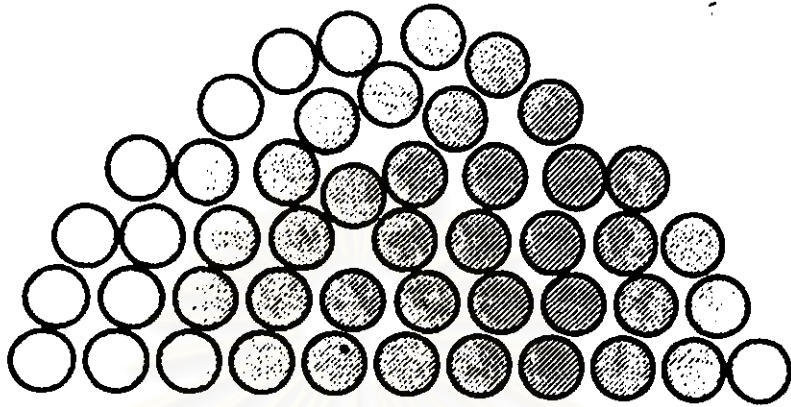


บทที่ 2

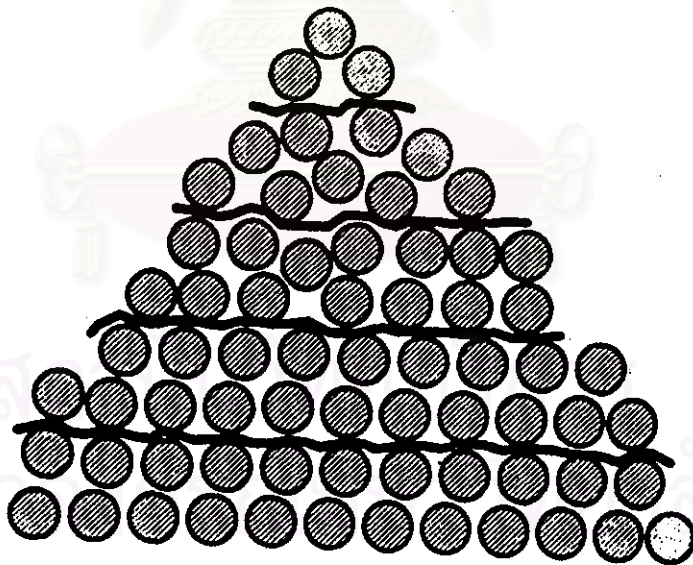
วิวัฒนาการและทฤษฎีที่เกี่ยวกับวัสดุเสริมดิน

2.1 วิวัฒนาการของวัสดุเสริมดิน

สำหรับวิวัฒนาการของวัสดุเสริมดินเริ่มต้นเมื่อประมาณ 30 กว่าปีที่ผ่านมามีในปี ค.ศ. 1960 โดยนาย Henri Vidal โดยเริ่มจากวันหนึ่งขณะที่เขากำลังพักผ่อนตากอากาศที่ชายหาด เขาได้ก่อกองทรายที่ชายหาดขึ้นเล่น เพื่อให้เป็นแท่งสูงชัน ด้วยเหตุนี้เองทำให้เขาสังเกตเห็นว่าความลาดเอียงของแท่งทรายที่ก่ได้ในแต่ละครั้งจะมีลักษณะเหมือนกันทุกครั้งไป (รูปที่ 2.1 ก) ในขณะนั้นรอบ ๆ ตัวเขามีตะปูอยู่เป็นจำนวนมาก เขาจึงได้นำตะปูที่มีอยู่วางสลับกับการก่กองทรายให้เป็นแท่งสูงชัน ปรากฏว่าเขาสามารถก่กองทรายให้ได้สูงกว่าคอนที่ไม่ตะปูวาง (รูปที่ 2.1 ข) อีกทั้งยังพบว่ายิ่งใช้ตะปูจำนวนมากขึ้นเท่าใด ความสูงของแท่งทรายก็จะมากขึ้นตามไปด้วย จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้เขาคิดว่า จะมีประโยชน์หรือไม่ในการที่จะเสริมวัสดุเสริมไว้ในทราย เพื่อให้มีความลาดเอียงสูงขึ้น และสามารถก่กองทรายได้สูงขึ้น แต่ในขณะนั้นยังไม่มีตำราเล่มใดที่กล่าวถึงเรื่องที่เขาได้คิดค้นขึ้น ดังนั้นเขาจึงเริ่มต้นค้นคว้าเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุเสริมดินอย่างจริงจัง และหลังจากที่เวลาผ่านไปได้ 3 ปี เขาก็ได้ทฤษฎีที่แน่นอนของวัสดุเสริมดิน ดังนั้นเขาจึงได้ทำการสร้างหุ่นจำลองขึ้นด้วยการใช้กระดาษเป็นวัสดุเสริมผสมในทราย แล้วทำการทดลองหุ่นจำลองนี้ ทำให้เขาได้คำตอบที่ต้องการ และเขาได้บันทึกคำตอบของเขาไว้ 2 ทางคือ ทางด้านทฤษฎี และทางด้านปฏิบัติ โดยทางทฤษฎีได้กล่าวถึงการรวมกันของวัสดุ 2 ชนิด ได้แก่ ทรายกับวัสดุเสริม จะทำให้ได้วัสดุใหม่ขึ้นมาอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งเขาให้ชื่อว่า วัสดุเสริมดิน (Earth Reinforcement) ส่วนในทางปฏิบัตินั้น เขาได้ศึกษาคุณสมบัติชนิดต่าง ๆ ของวัสดุที่นำมาใช้ในการทดลองเพื่อทำการเปรียบเทียบราคา และคุณภาพของวัสดุซึ่งเน้นหนักในด้านงานทาง และงานโครงสร้างกำแพงกันดิน



รูปที่ 2.1 ก แสดงการก่อตัวของทราซก่อนวางตะปูไว้ภายใน (Henri Vidal, 1978)



รูปที่ 2.1 ข แสดงการก่อตัวของทราซหลังวางตะปูไว้ภายใน (Henri Vidal, 1978)

ต่อจากนั้น เขาได้สร้างหุ่นจำลองและทำงานอีกชิ้นหนึ่งที่ Incarville ซึ่งเป็นถนนคู่
 ขนบทใน Normandy ซึ่งจากผลการทดสอบทำให้เขาเพิ่มความมั่นใจมากขึ้น เนื่องจากทุกสิ่งทุก
 อย่างเป็นไปตามทฤษฎีที่เขาได้คิดค้นไว้ตั้งแต่แรก หลังจากความสำเร็จขั้นต้นของเขาแล้ว ในปี
 ค.ศ. 1966 งานชิ้นแรกที่ออกสู่สายตาประชาชนก็คือ การสร้างกำแพงกันดินสูง 5 เมตร ใน
 Pyrenes Mountain โดยปราศจากความยากลำบากในการทำงาน จากงานชิ้นนี้เองทำให้เขามี
 โอกาสทดสอบวัสดุต่าง ๆ ที่จะนำมาใช้เป็นแผงกันดินด้านหน้า (Facing) เช่น แผ่นเหล็ก, แผ่น
 พลาสติก, แผ่นสแตนเลส และไฟเบอร์กลาส เป็นต้น ซึ่งทั้งหมดนี้เขาก็ได้พบว่า พลาสติกเป็น
 วัสดุที่ไม่เหมาะกับงานโครงสร้างเสริมดิน เนื่องจากเกิดการเสียหายและแตกหักได้ง่าย ในขณะที่
 เดียวกันเขาก็ได้ทำการจดทะเบียนลิขสิทธิ์เกี่ยวกับผลงานที่เขาได้ค้นคว้าและวิจัยนี้ ปรากฏว่ามีผู้
 สนใจและสอบถามปัญหาต่าง ๆ เกี่ยวกับโครงสร้างวัสดุเสริมดินนี้เป็นจำนวนมาก ต่อมาในปี
 ค.ศ. 1967 - 1969 นาย Henri Vidal ได้ติดต่อกับทาง French Highway Administration เพื่อ
 ทำงานชิ้นต่อไป ซึ่งเป็นเวลาเดียวกับที่ทาง French Highway Administration กำลังประสบ
 ปัญหาการออกแบบก่อสร้างทางเชื่อมระหว่าง Nice กับ Italy ซึ่งอยู่บนภูเขาที่มีความชันมาก
 ส่วนอีกด้านหนึ่งเป็นทะเล ทำให้การก่อสร้างระบบเดิมเป็นไปอย่างยากลำบาก และต้อง
 สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างเป็นจำนวนมาก นาย Henri Vidal พิจารณาแล้วเห็นว่าถ้าใช้
 โครงสร้างวัสดุเสริมดินที่เขาคิดค้นขึ้นมาใหม่นี้จะทำให้การก่อสร้างสะดวกรวดเร็วขึ้น อีกทั้งยัง
 สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างได้อีกด้วย ดังนั้นเขาจึงเสนอระบบโครงสร้าง
 วัสดุเสริมดินเพื่อใช้กับงานนี้กับทาง French Highway Administration ซึ่งเขาสามารถ
 ทำงานชิ้นดังกล่าวได้สำเร็จลุล่วงไปได้โดยปราศจากอุปสรรคใด ๆ

จากความสำเร็จดังที่กล่าวมานี้ ทำให้โครงสร้างวัสดุเสริมดินเป็นที่แพร่หลายมาก โดย
 ในช่วงปี ค.ศ. 1972 - 1982 มีโครงการมากกว่า 2,000 โครงการ ทั่วทุกแห่งในโลก ที่ใช้ระบบ
 โครงสร้างวัสดุเสริมดิน ซึ่งคิดเป็นพื้นที่ประมาณ 1,500,000 ตารางเมตร และในปัจจุบันการ
 ก่อสร้างโครงสร้างวัสดุเสริมดินก็ได้รับความนิยม และมีการก่อสร้างกันทั่วโลก โดยเฉพาะทาง
 แถบทวีปยุโรป และอเมริกา ส่วนในทวีปเอเชีย นั้น ถึงแม้ว่าเทคโนโลยีทางด้านโครงสร้าง
 วัสดุเสริมดินจะเข้ามาแพร่หลายช้ากว่าทางแถบยุโรป และอเมริการก็ตาม แต่ในปัจจุบันการ
 ก่อสร้างโครงสร้างวัสดุเสริมดินก็ได้รับความนิยม และแพร่หลายเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่าง
 ยิ่งในประเทศญี่ปุ่น ซึ่งมีบริษัทที่รับออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างวัสดุเสริมดินอยู่มากมาย

รวมทั้งยังมีโรงงานที่ทำการผลิตวัสดุเสริม เพื่อใช้ในงานด้านโครงสร้างวัสดุเสริมดินโดยเฉพาะอีกด้วย

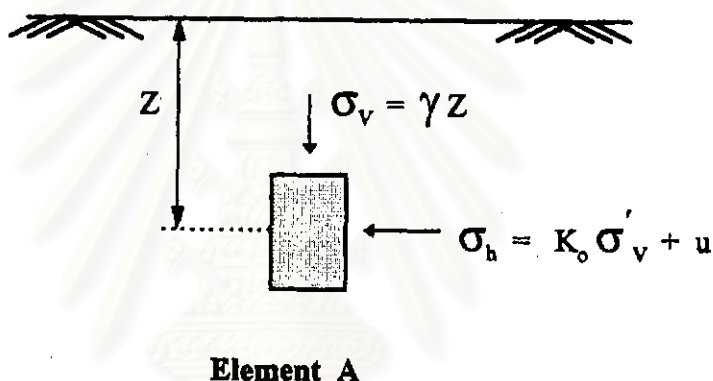
หลังจากที่นาย Henri Vidal ได้ทำการเผยแพร่วิวัฒนาการของโครงสร้างวัสดุเสริมดินแล้วนั้น ทำให้มีผู้ที่สนใจและดำเนินการวิจัยโครงสร้างวัสดุเสริมดินต่อเนื่องไปในด้านต่าง ๆ เช่น Kenneth L. Lee, Bobby Dean Adams และ Jean - Marie J. Vageron (1972) ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์เกี่ยวกับโครงสร้างกำแพงกันดินโดยใช้วัสดุเสริมดิน โดยทำการตรวจสอบหาความยาวของวัสดุเสริมที่เพียงพอจะทำให้เกิดแรงเสียดทาน ซึ่งป้องกันการเลื่อนไหลของแถบวัสดุเสริม พร้อมกับคำนวณหาค่าหน่วยแรงดึงสูงสุด และนำมาเปรียบเทียบกับแรงดึงด้านข้างที่กระทำต่อโครงสร้างวัสดุเสริมดิน JR. Bell, Alan N. Stilley และ Bruce Vandre (1975) ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์เกี่ยวกับวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมในโครงสร้างวัสดุเสริมดิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า โครงสร้างวัสดุเสริมดินที่ใช้ ไฟเบอร์ (Fiber) เป็นวัสดุเสริมที่สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายและต้นทุนของการก่อสร้างได้อย่างมาก

ในเวลาต่อมาวัสดุเสริมดินอีกชนิดหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจอย่างแพร่หลายมากก็คือ วัสดุโพลีเมอร์ ชนิดพิเศษ เช่นพวก แผ่นใยสังเคราะห์ และตาข่ายเสริมแรงเป็นต้น ซึ่งวัสดุเสริมพวกนี้ได้รับการทดสอบแล้วว่ามีความแข็งแรง สามารถทนแรงดึงได้สูง และมีค่าหน่วยการยึดหดตัวต่ำ อีกทั้งยังทนทานต่อการสึกหรอและกัดกร่อนตามสภาพดินฟ้าอากาศอีกด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 หลักการเบื้องต้น (Basic Concept)

วัสดุเสริมดิน (Earth Reinforcement) มีหลักการคล้ายคลึงกับคอนกรีตเสริมเหล็ก คือ เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของดินให้สามารถรับแรงต่าง ๆ ได้มากขึ้นจากเดิม โดยกำหนดให้มวลดินที่ใช้เป็น Semi-Infinite Mass, Cohesionless และ Isotropic ที่สภาวะปกติเมื่อดินไม่ได้รับแรงดันในด้านข้าง หน่วยแรงหลักที่เกิดขึ้นภายในอนุภาคใด ๆ จะเป็นแรงตามแนวตั้งและแนวราบ (σ_v และ σ_h) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 หน่วยแรงหลักที่เกิดขึ้นในมวลดิน (Element A) ที่สภาวะปกติ

จากรูปที่ 2.2 พิจารณามวลดิน A ซึ่งอยู่ต่ำกว่าระดับพื้นดินเท่ากับระยะ Z มวลดินก้อนนี้จะถูกกระทำด้วยหน่วยแรงในแนวตั้งเนื่องจากน้ำหนักของดินส่วนที่อยู่เหนือขึ้นไปเป็นระยะ Z ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\sigma_v = \gamma Z$ และหน่วยแรงในแนวราบซึ่งมีค่าเท่ากับ $\sigma_h = K_0 \sigma'_v + u$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- เมื่อ γ = ความหนาแน่นของเม็ดดิน
 u = แรงดันน้ำในมวลดิน (Pore Pressure)
 σ'_v = หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Vertical Effective Stress)
 $\sigma'_v = \sigma_v - u$
 K_0 = สัมประสิทธิ์ของแรงดันทางด้านข้างในสภาพสถิตย์ (Coefficient of Earth Pressure at Rest)

Jacky (1948) ได้กำหนดค่า K_0 ของ Cohesionless Soil ว่าเป็น Empirical Formular ดังนี้

$$K_0 = 1 - \sin \phi \dots\dots\dots(2.1)$$

- เมื่อ ϕ = มุมเสียดทานภายในของเม็ดดิน

จากนั้นถ้าให้ดินได้รับแรงทางด้านข้าง (Lateral Earth Pressure) จะทำให้เกิดการยึดหดตัวทางด้านข้างจนถึงสภาวะวิบัติ (Failure State) ซึ่งเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะคือ Active Failure และ Passive Failure

2.2.1 Active Failure

ในขณะที่หน่วยแรงในแนวตั้งมีค่าคงที่และหน่วยแรงในแนวราบมีค่าลดลงจนถึงค่าหนึ่งที่ทำให้ดินวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน โดยมีการเคลื่อนตัวในลักษณะ Tilting ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งดินที่อยู่ในสภาวะนี้จะอยู่ในสภาวะที่เรียกว่า Active State และหน่วยแรงในแนวราบของดินในสภาวะ Active State นี้เรียกว่า แรงดันทางด้านข้างของดินในสภาวะ Active ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\sigma_h = K_a \sigma_v \dots\dots\dots(2.2)$$

- เมื่อ K_a = สัมประสิทธิ์ของแรงดันทางด้านข้างของดินใน

สภาวะ Active (Coefficient of Earth Pressure at Active State)

Rankine (1857) ได้กำหนดค่า K_a สำหรับดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่นไว้ดังนี้

$$K_a = \tan^2 (45^\circ - \phi / 2) \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

$$= \frac{(1 - \sin \phi)}{(1 + \sin \phi)} \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

2.2.2 Passive Failure

ในขณะที่หน่วยแรงในแนวตั้งมีค่าคงที่และหน่วยแรงในแนวราบมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งที่ทำให้ดินวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน โดยมีการเคลื่อนตัวในลักษณะ Tilting ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งดินที่อยู่ในสภาวะนี้จะอยู่ในสภาวะที่เรียกว่า Passive State และหน่วยแรงในแนวราบของดินในสภาวะ Passive State นี้เรียกว่า แรงดันทางด้านข้างของดินในสภาวะ Passive ซึ่งมีค่าเท่ากับ

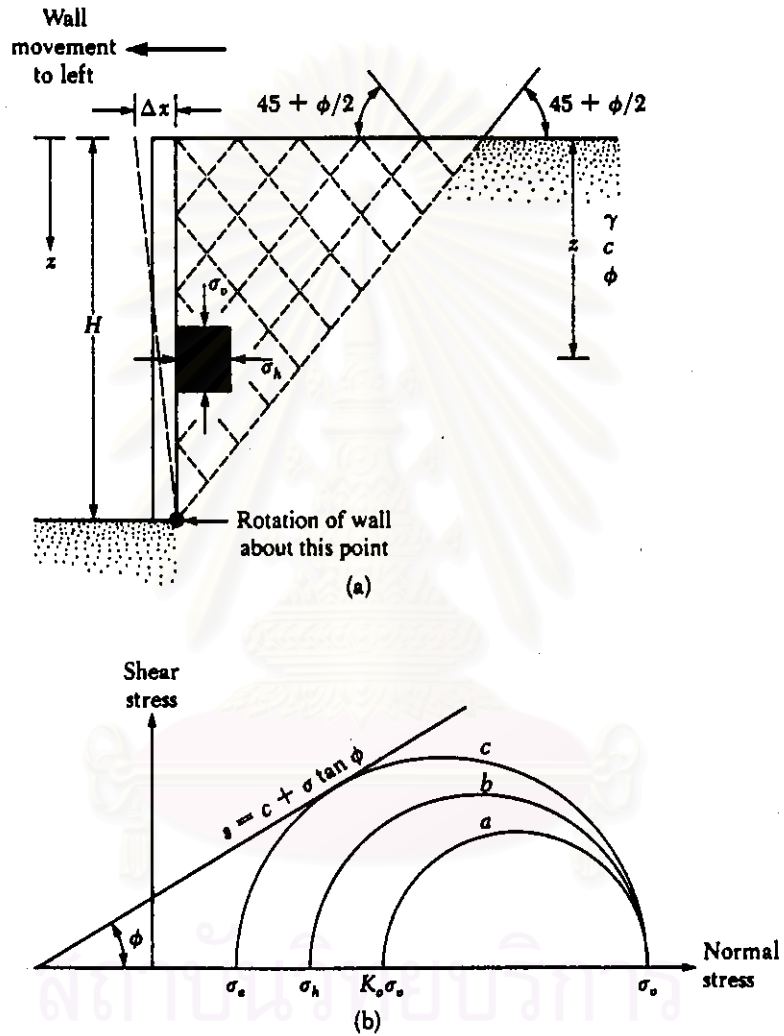
$$\sigma_h = K_p \sigma_v \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

เมื่อ K_p = สัมประสิทธิ์ของแรงดันทางด้านข้างของดินในสภาวะ Passive (Coefficient of Earth Pressure at Passive State)

