



การทำนายประวัติเวลาความเครียดการคืบจากประวัติเวลา การคลายความเค้นของทรายเมื่อรับแรงอัดสามแกน Prediction of Creep Strain Time History from Time history of Stress Relaxation of Sand Based on Triaxial Compression Tests

โฆษิต จริยาทัศน์กร และ วรัช ก้องกิจกุล*

Kosit Jariyatatsakorn and Warat Kongkitkul*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,

King Mongkut's University of Technology Thonburi

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

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

บทคัดย่อ

วัสดุทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีจะแสดงพฤติกรรมตอบสนองต่ออิทธิพลจากอัตราการให้แรงกระทำเนื่องจากสมบัติความหนืดของวัสดุ เช่น การคืบเมื่อให้แรงกระทำคงค้าง การคลายความเค้นเมื่อควบคุมความเครียดให้คงที่ ความเค้นกระโดดเมื่อเปลี่ยนอัตราความเครียดอย่างทันทีทันใด เป็นต้น การทำนายความเครียดการคืบที่แม่นยำมีความสำคัญต่อการประเมินสมรรถนะของโครงสร้างดินเมื่อรับแรงกระทำใช้งานในระยะยาว งานวิจัยนี้ใช้ทรายชนิดหนึ่งที่ผ่านขั้นตอนการคัดเลือกและปรับปรุงที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (King Mongkut's University of Technology Thonburi, KMUTT) จึงเรียกว่า ทราย KMUTT เป็นวัสดุสำหรับการทดสอบแรงอัดสามแกนด้วยประวัติการให้แรงแบบต่าง ๆ เพื่อศึกษาชนิดความหนืดและพฤติกรรมการคืบและการคลายความเค้นที่อัตราส่วนความเค้นต่าง ๆ เพื่อสร้างโครงสร้างการวิเคราะห์ซึ่งพัฒนาจากความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการคืบกับเวลาการคลายความเค้น และความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดไม่คืนกลับการคืบกับความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้น ที่อัตราความเครียดไม่คืนกลับเท่ากัน จากผลการศึกษาพบว่า 1. ทราย KMUTT แสดงพฤติกรรมตอบสนองต่ออิทธิพลจากอัตราการให้แรงกระทำโดยมีชนิดความหนืดแบบ TESRA (Temporary or Transient Effects of Strain Rate and Strain Acceleration) ในช่วงก่อนจุดสูงสุดและแปลงไปเป็นแบบ P&N (Positive & Negative) ในช่วงหลังจุดสูงสุด 2. ประวัติเวลาความเครียดการคืบสามารถทำนายได้อย่างแม่นยำจากประวัติเวลาการคลายความเค้นที่มีระยะเวลาสั้นกว่ามาก และ 3. แพกเตอร์เวลาที่ทำนายได้มีค่าเพิ่มขึ้นกับอัตราส่วนความเค้น

คำสำคัญ: การคืบ; การคลายความเค้น; การทดสอบแรงอัดสามแกน; ทราย; อัตราความเครียด

ABSTRACT

Most geotechnical engineering materials exhibit behaviours responded to the loading rate effect, which are due to their viscous property, e.g., creep (CP) by sustained loading, stress relaxation (SR) by keeping the strain constant, stress jump upon a stepwise change in the strain rate, etc. Precise prediction of creep strain is important for evaluation of the long-term performance of a soil structure under a constant working load. This research performed a series of special drained triaxial compression tests on a sand type. This sand was processed and treated in King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT), and hence it was named KMUTT sand. Various loading histories were applied so as to evaluate viscosity type and investigate the CP and SR behaviours at various values of stress ratio. An analytical framework was developed from systematic relationships between the elapsed times necessary to reach the same irreversible strain rate in CP and SR tests and those between the irreversible strain increments necessary to reach the same irreversible strain rate in CP and SR tests. The followings are found. KMUTT sand exhibits the behaviours responded to the loading rate effect by which the viscosity type is TESRA (Temporary or Transient Effects of Strain Rate and Strain Acceleration) in the pre-peak regime translated to P&N (Positive & Negative) in the post-peak regime. Time history of CP can be precisely predicted by time history of SR performed for a much shorter time. And, time factor from the prediction increases with increasing stress ratio.

Keywords: Creep; Stress relaxation; Triaxial Compression Test; Sand; Strain Rate

1. บทนำ

การคืบ (Creep) และการคลายความเค้น (Stress relaxation) เป็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของเวลา (Time effect) [1] ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 1. อิทธิพลการแก่ตัว (Ageing effect) และ 2. อิทธิพลอัตราการให้แรง (Loading rate effect) ดังแสดงในรูปที่ 1 พฤติกรรมการตอบสนองต่อ Ageing effect สังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงสมบัติของดิน อาทิ ความแข็งแรง กำลังรับแรงเฉือน เป็นต้น ซึ่งมีได้ทั้งผลทางด้านบวก เช่น แข็งแรงขึ้น และผลทางด้านลบ เช่น อ่อนแอลง โดยมีพารามิเตอร์ควบคุมคือเวลาที่กำหนดจุดเริ่มต้นที่แน่นอน ในอีกทางหนึ่ง Loading rate effect สังเกตได้จากการพฤติกรรมของดิน เช่น การคืบ การคลายความเค้น เป็นต้น ซึ่งเป็นพฤติกรรมตอบสนองที่ขึ้นกับอัตราการให้แรงกระทำต่อดินเนื่องจากสมบัติความหนืด (Viscous property) ของดิน โดยมีพารามิเตอร์ควบคุมคืออัตราความเครียด

ในการทำนายการเสีรูปของดินที่ขึ้นอยู่กับการที่ไม่ได้รับผลกระทบจาก Ageing effect และที่ไม่ใช่การ

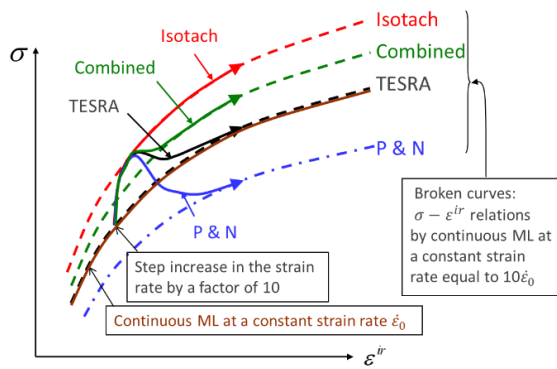
เสีรูปที่เกิดจากการอัดตัวคายน้ำ เช่น การคืบของตะกอนและทราย จะต้องอาศัยพื้นฐานความเข้าใจถึง Loading rate effect ที่ถูกต้อง เพราะดินที่มีสมบัติความหนืดแตกต่างกันจะมีพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดตอบสนองที่ต่างกัน [1-3] ความเข้าใจที่ถูกต้องคือกฎเกณฑ์สำคัญที่จะทำให้การทำนายการเสีรูปมีความถูกต้อง แม่นยำน่าเชื่อถือ และสะท้อนความเป็นจริงได้ดียิ่งขึ้น ในอดีตที่ผ่านมา ได้มีการทำนายการทรุดตัวของดินจากพฤติกรรมการตอบสนองต่อ Loading rate effect

	Phenomenon	Mechanism/material property	Parameter	
e.g., cement-mixed soil	Ageing effect	Time-dependent changes in the material property ⁺	Time with the fixed origin (t_0)	e.g., air-dried Sand [*]
	Apparent ageing Loading rate effect (creep, stress relaxation, etc.)	A rate-dependent response of material due to viscous property	Strain rate, $\dot{\epsilon}^{ir}$	

⁺ Positive ageing: e.g., cementation
Negative ageing: e.g., weathering

^{*} excluding geological diagenetic effects

รูปที่ 1 อิทธิพลของเวลาต่อพฤติกรรมของดิน [1]



รูปที่ 2 คุณสมบัติของชนิดความหนืดต่าง ๆ [2]

โดยอาศัยสมบัติความหนืดที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ อาทิ การทรุดตัวของโรงงานนิวเคลียร์บนชั้นตะกอนทราย [4] การทรุดตัวของสนามบินนานาชาติคันไซบนชั้นตะกอนดินเหนียว [5] เป็นต้น

Tatsuoka et al. [2] ได้จำแนกชนิดความหนืด (Viscosity type) ออกเป็น 4 แบบ กล่าวคือ Isotach, TESRA (Temporary or Transient Effects of Strain Rate and Strain Acceleration), Combined และ P&N (Positive & Negative) ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยทั่วไปแล้วดินที่ต่างกันจะมี Viscosity type แตกต่างกัน อาทิ ดินเหนียวและทราย จะมี Viscosity type ประเภท Isotach และ TESRA ตามลำดับ [6]

ดินที่มี Viscosity type แบบ Isotach จะแสดงพฤติกรรมเมื่อให้แรงกระทำแบบต่อเนื่องในลักษณะที่ความเค้นหนืดปัจจุบันจะเป็นฟังก์ชันกับความเครียดไม่คืนกลับและอัตราความเครียดไม่คืนกลับปัจจุบัน ดังนั้นความแข็งแรงเมื่อรับแรงกระทำอย่างต่อเนื่องจะมีค่าเพิ่มขึ้นกับอัตราความเครียด สำหรับดินที่มี Viscosity type อีก 3 แบบที่เหลือ จะแสดงพฤติกรรมในลักษณะที่ความเค้นหนืดที่เกิดขึ้นจวบจนปัจจุบัน ($\Delta\sigma_v$) จะสลายไปกับความเครียดไม่คืนที่เพิ่มขึ้นกลับไปสู่ค่าคงเหลือที่ต่างกันเมื่อรับแรงกระทำอย่างต่อเนื่อง สำหรับ Viscosity type แบบ TESRA ค่า $\Delta\sigma_v$ จะสลายหายไปทั้งหมดในท้ายที่สุดและความแข็งแรงเมื่อรับแรงกระทำอย่างต่อเนื่องจะไม่ขึ้นอยู่กับอัตราความเครียด สำหรับ Viscosity type แบบ Combined ค่า $\Delta\sigma_v$ จะสลายไปบางส่วนคล้ายกับ Viscosity type แบบ TESRA แต่

ยังคงเหลือค่าไว้ในท้ายที่สุด ดังนั้นความแข็งแรงเมื่อรับแรงกระทำอย่างต่อเนื่องจะเพิ่มขึ้นกับอัตราความเครียดคล้ายกับ Viscosity type แบบ Isotach สำหรับ Viscosity type แบบ P&N ค่า $\Delta\sigma_v$ จะสลายจากค่าบวกไปสู่ค่าลบ ดังนั้นความแข็งแรงเมื่อรับแรงกระทำอย่างต่อเนื่องจะลดลงกับอัตราความเครียด

จากรูปที่ 2 เราจะพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราเร็วการเฉือนตัวอย่างดินอย่างทันทีทันใด 10 เท่า พฤติกรรมการตอบสนองที่สังเกตได้ทันทีคือความเค้นกระโดด (Stress jump) ปริมาณ Stress jump จากการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วเป็นจำนวนเท่าที่เท่ากัน (10 เท่า) สำหรับดินที่มี Viscosity type แตกต่างกันจะมีค่าเท่ากัน หากสมมติว่าดินเหล่านี้มีค่าความอ่อนไหวต่ออัตราเร็ว (Rate-sensitivity coefficient) [2] เท่ากัน

