

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอกจากการทดสอบเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน (SPT) กับมุมเสียดทานภายในของทรายกรุงเทพฯ CORRELATION BETWEEN SPT N-VALUE AND FRICTION ANGLE OF BANGKOK SAND

คณิติน วงษ์สละ^{1,*}, และ สมโพธิ อยู่วิไร¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพฯ ประเทศไทย

*Corresponding author address: kanitin.w@mail.kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนน้การตอกของการเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน (N-SPT) กับมุมเสียดทานภายในของทรายกรุงเทพฯ โดยมีความหนาแน่นสัมพัทธ์และความเค้นในแนวตั้งที่แตกต่างกัน ในส่วนแรกงานวิจัยนี้เสนอสมการสัมพันธ์ของค่ามุมเสียดทานภายในของทรายกรุงเทพฯ กับพารามิเตอร์สถานะโดยใช้การวิเคราะห์ผลทดสอบกำลังอัดตัวแบบสามแกน พารามิเตอร์สถานะจะคำนวณจากระยะห่างจากสถานะของทรายกับสถานะวิกฤตที่มีความเค้นเท่ากัน ในส่วนที่สองงานวิจัยนี้ได้พัฒนาห้องมือสอบเทียบในห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบการเจาะทะลุมาตรฐานที่มีความหนาแน่นและความเค้นที่แตกต่างกัน จากผลการทดสอบพบว่าค่าจำนวนน้การตอกของทรายกรุงเทพฯแปรผันตรงกับความเค้นและความหนาแน่นสัมพัทธ์ของทรายกรุงเทพฯ งานวิจัยนี้ยังได้นำเสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเสียดทานภายในของทรายกรุงเทพฯ กับจำนวนน้การตอกที่มีความเค้นในแนวตั้งและความหนาแน่นของทรายที่แตกต่างกัน

คำสำคัญ: ทรายกรุงเทพฯ, จำนวนน้การตอก, พารามิเตอร์สถานะ, มุมเสียดทานภายใน, ห้องสอบเทียบ

Abstract

This study investigates the relationship between N-values of standard penetration test with frictions angle of Bangkok sand with different relative density and effect overburden stress. In the first part, this study suggests a correlation equation for the internal friction angle of Bangkok sand with state parameters using triaxial compression test results in analysis. The state parameter is computed from the distance from the initial sand state to the critical state under the same stress. In the second part, this paper developed a laboratory calibration chamber to test standard penetration tests with different densities and stresses. From the test results, it was found that the N-values of Bangkok sand were directly variation to the stress and relative density of Bangkok sand. This study also presents an equation for the relationship between the internal friction angle with the N-value of Bangkok sand has different vertical stress and sand densities.

Keywords: Bangkok sand, N-SPT, State parameter, Friction angle, Calibration chamber

รายการสัญลักษณ์

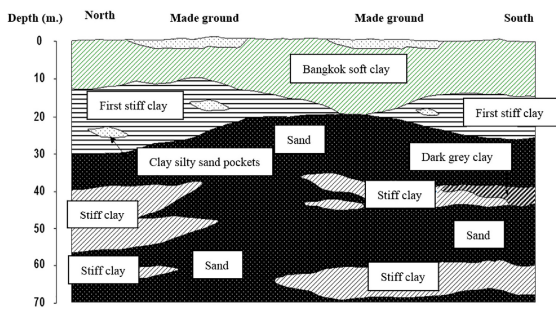
ψ	พารามิเตอร์สถานะ
DR	ความหนาแน่นสัมพัทธ์
e_{λ}	อัตราส่วนโพรงก่อนการเฉือนตัวอย่างดิน
e_{ss}	อัตราส่วนโพรงที่สถานะวิกฤต
p'	ความเค้นเฉลี่ย
N	จำนวนน้การตอก
ϕ'	มุมเสียดทานภายใน
σ_v	ความเค้นในแนวตั้ง
P_a	ความดันบรรยากาศ (atm)

