

รหัสชุดโครงการ 7-712-55-12-04



รายงานการวิจัย

ชุดโครงการวิจัย

พฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินลูกรังที่ปรับปรุงด้วยวัสดุเสริม
กำลังเพื่อใช้เป็นกำแพงกันดิน

(Performance of Lateritic Soil Stabilized with Earth
Reinforcement as a Retaining Structure)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

ชุดโครงการวิจัย

พฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินลูกรังที่ปรับปรุงด้วยวัสดุเสริมกำลังเพื่อใช้เป็น
กำแพงกันดิน

(Performance of Lateritic Soil Stabilized with Earth Reinforcement as
a Retaining Structure)

โครงการวิจัยย่อย

1. กำลังต้านทานแรงกดของเหล็กเสริมแบกทานในดินลูกรัง
หัวหน้าโครงการวิจัยย่อย: ศาสตราจารย์ ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข
2. พฤติกรรมการไหลของน้ำผ่านดินลูกรังที่ปรับปรุงด้วยวัสดุเสริมกำลัง
หัวหน้าโครงการวิจัยย่อย: รองศาสตราจารย์ ดร. อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ
2555

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2559

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักสองประการ คือการพัฒนาสมการทำนายกำลังต้านทานแรง
เฉือนของเหล็กเสริมแบกทานในดินลูกรัง และการศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำในดินลูกรัง ความ
ต้านทานแรงเฉือนรวมเท่ากับผลรวมของความต้านทานแรงเฉือนเสียดทานและความต้านทานแรงเฉือน
แบกทาน ความต้านทานแรงเฉือนเสียดทานประมาณได้จากกำลังต้านทานแรงเฉือนและสัมประสิทธิ์
การยึดเกาะ (α) ความต้านทานแรงเฉือนแบกทานของเหล็กตามขวาง n ตัว ขึ้นอยู่กับการรบกวนกัน
ระหว่างเหล็กตามขวาง ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 โซน ตามอัตราส่วนระหว่างระยะห่างเหล็กตามขวางต่อ
ความยาวขาคเหล็กตามขวาง (S/B) โซน 1 ($S/B \leq 3.75$) คือการวิบัติแบบบล็อก ซึ่งเหล็กตาม
ขวางทุกตัวมีพฤติกรรมเสมือนเป็นบล็อกผิวยาบ โซน 2 ($3.75 < S/B < S_2/B$) คือการวิบัติ
แบบรบกวนกันระหว่างเหล็กตามขวาง โซน 3 ($S/B > S_2/B$) คือการวิบัติแบบอิสระ α และ
อัตราส่วน S_2/B มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณส่วนละเอียด

ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของดินลูกรังสำหรับใช้เป็นวัสดุดินถมในพื้นที่เสริม
กำลัง ได้การศึกษาอิทธิพลเนื่องจากคุณสมบัติด้านการอุ้มน้ำของดิน รวมถึงคุณสมบัติของ
geocomposite ที่ใช้เป็นระบบระบายน้ำ ผ่านจำลองเชิงตัวเลขของกำแพงกันดินเสริมแรงที่มีการ
ติดตั้งระบบระบายน้ำแบบ geocomposite ผลการศึกษาพบว่าดินลูกรังสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุดิน
ถมได้ แต่จำเป็นต้องพิจารณาเสถียรภาพภายใต้ความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการกระจาย
ความชื้นในดินลูกรังจะมีช่วงกว้าง และอาจส่งผลต่อเสถียรภาพภายในได้ นอกจากนี้ยังพบว่าใน
กรณีที่ดินด้านต้นน้ำ นอกพื้นที่เสริมกำลังมีค่าความชื้นผ่านได้สูงมาก การเลือกใช้ geocomposite
จำเป็นต้องพิจารณาความสามารถในการระบายน้ำจำนวนมากที่อาจเกิดขึ้นได้กับดินประเภทนี้



Abstract

This research has two main objectives: development of pullout resistance of pullout resistance predictive equation for lateritic soil and investigation of flow behavior through the lateritic backfill. The total pullout resistance is the sum of pullout friction and bearing resistances. The pullout friction resistance is approximated from soil shear strength and interaction factor α . The pullout bearing resistance of n transverse members is governed by transverse member interference. The transverse member interference is classified into three zones, depending upon spacing and dimension of transverse member, S/B ratio. Zone 1 ($S/B \leq 3.75$) is block failure where all transverse members act like a rough block. Zone 2 ($3.75 < S/B < S_2/B$) is member interference failure. Zone 3 ($S/B > S_2/B$) is individual failure. The α and S_2/B ratio decrease with increasing fine content.

The feasibility of using lateritic soil as backfill material in mechanical stabilized earth wall was conducted through investigating hydrologic responses upon rising of the upstream water level. The water retention characteristic of the backfill material and hydraulic conductivity of geocomposite are the main factors being investigated. Numerical model in Plaxis 2-D was employed to conduct the parametric study. Results show that lateritic soil is potentially possible to be used as backfill material. However, care must be paid for stability analysis when the wall is involving with water. In addition, the drainage capacity of geocomposite must be determined to check whether the drainage system can support large amount of water from upstream side, particularly when the upstream soil possesses high hydraulic conductivity.



1. รายละเอียดของโครงการวิจัย

ชื่อแผนงานวิจัย: พฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินลูกรังที่ปรับปรุงด้วยวัสดุเสริมกำลัง pvc เพื่อใช้เป็นกำแพงกันดิน

ชื่อโครงการย่อยที่ 1: กำลังต้านทานแรงฉุดของเหล็กเสริมแบกทานในดินลูกรัง

ชื่อโครงการย่อยที่ 2: พฤติกรรมการไหลของน้ำผ่านดินลูกรังที่ปรับปรุงด้วยวัสดุเสริมกำลัง

