




## การประยุกต์ใช้วัสดุสังเคราะห์ในงานวิศวกรรมโยธา



**Short Course**  
on Theory, Design and Applications  
of Geosynthetics in Civil Engineering

**Suranaree**  
University of Technology

### บรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข  
ดร.เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์  
ณัฐชัย โปร่งมณี

11-12 กรกฎาคม 2556

ณ สุรสัมมนาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
นครราชสีมา



## สาส์นจากประธานกรรมการดำเนินการ

การอบรมความรู้เชิงทฤษฎี การออกแบบ และการประยุกต์ใช้วัสดุสังเคราะห์ในงานวิศวกรรมโยธา

การอบรมความรู้เชิงทฤษฎี การออกแบบ และการประยุกต์ใช้วัสดุสังเคราะห์ในงานวิศวกรรมโยธา ระหว่างวันที่ 11-12 กรกฎาคม พ.ศ. 2556 ณ สุรสีมาคาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในครั้งนี้ เป็นกิจกรรมความร่วมมือระหว่าง International Geosynthetic Society (IGS) – Thailand Chapter และสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา และศูนย์วิจัยความเป็นเลิศด้านวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เนื้อหาหลักของการอบรมนี้เป็นการนำเสนอทฤษฎีและแนวทางการออกแบบ รวมทั้งการประยุกต์ใช้วัสดุสังเคราะห์ในงานวิศวกรรมโยธา อันประกอบด้วย การซ่อมแซมถนนที่ชำรุด การเสริมกำลังในงานก่อสร้าง กำแพงกันดิน ป่อเก็บน้ำ และคันดินถนนบนดินเหนียวอ่อน การป้องกันการชะล้างหน้าดินตามไหล่เขาและริมตลิ่ง และการเป็นวัสดุแยกชั้นดินและวัสดุกรอง กลุ่มผู้เข้าร่วมอบรมประกอบด้วยอาจารย์ นักศึกษา นักวิจัย นักวิชาการ วิศวกรโยธา และนายช่างโยธา ของหน่วยงานทั้งภาครัฐและภาคเอกชน นอกจากนี้จะเป็นเวทีทางวิชาการแล้ว ผู้จัดงานได้จัดให้มีนิทรรศการแสดงผลสัมฤทธิ์วัสดุสังเคราะห์ และตัวอย่างการประยุกต์ใช้วัสดุสังเคราะห์ในงานวิศวกรรมโยธา โดยบริษัทผู้ผลิต ผู้ออกแบบ และผู้จัดจำหน่าย ที่มีประสบการณ์ในการออกแบบและติดตั้งทั้งในและต่างประเทศ เพื่อเป็นเวทีพบปะระหว่างผู้ประกอบการ ผู้ออกแบบ และวิศวกร ผู้ปฏิบัติงานจริง ได้แลกเปลี่ยนความรู้และประสบการณ์

วิทยากรเป็นผู้เชี่ยวชาญทางด้านวิศวกรรมปฐพีและวัสดุสังเคราะห์ ที่มีชื่อเสียงและเป็นที่ยอมรับระดับชาติและนานาชาติ ซึ่งได้แก่ ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข Prof. Denes T. Bergado รองศาสตราจารย์ ดร.พานิช วุฒิพิฤกษ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีลัมภ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมโพธิ อยุธยา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรัช กองกิจกุล และอาจารย์ ดร.พิรพงศ์ จิตเสงี่ยม ประสบการณ์จากวิทยากรได้นำบรรจุในเอกสารประกอบการอบรมนี้ บรรณาธิการและคณะกรรมการดำเนินการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าเอกสารประกอบการอบรมนี้จะเป็นเอกสารอ้างอิงทางวิชาการที่มีคุณค่าแก่นักศึกษา นักวิจัย นักวิชาการ และวิศวกร

คณะกรรมการดำเนินงานจัดการอบรมฯ ขอขอบคุณวิทยากร ผู้เข้าร่วมอบรม บริษัทผู้แสดงนิทรรศการ ผู้สนับสนุนงบประมาณ และทุกหน่วยงาน ที่ให้การสนับสนุนการจัดการอบรมครั้งนี้จนประสบความสำเร็จได้ด้วยดี หากมีข้อบกพร่องประการใด คณะกรรมการดำเนินงานขออภัยมา ณ โอกาสนี้

(ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

ประธานคณะกรรมการดำเนินการจัดการ

การอบรมความรู้เชิงทฤษฎี การออกแบบ

และการประยุกต์ใช้วัสดุสังเคราะห์ในงานวิศวกรรมโยธา

## สารบัญ

	หน้า
1. ทฤษฎีและการออกแบบกำแพงกันดินเสริมวัสดุเส้นใยสังเคราะห์.....	1
<i>ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข และ ดร.เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์</i>	
2. การบรรเทาการกัดเซาะลาดดินโดยใช้วัสดุสังเคราะห์ผสมผสานการปลูกพืชคลุมดิน .....	15
<i>รองศาสตราจารย์ ดร.พานิช วุฒิพิฤกษ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สยาม แกมขุนทด และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยรัตน์ ธีระวัฒน์สุข</i>	
3. Geosynthetics for Road and Highway Construction: Is it time for Thailand? .....	23
<i>Dr. Peerapong Jitsangiam</i>	
4. การประยุกต์ใช้วัสดุสังเคราะห์ในงานผิวทาง.....	33
<i>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมโพธิ อยู่วัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรัช ก้องกิจกุล และ ปรีดีเทพ อนุจร</i>	
5. กรณีศึกษาการก่อสร้างโครงสร้างดินเสริมแรงด้วยวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์ รองรับโครงสร้างถนน .....	41
<i>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรัช ก้องกิจกุล วรุตม์ ตันติวงษ์ บุญเลี้ยง หมูเย็น วรินทร์ ทุ่งเฟื่อง และ อธิตาพรรณ ฉันทโชติ</i>	

## ทฤษฎีและการออกแบบกำแพงกันดินเสริมวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ Theory and Design of Geosynthetic Reinforced Earth Wall

ศาสตราจารย์ ดร.สุชนันต์ หอพิบูลสุข<sup>1\*</sup> และ ดร.เชตศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง  
จังหวัดนครราชสีมา 30000

E-mail: <sup>1</sup>suksun@g.sut.ac.th, <sup>2</sup>cherdsak\_2526@hotmail.com

### บทคัดย่อ

การประยุกต์ใช้วัสดุเสริมกำลังในดินถมได้มีมาตั้งแต่สองทศวรรษที่แล้ว ราคาค่าก่อสร้างกำแพงกันดินเสริมกำลังขึ้นอยู่กับวัสดุเสริมกำลัง ด้วยเหตุนี้เองวัสดุเสริมกำลังจึงเป็นปัจจัยหลักในการควบคุมต้นทุนค่าก่อสร้าง วัสดุเส้นใยสังเคราะห์จัดเป็นวัสดุเสริมกำลังในดินที่มีราคาต่ำประเภทหนึ่ง บทความนี้นำเสนอทฤษฎีและการออกแบบของกำแพงกันดินที่เสริมกำลังด้วยวัสดุสังเคราะห์ และกล่าวถึงคุณสมบัติของวัสดุดินถมที่เหมาะสมในการก่อสร้างกำแพงกันดิน วัสดุเส้นใยสังเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ เส้นใยแบบถัก (Woven fabric) และเส้นใยแบบไม่ถัก (Non-woven fabric) การคำนวณออกแบบกำแพงกันดินเสริมวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ประกอบด้วยการตรวจสอบเสถียรภาพภายนอกและเสถียรภาพภายใน เสถียรภาพภายนอกประกอบด้วย การเลื่อน การพลิกคว่ำ กำลังรับแรงแบกทาน และเสถียรภาพลาดดิน เสถียรภาพภายในประกอบด้วย การฉีกขาดและการฉุดออกของวัสดุสังเคราะห์ ท้ายสุด บทความนี้นำเสนอตัวอย่างการออกแบบกำแพงกันดินเสริมวัสดุเส้นใยสังเคราะห์

**คำสำคัญ:** กำแพงกันดิน, วัสดุเส้นใยสังเคราะห์, เสถียรภาพภายนอก, เสถียรภาพภายใน

### Abstract

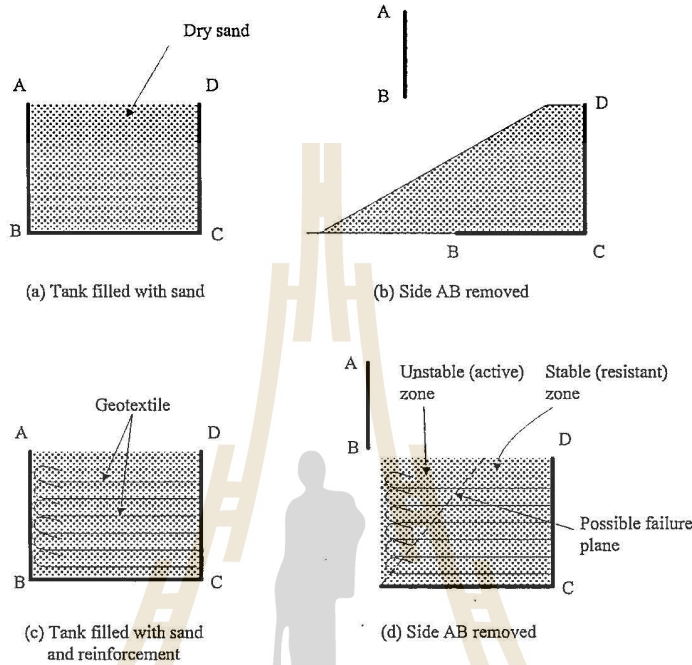
The use of reinforcement to stabilize embankment has grown rapidly two decades. The construction cost of reinforced earth wall depends on the reinforcement. Consequently, the reinforcement becomes the key factor in construction cost control. The geosynthetic is one of the cost-effective

reinforcement. This article presents theory and design of the geosynthetic reinforced earth wall and suggests the index and engineering properties of backfill for constructing the geosynthetic stabilized wall. The geosynthetics are classified into two types: woven fabric and non-woven fabric. The design calculation consists of the examination of external stability and internal stability. The examination of external stability deals with sliding, overturning bearing stress and circular slip. The examination of internal stability deals with rupture and pullout of geosynthetics. A design example of geosynthetic reinforced earth wall is finally presented.

**Keywords:** Reinforced earth wall, Geosynthetics, External stability and Internal stability

### 1. คำนำ

ดินเป็นวัสดุตามธรรมชาติที่มีกำลังต้านทานแรงอัดสูง แต่มีกำลังต้านทานแรงดึงต่ำมาก การเพิ่มกำลังต้านทานแรงดึงในดินสามารถทำได้โดยการเสริมวัสดุเสริมกำลังดินที่ได้รับการเสริมกำลังเรียกว่า “ดินเสริมกำลัง (Reinforced soil)” วัสดุเสริมกำลังอาจเป็นแผ่นเหล็ก เหล็กเส้น ตะแกรงเหล็ก และวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ เป็นต้น เมื่อน้ำหนักกระทำบนดินเสริมกำลัง วัสดุเสริมกำลังจะทำหน้าที่ต้านความเค้นดึง (Tensile stress) ซึ่งจะทำหน้าที่เหมือนเหล็กเสริมในคอนกรีต



รูปที่ 1 อธิบายของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ [6]

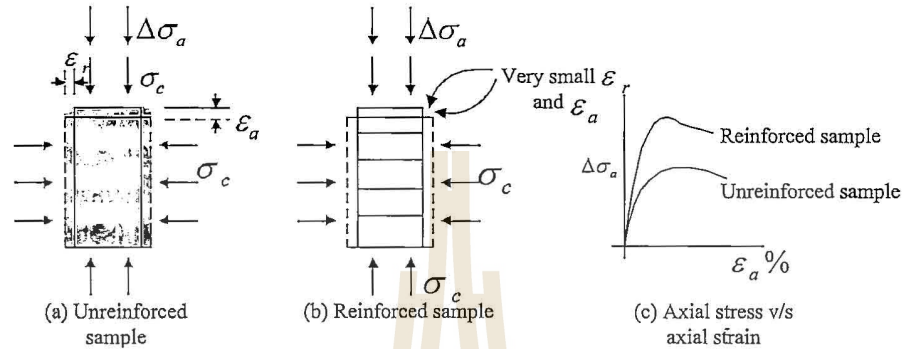
เพื่อให้เข้าใจกลไกการปรับปรุงดินด้วยวัสดุเสริมกำลังพิจารณาผลทดสอบในห้องปฏิบัติการสองผลทดสอบสำหรับการทดสอบที่หนึ่ง ถึง ABCD ดังแสดงในรูปที่ 1 ถูกเติมเต็มด้วยทรายแห้ง เมื่อทำการเปิดฝา AB ออก ทรายจะไม่สามารถตั้งในแนวตั้งได้ และจะจัดเรียงตัวใหม่โดยมีผิวหน้าที่มีความชัน ดังแสดงในรูปที่ 1b ถ้าทำการทดสอบใหม่อีกครั้งโดยการเสริมวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ในแนวนอนและม้วนปลายของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์เพื่อทำเป็น Facing กันดินถล่ม ดังแสดงในรูปที่ 1c เมื่อเปิดฝา AB ออก ทรายจะไม่พังทลาย เพราะเมื่อมวลดินในโซนที่ไม่เสถียร (Active zone) เริ่มเคลื่อนตัว มวลดินในโซนนี้จะพยายามดึงวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ไปด้วย แต่มวลดินในโซนต้านทาน (Resistant zone) จะจับยึดวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ไว้และรั้งไม่ให้มวลดินในโซนที่ไม่เสถียรเคลื่อนตัวลองพิจารณาอีกผลทดสอบซึ่งเป็นการศึกษาพฤติกรรมกรณีดินแบบระบายน้ำของตัวอย่างสองชนิด (ดินทรายแน่นและดินทรายแน่นที่เสริมวัสดุเส้น

ใยสังเคราะห์) ที่ถูกกระทำด้วยความเค้นรอบข้าง ประสิทธิภาพเท่ากันตัวอย่างทั้งสองแสดงพฤติกรรมที่น่าสนใจดังนี้

ก) ระหว่างการเฉือน ดินตัวอย่างเสริมเส้นใยสังเคราะห์แสดงความเครียดตามแนวแกนและตามแนวรัศมีที่ต่ำกว่าดินทรายที่ไม่มีการเสริมกำลัง ดังแสดงในรูปที่ 2a และ 2b

ข) ที่จุดวิกฤติ ความเค้นเบี่ยงเบนของดินตัวอย่างเสริมเส้นใยสังเคราะห์มีค่าสูงกว่าดินตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมกำลังอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 2c

วัสดุเสริมกำลังที่นิยมใช้ในประเทศไทยแบ่งออกเป็นสองประเภทตามพฤติกรรมความเค้น-ความเครียด (Stress-strain behavior) ได้แก่ วัสดุเสริมกำลังที่สามารถยืดได้ (Extensible reinforcement) และวัสดุเสริมกำลังที่ไม่สามารถยืดได้ (Inextensible reinforcement) วัสดุเสริมกำลังจำพวกโลหะ (Metallic reinforcement) เช่น เหล็ก

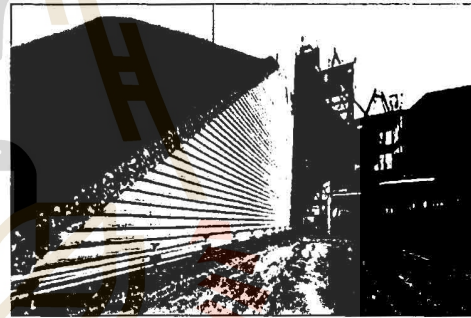


รูปที่ 2 การทดสอบแรงอัดสามแกนของทรายเสริมและไม่เสริมวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ [6]

แถบ (Strips) เหล็กเส้น (Bars) แผ่นเหล็ก (Sheets) และตะแกรงเหล็ก (Steel wire mesh) จัดเป็นวัสดุเสริมกำลังที่ไม่สามารถยึดได้ เนื่องจากเหล็กมีค่าโมดูลัสที่สูงและมีการยึดตัวและการคืบ (Creep) ที่ต่ำมาก วัสดุเสริมกำลังที่ทำจากเส้นใยสังเคราะห์ (Geogrid และ Geotextile) จัดเป็นวัสดุเสริมกำลังที่สามารถยึดได้ ซึ่งโดยทั่วไปจะมีแรงยึดเกาะระหว่างดินและวัสดุสูง วัสดุเสริมเส้นใยสังเคราะห์ (Geosynthetics) มักใช้เป็นวัสดุเสริมกำลังในโครงการที่ยอมให้มีการยึดตัว วัสดุเส้นใยสังเคราะห์สามารถใช้เป็นวัสดุระบายน้ำ (Drainage/filtration) และวัสดุแบ่งแยกดิน (Separation) ได้ด้วย

วัสดุเสริมกำลังทั้งที่ไม่สามารถยึดได้และที่สามารถยึดได้มักนำมาประยุกต์ใช้กับงานก่อสร้างโครงสร้างกันดิน (Retaining wall) ที่มีความชันสูงหรือตั้งตั้ง ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในบริเวณตัวเมืองที่มีพื้นที่ก่อสร้างจำกัด โครงสร้างกันดินเสริมกำลังช่วยลดความกว้างของฐานโครงสร้างดิน (Earth structure) (รูปที่ 3) ให้สามารถตั้งในแนวตั้งได้ การก่อสร้างโครงสร้างกันดินประเภทนี้จะประหยัดกว่าการก่อสร้างกำแพงกันดินแบบ Cantilever หรือแบบ Gravity นอกจากนี้ โครงสร้างกันดินเสริมกำลังยังสามารถประยุกต์ใช้กับงานก่อสร้างทางขึ้นสะพาน (Bridge abutment) งานดินถมของทางด่วนบริเวณภูเขา (Hilly region) งานดินชุดในแนวตั้งหรืองานดินชุดที่มีความชันน้อย งานเสริมเสถียรภาพของไหล่เขา

และงานเสริมกำลังของดินถมและถนนบนชั้นดินอ่อน เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4



รูปที่ 3 การประยุกต์ใช้วัสดุเสริมกำลังในงานโครงสร้างดิน ([www.recominingservices.com.au/content\\_common/pg-reinforced-earth-walls-int.seo](http://www.recominingservices.com.au/content_common/pg-reinforced-earth-walls-int.seo))



รูปที่ 4 การประยุกต์ใช้วัสดุเสริมกำลังในงานเสริมเสถียรภาพของไหล่เขา ([www.ifaipublications.com/iaa/articles/2011\\_3001\\_retaining\\_wall.html](http://www.ifaipublications.com/iaa/articles/2011_3001_retaining_wall.html))

## 2. ประเภทของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์

วัสดุเสริมกำลังเส้นใยเริ่มแรกประยุกต์ใช้ในงานป้องกันการกัดเซาะ (Erosion control) โดยใช้เป็นวัสดุทางเลือกแทนตัวกรองวัสดุเม็ดหยาบ (Granular filter) ดังนั้น ชื่อเดิมของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์คือเส้นใยกรอง (Filter fabric) ในช่วงปี ค.ศ. 1950 วัสดุเส้นใยสังเคราะห์เป็นเส้นใยบาง (Monofilament fabrics) ที่ใช้ในงานกรอง (Filter) ด้านหลังกำแพงคอนกรีต ใต้โครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูป เพื่อควบคุมการกัดเซาะ (Precast concrete erosion control block) และได้โครงสร้างหิน เพื่อป้องกันการกัดเซาะด้านหน้าเขื่อน (Stone riprap) เป็นต้น ในช่วงปลายปี ค.ศ. 1960 วิศวกรชาวฝรั่งเศสเริ่มประยุกต์ใช้เส้นใยแบบไม่ถักในงานวิศวกรรมต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานเสริมกำลังของถนนที่ไม่ปูพื้นทาง (Unpaved roads) งานเสริมกำลังของดินใต้หมอนรองรางรถไฟ (Railway ballast) และงานเสริมกำลังของดินถมและเขื่อน เป็นต้น หน้าที่หลักของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์คือการป้องกันการกัดเซาะของดินและการเสริมกำลังวัสดุเสริมกำลังที่สามารถยึดได้ส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ (Geosynthetics) ที่ทำจากโพลีเมอร์ ที่มีความต้านทานการเสีรูปตัว หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าเป็นวัสดุที่มีความต้านทานแรงดึงสูง แต่มีความยืดตัวสูงเมื่อรับแรงดึง วัสดุเส้นใยสังเคราะห์จะใช้เส้นใย (Fabric) ทำหน้าที่รับแรงร่วมกับดินบดอัด โดยที่เส้นใยยอมให้น้ำซึมผ่านได้ วัสดุเสริมเส้นใยสังเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

- เส้นใยแบบถัก (Woven fabric) แสดงดังรูปที่ 5 วัสดุเส้นใยแบบถักถูกทำขึ้นโดยอาศัยเทคนิคการถัก (Weaving techniques) คล้ายกับขบวนการผลิตเสื้อผ้า การถักมีด้วยกันสองวิธี คือการถักตามแนวยาวของเครื่องถักและการถักตามแนวขวางของเครื่องถัก
- เส้นใยแบบไม่ถัก (Non-woven fabric) แสดงดังรูปที่ 6 เส้นใยจะมีการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ (Random) แสดงดังรูปที่ 6 เชื่อมต่อ (Bonded) กันเป็นโครงสร้างระนาบ

(Planar structure) วิธีเชื่อมต่อ (Bonding method) มีด้วยกันหลายวิธี ดังนี้

- แผ่นโพลีเมอร์บางหลายแผ่น (Polymer filaments) วางบนสายพานเคลื่อนที่ผ่านไปยังลูกกลิ้งร้อน (Heated roller) วัสดุเสริมกำลังประเภทนี้จะมีความบางและมีกำลังเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic strength) สูงกว่าวัสดุเสริมกำลังแบบถัก
- การเชื่อมประสานเชิงกลทำโดยการส่งแผ่นโครงข่ายเส้นใยเข้าไปในเครื่องจักรที่เติมได้ด้วยเข็มเพื่อให้เกิดการยึดเกาะเชิงกล
- การเชื่อมประสานทางเคมี ทำโดยการส่งผ่านแผ่นโพลีเมอร์ บางหลายแผ่น (Polymer filaments) ผ่านสายพานและผสมกับเรซินอะครีลิก (Acrylic resin)



รูปที่ 5 วัสดุเสริมกำลังแบบแผ่นที่ทำจากเส้นใยสังเคราะห์แบบถัก (pagespeed.tencate.com/emea/geosynthetics/default.aspx)



รูปที่ 6 วัสดุเสริมกำลังแบบแผ่นที่ทำจากเส้นใยสังเคราะห์แบบไม่ถัก

### 3. วัสดุดินถมในงานโครงสร้างกันดิน

ดินถมเป็นตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อกำลังต้านทานแรงเฉดของเหล็กเสริมกำลัง และเสถียรภาพของกำแพงกันดินเสริมกำลังทั้งในสภาวะแห้งและเปียกน้ำ (Dry and wet states) ดินถมที่ดีต้องเป็นดินเม็ดหยาบที่ไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล วัสดุที่จะนำมาใช้เป็นดินถมต้องได้รับการทดสอบและการรับรองจากห้องปฏิบัติการก่อนที่จะนำมาใช้ และต้องมีคุณสมบัติดังนี้

- ซีดจำกัดเหลว ต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 30
- ดัชนีสภาพพลาสติกต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 6
- สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Coefficient of uniformity) ต้องมีค่ามากกว่า 4
- ความเป็นกรด-ด่างเมื่อทดสอบตามมาตรฐาน AASHTO T-289 "Determination of soil for use in corrosion testing" ต้องอยู่

