

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 งานวิจัยของหญ้าแฝกในเชิงเกษตรกรรม

ชุมพล คนศิลป์ และนุชจิ กองพลพรหม [1] ทำการศึกษาเปรียบเทียบการเจริญเติบโตระบบรากและผลผลิต ของหญ้าแฝกสายพันธุ์ต่างๆ ได้ผลดังนี้

1) การเจริญเติบโตของส่วนที่อยู่เหนือดิน

หญ้าแฝกจำนวน 10 พันธุ์ ที่นำมาปลูกมีความสามารถในการเจริญเติบโตและปรับตัวได้ดีทุกพันธุ์ การตั้งตัวในระยะแรกค่อนข้างช้า แต่เมื่อได้รับน้ำฝนในระยะเวลาต่อมา การเจริญเติบโตและการตั้งตัวดีขึ้นมาก เริ่มแตกใบใหม่และออกหน่อตามมา ผลการรวบรวมข้อมูลด้านการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตหญ้าสด ดังตารางที่ 2.1 ความสูงของหญ้าแฝกทั้ง 10 พันธุ์ พบว่า มีความสูงอยู่ระหว่าง 126-144.3 เซนติเมตร หญ้าแฝกพันธุ์กำแพงเพชร2 มีความสูงมากที่สุด วัดจากโคนต้นเหนือผิวดินถึงปลายใบที่ยาวที่สุด 144.3 เซนติเมตร รองลงมาได้แก่ หญ้าแฝกพันธุ์กำแพงเพชร1 ศรีลังกา ราชนบุรี และสงขลา3 ที่มีความสูงวัดได้ 141.0, 134.2, 132.5 และ 132.0 เซนติเมตร ตามลำดับ พันธุ์ที่มีความสูงปานกลาง ได้แก่ พันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ เลย สุราษฎร์ธานี ร้อยเอ็ด และนครสวรรค์ ซึ่งมีความสูงวัดได้ 129.3, 128.4, 127.9, 127.3 และ 126.0 เซนติเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 การเจริญเติบโตด้านความสูง การแตกหน่อ การขยายกอ และผลผลิตหญ้าสดของหญ้าแฝก 10 พันธุ์ (ปีที่ 2 ของการปลูก) [1]

พันธุ์หญ้าแฝก	ความสูง (ซม.)	การแตกหน่อ (หน่อ/ต้น)	การขยายกอ (ซม.)	ผลผลิตหญ้าสด (กก./ไร่)
T1 - กำแพงเพชร1	141.00	25.80	27.20	1954.50
T2 - กำแพงเพชร2	144.30	34.60	29.40	2478.50
T3 - นครสวรรค์	126.00	37.10	30.20	1735.00
T4 - ประจวบคีรีขันธ์	129.30	20.40	24.50	1939.00
T5 - ราชนบุรี	132.30	41.40	30.60	1846.50

ตารางที่ 2.1 การเจริญเติบโตด้านความสูง การแตกหน่อ การขยายกอ และผลผลิตหญ้าสดของหญ้าแฝก 10 พันธุ์ (ปีที่ 2 ของการปลูก) (ต่อ) [1]

พันธุ์หญ้าแฝก	ความสูง (ซม.)	การแตกหน่อ (หน่อ/ต้น)	การขยายกอ (ซม.)	ผลผลิตหญ้าสด (กก./ไร่)
T6 - ร้อยเอ็ด	127.30	41.40	30.60	1846.50
T7 - เลย	128.40	26.80	21.20	1932.50
T8 - ศรีลังกา	135.20	32.60	29.40	2788.50
T9 - สงขลา 3	132.00	18.20	18.80	1665.00
T10 - สุราษฎร์ธานี	127.90	19.40	24.40	2456.50

* ผลผลิตหญ้าสด ได้จากการตัด 3 ครั้งต่อปี

การเจริญเติบโตด้านการแตกหน่อของหญ้าแฝกพันธุ์ต่างๆ พบว่า หญ้าแฝกพันธุ์ต่างๆ มีอัตราการแตกหน่อสูงสุด เมื่ออายุ 6 เดือนอยู่ระหว่าง 18.2-41.4 หน่อต่อต้น หญ้าแฝกพันธุ์ร้อยเอ็ด มีอัตราการแตกหน่อสูงสุดวัดได้เฉลี่ย 41.4 หน่อต่อต้น รองลงมาได้แก่ หญ้าแฝกพันธุ์นครสวรรค์ ราชบุรี กำแพงเพชร 2 ศรีลังกา เลย กำแพงเพชร 1 ประจวบคีรีขันธ์ และสุราษฎร์ธานี ที่มีอัตราการแตกกอวัดได้ 37.1, 35.2, 34.6, 26.8, 25.8, 20.4 และ 19.8 หน่อต่อต้น ตามลำดับ ส่วนหญ้าแฝกพันธุ์สงขลา 3 มีอัตราการแตกกอที่น้อยที่สุดเพียง 18.2 หน่อต่อต้น

การขยายกอของหญ้าแฝกจำนวน 10 พันธุ์ ที่วัดได้เฉลี่ยเมื่ออายุ 1 ปี โดยวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของกอที่ระดับความสูงเหนือจากพื้นดิน 20 เซนติเมตร พบว่า การขยายกอของหญ้าแฝกพันธุ์ต่างๆ อยู่ระหว่าง 18.8 – 30.6 เซนติเมตร หญ้าแฝกพันธุ์ร้อยเอ็ด มีการขยายกอมากที่สุด มีค่าเฉลี่ยความกว้างของกอ 30.6 เซนติเมตร รองลงมาได้แก่ หญ้าแฝกพันธุ์นครสวรรค์ ราชบุรี กำแพงเพชร 2 ศรีลังกา เลย กำแพงเพชร 1 ประจวบคีรีขันธ์ และสุราษฎร์ธานี ส่วนหญ้าแฝกพันธุ์สงขลา 3 มีการขยายกอน้อยที่สุด โดยการวัดความกว้างของกอได้ 18.8 เซนติเมตร

การแตกหน่อและการขยายกอส่วนใหญ่มีความสัมพันธ์ในทางเดียวกัน หญ้าแฝกพันธุ์ที่มีอัตราการแตกหน่อสูง มักมีแนวโน้มช่วยให้มีการขยายกอออกตามด้านข้างมากขึ้น ในทำนองเดียวกันหญ้าแฝกพันธุ์ที่มีอัตราการแตกกอน้อยขยายออกตามด้านข้างจะน้อยตามไปด้วย ดังเช่น กรณีของหญ้าแฝกพันธุ์ร้อยเอ็ด มีอัตราการแตกหน่อสูงสุด 41.4 หน่อต่อต้น จะมีการขยายกอออกตามด้านข้างมากที่สุดวัดได้ 30.6 เซนติเมตร ในขณะที่พันธุ์หญ้าแฝกสงขลา 3 มีอัตราการ

แตกหน่อต่ำสุด จำนวน 18.2 หน่อต่อต้น และมีการขยายกอออกตามด้านข้างน้อยที่สุดเพียง 18.8 เซนติเมตร ความสามารถในการแตกหน่อและการขยายกอเป็นลักษณะประจำพันธุ์ของหญ้าแฝกแต่ละพันธุ์ ซึ่งเจริญเติบโตและปรับตัวได้ดีในสภาพอากาศและดินแต่ละท้องถิ่น

ผลจากการเจริญเติบโตของหญ้าแฝกแต่ละพันธุ์ เมื่อทำการตัดหญ้าแฝกในขณะที่กำลังเขียวสดอยู่ โดยทำการตัดสูงจากพื้นดิน 20 เซนติเมตร ทำการตัด 3 ครั้งต่อปี ดังตารางที่ 2.1 ปรากฏว่า หญ้าแฝกพันธุ์ศรีลังกาให้ปริมาณผลผลิตน้ำหนักรากสูงสุด 2,788.5 กิโลกรัมต่อไร่ รองลงมาได้แก่ หญ้าแฝกพันธุ์กำแพงเพชร 2 สุราษฎร์ธานี ราชบุรี กำแพงเพชร 1 ประจวบคีรีขันธ์ เลย ร้อยเอ็ด นครสวรรค์ และสงขลา 3 โดยเฉพาะหญ้าแฝกพันธุ์สงขลา 3 ให้ปริมาณน้ำหนักรากสดต่ำสุดเพียง 1665.0 กิโลกรัมต่อไร่ เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำหนักรากที่ได้รับจากพันธุ์ต่างๆ มีความแตกต่างกันนั้น เป็นเพราะว่ามีปัจจัยที่เป็นองค์ประกอบที่ช่วยให้น้ำหนักรากผลผลิตได้รับมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับความสูงของหญ้าแฝกและการขยายกอของหญ้าแฝกเป็นสำคัญ หญ้าแฝกที่มีการเจริญเติบโตดีทั้งด้านความสูงและการแตกกอ มีแนวโน้มได้รับปริมาณน้ำหนักรากสูง หญ้าแฝกที่มีการแตกหน่อและขยายกอน้อย แต่มีความสูงอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างมาก ไม่ได้หมายความว่า จะได้รับปริมาณน้ำหนักรากสูงตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าสังเกตว่าหญ้าแฝกพันธุ์ที่เป็นประเภทหญ้าแฝกลุ่ม เช่นพันธุ์ศรีลังกา กำแพงเพชร 1 สุราษฎร์ธานี มักมีปริมาณน้ำหนักรากสดสูงกว่าพันธุ์ที่เป็นหญ้าแฝกดอน ยกเว้น หญ้าแฝกพันธุ์สงขลา 3 ที่มีการแตกกอและการขยายกอน้อยมาก จึงทำให้ผลผลิตน้ำหนักรากที่ได้รับอยู่ในเกณฑ์ต่ำ การที่หญ้าแฝกลุ่ม ส่วนใหญ่มีปริมาณน้ำหนักรากสดสูงกว่าหญ้าแฝกดอน เป็นเพราะว่าหญ้าแฝกลุ่มส่วนใหญ่มีขนาดลำต้นสูงใหญ่และอวบกว่าหญ้าแฝกดอน หญ้าแฝกที่มีลำต้นอวบมักมีปริมาณความชื้นในลำต้นมากกว่าหญ้าแฝกที่มีความอวบน้ำน้อยกว่า จึงทำให้น้ำหนักรากโดยรวมของหญ้าแฝกลุ่มมีแนวโน้มสูงกว่าหญ้าแฝกดอน

2) การเจริญเติบโตของส่วนที่อยู่ใต้ดิน

ดังตารางที่ 2.2 ระบบรากลึก การกระจายของรากและปริมาณของรากหญ้าแฝกพันธุ์ต่างๆ มีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความสามารถในการเจริญเติบโตและการปรับตัวของหญ้าแฝกแต่ละพันธุ์ จากการศึกษาระดับความลึกของรากที่ยังลึกลงดิน ปรากฏว่าหญ้าแฝกพันธุ์ศรีลังกา มีระบบรากที่ยังลึกลงดินมากที่สุด 215 เซนติเมตร รองลงมาได้แก่ หญ้าแฝกพันธุ์ นครสวรรค์ เลย ร้อยเอ็ด ประจวบคีรีขันธ์ ราชบุรี สงขลา 3 กำแพงเพชร 2 กำแพงเพชร 1 และสุราษฎร์ธานี ที่มีระบบรากที่ยังลึกลงดินยาว 194, 170, 168, 168, 156, 120, 108, 98 และ 85 เซนติเมตร ตามลำดับ หญ้าแฝกพันธุ์สุราษฎร์ธานี มีระบบรากที่ยังลึกลงดินที่สั้นที่สุด