อย่างไรก็ตาม ภายหลังเมื่อความเครียดไม่คืนกลับ (Irreversible strain) เพิ่มขึ้นหลังจาก Stress jump แล้ว ดินที่มี Viscosity type แตกต่างกัน จะแสดงพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดแตกต่างกันดังนี้ 1. เส้นโค้งจะอยู่สูงขึ้นกว่าเดิมแบบถาวร 2. เส้นโค้งจะวกกลับมาเหมือนไม่มีอะไรเกิดขึ้น 3. เส้นโค้งจะวกกลับมาและตกลงไปต่ำกว่าเดิมแบบถาวร และ 4. เส้นโค้งจะมีพฤติกรรมก้ำกึ่งระหว่างแบบที่ 1 และ 2 สำหรับ Viscosity type แบบ Isotach, TESRA, P&N และ Combined ตามลำดับ [2]

จากการศึกษาในอดีต [2] พบว่า วัสดุที่มีลักษณะเป็นเม็ดที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (Unbound granular material) จะมี Viscosity type ขึ้นอยู่กับลักษณะการกระจายขนาดคละ (Gradation) และรูปร่างของเม็ด (Grain shape) ดังแสดงในตารางที่ 1 นอกจากนี้ สำหรับวัสดุชนิดเดียวกัน จะมี Viscosity type ที่เปลี่ยนแปลงไปกับความเครียดเฉือนไม่คืนกลับ จากช่วงก่อนจุดสูงสุด (Pre-peak regime) ไปสู่ช่วงหลังจุดสูงสุด (Post-peak regime) เช่น ดินที่มีความเชื่อมแน่นจะมี Viscosity type เปลี่ยนจาก Isotach ไปเป็น TESRA จากช่วงก่อนจุดสูงสุดไปสู่ช่วงหลังจุดสูงสุด เป็นต้น

ตารางที่ 1 อิทธิพลของพันธะ รูปร่างของเมล็ด และลักษณะการกระจายขนาดต่อการเปลี่ยนแปลงชนิดความหนืดกับความเครียดเฉือน [2]

Bound	Unbound		
Isotach (pre-peak) → TESRA (post-peak)	Grading	Well-graded	Poorly graded
	Shape		
	Angular	Isotach (or Combined)→ TESRA	TESRA→P&N
	Round	TESRA→P&N	P&N→P&N with instability

พฤติกรรมการตอบสนองต่อ Loading rate effect เช่น การคืบ การคลายความเค้น ความเค้นกระโดดของดินต่าง ๆ ที่มี Viscosity type ที่แตกต่างกันและมีการเปลี่ยนแปลง Viscosity type กับความเครียดเฉือน สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองสามองค์ประกอบไม่เชิงเส้น (Non-linear three-component, NTC) [2] ดังแสดงในรูปที่ 3 แบบจำลองนี้มี 3 องค์ประกอบ กล่าวคือ 1. อีลาสติก (Elastic, E) 2. พลาสติก (Plastic, P) และ 3. ความหนืด (Viscous, V) ความเค้นจากบอร์ดี E จะเท่ากับผลรวมระหว่างความเค้นจากบอร์ดี P และ V เข้าด้วยกัน ส่วนความเครียดจะมาจาก 2 ส่วนคือ ความเครียดอีลาสติกจากบอร์ดี E และความเครียดไม่คืนกลับจากบอร์ดี P และ V ดังจะได้อธิบายเพิ่มเติมภายหลัง

Nuntapanich et al. [7] ได้นำเสนอการทำนายพฤติกรรมคืบของตาข่ายเสริมกำลังโพลิเมอร์ (Polymer geogrid) ด้วยพฤติกรรมการคลายความเค้น ในงานศึกษาของ Nuntapanich et al. [7] พบว่า ในระหว่างที่ให้แรงดึงคงที่เพื่อให้เกิดการคืบ และในระหว่างที่ให้ความเครียดดึงคงที่เพื่อให้เกิดการคลายความเค้น อัตราความเครียดไม่คืนกลับ (Irreversible strain rate) จะมีค่าลดลงกับเวลาเรื่อย ๆ โดยที่ระยะเวลาที่รอจนกระทั่งมีค่าอัตราความเครียดไม่คืนกลับที่เท่ากันจากการคลายความเค้นสั้นกว่าการคืบอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น Nuntapanich et al. [7] จึงได้พัฒนาโครงสร้างการวิเคราะห์ (Analytical framework) เพื่อการทำนายความเครียดการคืบจากความเครียดไม่คืนกลับจากการทดสอบการคลายความเค้น ทั้งนี้ Nuntapanich et al. [7] ประสบความสำเร็จในการ

พัฒนาโครงสร้างการวิเคราะห์ที่สร้างจากผลการทดลองจริง และโครงสร้างการวิเคราะห์ที่สร้างจากการจำลองผลการทดสอบด้วยแบบจำลองสามองค์ประกอบเพื่อใช้ทำนายความเครียดการคืบจากการคลายความเค้น

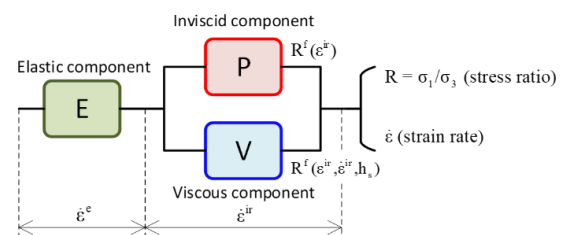
ตาข่ายเสริมแรงโพลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยของ Nuntapanich et al. [7] เกือบทั้งหมดมี Viscosity type แบบ Isotach และมีเพียงชนิดเดียวเท่านั้นที่เป็นแบบ Combined แต่กระนั้นการทำนายโดยอาศัยพฤติกรรมการคลายความเค้นก็ประสบผลสำเร็จได้ด้วยดี ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะนำแนวทางของโครงสร้างการวิเคราะห์ที่ Nuntapanich et al. [7] ได้สร้างไว้มาประยุกต์ใช้กับพฤติกรรมคืบและการคลายความเค้นของวัสดุอื่น ๆ ที่มี Viscosity type แตกต่างกันออกไปด้วยการทดสอบแรงอัดสามแกน

2. ความสัมพันธ์ระหว่างการคืบและการคลายความเค้น

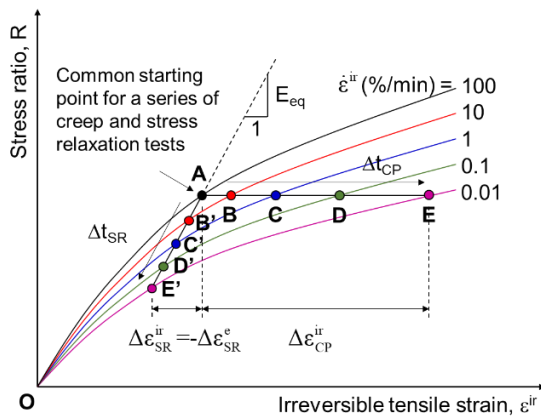
ตามแบบจำลองสามองค์ประกอบไม่เชิงเส้น (รูปที่ 3) อัตราส่วนความเค้น (Stress ratio, $R = \sigma'_1/\sigma'_3$) ประกอบไปด้วย 1. Inviscid stress ratio (R^f) และ 2. Viscous stress ratio (R^v) ในขณะที่ อัตราความเครียด (Strain rate, $\dot{\epsilon}$) ประกอบไปด้วย 1. อัตราความเครียดอีลาสติก (Elastic strain rate, $\dot{\epsilon}^e$) และ 2. อัตราความเครียดไม่คืนกลับ (Irreversible strain rate, $\dot{\epsilon}^{ir}$) ค่า Stress ratio และ Strain rate สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

$$R = R^f + R^v \quad (1)$$

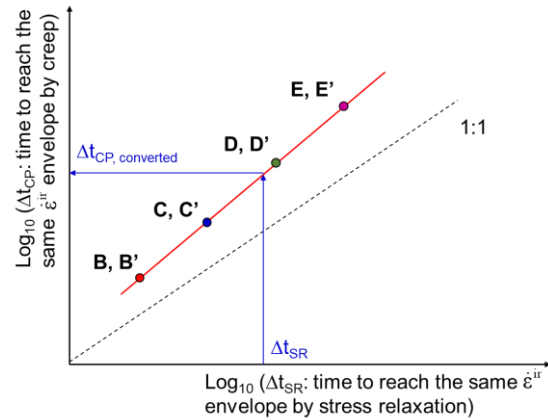
$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^e + \dot{\epsilon}^{ir} \quad (2)$$



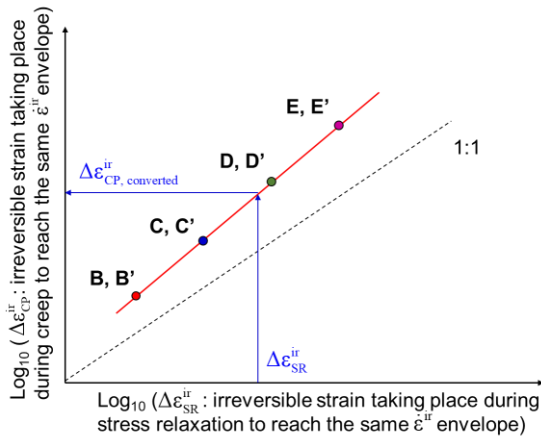
รูปที่ 3 แบบจำลองสามองค์ประกอบไม่เชิงเส้น



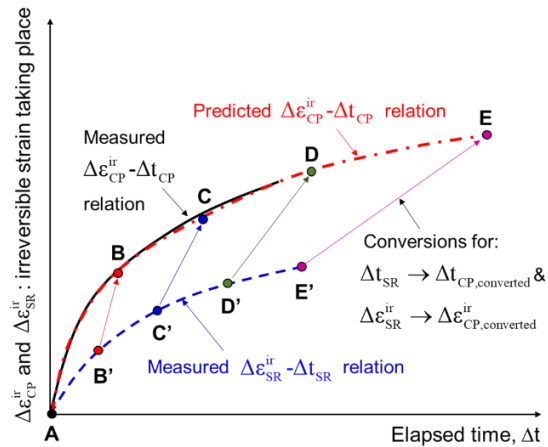
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4 การแปลงประวัติเวลาความเครียดไม่คืนกลับการคืบจากความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้นสำหรับวัสดุที่มี

Viscosity type แบบ Isotach: (ก) ความสัมพันธ์ $R - \epsilon^{ir}$ ในระหว่างการคืบและการคลายความเค้นพร้อมเส้นวงรอบ

สำหรับอัตราความเครียดไม่คืนกลับค่าต่าง ๆ; (ข) ความสัมพันธ์ $\Delta t_{CP} - \Delta t_{SR}$; (ค) ความสัมพันธ์ $\Delta \epsilon_{CP}^{ir} - \Delta \epsilon_{SR}^{ir}$; และ

(ง) ประวัติเวลาความเครียดไม่คืนกลับการคืบที่แปลงมาจากการคลายความเค้น (ดัดแปลงจาก [7])

