อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรต่อพฤติกรรมการคืบของทรายออสตัน
Effects of Cyclic Temperature Change on the Creep Behavior of Hostun Sand

คณิน วัฒนไตรภพ[1,*], โฆษิต จริยาทัศน์กร[2] และ วรัช ก้องกิจกุล[3]

[1,2,3] *ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพมหานคร*
**Corresponding author; E-mail address: kanin.vatta@kmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

วัสดุทางวิศวกรรมเทคนิคธรณี ทั้งวัสดุในที่และวัสดุถมกลับ อาทิ กรวดและทราย มักต้องรองรับน้ำหนักจากโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธา เช่น อาคาร สะพาน และกำแพงกันดิน ซึ่งโดยทั่วไปสามารถสมมติให้มีความเค้นกระทำคงที่ เมื่อวัสดุเหล่านี้ได้รับแรงกระทำคงที่จะเกิดการเสียรูปที่เรียกว่า "การคืบ" ซึ่งพฤติกรรมการคืบระยะยาวนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่ออายุการใช้งานของโครงสร้าง นอกจากแรงกระทำคงที่แล้ว วัสดุทางวิศวกรรมเทคนิคธรณียังต้องเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแวดล้อม เช่น การแปรผันของอุณหภูมิดินตามสภาพอากาศ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือน ค่าโมดูลัสอีลาสติก และพฤติกรรมการคืบของทราย อย่างไรก็ตาม อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรต่อพฤติกรรมการคืบยังไม่เคยได้รับการศึกษามาก่อน งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรต่อพฤติกรรมการคืบของทรายออสตัน โดยทำการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบควบคุมอุณหภูมิ ด้วยการเฉือนตัวอย่างไปยังค่าอัตราส่วนความเค้นต่าง ๆ จากนั้นควบคุมให้คงที่เพื่อให้เกิดการคืบ พร้อมทั้งจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรในช่วงระหว่าง 30 ถึง 60 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การคืบภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรไม่ส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของทรายออสตัน แต่ส่งผลกระทบให้ความเครียดการคืบมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าความเครียดการคืบที่อุณหภูมิคงที่ และภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรความแตกต่างของค่าความเครียดการคืบระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในวัฏจักรการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราความเค้นเพิ่มมากขึ้น

คำสำคัญ: การคืบ, การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักร, ทรายออสตัน, การทดสอบแรงอัดสามแกน

Abstract

Geotechnical engineering materials, both in-situ and backfill materials such as gravel and sand, must support loads from civil engineering structures like buildings, bridges, and retaining walls, which can be assumed to apply constant stress. When subjected to constant loads, these materials undergo deformation known as "creep," a long-term behavior crucial for structural service life. Besides constant loading, geotechnical materials also experience environmental temperature changes, such as soil temperature variations with atmospheric conditions. Previous research has shown that temperature differences affect sand's shear strength, elastic modulus, and creep behavior. However, the influence of cyclic temperature changes on creep behavior has not been studied. This research investigates the influence of cyclic temperature changes on the creep behavior of Hostun sand through temperature-controlled triaxial compression tests, shearing samples to various stress ratios after which they are kept constant, while simulating cyclic temperature variations between 30 and 60 degrees Celsius. The results show that the creep strain mobilized together with cyclic temperature changes does not influence the shear strength of Hostun sand. Nevertheless, cyclic temperature changes significantly increase the creep strain, resulting in higher values compared to that under constant temperature conditions. Additionally, as the stress ratio increases, the difference in creep strain between the maximum and minimum temperature points during cyclic temperature changes decreases.

Keywords: Creep, Cyclic temperature change, Hostun sand, Triaxial compression test

1. บทนำ

วัสดุทางวิศวกรรมเทคนิคธรณี อาทิ กรวดและทราย เป็นหนึ่งในวัสดุสำคัญสำหรับการก่อสร้าง ไม่ว่าจะเป็นวัสดุในที่หรือวัสดุถมกลับ โดยที่วัสดุทางเทคนิคธรณีมักได้รับแรงกระทำจากน้ำหนักโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธา เช่น อาคาร สะพาน และกำแพงกันดิน ซึ่งการรับแรงกระทำจากโครงสร้างเหล่านี้ เปรียบเสมือนการรับแรงคงที่ตลอดเวลาและเมื่อวัสดุเหล่านี้ได้รับแรงกระทำคงที่เป็นเวลานาน จะเกิดการเสียรูปตามเวลา พฤติกรรมนี้เรียกว่า การคืบ (Creep) ซึ่งเมื่อพฤติกรรมนี้เกิดขึ้นกับวัสดุในระยะยาวจะส่งผลต่อคุณภาพการใช้งานและเสถียรภาพการใช้งานของโครงสร้างได้ การศึกษาและเข้าใจในพฤติกรรมการคืบจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบและการประเมินความเสี่ยงของงานโครงสร้างทางด้านเทคนิคธรณี ตลอดจนโครงสร้างที่สร้างบนวัสดุเหล่านี้ [1-2] นอกจากนี้วัสดุทางเทคนิคธรณียังต้องเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแวดล้อม กล่าวคือการแปรผันของอุณหภูมิดินที่เกิดจากสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลง ตัวอย่างเช่น ในการสำรวจผลกระทบจากอุณหภูมิแวดล้อมต่อสะพานไร้รอยต่อ (Integral bridge) [3-4] พบว่าเมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงแบบวัฏจักรจะส่งผลต่อเสถียรภาพของโครงสร้างสะพาน ไม่ว่าจะเป็นการเสียรูปของโครงสร้างเนื่องจากดินเกิดการขยายหรือหดตัว หรือการเอียงของฐานรากสะพานที่เกิดจากการขยายหรือหดตัวของดิน

ปัจจุบันจึงเริ่มมีการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมทางอุณหพลศาสตร์ (Thermo-mechanical behavior) ของวัสดุทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีมากยิ่งขึ้น เช่น การทดสอบแรงอัดสามแกนแบบกระบอกทรงกลวง [5] เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณภูมิต่อกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของทรายอิ่มตัวด้วยน้ำ และ การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกกรรมทางกลของดินเหนียวด้วยการทดสอบการรับแรงอัดสามแกนแบบควบคุมอุณหภูมิ [6] โดยที่งานวิจัยทั้งสองชิ้นที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการให้อุณหภูมิคงที่ที่แตกต่างกันเท่านั้น แต่หากอ้างอิงจากการสำรวจข้อมูลของอุณหภูมิในดินพบว่า อุณหภูมิของดินนั้นไม่ได้คงที่ (Constant temperature) ตลอดเวลาแต่มีการเปลี่ยนแปลงแบบวัฏจักร (Cyclic temperature change) จึงส่งผลให้เริ่มมีงานวิจัยบางส่วนที่ศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของดินแบบวัฏจักร ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของดิน เช่น อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรส่งผลต่อค่าอีลาสติกยืดหยุ่นของดินเหนียว และการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรของดิน [7-8]

