



อิทธิพลของความหนาแน่นที่มีต่อ สมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีของโฟมโพลียูรีเทนขยายตัวสูง

Effects of Density on Geotechnical Engineering Properties of High-Expansive Polyurethane Foam

ธมนวรรณ สืบพงศ์¹ วรัช ก้องกิจกุล^{2,*} และ พรเทพ ม่วงสุขำ³

Tamonwan Seubpong¹, Warat Kongkitkul^{2,*} and Pornthep Muangsukhum³

^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประจักษ์อุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

³บริษัท เคมีคอนสตรัคชั่น จำกัด 157 ถนนเพชรเกษม แขวงหนองค้างพลู เขตหนองแขม กรุงเทพมหานคร 10160

^{1,2}Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Pracha Uthit Rd., Bangmod, Thung Khru, Bangkok 10140, Thailand

³ChemiConstruction Co., Ltd., 157 Phet Kasem Rd., Nong Khang Phlu, Nong Khaem, Bangkok 10160, Thailand

*E-mail: warat.kon@kmutt.ac.th, Tel: 0-2470-9304, Fax: 0-2427-9063

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีของโฟมโพลียูรีเทนขยายตัวสูงชนิดสองส่วนประกอบ ตัวอย่างที่ ใช้ถูกเตรียมให้มีความหนาแน่นแตกต่างกัน สมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีที่ได้ศึกษามีดังนี้ 1. กำลังรับแรงอัดทิศทางเดียว (σ_u) 2. อัตราส่วนปัวซองซีแคนท์ (v_{sec}) 3. โมดูลัสซีแคนท์ (E_{50}) 4. ความเครียดคงค้างเมื่อรับน้ำหนักกระทำแบบวัฏจักร (ϵ_{cyN}) 5. ความเค้นครากแนวตั้งเมื่ออัดตัวในหนึ่งมิติ (σ_y) และ 6. สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (k) จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทนเพิ่มขึ้น ค่า σ_u , ค่า E_{50} , ค่า ϵ_{cyN} และ ค่า σ_y จะเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม ค่า v_{sec} และค่า k จะลดลง นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาที่ค่าความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทนเท่ากัน ค่า v_{sec} จะลดลงกับระดับความเค้นแนวตั้งที่สูงขึ้น ในขณะที่ค่า ϵ_{cyN} จะเพิ่มขึ้นกับทั้งค่าอัตราส่วนความเค้นวัฏจักรและจำนวนรอบวัฏจักร สมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีดังกล่าวสามารถทำนายได้จากค่าความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทนจากสมการเชิงประจักษ์ที่พัฒนาขึ้นจากงานวิจัยนี้

คำสำคัญ: โฟมโพลียูรีเทน ความหนาแน่น กำลังรับแรงอัด การซึมผ่านของน้ำ การเสวยรูปคงเหลือ

ABSTRACT

This research studies various geotechnical engineering properties of a high-expansive polyurethane (PU) foam. This PU foam was of a two-component type. Test samples were prepared at various densities. The following properties were studied: i) uniaxial unconfined compressive strength (σ_u); ii) secant Poisson's ratio (v_{sec}); iii) secant modulus (E_{50}); iv) cyclic residual strain (ϵ_{cyN}); v) yield vertical stress in one-dimensional compression (σ_y); and vi) coefficient of permeability (k). It is found that, with increasing of the density of PU foam, the values of σ_u , E_{50} , ϵ_{cyN} , and σ_y increase, while the values of v_{sec} and k decrease. In addition, when considering at the same PU foam's density, the value of v_{sec} decreases with an increase in the vertical stress level, while the value of ϵ_{cyN} increases with cyclic

stress ratio (CSR) and number of cycle (N_c). Regression analyses were performed to develop empirical formulae to predict these properties from a given PU foam's density.

Keywords: Polyurethane foam, Density, Compressive strength, Permeability, Residual deformation

1. บทนำ

ชั้นดินบริเวณพื้นที่ภาคกลางของประเทศไทย โดยเฉพาะกรุงเทพมหานคร ประกอบด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีความหนามาก [1] เมื่อก่อสร้างโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธาที่ต้องถ่ายน้ำหนักลงสู่พื้นดินโดยตรง อาทิ ถนน พื้นโรงงาน ลานจอดรถ จะเกิดการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำในชั้นดินเหนียว การทรุดตัวบางครั้งอาจจะไม่เท่ากัน หรือไม่สม่ำเสมอ ในปัจจุบัน มีการแก้ไขโดยการฉีดโฟมโพลียูรีเทนซึ่งมีอัตราการขยายตัวสูงมาก [2, 3] ลงไปได้โครงสร้างดังกล่าวเพื่อแทนที่ช่องว่าง และ/หรือยกโครงสร้างให้มีระดับสูงขึ้น วิธีการฉีดโฟมโพลียูรีเทนนี้ทำโดยผสมโพลีออลและไอโซไซยานเตที่อยู่ในสถานะของเหลว ณ ขณะที่ออกมาจากหัวฉีดซึ่งจะกระจายสารผสมลงไปที่บริเวณใต้โครงสร้างที่วางอยู่บนผิวดิน โดยไม่จำเป็นต้องรื้อโครงสร้างเดิมออก เมื่อโฟมโพลียูรีเทนขยายตัวก็จะสร้างแรงยกเพื่อปรับระดับโครงสร้างที่วางอยู่บนผิวดินให้มีค่าระดับตามที่ต้องการ [2] วิธีการดังกล่าวสามารถดำเนินการได้ง่ายและประหยัด [4-6] นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความแข็งแรงและลดอัตราส่วนช่องว่างในดินได้อีกด้วย [4, 7]

โฟมโพลียูรีเทนขยายตัวสูงเกิดจากปฏิกิริยาคลายความร้อนระหว่างโพลีออลและไอโซไซยานเตที่ผสมกันในสัดส่วนปริมาตรเฉพาะตามข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ โฟมโพลียูรีเทนนั้น มีอัตราการขยายตัวเชิงปริมาตรเท่ากับหรือมากกว่า 20 เท่าของปริมาตรเริ่มต้นเมื่อขยายตัวอย่างอิสระ ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในการสร้างโฟมโพลียูรีเทน โดยทั่วไปคือ 30 วินาที ถึง 2 นาที ซึ่งถือเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก [4] โดยระยะเวลาการทำปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับอนุภาคของเรซินซึ่งได้รับผลกระทบมาจากอุณหภูมิขณะทำปฏิกิริยา [5] อนึ่ง โฟมโพลียูรีเทนเป็นวัสดุที่มีความเป็นกรดต่ำถึงปานกลาง และไวรังสี

อัลตราไวโอเลตและสารเคมีสังเคราะห์บางประเภท เช่น อะซิโตน ซึ่งมักจะไม่มีพบในดิน [2, 3]

โฟมสามารถแบ่งประเภทได้เป็น 2 ชนิด จากโครงสร้างระดับจุลภาค กล่าวคือ 1. โฟมแบบโครงสร้างเปิด (Open-cell foam) และ 2. โฟมแบบโครงสร้างปิด (Closed-cell foam) โฟมแบบโครงสร้างเปิดจะมีลักษณะที่ช่องว่างของโครงสร้างนั้นติดกัน ส่วนโฟมแบบโครงสร้างปิดจะมีลักษณะที่ช่องว่างไม่เชื่อมต่อกัน [8] ซึ่งโฟมแบบโครงสร้างปิดนี้มีความแข็งแรงและดูดซับพลังงานได้มากกว่าโฟมแบบโครงสร้างเปิด [8, 9] โฟมที่ใช้ในงานวิศวกรรมเทคนิคธรณีโดยทั่วไปที่ใช้สาร 2 ชนิดมาผสมกัน เช่น โฟมโพลียูรีเทนขยายตัวสูงนั้น มักเป็นโฟมแบบโครงสร้างปิด [3,10]

