

## แบบจำลองความสัมพันธ์สำหรับพฤติกรรมของผิวสัมผัสระหว่างทรายกับโครงสร้างผิวเรียบ Constitutive for granular soil-structure interface behavior

เอกรินทร์ สุดใจ<sup>1\*</sup> สุริยาวัชร ประอ้าย<sup>2</sup> นิพันธ์ อินสุข<sup>3</sup> ขวัญสิรินภา ธนวงค์<sup>4</sup> และ อีระวัชร เกียงคำ<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา <sup>5</sup>โยธาธิการและผังเมือง จ.พะเยา

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของผิวสัมผัสระหว่างทรายกับโครงสร้างโดยใช้เครื่องมือ Direct shear test ทรายที่ใช้ทดสอบเป็นทรายแม่น้ำในสภาพแห้ง ซึ่งมีความหนาแน่นสูงสุดเท่ากับ  $\gamma_{\max} = 17.90$  kN/m<sup>3</sup> และความหนาแน่นต่ำสุดเท่ากับ  $\gamma_{\min} = 15.50$  kN/m<sup>3</sup> ในการทดสอบจะใช้ทรายที่มีความหนาแน่นเริ่มต้น 2 ความหนาแน่น ( $D_r = 35\%$  และ  $D_r = 85\%$ ) โดยใช้หน่วยแรงกระทำขนาด ( $\sigma_n$ ) 100, 200, 300 kPa ภายใต้สภาวะ Constant Normal Load (CNL) และ Constant Normal Stiffness (CNS) จากการศึกษาพบว่า การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงแบบ CNL หน่วยแรงตั้งฉาก ( $\sigma_n$ ) มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือน ( $\tau$ ) และการเคลื่อนที่เชิงปริมาตร (การยุบตัวหรือขยายตัว  $[u]$ ) ขึ้นอยู่กับสภาพเริ่มต้นของตัวอย่าง ในขณะที่การทดสอบภายใต้สภาวะ CNS ค่าหน่วยแรงตั้งฉากจะเปลี่ยนแปลงเมื่อมีแรงเฉือนมากขึ้น การยุบตัวจะทำให้หน่วยแรงตั้งฉากลดลง ในขณะที่ทรายแน่นการขยายตัวจะทำให้หน่วยแรงตั้งฉากเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าค่า Stiffness ( $k$ ) ทำให้หน่วยแรงตั้งฉากเปลี่ยนไป ในการทำแบบจำลองเชิงตัวเลข ตัวแปรต่าง ๆ ที่อธิบายพฤติกรรมของผิวสัมผัสระหว่างทรายกับโครงสร้างสามารถหาได้จากการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงไม่ว่าจะอยู่ในสภาวะใด ๆ แบบจำลองที่ได้สามารถอธิบายพฤติกรรมของผิวสัมผัสระหว่างทรายกับโครงสร้างได้เป็นที่น่าพอใจ

คำสำคัญ: “พฤติกรรมผิวสัมผัส”, “แบบจำลองพฤติกรรมผิวสัมผัส”, “การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง”

### Abstract

This study was carried out to investigate the behavior of granular soil structure interface under Constant Normal Load (CNL) and Constant Normal Stiffness (CNS) conditions by using Casagrande direct shear apparatus. Dry sand ( $\gamma_{\max} = 17.90$  kN/m<sup>3</sup> and  $\gamma_{\min} = 15.50$  kN/m<sup>3</sup>) was used in this study. Two distinct initial densities ( $D_r = 35\%$  and  $D_r = 85\%$ ) with three values of initial normal stress ( $\sigma_n = 100, 200, 300$  kPa) were investigated. It was found that the initial normal stress, initial density and loading conditions (CNL and CNS) mainly influenced the interface behavior. Under CNS condition, the dilation or

contraction provided the variation of normal stress depending on the initial density. A small variation of normal stress could be observed. A constitutive modeling of granular soil-structure interface for which the changes in stress state took place depending on the initial boundary condition was proposed. Relevant variables were discussed. The simulations showed a fairly good agreement with the results obtained from interface direct shear tests.

Keywords: “Interface behavior”, “Model of Interface behavior”, “Direct shear test”

### 1. คำนำ

ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างเม็ดดินกับวัสดุโครงสร้างเป็นค่าที่จำเป็นค่าหนึ่งต่อผลการวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักและเสถียรภาพของโครงสร้างใต้ดิน ยกตัวอย่างเช่น เสาค้ำยัน กำแพงกันดิน เป็นต้น ซึ่งค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินกับวัสดุโครงสร้างนั้นแสดงความต้านทานแรงเฉือน ( $\tau$ ) จากความสัมพันธ์

$$\tau = \sigma \tan \delta \quad (1)$$

โดยที่  $\sigma$  แสดงถึงหน่วยแรงตั้งฉากที่มากกระทำกับผิวสัมผัส และ  $\tan \delta$  แสดงถึงมุมเสียดทานระหว่างทรายและวัสดุโครงสร้าง การศึกษาพฤติกรรมของผิวสัมผัสระหว่างดินทรายและวัสดุโครงสร้างได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (Airrey et al., 1992; Fakharian and Evgin, 1997) อีกทั้งการคาดการณ์ผลลัพธ์ของการทดสอบได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องด้วยเช่นกัน แบบจำลองเชิงตัวเลขต่างๆ ได้ถูกพัฒนาเพื่อให้สามารถอธิบายพฤติกรรมของผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้าง ซึ่งที่ผ่านมาสามารถอธิบายถึงพฤติกรรมการยุบตัว การขยายตัวที่ระยะเฉือนต่างๆ ได้เป็นอย่างดีที่น่าพอใจ แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองพวกนี้ก็ยังมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป

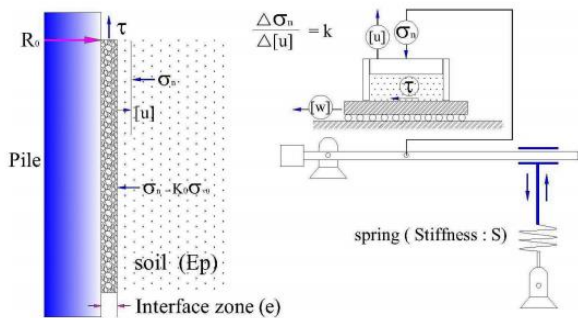
แบบจำลองความสัมพันธ์เชิงตัวเลขเพื่ออธิบายพฤติกรรมของผิวสัมผัสระหว่างดินและวัสดุโครงสร้างได้ถูกนำเสนอในรูปแบบต่างๆ อย่างต่อเนื่อง Desai et al [1985] และ Desai and Nagaraj [1988] ได้นำเสนอทฤษฎีของความต่อเนื่อง (Continuum) แต่ปัญหาที่มักเจอนั้นคือกรณีที่จำเป็น

