Eng.J.CMU.[2021] 28 [1], 223-240

วารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Engineering Journal
Chiang Mai University

อิทธิพลของกำลังรับแรงดึงสูงสุดและระยะห่างระหว่างชั้นของตาข่ายเสริมกำลังต่อกำลังอัดและการเสียรูปของทรายเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังเมื่อรับแรงอัดสามแกน

Impacts of Varied Tensile Strengths and Vertical Spacings of Geogrids on the Compressive Strength and Deformation of Geogrid-Reinforced Sand in Triaxial Compression

อรอนง สุมะนัสชัย และ วรัช ก้องกิจกุล*

Onanong Sumanuschai and Warat Kongkitkul*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,

King Mongkut's University of Technology Thonburi

126 Pracha Uthit Road, Bang Mod, Thung Khru, Bangkok 10140

*E-mail: warat.kon@kmutt.ac.th, Tel.: 02-470-9304, Fax.: 02-427-9063

บทคัดย่อ

พฤติกรรมของดินเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังมักจะได้รับอิทธิพลจากค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด ของตาข่ายเสริมกำลัง (T_{ult}) และระยะห่างระหว่างชั้นจากการจัดเรียงตาข่ายเสริมกำลัง (S_v) แนวคิดจากการออกแบบกำแพงกันดินเสริมกำลังในปัจจุบันมีนัยยะแสดงว่า สมรรถนะของดินที่เสริมกำลังในลักษณะที่ทำให้อัตราส่วน T_{ult}/S_v หรือค่า T_{ult}-to-S_v Ratio (TVR) เท่ากัน จะเหมือนกัน งานวิจัยนี้ทำการทดสอบแรงดันสามแกนกับทรายที่ไม่เสริมกำลังและที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังโพลีโพรพิลีนที่มีค่า T_{ult} แตกต่างกัน 4 ค่า จัดเรียงให้มีจำนวนชั้นและค่า S_v เพื่อให้สอดคล้องกับค่า TVR ที่กำหนดให้แตกต่างกัน 3 ค่า เพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าดังกล่าวต่อกำลังรับแรงอัดสูงสุด (R_{max}) และอัตราส่วนปัวซอง (ν_{sec}) ของทรายที่เสริมกำลัง จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อเปรียบเทียบที่ค่า TVR เท่ากัน ค่า R_{max} จะลดลงในขณะที่ค่า ν_{sec} จะเพิ่มขึ้นหรือทรายจะเสียรูปด้านข้างเพิ่มขึ้นเมื่อค่า T_{ult} เพิ่มขึ้น ซึ่งสื่อให้เห็นว่าสมรรถนะของการเสริมกำลังด้วยค่า T_{ult} ต่ำกว่าและจัดเรียงให้ถี่กว่าจะดีกว่าการเสริมกำลังด้วยค่า T_{ult} มากกว่าและจัดเรียงให้ห่างกว่า ในทางกลับกัน เมื่อเปรียบเทียบที่ค่า T_{ult} เท่ากัน ค่า R_{max} จะเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่า ν_{sec} จะลดลง เมื่อค่า TVR เพิ่มขึ้นเพราะว่าความหนาแน่นการเสริมกำลังจะมากขึ้น อิทธิพลของค่า T_{ult}

Received 22 March 2021
Revised 9 April 2021
Accepted 9 April 2021

และ TVR ที่มีต่อค่า R_{max} และ ν_{sec} สามารถอธิบายได้จากการพัฒนาเขตไม่ปลอดภัยที่เกิดจากการไม่เชื่อมต่อกันระหว่างตาข่ายเสริมแรงและผิวหน้าที่ปลายตาข่ายเสริมแรง ซึ่งส่งผลกระทบทางลบต่อการถ่ายแรงดึงจากตาข่ายเสริมแรงไปเป็นแรงดันโอบรัดส่วนเพิ่มในทราย

คำสำคัญ: กำลังรับแรงดึงสูงสุด; ระยะห่างระหว่างชั้น; ตาข่ายเสริมกำลัง; กำลังอัด; การเสียรูป; ทรายเสริมกำลัง

ABSTRACT

Behaviours of reinforced soil are affected by the ultimate tensile strength (T_{ult}) of geogrid and the vertical spacing (S_v) of geogrid arrangement. Basically, the concept inferred from the current design approach of a reinforced-soil retaining wall shows that, if the T_{ult}-to-S_v (or TVR) ratio is kept the same, the outcoming performance is also the same. In this research, a series of triaxial compression tests was performed with sand either unreinforced or reinforced with polypropylene geogrids having four different T_{ult} values. Number of geogrid layers and S_v were adjusted, therefore, three different TVRs were obtained. The effects of varying T_{ult} and TVR values were studied by comparing the compressive strength (R_{max}) and Poisson's ratio (ν_{sec}) among different geogrid-reinforced sand samples. The followings are found from the results of this study. For the same TVR, the R_{max} decreases, while the ν_{sec} increases or the lateral deformation increases, with increasing T_{ult}. This implies that the performance of reinforcing with the geogrids having lower T_{ult} but are closely spaced is better than that of reinforcing with the geogrids having higher T_{ult} but are coarsely spaced. On the other hand, when comparing at the same T_{ult}, the R_{max} increases with increasing TVR but ν_{sec} decreases with increasing TVR, because of the increasing of reinforcing density. The influences of T_{ult} and TVR on the R_{max} and ν_{sec} can be explained by the development of deterministic zone resulted from no connection between the geogrid and facing at the end. This deterministic zone negatively affects the transferring of the tensile force mobilised in the geogrid to additional confining pressure to sand.

Keywords: Ultimate tensile strength; Spacing, Geogrid; Compressive strength; Deformation; Reinforced sand

1. บทนำ

ตาข่ายเสริมกำลังโพลิเมอร์ (Geogrid) เป็นวัสดุเสริมกำลังชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างกำแพงกันดิน (Retaining wall) และงานโครงสร้างชั้นทาง (Pavement structure) การก่อสร้างโครงสร้างดินเสริมกำลัง (Geosynthetic- Reinforced Soil structure, GRS structure) โดยทั่วไปมักจะนำตาข่ายเสริมกำลังไปจัดเรียงเป็นชั้น ๆ ในดินถม (Backfill soil) เพื่อช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัด อีกทั้งช่วยลดการเสียรูปในแนวราบ ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อโครงสร้าง GRS ได้รับแรงอัดในแนวดิ่ง จะทำให้ดินถมป่องตัวออกในแนวราบเนื่องจากอิทธิพลของอัตราส่วนปัวซองส์ (Poisson's effect) ซึ่งจะทำให้ตาข่ายเสริมกำลังในดินถมยืดออก เมื่อตาข่ายเสริมกำลังยืดออกจะทำให้เกิดแรงดึงขึ้น (Tensile reinforcing effect) ซึ่งจะมีปฏิสัมพันธ์ถ่ายแรงดึงนั้นกลับมาที่ดินถมในลักษณะที่ทำให้แรงดันโอบรัด (Confining pressure) เพิ่มมากขึ้น กระบวนการดังกล่าวจะส่งผลให้ดินเสริมกำลังมีกำลังรับแรงอัดที่มากขึ้นและมีการเสียรูปแนวราบที่น้อยลง

จากการศึกษาของ Nicks et al. [1] พบว่า กำลังรับแรงดึงสูงสุด (Ultimate reinforcement strength, T_{ult}) และระยะห่างระหว่างชั้นของวัสดุเสริมแรง (Vertical spacing, S_v) เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่จะส่งผลต่อสมรรถนะ

กำลังและการเสียรูปของดินเสริมกำลัง การออกแบบกำแพงกันดินเสริมกำลังในปัจจุบัน มักจะคำนวณค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดที่ต้องการ ($T_{ult,req}$) จากสมการที่ (1)

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

เมื่อ σ_h คือ แรงดันดินด้านข้าง (Lateral earth pressure), S_v คือ ระยะห่างระหว่างชั้นของวัสดุเสริมแรง, RF คือสัมประสิทธิ์ลดทอนสำหรับความเสียหายจากการติดตั้ง การคืบและการเสื่อมสภาพระหว่างการใช้งาน และ FS คือ อัตราส่วนความปลอดภัย

จากสมการที่ (1) จะเห็นได้ว่า ถ้าหาก σ_h มีค่าคงที่ ความสัมพันธ์ระหว่าง S_v กับ $T_{ult,req}$ จะเป็นเส้นตรง นั่นหมายความว่า โครงสร้าง GRS ที่เสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมกำลังที่มีค่า T_{ult} เท่ากับค่าที่คำนวณได้จากสมการนี้จะตอบสนองต่อค่า σ_h ที่เท่ากัน ดังนั้นหากแปรผันค่า T_{ult} และ S_v ในสัดส่วนที่เท่ากัน จะได้ค่า σ_h ตอบสนองเท่าเดิม ตัวอย่างเช่น โครงสร้าง GRS ที่เสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมกำลังที่มีค่า $T_{ult} = T_{ult}$ และ $S_v = S_v$ จะได้ค่า σ_h ตอบสนองเท่ากับกรณี $T_{ult} = 2T_{ult}$ และ $S_v = 2S_v$ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยของ Pham [2] ซึ่งได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง T_{ult} และ S_v ที่มีต่อผลลัพธ์ของโครงสร้างดินเสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์พบว่า อิทธิพลของค่า S_v มีผลต่อสมรรถนะของโครงสร้างดินเสริมกำลังมากกว่า T_{ult} ดังนั้นสมมติฐานที่กล่าวไปข้างต้นนั้นจึงไม่ถูกต้องนัก

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของค่า T_{ult} และอัตราส่วนระหว่าง T_{ult} กับ S_v (T_{ult}-to-S_v ratio, T_{ult}/S_v หรือ TVR) ที่มีต่อกำลังรับแรงอัดสูงสุด(Maximum compressive strength, R_{max}) และการเสียรูปในแนวราบ (Lateral displacement) ของทรายเสริมกำลังโดยการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial compression test) ตาข่ายเสริมกำลังที่ใช้เป็นแบบสองทิศทาง (Biaxial geogrid) ที่ มีค่า T_{ult} แตกต่างกัน 4 ค่า ตัวอย่างทรายเสริมกำลังทดสอบจัดเรียงตาข่ายเสริมกำลังด้วยค่า S_v ที่แตกต่างกันเพื่อให้มีค่า TVR ที่แตกต่างกัน 3 ค่า (อธิบายภายหลัง) การเสียรูปแนวราบทำโดยการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนปัวซองส์เฉลี่ย (Secant Poisson's ratio, ν_{sec}) นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้นำการวิเคราะห์ภาพถ่ายมาใช้เปรียบเทียบการความเครียดแนวราบ (Horizontal strain) และความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum shear strain) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการเฉือนตัวอย่างตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนกระทั่งตัวอย่างวิบัติอีกด้วย

2. วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ในการทดสอบแรงอัดสามแกนใช้ตัวอย่างที่เตรียมจากทรายแห้ง (Air-dried) ทั้งกรณีไม่เสริมกำลังและเสริมกำลัง ตัวอย่างทรายที่ใช้เป็นรูปทรงปริซึมเพื่อให้หน้าตัดของตัวอย่างสอดคล้องกับทิศทางของแรงดึงตามแนวเส้นยืนของตาข่ายเสริมกำลัง การใช้ตัวอย่างรูปทรงปริซึมอาจได้รับผลกระทบจากอิทธิพลของมุม (Corner effect) เนื่องจากการเปลี่ยนทิศทางแบบทันทีทันใดของแรงอีลาสติกที่เกิดขึ้นในเมมเบรนหุ้มตัวอย่างบริเวณมุม แต่กระนั้นหากความหนาของเมมเบรนมีค่าน้อย ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจะมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังแสดงในงานวิจัยของ Nawir et al. [3]

ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบมีขนาดกว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 12 ซม. x 12 ซม. x 24 ซม. ขนาดหน้าตัดของตัวอย่างทรายใหญ่เพียงพอเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาคของทรายที่นำมาใช้ (อธิบายทีหลัง) ตามมาตรฐาน ASTM D7181 [4] และมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะรองรับแผ่นตาข่ายเสริมกำลังที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่จำนวน 4 ช่อง (รูปที่ 1) คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างมีดังต่อไปนี้

2.1 ทราย

ทรายที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นทรายจากแม่น้ำแม่กลอง จ.ราชบุรี ก่อนนำมาใช้งานได้นำมาผ่านกระบวนการล้างด้วยน้ำประปาเพื่อขจัดอนุภาคฝุ่นออกจนสะอาด อบให้แห้งเพื่อขจัดสารอินทรีย์ แล้วจึงนำไปร่อนผ่านตะแกรง ส่วนที่นำมาใช้งานเลือกมาเฉพาะส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 (0.424 มม.) แต่ค้างตะแกรงแบอร์ 100 (0.150 มม.) ทรายที่ได้จากขั้นตอนสุดท้ายมีการกระจายขนาดอนุภาคแบบสม่ำเสมอ (Uniform grade) ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติ

กายภาพและคุณสมบัติดัชนีของทรายที่ผ่านกระบวนการคัดเลือกแล้ว ทรายที่ผ่านกระบวนการคัดเลือกแล้วจะถูกนำมาเก็บรวบรวมในถังเก็บและพักไว้ภายในห้องทดสอบทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นให้คงที่ ดังนั้นเมื่อนำมาเตรียมตัวอย่างทดสอบ ทรายจะอยู่ในสภาวะแห้งในอากาศ (Air-dried)

2.2 ตาข่ายเสริมกำลัง

ตาข่ายเสริมกำลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นตาข่ายเสริมกำลังแบบสองทิศทาง ที่ผลิตจากเส้นใยพอลิโพรไพลีน (Polypropylene, PP) มีคุณสมบัติรับแรงดึงได้สูงและมีการยืดตัวต่ำ สามารถรับกำลังได้ทั้งสองทิศทาง โดยตาข่ายเสริมกำลังแต่ละแผ่นมีขนาดกว้าง x ยาว เท่ากับ 12 ซม. x 12 ซม. และมีค่า T_{ult} แตกต่างกัน 4 ค่า คือ 40, 60, 80 และ 120 kN/m ดังแสดงในรูปที่ 1 ตาข่ายเสริมกำลังที่มีค่า T_{ult} เท่ากับ 120 kN/m ได้มาจากการนำตาข่ายเสริมกำลังที่ T_{ult} เท่ากับ 60 kN/m จำนวน 2 แผ่นมาประกบเชื่อมติดกันด้วยกาวอีพอกซี่ ตามลำดับ ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติของตาข่ายเสริมกำลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้

3. วิธีการทดสอบ

3.1 วิธีการเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างทรายสำหรับการทดสอบแรงอัดสามแกนเริ่มจากการหล่อลื่นหัวตัวอย่างที่ผิวสัมผัสบริเวณฝาบนและฐานโดยใช้จารบีซิลิโคนสุญญากาศ (High-vacuum silicone grease) เพื่อทำให้ตัวอย่างสามารถขนาดตัวออกทางด้านข้างได้อย่างอิสระเมื่อถูกกดในแนวดิ่ง จากนั้นหุ้มเมมเบรน (Membrane) ที่ฐานแล้วจึงนำปลายอีกด้านของเมมเบรนใส่เข้าไปในโมลที่ประกอบเสร็จแล้ว จากนั้นหุ้มปลายของเมมเบรนไว้ที่ปากโมลด้านบน แล้วจึงให้แรงสุญญากาศต่อโมลเพื่อดูดเมมเบรนให้ติดกับผิวด้านในของโมล จากนั้นจึงจัดตำแหน่งของเมมเบรนให้เส้นตรงมุมตัวอย่างตรงกับมุมทั้ง 4 ของโมล

ตารางที่ 1 คุณสมบัติกายภาพและคุณสมบัติดัชนีของทรายที่ใช้ในงานวิจัยนี้

Specific gravity, G_s	Coefficient of uniformity, C_u	Coefficient of curvature, C_c	Maximum void ratio, e_{max}	Minimum void ratio, e_{min}	Mean diameter, D_{50} (mm)
2.64	1.87	0.94	1.033	0.678	0.285

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของตาข่ายเสริมกำลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้

No.	Ultimate tensile strength, T_{ult} (kN/m)	Number of members		Transverse member		Longitudinal member		Covering ratio, CR (%)
		Transverse	Longitudinal	Width (mm)	Length (mm)	Width (mm)	Length (mm)	
1	40	3	3	8.3	120	8.3	120	41.5
2	60	3	3	9.0	120	9.0	120	45.0
3	80	3	3	11.1	120	9.4	120	51.3
4	120	3	3	9.0	120	9.0	120	45.0

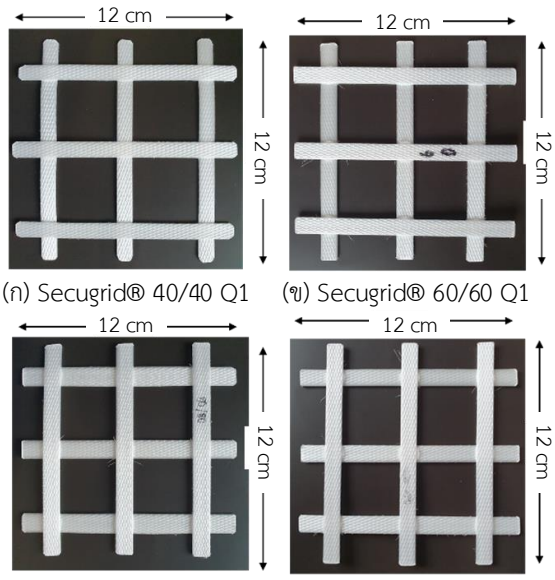
<u>หมายเหตุ:</u> Transverse member = เส้นยืนแนวขวาง; Longitudinal member = เส้นยืนแนวยาว และ Covering ratio = อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ที่ปกคลุมด้วยเส้นยืนทั้งสองแนวต่อพื้นที่ทั้งหมด

การบรรจุทรายลงในโมลทำด้วยวิธีการโปรยทรายผ่านเครื่องมือร่อนผ่านตะแกรงหลายชั้น (Multiple-sieving pluviating apparatus) เพื่อควบคุมความหนาแน่นและความสม่ำเสมอของทราย [5] ในงานวิจัยนี้พบว่า ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density, D_r) ของตัวอย่างที่เตรียมได้มีค่าประมาณร้อยละ 90-95 ในการเตรียมตัวอย่างทรายที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมแรง จะโปรยทรายเป็นชั้น ๆ ให้สอดคล้องกับตำแหน่งที่จะติดตั้งตาข่ายเสริมแรง การโปรยทรายในแต่ละชั้น จะโปรยจนกระทั่งระดับผิวทรายสูงกว่าระดับที่ต้องการเล็กน้อย แล้วจึงทำการดูดทรายส่วนที่สูงกว่าระดับที่ต้องการออกด้วยเครื่องดูดทรายที่ควบคุมแรงดูดให้คงที่ จากนั้นจึงวางตาข่ายเสริมกำลังลงบนผิวทรายที่ปรับระดับแล้ว แล้วจึงทำการโปรยทรายปิดทับและกระทุ้งด้วยค้อนยางกับท่อนไม้อีกครั้ง เพื่อขจัดการหลวมตัวของทรายที่อยู่ภายในช่องเปิดของตาข่ายเสริมกำลัง หลังจากนั้นดำเนินวิธีการข้างต้นกับการเสริมแรงในชั้นอื่น ๆ ให้ครบตามจำนวนชั้นที่ต้องการดังรูปที่ 2 วิธีการเตรียมตัวอย่างโดยละเอียดสามารถอ้างอิงได้จากงานวิจัยของ Kongkitkul et al. [6] การจัดเรียงตาข่ายเสริมกำลังที่มีค่า T_{ult} แตกต่างกัน (ตารางที่ 2) ด้วยค่า S_v ที่แตกต่างกัน ทำให้มีจำนวนชั้นการเสริมกำลังแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2 และการจัดเรียงดังกล่าวจะส่งผลลัพธ์ให้มีค่า TVR แตกต่างกัน 3 ค่าดังแสดงในตารางที่ 3

เมื่อเตรียมทรายชั้นสุดท้ายเสร็จแล้วจึงประกบฝาบนกับตัวอย่างแล้วทำการหุ้มปลายเมมเบรนมาเข้ากับฝาบนและทำการซีลตัวอย่าง จากนั้นจึงลดแรงสุญญากาศที่ให้กับโมลลงจนเป็นศูนย์ แล้วจึงให้แรงสุญญากาศบางส่วน (Partial vacuuming) เท่ากับ 30 kPa ซึ่งควบคุมให้คงที่ตลอดการทดสอบ เข้าไปภายในตัวอย่างผ่านทางท่อเชื่อมต่อบริเวณฝาบนและฐาน แรงสุญญากาศจะกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วถึงตามโพรงที่อยู่ระหว่างอนุภาคทราย ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นแรงดันโอบรัดจากภายในตัวอย่าง จากนั้นจึงแกะโมลออก [7]

3.2 วิธีการทดสอบ

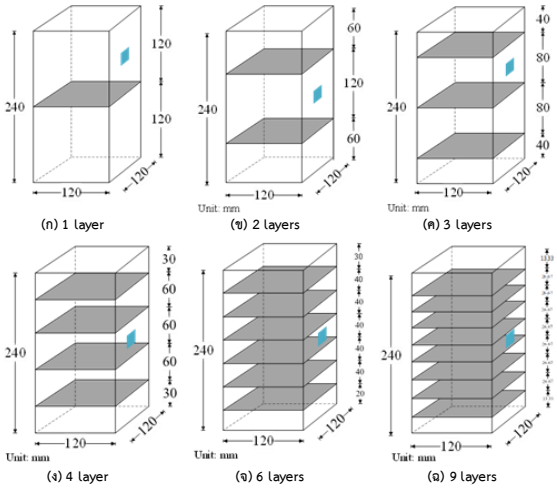
เมื่อเตรียมตัวอย่างพร้อมแล้ว จึงนำเพลาของเซลล์กดตัวอย่างไปต่อเข้ากับเพลาของเครื่องกด (รูปที่ 3) ในงานวิจัยนี้วัดแรงที่กระทำต่อตัวอย่างจากเซลล์วัดแรง (Load cell) ที่ติดตั้งอยู่ที่เหนือฝาบน นอกจากนี้ ยังได้มีการติดตั้งเซนเซอร์วัดระยะกระจัด (Displacement sensor) เพื่อวัดการเสียรูปของตัวอย่างในแนวดิ่ง เซนเซอร์เลเซอร์วัดระยะกระจัด (Laser Displacement sensor) เพื่อวัดการเสียรูปของตัวอย่างในแนวราบ ทรานดิวเซอร์วัดแรงดัน (Pressure transducer) เพื่อวัดแรงสุญญากาศบางส่วนที่ให้กับตัวอย่าง และกล้องถ่ายภาพด้านหน้าของตัวอย่างเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ภาพถ่าย เมื่อทำการติดตั้งและตั้งค่าสอบเทียบเครื่องมือวัดต่างๆ ตามที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว จึงกดตัวอย่างด้วยอัตราการเคลื่อนที่เท่ากับ 0.3 มิลลิเมตรต่อนาที หรือคิดเป็นอัตราความเครียดเท่ากับ 0.125 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที จนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ ด้วยอัตราความเครียดดังกล่าวการเฉือนตัวอย่างจะมีลักษณะแบบระบายน้ำโดยไม่ได้รับผลกระทบพลศาสตร์ และขั้นตอนการกดตัวอย่างจะใช้ระยะเวลาประมาณ 1.6 ชั่วโมง