ที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติเชิงกลของโฟมโพลียูรีเทนกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งส่วนมากสนใจศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมเมื่อรับแรงอัด อาทิ Gibson and Ashby [11] ได้แสดงพฤติกรรมการเสียรูปของโฟมหลายชนิด ทั้งโฟมแบบโครงสร้างเปิดและโฟมแบบโครงสร้างปิด และอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างของโครงสร้างระดับจุลภาคกับสมบัติของวัสดุ รูปแบบการวิบัติต่างๆ ของโฟมภายใต้การรับแรงอัด และพัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของโฟมกับโครงสร้างระดับจุลภาคสำหรับแต่ละรูปแบบการวิบัติ Saha et al. [12] ได้ศึกษาพฤติกรรมของโฟมโพลีเมอร์ที่มีความหนาแน่นต่างกัน 2 ค่า โดยทำการทดสอบกำลังอัดอัตราด้วยอัตราความเครียดที่แตกต่างกัน ซึ่งพบว่า ค่ากำลังอัดสูงสุดและการดูดซับพลังงานมีค่าขึ้นอยู่กับอัตราความเครียด และความหนาแน่นของโฟมเป็นอย่างมาก การศึกษาโดย Buzzi et al. [2] Yu et al. [4] และ Wei et al. [13] ได้สรุปว่า ความเค้นครากของโฟมโพลียูรีเทนมีค่าขึ้นอยู่กับความหนาแน่น และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น Valentino [10] ได้ศึกษาพฤติกรรมของโฟมโพลียูรีเทน 2 ชนิดที่เป็นที่

นิยมสำหรับงานวิศวกรรมเทคนิคธรณีและพบว่า ความเค้นที่จุดวิกฤติและยังโมดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ค่าทั้งสองนั้นขึ้นอยู่กับความหนาแน่นเป็นอย่างมาก โดยมีความสัมพันธ์กันแบบเอกซ์โพเนนเชียล

จากการศึกษาที่กล่าวมาข้างต้นนั้นจะเห็นได้ว่าสมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีของโฟมโพลียูรีเทน และความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเหล่านั้นกับความหนาแน่นยังคงอยู่ในวงจำกัด ซึ่งส่วนใหญ่จะสนใจเพียงแค่ค่ากำลังอัดเท่านั้น นอกจากนี้ การฉีดโฟมโพลียูรีเทนขยายตัวสูงในงานวิศวกรรมเทคนิคธรณีมักจะดำเนินการ โดยที่ไม่ได้มีการออกแบบเบื้องต้น โดยมากมักทำโดยอาศัยพื้นฐานจากประสบการณ์เท่านั้น เสมือนเป็นการลองผิดลองถูก งานวิจัยนี้จึงดำเนินการทดสอบ โฟมโพลียูรีเทนชนิดสองส่วนผสม เตรียมที่ความหนาแน่นที่แตกต่างกันระหว่าง $100 - 200 \text{ kg/m}^3$ เพื่อศึกษาอิทธิพลของความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทนต่อสมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคธรณี ซึ่งประกอบไปด้วย 1. ค่ากำลังรับแรงอัดในทิศทางเดียว 2. อัตราส่วนปัวซองของซีแคนท์ 3. โมดูลัสซีแคนท์ 4. ความเครียดคงค้างเมื่อรับน้ำหนักกระทำแบบวัฏจักร 5. พฤติกรรมการอัดตัวในหนึ่งมิติ และ 6. สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีต่างๆ ดังที่กล่าวไปข้างต้นกับค่าความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทนโดยได้นำเสนอออกมาในรูปแบบสมการเชิงประจักษ์เพื่อใช้ทำนายสมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีต่างๆ เมื่อทราบค่าความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทน

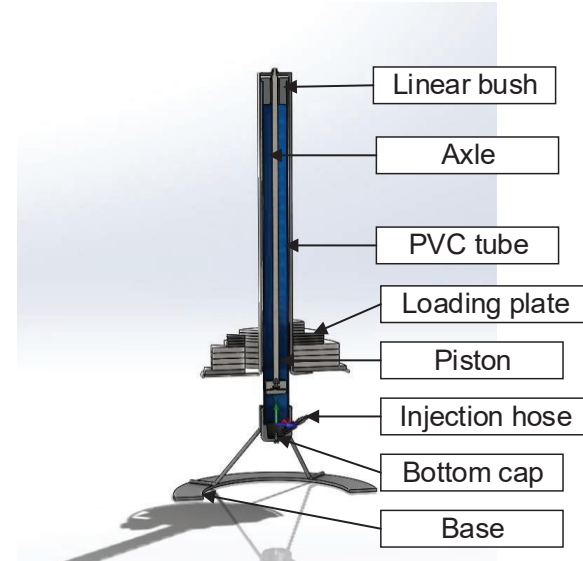
2. วัสดุ

2.1 โฟมโพลียูรีเทน

โฟมโพลียูรีเทนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นชนิดสองส่วนผสม (Two-component) โดยเป็นส่วนผสมระหว่างโพลีออล (Polyol) และไอโซไซยาเนต (Isocyanate) ที่อยู่ในสภาพของเหลว เมื่อสารสองชนิดดังกล่าวผสมกันจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและเกิดการขยายตัวที่รวดเร็ว โดยที่

ปริมาตรสามารถขยายตัวเพิ่มขึ้นได้ถึง 30 เท่า เมื่อเทียบกับปริมาตรเริ่มต้น

2.2 การเตรียมตัวอย่างการทดสอบ



รูปที่ 1 เครื่องมือเตรียมตัวอย่างรูปทรงกระบอกแบบชุดลูกสูบที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่ในงานวิจัยนี้

การเตรียมตัวอย่างโฟมโพลียูรีเทนในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือ 2 ส่วนประกอบกัน กล่าวคือ 1. เครื่องมือฉีดสารเคมี และ 2. เครื่องมือเตรียมตัวอย่างรูปทรงกระบอกแบบชุดลูกสูบ (รูปที่ 1) เครื่องมือส่วนแรกเป็นเครื่องมือนำเข้าจากต่างประเทศเพื่อใช้ในการงานก่อสร้างจริง ส่วนเครื่องมือส่วนที่ 2 ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่ในงานวิจัยนี้ เครื่องมือส่วนที่ 2 นี้สามารถจำลองสถานการณ์เมื่อฉีดโฟมโพลียูรีเทนลงไปในได้โครงสร้าง โดยที่โฟมโพลียูรีเทนที่มีสถานะเริ่มต้นเป็นของเหลว จะถูกฉีดเข้าไปในท่อพีวีซีที่มีลูกสูบอยู่ด้านในซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ตามแนวแกนของท่อพีวีซี ภายในของท่อพีวีซีจะเคลือบด้วยสารหล่อลื่นบางๆ เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างลูกสูบกับพื้นผิวภายในของท่อพีวีซี ในขณะที่ลูกสูบมีการเคลื่อนตัว ลูกสูบเชื่อมต่อกับโครงเหล็กภายนอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่มากกว่าโดยมีแกนกลางร่วมกัน โครงเหล็กภายนอกสามารถยกขึ้นในแนวตั้งพร้อมกับลูกสูบที่อยู่ด้านในท่อพีวีซี ส่วนล่างของโครงเหล็กสามารถรองรับแผ่นน้ำหนักที่จะถ่ายเป็นแรงกดไปที่ลูกสูบ เครื่องมือนี้จึง

