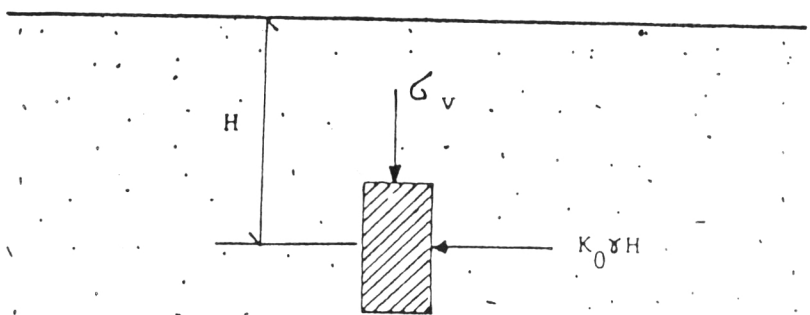




### สมมติฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างวัสดุเสริมดิน

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการเบื้องต้น สมมติฐาน และทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างวัสดุเสริมดินอันได้แก่ สภาพของหน่วยแรงที่เกิดขึ้น แรงยึดเกาะของวัสดุเสริมดิน แรงดึงในวัสดุเสริมดิน นอกจากนี้จะยังได้กล่าวถึงสมมติฐาน และทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ สภาพการวิบัติของโครงสร้างวัสดุเสริมดินรวมทั้งรายละเอียดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างวัสดุเสริมดิน

3.1 หลักการเบื้องต้น ( Basic Concept ) วัสดุเสริมดิน (Reinforced Earth) มีหลักการคล้ายคลึงกับคอนกรีตเสริมเหล็ก คือเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของดินให้สามารถรับแรงต่าง ๆ ได้มากขึ้นกว่าเดิม โดยกำหนดให้มวลดินที่ใช้เป็น Semi-infinite mass, cohesionless และ isotropic ในแต่ละระนาบในแนวนอน ที่สภาวะปกติ เมื่อดินไม่ได้รับแรงดันในคานข้าง หน่วยแรงหลักที่เกิดขึ้นภายในอนุภาคใด ๆ จะเป็นแรงตามแนวตั้ง และแนวราบ ( $\sigma_v$  และ  $\sigma_h$ )



จากรูป ที่ระยะ  $H$  จากผิวดิน,  $\sigma_v = \gamma H$ ,  $\sigma_h = k_0 \gamma H$  และ  $k_0$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันทางคานข้าง เมื่อไม่มีแรงดันทางคานข้างอื่น ๆ เข้ามาเกี่ยวข้อง

(2) Jaky ได้กำหนดค่า  $K_0$  ของ cohesionless soil ไว้เป็น empirical formular ดังนี้  $K_0 = 1 - \sin \phi$  ( $\phi$  คือมุมเสียดทานภายในของเม็ดดิน) จากนั้นให้ดินได้รับแรงดันทางด้านข้าง ( Lateral earth pressure ) จะทำให้เกิดการยืดหดตัวทางด้านข้าง ( Lateral strain ) ในแนวราบจนถึงสภาวะวิบัติ ( Failure state ) ซึ่งเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะดังรูป

จากรูป ตอนแรกอนุภาคของดินอยู่ในสภาวะสมดุล พลาสติก โดยให้หน่วยแรงหลักคือ  $\sigma_1 = OA$ ,  $\sigma_3 = OE$  (รูป a) เมื่อดินได้รับแรงดันทางด้านข้างจะเกิดสภาวะวิบัติได้สองวิธีคือ

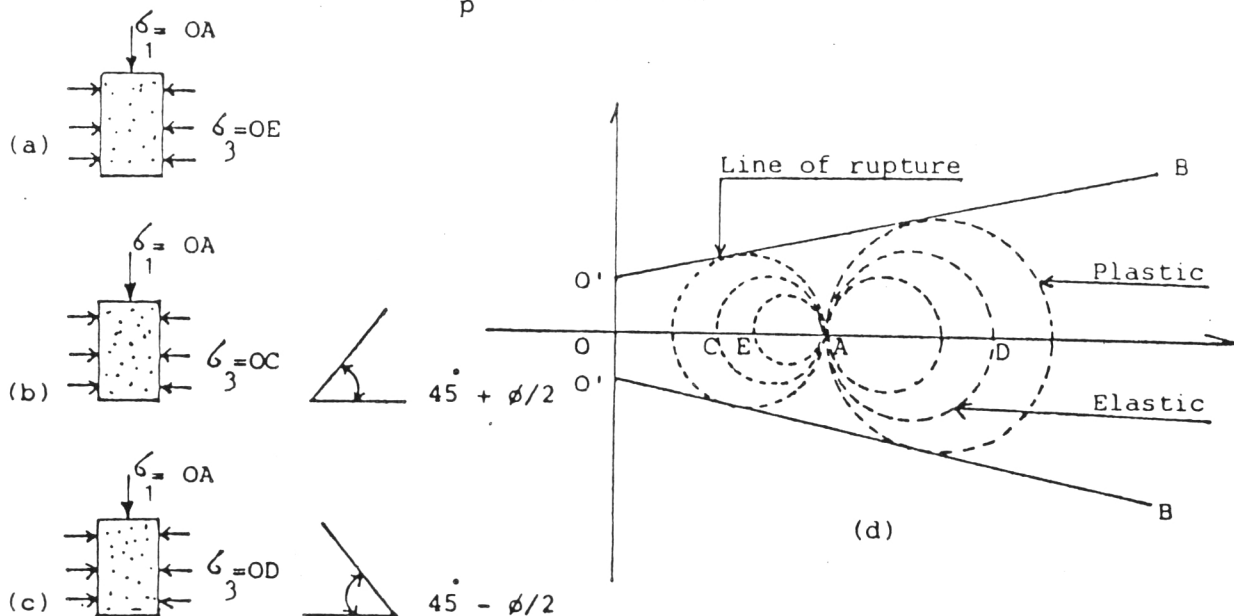
II. Active Failure โดยการให้แรงดันแนวตั้งคงที่ =  $OA$  แล้วลดแรงดันทางด้านข้างจนถึง  $OC$  (รูป d) จาก Mohr's circle วงกลมที่มี  $AC$  เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางจะสัมผัสกับ line of rupture เช่นกันที่สภาวะนี้ ทำให้แรงดันด้านข้างมีค่าเท่ากับ  $k_a \sigma_v$

ข. Passive Failure โดยให้แรงดันแนวตั้งคงที่ =  $OA$  แล้วเพิ่มแรงดันทางด้านข้างจนถึง  $OD$  (รูป d) จาก Mohr's circle จะเห็นว่าวงกลมที่มี  $AD$  เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางจะสัมผัสกับ line of rupture เช่นกันที่สภาวะนี้ทำให้แรงดันด้านข้างมีค่าเท่ากับ  $k_p \sigma_v$

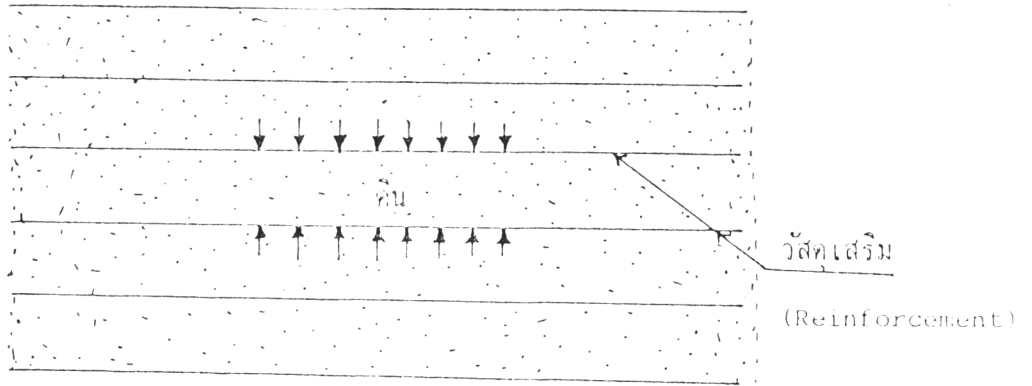
โดยที่  $k_a$  และ  $k_p$  หาได้จากทฤษฎีของ Coulomb หรือ Rankine โดยทั่วไป สำหรับดินที่ไม่มี ความเชื่อมแน่น ( Cohesionless Soil ) เช่นทรายจะได้อา

$$k_a = \tan^2(45^\circ - \phi/2)$$

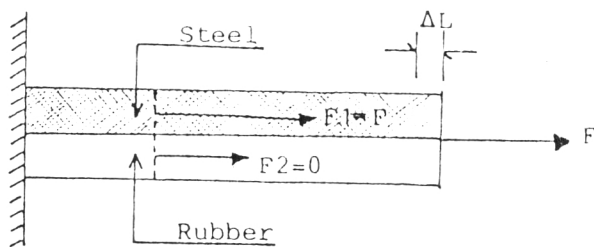
$$k_p = \tan^2(45^\circ + \phi/2)$$



เมื่อเราทำการเสริมวัสดุเสริม ( Reinforcement ) เข้าไปในดินดังรูป



โดยเราพยายามทำให้ดินถึงสภาวะวิกฤติในลักษณะของ Active failure เมื่อกำหนดให้แรงเสียดทานระหว่างดินกับวัสดุเสริมมากพอ ดินที่อยู่ระหว่างวัสดุเสริมทั้ง 2 อัน ซึ่งอยู่ติดกัน จะถูกทำให้ยึดโดยมีวัสดุเสริมเป็นขอบเขตบนและล่าง พฤติกรรมการรับแรงจะเป็นไปตามหลักการทั่วไป ตามรูป



