaul [24] และ Manbeian [26] ทำการทดสอบรากต้นไม้ในหลุมทดสอบจำนวนหนึ่ง โดยสังเกตการขยายของรากพืชไปในชั้น Unweathered till และ Weathered bedrock โดยคาดว่ารากพืชมีส่วนช่วยเสริมความแข็งแรงเฉือนแก่ดิน Wu; Mckinnel; Swanston [44] ได้วัดค่าความแข็งแรงดึงของรากถูกวัดโดยอุปกรณ์ที่แสดงในภาพที่ 2-53 ปลายด้านบนของรากถูกยึดกับสปริงที่ได้ทำการปรับแก้แล้ว อุปกรณ์นี้ถูกดึงขึ้นด้วยมือและแรงดึงถูกหาค่ามาจากการอัดตัวของสปริง มาตรฐานที่ติดกับพื้นผิวดินถูกใช้ที่จะวัดการเคลื่อนตัวที่ปลายของราก ภาพที่ 2-53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวกับน้ำหนักโดยมีการหับติเกิดขึ้นเนื่องจากรากขาด (Rupture) หรือโดยการหลุดออกของรากออกจากดิน (Pullout) หรือทั้งสองกรณีรวมกัน

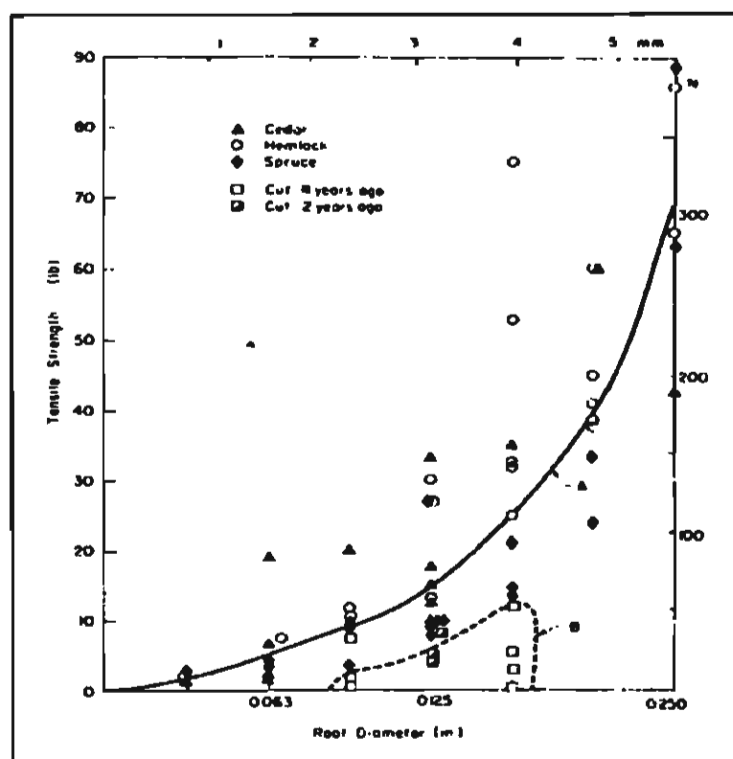


ภาพที่ 2-53 อุปกรณ์วัดความแข็งแรงดึงของราก (Wu; McKinnel; Swanston [44])



ภาพที่ 2-54 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและค่าการเคลื่อนตัวของราก (1 lb = 4.43 N; 1 ft = 30.48 cm.) (Wu; McKinnel; Swanston [44])

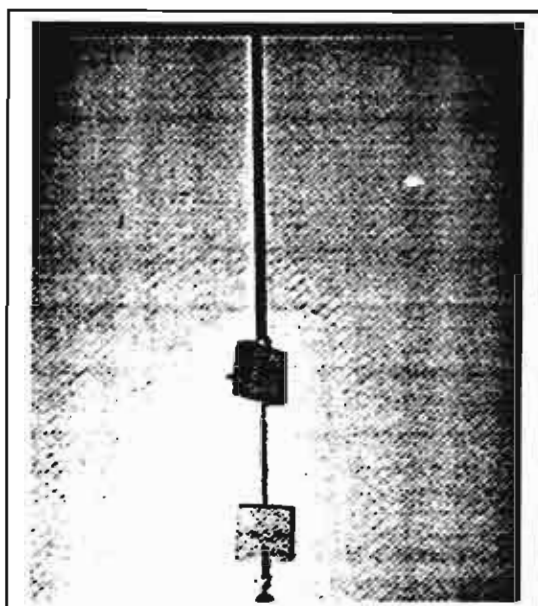
ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงกับเส้นผ่านศูนย์กลางของรากดังภาพที่ 2-55 พื้นที่ A เป็นการทดสอบรากซึ่งตั้งอยู่ใกล้ต้นไม้ที่มีชีวิต โดยสมมุติว่ากราฟ A แสดงค่าความแข็งแรงดึงของรากสด พื้นที่ B เป็นการทดสอบรากพืชอยู่ใกล้กับต้นไม้ ค่าความแข็งแรงดึงที่วัดได้ส่วนใหญ่จะตกอยู่ในโซน B ในภาพที่ 2-55 พบว่าการเน่าเปื่อยของรากหลังจากต้นไม้ถูกตัดโค่นมีผลต่อความแข็งแรงดึงของราก Burroughs และ Thomas [15], O'Loughlin [29] และ Ziemer and Swanston [45] ได้ศึกษาการลดต่ำลงในค่าความแข็งแรงดึงของรากหลังจากการตัดต้นไม้



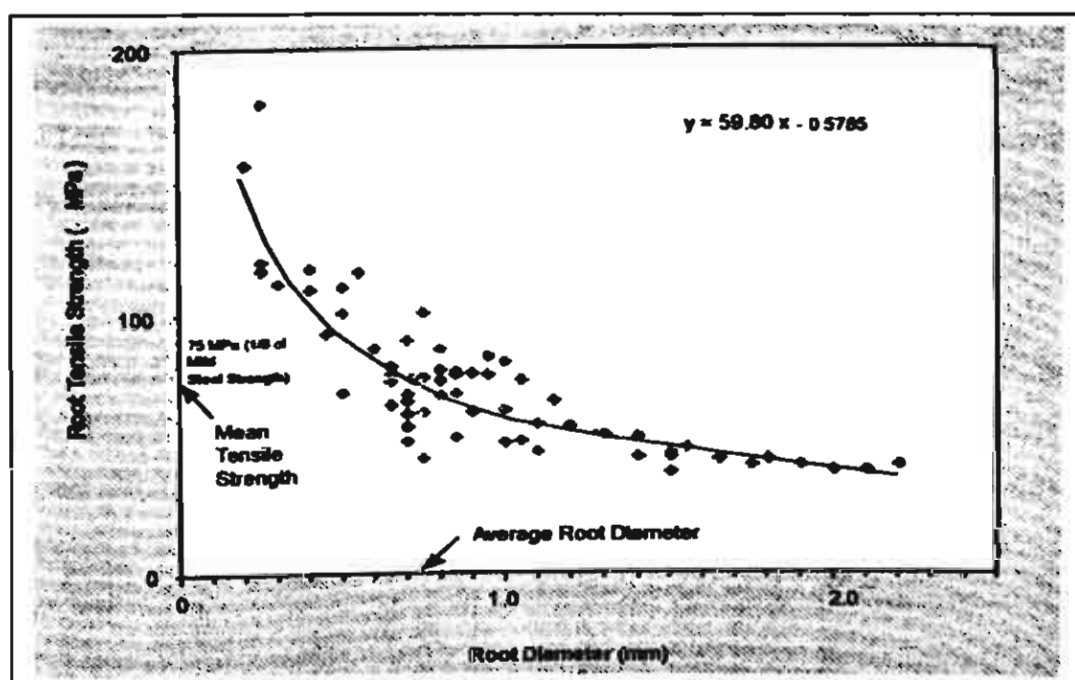
ภาพที่ 2-55_ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของรากและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก (Wu; Mckinnel; Swanston [44])

ดิถี แห่งเชาวนิช [2] ได้ศึกษาการเสริมความแข็งแรงดึงของดินด้วยรากหญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides*) โดยศึกษาการรับแรงดึงของราก พิจารณาอายุการเจริญเติบโตของหญ้าแฝก ที่อายุ 2 ปี โดยการทดลองจะต้องไม่เกิน 2 ชั่วโมง และรากต้องอยู่ในสภาพที่สด โดยใช้เครื่องมือ ดังแสดงในภาพที่ 2-56 จากการทดลองพบว่า ความแข็งแรงดึงของรากอยู่ในช่วงระหว่าง 40 –180 เมกะปาสคาล โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากอยู่ในช่วงระหว่าง 0.2 - 2.2 มิลลิเมตร และมีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึงของรากเท่ากับ 75 เมกะปาสคาล (ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากเท่ากับ 0.7 - 0.8 มิลลิเมตร) ซึ่งมีค่าประมาณ 1/6 เท่าของเหล็กกล้าละมุน และยังพบว่าความแข็งแรงดึงของ

รากมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2-57 และเปรียบเทียบกับรากต้นไม้ชนิดอื่นๆพบว่าสูงกว่ามาก ดังแสดงในตารางที่ 2-5



ภาพที่ 2-56 เครื่องมือทดสอบความแข็งแรงดึงของรากหญ้าแฝก (คิตี แห่งเชาวนิช [2])



ภาพที่ 2-57 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก (คิตี แห่งเชาวนิช [2])

ตารางที่ 2-5 ความแข็งแรงดึงของรากพืชชนิดต่างๆ

ชื่อทางพฤกษศาสตร์	ชื่อสามัญ	ความแข็งแรงดึง (MPa)
Salix sp.	Willow	9-36 *
Populus sp.	Poplars	5-38 *
Alnus sp.	Alders	4-74 *
Pseudotsuga sp.	Douglas fir	19-61 *
Acer sacharinum	Silver maple	15-30 *
Tsuga heterophylla	Western hemlock	27 *
Vaccinium sp.	Huckleberry	16 *
Hordeum vulgare	Barley	15-31 *
-	Grass ,forbs	2-20 *
-	Moss	0.002-0.007 *
Vetiveria zizanioides	Vetiver grass	40-120 **
* Wu [41]		** Hengchaovanich [2]

ที่มา : ดิถี แห่งเชาวนิช. "Vetiver Grass for Slope Stabilization and Erosion Control," in Pacific Rim Vetiver Network Technical Bulletin, No. 1998/2, 1998. pp. 4-16.

Wu T.H.. "Slope Stabilization." In Slope stabilization and erosion control : a bioengineering approach. Edited by R.P.C. Morgan and R.J. Rickson. London : E & FN Spon, 1995, 221 – 264.

วราธร; วิชัย; พานิช [3] ได้ทำการทดสอบความสามารถรับแรงดึงของรากหญ้าแฝกคอนกลุ่มพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ โดยที่รากจะต้องอยู่ในสภาพสด และใช้ระยะเวลาในการเตรียมตัวอย่างจนกระทั่งทำการทดสอบแล้วเสร็จไม่เกิน 3 ชั่วโมง ความยาวของรากที่ทดสอบอยู่ในช่วงระหว่าง 5 ถึง 20 เซนติเมตร ค่ากำลังรับแรงดึงเฉลี่ยที่ได้จากแรงดึงประลัยหารด้วยพื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยของรากบริเวณที่ขาด จากผลความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากหญ้าแฝก จากผลการทดสอบพบว่า

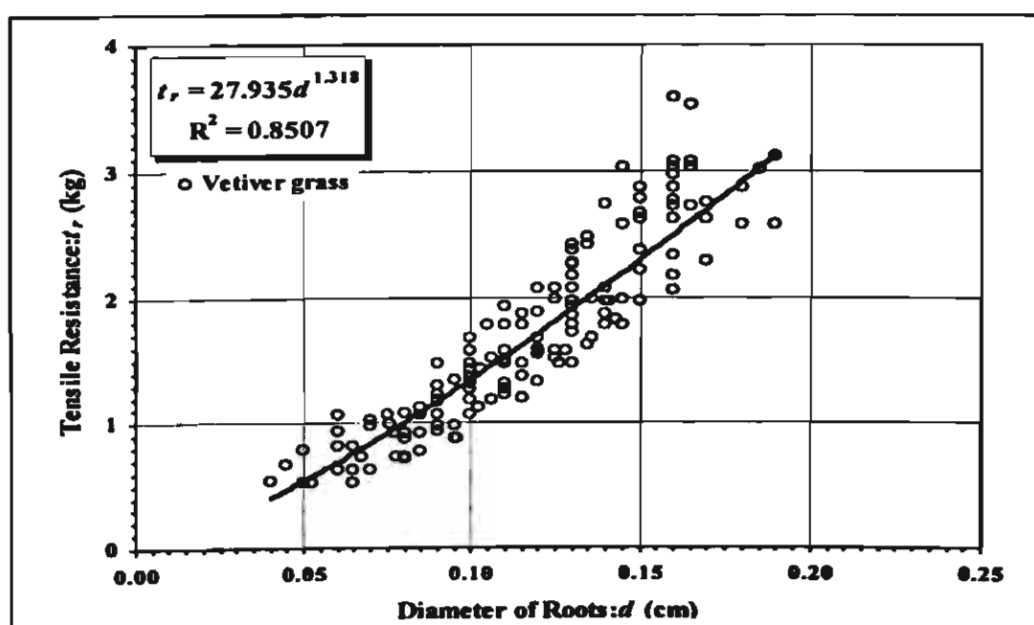
- ค่า Tensile Strain สูงสุดของรากมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 20 – 45
- ค่าแรงดึงของรากมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยให้สมการความสัมพันธ์คือ $t_r = 27.935d^{1.311}$ ซึ่งแรงดึงมีค่าพิสัยอยู่ในช่วงระหว่าง 0.52 ถึง 3.58

กิโลกรัม และรากมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 0.04 ถึง 0.19 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 2-58

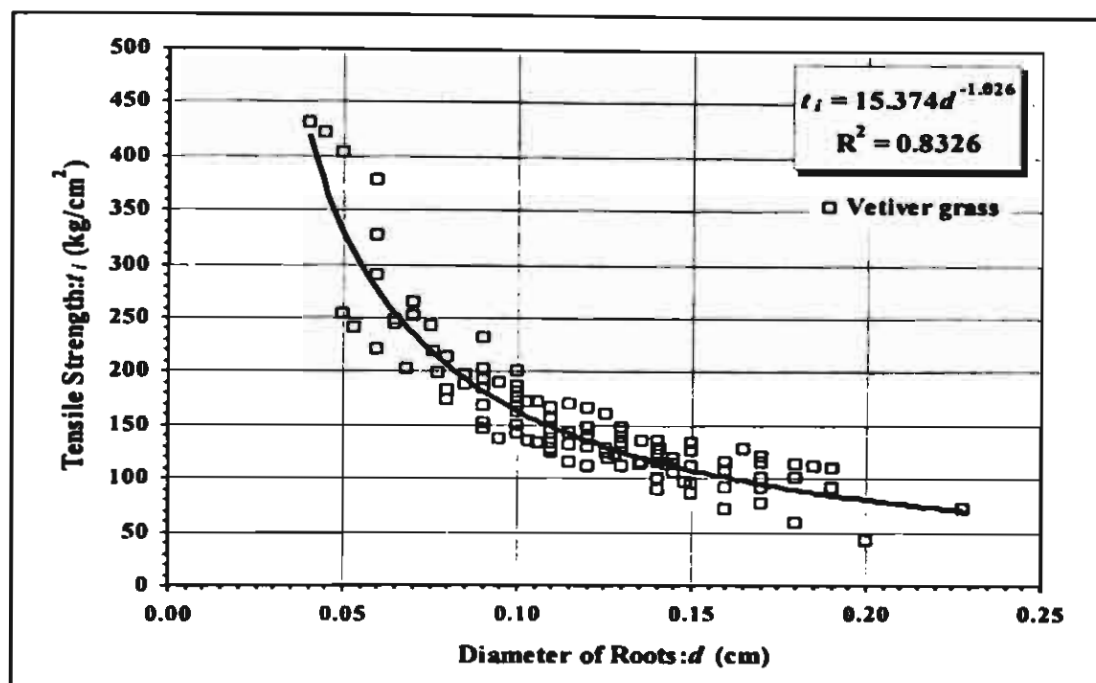
และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากหญ้าแฝก จากผลการทดสอบพบว่า

- ค่ากำลังรับแรงดึงของรากมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยให้สมการความสัมพันธ์ คือ $t_r = 15.374d^{-1.026}$ ซึ่งกำลังรับแรงดึงมีค่าพิสัยอยู่ในช่วงระหว่าง 41.98 ถึง 431.54 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยที่รากมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 0.04 ถึง 0.23 เซนติเมตร และถ้ารากมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 0.12 เซนติเมตร พบว่ากำลังรับแรงดึงมีค่าเท่ากับ 135.38 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 2-59

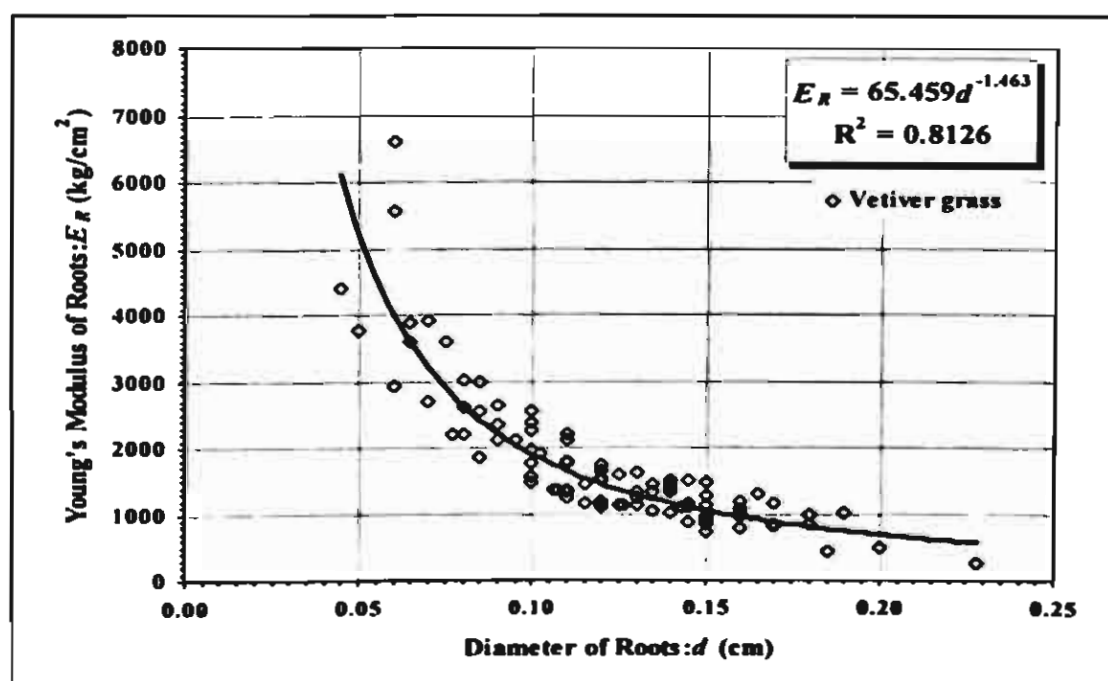
ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากหญ้าแฝก จากผลการทดสอบพบว่า ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของรากมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากมีขนาดใหญ่ขึ้นเช่นเดียวกับความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงดึงโดยให้สมการความสัมพันธ์ คือ $E_r = 65.459d^{-1.463}$ ซึ่งมีค่าพิสัยอยู่ในช่วงระหว่าง 274.30 ถึง 6601.67 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และรากมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 0.04 ถึง 0.23 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 2-60



ภาพที่ 2-58 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากหญ้าแฝกคอนกลุ่มพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ (วราธร; วิชัย; พานิช [3])



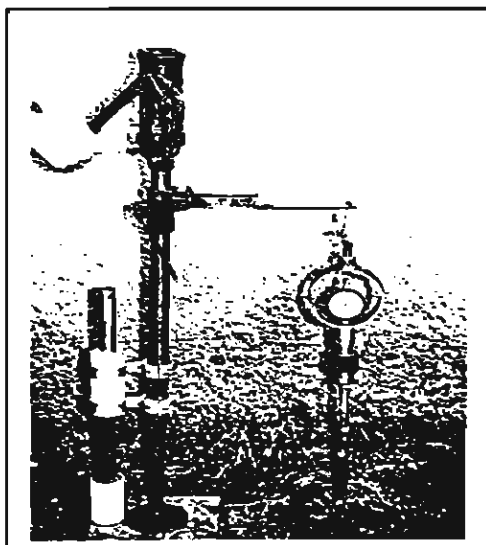
ภาพที่ 2-59 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากหญ้าแฝก
คอนกลุ่มพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ (วราธร; วิชัย; พานิช [3]).



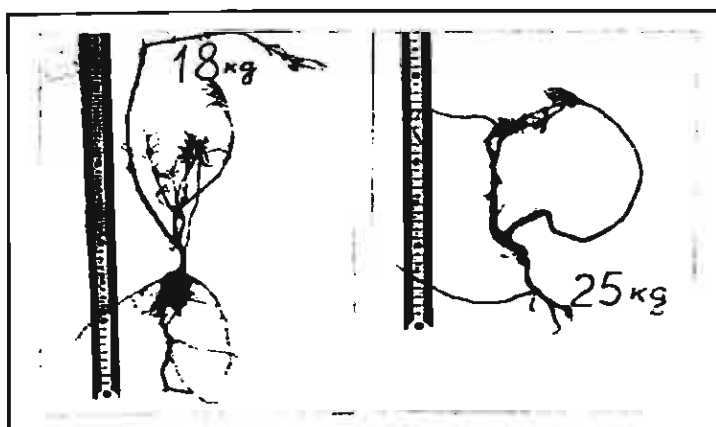
ภาพที่ 2-60 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากหญ้าแฝก
คอนกลุ่มพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ (วราธร; วิชัย; พานิช [3])

2.8.3 งานวิจัยของการทดสอบการดึงรากพืชออกจากดิน

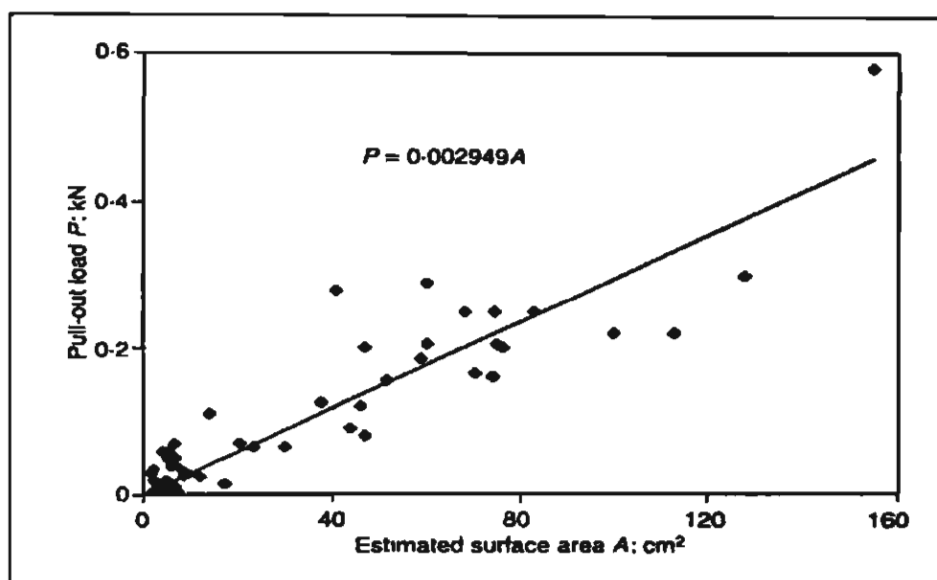
Operstien และ Fryman [28] ได้ทำการทดสอบการดึงหญ้าแอลฟาจำนวน 43 ตัวอย่างโดยหญ้าชนิดนี้ถูกปลูกขึ้นในดินชอล์กประเทศอิสราเอล ดินดังกล่าวมีค่า $LL = 61\%$ $PI = 36\%$ หน่วยน้ำหนักดินแห้งเท่ากับ 10.8 kN/m^3 ปริมาณความจุความชื้น 28% ระยะเวลาทดสอบที่ 10 เดือน จากผลการทดสอบดังกล่าวดังภาพที่ 2-61 พบว่า ความต้านทานของการดึงออกถูกควบคุมโดยความเสียดทานระหว่างรากในแนวตั้งและดิน และการเจริญเติบโตของรากที่เสริมดินที่เอียงทำมุมต่างกัน กับแนวตั้ง (เช่นภาพที่ 2-62) ในการดึงราก จะต้องมีการวัดขนาดของรากและประมาณพื้นที่ผิวทั้งหมดของราก ซึ่งน้ำหนักดึงออกมีค่าเท่ากับ P เป็นเสมือนฟังก์ชันของพื้นที่ผิวที่ประมาณได้ A บนพื้นฐานของภาพที่ 2-63 หน่วยความต้านทานต่อการดึงออกของหญ้าแอลฟาจากดินชอล์กถูกประมาณค่าเป็น 30 kPa



ภาพที่ 2-61 การทดสอบการดึงรากหญ้า alfalfa ออกจากดิน (Operstien and Fryman [28])



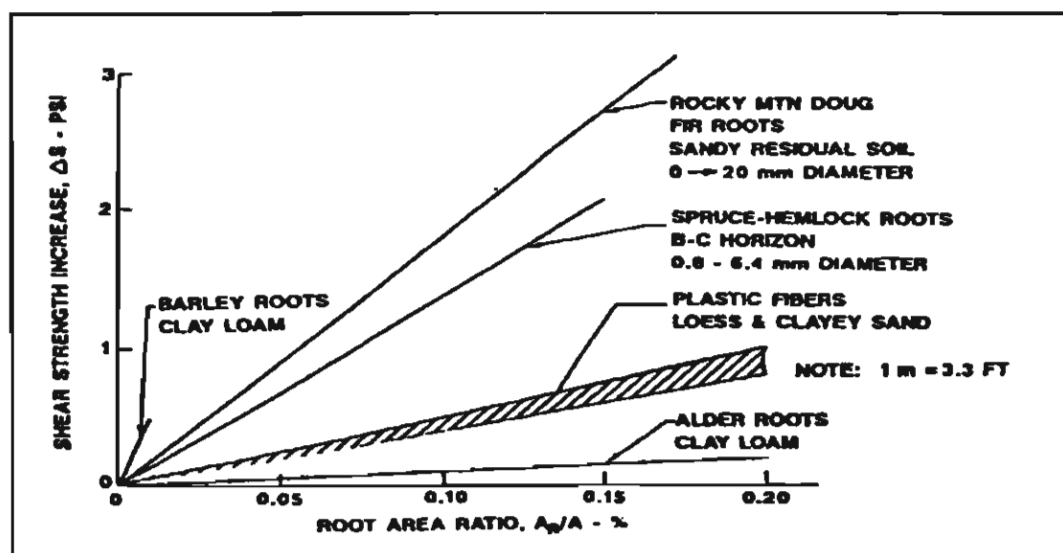
ภาพที่ 2-62 ตัวอย่างรากหญ้า alfalfa หลังจากการทดสอบการดึงออก (Operstien and Fryman [28])



ภาพที่ 2-63 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ดึงออกกับพื้นที่ผิวของรากที่ประมาณค่าได้
(Operstien and Fryman [28])

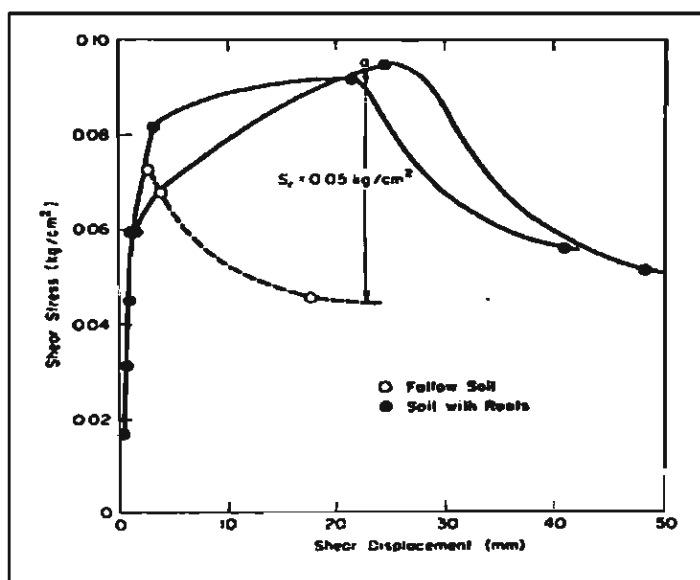
2.8.4 งานวิจัยของการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงของดินที่เสริมรากพืช

ภาพที่ 2-64 แสดงผลลัพธ์ของการศึกษาการเสริมกำลังในดินด้วยราก ในการศึกษาของ Gray [18] แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนพื้นที่ราก (0.05 – 0.15 %) จะส่งผลต่อจำนวนค่าความเชื่อมั่นปรากฏเป็นการเพิ่มความแข็งแรงเฉือนแก่ดินที่มีรากพืชที่มีชีวิตหรืออยู่ในสภาพสดในดินแต่ละประเภทที่เสริมรากพืชที่แตกต่างกันโดยจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.5 – 2.5 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว



ภาพที่ 2-64 ผลสรุปของการให้ผลลัพธ์ของค่าเสริมในความแข็งแรงเฉือนจากการเสริมกำลังด้วยรากพืชของดินที่แตกต่างกัน (Gray [18])

Manbeian [26] ได้ทำการศึกษาถึงผลลัพธ์ของการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงในห้องปฏิบัติการ โดยเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างดินที่ไม่ได้เสริมราก(ตัวอย่างดินเปล่า)และตัวอย่างดินที่เสริมรากพืช พบว่า ค่าเสริมความแข็งแรงเฉือนของรากจะมีค่าแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจนระหว่างค่าความแข็งแรงเฉือนของดินเปล่าและของดินที่เสริมรากพืช ดังภาพที่ 2-65 ดังแสดงให้เห็นว่าที่จุด a ค่าเสริมความแข็งแรงเฉือน(S_r) จะมีค่าเท่ากับ 4.9 กิโลปาสกาล (0.05 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

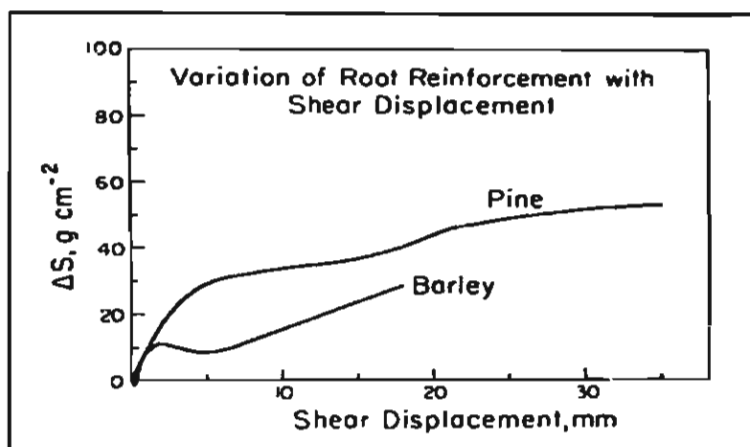


ภาพที่ 2-65 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับค่าการเคลื่อนตัวของดิน (Manbeian [26])

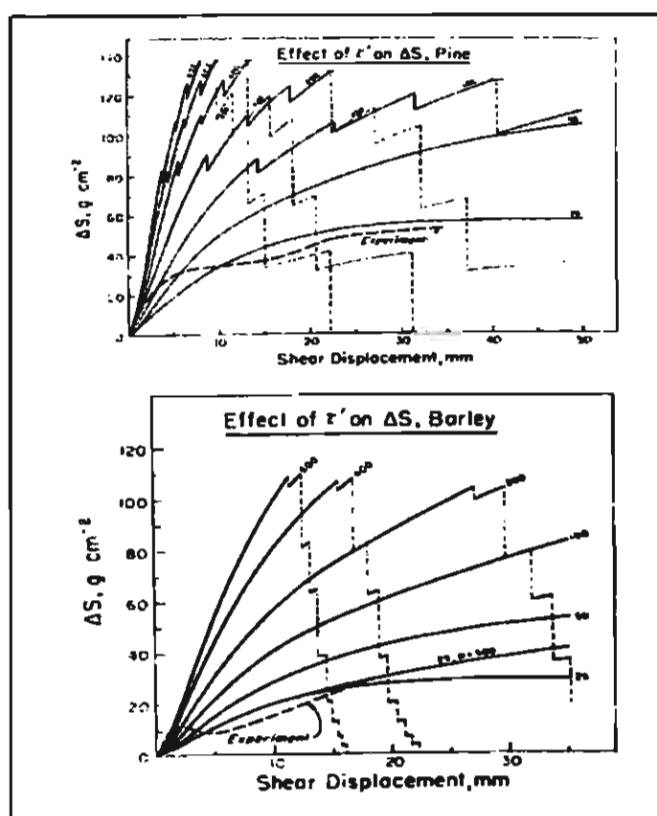
จากผลการทดสอบของ Waldron and Dakessian [35] พบว่าค่าการเสริมความแข็งแรงเฉือนด้วยราก, $\Delta S = S(\text{เสริมราก}) - S(\text{ไม่เสริมราก})$ สำหรับดินเหนียวปนทรายละเอียด (clay loam) สภาพอิมดัวที่เสริมรากข้าวบาร์เลย์ (barley) และรากคันทัน (pine) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 0.25 เมตรสำหรับแท่งดินที่เสริมรากคันทัน และ 0.1 เมตรสำหรับแท่งดินที่เสริมรากข้าวบาร์เลย์ ดังภาพที่ 2-66 ซึ่งค่า ΔS ของคันทันได้เพิ่มจาก $x = 0$ โดยตลอดขอบเขตทั้งหมดของการเคลื่อนตัว ซึ่งเป็นรูปแบบเหมาะสมมาก ๆ สำหรับการเพิ่มเสถียรภาพของลาดดิน ในดินที่เสริมรากข้าวบาร์เลย์, ΔS ได้แสดงค่าลบเล็กน้อยที่ $x = 0.5$ mm, ได้เพิ่มขึ้นไปประมาณ 10 g/cm^2 ที่ระยะ $x = 2$ มม. ซึ่งเชิงเล็กน้อย และจากนั้นได้เพิ่มขึ้นอย่างคงตัวที่ทุกค่าของ $x > 5$ mm

นอกจากนี้ Waldron and Dakessian [35] ยังพบอีกว่าค่าความแข็งแรงเฉือนของปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับราก (τ') ซึ่งมีผลต่อค่าการเสริมความแข็งแรงเฉือนด้วยราก, ΔS ของรากคันทันและของข้าวบาร์เลย์ ดังภาพที่ 2-67 ถึง 2-69 อีกทั้งค่าความยาวของรากยังมีผลต่อค่าการเสริมความแข็งแรงเฉือนด้วยราก, ΔS ซึ่งรากที่ยาวจะมีค่าความต้านทานต่อการเลื่อนไถลมากกว่ารากที่สั้น ดังภาพรูปที่ 2-68 ถึง 2-69 และความหนาของบริเวณการเฉือน Z ก็มีผลต่อค่าการเสริมความแข็งแรงเฉือนด้วยราก, ΔS

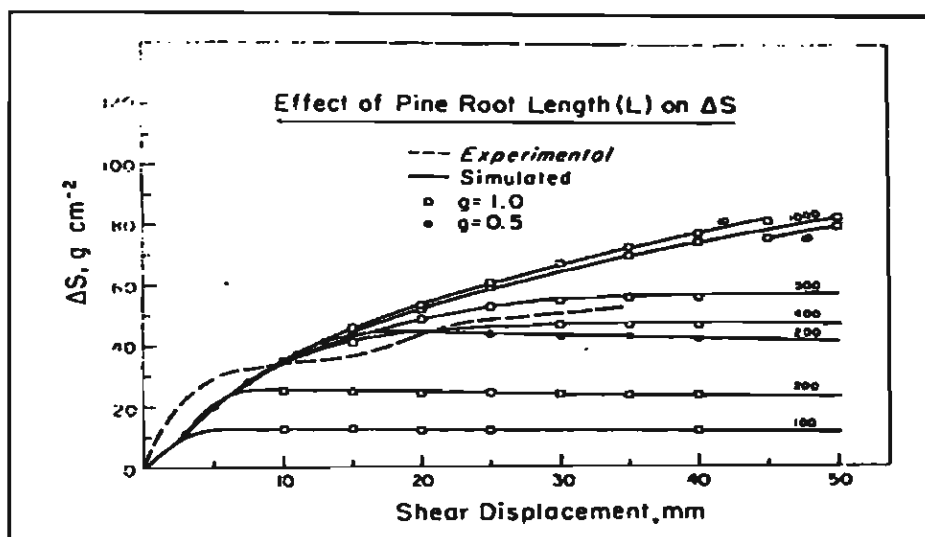
ดั่งภาพที่ 2-6966 แสดงการจำลองรากต้นสนที่มีค่า Z แปรเปลี่ยนจาก 0.2 – 2.0 เซนติเมตร โดยที่ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ มีค่าที่คงที่ จะทำให้ค่า ΔS เพิ่มขึ้นเมื่อ Z มีค่าที่เพิ่มขึ้นที่ค่าการเคลื่อนตัวเนื่องจากการเฉือนมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 35 มิลลิเมตรขึ้นไป



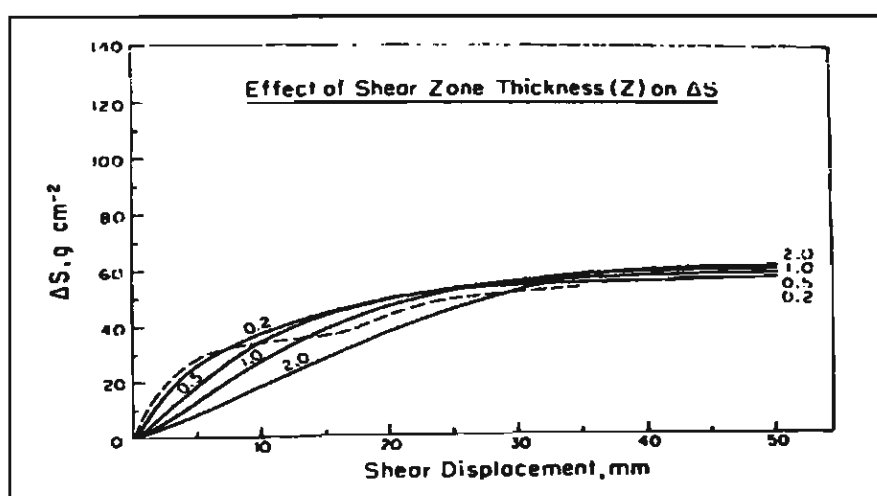
ภาพที่ 2-66 การแปรเปลี่ยนของค่าเสริมความแข็งแรงเฉือนของรากกับการเคลื่อนตัวเฉือน (Waldron and Dakessian [35])



ภาพที่ 2-67 ผลกระทบของค่าความแข็งแรงเฉือนของปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับราก(τ') ที่มีผลต่อค่าการเสริมความแข็งแรงเฉือนด้วยราก ΔS (Waldron and Dakessian [32])



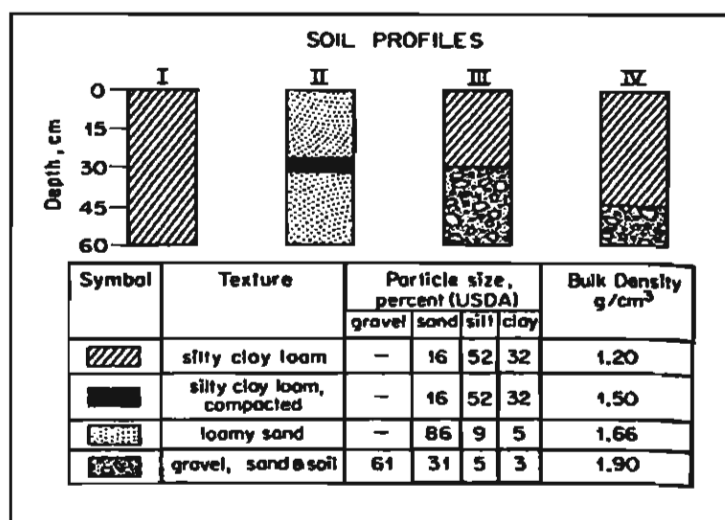
ภาพที่ 2-68 ผลกระทบของค่าความยาวของรากต้นสน L ที่มีผลต่อค่าการเสริมความแข็งแรงเฉือนด้วยราก, ΔS (Waldron and Dakessian [35])



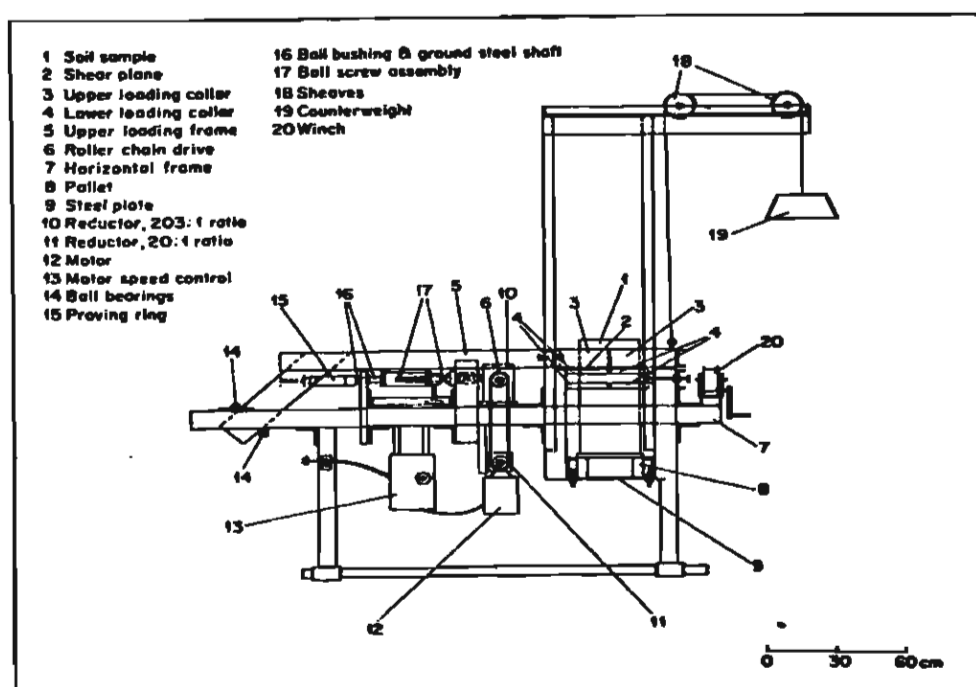
ภาพที่ 2-69 ผลกระทบของค่าความหนาบริเวณการเฉือน Z ที่มีผลต่อค่าการเสริมความแข็งแรงเฉือนด้วยราก, ΔS (Waldron and Dakessian [35])

Waldron [34] ได้ทำการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงของดินที่มีรากแพร่กระจายอยู่ในแท่งดินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตรซึ่งจะมีรากของต้น Alfalfa (*Medicago sativa*), barley (*Hordeum vulgare*) และ yellow pine (*Pine ponderosa*) ในรูปตัดขวางของดินทั้ง 4 ประเภทดังภาพที่ 2-70 โดยทำการทดสอบแรงเฉือนที่ระดับความลึก 15, 30, 40 เซนติเมตรด้วยเครื่องทดสอบดังภาพที่ 2-71 จากการทดสอบพบว่ารากของต้น alfalfa ให้ค่าความแข็งแรงเฉือนได้ดีที่สุด ดังภาพที่ 2-72 และค่าความเค้นเฉือนที่ค่าการเคลื่อนตัว 5 มิลลิเมตรและ 25 มิลลิเมตรของลักษณะดินแต่ละประเภททั้งที่เสริมรากพืชและไม่เสริมรากพืชถูกแสดงในตารางที่ 2-6 ตลอดจนได้แสดงให้เห็นถึง

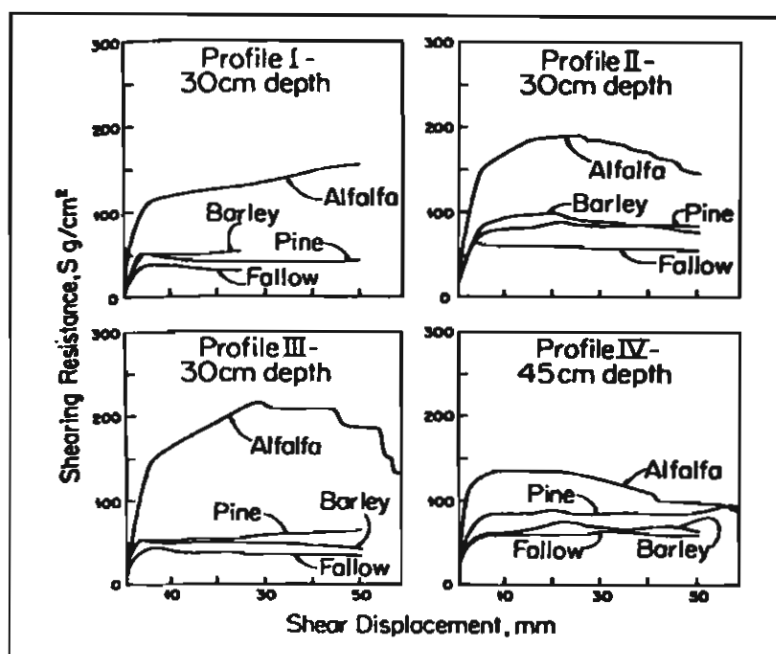
ค่าเสริมความต้านทานการเฉือนในดินที่เสริมรากคัน barley ที่ค่าการเคลื่อนตัว 25 มิลลิเมตรกับหน้าตัดของรากต่อหน้าตัดการเฉือนที่แปรเปลี่ยนในดินทั้ง 4 ประเภทดังภาพที่ 2-73 ซึ่งค่าหน้าตัดของรากต่อหน้าตัดการเฉือนมีค่ามากจะส่งผลให้ค่าเสริมความต้านทานการเฉือนในดินที่เสริมรากคัน barley ที่ค่าการเคลื่อนตัว 25 มิลลิเมตรในแต่ละรูปตัดขวางดินทั้ง 4 ประเภท



ภาพที่ 2-70 รูปตัดขวางของดินทั้ง 4 ประเภท (Waldron [34])



ภาพที่ 2-71 โค้ดแกรมของเครื่องมือทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนโดยตรงของดินในห้องปฏิบัติการ (Waldron [34])



ภาพที่ 2-72 ค่าความเค้นเฉือนกับการเคลื่อนตัวเฉือนสำหรับตัวอย่างดินที่เสริมรากพืชและไม่เสริมรากในแต่ละภาคตัดขวางของดินทั้ง 4 ประเภท (Waldron [34])

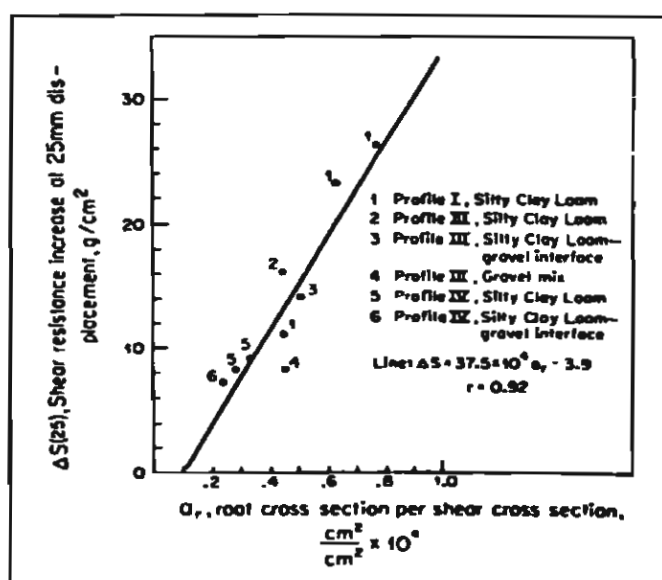
ตารางที่ 2-6 ค่าความต้านทานการเฉือน (S มีหน่วย g/cm^2)

Plant	S (5 mm)			S (25 mm)		
	Depth, cm					
	15	30	45	15	30	45
	<u>Profile I</u>			<u>Profile I</u>		
Alfafa	-	115	-	-	135	-
Barley	48	55	75	46	58	71
Pine	-	49	-	-	45	-
Follow	32	41	72	20	35	60
	<u>Profile II</u>			<u>Profile I</u>		
Alfafa	-	152	-	-	182	-
Barley	23	76	63	24	94	61
Pine	-	80	-	-	80	-
Follow	21	65	66	26	67	57

ตารางที่ 2-6 (ต่อ)

Plant	S (5 mm)			S (25 mm)		
	Depth, cm					
	15	30	45	15	30	45
	<u>Profile III</u>			<u>Profile III</u>		
Alfafa	-	158	-	-	210	-
Barley	39	53	91	35	54	83
Pine	-	56	-	-	60	-
Follow	26	43	100	19	40	75
	<u>Profile IV</u>			<u>Profile IV</u>		
Alfafa	-	-	133	-	-	127
Barley	32	46	63	26	37	72
Pine	-	-	86	-	-	100
Follow	24	34	64	18	28	65

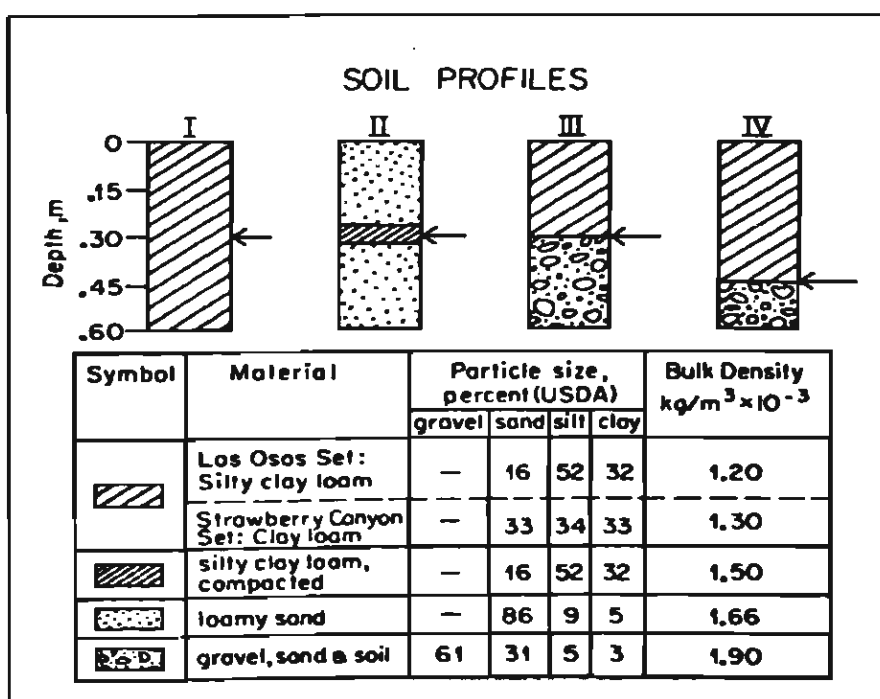
ที่มา : Waldron L.J. . "Shear Resistance of Root-Permeated Homogenous and Stratified Soil." Soil Science Society of America Journal 41 (1977) : 843-849.



ภาพที่ 2-73 ค่าเสริมความเค้นเฉือนของดินที่เสริมรากข้าวบาร์เลย์ที่ค่าการเคลื่อนตัว, $\Delta S(25)$ กับค่าหน้าตัดของรากต่อหน้าตัดเฉือนของดินทั้ง 4 ประเภท (Waldron [34])

Waldron and Dakessian [35] ได้ศึกษาผลกระทบของรากพืชตระกูลหญ้า, ถั่วฝักยาว, และต้นไม้ ซึ่งมีผลต่อค่าความต้านทานการเฉือนของรูปตัดขวางของดินทั้ง 4 ประเภทดังภาพที่ 2-74 โดยถูกสรแสดงถึงตำแหน่งของระนาบเฉือน โดยมีการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงทั้งในกรณีที่เสริมรากพืชและไม่เสริมรากพืชซึ่งต้องการทดสอบเป็น 2 แบบคือ แบบ Los Osos จะใช้รูปตัดขวางของดินทั้ง 4 ประเภทและ แบบ Strawberry Canyon ใช้เพียงรูปตัดขวางของดิน 2 ประเภทคือ I และ IV ซึ่งพบว่าอัตราส่วนของค่าความต้านทานแรงเฉือน S_r ของดินที่เสริมรากพืชต่อค่าความต้านทานของดินที่ไม่เสริมรากพืช S_f ที่ค่าการเคลื่อนตัวเฉือน 5 และ 25 มิลลิเมตรดังภาพที่ 2-75a – 2-75d ที่อายุของพืชที่ต่างกันซึ่งได้กำหนดไว้พบว่าอัตราส่วนนี้มีความแน่นอนกว่า S หรือ ΔS เพียงอย่างเดียวซึ่งทำการเปรียบเทียบความเป็นไปได้ของปริมาณการเสริมแรงด้วยรากของชนิดพืชที่ต่างกันที่ดินหลายประเภทและประเภทหน้าตัดที่ได้ใช้ โดยค่าความต้านทานแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากราก ΔS อาจถูกได้มาจากอัตราส่วนในภาพที่ 72a ถึง 72d และค่า S_r ในตารางที่ 2-7 ด้วยความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\Delta S = S_r - S_f = S_r (S_r / S_f - 1) \quad (2-54)$$

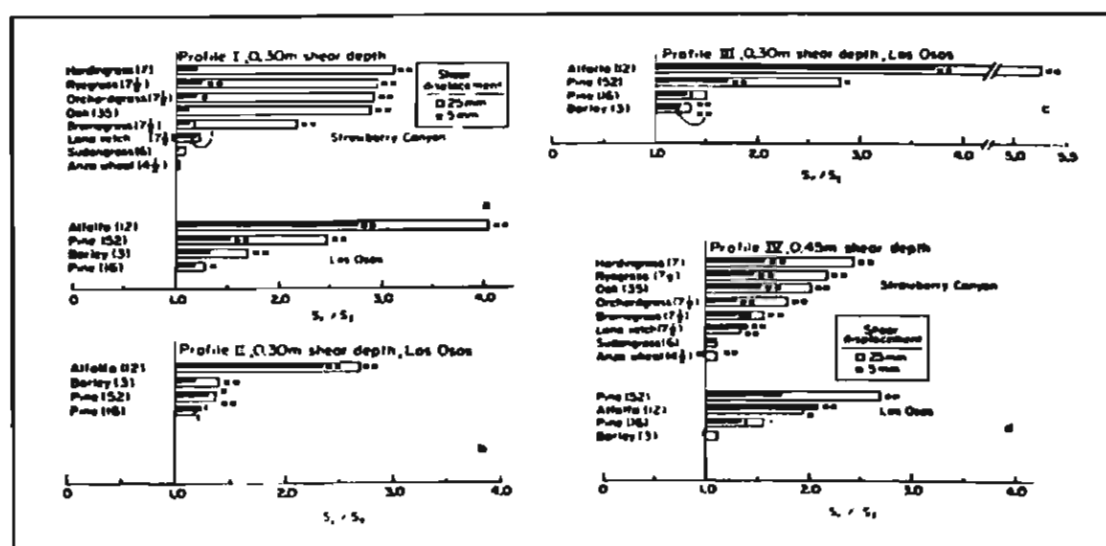


ภาพที่ 2-74 รูปตัดขวางของดินทั้ง 4 ประเภท (Waldron and Dakessian [35])

ตารางที่ 2-7 ค่าความต้านทานแรงเฉือนของวัสดุคินที่ไม่เสริมราก

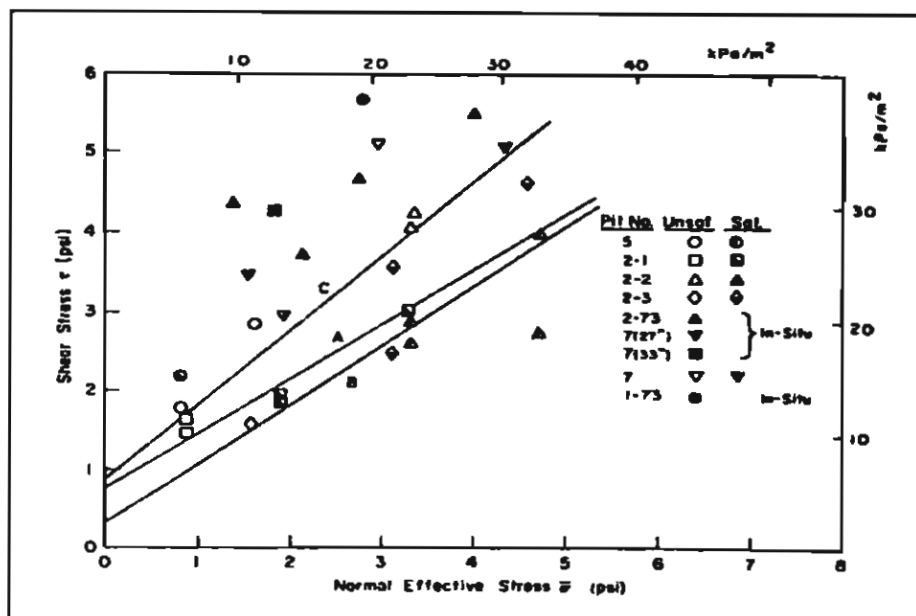
Test set	Shear displacement	Age	Shear resistance			
			Profile			
			I	II	III	IV
	mm	months	kPa			
Los Osos	5	14 – 16	4.0	6.4	4.2	6.3
Los Osos	5	52	4.2	6.7	5.4	7.2
Los Osos	25	14 – 16	3.4	6.6	3.9	6.4
Los Osos	25	52	3.1	6.7	4.0	6.1
Strawberry Canyon	5	6 – 7½	8.0	-	-	7.8
Strawberry Canyon	5	35	-	-	-	7.7
Strawberry Canyon	25	6 – 7½	5.0	-	-	6.5
Strawberry Canyon	25	35	-	-	-	6.2

ที่มา : Waldron L.J. and Dakessian S. . "Effect of Grass, Legume, and Tree Roots on Soil Shearing Resistance." *Soil Science Society of America Journal* 46 (1982) : 894-899.



