

แบบจำลองความสัมพันธ์สำหรับพฤติกรรมของผิวสัมผัสระหว่างทรายกับ
โครงสร้างผิวเรียบ



วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

พฤษภาคม 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

แบบจำลองความสัมพันธ์สำหรับพฤติกรรมของผิวสัมผัสระหว่างทรายกับโครงสร้างผิวเรียบ



วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

พฤษภาคม 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

CONSTITUTIVE MODEL FOR GRANULAR SOIL–STRUCTURE INTERFACE BEHAVIOR



EAKKARIN SUDJAI

A Thesis Submitted to University of Phayao
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Master of Engineering Degree in Civil Engineering
May 2023

Copyright 2023 by University of Phayao

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

แบบจำลองความสัมพันธ์สำหรับพฤติกรรมของผิวสัมผัสระหว่างทรายกับโครงสร้างผิวเรียบ

ของ เอกกรินทร์ สุดใจ

ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ของมหาวิทยาลัยพะเยา

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กรกฎ นุสลิทธิ)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

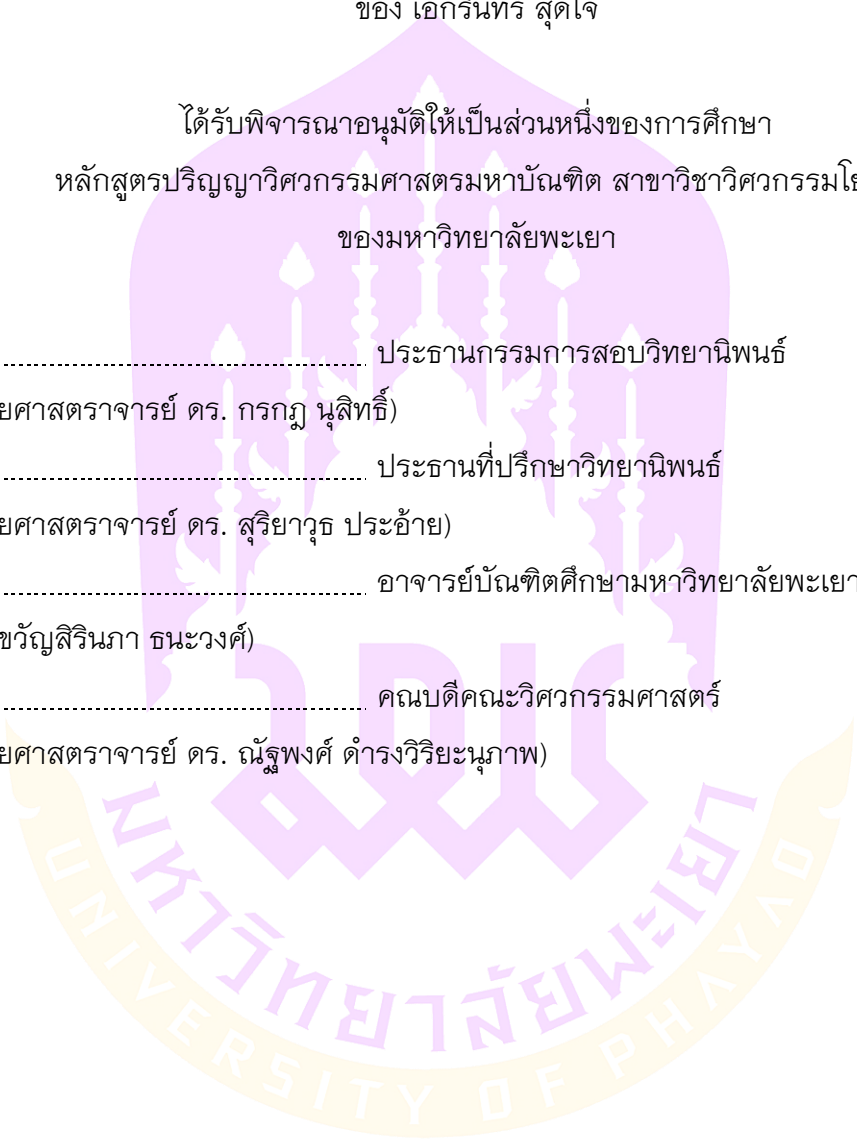
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุริยาวัช ประอ้าย)

..... อาจารย์บัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยพะเยา

(ดร. ขวัญสิรินภา ณะวงค์)

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุกาพ)



เรื่อง: แบบจำลองความสัมพันธ์สำหรับพฤติกรรมของผิวสัมผัสระหว่างทรายกับโครงสร้างผิวเรียบ
ผู้วิจัย: เอกรินทร์ สุดใจ, วิทยานิพนธ์: วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา), มหาวิทยาลัยพะเยา, 2565
อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุริยาวัชร ประอ้าย
คำสำคัญ: พฤติกรรมผิวสัมผัส, แบบจำลองพฤติกรรมผิวสัมผัส, การทดสอบแรงเฉือนแบบตรง

บทคัดย่อ

ในการออกแบบ ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานระหว่างโครงสร้างกับเม็ดดิน เป็นตัวแปรหนึ่งซึ่งจำเป็นต่อการออกแบบฐานราก เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักและเสถียรภาพของโครงสร้างฐานราก ความสัมพันธ์ของแรงเสียดทานระหว่างโครงสร้างกับเม็ดดินแสดงในรูปแบบของความต้านทานแรงเฉือน (T) งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาพฤติกรรมผิวสัมผัสระหว่างทรายและโครงสร้างผิวเรียบ โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงของผิวสัมผัส (Interface direct shear test) โดยที่ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคือทรายแม่น้ำในสภาพแห้ง ($\gamma_{max} = 17.90 \text{ kN/m}^3$ และ $\gamma_{min} = 15.50 \text{ kN/m}^3$) ที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density) ที่ 35% และ 85% โดยใช้หน่วยแรงตั้งฉากกระทำขนาด (σ_n) 100, 200 และ 300 kPa ภายใต้สภาวะ Constant normal load (CNL) และ Constant normal stiffness (CNS) โดยใช้ค่าความแข็งแก่รัง (Stiffness, k) 2 ค่า ได้แก่ 1,000 และ 3,000 kPa/mm พร้อมทั้งนำเสนอแบบจำลองความสัมพันธ์เชิงตัวเลขด้วยวิธี Rate type และแบบจำลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม Plaxis 3D ผลการศึกษาพบว่า การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบ CNL หน่วยแรงตั้งฉาก (σ_n) มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือน (T) และการเคลื่อนที่ในเชิงปริมาตร (การยุบตัวหรือขยายตัว : $[u]$) ในส่วนการทดสอบแบบ CNS หน่วยแรงตั้งฉาก (σ_n) มีการเปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลาการเฉือนส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนและการเคลื่อนที่ในเชิงปริมาตรไม่คงที่ตลอดระยะเวลาการเฉือน ในกรณีของทรายหลวมเมื่อมีค่า Stiffness มีผลทำให้หน่วยแรงตั้งฉากลดลงตลอดระยะเวลาการเฉือนส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนและการเคลื่อนที่ในเชิงปริมาตรลดลงตาม ในขณะที่ทรายแน่นเมื่อมีค่า Stiffness หน่วยแรงตั้งฉากจะลดลงเล็กน้อยในช่วงแรกของการเฉือนและเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการเฉือนส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนและการเคลื่อนที่ในเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นตาม ผลของแบบจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธี Rate type สามารถอธิบายพฤติกรรมผิวสัมผัสได้ดีในระยะเวลาการเฉือนที่มากทั้งในสภาวะ CNL และ CNS แบบจำลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติโดยใช้โมเดลของ Mohr coulomb ในการสร้างแบบจำลอง ผลของแบบจำลองทั้งในสภาวะ CNL และ CNS สามารถอธิบายพฤติกรรมของหน่วยแรงที่ผิวสัมผัสได้เป็นที่น่าพอใจ แต่อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของแบบจำลอง PLAXIS ไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมในการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรได้

Title: CONSTITUTIVE MODEL FOR GRANULAR SOIL–STRUCTURE INTERFACE BEHAVIOR
Author: Eakkarin Sudjai, Thesis: M.Eng. (Civil Engineering), University of Phayao, 2022
Advisor: Suriyayut Pra-ai
Keywords: Interface behavior, Model of Interface behavior, Direct shear test

ABSTRACT

In designing, the coefficient of friction between the structure and the soil grains is one of the parameters necessary for foundation design. It is a parameter used to analyze the load-bearing strength and stability of the foundation structure. The frictional relationship between the structure and the soil grains is expressed in the form of shear stress (τ). This thesis presents an investigation of the contact behavior between sand and a smooth structure. The interface direct shear test was used, in which the sample was dried river sand ($\gamma_{\max} = 17.90 \text{ kN/m}^3$ and $\gamma_{\min} = 15.50 \text{ kN/m}^3$) at densities of 35% and 85%, using the normal stress (σ_n) of 100, 200, and 300 kPa under the conditions of constant normal load (CNL) and constant normal stiffness (CNS) using two values of strength (Stiffness, k), namely 1,000 and 3,000 kPa/mm, together with the numerical correlation model by Rate type method and 3D finite element method model by Plaxis 3D program. In the CNL condition direct shear test, the normal stress (σ_n) affects shear stress (τ) and volume displacement (collapse/expansion: $[u]$). In the CNS condition, the normal stress (σ_n) changes over the shear stress, resulting in consistencies in shear strength and volumetric displacement over the course of shear. In the case of loose sand, when the stiffness resulted in a decrease in the normal stress throughout the testing period, it resulted in a decrease in shear strength and volume displacement accordingly. While the dense sand is compacted with stiffness, the normal stress slightly decreases during the initial shear phase and increases throughout the shear phase resulting in an increase in shear stress and volume displacement. The results of the rate type numerical model were able to explain the surface behavior well at large shear distances in both CNL and CNS conditions. The 3D finite element method model using Mohr Coulomb's model made a model. The model results in both CNL and CNS conditions satisfactorily explained the force behavior at the contact surface. However, the limitation of the PLAXIS model is that it cannot explain the behavior in volumetric changes.

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ต้องขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุริยาวัช ปรอ้าย ที่ได้ให้คำแนะนำตลอดจนวิธีการแก้ปัญหาต่าง ๆ ในงานวิจัยด้วยความเอาใจใส่ในงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบคุณสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองพะเยาและสาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา สำหรับเครื่องมือทดสอบและสิ่งอำนวยความสะดวกในการวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรกฎ นุสิทธิ์ จากภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร และดร.ชนา พุทธนานนท์ จาก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้คำแนะนำวิธีการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการใช้โปรแกรม PLAXIS 3 D ซึ่งเป็นเนื้อหาส่วนสำคัญของงานวิจัย ขอขอบคุณ ดร.ขวัญสิรินภา ธารวงค์ และดร.ปาลินี สุมิตสวรรคต์ ที่สละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำแนะนำการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนการให้คำแนะนำในการทำเล่มวิทยานิพนธ์ และสุดท้ายขออุทิศความดีความชอบให้แก่บิดามารดาและครอบครัวที่สนับสนุนในทุก ๆ ด้าน และขอขอบคุณกำลังใจจากมิตรรอบตัวทุกท่าน

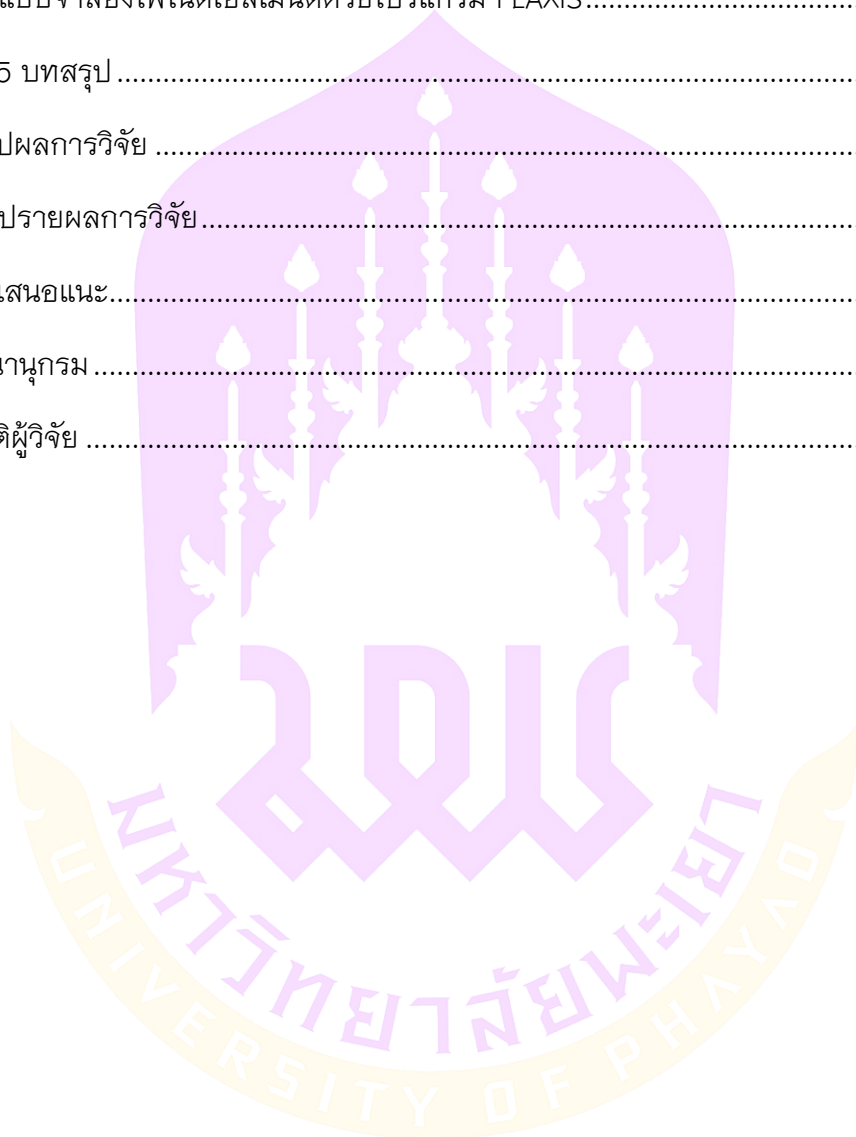
เอกรินทร์ สุตใจ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
ขอบเขตการวิจัย	3
แผนการดำเนินงานวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของผิวสัมผัส	6
การศึกษาพฤติกรรมผิวสัมผัสโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม PLAXIS	24
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	41
ตัวอย่างทรายที่ใช้ในการทดสอบ	41
เครื่องมือที่ใช้ทดสอบ	43
ขั้นตอนการทดสอบ.....	43
ความสัมพันธ์เชิงตัวเลขด้วยวิธี Rate type	49
แบบจำลองพฤติกรรมผิวสัมผัสด้วยโปรแกรม PLAXIS.....	60

บทที่ 4 ผลการศึกษา.....	66
ผลการทดสอบพฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างทฤษฎีกับโครงสร้างผิวเรียบ	66
ผลแบบจำลองความสัมพันธ์เชิงตัวเลขด้วยวิธี Rate type	74
ผลแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม PLAXIS.....	82
บทที่ 5 บทสรุป	93
สรุปผลการวิจัย	93
อภิปรายผลการวิจัย	95
ข้อเสนอแนะ.....	96
บรรณานุกรม	97
ประวัติผู้วิจัย	100



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 ตัวอย่างการศึกษาพฤติกรรมของผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้าง ด้วยเครื่องมือต่าง ๆ	9
ตาราง 2 ความคล้ายคลึงกันระหว่างการทดสอบแรงเฉือนสามแกนและการทดสอบ แรงเฉือนแบบตรง.....	20
ตาราง 3 หน่วยแรงที่กระทำบนหัวเสาเข็มของแบบจำลองที่พิจารณา	28
ตาราง 4 ผลของแบบจำลองผิวสัมผัสที่พิจารณา	34
ตาราง 5 รายละเอียดการทดสอบ	45
ตาราง 6 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างการทดสอบ	46
ตาราง 7 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ได้จากการหาความสัมพันธ์ ($D_r = 85\%$)	57
ตาราง 8 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ได้จากการหาความสัมพันธ์ ($D_r = 35\%$)	58
ตาราง 9 พารามิเตอร์วัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง.....	61
ตาราง 10 ขั้นตอนในการจำลองแบบจำลอง.....	62
ตาราง 11 พารามิเตอร์ของ Top cap ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง.....	64

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 หลักการของผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้างในงานเสาเข็ม	1
ภาพ 2 แผนการดำเนินงานวิจัย	4
ภาพ 3 หลักการของผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้างในงานวิศวกรรมปฐพี	7
ภาพ 4 รูปแบบการวิบัติของผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้างโดยเครื่องมือทดสอบ กำลังรับแรงเฉือนแบบตรง.....	7
ภาพ 5 การระบุความขรุขระของผิววัสดุโครงสร้าง หยาบและเรียบ	12
ภาพ 6 อิทธิพลของความขรุขระบนผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้างจากการทดสอบทรายซิลิกาและโครงสร้าง (Sand (Silica)–Structure tests).....	13
ภาพ 7 อิทธิพลอิทธิพลของความขรุขระบนผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้าง และค่าความแข็งแกร่ง จากการทดสอบทราย Calcareous ในสภาพแน่น	14
ภาพ 8 การเปรียบเทียบระหว่างแรงเฉือนที่ผิวของเสาเข็มและการทดสอบแรงเฉือน โดยตรงภายใต้สภาวะ CNS	16
ภาพ 9 สภาวะขอบเขตในการศึกษาพฤติกรรมของผิวสัมผัส.....	17
ภาพ 10 การศึกษาพฤติกรรมของผิวสัมผัสภายใต้สภาวะ CNS	18
ภาพ 11 ความคล้ายคลึงของพฤติกรรมที่สังเกตได้จากการทดสอบแรงเฉือน แบบสามแกน และผิวสัมผัสแบบตรง	19
ภาพ 12 ตัวแปรหลักที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบแรงเฉือนแบบตรงของผิวสัมผัส ระหว่างดินและโครงสร้าง.....	21
ภาพ 13 ตัวแปรหลักที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบแรงเฉือนแบบตรงของผิวสัมผัส ระหว่างดินและโครงสร้าง	22
ภาพ 14 แบบจำลองการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนภายใต้สภาวะ CNL	25
ภาพ 15 ผลการเปรียบเทียบของตำแหน่งที่แตกต่างกัน	26
ภาพ 16 ผลของแบบจำลองที่พิจารณาจุดที่อธิบายพฤติกรรมผิวสัมผัสได้ดีที่สุด.....	26

ภาพ 17 ลักษณะแบบจำลองพฤติกรรมผิวสัมผัสที่พิจารณา.....	27
ภาพ 18 ผลของแบบจำลองในการพิจารณาสัมประสิทธิ์ผิวสัมผัส (R_{inter}) ที่ 0.70.....	28
ภาพ 19 ผลของแบบจำลองในการพิจารณาสัมประสิทธิ์ผิวสัมผัส (R_{inter}) ที่ 0.75.....	29
ภาพ 20 ผลของแบบจำลองในการพิจารณาสัมประสิทธิ์ผิวสัมผัส (R_{inter}) ที่ 0.80.....	29
ภาพ 21 ผลของแบบจำลองในการพิจารณาสัมประสิทธิ์ผิวสัมผัส (R_{inter}) ที่ 0.85.....	30
ภาพ 22 ผลของแบบจำลองในการพิจารณาสัมประสิทธิ์ผิวสัมผัส (R_{inter}) ที่ 0.90.....	30
ภาพ 23 ผลของแบบจำลองในการพิจารณาสัมประสิทธิ์ผิวสัมผัส (R_{inter}) ที่ 0.95.....	31
ภาพ 24 ผลของแบบจำลองในการพิจารณาสัมประสิทธิ์ผิวสัมผัส (R_{inter}) ที่ 1.00.....	31
ภาพ 25 แสดงผลของแรงที่หัวเสาเชื่อมกับแรงที่ใต้เสาเข็มของแบบจำลอง Mohr coulomb และ Hard soil ภายใต้สัมประสิทธิ์ผิวสัมผัส (R_{inter}) ที่แตกต่างกัน.....	32
ภาพ 26 ลักษณะแบบจำลองพฤติกรรมผิวสัมผัสของโปรแกรม FLAC และโปรแกรม.....	34
ภาพ 27 รูปแบบเอลิเมนต์ของผิวสัมผัสระหว่างดินกับจีโอเท็กซ์ไทล์สำหรับดิน แบบ 6 โนด และ 15 โนด.....	36
ภาพ 28 รูปแบบเอลิเมนต์สำหรับดินแบบ 6 โนด และ 15 โนด ที่ใช้โดยโปรแกรม PLAXIS....	37
ภาพ 29 พื้นผิวครากแบบ Mohr-Coulomb ในสองมิติ (Mohr-Coulomb failure criterion).....	38
ภาพ 30 พื้นผิวครากแบบ Mohr-Coulomb ในสามมิติ (Mohr-Coulomb failure criterion).....	39
ภาพ 31 แผนการดำเนินการวิจัย.....	42
ภาพ 32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของตะแกรงกับเปอร์เซ็นต์ผ่าน.....	42
ภาพ 33 เครื่องมือทดสอบ.....	44
ภาพ 34 ตัวแปรที่สำคัญในการทดสอบผิวสัมผัสระหว่างทรายและโครงสร้าง.....	48
ภาพ 35 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสภาวะหน่วยแรงคงที่ (a, c, e) และสภาวะความ แข็งแรงแรงคงที่ (b, d, f).....	49
ภาพ 36 พารามิเตอร์สำคัญสำหรับอธิบายช่วงของผลการทดสอบ CNL.....	50
ภาพ 37 พารามิเตอร์สำคัญสำหรับอธิบายช่วงของผลการทดสอบ CNS.....	51

ภาพ 38 ลักษณะผลการทดสอบแรงเฉือนภายใต้สภาวะ CNS ที่พิจารณา การแตกของเม็ดทราย	52
ภาพ 39 ตัวอย่างการเลือกพารามิเตอร์ที่สำคัญของทรายแน่น.....	54
ภาพ 40 ค่าที่จุด peak และค่าที่จุด critical ของพารามิเตอร์ที่สำคัญของทรายแน่น ที่มีค่า k แตกต่างกัน	55
ภาพ 41 ความลาดชันเริ่มต้นและความลาดชันหลังค่าสูงสุดของทรายแน่นที่มีค่า k ต่างกัน.....	56
ภาพ 42 พารามิเตอร์ที่ได้หลังจากแยกความสัมพันธ์พล็อตกับ Normal stress (σ_n)	56
ภาพ 43 ลักษณะแบบจำลองการทดสอบ Direct shear ที่สร้างขึ้น.....	60
ภาพ 44 ผลของแบบจำลองที่สร้างขึ้นหลังจากผ่านขั้นตอนการสร้างอิเลิเมนต์.....	60
ภาพ 45 ตำแหน่งของตัวอย่างทรายที่ทำการวิเคราะห์พฤติกรรม	61
ภาพ 46 ตำแหน่งของระดับความสูงเหนือผิวสัมผัสที่ทำการวิเคราะห์พฤติกรรม.....	62
ภาพ 47 แบบจำลอง PLAXIS ใน Phase ที่ 1	63
ภาพ 48 แบบจำลอง PLAXIS ใน Phase ที่ 2	63
ภาพ 49 แบบจำลอง PLAXIS ใน Phase ที่ 3	63
ภาพ 50 ผลของหน่วยแรงและการยุบตัวที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง PLAXIS ที่ Phase ที่ 2 ของตัวอย่างทรายหลวม หน่วยแรงตั้งฉาก (σ_n) 100 kPa	65
ภาพ 51 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress (τ) และ Horizontal displacement ($[w]$) ของทรายแน่นและทรายหลวม	67
ภาพ 52 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Normal displacement ($[u]$) และ Horizontal displacement ($[w]$) ของทรายแน่นและทรายหลวม	67
ภาพ 53 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress (τ) และ Normal stress (σ_n) ของทรายแน่นและทรายหลวม	68
ภาพ 54 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Stress ratio (τ/σ_n) และ Horizontal displacement ($[w]$) ของทรายแน่นและทรายหลวม	69
ภาพ 55 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress (τ) และ Horizontal displacement ($[w]$) ของทรายแน่นและทรายหลวมภายใต้สภาวะ CNS	70

ภาพ 56 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Normal displacement ($[u]$) และ Horizontal displacement ($[w]$) ของทรายแน่นและทรายหลวมภายใต้สภาวะ CNS.....	71
ภาพ 57 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Normal stress (σ_n) และ Horizontal displacement ($[w]$) ของทรายแน่นและทรายหลวมภายใต้สภาวะ CNS.....	72
ภาพ 58 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress (τ) และ Normal stress (σ_n) ของทรายแน่นและทรายหลวมภายใต้สภาวะ CNS.....	73
ภาพ 59 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Stress ratio (τ/σ_n) และ Horizontal displacement ($[w]$) ของทรายแน่นและทรายหลวมภายใต้สภาวะ CNS.....	74
ภาพ 60 ผลแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress (τ) และ Horizontal displacement ($[w]$) ของทรายแน่นและทรายหลวมของแบบจำลอง Rate type.....	75
ภาพ 61 ผลแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Normal displacement ($[u]$) กับ Horizontal displacement ($[w]$) ของทรายแน่นและทรายหลวม ของแบบจำลอง Rate type	76
ภาพ 62 ผลแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress (τ) กับ Normal stress (σ_n) ของ ทรายแน่นและทรายหลวมของแบบจำลอง Rate type	76
ภาพ 63 ผลการพิจารณาพารามิเตอร์ X ของตัวอย่างทรายหลวม.....	78
ภาพ 64 ผลการพิจารณาพารามิเตอร์ Y ของตัวอย่างทรายหลวม หน่วยแรงตั้งฉาก (σ_n) 100 kPa ที่ $k = 3,000$ kPa/mm	78
ภาพ 65 ผลแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress (τ) และ Horizontal displacement ($[w]$) ภายใต้สภาวะ CNS ของแบบจำลอง Rate type.....	79
ภาพ 66 ผลแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Normal displacement ($[u]$) กับ Horizontal displacement ($[w]$) ภายใต้สภาวะ CNS ของแบบจำลอง Rate type	80
ภาพ 67 ผลแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Normal stress (σ_n) กับ Horizontal displacement ($[w]$) ภายใต้สภาวะ CNS ของแบบจำลอง Rate type.....	81
ภาพ 68 ผลแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Normal stress (σ_n) กับ Shear stress (τ) ภายใต้สภาวะ CNS ของแบบจำลอง Rate type	82

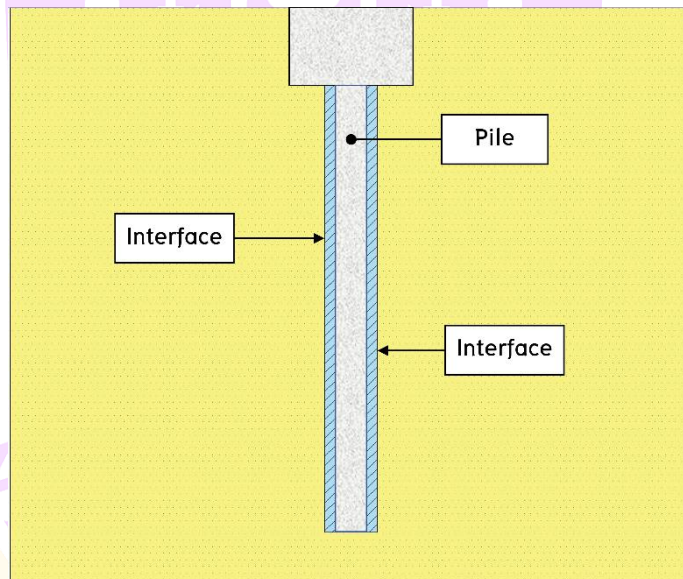
ภาพ 69 ผลการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress (τ) และ Horizontal displacement ($[w]$) ของทรายหลวมที่พิจารณาตำแหน่งที่แตกต่างกัน ของตัวอย่าง ของแบบจำลอง PLAXIS.....	84
ภาพ 70 ผลการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง Normal displacement ($[u]$) กับ Horizontal displacement ($[w]$) ของทรายหลวมที่พิจารณา ตำแหน่งที่แตกต่างกันของตัวอย่าง ของแบบจำลอง PLAXIS.....	85
ภาพ 71 ผลการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress (τ) และ Horizontal displacement ($[w]$) ของทรายหลวมที่พิจารณาความสูงที่แตกต่างกัน ของตัวอย่าง ของแบบจำลอง PLAXIS.....	86
ภาพ 72 ผลแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress (τ) และ Horizontal displacement ($[w]$) ภายใต้สภาวะ CNL ของแบบจำลอง PLAXIS.....	87
ภาพ 73 ผลการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง Normal stress (σ_n) กับ Shear stress (τ) ของทรายหลวมภายใต้สภาวะ CNS ที่พิจารณาตำแหน่งที่แตกต่างกัน ของตัวอย่าง ของแบบจำลอง PLAXIS.....	89
ภาพ 74 ผลการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง Normal displacement ($[u]$) กับ Horizontal displacement ($[w]$) ของทรายหลวมภายใต้สภาวะ CNS ที่พิจารณาตำแหน่งที่แตกต่างกันของตัวอย่าง ของแบบจำลอง PLAXIS.....	90
ภาพ 75 ผลการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง Normal stress (σ_n) กับ Shear stress (τ) ของทรายหลวมที่พิจารณาความสูงที่แตกต่างกันของตัวอย่าง ของแบบจำลอง PLAXIS.....	91
ภาพ 76 ผลแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Normal stress (σ_n) กับ Shear stress (τ) ภายใต้สภาวะ CNS ของแบบจำลอง PLAXIS.....	92

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันเนื่องจากการเจริญเติบโตของเมืองได้มีการก่อสร้างระบบสาธารณูปโภคขนาดใหญ่มากมาย ทั้งตึกสูง สะพาน เขื่อน กังหันลม สิ่งก่อสร้างเหล่านี้สามารถอยู่ได้ โดยการถ่ายน้ำหนักไปยังฐานรากที่อยู่ชั้นใต้ดิน ดังนั้นในการออกแบบฐานรากจำเป็นต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของดินที่จะใช้ในการออกแบบ เช่น ความสามารถในการรับกำลังแบกทาน และระยะการทรุดตัว เป็นต้น



ภาพ 1 หลักการของผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้างในงานเสาเข็ม

หลักการของปฐพีกลศาสตร์ในการนำมาประยุกต์ใช้ในการหาค่ากำลังแบกทานของโครงสร้างใต้ดิน เช่น ฐานรากเสาเข็ม จะขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานระหว่างโครงสร้างกับดินที่อยู่รอบ ๆ การศึกษาคุณสมบัติแรงเสียดทานของผิวสัมผัสระหว่างโครงสร้างใต้ดินกับดินรอบ ๆ จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการที่จะทำให้เกิดความเข้าใจคุณลักษณะและพฤติกรรมของโครงสร้างทางด้านวิศวกรรมปฐพี ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงเสียดทานระหว่างโครงสร้างกับเม็ดดินแสดงมาในรูปแบบของความต้านทานแรงเฉือน (τ) โดยตัวแปรที่มีผลต่อความต้านทานแรงเฉือน

คือ หน่วยแรงตั้งฉากที่มากระทำกับผิวสัมผัสฐานราก (σ) และมุมเสียดทานระหว่างดินกับฐานราก (δ) ซึ่งพฤติกรรมของแรงเฉือนจะเปลี่ยนไปตามสภาพเงื่อนไขของลักษณะพื้นผิวของโครงสร้างและดิน โดยตัวแปร δ ถือได้ว่าเป็นหนึ่งในตัวแปรที่สำคัญในการบ่งบอกถึงความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาคุณลักษณะของ δ ยังมีข้อจำกัดเนื่องจากความยุ่งยากและความซับซ้อนจากการที่ไม่สามารถระบุชั้นความหนาของผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้างได้อย่างแท้จริง อีกทั้งความยุ่งยากในการกำหนดสถานะเงื่อนไขที่ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากที่สุด เนื่องจากโครงสร้างทางปฐพีจะมีสถานะเงื่อนไขที่แตกต่างกัน

ที่ผ่านมาถึงแม้ว่าการศึกษาพฤติกรรมของผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้างได้รับความสนใจจากนักวิจัยเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก โดยใช้วิธีการที่แตกต่างกันทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนาม รวมถึงการพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่ออธิบายพฤติกรรมของผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาที่ผ่านมาจะมุ่งเน้นสำหรับผิวสัมผัสระหว่างดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว (Granular soil) หรือทรายและโครงสร้างผิวหยาบ (Rough surface) เป็นหลัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสร้างความสัมพันธ์เพื่ออธิบายพฤติกรรมดังกล่าวจะมีการกล่าวถึงเฉพาะวิธี Elasto-plasticity เนื่องจากตัวแปรที่ใช้พิจารณาจะมีไม่มากเมื่อเทียบกับวิธีอื่น แต่กระนั้นวิธีการดังกล่าวยังมีข้อจำกัดในการที่จะสามารถอธิบายพฤติกรรมแรงเฉือนของผิวสัมผัสได้เฉพาะระยะเฉือนที่ไม่มาก อีกทั้งการอธิบายพฤติกรรมหน่วยแรงเฉือนของผิวสัมผัสในสภาวะความแข็งแรงคงที่ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในสภาวะเงื่อนไขที่อธิบายพฤติกรรมของเสาเข็มยังไม่มีการศึกษาอย่างแพร่หลาย

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาแบบจำลองพฤติกรรมผิวสัมผัสระหว่างทรายกับวัสดุโครงสร้างผิวเรียบ โดยการพัฒนาเครื่องมือ Direct shear เพื่อทำการศึกษาแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของโครงสร้างกับเม็ดดิน พร้อมทั้งนำเสนอแบบจำลองความสัมพันธ์โดยวิธี Rate type และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม Plaxis 3D เพื่อที่จะสามารถอธิบายพฤติกรรมต่าง ๆ ของผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้างได้ทุกสภาวะ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของผิวสัมผัสระหว่างทรายและโครงสร้างผิวเรียบ (Smooth surface)

2. เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบพฤติกรรมของผิวสัมผัสระหว่างทรายกับวัสดุ โครงสร้างผิวเรียบกับแบบจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธี Rate type ภายใต้สภาวะหน่วยแรงคงที่ (Constant normal load: CNL) และในสภาวะความแข็งแรงแรงคงที่ (Constant normal stiffness)

3. เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบพฤติกรรมของผิวสัมผัสระหว่างทรายกับวัสดุ โครงสร้างผิวเรียบกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม PLAXIS 3D ภายใต้สภาวะ Constant normal load และในสภาวะ Constant normal stiffness

สมมุติฐานของงานวิจัย

1. แบบจำลองความสัมพันธ์เชิงตัวเลขด้วยวิธี Rate type สามารถทำนายพฤติกรรม ผิวสัมผัสระหว่างทรายและโครงสร้างผิวเรียบทั้งในสภาวะ Constant normal load และสภาวะ Constant normal stiffness

2. แบบจำลองทรายและโครงสร้างผิวเรียบทั้งในสภาวะ Constant normal load และสภาวะ Constant ความสัมพันธ์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม PLAXIS 3D สามารถ ทำนายพฤติกรรมผิวสัมผัสระหว่าง normal stiffness ได้

ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาพฤติกรรมของผิวสัมผัสระหว่างทรายจาก อําเภอยุช จังหวัดพะเยา (ในสภาพแห้ง) กับโครงสร้างผิวเรียบที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์เริ่มต้น $D_r = 35\%$ และ $D_r = 85\%$ โดยเครื่องมือทดสอบ Interface direct shear test

2. ศึกษาพฤติกรรมของผิวสัมผัสระหว่างทราย (ในสภาพแห้ง) กับโครงสร้างผิวเรียบ ภายใต้แรงกระทำแบบต่อเนื่อง (Monotonic loading) ในสภาวะหน่วยแรงคงที่ (Constant normal load: CNL) และในสภาวะความแข็งแรงแรงคงที่ (Constant normal stiffness) ที่หน่วยแรงตั้งฉากเริ่มต้น $\sigma_n = 100, 200$ และ 300 kPa และ $k = 1000$ และ 3000 kPa/mm

3. จำลองพฤติกรรมผิวสัมผัสระหว่างทรายและวัสดุโครงสร้างผิวเรียบโดยแบบจำลอง ไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม PLAXIS 3D โดยใช้วิธี Mohr coulomb สำหรับตัวอย่างทราย และวิธี linear elastic สำหรับผิวสัมผัส โดยขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองอ้างอิงจาก Pra-ai (2013)

แผนการดำเนินงานวิจัย

ลำดับ ที่	รายการ	เดือน											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง												
2	จัดเตรียมเครื่องมือและตัวอย่าง												
3	ทำการทดสอบ Direct shear test												
4	สร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ โดยวิธี Rate type และวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์												
5	เปรียบเทียบผลของแบบจำลอง กับผลของการทดสอบ												
6	สรุปและวิเคราะห์ผลการวิจัย												
7	จัดทำรายงานและเตรียมนำเสนอ												

ภาพ 2 แผนการดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้จะมีขั้นตอนทั้งหมด 7 ขั้นตอน ดังที่แสดงในตาราง โดยในเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องระหว่างเดือนมีนาคมถึงเดือนเมษายน ทำการจัดเตรียมเครื่องมือและตัวอย่างสำหรับการทดสอบ เดือนพฤษภาคมไปจนถึงเดือนกรกฎาคม เริ่มทำการทดสอบพฤติกรรมผิวสัมผัสด้วยวิธีการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบตรง (Direct shear test) โดยช่วงระหว่างเดือนมิถุนายนถึงเดือนสิงหาคม ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์และสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์โดยวิธี Rate type และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เดือนสิงหาคมถึงเดือนกันยายนทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบพฤติกรรมผิวสัมผัสกับแบบจำลองที่สร้างขึ้น และสรุปและวิเคราะห์ผลการวิจัยในเดือนสิงหาคม เดือนตุลาคมถึงเดือนธันวาคม จัดทำรายงานและเตรียมนำเสนอ

ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย

1. สามารถทราบถึงพฤติกรรมของผิวสัมผัสระหว่างทรายและโครงสร้างผิวเรียบ ภายใต้สภาวะ Constant normal load และสภาวะ Constant normal stiffness
2. สามารถคาดคะเนพฤติกรรมของผิวสัมผัสระหว่างทรายและโครงสร้างผิวเรียบ จากแบบจำลองที่สร้างขึ้น



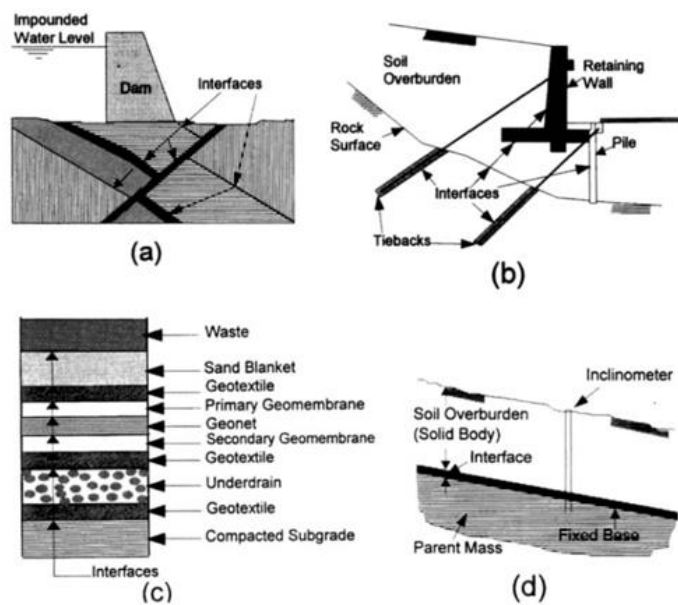
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของผิวสัมผัส

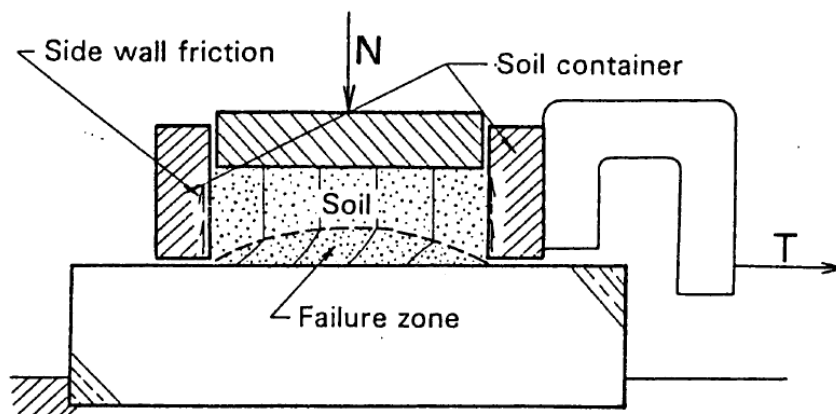
ในการนำหลักของปฐพีกลศาสตร์มาประยุกต์ใช้ในการหาค่าล้าแบกทานของโครงสร้างใต้ดิน เช่น ฐานรากเสาเข็ม กำแพงกันดิน และสมอยึด จะขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานระหว่างโครงสร้างกับดินที่อยู่รอบ ๆ ดังแสดงในภาพ 3 การศึกษาคุณสมบัติแรงเสียดทานของผิวสัมผัสระหว่างโครงสร้างใต้ดินกับดินรอบ ๆ ซึ่งเกิดเป็นลักษณะแผ่นบาง ๆ จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการที่จะทำให้เกิดความเข้าใจถึงคุณลักษณะและพฤติกรรมของโครงสร้างด้านปฐพี และยังจะช่วยทำให้เกิดความปลอดภัยมากยิ่งขึ้นในการออกแบบโครงสร้างนั้น ๆ การศึกษาผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้าง ซึ่งตั้งอยู่บนพื้นฐานของแรงเสียดทานหรือแรงฝืดที่เกิดขึ้นได้มีการพัฒนาหลากหลายรูปแบบ เช่น การศึกษาในห้องปฏิบัติการหรือในภาคสนาม รวมถึงการศึกษาโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งคุณลักษณะต่าง ๆ จะถูกศึกษาจากการทดลองทั้งในห้องปฏิบัติการหรือภาคสนาม เพื่อที่จะอธิบายพฤติกรรมของผิวสัมผัสได้ครอบคลุมยิ่งขึ้น

