ผลกระทบของกำลังรับแรงดึงสูงสุดและระยะห่างระหว่างชั้นของตาข่ายเสริมกำลังแบบสองทิศทางที่มีต่อกำลังอัดและการเสียรูปของทรายเสริมกำลัง

Effects of tensile strength and spacing of biaxial geogrids on the compressive strength and deformation of reinforced sand

อรอนง สุมะนัสชัย[1,*] และ วรัช ก้องกิจกุล[2]

[1,2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพฯ
**Corresponding author; E-mail address: onanong.sum@mail.kmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

การออกแบบโครงสร้างดินเสริมกำลัง (GRS) ในปัจจุบันได้มีการนำเสนอแนวคิดที่ว่า โครงสร้างดินที่เสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมแรงที่มีอัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงดึงสูงสุดและระยะห่างของวัสดุเสริมกำลัง (T_{ult}/S_v) เท่ากันจะให้กำลังอัดสูงสุดเท่ากัน อย่างไรก็ตามจากการศึกษาจำนวนมากพบว่าแนวคิดนี้ไม่ถูกต้องนัก นอกจากนี้ งานวิจัยในอดีตมักใช้การทดสอบแรงอัดแบบระนาบความเครียด ในงานวิจัยนี้ได้นำตาข่ายเสริมแรงสองทิศทาง (biaxial geogrid) ประเภท โพลีเอสเตอร์ (Polyester) ที่มี T_{ult} แตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 40, 60, 80 และ 120 kN/m มาเสริมแรงกับตัวอย่างทรายแล้วทำการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial compression test) การศึกษานี้กำหนดให้ค่า T_{ult}/S_v หรือ TVR เท่ากับ 500, 1000 และ 1500 kN/m/m ดังนั้นจำนวนชั้นของตาข่ายเสริมกำลังจะแตกต่างกันออกไปในแต่ละกรณี ทั้งนี้เพื่อที่จะมุ่งศึกษาอิทธิพลของค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด เมื่ออัตราส่วน TVR มีค่าคงที่ และ อิทธิพลของค่าอัตราส่วน TVR เมื่อ T_{ult} มีค่าคงที่ ผลการศึกษาพบว่าการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังที่มีค่า T_{ult} ต่ำแต่เสริมถี่ ๆให้ค่ากำลังอัดสูงสุดมากกว่า เสริมด้วยตาข่ายเสริมกำลังที่มีค่า T_{ult} สูงแต่เสริมห่างๆ ในทางเดียวกันการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังที่มีค่า T_{ult} ต่ำแต่เสริมถี่ ๆ ทำให้ตัวอย่างมีการเสียรูปด้านข้างที่น้อยกว่าการเสริมด้วยตาข่ายเสริมกำลังที่มีค่า T_{ult} สูงแต่เสริมห่างๆ

คำสำคัญ: กำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดึงของวัสดุเสริมแรง , ตาข่ายเสริมแรง ,แรงอัดสามแกน, ระยะห่างระหว่างชั้นของวัสดุเสริมแรง

Abstract

The current concept design method of a geosynthetic reinforced soil (GRS) structure shows that the behavior of GRS structure reinforced with the same ratio of the reinforcement strength (T_{ult}) to reinforcement spacing (S_v) provides the same result. However, many studies showed that this design concept is not very correct. Most of the previous studies are focusing on plane strain compression tests on soil reinforced with geotextile. In this study, biaxial geogrids, which are made from polyester having four different tensile strengths (i.e. 40, 60, 80 and 120 kN/m), were used in reinforced sand specimens for triaxial compression test. In this study, the T_{ult}/S_v values or TVR values 500, 1000 and 1500 kN/m/m, and thus the reinforcement arrangement pattern depends on the TVR value. This study aims to investigate the effect of T_{ult} on the compressive strength when T_{ult} is varied while TVR is fixed and the effect of TVR ratio when Tult is fixed. The results from this study show that the compressive strength increased by increasing TVR at the same T_{ult}. Contrary, the compressive strength decreased by increasing T_{ult} while keeping the same TVR. Also, the reinforcement spacing plays a much more important role than strength of reinforcement in a reinforced sand. Moreover, the sand reinforced with low T_{ult} and low S_v provides the lower lateral deformation than the sand reinforced with high T_{ult} and high S_v.

Keywords: Compressive strength, Reinforcement strength, Geogrid, Triaxial compression, Reinforcement spacing.

1. คำนำ

ตาข่ายเสริมกำลัง (Geogrid) เป็นหนึ่งในวัสดุที่ช่วยในการเพิ่มกำลังรับแรงอัด อีกทั้งยังช่วยในเรื่องของการลดการเสียรูปของโครงสร้างดินเสริมกำลัง (Geosynthetic-Reinforced Soil structure, GRS structure) เนื่องจากเมื่อโครงสร้างดินเสริมกำลังได้รับแรงอัดในแนวดิ่ง ตาข่ายเสริมกำลังในดินเสริมกำลังจึงมีการยืดออกในแนวราบ ทำให้เกิดผลกระทบจากแรงดึงในตาข่ายเสริมแรง ซึ่งผลกระทบนี้ทำให้แรงดันโอบรัดที่มีต่อตัวอย่างเพิ่มมากขึ้น จากการเพิ่มขึ้นของแรงดันโอบรัดทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้น ตาข่ายเสริมกำลังมีสมบัติหลักคือสามารถทนต่อแรงดึงได้ดี ปัจจัยที่จะให้โครงสร้างดินเสริมกำลังมีประสิทธิภาพในการรับแรงเพิ่มมากขึ้น ได้แก่ ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด (T_{ult}) และ ระยะห่างระหว่างชั้นของวัสดุเสริมแรง (S_v) นอกจากนั้น ในการออกแบบโครงสร้างดินเสริมกำลังในปัจจุบันใช้วิธีหาค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดที่ต้องการ ($T_{ult,req}$) จากสมการที่ (1)

$$T_{ult,req} = \sigma_h \times S_v \times FS \quad (1)$$

โดย σ_h คือ แรงดันดินด้านข้าง (Lateral earth pressure), S_v คือ ระยะห่างระหว่างชั้นของวัสดุเสริมแรง และ FS คือ ค่าความปลอดภัย จากสมการที่ (1) จะเห็นได้ว่าถ้าหากค่า σ_h คงที่เท่ากันตลอดทั้งความลึกของกำแพง ความสัมพันธ์ระหว่าง T_{ult} กับ S_v จะเป็นเส้นตรง นั่นหมายความว่าโครงสร้างดินเสริมกำลังที่เสริมด้วยวัสดุเสริมกำลังที่มีค่า T_{ult} เท่ากับค่าที่คำนวณได้จากสมการนี้จะตอบสนองต่อแรงดันดินด้านข้าง (σ_h) ที่เท่ากัน ดังนั้นหากเปลี่ยนแปลงค่า T_{ult} และ S_v ในสัดส่วนที่เท่ากัน จะได้ค่า σ_h ตอบสนองเท่าเดิม เช่น โครงสร้างดินเสริมแรงที่เสริมด้วยวัสดุเสริมแรงที่มีค่า $T_{ult} = T_{ult}$ และ $S_v = S_v$ จะ