ตารางที่ 2.2 การเจริญเติบโตของระบบรากหญ้าแฝก 10 พันธุ์ (เมื่ออายุ 2 ปี) [1]

พันธุ์หญ้าแฝก	ระบบรากลึกลงดิน (ซม.)	การกระจายด้านข้าง (หน่อ/ต้น)	น้ำหนักแห้งทั้งต้น (ซม.)
T1 - กำแพงเพชร 1	97.00	138.00	51.45
T2 - กำแพงเพชร 2	104.00	126.00	53.79
T3 - นครสวรรค์	194.00	120.00	34.64
T4 - ประจวบคีรีขันธ์	168.00	70.00	38.12
T5 - ราชบุรี	156.00	118.00	63.76
T6 - ร้อยเอ็ด	168.00	112.00	52.33
T7 - เลย	170.00	80.00	42.58
T8 - ศรีลังกา	215.00	105.00	92.01
T9 - สงขลา 3	120.00	94.00	33.16
T10 - สุราษฎร์ธานี	85.00	66.00	22.01

การเจริญของรากที่กระจายออกตามด้านข้างของหญ้าแฝก 10 พันธุ์ พบว่าหญ้าแฝกพันธุ์กำแพงเพชร 1 มีการเจริญของรากที่กระจายออกตามด้านข้างมากที่สุด วัดได้ 138 เซนติเมตร รองลงมาได้แก่ หญ้าแฝกพันธุ์กำแพงเพชร 2 นครสวรรค์ ราชบุรี ร้อยเอ็ด ศรีลังกา สงขลา 3 เลย ประจวบคีรีขันธ์ และสุราษฎร์ธานี ที่มีการเจริญของรากกระจายออกตามด้านข้างวัดได้ 126, 120, 118, 112, 105, 94, 80, 70 และ 66 เซนติเมตร ตามลำดับ

การเจริญของรากที่ยังลึกลงดินเป็นการขึ้นไปถึงความแข็งแรง และความสามารถของรากที่จะชอนไชทะลุชั้นดินลึกลงไปในดินหาอาหารและน้ำ เพื่อเสริมสร้างการเจริญเติบโตของลำต้นที่อยู่ส่วนบน อีกทั้งเพื่อการยึดเหนี่ยวดินให้เกิดความมั่นคงในการทรงตัว ไม่ล้มง่าย เช่นเดียวกับการกระจายของรากออกตามด้านข้าง ซึ่งช่วยยึดเหนี่ยวดินอย่างเหนียวแน่น ยากที่จะทำให้ดินหลุดลอยออกไปได้ จึงทำให้ระบบรากของหญ้าแฝกทุกสายพันธุ์มีระบบรากที่แข็งแรง ทนทานต่อแรงปะทะของน้ำ ช่วยป้องกันการชะล้างพังทลายของดินได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามการมีระบบรากที่แผ่ขยายออกตามด้านข้างมากๆ อาจมีผลเสียต่อพืชไร่ที่ปลูกร่วมอยู่ในระบบ เพราะหญ้าแฝกจะแย่งอาหารและน้ำจากพืชไร่ที่ปลูก กรณีนี้หญ้าแฝกดังกล่าวอาจเปรียบได้เป็นวัชพืชในไร่

3) ความสัมพันธ์ระหว่างต้นและราก

เครื่องชี้วัดอย่างหนึ่งที่บ่งบอกถึงระบบความแข็งแรงของรากพืช และปริมาณของรากที่เจริญอยู่ในดิน จากผลการเปรียบเทียบปริมาณการเจริญเติบโตที่อยู่บนดิน(ลำต้น ใบ ดอก และเมล็ด) และปริมาณการเจริญเติบโตที่อยู่ในดิน(ราก) ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ปริมาณน้ำหนักแห้งของต้น ราก และอัตราส่วนของรากกับต้นหญ้าแฝก 10 พันธุ์ [1]

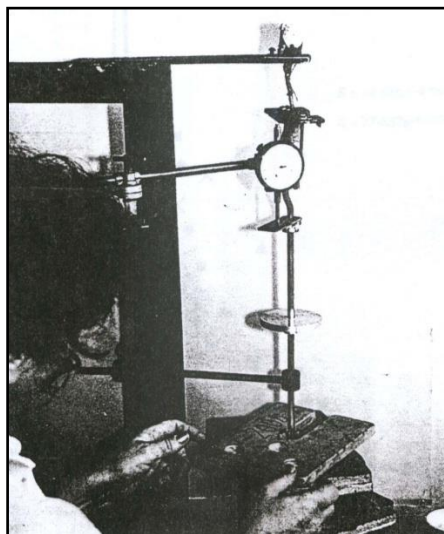
พันธุ์หญ้าแฝก	น้ำหนักแห้งของ ต้นหญ้าแฝก (กรัม/ต้น)	น้ำหนักแห้งของ รากหญ้าแฝก (กรัม/ต้น)	อัตราส่วนของต้น ต่อราก (Top : Root)
T1 - กำแพงเพชร 1	50.60	51.45	1:1.01
T2 - กำแพงเพชร 2	52.40	53.79	1:1.02
T3 - นครสวรรค์	44.80	48.60	1:1.08
T4 - ประจวบคีรีขันธ์	37.80	38.12	1:1.00
T5 - ราชบุรี	60.50	63.76	1:1.05
T6 - ร้อยเอ็ด	46.70	52.33	1:1.12
T7 - เลย	45.20	42.58	1:0.94
T8 - ศรีลังกา	74.20	92.01	1:1.24
T9 - สงขลา 3	36.50	33.16	1:1.09
T10 - สุราษฎร์ธานี	31.50	22.01	1:1.69

อัตราส่วนระหว่างต้นที่อยู่ส่วนบนกับรากที่อยู่ในดิน ของหญ้าแฝกพันธุ์ต่างๆ พบว่าหญ้าแฝกพันธุ์ศรีลังกา ร้อยเอ็ด นครสวรรค์ ราชบุรี กำแพงเพชร 2 กำแพงเพชร 1 มีแนวโน้มการเจริญเติบโตของรากมากกว่าลำต้น คือ มีอัตราส่วนของ Top:Root ประมาณ 1:1.24, 1:1.12, 1:1.08, 1:1.05, 1:1.02 และ 1:1.01 ตามลำดับ การที่หญ้าแฝกพันธุ์ต่างๆ มีอัตราส่วน Top : Root Ratio มากกว่า 1 สามารถช่วยในการตัดสินใจคัดเลือกพันธุ์หญ้าแฝกที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ปลูกป้องกันการชะล้างพังทลายของดินในไร่นา เพราะหญ้าแฝกพันธุ์ที่มี Top:Root Ratio แคบคือ มีปริมาณรากมากกว่าลำต้น แสดงว่าหญ้าแฝกพันธุ์นั้นๆ มีระบบรากที่มั่นคงแข็งแรง มีประสิทธิภาพสูงในการยึดเหนี่ยวดินเข้าด้วยกันอย่างเหนียวแน่น ในทางกลับกันหญ้าแฝกที่มี

Top:Root Ratio กว้างคือ มีปริมาณลำต้นมากกว่าราก แสดงว่าหญ้าแฝกพันธุ์นั้นๆ มีระบบรากที่ไม่ค่อยแข็งแรงยึดเหนี่ยวดินได้อย่างหลวมๆ และมีแนวโน้มช่วยป้องกันการชะล้างพังทลายของดินไม่ดีเท่ากับสายพันธุ์ที่มีปริมาณรากมาก เช่น หญ้าแฝกสายพันธุ์เลย และสุราษฎร์ธานี ซึ่งมี Top:Root Ratio เท่ากับ 1:0.94 และ 1:0.69 ตามลำดับ

2.1.2 งานวิจัยของการทดสอบแรงดึงของรากพืช

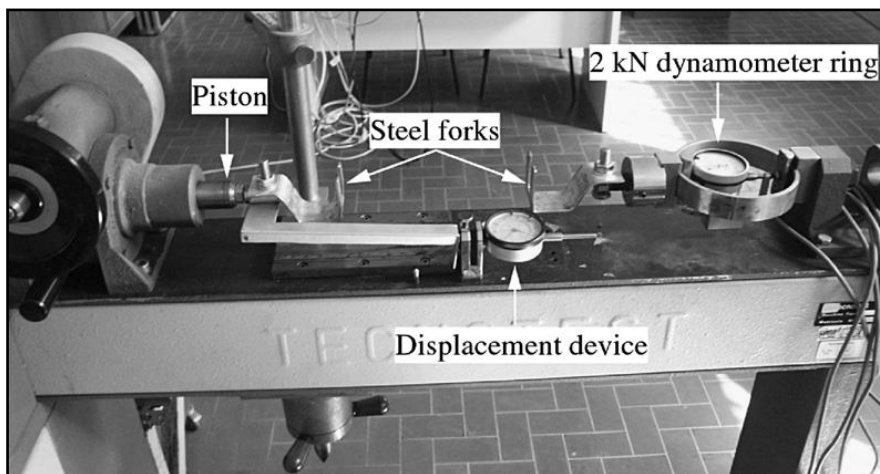
Operstien and Fryman [2] ได้ทดสอบรากของต้น alfalfa, rosemary, pisticia lentacia และ Citus ที่อายุ 2, 4, 6, 8 และ 10 เดือน และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.2 - 15 มิลลิเมตร และความยาว 40 - 500 มิลลิเมตร โดยการใส่น้ำหนักต่อเนื่องจนสำเร็จซึ่งลำดับของการเพิ่มน้ำหนักที่คงที่จนกระทั่งแตกหักและค่าการยึดตัวของรากจะถูกรวบรวมโดยการอ่านค่าจากมาตรวัดที่ติดไว้ที่เครื่องทดสอบดังภาพที่ 2.1 ซึ่งตัวอย่างรากพืชจะมีการนิยามดังภาพที่ 2.2 ก็ถือว่าเป็นการสิ้นสุดในแต่ละครั้งของการทดสอบ



ภาพที่ 2.1 การทดสอบแรงดึงของรากพืช [2]

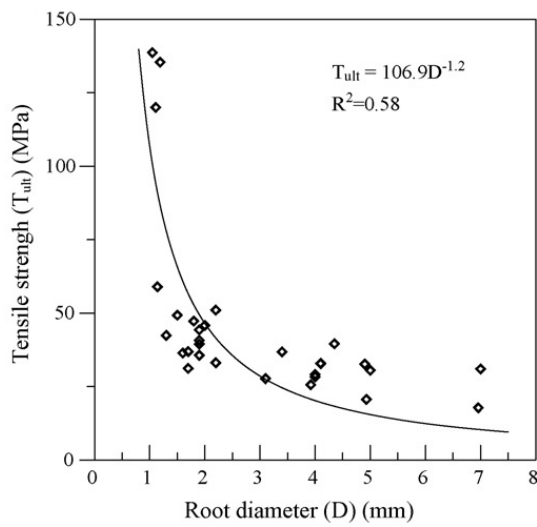


ภาพที่ 2.2 ตัวอย่างรากทดสอบเกิดการฉีกขาด [2]