สามารถเตรียมตัวอย่างโพลีเอทิลีนที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันโดยผันแปรน้ำหนักกดทับได้ รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างโพลีเอทิลีนที่เตรียมได้จากเครื่องมือดังกล่าว



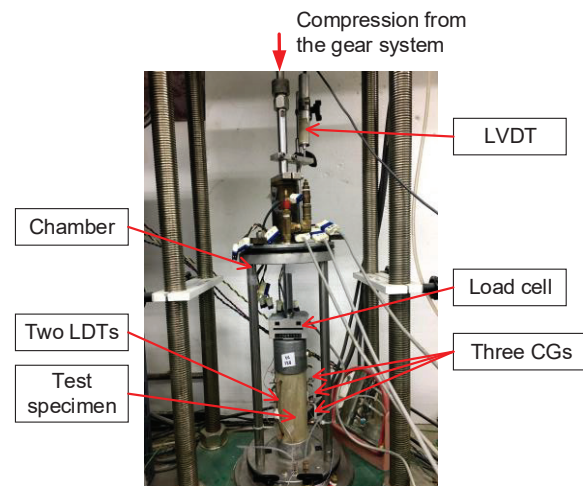
รูปที่ 2 ตัวอย่างของโพลีเอทิลีนรูปทรงกระบอกที่เตรียมจากเครื่องมือเตรียมตัวอย่างรูปทรงกระบอกแบบชุดลูกสูบ

3. วิธีการทดสอบ

3.1 การทดสอบแรงอัดทิศทางเดียว

การทดสอบแรงอัดทิศทางเดียวทำเพื่อกำหนดรับแรงอัดในทิศทางเดียว (Compressive strength, σ_u) โมดูลัสซีแคนท์ (Secant modulus, E_{50}) และอัตราส่วนปัวซองซีแคนท์ (Secant Poisson's ratio, ν_{sec}) จากการให้น้ำหนักกระทำแบบต่อเนื่องกับตัวอย่างโพลีเอทิลีน นอกจากนี้ยังได้ทดสอบแรงอัดทิศทางเดียวโดยให้น้ำหนักกระทำแบบวัฏจักรเพื่อกำหนดความเครียดคงค้าง (Cyclic residual strain, ϵ_{cyn}) งานวิจัยนี้ใช้เครื่องกดตัวอย่างที่มีระบบควบคุม วัดค่าเก็บและบันทึกผลอัตโนมัติ โดยใช้เซลล์วัดแรง (Load cell) สำหรับการวัดแรงกดที่กระทำต่อตัวอย่าง ใช้เซ็นเซอร์วัดระยะกระจัด (Linear variable differential transformer, LVDT) วัดการเสียรูปในแนวแกนของตัวอย่าง ใช้ทรานส์ดิวเซอร์วัดระยะกระจัดตามแนวแกนเฉพาะจุด (Local deformation transducer, LDT)

วัดการเสียรูปของตัวอย่างตามแนวแกนที่เป็นอิสระจากการเสียรูปที่ไม่สม่ำเสมอบริเวณหัวตัวอย่าง (Bedding errors) และใช้ทรานส์ดิวเซอร์วัดระยะกระจัดตามแนวราบเฉพาะจุด (Clip gauge, CG) วัดการเสียรูปด้านข้างของตัวอย่าง งานวิจัยนี้ได้ใช้ LDT จำนวน 1 คู่ และ CG จำนวน 3 อัน รายละเอียดการติดตั้งเครื่องมือวัดที่กล่าวมาข้างต้นแสดงในรูปที่ 3 สัญญาณที่ได้จากเครื่องมือวัดจะถูกขยายด้วยเครื่องขยายสัญญาณความเครียด (Strain amplifier) แล้วจึงถูกอ่านและบันทึกลงในคอมพิวเตอร์แบบอัตโนมัติ ตัวอย่างโพลีเอทิลีนที่ใช้สำหรับการทดสอบแรงอัดทิศทางเดียวเตรียมจากตัวอย่างที่ได้จากเครื่องมือเตรียมตัวอย่างรูปทรงกระบอกแบบชุดลูกสูบ (รูปที่ 2) โดยนำไปกลึงให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงเท่ากับ 75 และ 150 มิลลิเมตรตามลำดับ



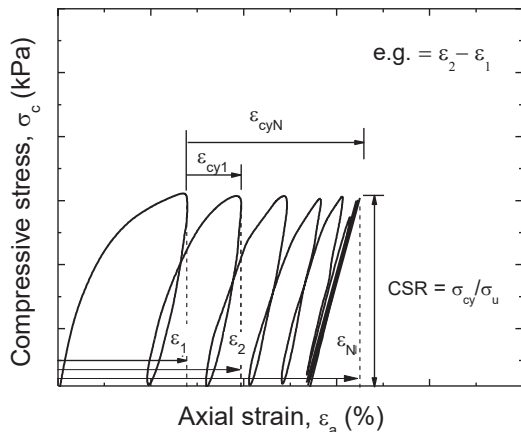
รูปที่ 3 การติดตั้งเครื่องมือวัดต่างๆ สำหรับการทดสอบแรงอัดทิศทางเดียว

3.1.1 การให้น้ำหนักกระทำแบบต่อเนื่อง

ในการกดตัวอย่างแบบให้น้ำหนักกระทำแบบต่อเนื่องนั้น ได้ควบคุมอัตราการกดให้เท่ากับ 1.3 mm/min ตั้งแต่เริ่มต้นไปจนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D695-08 [14]

3.1.2 การให้น้ำหนักกระทำแบบวัฏจักร

การทดสอบแบบนี้ทำเพื่อหาค่าความเครียดคงค้างเมื่อตัวอย่างโพลีเอทิลีนรับน้ำหนักกระทำแบบวัฏจักร (ϵ_{cyN}) ความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ_{cyN} กับจำนวนรอบวัฏจักร (Number of cycle, N_c) ที่ได้จากการทดลองสามารถนำมาใช้ทำนายการทรุดตัวของโพลีเอทิลีนเมื่อต้องรับน้ำหนักบรรทุกจรจากการใช้งานจริงได้



รูปที่ 4 นิยามของความเครียดคงค้างเมื่อให้น้ำหนักกระทำแบบวัฏจักร

รูปที่ 4 แสดงนิยามของค่า ϵ_{cyN} จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัด (Compressive stress, σ_c) และความเครียดแนวแกน (Axial strain, ϵ_a) ที่ได้จากการทดสอบแรงอัดทิศทางเดียว จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่า ค่า ϵ_{cyN} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

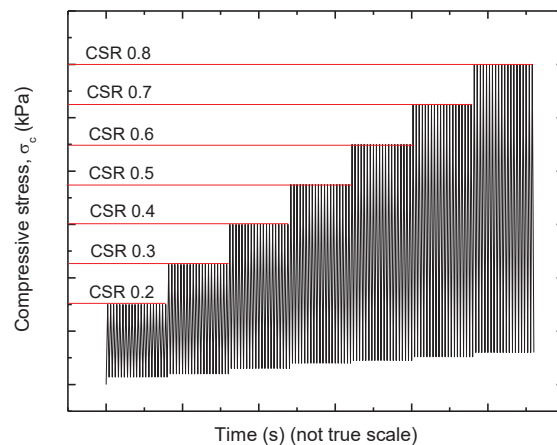
$$\epsilon_{cyN} = \epsilon_{N+1} - \epsilon_1 \quad (1)$$