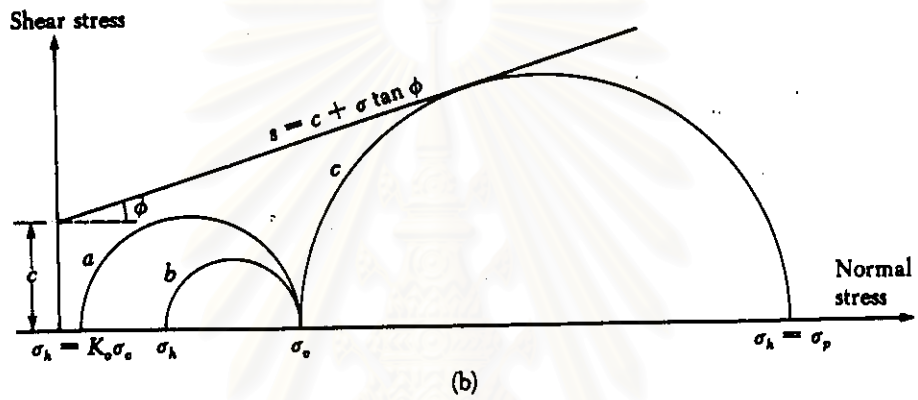
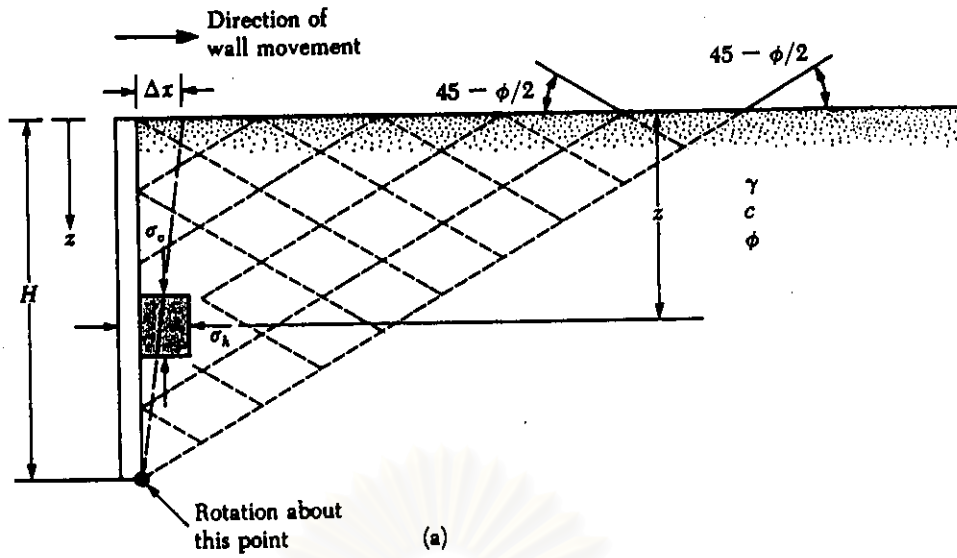
Rankine (1857) ได้กำหนดค่า K_p สำหรับดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่นไว้ดังนี้

$$K_p = \tan^2 (45^\circ + \phi / 2) \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

$$= \frac{(1 + \sin \phi)}{(1 - \sin \phi)} \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

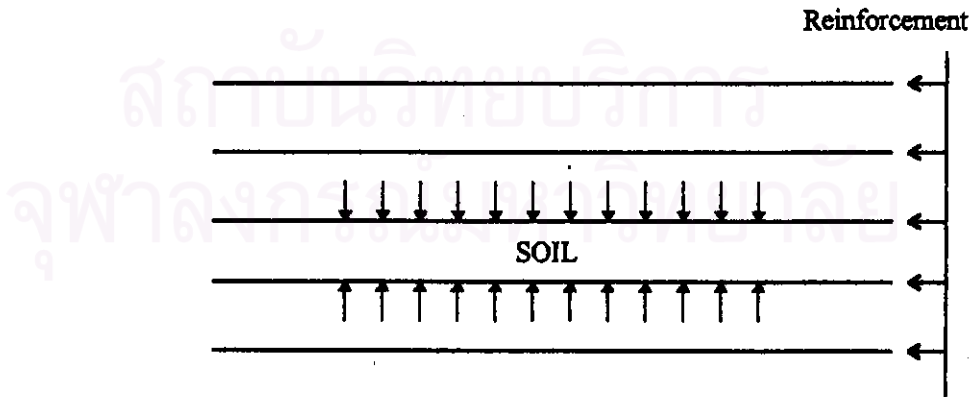


รูปที่ 2.3 แสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในสถานะ Active (Das, 1995)



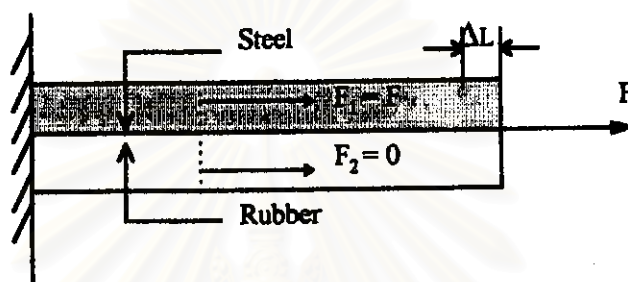
รูปที่ 2.4 แสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในสภาวะ Passive (Das, 1995)

เมื่อเราทำการเสริมวัสดุเสริม (Reinforcement) เข้าไปในดิน ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะการเสริมวัสดุเสริมเป็นชั้นๆภายในดิน

โดยทำให้ดินถึงสภาวะวิบัติในลักษณะของ Active Failure เมื่อกำหนดให้แรงยึดเกาะระหว่างดินกับวัสดุเสริมมีค่ามากพอ ดินที่อยู่ระหว่างวัสดุเสริมทั้ง 2 อันซึ่งอยู่ติดกันจะถูกทำให้ยึดออกโดยมีวัสดุเสริมเป็นขอบเขตบนและล่างซึ่งพฤติกรรมกรรมการรับแรงจะเป็นไปตามหลักการทั่วไป ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะการรับแรงร่วมกันระหว่าง Steel กับ Rubber

จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อให้ Steel และ Rubber รับแรงไปด้วยกัน โดยที่

$$E_{\text{steel}} \gg E_{\text{rubber}}$$

$$F_1 \gg F_2$$

$$\therefore F_1 = F \text{ และ } F_2 \text{ มีค่าน้อยมากถือว่าเท่ากับ } 0$$

เมื่อ E = ค่าโมดูลัส
 F_1 = แรงที่ถูกรับโดย Steel
 F_2 = แรงที่ถูกรับโดย Rubber

ซึ่งจะเห็นได้ว่าการรับแรงและการยึดตัวจะถูกควบคุมโดยวัสดุที่มีความแข็งแรงมากกว่า ซึ่งถ้าเทียบในโครงสร้างวัสดุเสริมดินนั้นก็คือตัววัสดุเสริม (Reinforcement) นั้นเอง ดังนั้นการยึดตัวทั้งหมดที่เกิดขึ้นก็คือการยึดตัวของวัสดุเสริมซึ่งมีค่าน้อยมากและไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงในดิน ส่วนแรงดึงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดันดินทางด้านข้างจะถูกรับโดยวัสดุเสริมทั้งหมด โดยถือว่าแรงดึงที่รับโดยดินมีค่าน้อยมากจนไม่ต้องนำมาคิด

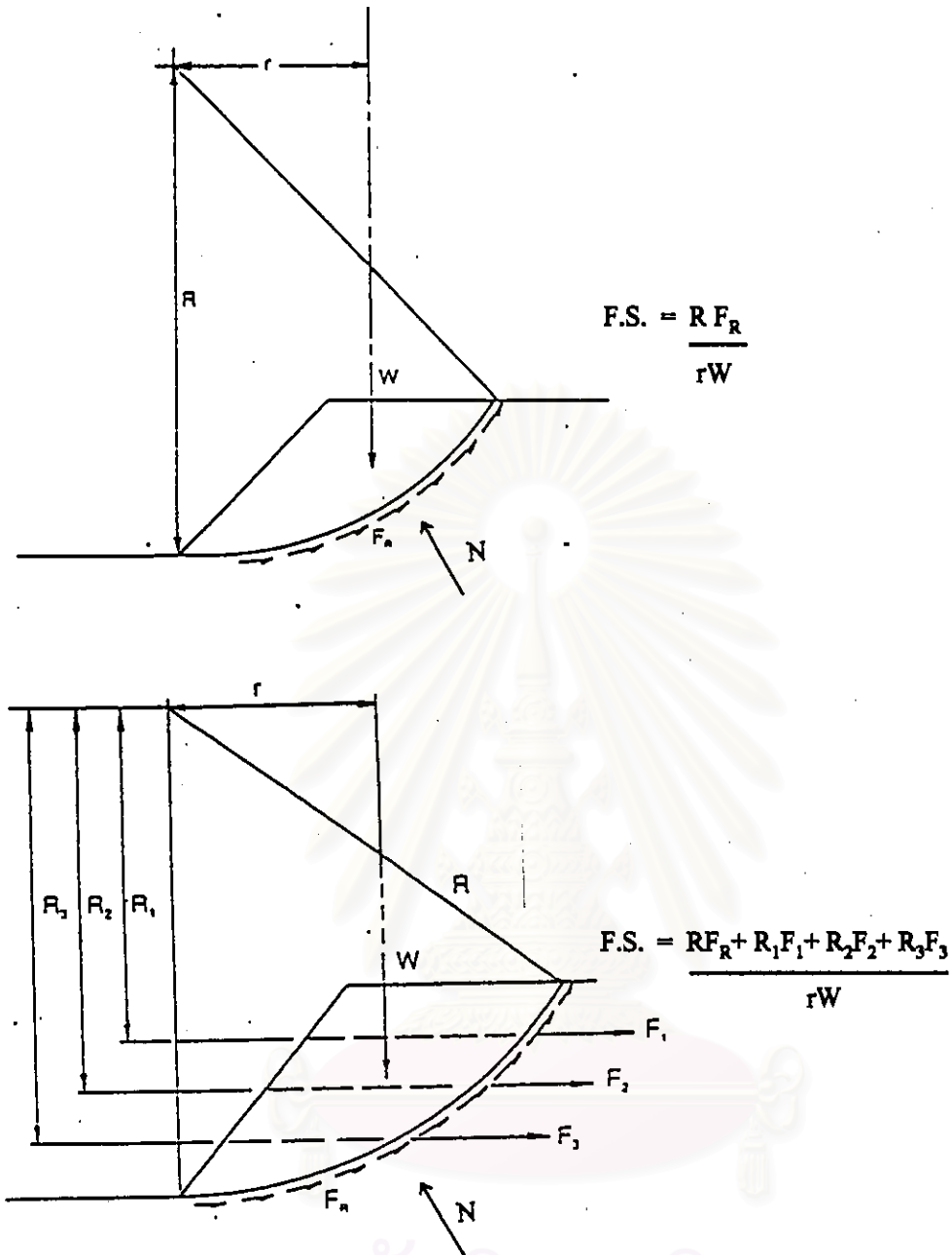
นอกจากหลักการเบื้องต้นที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ยังมีหลักการสำคัญของโครงสร้างวัสดุเสริมดิน ซึ่งพอจะสรุปเป็นหลักการสำคัญของโครงสร้างวัสดุเสริมดิน ได้ดังนี้

1. แรงยึดเกาะระหว่างดินกับวัสดุเสริมต้องมีมากพอ ซึ่งเป็นหลักสำคัญที่จะทำให้ดินและวัสดุเสริมสามารถรับแรงไปด้วยกันเหมือนวัสดุเดียวกันได้
2. วัสดุเสริมที่เสริมเข้าไปในโครงสร้างดินจะต้องสามารถรับแรงดึงที่เกิดจากการเคลื่อนตัวทั้งหมดของมวลดินได้ ซึ่งเป็นหลักสำคัญที่ทำให้มวลดินนั้นมีความต้านทานต่อหน่วยแรงได้เพิ่มมากขึ้น
3. จะต้องมีการแบ่งกันดินด้านหน้า สำหรับกันดินโดยวางตั้งในแนวตั้ง เพื่อป้องกันการเลื่อนไหลของดินออกนอกขอบเขต
ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดทั้งหมดไว้ในหัวข้อต่อไป

2.3 ผลกระทบของวัสดุเสริมดินที่มีผลต่อความสามารถในการรับหน่วยแรงเฉือนที่เข้ามากระทำ

สำหรับในกรณีของการก่อสร้างโครงสร้างดิน โดยดินที่นำมาใช้งานจะเป็นดินพวกที่มีเม็ดหยาบ ไม่มีความเชื่อมแน่น เช่น พวกกรวด , ทราย , ทรายแป้ง เพื่อช่วยในระบบการระบายน้ำนั้น ถ้าต้องการถมดินเพื่อให้ได้ความลาดชันที่สูงมาก ๆ โดยปราศจากกำแพงกันดินที่ทำจากคอนกรีตเสริมเหล็กแล้ว จะเห็นได้ว่ามุมลาดเอียง (β) ของโครงสร้างดินจะมีค่ามากกว่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ) จึงเป็นผลให้โครงสร้างดินถล่มเกิดการเลื่อนไหลพังทลายลงมาได้

จากปัญหาดังที่ได้กล่าวมาแล้วนี้ ถ้าต้องการทำการก่อสร้างเพื่อให้ได้โครงสร้างดินที่มีความลาดชันที่สูงมาก ๆ และมีเสถียรภาพด้วยนั้นก็สามารทำได้โดยการนำวัสดุเสริมเข้ามาเสริมภายในดิน เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของดินให้มีค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนที่เข้ามากระทำเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อเสริมวัสดุเสริมไว้ภายในดินจะทำให้ค่า Factor of Safety (F. S.) มีค่าเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้โครงสร้างดินนั้นมีเสถียรภาพมากขึ้นนั่นเอง

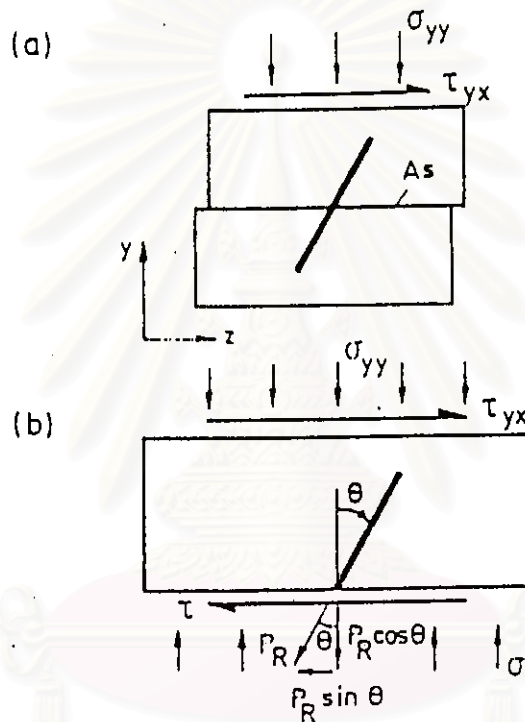


รูปที่ 2.7 แสดงค่า Factor of Safety ที่เพิ่มขึ้นของ โครงสร้างวัสดุเสริมดิน

(John Steward, 1990)

ซึ่งหลักการพื้นฐานที่ช่วยให้ โครงสร้างวัสดุเสริมดินมีเสถียรภาพเพิ่มมากขึ้นแสดงให้เห็นได้โดยการทดสอบแบบ Direct Shear Test (Jewell, 1988) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และสามารถสรุปได้ว่า

1. การเคลื่อนตัวของโครงสร้างดินเป็นผลให้เกิดแรงดึง (P_R) ขึ้นภายในตัววัสดุเสริม
2. The Tangential Component ของแรงดึงภายในวัสดุเสริม ($P_R \sin \theta$) จะช่วยลดแรงเฉือนที่เป็นสาเหตุของการพังทลาย
3. The Normal Component ของแรงดึงภายในวัสดุเสริม ($P_R \cos \theta$) จะช่วย เพิ่มค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนภายในดิน



The effect of reinforcement is twofold:

- (1) To reduce the stresses causing failure

$$\tau = \tau_{yx} - \frac{P_R \sin \theta}{A_s}$$

- (2) To increase the stresses resisting failure

$$\sigma = \sigma_{yy} + \frac{P_R \cos \theta}{A_s}$$

รูปที่ 2.8 ผลกระทบต่อหน่วยแรงภายในมวลดินที่เกิดจากแรงดึงภายในวัสดุเสริม

โดยการทดสอบแบบ Direct Shear Test (Jewell, 1988)

จากที่ได้กล่าวมาแล้วจะเห็นได้ว่าสำหรับโครงสร้างดินที่ทำการเสริมวัสดุเสริมเข้าไปนั้น จะทำให้มีผลกระทบต่อค่าความสามารถในการต้านทานต่อแรงเฉือน กล่าวคือทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนของโครงสร้างมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างดินนั้นมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้นนั่นเอง ดังจะเห็นได้จากสมการที่ 2.8 และ 2.9 ซึ่งแสดงค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนของโครงสร้างที่ไม่ได้เสริมวัสดุเสริม (Unreinforced) กับโครงสร้างที่ทำการเสริมวัสดุเสริมเข้าไป ดังนี้

The Total Shearing Resistance in Unreinforced Soil is

$$P_{\text{resistance}} = P_n \tan \phi \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

และ The Total Shearing Resistance in Reinforced Soil is

$$P_{\text{resistance}} = P_n \tan \phi + P_R (\sin \theta + \cos \theta \tan \phi_o) \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

เมื่อ

$P_{\text{resistance}}$ = Shearing Resistance Force

P_n = Normal Force

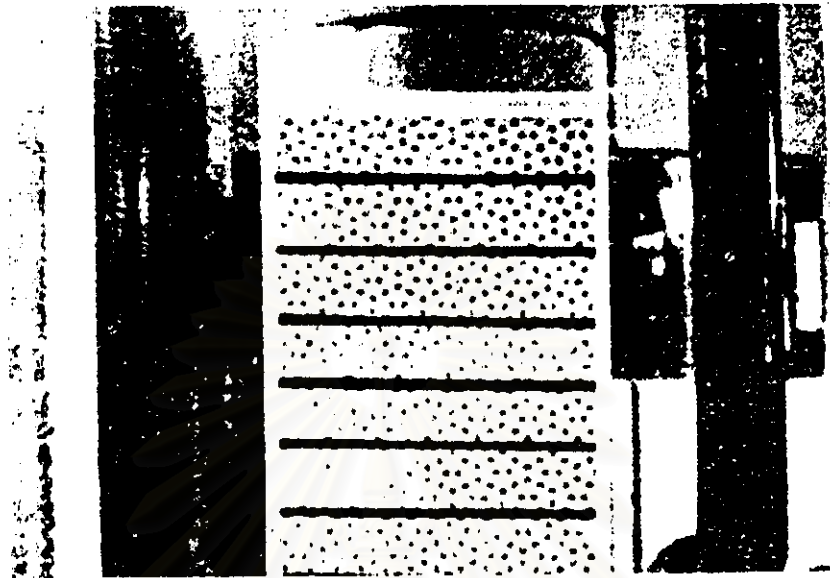
P_R = Reinforcement Tensile Force

ϕ = Angle of Friction in the Soil

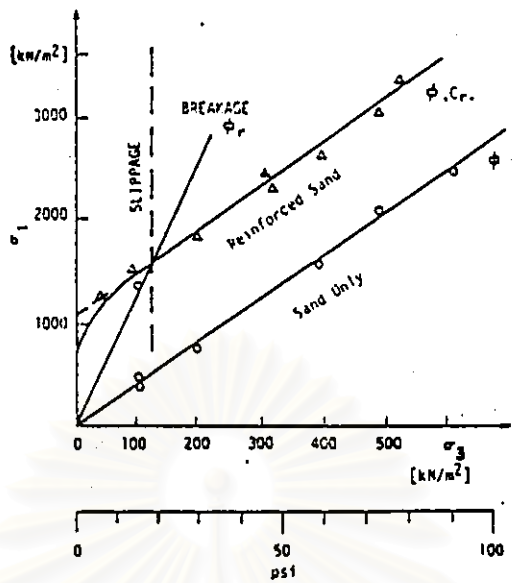
ϕ_o = Angle of Friction between the Reinforcement and Adjacent Soil