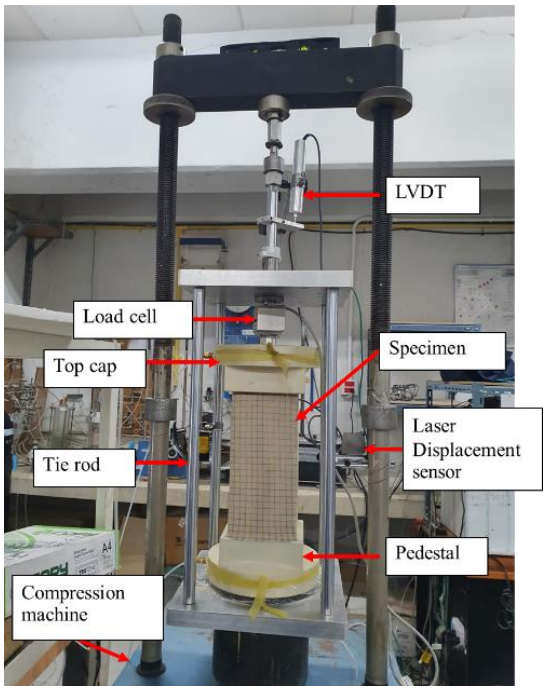
(ก) Secugrid® 40/40 Q1 (ข) Secugrid® 60/60 Q1

(ค) Secugrid® 80/80 Q1 (ง) Secugrid® 120/120 Q1

รูปที่ 1 ตาข่ายเสริมกำลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้ที่มีค่า Tult เท่ากับ (ก) 40 kN/m, (ข) 60 kN/m, (ค) 80 kN/m และ (ง) 120 kN/m



รูปที่ 2 ตำแหน่งของตาข่ายเสริมแรงที่จัดเรียงในตัวอย่างทรายเสริมกำลังที่มีจำนวนชั้นเสริมกำลังเท่ากับ (ก) 1 ชั้น, (ข) 2 ชั้น, (ค) 3 ชั้น, (ง) 4 ชั้น, (จ) 6 ชั้น และ (ฉ) 9 ชั้น



รูปที่ 3 การเตรียมตัวอย่างทรายเพื่อการทดสอบแรงอัดสามแกนและการติดตั้งเครื่องมือวัด

3.3 พารามิเตอร์ความเค้นและพารามิเตอร์ความเครียด

งานวิจัยนี้นำเสนอค่ากำลังรับแรงอัดของทรายเสริมกำลังด้วยพารามิเตอร์อัตราส่วนความเค้นเฉลี่ย (Average stress ratio, R) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

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

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

การเสียรูปในแนวดิ่งของตัวอย่างนำเสนอโดยค่าพารามิเตอร์ความเครียดแนวดิ่งเฉลี่ย (Average vertical strain, ε_v) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

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

เมื่อ ΔH คือการเปลี่ยนแปลงความสูงของตัวอย่างซึ่งวัดได้จากเซนเซอร์วัดระยะกระจัด และ H_0 คือความสูงเริ่มต้นของตัวอย่าง (เท่ากับ 240 mm)

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

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

เมื่อ ΔB_1 และ ΔB_2 คือการเปลี่ยนแปลงความกว้างของตัวอย่างทางด้านซ้ายและขวาบริเวณกึ่งกลางความสูงของตัวอย่างซึ่งวัดได้จากเซนเซอร์เลเซอร์วัดระยะกระจัดที่ติดตั้งทางด้านซ้ายและด้านขวาของตัวอย่าง ตามลำดับ และ B_0 คือความกว้างเริ่มต้นของตัวอย่าง (เท่ากับ 120 mm) ค่า ε_h ที่ได้จากเซนเซอร์เลเซอร์วัดระยะกระจัดนี้ สามารถเป็นตัวแทนของค่าเฉลี่ยของทั้งตัวอย่างเมื่อมีการเสียรูปด้านข้างแบบสม่ำเสมอตลอดความสูงของตัวอย่างดังเช่นกรณีตัวอย่างทรายที่ไม่เสริมกำลัง อย่างไรก็ตาม ตัวอย่างทรายที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังจะมีการเสียรูปด้านข้างในลักษณะไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นค่า ε_h ที่ได้จาก

เซนเซอร์เลเซอร์วัดระยะกระจัดอาจไม่สอดคล้องกับค่าเฉลี่ยของทั้งตัวอย่าง งานวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ภาพถ่ายเพื่อหาค่า ε_h ที่สามารถเป็นตัวแทนของทั้งตัวอย่างได้ ดังรายละเอียดที่จะได้อธิบายในภายหลัง

ตารางที่ 3 ค่า R_{max}, SR และ ν_{sec} ของตัวอย่างทรายที่ไม่เสริมกำลังและที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังที่มีค่า T_{ult} และ TVR ที่แตกต่างกัน

No.	Test name	Ultimate tensile strength, T_{ult} (kN/m)	Vertical spacing, S_v (m)	T_{ult}/S_v ratio, TVR	Maximum stress ratio, R_{max}	Strength ratio, SR	Vertical strain at R_{max}, $\varepsilon_{v,max}$ (%)	Horizontal strain at R_{max},$\varepsilon_{h,max}$ (%)	Secant Poisson's ratio, ν_{sec}
1	Unreinforced	N/A	N/A	N/A	6.389	1.501	5.655	-7.828	1.384
2	PP-T40-TVR500	40	0.08	500	11.949	1.870	4.355	-3.697	0.849
3	PP-T60-TVR500	60	0.12	500	9.592	1.501	3.962	-3.640	0.919
4	PP-T120-TVR500	120	0.24	500	6.821	1.068	3.182	-1.038	0.326
5	PP-T40-TVR1000	40	0.04	1000	22.945	3.592	4.930	-2.657	0.539
6	PP-T60-TVR1000	60	0.06	1000	19.310	3.023	4.739	-4.450	0.939
7	PP-T80-TVR1000	80	0.08	1000	12.012	1.880	4.268	-3.737	0.876
8	PP-T120-TVR1000	120	0.12	1000	9.284	1.453	3.484	-4.703	1.350
9	PP-T40-TVR1500	40	0.027	1500	34.286	5.367	5.403	-2.866	0.530
10	PP-T60-TVR1500	60	0.04	1500	21.709	4.501	4.498	-2.396	0.533
11	PP-T120-TVR1500	120	0.08	1500	11.662	1.825	4.282	-3.326	0.777

N/A: Not applicable.

4. ผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์

4.1 กำลังรับแรงอัดของทรายที่ไม่เสริมกำลัง

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R กับ ε_v ของตัวอย่างทรายที่ไม่เสริมกำลังแสดงในรูปที่ 4 จากรูปนี้จะเห็นได้ว่า ค่า R เพิ่มขึ้นเมื่อค่า ε_v เพิ่มขึ้นจนกระทั่งแสดงค่าสูงสุด (Peak state) พฤติกรรมดังกล่าวมีลักษณะของพฤติกรรมแข็งขึ้นด้วยความเครียด (Strain-hardening) ค่า R ที่จุดสูงสุดนี้จะนิยามเป็นอัตราส่วนความเค้นเฉลี่ยสูงสุด (R_{peak}) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.389 ที่ค่า ε_v เท่ากับ 5.655% จากนั้นค่า R จะลดลงตามค่า ε_v ที่เพิ่มขึ้นต่อไปจนถึงจุดเริ่มต้นของสถานะคงเหลือ (Residual state) พฤติกรรมในช่วงนี้มีลักษณะของพฤติกรรมอ่อนตัวลงด้วยความเครียด (Strain-softening) เมื่อเลยจุดดังกล่าวไปแล้วค่า R มีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงกับค่า ε_v ที่เพิ่มขึ้นต่อไป ค่า R ณ จุดนี้จะเรียกว่าอัตราส่วนความเค้นคงเหลือ (R_{res}) ซึ่งเท่ากับ 4.443 ที่ค่า ε_v เท่ากับ 11.253%

เมื่อสมมติให้ค่าความเชื่อมแน่น (Cohesion, c') ของทรายที่ใช้ทดลองมีค่าเท่ากับศูนย์ (c' = 0) มุมเสียดทานภายใน (ϕ') จะสามารถคำนวณได้จากค่า R ดังสมการที่ (5)

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

ค่า ϕ' ที่คำนวณได้จากค่า R_{peak} = 6.389 และ R_{res} = 4.443 เท่ากับ 46.8° และ 39.4° ตามลำดับ

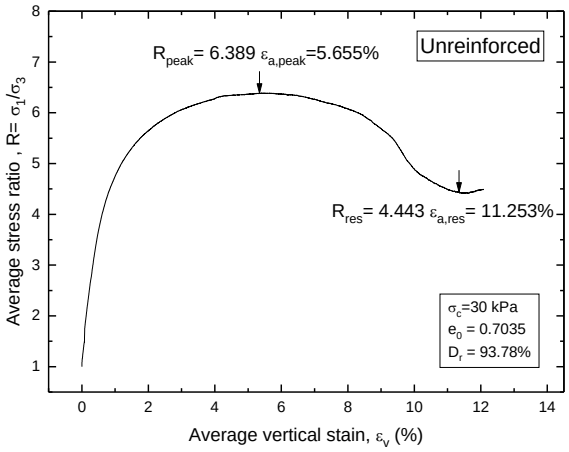
4.2 กำลังรับแรงอัดของทรายที่เสริมกำลัง

รูปที่ 5 ถึง 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า R กับ ε_v และความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างค่า ε_h กับ ε_v ที่ได้จากตัวอย่างทรายที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังที่มีค่า TVR ที่แตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 500, 1000 และ 1500 kN/m/m ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบที่ค่า TVR แต่ละค่าดังแสดงในรูปดังกล่าว จะเห็นได้ว่า

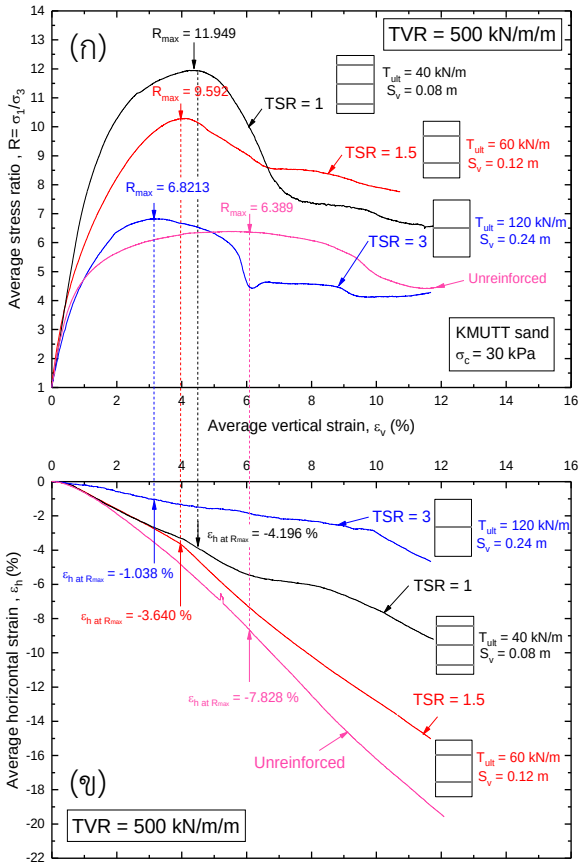
1. ค่า R ของทรายเสริมกำลังเพิ่มขึ้นกับค่า ε_v ที่เพิ่มขึ้นในลักษณะที่คล้ายคลึงกับกรณีของทรายไม่เสริมกำลัง อย่างไรก็ตาม ค่า R_{max} ของตัวอย่างทรายเสริมกำลังสูงกว่าของตัวอย่างทรายไม่เสริมกำลังอย่างมีนัยสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ทั้งนี้เป็นเพราะว่าตาข่ายเสริมกำลังช่วยทำให้แรงดันโอบรัดที่กระทำต่อทรายเพิ่มมากขึ้นจาก Tensile reinforcing effect
2. เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างทรายที่เสริมกำลังให้มีค่า TVR เท่ากันจะพบว่า ค่า R_{max} จากตัวอย่างที่ใช้ตาข่ายเสริมกำลังที่มีค่า T_{ult} ที่ต่ำกว่ามาจัดเรียงให้มีค่า S_v ต่ำกว่า จะสูงกว่าค่า R_{max} จากตัวอย่างที่ใช้ตาข่ายเสริมกำลังที่มีค่า T_{ult} ที่สูงกว่ามาจัดเรียงให้มีค่า S_v สูงกว่า ทั้งนี้เป็นเพราะว่าการจัดเรียงให้มีค่า S_v สูงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายแรงดึงจากตาข่ายเสริมกำลังไปเป็นแรงดันโอบรัดในทรายลดต่ำลง และทำให้มีส่วนของทรายที่แรงดึงจากตาข่ายเสริมกำลังถ่ายเทไปไม่ถึง หรือที่เรียกว่า เขตไม่ปลอดภัย (Deterministic zone, รูปที่ 9) [6] มีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

