

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและการศึกษาในอดีต

#### 2.1 การศึกษาในอดีต

ในอดีตที่ผ่านมาได้มีผู้ทำการศึกษาค้นคว้าและทดลองใช้วัสดุสังเคราะห์ (Geosynthetic) เสริมความแข็งแรงให้กับดินถมที่ก่อสร้างบนชั้นดินอ่อน โดยได้ทำเป็น test section ในสถานที่จริงหรือทำเป็นแบบจำลอง (Model) ขึ้นมาให้เหมือนกับสภาพจริงมากที่สุดพร้อมติดตั้งเครื่องมือต่างๆเพื่อตรวจวัดพฤติกรรมและการเปลี่ยนแปลงของวัสดุสังเคราะห์และชั้นดินเหนียวอ่อน โดยนำผลที่ตรวจวัดได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งสามารถนำมาสรุปได้ว่าทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณออกแบบมีความถูกต้องสามารถใช้เป็นบรรทัดฐานในการออกแบบต่อไปได้ในอนาคต ผลงานที่เคยมีผู้ศึกษาและทดลองทำในอดีตมีจำนวนมากหลายโครงการ แต่ในที่นี้จะขอยกมากล่าวเพื่อเป็นตัวอย่างเพียง 2 โครงการ ดังนี้

##### 2.1.1 การศึกษาการใช้แผ่นใยสังเคราะห์เสริมความแข็งแรงให้กับเขื่อนดินที่ก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อน (Case Study of a Geotextile Reinforced Levee on a Soft Clay Foundation) (F.M. Duarte , G.S. Satterlee U.S. Army Corps of Engineers , U.S.A , 1989)

Duarte และ Satterlee (1989) ได้ทำการศึกษาทดลองใช้แผ่นใยสังเคราะห์เสริมความแข็งแรงให้กับเขื่อนสำหรับป้องกันคลื่นเนื่องจากพายุเฮอริเคนซึ่งมีความจำเป็นต้องเพิ่มความสูงมากขึ้นจากเดิมอีก 2.13 เมตร เพื่อให้เขื่อนสามารถป้องกันคลื่นที่เกิดขึ้นเนื่องจากพายุขนาดครั้งหนึ่งใน 100 ปี โดยได้ทำเป็น test section ยาวประมาณ 150 เมตร ก่อนหน้านั้นได้มีการศึกษาและพิจารณาวิธีที่จะใช้ในการก่อสร้างด้วยวิธีอื่นๆ เช่น ใช้วิธีก่อสร้างบนเสาเข็มหรือใช้วิธีขุดลอกหน้าดินอ่อนออกไปแล้วถมด้วยทรายซึ่งทั้ง 2 วิธีนี้จะมีค่าก่อสร้างที่สูงมากต้องใช้เครื่องมือและเครื่องจักรขนาดใหญ่และใช้ระยะเวลาก่อสร้างนานมากได้มีการประมาณค่าก่อสร้างที่ใช้วิธีขุดลอกหน้าดินอ่อนประมาณ 85 ล้านดอลลาร์ และต้องใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างนานถึง 13 ปี จึงสามารถสร้างได้ระยะทาง 21 กิโลเมตรดังนั้นวิธีการก่อสร้างโดยเสริมความแข็งแรงด้วยแผ่นใยสังเคราะห์จึงถูกเลือกใช้สำหรับโครงการนี้ โดยขั้นตอนแรกที่จะต้องทำคือ การหาว่าแผ่นใย

สังเคราะห์ที่ใช้เสริมความแข็งแรงมีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะรองรับเขื่อนดินที่มีความสูงเพิ่มขึ้นได้มากน้อยแค่ไหน นอกจากนี้แผ่นใยสังเคราะห์จะต้องสามารถรองรับค่า strain ที่จะเกิดขึ้นจากการถมดินที่เพิ่มขึ้นได้ด้วย เพื่อให้มีพฤติกรรมที่เป็นลักษณะของ composite structure ได้เป็นอย่างดี ดังนั้นจึงมีการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมทั้งของแผ่นใยสังเคราะห์และชั้นดินเหนียวอ่อน อุปกรณ์ที่ติดตั้งประกอบด้วย strain gauges , settlement plates , piezometers และ inclinometers โดยเฉพาะข้อมูลที่ได้จาก strain gauge และ inclinometer จะถูกนำมาพิจารณาเป็นพิเศษ

ข้อมูลที่ได้จาก strain gauges สามารถนำมาคำนวณหาค่าแรงดึงในแผ่นใยสังเคราะห์ที่เกิดขึ้นได้ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าแรงดึงที่คำนวณได้จากทฤษฎีจะทำให้ทราบว่ากรออกแบบแบบแผ่นใยสังเคราะห์เสริมความแข็งแรงมีความถูกต้องแม่นยำมากน้อยเพียงใด ส่วนข้อมูลที่ได้จาก inclinometers จะทำให้ทราบถึงระดับความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อนที่อาจเกิดการพิบัติ (Failure Plane) ว่าจะอยู่ที่ระดับความลึกใดซึ่งกำหนดโดยค่าการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นมากที่สุดและข้อมูลนี้ยังสามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าแรงที่ทำให้เกิดการพิบัติ(Driving Force) และแรงต้านทานการพิบัติ (Resistance Force) ได้ ซึ่งจำเป็นจะต้องทำการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดชัน (Slope Stability) เพื่อหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยในชั้นดินเหนียวอ่อน

จากการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดชันของเขื่อนก่อนการก่อสร้างได้ค่ามาตรฐานอัตราส่วนความปลอดภัยประมาณ 1.1 เมื่อเพิ่มความสูงของเขื่อนขึ้นอีกประมาณ 2 เมตรจากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อไม่มีการเสริมแผ่นใยเคราะห์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะลดลงเหลือประมาณ 0.80 และ 0.85 ของ slope แต่ละด้าน แต่เมื่อได้มีการออกแบบเสริมความแข็งแรงด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ชนิดทนแรงดึงสูง (High Strength Woven Geotextile) สามารถรับแรงดึงได้สูงสุด (Ultimate Tensile Strength) 665.4 kN/m และรับแรงดึงปลอดภัย (Allowable Tensile Strength) ได้ 297.7 kN/m ที่ค่า strain 5% ซึ่งถักทอด้วยเส้นใย Polyester โดยได้เสริมเพียงชั้นเดียว (Single Layer) ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะเพิ่มขึ้นเป็น 1.3

หลังจากการก่อสร้างได้มีการตรวจวัดค่า strain ที่เกิดขึ้นบนแผ่นใยสังเคราะห์ โดยค่า strain เกิดขึ้นมากที่สุดที่ปลายของ slope ประมาณ 3.5% แสดงว่าแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นบนแผ่นใยสังเคราะห์เกิดที่ปลายของ slope ซึ่งจากกราฟ stress-strain ที่ได้จากการนำแผ่นใยสังเคราะห์ไปทดสอบแรงดึงแบบ wide width tensile test จะได้ค่าแรงดึงที่ตรงกับค่า strain 3.5% ที่เกิดขึ้นในแผ่นใยสังเคราะห์เท่ากับ 57.6 kN/m นอกจากนี้ยังได้วัดการเคลื่อนตัวด้านข้างของชั้นดินอ่อน ซึ่งเกิดขึ้นมากที่สุดเท่ากับ 0.356 เมตร ที่ระดับความลึก -3.4 เมตร ดังนั้นแสดงว่าที่ระดับ -3.4 เมตร เป็นระดับความลึกที่วิกฤติที่สุดคือมี slip plane ผ่าน ถ้าการพิบัติเกิดขึ้นจากการถมดินสูงเพิ่มขึ้น 2.0 เมตร ค่าแรงดึงในแผ่นใยสังเคราะห์ที่คำนวณได้จากค่า strain เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎีโดยการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดชันด้วยวิธี Wedge Method และ Circular Arc Method โดยให้ slip plane ผ่านที่ระดับ -3.4 เมตร และให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.0 จะได้ค่าแรงดึงที่คำนวณจากทฤษฎีทั้ง 2 วิธีมีค่ามากกว่าค่าแรงดึงที่คำนวณได้จากค่า strain ที่วัดได้ในสนามอยู่ 2.03 และ 1.67 เท่าตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณออกแบบแผ่นใยสังเคราะห์ทั้ง 2 วิธีซึ่งได้แก่ Wedge Method และ Circular Arc Method เป็นวิธีที่ใช้ได้อย่างปลอดภัย (Conservative)

สรุปทางเลือกในการแก้ปัญหาการก่อสร้างเขื่อนป้องกันคลื่นบนชั้นดินอ่อนโดยใช้แผ่นใยสังเคราะห์เสริมความแข็งแรงสามารถลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างจาก 85 ล้านบาท เหลือเพียง 54.2 ล้านบาท ระยะเวลาในการก่อสร้างลดลงจาก 13 ปีเหลือ 6 ปีและสามารถลดพื้นที่ก่อสร้างลงได้จาก 4000 เอเคอร์ เหลือเพียง 100 เอเคอร์ เท่านั้น

2.1.2 การออกแบบและก่อสร้างโดยใช้ Synthetic – Grid Reinforcement ในคันดินที่ก่อสร้างบนกองขยะกากสารเคมี (Design and Construction of Synthetic – Grid Reinforced Embankment over Soft Waste) (M.F. Houlihan , W.K. Rodgers , G. Willibey , N.D. Williams , 1989)

โครงการนี้เป็นโครงการซ่อมแซมคันดินถมที่ก่อสร้างบนพื้นที่ที่เคยเป็นบ่อทิ้งกากสารเคมี (Soda Ash) ซึ่งเกิดการพังเนื่องจากหลายสาเหตุหลายประการ ดังนี้

- มีการบดอัดที่ไม่ดี
- มีการซึมของน้ำใต้ดินและน้ำบนผิวดิน
- ดินฐานรากเป็นดินอ่อน โดยมีค่า average shear strength ประมาณ 5 kPa

ลักษณะของพื้นที่ด้านหนึ่งเป็นไหล่เขาอีกด้านหนึ่งเป็นแม่น้ำ โดยมีบ่อทิ้งกากสารเคมีอยู่ระหว่างแม่น้ำและไหล่เขา วัตถุประสงค์ของการก่อสร้างคันดินนี้เพื่อทำหน้าที่รองรับรางระบายน้ำเพื่อเบี่ยงเบนทางไหลของน้ำที่ไหลมาจากไหล่เขาให้ไหลลงสู่แม่น้ำโดยไม่ต้องผ่านบ่อทิ้งกากสารเคมีเพื่อที่จะป้องกันไม่ให้อายุการใช้งานไหลลงสู่แม่น้ำตอนล่าง โดยได้มีการพิจารณาหาวิธีการก่อสร้างที่เหมาะสมหลายวิธี เช่น

1. ย้ายแนวก่อสร้างคันดินขึ้นไปทางไหล่เขามากขึ้น โดยก่อสร้างใกล้กับแนวถนนเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่ดินฐานรากเป็นดินอ่อน
2. ปรับปรุงพื้นผิวคันดินเดิมให้สามารถป้องกันการไหลซึมของน้ำบนผิวดินได้
3. รื้อคันดินเดิมแล้วก่อสร้างใหม่ในแนวเดิม

โดยหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาเลือกแนวทางในการก่อสร้างประกอบด้วย

1. จะต้องสามารถป้องกันการเกิดน้ำท่วมได้ 100 ปี
2. จะต้องสามารถป้องกันการไหลซึมของน้ำใต้ดินและน้ำบนผิวดินได้
3. ค่าการทรุดตัวและค่าการทรุดตัวที่ต่างกันจะต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้
4. วิธีการก่อสร้างจะต้องไม่ยุ่งยากและไม่มีผลกระทบจากกากสารเคมีต่อคนงานและเครื่องจักร
5. ค่า Factor of Safety ของ Slope Stability จะต้องไม่ต่ำกว่า 1.4
6. ราคาก่อสร้างไม่สูงมากนัก

ซึ่งจากการพิจารณาหลักเกณฑ์ดังกล่าวแล้ว 2 วิธีแรกไม่สามารถที่จะกระทำได้นี้เนื่องจากไม่สามารถแก้ปัญหาในเรื่องของเสถียรภาพของคันดินในระยะเวลานาน (Long Term) ได้และไม่สามารถป้องกันการไหลซึมของน้ำใต้ดินและน้ำบนผิวดินได้ ดังนั้นวิธีที่ 3 จึงถูกเลือกให้เป็นวิธีที่ใช้ในการก่อสร้าง โดยขั้นแรกได้ทำการวิเคราะห์และออกแบบคันดินถมซึ่งเป็นดินเหนียวสูง 3.7 เมตร ฐานกว้าง 9.0 เมตร ตั้งอยู่บนบริเวณที่เป็นบ่อขยะกากสารเคมีโดยได้ออกแบบให้มีวัสดุสังเคราะห์ชนิดแบบเป็นตาข่าย (Synthetic Grid) เสริมความแข็งแรงพร้อมกับมีแผ่นใยสังเคราะห์และแผ่นพลาสติกกันซึมเสริมช่วยป้องกันการไหลซึมของน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน ผลของการวิเคราะห์ bearing capacity , slope stability , block sliding , plastic failure และการทรุดตัวด้วยวิธีของ finite element ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