จากรูป เมื่อให้ steel และ Rubber รับแรงไปด้วยกัน

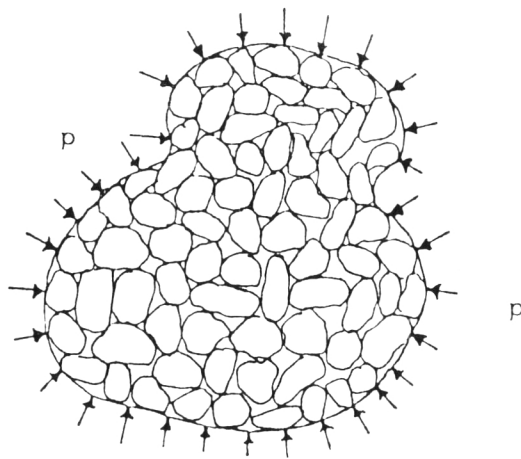
$$E_{\text{steel}} \gg E_{\text{rubber}}$$

$$F_1 \gg F_2$$

$$F_1 = F, F_2 = 0$$

E คือค่าโมดูลัส  $F_1 =$  แรงที่ถูกรับโดย steel,  $F_2 =$  แรงที่ถูกรับโดย Rubber

เมื่อกำหนดให้ระยะเสริมของวัสดุเสริมใกล้เคียงกันมากพอ การรับแรงและการบีบอัดตัวจะถูกควบคุมโดยวัสดุที่แข็งแรงกว่า ในพื้นที่ที่วัสดุเสริม ( Reinforcement ) ดังนั้นการบีบอัดตัวทั้งหมดก็ถือเป็นการบีบอัดตัวของวัสดุเสริม ซึ่งน้อยมากและไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงในดิน ดังนั้นหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจึงเหมือนเมื่อตอนแรกเริ่ม ทรายใต้ที่วัสดุเสริมยังไม่ถึงสภาวะวิบัติ และแรงดึงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดันภายในดินทางด้านข้าง จะถูกรับโดยวัสดุเสริม สำหรับแรงดึงที่รับโดยดิน ถือว่าน้อยมากจนไม่นำมาคิด

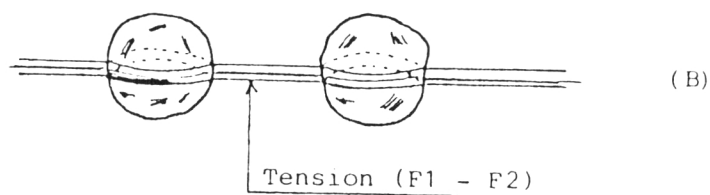
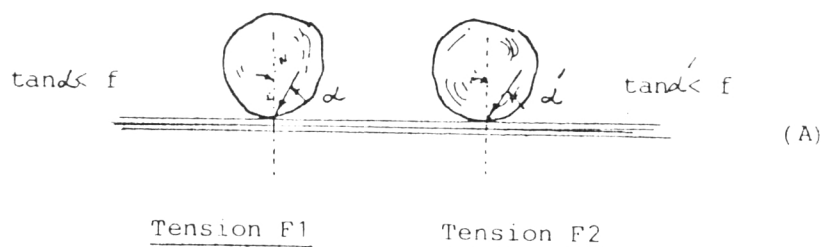


ในกรณีดินที่อิ่มตัว ( Saturated soil ) เมื่อได้รับแรงดันด้านข้าง " p " และไม่มี การไหลออกของน้ำเกิดขึ้น ค่า Bulk modulus ของน้ำจะสูงกว่าค่า Skeleton bulk modulus ของดินจากที่กล่าวมาแล้ว พอลจะสรุปเป็นหลักการสำคัญได้ดังนี้

- 1 . แรงยึดเกาะระหว่างดินกับวัสดุเสริมต้องมากพอ ซึ่งเป็นหลักใหญ่ที่จะทำให้ดินและวัสดุเสริมสามารถรับแรงไปด้วยกัน เหมือนวัสดุเดียวกันได้
- 2 . หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในดินและวัสดุเสริม ตัววัสดุเสริมต้องสามารถรับแรงที่เกิดขึ้นนี้ได้ทั้งหมด ส่วนแรงอัด และแรงเฉือนที่เกิดขึ้นให้ดินทำหน้าที่รับแรงส่วนนี้ ซึ่งเกิดจากน้ำหนักของตัวมันเอง และแรงภายในเม็ดดิน
- 3 . ต้องมี skin สำหรับกันดิน โดยวางตั้งในแนวตั้ง เพื่อกันดินไหลออกจากขอบเขต

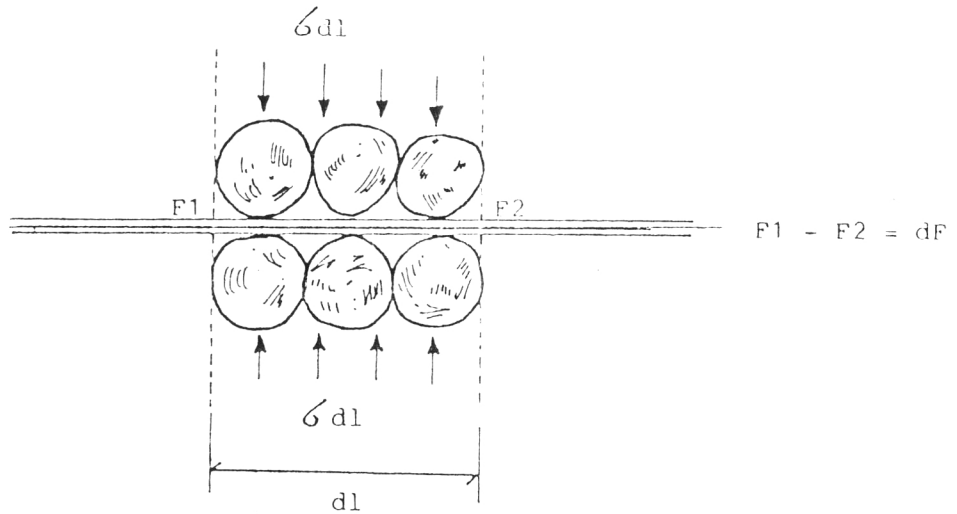
### 3.2 แรงยึดเกาะของวัสดุเสริมดิน ( Earth reinforcement adherence )

แรงยึดเกาะเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาถึงในการออกแบบ Reinforced Earth Structure (โครงสร้างวัสดุเสริมดิน) และเป็นตัวทำให้หลักการของวัสดุเสริมดินแตกต่างกับหลักการอื่น ๆ ที่นำมาใช้เกี่ยวกับงานดิน เช่น Anchored ties ซึ่งไม่เกิดแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดดินเลย

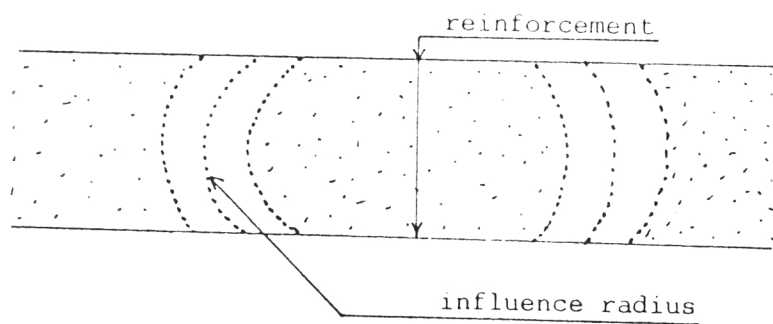


จากรูป พิจารณาเม็ดดิน 2 เม็ด กับแถบของวัสดุเสริม ให้แรงที่เกิดขึ้นระหว่างเม็ดดินกับแถบวัสดุเสริมทำมุม  $\alpha$  ใด ๆ กับระนาบฉากของแถบวัสดุเสริม ดังนั้นถ้าจะไม่ให้เกิดการเคลื่อนไถล (Slipping) จะได้ว่า  $\tan \alpha < f$  เสมอจากหลักความจริงข้างต้น แสดงให้เห็นถึงความสำคัญอันยิ่งของค่าความเสียด (Friction) ที่มีต่อทฤษฎีการออกแบบวัสดุเสริมดิน (Reinforced earth theory) ในกรณีที่แรงดึงในแถบวัสดุคงที่ตลอด จะไม่มีการส่งแรงระหว่างดินกับวัสดุเสริม ดังนั้นจะไม่เกิดแรงยึดเหนี่ยว (Bond) ขึ้น ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะเกิดกับพวก Anchored ties สำหรับในวัสดุเสริมดิน (Reinforced Earth) พฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะตามรูป (B)