ผิวสัมผัสระหว่างดินและวัสดุโครงสร้าง (Soil-structure interface) เป็นผลมาจากปรากฏการณ์ที่เกิดจากความไม่ต่อเนื่องและความแตกต่างของคุณสมบัติเชิงกลที่ผิวสัมผัสระหว่างดินกับวัสดุโครงสร้าง พฤติกรรมผิวสัมผัสจะเกิดขึ้นในบริเวณที่บางมาก ๆ รอบ ๆ วัสดุโครงสร้างที่ได้จากการพัฒนาของความเครียดในพื้นที่ (Strain localization) ซึ่งเกิดจากการส่งผ่านของแรงในแนวสัมผัสจากวัสดุโครงสร้างไปยังดิน ความไม่ต่อเนื่องของคุณสมบัติเชิงกลจะมีการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญและไม่สามารถเปลี่ยนแปลงกลับคืนสภาพเดิมได้ โชนของผิวสัมผัสประกอบด้วยส่วนหนึ่งของดินและอนุภาคบางส่วนที่ถูกฉีกออกมาจากส่วนที่ติดกับโครงสร้าง จึงมีคุณสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันมากเมื่อเทียบกับส่วนที่เหลือของดิน ดังแสดงในภาพ 4 ยกตัวอย่างเช่น โครงสร้างของเม็ดดินจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างสิ้นเชิงเมื่อมีแรงเฉือนมากกระทำ และการเปลี่ยนแปลงของเม็ดดินนั้นขึ้นอยู่กับระดับของหน่วยแรงที่มากกระทำ



ภาพ 3 หลักการของผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้างในงานวิศวกรรมปฐพี

ที่มา: Samtani, et al., 1996



ภาพ 4 รูปแบบการวิบัติของผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้างโดยเครื่องมือทดสอบ
กำลังรับแรงเฉือนแบบตรง

ที่มา: Yoshimi and Kishida, 1981

การกำหนดความหนาของผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้างได้มีการศึกษาอย่างมากมาย โดยใช้วิธีที่ต่างกันไป เป็นที่น่าสังเกตว่าในการกำหนดความหนาของผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้างเป็นสิ่งที่ละเอียดอ่อนมากและต้องใช้เครื่องมือวัดที่มีคุณภาพสูง ยกตัวอย่างเช่น (Hoteit, 1990) ประเมินความหนาของผิวสัมผัสโดยใช้ Stereophotogrammetry ในขณะที่ (Dejong, et al., 2003) ได้ทำการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของแรงเฉือนและการเปลี่ยนแปลงปริมาณของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายในวงเฉือน โดยใช้ Particle image velocimetry (PIV) อย่างไรก็ตาม ขนาดของเม็ดดินถือว่าเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความหนาของผิวสัมผัส ซึ่งถูกกล่าวถึงและมีการระบุโดยผู้เขียนที่ต่างกันในเชิงคุณภาพ โดยทั่วไปขนาดของเม็ดดินที่นำมาใช้ในการประกอบการกำหนดความหนาของผิวสัมผัสจะอยู่ในช่วง $7-14D_{50}$ (7 ถึง 14 เท่าของขนาดเม็ดดิน) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความขรุขระของผิวสัมผัสด้วย

พื้นที่บริเวณผิวสัมผัสประกอบด้วยส่วนที่เป็นอนุภาคของดินที่ถูกเฉือนออกมาจากโครงสร้าง สมบัติเชิงกลของดินซึ่งมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากส่วนที่เหลือของดิน จากการศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์ของผิวสัมผัสและวัสดุโครงสร้าง สามารถแสดงความต้านทานแรงเฉือน (τ) ดังสมการที่ 1

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

โดยที่ σ แสดงถึงหน่วยแรงตั้งฉากที่มากระทำกับผิวสัมผัสและ $\tan \delta$ แสดงถึงมุมเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างทรายและวัสดุโครงสร้าง

สำหรับงานทางด้านวิศวกรรมปฐพีชายฝั่ง การออกแบบการรับน้ำหนักบรรทุกของฐานรากเสาเข็ม โดยทั่วไปจะเป็นไปตามแนวทางของสถาบันอเมริกันปิโตรเลียม (American petroleum institute: API) เกณฑ์การวัดของ Coulomb ที่ใช้ในการหาค่าตั้งต้านทานแรงเฉือนของเสาเข็มสามารถหาได้จากสมการที่ 2

$$\tau = K \cdot \sigma'_n \tan \delta \quad (2)$$

โดยที่ K แสดงถึงสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง σ'_n แสดงถึงหน่วยแรงตั้งฉากประสิทธิผลที่กระทำบนผิวสัมผัสและ $\tan \delta$ แสดงถึงมุมเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างทรายและวัสดุโครงสร้าง

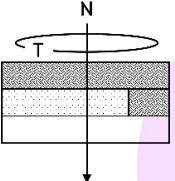
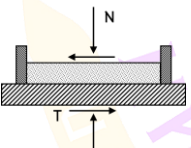
การศึกษาจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการหรือในสนามเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่ง ที่ได้รับความนิยม ในการศึกษาความเข้าใจที่ถูกต้องเกี่ยวกับพฤติกรรมเชิงกลของผิวสัมผัส การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการศึกษาต่าง ๆ สามารถพบเจอได้ทั่วไปดังแสดงในตาราง 1 แสดงตัวอย่างของการศึกษาผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้างโดยใช้เครื่องมือต่าง ๆ อย่างไม่

ก็ตาม การปรับแต่งและการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ต่าง ๆ ยังคงได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้เกิดความเข้าใจยิ่งขึ้นในพฤติกรรมของผิวสัมผัส

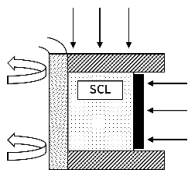
ตาราง 1 ตัวอย่างการศึกษาพฤติกรรมของผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้าง
ด้วยเครื่องมือต่าง ๆ

เครื่องมือ	ตัวอย่าง	ข้อดี	ข้อเสีย
	Potyondy (1961) Wernick (1974) Desai, et al. (1985) Hotiet (1990) Motara (2002) Prai-ai (2013)	1. เครื่องมือไม่ซับซ้อน 2. การเตรียมตัวอย่าง ไม่ยุ่งยาก 3. พื้นผิวของโครงสร้างสัมผัสกับดินด้านบนหรือด้านล่าง	1. เกิดการกระจุกตัวของความเค้นและความเครียดที่ขอบกำแพง Shear Box 2. ยากในการแบ่งแยกการเลื่อนไถลของดินและการเสียรูปของดิน 3. การสูญเสียตัวอย่างบางส่วนระหว่างการเลื่อน 4. พื้นที่หน้าตัดของ ผิวสัมผัสลดลงจากระยะการเลื่อนที่เพิ่มมากขึ้น
	Coyle, et al. (1967) Brumund, et al. (1973)	1. สามารถศึกษาแรงเสียดทานของเสาเข็มและสมอต่าง ๆ ได้ 2. เครื่องมือสามารถดัดแปลงได้ง่าย 3. พื้นที่ผิวคงที่	1. ไม่ทราบค่าหน่วยแรงตั้งฉากที่กระทำกับผิวสัมผัส 2. ผลกระทบจากการเตรียมตัวอย่างดินต่อผิวสัมผัส 3. เกิดการกระจุกของหน่วยแรงด้าน

ตาราง 1 (ต่อ)

เครื่องมือ	ตัวอย่าง	ข้อดี	ข้อเสีย
Direct ring shear 	Yoshimi, et al. (1981) Boulon, et al. (1991)	<ol style="list-style-type: none"> 1. ไม่มีผลกระทบจากขอบ Shear Box 2. สามารถทดสอบที่การเคลื่อนที่มาก ๆ ได้ 3. สามารถปรับเปลี่ยนความหลากหลายของสภาวะหน่วยแรงเฉือน 	หัวและท้าย ในขณะที่ทำการทดสอบ <ol style="list-style-type: none"> 1. มีความยุ่งยากในการเตรียมตัวอย่าง 2. การพัฒนาของหน่วยแรงเฉือนในตัวอย่าง 3. มีความยุ่งยากในการวิเคราะห์องค์ประกอบ
Simple shear 	Uesugi, et al. (1986) Uesugi, et al. (1988) Fakharian and Evgin (1997)	<ol style="list-style-type: none"> 1. การเตรียมตัวอย่างไม่ยุ่งยาก 2. พื้นที่ผิวสัมผัสคงที่ 3. สามารถแยกการเคลื่อนที่และการเสียรูปของตัวอย่าง 4. สามารถบันทึกภาพการเสียรูปและการเคลื่อนที่ของตัวอย่าง 	<ol style="list-style-type: none"> 1. เกิดการกระจุกของหน่วยแรงบริเวณขอบ Shear Box 2. ตำแหน่งของดินมีผลต่อการทดสอบ

ตาราง 1 (ต่อ)

เครื่องมือ	ตัวอย่าง	ข้อดี	ข้อเสีย
Ring simple shear 	De Gennaro (1999) Chambon (2003) Dumitrescu, et al. (2003) Corfdir, et al. (2004) Said (2007)	1. มีความต่อเนื่อง สำหรับการ เคลื่อนที่ทุก ๆ ผิวสัมผัส 2. ความหลากหลาย ในการกำหนด หน่วยแรง 3. สามารถทดสอบ ที่การเคลื่อนที่ มาก ๆ 4. พื้นผิวสัมผัส คงที่ 5. สามารถ บันทึกภาพ การเสียรูป และการเคลื่อนที่ ของตัวอย่าง	1. มีความยุ่งยากใน การเตรียมตัวอย่าง 2. มีความซับซ้อน ของเครื่องมือ จำเป็นต้องใช้ ความละเอียด รอบคอบ ในการทดสอบ 3. มีความยุ่งยาก ในการควบคุมหน่วย แรงตั้งฉากกับ ผิวสัมผัส

ที่มา: คัดลอกและดัดแปลงจาก: Bengabbou, 2003

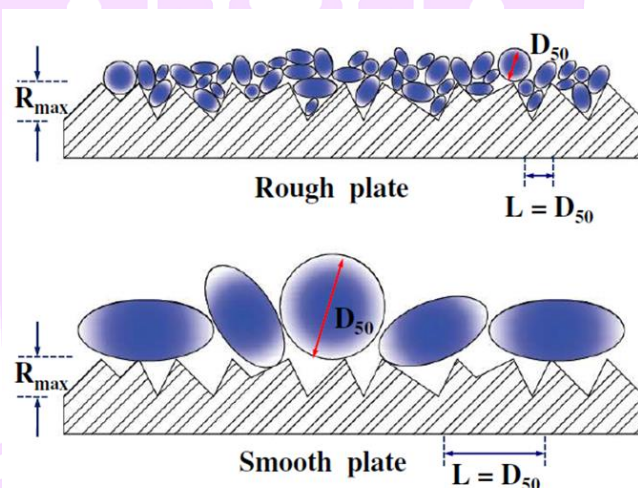
ความขรุขระของผิวสัมผัส (Roughness of surface)

จากการศึกษาที่ผ่านมาจะเห็นได้ชัดว่าพื้นที่ผิวสัมผัสของโครงสร้างเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผิวสัมผัสระหว่างดินและวัสดุโครงสร้าง ซึ่งเดิมที่ความขรุขระจะถูกกำหนดด้วยค่าความหยาบ (ความสูงต่ำของผิวโครงสร้าง) R_{max} (Yoshimi and Kishida, 1981) ที่วัดได้จากค่าความสูง-ต่ำ ตลอดระยะความยาว 0.20 mm หลังจากนั้นเพื่ออธิบายความขรุขระของผิวให้มีความเข้าใจมากยิ่งขึ้น Kishida and Uesugi (1987) ได้นำขนาดของดินเข้ามาเกี่ยวข้องในการกำหนดความขรุขระ โดยให้ค่าจำกัดความของความขรุขระ Normalized roughness ดังความสมการที่ 3

$$R_n = \frac{R_{\max}(L = D_{50})}{D_{50}} \quad (3)$$

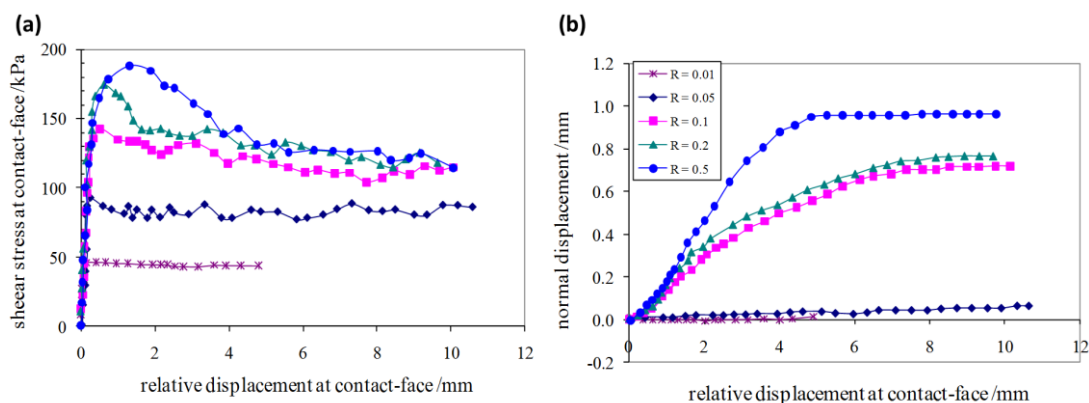
โดยที่ $R_{\max}(L = D_{50})$ คือ ค่าสูงต่ำของพื้นผิว R_{\max} ตลอดระยะความยาว $L = D_{50}$ (ระยะระหว่างผิวโครงสร้างที่สูงที่สุดถึงผิวโครงสร้างที่ต่ำที่สุดควรมีระยะ 50% ของอนุภาคทราย) ซึ่ง R_n สามารถระบุได้ว่าผิวของวัสดุโครงสร้างมีลักษณะหยาบหรือเรียบ ดังแสดงในภาพ 5

Hu and Pu (2004) ได้รายงานผลการศึกษาของความขรุขระของพื้นผิวที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของผิวสัมผัสดังในภาพ 6 แสดงผลของอิทธิพลของความขรุขระบนผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้างจากการทดสอบทรายซิลิกาและโครงสร้าง (Sand (Silica)–Structure tests) ($D_r = 90\%$, $\sigma_n = 200$ kPa ซึ่งจะเห็นได้ว่า R_n ที่มีค่ามากจะทำให้ผิวสัมผัสแสดงการขยายตัว (Dilative behavior) ได้อย่างชัดเจนเนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสของมวลดินและโครงสร้างมีมากกว่า



ภาพ 5 การระบุความขรุขระของผิววัสดุโครงสร้าง หยาบและเรียบ

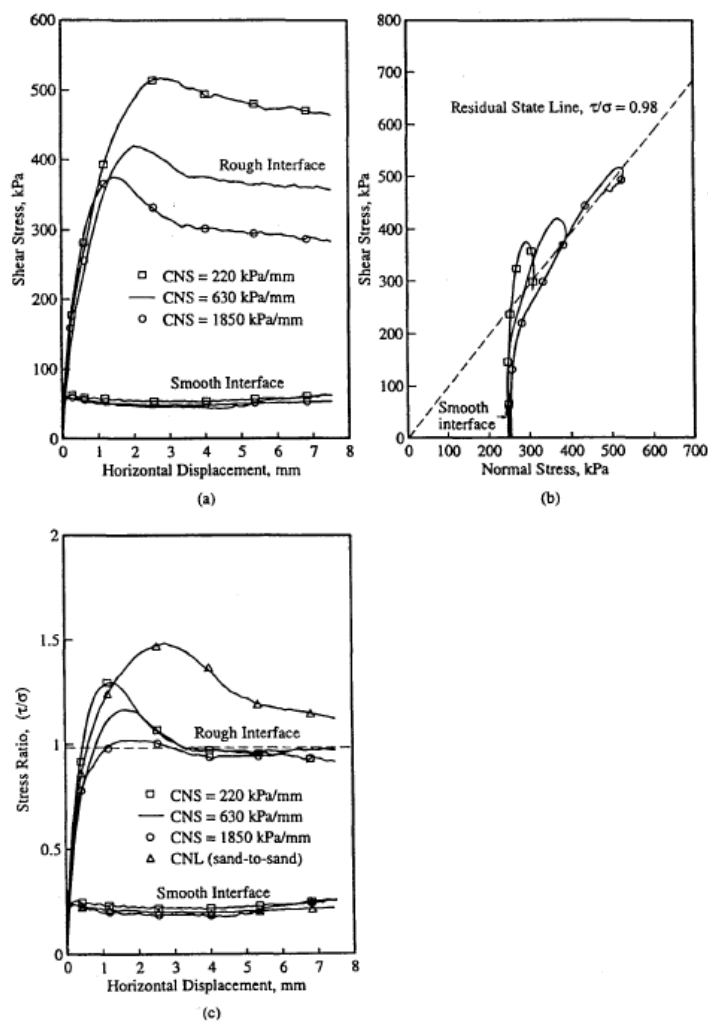
ที่มา: Kishida and Uesugi, 1987



ภาพ 6 อิทธิพลของความขรุขระบนผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้างจากการทดสอบทรายซิลิกาและโครงสร้าง (Sand (Silica)–Structure tests)

ที่มา: Hu and Pu, 2004

Airey, et al. (1992) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของผิวสัมผัสระหว่างทรายและโครงสร้าง ทั้งผิวหยาบและผิวเรียบภายใต้สภาวะ CNS โดยศึกษาผลของค่าความแข็งแแกร่ง Normal stiffness (k) กับความขรุขระของผิวสัมผัสและสภาพเริ่มต้นของตัวอย่าง (หลวมและแน่น) ความเข้มข้นของหน่วยแรงเริ่มต้น ดังแสดงในภาพ 7 แสดงผลของอิทธิพลอิทธิพลของความขรุขระบนผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้างและค่าความแข็งแแกร่ง จากการทดสอบทราย Calcareous สภาพแน่น ($Dr = 60\%$, $\sigma_n = 250$ kPa) ผลการทดสอบที่ได้จะมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับการทดสอบเสาเข็มจำลอง ซึ่งปัจจัยสำคัญเกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินรอบ ๆ เสาเข็มหรือโครงสร้างทั้งนี้จะได้ชัดว่า ความขรุขระของผิวสัมผัสจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของผิวสัมผัสด้วยเช่นกัน



ภาพ 7 อิทธิพลอิทธิพลของความขรุขระบนผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้าง และค่าความแข็งแรง จากการทดสอบทราย Calcareous ในสภาพแน่น

ที่มา: Airey, et al., 1992

Constant Normal Stiffness Condition (CNS)

ที่ผ่านมากการศึกษากฎพฤติกรรมของผิวสัมผัสส่วนใหญ่จะใช้เครื่องมือทดสอบแรงเฉือน โดยควบคุมหน่วยแรงตั้งฉากให้คงที่ตลอดช่วงเวลาที่มิแรงเฉือนมากระทำ (Constant Normal Load: CNL) ซึ่งเหมาะสมกับการศึกษากำแพงกันดิน การเสริมกำลังของที่ลาด เป็นต้น และเมื่อผิวสัมผัสมีแรงมากระทำแบบวัฏจักร ผิวสัมผัสจะแสดงการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นเนื่องจากจำนวนรอบของแรงวัฏจักรที่มากกระทำ ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงเฉือน

อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาของ Puech, et al. (1979) ในการทดสอบแรงดึงของเสาเข็มจำลองที่ฝังในชั้นทราย พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็ม เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของทรายรอบ ๆ เสาเข็ม ในขณะที่มีหน่วยแรงเฉือนมากกระทำ

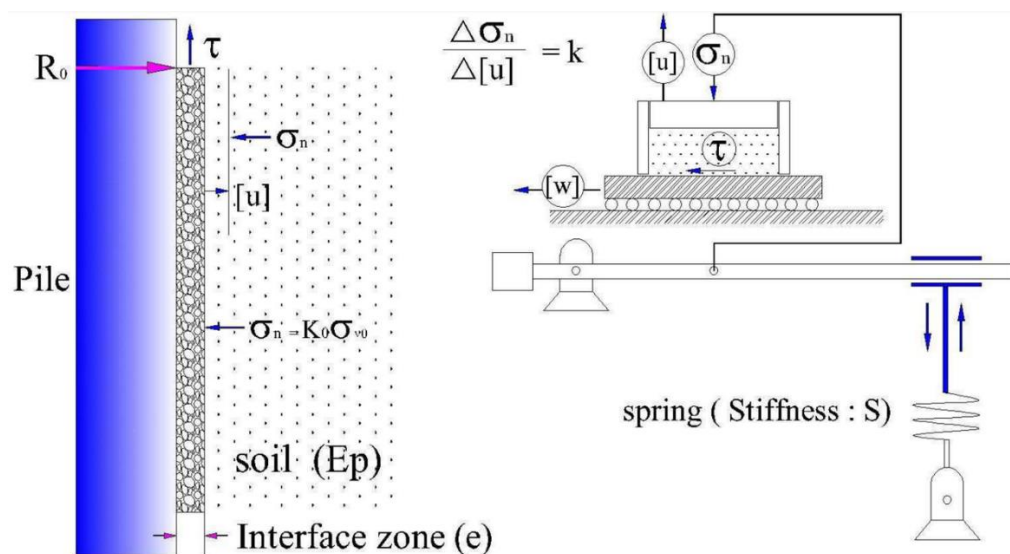
Schlosser and Guilloux (1981) ได้นิยามค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานปรากฏ (apparent friction coefficient, μ^*) ซึ่งได้จากการทดสอบแบบ pull-out test ซึ่งแสดงในรูปความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4

$$\mu^* = \frac{\tau}{\sigma_n} \quad (4)$$

โดยที่ $\mu^* \geq \mu = \tau / (\sigma_n + \Delta\sigma)$; τ คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่แท้จริง σ_n คือ หน่วยแรงตั้งฉากเริ่มต้น และ $\Delta\sigma$ แสดงถึงหน่วยแรงตั้งฉากที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างการทดสอบด้วยการดึง

คุณลักษณะทางปริมาตรของผิวสัมผัสจะกำหนดความต้านทานแรงเฉือนระหว่างดินและโครงสร้าง ซึ่งรูปแบบของผิวสัมผัสภายใต้สภาวะ CNS สามารถอธิบายได้ดังภาพ 8 โดยการกำหนดความแข็งแรงแรงดึง (Stiffness, k) สำหรับเสาเข็มที่มีรัศมี R ฝังดินที่มีค่า shear modulus G โดย e คือ ความหนาของผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้างที่เกิดขึ้นเมื่อมีหน่วยแรงเฉือนมากกระทำ ($e \ll R$) และ Δu การเปลี่ยนแปลงในแนวตั้งฉากที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการทดสอบ ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าความแข็งแรงแรงดึงจาก (Boulon and Foray, 1986) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 5

$$K = \frac{\Delta\sigma}{\Delta u} = \frac{2G}{R} \quad (5)$$

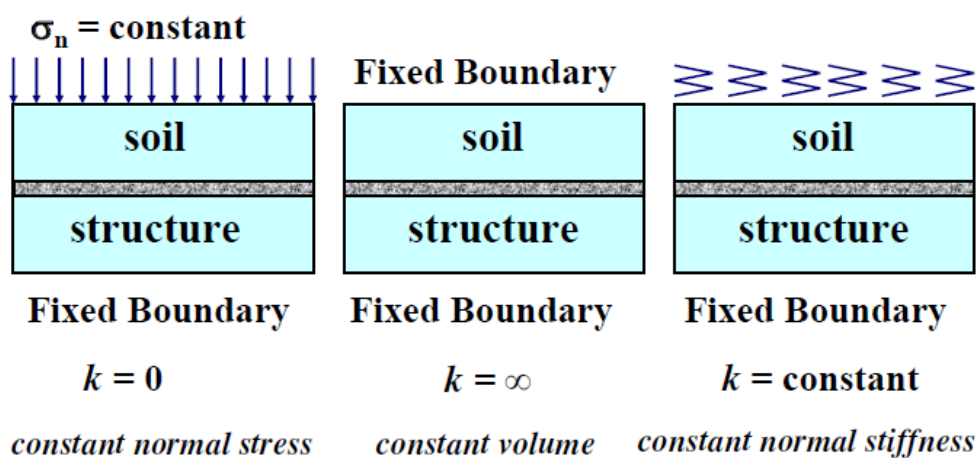


ภาพ 8 การเปรียบเทียบระหว่างแรงเฉือนที่ผิวของเสาเข็มและการทดสอบแรงเฉือน โดยตรงภายใต้สภาวะ CNS

ที่มา: Boulon and Foray, 1986

จากความสัมพันธ์ข้างต้นสามารถแบ่งรูปแบบสภาวะเฉือนได้ดังนี้
 กรณีที่ 1: $K = 0$ โดยที่ $\Delta\sigma = 0, \Delta[u] \neq 0$ (Constant Normal Unit Load: CNL)
 กรณีที่ 2: $K = \infty$ โดยที่ $\Delta\sigma \neq 0, \Delta[u] = 0$ (Constant Volume: CV)
 กรณีที่ 3: $K = \text{constant}$ โดยที่ $\Delta\sigma \neq 0, \Delta[u] \neq 0$ (Constant Normal Stiffness: CNS)
 ยกตัวอย่างเช่น กรณีที่ 1 หน่วยแรงตั้งฉากที่มากกระทำกับผิวสัมผัสจะมีค่าคงที่ตลอดช่วงเวลาที่หน่วยแรงเฉือนมากกระทำ ในกรณีที่ 2 ปริมาตรของผิวสัมผัสจะมีค่าคงที่ตลอดช่วงที่มีหน่วยแรงเฉือนมากกระทำและในกรณีที่ 3 ช่วงที่มีหน่วยแรงเฉือนมากกระทำ หน่วยแรงตั้งฉากและการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากจะมีการเปลี่ยนแปลงในสัดส่วน $\Delta\sigma / \Delta[u]$ ที่คงที่ตลอดเวลาดังแสดงในภาพ 9

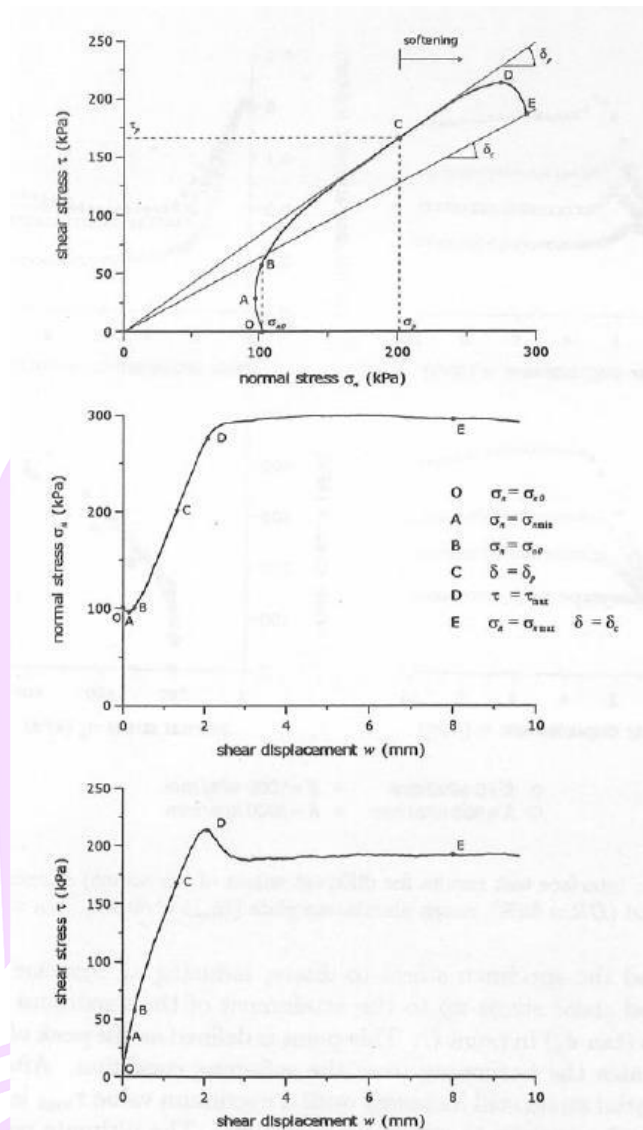
การศึกษาพฤติกรรมของผิวสัมผัสโดยใช้เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนโดยตรงภายใต้สภาวะ CNS ได้มีนักวิจัยหลาย ๆ ท่าน ศึกษาผลของ k ต่อผิวสัมผัสไม่ว่าจะเป็นแบบ monotonic และ cyclic ยกตัวอย่างเช่น (Tabucanon, et al., 1995); (Mortara, 2001); (Pra-ai, 2013)



ภาพ 9 สภาวะขอบเขตในการศึกษาพฤติกรรมของผิวสัมผัส

ที่มา: Fakharian and Evgin, 1997

ค่าความแข็งแรงแรง (k) จะมีผลต่อผิวสัมผัสโดยในช่วงที่มีหน่วยแรงเฉือนมากกระทำ ผิวสัมผัส จะแสดงพฤติกรรมยุบตัว (Contraction) หรือขยายตัว (Dilation) ขึ้นอยู่กับสภาวะเริ่มต้นของผิวสัมผัส (หลวมหรือแน่น) ในกรณีที่ผิวสัมผัสอยู่ในสภาพแน่น ดังแสดงในภาพ 10 แสดงผลการศึกษาพฤติกรรมของผิวสัมผัสภายใต้สภาวะ CNS ตัวอย่างแน่น ($D_r = 85\%$) ผิวขรุขระ ($R_{\max} = 60 \text{ mm}$), $k = 100 \text{ kPa/mm}$ เมื่อมีหน่วยแรงเฉือนมากกระทำ ผิวสัมผัสจะมีการยุบตัวเล็กน้อยในตอนเริ่มต้นหลังจากนั้นผิวสัมผัสจะมีการขยายตัวและทำให้หน่วยแรงตั้งฉากมีค่าเพิ่มมากขึ้น และส่งผลต่อหน่วยแรงเฉือนตามลำดับ เมื่อระยะเวลาในการเฉือนเพิ่มมากขึ้น อัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงตั้งฉากก็จะลดลงรวมทั้งหน่วยแรงเฉือนด้วย ซึ่งระยะเฉือนที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้อัตราส่วนของหน่วยแรงเฉือนต่อหน่วยแรงตั้งฉาก (Stress ratio, τ / σ_n) มีค่าคงที่ ซึ่งเราเรียกว่า สภาวะวิกฤต (Critical state) ในขณะที่ผิวสัมผัสสภาพหลวมจะแสดงพฤติกรรมแบบยุบตัวตลอดช่วงที่มีหน่วยแรงเฉือนมากกระทำ ทำให้สภาวะหน่วยแรงมีทิศทางที่ลดลง



ภาพ 10 การศึกษาพฤติกรรมของผิวสัมผัสภายใต้สภาวะ CNS

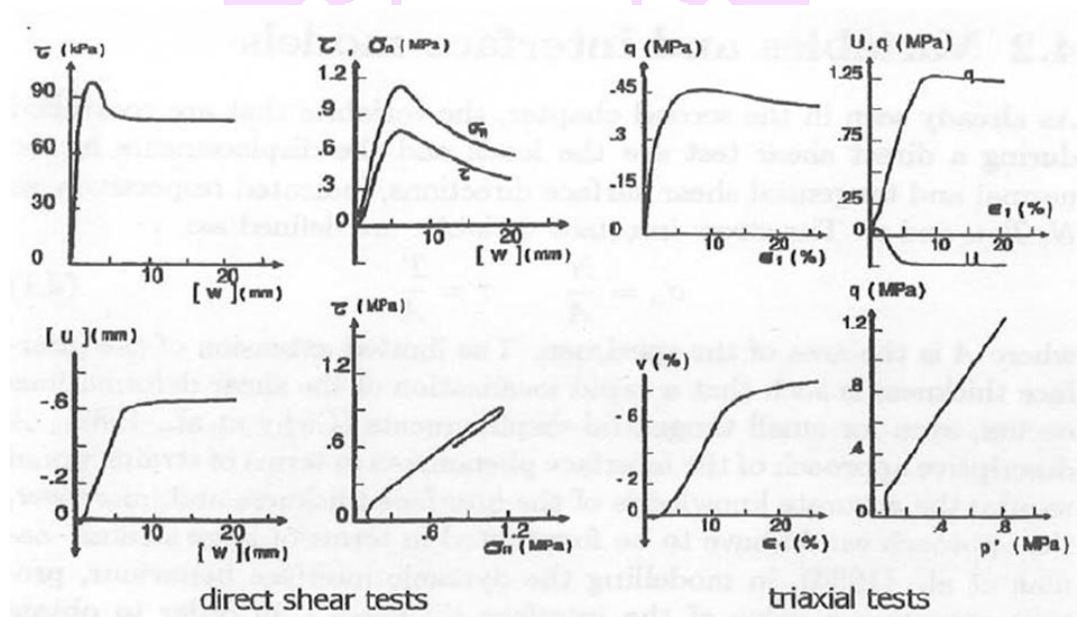
ที่มา: Mortara, 2001

แบบจำลองความสัมพันธ์ของดินและโครงสร้าง

แบบจำลองความสัมพันธ์เชิงตัวเลขเพื่ออธิบายพฤติกรรมของผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้าง ได้ถูกนำเสนอในรูปแบบต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง ทฤษฎีหนึ่งที่ยอมรับใช้ในการอธิบายแรงเสียดทาน คือ Perfectly plastic coulomb อย่างไรก็ตามทฤษฎีดังกล่าวยังมีข้อจำกัดเนื่องจากความเค้นที่ผิวสัมผัสจะพิจารณาในทิศทางของการเลื่อนเท่านั้น Desai, et al. (1985); Desai

and Nagaraj (1988) ได้นำเสนอทฤษฎีของความต่อเนื่อง แต่ปัญหาที่จะมักเจอนั้นคือการที่จำเป็นจะต้องระบุความหนาที่แน่นอนของผิวสัมผัส ซึ่งความหนาของผิวสัมผัสจะมีค่าน้อยมาก ๆ เมื่อเทียบกับชั้นดินบริเวณรอบ ๆ โครงสร้าง

Boulon (1989) ได้นำเสนอทฤษฎีของความต่อเนื่อง (Continuum) ในรูปแบบสองมิติ สำหรับการอธิบายพฤติกรรมของผิวสัมผัส โดยไม่ได้พิจารณาความหนาของผิวสัมผัส (Zero thickness) หลังจากนั้น Boulon and Nova (1990) ได้ศึกษาเปรียบเทียบความเหมือนพฤติกรรมของการทดสอบทรายแบบแนวแรงสามแกน (Triaxial tests) และการทดสอบแรงเฉือนแบบตรงของผิวสัมผัส ระหว่างดินและโครงสร้าง (Interface direct shear tests) ดังแสดงในภาพ 11 และตาราง 2 อีกทั้งได้อธิบายพฤติกรรมของผิวสัมผัสโดยแบบจำลอง Elastoplastic และ Rate type (Incremental) ซึ่งแต่ละทฤษฎีต่างมีข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกันไป การพัฒนาที่มีมาอย่างต่อเนื่องทำให้สามารถอธิบายพฤติกรรมของผิวสัมผัสไม่ว่าจะอยู่ในสภาวะใด ๆ ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น



ภาพ 11 ความคล้ายคลึงของพฤติกรรมที่สังเกตได้จากการทดสอบแรงเฉือนแบบสามแกนและผิวสัมผัสแบบตรง

ที่มา: Boulon and Nova, 1990

ตาราง 2 ความคล้ายคลึงกันระหว่างการทดสอบแรงเฉือนสามแกนและการทดสอบแรงเฉือนแบบตรง

การทดสอบ	ความคล้ายคลึงกัน			
การทดสอบแรงเฉือนสามแกน (Triaxial)	ε_v	ε_s	p'	q
การทดสอบแรงเฉือนแบบตรง (Direct shear)	$[u]$	$[w]$	τ	σ_n

ที่มา: คัดลอกและดัดแปลงจาก: Bengabbou, 2003

โดยทั่วไปเรามักจะพิจารณาแบบจำลองความสัมพันธ์ของผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้างในรูปแบบ 2 มิติ ดังแสดงในภาพ 11 เวกเตอร์ของตัวแปรหลักสามารถเขียนในรูปของสมการ 6 และสมการที่ 7

$$\underline{t} = \{\tau \quad \sigma_n\}^T \quad (6)$$

$$[u] = \{[w] \quad [u]\}^T \quad (7)$$

และอนุพันธ์ของตัวแปรเมื่อเทียบกับเวลาจะแสดงได้ดังสมการที่ 8 และสมการที่ 9

$$\underline{\dot{t}} = \{\dot{\tau} \quad \dot{\sigma}_n\}^T \quad (8)$$

$$[\dot{u}] = \{[\dot{w}] \quad [\dot{u}]\}^T \quad (9)$$

ในกรณีที่มีหน่วยแรงเฉือนมากกระทำ เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปของสมการที่ 10

$$\underline{\dot{t}} = \underline{d} [\dot{u}] \quad (10)$$

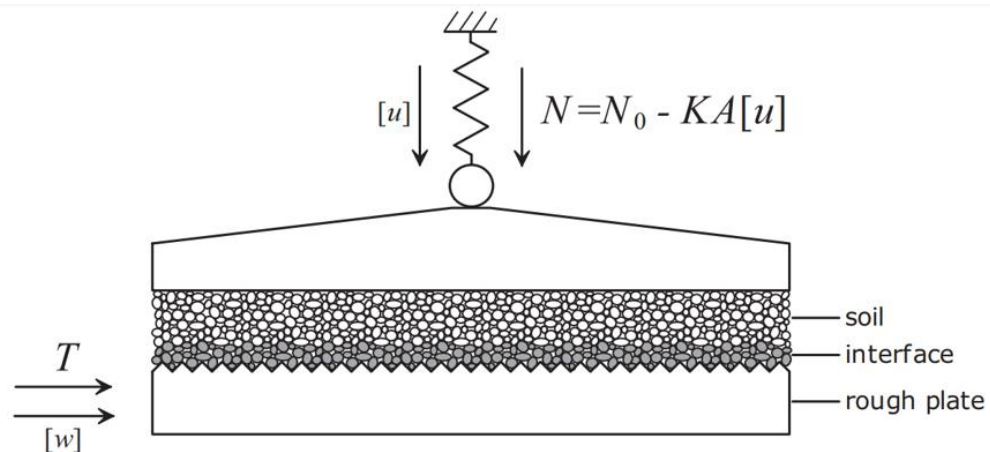
โดย \underline{d} คือ เมตริกซ์ความแข็งของผิวสัมผัส (Interface stiffness) ซึ่งสามารถเขียนดังสมการที่ 11

$$\underline{d} = \begin{bmatrix} k_s & k_{sn} \\ k_{ns} & k_n \end{bmatrix} \quad (11)$$

โดย

k_s และ k_n คือ ความแข็งของผิวสัมผัสในแนวแรงเฉือนและแนวตั้งฉากตามลำดับ

k_{sn} และ k_{ns} คือ ความแข็งของผิวสัมผัสในแนวแรงเฉือนควบคู่กับแนวตั้งฉาก



$$\begin{aligned} \sigma_n &= N/A \\ \sigma_{n0} &= N_0/A \\ \tau &= T/A \\ K &= -\Delta\sigma_n/\Delta[u] \end{aligned} \quad \begin{aligned} \text{stress vector } \sigma &= \begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \tau \end{Bmatrix} \\ \text{relative displacement vector } \mathbf{u} &= \begin{Bmatrix} [u] \\ [w] \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

ภาพ 12 ตัวแปรหลักที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบแรงเฉือนแบบตรงของผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้าง

ที่มา: Mortara, et al., 2002

แบบจำลอง Rate type

Boulon (1989) ได้นำเสนอหลักการพื้นฐานในการอธิบายพฤติกรรมของแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสของทรายและโครงสร้าง โดยใช้ความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นระหว่างอัตราส่วนเพิ่มของแรงที่กระทำ (Incremental loading)