ภาพที่ 2-75 อัตราส่วนของค่าความต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมรากต่อดินที่ไม่เสริมราก, S_v / S_h , ที่ค่าการเคลื่อนตัว 5 และ 25 มิลลิเมตรซึ่งอายุของพืชมีหน่วยเป็นเดือนที่ทำการทดสอบแรงเฉือนถูกแสดงอยู่ในวงเล็บข้างหลังแต่ละชื่อของพืช (Waldron and Dakessian [35])

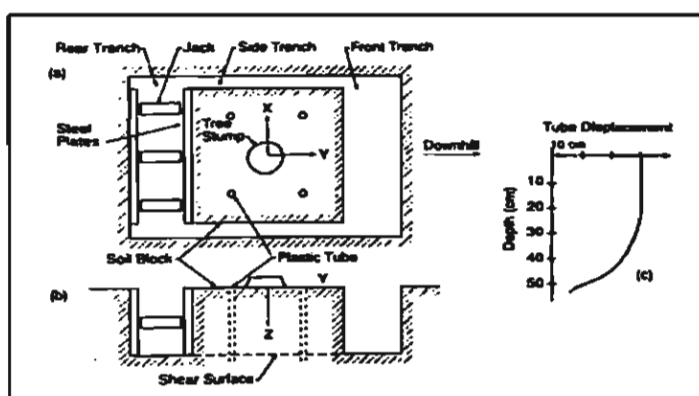
Wu; Mckinnel; Swanston [44] ได้ศึกษาการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงของดินที่เกาะเวลท์, อลาสก้าทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนามด้วยตัวอย่างในสนามทดสอบซึ่งการทดสอบกับตัวอย่างในห้องปฏิบัติการนั้นสามารถทดสอบได้ทั้งสภาพที่อิ่มตัวและไม่อิ่มตัว แต่ในการทดสอบในสนามนั้นจะทดสอบได้แต่ในสภาพที่ไม่อิ่มตัวเท่านั้น ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 2-76



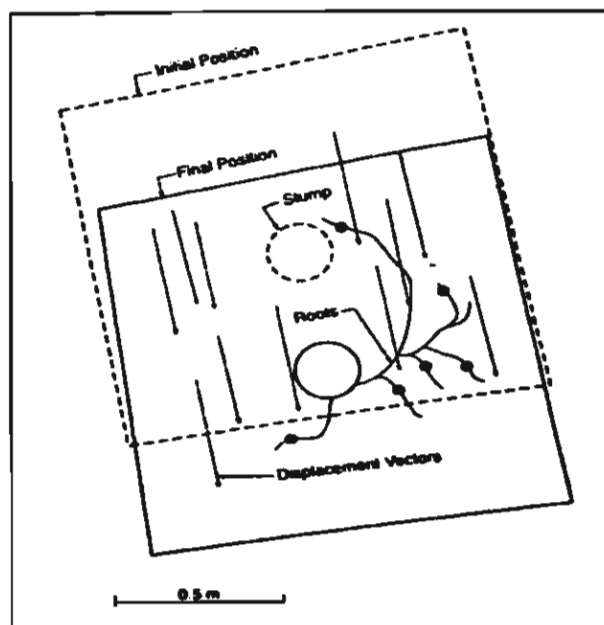
ภาพที่ 2-76 ผลลัพธ์ของการทดสอบแรงเฉือนทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนาม (Wu; Mckinnel; Swanston [44])

จากภาพที่ 2-76 พบว่าค่าที่ได้มีความแตกต่างกันบ้างระหว่างค่าของการทดสอบการเฉือนในห้องปฏิบัติการ และในสนามกับตัวอย่างดินที่ไม่อิ่มตัว เพราะเนื่องจากค่าที่ได้มีการกระจายตัวของข้อมูลค่อนข้างมากจึงไม่สามารถที่จะสรุปออกมาได้ในเชิงกราฟเส้นตรง แต่กับตัวอย่างดินที่มีอิ่มตัวจะสามารถสรุปออกมาได้จากกราฟแต่ละเส้นโดยค่าความเชื่อมั่น c' และมุมเสียดทานภายใน ϕ' หาได้จากภาพที่ 2-76 เนื่องด้วยพื้นผิวการเลื่อนไถลอยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดินตลอดเวลาของการเลื่อนไถล ค่าความแข็งแรงเฉือนในสภาพอิ่มตัวจึงถูกใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ ซึ่งค่าความแข็งแรงเฉือนที่ได้จะเป็นค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการต่อตัวอย่างที่อิ่มตัวเท่านั้นโดยพบว่า จากการวิเคราะห์แบบถดถอย (กราฟเส้น A, ภาพที่ 2-76) ให้ค่า $c' = 5.3$ kPa (0.75 psi) และ $\phi' = 34.7^\circ$ ส่วนเส้นกราฟ B จะให้ค่าความแข็งแรงเฉือนต่ำสุดโดยเส้นนี้ให้ค่า $c' = 2.1$ kPa (0.30 psi) และ $\phi' = 37^\circ$ และกราฟเส้น C, ให้ค่า $c' = 6.0$ kPa (0.85 psi) และ $\phi' = 44^\circ$ การใช้ค่าความแข็งแรงเฉือนในการวิเคราะห์เสถียรภาพนั้นควรที่มีการพิจารณาใช้ที่เหมาะสม

Wu และ Watson [42] ได้ทำการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงในสนามในพื้นที่ป่า Ashley ประมาณ 50 km ทางเหนือของ Christchurch ประเทศนิวซีแลนด์ ซึ่งป่าประกอบด้วยหลากหลายชนิดของต้นไม้ที่ปลูกได้ซึ่งปลูกด้วย Monterey Pine (*Pinus radiata* D Don) สนามที่ตั้งอยู่ที่ใกล้ฐานของลาดดินที่หันไปทางทิศใต้ด้วยมุมลาดชัน 27° ทำการทดสอบมีภาคตัดของดินที่สม่ำเสมอ และไม่มีหินขนาดใหญ่หรือซากไม้ฝังอยู่ แต่ละบล็อกทดสอบมีระบบรากของ *Pinus Radiata* อายุ 6 – 8 ปีอยู่จำนวนมาก และมีมาตรวัดแรงติดไปที่รากด้วย โดยที่บล็อกดินตะกอนทรายมีขนาดจัตุรัส 1 เมตร และลึก 50 เซนติเมตรดังภาพที่ 2-77 และทำการโยกเครื่องทดสอบให้แรงดันไฮดรอลิกดันตัวอย่างจากจุดเริ่มต้นการเฉือนจนกระทั่งเกิดการพิบัติ ดังภาพที่ 2-78

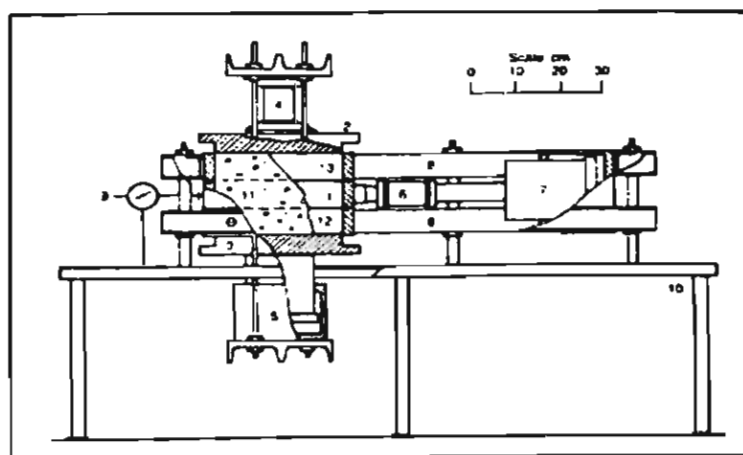


ภาพที่ 2-77 การทดสอบแรงเฉือน โดยตรงในสนาม (Wu and Watson [42])

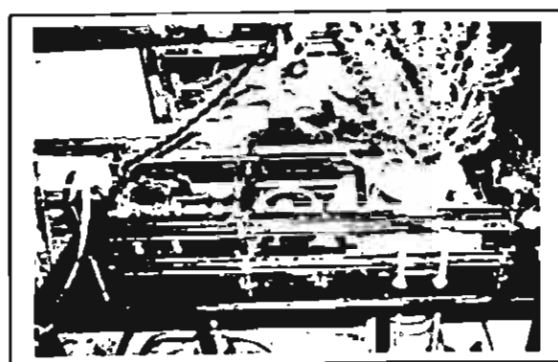


ภาพที่ 2-78 การเคลื่อนที่ของบล็อกดินในการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Wu and Watson [42])

Operstien and Fryman [28] ได้ทำการทดสอบแรงเค้นตรงบนตัวอย่างของดินชอล์กเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มิลลิเมตร และบนดินชอล์กที่เสริมด้วยรากของต้น alfalfa, rosemary, pisticia lentacia และ meoporum parvifolium อายุ 1-2 ปี ตัวอย่างถูกล้อมรอบด้วยท่อพลาสติกซึ่งฝังเข้าไปในหน้าตัดก่อนที่จะเตรียมตัวอย่างโดยทำการทดสอบแรงเค้นในอุปกรณ์การเค้นตรงขนาดใหญ่ อุปกรณ์นี้ถูกออกแบบเพื่อที่จะยอมให้เกิดการเค้นแบบเฉือนหรือแบบคู่ที่ได้ถูกแสดง ในภาพที่ 2-79 (Wiseman [38]) ซึ่งได้กระทำการเค้นต่อตัวอย่างดินที่เสริมรากพืชดังภาพที่ 2-80 โดยระนาบการเค้นอยู่ที่ความลึกระหว่าง 50 และ 750 มิลลิเมตรได้พื้นผิวดินซึ่งทดสอบการเค้นตรง ถูกกระทำจนกระทั่งการเคลื่อนตัวสูงสุด 40 มิลลิเมตร (ขีดจำกัดช่วงเครื่อง) ที่อัตราการเคลื่อนตัวการเค้นคงที่ประมาณ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาที ปริมาณความชื้นของดินบนระนาบการเค้นตรงมีค่าอยู่ในช่วง 27 - 41% ภาพที่ 2-81 แสดงตัวอย่างที่เสริมด้วยรากที่ห่อหุ้มในลอนได้ถูกเอาออกหลังจากการเค้นซึ่งตามมาในท่อที่หลายระดับ ภาพที่ 2-81(a) และ (b) แสดงรากหญ้า alfalfa และ rosemary ตามลำดับ ที่ไหลออกมาบนพื้นผิวการพังทลาย หลังจากการเค้นพบว่ารากที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง ใหญ่กว่า 1-2 มิลลิเมตรจะไม่แตกหักหรือฉีกขาดที่การเคลื่อนตัวการเค้นที่ 40 มิลลิเมตร



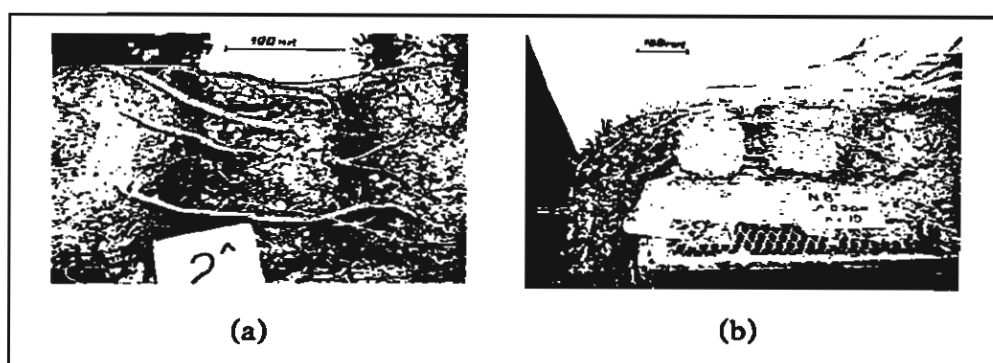
ภาพที่ 2-79 โคอะแกรมของเครื่องทดสอบแรงเค้นโดยตรง (Operstien and Fryman [28])



ภาพที่ 2-80 การทดสอบแรงเค้นของดินที่เสริมรากพืช (Operstien and Fryman [28])



ภาพที่ 2-81 ตัวอย่างที่เสริมด้วยรากที่ห่อหุ้มในลอนได้ถูกเอาออกหลังจากการเฉือน (Operstien and Fryman [28])



ภาพที่ 2-82 รากที่ไพล่ออกมาหลังจากการเฉือน a) ราก alfalfa b) ราก rosemary (Operstien and Fryman [28])

โดยพบว่า ค่าเสริมความแข็งแรงเฉือนของดินที่เสริมรากจะเป็นฟังก์ชันของค่าความต้านทานแรงดึงที่เสริมกำลังด้วยราก ถ้าดินที่เสริมกำลังด้วยรากซึ่งมีค่ามุมเสียดทานภายในของดินคงที่จะมีค่าเพิ่มความเชื่อมั่นของดินตามการเพิ่มของพื้นที่รากสัมผัส A_r และส่วนเสริมความแข็งแรงดึงของรากสัมผัส T_r ดังภาพที่ 2-83 และ 2-84 ซึ่ง A_r และ T_r ได้แสดงดังสมการ

$$A_r = F_r/F = \sum f_i n_i / F \quad (2-55)$$

$$T_r = \sum T_i t_i n_i / F \quad (2-56)$$

ซึ่ง F_r เป็นพื้นที่หน้าตัดรากรวมทั้งหมด, F เป็นพื้นที่หน้าตัดการเฉือนทั้งหมด, f_i เป็นพื้นที่หน้าตัดรากชั้น i , t_i เป็นค่าความแข็งแรงดึงของรากชั้นที่ i และ n_i เป็นจำนวนของรากของขนาดชั้นที่ i

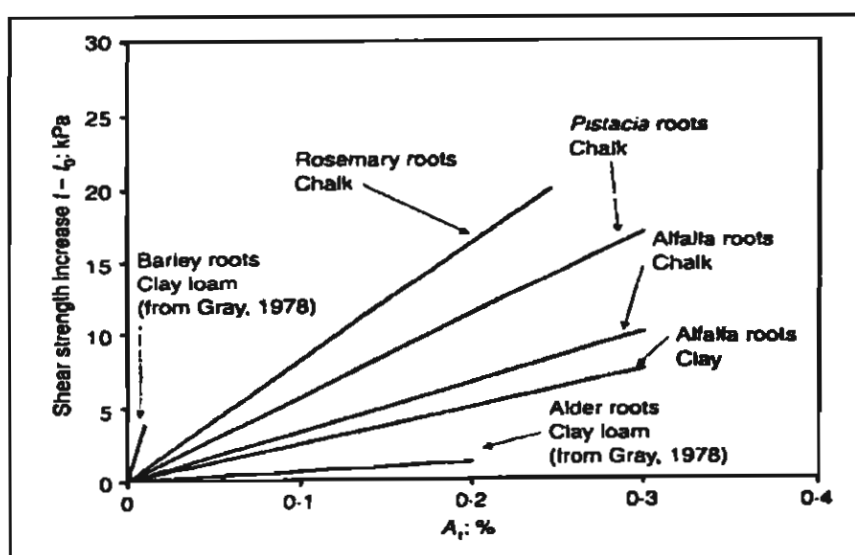
จากการทดสอบดินทั้งสองชนิดพบว่ามุมเสียดทานยังคงที่ (แต่ต่างกันสำหรับดินแต่ละชนิด) ขณะที่ค่าความเชื่อมั่นเพิ่มขึ้นตามกับค่า T_r ซึ่งค่าเสริมความแข็งแรงเฉือน (Δc) อาจเท่ากับการเสริมความเชื่อมั่นปรากฏ (Δc) ดังต่อไปนี้

$$\Delta t = \Delta c = c - c_0 \quad (2-57)$$

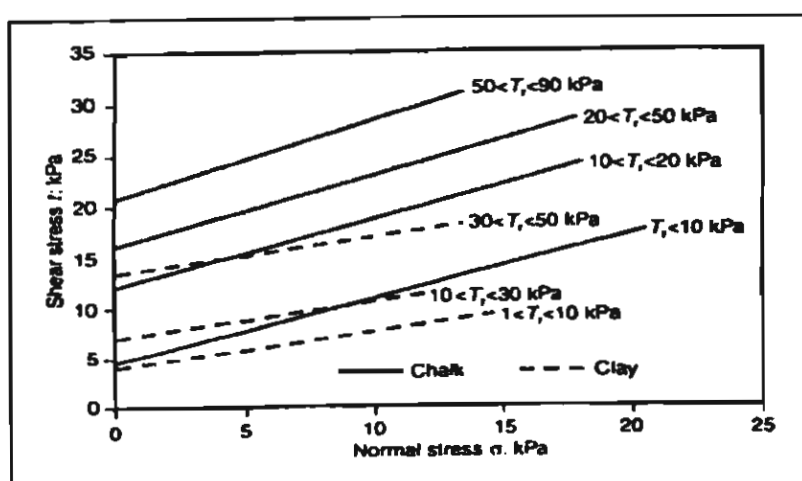
ซึ่ง c_0 เป็นค่าความเชื่อมแน่นของดินที่ไม่ได้เสริมรากและ c เป็นค่าความเชื่อมแน่นปรากฏของดินที่ถูกเสริมด้วยราก ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของค่าการยึดเหนี่ยวปรากฏ ดังภาพที่ 2-85 (หรือค่าความแข็งแรงเฉือนและค่าความแข็งแรงดึงสัมผัส T_r ที่จะเป็นเส้นตรง โดยคำนวณโดยประมาณ 14 องศา สำหรับดินซอล์ก และดินเหนียวที่ได้ทดสอบ อิทธิพลของรากต่อความแข็งแรงเฉือนโดยสมการ

$$T_{\max} = (c_0 + 0.25T_r) + \sigma \tan \phi \quad (2-58)$$

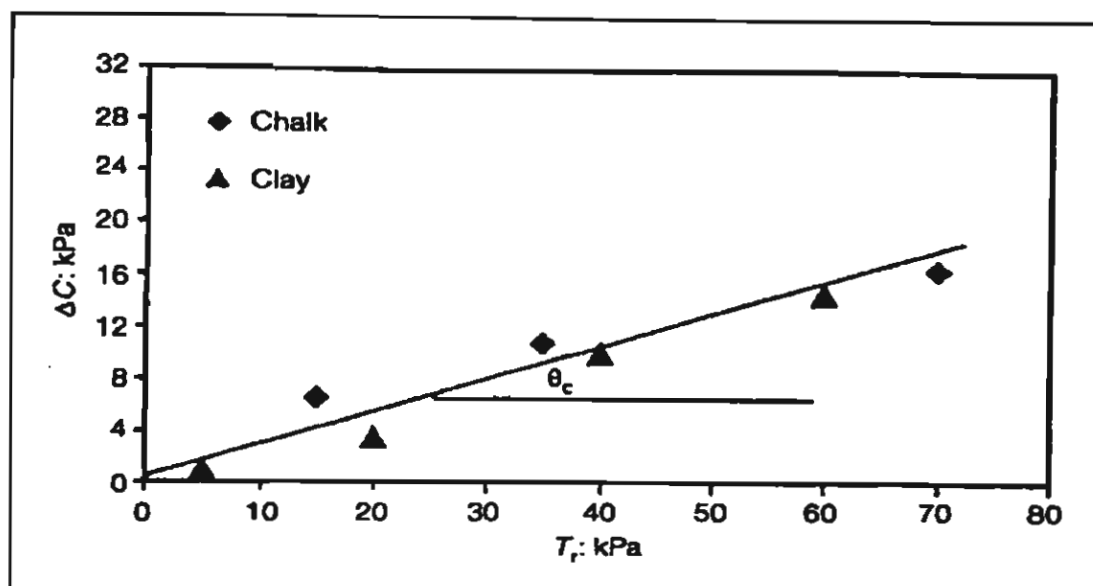
โดยค่า $0.25T_r$ ได้มาจากส่วนเพิ่มความแข็งแรงเฉือนที่เกิดจากรากพืช



ภาพที่ 2-83 ความสัมพันธ์ของค่าเพิ่มความแข็งแรงเฉือนกับค่าพื้นที่หน้าตัดสัมผัส A_r (Gray [18])

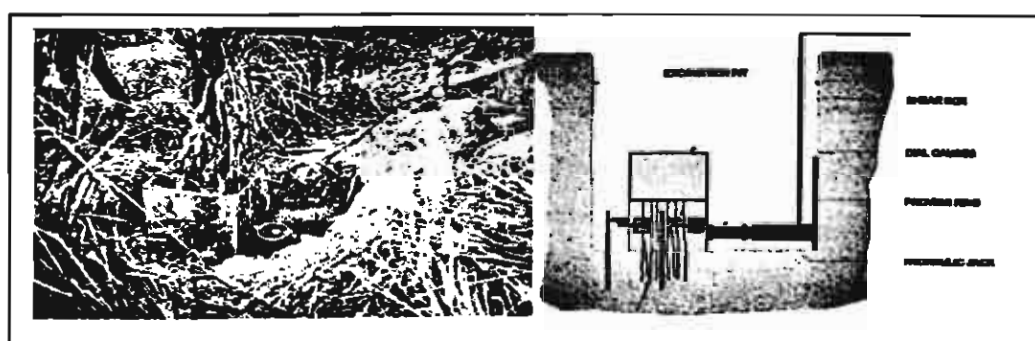


ภาพที่ 2-84 อิทธิพลของ T_r ต่อค่าความแข็งแรงเฉือนของดินซอล์ก และดินเหนียว (Operstien and Fryman [28])

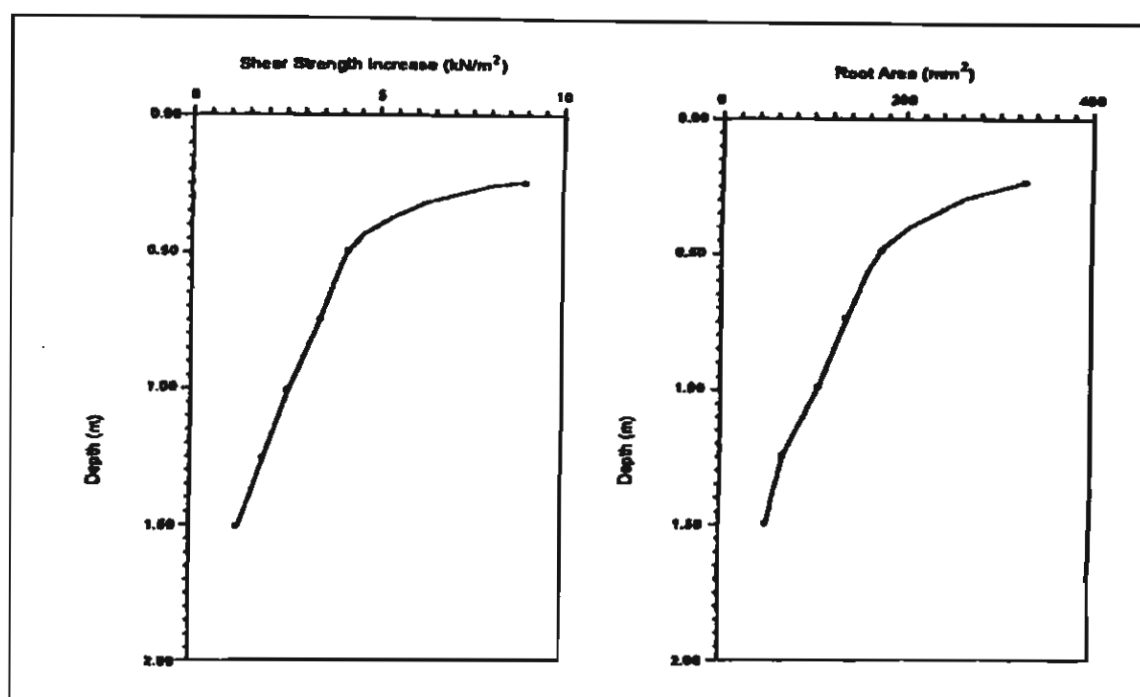


ภาพที่ 2-85 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสริมความเชื่อมั่นแน่นและค่าความแข็งแรงดึงสัมพันธ์
(Operstien and Fryman [28])

ดิถี แห่งเชาวนิช [2] ได้ศึกษาการเสริมความแข็งแรงเฉือนของดินด้วยรากหญ้าแฝกกลุ่ม (*Vetiveria zizanioides*) โดยศึกษาความแข็งแรงเฉือนโดยตรงในสนามของดินซึ่งเสริมรากหญ้าแฝกกลุ่มและไม่ได้เสริมรากหญ้าแฝกกลุ่ม ดังแสดงในภาพที่ 2-86 จากการทดลองพบว่า ความแข็งแรงเฉือนของดินที่ระดับความลึก 25 เซนติเมตรจากผิวดินจะมีค่ามากที่สุด และลดลงตามระดับความลึกของการทดสอบโดยค่าของความแข็งแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงจะขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดของรากหญ้าแฝกกลุ่มที่มีอยู่ในพื้นที่หน้าตัดการเฉือน ดังแสดงในภาพที่ 2-87



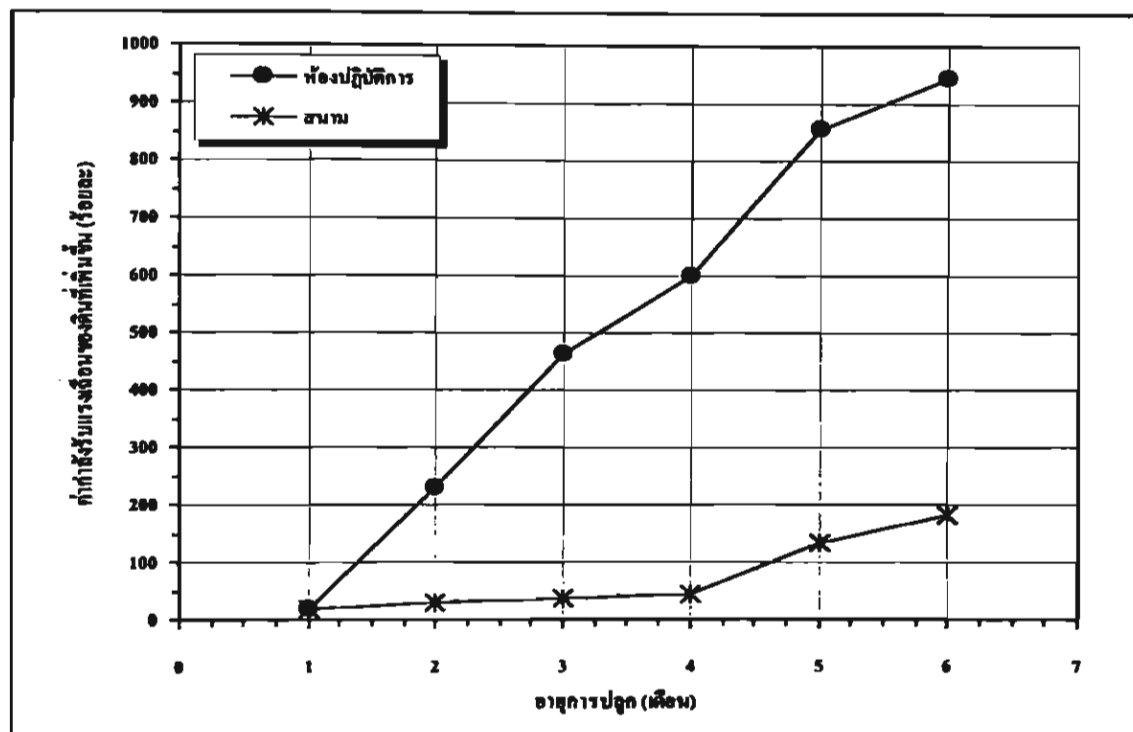
ภาพที่ 2-86 การทดสอบแรงเฉือนโดยตรงในสนาม (ดิถี แห่งเชาวนิช [2])



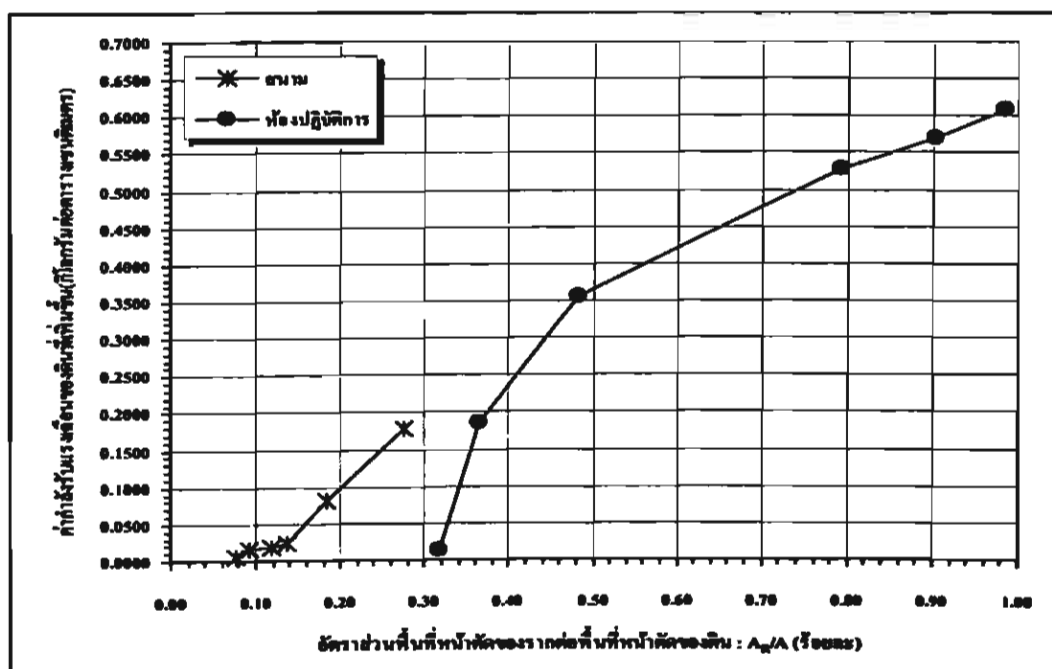
ภาพที่ 2-87 การเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดของรากที่มีผลต่อการเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่ระดับความลึกต่างกัน (ดิถี แห่งเชาวนิช [2])