ตาราง 2 คุณสมบัติของตาข่ายเสริมกำลัง

No.	Ultimate tensile strength, kN/m (T_{ult})	Number of transvers member	Number of longitudinal members	Transvers member width, mm	Transvers member height, mm	Longitudinal member width, mm	Longitudinal member width, mm	Covering ratio, %
1	40	5	5	3.15	120	3.15	120	26.25%
2	60	5	5	4.5	120	4.5	120	37.50%
3	80	5	5	3.15	120	3.15	120	26.25%
4	120	5	5	4.5	120	4.5	120	37.50%

การดูดเมมเบรนให้ติดกับผิวด้านในของโมล จากนั้นทำการจัดตำแหน่งของเมมเบรนให้จุดที่กำหนดไว้ตรงกับขอบของตัวอย่าง การบรรจุทรายลงในโมลทำได้โดยใช้วิธีการโปรยทรายผ่านเครื่องมือร่อนผ่านตะแกรงหลายชั้น (Multiple-sieving pluviating machine) เพื่อควบคุมความหนาแน่นและความสม่ำเสมอของทราย ในงานวิจัยนี้พบว่า ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density, Dr) ของตัวอย่างที่เตรียมได้มีค่าประมาณร้อยละ 90 – 95 ในส่วนของตัวอย่างที่มีการเสริมแรงควรจะต้องโปรยให้ระดับของทรายสูงขึ้นกว่าระดับที่ต้องการเล็กน้อย แล้วจึงทำการกำจัดทรายส่วนเกินออก จากนั้นจึงวางตาข่ายเสริมแรงลงบนทรายที่เตรียมไว้ แล้วจึงทำการโปรยทรายปิดทับ และทำการกระทุ้งด้วยค้อนยางกับท่อนไม้ เพื่อขจัดการหลวมตัวของทรายที่อยู่ ภายในช่องเปิดของตาข่ายเสริมกำลัง หลังจากนั้นดำเนินวิธีการข้างต้นกับการเสริมแรงในชั้นอื่น ๆ ให้ครบตามจำนวนชั้นที่ต้องการ

เมื่อเตรียมทรายชั้นสุดท้ายเสร็จ แล้วทำการประกบฝาบนกับตัวอย่าง แล้วทำการหุ้มปลายเมมเบรนมาเข้ากับฝาบนและทำการซีลตัวอย่าง จากนั้นจึงลดแรงดูดที่ให้กับโมลลงจนเป็นศูนย์ แล้วจึงให้แรงดูดเข้าไปภายในตัวอย่างผ่านทางท่อที่บริเวณฝาบนและฐาน ให้มีค่าเท่ากับ -30 kPa ซึ่งถูกควบคุมให้คงที่ตลอดการทดสอบ จากนั้นจึงแกะโมลออก

3.2 วิธีการทดสอบ

เมื่อทำการเตรียมตัวอย่างพร้อมแล้ว จึงนำเพลาของเซลล์กดตัวอย่างไปติดตั้งเข้ากับเพลาเครื่องกด (รูปที่ 2) ในงานวิจัยนี้วัดแรงที่กระทำต่อตัวอย่างจากเซลล์วัดแรง (Load cell) ที่ติดตั้งอยู่ที่บริเวณฝาบน นอกจากนั้นยังได้มีการติดตั้ง เซนเซอร์วัดระยะกระจัด (Displacement sensor) เพื่อวัดการเสียรูปในแนวดิ่งของตัวอย่าง เซนเซอร์เลเซอร์วัดระยะกระจัด (Laser Displacement sensor) เพื่อวัดการเสียรูปในแนวราบของตัวอย่าง และทรานดิวเซอร์วัดแรงดัน (Pressure transducer) เพื่อวัดแรงดันโอบรัด (แรงดูด) เมื่อทำการติดตั้งและตั้งค่าปรับเทียบเครื่องมือวัดตามที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว จึงทำการกดตัวอย่างด้วยอัตราการเคลื่อนที่เท่ากับ 0.3 มิลลิเมตรต่อนาทีจนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ

3.3 พารามิเตอร์ความเค้นและพารามิเตอร์ความเครียด

งานวิจัยนี้นำเสนอค่ากำลังรับแรงอัดของทรายเสริม กำลังด้วยพารามิเตอร์อัตราส่วนความเค้นเฉลี่ย (Average stress ratio, R) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$R = \frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{\sigma_c + q}{\sigma_c} = \frac{\sigma_c + (F/A_0)}{\sigma_c} \quad (2)$$

โดยที่ q คือความเค้นเบี่ยงเบน (Deviator stress, kPa) , F คือแรงกดที่วัดได้จากเซลล์วัดแรง (kN) , A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของตัวอย่าง (0.12 x 0.12 m^2) และ σ_c คือแรงดันโอบรัดที่ให้กับตัวอย่างซึ่งเท่ากับ 30 kPa

การเสียรูปในแนวดิ่งของตัวอย่างนำเสนอโดยค่าพารามิเตอร์ความเครียดในแนวดิ่งเฉลี่ย (Average vertical strain, ε_v) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$\varepsilon_v = -\frac{\Delta H}{H_0} \times 100\ (\%) \quad (3)$$

เมื่อ ΔH คือการเปลี่ยนแปลงความสูงของตัวอย่างซึ่ง วัดได้จากเซนเซอร์วัดระยะกระจัด และ H_0 คือความสูงเริ่มต้นของตัวอย่าง (240 mm)

การเสียรูปในแนวราบของตัวอย่างนำเสนอโดยค่าพารามิเตอร์ความเครียดในแนวราบเฉลี่ย (Average horizontal strain, ε_h) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$\varepsilon_h = -\frac{(\Delta B_1 + \Delta B_2)}{B_0} \times 100 \quad (4)$$

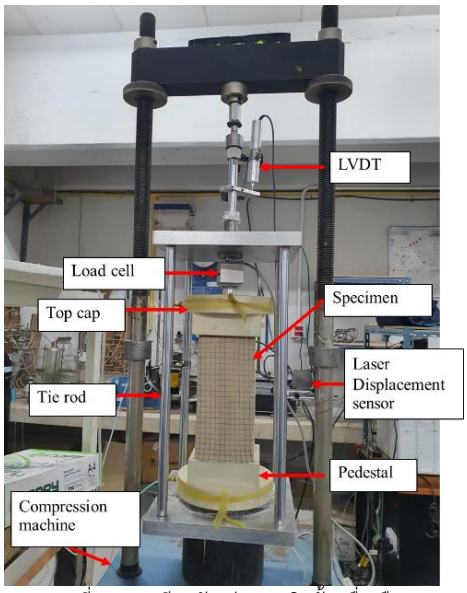
เมื่อ ΔB_1 และ ΔB_2 คือการเปลี่ยนแปลงความกว้างของตัวอย่างทางด้านซ้ายและขวา ซึ่งวัดได้จากเซนเซอร์เลเซอร์วัดระยะกระจัด ตามลำดับ และ B_0 คือความกว้างเริ่มต้นของตัวอย่าง (120 mm)