θ = Angle between Reinforcement and Direction Normally of Shearing Soil

เพื่อให้เห็นถึงพฤติกรรมของวัสดุเสริมที่ช่วยเพิ่มค่าความสามารถในการรับหน่วยแรงเฉือนที่กระทำต่อดินได้อย่างชัดเจน Schlosser และ Long (1972) ได้ทำการทดลองโดยใช้การทดสอบแบบแรงอัด 3 แกน (Triaxial Compression Test) กับตัวอย่างทรายที่ไม่ได้เสริมวัสดุเสริม และตัวอย่างทรายที่เสริมวัสดุเสริม โดยใช้แผ่นอลูมิเนียมเป็นวัสดุเสริมเสริมเข้าไปเป็นชั้น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การทดสอบแบบ Triaxial Compression Test เพื่อศึกษาพฤติกรรม
ในการต้านทานแรงเฉือนของวัสดุเสริมดิน (Henri Vidal, 1978)



รูปที่ 2.10 Strength Envelopes for Sand and Reinforced Sand (Schlosser & Long, 1972)

จากผลการทดลอง ดังรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าสำหรับที่ Confining Stress (σ_3) ค่าต่าง ๆ นั้น ตัวอย่างที่ทำการเสริมวัสดุเสริมจะสามารถรับแรงอัดสูงสุดได้สูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมวัสดุเสริม และเมื่อนำข้อมูลของทั้ง 2 ตัวอย่าง ที่ Confining Stress ค่าหนึ่ง ไปเขียนกราฟ วงกลมของ มอร์ (Mohr's Circle) แล้ว ดังรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าสำหรับตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมวัสดุเสริม นั้นค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนมีค่าเท่ากับ

$$\tau = \sigma \tan \phi \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

และสำหรับตัวอย่างที่เสริมวัสดุเสริมนั้น ค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนในบริเวณที่ทำการเสริมวัสดุเสริมจะมีค่าเท่ากับ

$$\tau = C'_R + \sigma \tan \phi_0 \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

- เมื่อ
- τ = ค่าความต้านทานแรงเฉือน (Shearing Resistance)
 - σ = Normal Stress
 - C'_R = Apparent Cohesion Generated by the Reinforcement
- (โดยที่ ϕ และ ϕ_0 มีค่าใกล้เคียงกัน)

ดังนั้น Schlosser และ Long ได้สรุปว่าการใช้วัสดุเสริมเสริมเข้าไปในดิน จะช่วยเพิ่มค่าความสามารถในการรับหน่วยแรงเฉือนที่กระทำต่อดินได้ โดยจากสมการที่ 2.11 จะเห็นได้ว่า ส่วนที่ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นก็คือ ค่า C'_R นั้นเอง ซึ่งค่า C'_R นี้เรียกว่า Apparent Cohesion

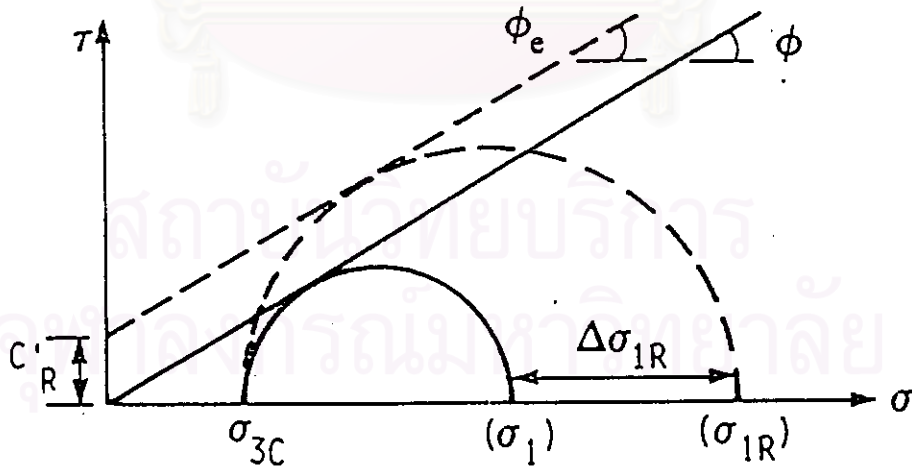
Schlosser และ Long (1972) ได้เสนอสมการเพื่อใช้หาค่า Apparent Cohesion (C'_R) ดังนี้

$$C'_R = \frac{R_T \sqrt{K_p}}{2 S_v} = \frac{R_T}{2 S_v \sqrt{K_s}} \dots\dots\dots(2.12)$$

เมื่อ

R_T = The Tensile Breaking Resistance of Reinforcement
(Commonly take the unit in Force per Length)

S_v = The Vertical Spacing between Horizontal Layers of Reinforcement



รูปที่ 2.11 แสดงค่า Apparent Cohesion ที่ทำให้ค่าความต้านทานแรงเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้น (Schlosser & Long, 1972)

2.4 ประเภทของแผ่นใยสังเคราะห์และผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้อง (Type of Geotextile and Related Products)

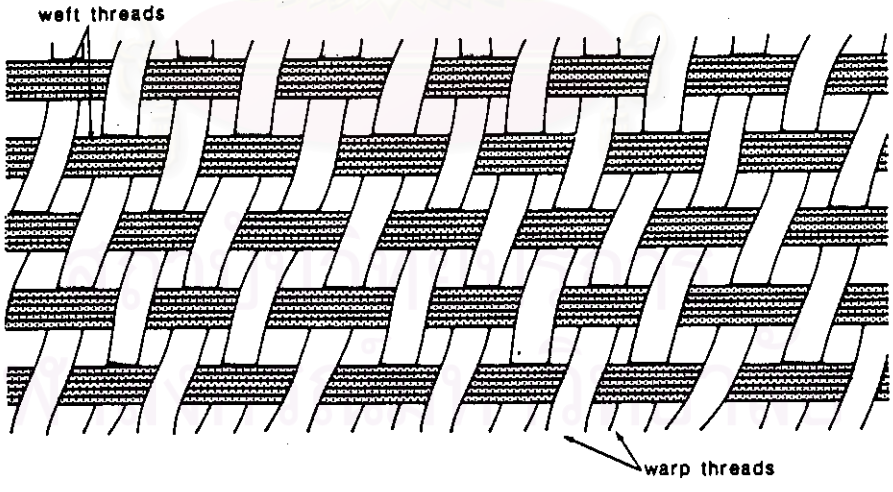
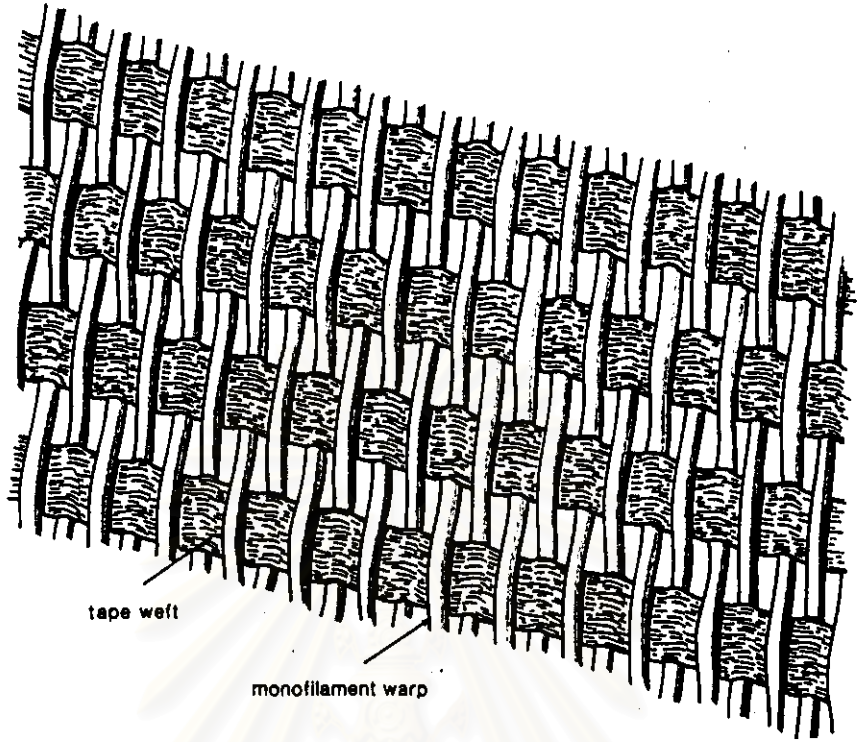
Geotextile เป็นผลิตภัณฑ์โพลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์สารโพลิเมอร์จำพวก Polypropylene, Polyeter, Polymide และ Polyethylene ซึ่งโพลิเมอร์เหล่านี้เป็นโพลิเมอร์พวกที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อนตามธรรมชาติหรือสารเคมีต่าง ๆ ดังนั้น Geotextile จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานทางด้าน Geotechnical Engineering เช่น งานฐานราก, งานโครงสร้างกำแพงกันดิน หรืองานโครงสร้างดินถม เป็นต้น

Exxon (1989) ได้ทำการแบ่ง Geotextile ออกเป็นประเภทต่างๆตามขบวนการผลิตได้ 4 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

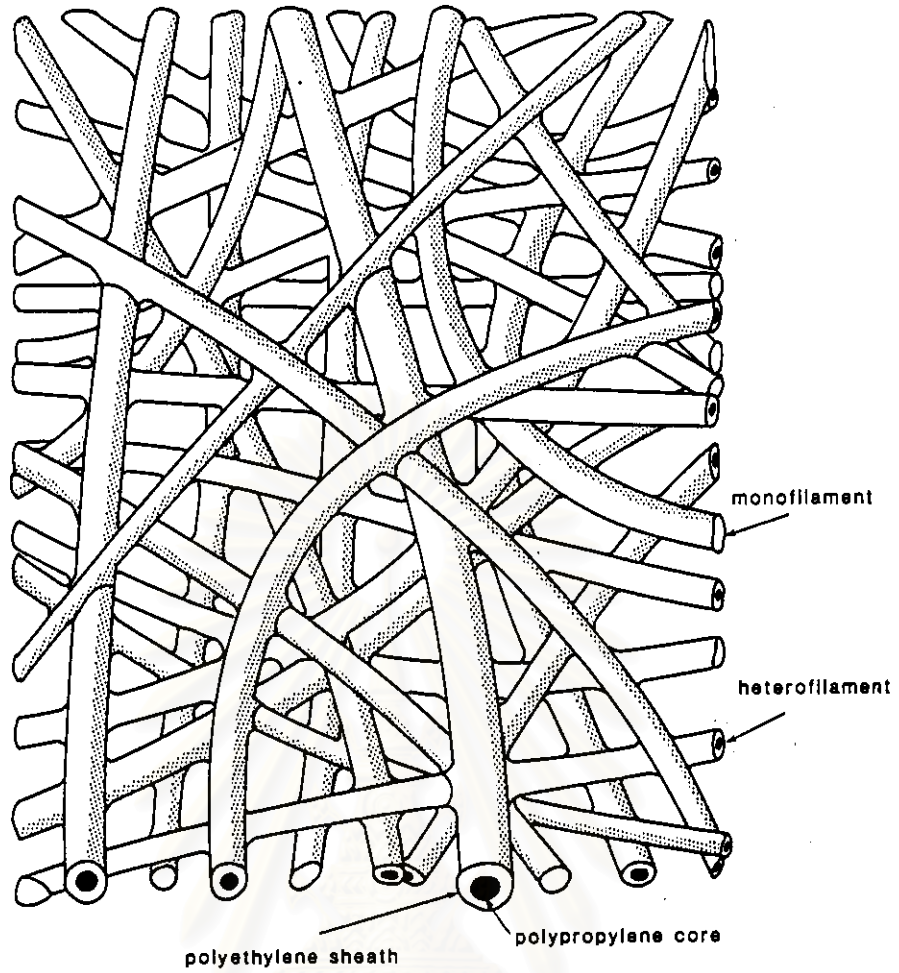
1. Woven Geotextiles เป็น Geotextile ที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยโพลิเมอร์แบบลายดัดเฉียงทำมุมซึ่งกันและกัน (ดังรูปที่ 2.12)
2. Nonwoven Geotextiles เป็น Geotextile ที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยโพลิเมอร์แบบสุ่ม (Random) (ดังรูปที่ 2.13)
3. Knitted Geotextiles เป็น Geotextile ที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยโพลิเมอร์แบบเกี่ยวซ้อนติดกันเป็นอนุกรมหนึ่งวงรอบหรือมากกว่านั้น (ดังรูปที่ 2.14)
4. Composite Geotextiles หรือ Stitch-bonded Geotextiles ซึ่งเป็น Geotextile ที่ถูกออกแบบมาโดยการนำ Woven, Nonwoven และ Knitted Geotextiles มาจัดเป็นชั้นหลาย ๆ ชั้น โดยแต่ละชั้นจะยึดเกาะกันด้วยพันธะที่เรียกว่า Stitching-bonded (ดังรูปที่ 2.15)

ซึ่งนอกจาก 4 ประเภทข้างต้นแล้วยังสามารถแบ่ง Geotextile ออกได้อีกตามลักษณะรูปร่างเฉพาะตัว ซึ่งเราเรียกว่า Geotextile Related Products เช่น

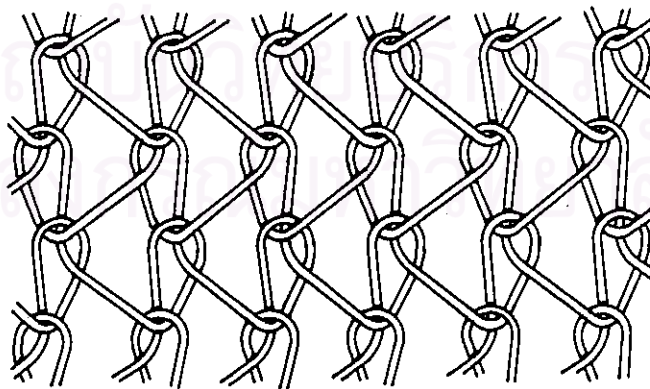
1. Grid ซึ่งเป็นวัสดุเสริมที่มีลักษณะเป็นช่องเปิดขนาดใหญ่ ที่เกิดจากการตัดกันของ Transverse Members กับ Longitudinal Members โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ (ดังรูปที่ 2.16)



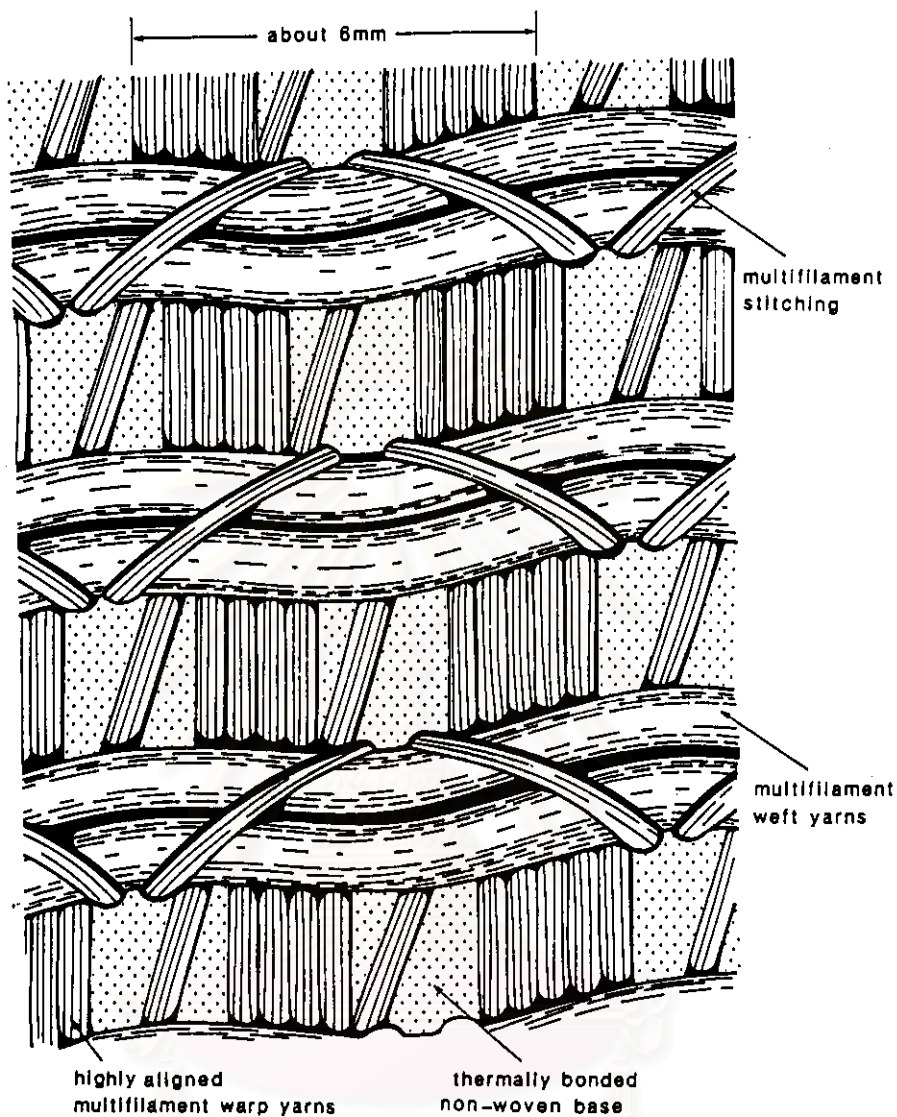
รูปที่ 2.12 ลักษณะของ Woven Geotextile (John, 1987)



รูปที่ 2.13 ลักษณะของ Nonwoven Geotextile (John, 1987)

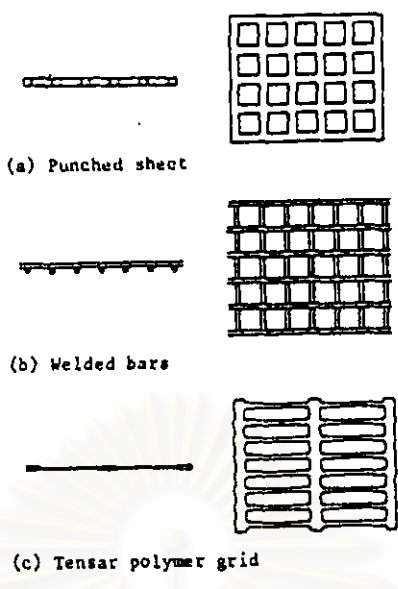


รูปที่ 2.14 ลักษณะของ Knitted Geotextile (John, 1987)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

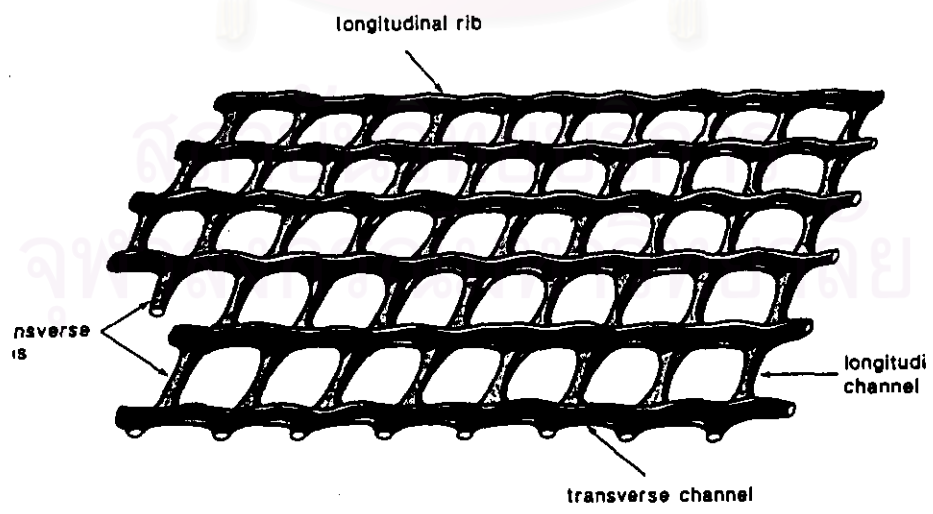
รูปที่ 2.15 ลักษณะของ Composite Geotextile (John, 1987)



รูปที่ 2.16 ประเภทของ Grid Reinforcement (Jewell, 1984)

- Punched Sheet
- Welded Bars
- Tensar Geogrid

2. Net ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับ Grid Reinforcement แต่จะมีช่องเปิดที่มีขนาดเล็กกว่ามากเมื่อเทียบกับช่องเปิดของ Grid Reinforcement (ดังรูปที่ 2.17)