การเลือกชนิดของวัสดุที่จะนำมาเสริมความแข็งแรงให้กับคันดินจะพิจารณาจากคุณสมบัติของวัสดุเป็นสำคัญ เช่น stress-strain characteristics , creep characteristics และ chemical compatibility เป็นต้น ซึ่งจากการพิจารณาคุณสมบัติดังกล่าว การใช้วัสดุสังเคราะห์ที่ทำจากเส้นใย polyester ถูกพิจารณาว่าเหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีความสามารถรับแรงดึงได้สูงและมี elastic modulus สูงกว่าชนิดอื่นๆ นอกจากนี้ยังได้มีการติดตั้งเครื่องมือเพื่อคอยตรวจวัดพฤติกรรมของคันดิน โดยมีจุดประสงค์ของการติดตั้งเครื่องมือนี้เพื่อเป็นการตรวจสอบการออกแบบและป้องกันการเสียหายมากกว่าเพื่อการค้นคว้าและวิจัย โดยเครื่องมือที่ได้มีการติดตั้งคือ Inclinometer เพื่อวัดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของคันดินโดยสามารถนำผลที่ได้มาประเมินหาค่า stress-strain

ที่เกิดขึ้นในวัสดุสังเคราะห์ โดยใช้ผลการทดสอบ wide width tensile test ซึ่งเป็นการทดสอบหาค่าความสามารถรับแรงดึงของวัสดุสังเคราะห์ โดยค่าแรงดึงที่ประเมินได้จะเป็นค่าโดยประมาณเท่านั้น ในกรณีที่ต้องการค่าที่ถูกต้องมากกว่านี้ควรมีการติดตั้ง strain gauge , extensometer หรือเครื่องมือที่ใช้วัดค่า stress-strain ในวัสดุสังเคราะห์โดยตรง จากผลการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างด้วย Inclinator สามารถนำมาประมาณค่า max. strain ที่เกิดขึ้นในวัสดุสังเคราะห์ได้ประมาณ 2% ซึ่งตรงกับค่า stress ที่เกิดขึ้นจากผลการทดลอง wide width tensile test เท่ากับ 135 kN/m น้อยกว่าค่าที่ได้มีการออกแบบไว้ประมาณ 2.6 เท่า ซึ่งแสดงว่าการออกแบบวัสดุสังเคราะห์อยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย

## ตารางที่ 2.1 Summary of Embankment Analysis Results

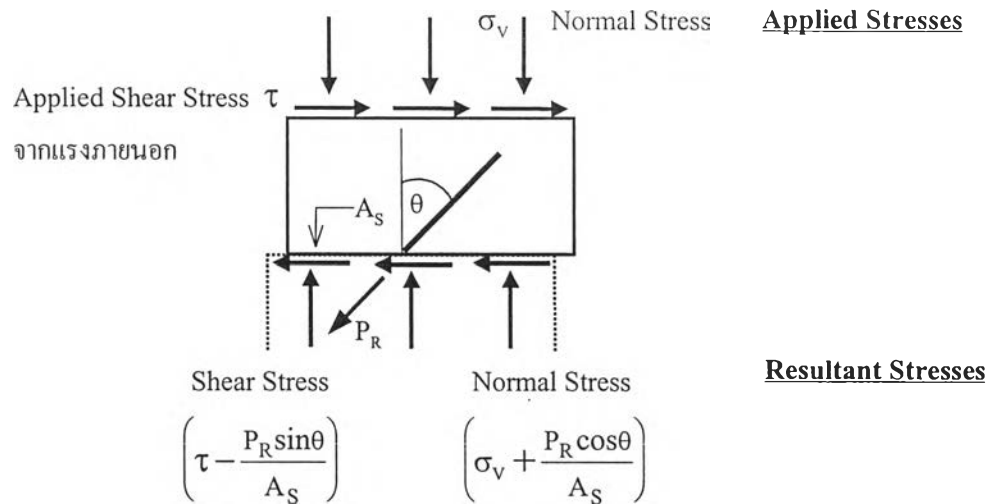
Analysis Method	Results	
	Unreinforced	Reinforced
Bearing Capacity	F.S. = 1.8	F.S. = 2.6
Circular Arc Slope Stability	F.S. = 1.0	F.S. = 1.4
Block Sliding Slope Stability	F.S. = 1.8	-
Finite Element	Settlement = 5.0 cm	Settlement = 2.0 cm
Plasticity – Lower bound	Emb. Height = 2.9 m	Emb. Height = 3.9 m
Plasticity – Upper bound	Emb. Height = 4.3 m	Emb. Height = 5.9 m

จากรายงานการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการนำวัสดุสังเคราะห์มาช่วยแก้ปัญหาทางวิศวกรรมก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งซึ่งถ้าได้รับการพิจารณาออกแบบให้เหมาะสมกับสถานการณ์และปัญหาที่เกิดขึ้นจะช่วยให้การก่อสร้างเป็นไปได้อย่างสะดวกรวดเร็วและประหยัดกว่าวิธีการก่อสร้างที่ใช้แก้ปัญหาทางวิศวกรรมแบบทั่วไป การใช้วัสดุสังเคราะห์ช่วยแก้ปัญหาในโครงการนี้สามารถลดระยะเวลาและค่าก่อสร้างให้กับเจ้าของงานได้เป็นจำนวนมาก

## 2.2 หลักการพื้นฐานของการวิเคราะห์และออกแบบมวลดินเสริมความแข็งแรง

การพิบัติของมวลดินจะเกิดขึ้นเนื่องจากหน่วยแรงเฉือน ดังนั้นเมื่อมวลดินถูกแรงภายนอกกระทำก่อนที่จะเกิดการพิบัติขึ้นจะเกิดหน่วยแรงต้านทานภายในมวลดินเนื่องจากมวลดินเกิดการเคลื่อนตัวตามแนวระนาบที่จะเกิดการพิบัติโดยจะช่วยต้านหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำภายนอก หน่วยแรงต้านทานที่เกิดขึ้นนี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคดิน (Particle Friction) , ลักษณะรูปร่างและการเรียงตัวของอนุภาคดิน (Particle Shapes and Packing) และหน่วยแรงอัดจากภายนอกที่เกิดจากน้ำหนักของดินที่ทับถมมาในอดีต (Compressive Stresses) ในกรณีที่แรงต้านทานมีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นก็จะเกิดการพิบัติของมวลดิน ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันการพิบัตินี้จึงได้มีการนำวัสดุมาเสริมเพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับมวลดิน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านการรับหน่วยแรงเฉือนของมวลดินให้มีความสามารถต้านทานหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำภายนอกที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดการพิบัติของมวลดินจนทำให้สิ่งก่อสร้างเกิดความเสียหายและไม่สามารถใช้งานได้ตามต้องการ

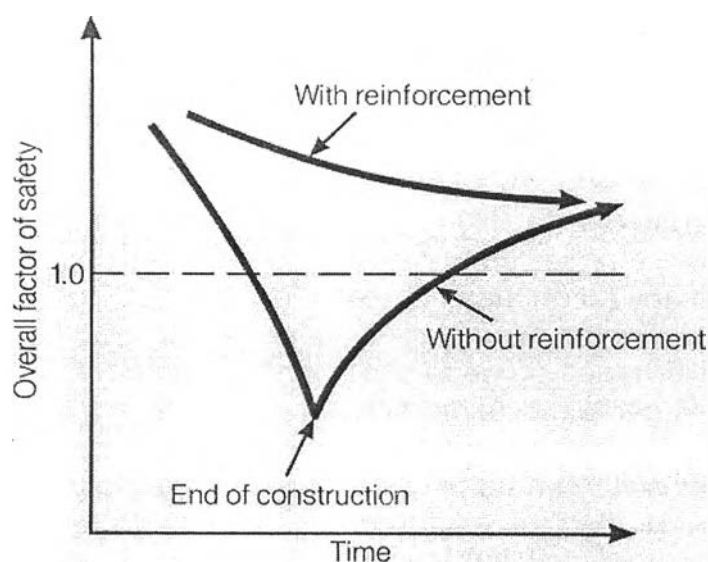
วัสดุเสริมความแข็งแรง (Reinforcement) จะเป็นตัวช่วยให้มวลดินมีเสถียรภาพเพิ่มมากขึ้น โดยการเพิ่มและลดหน่วยแรงที่มีผลต่อเสถียรภาพของมวลดินซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้จากการทดลอง direct shear test โดยการวางวัสดุเสริมเอียงทำมุม  $\theta$  กับแนวดิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 จะเห็นว่าแรงดึงที่เกิดขึ้นในวัสดุเสริม ( $P_R$ ) จะอยู่ในแนวเดียวกับวัสดุเสริมคือเอียงทำมุม  $\theta$  กับแนวดิ่ง เมื่อพิจารณาส่วนประกอบของแรงดึงในวัสดุเสริมตามทิศทางขนานและตั้งฉากกับระนาบรอยเลื่อนหรือระนาบของการพิบัติจะเห็นว่าส่วนประกอบของหน่วยแรงดึงในวัสดุเสริมในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบรอยเลื่อน ( $P_R \cos\theta$ ) จะช่วยเพิ่มค่าหน่วยแรงตั้งฉาก (Normal Stress) ของ Applied Stress ( $\sigma_v$ ) ซึ่งจะช่วยต้านทานการพิบัติที่เกิดขึ้นในมวลดิน ในขณะที่ส่วนประกอบของหน่วยแรงดึงในวัสดุเสริมในทิศทางที่ขนานกับระนาบรอยเลื่อน ( $P_R \sin\theta$ ) จะช่วยลดหน่วยแรงเฉือน (Shear Stress) ของหน่วยแรงเฉือนที่เข้ามากระทำ ( $\tau$ ) ที่จะทำให้เกิดการพิบัติในมวลดิน ดังนั้นการใช้วัสดุเสริมความแข็งแรงให้กับมวลดินจะช่วยทำให้มวลดินมีเสถียรภาพมากขึ้น โดยการเพิ่มหน่วยแรงตั้งฉากและลดหน่วยแรงเฉือน ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการเพิ่มขึ้นและลดลงของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในมวลดิน  
เมื่อมีการเสริมความแข็งแรงให้กับมวลดิน

เสถียรภาพของดินถมที่ก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อนส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับค่าความสามารถต้านทานแรงเฉือนของชั้นดินเหนียวอ่อน (Shearing Resistance) โดยเฉพาะการก่อสร้างดินถมบนชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีปัญหาเรื่องความสามารถในการรับน้ำหนัก (Bearing Capacity) และการพิบัติของ slope ที่เกิดขึ้นในชั้นดินเหนียวอ่อน การพิบัติของดินถมบนชั้นดินเหนียวอ่อนส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในช่วงระหว่างการก่อสร้างหรือหลังการก่อสร้างเสร็จใหม่ๆ ทั้งนี้เนื่องจากเป็นช่วงที่ชั้นดินเหนียวอ่อนจะต้องรับน้ำหนักสูงสุดและขบวนการยุบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) ในชั้นดินเหนียวอ่อนเพื่อช่วยเพิ่มค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่สามารถเกิดขึ้นได้ทันในช่วงระหว่างการก่อสร้างจึงทำให้ความสามารถในการรับหน่วยแรงเฉือนของชั้นดินเหนียวอ่อนมีค่าต่ำกว่าหน่วยแรงเฉือนที่เกิดจากน้ำหนักภายนอกที่ดินอ่อนจะต้องรับจึงเป็นสาเหตุของการพิบัติ ดังนั้นการเสริมความแข็งแรงด้วยวัสดุเสริมจะเป็นการเพิ่มเสถียรภาพของชั้นดินเหนียวอ่อน โดยช่วยป้องกันการพิบัติที่อาจจะเกิดขึ้นในช่วงระหว่างการก่อสร้างหรือหลังการก่อสร้างเสร็จใหม่ๆ (Short Term) ด้วยการลดค่าหน่วยแรงเฉือนของหน่วยแรงกระทำจากภายนอกที่มากระทำในมวลดินเหนียวอ่อน และด้วย stiffness ของวัสดุเสริมแรงยังช่วยลดค่าการทรุดตัวที่แตกต่าง (Differential Settlement)