1. บทนำ

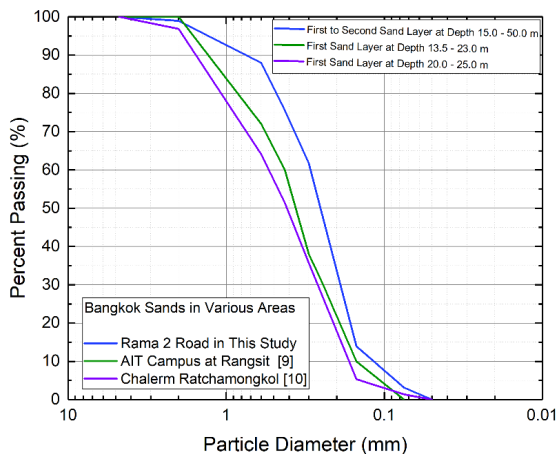
ในปัจจุบันกรุงเทพมหานครเป็นเมืองที่มีงานก่อสร้างเกิดขึ้นมากมายทั้งโครงการตึกสูงและงานโครงสร้างพื้นฐาน ชั้นดินของกรุงเทพฯเป็นดินเหนียวสลับกับชั้นทรายดังรูปที่ 1 งานก่อสร้างฐานรากส่วนใหญ่เป็นเสาเข็มวางอยู่บนชั้นทราย พารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการประเมินกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มคือมุมเสียดทานภายใน วิธีที่นิยมใช้หามุมเสียดทานภายในของทรายในปัจจุบันคือการคำนวณจากการทดสอบเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน (SPT) โดยใช้ค่าจำนวนการตอก (N-SPT) ในการประมาณจากสมการเชิงประจักษ์ [1] - [5] อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์เชิงประจักษ์เหล่านี้ให้ค่ามุมเสียดทานภายในที่แตกต่างกันเนื่องจากทรายแต่ละแหล่งกำเนิดมีคุณสมบัติทางกายภาพและการกระจายตัวของเม็ดที่แตกต่างกัน

งานวิจัยที่ผ่านมาบ่งชี้ให้เห็นว่าค่าจำนวนน้การตอกของการทดสอบเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานแปรผันตรงกับมุมเสียดทาน

ภายใน และค่าจำนวนนับการตอกยังมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นสัมพัทธ์ [3] ดังนั้นการศึกษาในอดีตจึงนิยมใช้ความหนาแน่นสัมพัทธ์หาความสัมพันธ์ของจำนวนนับการตอกและมุมเสียดทานภายใน โดยใช้อุปกรณ์สอบเทียบที่มีรูปแบบแตกต่างกันในการทดสอบ อย่างไรก็ตามงานวิจัยในอดีต [6] พบว่าพารามิเตอร์ช่วงอัตราส่วนโพรง (Void Ratio Range) และความเค้นมีผลกระทบต่อความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการตอกกับความหนาแน่นสัมพัทธ์ ดังนั้นในการหาค่ามุมเสียดทานภายในของทรายจำเป็นต้องพิจารณาถึงปัจจัยดังกล่าวข้างต้น



รูปที่ 1 แสดงชั้นดินในกรุงเทพฯ ของงานวิจัยในอดีต [8]



รูปที่ 2 ขนาดมวลผลของทรายกรุงเทพฯ ในพื้นที่ต่างๆ

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของทรายสามารถทำนายได้โดยใช้พารามิเตอร์สถานะ (State Parameter) [7] พารามิเตอร์ดังกล่าวจะบอกความแตกต่างของอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นไปจนถึงสถานะวิกฤตภายใต้เงื่อนไขความเค้นเฉื่อยเดียวกัน ซึ่งงานวิจัยในอดีต [7] พบว่าพารามิเตอร์สถานะบอกคุณสมบัติทางกายภาพของทรายได้ดีกว่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เพียงอย่างเดียวเพราะพารามิเตอร์สถานะได้คำนึงถึงผลกระทบที่มาจากอัตราส่วนโพรงและความเค้นที่แตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาในอดีตยังไม่มีการนำพารามิเตอร์สถานะมาใช้หามุมเสียดทานภายในของทรายกรุงเทพฯ และหาความสัมพันธ์กับค่าจำนวนนับการตอก

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทานภายในทรายกรุงเทพฯ กับพารามิเตอร์สถานะโดยใช้ข้อมูล

การทดสอบกำลังอัดสามแกนของทรายกรุงเทพฯ มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทานภายในกับพารามิเตอร์สถานะจากงานวิจัยในอดีต [9] นอกจากนี้ยังสร้างอุปกรณ์สอบเทียบ (Calibration Chamber) ในห้องปฏิบัติการเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนนับการตอกและพารามิเตอร์สถานะของทรายกรุงเทพฯ โดยมีการเปลี่ยนค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์และความเค้น จากนั้นนำมาผลจากสองส่วนมาวิเคราะห์ร่วมกันเพื่อนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า N-SPT และมุมเสียดทานภายในของทรายกรุงเทพฯ ในสถานะที่มีความหนาแน่นความเค้นที่แตกต่างกัน