วราร; วิชัย; พานิช [3] ได้ศึกษากำลังต้านทานแรงเฉือนโดยตรงของดินซึ่งเสริมกำลังด้วยรากหลัาแฝกและไม่ได้เสริมกำลังด้วยรากหลัาแฝก กรณีการทดสอบในสนามและในห้องปฏิบัติการ โดยพิจารณาผลกระทบเนื่องจากปัจจัยของอายุของการปลูกต่างๆกันและที่ระดับความลึก 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 และ 90 เซนติเมตร จากผิวดิน โดยการศึกษาในสนามได้ทำการปลูกหลัาแฝกชนิดแฝกคอน กลุ่มพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ จากต้นกล้าที่อายุ 4 สัปดาห์ โดยปลูกระยะห่างระหว่างแถว 100 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างต้น 10 เซนติเมตร ส่วนในห้องปฏิบัติการ ทำการปลูกหลัาแฝกในกระบอกตัวอย่างโดยใช้ท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร จากนั้นทำการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนโดยตรงของดินในห้องปฏิบัติการ และในสนามตั้งแต่อายุการปลูก 1, 2, 3, 4, 5, และ 6 เดือน ตามลำดับ

จากผลการศึกษาพบว่าค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนโดยตรงของดินที่เพิ่มขึ้นในห้องปฏิบัติจะขึ้นอยู่กับปัจจัยของอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของรากต่อพื้นที่หน้าตัดของดิน และอายุการปลูกดังภาพที่ 2-88 และ 2-89 ยังพบว่าในห้องปฏิบัติการมีค่าสูงกว่าในสนาม คิดเป็นร้อยละอยู่ในช่วง 19.47 ถึง 942.79 และ 17.55 ถึง 182.27 ตามลำดับ และ อย่างไรก็ตามค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนโดยตรงของดินในห้องปฏิบัติ และในสนาม มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน



ภาพที่ 2-88 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นในห้องปฏิบัติการและในสนาม กับอายุการปลูก ที่ระดับความลึก 10 เซนติเมตร จากผิวดิน (วราธร; วิชัย; พานิช [3])



ภาพที่ 2-89 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นในห้องปฏิบัติการและในสนาม กับอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของรากต่อพื้นที่หน้าตัดของดิน ที่ระดับความลึก 10 เซนติเมตร จากผิวดิน (วราธร; วิชัย; พานิช [3])

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 การหาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 การทดสอบของหาความชื้น (Water Content) พิกัดเหลว (Liquid Limit) และพิกัดพลาสติก (Plastic Limit) ของดินตามมาตรฐาน ASTM D 2487

3.1.2 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity of Soil) ตามมาตรฐาน ASTM D 854

3.1.3 การทดสอบหาขนาดเม็ดดิน (Grain Size Analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D 422

3.1.4 การทดสอบการบดอัดดิน (Compaction Test) ตามมาตรฐาน ASTM D698

3.15 การทดสอบหาความหนาแน่นของดินในสนาม (Field Density Test) ตามมาตรฐาน ASTM D1556

3.1.6 การทดสอบการเฉือนดินโดยตรง (Direct Shear Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 3080

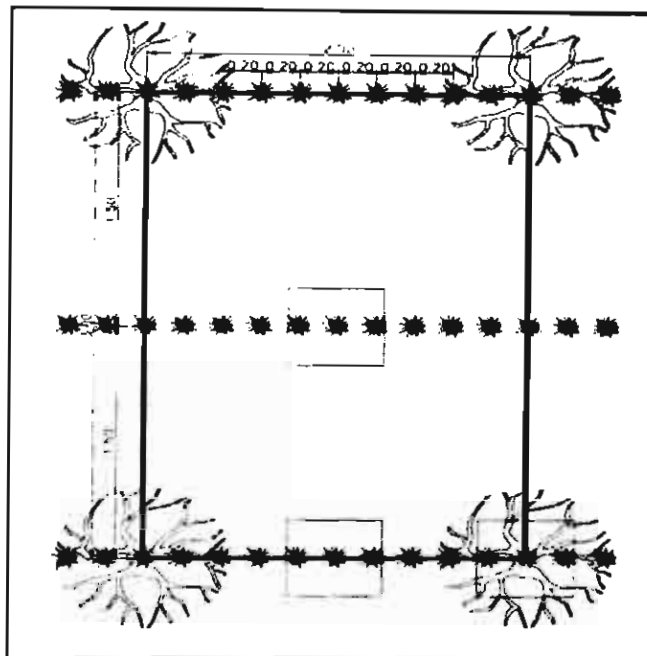
3.2 การจัดเตรียมแปลงทดลอง

การทดสอบกำลังต้านทานแรงถดถอยและแรงเฉือนของดินในรูปแบบการปลูกพืชแบบผสมผสานของกระถินเทพาและหญ้าแฝกในสนามนี้ จะใช้พื้นที่ในการปลูกประมาณ 540 ตารางเมตร ณ สถานที่ทดลองปลูกต้นกระถินเทพาและหญ้าแฝกคือ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตปทุมธานี ตำบลเนินหอม อำเภอเมือง จังหวัดปทุมธานี เตรียมพื้นที่โดยการกำจัดวัชพืชออกให้หมด ขุดร่องดินให้ได้ตามรูปแบบที่ต้องการหลังจากนั้นนำดินกล้ากระถินเทพาและหญ้าแฝกซึ่งมีอายุระหว่าง 1.5 เดือน ถึง 2 เดือน มีความสูงระหว่าง 10 เซนติเมตร 30 เซนติเมตร ในการทดลองครั้งนี้จะปล่อยให้มีการเจริญเติบโตตามธรรมชาติโดยแปลงทดลองนี้จะไม่มีการรดน้ำและไม่ใส่ปุ๋ยแต่อย่างใด การเตรียมแปลงทดลองอยู่ในช่วงฤดูฝนปลายเดือนสิงหาคม 2546 โดยกำหนดเป้าหมายการทดสอบในเดือนตุลาคม 2546 ถึงเดือนธันวาคม 2547 โดยการปลูกจะแบ่งเป็น 2 รูปแบบ คือ แบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม ซึ่งแต่ละรูปแบบมีการปลูกแบ่งเป็น 3 แบบซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1 กรณีรูปแบบการปลูกแบบสี่เหลี่ยม

3.2.1.1 รูปแบบที่ 1 ปลูกหญ้าแฝกเป็นแถวให้มีระยะห่างระหว่างกอประมาณ 0.20

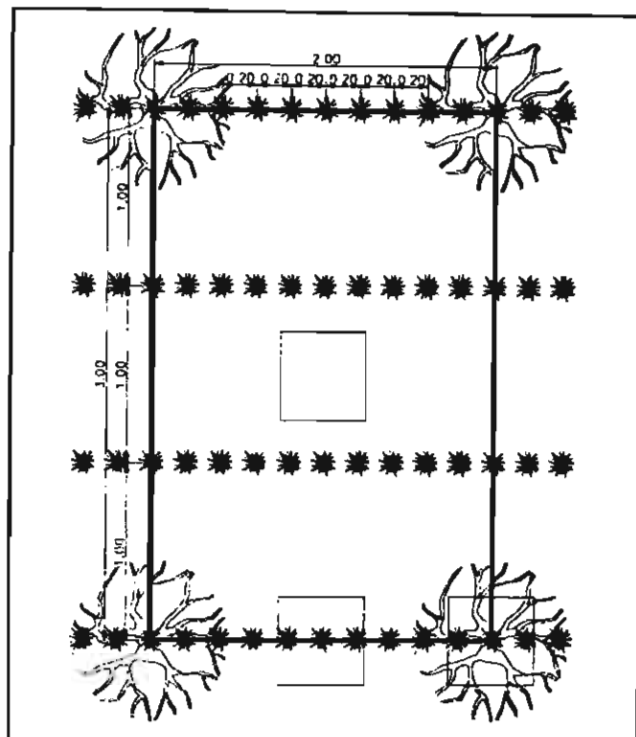
เมตร หนุ้าแฝกแต่ละแถวห่างกัน 1.50 เมตร กระดินเทพาจะปลูกแทรกอยู่ระหว่างกอหนุ้าแฝก โดยมีระยะห่างระหว่างต้นกระดินเทพาในแถวเดียวกัน 2.00 เมตร โดยเป็นการปลูกกระดินเทพาแทรกในแถวหนุ้าแฝกแบบแถวเว้นแถว ต้องจัดให้ต้นกระดินเทพามีรูปแบบการปลูกเป็นสี่เหลี่ยมดังภาพที่ 3-1



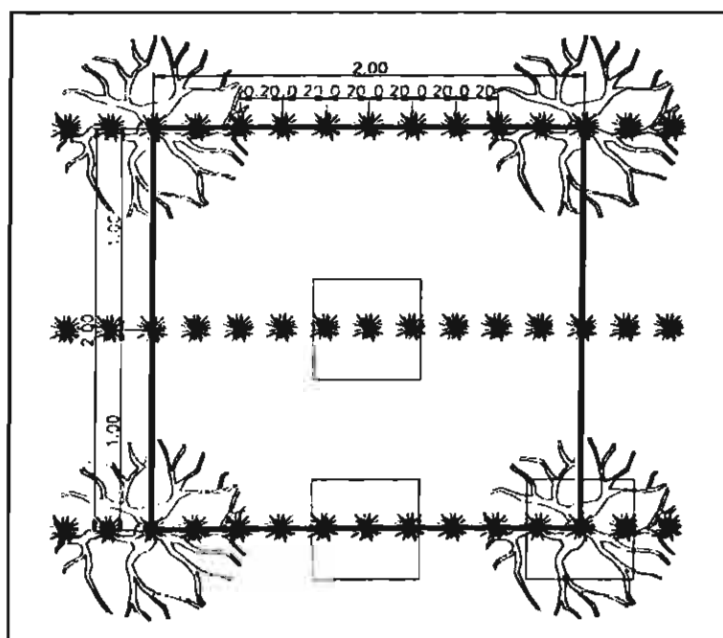
ภาพที่ 3-1 รูปแบบการปลูกแบบสี่เหลี่ยมแบบที่ 1

3.2.1.2 รูปแบบที่ 2 ปลูกหนุ้าแฝกเป็นแถวให้มีระยะห่างระหว่างกอประมาณ 0.20 เมตร หนุ้าแฝกแต่ละแถวห่างกัน 1.00 เมตร กระดินเทพาจะปลูกแทรกอยู่ระหว่างกอหนุ้าแฝก โดยมีระยะห่างระหว่างต้นกระดินเทพาในแถวเดียวกัน 2.00 เมตร โดยเป็นการปลูกให้ต้นกระดินเทพาแทรกอยู่ในแถวหนุ้าแฝกแบบแถวเว้นสองแถว ต้องจัดให้ต้นกระดินเทพามีรูปแบบเป็นสี่เหลี่ยมดังภาพที่ 3-2

3.2.1.3 รูปแบบที่ 3 ปลูกหนุ้าแฝกเป็นแถวให้มีระยะห่างระหว่างกอประมาณ 0.20 เมตร หนุ้าแฝกแต่ละแถวห่างกัน 1.00 เมตร กระดินเทพาจะปลูกแทรกอยู่ระหว่างกอหนุ้าแฝก โดยมีระยะห่าง 2.00 เมตร โดยเป็นการปลูกกระดินเทพาแทรกในแถวหนุ้าแฝกแบบแถวเว้นแถว ต้องให้ต้นกระดินเทพามีรูปแบบเป็นสี่เหลี่ยมดังภาพที่ 3-3



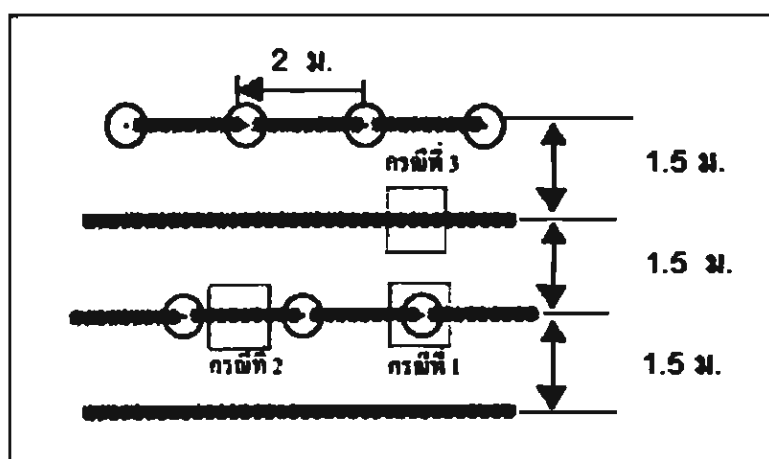
ภาพที่ 3-2 รูปแบบการปลูกแบบสี่เหลี่ยมแบบที่ 2



ภาพที่ 3-3 รูปแบบการปลูกแบบสี่เหลี่ยมแบบที่ 3

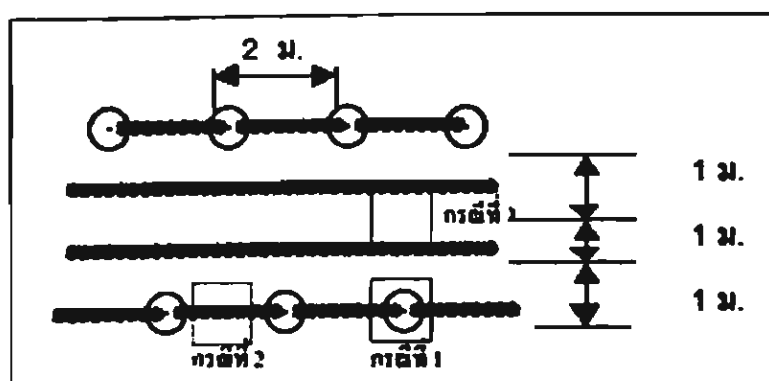
3.2.2 กรณีรูปแบบการปลูกแบบสามเหลี่ยม

3.2.2.1 รูปแบบที่ 1 ปลูกหญ้าแฝกเป็นแถวให้มีระยะห่างระหว่างกอประมาณ 0.2 เมตร หญ้าแฝกแต่ละแถวห่างกัน 1.50 เมตร กระถินเทพาจะปลูกแทรกอยู่ระหว่างกอหญ้า โดยมีระยะห่าง 2.00 เมตร โดยเป็นการปลูกแบบแถวเว้นแถว แต่วัดให้ต้นกระถินเทพามีรูปแบบเป็นสามเหลี่ยมดังภาพที่ 3-4



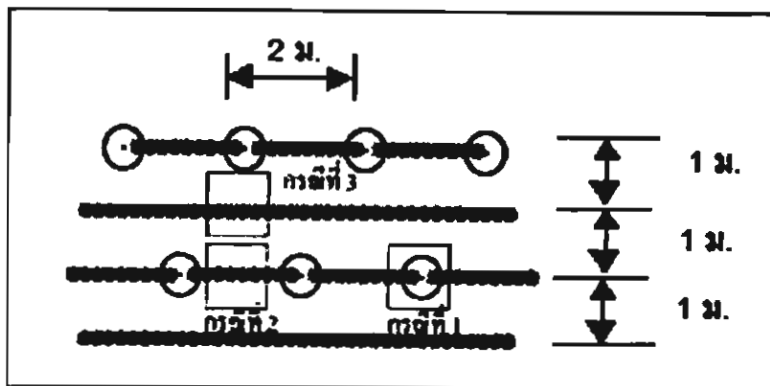
ภาพที่ 3-4 รูปแบบการปลูกแบบสามเหลี่ยมแบบที่ 1

3.2.2.2 รูปแบบที่ 2 ปลูกหญ้าแฝกเป็นแถวให้มีระยะห่างระหว่างกอประมาณ 0.2 เมตร หญ้าแฝกแต่ละแถวห่างกัน 1.00 เมตร กระถินเทพาจะปลูกแทรกอยู่ระหว่างกอหญ้า โดยมีระยะห่าง 2.00 เมตร โดยเป็นการปลูกแบบแถวเว้นสองแถว แต่วัดให้ต้นกระถินเทพามีรูปแบบเป็นสามเหลี่ยมดังภาพที่ 3-5



ภาพที่ 3-5 รูปแบบการปลูกแบบสามเหลี่ยมแบบที่ 2

3.2.2.3 รูปแบบที่ 3 ปลุกหญ้าแฝกเป็นแถวให้มีระยะห่างระหว่างกอประมาณ 0.2 เมตร หญ้าแฝกแต่ละแถวห่างกัน 1.00 เมตร กระดินเทพาจะปลูกแทรกอยู่ระหว่างกอหญ้า โดยมีระยะห่าง 2.00 เมตร โดยเป็นการปลูกแบบแถวเว้นสองแถว แต่วัดให้ต้นกระดินเทพามีรูปแบบเป็นสามเหลี่ยม ดังภาพที่ 3-6



ภาพที่ 3-6 รูปแบบการปลูกแบบสามเหลี่ยมแบบที่ 3

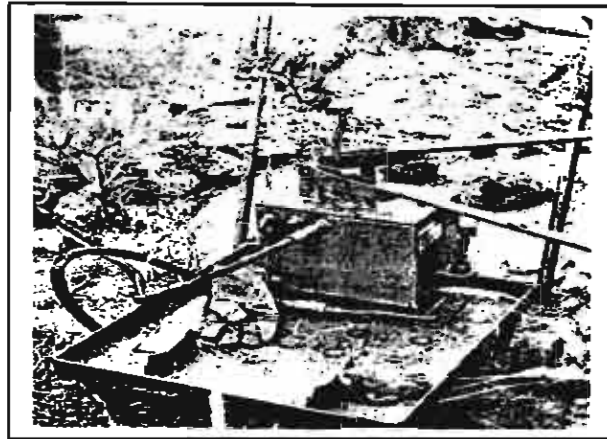
3.3 การเตรียมเครื่องมือในการทดสอบ ซึ่งแบ่งเป็น 4 ข้อหลักดังนี้

3.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือนโดยตรงในสนาม (ภาพที่ 3-7 และ 3-8) มีดังต่อไปนี้

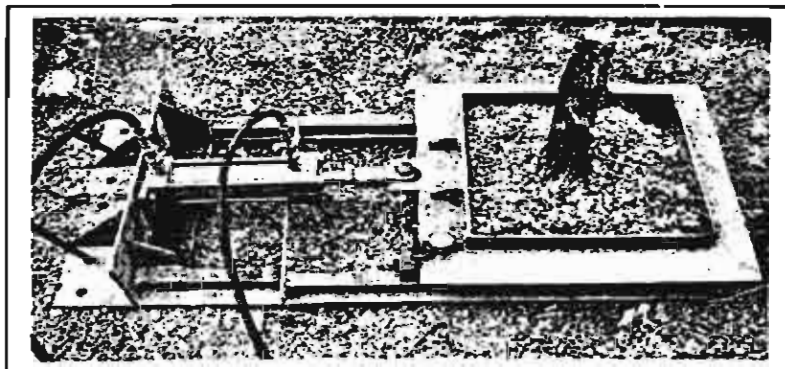
1. กล้องการเฉือนทำด้วยเหล็กแผ่นขนาด 500 x 500 x 150 มิลลิเมตร เหล็กหนา 10 มิลลิเมตร
2. กรอบโครงเหล็ก ขนาด 750 x 1500 x 60 มิลลิเมตร เหล็กหนา 10 มิลลิเมตร
3. Hydraulic Jack ขนาด 20 ตัน กระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร
4. Hydraulic Pump ขนาดมากกว่า 20 ตัน
5. Pressure Gage วัดความดันขนาด 60 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
6. Dial Gage วัดการเคลื่อนที่ในแนวราบ
7. ดัลป์เมตร
8. บรรทัดวัดระยะละเอียด (Vernier Callipers)
9. ระดับน้ำ
10. ประแจ
11. เหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ยาว 500 มิลลิเมตร จำนวน 6 เส้น
12. จอบ เสียม พลั่ว ขลัง อีเตอร์ มีดตัดแต่งดิน
13. สก๊อตต์แต่งก้อนดินในสนามเพื่อหาความยาวรากที่แท้จริง

14. ถุงเก็บตัวอย่างดินกระถินเทพาและหญ้าแฝกเพื่อนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ

15. ครอบป้องกันตัวอย่างดินในหลุมทดสอบ ตัวอย่างที่เก็บจะเก็บ 3 ครอบต่อ 1 ตัวอย่าง



ภาพที่ 3-7 Hydraulic Pump

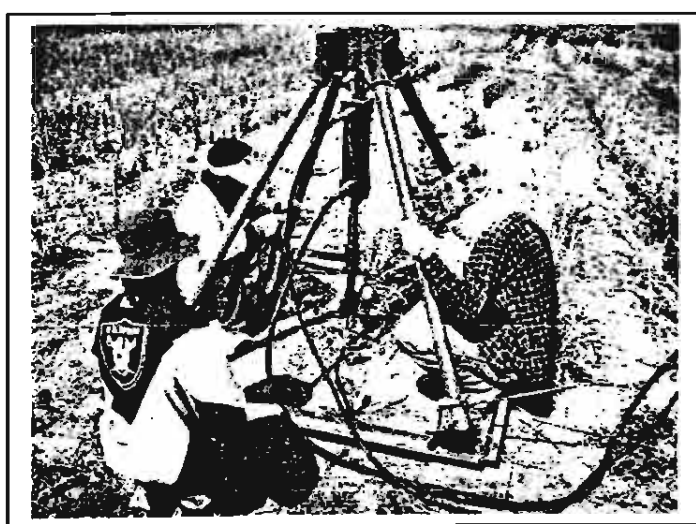


ภาพที่ 3-8 Shear Box , Hydraulic Jack และ Dial Gage

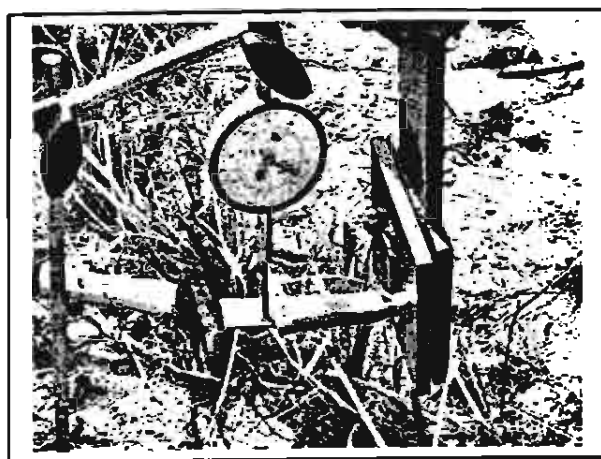
3.3.2 เครื่องมือทดสอบแรงถอนดึงในสนาม (ภาพที่ 3-9 และ 3-10) ดังต่อไปนี้

1. เสาคเหล็กสี่เหลี่ยมพร้อมด้วย พื้นหรือคานซึ่งสามารถปรับระดับความสูงต่ำได้
2. เหล็กแผ่นขนาด 300 x 300 x 10 มม. ออกแบบเพื่อรองรับขาเหล็กเสา จำนวน 4 ชุด และเหล็ก L- 50 x 50 x 3 มม. ยาว 1.40 เมตร จำนวน 4 ชิ้น สำหรับรัดรอบเสา
3. ชุดแผ่นเหล็กจับดินกระถินเทพา
4. Hydraulic Jack ขนาด 20 ตัน ครอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร
5. Hydraulic Pump ขนาด 100 ตัน
6. Pressure Gage วัดความดันขนาด 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

7. Dial Gage วัดการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง จำนวน 1 ตัว ความละเอียด 0.001 นิ้ว
8. ตลับเมตรและบรรทัดวัดระยะละเอียด (Vernier Callipers)
9. ถุงเก็บตัวอย่างดินกระถินเทพาและหญ้าแฝกเพื่อควบคุมความชื้นก่อนนำมาทดสอบกำลังรับแรงดึงของรากในห้องปฏิบัติการ
10. กระป๋องเก็บตัวอย่างดินเพื่อหาความชื้นของดินในสนาม จำนวน 3 กระป๋องต่อ 1 ตัวอย่างการทดสอบ



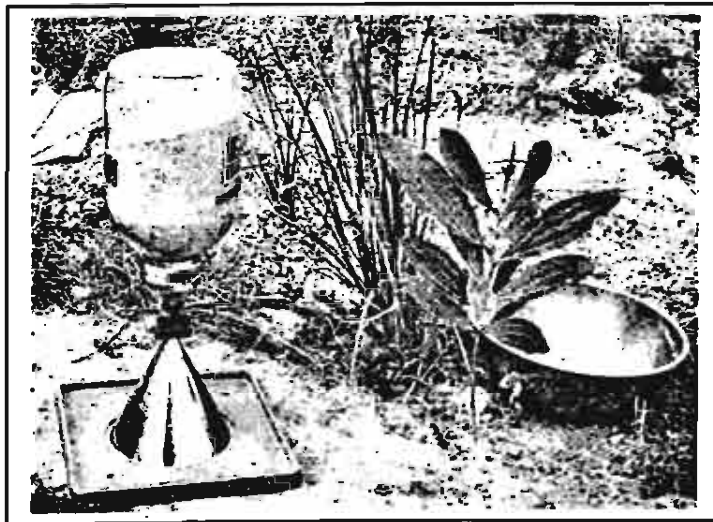
ภาพที่ 3-9 ชุดเครื่องมือทดสอบแรงถอนคิ่งในสนามพร้อมด้วย Hydraulic Jack



ภาพที่ 3-10 Dial Gage วัดการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง

3.3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบความหนาแน่นของดินในสนาม (ภาพที่ 3-11) ซึ่งมีดังต่อไปนี้

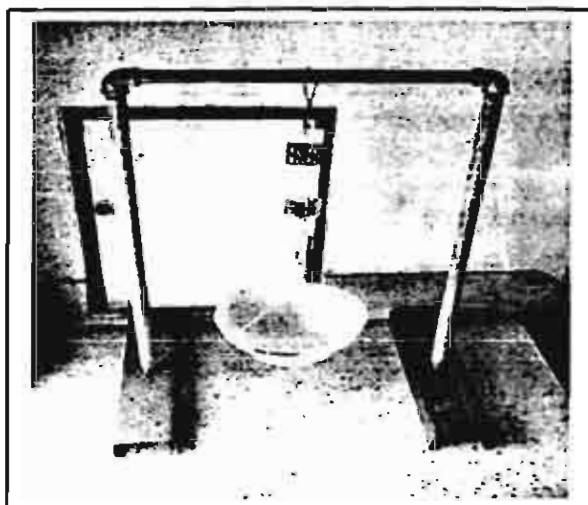
1. กรวยทรายขนาดปากกรวย 6 นิ้ว หรือ 4 นิ้ว มีเกลียวสำหรับหมุนเข้าออกที่ขวดแก้วและวาล์ว เปิด-ปิด ให้ทรายไหล
2. ขวดแก้วขนาดความจุ 1 แกลลอน มีเกลียวหมุนเข้ากรวยทราย
3. แผ่นหาความหนาแน่น (Field Density Plate) ขนาดประมาณ 12 x 12 ตารางนิ้ว มีขอบกันดินรอบด้าน
4. ทรายออกดิวาสำหรับหาปริมาตรหลุมทดสอบ
5. เครื่องมือขุดหลุมทดสอบ สกัดหน้ากว้างประมาณ 1 นิ้ว ยาวประมาณ 8 นิ้ว ช้อนตักดิน ขนาดด้านยาวประมาณ 8 นิ้ว ช้อนตักดินขนาดเล็ก ก้อนยาง แปรงขนอ่อน กระจับปี่ดินมีฝาปิด และกะละมังใส่ดิน
6. เครื่องชั่งสนามขนาด 10 กิโลกรัม อ่านละเอียด 1 กรัม
7. เครื่องชั่งอ่านละเอียด 0.01 กรัม สำหรับหาปริมาณความชื้นในดิน
8. ตู้อบ



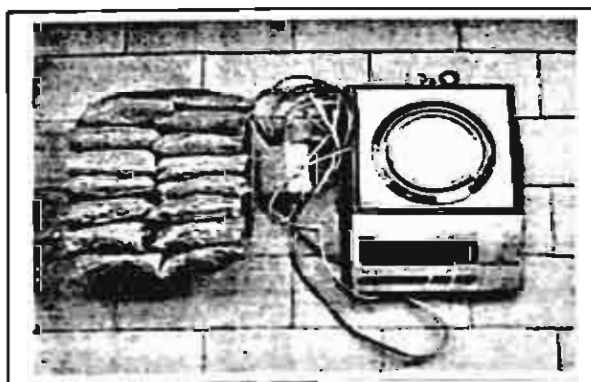
ภาพที่ 3-11 เครื่องมือทดสอบความหนาแน่นในสนาม

