

## ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนของทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ทำการแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ เพื่อสะดวกในการศึกษา และพิจารณา คือ ส่วนของวัสดุโพลิเมอร์สังเคราะห์(Geosynthetic Materials) การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test) และส่วนของเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 วัสดุโพลิเมอร์สังเคราะห์(Geosynthetic Materials)

#### 2.1.1. ความหมาย และความเป็นมาของวัสดุโพลิเมอร์สังเคราะห์

ความหมาย และประวัติความเป็นมาของวัสดุโพลิเมอร์สังเคราะห์ นั้น สมปาน อาชานันท์ (2538) และ Koerner (1994) ได้กล่าวถึงรายละเอียดของความหมาย และประวัติความเป็นมาไว้ดังต่อไปนี้

วัสดุโพลิเมอร์สังเคราะห์ คือ วัสดุที่ผลิตจากวัสดุประเภท โพลิเมอร์(Polymeric Materials) เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในงานดิน, งานหิน, งานที่เกี่ยวข้องกับงานวิศวกรรมปฐพี และงานที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างในงานดิน เช่น กำแพงกันดิน, เชือกกันดิน เป็นต้น หรือนำมาใช้ในงานระบบระบายน้ำ, งานกรองวัสดุ, งานป้องกันการกัดเซาะ และงานแยกชั้นวัสดุ

ตั้งแต่ยุคก่อนประวัติศาสตร์ มนุษย์มีความพยายามในการเพิ่มความแข็งแรง (Reinforce) แก่ดินให้ดีขึ้น โดยการใช้วิธีการง่ายๆ เช่น การปลูกพืชคลุมดินบริเวณริมฝั่งมาปูปิดผิวหน้าของดินหรือการใช้ดินผสมกับไม้เพื่อเพิ่มความแข็งแรง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อไม้เริ่มเสื่อมสภาพลง ปัญหาการกัดกร่อนก็จะเกิดขึ้น ในปี ค.ศ. 1926 หน่วยงาน South Caroline Highway Department ได้นำผ้าฝ้ายที่มีความหนาหลายๆ มาในการเสริมความคงตัวของถนนคันทาง ( Road Embankment ) โดยใช้วิธีการปูผ้าฝ้ายหนาๆ บนชั้นดินเดิม และใช้แอสฟัลต์ร้อนเททับและใช้ทรายชั้นบางๆ ปูทับบนแอสฟัลต์อีกทีหนึ่ง จากนั้นจึงดำเนินการก่อสร้างถนนคันทางบนชั้นดังกล่าวเป็นขั้นสุดท้าย ในปี ค.ศ. 1935 ได้มีการเผยแพร่ผลการทดลองของการใช้ถนน 8 แห่งที่ได้จากวิธีการก่อสร้างดังกล่าวข้างต้น พบว่าการใช้งานของถนนสามารถใช้การได้ดีจนถึงช่วงที่ผ้าฝ้ายเริ่มเสื่อมชำรุดซึ่งเป็นเหตุให้ถนนเกิดการชำรุดลงตามไปด้วย จากผลการทดลองนี้จึงนำไปสู่การริเริ่มพัฒนาวัสดุสังเคราะห์โดยใช้วัสดุประเภทโพลิเมอร์ เพื่อให้เกิดความคงทน และสามารถใช้งานได้ยาวนานขึ้น ในระหว่างปี ค.ศ. 1960 ถึง 1980 เป็นช่วงที่มีการพัฒนาวิธีการก่อสร้าง และทฤษฎีการคำนวณของวัสดุสังเคราะห์ขึ้น รวมทั้งมีการกำหนดมาตรฐานการผลิตในระดับสากล

เช่น ISO Committee on Geotextile, ASTM D35 on Geosynthetics เป็นต้น ในระหว่างปี 1990 จนถึงปัจจุบันได้เริ่มมีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อนำมาใช้งานในด้านการคำนวณ และ ประมวลผลให้รวดเร็วยิ่งขึ้น รวมทั้งสามารถแก้ปัญหาที่ยุ่งยากได้



รูปที่ 2.1 แสดงวัสดุจีโอสินเทติกส์ ชนิดต่าง ๆ

ชนิดต่างๆของวัสดุจีโอสินเทติกส์ ซึ่ง สมปาน อาชานันท์ (2538) และ Koerner (1994) ได้กล่าวว่าวัสดุสังเคราะห์สามารถจำแนกออกได้เป็น 7 ประเภทด้วยกัน ตาม

ลักษณะของรูปร่าง, วัสดุที่ใช้ในการผลิต, วิธีการผลิต และประโยชน์ในการใช้งานดังนี้ (แสดงไว้ในรูปที่ 2.1)

1. วัสดุจีโอเทคไทลส์ (Geotextiles) เป็นวัสดุสังเคราะห์ประเภทหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด มีลักษณะเป็นแผ่นหรือคล้ายกับผ้าที่ผลิตขึ้นจากวัสดุธรรมชาติ เช่น Cotton, Wool, Silk เป็นต้น จีโอเทคไทลส์ผลิตจากเส้นใย Synthetic Fiber ซึ่งเส้นใยมีความคงทนกว่าเส้นใยตามธรรมชาติ มีความยืดหยุ่นสูง มีความสม่ำเสมอ สามารถผลิตเป็นแผ่นได้โดยใช้การถักทอเหมือนผ้า 1. วัสดุจีโอเทคไทลส์แบบถักทอ (Woven Geotextiles) หรือใช้วิธีการสร้างพันธะอื่นๆ ที่ไม่ใช่การถักทอตามปกติ 2. วัสดุจีโอเทคไทลส์แบบไม่ถักทอ (Non-woven Geotextiles) เช่น การใช้พันธะเคมี, การใช้ความร้อน เป็นต้น ประโยชน์ของวัสดุจีโอเทคไทลส์มีอยู่ด้วยกันหลายอย่างคือ การแยกวัสดุ (Separation), การเสริมแรงหรือเสริมความคงตัว (Reinforcement), การกรองวัสดุ (Filtration), การระบายน้ำ (Drainage) และการป้องกันการกัดกร่อนหรือการกัดเซาะ(Protection)
2. วัสดุจีโอกริด (Geogrids) เป็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายแผ่นตารางที่มีช่องว่างบนแผ่นขนาดใหญ่ ในขบวนการผลิตวัสดุจีโอกริด อาจจะถูกดึงในทิศทางเดียวหรือสองทิศทางก็ได้ เพื่อให้คุณสมบัติทางกายภาพดีขึ้น ประโยชน์ของจีโอกริด มีอยู่ด้วยกันสองอย่าง คือ การแยกวัสดุ และการเสริมแรงหรือเสริมความคงตัว แต่ในการใช้งานจริงๆ วัสดุจีโอกริดจะถูกนำมาใช้ในการเสริมแรงหรือเสริมความคงตัวมากกว่า
3. วัสดุจีโอเนท (Geonets or Geospaces) เป็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายแผ่นตาข่ายผลิตจากวัสดุโพลีเอทิลีนประเภทโพลีเอทิลีน (Polyethylene) หน้าที่หลักของ วัสดุจีโอเนท จะใช้ในงานด้านการระบายน้ำซึ่งเหมาะสำหรับพื้นที่ที่ต้องรองรับน้ำ โดยการใช้งานจำเป็นต้องมีแผ่นวัสดุจีโอเทคไทลส์ประกบทั้งหน้าหลังเพื่อใช้กรองวัสดุที่จะเข้าไปอุดตันช่องระบายน้ำของวัสดุจีโอเนท
4. วัสดุจีโอเมมเบรนเป็นวัสดุสังเคราะห์โพลีเอทิลีนประเภทหนึ่งที่เป็นกลุ่มใหญ่รองจากวัสดุจีโอเทคไทลส์และมีปริมาณการใช้งานที่ใกล้เคียงกัน วัสดุจีโอเมมเบรนเป็นวัสดุโพลีเอทิลีนประเภทยางหรือพลาสติกที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ มีการซึมผ่านของน้ำต่ำมาก และกันน้ำ (Liquid or Vapor Barrier) ใช้ประโยชน์ในด้านการป้องกันการไหลเข้าออกของน้ำ หรือควบคุมน้ำเสียไม่ให้ไหลผ่านมาปะปนกับน้ำดี และยังใช้เป็นวัสดุกันระหว่างมวลดิน และโครงสร้างต่างๆ เพื่อลดการกัดกร่อน

