



บทความวิจัย

การประยุกต์วิธีเพิ่มอุณหภูมิแบบขั้นบันไดเพื่อประมาณความเครียดคงค้างของตาข่ายเสริมกำลังพอลิโพรพิลีนเมื่อรับแรงดึงวัฏจักรในระยะยาว

วรกมล บัวแสงจันทร์ และ วรัช ก้องกิจกุล*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 2470 9304 อีเมล: warat.kon@kmutt.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.07.013

รับเมื่อ 1 มีนาคม 2566 แก้ไขเมื่อ 11 พฤษภาคม 2566 ตอรับเมื่อ 30 พฤษภาคม 2566 เผยแพร่ออนไลน์ 31 กรกฎาคม 2567

© 2025 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

โครงสร้างดินเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมกำลังสังเคราะห์มักต้องรองรับแรงดึงวัฏจักรในระหว่างการใช้งาน เช่น น้ำหนักจราจร ซึ่งจะก่อให้เกิดแรงดึงวัฏจักรกระทำต่อวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์ แรงดึงวัฏจักรนี้ทำให้เกิดความเครียดคงค้างในวัสดุเสริมกำลัง ซึ่งอาจส่งผลต่อการเสียรูปโดยรวมของโครงสร้างดินเสริมกำลังที่มากขึ้นไป งานวิจัยนี้สนใจศึกษาการเกิดความเครียดคงค้างระยะยาวในตาข่ายเสริมกำลังชนิดพอลิโพรพิลีนเมื่อรับแรงดึงวัฏจักรที่มีระดับแรงกระทำสูงสุด แอมพลิจูดและความถี่แตกต่างกัน โดยใช้การเพิ่มอุณหภูมิแวดล้อมแบบขั้นบันไดจาก 30 ถึง 50 องศาเซลเซียส และใช้ระยะเวลา 1 ชั่วโมงต่อระดับอุณหภูมิเพื่อร่นระยะเวลาการทดสอบ ผลการทดสอบนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดคงค้างกับจำนวนรอบที่อุณหภูมิอ้างอิง (30 องศาเซลเซียส) เพื่อศึกษาอิทธิพลของแรงกระทำสูงสุด แอมพลิจูดและความถี่ต่อความสัมพันธ์ดังกล่าว ผลการศึกษาพบว่า ความเครียดคงค้างเมื่อรับแรงดึงวัฏจักรมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับแรงกระทำสูงสุดเพิ่มขึ้น แต่จะมีค่าลดลงเมื่อแอมพลิจูดเพิ่มขึ้น ในขณะที่อิทธิพลของความถี่ไม่มีนัยสำคัญซึ่งกล่าวได้ว่า ความเครียดคงค้างเมื่อรับแรงดึงวัฏจักรนั้นเกิดจากสมบัติที่ขึ้นกับอัตราความเครียดของตาข่ายเสริมกำลังเป็นหลัก ในขณะที่อิทธิพลของแรงดึงวัฏจักรที่ไม่ขึ้นกับอัตราความเครียดนั้นไม่ใช่สาเหตุที่แท้จริง

คำสำคัญ: การทดสอบแรงดึง ความเครียดคงค้าง ตาข่ายเสริมกำลัง แรงดึงวัฏจักร อุณหภูมิ

การอ้างอิงบทความ: วรกมล บัวแสงจันทร์ และ วรัช ก้องกิจกุล, “การประยุกต์วิธีเพิ่มอุณหภูมิแบบขั้นบันไดเพื่อประมาณความเครียดคงค้างของตาข่ายเสริมกำลังพอลิโพรพิลีนเมื่อรับแรงดึงวัฏจักรในระยะยาว,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 35, ฉบับที่ 1, หน้า 1-15, เลขที่บทความ 251-036807, ม.ค.-มี.ค. 2568.



Application of Stepped Isothermal Method for Estimation of Long-Term Cyclic Residual Strain of a Polypropylene Geogrid

Worakamol Buasaengchan and Warat Kongkitkul*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand

*Corresponding Author, Tel. 0 2470 9304, E-mail: warat.kon@kmutt.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.07.013

Received 1 March 2023 ; Revised 11 May 2023 ; Accepted 30 May 2023; Published online: 31 July 2024

© 2025 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

During service, geosynthetic-reinforced soil (GRS) structures are often subjected to cyclic loading, such as traffic loading, which causes cyclic tensile loading to occur in the geosynthetic reinforcement. This cyclic loading results in the development of cyclic residual strain ($\Delta\varepsilon_{\text{cyclic}}$) in the geosynthetic reinforcement, which can cause excessive global deformation of the GRS structure. This research aims to examine the development of $\Delta\varepsilon_{\text{cyclic}}$ in a polypropylene geogrid under various levels of tensile load (LL), as well as various double amplitudes (DA) and frequencies (f) of cyclic loading. To accelerate the process, an ambient temperature increase technique is employed, where the temperature is increased from 30°C to 50°C in steps while keeping it constant for one hour in each step. The test results were analysed to establish the relationship between $\Delta\varepsilon_{\text{cyclic}}$ and the number of cycles (N_c) at the reference temperature of 30°C. These relationships were then used to examine the effects of LL, DA, and f . The study found that $\Delta\varepsilon_{\text{cyclic}}$ increases with increasing LL, but decreases with increasing DA. The effect of f was found to be insignificant, suggesting that the rate-dependent property of the geogrid is the main factor contributing to $\Delta\varepsilon_{\text{cyclic}}$, while the rate-independent cyclic loading effect is insignificant.

Keywords: Cyclic, Geogrid, Residual Strain, Temperature, Tensile Testing

Please cite this article as: W. Buasaengchan and W. Kongkitkul, "Application of stepped isothermal method for estimation of long-term cyclic residual strain of a polypropylene geogrid," *The Journal of KMUTNB*, vol. 35, no. 1, pp. 1–15, ID. 251-036807, Jan.–Mar. 2025 (in Thai).

1. บทนำ

โครงสร้างดินเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์ (Geosynthetic-Reinforced Soil Structure; GRS) ได้รับความนิยมน้อยแต่แพร่หลายดังที่สามารถพบเห็นได้ในงานวิศวกรรมหลายประเภท อาทิ ถนน คันดิน กำแพงกันดิน และอื่น ๆ จึงมีนักวิจัยหลายท่านศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะการเสียรูปของตาข่ายเสริมกำลัง Hirakawa และคณะ [1] ศึกษาสมบัติความเหนียวของตาข่ายเสริมกำลังโดยคำนึงถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการพัฒนาความเครียดการคืบซึ่งพบว่าความเครียดการคืบเป็นการตอบสนองจากสมบัติความเหนียวของวัสดุ และการคืบไม่ใช่ปรากฏการณ์ที่ทำให้ตาข่ายเสริมกำลังเสื่อมคุณภาพลง นอกจากนี้ยังพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดเป็นฟังก์ชันของ 1) ความเครียดไม่คืนกลับฉบับพลัน 2) อัตราความเครียดไม่คืนกลับฉบับพลัน และ 3) ประวัติความเค้น ต่อมา Kongkitkul และคณะ [2] ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อค่าอีลาสติคิตีฟเนสของตาข่ายเสริมกำลังพอลิเมอร์หลายชนิดและพบว่า อุณหภูมิมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติอีลาสโตวิสโคพลาสติคของตาข่ายเสริมกำลังพอลิเมอร์ โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงดึงสูงสุดและค่าอีลาสติคิตีฟเนสจะมีค่าลดลง

โครงสร้างดินเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมกำลังสังเคราะห์ไม่เพียงแต่รับแรงกระทำแบบคงที่เท่านั้น โครงสร้างเหล่านี้ยังต้องรับแรงกระทำแบบวัฏจักร อาทิ น้ำหนักบรรทุกจรจรจร อีกด้วย Kongkitkul และคณะ [3] จึงศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของสมบัติความเหนียวที่มีต่อความเครียดคงค้างของตาข่ายเสริมกำลังเมื่อรับแรงกระทำแบบวัฏจักรและพบว่าความเครียดคงค้างที่เกิดขึ้นเมื่อรับแรงวัฏจักรเกิดจากการตอบสนองเนื่องจากสมบัติความเหนียวของวัสดุตาข่ายเสริมกำลังเอง โดยที่อิทธิพลจากความถี่ไม่มีนัยสำคัญ

นอกจากนี้ การทดสอบการคืบแบบธรรมดาเพื่อสร้างเส้นโค้งการฉีกขาดการคืบ (Creep Rupture Curve) แล้วนำมาหาค่าแฟกเตอร์ลดทอนการคืบของตาข่ายเสริมกำลัง (Creep Reduction Factor; RF_{CR}) จะต้องใช้ระยะเวลาในการทดสอบที่นานมาก จึงแทบจะเป็นไปไม่ได้เลยที่จะทำการทดสอบการคืบที่นานเท่ากับอายุการใช้งานของโครงสร้างดิน

เสริมกำลัง เช่น 50 ปี ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการพัฒนาการทดสอบการคืบแบบเร่งด้วยอุณหภูมิขึ้นมาเพื่อร่นระยะเวลาที่ต้องใช้ในการทดสอบ โดยใช้การเพิ่มอุณหภูมิแวดล้อมตัวอย่างให้สูงขึ้นในขณะที่ให้แรงดึงกระทำคงที่เพื่อเร่งอัตราความเครียดการคืบ