จะต้องระบุความหนาที่แน่นอนของผิวสัมผัส ซึ่งความหนาของผิวสัมผัสจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับชั้นดินบริเวณรอบๆ โครงสร้าง

ที่ผ่านมาการศึกษาพฤติกรรมของผิวสัมผัสส่วนใหญ่จะใช้เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนโดยควบคุมหน่วยแรงตั้งฉากให้คงที่ตลอดเวลาที่มีแรงเฉือนมากระทำ (Constant normal load, CNL) ซึ่งเหมาะสมกับการศึกษากำแพงกันดิน การเสริมกำลังของที่ลาด เป็นต้น และเมื่อผิวสัมผัสมีแรงมากระทำแบบวัฏจักร ผิวสัมผัสจะแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นเนื่องจากจำนวนรอบของแรงวัฏจักรที่มากกว่า ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงเฉือน (Fakharian and Evgin, 1997)

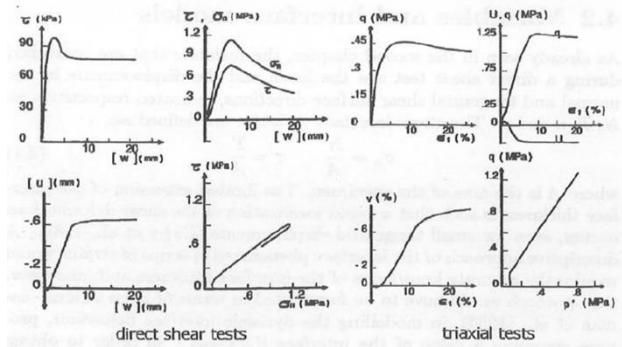
คุณลักษณะทางปริมาตรของผิวสัมผัสจะกำหนดความต้านทานแรงเฉือนระหว่างดินและโครงสร้าง ซึ่งรูปแบบของผิวสัมผัสภายใต้สภาวะ CNS (Constant normal stiffness) สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 1 โดยการกำหนดความแข็งแรงแรงคงที่ (Stiffness,  $k$ ) สำหรับเสาเข็มที่มีรัศมี  $R$  ผิงดินที่มีค่า shear modulus,  $G$  โดย  $e$  คือความหนาของผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้างที่เกิดขึ้นเมื่อมีหน่วยแรงเฉือนมากระทำ ( $e \ll R$ ) ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าความแข็งแรงแรงคงที่จาก Boulon & Foray [1986] สามารถแสดงได้ดังนี้

$$k = \frac{\Delta\sigma_n}{\Delta[u]} = \frac{2G}{R} \quad (2)$$



รูปที่ 1 การเปรียบเทียบระหว่างแรงเฉือนที่ผิวของเสาเข็มและการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงภายใต้สภาวะ CNS (Boulon and Foray, 1986)

Boulon [1989] ได้นำเสนอทฤษฎีความต่อเนื่อง (Continuum) ในรูปแบบสองมิติสำหรับอธิบายพฤติกรรมของผิวสัมผัสโดยไม่ได้พิจารณาความหนาของผิวสัมผัส (Zero thickness) หลังจากนั้น Boulon and Nova [1990] ได้ศึกษาเปรียบเทียบความเหมือนพฤติกรรมของการทดสอบทรายแบบแนวแรงสามแกน (Triaxial test) และการทดสอบแรงเฉือนแบบตรงของผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้าง (Interface direct shear test) (รูปที่ 2) อีกทั้งได้อธิบายพฤติกรรมของผิวสัมผัสโดยแบบจำลอง Elastoplastic และ Rate type (Incremental) ซึ่งแต่ละทฤษฎีต่างมีข้อดีข้อเสียต่างกัน



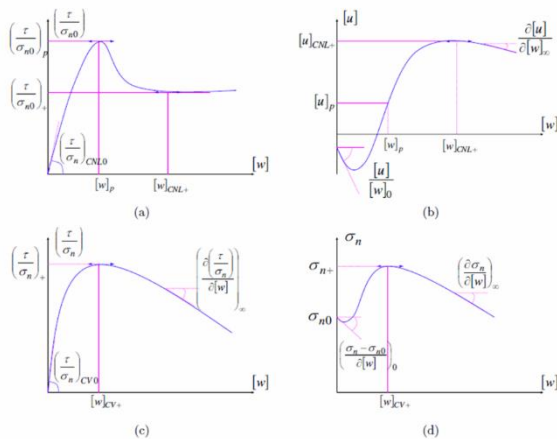
รูปที่ 2 ความคล้ายคลึงของพฤติกรรมที่สังเกตได้จากการทดสอบแรงเฉือนแบบสามแกนและผิวสัมผัสแบบตรง (Boulon and Nova, 1990)

โดยการวิเคราะห์แบบ Rate-type สามารถอธิบายพฤติกรรมของทรายระหว่างผิวสัมผัสกับวัสดุโครงสร้าง ที่ระยะการให้แรงเฉือนที่มีค่ามากได้ดี แต่ในขณะที่การวิเคราะห์แบบ Elastoplastic สามารถวิเคราะห์ได้เหมือนเช่นเดียวกับวิธีแบบ Rate type แต่จะอธิบายพฤติกรรมของผิวสัมผัสได้ดีในช่วงระยะการเฉือนที่ไม่มาก