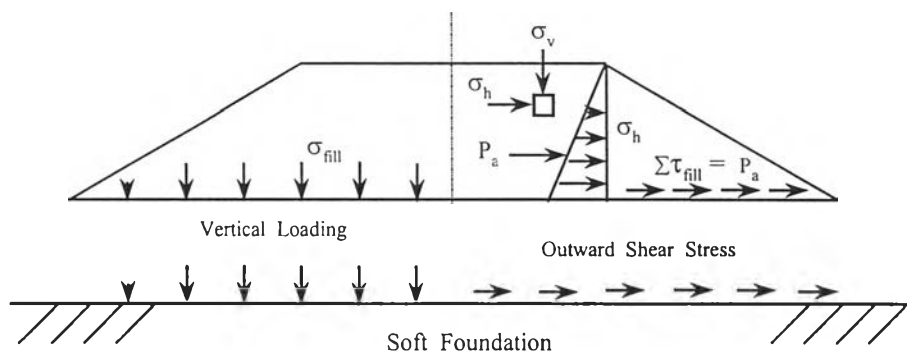
รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความปลอดภัยกับเวลาในช่วงระหว่างการก่อสร้าง

รูปที่ 2.2 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความปลอดภัยกับเวลาในช่วงระหว่างการก่อสร้างซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลของการเสริมความแข็งแรงให้กับดินถมที่ก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อน โดยจะช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้กับดินถมในช่วงระหว่างการก่อสร้างและหลังการก่อสร้าง เนื่องจากเมื่อวัสดุเสริมมีแรงดึงเกิดขึ้นจากการถ่ายแรงของมวลดินเมื่อระยะเวลาผ่านไปนานๆ จะทำให้เกิดความล้า (Creep) ในวัสดุเสริมซึ่งจะทำให้ความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุเสริมลดลง นอกจากนี้วัสดุเสริมความแข็งแรงจะมีการเสื่อมสภาพตามระยะเวลาเนื่องจากสภาวะแวดล้อมภายในมวลดินจะมีความเป็นกรด ด่าง และมีพวกเชื้อราและแบคทีเรียต่างๆ ที่จะทำให้วัสดุเสริมความแข็งแรงมีการเสื่อมสภาพ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยที่ใช้ในการผลิต

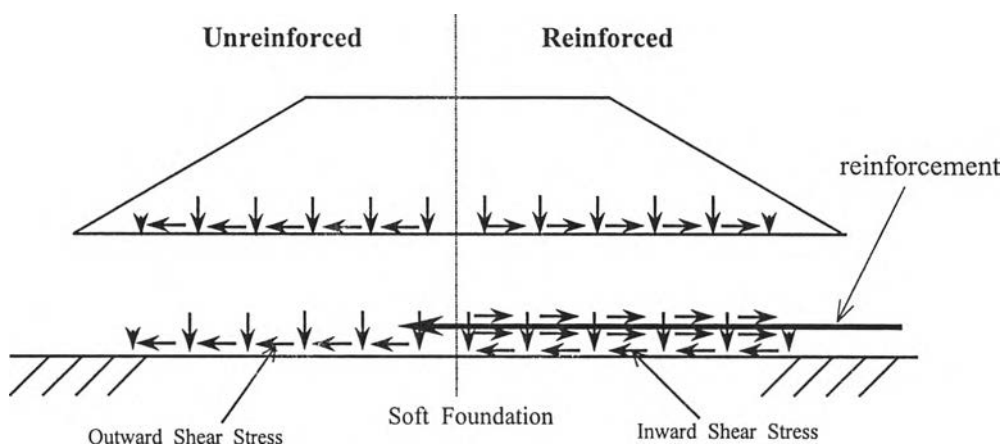
ในการออกแบบมวลดินเสริมความแข็งแรงโดยทั่วไปจะใช้ทฤษฎีแรงดันดิน (Earth Pressure) และเสถียรภาพของความลาดชัน (Slope Stability) โดยจะยึดหลักการพื้นฐานของความสมดุล (Limit Equilibrium) ของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายในมวลดิน รูปที่ 2.3 จะแสดงการกระจายของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนชั้นดินเหนียวอ่อนเนื่องจากน้ำหนักของดินถมเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่มีการใช้วัสดุเสริมความแข็งแรงกับกรณีที่มีการใช้วัสดุเสริมความแข็งแรง ในกรณีที่ไม่มีการใช้วัสดุเสริมความแข็งแรง (รูปที่ 2.3a) หน่วยแรงที่จะทำให้เกิดการพิบัติคือ Vertical Loading และ Outward Shear Stress จะถูกต้านด้วยหน่วยแรงยึดเหนี่ยวภายในชั้นดินเหนียวอ่อนเองถ้าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวภายในของชั้นดินเหนียวอ่อนมีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงที่จะทำให้เกิดการพิบัติก็จะเกิดความไม่สมดุลของหน่วยแรงขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุของการพิบัติ ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้เกิดความสมดุลของหน่วยแรงขึ้นจะต้องมีการเพิ่มค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวภายในของชั้นดินเหนียวอ่อนโดยการเสริมความแข็งแรงด้วยวัสดุเสริม (Reinforcement) (รูปที่ 2.3b) ซึ่งวัสดุที่ใช้เสริมความแข็งแรงจะทำหน้าที่ช่วยลดหน่วยแรงที่จะทำให้เกิดการพิบัติ (Outward Shear Stress) และเพิ่มหน่วยแรงที่จะช่วยต้านการพิบัติ (Inward Shear Stress)

การวิเคราะห์และออกแบบดินถมบนชั้นดินเหนียวอ่อนโดยมีวัสดุเสริมความแข็งแรง (Reinforced Embankment) จะมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น Finite Element , Finite Difference , Plasticity Analysis หรือการใช้ Design Charts ที่ได้จากการวิเคราะห์รูปแบบของดินถมหลายๆ รูปแบบ เป็นต้น แต่ในทางปฏิบัติการวิเคราะห์โดยใช้หลักการของความสมดุลจะเป็นที่นิยมและได้รับการยอมรับจากผู้เชี่ยวชาญหลายท่าน เช่น Wager (1968) , Maagdenberg (1977) , Broms (1977) , Hoedt (1978) , Fowler (1979) , Bell (1980) เป็นต้น

การวิเคราะห์ด้วยวิธีความสมดุลของหน่วยแรงนี้วัสดุเสริมจะถูกสมมติให้เป็นชั้นดินบาง ๆ ที่มีค่าแรงยึดเหนี่ยวสูง (Highly Cohesive Layer) รูปแบบของการพิบัติ (The Failure Mechanism) แต่ละชนิดจะถูกวิเคราะห์เพื่อหาค่าแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นในวัสดุเสริมแรงดึงนี้จะนำมาเปรียบเทียบกับความสามารถในการรับแรงดึงสูงสุดของวัสดุเสริม (The Reinforcement Tensile Strength) ซึ่งแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับวัสดุเสริมจะต้องมีค่าน้อยกว่าความสามารถของวัสดุเสริมที่รับแรงดึงได้จึงจะทำให้มวลดินอยู่ในสภาพสมดุลและมีเสถียรภาพ



(a)



(b)

รูปที่ 2.3 (a) แสดงการกระจายของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนชั้นดินเหนียวอ่อนกรณีที่ดินถมไม่มีการเสริมความแข็งแรง, (b) แสดงการกระจายของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนชั้นดินเหนียวอ่อน เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่มีการเสริมความแข็งแรงกับกรณีที่ไม่มีการเสริมความแข็งแรง

ดังนั้นหลักการที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์และออกแบบดินถมเสริมความแข็งแรงบนชั้นดินเหนียวอ่อน จะใช้การเปรียบเทียบแรงดึง 2 ชนิด คือ

- **The Required Reinforcement Forces** เป็นแรงดึงที่เกิดขึ้นในวัสดุเสริมที่ต้องการเพื่อช่วยต้านการพิบัติของมวลดิน ช่วยให้มวลดินอยู่ในสภาวะสมดุลด้วยอัตราส่วนปลอดภัยที่กำหนด แรงดึงนี้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติด้านความแข็งแรงของดินถมและดินเหนียวอ่อน (Soil Strength Properties)

- **The Available Reinforcement Forces** เป็นแรงดึงสูงสุดที่วัสดุเสริมสามารถที่จะรับได้โดยไม่ทำให้เกิดการฉีกขาดหรือมีระยะการยืดตัว (Elongation) มากเกินค่าที่กำหนดไว้ ซึ่งแรงนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดและคุณสมบัติด้านความแข็งแรงของวัสดุเสริม (Material Stiffness and Strength Properties) และนอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาระหว่างมวลดินและวัสดุเสริมอีกด้วย

ในการเปรียบเทียบที่ทุกๆ จุดบนวัสดุเสริมค่าของ the required reinforcement forces จะต้องไม่มากกว่าค่าของ the available reinforcement forces จึงจะช่วยให้ดินถมอยู่ในสภาพสมดุลได้โดยไม่เกิดการพิบัติ การออกแบบโดยทั่วไปจะมี 2 วิธี คือ Working Limit State และ Ultimate Limit State โดยวิธีของ Ultimate Limit State จะเป็นวิธีที่ดีกว่าและประหยัดกว่า เนื่องจากได้ใช้ความสามารถด้านความแข็งแรงของดินอย่างเต็มที่ (The Full Soil Shear Strength) ส่วนวิธีของ Working Limit State จะใช้ shear strength ของดินเพียงบางส่วนเท่านั้น

### 2.3 ลักษณะของการพิบัติ

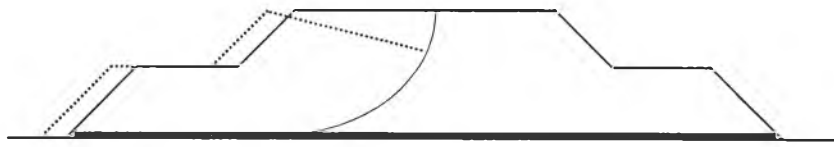
การออกแบบดินถมเสริมความแข็งแรงจะต้องทำการวิเคราะห์รูปแบบของการเกิดพิบัติหลาย ๆ รูปแบบด้วยกัน โดยจะเลือกรูปแบบของการพิบัติที่ให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยน้อยที่สุด (The Minimum Factor of Safety) หรือให้ค่าแรงดึงที่เกิดขึ้นในวัสดุเสริมมากที่สุด (The Maximum Required Reinforcement Force) มาทำการออกแบบ ซึ่งลักษณะของการพิบัติของดินถมที่สำคัญพอจะแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะ ดังนี้

1. **Horizontal Slope/Lateral Spreading Failure** เป็นการพิบัติเนื่องจากเกิดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินถม
2. **Rotational Slope/Foundation Bearing Failure** เป็นการพิบัติเนื่องจากดินเหนียวอ่อนไม่สามารถรับน้ำหนักของดินถมได้ จะทำให้เกิดการเลื่อนไถลทั้งของดินถมและดินเหนียวอ่อน ตามแนวระนาบของการพิบัติ ซึ่งจะถูกสมมติให้เป็นระนาบวงกลม (Slip Circle)
3. **Excessive Foundation Displacement Failure** เป็นการพิบัติเนื่องจากเกิดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินเหนียวอ่อนเพียงอย่างเดียว ทำให้ดินถมเกิดการทรุดตัวจมลง

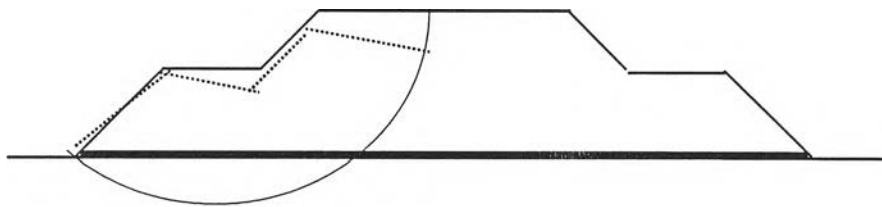
ลักษณะของการพิบัติแต่ละชนิด ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.4