3.3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบกำลังรับแรงดึงของรากกระถินเทพาและหญ้าแฝกในห้องปฏิบัติการ (ภาพที่ 3-12 และ 3-13) ดังต่อไปนี้

1. ที่จับยึดตัวอย่าง
2. ถาดวางน้ำหนัก
3. น้ำหนักถ่วงทราย
4. โครงเหล็กสำหรับแขวนอุปกรณ์และที่จับตัวอย่างราก
5. เวอร์เนียคาร์ลิเปอร์
6. เครื่องชั่งวัดละเอียด 0.001 กรัม



ภาพที่ 3-12 โครงเหล็กสำหรับแขวนอุปกรณ์และที่จับตัวอย่างราก และถาดวางน้ำหนัก



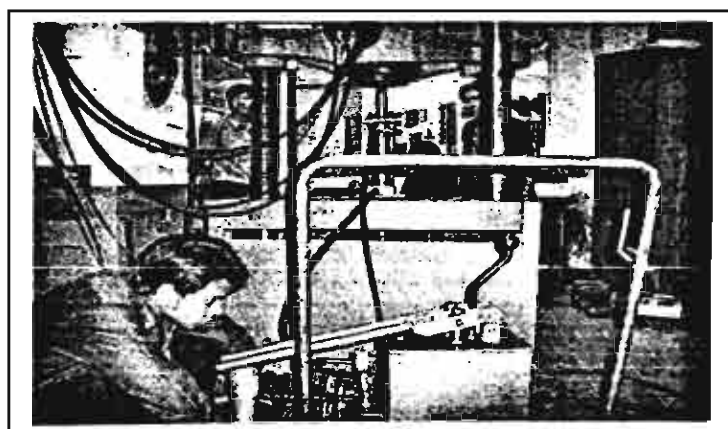
ภาพที่ 3-13 น้ำหนักถ่วงทรายและตาชั่ง

3.4 ระเบียบวิธีการทดสอบ

3.4.1 การทดสอบแรงเฉือนโดยตรงในสนามทั้ง 2 รูปแบบการปลูก

การทดสอบกระทำทุก 2 เดือน เริ่มตั้งแต่อายุการปลูก 2 เดือน ถึง 18 เดือน ตามลำดับ การทดสอบจะทำการทดสอบที่ตำแหน่งหญ้าระหว่างแถวกระถินเทพา หญ้าในแถวกระถินเทพาและตรงตำแหน่งต้นกระถินเทพา โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. ทดสอบเทียบเครื่องมือ โดยการประกอบ Hydraulic Jack เข้ากับเครื่องทดสอบ Universal แล้วประกอบ Pressure Gage ที่ใช้ในการทดสอบเข้ากับ Hydraulic Pump ดังแสดงในภาพที่ 3-14



ภาพที่ 3-14 การทดสอบเทียบเครื่องมือ

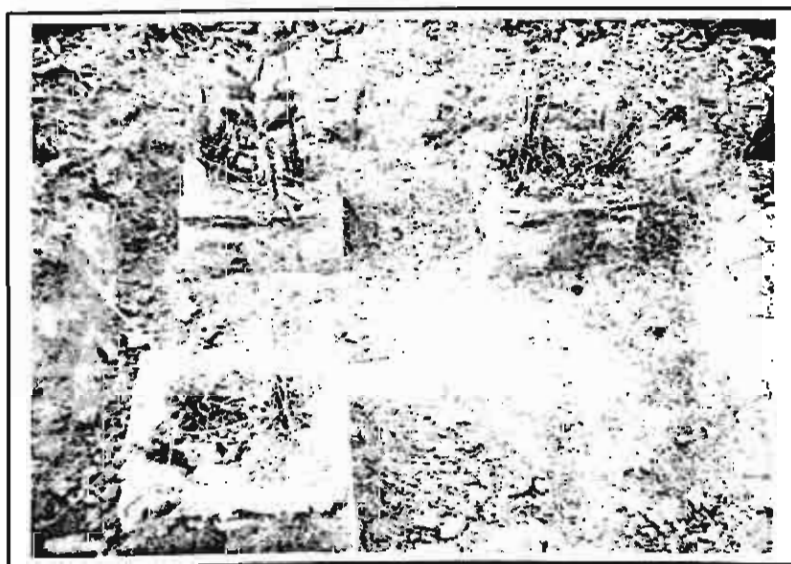
2. เก็บข้อมูลการเจริญเติบโตของกระถินเทพาและหญ้าแฝกตรงตำแหน่งที่ทดสอบในสนาม เช่น ความสูง เส้นผ่านศูนย์กลางและระยะร่วมเงาของต้นกระถินเทพา ดังแสดงในภาพที่ 3-15

3. ทำกรอบที่มีขนาด กว้าง 50 ซม. ยาว 50 ซม. ตามรูปแบบที่ทดสอบโดยวางในตำแหน่งตรงกลางต้นกระถินเทพาหรือหญ้าแฝกจุดที่ทำการทดสอบ โดยให้ต้นพืชอยู่ตรงศูนย์กลางของกรอบ เมื่อได้ตำแหน่งที่ต้องการแล้วใช้ปูนขาวโรยรอบกรอบเพื่อทำเครื่องหมายในการขุดแต่งหลุม ขุดแต่งหลุมด้วยจอบหรือเสียมตามรอยปูนขาวที่โรยไว้โดยระวังมิให้ก้อนดินที่จะทำการทดสอบกระทบกระเทือน ความลึกที่ต้องการคือ 25 เซนติเมตร เมื่อได้ขนาดใกล้เคียงที่กำหนด ปรับแต่งให้เรียบร้อย ดังภาพที่ 3-16

4. เก็บข้อมูลพื้นฐานของหลุมที่จะทดสอบ ได้แก่ ความกว้าง ความยาว และความสูงของหลุมทดสอบ ดังภาพที่ 3-17



ภาพที่ 3-15 การวัดความสูงต้น

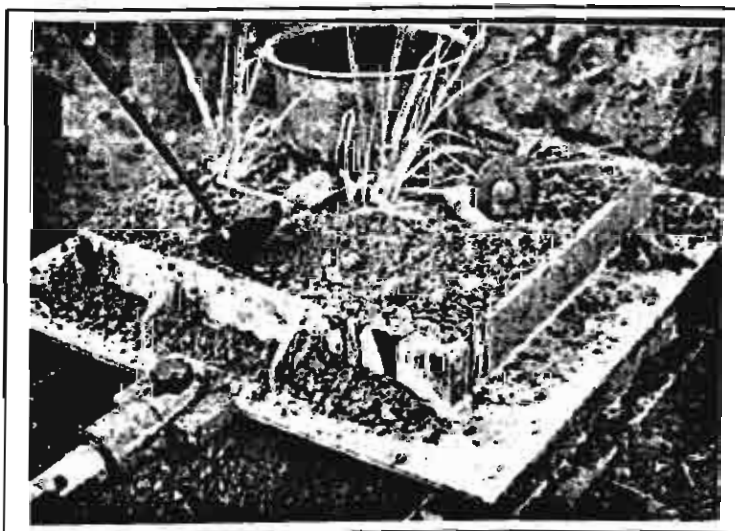


ภาพที่ 3-16 การเตรียมตัวอย่างดินที่พร้อมจะทดสอบ

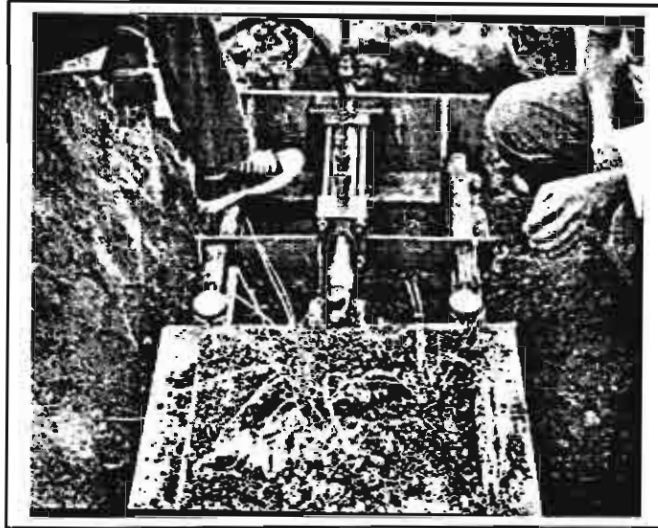


ภาพที่ 3-17 วัดขนาดหลุมทดสอบ ได้แก่ ความกว้าง ความยาว และความสูง

5. ประกอบ Shear Box ส่วนล่างที่ติดกับโครง เชื้อระดับด้วยระดับน้ำอีกครั้งหนึ่ง ยึดแน่นด้วยสลักปักกับดิน แล้วยก Shear Box ท่อนบนลงประกอบกับส่วนล่าง และติดตั้ง Hydraulic Jack เข้ากับ Shear Box ส่วนบนกับโครงค้ำยันแล้วขันน็อตให้แน่น แล้วใช้กำมะถันเทกรอกด้านหน้าไว้เพื่อให้พื้นที่การส่งถ่ายแรงของพื้นผิวเหล็กกับพื้นผิวดินมีความสม่ำเสมอ ดังภาพที่ 3-18 ทำการติด Dial Gage จำนวน 2 ตัว ทั้งซ้ายและขวา เพื่อวัดการเคลื่อนที่ในแนวราบของ Shear Box พร้อมกับติดตั้งสาย Hydraulic Pump เข้ากับกระบอก Hydraulic Jack ดังภาพที่ 3-19



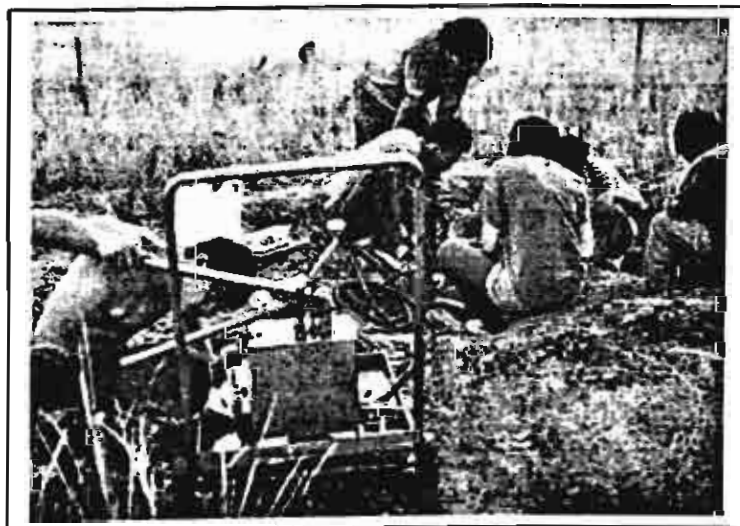
ภาพที่ 3-18 การเทกำมะถันเพื่อช่วยให้การส่งถ่ายแรงของพื้นผิวเหล็กกับพื้นผิวดินมีความสม่ำเสมอ



ภาพที่ 3-19 การติดตั้งเครื่องมือที่พร้อมจะทดสอบ

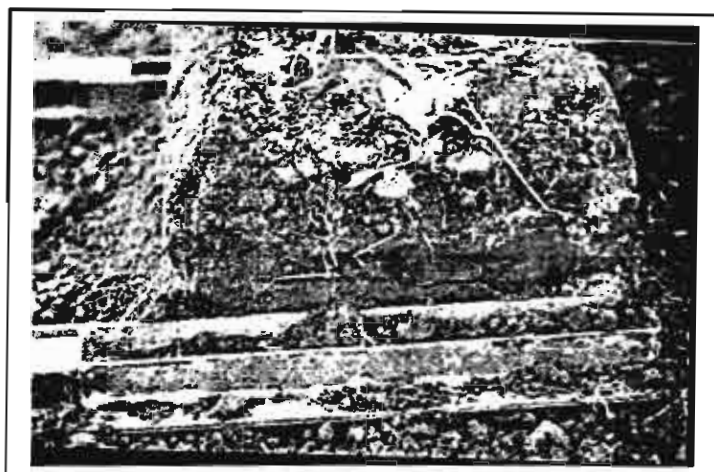
6. โยก Hydraulic Pump และตรวจสอบเข็มของ Pressure Gage เมื่อเข็มเริ่มกระดิกจึงปรับ Dial Gage ที่วัดการเคลื่อนตัวในแนวราบไปที่ศูนย์

7. ในการทดสอบใช้ผู้อ่านค่า Dial Gage จำนวน 2 คน คนประจำอยู่ที่ Hydraulic Pump ทำการ โยก Pump ให้มีอัตราคงที่พร้อมกับอ่านค่าแรงดันที่ Pressure Gage ทุกๆ 1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนอีกคนหนึ่งอ่านค่า Dial Gage ที่ Shear Box ดังภาพที่ 3-20



ภาพที่ 3-20 ช่วงการเดิน ซึ่งจะมคนประจำอยู่ที่ Hydraulic Pump ทำการโยก Pump และคนที่อ่าน Dial Gage 2 คน คนจดบันทึกค่า 2 คน

8. ทำการทดสอบจนกระทั่ง Pressure Gauge มีค่าลดลง ซึ่งแสดงว่า ตัวอย่างดินถูกเฉือนจนพิบัติแล้ว ดังภาพที่ 3-21



ภาพที่ 3-21 ดินถูกเฉือนจนพิบัติ

9. เก็บตัวอย่างดิน ณ ตำแหน่งรอยเฉือน เพื่อหาค่าความชันในมวลดินตามธรรมชาติ ดังภาพที่ 3-22



ภาพที่ 3-22 การเก็บตัวอย่างดินเพื่อหาค่าความชัน

10. เก็บตัวอย่างรากกระถินเทพาและหญ้าแฝกที่ทดสอบเสร็จแล้วในสนาม เพื่อหาปริมาณรากทั้งหมด และวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากทั้งหมด ณ ตำแหน่งรอยเฉือนขาดเพื่อคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดรากต่อพื้นที่หน้าตัดดิน

ตารางที่ 3-1 การทดสอบแรงเฉือนโดยตรงในสนาม

รูปแบบการปลูก	ระยะห่างต้น (เมตร)	จำนวน (ตัวอย่าง)
1	กลางต้นกระถิน	1
	ระหว่างต้นกระถิน	1
	ระหว่างแถว	1
2	กลางต้นกระถิน	1
	ระหว่างต้นกระถิน	1
	ระหว่างแถว	1
3	กลางต้นกระถิน	1
	ระหว่างต้นกระถิน	1
	ระหว่างแถว	1

หมายเหตุ : การทดสอบแรงเฉือนในสนามจะทำการทดสอบที่อายุ 2 ,4, 6, 8, 10, 12, 14 , 16 และ 18 เดือน ตามลำดับ

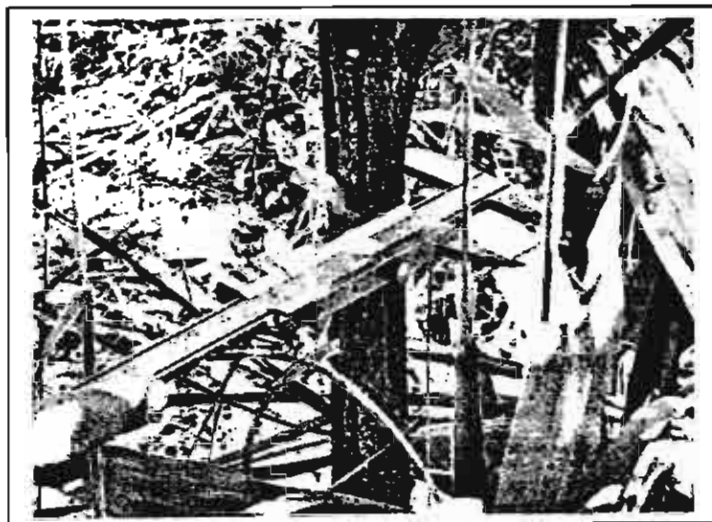
3.4.2 การทดสอบแรงถอนกิ่งต้นกระถินเทพาและหญ้าแฝกในแนวพินราบ และลาดคันดินในสนาม

การทดสอบที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10 , 12, 14, 16 และ 18 เดือน ตามลำดับ โดยมีขั้นตอนในการทดสอบดังต่อไปนี้

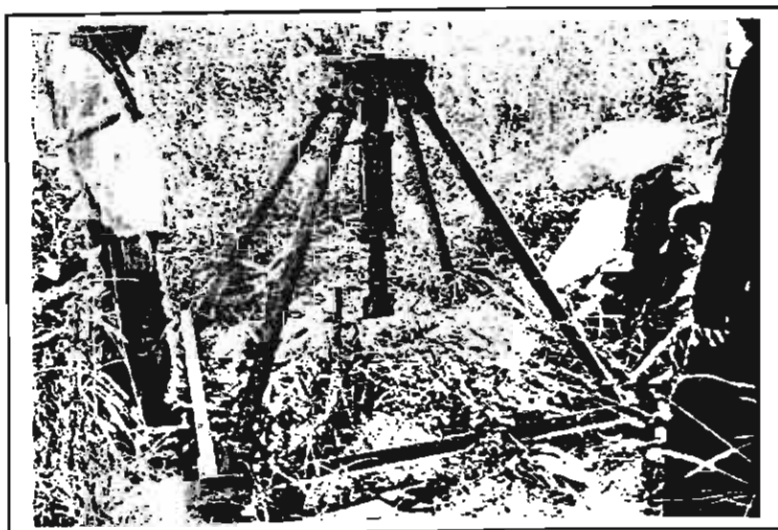
1. ทดสอบเทียบเครื่องมือ โดยการประกอบ Hydraulic Jack เข้ากับเครื่องทดสอบ Universal และประกอบ Pressure Gage ขนาด 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ใช้ในการทดสอบติดเข้ากับ Hydraulic Pump

2. เก็บข้อมูลเบื้องต้น เช่น ความสูงต้น ระยะร่มเงาและเส้นผ่านศูนย์กลางต้น (วัดที่โคนต้น) ดังภาพที่ 3-23

3. ประกอบเครื่องมือทดสอบโดยนำแผ่นเหล็กสำหรับรองรับเสา 4 ต้น วางให้ต้นกระถินเทพาอยู่ตรงกลาง แล้วประกอบเหล็กฉากกรอบทั้ง 4 ด้าน ประกอบเสาเข้ากับตัวยึด Hydraulic Jack ทั้ง 4 ต้นโดยให้เสาค้ำยันบนแผ่นเหล็กรองรับเสาพอดี ดังภาพที่ 3-24



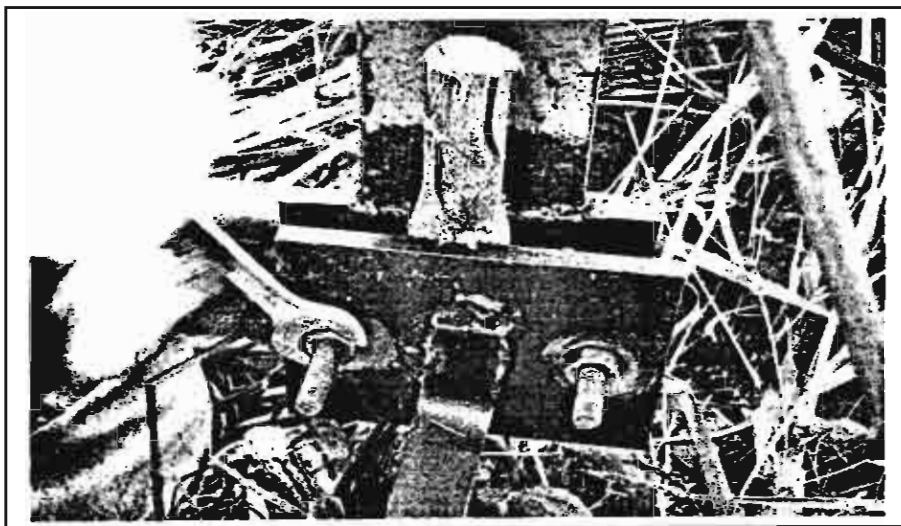
ภาพที่ 3-23 วัดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางคัน เพื่อเป็นข้อมูลในการเจริญเติบโต



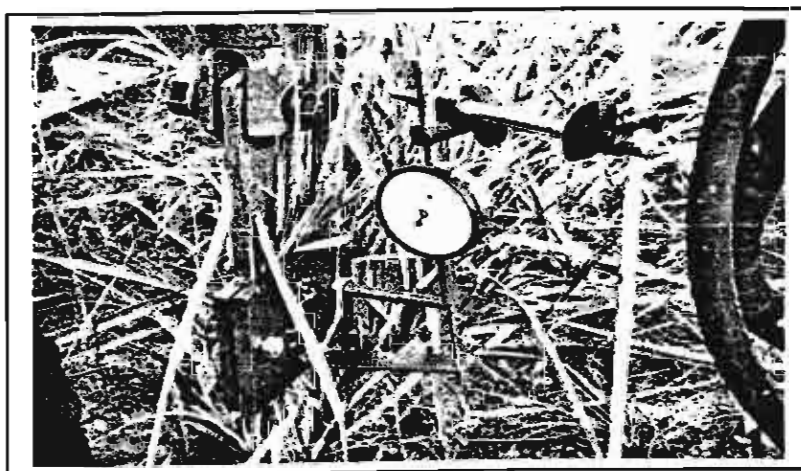
ภาพที่ 3-24 การประกอบเครื่องมือในการทดสอบแรงดึง

4. ติดตั้ง Hydraulic Jack เข้ากับโครง พร้อมหัวจับยึดดินตะพาหรือหญาแฝกเครื่องมือให้ยึดเครื่องมือได้ศูนย์กลางโครงพอดีขันน็อตให้แน่น แล้วขีด Stroke ของกระบอก Hydarulic Jack ดังแสดงในภาพที่ 3-25

5. ติดตั้ง Reference Beam และ Dial Gage เพื่อวัดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งเข้ากับหัวจับดินไม้ดังภาพที่ 3-26



ภาพที่ 3-25 การบีบอัดดินเทพาเข้ากับอุปกรณ์จับบีบอัด



ภาพที่ 3-26 ติดตั้ง Reference Beam และ Dial Gage เพื่อวัดการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง

6. ประกอบชุด Hydraulic Pump เข้ากับ Hydraulic Jack พร้อมโยก โดยใช้คน 2 คน คือ ประจำอยู่ที่เครื่อง Hydraulic Pump 1 คน และประจำอยู่ที่ Dial Gage เพื่ออ่านการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง อีก 1 คน

7. ตรวจสอบเข็มของ Pressure Gauge เมื่อเริ่มกระดิกให้ปรับ Dial Gage วัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง ไปที่ศูนย์แล้วเริ่มการทดสอบ

8. ในการทดสอบใช้ผู้อ่านค่า Dial Gage 2 คน คนซึ่งประจำอยู่ที่ Hydraulic Pump ทำการโยก Pump ให้มีอัตราคงที่โดยดูการเคลื่อนตัวของ Dial Gage แล้วจดค่า Pressure Gauge ตามค่าการเคลื่อนตัวของ Dial Gage ดังในภาพที่ 3-27



ภาพที่ 3-27 การทดสอบแรงดึงจะมีคนประจำเครื่อง Hydraulic Pump 1 คน และประจำอยู่ที่ Dial Gauge เพื่ออ่านการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง อีก 1 คน

9. อ่านค่าจนกระทั่ง Pressure Gauge มีค่าลดลง ซึ่งแสดงว่าดินกระถินเทพาหรือหญ้าแฝกที่ทดสอบแรงดึงนั้นถูกดึงจนพิบัติ ดังภาพที่ 3-28 และ 3-29 ตามลำดับ แล้วสกัดเอาดินที่อยู่โดยรอบ รากแขนงออกเพื่อดูความแผ่กว้างและลักษณะของราก วัดความกว้างโดยเฉลี่ยของรากที่ขาดเนื่องจากถูกกระทำโดยแรงถอน (Pull-Out Force) วัดความยาวของรากแก้วจากโคนต้นจนถึงจุดที่รากแก้วขาด และวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก ณ จุดที่รากแก้วและรากแขนงขาด เพื่อใช้คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดราก และหาพื้นที่ผิวสัมผัสของรากกับดิน และประเมินความยาวของรากที่ขาดคาอยู่ในดิน

10. เก็บตัวอย่างดิน ณ ตำแหน่งที่ทำการทดสอบ เพื่อหาค่าความชื้นในมวลดินตามธรรมชาติ เพื่อใช้ในการอ้างอิงค่าแรงถอนในแต่ละต้นทุก ครั้งที่ทำการทดสอบ

11. เก็บตัวอย่างดินกระถินเทพาหรือหญ้าแฝกเพื่อนำไปทดสอบการรับแรงดึงของรากในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 3-2 การทดสอบแรงถอนดิ่งในสนาม

รูปแบบการปลูก	ลักษณะการปลูก	จำนวนตัวอย่าง
1	กระถินเทพา	1
	หญ้าแฝก	1
2	กระถินเทพา	1
	หญ้าแฝก	1
3	กระถินเทพา	1
	หญ้าแฝก	1

หมายเหตุ : การทดสอบแรงถอนดิ่งในสนามจะทำการทดสอบที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือน ตามลำดับ



ภาพที่ 3-28 การถอนต้นกระถินเทพาจนพิบัติและขุดดูลักษณะการเจริญเติบโตของราก



ภาพที่ 3-29 ถอนต้นหญ้าแฝกจนพิบัติและขุดดูลักษณะการเจริญเติบโตของราก

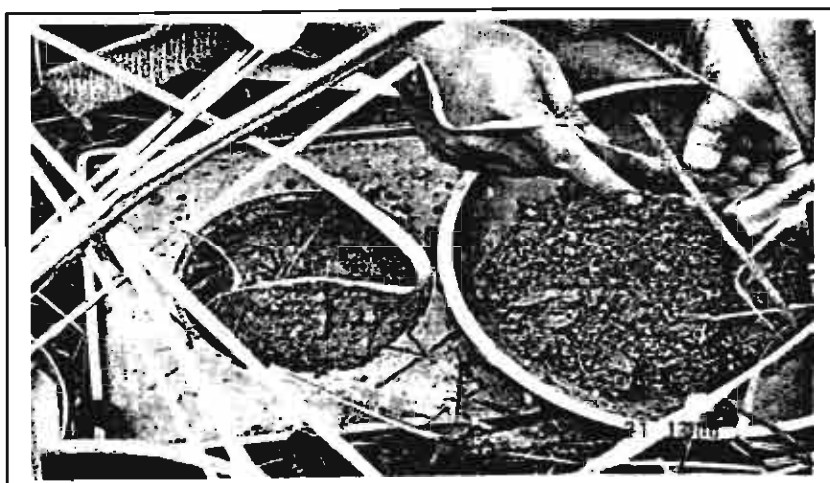
3.4.3 การทดสอบหาความหนาแน่นของดินในสนามแบบกรวยทราย

การทดสอบที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือน ตามลำดับ โดยมีขั้นตอนในการทดสอบดังต่อไปนี้

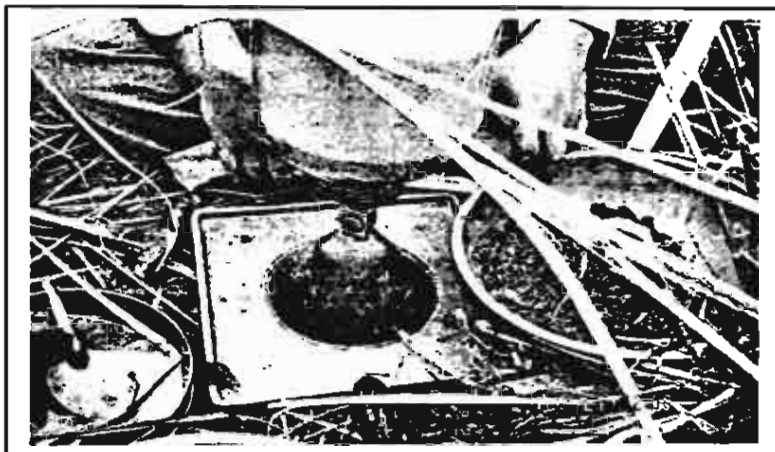
1. เตรียมกรวยทราย หมุนขวดแก้วออกจากกรวยทราย ใส่ทรายในขวดแก้วจนเกือบเต็มขวด
2. เตรียมผิวดินที่จะทำการทดสอบให้ราบเรียบ วางแผ่นหาความหนาแน่นบนพื้นดินที่เตรียมไว้ โดยห่างจากคันกระถินเทพาประมาณ 15 เซนติเมตร จากนั้นใช้ตะปูตอกยึดแผ่นหาความหนาแน่นยึดติดกับพื้นดิน ใช้รูกกลางแผ่นหาความหนาแน่นเป็นแนวดังภาพที่ 3-30 หลุมตามแนววงให้ให้ได้กลม ความลึกพอดีเหมาะสำหรับขนาดเมล็ดดินที่ทำการทดสอบ ขุดหลุมให้เป็นทรงกลมตั้งฉากที่ก้นหลุม (Right Cylinder) เพื่อหาความหนาแน่นของชั้นดิน โดยต้องเก็บเศษดินหลุมขึ้นมาให้หมด จากนั้นชั่งน้ำหนัก แล้วนำดินบางส่วนไปหาความชื้นธรรมชาติในมวลดิน