5. วัสดุจีโอซินเทติกส์เคลไลน์เนอร์ (Geosynthetic Clay Liner or GCLs) เป็นวัสดุที่มีลักษณะเป็นแผ่นที่เกิดจากการประกอบชั้นบางๆ ของเบนโทไนท์ (Bentonite Clay) ด้วยวัสดุจีโอเทคไทลล์หรือวัสดุจีโอเมมเบรนทั้งหน้าและด้านหลังแล้วจัดให้เป็นแผ่นเดียวกัน การใช้งานของ GCLs มีลักษณะเช่นเดียวกับวัสดุจีโอเมมเบรน คือใช้การป้องกันการซึมผ่านของน้ำ
6. วัสดุจีโอไพบี (Geopipes) เป็นวัสดุที่มีลักษณะเป็นแท่งคล้ายๆท่อ ผลิตจากวัสดุประเภทวัสดุโพลีเมอร์ ซึ่งมีความยืดหยุ่นและสามารถดัดโค้งได้ โดยความยืดหยุ่นและการดัดโค้งจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ผลิตวัสดุจีโอไพบี จะถูกใช้ประโยชน์ในด้านการระบายน้ำ เช่น ใช้เป็นท่อระบายน้ำในการระบายน้ำใต้ดินหลังกำแพงกับดิน เป็นต้น
7. วัสดุจีโอคอมโพสิท (Geocomposites) เป็นวัสดุที่ประยุกต์ขึ้นโดยการนำวัสดุสังเคราะห์มากกว่า 1 ชนิดมาใช้งานร่วมกัน เช่น วัสดุจีโอเทคไทลล์ใช้ประกอบกับวัสดุจีโอกริด หรือวัสดุจีโอเมมเบรน รวมถึงการใช้วัสดุจีโอเทคไทลล์ร่วมกับวัสดุจีโอเนท เป็นต้น หรือการนำวัสดุสังเคราะห์ประเภทใดประเภทหนึ่งมาใช้ร่วมกับวัสดุประเภทอื่นๆ เช่น ดิน , Styrofoam, Deformed Plastic Sheet , Steel Cables, Steel Anchors เป็นต้น เพื่อเพิ่มประโยชน์ใช้สอยในงานด้านต่างๆ

### 2.1.2. หน้าที่หลักของวัสดุจีโอซินเทติกส์ ที่ใช้ในงานสถานฝังกลบมูลฝอย

ในงานสถานฝังกลบขยะมูลฝอยนั้น จะใช้วัสดุจีโอซินเทติกส์เป็นส่วนประกอบ โดยหน้าที่วัสดุจีโอซินเทติกส์ ได้ถูกใช้เป็นวัสดุในระบบของ Liner และสามารถแบ่งหน้าที่ได้ออกเป็นหน้าที่หลักๆ 5 อย่าง ดังนี้

1. การกรอง ( Filtration )
2. การระบายน้ำ ( Drainage )
3. แยกวัสดุต่างชนิดออกจากกัน ( Separation )
4. เสริมกำลังรับแรง ( Reinforcement )
5. การกั้นน้ำซึมผ่าน ( Fluid barrier )
6. การป้องกัน ( Protection )

อีกทั้งยังมีข้อได้เปรียบของวัสดุโพลีเอทิลีนเทติกส์ เช่น มีการติดตั้งที่รวดเร็ว มีคุณภาพสูงในกระบวนการผลิต เป็นต้น จึงทำให้วัสดุโพลีเอทิลีนเทติกส์ ได้ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในทั้งในส่วนของ Liners และ ในส่วนที่ใช้ปกคลุม

โดยปกติใช้ วัสดุโพลีเอทิลีนเทติกส์ ตามคุณลักษณะเฉพาะและตามแต่ละชนิด เช่น วัสดุโพลีเอทิลีนเทติกส์ใช้ป้องกันดินไหลตามน้ำเข้าไปในท่อส่งน้ำ ป้องกันการกัดเซาะบริเวณชายฝั่งทะเลได้ วัสดุโพลีเอทิลีนเทติกส์ และวัสดุโพลีเอเมมเบรน เป็นวัสดุโพลีเอทิลีนเทติกส์ที่ใช้ในดินเหนียวและใช้วัสดุทั้ง 2 ชนิด ในการป้องกันการไหลซึมของน้ำของของเหลว (Leachate) หรือก๊าซที่เกิดขึ้นเกิดจากมูลฝอยในสถานฝังกลบมูลฝอย เป็นต้น

### 2.1.3. ก๊าซ และของเหลวที่เกิดขึ้นจากมูลฝอยในสถานฝังกลบมูลฝอย

นอกจากเรื่องของเสถียรภาพที่ถูกพิจารณาทั้งในระยะสั้น (Short term) และระยะยาว (Long term) แล้ว การพิจารณา ก๊าซ และของเหลว เพราะจะถูกแผ่กระจายออกมาจากสถานฝังกลบขยะมูลฝอยในระยะยาว เช่นกัน ซึ่งในสถานะของก๊าซจะถูกควบคุมโดยการจำกัดเรื่องอุณหภูมิ หรือเรื่องผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในขณะที่เรื่องของการควบคุมของเหลวที่เกิดขึ้นเกิดจากมูลฝอยในสถานฝังกลบมูลฝอยนั้นเป็นเรื่องที่ยากกว่า

Christensen et al. (1990) ของเหลวที่เกิดขึ้นเกิดจากมูลฝอยในสถานฝังกลบขยะมูลฝอย (Leachate) ถูกนิยามว่า เป็นของเหลวที่ไหลมาจากขยะหรือเกิดจากการเก็บกักขยะซึ่งอาจจะเป็นสารที่ละลาย หรือไม่ละลายน้ำได้ หลักสำคัญในการพิจารณาของเหลวที่เกิดขึ้นเกิดจากมูลฝอยในสถานฝังกลบมูลฝอยคือ หลีกเลียงและควบคุมปริมาณการรั่วไหลออกของของเหลวนั้นๆ ไปสู่สิ่งแวดล้อม

ในความเป็นจริงไม่มีระบบ Liner แบบใดที่สามารถป้องกันการรั่วไหลออกสู่สิ่งแวดล้อมอย่างสมบูรณ์ได้ในระยะยาว และไม่สามารถพิสูจน์เพื่อรับประกันการรั่วไหลได้นอกจากนั้นแล้วเรื่องการเลือกสถานที่ก่อสร้างสถานฝังกลบมูลฝอยยังจะต้องพิจารณาบริเวณที่ดินว่าในบริเวณนั้นมีค่าการซึมผ่านของดินต่ำ และเป็นบริเวณที่ซึ่งเมื่อเกิดการพังทลายของสถานฝังกลบมูลฝอยและเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมให้น้อยที่สุด

Christensen et al. (1990) และ Jaroonsit (1996) ได้ให้รายละเอียดของส่วนประกอบของระบบ Liner ที่เกี่ยวกับของเหลวที่เกิดขึ้นเกิดจากมูลฝอยในสถานฝังกลบขยะมูลฝอย ต่างๆ ดังนี้