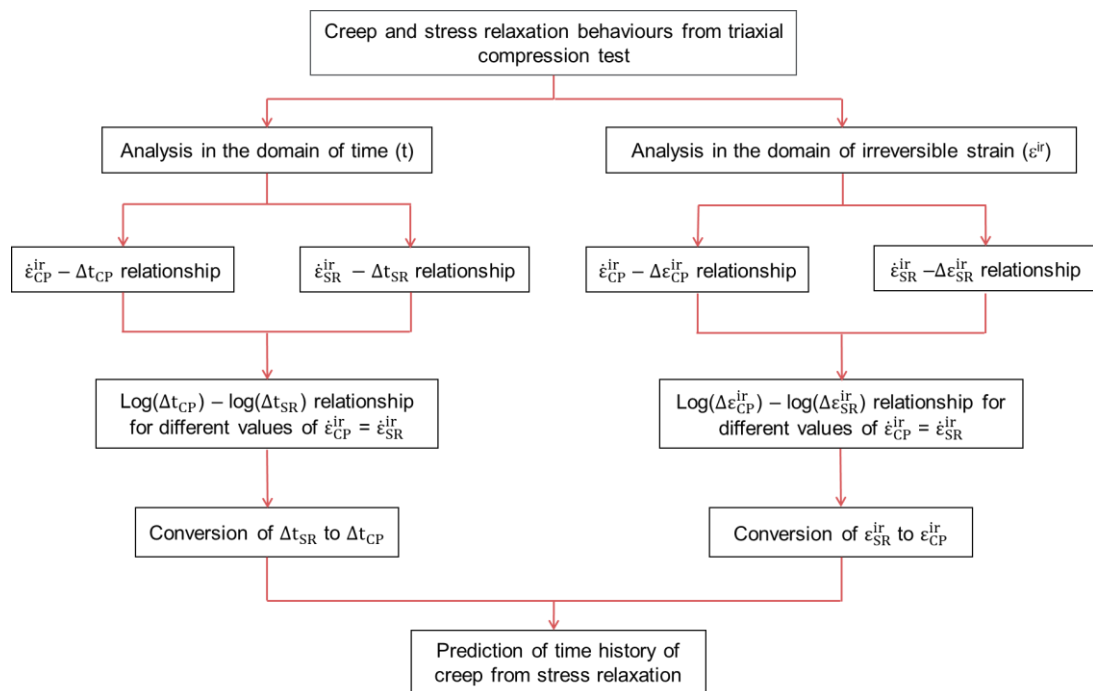
รูปที่ 4 (ก) แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ $R - \epsilon^{ir}$ จากการทดสอบแรงอัดสามแกนสำหรับวัสดุที่มี Viscosity type แบบ Isotach เมื่อให้แรงกระทำแบบต่อเนื่อง (Monotonic loading, ML) ด้วยอัตราความเครียดไม่คืนกลับคงที่เท่ากับ 100 %/min จากจุดเริ่มต้นที่จุด O ไปยังจุด A ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการคืบและการคลายความเค้น เมื่อเริ่มให้แรงกระทำคงค้าง (Sustained loading, SL) จุดสถานะของความเค้น-ความเครียดจะขยับจากจุด A ไปยังจุด B, C, D และ E ตามลำดับ โดยอัตราความเครียดไม่คืนกลับจะลดลง

กับเวลาที่ผ่านไป หากเริ่มให้ความเครียดคงที่ที่จุด A เพื่อให้เกิดการคลายความเค้น (Stress relaxation, SR) จุดสถานะความเค้น-ความเครียดจะเคลื่อนจากจุด A ไปยัง B', C', D' และ E' ตามลำดับ โดยอัตราความเครียดไม่คืนกลับจะลดลงกับเวลาที่ผ่านไปเช่นเดียวกัน ในระหว่างที่เกิดการคืบหรือการคลายความเค้น เราจะสามารถวาดเส้นวงรอบ $R - \epsilon^{ir}$ (Envelope) สำหรับค่าอัตราความเครียดไม่คืนกลับเดียวกัน ได้ดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) จากงานวิจัยในอดีตพบว่า หากวัสดุมี Viscosity type แบบ Isotach เส้นวงรอบที่ได้จากการ

คืบและที่ได้จากการคลายความเค้นจะเป็นเส้นเดียวกัน
[3, 7]

ตารางที่ 2 สมบัติกายภาพและดัชนีของทรายที่ใช้ในงานวิจัยนี้

Specific gravity, G_s	Coefficient of uniformity, C_u	Maximum void ratio, e_{max}	Minimum void ratio, e_{min}	Minimum dry density, $\rho_{d,min}$ (g/cm ³)	Maximum dry density, $\rho_{d,max}$ (g/cm ³)	Mean particle size, D_{50} (mm)
2.65	1.879	1.045	0.710	1.296	1.550	0.285



รูปที่ 5 ขั้นตอนการทำนายประวัติความเครียดไม่คืนกลับการคืบจากประวัติความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้น
(ดัดแปลงจาก [7])

รูปที่ 4 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการคืบ (Δt_{CP}) กับเวลาการคลายความเค้น (Δt_{SR}) ที่สอดคล้องกันกับอัตราความเครียดไม่คืนกลับที่เท่ากัน ความสัมพันธ์นี้สามารถพัฒนาได้มาจากทั้งผลการทดสอบจริงและผลการจำลองด้วยแบบจำลองสามองค์ประกอบไม่เชิงเส้นดังงานวิจัยของ Nuntapanich et al. [7] จากรูปนี้ เราจะพบว่า Δt_{CP} มีค่ามากกว่า Δt_{SR} หรือการคืบจะใช้เวลาการทดสอบนานกว่าการคลายความเค้น ดังนั้น หากเราทราบค่า Δt_{SR} จากการทดสอบการคลายความเค้น เราก็จะสามารถทำนายค่า Δt_{CP} ($\Delta t_{CP,converted}$) ได้

ในทำนองเดียวกัน รูปที่ 4 (ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดไม่คืนกลับการคืบ ($\Delta \epsilon_{CP}^{ir}$) กับความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้น ($\Delta \epsilon_{SR}^{ir}$) ที่สอดคล้องกันกับอัตราความเครียดไม่คืนกลับที่เท่ากัน จากรูปนี้หากเราทราบประวัติ $\Delta \epsilon_{SR}^{ir}$ จากการทดสอบการคลายความเค้น เราก็จะสามารถทำนายค่า $\Delta \epsilon_{CP}^{ir}$ ($\Delta \epsilon_{CP,converted}^{ir}$) ได้
ดังนั้น เมื่อเราพัฒนาความสัมพันธ์ $\Delta t_{CP} - \Delta t_{SR}$ และความสัมพันธ์ $\Delta \epsilon_{CP}^{ir} - \Delta \epsilon_{SR}^{ir}$ ดังแสดงในรูปที่ 4 (ข) และ

4 (ค) ตามลำดับแล้ว หากทำการทดสอบการคลายความเค้นจากจุด A ไปยังจุด E' เราจะสามารถทำนายค่า $\Delta t_{CP,converted}$ และ $\Delta \varepsilon_{CP,converted}^{ir}$ สำหรับการคืบจากจุด A ไปยังจุด E' ได้ดังแสดงในรูปที่ 4 (ง) โดยที่เวลาและความเครียดการคืบที่ได้จากการทำนายการคืบด้วยการคลายความเค้นจะมากกว่าการผลทดสอบการคืบจริง

Nuntapanich et al. [7] ได้เสนอขั้นตอนการพัฒนาโครงสร้างการวิเคราะห์เพื่อการทำนายประวัติความเครียดไม่คืนกลับการคืบจากประวัติความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้นสำหรับตาข่ายเสริมกำลังโพลีเมอร์ ดังรายละเอียดในรูปที่ 5 งานวิจัยนี้จะใช้แนวทางการพัฒนาโครงสร้างการวิเคราะห์ดังกล่าว มาประยุกต์เพื่อใช้ทำนายการคืบจากการคลายความเค้นของทรายเมื่อรับแรงอัดสามแกนดังจะได้อธิบายรายละเอียดต่อไป

3. วิธีการทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นทรายแม่น้ำจากแม่น้ำแม่กลอง จังหวัดราชบุรี ก่อนการนำมาใช้งาน ทรายนี้ได้ผ่านกระบวนการล้างด้วยน้ำประปา เพื่อขจัดอนุภาคฝุ่นและสิ่งสกปรกออก แล้วจึงนำไปอบให้แห้งเพื่อขจัดสารอินทรีย์และทำการร่อนผ่านตะแกรงแล้วนำเฉพาะส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 (0.424 มม.) แต่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 100 (0.150 มม.) มาใช้งาน สมบัติกายภาพและดัชนีของทรายนี้มีดังแสดงในตารางที่ 2 ในงานวิจัยนี้จะเรียกชื่อทรายที่ผ่านกระบวนการเตรียมพร้อมแล้วเสร็จนี้ว่า “ทราย KMUTT”

3.2 การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างทราย KMUTT เพื่อการทดสอบแรงอัดสามแกน เริ่มจากการหล่อขึ้นบริเวณหัวและฐานของตัวอย่างด้วยการทาจารบีซิลิโคนสุญญากาศ (High-vacuum silicone grease) หนา 50 ไมครอน ลงบนผิวฝาบาน (Top cap) และฐาน (Pedestal) แล้วจึงวางแผ่นยางพาราที่มีความหนา 0.3 มม. ลงบนผิวจารบี [8] จากนั้นนำเมมเบรนหุ้มกับฐานและนำโม่ประกบล้อมรอบ แล้วจึงนำปลายของเมมเบรนอีกด้านหนึ่งหุ้มปากโม่บริเวณด้านบน ในขั้นตอนถัดมาจะให้แรงสุญญากาศกับโม่เพื่อดูให้ผิวเมมเบรน

แนบสนิทกับผิวด้านในของโม่ จากนั้นทำการบรรจุทราย KMUTT ลงโม่โดยโปรยผ่านเครื่องมือร่อนผ่านตะแกรงหลายชั้น (Multiple-sieving pluviating machine) เพื่อควบคุมความหนาแน่นให้สม่ำเสมอตลอดทั่วถึงทั้งตัวอย่าง เมื่อบรรจุทรายเต็มโม่และปาดผิวหน้าให้เรียบแล้ว จึงนำฝาบานมาประกบตัวอย่าง แล้วหุ้มเมมเบรนกับฝาบานแล้วรัดให้แน่น จากนั้นจึงลดแรงสุญญากาศต่อโม่ลงจนหมดแล้วทำการให้แรงสุญญากาศบางส่วน (Partial vacuuming) เท่ากับ 10 กิโลปาสคาล ต่อตัวอย่างทรายที่อยู่ในโม่ผ่านทางฝาบานและฐานของตัวอย่างแล้วจึงแกะโม่ออกลักษณะของตัวอย่างเมื่อนำโม่ออกแล้วมีดังแสดงในรูปที่ 6

3.3 การทดสอบแรงอัดสามแกน

เมื่อแกะโม่แล้ว ตัวอย่างทรายจะถูกครอบด้วยเซลล์แรงดัน (Chamber) เพื่อให้แรงดันอากาศกระทำต่อตัวอย่างทรายทดสอบ จากนั้นจึงค่อย ๆ ลดแรงสุญญากาศบางส่วนพร้อม ๆ กับเพิ่มแรงดันเซลล์โดยที่ควบคุมให้แรงดันสุทธิที่กระทำต่อตัวอย่างทรายทดสอบเท่ากับ 20 กิโลปาสคาล จนกระทั่งแรงสุญญากาศบางส่วนเป็นศูนย์ จากนั้นจึงทำการอัดตัวอย่างแบบเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic consolidation) จนกระทั่งแรงดันเซลล์มีค่าเท่ากับ 200 กิโลปาสคาล