Boulon [1989] ได้นำเสนอได้นำเสนอหลักการพื้นฐานในการวิเคราะห์พฤติกรรมของแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสของทรายและโครงสร้าง โดยใช้ความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นระหว่างอัตราส่วนเพิ่มของแรงที่กระทำ (Incremental loading) โดยรูปที่ 3 ได้แสดงตัวแปรหลักที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้าง ภายใต้สภาวะ CNL เมื่อพิจารณาแล้วจะแบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือช่วงระยะการเฉือนเริ่มต้นจนถึงค่าสูงสุด ( $[w] \leq [w]_{CNL+}$ ) และช่วงระยะการเฉือนหลังจากค่าสูงสุด ( $[w] \geq [w]_{CNL+}$ ) โดยที่  $[w]_{CNL+}$  คือระยะการเคลื่อนที่ในแนวแรงเฉือนที่หน่วยแรงเฉือนสภาวะวิกฤติ,  $(\tau/\sigma_n)_+$  (Critical condition) ในขณะที่  $[w]_p$  และ  $[u]_p$  คือระยะการเคลื่อนที่ในแนวแรงเฉือนและในแนวตั้งฉากที่อัตราส่วนหน่วยแรงสูงสุดตามลำดับ

ภายใต้สภาวะ CV หรือ CNS เมื่อพิจารณาแล้วจะแบ่งได้เป็น 2 ช่วงเช่นกัน คือ  $[w] \leq [w]_{CV+}$  และช่วง  $[w] \geq [w]_{CV+}$  โดยที่  $[w]_{CV+}$  คือระยะการเคลื่อนที่ในแนวแรงเฉือนที่หน่วยแรงเฉือนสภาวะวิกฤติ,  $(\tau/\sigma_{n0})_+$

นอกเหนือจากค่าต่างๆที่เป็นตัวแปรที่อยู่ในช่วงก่อนและหลังหน่วยแรงเฉือนสภาวะวิกฤติแล้ว มุมที่เกิดขึ้นของก่อนและหลังหน่วยแรงเฉือนสภาวะวิกฤติ ก็เป็นตัวแปรที่สำคัญต่อการวิเคราะห์พฤติกรรมที่ผิวสัมผัสของทรายและโครงสร้างแบบ Rat-type เป็นอย่างมาก ยกตัวอย่างเช่น  $(\tau/\sigma_n)_{CNL0}$  คือมุมที่เกิดขึ้นของอัตราส่วนหน่วยแรงก่อนที่จะถึงจุดอัตราส่วนหน่วยแรงสูงสุด และ  $(\tau/\sigma_n)_{CNL+}$  คือมุมที่เกิดขึ้นของอัตราส่วนหน่วยแรงหลังจากจุดอัตราส่วนหน่วยแรงสูงสุด เป็นต้น โดยจะต้องหามุมทั้งหมด ทั้งในสภาวะ CNL และ CNS



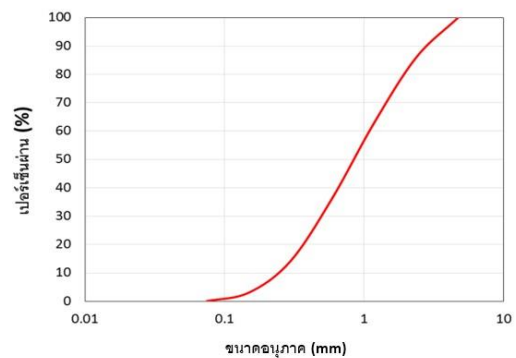
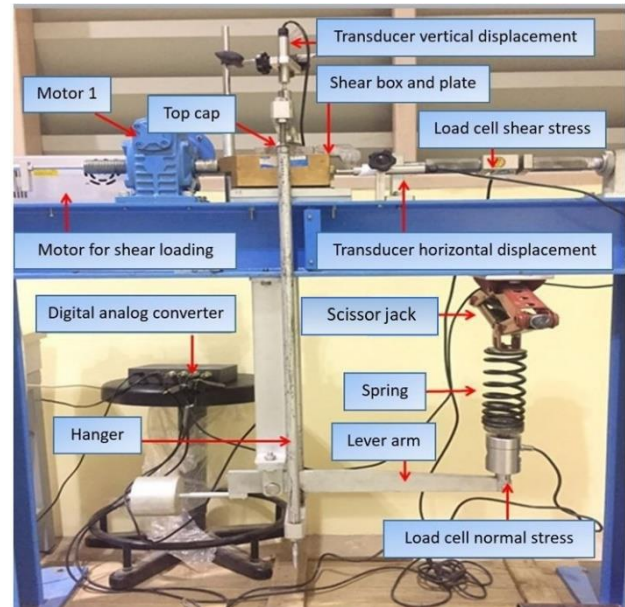
รูปที่ 3 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบแรงเฉือนแบบตรงของผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้าง ; (a),(b) ภายใต้สภาวะ CNL ; (c),(d) ภายใต้สภาวะ CNS และ CV , Boulon and Nova [1990]

งานวิจัยนี้จะศึกษาพฤติกรรมของแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของดินทรายกับวัสดุโครงสร้าง โดยการพัฒนาเครื่องมือ Direct Shear เพื่อทำการศึกษาระงัดทานระหว่างผิวสัมผัสของโครงสร้างกับเม็ดดิน พร้อมทั้งนำเสนอแบบจำลองความสัมพันธ์โดยวิธี Rate type เพื่อที่จะสามารถอธิบายพฤติกรรมต่าง ๆ ของผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้างได้ทุกสภาวะ

## 2. เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ เป็นเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาทั้งหมดเพื่อให้สอดคล้องกับการทดสอบ เครื่องมือที่พัฒนาเพื่อทดสอบหาแรงเฉือนโดยตรงนั้นคือ Direct shear test ซึ่งได้ดัดแปลงเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct shear device) (รูปที่ 4) โดยการดัดแปลง Shear box ด้านล่างเป็นแผ่นโลหะที่แสดงถึงโครงสร้าง สามารถทดสอบทั้งสภาวะ CNL และ CNS โดยการให้แรงผ่านแม่แรงและอ่านค่าแรงจาก Load cell การบันทึกระยะการเคลื่อนที่สามารถบันทึกได้โดยใช้อุปกรณ์ชนิดเปลี่ยนแปลงความเหนียวนำเชิงเส้น (Linear Variable Displacement Transducer, LVDT) และใช้มอเตอร์ในการออกแรงเฉือนและมีการวัดระยะแรงเฉือนด้วย LVDT ในการให้แรงเฉือนจะใช้ความเร็วของมอเตอร์ 0.5 mm/min และการบันทึกข้อมูลจะบันทึกทุก ๆ 3 วินาที

ทรายที่นำมาใช้ในการทดสอบมาจากแม่น้ำกกในสภาพทรายแห้ง ที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 16" ค้าง 100" (รูปที่ 3b) ทรายที่ใช้ในการทดสอบมีความหนาแน่นสูงสุดเท่ากับ  $\gamma_{max} = 17.90 \text{ kN/m}^3$  และความหนาแน่นต่ำสุดเท่ากับ  $\gamma_{min} = 15.50 \text{ kN/m}^3$  จะใช้ทรายหลวมที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์  $D_r = 35\%$  และทรายแน่นที่  $D_r = 85\%$  แผ่นเหล็กโครงสร้าง (Steel plate) จะมีลักษณะเป็นผิวเรียบและมีขนาดความกว้าง 8.8 ซม. ความสูง 2.27 ซม. เปรียบเสมือนเป็นผิวสัมผัสของเสาเข็ม ในการเตรียมตัวอย่างจะทำการฉาบผิวด้านล่างของ Shear box ด้วย Silicone grease เพื่อลดการสัมผัสระหว่าง Shear box และแผ่นโครงสร้าง อีกทั้งยังช่วยไม่ให้เม็ดทรายหลุดออกจาก Shear box ในขณะที่ทำการให้แรงเฉือน



รูปที่ 4 (a) เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนโดยตรงที่ถูกพัฒนาขึ้น (b) Grain size distribution ของทรายแม่น้ำกก

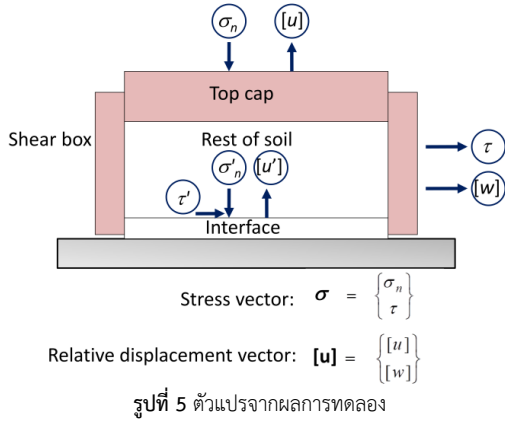
## 3. ผลการทดลอง

การศึกษาพฤติกรรมของผิวสัมผัสระหว่างดินทรายและโครงสร้าง จะทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยทดสอบภายใต้สภาวะความเค้นตั้งฉากคงที่ (CNL) และภายใต้สภาวะความแข็งแรงคงที่ (CNS) โดยใช้เครื่องมือทดสอบ Direct shear ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดการทดสอบของผิวสัมผัสแบบให้แรงเฉือนคงที่ (Monotonic test)

ตารางที่ 1 รายละเอียดการทดสอบ

Test	$D_r$ (%)	$\sigma_n$ (kPa)	$k$ (kPa/mm)
CNL	35%	100, 200, 300	0
	85%	100, 200, 300	0
CNS	35%	100, 200, 300	200
	85%	100, 200, 300	200
	35%	100, 200, 300	625
	85%	100, 200, 300	625

สำหรับตัวแปรที่สำคัญสำหรับการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5 โดย  $\sigma_n$  หน่วยแรงในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัส,  $\tau$  คือหน่วยแรงเฉือน,  $[u]$  คือระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉาก(การยุบตัว  $[u] < 0$  หรือการขยายตัว  $[u] > 0$ )



### 3.1 แบบจำลองเชิงตัวเลขแบบ Rate type

การวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์แสดงพฤติกรรมของผิวสัมผัสระหว่างดินทรายกับวัสดุโครงสร้างด้วยวิธี Rate-type นั้นจะแบ่งเป็น 2 ช่วงก็คือ ช่วงก่อนอัตราส่วนหน่วยแรงสูงสุด ( $\eta_{peak}$ ) และหลังจากค่าอัตราส่วนหน่วยแรงสูงสุด ( $\eta_{crit}$ ) (รูปที่ 3) โดยขั้นตอนแรกคือ หาค่าสูงสุดของแต่ละตัวแปรเช่น  $[w]_p, [u]_p, \tau_p, \sigma_{np}$  และหาค่าวิกฤติ Critical ของแต่ละตัวแปรเช่น  $[w]_+, [u]_+, \tau_+, \sigma_{n+}$  หาคความลาดชันช่วงก่อน Peak และความลาดชันช่วง Critical เมื่อได้ค่าแล้วนำมาพล็อตกับค่า Stiffness ( $k$ ) จะได้ค่าความสัมพันธ์เชิงตัวเลขโดยจะเป็นฟังก์ชัน Polynomial เมื่อได้ค่าความสัมพันธ์เชิงตัวเลขมาจะแยกเป็นแต่ละตัวแปรตามสมการ แล้วนำมาพล็อตกับ Normal stress ( $\sigma_n$ ) ก็จะได้ความสัมพันธ์เชิงตัวเลขที่นำมาเป็นพารามิเตอร์ในการสร้างแบบจำลอง โดยจะนำพารามิเตอร์ที่ได้ไปใช้กับสมการซึ่งมีอยู่ 2 ช่วง คือ ช่วงก่อนค่าสูงสุดและช่วงหลังค่าสูงสุด

สมการสุดท้ายช่วงก่อนค่าสูงสุด  $[w] \leq [w]_{peak}$

$$\tau / \sigma_n = \left( \frac{\alpha_0}{[w]_{\eta_{peak}}^2} - 2 \frac{\eta_{peak}}{[w]_{\eta_{peak}}^3} \right) [w]^3 + \left( -2 \frac{\alpha_0}{[w]_{\eta_{peak}}^2} + 3 \frac{\eta_{peak}}{[w]_{\eta_{peak}}^2} \right) [w]^2 + \alpha_0 [w] \quad (3)$$

$$\sigma_n = \left( \frac{\beta_0}{[w]_{\sigma_{peak}}^2} - 2 \frac{\sigma_{peak} - \sigma_n}{[w]_{\sigma_{peak}}^3} \right) [w]^3 + \left( -2 \frac{\beta_0}{[w]_{\sigma_{peak}}^2} + 3 \frac{\sigma_{peak} - \sigma_n}{[w]_{\sigma_{peak}}^2} \right) [w]^2 + \beta_0 [w] + \sigma_n \quad (4)$$

$$[u] = \left( \frac{\omega_0}{[w]_{[u]_{crit}}^2} - 2 \frac{[u]_{crit}}{[w]_{[u]_{crit}}^3} \right) [w]^3 + \left( -2 \frac{\omega_0}{[w]_{[u]_{crit}}^2} + 3 \frac{[u]_{crit}}{[w]_{[u]_{crit}}^2} \right) [w]^2 + \alpha_0 [w] \quad (5)$$

สมการสุดท้ายช่วงหลังค่าสูงสุด  $[w] \leq [w]_{peak}$

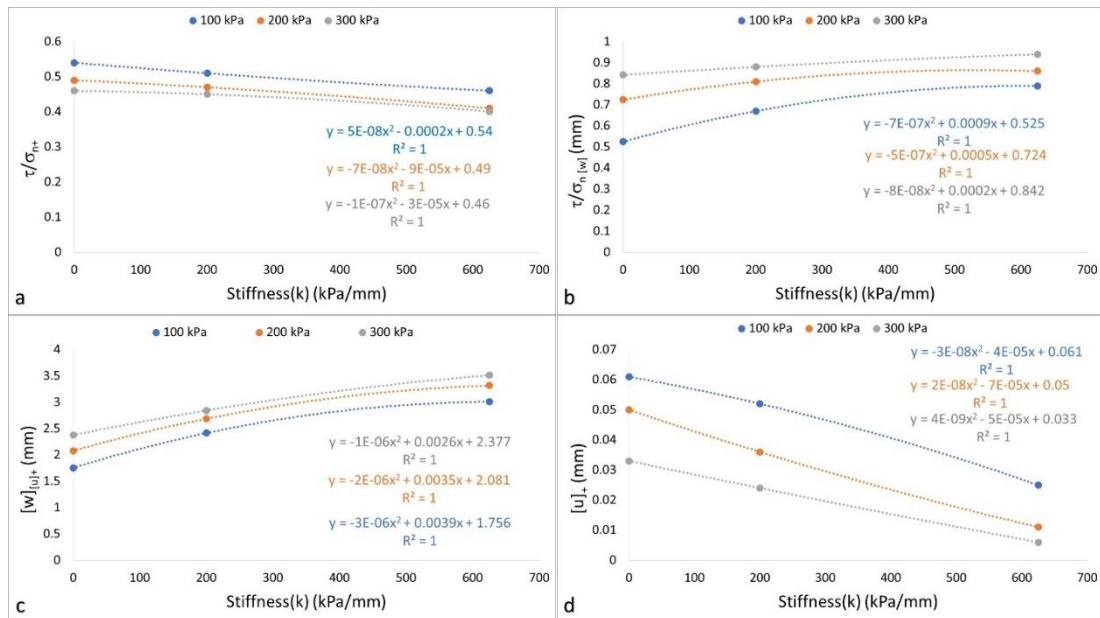
$$\tau / \sigma_n = \left( \frac{\tau}{\sigma_n} \right)_{crit} + \left[ \left( \frac{\tau}{\sigma_n} \right)_{peak} - \left( \frac{\tau}{\sigma_n} \right)_{crit} \right] \exp \left( - \frac{\ln(0.02)}{(3[w]_{\eta_{peak}})^2} \right) ([w] - [w]_{\eta_{peak}})^2 \quad (6)$$

$$\sigma_n = \sigma_{peak} + \beta_+ ([w] - [w]_{\sigma_{peak}}) - \beta_+ \left( \frac{[w]_{\sigma_{peak}}}{2.9957} \right) \left[ 1 - \exp \left( \left( [w] - [w]_{\sigma_{peak}} \right) \left( \frac{2.9957}{[w]_{\sigma_{peak}}} \right) \right) \right] \quad (7)$$

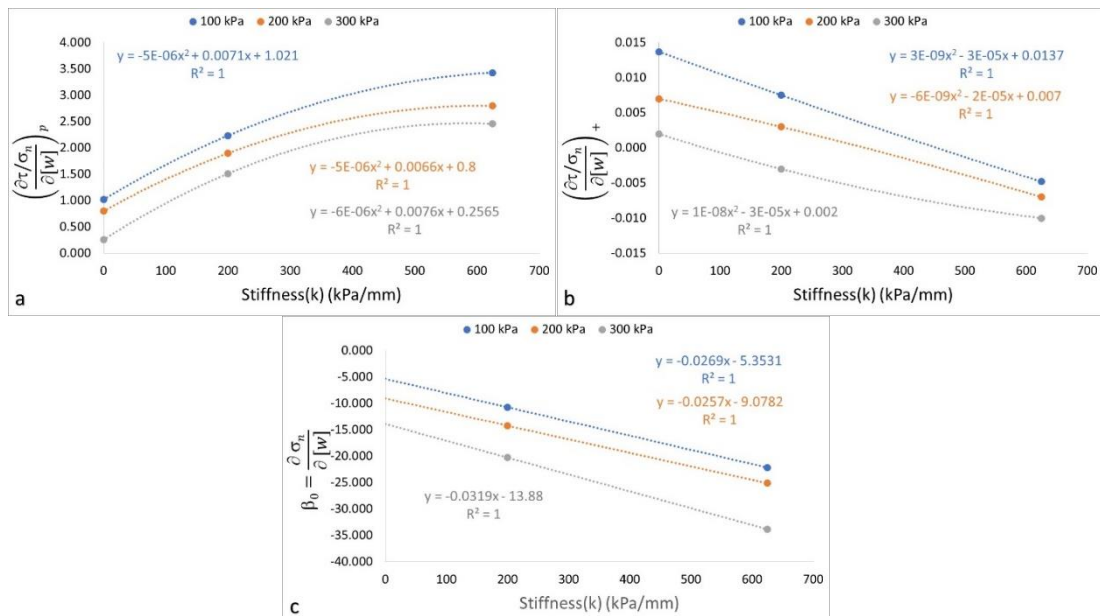
$$[u] = [u]_{crit} + \omega_+ ([w] - [w]_{[u]_{crit}}) - \omega_+ \left( \frac{[w]_{[u]_{crit}}}{2.9957} \right) \left[ 1 - \exp \left( \left( [w] - [w]_{[u]_{crit}} \right) \left( \frac{2.9957}{[w]_{[u]_{crit}}} \right) \right) \right] \quad (8)$$

จากรูป 6a จะเห็นได้ว่าค่า Stress ratio หลังการวิบัติ ( $\tau / \sigma_n$ )<sub>+</sub> จะลดลงเมื่อค่า Stiffness ( $k$ ) เพิ่มขึ้น ตามลำดับและค่า Stress ratio ของหน่วยแรงตั้งฉากที่น้อยจะมีค่ามากกว่า เนื่องจากมีค่า Normal stress ( $\sigma_n$ ) ทำให้หน่วยแรงที่มากมีค่าน้อยลง เมื่อได้ค่า Stress ratio ก็ต้องมีการพิจารณาก่อนการวิบัติ ของ Stress ratio ( $\tau / \sigma_n$ )<sub>[w]</sub> (รูปที่ 6b) จะเห็นได้ว่า ค่าระยะก่อนการวิบัติของหน่วยแรงที่น้อยก็จะมีค่าน้อยและจะสูงขึ้นเมื่อใช้หน่วยแรงตั้งฉากมากขึ้น

จากรูป 6c จะเห็นได้ว่าระยะหลังการวิบัติของการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง  $[w]_{[u]_+}$  จะมากขึ้นเมื่อค่า Stiffness ( $k$ ) เพิ่มขึ้นตามลำดับและค่าระยะหลังการวิบัติของการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของหน่วยแรงตั้งฉากที่น้อยจะมีระยะที่น้อยและจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีหน่วยแรงตั้งฉากมากขึ้น จากรูป 6d แสดงการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉาก (ยุบตัวหรือขยายตัว) ของทรายแน่นช่วงหลังจากการวิบัติ  $[u]_+$  จะเห็นได้ว่าการขยายตัวจะขยายตัวได้น้อยลงเมื่อค่า Stiffness ( $k$ ) เพิ่มขึ้น และหน่วยแรงตั้งฉากที่น้อยจะขยายตัวได้มากกว่าหน่วยแรงตั้งฉากที่มาก



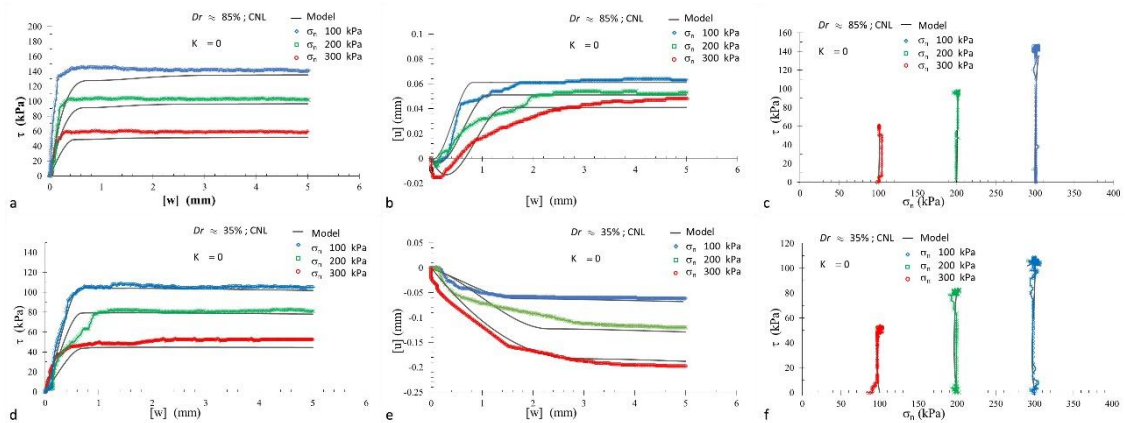
รูปที่ 6 ค่าที่จุด Peak และค่าที่จุด Critical ของพารามิเตอร์ที่สำคัญของทรายแน่น ( $D_r = 85\%$ ) ที่มีค่า  $k$  แตกต่างกัน



รูปที่ 7 ความลาดชันเริ่มต้นและความลาดชันหลังค่าสูงสุดของทรายแน่น ( $D_r = 85\%$ ) ที่มีค่า  $k$  แตกต่างกัน

นอกจากค่า Peak และค่า Critical ของแต่ละพฤติกรรมแล้ว ค่าความลาดชันช่วง Peak และความลาดชันช่วง Critical ก็ต้องนำมาพล็อตกับค่า Stiffness ( $k$ ) โดยรูปที่ 7a แสดงความสัมพันธ์ของค่าความลาดชันช่วง Peak ของ Stress ratio กับค่า Stiffness ( $k$ ) จะเห็นว่าความชันของค่า Stress ratio จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามค่า Stiffness ( $k$ ) ที่เพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างที่ใช้หน่วยแรงตั้งฉากที่น้อยจะมีค่าความชันของ Stress ratio ที่มากและจะน้อยเมื่อใช้หน่วยแรงตั้งฉากที่น้อย รูปที่ 7b แสดงความสัมพันธ์ของค่าความลาดชันช่วง Critical ของ Stress ratio กับค่า Stiffness ( $k$ )

จะเห็นว่าความชันของค่า Stress ratio จะลดลงเรื่อยๆตามค่า Stiffness ( $k$ ) ที่เพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างที่ใช้หน่วยแรงตั้งฉากที่น้อยจะมีค่าความชันของ Stress ratio ที่มากและจะน้อยเมื่อใช้หน่วยแรงตั้งฉากที่มาก รูปที่ 7c แสดงความสัมพันธ์ของค่าความลาดชันช่วง Peak ของ Normal stress ( $\sigma_n$ ) กับค่า Stiffness ( $k$ ) จะเห็นว่า ความชันของค่า Normal stress ( $\sigma_n$ ) จะลดลงเรื่อยๆตามค่า Stiffness ( $k$ ) ที่เพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างที่ใช้หน่วยแรงตั้งฉากที่น้อยจะมีค่าความชันของ Normal stress ( $\sigma_n$ ) ที่มากและจะน้อยเมื่อใช้หน่วยแรงตั้งฉากที่มาก



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress ( $\tau$ ) กับ Horizontal displacement [ $w$ ] และความสัมพันธ์ระหว่าง Normal displacement [ $u$ ] กับ Horizontal Displacement [ $w$ ] และความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress ( $\tau$ ) กับ Normal Stress ( $\sigma_n$ ) ของทรายแน่น (a,b,c) และทรายหลวม (d,f,g)

### 3.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนภายใต้สภาวะหน่วยแรงคงที่ (CNL)

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบ CNL ได้กำหนดให้ความเค้นตั้งฉากมีค่าคงที่ โดยให้น้ำหนักที่กระทำ คือ 100, 200, 300 kPa ที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ ( $D_r=85\%$ ) และ ( $D_r=35\%$ ) ผลการทดสอบพบว่าค่า Normal stress ( $\sigma_n$ ) มีผลต่อ Shear stress ( $\tau$ ) และ Normal displacement [ $u$ ] โดยจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า  $\sigma_n$  เพิ่มขึ้น

จากการทดลองความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress ( $\tau$ ) กับ Horizontal displacement [ $w$ ] (รูปที่ 8) ของทรายแน่นและทรายหลวม พบว่า Shear stress ( $\tau$ ) จะมีค่ามากขึ้นตาม Normal stress ( $\sigma_n$ ) ที่มาก โดยเมื่อทำการเฉือน ค่า Shear stress ( $\tau$ ) จะเพิ่มขึ้นตามระยะ Horizontal displacement [ $w$ ] จน Shear stress ( $\tau$ ) สูงสุด แล้ว Shear stress ( $\tau$ ) จะมีค่าคงที่ตลอดระยะการเฉือน

จากการทดลองความสัมพันธ์ระหว่าง Normal displacement [ $u$ ] กับ Horizontal displacement [ $w$ ] (รูปที่ 8) ของทรายแน่นและทรายหลวม พบว่า ในกรณีของทรายแน่น (รูปที่ 8b) การเฉือนในช่วงแรกทรายจะมีการยุบตัวเล็กน้อย หลังจากนั้นทรายจะมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นตามระยะการเฉือน [ $w$ ] ในกรณีของทรายหลวม (รูปที่ 8e) ในขณะที่เฉือน หากหน่วยแรงตั้งฉาก ( $\sigma_n$ ) มีค่ามาก การยุบตัว [ $u$ ] ก็จะมากขึ้นตามไปด้วย และการยุบตัวก็มากขึ้นเรื่อย ๆ ตามระยะการเฉือน [ $w$ ]

จากรูป 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress ( $\tau$ ) กับ Normal stress ( $\sigma_n$ ) กรณีการเฉือนภายใต้สภาวะหน่วยแรงคงที่แม้ค่า Shear stress ( $\tau$ ) จะมากขึ้น ค่า Normal stress ( $\sigma_n$ ) ก็จะมีค่าคงที่ตลอด

### 3.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนภายใต้สภาวะความแข็งแกร่งคงที่ (CNS)

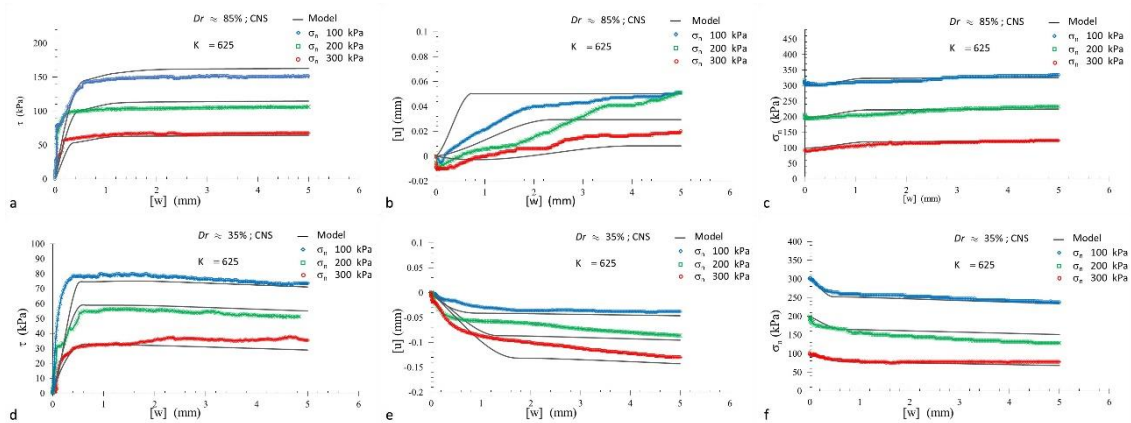
การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบ CNS ได้กำหนดให้ความเค้นตั้งฉากมีค่าคงที่ โดยให้น้ำหนักที่กระทำ คือ 100, 200, 300 kPa ที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ ( $D_r=85\%$ ) และ ( $D_r=35\%$ ) ผลการทดสอบพบว่าค่า

Normal stress ( $\sigma_n$ ) มีผลต่อ Shear stress ( $\tau$ ) และ Horizontal displacement [ $w$ ] โดยในการทดสอบค่า  $\sigma_n$  จะมีค่าไม่คงที่

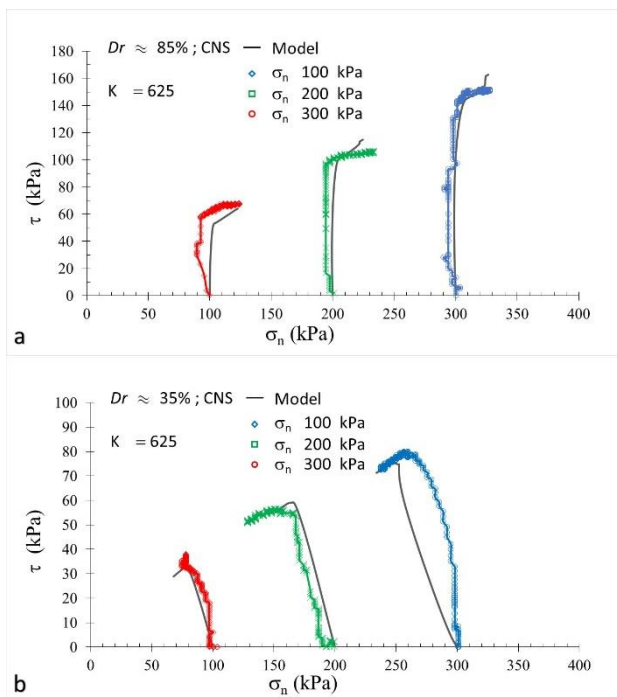
จากการทดลองความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress ( $\tau$ ) กับ Horizontal displacement [ $w$ ] (รูปที่ 9) ของทรายแน่นและทรายหลวม พบว่าเมื่อแรงกระทำมีค่ามากขึ้น shear stress ( $\tau$ ) จะมีค่าสูง โดย Normal stress ( $\sigma_n$ ) จะมีค่าไม่คงที่ ซึ่งส่งผลให้ shear stress ( $\tau$ ) มีค่าไม่คงที่ตามตลอดระยะ Horizontal displacement [ $w$ ]

จากการทดลองความสัมพันธ์ระหว่าง Normal displacement [ $u$ ] กับ Horizontal displacement [ $w$ ] ของทรายแน่นและทรายหลวม ในกรณีของทรายแน่น (รูปที่ 9b) พบว่าเมื่อใส่ค่า Normal stress ( $\sigma_n$ ) ทรายจะยุบตัวเล็กน้อย เมื่อทำการเฉือนทรายจะมีการขยายตัวส่งผลให้ค่า Normal displacement [ $u$ ] เพิ่มขึ้นตลอดระยะการเฉือน [ $w$ ] ในกรณีของทรายหลวม (รูปที่ 9e) พบว่าเมื่อใส่ค่า Normal stress ( $\sigma_n$ ) มาก การยุบตัว Normal displacement [ $u$ ] ก็จะมีค่ามาก เมื่อทำการเฉือน Normal displacement [ $u$ ] จะลดลงเรื่อยๆ ตามระยะ Horizontal displacement [ $w$ ] ที่เพิ่ม

จากการทดลองความสัมพันธ์ระหว่าง Normal stress ( $\sigma_n$ ) กับ Horizontal displacement [ $w$ ] ของทรายแน่นและทรายหลวม ในกรณีของทรายแน่น (รูปที่ 9c) ทรายจะมีการยุบตัวในช่วงแรกและขยายตัวในภายหลัง ทำให้หน่วยแรงตั้งฉาก Normal stress ( $\sigma_n$ ) จะลดลงในช่วงแรก หลังจากนั้นจะเพิ่มมากขึ้นตามแรงเฉือน Shear stress ( $\tau$ ) ตามระยะ Horizontal displacement [ $w$ ] ที่เพิ่มขึ้น ในกรณีของทรายหลวม (รูปที่ 9f) เมื่อมีแรงเฉือน Shear stress ( $\tau$ ) มากกระทำ ทำให้หน่วยแรงตั้งฉาก Normal stress ( $\sigma_n$ ) ลดลง ตามระยะ Horizontal displacement [ $w$ ] ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากทรายมีการยุบตัวเกิดขึ้น



รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress ( $\tau$ ) กับ Horizontal displacement [ $w$ ] และความสัมพันธระหว่าง Normal displacement [ $u$ ] กับ Horizontal Displacement [ $w$ ] และความสัมพันธระหว่าง Normal Stress ( $\sigma_n$ ) กับ Horizontal Displacement [ $w$ ] ของทรายแน่น (a,b,c) และทรายหลวม (d,f,g)



รูปที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress ( $\tau$ ) กับ Normal stress ( $\sigma_n$ ) ของทรายแน่น (a) และทรายหลวม (b)

จากการทดลองความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress ( $\tau$ ) กับ Normal stress ( $\sigma_n$ ) ของทรายแน่นและทรายหลวม ในกรณีของทรายแน่น (รูปที่ 10a) พบว่า เมื่อทำการเลื่อนค่า Normal stress ( $\sigma_n$ ) จะลดลง ทำให้ Shear stress ( $\tau$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากในระหว่างการเลื่อน ทรายแน่นจะมีการพองตัวทำให้มุมเสียดทานมีค่ามากซึ่งเกิดจากมุม Dilatancy เส้นแนวโน้มที่ได้นี้จะเกิดจากการนำค่าสูงสุด (Peak) แล้วค่าคงที่ (Critical) ของแต่ละหน่วยแรงมาพล็อต ในกรณีของทรายหลวม (รูปที่ 10b) พบว่า ในระหว่างการเลื่อน Normal stress ( $\sigma_n$ ) จะมีค่า

ลดลง เนื่องจากค่า Shear stress ( $\tau$ ) ลดลง เป็นผลมาจากการที่ทรายมีการยุบตัว

#### 4. บทสรุป

ผลลัพธ์ของแบบจำลองพฤติกรรมของทรายระหว่างผิวสัมผัสกับโครงสร้างผิวเรียบเป็นไปได้ดี คือเป็นไปในทิศทางที่ถูกต้องตามการศึกษาในการวิเคราะห์วิธีแบบ Rate-type ซึ่งแบบจำลองจะมีค่าที่แตกต่างจากค่าที่ได้จากเครื่อง Direct shear test ไม่มากนักสามารถยอมรับได้ ในการศึกษาแบบจำลองพฤติกรรมของทรายระหว่างผิวสัมผัสกับโครงสร้างผิวเรียบนั้น เป็นการเริ่มต้นที่จะศึกษาทำให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆคลาดเคลื่อนไป ซึ่งจะต้องมีการปรับแก้ค่าต่างๆ ให้เหมาะสมกับค่าที่นำมาวิเคราะห์ถึงจะได้แบบจำลองที่สมบูรณ์และมีความแม่นยำ

#### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองพะเยาและสาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา สำหรับเครื่องมือทดสอบและสิ่งอำนวยความสะดวกในการวิจัยในครั้งนี้

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Airey D, Al-Douri R, Poulos H, (1992). Estimation of pile friction degradation from shear box tests. ASTM Geotechnical Testing Journal, pp.388-392.
- [2] Boulon M, (1989). Features of soil structure interface behavior. Computers and Geotechnics, pp.115-131.
- [3] Boulon M, Foray P, (1986). Physical and numerical simulations of lateral shaft friction along offshore piles in sand, pp.127-147.

- [4] Boulon M, Nova R, (1990). Modelling of soil-structure interface behaviour, a comparison between elastoplastic and rate type laws. *Computer and Geotechnics*, pp.21-46.
- [5] Fakharian K, Evgin E, (1997). Cyclic simple shear behaviour of sand-steel interfaces under constant normal stiffness condition. *ASCE JGGE*, pp.1096-1105.
- [6] Praai S, (2013). Essais et modélisation du cisaillement cyclique sol-structure à grand nombre de cycles: Application aux pieux. Thèse de doctorat, Université de Grenoble.
- [7] Samtani N.C., Desai C.S., VullietAn L, (1996). Interface model to describe viscoplastic behavior. *Int. Num J.. Anal. Meth. Geomech.*