ทุนอุดหนุนการวิจัย: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ 2555

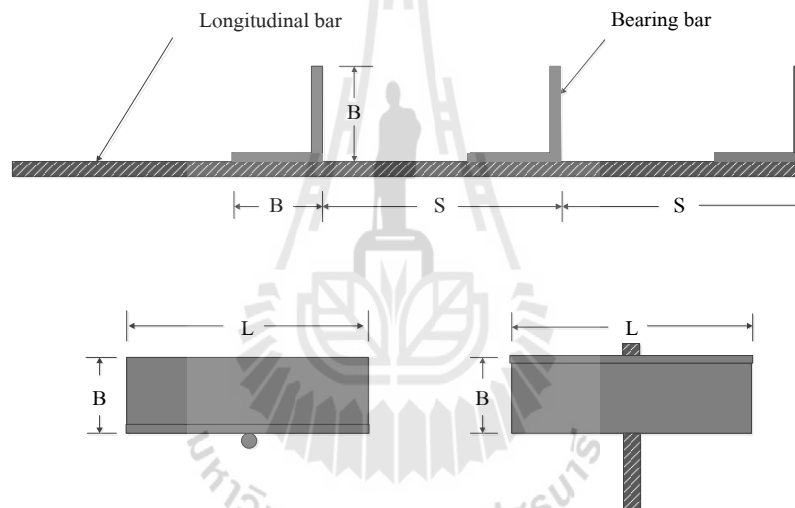
2. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในช่วงสองศตวรรษที่ผ่านมา โครงสร้างกันดินแบบเสริมกำลัง (Mechanically Stabilized Earth, MSE) โดยใช้เหล็กและโพลีเมอร์เป็นวัสดุเสริมกำลัง (Reinforcement) ได้รับการยอมรับและใช้ในงานทางวิศวกรรมปฐพีอย่างแพร่หลาย โครงสร้างกันดินเสริมกำลังสามารถใช้ก่อสร้างดินถมที่สูงและชันมาก โดยปราศจาก Berm และ Side slope ดังนั้น จึงช่วยลดปัญหาด้านข้อจำกัดของพื้นที่ด้านข้าง ข้อดีอีกประการหนึ่งของกำแพงกันดินแบบนี้คือการทรุดตัวของกำแพงกันดินแบบ MSE มีความสม่ำเสมอ (การทรุดตัวที่แตกต่างกันมีค่าน้อยมาก) ทำให้ลดปัญหาการแตกร้าวของผิวถนน เหล็กเสริมกำลังที่ฐานของกำแพงกันดินช่วยต้านการเคลื่อนตัวในแนวนอนของดินถมและเพิ่มกำลังรับแรงแบกทานของดินฐานราก (Jewell, 1986)

วัสดุเสริมกำลังเป็นตัวแปรหลักที่ควบคุมราคาค่าก่อสร้าง ราคาค่าก่อสร้างเฉพาะวัสดุเสริมกำลังและการติดตั้ง (ไม่รวมค่าดินถมและการบดอัด) จะแปรผันในช่วง 2,500–3,500 บาท ต่อตารางเมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุเสริมกำลัง (แตกต่างกันตามแต่การเลือกใช้ของแต่บริษัทก่อสร้าง) วัสดุเสริมกำลังที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศหรือต้องเสียค่าลิขสิทธิ์ให้กับเจ้าของสิทธิบัตรต่างชาติจะมีราคาสูงมาก

เพื่อเป็นการลดต้นทุนค่าก่อสร้างให้แก่บริษัทก่อสร้าง อันนำมาซึ่งการลดงบประมาณค่าก่อสร้างของเจ้าของงาน (กรมทางหลวง กรมชลประทาน และหน่วยงานภาครัฐและเอกชน) บริษัท จีไอฟอร์ม จำกัด ได้ร่วมกับสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข พัฒนาเหล็กเสริมแบกทานแบบใหม่ที่เรียกว่า “เหล็กเสริมแบกทาน (Bearing reinforcement)” ซึ่งเป็นเหล็กเสริมที่ใช้เหล็กข้ออ้อย (Deformed bar) เป็นเหล็กแกน (Longitudinal member) และใช้เหล็กฉากเป็นเหล็กตามขวาง

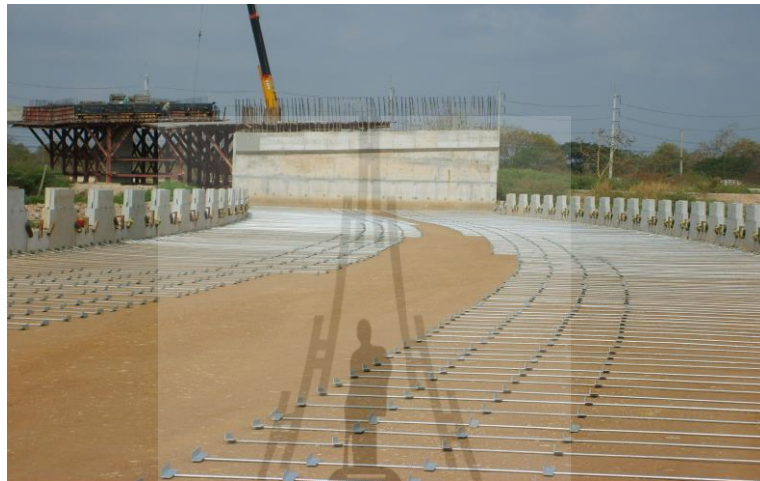
(Transverse member) ดังแสดงในรูปที่ 1 จุดเด่นของเหล็กเสริมแบกทานคือความสามารถในการรับแรงแบกทานของเหล็กเสริมสูงมาก อีกทั้งการประกอบสามารถทำได้อย่างง่ายดาย (รูปแบบไม่ซับซ้อน) ด้วยช่างเชื่อม จึงทำให้มีราคาต้นทุนที่ต่ำกว่าเหล็กเสริมแบบแผ่นเมื่อพิจารณากำลังต้านทานแรงจุดที่เท่ากัน เหล็กเสริมนี้ได้รับอนุสิทธิบัตร จากกรมทรัพย์สินทางปัญญา ในปี พ.ศ. 2553 กำแพงกันดินเหล็กเสริมแบกทานได้นำประยุกต์ใช้เป็น Bridge abutment ในโครงการก่อสร้างของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทยหลายโครงการ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2551 โดยการก่อสร้างของบริษัท จีไอฟอร์ม จำกัด และการออกแบบโดยสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รูปที่ 2 แสดงภาพถ่ายกำแพงกันดินเหล็กเสริมแบกทานที่ใช้เป็น Bridge abutment โครงการทางแยกต่างระดับสระบุรีตอนสอง



รูปที่ 1 ลักษณะของเหล็กเสริมแบกทาน

นอกจากการประยุกต์ใช้กำแพงกันดินเสริมกำลังเป็น Bridge abutment แล้ว กำแพงกันดินเสริมกำลังยังสามารถใช้เป็นโครงสร้างกันดินสำหรับงานถนนตามไหล่เขาได้ การประยุกต์ใช้กำแพงกันดินชนิดนี้กับงานตามไหล่เขาจะเริ่มมีขึ้นในประเทศไทยครั้งแรกในโครงการก่อสร้างถนนเส้นทาง 11 (อุตรดิตถ์-เด่นชัย) รูปแบบก่อสร้างโครงสร้างกันดินแสดงดังรูปที่ 3 การออกแบบกำแพงกันดินตามไหล่เขาก็สามารถทำได้เช่นเดียวกับกำแพงกันดินสำหรับ Bridge abutment คือการตรวจสอบเสถียรภาพภายนอกและภายใน ซึ่งสามารถอ้างอิงได้จากมาตรฐาน/คู่มือการออกแบบต่างๆ เช่น มาตรฐานของ American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO) เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม มาตรฐานการออกแบบส่วนใหญ่ไม่ได้ระบุวิธี

/แนวทางการติดตั้งระบบระบายน้ำให้กับกำแพงกันดินเสริมกำลัง สำหรับการก่อสร้างกำแพงกันดินเสริมกำลังตามไหล่เขา ระบบระบายน้ำเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากน้ำที่ไหลตามไหล่เขา เนื่องจากพายุฝนอาจซึมผ่านเข้าไปยังกำแพงกันดินเสริมกำลัง ทำให้กำลังต้านทานแรงเฉือนและความต้านทานการเสียรูปของดินลดต่ำลง มีผลให้กำลังต้านทานแรงเฉือนของเหล็กเสริมกำลังและเสถียรภาพของกำแพงกันดินเสริมกำลังลดลง