ความชันด้านข้าง Liner (Side-Slope Liner) ได้ถูกสร้างในบริเวณด้านล่างของระดับพื้นผิว ดังนั้นควรจะต้องมีคุณสมบัติไม่สามารถให้ของเหลวซึมออกได้ แต่ของเหลวสามารถไหลผ่านได้ อีกทั้งยังต้องสามารถทนแรงดันของน้ำ และป้องกันการรั่วของก๊าซชีวภาพ (Biogas) ซึ่งระบบของความชันด้านข้าง Liner ต้องพิจารณาการก่อสร้างเพื่อป้องกันในระบบดังกล่าว อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงเรื่องการป้องกันเสถียรภาพ (Slope-failure resistance) ด้วย

Liner ด้านล่าง (Bottom Liner) ควรจะต้องป้องกันในเรื่องของป้องกันการรั่วของของเหลวที่เกิดขึ้นเกิดจากมูลฝอย และก๊าซชีวภาพสู่สิ่งแวดล้อม รวมถึงการคำนึงถึงกลศาสตร์ในการรับน้ำหนักของมูลฝอย

สิ่งสุดท้ายในการพิจารณาคือ Liner ด้านบน (Top Cover Liner) การพิจารณาในส่วนนี้ต้องมีการป้องกันป้องกันการรั่วของก๊าซชีวภาพสู่สิ่งแวดล้อม อีกทั้งการดูแลรักษาในเรื่องต่างๆ เช่น ระบบป้องกันการกัดกร่อน (Erosion control) การลดการซึมผ่านของน้ำฝนที่ตรงจุดเชื่อมต่อ (Sealing) และระบบการไหล (Drainage Functions)

#### 2.1.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพ (Stability Analysis)

Jaroonsit (1994) กล่าวว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพในงานสถานฝังกลบมูลฝอย โดยทั่วไปการวิเคราะห์มีอยู่ 2 วิธีใหญ่คือ วิธีสมดุลสุดขีด (Limit Equilibrium) และวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ (Finite-Element) โดยวิธี Limit Equilibrium เป็นวิธีวิเคราะห์ในเบื้องต้นซึ่งเปรียบเทียบระหว่างแรงขับ (Driving Force) กับแรงต้าน (Resisting Force) แรงขับนั้นจะประกอบด้วย น้ำหนัก (Gravity) และแรงแผ่นดินไหว (Earthquake Force) ในขณะที่แรงต้านจะประกอบไปด้วยกำลังของวัสดุ ซึ่งกำลังของวัสดุตลอดระยะนาบการไถลนั้นจะถูกลดค่าลงในรูปของค่าอัตราความปลอดภัย (Factor of Safety) และมวลที่อยู่ในระยะนาบของการไถลจะอยู่ในสภาวะสมดุล ซึ่งวิธีนี้ไม่ได้พิจารณาการเคลื่อนตัวของ Slope Failure

สำหรับวิธี Finite-Element เป็นวิธีที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานของการพิจารณาปฏิกิริยาของความเค้นและความเครียด (Stress-Strain Respond) ในมวลที่ถูกแรงกระทำ เพราะเป็นกระบวนการพิจารณาที่ให้ค่าถูกต้องละเอียดมากกว่า และค่าประมาณของความเค้น การเสียรูปอยู่ในช่วงค่าที่ยอมรับได้ แต่ในระบบกักเก็บมูลฝอยการที่เราจะได้ค่าตัวแปรของความเค้น และความเครียดนั้นทำได้ยาก ดังนั้นแล้วในการพิจารณาด้วยวิธี Limit Equilibrium จะเป็นกระบวนการที่ง่ายกว่าในการวิเคราะห์

วิธี Limit Equilibrium โดยที่ใช้กันทั่วไปมีวิธีการวิเคราะห์ที่อยู่ 3 วิธีคือ วิธี Method of Slice วิธี Infinite Slope และวิธี Wedge Method วิธีแรกเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ส่วนโค้ง รูปสี่เหลี่ยมหรือรูปร่างอื่นๆ ช่วยในการวิเคราะห์พื้นผิวในการเลื่อน ซึ่งพื้นผิวในการเลื่อนมีสาเหตุมาจากการเคลื่อนตัวของวัสดุจีโอซินเทติกส์ วิธีที่สอง Infinite Slope เป็นการพิจารณาในหนึ่งมิติ และการเคลื่อนตัวที่ขนานกับความชัน ซึ่งในสถานการณ์นี้จะเกิดขึ้นกับชั้นปกคลุมชั้นสุดท้าย ( Final Cover ) ซึ่งจะอยู่บริเวณความชันด้านข้างของมูลฝอย ( Refuse Side Slope ) ส่วนวิธี Wedge Method โดยทั่วไปจะพิจารณามวลในรูปทรงเรขาคณิตจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมในลักษณะต่างๆ และพิจารณาสมมูลที่เกิดขึ้น สำหรับในการวิเคราะห์ชั้นดินที่ปกคลุม ( Soil Cover ) วิธีนี้เป็นวิธีที่มีความเหมาะสมกับความเป็นจริงมากกว่าวิธี Infinite Slope เพราะว่าได้รวมเอาผลกระทบที่เกิดจากแรงเสียดทานของมวลดินที่ผิวความชันด้านล่าง ( Toe Slope ) และ เป็นคำนวณความชันที่จำกัด ( Finite Slope ) ตามสภาพความเป็นจริง

## 2.2 การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test)

### 2.2.1 ทฤษฎีของมอห์-คูลอมป์ (Mohr-Coulomb Throem)

Mohr ได้เสนอทฤษฎีขึ้นในปี ค.ศ. 1700 ว่าการวิบัติของวัสดุมาจากการกระทำร่วมกันที่จุดวิกฤตระหว่างหน่วยแรงกดตั้งฉากกับหน่วยแรงเฉือน ( Critical combination of normal stress and shearing stress ) ไม่ได้มาจากค่าหน่วยแรงกดตั้งฉากสูงสุด ( Maximum normal stress ) หรือหน่วยแรงเฉือนสูงสุด ( Maximum shear stress ) ดังนั้น ตัวแปรของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดตั้งฉากสูงสุด,  $\sigma$  และหน่วยแรงเฉือนสูงสุดภายใน,  $\tau$ , บนระนาบวิบัติสามารถแสดงได้ในรูปสมการดังนี้ ( ดังรูปที่ 2.2 (a) )

$$\tau_r = f(\sigma) \quad (2.1)$$

ความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.1 จะมีลักษณะเป็นสมการเส้นโค้ง ดังรูปที่ 2.2 (b) แต่สำหรับปัญหาทาง ปรุฐพีกลศาสตร์ (Soil Mechanics) ก็เพียงพอที่จะประมาณค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุด,  $\tau_r$  บนระนาบวิบัติให้เป็นสมการเส้นตรง Coulomb ได้เสนอแนวคิด ในปี ค.ศ. 1776 สมการเส้นตรงสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (2.2)$$

เมื่อ  $c$  = หน่วยแรงยึดเหนี่ยว ( Cohesion )

$\phi$  = มุมเสียดทานภายใน (Angle of Internal Friction)

ความหมายของสมการข้างต้นสามารถอธิบายได้ดังนี้ ถ้าค่าหน่วยแรงกดตั้งฉากสูงสุด และหน่วยแรงเฉือนสูงสุด บนระนาบของดินมีค่าที่จุด A ในรูปที่ 2 (b) การวิบัติจากหน่วยแรงเฉือนจะไม่เกิดขึ้นที่ระนาบนั้น ส่วนที่จุด C การวิบัติจากหน่วยแรงเฉือนจะไม่เกิดขึ้น เนื่องจากจะเกิดการวิบัติที่จุด B ก่อนแล้ว