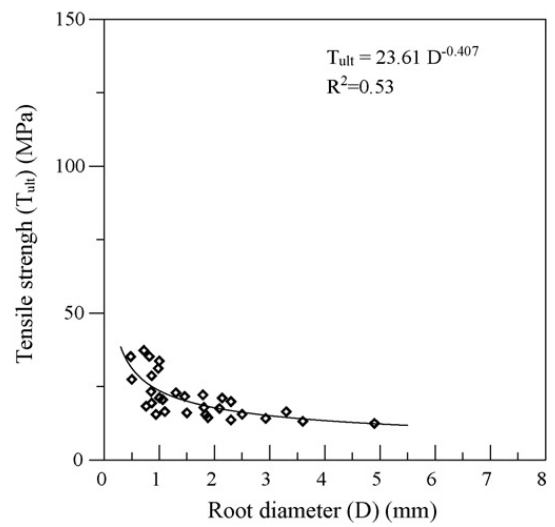


ภาพที่ 2.3 เครื่องมือวัดความแข็งแรงดึงของรากพืชในห้องปฏิบัติการ [3]

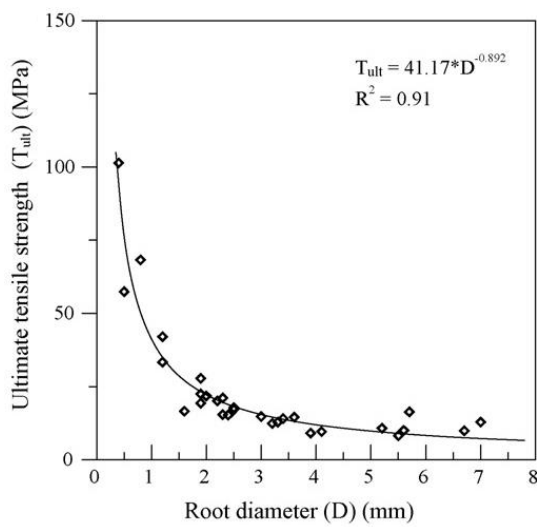
Chia-Cheng Fan and Yu-Wen Chen [4] ได้ทำการวิจัยโดยการทดสอบหาความแข็งแรงดึงประลัยของรากพืช 5 ชนิด เพื่อหาความแข็งแรงดึงประลัยของรากพืช ซึ่งเป็นการคำนวณบนหลักพื้นฐานของค่าแรงดึงต่อพื้นที่หน้าตัดของรากพืช พบว่า ความแข็งแรงดึงประลัยของรากพืชจะแปรผันตรงกับพื้นที่หน้าตัดของรากพืชที่ขนาดเล็กลง ดังภาพที่ 2.4



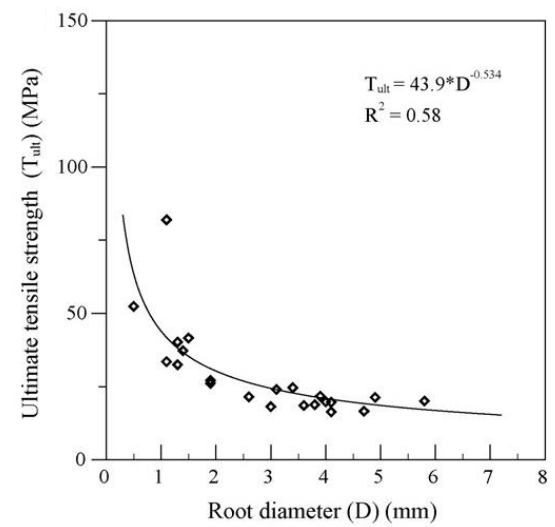
(ก) ดิน Lined hibiscus



(ข) ดิน Japanese Mallotus

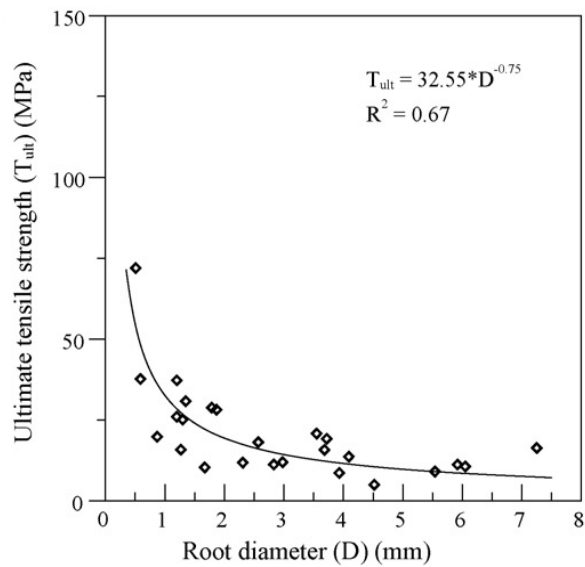


(ค) ดิน Chinese tallow



(ง) ดิน Ironwood

ภาพที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงประลัยกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากพืชชนิดต่างๆ [4]



(จ) ต้น White popinac

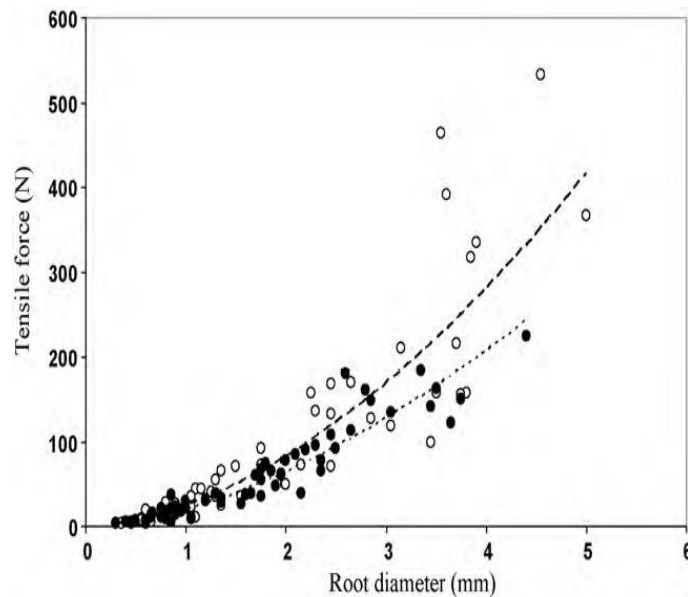
ภาพที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงประลัยกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากพืชชนิดต่างๆ (ต่อ) [4]

จากภาพที่ 2.4 ความสัมพันธ์ดังกล่าวเมื่อนำมาสร้างสมการเส้นถดถอยในรูปแบบสมการยกกำลังเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงดึงประลัยกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากพืชทุกตัวอย่างได้สมการดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมการเส้นถดถอยในรูปแบบสมการยกกำลังของค่าความแข็งแรงดึงประลัยกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากพืช [4]

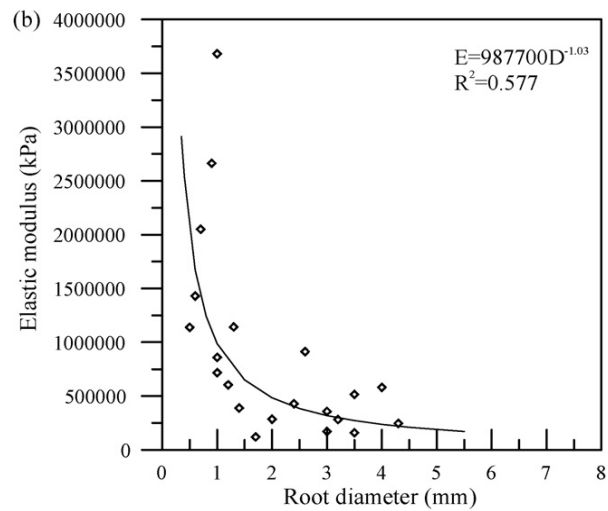
Linden hibiscus	Japanese Mallotus	Chinese tallow	Ironwood	White popinac
$T_{ult}=106.9xD^{-1.2}$ $R^2 = 0.58$	$T_{ult}=23.61xD^{-0.407}$ $R^2 = 0.53$	$T_{ult}=41.17xD^{-0.89}$ $R^2 = 0.91$	$T_{ult}=43.90xD^{-0.534}$ $R^2 = 0.58$	$T_{ult}=32.55xD^{-0.75}$ $R^2 = 0.67$

Ehsan Abdi and other [5] ได้ทำการวิจัยหาค่าแรงดึงของรากพืชที่ราบเชิงเขาจำนวน 59 รากซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.30 – 5.00 มิลลิเมตร และที่ลาดเชิงเขาจำนวน 62 รากซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.30 – 4.40 มิลลิเมตร พบว่าค่าแรงดึงที่เพิ่มขึ้นจะแปรผันตรงกับเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีขนาดเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 2.5



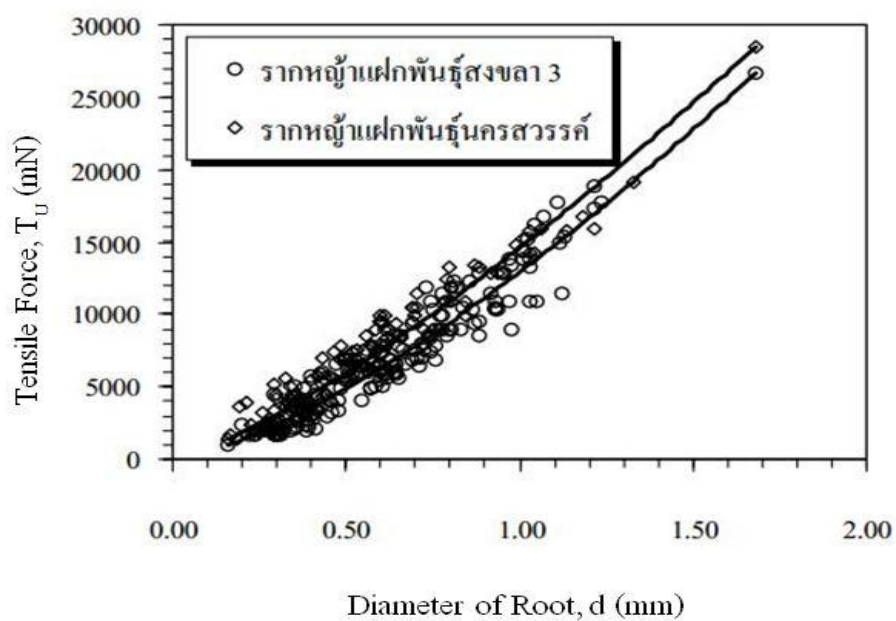
ภาพที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรากพืชที่ราบเชิงเขา (○) และรากพืชที่ลาดเชิงเขา (●) [5]