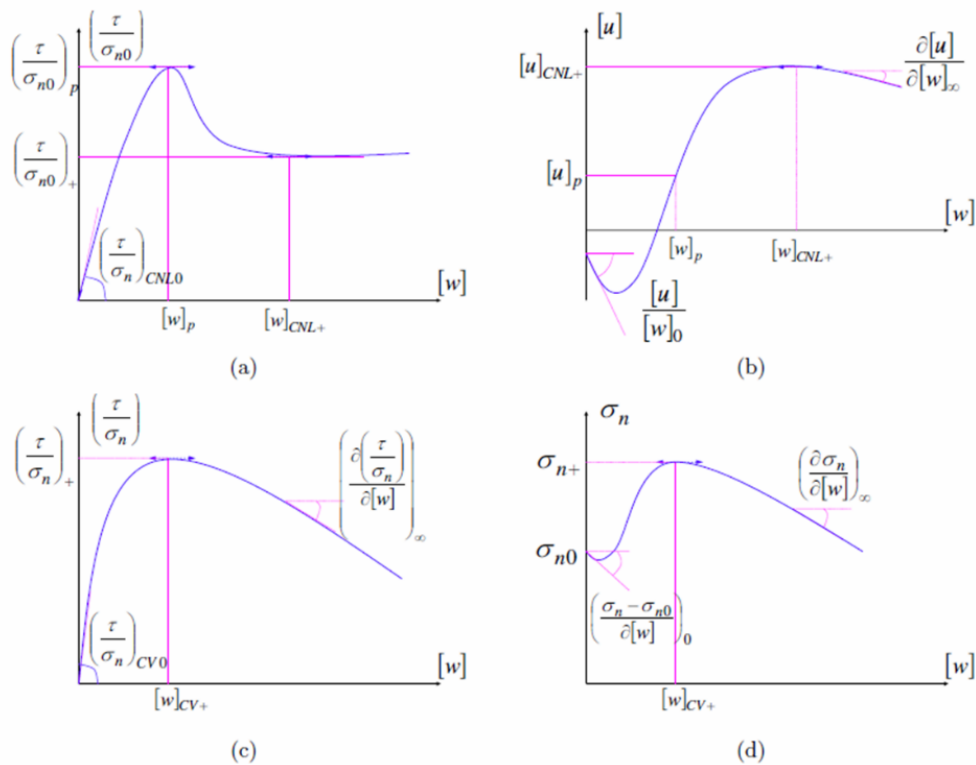
$$[\dot{\mathbf{u}}] dt = \begin{Bmatrix} [\dot{w}] \\ [\dot{u}] \end{Bmatrix} dt \quad (12)$$

และผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น

$$[\dot{\sigma}] dt = \begin{Bmatrix} \dot{\tau} \\ \dot{\sigma}_n \end{Bmatrix} dt \quad (13)$$

โดยที่ dt คือช่วงเวลาใด ๆ ที่พิจารณา ตัวแปรต่าง ๆ จะถูกสมมติให้มีความต่อเนื่องตลอดช่วงที่มีแรงกระทำจากสภาวะเริ่มต้น ทำให้สามารถประมาณอัตราส่วนเพิ่มโดยฟังก์ชันต่าง ๆ ได้ ยกตัวอย่างเช่น Polynomial และ Exponential

อัตราส่วนเพิ่มของผลลัพธ์สามารถหาได้จากอนุพันธ์ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังเช่น $\tau([w])$ หรือ $[u]([w])$ ในกรณีของ CNL เป็นต้น ดังแสดงในภาพ 13 แสดงตัวแปรหลักที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบแรงเฉือนแบบตรงของผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้างภายใต้สภาวะ CNL (a, b) และภายใต้สภาวะ CNS และ CV (c, d)



ภาพ 13 ตัวแปรหลักที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบแรงเฉือนแบบตรงของผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้าง

ที่มา: Boulon and Nova (1990)

ภายใต้สภาวะ CNL เมื่อพิจารณาช่วง $[w] \leq [w]_{CNL+}$ และ $[w] > [w]_{CNL+}$ โดยที่ $[w]_{CNL+}$ คือ ระยะการเคลื่อนที่ในแนวแรงเฉือนที่หน่วยแรงเฉือนสภาวะวิกฤติ $(\tau/\sigma_{n0})_+$ (Critical condition) ในขณะที่ $[w]_p$ และ $[u]_p$ คือ ระยะการเคลื่อนที่ในแนวแรงเฉือนและแนวตั้งฉากที่อัตราส่วนหน่วยแรงสูงสุดตามลำดับ ตัวแปรต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 14 ถึงสมการที่ 17

$$\text{ช่วง } [w] \leq [w]_{CNL+}$$

$$\frac{\tau}{\sigma_{n0}} = f_{CNL} \left[\left(\frac{\tau}{\sigma_{n0}} \right)_{CNL}, [w]_p, \left(\frac{\tau}{\sigma_{n0}} \right)_p, [w]_{CNL+}, \left(\frac{\tau}{\sigma_{n0}} \right)_+ \right] \quad (14)$$

$$[u] - [u]_0 = g_{CNL} \left[\left(\frac{[u]}{[w]} \right)_0, [w]_p, [w]_p, [w]_{CNL+}, [u]_{CNL+}, \right] \quad (15)$$

$$\text{ช่วง } [w] > [w]_{CNL+}$$

$$\frac{\tau}{\sigma_{n0}} = \left(\frac{\tau}{\sigma_{n0}} \right)_{CNL+} \quad (16)$$

$$[u] - [u]_+ = \left(\frac{[u]}{[w]} \right)_\infty \cdot ([w] - [w]_{CNL+}) \quad (17)$$

ภายใต้สภาวะ CV หรือ CNS หน่วยแรงตั้งฉากมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีหน่วยแรงเฉือนมากกระทำ โดยที่ $[w]_{CV+}$ คือ การเคลื่อนที่ในแนวแรงเฉือนที่อัตราส่วนหน่วยแรงสูงสุด $(\tau/\sigma_{n0})_+$ เช่นเดียวกันตัวแปรต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 18 ถึงสมการที่ 21

$$\text{ช่วง } [w] \leq [w]_{CV+}$$

$$\frac{\tau}{\sigma_{n0}} = f_{CV} \left[\left(\frac{\tau}{\sigma_n} \right)_{CVL}, [w]_{CV+}, \left(\frac{\tau}{\sigma_n} \right)_+ \right] \quad (18)$$

$$\sigma_n - \sigma_{n0} = g_{CV} \left[\left(\frac{\sigma_n - \sigma_{n0}}{[w]} \right)_0, [w]_{CV+}, \sigma_{n+} \right] \quad (19)$$

$$\text{ช่วง } [w] > [w]_{CV+}$$

$$\frac{\tau}{\sigma_n} - \left(\frac{\tau}{\sigma_n} \right)_+ = \left(\frac{\partial \left(\frac{\tau}{\sigma_n} \right)}{\partial [w]} \right)_\infty \cdot ([w] - [w]_{CV+}) \quad (20)$$

$$\sigma_n - \sigma_{n+} = \left(\frac{\partial \sigma_n}{\partial [w]} \right)_\infty ([w] - [w]_{CV+}) \quad (21)$$

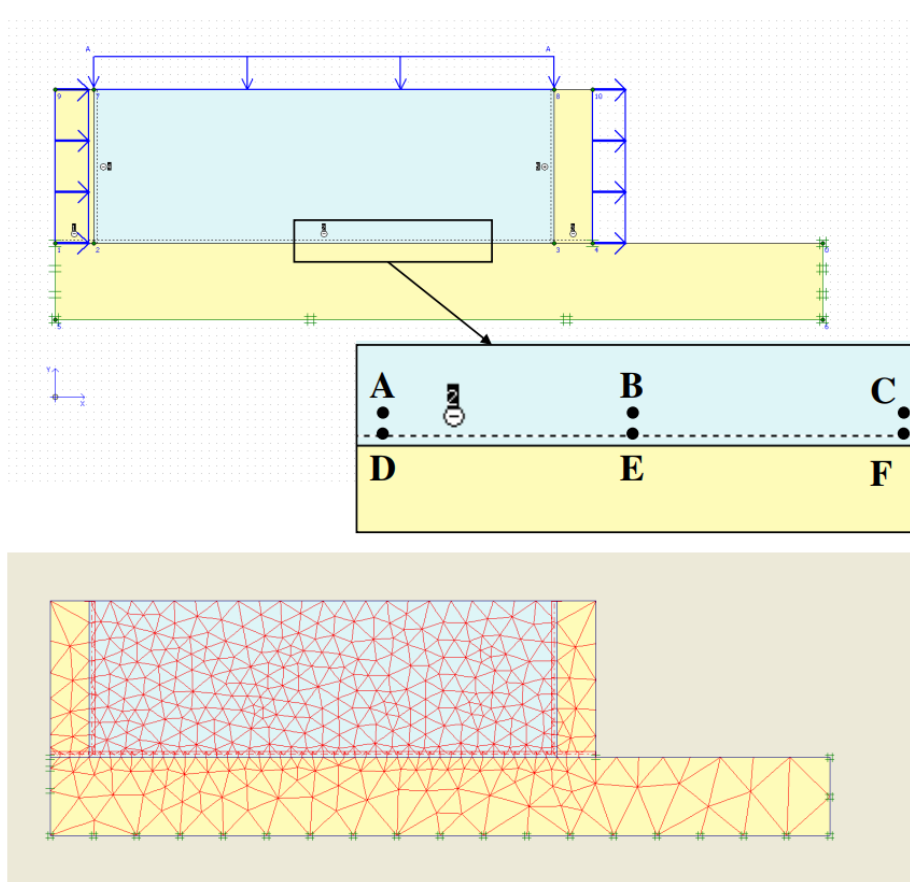
แบบจำลองความสัมพันธ์เพื่ออธิบายพฤติกรรมของผิวสัมผัสระหว่างดินและโครงสร้างสามารถเขียนในรูปของสมการที่ 22

$$\begin{Bmatrix} \dot{\epsilon} \\ \dot{\sigma}_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{\epsilon}}{\partial [\dot{w}]} & \frac{\partial \dot{\epsilon}}{\partial [\dot{u}]} \\ \frac{\partial \dot{\sigma}_n}{\partial [\dot{w}]} & \frac{\partial \dot{\sigma}_n}{\partial [\dot{u}]} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} [\dot{w}] \\ [\dot{u}] \end{Bmatrix} \quad (22)$$

การศึกษาพฤติกรรมผิวสัมผัสโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม PLAXIS

ที่ผ่านมาได้มีซอฟต์แวร์ที่สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมผิวสัมผัสหลากหลายซอฟต์แวร์โดยที่นิยมใช้จะมี FLAC และ PLAXIS ซึ่งได้มีผู้วิจัยนำซอฟต์แวร์เหล่านี้ไปทำการศึกษาพฤติกรรมผิวสัมผัส เช่น

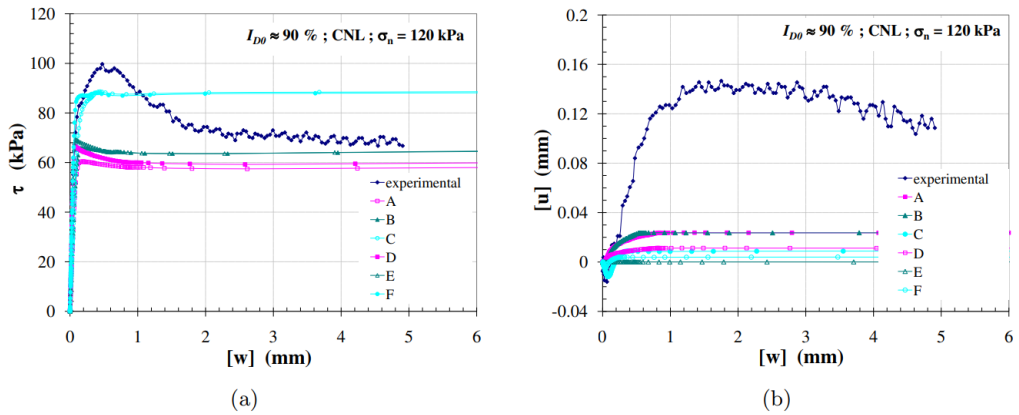
Pra-ai (2013) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมผิวสัมผัสโดยใช้ PLAXIS 2D โดยจำลองการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง แบบ Monotonic ภายใต้สภาวะสองสภาวะ คือ Constant normal load (CNL) และสภาวะ Constant normal stiffness (CNS) โดยใช้วิธีการ Mohr Coulomb ในการวิเคราะห์ โดยคำนึงถึงพารามิเตอร์ห้าตัวคือ E , ν , c , ϕ , ψ โดยพารามิเตอร์ E และ ν สำหรับความ Elasticity ของดิน พารามิเตอร์ ϕ และ c สำหรับความ Plasticity ของดิน และเป็นมุมของการขยายตัวของดิน สำหรับการจำลองการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนภายใต้สภาวะ CNL ลักษณะของแบบจำลองได้แสดงดังภาพ 14 ได้ทำการสร้างแผ่นเหล็กด้านล่างและทำการสร้าง Shear box โดยข้างในมีตัวอย่างทรายและทำการสร้าง Interface ระหว่างทรายและ Shear box และ Interface ระหว่างทรายและแผ่นเหล็กด้านล่าง ในการทดสอบแผ่นเหล็กด้านล่าง จะถูกกำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนที่เพื่อให้ Shear box เคลื่อนที่ไปทางแนวนอนเพื่อทำการเฉือนโดยที่ Shear box ไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง ความเค้น (σ_n) ที่กำหนด (60, 120 และ 310 kPa) จะกระจายอย่างสม่ำเสมอบนตัวอย่างทรายและได้มีการกำหนดจุด 6 จุด ใกล้เคียงผิวสัมผัสเพื่อสังเกตพฤติกรรม



ภาพ 14 แบบจำลองการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนภายใต้สภาวะ CNL

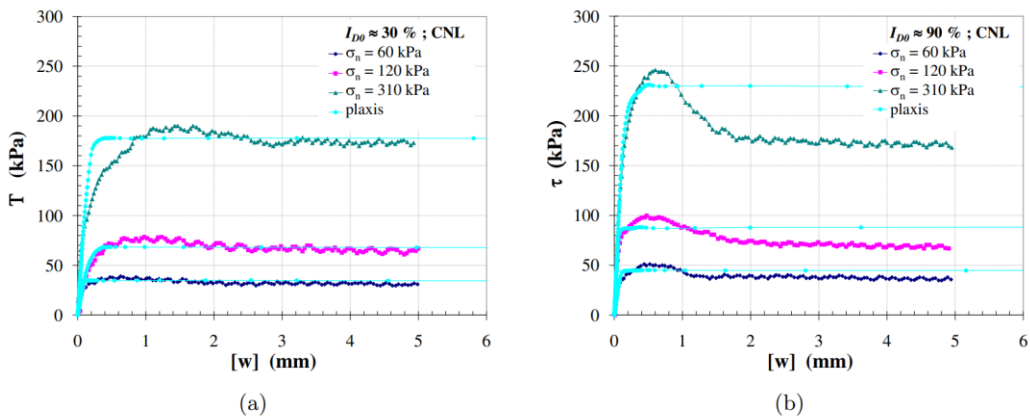
ที่มา: Pra-ai, 2013

ผลการจำลองพบว่าแบบจำลอง PLAXIS สามารถอธิบายพฤติกรรมการเฉือนในกรณีของความเค้นได้ดี แต่ไม่ประสบความสำเร็จในการอธิบายการกระจัด (การยุบตัว, ขยายตัว) ดังแสดงในภาพ 15a c และ 15b ของทรายได้ สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลอง PLAXIS โดยวิธี Mohr coulomb จะไม่ประสบความสำเร็จอย่างเต็มที่ในการอธิบายการกระจัดของการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงของผิวสัมผัส ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้แบบจำลองขั้นสูงหรือโปรแกรมเวอร์ชันที่สูงกว่าที่มีในขนาดมาเพื่อทำการศึกษาต่อไป ภาพ 16 แสดงผลของแบบจำลองที่พิจารณาจุดที่อธิบายพฤติกรรมผิวสัมผัสได้ดีที่สุด จะเห็นได้ว่าแบบจำลอง PLAXIS สามารถอธิบายผลของหน่วยแรงเฉือน (τ) ได้อย่างเป็นที่น่าสนใจ และจุดที่สามารถอธิบายพฤติกรรมผิวสัมผัสได้ดีที่สุด คือ ตำแหน่งด้านท้ายของตัวอย่างที่บริเวณผิวสัมผัส



ภาพ 15 ผลการเปรียบเทียบของตำแหน่งที่แตกต่างกัน

ที่มา: Pra-ai, 2013

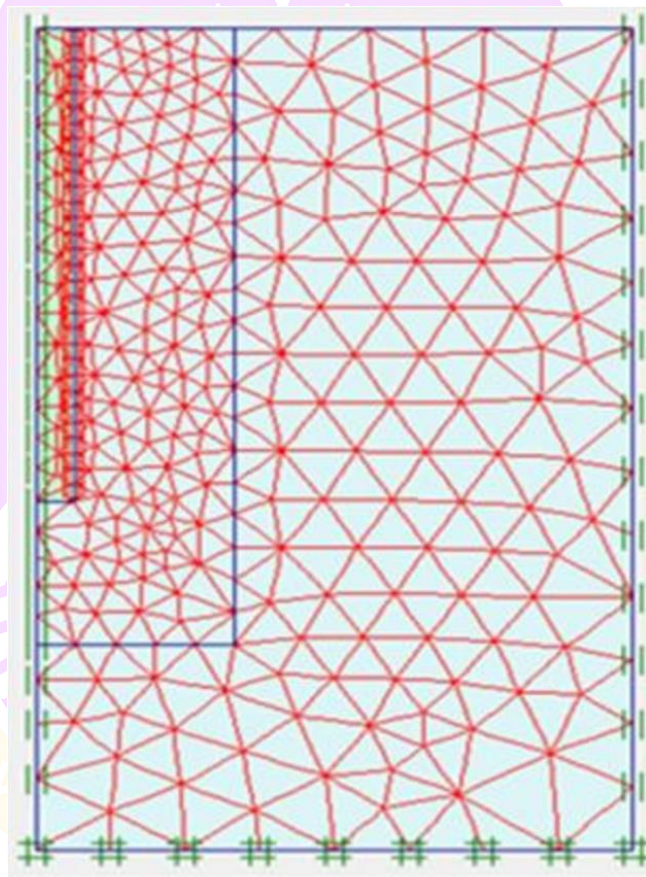


ภาพ 16 ผลของแบบจำลองที่พิจารณาจุดที่อธิบายพฤติกรรมผิวสัมผัสได้ดีที่สุด

ที่มา: Pra-ai, 2013

Jalali, et al. (2012) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มและดิน และศึกษาผลของการทรุดตัวและแรงเฉือนในพื้นที่ของผิวสัมผัสที่เกิดขึ้น โดยใช้ PLAXIS 2D ด้วยวิธี Mohr coulomb และวิธี Hard soil และทำการศึกษาแรงแบบ Dynamic เพื่อทำการวิเคราะห์พฤติกรรมผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มและดินโดยใช้โปรแกรม Ansys ภาพ 17 แสดงลักษณะแบบจำลองที่พิจารณาโดยทางฝั่งซ้ายจะทำการสร้างเสาเข็มใส่เข้าไปในดินและทำการสร้าง

ผิวสัมผัสระหว่างดินและเสาเข็มเมื่อทำการสร้างเอลิเมนต์ ในการทำการทดสอบจะทำการใส่แรงที่หัวเสาเข็ม และทำการพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นบนหัวและใต้เสาเข็ม และพิจารณาการเคลื่อนตัวของใต้เสาเข็มด้วย หน่วยแรงที่กระทำบนหัวเสาเข็ม แสดงในตาราง 3 นอกจากนี้พิจารณาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ปลายเสาเข็ม และพิจารณาการเคลื่อนตัวของใต้เสาเข็มแล้ว ยังเลือกที่จะพิจารณาสัมประสิทธิ์ผิวสัมผัส (R_{inter}) ตั้งแต่ 0.7 ถึง 1.0 เพื่อวิเคราะห์ถึงผลของสัมประสิทธิ์ผิวสัมผัสต่อพฤติกรรมผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มและดิน โดยเปรียบเทียบทั้งสองวิธี คือ วิธี Mohr coulomb และวิธี Hard soil



ภาพ 17 ลักษณะแบบจำลองพฤติกรรมผิวสัมผัสที่พิจารณา

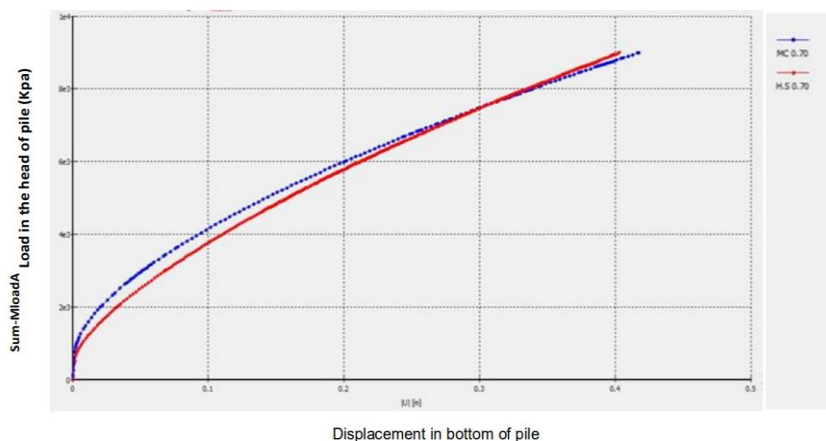
ที่มา: Jalali, et al., 2012

ตาราง 3 หน่วยแรงที่กระทำบนหัวเสาเข็มของแบบจำลองที่พิจารณา

Phase	Loading intensity (kPa)
1	1,000
2	2,000
3	3,000
4	6,000
5	9,000

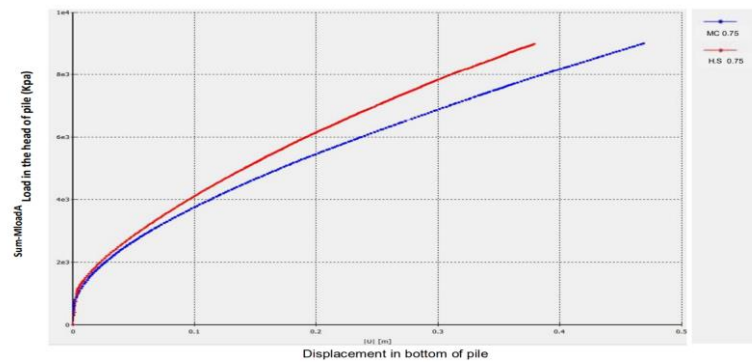
ที่มา: คัดลอกและดัดแปลงจาก: Jalali, et al., 2012

ภาพ 18 ถึงภาพ 24 แสดงผลของการเคลื่อนตัวของเสาเข็มกับแรงที่หัวเสาเข็มของแบบจำลอง Mohr coulomb และ Hard soil ภายใต้สัมประสิทธิ์ผิวสัมผัส (R_{inter}) ที่แตกต่างกัน (0.7 ถึง 1.0) พบว่า วิธี Mohr coulomb มีความแม่นยำมากกว่าวิธี Hard soil (ภาพ 18 ถึงภาพ 21) เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์ผิวสัมผัสที่เหมาะสม ($R_{inter} = 0.7-0.85$) เมื่อปลายสุดของกราฟเข้าใกล้เส้นระดับแนวนอนมากขึ้น การวัดการทรุดตัวของเสาเข็มจะมีความแม่นยำมากขึ้นเมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์ผิวสัมผัสที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ของภาพที่ 21 ถึงภาพที่ 24 แสดงให้เห็นว่า วิธี Hard soil มีความแม่นยำและเที่ยงตรงมากกว่าวิธี Mohr coulomb เมื่อสัมประสิทธิ์ผิวสัมผัสมีค่ามากขึ้น ($R_{inter} = 0.85-1.0$)



ภาพ 18 ผลของแบบจำลองในการพิจารณาสัมประสิทธิ์ผิวสัมผัส (R_{inter}) ที่ 0.70

ที่มา: Jalali, et al., 2012



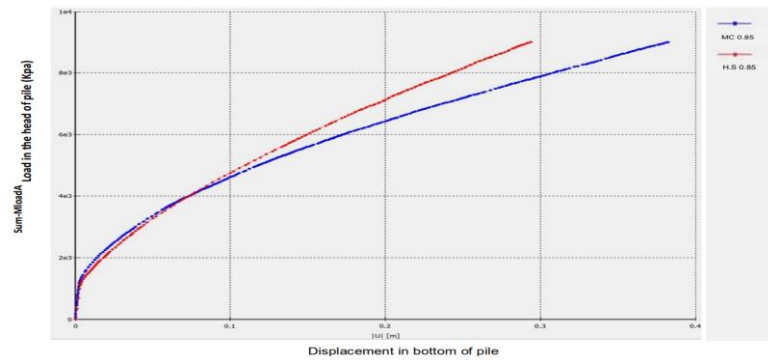
ภาพ 19 ผลของแบบจำลองในการพิจารณาสัมประสิทธิ์ผิวสัมผัส (R_{inter}) ที่ 0.75

ที่มา: Jalali, et al., 2012



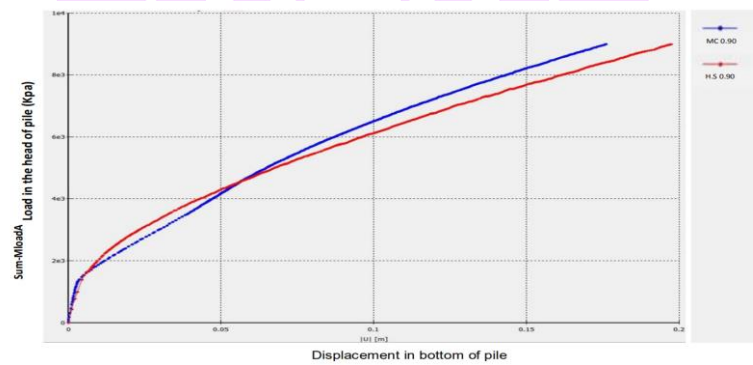
ภาพ 20 ผลของแบบจำลองในการพิจารณาสัมประสิทธิ์ผิวสัมผัส (R_{inter}) ที่ 0.80

ที่มา: Jalali, et al., 2012



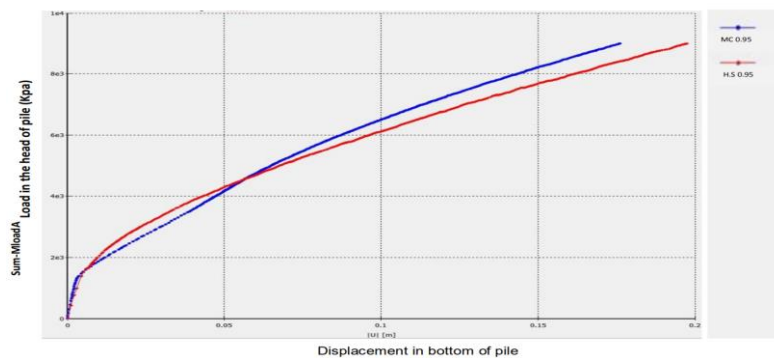
ภาพ 21 ผลของแบบจำลองในการพิจารณาสัมประสิทธิ์ผิวสัมผัส (R_{inter}) ที่ 0.85

ที่มา: Jalali, et al., 2012



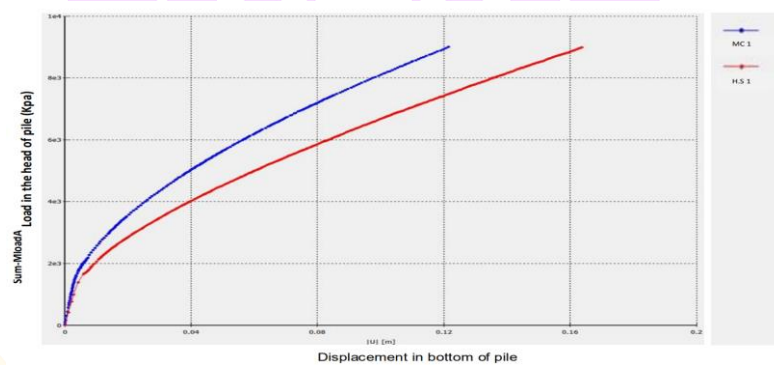
ภาพ 22 ผลของแบบจำลองในการพิจารณาสัมประสิทธิ์ผิวสัมผัส (R_{inter}) ที่ 0.90

ที่มา: Jalali, et al., 2012



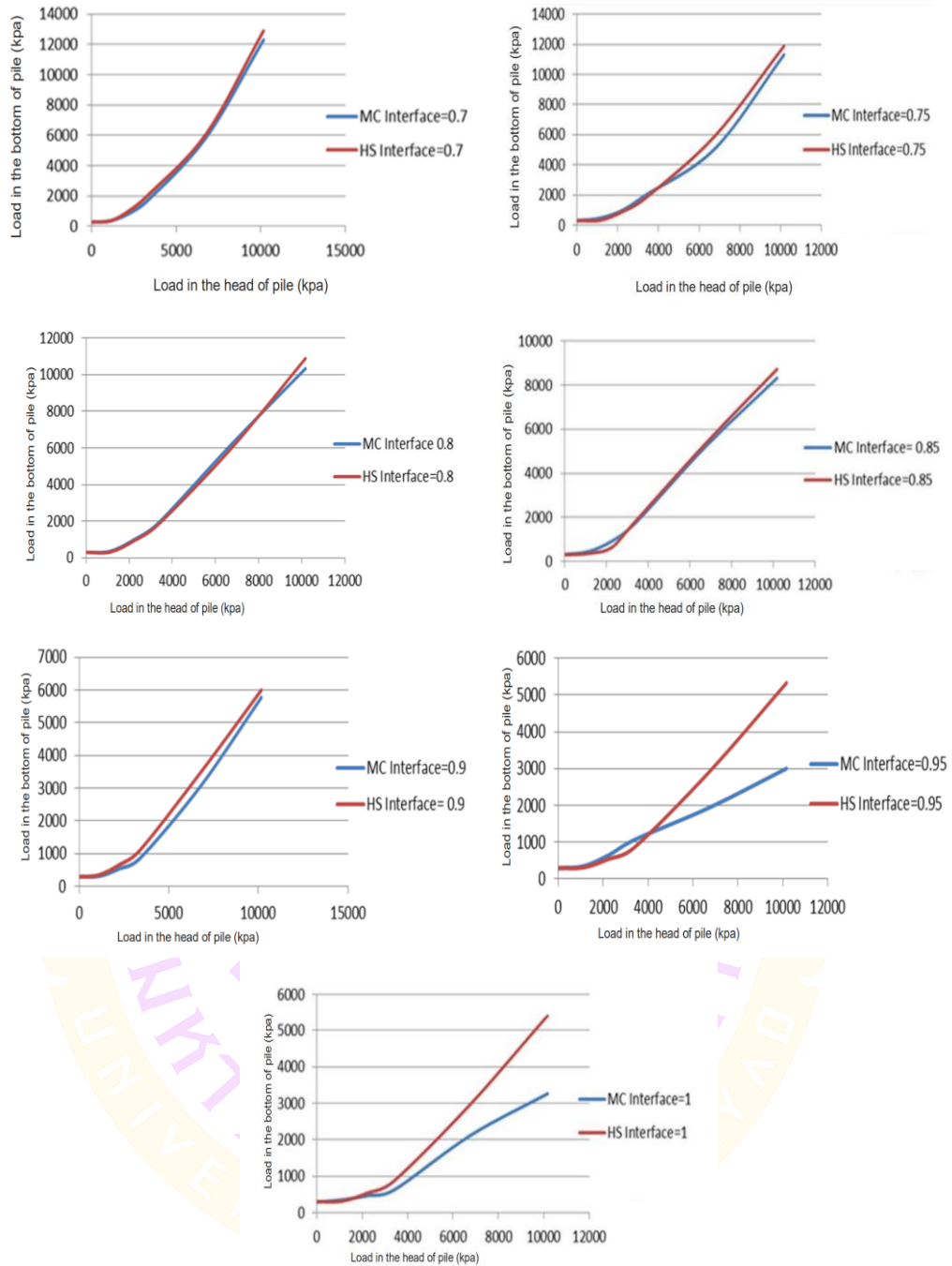
ภาพ 23 ผลของแบบจำลองในการพิจารณาสัมประสิทธิ์ผิวสัมผัส (R_{inter}) ที่ 0.95

ที่มา: Jalali, et al., 2012



ภาพ 24 ผลของแบบจำลองในการพิจารณาสัมประสิทธิ์ผิวสัมผัส (R_{inter}) ที่ 1.00

ที่มา: Jalali, et al., 2012



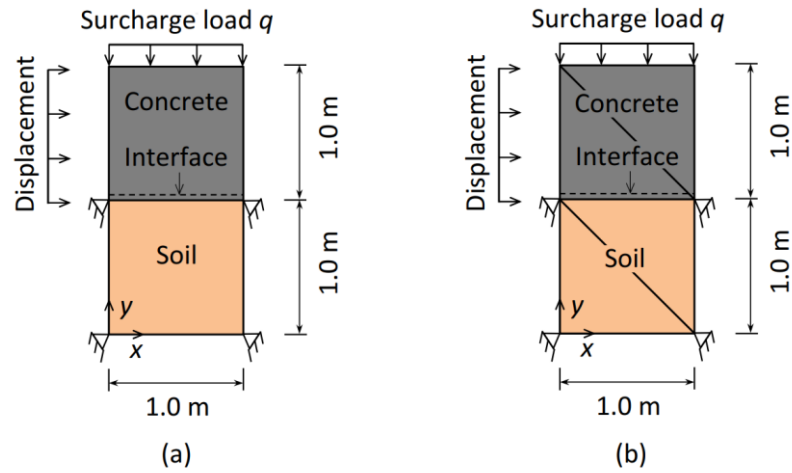
ภาพ 25 แสดงผลของแรงที่หัวเสาเข็มกับแรงที่ได้เสาเข็มของแบบจำลอง Mohr coulomb และ Hard soil ภายใต้สัมประสิทธิ์ผิวสัมผัส (R_{inter}) ที่แตกต่างกัน

ที่มา: Jalali, et al., 2012

ภาพ 25 แสดงผลของแรงที่หัวเสาเข็มกับแรงที่ใต้เสาเข็มของแบบจำลอง Mohr coulomb และ Hard soil ภายใต้สัมประสิทธิ์ฝืดฝัสมัด (R_{inter}) ที่แตกต่างกัน (0.7 ถึง 1.0) พบว่าแบบจำลองทั้งสองวิธีสามารถแสดงผลได้ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อสัมประสิทธิ์ฝืดฝัสมัดมีค่ามากขึ้น ($R_{inter} = 0.95-1.0$) แรงที่ใต้เสาเข็มของวิธี Mohr coulomb ให้ผลน้อยกว่าวิธี Hard soil และพบว่า ยิ่งค่าสัมประสิทธิ์ฝืดฝัสมัดมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลกระทบต่อแรงที่ปลายเสาเข็มมีค่าน้อยลง

Yu, et al. (2015) ศึกษาอิทธิพลของการเลือกใช้โปรแกรม FLAC กับ PLAXIS ในการจำลองแบบจำลองฝืดฝัสมัดของการเสริมแรงระหว่างดินและโครงสร้าง โดยศึกษาเสถียรภาพของกำแพงกันดิน (MSE) อาจมีผลอย่างมากต่อพฤติกรรมของแบบจำลอง ในการศึกษาจะใช้โปรแกรมสองโปรแกรม คือ โปรแกรม FLAC (วิธี Finite difference method) และโปรแกรม PLAXIS (วิธี Finite element method) ในการคำนวณในโปรแกรมจะใช้วิธี Mohr coulomb ซึ่งมีอยู่ภายในโปรแกรมทั้งสอง

แบบจำลองฝืดฝัสมัดที่ทำการศึกษาแสดงดังภาพที่ 26 แสดงลักษณะการจำลองพฤติกรรมฝืดฝัสมัดของโปรแกรม FLAC (ภาพ 26a) และโปรแกรม PLAXIS (ภาพ 26b) โดยทั้งสองโปรแกรมทำการสร้าง Unit cells (ขนาด 1×1 เมตร) วางซ้อนกันสองเซลล์โดยเซลล์ด้านบนเป็นคอนกรีต ส่วนเซลล์ด้านล่างเป็นก้อนดิน ในการทดสอบจะทำการใส่แรงแผ่กระจายเต็มหน้าตัดด้านบนเซลล์คอนกรีต และทำการสั่งให้เซลล์คอนกรีตเคลื่อนตัวไปทางด้านขวาของเซลล์ โดยเซลล์ดินที่อยู่ด้านล่างจะถูกตั้งค่าไม่มีการเคลื่อนที่ ความหนาของฝืดฝัสมัดระหว่างเซลล์คอนกรีตด้านบนและเซลล์ดินด้านล่างจะถูกกำหนดให้เป็น 0 เซลล์คอนกรีตจะถูกกำหนดให้เป็นแบบจำลองประเภท Linear elastic เกณฑ์ความล้มเหลวของ Mohr coulomb จะถูกใช้สำหรับฝืดฝัสมัด ผลของแบบจำลองสามารถสรุปได้ว่า โปรแกรม FLAC และโปรแกรม PLAXIS สามารถอธิบายผลพฤติกรรมฝืดฝัสมัดได้ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตาราง 4 โดยผลของ Normal displacement และ Shear stress ที่ได้จากแบบจำลอง FLAC และ PLAXIS เมื่อนำผลทั้งสองมาเปรียบเทียบกัน พบว่า แบบจำลองทั้งสองสามารถแสดงผลของพฤติกรรมฝืดฝัสมัดที่เกิดขึ้นได้ใกล้เคียงกัน



ภาพ 26 ลักษณะแบบจำลองพฤติกรรมผิวสัมผัสของโปรแกรม FLAC และโปรแกรม

ที่มา: Yu, et al., 2015

ตาราง 4 ผลของแบบจำลองผิวสัมผัสที่พิจารณา

Applied surcharge load (kPa)	Applied displacement (mm)	Soil-concrete interface ($k_n = 1.1 \times 10^7$ Pa/m, $k_s = 1.0 \times 10^6$ Pa/m)						
		Normal displacement (mm)			Shear stress (kPa)			Shear stress state
		FLAC	PLAIXS	Analytical	FLAC	PLAIXS	Analytical	
$q = 10$	5	0.909	0.910	0.909	5.00	5.00	5.00	Elastic
	10				9.39	9.40	9.39	Plastic
	15				9.39	9.40	9.39	Plastic
	20				9.39	9.40	9.39	Plastic
$q = 50$	20	4.55	4.55	4.55	20.0	20.0	20.0	Elastic
	40				40.0	40.0	40.0	Elastic
	60				43.0	43.0	43.0	Plastic
	80				43.0	43.0	43.0	Plastic
$q = 100$	80	9.09	9.10	9.09	80.0	80.0	80.0	Elastic
	100				84.9	85.0	84.9	Plastic
	120				84.9	85.0	84.9	Plastic
	140				84.9	85.9	84.9	Plastic

ที่มา: คัดลอกและดัดแปลงจาก: Yu, et al., 2015

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (PLAXIS)

โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ PLAXIS เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางธรณีเทคนิคด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1987 ที่ Technical University of Delt ประเทศเนเธอร์แลนด์ ใ้ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม PLAXIS สามารถวิเคราะห์ปัญหาได้ทั้งแบบ Undrained และ Consolidation Analysis ทั้งในระบบ 3 มิติ และ 2 มิติ (Plane Strain or Axisymmetry) สามารถกำหนดขอบเขตของการเคลื่อนตัวควมดันน้ำส่วนเกิน และสามารถจำลองขั้นตอนของการก่อสร้าง (Construction Stage) ได้ โปรแกรม PLAXIS ประกอบด้วยกลุ่มงาน 3 กลุ่มหลัก และมีความต่อเนื่องกัน โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

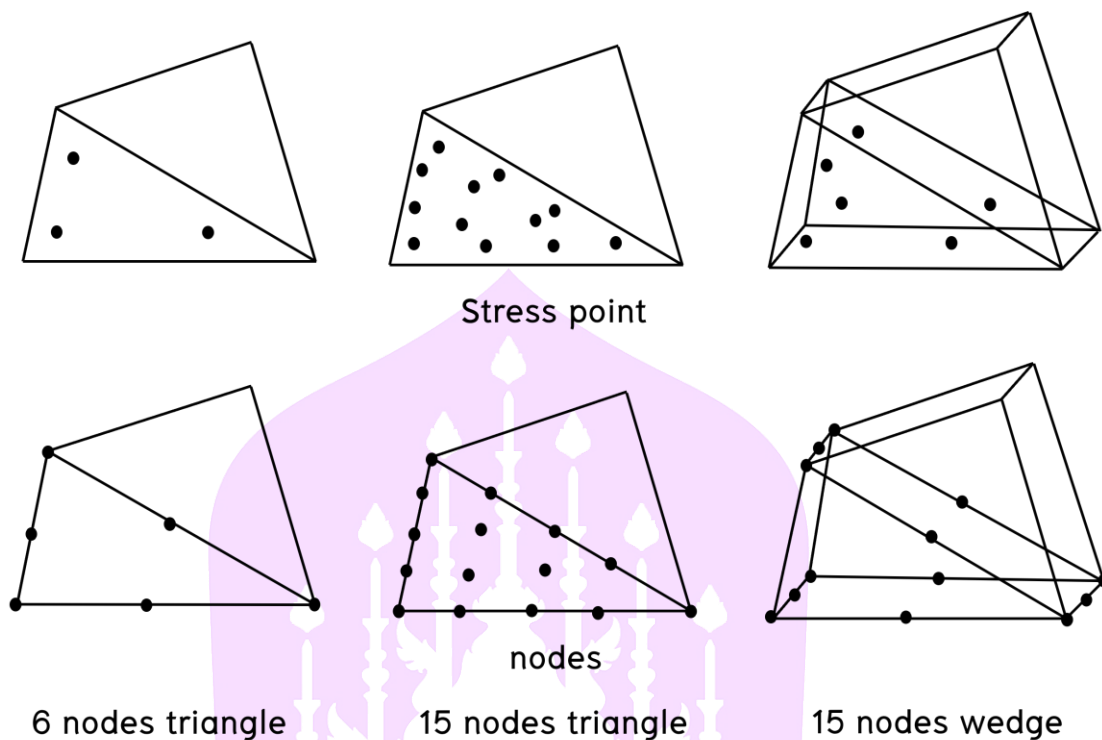
1. INPUT

เป็นกลุ่มงานที่ใช้ในการกำหนดลักษณะขอบเขตแบบจำลองของชั้นดินและคุณสมบัติของรูปร่างของแบบจำลอง (Geometry) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ซึ่งในการทำงานมีลักษณะที่สำคัญดังต่อไปนี้ ในการกำหนดขอบเขตชั้นดิน (Soil Layer) โครงสร้างประกอบ (Structures) ขั้นตอนการก่อสร้าง (Construction Stage) และขอบเขตเงื่อนไขของแบบจำลอง (Boundary Condition) สามารถกำหนดได้โดยใช้วิธีการทางกราฟฟิก รูปแบบของเอลิเมนต์ (Element) ในการวิเคราะห์ปัญหา โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความจำเป็นต้องจำลองวัสดุที่อยู่ในขอบเขตของปัญหาที่ทำการพิจารณาด้วยเอลิเมนต์ต่าง ๆ โดยการจำลองวัสดุของปัญหาของโปรแกรม PLAXIS มีรูปแบบเอลิเมนต์สำหรับวัสดุต่าง ๆ ดังนี้

1.1 เอลิเมนต์สำหรับดิน (Soil Element) มีรูปแบบของเอลิเมนต์เป็นโครงสามเหลี่ยมสำหรับการวิเคราะห์แบบ 2 มิติ แต่ละเอลิเมนต์มีจำนวนของ Nodal Point เป็น 6 โหนด และ 15 โหนด ส่วนการวิเคราะห์แบบสามมิติ จะมีเอลิเมนต์แบบเดียว คือ แบบรูปสี่เหลี่ยมซึ่งมีจำนวนของ Nodal Point เป็น 15 โหนด

1.2 เอลิเมนต์สำหรับจีโอเท็กซ์ไทล์ (Geotextile Element) มีรูปแบบเอลิเมนต์ลักษณะเป็นแผ่นบางสามารถรับแรงดึง (Tension) ได้แต่ไม่สามารถรับแรงอัด (Compression) ได้ และถือว่ามีพฤติกรรมเป็นอิลาสติก

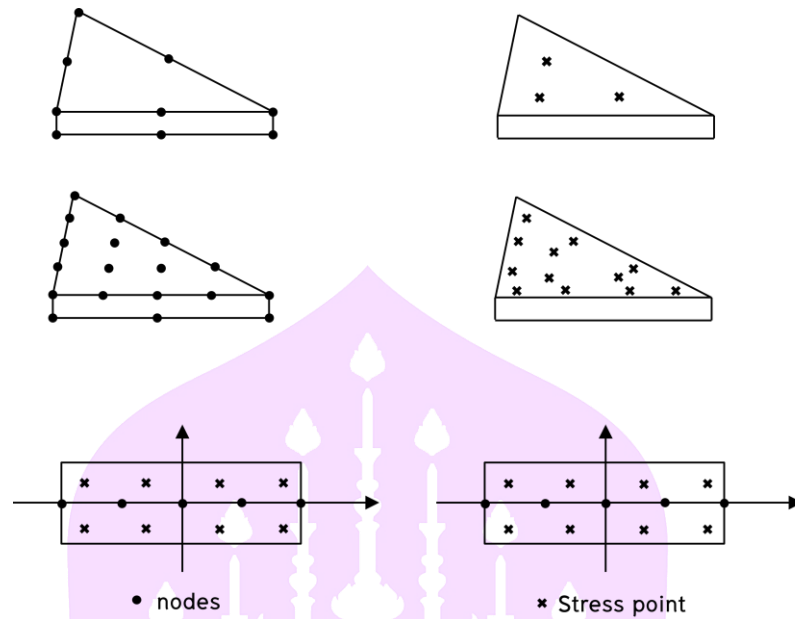
1.3 เอลิเมนต์ของผิวสัมผัสระหว่างดินกับจีโอเท็กซ์ไทล์ (Interface element) เป็นเอลิเมนต์ที่ทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมต่อบนระหว่างดินกับจีโอเท็กซ์ไทล์ โดยแสดงโหนด และ Stress Point ดังแสดงในภาพ 27 จากภาพแสดงความหนาของเอลิเมนต์ของผิวสัมผัสระหว่างดินกับจีโอเท็กซ์ไทล์ซึ่งเป็นความหนาเสมือนเนื่องจากในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ถือว่าจุดที่อยู่คู่กันถือว่าเป็นจุดเดียวกัน ดังนั้นความหนาของผิวสัมผัสระหว่างดินกับจีโอเท็กซ์ไทล์จึงเป็นศูนย์



ภาพ 27 รูปแบบเอลิเมนต์ของผิวสัมผัสระหว่างดินกับจีโอเท็กซ์ไทล์สำหรับดินแบบ 6 โหนด และ 15 โหนด

ที่มา: คัดลอกและดัดแปลงจาก: Brinkgreve and Vermeer, 1998

ชนิดของเอลิเมนต์ (Element) ที่สามารถกำหนดในโปรแกรม PLAXIS ประกอบด้วย 6 node triangular element และ 15-node triangular element สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาใน 2 มิติ (2D Analysis) ส่วนในการวิเคราะห์ปัญหาใน 3 มิติ (3D Analysis) สามารถกำหนดได้เพียงรูปแบบเดียว คือ 15-node wedge element ดังแสดงในภาพ 28



ภาพ 28 รูปแบบเอลิเมนต์สำหรับดินแบบ 6 โหนด และ 15 โหนด ที่ใช้โดยโปรแกรม PLAXIS

ที่มา: คัดลอกและดัดแปลงจาก: Brinkgreve and Vermeer, 1998

แบบจำลองของชั้นดิน (Soil Model) ที่สามารถกำหนดได้ในโปรแกรม PLAXIS มีทั้งหมด 5 แบบคือ Linear Elastic, Mohr-Coulomb, Soft-Soil model, Hardening Soil model และ Soft-Soil (creep) model ในที่นี้จะใช้แบบจำลอง Mohr-Coulomb ในการวิเคราะห์ แบบจำลอง Mohr-Coulomb นี้เป็นที่นิยมมากในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิค โดยที่มาจาก การทดสอบในห้องปฏิบัติการไม่ว่าจะเป็นการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear test) และการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำ (CD-Test) ผลการทดสอบทั้งสองจะนำมาวิเคราะห์โดยใช้วงกลมมอร์ ซึ่งการนิยามเงื่อนไขการคราก นิยมใช้ตัวแปรความเค้นตั้งฉาก (Normal Stress: σ_n) และความเค้นเฉือน (Shear Stress: τ) ดังในสมการที่ 23

$$\tau_f = c' + \sigma_{nf} \tan \phi' \quad (23)$$

โดยที่ค่า c' และ ϕ' คือ ค่าแรงยึดเหนี่ยวภายในตัดแกน (Cohesion intercept) และมุมแรงเสียดทาน (Angle of frictional resistance) ตามลำดับและดัชนี f หมายถึง ภาวะวิบัติ (Failure) ในบางครั้งการพิจารณาความเค้นความเครียดในเงื่อนไขระนาบความเครียด (Plane strain) สามารถพิจารณาเงื่อนไข Mohr-Coulomb ได้ดังสมการที่ 24

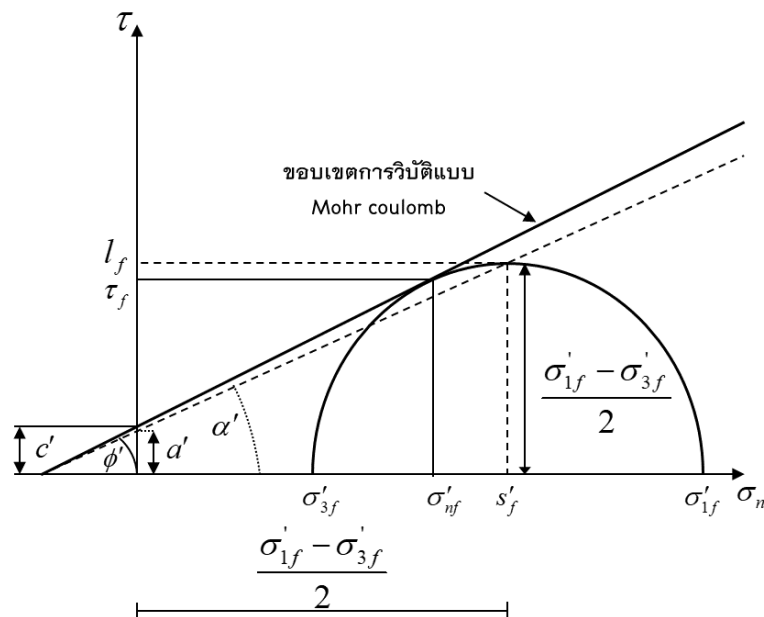
$$t'_f = a' + s'_f \tan \alpha' \quad (24)$$

$$\text{โดยที่ } a' = c' \cos \phi' \text{ และ } \sin \phi' = \tan \alpha'$$

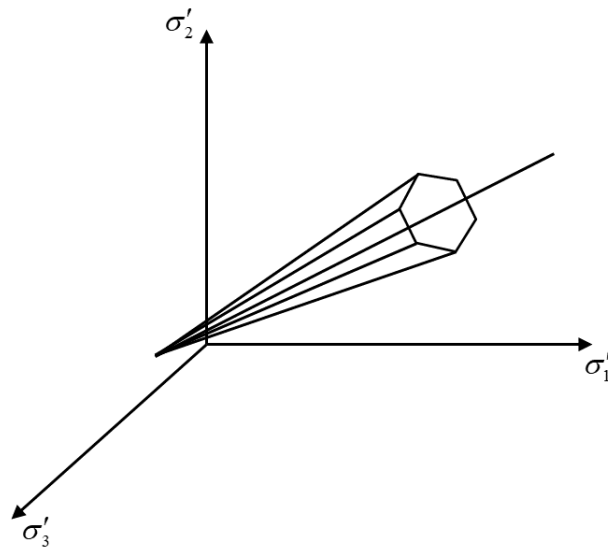
ภาพที่ 29 และภาพที่ 30 แสดงพื้นผิวดรากแบบ Mohr-Coulomb ที่นิยามโดยใช้ตัวแปรความเค้นตั้งฉาก และความเค้นเฉือน เนื่องจากการนิยามความเค้นความเครียดแบบสองมิติ อาจจะไม่สะดวกในการนำไปคำนวณ โดยวิธีเชิงตัวเลข ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องดัดแปลงฟังก์ชันดรากที่นิยามในสองมิติให้เป็นการนิยามในสามมิติ โดย (Potts and Zdravković, 1999) ได้นิยามฟังก์ชันดังสมการที่ 25

$$\sqrt{3J_2} = \left(p' + \frac{c'}{\tan \phi'} \right) M \quad (25)$$

โดยที่ค่า M คือ อัตราส่วนความเค้นในสถานะวิกฤต (Critical state stress ratio: τ / σ_{n+}) โดยปกติแล้วจะหาได้จากการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำ (CD-Test) ทั้งแบบรับแรงอัด (Compression) และแบบรับแรงดึง (Extension)



ภาพ 29 พื้นผิวดรากแบบ Mohr-Coulomb ในสองมิติ (Mohr-Coulomb failure criterion)



ภาพ 30 พื้นผิวครากแบบ Mohr–Coulomb ในสามมิติ (Mohr–Coulomb failure criterion)

ที่มา: Sushma and Pradeep Kumar, 2012

2. CALCULATION

เป็นกลุ่มงานที่ใช้ในการคำนวณในโปรแกรม PLAXIS มีขั้นตอนการคำนวณที่แยกจากกันชัดเจน ระหว่าง Plastic Calculation, Consolidation Analysis และ Update Mesh Analysis ดังนั้นในการวิเคราะห์แต่ละโครงการจะมีขั้นตอนในการคำนวณมากกว่าหนึ่งขั้นตอน ลักษณะเฉพาะของการคำนวณที่มีในโปรแกรม PLAXIS มีดังต่อไปนี้

2.1 Automatic Load Stepping โปรแกรม PLAXIS สามารถกำหนดลำดับ และเวลาของขั้นตอนการเพิ่มของน้ำหนักกระทำ (Load) ได้โดยอัตโนมัติ

2.2 Arc–Length Control ในการคำนวณหาค่าน้ำหนักกระทำที่ทำให้โครงสร้างเกิดการพิบัติ (Collapse Load) และกลไกของการพิบัติ (Failure Mechanisms) โปรแกรม PLAXIS จะใช้หลักการ Arc–Length Control ซึ่งเป็นหลักการทาง Mechanical Engineering เข้ามาใช้ในการควบคุมและตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์

2.3 Stage Construction โปรแกรม PLAXIS สามารถที่จะจำลองลำดับขั้นตอนของการก่อสร้าง เช่น สามารถจำลองลำดับของงานขุด (Excavation) และงานถมได้ใกล้เคียงกับ

ลำดับขั้นตอนของการก่อสร้างจริงที่เกิดขึ้นในสนาม Safety Factor โปรแกรม PLAXIS มีหลักการพิเศษที่เรียกว่า Phi-c-reduction สามารถใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของการก่อสร้างได้โดยตรงจากวิธี Finite Element

3. OUTPUT

เป็นกลุ่มงานที่ใช้สรุปผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการป้อนข้อมูลใน INPUT และผลการคำนวณจาก CALCULATION รูปแบบการแสดงผลของโปรแกรม PLAXIS มีดังนี้

รูปแบบกราฟิกโดยสามารถแสดงผลในรูปแบบของ Contour Line, Contour Shading, Deformed Mesh, Displacement Arrows และ Cross-Sections นอกจากนี้ยังมีฟังก์ชันพิเศษที่สามารถแสดงเส้นทางเดินของหน่วยแรง (Stress Path) เพื่อใช้ในการติดตามและตรวจสอบพฤติกรรมของชั้นดินที่เกิดจากการก่อสร้างในแต่ละขั้นตอนได้ รูปแบบตารางผลการคำนวณที่ได้สามารถแสดงค่าในรูปแบบของตาราง และสามารถนำค่าในตารางที่ได้จากโปรแกรมนี้เชื่อมโยงเข้ากับโปรแกรมอื่น เช่น Microsoft Words และ Microsoft Excel ได้



บทที่ 3

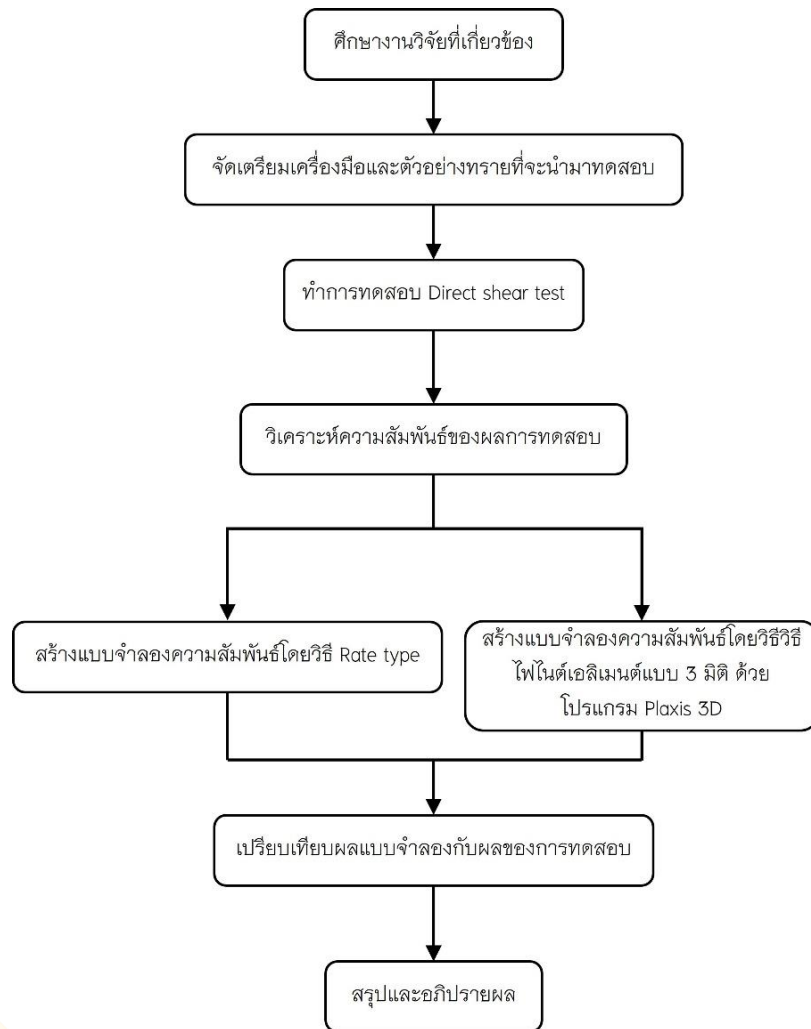
วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมผิวสัมผัสระหว่างทรายและวัสดุโครงสร้างผิวเรียบ รวมถึงการสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์เชิงตัวเลขที่อธิบายถึงพฤติกรรมผิวสัมผัส ทั้งนี้เพื่อให้เข้าใจในขั้นตอนการดำเนินการวิจัย จึงทำการแบ่งขั้นตอนการดำเนินงาน ดังแสดงในภาพ 31 แสดงแผนการดำเนินงานวิจัย ในส่วนของการทดสอบในห้องปฏิบัติการ การทดสอบจะทดสอบด้วยเครื่องมือการทดสอบที่พัฒนาขึ้นเพื่อให้เหมาะสมกับการวิจัย โดยตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบจะใช้ตัวอย่างทรายในสภาพแห้งที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์เริ่มต้น (Relative density) $D_r = 35\%$ แทนตัวอย่างทรายหลวม และ $D_r = 85\%$ แทนตัวอย่างทรายแน่น ใช้หน่วยแรงตั้งฉากเริ่มต้น 100, 200 และ 300 kPa ภายใต้สภาวะความเค้นตั้งฉากคงที่ (CNL) และภายใต้สภาวะความเค้นแรงคงที่ (CNS) การทดสอบภายใต้สภาวะ CNS ทำการทดสอบโดยใช้ค่าความเค้นแรง (k) เริ่มต้นที่ 1,000 และ 3,000 kPa/mm เมื่อทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการเสร็จเรียบร้อยแล้วนำผลจากการทดสอบมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์เพื่อนำความสัมพันธ์ ที่ได้ไปสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์เชิงตัวเลขด้วยวิธี Rate type และแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม PLAXIS 3D แล้วนำผลแบบจำลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ สรุป และอภิปรายผลการวิจัย

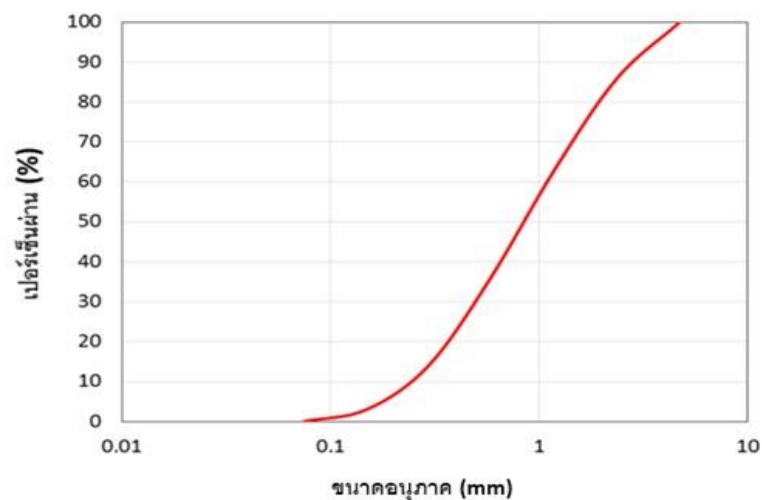
ตัวอย่างทรายที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวอย่างทรายที่นำมาใช้ในการทดสอบมาจากแม่น้ำในสภาพทรายแห้ง ที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 16” ค้าง 100” ดังแสดงในภาพ 32 ทรายที่ใช้ในการทดสอบมีความหนาแน่นสูงสุดเท่ากับ $\gamma_{\max} = 17.90 \text{ kN/m}^3$ และความหนาแน่นต่ำสุดเท่ากับ $\gamma_{\min} = 15.50 \text{ kN/m}^3$ ใช้ทรายหลวมที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density) $D_r = 35\%$ และทรายแน่นที่ $D_r = 85\%$ โดยสามารถคำนวณน้ำหนักทรายที่ความหนาแน่นใด ๆ ได้จากสมการที่ 26

$$D_r = \frac{\gamma_{d\max}}{\gamma_d} \left[\frac{\gamma_d}{\gamma_{d\max}} - \frac{\gamma_{d\min}}{\gamma_{d\min}} \right] = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (26)$$



ภาพ 31 แผนการดำเนินการวิจัย



ภาพ 32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของตะแกรงกับเปอร์เซ็นต์ผ่าน

เครื่องมือที่ใช้ทดสอบ

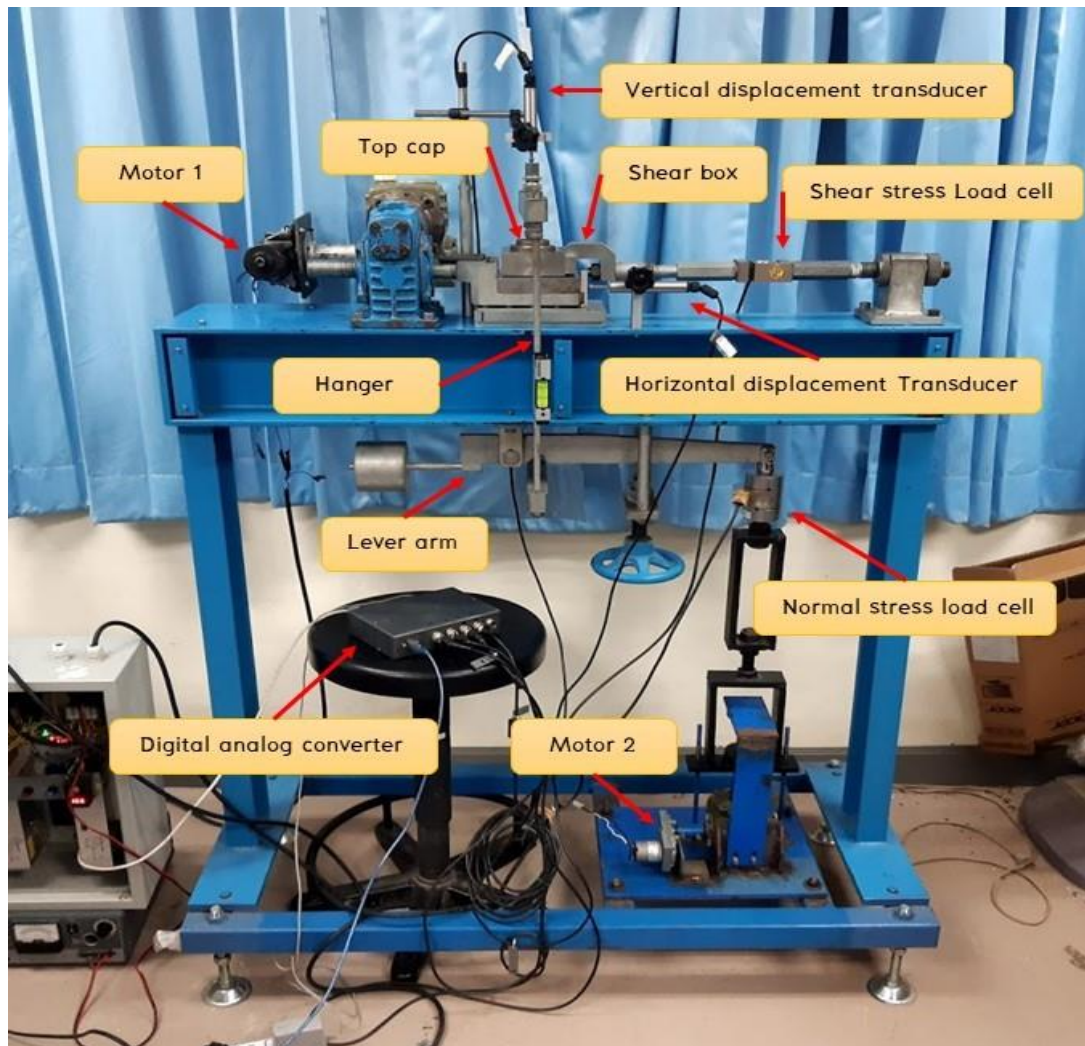
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ เป็นเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาทั้งหมดเพื่อให้สอดคล้องกับการทดสอบ เครื่องมือที่พัฒนาเพื่อทดสอบหาแรงเฉือนโดยตรงนั้น คือ Direct shear test ซึ่งได้ดัดแปลงเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct shear device) ดังแสดงในภาพที่ 33 โดยการดัดแปลง Shear box ด้านล่างเป็นแผ่นโลหะที่แสดงถึงโครงสร้าง สามารถทดสอบทั้งสภาวะ CNL และ CNS โดยการให้แรงผ่านแม่แรงโดยใช้ Motor 2 (Motor ด้านล่าง) ในการหมุนเกลียวดึง ให้ Level arm กดต่ำลง และที่ปลายอีกด้านของ Lever arm ได้คาบเกี่ยวกับ Hanger (แกนที่ปลายด้านล่างคาบเกี่ยวกับ Level arm และปลายด้านบนคาบเกี่ยวกับ Top cap) เมื่อระดับ Lever arm กดต่ำลงจะส่งผลให้ Hanger กดต่ำลงด้วยเช่นกัน เปรียบเสมือนเป็นการใส่หน่วยแรงตั้งฉาก กดไปที่ Top cap ผ่านไปถึงตัวอย่างทราย และอ่านค่าหน่วยแรงตั้งฉากจาก Normal stress load cell การบันทึกกระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากและแนวระนาบสามารถบันทึกได้โดยใช้อุปกรณ์ชนิดเปลี่ยนแปลงความเหนียวนำเชิงเส้น (Linear variable displacement transducer: LVDT) คือ Vertical displacement transducer ในการบันทึกกระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉาก และ Horizontal displacement transducer ในการบันทึกกระยะการเคลื่อนที่ในแนวระนาบ ในการเฉือนจะใช้ Motor 1 (Motor ด้านบน) ในการออกแรงให้แผ่นเหล็กโลหะด้านล่างเคลื่อนที่ไปในแนวระนาบ และมีการวัดแรงเฉือนที่เกิดขึ้น โดยใช้ Shear stress load cell ในการให้แรงเฉือนจะใช้ความเร็วของมอเตอร์ 0.5 mm/min และการบันทึกข้อมูลจะบันทึกทุก ๆ 3 วินาที

แผ่นเหล็กโครงสร้าง (Steel plate) จะมีลักษณะเป็นผิวเรียบและมีขนาดความกว้าง 8.8 ซม. ความสูง 2.27 ซม. เปรียบเสมือนเป็นผิวสัมผัสของเสาเข็ม ในการเตรียมตัวอย่าง จะทำการฉาบผิวด้านล่างของ Shear box ด้วย Silicone grease เพื่อลดการสัมผัสระหว่าง Shear box และแผ่นโครงสร้าง อีกทั้งยังช่วยไม่ให้เกิดทรายหลุดลอดออกจาก Shear box ในขณะที่ทำการให้แรงเฉือน

ขั้นตอนการทดสอบ

การศึกษาพฤติกรรมของผิวสัมผัสระหว่างดินทรายและโครงสร้าง จะทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยทดสอบภายใต้สภาวะความเค้นตั้งฉากคงที่ (CNL) และภายใต้สภาวะความแข็งแรงแคงที่ (CNS) โดยใช้เครื่องมือทดสอบ Direct shear ที่พัฒนาขึ้น รายละเอียดการทดสอบสามารถอธิบายดังแสดงในตาราง 5 แสดงรายละเอียดการทดสอบของผิวสัมผัสแบบให้แรงเฉือนคงที่ (Monotonic test) ในการเลือกใช้ค่าความแข็งแรงแรง (k) เพื่ออธิบายพฤติกรรมของเสาเข็ม โดยทั่วไปค่า k จะอยู่ในช่วงของ 100–1000 kPa/mm ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของเสาเข็ม

และค่าโมดูลัสแรงเฉือนของดิน (G) ในขณะที่ k มีค่าสูงๆ (3000–5000 kPa/mm) จะใกล้เคียงกับเงื่อนไขสภาวะปริมาตรคงที่ (Constant volume condition)



ภาพ 33 เครื่องมือทดสอบ

ตาราง 5 รายละเอียดการทดสอบ

Test	D_r (%)	σ_n (kPa)	k (kPa/mm)
CNL	35%	100, 200, 300	0
	85%	100, 200, 300	0
CNS	35%	100, 200, 300	1,000
	85%	100, 200, 300	1,000
	35%	100, 200, 300	3,000
	85%	100, 200, 300	3,000

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ ขั้นตอนแรกทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างทรายให้ตรงกับควมหนาแน่นเริ่มต้นของตัวอย่างที่ทำการทดสอบ จากนั้นทำการทา Silicone grease ที่ Shear box บริเวณด้านที่สัมผัสกับผิวโครงสร้างและติดตั้งเข้าด้วยกัน ทำการใส่ตัวอย่างทรายลงใน Shear box โดยในกรณีของทรายหลวมการใส่ตัวอย่างทรายต้องค่อย ๆ โปรยทรายลง Shear box โดยให้เบามือมากที่สุด ให้ได้ความสูงของตัวอย่างทราย 2 เซนติเมตร และใช้พู่กันเกลี่ยผิวทรายให้เรียบ ในกรณีของทรายแน่นทำการโปรยทรายลงเป็นชั้น ๆ แบ่งเป็น 3 ชั้น และใช้ค้อนยางทุบก่อนเหล็กที่มีขนาดพอดีกับขนาดของตัวอย่างทรายบนผิวหน้าทรายโดยทุบทุก ๆ ชั้นให้เท่า ๆ กัน ให้ได้ความสูงของตัวอย่างทราย 2 เซนติเมตร เมื่อใส่ตัวอย่างทรายลงใน Shear box เรียบร้อยแล้ว ทำการใส่ Top cap และติดตั้ง Hanger รวมถึง Load cell และ Transducer vertical displacement และ Transducer horizontal displacement ให้พร้อมสำหรับการทดสอบ ภาพประกอบการเตรียมตัวอย่าง แสดงดังตาราง 6 โดยขั้นตอนการทดสอบจะมีดังนี้

1. ติดตั้งคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมสำหรับการทดสอบ เข้ากับเครื่องทดสอบแรงเฉือนโดยตรง
2. Shear box มีขนาดความสูง 3.6 เซนติเมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.36 เซนติเมตร และมีพื้นที่ 31.67 ตารางเซนติเมตร
3. ทำการเตรียมตัวอย่างทรายสำหรับการทดสอบ ดังแสดงในตาราง 6
4. ในกรณีของทรายหลวม เททรายลงในกล่อง Shear box แล้วทำการเกลี่ยหน้าทรายด้วยพู่กันให้เรียบเสมอกันตลอดพื้นที่หน้าตัด แล้วทำการวัดความสูงของทรายให้ได้ 2 เซนติเมตร
5. ในกรณีของทรายแน่น เททรายลงไปลงในกล่อง Shear box โดยการใส่ทรายเป็นสามชั้น ชั้นละเท่า ๆ กัน แล้วทำการเกลี่ยหน้าทรายด้วยแปรงหรือพู่กันให้เรียบเสมอกันตลอด

พื้นที่หน้าตัด โดยในแต่ละชั้นจะทำการปิด Top cap แล้วใช้ค้อนยางทุบ Top cap ทำให้ทรายแน่น ทำจนครบสามชั้นแล้วทำการวัดความสูงของทรายให้ได้ 2 เซนติเมตร

6. ทำการติดตั้ง Load cell เช้ากับเครื่องทดสอบแรงเฉือน แล้วทำการวัดแขนส่งถ่ายแรงให้อยู่ในแนวระนาบ โดยใช้ตัววัดระดับน้ำ

7. ตั้งค่าความถี่ จำนวนรอบ น้ำหนัก เวลาที่ต้องการบันทึก สำหรับการทดลอง

ตาราง 6 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

ภาพประกอบ	รายละเอียดขั้นตอน
	<p>1. ชั่งน้ำหนักทรายตัวอย่าง</p>
	<p>2. ทา Silicone grease ที่ Shear box บริเวณด้านที่สัมผัสกับผิวโครงสร้าง</p>
	<p>3. กรณีของทรายหลวม การใส่ตัวอย่างทรายต้องค่อย ๆ ปล่อยให้ทรายลง Shear box โดยให้เบาที่สุด</p>
	<p>4. ใช้ฟู่กันค่อย ๆ เกลี่ยผิวหน้าทรายให้เรียบในกรณีที่ใส่ตัวอย่างทรายเรียบร้อยแล้ว</p>

ตาราง 6 (ต่อ)

ภาพประกอบ	รายละเอียดขั้นตอน
	5. กรณีของทรายแน่น ไปรยทรายลงเป็นชั้น ๆ และใช้ค้อนยางทุบแผ่นเหล็กบนผิวหน้าทรายโดยทุบทุก ๆ ชั้นให้เท่า ๆ กัน
	6. เมื่อใส่ตัวอย่างทรายเสร็จใช้เวอร์เนียวัดความสูงของทรายโดยให้ทรายสูง 2 เซนติเมตร
	7. ทำการใส่ Top cap และติดตั้ง Hanger รวมถึง Load cell และ Transducer displacement ให้พร้อมสำหรับการทดสอบ
	8. ทำการติดตั้ง Transducer vertical displacement
	9. ทำการติดตั้ง Transducer horizontal displacement รวมถึง Load cell ให้พร้อมสำหรับการทดสอบ

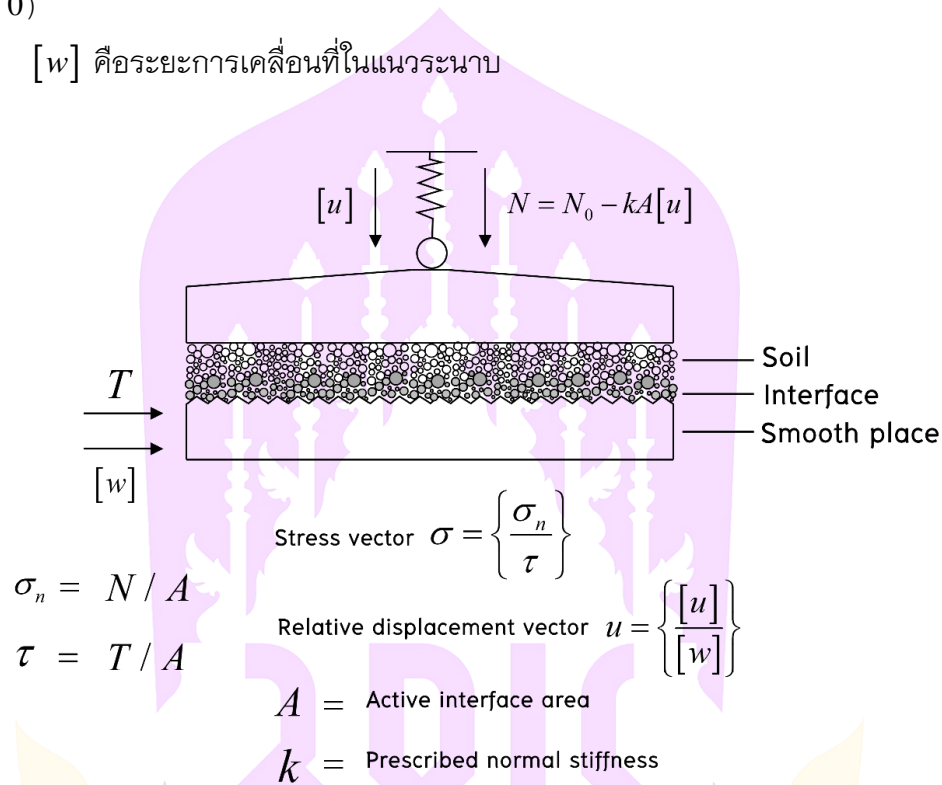
สำหรับตัวแปรที่สำคัญสำหรับการศึกษาคำนี้สามารถแสดงได้ดังภาพ 34

โดย σ_n คือ หน่วยแรงในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัส

τ คือ หน่วยแรงเฉือน

$[u]$ คือ ระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉาก (การยุบตัว $[u] < 0$ หรือการขยายตัว $[u] > 0$)

$[w]$ คือระยะการเคลื่อนที่ในแนวระนาบ



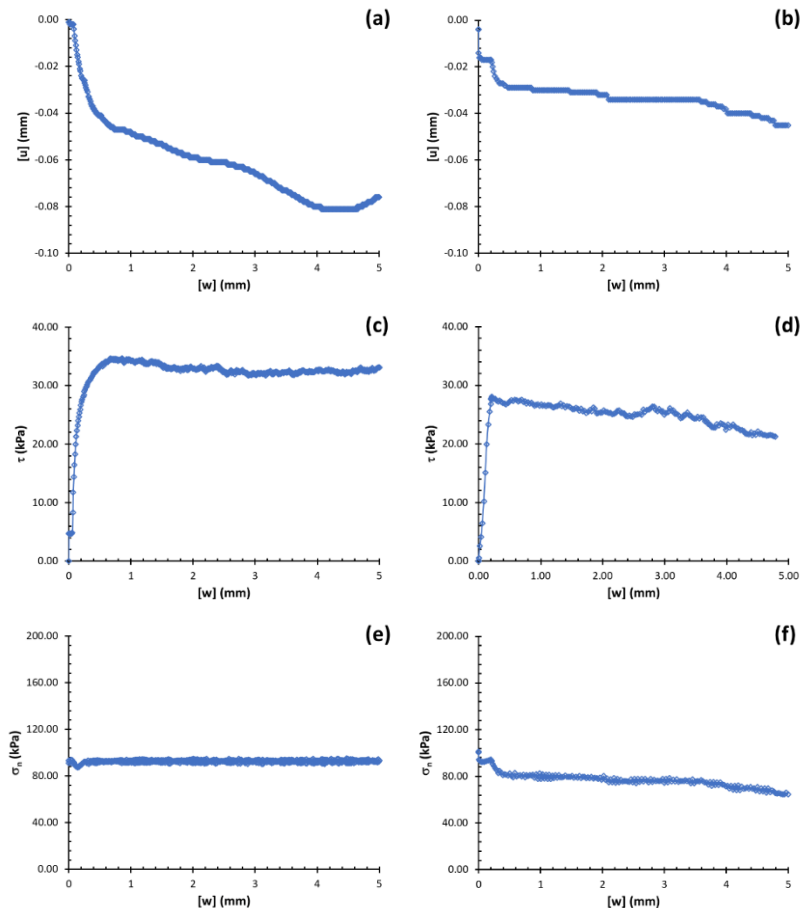
ภาพ 34 ตัวแปรที่สำคัญในการทดสอบผิวสัมผัสระหว่างทรายและโครงสร้าง

ที่มา: คัดลอกและดัดแปลงจาก: Mortara, et al., 2002

พฤติกรรมผิวสัมผัสภายใต้สภาวะหน่วยแรงคงที่ (CNL) และสภาวะความแข็งแรงแรงคงที่ (CNS)

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนภายใต้สภาวะหน่วยแรงคงที่ (CNL) และสภาวะความแข็งแรงแรงคงที่ มีความแตกต่างตรงที่ผลของพฤติกรรมที่แตกต่างกัน โดยสภาวะหน่วยแรงคงที่นั้น หน่วยแรงตั้งฉาก (σ_n) จะคงที่ตลอดระยะการเฉือน แต่เมื่อเป็นสภาวะความแข็งแรงแรงคงที่ หน่วยแรงตั้งฉาก (σ_n) จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของระยะการเคลื่อนที่

ในแนวตั้งฉาก (การยุบตัวหรือขยายตัว) $[u]$ ความแตกต่างของสถานะหน่วยแรงคงที่และสถานะความแข็งแรงคงที่ แสดงดังภาพ 35

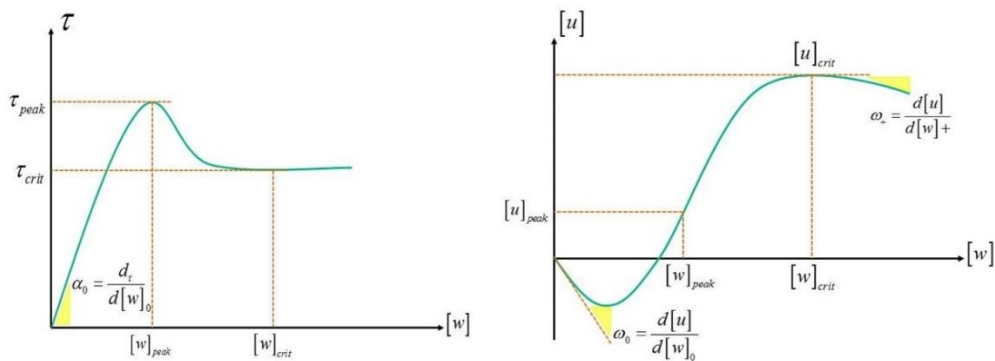


ภาพ 35 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสถานะหน่วยแรงคงที่ (a, c, e) และสถานะความแข็งแรงคงที่ (b, d, f)

ความสัมพันธ์เชิงตัวเลขด้วยวิธี Rate type

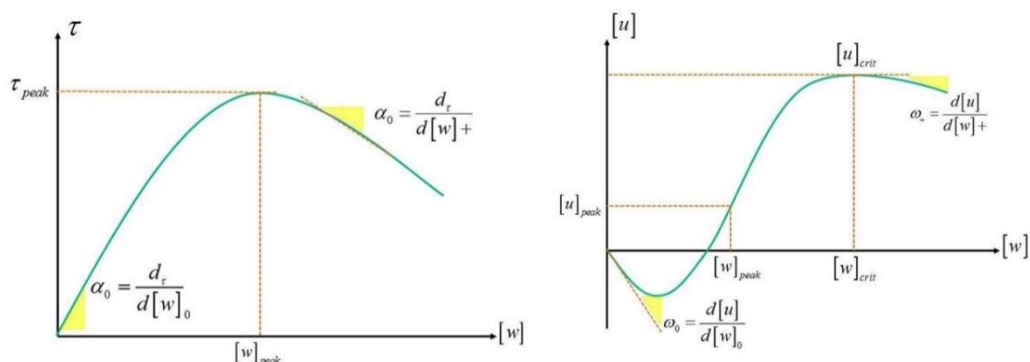
วิธีการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์แสดงพฤติกรรมของผิวสัมผัสระหว่างดินทรายกับวัสดุโครงสร้างด้วยวิธี Rate-type นั้นจะแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงก่อนอัตราส่วนหน่วยแรงสูงสุด (Peak stress ratio: η_{peak}) และหลังจากค่าอัตราส่วนหน่วยแรงสูงสุด ซึ่งจะเป็นค่าอัตราส่วนหน่วยแรงวิกฤติ (Critical stress ratio: η_{crit}) โดยขั้นตอนการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงตัวเลขมีดังนี้

1. หาค่าสูงสุด (Peak) ของแต่ละตัวแปรเช่น $[w]_p$, $[u]_p$, τ/σ_{np} , σ_{np} และหาค่าวิกฤติ (Critical) ของแต่ละตัวแปรเช่น $[w]_+$, $[u]_+$, τ/σ_{n+} , σ_{n+} หาความลาดชันช่วงก่อน Peak condition และความลาดชันช่วง Critical condition
2. เมื่อได้ค่าแล้วนำมาพล็อตกับค่า Stiffness (k) จะได้ค่าความสัมพันธ์เชิงตัวเลข โดยจะเป็นฟังก์ชัน Polynomial หรือ Exponential
3. เมื่อได้ค่าความสัมพันธ์เชิงตัวเลขมาจะแยกเป็นแต่ละตัวแปรตามสมการ แล้วนำมาพล็อตกับ Normal stress (σ_n)
4. จะได้ค่าความสัมพันธ์เชิงตัวเลขที่นำมาเป็นพารามิเตอร์ในการสร้างแบบจำลอง ในวิธีนี้พารามิเตอร์พื้นฐานที่สำคัญที่ได้มาจากการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงของ ผิวงอผิว โดยที่จะพิจารณาอัตราส่วนหน่วยแรง $\eta = \tau/\sigma_n$ และ $[u]$ เมื่อเทียบกับ $[w]$ ในสภาวะ CNL และ CNS ดังแสดงในภาพ 36 และภาพ 37



ภาพ 36 พารามิเตอร์สำคัญสำหรับอธิบายช่วงของผลการทดสอบ CNL

ที่มา: Pra-ai, 2013



ภาพ 37 พารามิเตอร์สำคัญสำหรับอธิบายช่วงของผลการทดสอบ CNS

ที่มา: Pra-ai, 2013

เมื่อพิจารณาการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงของผิวสัมผัสระหว่างดินทรายและโครงสร้างพฤติกรรมต่าง ๆ เช่น การขยายตัว การพัฒนาของมุมเสียดทาน และการแตกหักของเม็ดทราย บริเวณผิวสัมผัส สามารถแบ่งการพิจารณาได้เป็นสองช่วง อย่างไรก็ตามการแบ่งช่วงนี้ค่อนข้างมีความยุ่งยากในการที่จะกำหนดอย่างชัดเจน

ช่วงแรก คือ ช่วงก่อนอัตราส่วนหน่วยแรงสูงสุด (Peak stress ratio: η_{peak}) ($\eta_{peak} = \tau_{peak} / \sigma_n$) โดยที่ระยะการเคลื่อนที่ในแนวแรงเฉือน ($[w]$) จะมีค่าไม่มาก

ช่วงต่อมา คือ ช่วงหลังจากค่าอัตราส่วนหน่วยแรงสูงสุดซึ่งจะเป็นค่าอัตราส่วนหน่วยแรงวิกฤติ (Critical stress ratio: η_{crit}) และพฤติกรรมของผิวสัมผัสมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะการเคลื่อนที่ในแนวแรงเฉือน ($[w]$)

สภาวะวิกฤติ (η_{crit}) คือ สภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนหน่วยแรง (η_{crit}) และการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉาก ($[u]$) สามารถสังเกตได้เมื่อระยะการเฉือนมาก ๆ ในสภาวะ CNS ค่า τ และ σ_n จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับความหนาแน่นเริ่มต้น

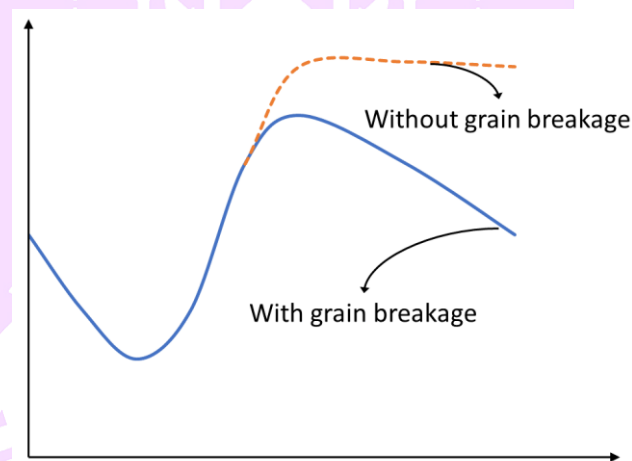
โดยทั่วไป การคงสภาพของการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉาก (ไม่มีการขยายหรือยุบตัว) ที่ระยะเฉือนมาก ๆ มีความสอดคล้องกับสภาวะวิกฤติ อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงของผิวสัมผัสจะพบว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $[u]-[w]$ และ $\sigma_n-[w]$ มีความคล้ายคลึงกัน ในสภาวะ CNS คุณลักษณะที่สำคัญของผิวสัมผัสคือการยุบตัวหรือขยายตัว (ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นเริ่มต้น) เนื่องจากการเรียงตัวกันใหม่ของเม็ดทรายในชั้นบาง ๆ ติดกับ

โครงสร้าง การลดลงของกราฟทั้งสองที่ระยะเฉือนมาก ๆ อาจเนื่องมาจากการที่เม็ดทรายที่ผิวสัมผัสชั้นบาง ๆ นั้นเกิดการแตกหัก (Boulon, 1988)

จากภาพ 38 เมื่อมีแรงเฉือนมากกระทำ พฤติกรรมของผิวสัมผัสสามารถพิจารณาได้ดังนี้

ส่วนแรกที่เกิดจากการเคลื่อนที่ในแนวแรงเฉือน จะมีการจัดเรียงตัวใหม่ของเม็ดทรายภายในผิวสัมผัส (การยุบตัวหรือขยายตัว)

ส่วนที่ 2 เป็นผลมาจากการแตกหักของเม็ดทรายเนื่องจากพลังงานที่เกิดขึ้น เนื่องจากมีแรงเฉือนมากกระทำ อย่างไรก็ตามบางครั้งก็ระยะเฉือนมาก ๆ การเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงจะไม่สามารถสังเกตเห็นได้ ทั้งนี้เนื่องจากพลังงานที่เกิดขึ้นอาจจะมีไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการแตกหักของเม็ดทรายที่บริเวณผิวสัมผัส



ภาพ 38 ลักษณะผลการทดสอบแรงเฉือนภายใต้สภาวะวะ CNS ที่พิจารณาการแตกของเม็ดทราย

ที่มา: คัดลอกและดัดแปลงจาก: Pra-ai, 2013

โดยจะแบ่งช่วงของการพิจารณาได้ ดังนี้

ก่อนค่าหน่วยแรงสูงสุด

1. ค่าโมดูลัสของอัตราส่วนหน่วยแรง ($\eta([w])$) เริ่มต้น, $\alpha_0: \alpha_0 = \partial\eta/\partial[w]_0$
2. อัตราส่วนหน่วยแรงสูงสุด, η_{peak}
3. ระยะการเคลื่อนที่ในแนวแรงเฉือน $[w]$ ที่สัมพันธ์กับ η_{peak} , $[w]_{\eta_{peak}}$

4. ความลาดชันของการขยายตัว (Dilatancy) เริ่มต้น, $\omega_0: \omega_0 = \partial[u]/\partial[w]_0$

หลังค่าหน่วยแรงสูงสุด

1. อัตราส่วนหน่วยแรงที่สภาวะวิกฤต, η_{crit}

2. ระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉาก ที่สภาวะวิกฤต, $[u]_{crit}$

3. ความลาดชันของการขยายตัว (Dilatancy) ที่ระยะเฉือนมาก ๆ, $\omega_+: \omega_+ = \partial[u]/\partial[w]_+$

ในทำนองเดียวกันภายใต้เงื่อนไข CNS ตัวแปรพื้นฐานที่สำคัญซึ่งอธิบายหน่วยแรงเฉือน (τ) และหน่วยแรงตั้งฉาก σ_n จะถูกกำหนดโดยที่

ช่วงก่อนถึงค่าสูงสุด

1. ค่าโมดูลัสของอัตราส่วนหน่วยแรง ($\eta([w])$) เริ่มต้น, $\alpha_0: \alpha_0 = \partial\eta/\partial[w]_0$

2. อัตราส่วนหน่วยแรงสูงสุด, η_{peak}

3. หน่วยแรงตั้งฉากสูงสุด, $\sigma_{n peak}$

4. ระยะการเคลื่อนที่ในแนวแรงเฉือน $[w]$ ที่สัมพันธ์กับ η_{peak} และ $\sigma_{n peak}$, $[w]_{\eta peak}$

และ $[w]_{\sigma_{n peak}}$

5. ค่าโมดูลัสของหน่วยแรงตั้งฉากเทียบกับระยะเฉือน ($\sigma_n([w])$) เริ่มต้น, β_0

: $\beta_0 = \partial\sigma_n/\partial[w]_0$

6. ความลาดชันของการขยายตัว (Dilatancy) เริ่มต้น, $\omega_0: \omega_0 = \partial[u]/\partial[w]_0$

ช่วงหลังค่าสูงสุด

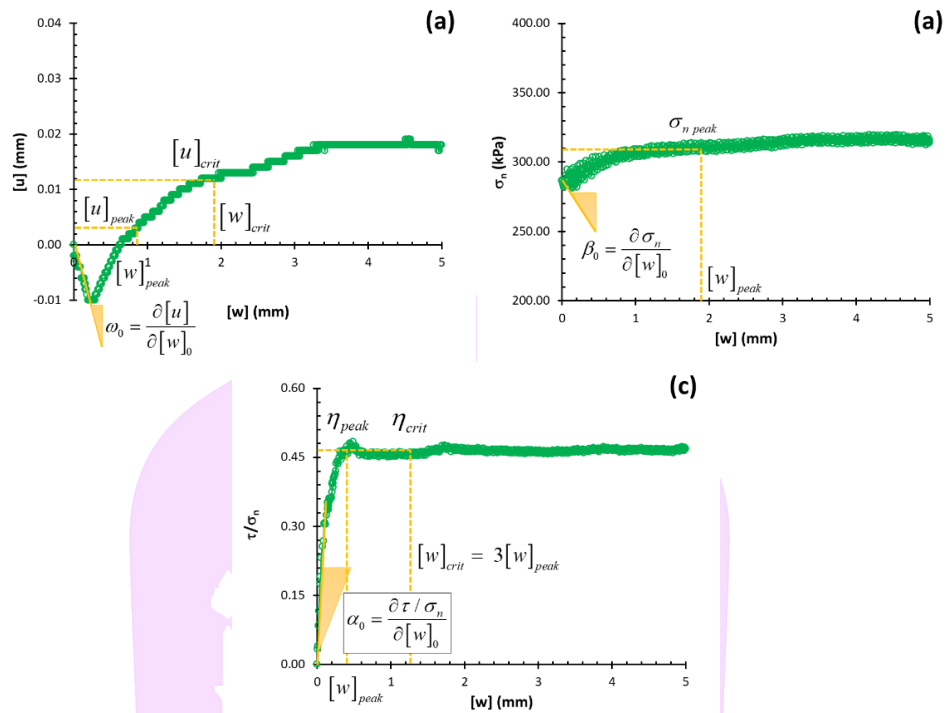
1. อัตราส่วนหน่วยแรงที่สภาวะวิกฤต, η_{crit}

2. โมดูลัสของ $\sigma_n([w])$ ที่สัมพันธ์กับช่วงหลังค่าสูงสุด, $\beta_+: \beta_+ = \partial\sigma_n/\partial[w]_+$

3. ระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉาก ที่สภาวะวิกฤต, $[u]_{crit}$

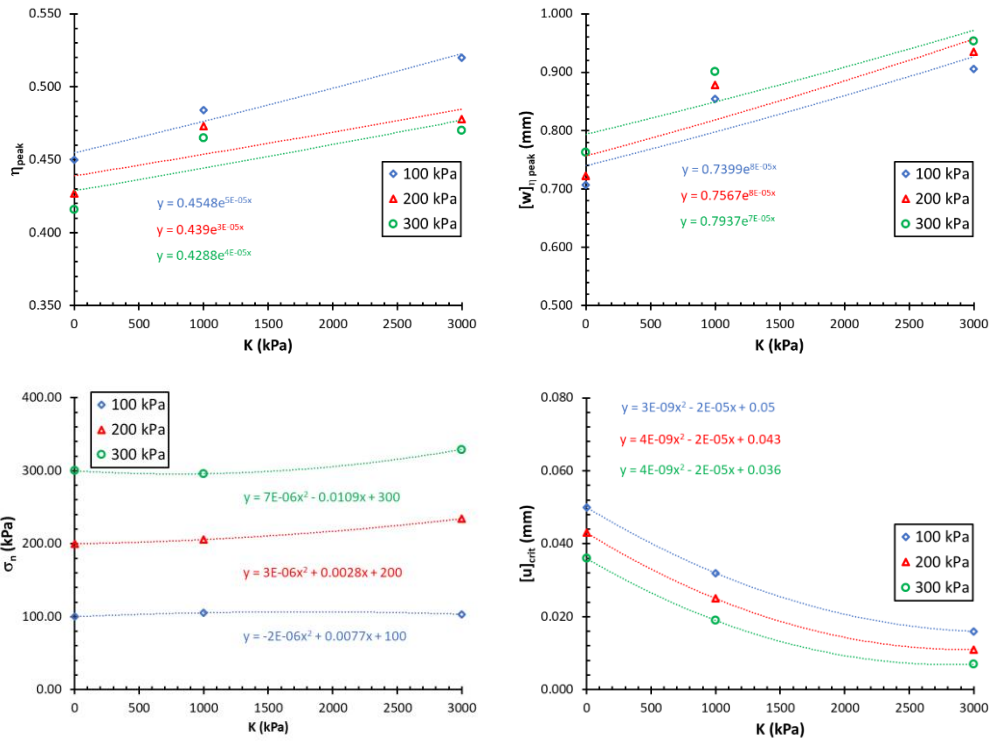
4. ความลาดชันของการขยายตัว (Dilatancy) ที่ระยะเฉือนมาก ๆ, $\omega_+: \omega_+ = \partial[u]/\partial[w]_+$

การกำหนดรูปแบบของพฤติกรรมของ CNL และ CNS จากการทดสอบแบบ Monotonic จะได้จากการตรวจดูค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญต่อการบ่งบอกถึงพฤติกรรมของผิวสัมผัส ดังแสดงในภาพที่ 39 แสดงการพิจารณาพารามิเตอร์ของ η_{peak} , $[w]_{peak}$, σ_n และ $[u]_{crit}$ ที่ได้จากการตรวจสอบผลกรทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบ Monotonic ของทราย $D_r = 85\%$, $\sigma_n = 300$ kPa, $k = 1000$ kPa/mm

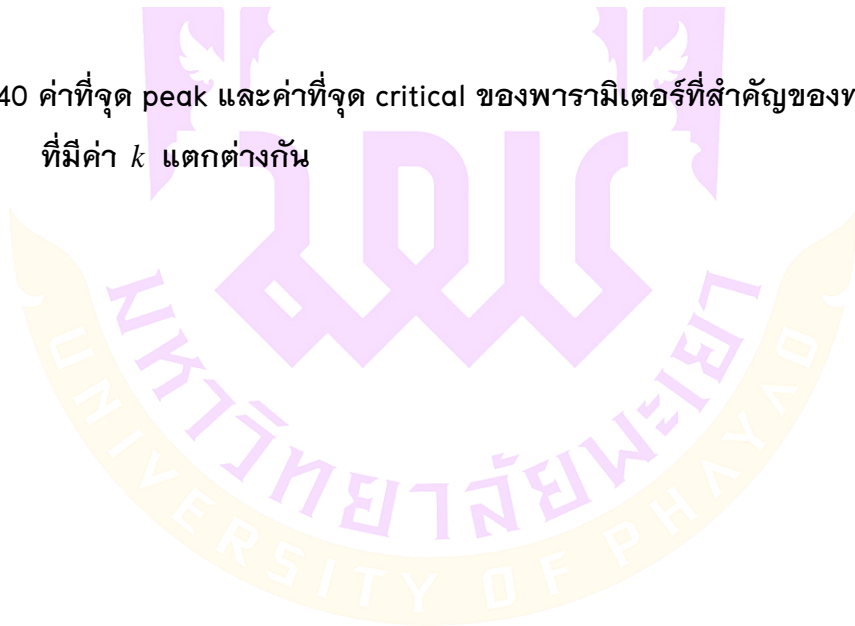


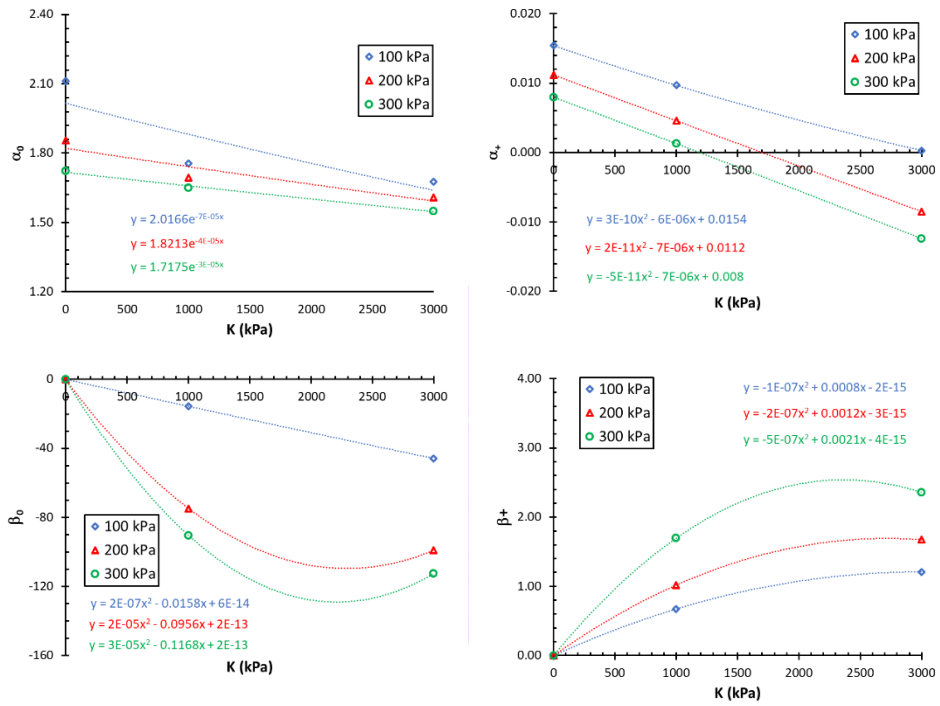
ภาพ 39 ตัวอย่างการเลือกพารามิเตอร์ที่สำคัญของทรายนั่น

ภาพ 40 แสดงค่าที่จุด peak และค่าที่จุด critical ของพารามิเตอร์ที่สำคัญของทรายนั่นที่นำมาพล็อตเทียบกับค่าความแข็งแรงแรง (k) แล้วเลือกความสัมพันธ์เป็น Polynomial หรือ Exponential ภาพ 41 แสดงค่าความลาดชันเริ่มต้นและความลาดชันหลังค่าสูงสุดพารามิเตอร์ที่สำคัญของทรายนั่นที่นำมาพล็อตเทียบกับค่าความแข็งแรงแรง (k) แล้วเลือกความสัมพันธ์เป็น Polynomial หรือ Exponential เมื่อได้ค่าความสัมพันธ์ต่าง ๆ ที่พล็อตเทียบกับค่าความแข็งแรงแรง (k) แล้ว หลังจากนั้นจะนำมาแยกความสัมพันธ์ของโพลีโนเมียล ($Ak^2 + Bk + C$) หรือ ($Bk + C$) กับแยกความสัมพันธ์เอกซ์โพเนนเชียล ($A \times EXP(B \times k)$) แล้วนำมาพล็อตกับหน่วยแรงตั้งฉาก (Normal stress, σ_n) จะได้ความสัมพันธ์ใหม่ ดังแสดงในภาพ 42 ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นพารามิเตอร์ที่สมบูรณ์ที่จะนำไปสร้างแบบจำลองพฤติกรรมผิวสัมผัสระหว่างทรายกับโครงสร้างผิวเรียบ ดังแสดงในตาราง 7 และตาราง 8

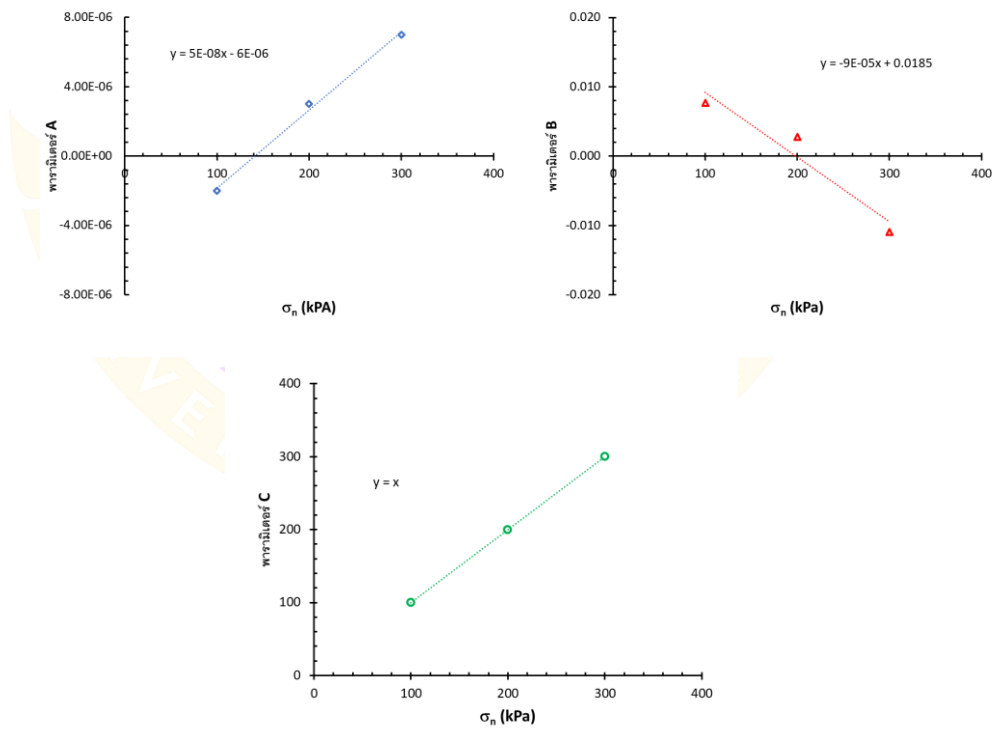


ภาพ 40 ค่าที่จุด peak และค่าที่จุด critical ของพารามิเตอร์ที่สำคัญของทรายแน่น ที่มีค่า k แตกต่างกัน





ภาพ 41 ความลาดชันเริ่มต้นและความลาดชันหลังค่าสูงสุดของทรายแน่นที่มีค่า k ต่างกัน



ภาพ 42 พารามิเตอร์ที่ได้หลังจากแยกความสัมพันธ์พล็อตกับ Normal stress (σ_n)

ตาราง 7 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ได้จากการหาความสัมพันธ์ ($D_r = 85\%$)

พารามิเตอร์	สมการ	A	B	C
η_{peak}	$(A \times EXP(B \times k))$	$-(1.00E-04 \sigma_n) + 0.4669$	$-(5.00E-09 \sigma_n) + (6.00E-06)$	
$[w]_{\eta_{peak}}$	$(A \times EXP(B \times k))$	$-(3.00E-04 \sigma_n) + 0.7096$	$-(5.00E-08 \sigma_n) + (9.00E-05)$	
α_0	$(A \times EXP(B \times k))$	$-(1.50E-03 \sigma_n) + 2.1509$	$(2.00E-07 \sigma_n) - (9.00E-05)$	
α_+	$(Ak^2 + Bk + C)$	$-(3.00E-09 \sigma_n) + (6.00E-05)$	$-(2.00E-09 \sigma_n) + (1.00E-06)$	$(2.00E-05 \sigma_n) - 0.0038$
η_{crit}	$(A \times EXP(B \times k))$	$-(1.00E-04 \sigma_n) + 0.4619$	$-(5.00E-08 \sigma_n) + (5.00E-05)$	
$[u]_{crit}$	$(Ak^2 + Bk + C)$	$(3.00E-12 \sigma_n) + (4.00E-09)$	$-(2.00E-08 \sigma_n) - (2.00E-05)$	$-(6.00E-05 \sigma_n) + 0.0557$
$[w]_{[u]_{crit}}$	$(A \times EXP(B \times k))$	$(5.00E-04 \sigma_n) + 1.7116$	$-(5.00E-09 \sigma_n) + (2.00E-05)$	
ω_0	$(Ak^2 + Bk + C)$	$-(6.00E-12 \sigma_n) + (2.00E-09)$	$(2.00E-08 \sigma_n) - (1.00E-05)$	$-(5.00E-05 \sigma_n) - 0.011$
ω_+	$(Ak^2 + Bk + C)$	$-(5.00E-15 \sigma_n) - (4.00E-12)$	$(5.00E-11 \sigma_n) + (1.00E-08)$	$-(2.00E-07 \sigma_n) - (2.00E-05)$
σ_n_{peak}	$(Ak^2 + Bk + C)$	$-(5.00E-08 \sigma_n) - (6.00E-06)$	$-(9.00E-05 \sigma_n) + 0.0185$	σ_n
$[w]_{\sigma_n_{peak}}$	$(Ak^2 + Bk + C)$	$-(6.00E-12 \sigma_n) + (3.00E-09)$	$(5.00E-08 \sigma_n) - (3.00E-05)$	$-(1.00E-04 \sigma_n) + 0.6053$
β_0	$(Ak^2 + Bk + C)$	$(1.00E-07 \sigma_n) - (1.00E-05)$	$-(5.00E-04 \sigma_n) + 0.0249$	$(7.00E-09 \sigma_n) + (1.00E-05)$
β_+	$(Ak^2 + Bk + C)$	$-(2.00E-09 \sigma_n) + (1.00E-07)$	$(7.00E-06 \sigma_n) + (7.00E-05)$	$-(1.00E-05 \sigma_n) - (1.00E-08)$

ตาราง 8 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ได้จากการหาความสัมพันธ์ ($D_r = 35\%$)

พารามิเตอร์	สมการ	A	B	C
η_{peak}	$(Ak^2 + Bk + C)$	$-(5.00E-12 \sigma_n) + (4.00E-09)$	$-(1.00E-15 \sigma_n) - (3.00E-05)$	$(3.00E-04 \sigma_n) + 0.4$
$[w]_{\eta_{peak}}$	$(Ak^2 + Bk + C)$	$-(3.00E-12 \sigma_n) + (3.00E-08)$	$-(5.00E-15 \sigma_n) - (1.00E-04)$	$-(1.00E-03 \sigma_n) + 0.8947$
α_0	$(Ak^2 + Bk + C)$	$-(1.00E-12 \sigma_n) + (2.00E-08)$	$(5.00E-07 \sigma_n) + (2.00E-04)$	$-(1.50E-03 \sigma_n) + 1.35$
α_+	$(Ak^2 + Bk + C)$	$-(5.00E-13 \sigma_n) - (3.00E-10)$	$-(5.00E-10 \sigma_n) + (2.00E-06)$	$-(2.00E-05 \sigma_n) + (4.60E-03)$
η_{crit}	$(Ak^2 + Bk + C)$	$-(2.00E-11 \sigma_n) + (9.00E-09)$	$(2.00E-07 \sigma_n) - (6.00E-05)$	$-(3.00E-04 \sigma_n) + 0.4207$
$[u]_{crit}$	$(Ak^2 + Bk + C)$	$(2.00E-11 \sigma_n) - (1.00E-08)$	$-(5.00E-08 \sigma_n) + (5.00E-05)$	$-(8.00E-05 \sigma_n) + 0.0723$
$[w]_{[u]_{crit}}$	$(A \times EXP(B \times k))$	$(1.50E-03 \sigma_n) + 1.2824$	$-(2.00E-07 \sigma_n) - (6.00E-05)$	
ω_0	$(Ak^2 + Bk + C)$	$(2.00E-11 \sigma_n) - (3.00E-09)$	$-(5.00E-09 \sigma_n) + (3.00E-05)$	$-(3.00E-04 \sigma_n) - 0.0872$
ω_+	$(Ak^2 + Bk + C)$	$(1.00E-14 \sigma_n) - (3.00E-12)$	$-(5.00E-12 \sigma_n) + (9.00E-06)$	$-(1.00E-07 \sigma_n) + (1.00E-06)$
$\sigma_{n, peak}$	$(Ak^2 + Bk + C)$	$-(2.00E-08 \sigma_n)$	$-(2.00E-04 \sigma_n)$	σ_n
$[w]_{\sigma_{n, peak}}$	$(Ak^2 + Bk + C)$	$(5.00E-11 \sigma_n) - (9.00E-08)$	$(2.00E-09 \sigma_n) - (5.00E-04)$	$(1.00E-03 \sigma_n) + 0.7047$
β_0	$(Ak^2 + Bk + C)$	$(1.00E-07 \sigma_n) - (3.00E-06)$	$-(5.00E-04 \sigma_n) + (8.00E-03)$	$(1.00E-15 \sigma_n)$
β_+	$(Ak^2 + Bk + C)$	$(1.00E-09 \sigma_n) + (7.00E-07)$	$(7.00E-06 \sigma_n) - (3.20E-03)$	$-(2.00E-10 \sigma_n) + (9.00E-09)$

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของงานวิจัยครั้งนี้จะนำเสนอสมการการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ซึ่งสมการได้ถูกบรรยายโดย (Boutrif and Boulon, 1993); (Garnica-Anguas, 1993) โดยสร้างขึ้นจากสถานะเริ่มต้นและสถานะปัจจุบันของผิวสัมผัส เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์แล้ว จะสามารถแบ่งสมการที่ใช้ได้เป็นสองช่วง ดังนี้

ช่วงก่อนถึงค่าสูงสุด; $[w] \leq [w]_{peak}$

$$\tau / \sigma_n = \left(\frac{\alpha_0}{[w]_{\eta peak}^2} - 2 \frac{\eta_{peak}}{[w]_{\eta peak}^2} \right) \square [w]^3 + \left(-2 \frac{\alpha_0}{[w]_{\eta peak}} + 3 \frac{\eta_{peak}}{[w]_{\eta peak}^2} \right) \square [w]^2 + \alpha_0 \square [w] \quad (27)$$

$$\sigma_n = \left(\frac{\beta_0}{[w]_{\sigma peak}^2} - 2 \frac{\sigma_{peak} - \sigma_n}{[w]_{\sigma peak}^3} \right) \square [w]^3 + \left(-2 \frac{\beta_0}{[w]_{\sigma peak}} + 3 \frac{\sigma_{peak} - \sigma_n}{[w]_{\sigma peak}^2} \right) \square [w]^2 + \beta_0 \square [w] + \sigma_n \quad (28)$$

$$[u] = \left(\frac{\omega_0}{[w]_{[u]crit}^2} - 2 \frac{[u]_{crit}}{[w]_{[u]crit}^3} \right) \square [w]^3 + \left(-2 \frac{\omega_0}{[w]_{[u]crit}} + 3 \frac{[u]_{crit}}{[w]_{[u]crit}^2} \right) \square [w]^2 + \omega_0 \square [w] \quad (29)$$

ช่วงหลังค่าสูงสุด; $[w] > [w]_{peak}$

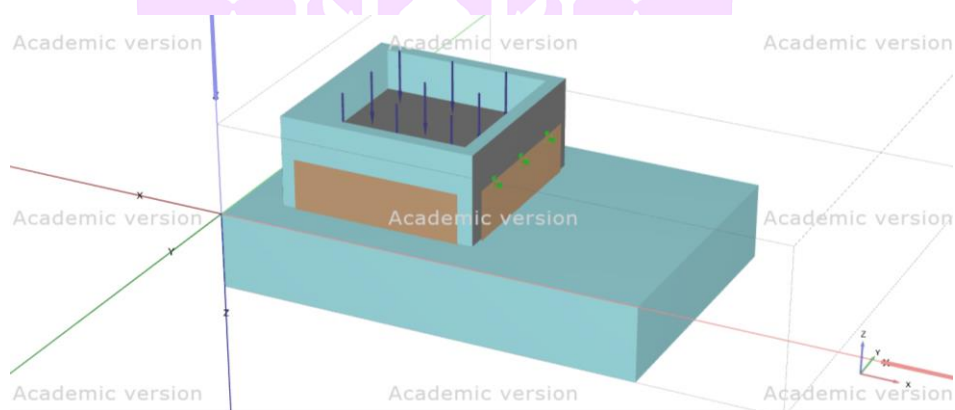
$$\tau / \sigma_n = \left(\frac{\tau}{\sigma_n} \right)_{crit} + \left[\left(\frac{\tau}{\sigma_n} \right)_{peak} - \left(\frac{\tau}{\sigma_n} \right)_{crit} \right] \square \left(\frac{\ln(Y)}{(3[w]_{\eta peak})^2} \square ([w] - [w]_{\eta peak})^2 \right) \quad (30)$$

$$\sigma_n = \sigma_{peak} + \beta_+ \square ([w] - [w]_{\sigma peak}) - \beta_+ \square \left[1 - \exp \left(([w] - [w]_{\sigma peak}) \square \frac{X}{[w]_{\sigma peak}} \right) \right] \quad (31)$$

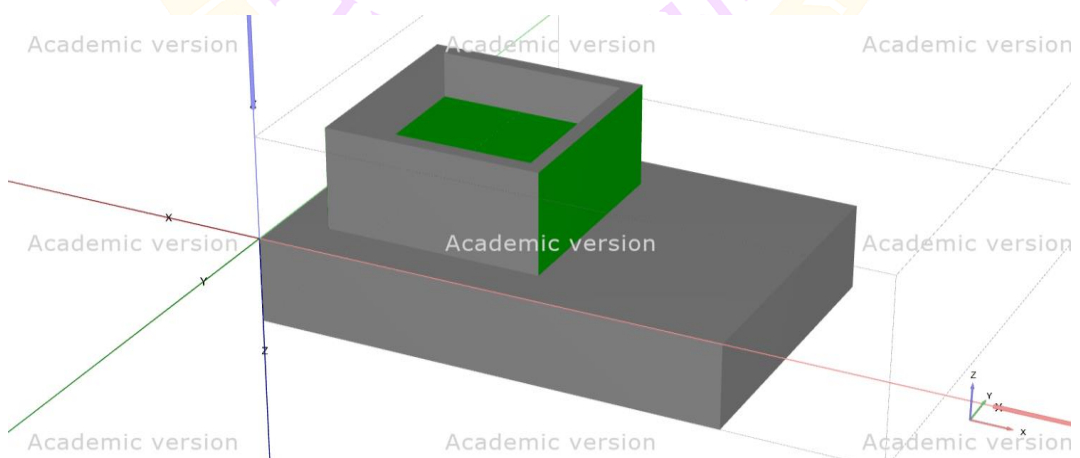
$$[u] = [u]_{crit} + \omega_+ \square ([w] - [w]_{[u]crit}) - \omega_+ \square \left(\frac{[w]_{[u]crit}}{X} \right) \square \left[1 - \exp \left(([w] - [w]_{[u]crit}) \square \frac{X}{[w]_{[u]crit}} \right) \right] \quad (32)$$

แบบจำลองพฤติกรรมผิวสัมผัสด้วยโปรแกรม PLAXIS

ในการวิเคราะห์พฤติกรรมผิวสัมผัสระหว่างทรายกับวัสดุโครงสร้างผิวเรียบด้วยโปรแกรม PLAXIS จะเริ่มที่การสร้างผิวสัมผัสโดยการสร้างแผ่นเหล็กผิวเรียบกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร และหนา 3 เซนติเมตร จากนั้นสร้าง Shear box ขนาดกว้างยาว 8 เซนติเมตร สูง 3.6 เซนติเมตร จากนั้นทำการใส่ทรายเข้าไปด้านใน Shear box โดยความสูงของทราย จะให้ทรายสูง 2 เซนติเมตร เมื่อสร้างแบบจำลองเรียบร้อยแล้ว จะทำการใส่แรงแผ่กระจาย (Surface load) เต็มพื้นที่ด้านบนบนผิวทราย การเงื่อนไขจะทำการตั้งค่า Shear box ให้เลื่อนไป 2.4 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพ 43 เมื่อทำการสร้างแบบจำลองเสร็จสิ้นจะเข้าสู่ขั้นตอนการ Mesh เพื่อสร้างอีลิเมนต์สำหรับการคำนวณพฤติกรรมผิวสัมผัส ดังแสดงในภาพ 44 พารามิเตอร์และขั้นตอนที่ใช้ในการจำลองแบบจำลองอธิบายในตาราง 9 และ 110 ตามลำดับ



ภาพ 43 ลักษณะแบบจำลองการทดสอบ Direct shear ที่สร้างขึ้น

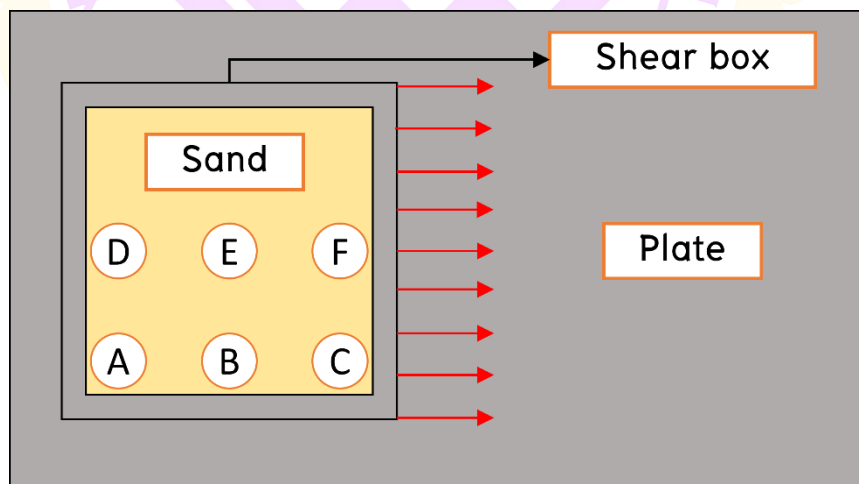


ภาพ 44 ผลของแบบจำลองที่สร้างขึ้นหลังจากผ่านขั้นตอนการสร้างอีลิเมนต์

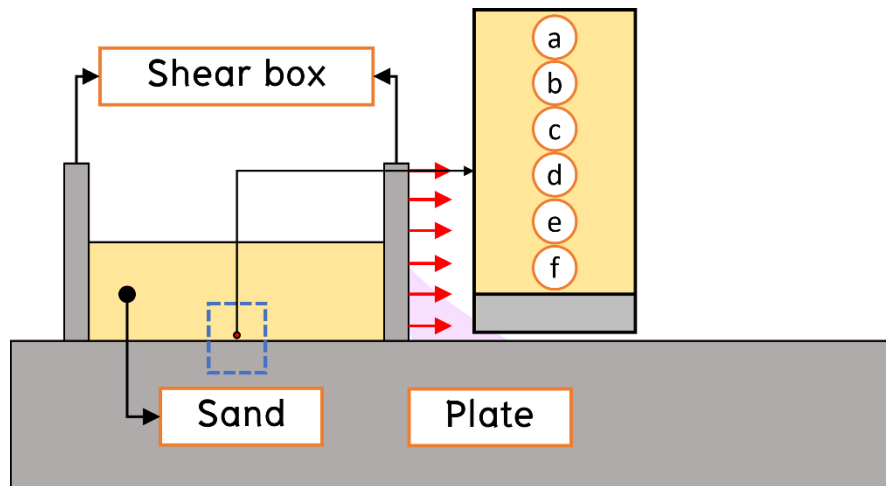
ตาราง 9 พารามิเตอร์วัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

พารามิเตอร์	ทรายแน่น	ทรายหลวม	เหล็ก	ผิวสัมผัส เหล็ก-เหล็ก
Material model	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Linear elastic	Linear elastic
γ_{dry} (kN / m^2)	17.90	15.50	60	-
γ_{sat} (kN / m^2)	20.94	19.47	0	-
E_{ref} (kN / m^2)	3150, 5850, 7150	2150, 4650, 6150	2.1E07	2.1E07
ν	0.30	0.30	0.15	0.15
C_{ref} (kN / m^2)	0.10	0.10	-	0.10
ϕ ($^{\circ}$)	22	18	-	5
ψ ($^{\circ}$)	3	0	-	0
R_{inter}	0.50	0.50	-	0.05

สิ่งหนึ่งที่สำคัญคือ ในการดูผลของการคำนวณ โปรแกรมจะแสดงให้เห็นภาพรวมของแบบจำลองทั้งหมด จะทำการเลือกดูเฉพาะจุดไม่ได้ ดังนั้นจึงต้องใส่พิกัดจุดเพื่อคำนวณแยกจึงจะสามารถดูค่าได้ ดังแสดงในภาพ 45 และภาพ 46



ภาพ 45 ตำแหน่งของตัวอย่างทรายที่ทำการวิเคราะห์พฤติกรรม

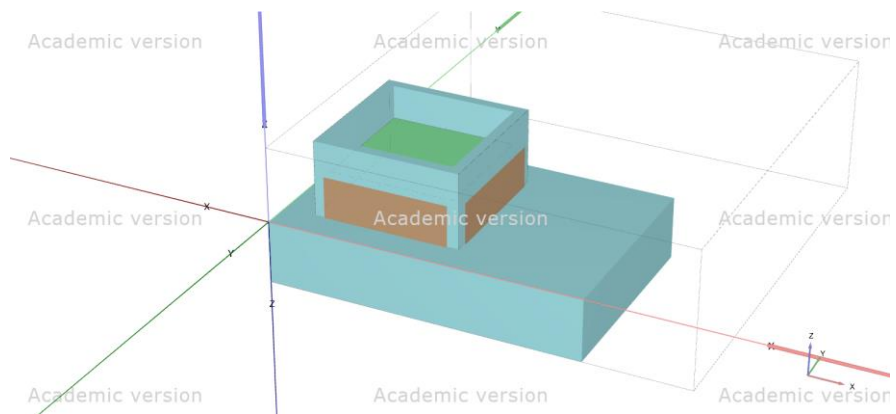


ภาพ 46 ตำแหน่งของระดับความสูงเหนือผิวสัมผัสที่ทำการวิเคราะห์พฤติกรรม

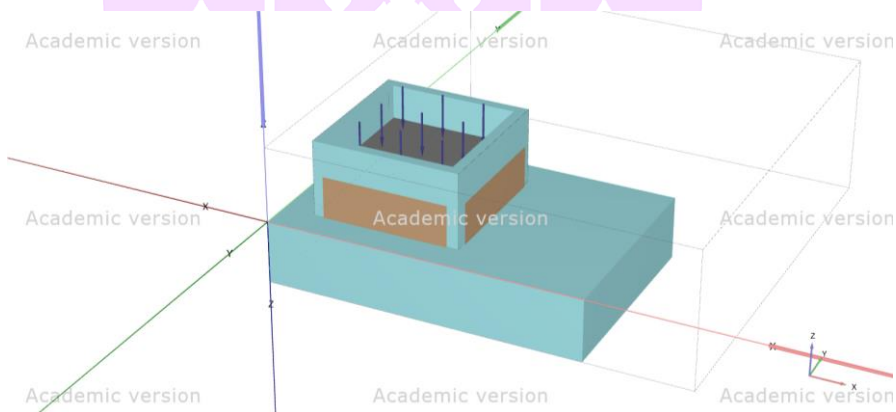
ตาราง 10 ขั้นตอนในการจำลองแบบจำลอง

Phase	Calculation type	Loading type	Load (kPa)	Displacement (mm)
1	Plastic	Staged construction	inactive	inactive
2	Plastic	Staged construction	100, 200, 300	inactive
3	Plastic	Staged construction	100, 200, 300	+24

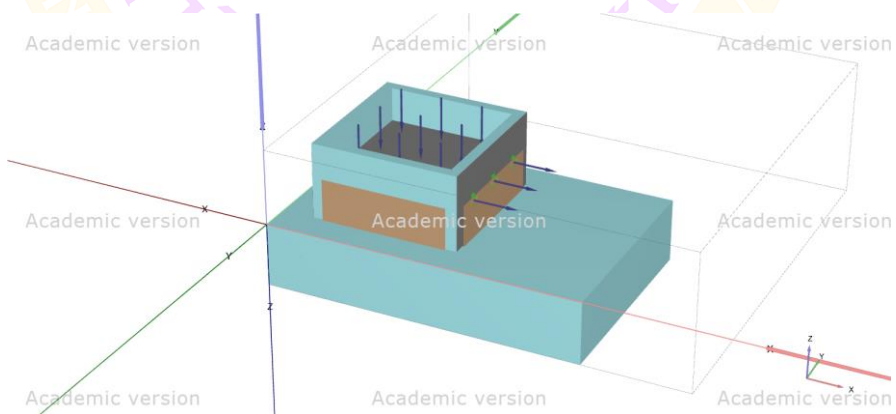
ภาพ 47 ภาพ 48 และภาพ 49 แสดงผลของแบบจำลองในแต่ละ Phase ที่ทำการจำลอง โดยใน Phase ที่ 1 จะทำการ Activate แผ่นเหล็ก Shear box ผิว Interface และตัวอย่างทราย ที่สร้างขึ้นใน Phase ที่ 2 ทำการ Activate หน่วยแรงตั้งฉาก (σ_v) ที่กระทำบนผิวด้านบนของ ตัวอย่างทราย Phase ที่ 3 ทำการสั่งให้ Shear box ทำการเคลื่อนที่ไป 24 มิลลิเมตร



ภาพ 47 แบบจำลอง PLAXIS ใน Phase ที่ 1



ภาพ 48 แบบจำลอง PLAXIS ใน Phase ที่ 2



ภาพ 49 แบบจำลอง PLAXIS ใน Phase ที่ 3

เนื่องจากโปรแกรม PLAXIS ไม่สามารถกำหนดค่าความแข็งแรงแรงของดินได้ (Stiffness) จึงต้องแก้ปัญหาโดยใช้ความสัมพันธ์ ซึ่งอ้างอิงจากงานวิจัยของ Pra-ai (2013) ดังแสดงในสมการที่ 33 โดยทำการสร้าง Top cap ขนาด $6 \times 6 \times 0.5$ เซนติเมตร วางไว้ด้านบนผิวของตัวอย่างทราย และเปลี่ยนตำแหน่งของหน่วยแรงตั้งฉาก (σ_n) มากระทำบนผิว Top cap แทนตำแหน่งผิวด้านบนของตัวอย่างทราย พารามิเตอร์ของ Top cap แสดงในตาราง 12

$$k = \frac{\Delta\sigma}{\Delta[u]} = \frac{E}{h} \quad (33)$$

โดย E คือ ค่า Young's modulus ของ Top cap และ h คือ ความสูงของ Top cap

ตาราง 11 พารามิเตอร์ของ Top cap ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

พารามิเตอร์	Top cap	Top cap
	(k = 1,000 kPa/mm)	(k = 3,000 kPa/mm)
Material model	Linear elastic	Linear elastic
γ_{dry} (kN / m^2)	60	60
γ_{sat} (kN / m^2)	60	60
E_{ref} (kN / m^2)	5,000	15,000
ν	0.15	0.15
C_{ref} (kN / m^2)	-	-
ϕ ($^{\circ}$)	-	-
ψ ($^{\circ}$)	-	-
R_{inter}	-	-

ภาพ 50 ผลของหน่วยแรงและการยุบตัวที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง PLAXIS ที่ Phase 2 ของตัวอย่างทรายหลวม หน่วยแรงตั้งฉาก (σ_n) 100 kPa จากภาพเป็นการตรวจสอบแบบจำลองว่าในการใส่หน่วยแรงตั้งฉากเริ่มต้นลงไปทีผิวของตัวอย่างทรายที่สร้างขึ้น หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในตัวอย่งทรายตรงกับหน่วยแรงตั้งฉากที่ตั้งค่าไว้หรือไม่

บทที่ 4

ผลการศึกษา

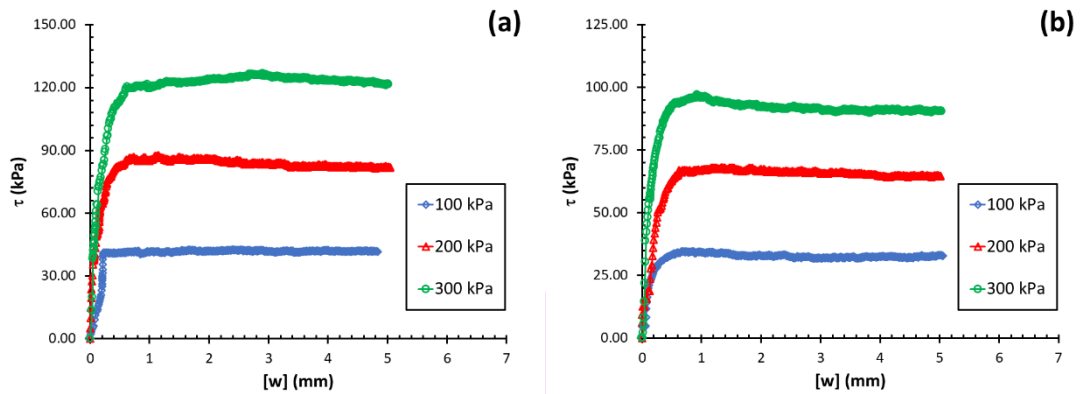
เนื้อหาบทนี้จะนำเสนอผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการรวมถึงผลของแบบจำลองที่สร้างขึ้นจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนภายใต้สภาวะความเค้นตั้งฉากคงที่ (CNL) และภายใต้สภาวะความแข็งแรงคงที่ (CNS) โดยใช้เครื่องมือทดสอบ Direct shear test เพื่อคำนวณหาค่ากำลังรับแรงเฉือนโดยตรง และพฤติกรรมการยุบตัวของทรายที่เกิดขึ้น ในที่นี้จะแสดงผลเป็นกราฟเปรียบเทียบค่าจากห้องปฏิบัติการกับกราฟแบบจำลองที่สร้างขึ้นมา

ผลการทดสอบพฤติกรรมผิวสัมผัสระหว่างทรายกับโครงสร้างผิวเรียบ

ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนภายใต้สภาวะหน่วยแรงคงที่ (Constant normal load: CNL)

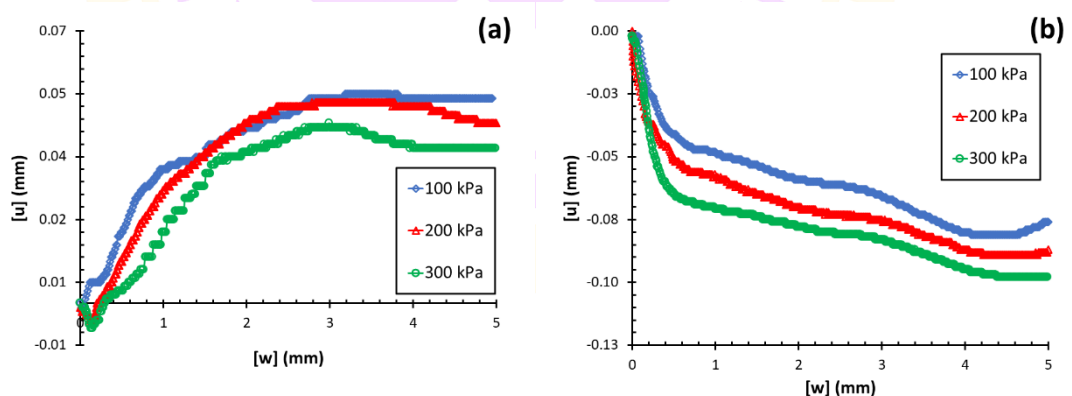
การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบ CNL ได้กำหนดให้ความเค้นตั้งฉาก Normal stress (σ_n) มีค่าคงที่ โดยให้น้ำหนักที่มากกระทำ 3 ระดับ คือ 100, 200, 300 kPa ในการทดสอบนี้ได้ทดสอบทรายแบบแน่นและแบบหลวม ที่มีความหนาแน่นที่ $D_r = 85\%$ และ $D_r = 35\%$ ตามลำดับ ผลการทดสอบระบุว่าค่า Normal stress (σ_n) มีผลต่อ Shear stress (τ) และ Normal displacement ($[u]$) โดยจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า Normal stress (σ_n) เพิ่มขึ้น

ภาพ 51 แสดงผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress (τ) กับ Horizontal displacement ($[w]$) ของทรายแน่น (ภาพ 51a) และทรายหลวม (ภาพ 51b) พบว่า Shear stress จะมีค่ามากขึ้นตาม Normal stress ที่มากขึ้น โดยเมื่อทำการเฉือน ค่า Shear stress จะเพิ่มขึ้นตามระยะ Horizontal displacement จน Shear stress ถึงค่าสูงสุด (Peak) เมื่อเกิดการวิบัติ (Critical) ค่า Shear stress จะคงที่ตลอดระยะเวลาการเฉือน



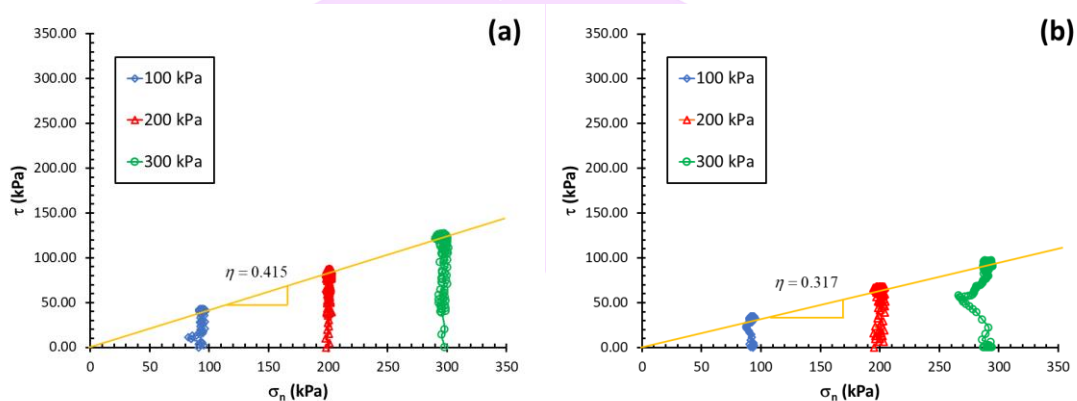
ภาพ 51 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress (τ) และ Horizontal displacement ($[w]$) ของทรายแน่นและทรายหลวม

ภาพ 52 แสดงผลการทดสอบของความสัมพันธ์ระหว่าง Normal displacement ($[u]$) กับ Horizontal displacement ($[w]$) ของทรายแน่น (ภาพ 52a) และทรายหลวม (ภาพ 52b) พบว่า ในกรณีของทรายแน่น ในช่วงแรกของการเฉือนทรายจะมีการยุบตัวเล็กน้อย จากนั้นทรายจะมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นตามระยะการเฉือนและเมื่อทรายเกิดการวิบัติการขยายตัวของทรายจะมีอัตราการขยายตัวที่ลดลงและคงที่ตลอดระยะการเฉือน ในกรณีของทรายหลวมในการเฉือนของทรายหลวมทรายจะมีการยุบตัวเรื่อย ๆ ตลอดระยะการเฉือน และหาก Normal stress มาก การยุบตัวของทรายก็จะมากขึ้นตาม Normal stress ที่มากขึ้น



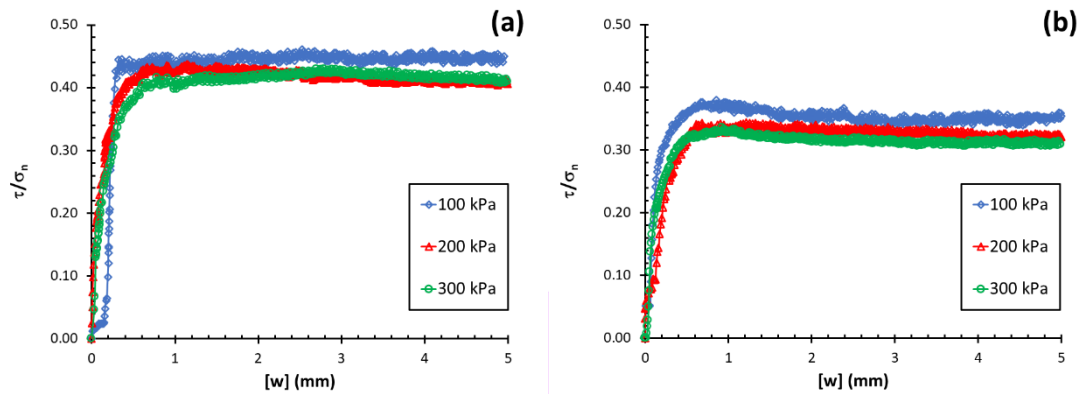
ภาพ 52 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Normal displacement ($[u]$) และ Horizontal displacement ($[w]$) ของทรายแน่นและทรายหลวม

ภาพ 53 แสดงผลการทดสอบความสัมพันธ์ของ Shear stress (τ) กับ Normal stress (σ_n) พบว่า ในการทดสอบกรณีของ CNL แม้ในการเลื่อนค่าของ Shear stress (τ) จะเพิ่มขึ้นตามค่า Normal stress (σ_n) ที่ใช้แต่ค่าของ Normal stress (σ_n) จะคงที่ตลอดระยะเวลาการเลื่อน โดยมุมเสียดทานที่ได้จากการทดสอบทรายแน่นได้เท่ากับ 23.778° และมุมเสียดทานที่ได้จากการทดสอบทรายหลวมได้เท่ากับ 18.163°



ภาพ 53 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress (τ) และ Normal stress (σ_n) ของทรายแน่นและทรายหลวม

ภาพ 54 แสดงผลการทดสอบความสัมพันธ์ของ Stress ratio (τ / σ_n) กับ Horizontal displacement ($[w]$) พบว่าทั้งในกรณีของทรายแน่น (ภาพ 54a) และทรายหลวม (ภาพ 54b) ความแตกต่างของหน่วยแรงมีผลต่อความแตกต่างของ Stress ratio เพียงเล็กน้อย โดยตัวอย่างที่ใช้หน่วยแรงตั้งฉาก (Normal stress) ที่น้อยจะให้ผลของ Stress ratio ที่มากและจะลดลงในตัวอย่างที่ใช้ Normal stress มากขึ้น และทรายแน่นจะให้ผลของ Stress ratio ที่มากกว่าทรายหลวม



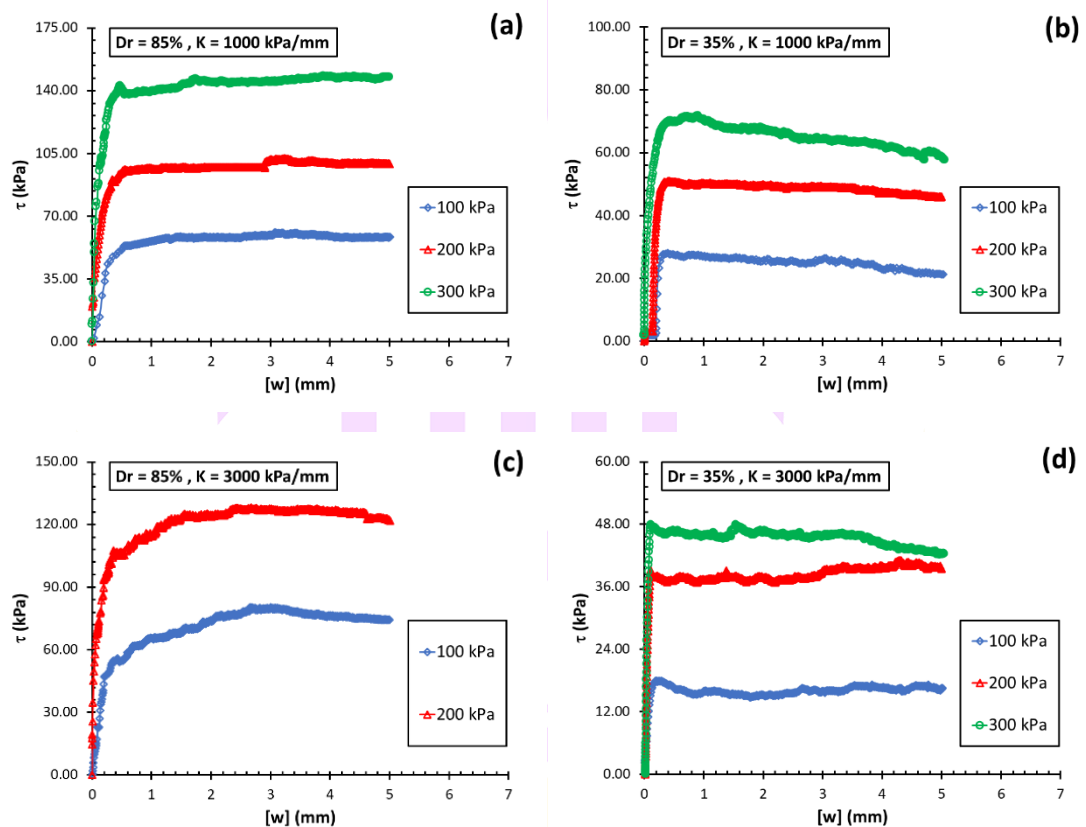
ภาพ 54 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Stress ratio (τ/σ_n) และ Horizontal displacement ($[w]$) ของทรายแน่นและทรายหลวม

ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนภายใต้สภาวะความแข็งแรงแรงคงที่ (Constant normal stiffness: CNS)

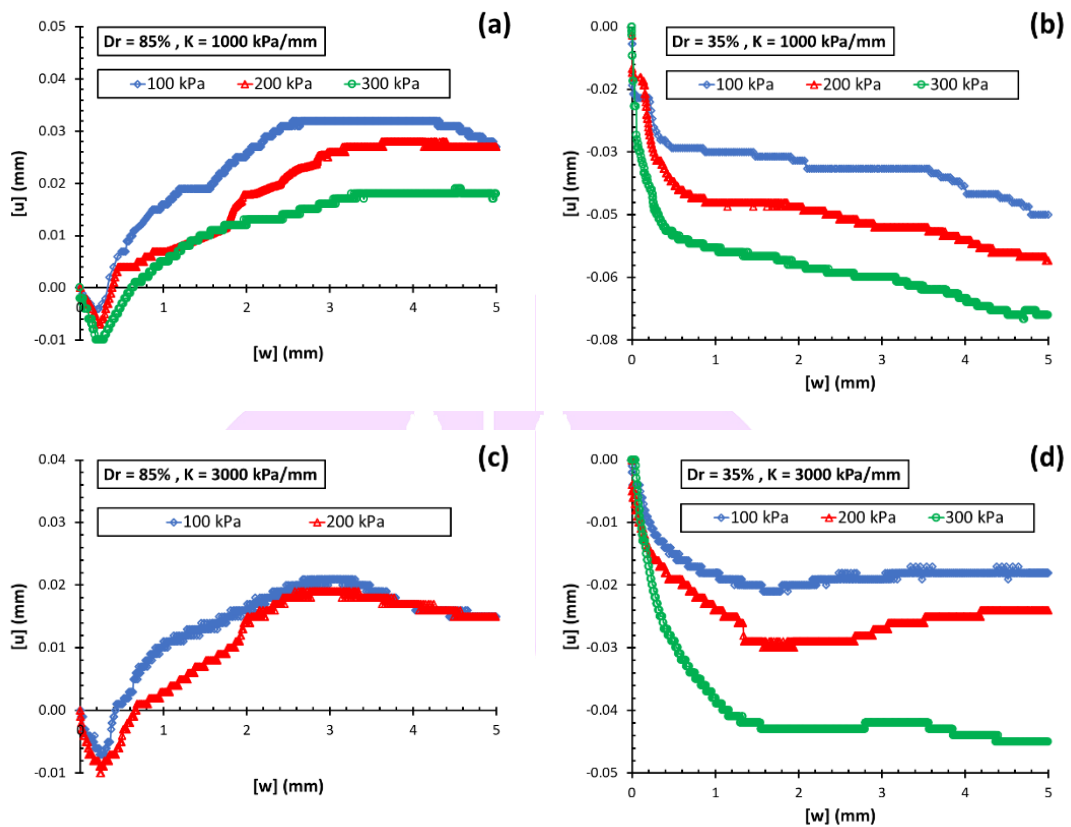
การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบ CNS ได้กำหนดให้ความเค้นตั้งฉาก Normal stress (σ_n) มีค่าคงที่ โดยให้น้ำหนักที่กระทำ คือ 100 200 และ 300 kPa ในการทดสอบนี้ได้ทดสอบทรายแบบแน่นและแบบหลวม ที่มีความหนาแน่นที่ $D_r = 85\%$ และ $D_r = 35\%$ ตามลำดับ ผลการทดสอบระบุว่าค่า Normal stress (σ_n) มีผลต่อ Shear stress (τ) และ Normal displacement ($[u]$) โดยในระหว่างการทดสอบค่า Normal stress (σ_n) จะมีค่าไม่คงที่ตลอดระยะเวลาการเฉือน ส่งผลให้ค่า Shear stress (τ) และค่า Normal displacement ($[u]$) ไม่คงที่ตลอดระยะเวลา

ภาพ 55 แสดงผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress (τ) กับ Horizontal displacement ($[w]$) ของทรายแน่นและทรายหลวม พบว่า เมื่อ Normal stress (σ_n) ที่มากกระทำ มีค่ามาก Shear stress (τ) ก็จะมีค่าสูงโดย Normal stress (σ_n) จะมีค่าไม่คงที่ส่งผลให้ Shear stress (τ) มีค่าไม่คงที่ตลอดระยะเวลา Horizontal displacement ($[w]$) ในกรณีของทรายแน่น (ภาพ 55a และ 55c) ในช่วงแรกของการเฉือน Shear stress (τ) จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับระยะเวลาการเฉือนและเมื่อทำการเฉือนไปถึงจุดถึงจุด Critical แรง Shear stress (τ) จะเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลา Horizontal displacement ($[w]$) ในกรณีของทรายหลวม (ภาพ 55b และ 55d) ในช่วงแรกของการเฉือน Shear stress (τ) จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับระยะเวลาการเฉือนและเมื่อทำการเฉือนไปถึงจุด Critical แรง Shear stress (τ) จะลดลงตลอดระยะเวลา Horizontal displacement ($[w]$)

ภาพ 56 แสดงผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Normal displacement ($[u]$) กับ Horizontal displacement ($[w]$) ของทรายแน่นและทรายหลวม ในกรณีของทรายแน่น (ภาพ 56a และ 56c) พบว่า ในช่วงแรกของการเฉือนทรายจะมีการยุบตัวเล็กน้อยเมื่อทำการเฉือนไปเรื่อย ๆ ทรายจะมีการขยายตัวส่งผลให้ Normal displacement ($[u]$) เพิ่มขึ้นตลอดระยะ Horizontal displacement ($[w]$) ในกรณีของทรายหลวม (ภาพ 56b และ 56d) พบว่า เมื่อใช้ค่า Normal stress (σ_n) มาก การยุบตัว Normal displacement ($[u]$) ก็จะมีค่ามาก เมื่อทำการเฉือนค่า Normal displacement ($[u]$) จะลดลงเรื่อย ๆ ตลอดระยะ Horizontal displacement ($[w]$) ที่เพิ่ม

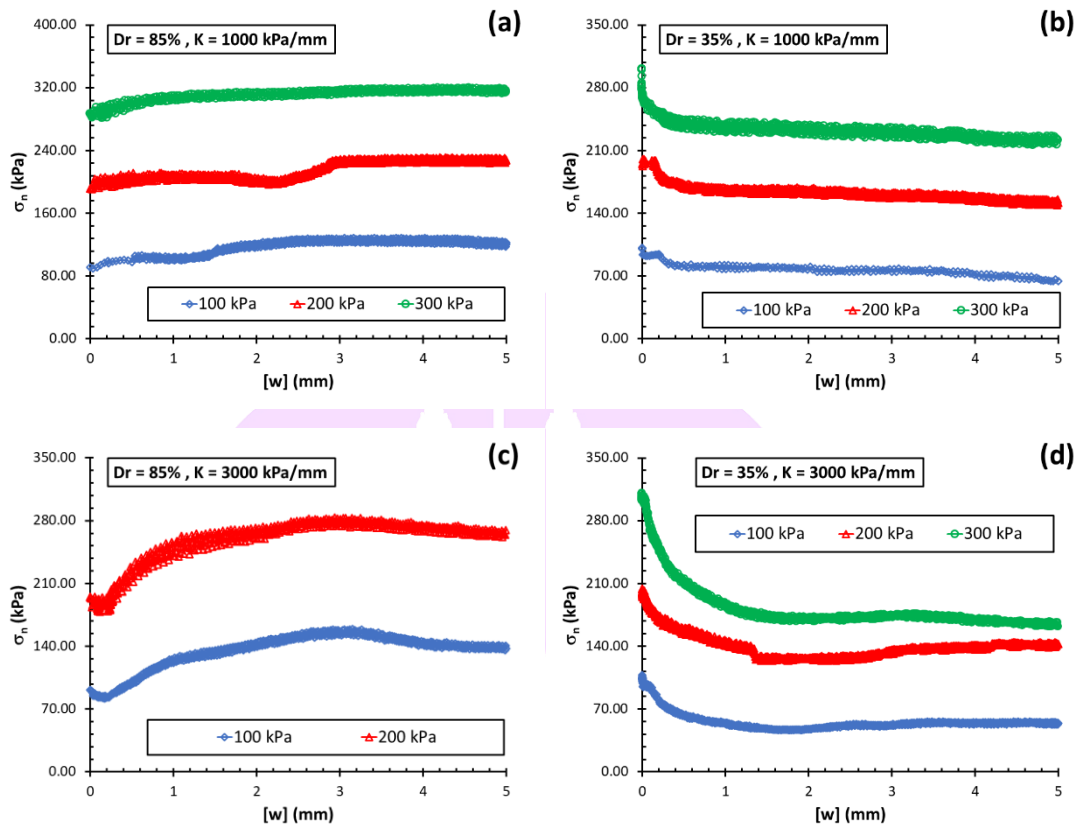


ภาพ 55 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress (τ) และ Horizontal displacement ($[w]$) ของทรายแน่นและทรายหลวมภายใต้สภาวะ CNS



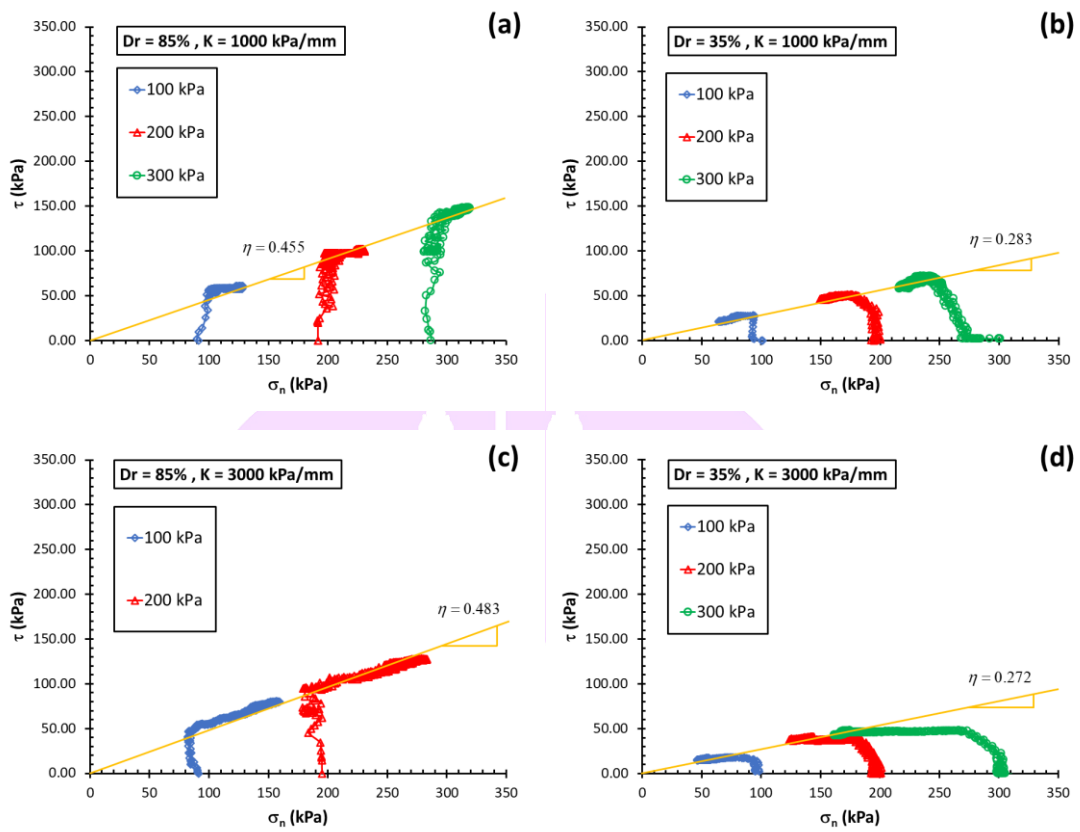
ภาพ 56 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Normal displacement ($[u]$) และ Horizontal displacement ($[w]$) ของทรายแน่นและทรายหลวม ภายใต้สภาวะ CNS

ภาพ 57 แสดงผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Normal stress (σ_n) กับ Horizontal displacement ($[w]$) ในกรณีของทรายแน่น (ภาพ 56a, c) ทรายจะมีการยุบตัวในช่วงแรกของการเฉือนและขยายตัวในภายหลัง ส่งผลให้ความเค้นตั้งฉาก Normal stress (σ_n) จะลดลงในช่วงแรก หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นตามระยะการเฉือน Horizontal displacement ($[w]$) ในกรณีของทรายหลวม (ภาพ 57b, d) ในการเฉือนของทรายหลวม ทรายจะมีการยุบตัวตลอดระยะการเฉือน ส่งผลให้ค่า Normal stress (σ_n) ลดลงตลอดระยะ Horizontal displacement ($[w]$) ที่เพิ่มขึ้น



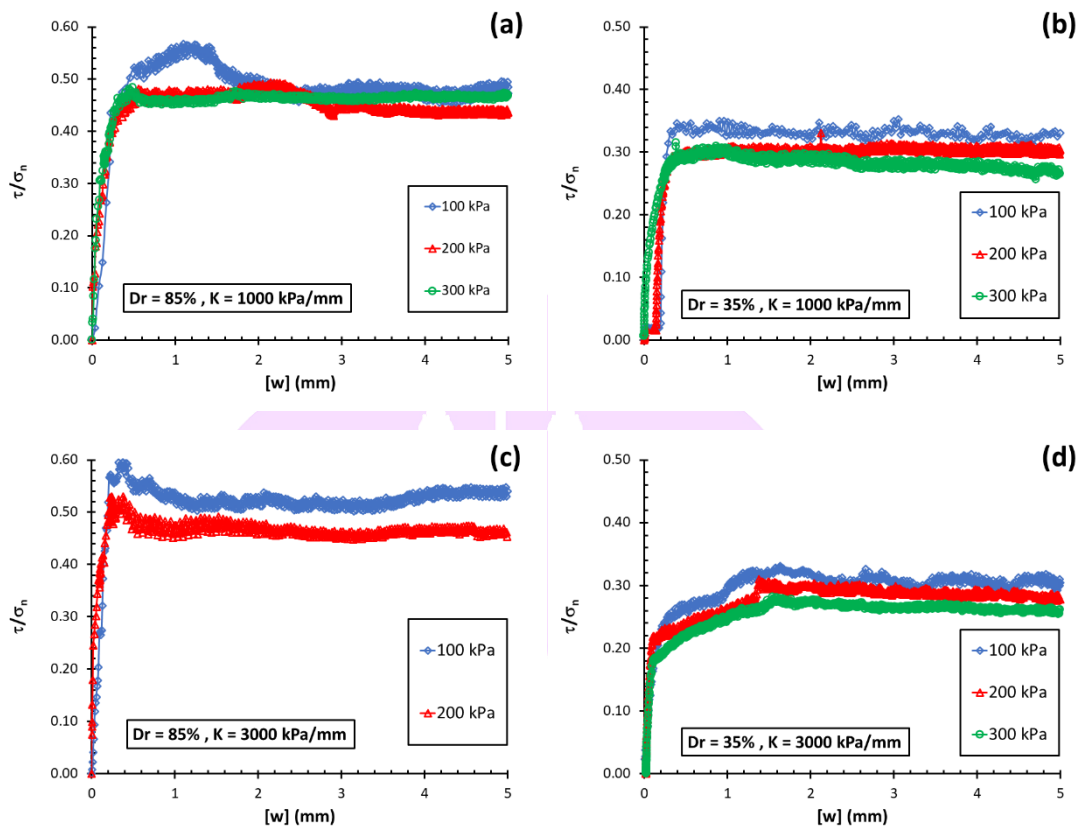
ภาพ 57 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Normal stress (σ_n) และ Horizontal displacement ($[w]$) ของทรายแน่นและทรายหลวมภายใต้สภาวะ CNS

ภาพ 58 แสดงผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress (τ) กับ Normal stress (σ_n) ของทรายแน่นและทรายหลวม ในกรณีของทรายแน่น (ภาพ 58a และ 58c) เมื่อทำการเลื่อนทรายไปเรื่อย ๆ ตัวทรายจะมีการขยายตัว ส่งผลให้ค่า Normal stress (σ_n) เพิ่มมากขึ้น เมื่อค่า Normal stress (σ_n) เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่า Shear stress (τ) มีค่าเพิ่มมากขึ้นตาม ตลอดระยะเวลาการเลื่อน ในกรณีของทรายหลวม (ภาพ 58b และ 58d) ในระหว่างการเลื่อนของทรายหลวม ตัวทรายจะมีการยุบตัวตลอดระยะเวลาการเลื่อน เมื่อทรายเกิดการยุบตัวส่งผลให้ค่า Normal stress (σ_n) ลดลงตามไปด้วยส่งผลให้ค่า Shear stress (τ) ลดลงตลอดระยะเวลาการเลื่อน โดยในกรณีที่ $k = 1,000$ kPa/mm มุมเสียดทานที่ได้จากการทดสอบทรายแน่นได้เท่ากับ 26.070° และมุมเสียดทานที่ได้จากการทดสอบทรายหลวมได้เท่ากับ 16.215° โดยในกรณีที่ $k = 3,000$ kPa/mm มุมเสียดทานที่ได้จากการทดสอบทรายแน่นได้เท่ากับ 27.674° และมุมเสียดทานที่ได้จากการทดสอบทรายหลวมได้เท่ากับ 15.584°



ภาพ 58 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress (τ) และ Normal stress (σ_n) ของทรายแน่นและทรายหลวมภายใต้สภาวะ CNS

ภาพ 59 แสดงผลการทดสอบความสัมพันธ์ของ Stress ratio (τ/σ_n) กับ Horizontal displacement ($[w]$) พบว่าในการทดสอบภายใต้สภาวะ Constant normal stiffness แม้ค่า Normal stress และ Shear stress จะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลาเงื่อนไข แต่ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ Stress ratio ทั้งในกรณีของทรายแน่นและทรายหลวม และตัวอย่างที่ใช้ Normal stress เริ่มต้นที่น้อยจะให้ค่า Stress ratio ที่มากและลดลงเล็กน้อยเมื่อใช้ Normal stress เริ่มต้นที่มาก



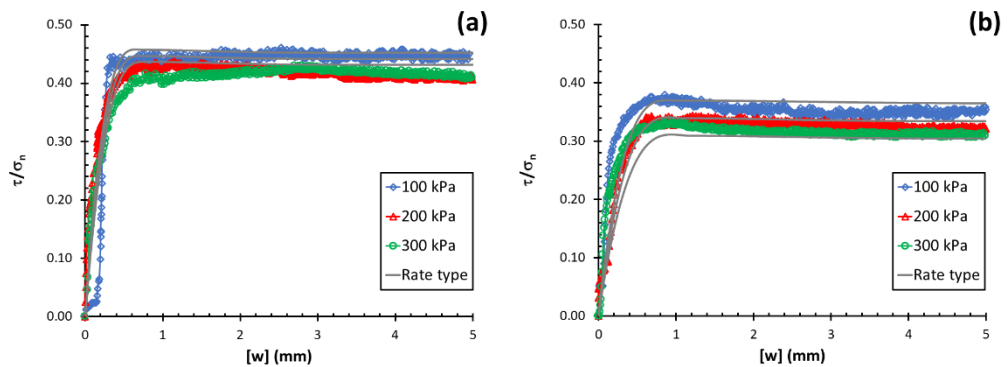
ภาพ 59 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Stress ratio (τ/σ_n) และ Horizontal displacement ($[w]$) ของทรายแน่นและทรายหลวมภายใต้สภาวะ CNS

ผลแบบจำลองความสัมพันธ์เชิงตัวเลขด้วยวิธี Rate type

ผลแบบจำลองความสัมพันธ์เชิงตัวเลขภายใต้สภาวะหน่วยแรงคงที่ (Constant normal load: CNL)

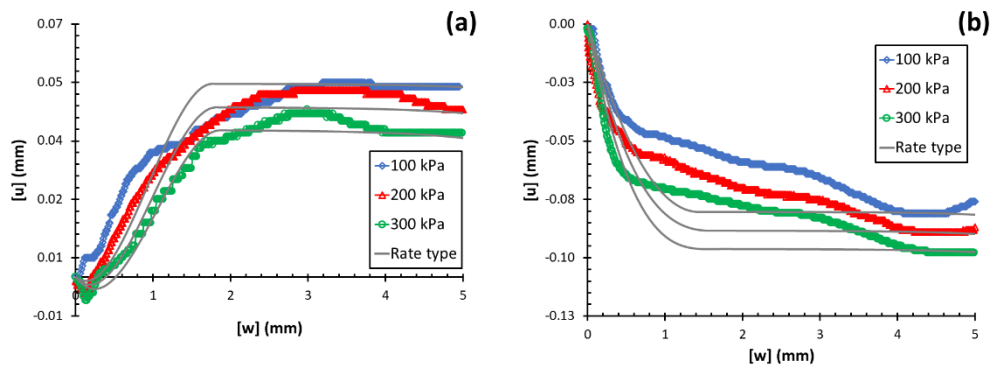
การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบ CNL ได้กำหนดให้ค่าความเค้นตั้งฉาก Normal stress (σ_n) มีค่าคงที่ โดยให้น้ำหนักที่มากกระทำ 3 ระดับ คือ 100, 200, 300 kPa ในการทดสอบนี้ได้ทดสอบทรายแบบแน่นและแบบหลวม ที่มีความหนาแน่นที่ $D_r = 85\%$ และ $D_r = 35\%$ ตามลำดับ ผลการทดสอบระบุว่าค่า Normal stress มีผลต่อ Shear stress และ Normal displacement โดยจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า Normal stress เพิ่มขึ้น

จากภาพ 60 ผลแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Stress ratio กับ Horizontal displacement ของทรายแน่น (ภาพ 60a) และทรายหลวม (ภาพ 60b) พบว่า แบบจำลอง rate type สามารถอธิบายพฤติกรรมของ Stress ratio ที่เกิดขึ้นได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ



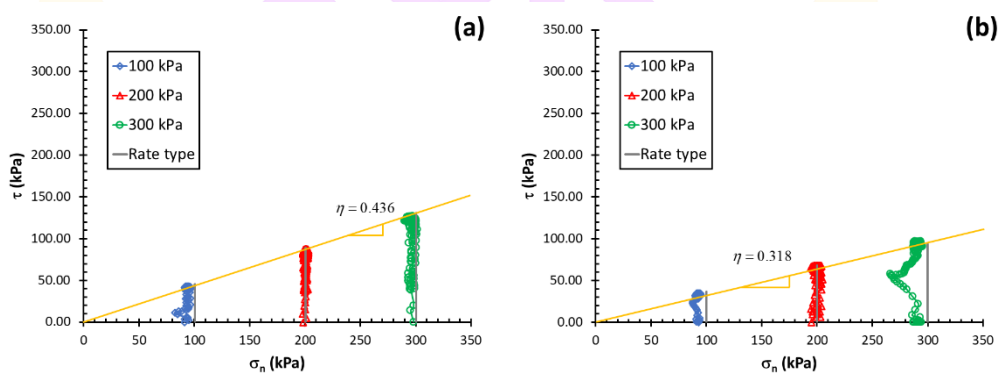
ภาพ 60 ผลแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress (τ) และ Horizontal displacement ($[w]$) ของทรายแน่นและทรายหลวมของแบบจำลอง Rate type

ภาพ 61 ผลแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Normal displacement กับ Horizontal displacement ในกรณีของทรายแน่น (ภาพ 61a) แบบจำลองสามารถอธิบายพฤติกรรมการยุบตัวและขยายตัวที่เกิดขึ้นได้เป็นที่น่าพอใจ ช่วงที่ทรายเริ่มขยายตัวช่วงแรกก่อนที่จะถึงจุดสูงสุด (Peak) ผลที่ได้จากแบบจำลองมีความแตกต่างจากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเล็กน้อย แต่ผลของแบบจำลองหลังจากถึงจุดวิบัติ (Critical) ผลจากแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ในกรณีของทรายหลวม (ภาพ 61b) ในช่วงแรกก่อนถึงจุด Peak แบบจำลองสามารถอธิบายพฤติกรรมการยุบตัวของทรายได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แต่ผลของแบบจำลองหลังจากที่ถึงจุด Critical เป็นต้นไป แบบจำลองอธิบายพฤติกรรมการยุบตัวของทราย แตกต่างจากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ คือ ระบุว่าของการยุบตัวของทรายจากผลแบบจำลองเมื่อถึงจุด Critical การยุบตัวจะคงที่ไปตลอดระยะการเฉือนแต่ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเมื่อถึงจุด Critical ทรายจะมีการยุบตัวต่อไปเล็กน้อยและเริ่มคงที่ตามระยะการเฉือนที่มากขึ้น



ภาพ 61 ผลแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Normal displacement ($[u]$) กับ Horizontal displacement ($[w]$) ของทรายแน่นและทรายหลวมของแบบจำลอง Rate type

ภาพ 62 ผลแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress กับ Normal stress ผลของแบบจำลอง Rate type สามารถอธิบายพฤติกรรมของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ทั้งในกรณีของทรายแน่น (ภาพ 62a) และในกรณีของทรายหลวม (ภาพ 62b) โดยมุมเสียดทานที่ได้จากแบบจำลองได้เท่ากับ 24.981° และมุมเสียดทานที่ได้จากการทดสอบทรายหลวมได้เท่ากับ 18.220°



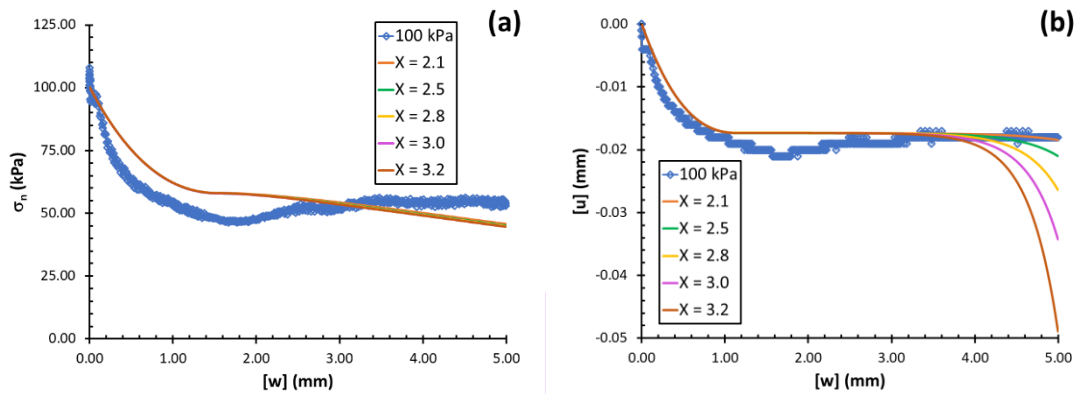
ภาพ 62 ผลแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress (τ) กับ Normal stress (σ_n) ของทรายแน่นและทรายหลวมของแบบจำลอง Rate type

**ผลแบบจำลองความสัมพันธ์เชิงตัวเลขภายใต้สภาวะความแข็งแรงแรงคงที่
(Constant normal stiffness: CNS)**

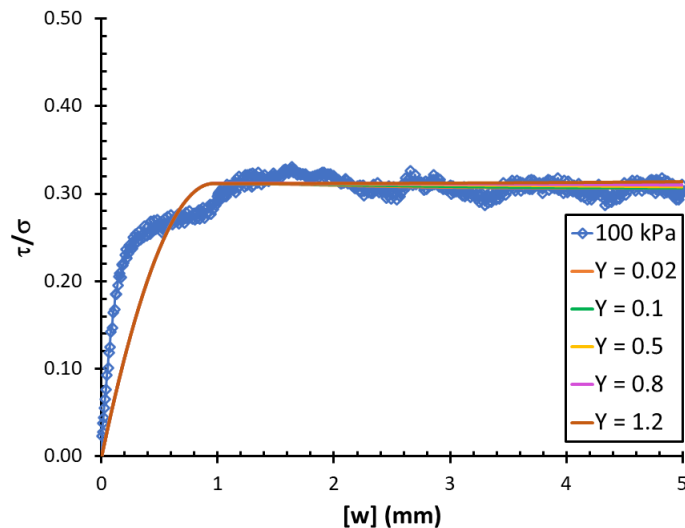
การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบ CNS ได้กำหนดให้ความเค้นตั้งฉาก Normal stress (σ_n) มีค่าคงที่ โดยให้น้ำหนักที่กระทำคือ 100, 200, 300 kPa ในการทดสอบนี้ได้ทดสอบทรายแบบแน่นและแบบหลวม ที่มีความหนาแน่นที่ $D_r = 85\%$ และ $D_r = 35\%$ ตามลำดับ ผลการทดสอบระบุว่าค่า Normal stress มีผลต่อ Shear stress และ Normal displacement โดยในการทดสอบค่า Normal stress จะมีค่าไม่คงที่ตลอดระยะเวลาการเฉือน ในการสร้างแบบจำลองจากข้อมูลที่ได้มาทางผู้วิจัยได้ทำการดูกราฟแต่ละค่าจะเป็นแบบใดเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ X (สมการ 31 และสมการ 32) (2.1, 2.5, 2.8, 3.0 และ 3.2) และพารามิเตอร์ Y (สมการ 30) (0.02, 0.1, 0.5, 0.8 และ 1.2)

จากภาพที่ 63 แสดงผลการเปรียบเทียบการใช้พารามิเตอร์ X ที่แตกต่างกันของสมการ 31 และสมการ 32 ของตัวอย่างทรายหลวม ($D_r = 35\%$) หน่วยแรงตั้งฉาก Normal stress 100 kPa ที่ $k = 3000$ kPa/mm พบว่าพารามิเตอร์ X ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าหน่วยแรงตั้งฉาก (ภาพ 63a) Normal stress น้อยมากโดยยิ่งค่าของพารามิเตอร์ X มากขึ้นจะส่งผลให้แรงหลังจากช่วง Critical condition ลดลงมากขึ้น ในส่วนของการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉาก (ภาพ 63b) Normal displacement พารามิเตอร์ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด โดยพบว่า ค่าของพารามิเตอร์ X มากขึ้นจะส่งผลให้การยุบตัวหลังจากช่วง Critical condition เพิ่มมากขึ้น จากการเปรียบเทียบพบว่า พารามิเตอร์ที่สามารถอธิบายพฤติกรรมได้ดีที่สุด คือ พารามิเตอร์ 2.1

จากภาพ 64 แสดงผลการเปรียบเทียบการใช้พารามิเตอร์ Y ที่แตกต่างกันของสมการ 30 ของตัวอย่างทรายหลวม ($D_r = 35\%$) หน่วยแรงตั้งฉาก Normal stress 100 kPa ที่ $k = 3000$ kPa/mm พารามิเตอร์ Y ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า Stress ratio น้อยมาก และพบว่า ยิ่งพารามิเตอร์ Y มีค่ามากเท่าไรจะส่งผลให้ค่า Stress ratio หลังจากช่วง Critical condition ลดลงมากเท่านั้นและพารามิเตอร์ Y ที่สามารถอธิบายพฤติกรรมได้ดีที่สุด คือ 0.02

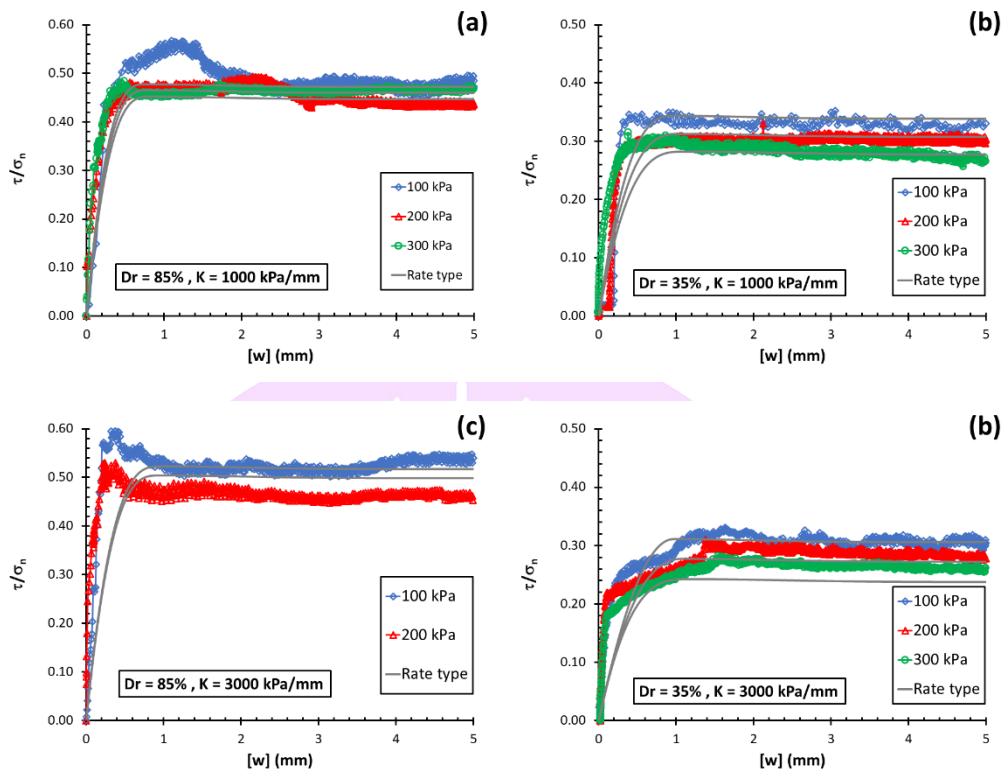


ภาพ 63 ผลการพิจารณาพารามิเตอร์ X ของตัวอย่างทรายหลวม



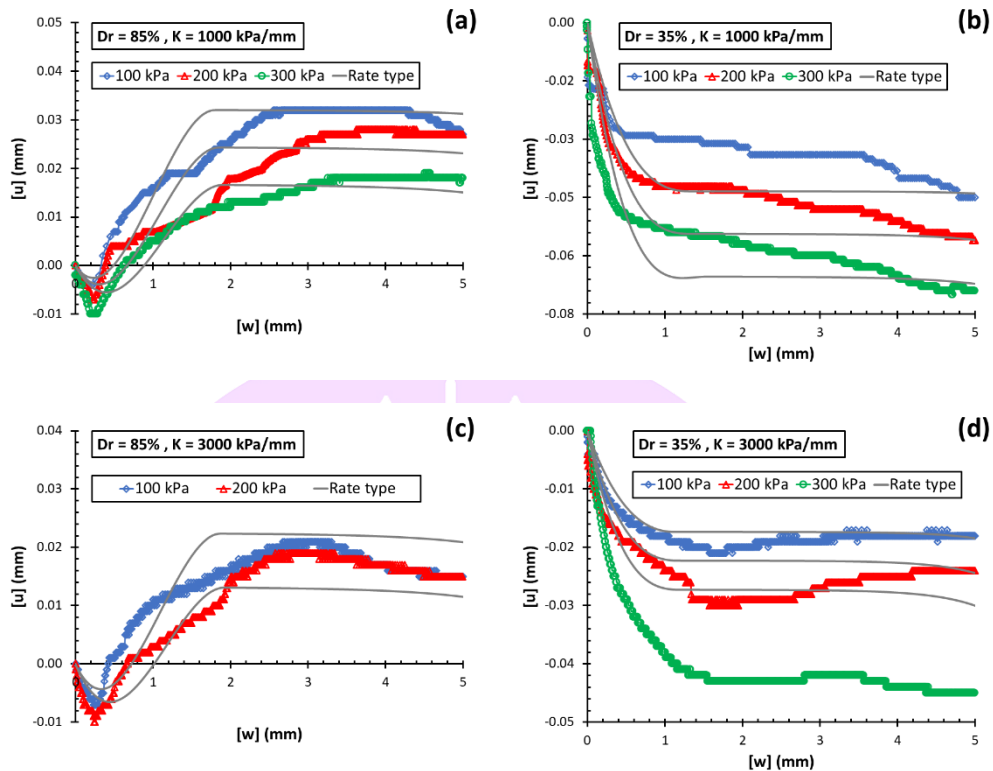
ภาพ 64 ผลการพิจารณาพารามิเตอร์ Y ของตัวอย่างทรายหลวม หน่วยแรงตั้งฉาก (σ_n) 100 kPa ที่ $k = 3,000$ kPa/mm

จากภาพ 65 แสดงผลแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง stress ratio กับ Horizontal displacement ของทรายแน่น (ภาพ 65a และภาพ 65c) และทรายหลวม (ภาพ 65b และภาพ 65d) แบบจำลองสามารถอธิบายพฤติกรรมของ Stress ratio ที่เกิดขึ้นได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องแบบจำลองทั้งในกรณีทรายหลวมและทรายแน่น ภายใต้สภาวะ CNS ที่ $k = 1000$ kPa/mm และที่ $k = 3000$ kPa/mm



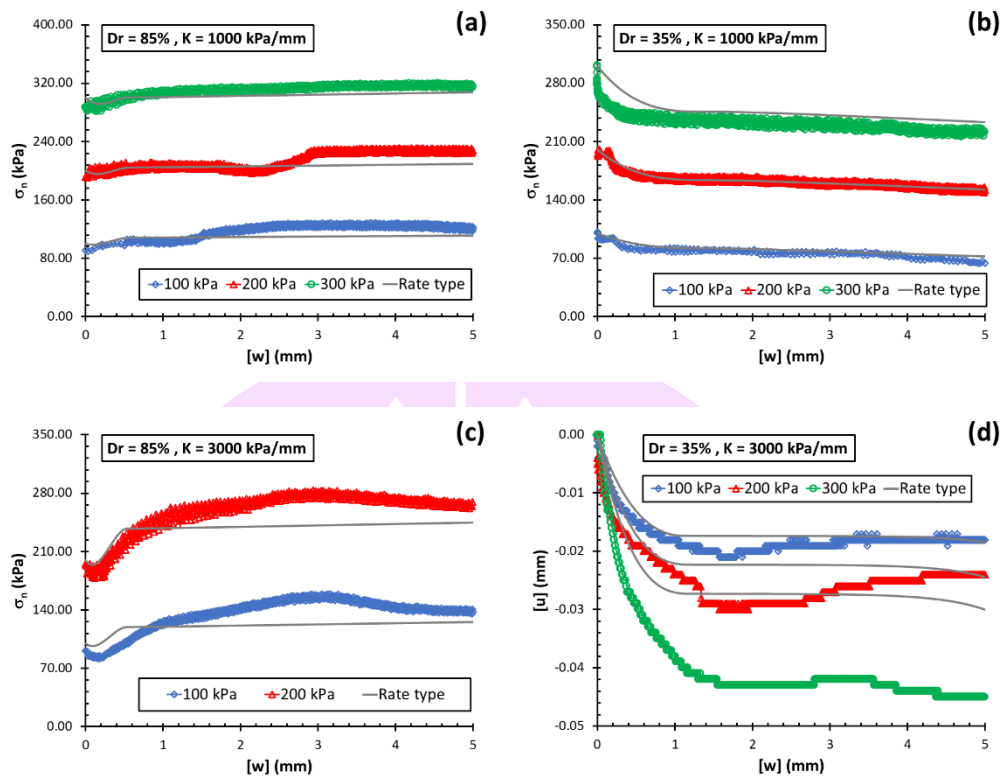
ภาพ 65 ผลแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress (τ) และ Horizontal displacement ($[w]$) ภายใต้สภาวะ CNS ของแบบจำลอง Rate type

ภาพ 66 แสดงผลแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Normal displacement กับ Horizontal displacement ของทรายแน่นและทรายหลวมภายใต้สภาวะ CNS ที่ $k = 1000$ kPa/mm และที่ $k = 3000$ kPa/mm ในกรณีของทรายแน่น (ภาพ 66a และภาพ 66c) แบบจำลองสามารถอธิบายการยุบตัว ขยายตัวที่เกิดขึ้นได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในกรณี $k = 1000$ kPa/mm แต่ในกรณี $k = 3000$ kPa/mm ผลของแบบจำลองแตกต่างจากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเล็กน้อย ในกรณีของทรายหลวม (ภาพ 66b และภาพ 66d) แบบจำลองสามารถอธิบายพฤติกรรมการยุบตัวของทรายได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการแต่ระยะของการยุบตัวของทรายผลของแบบจำลองแตกต่างกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเล็กน้อย



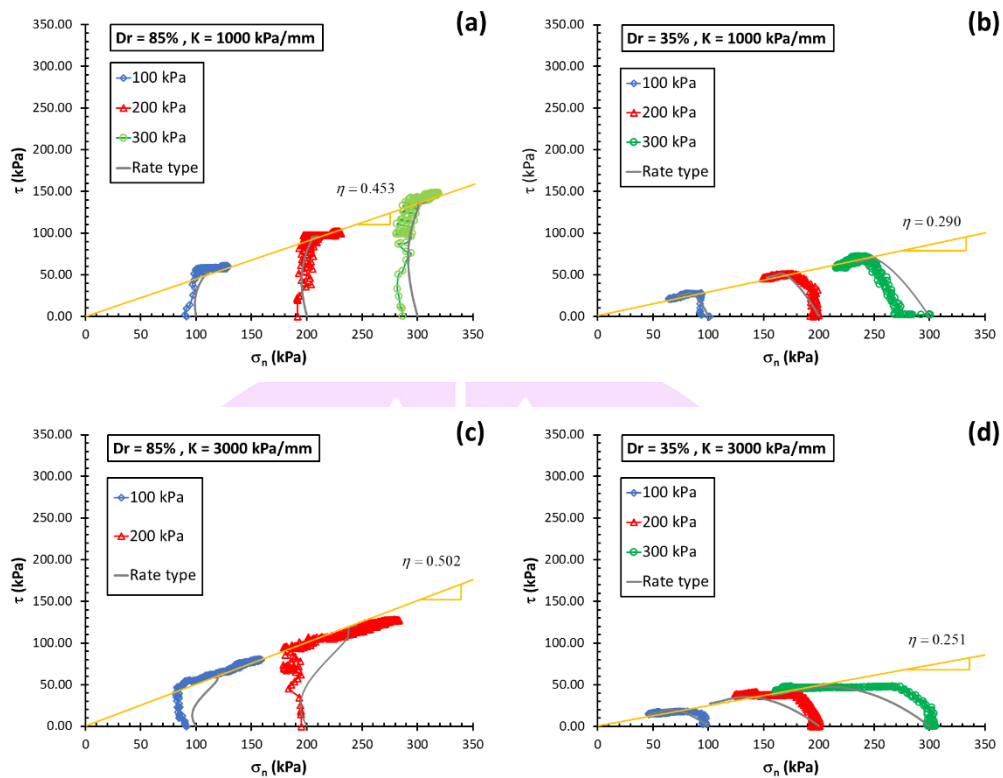
ภาพ 66 ผลแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Normal displacement ($[u]$) กับ Horizontal displacement ($[w]$) ภายใต้สภาวะ CNS ของแบบจำลอง Rate type

ภาพ 67 แสดงผลแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Normal stress กับ Horizontal displacement ในกรณีของทรายแน่น (ภาพ 67a และภาพ 67c) และทรายหลวม (ภาพ 67b และภาพ 67d) ภายใต้สภาวะ CNS ที่ $k = 1000$ kPa/mm และที่ $k = 3000$ kPa/mm แบบจำลองสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ Normal stress ตลอดระยะเวลาการเงื่อนไขได้เป็นที่น่าพอใจทั้งในกรณีทรายหลวมและทรายแน่น และที่ $k = 1000$ kPa/mm และที่ $k = 3000$ kPa/mm แต่ผลของตัวอย่างทรายแน่นที่ $k = 3000$ ขนาดของ Normal stress ที่ได้จากแบบจำลองให้ผลน้อยกว่าผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการเล็กน้อย



ภาพ 67 ผลแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Normal stress (σ_n) กับ Horizontal displacement ($[w]$) ภายใต้สภาวะ CNS ของแบบจำลอง Rate type

ภาพ 68 แสดงผลแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress กับ Normal stress ในกรณีของทรายแน่น (ภาพ 68a และภาพ 68c) และทรายหลวม (ภาพ 68b และภาพ 68d) ภายใต้สภาวะ CNS ที่ $k = 1000$ kPa/mm และที่ $k = 3000$ kPa/mm แบบจำลองสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของหน่วยของ Shear stress และ Normal stress ระหว่างการเฉือนได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการและระนาบหน่วยแรงที่ได้จากแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยในกรณีที่ $k = 1,000$ kPa/mm มุมเสียดทานที่ได้จากแบบจำลองของทรายแน่นได้เท่ากับ 25.955° และมุมเสียดทานที่ได้จากแบบจำลองของทรายหลวมได้เท่ากับ 16.616° โดยในกรณีที่ $k = 3,000$ kPa/mm มุมเสียดทานที่ได้จากแบบจำลองของทรายแน่นได้เท่ากับ 28.762° และมุมเสียดทานที่ได้จากแบบจำลองของทรายหลวมได้เท่ากับ 14.381°



ภาพ 68 ผลแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Normal stress (σ_n) กับ Shear stress (τ) ภายใต้สภาวะ CNS ของแบบจำลอง Rate type

ผลแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม PLAXIS

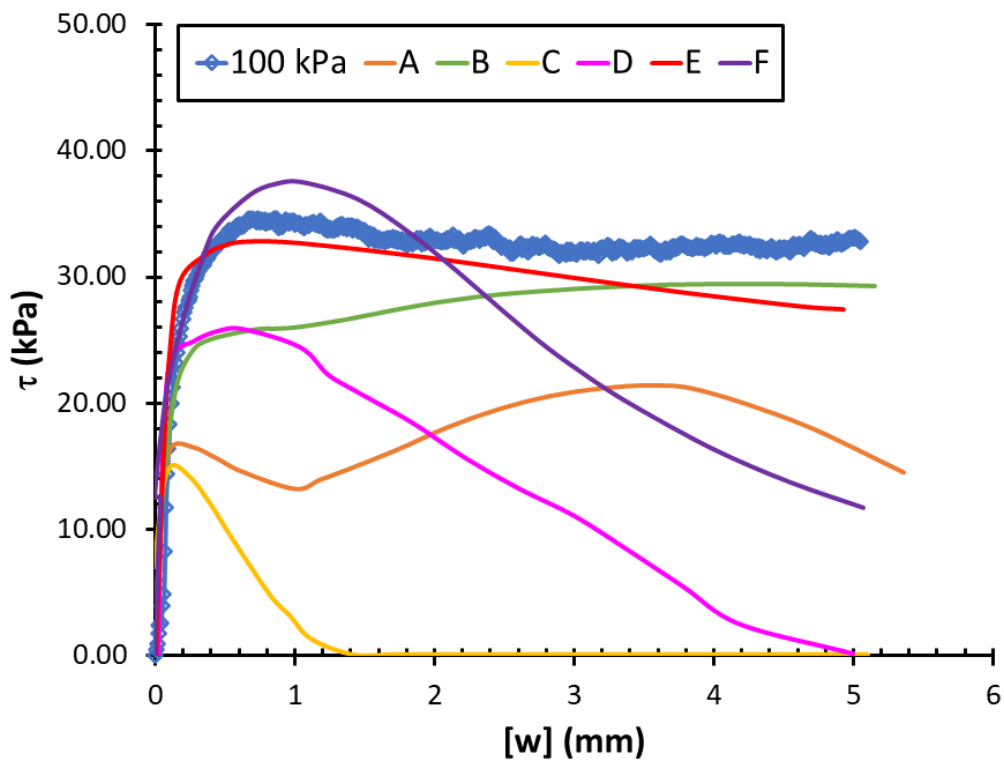
ผลแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ภายใต้สภาวะหน่วยแรงคงที่ (Constant normal load: CNL)

การจำลองพฤติกรรมผิวสัมผัสด้วยโปรแกรม PLAXIS ภายใต้สภาวะหน่วยแรงคงที่ (CNL) จะทำการโดยทำการสร้างแผ่นเหล็กผิวเรียบโดยเปรียบให้เป็นเหมือนผิวโครงสร้าง จากนั้นทำการสร้าง Shear box และทำการสร้างทรายใส่ลงไป ใน Shear box ทำการใส่ Surface load หรือหน่วยแรงตั้งฉากลงไปทีละอย่างทีละอย่าง และทำการเลื่อน Shear box ไป 24 มิลลิเมตร โดยขั้นตอนที่กล่าวมาทั้งหมดเปรียบเสมือนให้เป็นการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

การสังเกตพฤติกรรมผิวสัมผัสในเรื่องแรกจะเป็นการวิเคราะห์ตำแหน่งของทรายที่แตกต่างกัน ในการเลื่อนจะมีผลต่อพฤติกรรมของ Shear stress แตกต่างหรือไม่ โดยจะทำการ Mark point ที่ทราย ระหว่างผิวทรายกับผิวโครงสร้าง เป็นจำนวน 6 จุดที่แตกต่างกัน ดังแสดงในภาพ 45 จะทำการแบ่งแนวจุด Mark point เป็น 2 แนว โดยแนวแรกจะเป็นแนวของ

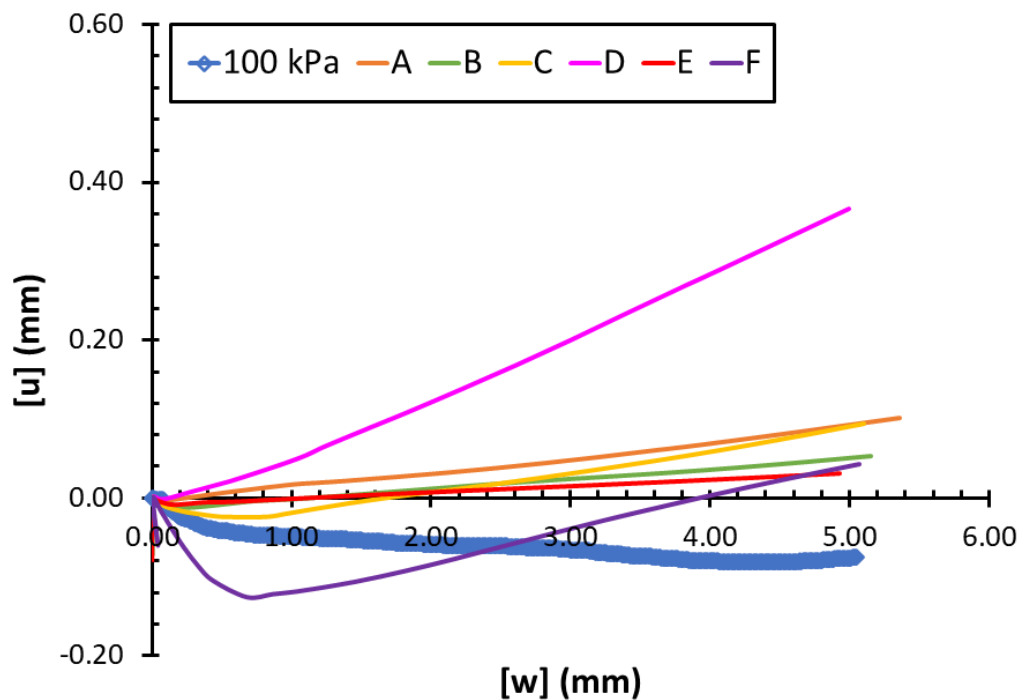
บริเวณข้าง Shear box แนวที่ 2 เป็นแนวของบริเวณกึ่งกลางของตัวอย่างทราย โดยจะ Mark point แนวละ 3 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งด้านหน้าตัวอย่าง ตำแหน่งกึ่งกลางตัวอย่าง และตำแหน่งด้านหลังตัวอย่าง

ผลของ Shear stress กับ Horizontal displacement ในการเปรียบเทียบตำแหน่งที่แตกต่างกัน แสดงในภาพ 69 โดยเป็นตัวอย่างทรายหลวม ($D_r = 35\%$) หน่วยแรงตั้งฉาก Normal stress = 100 kPa ผลของ Shear stress ณ จุด A เมื่อทำการเฉือน Shear stress จะมีค่ามากขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อถึงจุดวิบัติ Shear stress จะตกลงจนถึงระยะเฉือนที่ 1 มิลลิเมตร และเพิ่มขึ้นไปจนถึงระยะเฉือนที่ 4 มิลลิเมตร จากนั้น Shear stress จะตกลงตลอดระยะการเฉือน ผลของ Shear stress ณ จุด B เมื่อทำการเฉือน Shear stress จะมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อถึงจุดสูงสุด (Peak) Shear stress จะมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดระยะการเฉือน และระดับของ Shear stress ที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ผลของ Shear stress ณ จุด C ในขณะที่ทำการเฉือน Shear stress จะมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อถึงจุดสูงสุด (Peak) Shear stress จะมีค่าลดลงไปจนถึงระยะเฉือนที่ 1 มิลลิเมตร จากนั้น Shear stress จะมีค่าคงที่ตลอดระยะการเฉือน ผลของ Shear stress ณ จุด D ในขณะที่ทำการเฉือน Shear stress จะมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อถึงจุดสูงสุด (Peak) Shear stress จะมีค่าลดลงตลอดระยะเฉือน ซึ่งไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมผิวสัมผัสภายใต้สภาวะ CNL ได้เลย ณ จุด E เป็นผลที่สามารถอธิบายพฤติกรรมการเฉือนใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการมากที่สุด โดยจะแตกต่างกันที่ผลของ Shear stress ณ จุด E เมื่อทำการเฉือนไปจนถึง Peak แล้ว Shear stress จะลดลงเล็กน้อยตลอดระยะการเฉือน แต่ระดับของ Shear stress ที่เกิดขึ้นมีผลใกล้เคียงกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ผลของ Shear stress ณ จุด F จะมีความคล้ายคลึงกับจุด D คือ เมื่อทำการเฉือน Shear stress จะมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อถึงจุดสูงสุด (Peak) Shear stress จะมีค่าลดลงตลอดระยะเฉือน ซึ่งไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมผิวสัมผัสภายใต้สภาวะ CNL ได้



ภาพ 69 ผลการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress (τ) และ Horizontal displacement ($[w]$) ของทรายหลวมที่พิจารณาดำแหน่งที่แตกต่างกัน ของตัวอย่าง ของแบบจำลอง PLAXIS

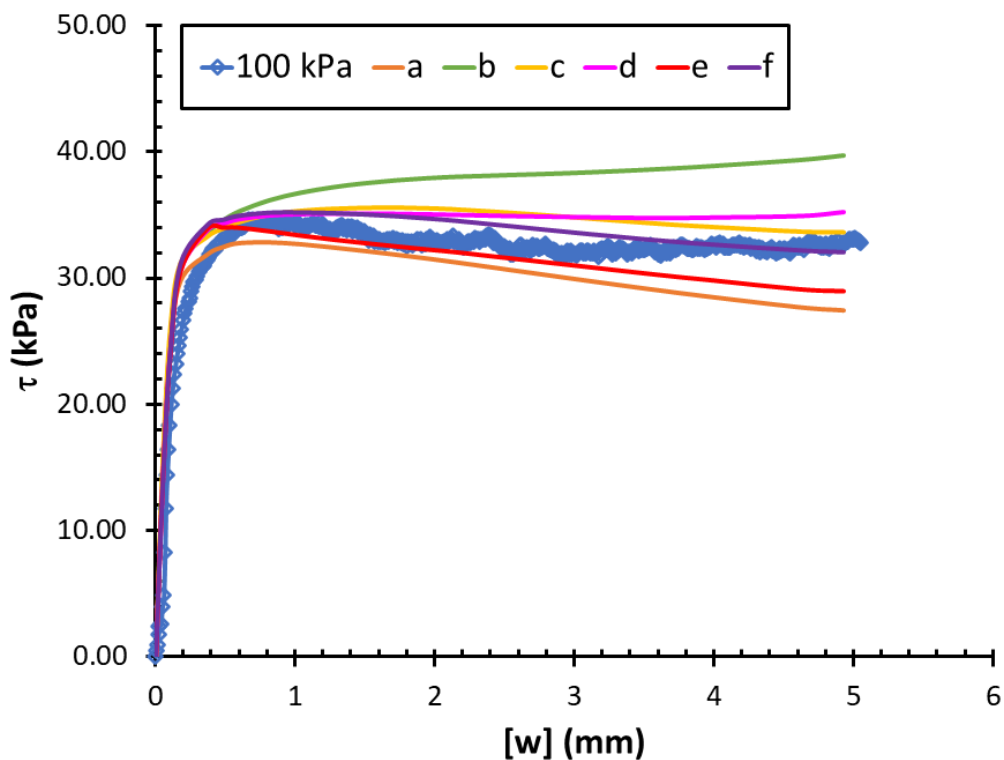
ภาพ 70 แสดงผลของการเปรียบเทียบตำแหน่งที่แตกต่างกันของตัวอย่างต่อผลของ Horizontal displacement กับ Normal displacement โดยเป็นตัวอย่างทรายหลวม ($D_r = 35\%$) หน่วยแรงตั้งฉาก Normal stress = 100 kPa จากผลของแบบจำลองจะเห็นได้ว่า แบบจำลอง PLAXIS ไม่สามารถอธิบายการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉาก (การยุบตัวและการขยายตัว) ของตัวอย่างทรายในสภาวะหน่วยแรงคงที่ได้ โดยพฤติกรรมที่เกิดขึ้นตั้งแต่จุด A ไปจนถึงจุด F มีพฤติกรรมที่เหมือนกัน คือ เมื่อเริ่มการเฉือนตัวอย่างทรายจะยุบตัวตามระยะการเฉือนเมื่อถึงจุด Peak หลังจากนั้นตัวอย่างทรายจะมีการขยายตัวตลอดระยะการเฉือน



ภาพ 70 ผลการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง Normal displacement ($[u]$) กับ Horizontal displacement ($[w]$) ของทรายหลวมที่พิจารณาตำแหน่งที่แตกต่างกันของตัวอย่าง ของแบบจำลอง PLAXIS

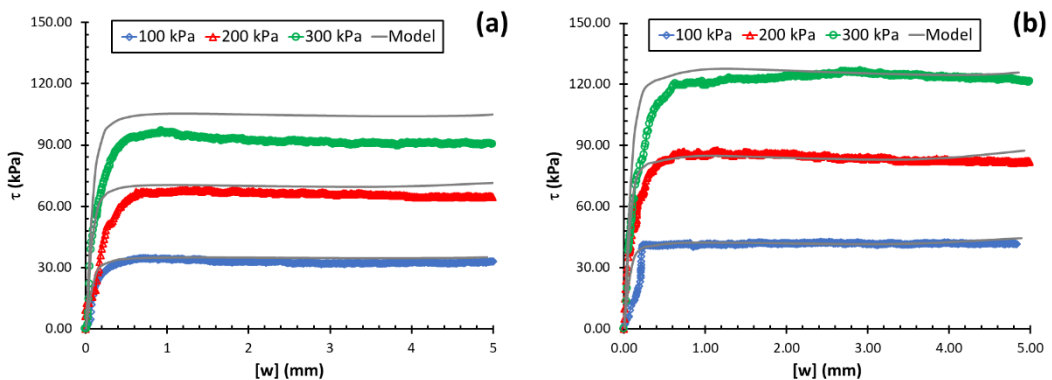
การสังเกตพฤติกรรมผิวสัมผัสในเรื่องต่อมาจะเป็นการวิเคราะห์ว่าที่ระดับความสูงเหนือผิวสัมผัสที่แตกต่างกันจะมีผลต่อพฤติกรรม Shear stress แตกต่างอย่างไร โดยจะทำการ Mark point บริเวณจุด E ที่ระดับเหนือผิวสัมผัสที่แตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 46 โดยผลของ Shear stress กับ Horizontal displacement ในการเปรียบเทียบความสูงเหนือผิวสัมผัสที่แตกต่างกัน แสดงในภาพ 71 แสดงผลการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress และ Horizontal displacement ของทรายหลวม หน่วยแรงตั้งฉาก Normal stress = 100 kPa ที่พิจารณาความสูงที่แตกต่างกันของตัวอย่างของแบบจำลอง PLAXIS จากภาพจะเห็นได้ว่า ในการทดสอบพฤติกรรมรับแรงเฉือนแบบ CNL ตำแหน่งที่ความสูงเหนือผิวสัมผัสที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ผลของแบบจำลองมีความแตกต่างกัน โดยตำแหน่ง a เมื่อทำการเฉือนไปจนถึงจุด peak หลังจากนั้นค่า Shear stress จะลดลงตลอดระยะเวลาการเฉือน ซึ่งพฤติกรรมนี้ไม่ใช่พฤติกรรมของผิวสัมผัสภายใต้สภาวะ CNL ตำแหน่ง b เมื่อทำการเฉือนไปจนถึงจุด peak ค่า Shear stress

จะเพิ่มขึ้นตลอดระยะการเฉือน ซึ่งไม่ใช่พฤติกรรมของ CNL ตำแหน่ง c เมื่อทำการเฉือนไปจนถึงจุด peak ค่า Shear stress จะลดลงเล็กน้อยตลอดระยะการเฉือน ตำแหน่ง d เป็นตำแหน่งที่อธิบายพฤติกรรมผิวสัมผัสของ Shear stress ภายใต้สภาวะ CNL ได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการมากที่สุด โดยเมื่อทำการเฉือนไปจนถึงจุด peak ค่า Shear stress จะมีค่าค่อนข้างคงที่ไปตลอดระยะการเฉือน โดยในช่วงท้ายของระยะเฉือน (4 มิลลิเมตร) เป็นต้นไป ค่า Shear stress จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ตำแหน่ง e พฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะเหมือนกับตำแหน่ง a แต่ระดับของ Shear stress จะมากกว่าตำแหน่ง a ตำแหน่ง f พฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะเหมือนกับตำแหน่ง c แต่ระดับของ Shear stress ที่เกิดขึ้นจะน้อยกว่าตำแหน่ง c เล็กน้อย สามารถสรุปได้ว่าตำแหน่งความสูงที่สามารถอธิบายพฤติกรรมผิวสัมผัสภายใต้สภาวะ CNL ได้ดีที่สุด คือ ตำแหน่ง d (เหนือระดับผิวสัมผัสประมาณ 1 มิลลิเมตร)



ภาพ 71 ผลการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress (τ) และ Horizontal displacement ($[w]$) ของทรายหลวมที่พิจารณาความสูงที่แตกต่างกัน ของตัวอย่าง ของแบบจำลอง PLAXIS

เมื่อพิจารณาทั้งความแตกต่างของตำแหน่งและความสูงที่แตกต่างกับเหนือผิวสัมผัส โดยใช้ตัวอย่างทรายหลวม ที่หน่วยแรงตั้งฉาก Normal stress = 100 kPa พบว่า ตำแหน่งที่สามารถอธิบายพฤติกรรมผิวสัมผัสได้ดีที่สุดคือตำแหน่งกึ่งกลางของตัวอย่างทราย (ตำแหน่ง E) และความสูงเหนือผิวสัมผัสที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของผิวสัมผัสได้ดีที่สุด คือ ตำแหน่งที่ใกล้ผิวสัมผัสที่สุด (ตำแหน่ง d) ผลของการพิจารณาทั้งตำแหน่งและความสูงเหนือผิวสัมผัส จะแสดงดังภาพ 72 แสดงผลแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress และ Horizontal displacement ของทรายหลวม (ภาพ 72a) และทรายแน่น (ภาพ 72b) ภายใต้สภาวะ CNL



ภาพ 72 ผลแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress (τ) และ Horizontal displacement ($[w]$) ภายใต้สภาวะ CNL ของแบบจำลอง PLAXIS

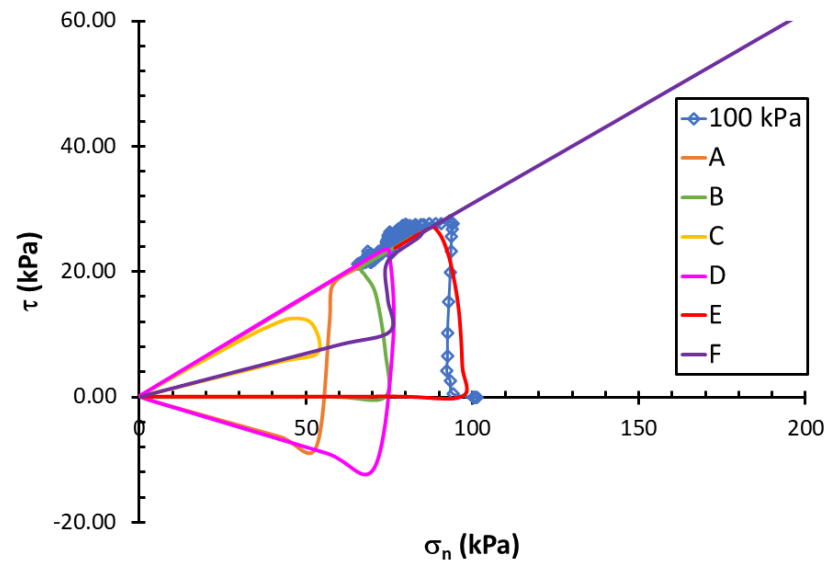
ผลแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ภายใต้สภาวะความแข็งแรงแรงคงที่ (Constant normal stiffness: CNS)

การจำลองพฤติกรรมผิวสัมผัสด้วยโปรแกรม PLAXIS ภายใต้สภาวะความแข็งแรงแรงคงที่ (CNS) วิธีการจะไม่แตกต่างจากสภาวะหน่วยแรงแรงคงที่ (CNL) มากนัก ความแตกต่าง คือ ในสภาวะความแข็งแรงแรงคงที่ โปรแกรม PLAXIS ไม่สามารถกำหนดค่าความแข็งแรงแรงของดินได้ (Stiffness) จึงต้องทำการแก้ปัญหาโดยอ้างอิงจากสมการที่ 33 โดยการสร้าง Top cap และกำหนดค่า E ของ Top cap และเปลี่ยนตำแหน่งของ Surface load จากตำแหน่งบนตัวอย่างทรายไปอยู่ที่ตำแหน่งของบน Top cap แทน จากนั้นทำการทดสอบตัวอย่างไม่ต่างจากสภาวะหน่วยแรงแรงคงที่

ในการพิจารณาพฤติกรรมผิวสัมผัสในสภาวะความแข็งแรงแรงคงที่ จะทำการพิจารณา 2 เรื่อง คือ ตำแหน่งของทรายที่แตกต่างกันในการเลื่อนจะมีผลต่อพฤติกรรมของ Shear stress ที่แตกต่างกันหรือไม่ และระดับความสูงเหนือผิวสัมผัสที่แตกต่างกันจะมีผลต่อพฤติกรรม

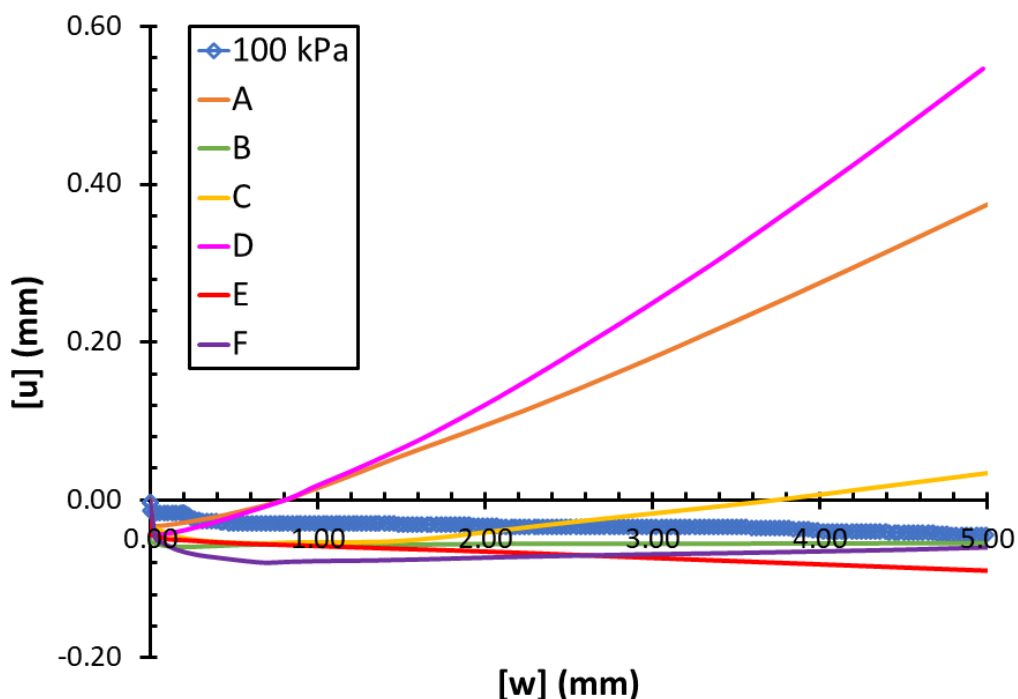
Shear stress แตกต่างกันหรือไม่ ตำแหน่งของทรายที่แตกต่างกันจะพิจารณาจุด Mark point ดังแสดงในภาพที่ 45 และความสูงเหนือผิวสัมผัสจะพิจารณาจุด Mark point ดังแสดงในภาพที่ 46

ภาพ 73 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress (τ) กับ Normal stress (σ_n) ของทรายทรายหลวม ที่หน่วยแรงตั้งฉาก Normal stress = 100 kPa ที่ $k = 1000$ kPa/mm ที่พิจารณาตำแหน่งของทรายที่แตกต่างกัน ในตำแหน่ง A เมื่อเริ่มการเฉือนค่า Shear stress จะเพิ่มขึ้นตามระยะการเฉือนเมื่อถึงจุด Peak ค่า Normal stress จะเพิ่มขึ้นไประยะหนึ่ง ส่งผลให้ Shear stress มีค่ามากขึ้นตาม จากนั้นค่า Normal stress จะมีค่าลดลงตลอดระยะการเฉือน ส่งผลให้ Shear stress ลดลงตลอดระยะเฉือนเช่นกัน ในตำแหน่ง B เมื่อเริ่มการเฉือนค่า Shear stress จะเพิ่มขึ้นตามระยะการเฉือน เมื่อใกล้ถึงจุด Peak ค่า Normal stress จะลดลงเล็กน้อย จากนั้นจะเพิ่มขึ้นตลอดระยะการเฉือน ซึ่ง Shear ก็มีพฤติกรรมเช่นเดียวกัน ในตำแหน่ง C เมื่อเริ่มเฉือนค่า Shear stress จะเพิ่มขึ้นตามระยะการเฉือน แต่ระดับการเพิ่มของ Shear stress จะน้อยกว่าตำแหน่ง A และตำแหน่ง B จากนั้น Normal stress จะลดลงตลอดระยะการเฉือน ส่งผลให้ Shear stress ลดลงตามเช่นกัน ลักษณะการเพิ่มและลดของระดับ Shear stress กับ Normal stress แตกต่างกับตำแหน่ง A และ B อย่างชัดเจน ในตำแหน่ง D พฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะคล้ายคลึงกับพฤติกรรมในตำแหน่ง A สิ่งที่แตกต่างกันคือ ระดับ Normal stress ที่เกิดขึ้นมีมากกว่าตำแหน่ง A แต่ระดับ Shear stress ที่เกิดขึ้นนั้นใกล้เคียงกับตำแหน่ง A ในตำแหน่ง E เมื่อเริ่มการเฉือนค่า Normal stress จะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ Shear stress มีค่าเพิ่มขึ้นตาม และเมื่อถึงจุด Peak ค่า Normal stress จะลดลงตลอดระยะการเฉือน ส่งผลให้ Shear stress ลดลงตลอดระยะการเฉือนเช่นกันที่ตำแหน่ง E ค่า Shear stress กับ Normal stress ที่เกิดขึ้นมีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากที่สุด ในตำแหน่ง F เมื่อเริ่มเฉือน Shear stress จะเพิ่มขึ้นตามระยะการเฉือน เมื่อถึงจุด Peak ค่า Normal stress จะเพิ่มขึ้นตลอดระยะการเฉือน ส่งผลให้ Shear stress เพิ่มขึ้นตาม หากทำการสังเกตจากตำแหน่งทั้งหมดจะเห็นว่าตำแหน่ง A B C D และ F มีระดับ Normal stress เริ่มต้นก่อนที่จะทำการเฉือนไม่ตรงกับการตั้งค่าไว้ในตอนแรก มีเพียงตำแหน่ง E เท่านั้นที่ระดับ Normal stress เริ่มต้นก่อนการเฉือนนั้นมีค่าตรงกับที่ตั้งค่าไว้ จากภาพที่ 67 สามารถสรุปได้ว่าตำแหน่ง E หรือกึ่งกลางของตัวอย่างสามารถอธิบายพฤติกรรมการเฉือนของสถานะความแข็งแรงคงที่ (CNS) ได้ดีที่สุด



ภาพ 73 ผลการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง Normal stress (σ_n) กับ Shear stress (τ) ของทรายหลวมภายใต้สภาวะ CNS ที่พิจารณาตำแหน่งที่แตกต่างกัน ของตัวอย่าง ของแบบจำลอง PLAXIS

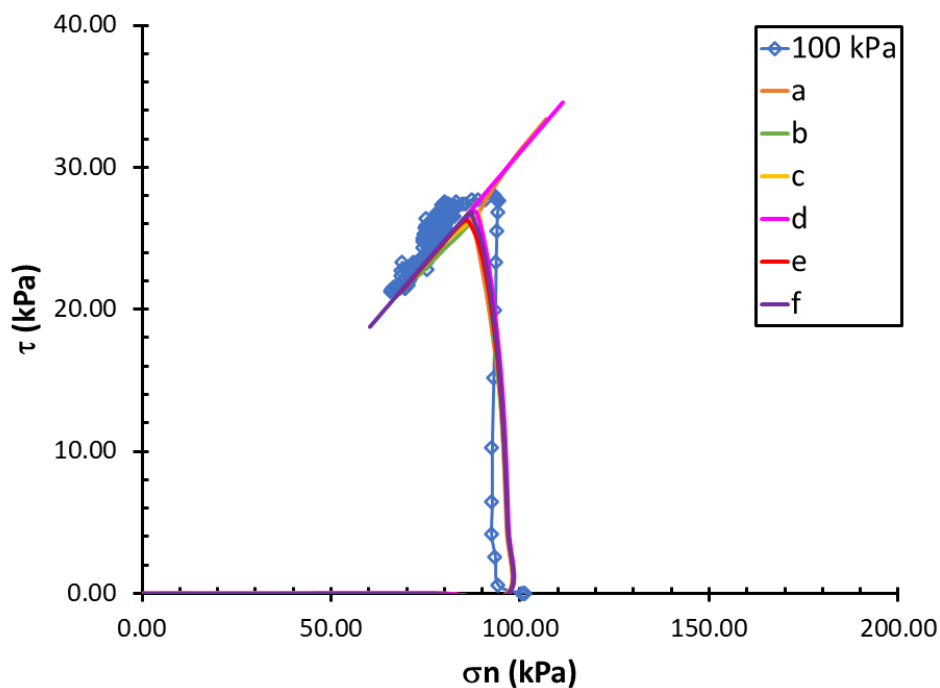
ภาพ 74 แสดงผลของการเปรียบเทียบตำแหน่งที่แตกต่างกันของตัวอย่างต่อผลของ Horizontal displacement กับ Normal displacement ของทรายทรายหลวม ที่หน่วยแรงตั้งฉาก Normal stress = 100 kPa ที่ $k = 1000$ kPa/mm จากแบบจำลองจะเห็นได้ว่า แบบจำลอง PLAXIS ไม่สามารถอธิบายการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉาก (การยุบตัวและการขยายตัว) ของตัวอย่างทราย ในสภาวะความแข็งแรงแรงคงที่ได้



ภาพ 74 ผลการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง Normal displacement ($[u]$) กับ Horizontal displacement ($[w]$) ของทรายหลุมภายใต้สภาวะ CNS ที่พิจารณาตำแหน่งที่แตกต่างกันของตัวอย่าง ของแบบจำลอง PLAXIS

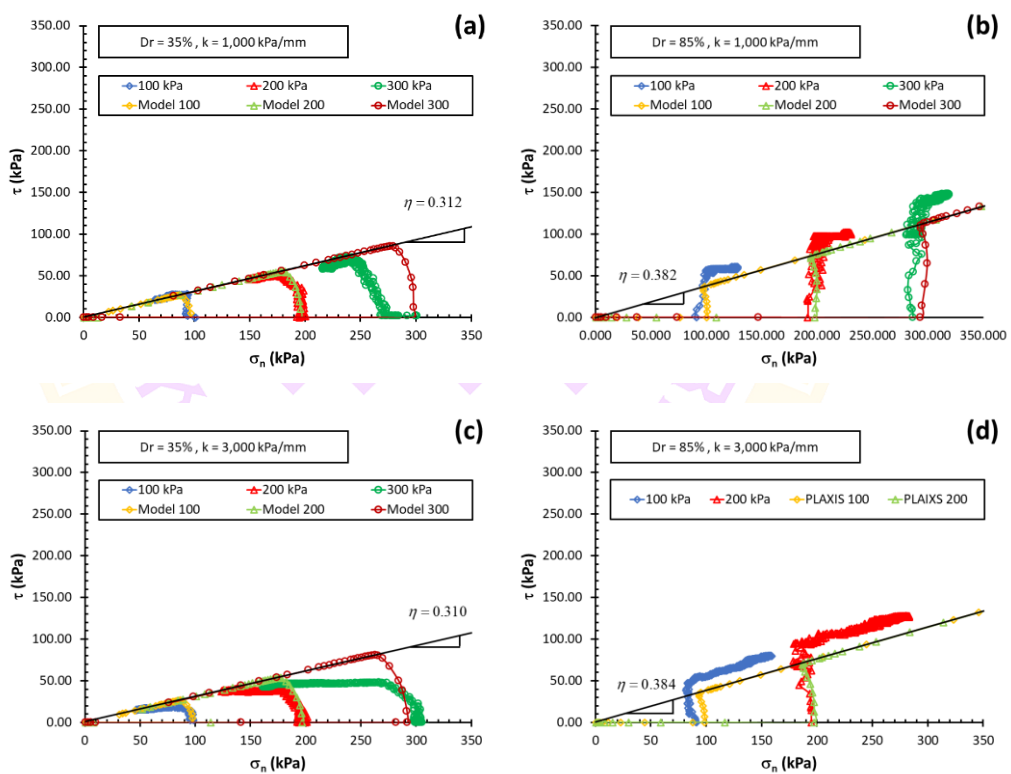
ภาพ 75 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress กับ Normal stress ของทรายหลุมที่หน่วยแรงตั้งฉาก Normal stress = 100 kPa ในการพิจารณาความสูงเหนือผิวสัมผัสที่แตกต่างกันในตำแหน่ง A เมื่อเริ่มเฉือน Shear stress จะเพิ่มขึ้นตามระยะการเฉือน และเมื่อถึงจุด Peak ค่า Normal stress จะเพิ่มขึ้นตลอดระยะการเฉือน ส่งผลให้ Shear stress มีค่าเพิ่มขึ้นตามในตำแหน่ง B เมื่อเริ่มเฉือน Shear stress จะเพิ่มขึ้นตามระยะการเฉือน เมื่อถึงจุด Peak ค่า Normal stress จะลดลงไปตามระยะเฉือนระยะหนึ่ง จากนั้นจะเพิ่มขึ้นตลอดระยะการเฉือน ส่งผลให้ Shear stress ลดลงระยะหนึ่ง จากนั้นจะเพิ่มขึ้นตลอดระยะการเฉือน ในตำแหน่ง C จะมีพฤติกรรมคล้ายกับตำแหน่ง B สิ่งที่แตกต่างกันคือ เมื่อถึงจุด Peak ค่า Normal stress จะลดลงไปตามระยะเฉือนระยะหนึ่ง ซึ่งระดับการลดลงของ Normal stress จะน้อยกว่าตำแหน่ง B จากนั้น Normal stress จะเพิ่มขึ้นตลอดระยะเฉือนเช่นเดียวกับตำแหน่ง B ในตำแหน่ง D จะมีพฤติกรรมคล้ายกับตำแหน่ง B และตำแหน่ง C สิ่งที่แตกต่างกัน คือ เมื่อถึงจุด Peak ค่า Normal stress

จะลดลงไปตามระยะเฉือนระยะหนึ่ง ซึ่งระดับการลดลงของ Normal stress จะน้อยกว่าตำแหน่ง B และตำแหน่ง C จากนั้น Normal stress จะเพิ่มขึ้นตลอดระยะเฉือนเช่นเดียวกับ B และตำแหน่ง C ในตำแหน่ง E เมื่อเริ่มเฉือน Shear stress จะเพิ่มขึ้นตามระยะการเฉือน และเมื่อถึงจุด Peak ค่า Normal stress จะลดลงตลอดระยะการเฉือน ส่งผลให้ค่า Shear stress ลดลงตลอดระยะการเฉือนเช่นเดียวกัน ในตำแหน่ง F จะมีพฤติกรรมคล้ายกับตำแหน่ง E สิ่งที่แตกต่างกัน คือ เมื่อถึงจุด Peak ระดับการลดลงของ Normal stress ตลอดระยะการเฉือนจะน้อยกว่าตำแหน่ง E ส่งผลให้ Shear stress ลดลงตลอดระยะการเฉือนเช่นเดียวกัน และมีขนาดของ Shear stress น้อยกว่าตำแหน่ง E เช่นกัน จากการพิจารณาพบว่า ตำแหน่งที่สามารถอธิบายพฤติกรรมได้ดีที่สุด คือ ตำแหน่ง F หรือตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับผิวสัมผัสมากที่สุด



ภาพ 75 ผลการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง Normal stress (σ_n) กับ Shear stress (τ) ของทรายหลวมที่พิจารณาความสูงที่แตกต่างกันของตัวอย่างของแบบจำลอง PLAXIS

เมื่อนำผลที่ได้จากการพิจารณาทั้งผลของตำแหน่งที่แตกต่างกันของตัวอย่างและผลของตำแหน่งความสูงเหนือผิวสัมผัส สามารถสรุปได้ว่าตำแหน่งที่ดีที่สุดในการวิเคราะห์พฤติกรรมผิวสัมผัสในสภาวะความแข็งแรงคงที่ (CNS) คือ ตำแหน่งกึ่งกลางของตัวอย่าง (ตำแหน่ง E) ที่ความสูงใกล้เคียงกับผิวสัมผัสมากที่สุด (ตำแหน่ง F) ผลที่ได้จากการนำตำแหน่งที่ได้ไปใช้กับตัวอย่างอื่น ๆ ของการทดสอบจะแสดงดังภาพ 76 แสดงผลแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Normal stress และ Shear stress ของทรายหลวม (ภาพ 76a และภาพ 76c) และทรายแน่น (ภาพ 76b และภาพ 76d) ภายใต้สภาวะ CNS โดยในกรณีนี้ที่ $k = 1,000$ kPa/mm มุมเสียดทานที่ได้จากแบบจำลองของทรายแน่นได้เท่ากับ 21.887° และมุมเสียดทานที่ได้จากแบบจำลองของทรายหลวมได้เท่ากับ 17.876° โดยในกรณีนี้ที่ $k = 3,000$ kPa/mm มุมเสียดทานที่ได้จากแบบจำลองของทรายแน่นได้เท่ากับ 22.002° และมุมเสียดทานที่ได้จากแบบจำลองของทรายหลวมได้เท่ากับ 17.762°



ภาพ 76 ผลแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Normal stress (σ_n) กับ Shear stress (τ) ภายใต้สภาวะ CNS ของแบบจำลอง PLAXIS

บทที่ 5

บทสรุป

สรุปผลการวิจัย

การทดสอบพฤติกรรมผิวสัมผัสโดยการจำลองการทดสอบแรงเฉือนโดยใช้แผ่นเหล็กผิวเรียบด้านล่าง เปรียบเสมือนผิวโครงสร้างทำการเชื่อมกับทรายที่มีความหนาแน่นสองความหนาแน่น คือ $Dr = 35\%$ และ $Dr = 85\%$ โดยใช้หน่วยแรงตั้งฉากสามหน่วยแรง คือ 100, 200 และ 300 kPa ในการทดสอบมีสองสถานะที่ศึกษา คือ สถานะหน่วยแรงคงที่ (CNL) และสถานะความแข็งแรงคงที่ (CNS) ผลการศึกษา พบว่า ในสถานะหน่วยแรงคงที่ หน่วยแรงตั้งฉาก Normal stress ที่กระทำกับตัวอย่างทรายจะคงที่ตลอดระยะเวลาการเฉือน ส่งผลให้แรงเฉือน Shear stress ที่เกิดขึ้นจากการเฉือนหลังจากช่วง Critical condition คงที่ตลอดระยะเวลาการเฉือนและภายใต้สถานะความแข็งแรงคงที่ค่า Normal stress มีผลต่อ Shear stress และ Normal displacement โดยในระหว่างการทดสอบค่า Normal stress จะมีค่าไม่คงที่ตลอดระยะเวลาการเฉือนเมื่อในกรณีทรายหลวม ($Dr = 35\%$) ทรายมีการยุบตัวตลอดระยะเวลาการเฉือน ส่งผลให้ค่า Normal stress ลดลงและเนื่องจากค่า Normal stress ลดลงส่งผลให้ค่า Shear stress ลดลงตามไปด้วย กลับกันในตัวอย่งทรายแน่น ($Dr = 85\%$) หลังทำการเฉือนผ่านช่วง Critical condition ทรายจะมีการขยายตัว ส่งผลให้ค่า Normal stress เพิ่มขึ้น และเนื่องจากค่า Normal stress เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า Shear stress ลดลงตามไปด้วย ผลการทดสอบทั้งสองสถานะ พบว่า สถานะทั้งสองสถานะไม่ส่งผลต่ออัตราส่วนหน่วยแรง (Stress ratio) ที่เกิดขึ้น หรือส่งผลที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยในสถานะ CNL มุมเสียดทานที่ได้จากการทดสอบทรายแน่นได้เท่ากับ 23.778° และมุมเสียดทานที่ได้จากการทดสอบทรายหลวมได้เท่ากับ 18.163° และในสถานะ CNS กรณีที่ $k = 1,000$ kPa/mm มุมเสียดทานที่ได้จากการทดสอบทรายแน่นได้เท่ากับ 26.070° และมุมเสียดทานที่ได้จากการทดสอบทรายหลวมได้เท่ากับ 16.215° โดยในกรณีที่ $k = 3,000$ kPa/mm มุมเสียดทานที่ได้จากการทดสอบทรายแน่นได้เท่ากับ 27.674° และมุมเสียดทานที่ได้จากการทดสอบทรายหลวมได้เท่ากับ 15.584°

แบบจำลองพฤติกรรมผิวสัมผัสด้วยความสัมพันธ์เชิงตัวเลขด้วยวิธี Rate type สามารถอธิบายพฤติกรรมผิวสัมผัสได้ดีในระยะเวลาการเฉือนที่มาก ไม่ว่าจะเป็นสถานะ CNL และในสถานะ CNS โดยในสถานะ CNL มุมเสียดทานที่ได้จากแบบจำลองได้เท่ากับ 24.981° และมุมเสียดทานที่ได้

จากการทดสอบทรายหลวมได้เท่ากับ 18.220° และในสภาวะ CNS กรณีที่ $k = 1,000$ kPa/mm มุมเสียดทานที่ได้จากแบบจำลองของทรายแน่นได้เท่ากับ 25.955° และมุมเสียดทานที่ได้จากแบบจำลองของทรายหลวมได้เท่ากับ 16.616° โดยในกรณีที่ $k = 3,000$ kPa/mm มุมเสียดทานที่ได้จากแบบจำลองของทรายแน่นได้เท่ากับ 28.762° และมุมเสียดทานที่ได้จากแบบจำลองของทรายหลวมได้เท่ากับ 14.381° โดยตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้มาได้มาจากการค่าสูงสุด (Peak) ของแต่ละตัวแปร เช่น $[w]_p$, $[u]_p$, τ/σ_{np} , σ_{np} และค่าวิกฤติ (Critical) ของแต่ละตัวแปร เช่น $[w]_+$, $[u]_+$, τ/σ_{n+} , σ_{n+} ความลาดชันช่วงก่อน Peak condition (ω_0 , α_0 และ β_0) และความลาดชันช่วง Critical condition (ω_+ , α_+ และ β_+) จากการเปรียบเทียบตัวแปรที่ใช้ในสมการสร้างแบบจำลอง ทั้งตัวแปร X (สมการ 31 และสมการ 32) และตัวแปร Y (สมการ 30) พบว่า ทั้งพารามิเตอร์ X และพารามิเตอร์ Y ส่งผลต่อพฤติกรรมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ความแตกต่างในระหว่างขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ช่วงก่อนอัตราส่วนหน่วยแรงสูงสุด (η_{peak}) และหลังจากอัตราส่วนหน่วยแรงสูงสุด (η_{crit})

แบบจำลองพฤติกรรมผิวสัมผัสด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม PLAXIS 3D สามารถอธิบายพฤติกรรมผิวสัมผัสได้ดีในสภาวะ CNL แต่ในสภาวะ CNS ผลของแบบจำลองสามารถอธิบายพฤติกรรมได้เป็นอย่างดี แต่ระดับของหน่วยแรงที่เกิดขึ้น ไม่ว่าจะเป็น Shear stress และ Normal stress ของแบบจำลองไม่เท่ากับผลการทดสอบจริง ในกรณีทรายหลวมหน่วยแรงที่ได้จากแบบจำลองจะมากกว่าผลการทดสอบจริง ในกรณีของทรายแน่นหน่วยแรงที่ได้จากแบบจำลองจะน้อยกว่าผลการทดสอบจริง และด้วยข้อจำกัดของแบบจำลอง Mohr coulomb ที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นได้ดี แต่ไม่สามารถอธิบายการยุบตัวและการขยายตัวของทรายได้ ส่งผลให้ผลของแบบจำลองไม่สามารถอธิบายการยุบตัวหรือขยายตัวได้ ในกรณีที่ $k = 1,000$ kPa/mm มุมเสียดทานที่ได้จากแบบจำลองของทรายแน่นได้เท่ากับ 21.887° และมุมเสียดทานที่ได้จากแบบจำลองของทรายหลวมได้เท่ากับ 17.876° โดยในกรณีที่ $k = 3,000$ kPa/mm มุมเสียดทานที่ได้จากแบบจำลองของทรายแน่นได้เท่ากับ 22.002° และมุมเสียดทานที่ได้จากแบบจำลองของทรายหลวมได้เท่ากับ 17.762° ในการพิจารณาได้พิจารณาถึงความแตกต่างของตำแหน่งของตัวอย่างทรายส่งผลอย่างไรต่อพฤติกรรมผิวสัมผัส พบว่า ตำแหน่งที่สามารถอธิบายพฤติกรรมผิวสัมผัสได้ดีที่สุด คือ ตำแหน่งกึ่งกลางของตัวอย่างทราย และในการพิจารณาความแตกต่างตำแหน่งความสูงเหนือผิวสัมผัสส่งผลอย่างไรต่อพฤติกรรมผิวสัมผัส พบว่า ตำแหน่งที่สามารถอธิบายพฤติกรรมผิวสัมผัสได้ดีที่สุด

คือ ตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับผิวสัมผัสมากที่สุด กล่าวคือยิ่งใกล้เคียงผิวสัมผัสมากเพียงใดก็จะยิ่งส่งผลต่อความแม่นยำของแบบจำลองมากขึ้นเท่านั้น

อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่า ผลการทดสอบมีความสอดคล้องกับผลการศึกษาที่ผ่านมา ทั้งภายใต้สภาวะ CNL และสภาวะ CNS สามารถอธิบายอิทธิพลของโครงสร้างผิวเรียบที่มีต่อพฤติกรรมผิวสัมผัส คือ ในระหว่างการทำการเฉือนอนุภาคทราย มีการแตกน้อยกว่าผิวโครงสร้างที่ขรุขระ ส่งผลให้พฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของปริมาตร (การยุบตัวและการขยายตัว) และการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงจะน้อยกว่าเมื่อเทียบกับพฤติกรรมผิวสัมผัสของโครงสร้างผิวขรุขระและสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ว่า พฤติกรรมผิวสัมผัสภายใต้สภาวะ CNL และสภาวะ CNS ผลของพฤติกรรมทั้งสองมีผลต่อมุมเสียดทานที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงและปริมาตรบริเวณผิวสัมผัส

ผลของแบบจำลองพฤติกรรมผิวสัมผัสด้วยความสัมพันธ์เชิงตัวเลขด้วยวิธี Rate type สามารถอธิบายพฤติกรรมผิวสัมผัสได้ดีในระยะเวลาเฉือนที่มาก ไม่ว่าจะเป็นสภาวะ CNL) และในสภาวะ CNS ผลจากการเปรียบเทียบผลแบบจำลองกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองสามารถอธิบายพฤติกรรมผิวสัมผัสที่เกิดขึ้นได้ดี แต่ก็มีตัวอย่างที่ระดับของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรหรือระดับของหน่วยแรงที่แบบจำลองให้ผลน้อยกว่าผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเล็กน้อย และมุมเสียดทานที่ได้จากแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ หากต้องการผลของแบบจำลองที่มีความแม่นยำ ผู้ทำการศึกษาต้องสังเกตว่าแนวโน้มของตัวอย่างการทดสอบแต่ละตัวอย่างมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันหรือไม่ หากไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกันจะส่งผลให้ผลของแบบจำลองผิดเพี้ยนไปจากผลการทดสอบจริง ยิ่งแนวโน้มของความสัมพันธ์ช่วงก่อนอัตราส่วนหน่วยแรงสูงสุด และหลังจากค่าอัตราส่วนหน่วยแรงสูงสุดเป็นไปในทิศทางเดียวกันและใกล้เคียงกันมากเท่าใด ก็จะมีส่งผลให้ผลของแบบจำลองมีความแม่นยำมากขึ้นเท่านั้น

ผลของแบบจำลองพฤติกรรมผิวสัมผัสด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม PLAXIS 3D สามารถอธิบายพฤติกรรมผิวสัมผัสได้ดีในสภาวะ CNL และ CNS แต่ระดับของหน่วยแรงที่ได้จากแบบจำลองในสภาวะ CNS แตกต่างจากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เกิดจากข้อจำกัดของแบบจำลอง Mohr coulomb ที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นได้ดี แต่ไม่สามารถอธิบายการยุบตัวและการขยายตัวของทรายได้ ส่งผลให้ผลของแบบจำลองไม่สามารถอธิบายการยุบตัวหรือขยายตัวได้ และในสภาวะ CNS มุมเสียดทานที่ได้จากแบบจำลองกรณีทรายหลวม

สามารถให้ผลได้ใกล้เคียงกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แต่ในกรณีของทรายแน่นเนื่องจากหน่วยแรงที่ได้จากแบบจำลองให้ผลน้อยกว่าการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ ส่งผลให้มุมเสียดทานที่ได้จากแบบจำลองน้อยกว่าผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเล็กน้อย และจากการศึกษาที่ผ่านมา Pra-ai (2013) ได้ทำการวิเคราะห์จุดที่สามารถอธิบายพฤติกรรมผิวสัมผัสได้ดีที่สุด โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม PLAXIS 2D พบว่า ตำแหน่งที่สามารถอธิบายพฤติกรรมผิวสัมผัสได้ดีที่สุด คือ ตำแหน่งด้านท้ายของตัวอย่างที่บริเวณผิวสัมผัส แต่ผลการวิเคราะห์ตำแหน่งที่ได้จากแบบจำลอง PLAXIS 3D พบว่า จุดที่สามารถอธิบายพฤติกรรมผิวสัมผัสได้ดีที่สุด คือ ตำแหน่งกึ่งกลางของตัวอย่างที่บริเวณผิวสัมผัส

ข้อเสนอแนะ

ผลของแบบจำลองทั้งสองวิธีสามารถอธิบายพฤติกรรมผิวสัมผัสระหว่างทรายและโครงสร้างผิวเรียบได้ดี หากต้องการให้แบบจำลองทั้งสองวิธีมีความแม่นยำมากขึ้น ผู้ที่ต้องการนำไปศึกษาและพัฒนาต่อจำเป็นต้องศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมผิวสัมผัส ไม่ว่าจะเป็นของตัวอย่างดินและผิวโครงสร้างมากขึ้น เพื่อนำไปวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของผิวสัมผัสให้ได้ผลของแบบจำลองที่แม่นยำยิ่งขึ้น



บรรณานุกรม

- Airey, D. W., Al-Douri, R. H. and Poulos, H. G. (1992). Estimation of pile friction degradation from shearbox test. **Geotechnical Testing Journal**, 15, 399–392.
- Bengabbou, N. M. F. (2003). Etude de l'interface sol–paroi moulée. **Revue Française de Génie Civil**, 7(1), 120–120. DOI: 10.1080/12795119.2003.9692469
- Boulon, M. (1988). Numerical and physical modelling of piles behaviour under monotonous and cyclic loading. **Int. Symposium SOWAS**, 88, 285–293.
- Boulon, M. (1989). Basic features of soil structure interface behaviour. **Computers and geotechnics**, 7(1–2), 115–131. DOI: 10.1016/0266–352X(89)90010–4.
- Boulon, M. and Foray, P. (1986). Physical and numerical simulation of lateral shaft friction along offshore piles in sand. **The 3rd Int. Conf. On Numerical Methods in offshore piling**, 127–146.
- Boulon, M. and Nova, R. (1990). Modelling of soil–structure interface behaviour a comparison between elastoplastic and rate type laws. **Computers and geotechnics**, 9(1–2), 21–46. DOI: 10.1016/0266–352X(90)90027–S.
- Boutrif, A. and Boulon, M. (1993). **Mesure du comportement d'interface sol–structure à la boîte de cisaillement direct annulaire et modélisatio.**
Retrieved September 14, 2022, from,
<https://books.google.co.th/books?id=zIWkNwAACAAJ>.
- Brinkgreve, R. B. J. and Vermeer, P. A. (1998). Finite element code for soil and rock analyses. **AA Balkema, Rotterdam, Netherlands.**
- Dejong, J. T., Randolph, M. F. and White, D. J. (2003). Interface load transfer degradation during cyclic loading: a microscale investigation. **Soils and Foundations**, 43(4), 81–93
- Desai, C. S., Dnimm, E. C. and Zaman, M. M. (1985). Cyclic testing and modeling of interfaces. **Journal of geotechnical engineering**, 111, 793–815.
DOI: 10.1061/(ASCE)0733–9410(1985)111:6(793).

- Desai, C. S. and Nagaraj, B. (1988). Modeling for cyclic normal and shear behavior of interfaces. **Journal of engineering mechanics**, 114(7), 1198–1217.
DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1988)114:7(1198).
- Fakharian, K. and Evgin, E. (1997). Cyclic simple-shear behavior of sand-steel interfaces under constant normal stiffness condition. **Geotechnical and geoenvironmental engineering**, 1096–1105. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:12(1096).
- Garnica and Anguas, P. (1993). **Simulation numérique du frottement entre solides par équations intégrales aux frontières et modèle d'interface non linéaire: application aux pieux**. Grenoble 1
- Hoteit, N. (1990). Contribution a l'étude du comportement d'interface sable-inclusion et application au frottement apparent. Retrieved September 14, 2022, from, <https://cir.nii.ac.jp/crid/1573668924472989952>.
- Hu, L. and Pu, J. (2004). Testing and Modeling of Soil-Structure Interface. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, 130(8), 1–5.
DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:8(851).
- Jalali, M. M., Golmaei, S. H., Jalali, M. R., Borthwick, A., Ahmadi, M. K. Z. and Moradi, R. (2012). Using finite element method for pile-soil interface (through plaxis and ansys). **Journal of civil engineering and construction technology**, 3(10), 256–272.
DOI: 10.5897/JCECT12.024.
- Kishida, H. and Uesugi, M. (1987). Tests of the interface between sand and steel in the simple shear apparatus. **Géotechnique**, 37(1), 45–52.
- Mortara, G. (2001). **An elastoplastic model for sand-structure interface behaviour under monotonic and cyclic loading**. Retrieved September 14, 2022, from, https://www.researchgate.net/publication/256120781_An_elastoplastic_model_for_sand-structure_interface_behavior.
- Mortara, G., Boulon, M. and Ghionna, V. N. (2002). A 2-D Constitutive model for cyclic interface behaviour. **International journal for numerical and analytical methods in geomechanics**, 26(11). DOI: <https://doi.org/10.1002/nag.236>.

- Potts, D. M. and Zdravković, L. (1999). **Finite element analysis in geotechnical engineering** (T. a. M. Imperial College of Science Ed.). London: Thomas Telford Books. Retrieved September 14, 2022, from, from, <http://www.t-telford.co.uk/>.
- Pra-ai, S. (2013). **Behaviour of soil–structure interfaces subjected to a large number of cycles. Application to piles**. Doctoral dissertation, Ph. D., Université de Grenoble, Grenoble.
- Puech, A., Foray, P., Boulon, M. and Desrues, J. (1979). Calcul des pieux à l'arrachement à partir d'un modèle numérique en contraintes effectives–premiers résultats. **VII European Conf. on soils mechanics and foundation engineering**, 227–232.
- Samtani, N. C., Desai, C. S. and Vulliet, L. (1996). An interface model to describe viscoplastic behavior. **International journal for numerical and analytical methods in geomechanics**, 20(4), 231–252.
- Schlosser, F. and Guilloux, A. (1981). Le frottement dans le renforcement des sols. **Revue Française de Géotechnique**, 65–79.
- Sushma, P. and Pradeep Kumar, R. (2012). Numerical modeling of interface between soil and pile to account for loss of contact during seismic excitation. In **15th World conference on earthquake engineering** (n.d.): Lisbon Poland.
- Tabucanon, J. T., Airey, D. W. and Poulos, H. G. (1995). Pile skin friction in sand from constant normal stiffness test. **Geotechnical Testing Journal**, 18, 350–364.
- Yoshimi, Y. and Kishida, T. (1981). A Ring Torsion Apparatus for Evaluating Friction Between Soil and Metal Surfaces. **Geotechnical Testing Journal**, 145–152.
- Yu, Y., Damians, I. P. and Bathurst, R. J. (2015). Influence of choice of FLAC and PLAXIS interface models on reinforced soil–structure interactions. **Computers and geotechnics**, 65, 164–174. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.12.009>.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	เอกรินทร์ สุดใจ
วัน เดือน ปี เกิด	13 ตุลาคม พ.ศ.2539
สถานที่เกิด	สระบุรี
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2562 วศ.บ. (โยธา), มหาวิทยาลัยพะเยา, พะเยา
ที่อยู่ปัจจุบัน	124/123 ตำบลตาลเดี่ยว อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี 18110
ผลงานตีพิมพ์	เอกรินทร์ สุดใจ และคณะ. (2563). แบบจำลองความสัมพันธ์สำหรับพฤติกรรมของผิวสัมผัสระหว่างทรายกับโครงสร้างผิวเรียบ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ, 25, GTE48. เอกรินทร์ สุดใจ และคณะ. การศึกษาสภาพอุทกวิทยาโดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ SWAT: กรณีศึกษาลุ่มน้ำอิง ตอนบน ประเทศไทย. การประชุมวิชาการพะเยาวิจัย, 11, SCI-O33
รางวัลที่ได้รับ	-