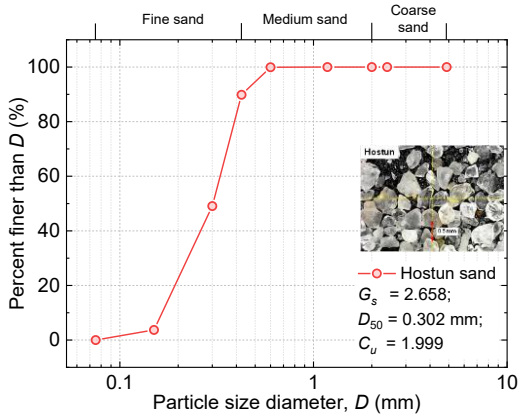
อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ศึกษาพฤติกรรมของดินภายใต้การให้อุณหภูมิแบบวัฏจักรยังคงมีอยู่อย่างจำกัดและยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาพฤติกรรมนี้ควบคู่กับพฤติกรรมการคืบของทราย จึงนำมาสู่วัตถุประสงค์ในงานวิจัยครั้งนี้ คือ 1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการคืบของทรายออสตันด้วยการทดสอบแรงอัดสามแกนที่ถูกควบคุมอุณหภูมิให้มีการเปลี่ยนแปลงแบบวัฏจักร และ 2. เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการคืบของทรายออสตันที่ระหว่างสภาวะที่อุณหภูมิคงที่และสภาวะที่อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงแบบวัฏจักร วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

1.1 ทรายออสตัน (Hostun sand)

ในการศึกษานี้เลือกใช้ทรายออสตันในการทดสอบการรับแรงอัดสามแกนภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักร ทรายออสตันเป็นทรายที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการศึกษาทางด้านวิศวกรรมเทคนิคธรณี [9-10] โดยก่อนการนำมาใช้งานทดสอบทรายออสตันจะถูกล้างชำระฝุ่นด้วยน้ำประปาและอบจนแห้ง ขนาดและลักษณะของทรายออสตันที่ใช้ในการศึกษานี้แสดงในรูปที่ 1 และมีสมบัติกายภาพและสมบัติดัชนีแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติกายภาพและสมบัติดัชนีของทรายออสตัน

G_s (-)	e_{max} (-)	e_{min} (-)	D_{50} (mm)	C_u (-)	Particle shape
2.658	0.950	0.586	0.302	1.999	Sub-angular to angular



รูปที่ 1 การกระจายตัวขนาดคละและลักษณะของทรายออสตัน [11]

1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกนแบบควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controlled triaxial compression apparatus) ได้เริ่มต้นพัฒนาจากการศึกษาของ Punya-in และ Kongkitkul [12] ต่อมาระบบการควบคุมอุณหภูมิได้ถูกพัฒนาให้มีความเสถียรมากขึ้นในการศึกษาของ Jariyatatsakorn และ Kongkitkul [11] อย่างไรก็ตามเครื่องมือทดสอบนี้ยังขาดระบบการลดอุณหภูมิให้กับตัวอย่าง เพื่อให้สามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรได้ ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาระบบระบายความร้อนโดยการใช้หม้อน้ำ (Radiator) ดังรูปที่ 2 ระบบควบคุมอุณหภูมิมีการทำงานดังนี้ น้ำรอบตัวอย่าง (Cell water) จะถูกให้ความร้อนโดยการใช้เครื่องทำน้ำร้อน (Heater) และจะถูกลดอุณหภูมิโดยการใช้หม้อน้ำพร้อมพัดลมระบายความร้อน

ในการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบควบคุมอุณหภูมิจะใช้เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple Type-K) ทั้งหมดจำนวนสามตัวแสดงดังรูปที่ 2 โดยตัวที่หนึ่งและสองจะติดตั้งอยู่ภายในเซลล์แรงดัน (Chamber) โดยหนึ่งตัวจะใช้สำหรับควบคุมอุณหภูมิของน้ำภายในเซลล์แรงดันผ่านตู้ควบคุมอุณหภูมิ (Thermal controller) และอีกหนึ่งตัวใช้สำหรับเก็บค่าอุณหภูมิของน้ำภายในเซลล์แรงดันระหว่างการทดสอบ ในขณะที่เทอร์โมคัปเปิลตัวที่สามใช้สำหรับวัดอุณหภูมิบริเวณตัวอย่าง ซึ่งจะมีลักษณะเป็นเส้นด้ายกันน้ำที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ติดตั้งภายในตัวอย่างทรายเพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนตัวอย่างทรายในการทดสอบ

ในการทำงานของระบบทำความร้อนและระบบระบายความร้อนจะมีตู้ควบคุมเพื่อสลับการทำงานโดยใช้โซลินอยวาล์ว (Solenoid valve) ดังรูปที่ 2 สลับระบบทำความร้อนและระบบระบายความร้อน ซึ่งโซลินอยวาล์วจะรับสัญญาณเอ้าต์พุตจากตู้ควบคุมอุณหภูมิ เรียกว่าระบบป้อนกลับ (Feedback control) ซึ่งหลักการทำงาน คือ เมื่ออุณหภูมิของน้ำต่ำกว่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ระบบจะรับสัญญาณเพื่อเปลี่ยนเป็นระบบทำความร้อน ในทางกลับกันเมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงกว่าอุณหภูมิเป้าหมายสัญญาณที่ส่งจะถูกตัดและระบบจะถูกปรับเป็นระบบระบายความร้อนแทน

นอกจากนี้เพื่อรองรับการทดสอบที่ใช้ระยะเวลานานจึงจำเป็นต้องใช้ปั๊มน้ำหมุนเวียนน้ำระหว่างเซลล์แรงดันและระบบทำความร้อนและระบบระบายความร้อนจำนวนสองตัวสลับการทำงานโดยจะถูกควบคุมด้วยตู้ควบคุมปั๊ม (Pump unit control) โดยการทำงานจะตั้งเครื่องจับเวลา (Timer) ให้สลับกันทำงานทุก ๆ 30 นาที