2. วัสดุและวิธีการศึกษา

2.1. วัสดุ

ทรายกรุงเทพฯ ที่ใช้ในการศึกษานี้ นำมาจากโครงการก่อสร้างทางพิเศษสายพระราม 3 - ดาวคะนอง-วงแหวนรอบนอกกรุงเทพมหานครด้านตะวันตก สัญญาที่ 2 ที่ความลึก 15 เมตรลงไป ซึ่งมีคุณสมบัติเบื้องต้นแสดงดังตารางที่ 1 และขนาดมวลผลของการศึกษานี้เทียบกับงานศึกษาในอดีต [9] - [10] แสดงในรูปที่ 2

ตารางที่ 1 คุณสมบัติเบื้องต้นของทรายกรุงเทพฯ

Parameter	Value	Unit
Specific gravity	GS	2.69 -
Max. void ratio	e_{max}	1.105 -
Min. void ratio	e_{min}	0.656 -
Coefficient of uniformity	C_u	2.52 -
Coefficient of curvature	C_c	1.05 -
Mean grain size	D_{50}	0.253 mm
Soil classification	SP	-

2.2. การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทานภายในกับพารามิเตอร์สถานะ

งานวิจัยนี้นำผลทดสอบกำลังอัดสามแกนของงานวิจัยในอดีต [9] มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทานภายในและพารามิเตอร์สถานะ พารามิเตอร์สถานะสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1)

$$\psi = e_\lambda - e_{ss} \quad (1)$$

งานวิจัยนี้ทำการหาเส้นสถานะวิกฤตจากผลการทดสอบการอัดตัวแบบสามแกน โดยเลือกใช้เฉพาะตัวอย่างทรายที่เข้าสู่สถานะวิกฤตดังแสดงในรูปที่ 3 ส่วนผลทดสอบที่ไม่เข้าสู่สถานะวิกฤตส่วนใหญ่จะเป็นทรายบดอัดแน่นซึ่งเกิดจากการทดสอบที่ยังไม่ถึงความเครียดปริมาตรคงที่อันเนื่องมาจากการเกิดขึ้นของแถบการเฉือน (shear band) ทำให้เกิดการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดไม่สม่ำเสมอ [7] จากความสัมพันธ์ในรูปที่ 3 สามารถหาสมการของสถานะวิกฤตได้ดังสมการด้านล่าง

$$e_{ss} = 1.07866 - 0.6358 \ln p' \quad (2)$$

รูปที่ 4 แสดงสถานะเริ่มต้นของทรายในกรุงเทพฯ ก่อนการเฉือนในการรับแรงอัดแบบสามแกน จะเห็นได้ว่าทรายที่มีสภาพหลวมส่วนใหญ่จะมีค่าอัตราส่วนโพรงอยู่บนเส้นสถานะวิกฤต ทรายแน่นปานกลางจะมีอัตราส่วนโพรงอยู่ใต้เส้นสถานะวิกฤตเล็กน้อย และค่าอัตราส่วนโพรงของทรายนั่นจะอยู่ต่ำกว่าเส้นสถานะวิกฤตมาก แต่ถ้าพิจารณาตัวอย่างที่มีอัตราส่วนโพรงเดียวกัน ค่าพารามิเตอร์สถานะจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความเค้นเฉลี่ยที่มากขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทานภายในกับพารามิเตอร์สถานะแสดงในรูปที่ 5 จากความสัมพันธ์นี้สามารถสร้างสมการที่ใช้ทำนายมุมเสียดทานภายในและพารามิเตอร์สถานะดังสมการที่ (3)

$$\phi' = 34.867 - 26.463 \psi \quad (3)$$

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทานภายในกับพารามิเตอร์สถานะของทรายกรุงเทพฯ เทียบกับทรายชนิดอื่น มุมเสียดทานภายในของทรายมีค่าระหว่าง 27 ถึง 47 องศาและแปรผันกับพารามิเตอร์สถานะอย่างมีนัยสำคัญ