### 2.3.1 Horizontal Sliding/Lateral Spreading of Embankment

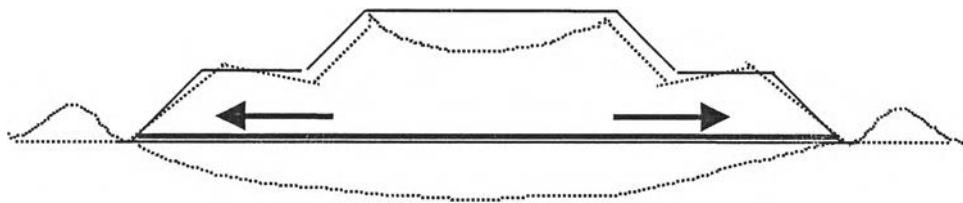
ลักษณะของการพิบัติแบบนี้จะเป็นลักษณะที่ดินถมเกิดการเคลื่อนตัวไปทางด้านข้าง (Lateral Spreading) โดยแรงที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวจะเป็นแรงดันดินของดินถม (Active Earth Pressure) และแรงดันน้ำ (Hydrostatic Pressure) ในกรณีที่มีรอยแตกที่ผิวของดินถมซึ่งเป็นลักษณะของ tension crack แรงเหล่านี้จะถูกต้านด้วยแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างดินถมและแผ่นใยสังเคราะห์ซึ่งจะมีลักษณะคงที่ตลอด แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดแรงดึงในแผ่นใยสังเคราะห์ ขนาดของแรงดึงจะมีขนาดลดลงตั้งแต่กึ่งกลางหน้าตัดของดินถมจนถึงปลายแนวลาดเอียง (Slope) ของดินถม โดยแผ่นใยสังเคราะห์จะต้องมีความสามารถในการรับแรงดึงที่เกิดจากแรงเสียดทานนี้ได้ เพราะมิฉะนั้นอาจจะทำให้แผ่นใยสังเคราะห์เกิดการฉีกขาดหรือมีการยืดตัวมากเกินไปจนทำให้เกิดการเคลื่อนตัว (Sliding) ระหว่างแผ่นใยสังเคราะห์และชั้นดินเหนียวอ่อน



(a) Horizontal Slope/Lateral Spreading Failure

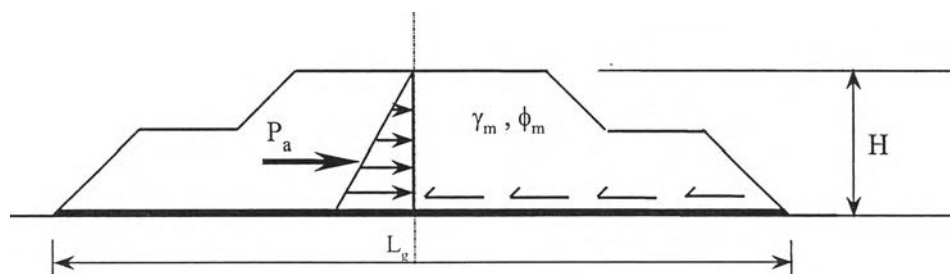


(b) Rotational Slope/Foundation Bearing Failure



(c) Excessive Foundation Displacement Failure

รูปที่ 2.4 รูปแบบของการพิบัติลักษณะต่าง ๆ



รูปที่ 2.5 การวิเคราะห์หาแรงดันดินเนื่องจากการพิบัติแบบ Horizontal Sliding

แรงดันดินที่เกิดขึ้นสามารถหาได้โดยใช้ทฤษฎีแรงดันดินของ Mohr-Coulomb โดยจะคิดที่กึ่งกลางของดินถม ดังแสดงในรูปที่ 2.5

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma_m H^2 K_a \quad (2.1)$$

โดยที่  $P_a$  = แรงดันดินเนื่องจากดินถม

$\gamma_m$  = หน่วยน้ำหนักของดินถม

$H$  = ความสูงของดินถม

$K_a$  = Active Earth Pressure Coefficients =  $\tan^2(45 - \frac{\phi_m}{2})$

$\phi_m$  = ค่ามุมเสียดทานภายในของดินถม

ส่วนแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างดินถมและแผ่นใยสังเคราะห์ ซึ่งจะต่อต้านแรงดันดินเนื่องจากดินถม ( $P_a$ ) ช่วยให้ดินถมไม่เกิดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสามารถหาได้ ดังนี้

$$P_r = \frac{1}{2} L_g \gamma_m H \tan \phi_{sg} \quad (2.2)$$

โดยที่  $P_r$  = แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างดินถมและแผ่นใยสังเคราะห์

$L_g$  = ความยาวของแผ่นใยสังเคราะห์ตามหน้าตัดของดินถม

$\phi_{sg}$  = ค่ามุมเสียดทานภายในระหว่างดินถมและแผ่นใยสังเคราะห์

ค่ามุมเสียดทานภายในระหว่างดินถมและแผ่นใยสังเคราะห์สามารถหาได้จากค่ามุมเสียดทานภายในของดินถมโดยใช้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\tan \phi_{sg} = f_b \tan \phi_m \quad (2.3)$$

โดยที่  $f_b$  = Coefficient of Interaction = 0.5 – 0.9

$\phi_m$  = ค่ามุมเสียดทานภายในของดินถม

ดังนั้น ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Factor of Safety Against Sliding ,  $F.S._{sliding}$ ) คือ

$$F.S._{sliding} = \frac{P_r}{P_a} \quad (2.4)$$

ถึงแม้ว่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างดินถมและแผ่นใยสังเคราะห์( $P_r$ ) จะมีค่ามากกว่าแรงดันดิน( $P_a$ ) ก็ตามดินถมอาจจะเกิดการเคลื่อนตัวได้เช่นกันเนื่องจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดแรงดึงในแผ่นใยสังเคราะห์ซึ่งแรงดึงนี้จะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อแผ่นใยสังเคราะห์เริ่มมีการยืดตัว ถ้าความสามารถในการรับแรงดึงสูงสุดของแผ่นใยสังเคราะห์ (Ultimate Tensile Strength ,  $T_{ult}$ ) มีค่าน้อยกว่าแรงดันดิน ( $P_a$ ) แผ่นใยสังเคราะห์จะเกิดการยืดตัวมากเกินไปกำหนดหรืออาจจะเกิดการฉีกขาดทำให้ดินถมเกิดการเคลื่อนตัวตามแนวระนาบระหว่างแผ่นใยสังเคราะห์และชั้นดินเหนียวอ่อน ดังนั้นตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมเพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวของดินถมตามแนวระนาบของแผ่นใยสังเคราะห์กับชั้นดินเหนียวอ่อนคือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Tensile Modulus) ของแผ่นใยสังเคราะห์และอัตราส่วนความปลอดภัยที่ใช้ในการหาค่าโมดูลัสต่ำสุดที่ต้องการซึ่งโดยปกติจะใช้เท่ากับ 2 ดังนั้นการออกแบบเพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวดังกล่าวจะต้องคำนวณหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นต่ำสุด(Minimum Tensile Modulus) ของแผ่นใยสังเคราะห์ที่ต้องการซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$E_f = \frac{T_{ult}}{\epsilon_{max}} \quad (2.5)$$

- โดยที่  $E_f$  = Tensile Modulus ของแผ่นใยสังเคราะห์  
 $T_{ult}$  = แรงดึงสูงสุดของแผ่นใยสังเคราะห์ที่ต้องการ  
 = แรงดันดินที่เกิดขึ้นคูณด้วยอัตราส่วนปลอดภัย ซึ่งโดยปกติไม่ควรใช้ต่ำกว่า 2.0 ( $P_a \times F.S.$ )  
 $\epsilon_{max}$  = ค่าการยืดตัวมากที่สุดที่ยอมให้ได้ของแผ่นใยสังเคราะห์ ซึ่งตามมาตรฐานของ American (The Corps of Engineers) ยอมให้มีการยืดตัวได้ 10%

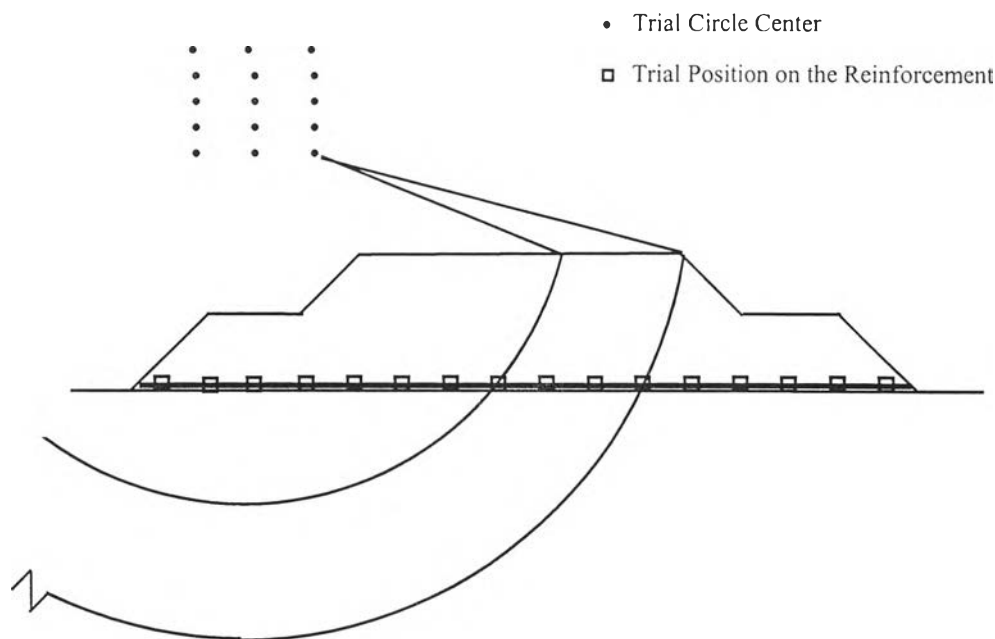


ค่า Tensile Modulus ( $E_p$ ) ที่หามาได้เป็นค่าต่ำสุดที่จะป้องกันไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างตามแนวระนาบระหว่างแผ่นใยสังเคราะห์และดินเหนียวอ่อน ซึ่งในการเลือกแผ่นใยสังเคราะห์จะต้องเลือกแผ่นใยสังเคราะห์ที่มีค่า Tensile Modulus ไม่ต่ำกว่าค่าที่ได้มาจากการคำนวณ

### 2.3.2 Rotational Slope/Foundation Bearing Failure

เป็นการพิบัติของชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Foundation Soil) ซึ่งรูปแบบของการพิบัติจะเป็นลักษณะ slope failure โดยที่ระนาบของการพิบัติจะถูกสมมติให้เป็นระนาบวงกลม (Slip Circle) การวิเคราะห์หาค่าแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นในแผ่นใยสังเคราะห์ที่จะช่วยต้านไม่ให้เกิดการพิบัติแบบ Rotational Slope Failure มีหลายวิธีด้วยกันซึ่งแต่ละวิธีจะมีสมมติฐานที่แตกต่างกันแต่จะยึดหลักการพื้นฐานของความสมดุลของหน่วยแรงเหมือนกันในที่นี้จะขอกกล่าวเฉพาะวิธีที่ใช้กันทั่วไป ดังนี้

JEWELL , R.A. (1982) ได้ใช้วิธี Slip Circle Analysis ในการวิเคราะห์ดินถมที่มีการเสริมความแข็งแรงด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและใช้กันทั่วไปโดยจะวิเคราะห์ระนาบของการพิบัติที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 แต่ละตำแหน่งของจุดศูนย์กลางจะวิเคราะห์ระนาบพิบัติตามแนวของแผ่นใยสังเคราะห์โดยจะแบ่งเป็นช่วงๆตามความเหมาะสมและความละเอียดที่ต้องการ แต่ละจุดบนแผ่นใยสังเคราะห์จะให้ค่าแรงดึงที่เกิดขึ้นในแผ่นใยสังเคราะห์ที่ต้องการ (The Required Reinforcement Forces) เพื่อให้มวลดินอยู่ในสภาวะสมดุลและเมื่อเปรียบเทียบในแต่ละจุดศูนย์กลางแล้วค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่ต่ำที่สุดและค่าแรงดึงที่เกิดขึ้นในแผ่นใยสังเคราะห์ที่มากที่สุดจะเป็นค่าที่นำมาใช้ในการออกแบบ

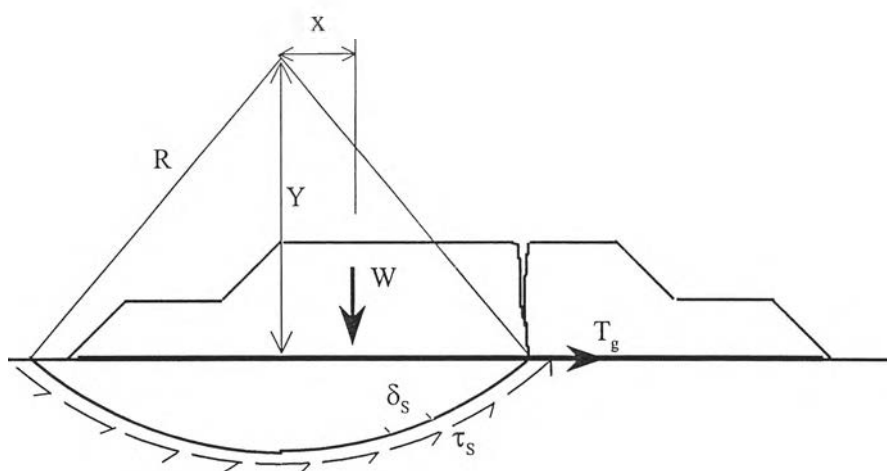


รูปที่ 2.6 การวิเคราะห์ห้ระนาบของการพิบัติที่ตำแหน่งต่าง ๆ

สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าแรงดึงสูงสุดในแผ่นใยสังเคราะห์มีดังนี้

