การทำนายพฤติกรรมการคืบจากพฤติกรรมการคลายความเค้นของทรายภายใต้แรงอัดสามแกน

Prediction of creep behaviour from stress relaxation behaviour of a sand under triaxial compression

โฆษิต จริยาทัศน์กร[1*] และ วรัช ก้องกิจกุล[2]

[1,2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพฯ

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

บทคัดย่อ

การศึกษาพฤติกรรมการคืบในวัสดุเม็ดหยาบมีความเกี่ยวข้องกับความหนืดในวัสดุ โดยคุณสมบัติความหนืดสามารถหาได้จาก การเปลี่ยนอัตราความเครียด, การให้แรงคงที่ในระหว่างที่ให้แรงกระทำอย่างต่อเนื่องที่อัตราความเครียดคงที่ และการให้แรงกระทำอย่างต่อเนื่องที่ค่าอัตราความเครียดคงที่ค่าต่าง ๆ การศึกษาครั้งนี้นำผลการทดสอบมาจากการศึกษาในอดีต และหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการจำลองเพื่อจำลองและเปรียบเทียบ พฤติกรรมการคืบสามารถทำนายได้จากพฤติกรรมการคลายความเค้นซึ่งใช้เวลาทดสอบน้อยกว่า การศึกษาครั้งนี้ใช้แบบจำลองสามองค์ประกอบไม่เชิงเส้น (Non-linear three-component, NTC) จำลองประวัติเวลาความเครียดจากการคืบและการคลายความเค้น โดยระยะเวลาที่ใช้สำหรับจำลองการคืบและการคลายความเค้นคือ 10 ปีที่อัตราส่วนความเค้นต่าง ๆ เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการเพิ่มขึ้นของความเครียดไม่คืนค่าสำหรับการคืบและการคลายความเค้นที่อัตราความเครียดไม่คืนค่าค่าเดียวกัน การทำนายประวัติเวลาของการคืบจากประวัติเวลาของการคลายความเค้นประกอบไปด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกคือความสัมพันธ์ระหว่างเวลาของการคืบกับเวลาของการคลายความเค้น ส่วนที่สองเป็นความสัมพันธ์ของความเครียดไม่คืนค่า โดยระยะเวลาของการคืบที่ได้จากการทำนายมีแนวโน้มมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนความเค้น

คำสำคัญ: การคืบ, การคลายความเค้น, คุณสมบัติความหนืด, อัตราความเครียด, แบบจำลองสามองค์ประกอบไม่เชิงเส้น

Abstract

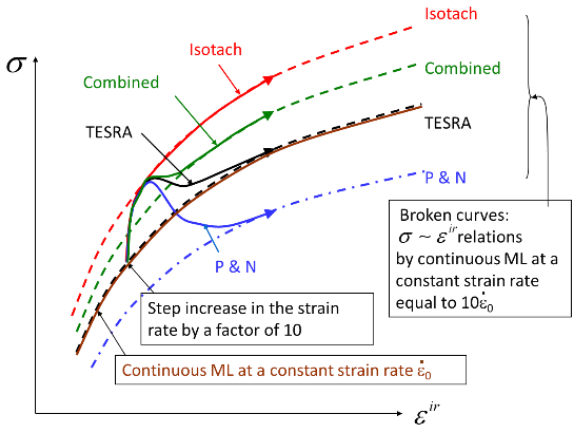
Creep behaviour of granular materials is related to the viscosity of material. The viscous properties can be evaluated by stepwise changing the strain rate and performing sustained loading during monotonic loading (ML) at a constant strain rate and also by ML tests at different constant values of strain rate. This study, uses the experimental and analysis results from a previous study for determining the appropriate parameters for simulations of long-term creep and stress relaxation. The creep behaviour can be predicted by stress relaxation behaviour, which is performed for a much shorter period. The non-linear three-component (NTC) model was used to simulate time histories of creep strain and stress relaxation. The simulated creep duration and stress relaxation duration are equal to 10 years/stage. Systematic relationships between the elapsed times and the irreversible strain increments in sustained loading (SL) and stress relaxation (SR) simulation necessary to reach the same irreversible strain rate were developed. There are two sets of relation for analysing the predicted long-term time history of creep strain from a short-term time history of stress relaxation. The first set is the relationship between time for creep and time for stress relaxation. It can convert the time for stress relaxation to the time for creep at the same irreversible strain rate. The second set is the relationship for the irreversible strain. The time histories of creep, which were predicted from stress relaxation behaviour tend to increase with an increase of stress ratio. Moreover, the prediction in this framework was well simulated.