ระหว่าง 3 ถึง 10 สำหรับดินถมที่ใช้กับวัสดุเส้นใยสังเคราะห์

- ปริมาณสารอินทรีย์ เมื่อทดสอบตามมาตรฐาน AASHTO T-267 "Determination of organic content in soils by loss on ignition" ต้องไม่เกินร้อยละ 1.0 โดยมวล
- มุมเสียดทานภายในเมื่อทดสอบตามมาตรฐาน AASHTO T-236 "Direct shear test of soils under consolidated drained conditions" สำหรับวัสดุที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 10 ที่ทำการบดอัดให้มีความแน่นไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของความหนาแน่นสูงสุด ตามวิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 32 องศา
- วัสดุที่นำมาใช้เป็นวัสดุดินถมเสริมกำลังต้องมีขนาดคละ ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดคละของวัสดุดินถมสำหรับกำแพงกันดินเสริมเส้นใยสังเคราะห์ (มาตรฐานที่ ทล.-ม. 105/2550)

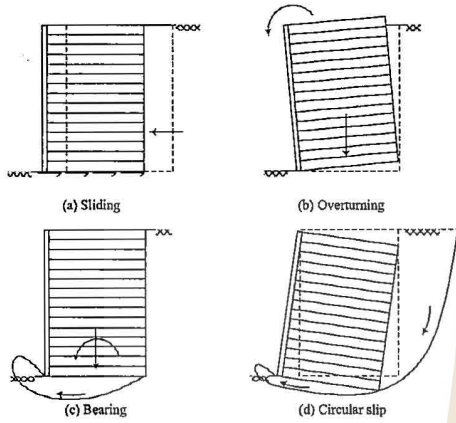
ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล (Percent passing)					
ขนาดตะแกรง					
37 มม. (1 ½ นิ้ว)	18.75 มม. (3/4 นิ้ว)	4.75 มม. (เบอร์ 4)	0.425 มม. (เบอร์ 40)	0.150 มม. (เบอร์ 100)	0.075 มม. (เบอร์ 200)
100	-	30-100	15-100	5-65	0-15

### 4. วิธีการออกแบบกำแพงกันดินเสริมกำลังในสภาวะสถิต

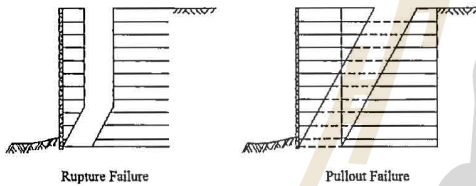
การออกแบบกำแพงกันดินเสริมวัสดุเส้นใยสังเคราะห์จะเกี่ยวข้องกับการตรวจสอบเสถียรภาพภายนอกและภายใน [3,8,9] การตรวจสอบเสถียรภาพภายนอกสามารถทำได้เช่นเดียวกับวิธีดั้งเดิม (Conventional method) โดยสมมติว่ากำแพงกันดินเสริมกำลังเป็นโครงสร้างกึ่งแข็งกึ่ง (Semi-rigid structure) ดังแสดงในรูปที่ 7

การตรวจสอบเสถียรภาพภายนอก (รูปที่ 7) ประกอบด้วยตรวจสอบการพลิกคว่ำ การเลื่อนไถล กำลังรับแรงแบกทาน และเสถียรภาพลาดดิน นอกจากเสถียรภาพภายนอกแล้ว กำแพงกันดินเสริมเส้นใยสังเคราะห์ต้องมีเสถียรภาพภายใน กล่าวคือ วัสดุเส้นใยสังเคราะห์ต้องมีกำลังต้านทานการฉีกขาด (Rupture resistance) และกำลังต้านทานแรงเฉด (Pullout resistance) เพียงพอ (รูปที่ 8)





รูปที่ 7 เสถียรภาพภายนอกของกำแพงกันดินเสริมกำลัง



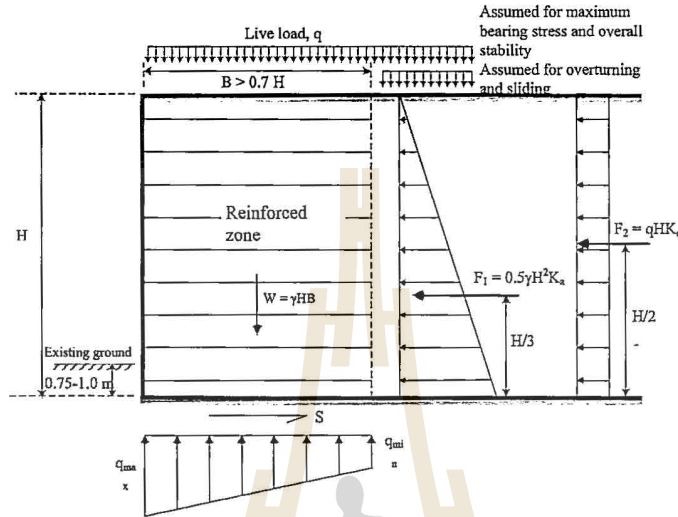
รูปที่ 8 เสถียรภาพภายในของกำแพงกันดินเสริมกำลัง

#### 4.1 การตรวจสอบเสถียรภาพภายนอก

วิธีการออกแบบกำแพงกันดินเสริมเส้นใยสังเคราะห์ด้านการวิบัติภายนอกโดยทั่วไป คือการสมมติขนาดและรูปร่างของกำแพงกันดินและทำการตรวจสอบเสถียรภาพภายนอก ถ้าพบว่าเสถียรภาพภายนอกของกำแพงกันดินมีค่าต่ำหรือไม่เพียงพอ ก็ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างใหม่ และทำการตรวจสอบอีกครั้งขั้นตอนนี้จะถูกทำซ้ำๆ จนกระทั่งพบว่ากำแพงกันดินที่ออกแบบมีเสถียรภาพเพียงพอต่อการใช้งาน ความยาวของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ควรมีค่าไม่น้อยกว่า 0.7 เท่าของความสูงของกำแพงกันดิน

กำแพงกันดินจะมีเสถียรภาพภายนอก ก็ต่อเมื่อกำแพงกันดินไม่มีการเคลื่อนตัวในสามทิศทาง อันได้แก่ ในแนวนอน (การเลื่อนไถล) ในแนวตั้ง (การทรุดตัว) ที่มากเกินไป และการวิบัติเนื่องจากแรงแบกทานของดินฐานราก) และการพลิกคว่ำ การออกแบบจะเป็นการตรวจสอบเสถียรภาพของการเคลื่อนตัวใน

สามทิศทางนี้ เพื่อให้ได้อัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสม การตรวจสอบการเคลื่อนตัวในแนวนอนและการพลิกคว่ำอาศัยหลักความสถิต (Law of statics) ส่วนการตรวจสอบการเคลื่อนตัวในแนวตั้งอาศัยทฤษฎีกำลังรับแรงแบกทานของดิน (Bearing capacity theory) ในการตรวจสอบเสถียรภาพภายนอก (รูปที่ 9) ผู้ออกแบบต้องพิจารณาน้ำหนักบรรทุกจรในสองกรณี คือ 1) น้ำหนักบรรทุกจรเกิดขึ้นทั้งในโซนเสริมกำลัง (Reinforced zone) และในโซนไม่เสริมกำลัง (Unreinforced zone) และ 2) น้ำหนักบรรทุกจรเกิดขึ้นเฉพาะในโซนไม่เสริมกำลัง น้ำหนักบรรทุกจรในโซนเสริมกำลังจะช่วยเพิ่มเสถียรภาพด้านการเลื่อนไถลและการพลิกคว่ำ แต่จะลดเสถียรภาพด้านการวิบัติเนื่องจากแรงแบกทานของดินฐานราก ดังนั้น น้ำหนักบรรทุกจรในกรณีที่ 2) จะใช้ในการตรวจสอบอัตราส่วนปลอดภัยด้านการเลื่อนไถลและด้านการพลิกคว่ำ ส่วนน้ำหนักบรรทุกจรในกรณีที่ 1) จะใช้ในการตรวจสอบอัตราส่วนปลอดภัยด้านการวิบัติเนื่องจากแรงแบกทาน น้ำหนักบรรทุกจร (Live load,  $q$ ) ที่นิยมใช้กันในการออกแบบกำแพงกันดินเสริมเส้นใยสังเคราะห์ สำหรับงานทางหลวงควรมีค่าไม่น้อยกว่า 20 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร AASHTO's Standard Specifications Highway Bridge Section 5.8 แนะนำว่ากำแพงกันดินเสริมเส้นใยสังเคราะห์ต้องมีค่าอัตราส่วนปลอดภัยด้านการเลื่อนไถล การพลิกคว่ำ และการวิบัติเนื่องจากแรงแบกทานไม่น้อยกว่า 1.5, 2.0 และ 2.5 ตามลำดับ เมื่ออยู่ในสภาวะสถิต อัตราส่วนปลอดภัยด้านการเลื่อนไถล คืออัตราส่วนระหว่างแรงต้านทานการเลื่อนไถล (Sliding resistance force,  $P_h$ ) ต่อแรงที่ทำให้เกิดการเลื่อนไถล (Sliding force) แรงต้านทานการเลื่อนไถล ( $S$ ) เท่ากับผลคูณของน้ำหนักบรรทุกจรในแนวตั้ง ( $W$ ) กับสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Coefficient of friction) ระหว่างฐานของกำแพงกันดินและดินด้านใต้ฐาน สำหรับดินเม็ดหยาบและเท่ากับผลคูณของกำลังต้านทานแรงเฉือน ( $S_u$ ) กับความกว้างของกำแพงกันดิน ( $B$ ) สำหรับดินเม็ดละเอียด ส่วนแรงที่ทำให้เกิดการเลื่อนไถลจะเป็นแรงในแนวนอนเนื่องจากแรงดันด้านข้างของดินถม (Backfill) และน้ำหนักบรรทุกจร (Live load) สำหรับการพิจารณาน้ำหนักบรรทุกจรในกรณี 2) แรง



รูปที่ 9 แรงที่กระทำต่อกำแพงกันดินเสริมกำลังในสภาวะสถิต

ต้านทานการเลื่อนไถลและแรงที่กระทำให้เกิดการเลื่อนไถลสามารถหาได้

$$S = W \tan \phi \quad \text{สำหรับฐานรากที่เป็นดินเม็ดหยาบ} \quad (1)$$

$$S = S_u B \quad \text{สำหรับฐานรากที่เป็นดินเม็ดหยาบ} \quad (2)$$

$$P_h = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a + qHK_a \quad (3)$$

เมื่อ  $K_a$  คือสัมประสิทธิ์ความดันดินด้านข้างที่สภาวะ Active และ  $H$  คือความสูงของกำแพงกันดิน

อัตราส่วนปลอดภัยด้านการพลิกคว่ำหาได้จากอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ต้านทานการพลิกคว่ำ (Total righting moment,  $M_r$ ) ต่อโมเมนต์ที่ก่อให้เกิดการพลิกคว่ำ (Total overturning moment,  $M_o$ ) ที่สภาวะสมดุลและการพลิกคว่ำเริ่มเกิดพอดี แรงปฏิกริยาระหว่างดินและกำแพงกันดินจะอยู่ที่จุด Toe พอดี พิจารณาสมดุลการหมุนรอบจุด Toe (อ้างอิงรูปที่ 9) และพิจารณาน้ำหนักบรรทุกจรในกรณีที่ 2) โมเมนต์ที่ก่อให้เกิดการพลิกคว่ำ และโมเมนต์ต้านทานการพลิกคว่ำสามารถคำนวณได้จาก

$$M_o = \left( F_1 \times \frac{H}{3} \right) + \left( F_2 \times \frac{H}{2} \right) \quad (4)$$

$$M_r = W \times \frac{B}{2} \quad (5)$$

อัตราส่วนปลอดภัยด้านการวิบัติเนื่องจากแรงแบกทานของดิน หาได้จากอัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงแบกทานประลัย (Ultimate bearing capacity) ต่อความดันเฉลี่ยที่กระทำต่อฐานของกำแพงกันดิน (Average contact pressure) แรงในแนวนอนอันเนื่องจากแรงดันดินด้านข้างมักก่อให้เกิดโมเมนต์ในฐานรากของกำแพงกันดิน ซึ่งอาจส่งผลให้การกระจายความเค้นใต้ฐานรากไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 10 ในกรณีที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง ( $e$ ) มีค่าเท่ากับศูนย์ ความเค้นใต้ฐานรากจะกระจายสม่ำเสมอ (รูปที่ 10a) ความเค้นที่กระจายใต้ฐานรากจะมีความแตกต่างกันเมื่อระยะเยื้องศูนย์กลางมีค่ามากกว่าศูนย์ และจะก่อให้เกิดความเค้นมากที่สุด ( $q_{max}$ ) และน้อยที่สุด ( $q_{min}$ ) ความเค้นที่น้อยที่สุดจะมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อระยะเยื้องศูนย์กลางมีค่าเท่ากับหนึ่งในหกของความกว้างฐานราก ( $B/6$ ) (รูปที่ 10b) วิศวกรผู้ออกแบบไม่ควรออกแบบให้ระยะเยื้องศูนย์กลางมีค่ามากกว่าหนึ่งในหกของความกว้างฐานราก เนื่องจากจะเกิดการทรุดตัวอย่างมากในด้านที่เกิดความเค้นมากที่สุด (รูปที่ 10c) ดังนั้น ถ้าพบว่าระยะเยื้องศูนย์กลางมีค่ามากเกินไป ( $e > B/6$ )

ควรขยายขนาดของฐานรากโดยการเพิ่มความยาวของ  
วัสดุเสริมกำลัง

ระยะเยื้องศูนย์กลางและความดันดินใต้ฐานราก (รูปที่ 10) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6) ถึง (9) จาก  
ประสบการณ์การออกแบบ ผู้เขียนพบว่าควรทำการ  
ตรวจสอบการเสถียรภาพด้านการวิบัติของดินฐานราก  
และระยะเยื้องศูนย์กลางก่อนการตรวจสอบเสถียรภาพด้าน  
อื่น เนื่องจากเสถียรภาพด้านนี้จะเป็นตัววิกฤติที่สุด

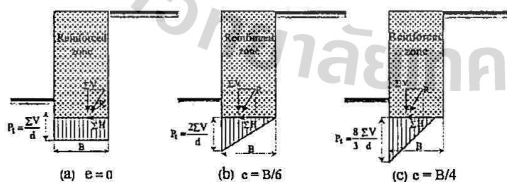
$$e = \frac{B}{2} - \left( \frac{M_r - M_o}{\sum V} \right) < \frac{B}{6} \quad (6)$$

$$q_{\max} = \left( \frac{\sum V}{B} \right) \left( 1 + \frac{6e}{B} \right) \quad (7)$$

$$q_{\min} = \left( \frac{\sum V}{B} \right) \left( 1 - \frac{6e}{B} \right) > 0 \quad (8)$$

$$q_{av} = \frac{\sum V}{(B - 2e)} < q_{all} \quad (9)$$

เมื่อ  $\sum V$  คือน้ำหนักกดทับในแนวตั้ง ซึ่งเท่ากับ  $W$   
สำหรับการพิจารณาน้ำหนักบรรทุกจรกรณี 2) และ  
เท่ากับ  $W + qB$  สำหรับการพิจารณาน้ำหนักบรรทุกจร  
กรณี 1) และ  $M_r$  มีค่าเท่ากับ  $W \times \frac{B}{2}$  สำหรับการ  
พิจารณาน้ำหนักบรรทุกจรกรณี 2) และเท่ากับ  
 $\left( W \times \frac{B}{2} \right) + \left( q \times \frac{B^2}{2} \right)$  สำหรับการพิจารณาน้ำหนัก  
บรรทุกจรกรณี 1)



รูปที่ 10 ลักษณะการกระจายความเค้นในดิน  
ใต้ฐานราก

#### 4.2 การตรวจสอบเสถียรภาพภายใน

เสถียรภาพภายในของกำแพงกันดินเสริมเส้นใย  
สังเคราะห์ประกอบด้วยเสถียรภาพด้านการฉีกขาด

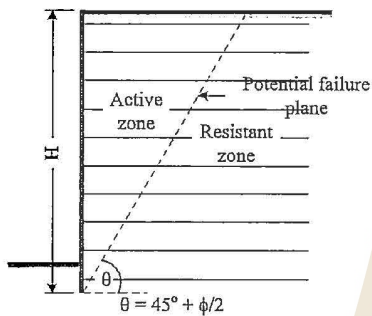
ของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ (Rupture resistance)  
และเสถียรภาพด้านการฉีกขาดวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ออก  
จากดินถม (Pullout resistance) อัตราส่วนปลอดภัย  
ด้านการฉีกขาด คืออัตราส่วนระหว่างกำลังต้านทาน  
แรงฉีกขาดของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ต่อแรงดึงที่  
เกิดขึ้นในวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ อัตราส่วนปลอดภัย  
ด้านการวิบัติเนื่องจากการฉีกขาด คืออัตราส่วน  
ระหว่างกำลังต้านทานแรงฉีกขาดของวัสดุเส้นใย  
สังเคราะห์ในโซนต้านทานการเคลื่อนตัว (หลังระนาบ  
วิบัติ) ต่อแรงฉีกสูงสุดที่กระทำให้วัสดุเส้นใย  
สังเคราะห์เคลื่อนออกจากดินถม

กำแพงกันดินเสริมเส้นใยสังเคราะห์ต้องมี  
อัตราส่วนปลอดภัยด้านการฉีกขาดไม่น้อยกว่า 2.0  
และอัตราส่วนปลอดภัยด้านการวิบัติเนื่องจากการฉีก  
ขาดไม่น้อยกว่า 1.5 ในสภาวะสถิต [2] หัวข้อต่อไปนี้จะ  
กล่าวถึงวิธีการประมาณตำแหน่งของแรงดึงสูงสุด  
(ระนาบวิบัติ) แรงดึงสูงสุดและแรงฉีกสูงสุดที่จะ  
เกิดขึ้นในวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ กำลังต้านทานแรงฉีก  
ขาด และกำลังต้านทานแรงฉีก เพื่อใช้ในการ  
ตรวจสอบเสถียรภาพภายใน AASHTO (2002)  
แนะนำว่าความยาวของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ในโซน  
ด้านการเคลื่อนตัว (Resistant zone) ควรมีความยาว  
ไม่น้อยกว่า 900 มิลลิเมตร และความยาวของวัสดุเส้นใย  
สังเคราะห์ทั้งหมดไม่ควรน้อยกว่า 2.4 เมตร

#### 4.2.1 ตำแหน่งของแรงดึงสูงสุดและระนาบ วิบัติในดินเสริมกำลัง

มวลดินเสริมกำลังถูกแบ่งออกเป็นสองโซน ได้แก่  
โซนเคลื่อนตัว (Active zone) และโซนต้านทาน  
การเคลื่อนตัว (Resistant zone) มวลดินในโซนเคลื่อน  
ตัวพยายามเคลื่อนตัวออกจากกำแพงกันดิน แต่จะถูก  
ต้านด้วยกำลังต้านทานแรงฉีกที่เกิดขึ้นตลอดแนวของ  
วัสดุเส้นใยสังเคราะห์ ดังนั้น แรงฉีกที่เกิดขึ้นในวัสดุ  
เส้นใยสังเคราะห์จะมีทิศทางพุ่งเข้าสู่ Facing ในขณะที่  
แรงต้านทานการฉีกขาดของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ใน  
โซนต้านทานการเคลื่อนตัว (Resistant zone) จะมี  
ทิศทางพุ่งออกจาก Facing แรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นใน  
วัสดุเส้นใยสังเคราะห์จะเกิดขึ้นที่จุดเปลี่ยนโซนจาก  
โซนเคลื่อนตัว (Active zone) เป็นโซนต้านทาน  
การเคลื่อนตัว (Resistant zone) จุดเชื่อมต่อระหว่างแรง

ดึงสูงสุดในวัสดุเส้นใยสังเคราะห์จะเป็นระนาบวิบัติของกำแพงกันดินเสริมวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ด้วยระนาบวิบัตินี้สามารถประมาณได้จาก Tie-back theory ซึ่งมีลักษณะเป็นแนวเส้นตรงทำมุม  $45 + \phi/2$  องศา (ดังแสดงในรูปที่ 11) เมื่อ  $\phi$  คือมุมเสียดทานภายในของดินถมในโซนเสริมกำลัง



Tie-back structure theory

รูปที่ 11 ระนาบการวิบัติในดินเสริมกำลัง

#### 4.2.2 แรงดึงสูงสุดในวัสดุเส้นใยสังเคราะห์

ในกรณีที่กำลังต้านทานแรงจุดในโซนด้านการเคลื่อนตัวมีค่าสูงมากพอ (วัสดุเส้นใยสังเคราะห์อยู่ในสถานะสมดุล) แรงจุดที่เกิดขึ้นจะเท่ากับแรงดึงที่เกิดขึ้นในวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ ซึ่งจะสมดุลกับความดันดินด้านข้างที่เกิดขึ้นในโซนเสริมกำลัง (Reinforced zone) ความดันดินด้านข้างที่กระทำต่อวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ในแต่ละชั้นจะเท่ากับความเค้นในแนวตั้งคูณด้วยสัมประสิทธิ์ความดันดินด้านข้าง (สถานะอยู่นิ่งหรือ Active) สำหรับวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ การเคลื่อนตัวด้านข้างจะเกิดขึ้นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณด้านบนของกำแพงกันดินส่งผลให้ความดันดินด้านข้างในวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ทุกชั้นอยู่ในสถานะ Active ดังนั้น แรงดึงและแรงจุดสูงสุดที่เกิดขึ้นในวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ประมาณได้จาก

$$T = K_o \sigma_v S_h S_v \quad (10)$$

เมื่อ  $K_o$  คือสัมประสิทธิ์ความดันดินด้านข้างในสถานะ Active ซึ่งเท่ากับ  $\tan^2(45 - \phi/2)$  และ  $S_h$  และ  $S_v$  คือระยะห่างระหว่างวัสดุเสริมกำลังในแนวนอนและแนวตั้ง ตามลำดับ

#### 4.2.3 กำลังต้านทานการฉีกขาด (Rupture Resistance)

กำลังต้านทานการฉีกขาดของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ที่อายุการใช้งานใดๆ สามารถประมาณได้ตามมาตรฐานสำนักงานทางหลวงแห่งรัฐบาลกลางสหรัฐ (FHWA) มาตรฐานของประเทศอังกฤษ (BS8006: 1995) และมาตรฐานของออสเตรเลีย ดังนี้

$$T_d = \frac{T_c}{FS_c \times FS_d \times FS_e \times FS_m} \quad (11)$$

เมื่อ  $T_d$  คือกำลังต้านทานการฉีกขาดของวัสดุที่อายุใช้งาน

$T_c$  คือกำลังต้านทานการฉีกขาดของวัสดุ (หลังการผลิต)

$FS_c$  คือแฟคเตอร์ความเค้น

$FS_d$  คือแฟคเตอร์ความเสียหายที่เกิดระหว่างการก่อสร้าง

$FS_e$  คือแฟคเตอร์สภาพแวดล้อม

$FS_m$  คือแฟคเตอร์มาตรฐานการผลิต

การประมาณแฟคเตอร์ความเค้นจำเป็นต้องทราบอิทธิพลของความเค้นต่อกำลังต้านทานการฉีกขาดของวัสดุเสริมกำลังที่อายุการใช้งาน สมมติว่าวัสดุเส้นใยสังเคราะห์มีค่ากำลังรับแรงดึงลดลงเหลือร้อยละ 67 หลังการใช้งานแล้ว 120 ปี แสดงว่าแฟคเตอร์ความเค้นมีค่าเท่ากับ 1.5 (1.00/0.67)

