ผลกระทบของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมอีลาสติกและการเสียรูปที่ขึ้นกับเวลาของทรายออสตัน เมื่อรับแรงเฉือนสามแกน

Temperature effects on the elastic and time-dependent deformation behaviours of Hostun sand under triaxial shearing

โฆษิต จริยาทัศน์กร[1,*] และ วรัช ก้องกิจกุล[1]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพฯ

**Corresponding author; E-mail address: kosit.jar@mail.kmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

การเสียรูประยะยาวมีความเกี่ยวข้องกับอิทธิพลของเวลาซึ่งประกอบด้วย อิทธิพลของอัตราการให้แรง (Loading rate effect) และอิทธิพลของการแก่ตัว (Ageing effect) ในปัจจุบันงานวิศวกรรมเทคนิคธรณีที่มีความเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น อาทิ เสาเข็มพลังงาน การแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนผ่านหลุมเจาะ เป็นต้น ดังนั้นพฤติกรรมเชิงอุณหพลศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการเสียรูปในระยะยาวจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ ในช่วงหลายปีที่ผ่านมามีการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมทางอุณหพลศาสตร์ในดินเหนียวเป็นอย่างมาก ในขณะที่การศึกษาในทรายยังมีอยู่อย่างจำกัด งานวิจัยนี้จึงใช้ทรายออสตัน (Hostun sand) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในงานวิจัยอย่างแพร่หลาย มาทดสอบแรงอัดสามแกนผ่านประวัติการให้แรงแบบวัฏจักร และการให้แรงกระทำคงค้าง เพื่อศึกษาค่าอีลาสติกยังก์โมดูลัสและพฤติกรรมการคืบที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ได้แก่ 30 45 และ 60 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษาพบว่า 1. ค่าอีลาสติกยังก์โมดูลัสเป็นค่าที่ขึ้นกับระดับความเค้น โดยมีพฤติกรรมแบบไฮโปอีลาสติก 2. ที่ระดับความเค้นเดียวกันค่าอีลาสติกยังก์โมดูลัสมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และ 3. ปริมาณความเครียดการคืบเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิและระดับความเค้นที่เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: การคืบ, การทดสอบแรงอัดสามแกน, ความหนืด, ทรายออสตัน, อุณหภูมิ

Abstract

Long-term deformation of geomaterials is related to the time effects, which is consisting of the following two components: i) loading rate effect; and ii) ageing effect. Nowadays, the number of temperature-related geotechnical engineering projects tends to increase, e.g., energy pile, heating and cooling via borehole heat exchangers, etc. Therefore, thermo-mechanical behaviour should be investigated for the long-term deformation problems. For recent years, the thermo-mechanical behaviour of cohesive soils has been revealed by various studies, while there are limited studies regarding the thermal effects in granular materials such as sand. This research performed a series of special drained triaxial compression tests on Hostun sand, which is widely used in the field of geotechnical engineering research. The cyclic loading (CL) and sustained loading (SL) were performed to evaluate the quasi-elastic Young's modulus and creep behaviour at different temperatures. The target temperatures consist of 30, 45, and 60 °C. The results show that: i) the elastic Young's modulus is stress level-dependent, which is of a hypo-elastic type; ii) the elastic Young's modulus decreases with an increase in the temperature; and iii) the creep strain increases with increasing temperature and stress level.

Keywords: creep, triaxial compression test, viscosity, Hostun sand, temperature

1. บทนำ

ปัจจุบันงานวิศวกรรมทางเทคนิคธรณีที่มีความเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น อาทิ เสาเข็มพลังงาน [1-4] กำแพงดินเสริมกำลังที่ติดตั้งระบบเปลี่ยนถ่ายพลังงาน [5] การกำจัดกากนิวเคลียร์ [6] ดังนั้นจะพบว่า ปัญหาทางเทคนิคธรณีปัจจุบันส่งผลให้ดินต้องถูกใช้งานในสภาพที่อุณหภูมิไม่คงที่ (Non-isothermal conditions) ในอดีตที่ผ่านมาจึงเริ่มมีการศึกษาถึงพฤติกรรมทางอุณหพลศาสตร์ (Thermo-mechanical behaviour) ในดินขึ้นรวมถึงตาข่ายเสริมกำลังสังเคราะห์ ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในงานทางวิศวกรรมเทคนิคธรณี