3. ชั่งน้ำหนักกรวยและทรายที่บรรจุอยู่ในขวดก่อนการผสม แล้วกรวยทรายให้ขอบกรวยทรายวางอยู่บนบ่าแผ่นหาความหนาแน่น เปิดวาล์วให้ทรายไหลลงก้นหลุมจนกระทั่งทรายหยุดไหล ปิดวาล์วหว่านกรวยทรายขึ้นมาขึ้นเครื่องชั่งละเอียดถึง 1 กรัม ดังภาพที่ 3-31 นักกรวยทรายและทรายที่เหลือหลังทดลอง ดังภาพที่ 3-32

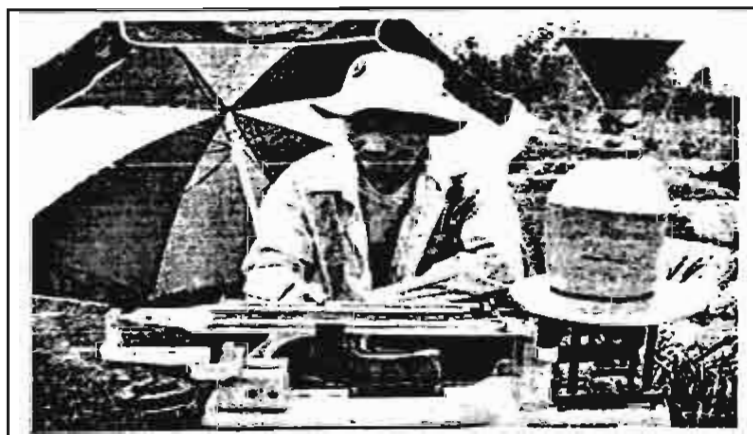
4. ใช้ช้อนตักทรายที่เหลือในหลุมขึ้นมาใส่กรวยทรายเพื่อนำไปใช้ครั้งต่อไป ดังภาพที่ 3-33 วนทรายที่มีเศษดินปนมาควรแยกไว้ต่างหากเพื่อใช้ตะแกรงร่อนแยกเสียก่อนที่จะนำมาใช้กับทรายสะอาดในขวด



ภาพที่ 3-30 การขุดหลุมเพื่อทำการทดสอบความหนาแน่นของดินในสนามแบบกรวยทราย



ภาพที่ 3-31 กรวยทรายให้ขอบกรวยทรายวางอยู่บนป่าแผ่นหาความหนาแน่น



ภาพที่ 3-32 การชั่งน้ำหนักเพื่อหาความหนาแน่นของดินในสนาม



ภาพที่ 3-33 การเก็บทรายที่สะอาดเพื่อนำไปใช้ครั้งต่อไป

ตารางที่ 3-3 การทดสอบความหนาแน่นในสนาม

รูปแบบการปลูก	ลักษณะการปลูก	จำนวนตัวอย่าง
1	กระถินเทพา	1
	หญ้าแฝก	1
2	กระถินเทพา	1
	หญ้าแฝก	1
3	กระถินเทพา	1
	หญ้าแฝก	1

หมายเหตุ : การทดสอบความหนาแน่นในสนามจะทำการทดสอบที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือนตามลำดับ

3.4.4 วิธีการทดสอบกำลังรับแรงดึงรากกระถินเทพาและหญ้าแฝกในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบแรงดึงรากต้นกระถินเทพาและหญ้าแฝกในห้องปฏิบัติการ โดยจะเก็บตัวอย่างรากของกระถินเทพาและหญ้าแฝกหลังจากการทดสอบในสนามทดสอบที่อายุการปลูก ที่ 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือนตามลำดับ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

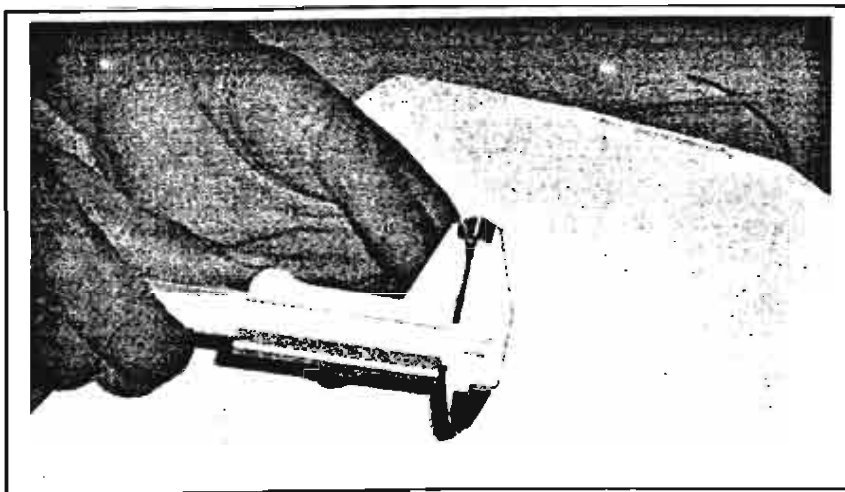
1. นำรากกระถินเทพาและรากหญ้าแฝกที่ได้จากการทดสอบในสนาม มาล้างดินออกให้หมด
2. นำรากกระถินเทพาและรากหญ้าแฝกมาวัดความยาวราก และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยด้วยเครื่องมือวัดละเอียด
3. ใช้กรรไกร หรือมีดตัดรากต้นกระถินเทพาและหญ้าแฝกให้ยาวประมาณ 5-10 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3-34
4. ชั่งน้ำหนักรากกระถินเทพาและรากหญ้าแฝก ใช้บรรทัดวัดละเอียดวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากกระถินเทพาและหญ้าแฝก ดังภาพที่ 3-35
5. นำรากกระถินเทพาและรากหญ้าแฝก มาประกอบเข้ากับอุปกรณ์ยึดจับรากกระถินเทพา โดยยึดด้านบนและด้านล่าง จากนั้นนำไปแขวนไว้กับโครงเหล็กและยึดด้วยน๊อตดังภาพที่ 3-36
6. อ่านค่าความยาวบนเกจก่อนจะนำถาดวางน้ำหนักไปแขวนไว้กับส่วนล่างของที่ยึดจับ
7. แขวนถาดวางน้ำหนักและเพิ่มน้ำหนักถ่วงทรายให้คงที่ทุก 2 นาที

8. อ่านค่าความยาวของรากกระดูกเหงือกและเหง้าแฝงจากกราฟทุกครั้งที่มีการเพิ่มน้ำหนัก จนกระทั่งตัวอย่างรากกระดูกเหงือกและรากเหง้าแฝงถึงขีด

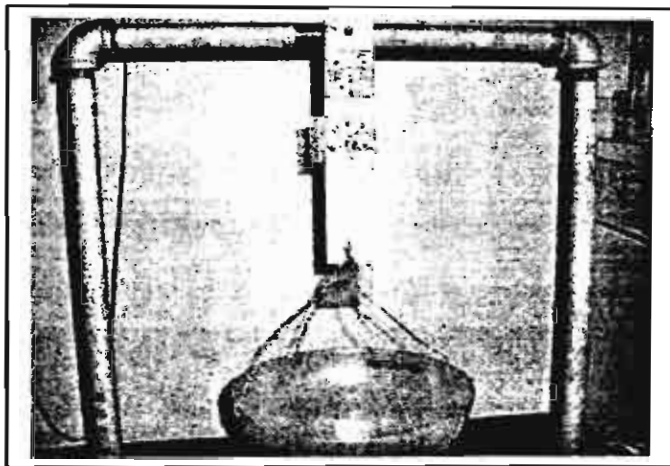
9. ทดสอบรากกระดูกเหงือกประมาณ 20 รากต่อ 1 ตัวอย่างต้นกระดูกเหงือกจากทั้งหมดของตัวอย่างต้นกระดูกเหงือกที่ใช้ 3 ตัวอย่างตามลำดับ โดยมีขั้นตอนในการทดสอบเช่นเดียวกับเหง้าแฝง



ภาพที่ 3-34 วัดรากต้นกระดูกเหงือกและเหง้าแฝงให้ยาวประมาณ 5-10 เซนติเมตร



ภาพที่ 3-35 การใช้เวอร์เนียคาร์ลิเปอร์วัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง



ภาพที่ 3-36 การประกอบรากเข้ากับอุปกรณ์ยึดจับรากพร้อมทดสอบ

บทที่ 4

ผลการวิจัย

จากผลการวิจัยเรื่องคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของดินที่เสริมด้วยรากกระถินเทพาและหญ้าแฝก สำหรับงานป้องกันลาดชันดิน สรุปผลงานวิจัยโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในสนามทดลอง
2. การเจริญเติบโตของต้นกระถินเทพาและหญ้าแฝกในสนาม
3. ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมรากกระถินเทพาและรากหญ้าแฝกในแปลงทดลองที่ระยะการปลูกต่างกัน
4. ผลการทดสอบแรงดึงดินกระถินเทพาและหญ้าแฝกในห้องปฏิบัติการ
5. ผลการทดสอบแรงถอนดึงดินกระถินเทพาและกอหญ้าแฝกในสนาม
6. ผลการทดสอบความหนาแน่นของดินในสนาม

4.1 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในสนามทดลอง

ดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบทั้งในสนามและในห้องปฏิบัติการโดยนำมาจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตปราจีนบุรี ตำบลเนินหอม อำเภอเมือง จังหวัดปราจีนบุรี โดยเก็บตัวอย่างดินที่ถูกรบกวน (Disturbed Soil) จากการทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมได้แสดงผลดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 คุณสมบัติของดินด้านวิศวกรรมของดินในสนามทดลอง

คุณสมบัติของดินทางด้านวิศวกรรม	
Specific Gravity, Gs	2.561
Dry Unit Weight of Soil, (t /m ³)	1.770
Optimum Moisture Content (%)	12.42
Liquid Limit ,LL (%)	31.31
Plastic Limit, PL (%)	17.94
Plastic Index, PI (%)	13.37
% Finer No.3/8	95.14
% Finer No.4	68.83

ตารางที่ 4-1 (ต่อ) คุณสมบัติของดินด้านวิศวกรรม

คุณสมบัติของดินทางด้านวิศวกรรม	
% Finer No.10	55.44
% Finer No.40	35.81
% Finer No.100	22.51
% Finer No.200	11.21
Cohesion (kg/cm^2)	0.20
Angle of Internal friction	35.05
C_u	25.33
C_c	4.35
Classification	SP-SC

ตัวอย่างดินผ่าน No.200 < 50 % เป็นดินเม็ดหยาบ (G, S) ผ่าน No.4 > 50 % เป็นทราย (S) จากภาคผนวก ข สามารถคำนวณค่า $C_u = 25.33$ $C_c = 4.35$ ได้เป็น Poorly Graded Sand with Clay (SP-SC) เนื่องจาก SW จะต้องมียค่า $C_u > 6$, $C_c = 1-3$

4.2 การศึกษาการเจริญเติบโตของคันกระถินเทพาและกอหญ้าแฝก ในสนาม

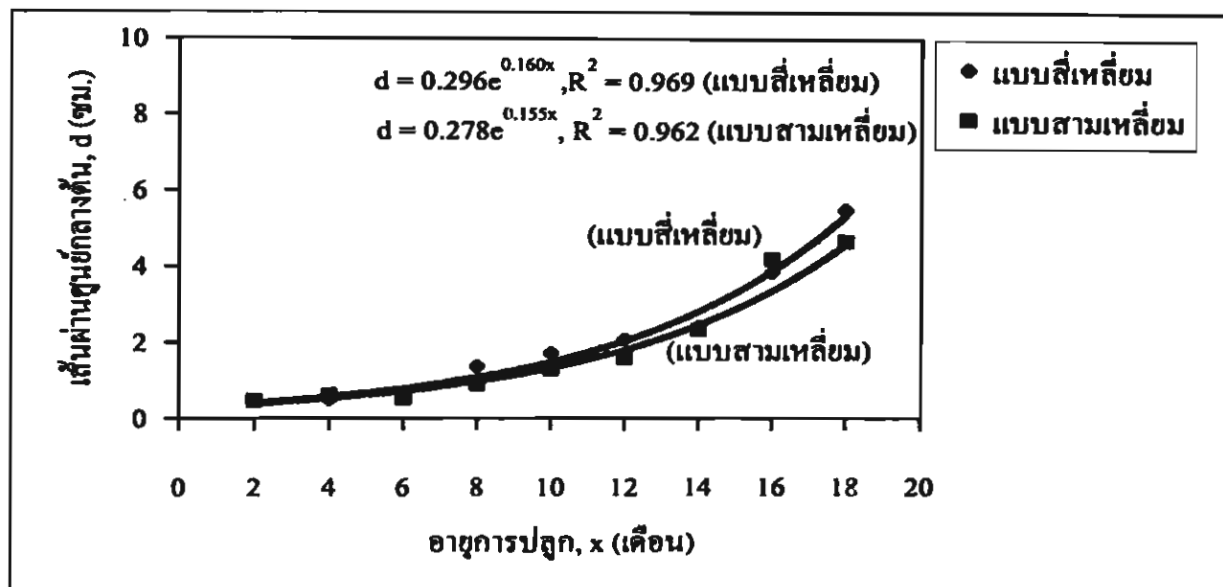
การศึกษากการเจริญเติบโตของคันกระถินเทพาและกอหญ้าแฝกในสนามของการปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม โดยมีรูปแบบการปลูกที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ได้ทำการตรวจสอบการเจริญเติบโตโดยการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูงของต้น ความกว้าง และความยาวของราก คันกระถินเทพาและหญ้าแฝกที่อายุ 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือนตามลำดับซึ่งผลการทดสอบ แสดงดังภาพที่ 4-1 ถึง 4-8 ตามลำดับ

จากภาพที่ 4-1 พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคันกระถินเทพาของการปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม ที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือนมีค่าดังต่อไปนี้

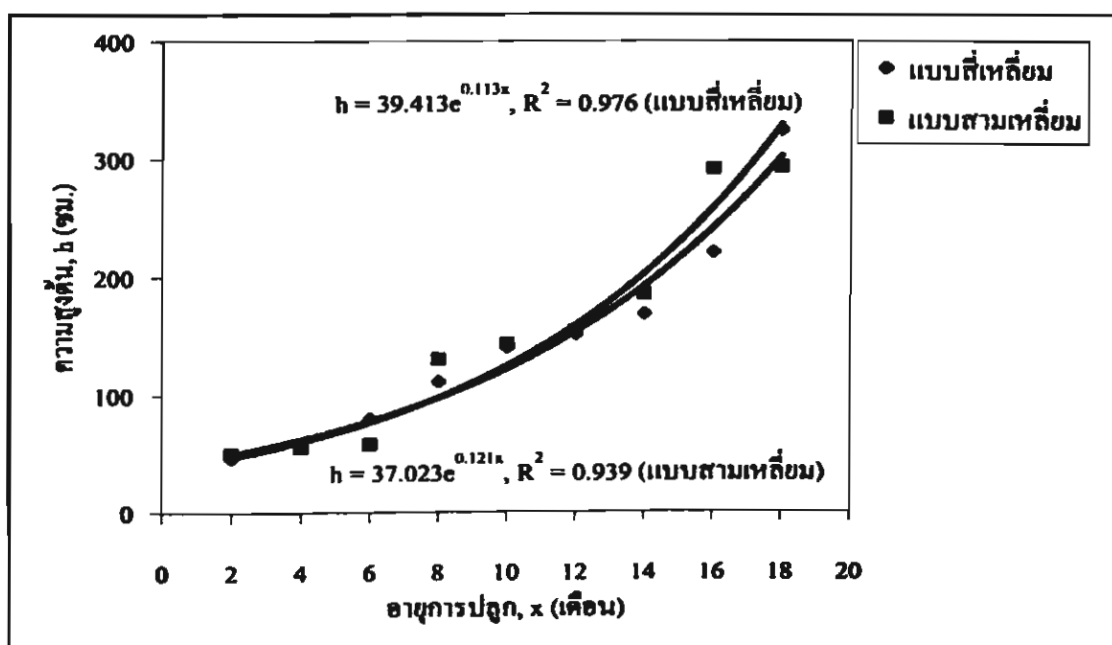
การปลูกแบบสี่เหลี่ยม คันกระถินเทพามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นดังนี้ 0.46, 0.495, 0.60, 1.35, 1.70, 2.07, 2.40, 3.84 และ 5.47 เซนติเมตรตามลำดับ จากการศึกษาวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางของกระถินเทพากับอายุการปลูก คือ $d = 0.296e^{0.160x}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.969$

การปลูกแบบสามเหลี่ยม คันกระถินเทพามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นดังนี้ 0.46, 0.60, 0.52, 0.89, 1.29, 1.59, 2.33, 4.17 และ 4.64 เซนติเมตรตามลำดับ จากการศึกษาวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดย

ใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางของกระดินเทพากับอายุการปลูก คือ $d = 0.278e^{0.155x}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.962$



ภาพที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางต้นกระดินเทพาที่ปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม กับอายุการปลูกในสนามในแนวนราบ

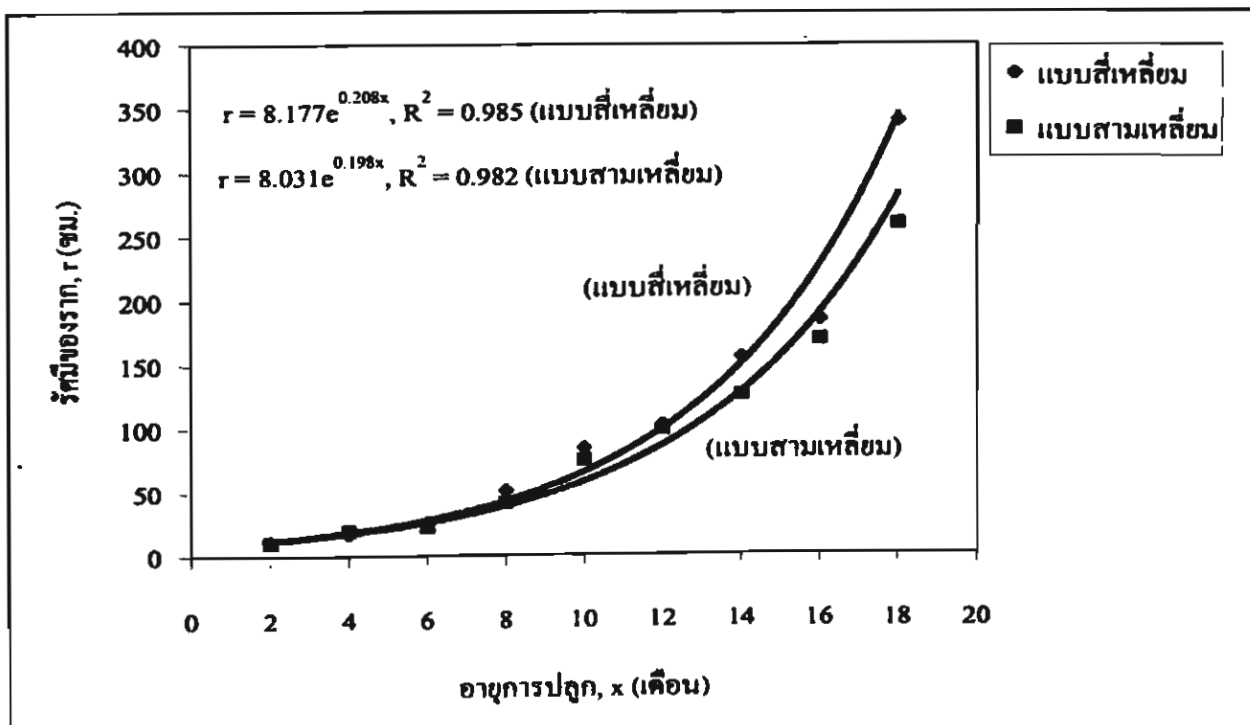


ภาพที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงต้นกระดินเทพา ที่ปลูกแบบสี่เหลี่ยมและแบบสามเหลี่ยม กับอายุการปลูกในสนามในแนวนราบ

จากภาพที่ 4-2 พบว่า ความสูงของต้นกระถินเทพาของการปลูกแบบสี่เหลี่ยมและแบบสามเหลี่ยม ที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือนมีค่าดังต่อไปนี้

การปลูกแบบสี่เหลี่ยม ต้นกระถินเทพามีความสูงขึ้นดังนี้ 46.33, 58.00, 80.00, 111.00, 140.00, 151.00, 168.00, 220.00 และ 324.00 เซนติเมตรตามลำดับ จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความสูงของกระถินเทพากับอายุการปลูกคือ $h = 39.413e^{0.113x}$ โดยมีค่า $R^2=0.976$

การปลูกแบบสามเหลี่ยม ต้นกระถินเทพามีความสูงขึ้นดังนี้ 36.33, 50.00, 55.00, 58.00, 142.67, 144.33, 185.00, 130.33, 291.15 และ 292.67 เซนติเมตรตามลำดับ จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความสูงของกระถินเทพากับอายุการปลูกคือ $h = 37.023e^{0.121x}$ โดยมีค่า $R^2=0.939$



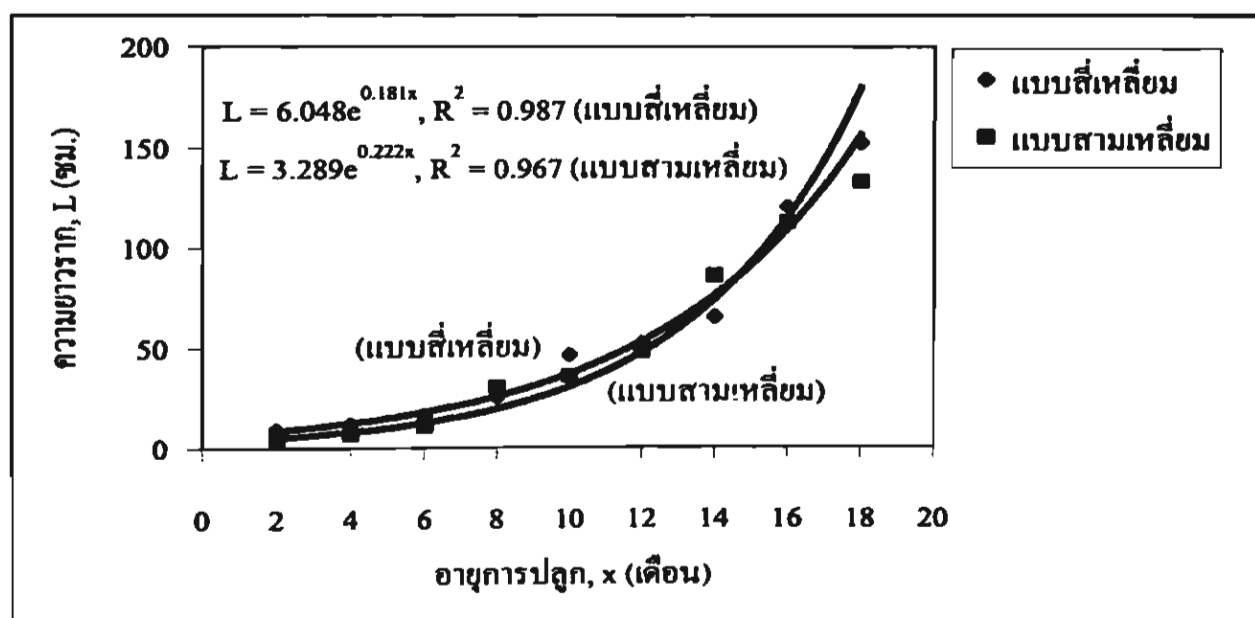
ภาพที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีรากกระถินเทพา ที่ปลูกแบบสี่เหลี่ยมและแบบสามเหลี่ยม กับอายุการปลูกในสนามในแนวราบ

จากภาพที่ 4-3 พบว่ารัศมีรากของกระถินเทพาของการปลูกแบบสี่เหลี่ยมและแบบสามเหลี่ยม ที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือนมีค่าดังต่อไปนี้

การปลูกแบบสี่เหลี่ยม ต้นกระถินเทพามีรัศมีรากเพิ่มขึ้นดังนี้ 11.33, 17.17, 26.50, 51.00, 84.00, 102.00, 155.00, 184.00 และ 340.00 เซนติเมตรตามลำดับ จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดย

ใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของรัศมีรากของกระดินเทพากับอายุการปลูกคือ $r = 8.177e^{0.208x}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.985$

การปลูกแบบสามเหลี่ยม ต้นกระดินเทพามีรัศมีรากเพิ่มขึ้นดังนี้ 10.18, 19.50, 22.40, 41.60, 74.80, 98.50, 125.40, 168.80 และ 258.90 เซนติเมตรตามลำดับ จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของรัศมีรากของกระดินเทพากับอายุการปลูกคือ $r = 8.031e^{0.198x}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.982$

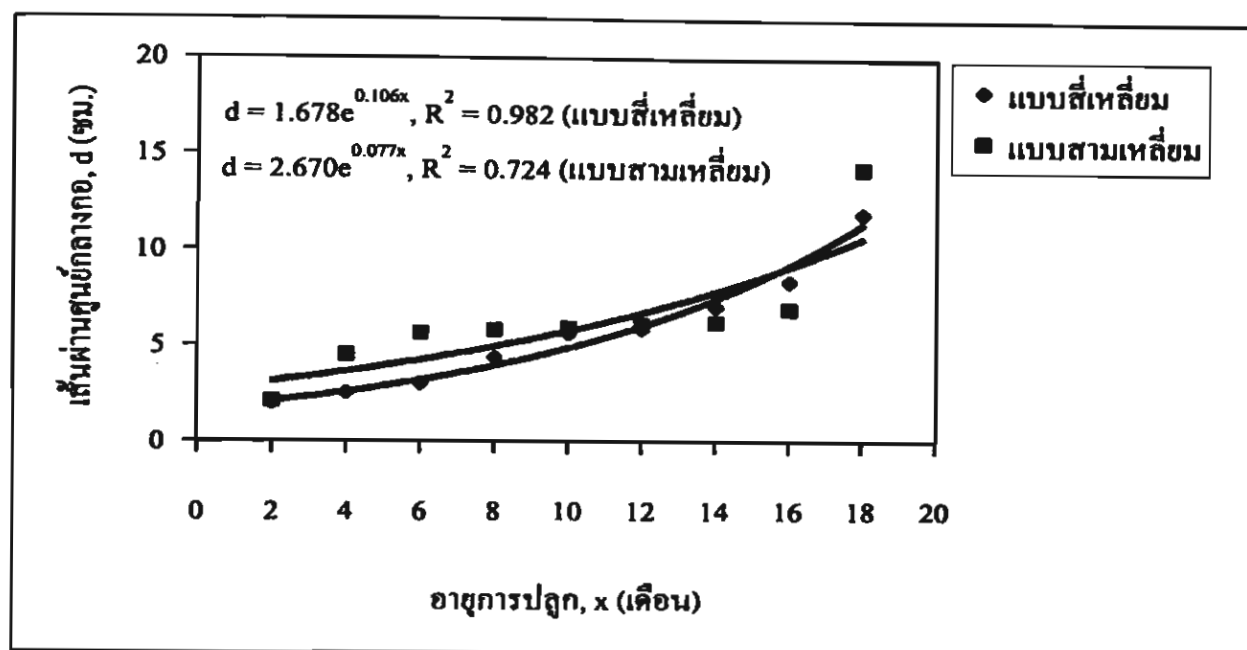


ภาพที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรากกระดินเทพา ที่ปลูกแบบสี่เหลี่ยมและแบบสามเหลี่ยม กับอายุการปลูกในสนามในแนวราบ

จากภาพที่ 4-4 พบว่า ความยาวของรากกระดินเทพาของการปลูกแบบสี่เหลี่ยมและแบบสามเหลี่ยม ที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือนมีค่าดังต่อไปนี้

การปลูกแบบสี่เหลี่ยม ต้นกระดินเทพามีขนาดความยาวของรากเพิ่มขึ้นดังนี้ 9.16, 12.00, 16.00, 25.00, 46.00, 52.00, 65.00, 120.00 และ 152.00 เซนติเมตรตามลำดับ จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความยาวรากของกระดินเทพากับอายุการปลูก คือ $L = 6.048e^{0.181x}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.987$

การปลูกแบบสามเหลี่ยม ต้นกระดินเทพามีขนาดความยาวของรากเพิ่มขึ้นดังนี้ 4.16, 7.10, 11.20, 30.25, 35.75, 47.75, 85.60, 112.50 และ 132.80 เซนติเมตรตามลำดับ จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความยาวรากของกระดินเทพากับอายุการปลูก คือ $L = 3.289e^{0.222x}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.967$



ภาพที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกอกของกล้วยแฝก ที่ปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม กับอายุการปลูกในสนามในแนวราบ

จากภาพที่ 4-5 พบว่า เส้นผ่านศูนย์กลางกอกของกล้วยแฝกของการปลูกแบบสี่เหลี่ยมและแบบสามเหลี่ยม ที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือนมีค่าดังต่อไปนี้