Chia-Cheng Fan and Chih-Feng Su [6] ได้ทำการวิจัยโดยการทดสอบรากของต้น Prickly Sesban ซึ่งใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.50 – 4.50 มิลลิเมตร และความยาวราก 20 เซนติเมตร มาทำการทดสอบแรงดึง พบว่า ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแปรผันตรงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีขนาดเล็กลง ดังภาพที่ 2.6



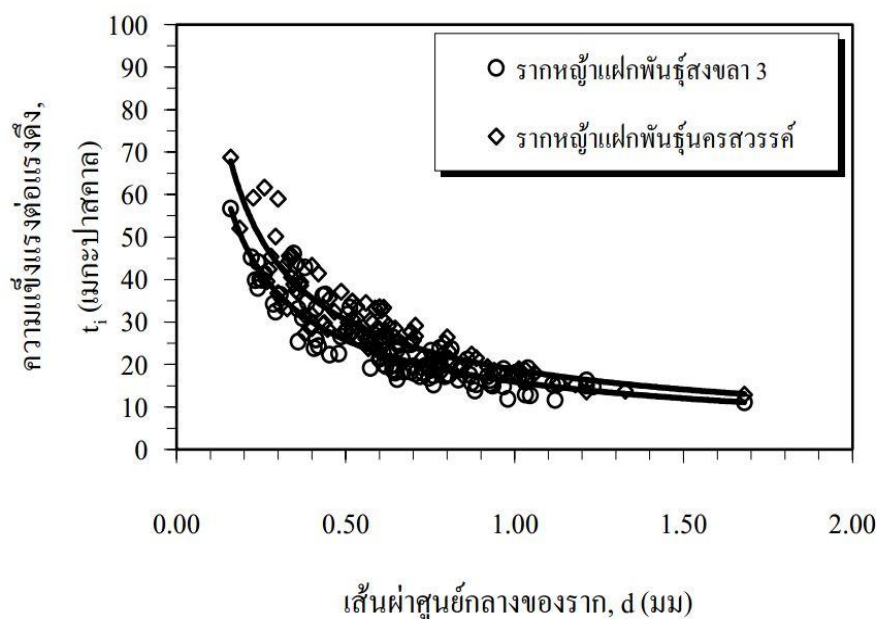
ภาพที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรากต้น Prickly Sesban [6]

พานิช วุฒิพฤษย์และจาดุรงค์ เสาวภาคย์ไพบูลย์ [7] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของดินทรายตะกอนที่เสริมรากหญ้าแฝกกลุ่มพันธุ์สงขลา 3 และ รากหญ้าแฝกดอนกลุ่มพันธุ์นครสวรรค์สำหรับงานป้องกันลาดคันดิน ผลการทดสอบ พบว่า ค่าแรงดึงของรากหญ้าแฝกทั้งสองจะแปรผันตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังภาพที่ 2.7



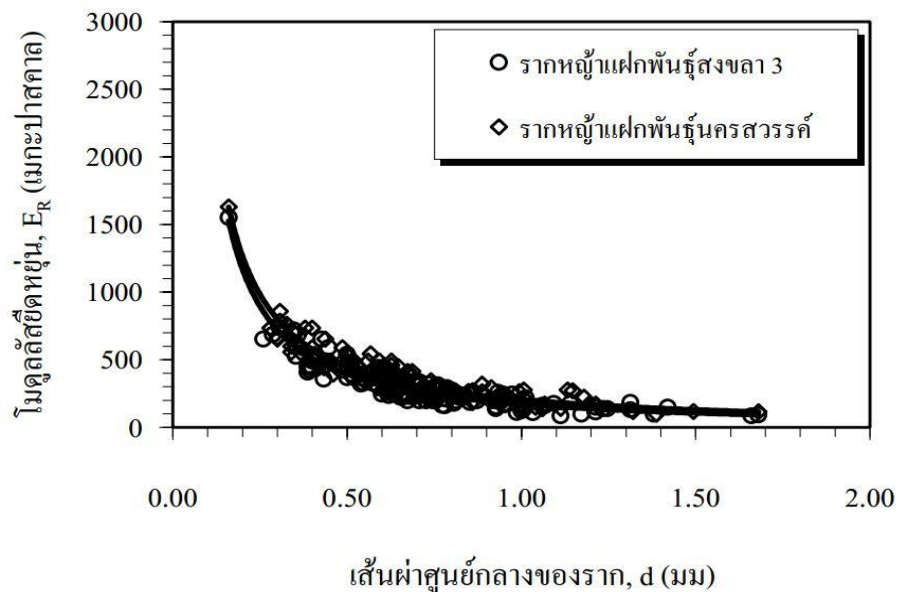
ภาพที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก [7]

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการเส้นถดถอย หาความสัมพันธ์ของแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากหญ้าแฝกลุ่มกลุ่มพันธุ์สงขลา 3 และ รากหญ้าแฝกดอนกลุ่มพันธุ์นครสวรรค์ ในรูปแบบสมการเลขยกกำลัง คือ $T_U = 12912.433d^{1.399}$, $R^2 = 0.887$ และ $T_U = 14583.606d^{1.291}$, $R^2 = 0.887$ ตามลำดับ ส่วนผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงต่อการรับแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก พบว่า ค่าความแข็งแรงต่อการรับแรงดึงของรากจะแปรผันตรงตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีขนาดเล็กลง ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงต่อแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก [7]

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการเส้นถดถอย หาความสัมพันธ์ความแข็งแรงต่อแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ของรากหญ้าแฝกลุ่มกลุ่มพันธุ์สงขลา 3 และ รากหญ้าแฝกดอนกลุ่มพันธุ์นครสวรรค์ ในรูปแบบสมการเลขยกกำลัง คือ $t_t = 15.938d^{-0.692}$, $R^2 = 0.828$ และ $t_t = 18.774d^{-0.701}$, $R^2 = 0.846$ ตามลำดับ ส่วนผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก พบว่า ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะแปรผันตรงตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีขนาดเล็กลง ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก [7]

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการเส้นถดถอย หาความสัมพันธ์ความแข็งแรงดึง กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากหญ้าแฝกกลุ่มพันธุ์สงขลา 3 และ รากหญ้าแฝกคองกลุ่มพันธุ์นครสวรรค์ ในรูปแบบสมการเลขยกกำลัง คือ $E_R = 171.559d^{-1.192}$, $R^2 = 0.843$ และ $E_R = 204.990d^{-1.131}$, $R^2 = 0.852$ ตามลำดับ

2.1.3 งานวิจัยของการทดสอบแรงเฉือนของรากพืช

แบบจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและราก

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและรากมีพื้นฐานมาจากสมการของ Coulomb โดยความสามารถต้านทานการเฉือนของดิน, S เกิดจากค่าความเฉือนแน่นและแรงเสียดทาน

$$S = c + \sigma_N \tan \phi \quad (2.1)$$

โดยที่ σ_N คือ ความเค้นตั้งฉากบนระนาบการเฉือน, ϕ คือ ค่ามุมเสียดทานภายในของดิน และ c คือ ค่าความเฉือนแน่นของดิน หลายสมมุติฐานถูกนำมาใช้ในการแก้ไขสมการที่ (2.1) สำหรับดินที่เสริมรากซึ่งมีดังต่อไปนี้

1. รากยึดตัวตามแนวค้ำยังลึกผ่านแนวการเฉือนตามแนวราบที่หนา z ซึ่งได้แสดงในภาพที่ 35 และความหนา z นี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเล่น
2. รากของชั้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน, d_i ซึ่งจะสามารถบดงอและยึดหยุ่นเชิงเส้นได้ด้วยค่าโมดูลัสของยึดหยุ่น E ซึ่งมีอยู่ในรากแต่ละเส้น
3. มุมเสียดทานของดิน, ϕ จะไม่มีผลกระทบต่อราก ดังนั้น สมการของคูลอมบ์สำหรับดินที่เสริมรากจะเป็น

$$S_R = c + \Delta S_R + \sigma_N \tan \phi \quad (2.2)$$

ซึ่งจากสมการที่ (2.2) จะมีความสอดคล้องกับการประเมินค่าความแข็งแรงเฉือนของดินที่เสริมรากที่ได้ทำการศึกษาโดย Wu [8] โดยมีค่าเท่ากับความแข็งแรงเฉือนของดินที่ไม่มีการเสริมรากบวกกับความแข็งแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นด้วยราก

Wu [8] ศึกษาการคาดคะเนความแข็งแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นด้วยรากมีค่าเท่ากับผลต่างของความแข็งแรงเฉือนของดินที่เสริมรากกับความแข็งแรงเฉือนของดินที่ไม่มีการเสริมด้วยราก ดังสมการ

$$\Delta S_R = S_R - S \quad (2.3)$$

เมื่อ

ΔS_R คือ ความแข็งแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นด้วยราก

S_R คือ ความแข็งแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยราก

S คือ ความแข็งแรงเฉือนของดินที่ไม่มีการเสริมราก

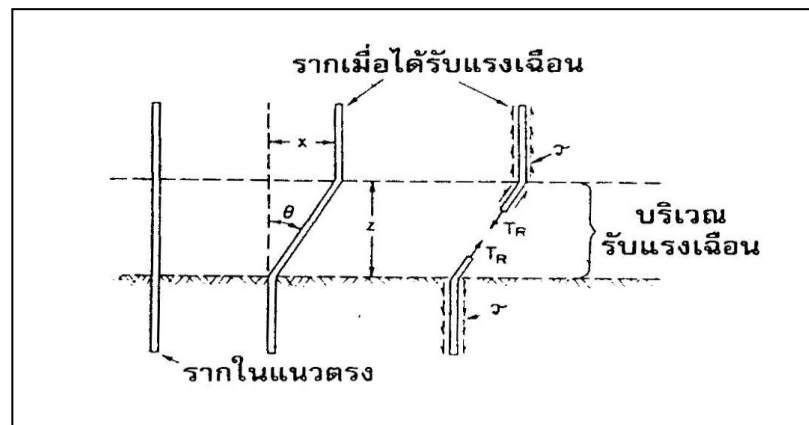
4. ความเครียดเนื่องจากแรงดึงในรากจะมีค่าน้อยมาก ดังนั้น ความยาวของรากที่ถูกกระทำเนื่องจากแรงดึงจะมีเท่ากับความยาวของรากที่ไม่ได้ถูกกระทำเนื่องจากแรงดึง
5. ดินกระทำต่อรากด้วยแรงดึงโดยความเค้นในแนวสัมผัส τ ที่พื้นผิวภายในดิน-ราก และความเค้นนี้มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ τ' เกิดขึ้นขณะที่การเลื่อนไถลที่จะเริ่มเกิดขึ้น
6. ค่าเคลื่อนตัวตามยาวทั้งหมดของดินมีความสัมพันธ์กับรากซึ่งประกอบด้วยความเครียดเนื่องจากแรงดึงแบบยึดหยุ่นและการเลื่อนไถลโดยทำให้เกิดค่าความเค้นแนวสัมผัสสูงสุดได้

สมมุติฐานทั้งหมดเหล่านี้ได้ใช้ในการพัฒนาแบบดั้งเดิม Waldron [9] ซึ่งได้ถูกดัดแปลงที่นี้เพื่อที่จะขยายแบบจำลองให้กว้างขวางไปยังแถบของชั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางราก

สำหรับรากทั้งหมดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงขนาดเดียว ความต้านทานแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นด้วยรากถูกแสดงให้เห็นก่อนหน้านี้ คือ Waldron [9]

$$\Delta S_R = a_r T_R \delta \quad (2.4)$$

โดยที่ $a_r = A_r/A_s$, A_s คือ พื้นที่หน้าตัดการเฉือนดินทั้งหมด และ A_r คือ พื้นที่หน้าตัดรากทั้งหมดที่ระนาบการเฉือน



ภาพที่ 2.10 แบบจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและรากพืช Wu [8]

$$\delta = (\sin\theta + \cos\theta \tan\phi)$$

ซึ่ง θ คือ มุมของการเอียงตัวจากแนวดิ่งของรากที่เกิดขึ้นโดยการเคลื่อนตัวแบบเฉือนตามแนวราบของดินที่เสริมราก (ดูภาพที่ 2.10) T_R เป็นค่าความเค้นดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นในการเคลื่อนตัวเนื่องจากการเฉือนใดๆ

รากในแบบจำลองจะตอบสนองต่อการให้น้ำหนักไปยังรากซึ่งอาจเกิดการยืดของราก การเลื่อนไถลของรากทั่วดินหรือการฉีกขาดของรากอย่างใดอย่างหนึ่ง

ชัชวาล ตั้งวัฒน์สุวรรณและคณะ [10] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของดินทรายที่เสริมรากหญ้าแฝกกลุ่มพันธุ์ราชบุรี เพื่อศึกษากำลังต้านทานแรงเฉือนโดยตรงของดินในสนาม และในห้องปฏิบัติการซึ่งเสริมกำลังด้วยรากหญ้าแฝกและไม่ได้เสริมกำลังด้วยรากหญ้าแฝก โดยพิจารณาผลกระทบเนื่องจากอายุของการปลูกต่างกัน และศึกษากำลังแรงดึงของรากหญ้าแฝก ซึ่งมีผลเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน โดยพิจารณาผลกระทบเนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากและอายุการปลูกจากการศึกษาพบว่า ปริมาตรรากหญ้าแฝกมีจำนวนเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูกทั้งในสนามและห้องปฏิบัติการ ค่าแรงดึงประลัยของรากจะแปรผันตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากดังสมการ $\sigma = 1.3895d^{0.965}$ ค่ากำลังรับแรงดึงของรากจะแปรผกผันกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากดังสมการ $t_r = 209.05d^{-1.7741}$ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะแปรผกผันกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากดังสมการ $E_r = 5187.6d^{-2.3448}$ และค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกในสนามและในห้องปฏิบัติการจะสูงกว่าดินที่ไม่ได้เสริมแรง โดยอยู่ในช่วงร้อยละ 28.21-102.34 และ 32.61-1042.55 ตามลำดับ

วราธร แก้วแสงและคณะ [11] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของดินเหนียวเสริมรากหญ้าแฝกดอน กลุ่มพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ เพื่อศึกษากำลังต้านทานของแรงเฉือนโดยตรงของดินในสนามและห้องปฏิบัติการของดินซึ่งเสริมกำลังด้วยรากหญ้าแฝกและไม่ได้เสริมกำลังด้วยรากหญ้าแฝก โดยพิจารณาผลกระทบเนื่องจากปัจจัยของอายุของการปลูกต่างกัน และศึกษากำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝกซึ่งมีผลต่อการเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน โดยพิจารณาผลกระทบเนื่องจากปัจจัยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากและอายุของการปลูก จากผลการศึกษาพบว่าค่ากำลังรับแรงดึงจะแปรผกผันกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากดังสมการ $t = 1671.3d^{-1.0197}$ และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะแปรผกผันกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากเช่นเดียวกันดังสมการ $E_r = 115.41d^{-1.498}$ ส่วนค่าแรงดึงประลัยจะแปรผันตามกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากดังสมการ $\sigma = 359.09e^{1.2327d}$ และค่ากำลังต้านทานของแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกในห้องปฏิบัติการและในสนามมีแนวโน้มสูงขึ้นกว่าดินที่ไม่ได้เสริมแรงอยู่ในช่วงร้อยละ 19.47-599.49 และ 7.55-182.27 ตามลำดับ

วิชัย สัตว์รพทานสกุลและคณะ [12] ได้ศึกษาเปรียบเทียบผลการวิจัยการเสริมกำลังของดินโดยใช้รากพืชชนิดต่างๆ ในประเทศไทยโดยมุ่งเน้นการใช้รากหญ้าแฝกเป็นวัสดุเสริม การวิจัยดำเนินการโดยใช้หญ้าแฝกดอนกลุ่มพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์จากต้นกล้าอายุ 20 เซนติเมตร และมีรากยาว 10 เซนติเมตร กำหนดให้ระยะในการปลูกระหว่างแถวห่างกัน 10 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างต้น 10 เซนติเมตร ในห้องปฏิบัติการทำการปลูกหญ้าแฝกในท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร จากนั้นทำการทดสอบความสามารถในการรับแรงดึงของรากหญ้าแฝก

กำลังต้านทานแรงเฉือนโดยตรงทั้งในสนามและห้องปฏิบัติการ ทั้งกรณีของดินที่เสริมกำลังด้วยรากหญ้าแฝกและดินที่ไม่ได้เสริมแรง โดยพิจารณาผลกระทบเนื่องจากปัจจัยของอายุการปลูกเป็นหลัก จากผลการทดสอบในช่วงต้นพบว่า กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเสริมกำลังด้วยรากหญ้าแฝกในสนามและห้องปฏิบัติการมีแนวโน้มสูงขึ้นกว่าดินธรรมดาประมาณ 24 เปอร์เซ็นต์และ 43 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับนอกจากนี้ยังพบว่าความสามารถในการรับแรงดึงของรากหญ้าแฝกแปรผันตรงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก

Manbeian, T. [13] ได้ทำการศึกษาถึงผลลัพธ์ของการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงในห้องปฏิบัติการโดยเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างดินที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยรากพืชและตัวอย่างดินที่เสริมแรงด้วยรากพืช พบว่า ค่าความความแข็งแรงเฉือนของดินที่เสริมรากพืช ให้ค่ากำลังสูงกว่าดินที่ไม่ได้เสริมแรงโดยรากพืชอย่างเด่นชัด

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 หญ้าแฝก (Vetiver grass)

[14] หญ้าแฝก เป็นพืชตระกูลหญ้าที่มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว แตกกอแน่นตั้งตรง มีรากฝอยที่ยาว แข็งแรง ยึดสานกันแน่นรากหญ้าแฝกจะหยั่งลึก ลงไปในแนวดิ่ง ได้ถึงประมาณ 3 เมตร แล้วแต่สภาพดินและแนวนอนกว้างประมาณ 0.5 เมตร จึงไม่รบกวนรากของพืชอื่นที่ปลูกข้างเคียง รากของหญ้าแฝกเปรียบเสมือนกำแพงใต้ดิน ซึ่งจะทำหน้าที่เกาะยึดดิน สงวนน้ำในดิน กรอง และดูดซับธาตุอาหารและสารเคมี ลดมลพิษต่อ สภาพแวดล้อม และเป็นแหล่งของอินทรีย์วัตถุอย่างดี ส่วนลำต้นของหญ้าแฝกเมื่อปลูกชิดติดกันเป็นแถวตามแนวระดับในพื้นที่ลาดชัน และไหลถล่มจะทำให้เปรียบเสมือนแนวรั้วช่วยในการกักเก็บตะกอนดิน กรองเศษซากพืช และปล่อยให้น้ำส่วนหนึ่งไหลผ่านไปได้ ซึ่งจะช่วยลดการชะล้างพังทลายของดิน และเก็บรักษาความชื้นในดิน ดังนั้น การนำหญ้าแฝกไปปลูกในพื้นที่ต่างๆ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้ในแง่ภูมิ

หญ้าแฝกที่พบในประเทศไทยจำแนกได้ 2 ชนิดด้วยกันคือ

1) หญ้าแฝกดอน (Vetiveria nemoralis) แบ่งตามกลุ่มพันธุ์ดังนี้

- กลุ่มพันธุ์เลย เจริญเติบโตดีในสภาพพื้นที่เป็นดินร่วนเหนียว แตกกอ 26 ต้นต่อกอ เส้นผ่านศูนย์กลางกอ 13 เซนติเมตร สูง 108 เซนติเมตร การแตกกอแน่นตั้งตรง ใบสีเขียว กาบใบสีชมพู ดอกสีม่วง เริ่มออกดอกอายุประมาณ 1 เดือนหลังจากปลูก



ภาพที่ 2.11 หญ้าแฝกดอนกลุ่มพันธุ์เลียบ [14]

- กลุ่มพันธุ์นครสวรรค์ เจริญเติบโตในสภาพพื้นที่เป็นดินทรายร่วนเหนียว แดกกอ 35 ต้นต่อกอ เส้นผ่านศูนย์กลางกอ 12 เซนติเมตร สูง 89 เซนติเมตร การแตกกอแน่นแต่กางออกเป็น ทรงพุ่มเตี้ย ใบสีเขียวเข้ม ดอกสีม่วง เริ่มออกดอกเมื่ออายุประมาณครึ่งเดือนหลังจากปลูก



ภาพที่ 2.12 หญ้าแฝกดอนกลุ่มพันธุ์นครสวรรค์ [14]

- กลุ่มพันธุ์กำแพงเพชร 1 เจริญเติบโตดีในสภาพพื้นที่เป็นดินทรายถึงดินร่วนเหนียว แดกกอ 34 ต้นต่อกอ เส้นผ่านศูนย์กลางกอ 12 เซนติเมตร สูง 106 เซนติเมตร แดกกอแน่นตั้งตรง ใบสีเขียวหนา กาบใบสีฟ้าขาวดอกสีม่วงเริ่มออกดอกเมื่ออายุประมาณครึ่งเดือนหลังจากปลูก



ภาพที่ 2.13 หญ้าแฝกคอนกลุ่มพันธุ์กำแพงเพชร 1 [14]

- กลุ่มพันธุ์ร้อยเอ็ด เจริญเติบโตดีในสภาพพื้นที่เป็นดินทราย แดกกอ 26 ต้นต่อกอ เส้นผ่านศูนย์กลางกอ 7 เซนติเมตร สูง 70 เซนติเมตร แดกกอแน่นตั้งตรง ใบสีเขียว ดอกสีน้ำตาล เริ่มออกดอกเมื่ออายุประมาณครึ่งเดือนหลังจากปลูก



ภาพที่ 2.14 หญ้าแฝกคอนกลุ่มพันธุ์ร้อยเอ็ด [14]

- กลุ่มพันธุ์ราชบุรี เจริญเติบโตดีในสภาพพื้นที่เป็นดินทรายถึงดินร่วนเหนียว แดกกอ 32 ต้นต่อกอ เส้นผ่านศูนย์กลางกอ 12 เซนติเมตร สูง 110 เซนติเมตร แดกกอแน่นตั้งตรง ใบสีเขียวอ่อน กาบใบสีน้ำตาลเริ่มออกดอกเมื่ออายุ ประมาณ 1 เดือนหลังจากปลูก เป็นสายพันธุ์ที่ให้ น้ำหนักสดดี