รูปที่ 2.17 ลักษณะของ Net Geotextile (John, 1987)

ซึ่งการแบ่งประเภทของ Geotextile โดยละเอียดจะแสดงไว้ดังรูปที่ 2.18 โดยจากรูปจะเห็นว่า Geotextile จะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ตามลักษณะของเส้นใยที่ใช้คือ

1. Natural Fibers เป็น Geotextile ที่ผลิตมาจากเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติ เช่นพวกปอ (Jute Grid), แถบกระดาษ (Paper Strip), แฉ่นไม้ (Wood Shavings) เป็นต้น
2. Synthetic Fibers เป็น Geotextile ที่ผลิตมาจากเส้นใยที่ได้จากการสังเคราะห์สารจำพวก โพลีเมอร์ชนิดพิเศษ สามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภทคือ

2.1) Conventional Geotextile ได้แก่ Geotextile จำพวก Woven, Non-Woven และ Knitted (รายละเอียดดังที่ได้กล่าวมาแล้ว) ซึ่งในกรณีของ Woven และ Non-Woven ยังสามารถแบ่งเป็นประเภทย่อย ๆ ดังได้อีกดังนี้

Woven Geotextile สามารถแบ่งออกได้ตามลักษณะของเส้นใยโพลีเมอร์ที่ใช้ได้แก่

- Mono Filament เป็นการผลิตโดยการใช้เส้นใยโพลีเมอร์เพียงชนิดเท่านั้น
- Multi Filament เป็นการผลิตโดยการใช้เส้นใยโพลีเมอร์หลายชนิดผสมกัน
- Slit Film เป็นการผลิตโดยการใช้เส้นใยโพลีเมอร์ที่ได้รับการตัดด้วยใบมีดตามแนวยาวให้มีลักษณะเป็นเส้นใยที่แบนและยาว

Non-Woven Geotextile เนื่องจาก Non-Woven Geotextile ประกอบไปด้วยการจัดเรียงเส้นใยอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งต่างจาก Woven Geotextile ที่มีการสานเส้นใยยึดติดกันอย่างเป็นระเบียบ ทำให้ในขั้นตอนการผลิตจึงต้องมีการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวให้กับเส้นใยด้วย ดังนั้นจึงสามารถแบ่งประเภทของ Non-Woven Geotextile ตามลักษณะของวิธีการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวให้กับเส้นใยได้ดังนี้

- Mechanically Bonded จะประกอบไปด้วยการใช้วัสดุที่มีลักษณะคล้ายเข็มปลายแหลม (Needle) เล็กๆ มากมายทลงบนเส้นใยโพลีเมอร์ ซึ่งเส้นใยจะถูกทำให้ยึดเหนี่ยวกันด้วยปลายแหลมของวัสดุที่ใส่เข้าไปนั่นเอง ในบางครั้งจะเรียก Geotextile ที่ผ่านขบวนการผลิตแบบนี้ว่า Needle-Punched Geotextile
- Chemically Bonded เส้นใยจะถูกทำให้ยึดเหนี่ยวกันโดยวิธีการทางเคมี ซึ่งโดยส่วนใหญ่มักจะนิยมใช้สารเคมีจำพวก Acrylic Resin พ่นลงบนเส้นใย

- Thermally Bonded เส้นใยจะได้รับแรงดันและความร้อนเพื่อให้เส้นใยหลอมละลาย และทำให้เกิดความเชื่อมแน่นเพิ่มขึ้น

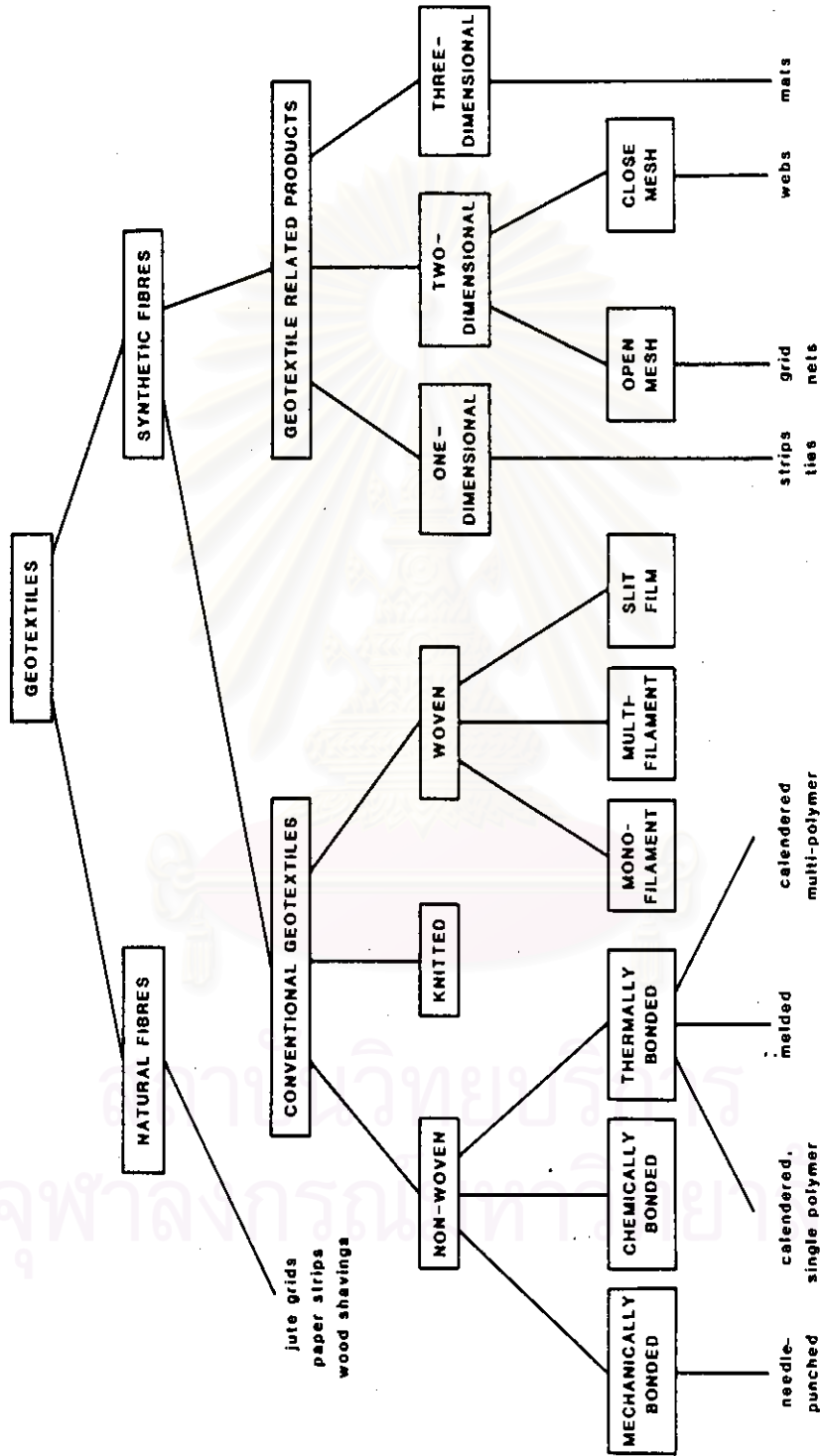
2.2) Geotextile Related Products สามารถแบ่งออกได้ตามลักษณะรูปร่างเฉพาะตัวดังนี้

- One Dimensional เช่น Strip, Tie
- Two Dimensional ซึ่งจะแบ่งออกตามลักษณะของตาข่ายได้เป็น Open Mesh (ตาข่ายแบบเปิด) เช่นพวก Grid, Net และ Close Mesh (ตาข่ายแบบปิด) เช่นพวก Web (ดังรูปที่ 2.19)
- Three Dimensional เช่น Mat (ดังรูปที่ 2.20)

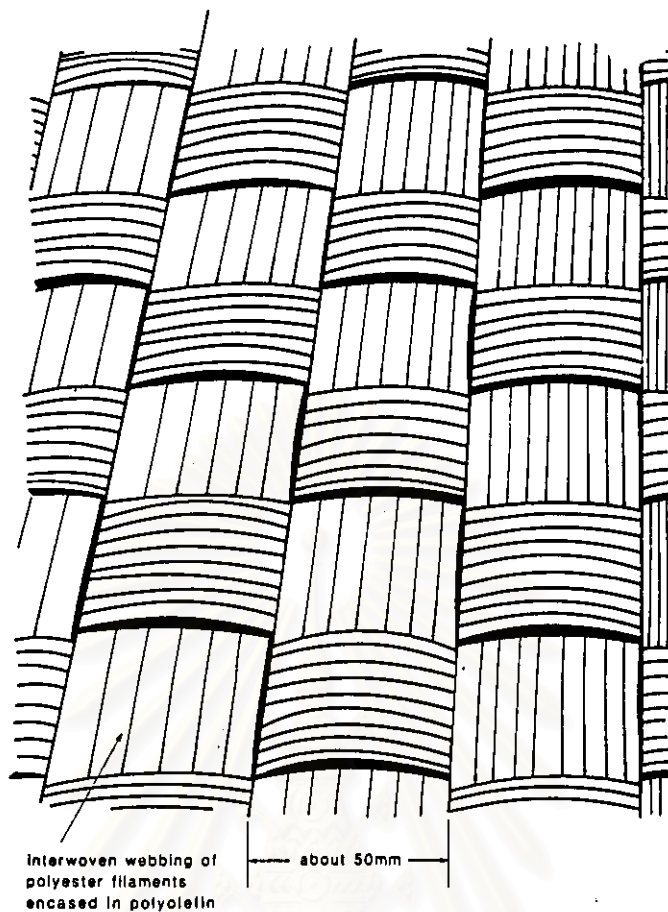
N.Richardson (1990) ได้แบ่งลักษณะการใช้งานของ Geotextile แบ่งตามชนิดของ Geotextile และลักษณะงานต่างๆ ได้ตามตารางที่ 2.1

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า Geotextile และ Geogrid เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานวัสดุเสริมดิน (Soil Reinforcement) ซึ่งเหตุผลที่ทำให้ Geotextile และ Geogrid เหมาะที่จะนำมาใช้งานด้านนี้ก็คือ

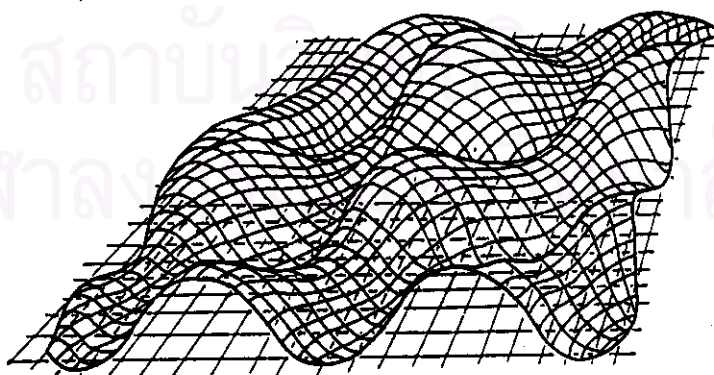
1. Geotextile และ Geogrid เป็นวัสดุที่ผลิตมาโดยผ่านขบวนการควบคุมคุณภาพตามมาตรฐาน ทำให้มีความแข็งแรง ทนทาน
2. Geotextile และ Geogrid ผลิตมาจากวัสดุโพลีเมอร์ซึ่งมีความทนทานต่อแรงกระทำต่างๆตามธรรมชาติ ดังนั้นจึงเหมาะที่จะนำมาใช้ในงานที่มีอายุงานยาวนานได้
3. Geotextile และ Geogrid เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ทำให้สะดวกในการขนส่ง หรือเคลื่อนย้าย
4. Geotextile และ Geogrid เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงทำให้สามารถต้านทานต่อหน่วยแรงต่างๆที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการทำงาน หรือการติดตั้งได้



รูปที่ 2.18 Geotextile Classification Group



รูปที่ 2.19 ลักษณะของ Web Geotextile (John, 1987)



รูปที่ 2.20 ลักษณะของ Mat Geotextile (John, 1987)

ตารางที่ 2.1 ลักษณะการใช้งานของGeotextile แบ่งตามชนิดของGeotextileและลักษณะงาน
ต่าง ๆ (N.Richardson, 1990)

Section	Application Area	Geosynthetics	Function For
		Involed	Performance
1	Subgrade stabilization	GT,GG	S,R,F
2	Embankment on soft soils	GT,GG	R,S
3	Slope reinforcement	GT,GG	R
4	Retaining walls	GT,GG	R
5	Drainage and Filtration	GT	F,S
6	Drainage-prefab.composite	GC,GN	D,F,S,B
7	Erosion control-reinforcement	GC	R,S
8	Erosion control-rip rap	GT	F,S
9	Erosion control-mats	GT	F,S
10	Sediment control-silt fence	GT	B,R,S
11	Asphalt overlay	GT,GC	B,R,S
12	Geomembrane protection	GT	S,R

Note	GT = Geotextile	S = Separation
	GG = Geogrid	R = Reinforcement
	GC = Geocomposite	F = Filtration
	GN = Geonet	D = Drainage
		B = Barrier

2.5 แรงยึดเกาะระหว่างดินกับวัสดุเสริม (Bond between Soil and Reinforcement)

ในการก่อสร้างโครงสร้างดินโดยวิธีการใช้วัสดุเสริมนั้น แรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดันดินทางด้านข้างจะถูกรับโดยวัสดุเสริม ซึ่งถ้าให้แรงดึงที่เกิดขึ้นในวัสดุเสริมแผ่กระจายเป็นรูปสามเหลี่ยมและมีค่าสูงสุดที่ผิวนอกโครงสร้าง และให้แรงดึงเพิ่มขึ้นเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความลึกเช่นเดียวกับแรงดันด้านข้างของดิน ดังรูปที่ 2.21 ถ้าแรงดันทางด้านข้างของดินเกินกว่าค่า Rankine Active Earth Pressure จะได้ค่าแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นในแถบวัสดุเสริมที่ความลึก Z ใด ๆ ดังนี้

- แรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของดินเพียงอย่างเดียว

$$P_{R(max)} = K_a \gamma Z w S_v \dots\dots\dots(2.13)$$

- แรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของดิน + น้ำหนักจากภายนอกในลักษณะแผ่กระจาย

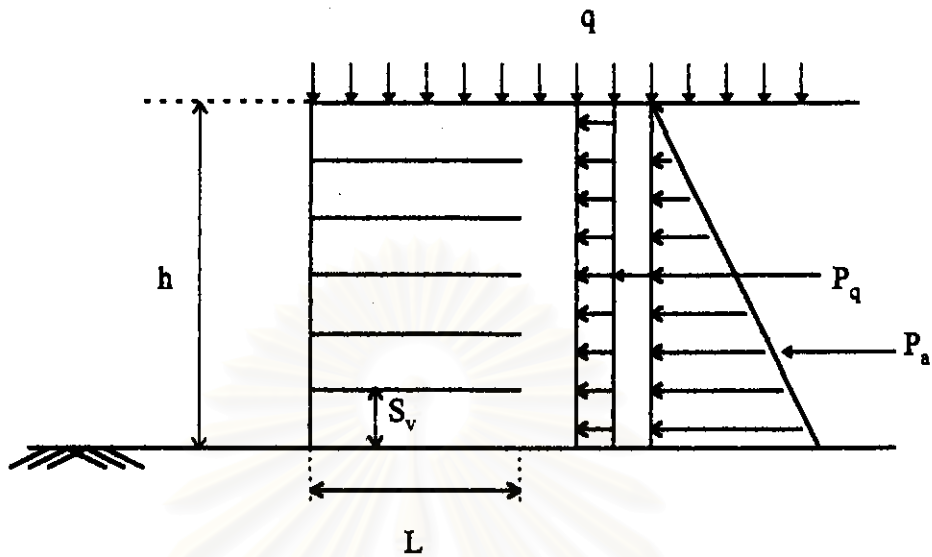
$$P_{R(max)} = K_a (\gamma Z + q) w S_v \dots\dots\dots(2.14)$$

เมื่อ $P_{R(max)}$ = แรงดึงสูงสุดวัสดุเสริมในกรณีโครงสร้าง
วัสดุเสริมดินถึงจุดวิบัติ (ton)

w = Width of the Reinforcement (m.)

S_v = Vertical Spacing of the Reinforcement (m.)

q = น้ำหนักจากภายนอกในลักษณะแผ่กระจาย (t/m^2)



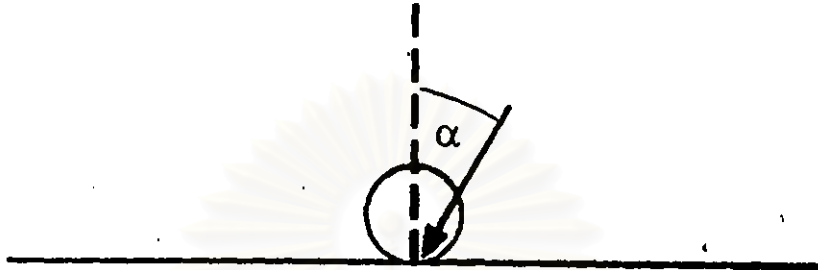
รูปที่ 2.21 แสดงหน่วยแรงดินทางด้านข้างที่เกิดขึ้นในโครงสร้างวัสดุเสริมดิน

(Bob Barrett, 1990)

แรงดึงที่เกิดขึ้นในวัสดุเสริมเนื่องจากการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของโครงสร้างดินนั้น จะถูกต้านทานด้วยแรงยึดเกาะที่เกิดขึ้นระหว่างดินกับวัสดุเสริม เพื่อป้องกันการพังทลายของ โครงสร้างวัสดุเสริมดิน ซึ่งแรงยึดเกาะ (Bond) ที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดจากการส่งผ่านหน่วยแรงใน โครงสร้างวัสดุเสริมดิน โดยจะอาศัยแรงภายในที่เกิดขึ้นระหว่างดินกับวัสดุเสริม 2 ชนิด คือ Friction Force และ Passive Soil Resistance

ซึ่งสำหรับวัสดุเสริมที่มีลักษณะเป็น Sheet เช่นพวก Geotextile นั้น การส่งผ่านหน่วย แรงจะอาศัย Friction Force เนื่องจากวัสดุเสริมชนิดนี้มีลักษณะเป็นแผ่นแบนราบเรียบ แต่ใน วัสดุเสริมที่มีลักษณะเป็น Grid (Geogrid) นั้น เนื่องจากเป็นวัสดุเสริมที่มีลักษณะไม่เป็นแผ่น แบนเรียบคือมีส่วนที่นูนขึ้นมา ดังนั้นการส่งผ่านหน่วยแรงจะไม่ได้อาศัย Friction Force เพียง อย่างเดียว แต่จะอาศัยแรงที่เรียกว่า Passive Soil Resistance ด้วย

2.5.1 Friction Load Transfer

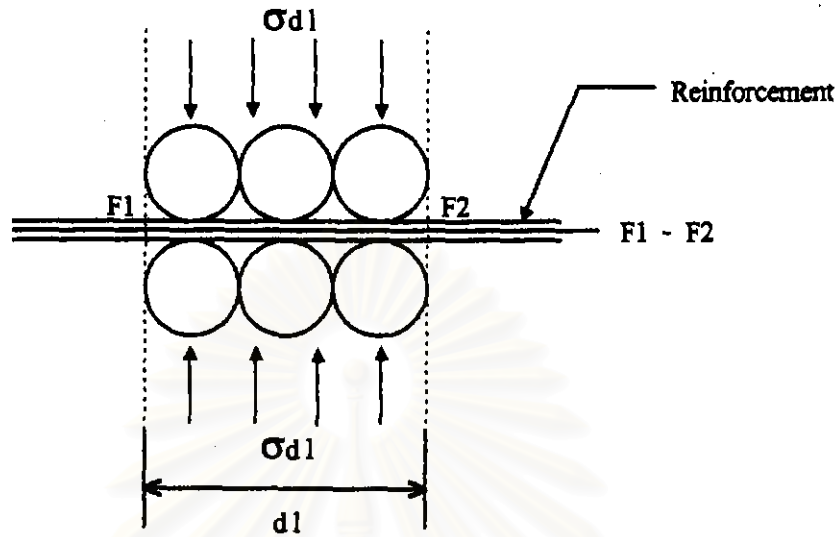


รูปที่ 2.22 ลักษณะการสัมผัสของเม็ดดินกับแถบวัตถุเสริม (Henri Vidal, 1978)