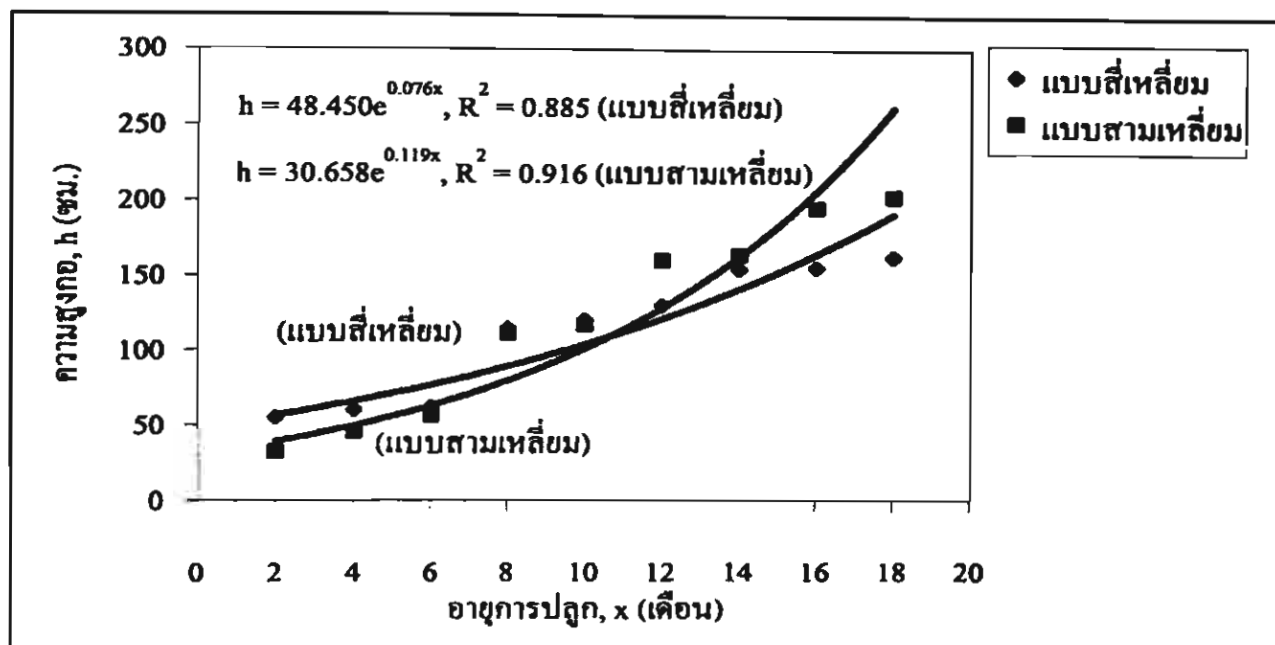
การปลูกแบบสี่เหลี่ยม กล้วยแฝกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกอกกล้วยแฝกเพิ่มขึ้นดังนี้ 2.00, 2.50, 3.00, 4.35, 5.60, 5.88, 7.02, 8.32 และ 11.89 เซนติเมตรตามลำดับ จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางของกล้วยแฝกกับอายุการปลูก คือ $d = 1.678e^{0.106x}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.982$

การปลูกแบบสามเหลี่ยม กล้วยแฝกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกอกกล้วยแฝกเพิ่มขึ้นดังนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นจากต้นกล้าเดิมคิดเป็น 2.10, 4.50, 5.63, 5.80, 5.92, 6.10, 6.20, 6.92 และ 14.22 เซนติเมตรตามลำดับ จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางของกล้วยแฝกกับอายุการปลูก คือ $d = 2.670e^{0.077x}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.724$

จากภาพที่ 4-6 พบว่า ความสูงกอกกล้วยแฝกของการปลูกแบบสี่เหลี่ยมและแบบสามเหลี่ยม ที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือนมีค่าดังต่อไปนี้

การปลูกแบบสี่เหลี่ยม กล้วยแฝกมีความสูงกอกเพิ่มขึ้นดังนี้ 54.85, 60.00, 61.67, 114.00, 120.00, 130.00, 154.00, 155.00 และ 162.00 เซนติเมตรตามลำดับ จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความสูงต้นของกล้วยแฝกกับอายุการปลูก คือ

$$h = 48.450e^{0.076x} \text{ โดยมีค่า } R^2=0.885$$



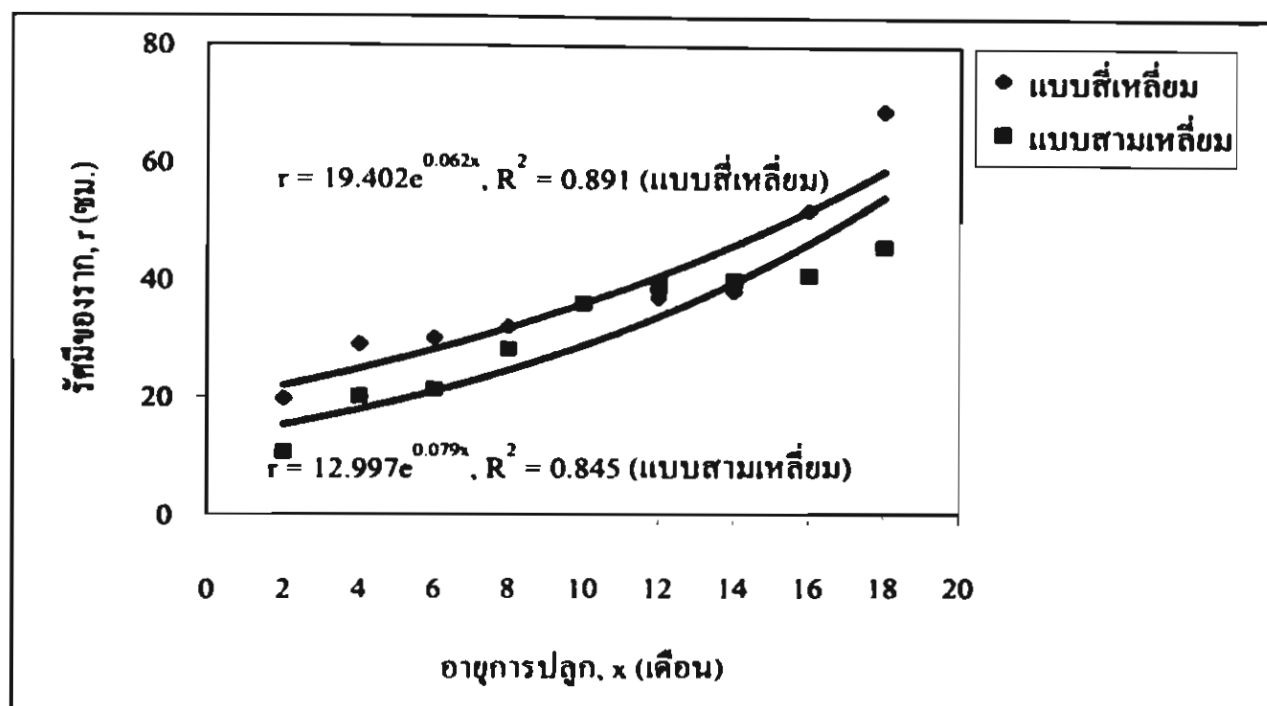
ภาพที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงต้นหญ้าแฝก ที่ปลูกแบบสี่เหลี่ยมและแบบสามเหลี่ยม กับอายุการปลูกในสนามในแนวราบ

การปลูกแบบสามเหลี่ยม หญ้าแฝกมีความสูงกอเพิ่มขึ้นดังนี้ 32.00, 45.00, 56.00, 111.00, 116.67, 160.00, 163.75, 195.00 และ 205.50 เซนติเมตรตามลำดับ จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความสูงต้นของหญ้าแฝกกับอายุการปลูกคือ $h = 30.658e^{0.119x}$ โดยมีค่า $R^2=0.916$

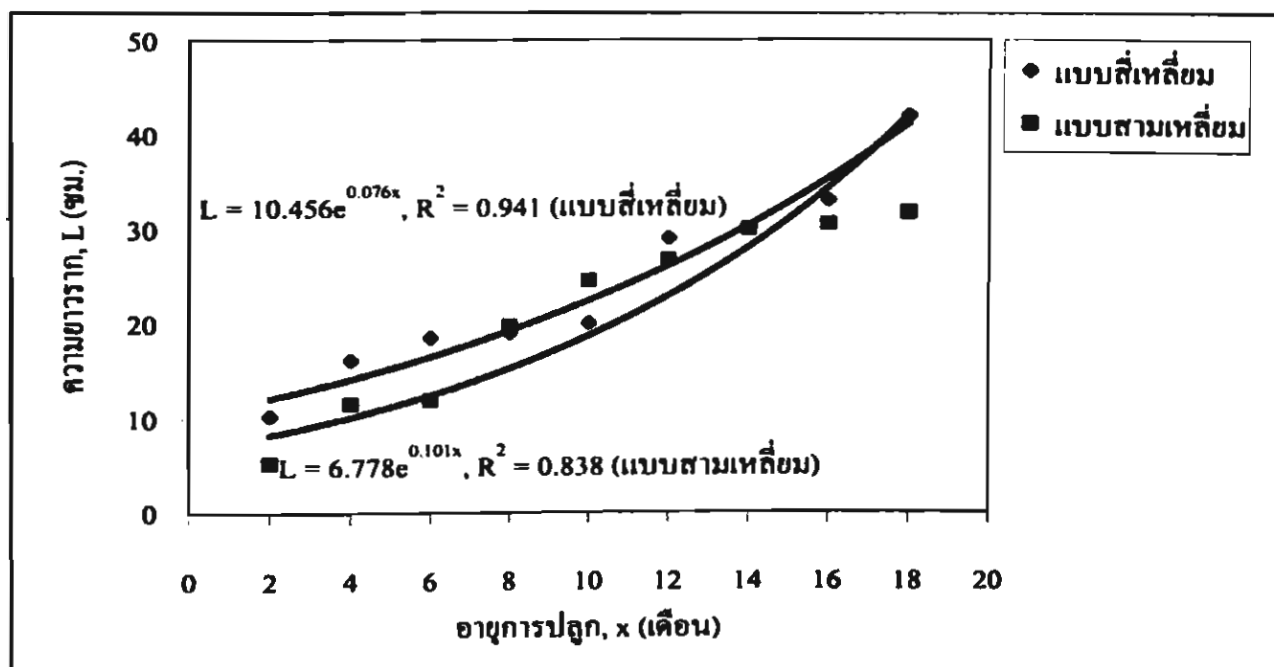
จากภาพที่ 4-7 พบว่า รัศมีรากหญ้าแฝกของการปลูกแบบสี่เหลี่ยมและแบบสามเหลี่ยม ที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือนมีค่าดังต่อไปนี้

การปลูกแบบสี่เหลี่ยม หญ้าแฝกมีรัศมีรากเพิ่มขึ้นดังนี้ 19.67, 29.00, 30.00, 32.00, 36.00, 37.00, 38.00, 52.00 และ 62.00 เซนติเมตรตามลำดับ จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของรัศมีรากของหญ้าแฝกกับอายุการปลูก คือ $r = 19.402e^{0.062x}$ โดยมีค่า $R^2=0.941$

การปลูกแบบสามเหลี่ยม หญ้าแฝกมีรัศมีรากเพิ่มขึ้นดังนี้ 4.90, 10.67, 20.10, 21.30, 32.20, 39.60, 43.60, 47.00, 49.33 และ 56.33 เซนติเมตรตามลำดับ จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของรัศมีรากของหญ้าแฝกกับอายุการปลูกคือ $r = 30.658e^{0.119x}$ โดยมีค่า $R^2=0.916$



ภาพที่ 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีรากหญ้าแฝก ที่ปลูกแบบสี่เหลี่ยมและแบบสามเหลี่ยม กับ อายุการปลูกในสนามในแนวราบ



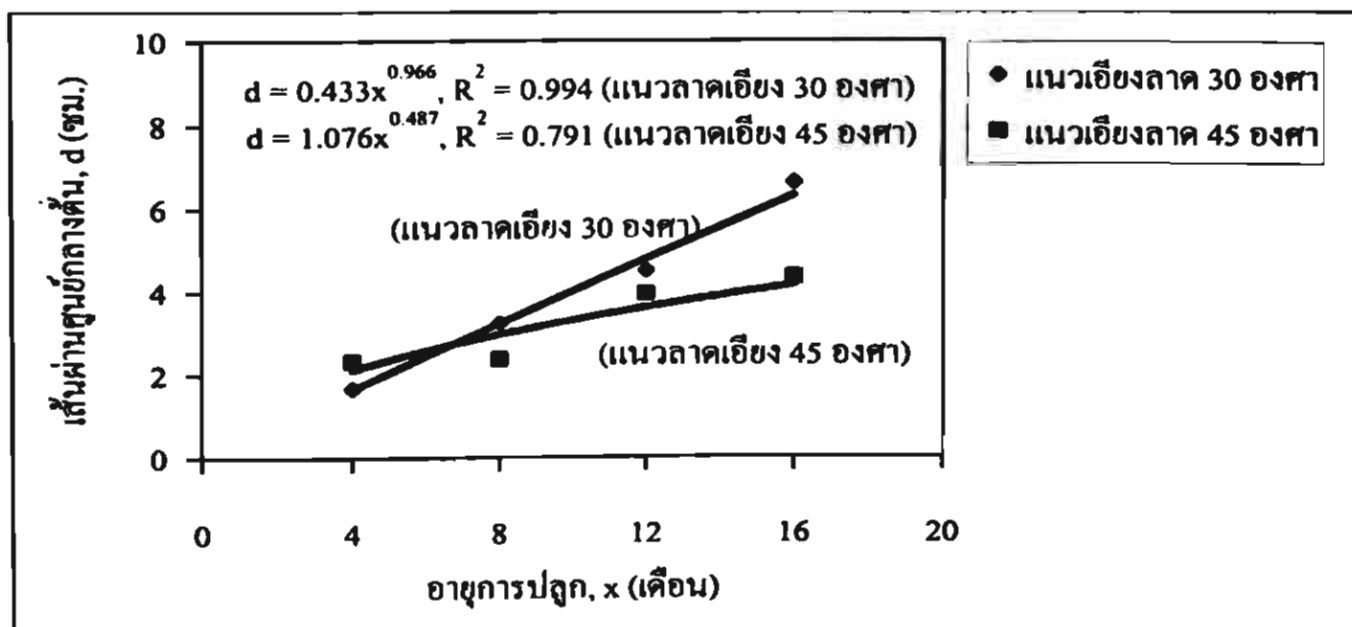
ภาพที่ 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรากหญ้าแฝก ที่ปลูกแบบสี่เหลี่ยมและแบบสามเหลี่ยม กับอายุการปลูกในสนามในแนวราบ

จากภาพที่ 4-8 พบว่า ความยาวรากหญ้าแฝกของการปลูกแบบสี่เหลี่ยมและแบบสามเหลี่ยม ที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือนมีค่าดังต่อไปนี้

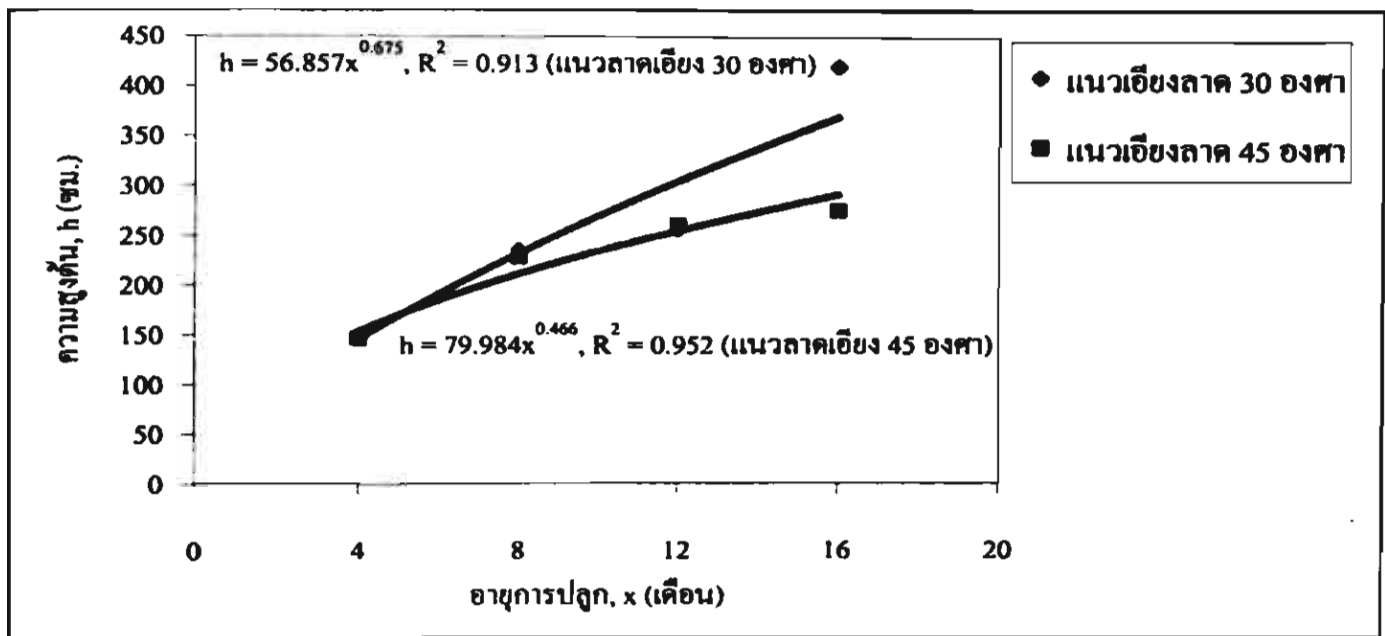
การปลูกแบบสี่เหลี่ยม หญ้าแฝกมีความยาวรากเพิ่มขึ้นดังนี้ 10.33, 16.18, 18.50, 19.00, 20.00, 29.00, 30.00, 33.00 และ 42.00 เซนติเมตรตามลำดับ จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความยาวรากของหญ้าแฝกกับอายุการปลูก คือ $L = 10.456e^{0.076x}$ โดยมีค่า $R^2=0.941$

การปลูกแบบสามเหลี่ยม หญ้าแฝกมีความยาวรากเพิ่มขึ้นดังนี้ 5.33, 11.60, 12.00, 19.75, 24.80, 26.75, 30.00, 30.50 และ 31.75 เซนติเมตรตามลำดับ จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความยาวรากของหญ้าแฝกกับอายุการปลูกคือ $L = 6.778e^{0.101x}$ โดยมีค่า $R^2=0.838$

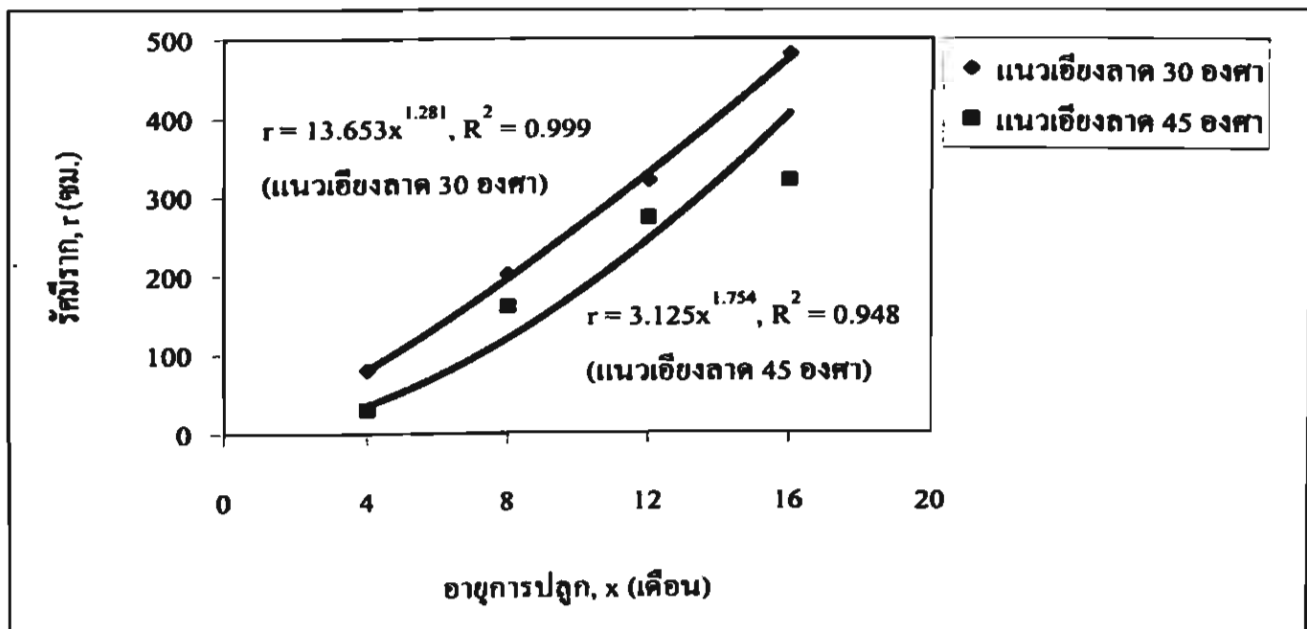
ดังนั้นจากการศึกษาการเจริญเติบโตของต้นกระถินเทพาและกอหญ้าแฝกในสนามของการปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม พบว่า ที่อายุเพิ่มขึ้นการปลูกแบบสี่เหลี่ยมจะให้ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูงของต้น ความกว้าง และความยาวของรากต้นกระถินเทพาและหญ้าแฝก ที่มีแนวโน้มสูงกว่าการปลูกแบบสามเหลี่ยม



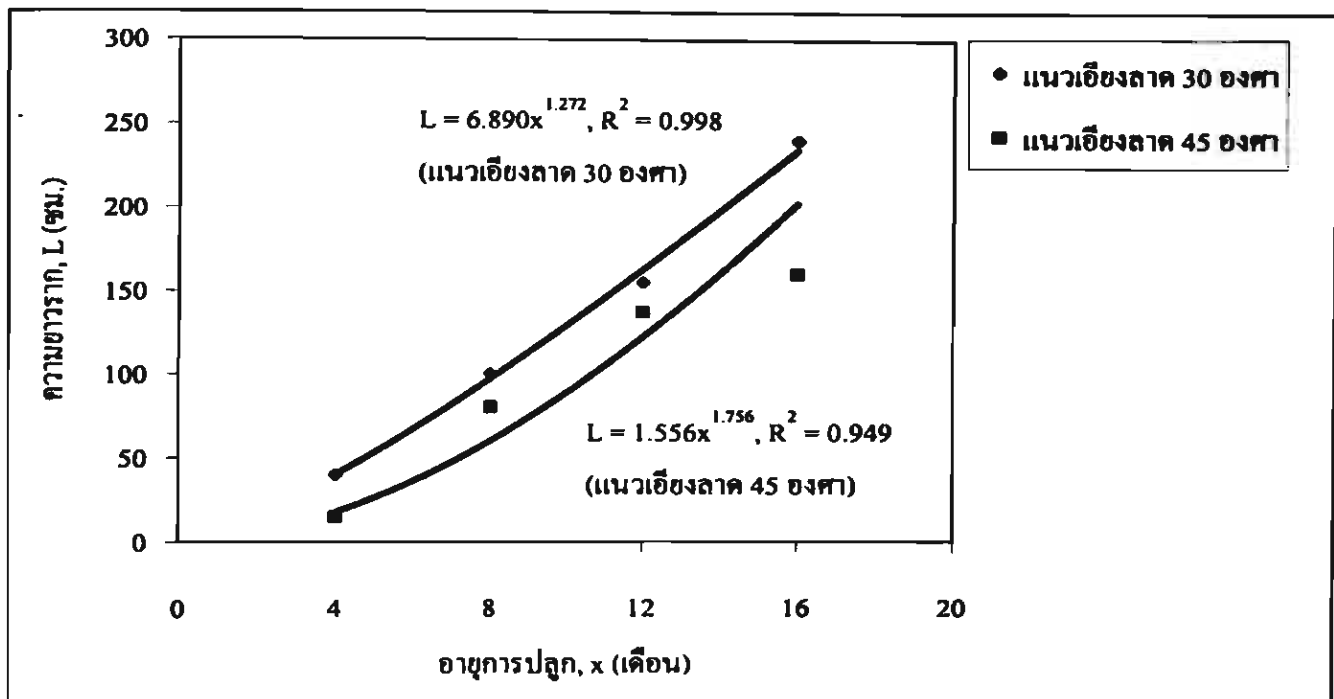
ภาพที่ 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางต้นกระถินเทพา ที่ปลูกในแนวลาดเอียง กับอายุการปลูกในสนาม



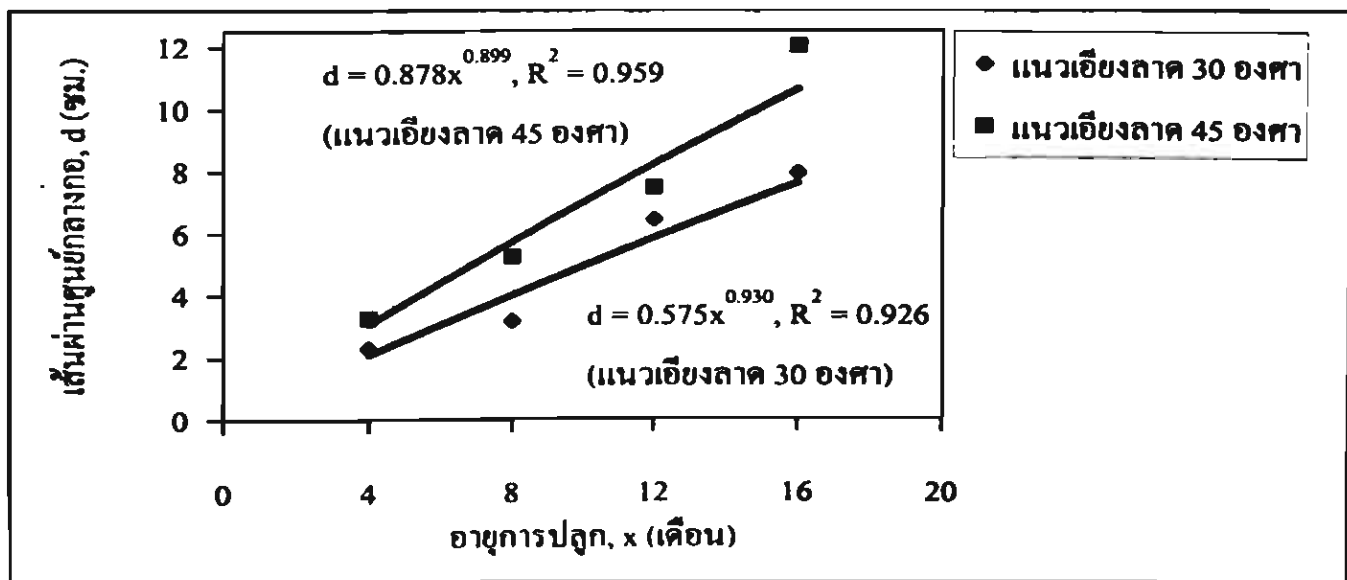
ภาพที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงต้นกระถินเทพา ที่ปลูกในแนวลาดเอียง กับ อายุการปลูกในสนาม



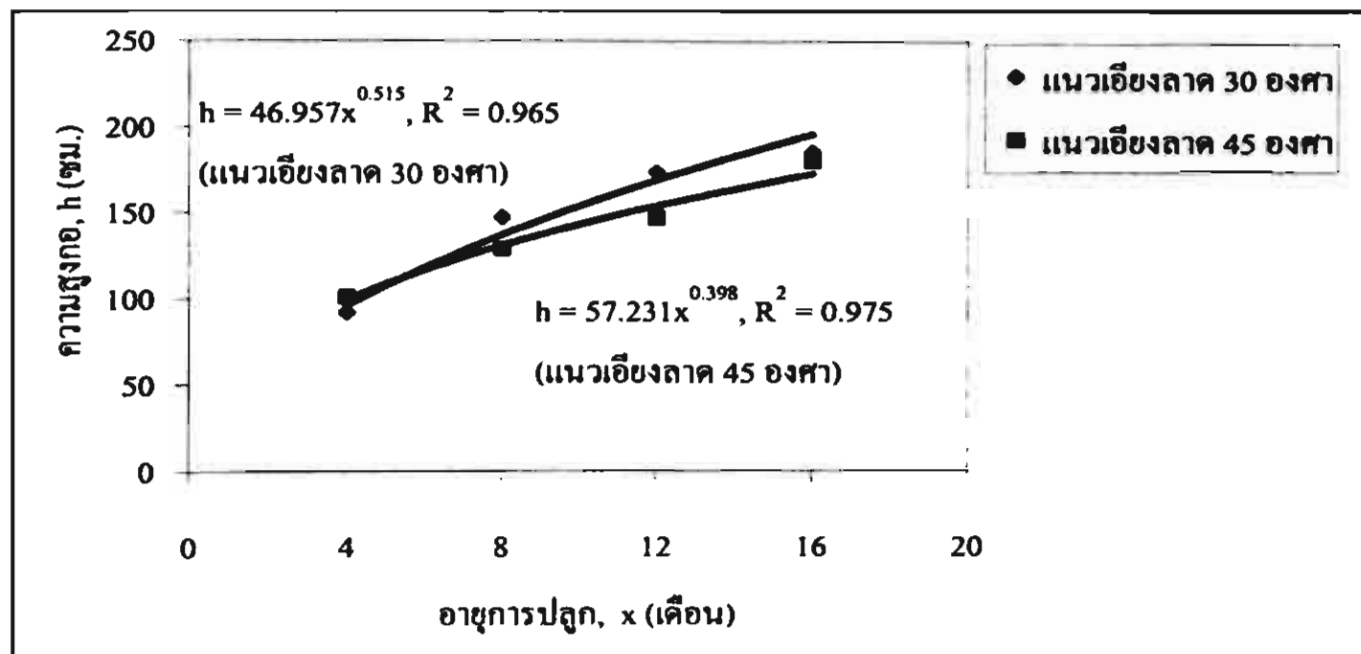
ภาพที่ 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างรศมีรากต้นกระถินเทพา ที่ปลูกในแนวลาดเอียง กับ อายุการปลูกในสนาม