ภาพที่ 2.15 หญ้าแฝกคอนกลุ่มพันธุ์ราชบุรี [14]

- กลุ่มพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ เจริญเติบโตดีในสภาพพื้นที่เป็นดินร่วนเหนียว และ ดุกรัง แดกกอ 26 ต้นต่อกอ เส้นผ่านศูนย์กลางกอ 14 เซนติเมตร สูง 112 เซนติเมตร แดกกอแน่น หน่อ ใหญ่ ตั้งตรง ใบหนาสีเขียวเข้ม ร่องโคนใบขาว กาบใบสีขาวนวล ออกดอกช้าบางแห่งใน 2 ปีแรก ยังไม่ออกดอกหรือมี เปอร์เซ็นต์ออกดอกน้อย ดอกสีม่วงช่อดอกเล็ก



ภาพที่ 2.16 หญ้าแฝกคอนกลุ่มพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ [14]

2) หญ้าแฝกกลุ่ม (Vetiveria zizanioides) แบ่งตามกลุ่มพันธุ์ดังนี้

- กลุ่มพันธุ์ศรีลังกา เจริญเติบโตดีในสภาพพื้นที่ดอน เป็นดินลูกรังอากาศหนาวเย็น มีร่มเงา แดกกอ 10 ต้นต่อกอ เส้นผ่านศูนย์กลางกอ 11 เซนติเมตร สูง 101 เซนติเมตร แดกกอค่อนข้างกลม หน่อกลม ยึดปล้องเร็ว โคนกอเล็ก ใบแก่ค่อนข้างเล็กท้องใบสีขาวนวลใกล้เคียง ไปทางด้านใบหญ้าแฝกดอน ดอกมีสีม่วง เริ่มออกดอกเมื่ออายุประมาณ 1 เดือน หลังจากปลูก ขยายพันธุ์ง่ายสภาพที่มีความชื้นสูง แสงน้อย จะไม่ต้านทานโรคโคนเน่า



ภาพที่ 2.17 หญ้าแฝกกลุ่มพันธุ์ศรีลังกา [14]

- กลุ่มพันธุ์กำแพงเพชร 2 เจริญเติบโตดีในสภาพพื้นที่เป็นดินทรายถึงดินลูกรัง แดกกอ 18 ต้นต่อกอ เส้นผ่านศูนย์กลางกอ 8 เซนติเมตร สูง 94 เซนติเมตร แดกกอค่อนข้างกลม หน่อกลม ค่อนข้างเล็ก ยึดปล้องเร็ว ทรงพุ่มกางใบสีเขียวเข้ม ท้องใบสีขาว ดอกสีม่วงแดงออกดอก เมื่ออายุ ประมาณครึ่งเดือน หลังจากปลูก ต้นโตปล้องไม่ตรงให้น้ำหนักสดสูง ให้คุณค่าทางอาหารสัตว์ดีกว่าสายพันธุ์อื่นๆ



ภาพที่ 2.18 หญ้าแฝกกลุ่มกลุ่มพันธุ์กำแพงเพชร 2 [14]

- กลุ่มพันธุ์สุราษฎร์ธานี เจริญเติบโตในสภาพพื้นที่เป็นดินร่วนเหนียวและดินลูกรัง แดกกอ 22 ต้นต่อกอ เส้นผ่านศูนย์กลางกอ 13 เซนติเมตร สูง 108 เซนติเมตร แดกกอหลวม หน่อกลมอวบ ยึดปล้องเร็ว ทรงพุ่มกางออกมา ใบสีเขียวอ่อน ท้องใบขาว ดอกสีม่วงแดง ออกดอกเมื่ออายุประมาณ 1 เดือน หลังจากปลูก



ภาพที่ 2.19 หญ้าแฝกกลุ่มกลุ่มพันธุ์สุราษฎร์ธานี [14]

- กลุ่มพันธุ์สงขลา 3 เจริญเติบโตดีในสภาพพื้นที่เป็นดินร่วนเหนียวถึงดินลูกรัง แดกกอ 24 ต้นต่อกอ เส้นผ่านศูนย์กลางกอ 13 เซนติเมตร สูง 112 เซนติเมตร แดกกอหลวม หน่อกลมอวบยืด ปล้องเร็ว ใบสีเขียวอ่อน ท้องใบสีขาว ดอกสีม่วงแดง ออกดอกเมื่ออายุ ประมาณ 1 เดือนครึ่ง หลังจากปลูก



ภาพที่ 2.20 หญ้าแฝกกลุ่มพันธุ์สงขลา 3 [14]

2.2.2 หญ้ารูซี่

1) ถิ่นกำเนิดและการกระจาย (Origin and distribution)

กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ [15] หญ้ารูซี่ (*Brachiaria ruziziensis*) เป็นหญ้าเขตร้อน ประเภทค้ำปี มีลักษณะการเจริญเติบโต แบบกึ่งตั้งกึ่งเลื้อย สูง 60-100 เซนติเมตร ลำต้นกลม แข็งเรียวยาวเล็ก ไม่มีขน มีรากซึ่งแตกแขนงบริเวณโคนต้น ใบสีเขียวอ่อน อ่อนนุ่ม มีขนละเอียดคลุมทั้งด้านหน้าและหลังใบ ใบยาว 13-15 เซนติเมตร กว้าง 0.8-2.5 เซนติเมตร เจริญเติบโตได้ดีในบริเวณที่ดอนที่มีฝนตกมากกว่า 1,000 มิลลิเมตร และในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ แต่ก็สามารถขึ้นได้ในดินอุดมสมบูรณ์ต่ำ โดยเฉพาะในดินร่วนปนทราย หรือดินเหนียวที่มีการระบายน้ำดีทนแล้งพอสมควร ไม่ทนต่อสภาพชื้นแฉะ และทนต่อการเหยียบย่ำของสัตว์ มีคุณค่าทางอาหารสัตว์สูง สัตว์ชอบกิน ลักษณะเด่นของหญ้ารูซี่ คือ สามารถผลิตเมล็ดได้มาก และเมล็ดมีความงอกสูงทำให้สะดวกต่อการขยายพันธุ์ เป็นผลให้เกษตรกรผู้เลี้ยงสัตว์ปลูกหญ้ารูซี่อย่างแพร่หลายทั่วประเทศ

2) ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

- ราก (Roots) หญ้ามีรากเป็นระบบรากฝอย (fibrous root system) ประกอบด้วยรากขนาดเล็กเท่า ๆ กันมากมาย เกิดที่บริเวณข้อของลำต้นที่อยู่ใต้ดินหรือใกล้ผิวดิน มีการสานกันแน่นเป็นแผ่น เมื่อเมล็ดเริ่มงอกจะมีรากอันแรกเจริญจากส่วนรากแรกเกิด (radicle) ของต้นอ่อนของเมล็ดเรียกว่า primary root ส่วนรากแขนง (seminal roots) เกิดบริเวณข้อที่ใบเลี้ยงติดอยู่ (scutellar node) ประมาณ 6-7 ราก รากชุดนี้เป็นรากชั่วคราวซึ่งใช้สำหรับการตั้งตัวของพืชในระยะแรก ส่วนรากถาวรชุดแรกเกิดที่ข้อถัดขึ้นไปที่มีกาบหุ้มยอดอ่อน (coleoptile) ติดอยู่ซึ่งเรียกข้อนี้ว่า coleoptilar node รากถาวรชุดอื่น ๆ จะเกิดที่ข้อที่อยู่ใกล้ผิวดิน รวมทั้งบริเวณข้อของลำต้นที่เลื้อยไปตามผิวดินและใต้ดินเรียกรากเหล่านี้ว่ารากพิเศษ (adventitious roots) [15]

- ลำต้น (Shoot)



ภาพที่ 2.20 ลักษณะต้นหญ้าธัญ [15]

ลำต้นหญ้าเจริญมาจากส่วนของยอดอ่อน (plumule) ในเมล็ด ลำต้นแรกที่ยกขึ้นมานี้เรียกว่า main stem ต้นหญ้าสามารถแตกหน่อหรือแขนง (tillers) ได้มากมายและรวดเร็ว จากข้อล่าง ๆ ของลำต้นทำให้มีลักษณะเป็นกอ ลำต้นหญ้ามักมีลักษณะกลมหรือค่อนข้างแบนแบ่งเป็นข้อและปล้อง (node and internode) ให้เห็นชัดเจน ส่วนของปล้องมักมีลักษณะเป็นรูกลวง

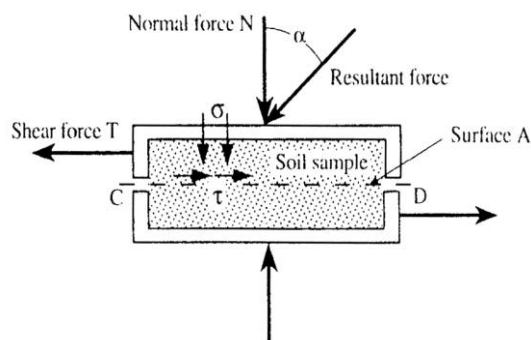
ภายในและต้นในส่วนของข้อ ปล้องบริเวณโคนต้นจะสั้น ส่วนยอดจะยืดยาวออก โดยเฉพาะเมื่อหญ้าจะออกดอก ที่ข้อทุกข้อมีตาราก ตายอดและตาใบอยู่ ซึ่งทั้งตารากและตายอดนี้พร้อมที่จะเจริญได้ทันทีเมื่อมีสภาพการณ์เหมาะสม จึงทำให้หญ้าขยายพันธุ์โดยใช้ท่อนพันธุ์ได้ [15]

2.2.3 หลักของการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง

การทดสอบการเฉือนโดยตรงถูกนำมาใช้เพื่อที่จะหาค่าความแข็งแรงแรงเฉือนของดินบนพื้นที่ผิวที่พบได้ หลักการของการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง ถูกแสดงในภาพที่ 6 ตัวอย่างดินถูกจำกัดให้อยู่ภายในกล่องที่มีความแข็งแรงซึ่งแบ่งออกเป็นส่วบนและส่วนล่างถูกกระทำด้วย น้ำหนักตั้งฉาก N และถูกเฉือนโดยแรงเฉือน T ถ้า A เป็นพื้นที่ของพื้นที่ผิว CD ความเค้นเฉือนที่กระทำบนผิว CD จะเท่ากับ T/A และความเค้นตั้งฉากจะมีค่าเท่ากับ N/A ความแข็งแรงแรงเฉือนของดินคือความเค้นเฉือน τ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ดินเกิดการเลื่อนบนพื้นที่ผิว CD ซึ่งสามารถนิยามได้โดยทฤษฎีของ มอร์ – คูลอมบ์