1. แรงที่เกิดขึ้นในแผ่นใยสังเคราะห์จะมีทิศทางเดียวกับแนวการวางของแผ่นใยสังเคราะห์
2. แรงที่เกิดขึ้นในแผ่นใยสังเคราะห์จะช่วยลดค่าหน่วยแรงเฉือนที่จะทำให้เกิดการพิบัติในมวลดินเท่านั้น โดยจะไม่คิดการเพิ่มความต้านทานของหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มของหน่วยแรงตั้งฉาก (Normal Stress)
3. ในการออกแบบจะกำหนดค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเพื่อหาค่าแรงดึงในแผ่นใยสังเคราะห์ ซึ่งอาจจะไม่ตรงกับค่าที่เกิดขึ้นจริง

จากรูปที่ 2.7 ในกรณีที่ดินถมไม่มีการเสริมความแข็งแรง (Unreinforced Embankment) การหาค่าอัตราส่วนปลอดภัยสำหรับการพิบัติแบบ slope failure (Factor of safety against slope failure) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของ Restoring Moments ( $M_R$ ) กับ Disturbing Moments ( $M_D$ ) ดังสมการที่ (2.6)



รูปที่ 2.7 Definitions and Forces for a Slip Circle Analysis

$$F.S._{\text{unreinforced}} = \frac{M_R}{M_D} \quad (2.6)$$

โดยที่  $M_R$  = ผลรวมของ the restoring moments ซึ่ง ได้มาจากความต้านทานแรง  
เฉือนของดิน =  $(\sum \tau_s \delta_s)R$

$M_D$  = ผลรวมของ the disturbing moments =  $Wx$

ในกรณีที่ดินถมมีการเสริมความแข็งแรง (Reinforced Embankment) ที่ฐานของดินถม  
เพียงชั้นเดียวด้วยแผ่นใยสังเคราะห์แรงดึงที่เกิดขึ้นในแผ่นใยสังเคราะห์จะช่วยเพิ่มค่า Restoring  
Moment ( $\Delta M_R$ ) ดังแสดงในสมการที่ (2.7)

$$\Delta M_R = T_g Y \quad (2.7)$$

โดยที่  $T_g$  = แรงดึงที่เกิดขึ้นในแผ่นใยสังเคราะห์ที่จุดตัดระหว่างระนาบพิบัติกับ  
แนวของแผ่นใยสังเคราะห์

$Y$  = ระยะในแนวตั้งระหว่างจุดศูนย์กลางของระนาบพิบัติกับแผ่นใย  
สังเคราะห์

ดังนั้นค่าอัตราส่วนปลอดภัยสำหรับการพิบัติแบบ slope failure ของดินถมที่มีการเสริมความแข็งแรงสามารถหาได้ ดังนี้

$$F.S._{reinforced} = \frac{M_R + \Delta M_R}{M_D} \quad (2.8)$$

ในกรณีที่กำหนดค่าอัตราส่วนปลอดภัยตามที่ต้องการ ค่าแรงดึงในแผ่นใยสังเคราะห์ที่ต้องการเพื่อให้มวลดินอยู่ในสภาวะสมดุลย์สามารถหาได้จากสมการ (2.8) ซึ่งมี 2 วิธี ดังนี้

1. วิธี Working Limit State ค่าแรงดึงในแผ่นใยสังเคราะห์ที่ต้องการ ( $T_{wg}$ ) สามารถหาได้ ดังนี้

$$T_{wg} = \frac{M_D - \frac{M_R}{F.S.}}{Y_R} \quad (2.9)$$

2. วิธี Ultimate Limit State ค่าแรงดึงในแผ่นใยสังเคราะห์ที่ต้องการ ( $T_{ug}$ ) หาได้ ดังนี้

$$T_{ug} = \frac{M_D \times F.S. - M_R}{Y_R} \quad (2.10)$$

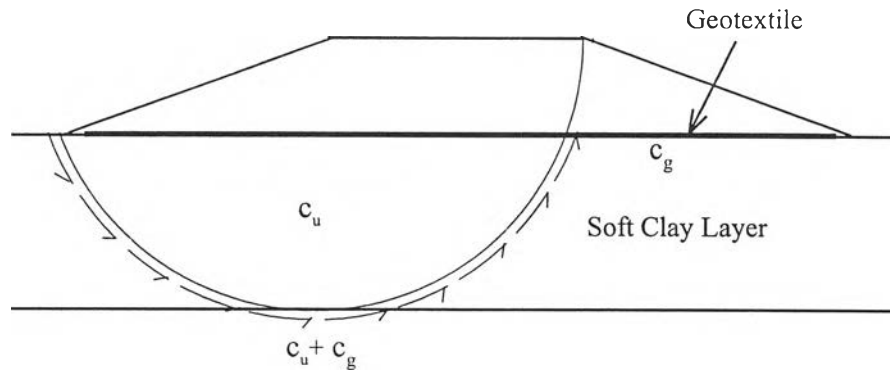
FOWLER , J. (1979) ได้ใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดชันของ BISHOP (The Simplified Bishop Slope Stability) เพื่อหาค่าแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นในแผ่นใยสังเคราะห์ โดยมีสมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ ดังนี้

1. แรงดึงในแผ่นใยสังเคราะห์จะเกิดขึ้นสูงสุดก่อนที่จะเกิดการพิบัติแบบ Slope Failure
2. เมื่อดินถมมี tension cracks เกิดขึ้นจะไม่เกิดความต้านทานเนื่องจากแรงเฉือนในดินถม
3. ระนาบของพิบัติจะเป็นลักษณะวงกลม (Critical Slip Circle) โดยจะเริ่มตั้งแต่ชั้นดินถมลงไปจนถึงชั้นดินเหนียวอ่อนที่ระดับความลึกที่มีค่าแรงยึดเหนี่ยวต่ำสุด
4. แรงดึงสูงสุดในแผ่นใยสังเคราะห์จะเกิดขึ้นพร้อมกับค่าแรงยึดเหนี่ยวในดินเหนียวอ่อน
5. แรงดึงในแผ่นใยสังเคราะห์เทียบเท่ากับแรงยึดเหนี่ยวในชั้นดินเหนียวอ่อน โดยกระจายสม่ำเสมอบนระนาบพิบัติและมีมุมเสียดทานภายใน ( $\phi$ ) เท่ากับศูนย์
6. ระดับน้ำใต้ดินจะถูกสมมติให้อยู่ที่ระดับเดียวกับแผ่นใยสังเคราะห์

ในการวิเคราะห์จะสมมติให้แผ่นใยสังเคราะห์วางอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อนซึ่งเป็นฐานรองรับดินถม เมื่อเกิดการพิบัติระนาบพิบัติจะเป็นลักษณะส่วนโค้งของวงกลม โดยจะแผ่ขยายไปจนถึงปลายแนวลาดเอียงของดินถม ดังแสดงในรูปที่ 2.8 หน่วยแรงที่จะคอยต้านไม่ให้เกิดการพิบัติประกอบด้วยหน่วยแรงดึงในแผ่นใยสังเคราะห์และหน่วยแรงยึดเหนี่ยวในชั้นดินเหนียวอ่อนซึ่งกระจายสม่ำเสมอตามความยาวส่วนโค้งของระนาบพิบัติ

จากสมมติฐานที่พิจารณาให้หน่วยแรงดึงในแผ่นใยสังเคราะห์เทียบเท่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวในชั้นดินเหนียวอ่อน ดังนั้นผลรวมของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่จะช่วยต้านไม่ให้เกิดการพิบัติ คือ

$$c = c_g + c_u \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.8 การวิเคราะห์ดินถมเสริมความแข็งแรงโดยใช้ทฤษฎีของ FOWLER

โดยที่  $c$  = หน่วยแรงยึดเหนี่ยวรวม

$c_g$  = หน่วยแรงยึดเหนี่ยวในแผ่นใยสังเคราะห์

$c_u$  = หน่วยแรงยึดเหนี่ยวในชั้นดินเหนียวอ่อน

ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและหน่วยแรงยึดเหนี่ยวในแผ่นใยสังเคราะห์สามารถได้ดังสมการที่ (2.12)

$$T_g = c_g L \quad (2.12)$$

โดยที่  $T_g$  = แรงดึงในแผ่นใยสังเคราะห์

$L$  = ความยาวของส่วนโค้งของระนาบพิบัติส่วนที่อยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนหรือได้แผ่นใยสังเคราะห์

จากหลักการพื้นฐานของความสมดุลของหน่วยแรงจะได้ว่า แรงที่ทำให้เกิดการพิบัติ (Driving Force ,  $F_D$ ) จะเท่ากับแรงที่ช่วยต้านไม่ให้เกิดการพิบัติ (Resisting Force ,  $F_R$ ) ซึ่งสามารถหาได้ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 F_R &= cL \\
 &= (c_u + c_u)L \\
 &= T_u + c_uL
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

แรงที่ทำให้เกิดการพิบัติจะเกิดจากน้ำหนักของดินถม (W) โดยการพิจารณาส่วนโค้งย่อย (Slices) ของระนาบพิบัติจะได้ว่า

$$F_D = \sum W_i \sin \theta_i \tag{2.14}$$

ดังนั้นจากหลักการสมดุลของหน่วยแรงสามารถหาค่าแรงดึงในแผ่นใยสังเคราะห์ที่จะช่วยต้านไม่ให้เกิดการพิบัติในดินเหนียวอ่อนได้ ดังนี้

$$T_u = F.S. \times \sum W_i \sin \theta_i - c_u L \tag{2.15}$$

การหาค่าแรงดึงในแผ่นใยสังเคราะห์ทั้ง 2 วิธีตามที่ได้กล่าวมาแล้วนี้จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์รูปแบบของการพิบัติหลายๆ ครั้งเพื่อหาค่าแรงดึงในแผ่นใยสังเคราะห์ที่มากที่สุด ซึ่งเป็นงานที่ต้องทำซ้ำๆ กันจึงจำเป็นต้องมีคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ ดังนั้นจึงได้มีการจัดทำเป็น charts สำหรับใช้ในการออกแบบหาค่าแรงดึงที่เกิดขึ้นในแผ่นใยสังเคราะห์ซึ่งได้มีผู้จัดทำไว้มากมายหลายท่าน แต่ในที่นี้จะขอเสนอตัวอย่าง charts ที่ใช้สำหรับโครงการ Pinto Pass Embankment ซึ่งจัดทำขึ้นโดย The U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station มีด้วยกัน 2 charts ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และ 2.10 โดยปกติการใช้ charts ออกแบบหาค่าแรงดึงในแผ่นใยสังเคราะห์นี้จะใช้สำหรับการออกแบบในขั้นต้น (Preliminary Design) เท่านั้นเพื่อประเมินราคาค่าก่อสร้างเปรียบเทียบกับวิธีการก่อสร้างแบบอื่น

ในการสร้าง design curves จะต้องทำการวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนปลอดภัยและหน่วยแรงยึดเหนี่ยวรวม(c) ของระนาบวิกฤติโดยการกำหนดส่วนโค้งของระนาบวิกฤติตามตำแหน่งต่างๆ แล้วนำมาเขียนเป็น curves แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ไม่มีหน่วย 2 ตัวแปร คือ Depth Ratio (D) และ Stability Number (N) ซึ่งได้มาจากการรวบรวมตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

กับการออกแบบ เช่น ความสูงของดินถม (H) , ความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน (h) และค่าแรงยึดเหนี่ยวของชั้นดินเหนียวอ่อน ( $c_u$ ) และแผ่นใยสังเคราะห์ ( $c_g$ ) แล้วสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านี้ให้เป็นตัวแปรใหม่ที่ไม่มีหน่วย ดังนี้