โดยที่ ϵ_{cyN} คือความเครียดแนวแกนคงค้างเมื่อครบรอบวัฏจักรที่ N (ไม่รวมรอบที่ 1), ϵ_1 คือความเครียดแนวแกนสูงสุดที่เกิดขึ้นในรอบที่ 1 และ ϵ_{N+1} คือความเครียดแนวแกนสูงสุดที่เกิดขึ้นในรอบที่ $N+1$ เช่น $\epsilon_{cy1} = \epsilon_2 - \epsilon_1$ เป็นต้น ในการให้น้ำหนักกระทำแบบวัฏจักรจะทำการผันแปรค่าความเค้นอัดสูงสุดระหว่างชุดวัฏจักรที่ต่างกัน โดยอ้างอิงกับค่าอัตราส่วนความเค้น

วัฏจักร (Cyclic stress ratio, CSR) ซึ่งแสดงในสมการที่ (2)

$$CSR = \frac{\sigma_{cy}}{\sigma_u} \quad (2)$$

โดยที่ σ_{cy} คือ ค่าความเค้นอัดแนวแกนสูงสุดในแต่ละชุดวัฏจักร และ σ_u คือ ค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบกำลังอัดทิศทางเดียวอย่างต่อเนื่อง ในการทดสอบจะผันแปรค่า CSR จาก 0.2 ถึง 0.8 ระหว่างชุดวัฏจักรที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 5 โดยที่ค่าความเค้นแนวแกนต่ำสุดในแต่ละชุดวัฏจักรมีค่าเท่ากับร้อยละ 10 ของค่า σ_{cy} สำหรับชุดวัฏจักรนั้น [15] ในแต่ละชุดวัฏจักรจะให้น้ำหนักกระทำซ้ำจำนวน 20 รอบ



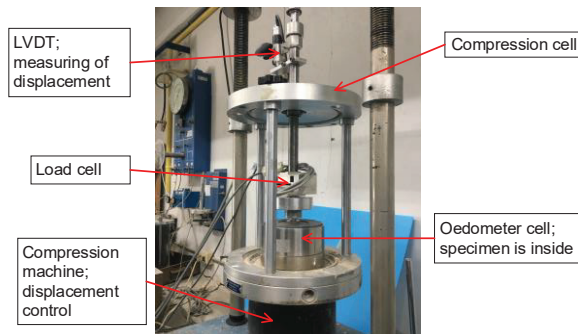
รูปที่ 5 รูปแบบการให้น้ำหนักกระทำแบบวัฏจักร

3.2 การทดสอบการอัดตัวในหนึ่งมิติ

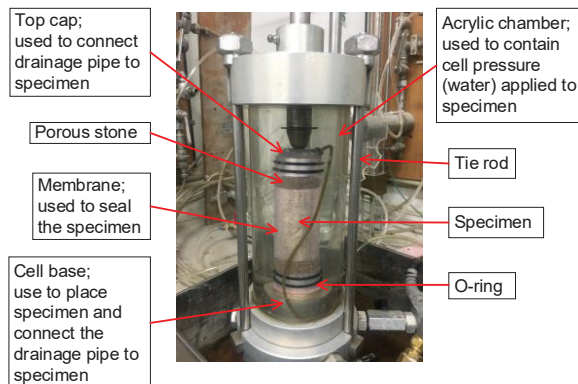
งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบการอัดตัวในหนึ่งมิติเพื่อหาค่าความเค้นครากในแนวตั้ง (Yield vertical stress, σ_y) รูปที่ 6 แสดงรายละเอียดเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ การทดสอบนี้ทำแบบใช้อัตราความเครียดคงที่ (Constant-Rate-of-Strain, CRS) เท่ากับร้อยละ 0.87 ต่อนาที ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาเท่ากับ 60 มิลลิเมตรและ 20 มิลลิเมตรตามลำดับ

3.3 การทดสอบการซึมผ่านของน้ำ

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดสอบการซึมผ่านของน้ำ ด้วยวิธีกำแพงยืดหยุ่น (Flexible-wall) ตามมาตรฐาน ASTM D5084-16a [16] เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (Coefficient of permeability, k) ของโพลียูรีเทน รูปที่ 7 แสดงรายละเอียดเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงเท่ากับ 35 มิลลิเมตรและ 70 มิลลิเมตร ตามลำดับ การทดสอบทำโดยให้แรงดันไฮดรอลิกเพื่อให้ผิวเมมเบรนแนบกับตัวอย่าง เมื่อตัวอย่างอยู่ในสถานะสมดุลแล้วจึงให้แรงดันน้ำในโพรงบริเวณหัวและท้ายตัวอย่างแตกต่างกัน 5 kPa เพื่อทำให้น้ำไหลผ่านเข้าออกตัวอย่าง การทดสอบนี้ใช้บิวเรต (Burette) ที่เชื่อมต่อเข้ากับทรานส์ดิวเซอร์วัดแรงดันที่ไม่เท่ากัน (Differential pressure transducer, DPT) เพื่อวัดปริมาตรน้ำที่ไหลเข้าออกตัวอย่างแบบอัตโนมัติ



รูปที่ 6 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการอัดตัวในหนึ่งมิติ

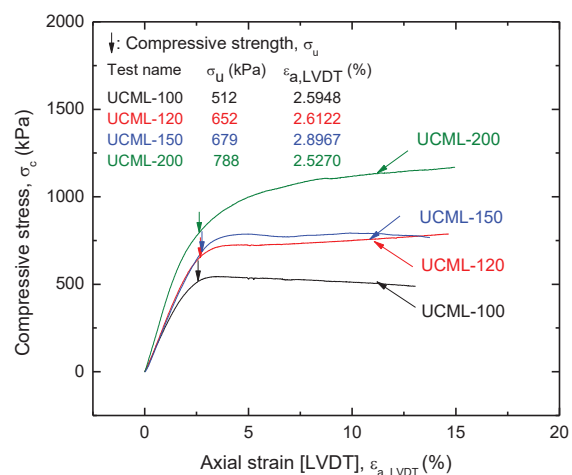


รูปที่ 7 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการซึมผ่านของน้ำแบบกำแพงยืดหยุ่น

4. ผลการทดสอบและวิจารณ์ผลการทดสอบ

4.1 ผลการทดสอบแรงอัดทิศทางเดียวแบบต่อเนื่อง

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Compressive stress, σ_c) กับความเครียดแนวแกน (Axial strain, ϵ_a) ของตัวอย่างโพลียูรีเทนที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าโพลียูรีเทนที่มีความหนาแน่นมากกว่าจะมีกำลังรับแรงอัดที่มากกว่า จากรูปที่ 8 จะสามารถนิยามหาค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive strength, σ_u) ได้ จากจุดบนความสัมพันธ์ $\sigma_c - \epsilon_a$ เมื่อแสดงบนแกนล็อกการิทึม ($\log \sigma_c - \log \epsilon_a$) ที่มีความโค้งมากที่สุดหรือมีรัศมีความโค้ง (Radius of curvature, ρ) น้อยที่สุด ค่า σ_u ที่หาได้ด้วยวิธีดังกล่าวระบุด้วยลูกศรในรูปที่ 8 นอกจากนี้ จะสังเกตได้ว่าค่า σ_u สอดคล้องกับค่า σ_c ที่ค่า ϵ_a เท่ากับร้อยละ 2.5 โดยประมาณ นอกจากนี้ โพลียูรีเทนยังได้แสดงพฤติกรรมแบบแข็งตัวด้วยความเครียด (Strain hardening) อย่างต่อเนื่อง กล่าวคือ ค่า σ_c มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แม้กระทั่งเมื่อเลยจุดที่ $\sigma_c = \sigma_u$ ไปแล้ว อย่างไรก็ตามอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า σ_c กับค่า ϵ_a มีค่าลดลงเป็นอย่างมากเมื่อเลยจุดนี้ไปแล้ว