2. วิธีการทดสอบ

2.1 การเตรียมตัวอย่างรับแรงอัดสามแกน

การเตรียมตัวอย่างทรายออสตันเพื่อการทดสอบแรงอัดสามแกนเริ่มต้นจากการทาจารบีซิลิโคนสุญญากาศ (High vacuum silicone grease) ลงบนผิวของฐาน (Pedestal) และ ฝาบน (Top cap) ด้วยความหนา 50 ไมครอน [13] แล้วจึงนำแผ่นยางพารามาประกบ หลังจากนั้นติดตั้งเมมเบรนให้ครอบฐานและรัดให้แน่น ทำการดึงเมมเบรนให้ติดกับโมลอย่างแนบสนิทด้วยแรงสุญญากาศและโปรยทรายออสตันด้วยเครื่องมือร่อนผ่านตะแกรงหลายชั้น (Multi-sieving pluviating machine) เพื่อควบคุมความหนาแน่นของทรายให้สม่ำเสมอทั่วทั้งตัวอย่าง [14] หลังจากนั้นจึงนำฝาโมลมาประกบและรัดให้แน่นอีกครั้ง ต่อมาจึงลดแรงสุญญากาศต่อโมลลงจนหมดแล้วให้แรงสุญญากาศบางส่วน (Partial vacuuming) เท่ากับ 20 กิโลปาสคาลผ่านทางฝาบนและฐานของตัวอย่างแล้วจึงแกะโมลออกจากนั้นจึงรอเป็นเวลา 30 นาทีเพื่อให้ตัวอย่างเข้าสู่สภาวะสมดุล

2.2 การทดสอบการรับแรงอัดสามแกน

เมื่อแกะโมลออกจากตัวอย่างทรายแล้วทำการติดตั้ง Thermocouple เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร เข้าในตัวอย่างทรายผ่านทางฝาบน ติดตั้ง Thermocouple สองตัวที่เหลือไว้บริเวณด้านข้างของตัวอย่างในระดับที่เท่ากัน และติดตั้งสายน้ำเข้าเพื่อลดการกระแทกของน้ำที่จะส่งผลกระทบต่อตัวอย่างในระหว่างการทดสอบ หลังจากนั้นนำเซลล์แรงดันมาครอบและค่อย ๆ เติมน้ำเข้าไปในเซลล์แรงดัน จนน้ำท่วมทั้งตัวอย่าง จากนั้นจึงลดแรงสุญญากาศบางส่วนพร้อมกันกับเพิ่มแรงดันเซลล์ (Cell pressure) จนกระทั่งแรงสุญญากาศหมดไปและแรงดันเซลล์ที่กระทำกับตัวอย่างเท่ากับ 20 กิโลปาสคัล หลังจากนั้นเพิ่มแรงดันเซลล์เพื่ออัดตัวอย่างแบบเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic consolidation) จนถึง 30 กิโลปาสคัล

ต่อมาจึงเริ่มเพิ่มอุณหภูมิของน้ำจนกระทั่งอุณหภูมิของทรายถึงอุณหภูมิเป้าหมาย หลังจากนั้นรอเวลานาน 120 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของน้ำในเซลล์แรงดันและอุณหภูมิภายในตัวอย่างมีค่าเท่ากัน จึงเริ่มเฉือนตัวอย่างด้วยเครื่องกดความแม่นยำสูง (Precision compression machine) ภายใต้การให้อุณหภูมิแบบคงที่ จนถึงอัตราส่วนความเค้น (Stress ratio, R) เป้าหมาย และควบคุมให้มีค่าคงที่เพื่อให้เกิดการคืบ อัตราส่วนความเค้นในการศึกษานี้มีนิยามคือ อัตราส่วนระหว่างความเค้นประสิทธิผลแกนหลักและแกนรอง ($R=\sigma'_1/\sigma'_3$) จากนั้นจึงควบคุมอุณหภูมิแก่ตัวอย่างให้มีการเปลี่ยนแปลงแบบวัฏจักรในระหว่างการคืบเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเครียดการคืบที่เกิดขึ้นภายใต้พิสัยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรที่แตกต่างกันกัน

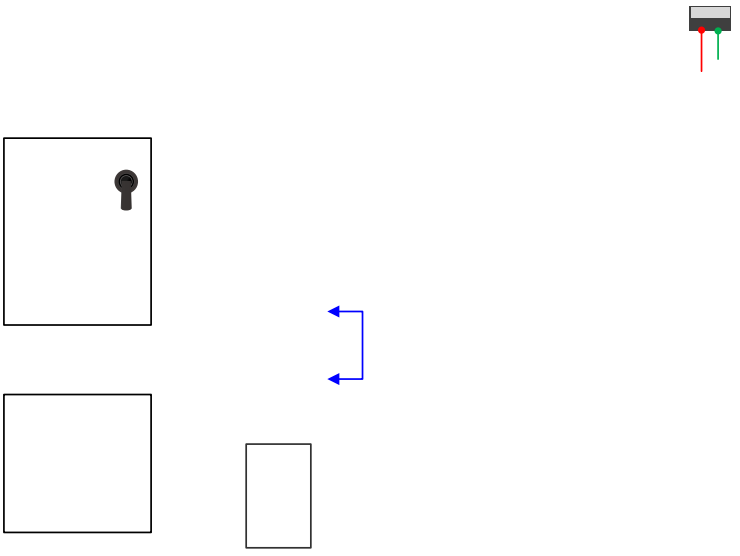
2.3 การปรับแก้ค่าการขยายและหดตัวของอุปกรณ์ทดสอบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ในการทดสอบแรงอัดสามแกนเมื่อน้ำในเซลล์แรงดันมีอุณหภูมิสูงขึ้นจากระบบทำความร้อน จะส่งผลให้ตัวอย่างทราย ฐาน ฝาบน รวมไปถึงเพลากดตัวอย่าง (piston) เกิดการขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal expansion) ซึ่งหมายความว่า ค่าการเสียรูปที่วัดได้จากการทดสอบไม่ใช่ค่าการเสียรูปที่แท้จริงที่มาจากการเฉือนและการคืบเท่านั้น ดังนั้นเพื่อที่จะได้ค่าการเสียรูปที่แท้จริงของตัวอย่าง จึงจำเป็นต้องมีการปรับแก้ค่าการเสียรูปส่วนเกินซึ่งเกิดจากการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของอุปกรณ์ที่กล่าวมาข้างต้น โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