อย่างไรก็ตาม การศึกษาพฤติกรรมทางอุณหพลศาสตร์ในอดีตส่วนใหญ่เป็นการศึกษาในดินที่มีความเชื่อมแน่น (Cohesive soils) เช่น การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิใน Boom clay ด้วยการทดสอบแรงอัดสามแกน [7]

การศึกษาอิทธิพลร่วมกันระหว่างอัตราความเครียดกับอุณหภูมิต่อพฤติกรรมการระบายน้ำของดินเหนียว [8] การประเมินสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพภายใต้อุณหภูมิที่สูงขึ้น [9] เป็นต้น ในขณะที่การศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิในดินเม็ดหยาบ (Granular materials) อันได้แก่ การศึกษาพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของทรายบดอัดที่ความดันและอุณหภูมิสูง [10] ผลกระทบของอุณหภูมิต่อกำลังรับแรงเฉือนและปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงในทรายที่อิ่มตัวด้วยน้ำ [11, 12] กลับมีอยู่เพียงเล็กน้อย

งานวิจัยในอดีตได้แสดงให้เห็นว่า การทรุดตัวระยะยาว (Long-term settlement) ไม่ได้เกิดขึ้นจากการเสียรูปอีลาสติก (Elastic deformation) เพียงอย่างเดียว แต่เกิดจากการเสียรูปที่ไม่เป็นอีลาสติกร่วมด้วย (Inelastic deformation) [13] ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับอิทธิพลของเวลา (Time effect) ดังนั้นการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิร่วมกันกับอิทธิพลของเวลาจึงมีความสำคัญ จากที่กล่าวมาข้างต้น จึงนำมาสู่วัตถุประสงค์ของการศึกษาในครั้งนี้คือศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมอีลาสติกและการเสียรูปที่ขึ้นกับเวลาของทราย โดยทรายที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ ทรายออสตัน ซึ่งมีถิ่นกำเนิดจากประเทศฝรั่งเศสและนิยมใช้ทดสอบกันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยทางวิศวกรรมเทคนิคธรณี

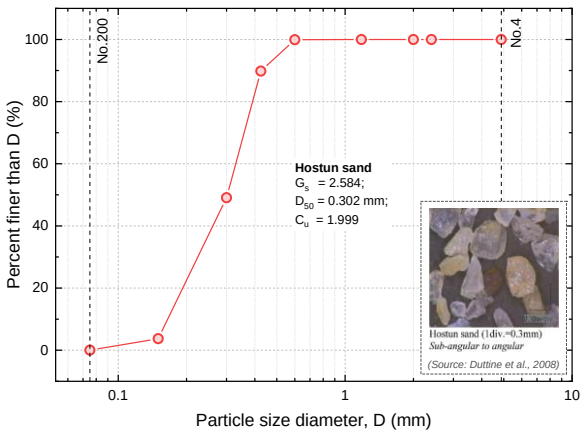
2. วัสดุและเครื่องทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

การศึกษาในครั้งนี้ เลือกใช้ทรายออสตันซึ่งเป็นทรายชนิดหนึ่งจากประเทศฝรั่งเศสและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยทางด้านสาขาวิศวกรรมเทคนิคธรณี [14] โดยมีสมบัติกายภาพและสมบัติดัชนีแสดงในตารางที่ 1 และมีลักษณะการกระจายขนาดคละแสดงดังรูปที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติกายภาพและสมบัติดัชนีของทรายออสตัน

G_s	e_{max}	e_{min}	D_{50} (mm)	C_u	Particle shape
2.584	0.854	0.522	0.302	1.999	Sub-angular to angular



