

กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯ  
จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ  
Undrained Shear Strength of Bangkok Clay from Laboratory Tests

วรรณวรงค์ รัตนานิกม และ สยาม ยิ้มศิริ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

Email: wanwarangr@buu.ac.th, ysiam@buu.ac.th



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ( $s_u$ ) ของดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่วัดได้จากการทดสอบต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ (i) การทดสอบแรงอัดแกนเดียว (UC), (ii) การทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่อัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำ (UU), (iii) การทดสอบแรงอัดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำ (CIUC และ  $CK_0UC$ ), (iv) การทดสอบแรงดึงสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำ (CIUE และ  $CK_0UE$ ), (v) การทดสอบเฉือนตรง (DS) และ (vi) การทดสอบเฉือนตรงอย่างง่าย (DSS) ชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่ศึกษาเป็นชั้นดินอ่อนมากถึงแข็งปานกลางอยู่ระหว่างความลึก 2-14 เมตร ผลการศึกษาได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $s_u$  กับความลึกและความแปรปรวนของข้อมูลจากผลการทดสอบชนิดต่างๆ และนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $s_u$  ที่ได้จากการทดสอบเหล่านี้ นอกจากนี้ยังได้ตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงประสบการณ์และเชิงทฤษฎีที่นำเสนอโดยผู้วิจัยต่างๆ

คำสำคัญ : ▶▶▶

กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ดินเหนียวกรุงเทพฯ การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

 ABSTRACT

This research studied the undrained shear strength of undisturbed Bangkok Clay specimens investigated by various laboratory tests, i.e. (i) unconfined compression test (UC), (ii) unconsolidated undrained triaxial test (UU), (iii) isotropically/ $K_0$ -consolidated undrained triaxial compression tests (CIUC and  $CK_0UC$ ), (iv) isotropically/ $K_0$ -consolidated undrained triaxial extension tests (CIUE and  $CK_0UE$ ), (v) direct shear test (DS), and (vi) direct simple shear test (DSS). The soil layers of interest in this study are very soft to medium clays which are located between 2-14 m depth below ground

surface. The variations of undrained shear strength with depth and their degree of scattering are presented and discussed. The interrelationships among undrained shear strengths from various laboratory tests are analyzed and relevant discussions are made. The validity of various empirical and theoretical relationships for predicting undrained shear strength of Bangkok Clay are evaluated.

Keywords :

undrained shear strength, Bangkok clay, laboratory tests

## 1 บทนำ

กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (undrained shear strength,  $s_u$ ) ถือเป็นสมบัติต้านกำลังที่สำคัญของดินเหนียวภายใต้เงื่อนไขการให้แรงระยะสั้นหรือไม่ระบายน้ำ การวิเคราะห์เสถียรภาพของดินในกรณีดังกล่าวมักเป็นแบบหน่วยแรงรวม (total stress analysis) โดยอาศัยค่า  $s_u$  ของดินซึ่งสามารถหาได้จากการทดสอบทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนาม งานวิจัยในอดีตพบว่า ค่า  $s_u$  มีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวิธีการทดสอบที่ต่างกัน เช่น รูปแบบการเฉือน (mode of shearing) สภาพขอบเขต (boundary conditions) อัตราเร็วในการให้แรง (rate of loading) หน่วยแรงโอบรัด (confining stress) และหน่วยแรงเริ่มต้น (initial stress) [1-4] ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของโครงสร้างทางวิศวกรรมปฐพีที่มีความแม่นยำจำเป็นต้องพิจารณา ค่า  $s_u$  ของดินให้สอดคล้องกับสถานะที่เกิดขึ้นจริงในสนาม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องให้ความสำคัญในการเลือกวิธีการทดสอบที่มีเงื่อนไขสภาพขอบเขตที่สอดคล้องกัน จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่า มีนักวิจัยให้ความสนใจในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่า  $s_u$  จากการทดสอบวิธีต่างๆ [1, 5, 6, 7] แต่อย่างไรก็ตาม ข้อมูลการวิเคราะห์ดังกล่าวของดินเหนียวกรุงเทพฯ ยังคงมีน้อย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาและเปรียบเทียบ ค่า  $s_u$  ของดินเหนียวกรุงเทพฯ จากการทดสอบต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ

## 2 งานวิจัยในอดีตเกี่ยวกับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดิน

Kulhawy & Mayne [3] เสนอสมการเชิงประสบการณ์ระหว่างค่า  $s_u/\sigma_{vo}'$  จากการทดสอบ DSS และจากการทดสอบอื่นๆ ดังสมการที่ (1) ถึง (3) โดยพบว่าดินเหนียวเนื้อเดียวจะมีค่า  $s_u$  จากการทดสอบ plane strain compression (PSC) มากกว่าค่าจากการทดสอบ direct simple shear (DSS) และมากกว่าค่าจากการทดสอบ plane strain extension (PSE) ตามลำดับ ค่า  $s_u$  จากการทดสอบ triaxial compression (TC) มีค่าใกล้เคียงกับค่าจากการทดสอบ PSC และค่า  $s_u$  จากการทดสอบ triaxial extension (TE) มีค่าน้อยกว่าค่าจากการทดสอบ PSE ประมาณ 10-25% Chen & Kulhawy [4] ได้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $s_u$  ที่ได้จากการทดสอบ CIUC, UU และ UC โดยพบว่าดินเหนียวที่มีมุมเสียดทาน  $\phi = 30$  และ OCR < 2 จะมีค่าอัตราส่วน ( $s_u$ )UU หรือ UC/( $s_u$ )CIUC ประมาณ 0.40-0.75 และค่านี้มีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า OCR สูงขึ้น

$$\left(\frac{s_u}{\sigma_{vo}'}\right)_{DSS} = 0.67 \left(\frac{s_u}{\sigma_{vo}'}\right)_{CK_{\sigma UC}} \quad (1)$$

$$\left(\frac{s_u}{\sigma_{vo}'}\right)_{DSS} = 0.40 \left[ \left(\frac{s_u}{\sigma_{vo}'}\right)_{PSC} + \left(\frac{s_u}{\sigma_{vo}'}\right)_{PSE} \right] \quad (2)$$

$$\left(\frac{s_u}{\sigma_{vo}'}\right)_{DSS} = 0.45 \left[ \left(\frac{s_u}{\sigma_{vo}'}\right)_{CK_{\sigma UC}} + \left(\frac{s_u}{\sigma_{vo}'}\right)_{CK_{\sigma UE}} \right] \quad (3)$$