ต่อมา Horslev (1937) ได้คำนึงผลกระทบจากแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) สมการของ Coulomb จึงเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \tan \phi' \quad (2.3)$$

เมื่อ  $c'$  = หน่วยแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล

$\phi'$  = มุมเสียดทานภายในประสิทธิผล

$u$  = แรงดันน้ำในดิน

เพื่อให้สมการมีรูปแบบที่ง่ายขึ้น เราจะใช้แนวคิดของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress) สามารถเขียนสมการใหม่ ได้ดังนี้

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (2.4)$$

ดินก็เหมือนกับวัสดุก่อสร้างอื่นๆ เช่น ไม้ เหล็ก และคอนกรีต คือสามารถรับแรงกระทำได้จนถึงจุดวิบัติ แต่แตกต่างตรงที่การวิบัติของดินจะเนื่องมาจากแรงเฉือนทั้งหมด ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน (Shear strength of soil) ขึ้นอยู่กับตัวประกอบต่างๆ มากมาย แต่ตัวประกอบที่สำคัญที่ใช้พิจารณา คือ

1. แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน
2. แรงเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดิน

ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่มีเม็ดหยาบ เช่น กรวด หรือทราย ขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดินเป็นส่วนใหญ่ นั่นคือขึ้นอยู่กับน้ำหนักหรือแรงกดที่กระทำตั้ง

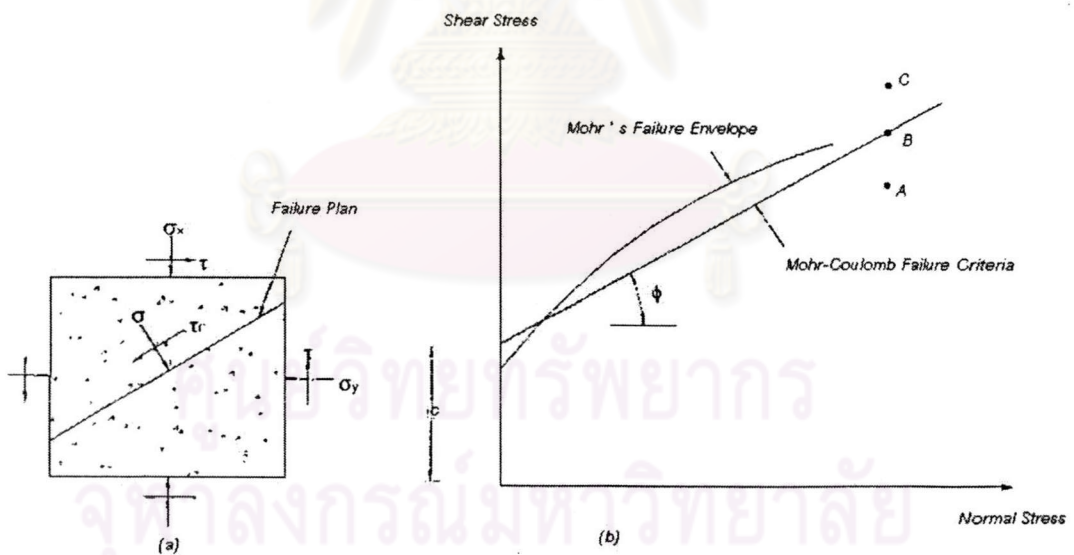


จาก กับระนาบของแรงเฉือน ส่วนค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่มีเม็ดเล็กและละเอียด เช่น ดินเหนียว ขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของเม็ดดิน ซึ่งเปลี่ยนแปลงได้ตามค่าของ ปริมาณน้ำในมวลดิน ขนาดของเม็ดดิน และการบดดิน ฉะนั้นกำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน ประเภทนี้จึงไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง และไม่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักหรือแรงกดที่กระทำมากนัก ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือน กับหน่วยแรงกดตั้งฉากที่ได้จากการทดลองของดินชนิดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.3

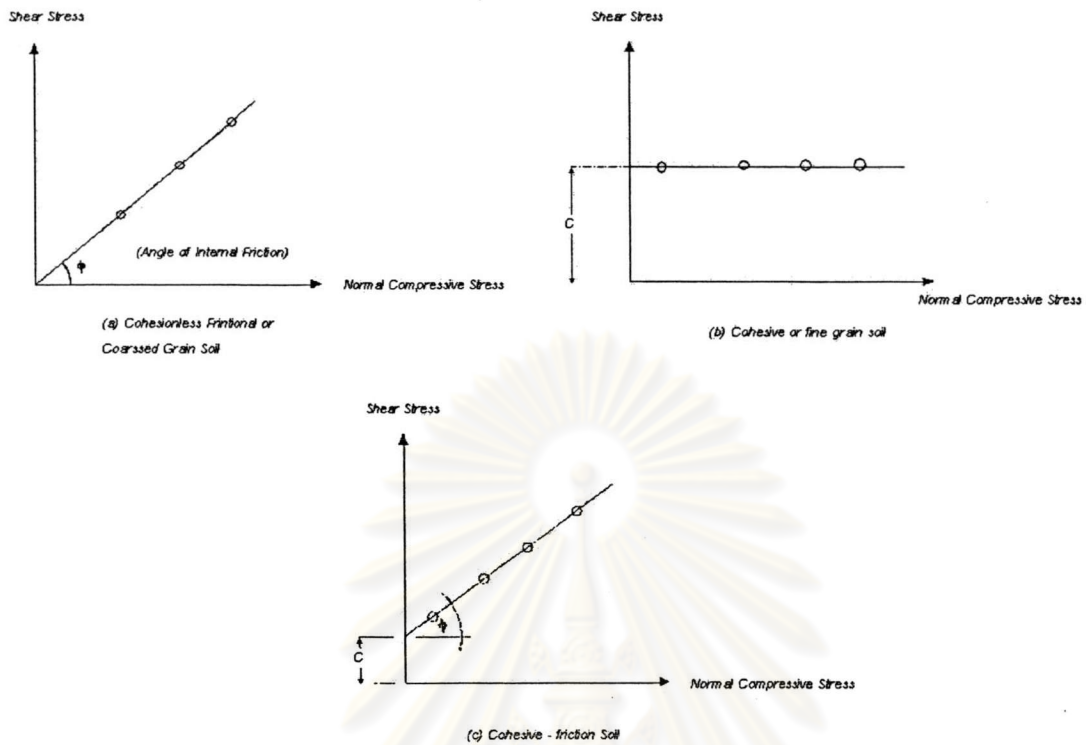
ซึ่งค่ามุมเสียดทานภายในของเม็ดดินขึ้นอยู่กับขนาด และรูปร่างของอนุภาคเม็ด ดิน อัตราส่วนช่องว่าง และแรงดันดินด้านข้างและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสามารถหาได้จาก สมการดังต่อไปนี้

$$\mu = F / R = \tan \phi \quad (2.5)$$

เมื่อ  $\phi$  = มุมเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดิน



รูปที่ 2.2 (a) Mohr's failure envelope (b) Mohr-Coulomb failure failure criteria (Das, 2001)

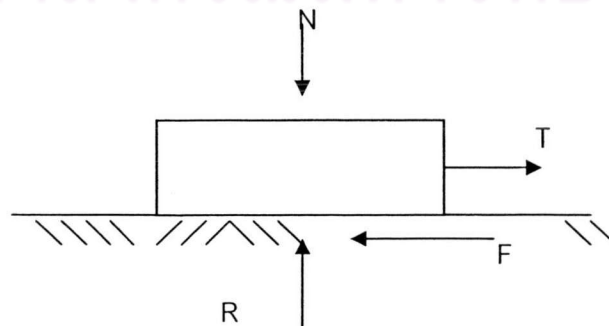


รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับหน่วยแรงตั้งฉากที่ได้จากการทดสอบของดิน (วินิต,2522)