แฟคเตอร์ความเสียหายที่เกิดระหว่างการก่อสร้างเกี่ยวข้องกับการสูญเสียกำลังเนื่องจากความเสียหายของวัสดุเสริมกำลังเมื่อมีการบดอัดดินระหว่างการติดตั้ง ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ ลักษณะของดินถมบดอัดและพลังงานการบดอัด ค่าแฟคเตอร์นี้หาได้จากผลทดสอบในสนาม แฟคเตอร์นี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของเม็ดดินเนื่องจากดินเม็ดหยาบมีแนวโน้มที่จะทำความเสียหายกับวัสดุเสริมกำลังมากกว่าดินเม็ดละเอียดและมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานแรงดึง

แฟคเตอร์สภาพแวดล้อมเกี่ยวข้องกับความทนทานของวัสดุเสริมกำลังเส้นใยต่อสภาพทางเคมีและชีวภาพ แฟคเตอร์นี้ขึ้นอยู่กับค่า pH ของดิน



แฟกเตอร์มาตรฐานการผลิตเกี่ยวข้องกับความไม่สม่ำเสมอของเส้นใยในขบวนการผลิต บริษัทที่ได้รับมาตรฐานคุณภาพผลิตภัณฑ์ ISO 9001:2000 และมาตรฐานควบคุมการผลิต ISO/IEC 17025 สามารถ

ใช้ค่าแฟกเตอร์นี้เท่ากับ 1.0 ได้ ตารางที่ 2 และ 3 ตัวอย่างข้อมูลด้านเทคนิคของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์เพื่อใช้ประกอบความเข้าใจและประกอบการออกแบบ

ตารางที่ 2 แฟกเตอร์เนื่องจากความเสียหายที่เกิดระหว่างการก่อสร้าง

ขนาดเม็ดดิน	PEC35	PEC50	PEC75	PEC100	PEC150	PEC200
ทราย/ดินตะกอน/ดินเหนียวที่มีขนาดเล็กกว่า 6 มม.	1.05	1.02	1.00	1.00	1.00	1.00
กรวดและหินคลุกที่มีขนาดใหญ่กว่า 60 มม.	1.33	1.25	1.19	1.14	1.09	1.05

ตารางที่ 3 ตัวอย่างข้อมูลด้านเทคนิคของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์

Property	PEC 35	PEC 50	PEC 75	PEC 100	PEC 150	PEC 200	PEC 35/35	PEC 50/50	PEC 75/75	PEC 100/100
Characteristic short term tensile strength MD (kN/m)	35	50	75	100	150	200	35	50	75	100
Characteristic short term tensile strength CD (kN/m)	14	14	14	14	14	14	35	50	75	100
Strain at short term strength MD (%)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Partial factor –creep rupture at 120 years design life	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55
Creep limited strength at 120 years design life(kN/m)	22.6	32.3	48.4	64.5	96.8	129.0	22.6	32.3	48.4	64.5
Partial factor-construction damage in clay, silt or sand	1.05	1.02	1.00	1.00	1.00	1.00	1.05	1.02	1.00	1.00
Partial factor-environmental effects soil environment, pH<11 at 120 years design life	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
Long term design strengths at 120 years design life in clay, silt or sand(kN/m)	19.6	28.8	44.0	58.7	88.0	117.3	19.6	28.8	44.0	58.7
Water flow rate normal to the plane(mm/s) ISO 11058	65	65	65	65	65	65	50	50	50	50
Water flow rate the plane 20kPa (10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> /s) ISO 12958(l/mh)	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
National mass ISO 9864(g/m <sup>2</sup> )	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
	265	295	335	390	445	530	360	370	475	550

#### 4.2.4 กำลังต้านทานแรงฉุด (Pullout resistance) ของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์

กำลังต้านทานแรงฉุดของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์เกิดจากความเสียดทานระหว่างวัสดุเส้นใยสังเคราะห์และดินถมเป็นหลัก ดังนั้น กำลังต้านทานแรงฉุดต่อความกว้างหนึ่งหน่วยจึงสามารถคำนวณได้จาก

$$P_f = 2\sigma_v \tan\left(\frac{2}{3}\phi\right)L_e \quad (12)$$

นอกจากการคำนวณกำลังต้านทานแรงฉุดแล้วผู้ออกแบบจำเป็นต้องคำนวณหาความยาวส่วนคลุมกลับของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์เพื่อใช้เป็น Facing ของโครงสร้างกันดิน ซึ่งเรียกว่า "Overlap,  $L_0$ " ค่า Overlap นี้สามารถคำนวณได้โดยสมมติว่าความดันดินในแนวนอนมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของความดันดินในแนวนอนทั้งหมด ดังนั้น

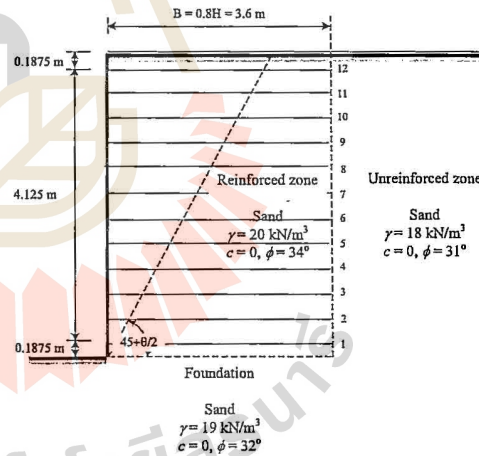
$$L_0 = \frac{(0.5\sigma_h)(\Delta z)(FS)}{2\left[c + \sigma_v \tan\left(\frac{2}{3}\phi\right)\right]} \quad (13)$$

เมื่อ  $\Delta z$  คือระยะห่างระหว่างวัสดุเสริมกำลังในแนวตั้ง  $FS$  คืออัตราส่วนปลอดภัย ซึ่งควรมีค่าไม่น้อยกว่า 1.5 ความยาว Overlap นี้ควรมีค่าไม่น้อยกว่า 1.0 ถึง 1.5 เมตร เนื่องจากการบดอัดดินด้านหน้ากำแพงอาจมีประสิทธิภาพต่ำ (ทำการบดอัดได้ยาก) ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของ Facing ที่มาก ส่งผลให้วัสดุเสริมกำลังในส่วนของ Overlap เกิดการเคลื่อนตัวออก

#### 5. ตัวอย่างการออกแบบกำแพงกันดินเสริมวัสดุเส้นใยสังเคราะห์

ตัวอย่างการออกแบบกำแพงกันดินเสริมวัสดุเส้นใยสังเคราะห์สูง 4.5 เมตร แสดงดังรูปที่ 12 วัสดุเสริมเส้นใยสังเคราะห์มีกำลังต้านทานแรงดึงเท่ากับ 50 กิโลนิวตันต่อเมตร (PEC50) ระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าระดับฐานของกำแพงกันดินมาก กำหนดให้คุณสมบัติของดินฐานรากและดินถมเป็นดังนี้

- ฐานราก: ดินทราย ที่มีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 19 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร และมุมเสียดทานภายในเท่ากับ 32 องศา
  - ดินถมในโซนเสริมกำลัง: ดินทราย ที่มีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 20 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร และมุมเสียดทานภายในเท่ากับ 34 องศา
  - ดินถมในโซนไม่เสริมกำลัง: ดินทราย ที่มีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 18 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร และมุมเสียดทานภายในเท่ากับ 31 องศา
  - น้ำหนักบรรทุกจรเท่ากับ 20 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร
- สมมติให้กำแพงกันดินเสริมวัสดุเส้นใยสังเคราะห์มีความกว้างเท่ากับ 0.8 เท่าของความสูง เท่ากับ 3.6 เมตร และการจัดวางวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ในแนวตั้งแสดงดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความดันดินด้านข้างกับ

#### แรงที่กระทำต่อบล็อกดินเสริมกำลัง

สัมประสิทธิ์ความดันดินด้านข้าง

$$K_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)$$

$$K_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{31^\circ}{2}\right) = 0.32$$

แรงดันดินด้านข้างเนื่องจากน้ำหนักของดินถม

$$P_{h1} = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2$$

$$P_{h1} = \frac{1}{2} \times 0.32 \times 18 \times 4.5^2 = 58.3 \text{ กิโลนิวตันต่อเมตร}$$

แรงดันดินด้านข้างเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกจร

$$P_{h2} = K_q q H$$

$$P_{h2} = 0.32 \times 20 \times 4.5 = 28.8 \text{ กิโลนิวตันต่อเมตร}$$

โมเมนต์ที่ทำให้เกิดการพลิกคว่ำเนื่องจากน้ำหนักดินถม

$$M_{o1} = F_1 \frac{H}{3}$$

$$M_{o1} = 58.3 \times \frac{4.5}{3} = 87.5 \text{ กิโลนิวตัน-เมตรต่อเมตร}$$

โมเมนต์ที่ก่อให้เกิดการพลิกคว่ำเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกจร

$$M_{o2} = F_2 \frac{H}{2}$$

$$M_{o2} = 28.8 \times \frac{4.5}{2} = 64.8 \text{ กิโลนิวตัน-เมตรต่อเมตร}$$

น้ำหนักของดินถมในโซนเสริมกำลัง

$$W = \gamma H B$$

$$W = 20.0 \times 4.5 \times 3.6 = 324.0 \text{ กิโลนิวตันต่อเมตร}$$

โมเมนต์ด้านเนื่องจากน้ำหนักดินถมในโซนเสริมกำลัง

$$M_{r1} = W \frac{B}{2}$$

$$M_{r1} = 324.0 \times \frac{3.6}{2} = 583.2 \text{ กิโลนิวตัน-เมตรต่อเมตร}$$

โมเมนต์ด้านเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกจรในโซนเสริมกำลัง

$$M_{r2} = q \frac{B^2}{2}$$

$$M_{r2} = 20.0 \times \frac{3.6^2}{2} = 129.6 \text{ กิโลนิวตัน-เมตรต่อเมตร}$$

ตรวจสอบเสถียรภาพภายนอก

- กรณีไม่พิจารณาน้ำหนักบรรทุกทุกจรในโซนเสริมกำลัง  
ระยะเอียงศูนย์

$$e = \frac{B}{2} - \frac{(M_{r1} - M_{o1} - M_{o2})}{W}$$

$$e = \frac{3.6}{2} - \frac{(583.2 - 87.5 - 64.8)}{324.0}$$

$$e = 0.47 < \frac{B}{6} = \frac{3.6}{6} = 0.6 \quad \text{O.K.}$$

ความเค้นเฉลี่ยใต้ฐานราก

$$q_{av} = \frac{W}{(B - 2e)}$$

$$q_{av} = \frac{324.0}{(3.6 - 2 \times 0.47)} = 121.8 \text{ กิโลปาสกาล}$$

กำลังรับแรงแบกทาน

$$q_{ult} = \frac{1}{2} \gamma (B - 2e) N_\gamma$$

$$N_\gamma = \exp(\pi \tan \phi) \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)$$

$$N_\gamma = \exp(\pi \tan 32^\circ) \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{32^\circ}{2} \right) = 23.2$$

$$N_\gamma = (N_q - 1) \tan(1.4\phi)$$

$$N_\gamma = (23.2 - 1) \tan(1.4 \times 32^\circ) = 22.0$$

$$q_{ult} = \frac{1}{2} \times 19.0 \times (3.6 - 2 \times 0.47) \times 22.0 = 555.9$$

$$q_{ult} = 555.9 \text{ กิโลปาสกาล}$$

เสถียรภาพด้านการวิบัติจากแรงแบกทาน

$$FS_b = \frac{555.9}{121.8} = 4.6 > 2.5 \quad \text{O.K.}$$

เสถียรภาพด้านการลื่นไถล

$$FS_s = \frac{W \tan \phi}{F_1 + F_2}$$

$$FS_s = \frac{324.0 \tan 32^\circ}{(58.3 + 28.8)} = 2.3 > 1.5 \quad \text{O.K.}$$

เสถียรภาพด้านการพลิกคว่ำ

$$FS_o = \frac{M_{r1}}{M_{o1} + M_{o2}}$$

$$FS_o = \frac{583.2}{(87.5 + 64.8)} = 3.8 > 2.0 \quad \text{O.K.}$$

กรณีพิจารณาน้ำหนักบรรทุกทุกจรในโซนเสริมกำลัง

ระยะเอียงศูนย์

$$e = \frac{B}{2} - \frac{(M_{r1} + M_{r2} - M_{o1} - M_{o2})}{W + qB}$$

$$e = \frac{3.6}{2} - \frac{(583.2 + 129.6 - 87.5 - 64.8)}{324.0 + (20.0 \times 3.6)}$$

$$e = 0.38 < \left[ \frac{B}{6} = \frac{3.6}{6} = 0.6 \right] \quad \text{O.K.}$$

ความเค้นเฉลี่ยใต้ฐานราก

$$q_{av} = \frac{W + qB}{(B - 2e)}$$

$$q_{av} = \frac{324.0 + (20.0 \times 3.6)}{(3.6 - 2 \times 0.38)} = 139.4 \text{ กิโลปาสกาล}$$

กำลังรับแรงแบกทาน

$$q_{ult} = \frac{1}{2} \gamma (B - 2e) N_\gamma$$

$$N_\gamma = \exp(\pi \tan 32^\circ) \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{32^\circ}{2} \right) = 23.2$$

$$N_\gamma = (23.2 - 1) \tan(1.4 \times 32^\circ) = 22.0$$

$$q_{ult} = \frac{1}{2} \times 19.0 \times (3.6 - 2 \times 0.38) \times 22.0 = 593.6$$

$$q_{ult} = 593.6 \text{ กิโลปาสกาล}$$

เสถียรภาพด้านการวิบัติจากแรงแบกทาน

$$FS_b = \frac{q_{ult}}{q_{av}}$$

$$FS_b = \frac{593.6}{139.4} = 4.3 > 2.5 \quad \text{O.K.}$$

เสถียรภาพด้านการเลื่อนไถล

$$FS_s = \frac{(W + qB) \tan \phi}{F_1 + F_2}$$

$$FS_s = \frac{[324.0 + (20.0 \times 3.6)] \tan 32^\circ}{(58.3 + 28.8)} = 2.8 > 1.5$$

$$FS_s = 2.8 > 1.5$$

O.K.

เสถียรภาพด้านการพลิกคว่ำ

$$FS_o = \frac{M_{r1} + M_{r2}}{M_{o1} + M_{o2}}$$

$$FS_o = \frac{583.2 + 129.6}{(87.5 + 64.8)} = 4.7 > 2.0 \quad \text{O.K.}$$

ตรวจสอบเสถียรภาพภายใน

กำลังต้านทานแรงดึงที่อายุใช้งาน 120 ปี เท่ากับ  
28.8 กิโลนิวตันต่อเมตร สำหรับ PEC50 (ตารางที่ 3)

- ตรวจสอบเสถียรภาพด้านการฉีกขาด

แรงดึงสูงสุดสำหรับ PEC50 ระดับที่ 1

$$T = \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{34^\circ}{2} \right) \times [(20.0 \times 4.3125) + (20.0)] \times 0.375$$

$$T = 11.264 \text{ กิโลนิวตันต่อเมตร}$$

อัตราส่วนปลอดภัยด้านการฉีกขาด

$$FS = \frac{28.8}{11.264} = 2.56 > 2.0 \quad \text{O.K.}$$

- ตรวจสอบเสถียรภาพด้านการดูดและระยะพักกลับ  
แรงดึงในวัสดุเสริมกำลังระดับที่ 12

$$T = \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{34^\circ}{2} \right) \times [(20.0 \times 0.1875) + (20.0)] \times 0.375$$

$$T = 2.52 \text{ กิโลนิวตันต่อเมตร}$$

$$P_f = 2\sigma_v \tan \left( \frac{2}{3} \phi \right) L_e$$

$$P_f = 2(20 \times 0.1875 + 20) \tan \left( \frac{2}{3} \times 34 \right) \times 1.31$$

$$P_f = 25.97 \text{ กิโลนิวตันต่อเมตร}$$

$$FS = \frac{25.97}{2.52} = 10.314 > 1.5 \quad \text{O.K.}$$

ระยะพักกลับ

$$L_0 = \frac{(0.5\sigma_h)(\Delta z)(FS)}{2 \left[ c + \sigma_v \tan \left( \frac{2}{3} \phi \right) \right]}$$

$$\text{เมื่อ } FS = 1.5$$

$$L_0 = \frac{0.375T}{c + \sigma_v \tan \left( \frac{2}{3} \phi \right)}$$

$$L_0 = \frac{0.375 \times 2.518}{(20 \times 0.1875 + 20) \tan \left( \frac{2}{3} \times 34 \right)}$$

$$L_0 = 0.095 \text{ m} \text{ ดังนั้น เลือก } L_0 = 1.50 \text{ m}$$

## 6. สรุป

บทความนี้นำเสนอทฤษฎีและการออกแบบของ  
กำแพงกันดินเสริมวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ วัสดุเส้นใย  
สังเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ เส้นใยแบบถัก  
(Woven fabric) และเส้นใยแบบไม่ถัก (Non-woven  
fabric) การคำนวณออกแบบประกอบด้วย  
ตรวจสอบเสถียรภาพภายนอกและเสถียรภาพภายใน  
เสถียรภาพภายนอกประกอบด้วย การเลื่อนไถล การพลิก  
คว่ำ กำลังรับแรงแบกทาน และเสถียรภาพลาดดิน  
เสถียรภาพภายในประกอบด้วย การฉีกขาดและการดูด  
ออกของวัสดุสังเคราะห์ ตัวอย่างการคำนวณที่แสดง  
ในตอนท้ายของบทความสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการ  
การออกแบบกำแพงกันดินที่ใช้วัสดุเส้นใยสังเคราะห์ที่  
มีกำลังต้านทานแรงดึงและระดับความสูงต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

[1] AASHTO. Standard specifications for  
highway and bridge. firsted. American  
Association of State Highway and



- Transportation Officials, Washington D.C., 1996.
- [2] AASHTO. Standard specifications for highway and bridge. seventh ed. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., 2002.
- [3] Anderson, L.R., Sharp, K.D., Woodward, B.L., and Winward, R.F., "Performance of the Rainier Avenue welded wire retaining wall", Seattle, Washington, Report submitted to the Hilfiker Co. and Washington State Department of Transportation, USA, 1985
- [4] Anderson, L.R., Sharp, K.D., and Harding, O.T., "Performance of 50-foot high welded wire wall", Soil Improvement – A Ten Year Update, Geotechnical Special Publication No.12, ASCE, pp.280-308, 1987.
- [5] Christopher, B., Gill, S., Giroud, J.P., Juran, I., Schlosser, F., Mitchell, J.K., and Dunicliff, J., "Reinforced soil structure", Volume 1: Design and Construction Guideline, Report Prepared for U.S. Federal Highway Administration, 287p, 1990.
- [6] Gulhati, S.K., and Datta, M., Geotechnical Engineering. McGraw-Hill, 738p, 2005.
- [7] Juran, I., and Christopher, B., "Laboratory model study on geosynthetic reinforced soil retaining wall", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.115, No.7, pp.905-926, 1989.
- [8] Lee, K.L., Adams, B.D., and Vagneron, J.J., "Reinforced earth retaining walls", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.99, No.SM10, 1973.
- [9] Mitchell, J.K. and Villet, W.C.B., "Reinforcement of earth slopes and embankments", National Cooperative Highway Research Program Report 290, Trans. Research Board, National Research Council, Washington, D.C., USA, 1987

## การบรรเทาการกัดเซาะลาดดินโดยใช้วัสดุสังเคราะห์ผสมผสานการปลูกพืชคลุมดิน Mitigation Measure for Soil Slope Erosion using combination of Geosynthetic Materials and Plant Covering

รองศาสตราจารย์ ดร.พานิช วุฒิพฤษภูมิ<sup>1\*</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สยาม แกมขุนทด<sup>2</sup>  
และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยรัตน์ อีระวัฒน์สุข<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ

<sup>3</sup> ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ

E-mail: <sup>1</sup>pnv@kmutnb.ac.th, <sup>2</sup>sayamkam@kmutnb.ac.th

### บทคัดย่อ

จากสภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเกิดพายุฝนที่รุนแรง ก่อให้เกิดการตัดไม้ทำลายป่าทำให้ลาดดินตามธรรมชาติไร้สิ่งปกคลุม กระแสที่ไหลแรงกัดเซาะลาดดิน กระทั่งไร้เสถียรภาพและไหลเลื่อนลงมาเป็นมวลขนาดใหญ่ปกคลุมแผ่นดินเบื้องล่าง สร้างความเสียหายแก่ชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนในที่สุด บทความนี้นำเสนอการบรรเทาการกัดเซาะลาดดินโดยวัสดุสังเคราะห์ ซึ่งมีรูปแบบแตกต่างกัน ทั้งผลิตจากวัสดุตามธรรมชาติ หรือวัสดุสังเคราะห์ตามกระบวนการทางเคมี หรือนำมาผสมผสานร่วมกัน วัสดุที่นำมาใช้เหล่านี้เสื่อมสลายไปตามกาล ดังนั้นการบรรเทาการกัดเซาะลาดดินจะไม่บังเกิดผลหากไม่ได้รับความร่วมมือจากธรรมชาติ หรือพืชปกคลุมดินประจำถิ่นซึ่งต้องแสดงบทบาทนำในที่สุด

คำสำคัญ: การกัดเซาะ ลาดดิน วัสดุสังเคราะห์

### Abstract

Nowadays, global warming causes the climate change and severe rainstorm. Deforestation destroys natural soil covering. Heavy rainfall with stream flow erodes the bear soil until instability is reached thereby the soil mass move downward and cover the fertile land far beyond and damage to life and property of the people as a consequence. This paper presents the mitigation of soil erosion using natural fiber,

synthetic materials or a combination of them. However, these materials decay with time. Therefore, soil erosion will not come to fruition without the kindly cooperation of nature. Original species of grass or plant which grow afterward must be a real slope protection leader.