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์

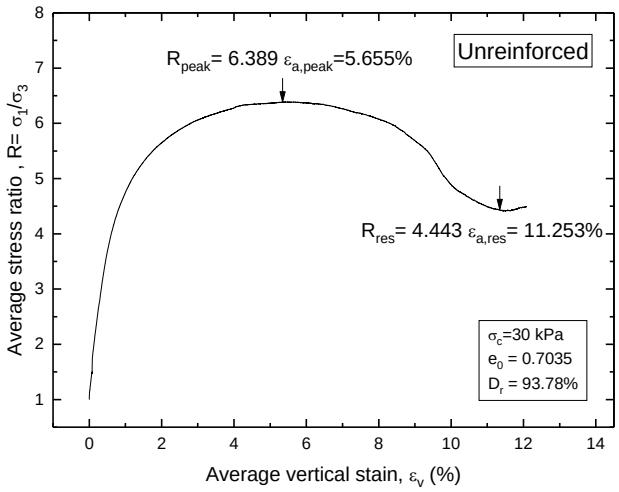
4.1 กำลังรับแรงอัดของทรายที่ไม่เสริมกำลัง

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเค้นเฉลี่ย (R) กับความเครียดแนวดิ่งเฉลี่ย (ε_v) ของตัวอย่างทรายที่ไม่เสริมกำลังแสดงในรูปที่ 3 จากรูปจะเห็นได้ว่าค่า R เพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าสูงสุด หรือเรียกว่าเป็นการแสดงพฤติกรรมแข็งขึ้นด้วยความเครียด (Strain-hardening) ที่ R ณ จุดนี้จะนิยามว่าเป็น อัตราส่วนความเค้นเฉลี่ยสูงสุด (R_{peak}) ซึ่งเท่ากับ 6.389 ที่ ε_v เท่ากับ 5.655% จากนั้นค่า R จะลดลงตาม ε_v จนมีค่าต่ำสุด หรือเรียกได้ว่าเกิดพฤติกรรมอ่อนตัวลงด้วยความเครียด (Strain-softening) เมื่อเลยจุดดังกล่าวไปแล้วค่า R มีแนวโน้มที่จะคงที่กับการเพิ่มขึ้นของ ε_v ซึ่ง R ณ

จุดนี้เราจะเรียกว่า อัตราส่วนความเค้นคงเหลือ (R_{res}) ซึ่งเท่ากับ 4.443 ที่ ε_v เท่ากับ 11.253%



รูปที่ 2 การเตรียมตัวอย่างและติดตั้งเครื่องมือ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง R กับ ε_v จากตัวอย่างทรายที่ไม่เสริมกำลัง

เมื่อสมมติให้ค่าความเชื่อมแน่น (Cohesion) ของ ทรายที่ใช้ทดลองมีค่าเท่ากับศูนย์ มุมเสียดทานภายใน (ϕ) จะสามารถคำนวณได้จากค่า R ดังสมการที่ (5)

$$\phi = \sin^{-1}\left(\frac{R-1}{R+1}\right) \quad (5)$$

ซึ่ง ϕ ที่คำนวณได้จากค่า R_{peak} และ R_{res} เท่ากับ 46.8° และ 39.4° ตามลำดับ

4.2 *กำลังรับแรงอัดของทรายที่เสริมกำลัง*

รูปที่ 4 ถึง 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า R กับค่า ε_v และความสัมพันธ์ระหว่างระหว่าง ε_h กับ ε_v ที่ได้จากตัวอย่างทรายที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังที่มีค่า TVR (T_{ult}-to-S_v ratio) ที่แตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 500, 1000 และ 1500 kN/m/m ตามลำดับ จากรูปทั้งสามจะเห็นได้ว่า

1. ทรายเสริมกำลังแสดงพฤติกรรมแข็งขึ้นด้วยความเครียดจนกระทั่งแสดงค่า R สูงสุดแล้วจึงแสดงพฤติกรรมอ่อนตัวลงด้วยความเครียดในลักษณะที่ คล้ายคลึงกับทรายที่ไม่เสริมกำลัง
2. จากความสัมพันธ์ระหว่าง R_{max} กับ ε_v ของในทุก ๆ กรณีของ TVR แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างทรายเสริมกำลังให้ค่า R_{max} ที่มีค่ามากกว่า R_{max} ของตัวอย่างทรายที่ไม่เสริมกำลังเป็นอย่างมาก ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบค่า R_{max} และค่า ε_v ที่ R_{max} ของตัวอย่างทั้งหมด โดยอัตราส่วนกำลัง (Strength ratio, SR) นิยามจากอัตราส่วนระหว่างค่า R_{max} ของทรายที่เสริมกำลังต่อค่า R_{max} ของทรายที่ไม่เสริมกำลัง (เท่ากับ 6.389) จากผลการทดสอบและวิเคราะห์พบว่า ค่า R_{max} ที่สูงที่สุดของกรณี TVR เท่ากับ 500, 1000 และ 1500 kN/m/m คือ 10.325 , 17.034 และ 26.034 ตามลำดับ โดยค่าสูงสุดของทุกกรณีที่กล่าวมาได้มาจากกรณีที่เสริมแรงด้วย T_{ult} ที่น้อยที่สุด (40 kN/m^2) ดังนั้นการเสริมแรงที่ถี่มาก ๆ ด้วย T_{ult} ต่ำๆ จะให้ค่า R_{max} ที่มากกว่าการเสริมแรงห่างๆ ด้วย T_{ult} สูงๆ ตาข่ายเสริมกำลังสามารถทำให้กำลังอัดของทรายที่เสริมกำลังมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นอันมากได้ เพราะเมื่อรับแรงอัดกระทำในแนวดิ่ง ตัวอย่างทรายจะขยายตัวด้านข้างในแนวราบ (Poisson's effect) ทำให้ตาข่ายเสริมกำลังที่เรียง ตัวอยู่ในแนวราบเช่นกันยืดตัวออก จึงเกิดแรงดึงขึ้นในตาข่ายเสริมกำลัง ในทางกลับกันแรงดึงที่เกิดขึ้น ในตาข่ายเสริมกำลังนี้ก็ถ่ายกลับไปสู่ทรายซึ่งจะทำให้แรงดันโอบรัดที่กระทำต่อทรายมีค่ามากขึ้น จึงทำให้การรับแรงในแนวดิ่งมีค่าเพิ่มขึ้น
3. จากความสัมพันธ์ระหว่าง ε_h และ ε_v นำมาสร้างเป็น ν_{sec} โดยนิยามจาก อัตราส่วนระหว่าง ε_h และ ε_v (ตารางที่ 3) จาก ν_{sec} ของในทุก ๆ กรณีของ TVR ดังแสดงในรูป 7 แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างทรายเสริมกำลังให้ค่า ν_{sec} ที่น้อยกว่าตัวอย่างทรายไม่เสริมกำลังกล่าวคือทรายเสริมกำลังจะมีการป่องตัวออกทางด้านข้างที่น้อยกว่า โดยจะเห็นได้ชัดจากตัวอย่างที่ความหนาแน่นของการเสริมกำลังมาก ๆ (TVR =1500 kN/m/m) จะทำให้ตัวอย่างมีค่า ν_{sec} มีค่าน้อยกว่าชัดเจน หรืออีกนัยหนึ่งคือมีการเสียรูปในแนวราบน้อย เนื่องจากเมื่อค่า TVR สูงขึ้น ค่า S_v จะต่ำลง หรือความถี่ของจำนวนชั้นการเสริมกำลังมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ในกรณีที่ TVR สูง และ T_{ult} ต่ำ จะมีค่า ν_{sec} ต่ำกว่ากว่ากรณี TVR สูงหรือตัวอย่างมีการเสียรูปด้านข้างที่น้อยกว่าแต่ T_{ult} สูง เมื่อเสริมถี่หรือชิดกันมากขึ้น การถ่ายแรงดึงจากตาข่ายเสริมแรงไปยังแรงดันโอบรัดในทรายมีประสิทธิภาพดีกว่า [3] แต่อย่างไรก็ตามในกรณีของตัวอย่างที่เสริมแรงด้วย T_{ult}=120 kN/m^2 ที่ TVR 1500 kN/m/m ค่า ν_{sec} ของตัวอย่างมีค่าที่สูง เนื่องจาก LDS ตรวจวัดในบริเวณที่ตัวอย่างเกิดการวิบัติ