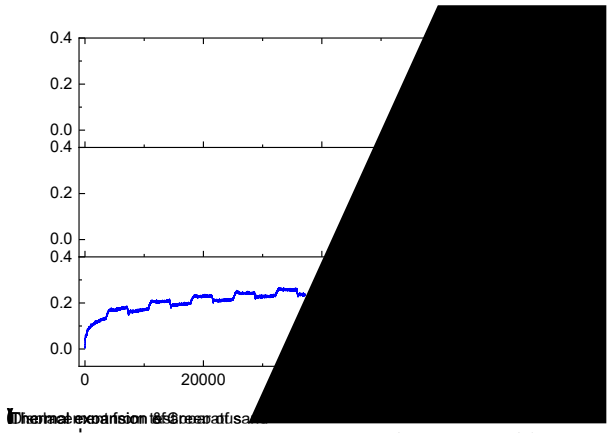
$$\Delta h = \alpha \times \Delta T \times h_0 \quad (1)$$

เมื่อ Δh คือ ความสูงที่เปลี่ยนแปลงจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (mm)
α คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของอุปกรณ์ (/°C)
ΔT คือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (°C)
h_0 คือ ความสูงเริ่มต้นของอุปกรณ์ (mm)

การทดสอบแรงอัดสามแกนแบบควบคุมอุณหภูมิในการศึกษานี้ จะมีการปรับแก้ค่าการเสียรูปที่วัดได้โดยนำไปหักออกด้วยค่าการเสียรูปที่เกิดจากการขยายตัวจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอุปกรณ์ โดยที่ h_0 มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 260 มิลลิเมตร ซึ่งคือผลรวมของความหนาฐาน ความหนาฝาบน และความยาวแท่งกดที่อยู่ภายในเซลล์แรงดัน อย่างไรก็ตาม h_0 จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าการเสียรูปของทรายที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบทำจากสแตนเลส 304 (Stainless 304) มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเชิงเส้น (Linear coefficient of thermal expansion, α) เท่ากับ 17.6 x 10^{-6} /°C รูปที่ 3 แสดงประวัติเวลาความเครียดการคืบในระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรก่อนและหลังการปรับแก้ค่าการขยายตัวเนื่องจากขยายและหดตัวของอุปกรณ์ทดสอบ



รูปที่ 2 เครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนที่สามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรได้



รูปที่ 3 ประวัติเวลาการเสียรูปของตัวอย่างในระหว่างการให้อุณหภูมิแบบวัฏจักร (ก) การเสียรูปก่อนการปรับแก้ (ข) ค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของอุปกรณ์ทดสอบและ (ค) การเสียรูปหลังจากการปรับแก้

2.4 โปรแกรมการทดสอบ

2.4.1 การทดสอบแรงอัดสามแกนด้วยอุณหภูมิคงที่ (SL-CT)

การทดสอบแรงอัดสามแกนด้วยอุณหภูมิคงที่ในการศึกษานี้จะใช้ประวัติการให้แรงเฉือนดังรูปที่ 4(ก) เริ่มจากช่วง $O \rightarrow A$ ที่ให้แรงเฉือนอย่างต่อเนื่อง (Monotonic loading, ML) ที่อัตราความเครียดแนวแกน ($\dot{\varepsilon}$) เท่ากับ 0.075 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที จนกระทั่งถึงอัตราส่วนความเค้นเป้าหมาย โดยอัตราส่วนความเค้นเป้าหมายของการศึกษาครั้งนี้ คือ 2 และ 4 ต่อมาจึงให้แรงกระทำคงค้าง (sustained (creep) loading, SL) นาน 1,200 นาที (20 ชั่วโมง) (จาก $A \rightarrow B$) จากนั้นจึงให้แรงเฉือนอย่างต่อเนื่องแก่ตัวอย่างอีกครั้งจนสิ้นสุดการทดสอบที่ความเครียดเท่ากับเท่ากับ 16 เปอร์เซ็นต์ (จาก $B \rightarrow C$) โดยอุณหภูมิที่ใช้ตลอดการทดสอบในรูปแบบนี้เป็นการให้อุณหภูมิแบบคงที่เท่ากับ 30 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4(ก)

2.4.2 การทดสอบแรงอัดสามแกนที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรในระหว่างการคืน (SL-CYT)

การทดสอบแรงอัดสามแกนที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรจะใช้ประวัติของแรงดังรูปที่ 4(ก) เช่นเดียวกันกับรูปแบบ SL-CT โดยเริ่มจากช่วง $O \rightarrow A$ ที่ให้แรงเฉือนอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งถึงค่า R เป้าหมายเท่ากับ 2 และ 4 ซึ่งในช่วงนี้อุณหภูมิตัวอย่างทดสอบจะถูกรักษาให้คงที่ที่อุณหภูมิอ้างอิงที่เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

เมื่อถึงค่า R เป้าหมายแล้ว แรงเฉือนจะถูกควบคุมให้คงที่เพื่อให้เกิดการคืน ($A \rightarrow B$) เป็นระยะเวลา 1,200 นาที (20 ชั่วโมง) ซึ่งเท่ากับเวลาการทดสอบการคืนแบบ SL-CT ในระหว่างการให้แรงเฉือนคงที่จะทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรจำนวน 10 รอบ ประกอบด้วยช่วงเพิ่มอุณหภูมิ และลดอุณหภูมิ ช่วงละ 60 นาที รวมเป็น 120 นาที (2 ชั่วโมง) ต่อหนึ่งรอบ ซึ่งจะเริ่มทันทีเมื่อเฉือนตัวอย่างจนมาถึงค่า R เป้าหมาย โดยมีพิสัยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในวัฏจักรที่ไม่เท่ากัน กล่าวคือ อุณหภูมิต่ำสุดในระหว่างการเปลี่ยนแปลงแบบวัฏจักรจะมีค่าเท่ากันเท่ากับอุณหภูมิอ้างอิงเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสูงสุดจะมีค่าแตกต่างกันคือ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4(ข) เพื่อศึกษาอิทธิพลของพิสัยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรต่อความเครียดการคืบ

เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรแก่ตัวอย่างครบ 10 รอบ จึงเริ่มมีการให้แรงเฉือนการกระทำอย่างต่อเนื่องอีกครั้ง จนกระทั่งความเครียดเท่ากับ 16 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 4(ก) ($B \rightarrow C$)ในขั้นตอนนี้ อุณหภูมิของตัวอย่างจะถูกรักษาให้คงที่เท่ากับอุณหภูมิอ้างอิงจนสิ้นสุดการทดสอบ