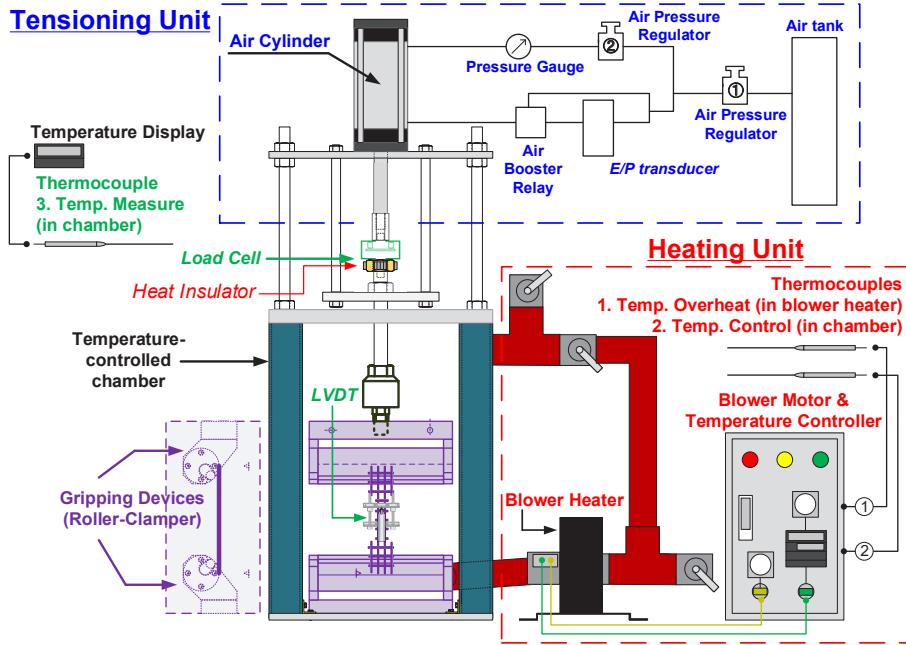
งานวิจัยนี้ประยุกต์การทดสอบการคืบแบบเร่งด้วยอุณหภูมิรูปแบบหนึ่งซึ่งเรียกว่า Stepped Isothermal Method (SIM) [4] ซึ่งเป็นวิธีการเร่งอัตราความเครียดในระหว่างการให้แรงดึงกระทำคงที่ด้วยการเพิ่มอุณหภูมิเป็นขั้น ๆ ในแต่ละขั้นจะควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ มาใช้กับการทดสอบแรงดึงของตาข่ายเสริมกำลังพอลิเมอร์พอลิโพรพิลีนเมื่อรับแรงวัฏจักร ผลการทดสอบจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อพัฒนาเส้นโค้งหลัก (Master Curve) [5] ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดดึง (ϵ) เมื่อตาข่ายเสริมกำลังรับแรงดึงวัฏจักรกับจำนวนรอบ (N_c) ที่อุณหภูมิอ้างอิง (30 องศาเซลเซียส) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของแรงกระทำสูงสุดหรือระดับแรงดึง (Load Level; LL) และอิทธิพลของแอมพลิจูด (Double Amplitude; DA) และความถี่ (Frequency; f) ของแรงดึงวัฏจักรต่อความเครียดคงค้างของตาข่ายเสริมกำลังเมื่อรับแรงดึงวัฏจักรระยะยาว ผลการศึกษาสามารถนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าความเครียดคงค้างเมื่อทราบค่าพารามิเตอร์อิทธิพลดังกล่าวต่อไปได้

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

การทดสอบในงานวิจัยนี้จำเป็นต้องใช้เครื่องทดสอบที่สามารถควบคุมแรงดึงและอุณหภูมิ รวมถึงเครื่องมือวัดต่าง ๆ ที่ใช้เก็บค่าแรงดึง การเสียรูป และอุณหภูมิ รายละเอียดของเครื่องทดสอบและเครื่องมือวัดที่ใช้แสดงดังรูปที่ 1

2.1 เครื่องดึงตัวอย่างและหน่วยควบคุมอุณหภูมิ

เครื่องดึงตัวอย่างประกอบด้วยกระบอกกลมที่ภายในบรรจุอากาศอัด สามารถให้แรงได้สองทิศทาง กล่าวคือให้แรงกระทำและถอนแรงกระทำ โดยที่แรงดันอากาศในกระบอกกลมสามารถควบคุมได้ด้วยตัวแปลงสัญญาณไฟฟ้า

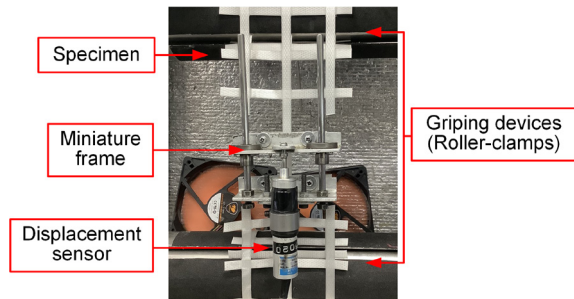


รูปที่ 1 แผนภาพแสดงเครื่องทดสอบและเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ [2]

เป็นแรงดันลม (Electro-pneumatic (E/P) Transducer) ตัวอย่างทดสอบจะอยู่ในตู้ทดสอบที่ควบคุมอุณหภูมิโดยการไหลเวียนอากาศเข้า-ออกระหว่างตู้ทดสอบกับหน่วยควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งจะนำอากาศจากภายนอกส่วนหนึ่ง มาผสมกับอากาศที่ไหลเวียนออกมาจากตู้ทดสอบ แล้วส่งผ่านไปฮีตเตอร์แล้วส่งไปยังตู้ทดสอบ อากาศส่วนที่ไหลเวียนออกมาจากตู้ทดสอบที่ไม่ได้วนกลับมาผ่านฮีตเตอร์จะถูกปล่อยทิ้งออกไปภายนอกระบบไหลเวียน

2.2 เครื่องมือวัด

การทดสอบนี้ใช้เซลล์วัดแรงเพื่อวัดแรงดึงที่กระทำกับตัวอย่าง เทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิรอบตัวอย่าง และเซ็นเซอร์วัดระยะเพื่อวัดระยะยืดของตัวอย่างที่เกิดขึ้นแบบเฉพาะจุด โดยเซ็นเซอร์วัดระยะจะถูกติดอยู่กับโครงโลหะเพื่อประคองให้อยู่ในแนวศูนย์กลางของตัวอย่างทดสอบ ในระหว่างการให้แรงดึงกระทำกับตัวอย่าง โครงโลหะนี้สามารถเคลื่อนที่ขึ้น-ลงตามแนวแรงดึงได้อย่างอิสระดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตัวอย่างตาข่ายเสริมกำลังพอลิโพรพิลีนที่ติดตั้งเข้ากับโครงโลหะและเซ็นเซอร์วัดระยะ

2.3 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุเสริมแรงสังเคราะห์ที่นำมาทดสอบหาความเครียดคงค้างเมื่อรับแรงวัฏจักรในงานวิจัยนี้ คือ ตาข่ายเสริมกำลังพอลิโพรพิลีน (Polypropylene (PP) Geogrid) ดังแสดงในรูปที่ 2 ตาข่ายเสริมกำลังนี้สามารถรับแรงได้ทั้งสองทิศทาง มีค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด (V_{ult}) และความเครียดที่จุดขาดเท่ากับ 40 กิโลนิวตันต่อเมตร และร้อยละ 8 ตามลำดับ จากข้อมูลของผู้ผลิต

2.4 รายละเอียดการทดสอบ

งานวิจัยนี้ใช้ประวัติการทดสอบ 3 รูปแบบ ประกอบด้วย

- 1) การให้แรงกระทำแบบต่อเนื่องภายใต้อุณหภูมิคงที่ (ML-CT)
- 2) การให้แรงกระทำแบบคงค้างภายใต้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบขั้นบันได (SL-SIT) และ
- 3) การให้แรงกระทำแบบขั้นบันไดภายใต้การควบคุมอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบขั้นบันได (CL-SIT) รายละเอียดของประวัติการทดสอบทั้งสามรูปแบบ (ตารางที่ 1 และรูปที่ 3) มีดังนี้

1) ML-CT (Monotonic Loading - Constant Temperature) คือ การให้แรงกระทำอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราเร่งเท่ากับ 0.6 กิโลนิวตันต่อเมตรต่อนาที จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบถึงแรงดึงประลัย (V_{ult}) ภายใต้การควบคุมอุณหภูมิให้คงที่เท่ากับ 30 35 40 45 และ 50 องศาเซลเซียส ในแต่ละการทดสอบ

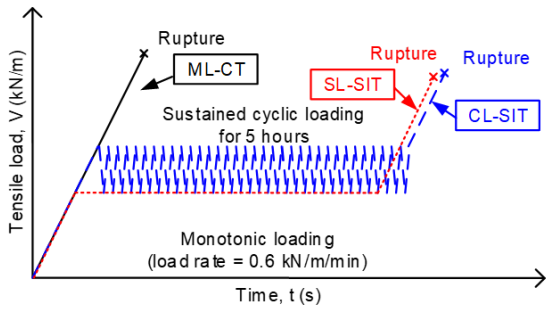
2) SL-SIT (Sustained Loading - Stepped Increasing Temperature) คือ การให้แรงกระทำอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราเร่งเท่ากับ 0.6 กิโลนิวตันต่อเมตรต่อนาที ภายใต้อุณหภูมิควบคุมเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส จนกระทั่งถึงค่าแรงดึงเป้าหมายที่ระดับของแรงเท่ากับร้อยละ 40 และ 50 ของ V_{ult} ที่ได้จากการทดสอบแบบ ML-CT ที่อุณหภูมิเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส แล้วจึงให้แรงกระทำแบบคงค้างเป็นเวลารวม 5 ชั่วโมง เมื่อให้แรงกระทำคงค้างครบทุก ๆ หนึ่งชั่วโมง

อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างทันทีเท่ากับ 5 องศาเซลเซียส ดังนั้นในขั้นสุดท้ายอุณหภูมิควบคุมจะเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส เมื่อเสร็จสิ้นการให้แรงคงค้าง จะให้แรงกระทำอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราเร่งเท่ากับ 0.6 กิโลนิวตันต่อเมตรต่อนาที ดังเดิม จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบประลัย

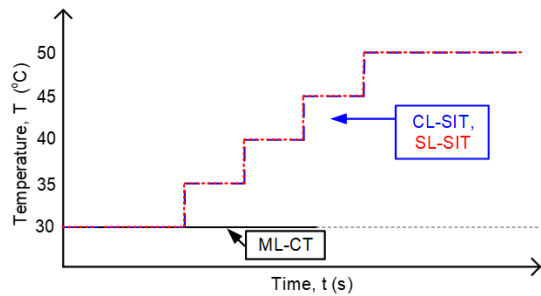
3) CL-SIT (Cyclic Loading - Stepped Increasing Temperature) คือ การให้แรงกระทำอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราเร่งเท่ากับ 0.6 กิโลนิวตันต่อเมตรต่อนาที ภายใต้อุณหภูมิควบคุมเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส จนกระทั่งถึงค่าแรงดึงเป้าหมายที่ระดับของแรงเท่ากับร้อยละ 25 50 และ 75 ของ V_{ult} ที่ได้จากการทดสอบ ML-CT ที่อุณหภูมิเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส แล้วจึงให้แรงกระทำแบบวัฏจักรเป็นชุด แต่ละชุดนานเท่ากับ 1 ชั่วโมง รวมทั้งหมดจำนวน 5 ชุด เมื่อให้แรงกระทำแบบวัฏจักรเสร็จสิ้นในแต่ละชุด อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างทันทีเท่ากับ 5 องศาเซลเซียส ดังนั้นในชุดแรงวัฏจักรสุดท้าย อุณหภูมิควบคุมจะเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส ในแต่ละชุดแรงกระทำแบบวัฏจักร จะแปรผันความถี่จำนวน 3 ค่า ได้แก่ 1/100 1/45 และ 1/30 เฮิรตซ์ และแอมพลิจูด (Amplitude; DA) เท่ากับร้อยละ 5 10 และ 20 ของ V_{ult} ที่ได้จากการทดสอบ ML-CT ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ดังนั้นจำนวนรอบ (Number of Cycle; N_c) และอัตราแรงระหว่างการให้แรงวัฏจักรจะไม่เท่ากัน

ตารางที่ 1 รายการทดสอบแต่ละรูปแบบ

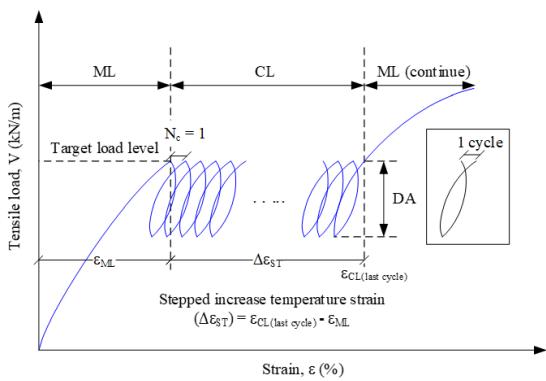
รูปแบบ				อุณหภูมิ (°C)					
				30	35	40	45	50	30-50
ML-CT				/	/	/	/	/	
SL-SIT	40% V_{ult}								/
	50% V_{ult}								/
CL-SIT	LL _{target} = 25% V_{ult}	DA = 5% V_{ult} 10% V_{ult} 20% V_{ult}	f = 1/100 Hz 1/45 Hz 1/30 Hz						/ (9 tests)
	LL _{target} = 50% V_{ult}	DA = 5% V_{ult} 10% V_{ult} 20% V_{ult}	f = 1/100 Hz 1/45 Hz 1/30 Hz						/ (9 tests)
LL _{target} = 75% V_{ult}	DA = 5% V_{ult} 10% V_{ult} 20% V_{ult}	f = 1/100 Hz 1/45 Hz 1/30 Hz						/ (9 tests)	



(ก)



(ข)



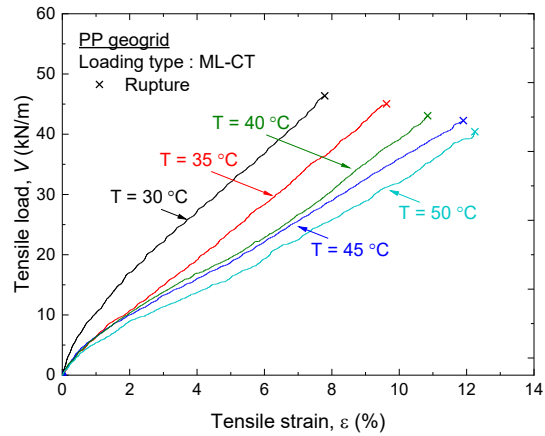
(ค)

รูปที่ 3 ประวัติการทดสอบ (ก) ประวัติเวลาการให้แรงดึงที่ใช้ในการทดสอบ (ข) ประวัติเวลาอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ และ (ค) นิยามของจำนวนรอบและแอมพลิจูด

3. ผลการทดลอง

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับความเครียด

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึง (V) กับความเครียด (ε) ที่ได้จากการทดสอบแบบ ML-CT ที่อุณหภูมิคงที่ที่แตกต่างกัน 5 ค่า จากรูปนี้จะสามารถเห็นพฤติกรรม

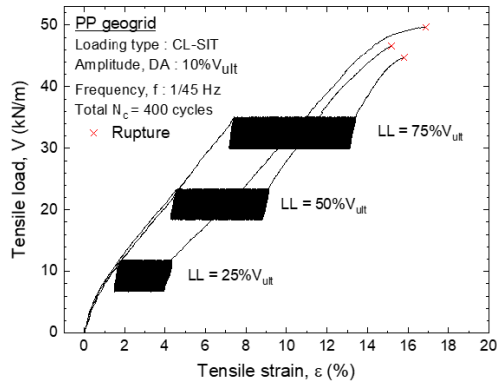


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับความเครียดที่ได้จากการทดสอบ ML-CT ที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ

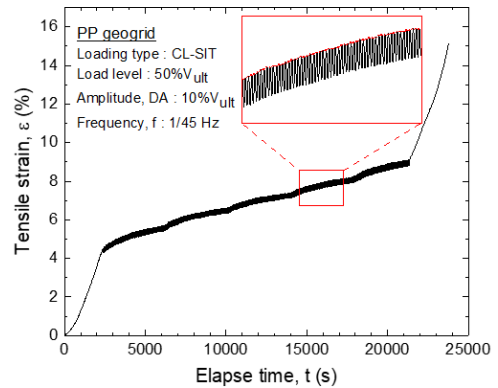
ต่าง ๆ ได้ดังนี้ 1) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แรงดึงประลัย (V_{ult}) มีค่าลดลง ในขณะที่ค่าความเครียด ณ จุดประลัยของตัวอย่าง (ϵ_{rup}) เพิ่มขึ้น 2) ความชันสัมผัส (E_{tan}) ของความสัมพันธ์ V-ε ในช่วงสุดท้ายก่อนที่ตัวอย่างจะประลัยมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และ 3) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราความเครียด (Strain Rate) เมื่อกำลังเข้าสู่จุดประลัย ($\dot{\epsilon}_{rup}$) มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่า E_{tan} ลดลงในขณะที่อัตราการให้แรงดึงที่พฤติกรรมดังกล่าวเกิดขึ้นเพราะพอลิเมอร์ประกอบขึ้นจากสายโซ่ยาวของโมเลกุลซ้ำ ๆ ซึ่งถูกยึดไว้ด้วยแรงระหว่างโมเลกุลที่อ่อนแอ เมื่อได้รับความร้อน แรงระหว่างโมเลกุลเหล่านี้จะอ่อนตัวลง ทำให้โซ่เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระมากขึ้น และลดความแข็งแรงของวัสดุอย่างไรก็ตาม จากการเปรียบเทียบรูปร่างของวัสดุเสริมกำลังภายหลังการทดสอบระหว่างตัวอย่างที่ทดสอบภายใต้ประวัติแรงและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

3.2 ผลการวิเคราะห์เส้นโค้งหลัก

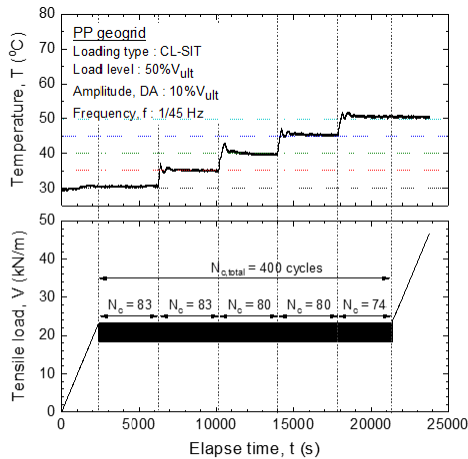
รูปที่ 5 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึง (V) กับความเครียดดึง (ε) จากการทดสอบแบบ CL-SIT ด้วยแอมพลิจูด (DA) เท่ากับ $10\%V_{ult}$ หรือ 4.64 กิโลนิวตันต่อเมตร และความถี่ (f) เท่ากับ 1/45 เฮิรตซ์ ที่ระดับแรงดึง (LL) เท่ากับ $25\%V_{ult}$, $50\%V_{ult}$ และ $75\%V_{ult}$ (ตารางที่ 1) รูปที่ 5 (ข)



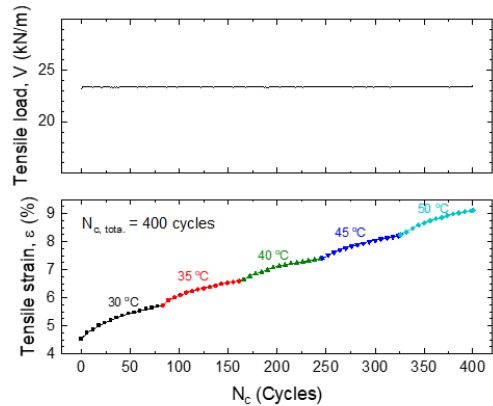
(ก)



(ค)



(ข)



(ง)

รูปที่ 5 ตัวอย่างผลการทดสอบแบบ CL-SIT เมื่อ $LL = 50\%V_{ult}$ $DA = 10\%V_{ult}$ และ $f = 1/45$ เฮิรตซ์: (ก) ความสัมพันธ์ V กับ ϵ ; (ข) ประวัติเวลาของ V และ T ; (ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ กับ t ; และ (ง) ความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ N_c และความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ กับ N_c

แสดงประวัติเวลาของอุณหภูมิและแรงดึงจากการทดสอบแบบ CL-SIT ด้วย $DA = 10\%V_{ult}$, $f = 1/45$ เฮิรตซ์ และ $LL = 50\%V_{ult}$ เมื่อได้ประวัติเวลาดังรูปที่ 5(ข) แล้วจะทำการนับจำนวนรอบ (N_c) ที่ได้จริงในแต่ละช่วงอุณหภูมิ เพื่อใช้วิเคราะห์ต่อไป

รูปที่ 5 (ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่เกิดขึ้นกับเวลาซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อให้แรงวัฏจักรความเครียดที่เกิดขึ้นก็จะมีลักษณะเป็นวัฏจักรเช่นเดียวกัน โดยที่จุดยอดด้านบนของแรงดึงที่ให้กับตัวอย่างจะเกิดขึ้น ณ เวลาเดียวกัน

กับจุดยอดด้านบนของความเครียด ดังนั้นจึงสามารถเก็บค่าความเครียดและแรงดึงที่จุดยอดเหล่านี้เพื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับจำนวนรอบ และความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับจำนวนรอบดังแสดงในรูปที่ 5 (ง)

จากนั้นจึงสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϵ กับ $\log_{10}(N_c)$ โดยกำหนดให้ $N_c = 0$ ที่จุดเริ่มต้นที่แท้จริงของแต่ละชั้นอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 6 (ก) จากนั้นเลือกส่วนของเส้นโค้งความสัมพันธ์ช่วงปลายทางด้านขวาที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงซึ่งจะเป็นส่วนที่จะสามารถนำมาเลื่อนกราฟ (Horizontal



Shift) ในแนวนอนได้แล้วคำนวณหาค่าแฟกเตอร์เลื่อนกราฟในแนวนอน (Horizontal Shift Factor) ตารางที่ 2 แสดงค่าแฟกเตอร์เลื่อนกราฟในแนวนอนสำหรับค่า f ที่แตกต่างกัน รูปที่ 6 (ข) แสดงผลการเลื่อนกราฟในแนวนอน จากรูปนี้เราจะเห็นได้ว่ากราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากอุณหภูมิต่าง ๆ ยังไม่ซ้อนทับต่อเนื่องกัน จึงต้องทำการเลื่อนกราฟแนวตั้ง (Vertical Shift) เพื่อให้ได้เส้นโค้งหลักดังแสดงในรูปที่ 6 (ค) ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิแบบขั้นบันไดสามารถเร่งการเกิดความเครียดคงค้างจากแรงวัฏจักรจากประมาณ 80 รอบไปเป็นประมาณ 18,000 ($10^{4.25}$) รอบ ซึ่งจะสามารถร่นระยะเวลาการทดสอบได้อย่างมีนัยสำคัญ

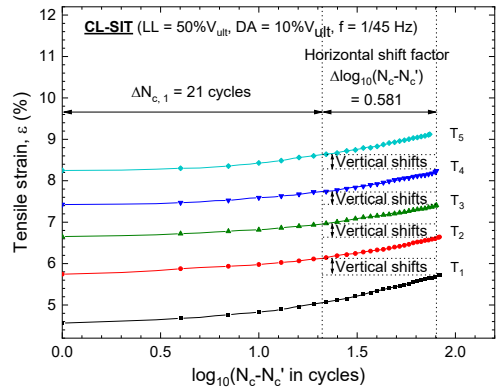
ตารางที่ 2 แฟกเตอร์เลื่อนกราฟในแนวนอน

ความถี่ (Hz)	ค่าแฟกเตอร์เลื่อนกราฟในแนวนอน			
	30 °C - 35 °C	35 °C - 40 °C	40 °C - 45 °C	45 °C - 50 °C
1/100	0.556	1.113	2.225	4.450
1/45	0.581	1.162	2.323	4.647
1/30	0.598	1.196	2.393	4.785

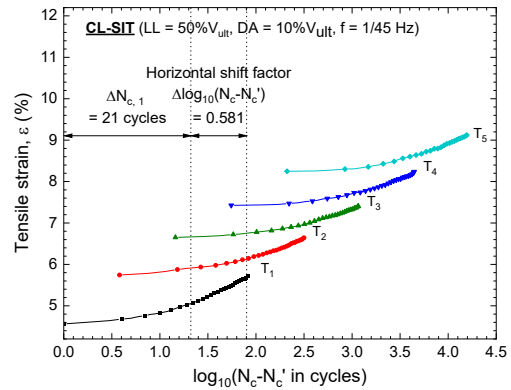
3.3 อิทธิพลของระดับแรงต่อความเครียดคงค้าง

เพื่อศึกษาอิทธิพลของระดับแรง (LL) ที่มีต่อปริมาณความเครียดที่เกิดขึ้นของตาข่ายเสริมกำลังเมื่อรับแรงวัฏจักร จึงได้ทำการเปรียบเทียบค่าความเครียดคงค้างที่เกิดจากการเพิ่มอุณหภูมิแบบขั้นบันได ($\Delta\epsilon_{ST}$) ที่ได้จากผลการทดสอบโดยตรงก่อนการวิเคราะห์แบบ SIM ดังแสดงในรูปที่ 7 และค่าความเครียดคงค้างเมื่อรับแรงวัฏจักรที่ได้จากเส้นโค้งหลัก ($\Delta\epsilon_{cyclic}$) ภายหลังการวิเคราะห์แบบ SIM ดังแสดงในรูปที่ 8 เมื่อให้แรงวัฏจักรกระทำด้วยค่า DA และ f ที่แตกต่างกัน

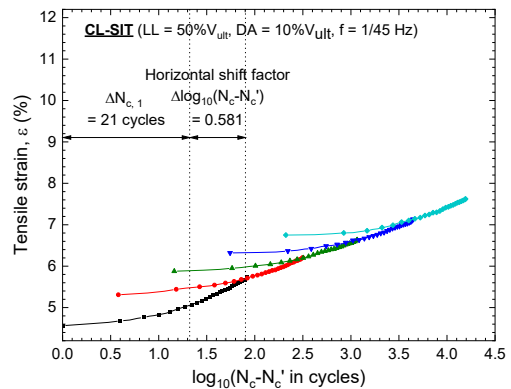
จากรูปที่ 7 และ 8 เห็นได้ว่า เมื่อค่า LL เพิ่มขึ้น ค่า $\Delta\epsilon_{ST}$ และ $\Delta\epsilon_{cyclic}$ มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นค่าความเครียดคงค้างจากแรงกระทำแบบวัฏจักรระยะสั้นภายใต้อุณหภูมิคงที่ที่แตกต่างกัน ($\Delta\epsilon_{ST}$ ในรูปที่ 7) และค่าความเครียดคงค้างจากแรงกระทำแบบวัฏจักรระยะยาวที่อุณหภูมิอ้างอิงคงที่จากเส้นโค้งหลัก ($\Delta\epsilon_{cyclic}$ ในรูปที่ 8) จะมากขึ้นเมื่อค่า LL มากขึ้น



(ก)

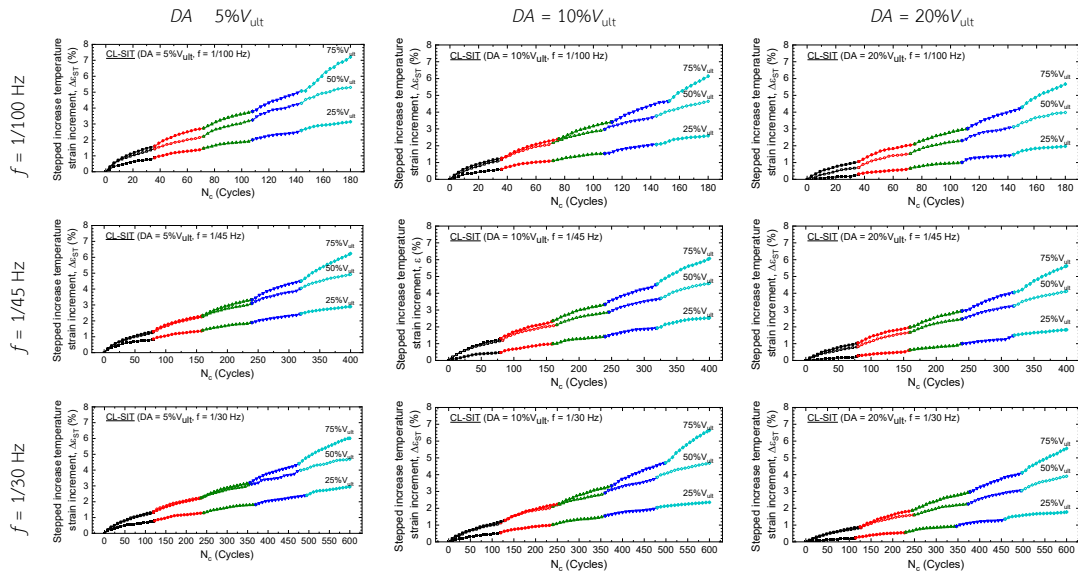


(ข)

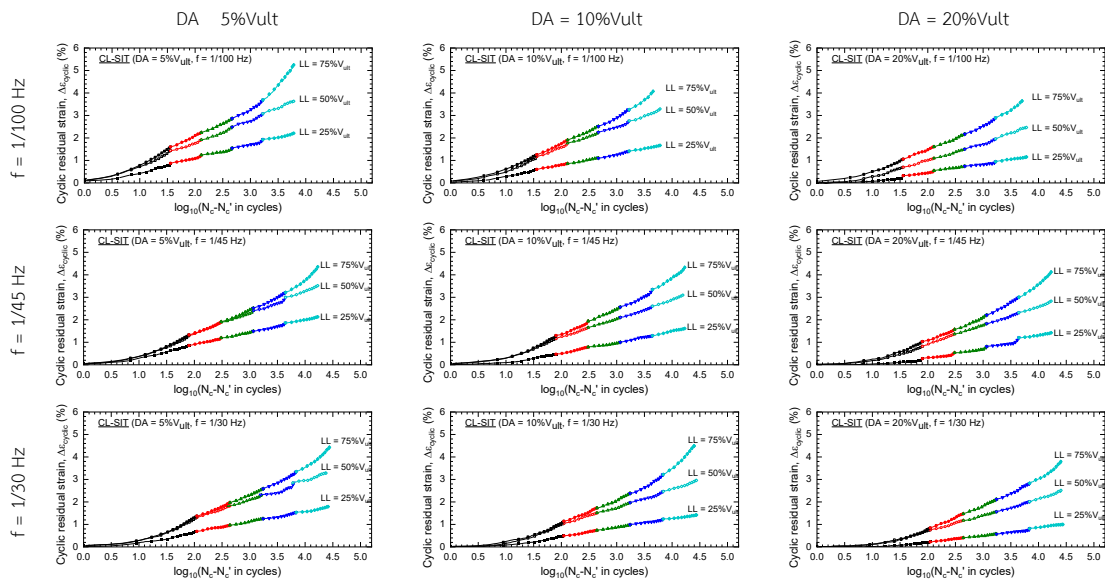


(ค)

รูปที่ 6 ขั้นตอนการสร้างเส้นโค้งหลักจากความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ กับ $\log_{10}(N_c)$: (ก) ก่อนการเลื่อนกราฟในแนวนอน; (ข) ภายหลังการเลื่อนกราฟในแนวนอน แต่ก่อนการเลื่อนกราฟในแนวตั้ง; และ (ค) ภายหลังการเลื่อนกราฟในแนวตั้งซึ่งจะได้เป็นเส้นโค้งหลัก



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta\epsilon_{ST}$ กับ N_c จากการทดสอบแบบ CL-SIT เปรียบเทียบกับ LL แตกต่างกัน

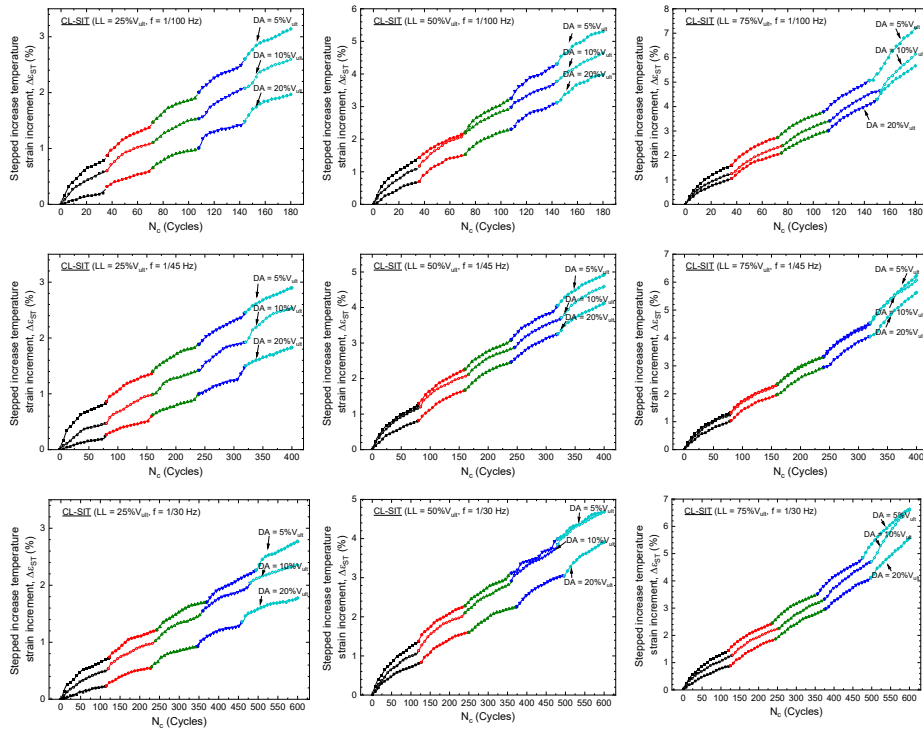


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta\epsilon_{cyclic}$ กับ $\log_{10}(N_c - N'_c)$ จากการทดสอบแบบ CL-SIT เปรียบเทียบกับ LL แตกต่างกัน

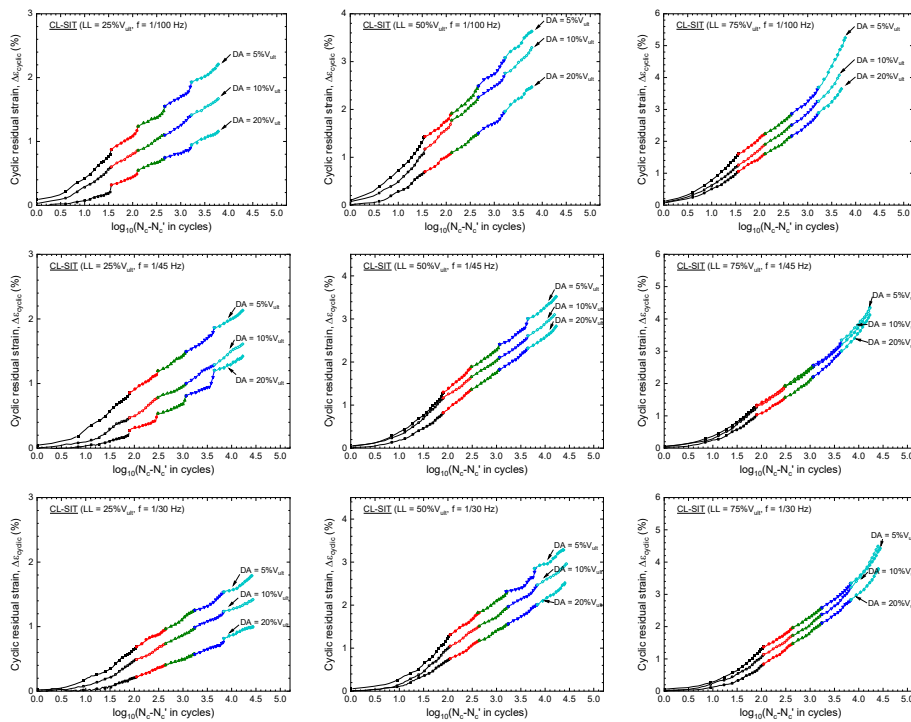
3.4 อิทธิพลของแอมพลิจูดต่อความเคียดคงค้าง

เพื่อศึกษาอิทธิพลของแอมพลิจูด (DA) ที่มีต่อปริมาณความเคียดที่เกิดขึ้นของดาข่ายเสริมกำลังเมื่อรับแรงวัฏจักร จึงได้ทำการเปรียบเทียบค่าความเคียดคงค้างที่เกิดจากการเพิ่มอุณหภูมิแบบขั้นบันได ($\Delta\epsilon_{ST}$) ที่ได้จากผล

การทดสอบโดยตรงก่อนการวิเคราะห์แบบ SIM ดังแสดงในรูปที่ 9 และค่าความเคียดคงค้างเมื่อรับแรงวัฏจักรที่ได้จากเส้นโค้งหลัก ($\Delta\epsilon_{cyclic}$) ภายหลังการวิเคราะห์แบบ SIM ดังแสดงในรูปที่ 10 เมื่อให้แรงวัฏจักรกระทำด้วยค่า LL และ f ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta\epsilon_{ST}$ กับ N_c จากการทดสอบแบบ CL-SIT เปรียบเทียบที่ DA ต่างๆกัน



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta\epsilon_{cyclic}$ กับ $\log_{10}(N_c - N'_c)$ จากการทดสอบแบบ CL-SIT เปรียบเทียบที่ DA ต่างๆกัน

วรกมล บัวแสงจันทร์ และ วรัช ก้องกิจกุล, “การประยุกต์วิธีเพิ่มอุณหภูมิแบบขั้นบันไดเพื่อประมาณความเคียดคงค้างของตาข่ายเสริมกำลังพอลิพรทิลีนเมื่อรับแรงดึงวัฏจักรในระยะยาว.”