ตารางที่ 3 ค่า R_{max}, $\varepsilon_{v,max}$ และ SR ของตัวอย่างทรายที่ ไม่เสริมกำลังและที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลัง

	Test name	Ultimate tensile strength, T_{ult} (kN/m)	Vertical spacing, S_v (m)	Maximum stress ratio, R_{max}	Strength ratio, SR	Vertical strain at R_{max}, ε_v (%)	Horizontal strain at R_{max}, ε_h (%)	Secant Poisson's ratio, v_{sec} (%)
1	Unreinforced	-	-	6.389	1.000	5.655	-7.828	1.384
2	PET-T40-TVR500	40	0.08	10.325	1.616	4.261	-4.721	1.108
3	PET-T60-TVR500	60	0.12	10.279	1.609	4.228	-5.671	1.341
4	PET-T120-TVR500	120	0.24	7.608	1.191	3.971	-4.385	1.104
5	PET-T40-TVR1000	40	0.04	17.034	2.666	5.106	-4.241	0.831
6	PET-T60-TVR1000	60	0.06	16.840	2.636	5.079	-4.81	0.947
7	PET-T80-TVR1000	80	0.08	14.423	2.258	4.645	-4.3	0.926
8	PET-T120-TVR1000	120	0.12	11.759	1.841	4.572	-4.572	1.000
9	PET-T40-TVR1500	40	0.027	26.342	4.123	5.055	-2.838	0.561
10	PET-T60-TVR1500	60	0.04	26.026	4.074	5.031	-2.629	0.523
11	PET-T120-TVR1500	120	0.08	18.101	2.833	4.917	-6.063	1.233

4.3 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างชั้นของการเสริมกำลัง (S_v) ต่อ R_{max}

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง R_{max} กับระยะห่างของการเสริมแรงในแนวดิ่ง (S_v) จากกราฟจะเห็นได้ว่า ที่ TVR เท่ากัน เมื่อระยะห่างของการเสริมแรงเพิ่มขึ้น ทำให้ค่า R_{max} ลดลงอย่างมีนัยยะ ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อค่า S_v ลดลง จะได้ว่า 1. การถ่ายแรงดึงจากตาข่ายเสริมกำลังไปสู่การพัฒนาแรงดันโอบรัดต่อทรายมีประสิทธิภาพดีขึ้น และ 2. ขนาดของพื้นที่ของทรายที่แรงดึงจากตาข่ายเสริมกำลังไม่สามารถเพิ่มแรงดันโอบรัด (บริเวณ A ในรูปที่ 9, [2]) เล็กลง บริเวณนี้เรียกว่าเขตอันตราย (Deterministic zone) ในทฤษฎีพลาสติก ในกรณีค่า S_v คงที่และค่า TVR มีค่าเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าค่า R_{max} เพิ่มขึ้น เนื่องจากในการทดสอบกรณีดังกล่าว ตาข่ายเสริมแรงที่ใช้สำหรับค่า TVR ที่สูงกว่าจะมีค่า T_{ult} ที่มากกว่ากรณีที่ TVR ต่ำ ซึ่งเหมือนกับกรณีทดสอบด้วย S_v ที่เท่ากันแต่เพิ่ม T_{ult} [3]

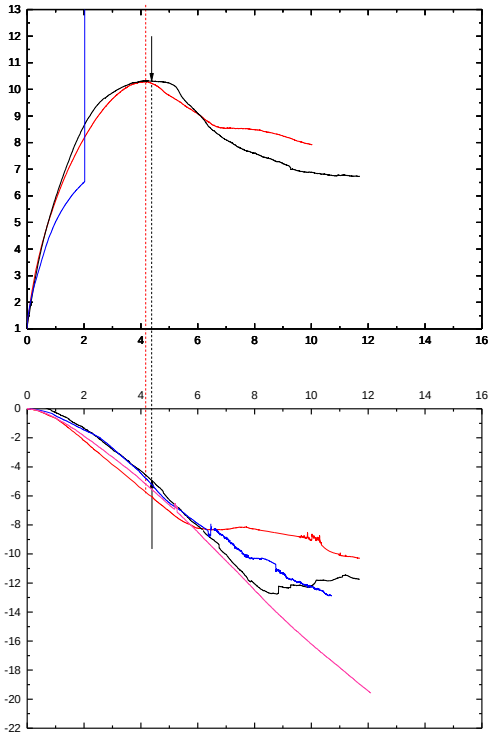
4.4 อิทธิพลของกำลังรับแรงดึงสูงสุดของตาข่ายเสริมแรง (T_{ult}) ต่อ R_{max}

จากรูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง R_{max} กับกำลังรับแรงดึงสูงสุดของตาข่ายเสริมแรง (T_{ult}) จากกราฟจะเห็นได้ว่า ที่ TVR เท่ากัน เมื่อกำลังรับแรงดึงสูงสุดของตาข่ายเสริมแรงเพิ่มขึ้น ทำให้ค่า R_{max} ลดลง