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดแนวแกนของโพลียูรีเทนที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน

ค่าโมดูลัสซีแคนท์ (Secant modulus, E_{50}) สามารถหาได้จาก $E_{50} = (\sigma_u/2)/\epsilon_{50}$ เมื่อ ϵ_{50} คือค่าความเครียดแนวแกนบนความสัมพันธ์ $\sigma_c - \epsilon_a$ ที่สอดคล้องกับค่าของ $\sigma_u/2$

ตารางที่ 1 ค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียว และ โมดูลัสซีแคนท์ จากการทดสอบแรงอัดทิศทางเดียวแบบต่อเนื่อง

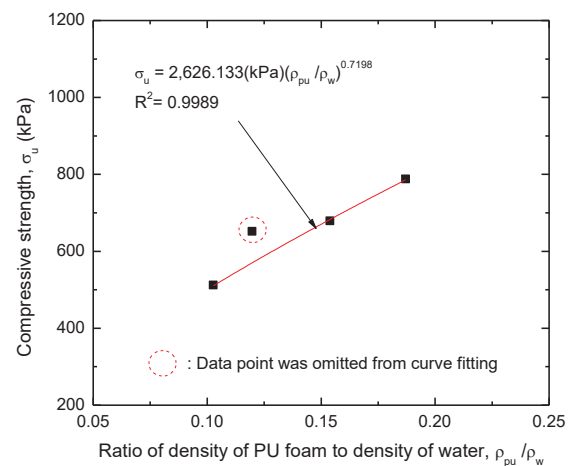
Test name	Density, ρ_{pu} (kg/m ³)	Compressive strength, σ_u (kPa)	Secant modulus, E_{50} (MPa)
UCML-100	102.70	512	26
UCML-120	119.69	652	28
UCML-150	153.86	679	27
UCML-200	187.06	788	39

ตารางที่ 1 แสดงค่า σ_u และ E_{50} สำหรับโฟมโพลียูรีเทนที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันจากการทดสอบแรงอัดทิศทางเดียวแบบต่อเนื่อง จากตารางนี้จะเห็นได้ว่าค่า σ_u และค่า E_{50} ของโฟมโพลียูรีเทนที่กลุ่มความหนาแน่นเท่ากับ 100 kg/m³ นั้นน้อยที่สุด ในขณะที่เดียวกันของกลุ่มความหนาแน่นเท่ากับ 200 kg/m³ นั้นมากที่สุด จึงสรุปได้ว่า เมื่อความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทนเพิ่มขึ้น ค่า σ_u และค่า E_{50} จะเพิ่มขึ้นตาม เมื่อนำค่า σ_u และค่า E_{50} มาสร้างความสัมพันธ์กับอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทนกับความหนาแน่นของน้ำ (ρ_{pu}/ρ_w) จะได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10 ตามลำดับ จากรูปทั้งสองนี้จะเห็นได้ว่า ค่า σ_u และค่า E_{50} เพิ่มขึ้นกับค่า ρ_{pu}/ρ_w แบบไม่เชิงเส้น ซึ่งสามารถวิเคราะห์ถดถอย (Regression) ได้ด้วยสมการที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

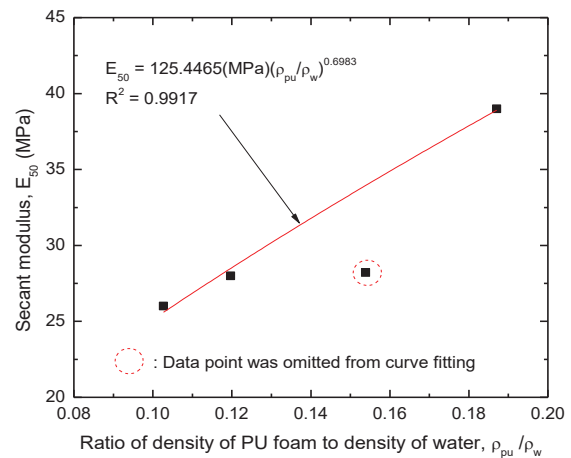
$$\sigma_u \text{ (kPa)} = 2,626.1330(\rho_{pu}/\rho_w)^{0.7198} \quad (3)$$

$$E_{50} \text{ (MPa)} = 125.4485(\rho_{pu}/\rho_w)^{0.6983} \quad (4)$$

เมื่อ ρ_w คือความหนาแน่นของน้ำมีค่าเท่ากับ 1,000 kg/m³ เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของสมการทำนายค่า σ_u ที่ได้ งานวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์ใช้สมการที่ 3 เพื่อทำนายค่า σ_u ของโฟมโพลียูรีเทนและเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริงจากการศึกษาของ Priddy and Newman [7], Valentino et al. [10] และ DRR [17]



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวกับอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทนกับความหนาแน่นของน้ำ



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสซีแคนท์กับอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทนกับความหนาแน่นของน้ำ

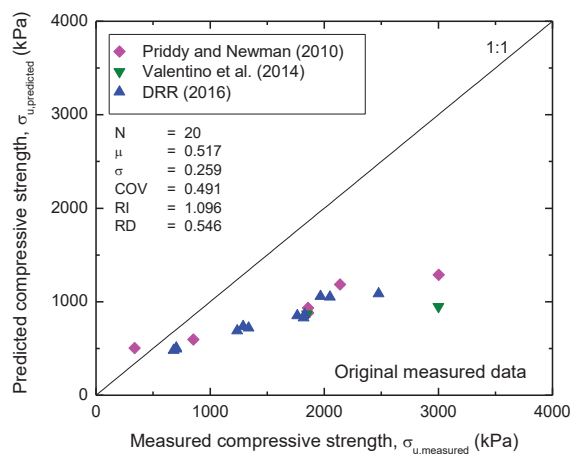
ผลการเปรียบเทียบเริ่มต้นแสดงดังรูปที่ 11(ก) ซึ่งจะเห็นว่า ผลการทำนายมีค่าสูงเกินกว่าค่าจริงที่วัดได้ค่อนข้างมาก ทั้งนี้ความแตกต่างเกิดขึ้นจากสาเหตุดังนี้ 1. อัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างที่ไม่เท่ากัน และ 2. อัตราความเครียดที่ใช้ในการกดตัวอย่าง

ไม่เท่ากันดังรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 2 โดยที่ค่าแฟกเตอร์ปรับแก้สำหรับอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่าง (Correction factor) มีค่าตาม ASTM C 39/C 39M-12 [18]

ตารางที่ 2 รายละเอียดของรูปทรง ขนาดตัวอย่าง และอัตราความเครียดในการกดตัวอย่าง

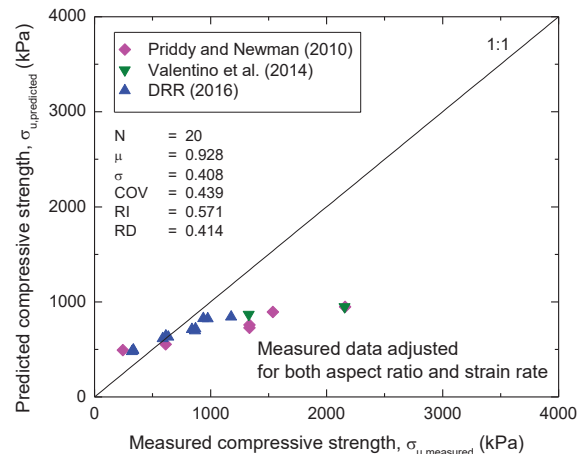
Data source	Shape	Specimen's dimensions (mm) ¹⁾	Aspect ratio ²⁾	Correction factor ³⁾	Strain rate (%/min)
This study	Cylindrical	70 × 150	2	1	0.87
Priddy and Newman (2010)	Cylindrical	102.6 × 102.6	1	0.91	9.75
Valentino et al. (2014)	Cylindrical	60 × 60	1	0.91	9.84
DRR (2016)	Rectangular	56 × 56 × 26	0.5	0.8333, 0.55	0.38