Keywords: creep, stress relaxation, viscous properties, strain rate, non-linear three-component model

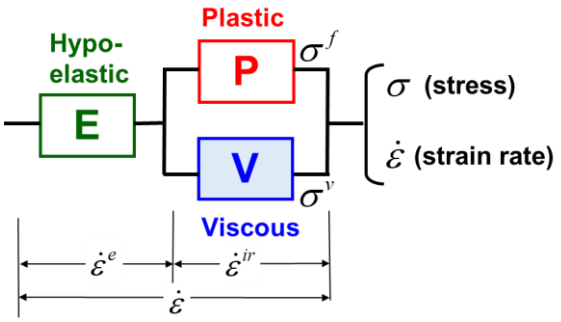
1. บทนำ

ในการทำนายการทรุดตัวหรือการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง การมีพื้นฐานความเข้าใจเกี่ยวกับอิทธิพลของอัตราการให้แรง (Loading rate effect) ที่มีต่อความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดเนื่องมาจากคุณสมบัติความหนืดของวัสดุ [1-3] มีความสำคัญเพื่อให้การทำนายมีความถูกต้องแม่นยำ และสะท้อนความเป็นจริงได้มากขึ้น ในอดีตมีการศึกษาหลายกรณีที่แสดงถึงความสำคัญของการศึกษาคุณสมบัติความหนืด อาทิ โรงงานนิวเคลียร์บนชั้นตะกอนทราย [4], สนามบินนานาชาติ Kansai บนชั้นตะกอนดินเหนียว [5]

คุณสมบัติความหนืด (Viscous properties) โดยทั่วไปสามารถจำแนกได้เป็น 4 ประเภทคือ Isotach, TESRA, P&N และ Combined [2] ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยวัสดุที่แตกต่างกันสามารถปรากฏคุณสมบัติความหนืดที่แตกต่างกันได้ เช่น ดินเหนียวมักปรากฏลักษณะเป็น Isotach [6] นอกจากนี้การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติความหนืด จะมีการจำลองผลการทดสอบโดยใช้แบบจำลองสามองค์ประกอบแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear three-component, NTC) ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนที่เป็น Elastic, Plastic และ Viscous ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยการศึกษาถึงพฤติกรรมการคืบและพฤติกรรมการคลายความเค้นจำเป็นที่จะต้องใช้ความเข้าใจพื้นฐานของคุณสมบัติความหนืด ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ผลการทดสอบแรงอัดสามแกนกับทราย Albany จากการศึกษาของ Tatsuoka et al. [2] ซึ่งมีคุณสมบัติความหนืดเป็นแบบ Positive and Negative (P&N)



รูปที่ 1 ลักษณะของคุณสมบัติความหนืดประเภทต่าง ๆ [3]



รูปที่ 2 แบบจำลองสามองค์ประกอบแบบไม่เชิงเส้น [2]

2. ความสัมพันธ์ระหว่างการคืบและการคลายความเค้น

จากแบบจำลองสามองค์ประกอบไม่เชิงเส้น (รูปที่ 1) ความเค้น (Stress, σ) ประกอบไปด้วย inviscid stress (σ^f) และ viscous stress (σ^v) ในขณะที่อัตราความเครียด (Strain rate, $\dot{\varepsilon}$) ประกอบไปด้วย อัตราความเครียดอีลาสติก (Elastic strain rate, $\dot{\varepsilon}^e$) และ อัตราความเครียดไม่คืนค่า (Irreversible strain rate, $\dot{\varepsilon}^{ir}$) สามารถแสดงได้ดังนี้

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

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

โดยอัตราความเครียดในส่วนพลาสติก (P body) ในรูปที่ 2 และในส่วน viscous (V body) ของแบบจำลองสามองค์ประกอบไม่เชิงเส้น ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ ซึ่งส่วนประกอบทั้ง 2 ส่วนนี้เชื่อมโยงขนานกัน

รูปที่ 3 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $R-\varepsilon^{ir}$ สำหรับวัสดุที่มีคุณสมบัติหนืดแบบ isotach โดยเป็นการจำลองการทดสอบแบบให้แรงกระทำแบบต่อเนื่อง (Monotonic loading, ML) ที่อัตราความเครียดไม่คืนค่าคงที่จากจุดเริ่มต้นจนถึงจุด A โดยระหว่างทำการให้แรงกระทำคงค้าง (Sustained loading, SL) สถานะของความเค้น-ความเครียดจะขยับจากจุด A ไปยังจุด B, C, D และ E ตามลำดับ โดยอัตราความเครียดไม่คืนค่าจะลดลงตามประวัติเวลาที่ผ่านไป เช่นเดียวกันกับการคลายความเค้น (Stress relaxation, SR) สถานะของความเค้น-ความเครียดจะขยับจากจุด A ไปยัง B', C', D' และ E' ตามลำดับ ที่อัตราความเครียดไม่คืนค่าค่าเดียวกัน สามารถสร้างเส้นขอบเขต (Envelope) ของการคืบและการคลายความเค้นได้ จากการศึกษาในอดีตของ Nuntapanich et al. [7] พบว่าหากวัสดุมีคุณสมบัติความหนืดเป็น Isotach เส้นขอบเขตของการคืบและการคลายความเค้นจะเป็นเส้นเดียวกัน