Ladd & Lambe [8] พบว่า การรบกวนตัวอย่างดิน และค่าแรงดันน้ำในดินที่ลดลงจนติดลบเนื่องจากการเจาะสำรวจและเก็บตัวอย่างดินในสนามเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ค่า  $s_u$  ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการต่ำกว่าความเป็นจริงประมาณ 20-50% ดังนั้น Bjerrum [9] จึงเสนอเทคนิค Recompression และ Ladd & Foott [10] เสนอเทคนิค SHANSEP (Stress History and Normalization Soil Engineering Parameters) เพื่อลดปัญหาดังกล่าว โดยเทคนิค SHANSEP ทำโดยการเพิ่มหน่วยแรงในช่วงอัดตัวคายน้ำแก่ตัวอย่างดินให้สูงเกินกว่าค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เคยกระทำต่อดินในอดีต ( $v, \max'$ ) เพื่อให้ตัวอย่างดินอยู่ในสภาวะ NC จากนั้นจึงลดหน่วยแรงอัดตัวคายน้ำไปที่ค่า OCR ต่างๆ และเฉือนตัวอย่างดินจนกระทั่งวัฏปฏิบัติ ผลการทดสอบสามารถสร้างความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (4)

$$\left(\frac{s_u}{\sigma_{vo}'}\right)_{OC} = \left(\frac{s_u}{\sigma_{vo}'}\right)_{NC} \text{OCR}^m \quad (4)$$

Ladd & Foott [10] และ Graham et al. [11] รายงานว่า กำลังของดินที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการขึ้นกับค่าอัตราความเครียด (strain rate.) โดยพบว่า ค่า  $s_u$  จะเพิ่มขึ้นประมาณ 105% เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นในแต่ละรอบของ log สาเหตุเนื่องมาจากความคืบแบบไม่ระบายน้ำของตัวอย่างดินที่เกิดขึ้นระหว่างการเฉือนจะทำให้  $u$  เพิ่มขึ้น ความเค้นประสิทธิผลลดลง และกำลังลดลง เมื่ออัตราความเครียดลดลงจะทำให้มีเวลาเกิดความคืบมากขึ้น และทำให้ค่า  $s_u$  ลดลง

หากพิจารณาอัตราความเครียดที่ 1%/ชั่วโมง เป็นค่ามาตรฐานจะสามารถแสดงความสัมพันธ์โดยประมาณของค่า  $s_u$  ที่อัตราความเครียดต่างๆ ได้ดังสมการที่ (5)

$$\frac{s_u}{s_u \text{ for } \dot{\epsilon} = 1\% / \text{hr}} = 1 + 0.1 \log \dot{\epsilon} \quad (5)$$

### 3. งานวิจัยในอดีตเกี่ยวกับดินเหนียวกรุงเทพฯ

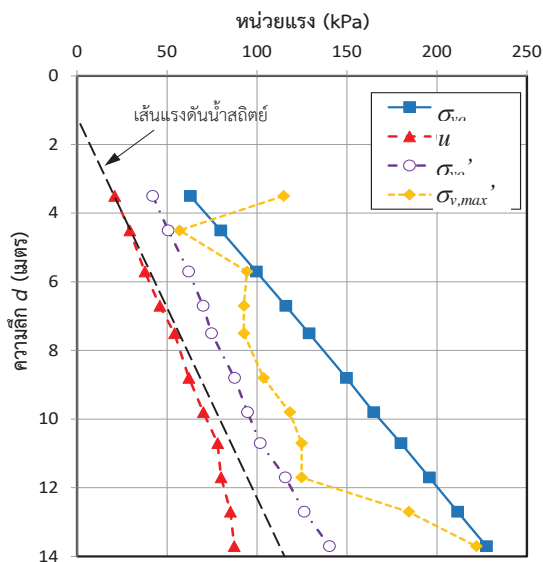
ชั้นดินกรุงเทพฯ มีลักษณะดังนี้ (i) ชั้นบนที่ระดับความลึก 2-5 เมตรแรกเป็นชั้นดินเปลือก (weathered crust) มีค่า SPT ระหว่าง 2-21 และค่าความชื้นของดินเท่ากับ 10-35% (ii) ที่ระดับความลึก 3-12 เมตรเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมาก (soft to very soft clay) มีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำระหว่าง 10-30 kPa และค่าความชื้นของดินเท่ากับ 60-105% (iii) ที่ระดับความลึก 15-35 เมตรเป็นชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางถึงแข็ง (medium to stiff clay) มีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำระหว่าง 26-160 kPa และค่าความชื้นของดินเท่ากับ 15-60% (iv) ที่ระดับลึกกว่า 35 เมตรเป็นชั้นดินทรายชั้นที่ 1 และใต้ชั้นนี้จะเป็นชั้นดินเหนียวและชั้นทรายสลับกัน และ (v) คาดว่าชั้นหินแข็ง (bedrock) อยู่ที่ระดับความลึกประมาณ 550-2,000 เมตร [12-13] โดยทั่วไปดินเหนียวกรุงเทพฯ มีค่า OCR ประมาณ 1.1-1.6 Shibuya et al. [14] แสดงคุณสมบัติของดินกรุงเทพฯ บริเวณสถานี MRT สุทธิสาร ดังแสดงในตารางที่ 1 และภาพที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของดินกรุงเทพฯ บริเวณสถานี MRT สุทธิสาร [14]

ความลึก (เมตร)	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w$ (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	$\sigma_{vo}$ (kPa)	$u$ (kPa)	$\sigma_{vo}'$ (kPa)	$\sigma_{v,max}'$ (kPa)	OCR
3.5	17.3	48.5	60.4	25.2	35.2	62.9	20.9	42.0	114.8	2.7
4.5	16.9	54.3	67.5	22.2	45.3	79.8	29.2	50.5	56.9	1.1

5.7	16.5	68.5	73.7	25.7	48.0	99.6	37.6	62.0	94.4	1.5
6.7	16.3	48.8	45.8	19.4	26.4	115.9	45.9	69.9	92.7	1.3
7.5	16.2	51.7	62.4	20.5	41.9	128.8	54.1	74.7	92.7	1.2
8.8	16.0	77.3	74.0	23.5	50.5	149.6	62.1	87.5	103.6	1.2
9.8	15.9	63.9	67.0	21.4	45.6	164.8	70.1	94.7	118.2	1.2
10.7	15.9	68.8	94.5	26.5	68.0	179.9	78.1	101.8	124.8	1.2
11.7	15.8	69.2	97.3	27.2	70.1	195.7	80.0	115.7	124.8	1.1
12.7	15.8	60.0	84.8	23.9	60.9	211.4	85.2	126.2	184.3	1.5
13.7	16.0	64.7	87.7	24.6	63.1	227.5	87.3	140.2	221.9	1.6

หมายเหตุ  $t$  = หน่วยน้ำหนักของดิน  $vo$  = หน่วยแรงกดทับทั้งหมด  $u$  = ความดันน้ำ  $vo'$  = หน่วยแรงกดทับประสิทธิผล  $OCR$  = อัตราส่วนการอัดตัวคายน้ำ



ภาพที่ 1 หน่วยแรงของดินเหนียวกรุงเทพฯ

งานวิจัยนี้ได้ทดสอบดินในห้องปฏิบัติการและ ทบทวนผลการทดสอบจากงานวิจัยในอดีต เพื่อเปรียบเทียบค่า  $s_u$  ของดินเหนียวกรุงเทพฯ จากการทดสอบ ต่างๆ โดยตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่ศึกษามาจาก