เมื่อทำการอัดตัวอย่างจนเสร็จสิ้นแล้ว ตัวอย่างทรายจะถูกเชื่อมด้วยการใช้เครื่องกดความแม่นยำสูง (Precise compression machine) ดังแสดงในรูปที่ 7 เครื่องกดฯ นี้สามารถทำการทดสอบแบบต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้ 1. การทดสอบการคืบและการคลายความเค้น 2. การเปลี่ยนอัตราความเครียดแบบทันทีทันใด และ 3. การทดสอบแบบวัฏจักรที่มีค่าแอมพลิจูดความเครียดน้อยเพื่อหาค่าฮิสเทติกยังก์โมดูลัสในระหว่างการให้แรงกระทำอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราความเครียดคงที่ [9]

3.4 โปรแกรมการทดสอบ

รูปแบบของการให้แรงกระทำเพื่อเชื่อมตัวอย่างทรายทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 1. การให้แรงกระทำอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราความเครียดคงที่ที่แตกต่างกัน 2. การให้แรงกระทำที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดในระหว่างการเชื่อม 3. การให้แรงกระทำ

แบบวัฏจักร 4. การให้แรงกระทำคงค้าง และ 5. การคลายความเค้น การเงื่อนไขตัวอย่างทรายทดสอบใช้อัตราความเครียดพื้นฐานเท่ากับ 0.03 %/min โปรแกรมการทดสอบพร้อมรายละเอียดสำหรับแต่ละตัวอย่างแสดงในตารางที่ 3

4. ชนิดความหนืดของทราย KMUTT

งานวิจัยนี้เป็นการต่อยอดการพัฒนาโครงสร้างการวิเคราะห์เพื่อการแปลงประวัติความเครียดการคืบจากประวัติความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้นจากงานวิจัยของ Nuntapanich et al. [7] ซึ่งได้พัฒนาโครงสร้างการวิเคราะห์จากผลการทดสอบแรงดึงกับตัวอย่างตาข่ายเสริมกำลังโพลิเมอร์ต่าง ๆ ซึ่งมี Viscosity type แบบ Isotach และ Combined โดยงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้แนวทางของโครงสร้างการวิเคราะห์ดังกล่าวกับผลทดสอบแรงอัดสามแกนที่ใช้ตัวอย่างทราย KMUTT ในสภาพแห้งซึ่งควรจะมี Viscosity type แตกต่างออกไปจากแบบ Isotach และ Combined

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเค้น (R) กับความเครียดแนวแกนไม่คืนกลับ (ϵ^{ir}) จากการทดสอบ 05-SJ (ตารางที่ 3) ในการทดสอบนี้ ตัวอย่างทรายถูกเงื่อนไขอย่างต่อเนื่องแต่อัตราความเครียดในระหว่างการเงื่อนไขตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดหลาย ๆ ครั้ง เราจะสังเกตเห็นได้ว่าความเค้นกระโดดขึ้นและกระโดดลงเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างทันทีทันใดตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 8 กับรูปที่ 2 จะพบว่าทราย KMUTT มี Viscosity type แบบ TESRA ในช่วงก่อนจุดสูงสุด แต่เมื่อเข้าสู่ช่วงหลังจุดสูงสุดแล้ว Viscosity type จะเปลี่ยนไปเป็นแบบ P&N พฤติกรรมแบบนี้พบได้เช่นกันกับทรายที่มีอนุภาคเหลี่ยม (Angular) และลักษณะการกระจายขนาดผลึกที่ไม่ดี (Poorly graded) (ตารางที่ 1) ดังที่ได้อธิบายในงานวิจัยของ Tatsuoka et al. [2]

5. การพัฒนาโครงสร้างการวิเคราะห์

5.1 ผลการทดสอบการคืบและการคลายความเค้น

รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ $R - \epsilon^{ir}$ จากการทดสอบการคืบและการคลายความเค้นที่มีจุดเริ่มต้นที่อัตราส่วนความเค้นต่าง ๆ (การทดสอบ 06-CP-SR-1) จากรูปนี้ เราจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าทราย KMUTT แสดงความเครียดการคืบเมื่อให้แรงกระทำคงค้าง และแสดงการคลายความเค้นเมื่อควบคุมให้ความเครียดคงที่ พฤติกรรมดังกล่าวนี้เป็นการตอบสนองจาก Loading rate effect เนื่องจากสมบัติความหนืดของทราย KMUTT เอง จากพฤติกรรมการคืบและการคลายความเค้นจากผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 9 และการทดสอบ 06-CP-SR-2 จะสามารถวิเคราะห์หาประวัติเวลาความเครียดไม่คืนกลับการคืบ ($\Delta\epsilon_{CP}^{ir}$) และความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้น ($\Delta\epsilon_{SR}^{ir}$) ได้ดังแสดงในรูปที่ 10 (ก) และ 10 (ข) ตามลำดับ

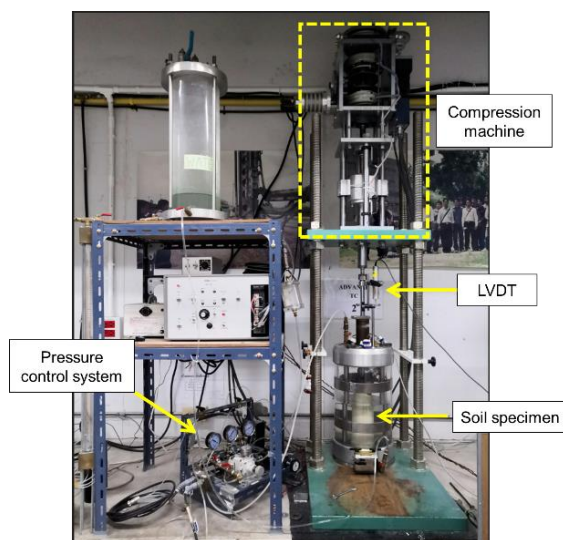
ตารางที่ 3 โปรแกรมการทดสอบแรงอัดสามแกนที่ใช้ในงานวิจัยนี้

No.	Test name	Shearing pattern (s)	$\dot{\epsilon}$ (%/min)	D_r (%)
1	01-ML-0.003	Continuous ML at a constant strain rate	0.003	90.6
2	02-ML-0.03		0.03	89.4
3	03-ML-0.3		0.3	87.8
4	04-ML-1.5		1.5	89.1
5	05-SJ	Stepwise change in the strain rate	0.003 0.03 0.3	82.1
6	06-CP-SR-1	Creep and stress relaxation	0.03	82.6
7	06-CP-SR-2		0.03	85.8
8	07-CP-SR-CL	Creep, Stress relaxation and Cyclic loading	0.03	82.1
9	08-SJ-CP-CL	1. Stepwise change in the strain rate 2. Creep 3. Cyclic loading	0.003 0.03 0.3	82.6
10	09-SJ-CP-SR-CL	1. Stepwise change in the strain rate	0.003 0.03 0.3	82.9

		2. Creep		
		3. Stress relaxation		
		4. Cyclic loading		



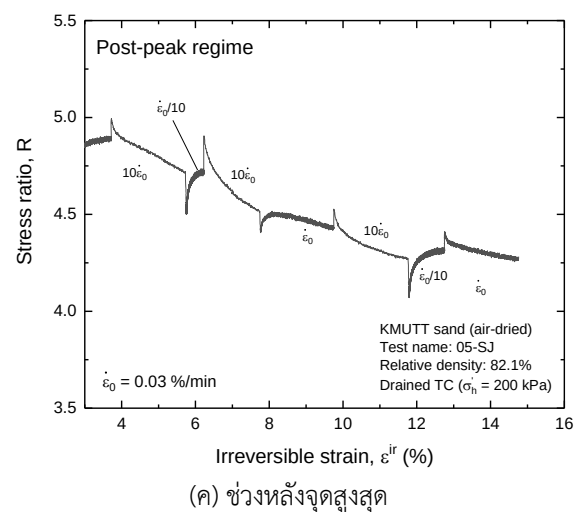
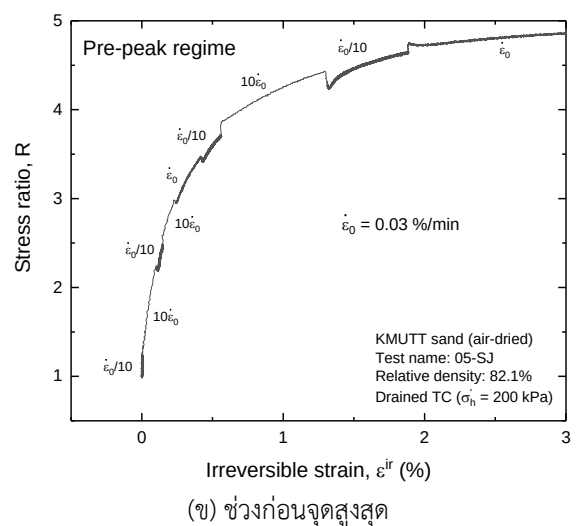
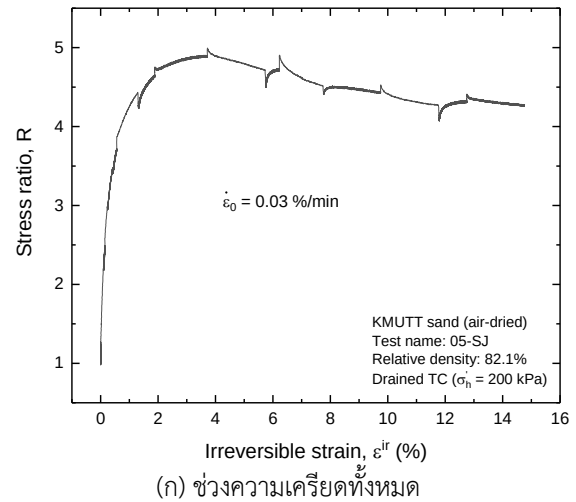
รูปที่ 6 ตัวอย่างทราย KMUTT ภายหลังการแกะ
โมลออกเพื่อใช้สำหรับการทดสอบสามแกน



รูปที่ 7 เครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนที่ใช้ในงานวิจัยนี้

จากประวัติเวลาความเครียดไม่คืนกลับการคืบและความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้นที่แสดงในรูปที่ 10 จะพบว่า ความเครียดไม่คืนกลับทั้งสองแบบจะมีค่าเพิ่มขึ้นกับเวลา และเมื่อเปรียบเทียบที่เวลาเท่ากัน จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนความเค้นมากขึ้น ทั้งนี้ประวัติเวลาความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้นที่อัตราส่วนความเค้นเท่ากับ 1.98 และ 2.49 มีแนวโน้มแตกต่างออกไปจากค่าที่ได้จากอัตราส่วนความเค้นอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 10 (ข)

งานวิจัยนี้จึงไม่ได้นำประวัติความเครียดไม่คืนกลับจากการทดสอบที่อัตราส่วนความเค้น 2 ค่านี้นมาใช้ในการพัฒนาโครงสร้างการวิเคราะห์



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเค้นกับความเครียดไม่คืนกลับแนวแกนซึ่งแสดงความเค้นกระโดดเมื่ออัตราความเครียดเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจากการทดสอบ 05-SJ