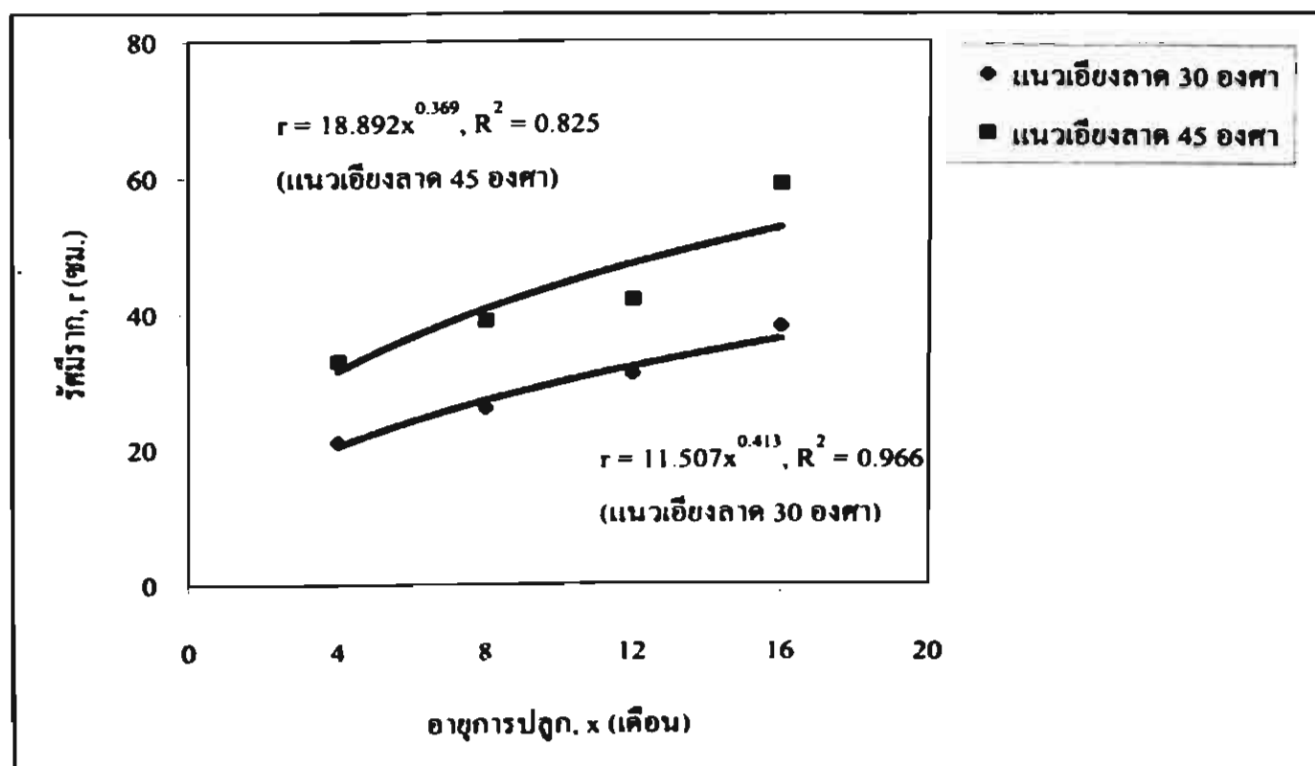
ภาพที่ 4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรากต้นกระถินเทพา ที่ปลูกในแนวลาดเอียง กับ อายุการปลูกในสนาม



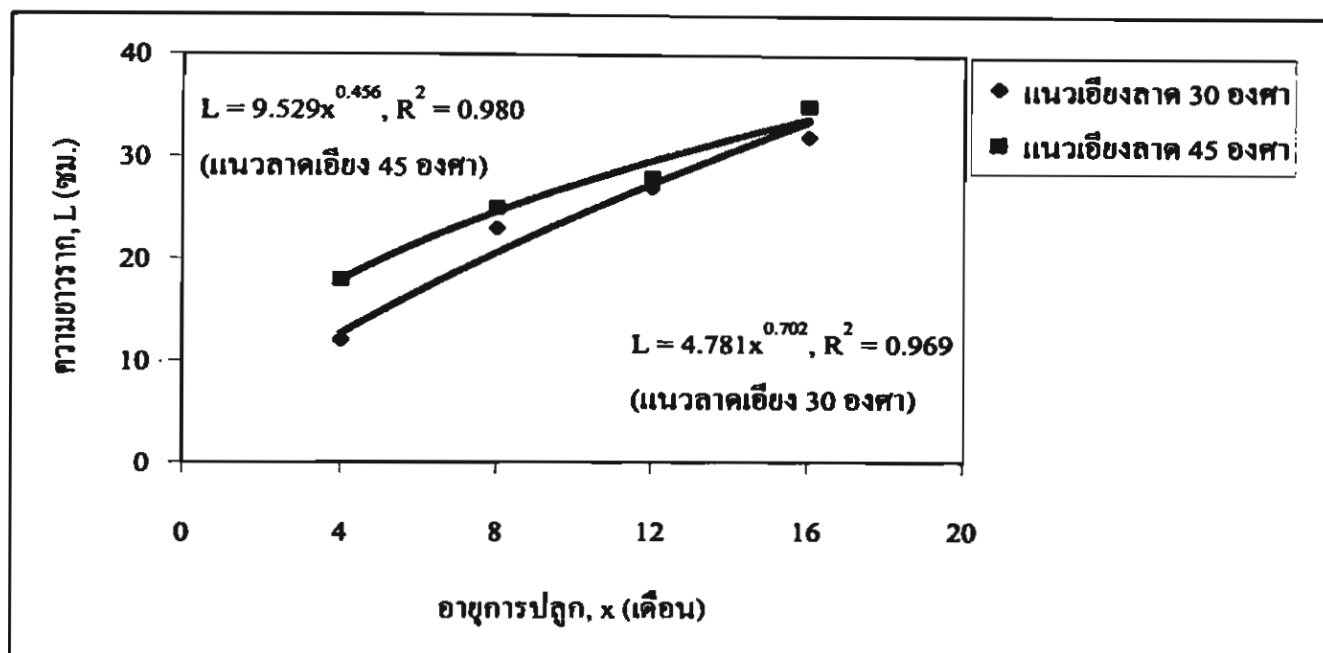
ภาพที่ 4-13 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกอกหญ้าแฝกที่ปลูกในแนวลาดเอียง กับอายุการปลูกในสนาม



ภาพที่ 4-14 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของกอกล้วยาแฟกที่ปลูกในแนวลาดเอียง กับอายุการปลูกในสนาม



ภาพที่ 4-15 ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีรากกล้วยาแฟกที่ปลูกในแนวลาดเอียง กับอายุการปลูกในสนาม



ภาพที่ 4-16 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรากหญ้าแฝกที่ปลูกในแนวลาดเอียง กับอายุการปลูกในสนาม

จากการเก็บข้อมูลการเจริญเติบโตของกระถินเทพาและหญ้าแฝกในสนามความลาดชันของการปลูกที่ 30 และ 45 องศา ซึ่งแสดงในภาพที่ 4-9, 4-10, 4-11, 4-12, 4-13, 4-14, 4-15 และ 4-16 ตามลำดับ ซึ่งพบว่า

เส้นผ่านศูนย์กลางของกระถินเทพาความลาดชันการปลูก 30 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 1.67 ถึง 6.60 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางของกระถินเทพากับอายุการปลูก คือ $d = 0.433x^{0.966}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.994$

เส้นผ่านศูนย์กลางของกระถินเทพาความลาดชันการปลูก 45 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 2.32 ถึง 4.33 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางของกระถินเทพากับอายุการปลูก คือ $d = 1.076x^{0.487}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.791$

ความสูงต้นของกระถินเทพาความลาดชันการปลูก 30 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 149.00 ถึง 420.00 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความสูงต้นของกระถินเทพากับอายุการปลูก คือ $h = 56.857x^{0.675}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.913$

ความสูงต้นของกระถินเทพาความลาดชันการปลูก 45 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 146.00 ถึง 275.00 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความสูงต้นของกระถินเทพากับอายุการปลูก คือ $h = 79.985x^{0.466}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.952$

รัศมีรากของกระถินเทพาความลาดชันการปลูก 30 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 80.00 ถึง 480.00 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของรัศมีรากของกระถินเทพากับอายุการปลูก คือ $r = 3.125x^{1.754}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.948$

รัศมีรากของกระถินเทพาความลาดชันการปลูก 45 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 30.00 ถึง 320.00 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของรัศมีรากของกระถินเทพากับอายุการปลูก คือ $r = 13.653x^{1.281}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.999$

ความยาวรากของกระถินเทพาความลาดชันการปลูก 30 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 40.00 ถึง 240.00 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความยาวรากของกระถินเทพากับอายุการปลูก คือ $L = 6.887x^{1.277}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.998$

ความยาวรากของกระถินเทพาความลาดชันการปลูก 45 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 15.00 ถึง 160.00 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความยาวรากของกระถินเทพากับอายุการปลูก คือ $L = 1.556x^{1.755}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.948$

เส้นผ่านศูนย์กลางของกอหญ้าแฝกความลาดชันการปลูก 30 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 2.30 ถึง 7.90 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางของกอหญ้าแฝกกับอายุการปลูก คือ $d = 0.575x^{0.930}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.926$

เส้นผ่านศูนย์กลางของกอหญ้าแฝกความลาดชันการปลูก 45 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 3.26 ถึง 12.00 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางของกอหญ้าแฝกกับอายุการปลูก คือ $d = 0.878x^{0.899}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.959$

ความสูงกอหญ้าแฝกความลาดชันการปลูก 30 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 92.00 ถึง 185.00 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความสูงต้นของกอหญ้าแฝกกับอายุการปลูก คือ $h = 46.957x^{0.515}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.965$

ความสูงต้นของกอหญ้าแฝกความลาดชันการปลูก 45 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 101.00 ถึง 180.00 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความสูงต้นของกอหญ้าแฝกกับอายุการปลูก คือ $h = 57.231x^{0.398}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.975$

รัศมีรากของหญ้าแฝกความลาดชันการปลูก 30 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 21.00 ถึง 38.00 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของรัศมีรากของหญ้าแฝกกับอายุการปลูก คือ $r = 11.507x^{0.413}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.966$

รัศมีรากของหญ้าแฝกความลาดชันการปลูก 45 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 33.00 ถึง 59.00 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของรัศมีรากของหญ้าแฝกกับอายุการปลูก คือ $r = 18.892x^{0.369}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.825$

ความยาวรากของหญ้าแฝกความลาดชันการปลูก 30 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 12.00 ถึง 32.00 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความยาวรากของหญ้าแฝกกับอายุการปลูก คือ $L = 4.781x^{0.702}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.969$

ความยาวรากของกระถินเทพาความลาดชันการปลูก 45 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 18.00 ถึง 35.00 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความยาวรากของหญ้าแฝกกับอายุการปลูก คือ $L = 9.529x^{0.456}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.980$

ดังนั้นจากการศึกษาการเจริญเติบโตของหญ้าแฝกและกระถินเทพาในสนาม ทั้งการปลูกในแนวราบและในแนวลาดชันพบว่า การเจริญเติบโตของหญ้าแฝกและกระถินเทพาที่ปลูกในแนวลาดชันจะมีการเจริญเติบโตดีกว่าในแนวราบเพราะลักษณะดินในแนวลาดชันจะเป็นดินที่ซุยทำให้รากพืชได้รับสารอาหารและออกซิเจนที่เพียงพอในการเจริญเติบโต การเจริญเติบโตของกระถินเทพาที่ปลูกในแนวลาดชัน 30 องศาจะมีการเจริญเติบโตดีกว่าแนวลาดชัน 45 องศา แต่การเจริญเติบโตของหญ้าแฝกที่ปลูกในแนวลาดชัน 45 องศาจะมีการเจริญเติบโตดีกว่าแนวลาดชัน 30 องศา

4.3 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมรากกระถินเทพาและรากหญ้าแฝกในแปลงทดลองที่ระยะการปลูกต่างกัน

จากผลการทดสอบแรงเฉือนของดินที่ระดับความลึก 20 ซม.จากผิวดิน โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเปล่า และดินที่เสริมด้วยรากกระถินเทพาและหญ้าแฝก ที่การปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยมของรูปแบบที่ 1, 2, 3 กับอายุการปลูกในสนาม คือ 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือน ตามลำดับ พบว่า

จากภาพที่ 4-17 พบว่า กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากกระถินเทพาและหญ้าแฝกที่การปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม ทดสอบที่กลางคัน ระหว่างคัน ระหว่างแถว และดินเปล่า รูปแบบที่ 1 มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามอายุการปลูกที่ 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าดังนี้

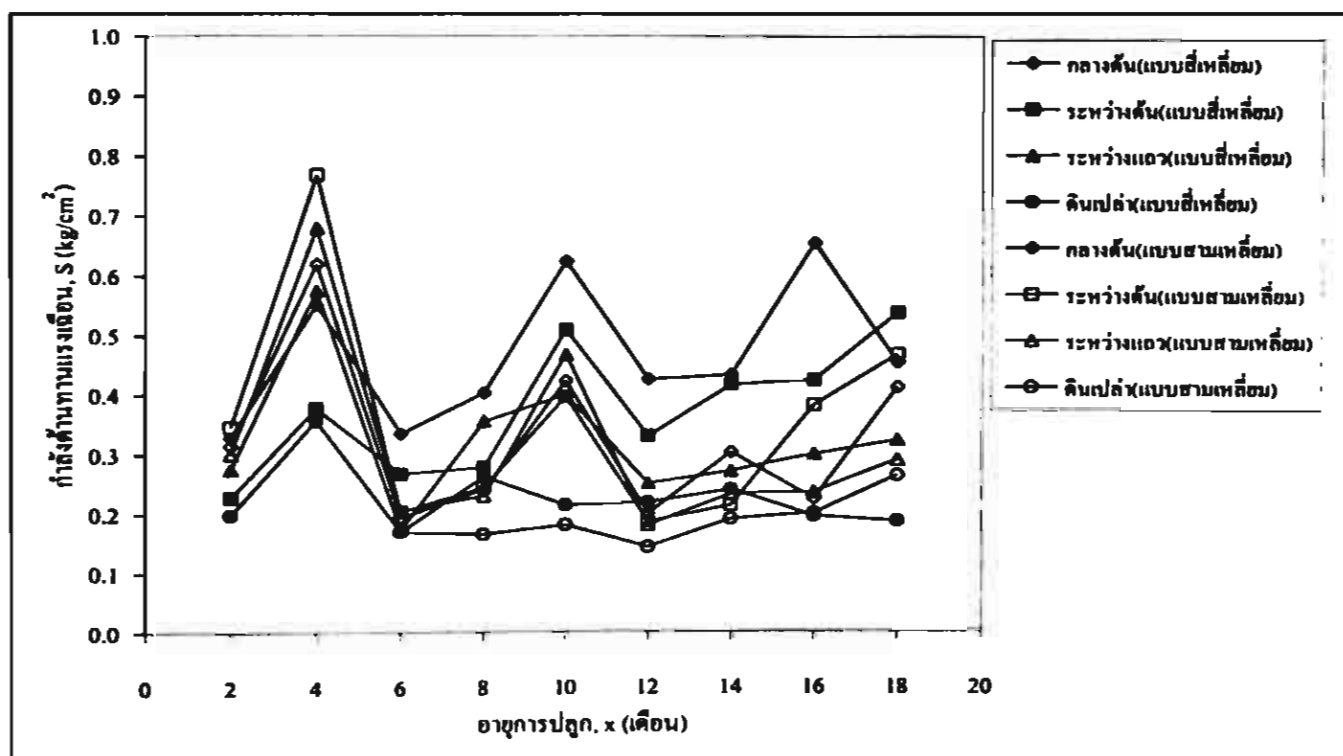
การปลูกแบบสี่เหลี่ยม

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากต้นกระถินเทพาและหญ้าแฝกมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่อายุการปลูกเดียวกัน โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.329 ถึง 0.653 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างคัน โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.228 ถึง 0.423 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างแถวกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.275 ถึง 0.300 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเปล่า โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.175 ถึง 0.263 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



ภาพที่ 4-17 ความสัมพันธ์ระหว่างดินเปล่า ดินที่เสริมรากกระถินเทพา และ หญ้าแฝก ที่การปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม รูปแบบที่ 1 กับอายุการปลูกในสนาม

การปลูกแบบสามเหลี่ยม

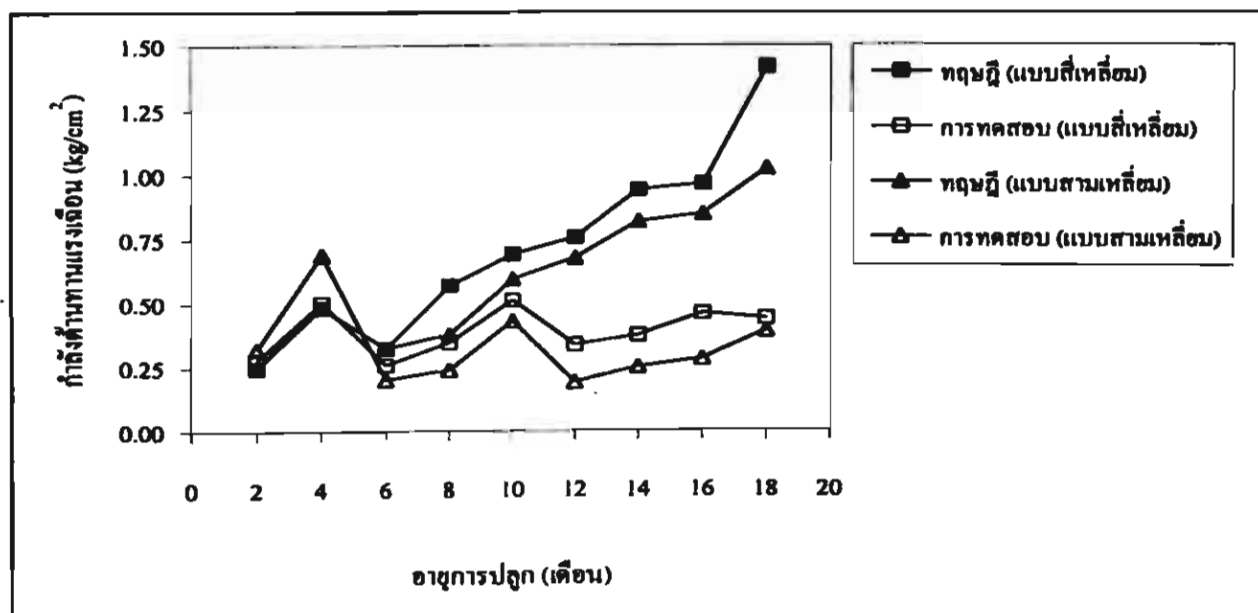
กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากคันกระถินเทพาและหญ้าแฝกมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่อายุการปลูกเดียวกัน โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.193 ถึง 0.619 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างคัน โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.186 ถึง 0.769 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างแถวกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.180 ถึง 0.679 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเปล่า โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.143 ถึง 0.357 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ดังนั้นการทดสอบกำลังต้านทานการเฉือนทั้ง 3 แบบและดินเปล่าในรูปแบบการปลูกที่ 1 พบว่ากำลังต้านทานการเฉือนกลางคันกระถินเทพามีค่ามากกว่าหญ้าแฝกระหว่างแถวกระถินเทพา, หญ้าแฝก ระหว่างคันกระถินเทพา และดินเปล่า เมื่อเปรียบเทียบที่อายุการปลูกเดียวกัน พบว่า ในช่วง 2 – 4 เดือน ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมรากของรูปแบบสามเหลี่ยมจะมีค่ามากกว่ารูปแบบสี่เหลี่ยม แต่เมื่ออายุการปลูกมากกว่า 4 เดือนขึ้นไป ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมรากของรูปแบบสี่เหลี่ยมจะมีค่ามากกว่ารูปแบบสามเหลี่ยม และในช่วง 6 เดือนแรก กำลังต้านทานการเฉือนของกลางคันกระถินเทพาจะใกล้เคียงกับ ระหว่างคันและระหว่างแถวของกระถินเทพา เนื่องจากอิทธิพลของรากกระถินเทพายังไม่เจริญเติบโตเต็มที่ทำให้กำลังต้านทานแรงเฉือนที่ได้จะเป็นในส่วนของหญ้าแฝกเป็นส่วนใหญ่ แต่เมื่ออายุการปลูกที่มากกว่า 8 เดือนรากกระถินเทพาเริ่มเข้ามามีอิทธิพลทำให้ระบบรากพืชแบบผสมผสานสมบูรณ์แบบส่งผลให้กำลังต้านทานการเฉือนที่กลางคันกระถินมีค่าสูงขึ้น



ภาพที่ 4-18 กำลังต้านทานการเฉือนของทฤษฎี และทดสอบในสนามอายุการปลูกแบบสี่เหลี่ยม และ แบบสามเหลี่ยมของรูปแบบที่ 1

จากภาพที่ 4-18 กำลังต้านทานการเฉือนของทฤษฎี และทดสอบในสนามอายุการปลูกแบบสี่เหลี่ยม และ แบบสามเหลี่ยมของรูปแบบที่ 1 ที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าดังนี้

การปลูกแบบสี่เหลี่ยม

กำลังด้านทานการเหือนของทฤษฎีมีค่าดังนี้ 0.248, 0.482, 0.323, 0.568, 0.689, 0.755, 0.941, 0.963 และ 1.415 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังด้านทานการเหือนของการทดสอบในสนามมีค่าดังนี้ 0.277, 0.501, 0.259, 0.345, 0.510, 0.335, 0.373, 0.458 และ 0.437 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

การปลูกแบบสามเหลี่ยม

กำลังด้านทานการเหือนของทฤษฎีมีค่าดังนี้ 0.247, 0.482, 0.323, 0.376, 0.593, 0.675, 0.817, 0.846 และ 1.023 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังด้านทานการเหือนของการทดสอบในสนามมีค่าดังนี้ 0.321, 0.689, 0.201, 0.238, 0.429, 0.188, 0.250, 0.280 และ 0.389 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ดังนั้นกำลังด้านทานการเหือนของการทดสอบในสนามซึ่งเป็นค่าไม่สูงมากถ้าเปรียบกับค่าทางทฤษฎีซึ่งอาจจะมีผลมาจากปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในดินมีผลต่อกำลังด้านทานการเหือนของการทดสอบในสนาม แต่ในทางทฤษฎีไม่นำเอาปริมาณความชื้นมาเกี่ยวข้องด้วย ที่อายุการปลูก 4 เดือนขึ้นไปกำลังด้านทานการเหือนของทางทฤษฎี และการทดสอบในสนามของรูปแบบสี่เหลี่ยมมีค่ามากกว่ารูปแบบสามเหลี่ยม ซึ่งทำให้พบว่ารากพืชสามารถเพิ่มกำลังรับแรงเหือนได้มากเลยทีเดียว

จากภาพที่ 4-19 พบว่ากำลังด้านทานแรงเหือนของดินที่เสริมด้วยรากกระถินเทพาและหญ้าแฝก ที่การปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม ทดสอบที่กลางคัน ระหว่างต้น ระหว่างแถว และดินเปล่า รูปแบบที่ 2 มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามอายุการปลูกที่ 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าดังนี้

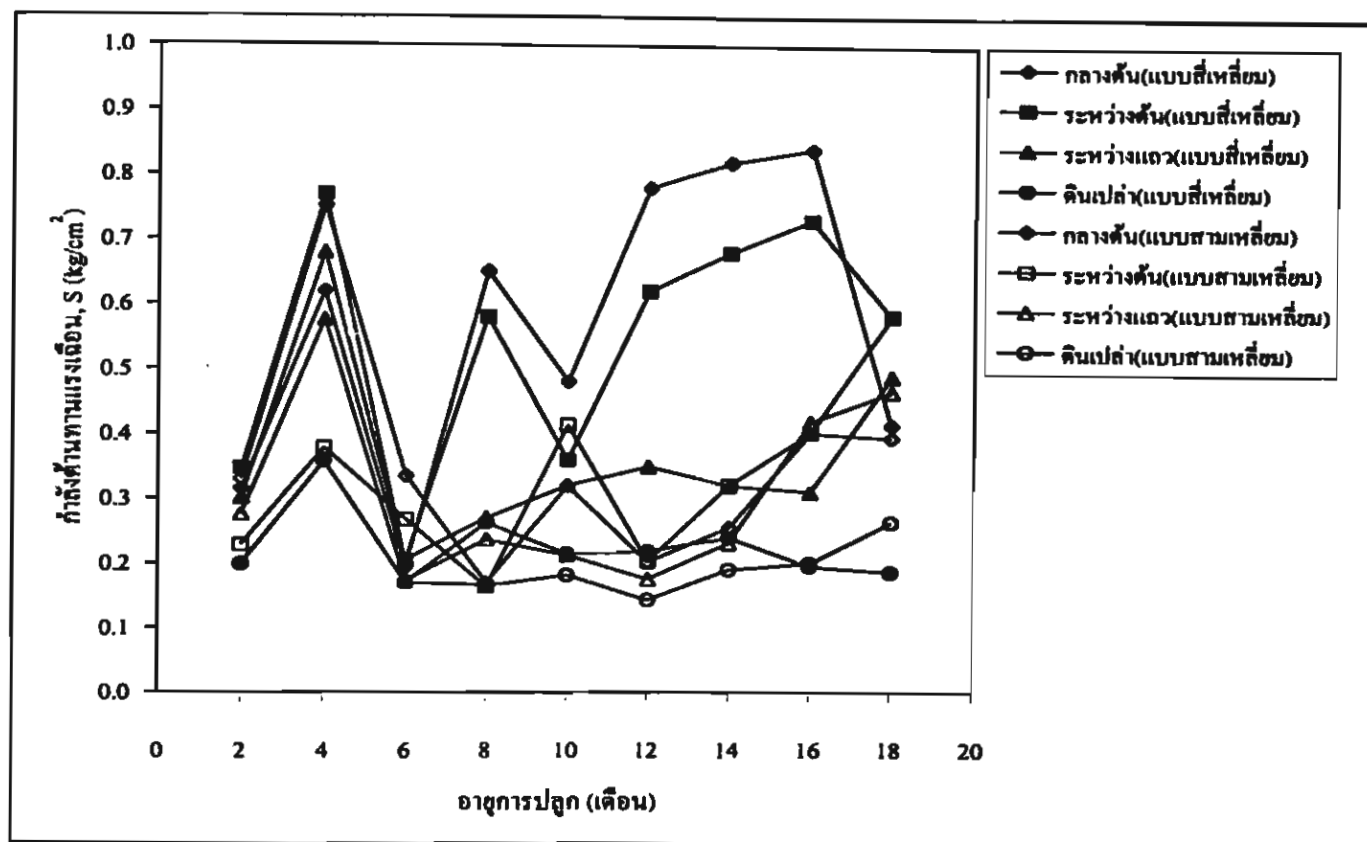
การปลูกแบบสี่เหลี่ยม

กำลังด้านทานแรงเหือนของดินที่เสริมด้วยรากต้นกระถินเทพาและหญ้าแฝก มีอัตราการเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูก โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.314 ถึง 0.821 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังด้านทานแรงเหือนของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างต้นกระถินเทพา มีอัตราการเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูก โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.347 ถึง 0.627 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังด้านทานแรงเหือนของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างแถวกระถินเทพา มีอัตราการเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูก โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.301 ถึง 0.352 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังด้านทานแรงเหือนของดินเปล่า โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.175 ถึง 0.263 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



ภาพที่ 4-19 ความสัมพันธ์ระหว่างดินเปล่า ดินที่เสริมรากกระถินเทพา และหญ้าแฝกที่การปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม รูปแบบที่ 2 กับอายุการปลูกในสนาม

การปลูกแบบสามเหลี่ยม

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากต้นกระถินเทพาและหญ้าแฝก มีอัตราการเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูก โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.170 ถึง 0.751 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างต้นกระถินเทพา มีอัตราการเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูก โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.164 ถึง 0.582 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างแถวกระถินเทพา มีอัตราการเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูก โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.173 ถึง 0.575 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเปล่า โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.143 ถึง 0.357 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ดังนั้นการทดสอบกำลังด้านการเฉือนทั้ง 3 แบบและดินเปล่าในรูปแบบการปลูกที่ 2 พบว่ากำลังด้านการเฉือนกลางต้นกระถินเทพามีค่ามากกว่าหญ้าแฝกระหว่างแถวกระถินเทพา, หญ้าแฝกระหว่างต้นกระถินเทพา และดินเปล่า เมื่อเปรียบเทียบที่อายุการปลูกเดียวกัน ค่ากำลังด้านการเฉือนของดินที่เสริมรากของรูปแบบสี่เหลี่ยมจะมีค่ามากกว่ารูปแบบสามเหลี่ยม และในช่วง 6 เดือนแรก