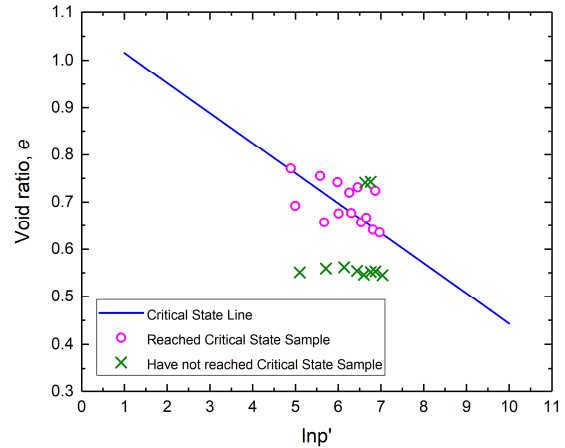
2.3. การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนนบการตอกและพารามิเตอร์สถานะ

ในงานวิจัยนี้จะพัฒนาอุปกรณ์เพื่อใช้ทดสอบ SPT ในห้องปฏิบัติการโดยจะอ้างอิงกับงานวิจัยในอดีต [14] อุปกรณ์ที่พัฒนาแล้วสำหรับสอบเทียบการเจาะของมาตรฐานกับดินที่ไม่มี ความเชื่อมั่น เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนบการตอกกับพารามิเตอร์สถานะ อุปกรณ์สอบเทียบ (Calibration Chamber) จะมีขนาดเล็กและใช้งานง่ายกว่าอุปกรณ์สอบเทียบในอดีต

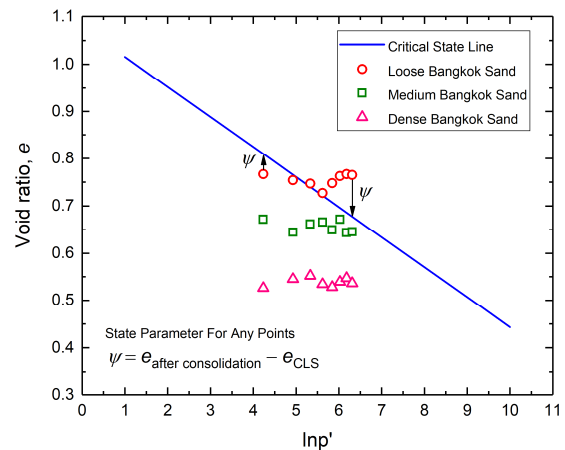
2.3.1. การออกแบบอุปกรณ์สอบเทียบ

อุปกรณ์สอบเทียบที่ใช้ต้นแบบจากงานวิจัยในอดีต [14] ดังแสดงในรูป 7 ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวแบ่งขึ้นส่วนหลักๆ เป็น 3 ชิ้นส่วน ดังนี้

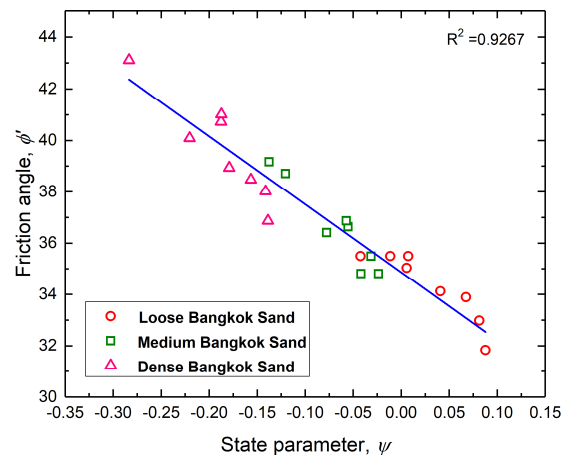
ชิ้นส่วนแรกคือคานสำหรับให้แรง (Loading arm) ใช้สำหรับให้ความเค้นในแนวตั้งกับตัวอย่างทดสอบผ่านแผ่นให้แรง (Top plate) โดยแขวนน้ำหนักไว้ที่ปลายของคาน เพื่อให้ได้ความเค้นในแนวตั้งที่ต้องการ แผ่นให้แรงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 33.8 เซนติเมตร เจาะรูตรงกลางขนาด 3 นิ้ว เพื่อให้กระบอกผ่าสามารถผ่านลงไปถึงตัวอย่างทดสอบได้



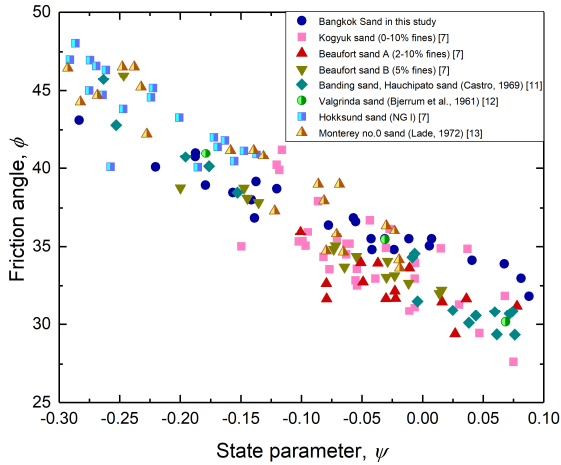
รูปที่ 3 ผลการตรวจสอบสถานะวิกฤตและเส้นสถานะวิกฤต