จากรูปให้คิด 2 จุดอยู่ห่างกันเป็นระยะ  $d_1$  แรงดึงที่เกิดขึ้นที่ภายนอกของเม็ดคั้นทั้งสอง เป็น  $F_1$  และ  $F_2$  ตามลำดับ และให้  $dF = F_1 - F_2$  เราจะได้ว่า  $dF$  นี้เป็นแรงยึดเหนี่ยว (Bond) ของเม็ดคั้นนั้น สมมติหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากกับระนาบของวัสดุเสริมเป็น  $\sigma$



หน่วยแรงทั้งหมดที่เกิดขึ้นตลอดระยะทาง  $d_1 = 2\sigma d_1$  และเพื่อป้องกันการเคลื่อนไถล (Slipping) ค่า  $\frac{dF}{2\sigma d_1} < f$  โดยที่  $f$  คือค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดของวัสดุเสริม



จากรูปแสดงให้เห็นถึงทางเดินของเม็ดคั้นที่ถ่ายแรงจากเม็ดหนึ่งไปยังอีกเม็ดหนึ่ง ระหว่างชั้นของวัสดุเสริมที่อยู่ติดกัน (Horizontal strips)

### 3.3 การศึกษาทดลองแรงยึดเกาะของวัสดุเสริมดิน ( Experimental studies

of earth - reinforcement adherence ) เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย Direct Shear Box, แผ่นวัสดุเสริมและทราย โดยแบ่งการทดลองแรงยึดเกาะออกเป็น 2 กรณี คือ หาค่าแรงยึดเกาะระหว่างไม้ไผ่กับทรายที่อุณหภูมิปกติค่าหนึ่ง กับค่าแรงยึดเกาะระหว่างไม้ไผ่กับทรายที่อุณหภูมิเตาอบอีกค่าหนึ่ง นอกจากนี้ยังแบ่งผิวของไม้ไผ่ออกเป็น 2 ชนิด คือไม้ไผ่ชุบฟลีนโคท กับ ชนิดไม้ไผ่เรียบ

ทฤษฎี การหาค่าแรงยึดเกาะของไม้ไผ่กับทราย หาได้จากความเสียดทานระหว่าง เม็ดทรายกับแผ่นผิวไม้ไผ่ โดยใช้วิธี Direct Shear เช่นเดียวกับการหาค่าความเสียดทานภายในของเม็ดทราย กำหนดให้  $\theta$  เป็นมุมเสียดทานระหว่างไม้ไผ่กับทราย เราจะได้ว่า  $\theta = \tan^{-1} \frac{s}{p}$

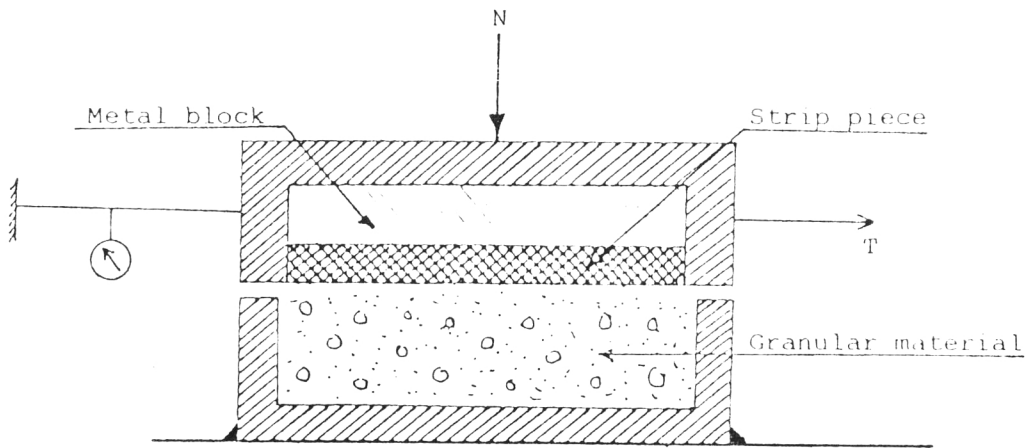
โดย  $\theta$  คือมุมเสียดทานระหว่างไม้ไผ่กับทราย

$s$  คือหน่วยแรงเฉือน หาได้จากการเอาค่า Proving ring reading ลบด้วย initial proving ring reading แล้วคูณด้วยค่า ring calibration จากนั้นจึงหารด้วย พ.ท. ที่ถูกแรงเฉือนกระทำ

$p$  คือหน่วยแรงตั้งฉาก มีค่าเท่ากับ  $n$  ที่ใช้ดวงหารด้วยพื้นที่ถูกแรงเฉือนกระทำ

ค่าอัตราส่วน  $s/p$  คืออัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับหน่วยแรงตั้งฉาก ที่กระทำ บนพื้นที่ผิวเดียวกัน ซึ่งเราสามารถหาค่าได้โดยการนำแรงเฉือนหารด้วยแรงกดที่กระทำบนพื้นที่ผิวเดียวกันนั้น

ดังนั้นเราสามารถหาค่ามุมเสียดทานระหว่างไม้ไผ่กับทรายสูงสุดได้โดยใช้อัตราส่วนของแรงเฉือนสูงสุดต่อแรงกดสูงสุด  $(s/p)_m$  และในการหาค่ามุมเสียดทาน ( Ultimate friction angle ) เราสามารถใช้อัตราส่วนระหว่างแรงเฉือนต่อแรงตั้งฉากนี้ได้เช่นกัน นอกจากนี้เรายังสามารถหาค่ามุมเสียดทานระหว่างไม้ไผ่กับทรายได้อีกวิธีหนึ่ง คือการเขียนกราฟระหว่างแรงเฉือนและแรงตั้งฉาก ค่าของมุมเสียดทานก็คือ ค่าความลาดเอียง ( Slope ) ของกราฟที่เขียน



Direct Shear Box

### วิธีการทดลอง

- วัดขนาดของภาชนะที่ใช้เสร็จแล้วนำไปติดกับเครื่อง shear machine
- ชั่ง น.น. dish ที่ใช้ใส่ทรายที่จะทำการทดลอง
- ใส่ทรายลงไป ใน dish ตามรูปประมาณ  $\frac{1}{2}$  นิ้ว
- ทำการชั่ง น.น. ใหม่อีกครั้งหนึ่ง เราจะได้อัตราของน.น. ที่ชั่ง 2 ครั้ง คือ น.น. ของทรายที่ใช้ในการทดลอง
- ปาดผิวหน้าของทรายให้ได้ระดับ พร้อมกับวางแถบไม้ไผ่ที่จัดเตรียมไว้บนทรายอีกทีหนึ่ง
- จากนั้นให้วางกล่องโลหะ ( Metal block ) ทับข้างบนอีกชั้นหนึ่ง แต่ก่อนที่จะวางกล่องโลหะ ควรจะวัดความหนาของทรายอีกครั้งหนึ่ง
- ใส่ตุ้ม น.น. ขนาด 4 ก.ก. แล้วปล่อยสกรูที่ล็อกในแนวตั้งออก
- ทำการจดค่าต่าง ๆ บน dial gauge ที่ติดอยู่กับเครื่อง shear machine gauge อันที่หนึ่งเป็นค่า proving ring scale ซึ่งจะวัดค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้น ส่วน gauge อีก 2 อัน จะทำหน้าที่วัดระยะทางที่เคลื่อนออกจากที่เดิม ( displacement ) ทั้งในระนาบตั้ง และระนาบราบ



- ทำการเพิ่มแรงเฉือนโดยใช้มือหมุนเครื่อง shear machine อย่างสม่ำเสมอแล้วอ่านค่า ทุก ๆ 15 วินาที ในช่วงเวลา 2 นาทีแรก จากนั้นให้ทำการอ่านทุก ๆ .03 นิ้ว ของระยะทางที่เคลื่อนที่ในระนาบราบ จนได้ระยะทางมากกว่า 15% ของความยาวของ specimen จึงหยุดทำการทดลอง

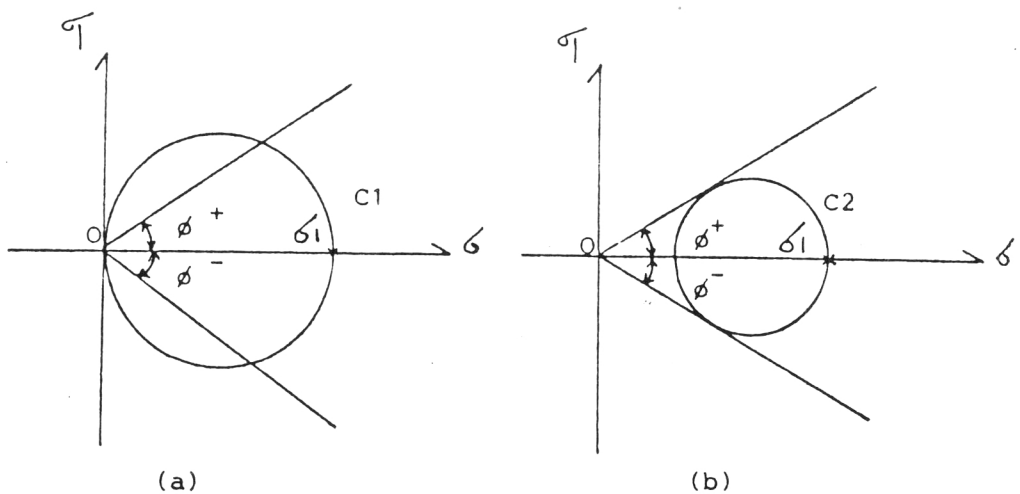
หลังจากที่หยุดทำการทดลองแล้วให้เปลี่ยนค้อน.น.ใหม่ โดยใช้ค้อน.น.ขนาด 8 ก.ก. และ 12 ก.ก. ตามลำดับแล้วทำการทดลองตั้งแต่แรกใหม่อีก เราจะได้ค่าแรงเฉือนสูงสุดจำนวน 3 ค่า ซึ่งจะนำไป plot กราฟ หากมุมเสียดทานระหว่างไม้ไผ่กับทรายได้ และค่าอัตราส่วนระหว่างแรงเฉือนกับแรงตั้งฉากนี้ คือ แรงยึดเกาะของวัสดุเสริมดินนี้เอง จากกราฟภาคผนวก ข. เราจะได้  $f = \tan \phi$