Keywords: soil erosion, soil slope, synthetic materials

### 1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เทือกเขาหรือที่ราบสูงซึ่งเกิดจากการขยับตัวของเปลือกโลกรวมทั้งลาดดินที่มนุษย์สร้างขึ้นเช่นลาดดินตัดและคันทาง อาจสึกกร่อนลงได้จากกระบวนการกัดเซาะผิวหน้าซึ่งมักเกิดจากการกระทำของน้ำฝนทำให้ทรัพยากรดินเสื่อมโทรมลง เพราะเมื่อน้ำไหลผ่านผิวหน้าดินจะนำเอามวลดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่อการเกษตรกรรมไหลลงตามกระแสน้ำและไปตกค้างอยู่ตามแหล่งน้ำธรรมชาติ หรืออ่างเก็บน้ำเพื่อการเกษตรกรรมทำให้ดินแข็ง บางครั้งทำให้อัตราส่วนปลดปล่อยของลาดดินลดต่ำลงจนกระทั่งเกิดการพังทลายของลาดดิน และส่งผลเสียต่อพื้นที่เกษตรกรรม ทำให้ผลผลิตทางการเกษตรลดลง นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อปริมาณเก็บกักน้ำในอ่างเก็บน้ำซึ่งดินแข็งเนื่องจากปริมาณตะกอนดินสะสมเพิ่มมากขึ้นทุกปี การป้องกันการกัดเซาะหน้าดินโดยใช้วัสดุสังเคราะห์ ผสมผสานกับการปลูกพืชคลุมดินเป็นวิธีการหนึ่งที่บรรเทาการกัดเซาะได้เป็นอย่างดี

การกัดเซาะผิวดินเกิดจากการหลุดลอกของชั้นผิวดินเนื่องจาก ลม น้ำ หรือน้ำแข็ง เริ่มต้นจากการกระแทก (impact) การลาก (drag) หรือแรงดึงลาก (tractive force) ที่กระทำต่ออนุภาคดินบริเวณพื้นผิวดิน เมื่อฝนตก หยาดฝนจะกระแทกลงบนพื้นดินที่ว่างเปล่าหรือถูกไถคราดทิ้งไว้ จากนั้นจะขับเคลื่อนเม็ดดินไปไกลจากจุดเดิม เมื่อฝนตกหนักมากและนานขึ้น ปริมาณน้ำจะรวมกันเป็นสายธารขนาดเล็กซึ่งอาจกัดเซาะเกิดเป็นร่องริ้ว (rill) เมื่อริ้วเหล่านี้รวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นกลายเป็นร่องลึก (gully) ที่มีความซับซ้อนและมีอำนาจในการทำลายเมื่อเกิดขึ้นแล้วมีอาจหยุดยั้งได้โดยเฉพาะพื้นผิวดินที่ว่างเปล่ามีความเปราะบางต่อการถูกกัดเซาะในทุกรูปแบบ ตารางที่ 1 แสดงลักษณะเด่นของกระบวนการกัดกร่อน น้ำฝนและพืชเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการกัดเซาะ การกัดเซาะโดยฝนถูกควบคุมโดยประเภทของดิน สภาพอากาศ ภูมิประเทศรวมทั้งความชื้นและช่วงเวลาการเกิดฝนตก ความหยาบของผิวดิน ความยาวและความลาดชันของลาดดิน ประเภทและขอบเขตของพืชที่ปกคลุมดิน ปัจจัยเหล่านี้รวมอยู่ในสมการการสูญเสียดินทั่วไป [1]

### 1.1 ธรรมชาติการกัดเซาะผิวดิน

ตัวกลางการกัดเซาะที่สำคัญคือน้ำ ลมและน้ำแข็ง ตัวกลางเหล่านี้สามารถกัดเซาะและเคลื่อนย้ายอนุภาคดินจากการไหลผ่าน การกระแทกหรือหลุดออกจากผิวดิน ตัวกลางแต่ละชนิดสามารถกัดกร่อนในลักษณะแตกต่างกัน ตัวอย่างเช่นการกัดเซาะโดยน้ำฝนเกิดใน เมื่อหยาดฝนตกลงมาสู่ดินจะทำลายโครงสร้างดินทำให้เม็ดดินกระจาย น้ำที่ไหลบ่าลงมาตามลาดดินทำให้เกิดร่องริ้ว นำไปสู่การเกิดช่องธารน้ำไหลในที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 1

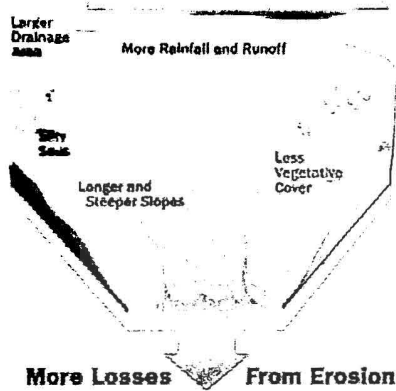
ปัจจัยที่ทำให้เกิดการกัดเซาะรุนแรงได้แก่ ฝนที่ตกหนัก ลาดดินสูงชัน การตัดไม้ทำลายป่า และดินในบริเวณนั้นเป็นดินที่ถูกกัดเซาะได้ง่ายดังแสดงในรูปที่ 2 ในทางตรงข้ามบริเวณที่มีปริมาณฝนต่ำ ลาดดินไม่สูงชันมากนัก และยังคงมีพืชปกคลุมหนาแน่นและดินบริเวณนั้นมีความเชื่อมั่น การกัดเซาะลาดดินย่อมต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 3

ตารางที่ 1 ลักษณะเด่นของการกัดเซาะบริเวณผิวดิน

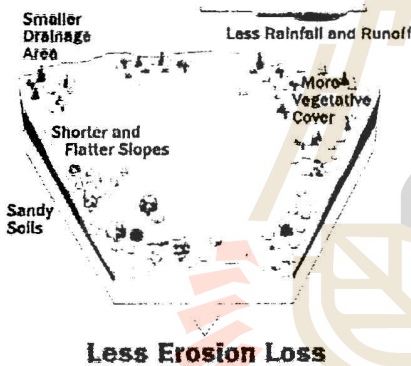
การกัดเซาะผิวดิน	
กระบวนการ	การหลุดลอก และนำพาอนุภาคดิน
แบบจำลองทางกายภาพหรือแบบจำลองการทำนาย	สมการการสูญเสียดินทั่วไป $A=R*K*L*S*C$ เมื่อ A = ค่าการสูญเสียดิน R = แฟกเตอร์ฝนตก K = ค่าความสามารถกัดเซาะได้ L = ปัจจัยความยาวของลาดดิน S = แฟกเตอร์ความลาดชัน C = แฟกเตอร์พืชที่ปกคลุม
คุณสมบัติดินที่สำคัญ	ความสามารถกัดเซาะได้ $K = f(D_{50}, Cu, \% org.)$
บทบาทของพืชปกคลุม	สกัดการไหลของน้ำ หยุดยั้งการไหล หน่วงเหนี่ยวการไหล ดูดซับน้ำ
พืชที่มีประสิทธิภาพสูงสุด	หญ้าและพืชที่ไม่ใช่หญ้าซึ่งขึ้นอย่างหนาแน่น พืชใบคลุมดินที่มีระบบรากเป็นตาข่ายประสานกันใกล้ผิวดิน



รูปที่ 1 ลักษณะการกัดเซาะจากหยาดฝน



รูปที่ 2 การสูญเสียเนื่องจากการกัดเซาะในปริมาณสูง



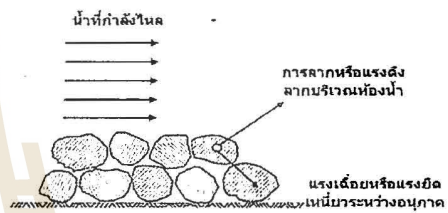
รูปที่ 3 การสูญเสียเนื่องจากการกัดเซาะในปริมาณลดลง

### 1.2 กลไกการกัดเซาะ

การป้องกันและควบคุมการกัดเซาะขึ้นอยู่กับความเข้าใจกลไกของกระบวนการกัดเซาะ การกัดเซาะประกอบด้วยกระบวนการพื้นฐานสองกระบวนการคือ (1) การหลุดออกของเม็ดดิน และ (2) การเคลื่อนย้ายของเม็ดดิน แรงที่กระทำต่ออนุภาคดินบริเวณผิวสัมผัสแสดงในรูปที่ 4 แรงดึงลากเนื่องจากน้ำที่พัดผ่านถูกต้านทานโดยมุมเสียดทานภายในหรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน โดยแรงดึงลากนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วและปริมาณการไหลรวมทั้งรูปร่างและความหยาบของเม็ดดิน ส่วนแรงต้านทานจะขึ้นอยู่กับสมบัติพื้นฐานของดิน โครงสร้างของดิน

และปฏิสัมพันธ์ทางฟิสิกส์เคมีที่เกิดขึ้น การป้องกัน การกัดเซาะประกอบด้วย

- (1) ลดแรงดึงลากโดยลดความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านผิวดินโดยกระจายพลังงานของน้ำไปในพื้นที่ป้องกัน
- (2) เพิ่มความต้านทานการกัดเซาะด้วยการเสริมความแข็งแรงแก่ผิวดินบริเวณนั้นโดยการเพิ่มการเชื่อมยึดระหว่างเม็ดดิน



รูปที่ 4 แผนภาพแสดงการกระทำของแรงต่ออนุภาคดินบริเวณท้องน้ำ

### 1.3 สาเหตุการกัดเซาะ

ปัจจัยพื้นฐานที่ควบคุมการกัดเซาะของฝนมี่ 4 ประการคือ

- (1) สภาพอากาศหมายถึงช่วงเวลาและความถี่ในการเกิดพายุ
- (2) ประเภทของดินหมายถึงความสามารถในการถูกกัดเซาะได้ง่าย
- (3) สภาพภูมิประเทศหมายถึงความยาวและความลาดชันของลาดดิน
- (4) พื้นที่ปกคลุม หมายถึง ประเภทและขอบเขตพืชที่ขึ้นปกคลุม

พารามิเตอร์เกี่ยวกับอากาศที่สำคัญที่สุดต่อควบคุมการกัดเซาะเนื่องจากฝนมี่คือความเข้มและช่วงเวลาการเกิดฝนมี่ [5] ได้แสดงให้เห็นว่าพายุฝนมี่ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดการกัดเซาะคือผลคูณระหว่างพลังงานฝนมี่ตกกับความเข้มสูงสุดของฝนมี่ในช่วงเวลา 30 นาที หยาดฝนมี่ที่กระแทกผืนดินที่ว่างเปล่าไม่เพียงพอทำให้เกิดการกัดเซาะแต่ยังอัดดินให้มีความแน่นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการซึมผ่านของดินลดลง ช่วยลดแรงดันการไหลซึมในดินซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญทำให้เกิดการพังทลายของลาดดิน ลักษณะความอ่อนไหวหรือความไวต่อการถูกกัดเซาะของดินเรียกว่า ความสามารถถูกกัดเซาะได้ (erodibility) ดิน

บางประเภทเช่นตะกอนทรายถูกกัดเซาะได้ง่ายกว่าดินประเภทอื่นเช่นกรวดหยาบที่มีขนาดคลลستی โดยทั่วไปหากดินมีปริมาณสารอินทรีย์หรือดินเหนียวเพิ่มมากขึ้นความสามารถถูกกัดเซาะได้จะลดลง ทั้งนี้ความสามารถถูกกัดเซาะได้ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆ อาทิ ลักษณะพื้นผิว ปริมาณความชื้นเดิม อัตราส่วนช่องว่าง การแลกเปลี่ยนไอออน ค่าความเป็นกรดต่าง และส่วนประกอบหรือความเข้มข้นของอิออนที่มีอยู่ในน้ำที่มากัดเซาะ ตารางที่ 2 แสดงตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการกัดเซาะ จากการศึกษาในช่วงที่ผ่านมา ยังไม่ปรากฏว่ามีนักวิจัยท่านใดระบุดัชนีความสามารถถูกกัดเซาะได้ในรูปแบบอย่างง่ายและเป็นที่ยอมรับกันทั่วไป ทั้งๆที่มีการทดสอบหลากหลายวิธีเช่นการทดสอบการพังกระจาย [2] การทดสอบการแตกหัก [3] การทดสอบรูเข็ม [4] โดยสามารถสรุปลำดับความสามารถถูกกัดเซาะได้มากที่สุดไปยังความสามารถถูกกัดเซาะได้น้อยที่สุดได้ดังนี้

ตารางที่ 2 แนวโน้มของดินที่สามารถถูกกัดเซาะได้

- ความสามารถถูกกัดเซาะต่ำหากเป็นกรวดหยาบที่มีขนาดคลลستی
- ความสามารถถูกกัดเซาะสูงหากเป็นทรายละเอียดหรือดินตะกอนทรายที่มีขนาดสม่ำเสมอ
- ความสามารถถูกกัดเซาะลดลงเมื่อปริมาณสารอินทรีย์และดินเหนียวเพิ่มมากขึ้น
- ความสามารถถูกกัดเซาะลดลง หากอัตราส่วนช่องว่างต่ำและมีปริมาณความชื้นเดิมสูง
- ความสามารถถูกกัดเซาะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการดูดซับไฮเดียมเพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของอิออนในน้ำลดลง

ML > SM > SC > MH > OL >> CL > CH >  
GM > SW > GP > GW

เมื่อ GW หมายถึงกรวดที่มีขนาดคลลستی  
GP หมายถึงกรวดที่มีขนาดคลลستی  
GM หมายถึงกรวดปนดินตะกอนทราย  
SW หมายถึงทรายที่มีขนาดคลลستی  
SM หมายถึงทรายปนดินตะกอนทราย

SC หมายถึงทรายปนดินเหนียว  
ML หมายถึงดินตะกอนทรายที่มีสภาพพลาสติกต่ำ  
MH หมายถึงดินตะกอนทรายที่มีสภาพพลาสติกสูง  
CL หมายถึงดินเหนียวที่มีสภาพพลาสติกต่ำ  
CH หมายถึงดินเหนียวที่มีสภาพพลาสติกสูง  
OL หมายถึงดินอินทรีย์ที่มีสภาพพลาสติกต่ำ

ลำดับความสามารถถูกกัดเซาะนั้นไม่ซับซ้อนแต่ขึ้นอยู่กับขนาดคลลและดัชนีพลาสติกของดินแปลงสภาพ ดังนั้นจึงไม่สามารถพิจารณาผลกระทบเนื่องจากโครงสร้างดิน อัตราส่วนช่องว่าง และปริมาณความชื้นเดิม Wischmeir และคณะ (1971) ได้นำเสนอกราฟความสามารถถูกกัดเซาะเพื่อใช้ในการสมการการสูญเสียดินทั่วไปซึ่งขึ้นอยู่กับการวัดคุณสมบัติดินอย่างง่าย โดยตัวแปรที่มีผลต่อการกัดเซาะเนื่องจากฝนประกอบด้วย (1) มุมลาดเอียง (2) ความยาวลาดดิน (3) ขนาดและรูปร่างพื้นที่รับน้ำ เมื่อลาดดินมีความชันเพิ่มขึ้นจะทำให้อิทธิพลหรือความสำคัญของความยาวลาดดินมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น Loch.R.J. (2002) สร้างชุดจำลองน้ำฝนให้มีลักษณะคล้ายคลึงกับฝนตกตามธรรมชาติที่มีความเข้มมากกว่า 40 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง เพื่อทดสอบหาค่าการซึมผ่านของดินและการกัดเซาะผิวดิน

แผ่นวัสดุคลุมดินใช้เป็นงานชั่วคราวเพื่อลดแรงกระแทกจากหยาดฝนไม่ให้กระแทกลงบนพื้นดินโดยตรง ลดการกัดเซาะผิวดินหน้าดิน เพิ่มการซึมผ่านของน้ำและรักษาความชื้นในดิน การปกคลุมดินป้องกันลาดดินสูงชัน รวมทั้งร่องระบายน้ำที่มีแนวโน้มถูกน้ำกัดเซาะ นอกจากการใช้วัสดุสังเคราะห์แล้วพืชมีบทบาทสำคัญอย่างมากในการควบคุมการกัดเซาะจากน้ำฝน การแผ้วถางพืชโดยน้ำมือมนุษย์หรือการสูญเสียโดยกระบวนการทางธรรมชาติเช่นไฟป่าทำให้ผิวดินหน้าดินถูกกัดเซาะง่ายขึ้น ดังนั้นหากเพิ่มมาตรการรักษาสภาพธรรมชาติหรือการปลูกพืชทดแทนการถูกทำลายจะช่วยลดการสูญเสียผิวดินและบรรเทาการกัดเซาะลงได้

## 2. การบรรเทาการกัดเซาะ

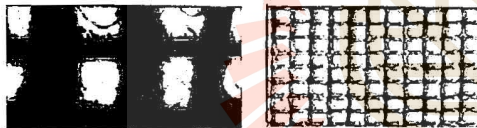
ลาดดินที่จะถูกกัดเซาะ จำเป็นต้องลดหรือชะลอความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านผิวดิน โดยใช้วัสดุควบคุมการกัดเซาะซึ่งอาจเป็นแผ่นหรือม้วนที่ผลิตจากเส้นใย

ธรรมชาติเพียงอย่างเดียวหรือผสมผสานเส้นใยธรรมชาติเข้ากับวัสดุสังเคราะห์ก็เป็นได้

### 2.1 แผ่นควบคุมการกัดเซาะ

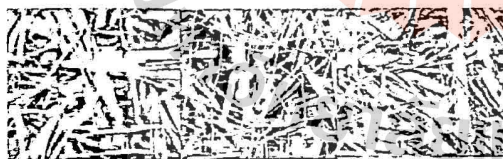
แผ่นควบคุมการกัดเซาะถักทอขึ้นจากวัสดุที่ต้องการใช้ มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านผิวหน้า วัสดุที่เลือกควรมีสันนูนเพื่อขวางทางน้ำให้ไหลช้าลง มีแผ่นควบคุมการกัดเซาะหลายชนิด บางประเภทเป็นแผ่นสังเคราะห์บางชนิดเป็นวัสดุธรรมชาติ มีวัสดุที่เป็นทั้งวัสดุสังเคราะห์และวัสดุธรรมชาติเพียง 2, 3 แผ่นประเภทนี้อาจทำจากฟางข้าว เส้นใยแอสเฟน ไยมะพร้าว ปอกระเจา และโพลีพรพิลีน ดังรูปที่ 5 ถึง 8

แผ่นควบคุมการกัดเซาะติดตั้งได้ง่าย แต่ต้องมั่นใจว่าน้ำไหลผ่านบนผิวหน้าของแผ่น โดยการขุดร่องด้านเหนือลาดดิน แล้วนำปลายบนของแผ่นม้วนฝังในร่องยึดตรึงด้วยเหล็กรูปตัวยูเพื่อห่อหุ้มวัสดุมูลเม็ด ดังแสดงในรูปที่ 9 นอกจากนี้การปูแผ่นควบคุมการกัดเซาะควรคำนึงถึงทิศทางลมเพื่อป้องกันไม่ให้แผ่นหลุดร่อนจากแรงลมที่อาจซอกซอนเข้าใต้แผ่นได้ ดังแสดงดังรูปที่ 10



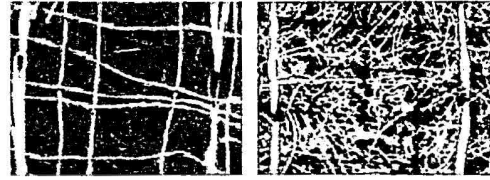
(ก) ตาข่ายปอกระเจา (ข) ตาข่ายสังเคราะห์กับปอกระเจา

รูปที่ 5 ตาข่ายปอกระเจา



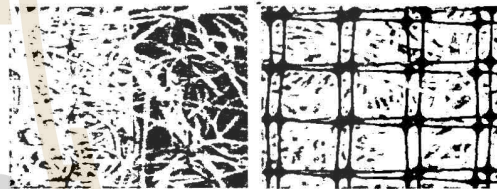
(ก) ฟางผสมวัสดุสังเคราะห์ชั้นเดียว (ข) ฟางผสมตาข่ายปอกระเจาสองชั้น (ค) ฟางผสมวัสดุสังเคราะห์สองชั้น

รูปที่ 6 ตาข่ายฟางผสมวัสดุสังเคราะห์และปอกระเจา



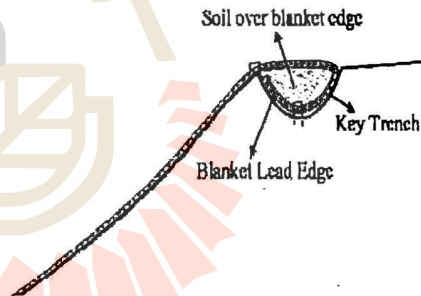
(ก) ไยมะพร้าวผสมตาข่ายปอกระเจา (ข) ไยมะพร้าวผสมตาข่ายสังเคราะห์

รูปที่ 7 ไยมะพร้าวผสมตาข่ายปอกระเจาและตาข่ายสังเคราะห์

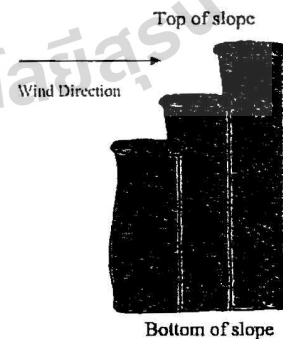


(ก) เส้นใยแอสเฟนผสมวัสดุสังเคราะห์ชั้นเดียว (ข) เส้นใยแอสเฟนผสมวัสดุสังเคราะห์สองชั้น

รูปที่ 8 เส้นใยแอสเฟนผสมวัสดุสังเคราะห์



รูปที่ 9 ป้องกันไม่ให้แผ่นควบคุมการกัดเซาะเลื่อนไถล



รูปที่ 10 การทับซ้อนแผ่นควบคุมการกัดเซาะโดยคำนึงถึงทิศทางลม

## 2.2 ม้วนเส้นใย

ม้วนเส้นใยเป็นอุปกรณ์ควบคุมการกัดเซาะอีกประเภทหนึ่ง มักใช้วัสดุประเภทเดียวกับแผ่นควบคุมการกัดเซาะแต่ผลิตเป็นม้วนมีแกน คล้ายท่อไม้ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางตามต้องการ โดยส่วนแกนมีประโยชน์ช่วยชะลอน้ำให้ไหลช้าลงเพื่อให้ดินที่ไหลมากับน้ำตกตะกอน รูปที่ 11 แสดงการใช้ม้วนเส้นใยที่ทำจากฟางข้าวโดยปูลาดให้ยาวพอที่จะลดความเร็วของน้ำไหล ลดแรงกัดเซาะและเปิดโอกาสให้เม็ดดิน

ตกตะกอน ภายหลังจากผ่านไป 1 ปี ภูเขาธรรมชาติจะขึ้นปกคลุมลาดดินดังแสดงในรูปที่ 12 ม้วนเส้นใยที่ทำจากใยมะพร้าวเป็นที่นิยมมากกว่าเส้นใยชนิดอื่นดังรูปที่ 13 ในการติดตั้งม้วนเส้นใยต้องยึดตรึงด้วยหลักไม้ไม่ให้ขยับดังแสดงในรูปที่ 14



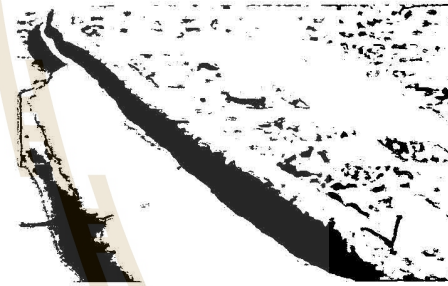
รูปที่ 11 การปูม้วนเส้นใยผลิตจากวัสดุธรรมชาติ



รูปที่ 12 ม้วนเส้นใยฟางข้าวภายหลังการปู 1 ปี



รูปที่ 13 ม้วนเส้นใยผลิตจากใยมะพร้าวเป็นที่นิยมใช้กันทั่วโลก



รูปที่ 14 การยึดตรึงม้วนเส้นใยด้วยหมุดไม้

## 3. ทางเลือกอื่น

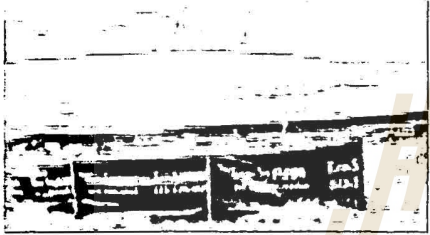
นอกจากการใช้แผ่นควบคุมการกัดเซาะและม้วนเส้นใยเพื่อช่วยบรรเทาการกัดเซาะแล้ว ยังมีทางเลือกอื่นอีกเช่นการใช้ปุ๋ยน้ำ (hydro mulch) การสร้างรั้วตักดินตะกอนทราย (silt fence) การสร้างแนวชลอน้ำด้วยหินหรือท่อไม้ที่ทำได้ในพื้นที่

การใช้ ปุ๋ยน้ำอาจมีราคาแพงและใช้ไม่ได้ผลในฤดูฝน แต่หากพืชประจำถิ่นเจริญเติบโตขึ้นได้ก่อนที่ปุ๋ยน้ำเสื่อมสภาพลง นับว่าประสบความสำเร็จ โดยต้องปลูกพืชที่พึ่งประสงค์ก่อนวัชพืชจะเจริญเติบโต ดังแสดงในรูปที่ 15