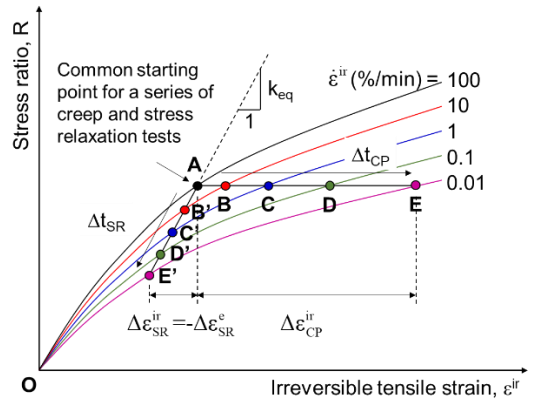
จากรูปที่ 3 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประวัติเวลาการคืบและการคลายความเค้นที่อัตราความเครียดไม่คืนค่าต่างกัน ซึ่งสามารถได้จากการทดสอบหรือการจำลอง โดยสามารถแปลงค่าเป็น $\Delta t_{CP,converted}$ จากการทราบค่า Δt_{SR} จากความสัมพันธ์ในรูปนี้ เช่นเดียวกันกับรูปที่ 3 (ค) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดไม่คืนค่าของการคืบและการคลายความเค้นที่อัตราความเครียดไม่คืนค่าต่างกัน โดยจะสามารถได้ค่า $\Delta\varepsilon^{ir}_{CP,converted}$ จากการทราบค่า $\Delta\varepsilon^{ir}_{SR}$ ผ่านความสัมพันธ์ในรูปที่ 3 (ค) ดังนั้นเมื่อทราบค่าของ $\Delta t_{CP,converted}$ และ $\Delta\varepsilon^{ir}_{CP,converted}$ จึงนำไปสู่การทำนายพฤติกรรมการคืบจากพฤติกรรมการคลายความเค้นได้ดังแสดงในรูปที่ 3 (ง) โดยในการศึกษาของ Nuntapanich et al. [7] ตาข่ายเสริมแรง (geogrid) ที่ใช้ในการทดสอบมีคุณสมบัติความหนืดแบบ Isotach และมีบางประเภทแบบ non-isotach แต่ยังสามารถใช้วิธีการนี้ในการทำนายพฤติกรรมการคืบนี้ได้

3. พารามิเตอร์และการจำลองพฤติกรรมของทราย Albany

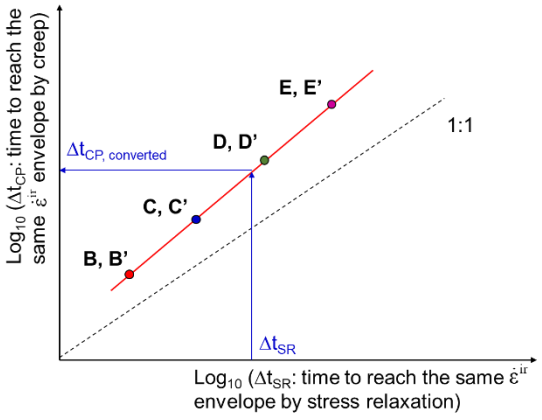
จากผลการทดสอบทราย Albany ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการจำลองในขั้นตอนต่อไปดังแสดงในตารางที่ 1 โดยเมื่อได้พารามิเตอร์สำหรับการจำลองแล้ว จึงนำไปทำการจำลองการคืบ โดยเป็นการคืบที่อัตราส่วนความเค้น (Stress ratio, R) ต่าง ๆ เช่นเดียวกันกับการคลายความเค้น ดังแสดงในรูปที่ 4

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของทราย Albany

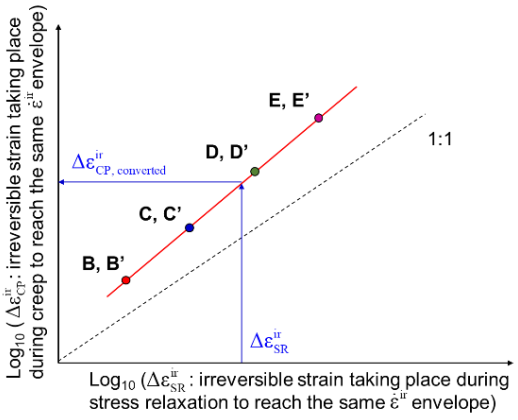
Viscosity type function			$\dot{\varepsilon}_0^{ir}$	(%/sec)	1.0E-3
θ_1		-1	$\dot{\varepsilon}_{int}^{ir}$	(%/sec)	2.752E-6
θ_2		-0.3	Hypo-elastic		
ε_0^{ir}	(%)	12	b		0
c		1	E_{ini}		25
Viscous function			σ_0		1
α		0.24	Decay function		
m		0.04	r_1		0.001
$\dot{\varepsilon}_{ref}^{ir}$	(%/sec)	1.0E-7	r_2		0.001
α^*		0.14	ε_0^{ir}	(%)	0.2
$1+b^*$		0.25	c		0.3