- 1) D x H (cylindrical) and W × L × H (rectangular)
- 2) H/D (cylindrical) and H/W (rectangular)
- 3) from ASTM C 39/C 39M-12 [18]



(ก)

รูปที่ 11 ผลการทำนายค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียว (σ_u) ด้วยสมการที่ 3. (ก) กรณีที่ใช้ค่า σ_u ต้นฉบับ และ (ข) กรณีที่ปรับแก้ค่า σ_u สำหรับอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างและอัตราความเครียดที่ไม่เท่ากัน



(ข)

รูปที่ 11 (ต่อ) ผลการทำนายค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียว (σ_u) ด้วยสมการที่ 3. (ก) กรณีที่ใช้ค่า σ_u ต้นฉบับ และ (ข) กรณีที่ปรับแก้ค่า σ_u สำหรับอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างและอัตราความเครียดที่ไม่เท่ากัน

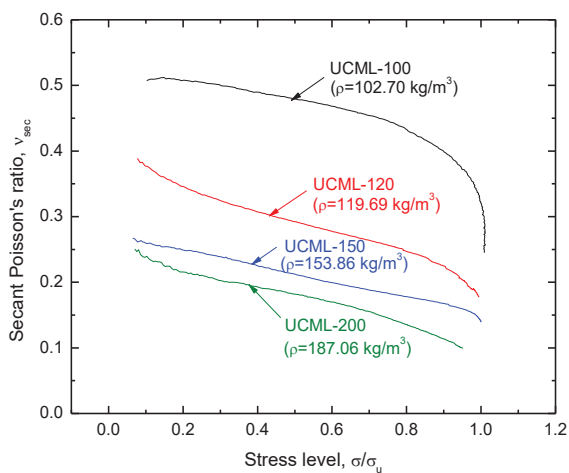
นอกจากนี้ พฤติกรรมของโฟมโพลียูรีเทนนั้นขึ้นอยู่กับอัตราความเครียดอย่างมีนัยยะสำคัญ Tatsuoka et al.

[19] ได้เสนอว่าค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้นกระโดด ($\Delta\sigma$) ต่อความเค้นปัจจุบัน (σ) มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนระหว่างอัตราความเครียดไม่คืนกลับภายหลังการกระโดดของความเค้น ($\dot{\epsilon}_{after}^{ir}$) ต่ออัตราความเครียดไม่คืนกลับก่อนหน้าการกระโดดของความเค้น ($\dot{\epsilon}_{before}^{ir}$) ดังแสดงในสมการที่ 5

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \beta \log_{10} \left(\frac{\dot{\epsilon}_{after}^{ir}}{\dot{\epsilon}_{before}^{ir}} \right) \quad (5)$$

ค่า β คือสัมประสิทธิ์ความไวต่ออัตราความเครียด (Rate-sensitivity coefficient) ซึ่งมีค่าประมาณ 0.2 สำหรับวัสดุจำพวกโพลีเมอร์ [20]

รูปที่ 11(ข) แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่า σ_u ที่ได้จากการทำงานกับค่า σ_u ที่วัดได้จริงจากการทดสอบเมื่อได้ทำการปรับแก้สำหรับอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างและอัตราความเครียดที่ใช้ในการกดตัวอย่างที่ไม่เท่ากันแล้ว จากรูปนี้จะเห็นได้ว่า ผลการทำนายมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงมากกว่าเดิมเป็นอันมาก ถึงแม้ว่าจะมีข้อมูลบางจุดที่ผลการทำนายไม่สอดคล้องกับค่าที่วัดได้จากการทดลองอยู่บ้าง แต่ทั้งนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องมาจากวิธีการนิยามค่ากำลังรับแรงอัดในทิศทางเดียว (σ_u) มีความแตกต่างกับวิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้

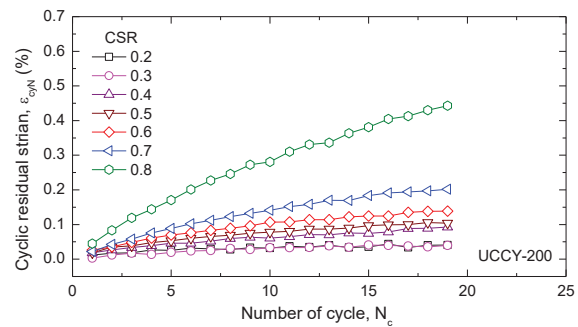


รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปัวซองซีแคนท์กับระดับความเค้นสำหรับโพลีโพรพิลีนที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน

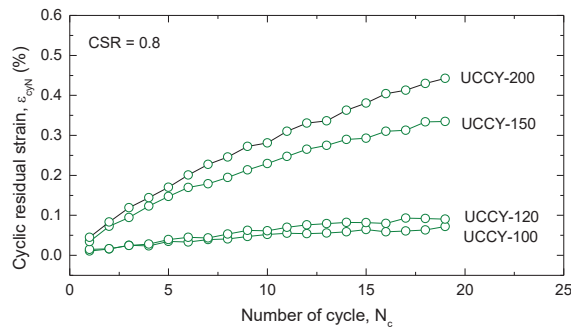
รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปัวซองซีแคนท์ (Secant Poisson's ratio, v_{sec}) กับระดับความเค้น (Stress level, σ/σ_u) โดยที่ค่า v_{sec} หาได้โดย $v_{sec} = -\epsilon_{h,CG}/\epsilon_{a,LDT}$ หรือเท่ากับค่าบวกของค่าความชันของเส้นตรงที่ลากผ่านจุดเริ่มต้นกับจุดตามความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวราบ (Horizontal strain, ϵ_h) และ ϵ_a จากรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่า 1. เมื่อพิจารณาที่ความหนาแน่นเท่ากัน ค่า v_{sec} จะลดลงเมื่อค่า σ/σ_u เพิ่มขึ้น และ 2. เมื่อพิจารณาที่ค่า σ/σ_u เท่ากัน ค่า v_{sec} จะลดลงเมื่อความหนาแน่นของโพลีโพรพิลีนเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าค่า v_{sec} นั้นขึ้นอยู่กับค่า σ/σ_u และความหนาแน่นของโพลีโพรพิลีน พฤติกรรมดังกล่าวของโพลีโพรพิลีนมีความสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Wei et al. [13] งานวิจัยนี้ได้ใช้สมการเชิงประจักษ์ที่มีรูปแบบดังสมการที่ 6 ในการวิเคราะห์ที่ถดถอยหาความสัมพันธ์สำหรับพฤติกรรมดังกล่าว

$$v_{sec} = [A - B(\sigma/\sigma_u)] + C \exp[-(p_{pu}/p_w)/D] \quad (6)$$

โดยที่ A, B, C, และ D มีค่าเท่ากับ 0.2544, 0.1416, 65.1932 และ 0.0190 ตามลำดับ



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดคงค้างเมื่อรับน้ำหนักกระทำแบบวัฏจักรกับจำนวนรอบวัฏจักรที่ค่า CSR ต่างๆ ตั้งแต่ 0.2 ถึง 0.8 สำหรับโพลีโพรพิลีนกลุ่มความหนาแน่นเท่ากับ 200 kg/m³