รูปที่ 1 การกระจายขนาดคละของทรายออสตัน

2.2 เครื่องทดสอบ

เครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนแบบควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ถูกพัฒนาจากงานวิจัยของ Punya-in and Kongkitkul [15] ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยการวัดอุณหภูมิจะใช้เทอร์โมคัปเปิล (K-type thermo-couple) จำนวนสองตัว โดยตัวแรกจะติดตั้งอยู่ทางน้ำออกจากตู้ควบคุมอุณหภูมิ (Thermal controller, หมายเลข 5 ในรูปที่ 2) เพื่อเป็นตัวนำสัญญาณเอาต์พุตป้อนกลับเข้าสู่ระบบควบคุมอุณหภูมิ เรียกลักษณะระบบควบคุมแบบนี้ว่า ระบบป้อนกลับ (Feedback Control System) และอีกหนึ่งตัวจะถูกติดตั้งอยู่ภายในเซลล์แรงดัน (Chamber) เพื่อวัดอุณหภูมิของน้ำรอบตัวอย่างทดสอบ (หมายเลข 6 ในรูปที่ 2) โดยน้ำที่อยู่ภายในเซลล์แรงดันนี้จะถูกหมุนเวียนไปที่เครื่องทำความร้อน (Heater) ที่ถูกควบคุมการทำงานโดยตู้ควบคุมอุณหภูมิ ผ่านปั๊มไดอะแฟรม (Diaphragm pump) สองตัวที่สลับการทำงานกันเพื่อยืดอายุการใช้งานของปั๊ม

นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำภายในเซลล์แรงดันจะส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนออกสู่นอกเซลล์ ทำให้ต้องติดตั้งฉนวนกันความร้อน (Heat insulator, หมายเลข 2 ในรูปที่ 2) ไว้บริเวณด้านล่างของโหลดเซลล์ (Load cell) เพื่อไม่ให้ความร้อนถูกส่งผ่านไปยังบริเวณผิวของโหลดเซลล์ที่มีสเตรนเกจ (strain gauge) ติดตั้งอยู่ ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการอ่านค่าแรงที่ผิดพลาดได้