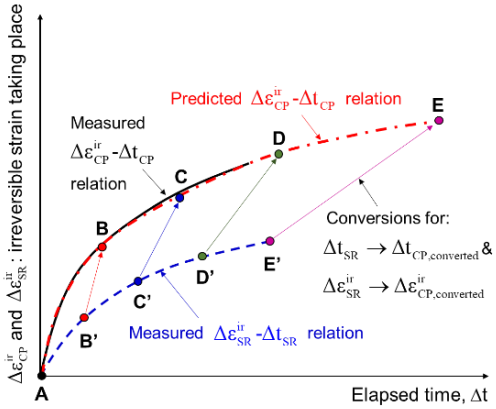
(ก)



(ข)

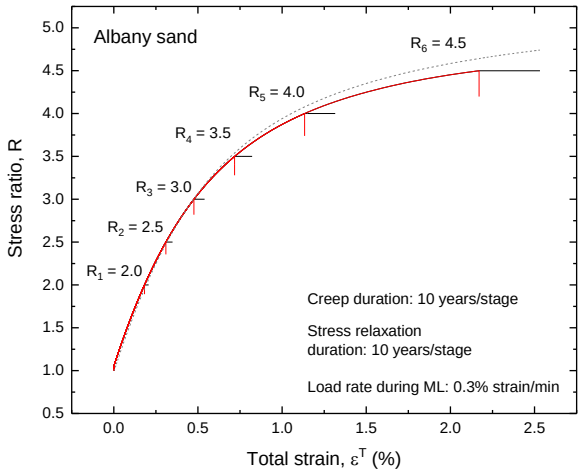


(ค)

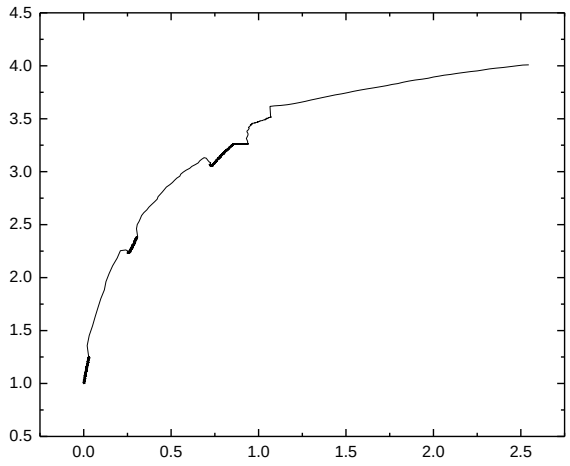


(ง)

รูปที่ 3 การแปลงพฤติกรรมการคลายความเค้นเป็นพฤติกรรมการคืบสำหรับวัสดุที่เป็น isotach: (ก) ความสัมพันธ์ $R-\varepsilon^{ir}$ ในช่วงการคืบและการคลายความเค้นพร้อมเส้นขอบเขตสำหรับอัตราความเครียดไม่คืนค่าที่ค่าต่าง ๆ; (ข) ความสัมพันธ์ $\Delta t_{CP}-\Delta t_{SR}$; (ค) ความสัมพันธ์ $\Delta\varepsilon_{CP}^{ir}-\Delta\varepsilon_{SR}^{ir}$; (ง) การทำนายประวัติเวลาของความเครียดการคืบจากประวัติเวลาของความเครียดไม่คืนค่า ในช่วงการคลายความเค้น [7]



รูปที่ 4 การจำลองการคืบและการคลายความเค้นที่อัตราส่วนความเค้นต่าง ๆ



รูปที่ 5 ผลการทดสอบและผลการจำลองของทราย Albany

รูปที่ 5 แสดงผลการทดสอบทราย Albany จาก Tatsuoka et al. [2] เปรียบเทียบกับผลการจำลองโดยใช้พารามิเตอร์จากตารางที่ 1 จากนั้นจึงทำการจำลองการคืบและการคลายความเค้นที่อัตราส่วนความเค้นต่าง ๆ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดไม่คืนค่ากับเวลาเนื่องจากการคืบและการคลายความเค้น แสดงดังรูปที่ 6 ที่อัตราความเครียดไม่คืนค่าค่าเดียวกันสามารถทราบค่าของประวัติเวลาเนื่องจากการคืบและการคลายความเค้น แสดงดังรูปที่ 7 โดยพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเนื่องจากการคืบและการคลายความเค้นมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง โดยแสดงได้ดังสมการที่ (3)

$$\log(\Delta t_{CP}) = S_t \cdot \log(\Delta t_{SR}) + \log(\Delta t_0) \tag{3}$$