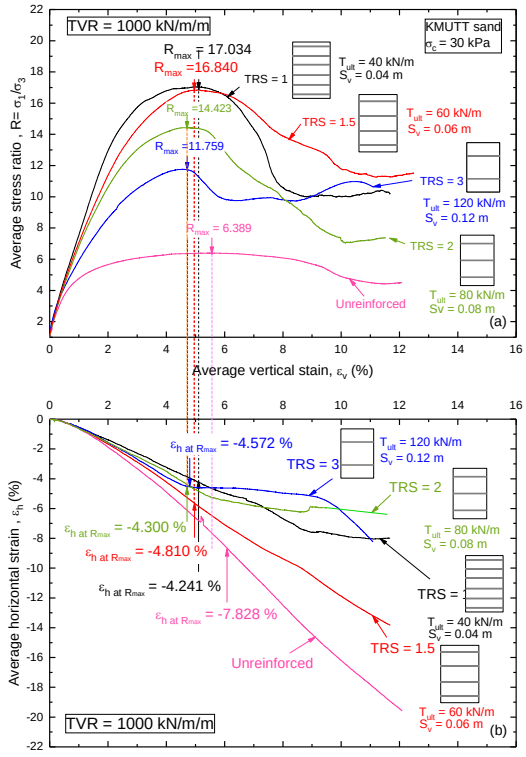
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างชั้นของการเสริมกำลัง (S_v) กับกำลังรับแรงดึงสูงสุดของตาข่ายเสริมแรง (T_{ult}) ที่มีต่อ R_{max}

รูปที่ 8 และ 10 สามารถสรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มกำลังรับแรงดึงของตาข่ายเสริมกำลัง ในขณะที่เพิ่มระยะห่างระหว่างชั้นการเสริมกำลังโดยคงค่า TVR เท่าเดิมทำให้ค่า R_{max} ลดลง เนื่องจากมีพื้นที่ที่อิทธิพลของการเสริมแรงไปไม่ถึงมีสัดส่วนมาก ซึ่งไม่เป็นไปตามทฤษฎีการออกแบบ MSE (สมการที่ 1) ที่ความสัมพันธ์ของ T_{ult} และ S_v ควรจะมีแนวโน้มเดียวกับผลลัพธ์ของค่า R_{max} [3] แต่อย่างไรก็ตามจากความชันของความสัมพันธ์ R_{max} กับ S_v (รูปที่ 8) มีมากกว่าความชันของความสัมพันธ์ R_{max} กับ T_{ult} (รูปที่ 10) ในทุกกรณีของ TVR ซึ่งแสดงให้เห็นว่า S_v มีอิทธิพลต่อค่า R_{max} มากกว่า T_{ult} [4] กล่าวโดยอธิบายคือ เมื่อการลดลงของระยะห่างระหว่างชั้น (ΔS_v) เท่ากับการลดลงของกำลังรับแรง (ΔT_{ult}) ผลลัพธ์ของ R_{max} จากการลดลงของ S_v จะมากกว่าค่าที่ได้จากการเพิ่ม T_{ult}

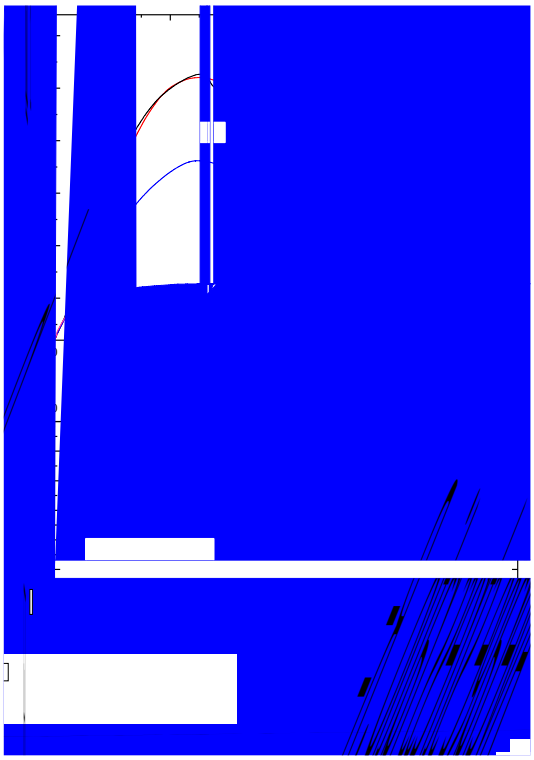
รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง SR กับ TSR (Tesile strength ratio) ของทุกกรณีของ TVR จากรูปจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของ TVR ที่ T_{ult} ที่เท่ากันทำให้กำรับแรงอัดสูงสุดเพิ่มขึ้น แต่ในทางตรงกันข้าม เมื่อเพิ่ม T_{ult} ในขณะที่ค่า TVR เท่ากันทำให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างลดลง [6]



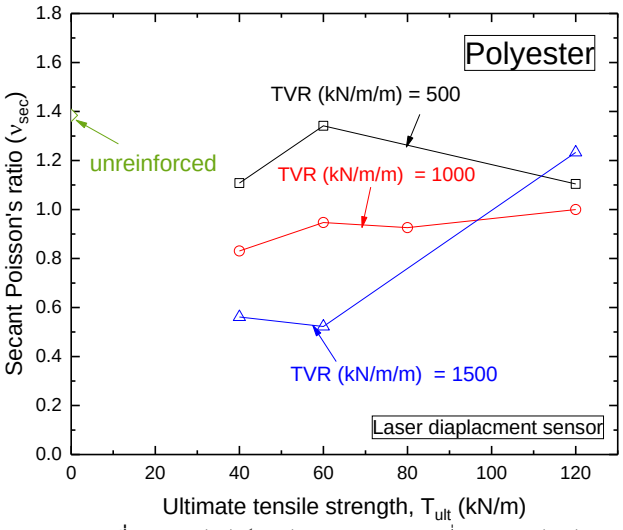
รูปที่ 4 ผลการทดสอบของตัวอย่างทรายเสริมกำลังที่มีค่า TVR เท่ากับ 500 kN/m/m ; (a) ความสัมพันธ์ระหว่าง R กับ ε_v และ (b) ความสัมพันธ์ระหว่าง ความสัมพันธ์ระหว่าง ε_h กับ ε_v



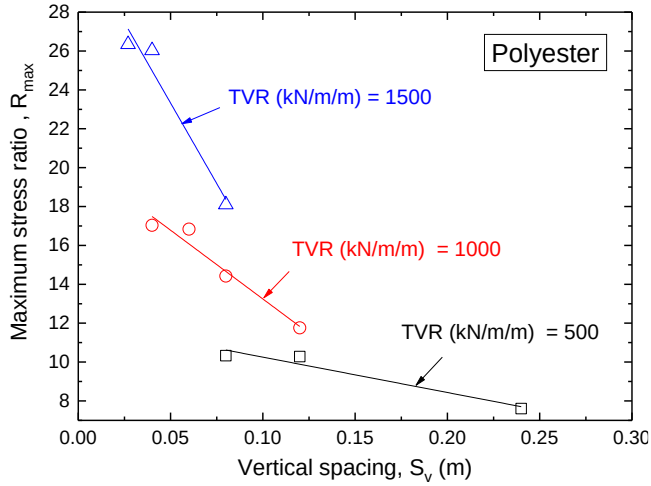
รูปที่ 5 ผลการทดสอบของตัวอย่างทรายเสริมกำลังที่มีค่า TVR เท่ากับ 1000 kN/m/m ; (a) ความสัมพันธ์ระหว่าง R กับ ε_v และ (b) ความสัมพันธ์ระหว่าง ความสัมพันธ์ระหว่าง ε_h กับ ε_v