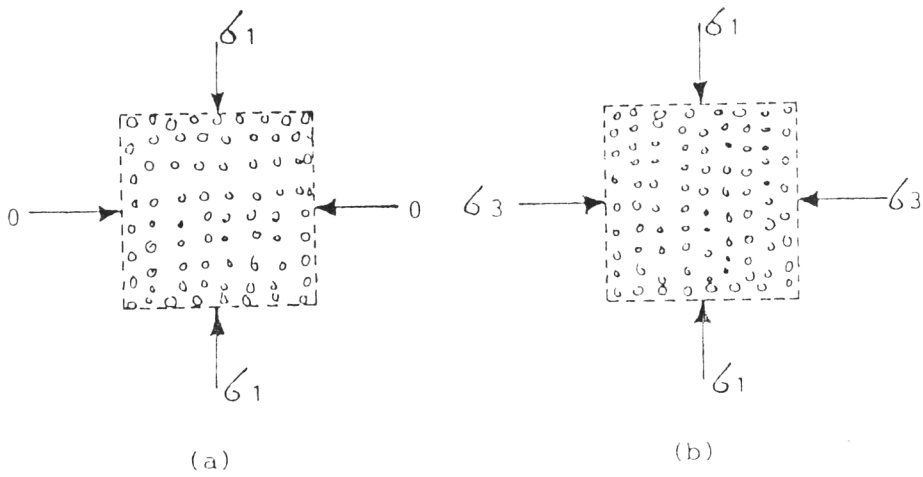
$f$  = สัมประสิทธิ์ของแรงยึดเกาะของวัสดุเสริมดิน

$\phi$  = มุมเสียดทานระหว่างทรายกับวัสดุเสริม

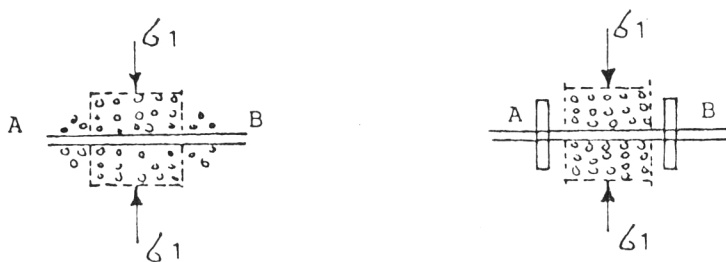
3.4 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในดิน และวัสดุเสริม ในการหาค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในดิน และวัสดุเสริม เราต้องคำนึงถึงหน่วยแรงหลักทั้งสองนี้ คือ Unconfined Compression และ Simple Traction Force ซึ่งจะเป็นตัวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงในดินขึ้น

#### 3.4.1 Unconfined Compression (แรงกด)





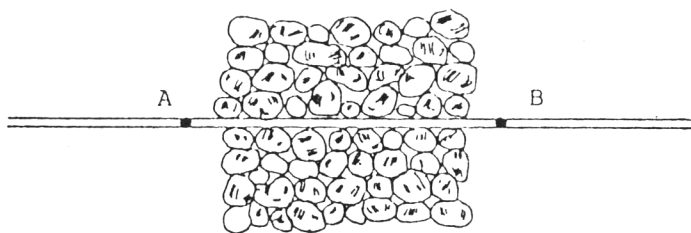
พิจารณารูป ( a ) กล่องสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ถูกแรงกระทำตามรูป คือ  $\sigma_1$  กระทำในแนวตั้ง กล่องนี้ไม่สามารถอยู่ในสภาวะสมดุลได้ เนื่องจากวงกลม Mohr Circle ตัดกับเส้น Intrinsic curve ดังนั้นถ้าจะให้ลูกสี่เหลี่ยมลูกบาศก์นี้สมดุลจะต้องมีแรง  $\sigma_3$  มากระทำด้านข้าง ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $k_a \sigma_1$  ในทิศทางที่ตั้งฉากกับ  $\sigma_1$  ตามรูป ( b ) โดยที่  $k_a$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของ Active earth pressure ซึ่งเป็น function ของมุมเสียดทานภายใน คือ  $k_a = \tan^2(45 - \phi/2)$  จากรูป ( b ) เมื่อวงกลม Mohr circle สัมผัสกับเส้น Intrinsic curve โดยไม่มีวัสดุเสริมหน่วยแรง  $\sigma_2$  นี้จะถูกต้านโดยแรงกระทำจากภายนอก ซึ่งในกรณีนี้ จะไม่เกี่ยวกับ Unconfined Compression หรืออีกนัยหนึ่งดินที่ไม่มีวัสดุเสริมจะไม่สามารถรับแรง Unconfined Compression ได้เลย



จากรูป สมมติให้สี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่มีปริมาตร 1 หน่วย รับแรงกด Compressive stress ( $\sigma_1$ ) ในด้านใดด้านหนึ่ง และให้ความเค้น  $\epsilon_1 = \frac{\Delta l_1}{l_1}$  เกิดขึ้นในทิศทางที่แรงกระทำ ส่วน  $\epsilon_2 = \frac{\Delta l_2}{l_2}$  และ  $\epsilon_3 = \frac{\Delta l_3}{l_3}$  เป็นความเค้นที่เหลืออีก 2 ด้าน ซึ่งอยู่ในระนาบที่ตั้งฉากกับแรงกด  $\sigma_1$  และอยู่ในทิศทางเดียวกับวัสดุเสริม  $\therefore$  ค่าความเค้นของวัสดุเสริม  $= \frac{k_0 \sigma_1}{ES}$  \* โดยที่ S คือพื้นที่หน้าตัดของวัสดุเสริม และ E คือค่า Young Modulus ของวัสดุเสริม แต่ค่าความเค้นจะมีค่าน้อยมาก และมักจะไม่นำมาคิดในเวลาคำนวณ ถ้ากำหนดให้  $E_0$  เป็น Tangent modulus หาได้จากการ loading ด้วย Oedometer test จะได้อัตราความเค้นในแนวตั้ง  $\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_0}$  ซึ่งสามารถหาค่าได้ และสังเกตได้ชัดเจน ดังนั้นเราสามารถสรุปได้ว่าแรงกด Compression loading สามารถทำให้เกิดการทรุดตัวที่มองเห็นได้ และค่าของแรงที่กระทำต่อวัสดุเสริมเท่ากับ  $\sigma_2 = \frac{k_0}{S} \sigma_1$  \*

- โดย E คือ elastic modulus หรือโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเสริม
- S คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุเสริมต่อ 1 หน่วย พื้นที่ผิวของมวลดิน
- $k_0$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของ lateral earth pressure at rest

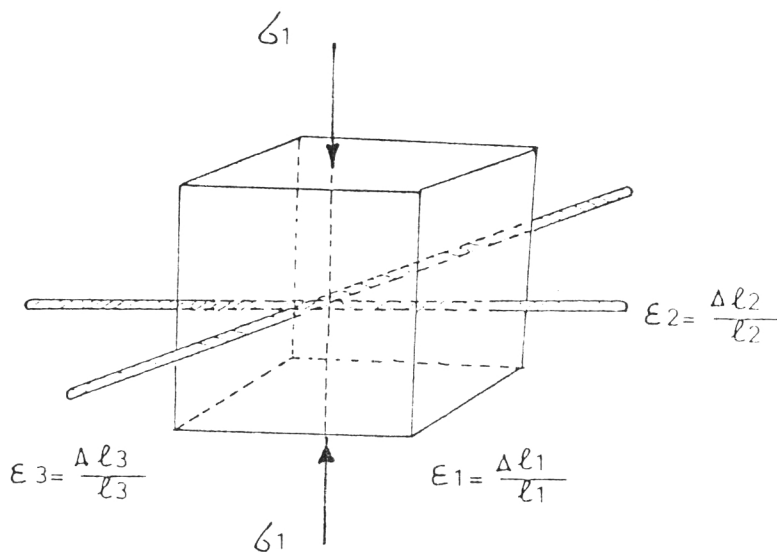
3.4.2 Simple Traction(แรงดึง) แรงดึงที่เกิดขึ้นจะถูกรับโดยวัสดุเสริมทั้งหมด ทั้งนี้เนื่องจากเราสมมติให้วัสดุเสริม A, B ตามรูป ไม่เกิดการเคลื่อนไถลเวลาที่ถูกแรงกระทำให้ยืดตัวออก และมีค่าความเค้นน้อยมากนั่นเอง