4.3 อิทธิพลของกำลังรับแรงดึงสูงสุดของตาเสริมแรง (T_{ult}) ที่มีต่อ R_{max}

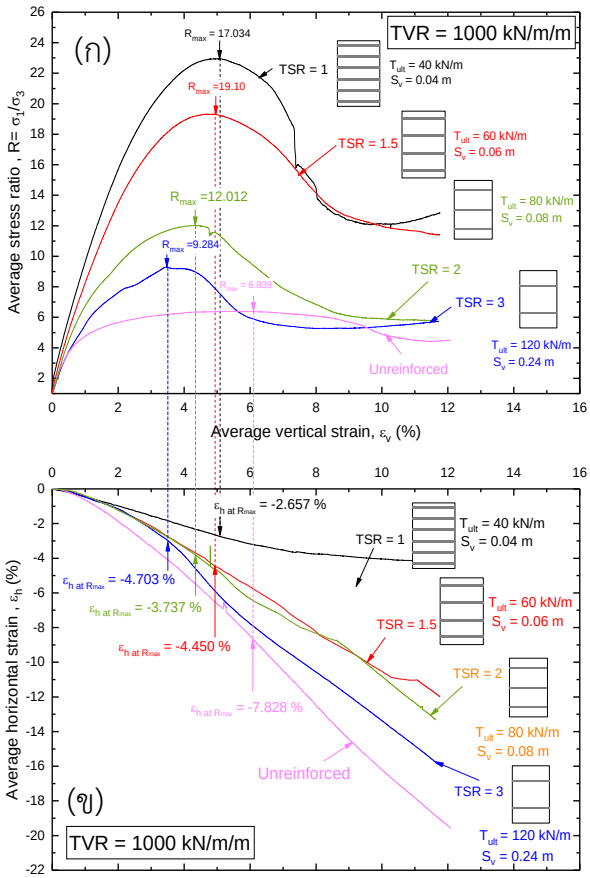
จากความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า R กับ ε_v สำหรับค่า TVR แต่ละค่าที่แสดงในรูปที่ 5 ถึง 7 เมื่อนำค่า R_{max} มาสร้างความสัมพันธ์กับค่า T_{ult} จะได้ดังรูปที่ 8 เมื่อเปรียบเทียบที่ค่า T_{ult} เท่ากันจะเห็นได้ว่า การเพิ่มขึ้นของค่า TVR จะส่งผล



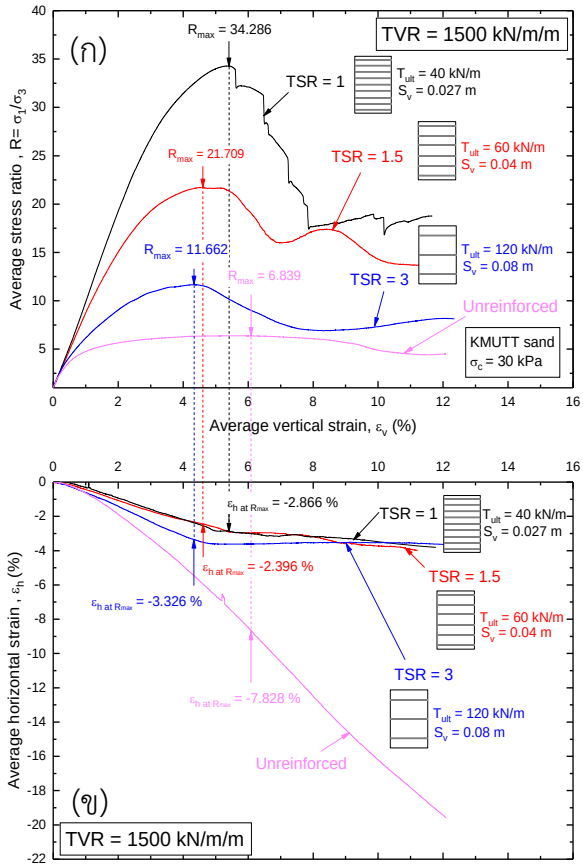
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง R กับ ε_v จากตัวอย่างทรายที่ไม่เสริมกำลัง



รูปที่ 5 ผลการทดสอบจากตัวอย่างทรายเสริมกำลังที่มีค่า TVR เท่ากับ 500 kN/m/m: (ก) ความสัมพันธ์ R-ε_v และ (ข) ความสัมพันธ์ ε_h - ε_v



รูปที่ 6 ผลการทดสอบจากตัวอย่างทรายเสริมกำลังที่มีค่า TVR เท่ากับ 1000 kN/m/m: (ก) ความสัมพันธ์ R-ε_v และ (ข) ความสัมพันธ์ ε_h-ε_v



รูปที่ 7 ผลการทดสอบจากตัวอย่างทรายเสริมกำลังที่มีค่า TVR เท่ากับ 1500 kN/m/m: (ก) ความสัมพันธ์ R-ε_v และ (ข) ความสัมพันธ์ ε_h-ε_v

ทำให้ค่า R_{max} เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะว่าเมื่อค่า TVR เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่า S_v ลดลง (ตารางที่ 3) ระยะห่างระหว่างชั้นที่ลดลงส่งผลให้ความหนาแน่นการเสริมกำลัง (Reinforcing density) เพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อเสริมแรงด้วยตาข่ายเสริมแรงที่มีค่า T_{ult} เท่ากัน ตัวอย่างทรายที่เสริมกำลังด้วยความหนาแน่นการเสริมกำลังที่มากกว่าจะแสดงค่า R_{max} ที่มากกว่าตัวอย่างทรายที่เสริมกำลังด้วยความหนาแน่นการเสริมกำลังที่น้อยกว่า

เมื่อเปรียบเทียบที่ค่า TVR เท่ากัน ค่า R_{max} ลดลงเมื่อค่า T_{ult} ของตาข่ายเสริมกำลังเพิ่มขึ้น เพราะว่าเมื่อค่า T_{ult} เพิ่มขึ้นในขณะที่ค่า TVR มีค่าเท่าเดิม จะส่งผลให้ค่า S_v เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่า S_v จะทำให้พื้นที่เขตไม่ปลอดภัยเพิ่มขึ้น ซึ่งเขตไม่ปลอดภัย หรือ Deterministic zone คือพื้นที่ที่อิทธิพลจาก Tensile reinforcing effect ถ่ายเทไปไม่ถึง เมื่อค่า S_v สูงขึ้น สัดส่วนของเขตไม่ปลอดภัยจะเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 10 เมื่อเขตไม่ปลอดภัยมีสัดส่วนสูงขึ้น นั่นหมายความว่า มีส่วนของทรายที่ไม่ได้รับแรงดันโอบรัดส่วนเพิ่มที่พัฒนาจากปฏิสัมพันธ์กับแรงดึงในตาข่ายเสริมกำลังในสัดส่วนที่ขึ้นตามกันไปด้วย จึงทำให้ค่า R_{max} ลดลง

4.4 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างชั้นของการเสริมกำลัง (S_v) ต่อค่า R_{max}

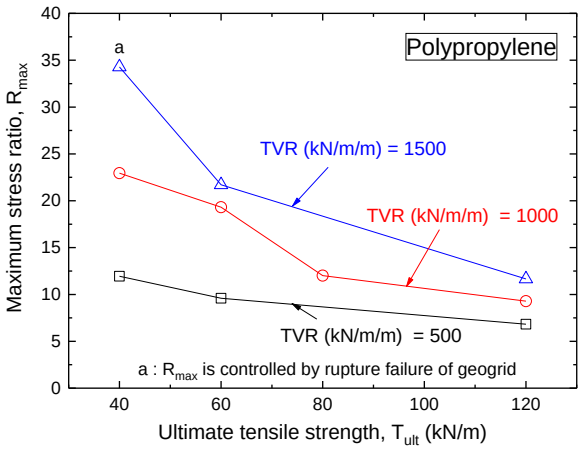
รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า R_{max} กับ S_v สำหรับค่า TVR ที่แตกต่างกัน เราอาจสังเกตได้ว่าการเพิ่มขึ้นของค่า S_v ส่งผลให้ค่า R_{max} ลดลงอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนเขตไม่ปลอดภัยดังที่กล่าวไปในหัวข้อที่แล้ว และเมื่อพิจารณาที่ค่า S_v เท่ากัน ค่า R_{max} ที่ได้จากการเสริมกำลังให้มีค่า TVR แตกต่างกันกลับใกล้เคียงกัน

มาก ทั้งนี้ เราอาจอนุมานได้ว่า ความสัมพันธ์ R_{max} - S_v สำหรับค่า TVR ที่ไม่เท่ากันมีแนวโน้มที่จะกลายเป็นความสัมพันธ์ไม่เชิงเส้นเดียวกันได้ พฤติกรรมดังกล่าวสอดคล้องกับสมการทำนายค่า R_{max} ของทรายเสริมกำลังที่นำเสนอโดย Tatsuoka [8] ซึ่งได้นิยามความหนาแน่นการเสริมกำลังจากอัตราส่วนระหว่างความกว้างของตัวอย่างทรายเสริมกำลัง (d) ต่อระยะห่างระหว่างชั้นของตาข่ายเสริมกำลัง (h) (h = S_v ของงานวิจัยนี้ และได้อธิบายว่า ในกรณีที่การวิบัติของทรายเสริมกำลังถูกควบคุมโดยการวิบัติในส่วนของทราย โดยที่ไม่เกิดการฉีกขาดของตาข่ายเสริมกำลัง ค่า R_{max} ของทรายเสริมกำลังจะขึ้นอยู่กับ 1. ค่า d/h, 2. มุมเสียดทานภายในของทราย (ϕ) และ 3. มุมเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างทรายกับตาข่ายเสริมกำลัง (δ) ดังนั้นทรายเสริมกำลังจะแสดงค่า R_{max} เท่ากันเมื่อค่า d/h, ϕ และ δ เท่ากัน ตัวอย่างการทำนายค่า R_{max} ของทรายเสริมกำลังเมื่อรับแรงอัดสามแกนแสดงในงานวิจัยของ ส.สุดใจ และ ว.ก้องกิจกุล [9]