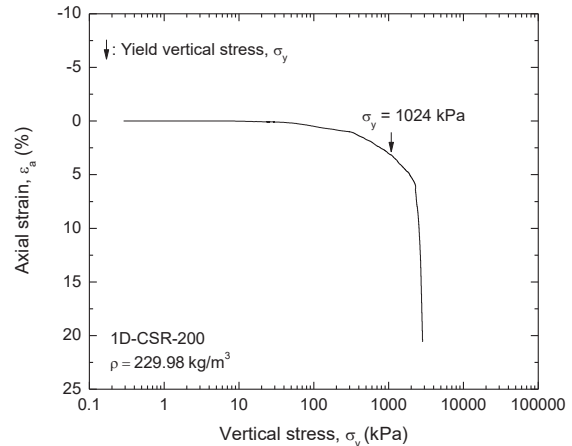
รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดคงค้างเมื่อรับน้ำหนักกระทำแบบวัฏจักรกับจำนวนรอบวัฏจักรที่ค่า CSR เท่ากับ 0.8 สำหรับโพลีเอทิลีนทุกกลุ่ม ความหนาแน่น

4.2 ผลการทดสอบแรงอัดทิศทางเดียวแบบวัฏจักร

รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดคงค้างเมื่อรับน้ำหนักกระทำแบบวัฏจักร (Cyclic residual strain, ϵ_{cyN}) กับจำนวนรอบวัฏจักร (N_c) ที่ค่า CSR เท่ากับ 0.2 ถึง 0.8 ของโพลีเอทิลีนกลุ่มความหนาแน่นเท่ากับ 200 kg/m^3 จะเห็นได้ว่าค่า ϵ_{cyN} ที่ CSR เท่ากับ 0.2 ถึง 0.5 ไม่ได้เพิ่มขึ้นกับ N_c อย่างมีนัยยะสำคัญ หรืออาจกล่าวได้ว่าค่า ϵ_{cyN} จะเริ่มพัฒนาอย่างมีนัยยะสำคัญก็ต่อเมื่อค่า CSR มากกว่า 0.5 หรือเมื่อค่าน้ำหนักกระทำแบบวัฏจักรมีค่ามากกว่าครึ่งหนึ่งของค่า σ_y ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการพัฒนาค่า ϵ_{cyN} เมื่อค่า CSR เท่ากับ 0.6, 0.7 และ 0.8 เท่านั้น เมื่อพิจารณาที่ค่า CSR ดังกล่าวจะสังเกตได้ว่า ค่า ϵ_{cyN} ขึ้นอยู่กับทั้งค่า N_c และค่า CSR กล่าวคือ ค่า ϵ_{cyN} จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า N_c และค่า CSR เพิ่มขึ้น รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϵ_{cyN} กับค่า N_c ที่ค่า CSR เท่ากับ 0.8 สำหรับโพลีเอทิลีนทุกกลุ่มความหนาแน่น ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า ϵ_{cyN} ยังขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของโพลีเอทิลีนด้วย ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าค่า ϵ_{cyN} ขึ้นอยู่กับค่า N_c , ค่า CSR และค่าความหนาแน่นของโพลีเอทิลีน (ρ_{pu}) งานวิจัยนี้ได้ใช้สมการเชิงประจักษ์ที่มีรูปแบบดังสมการที่ 7 ในการวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์สำหรับพฤติกรรมดังกล่าว

$$\epsilon_{cyN} (\%) = A(\text{CSR})^{3.9234} (N_c)^{0.5892} \quad (7ก)$$

$$A = 47.285 (\%) (\rho_{pu} / \rho_w) \quad (7ข)$$

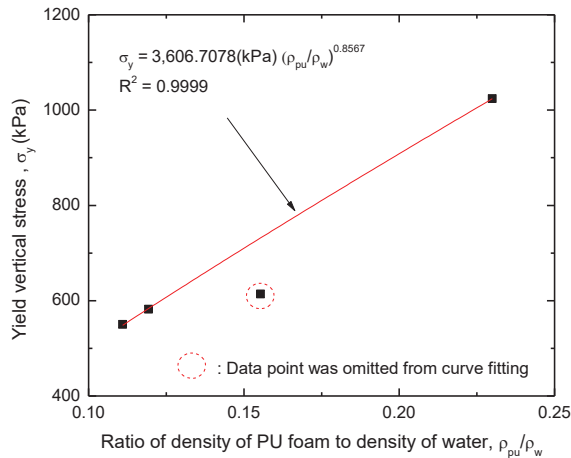


รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดแนวแกนกับความเค้นแนวตั้งจากการทดสอบการอัดตัวในหนึ่งมิติสำหรับโพลีเอทิลีนกลุ่มความหนาแน่นเท่ากับ 200 kg/m^3

4.3 ผลการทดสอบการอัดตัวในหนึ่งมิติ

รูปที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϵ_a กับความเค้นในแนวตั้ง (Vertical stress, σ_v) จากการทดสอบการอัดตัวในหนึ่งมิติสำหรับโพลีเอทิลีนกลุ่มความหนาแน่นเท่ากับ 200 kg/m^3 ซึ่งจะสังเกตได้ว่าค่า ϵ_a จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อค่า σ_v เกินค่าความเค้นครากในแนวตั้ง (Yield vertical stress, σ_y) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นิยามค่า σ_y จากจุดบนความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(\epsilon_a)$ กับ $\log(\sigma_v)$ ที่มีความโค้งมากที่สุดหรือจุดที่รัศมีความโค้ง (Radius of curvature, ρ) น้อยที่สุด เมื่อนำค่า σ_y ที่นิยามได้สำหรับทุกกลุ่มความหนาแน่นของโพลีเอทิลีนมาแสดงกับค่า ρ_{pu} / ρ_w จะได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 16 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า σ_y เพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของโพลีเอทิลีนมีค่าเพิ่มขึ้นโดยลักษณะความสัมพันธ์เป็นแบบไม่เชิงเส้นดังสมการที่ 8

$$\sigma_y (\text{kPa}) = 3,606.7078 (\text{kPa}) (\rho_{pu} / \rho_w)^{0.8567} \quad (8)$$

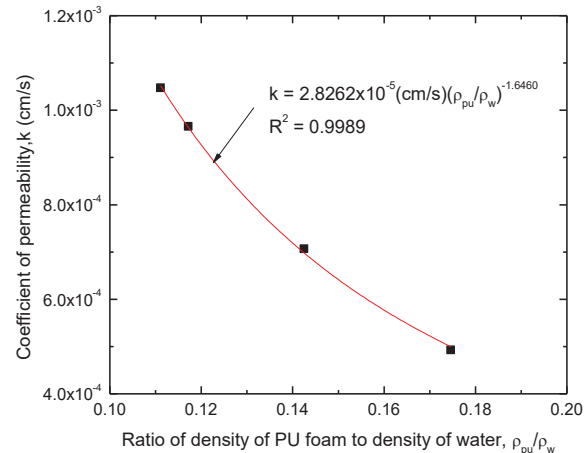


รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นครากแนวตั้งกับอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทนกับความหนาแน่นของน้ำจากการทดสอบการอัดตัวในหนึ่งมิติ