จากรูป สมมติว่าเราวางวัสดุเสริมตั้งฉากกับทิศทางของ compressive stress ( $\sigma_1$ ) และห้ามุมฉากซึ่งกันและกัน พร้อมกับไม่ให้เกิดการเลื่อนไหลของแถบวัสดุเสริมกับมวลดิน ซึ่งเป็นไปตามกฎเกณฑ์ของแรงยึดเกาะระหว่างวัสดุเสริมกับดิน ดังนั้นมวลดิน A & B จะไม่เลื่อนไหล เนื่องจากการเชื่อมโยงของวัสดุเสริม และมวลดินทั้ง 2 นี้ จะอยู่ชิดติดกับด้านข้างของรูปปลุกบาศก์ โดยมีวัสดุเสริมเป็นตัวเชื่อม และเมื่อแรงกด  $\sigma_1$  มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดการเลื่อนไหลของมวลดิน ซึ่งจะเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังต่อไปนี้

ก. ความเค้นในแนวตั้งจะเพิ่มขึ้น ( Vertical Strain  $\epsilon_1$  )

ข. แรงดึงในวัสดุเสริมจะมีค่ามากขึ้นด้วย ( Traction in the reinforcement )

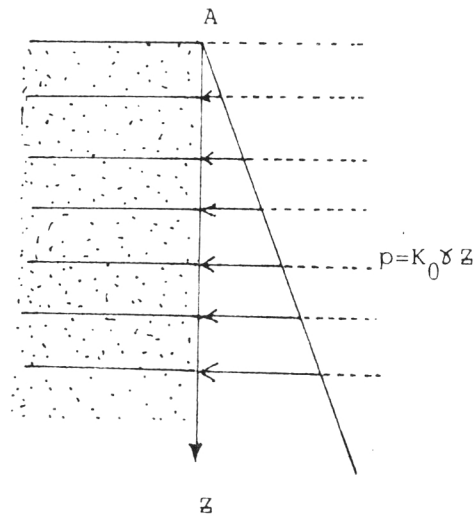
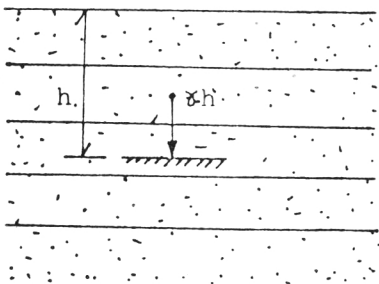


ดังนั้นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเสริมที่ปรากฏ =  $ES$

โดย  $E$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเสริม

$S$  คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุเสริมต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวของมวลดิน

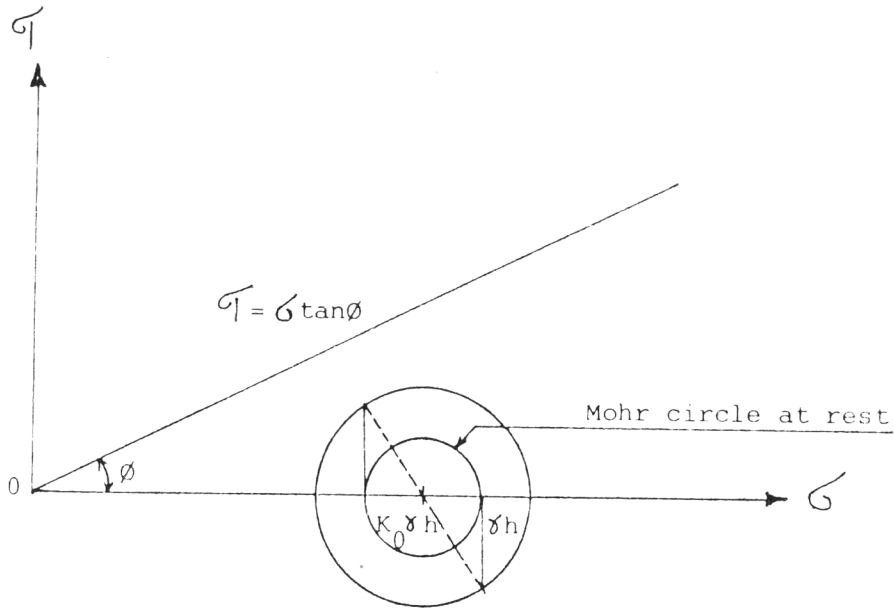
ในกรณีเสริมเป็นชั้น ๆ ในแนวนอน ( Horizontal strips ) พิจารณามวลดินที่เป็น Semi-infinite โดยมีวัสดุเสริม เสริมในแนวนอนเป็นชั้น ๆ ดังรูป



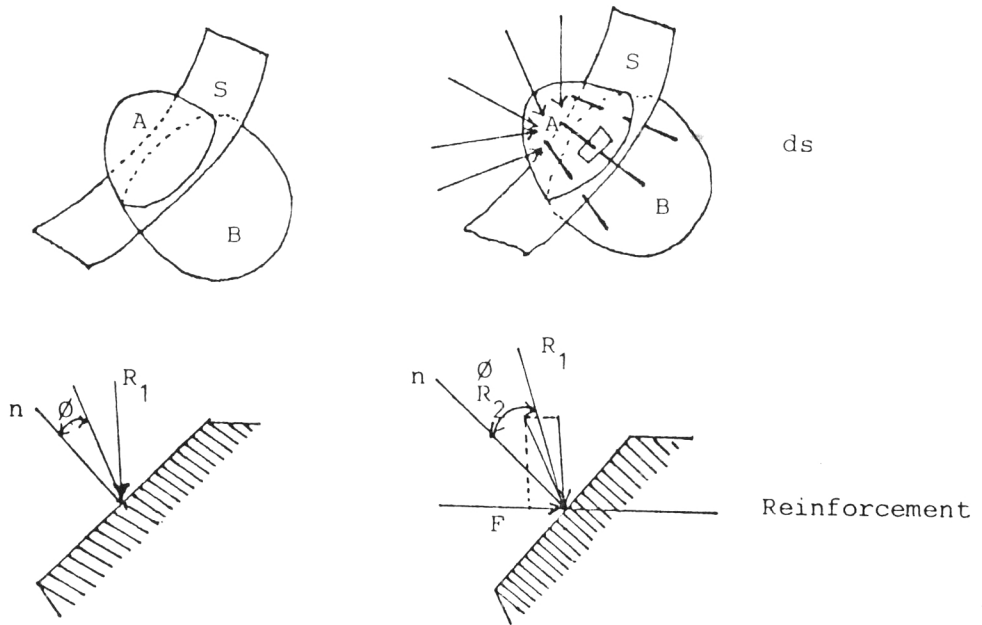
ที่จุดใด ๆ ที่อยู่ลึกเป็นระยะ  $h$  ถ้าให้  $\sigma_1$  เป็นแรงตามแนวตั้ง เราจะได้ว่า  $\sigma_1 = \gamma h$  จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นหน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายในดิน เหมือนสภาวะเริ่มแรก แรงดันที่เกิดขึ้นทางด้านข้างจะเท่ากับ  $K_a \gamma z$

นั่นคือ  $P = K_a \gamma z$  ( $z$  คือระยะจากผิวบนถึงจุดที่คิดแรง)

แต่เนื่องจากตามพฤติกรรมที่เป็นจริง แรงดึงในแถบวัสดุเสริมจะก่อให้เกิดแรงเฉือนขึ้นในดินด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากการยึดเกาะระหว่างดินกับแถบวัสดุเสริม ด้วยเหตุนี้จึงทำให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายในดินเปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะนี้ เหมือนตอนเริ่มแรกเป็นสภาวะที่เก็บบังคับ ดังนั้นในการคำนวณออกแบบจึงใช้ค่า Active Earth Pressure ( $K_a$ ) ตามรูป

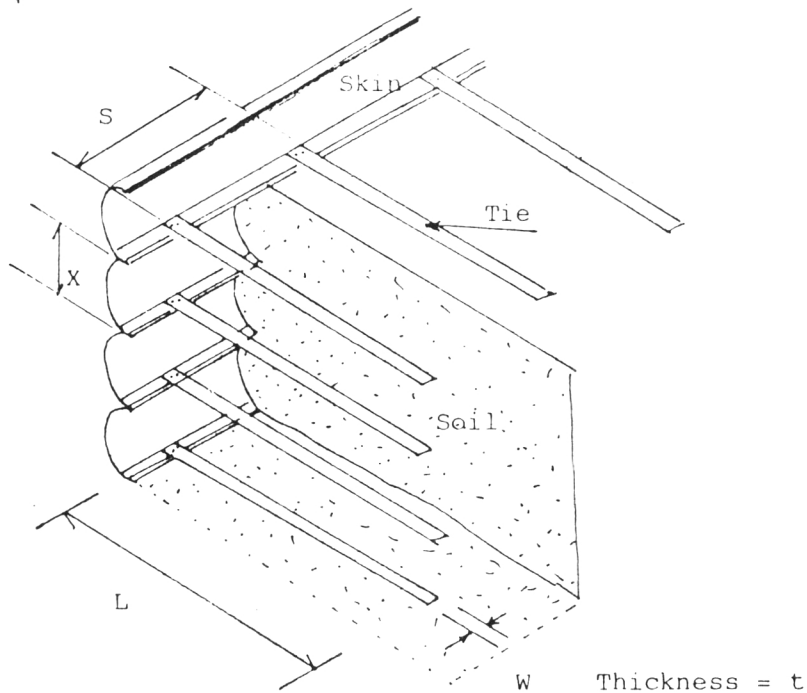


3.5 การคำนวณหาแรงดึงในวัสดุเสริม ก่อนอื่นเราจะพิจารณาถึงโครงสร้างที่มีรูปร่างต่าง ๆ กัน โดยมีวัสดุเสริม เสริมอยู่ภายในเพื่อรับแรงกระทำต่าง ๆ จากภายนอก ตามรูป