รูปที่ 4 ค่าอัตราส่วนช่องว่างหลังอัดตัวคายน้ำแล้วกับเส้นสถานะวิกฤต ใช้สำหรับหาพารามิเตอร์สถานะ



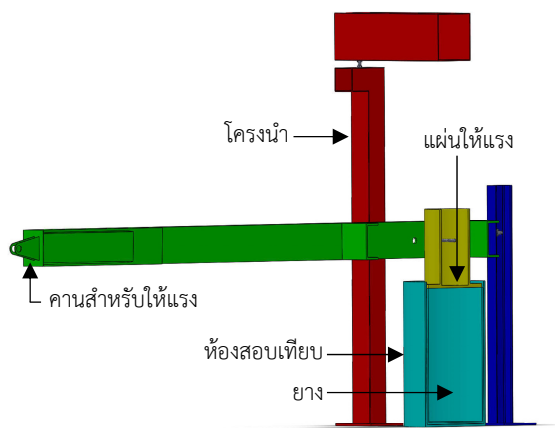
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทานภายในและพารามิเตอร์สถานะของทรายกรุงเทพฯ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทานภายในและพารามิเตอร์สถานะของทรายกรุงเทียบกับทรายชนิดต่างๆ



(ก)



(ข)

รูปที่ 7 (ก) ภาพถ่ายอุปกรณ์สอบเทียบ (ข) รูปตัดอุปกรณ์สอบเทียบ

ชั้นสวนที่สองคือโครงนำ (Guide frame) ใช้สำหรับประกอบให้ก้านเจาะทะลวงมาตรฐาน ให้สามารถตั้งในแนวตั้งได้ ประกอบด้วยเสาสองต้นและคานที่ใช้สำหรับเป็นโครงนำ

ส่วนสุดท้ายคือห้องสอบเทียบ (Calibration chamber) เป็นผนังเหล็กแข็งแรงมีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 36 เซนติเมตร และมีความสูง 60 เซนติเมตร ใช้สำหรับใส่ตัวอย่างดินที่ไม่มีความชื้นแน่น โดยภายในห้องสอบเทียบมีการติดตั้งยางที่มีค่าความยืดหยุ่นอยู่ระหว่าง 186-1,048 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร และมีการติดตั้ง Force sensors ระหว่างยางกับผนังและพื้นเหล็ก สำหรับใช้ตรวจสอบอิทธิพลของขอบเขตที่แข็งแรงไปและใช้สำหรับวัดความเค้นในแนวด้านข้างที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการทดสอบการเจาะทะลวงมาตรฐาน

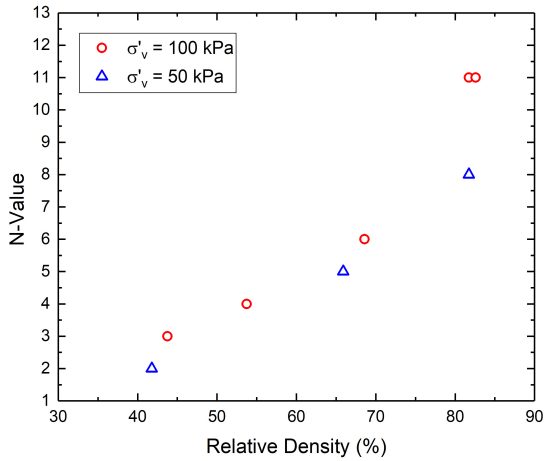
2.3.2. ขั้นตอนการทดสอบ

อุปกรณ์การตอก SPT ใช้ตุ้มตอกมาตรฐานแบบโดนน้หนัก 63.5 กิโลกรัม ก้านเจาะแบบ AW และกระบอกเก็บตัวอย่างดินแบบผ่า การเตรียมตัวอย่างใช้วิธีกำหนดความหนาแน่นสัมพัทธ์ โดยใช้เทคนิคการบดอัดที่เรียกว่า Under-compaction ของงานวิจัยในอดีต [15] ขั้นตอนการสอบเทียบคือเตรียมทรายแห้งโดยใช้ความหนาแน่นสัมพัทธ์เป็นตัวควบคุมคำนวณหาหน้าหนักทรายแห้งที่ต้องใช้ทั้งหมด ต่อมาแบ่งทรายเป็นทั้งหมด 6 ชั้นให้น้ำหนักเท่ากันแล้วทำการบดอัด โดยใช้แผ่นเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดเท่าตัวอย่างทดสอบวางลงบนทรายที่ต้องการบดอัดและใช้แท่งน้ำหนัก 5 กิโลกรัม ยกให้มีความสูง 25 เซนติเมตร แล้วปล่อยตกอิสระ โดยจำนวนครั้งที่ยกแท่งน้ำหนักต้องทำการทำนายก่อนว่าต้องยกแท่งน้ำหนักตกกระทบกี่ครั้งถึงจะได้ความหนาแน่นที่ต้องการ [15] เพื่อให้ทรายแต่ละชั้นมีความหนาแน่นสัมพัทธ์หลังบดอัดใกล้เคียงกันมากที่สุด ต่อมาทำการติดตั้งคานให้แรงและกำหนดความเค้นในแนวตั้งที่ต้องการแล้วคำนวณน้ำหนักที่ต้องแขวนที่ปลายคานให้แรง ทำการแขวนน้ำหนักและบันทึกค่าแรงดันด้านข้างจาก force sensors เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่สภาวะอยู่นิ่ง ติดตั้งอุปกรณ์เจาะทะลวงมาตรฐานและทำการตอกนับจำนวนการตอก

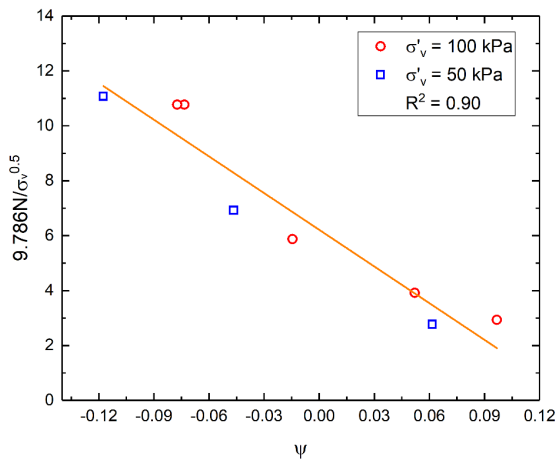
3. ผลการทดสอบ

ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับการตอกกับความหนาแน่นสัมพัทธ์แสดงในรูปที่ 8 พบว่าเมื่อความหนาแน่นสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าจำนวนนับการตอกเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อพิจารณาภายใต้ความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่เท่ากันแต่ให้ความเค้นในแนวตั้งแตกต่างกัน จะส่งผลให้ค่าจำนวนนับการตอกที่ได้มีค่าแตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต [16] ที่สรุปไว้ว่าค่าจำนวนนับการตอกแปรผันตรงกับค่าความเค้นในแนวตั้งเนื่องจากกำลังรับแรง

เดือนของทรายจะเพิ่มขึ้นกับความเค้นที่เพิ่มขึ้น จึงสรุปได้ว่าค่าจำนวนนับการตอกนอกจากจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นสัมพัทธ์แล้วยังมีค่าความเค้นในแนวตั้งเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนนับการตอกกับความหนาแน่นสัมพัทธ์



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์สถานะกับค่า N-SPT โดยปรับแก้ค่า N จากงานวิจัยก่อนหน้า [17]

งานวิจัยนี้ได้นำสมการปรับแก้ค่าจำนวนนับการตอกที่จากความดันจากน้ำหนักดินข้างบนของงานวิจัยในอดีต [17] และนำค่าจำนวนนับการตอกที่ปรับแก้แล้วสร้างความสัมพันธ์ดังแสดงในรูป 9 จากรูปค่าจำนวนนับการตอกที่ปรับแก้แล้วมีความสัมพันธ์ที่ดีกับพารามิเตอร์สถานะโดยมีค่า $R^2=0.90$ แต่เพื่อพัฒนาความสัมพันธ์ให้ดียิ่งขึ้นเพื่อให้เหมาะสมกับทรายกรุงเทพฯ งานวิจัยนี้ได้นำเสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า N-SPT กับค่าความเค้นและพารามิเตอร์สถานะ หาสมการความสัมพันธ์โดยการใช่วิธี optimization ของ Levenberg-Marquardt Method [18] ใช้โปรแกรมใน Scipy [19] โดยใช้ภาษาไพธอนในการทำงานจะได้สมการดังต่อไปนี้

$$\psi = N^{-0.181} \left(\frac{\sigma_v}{P_a} \right)^{0.157} - 0.725 \quad (4)$$

$$R^2 = 0.99$$

โดยที่ P_a คือค่าความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure) มีค่า 101.325 kPa

จากสมการที่ 4 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า SPT-N กับตัวแปรสถานะ (State parameter) และ ความเค้นดังรูปที่ 10

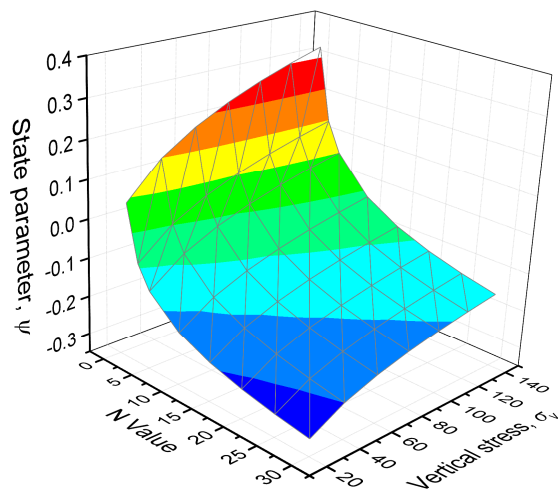
3.1. ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับการตอกกับมุมเสียดทานภายในของทรายกรุงเทพฯ

หลังจากได้ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทานภายในกับพารามิเตอร์สถานะและค่าจำนวนการตอกกับพารามิเตอร์สถานะแล้ว สามารถคำนวณกลับหาความสัมพันธ์ของจำนวนนับการตอกกับมุมเสียดทานภายในของทรายกรุงเทพฯแสดงได้ในสมการที่ 5

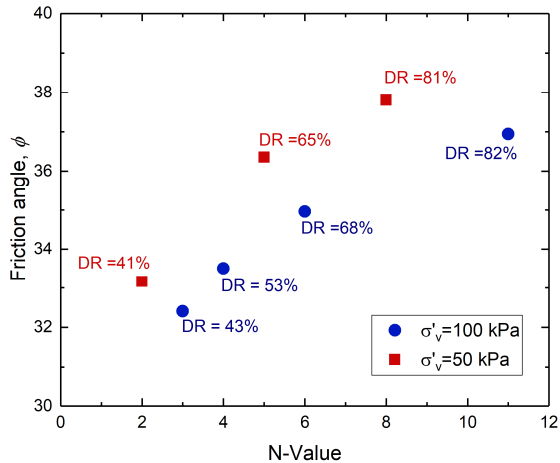
$$\phi' = -26.463N^{-0.181} \left(\frac{\sigma_v}{P_a} \right)^{0.157} + 54.053 \quad (5)$$

$$\sigma_v < 100 \text{ kPa}$$

จากสมการที่ 5 เมื่อนำผลทดสอบเข้าไปแทนค่าสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนนับการตอกกับมุมเสียดทานภายในได้ดังรูปที่ 11 จากรูปจะเห็นได้ว่าภายใต้ความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกันแต่ให้ความเค้นในแนวตั้งที่ต่างกัน จะมีความมุมเสียดทานภายในที่ต่างกัน โดยทรายที่ให้ความเค้นในแนวตั้งน้อยกว่ามีค่ามุมเสียดทานภายในมากกว่าทรายที่ให้ความเค้นในแนวตั้งมากกว่า สมการที่นำเสนอมีข้อจำกัดคือค่าความเค้นจะไม่เกิน 100 kPa ใช้ได้กับชั้นทรายที่มีความลึกไม่เกิน 20 เมตร



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์สถานะกับ ค่า SPT-N และค่าความเค้น



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทานภายในกับจำนวนนับการตอกจากผลการทดสอบ

4. สรุป

ในการศึกษาทรายกรุงเทพฯ ครั้งนี้ เพื่อความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับการตอกกับมุมเสียดทานภายในโดยขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์สถานะมีข้อสรุปได้ดังนี้

- งานวิจัยนี้ได้นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทานภายในของทรายกรุงเทพฯ กับพารามิเตอร์สถานะ (state parameter) พารามิเตอร์สถานะ จากการทดสอบให้แรงอัดแบบสามแกนจะมีตัวแปรคือความเค้นและอัตราส่วนโพรงดังสมการต่อไปนี้

$$\phi' = 34.867 - 26.463\psi$$

- อุปกรณ์สอบเทียบได้พัฒนาขึ้นในห้องปฏิบัติการเพื่อใช้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า N-SPT กับความแน่นและความเค้น
- ค่า -SPT แปรผันตรงกับความเค้นและความหนาแน่นสัมพัทธ์ของทรายกรุงเทพฯ
- สมการเชิงประจักษ์เพื่อให้ประมาณค่าแรงเสียดทานภายในจากค่า N-SPT ในสภาพความเค้นที่ต่างกันดังต่อไปนี้

$$\phi' = -26.463N^{-0.181} \left(\frac{\sigma_p}{P_a} \right)^{0.157} + 54.053$$

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระเจ้าเกล้าธนบุรี ที่สนับสนุนเอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือสำหรับงานวิจัย

6. การอ้างอิง

- Hatanaka, M. and Uchida, A. (1996). Empirical correlation between penetration resistance and internal friction angle of sandy soils. *Soils and Foundations* **36**(4), 1-9. DOI: 10.3208/sandf.36.4_1.
- Meyerhof, G. G., (1956). Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils. *ASCE Journal of*

Geotechnical Engineering **82**(1), 866/1-866/19. DOI: 10.1061/JSFEAQ.0000001.

- Mujtaba H, Farooq K, Sivakugan N, Das BM (2018). Evaluation of relative density and friction angle based on SPT-N values. *KSCCE Journal of Civil Engineer* **22**(3), 1-10. DOI: 10.1007/s12205-017-1899-5.
- Peck, R. B., Hanson, W. E., and Thornburn, T. H. (1974). *Foundation Engineering, 2nd ed.* Wiley, New York, USA.
- Weeranun P (1983). Prediction of Pile Carrying From Standard Penetration Test (N) In Bangkok Metropolis Subsoil. Master Dissertation of Chulalongkorn University, Thailand.
- Cubrinovski, M. and Ishihara, K. (1999). Empirical correlation between SPT N-value and relative density for sandy soils. *Soils and Foundations* **39**(3), 61-71. DOI: 10.3208/sandf.39.5_61.
- K. Been and M.G. Jefferies (1985). A state parameter for sands. *Géotechnique* **35**(2), 99-112. DOI: 10.1680/geot.1985.35.2.99
- Teparaksa, W. (1999). Principle and application of instrumentation for the first MRTA subway project in Bangkok. *Proceedings of 5th international symposium on field measurements in geomechanics*, December, Singapore.
- Mollah A (1977). Strength and Deformation Characteristics of Bangkok Sand Under Triaxial Compression. Master Dissertation of Asian Institute of Technology, Thailand.
- Jittavee Sittidumrong, Apinit Jotisankasa and Korchoke Chantawarangul (2019). Effect of thermal cycles on volumetric behavior of Bangkok sand. *Geomechanics for Energy and the Environment* **20**, 12. DOI: 10.1016/j.gete.2019.100127
- Castro, G. (1969). Liquefaction of sand. PhD thesis Division of Engineering and Applied Physic, Harvard University, United States.
- Bjerrum, L., Kringstad, S. & Kummenje, o. (1961). The shear strength of a fine sand. *Proc. 5th Int.*, Paris.
- Lade, P. V. (1972). The stress-strain and strength characteristics of cohesionless soils. PhD thesis of University of California at Berkeley, United States.

- [14] Ghali, M., Chekirad, M., Karray, M., (2020). Laboratory Simulator for Geotechnical Penetration Tests. *Geotechnical Testing Journal* **43**(1), 211-234. DOI: 10.1520/GTJ20170413
- [15] Ladd, R. S. (1978). Preparing Test Specimens Using Undercompaction. *Geotechnical Testing Journal* **1**(1), 16-23. DOI: 10.1520/GTJ10364J.
- [16] Gibbs, H. J. and Holtz, W. G. (1957). Research on determining the density of sands by spoon penetration testing. *Proceedings of 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, August, London, England.
- [17] Liao, S. and Whitman, R. V. (1986). Overburden correction factor for SPT in sand. *Journal of Geotechnical Engineering* **112**(3), 373-377. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1986)112:3(373).
- [18] Moré, J. J. (1978). The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory, Watson G.A. (eds) *Numerical Analysis. Lecture Notes in Mathematics*, Springer, Berlin, 105–116.
- [19] The SciPy community, (2019). `scipy.optimize.curve_fit`. accessed 11 June 2020.