รั้วตักดินตะกอนทรายอาจใช้ในกรณีที่ลาดดินด้านบนถูกปรับเปลี่ยนเนื่องจากการก่อสร้าง เช่นการตัดถนน เมื่อฝนตกน้ำจะไหลบ่าลงมาพร้อมตะกอนจำนวนมาก รั้วตักตะกอนจะชลอน้ำพร้อมกรองตะกอนไม่ให้ไหลตามน้ำ จนกระทั่งลาดดินปรับเสถียรภาพได้อีกครั้งจึงรื้อรั้วตักตะกอนดินออก ดังแสดงในรูปที่ 16



รูปที่ 15 การพ่นปุ๋ยน้ำ



รูปที่ 16 รั้วดักตะกอนทราย

การบรรเทาการกัดเซาะลาดดินด้วยวัสดุธรรมชาติ เป็นวิธีที่มีราคาถูก หากสามารถหาวัสดุที่เหมาะสมในพื้นที่ได้ และมีข้อดีคือกลมกลืนไปกับธรรมชาติ

#### 4. สรุป

การกัดเซาะลาดดินเกิดจากสาเหตุสำคัญคือการทำลายสภาพลาดดินตามธรรมชาติ ทำให้เสียคุณภาพตามธรรมชาติไปเช่นการตัดไม้ทำลายป่า การแผ้วถางพื้นที่เพื่อการเกษตรกรรม เมื่อฝนตก หยาดฝนที่กระทบดินซึ่งปราศจากสิ่งปกคลุม ไปทำลายโครงสร้างดิน เกิดเป็นร่องร้ว และลึกมากขึ้นเมื่อมีกระแสน้ำไหลป่า น้ำพาตะกอนดินไหลลงตามน้ำ ผิวหน้าดินเปลี่ยนสภาพ ทำให้เสถียรภาพของลาดดินลดลง การบรรเทาการกัดเซาะลาดดินทำได้โดยการปกคลุมดินด้วยวัสดุธรรมชาติ หรือผสมผสานกับวัสดุสังเคราะห์ เพื่อลดแรงกระแทกจากหยาดฝนช่วยบรรเทาการกัดเซาะหน้าดินได้ หากธรรมชาติเอื้ออำนวย พี่ชประชาถิ่นที่ขึ้นปกคลุมดินในเวลาต่อมาช่วยเพิ่มเสถียรภาพแก่ลาดดินได้ การบรรเทาการกัดเซาะลาดดินอย่างยั่งยืนจึงนำวิธีทางวิศวกรรมมาผสมผสานกับกลไกทางธรรมชาติ และหากมนุษย์เอาใจใส่ดูแลธรรมชาติ เคารพต่อธรรมชาติ ปัญหาการกัดเซาะลาดดินย่อมบรรเทาลงในที่สุด

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. USDA Agricultural Handbook No.537, Washington, DC, 1978.
- [2] Volk, G.M., "Method of determining the degree of dispersion of the clay fraction of soils", *Soil Science Society of America Proceedings* 2: pp.432-445, 1973.
- [3] Emerson, W.W., "A classification of soil aggregates based on their coherence in water", *Australian journal of soil research* 2: pp.211-217, 1967.
- [4] Sherard, J.L., Ryker, N.L. and Decker, R.S., "Pinhole test for identifying dispersive soils", *Journal of Geotechnical Engineering (ASCE)* 102(GT1): pp.69-85, 1978.
- [5] Wischmeier, W.H., Johnson, C.B. and Cross, B.V., "A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites", *Journal of Soil and Water Conservation* 26(5): pp.189-193, 1971.
- [6] ASTM D 854-10 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer
- [7] ASTM D 4318: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils
- [8] Chaipattana Foundation, "What is vetiver grass?" Chaipattana Network Webmaster: pp.1-4, 1996.
- [9] Voottipruex, P., Bergado, D.T., Mairaeng, S., Chucheeprajakul, S and Modmoltin, C., "Soil reinforcement with combination roots system: A case study of vetiver grass and acacia mangium willd", *Lowland technology international* Vol.10 (2) pp.56-67, 2008.



## Geosynthetics for Road and Highway Construction: Is it time for Thailand?

Dr. Peerapong Jitsangiam

Department of Civil Engineering, School of Civil and Mechanical Engineering, Curtin University, Perth,  
Western Australia, Australia 6102  
E-mail: p.jitsangiam@curtin.edu.au

### Abstract

This article proposes the conceptual idea of bringing an additional technique into the process of cement stabilisation in Thailand, that of geotextile applications. The main purpose of the geotextile application outlined in this article is the prevention of early damage from transverse reflection and block cracking; common failure modes in modern Thailand road pavements which have been rehabilitated using cement stabilisation. There is currently a lack of advanced knowledge with regard to mixture design and proper construction skills for cement stabilisation associated with in-situ pavement recycling processes. As a consequence, most newly rehabilitated road pavements in Thailand are facing a high degree of deterioration caused by the drying of shrinkage cracks in the cement stabilised base course layer. Due to the weakening of the base course layer, further pavement deterioration takes place (e.g., transverse reflection and block cracking). In Australia, a paving fabric (i.e., a geotextile application used in a pavement's surface) has been introduced and been found to be effective in the rehabilitation of cracked and highly deteriorated pavements. It does this by reducing the incidence of reflection cracking and it provides a high level of performance as a waterproofing membrane. Based on Australian experience, the paving fabric

technique is a viable solution for minimising premature pavement damage in Thailand's road pavements. In addition, the adoption of this technique may be used to treat the more severe consequences of block cracking in rehabilitated road pavements.

**Keywords:** Geotextiles, Pavements, Paving Fabrics, In-situ pavement recycling, Cement Stabilisation

### 1. Introduction

In-situ pavement recycling with cement stabilisation has recently gained popularity in Thailand pavement rehabilitation and construction. With early damage to rehabilitated pavements still occurring, Thailand road and highway authorities and their contractors have attempted to identify the causes of this damage. Cement stabilised base course, produced from in-situ recycled materials (i.e., a combination of asphalt material from a pavement surface, and crushed rock material from a pavement base), is currently preferred in pavement rehabilitation in Thailand due to the ease of construction processes and no new materials or transportation being required. However, such cement stabilised material needs to be examined to discover whether factors involved in its manufacture, mix design, and/or construction are partly responsible for the problem of early damage to pavements. However, based on a series of cement stabilisation studies carried out in the USA,

an investigation into this problem would take considerable time in achieving results[1].

Despite this, a newly developed construction technique exists in the USA. This has been used successfully to hinder shrinkage cracks after micro-cracks are generated by the compaction process in cement stabilised base course layers[2]. This process may assist in finding a more immediate solution to severe early pavement damage in Thailand. The tentative solution for Thailand may be found in the introduction of proper construction techniques into the existing construction process to minimise the effects of potential shrinkage cracks in a cement stabilised base course layer. From Australia's experience in roadway construction, geotextiles have successfully been introduced into conventional roadway construction. They can be incorporated into an asphalt surface layer to form a geotextile fabric (or a paving fabric) which provides a tough and flexible membrane intended to resist potential cracking in a roadway.

The micro-crack generating technique generally requires longer construction periods with relatively high quality curing processes, and this would not suit the extremely traditional construction methods used by the majority in the Thailand roadway construction industry. In addition, the main purpose of this technique is to prevent a potential crack and it does not address how the generation of micro-cracks can adversely alter the initial properties of cemented material.

• Paving fabrics (i.e., geotextiles used in pavements) for asphalt paving have been introduced into modern roadway

construction by utilising the tensile strength of the geotextile and the elastic recovery properties of an asphalt binder to bridge pavement cracks, and these inhibit reflective cracking. Furthermore, the paving fabric ensures a waterproof surface which maintains the structural integrity of the road pavement. Successful case studies in Australia have demonstrated that paving fabrics can extend the life of road surfaces by up to 10 years over and above a design life of 8-10 years [3-5]. Despite the additional costs incurred, the benefits to maintenance programs are found either in time savings, or in the delaying of the application of a reseal to an extent twice the time frame than that usually allocated. These elements make a valuable contribution to effective asset management.

When introducing the idea paving fabric applications into Thailand, the advantages should be outlined. By illustrating the technique to Thailand road authorities and the road construction industry, the benefit of paving fabrics in providing improved pavement performance would be understood. The implementation of paving fabrics into Thailand's pavements would demonstrate an immediate and viable solution for roadway rehabilitation and long-term improvements which are desperately needed.

## 2. In-situ Pavement Recycling

### Cement Stabilisation

Pavement rehabilitation is a process which all highway agencies require when existing pavements reach a poor condition where maintenance costs become excessive, or the pavement deteriorates to an unacceptable level of service. Rehabilitation by definition requires that the rehabilitated

pavement performance be superior to the original pavement, to cater for higher traffic demands that have evolved over the life of the pavement. In-situ stabilisation techniques for improving deteriorated pavements have long been used in the road construction industry in many countries around the world for pavement rehabilitation (or construction). In-situ stabilisation is generally, but not always, carried out through the addition of a binder. Common methods of stabilisation incorporate small quantities (1–4 per cent by mass) of binders (i.e., cements such as Portland and Blended cement, lime, bitumen, and miscellaneous other chemicals). To date, this technique has generally been selected for pavement rehabilitation because it has significant cost advantages, although the social and environmental benefits (i.e., quick recovery and lack of disruption, no excavation, and no or minimal removal of material from or into the site) have also been recognised.

In Thailand, in-situ recycling with cement stabilisation has been recently used for rehabilitating severely deteriorated pavements. Based on the mix design procedure, the process of determining the optimum cement and water contents of a mixture for pavements accords with the standard of the Department of Highway (DOH), Thailand standards[6]. The process relies on an empirical evaluation of the optimum cement content, based on the minimum unconfined compressive strength (UCS) of 1 MPa at a 7-day curing time, and an optimum moisture content derived from a simple compaction test. It is noteworthy that consideration of strength only (i.e., UCS values of test samples) without consideration

of long-term durability and performance, would result in a very stiff base layer characterised by a quite high resilient modulus. This would not necessarily guarantee acceptable long-term pavement performance [7]. For instance, in many roads and highways in Thailand, shrinkage cracks within in-situ cement-stabilised base course layers reflect into the surface of treatment and appear as transverse cracks with the spacing in between 1 m and 15 m, as illustrated in Figure 1. Even though these cracks may not present a pavement structural problem, they usually accelerate degradation of the pavement by allowing water to penetrate into the layers underneath the asphalt surface. Consequently, the transverse cracks on the surface generally create more severe block cracking, causing a reduction in pavement support with moisture disintegrating the underlying base materials.

During the process of in-situ recycling, as shown in Figure 2, a recycler granulates the existing pavement material while homogeneously mixing in binding agents (e.g., cement) and water at the same time. This method produces a new construction material mix in just one single machine pass. From a construction perspective, this technique requires precise and skillful processes to consistently control construction conditions (i.e., adding cement and water, compaction, curing) to assure that the final product can provide acceptable short-term and long-term performance. In the case of Thailand, apart from a less effective mix design, there is a lack of fundamental understanding of the construction processes of in-situ recycling with

cement stabilisation. This plays a major role in causing premature damage in pavements.

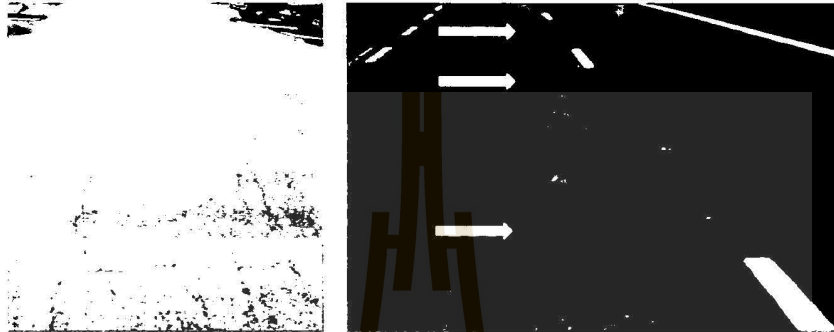


Figure 1: Block and transverse reflection cracking causing from drying shrinkage cracks in a cement stabilised base layer in Thailand



Figure 2: In-situ pavement recycling in Thailand

### 3. Geotextile Applications in Pavements

The concept of using geotextiles in pavement seals was first developed in the USA around 1930, and it was introduced into Australia in the 1970s[8]. In Australia, the main purpose of using geotextiles in pavement seals is to rehabilitate cracked and weak pavements by reducing the incidence of transverse reflection cracking and by providing higher waterproofing performance. Furthermore, geotextile applications have been used as an initial treatment for new pavement in order to prevent reflection cracks on asphalt surfacing from the cemented base course layer underneath.

They can also be used for the surfacing of low quality granular pavement materials.

Geotextiles (i.e., paving fabrics) in pavement seals are usually termed Geotextile Reinforced Seals (GRS). GRS incorporate a layer of geotextile fabrics into the asphalt paving to provide a tough and flexible member acting as a Strain Alleviating Membrane (SAM) and a Strain Alleviating Membrane Interlayer (SAMI). The reinforced sprayed seal systems (i.e., existing pavement seals with geotextile) can then provide better cracking resistance [9].

The two roles of the geotextile fabric in GRS are 1) it reinforces the binder film to

maintain integrity and to resist cracking under limited tensile forces and 2) it acts as a binder reservoir to enable a greater binder application rate which reduces strain and improves waterproofing ability [10].

Based on Australia's climate and road-life history, paving fabrics for asphalt paving were selected to bridge the gap between an inadequate resealed surface and the idea of complete rehabilitation which would have been cost-prohibitive. In the early 1970s, non-woven needle punched geotextiles were used for reinforcing and waterproofing chip seals and asphalt overlays [5]. Pavement deterioration is usually the result of heavy loading, water ingress, insufficient drainage, and pavement ageing. Without sufficient maintenance, paved roads can rapidly deteriorate. The escalating cost of pavement rehabilitation highlights the need for cost-effective solutions to fulfill two main

requirements, being 1) minor strengthening or surface improvement and 2) substantial strengthening and waterproofing. These two main requirements in pavement rehabilitation may overlap into a single procedure to cope with both waterproofing and strengthening of pavements. This can be achieved by incorporating a paving fabric (e.g., geotextile) to form a reinforcing and waterproofing interlayer within an asphalt layer which will provide protection for the pavement layer underneath.

A rough description of the construction of paving fabrics with an asphalt surface is as follows. Construction is carried out by initially applying a sprayed bond coat and then spreading the fabric by lightly rolling it to hold it in place. A sprayed seal (or other paving material) is then placed over the fabric. Figure 3 (a) and (b) shows the laying of the fabric.



Figure 3 Construction of paving fabrics for an asphalt pavement (modified from [11])

#### 4. Geotextile Reinforced Pavements for Thailand

The process of using geotextiles in the reinforcement of pavements is relatively untried in Thailand. This is due to the use of fairly conventional pavement design and construction, both of which are completely empirical. Conventional (i.e., empirical) pavement design processes do not have the flexibility to incorporate new materials (e.g.,

geotextiles or paving fabrics, alternative and recycled materials) as part of a pavement structure. In Thailand, the selection criteria for pavement materials only allows a small utilisation window for commonly used materials which comply with traditional design and construction specifications. The choice of these materials is generally derived from experience in design and construction. It can be said that current pavement analysis

and design and construction in Thailand is thought to be sub-standard. A number of highways and roads are exhibiting extensive surface damage before their designed life expiry, as a result of increasing numbers of vehicles. Pavement analysis, design and construction in Thailand rely predominantly on the empirical approach along with experience and basic experimentation with traditional construction processes. Thus, explanations for the damage occurring under the present conditions are difficult to determine and assess. It seems timely therefore to find an immediate and effective solution for Thailand's pavements without altering the conventional concept of pavement design and construction. As a tentative solution, the application of geotextiles to pavement in Thailand may suffice until longer-term options are explored.

#### 4.1 The philosophy of geotextile applications for Thailand pavements

As previously outlined, this article presents a conceptual idea of how to use geotextiles to prevent early pavement damage such as reflection cracking in rehabilitated pavements constructed with in-situ pavement recycling techniques. Consequently, the main function of geotextile use in pavements is to provide a special barrier with sufficient strength to withstand shear and tensile stresses created by movements of the underlying pavement base course. These stresses are due to traffic loading, moisture ingress or thermal effects (expansion and contraction), where the movements generate cracks and weakens the existing base course, extending upwards to

the pavement asphalt surface. Figure 4 illustrates paving fabrics preventing a reflection crack from an underlying base course layer.

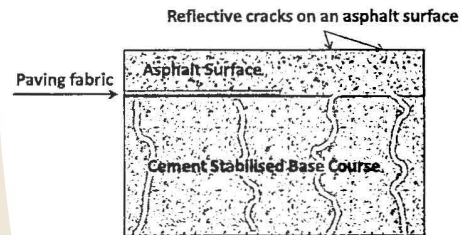


Figure 4: Paving fabrics with the prevention of reflective cracking

#### 4.2 The proposed pavement structure using paving fabrics

Figure 5(a) and (b) shows the proposed pavement structure of cement stabilised base course pavements in conjunction with the use of paving fabrics.

Figure 5(a) illustrates the pavement structure of the thin asphalt wearing course (i.e., the overall thinness of an asphalt layer less than or equal to 7. cm) with a paving fabric. In this case, paving fabrics are incorporated into the asphalt wearing layer, acting as a strain alleviating membrane (SAM) which bridges existing cracking in an underlying base course layer and provides, at the same time, a waterproofing layer.

Figure 5(b) shows the addition of a paving fabric in a mid-layer of the normal asphalt wearing course (i.e., a normal asphalt layer thickness of 10 cm for most Thailand pavements). It acts as a strain-alleviating membrane interlayer (SAMI), by which the SAM and SAMI formed by double paving fabrics can maintain the integrity of a wearing pavement surface. This alleviates excessive strain occurring from the weakening base

course, prevents the onset of reflection cracking and minimises its extent and

severity.

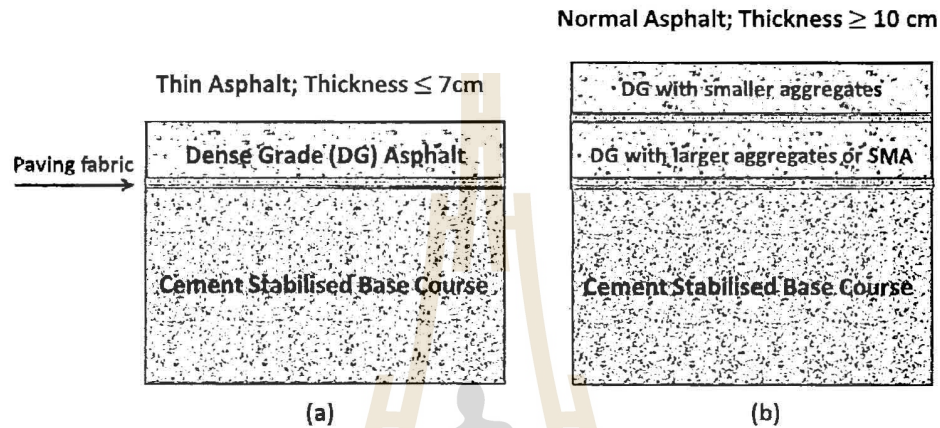


Figure 5: Paving fabrics in proposed pavement treatment for existing Thailand pavements

#### 4.3 Technical comments for the construction of in-situ recycling pavements with paving fabrics

##### 4.3.1 Paving fabric properties and allowances

Based on the Australian installations of paving fabrics under an asphalt layer, a 140 and 180 g/m<sup>2</sup> Polyester non-woven needle punched geotextile with a melting point in excess of 240°C would normally be used. The binder retention allowance strongly depends on the bond coat application. The bond coat needs to be sufficient to hold the fabric in place without bleeding through the fabric and adhering to the types of the fabric spreading and rolling equipment. The bond coat application rate would be approximately 0.6-0.9 L/m<sup>2</sup> [5].

##### 4.3.2 Surface texture allowance

It is not usually necessary to introduce any allowance for either embedment or surface texture in the application of paving fabrics. However, the application of paving

fabrics onto very coarse textured surfaces (i.e., generally in excess of 2-2.5 mm texture [12]) should generally be avoided without the application of a pre-treatment to reduce the coarse texture.

##### 4.3.3 Equipment

Only a particular part of the geotextile fabric applicator is required. No additional plants or equipment are necessary to those normally used for bituminous sprayed surfacing operations. The fabric applicator is made from a built-in steel frame, with existing items in the plant such as a multi-wheeled roller, being used by the sealing crew, (see Figure 3).

##### 4.3.4 Construction

The installation of paving fabrics should preferably be carried out in good weather with an appropriate ambient temperature that is not too high, in order to prevent the consequent risk of bitumen bleeding. The geotextile should be rolled out slowly (using a fabric applicator) immediately after

applying the tack coat and as close behind the sprayer as practicable. The dispensing of fabric should be controlled by adjusting the rubber spreader bar to match the road profile to ensure wrinkle-free application. All wrinkles smaller than 5mm can be dispersed and smoothed by brooming [4].

Adjoining or adjacent rolls should overlap by a minimum of 100 mm, with the overlapped joint receiving additional binder. Placement of fabrics along straight alignments may be done with ease; however, caution should be exercised on curves of less than 100m in radius due to the risk of creasing the fabric [5]. Where the paving fabric is to be placed around a curve, it should be 'cut and butted' at regular intervals along the inner side of the curve (to minimise overlap thickness). Resulting overlaps should be hand-sprayed with additional bitumen so that the geotextile is fully saturated. Wrinkles larger than 25 mm should be treated in the same manner [5].

## 5. Conclusions and Recommendations

The early damage of reverse reflection and block cracks on recently-constructed pavements, based on in-situ recycling techniques with cement stabilisation in Thailand needs to be urgently addressed. Using construction techniques to minimise cracking problems appears to be the most viable option as an immediate solution. This article introduced the idea of geotextiles to reinforce pavements. A layer of geotextile fabrics in asphalt paving would provide a tough and flexible member acting as a Strain Alleviating Membrane (SAM), and a Strain Alleviating Membrane Interlayer (SAMI), as shown in Figure 5. These reinforced

pavement systems (i.e., existing pavement seals with geotextile) can provide more effective cracking resistance.

This proposed idea is quite new to Thailand. Further and more in-depth investigations into geotextile applications in pavements are required. This is particularly so with regard to the use of paving fabrics in a cement stabilised base course layer. Suitable types of pavement fabric, effective and reliable construction processes, and a long-term monitoring program of the proposed ideas are required, along with further studies and pavement trials to prove whether or not this is workable for Thailand.

## References

- [1] Garber, S., Rasmussen, R. O., and Harrington, D., "Cement-Treated Base: Guide to Cement-Based Integrated Pavement Solutions" Portland Cement Association, Illinois, 2011.
- [2] Scullion, T., "Field Investigation: Pre-Cracking of Soil-Cement Bases to Reduce Reflection Cracking". Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board: Washington, DC. pp. 22-30, 2002.
- [3] Fyfe, R., "Performance assessment of paving fabric applications on Australian roads", 13th AAPA International Flexible Pavements Conference, 2009: Surfers paradise, Queensland, Australia.
- [4] Fyfe, R., "Performance assessment of paving fabric applications on Australian roads". Roads, 2010.
- [5] Fyfe, R., and South Australia, "Geotextile Reinforced Seals under Asphalt", 14th AAPA International Flexible Pavements Conference, 2011: Sydney, Australia.