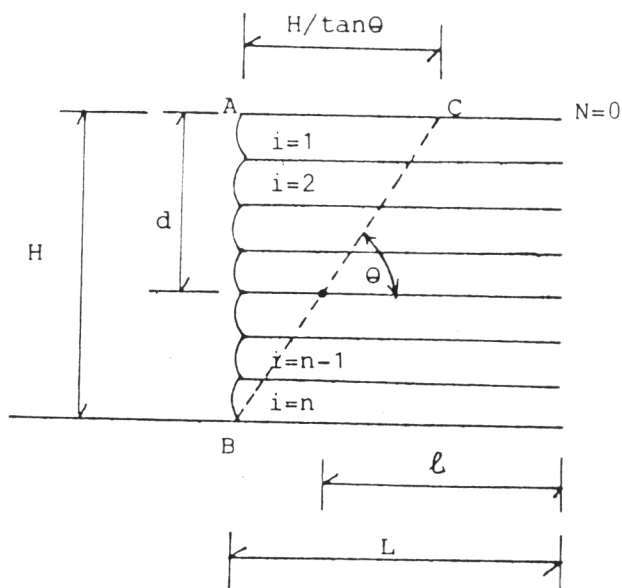
จากรูป A & B ถูกตัดขาดจากกันโดยพื้นผิว S และเพื่อเป็นการป้องกันมิให้วัตถุ A เคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งใหม่ วัสดุเสริมที่เชื่อมตอระหว่าง A&B จะทำหน้าที่รับแรงที่จะทำให้วัตถุทั้งสอง เคลื่อนที่ออกจากกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ พิจารณานูนภาค ds ที่ถูกแรงกระทำ  $R_1$  ทำมุมกับ ระนาบฉากมากกว่ามุมเสียดทานภายในทำให้วัตถุ A พยายามจะเคลื่อนไถลออกจากที่เดิม แต่ เนื่องจากมีวัสดุเสริมเชื่อมอยู่ระหว่าง A&B จึงเกิดแรง F ตามแนวที่วัสดุเสริมอยู่ ทำให้ผลลัพธ์ของ แรง F &  $R_1$  คือแรง  $R_2$  ทำมุมกับระนาบฉาก น้อยกว่ามุมเสียดทานภายใน วัตถุทั้ง 2 ก่อนจึง สามารถติดกันอยู่ได้ โดยไม่เคลื่อนที่ออกจากกัน ทั้งนี้เนื่องจากแรงดึงที่เกิดขึ้นในวัสดุเสริม เป็น ตัวทำให้เกิดสภาวะสมดุลขึ้นอีกครั้งหนึ่ง



จากรูปดินที่ใช้ต้องเป็น cohesionless , free draining material และมีความหนาแน่น ส่วนมุมเสียดทานภายในขึ้นอยู่กับแบบและความหนาแน่นของดิน สำหรับวัสดุเสริมที่ใช้เป็นแผ่นบาง ๆ มีความกว้างพอประมาณ ตัดเป็นเส้น ๆ เสริมตามตำแหน่งในรูป ยึดติดกับ skin กับ นอต เพื่อป้องกันการไหลออกของมวลดิน นอกจากนี้เรายังสมมุติว่าไม่มีความฝืดระหว่าง skin กับมวลดินที่ทำการทดลอง และสืบเนื่องมาจากแรงยึดเกาะระหว่างวัสดุเสริมกับดิน เราแบ่งการคำนวณหาแรงดึงในวัสดุเสริมออกเป็น 2 กรณี คือ

- ก. เมื่อแรงยึดเกาะของวัสดุเสริมกับดินมากพอ  
 ข. เมื่อแรงยึดเกาะของวัสดุเสริมกับดินมีไม่พอ

### 3.5.1 การคำนวณหาแรงดึงในวัสดุเสริมกรณี Tie Breaking



จากรูป โดยวิธีของ Rankine เราจะได้แรงดึงสูงสุด  $T_d$  มีค่าเท่ากับ

$$T_d = K_a \gamma d s x \quad (\text{เป็นค่าแรงดึงที่เกิดขึ้นกับวัสดุเสริม 1 อัน})$$

โดยที่  $s$  และ  $x$  เป็นระยะทางในแนวราบและแนวตั้งของวัสดุเสริม ตามรูป ตามปกติแรงดึงสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ชั้นล่างสุดของวัสดุเสริม คือที่  $d=H$

$$T_{(\max)} = K_a \gamma H s x$$

จากรูปโดยวิธีของ Coulomb Force เราจะได้แรงดึงสูงสุด มีค่าเท่ากับ

$$T_{(\max)} = \frac{n}{n+1} K_a \gamma H s x$$

จากรูปโดยวิธีของ Coulomb Moment เราจะได้แรงดึงสูงสุดเกิดขึ้นที่ชั้นล่างสุดของวัสดุเสริม

$$T_{(\max)} = \frac{n^2}{n^2-1} K_a \gamma H s x$$

พิจารณาค่า  $n$  ในสูตรของ Coulomb Force และ Coulomb Moment ถ้า  $n$  มีค่ามาก เราจะได้ว่า  $\frac{n}{n+1}$  และ  $\frac{n^2}{n^2-1}$  มีค่าใกล้เคียง 1 มาก นั่นคือวิธีของ Rankine

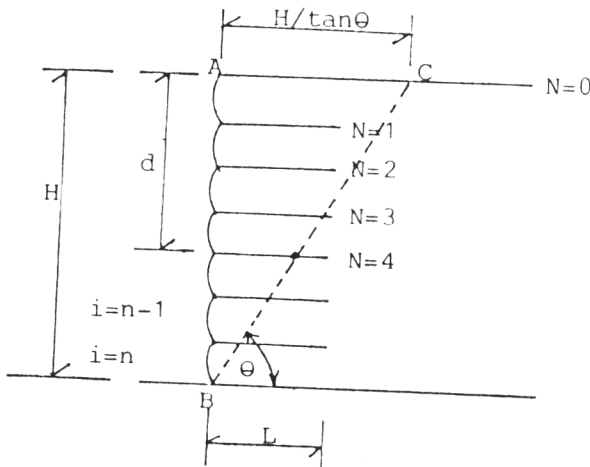


ถ้าให้  $\sigma_y$  เป็นหน่วยแรงพิบัติของวัสดุเสริม และพื้นที่หน้าตัดของวัสดุเสริมเท่ากับ  $wt$  เมื่อ  $n$  มีค่ามาก ๆ เราจะได้ว่า

$$FS_y = \frac{\sigma_y wt}{K_a \gamma H S_x} = \frac{\text{แรงต้าน}}{\text{แรงดึงที่เกิดขึ้น}}$$

โดยที่  $FS_y$  คือ Factor of Safety against yielding or failure of tie

3.5.2 การคำนวณหาแรงดึงในวัสดุเสริมกรณี Tie Pull Out



สิ่งสำคัญที่เราจะต้องทราบในการคำนวณหาแรงต้านทาน การถอนของวัสดุเสริมดิน คือ ค่า  $l$  ซึ่งเป็นส่วนของวัสดุเสริมที่อยู่หลัง zone of active Rankine failure ได้แก่ส่วนที่อยู่หลังเส้น  $BC$  นั้นเอง ตามรูป ดังนั้นค่าแรงต้านทานการถอนของวัสดุเสริมที่มีความลึก  $d$  ใด ๆ จะมีค่าเท่ากับ

$$F_r = 2l p \gamma d \tan \phi_u$$

โดย  $p$  คือ ความกว้างของวัสดุเสริม

$\phi_u$  คือ มุมเสียดทานระหว่างวัสดุเสริมกับดิน

จากจุดนี้ เราจึงแบ่งวิธีการหาค่าแรงค้ำยันข้างที่กระทำต่อแบบจำลองได้ 3 วิธี คือ โดยวิธีการของ Rankine เราจะได้ผลรวมของแรงค้ำยันข้างที่กระทำต่อพื้นที่แบบจำลอง ซึ่งเสริมวัสดุเสริม 1 อัน เท่ากับ

$$F_e = Sx \delta d K_a$$

จากสมการทั้ง 2 เราจะได้ว่า  $FS_{(\phi)} = \frac{2\ell w \tan \phi (u)}{Sx K_a}$

และสืบเนื่องมาจากสมการข้างบนนี้ จุดวิกฤติจะเกิดขึ้นที่ผิวบนสุดของแบบจำลอง โดยมีความยาวของวัสดุเสริมหลังระนาบพิศต้องมีค่าน้อยที่สุด =  $\ell$

$$L = \frac{H}{\tan \theta} + \frac{Sx K_a FS_{(\phi)}}{2\ell w \tan \phi (u)}$$

โดยวิธีการของ Coulomb เราจะได้ค่าแรงต้านทานการถอนของวัสดุเสริมที่ความลึก  $d$  ใด ๆ จะมีค่าเท่ากับ

$$F_r = 2\ell XW \tan \phi_u \sum_{i=N}^n i [L - (n-i)X \tan (45^\circ - \frac{\phi}{2})]$$