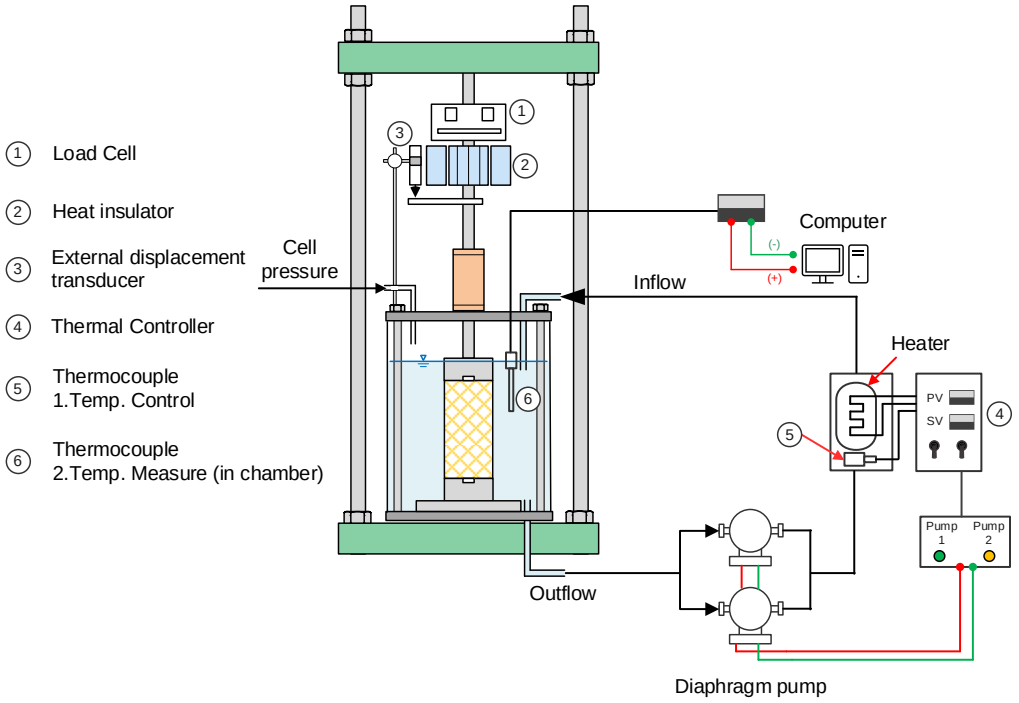
3. วิธีการทดสอบ

3.1 การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างทรายออสตันเพื่อทำการทดสอบแรงอัดสามแกน เริ่มจากการหล่อลื่นบริเวณหัวและฐานของตัวอย่างด้วยการใช้จารบีซิลิโคนสุญญากาศ (High-vacuum silicone grease) หนา 50 ไมครอน ลงบนผิวฝาบน (Top cap) และฐาน (Pedestal) แล้วจึงวางแผ่นยางพาราที่มีความหนา 0.3 มม. ลงบนผิวจารบี [16] จากนั้นนำเมมเบรนหุ้มกับฐานและนำโมลประกบล้อมรอบ แล้วจึงนำปลายของเมมเบรนอีกด้านหนึ่งหุ้มปากโมลบริเวณด้านบน โดยผิวของเมมเบรนจะถูกดูดให้แนบสนิทกับผิวด้านในของโมลผ่านการให้แรงสุญญากาศ จากนั้นทำการบรรจุทรายออสตันลงโมลโดยโปรยผ่านเครื่องมือร่อนผ่านตะแกรงหลายชั้น (Multiple-sieving pluviating machine) เพื่อควบคุมความหนาแน่นให้สม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งตัวอย่าง [17] จากนั้นจึงนำฝาบนมาประกบตัวอย่างแล้วหุ้มเมมเบรนกับฝาบนแล้วรัดให้แน่น แล้วทำการลดแรงสุญญากาศต่อโมลลงจนหมดแล้วทำการให้แรงสุญญากาศบางส่วน (Partial vacuuming) เท่ากับ 20 กิโลปาสคาลแก่ตัวอย่างทรายที่อยู่ในโมลผ่านทางฝาบนและฐานของตัวอย่าง แล้วจึงแกะโมลออกจากนั้นจึงรอเป็นเวลา 30 นาทีเพื่อให้ตัวอย่างเข้าสู่สภาวะสมดุล

3.2 การทดสอบแรงอัดสามแกน

เมื่อแกะโมลออกแล้ว ทำการติดตั้ง thermocouple แล้วจึงนำเซลล์แรงดันมาครอบ จากนั้นทำการเติมน้ำเข้าไปภายในเซลล์แรงดัน เมื่อปริมาณน้ำสูงจนท่วมตัวอย่าง จึงค่อย ๆ ลดแรงสุญญากาศบางส่วนพร้อม ๆ กับเพิ่ม



รูปที่ 2 เครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนที่สามารถควบคุมอุณหภูมิตัวอย่างทดสอบได้

แรงดันเซลล์โดยควบคุมให้แรงดันสุทธิที่กระทำต่อตัวอย่างทรายทดสอบเท่ากับ 20 กิโลปาสคาล จนกระทั่งแรงสุญญากาศบางส่วนเป็นศูนย์ จากนั้นจึงทำการอัดตัวอย่างแบบเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic consolidation) จนกระทั่งแรงดันเซลล์มีค่าเท่ากับ 30 กิโลปาสคาล

เมื่อทำการอัดตัวอย่างจนเสร็จสิ้น น้ำภายในเซลล์จะถูกเพิ่มอุณหภูมิจนถึงค่าที่กำหนด จากนั้นทำการรอเป็นเวลา 60 นาทีเพื่อให้อุณหภูมิภายในตัวอย่างเท่ากับอุณหภูมิของน้ำภายในเซลล์ (เข้าสู่สภาวะสมดุล) ต่อมาตัวอย่างจะถูกเฉือนภายใต้อุณหภูมิคงที่ด้วยการใช้เครื่องกดความแม่นยำสูง (Precise compression machine) เครื่องกดฯ นี้สามารถทำการทดสอบแบบต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้ 1. การทดสอบการคืบ 2. การเปลี่ยนอัตราความเครียดแบบทันทีทันใด และ 3. การทดสอบแบบวัฏจักรที่มีค่าแอมพลิจูดความเครียดน้อยเพื่อหาค่าอีลาสติกยังก์โมดูลัสในระหว่างการให้แรงกระทำอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราความเครียดคงที่ [18]