เพื่อให้เห็นถึงหลักการพื้นฐานของการเกิดแรงเสียดทาน (Friction Force) ระหว่างแถบวัตถุเสริมกับเม็ดดินได้อย่างชัดเจน จะทำการพิจารณาเม็ดดินกับแถบของวัตถุเสริมดังแสดงในรูปที่ 2.22 โดยให้แรงที่เกิดขึ้นระหว่างเม็ดดินกับแถบวัตถุเสริมทำมุมใด ๆ กับระนาบฉากของวัตถุเสริมนั้น ถ้า $\tan \alpha < \tan \phi$ แล้วจะทำให้พฤติกรรมที่เกิดขึ้นระหว่างแถบวัตถุเสริมกับเม็ดดินมีลักษณะดังรูปที่ 2.23 คือจะเกิดแรงยึดเกาะขึ้นโดยแรงยึดเกาะที่เกิดขึ้นนี้ก็คือแรงเสียดทานที่คอยต้านทานไม่ให้เกิดการเลื่อนไหลระหว่างเม็ดดินกับแถบวัตถุเสริมนั่นเอง



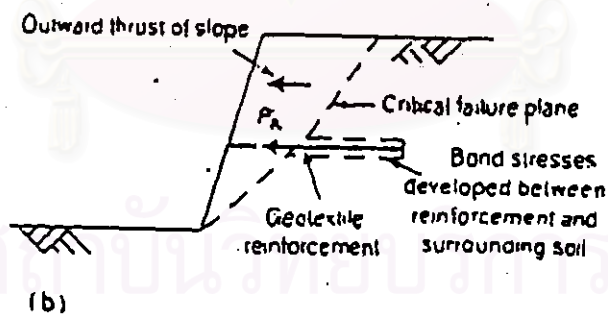
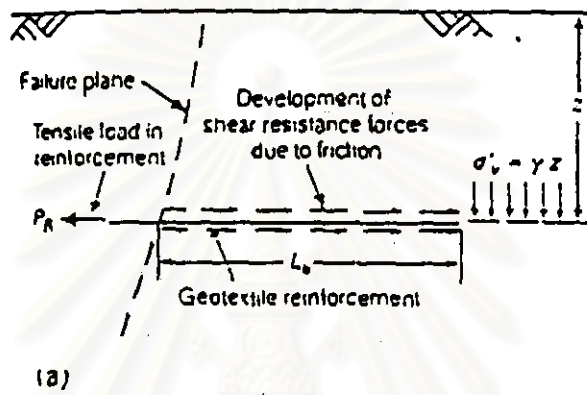
รูปที่ 2.23 พฤติกรรมของการส่งผ่านแรงระหว่างดินกับวัตถุเสริม (Henri Vidal, 1978)



รูปที่ 2.24 การส่งผ่านแรงระหว่างดินกับวัสดุเสริม โดยอาศัยแรงเสียดทาน (Mitchell, 1987)

ในการส่งผ่านแรงระหว่างดินกับวัสดุเสริมโดยอาศัยแรงเสียดทานนั้นมีหลักการสำคัญอยู่อย่างหนึ่งซึ่งทำให้หลักการของวัสดุเสริมดินแตกต่างจากหลักการอื่น ๆ ที่นำมาใช้เกี่ยวกับงานดินนั่นก็คือ เพื่อให้เกิดการส่งผ่านแรงโดยอาศัยแรงเสียดทานนั้น แรงดึงภายในแถบวัสดุเสริมจะต้องมีค่าไม่คงที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.24 ให้ดิน 2 จุดอยู่ห่างกันเป็นระยะ d_1 แรงดึงที่เกิดขึ้นภายในแถบวัสดุเสริมที่จุดทั้งสองเป็น F_1 และ F_2 ตามลำดับ และให้ $dF = F_1 - F_2$ จะได้ว่า dF นี้เป็นแรงเสียดทานของเม็ดดินนั้นนั่นเอง แต่ถ้าเป็นงานดินในลักษณะอื่น ๆ เช่นพวก Anchored Ties แล้ว แรงดึงที่เกิดขึ้นในแถบวัสดุเสริมจะมีค่าคงที่ตลอด ทำให้ไม่มีการส่งผ่านแรงระหว่างดินกับวัสดุเสริม ($dF = 0$) ดังนั้นในกรณีนี้จะไม่เกิดแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดดินขึ้นเลย

ซึ่งลักษณะของแรงยึดเกาะแบบ Friction Force แสดงไว้ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 Reinforcement and Soil Bond by Friction (Exxon, 1989)

จากรูปจะเห็นได้ว่าแรงเสียดทานระหว่างดิน กับวัสดุเสริม จะเกิดขึ้นในแนวขนานกับผิวของวัสดุเสริม

ดังนั้นแรงต้านทานต่อแรงดึงที่เกิดขึ้นภายในวัสดุเสริมเนื่องจากการส่งผ่านแรงโดยอาศัยแรงเสียดทาน เพื่อป้องกันการเลื่อนไถลของโครงสร้างวัสดุเสริมดินจะมีค่าเท่ากับ

$$P_{\text{resistance}} = 2 \sigma'_v L_b w \tan \phi_o \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

เมื่อ L_b = Length of Reinforcement Bond (m.)

โดยที่ $\tan \phi_o = f_b \tan \phi \quad \dots\dots\dots(2.16)$

เมื่อ f_b = Coefficient of Interaction

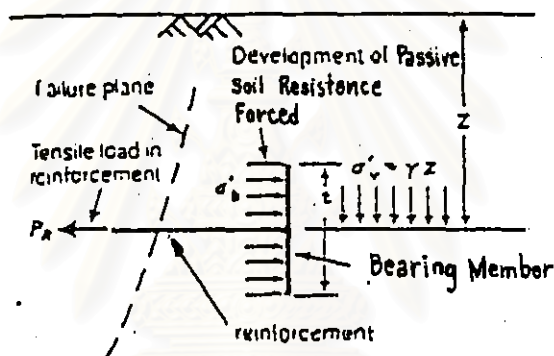
Exxon (1989) ได้เสนอค่า f_b ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุเสริม และมีค่าไม่เกิน 1.0 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงค่า Interaction Coefficient (f_b) ของวัสดุเสริมชนิดต่าง ๆ (Exxon, 1989)

Type of Geotextile	Interaction Coefficient (f_b)
WOVENS	0.5 - 0.9
NONWOVENS	0.6 - 0.8
KNITTEDS	0.8 - 0.9
STITCH-BONDED	0.75 - 0.9

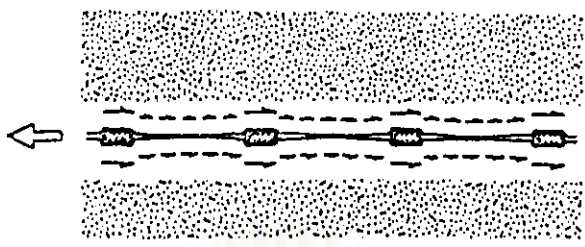
2.5.2 Passive Soil Resistance

สำหรับแรงยึดเกาะแบบ Passive Soil Resistance ที่เกิดขึ้นระหว่างดินกับวัสดุเสริมนั้น จะเกิดขึ้นในกรณีที่วัสดุเสริมที่ใช้มีลักษณะของผิวไม่แบนเรียบ โดยตลอดความยาว คือจะมีส่วนที่นูนขึ้นมาในลักษณะที่ดังฉากกับระนาบของวัสดุเสริมนั้น ซึ่งเรียกว่า Bearing Member โดยที่ตัว Bearing Member นี้เองที่จะทำหน้าที่ในการ Develop แรง Passive Soil Resistance ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.26

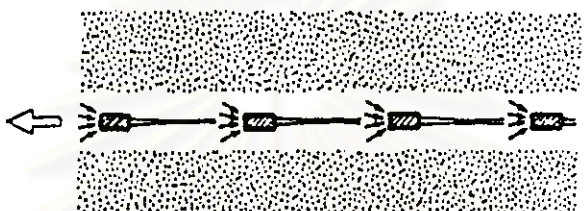


รูปที่ 2.26 Reinforcement and Soil Bond by Passive Soil Resistance
(Exxon, 1989)

ในกรณีของวัสดุเสริมที่อาศัยแรงยึดเกาะแบบ Passive Soil Resistance เช่น Geogrid โดยส่วนใหญ่จะมีแรงยึดเกาะแบบ Friction Load Transfer รวมอยู่ด้วย อันเป็นผลเนื่องมาจาก บริเวณของวัสดุเสริมในส่วนที่ไม่ใช่ Bearing Member นั้นเอง ดังรูปที่ 2.27



A) Friction Between Soil and Plane Surfaces



B) Soil Passive Resistance on Reinforcement Surfaces

รูปที่ 2.27 ลักษณะของแรงยึดเกาะแบบ Friction Load Transfer กับ Passive Soil Resistance ที่เกิดขึ้นระหว่างดินกับ Geogrid (Jewell, 1984)

ดังนั้นแรงต้านทานต่อแรงดึงทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในวัสดุเสริมเนื่องจากการส่งผ่านแรง โดย Passive Soil Resistance และ Friction Force เพื่อป้องกันการเลื่อนไถลของโครงสร้าง วัสดุเสริมดินจะมีค่าเท่ากับ

$$P_{\text{resistance}} = P_p + P_f \dots\dots\dots(2.17)$$

เมื่อ P_p = Shearing Resistance Developed by Passive Soil Resistance (ton)

P_f = Shearing Resistance Developed by Friction between Soil and Plane Surface (ton)

ซึ่งแรงต้านทานต่อแรงดึงภายในวัตถุเสริมที่เกิดจากแรงยึดเกาะแบบ Passive Soil Resistance (P_p) จะมีค่าเท่ากับ

$$P_p = \alpha_b w t \sigma'_b n \quad \dots\dots\dots(2.18)$$

- เมื่อ
- σ'_b = Available End Bearing Stress (t/m^2)
 - t = Thickness of the Reinforcement (m.)
 - n = The Number of Transverse Bearing Member
 - α_b = Fraction of Width (w) Available for Bearing

โดยที่ : Transverse and Longitudinal Members are in different horizontal plane such as Welded Grid $\alpha_b = 1$

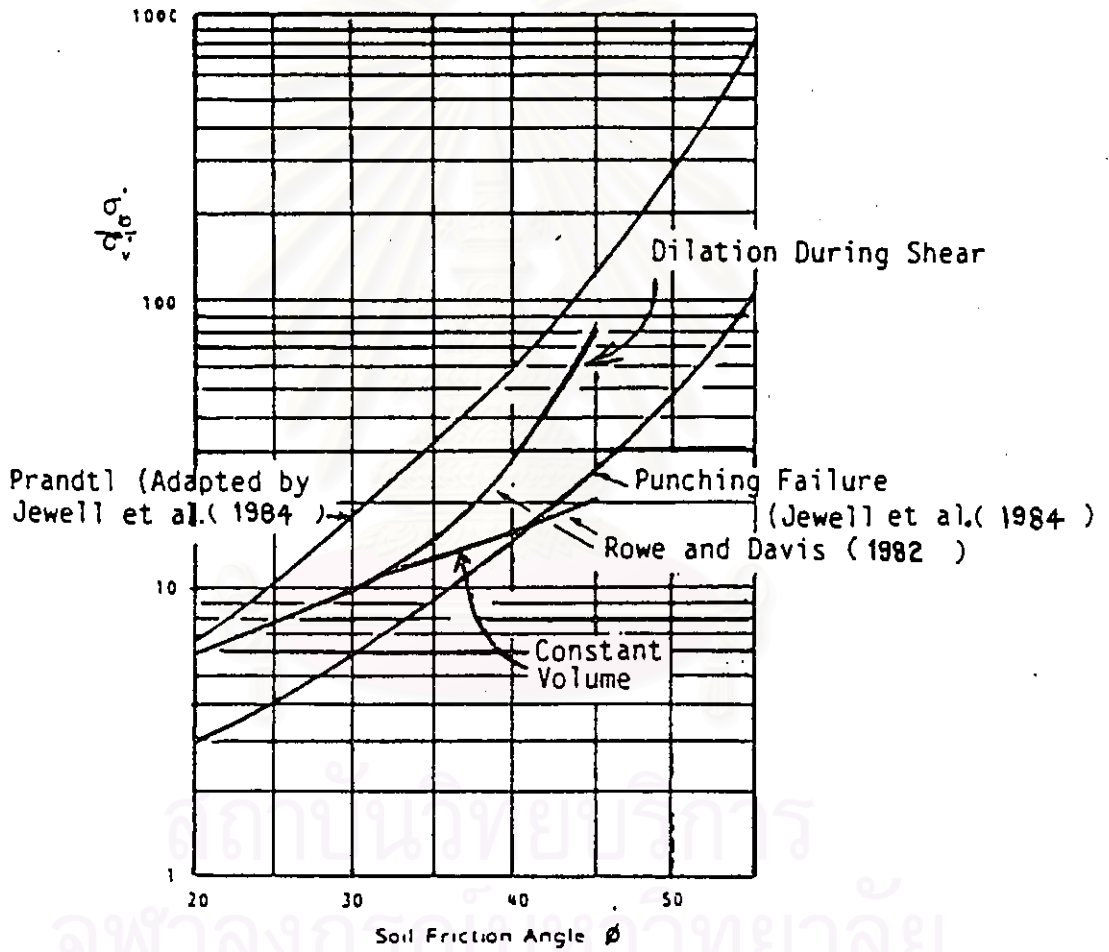
: Grid system , such as Tensar which all member are in the same plane $\alpha_b < 1$ (For Tensar Geogrid Type SR55 use $\alpha_b = 0.38$)

Rowe (1982) ได้เสนอความสัมพันธ์ของค่า Available End Bearing Stress (σ'_b) ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปฟังก์ชันของ หน่วยแรงในแนวตั้งประสิทธิผล (Vertical Effective Stress) ได้ดังนี้

$$\sigma'_b = F'_r \sigma'_v \quad \dots\dots\dots(2.19)$$

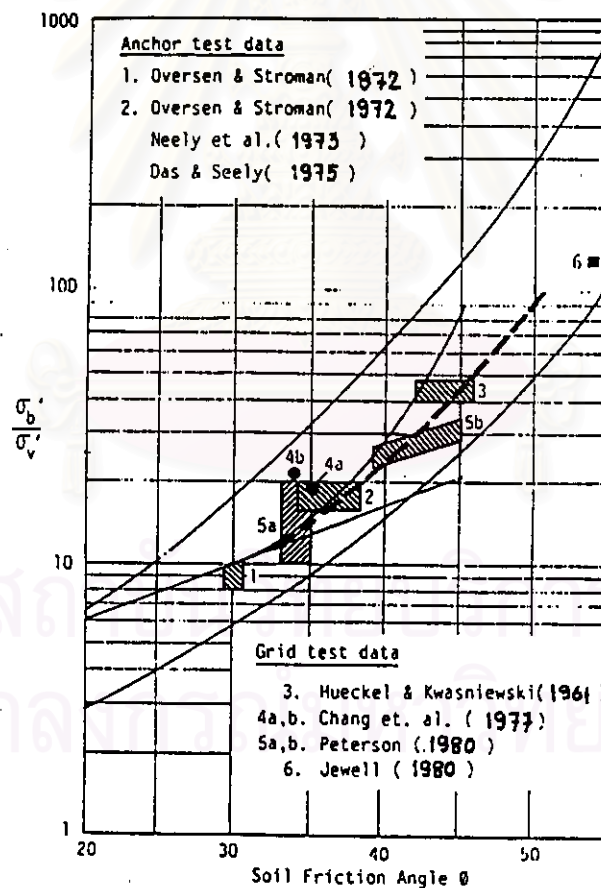
เมื่อ F'_r = Soil Bearing Stress Ratio

ในการหาค่า σ'_b นั้น Rowe & Davis (1982) และ Jewell et. al. (1984) ได้เสนอกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soil Bearing Stress Ratio (σ'_b / σ'_v) กับ Friction Angle (ϕ) ดังแสดงในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 Relationships between Bearing Stress Ratio and Soil Friction Angle
 (Jewell, 1984)

ซึ่งจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.28 นี้ จะเป็นความสัมพันธ์ที่ได้มาจากการวิเคราะห์ด้วยหลักการทางทฤษฎี ได้แก่การวิเคราะห์ด้วยหลักการทาง Finite Element Method ทำให้ต่อมาภายหลัง Jewell et. al. (1984) ได้ทำการรวบรวมผลการทดลองต่าง ๆ ที่ได้มีการทำการทดลองกับตัวอย่างจริงเอาไว้ก่อนหน้านี้ โดยใช้วัสดุเสริมประเภท Anchor และ Grid Reinforcement ด้วยการทดลองแบบ Pullout Test และ Direct Shear Test เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎี ดังแสดงในรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 Comparison of Test Result with Predicted Value of Bearing Stress

จากผลการทดลองในกรณีที่ใช้ Grid Reinforcement นั้น ผู้ที่ได้ทำการทดลองจะประกอบไปด้วย Hueckel and Kwasniewski (1961) ซึ่งทำการทดสอบโดยวิธี Pullout Test กับ Grid Reinforcement ที่มีความยาวน้อย ๆ ใส่เอาไว้ภายในตัวอย่างทราย, Chang et. al. (1977) and Peterson (1980) ซึ่งทำการทดสอบโดยวิธี Pullout Test กับตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ และ Jewell (1980) ซึ่งทำการทดสอบโดยใช้วิธีการทดสอบแบบ Direct Shear Test

จากผลการทดลอง (รูปที่ 2.29) จะเห็นได้ว่า ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ Pullout Test หรือ Direct Shear Test นั้นจะมีค่าอยู่ภายในขอบเขตของกราฟรูปที่ 2.28 ดังนั้นจึงสามารถใช้กราฟในรูปที่ 2.28 เพื่อการหาค่า σ'_v ได้ โดยเมื่อทราบค่า Friction Angle (ϕ) ของทรายที่ใช้แล้ว จากการประมาณค่าภายในกราฟรูปที่ 2.28 ก็จะได้ค่า Soil Bearing Stress Ratio (σ'_b / σ'_v) ซึ่งเมื่อทราบความลึกในจุดที่พิจารณา ก็สามารถหาค่า σ'_v เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่า σ'_b จากสมการ 2.19 ต่อไปได้

สำหรับแรงต้านทานต่อแรงดึงภายในวัสดุเสริมแบบ Grid Reinforcement ที่เกิดขึ้นจากแรงยึดเกาะแบบ Friction Force (P_f) เพียงอย่างเดียว นั้น จะมีค่าเท่ากับ

$$P_f = 2A_r \alpha_s \sigma'_v \tan \phi \quad \dots\dots\dots(2.20)$$

เมื่อ $A_r =$ Area of the Grid (wL_r) (m^2)

$\alpha_s =$ Fraction of Grid Surface Area that is solid

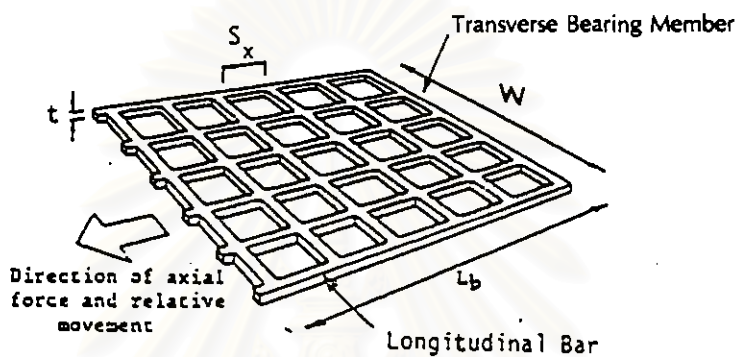
(For Tensar Geogrid Type SR55 use $\alpha_s = 0.54$)

สำหรับในกรณีของ Grid Reinforcement ที่ระยะห่างระหว่าง Transverse Bearing Members มีค่าใกล้เคียงกันมาก เราสามารถถือได้ว่า ดิน และ วัสดุเสริม มีลักษณะรวมกันเป็น Sheet ที่มีความหนา s และคำนวณหาแรงต้านทานต่อแรงดึงที่เกิดขึ้นได้ ตามสมการของแรงดึงที่ได้จาก Friction Load Transfer ดังนี้

$$P_{\text{resistance}} = 2 w S_x n \sigma'_v \tan \phi \quad \dots\dots\dots(2.21)$$

เมื่อ S_x = Longitudinal Spacing of Transverse Bearing Members (m.)