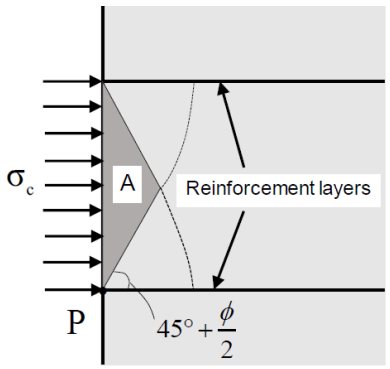
รูปที่ 6 ผลการทดสอบของตัวอย่างทรายเสริมกำลังที่มีค่า TVR เท่ากับ 1500 kN/m/m ; (a) ความสัมพันธ์ระหว่าง R กับ ε_v และ (b) ความสัมพันธ์ระหว่าง ความสัมพันธ์ระหว่าง ε_h กับ ε_v



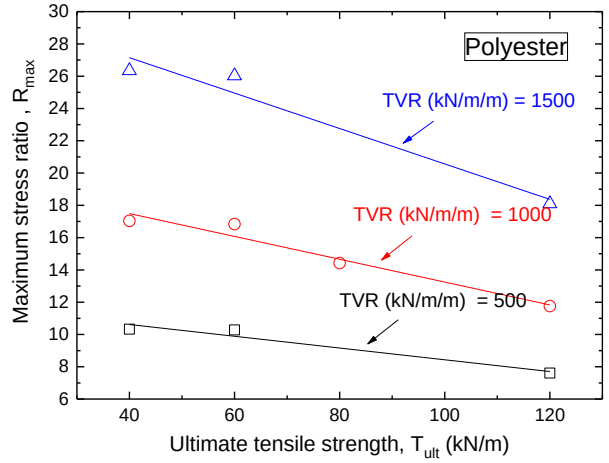
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง ν_{sec} และ T_{ult} ที่ TVR แตกต่างกัน



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง R_{max} และระยะห่างระหว่างชั้นของการเสริมแรง (S_v)



รูปที่ 9 เขตอันตราย (Deterministic zone) ในทรายเสริมกำลัง [2]

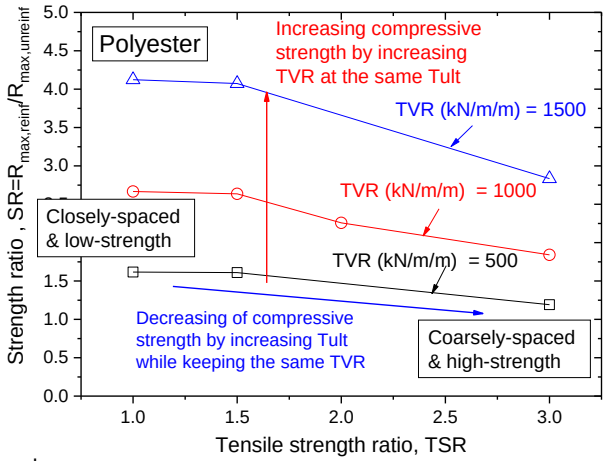


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง R_{max} และกำลังรับแรงดึงสูงสุดของตาข่ายเสริมแรง (T_{ult})

5. การทำนายค่ากำลังอัดของทรายเสริมกำลัง

Tatsuoka (2004) [7] ได้นำเสนอสมการสำหรับการทำนายค่ากำลังอัดของดินเสริมกำลังจากพารามิเตอร์ 4 ค่า ได้แก่ ค่ามุมเสียดทานภายในของดิน (ϕ) มุมเสียดทานระหว่างตาข่ายเสริมกำลังกับดิน (δ) ความหนาแน่นการเสริมกำลัง (d/h) และกำลังรับแรงดึงของตาข่าย (T_{ult}) โดยได้แบ่งการทำนายค่ากำลังอัดเป็น 2 รูปแบบตามลักษณะการวิบัติของดินเสริม

กำลังที่แตกต่างกัน กล่าวคือ 1. กรณีที่กำลังอัดถูกควบคุมด้วยการวิบัติของดิน และ 2. กรณีที่กำลังอัดถูกควบคุมด้วยการฉีกขาดของตาข่ายเสริมกำลัง



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลัง (SR) และอัตราส่วนการเสริมกำลัง (TSR)

5.1 กรณีที่กำลังอัดถูกควบคุมด้วยการวิบัติในดิน

ในกรณีนี้ค่าอัตราส่วนความเค้นที่ทำนายจะเรียกเป็น ค่า $R_{max.1}$ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6)

$$\overline{R}_{max.1} = \frac{P_1\left[1-\left(\frac{h}{d}\right)\tan\varepsilon\right]+1}{\left(\tan\varepsilon\right)^2} \quad (6.1)$$

$$P_1 = \frac{\exp(B)-1}{B} - 1 \quad (6.2)$$

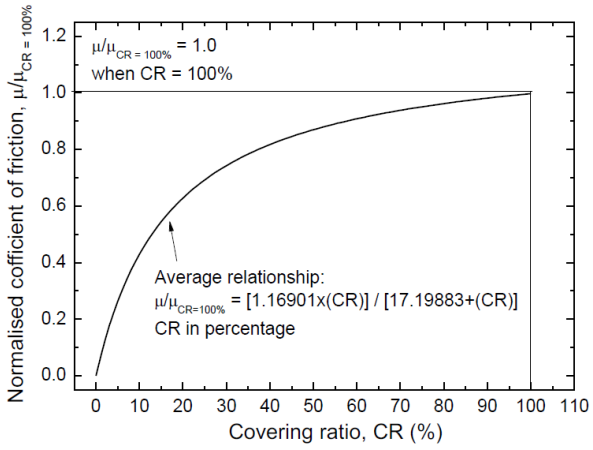
$$B = 2\delta_b\left(\frac{\cos\delta_b+\sin\phi}{\cos\delta_b}\right)\tan\phi\left(\frac{d}{h}-\tan\varepsilon\right) \quad (6.3)$$

$$\delta_b = \frac{1}{2}\left[\mu+\arcsin\left(\frac{\sin\mu}{\sin\phi}\right)\right] \quad (6.4)$$

$$\varepsilon = \frac{\pi}{4}-\frac{\phi}{2} \quad (6.5)$$

Peng, et al. [3] ได้นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดที่ทำนายได้จาก 2D FEM กับค่า δ และได้ทำการเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้กับค่าที่ได้จากผลการทดลอง เมื่อเทียบที่ค่ากำลังอัดของทรายเสริมกำลังเดียวกัน พบว่าจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปกคุม (Covering ratio, CR) จากผลการทดลองกับค่า δ จากการวิเคราะห์ FEM

สุรพันธ์ สุดใจ [9] ได้ทำการดัดแปลงความสัมพันธ์ดังกล่าว โดยพิจารณาในรูปแบบของสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Coefficient of friction, μ) แล้วนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า อัตราส่วน $\mu/\mu_{CR=100\%}$ กับค่า CR ดังแสดงในรูปที่ 12 โดยค่า $\mu_{CR=100\%}$ คือ 0.662 ซึ่งได้มาจากการทดสอบแรงเฉือน (Direct shear test) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ความสัมพันธ์นี้ในการคำนวณค่า μ เพื่อใช้ในการทำนายได้จากการแทนค่า CR จากนั้นจึงคำนวณหาค่ามุมเสียดทานได้จาก $\delta = \tan^{-1}(\mu)$