ซึ่งค่ามุมเสียดทานภายในของเม็ดดินขึ้นอยู่กับขนาด และรูปร่างของอนุภาคเม็ดดิน อัตราส่วนช่องว่าง และแรงดันดินด้านข้างและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\mu = F / R = \tan \phi \quad (2.5)$$

เมื่อ  $\phi$  เป็นมุมเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดิน



รูปที่ 2.4 แสดงสภาวะสมดุลของวัตถุที่เกิดจากแรงกดตั้งฉาก และแรงเฉือนในแนวราบ

กฎพื้นฐานของแรงเสียดทาน (R.C.Hibbeler, 1995)

1. แรงเสียดทานเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อแรงกดตั้งฉาก
2. แรงเสียดทานระหว่างวัตถุสองชนิดจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุ

## 2.2.2 วิธีการทดสอบหาความต้านทานแรงเฉือนของดิน

วิธีการทดสอบหากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินในห้องปฏิบัติการ และในสนาม มีอยู่ด้วยกัน 5 วิธี ( วรากร, จิรพัฒน์, ประทีป, 2525) คือ

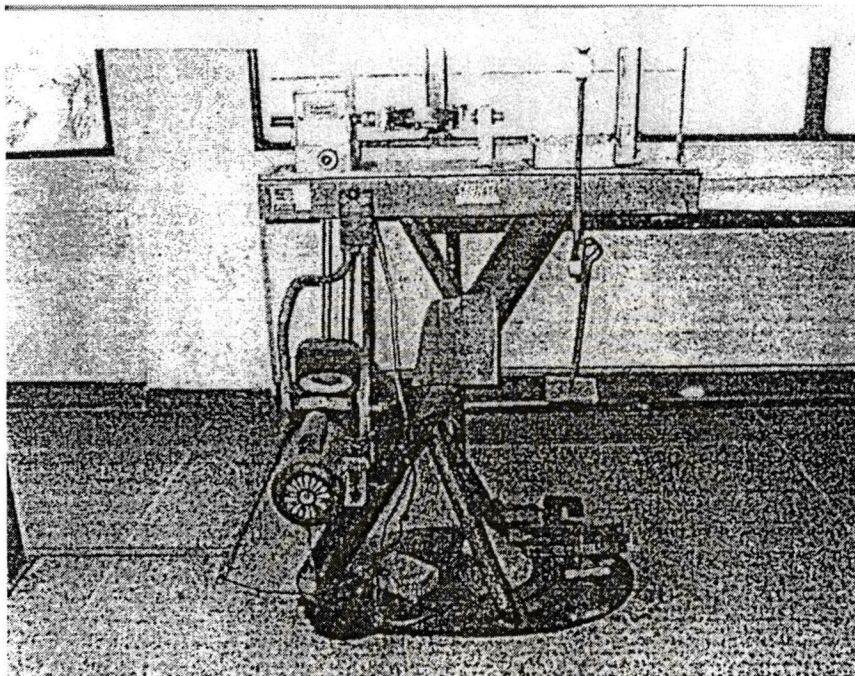
1. การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test)
2. การทดสอบหากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินโดยการกดตัวอย่างดินทรงกระบอกทางแนวตั้งและมีแรงดันดินด้านข้าง (Triaxial Compression Test)
3. การทดสอบหากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินโดยการกดตัวอย่างทรงกระบอกทางแนวตั้งโดยไม่มีแรงดันด้านข้าง (Unconfined Compression Test)
4. การทดสอบในสนามโดยการใช้ใบพัดสี่แฉก ( Vane Shear Test )
5. การทดสอบในสนามโดยวิธีสแตนดาร์ดพีเนเทรชัน ( Standard Penetration Test )

## 2.2.3 การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง

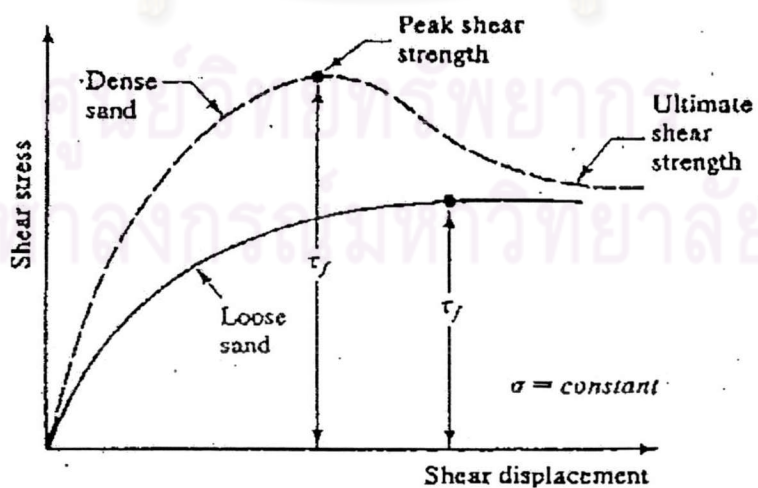
เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วในการหากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินโดยอาศัยเครื่องมือที่เรียกว่ากล่องทดสอบแรงเฉือน (Shear Box) ดังแสดงในรูปที่ 2.5

วิธีการทดลองทำโดยการบรรจุดินตัวอย่างลงไประหว่างแผ่นหินพรุน ( Porous Stone Plate ) ที่มีใบมีดไพล์เป็นระยะซึ่งใช้ช่วยในการกระจายน้ำหนักลงสู่ดิน ให้น้ำหนักกดมีค่าคงที่ตลอดการทดลองหนึ่งๆ ซึ่งกระทำตั้งฉากกับระนาบของแรงเฉือน แล้วค่อยๆ เพิ่มค่าแรงเฉือนซึ่งวัดโดยใช้วงแหวนวัดแรง ( Proving ring ) จนกระทั่งดินถูกเฉือนขาดออกจากกัน จะได้ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน เมื่อทำการทดลองซ้ำอีก 2-3 ครั้ง โดยเปลี่ยนค่าน้ำหนักกดตั้งฉากแล้วนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับระยะการเคลื่อนที่ในแนวราบจะได้

กราฟที่มีลักษณะโค้งคว่ำ จุดสูงสุดของกราฟคือหน่วยแรงเฉือนสูงสุด (Peak shear strength) ดังรูปที่ 2.6

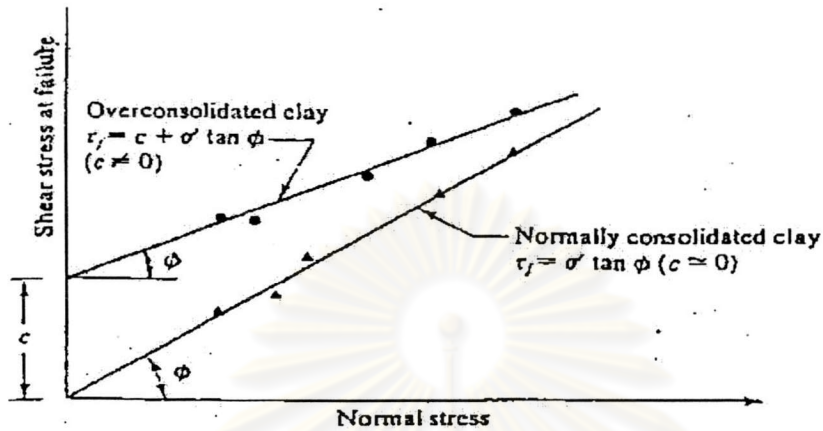


รูปที่ 2.5 เครื่องทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Device)



รูปที่ 2.6 การเขียนกราฟระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวราบของทราย(Das, 1990)

นำค่าหน่วยแรงเฉือน ณ จุดวิบัติกับหน่วยแรงกดตั้งฉากมาเขียนกราฟก็สามารถหาค่าแรงยึดเหนี่ยว และมุมเสียดทานภายในของดินได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การเขียนกราฟระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับหน่วยแรงกดตั้งฉาก (Das, 1990)

การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง สามารถทดสอบได้ทั้งกรณีที่ยอมให้น้ำในดินไหลซึมออกไปได้ (Drained) ซึ่งการทดสอบจะดำเนินไปอย่างช้าๆ และจะไม่มีแรงต้านทานจากความดันของน้ำ การทดลองอีกกรณีหนึ่งคือไม่ยอมให้น้ำในดินไหลซึมออกไป (Undrained) ซึ่งการทดลองจะดำเนินไปอย่างรวดเร็ว และมีหน่วยแรงต้านทานจากความดันของน้ำเกิดขึ้นด้วย

## 2.2.4 ข้อสังเกตทั่วไปเกี่ยวกับ การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง

การทดสอบแรงเฉือนโดยตรงเป็นการทดสอบที่ง่ายต่อการปฏิบัติ แต่ก็ยังมีจุดบกพร่องที่ปรากฏอยู่เสมอ ความน่าเชื่อถือของผลการทดสอบจะกลายเป็นคำถามอยู่เสมอเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ในตัวอย่างซึ่งส่งเสริมให้ดินไม่ได้วิบัติ ที่ระนาบที่อ่อนแอมากที่สุดของดิน แต่จะวิบัติในระนาบของกล่องทดสอบแรงเฉือน ดังนั้นการกระจายตัวของหน่วยแรงเฉือนจะไม่เหมือนกัน แม้จะทดสอบด้วยดินตัวอย่างเดียวกัน แต่เมื่อมองในแง่ของเศรษฐกิจการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงมักจะถูกใช้ทดสอบกับดินทราย (Das, 1998)

### 2.2.5 ประโยชน์ของการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง

การทดสอบในห้องทดลองสามารถหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินได้สะดวก ถึงแม้ผลที่ออกมาจะให้ความพอใจน้อยก็ตาม (Hanzawa, 1992)

1. การเตรียมตัวอย่างค่อนข้างง่าย และสะดวก
2. การหาค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินข้างในสถานะนิ่ง (Coefficient of earth pressure at rest)  $K_0$  กระทำได้ง่าย
3. การหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือน สามารถกระทำได้ทุกกระนาบ

ประโยชน์ของการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test) เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบแรงเฉือนโดยการกดตัวอย่างดินทรงกระบอกทางแนวตั้ง และมีแรงดันดินด้านข้าง (Triaxial Test) มีดังนี้

1. เทคนิคในการทดสอบได้ง่ายกว่า
2. สามารถเลือกตัวอย่างที่มีคุณภาพ และความสม่ำเสมอได้ง่ายกว่า เพราะใช้ตัวอย่างที่มีขนาดเล็กกว่า
3. การหาค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินข้างในสถานะนิ่งและค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนในทุกกระนาบ กระทำได้ง่ายกว่า
4. เวลาที่ใช้ทดสอบสั้นกว่า
5. ราคาถูกกว่า

### 2.2.6 การทดสอบแรงเสียดทานระหว่างวัสดุ 2 ชนิด

ปัญหาส่วนใหญ่ในการออกแบบฐานราก คือ การหามุมของแรงเสียดทานระหว่าง ดินกับวัสดุที่ใช้ทำฐานราก ได้แก่ คอนกรีต, เหล็ก และไม้ กำลังต้านทานแรงเฉือนตามแนวสัมผัส ระหว่างดินกับวัสดุที่ใช้ทำฐานราก,  $\tau_f$  สามารถหาได้ดังนี้

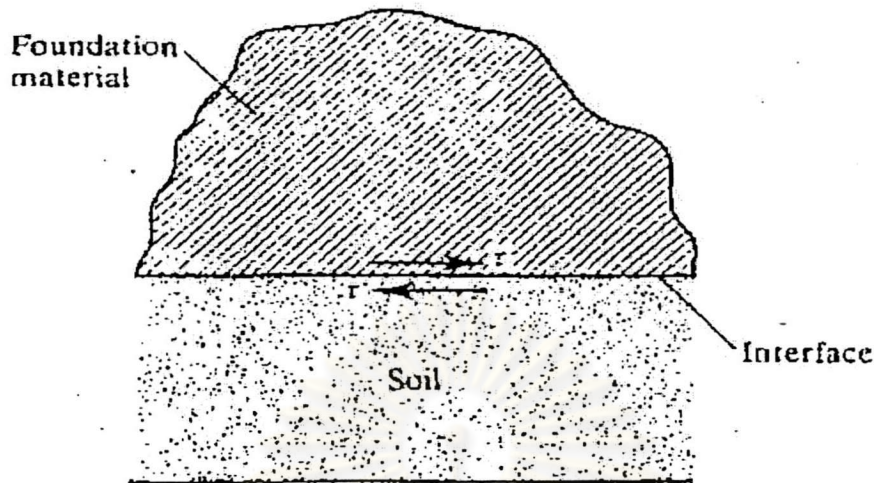
$$\tau_f = C_a + \sigma' \tan \delta \quad (2.6)$$

เมื่อ

$C_a$  = หน่วยแรงยึดเกาะระหว่างผิวสัมผัส (Adhesion)

$\delta$  = มุมของแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส (Angle of Interface

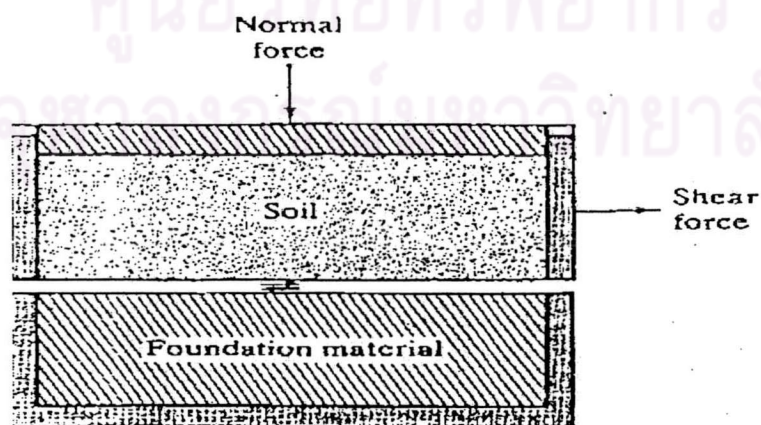
Friction)



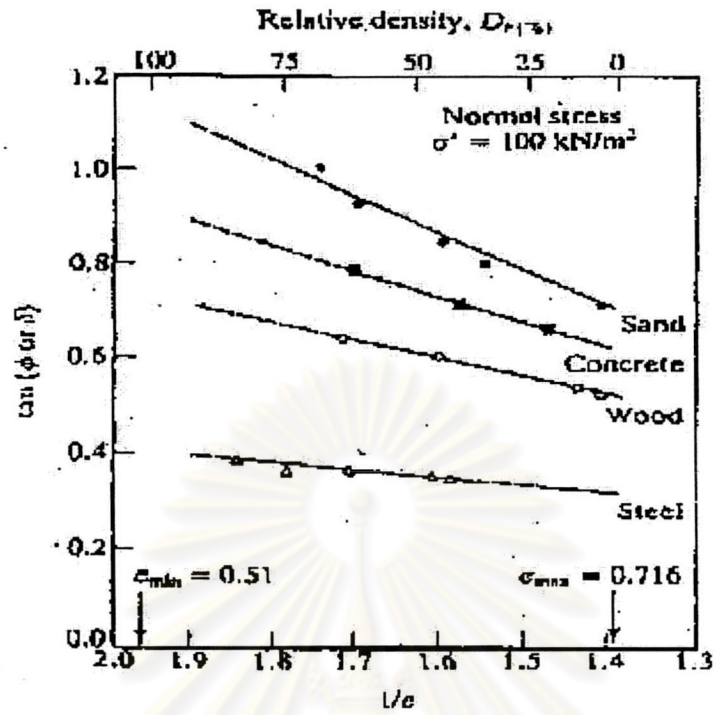
รูปที่ 2.8 การกระทำต่อกันระหว่างดินกับวัสดุฐานราก (Das, 1990)

ตัวแปรของกำลังต้านทานแรงเฉือน สามารถหาได้ง่ายโดยการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง นี่คือ ประโยชน์ที่มากที่สุดที่ได้รับจากการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง เราสามารถวางวัสดุลงในกล่องด้านล่างและวางดินในกล่องด้านบนดังแสดงในรูปที่ 2.9

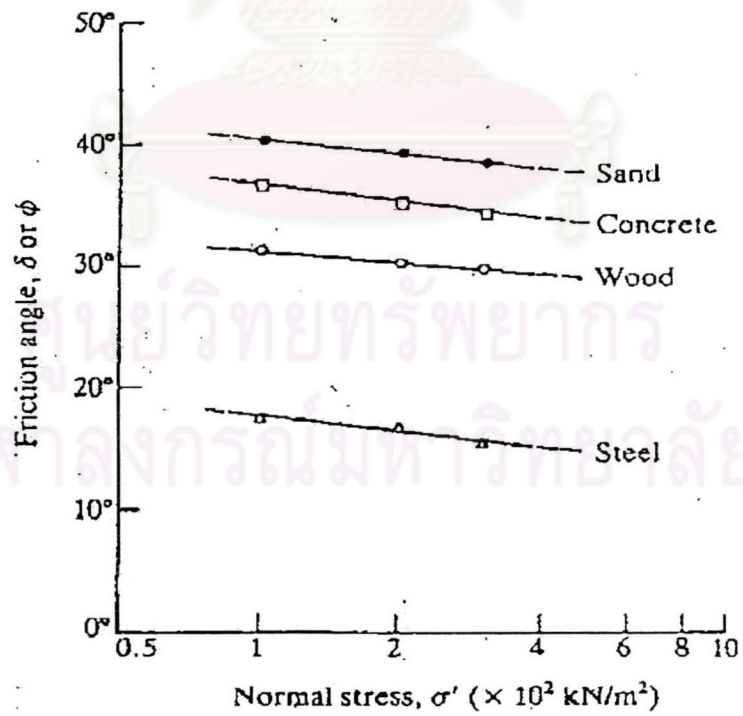
รูปที่ 2.10 แสดงผลการทดสอบระหว่าง Quartz sand กับคอนกรีต, ไม้ และเหล็ก โดยใช้หน่วยแรงประสิทธิผล ( $\sigma'$ )  $14.5 \text{ lb/in}^2$  ( $100 \text{ KN/m}^2$ ) รูปที่ 2.11 แสดงการแปรผันของมุมมองของแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส ( $\delta$ ) ระหว่าง Quartz sand (ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 45%) กับวัสดุฐานรากที่ถูกกระทำ จากรูปแสดงให้เห็นว่า ค่ามุมของแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส จะเพิ่มขึ้นเมื่อหน่วยแรงกดตั้งฉากประสิทธิผลลดลง



รูปที่ 2.9 แสดงการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง เพื่อที่จะหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส (Das, 1990)



รูปที่ 2.10 แสดงผลการทดสอบระหว่าง Quartz sand กับคอนกรีต, ไม้ และเหล็ก โดย Acar, Durgunoglu, and Tumay, 1998



รูปที่ 2.11 แสดงการแปรผันของค่ามุมของแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของ Quartz sand (ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 45%) กับวัสดุฐานราก (Acar & Durgunoglu, 1998)



ตารางที่ 2.1 แสดงค่า  $\delta/\phi$  สำหรับผิวสัมผัสระหว่างวัสดุฐานรากกับดิน ( Kulhawy ,1991)

Foundation Type	$\delta/\phi$
Rough Concrete	1.0
Smooth Concrete ( i.e.,precast pile )	0.8-1.0
Rough Steel ( i.e.,step-taper pile )	0.7-0.9
Smooth Steel ( i.e., pipe pile or H-pile )	0.5-0.7
Wood ( i.e., timber pile )	0.8-0.9
Drilled shaft built using dry method or with temporary casing and good construction techniques	1.0
Drilled shaft built with slurry method ( higher values correspond to more careful construction methods )	0.8-1.0

ตารางที่ 2.2 แสดงค่ามุม  $\delta$  ในเทอมของค่ามุม  $\phi$  (ASCE, 1993)

Pile Material	$\delta$
Steel	$0.67 \phi - 0.83 \phi$
Concrete	$0.90 \phi - 1.00 \phi$
Timber	$0.80 \phi - 1.00 \phi$

### 2.3 เอกสาร และงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง

ในอดีตได้มีผู้ศึกษา และทำการทดสอบหาค่ากำลังเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินกับวัสดุจีโอซินเทติกส์ประเภทต่างๆ และกำลังเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุจีโอซินเทติกส์ด้วยกันเองในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ดังนี้

William and Houlihan (1986) ได้เสนอว่าลักษณะของผิวสัมผัส การลื่นไถลระหว่างชั้นของวัสดุจีโอซินเทติกส์ ซึ่งตัวประกอบที่สำคัญของค่ากำลังเสียดทานที่ผิวสัมผัสใน

ขณะเดียวกัน Mitchell et al. (1990) ได้ให้ข้อสังเกตว่าค่ากำลังเสียดทานที่ผิวสัมผัสจะลดลงเมื่อผิวสัมผัสระหว่างวัสดุโพลีเอทิลีนเทติกส์มีความเรียบที่ผิวสัมผัสมากขึ้น

ในปีเดียวกัน Miyamori et al. (1986) ได้ทำการทดสอบหาค่ากำลังเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างทรายถม และวัสดุจีโอเทคไทลล์ ผลการทดสอบปรากฏว่าค่ากำลังเสียดทานที่ผิวสัมผัสมีค่าอยู่ในระหว่าง 72-87 % ของค่ากำลังเสียดทานของทรายด้วยกันเอง และในเวลาเดียวกันนั้น Ingold et al. (1986) ได้ทำการหาค่าอัตราส่วนของมุมเสียดทานระหว่างทรายกับวัสดุจีโอเทคไทลล์ และ มุมเสียดทานของทรายด้วยกันเอง ( $\delta/\phi$ ) พบว่ามีค่าประมาณ 0.75 แต่ในปี 1991 Athanasopoulos (1991) กลับได้ค่าการหาค่าอัตราส่วนของมุมเสียดทานระหว่างทรายกับวัสดุจีโอเทคไทลล์ และมุมเสียดทานของทรายด้วยกันเอง ( $\delta/\phi$ ) ประมาณ 0.5-1.6 เนื่องจากวัสดุจีโอเทคไทลล์ตามท้องตลาดมีศักยภาพสูงขึ้นตามการใช้งาน