5 แห่ง ได้แก่ (i) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CU) (ii) มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ (KU) (iii) สถาบันเทคโนโลยี แห่งเอเชีย (AIT) (iv) สถานี MRT สุทธิสาร และ (v) สนามบินสุวรรณภูมิ ลักษณะชั้นดินและคุณสมบัติทาง ดัชนีต่างๆ ของชั้นดินแต่ละแห่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ โดยค่าระดับความลึกของดินแต่ละ ชั้นในตารางที่ 3 เป็นค่าความลึกเฉลี่ยของดินเหนียว กรุงเทพฯ ที่ศึกษาทั้ง 5 แห่ง และมีค่าคุณสมบัติทาง ดัชนีเฉลี่ยของดินเหนียวกรุงเทพฯ จากทุกแห่งเป็น ดังนี้ (i) พิกัดเหลว (Liquid Limit, LL) = 80–90% (ii) พิกัดพลาสติก (Plastic Limit, PL) = 30–33% (iii) ดัชนีพลาสติก (Plasticity Index, PI) = 52–57% (iv) ความชื้น (water content, w) ของชั้นดินเหนียวอ่อน ถึงอ่อนมาก (ความลึก 2–11 เมตร) = 70–80% ส่งผล ให้ค่าดัชนีเหลว (Liquidity Index, LI) ในช่วงความลึก ดังกล่าว = 0.75–0.83 และ (v) ความชื้นของชั้นดิน เหนียวแน่นปานกลาง (ความลึก 11–14 เมตร) = 65% และค่า LI = 0.66 (ดูภาพที่ 2)

ตารางที่ 2 ลักษณะชั้นดินของบริเวณที่ศึกษา

ชั้นดิน	CU	KU	AIT	MRT สุทธิสาร	สนามบินสุวรรณภูมิ
ชั้นดินเปลือก	0-3 เมตร	0-2 เมตร	0-2 เมตร	0-4 เมตร	0-1 เมตร
ชั้นดินเหนียวอ่อนมาก	3-6 เมตร	2-5 เมตร	ไม่พบ	ไม่พบ	1-8 เมตร
ชั้นดินเหนียวอ่อน	6-11 เมตร	5-11 เมตร	2-10 เมตร	4-9 เมตร	8-13 เมตร
ชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง	11-14 เมตร	11-13 เมตร	ไม่พบ	9-13 เมตร	13-15 เมตร

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางดัชนีต่างๆของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯที่ศึกษา

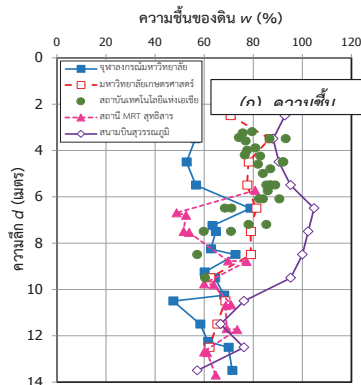
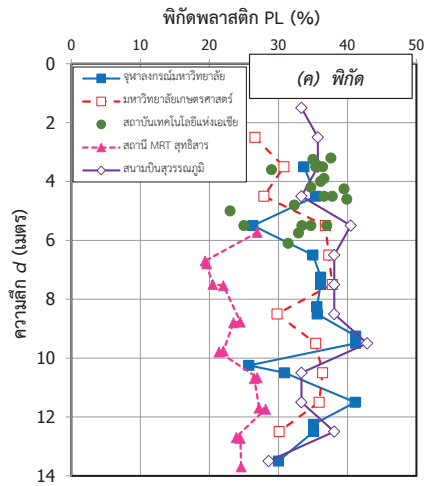
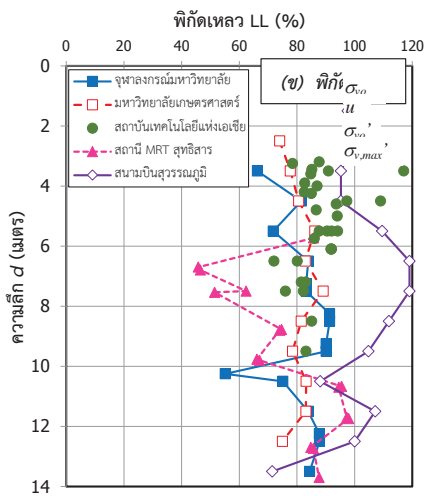
ชั้นดิน	ระดับความลึก (เมตร)	w (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	LI
ชั้นดินเหนียวอ่อนมาก	2 – 6	81.6	91.4	33.5	57.9	0.83
ชั้นดินเหนียวอ่อน	6 – 11	72.0	84.9	33.2	51.7	0.75
ชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง	11 – 14	64.6	82.6	29.4	53.2	0.66