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วน $\mu/\mu_{CR=100\%}$ กับค่า CR [9]

รูปที่ 13 และ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $R_{max.1}$ กับค่า δ ที่ได้จากการทำนายด้วยค่า δ เท่ากับ 46.8°, 43.1° และ 39.4° ซึ่งมีค่าเท่ากับมุมเสียดทานสูงสุด (ϕ_{peak}) ค่าระหว่างกลางจุดสูงสุดและค่าคงเหลือ ($\phi_{intermediate}$) และมุมเสียดทานคงเหลือ (ϕ_{res}) ตามลำดับ ที่ได้จากการทดสอบแรงอัดสามแกนกับตัวอย่างทรายที่ไม่เสริมกำลัง (รูปที่ 3) ลงในสมการที่ 6 และทำการเปรียบเทียบกับค่า R_{max} ที่ได้จากการทดสอบในการศึกษานี้ จากรูปที่ 13(a) คือกรณีที่เสริมแรง 1 ชั้น (d/h=0.5) จะเห็นได้

ว่าค่า R_{max} ที่ได้จากการทดสอบมีค่ามากกว่า $R_{max,1}$ ที่ได้จากการทำนาย เนื่องจากในกรณีนี้พื้นที่พลาสติก (deterministic zone) มาก ทำให้มีพื้นที่ที่ผลกระทบของการเสริมแรง (รูปที่ 9) ไปไม่ถึง ค่าที่ได้จากการทำนายจึงมีค่าน้อยกว่าการทดสอบ แต่ในทางตรงกันข้าม จากรูปที่ 13(b) และ 13(c) นี้จะเห็นได้ว่า ค่า ϕ ที่ใช้ทำนายเพื่อให้ค่า $R_{max.1}$ สอดคล้องกับผลการทดสอบ และในกรณีของของ 13(c) จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของ δ ทำให้ค่า ϕ มีค่าเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย จากรูปที่ 13(d) และ 14 พบว่าค่าของค่า ϕ ที่ใช้ทำนายเพื่อให้ค่า $R_{max.1}$ มีต่ำกว่าค่า ϕ_{res}

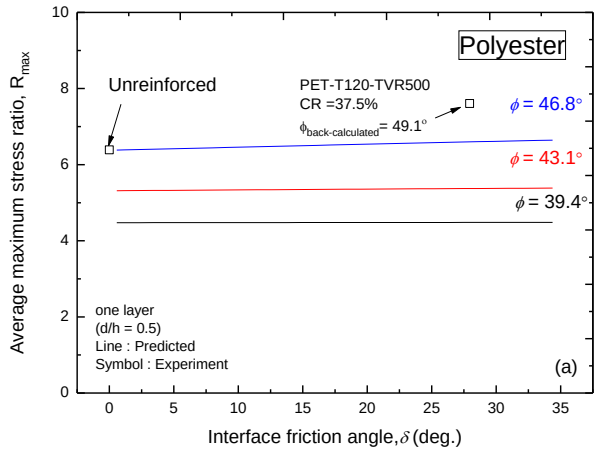
5.2 กรณีที่กำลังอัดถูกควบคุมด้วยการฉีกขาดของตาข่ายเสริมกำลัง

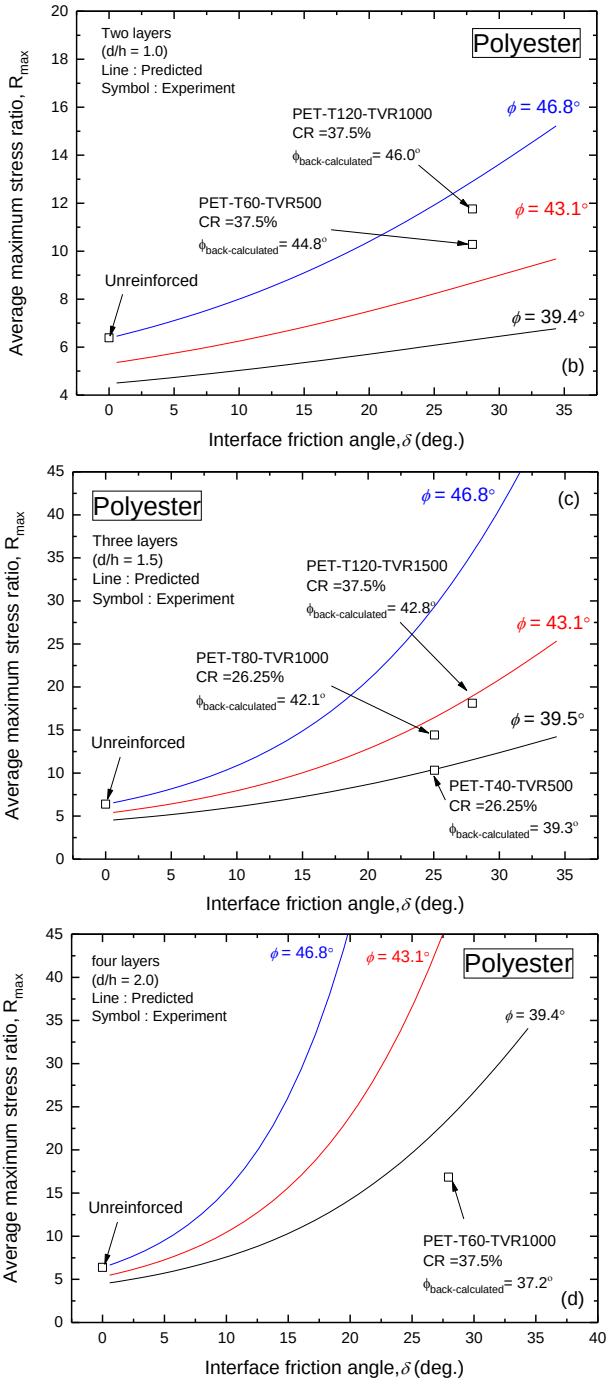
ในกรณีที่การวิบัติของดินเสริมกำลังเกิดขึ้นจากการฉีกขาดของตาข่ายเสริมกำลัง จะเรียกอัตราส่วนความเค้นที่ทำนายเป็นค่า $R_{max.2}$ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 7 [7]

$$R_{\max.2} = \frac{h}{d}\left[\frac{(1+\sin\phi)\exp(\delta_b 2\tan\phi)}{\sin\phi\sin 2\delta_b}\times\frac{T_{ult}-T_{connection}}{h\sigma_c}+\frac{1}{\tan\varepsilon}\right] \quad (7)$$