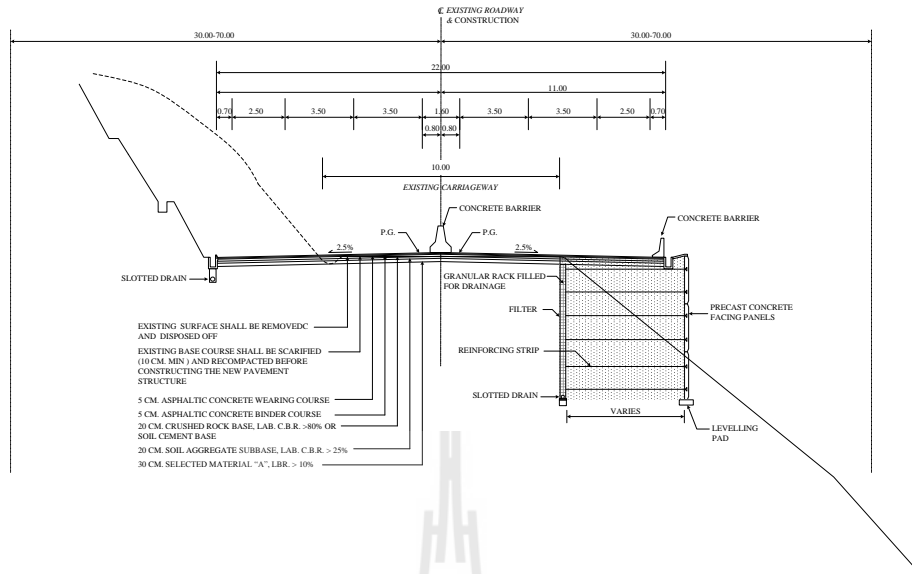


(ก) การจัดวางเหล็กเสริมแบกทาน



(ข) Facing ของกำแพงกันดินเหล็กเสริมแบกทาน

รูปที่ 2 กำแพงกันดินเสริมกำลังแบกทาน โครงการทางแยกต่างระดับสระบุรีตอนสอง



รูปที่ 3 แบบก่อสร้างทั่วไปของกำแพงกันดินเสริมกำลังบริเวณไหล่เขา

การออกแบบกำแพงกันดินเสริมกำลังจำเป็นต้องมีความรู้ทางด้านปฏิกริยาร่วมระหว่างดินและเหล็กเสริมแบกทาน และพฤติกรรมการไหลของน้ำผ่านกำแพงกันดินเสริมกำลังที่มีระบบระบายน้ำ ในด้านปฏิกริยาร่วมระหว่างดินและเหล็กเสริมแบกทาน Horpibulsuk and Niramitkornburee (2010) และ Horpibulsuk et al. (2009) ได้ทำการศึกษาการพัฒนารวมของเหล็กเสริมกำลังแบกทานในดินทรายที่มีความคละสมำเสมอ (Uniformly graded sand) และได้นำเสนอสมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดและการเคลื่อนตัว และกำลังต้านทานแรงจุด นอกจากนี้ พวกเขาพบว่าระยะห่างระหว่างเหล็กตามขวางที่เหมาะสมคือ $S = 25B$ เมื่อ B คือความยาวของขาเหล็กฉาก แต่อย่างไรก็ตาม งานวิจัยดังกล่าวเป็นเพียงงานวิจัยเริ่มต้น ซึ่งจำกัดอยู่เพียงแค่ดินทรายชนิดเดียว กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินประเภทนี้แปรผันตามมุมเสียดทานภายใน (Internal friction) เพียงอย่างเดียว ดังนั้น สมการที่พัฒนาขึ้นจึงไม่สามารถใช้ได้กับดินเหนียวและเสียดทาน (Cohesion-frictional soils)

สำหรับดินถมที่ใช้ในพื้นที่เสริมกำลัง กรมทางหลวงแห่งประเทศไทยกำหนดให้ใช้ดินเม็ดหยาบที่มีกำลังต้านทานแรงเฉือนและความชื้นผ่านน้ำสูงเป็นวัสดุดินถมในพื้นที่เสริมกำลัง โดยดินเม็ดหยาบต้องมีปริมาณดินเม็ดละเอียดปนอยู่ไม่เกินร้อยละ 15 ดังนั้น เพื่อผลทั้งในแง่ของกำลังของดินถม และผลในแง่ของการระบายน้ำด้วย ในปัจจุบัน ประเทศไทยได้มีการใช้ก่อสร้างกำแพงกันดินเสริมกำลังในพื้นที่ไหล่เขาในหลายๆโครงการ เช่นโครงการก่อสร้างถนนเส้นทาง 11

(อุตรดิตถ์-เด่นชัย) โครงการประเภทนี้มีความพิเศษ คือกำแพงมีความสูงมาก และต้องใช้ปริมาณดินจำนวนมาก การใช้ดินที่มีคุณภาพดี แต่ไม่ผ่านมาตรฐานของกรมทาง (marginal soil) เป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถช่วยประหยัดค่าขนส่ง และค่าวัสดุได้เป็นอย่างมาก ทั้งนี้ในพื้นที่ดังกล่าวมีโอกาสที่น้ำจากพื้นที่เขาจะมากกระทบต่อเสถียรภาพของกำแพงได้มาก ดังนั้นการพิจารณาใช้ marginal soil ในพื้นที่ ที่มีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง จำเป็นต้องมีการศึกษาอย่างละเอียด รวมถึงการศึกษาความสามารถของระบบระบายน้ำที่จะนำมาใช้ในพื้นที่ดังกล่าวด้วย Chinkulkijniwat et al. (2016) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน และของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ทางธรณีเทคนิค ใน geocomposite พบว่าคุณลักษณะการอุ้มน้ำที่แตกต่างกัน บริเวณรอยต่อระหว่างดิน และวัสดุใยสังเคราะห์ มีผลต่อฟังก์ชันความซึมผ่านได้ที่แตกต่างกัน และก่อให้เกิดการหน่วงการระบายน้ำได้ อย่างไรก็ตามในการศึกษาดังกล่าวมิได้พิจารณาการนำ marginal soil มาใช้เป็นวัสดุดินถม อีกทั้งมิได้พิจารณาสภาพที่สอดคล้องกับสภาพในสนาม การศึกษานี้จะทำการศึกษาความเหมาะสมของการนำ marginal soil มาใช้เป็นวัสดุดินถม รวมถึงอิทธิพลของวัสดุ geocomposite ที่ใช้เป็นระบบระบายน้ำ ต่อความสามารถในการป้องกันน้ำเข้าสู่พื้นที่เสริมกำลัง

3. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาสมการทำนายกำลังต้านทานแรงเฉือนของเหล็กเสริมแบกทานในดินลูกรัง ซึ่งเป็นดินเหนียวและเสียดทาน (Cohesion-frictional soil)
2. เพื่อสร้างความเข้าใจถึงอิทธิพลของพารามิเตอร์อิทธิพลต่อพฤติกรรมการไหลของน้ำผ่านกำแพงกันดิน อันจะนำมาซึ่งการพัฒนารูปแบบและการจัดวางระบบระบายน้ำ วัสดุเส้นใยสังเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพในเชิงวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์
3. เพื่อศึกษาและจำลองพฤติกรรมของกำแพงกันดินเสริมกำลังพร้อมระบบระบายน้ำ เมื่อมีการไหลของน้ำ อันนำมาซึ่งแบบจำลองที่ถูกต้องและเหมาะสมในการคำนวณ และการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของน้ำผ่านกำแพงกันดินเสริมกำลังและพฤติกรรมทางกลของกำแพงกันดินเสริมกำลังได้

4. กำลังต้านทานแรงฉุดของเหล็กเสริมแบกทานในดินลูกรัง

กำลังต้านทานแรงฉุดทั้งหมด (P_t) ของเหล็กเสริมแบกทานเป็นผลรวมของกำลังต้านทานแรงฉุดเสียดทานของเหล็กตามยาว (P_f) และกำลังต้านทานแรงฉุดแบกทานของเหล็กตามขวาง (P_{bn})

$$P_t = P_f + P_{bn} \quad (1)$$

กำลังต้านทานแรงฉุดเสียดทาน (P_f) สามารถประมาณได้จาก

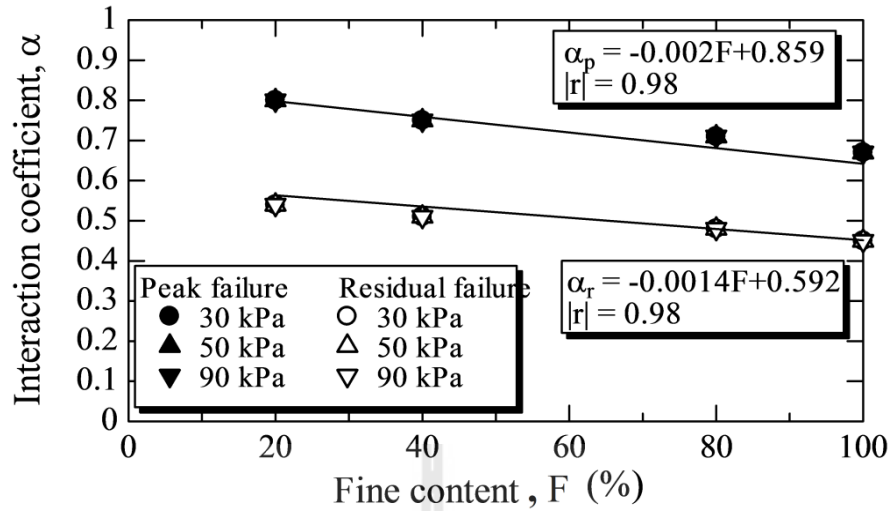
$$P_f = \alpha (c + \sigma_v \tan \phi) A_s \quad (2)$$

เมื่อ c คือหน่วยแรงเหนียว (Adhesion) ϕ คือมุมเสียดทานภายในของดิน σ_v คือความเค้นกดทับในแนวตั้ง และ A_s คือพื้นที่ผิวของเหล็กเสริมกำลัง ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\pi d L_e$ เมื่อ d คือเส้นผ่านศูนย์กลาง และ L_e คือความยาวประสิทธิผลในโซนต้านทานการเคลื่อนที่ (resistant zone)

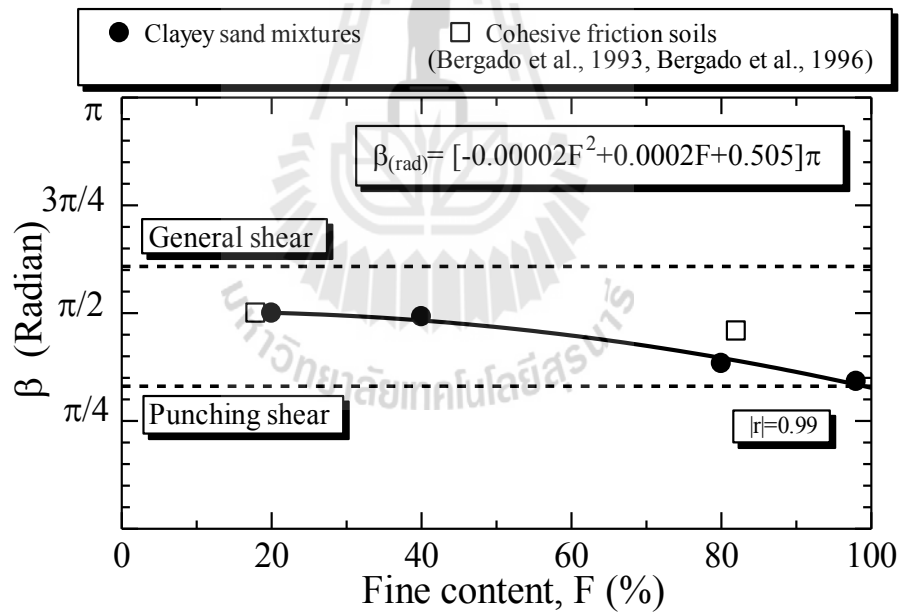
รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การยึดเกาะสูงสุดและสัมประสิทธิ์การยึดเกาะคงค้าง (α_p และ α_r) กับปริมาณส่วนละเอียด α_p และ α_r ไม่แปรผันตามความเค้นตั้งฉากและมีแนวโน้มที่จะลดลงตามปริมาณส่วนละเอียดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดลงของอิทธิพลการยึดเกาะ ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การยึดเกาะกับปริมาณส่วนละเอียด, F (ร้อยละ) แสดงได้ด้วยฟังก์ชันเชิงเส้น ดังนี้

$$\alpha_p = -0.002F + 0.859 \quad \text{เมื่อ } 20\% < F < 98\% \quad (3)$$

$$\alpha_r = -0.0014F + 0.592 \quad \text{เมื่อ } 20\% < F < 98\% \quad (4)$$



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง α_p และ α_r กับ F



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง β และปริมาณส่วนละเอียด

กำลังต้านทานแรงจุดแบกทานของเหล็กตามขวางสามารถคำนวณได้โดยพิจารณาว่าเหล็กตามขวางทำหน้าที่เสมือนฐานรากที่ถูกดึงผ่านดิน กำลังต้านทานแรงจุดแบกทานของเหล็กตามขวางจำนวน n ตัว สามารถประมาณได้จากกำลังต้านทานแรงจุดแบกทานของเหล็กตามขวางหนึ่งตัว

$$P_{bn} = n \times IF \times P_{b1} \quad (5)$$

เมื่อ P_{b1} คือกำลังต้านทานแรงจุดแบกทานของเหล็กตามขวางหนึ่งตัว และ IF คือแฟคเตอร์ปรับจูนระหว่างเหล็กตามขวาง ซึ่งแปรผันตามขนาดของเหล็กตามขวางและระยะห่างระหว่างเหล็กตามแนวขวาง R จะมีค่าไม่เกิน 1.0

แรงจุดแบกทานของเหล็กตามขวางหนึ่งตัว (P_{b1}) สามารถคำนวณได้จาก

$$P_{b1} / BL = cN_c + \sigma_v N_q \quad (6)$$

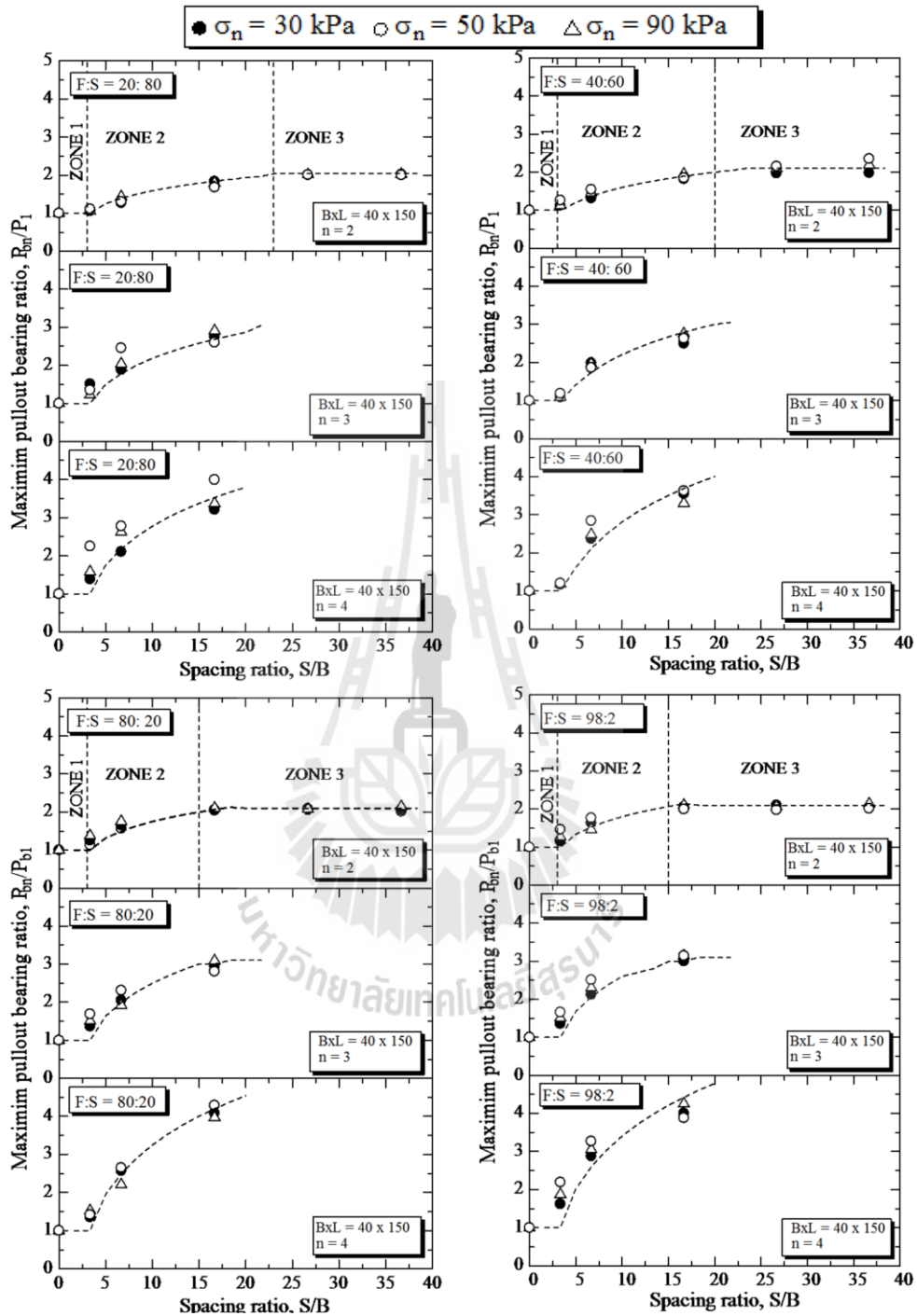
เมื่อ B และ L คือขนาดของเหล็กตามขวาง และ N_c และ N_q คือตัวแปรกำลังรับแรงแบกทานซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$N_q = \frac{1}{\cos \phi} \times \exp[2\beta \tan \phi] \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \quad (7)$$

$$N_c = \frac{1}{\sin \phi} \exp[2\beta \tan \phi] \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) - \cot \phi \quad (8)$$

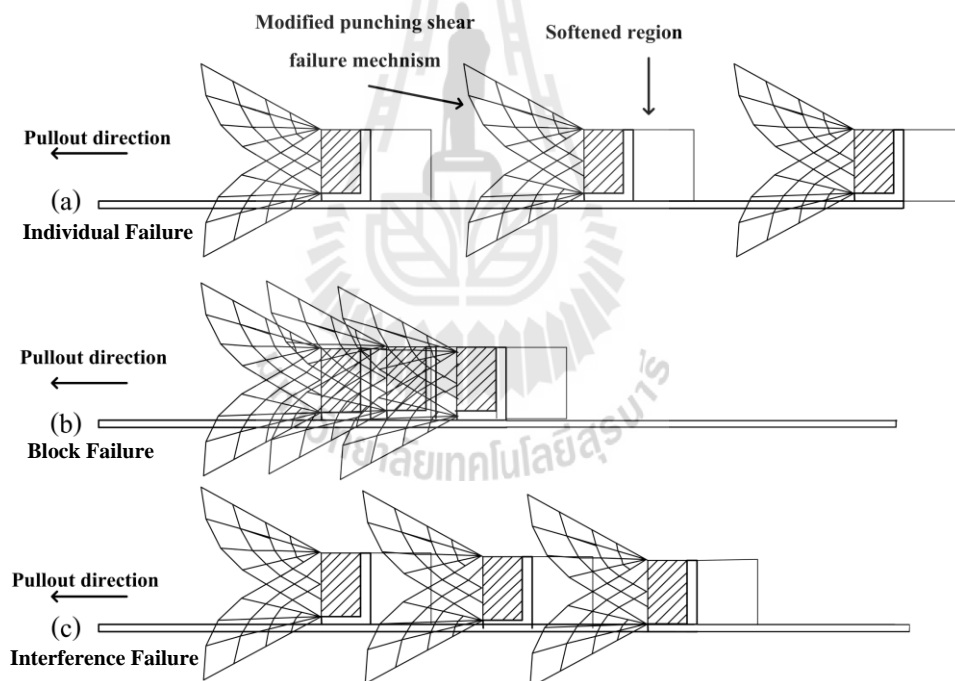
โดยที่ β คือมุมระนาบวิบัติ ซึ่งมีค่าลดลงตามปริมาณส่วนละเอียดที่เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่าง β และปริมาณส่วนละเอียดแสดงดังในรูปที่ 5 ในฟังก์ชันโพลีโนเมียลดังในสมการต่อไปนี้

$$\beta(\text{rad}) = \left[-0.00002F^2 + 0.0002F + 0.505 \right] \pi \quad \text{สำหรับ } 20\% < F < 98\% \quad (9)$$



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง P_{br}/P_{b1} และ S/B

รูปที่ 6 แสดงกลไกการวิบัติของเหล็กตามขวางจำนวน n ตัว ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 โชน ขึ้นอยู่กับค่าของพารามิเตอร์ไร้หน่วย S/B โชนที่ 3 (รูปที่ 7a) เป็นโชนการวิบัติอิสระ ($S/B > S_2/B$) ซึ่งดินบดอัดบริเวณด้านหน้าของเหล็กตามขวางแต่ละตัววิบัติโดยปราศจากการรบกวนกันของระนาบวิบัติ กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่อยู่ใกล้กับเหล็กตามขวางทุกตัวมีค่าประมาณเท่ากับกำลังต้านทานแรงเฉือนสูงสุดขณะที่ดินเกิดการวิบัติ โชนที่ 1 (รูปที่ 7b) แสดงการวิบัติแบบบล็อก (Block failure) เมื่อ $S/B < S_1/B$ ซึ่งเหล็กตามขวางแต่ละตัวมีผิวสัมผัสการเฉือนร่วมกันและก่อตัวรวมกันเป็นระนาบขรุขระ (Rough shear surface) ดังนั้นเหล็กตามขวางตัวแรกเพียงตัวเดียวที่ก่อให้เกิดความต้านทานแรงจุดแบกทาน โชนที่ 2 (รูปที่ 7c) เมื่อ $S_1/B < S/B < S_2/B$ เป็นการวิบัติที่ระนาบวิบัติรบกวนกันซึ่งกันและกัน และดินเกิดการวิบัติใน Softened region



รูปที่ 7 กลไกการวิบัติของเหล็กเสริมแบบกทาน d) การวิบัติแบบอิสระ

b) การวิบัติแบบบล็อก และ c) การวิบัติแบบรบกวนกัน

รูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่า S_1/B มีค่าประมาณคงที่สำหรับทุกปริมาณส่วนละเอียด และมีค่าเท่ากับ 3.75 อย่างไรก็ตาม S_2/B มีค่าลดลงตามปริมาณส่วนละเอียดที่เพิ่มขึ้นและกำลังต้านทานแรงเฉือนที่ลดลง หรืออีกนัยหนึ่งว่า ปริมาณส่วนละเอียดมีผลกับ Softened region และระนาบของการวิบัติของดินด้านหน้าเหล็กตามขวาง

แฟคเตอร์การรบกวนมีค่าแปรผันตาม S/B และจำนวนเหล็กตามขวาง (n) โดยไม่แปรผันตามความเค้นตั้งฉาก

$$IF = \frac{P_{bn}}{nP_{b1}} = a + b \ln\left(\frac{S}{B}\right) \quad (10)$$

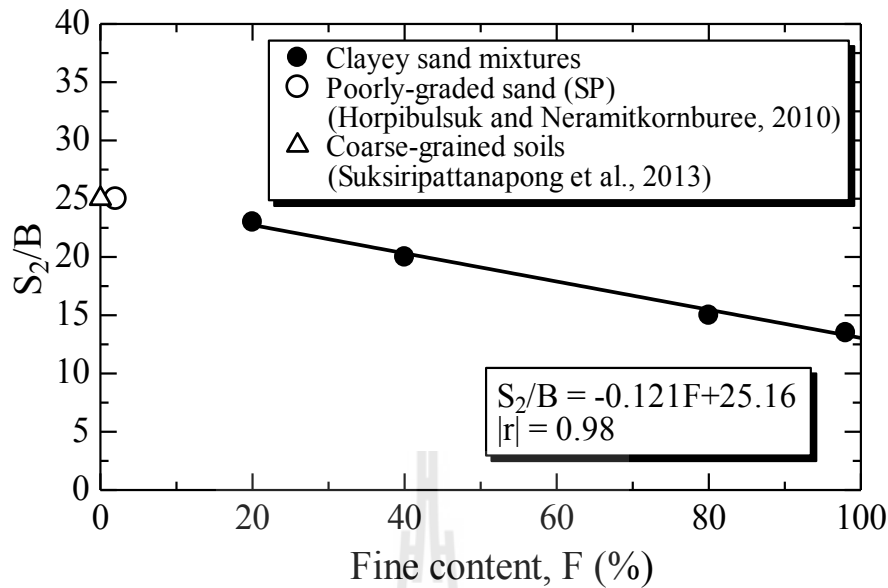
เมื่อ a และ b เป็นค่าคงที่ ขึ้นกับจำนวนเหล็กตามขวางและปริมาณส่วนละเอียด ค่าคงที่ทั้งสองค่านี้หาได้จากเงื่อนไขทางกายภาพดังนี้ 1) เมื่อ S/B เท่ากับ 3.75 แฟคเตอร์การรบกวน (IF) เท่ากับ $1/n$ เพราะว่า P_{bn} และ P_{b1} เป็นค่าเดียวกัน และ 2) เมื่อ S/B เท่ากับ S_2/B แฟคเตอร์การรบกวน (IF) เท่ากับ 1 เงื่อนไขทั้งสองนี้ให้ค่า IF ที่ต่ำสุดและสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับ $S/B = S_1/B$ และ S_2/B ตามลำดับ จากเงื่อนไขดังกล่าว ค่าคงที่ a และ b สามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$b = \frac{\left[1 - \frac{1}{n}\right]}{\left[\ln\left(\frac{S_2}{B}\right) - \ln\left(\frac{S_1}{B}\right)\right]} = \frac{\left[1 - \frac{1}{n}\right]}{\left[\ln\left(\frac{S_2}{B}\right) - 1.322\right]} \quad (11)$$

$$a = 1 - b \ln\left(\frac{S_2}{B}\right) \quad (12)$$

S_2/B มีค่าลดลงเชิงเส้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณส่วนละเอียด ดังแสดงในรูปที่ 8 และสมการที่ 13

$$S_2 / B = -0.121F + 25.16 \quad \text{สำหรับ } 20\% < F < 98\% \quad (13)$$

รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง S_2/B และปริมาณส่วนละเอียด

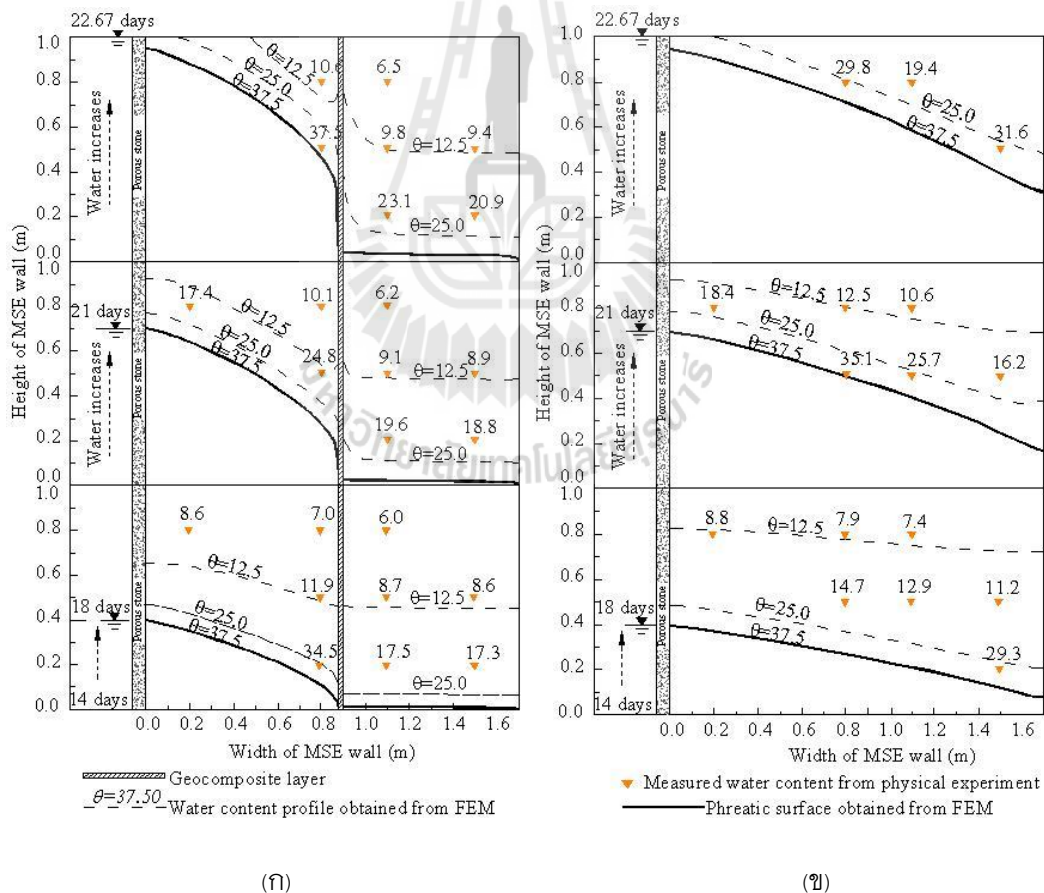
5. พฤติกรรมการไหลของน้ำผ่านดินลูกรังที่ปรับปรุงด้วยวัสดุเสริมกำลัง

การศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำผ่านดินลูกรังที่ปรับปรุงด้วยวัสดุเสริมกำลัง ทำโดยทดสอบการไหลของน้ำในแบบจำลองเชิงกายภาพกำแพงกันดินเสริมแรง ที่มีการติดตั้ง และไม่ติดตั้ง geocomposite เป็นระบบระบายน้ำ ผลการทดลองพบว่าการใช้ geocomposite เป็นระบบระบายน้ำ โดยติดตั้งที่ด้านท้ายของพื้นที่เสริมกำลัง สามารถช่วยป้องกันการไหลของน้ำเข้าสู่พื้นที่เสริมกำลังได้เป็นอย่างดี ผลการทดลองเปรียบเทียบระดับน้ำ และความชื้นในดินระหว่างการติดตั้ง และไม่ติดตั้ง geocomposite เป็นระบบระบายน้ำแสดงดังรูปที่ 9 จากนั้นจึงทำการสอบเทียบแบบจำลองเชิงตัวเลขแบบ 2 มิติ ที่สร้างขึ้นในโปรแกรม Plaxis กับผลการทดสอบจากแบบจำลองเชิงกายภาพ

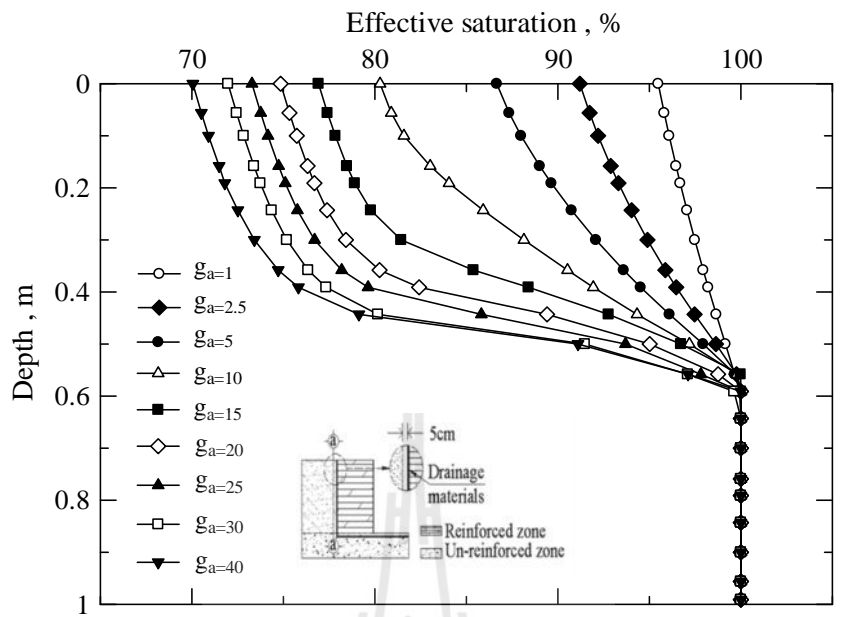
แบบจำลองเชิงตัวเลขที่ผ่านการสอบเทียบแล้ว ถูกนำไปใช้ในการศึกษาอิทธิพลของดินลูกรัง และ geocomposite กำแพงกันดินเสริมกำลัง ที่มีการติดตั้ง geocomposite เป็นระบบระบายน้ำ และมีการใช้ดินลูกรังเป็นดินเดิม และดินถม ผลการศึกษาด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขจำนวนทั้งสิ้น 60 กรณี พบว่าดินที่มีขนาดโพรงเล็ก (มีปริมาณดินเม็ดละเอียดปนอยู่มาก) และดินที่มีการกระจายขนาดโพรงกว้าง (มีปริมาณดินเม็ดละเอียดสูง) จะมีการกระจายความชื้นกว้าง ทำให้เกิดบริเวณที่มีความชื้นในดินสูงเป็นบริเวณกว้าง ดังรูปที่ 10 และ 11 ซึ่งจะส่งผลต่อเสถียรภาพภายในพื้นที่

เสริมกำลังได้ นอกจากนี้ยังพบว่าการกระจายความชื้นในดินทั้งพื้นที่เสริมกำลัง และนอกพื้นที่เสริมกำลัง ได้รับอิทธิพลจากชนิดของดินที่ใช้ในพื้นที่นั้นๆ เท่านั้น โดยไม่ได้รับอิทธิพลจากระบบระบายน้ำ และชนิดของดินนอกพื้นที่พิจารณา