โปรแกรมการทดสอบออกแบบให้ทำการทดสอบแบบ SL-CT ที่ค่า R เป้าหมายที่แตกต่างกัน ในตัวอย่างทดสอบเดียวกัน (การทดสอบที่ 5 และ 6) และคนละตัวอย่างกัน (การทดสอบที่ 1 ถึง 4) และทำการทดสอบแบบ SL-CYT ที่ค่า R เป้าหมายที่แตกต่างกันและมีพิสัยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ในตัวอย่างทดสอบเดียวกัน (การทดสอบที่ 9 และ 10) และคนละตัวอย่างทดสอบกัน (การทดสอบที่ 7 และ 8) ดังแสดงในตารางที่ 2 เพื่อการเปรียบเทียบความเครียดการคืบที่อุณหภูมิคงที่ที่แตกต่างกันและเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีพิสัยการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันและที่ค่า R เป้าหมายที่แตกต่างกัน

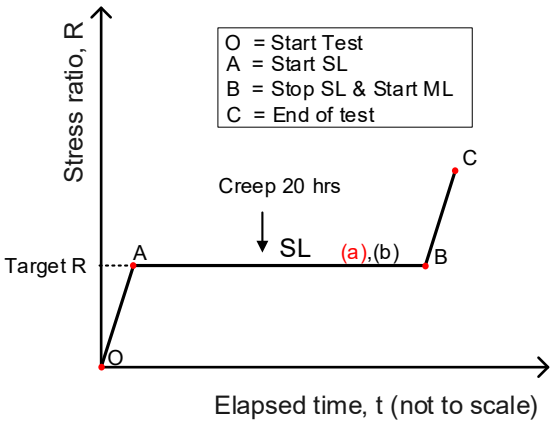
3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

3.1 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอุณภูมิแบบวัฏจักรต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด

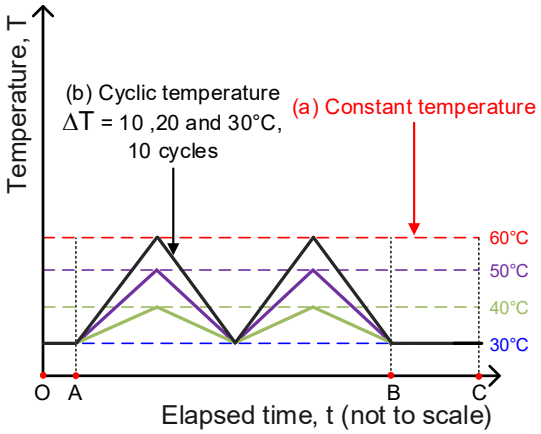
รูปที่ 5(ก) เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเค้นและความเครียดระหว่างการทดสอบแบบ SL-CT ที่อุณหภูมิเท่ากับ 30 °C ที่มีค่า R เป้าหมายเท่ากับ 2 และ 4 (การทดสอบที่ 1 และ 3)และการทดสอบแบบ SL-CYT ที่มีค่า R เป้าหมายเท่ากับ 2 และมีพิสัยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 30 – 40 °C (การทดสอบที่ 7) ภายหลังการคืบ อุณหภูมิในการทดสอบทั้งสามอย่างจะถูกควบคุมให้คงที่เท่ากับ 30 °C แล้วถูกเฉือนอย่างต่อเนื่องจนความเครียดแนวแกนเท่ากับ 16 % จากรูปที่ 5(ข) นี้จะเห็นได้ว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของตัวอย่างทดสอบมีค่าใกล้เคียงกันมาก หรือกล่าวได้ว่าการคืบที่ค่า R แตกต่างกัน และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรในระหว่างการคืบ ไม่ส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของทรายออสตัน ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดจะแปรผันกับอุณหภูมิ ณ ขณะที่กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกำลังจะเกิดขึ้น ดังการศึกษาของ Jariyatatsakorn and Kongkitkul [11]

ตารางที่ 2 โปรแกรมและรายละเอียดการทดสอบของทรายออสตัน

Test No.	Test name	Temperature type	T (°C)	Target R for SL	e_0 (-)	D_r (%)
1	SL-CT_T30_R2	Constant temperature	30	2	0.640	85.06
2	SL-CT_T40_R2		40		0.645	83.80
3	SL-CT_T30_R4		30	4	0.653	81.50
4	SL-CT_T40_R4		40		0.640	85.08
5	SL-CT_T50_R2,4		50	2, 4	0.655	81.05
6	SL-CT_T60_R2,4		60		0.647	83.22
7	SL-CYT_T40_R2	Cyclic temperature	30-40	2	0.644	83.94
8	SL-CYT_T40_R4		30-40	4	0.647	83.15
9	SL-CYT_T50_R2,4		30-50	2, 4	0.657	80.54
10	SL-CYT_T60_R2,4		30-60		0.653	81.46

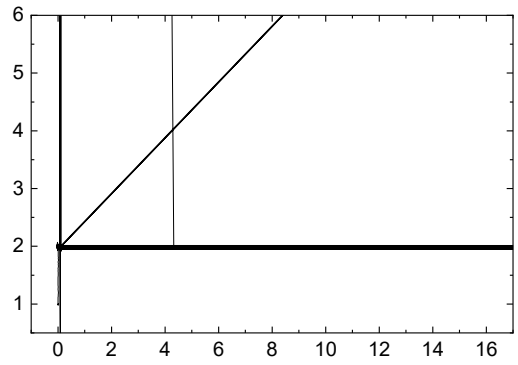


(ก) ประวัติเวลาของอัตราส่วนความเค้นสำหรับการทดสอบแบบ SL-CT และ SL-CYT

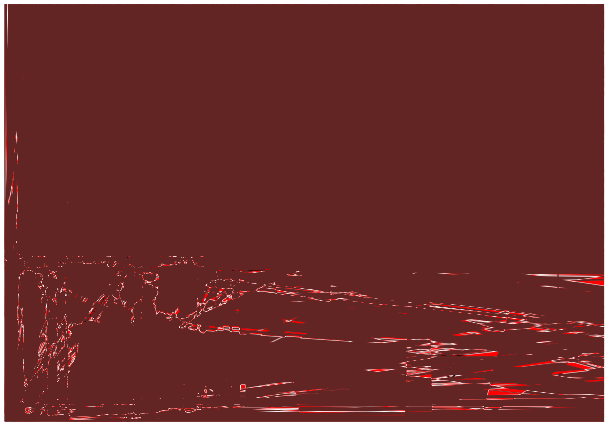


(ข) ประวัติเวลาของอุณหภูมิสำหรับการทดสอบแบบ SL-CT และ SL-CYT

รูปที่ 4 โปรแกรมการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ค่าต่างๆ (SL-CT) และแบบที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักร (SL-CYT)