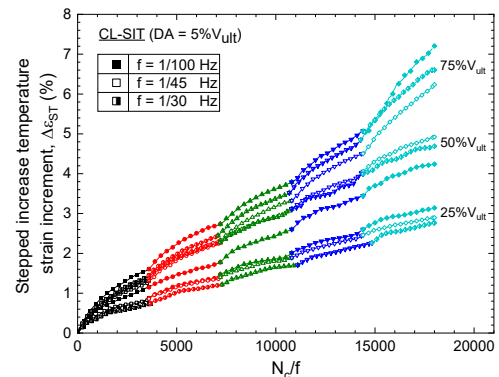
จากรูปที่ 9 และ 10 จะเห็นได้ว่า เมื่อค่า DA เพิ่มขึ้น ค่า $\Delta\epsilon_{ST}$ และ $\Delta\epsilon_{cyclic}$ กลับลดลง โดยการลดลงของค่า $\Delta\epsilon_{ST}$ และ $\Delta\epsilon_{cyclic}$ จะสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบที่ค่า LL ที่ต่ำกว่า หมายความว่าค่าความเครียดคงค้างจากแรงกระทำแบบวัฏจักรระยะสั้นภายใต้อุณหภูมิคงที่ที่แตกต่างกัน ($\Delta\epsilon_{ST}$ ในรูปที่ 9) และค่าความเครียดคงค้างจากแรงกระทำแบบวัฏจักรระยะยาวที่อุณหภูมิอ้างอิงคงที่จากเส้นโค้งหลัก ($\Delta\epsilon_{cyclic}$ ในรูปที่ 10) จะลดลงเมื่อค่า DA เพิ่มขึ้น

พฤติกรรมนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Kongkitkul และคณะ [3] ซึ่งได้อธิบายว่า เมื่อให้แรงวัฏจักรที่ค่า LL เดียวกันโดยควบคุมให้ค่าแรงสูงสุดในระหว่างการให้แรงวัฏจักรเท่ากัน (เช่น รูปที่ 3 (ค)) แรงดึงเฉลี่ยในระหว่างการให้แรงวัฏจักรจะมีค่าลดลงเมื่อค่า DA เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ แรงคงค้างเทียบเท่า (Equivalent Creep Load; V_{eq}) ที่จะทำให้เกิดความเครียดคงค้างการคืบ (Creep Strain) ที่เวลาเดียวกันเท่ากับความเครียดคงค้างที่เกิดจากแรงวัฏจักร (Cyclic Residual Strain) จะลดลงเมื่อค่า DA เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ พฤติกรรมดังกล่าวยังสอดคล้องกับลักษณะการเกิดความเครียดคงค้างของทราย [6] ทรายเสริมกำลัง [7] และคอนกรีตรีไซเคิล [8]

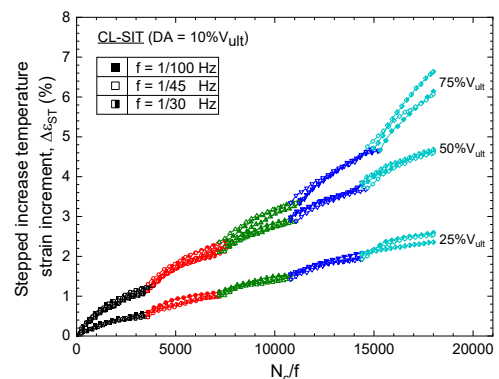
3.5 อิทธิพลของความถี่ต่อความเครียดคงค้าง

ในการทดสอบแบบ CL-SIT จะใช้เวลาในแต่ละขั้นอุณหภูมิเท่ากัน เนื่องจากการผันแปรค่า f ของการให้แรงวัฏจักร ค่า N_c จึงไม่เท่ากันเมื่อค่า f แตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อศึกษาอิทธิพลของความถี่การให้แรงวัฏจักรที่มีต่อปริมาณความเครียดคงค้างที่เกิดขึ้นของตาข่ายเสริมกำลังจึงจำเป็นต้องนอร์มัลไลซ์ค่า N_c ด้วยค่า f ก่อน รูปที่ 11 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta\epsilon_{ST}$ กับ N_c/f เมื่อให้แรงวัฏจักรกระทำด้วยค่า LL และ f ที่แตกต่างกันพบว่า เมื่อเปรียบเทียบที่ค่า LL เดียวกันความสัมพันธ์ที่ได้ จากค่า f ที่แตกต่างกันมีลักษณะใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าค่า $\Delta\epsilon_{ST}$ ไม่ขึ้นกับค่า f ของแรงวัฏจักร

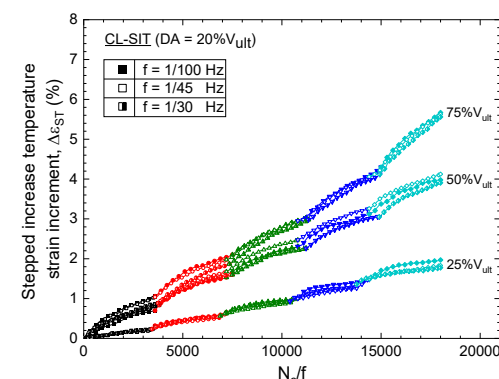
ในทำนองเดียวกันหากต้องการศึกษาอิทธิพลของความถี่ที่มีต่อความเครียดคงค้างของตาข่ายเสริมกำลังเมื่อรับ



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta\epsilon_{ST}$ กับ N_c/f จากการทดสอบแบบ CL-SIT เปรียบเทียบที่ LL แตกต่างกัน เมื่อ DA เท่ากับ (ก) $5\%V_{ult}$ (ข) $10\%V_{ult}$ และ (ค) $20\%V_{ult}$

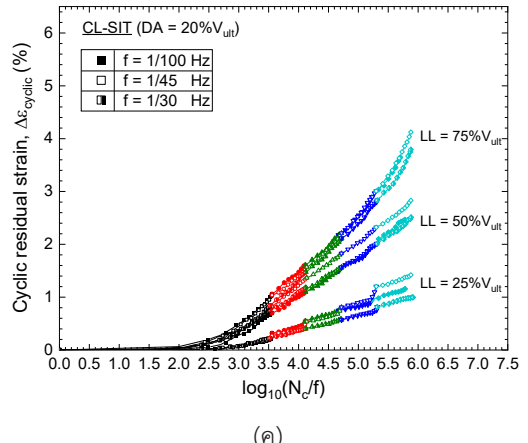
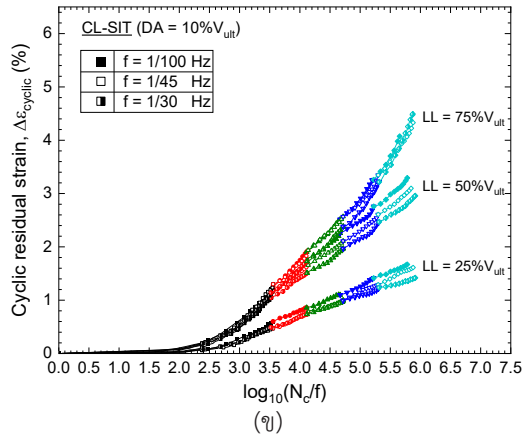
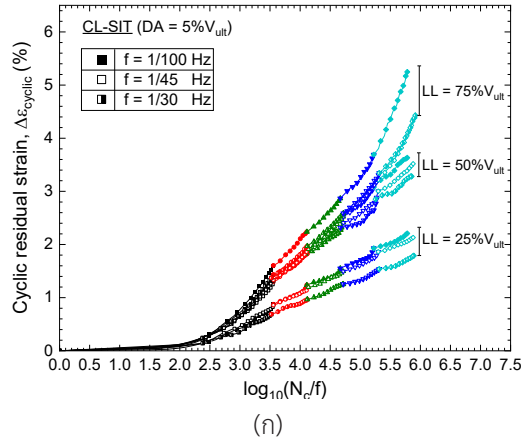


แรงวัฏจักรระยะยาวที่ได้จากเส้นโค้งหลัก ($\Delta\epsilon_{cyclic}$) ข้อมูลที่นำมาเปรียบเทียบจำเป็นต้องจัดให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta\epsilon_{cyclic}$ กับ $\log_{10}(N_c/f)$ ก่อน รูปที่ 12 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta\epsilon_{cyclic}$ กับ $\log_{10}(N_c/f)$ เมื่อให้แรงวัฏจักรกระทำด้วยค่า LL และ f ที่แตกต่างกัน สามารถสังเกตได้ว่าการเพิ่มขึ้นของความถี่ของแรงวัฏจักร ไม่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญใด ๆ กับปริมาณความเครียดคงค้างเมื่อรับแรงวัฏจักรระยะยาว เพราะว่าความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดสอบภายใต้เงื่อนไขระดับแรงและแอมพลิจูดที่เท่ากันแต่ความถี่แตกต่างกันใกล้เคียงกัน

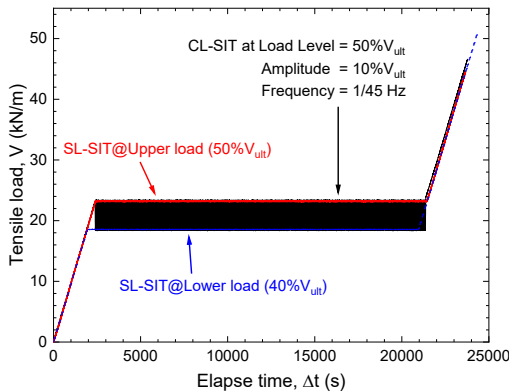
จากผลการทดสอบดังที่แสดงข้างต้น จะสามารถสังเกตได้ว่าปริมาณความเครียดคงค้างเมื่อได้รับแรงวัฏจักรระยะสั้นที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ($\Delta\epsilon_{ST}$) และปริมาณความเครียดคงค้างเมื่อได้รับแรงวัฏจักรระยะยาว ($\Delta\epsilon_{cyclic}$) ที่ได้จากการทดสอบภายใต้เงื่อนไขระดับแรง (LL) และแอมพลิจูด (DA) เท่ากันแต่ความถี่ (f) ต่างกันมีค่าใกล้เคียงกัน พฤติกรรมดังกล่าวนี้คล้ายกับผลการศึกษาของ Kongkitkul และคณะ [3] อีกเช่นกัน ซึ่งได้อธิบายไว้ว่า การเกิดความเครียดคงค้างของตาข่ายเสริมกำลังสังเคราะห์ (Residual Tensile Strain) ภายใต้แรงวัฏจักรเป็นการตอบสนองที่ขึ้นกับอัตราความเครียด (Rate Effect) เนื่องจากสมบัติความหนืด (Viscous Property) ของตาข่ายเสริมกำลังสังเคราะห์ โดยที่อิทธิพลจากแรงวัฏจักรที่ไม่ขึ้นกับเวลานั้นไม่มีนัยสำคัญ กล่าวคือ ภายใต้การกระทำจากแรงวัฏจักรที่มีค่า LL และ DA เท่ากัน ค่าความเครียดคงค้างจะขึ้นกับระยะเวลาที่แรงวัฏจักรกระทำ แต่ไม่ขึ้นกับจำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ นอกจากนี้ พฤติกรรมดังกล่าวยังสอดคล้องกับลักษณะการเกิดความเครียดคงค้างของทรายเมื่อรับแรงกระทำแบบวัฏจักรในการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบที่มีค่า DA ต่ำ [6]

3.6 แพกเตอร์จำนวนรอบ

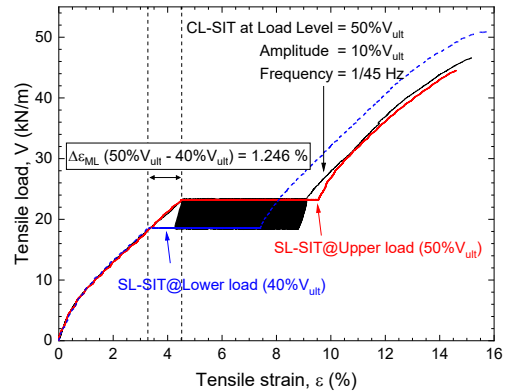
ภายหลังจากการเลื่อนกราฟโดยอาศัยเทคนิคการเพิ่มอุณหภูมิแบบขั้นบันได (SIM) เพื่อสร้างเส้นโค้งหลัก (Master Curve) เห็นได้ว่าค่า $\log_{10}(N_c)$ เพิ่มขึ้นด้วยค่าเลื่อนกราฟในแนวนอน (Horizontal Shifting) ซึ่งผลลัพธ์จะแตกต่างกัน



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta\epsilon_{cyclic}$ กับ $\log_{10}(N_c/f)$ จากการทดสอบแบบ CL-SIT เปรียบเทียบที่ LL ต่างกัน เมื่อ DA เท่ากับ (ก) 5%V_{ult}, (ข) 10%V_{ult} และ (ค) 20%V_{ult}



(ก)



(ข)

รูปที่ 13 การเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่าง CL-SIT และ SL-SIT ที่คงค้างที่ระดับแรงสูงสุดและต่ำสุดในวัฏจักรของ CL-SIT: (ก) ประวัติแรงดึง และ (ข) ความสัมพันธ์ V-ε

ออกไปตามความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ เพื่อการเปรียบเทียบ ในที่นี้จะนิยามแฟกเตอร์จำนวนรอบ เท่ากับจำนวนรอบจากการทดสอบด้วยวิธีเพิ่มอุณหภูมิแบบขั้นบันไดแล้ววิเคราะห์แบบ SIM ($N_{c,SIM}$) ต่อจำนวนรอบจากการทดสอบที่อุณหภูมิอ้างอิง ($N_{c,EXP}$) ดังสมการที่ (1) ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์จำนวนรอบจากการทดสอบด้วยค่า f ที่แตกต่างกัน จากตารางนี้จะพบว่า ค่าแฟกเตอร์จำนวนรอบเพิ่มขึ้นเมื่อค่า f เพิ่มขึ้น โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับประมาณ 200 หมายความว่าด้วยการทดสอบด้วยวิธีเพิ่มอุณหภูมิแบบขั้นบันไดและการวิเคราะห์แบบ SIM จะสามารถเร่งการทดสอบแรงวัฏจักรได้ประมาณ 200 เท่า

$$Cycle\ factor = \frac{N_{c,SIM}}{N_{c,EXP}} \quad (1)$$

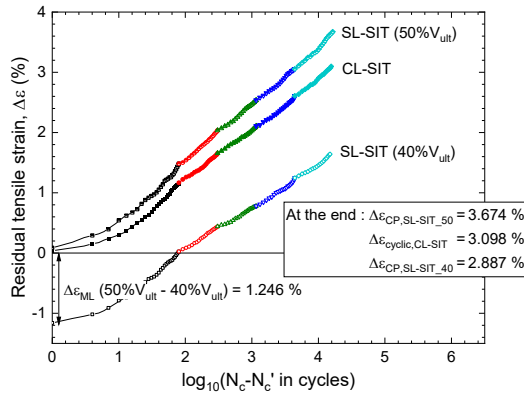
3.7 ความเครียดการคืบ

รูปที่ 13 (ก) เปรียบเทียบประวัติเวลาแรงดึงที่กระทำกับตัวอย่างทดสอบระหว่างการทดสอบแบบ CL-SIT ด้วยการทดสอบแบบ SL-SIT ที่ $LL = 50\%V_{ult}$ และที่ $LL = 40\%V_{ult}$ รูปที่ 13 (ข) เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ ϵ จากการทดสอบทั้งสามแบบ จากรูปที่ 13 จะเห็นได้ว่าค่า V ในระหว่างการให้แรงคงค้างในการทดสอบแบบ SL-SIT อยู่ที่ระดับแรงสูงสุดและต่ำสุดของแรงวัฏจักรในการทดสอบแบบ CL-SIT

จากที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้น ภายใต้เงื่อนไขระยะเวลาทดสอบที่เท่ากัน ความถี่ไม่ส่งผลต่อปริมาณความเครียดคงค้างเมื่อรับแรงวัฏจักร เพื่อเปรียบเทียบความเครียดคงค้างเมื่อตาข่ายเสริมกำลังรับแรงวัฏจักรและแรงคงค้าง ข้อมูล

ตารางที่ 3 แฟกเตอร์จำนวนรอบจากการทดสอบแบบ CL-SIT ที่ค่า f ต่าง ๆ

CL-SIT	ความถี่ (Hz)	$N_{c,EXP}$ (จำนวนรอบจากการทดสอบที่อุณหภูมิอ้างอิง)	$N_{c,SIM}$ (จำนวนรอบจากการทดสอบและวิเคราะห์แบบ SIM)	ค่าแฟกเตอร์จำนวนรอบ
	1/100	36	6,053	
1/45	80	16,827	210	
1/30	120	27,416	228	



รูปที่ 14 การเปรียบเทียบความเครียดคงค้างระหว่างการทดสอบ CL-SIT กับการทดสอบ SL-SIT ที่มีแรงคงค้างเท่ากับค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของแรงวัฏจักร

เวลาจากการทดสอบแบบ SL-SIT จะถูกแปลงให้อยู่ในหน่วยของจำนวนรอบ โดยสมมติค่า $f = 1/45$ เฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นค่าตรงกลางของพิสัยค่า f ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เมื่อแปลงค่าเวลาในการทดสอบแบบ SL-SIT เป็นจำนวนรอบ (N_c) แล้วสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง ε กับ N_c ได้ จากนั้นจะใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ SIM เพื่อเลื่อนกราฟในแนวนอนและแนวตั้งเพื่อสร้างเส้นโค้งหลักและนำไปเปรียบเทียบกับเส้นโค้งหลักที่ได้จากการทดสอบแบบ CL-SIT

เพื่อศึกษาอิทธิพลของแอมพลิจูด (DA) ที่มีต่อปริมาณความเครียดคงค้างที่เกิดขึ้นของตาข่ายเสริมกำลังเมื่อรับแรงวัฏจักร ($\Delta\varepsilon_{cyclic}$) ได้อย่างชัดเจนมากขึ้น จึงได้นำค่า $\Delta\varepsilon_{cyclic}$ มาเปรียบเทียบกับความเครียดคงค้างเมื่อตาข่ายเสริมกำลังรับแรงคงค้าง ($\Delta\varepsilon_{CP}$) รูปที่ 14 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความเครียดคงค้างระยะยาวกับ $\log_{10}(N_c)$ ที่ได้จากเส้นโค้งหลักจากวิเคราะห์ผลการทดสอบแบบ SIM กับการทดสอบแบบ SL-SIT และ CL-SIT ค่าความเครียดคงค้างที่จุดเริ่มต้นเมื่อ $N_c = 0$ ของการทดสอบแบบ SL-SIT ด้วย $LL = 40\%V_{ult}$ จะถูกหักออกด้วยความเครียดส่วนเพิ่มที่เกิดขึ้นในระหว่างที่แรงดึงเพิ่มขึ้นจาก $LL = 40\%V_{ult}$ ไปสู่ $LL = 50\%V_{ult}$ ($\Delta\varepsilon_{ML} = 1.246\%$ ดังแสดงในรูปที่ 13 (ข)) ซึ่งเป็นความเครียดส่วนเพิ่มที่เกิดจากการเพิ่มแรงดึงจาก $LL = 40\%V_{ult}$ ไปสู่ $LL = 50\%V_{ult}$ แต่ไม่ได้เกิดจากแรงคง

ค้างหรือแรงวัฏจักรออกไป เพื่อให้สามารถทำการเปรียบเทียบการพัฒนาความเครียดคงค้างระหว่างการทดสอบแบบ CL-SIT ร่วมกับ SL-SIT ได้

เมื่อพิจารณาที่ปลายทางด้านขวาสุดของความสัมพันธ์ในรูปที่ 14 พบว่า ค่า $\Delta\varepsilon_{CP}$ เมื่อ $LL = 50\%V_{ult}$ มีค่าสูงที่สุด (3.674%) ตามด้วยค่า $\Delta\varepsilon_{cyclic}$ เมื่อ $LL = 50\%V_{ult}$ (3.098%) และค่า $\Delta\varepsilon_{CP}$ เมื่อ $LL = 40\%V_{ult}$ (2.887%) ตามลำดับ พฤติกรรมเหล่านี้สามารถอธิบายได้ดังนี้

- 1) การทดสอบแบบ SL-SIT ด้วย $LL = 50\%V_{ult}$ เปรียบเสมือนว่าเราทำการทดสอบแบบ CL-SIT ที่ $LL = 50\%V_{ult}$ แต่กำหนดค่า $DA = 0$, 2) การทดสอบแบบ SL-SIT ด้วย $LL = 40\%V_{ult}$ มีค่าแรงกระทำคงที่เท่ากับแรงต่ำสุดในวัฏจักรของการทดสอบแบบ CL-SIT, 3) แรงกระทำแบบวัฏจักรมีค่าลงขึ้นอยู่กับแรงดึงที่ $LL = 50\%V_{ult}$ กับ $LL = 40\%V_{ult}$ และ 4) ความเครียดคงค้างที่เกิดขึ้นในการทดสอบแบบ CL-SIT จึงมีค่าระหว่างค่าจากการทดสอบ SL-SIT ที่ $LL = 50\%V_{ult}$ กับที่ $LL = 40\%V_{ult}$ พฤติกรรมนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Kongkitkul และคณะ [3] ที่ได้อธิบายไว้ว่า แรงคงค้างเทียบเท่า (Equivalent Creep Load; V_{eq}) สำหรับการทดสอบแบบให้แรงคงค้างเพื่อให้เกิดความเครียดคงค้างเท่ากับความเครียดคงค้างจากการทดสอบแบบให้แรงวัฏจักรจะมีค่าลดลงเมื่อแอมพลิจูดของแรงวัฏจักรมีค่าเพิ่มขึ้น

4. สรุป

จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบในการศึกษานี้ สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) การเพิ่มอุณหภูมิสามารถเร่งการเกิดความเครียดคงค้างของตาข่ายเสริมกำลังพอลิโพรพิลีนเมื่อรับแรงวัฏจักร (ε_{cyclic}) ที่กระทำที่ระดับแรง (LL) แอมพลิจูด (DA) และความถี่ (f) ที่แตกต่างกันได้

- 2) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ε_{cyclic} ระยะยาวกับเวลาหรือเส้นโค้งหลัก (Master curve) สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ε_{cyclic} ระยะสั้นกับเวลาที่ได้จากการทดสอบที่อุณหภูมิแตกต่างกันในแนวนอนและแนวตั้งตามวิธี Stepped Isothermal Method (SIM)

3) ค่า ε_{cyclic} ระยะยาวเพิ่มขึ้นเมื่อค่า LL เพิ่มขึ้น หรือ เข้าใกล้จุดประลัยมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับค่า LL เท่ากัน ค่า ε_{cyclic} ระยะยาวจะลดลงเมื่อค่า DA มากขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะ เมื่อเปรียบเทียบกับค่า LL เท่ากัน แรงดึงเฉลี่ยในระหว่างที่ให้ แรงกระทำแบบวัฏจักรจะมีค่าลดลงเมื่อค่า DA มากขึ้น

4) ค่า ε_{cyclic} ระยะยาวที่เกิดจากแรงวัฏจักรที่กระทำที่ LL และ DA เท่า ๆ กัน แต่มีค่า f แตกต่างกันมีค่าใกล้เคียง กันมาก หมายความว่า ε_{cyclic} ระยะยาวที่เกิดจากแรงวัฏจักร ที่กระทำด้วยจำนวนรอบ (N_c) ที่แตกต่างกันแต่กระทำภายใน ระยะเวลาที่เท่ากันมีค่าใกล้เคียงกัน พฤติกรรมนี้แสดงให้เห็น ว่าการพัฒนาความเครียดคงค้างจากแรงวัฏจักรนั้นเป็นการ ตอบสนองที่ขึ้นกับอัตราความเครียดจากสมบัติความหนืด ของวัสดุ โดยที่อิทธิพลจากแรงวัฏจักรที่ไม่ขึ้นกับอัตรา ความเครียดนั้นไม่มีนัยสำคัญ

ผลจากงานวิจัยนี้ทำให้ทราบพฤติกรรมการเกิด ความเครียดตึงคงค้างของวัสดุเสริมกำลังสังเคราะห์เมื่อรับ แรงดึงวัฏจักรที่กระทำที่ระดับแรงดึงที่แตกต่างกัน และมี แอมพลิจูดและความถี่ของแรงวัฏจักรที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ ผลการทดสอบยังสามารถนำไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายความเครียดตึงคงค้างของ วัสดุเสริมแรงสังเคราะห์ที่เพิ่งเกิดขึ้นตลอดช่วงอายุการใช้งานได้ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ บริษัท วิกเกอ เมอเจอร์ จำกัด ที่ อนุเคราะห์ตาข่ายเสริมกำลังเพื่อทดสอบในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Hirakawa, W. Kongkitkul, F. Tatsuoka, and T. Uchimura, "Time-dependent stress-strain behaviour due to viscous properties of geogrid reinforcement," *Geosynthetics International*, vol. 10, no. 6, pp. 176–199, 2003.
- [2] W. Kongkitkul, W. Tabsombut, C. Jaturapitakkul, and F. Tatsuoka, "Effects of temperature on

the rupture strength and elastic stiffness of geogrids," *Geosynthetics International*, vol. 19, no. 2, pp. 106–123, 2012.

- [3] W. Kongkitkul, D. Hirakawa, F. Tatsuoka, and T. Uchimura, "Viscous deformation of geosynthetic reinforcement under cyclic loading conditions and its model simulation," *Geosynthetics International*, vol. 11, no. 2, pp. 73–99, 2004.
- [4] J. S. Thornton, "Conventional and stepped isothermal methods for characterizing long-term creep strength of polyester geogrids," *Proc. of the 6th International Conference on Geosynthetics*, Atlanta, vol. 2, pp. 691–698, 1998.
- [5] W. Kongkitkul and F. Tatsuoka, "A theoretical framework to analyse the behaviour of polymer geosynthetic reinforcement in temperature-accelerated creep tests," *Geosynthetics International*, vol. 14, no. 1, pp. 23–38, 2007.
- [6] F. Tatsuoka, "Inelastic deformation characteristics of geomaterial," *Solid Mechanics and its Applications*, vol. 146, pp. 1–108, 2007.
- [7] W. Kongkitkul, D. Hirakawa, and F. Tatsuoka, "Residual deformation of geosynthetic-reinforced sand in plane strain compression affected by viscous properties of geosynthetic reinforcement," *Soils and Foundations*, vol. 48, no. 3, pp. 333–352, 2008.
- [8] U. Aqil, F. Tatsuoka, T. Uchimura, T. N. Lohani, Y. Tomita, and K. Matsushima, "Strength and deformation characteristics of recycled concrete aggregate as a backfill material," *Soils and Foundations*, vol. 45, no. 5, pp. 53–72, 2005.