ลักษณะทาง Geometry ของ Grid Reinforcement แสดงไว้ดังรูปที่ 2.30



$A_g = WL_b$ Grid surface area

α_s Fraction of grid surface area that is solid

α_b Fraction of grid width b available for bearing

รูปที่ 2.30 Geometry of Grid Reinforcement (Jewell, 1984)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

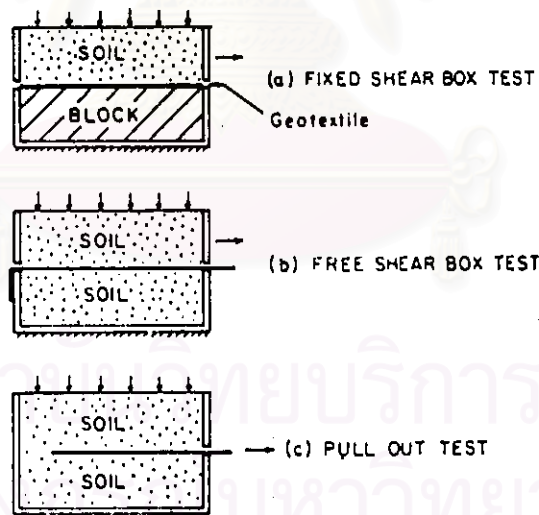
2.6 วิธีการหาความเสียดทานระหว่างทรายกับวัสดุเสริม

ในปี 1982 นาย T.S. Ingold ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับวิธีการทดสอบเพื่อหาค่าความเสียดทานระหว่างทรายกับวัสดุเสริม โดยใช้วิธีการทดสอบ 2 วิธีด้วยกันคือ Shear Box Test และ Pull Out Test โดยวิธี Shear Box Test จะแยกออกได้อีกเป็น 2 วิธีย่อยคือ Fixed Shear Test และ Free Shear Test (ซึ่งลักษณะของการทดลองทั้ง 3 แบบแสดงไว้ดังรูปที่ 2.31) และใช้วัสดุเสริมในการทดลองทั้งหมด 3 ชนิด คือ Woven Geotextile , Nonwoven Geotextile และ Geogrid ส่วนขนาดของ ตัว Shear Box ที่ใช้ในการทดสอบจะมีอยู่ 3 ขนาด คือ

ขนาด 60 * 60 mm ใช้ในการทดสอบแบบ Fixed Shear Test

ขนาด 300 * 300 mm ใช้ในการทดสอบแบบ Fixed Shear Test และ Free Shear Test

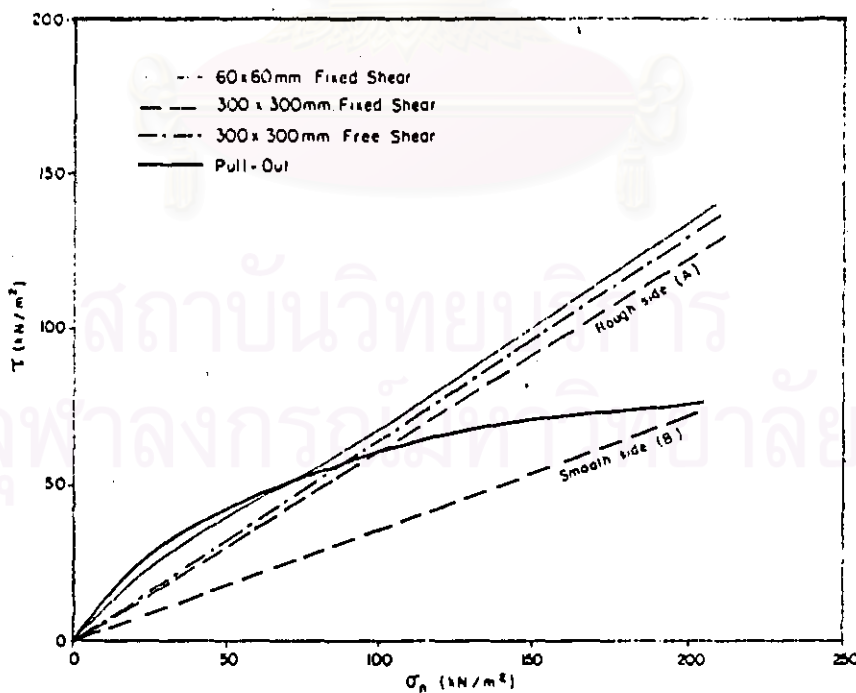
ขนาด 285 * 500 mm ใช้ในการทดสอบแบบ Pull Out Test



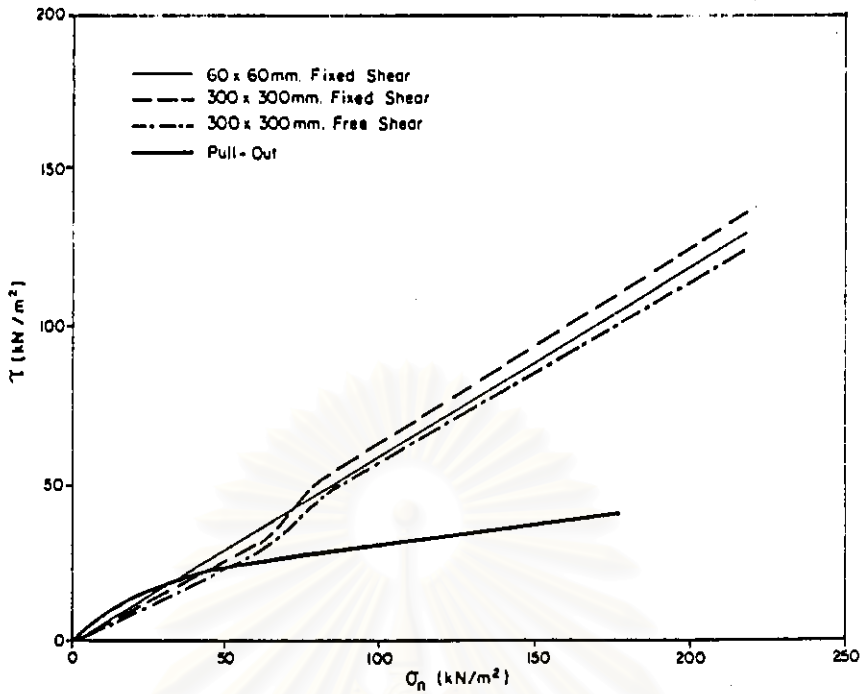
รูปที่ 2.31 แสดงวิธีการทดสอบเพื่อหาค่าความเสียดทานระหว่างทรายกับวัสดุเสริมแบบต่างๆ (T.S. INGOLD , 1982)

ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.32 , 2.33 , 2.34 , 2.35 , 2.36 , 2.37 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ค่ามุมเสียดทานระหว่างทรายกับวัสดุเสริม (ϕ_o) จะสามารถหาได้จากกราฟ โดยที่ $\phi_o = \tan^{-1} (\tau / \sigma_n)$ และมุมเสียดทานระหว่างทรายกับวัสดุเสริมนี้จะมีค่าค่อนข้างคงที่ในการทดสอบแบบ Shear Box Test ส่วนในการทดสอบแบบ Pull Out Test นั้นค่ามุมเสียดทานระหว่างทรายกับวัสดุเสริม จะขึ้นอยู่กับค่าหน่วยแรงในแนวตั้งฉาก ก็จะมีค่าลดลงเมื่อหน่วยแรงตั้งฉากมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสาเหตุที่ทำให้การทดสอบแบบ Pull Out Test ได้ค่ามุมเสียดทานระหว่างทรายกับวัสดุเสริมมีค่าไม่คงที่ เขาได้สรุปว่ามีสาเหตุมาจากความสามารถในการยืดตัว (Extensibility) ของ Geotextile เวลาที่ทำการดึงวัสดุเสริมออกจากทรายในการทดสอบแบบ Pull Out Test นั้นเอง

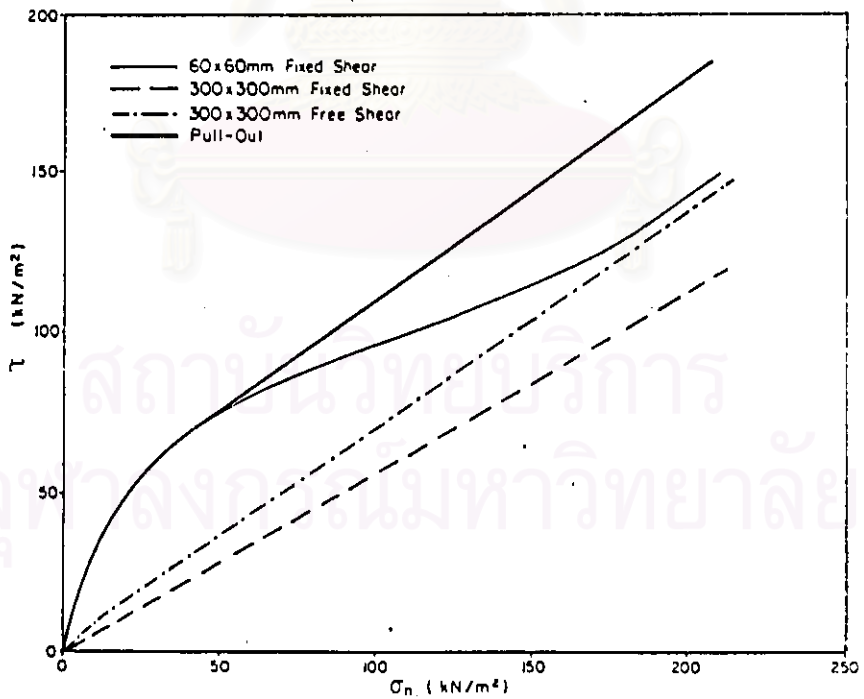
ซึ่งจากปัญหาดังกล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่า เนื่องจากการทดสอบแบบ Shear Box Test นี้ให้ค่ามุมเสียดทานระหว่างทรายกับวัสดุเสริมมีค่าค่อนข้างคงที่ ทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ข้อมูลเมื่อเทียบกับการทดสอบแบบ Pull Out Test ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้การทดสอบ Shear Box Test แบบ Free Shear Test เพื่อหาค่าแรงเสียดทานระหว่างทรายกับวัสดุเสริมนั่นเอง



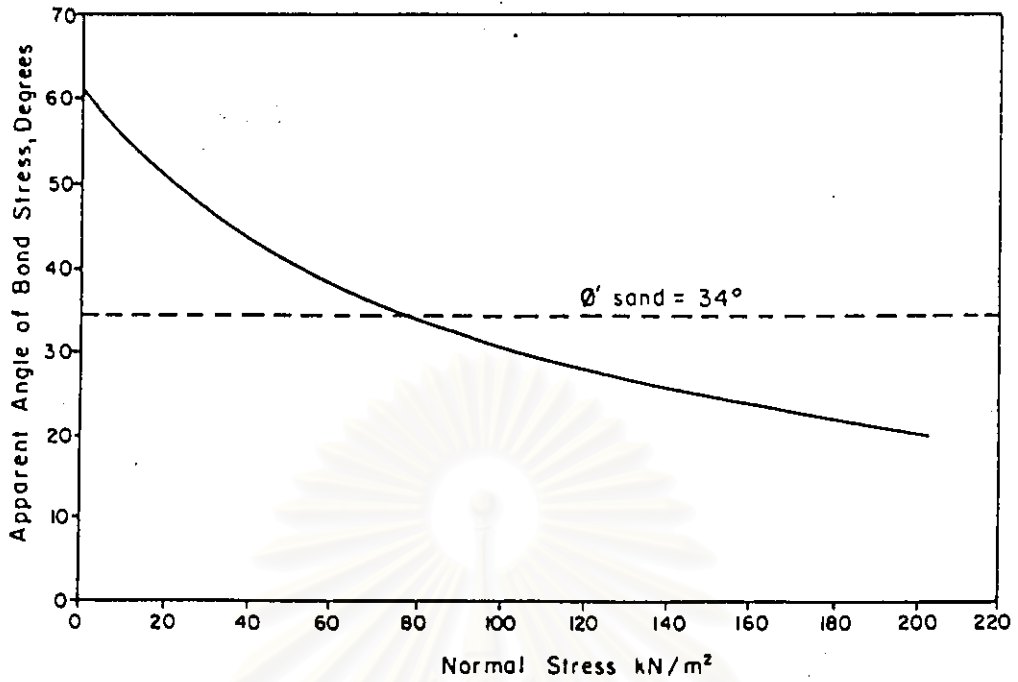
รูปที่ 2.32 Comparison of test result : Woven Material (T.S. INGOLD , 1982)



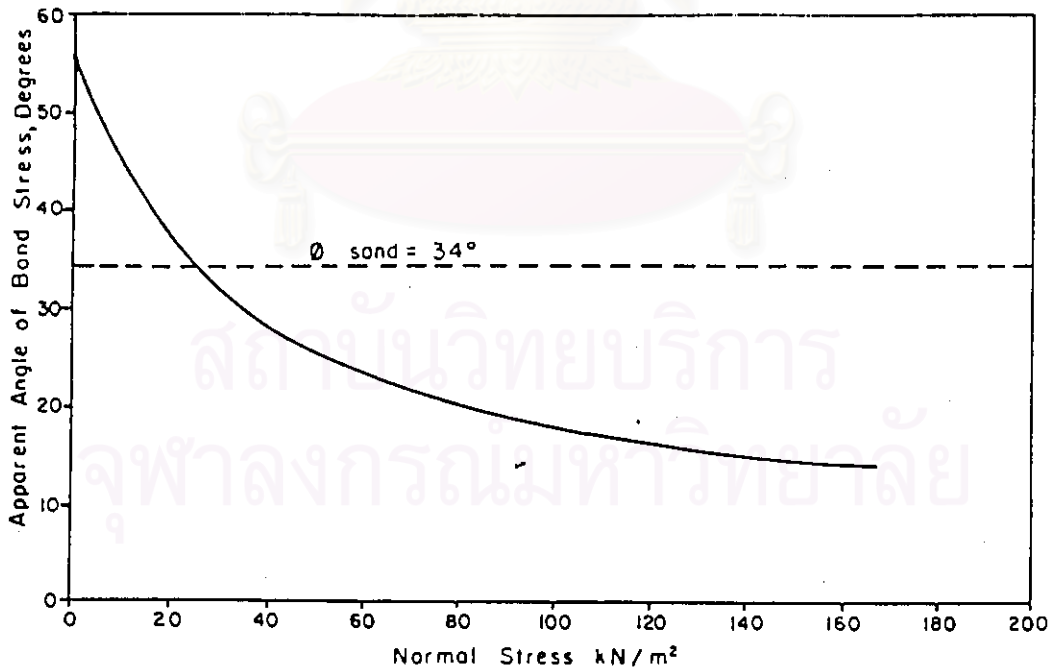
รูปที่ 2.33 Comparison of test result : Nonwoven Material (T.S. INGOLD , 1982)



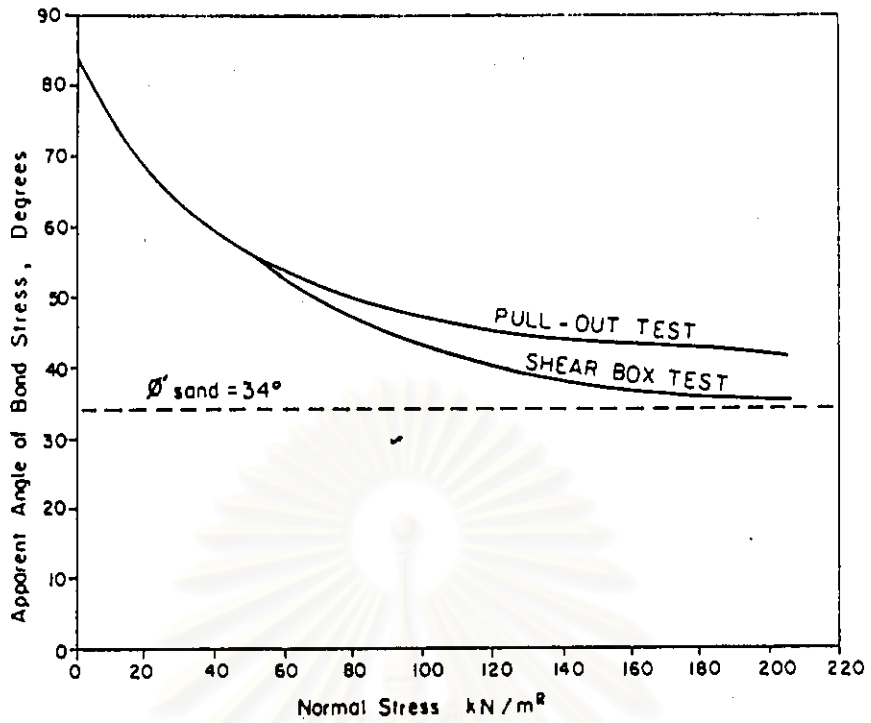
รูปที่ 2.34 Comparison of test result : Geogrid Material (T.S. INGOLD , 1982)



รูปที่ 2.35 Variation of angle bond stress for pull out test : Woven Material
(T.S. INGOLD , 1982)



รูปที่ 2.36 Variation of angle bond stress for pull out test : Nonwoven Material
(T.S. INGOLD , 1982)



รูปที่ 2.37 Variation of angle bond stress for pull out test : Geogrid Material
(T.S. INGOLD , 1982)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.7 แผงกันดินด้านหน้า (Facing Element)

แผงกันดินด้านหน้า (Facing) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญส่วนหนึ่งในโครงสร้างวัสดุเสริมดินเนื่องจากสำหรับโครงสร้างวัสดุเสริมดินที่มีความลาดเอียงของโครงสร้างสูงมาก ๆ นั้น จำเป็นจะต้องใช้แผงกันดินด้านหน้า เพื่อป้องกันการรูกักตเซาะและการเลื่อนไหลของดินออกมา อีกทั้งแผงกันดินด้านหน้ายังทำให้เกิดความสวยงามทางสถาปัตยกรรมกับตัวโครงสร้างอีกด้วย ในการใช้งานควรทำให้แผงกันดินด้านหน้ามีรูเพื่อระบายน้ำออกจากดินด้วย

แผงกันดินด้านหน้านี้จะสามารถทำมาจากวัสดุหลายชนิดด้วยกัน ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดก็จะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน ขนาดของโครงสร้าง และรูปร่างลักษณะของวัสดุที่ใช้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงข้อดีและข้อเสียของวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้ทำแผงกันดินด้านหน้า

(Colin Jones, 1985)

<i>Materials</i>	<i>Potential advantages</i>	<i>Potential disadvantages</i>	<i>Other considerations</i>
Aluminium	Durable Easily transported and handled Very versatile for erection purposes Can be cast	Requires experience in extrusion techniques for manufacturer Aesthetics (surface finish may deteriorate or distort) May encourage electrolytic action	Little used to date
Brick or masonry	Good material common to industry Good aesthetics Very durable	Produces a stiff facing unsuitable for soft foundations or where differential movements are likely Not particularly suited to tall structures	Very suitable for small structures
Concrete precast slabs	Technique available to industry, no need for further development Finisher good Relatively inexpensive, although s. steel lugs can be expensive Particularly suited to large construction where cost of formwork is low	Care required over durability, air entrainment may be necessary Shape of unit critical to rate of production and cost Rate of production and cost dependent upon the lead time available for manufacture	Most common form of facing
Concrete pressed slabs	Durability and finish very good Once system developed, individual units have very low cost Weight of proposed units can be within the lifting capacity of one man	Difficult to reinforce Potential staining problem from reinforcement Fixing of lugs into unit difficult Formation of holes in unit difficult Shape of unit is critical to production technique	Little used to date

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

<i>Materials</i>	<i>Potential advantages</i>	<i>Potential disadvantages</i>	<i>Other considerations</i>
Concrete prestressed	Readily available, if adopted from existing construction elements, e.g. Double Tee Very durable Easily transported and erected Good aesthetics	Best suited to small and medium-height structures	Most durable form of facing
Fabric/textiles/geogrids	Very lightweight Very flexible Good for temporary structures Good for military structures	Aesthetics Durability (UV, rodents, and vandals)	Covering face with soil or vegetation eliminates problems
Glass-reinforced cement, GRC	Very resistant to impact Finish good and economic in material Fixing of lugs presents no problems Factory production if spray-up manufacture used	New material which may not be completely understood Premix manufacture in early stages of development Manufacturers costs can be high	Little used because of cost
Glass-reinforced plastic, GRP	Durable and strong, very resistant to impact Finish is good Very light and easily shaped Rate of unit output high	Colour affected by ultra-violet light Susceptible to damage from intense heat	Used in maintenance
Plastics (PVC, ABS)	Very light-weight, strong Finish good Easily shaped Rate of unit output high and easily transported	Melts at relatively low temperatures Fairly new materials, life expectancy unknown Some materials susceptible to ultra-violet light Creep characteristics not known Durability	Used in maintenance
Steel, galvanized	Relatively inexpensive Easily transported, rate of production high Easily shaped Good for industrial structures	Durability Aesthetics	Normally used with industrial environment
Steel, stainless (316)	Durable Easily transported, rate of production high Easily shaped	Special surface treatments increase cost significantly Can be expensive Thin sections lead to great flexibility	
Steel, weather resistant	Relatively inexpensive Interesting architectural finish	Overlapping thin plates corrode	
Timber (planks)	Readily available Particularly suitable for short life or temporary structures Suitable for third world countries	Aesthetics Susceptible to termites, etc.	Roman structures, recently discovered
Timber (plywood)	Readily available Suitable for short life/ temporary structures Suitable for small-scale structures	Not suitable for long life Durability	

2.8 สภาพการวิบัติของโครงสร้างวัสดุเสริมดิน

สำหรับโครงสร้างวัสดุเสริมดินที่ทำการก่อสร้างเป็นแบบ Vertical Slope นั้น โครงสร้างวัสดุเสริมดินจะต้องสามารถทนต่อแรงดึงที่เกิดขึ้นในดินได้ และต้องมีค่าแรงยึดเกาะระหว่างดินกับวัสดุเสริมมากเพียงพอ เพื่อไม่ให้เกิดการเลื่อนไหลของวัสดุเสริมกับดิน ดังนั้นในกรณีนี้เรา จะแบ่งสภาพการวิบัติของโครงสร้างวัสดุเสริมดินออกได้เป็น 2 กรณีคือ

2.8.1 Tension Failure

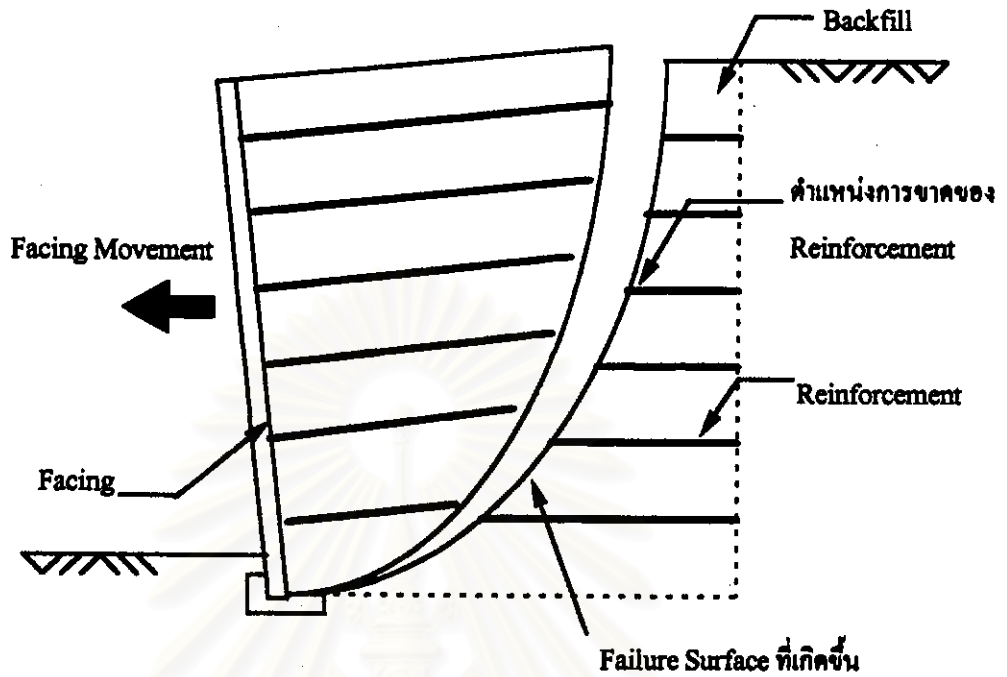
เกิดขึ้นเมื่อแรงยึดเกาะของวัสดุเสริมกับดินมีค่ามากพอและแรงดันทางด้านข้างมีค่าเกินกว่าแรงดึงสูงสุดที่วัสดุเสริมจะรับได้ทำให้เกิดการขาดขึ้นที่ตัววัสดุเสริม เป็นผลให้เกิดการพังทลายขึ้น(ดังรูปที่ 2.38)

จากรูปที่ 2.38 จะเห็นได้ว่าเมื่อโครงสร้างวัสดุเสริมดินเกิดการเคลื่อนตัว จนกระทั่งแรงดันด้านข้างมีค่ามากกว่าแรงดึงสูงสุดในตัววัสดุเสริม ในขณะที่แรงยึดเกาะของวัสดุเสริมกับดินมีค่ามากกว่าแรงดันทางด้านข้างที่เกิดขึ้น ทำให้ตัววัสดุเสริมนั้นขาดออกจากกัน ในบริเวณที่ Failure Surface ดัดผ่าน ซึ่งเป็นจุดที่วัสดุเสริมไม่สามารถรับแรงดึงที่เกิดขึ้นได้มากกว่านี้อีกแล้ว

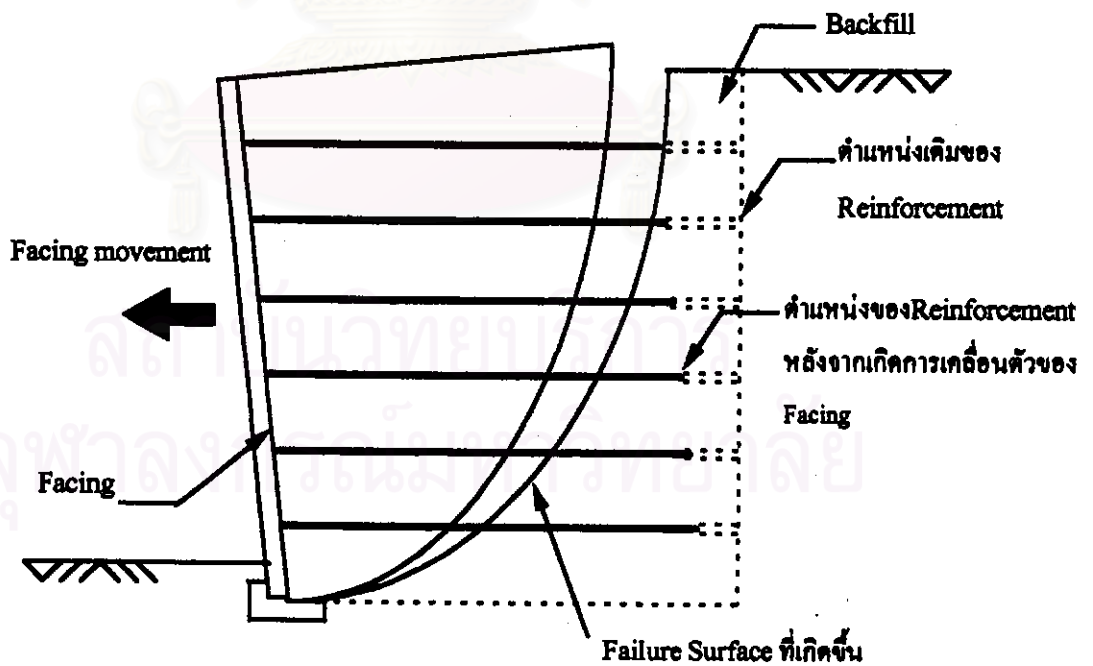
2.8.2 Pull - Out Failure

เกิดขึ้นเมื่อแรงยึดเกาะของวัสดุเสริมกับดินมีค่าไม่มากพอ ทำให้เกิดการเลื่อนไหลระหว่างผิววัสดุเสริมกับมวลดินโดยรอบ เป็นผลให้วัสดุเสริมเกิดการเลื่อนออกจากตำแหน่งเดิม ตามการเคลื่อนที่ของแผงกันดินด้านหน้า (Facing) (ดังรูปที่ 2.39)

จากรูปที่ 2.39 จะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างวัสดุเสริมดินโดยที่แรงยึดเกาะของวัสดุเสริมกับดินมีค่าน้อยกว่าแรงดันทางด้านข้างที่เกิดขึ้น จะทำให้ตัววัสดุเสริมที่เสริมอยู่นั้นเกิดการเลื่อนออกจากตำแหน่งเดิมที่ทำการเสริมไว้(จากรูปที่ 2.39 ตำแหน่งเดิมคือบริเวณที่เป็นเส้นประ) ในทิศทางเกี่ยวกับการเคลื่อนตัวของโครงสร้างวัสดุเสริมดิน จนกระทั่งความยาวที่ใช้ในการ develop แรงยึดเกาะมีค่าน้อยลงอย่างมาก ทำให้เกิดการพังทลายขึ้น



รูปที่ 2.38 สภาพวิบัติของโครงสร้างวัสดุเสริมดินแบบ Tension Failure



รูปที่ 2.39 สภาพวิบัติของโครงสร้างวัสดุเสริมดินแบบ Pull - Out Failure

2.9 การวิเคราะห์เสถียรภาพของโครงสร้างวัตถุเสริมดิน

ในการวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพของโครงสร้างวัตถุเสริมดินนั้น จะสามารถทำการวิเคราะห์ได้ 2 แบบด้วยกันคือ Local Stability และ Overall Stability

2.9.1 Local Stability Analysis

สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของโครงสร้างวัตถุเสริมดินในแบบ Local Stability นั้น จะพิจารณาวัดดินบริเวณที่อยู่โดยรอบวัตถุเสริมเพียงชั้นใดชั้นหนึ่งเท่านั้น

- การวิเคราะห์กรณี Tension Failure

จากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.5 ถ้าแรงดันด้านข้างของดินเกินกว่าค่า Rankine Active Earth Pressure จะได้ค่าแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นในแผ่นวัตถุเสริมที่ความลึก Z ใด ๆ คือ

จากสมการ 2.13

$$P_{R(max)} = K_a \gamma Z w S_v \quad (\text{เป็นแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของดินเพียงอย่างเดียว})$$

จากสมการ 2.14

$$P_{R(max)} = K_a (\gamma Z + q) w S_v \quad (\text{เมื่อบวกน้ำหนักจากภายนอกในลักษณะแผ่กระจาย})$$

ถ้ากำหนดให้หน่วยแรงต่อหน่วยความยาวที่จุดกลางของวัตถุเสริมเป็น σ_y และวัตถุเสริมที่ใช้มีความกว้าง (w) จะได้แรงต้านทาน ($P_{resistance}$) ที่เกิดจากวัตถุเสริม ดังนี้

$$P_{resistance} = \sigma_y w \quad (\text{ต่อวัตถุเสริม 1 ชั้น}) \quad \dots\dots\dots(2.22)$$

ดังนั้นถ้าต้องการหาค่าความปลอดภัย (Factor of Safety, F. S.) จะได้ว่า

$$\text{Factor of Safety (F. S.)} = \frac{\text{แรงต้านทาน (P}_{\text{resistance}}\text{)}}{\text{แรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้น (P}_{\text{R(max)}}\text{)}}$$

● การวิเคราะห์กรณี Pull - Out Failure

จากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.8 นั้น สภาพการวิบัติในลักษณะ Pull - Out Failure นี้ จะเกิดขึ้นเมื่อแรงยึดเกาะของวัสดุเสริมดินมีค่าน้อยกว่า แรงดันทางด้านข้างที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่ ความยาววัสดุเสริม และมุมเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุเสริมกับดิน ดังนั้นแรงต้านทาน (P_{resistance}) ที่เกิดจากวัสดุเสริมจะมีค่าดังนี้

For Geotextile Reinforcement

จากสมการ 2.15

$$P_{\text{resistance}} = 2 \sigma'_v L_b w \tan \phi_o \quad (\text{ต่อวัสดุเสริม 1 ชั้น})$$

For Geogrid Reinforcement

จากสมการ 2.17

$$\begin{aligned} P_{\text{resistance}} &= P_p + P_f \quad (\text{ต่อวัสดุเสริม 1 ชั้น}) \\ &= \alpha_b w t \sigma'_{v,n} + 2A_r \alpha_s \sigma'_v \tan \phi_o \end{aligned}$$

ดังนั้น

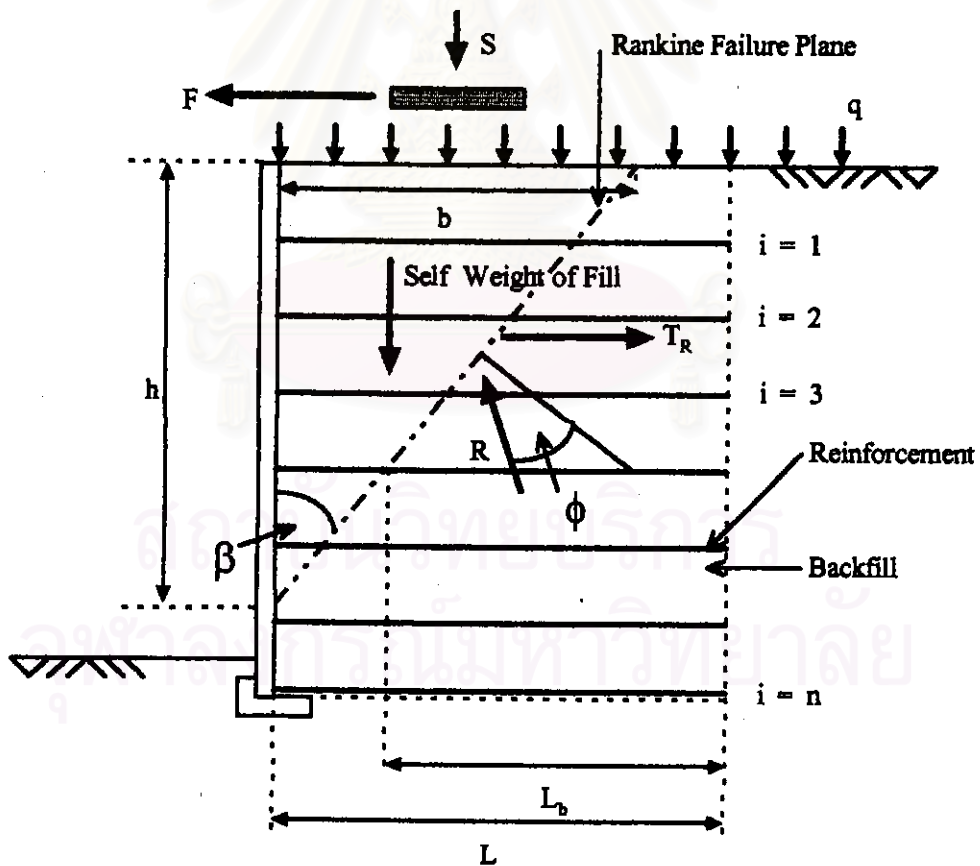
$$\text{Factor of Safety (F. S.)} = \frac{\text{แรงต้านทาน (P}_{\text{resistance}}\text{)}}{\text{แรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้น (P}_{\text{R(max)}}\text{)}}$$

2.9.2 Overall Stability Analysis

สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของโครงสร้างวัตถุเสริมดินในแบบ Overall Stability นั้น จะพิจารณามวลดินบริเวณที่อยู่โดยรวมทั้งหมดในรูปของ Block หรือ Wedge โดยวิธีวิเคราะห์แบบ Wedge Analysis

ซึ่งในการวิเคราะห์แรงดึงทั้งหมดที่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างวัตถุเสริมดินนั้น ในการคำนวณเพื่อหาค่าแรงนี้จะขึ้นอยู่กับรูปร่างลักษณะของ Failure Plane ที่เกิดขึ้นด้วยว่ามีรูปร่างอย่างไร เช่น เป็นแบบ Rankine หรือแบบ Bilinear เป็นต้น

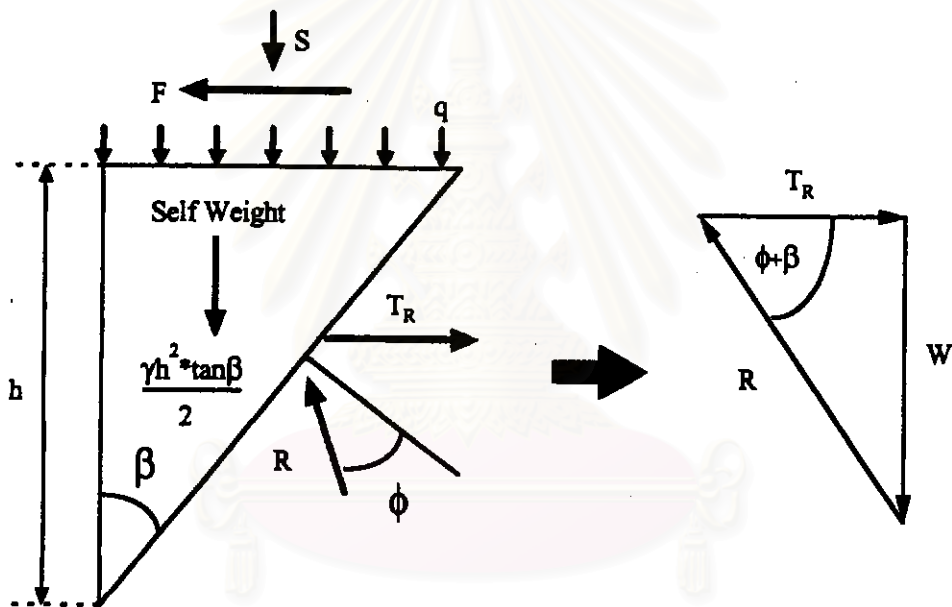
- กรณี Failure Plane มีลักษณะแบบ Rankine



รูปที่ 2.40 Indicates the Loads and Forces to be considered in the analysis in case of Rankine Failure Plane (Colin Jones, 1985)

จากรูปที่ 2.40 แรงที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์มีดังนี้

1. Self - Weight of the Fill in the Wedge
2. Uniformly Distributed Surcharge (q)
3. Vertical Loading (S)
4. Horizontal Loading (F)
5. The Resultant Force (R) on the Potential Failure Plane
6. Total Tension (T_R) in the Reinforcement intercepted by the Potential Failure Plane



รูปที่ 2.41 การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยวิธี Wedge Analysis ในกรณีลักษณะของ Wedge เป็นแบบ Rankine Failure Plane

พิจารณา Wedge ในรูปที่ 2.41 จะได้ว่า

แรงดึงทั้งหมดที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างวัตถุเสริมดินมีค่าเท่ากับ