(ก) ช่วงความเครียดแนวแกนทั้งหมด

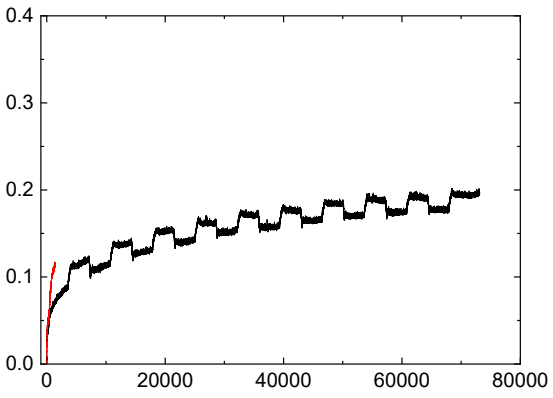


(ข) ช่วงความเครียดแนวแกนก่อนจุดสูงสุด

รูปที่ 5 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเค้นและความเครียดแนวแกนระหว่างการทดสอบแบบ SL-CT ที่มีค่า R เป้าหมายเท่ากับ 2 และ 4 ที่อุณหภูมิเท่ากับ 30 °C และ SL-CYT ที่มีค่า R เป้าหมายเท่ากับ 2 ที่มีพิสัยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 30 – 40 °C

3.2 ความเครียดการคืบเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงแบบวัฏจักร

จากการทดสอบแรงอัดสามแกนและควบคุมแรงเฉือนคงที่เพื่อให้เกิดการคืบที่ค่า R เดียวกันภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรด้วยพิสัยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน พบว่า เมื่อพิสัยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรในตัวอย่างทรายเพิ่มมากขึ้น ความเครียดการคืบของทรายจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งแสดงว่าค่าความเครียดการคืบภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรจะแปรผันกับพิสัยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าเมื่อพิสัยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น ความแตกต่างระหว่างค่าความเครียดการคืบที่จุดสูงสุดและจุดต่ำสุดของแต่ละรอบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก็มีมากขึ้นด้วย ซึ่งจะขออธิบายต่อในภายหลัง



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบประวัติเวลาความเครียดการคืบภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรที่มีพิสัยการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน

3.3 การเปรียบเทียบพฤติกรรมการคืบเมื่ออุณหภูมิคงที่และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแบบวัฏจักร

เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรจึงจำเป็นที่จะต้องมีการทดสอบการคืบภายใต้อุณหภูมิคงที่ที่แตกต่างกัน (SL-CT) ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิเป้าหมายสูงสุดและต่ำสุดของการทดสอบด้วยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักร (SL-CYT) รูปที่ 7

เปรียบเทียบประวัติเวลาของอุณหภูมิและความเครียดการคืบระหว่างการทดสอบแบบ SL-CT ที่อุณหภูมิ 30 และ 40 °C และการทดสอบแบบ SL-CYT ที่มีพิสัยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 30 – 40 °C จากรูปนี้จะพบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรจะส่งผลให้ความเครียดการคืบมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการให้อุณหภูมิแบบคงที่ที่อัตราส่วนความเค้นเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่าความเครียดการคืบภายใต้อุณหภูมิคงที่จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ในขณะที่เมื่อสังเกตความเครียดการคืบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรพบว่าเมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วงขาขึ้น ค่าความเครียดการคืบจะมีค่าน้อยกว่าในขณะที่อุณหภูมิอยู่ในช่วงขาลง ทั้งนี้เพราะอนุภาคของทรายเกิดการขยายและหดตัว ตามลำดับ เนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดเวลาในระหว่างการคืบ จากผลการทดลองที่พบว่าค่าความเครียดการคืบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักร สามารถอธิบายได้ทางกลไกว่า การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทำให้อนุภาคทรายเกิดการขยายตัวและหดตัวซ้ำ ๆ ซึ่งส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคลดลง และมีการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างจุลภาคภายในตัวอย่าง การเปลี่ยนแปลงนี้ช่วยส่งเสริมให้เกิดการเสียรูปสะสมตามเวลาเพิ่มขึ้นภายใต้แรงกระทำคงที่ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของพฤติกรรมการคืบ [15-16]

เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดการคืบภายใต้อุณหภูมิแบบวัฏจักร ($\varepsilon_{CP\text{-}CYT}$) และความเครียดการคืบภายใต้อุณหภูมิคงที่ ($\varepsilon_{CP\text{-}CT}$) หากพิจารณาความเครียดการคืบที่สูงที่สุดในแต่ละวัฏจักรที่ได้จากการทดสอบแบบ SL-CYT จะสามารถนำมาวาดเส้นขอบเขต (Envelope) ตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งได้จากการฟิตด้วยสมการไม่เชิงเส้น (Non-linear fitting) มาเปรียบเทียบกับ $\varepsilon_{CP\text{-}CT}$ ที่ได้จากการทดสอบแบบ SL-CT เพื่อหาความสัมพันธ์ของความเครียดการคืบที่เพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรจากสมการที่ 2

$$\alpha_{CYT} = \frac{\varepsilon_{CP-CYT}}{\varepsilon_{CP-CT}} \tag{2}$$

โดยที่ α_{CYT} คือ อัตราส่วนความเครียดการคืบที่เพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักร เมื่อเปรียบเทียบกับความเครียดการคืบที่อุณหภูมิคงที่ แสดงได้ดังรูปที่ 9 ซึ่งพบว่า α_{CYT} มีแนวโน้มที่ค่อนข้างคงที่และมีความเบี่ยงแบนมาตรฐานเท่ากับ 0.06763 จึงนำค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบของแต่ละวัฏจักรมาหาค่าเฉลี่ย ($\alpha_{CYT,avg}$) สำหรับค่า R และพิสัยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักร (ΔT) ที่แตกต่างกัน

จากผลการทดสอบทั้งหมดตามตารางที่ 2 จะสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง $\alpha_{CYT,avg}$ และ ΔT สำหรับค่า R ที่แตกต่างกันได้ดังรูปที่ 10 ซึ่งจะเห็นได้ว่าจุดข้อมูลเหล่านี้มีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น ดังแสดงในสมการที่ 2

$$\alpha_{CYT,avg} = 1 + m \times \Delta T \tag{3}$$

เมื่อ $\alpha_{CYT,avg}$ คือ ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนความเครียดการคืบที่เพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักร; m คือ ค่าความชันจากการฟิตสมการเส้นตรง (linear fit) และ ΔT คือพิสัยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (°C) โดยที่ m มีค่าเท่ากับ 0.07802 และ 0.07150 สำหรับที่ R เท่ากับ 2 และ 4 ตามลำดับ ซึ่งกล่าวคือ หากนำความเค้นการคืบที่ R เดียวกันภายใต้อุณหภูมิอ้างอิงเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส และทราบพิสัยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักร จะสามารถทำนายความเครียดการคืบภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรได้ด้วยค่า $\alpha_{CYT,avg}$