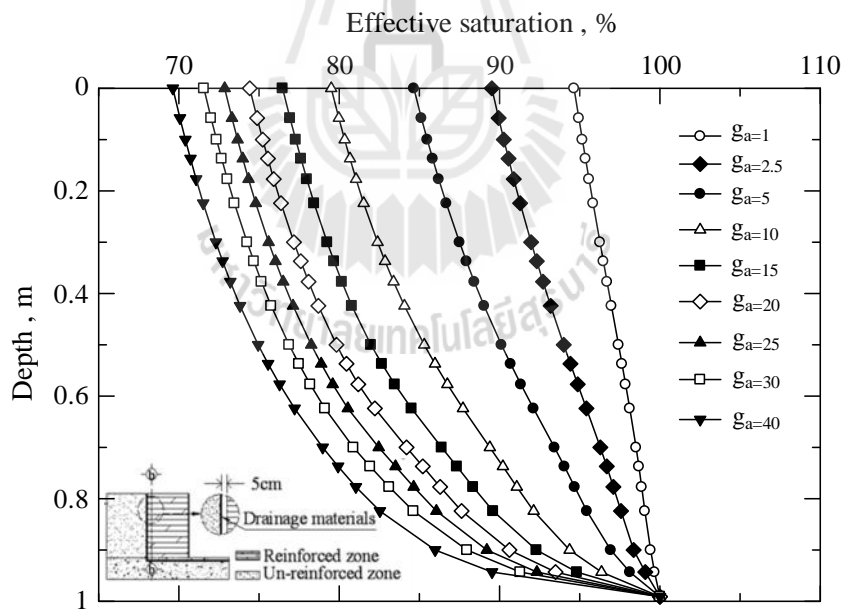
นอกจากนี้หากพิจารณาการป้องกันน้ำไหลเข้าสู่พื้นที่เสริมกำลังเป็นหลัก จะพบว่าหากดินเดิมด้านต้นน้ำ นอกพื้นที่เสริมกำลัง มีความชื้นผ่านได้สูง จะมีโอกาสเกิดระดับในพื้นที่เสริมกำลังสูง ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่ระบบระบายมีปริมาณมากเกินความสามารถที่ระบบระบายน้ำจะรับได้ ดังนั้นหากในพื้นที่ก่อสร้าง คาดว่ามีปริมาณน้ำจำนวนมากไหลเข้าสู่พื้นที่เสริมกำลัง จำเป็นต้องมีการออกแบบระบบระบาย ผ่านการคำนวณความสามารถในการระบายน้ำของระบบระบายน้ำ เพื่อให้มั่นใจได้ว่าน้ำที่ไหลมาจากพื้นที่ด้านนอก จะไม่เข้าสู่พื้นที่เสริมกำลัง อันจะมีผลเสียร้ายแรงต่อเสถียรภาพของกำแพงกันดินเสริมกำลัง



รูปที่ 9 ผลทดสอบการระบายน้ำในกำแพงกันดินเสริมกำลังเมื่อ
(ก) มีการติดตั้ง และ (ข) ไม่มีการติดตั้ง geocomposite เป็นระบบระบายน้ำ



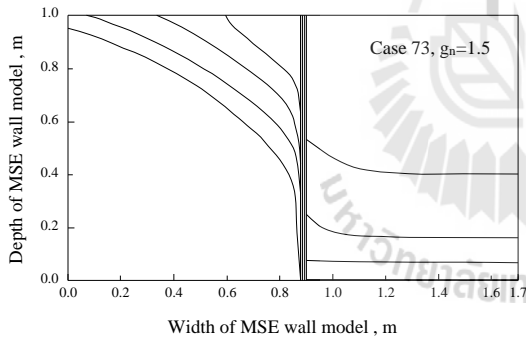
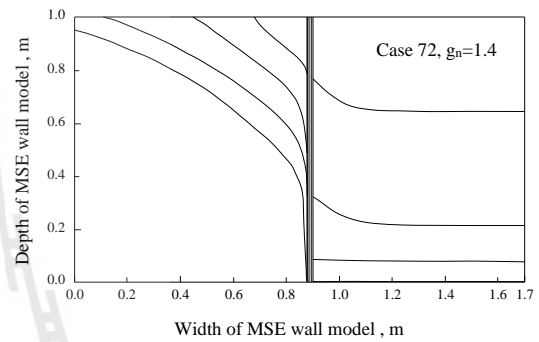
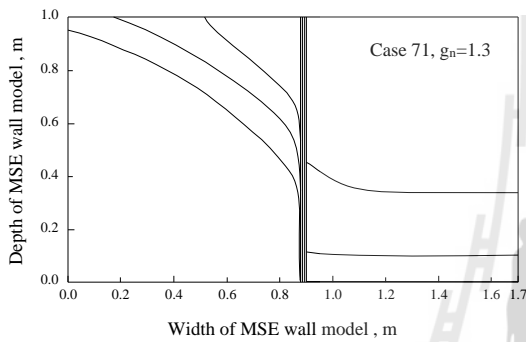
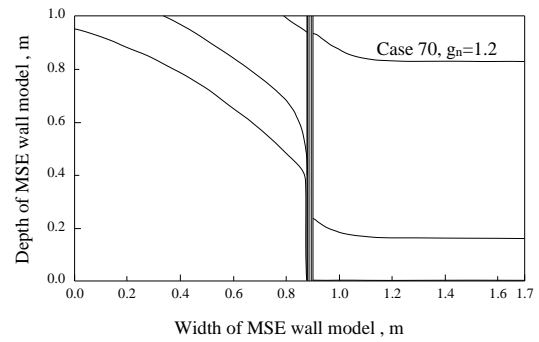
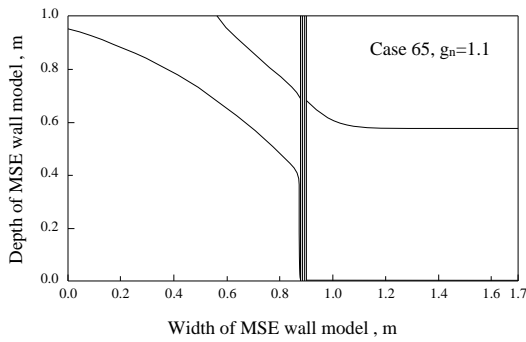
(ก)



(ข)

รูปที่ 10 อิทธิพลของขนาดโพรงต่อการกระจายความชื้นในดิน

(ก) นอกพื้นที่เสริมกำลัง และ (ข) ในพื้นที่เสริมกำลัง



รูปที่ 11 อิทธิพลของการกระจายขนาดโพรงในดิน ต่อระดับน้ำ
และการกระจายความชื้นในดินของกำแพงกันดินเสริมกำลัง



6. รายงานคณะวิจัย พร้อมทั้งหน่วยงานที่สังกัด

ผู้อำนวยการโครงการ

สถานที่ติดต่อ

โทรศัพท์

โทรสาร

อีเมลล์

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย

ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง

จังหวัดนครราชสีมา

044-22-4322

044-22-4607

suksun@g.sut.ac.th

หัวหน้าโครงการย่อยที่ 1

สถานที่ติดต่อ

โทรศัพท์

โทรสาร

อีเมลล์

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย

ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง

จังหวัดนครราชสีมา

044-22-4322

044-22-4607

suksun@g.sut.ac.th

หัวหน้าโครงการย่อยที่ 2

สถานที่ติดต่อ

โทรศัพท์

โทรสาร

อีเมลล์

รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย

ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง

จังหวัดนครราชสีมา

044-22-4353

044-22-4607

avirut@sut.ac.th