1. **The Depth Ratio (D)** เป็นอัตราส่วนระหว่างผลรวมของความสูงของชั้นดินถม (H) และความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน (h) กับความสูงของชั้นดินถม (H)

$$D = \frac{H + h}{H} \quad (2.16)$$

2. **The Stability Number (N)** เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าแรงยึดเหนี่ยว (c) กับหน่วยน้ำหนักของดินเหนียวอ่อน ( $\gamma_m$ ) และความสูงของดินถม (H)

$$N = \frac{c}{\gamma_m H} \quad (2.17)$$

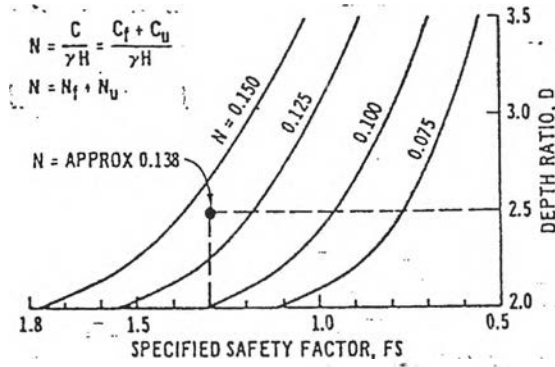
ขั้นตอนการออกแบบหาค่าแรงดึงในแผ่นใยสังเคราะห์โดยการใช้ design charts มีดังนี้

1. หาค่า Depth Ratio , D
2. กำหนดค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่ต้องการ ซึ่งโดยปกติจะใช้ F.S. = 1.30
3. ใช้ chart รูปที่ 2.9 หาค่า Stability Number , N
4. คำนวณหา Stability Number ของดินเหนียวอ่อน ,  $N_u = \frac{c_u}{\gamma_m H}$
5. คำนวณหา Stability Number ของแผ่นใยสังเคราะห์ ,  $N_g = N - N_u$
6. คำนวณหาแรงยึดเหนี่ยวของแผ่นใยสังเคราะห์ ,  $c_g = N_g \gamma_m H$
7. ใช้ chart รูปที่ 2.10 หาค่าแรงดึงในแผ่นใยสังเคราะห์ที่ต้องการ ,  $T_g$

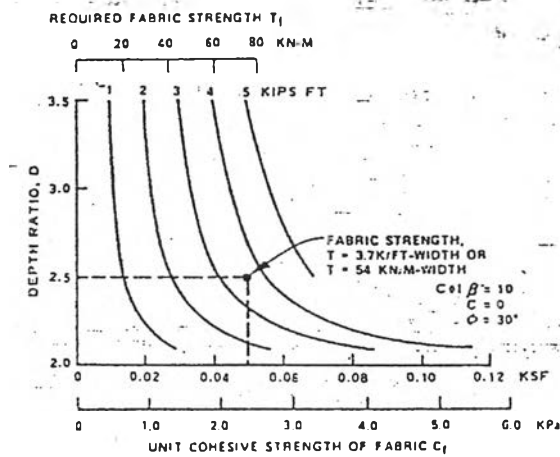
ในการคำนวณหาค่าแรงดึงในแผ่นใยสังเคราะห์ ส่วนใหญ่ค่าที่ได้จากการคำนวณเนื่องจากการพิบัติของดินเหนียวอ่อน (Slip Circle Type Failure or Rotational Type Failure) จะมาก



กว่าค่าของแรงดึงที่คำนวณได้จากการพิบัติเนื่องจากการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินถม (Horizontal Sliding or Lateral Spreading of Embankment)



รูปที่ 2.9 Design Chart for Determining Stability Number



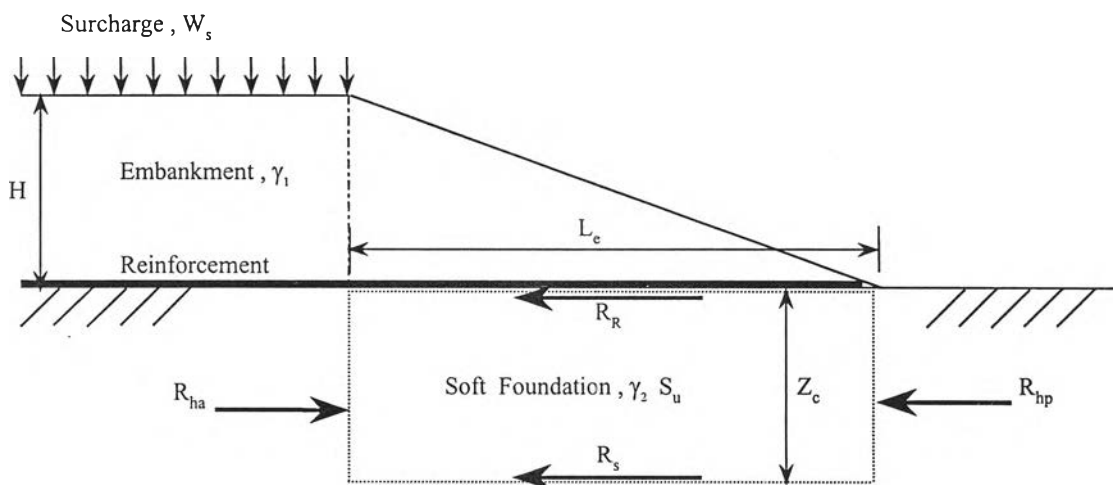
รูปที่ 2.10 Design Chart for Determining Fabric Strength

### 2.3.3 Foundation Extrusion Failure

เป็นการพิบัติเนื่องจากชั้นดินเหนียวอ่อนเกิดการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง(Extrusion) เนื่องจากน้ำหนักกดทับของดินถมทำให้ดินถมเกิดการทรุดตัวจมลง แผ่นใยสังเคราะห์ที่อยู่ใต้ดินถม จะเกิดการยืด ดังแสดงในรูปที่ 2.4c ในกรณีที่ชั้นดินเหนียวอ่อนเกิดการเคลื่อนตัวมากเกินไป (Excessive Displacement) แผ่นใยสังเคราะห์ก็จะเกิดการยืดตัวที่มากเกินไป (Excessive Elongation) จนอาจเกิดการฉีกขาดขึ้นทำให้ดินถมเกิดการพิบัติได้

ในการป้องกันการพิบัติลักษณะนี้จะต้องคำนวณออกแบบความยาว side slope ของดินถมให้มีความยาวเพียงพอที่จะสามารถเกิดหน่วยแรงต้านทานมากกว่าแรงเฉือนที่จะทำให้เกิดการพิบัติ ซึ่งในการคำนวณออกแบบจะใช้ทฤษฎี Plasticity Solution ของ Terzaghi (1943) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกโดยมีรายละเอียดของการคำนวณดังนี้

จากรูปที่ 2.11 เมื่อพิจารณาถึงลักษณะของการพิบัติของชั้นดินเหนียวอ่อนในลักษณะ Foundation Extrusion จะเห็นว่าแรงที่จะทำให้เกิดการพิบัติและแรงที่ต้านทานการพิบัติในชั้นดินเหนียวอ่อนจะประกอบด้วยแรงดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.11 Force Component in Foundation Extrusion Stability Analysis

- $R_{ha}$  เป็นแรงดันดินด้านข้างที่จะทำให้ชั้นดินเหนียวอ่อนเกิดการเคลื่อนตัว ซึ่งเป็นแรงที่จะทำให้เกิดการพิบัติ
- $R_{hp}$  เป็นแรงดันดินด้านข้างที่จะช่วยต้านไม่ให้ชั้นดินเหนียวอ่อนเกิดการเคลื่อนตัว
- $R_R$  เป็นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสได้แผ่นใยสังเคราะห์กับผิวสัมผัสบนชั้นดินเหนียวอ่อน โดยจะเป็นแรงที่จะช่วยต้านไม่ให้เกิดการพิบัติ
- $R_s$  เป็นแรงเฉือนในชั้นดินเหนียวอ่อนที่จะช่วยต้านไม่ให้เกิดการพิบัติ

ดังนั้นในการป้องกันการพิบัติในลักษณะของ Foundation Extrusion ค่าแรงดันดินด้านข้าง  $R_{ha}$  จะต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับผลรวมของค่าแรงดันดินด้านข้าง  $R_{hp}$  , แรงเสียดทาน  $R_R$  และแรงเฉือน  $R_s$  นั่นคือ

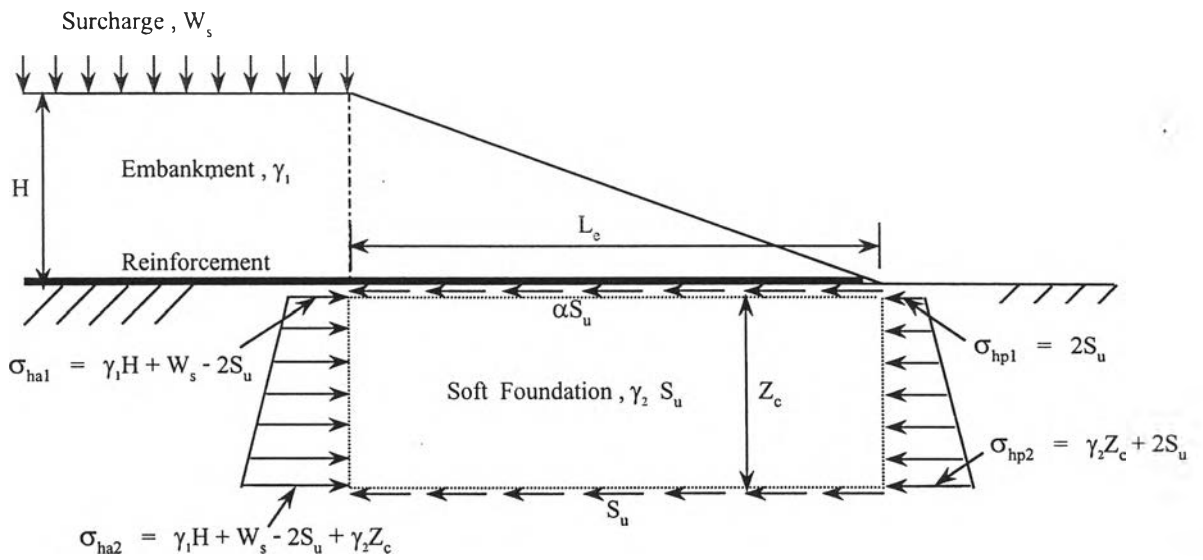
$$R_{ha} \leq R_{hp} + R_R + R_s \quad (2.18)$$

ในกรณีที่ชั้นดินเหนียวอ่อนมีค่า Undrained Shear Strength คงที่ตลอดความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อนลักษณะของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในชั้นดินเหนียวอ่อนจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.12a และในกรณีที่ชั้นดินเหนียวอ่อนมีค่า Undrained Shear Strength เพิ่มขึ้นสม่ำเสมอตลอดความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อนลักษณะของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในชั้นดินเหนียวอ่อนจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.12b

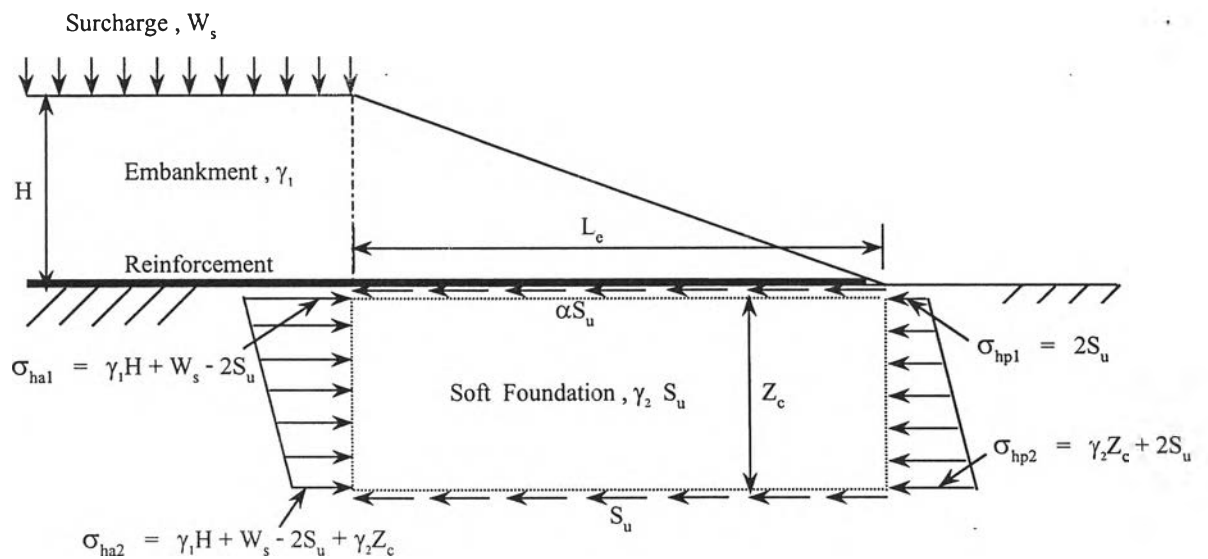
จากรูปที่ 2.12a และ 2.12b และจากสมการที่ (2.18) จะสามารถหาความยาว side slope ของดินถมที่จะสามารถป้องกันการพิบัติของชั้นดินเหนียวอ่อนในลักษณะของ Foundation Extrusion ได้ดังนี้

$$L_c \leq \frac{(\gamma_1 H + W_s - 4S_u) Z_c}{(1 + \alpha) S_u} \quad (2.19)$$

- โดยที่  $L_c$  = ความยาว side slope ของดินถม  
 $\gamma_1$  = ความหนาแน่นรวมของชั้นดินถม  
 $\gamma_2$  = ความหนาแน่นรวมของชั้นดินเหนียวอ่อน