3.4 ความแตกต่างของค่าความเครียดการคืบระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในวัฏจักรการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

จากที่กล่าวมาในหัวข้อที่แล้ว เส้นขอบเขตของ $\varepsilon_{CP\text{-}CYT}$ สามารถได้มาจากการพิจารณา ณ ที่จุดสูงสุด-ต่ำสุดในแต่ละวัฏจักร ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8 เส้นขอบเขตของอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสจะอยู่สูงกว่าอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

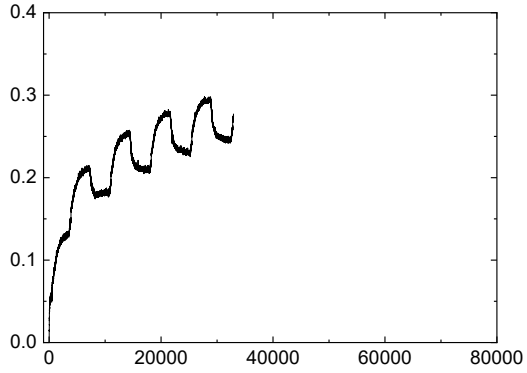
เส้นขอบเขตนี้ได้จากการฟิตด้วยสมการไม่เชิงเส้น (Non-linear fitting) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความแตกต่างของค่าความเครียดการคืบระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในวัฏจักรการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Creep axial strain increment during cyclic temperature change, $\Delta\varepsilon_{CP\text{-}CYT}$) จากการนำค่าบนเส้นขอบเขตสูงสุดลบด้วยค่าบนเส้นขอบเขตต่ำสุด ณ เวลาเดียวกันที่ทุก ๆ 7,200 วินาที โดยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 11 ซึ่งพบว่า ค่า $\Delta\varepsilon_{CP\text{-}CYT}$ ค่อนข้างคงที่ ดังนั้นค่า $\Delta\varepsilon_{CP\text{-}CYT}$ จากแต่ละรอบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยสำหรับค่า R ที่ทำการทดสอบการคืบและพิสัยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักร (ΔT) ที่แตกต่างกัน

จากผลการทดสอบทั้งหมดตามตารางที่ 2 และการวิเคราะห์ค่า $\Delta\varepsilon_{CP\text{-}CYT}$ สำหรับค่า R และ ΔT ที่แตกต่างกัน จะสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของค่า $\Delta\varepsilon_{CP\text{-}CYT}$ ($\Delta\varepsilon_{CP\text{-}CYT,avg}$) และ ΔT สำหรับค่า R ที่แตกต่างกันได้ดังรูปที่ 12 ซึ่งจะเห็นได้ว่าจุดข้อมูลเหล่านี้มีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น ดังแสดงในสมการที่ 4

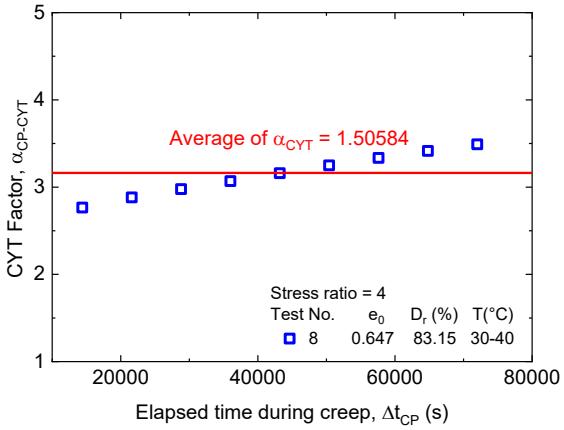
$$\Delta\varepsilon_{CP-CYT,avg} = M_{CP-CYT} \times \Delta T \tag{4}$$

เมื่อ $\Delta\varepsilon_{CP\text{-}CYT,avg}$ คือ ค่าเฉลี่ยความแตกต่างของค่าความเครียดการคืบระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในวัฏจักรการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (%), $M_{CP\text{-}CYT}$ คือความชันของความสัมพันธ์ (%/°C) และ ΔT คือพิสัยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (°C) โดยค่า $M_{CP\text{-}CYT}$ นี้มีค่าเท่ากับ 0.00247 และ 0.00206 สำหรับการคืบที่ R เท่ากับ 2 และ 4 ตามลำดับ หรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อ R เพิ่มมากขึ้นอัตราความแตกต่างของค่าความเครียดการคืบระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในวัฏจักรการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีค่าลดลง

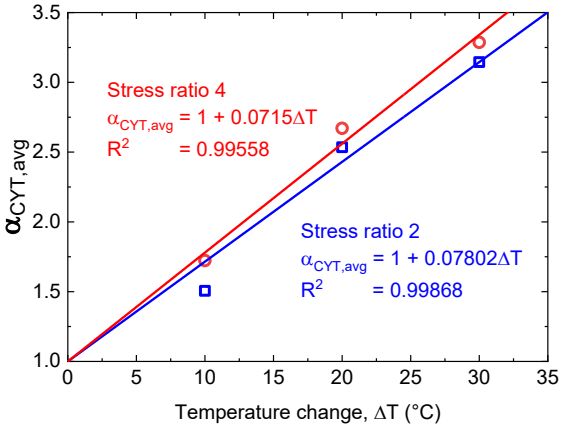
รูปที่ 7 การเปรียบเทียบประวัติอุณหภูมิและความเครียดการคืบภายใต้อุณหภูมิแบบคงที่ (SL-CT) ที่ T = 30 และ 40 °C และภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักร (SL-CYT) ที่มีพิสัย 30 – 40 °C



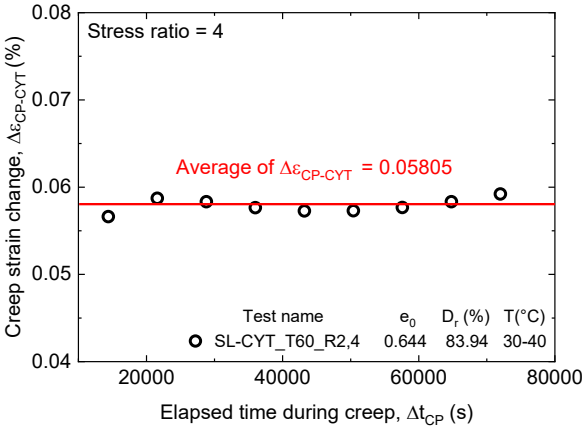
รูปที่ 8 ประวัติเวลาความเครียดการคืบเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงแบบวัฏจักร (SL-CYT) ที่มีพิสัยเท่ากับ 30 – 60 °C และเส้นขอบเขตที่ 30 °C และที่ 60 °C