3.3 โปรแกรมทดสอบ

รูปแบบการให้แรงกระทำเพื่อเฉือนตัวอย่างทรายทดสอบในการศึกษาครั้งนี้ประกอบไปด้วยการให้แรงกระทำคงค้างและการให้แรงกระทำแบบวัฏจักร เริ่มต้นเฉือนตัวอย่างทรายทดสอบโดยใช้อัตราความเครียดพื้นฐานเท่ากับ 0.075 %/นาที จนถึงอัตราส่วนความเค้น (Stress ratio, R) ที่กำหนดคือ 2.5 3 3.5 4 4.5 และ 5 (รูปที่ 3(ก)) จากนั้นจะให้แรงกระทำคงค้างเป็นเวลาสามชั่วโมง เพื่อสังเกตพฤติกรรมการเสียรูปเนื่องจากการคืบ ต่อมาทำการให้แรงกระทำแบบวัฏจักรที่มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับ 25 กิโลปาสคาลเป็นจำนวน 10 รอบ (รูปที่ 3(ข)) เพื่อหาค่าอีลาสติกยังก์โมดูลัสเทียบเท่า (Equivalent elastic Young's modulus, E_{eq}) จากนั้นจึงเริ่มให้แรงกระทำอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราความเครียดคงที่ ที่อัตราความเครียดพื้นฐาน โดยระหว่างการเฉือนตัวอย่าง อุณหภูมิของน้ำบริเวณรอบตัวอย่างทดสอบจะถูกควบคุมให้คงที่เท่ากับ 30 45 หรือ 60 องศาเซลเซียส

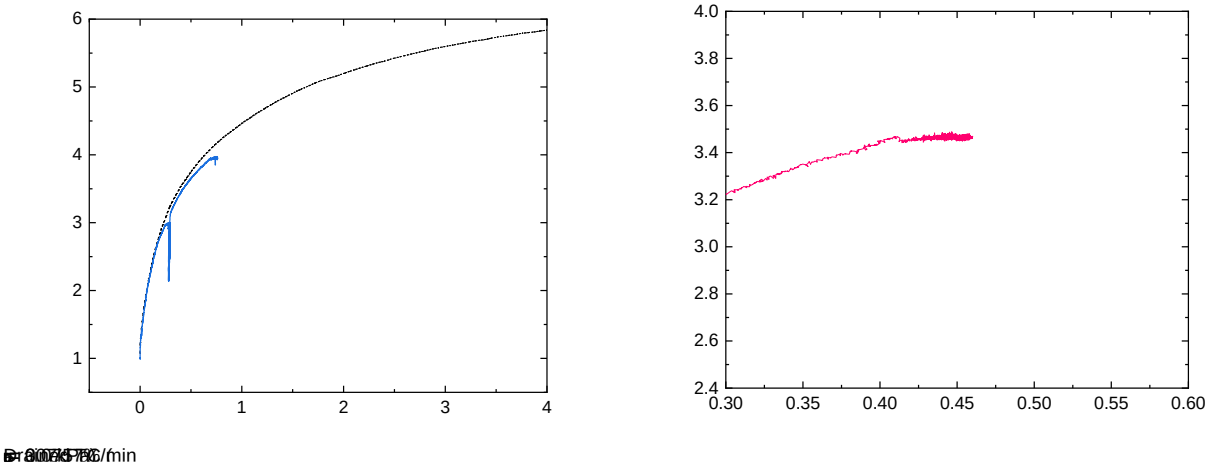
4. ผลการทดสอบ

4.1 อีลาสติกยังก์โมดูลัสเทียบเท่า

การหาค่าอีลาสติกยังก์โมดูลัสเทียบเท่าที่ระดับอัตราส่วนความเค้นต่าง ๆ สามารถหาได้จากการทดสอบให้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรหลังจากตัวอย่างทดสอบได้รับแรงกระทำแบบคงค้าง เพื่อให้ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในช่วงนี้เป็นความเครียดอีลาสติกเพียงอย่างเดียว [19] โดยค่าอีลาสติกยังก์โมดูลัสเทียบเท่านี้สามารถหาได้จากการฟิตความสัมพันธ์เชิงเส้นของจุดข้อมูลความเค้น-ความเครียดในช่วงการถอนแรงกระทำ ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งสามารถนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยอีลาสติกยังก์โมดูลัสเทียบเท่ากับอัตราส่วนความเค้นในแนวดิ่ง (Vertical stress ratio, σ_1 / σ_0) เมื่อ σ_0 มีค่าเท่ากับ 100 กิโลปาสคาล ในมาตราส่วนลอการิทึม (full-log scale) ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยพบว่าค่า E_{eq} มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนความเค้นแนวดิ่ง ซึ่งพฤติกรรมที่ค่าอีลาสติกยังก์โมดูลัสขึ้นกับระดับความเค้นนี้ เรียกว่า "พฤติกรรมแบบไฮโปอีลาสติก" ที่แสดงได้ดังสมการที่ (1)

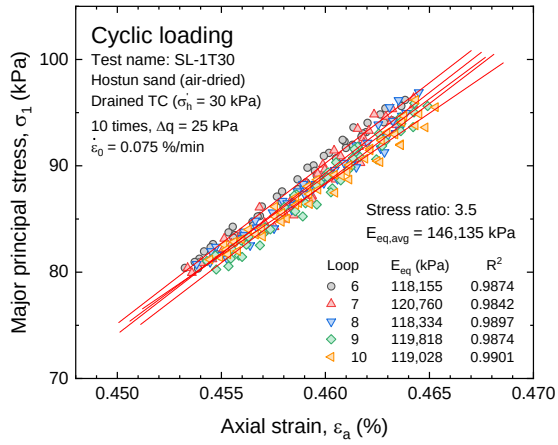
$$E_{eq} = E_0 \left(\sigma_1 / \sigma_0 \right)^m \quad (1)$$

เมื่อ E_{eq} คือ อีลาสติกยังก์โมดูลัสเทียบเท่า, E_0 และ m เป็นค่าคงที่ที่แตกต่างกันในแต่ละอุณหภูมิ

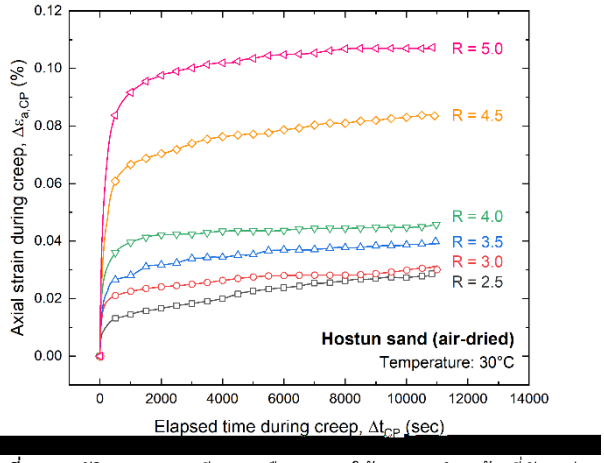


(ก) (ข)

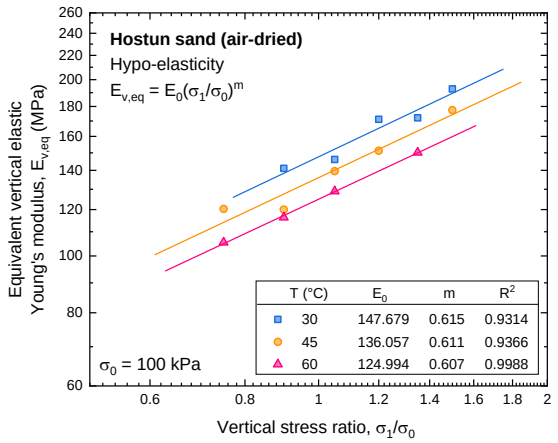
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้น-ความเครียดแนวแกนที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส: (ก) ช่วงความเครียดก่อนจุดสูงสุด และ (ข) ช่วงระหว่างการให้แรงกระทำคงค้างและการให้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร



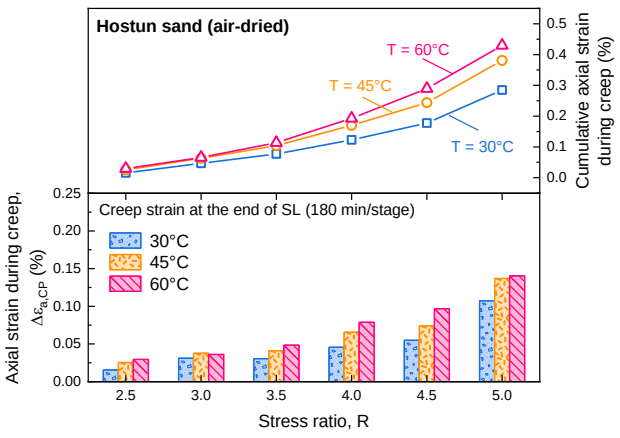
รูปที่ 4 การฟิตข้อมูลความสัมพันธ์เชิงเส้นของความเค้น-ความเครียดจากการให้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรในช่วงถอนแรงกระทำ สำหรับรอบที่ 6 ถึง 10



รูปที่ 6 ประวัติเวลาความเครียดการคืบจากการให้แรงกระทำคงค้างที่อัตราส่วนความเค้นต่าง ๆ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอีลาสติกยังก์โมดูลัสเทียบเท่ากับอัตราส่วนความเค้นในแนวดิ่งที่อุณหภูมิแตกต่างกัน



รูปที่ 7 ปริมาณความเครียดและความเครียดการคืบสะสมที่อัตราส่วนความเค้นต่าง ๆ และที่อุณหภูมิแตกต่างกันเท่ากับ 30 40 และ 60 องศาเซลเซียส

4.2 การทดสอบการคืบ

จากการทดสอบการคืบที่ระดับความเค้นแตกต่างกัน พบว่าปริมาณความเครียดแนวแกนในช่วงการคืบมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามระดับความเค้นที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยปริมาณความเครียดแนวแกนในช่วงการคืบของที่อุณหภูมิและระดับความเค้นต่าง ๆ ที่จุดสุดท้ายของการทดสอบการคืบ (180 นาที) และปริมาณความเครียดแนวแกนสะสมที่แต่ละอุณหภูมิสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7 ซึ่งจะพบว่าที่อัตราส่วนความเค้นเดียวกัน ปริมาณความเครียดแนวแกนการคืบมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

5. สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาในครั้งนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ปริมาณความเครียดการคืบจากการทดสอบการคืบมีค่ามากขึ้นเมื่อระดับความเค้นและอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น
2. การทดสอบโดยการให้แรงแบบเป็นวัฏจักร แสดงให้เห็นว่าค่าอีลาสติกยังก์โมดูลัสที่ระดับความเค้นแตกต่างกันนั้นมีค่าไม่คงที่ กล่าวคือ ค่าอีลาสติกยังก์โมดูลัสมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อระดับความเค้นเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นพฤติกรรมแบบ “ไฮโปอีลาสติก” ในขณะที่ที่ระดับความเค้นเดียวกัน ค่าอีลาสติกยังก์โมดูลัสมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น
3. ทรายแสดงความเครียดการคืบเมื่อให้แรงกระทำคงค้าง ความเครียดการคืบมีค่าเพิ่มขึ้นกับระดับความเค้นและอุณหภูมิ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ Prof. Fumio Tatsuoka and Prof. Yoshiaki Kikuchi จาก Tokyo University of Science (TUS), Japan และ Prof. Reiko Kuwano จาก Institute of Industrial Science (IIS), University of Tokyo, Japan ผู้ให้การสนับสนุนทรายออสตันสำหรับใช้ในการทดสอบครั้งนี้ นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยจากทุนเพชรพระจอมเกล้าดุษฎีบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เลขสัญญาที่ 7/2563

เอกสารอ้างอิง

[1] Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Geotechnique*, 56(2), pp.81-122.

[2] Knellwolf, C., Peron, H. and Laloui, L. (2011). Geotechnical Analysis of Heat Exchanger Piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(10), pp.890-902.

[3] Moradshahi, A., Faizal, M., Bouazza, A. and McCartney, J.S., (2021). Effect of nearby piles and soil properties on thermal behaviour of a field-scale energy pile. *Canadian Geotechnical Journal*, 58(9), pp.1351-1364.

[4] Olgun, C.G., Ozudogru, T.Y. and Arson, C.F. (2014). Thermo-mechanical radial expansion of heat exchanger piles and possible effects on contact pressures at pile-soil interface. *Geotechnique Letters*, 4, pp.170-178.

[5] Stewart, M.A., Coccia, C.J. and McCartney, J.S. (2014). Issues in the implementation of sustainable heat exchange technologies in reinforced, unsaturated soil structures. *Geo-Congress 2014: Geo-characterization and Modeling for Sustainability*, pp.4066-4075.

[6] Gens, A., Sanchez, M., Guimaraes, L. D., Alonso, E. E., Lloret, A., Olivella, S., Villar, M. V. and Huertas, F. (2009). A full-scale in situ heating test for high-level nuclear waste disposal: observations, analysis and interpretation. *Geotechnique*, 59(4), pp.377-399.

[7] De Bruyn, D. and Thimus, J.F. (1996). The influence of temperature on mechanical characteristics of Boom clay: the results of an initial laboratory programme. *Engineering Geology*, 41(1-4), pp.117-126.

[8] Tsutsumi, A. and Tanaka, H. (2012). Combined effects of strain rate and temperature on consolidation behavior of clayey soils. *Soils and Foundations*, 52(2), pp.207-215.

[9] Abuel-Naga, H.M., Bergado, D.T., Ramana, G.V., Grino, L., Rujivipat, P. and Thet, Y. (2006). Experimental evaluation of engineering behavior of soft Bangkok clay under elevated temperature. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 132(7), pp.902-910.

[10] Graham, J., Alfaro, M. and Ferris, G. (2004). Compression and strength of dense sand at high pressures and elevated temperatures. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(6), pp.1206-1212.

[11] Liu, H., et al. (2018). Effects of temperature on the shear strength of saturated sand. *Soils and Foundations*, 58(6), pp.1326-1338.

[12] 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.

[13] Tatsuoka, F., (2007) *Inelastic deformation characteristics of geomaterial*. Springer, pp.1-108.

[14] Schanz, T. and Vermeer, P. (1996). Angles of friction and dilatancy of sand. *Geotechnique*, 46(1), pp.145-151.

[15] Punya-in, Y. and Kongkitkul, W. (2021). An experimental study on temperature effects on elastic and creep deformation behaviours of a sand. *11th International Conference on Geotechnique, Construction Materials &*

Environment, Kyoto, Japan, 3-5 November 2021, pp.156-163.

[16] Tatsuoka, F. and Haibara, O. (1985). Shear resistance between sand and smooth or lubricated surfaces. *Soils and Foundations*, 25(1), pp.89-98.

[17] Jariyatatsakorn, K. and Kongkitkul, W. (2021). Prediction of Time History of Creep Strain from Time history of Stress Relaxation of Sand in Triaxial Compression. *Engineering Journal Chiang Mai University*, 28(2), pp.1-18.

[18] Santucci de Magistris, F., Koseki, J., Amaya, M., Hamaya, S., Sato, T. and Tatsuoka, F. (1999). A triaxial testing system to evaluate stress-strain behavior of soils for wide range of strain and strain rate. *Geotechnical Testing Journal*, 22(1), pp.44-60.

[19] Kohata, Y., Tatsuoka, F., Wang, L., Jiang, G., Hoque, E. and Kodaka, T. (1997). Modelling the non-linear deformation properties of stiff geomaterials. *Geotechnique*, 47(3), pp.563-580.