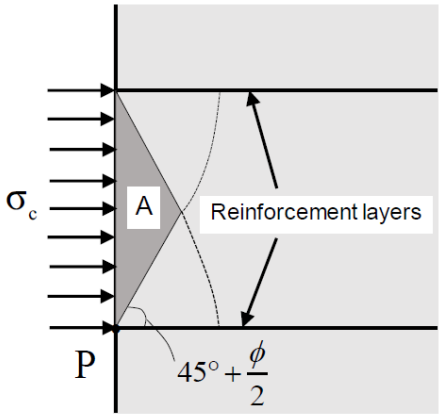
ในงานวิจัยนี้ ตัวอย่างทรายเสริมกำลังมีความกว้าง (d) เท่ากัน (เท่ากับ 12 ซม.) ดังนั้น เมื่อค่า S_v เพิ่มขึ้น ค่า d/h จะลดลง และค่า R_{max} ที่ได้จากการทำนายจะลดลงตามกันไปด้วยโดยไม่ขึ้นอยู่กับค่า T_{ult} ของตาข่ายเสริมกำลัง และค่า TVR จากการจัดเรียง ถ้าการวิบัติของทรายเสริมกำลังถูกควบคุมด้วยการวิบัติในส่วนของทราย จึงอาจกล่าวได้ว่าค่า R_{max} ของทรายเสริมกำลังจะสูงที่สุดเมื่อจัดเรียงตาข่ายเสริมกำลังให้ชิดกันมากที่สุด

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลัง (Strength ratio, SR) กับอัตราส่วนกำลังรับแรงดึงสูงสุด (Tensile strength ratio, TSR)

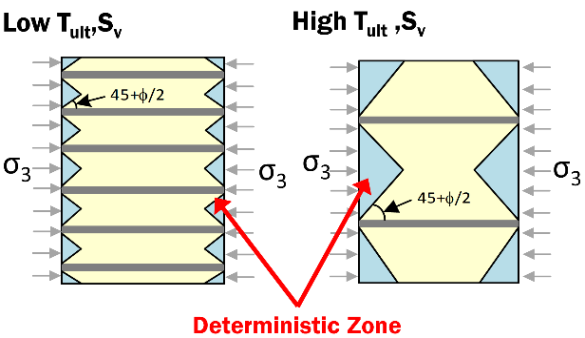
รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลัง (Strength ratio, SR) ซึ่งนิยามจากอัตราส่วนระหว่างค่า R_{max} ของทรายที่เสริมกำลังต่อค่า R_{max} ของทรายที่ไม่เสริมกำลัง (เท่ากับ 6.389) กับอัตราส่วนกำลังรับแรงดึงสูงสุด (Tensile strength ratio, TSR) นิยามจากอัตราส่วนระหว่างค่า T_{ult} ของตาข่ายเสริมกำลังต่อค่า T_{ult} อ้างอิง ($T_{ult,ref}$) งานวิจัยนี้กำหนดให้ค่า $T_{ult,ref}$ เท่ากับ 40 kN/m



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R_{max} กับ T_{ult} สำหรับค่า TVR ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 9 เขตไม่ปลอดภัย (Deterministic zone) ในทรายเสริมกำลัง [5]



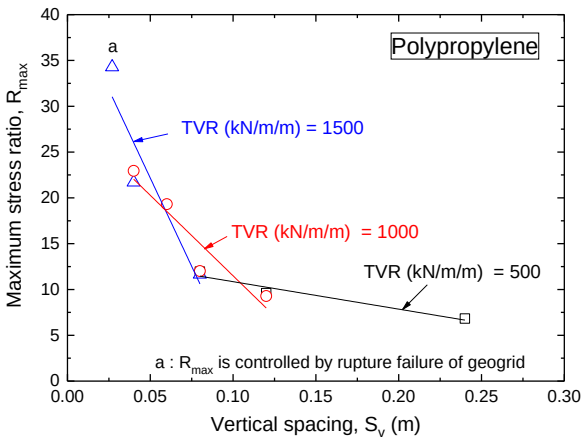
รูปที่ 10 การเปรียบเทียบสัดส่วนของเขตไม่ปลอดภัยระหว่างกรณีที่เสริมกำลังด้วยค่า T_{ult} และ S_v ที่ต่ำกับกรณีที่เสริมกำลังด้วยค่า T_{ult} และ S_v ที่สูง

จากความสัมพันธ์ในรูปที่ 12 จะสามารถสังเกตได้ว่า เมื่อเปรียบเทียบที่ค่า TVR เดียวกัน การเพิ่มขึ้นของค่า T_{ult} หรือการเพิ่มค่า TSR จะส่งผลให้ค่า R_{max} ลดลง ในทางตรงกันข้าม เมื่อเปรียบเทียบที่ค่า T_{ult} หรือค่า TSR ที่เท่ากัน การเพิ่มขึ้นของค่า TVR จะส่งผลให้ค่า R_{max} เพิ่มขึ้น

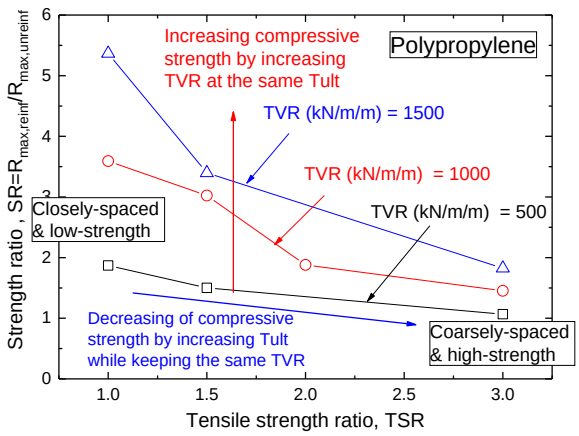
จากที่กล่าวมาข้างต้นจะสามารถได้ข้อสรุปว่า ทรายที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังที่มีกำลังรับแรงดึงสูงสุดต่ำกว่า แต่จัดเรียงให้มีระยะห่างระหว่างชั้นใกล้ชิดกัน จะมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่มากกว่าทรายที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังที่มีกำลังรับแรงดึงสูงสุดมากกว่า แต่จัดเรียงให้มีระยะห่างระหว่างชั้นห่างกัน พฤติกรรมนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Shen et al. [10] พฤติกรรมที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่า สมมติฐานที่ว่าโครงสร้าง GRS ที่เสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมกำลังให้มีค่า TVR เท่ากัน (สมการที่ 1) จะตอบสนองต่อค่า σ_h ที่เท่ากันไม่เป็นความจริง ทั้งนี้ ในการทดสอบแรงอัดสามแกนกับตัวอย่างทรายเสริมกำลังในงานวิจัยนี้ ไม่มีการเชื่อมต่อระหว่างเมมเบรนกับตาข่ายเสริมกำลัง หรือไม่มีกำลังที่จุดเชื่อมต่อกับผิวหน้า (No connection strength with the facing) จึงทำให้บริเวณแอคทีฟ (Active zone) ที่ติดกับเมมเบรนมีแรงดันโอบรัดต่ำเพราะได้รับอิทธิพลจากแรงดึงในตาข่ายเสริมกำลังน้อยกว่า กล่าวคือในกรณีนี้ แรงดึงจะมีค่าสูงสุดที่กึ่งกลางตัวอย่างและจะมีค่าลดลงไปสู่ศูนย์ที่ปลายด้านข้างที่จรดกับเมมเบรน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดเป็นเขตไม่ปลอดภัยขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 9 [6] ในทางตรงกันข้าม ถ้ามีการเชื่อมต่อกันระหว่างเมมเบรนกับตาข่ายเสริมกำลัง จะทำให้แรงดันโอบรัดในบริเวณแอคทีฟมีค่าสูง เพราะแรงดึงในตาข่ายเสริมกำลังสามารถพัฒนาได้เต็มที่ ดังแสดงในรูปที่ 13 พฤติกรรมนี้แสดงให้เห็นความสำคัญของการเชื่อมต่อตาข่ายเสริมกำลังเข้ากับผิวหน้า และการเลือกใช้ผิวหน้าลักษณะแข็งแกร่ง (Rigid) เพื่อที่จะทำให้แรงดันโอบรัดในบริเวณแอคทีฟมีค่าสูง ดังที่ได้อธิบายในงานวิจัยของ Tatsuoka [11]

4.6 การเปรียบเทียบการเสียรูปแนวราบด้วยค่าอัตราส่วนปัวซองจากผลการวัดด้วยเลเซอร์

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ε_h กับ ε_v แสดงในรูปที่ 5(ข), 6(ข) และ7(ข) สำหรับค่า TVR เท่ากับ 500, 1000 และ 1500 kN/m/m ตามลำดับ ที่จุดที่ตัวอย่างแสดงค่า R_{max} ในแต่ละกรณี จะมีค่า ε_v ไม่เท่ากัน ดังนั้นเราจึงไม่สามารถเปรียบเทียบการเสียรูปแนวราบของทรายเสริมกำลังระหว่างกรณีที่แตกต่างกันด้วยค่า ε_h ได้โดยตรง ในงานวิจัยนี้ จึงได้นิยามอัตราส่วนปัวซอง (Secant Poisson's ratio, ν_{sec}) ดังสมการที่ (7) เพื่อใช้สำหรับการเปรียบเทียบคุณลักษณะของการเสียรูปด้านข้างของทรายที่เสริมกำลังในลักษณะที่แตกต่างกัน



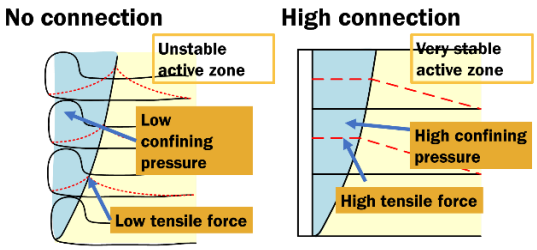
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่าง R_{max} กับ S_v สำหรับค่า TVR ที่แตกต่างกัน



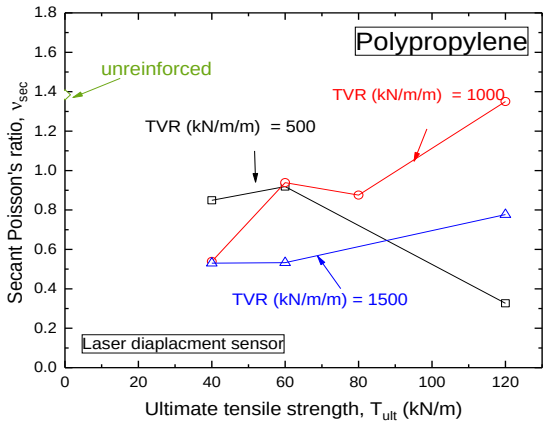
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลัง (SR) กับอัตราส่วนกำลังรับแรงดึงสูงสุด (TSR)

$$\nu_{sec} = -\frac{\varepsilon_{h,R_{max}}}{\varepsilon_{v,R_{max}}} \quad (7)$$

เมื่อ $\varepsilon_{h,Rmax}$ และ $\varepsilon_{v,Rmax}$ คือค่าความเครียดแนวราบเฉลี่ย และค่าความเครียดแนวดิ่งเฉลี่ย ที่ตอบสนองต่อเหตุการณ์ที่ตัวอย่างแสดงค่า R_{max} ตามลำดับ



รูปที่ 13 ความแตกต่างของพฤติกรรมของกำแพงกันดินเสริมกำลังระหว่างกรณีที่ไม่มีกำลังที่จุดเชื่อมต่อกับกรณีที่กำลังที่จุดเชื่อมต่อมีค่าสูง



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ν_{sec} กับ T_{ult} สำหรับค่า TVR ที่แตกต่างกัน ที่ได้จากเซนเซอร์เลเซอร์วัดระยะกระจัด

รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ν_{sec} กับ T_{ult} ที่ค่า TVR ต่าง ๆ เมื่อเปรียบเทียบที่ค่า TVR เดียวกันจะพบว่า การเพิ่มขึ้นของค่า T_{ult} มีแนวโน้มที่จะส่งผลให้ค่า ν_{sec} เพิ่มขึ้น หรือตัวอย่างจะมีการเสียรูปด้านข้างเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะว่า เมื่อเพิ่มค่า T_{ult} ในขณะที่ค่า TVR เท่ากันจะทำให้ค่า S_v เพิ่มขึ้น ตัวอย่างจึงมีเขตไม่ปลอดภัยในสัดส่วนที่มากขึ้น และจะส่งผลให้ตัวอย่างมีการเสียรูปด้านข้าง หรือป่องออกมากขึ้น

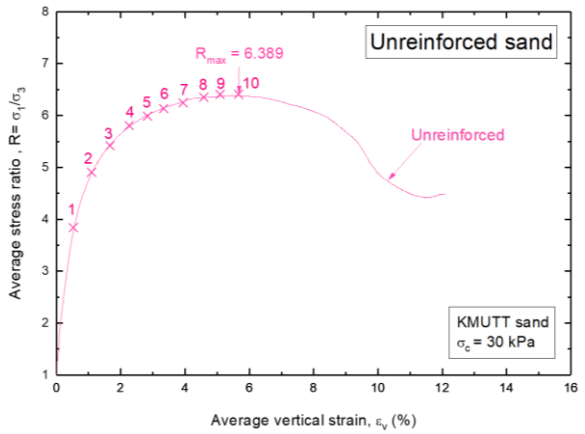
ในทางตรงกันข้าม เมื่อเปรียบเทียบที่ค่า T_{ult} เท่ากันจะพบว่า การเพิ่มขึ้นของ TVR จะส่งผลให้ ν_{sec} มีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นการเสริมแรง จากรูปที่ 14 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่า ν_{sec} ค่อนข้างกระจายตัว เพราะว่าเซนเซอร์เลเซอร์วัดระยะกระจัดแต่ละตัว วัดการเสียรูปที่ผิวด้านข้างของตัวอย่างเพียงแค่จุดเดียวที่บริเวณกึ่งกลาง (รูปที่ 3) แต่การเสียรูปด้านข้างของตัวอย่างทรายที่เสริมแรงจะมีลักษณะไม่สม่ำเสมอเนื่องจากอิทธิพลจาก Tensile reinforcing effect ไม่เท่ากันตลอดความสูงของตัวอย่าง (รูปที่ 10) ดังนั้นจะต้องใช้วิธีการอื่นเพื่อหาค่า ν_{sec} เฉลี่ย ที่สามารถเป็นตัวแทนของตัวอย่างทรายเสริมกำลังทั้งตัวอย่างได้ดังจะได้อธิบายต่อไป

5. การวิเคราะห์ภาพถ่าย (Photogrammetric analysis)

ในระหว่างการทดสอบแรงอัดสามแกนในงานวิจัยนี้ ตัวอย่างทดสอบจะถูกถ่ายรูปทางด้านหน้าทุก ๆ 1 นาที เพื่อนำรูปมาทำการวิเคราะห์ภาพถ่าย (Photogrammetric analysis) และคำนวณสนามความเครียด (Strain field) ที่เกิดขึ้นกับตัวอย่าง เพื่อศึกษาการเสียรูปแนวราบและการพัฒนาแถบเฉือน (Shear band) เพื่อการนี้ ได้แบ่งค่า ε_v ในช่วงก่อนถึงจุดสูงสุดออกเป็น 10 ช่วงเท่าๆ กัน ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 15 จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ภาพถ่ายที่สอดคล้องกับจุดทั้ง 10 จุดที่กำหนด รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์ภาพถ่ายแสดงในงานศึกษาของ Kongkitkul et al. [12]

5.1 การเปรียบเทียบค่าการเสียรูปแนวราบระหว่างเซนเซอร์เลเซอร์วัดระยะกระจัดกับการวิเคราะห์ภาพถ่าย

รูปที่ 16(ก) ถึงรูปที่ 16(ค) เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่า ε_h กับ ε_v ที่ได้จากการวัดด้วยเซนเซอร์เลเซอร์วัดระยะกระจัด ($\varepsilon_{h,LDS}$) กับการวิเคราะห์ภาพถ่าย ($\varepsilon_{h,photo}$) ของตัวอย่างทรายไม่เสริมกำลังและตัวอย่างทรายเสริมกำลังด้วย T_{ult}=60 kN/m & TVR=500 kN/m/m และ T_{ult}=120 kN/m & TVR=500 kN/m/m

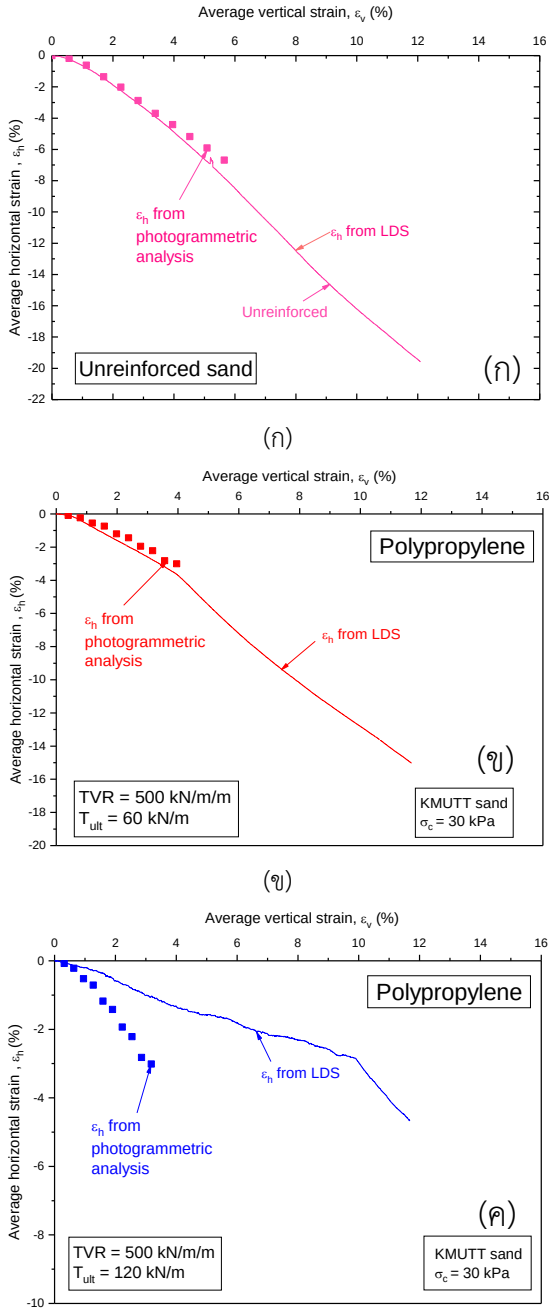


รูปที่ 15 ตัวอย่างการแบ่งค่า ε_v ออกเป็น 10 ช่วงเท่าๆ กัน จากจุดเริ่มต้นการเฉือนตัวอย่างไปยังจุดที่แสดงค่า R_{max} จากการทดสอบแรงอัดสามแกนกับทรายที่ไม่เสริมกำลัง

จากรูปที่ 16(ก) จะเห็นได้ว่า ค่า $\varepsilon_{h,LDS}$ และ $\varepsilon_{h,photo}$ ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เป็นเพราะว่าการเสียรูปของตัวอย่างทรายที่ไม่เสริมกำลังในช่วงก่อนที่จะถึงจุดสูงสุดมีลักษณะสม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบในภาพรวมการเสียรูปของตัวอย่างทรายเสริมกำลังทุกตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 4 เราจะพบว่า โดนส่วนมาก $\varepsilon_{h,LDS}$ และ $\varepsilon_{h,photo}$ มีค่าใกล้เคียงกันดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 16(ข) แต่จะมีในบางกรณีที่ $\varepsilon_{h,photo}$ มีค่าติดลบมากกว่า $\varepsilon_{h,LDS}$ ดังแสดงในรูปที่ 16(ค) ทั้งนี้เป็นเพราะว่าค่า $\varepsilon_{h,LDS}$ ที่วัดได้จากเซนเซอร์เลเซอร์วัดระยะกระจัดได้รับอิทธิพลจากแรงดึงของตาข่ายเสริมกำลังที่ตำแหน่งการวัด ซึ่งเราจะสังเกตได้ว่าความแตกต่างระหว่างค่า $\varepsilon_{h,LDS}$ และ $\varepsilon_{h,photo}$ มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

5.2 การเปรียบเทียบการเสียรูปแนวราบด้วยค่าอัตราส่วนปัวซองจากผลการวิเคราะห์ภาพถ่าย

เช่นเดียวกับการเสียรูปแนวราบที่วิเคราะห์จากเซนเซอร์เลเซอร์วัดระยะกระจัด การเปรียบเทียบค่า ε_h ระหว่างกรณีที่แตกต่างกันจำเป็นจะต้องใช้ค่า ν_{sec} มาเปรียบเทียบกัน (ตารางที่ 4) รูปที่ 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ν_{sec} กับ T_{ult} สำหรับค่า TVR ต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบที่ค่า TVR ที่เท่ากันจะพบว่า การเพิ่มขึ้นของ T_{ult} ส่งผลให้ ν_{sec} มีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนเขตไม่ปลอดภัย ในทางตรงกันข้าม เมื่อเปรียบเทียบ



รูปที่ 16 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่า ε_h กับ ε_v ระหว่างเซนเซอร์เลเซอร์วัดระยะกระจัดและการวิเคราะห์ภาพถ่าย: (ก) ทรายไม่เสริมกำลัง และทรายเสริมกำลังด้วย: (ข) T_{ult}=60 kN/m & TVR=500 kN/m/m และ (ค) T_{ult}=120 kN/m & TVR=500 kN/m/m

ที่ค่า T_{ult} ที่เท่ากันจะพบว่า การเพิ่มขึ้นของค่า TVR จะส่งผลให้ค่า ν_{sec} ลดลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นการเสริมกำลัง

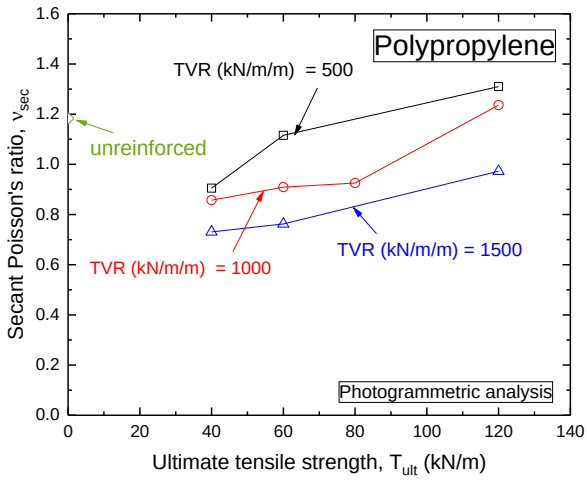
เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างรูปที่ 14 กับรูปที่ 17 จะเห็นได้ว่า ผลการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายมีความเป็นระบบมากกว่าผลการทดลองที่ได้จากเซนเซอร์เลเซอร์วัดระยะกระจัด นอกจากนี้ผลการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายจะมีความน่าเชื่อถือมากกว่าผลการทดลองที่ได้จากเซนเซอร์เลเซอร์วัดระยะกระจัด เพราะผลการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายเฉลี่ยมาจากตัวอย่างทั้งตัวอย่าง แต่ผลการทดลองจากเซนเซอร์เลเซอร์วัดระยะกระจัด ได้มาจากการวัดเพียงแค่จุดเดียวแล้วนำมาเป็นตัวแทนของทั้งตัวอย่าง จึงอาจทำให้มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงได้