4.4 ผลการทดสอบการซึมผ่านของน้ำ

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Coefficient of permeability, k) ของ โฟมโพลียูรีเทนที่ได้จากการทดสอบการซึมผ่านของน้ำในงานวิจัยนี้มีค่าอยู่ในช่วง 10^{-3} ถึง 10^{-4} cm/s (10^{-5} ถึง 10^{-6} m/s) ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่าโฟมโพลียูรีเทนเป็นวัสดุที่มีการซึมผ่านน้ำต่ำถึงปานกลาง [21] เมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับค่า ρ_{pu}/ρ_w ดังแสดงในรูปที่ 17 จะเห็นได้ว่าค่า k ลดลงเมื่อความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทนเพิ่มขึ้นโดยมีลักษณะความสัมพันธ์เป็นแบบไม่เชิงเส้นดังสมการที่ 9

$$k(\text{cm/s}) = 2.8262 \times 10^{-5} (\text{cm/s}) (\rho_{pu}/\rho_w)^{-1.6460} \quad (9)$$



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทนกับความหนาแน่นของน้ำ

5. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้นำเสนออิทธิพลของความหนาแน่นต่อสมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคของโฟมโพลียูรีเทนขยายตัวสูง การทดสอบประกอบด้วย การทดสอบแรงอัดในทิศทางเดียว การทดสอบการอัดตัวในหนึ่งมิติ และการทดสอบการซึมผ่านของน้ำ จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. ค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียว (σ_u) และค่าโมดูลัสซีแคนท์ (E_{50}) เพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทน (ρ_{pu}) เพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน ค่าอัตราส่วนบิวของซีแคนท์ (v_{sec}) มีค่าลดลงเมื่อค่า ρ_{pu} และระดับความเค้น (σ/σ_u) เพิ่มขึ้น
2. เมื่ออัตราส่วนความเค้นวัฏจักร (CSR) มีค่าน้อยกว่า 0.5 การพัฒนาความเครียดคงค้างเมื่อรับน้ำหนักกระทำแบบวัฏจักรนั้น ไม่มีนัยยะสำคัญ แต่เมื่อค่า CSR มากกว่า 0.5 ความเครียดคงค้างเมื่อรับน้ำหนักกระทำแบบวัฏจักรจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า ρ_{pu} ค่า CSR และจำนวนรอบวัฏจักร (N_c) เพิ่มขึ้น
3. เมื่อโฟมโพลียูรีเทนถูกอัดตัวในหนึ่งมิติ ค่าความเค้นครากในแนวตั้ง (σ_y) จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า ρ_{pu} เพิ่มขึ้น
4. ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (k) ลดลงเมื่อค่า ρ_{pu} เพิ่มขึ้น

งานวิจัยนี้ได้สร้างสมการเชิงประจักษ์เพื่อทำนายค่าสมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคชนิดที่ได้กล่าวมาข้างต้นเมื่อทราบความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทน ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อไปสำหรับการออกแบบทางวิศวกรรมโดยคำนึงถึงความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทนที่เพียงพอต่อสมบัติที่ต้องการ จึงจะสามารถทำให้การใช้งานโฟมโพลียูรีเทนเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยและวิชาการตามแผนกลยุทธ์เพื่อการพัฒนาภาควิชาวิศวกรรมโยธา ภายใต้โครงการการสร้างความเข้มแข็งให้กับหน่วยวิจัยในภาควิชาวิศวกรรมโยธา มจร. ประจำปีงบประมาณ 2561 (CE-KMUTT 6118)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Soralump, S. (2004). Geotechnical engineering problems and tentative solutions in Thailand, paper presented in *the Young Geotechnical Engineering Conference*, Taipei, Taiwan.
- [2] Buzzi, O., Fityus, S. and Sloan, W.S. Structure and Properties of Expanding Polyurethane Foam in the Context of Foundation Remediation in Expansive Soil. *Mechanics of Materials*, 2008; 40: 1012-1021.
- [3] Buzzi, O., Fityus, S. and Sloan, W. S. Use of Expanding Polyurethane Resin to Remediate Expansive Soil Foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, 2010; 47: 623-634.
- [4] Yu, L., Wang, R. and Skirrow, R. The Application of Polyurethane Grout in Roadway Settlements Issues. The Canadian Geotechnical Conference 2013, Canada.
- [5] Chelat, D., Jais, I. B. Mohd., Razali, R. and Tawaf, M. K. Performance Comparison Between Polyurethane Injection Pile and Slab System Against Lightweight Concrete as a Ground Improvement Using Finite Element Analysis. *Journal of Applied Sciences Research*, 2015; 11: 11-16.
- [6] Somarathna, H. M. C. C., Raman, S. N., Mohtotti, D., Mutalib, A. A. and Badri, K. H. The Use of Polyurethane for Structural and Infrastructural Engineering Applications: A State-of-the-Art Review. *Construction and Building Materials*, 2018; 190: 995-1014.
- [7] Priddy, L. P. and Newman, J. K. (2010). Full-scale Field Testing for Verification of Mechanical Properties of Polyurethane Foams for Use as Backfill in PCC Repairs. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010; 22: 245-252.
- [8] Efstathiou, K. Synthesis and Characterization of a Polyurethane Prepolymer for the Development of a Novel Acrylate-Based Polymer Foam. Budapest University of Technology and Economics (BME), 2011; 1-57.
- [9] Queheillalt, D. T., Katsumura, Y. and Wadley, H. N. G. Synthesis of Stochastic Open Cell Ni-based Foams. *Scripta Materialia*, 2004; 50: 313-317.
- [10] Valentino, R., Romeo, E. and Stevanoni, D. An Experimental Study on the Mechanical Behaviour of Two Polyurethane Resins Used for Geotechnical Applications. *Mechanics of Materials*, 2014; 71: 201-113.
- [11] Gibson, L. J. and Ashby, M. F. Cellular Solids. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1997.
- [12] Saha, M. C., Mahfuz, H., Chakravarty, U. K., Uddin, M., Kabir, Md. E. and Jeelani, S. Effect of Density, Microstructure, and Strain Rate on Compression Behavior of Polymeric Foams. *Materials Science and Engineering*, 2005; A406: 328-336.
- [13] Wei, Y., Wang, F., Gao, X. and Zhong, Y. Microstructure and Fatigue Performance of Polyurethane Grout Materials Under Compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017; 29: 1-8.
- [14] ASTM D 695-08. Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastic. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [15] AASHTO T 307-99. Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials. American Association of State Highway and Transportation Officials.

- [16] ASTM D 5084-16a. Standard Test Method for Measurement of Hydraulic conductivity of Saturated Porous Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [17] กรมทางหลวงชนบท. การแก้ไขปัญหาคาร์ทรุดตัวของเชิงลาดสะพานด้วยโพลียูรีเทนโฟม (PU-Foam). สำนักบำรุงทาง, กรมทางหลวงชนบท, 2559.
- [18] ASTM C 39/ C 39M-12. Standard Test Method for Compressive strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [19] Tatsuoka, F., Di Benedetto, H., Enomoto, T., Kawabe S. and Kongkitkul, W. Various Viscosity Types of Geomaterials in Shear and Their Mathematical Expression. *Soils and Foundations*, 2008; 48: 41-60.
- [20] Kongkitkul, W., Tatsuoka, F. and Hirakawa, D. Creep Rupture Curve for Simultaneous Creep Deformation and Degradation of Geosynthetic Reinforcement. *Geosynthetics International*, 2007; 14: 189-200.
- [21] Terzaghi, K., Peck. R. B. and Mesri, G. Soil Mechanics in Engineering Practice. Wiley, J. and Sons, T. (Ed.), Canada, USA, 1996; 73.