เมื่อ S_t คือความชันของความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเนื่องจากการคืบและการคลายความเค้นในรูปที่ 7 โดยค่าความชันที่ใช้เป็นความชันเฉลี่ยจากเส้นตรงที่อัตราส่วนความเค้นต่างกัน และ Δt_0 คือค่าคงที่ ที่ได้จากสมการเส้นตรงที่ใช้ค่าความชันเป็นค่าเฉลี่ย เมื่อทราบค่าคงที่นี้แล้วจึงนำไปแสดงความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความเค้นเริ่มต้นของการคืบและการคลายความเค้น (รูปที่ 8) โดยทำการหาสมการที่พอดีกับจุดเหล่านี้เพื่อทำให้สามารถทราบค่าคงที่ Δt_0 สำหรับทุก ๆ อัตราส่วนความเค้นได้ โดยสมการที่ใช้แสดงดังข้างล่าง

$$R_i = F \cdot e^{\log \Delta t_0 / b_0} + R_0(t) \tag{4}$$

เมื่อ $F,\ b_0,\ R_0(t)$ คือค่าคงที่

รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดไม่คืนค่าและความเครียดไม่คืนค่าเนื่องจากการคืบและการคลายความเค้น โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดไม่คืนค่าเนื่องจากการคืบและการคลายความเค้นที่อัตราความเครียดไม่คืนค่าค่าเดียวกันสามารถแสดงดังในรูปที่ 10 โดยมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงแสดงได้ดังสมการที่ (5)

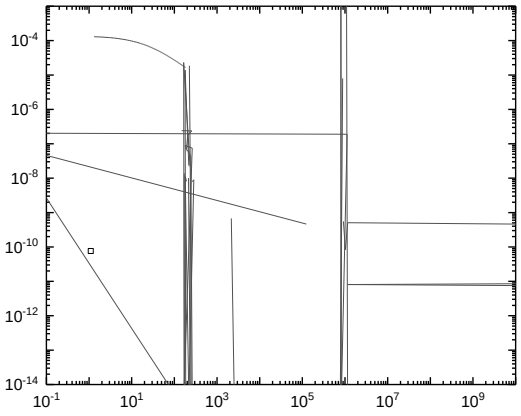
$$\log(\Delta\varepsilon_{CP}^{ir}) = S_\varepsilon \cdot \log(\Delta\varepsilon_{SR}^{ir}) + \log(\Delta\varepsilon_0^{ir}) \tag{5}$$

เมื่อ S_ε คือความชันระหว่างความเครียดไม่คืนค่าเนื่องจากการคืบและการคลายความเค้นในรูปที่ 10

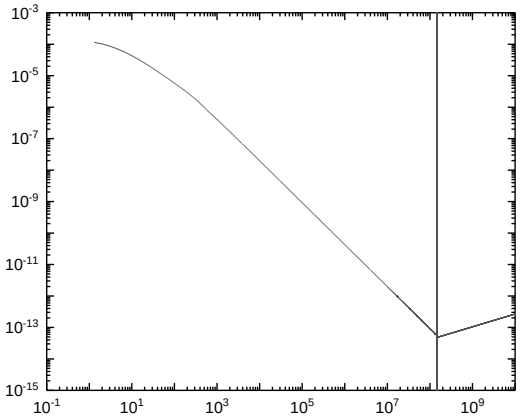
รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเค้นเริ่มต้นการคืบและการคลายความเค้นกับค่าคงที่ $\Delta\varepsilon_0^{ir}$ ทำการหาสมการที่พอดีกับข้อมูลเพื่อให้สามารถทราบค่าคงที่ $\Delta\varepsilon_0^{ir}$ สำหรับทุก ๆ อัตราส่วนความเค้นที่ต้องการทำนายได้ โดยสมการสามารถแสดงได้ดังข้างล่าง

$$R_i = G \cdot e^{\log \Delta\varepsilon_0^{ir} / d_0} + R_0(\varepsilon) \tag{6}$$

เมื่อ $G,\ \mathrm{d}_0$ และ $R_0(\varepsilon)$ คือค่าคงที่

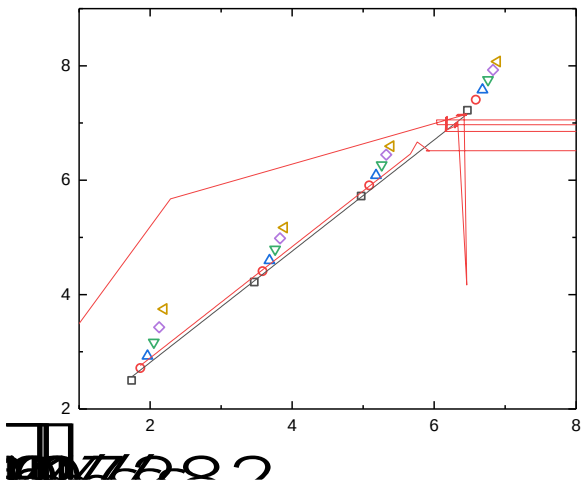


(ก)

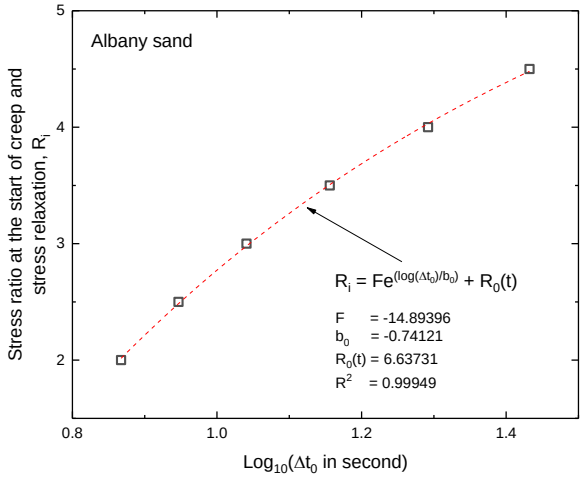


(ข)

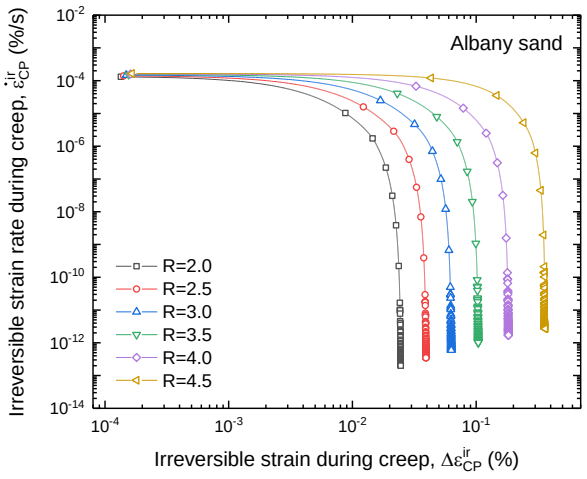
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดไม่คืนค่า ($\dot{\varepsilon}^{ir}$) กับเวลา (Δt); (ก) ความสัมพันธ์ในช่วงการคืบ และ (ข) ความสัมพันธ์ในช่วงการคลายความเค้น



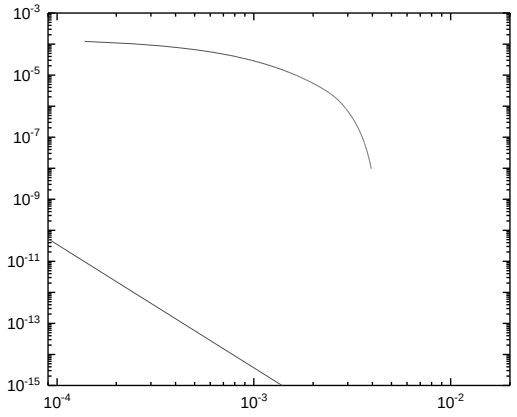
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการคืบและเวลาการคลายความเค้นที่อัตราความเครียดไม่คืนค่าต่าง ๆ



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเค้นเริ่มต้นการคืบและการคลายความเค้นกับค่าคงที่ Δt_0

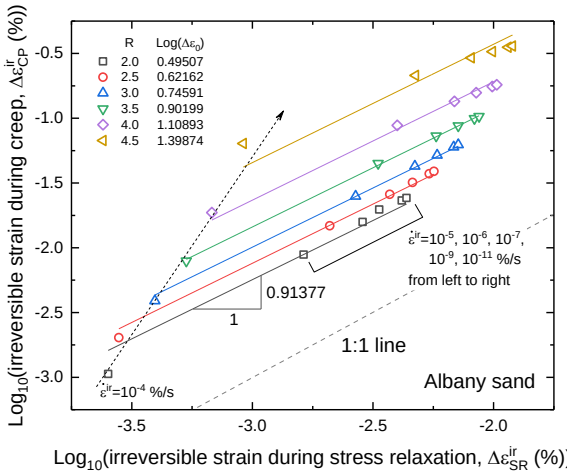


(ก)

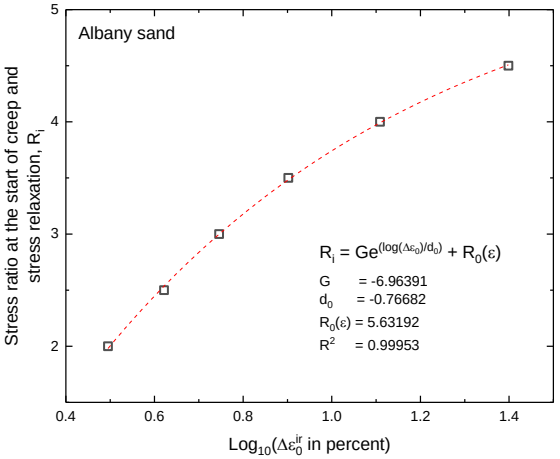


(ข)

รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดไม่คืนค่า ($\dot{\varepsilon}^{ir}$) และความเครียดไม่คืนค่า (ε^{ir}); (ก) ความสัมพันธ์ในช่วงการคืบ และ (ข) ความสัมพันธ์ในช่วงการคลายความเค้น



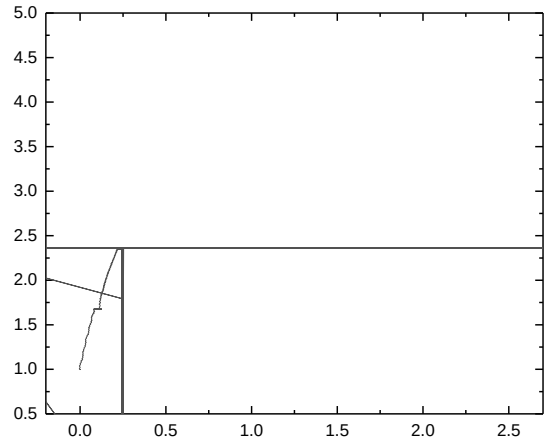
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดไม่คืนค่าจากการคืบและจากการคลายความเค้นที่อัตราความเครียดไม่คืนค่าต่าง ๆ



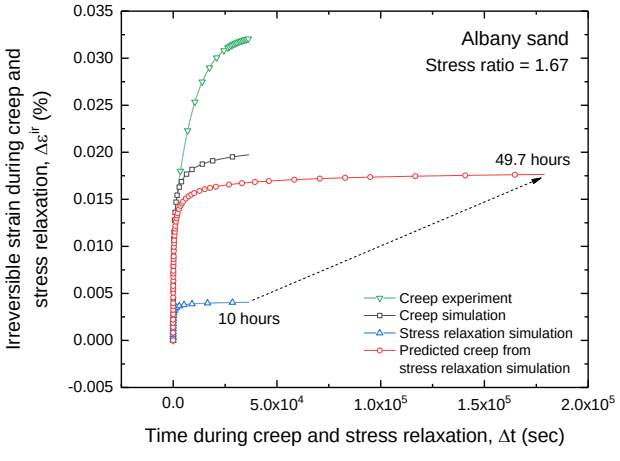
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเค้นเริ่มต้นการคืบและการคลายความเค้นกับค่าคงที่ Δt_0

รูปที่ 12 แสดงผลการทดสอบการคืบของทราย Albany ที่อัตราส่วนความเค้นต่าง ๆ จากการศึกษาของ Tatsuoka et. al. [2] พร้อมทั้งผลการจำลองที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ โดยการทำนายพฤติกรรมการคืบในการศึกษาครั้งนี้เริ่มจากการจำลองการคลายความเค้นที่อัตราส่วนความเค้นเริ่มต้นค่าเดียวกันกับผลการทดสอบการคืบ เนื่องจากไม่มีผลการทดสอบการคลายความเค้นที่อัตราส่วนเดียวกันกับการคืบ จากนั้นทำการหาค่าคงที่ Δt_0 สำหรับอัตราส่วนความเครียดค่าต่าง ๆ ได้จากสมการที่ (4) แล้วจึงนำไปแทนค่าเพื่อหาค่า $\Delta t_{CP,converted}$ โดยใช้สมการที่ (3)

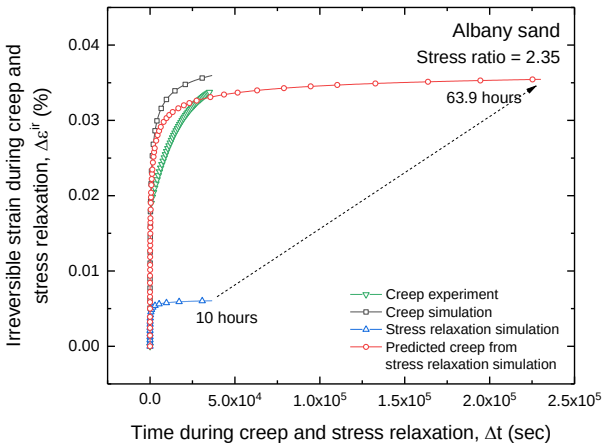
ในทำนองเดียวกันกับความเครียดไม่คืนค่า เริ่มต้นจากการหาค่าคงที่ $\Delta\varepsilon_0^{ir}$ จากสมการที่ (6) เพื่อนำไปแทนต่อไปในสมการที่ (5) จะทำให้ทราบค่า $\Delta\varepsilon_{CP,converted}$ โดยผลการทำนายแสดงดังรูปที่ 13 และรูปที่ 14 แสดงผลการทำนายเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากรูปที่ 5 โดยใช้วิธีการทำนายเช่นเดียวกันกับที่กล่าวไปแล้วข้างต้น



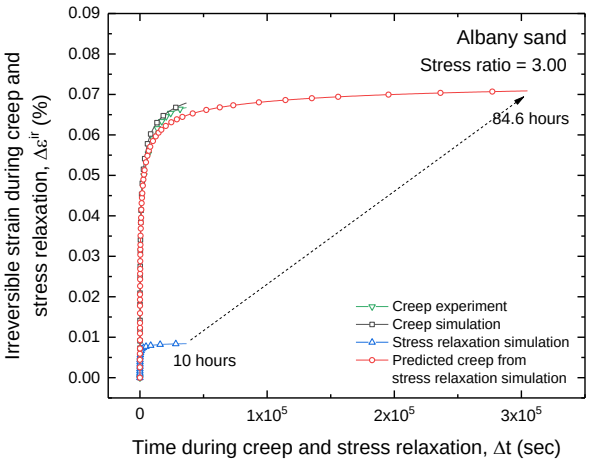
รูปที่ 12 ผลการทดสอบการคืบของทราย Albany จาก Tatsuoka et al.[2] เปรียบเทียบกับการจำลองจากการศึกษาในครั้งนี้



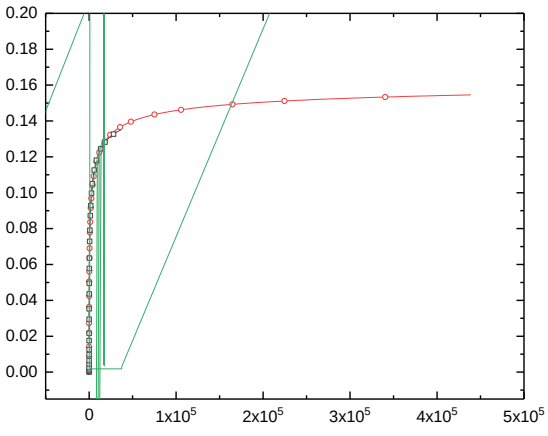
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

(จ)

รูปที่ 13 ผลทำนายความเครียดการคืบจากการจำลองความเครียดของการคลายความเค้นที่อัตราส่วนความเค้นต่าง ๆ; (ก) 1.67, (ข) 2.35, (ค) 3.00, (ง) 3.70 และ (จ) 4.36

รูปที่ 14 ผลทำนายความเครียดการคืบจากการจำลองความเครียดของการคลายความเค้นจากผลการทดสอบในรูปที่ 5

4. การวิเคราะห์ผลการทำนาย

จากผลการทำนายดังแสดงในรูปที่ 13 และ 14 พบว่า ในส่วนของเวลาจากผลทำนายที่อัตราส่วนความเค้นต่าง ๆ มีค่าไม่เท่ากัน ในที่นี้จะแสดงเป็นจำนวนเท่าของเวลาการคืบจากการทำนายต่อเวลาจากการคลายความเค้น (Time factor) แสดงดังตารางที่ 2 ในส่วนของความคลาดเคลื่อนของความเครียดไม่คืนค่าจากผลการทำนายเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจะคิดจากจุดที่เวลาเดียวกัน โดยเลือกใช้จุดสุดท้ายของการคืบจากผลการทดสอบ

ตารางที่ 2 จำนวนเท่าของเวลาและความคลาดเคลื่อนของผลการทำนาย

อัตราส่วนความเค้น, R	Time factor	ค่าความคลาดเคลื่อนของความเครียดไม่คืนค่า (%)
1.67	4.97	47.77[a]
2.35	6.39	2.46[a]
3.00	8.46	2.88[a]
3.26	10.00	25.41[b]
3.70	12.19	0.80[a]

geomaterials in shear and their mathematical expression. *Soils and Foundations*, *48*(1), pp.41–60.

[3] Tatsuoka, F. (2007). *Soil stress-strain behavior measurement, modeling and analysis.* Springer, pp.1–108.

[4] Jardine, R. J., Standing, J. R., & 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, 2, pp.201–245.

[5] Furudoi, T., & Kobayashi, M. (2009). Geotechnical issues and approach on Kansai International Airport Project—Prediction and performance of settlement. *J. Soc. Civ. Eng. Ser. C*, *65*(4), pp.998–1017.

[6] Lade, P. V., Nam, J., & Liggio, C. D. (2010). Effects of particle crushing in stress drop-relaxation experiments on crushed coral sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *136*(3), pp.500–509.

[7] Nuntapanich, N., Kongkitkul, W., Tatsuoka, F., & Jongpradist, P. (2018). Prediction of creep behaviour from load relaxation behaviour of polymer geogrids. *Geosynthetics International*, 25(3), pp.334–349.