5.3 สนามความเครียดจากการวิเคราะห์ภาพถ่าย

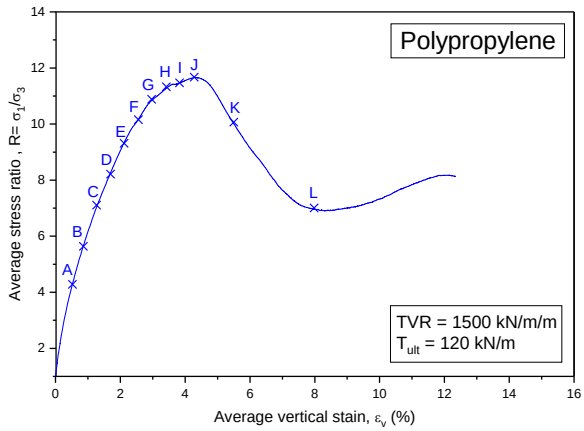
รูปที่ 18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า R กับ ε_v ที่ได้จากผลการทดสอบ PP-T120-TVR1500 (ตารางที่ 3) การวิเคราะห์ภาพถ่ายได้ทำที่พิกัด R: ε_v ต่าง ๆ โดยแบ่งเป็น 10 จุดสำหรับช่วงก่อนจุดสูงสุด (Pre-peak regime) ด้วยจุด A ถึงจุด J และกำหนดให้จุด K เป็นตัวแทนของช่วงการอ่อนตัวลงด้วยความเครียด (Strain-softening) และจุด L คือจุดเริ่มต้นของสถานะคงเหลือ (Residual state)

รูปที่ 19 แสดงเส้นชั้นความเครียดแนวราบ (Horizontal strain contour) ในช่วงก่อนจุดสูงสุด จากจุด A ไปยังจุด J จากการเปรียบเทียบไล่เรียงเส้นชั้นความเครียดแนวราบดังกล่าวจะเห็นได้ว่า บริเวณรอบๆ ที่ตาข่ายเสริมแรงวางตัวอยู่จะมีค่า ε_h ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของทั้งตัวอย่าง เนื่องจากบริเวณนี้จะได้รับผลกระทบจากแรงดึงของตาข่ายเสริมแรงมากกว่า นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่าค่า ε_h จะกระจายตัวไปทั่วทั้งตัวอย่างและเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากจุด A ไปยังจุด J อย่างไรก็ตาม แม้ว่าตัวอย่างจะเข้าสู่สถานะที่จุดสูงสุดที่จุด J แล้ว แต่แถบเฉือน (Shear band) ที่ชัดเจนก็ยังไม่ปรากฏตัวขึ้น เมื่อพิจารณาที่จุด K ในระหว่างช่วงการอ่อนตัวลงด้วยความเครียด และจุด L ที่จุดเริ่มต้นของสถานะคงเหลือ ดังแสดงในรูปที่ 20 ก็ยังไม่สามารถที่จะสังเกตเห็นแถบเฉือนได้อย่างชัดเจน

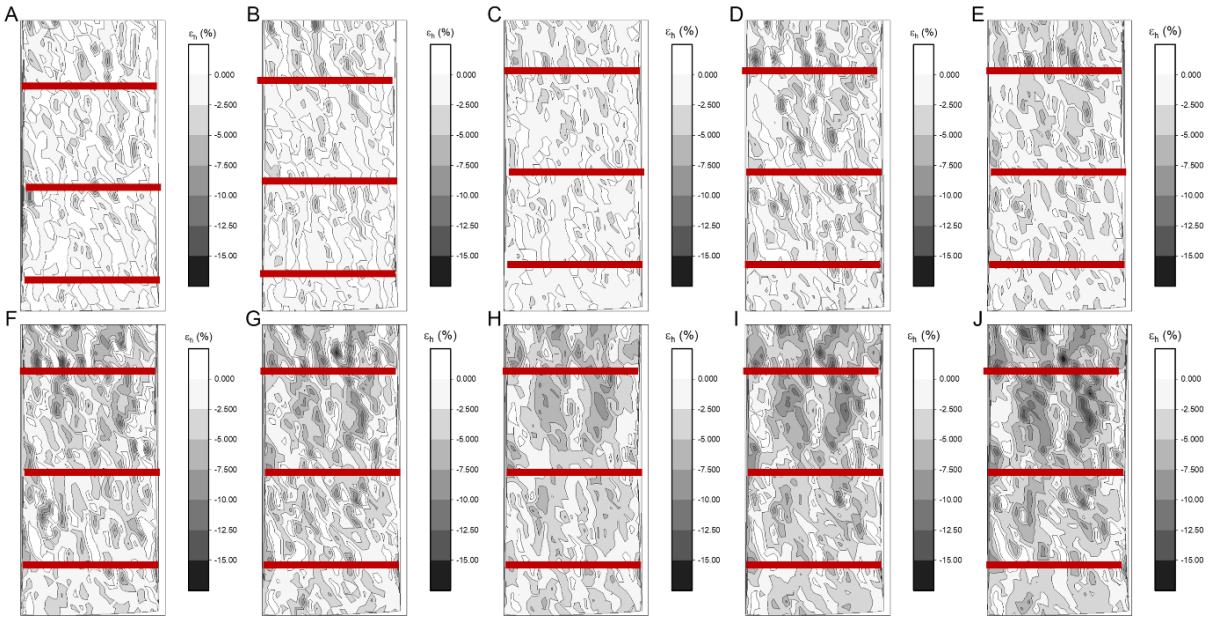
รูปที่ 21 แสดงเส้นชั้นความเครียดเฉือนสูงสุด (Maximum shear strain (γ_{max}) contour) สำหรับช่วงก่อนจุดสูงสุด ตั้งแต่จุด A ถึงจุด J จากรูปนี้จะเห็นได้ว่าค่า γ_{max} มีลักษณะการกระจายแบบไม่สม่ำเสมอในตัวอย่าง เพราะว่าทรายแต่ละบริเวณในตัวอย่างจะได้รับอิทธิพลจาก



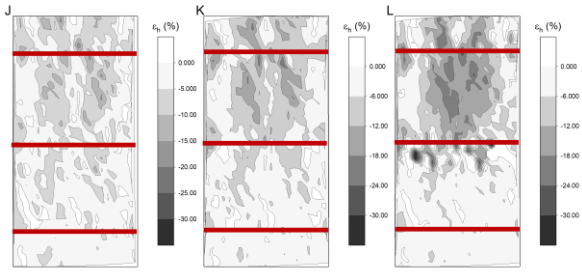
รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ν_{sec} กับ T_{ult} สำหรับค่า TVR ที่แตกต่างกันที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพถ่าย



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R กับ ε_v จากตัวอย่างทรายที่เสริมกำลังด้วย T_{ult} = 120 kN/m & TVR=1500 kN/m/m พร้อมจุด A ถึง J ในช่วงก่อนจุดสูงสุด จุด K ในระหว่างการอ่อนตัวลงด้วยความเครียด และจุด L ที่จุดเริ่มต้นสถานะคงเหลือ



รูปที่ 19 การเปรียบเทียบเส้นชั้นความเครียดแนวราบ ณ จุดต่างๆ ในรูปที่ 18 ในช่วงก่อนจุดสูงสุด ตั้งแต่จุด A ไปยังจุด J



Peak state **After Peak state** **Start residual state**

รูปที่ 20 การเปรียบเทียบเส้นชั้นความเครียดแนวราบ ณ จุดต่าง ๆ ในรูปที่ 18 ในช่วงหลังจุดสูงสุดระหว่างที่จุดสูงสุด (J) ระหว่างการอ่อนตัวลงด้วยความเครียด (K) และจุดเริ่มต้นสถานะคงเหลือ (L)

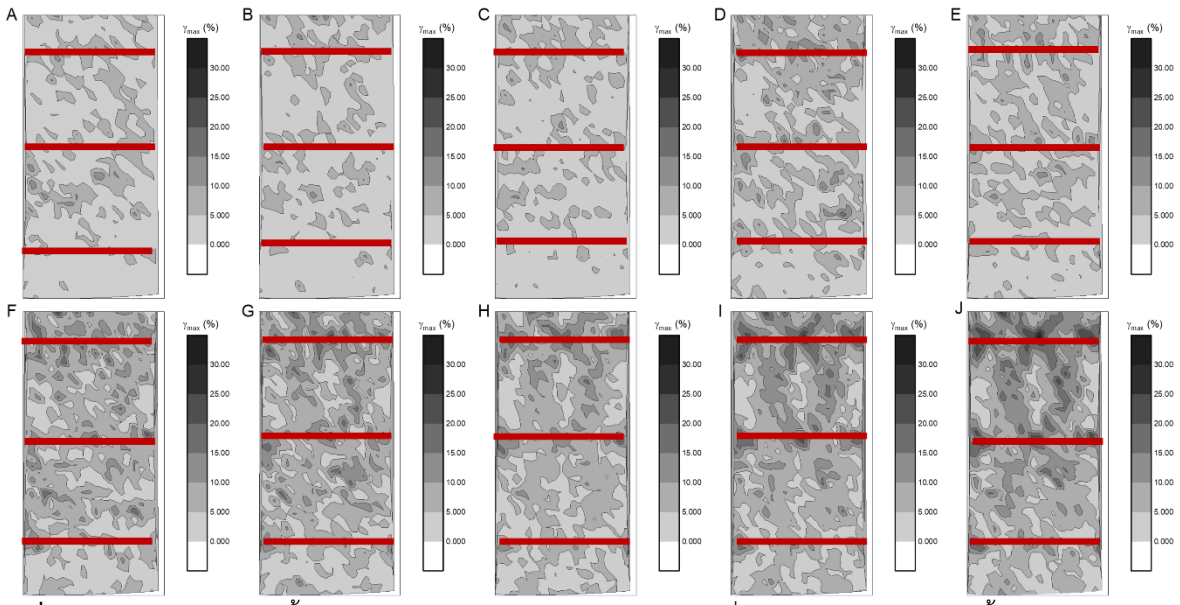
แรงดึงในตาข่ายเสริมกำลังไม่เท่ากัน และวิถีความเค้นของแต่ละบริเวณในตัวอย่างทรายที่เสริมกำลังจะไม่เหมือนกัน และมีความซับซ้อนสูง ซึ่งจะส่งผลให้แต่ละบริเวณเกิดความเครียดเฉือนสูงสุดไม่เท่ากัน อย่างไรก็ตาม ที่จุด J ที่ตัวอย่างแสดงค่า R_{max} ก็ยังไม่พบว่ามีแถบเฉือนที่ชัดเจนปรากฏขึ้น

รูปที่ 22 แสดงการเปรียบเทียบเส้นชั้นความเครียดเฉือนสูงสุดระหว่างที่จุดสูงสุด ระหว่างช่วงการอ่อนตัวลงด้วยความเครียด และที่จุดเริ่มต้นของสถานะคงเหลือ จากรูปนี้จะเห็นได้ว่า แม้ตัวอย่างจะเริ่มเข้าสู่สถานะคงเหลือแล้ว แถบเฉือนที่ชัดเจนก็ยังคงไม่ปรากฏตัวขึ้น ที่จุด L หรือเมื่อเริ่มเข้าสู่สถานะคงเหลือ จะเห็นได้ว่า γ_{max} จะมีค่าสูงสุดที่บริเวณตาข่ายเสริมกำลังชั้นบนสุดและชั้นกลาง