โดยที่  $i$  คือ ผลรวมของครรชนของจำนวนวัสดุเสริม เริ่มต้นจาก  $i = 1$  ที่ผิวบนสุดจนถึง  $i = n$  ที่ผิวล่างสุดของแบบจำลอง และ  $N$  คือค่าของ  $i$  สำหรับวัสดุเสริมอันที่อยู่ผิวบนสุดจนถึงล่างสุด นอกจากนี้ ผลรวมของแรงค้ำยันข้างที่กระทำต่อพื้นที่แบบจำลอง ซึ่งเสริมวัสดุเสริม 1 อันมีค่าเท่ากับ

$$F_e = \frac{1}{2} SH^2 \delta d K_a$$

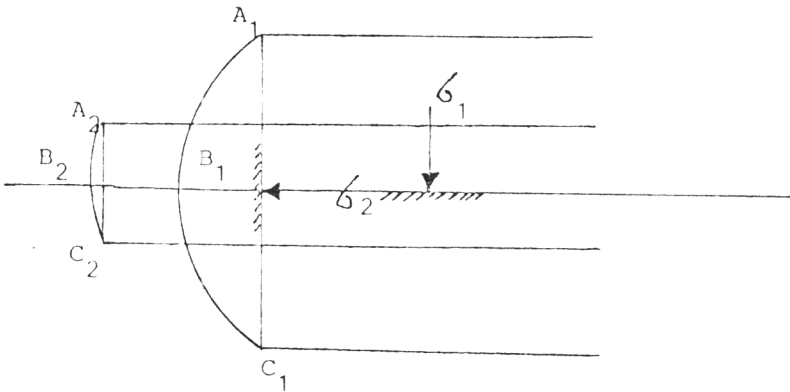
จากสมการทั้ง 2 เราจะได้ว่า

$$FS_{(\phi)} = \frac{4XW \tan \phi (u)}{K_a H^2 S} \sum_{i=N}^n i [L - (n-i)X \tan (45^\circ - \frac{\phi}{2})]$$

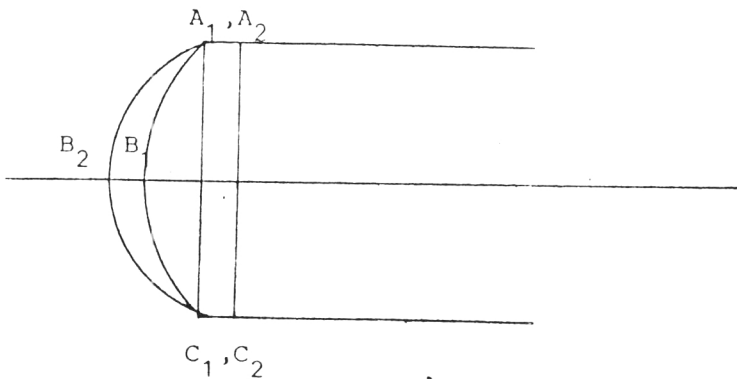
โดยวิธีการของ Coulomb moment ซึ่งคล้ายคลึงกับวิธีการของ Coulomb เพียงแต่ว่าใช้ผลรวมของโมเมนต์ toe ของแรงเสียดทานในแต่ละวัสดุเสริมเปรียบเทียบกับค่า moment รวมแรงค้ำยันข้างของดินตามรูป เราจะได้ว่า

$$FS_{(\phi)} = \frac{12WX^2 \tan \phi (u)}{K_a H^3 S} \sum_{i=N}^n (n-i)i [L - (n-i)X \tan (45^\circ - \frac{\phi}{2})]$$

3.6 skin สำหรับกันดิน (แผงกันดินค้ำข้าง)

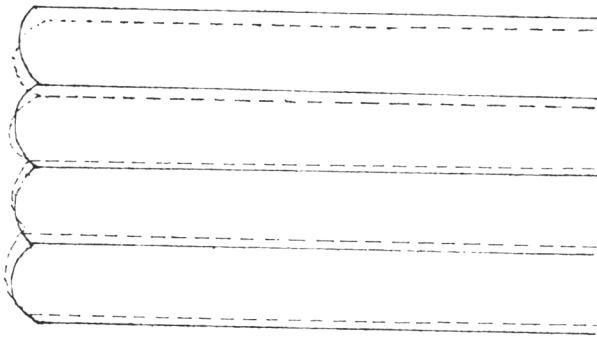


พิจารณารูปจะเห็นว่าแรงค้ำด้านข้างของดิน จะถูกล้อมรอบด้วยอนุภาคของ skin ซึ่งอยู่ในสภาวะของ Rankine state นั่นคือ หน่วยแรงหลัก  $\sigma_1$  และ  $\sigma_2$  ที่จุดใด ๆ ที่ขนานและตั้งฉากกับทิศทางของ skin และค่าอัตราส่วน  $\sigma_1$  ของหน่วยแรงหลักทั้ง 2 นี้ จะคงที่ภายใต้  $\sigma_2$  เงื่อนไขอันนี้ โดยการใช้ทฤษฎีของ Membrane เราสามารถตรวจสอบว่ารูปร่างที่ stable ของ skin ควรจะเป็น semi ellipse โดยมีค่า axis - ratio เท่ากับ  $\sqrt{Ka}$



เมื่อค่าของ  $k_a$  เปลี่ยนแปลงไปตามรูป หรือว่าไม่ตรงกับค่า  $\phi = 30^\circ$  ที่ใช้ในตอนแรก  
 ดังนั้นรูป ellipse จะค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงรูปร่างจนกระทั่งค่า Axis - ratio มีค่าเท่ากับ  
 $\sqrt{k_a}$  ซึ่งตรงกับค่าความเสียดที่แท้จริงที่มุมเสียดทานภายในของดิน

ในทางปฏิบัติจะเกิดปรากฏการณ์ขึ้น 2 อย่างพร้อมกันคือ จะมีการทรุดตัว ( Settlement )  
 พร้อม ๆ กับการเปลี่ยนแปลงของค่า  $k_a$  ตามรูป



ซึ่งจะทำให้ค่า local curvature radius ของ skin เปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้  
 วัสดุที่จะใช้ทำเป็น skin ต้องสามารถทนต่อการกัดกร่อน ทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศ และมีความ  
 อ่อนตัว ( flexible ) เพื่อจะสามารถเปลี่ยนไปตามการเปลี่ยนแปลงของดินได้ด้วย

### 3.7 สมมุติฐานที่ใช้ออกแบบโครงสร้างวัสดุเสริมดิน

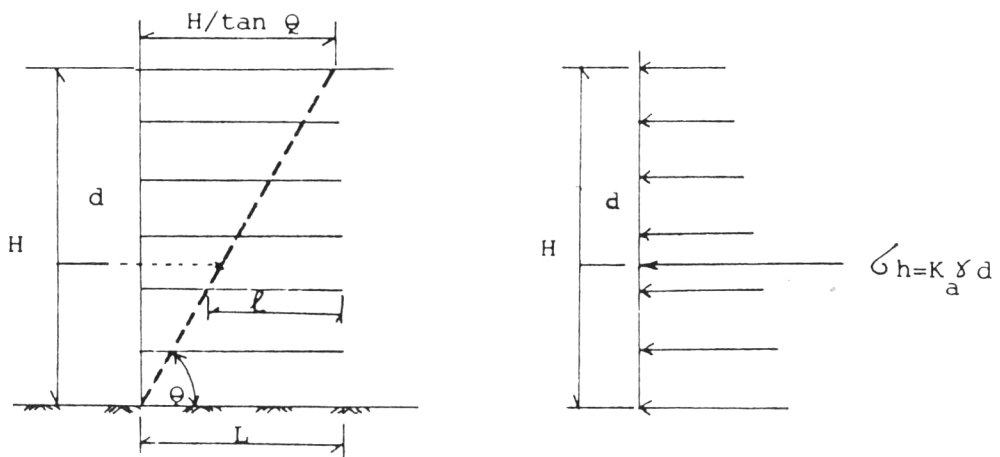
ให้โครงสร้างวัสดุเสริมดินเคลื่อนที่ตามแนวราบได้ เมื่อโครงสร้างรับน้ำหนักถึงจุด Rankine-Active failure และผลของการเคลื่อนที่ จะทำให้เกิด skin friction ระหว่างดินกับแถบวัสดุเสริม โดยการแผ่กระจายของแรงตลอดแนวนอน ( facing ) โครงสร้างจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความลึก ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้  $\sigma_h = K_a \gamma d$

โดย  $K_a$  คือสัมประสิทธิ์ของ active earth pressure

∅ เป็นมุมเสียดทานภายในของดินถม

χ เป็นน้ำหนักของดินถมต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

d เป็นความลึกที่ต้องการหาแรงค้ำดันข้าง วัดจากบนสุดลงไป



### 3.8 สภาพการวิบัติของโครงสร้างวัสดุเสริมดิน

จากที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้นโครงสร้างวัสดุเสริมดินต้องสามารถทนต่อแรงดึงที่เกิดขึ้นในดินได้ และต้องมีความฝืดระหว่างดินกับแถบวัสดุเสริมมากเพียงพอ เพื่อไม่ให้เกิดการเลื่อนไหลของแถบวัสดุเสริมกับดินได้ ดังนั้นเราจึงแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 กรณีคือ