**a. Simple Block Analysis of Foundation Extrusion Stability for the Soft Foundation is of Limited Depth and has Constant Undrained Shear Strength with Depth**



**b. Simple Block Analysis of Foundation Extrusion Stability for the Soft Foundation has Increase Undrained Shear Strength with Depth**

รูปที่ 2.12 Analysis of Foundation Extrusion Stability



- $H$  = ความสูงของชั้นดินถม  
 $W_s$  = น้ำหนักภายนอกที่กระทำบนชั้นดินถม  
 $S_u$  = ค่า Undrained Shear Strength ในชั้นดินเหนียวอ่อน  
 $Z_c$  = ความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน  
 $\alpha$  = Interaction Coefficient ระหว่างผิวสัมผัสของแผ่นใยสังเคราะห์กับชั้นดินเหนียวอ่อน

ดังนั้นแรงดึงที่เกิดขึ้นในแผ่นใยสังเคราะห์เนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสใต้แผ่นใยสังเคราะห์กับผิวบนชั้นดินเหนียวอ่อนสามารถหาได้ดังนี้

$$T_g = \alpha S_u (L_c + 0.5L_c) \quad (2.20)$$

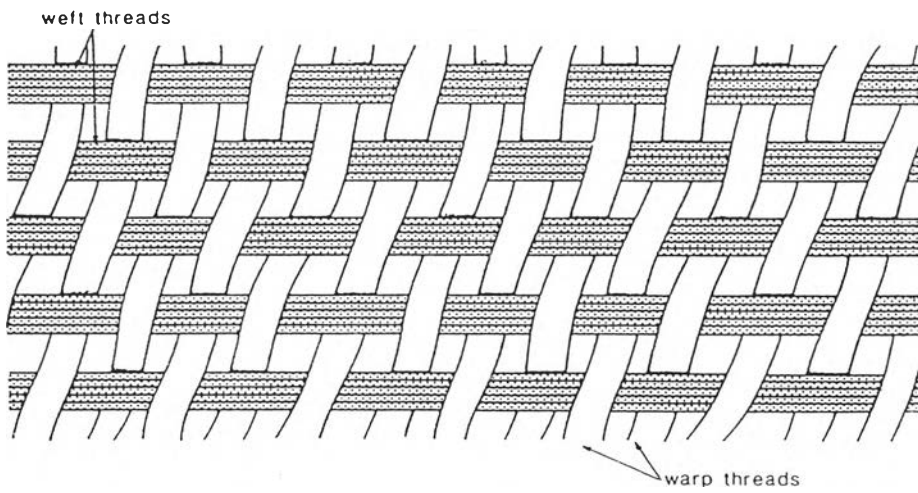
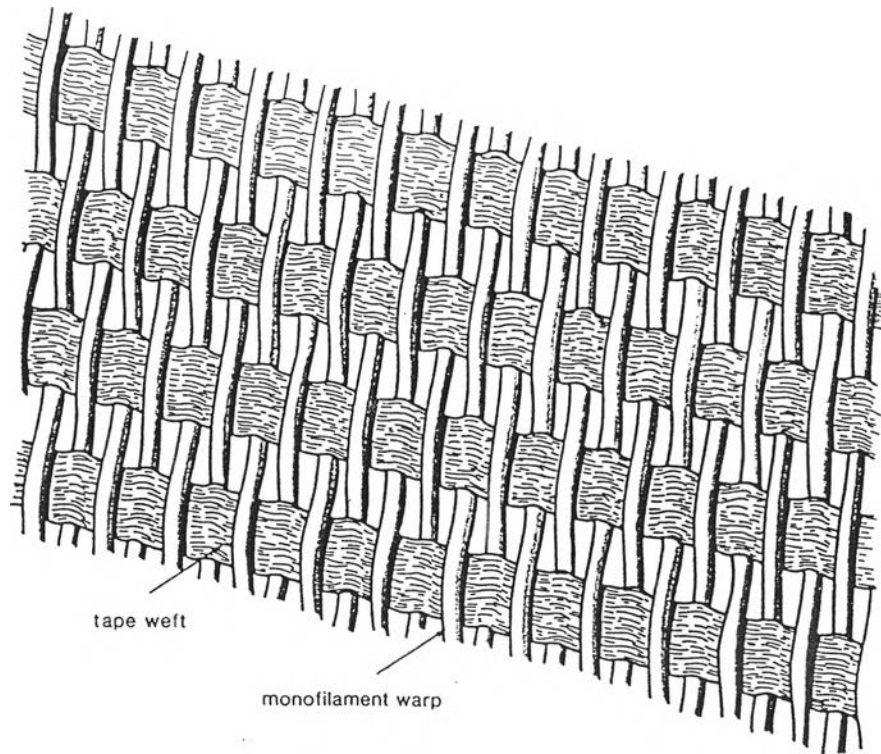
- โดยที่  $T_g$  = แรงดึงที่เกิดขึ้นในแผ่นใยสังเคราะห์เนื่องจากแรงเสียดทาน  $R_r$   
 $L_c$  = ความกว้างของดินถมที่ชั้นบนสุด (Width of Embankment Crest)

ในกรณีที่  $L_c > L_c$  ค่าในวงเล็บในสมการที่ (2.20) ควรจะใช้เท่ากับ  $(1.5L_c)$  เนื่องจาก critical failure plane ส่วนมากจะเกิดขึ้นในช่วงระหว่าง  $L_c$  ถึง  $(L_c + 0.5L_c)$

## 2.4 ชนิดของแผ่นใยสังเคราะห์

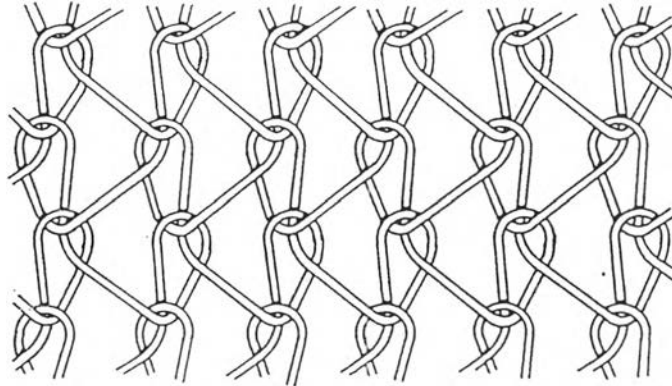
แผ่นใยสังเคราะห์จะมีหลายชนิดด้วยกัน แต่ที่ใช้กันทั่วไปในงานวิศวกรรมธรณีจะมีอยู่ 3 ชนิด คือ

1. **Woven Geotextiles** เป็นแผ่นใยสังเคราะห์ที่มีกรรมวิธีการผลิตโดยการนำเส้นใยมาถักทอประสานกันเป็นตาราง ซึ่งรูปแบบการถักทอจะมีหลายชนิดแต่ละชนิดก็จะมีชื่อเรียกแตกต่างกันขึ้นอยู่กับรูปแบบและจำนวนเส้นใยที่ใช้ในการถักทอเช่น Monofilament Wovens , Multifilament Wovens , Tape Wovens Geotextiles (รูปที่ 2.13) และ Knitted Wovens Geotextiles (รูปที่ 2.14) เป็นต้น นอกจากนี้ชนิดของเส้นใยที่ใช้ในถักทอก็มีอยู่หลายชนิดด้วยกัน เช่น

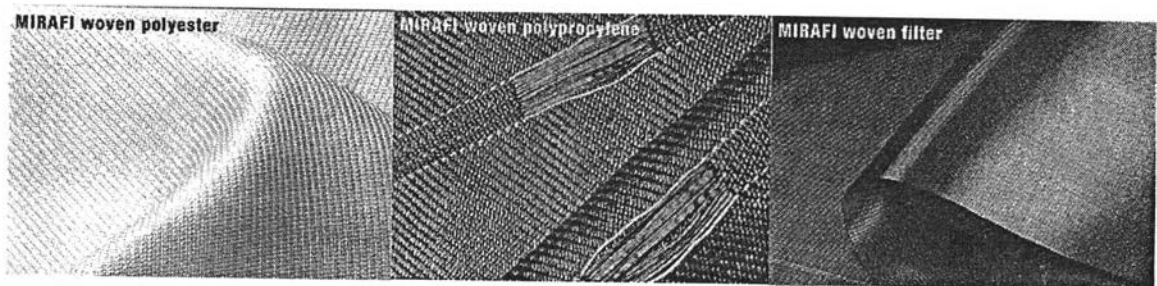


รูปที่ 2.13 ลักษณะของแผ่นใยสังเคราะห์ชนิด Woven Geotextile (John, 1987)

Polyester , Polypropylene และ Polyethylene เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.15 แผ่นใยสังเคราะห์ชนิดนี้มีความสามารถรับแรงดึงได้สูง (High Tensile Strength) และมีคุณสมบัติในการยืดตัวต่ำ (Low Extension)

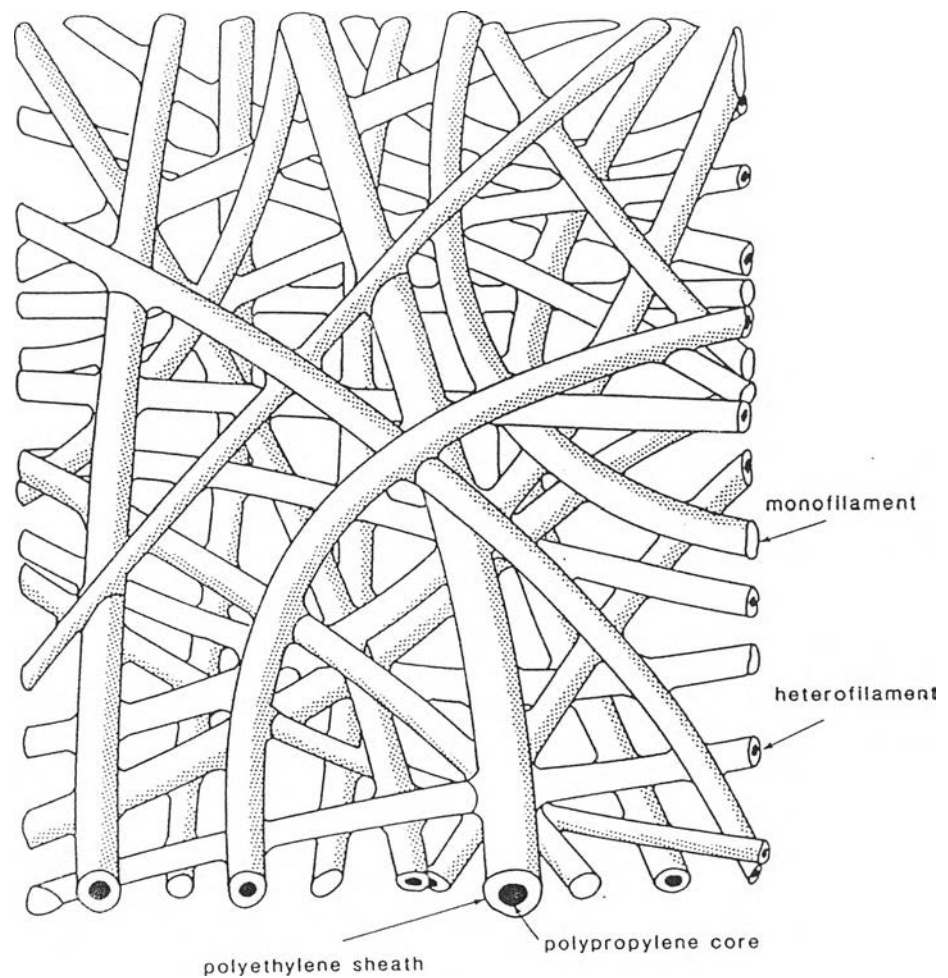


รูปที่ 2.14 ลักษณะของ Knitted Woven Geotextile (John, 1987)



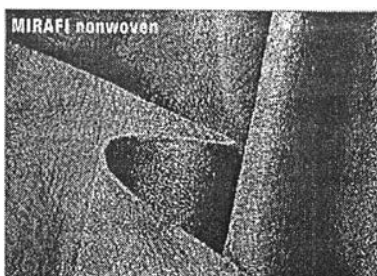
รูปที่ 2.15 ลักษณะของแผ่นใยสังเคราะห์ชนิดถักทอที่ผลิตด้วยเส้นใยชนิดต่างๆ

2. **Nonwoven Geotextiles** เป็นแผ่นใยสังเคราะห์ที่มีกรรมวิธีการผลิตโดยใช้ความร้อนหรือ resin ช่วยในการยึดเกาะกันของเส้นใยไม่มีการนำเส้นใยมาถักทอประสานกันแบบชนิดแรก จะมีชื่อเรียกแตกต่างกันตามวิธีการที่ใช้ในการผลิต เช่น Thermally Bonded หรือ Melt Bonded , Needle Punched และ Resin Bonded Geotextiles เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.16 และ 2.17 แผ่นใยสังเคราะห์ชนิดนี้มีความสามารถรับแรงดึงได้น้อย (Low Tensile Strength) และมีคุณสมบัติการยืดตัวสูง (High Extension)



รูปที่ 2.16 ลักษณะการยึดเกาะของเส้นใยของแผ่นใยสังเคราะห์ชนิด Nonwoven Geotextile (John, 1987)



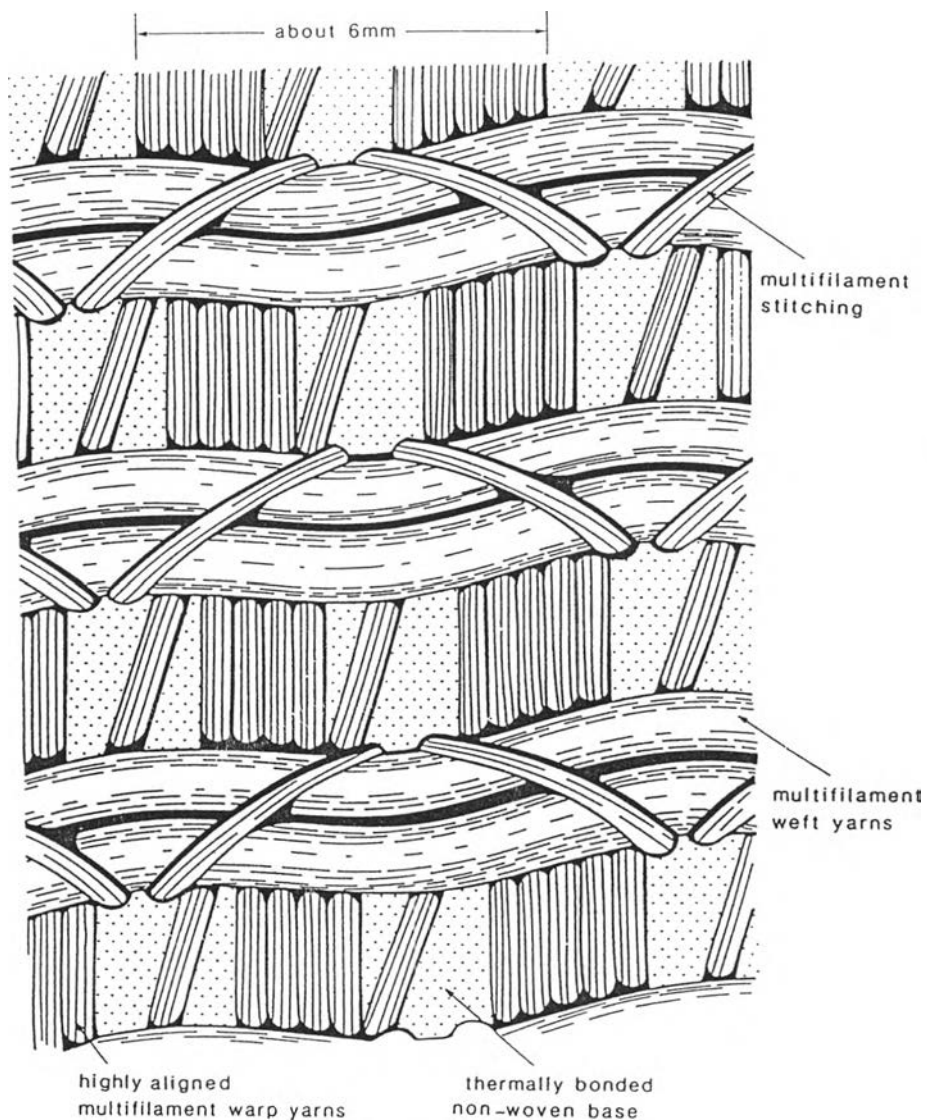


รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะของแผ่นใยสังเคราะห์ชนิดไม่ถักทอ  
ที่ใช้กรรมวิธีผลิตแบบ Needle Punched

3. **Composite Geotextile** เป็นแผ่นใยสังเคราะห์ชนิดพิเศษที่มีการผสมกันระหว่าง Nonwoven Geotextile และ Woven Geotextile โดยได้นำข้อดีของแผ่นใยสังเคราะห์แต่ละชนิดมาเสริมซึ่งกันและกัน ดังนั้นแผ่นใยสังเคราะห์ชนิดนี้จึงมีความสามารถรับแรงดึงได้มากกว่า Nonwoven Geotextile และมีคุณสมบัติการยึดตัวสูงกว่า Woven Geotextile ลักษณะของแผ่นใยสังเคราะห์ชนิดนี้ได้แสดงในรูปที่ 2.18

ในการเลือกแผ่นใยสังเคราะห์ที่เหมาะสมสำหรับการเสริมความแข็งแรงให้กับมวลดิน ควรจะพิจารณาถึงคุณสมบัติของแผ่นใยสังเคราะห์และองค์ประกอบต่างๆที่จะมีผลกระทบต่อแผ่นใยสังเคราะห์ เช่นความสามารถในการรับแรงดึง , ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น , ชนิดของเส้นใยที่นำมาถักทอ , อายุการใช้งาน , ความสามารถทนทานต่อสภาวะแวดล้อมต่างๆ เช่น อุณหภูมิ , แสงแดด , ความเป็นกรด ด่างหรือเชื้อรา แบคทีเรีย ในมวลดิน เป็นต้น และที่สำคัญราคาค่าก่อสร้างจะต้องไม่มากกว่าการก่อสร้างแบบวิธีอื่น คุณสมบัติที่สำคัญที่ควรพิจารณาในการเลือกใช้แผ่นใยสังเคราะห์สำหรับเสริมความแข็งแรงประกอบด้วย ดังนี้

1. **Strength** แผ่นใยสังเคราะห์ที่ใช้จะต้องมีความสามารถที่จะรับแรงดึงที่เกิดขึ้นเพื่อทำให้มวลดินอยู่ในสภาพสมดุลได้ด้วยอัตราส่วนปลอดภัยที่เพียงพอ
2. **Stiffness** ค่า stiffness ของแผ่นใยสังเคราะห์ที่ใช้จะต้องมีความเหมาะสมอย่างเพียงพอเพื่อที่จะสามารถทำให้เกิดแรงดึงที่ระยะการยึดตัว (Tension Strain) ไม่เกินค่าที่กำหนด



รูปที่ 2.18 ลักษณะของแผ่นใยสังเคราะห์ชนิด Composite Geotextile (John, 1987)

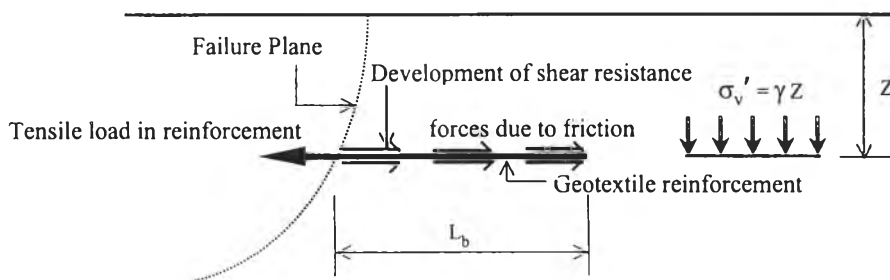
3. **Bond** แผ่นใยสังเคราะห์ที่ใช้ต้องมีความสามารถในการยึดเกาะกับมวลดินได้เป็นอย่างดี เพื่อที่จะสามารถถ่ายแรงดึงที่เกิดขึ้นได้โดยที่มวลดินยังอยู่ในสภาพสมดุลย์
4. **Durability** อิทธิพลของเวลาและอุณหภูมิรวมทั้งสภาวะแวดล้อมต่างๆ ภายในมวลดินที่จะมีผลกระทบต่อแผ่นใยสังเคราะห์จะต้องได้รับการพิจารณา

## 2.5 พฤติกรรมร่วมกันระหว่างมวลดินกับแผ่นใยสังเคราะห์เมื่อมวลดินเกิดการเคลื่อนตัว (Interaction between Geotextile Reinforcement and Soil)

ในขณะที่มวลดินเริ่มจะมีการเคลื่อนตัวเกิดขึ้น ระหว่างผิวสัมผัสของมวลดินกับแผ่นใยสังเคราะห์จะมีพฤติกรรมร่วมกัน (Interaction) โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะดังนี้ คือ

1. **Friction Bond** เป็นการกระทำร่วมกันระหว่างมวลดินกับแผ่นใยสังเคราะห์ ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทาน (Friction) ที่ผิวระหว่างแผ่นใยสังเคราะห์กับมวลดินที่อยู่รอบๆ โดยจะมีการถ่ายแรงซึ่งกันและกันเกิดเป็นแรงยึดเกาะกันระหว่างผิวของมวลดินกับแผ่นใยสังเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 2.19 แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นนี้จะช่วยต้านแรงดึงที่เกิดขึ้นในแผ่นใยสังเคราะห์ ( $T_g$ ) ไม่ให้เกิดการพิบัติแบบ Pull out ดังนั้นการป้องกันการพิบัติแบบ Pull out ค่าแรงดึง  $T_g$  จะต้องมีค่าน้อยกว่าค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น ดังนี้

$$T_g \leq 2\sigma'_v L_b \tan\phi_{sg} \quad (2.21)$$



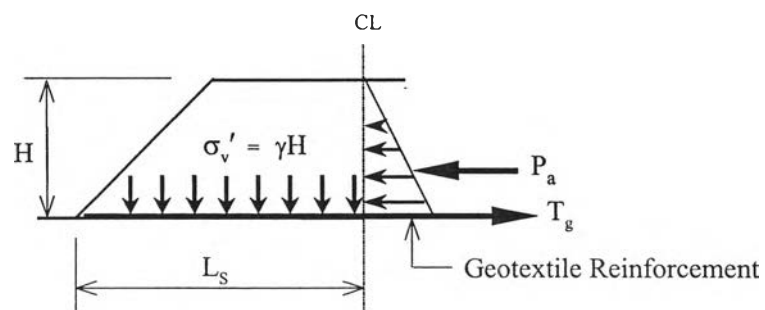
รูปที่ 2.19 Reinforcement and Soil Bond by Friction

- โดยที่  $T_g$  = แรงดึงที่เกิดขึ้นในแผ่นใยสังเคราะห์
- $\sigma_v'$  = Effective Normal Stress
- $L_b$  = ความยาวของแผ่นใยสังเคราะห์ที่เกิดแรงยึดเกาะกันด้วยแรงเสียดทาน
- $\phi_{sg}$  = ค่ามุมเสียดทานภายในระหว่างแผ่นใยสังเคราะห์กับมวลดินที่อยู่รอบๆ

2. **Sliding Resistance** เป็นการกระทำร่วมกันระหว่างมวลดินกับแผ่นใยสังเคราะห์ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทานที่ผิวระหว่างแผ่นใยสังเคราะห์กับดินถม ดังแสดงในรูปที่ 2.20 โดยจะช่วยต้านการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่จะเกิดขึ้นของดินถมเนื่องจากแรงดันดิน (Active Earth Pressure,  $P_a$ ) ซึ่งจะคิดที่กึ่งกลางของดินถม (Center of Embankment) เพื่อให้ดินถมอยู่ในสภาวะสมดุลย์แรงดันดินจะต้องไม่มากกว่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น นั่นคือ

$$P_a \leq \sigma_v' L_s \tan \phi_{sg} \quad (2.22)$$

- โดยที่  $\sigma_v'$  = Effective Normal Stress
- $L_s$  = ความยาวของแผ่นใยสังเคราะห์ตั้งแต่กึ่งกลางของดินถมจนถึงปลายของดินถม
- $\phi_{sg}$  = ค่ามุมเสียดทานภายในระหว่างดินถมกับแผ่นใยสังเคราะห์



รูปที่ 2.20 Sliding Resistance along Surface of Geotextile Reinforcement