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2.5)$$

ที่ซึ่ง c เป็นค่าเชื่อมแน่น และ ϕ เป็นค่ามุมเสียดทาน



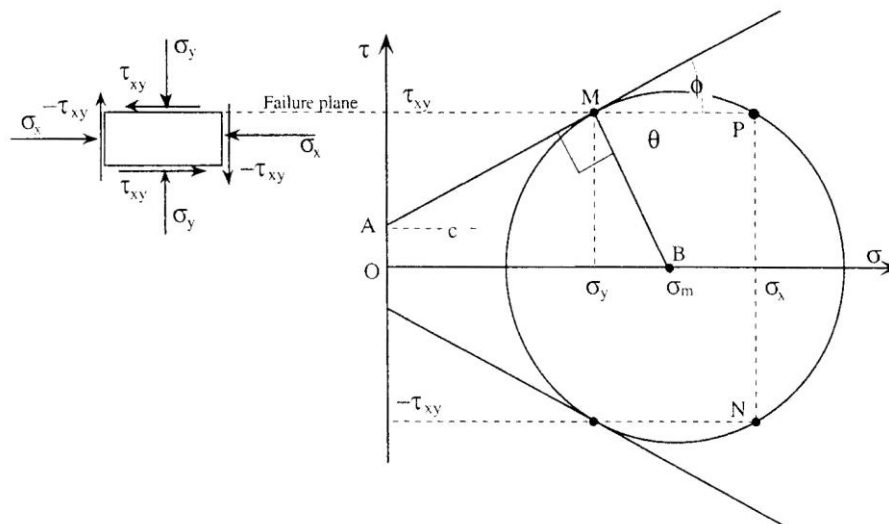
ภาพที่ 2.21 ตัวอย่างดินในกล่องการเฉือนโดยตรง Bardet [16]

2.2.4 ความเค้นในการทดสอบการเฉือนโดยตรง (Shear in Direction Shear Test)

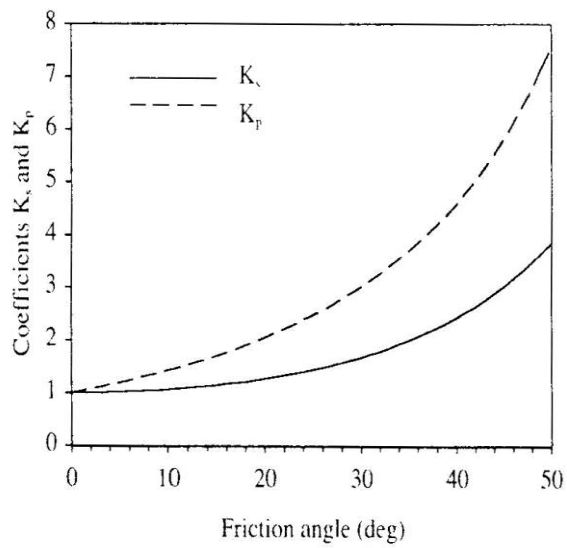
วงกลมมอร์ถูกเขียนขึ้นที่สภาพการพิบัติของตัวอย่างดิน ซึ่งถูกสมมุติว่าระนาบการพิบัติอยู่ในแนวราบและความเค้นมีค่าสม่ำเสมอ ซึ่งได้แสดงในภาพที่ 2.22 พิกัด M แสดงค่าความเค้นบนพื้นผิวแนวราบ และพิกัด N แสดงค่าความเค้นบนระนาบในแนวตั้ง พิกัดเชิงขั้ว P อยู่บนเส้นในแนวราบเดียวกันกับพิกัด M เมื่อระนาบการพิบัติอยู่ในแนวราบ วงกลมมอร์ที่สภาพการพิบัติได้สัมผัสกับเส้น AM และจุดศูนย์กลางของวงกลม, B ถูกกำหนดให้มีรัศมียาวเส้น MB ที่ตั้งฉากเส้น AM ดังนั้นความเค้นตั้งฉาก σ_y และ σ_x ที่กระทำบนพื้นผิวแนวราบและแนวตั้งตามลำดับจะมีค่าเป็น

$$\sigma_x = 2c \tan \phi + K_s \sigma_y \text{ และ } K_s = 1 + 2 \tan^2 \phi \quad (2.6)$$

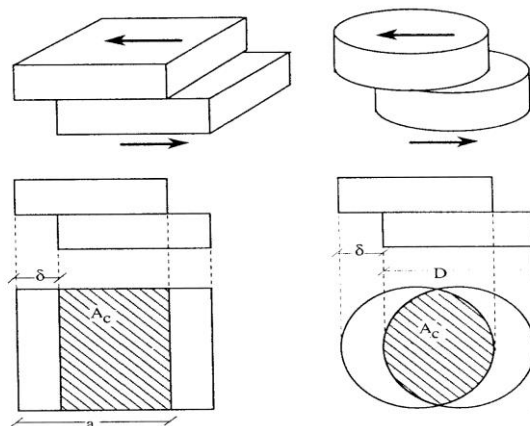
ซึ่งแสดงในภาพที่ 2.23 K_s มีค่ามากกว่า 1 ตามค่า ϕ ที่เพิ่มขึ้น แต่ยังคงมีค่าน้อยกว่า สัมประสิทธิ์ K_p ของทฤษฎีใน Rankine สำหรับความดันดิน ($K_p = (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi)$)



ภาพที่ 2.22 สภาวะความเค้นที่พิบัติในการทดสอบการเฉือนตรงด้วยวงกลมมอร์ Bardet [16]



ภาพที่ 2.23 การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ K_s และ K_p กับมุมความเสียดทาน Bardet [16]



ภาพที่ 2.24 พื้นที่การเฉือนที่ปรับแก้ Bardet [16]

ซึ่งได้แสดงในภาพที่ 2.24 พื้นที่สัมผัสระหว่างครึ่งตัวอย่างทั้งสองเปลี่ยนแปลงตามการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ δ ระหว่างกล่องที่อยู่ต่ำกว่าและสูงกว่า พื้นที่ที่ถูกตัด A_c ของตัวอย่างที่ทำการเฉือนสำหรับกล่องจตุรัสยาว a

$$A_c = a(a - \delta) \quad (2.7)$$

และสำหรับกล่องทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน D

$$A_c = D^2/2 (\theta - \delta/D \sin \theta) \quad (2.8)$$

ที่ซึ่ง $\theta = \cos^{-1}(\delta/D)$ ในหน่วยเรเดียน

ความเค้นเฉือน τ และความเค้นดึงจาก σ บนพื้นผิวแนวราบ ถูกคำนวณมาจากพื้นที่ที่ถูกตัด A_c แรงทางด้านข้างที่วัดค่าได้ T และ แรงดึงจาก N :

$$\tau = T/A_c \text{ และ } \sigma = N/A_c \quad (2.9)$$

ความคลาดเคลื่อนที่มีต่อค่าความเค้นจากความคลาดเคลื่อนบนพื้นที่สัมผัสนั้น คือกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัส ($A = a^2$)

$$\Delta A/A = (A - A_c) = \delta/a$$

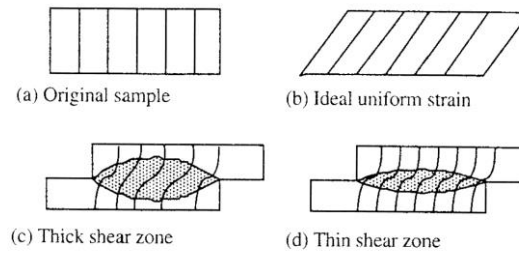
และสำหรับกล่องทรงกระบอก ($A = \pi D^2/4$)

$$\Delta A/A = (A - A_c)/A = 1 - (2\theta/\pi) + (2\delta/\pi D)\sin\theta$$

สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางตัวอย่างต้นแบบ $D = 6.3$ ซม. , ความคลาดเคลื่อนต่อความเค้นเฉือนและความเค้นดึงจาก อาจจะมีถึง 20% เมื่อ $\delta = 1$ ซม.

ความเครียดในการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Strain in Direction Shear Test) ในการทดสอบการเฉือนโดยตรง, ปฏิบัติการของวัสดุถูกรายงานเทียบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนแทนด้วยความเครียดเฉือน เพราะมันเป็นไปได้ที่จะหาค่าความเครียดเฉือน ดังนั้น การทดสอบแรงเฉือนโดยตรงจะไม่เหมาะสมสำหรับการศึกษาความสัมพันธ์ความเค้น- ความเครียดของดิน

ภาพที่ 2.25 a แสดงถึงตัวอย่างในสภาวะก่อนถูกการเฉือนในการทดสอบการเฉือนตรงเส้นแนวตั้งในภาพที่ 2.25 แสดงถึงตำแหน่งเริ่มต้น และตำแหน่งที่ผิดรูปไปของมวลเม็ดดิน ซึ่งถูกทำเครื่องหมายไว้เพื่อที่จะให้เห็นเด่นจากสภาพหยุดนิ่งของตัวอย่าง ถ้าความเครียดเฉือนมีค่าคงที่ ตัวอย่างที่ถูกเฉือนจะเกิดการเอียงอย่างสม่ำเสมอดังในภาพที่ 2.25 b อย่างไรก็ตามภาพที่ 2.25 c และ 2.25 d การเสียรูปถูกรวมอยู่ภายในบริเวณการเฉือนที่หนาหรือบาง หน้าสัมผัสภายในระหว่างบล็อก ส่วนบนและส่วนล่างดินจะบีบอัดที่ขอบของบล็อกก่อนที่ดินจะบีบอัดที่ตำแหน่งศูนย์กลางของตัวอย่าง



- a.) ตัวอย่างของภาพเริ่มแรก b.) ความเครียดที่สม่ำเสมอในอุดมคติ
c.) บริเวณการเฉือนที่หนา d.) บริเวณการเฉือนที่บาง

ภาพที่ 2.25 การเคลื่อนตัวเชิงอุดมคติและแบบสังเกตในการทดสอบการเฉือนโดยตรง Lambe [17]

2.2.5 กฎของฮุก (Hooke's law)

[17] กฎของฮุก กล่าวว่าไว้ว่า “ในช่วงของอีลาสติก (elastic) ความเค้นจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความเครียดนั้น”

ค่าคงที่มีสัญลักษณ์ว่า E ซึ่งเรียกว่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) หรือโมดูลัสของยัง (young's modulus) มีหน่วยเหมือนกับความเค้นคือปาสคาล เขียนแทนในสมการ ได้ดังนี้

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.10)$$

เมื่อ $\sigma = AF$ และ $\epsilon = L\delta$ แทนในสมการ (2.10) จะได้

$$E = \frac{AF}{L\delta} \quad (2.11)$$

ในทำนองเดียวกันความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับความเครียดเฉือนในช่วงของ พืดจำกัดยืดหยุ่นเขียนได้ดังนี้

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2.12)$$

เมื่อ G = โมดูลัสของความเค้น (modulus of rigidity) มีหน่วยเป็น นิวตันต่อตารางเมตร

τ = ความเค้นเฉือน มีหน่วยเป็น นิวตันต่อตารางเมตร

γ = ความเครียดเฉือน มีหน่วยเป็น เรเดียน

2.2.6 สัมประสิทธิ์ของตัวกำหนด (Coefficient of determination, R^2)

ทัศนีย์ ชังเทศ และสมภพ ถาวรยิ่ง [18] การวัดอัตราส่วนระหว่างผลกำลังสองของการกระจายที่อธิบายได้กับผลรวมกำลังสองของการกระจายทั้งหมด ซึ่งเรียกว่าสัมประสิทธิ์ของตัวกำหนด (Coefficient of determination) (R^2) นั่นคือ