โดยที่ T_{ult} คือค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของตาข่ายเสริมกำลังซึ่งมีจำนวน 2 ค่า ได้แก่ 40 และ 60 kN/m, $T_{connection}$ คือค่ากำลังที่จุดเชื่อมต่อระหว่างปลายตาข่ายเสริมกำลังกับผิวหน้าซึ่งในการศึกษานี้ไม่ได้เชื่อมปลายตาข่ายเข้ากับแมมเบรนจึงมีค่า $T_{connection}$ เท่ากับศูนย์ และ σ_c คือค่าแรงดันโอบรัดที่ให้กับตัวอย่างซึ่งมีค่าเท่ากับ 30 kPa

รูปที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $R_{max.2}$ กับค่า δ ที่ได้จากการทำนายด้วยค่า ϕ เท่ากับ 47.8°, 44.0° และ 39.5° ลงในสมการที่ 7 และทำการเปรียบเทียบกับค่า R_{max} ที่ได้จากการทดสอบแรงอัดสามแกนในการศึกษานี้ จากรูปที่ 15 (a) กรณีการเสริมแรง 9 ชั้น (d/h =4.5) ซึ่งค่า T_{ult} ที่ใช้ในการคำนวนในสมการการทำนายเท่ากับ T_{ult} =40 kN/m จะเห็นได้ว่ากราฟที่ได้จากสมการมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการทดลองเป็นอันมาก ซึ่งค่า ϕ ที่ทำนายได้ใกล้เคียงที่สุดคือ ϕ_{res}





รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $R_{max.1}$ กับค่า δ ที่ได้จากการทำนายด้วยค่า δ เท่ากับ 46.8°, 43.1° และ 39.4° เปรียบเทียบกับค่า R_{max} ที่ได้จากการทดสอบในการศึกษาครั้งนี้กรณี ; (a) เสริมแรงกำลังจำนวน 1 ชั้น(d/h = 0.5) , (b) เสริมแรงกำลังจำนวน 2 ชั้น (d/h = 1.0) , (c) เสริมแรงกำลังจำนวน 3 ชั้น (d/h = 1.5) , (d) เสริมแรงกำลังจำนวน 4 ชั้น (d/h = 2.0)

ด้านข้างจะลดน้อยลง ในทางตรงกันข้ามเมื่อเพิ่มค่า T_{ult} ค่าของ v_{sec} จะเพิ่มขึ้นที่ TVR ที่เท่ากัน

3. ในกรณีที่ TVR คงที่ เมื่อลดระยะห่างระหว่างชั้นของการเสริมกำลัง ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมากขึ้น เนื่องจากการถ่ายแรงดึงจากตาข่ายเสริมกำลังไปสู่การเพิ่มขึ้นของแรงดันโอบรัดต่อทรายมีประสิทธิภาพดีขึ้น และ ขนาดของพื้นที่ที่อิทธิพลจากแรงดึงในตาข่ายเสริมกำลังจะถ่ายไปไม่ถึง มีขนาดเล็กลง และในกรณีเดียวกัน หากเพิ่มค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของตาข่ายเสริมแรง (T_{ult}) ในขณะที่ค่า S_v เพิ่ม จะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างลดลงมากไปกว่านั้น จากผลการทดสอบ บอกได้ว่าอิทธิพลของ T_{ult} และ S_v ไม่เป็นไปตามทฤษฎีการออกแบบของ MSE กล่าวคือ ใ กย

รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $R_{max.1}$ กับค่า δ ที่ได้จากการทำนายด้วยค่า δ เท่ากับ 46.8°, 43.1° และ 39.4° เปรียบเทียบกับค่า R_{max} ที่ได้จากการทดสอบในการศึกษาครั้งนี้กรณีเสริมแรงกำลังจำนวน 6 ชั้น (d/h = 3.0)

รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $R_{max.2}$ กับค่า δ ที่ได้จาก การทำนายด้วยค่า δ เท่ากับ 46.8°, 43.1° และ 39.4° เปรียบเทียบกับค่า R_{max} ที่ได้จากการทดสอบในการศึกษาครั้งนี้กรณี ; (a) เสริมแรงกำลังจำนวน 6 ชั้น (d/h = 3.0) และ (b) เสริมแรงกำลังจำนวน 9 ชั้น (d/h = 4.5)

6. สรุปผลการศึกษา

1. ตัวอย่างทรายที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังมีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าตัวอย่างทรายที่ไม่เสริมกำลัง เนื่องจากแรงอัดในแนวดิ่งที่กระทำกับตัวอย่างทำให้เกิดแรงดึงในตาข่ายเสริมแรง ซึ่งจะถ่ายไปยังแรงดันโอบรัดของตัวอย่าง และเมื่อแรงดันโอบรัดมากขึ้น กำลังรับแรงอัดจึงมากขึ้นตาม
2. ตัวอย่างทรายที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังมีการป่องออกในแนวราบที่น้อยกว่าทรายที่ไม่เสริมกำลัง และ ต้วอย่างที่ทรายเสริมกำลังที่ T_{ult} มีค่าคงที่ เมื่อ TVR มีค่าเพิ่มขึ้น v_{sec} จะมีค่าลดลง หมายความว่าตัวอย่างที่มีค่า TVR เพิ่มขึ้นการป่องออกทาง

sand. Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, The University of Tokyo, Japan.

[2] Kongkitkul, W., Tatsuoka, F. and Hirakawa, D. (2007). Effects of reinforcement type and loadinghistory on the deformation of reinforced sand in plane strain compression, *Soils and Foundations*, vol. 47(2), pp. 395-414.

[3] Peng, F., Kotake, N., Tatsuoka, F., Hirakawa, D. and Tanaka, T. (2000). Plane strain compression behavior of geogrid-reinforced sand and its numerical analysis, Soils and Foundations, vol. 40(3), pp. 55-74.

[4] Pham, T.Q. (2009). Investigating Composite Behavior of Geosynthetic Reinforced Soil (GRS) Mass. Ph. D. Thesis. University of Colorado, Denver, USA.

[5] Nicks, J. E., Adams, M., Ooi, P., & Stabile, T. (2013). Geosynthetic reinforced soil performance testing - Axial load deformation relationships. FHWA-HRT-13-066.

[6] Shen, P., Han, J., & Xu, C. (2019). Numerical Investigation of Pullout Resistance Effects on Behavior of Geosynthetic-Reinforced Soil (GRS) Piers. Unpublished manuscript

[7] Tatsuoka, F. (2004). An approximate isotropic perfectly plastic solution for compressive strength of geosynthetic-reinforced soil, Geosynthetics International, vol. 11(5), pp. 390-405.

[8] Tatsuoka, F., Okahara, M., Tanaka, T., Tani, K., Morimoto, T. and Siddiquee, M. S. A. (1991). Progressive failure and particle size effect in bearing capacity of a footing on sand, *ASCE Geotechnical Special Publication*, vol. 27, pp. 788-802.

[9] สุรพันธ์ สุดใจ (2018). ผลกระทบของอัตราส่วนปกคลุมและระยะระหว่างชั้นของตาข่ายเสริมกำลังแบบสองทิศทางที่มีต่อกำลังอัดของทรายเสริมกำลัง*วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. วิศวกรรมศาสตร์*, มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี