

การหาค่าโมดูลัสเฉือนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมผงซิลิกา
โดยใช้การทดสอบแรงอัดของดินโดยปราศจากแรงด้านข้าง
ร่วมกับเบนด์เออร์อีลิเมนต์

Shear Modulus Identification of Soft Bangkok Clay with Silica
Powder using an Unconfined Compression
Test with Bender Elements

พิธาน ไพโรจน์^{1*}

Pithan Pairojn^{1*}

^{1*}สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม

39/1 ถนนรัชดาภิเษก แขวงจันทรเกษม เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900 โทรศัพท์ 0 2942 6800

E-mail: dr.pithan@gmail.com

^{1*}Civil Engineering Technology, Faculty of Science, Chandrakasem Rajabhat University

39/1 Ratchadapisek Road, Chandrakasem, Chatuchak, Bangkok, Thailand 10900 Tel. +66 2942 6800

E-mail: dr.pithan@gmail.com

วันที่รับบทความ 7 พฤศจิกายน 2561

Received: Nov. 7, 2018

วันที่รับแก้ไขบทความ 13 พฤษภาคม 2562

Revised: May. 13, 2019

วันที่ตอบรับบทความ 30 พฤษภาคม 2562

Accepted: May. 30, 2019

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าโมดูลัสเฉือนของดินเหนียวกรุงเทพมหานครผสมผงซิลิกาจากการทดสอบแรงอัดของดินโดยปราศจากแรงด้านข้าง โดยวัดความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จากเบนด์เออร์อีลิเมนต์ ซึ่งติดตั้งไว้ที่ฝาครอบด้านบนและแท่นของเครื่องทดสอบแรงอัดของดินโดยปราศจากแรงด้านข้าง เพื่อให้ทราบการเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสเฉือนได้ ซึ่งค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำหาได้จากการทดสอบที่อัตราความเครียด 1 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที่ ระหว่างที่มีการบันทึกค่าโมดูลัสเฉือน ผลการวิจัยพบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าโมดูลัสเฉือนเพิ่มขึ้นเมื่ออัดดินผสมผงซิลิกาในอัตราที่เพิ่มขึ้นแต่ความความเครียดลดลง ณ จุดวิกฤติ ดังนั้น การปรับปรุงคุณภาพดินคันทางโดยใช้ซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่มระหว่างการอัดดินในการก่อสร้างสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของคันทางได้

คำสำคัญ: ดินเหนียวกรุงเทพมหานคร, เบนด์เออร์อีลิเมนต์, โมดูลัสเฉือน

Abstract

The present study aimed to increase the undrained shear strength, elastic modulus and shear modulus of Bangkok Clay with silica powder when subjected to an unconfined compression test with bender elements. The shear wave velocity was measured using a pair of bender elements installed in the top cap and pedestal of the unconfined cell. The undrained shear strength measurement was conducted step by step in order to determine the variation of shear modulus. Measurement was carried out at the strain rate of 1%/min during which the shear modulus was continuously recorded. Results found that when the soil was mixed with silica powder at an increased rate, the undrained shear strength, elastic modulus, and shear modulus increased, whereas the strain decreased at the point of failure. It is concluded, therefore, that the improvement of soil quality using silica powder can lead to an increase in the efficiency of road construction.

Keywords: bangkok clay, bender element, shear modulus

1. บทนำ

ปัจจุบันการก่อสร้างในพื้นที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่าง เช่น การก่อสร้างถนน มักจะประสบปัญหาการพังทลายเนื่องมาจากดินฐานรากที่มีสภาพเป็นดินเหนียวอ่อน (ดินกรุงเทพมหานคร) โดยเฉพาะถนนที่อยู่ริมคลองชลประทานหรือแม่น้ำ ซึ่งเป็นพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ที่มีชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ นั้นเกิดขึ้นจากการตกตะกอนของดินเหนียวในพื้นที่ที่ในอดีตเมื่อกว่า 10,000 ปีที่แล้วเป็นทะเล เมื่อดูจากทิศตะวันตก-ตะวันออก ดินเหนียวอ่อนนี้มีความหนาเฉลี่ย 8 - 18 เมตร ในช่วงบริเวณกรุงเทพฯ และมีความหนาต่าง ๆ กันไปตามพื้นที่ ลักษณะชั้นดินนั้นมีความแปรปรวนไม่คงที่ และมีโอกาสเกิดการลดลงของระดับน้ำอย่างรวดเร็ว (Sudden drawdown) จากการใช้งานปกติที่มีการจ่ายน้ำเข้าคลองซอย หรือในช่วงที่น้ำแล้งมากที่เกษตรกรจะเร่งสูบน้ำเข้าพื้นที่สวนหรือไร่นา หรือในช่วงปลายฤดูฝนต้นฤดูหนาวที่น้ำในคลองจะระบายออกได้เร็วขึ้น ซึ่งจะทำให้มีโอกาสในการพังทลายของลาดตลิ่งมากขึ้น จึงต้องมีการออกแบบและก่อสร้างถนนให้เหมาะสมตามหลักวิชาการด้านวิศวกรรม โดยค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_u) และค่าโมดูลัสเฉือน (G_{max}) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการออกแบบ

ดังนั้น การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวคันทางโดยใช้สารผสมเพิ่ม (Barnes, G., 2018; Istratea, O. and Chen, B., 2018; Mousavi, S. E. and Karamvand, A., 2017; Goodarzia, A., Akbari, H.R. and Salimi, M., 2016) จึงเป็นอีกทางเลือก ที่อาจจะสามารถเพิ่มโดยค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_u) และค่าโมดูลัสเฉือน (G_{max}) ของดินคันทางได้

ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ผงซิลิกาเนื่องจากมีราคาถูกและสามารถผลิตจากขี้เถ้าที่เป็นส่วนเหลือจากกระบวนการสีข้าว สามารถหาได้ในท้องถิ่นพื้นที่จังหวัดชัยนาทซึ่งเป็นพื้นที่บริการของมหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม ทั้งนี้การทดสอบหาค่าดังกล่าวจะต้องทดสอบทีละครั้งและใช้ระยะเวลาในการทดสอบที่ยาวนาน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงพัฒนาเครื่องทดสอบทดสอบแรงอัดของดินโดยปราศจากแรงด้านข้างร่วมกับเบन्दอร์อิเลเมนต์ที่สามารถทดสอบค่าทั้งหมดได้ในการทดสอบเพียงครั้งเดียว

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าโมดูลัสเฉือนของดินเหนียวกรุงเทพมหานครที่ผสมผงซิลิกา

2.2 เพื่อพัฒนาเครื่องทดสอบแรงอัดของดินโดยปราศจากแรงด้านข้างร่วมกับเบन्दอร์อิเลเมนต์

3. วิธีดำเนินการวิจัย

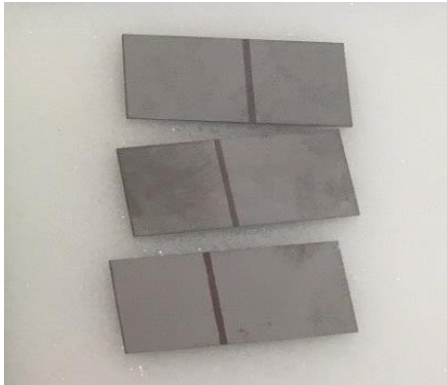
3.1 ผู้วิจัยดำเนินการพัฒนาเครื่องทดสอบแรงอัดของดินโดยปราศจากแรงด้านข้างร่วมกับเบन्दอร์อิเลเมนต์โดยใช้โครงทดสอบแรงอัดของดินโดยปราศจากแรงด้านข้างของ ELE International มาพัฒนาประกอบติดตั้งอุปกรณ์ Axial force transducer และ Axial Displacement transducer ของ Kyowa ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 เครื่องทดสอบแรงอัดของดินโดยปราศจากแรงด้านข้าง

3.2 ติดตั้งเบन्दอร์อิเลเมนต์ เพื่อวัดค่าโมดูลัสที่ระดับ Small strain ซึ่งเบन्दอร์อิเลเมนต์ (Bender element) จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณระบบเครื่องกลไฟฟ้า (Electro mechanical system) โดยจะแปลงพลังงานกล (การสั่นไหว) เป็นพลังงานทางไฟฟ้าและในทางกลับกันจะแปลงพลังงานทางไฟฟ้าเป็นพลังงานทางกล เบन्दอร์อิเลเมนต์จะมีลักษณะเป็นแผ่น Piezo ceramic สองแผ่นประกบติดกัน จะสามารถเป็นได้ทั้งตัวรับสัญญาณและตัวส่งสัญญาณ โดยที่การใช้จะแตกต่างกัน

ในการต่อวงจรไฟฟ้า ซึ่งในการใช้เบนเดอร์อิลิเมนต์ เนื่องจากเป็นวัสดุที่ต้านทานกระแสไฟฟ้า เพราะฉะนั้นจะต้องระวังเรื่องการลัดวงจร จึงจำเป็นต้องมีฉนวนกันกระแสไฟฟ้าลัดวงจร เนื่องจากความชื้นโดยจะใช้ Epoxy เคลือบรอบตัวเบนเดอร์อิลิเมนต์ ดังภาพที่ 2



(ก) ตัวอย่างเบนเดอร์อิลิเมนต์ T226



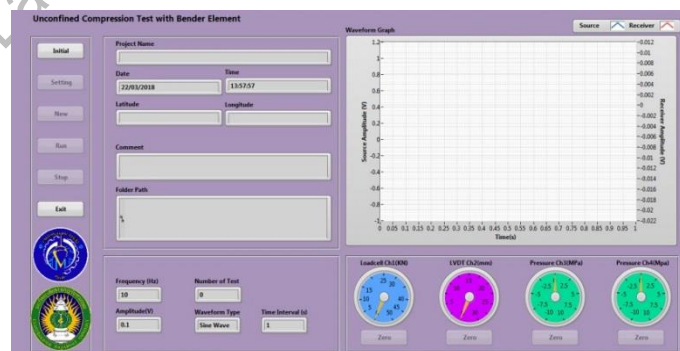
(ข) การต่อสายไฟฟ้ากับเบนเดอร์อิลิเมนต์

ภาพที่ 2 เบนเดอร์อิลิเมนต์

3.3 ติดตั้งอุปกรณ์ประกอบเพื่อการรับส่งสัญญาณคลื่นโดยใช้ NI CompactDAQ Set ซึ่งประกอบติดตั้งกับ NI9237, NI9215, NI9263, NI9915, Function generator, Amplified voltage และ DC supply 24V 5A สำหรับควบคุมการทำงานและบันทึกผลด้วยโปรแกรม LabView ดังภาพที่ 3



(ก) NI CompactDAQ Set



(ข) LabView Program

ภาพที่ 3 อุปกรณ์รับส่งสัญญาณและบันทึกผล

3.4 เก็บตัวอย่างดินสำหรับนำมาทดสอบ ซึ่งดินเหนียวที่บริเวณเขตบางเขน กรุงเทพมหานคร ที่ความลึก 0 - 5 เมตร ($13^{\circ}53'03''\text{N}$, $100^{\circ}36'19''\text{E}$) ซึ่งมีคุณสมบัติทางวิศวกรรม ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของตัวอย่างดินเหนียวที่ใช้ทดสอบ

คุณสมบัติ	มาตรฐานการทดสอบ	ค่า
Water content, Wc (%)	ASTM D 4959-00	20-21
Total unit weight, γ_t (t/m ³)	ASTM D 4253-00	1.95
Liquid limit, LL (%)	ASTM D 4318	53
Plastic limit, PL (%)	ASTM D 4318	28
Plasticity index, PI (%)	ASTM D 4318	25
Specific gravity, G_s	ASTM D 854-00	2.56

แล้วทำการบดอัดดินเหนียวแบบมาตรฐาน ASTM D 698-12e2 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (ASTM International, 2019) โดยผสมน้ำปกติและผสมผงซิลิกาเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 จนถึง 50 ของน้ำหนักน้ำตามลำดับ แล้วคลุกให้เข้ากันตามภาพที่ 4 และตัดแต่งตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM D 2166-00 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil (ASTM International, 2000) ตามภาพที่ 5 ก่อนนำไปติดตั้งกับเครื่องทดสอบแรงอัดของดินโดยปราศจากแรงด้านข้างร่วมกับเบนเดอร์อิลิเมนต์ เพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและค่าโมดูลัสเฉือนต่อไป



(ก) ดินเหนียวผสมผงซิลิกา



(ข) บดอัดดินแบบมาตรฐาน

ภาพที่ 4 การทดสอบบดอัดดิน



ภาพที่ 5 การตัดแต่งตัวอย่างดินที่ได้จากการทดสอบการบดอัดดิน

3.5 เมื่อตัดแต่งตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบบดอัดดินแล้ว นำมาติดตั้งกับเครื่องทดสอบแรงอัดของดินโดยปราศจากแรงด้านข้างร่วมกับเบนด์ร้อลิเมนต์ (ภาพที่ 6) ซึ่งการทดสอบจะสามารถหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ได้จากสมการที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM D 2166-00 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil (Pairojn, P. and Pedrung, S., 2018)

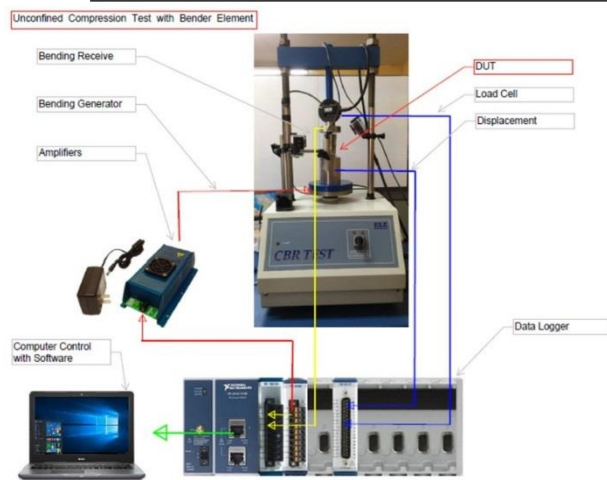
$$S_u = \frac{q_u}{2} \quad (1)$$

เมื่อ S_u คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength) และ q_u คือ ค่ากำลังรับแรงอัดของดินโดยปราศจากแรงด้านข้าง (Unconfined Compressive Strength)

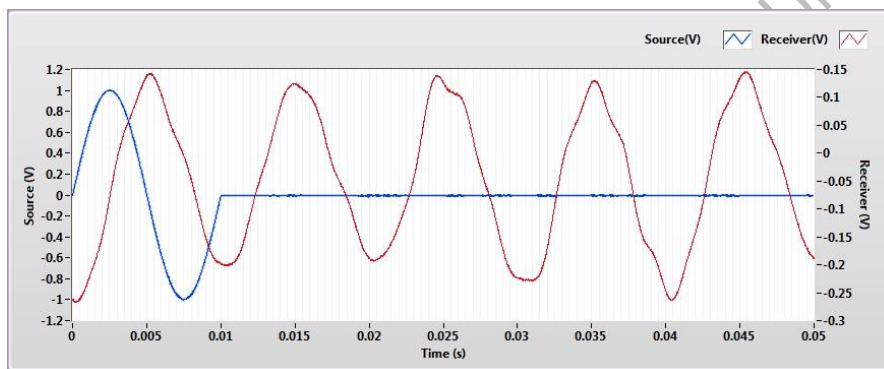
โดยระบบเบนด์ร้อลิเมนต์ที่ได้ถูกติดตั้งไว้ในทดสอบแรงอัดของดินโดยปราศจากแรงด้านข้าง (ภาพที่ 6) โดยส่งสัญญาณคลื่นเฉือนรูป Sine ขนาด 20V p-p ความถี่ 1 kHz ถูกสร้างโดย Function generator และส่งผ่านตัวส่งที่ Base ผ่านตัวอย่างดินไปที่ตัวรับที่ Top cap เวลาที่คลื่นเฉือนใช้เดินทางผ่านตัวอย่างดิน (ภาพที่ 7) จะใช้คำนวณหาความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave velocity) ดังสมการที่ 2 (Pairojn, P. and Pedrung, S., 2018)

$$V_s = \frac{L}{t} \quad (2)$$

เมื่อ V_s คือ ความเร็วคลื่นเฉือน (m/s), ΔL คือ ระยะทางระหว่างปลายทั้งสองข้างของเบนด์ร้อลิเมนต์ (m) และ Δt คือ ระยะเวลาที่คลื่นเดินทางระหว่างตัวส่งและตัวรับสัญญาณ peak-peak (s)



ภาพที่ 6 ระบบเครื่องทดสอบแรงอัดของดินโดยปราศจากแรงด้านข้างร่วมกับเบนด์อริลิเมนต์ที่ได้รับการพัฒนา



ภาพที่ 7 คลื่นเค้นจากการทดสอบดินผสมซิลิกาในอัตราร้อยละ 30

เมื่อได้ค่าความเร็วคลื่นเค้นแล้ว จากนั้นสามารถหาค่าโมดูลัสเค้นระดับความเครียดต่ำ (Small-strain shear modulus) ได้จากสมการที่ 3 (Pairojn, P. and Pedrung, S., 2018)

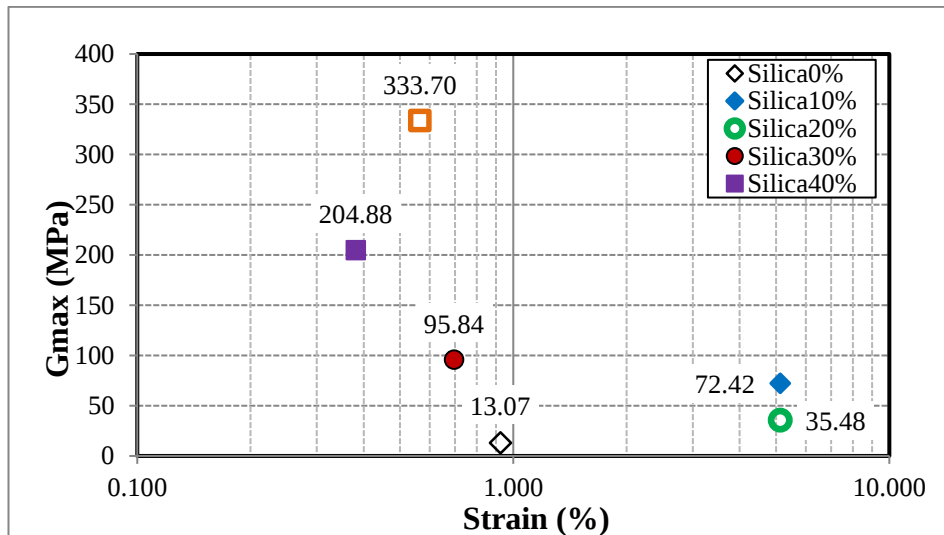
$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (3)$$

เมื่อ $G_{\max}$ คือ ค่าโมดูลัสเค้น (Shear modulus), ρ คือ ความหนาแน่นของดิน และ V_s คือ ความเร็วคลื่นเค้น (m/s)

4. ผลการวิจัย

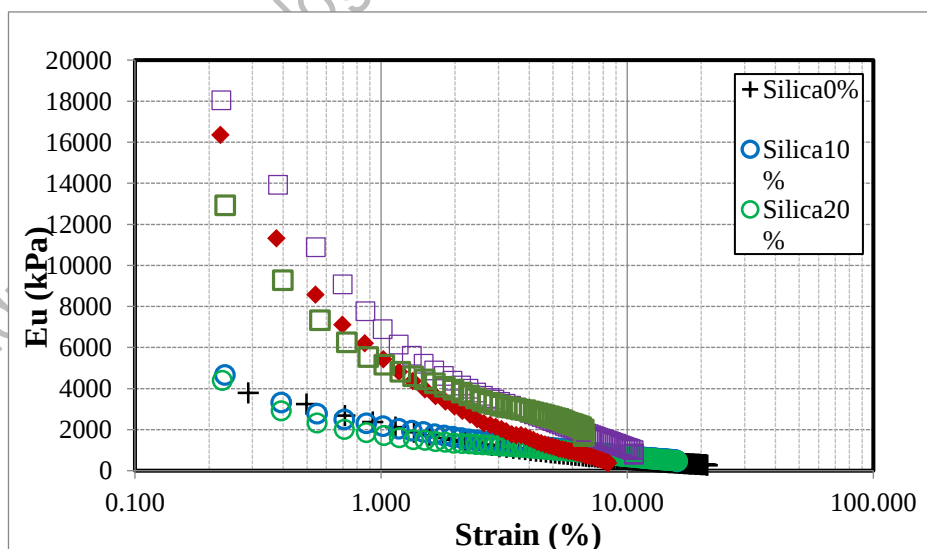
4.1 จากการทดสอบแรงอัดของดินโดยปราศจากแรงด้านข้างร่วมกับเบนด์อริลิเมนต์ พบว่า ค่าโมดูลัสเค้นจะลดลงตามระดับความเครียดที่เพิ่มขึ้น โดยค่าโมดูลัสเค้นของดินที่ผสมน้ำและซิลิกา ร้อยละ 50 มีค่ามากที่สุด 333.70 MPa ซึ่งมีค่ามากกว่าผสมน้ำปกติซึ่งมีค่า 13.07 MPa อยู่ประมาณ

25 เท่า ณ ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมต่อการบดอัด (Optimum moisture content, OMC) ดังภาพที่ 8



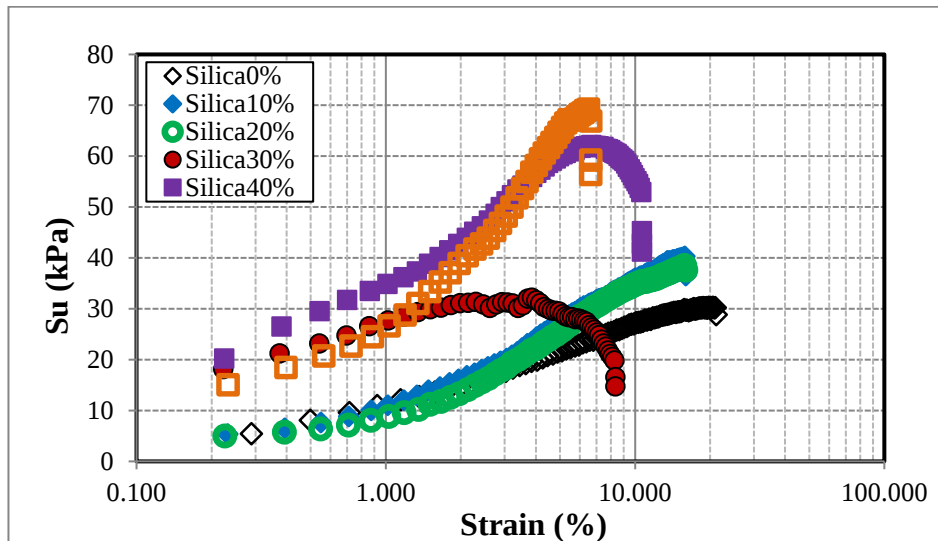
ภาพที่ 8 ค่าโมดูลัสเฉือนของดินที่ผสมน้ำและซิลิกา

4.2 จากการทดสอบแรงอัดของดินโดยปราศจากแรงด้านข้างร่วมกับเบนด์รอลิเมนต์ พบว่า ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะลดลงตามระดับความเครียดที่เพิ่มขึ้น โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินที่ผสมน้ำและซิลิการ้อยละ 40 มีค่ามากที่สุด 18,039.50 kPa ซึ่งมีค่ามากกว่าผสมน้ำปกติซึ่งมีค่า 3,799.16 kPa อยู่ประมาณ 5 เท่า ณ ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมต่อการบดอัด (Optimum moisture content, OMC) ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินที่ผสมน้ำและซิลิกา

4.3 จากการทดสอบแรงอัดของดินโดยปราศจากแรงด้านข้างร่วมกับเบนเดอร์อิลิเมนต์ พบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินที่ผสมน้ำและซิลิการ้อยละ 50 มีค่ามากที่สุด 69.25 kPa ซึ่งมีค่ามากกว่าผลสมน้ำปกติซึ่งมีค่า 30.34 kPa อยู่ประมาณ 2 เท่า ณ ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมต่อการบดอัด (Optimum moisture content, OMC) ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินที่ผสมน้ำและซิลิกา

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

5.1 จากผลการวิจัยสรุปได้ว่า การปรับปรุงคุณภาพดินคันทางโดยใช้ซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่มระหว่างการบดอัดดินในการก่อสร้างสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของคันทาง ให้มีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและโมดูลัสเฉือนเพิ่มขึ้น จากผลการทดสอบดินที่ผสมน้ำและซิลิกาตามอัตราส่วนต่าง ๆ นั้น ให้ค่าโมดูลัสเฉือนและค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำมากกว่าดินที่ผสมน้ำปกติในทุกกรณี แสดงให้เห็นว่า สามารถนำซิลิกาไปใช้ปรับปรุงคุณภาพดินโดยการผสมเป็นสารผสมเพิ่มในระหว่างการบดอัดดินก่อสร้างคันทางได้

5.2 ผู้วิจัยได้พัฒนาเครื่องทดสอบแรงอัดของดินโดยปราศจากแรงด้านข้างร่วมกับเบนเดอร์อิลิเมนต์ (Pairojn, P. and Pedrung, S., 2018) ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ค่าความเร็วคลื่นเฉือนและค่าโมดูลัสเฉือนของดินเหนียวได้พร้อมกันในการทดสอบเพียงครั้งเดียว ทำให้ลดระยะเวลา ประหยัดค่าใช้จ่าย และนำไปแก้ไขปัญหาระหว่างการก่อสร้างได้อย่างทันท่วงที จึงเป็นนวัตกรรมที่ตอบโจทย์ให้แก่วิศวกรผู้ออกแบบ วิศวกรภาคสนาม และผู้ควบคุมงานอีกทางหนึ่งด้วย

5.3 วิศวกรหรือผู้ควบคุมงานจะต้องพิจารณาความคุ้มค่าและความเป็นไปได้ในเชิงเศรษฐศาสตร์ในการนำไปใช้งาน ในส่วนของราคางานก่อสร้างที่เพิ่มขึ้นจากการใช้ซิลิกาในอัตราส่วน

ต่าง ๆ ต้นทุนของซิลิกา ราคา 10 บาท/กิโลกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับสารผสมเพิ่มตัวอย่างเช่น ยางพารา ราคา 155 บาท/กิโลกรัม โมโนแซคคาไรด์ ราคา 12 บาท/กิโลกรัม แมกนีเซียมคลอไรด์ ราคา 22 บาท/กิโลกรัม และปูนขาว ราคา 15 บาท/กิโลกรัม พบว่า หากผสมในอัตราส่วนที่เท่ากันซิลิกา จะมีต้นทุนที่ต่ำกว่า

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยได้รับการสนับสนุนจากทุนวิจัยงบประมาณรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2561 ของมหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม

7. เอกสารอ้างอิง

- ASTM International. (2019). **ASTM D 698-12e2 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort**, [online]. Available HTTP: <http://www.astm.org/Standards/D698.htm>, access on 13/05/2019.
- _____. (2000). **ASTM D 2166-00 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil**, [online]. Available HTTP: <http://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D2166-00.htm>, access on 13/05/2019.
- Barnes, G. (2018). Workability of clay mixtures, **Applied Clay Science**, Vol.162(153), 107-112.
- Goodarzia, A., Akbari, H.R. and Salimi, M. (2016). Enhanced stabilization of highly expansive clays by mixing cement and silica fume, **Applied Clay Science**, Vol.132(133), 678-684.
- Istratea, O. and Chen, B. (2018). Structure and properties of clay/recycled plastic composites, **Applied Clay Science**, Vol.162(156), 144-151.
- Mousavi, S.E. and Karamvand, A. (2017). Assessment of strength development in stabilized soil with CBR plus and silica sand, **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, Vol.4(4), 412-421.
- Pairojn, P. and Pedrung, S. (2018). An identification of shear wave velocity of soft bangkok clay using unconfined compression test with bender element, **The 23rd National Convention on Civil Engineering**, Srinakharinwirot University Nakhonnayok Province. (in Thai)