1) สูตรสุทธหา R^2 ดังนี้

$$\sum (y_i - \bar{y})^2 = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2.13)$$

$$\text{หรือ} \quad SSY = SSR + SSE \quad (2.14)$$

ซึ่ง y เป็นค่าที่ได้จากข้อมูล

$\hat{y}$ เป็นค่าที่ได้จากสมการถดถอย

$\bar{y}$ เป็นค่าเฉลี่ยของ y

จากสมการ (2.15) สมการจะได้ว่า

$$1 = \frac{SSR}{SSY} + \frac{SSE}{SSY} \quad (2.15)$$

$$\text{ซึ่ง} \quad R^2 = \frac{SSR}{SSY} \quad (2.16)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad R^2 = 1 - \frac{SSE}{SSY} \quad (2.17)$$

2) คุณสมบัติของ R^2

- R^2 มีค่าเป็นบวกเสมอ
- R^2 มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 หรือมีค่าตั้งแต่ 0% ถึง 100%
นั่นคือ $0 \leq R^2 \leq 1$ หรือ $0\% \leq R^2 \leq 100\%$

3) ประโยชน์ของ R^2

- R^2 เป็นเครื่องวัดความใกล้ชิดระหว่างเส้นการถดถอยกับค่า Y บนแผนภาพการกระจายหมายความว่า ถ้า
 - ก) $R^2 = 1$ ค่า Y จะอยู่บนเส้นถดถอยทุกจุด
 - ข) R^2 มีค่ามาก Y จะอยู่ใกล้ชิดกับเส้นการถดถอย
 - ค) R^2 มีค่าน้อย Y จะอยู่ห่างจากเส้นการถดถอย
 - ง) R^2 มีค่าเท่ากับศูนย์ Y จะกระจายห่างกันกับเส้นการถดถอยมาก จนหาแนวโน้มที่ถูกต้องไม่ได้
- R^2 เป็นเครื่องวัดความเหมาะสมของเส้นการถดถอยว่า จะแสดงแนวโน้มของข้อมูลบนแผนภาพการกระจาย ได้มากน้อยเพียงใด เช่นกรณีทีศึกษถึงการถดถอยของข้อมูลบนเส้นตรง จะได้ว่า เมื่อ
 - ก) R^2 มีค่าใกล้เคียง 1 แสดงว่าแนวโน้มของข้อมูลจะเป็นลักษณะแนวเส้นตรงมากที่สุด
 - ข) R^2 มีค่าใกล้เคียง 0 แสดงว่าแนวโน้มของข้อมูลจะมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งอาจจะเป็นเส้นโค้งก็ได้
- ในทางปฏิบัติใช้ R^2 เป็นเครื่องแสดงอิทธิพลของตัวแปรอิสระ(X) ที่มีต่อตัวแปรตาม (Y) ทั้งนี้ เพราะว่าจากค่า R^2 ที่คำนวณได้จะบอกให้ทราบว่า การกระจายทั้งหมดของค่า Y นั้น สามารถอธิบายได้จากเส้นการถดถอยกี่เปอร์เซ็นต์ นั่นคือ อาจพูดได้อีกว่า R^2 นั้นเป็นค่าบอกให้เราทราบว่า การกระจายของค่า Y ทั้งหมดนั้นจะสามารถอธิบายได้จากค่า X ได้กี่เปอร์เซ็นต์ หรือ X มีอิทธิพลต่อ Y กี่เปอร์เซ็นต์ เมื่อ
 - ก) $R^2 = 0.5$ หมายความว่า สมการถดถอยนี้สามารถอธิบายการกระจายของ Y ได้ 50 เปอร์เซ็นต์ หรือ X มีอิทธิพลต่อ Y 50 เปอร์เซ็นต์
 - ข) $R^2 = 0.7958$ หมายความว่า สมการการถดถอยนี้ สามารถอธิบายการกระจายของ Y ได้ 79.58% หรือ X มีอิทธิพลต่อ Y 79.58% พึงจำได้ว่า การที่ X มีอิทธิพลต่อ Y 50% ก็ดี หรือ 79.58% ก็ดีนั้น เนื่องด้วยสมการการถดถอยที่

พิจารณานั้นมีตัวแปรอิสระ (X) เพียงตัวเดียว ซึ่งความจริงแล้วยังมีตัวแปรอิสระอื่นๆ อีกมากที่มีอิทธิพลต่อ Y ซึ่งไม่รู้ หรือไม่ได้นำมาพิจารณา ดังนั้น จากค่า $R^2 = 0.7958$ จะพบว่า X ที่กำลังพิจารณาอยู่เท่านั้นที่รู้ว่ามีอิทธิพลต่อ Y เท่ากับ $1 - 0.7958 = 0.2042$ หรือเท่ากับ 20.42%

2.2.7 การถดถอย (Regression)

ทรงศิริ แต่สมบัติ [19] การถดถอยเป็นวิธีการทางสถิติอย่างหนึ่งที่ใช้ในการตรวจหาหรือตรวจสอบลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลตั้งแต่ 2 ชุดขึ้นไป ซึ่งอาศัยความรู้ประสบการณ์ และการทดลองที่แล้่วมาเป็นหลัก โดยมีวัตถุประสงค์ว่า จะนำเอาลักษณะความสัมพันธ์อันนี้ไปใช้ให้เป็นประโยชน์ในอนาคต

รูปแบบการถดถอยแยกออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ รูปแบบการถดถอยเชิงเส้นตรง (linear regression model) และรูปแบบการถดถอยไม่เชิงเส้นตรง (nonlinear regression model) หลักการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นตรง คือใช้วิธีการกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้นตรง (ordinary least squares method) สำหรับรูปแบบการถดถอยไม่เชิงเส้นตรงที่แปลงเป็นรูปแบบการถดถอยเชิงเส้นตรงไม่ได้ ต้องใช้การวิเคราะห์การถดถอยที่ยุ่งยากขึ้นคือวิธีการกำลังสองน้อยที่สุดไม่เชิงเส้นตรง (nonlinear least method)

สุคม ลิปิเลิศ [20] ข้อมูลทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ ส่วนมากได้มาจากการทดลองซึ่งมีจำนวนข้อมูลที่มาบางครั้งข้อมูลบางส่วนที่ได้มาอาจมีความผิดพลาดไป บางครั้งการใช้การประมาณค่าในช่วงด้วยฟังก์ชันพหุนามนั้นอาจไม่เหมาะสม ซึ่งเส้นของฟังก์ชันจะแกว่งขึ้นลง ทำให้การประมาณค่าในช่วงระหว่างข้อมูลนั้นคลาดเคลื่อนไปจากข้อมูลเดิมมาก

สำหรับแนวทางในการสร้างฟังก์ชันที่เหมาะสมกับข้อมูลที่ได้มานั้นไม่จำเป็นที่เส้นของฟังก์ชันจะต้องผ่านจุดข้อมูล แต่ละเส้นของฟังก์ชันจะดูแนวโน้มของข้อมูลว่ามีลักษณะเช่นไร แล้วลากเส้นของฟังก์ชันให้เป็นไปตามลักษณะของข้อมูลนั้น ซึ่งเส้นของฟังก์ชันเป็นแบบเชิงเส้นตามลักษณะของข้อมูล โดยใช้การถดถอยแบบกำลังสองน้อยที่สุด

หากข้อมูลจะกระจายอยู่ในรูปแบบของสมการยกกำลัง (Power Equation), สมการเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential Equation) และสมการอัตราสู่จุดอิ่มตัว (Saturate – Growth Rate Equation) ซึ่งสมการทั้งสามรูปแบบนี้สามารถประยุกต์ให้อยู่ในรูปการถดถอยแบบเชิงเส้นได้ดังต่อไปนี้

1) สมการยกกำลัง (Power Equation)

ลักษณะของสมการแบบยกกำลังเขียนเป็นสมการดังนี้

$$y = ax^b \quad (2.18)$$

เมื่อ a และ b คือค่าคงที่ การประยุกต์การถดถอยแบบเชิงเส้นสำหรับข้อมูลลักษณะนี้ทำได้จากการใช้ลอการิทึมฐานสิบทั้งสองด้านของสมการ ดังนี้

$$\log y = \log a + b \log x \quad (2.19)$$

จากการแปลงข้อมูลที่มีการกระจายแบบสมการยกกำลังไปสู่รูปแบบเชิงเส้น ทำให้สามารถใช้การถดถอยแบบเชิงเส้นคำนวณหาค่า a_0 และ a_1 ได้ จากนั้นจึงแปลงค่ากลับเพื่อหาค่า a และ b ที่ต้องการได้ดังนี้

$$a_0 = \log a \rightarrow a = 10^{a_0} \quad (2.20)$$

$$b = a_1 \quad (2.21)$$

2) สมการเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential Equation)

ลักษณะของสมการแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล เขียนสมการได้ดังนี้

$$y = a e^{bx} \quad (2.22)$$

เมื่อ a และ b คือค่าคงที่ การประยุกต์การถดถอยแบบเชิงเส้นสำหรับข้อมูลลักษณะนี้ทำได้จากการใช้ลอการิทึมธรรมชาติ (Natural Logarithm) ทั้งสองด้านของสมการดังนี้

$$\ln y = \ln a + b x \quad (2.23)$$

จากการแปลงข้อมูลที่มีการกระจายแบบสมการเอ็กซ์โพเนนเชียลไปสู่รูปแบบเชิงเส้น ทำให้สามารถใช้การถดถอยแบบเชิงเส้นคำนวณหาค่า a_0 และ a_1 ได้ จากนั้นจึงแปลงค่ากลับเพื่อหาค่า a และ b ที่ต้องการได้ดังนี้

$$a_0 = \ln a \rightarrow a = e^{a_0} \quad (2.24)$$

$$b = a_1 \quad (2.25)$$

3) สมการอัตราเพิ่มสู่จุดอิ่มตัว (Saturate – Growth Rate Equation)
ลักษณะของสมการอัตราเพิ่มสู่จุดอิ่มตัว เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$y = a \frac{x}{b+x} \quad (2.26)$$

เมื่อ a และ b คือค่าคงที่ การประยุกต์การถดถอยแบบเชิงเส้น สำหรับข้อมูล
ลักษณะนี้ทำได้โดยการผกผันทั้งสองด้านของสมการดังนี้

$$\frac{1}{y} = \frac{b+x}{ax} \quad (2.27)$$

$$\therefore \frac{1}{y} = \frac{1}{a} + \frac{b}{a} \cdot \frac{1}{x} \quad (2.28)$$

จากการแปลงข้อมูลที่มีการกระจายแบบสมการอัตราเพิ่มสู่จุดอิ่มตัวไปสู่รูปแบบ
เชิงเส้น ทำให้สามารถใช้การถดถอยแบบเชิงเส้นคำนวณหาค่า a_0 และ a_1 ได้จากนั้นจึงแปลงค่ากลับ
เพื่อหาค่า a และ b ที่ต้องการได้ดังนี้

$$a_0 = 1/a \rightarrow a = 1/a_0 \quad (2.29)$$

$$a_1 = b/a \rightarrow b = a_1/a_0 \quad (2.30)$$