**Tie Breaking** เกิดขึ้นเมื่อแรงยึดเกาะของวัสดุเสริมกับดินมากพอ และแรงค้ำดันข้างมีค่าเกินกว่าแรงดึงสูงสุดที่วัสดุเสริมจะรับได้

**Tie Pull out** เกิดขึ้นเมื่อแรงยึดเกาะของวัสดุเสริมกับดินมีไม่พอ ทำให้เกิดการเลื่อนไถลระหว่างผิวของวัสดุเสริมกับมวลดินรอบ ๆ

ก. เมื่อโครงสร้างวัสดุเสริมดินไม่สามารถทนต่อแรงดึงที่เกิดขึ้นในดินได้ (Tie Breaking failure) สมมติให้แรงดึงที่เกิดขึ้นในแถบวัสดุเสริมแผ่กระจายเป็นรูปสามเหลี่ยม และมีค่าสูงสุดที่ผิวหน้าโครงสร้าง และให้แรงดึงเพิ่มขึ้นเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความลึก เช่นเดียวกับแรงดันด้านข้างของดินตั้งรูป ถ้าแรงดันด้านข้างของดินเกินกว่าค่า Rankine active earth pressure เราจะได้ค่าแรงดึงที่เกิดขึ้นในแถบวัสดุเสริมที่ความลึก  $d$  คือ

$$T_d = K_a d s x \quad (\text{เป็นแรงดึงที่เกิดขึ้นจากน.น. ของดินอย่างเดียว})$$

$$T_d = K_a (s d + q) s x \quad (\text{เมื่อบวกล.น. จากภายนอกในลักษณะแผ่กระจาย})$$

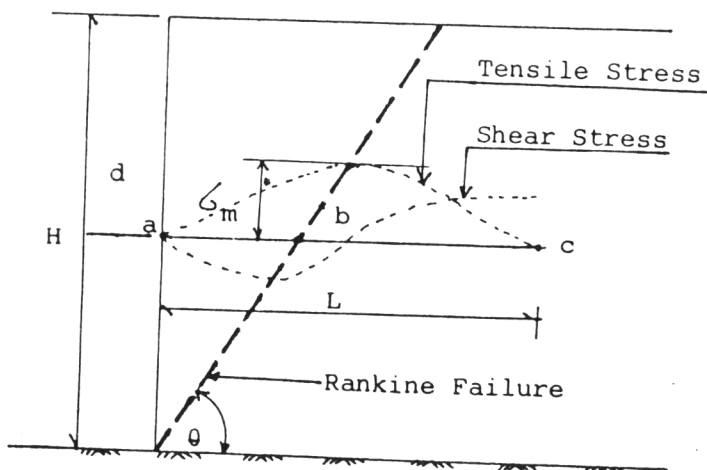
$$T_d = K_a \left( s d + \frac{Q}{2} k \right) s x \quad (\text{เมื่อบวกล.น. จากภายนอกในลักษณะเป็นจุด})$$

โดยที่  $s$  และ  $x$  เป็นระยะห่างในแนวนอนและแนวตั้งของแถบวัสดุเสริมที่กำหนดให้ หน่วยแรงที่จุดกลางของวัสดุเสริมเป็น  $\sigma_y$  และแถบวัสดุเสริมมีความกว้าง  $w$ , หนา  $t$  เราจะได้แรงต้านทานที่เกิดจากแถบวัสดุเสริมเป็น  $T_y = \sigma_y w t n$  \*

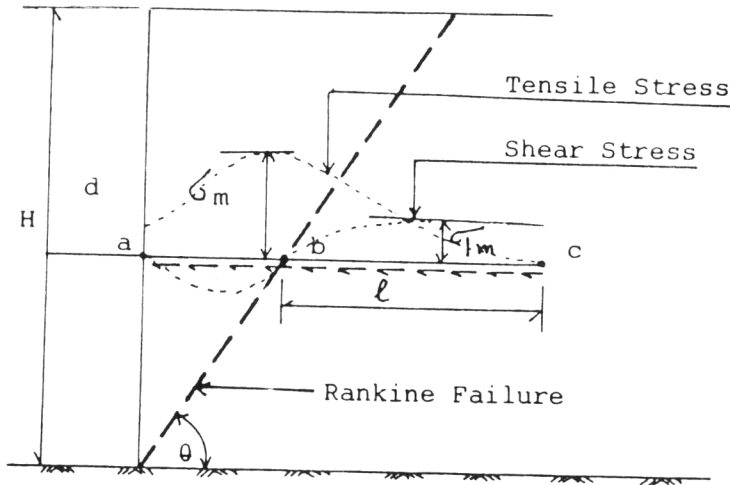
น คือจำนวนวัสดุเสริมที่ใช้ในโครงสร้างวัสดุเสริมดิน

จากที่กล่าวมานี้ถ้าต้องการหาค่าความปลอดภัย Factor of Safety จะได้ว่า

$$\text{ความปลอดภัย} = \frac{\text{แรงต้านทั้งหมด}}{\text{แรงดันที่เกิดขึ้น}}$$



ข. เมื่อโครงสร้างวัสดุเสริมดินมีแรงเสียดทานระหว่างแถบวัสดุกับดินน้อยกว่าแรงดึงที่เกิดขึ้น ( Tie Pull out Failure )



พิจารณารูปข้างบนความยาวส่วนที่อยู่หลัง Rankine Failure เท่านั้นที่สามารถนำมาคิดหาแรงต้านทานอันเกิดจากความฝืดของดินกับแถบวัสดุเสริมได้ จากรูปจุด Maximum Tensile Stress ไม่ได้อยู่บนเส้น Rankine Failure แสดงว่าวัสดุเสริมที่ใช้ยังสามารถทนต่อแรงดึงที่เกิดขึ้นได้ แต่โครงสร้างถึงสภาวะวิกฤติเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างแถบวัสดุเสริมกับดินน้อยกว่าแรงดึงที่เกิดขึ้น

ถ้ากำหนดให้หน่วยแรงเฉือนแผ่กระจายมี curve เป็นรูป parabola ดังรูปข้างบนตามแนวแกน b-c เราจะได้แรงต้านทานที่เกิดจากแถบวัสดุเสริมคือ

$$Fr = 2l \int_0^d \tau_m \tan \phi_{(u)} \dots *$$

หมายเหตุ สูตรที่ได้เป็นค่าแรงต้านทานของวัสดุเสริมเพียง 1 อัน ซึ่งถ้าต้องการหาค่าแรงต้านทานทั้งหมดของโครงสร้างเราจะต้องใช้สูตรดังนี้

$$Fr = 2 \sum_{i=N}^n \delta x_i \tan \phi_{(u)} \int_0^d i [L - (n-i) x \tan(45^\circ - \phi/2)]$$

$$\text{สำหรับค่าความปลอดภัย} = \frac{\text{แรงต้านทั้งหมด}}{\text{แรงดึงที่เกิดขึ้น}}$$

### 3.9 สูตรที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างคานเสริมไม้ไผ่

ก. เมื่อโครงสร้างวัสดุเสริมคานไม่สามารถรับแรงดึงที่เกิดขึ้นในคานได้

(Tie Breaking Failure)

แรงต้าน  $(T_y) = G_y \cdot w \cdot t$  (ต่อวัสดุเสริม 1 อัน)

แรงดึง  $(T_d) = K_a \cdot \sigma \cdot d \cdot S_x$  (เป็นแรงดึงที่เกิดจากน.น.ของคานอย่างเดียว)

$(T_d) = K_a (\sigma d + q) S_x$  (เมื่อบวกน.น.จากภายนอกในลักษณะแผ่กระจาย)

$(T_d) = K_a (\sigma d + \frac{Q}{B^2} K) S_x$  (เมื่อบวกน.น.จากภายนอกในลักษณะเป็นจุด)

ความปลอดภัย  $FS = \frac{T_y}{T_d} \text{ -----}^*$

ข. เมื่อโครงสร้างวัสดุเสริมคานมีแรงเสียดทานระหว่างแถบวัสดุกับคานน้อยกว่าแรงดึง  
ที่เกิด

(Tie Pull-Out Failure)

แรงต้าน  $(F_r) = 2 l_w \cdot \sigma \cdot d \cdot \tan \phi^{(u)}$  (ต่อวัสดุเสริม 1 อัน)

แรงดึง  $(T_d) = K_a \cdot \sigma \cdot d \cdot S_x$  (เป็นแรงดึงที่เกิดจากน.น.ของคานอย่างเดียว)

$(T_d) = K_a (\sigma d + q) S_x$  (เมื่อบวกน.น.จากภายนอกในลักษณะแผ่กระจาย)

$(T_d) = K_a (\sigma d + \frac{Q}{B} K) S_x$  (เมื่อบวกน.น.จากภายนอกในลักษณะเป็นจุด)

ความปลอดภัย  $FS = \frac{F_r}{T_d} \text{ -----}^*$