5.2 ประวัติเวลาอัตราความเครียดไม่คืนกลับ

จากการทดสอบการคืบ ความเครียดการคืบที่เกิดขึ้น ($\Delta \varepsilon_{CP}$) จะมีค่าเท่ากับความเครียดไม่คืนกลับที่เกิดขึ้นในระหว่างที่ให้แรงกระทำคงค้างหรือความเครียดไม่คืนกลับการคืบ ($\Delta \varepsilon_{CP}^{ir}$) ทั้งนี้เป็นเพราะว่าความเค้นไม่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการคืบ ($\dot{R} = 0$) ดังนั้นจากแบบจำลองสามองค์ประกอบไม่เชิงเส้น (รูปที่ 3) จะได้ว่า อัตราความเครียดอีลาสติกเท่ากับศูนย์ ($\dot{\varepsilon}^e = 0$) ดังนั้นจากสมการที่ 2 จะได้ว่า $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^{ir}$ ในระหว่างการคืบ

ในระหว่างการทดสอบการคลายความเค้น ความเครียดถูกควบคุมให้มีค่าเท่ากับศูนย์ ($\dot{\varepsilon} = 0$) แต่ความเค้นจะลดลง ($\dot{R} < 0$) ดังนั้นจากแบบจำลองสามองค์ประกอบไม่เชิงเส้น เราจะเห็นได้ว่า อัตราความเครียดอีลาสติกจะมีค่าเป็นลบ ($\dot{\varepsilon}^e < 0$) และเพื่อคงไว้ซึ่งอัตราความเครียดเท่ากับศูนย์ ($\dot{\varepsilon} = 0$) อัตราความเครียดไม่คืนกลับจะมีค่าเป็นบวก ($\dot{\varepsilon}^{ir} > 0$) กล่าวคือ อัตราความเครียดที่เกิดขึ้นในระหว่างการคลายความเค้นจะมีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ (3)

$$\Delta \varepsilon_{SR} = \Delta \varepsilon_{SR}^e + \Delta \varepsilon_{SR}^{ir} = 0 \quad (3)$$

ดังนั้น ค่า $\Delta \varepsilon_{SR}^{ir}$ มีค่าเท่ากับ $-\Delta \varepsilon_{SR}^e$ ในระหว่างการคลายความเค้น และค่า $\Delta \varepsilon_{SR}^e$ ที่เวลาต่าง ๆ ในระหว่างการคลายความเค้นจะหาได้จากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความเค้น (ΔR) ดังแสดงในสมการที่ 4

$$\Delta \varepsilon_{SR}^{ir} = -\Delta \varepsilon_{SR}^e = -\frac{\Delta R}{E_{eq}(R)} \quad (4)$$

เมื่อ $E_{eq}(R)$ คืออีลาสติคยังก์โมดูลัสเทียบเท่า (Quasi-elastic Young's modulus) [7]

อัตราความเครียดไม่คืนกลับ ($\dot{\varepsilon}^{ir}$) สามารถหาได้จากการหาอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของประวัติเวลาความเครียดไม่คืนกลับ แต่ประวัติเวลาความเครียดไม่คืนกลับที่บันทึกได้จากการทดสอบมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงความชันสัมผัสที่

แปรปรวนดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 11 ซึ่งจะส่งผลต่อการกระจายค่าอัตราความเครียด ที่ได้จากการหาอนุพันธ์กับประวัติเวลาความเครียดที่วัดได้จากการทดสอบโดยตรง นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์ในขั้นต้นพบว่า ไม่สามารถฟิตประวัติเวลาของความเครียดไม่คืนกลับสำหรับระยะเวลาการทดสอบทั้งหมดได้ด้วยสมการเพียงสมการเดียว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้วิธีแบ่งประวัติเวลาความเครียดไม่คืนกลับออกเป็นช่วง ๆ แล้วฟิตแต่ละช่วงด้วยสมการพหุนามกำลังสาม (Segmental polynomial fitting [10]) ซึ่งแสดงในสมการที่ (5)

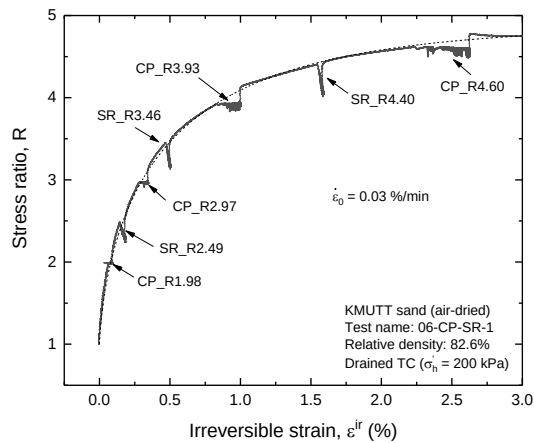
$$\varepsilon^{ir} = A + B \times \log(\Delta t) + C \times [\log(\Delta t)]^2 + D \times [\log(\Delta t)]^3 \quad (5)$$

เมื่อนำสมการที่ 5 มาหาอนุพันธ์อันดับหนึ่ง จะได้ดังสมการที่ (6)

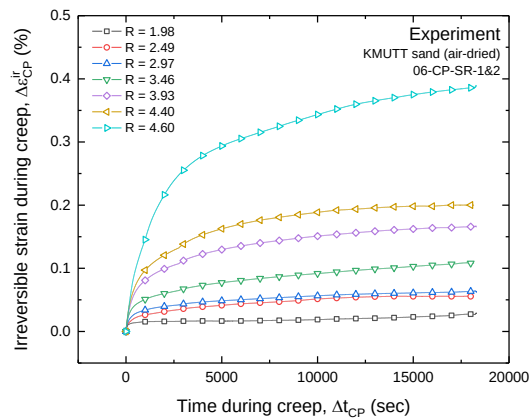
$$\frac{d\varepsilon^{ir}}{dt} = \frac{B}{\ln 10} \cdot \frac{1}{\Delta t} + \frac{2C}{(\ln 10)^2} \cdot \frac{\ln(\Delta t)}{\Delta t} + \frac{3D}{(\ln 10)^3} \cdot \frac{[\ln(\Delta t)]^2}{\Delta t} \quad (6)$$

เมื่อ ε^{ir} คือ ความเครียดไม่คืนกลับจากการคืบหรือการคลายความเค้น (%); Δt คือ เวลาที่มีจุดเริ่มต้นที่จุดเริ่มต้นของการคืบหรือการคลายความเค้น (วินาที); A, B, C, และ D เป็นค่าคงที่สำหรับแต่ละช่วง

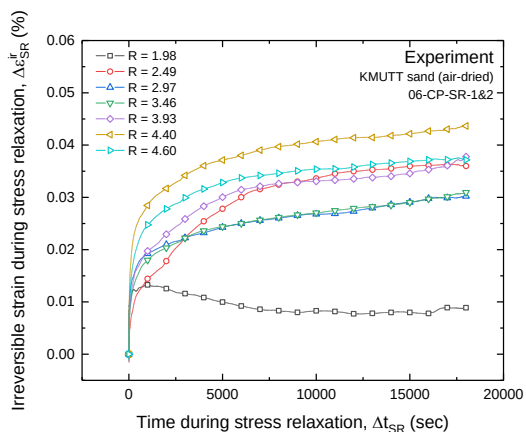
ตัวอย่างการใช้ Segmental polynomial fitting (สมการที่ 5) สำหรับฟิตประวัติเวลาความเครียดไม่คืนกลับแสดงในรูปที่ 11 ซึ่งเป็นประวัติเวลาความเครียดการคืบจากการทดสอบ 06-CP-SR-1 ที่อัตราส่วนความเค้น $R = 4.60$ วิธีการฟิตข้อมูลแบบนี้ใช้กับทั้งผลการทดสอบการคืบและการคลายความเค้นอื่น ๆ ทั้งหมดในงานวิจัยนี้ (ตารางที่ 3) จากนั้น เราจะสามารถหาประวัติเวลาของอัตราความเครียดไม่คืนกลับได้จากสมการที่ 6 รูปที่ 12 (ก) และ 12 (ข) แสดงประวัติเวลาอัตราความเครียดไม่คืนกลับการคืบและประวัติเวลาอัตราความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้น ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดสอบ 06-CP-SR-1 และ 06-CP-SR-2



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเค้นกับความเครียดไม่คืนกลับจากการทดสอบ 06-CP-SR-1 ที่แสดงการคืบและการคลายความเค้นที่อัตราส่วนความเค้นต่าง ๆ ที่แทรกระหว่างการเงื่อนไขตัวอย่างด้วยอัตราความเครียดคงที่

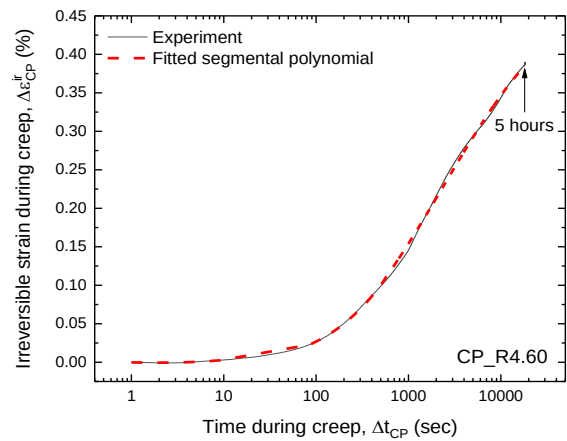


(ก) การคืบ

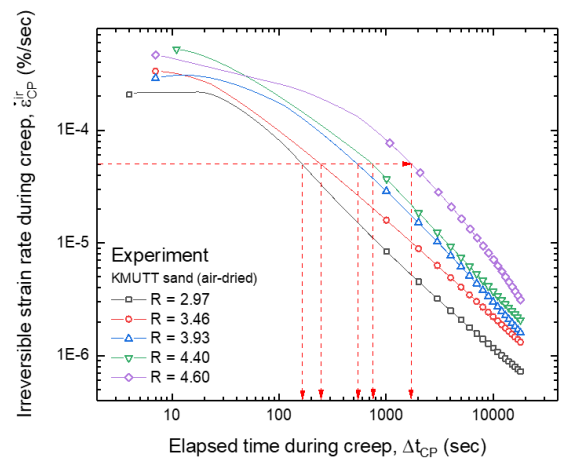


(ข) การคลายความเค้น

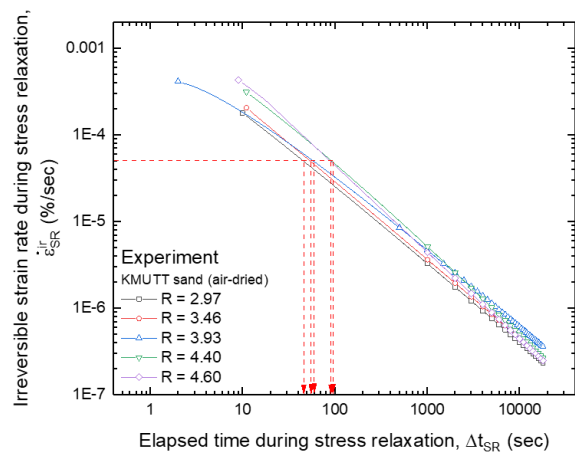
รูปที่ 10 ประวัติเวลาความเครียดไม่คืนกลับจากการทดสอบ 06-CP-SR-1 และ 06-CP-SR-2



รูปที่ 11 ประวัติเวลาความเครียดไม่คืนกลับการคืบที่อัตราส่วนความเค้นเท่ากับ 4.60 จากการทดสอบ 06-CP-SR-1 เปรียบเทียบกับผลการฟิตข้อมูลด้วยวิธี Segmental polynomial fitting