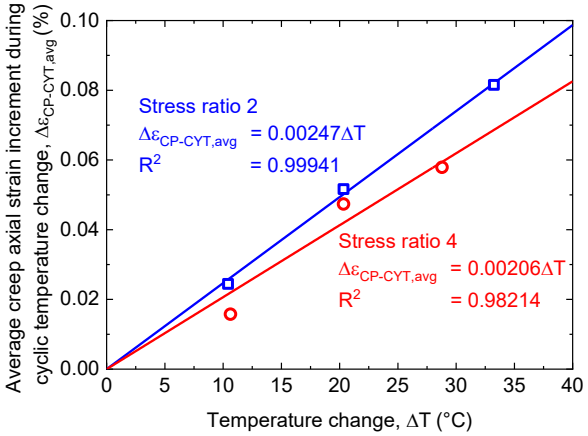
รูปที่ 9 อัตราส่วนความเครียดการคืบภายใต้ช่วงอุณหภูมิแบบวัฏจักรต่อความเครียดการคืบภายใต้ช่วงอุณหภูมิแบบคงที่



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปรับแก้ความเครียดการคืบที่เพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรต่อและพิสัยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักร



รูปที่ 11 การเปลี่ยนแปลงความเครียดการคืบภายใต้ช่วงอุณหภูมิแบบวัฏจักร



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของค่าความเครียดการคืบระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในวัฏจักรการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและพิสัยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักร

4. บทสรุป

จากการศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรต่อพฤติกรรมการคืบของทรายออสตันด้วยการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบควบคุมอุณหภูมิสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การคืบเมื่อให้แรงกระทำคงค้างที่ระดับความเค้นแตกต่างกันและมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักร ไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของทรายออสตัน
2. เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงอัดสามแกนโดยควบคุมอุณหภูมิแบบคงที่และแบบเปลี่ยนแปลงแบบวัฏจักรพบว่า ภายใต้การเปลี่ยนแปลงแบบวัฏจักรจะส่งผลให้ค่าความเครียดการคืบสูงกว่าภายใต้การให้อุณหภูมิแบบคงที่อย่างชัดเจน
3. ความแตกต่างของค่าความเครียดการคืบระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในวัฏจักรการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีค่าค่อนข้างคงที่

4. เมื่อพิสัยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในวัฏจักรเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความเครียดการคืบที่เกิดขึ้นเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน และเมื่อเปรียบเทียบที่ค่าพิสัยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในวัฏจักรเท่ากัน ความแตกต่างของค่าความเครียดการคืบระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในวัฏจักรการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมากขึ้น
5. อัตราส่วนความเครียดการคืบสูงสุดภายใต้การให้อุณหภูมิแบบวัฏจักรต่อความเครียดการคืบภายใต้อุณหภูมิคงที่ มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่าพิสัยของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรที่อัตราส่วนความเค้นแตกต่างกัน

เอกสารอ้างอิง

[1] Furudoi, T. (2010). The Second Phase Construction of Kansai International Airport Considering the Large and Long-Term Settlement of the Clay Deposits. *Soils and Foundations*, 50(6), pp.805-816.

[2] Puzrin, A.M., Alonso, E.E. and Pinyol, N.M., (2010) *Unexpected Excessive Settlements: Kansai International Airport, Japan*. Springer Netherlands, pp.23-43.

[3] Huntley, S.A. and Valsangkar, A.J. (2013). Field monitoring of earth pressures on integral bridge abutments. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(8), pp.841-857.

[4] Tatsuoka, F., Hirakawa, D., Nojiri, M., Aizawa, H., Nishikiori, H., Soma, R., Tateyama, M. and Watanabe, K. (2009). A new type of integral bridge comprising geosynthetic-reinforced soil walls. *Geosynthetics International*, 16(4), pp.301-326.

[5] Liu, H., Liu, H., Xiao, Y. and McCartney, J.S. (2018). Effects of temperature on the shear strength of saturated sand. *Soils and Foundations*, 58(6), pp.1326-1338.

[6] Cekerevac, C. and Laloui, L. (2004). Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28, pp.209-228.

[7] Ng, C.W., Zhou, C., Zhang, S. and Zhang, Q. (2023). Effects of thermal cycles on soil behaviour: theoretical and experimental studies. *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, p.00003.

[8] Bentil, O.T. and Zhou, C. (2022). Effects of Temperature and Thermal Cycles on the Elastic Shear Modulus of Saturated Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 148(7), p.06022006.

[9] Duttine, A., Tatsuoka, F., Kongkitkul, W. and Hirakawa, D. (2008). Viscous Behaviour of Unbound Granular Materials in Direct Shear. *Soils and Foundations*, 48(3), pp.297-318.

[10] Di Benedetto, H. and Ezaoui, A. (2009). Experimental measurements of the global anisotropic elastic behaviour of dry Hostun sand during triaxial tests, and effect of sample preparation. *Geotechnique*, 59, pp.621-635.

[11] Jariyatatsakorn, K. and Kongkitkul, W. (2023). EFFECTS OF TEMPERATURE ON STRENGTH AND TIME-DEPENDENT DEFORMATION BEHAVIOURS OF HOSTUN SAND UNDER SHEAR. *International Journal of GEOMATE*, 24.

[12] Punya-in, Y. and Kongkitkul, W. (2022). Effects of Temperature on the Stress-Strain-Time Behavior of Sand under Shear. *Journal of Testing and Evaluation*, 51, p.20220005.

[13] Tatsuoka, F. and Haibara, O. (1985). Shear Resistance Between Sand and Smooth or Lubricated Surfaces. *Soils and Foundations*, 25(1), pp.89-98.

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

[15] Ng, C.W., Zhou, C., Zhang, S. and Zhang, Q. (2023). Effects of thermal cycles on soil behaviour: theoretical and experimental studies. *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, p.00003.

[16] Liu, H., Liu, H., Xiao, Y. and McCartney, J.S. (2018). Influence of Temperature on the Volume Change Behavior of Saturated Sand. *Geotechnical Testing Journal*, 41(4), pp.747-758.