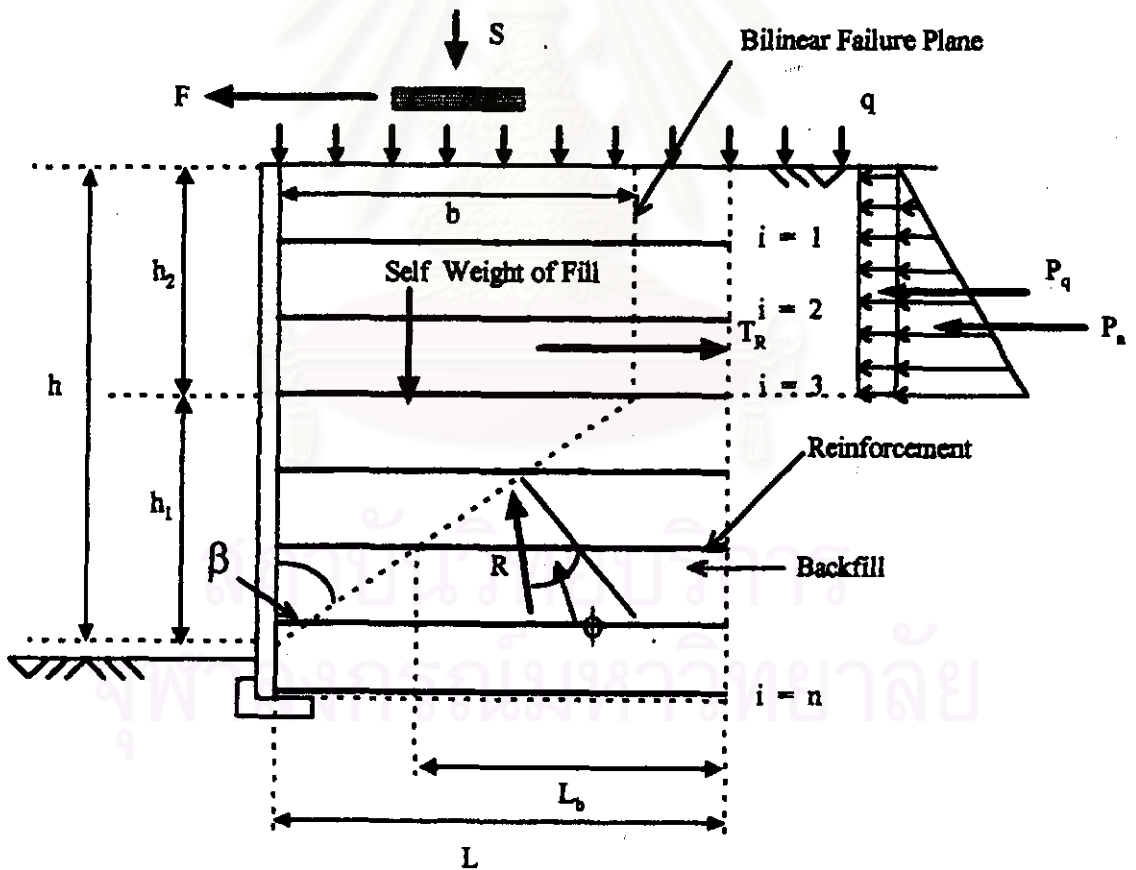
$$T_R = \frac{W}{\tan(\phi + \beta)} \dots\dots\dots(2.23)$$

โดยที่ W = น้ำหนักของ Wedge ทั้งหมด

For General Case $T_R = \left[\frac{h \cdot \tan\beta (\gamma h + 2q) + 2S}{2 \tan(\phi + \beta)} \right] + F$ (2.24)

For $F=0, S=0$ $T_R = \frac{h \cdot \tan\beta (\gamma h + 2q)}{2 \tan(\phi + \beta)}$ (2.25)

● กรณี Failure Plane มีลักษณะแบบ Bilinear



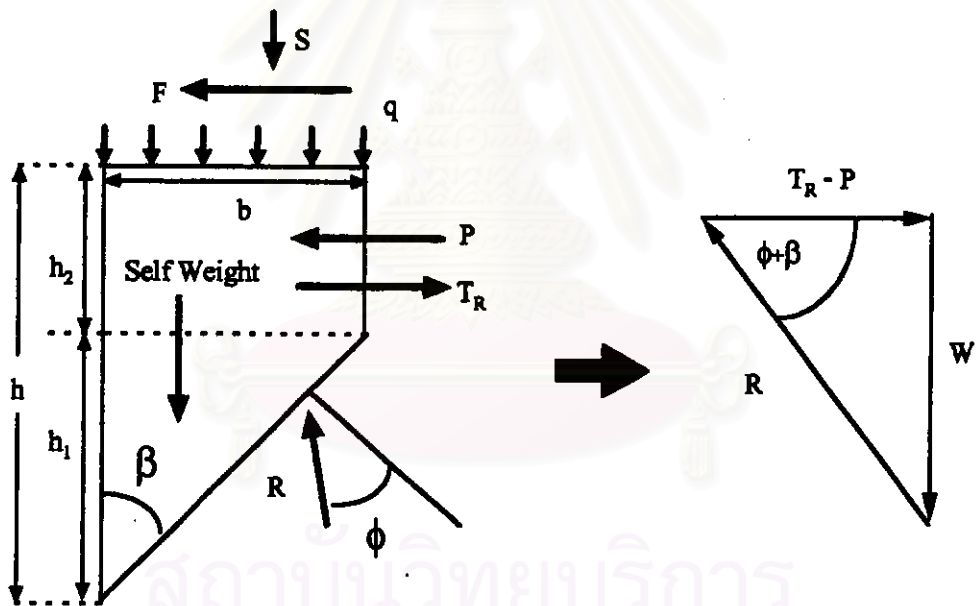
รูปที่ 2.42 Indicates the Loads and Forces to be considered in the analysis in case of Bilinear Failure Plane (Colin Jones, 1985)

จากรูปที่ 2.42 $P_a =$ The Active Force per Unit Length
 $= \frac{1}{2} K_a \gamma h_2^2$ (2.26)

$P_q =$ The Force per Unit Length from Uniformly Distributed Surcharge
 $= K_a q h_2$ (2.27)

ดังนั้นให้ $P = P_a + P_q$ (2.28)

∴ จะได้ว่า $P = \frac{1}{2} K_a \gamma h_2^2 + K_a q h_2$ (2.29)



รูปที่ 2.43 การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยวิธี Wedge Analysis ในกรณี
 ลักษณะของWedge เป็นแบบ Bilinear Failure Plane

พิจารณา Wedge ในรูปที่ 2.43 จะได้ว่า

$$T_R - P = \frac{W}{\tan(\phi + \beta)} \quad \text{.....(2.30)}$$

∴ แรงดึงทั้งหมดที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างวัสดุเสริมดินมีค่าเท่ากับ

$$T_R = \frac{W}{\tan(\phi + \beta)} + P \quad \text{.....(2.31)}$$

โดยที่ W = น้ำหนักของ Wedge ทั้งหมด

$$\text{For General Case} \quad T_R = \left[\frac{\gamma(h + h_2)b + 2qb + 2S}{2 \tan(\phi + \beta)} \right] + F + P \quad \text{.....(2.32)}$$

$$\text{For } F = 0, S = 0 \quad T_R = \frac{\gamma(h + h_2)b + 2qb}{2 \tan(\phi + \beta)} + P \quad \text{.....(2.33)}$$

ถ้าหับแรงต้านทาน ($T_{resistance}$) ทั้งหมดที่เกิดขึ้นโดยคิดจากจำนวนวัสดุเสริมทั้งหมดที่
เส้น Failure Plane ตัดผ่าน จะมีค่าดังนี้

- กรณี Tension Failure

โดยทั่วไปมักจะไม่ใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบ Overall Stability Analysis กับกรณี Tension Failure เนื่องจากในโครงสร้างวัสดุเสริมดินนั้น ถ้าวัสดุเสริมตัวใดตัวหนึ่งเกิดขาดขึ้นเพียงตัวเดียวก็ตาม ก็จะทำให้โครงสร้างนั้นเกิดการพังทลายขึ้นแล้ว จึงไม่สามารถที่จะกำหนดได้ว่า แรงต้านทานทั้งหมด ($T_{resistance}$) ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับผลรวมของ Tensile Strength ของวัสดุเสริมทั้งหมดที่ใช้เสริม เนื่องจากถ้าใช้ผลรวมของ Tensile Strength ของวัสดุเสริมทั้งหมดที่นำมาเป็นค่าแรงต้านทานทั้งหมดที่เกิดขึ้นแล้ว จะได้ค่าแรงต้านทานต่อการพังทลายมากเกินไปเกินความเป็นจริง หมายความว่าถ้าจะให้โครงสร้างเกิดการพังทลายขึ้นแรงที่มา

กระทำจะต้องสามารถทำให้วัสดุเสริมที่ใช้ทั้งหมดเกิดการขาดขึ้นทุกตัว ซึ่งจริงๆ แล้วเพียงตัวเดียวที่ขาดก็จะถือว่าโครงสร้างดินได้เกิดการพังทลายขึ้นแล้ว ดังนั้นในการวิเคราะห์กรณี Tension Failure นี้จึงมักใช้การวิเคราะห์ในแบบ Local Stability Analysis (ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.9.1)

● กรณี Pull - Out Failure

For Geotextile Reinforcement

$$\begin{aligned} T_{\text{resistance}} &= \sum_{i=1}^n P_{\text{resistance}} \\ &= \sum_{i=1}^n 2 \sigma'_{vi} L_{bi} \tan \phi_o \end{aligned} \quad \text{.....(2.34)}$$

For Geogrid Reinforcement

$$\begin{aligned} T_{\text{resistance}} &= \sum_{i=1}^n P_{\text{resistance}} \\ &= \sum_{i=1}^n (\alpha_b t \sigma'_{bi} n + 2L_{bi} \alpha_s \sigma'_{vi} \tan \phi_o) \end{aligned} \quad \text{.....(2.35)}$$

ดังนั้น Factor of Safety (F. S.) = $\frac{\text{แรงต้านทาน } (T_{\text{resistance}})}{\text{แรงดึงที่เกิดขึ้น } (T_R)}$

สำหรับกรณีของ Pull-Out Failure นี้ ในกรณีที่วัสดุเสริมที่ใช้เกิดการขาดขึ้นเพียงบางเส้นนั้น ในการวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์เหมือนเดิมดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น คือคิดค่าผลรวมของแรงต้านทานทั้งหมดจากวัสดุเสริมทั้งหมดที่ใช้ เพียงแต่จะยกเว้นเส้นที่ขาดไป โดยจะไม่นำมาคิดรวมอยู่ในสมการเพื่อที่จะหาค่าผลรวมของแรงต้านทานทั้งหมดนั่นเอง



2.10 การใช้วัสดุเสริมดินโดยทั่วไป

สำหรับการใช้วัสดุเสริมดินนั้นจะสามารถใช้ได้ในงานหลายประเภทด้วยกัน ได้แก่

1. งานสะพาน (Bridge Work)

สำหรับงานสะพานนี้การใช้วัสดุเสริมดินจะเป็นการเสริมวัสดุเสริมดินเข้าไปในบริเวณของค่อมสะพาน (Bridge Abutment) ดังแสดงในรูปที่ 2.44

2. งานเขื่อน (Dams)

สำหรับงานเขื่อนจะทำการเสริมวัสดุเสริมในบริเวณที่เป็นตัวเขื่อน ดังแสดงในรูปที่ 2.45

3. งานดินถม (Embankment)

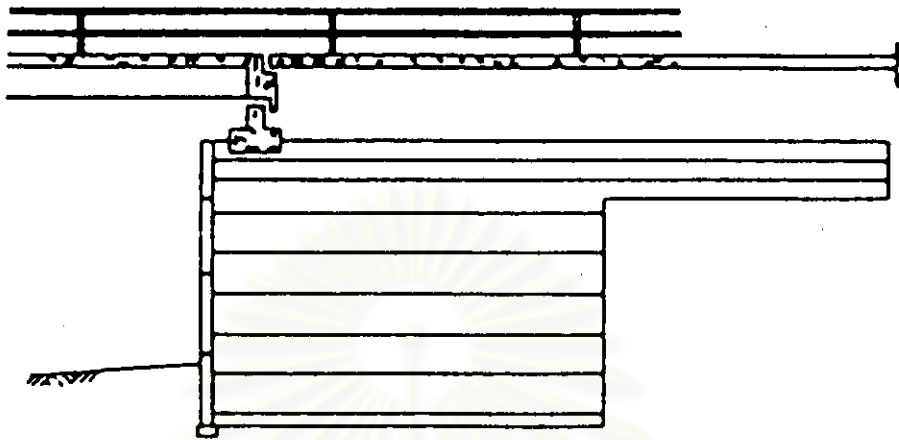
ในงานถมดินวัสดุเสริมดินที่ทำการเสริมเข้าไปในโครงสร้างดินจะทำให้โครงสร้างดินนั้นสามารถทำการถมดินได้ความลาดชันที่มีค่าสูงมากๆ (Steep Slope) ดังแสดงในรูปที่ 2.46ก. และในกรณีที่จะต้องทำการถมดินบนชั้นดินอ่อนก็สามารถที่จะใช้วัสดุเสริมวางเอาไว้ด้านบนของชั้นดินอ่อน แล้วจึงค่อยทำการถมดินทับลงไป ซึ่งการเสริมในลักษณะนี้ก็จะช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้กับโครงสร้างดินถมได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.46ข.

4. งานฐานราก (Foundation)

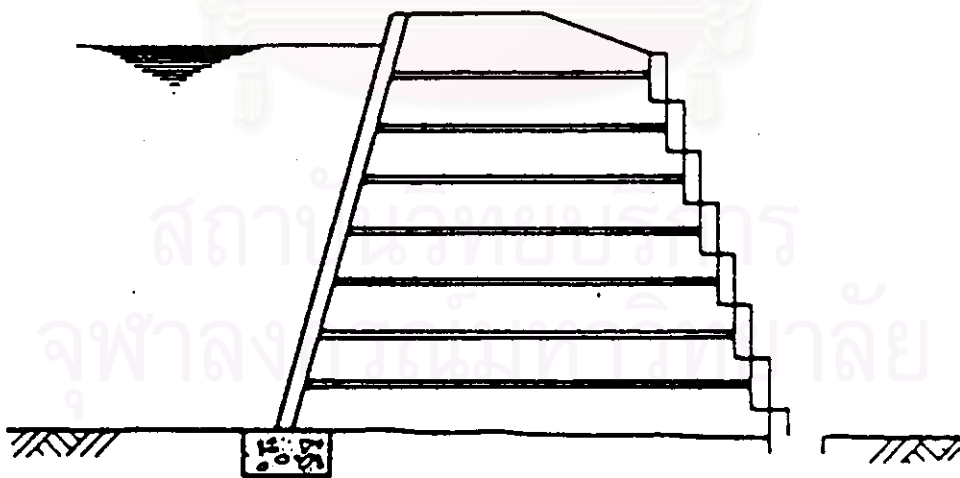
ในกรณีที่จะทำการก่อสร้างถึงปลูกสร้างต่าง ๆ นั้น ถ้าสภาพของดินบริเวณที่ใช้ทำการก่อสร้างเป็นดินอ่อน ซึ่งไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นฐานรานั้น การใช้วัสดุเสริมเสริมภายในดินบริเวณที่จะทำการก่อสร้างก็เป็นการเสริมกำลังให้กับดินได้ ซึ่งจะทำให้สภาพของดินบริเวณนั้นเหมาะที่จะใช้เป็นฐานรากในการทำการก่อสร้างต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.47

5. งานทาง (Highway)

ในการก่อสร้างทางนั้นมักจะใช้วัสดุเสริมดินกับการก่อสร้างทางในบริเวณที่มีลักษณะสภาพภูมิประเทศที่เป็นภูเขา ดังแสดงในรูปที่ 2.48



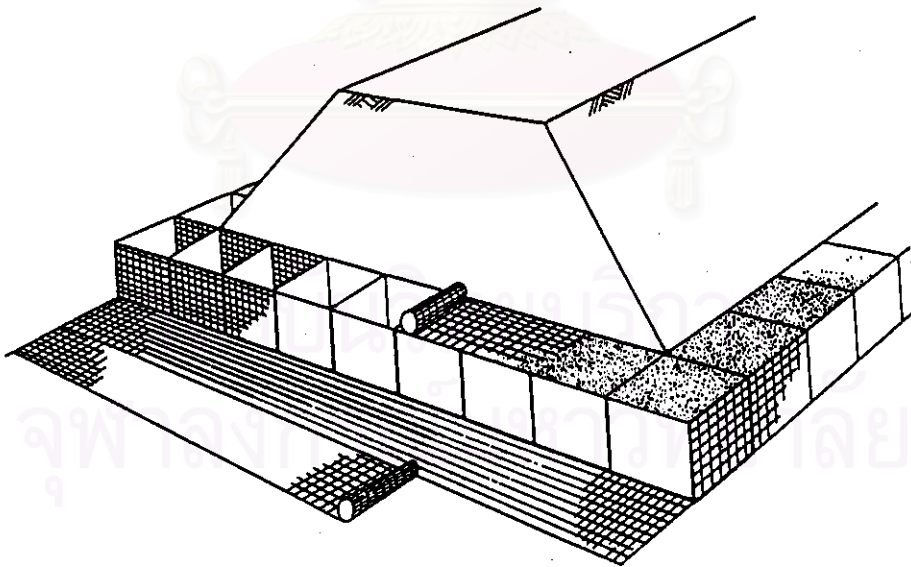
รูปที่ 2.44 การใช้วัสดุเสริมดินในงานสะพาน (Colin Jones, 1985)



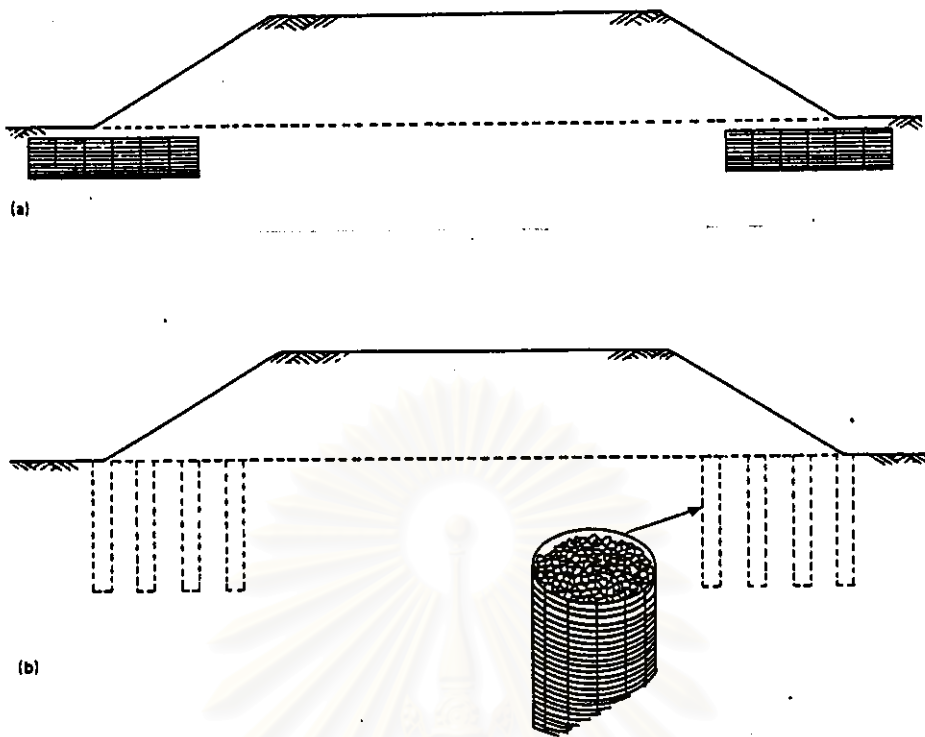
รูปที่ 2.45 การใช้วัสดุเสริมดินในงานเขื่อน (Colin Jones, 1985)



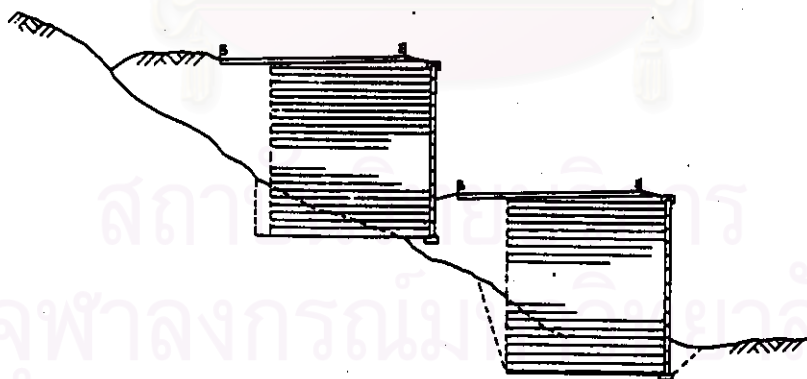
รูปที่ 2.46ก. การใช้วัสดุเสริมดินในงานดินถมในลักษณะของ Steep Slope
(Colin Jones, 1985)



รูปที่ 2.46ข. การใช้วัสดุเสริมดินในงานดินถมในลักษณะของการเพิ่ม
เสถียรภาพให้กับชั้นดินอ่อน (Colin Jones, 1985)



รูปที่ 2.47 การใช้วัสดุเสริมดินในงานฐานราก (Colin Jones, 1985)



รูปที่ 2.48 การใช้วัสดุเสริมดินในงานทาง (Colin Jones, 1985)