(ก) การคืบ



(ข) การคลายความเค้น

รูปที่ 12 ประวัติเวลาของอัตราความเครียดไม่คืนกลับจากการทดสอบ 06-CP-SR-1 และ 06-CP-SR-2

5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการคืบและเวลาการคลายความเค้น

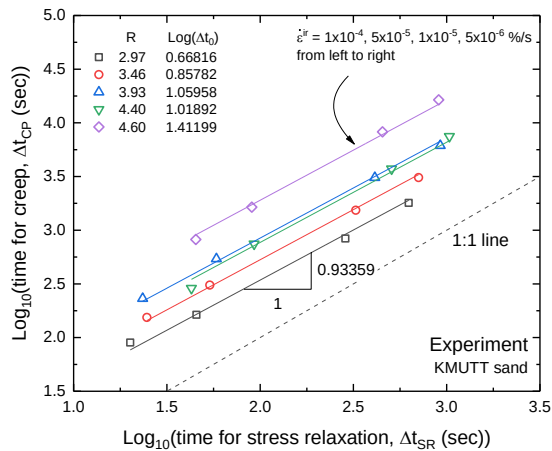
เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนความเครียดไม่คืนกลับ ($\dot{\epsilon}^{ir}$) ในรูปที่ 12 (ก) และ 12 (ข) เราสามารถอ่านข้อมูลเวลาการคืบ (Δt_{CP}) และเวลาการคลายความเค้น (Δt_{SR}) ที่สอดคล้องได้ตามลำดับ งานวิจัยนี้เลือกที่จะกำหนดค่า $\dot{\epsilon}^{ir}$ เท่ากับ 10^{-4} , 5×10^{-5} , 10^{-5} และ 5×10^{-6} %/s เพื่อใช้อ่านค่า Δt_{CP} และ Δt_{SR} จากรูปที่ 12 (ก) และ 12 (ข) จากนั้นจึงนำค่า Δt_{CP} และ Δt_{SR} ที่อ่านได้ที่ค่า $\dot{\epsilon}^{ir}$ เดียวกัน ($\dot{\epsilon}_{CP}^{ir} = \dot{\epsilon}_{SR}^{ir}$) มาสร้างความสัมพันธ์กันจะได้ดังรูปที่ 13 จากรูปนี้ เราจะสามารถสังเกตแนวโน้มพฤติกรรมดังต่อไปนี้ได้

1. จุดข้อมูลทั้งหมดอยู่เหนือเส้น 1:1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราความเครียดไม่คืนกลับค่าเดียวกัน เวลาการคืบนานกว่าเวลาการคลายความเค้น
2. ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการคืบกับเวลาการคลายความเค้นมีลักษณะเป็นเส้นตรงเมื่อพล็อตในมาตราส่วนลอการิทึม ดังนั้นจึงสามารถพิตข้อมูลความสัมพันธ์ดังกล่าวด้วยสมการที่ 7

$$\log(\Delta t_{CP}) = S_i \cdot \log(\Delta t_{SR}) + \log(\Delta t_0) \quad (7)$$

เมื่อ Δt_{CP} คือเวลาการคืบ (s); Δt_{SR} คือเวลาการคลายความเค้น (s); S_i คือความชันเฉลี่ย; และ Δt_0 คือจุดตัดแกนตั้ง (s)

3. ค่า Δt_0 มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความเค้นที่จุดเริ่มต้นการคืบและการคลายความเค้น (R_i) ใน



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการคืบ (Δt_{CP}) กับเวลาการคลายความเค้น (Δt_{SR})

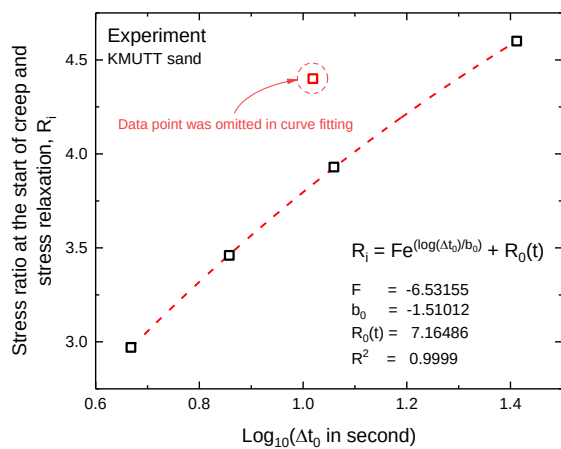
ลักษณะไม่เชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 14 งานวิจัยนี้พบว่าสมการเอกซ์โพเนนเชียลชื่อ “ExpGro1” ดังแสดงในสมการที่ 8 สามารถพิตจุดข้อมูลความสัมพันธ์ดังกล่าวได้อย่างเหมาะสม

$$R_i = F \cdot e^{(\log(\Delta t_0)/b_0)} + R_0(t) \quad (8)$$

เมื่อ R_i คืออัตราส่วนความเค้นที่จุดเริ่มต้นการคืบและการคลายความเค้น; F , b_0 , และ $R_0(t)$ คือค่าคงที่ดังแสดงในรูปที่ 14

5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดไม่คืนกลับกับความเครียดไม่คืนกลับ

จากการทดสอบการคืบและการคลายความเค้น นอกจากเราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดไม่คืนกลับกับเวลาดังแสดงในรูปที่ 12 (ก) และ 12 (ข) แล้ว เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดไม่คืนกลับกับความเครียดไม่คืนกลับอีกด้วย รูปที่ 15 (ก) และ 15 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดไม่คืนกลับกับความเครียดไม่คืนกลับการคืบ ($\dot{\epsilon}_{CP}^{ir} - \Delta \epsilon_{CP}^{ir}$) และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดไม่คืนกลับกับความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้น ($\dot{\epsilon}_{SR}^{ir} - \Delta \epsilon_{SR}^{ir}$) ตามลำดับ



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเค้นเริ่มต้นการคืบและการคลายความเค้น (R_i) กับค่า Δt_0

เมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 12 และ 15 เข้าด้วยกัน เราจะพบว่า ลักษณะความสัมพันธ์ $\dot{\epsilon}^{ir} - \Delta t$ (รูปที่ 12) คล้ายคลึงกันกับ ความสัมพันธ์ $\dot{\epsilon}^{ir} - \Delta \epsilon^{ir}$ (รูปที่ 15)

5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดไม่คืนกลับการคืบ กับความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้น

จากความสัมพันธ์ $\dot{\epsilon}_{CP}^{ir} - \Delta \epsilon_{CP}^{ir}$ จากการคืบ (รูปที่ 15 (ก)) และความสัมพันธ์ $\dot{\epsilon}_{SR}^{ir} - \Delta \epsilon_{SR}^{ir}$ จากการคลายความเค้น (รูปที่ 15 (ข)) เราจะสามารถอ่านค่าความเครียดไม่คืนกลับ ($\Delta \epsilon^{ir}$) ตอบสนองเมื่อกำหนดค่าอัตราความเครียดไม่คืนกลับได้ ในงานวิจัยนี้เลือกที่จะกำหนดค่าอัตราความเครียดไม่คืนกลับชุดเดียวกันกับที่ใช้สร้างความสัมพันธ์ $\Delta t_{CP} - \Delta t_{SR}$ (รูปที่ 13) เมื่อนำค่า $\Delta \epsilon_{CP}^{ir}$ และ $\Delta \epsilon_{SR}^{ir}$ ที่อ่านได้ที่ค่า $\dot{\epsilon}^{ir}$ เดียวกัน ($\dot{\epsilon}_{CP}^{ir} = \dot{\epsilon}_{SR}^{ir}$) มาสร้างความสัมพันธ์กันดังรูปที่ 16 ซึ่งมีแนวโน้มพฤติกรรมที่สังเกตได้ดังนี้

1. จุดข้อมูลทั้งหมดอยู่เหนือเส้น 1:1 กล่าวคือ ความเครียดไม่คืนกลับการคืบมีค่ามากกว่าความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้นเสมอ เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราความเครียดไม่คืนกลับค่าเดียวกัน
2. ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดไม่คืนกลับการคืบกับความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้น มีลักษณะเป็นเส้นตรงเมื่อพล็อตในมาตราส่วนลอการิทึม ดังนั้นจึงสามารถพิตข้อมูลความสัมพันธ์ดังกล่าวด้วยสมการที่ (9)

$$\log(\Delta \epsilon_{CP}^{ir}) = S_\epsilon \cdot \log(\Delta \epsilon_{SR}^{ir}) + \log(\Delta \epsilon_0) \quad (9)$$

เมื่อ $\Delta \epsilon_{CP}^{ir}$ คือความเครียดไม่คืนกลับการคืบ (%);

$\Delta \epsilon_{SR}^{ir}$ คือความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้น (%); S_ϵ คือความชันเฉลี่ย และ $\Delta \epsilon_0$ คือจุดตัดแกนตั้ง

3. ค่า $\Delta \epsilon_0$ มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความเค้นที่จุดเริ่มต้นการคืบและการคลายความเค้น (R_i) ในลักษณะไม่เชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 17 ซึ่งสามารถพิตความสัมพันธ์ดังกล่าวด้วยสมการเอกซ์โปเนนเชียลชื่อ “ExpGro1” ดังแสดงในสมการที่ (10)

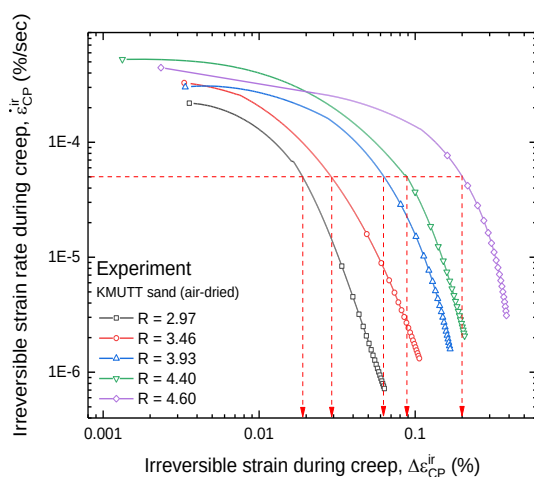
$$R_i = G \cdot e^{(\log(\Delta \epsilon_0)/d_0)} + R_0(\epsilon) \quad (10)$$

เมื่อ R_i คืออัตราส่วนความเค้นที่จุดเริ่มต้นการคืบและการคลายความเค้น; G , d_0 , และ $R_0(\epsilon)$ คือค่าคงที่ดังแสดงในรูปที่ 17

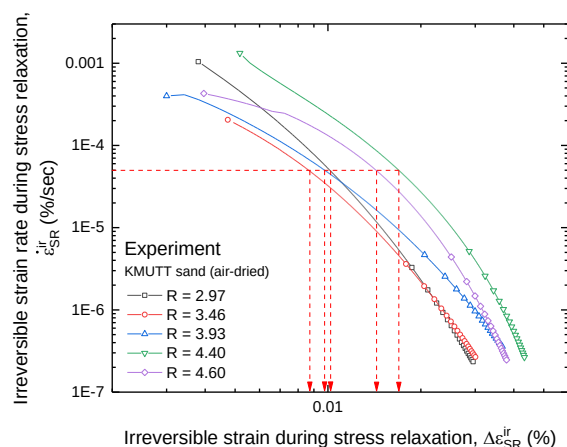
5.6 ขั้นตอนการแปลงประวัติเวลาการคืบด้วยประวัติเวลาการคลายความเค้น