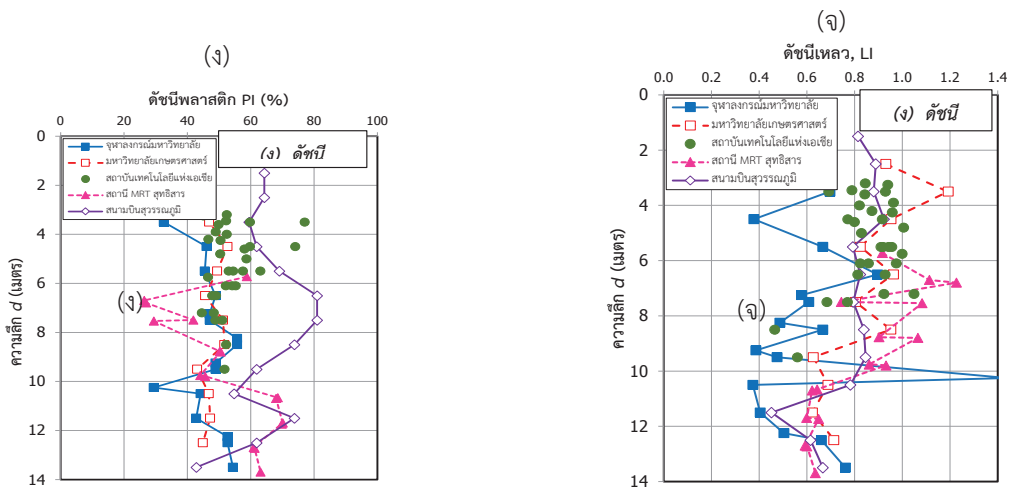
ตารางที่ 4 รายละเอียดการทดสอบ

การทดสอบ	อ้างอิง	ที่มาของตัวอย่างดิน	เงื่อนไขการทดสอบ
UC	[21]	CU, KU, AIT	ตัวอย่างดิน $\phi$ 38 มม.×สูง 76 มม. $\dot{\epsilon}_a = 1\%$ /นาที่
	[15]	MRT สุทธิสาร	
	[14]	MRT สุทธิสาร	
UU	[16]	สนามบินสุวรรณภูมิ	ตัวอย่างดิน $\phi$ 38 มม.×สูง 76 มม. $\dot{\epsilon}_a = 1\%$ /นาที่
CIUC/ CIUE	[21, 22] (CIUC)	CU [21, 22], KU [21], AIT [21]	ตัวอย่างดิน $\phi$ 50 มม.×สูง 100 มม. $\dot{\epsilon}_a = 0.025\%$ /นาที่
	[17] (CIUE)	AIT	ตัวอย่างดิน $\phi$ 38 มม.×สูง 76 มม. $\dot{\epsilon}_a = 0.064\%$ /นาที่
CK <sub>o</sub> UC/ CK <sub>o</sub> UE	[18] (CK <sub>o</sub> UC/CK <sub>o</sub> UE)	AIT	ตัวอย่างดิน $\phi$ 50 มม.×สูง 100 มม. $\dot{\epsilon}_a = 0.0067\%$ /นาที่
	[15] (CK <sub>o</sub> UC/CK <sub>o</sub> UE)	MRT สุทธิสาร	ตัวอย่างดิน $\phi$ 38 มม.×สูง 76 มม. $\dot{\epsilon}_a = 0.1\%$ /นาที่
	[14] (CK <sub>o</sub> UC)	MRT สุทธิสาร	ตัวอย่างดิน $\phi$ 50 มม.×สูง 100 มม. $\dot{\epsilon}_a =$

			0.05%/นาทึ
DS	[19]	AIT	ตัวอย่างดิน $\phi$ 60 มม. $\times$ สูง 20 มม.อัตราเร็วในการทดสอบ = 1 มม./นาทึ
	[15]	MRT สุทธิสาร	ตัวอย่างดิน $\phi$ 60 มม. $\times$ สูง 20 มม.อัตราเร็วในการทดสอบ = 0.25 มม./นาทึ
	[14]	MRT สุทธิสาร	ไม่ระบุขนาดตัวอย่างดินอัตราเร็วในการทดสอบ = 0.1 มม./นาทึ
	[20]	AIT	ตัวอย่างดิน $\phi$ 60 $\times$ 60 มม. $^2$ $\times$ สูง 50 มม.อัตราเร็วในการทดสอบ = 0.6 มม./นาทึ
DSS	[23]	BTS อ่อนนุช	เครื่องมือชนิด NGI ขนาดตัวอย่างดิน $\phi$ 67 มม. $\times$ สูง 20 มม $\dot{\gamma} = 0.083\%$ /นาทึ

หมายเหตุ  $\phi$  = เส้นผ่านศูนย์กลาง  $\dot{\epsilon}_a$  = อัตราความเครียดในแนวแกน  $\dot{\gamma}$  = อัตราความเครียดเฉือน





ภาพที่ 2 สมบัติทางดัดขึ้นนี้ต่างๆ ของดินเหนียวกรุงเทพฯ

(ก) ความชื้นของดิน (ข) พิกัดเหลว (ค) พิกัดพลาสติก (ง) ดัชนีพลาสติก (จ) ดัชนีเหลว

#### 4. ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

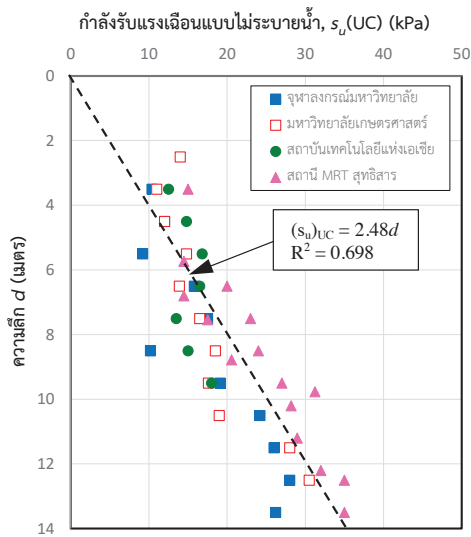
งานวิจัยนี้วิเคราะห์ค่า  $s_u$  ของดินเหนียวกรุงเทพฯ จากการทดสอบต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ (i) การทดสอบแรงอัดแกนเดียว (UC), (ii) การทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่อัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำ (UU) (iii) การทดสอบแรงอัดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำ (CIUC และ  $CK_0UC$ ) (iv) การทดสอบแรงดึงสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำ (CIUE และ  $CK_0UE$ ) (v) การทดสอบเฉือนตรง (DS) และ (vi) การทดสอบเฉือนตรงอย่างง่าย (DSS) โดยผลการทดสอบได้จากการทบทวนข้อมูลจากงานวิจัยในอดีตตั้งสรุปในตารางที่ 4 เนื่องจากการทดสอบเหล่านี้ใช้อัตราความเครียดที่แตกต่างกัน ดังนั้นในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบจึงจำเป็นต้องปรับแก้ค่า  $s_u$  ให้มีอัตราความเครียดอ้างอิงเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 5 โดยใช้สมการที่ (5)

ตารางที่ 5 อัตราความเครียดอ้างอิง

การทดสอบ	อัตราความเครียดอ้างอิง
UC, UU	$\dot{\epsilon} = 1\%/นาที$
CIUC, CIUE, $CK_0UC, CK_0UE$	$\dot{\epsilon} = 0.025\%/นาที$
DS	อัตราเร็วในการทดสอบ = 1 มม./นาที
DSS	$\dot{\gamma} = 0.083\%/นาที$

#### 4.1 การทดสอบแรงอัดแกนเดียว

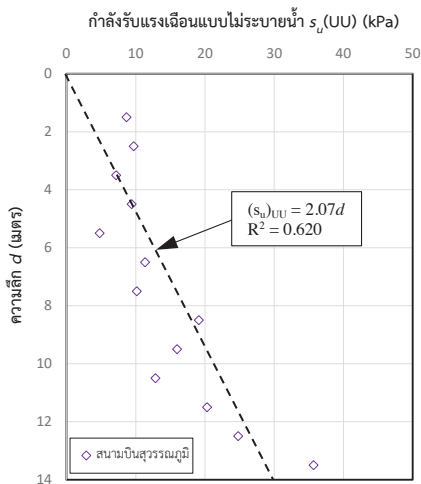
ภาพที่ 3 แสดงค่า  $s_u$  จากการทดสอบ UC ของตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่ CU, KU, และ AIT โดยทดสอบกับตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร สูง 76 มิลลิเมตร และเฉือนด้วยอัตราความเครียด 1%/นาที [21] นอกจากนั้นยังแสดงผลการทดสอบของ Shibuya et al. [14] และ Tanaka et al. [15] ที่สถานี MRT สุทธิสารซึ่งมีเงื่อนไขการทดสอบเหมือนกับของงานวิจัยนี้



ภาพที่ 3 ผลการทดสอบ UC

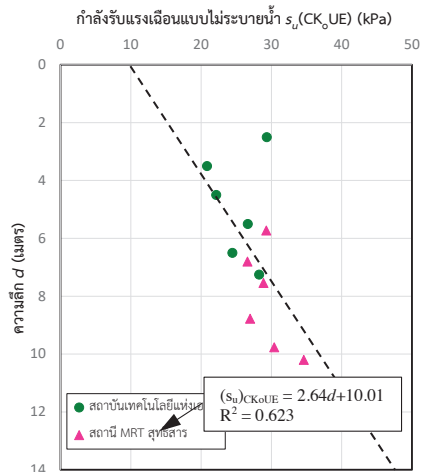
#### 4.2 การทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่อัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำ

ภาพที่ 4 แสดงค่า  $s_u$  จากการทดสอบ UU ของดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่สนามบินสุวรรณภูมิโดย Shibuya & Hanh [16] ซึ่งทดสอบกับตัวอย่างดินมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร สูง 76 มิลลิเมตร และเฉือนด้วยอัตราความเครียด 1%/นาที



ภาพที่ 4 ผลการทดสอบ UU

#### 4.3 การทดสอบแรงอัดและดึงสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำเท่ากันทุกทิศทางและไม่ระบายน้ำ



ภาพที่ 5 ผลการทดสอบ CIUC

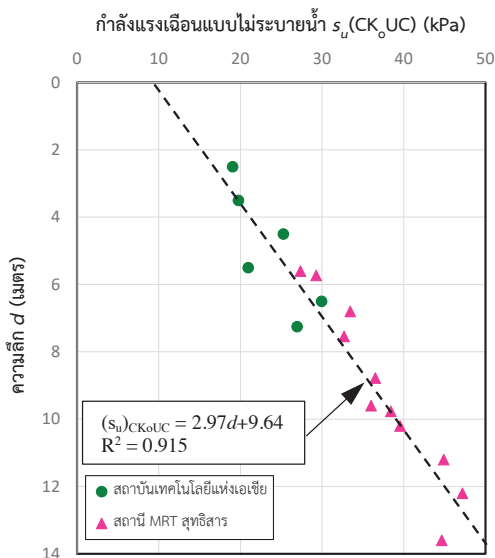
ภาพที่ 5 แสดงค่า  $s_u$  จากการทดสอบ CIUC ของตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่ CU [21, 22], KU [21] และ AIT [21] โดยตัวอย่างดินมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร และถูกให้หน่วยแรงอัดตัวคายน้ำเท่ากับหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยในสนามและเฉือนด้วยอัตราความเครียด 0.025%/นาที จากผลการทดสอบพบว่า ค่า  $s_u$  โดยวิธี CIUC มีความแปรปรวนน้อยกว่าวิธี UC และ UU Tapubolon [17] รายงานค่า  $s_u$  จากการทดสอบ CIUC ของดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่ AIT โดยตัวอย่างดินถูกหน่วยแรงอัดตัวคายน้ำสูงกว่าค่าหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยในสนามเพื่อให้ตัวอย่างดินอยู่ในสถานะ NC ก่อนจะลดค่าหน่วยแรงอัดตัวคายน้ำลงและเฉือนตัวอย่างดินที่ OCR = 1.2 และ 4 การทดสอบทำกับตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร สูง 76 มิลลิเมตร และเฉือนด้วยอัตราความเครียด 0.064%/นาที ค่า  $s_u$  ที่ได้จากการทดสอบนี้ถูกปรับแก้ไปที่อัตราความเครียดอ้างอิง 0.025%/นาที โดยสมการที่ (5) ผลการทดสอบสามารถ



สร้างสมการความสัมพันธ์โดยใช้เทคนิค SHANSEP ได้ตั้งสมการที่ (6) เมื่อทราบค่าคุณสมบัติของดินเหนียวกรุงเทพฯ ในตารางที่ 1 จะสามารถคำนวณหาค่า  $s_u$  ที่ความลึกต่างๆ ได้

$$\left(\frac{s_u}{\sigma_{vo}'}\right)_{CIUE} = 0.177OCR^{0.857} \quad (6)$$

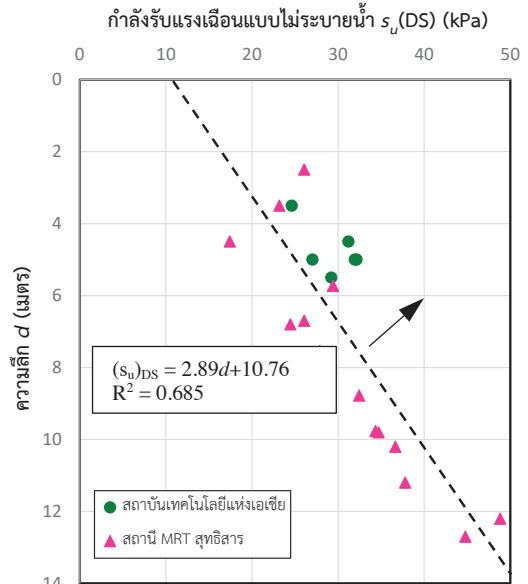
4.4 การทดสอบแรงอัดและดึงสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำไม่เท่ากันทุกทิศทางและไม่ระบายน้ำ



ภาพที่ 6 ผลการทดสอบ CK<sub>o</sub>UC

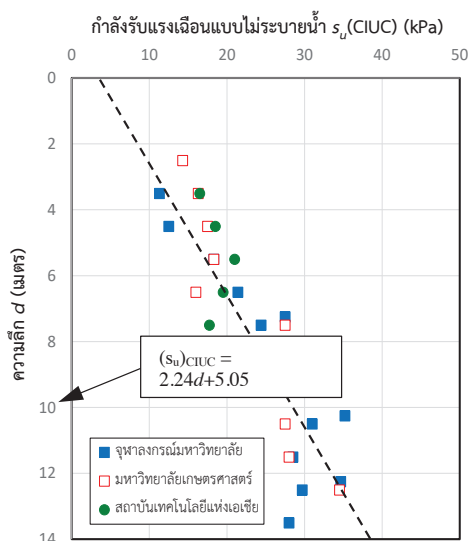
ภาพที่ 6 แสดงค่า  $s_u$  จากการทดสอบ CK<sub>o</sub>UC ของดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่สถานี MRT สุทธิสารโดย Tanaka et al. [15] และ Shibuya et al. [14] และที่ AIT โดย Seah & Lai [18] ภาพที่ 7 แสดงค่า  $s_u$  จากการทดสอบ CK<sub>o</sub>UE ของดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่สถานี MRT สุทธิสาร และ AIT โดย Tanaka et al. [15] และ Seah & Lai [18] ตามลำดับ การทดสอบเหล่านี้ทำโดยการให้หน่วยแรงอัดตัวคายน้ำกับตัวอย่างดินภายใต้สภาพ  $K_o$  ไปที่ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในสนามก่อนทำการเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบเหล่านี้มี 2 ขนาดคือ เส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร สูง 76 มิลลิเมตร และเส้น

ผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร และใช้อัตราความเครียดแตกต่างกัน คือ 0.0067–0.1%/นาที่ ค่า  $s_u$  จากผลการทดสอบเหล่านี้ถูกปรับแก้ไปที่ค่าอัตราความเครียดอ้างอิง 0.025%/นาที่ โดยใช้สมการที่ (5) ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่า  $s_u$  จากการทดสอบ CK<sub>o</sub>UC มีความแปรปรวนน้อยที่สุด



ภาพที่ 7 ผลการทดสอบ CK<sub>o</sub>UE

#### 4.5 การทดสอบเฉือนตรง



ภาพที่ 8 ผลการทดสอบ DS

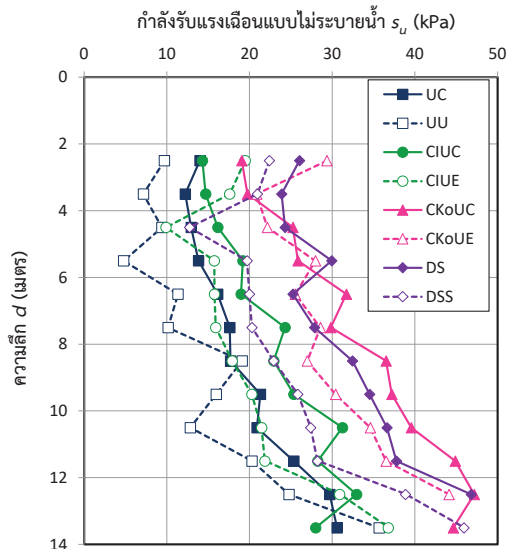
ภาพที่ 8 แสดงค่า  $s_u$  จากการทดสอบ DS ของดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่ AIT โดย Memon [20] และ Seah et al. [19] และที่สถานี MRT สุทธิสารโดย Tanaka et al. [15] และ Shibuya et al. [14] ตัวอย่างดินถูกหน่วยแรงอัดตัวคายน้ำในสภาพหนึ่งมิติเท่ากับหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งในสนามและเงื่อนไขไม่ระบายน้ำ ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบนี้มี 2 ขนาด คือ ตัวอย่างดินรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร และสูง 20 มิลลิเมตร และตัวอย่างดินรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 60 มิลลิเมตร และสูง 50 มิลลิเมตร ตัวอย่างดินถูกเชื่อมด้วยอัตราเร็วแตกต่างกัน คือ 0.1-1 มิลลิเมตร/นาที ค่า  $s_u$  ที่ได้ถูกปรับแก้ไปที่อัตราเร็วในการเชื่อมอ้างอิง 1 มิลลิเมตร/นาที โดยใช้สมการที่ (5) ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่า  $s_u$  โดยวิธี DS มีความแปรปรวนน้อยกว่าค่า  $s_u$  โดยวิธี UC และ UU อย่างมาก

4.6 การทดสอบเงื่อนไขตรงอย่างง่าย

การทดสอบ DSS [23] ได้ทำกับตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่สถานี BTS ย่อนนุชด้วยเครื่อง DSS ชนิด NGI (Geonor H-12) ตัวอย่างดินที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 67 มิลลิเมตร และสูง 20 มิลลิเมตร ตัวอย่างดินถูกหน่วยแรงอัดตัวคายน้ำในสภาพหนึ่งมิติเท่ากับหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งในสนาม ก่อนจะลดหน่วยแรงอัดตัวคายน้ำลง เพื่อให้ตัวอย่างดินมีค่า OCR = 1, 1.5, 2, 3, และ 4 ตามลำดับ จากนั้นเชื่อมตัวอย่างดินแบบไม่ระบายน้ำโดยใช้อัตราความเครียด 0.083%/นาที ผลการทดสอบสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์โดยใช้เทคนิค SHANSEP ได้ดังสมการที่ (7) เมื่อทราบค่าคุณสมบัติของดินเหนียวกรุงเทพฯ ในตารางที่ 1 จะสามารถคำนวณหาค่า  $s_u$  ที่ความลึกต่างๆ ได้

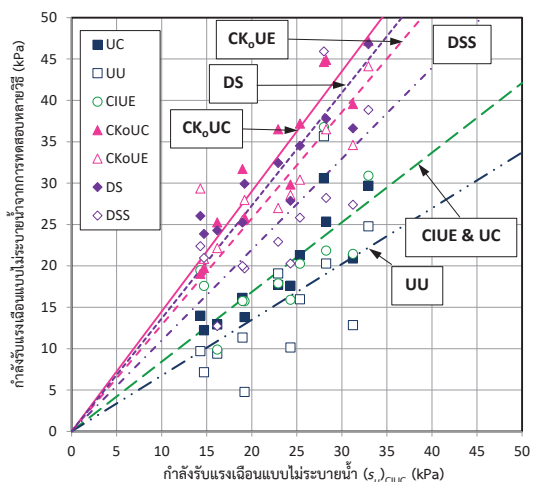
$$\left( \frac{s_u}{\sigma_{vo}'} \right)_{DSS} = 0.23OCR^{0.77} \quad (7)$$

5. ความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯ



ภาพที่ 9 ค่า  $s_u$  ของดินเหนียวกรุงเทพฯ กับความลึก

ภาพที่ 9 แสดงค่า  $s_u$  ของดินเหนียวกรุงเทพฯ กับความลึกจากการทดสอบต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ โดยค่า  $s_u$  ที่ได้จากการทดสอบ UC, UU, CIUC, CK<sub>0</sub>UC, CK<sub>0</sub>UE, และ DS เป็นค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบที่แสดงในหัวข้อที่ 4 ส่วนค่า  $s_u$  จากการทดสอบ CIUE และ DSS ได้จาก

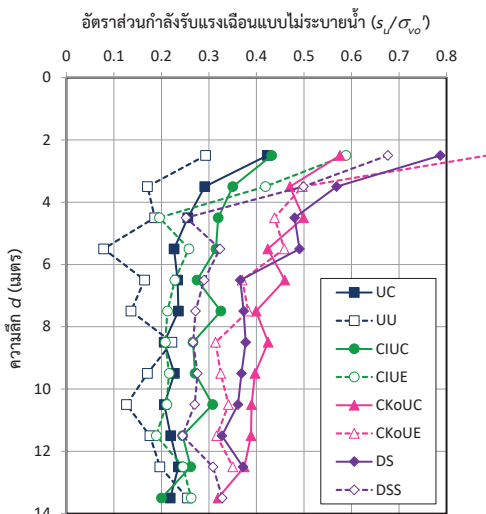


ภาพที่ 10 การเปรียบเทียบค่า  $s_u$

## กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯ จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

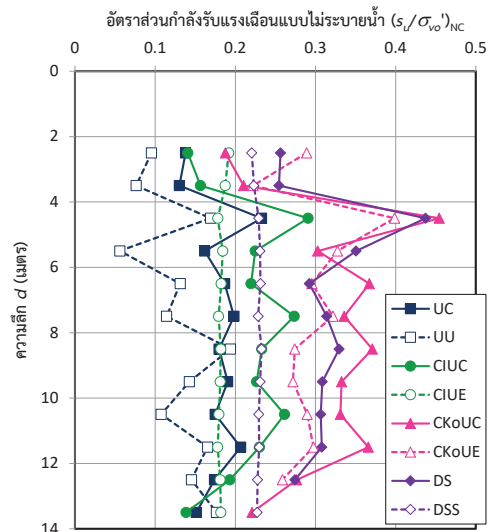
การวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค SHANSEP ดังสมการที่ (6) และ (7) ตามลำดับ โดยพบว่าค่า  $s_u$  ที่ได้จากการทดสอบ  $CK_0UC$  มีค่าสูงที่สุด และจากการทดสอบ  $UU$  มีค่าต่ำที่สุด ภาพที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบค่า  $s_u$  จากการทดสอบต่างๆ โดยใช้ผลการทดสอบจากวิธี CIUC เป็นการทดสอบอ้างอิง [2] และสมการที่ (8) แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นและค่า  $R^2$  เมื่อเรียงลำดับค่า  $s_u$  ของแต่ละการทดสอบจากมากไปหาน้อยจะได้  $CK_0UC$ ,  $DS$ ,  $CK_0UE$ ,  $DSS$ ,  $CIUC$ ,  $CIUE$ ,  $UC$ , และ  $UU$  ตามลำดับ และเมื่อเรียงลำดับค่า  $s_u$  ของแต่ละการทดสอบจากความแปรปรวนน้อยไปหามาก ( $R^2$  มากไปหาน้อย) จะได้  $CK_0UC$ ,  $UC$ ,  $DS$ ,  $CK_0UE$ ,  $DSS$ ,  $CIUE$ , และ  $UU$  ตามลำดับ

$$\left. \begin{aligned} (s_u)_{UC} &= 0.843(s_u)_{CIUC} & R^2 &= 0.763 \\ (s_u)_{UU} &= 0.673(s_u)_{CIUC} & R^2 &= 0.414 \\ (s_u)_{CIUE} &= 0.873(s_u)_{CIUC} & R^2 &= 0.430 \\ (s_u)_{CK_0UC} &= 1.451(s_u)_{CIUC} & R^2 &= 0.870 \\ (s_u)_{CK_0UE} &= 1.287(s_u)_{CIUC} & R^2 &= 0.571 \\ (s_u)_{DS} &= 1.364(s_u)_{CIUC} & R^2 &= 0.711 \\ (s_u)_{DSS} &= 1.099(s_u)_{CIUC} & R^2 &= 0.511 \end{aligned} \right\} (8)$$



ภาพที่ 11 ค่า  $s_u/\sigma_{vo}'$  กับความลึก

ภาพที่ 11 แสดงค่า  $s_u/\sigma_{vo}'$  กับความลึกของดินเหนียวกรุงเทพฯ โดยพบว่า ที่ความลึกไม่เกิน 4 เมตรจะมีค่า  $s_u/\sigma_{vo}'$  สูง เนื่องจากดินมีค่า OCR สูง ภาพที่ 12 แสดง ค่า  $(s_u/\sigma_{vo}')_{NC}$  ของดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่สภาวะ NC โดยใช้สมการ SHANSEP (สมการที่ (4)) และใช้ค่าคงที่  $m = 0.8$  โดยพบว่า ค่า  $(s_u/\sigma_{vo}')_{NC}$  ค่อนข้างคงที่กับความลึก ค่า  $(s_u/\sigma_{vo}')_{NC}$  จากการทดสอบ  $CIUE$  และ  $DSS$  เป็นค่าคงที่กับความลึก เนื่องจากคำนวณโดยเทคนิค SHANSEP ในสมการที่ (6) และ (7) ตารางที่ 6 สรุปค่าเฉลี่ยของ  $(s_u/\sigma_{vo}')_{NC}$



ภาพที่ 12 ค่า  $(s_u/\sigma_{vo}')_{NC}$  กับความลึก ตารางที่ 6 ค่า  $(s_u/\sigma_{vo}')_{NC}$  เฉลี่ยจากการทดสอบต่างๆในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบ	ดินเหนียวกรุงเทพฯ (งานวิจัยนี้)	ดินเหนียว Boston Blue [7]
UC	0.18	0.14
UU	0.13	0.19
CIUC	0.22	0.32
CIUE	0.18	0.24
$CK_0UC$	0.31	0.33
$CK_0UE$	0.30	0.16
DS	0.31	NA
DSS	0.23	0.20

## 6. วิเคราะห์ผลการทดสอบ

ตารางที่ 6 แสดงว่าค่า  $(s_u/\sigma_{vo})_{NC}$  ของดินเหนียวกรุงเทพฯ จากงานวิจัยนี้ค่อนข้างสอดคล้องกับผลการทดสอบของดินเหนียว Boston Blue [7] ยกเว้นผลการทดสอบ CK<sub>0</sub>UE ที่ให้ผลสูงกว่ามาก และผลการทดสอบ UU, CIUC, และ CIUE ให้ผลต่ำกว่ามาก หากแทนค่า  $s_u$  จากการทดสอบชนิดต่างๆ ที่ได้จากงานวิจัยนี้ (สมการที่ (8)) ลงในสมการเชิงประสกรณที่เสนอโดย Kulhawy & Mayne [3] จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้ (i)  $(s_u)_{DSS}=0.75(s_u)_{CK_0UC}$  (สมการที่ (1)) ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดสอบที่ได้จากงานวิจัยนี้  $((s_u)_{DSS}=0.77(s_u)_{CK_0UC})$  และ (ii)  $(s_u)_{DSS}=1.23(s_u)_{CIUC}$  (สมการที่ (3)) ซึ่งสูงกว่าผลการทดสอบที่ได้จากงานวิจัยนี้เล็กน้อย  $((s_u)_{DSS}=1.10(s_u)_{CIUC})$

ค่าอัตราส่วน  $(s_u)_{UU}/(s_u)_{CIUC}$  และ  $(s_u)_{UC}/(s_u)_{CIUC}$  = 0.67–0.84 ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่ามากกว่าของดินเหนียว Boston Blue (0.44–0.59) [7] และสูงกว่าค่าจากงานวิจัยของ Chen & Kulhawy [4] (0.40–0.75)

จากผลการทดสอบแรงอัดและดึงสามแกนได้ค่าอัตราส่วน  $(s_u)_{CIUE}/(s_u)_{CIUC} = 0.87$  และ  $(s_u)_{CK_0UE}/(s_u)_{CK_0UC} = 0.89$  ซึ่งมีค่าสูงกว่าผลการทดสอบของดินเหนียว Boston Blue (0.75 และ 0.48) [7] แต่สอดคล้องกับ Tanaka et al. [15] ที่รายงานว่าค่าอัตราส่วน  $(s_u)_{CK_0UE}/(s_u)_{CK_0UC}$  ของดินเหนียวกรุงเทพฯ มีค่ามากซึ่งส่งผลให้ดินเหนียวกรุงเทพฯ แสดงพฤติกรรมแบบเท่ากันทุกทิศทางมากกว่าดินเหนียวในยุโรปและญี่ปุ่น

## 7. สรุปผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาค่า  $s_u$  ของดินเหนียวกรุงเทพฯ จากการทดสอบต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ

ผลการทดสอบพบว่า ค่า  $s_u$  ของดินเหนียวกรุงเทพฯ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นกับความลึกเป็นเชิงเส้น ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $s_u$  และความลึกจากการทดสอบ UU และ UC มีความแปรปรวนสูงที่สุด ( $R^2$  น้อย) เพราะในการทดสอบนี้ไม่มีการให้หน่วยแรงอัดตัวคายน้ำแก่ตัวอย่างดินและไม่สามารถควบคุมความอิมตัวด้วยน้ำของตัวอย่างดินได้ ฉะนั้นควรใช้ค่า  $s_u$  จากการทดสอบเหล่านี้ด้วยความระมัดระวังเนื่องจากความแปรปรวนที่มาก เมื่อเรียงลำดับค่า  $s_u$  ที่ได้จากแต่ละการทดสอบจากมากไปน้อยจะได้ดังนี้ CK<sub>0</sub>UC, DS, CK<sub>0</sub>UE, DSS, CIUC, CIUE, UC, และ UU ตามลำดับ และเมื่อเรียงลำดับความแปรปรวนของความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $s_u$  จากการทดสอบต่างๆ กับค่า  $(s_u)_{CIUC}$  จากน้อยไปหามาก ( $R^2$  มากไปหาน้อย) จะได้ดังนี้ CK<sub>0</sub>UC, UC, DS, CK<sub>0</sub>UE, DSS, CIUE, และ UU ตามลำดับ โดยสมการความสัมพันธ์ทั้งหมดถูกแสดงในสมการที่ (8) การศึกษานี้ยังพบว่า สมการเชิงประสกรณที่เสนอโดย Kulhawy & Mayne [3] ให้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $s_u$  ที่ได้จากการทดสอบต่างๆ ตรงกับผลการทดสอบของดินเหนียวกรุงเทพฯ และดินเหนียวกรุงเทพฯ มีพฤติกรรมแบบเท่ากันทุกทิศทางมากกว่าดินเหนียวอื่นในด้านกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

## 8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนการวิจัยและพัฒนาของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา เลขที่ วจพ 7/2558 และทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 มหาวิทยาลัยบูรพา ขอขอบคุณ ศ.ดร. สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง ที่ให้คำปรึกษาในการทำวิจัย

## 9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ladd C.C., Foott R., Ishihara K., Schlosser F., and Poulos H.G. (1977). Stress–deformation and strength characteristics, 9th ICSMFE, Tokyo, 2: 421–494.
- [2] Wroth C.P. (1984). Interpretation of in–situ soil tests. *Geotechnique*, 34(4): 449–489.
- [3] Kulhawy F.H. and Mayne P.W. (1990). Manual on estimating soil properties for foundation design, Report EL–6800, Electric Power Research Institute, California.
- [4] Chen Y.J. and Kulhawy F.H. (1993). Undrained strength interrelationships among CIUC, UU, and UC tests. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 119(11): 1732–1750.
- [5] Wroth C.P. and Housley G.T. (1985). Soil mechanics – properties characterization and analysis procedures. 11th ICSMFE, San Francisco, 1: 1–55.
- [6] Ahamad M. (1997). Undrained shear strength characteristics of soft Bangkok clay by recompression triaxial tests. M.Eng thesis, Asian Institute of Technology, Thailand.
- [7] Mayne P. W., Coop M.R., Springman S. Huang A.B. and Zoenberg J. (2009). Geomaterial behavior and testing. 17th ICSMGE, Egypt, 4: 2777–2872.
- [8] Ladd C.C. and Lambe T.W. (1968). The strength of undisturbed clay determined from undrained tests. *Symp. on Laboratory Shear Testing of Soils*, ASTM, 342–371.
- [9] Bjerrum L. (1973). Problem of soil mechanics and construction of soft clay and structurally unstable soils (collapsible, expansive and others). 8th ICSMFE, Moscow, 3: 111–159.
- [10] Ladd C.C. and Foott R. (1974). New design procedure for stability of soft clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 100(GT7): 763–786.
- [11] Graham J., Crook J.H. and Bell A.L. (1983). Time effects on the stress–strain behavior of natural soft clays. *Geotechnique*, 33(3): 327–340.
- [12] Brand E.W. and Balasubramaniam A.S. (1976). Soil compressibility and land subsidence in Bangkok. *Proc. International Symposium on Land Subsidence*, California, USA, 365–374.
- [13] Balasubramaniam A.S., Oh E.Y.N. and Phienweij N. (2009). Bored and driven pile testing in Bangkok sub–soils. *Journal of Lowland Technology International*, 11(1): 29–36.
- [14] Shibuya S., Tamrakar S.B. and Theramast N. (2001). Geotechnical site characterization on engineering properties of Bangkok Clay. *Geotechnical Engineering*, SEAGS, 3(2): 139–151.
- [15] Tanaka H., Locat J., Shibuya S., Soon T.T. and Shiwakoti D.R. (2001). Characterization of Singapore, Bangkok and Ariake Clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 38: 378–400.
- [16] Shibuya S. and Hanh L.T. (2001). Estimating undrained shear strength of soft clay ground improved by pre–loading with PVD case history in Bangkok. *Soils and Foundations*, 41(4): 95–101.

[17] Tapubolon M. (1981). Behavior of soft Bangkok Clay under horizontal loading. M.Eng. thesis, Asian Institute of Technology, Thailand.

[18] Seah T.H. and Lai K.C. (2003). Strength and deformation behavior of soft Bangkok Clay. Geotechnical Testing Journal, ASTM, 26(4): 1–11.

[19] Seah T.H., Sangtian N., and Chan I.C. (2004). Vane shear behavior of soft Bangkok Clay. Geotechnical Testing Journal, ASTM, 27(1): 57–66.

[20] Memon M.A. (1976). Undarined shear strength on different failure planes of soft Rangsit Clay. M.Eng thesis, Asian Institute of Technology, Thailand

[21] พงศกร สุนทรานนท์ (2554). ความแปรปรวนของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯ จากการแปลงผลการทดสอบหลายวิธี. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

[22] ฉัตรชัย คงจีบ (2554). พฤติกรรมความเค้นและความเครียดของดินเหนียวกรุงเทพฯ สำหรับการประยุกต์ใช้ในวิศวกรรมแผ่นดินไหว. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

[23] นิรุจน์ ก้อนคง (2550). พฤติกรรมเฉือนไม่ระบายน้ำแบบวัฏจักรของดินเหนียวกรุงเทพฯ โดยเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนอย่างง่าย. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.