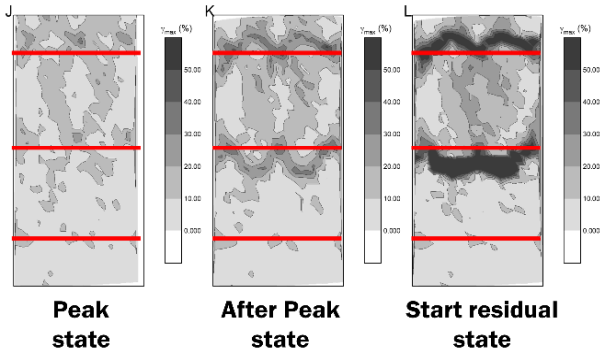
อย่างไรก็ตาม แถบเฉือนได้ปรากฏอย่างชัดเจนทางด้านข้างของตัวอย่างซึ่งไม่ได้พิมพ์มาร์กเกอร์สำหรับการวิเคราะห์ภาพถ่ายดังแสดงในรูปที่ 23 จากรูปนี้จะเห็นได้ว่าแถบเฉือนเริ่มปรากฏจากปลายด้านหนึ่งของตาข่ายเสริมกำลัง ทั้งนี้เป็นเพราะว่าแรงดึงบริเวณปลายตาข่ายเสริมกำลังจะมีค่าน้อยที่สุด ส่งผลให้การพัฒนาแรงดันโอบรัดที่ได้มาจากผลกระทบของแรงดึงจากตาข่ายเสริมกำลังมีค่าน้อยตามกันไปด้วย

รูปที่ 24(ก) ถึง 24(ค) แสดงเส้นชั้นความเครียดหลักสูงสุด (Major principal strain (ε_1) contour) เส้นชั้นความเครียดหลักต่ำสุด(Minor principal strain (ε_3) contour) และเวกเตอร์ระยะกระจัด (Displacement vector) ที่จุดเริ่มต้นของสถานะคงเหลือ (จุด L) จากรูปนี้จะสังเกตเห็นได้ว่า ค่า ε_1 ตรงบริเวณที่วางตาข่ายเสริมกำลังจะมากกว่าค่าเฉลี่ยของทั้งตัวอย่าง ในทางตรงกันข้าม ค่า ε_3

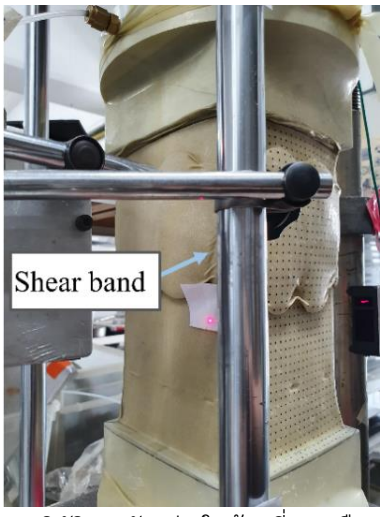
บริเวณที่วางตาข่ายเสริมกำลังจะน้อยกว่า (ติดลบมากกว่า) ค่าเฉลี่ยของทั้งตัวอย่าง ทั้งนี้เป็นเพราะผลกระทบที่ถูกควบคุมจากการเสริมแรง และตรงบริเวณด้านข้างตัวอย่างที่อยู่ระหว่างตาข่ายเสริมกำลังแต่ละชั้น จะมีการบวมตัวหรือขยายตัวออก และทิศทางของเวกเตอร์การกระจัดหันออกไปด้านนอกตัวอย่าง ซึ่งแสดงให้เห็นเขตไม่ปลอดภัย



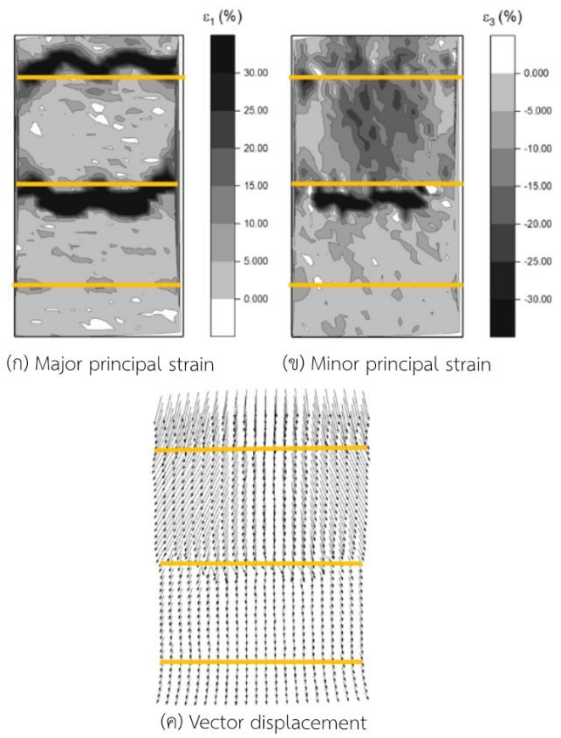
รูปที่ 21 การเปรียบเทียบเส้นชั้นความเครียดเฉือนสูงสุด ณ จุดต่าง ๆ ในรูปที่ 18 ในช่วงก่อนจุดสูงสุด ตั้งแต่จุด A ไปยังจุด J



รูปที่ 22 การเปรียบเทียบเส้นชั้นความเครียดเฉือนสูงสุด ณ จุดต่าง ๆ ในรูปที่ 18 ในช่วงหลังจุดสูงสุดระหว่างที่จุดสูงสุด (J) ระหว่างการอ่อนตัวลงด้วยความเครียด (K) และจุดเริ่มต้นสถานะคงเหลือ (L)



รูปที่ 23 การวิบัติของตัวอย่างในด้านที่แถบเฉือนปรากฏ



รูปที่ 24 ผลการวิเคราะห์ภายถ่ายกรณี PP-T120-TVR1500 (ก) เส้นชั้นความเครียดหลักสูงสุด (ข) เส้นชั้นความเครียดหลักต่ำสุด และ (ค) เวกเตอร์ระยะกระจัดที่จุดเริ่มต้นของสถานะคงเหลือ

6. สรุปผลการศึกษา

จากผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ที่นำเสนอในบทความนี้ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. ทรายที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังจะแสดงค่า R_{max} ที่สูงกว่าทรายที่ไม่เสริมกำลังเป็นอันมาก เพราะทรายที่เสริมกำลังจะได้รับอิทธิพลจากการยืดตัวออกและสร้างแรงดึงปฏิสัมพันธ์จากตาข่ายเสริมกำลังซึ่งทำให้แรงดันโอบรัดที่กระทำต่อทรายเพิ่มขึ้น
2. เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วน TVR เท่ากัน ค่า R_{max} จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า T_{ult} ของตาข่ายเสริมกำลังลดลง เพราะค่า S_v ลดลงจากการจัดเรียงตาข่ายเสริมกำลังให้ชิดกันมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้สัดส่วนของเขตไม่ปลอดภัยลดลง และการถ่ายเทแรงดึงจากตาข่ายเสริมกำลังไปสู่การเพิ่มขึ้นของแรงดันโอบรัดจะมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ผลลัพธ์ดังกล่าวไม่สอดคล้องกับสมมติฐานการออกแบบที่แสดงว่าเมื่ออัตราส่วน TVR เท่ากัน ค่า σ_h ตอบสนองจะเท่ากัน และค่า R_{max} ของทรายเสริมกำลังจะเท่ากัน
3. เมื่อเปรียบเทียบที่ค่า T_{ult} เท่ากัน ค่า R_{max} จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน TVR เพิ่มขึ้น เพราะค่า S_v จะลดลงจึงส่งผลให้ความหนาแน่นการเสริมกำลังเพิ่มมากขึ้น เมื่อการวิบัติของทรายเสริมกำลังถูกควบคุมด้วยการวิบัติในทรายโดยไม่เกิดการฉีกขาดของตาข่ายเสริมกำลัง ทรายที่เสริมกำลังด้วยความหนาแน่นการเสริมกำลังมากกว่าหรือเรียงชิดกันมากกว่า จะแสดงค่า R_{max} มากกว่าเสมอโดยไม่ขึ้นกับค่า T_{ult} ของตาข่ายเสริมกำลัง
4. เมื่อเปรียบเทียบที่ค่า TVR เท่ากัน ค่า ν_{sec} ของทรายที่เสริมกำลังจะเพิ่มขึ้น เมื่อค่า T_{ult} ของตาข่ายเสริมกำลังเพิ่มขึ้นเนื่องจากค่า S_v จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นทรายที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังที่มีค่า T_{ult} มากกว่าและจัดเรียงให้มีค่า S_v มากกว่า จะเสียรูปแนวราบมากกว่าเมื่อรับแรงกระทำในแนวดิ่งที่เท่ากัน
5. เมื่อเปรียบเทียบที่ค่า T_{ult} เท่ากัน จะเห็นได้ว่า ν_{sec} มีค่าลดลงเมื่อ TVR มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่า S_v ลดลง ซึ่งทำให้ความหนาแน่นของการเสริมกำลังเพิ่มขึ้น และส่งผลให้การเสียรูปในแนวราบของทรายเสริมกำลังลดลง
6. การกระจายความเครียดจากการวิเคราะห์ภาพถ่ายของทรายเสริมกำลังในช่วงก่อนจุดสูงสุดมีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ ค่า ε_h บริเวณที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังมีค่าติดลงน้อยกว่าบริเวณที่เหลืออื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากจากอิทธิพลของแรงดึงที่เกิดขึ้นในตาข่ายเสริมกำลัง นอกจากนี้ การวิเคราะห์ภาพถ่ายจะสามารถแสดงลักษณะของเขตไม่ปลอดภัยที่สังเกตได้จากผลการทดสอบจริง

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยและวิชาการตามแผนกลยุทธ์เพื่อการพัฒนาภาควิชาวิศวกรรมโยธา ภายใต้โครงการการสร้างความเข้มแข็งให้กับหน่วยวิจัยในภาควิชาวิศวกรรมโยธา มจธ. ประจำปีงบประมาณ 2562 (CE-KMUTT 6205) ผู้เขียนขอขอบพระคุณ บริษัท วิกเกอ เมอเจอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนตาข่ายเสริมกำลังสำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Nicks, J. E., Adams, M., Ooi, P. and Stabile, T. Geosynthetic Reinforced Soil Performance Testing - Axial Load Deformation Relationships. FHWA-HRT-13-066, 2013.

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

[3] Nawir, H., Tatsuoka, F. and Kuwano, R. Experimental Evaluation of the Viscous Properties of Sand in Shear. *Soils and Foundations*, 2003, 43(6): 13-31.

[4] ASTM D7181-20. Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.

[5] Miura, S. and Toki, S. A Sample Preparation Method and Its Effect on Static and Cyclic Deformation-Strength Properties of Sand. *Soils and Foundations*, 1982; 22(1): 61-77.

[6] Kongkitkul, W., Tatsuoka, F.and Hirakawa, D. Effects of Reinforcement Type and Loading History on the Deformation of Reinforced Sand in Plane Strain Compression. *Soils and Foundations*, 2007; 47(2): 395-414.

[7] Kongkitkul, W. Effect of Material Viscous Properties on the Residual Deformation of Geosynthetic-Reinforced Sand. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Tokyo, Japan, 2004.

[8] Tatsuoka, F. An Approximate Isotropic Perfectly Plastic Solution for Compressive Strength of Geosynthetic-Reinforced Soil. *Geosynthetics International*, 2004; 11(5): 390-405.

[9] สุรพันธ์ สุดใจ และ วรัช ก้องกิจกุล. ผลกระทบของอัตราส่วนปกคลุมและระยะระหว่างชั้นของตาข่ายเสริมกำลังแบบสองทิศทางที่มีต่อกำลังอัดของทรายเสริมกำลัง. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2563; 27(1): 198-211.

[10] Shen, P., Han, J., and Xu, C. Numerical Investigation of Reinforcement Pullout Resistance Effects on Behavior of Geosynthetic-Reinforced Soil (GRS) Piers. *Geotextiles and Geomembranes*, 2019; 49(3): 564-578.

[11] Tatsuoka, F. Geosynthetic-Reinforced Soil Structures for Railways and Roads: Development from Walls to Bridges. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2019; 4: 49-67.

[12] Kongkitkul, W., Tatsuoka, F. and Hirakawa, D. Rate-Dependent Load-Strain Behaviour of Geogrid Arranged in Sand Under Plane Strain Compression. *Soils and Foundations*, 2007; 47(3): 473-491.