- [6] Department of Highways. Standard DH-S 213/2000 Pavement Recycling, Department of Highways: Bangkok, Thailand, 2000.
- [7] James, G. M., "Geosynthetic materials as asphalt reinforcement: the Southern African experience", 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, 2004, Document Transformation Technologies: Sun City, North West Province, South Africa.
- [8] Alexander, W. S., and McKenna, R. W. "Geotextile paving fabrics used to extend the life of thin asphalt pavements", 1st Malaysian Road Conference, 1994, Ministry of Works: Kuala Lumpur, Malaysia.
- [9] Austroads. AP-T37/05 Geotextile Reinforced Seals, 2005.
- [10] VicRoads. Technical Note 14 Geotextile Reinforced Seals, 2008: Queensland.
- [11] AAPA-Queensland. Sprayed Treatment Selection. 2010.
- [12] VicRoads. Standard Specification Section 408 - Sprayed Bituminous Surfacing, 2012: Queensland.



## การประยุกต์ใช้วัสดุสังเคราะห์ในงานผิวทาง Application of Geosynthetics in Pavement Engineering

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมโพธิ อยุธยา<sup>1\*</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรัช ก้องกิจกุล<sup>2</sup> และ ปรีดิเทพ อนุจร<sup>3</sup>  
<sup>1,2</sup> ศูนย์วิจัยกลศาสตร์การคำนวณในวิศวกรรมเทคนิคธรณีและการปรับปรุงคุณภาพดิน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

E-mail: sompote.you@kmutt.ac.th

<sup>3</sup> บริษัท เทนคาค้า จีโอซินเทติกส์ (ประเทศไทย) จำกัด

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการใช่วัสดุเสริมแรงในการก่อสร้างผิวทางยืดหยุ่น ส่วนแรกจะนำเสนอความรู้และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการใช่วัสดุสังเคราะห์ในการเสริมแรงและลดการแตกร้าวของผิวทาง ในส่วนที่สองบทความนี้นำเสนอพฤติกรรมของผิวทางยืดหยุ่นเสริมแรงของแบบจำลองย่อส่วนในห้องปฏิบัติการ จากผลการทดสอบจะเห็นได้ชัดว่าวัสดุเสริมแรงสามารถลดการเสีรูปของผิวทางได้เป็นอย่างดี ในส่วนสุดท้ายจะนำเสนอกรณีศึกษาถึงการนำวัสดุเสริมแรงไปใช้ในการก่อสร้างผิวทางและการเสริมผิวทาง

### Abstract

This paper presents the application of using a geosynthetic in a flexible pavement. Firstly, the theoretical background of employing geosynthetics as reinforcement and crack relieve layer in flexible pavement is presented. Secondly, to understand of the reinforcement function of geosynthetics in flexible pavement, the results of scale-down physical model are presented. The application of geosynthetics in flexible pavement can be significantly reduced the permanent deformation of flexible pavement. Finally, cases study of using geosynthetics for construction of flexible pavement in Thailand is presented.

Keywords: Reinforcement, Geosynthetics, Flexible pavement

### 1. บทนำ

การเกิดความเสียหายของผิวทางแบบยืดหยุ่น (Flexible Pavement) จะเกิดจากการที่ผิวทางไม่สามารถรองรับปริมาณจราจรที่มีปริมาณมากเกินกว่าที่การออกแบบไว้หรือมีน้ำหนักกระทำมากเกินไปอันจะส่งผลให้เกิดการเสีรูปกับผิวทางและชั้นรองผิวทาง การแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการเพิ่มความหนาหรือความแข็งแรงของผิวทางและชั้นรองผิวทางเลือกอีกวิธีหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าวคือการใช้แผ่นใยสังเคราะห์ในการเสริมแรงให้กับผิวทาง แผ่นใยสังเคราะห์จะมีหน้าที่เสริมแรงโดยเฉพาะแรงดึงให้กับวัสดุชั้นต่างๆในผิวทางและยังเป็นชั้นที่ลดการเพิ่มขึ้นของรอยแตก (Crack relieve layer) ในปัจจุบันมีงานวิจัยและกรณีศึกษาแสดงถึงประสิทธิภาพในการใช่วัสดุเสริมแรงในผิวทางแบบยืดหยุ่นโดยสามารถสรุปได้ว่าการใช่วัสดุดังกล่าวจะสามารถลดการเสีรูปของผิวทางได้เป็นอย่างดี [1,2] การใช่วัสดุเสริมแรงในผิวทางจะเป็นการเพิ่มราคาค่าก่อสร้างจากการก่อสร้างแบบปรกติแต่จะเป็นการเพิ่มอายุการใช้งานของผิวทางทำให้ลดการบำรุงรักษา หากพิจารณาค่าก่อสร้างและค่าบำรุงรักษาจะพบว่าผิวทางยืดหยุ่นเสริมแรงจะมีราคาถูกกว่าผิวทางแบบปรกติ [3] บทความนี้แบ่งออกเป็นสามส่วนคือส่วนแรกจะนำเสนอพฤติกรรมของผิวทางยืดหยุ่นเสริมแรงในแบบจำลองย่อส่วนในห้องปฏิบัติการ [2] การออกแบบผิวทางเสริมแรง และ กรณีศึกษาในการนำไปใช้งาน

### 2. ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน

ผิวทางยืดหยุ่นประกอบด้วยส่วนประกอบหลักสองส่วนคือส่วนผิวทางและชั้นรองผิวทางดังแสดงใน

รูปที่ 1 วัสดุที่ใช้เป็นผิวทางจะเป็นแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphaltic Concrete) โดยจะประกอบด้วยมวลรวมที่เป็นหินและยางแอสฟัลต์ (Asphalt) โดยยางจะทำหน้าที่ยึดระหว่างมวลรวมเข้าด้วยกัน ชั้นผิวทางจะเป็นส่วนที่สัมผัสกับล้อของยานพาหนะโดยตรง ผิวทางจะต้องมีความแข็งแรงที่จะรับน้ำหนักของล้อได้และมีความยืดหยุ่นเพื่อช่วยในการเบรกของยานพาหนะ หลังจากนั้นความเครียดจะถ่ายต่อไปยังชั้นรองผิวทาง ซึ่งจะประกอบด้วยชั้นต่างโดยจะมีสลิปเฟสลดลงไปเรื่อยๆจนถึงชั้นดินเดิม (Subgrade) ในการออกแบบจะต้องพิจารณาความเค้นหรือความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นรวมถึงดินเดิมไม่ให้มีค่ามากเกินไปจนทำให้เกิดการเสียรูปถาวร (Permanent deformation) ที่เร็วเกินไป

ในการออกแบบผิวทางแบบกลศาสตร์ (Mechanistic Design) จะพิจารณาความเครียดที่เกิดขึ้นในส่วนที่ 2 และ 3 เพื่อนำไปประมาณถึงปริมาณการจราจรที่ผิวทางสามารถรับได้ในอนาคต

ผิวทางเมื่อมีการใช้งานไปสักระยะจะเกิดการเสียรูปหรือเกิดการแตกทำให้ถนนขรุขระส่งผลให้เกิดปัญหาด้านความปลอดภัยต่อยานพาหนะดังนั้นจึงต้องมีการซ่อมบำรุงโดยการเสริมผิวทาง (Overlay) หรือหากมีความเสียหายมากจะต้องรื้อผิวทางแล้วก่อสร้างผิวทางใหม่ (Full depth repair) ความเสียหายของผิวทางมีสาเหตุดังต่อไปนี้แสดงในรูปที่ 1

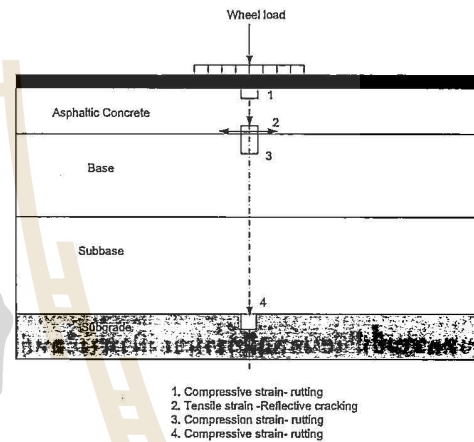
1. น้ำหนักจากล้อรถยนต์ถ่ายลงบนผิวทางทำให้เกิดความเค้นอัดที่ผิวสัมผัส เมื่อมีน้ำหนักกระทำซ้ำไปซ้ำมา (Cyclic load) จะส่งผลให้แอสฟัลต์คอนกรีตแน่นขึ้นทำให้เกิดการเสียรูปแบบถาวร (permanent deformation) หรือ rutting การแก้ปัญหาดังกล่าวทำได้โดยใช้แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความแข็งแรงมากขึ้น

2. ผิวทางเกิดการอ่อนทำให้เกิดความเครียดดึงที่ใต้ผิวทาง จนทำให้เกิดการแตกของผิวทางและขยายตัวขึ้นจนถึงผิวทางด้านบน การแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยใช้วัสดุเสริมแรงใส่ในบริเวณที่เกิดความเค้นดึงเป็นการลดความเครียดดึงที่เกิดขึ้นหรืออาจจะเพิ่มความหนาของชั้นผิวทาง

3. การเกิดความเครียดอัดที่ชั้นรองผิวทาง ทำให้เกิดความเค้นอัดถาวร (Permanent compressive

deformation) สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มความหนาของผิวทางหรือการใช้วัสดุเสริมแรง

4. การเกิดความเค้นที่ดินเดิมทำให้เกิดการเสียรูปของผิว สามารถแก้ไขได้โดยใช้ผิวทางและชั้นรองผิวทางที่มีความหนามากขึ้น หรืออาจจะใช้วัสดุในชั้นรองผิวทางที่มีความแข็งแรงมากขึ้น



รูปที่ 1 การเกิดความเครียดใต้ผิวทาง

### 2.1 การออกแบบผิวทางยึดหยุ่นแบบเสริมแรง

การออกแบบจะใช้หลักการของเปรียบเทียบการเสียรูปของผิวทางที่มีการเสริมแรงและผิวทางที่ไม่มีการเสริมแรง โดยจะพิจารณาถึงจำนวนของน้ำหนักแบบวงจรรที่กระทำในการเสียรูปถาวรที่เท่ากัน [4] โดยกำหนดพารามิเตอร์ที่เรียกว่า Fabric effective factor – FEF ดังแสดงในรูปที่ 2

$$FEF = \frac{N_{\text{reinforce}}}{N_{\text{non-reinforce}}} \quad (1)$$

$N_{\text{reinforce}}$  = จำนวนครั้งของแรงกระทำในกรณีที่มีการเสริมแรง

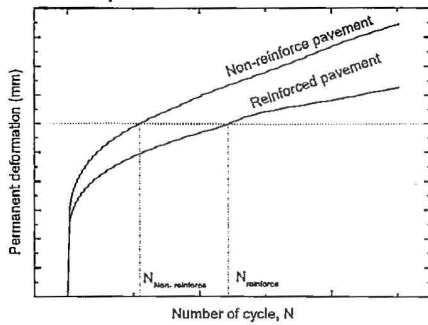
$N_{\text{non-reinforce}}$  = จำนวนครั้งของแรงกระทำในกรณีที่ไม่มีการเสริมแรง

ค่า FEF สามารถนำไปใช้ในการออกแบบในทางปฏิบัติได้ [5] โดยการลดทอนค่าปริมาณของจราจรที่ได้ประมาณการไว้จากสมการด้านล่าง

$$DTN_R = \frac{DTN_N}{FEF} \quad (2)$$

DTNR = ค่าปริมาณการจราจรที่มีการลดทอนลงเนื่องจากใช้วัสดุเสริมแรงในผิวทาง  
DTNN = ค่าปริมาณการจราจร

$$\frac{dc}{dN} = \text{ระยะทางการเพิ่มขึ้นของรอยแตกต่อจำนวนน้ำหนักระทำต่อผิวทาง}$$



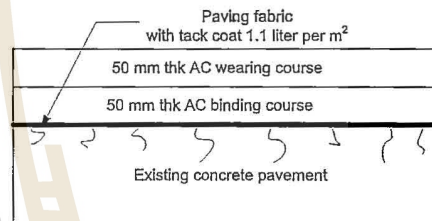
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเสียรูปแบบถาวรกับจำนวนรอบของน้ำหนักที่กระทำ

## 2.2 การใช้เป็นชั้นในการลดการแตกของผิวทาง (Crack Relieve Layer)

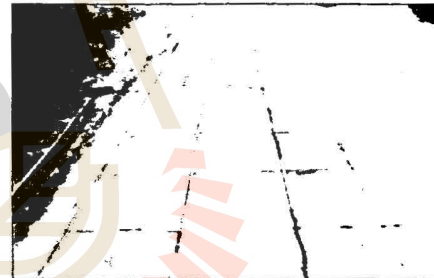
แผ่นใยสังเคราะห์ยังสามารถใช้เป็นชั้นเพื่อลดการเพิ่มขึ้นของรอยแตกในผิวทางแบบยืดหยุ่นโดยจะลดรอยแตกที่จะขึ้นมาจากรอยแตกเดิมและขึ้นไปผิวทาง (Refractive cracking) ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 มีผลงานวิจัยในห้องปฏิบัติการพบว่าสามารถลดการเพิ่มขึ้นของรอยแตกได้เป็นอย่างดี [6] ดังแสดงในสมการที่ 3

$$\frac{dc}{dN} = AK^n \quad (3)$$

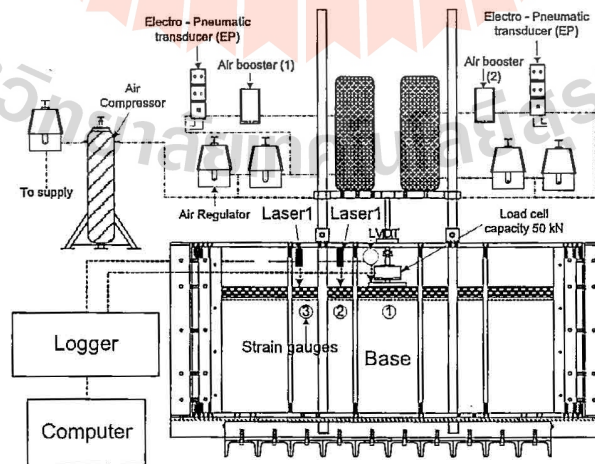
A และ n เป็นค่าคงที่ จากผลงานวิจัยในอดีตพบว่าค่า A ของผิวทางที่มีการเสริมด้วยวัสดุใยสังเคราะห์จะมีค่าน้อยกว่าแบบไม่ได้เสริมด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ถึงหนึ่งเท่า [4] ดังนั้นการเสริมด้วยวัสดุใยสังเคราะห์จึงสามารถเพิ่มอายุการใช้งานของการเสริมผิวทางได้



รูปที่ 3 การใช้ paving fabric ในผิวการเสริมผิวทาง



รูปที่ 4 รอยแตกของการเสริมผิวทางบนถนนคอนกรีตเดิม [7]



รูปที่ 5 แบบจำลองย่อยส่วน

### 3. แบบจำลองย่อส่วนในห้องปฏิบัติการ

ในการศึกษาพฤติกรรมของผิวทางเสริมแรงโดยการสร้างถนนจริงและเปิดใช้กับจราจรในสภาพจริงมีความสิ้นเปลืองและใช้เวลามากจึงมีงานวิจัยในอดีตที่ใช้แบบจำลองย่อส่วนในการจำลองผิวทางอาทิเช่น [8-12] แบบจำลองย่อส่วนเพื่อใช้ทดสอบผิวทางแบบยึดหยุ่นเสริมแรงถูกสร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการเทคนิคธรณี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ภายใต้การสนับสนุนของกรมทางหลวงชนบท [2] การจำลองจะย่อส่วนจากถนนจริงลงมาประมาณ 2.5 เท่า โดยจะใช้ผิวทางหนา 6 cm ใช้รองผิวทางจะใช้ทรายสะอาดในการจำลองเพื่ออำนวยความสะดวกคุณภาพในการทดสอบวัสดุสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดสอบคือ paving fabric และ geogrid ดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2 เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบทั้งสองวัสดุเสริมแรงจึงเลือกให้กำลังรับแรงดึงและสติฟเนสมีค่าใกล้เคียงกัน ปริมาณแอสฟัลต์ใช้ในการทดสอบใช้ครั้งที่ 5 % โดยจะบดอัดให้ได้ความหนาแน่นที่ 21 kN/m<sup>3</sup>

แบบจำลองย่อส่วนที่ใช้ในการทดสอบจะเป็น plane strain ผนังด้านข้างของแบบจำลองจะเป็นอะคริลิกใสเพื่อให้สามารถมองเห็นภายในและวัดการเสีรูปร่างภายในได้ กล้องที่ใช้ทดสอบมีขนาดกว้าง 180 ซม. ลึก 40 ซม. ทรายที่ใช้จะถูกโปรยลงมาให้ได้ความหนาแน่นที่ 80 % relative density จากนั้นจะเป็นการให้น้ำหนักกระทำแบบวัฏจักรโดยให้น้ำหนักกระทำเท่ากับ 400 kPa

#### 3.1 ผลการทดสอบในแบบจำลองย่อส่วนในห้องปฏิบัติการ

การเสีรูปร่างของผิวทางจากการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรแสดงในรูปที่ 6 และ 7 จะสังเกตได้ว่าจะมีการเสีรูปร่างแบบการเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบของน้ำหนักที่กระทำกับผิวทาง โดยจะการเสีรูปร่างที่เพิ่มขึ้นในแต่ละรอบที่น้ำหนักกระทำมีแนวโน้มที่ลดลงเนื่องจากแอสฟัลต์คอนกรีตแน่นขึ้นเรื่อยๆทำให้สติฟเนสของวัสดุเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะในกรณีที่มีรอบการให้น้ำหนักมากกว่า 20 รอบไปแล้ว การเสริมแรงด้วยวัสดุเสริมแรงจะช่วยลดการเสีรูปร่างของผิวทางแบบยึดหยุ่นอย่างเห็นได้ชัดแต่ในกรณีที่มีการเสริมด้วย geogrid

จะช่วยลดการเสีรูปร่างได้ไม่มากนัก ถ้าหากแบ่งการเสีรูปร่างของโครงสร้างผิวทางออกเป็นส่วนๆดังรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าไม่ว่าจะเสริมแรงหรือไม่จะเกิดการเสีรูปร่างของผิวทางที่เป็นแอสฟัลต์ไม่ต่างกันมากนัก การเสริมแรงในผิวทางจะเป็นการลดการเสีรูปร่างของชั้นรองผิวทางอย่างเห็นได้ชัดหรืออาจจะกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าเป็นการลดการแอ่นตัวของผิวทางเนื่องจากมีวัสดุเสริมแรงช่วยในการรับแรงดึงที่ได้ผิวทาง ผลที่ได้จะสอดคล้องกับความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นได้ผิวทางดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10 จะเห็นได้ชัดว่าการเสริมแรงในผิวทางจะสามารถลดการเสีรูปร่างของชั้นรองผิวทางได้อย่างชัดเจน ค่า Fabric effective factor แสดงในตารางที่ 3 โดยจะสามารถนำค่าที่ได้ไปใช้ในการออกแบบได้

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของ paving fabric

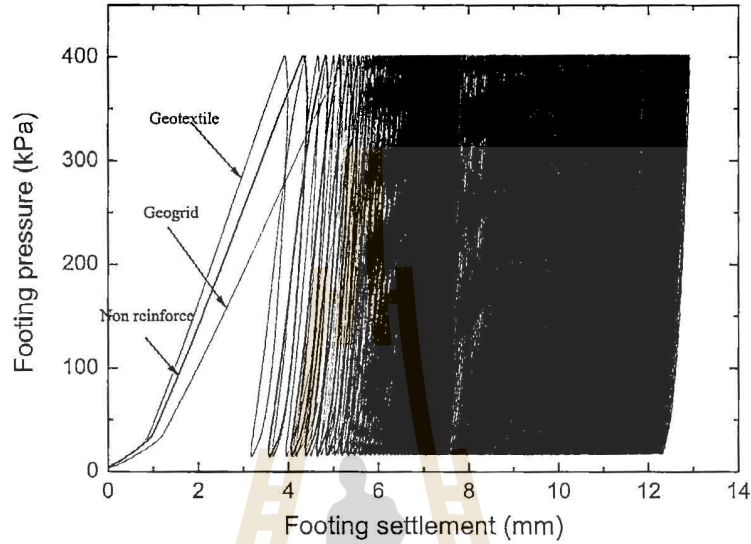
Property	Test Standard	Unit	Value
Asphalt retention	Texas DOT Item 3099	kg/m <sup>2</sup>	1.1
	ASTM D6140-97		
Tensile strength (md/cd)	-	kN/m	50 / 50
Elongation at break	ISO 3341	%	3
Strength at 2 % strain	-	kN/m	34 / 34
E-Modulus of the glass filaments	-	MPa	73,000
Mesh width of the glass filaments	-	mm	40 x 40
Mass per unit area	EN ISO 9864	g/m <sup>2</sup>	300

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของ Geogrid

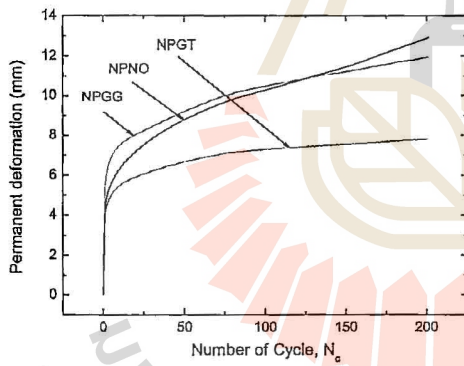
Property	Test Standard	Unit	Value
Tensile strength (warp)	ISO 10319	kN/m	50
Tensile elongation (warp)	ISO 10319	%	4
Tensile strength (weft)	ISO 10319	kN/m	50
Tensile elongation (weft)	ISO 10319	%	4
Aperture size	-	Mm	20 x 20
Mass per unit area (g/m <sup>2</sup> )	ISO 9864, ASTM D5261	g/m <sup>2</sup>	335
Width	-	m	0.5 or 1.0
Length	-	m	50

ตารางที่ 3 ค่า Fabric effective factor ของวัสดุเสริมแรงชนิดต่างๆกัน

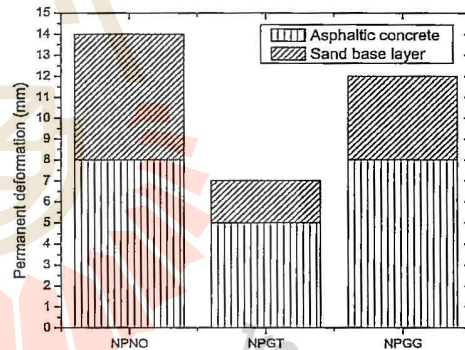
Case	Fabric Effective Factor	
	Geotextile	Geogrid
New pavement	10.0	1.4
Overlay with slight damage of existing pavement	6.9	5.0
Overlay with high damage of existing pavement	1.5	1.6



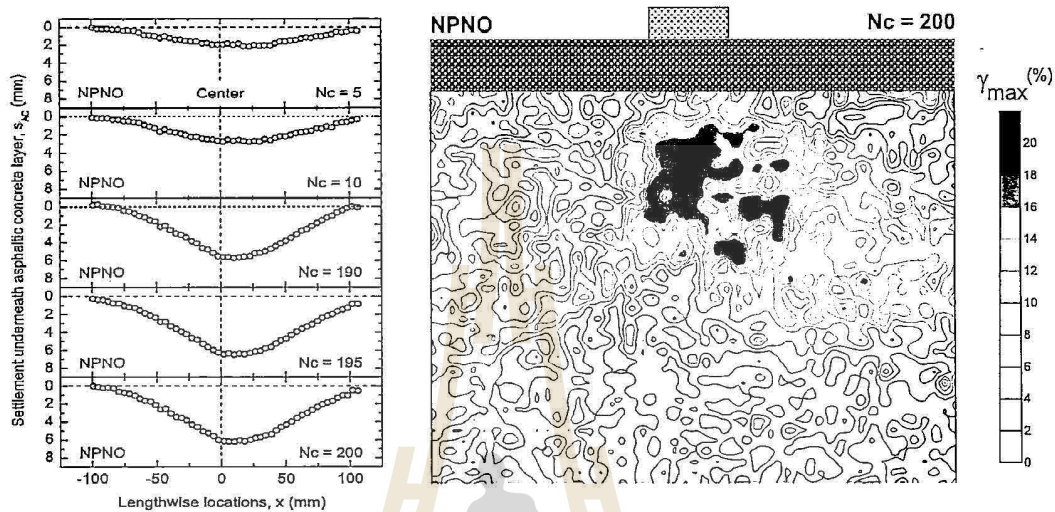
รูปที่ 6 การเสียรูปของผิวทางที่เสริมด้วยวัสดุต่างชนิดกัน



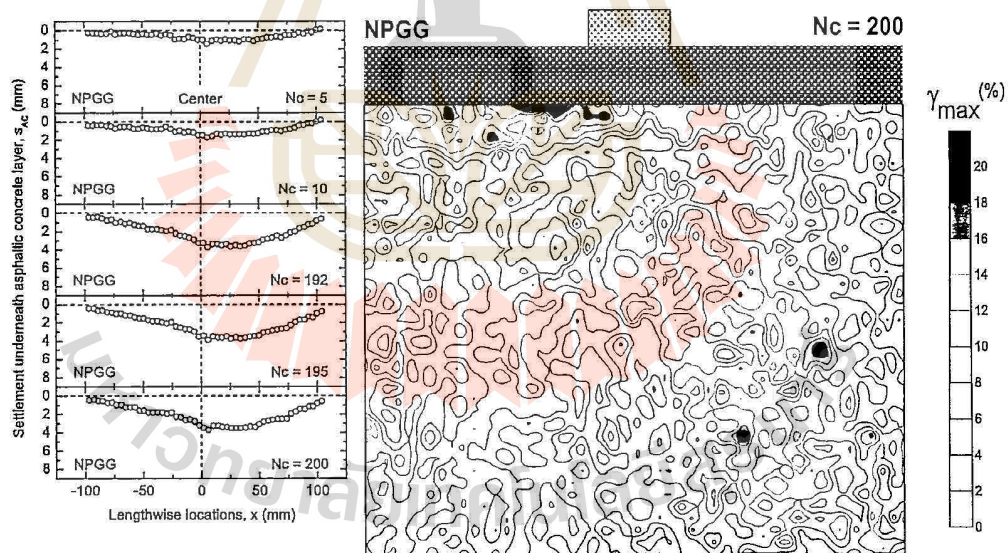
รูปที่ 7 การเสียรูปแบบถาวรของผิวทางเสริมด้วยวัสดุเสริมแรงต่างชนิดกัน



รูปที่ 8 การเสียรูปแบบถาวรของผิวทางที่เกิดขึ้นโดยแยกเป็นแต่ละส่วนประกอบของโครงสร้างผิวทาง



รูปที่ 9 ความเครียดเฉือนและการเสียรูปของผิวทางที่ไม่ได้เสริมแรง



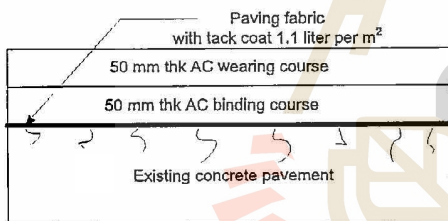
รูปที่ 10 ความเครียดเฉือนและการเสียรูปของผิวทางที่เสริมแรงด้วย geogrid

#### 4. กรณีศึกษา

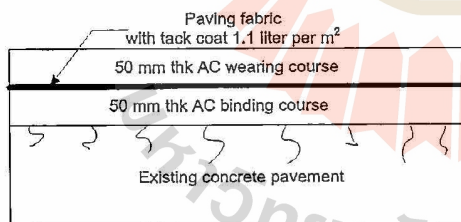
ในประเทศไทยมีการเริ่มใช้แผ่นใยสังเคราะห์ในงานผิวทางเมื่อปี ค.ศ. 2002 โดยมีการใช้ในทางหลวงหมายเลข 1 กรุงเทพ-สระบุรี และหมายเลข 32 บางปะอิน-นครสวรรค์ หมายเลข 314 บางปะกง

ฉะเชิงเทรา และหมายเลข 14 เขาทราย-ตากฟ้า รูปแบบของการก่อสร้างแสดงในรูป 11 ก่อนการปูแผ่นใยสังเคราะห์จะฉีดยางมะตอย (tack coat) ก่อนเพื่อให้แผ่นใยสังเคราะห์มีการยึดติดกับผิวทางด้านบนและด้านล่าง ปริมาณยางแอสฟัลต์ที่ใช้ในการก่อสร้าง

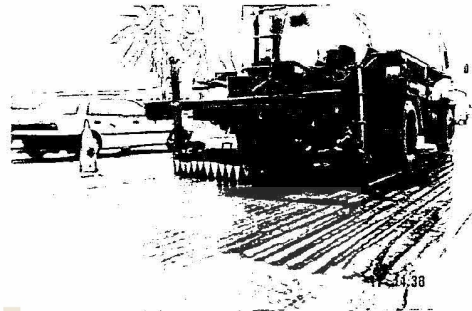
คือเท่ากับ 1.1 ลิตรต่อตารางเมตร ปริมาณยางดังกล่าวจะต้องพอดีกับชนิดของแผ่นใยสังเคราะห์หากใส่มากเกินไปจะทำให้เกิดเป็นชั้นของยางกับแผ่นใยสังเคราะห์ซึ่งมีสตีเฟนสต่ำทำให้เกิดปัญหาในภายหลังหรือในทางกลับกันหากใส่อย่างน้อยเกินไปจะทำให้เกิดฟองอากาศในแผ่นใยสังเคราะห์ทำให้เกิดการลอกหลุดได้ในอนาคต การออกแบบความหนาของการเสริมผิวทางใช้หลักการของสมการที่ 3 [4] จะได้ว่าผิวทางสามารถรับปริมาณจราจรได้อีก  $2 \times 10^6$  ESALs จากนั้นกรมทางหลวงได้ขยายผลโดยนำไปก่อสร้างในทางหลวงหมายเลข 2 สระบุรี-นครราชสีมาดังแสดงในรูปที่ 12 และ 13 การออกแบบจะต่างจากกรณีศึกษาในกรณีแรกกล่าวคือก่อนการปูแผ่นใยสังเคราะห์จะมีการปรับผิวทางเดิมให้เรียบก่อนด้วยการแอสฟัลต์คอนกรีตชั้นแรกหนา 50 มม. ก่อนที่จะมีการติดตั้งแผ่นใยสังเคราะห์ผิวทางดังกล่าวจะสามารถรับปริมาณจราจรได้อีก  $1 \times 10^6$  EASLs



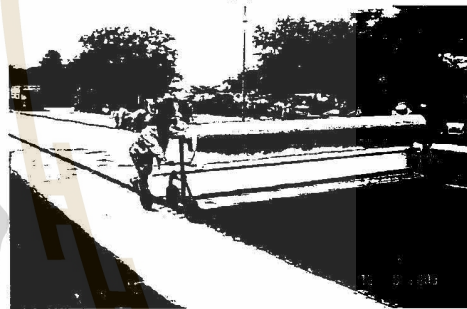
รูปที่ 11 การเสริมผิวทางด้วยแผ่นใยสังเคราะห์แบบที่ 1



รูปที่ 12 การเสริมผิวทางด้วยแผ่นใยสังเคราะห์แบบที่ 2



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 13 การก่อนสร้างการเสริมผิวทางด้วยแผ่นใยสังเคราะห์



## 5. บทสรุป

การใช้วัสดุใยสังเคราะห์ในผิวทางยึดหยุ่นจะเป็นการเสริมแรงให้กับผิวทางและเป็นการลดการแตกร้าวที่จะเกิดได้ผิวทาง จากผลการทดสอบผิวทางยึดหยุ่นแบบเสริมแรงในห้องปฏิบัติการพบว่า การเสริมแรงด้วยแผ่นใยสังเคราะห์สามารถลดการเสียรูปของผิวทางได้เป็นอย่างดี และยังพบอีกว่าการใช้วัสดุเสริมแรงจะช่วยลดความเค้นเฉือนได้ผิวทางได้อย่างมีนัยยะสำคัญเมื่อเทียบกับผิวทางที่ไม่มีการเสริมแรง ในบทความนี้ยังได้นำเสนอกรณีศึกษาในการใช้วัสดุเสริมแรงในการเสริมผิวทาง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Bergado, D. T., Youwai, S., Hai, C. N. and Voottipreux, P., "Interaction of nonwoven needle-punched geotextiles under axisymmetric loading conditions with application to reinforced unpaved roads", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 19, No. 5, pp. 299-328, 2001.
- [2] Youwai, Sompote, Warat Kongkitkul, Koonnamas Punthutaecha, Preedithep Anujorn, Pornkasem Jongpradist, "Geosynthetic-reinforced flexible pavement in Thailand", *Proceedings of the ICE-Ground Improvement*, pp. 249-258, 2012
- [3] Perkins, S. W., Bowders, J. J., Christopher, B. R. and Berg R. R., "Geosynthetic Reinforcement for Pavement Systems: US Perspectives", *Geotechnical Special Publication ASCE* (30), 155, pp. 1-15, 2005.
- [4] Koener, R. M., Design with Geosynthetics, Prentice Hall Inc, US, 1998.
- [5] Asphalt Institute, Thickness Design — Asphalt Pavements for Highways and Streets, Manual Series No.1 (MS-1). Asphalt Institute, Lexington, KY., 1991
- [6] Molenaar, A. A. A. and Nods, M., "Design method for plain and geogrid reinforced overlays on cracked pavements", Proc. 3rd Intl. RILEM Conference ed L. Francken, E. Beuving and A. A.A. Molenaar. London. pp. 311-320, 1996.
- [7] Gregory S. Cleveland, Joe W. Button, and Robert L. Lytton, "Geosynthetics In Flexible And Rigid Pavement Overlay Systems To Reduce Reflection Cracking", FHWA/TX-02/1777- 1, Texas Department of Transportation Research and Technology Implementation Office, 2001.
- [8] Haas, R., Walls, J. and Carroll, R.G., "Geogrid Reinforcement of Granular Bases in Flexible Pavements", Transportation Research Record 1188, pp. 19-27, 1988.
- [9] Perkins, S.W., "Geosynthetic reinforcement of flexible pavements: laboratory based pavement test sections", FHWA/MT-99-001/8138, Final Report, Montana Department of Transportation Research, Development and Technology Transfer Program; United States Federal Highway Administration, 1999.
- [10] Ling, H. I. and Liu, Z., "Performance of geosynthetic-reinforced asphalt pavements", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, ASCE, Vol. 127, No. 2, pp. 177-184, 1999.
- [11] Khodaii, A., Fallah, S. and Nejad, F.H. , "Effects of geosynthetics on reduction of reflection cracking in asphalt overlays", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.27, No.1, pp.1-8, 2009.

## กรณีศึกษาการก่อสร้างโครงสร้างดินเสริมแรงด้วยวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์ รองรับโครงสร้างถนน

### Case Study on Geosynthetic-Reinforced Soil Structures Supporting Pavement Structure

วรัช ก้องกิจกุล<sup>1\*</sup> วรุตม์ ตันติวงษ์<sup>2</sup> บุญเสียง หมูเย็น<sup>3</sup> วรินทร์ พึ่งเฟื่อง<sup>4</sup> และ วิฑิตาพรรณ ฉันทโชติ<sup>5</sup>  
<sup>1</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
<sup>2</sup>วิศวกรโครงการ, บริษัท พีระมิตคอนกรีต จำกัด  
<sup>3</sup>ผู้อำนวยการแขวงทางหลวงระนอง, กรมทางหลวง  
<sup>4</sup>ผู้อำนวยการสำนักงานบำรุงทางสุราษฎร์ธานีที่ 3, กรมทางหลวง  
<sup>5</sup>นักศึกษาปริญญาเอก, ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
E-mail: warat.kon@kmutt.ac.th

#### บทคัดย่อ

การก่อสร้างโครงสร้างดินเพื่อยกระดับ เช่น คันทางถนน ในอดีตมักก่อสร้างโดยทำเป็นลาดชันทางด้านข้างให้มีความชันน้อยๆ เช่น 2H:1V ซึ่งในกรณีที่ต้องยกระดับขึ้นสูงมากจะต้องใช้ปริมาณดินถมมหาศาลและใช้พื้นที่ค่อนข้างมาก เมื่อพื้นที่มีจำกัดก็มักจะก่อสร้างโดยทำเป็นกำแพงกันดินแบบ RC Cantilever Wall ซึ่งจะมีค่าก่อสร้างค่อนข้างสูงมากและโดยมากมักจะต้องตอกเสาเข็มเพื่อรองรับฐานรากกำแพง จึงเป็นที่มาของการก่อสร้างโครงสร้างดินเสริมแรงด้วยวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์โพลีเมอร์ที่มีราคาต่ำกว่าถูกกว่า และก่อสร้างได้รวดเร็วกว่าบทความนี้จะนำเสนอกรณีศึกษาการก่อสร้างโครงสร้างดินเสริมแรง 2 กรณีที่ได้ดำเนินการเสร็จลุล่วงไปแล้วด้วยดีและกำลังอยู่ในระหว่างการใช้งานตามปกติประกอบได้ด้วย 1) กำแพง Modular Block ในงานขยายคันทางถนนเพื่อเพิ่มผิวทางจราจร และ 2) ลาดชันเสริมแรงแบบผิวหน้า Soil Bag ในงานแก้ไขการวิบัติของคันทางถนน การก่อสร้างทั้งสองโครงการมีรายละเอียดและลำดับขั้นตอนค่อนข้างมาก ต้องอาศัยความเข้าใจและความเอาใจใส่อย่างรอบคอบ และมีการควบคุมงานที่ดีจากวิศวกรหน้างาน จึงจะก่อสร้างได้อย่างสำเร็จไปได้ด้วยดีและมีความคงทนแข็งแรง คำสำคัญ: กำแพงกันดินเสริมแรง, ลาดชันเสริมแรง, วัสดุเสริมแรงสังเคราะห์, คันทางถนน, กรณีศึกษา

#### 1. คำนำ

อุทกภัยที่เกิดขึ้นในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทยในช่วงเดือนมีนาคมถึงเมษายน พ.ศ. 2554 ได้สร้างความเสียหายอย่างหนักต่อถนนหนทางต่างๆ ที่ใช้ในการคมนาคม ลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ภาคใต้บริเวณที่เกิดความเสียหายของถนนมักพบว่า เป็นพื้นที่ที่น้ำหลากไหลผ่าน มีลาดชันค่อนข้างมาก ดินเดิมมีลักษณะเป็นป่าพรุซึ่งมีกำลังแบกทานต่ำ จึงพบความเสียหายแบบการวิบัติของลาดชันในหลายบริเวณซึ่งต้องทำการแก้ไขโดยการรื้อหรือปรับเปลี่ยนโครงสร้างถนนเดิม แล้วทำการก่อสร้างขึ้นมาใหม่ให้กลับเข้าสู่สภาพที่ดีดั้งเดิมหรือมีความต้านทานต่อภัยธรรมชาติที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตได้มากกว่าเดิม ดังนั้นจึงได้มีการนำวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์มาประยุกต์ใช้เสริมแรงสำหรับการก่อสร้างคันทางถนนที่จะทำการก่อสร้างพื้นที่ขึ้นมาใหม่

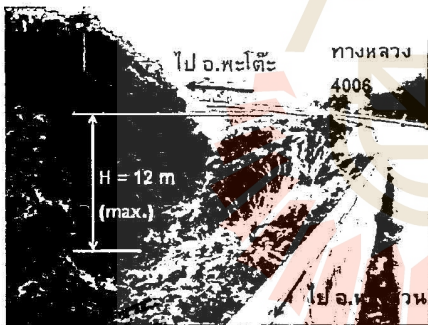
บทความนี้จะนำเสนอกรณีศึกษาการก่อสร้างคันทางถนน 2 โครงการในพื้นที่ภัยพิบัติจากอุทกภัยในภาคใต้ตั้งที่กล่าวมาข้างต้นซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. โครงการแก้ไขปัญหาภัยพิบัติ (งานคืนสู่สภาพเดิม) ในทางหลวงหมายเลข 4006 ตอนแยกทางหลวงหมายเลข 4 (ราชกรูด) - กม.68+100 (ต่อเขตแขวงฯ ชุมพร) ระหว่าง กม.53+900 - กม.56+000ระยะทาง 2.100 กม. ซึ่งก่อสร้างเป็นกำแพง Modular Block เสริมแรงด้วยวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์ และ

2. โครงการฟื้นฟูทางหลวงที่ได้รับผลกระทบจากภัยพิบัติบนทางหลวงหมายเลข 44 ตอนควบคุม 00440200 กม.37+200 (ต่อเขต บท.พังงา) – ไทรโสภา ระหว่าง กม.56+200 – กม.56+450 ซึ่งก่อสร้างเป็นลาดชันเสริมแรงด้วยวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์ที่มีผิวหน้าแบบ Soil Bag

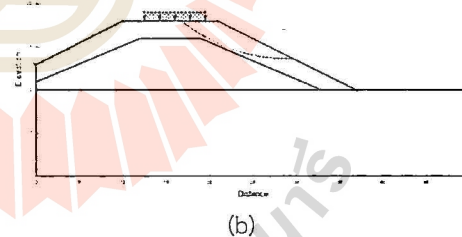
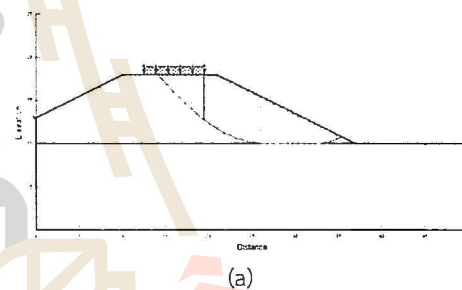
2. สภาพเดิมก่อนการก่อสร้างและสาเหตุความเสียหาย

โครงการที่ 1 สืบเนื่องมาจากการปัญหาความเสียหายกับทางหลวงหมายเลข 4006 งานแก้ไขได้ดำเนินการไปพร้อมๆ กับการขยายช่องทางจราจรจาก 2 ช่องทางเป็น 4 ช่องทาง โครงสร้างถนนเดิมบริเวณที่จะก่อสร้างกำแพง Modular Block [1] ไม่ได้รับความเสียหายจากอุทกภัย แต่ต้องการขยายผิวจราจรคันทางถนนมีลักษณะเป็นคันดินที่ไยถถนนขึ้นสูง มีความชันของลาดชันด้านข้างค่อนข้างมาก ถนนมีความคดเคี้ยว มีการเปลี่ยนระดับ Profile Grade ค่อนข้างมาก ดังแสดงในรูปที่ 1a



รูปที่ 1 สภาพพื้นที่ก่อนการก่อสร้าง: a) กำแพง Modular Block (โครงการที่ 1) และ b) ลาดชันเสริมแรง (โครงการที่ 2)

สำหรับพื้นที่บริเวณโครงการที่ 2 ได้เกิดการเลื่อนไถลของคันทางถนนออกไปทางด้านข้างเป็นระยะทาง 250 เมตรภายหลังฝนตกหนักอย่างต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 1b ในเบื้องต้นสันนิษฐานว่าการเลื่อนไถลน่าจะเกิดจากการอ่อนกำลังลงของดินเมื่อสัมผัสกับน้ำฝน จึงได้นำดินบริเวณที่เกิดการเลื่อนไถลมาทดสอบกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวแบบไม่อัดตัวอย่าง ซึ่งพบว่า กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength,  $S_u$ ) มีค่าเท่ากับ 13.54 และ 8.22 kPa เมื่อไม่แช่และแช่ตัวอย่างดินก่อนการทดสอบตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่า  $S_u$  มีค่าลดลงถึงร้อยละ 40 ซึ่งน่าจะเป็นสาเหตุหลักของการวิบัติที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพเพื่อวิเคราะห์สาเหตุการวิบัติของลาดชันในโครงการที่ 2:

- a) ลาดชันเสถียรเมื่อไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (F.S. = 1.308) และ b) ลาดชันวิบัติเมื่อดินบริเวณผิวอิ่มตัวด้วยน้ำ (F.S. = 0.859)

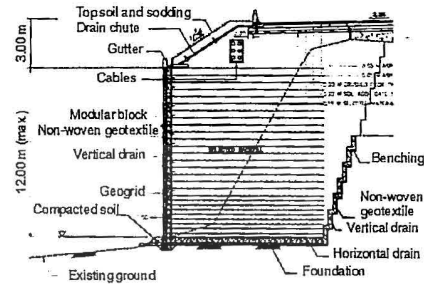
เมื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของคันทางด้วยโปรแกรม Slope/W [2] โดยจำลองลาดชันที่อยู่ในสภาพดั้งเดิมให้มีค่า  $S_u$  เท่ากับ 13.54 kPa ดังแสดงในรูปที่ 2a พบว่ามีลาดชันมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.)

เท่ากับ 1.308 ซึ่งถือว่าเสถียร แต่เมื่อจำลองให้ดินบริเวณผิวหน้าทั้งหมดอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำโดยใช้  $S_u = 8.22 \text{ kPa}$  ดังแสดงในรูปที่ 2b พบว่า F.S. ลดลงเหลือเพียง 0.859 ลาดชันจึงเกิดการเลื่อนไถลขึ้น จึงกล่าวได้ว่า เมื่อดินเดิมอยู่ในสภาวะเปียกและเกิดการสะสมความชื้นเป็นระยะเวลานานจากฝนตกหนักเป็นระยะเวลานานจนทำให้ดินอิ่มตัวและกำลังของดินจะมีค่าลดลง ดินจะสูญเสียเสถียรภาพ ส่งผลให้เกิดการเลื่อนไถลขึ้น

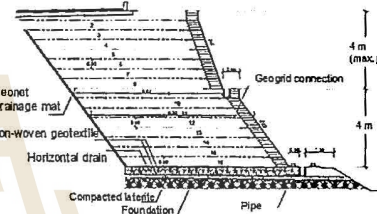
### 3. แนวทางการดำเนินการก่อสร้างเพื่อแก้ไขปัญห

โครงการที่ 1 เป็นการขยายจำนวนช่องจราจรของถนนที่ยกตัวขึ้นสูงมากจากระดับดินเดิม (รูปที่ 1a) การก่อสร้างด้วยวิธีการถมดินออกไปทางด้านข้างด้วยลาดชันมีความชันน้อยๆ เช่น 2H:1V ไม่สามารถทำได้เนื่องจากพื้นที่เขตทางมีจำกัด ผู้ออกแบบจึงได้กำหนดให้ก่อสร้างเป็นกำแพง Modular Block เสริมแรงด้วยวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์ มีความสูงที่มากที่สุดอยู่ที่ประมาณ 12 เมตร มีฐานอยู่ที่ระยะ 3 เมตร ร่นเข้ามาจากเขตทาง ดังแสดงในรูปที่ 3a เพื่อยกระดับคันทางถนนขึ้น แล้วเว้นความสูง 3 เมตร สุดท้ายให้ก่อสร้างเป็นลาดชันมีความชันเท่ากับ 1.5H:1V กำแพง Modular Block นี้ได้ออกแบบมาให้มีชั้นระบายน้ำในแนวตั้งบริเวณด้านหลัง Modular Block และบริเวณที่ติดกับลาดชันคันทางถนนเดิม และมีชั้นระบายน้ำในแนวราบบริเวณที่ติดกับชั้นดินฐานรากเพื่อการระบายน้ำที่อาจเข้ามาในโครงสร้างกำแพง Modular Block ให้ได้มีประสิทธิภาพ

สำหรับโครงการที่ 2 ได้ออกแบบให้ก่อสร้างเป็นลาดชันเสริมแรงด้วยวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์มีผิวหน้าเป็น Soil Bag ลาดชันมีอยู่ 2 ส่วน กล่าวคือ ส่วนล่างมีความสูงเท่ากับ 4 เมตร มีความชันเท่ากับ 0.75H:1V ส่วนบนมีความสูงเท่ากับ 4 เมตร มีความชันเท่ากับ 0.4H:1V รวมความสูงลาดชันทั้งหมดเท่ากับ 8 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3b โดยมีชั้นระบายน้ำในแนวตั้งบริเวณที่ติดกับลาดชันเดิมและชั้นระบายน้ำในแนวราบบริเวณที่ติดกับดินฐานราก



(a)



(b)

รูปที่ 3 แบบแสดงรายละเอียดการก่อสร้าง: a) กำแพง Modular Block ในโครงการที่ 1 และ b) ลาดชันเสริมแรงแบบผิวหน้า Soil Bag ในโครงการที่ 2

### 4. ขั้นตอนการก่อสร้าง

การก่อสร้างมีขั้นตอนการดำเนินงานทั้งที่ทำตามแบบและขั้นตอนการเตรียมพื้นที่และฐานรากซึ่งคล้ายคลึงกันสำหรับทั้งสองโครงการ แต่จะแตกต่างกันตรงการก่อสร้างผิวหน้ากำแพงซึ่งจะได้อธิบายดังต่อไปนี้

#### 4.1 การปรับปรุงสภาพพื้นที่ที่จะทำการก่อสร้าง

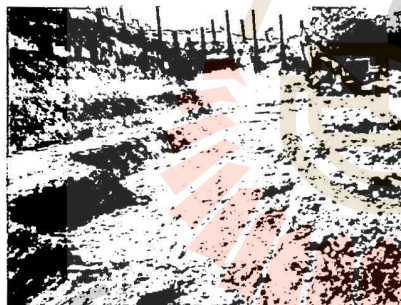
พื้นที่บริเวณที่จะทำการก่อสร้างต้องได้รับการปรับปรุงเสียก่อนโดยทำการถางป่าขุดต่อ (Clearing and Grubbing) ปรับระดับดินฐานราก พร้อมทั้งตัดดินส่วนที่เลื่อนไถลเสียหาย (ถ้ามี) ออกไป (รูปที่ 4a) เนื่องจากปลายวัสดุเสริมแรงตามแบบจะอยู่ใกล้กับดินเดิมมากจึงทำให้ต้องตัดลาดชันด้านข้างคันทางเดิมด้วยความชันที่มาก ดังนั้น ทั้งสองโครงการจึงได้ทำการติดตั้ง Sheet Pile ชั่วคราว (รูปที่ 4b) เพื่อรักษาเสถียรภาพและอำนวยความสะดวกในระหว่างการก่อสร้างที่จะตามมา จากนั้น จึงทำการปรับระดับดินเดิมแล้วบดทับให้มีความหนาแน่นแห้งไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของ



รูปที่ 4 การปรับสภาพพื้นที่ที่จะทำการก่อสร้าง: a) การถางป่าขุดต่อและปรับระดับดินเดิม และ b) การติดตั้ง Sheet Pile ขั้วคร่าวเพื่อรักษาเสถียรภาพ

ความหนาแน่นแห้งสูงสุดจากการทดสอบการบดอัด ในห้องปฏิบัติการด้วยวิธีสูงกว่ามาตรฐาน [3] ในขั้นตอนนี้ หากพบดินอ่อนจะต้องทำการขุดลอกทิ้งทั้งหมด (รูปที่ 5) แล้วแทนที่ด้วยดินที่มีคุณภาพดี เช่น ดินลูกรัง แล้วปรับระดับและบดทับจนมีความแน่นตามที่กำหนด

ความหนาแน่นตามที่ต้องการไว้ก่อนแล้วเพื่อทำการแยกชั้นวัสดุไม่ให้ปะปนกัน (รูปที่ 6a) หากต้องติดตั้งรางระบายน้ำทางยาวหน้าฐานของกำแพงหรือลาดชัน จะต้องดำเนินการก่อน รอยต่อระหว่างแผ่นใยสังเคราะห์ตามแนวยาวจะต้องทับและเย็บติดกันด้วยเครื่องเย็บ



รูปที่ 5 การขุดลอกดินอ่อนทิ้งก่อนแทนที่ด้วยดินลูกรังบดทับ



(a)



(b)

#### 4.2 การติดตั้งชั้นหินระบายน้ำในแนวราบ

เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำซึบภายในโครงสร้างดินเสริมแรงอันจะนำมาซึ่งการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักโครงสร้างดินและการอ่อนกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุถม จึงต้องทำการก่อสร้างชั้นระบายน้ำดักเอาไว้รอบนอกวัสดุถมบริเวณที่จะเสริมกำลังตามแบบที่แสดงในรูปที่ 3 การก่อสร้างเริ่มจากการปูแผ่นใยสังเคราะห์ Non-Woven Geotextile ที่มีมวล 140-200 กิโลกรัมต่อตารางเมตร (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM 3776, [4]) ลงบนดินฐานรากที่ทำการบดอัดให้ได้

รูปที่ 6 การติดตั้งชั้นระบายน้ำในแนวราบ: a) การปูแผ่น Non-Woven Geotextile เพื่อแยกชั้นวัสดุ และ b) การลงวัสดุหินบดทับเพื่อเป็นชั้นระบายน้ำ

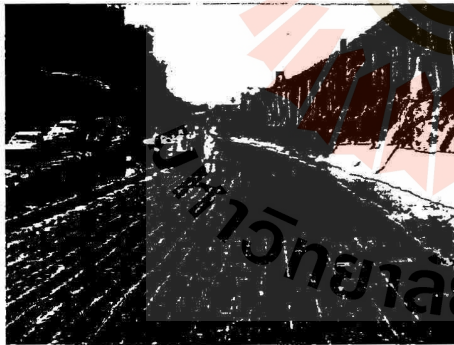
จากนั้นจึงลงวัสดุหินไม่ขนาด 3/8 - 3/4 นิ้วเพื่อใช้เป็นชั้นหินระบายน้ำ โดยใส่ให้ได้ปริมาณตามแบบที่กำหนดแล้วทำการบดทับให้แน่น ใช้เครื่องจักรขนาดเล็กสำหรับการบดทับบริเวณที่ใกล้กับผิวหน้ากำแพงหรือลาด (รูปที่ 6b) เสร็จแล้วจึงนำปลายแผ่นใยสังเคราะห์ที่ได้เหลือเมื่อไว้มาหุ้มชั้นหินไม่นี้

#### 4.3 การติดตั้งวัสดุเสริมแรง

การติดตั้งวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์สำหรับการก่อสร้างกำแพง Modular Block ในโครงการที่ 1 และลาดชันเสริมแรงแบบผิวหน้า Soil Bag ในโครงการที่ 2 มีรายละเอียดแตกต่างกันดังแสดงต่อไปนี้



(a)



(b)

รูปที่ 7 การติดตั้งวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์ในกำแพง Modular Block: a) การเตรียมฐานรากกำแพง และ b) การปูวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์

##### 4.3.1 การติดตั้งวัสดุเสริมแรงสำหรับกำแพง Modular Block

การก่อสร้างกำแพง Modular Block จะต้องเตรียมฐานรากสำหรับการจัดวาง Modular Block

เสียก่อนดังแสดงในรูปที่ 7a การก่อสร้างทำได้โดยการปรับระดับและบดทับดินเดิมให้แน่น วางแบบหล่อคอนกรีตตาม Alignment ที่กำหนด จากนั้นเทคอนกรีตฐานรากโดยจัดเรียง Modular Block บนฐานรากคอนกรีตให้ตรงตาม Alignment (รูปที่ 7a)

ในโครงการที่ 1 ใช้วัสดุเสริมแรงสังเคราะห์จีโอกรีดที่ทำมาจาก HDPE ซึ่งผู้ผลิตได้ออกแบบตัว Grip Lock เพื่อยึดแผ่นวัสดุเสริมแรงเข้ากับ Modular Block ที่จัดเรียงกันเป็นผิวหน้ากำแพง การติดตั้งวัสดุเสริมแรงทำได้โดยการติดตั้ง Grip Lock เข้ากับปลายวัสดุเสริมแรงที่ได้เตรียมไว้ แล้ววาง Modular Block เพื่อให้หน้าหนักกดทับยึดปลายวัสดุเสริมแรงไว้ แล้วจึงตรึงวัสดุเสริมแรงบนผิวหน้าของชั้นดินที่ได้รับการปรับระดับและบดทับไปก่อนหน้า (รูปที่ 7b) บริเวณที่วัสดุเสริมแรงต่อกันในทิศทางเข้าไปในกำแพงจะต้องเหลื่อมกันอย่างน้อย 30 เซนติเมตร จากนั้นจึงลงวัสดุถมแล้วทำการบดทับโดยกำหนดให้เครื่องจักรแล่นขนานกับกำแพงเท่านั้น การบดทับเริ่มจากบริเวณที่ติดกับกำแพงก่อนแล้วค่อยๆ ไล่เข้าไปด้านในเพื่อให้วัสดุเสริมแรงที่ไต่ปูดังขึ้นเรื่อยๆ เมื่อบดทับ การบดทับบริเวณที่ใกล้กับกำแพงต้องใช้เครื่องจักรขนาดเล็กเพื่อป้องกันการเสียรูปของกำแพงที่ได้จัดเรียง Alignment ไว้ดีแล้วก่อนหน้า

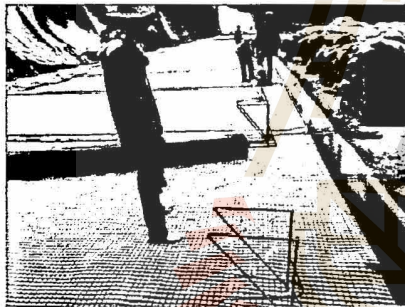
##### 4.3.2 การติดตั้งวัสดุเสริมแรงสำหรับลาดชันเสริมแรงแบบผิวหน้า Soil Bag

การก่อสร้างลาดชันเสริมแรงแบบผิวหน้า Soil Bag เริ่มจากการปูวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์ลงบนชั้นดินบดทับก่อนหน้า สำหรับการเสริมแรงชั้นแรก ปูวัสดุเสริมแรงลงบนชั้นระบายน้ำในแนวราบที่ได้เตรียมไว้ โดยเหลือส่วนปลายของวัสดุเสริมแรงทางด้านหน้าของลาดชันไว้ดังแสดงในรูปที่ 8a ส่วนปลายที่เหลือไว้นี้ต้องเพียงพอสำหรับการเชื่อมต่อเข้ากับวัสดุเสริมแรงในชั้นถัดไป การทาบวัสดุเสริมแรงในทิศที่ตั้งฉากกับแนวกำแพงจะต้องมีระยะไม่น้อยกว่า 30 เซนติเมตร

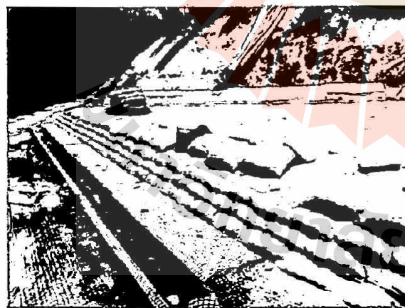
Soil Bag สำหรับวางทับวัสดุเสริมแรงและเป็นผิวหน้าจะต้องบรรจุดินที่มีส่วนผสมของปุ๋ยอินทรีย์และเมล็ดพืชประเภทหญ้าและถั่วเพื่อให้งอกออกมาปกคลุมผิวหน้าของลาดชันป้องกันการกัดเซาะจากน้ำ

และการเสื่อมสภาพจากแสงอาทิตย์ การบรรจุดินที่มี ส่วนผสมดังกล่าว ให้ใส่ลงไปตรงกันถุงปริมาณ ครึ่งหนึ่ง ส่วนที่เหลือครึ่งบนของถุงจะบรรจุดินในพื้นที่ ก่อสร้างจนเต็มถุง หลังจากนั้นจึงร้อยปิดปากถุงให้ แน่น เมื่อเสร็จสิ้น Soil Bag จะมีความหนาประมาณ 12.5 เซนติเมตร

การจัดเรียง Soil Bag ลงบนวัสดุเสริมแรง ให้หัน ด้านกันถุงออกไปทางด้านนอกลาดชันและเรียง สลับกันเพื่อให้รอยซ้อนกันระหว่างกระสอบไม่ต่อเนื่อง จนได้ความสูง 0.5 เมตร (รูปที่ 8b) การจัดเรียงให้ได้ ความชันและระดับตามที่กำหนด จะใช้ไม้แบบหรือ การชิงเอนช่วยก็ได้ จากนั้นจึงตักวัสดุเสริมแรงแล้วลง วัสดุถมเป็นชั้นๆ ชั้นละ 12.5 เซนติเมตร แล้วบดทับ ให้ได้ความแน่นตามที่กำหนด ทำซ้ำจนครบ 4 ชั้นจน ได้ความหนาทั้งหมดเท่ากับ 0.5 เมตร



(a)

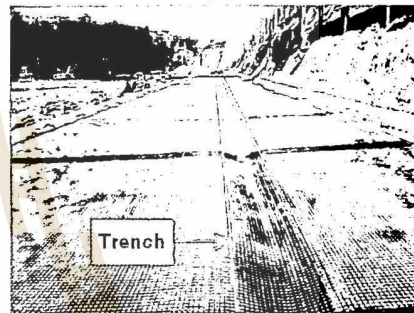


(b)

รูปที่ 8 การติดตั้งวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์ในลาดชัน แบบผิวหน้า Soil Bag: a) การปูวัสดุเสริมแรง และ b) การจัดเรียง Soil Bag และลงวัสดุถมบดอัด

เมื่อต้องการก่อสร้างชั้นถัดไป ให้ตลบลายวัสดุ เสริมแรงที่เหลือเผื่อไว้ (รูปที่ 8a) ให้กลับมาปูลงบน ชั้นวัสดุถมที่บดทับไปก่อนหน้านี้ แล้วจึงตักไว้ด้วยหมุด

(รูปที่ 9) การปูวัสดุเสริมแรงในชั้นถัดมาให้ทำการขุด ผิวดินชั้นที่บดทับไปก่อนหน้านี้ให้เป็นร่อง (Trench) ตามแนวนานกับกำแพงเพื่อใช้ตรึงแผ่นวัสดุเสริมแรง เมื่อปูวัสดุเสริมแรงสำหรับชั้นถัดไปเรียบร้อยแล้ว (รูป ที่ 10) ให้รัดวัสดุเสริมแรงชั้นก่อนหน้านี้และชั้นที่วางทับ อยู่เข้าด้วยกันทุกๆ ระยะ 0.25 เมตรในทิศทางขนาน กับลาดชัน จากนั้นจึงจัดเรียง Soil Bag ให้อยู่ใน ตำแหน่งตามแบบแล้วลงวัสดุถมและบดทับเฉก เช่นเดียวกับดินเสริมแรงชั้นแรก



รูปที่ 10 การขุดดินเป็นร่องในทิศทางขนานกับลาดชัน เพื่อใช้ตรึงแผ่นวัสดุเสริมแรง

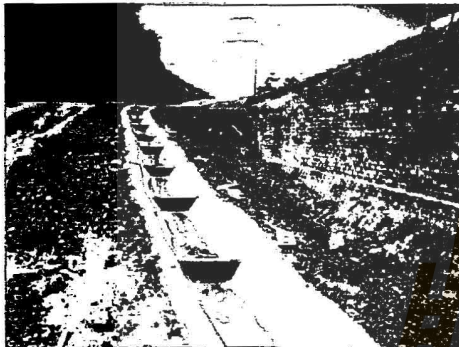


รูปที่ 11 การติดตั้งแผ่นระบายน้ำในแนวตั้งบริเวณที่ โครงสร้างดินเสริมแรงติดกับโครงสร้างดินเดิม เพื่อใช้ตัดก้นน้ำแล้วระบายลงสู่ชั้นระบายน้ำ ในแนวราบทางด้านล่าง

#### 4.4 การติดตั้งชั้นระบายน้ำในแนวตั้ง

บริเวณด้านหลังของโครงสร้างดินเสริมแรงที่ติด กับโครงสร้างดินเดิม จะต้องติดตั้งชั้นระบายน้ำใน แนวตั้งเพื่อใช้ตัดก้นน้ำใต้ดินที่อาจมี ไม่ให้เข้ามาใน บริเวณดินเสริมแรง ชั้นระบายน้ำในแนวตั้งนี้อาจ ก่อสร้างได้โดยการทำเป็นชั้นหินระบายน้ำซึ่งจะต้อง โอบรอบด้วย Non-Woven Geotextile เพื่อป้องกัน

ไม่ให้เกิดการปนเปื้อนหินระบายน้ำซึ่งอาจทำให้เกิดการอุดตันในชั้นระบายน้ำนี้ได้ อย่างไรก็ตาม ทั้งโครงการที่ 1 และ 2 เลือกที่จะก่อสร้างทางระบายน้ำในแนวตั้งด้วยแผ่นระบายน้ำ (Geonet Drainage Mat) เนื่องจากติดตั้งได้ง่ายดังแสดงในรูปที่ 11



(a)



(b)

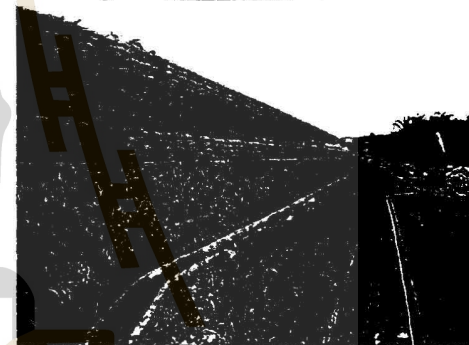
รูปที่ 12 รางระบายน้ำในแนวตั้ง (Step Drain Chute) เพื่อใช้ระบายน้ำจากผิวจราจร: a) กำแพง Modular Block ในโครงการที่ 1 และ b) ลาดชั้นเสริมแรงแบบผิวหน้า Soil Bag ในโครงการที่ 2

#### 4.5 การติดตั้งรางระบายน้ำ

การก่อสร้างกำแพงกันดินเสริมแรงจะต้องป้องกันไม่ให้น้ำเข้าไปในบริเวณที่เสริมแรง ดังนั้น น้ำที่ไหลมาจากผิวจราจรจะต้องถูกดักให้ระบายออกไปตามทางระบายน้ำในแนวราบที่ได้เตรียมไว้ทางด้านข้างของถนน (Gutter) เมื่อน้ำได้มารวมกันแล้วจะต้องระบายออกไปตามรางระบายน้ำในแนวตั้ง (Step Drain Chute) ที่มีลักษณะเป็นขั้นบันไดเพื่อชะลอความเร็วการไหลของน้ำดังแสดงในรูปที่ 12



(a)



(b)

รูปที่ 13 สภาพหน้างานเมื่อเพิ่งก่อสร้างแล้วเสร็จ: a) กำแพง Modular Block ในโครงการที่ 1 และ b) ลาดชั้นเสริมแรงแบบผิวหน้า Soil Bag ในโครงการที่ 2

#### 4.6 การเก็บรายละเอียดขั้นสุดท้าย

เมื่อได้ก่อสร้างโครงสร้างกำแพง Modular Block และลาดชั้นเสริมแรงแบบผิวหน้า Soil Bag แล้วเสร็จ จึงเริ่มทำการก่อสร้างโครงสร้างชั้นทาง ผิวทาง ระบบไฟส่องสว่าง และตีเส้นผิวจราจร นอกจากนี้จะต้องทำความสะอาดบริเวณไซต์งานก่อสร้างโดยเฉพาะรางระบายน้ำเพื่อให้พร้อมใช้งาน รวมทั้งทำการปลูกหญ้าปกคลุมลาดชั้นเหนือกำแพง Modular Block เมื่อเสร็จสิ้นการก่อสร้างแล้ว กำแพง Modular Block และลาดชั้นเสริมแรงแบบผิวหน้า Soil Bag จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 13a และ 13b ตามลำดับ



## 5. สรุป

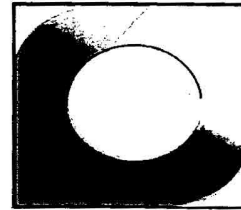
บทความนี้ได้นำเสนอกรณีศึกษา 2 กรณีจากการก่อสร้างโครงสร้างดินเสริมแรงเพื่อรองรับโครงสร้างถนนที่ได้ดำเนินการแล้วเสร็จและกำลังใช้งานอยู่ในประเทศไทย กล่าวคือ 1) การก่อสร้างกำแพง Modular Block เพื่อการขยายช่องทางจราจร และ 2) การก่อสร้างลาดชันเสริมแรงแบบผิวหน้า Soil Bag ในงานแก้ไขการวิบัติของคันทางถนน ขั้นตอนการก่อสร้างประกอบไปด้วย การปรับสภาพพื้นที่ที่จะทำการก่อสร้าง การติดตั้งชั้นหินระบายน้ำในแนวราบ การติดตั้งวัสดุเสริมแรง การติดตั้งชั้นระบายน้ำในแนวตั้ง การติดตั้งรางระบายน้ำ และการเก็บรายละเอียดชั้นสุดท้าย ซึ่งมีรายละเอียดปลีกย่อยที่สำคัญๆ ค่อนข้างมาก การก่อสร้างจะต้องดำเนินการด้วยความเข้าใจและความเอาใจใส่ มีวิศวกรควบคุมจึงจะได้โครงสร้างดินเสริมแรงที่มีความคงทนแข็งแรงอย่างเช่นกรณีศึกษาที่ได้นำเสนอ

## เอกสารอ้างอิง

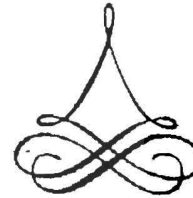
- [1] Elias, V., and Christopher, B.R., "Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes: Design & Construction Guidelines", U.S. Department of Transportation Publication No. FHWA-NHI-00-043, 2001, Federal Highway Administration
- [2] [http://www.geoslope.com/products/slope\\_ew.aspx](http://www.geoslope.com/products/slope_ew.aspx)
- [3] ASTM D1557 - 12 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>))
- [4] ASTM D3776 / D3776M - Standard Test Methods for Mass Per Unit Area (Weight) of Fabric

The Advanced Geosynthetic Contractor

# Ceteau



ห้างหุ้นส่วนจำกัดนันทพลวิศวกรรม  
NUNTHAPHON ENGINEERING LIMITED PARTNERSHIP  
187/2 ซอยเทศบาล 4/1 ถนนวิภาวดีรังสิต แขวง หลักสี่ เขต หลักสี่ กรุงเทพฯ 10210  
โทร 042-743346 โทรสาร 042-743346



TOGETHER ARCHITECTS CO.,LTD.  
บริษัท สถาปนิกภูเกิดเตอร์ จำกัด  
เลขที่ 449 / 9 ถนนสีลมเมือง ต.บางพลีใหญ่  
อ.เมือง จ.สมุทรสาคร 17000  
โทร 042-743346 โทรสาร 042-743436  
www.togetherarchitects.com

**WAGI**  
บริษัท เอเชีย จีโอเทคนิคัล อินสตรูเมนต์ จำกัด  
Asia Geotechnical Instrument Co., Ltd.

**TENCATE**  
materials that make a difference



บริษัท ซีพีที จำกัด (มหาชน)

Seafco Public Company Limited