การแปลงประวัติเวลาการคลายความเค้นเป็นประวัติเวลาการคืบมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ค่า Δt_0 ที่อัตราส่วนความเค้นต่าง ๆ สามารถหาได้จากการแทนค่าอัตราส่วนความเค้นที่จุดเริ่มต้นการคืบและ



(ก) การคืบ



(ข) การคลายความเค้น

รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดไม่คืนกลับกับความเครียดไม่คืนกลับ

จากการทดสอบ 06-CP-SR-1 และ 06-CP-SR-2

การคลายความเค้น (R_i) และค่าคงที่ F , b_0 และ $R_0(t)$ ลงในสมการที่ (8) ซึ่งสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ (11)

$$\Delta t_0 = 10^{b_0 \cdot \ln\left(\frac{R_i - R_0(t)}{F}\right)} \quad (11)$$

2. การแปลงเวลาการคลายความเค้น (Δt_{SR}) เป็นเวลาการคืบ (Δt_{CP}) ทำได้โดยแทนค่า Δt_0 จากขั้นตอนก่อนหน้านี้ และ S_i ลงในสมการที่ (7) ซึ่งสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ (12)

$$\Delta t_{CP} = 10^{(S_i \cdot \log(\Delta t_{SR}) + \log(\Delta t_0))} \quad (12)$$

3. ค่า $\Delta \varepsilon_0$ หาได้จากสมการที่ (10) เมื่อทราบค่า R_i และค่าคงที่ G , d_0 และ $R_0(\varepsilon)$ โดยสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ (13)

$$\Delta \varepsilon_0 = 10^{d_0 \cdot \ln\left(\frac{R_i - R_0(\varepsilon)}{G}\right)} \quad (13)$$

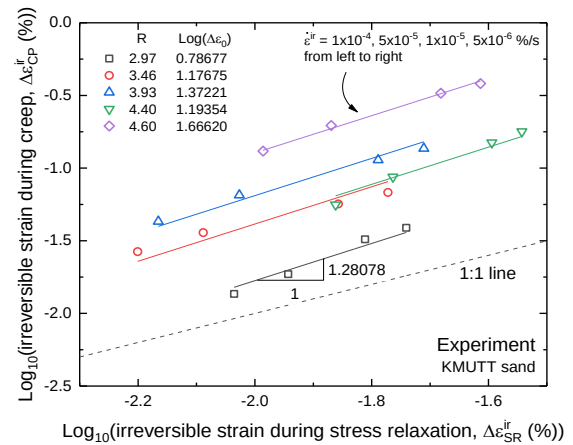
4. ค่า $\Delta \varepsilon_{SR}^{ir}$ สามารถแปลงเป็น $\Delta \varepsilon_{CP}^{ir}$ ได้โดยแทนค่า $\Delta \varepsilon_0$ จากขั้นตอนก่อนหน้านี้ และค่าคงที่ S_e ลงในสมการที่ (9) ซึ่งสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ (14)

$$\Delta \varepsilon_{CP}^{ir} = 10^{(S_e \cdot \log(\Delta \varepsilon_{SR}^{ir}) + \log(\Delta \varepsilon_0))} \quad (14)$$

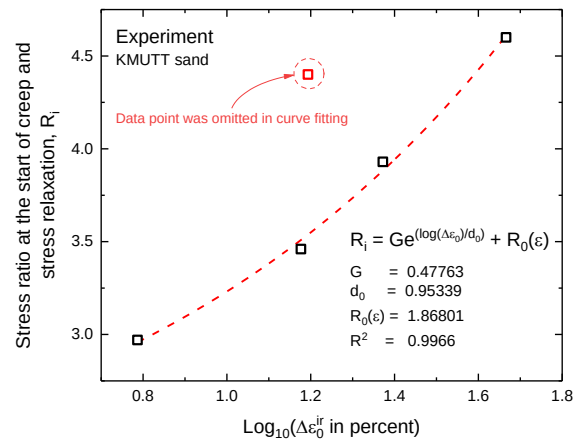
6. ผลการแปลงประวัติเวลาการคืบด้วยประวัติเวลาการคลายความเค้น

รูปที่ 18 เปรียบเทียบประวัติเวลาความเครียดไม่คืนกลับการคืบ ($\Delta \varepsilon_{CP}^{ir}$) ประวัติเวลาความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้น ($\Delta \varepsilon_{SR}^{ir}$) และประวัติเวลาความเครียดไม่คืนกลับการคืบที่แปลงจากประวัติเวลาความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้น ($\Delta \varepsilon_{CP,converted}^{ir}$; รูปที่ 4 (ง)) ที่ค่าอัตราส่วนความเค้นต่าง ๆ จากผลการทดสอบ 06-CP-SR-1 และ 06-CP-SR-2 และผลการวิเคราะห์ตามโครงสร้างการวิเคราะห์ที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ จากรูปที่ 18 จะพบว่า 1. ประวัติเวลาของค่า $\Delta \varepsilon_{CP,converted}^{ir}$ ที่ได้จากการ

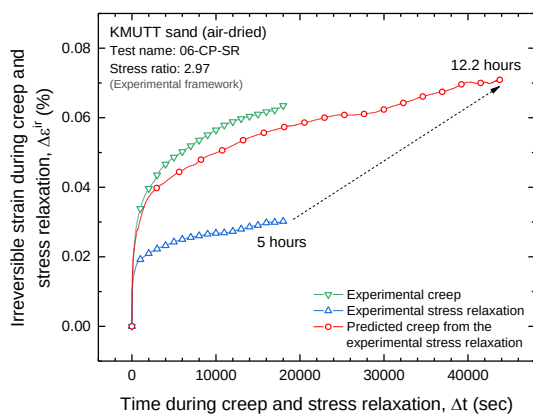
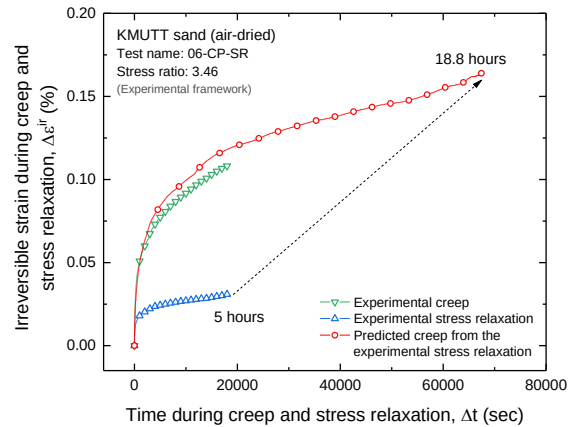
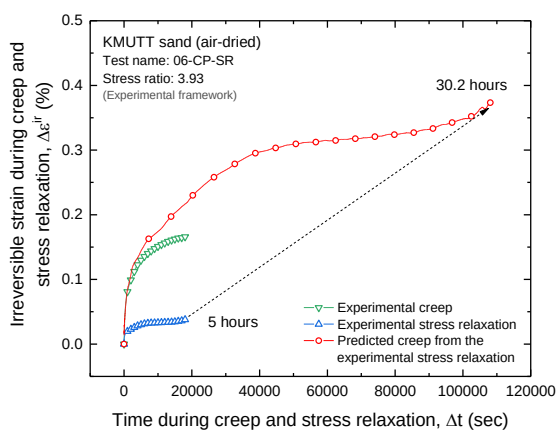
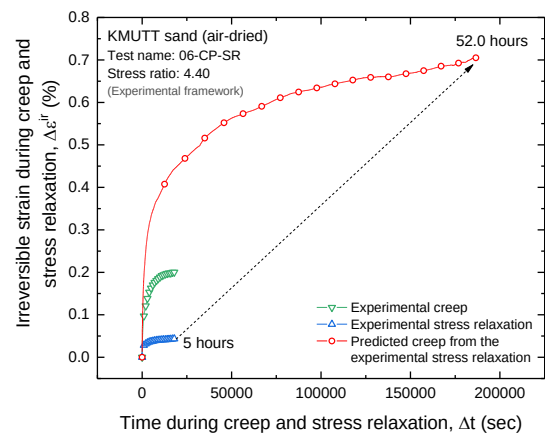
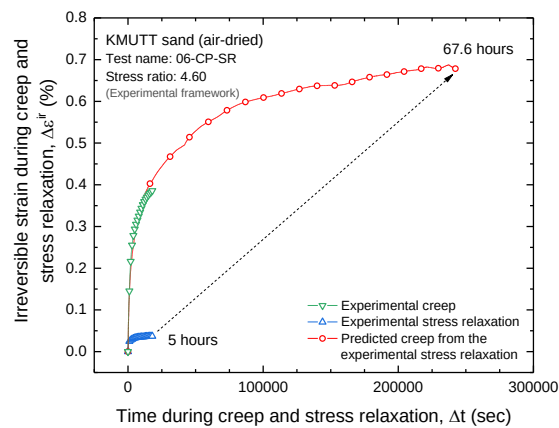
แปลงด้วยโครงสร้างการวิเคราะห์สอดคล้องกับประวัติเวลาของค่า $\Delta \varepsilon_{CP}^{ir}$ ที่ได้จากการทดสอบจริง โดยมีลักษณะคล้าย ๆ กับการขยายประวัติเวลาของค่า $\Delta \varepsilon_{SR}^{ir}$ ให้มาสอดคล้องกับประวัติเวลาของค่า $\Delta \varepsilon_{CP}^{ir}$ และ 2. เวลาการคืบที่ได้จากการแปลงจากเวลาการคลายความเค้น ($\Delta t_{CP,converted}$; รูปที่ 4 (ง)) มากกว่าระยะเวลาทดสอบการคลายความเค้นจริง (5 ชั่วโมง) อย่างมีนัยสำคัญมาก



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดไม่คืนกลับการคืบ ($\Delta \varepsilon_{CP}^{ir}$) กับความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้น ($\Delta \varepsilon_{SR}^{ir}$)



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเค้นเริ่มต้นการคืบและการคลายความเค้น (R_i) กับค่า $\Delta \varepsilon_0$

(ก) $R = 2.97$ (ข) $R = 3.46$ (ค) $R = 3.93$ (ง) $R = 4.40$ (จ) $R = 4.60$

รูปที่ 18 ประวัติเวลาการคืบที่แปลงจากประวัติเวลาการคลายความเค้นเปรียบเทียบกับประวัติเวลาความเครียดไม่คืนกลับ การคืบและประวัติเวลาความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้นที่ได้จากผลการทดสอบ 06-CP-SR-1 และ 06-CP-SR-2 ที่อัตราส่วนความเค้นต่าง ๆ

โครงสร้างการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นจากผลการทดสอบ 06-CP-SR-1 และ 06-CP-SR-2 (หัวข้อที่ 5) ยังสามารถนำไปใช้ทำนายประวัติเวลาความเครียดการคืบจากการคลายความเค้นของทราย KMUTT ที่อัตราส่วนความเค้นอื่น ๆ จากผลการทดสอบอื่น ๆ นอกจากที่กล่าวมาข้างต้นได้อีกด้วย จากโปรแกรมการทดสอบ (ตารางที่ 3) การทดสอบอื่นที่มีประวัติการให้แรงกระทำคงค้างเพื่อให้เกิดการคืบได้แก่ การทดสอบ 07-CP-SR-CL, 08-SJ-CP-CL และ 09-SJ-CP-SR-CL โดยที่ประวัติเวลาการคลายความเค้นที่อัตราส่วนความเค้นเท่ากับ 4.64 ในการทดสอบ 08-SJ-CP-CL และ 09-SJ-CP-SR-CL ได้มาจากการจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยแบบจำลองสามองค์ประกอบไม่เชิงเส้น [2] แล้วนำไปแปลงเป็นประวัติเวลาความเครียดการคืบด้วยโครงสร้างการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ (หัวข้อที่ 5) แล้วจึงนำไปเปรียบเทียบกับประวัติเวลาการคืบที่วัดได้จริงจากการทดสอบดังกล่าว

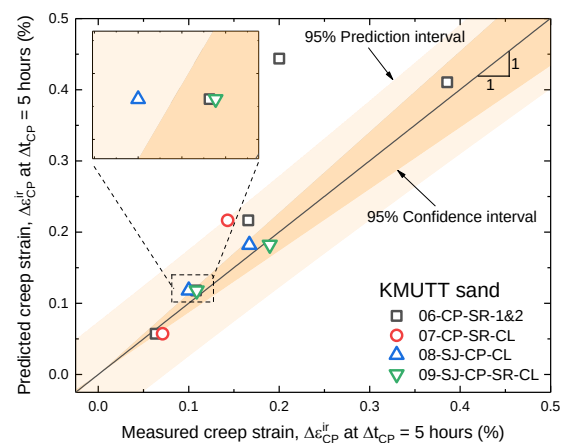
จากรูปที่ 18 เราอาจสังเกตได้ว่า เวลาการคืบที่ได้จากการแปลงจากเวลาการคลายความเค้นที่อัตราส่วนความเค้นที่แตกต่างกันจะแตกต่างกัน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้นิยามอัตราส่วนระหว่างเวลาการคืบที่ได้จากแปลงด้วยโครงสร้างการวิเคราะห์ต่อเวลาการคลายความเค้น (5 ชั่วโมง) ซึ่งจะเรียกว่าแฟกเตอร์เวลา (Time factor) ดังสมการที่ (15)

$$\text{Time factor} = \frac{\Delta t_{CP, \text{converted}}}{\Delta t_{SR, \text{original}}} \quad (15)$$

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์เวลาที่ได้จากการแปลงประวัติเวลาการคลายความเค้นไปเป็นประวัติเวลาการคืบด้วยโครงสร้างการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นที่อัตราส่วนความเค้นต่าง ๆ จากตารางนี้ เราจะพบว่า เมื่ออัตราส่วนความเค้นเพิ่มมากขึ้น ค่าแฟกเตอร์เวลาก็จะเพิ่มขึ้นตามกันไปด้วย นั่นหมายความว่า อัตราการขยายประวัติเวลาความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้นไปยังประวัติเวลาความเครียดไม่คืนกลับการคืบจะเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนความเค้นเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4 แฟกเตอร์เวลาและความคลาดเคลื่อนของผลการทำนายความเครียดการคืบจากการคลายความเค้น

Stress ratio, R	Time factor	Difference between the predicted and the measured values of $\Delta \epsilon_{CP}^{ir}$ at $\Delta t_{CP} = 5$ hours (%)
Test: 06-CP-SR-1 and 06-CP-SR-2		
2.97	2.44	9.90
3.46	3.76	9.15
3.93	6.04	30.58
4.40	10.40	121.71
4.60	13.52	6.45
Test: 07-CP-SR-CL		
2.97	2.44	19.65
3.93	6.04	51.36
Test: 08-SJ-CP-CL		
3.46	3.76	18.06
4.64	14.84	9.08
Test: 09-SJ-CP-SR-CL		
3.46	3.76	8.45
4.64	14.82	3.86



รูปที่ 19 การเปรียบเทียบค่าความเครียดไม่คืนกลับจากการทำนายและจากการทดสอบที่ Δt_{CP} เท่ากับ 5 ชั่วโมง

ความแตกต่างระหว่างค่าความเครียดการคืบที่แปลงจากการคลายความเค้นกับค่าความเครียดการคืบจากการทดสอบการคืบจริง เมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเวลาเท่ากับ 5 ชั่วโมงแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งจะพบว่า โดยภาพรวมแล้วความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อย ยกเว้นสำหรับการทำนายที่อัตราความเค้นเท่ากับ 4.40 ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะประวัติเวลาความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้นจากการทดสอบแรงอัดสามแกนที่อัตราส่วนความเค้นเท่ากับค่านี้ (รูปที่ 10 (ข)) มีค่ามากผิดไปจากแนวโน้มพฤติกรรมที่ได้จากการทดสอบการคลายความเค้นที่อัตราส่วนความเค้นค่าอื่น ๆ จึงส่งผลให้ค่าความเครียดไม่คืนกลับการคืบที่ได้จากการแปลงมีค่ามากผิดปกติตามไปด้วย

รูปที่ 19 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเครียดการคืบที่ทำนายจากการคลายความเค้นกับค่าความเครียดการคืบที่ได้จากการทดสอบจริงที่ระยะเวลาเท่ากับ 5 ชั่วโมงที่อัตราส่วนความเค้นต่าง ๆ ตามตารางที่ 4 จากรูปนี้ เราจะเห็นว่าผลการทำนายส่วนใหญ่อยู่บนเส้น 1:1 และมีข้อมูลบางส่วนที่แสดงผลการทำนายมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง แต่กระนั้น ผลการทำนายทั้งหมดอยู่ภายในช่วงพิสัยการทำนาย (Prediction interval) ที่ร้อยละ 95

7. สรุปผลการศึกษา

จากการผลการทดสอบ และผลการทำนายประวัติความเครียดการคืบจากพฤติกรรมการคลายความเค้นของทราย KMUTT ด้วยโครงสร้างการวิเคราะห์ที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ สามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

1. จากการทดสอบแรงอัดสามแกนกับทราย KMUTT พบว่า ทรายชนิดนี้มีชนิดความหนืดที่ไม่ใช่แบบ Isotach โดยชนิดความหนืดเป็นแบบ TESRA ในช่วงก่อนจุดสูงสุด และเปลี่ยนแปลงตามค่าความเครียดเฉือนไม่คืนกลับที่เพิ่มขึ้นไปเป็นแบบ P&N ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของทรายชนิดอื่น ๆ ที่มีอนุภาคเหลี่ยมคมและมีการกระจายขนาดผลที่ไม่ดีจากงานวิจัยอดีต
2. ทราย KMUTT แสดงพฤติกรรมความเครียดการคืบและการคลายความเค้น เมื่อให้แรงกระทำ

คงค้างและเมื่อควบคุมความเครียดให้คงที่ตามลำดับ ในระหว่างการคลายความเค้น ถึงแม้ว่าความเครียดจะมีค่าคงที่ แต่ความเครียดไม่คืนกลับจะเพิ่มขึ้น ความเครียดไม่คืนกลับการคืบและความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้นจะเพิ่มขึ้นกับเวลาด้วยอัตราที่ลดลงเรื่อย ๆ พฤติกรรม การคลายความเค้นจะใช้เวลาไปสู่อัตราความเครียดไม่คืนกลับค่าเดียวกันสั้นกว่าพฤติกรรมการคืบ

3. ประวัติเวลาความเครียดการคืบของทราย KMUTT สามารถแปลงจากประวัติเวลาความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้นด้วยโครงสร้างการวิเคราะห์ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ได้ โดยสำเร็จ ซึ่งมีพื้นฐานมาจากพฤติกรรมของต่ายเสริมแรงโพลิเมอร์ที่มีชนิดความหนืดแบบ Isotach จากงานวิจัยในอดีต ดังนั้นโครงสร้างการวิเคราะห์ดังกล่าวจึงสามารถนำมาใช้กับวัสดุที่มีชนิดความหนืดอื่น ๆ เช่น TESRA, P&N ได้
4. ประวัติเวลาความเครียดการคืบที่ได้จากการแปลงประวัติเวลาความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้นที่อัตราส่วนความเค้นค่าต่าง ๆ มีลักษณะเป็นการขยายสเกลของระยะเวลาและความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้นแปลงไปสู่ระยะเวลาและความเครียดการคืบ ประวัติเวลาความเครียดการคืบที่ได้จากการแปลงมีลักษณะใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดสอบการคืบจริง เวลาที่จุดสุดท้ายของความเครียดการคืบที่แปลงได้ยาวกว่าเวลาที่จุดสุดท้ายของการคลายความเค้นอย่างมีนัยสำคัญ อัตราส่วนระหว่างเวลาสองค่านี้เรียกว่า แฟกเตอร์เวลา ซึ่งพบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนความเค้นที่จุดเริ่มต้นการคืบและการคลายความเค้น

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยและวิชาการตามแผนกลยุทธ์เพื่อการพัฒนาภาควิชาวิศวกรรมโยธา

ภายใต้โครงการการสร้างความเข้มแข็งให้กับหน่วยวิจัย
ในภาควิชาวิศวกรรมโยธา มจร. ประจำปีงบประมาณ 2562
(CE-KMUTT 6205) ผู้เขียนลำดับที่ 1 ขอขอบพระคุณ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
ธนบุรี ที่ได้สนับสนุนทุนการศึกษาเพชรโยธา เพื่อการศึกษา
และการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Tatsuoka, F., (2007), Inelastic Deformation Characteristics of Geomaterial, *Soil Stress-Strain Behavior: Measurement, Modeling and Analysis*, March 2007, pp 1-108.
- [2] Tatsuoka, F., Di Benedetto, H., Enomoto, T., Kawabe, S. and Kongkitkul, W., (2008), Various Viscosity Types of Geomaterials in Shear and Their Mathematical Expression, *Soils and Foundations*, Vol. 48(1), pp. 41-60.
- [3] Duttine, A., Tatsuoka, F., Salotti, A. and Ezaoui, A., (2015), Creep and Stress Relaxation Envelopes of Granular Materials in Direct Shear. paper presented in *Proc. of 15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering and 6th International Conference on Deformation Characteristics of Geomaterials*, Buenos Aires.
- [4] Jardine, R.J., Standing, J.R. and Kovacevic, N., (2005), Lessons Learned from Full Scale Observations and the Practical Application of Advanced Testing and Modelling. *Proceedings of the 3rd International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials*, Lyon, France, Vol. 2, pp. 201-245.
- [5] Furudoi, T. and Kobayashi, M., (2009), Geotechnical Issues and Approach on Kansai International Airport Project—Prediction and Performance of Settlement, *J. Soc. Civ. Eng. Ser. C*, Vol. 65(4), pp. 998-1017.
- [6] Lade, P. and Karimpour, H., (2010), Static Fatigue Controls Particle Crushing And, *Soils and Foundations*, Vol. 50, pp. 573-583.
- [7] Nuntapanich, N., Kongkitkul, W., Tatsuoka, F. and Jongpradist, P., (2018), Prediction of Creep Behaviour from Load Relaxation Behaviour of Polymer Geogrids, *Geosynthetics International*, Vol. 25(3), pp. 334-349.
- [8] Tatsuoka, F. and Haibara, O., (1985), Shear Resistance between Sand and Smooth or Lubricated Surfaces, *Soils and Foundations*, Vol. 25(1), pp. 89-98.
- [9] 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*, Vol. 22(1), pp.44-60.
- [10] Kongkitkul, W., Hirakawa, D. and Tatsuoka, F., (2007), Viscous Behaviour of Geogrids; Experiment and Simulation, *Soils and Foundations*, Vol. 47(2), pp. 265-283.