Matin et al.(1984) ได้ทำการทดสอบหาค่ากำลังเฉือนของวัสดุโพลีเอทิลีนเทติกส์ประเภทต่างๆ และประมาณค่าคุณสมบัติของกำลังรับแรงเฉือน ที่แสดงในรูปของมุมเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสดังที่แสดงในตารางที่ 2.3 William and Houlihan. (1986) ได้เสนอค่าของมุมเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสระหว่างวัสดุจีโอเทคไทลล์กับวัสดุโพลีเอทิลีนเทติกส์ ดังที่แสดงในตารางที่ 2.4 ซึ่งผลการทดสอบค่าที่ได้จะเท่ากับของ Matin et al. (1984) Negussey et al, (1989) เป็นอีกคนหนึ่งที่ได้ทำการหาค่าค่าของมุมเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของวัสดุจีโอเทคไทลล์กับวัสดุโพลีเอทิลีนเทติกส์ ดังที่แสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.3 แสดงผลการทดสอบของ Matin et al. (1984) ค่ามุมเสียดทานที่ผิวสัมผัสต่างๆ

Interface	Friction angle ( degree )
PVC Geomembrane & Nonwoven, Needle punched Geotextile	18
PVC Geomembrane & Woven, Polypropylene, Polyester Geotextile	20
HDPE Geomembrane & Nonwoven, Needle punched Geotextile	10
HDPE Geomembrane & Woven, Polypropylene, Polyester Geotextile	9

ตารางที่ 2.4 แสดงผลการทดสอบของ William and Houlihan (1986) ค่ามุมเสียดทานที่ผิวสัมผัส  
ต่างๆ (ผลที่ได้จะมีค่าเหมือนกับของ Matin et al. ในปี 1984)

Interface	Friction angle ( degree )
PVC Geomembrane & Nonwoven, Needle punched Geotextile	18
PVC Geomembrane & Woven, Polypropylene, Polyester Geotextile	20
HDPE Geomembrane & Nonwoven, Needle punched Geotextile	10
HDPE Geomembrane & Woven, Polypropylene, Polyester Geotextile	9

ตารางที่ 2.5 แสดงผลการทดสอบของ Negussey et al, (1989) ค่ามุมเสียดทานที่ผิวสัมผัสต่างๆ

Interface	Friction angle ( degree )
HDPE Geomembrane & Nonwoven Geotextile	6.5
HDPE Geomembrane & HDPE Geomembrane	6.5

ในงานวิจัยของ Kim (1992) ได้ทำการทดสอบหาค่ากำลังเสียดทานที่ผิวสัมผัส  
ระหว่างดินกับวัสดุจีโอเทคไทลล์ 2 ชนิดคือ วัสดุจีโอเทคไทลล์แบบหนา และวัสดุจีโอเทคไทลล์  
แบบบาง กระทำในสภาวะระบายน้ำ (Drained Condition) และสภาวะไม่ระบายน้ำ (Undrained  
Condition) พบว่าที่สภาวะระบายน้ำค่ากำลังเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินกับวัสดุจีโอเทค  
ไทลล์แบบหนา ค่ากำลังเสียดทานที่ผิวสัมผัสจะลดลง 35+5% ส่วนค่ากำลังเสียดทานที่ผิวสัมผัส  
ระหว่างดินกับวัสดุจีโอเทคไทลล์แบบบางมีค่า 45+5% ที่สภาวะไม่ระบายน้ำค่ากำลังเสียดทานที่  
ผิวสัมผัสระหว่างดินกับวัสดุจีโอเทคไทลล์แบบหนา ค่ากำลังเสียดทานที่ผิวสัมผัสจะลดลง 50+2%  
และมีค่าลดลงประมาณ 60% สำหรับค่ากำลังเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินกับวัสดุจีโอเทค  
ไทลล์แบบบาง

และในปีเดียวกันนั้น Mitchell and Mitchell (1992) ได้ค้นพบจากผลการทดสอบ  
การกำหนดทิศทางของวัสดุจีโอเนท ซึ่งสัมพันธ์กับทิศทางการเลื่อนตามวัสดุจีโอเมมเบรน ใน

ทิศทางต่างๆ พบว่าค่ามุมที่ได้ต่างกันซึ่งค่าที่ได้มีอิทธิพลทำให้ค่ามุมเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสต่างกันประมาณ 2-4 องศา ดังที่แสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แสดงผลการทดสอบของ Mitchell and Mitchell (1992) ค่ามุมเสียดทานที่ผิวสัมผัสกับทิศทางที่เปลี่ยนแปลงไป

Interface	Friction angle ( degree )
HDPE Geomembrane & Geonet	9.5-12.5
HDPE Geomembrane & Geonet (transverse shear)	7.0-8.0
HDPE Geomembrane & Geonet (aligned shear)	5.0-8.0

ในปี 1994 Tien, Ming-hua (1994) ได้นำเสนองานวิจัยที่ทำการทดสอบระหว่างดินเหนียวกับวัสดุจีโอเทคไทลล์ และทรายกับวัสดุจีโอเทคไทลล์ พบว่าอัตราส่วนของมุมเสียดทานที่ผิวสัมผัสในกรณีทรายกับวัสดุจีโอเทคไทลล์ และมุมเสียดทานที่ผิวสัมผัสของทราย ( $\delta/\phi$ )<sub>SAND</sub> มีค่ามากกว่าค่าอัตราส่วนของมุมเสียดทานที่ผิวสัมผัสในกรณีดินเหนียวกับวัสดุจีโอเทคไทลล์ และมุมเสียดทานของดินเหนียว ( $\delta/\phi$ )<sub>CLAY</sub> และ Tien, Ming-hua ยังพบว่าค่ามุมเสียดทานที่ผิวสัมผัส ( $\delta$ ) จะมีค่าลดลงเมื่อในการทดสอบทำการลดค่าหน่วยแรงตั้งฉาก ( $\sigma_n$ ) แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มผิวสัมผัสของวัสดุจีโอเทคไทลล์ให้มีความหยาบเพิ่มขึ้น

Soek et al. (1998) ได้ทำการทดสอบหาค่ากำลังเฉือนของวัสดุจีโอซินเทติกส์โดยทำการทดสอบผิวสัมผัสระหว่างวัสดุจีโอเมมเบรนกับวัสดุจีโอเทคไทลล์ และได้ทำการสรุปผลการทดสอบได้ว่า ความหยาบของผิวสัมผัสมีอิทธิพลเป็นอันดับแรกในการพิจารณาเรื่องกำลังเฉือนของวัสดุจีโอซินเทติกส์

Eric, J.T. and Patrick J.F. (2001) ได้ทำการศึกษากำลังเฉือนระหว่าง วัสดุจีโอเมมเบรนทั้งแบบที่มีผิวเรียบ และวัสดุจีโอเมมเบรนแบบที่มีผิวไม่เรียบ กับวัสดุจีโอซินเทติกส์เคลไลน์เนอร์ชนิด Needle-punched (GCLs) ทั้งแบบถักทอและแบบไม่ถักทอผลการทดสอบปรากฏว่าการเสียดทานจะเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุจีโอเมมเบรน และวัสดุจีโอซินเทติกส์เคลไลน์เนอร์ชนิด Needle-punched ในทุกๆตัวอย่าง และยังพบว่ากำลังรับแรงเฉือนของวัสดุจีโอเมมเบรนแบบผิวไม่เรียบกับวัสดุจีโอซินเทติกส์เคลไลน์เนอร์ชนิด Needle-punched แบบไม่ถักทอมีค่าสูงกว่าการ

ทดสอบของวัสดุโพลิเอไมด์แบบผิวไม่เรียบกับวัสดุโพลิเอไมด์เคลือบเส้นใยไนลอน Needle-punched แบบถักทอ ส่วนวัสดุโพลิเอไมด์แบบที่มีผิวเรียบกับวัสดุโพลิเอไมด์เคลือบเส้นใยไนลอน Needle-punched ทั้งแบบถักทอ และแบบไม่ถักทอไม่มีความแตกต่างกันมาก



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย