



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา	วิศวกรรมโยธา
สาขา	ภาควิชา
เรื่อง	คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ แบบคงสภาพ Engineering Properties of Undisturbed Bangkok Stiff Clays
نامผู้วิจัย	นางสาวชนวรรณ วรรณวงษ์
ได้พิจารณาเห็นชอบโดย	
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	( รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงกูร, Ph.D. )
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	( อาจารย์ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข, Ph.D. )
หัวหน้าภาควิชา	( ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ยอดสุดใจ, D.Eng. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ แบบคงสภาพ

Engineering Properties of Undisturbed Bangkok Stiff Clays

โดย

นางสาวชนวรรณ วรรณวงษ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ชนวรรณ วรรณวงษ์ 2555: คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ แบบคงสภาพ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทวางกูร, Ph.D. 103 หน้า

การออกแบบโครงสร้างเพื่อการก่อสร้างในงานที่เกี่ยวข้องด้านวิศวกรรมปฐพีนั้นคุณสมบัติของดินเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับใช้ในการออกแบบ ปัจจุบันข้อมูลในส่วนชั้นดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ที่ได้จากการเจาะสำรวจเพื่อเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพมาทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนและการยุบอัดตัวของดินยังไม่แพร่หลาย

ดังนั้นในการศึกษานี้ ได้ทำการรวบรวมข้อมูลเจาะสำรวจชั้นดินในพื้นที่กรุงเทพฯ โดยคัดเลือกเฉพาะผลการทดสอบของตัวอย่างดินเหนียวแข็งแบบคงสภาพมาทดสอบจำนวน 247 หลุมเจาะ ซึ่งกระจายอยู่ทั่วไปในพื้นที่กรุงเทพฯ และทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรม โดยเน้นทางด้านกำลังรับแรงเฉือนและการยุบอัดตัวของดิน

ผลการศึกษาพบว่าชั้นดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ มีความลึกโดยเฉลี่ยเท่ากับ 15 ถึง 23 เมตร ชั้นดินนี้มีความหนาตั้งแต่ 3 ถึง 12 เมตร มีค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน Natural water content ( $w_p$ ) เท่ากับ  $27.02 \pm 7.41\%$  ค่า Liquid limit (L.L.) เท่ากับ  $53.87 \pm 16.31\%$  ค่า Plasticity index (P.I.) เท่ากับ  $30.67 \pm 12.00\%$  ค่า Total unit weight ( $\gamma$ ) เท่ากับ  $1.96 \pm 0.13 \text{ t/m}^3$  สำหรับคุณสมบัติทางด้านกำลังรับแรงเฉือนของดิน ได้แก่ ค่า Undrained shear strength ( $S_u$ ) เท่ากับ  $8.83 \pm 3.57 \text{ t/m}^2$  ค่า Undrained modulus of elasticity ( $E_u$ ) เท่ากับ  $787.69 \pm 383.58 \text{ t/m}^2$  สำหรับคุณสมบัติทางการยุบอัดตัวของดิน ได้แก่ ค่า Initial void ratio ( $e_0$ ) เท่ากับ  $0.737 \pm 0.108$  ค่า Compression index ( $C_c$ ) เท่ากับ  $0.155 \pm 0.042$  ค่า Recompression index ( $C_r$ ) เท่ากับ  $0.045 \pm 0.025$  ค่า Coefficient of consolidation ( $C_v$ ) เท่ากับ  $1.63 \pm 1.07 \text{ m}^2/\text{year}$  ค่า Maximum past pressure ( $\sigma'_p$ ) เท่ากับ  $29.43 \pm 9.03 \text{ t/m}^2$  ค่า Over consolidation ratio (OCR) เท่ากับ  $2.33 \pm 0.64$  แสดงว่าดินประเภท Lightly over consolidated clay

Tanawan Wannawong 2012: Engineering Properties of Undisturbed Bangkok Stiff Clays. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Korchoke Chantawaragul, Ph.D. 103 pages.

Engineering design and construction of structures in geotechnical engineering works has directly related to aims to study the properties of soil. Engineering properties of soils becomes very important parameters for the design. Nowadays, the data in Bangkok stiff clays from subsoil investigation for undisturbed samples of stiff clays test for values its strength and compressibility are still not widespread.

In this study compiles and systematically collect the results of subsoil investigation by only selection of the results of undisturbed samples of stiff clays totally more than 247 boreholes over the area of Bangkok. Physical and engineering properties analysis for which focuses on its shear strength and compressibility characteristics.

Study results showed the thickness of Bangkok stiff clays ranges between 3 to 12 meters at average depth from 15 m. to 23 m. Average natural water content ( $w_n$ ) of stiff clays are in range of  $27.02 \pm 7.41\%$ . Liquid limit (L.L.) are  $53.87 \pm 16.31\%$ . Plasticity index (P.I.) are  $30.67 \pm 12.00\%$ . Total unit weight ( $\gamma_t$ ) are  $1.96 \pm 0.13 \text{ t/m}^3$ . The shear strength properties namely average undrained shear strength ( $S_u$ ) are in range of  $8.83 \pm 3.57 \text{ t/m}^2$ . Undrained modulus of elasticity ( $E_u$ ) are  $787.69 \pm 383.58 \text{ t/m}^2$ . The compressibility properties namely average initial void ratio ( $e_0$ ) are in range of  $0.737 \pm 0.108$  Compression index ( $C_c$ ) are  $0.155 \pm 0.042$ . Recompression index ( $C_r$ ) are  $0.045 \pm 0.025$ . Coefficient of consolidation ( $C_v$ ) are  $1.63 \pm 1.07 \text{ m}^2/\text{year}$ . Maximum past pressure ( $\sigma'_p$ ) are  $29.43 \pm 9.03 \text{ t/m}^2$ . Over consolidation ratio (OCR) are  $2.33 \pm 0.64$  and shows that the clay is lightly over consolidated clay.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ก่อโชค จันทรวงกูร และอาจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข ที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการดำเนินงานวิจัย คำแนะนำในการแก้ปัญหาต่างๆในงานวิจัย และตรวจแก้วิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัยครั้งนี้ พร้อมทั้งขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะ

ขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และบริษัท เซเวน แอสโซซิเอต คอนซัลแตนท์ จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์ ข้อมูลในการศึกษาครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่ๆน้องๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ชี้แนะ ให้กำลังใจ และสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ธนวรรณ วรรณวงษ์  
เมษายน 2555

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	25
อุปกรณ์	25
วิธีการ	25
ผลและวิจารณ์	28
สรุปและข้อเสนอแนะ	80
สรุป	80
ข้อเสนอแนะ	84
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	85
ภาคผนวก	90
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	103

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ความสัมพันธ์ระหว่าง SPT-N และ $Q_u$ กับความแข็งแรงของดินเหนียว	13
2	ความสัมพันธ์ระหว่าง Liquidity index กับความแข็งแรงของดินเหนียว	14
3	แสดงคุณสมบัติดินเหนียวแข็งบริเวณกรุงเทพฯ ของผู้วิจัยต่างๆ	17
4	แสดงคุณสมบัติดินเหนียวแข็งบริเวณกรุงเทพฯ ของกำธร (2529)	18
5	แสดงคุณสมบัติดินเหนียวแข็งบริเวณกรุงเทพฯ ของ Tonyagate (1978)	19
6	แสดงคุณสมบัติดินเหนียวแข็งชั้นที่ 1 บริเวณกรุงเทพฯ ของ Parentela (1983)	20
7	แสดงคุณสมบัติดินเหนียวแข็งชั้นที่ 2 บริเวณกรุงเทพฯ ของ Parentela (1983)	21
8	สมการความสัมพันธ์ทางด้านการยุบอัดตัวสำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯ	22
9	สมการความสัมพันธ์ทางด้านกำลังสำหรับดิน Normally consolidated clays	23
10	แสดงค่าพารามิเตอร์ด้านกำลังของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ	24
11	ค่าเฉลี่ยและขอบเขตความลึกชั้นดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ แต่ละกลุ่มพื้นที่	31
12	ค่าทางสถิติของคุณสมบัติทางกายภาพดินเหนียวแข็งในกลุ่มกรุงเทพเหนือ	31
13	ค่าทางสถิติของคุณสมบัติทางกายภาพดินเหนียวแข็งในกลุ่มกรุงเทพตะวันออก	32
14	ค่าทางสถิติของคุณสมบัติทางกายภาพดินเหนียวแข็งในกลุ่มกรุงเทพกลาง	32
15	ค่าทางสถิติของคุณสมบัติทางกายภาพดินเหนียวแข็งในกลุ่มกรุงเทพใต้	32
16	ค่าทางสถิติของคุณสมบัติทางกายภาพดินเหนียวแข็งในกลุ่มกรุงเทพตะวันตก	33
17	ค่าทางสถิติของคุณสมบัติทางกายภาพดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ทั้งหมด	33
18	การแบ่งขอบเขตชั้นดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ โดยพิจารณาจากค่า $w_u$	34
19	ค่าทางสถิติของ $S_u$ ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ	45
20	ค่า Undrained modulus of elasticity ( $E_u$ ) ของเขตพื้นที่กรุงเทพฯ ต่างๆ	47
21	ข้อมูลผลการทดสอบ CU Triaxial compression test สำหรับดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ	49

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
22	ค่า Parameter A at failure ของดินชนิดต่างๆ	57
23	ค่า Cohesion และค่า Angle of internal friction ดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ	59
24	คุณสมบัติทางด้านการยุบอัดตัวของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ	60
25	ค่าทางสถิติของคุณสมบัติทางด้านการยุบอัดตัวของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ	62
26	สมการความสัมพันธ์ระหว่าง $S_u/\sigma'_{v0}$ กับ P.I. ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ	72
27	สมการความสัมพันธ์ระหว่าง $S_u/\sigma'_{v0}$ กับ L.L. ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ	72
28	สมการความสัมพันธ์ระหว่าง $S_u/\sigma'_{v0}$ กับ $w_n$ ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ	72
29	สมการความสัมพันธ์ระหว่าง $C_c$ กับคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ	75
30	สมการความสัมพันธ์ระหว่าง CR กับคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ	78
31	สรุปคุณสมบัติของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ	81
<b>ตารางผนวกที่</b>		
1	สรุปจำนวนข้อมูลดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ	91

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	สภาพทางปฐพีในพื้นที่ราบลุ่มภาคกลาง	5
2	โครงสร้างทางธรณีวิทยาภาคกลาง (ภาพตัดแนวเหนือ-ใต้)	6
3	ภาพตัดจากอ่าวไทยไปทางตอนเหนือบริเวณดินดอนสามเหลี่ยมเจ้าพระยา	7
4	ภาพตัดขวางในแนวทิศตะวันออก-ตะวันตกบริเวณดินดอนสามเหลี่ยม	8
5	ภาพตัดชั้นดินตะกอนของพื้นที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่าง	9
6	การถอยร่นของขอบทะเลไปสู่ทะเลจีนใต้	9
7	การหาค่า $\sigma'_p$ โดยวิธีของ Casagrande	15
8	การหาค่า $\sigma'_p$ โดยวิธีหลักการของงาน	16
9	การหาค่า $\sigma'_p$ โดยวิธี Log-Log	16
10	แสดงตำแหน่งหลุมเจาะโครงการศึกษาผลกระทบต่อโครงสร้างใต้ดินเนื่องจากการกั้นตัวของแรงดันน้ำในชั้นน้ำบาดาล	26
11	แสดงพื้นที่ของข้อมูลหลุมเจาะในการศึกษาครั้งนี้	27
12	แสดงการแบ่งกลุ่มพื้นที่กรุงเทพฯ ในการศึกษาครั้งนี้	28
13	แสดงแนว Profile ของชั้นดินเหนียวแข็งเหนียวแข็งในพื้นที่กรุงเทพฯ	29
14	ลักษณะชั้นดินเหนียวแข็งแนวเหนือ-ใต้ (ก) และแนวตะวันออก-ตะวันตก (ข) ในพื้นที่กรุงเทพฯ	30
15	ความสัมพันธ์ระหว่าง $w_n$ , L.L. และ P.L. กับระดับความลึกชั้นดินเหนียวแข็งแต่ละกลุ่มพื้นที่	35
16	ความสัมพันธ์ระหว่าง P.I. และ L.I. กับระดับความลึกชั้นดินเหนียวแข็งแต่ละกลุ่มพื้นที่	38
17	ความสัมพันธ์ระหว่าง P.I. กับ L.L. ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ	41
18	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\gamma_s$ กับระดับความลึกชั้นดินเหนียวแข็งแต่ละกลุ่มพื้นที่	42
19	ความสัมพันธ์ระหว่าง $G_s$ กับระดับความลึกชั้นดินเหนียวแข็งแต่ละกลุ่มพื้นที่	43
20	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain จากการทดสอบ Unconfined compression test	44

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	ความสัมพันธ์ระหว่าง $S_u$ กับความลึกชั้นดินเหนียวแข็งแต่ละกลุ่มพื้นที่	45
22	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $E_u/S_u$ กับความลึกชั้นดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ	48
23	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator stress กับ Strain BH-1	51
24	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator stress กับ Strain BH-2	51
25	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized deviator stress กับ Strain BH-1	52
26	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized deviator stress กับ Strain BH-2	52
27	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Excess pore pressure กับ Strain BH-1	54
28	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Excess pore pressure กับ Strain BH-2	54
29	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized excess pore pressure กับ Strain BH-1	55
30	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized excess pore pressure กับ Strain BH-2	55
31	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Pore pressure parameter A กับ Strain BH-1	56
32	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Pore pressure parameter A กับ Strain BH-2	56
33	Total stress path และ Effective stress path BH-1	58
34	Total stress path และ Effective stress path BH-2	58
35	การจำแนกรูปร่างลักษณะของ Effective stress path	59
36	ความสัมพันธ์ระหว่าง $e_0$ กับระดับความลึกชั้นดินเหนียวแข็งแต่ละเขตพื้นที่	63
37	แสดงการเปลี่ยนแปลงของการกระจายจุดข้อมูลของตัวอย่างดินเหนียวแข็ง จากกราฟประเภทต่างๆ	64
38	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\sigma'_p$ และ $\sigma'_{v0}$ กับความลึกชั้นดินเหนียวแข็ง กรุงเทพฯ	66
39	ความสัมพันธ์ระหว่าง OCR กับระดับความลึกชั้นดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ	67
40	ความสัมพันธ์ระหว่าง $C_v$ กับ Pressure ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ	68
41	ความสัมพันธ์ระหว่าง $S_u/\sigma'_{v0}$ กับ P.I. ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ และ ผลวิจัยอื่น	70

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
42	ความสัมพันธ์ระหว่าง $S_u/\sigma'_{v0}$ กับ L.L. ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ และผลวิจัยอื่น	71
43	ความสัมพันธ์ระหว่าง $S_u/\sigma'_{v0}$ กับ $w_n$ ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ	71
44	ความสัมพันธ์ระหว่าง $C_c$ กับ L.L. ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ และผลวิจัยอื่น	74
45	ความสัมพันธ์ระหว่าง $C_c$ กับ $w_n$ ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ และผลวิจัยอื่น	74
46	ความสัมพันธ์ระหว่าง $C_c$ กับ $e_0$ ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ และผลวิจัยอื่น	75
47	ความสัมพันธ์ระหว่าง CR กับ L.L. ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ	77
48	ความสัมพันธ์ระหว่าง CR กับ $w_n$ ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ และผลวิจัยอื่น	77
49	ความสัมพันธ์ระหว่าง CR กับ L.L. ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ	78
<b>ภาพผนวกที่</b>		
1	ความสัมพันธ์ระหว่าง Void ratio กับ Pressure (Log scale) ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ	93
2	ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain กับ Pressure (Log scale) ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ	98

## คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ แบบคงสภาพ

### Engineering Properties of Undisturbed Bangkok Stiff Clays

#### คำนำ

ในปัจจุบันกรุงเทพมหานครมีการก่อสร้างกันอย่างกว้างขวางและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งการก่อสร้างนั้นจำเป็นต้องมีโครงสร้างฐานรากเพื่อรองรับภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่มีน้ำหนักมาก ซึ่งในการออกแบบโครงสร้างฐานรากให้ได้ดีและเหมาะสมนั้นต้องทราบลักษณะพฤติกรรมและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินบริเวณนั้นๆ ถ้าปราศจากข้อมูลชั้นดินที่ดี อาจก่อให้เกิดผลเสียหลายประการ เช่น อาจเกิดความไม่มั่นคงของสิ่งปลูกสร้าง หรือต้องมีการออกแบบเพื่อไว้มาก ทำให้เกิดความไม่ประหยัดขึ้นได้

ลักษณะทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพฯ นั้น ได้รับอิทธิพลจากแม่น้ำเจ้าพระยา และอ่าวไทย โดยมีลักษณะทั่วไปดังนี้คือ ชั้นดินบนสุดจะเป็นชั้นผิวดิน (Weathered crust) ที่ระดับความลึกผิวดินถึงประมาณ 2 เมตร ถัดไปจะเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลาง (Soft to medium stiff clay) ที่ระดับความลึกประมาณ 2 เมตร ถึง 18 เมตร ถัดไปจะเป็นชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) ที่ระดับความลึกประมาณ 18 เมตร ถึง 25 เมตร จากนั้นจะเป็นชั้นทรายสลับชั้นดินเหนียวแข็ง ซึ่งในความจริงที่มีการกำหนดชื่อชั้นดินนี้ขึ้น เพราะที่ดินมีคุณสมบัติที่ต่างกัน โดยลักษณะเฉพาะต่างๆ ของดินเปลี่ยนแปลงไปตามความลึก ซึ่งในอดีตที่ผ่านมาชั้นดินเหนียวอ่อนได้รับการศึกษาถึงพฤติกรรมและคุณสมบัติของดินเป็นที่แพร่หลาย เนื่องจากเป็นชั้นดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนต่ำ และการยุบอัดตัวค่อนข้างสูง ในส่วนของชั้นดินเหนียวแข็งการศึกษาพฤติกรรมและคุณสมบัติของดินยังไม่แพร่หลายมากนัก อาจจะเป็นด้วยเหตุผลที่ว่าชั้นดินนี้คุณสมบัติทางด้านกำลังและการยุบอัดตัวค่อนข้างดี จึงเป็นเหตุผลที่ไม่ได้คำนึงถึงในส่วนของชั้นดินนี้อย่างจริงจัง และการเก็บตัวอย่างแบบคงสภาพของชั้นดินนี้ค่อนข้างลำบาก ส่วนใหญ่จะเป็นการเก็บตัวอย่างแบบถูกรบกวน ทำให้วิศวกรผู้ออกแบบขาดข้อมูลในส่วนของชั้นดินเหนียวแข็งนี้ ซึ่งใช้ในการออกแบบหาความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างฐานราก และการวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวของชั้นดิน ฉะนั้นจึงเป็นที่มาที่ไปในการศึกษาครั้งนี้ว่าชั้นดินเหนียวแข็งในพื้นที่กรุงเทพฯ มีพฤติกรรมและคุณสมบัติของดินเป็นอย่างไร

ในการวิจัยนี้ต้องการศึกษาดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ จากผลการเจาะสำรวจชั้นดินในเขต กรุงเทพมหานครและพื้นที่ใกล้เคียงที่สามารถรวบรวมได้จากการเจาะสำรวจที่ผ่านมา ซึ่งมีการศึกษาในส่วนที่มีการเก็บตัวอย่างแบบคงสภาพ เพื่อศึกษาดูพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับสภาพก่อนมีการเก็บตัวอย่างขึ้นมา โดยจะนำมาศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางวิศวกรรม โดยเน้นเฉพาะในเรื่องของกำลังและการยุบอัดตัวของดิน โดยคัดเลือกเฉพาะกลุ่มที่สอดคล้องกับคุณสมบัติดินเหนียวแข็ง การศึกษาครั้งนี้นำไปเป็นข้อมูลเบื้องต้นให้วิศวกรผู้ออกแบบได้ใช้พิจารณาในการออกแบบงานด้านโครงสร้างฐานรากหรือโครงสร้างวิศวกรรมปฐพีได้ ซึ่งจะเป็นแนวทางในการดูพฤติกรรมของดิน ในส่วนของชั้นดินเหนียวแข็ง พร้อมทั้งใช้คาดเดาลักษณะพฤติกรรมของดินที่เกิดขึ้นระหว่างการก่อสร้างและหลังการก่อสร้าง

## วัตถุประสงค์

เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของตัวอย่างดินเหนียวแข็ง กรุงเทพฯ โดยเน้นเฉพาะเรื่องของกำลังและการยุบอัดตัวของดิน พร้อมเปรียบเทียบผลวิเคราะห์ ซึ่งได้จากการรวบรวมข้อมูลเจาะสำรวจชั้นดินในพื้นที่กรุงเทพฯ เนื่องจากในปัจจุบันข้อมูลที่ได้จากการเจาะสำรวจเพื่อเก็บตัวอย่างดินมาทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนและการยุบอัดตัวของดินเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดหาความสามารถในการรับน้ำหนักของ โครงสร้างฐานราก และการวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวของชั้นดินในการรองรับโครงสร้างต่างๆ นั้น ยังไม่แพร่หลาย เนื่องจากการเก็บตัวอย่างดินเหนียวแข็ง แบบคงสภาพ เพื่อนำมาทดสอบ ก่อนข้างจะมีการเก็บตัวอย่างมาทดสอบน้อย

## ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษาวิจัยนี้ เป็นการรวบรวมข้อมูลเจาะสำรวจชั้นดินในพื้นที่กรุงเทพฯ โดยคัดเลือกเฉพาะผลการทดสอบของตัวอย่างดินเหนียวแข็งแบบคงสภาพมาทดสอบ และทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรม เฉพาะในส่วนของกำลังรับแรงเฉือนและการยุบอัดตัวของดิน ภายใต้ออบเขตของข้อมูลที่รวบรวมได้ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของดินเหนียวแข็งที่มีสภาพใกล้เคียงกับดินบริเวณที่ทำการเก็บตัวอย่าง พร้อมกับเปรียบเทียบพฤติกรรมของชั้นดินนี้ ในบริเวณต่างๆ ของกรุงเทพฯ

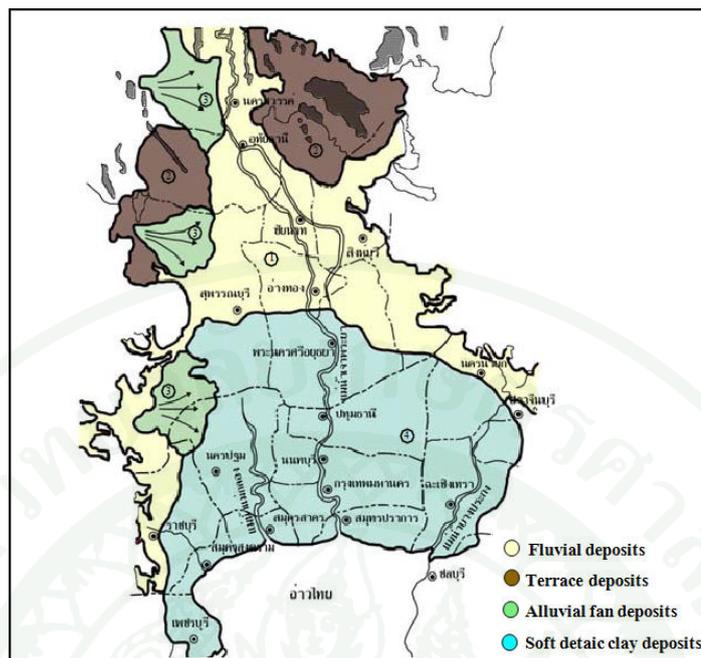
## การตรวจเอกสาร

### สภาพธรณีวิทยาดินตะกอนลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง

ภาคกลางของประเทศไทย คือพื้นที่เริ่มตั้งแต่จังหวัดนครสวรรค์ลงมาจรดปากอ่าวไทย พื้นที่ส่วนนี้หากดูจากแผนที่ธรณีวิทยาของประเทศไทยดังภาพที่ 1 พบว่าเป็นพื้นที่ของเขตอิทธิพลดินตะกอนลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาเป็นสำคัญ (มีตะกอนดินจากภูเขาขนานอยู่ทั้งสองด้านแทรกอยู่ในพื้นที่ด้านข้าง) ตะกอนดินบริเวณนี้เป็นส่วนหนึ่งของชุดดินตะกอนที่ถูกแม่น้ำพัดพามาจากภูเขาทางภาคเหนือของประเทศไทย ซึ่งตะกอนดินมีขนาดใหญ่ เช่น กรวด, ดินทราย และตะกอนทราย ส่วนใหญ่ตกตะกอนในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยไปแล้ว เม็ดดินที่เหลือซึ่งเป็นเม็ดดินขนาดเล็ก เช่น ดินเหนียว จึงถูกพัดพามาตกตะกอนในพื้นที่ส่วนภาคกลางของประเทศไทย ดังนั้นดินตะกอนในภาคกลางจึงมีดินเหนียวปนอยู่ในปริมาณที่สูงกว่าภาคเหนือจากแผนที่ทางธรณีวิทยาของประเทศไทย แสดงไว้ชัดเจนว่าดินตะกอนในพื้นที่ภาคกลางแบ่งออกได้เป็นดินตะกอน 2 ลักษณะ คือ

ดินตะกอนน้ำจืดเป็นดินที่อยู่ในพื้นที่ภาคกลางตอนบน (ตั้งแต่นครสวรรค์ลงไปถึงอ่างทอง) ประกอบด้วยดินตะกอน Fluvial deposits วางตัวอยู่พื้นที่ส่วนกลางขนานกับลำน้ำเจ้าพระยา และขนานด้วย Alluvial fan และ Terrace deposits ในด้านตะวันตกของพื้นที่ เนื่องจากการตกตะกอนของดินตะกอนน้ำจืดในแต่ละครั้งจะมีชั้นค่อนข้างบางเมื่อถูกแดดดินก็จะแข็งตัว ฉะนั้นเนื้อดินพื้นที่นี้ จึงอยู่ในสภาพของดินเหนียวแข็งเป็นส่วนใหญ่

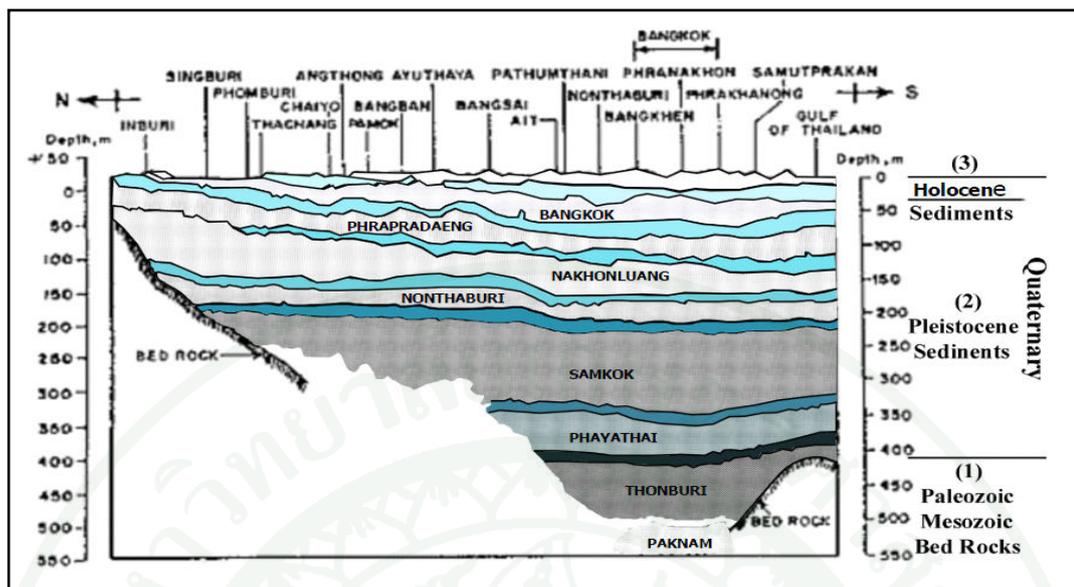
ตะกอนดินเหนียวอ่อนเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนปากแม่น้ำ (Deltaic clay) ที่ปกคลุมเกือบเต็มพื้นที่ราบลุ่มของภาคกลางตอนล่าง ครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของ 14 จังหวัด รวมทั้งพื้นที่ทั้งหมดของกรุงเทพมหานคร (ภาพที่ 1) เหตุที่ดินตะกอนส่วนนี้ยังอ่อนตัวอยู่ เพราะเป็นตะกอนดินเหนียวที่ถูกแม่น้ำพัดพาออกสู่ทะเลที่ปากอ่าวไทยแล้วเกิดการตกตะกอนในท้องทะเลลึก (โดยที่ดินตะกอนบางส่วนก็ถูกน้ำทะเลผลักดันกลับมามากที่ชายฝั่ง) ชั้นดินกว่าจะโผล่พื้นระดับน้ำทะเล ก็มีความหนาพอสมควรแล้ว เมื่อโผล่พื้นผิวน้ำทะเลจึงถูกแดดเฉพาะส่วนที่เป็นผิวน้ำ (หนาประมาณ 3-5 เมตร) จึงแห้งและแข็งกว่า ส่วนดินที่อยู่ตลิ่งจึงยังคงสภาพที่อ่อนอยู่



ภาพที่ 1 สภาพทางปฐพีในพื้นที่ราบลุ่มภาคกลาง

ที่มา: วิชาญ (2546)

พื้นที่ภาคกลางตอนล่าง เดิมเป็นโครงสร้างของหินแกรนิตและหินแปร ซึ่งเป็นหินในยุค Paleozoic epoch ถึง Mesozoic era (อายุมากกว่า 60 ล้านปี) เมื่อประมาณ 3-5 ล้านปีที่ผ่านมา ได้เกิดการทรุดตัวในลักษณะ Block faulting เกิดเป็นแอ่งหินขนาดใหญ่ ปัจจุบันท้องของแอ่งหินอยู่ลึกประมาณ 2,000 เมตร โดยมีขอบแอ่งด้านเหนือสุดอยู่ที่จังหวัดชัยนาท ดังแสดงในภาพที่ 2

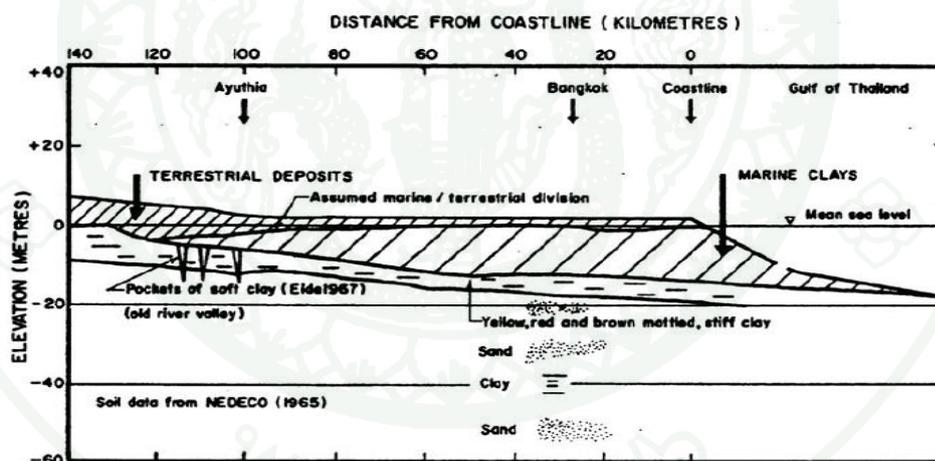


ภาพที่ 2 โครงสร้างทางธรณีวิทยาภาคกลาง (ภาพตัดแนวเหนือ-ใต้)

ที่มา: วิชาญ (2546)

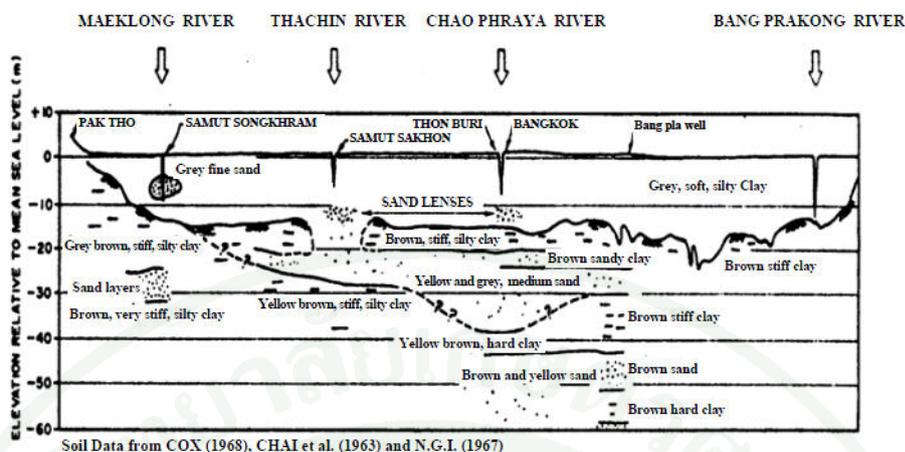
ในช่วง 7 ล้านปีจนถึงปัจจุบัน (Quaternary period) ได้มีการตกตะกอนของชั้นดินบนแอ่งหินนี้ โดยส่วนใหญ่เป็นดินตะกอนน้ำจืดที่น้ำพัดพามาจากภูเขาทางเหนือ วางตัวอยู่กลางแอ่ง และดินตะกอนจากภูเขาที่โอบอยู่สองฝั่งของแอ่ง วางตัวอยู่ด้านข้าง ความรู้เกี่ยวกับชั้นดินตะกอนต่างๆ ในแอ่งหินนี้มีการสำรวจศึกษาอยู่เฉพาะช่วงความลึก 600 เมตรแรก (ดังแสดงในภาพที่ 2 เช่นกัน) โดยในช่วงความลึกนี้พบว่า มีชั้นดินทรายซึ่งเป็นแหล่งเก็บน้ำใต้ดินที่มีความหนาค่อนข้างมาก (โดยเฉพาะอย่างยิ่งชั้นที่อยู่ลึกลงไปมาก) โดยแบ่งได้จำนวน 8 ชั้น วางตัวสลับกับชั้นดินเหนียวที่บ น้ำที่ไม่หนามากนัก ตอนบนสุดของพื้นที่ภาคกลางตอนล่าง เป็นชั้นดินเหนียวอ่อนปากแม่น้ำ ที่เกิดในยุค Holocene epoch ซึ่งเป็นยุคที่มีการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกและมีการยกระดับของน้ำทะเล อันเนื่องมาจากการละลายตัวของภูเขาน้ำแข็งทางขั้วโลกเหนือ การยกระดับของน้ำทะเลช่วงนี้เกิดขึ้นต่อเนื่องยาวนานมากกว่าหมื่นปี (ช่วง 20,000-5,000 ปีก่อนปัจจุบัน) เป็นการยกระดับน้ำทะเลจาก -120 เมตร Mean sea level (MSL) จนถึงระดับที่สูงกว่า MSL เล็กน้อย แล้วมีการลดระดับน้ำทะเลลงอย่างช้าๆ ในช่วงหลังจาก 5,000 ปี จนถึงปัจจุบัน (สำหรับประเทศไทยการลดระดับน้ำทะเลเกิดเมื่อประมาณ 6,000 กว่าปีมาแล้ว) ทำให้เกิดการตกตะกอนของชั้นดินอ่อนในประเทศไทย

สำหรับประเทศไทย เกิดชั้นดินเหนียวอ่อนปากแม่น้ำ โดยมีแม่น้ำเจ้าพระยา และแม่น้ำท่าจีนเป็นแกนหลัก ตะกอนดินเหนียวส่วนใหญ่พัฒนามาจากตอนเหนือของประเทศไหลลงสู่ท้องทะเลทางปากแม่น้ำ ดินตะกอนส่วนใหญ่ตกตะกอนในสภาพน้ำเค็มในท้องทะเลเรียกว่า “Marine clay” ในขณะที่บางส่วนตกตะกอนที่ชายฝั่งในสภาพน้ำกร่อยเรียกว่า “Intertidal clay” ในช่วงที่ระดับน้ำทะเลยกระดับ (Transgression period) ดินตะกอนชายฝั่งจะวางตัวอยู่ใต้ชั้นดิน Marine clay แต่ในช่วงที่ระดับน้ำทะเลลดระดับลง (Regression period) ดินตะกอนชายฝั่งจะวางตัวอยู่บนชั้น Marine clay ฉะนั้นชั้นดินเหนียวอ่อนปากแม่น้ำของประเทศไทย จึงประกอบด้วยชั้นดินตะกอน 3 ชุดคือ ดินตะกอนชายฝั่งวางตัวอยู่ตอนบน มีชั้น Marine clay ที่ค่อนข้างหนาวางตัวถัดลงมา และมีชั้นดินตะกอนชายฝั่งอยู่ใต้ Marine clay อีกชั้นหนึ่ง ชั้นดินเหนียวอ่อนนี้ปกคลุมพื้นที่ประมาณ 14,000 ตารางกิโลเมตร (ประมาณ 14 จังหวัด) ชั้นดินเหนียวอ่อนทั้งผืนนี้วางตัวอยู่บนชั้นดินเหนียวแข็งที่เกิดตอนปลายของ Pleistocene epoch โดยมีชั้นดินทรายสลับกับชั้นดินเหนียว ที่เกิดในช่วงของ Pleistocene epoch นี้ จำนวนหลายชั้น วางตัวอยู่ถัดลงไปจนถึงความลึกนับพันเมตร จนกว่าจะถึง Bed rock ภาพตัดของแอ่งชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ แสดงไว้ในภาพที่ 3 และ 4



ภาพที่ 3 ภาพตัดจากอ่าวไทยไปทางตอนเหนือบริเวณดินดอนสามเหลี่ยมเจ้าพระยา

ที่มา: Cox (1968)

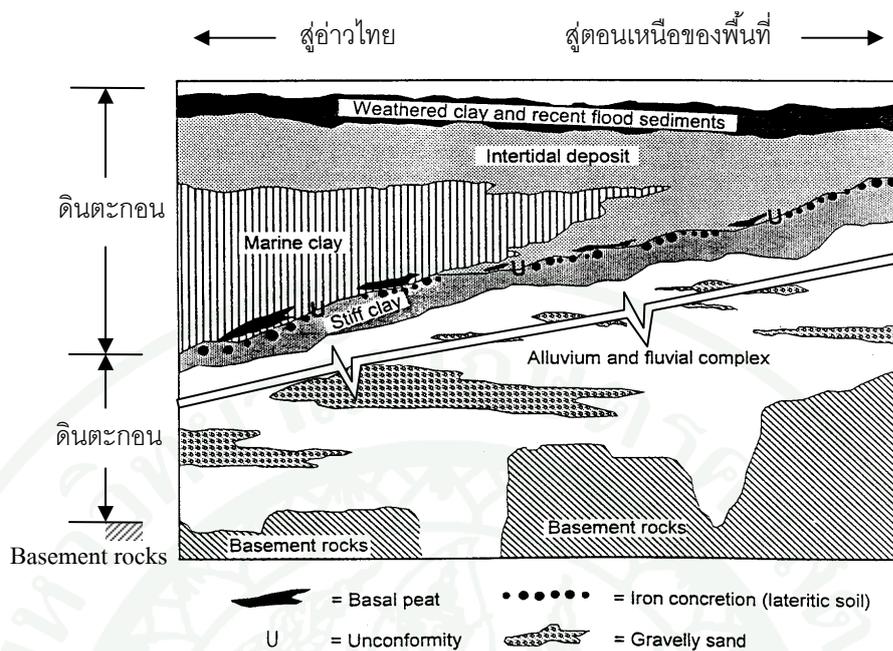


ภาพที่ 4 ภาพตัดขวางในแนวทิศตะวันออก - ตะวันตกบริเวณดินดอนสามเหลี่ยมเจ้าพระยา

ที่มา: Cox (1968)

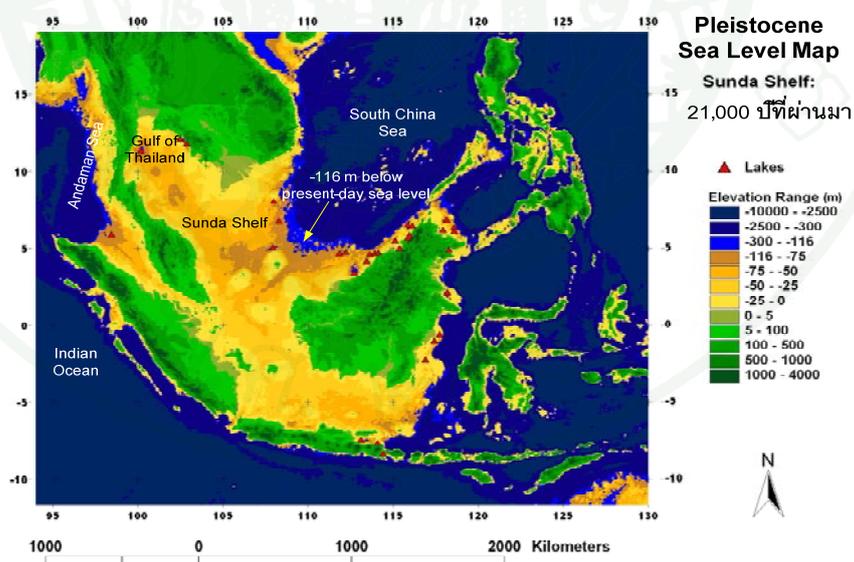
#### การกำเนิดชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay)

ตะกอนสมัย Pleistocene ตอนปลาย ส่วนใหญ่เป็นที่ราบตะกอนน้ำพาและอยู่ที่ระดับความลึกประมาณ 10 - 20 เมตร จากระดับน้ำทะเลปัจจุบัน ชั้นบนสุดเป็นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) ปะปนกับทรายและกรวด (กรมทรัพยากรธรณี, 2542) มีสีเทาจนกระทั่งถึงสีน้ำตาลอ่อน แต่ส่วนมากมีจุดประ (Mottle) สีเหลือง สีส้ม สีแดงของแร่เหล็กและแมงกานีสปะปนอยู่ในเนื้อดินส่วนบน บางบริเวณเป็นชั้นดินลูกรัง และศิลาแลง แสดงให้เห็นว่าผิวดินบริเวณนี้เคยสัมผัสกับอากาศมาก่อน ซึ่งบ่งบอกถึงสภาพแวดล้อมที่เปิดโล่งของพื้นที่ในอดีต ทำให้การสะสมตัวของตะกอนเกิดรอยชั้นไม่ต่อเนื่อง (Unconformity) กับชั้นดินด้านบน ดังภาพที่ 5 (Natalaya and Rau, 1983) แสดงว่าในอดีตน้ำทะเล (สมัย Pleistocene ตอนปลาย) ได้ร่นถอยออกจากบริเวณนี้ซึ่งเป็นอ่าวไทยปัจจุบัน ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดน้ำแข็งที่ขั้วโลกขึ้น ส่งผลให้บริเวณอ่าวไทยทั้งหมดและไหล่ทวีปซุนด้า (Sunda Shelf) เกิดการตื้นเขินจนกลายเป็นแผ่นดินดังภาพที่ 6 ต่อมาเกิดการกัดเซาะและเกิดการสะสมตัวของตะกอนธารน้ำพาทับถมกับตะกอนเดิม (วรากร, 2543)



ภาพที่ 5 ภาพตัดชั้นดินตะกอนของพื้นที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่าง

ที่มา: Sinsakul (2000) อ้าง โดย ว.ส.ท. (2546)



ภาพที่ 6 การถอยร่นของขอบทะเลไปสู่ทะเลจีนใต้

ที่มา: Sathiamurthy and Voris (2006)

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของ Stiff clay ปรากฏว่ามีค่าการนำไฟฟ้าต่ำ (Low electric conductivity) อัลคาไลน์เล็กน้อย (Slight alkalinity) ปริมาณ Chloride iron ต่ำ แร่ประกอบดินเหนียวหลักคือ Kaolinite (Wongsomsak and Theyapunte, 1987; Sinsakul, 2000) จากข้อมูลเหล่านี้แปลความหมายได้ว่าสภาวะการสะสมตัวเป็นแบบ ที่ราบน้ำท่วมถึงอยู่ในช่องทางน้ำ (Flood deposit following channel migration)

ในช่วงเวลาปลายสมัย Pleistocene ที่น้ำทะเลลดลง พื้นผิวที่สะสมตัวก่อนหน้านี้ก็จะเริ่มถูกกัดเซาะและสะสมตะกอนที่มีขนาดใหญ่มากขึ้นเนื่องจากธารน้ำ โดยในปัจจุบันเกิดขึ้นบริเวณตอนบนของแอ่งเจ้าพระยา ได้แก่จังหวัดชัยนาท และสิงห์บุรี ซึ่งเป็นที่ราบน้ำท่วมถึงเก่า ลำดับการสะสมตัวของตะกอนชี้ให้เห็นว่าตะกอนในแอ่งที่สะสมอยู่บน Floodplain และ Lavee มีต้นกำเนิดมาจาก Fluvial ขณะที่ Alluvial fan และ Terrace จะเกิดอยู่บริเวณขอบของพื้นที่

จากลักษณะของชั้นตะกอนสมัย Pleistocene ตอนปลาย ถูกปิดทับด้วยตะกอนสมัย Holocene ซึ่งสามารถหาอายุได้ อย่างไรก็ตามอายุของตะกอนที่สะสมตัวในสมัย Pleistocene จากตัวอย่าง Lignite ที่ได้จากตอนใต้ในอ่าวไทย โดยวิธี Radiocarbon dating มีค่า  $11,170 \pm 150$  ปี ก่อนปัจจุบัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำทะเลมีการเพิ่มระดับสูงขึ้นในสมัย Pleistocene ตอนปลาย (Biwas, 1973) สำหรับอายุภายในบริเวณพื้นที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่าง จาก Limestone nodules หรือ Calcrete ใน Stiff clay ได้อายุเท่ากับ  $14,700 \pm 2,300$  จนถึง  $45,000 \pm 6,900$  ปี ก่อนปัจจุบัน (Nutalaya and Rau, 1983)

นอกจากนี้ซากเปลือกหอยที่ค้นพบในชั้น Stiff clay บริเวณบ้านแพรกษา จังหวัดสมุทรปราการ ให้ค่าอายุเท่ากับ  $35,460 \pm 1,300$  ปี ก่อนปัจจุบัน (Chaimanee, 1997; Sinsakul, 2000) ค่าอายุเหล่านี้ควรจะแสดงถึงการลดของระดับน้ำทะเลในสมัย Pleistocene ตอนปลาย ซึ่งจากหลักฐานของซากเปลือกหอยขัดแย้งกับข้อมูลทาง Paleoenvironment ณ เวลานั้น ดังนั้นเปลือกหอยเหล่านี้อาจจะสะสมตัวใหม่บนผิวของ Stiff clay เนื่องจากพายุพัดพามา ซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นของสมัย Holocene หรือไม่ก็แสดงถึงช่วงเริ่มต้นของการลดถอยของระดับน้ำทะเลในสมัย Pleistocene ตอนปลาย

## สภาพชั้นดินและคุณสมบัติของชั้นดินในพื้นที่กรุงเทพฯ

### สภาพชั้นดินของพื้นที่กรุงเทพฯ

ปัจจุบันนี้การสำรวจสภาพชั้นดินในพื้นที่กรุงเทพฯ ยังคงมีการสำรวจอย่างต่อเนื่อง และจากผลการสำรวจที่ผ่านมาสามารถจำแนกประเภทของชั้นดินกรุงเทพฯ ได้ดังนี้

1. Top soil หรือ Weathered crust พบตั้งแต่ผิวดินลงไป มีความหนาอยู่ในช่วง 1-3 เมตร
2. Very soft to medium stiff clay พบต่อจากชั้นดิน Top soil ความหนาประมาณ 10-15 เมตร ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯมีแร่ประกอบหลักคือ Kaolinite กับ Illite และ Montmorillonite
3. Stiff to very stiff clay พบต่อจากชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ความหนาประมาณ 5-10 เมตร บางพื้นที่อาจพบที่ความลึก 25-30 เมตร ดินเหนียวชั้นนี้มีดินทรายและตะกอนทรายปะปนอยู่
4. First sand layer ดินทรายชั้นแรก มีความหนาประมาณ 8-16 เมตร โดยทั่วไปพบที่ความลึก 20-30 เมตร ดินทรายในชั้นนี้จะมีดินเหนียวและตะกอนทรายปะปนอยู่บ้าง
5. ชั้นดินในระดับลึก โดยทั่วไปพบที่ความลึกมากกว่า 35 เมตร ประกอบด้วยดินเหนียวแข็ง (Stiff to Hard clay/Hard clay) และดินทรายแน่น (Dense sand) วางตัวสลับกันตลอดความลึก

### คุณสมบัติของชั้นดินกรุงเทพฯ

ในอดีตที่ผ่านมาเมื่อนักวิจัยได้ทำการสำรวจและวิเคราะห์คุณสมบัติของดินในพื้นที่ของกรุงเทพฯ ได้มีการสำรวจทดสอบเพื่อนำผลไปใช้วิเคราะห์ความปลอดภัย (การทรุดตัวและการรับน้ำหนัก) ของอาคารสิ่งปลูกสร้าง โดยข้อมูลคุณสมบัติดินทั่วไปที่มีอยู่สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

ดินเหนียวแข็ง (Weathered crust) มีความหนาประมาณ 2-4 เมตร ความชื้นตามธรรมชาติ ( $w_n$ ) ประมาณ 40% ค่ากำลังรับแรงเฉือนในสภาพไม่มีการระบายน้ำ 3-5 ตัน/ตร.ม. ค่า Plasticity index (PI) ประมาณ 50% และหน่วยน้ำหนักรวม ( $\gamma$ ) 1.70-1.90 ตัน/ลบ.ม. (A.I.T., 1981)

ดินเหนียวอ่อน มีความหนาประมาณ 10-15 เมตร ประกอบด้วย ดินทราย 1-10%, ดินตะกอนทราย 20-50% และดินเหนียว 40-70% ค่า  $w_n$  อยู่ในช่วง 70-100% (A.I.T., 1981) โดยค่า  $w_n$  มีค่าใกล้เคียง Liquid limit (LL) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 40-90% มีค่า Plastic limit (PL) อยู่ในช่วง 20-40% ค่า PI อยู่ในช่วง 20-60% (Kerdsuwan, 1984) Liquidity index (LI) มีค่าใกล้เคียงกับ 1 ส่วนค่ากำลังรับแรงเฉือนในสภาพไม่มีการระบายน้ำมีค่าน้อยอยู่ในช่วง 1-2 ตัน/ตร.ม. และมีค่า  $\gamma_t$  อยู่ในช่วง 1.50-1.60 ตัน/ลบ.ม. อัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio,  $e$ ) มีค่ามากกว่า 2 (A.I.T., 1981) และค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific gravity,  $G_s$ ) มีค่าอยู่ในช่วง 2.62-2.68 (Rujivipat, 1980)

ดินเหนียวแข็ง (1<sup>st</sup> Stiff clay) พบที่ความลึก 13-29 เมตร ความหนาประมาณ 5-10 เมตร ประกอบด้วย ดินทราย 3-40%, ตะกอนทราย 20-50% และดินเหนียว 25-60% มีค่า  $w_n$  และ PL มีค่าอยู่ในช่วง 15-40% ค่า LL อยู่ในช่วง 25-90% ค่า PI อยู่ในช่วง 10-50% ค่า LI มีค่าใกล้เคียงกับศูนย์หรือเป็นลบ ค่า PI ของดินเหนียวแข็งนี้จะมีค่าน้อยกว่าดินเหนียวอ่อน (Kerdsuwan, 1984) กำลังรับแรงเฉือนในสภาพไม่มีการระบายน้ำมีค่ามากกว่า 10 ตัน/ตร.ม. และค่า  $\gamma_t$  มีค่าอยู่ในช่วง 1.80-2.00 ตัน/ลบ.ม. อัตราส่วนช่องว่างมีค่าประมาณ 0.6 (A.I.T., 1981)

ดินทรายชั้นแรก (1<sup>st</sup> sand) มีค่า  $w_n$  ประมาณ 20%, ค่า  $\gamma_t$  มีค่าประมาณ 2.0 ตัน /ลบ.ม. อัตราส่วนช่องว่างมีค่าประมาณ 0.5 (A.I.T., 1981)

ดินเหนียวแข็งชั้นที่ 2 (2<sup>nd</sup> Stiff clay) พบที่ความลึกประมาณ 24-50 เมตร ค่า  $w_n$  และ PL มีค่าอยู่ในช่วง 15-35% มีค่า LL อยู่ในช่วง 35-70% ค่า PI อยู่ในช่วง 15-45% ค่า LI มีค่าอยู่ในช่วง -0.35-0.75 และค่า  $\gamma_t$  มีค่า 1.8-2.25 ตัน/ลบ.ม. (Kerdsuwan, 1984)

## คุณสมบัติทางวิศวกรรม

### การแบ่งชั้นดินตาม Soil consistency สำหรับดินเหนียว

สำหรับการแบ่งชั้นดินตาม Soil consistency นั้นมีความจำเป็นต้องใช้คุณสมบัติทางวิศวกรรม โดยเฉพาะคุณสมบัติด้านความแข็งแรง ทั้งนี้จะทำให้ชั้นดินที่ได้ทำการจัดแบ่งแล้วจะมีความแข็งแรงใกล้เคียงกัน ง่ายต่อการเรียกชื่อและใช้งาน ซึ่ง Terzaghi and Peck (1967) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ค่า SPT-N , Unconfined compressive strength ( $Q_u$ ) และชื่อเรียกความแข็งแรงของดินเหนียว ดังตารางที่ 1 นอกจากนี้คุณสมบัติด้านความแข็งแรง ยังมีค่า Liquidity index (LI) ที่สามารถบ่งชี้แบ่งชั้นดินตาม Soil consistency ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง SPT-N และ  $Q_u$  กับความแข็งแรงของดินเหนียว

SPT-N (blows/ft)	Unconfined Compressive Strength, $Q_u$ (t/m <sup>2</sup> )	Consistency
< 2	< 2.5	Very Soft
2 - 4	2.5 - 5.0	Soft
4 - 8	5.0 - 10.0	Medium Stiff
8 - 15	10.0 - 20.0	Stiff
15 - 30	20.0 - 40.0	Very Stiff
> 30	> 40.0	Hard

ที่มา: Terzaghi and Peck (1967)

## ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Liquidity index (LI) กับความแข็งแรงของดินเหนียว

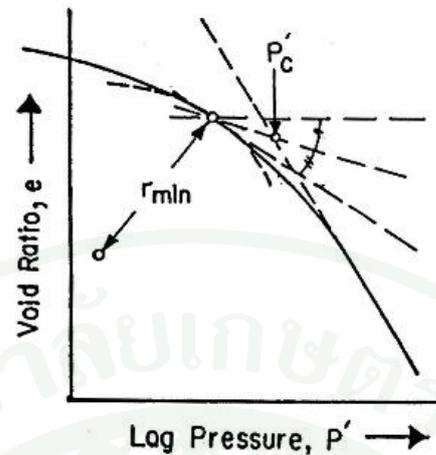
Liquidity Index	Consistency
$LI > 0.75$	Very Soft
$0.50 < LI < 0.75$	Soft
$0.25 < LI < 0.50$	Medium Stiff
$0 < LI < 0.25$	Stiff
$LI < 0$	Hard

ที่มา: ประทีป (2531)

### วิธีการประมาณค่าหน่วยแรงกดทับสูงสุดในอดีตของดิน

หน่วยแรงกดทับสูงสุดในอดีตของดิน (Maximum past pressure,  $\sigma'_p$ ) เป็นคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่สำคัญอย่างหนึ่งของดินที่ชี้บ่งสถานะอัดแน่นของดิน เมื่อดินซึ่งถูกกดทับด้วยหน่วยแรงปัจจุบันน้อยกว่าหน่วยแรงในอดีตดินนั้นอยู่ในสถานะอัดแน่นเกินตัว หากดินถูกกดทับด้วยหน่วยแรงปัจจุบันเท่ากับหน่วยแรงในอดีตดินนั้นอยู่ในสถานะอัดแน่นปกติ ซึ่งการประมาณค่า  $\sigma'_p$  นั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีดังต่อไปนี้

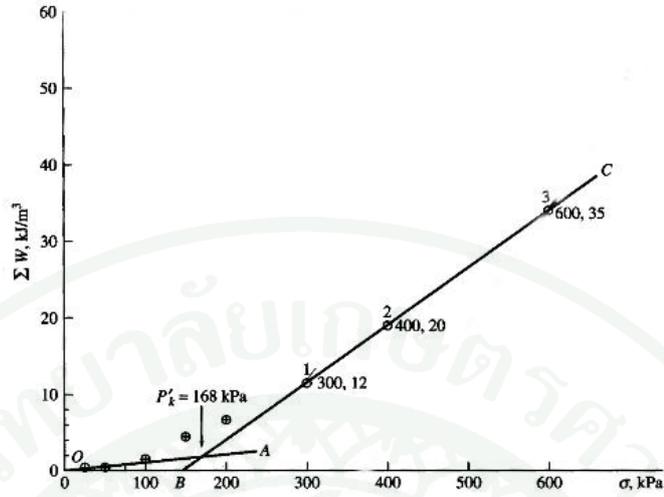
Casagrande (1936) ได้เสนอวิธีนี้ขึ้นมาจากความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนช่องว่าง และ log ของความดัน จากข้อมูลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ หากลากเส้นตรงในแนวราบและเส้นสัมผัส ณ จุดที่มีความโค้งมากที่สุด แล้วแบ่งครึ่งมุมของเส้นทั้งสองแล้วต่อส่วนที่เป็นเส้นตรงมาตัดกับเส้นแบ่งครึ่งมุมดังกล่าวจุดที่ได้คือ  $\sigma'_p$  ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 การหาค่า  $\sigma'_p$  โดยวิธีของ Casagrande

ที่มา: Casagrande (1936) อ้างโดย ชิดชัย (2528)

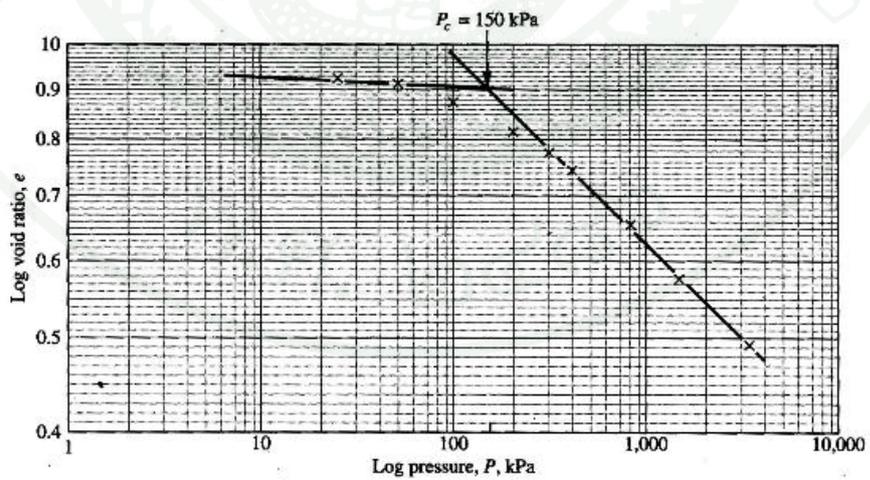
Becker (1987) เสนอวิธีหลักของงานซึ่งเป็นวิธีที่อาศัยพื้นฐานหลักของงาน โดยคำนวณงานที่เกิดขึ้น เนื่องจากผลของ Vertical pressure และ Strain ตามสมการ  $\Delta w = \left[ \frac{\sigma_{i+1} + \sigma_i}{2} \right] (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i)$  และคำนวณงานสะสม ตามสมการ  $w = \Sigma \Delta w$  จากนั้นนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $w$  กับ  $\sigma'_v$  และลากเส้นตรงช่วง Pre-yield และ Post-yield โดยจุดตัดคือค่า  $\sigma'_p$  ดังแสดงในภาพที่ 8 ซึ่งไตรภพ (2546) พบว่าการกระจายของจุดในช่วง Post-yield มีความเป็นเส้นตรงสูง แต่ในช่วง Pre-yield การกระจายของจุดมีความเป็นเส้นตรงไม่สูงเท่าช่วง Post-yield แต่การลากเส้นตรงช่วง Pre-yield และ Post-yield ตัดกันนั้น ก็ยังมีความแน่นอนสูงกว่าวิธีของ Casagrande



ภาพที่ 8 การหาค่า  $\sigma'_p$  โดยวิธีหลักการของงาน

ที่มา: Bowles (1996)

Jose (1989) เสนอวิธี Log-Log เป็นการใช้เทคนิคในการปรับ Log scale ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Void ratio กับ Vertical stress เพื่อให้กราฟเป็นเส้นตรงช่วง Pre-yield และ Post-yield และลากเส้นตรงช่วง Pre-yield และ Post-yield โดยจุดตัดคือค่า  $\sigma'_p$  ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 การหาค่า  $\sigma'_p$  โดยวิธี Log-Log

ที่มา: Bowles (1996)

วิธีการหาค่า  $\sigma'_p$  ทั้ง 3 วิธี จากการศึกษาของไตรภพ (2546) พบว่าวิธี Log-Log ให้ค่า  $\sigma'_p$  ใกล้เคียงมากที่สุด

### การศึกษาคูณสมบัติของชั้นดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ที่ผ่านมา

Muktaphant *et al.* (1966) ได้กล่าวว่า ดิน Stiff clay และ Very stiff clay คือดินที่มีค่า Unconfined compressive strength ระหว่าง 10-40 ตัน/ตร.ม. มีสีเทาอ่อนพบได้โดยทั่วไปใต้ชั้นดินเหนียวอ่อนปานกลาง มีความหนาของชั้นดินตั้งแต่ 1-7 เมตร ช่วงการแปรเปลี่ยนจากดิน Medium stiff clay เป็นดิน Stiff clay ไม่สามารถแยกได้จากสีดิน เนื่องจากมีสีเทาเหมือนกัน แต่สามารถสังเกตได้จากค่า Natural water content ของ Stiff clay หรือ Very stiff clay ซึ่งจะน้อยกว่าชั้น Medium stiff clay ประมาณ 40 % มีค่าหน่วยน้ำหนัก 1.55-1.65 ตัน/ลบ.ม. ค่า  $e_0 = 1.10-1.30$  ในบางจุดอาจพบว่ามีจุดต่างสีเทาและน้ำตาลในกระเปาะของ Silty clay อาจพบได้ตามความลึกต่างๆ ในชั้นดินนี้

กำธร (2529) ได้อ้างถึง Hengchaovanich (1969) ซึ่งพบว่าดินชั้นดินเหนียวแข็งโดยมากมักจะมีทรายผสมอยู่ด้วย ค่า Liquid limit มีค่าใกล้เคียงกับ Plastic limit และมีลักษณะเป็น Highly over consolidated clay มีค่า Shear strength สูง และค่า Compressibility ต่ำ ซึ่งผล Undrained shear strength ที่ได้จากการทดสอบโดย Unconfined compression และ Triaxial แบบ UU จะมีค่าประมาณ 5-15 ตัน/ตร.ม. นอกจากนี้ยังได้รวบรวมคุณสมบัติทั่วไปของชั้นดินเหนียวแข็งบริเวณกรุงเทพฯ ไว้ โดยแสดงดังตารางที่ 3 และตารางที่ 4

ตารางที่ 3 แสดงคุณสมบัติดินเหนียวแข็งบริเวณกรุงเทพฯ ของผู้วิจัยต่างๆ

คุณสมบัติ	Muktabhant et al. (1966)	Vogthieres (1966)	Hengchaovanich (1969)	Brand (1971)
Depth (ft)	26 - 36	48	36	61 - 200
$w_n$ (%)	20 - 40	30	20 - 30	18.9 - 39.1
LL (%)	45 - 70	58	$59.5 \pm 5.9$	29.1 - 62.2
PL (%)	20 - 30	24	$22.6 \pm 1.6$	-
$G_s$	2.70 - 2.80	-	$2.74 \pm 0.02$	2.66 - 2.76
$e$	1.10 - 1.30	-	-	0.58 - 1.00

ตารางที่ 3 (ต่อ)

คุณสมบัติ	Muktabhant et al. (1966)	Vogthieres (1966)	Hengchaovanich (1969)	Brand (1971)
$\gamma_t$ (t/m <sup>3</sup> )	1.54 - 1.60	1.49	1.61	1.46 - 1.71
$Q_u$ (t/m <sup>2</sup> )	14 - 56	18	-	-
Sensitivity	-	1.3 - 1.5	1.3	-

ตารางที่ 4 แสดงคุณสมบัติดินเหนียวแข็งบริเวณกรุงเทพฯ ของกำธร (2529)

คุณสมบัติ	ผลการทดสอบ
Depth (m)	14.02 - 23.63
$w_n$ (%)	30.28 ± 6.78
LL (%)	55.16 ± 10.36
PL (%)	24.06 ± 2.87
$\gamma_t$ (t/m <sup>3</sup> )	1.77 ± 0.16
$G_s$	2.672 ± 0.02
$S_u$ (ksc)	0.693 ± 0.24

Tonyagate (1978) สรุปคุณสมบัติของดินเหนียวแข็งในบริเวณต่างๆ คุณสมบัติที่จะกล่าวถึงนั้นเกี่ยวกับส่วนของชั้นดินเหนียวแข็งที่ระดับความลึก 10 ถึง 25 เมตร เท่านั้น เนื่องจากใน ส่วนชั้นดินเหนียวแข็งที่ระดับลึกกว่านี้ไม่ได้รับการศึกษาคุณสมบัติของดินกว้างขวางมากนักดัง ตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงคุณสมบัติดินเหนียวแข็งบริเวณกรุงเทพฯ ของ Tonyagate (1978)

Soil Properties	AIT	Bangkok	Pathum	Nong	Pom
	campus	Noi	Wan	Ngoo Hao	Prachul
Depth, m	10 - 14	15 - 23.5	13 - 19.5	15.5 - 25.5	17 - 25
w <sub>n</sub> , %	20 - 30	20 - 30	20 - 40	20 - 30	20 - 40
LL, %	40 - 80	30 - 70	40 - 80	30 - 50	40 - 100
PL, %	15 - 30	15 - 30	20 - 30	15 - 30	15 - 35
PI, %	20 - 50	15 - 50	20 - 60	10 - 30	20 - 80
LI	-0.2 - 0.4	-0.2 - 0.4	-0.2 - 0.4	-0.2 - 0.4	0 - 0.6
$\gamma_p$ , t/m <sup>3</sup>	1.9 - 2.1	1.8 - 2.2	1.8 - 2.2	1.9 - 2.3	1.8 - 2.2
e <sub>0</sub>	0.6 - 1.0	0.4 - 1.0	0.6 - 0.8	0.6 - 0.8	0.6 - 1.2
G <sub>s</sub>	2.72 - 2.78	2.65 - 2.75	2.65 - 2.75	2.65 - 2.75	2.67 - 2.76
Salt content, g/l	25 - 40	-	2 - 5	12 - 20	-
pH	8 - 10	-	4 - 9	7 - 9	-
C <sub>c</sub>	0.096 ± 0.120	0.089 ± 0.015	0.093 ± 0.010	0.079 ± 0.013	0.110 ± 0.039
CR	0.058 ± 0.014	0.052 ± 0.011	0.052 ± 0.014	0.048 ± 0.012	0.054 ± 0.027
C <sub>v</sub> , cm <sup>2</sup> /sec x10 <sup>-4</sup>	1 - 70	10 - 40	1 - 7	1 - 10	1 - 15

Rujivipat (1980) ทำการทดสอบคุณสมบัติด้านการยุบอัดตัวได้ของดินเหนียวกรุงเทพฯ พบว่า ดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) จุดแรงดันสูงสุดที่ดินเคยรับในอดีตจะหาได้ก่อนข้างยาก เนื่องจากเส้นกราฟ e-log P' จะราบเรียบ

Parentela (1983) ในการศึกษาคุณสมบัติด้านการยุบอัดตัวของดินเหนียวแข็งชั้นที่หนึ่ง ที่ระดับความลึกไม่เกิน 22 เมตร มีพฤติกรรมเป็น Heavily overconsolidated clay ส่วนดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง ที่ระดับความลึกระหว่าง 22 ถึง 50 เมตร โดยขณะทำการวิเคราะห์ข้อมูลของดินเหนียวแข็งชั้นที่สองมีปริมาณไม่มากนัก สรุปได้ว่าดินเหนียวแข็งชั้นที่สองมีพฤติกรรมเป็น Normally consolidated clay (NC) หรือเป็น Very slightly over consolidated clay และสรุปคุณสมบัติของดินเหนียวแข็งชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ในบริเวณต่างๆ ดังตารางที่ 6 และ 7 ตามลำดับ

ตารางที่ 6 แสดงคุณสมบัติดินเหนียวแข็งชั้นที่ 1 บริเวณกรุงเทพฯ ของ Parentela (1983)

Soil Properties	Shangri la Hotel	Sukhumvit Soi 19	Rama IV	Sri Ayuthaya	South Sathorn	Bangkok Bank Silom Road
Depth, m	14-25	13.5-21	16-36	14-22	12-20	12-22
$w_n, \%$	21.1-55.5	20.5-35.9	28.1-34.9	19.2-37.2	20.5-32.5	23.2-28
LL, %	30.2-77.5	30.4-79.9	56.3-68.7	26.7-61.7	36.4-63	43.9-75
PL, %	15.8-33.2	16.3-27	22.1-22.7	17.5-24.5	22.1-23.7	23.4-34.5
PI, %	10.5-47.1	8.2-52.3	34.2-46	9.2-38.4	12.7-37.1	20-40.5
LI	-0.36-0.41	-0.21-0.33	0.12-0.34	0.1-0.47	0.03-0.09	-0.23-0.07
$\gamma, t/m^3$	1.7-2.14	1.8-2.05	1.81-2.04	1.81-2.17	1.84-2.83	1.99-2.05
$e_0$	0.843	-	-	-	0.910	0.727
$G_s$	2.64	-	-	-	2.65	2.69
$S_u(UC), t/m^2$	3-18	4.3-11.9	15.8	11.4-16	9.3-15.5	4.3-22.5
$S_u(PP), t/m^2$	2.5-41.8	6.3-17.5	-	5 - 17.5	7.5-22.5	-
$C_c$	0.352	-	-	-	-	0.221
CR	0.121	-	-	-	0.166	-
RR	0.017	-	-	-	0.03	-
$\sigma'_p, t/m^2$	25.8	-	-	-	50	41
$\sigma'_{v0}, t/m^2$	15.7	-	-	-	50	17.6
OCR	1.64	-	-	-	1	2.32

ตารางที่ 7 แสดงคุณสมบัติดินเหนียวแข็งชั้นที่ 2 บริเวณกรุงเทพฯ ของ Parentela (1983)

Soil Properties	Shangri la Hotel	Sukhumvit Soi 19	Rama IV	Sri Ayuthaya	South Sathorn	Bangkok Bank Silom Road
Depth, m	38-50	25-34.5	22.5-43.3	22-34	37.5-45	38-49
$w_n$ , %	15.3-45.5	20-29.5	17.5-28.7	19.7-29	15.6-25.3	18-28.4
LL, %	29.2-63.2	49.8-65.6	46.1-71.9	36.2-57.2	39.1-48.6	42.9-66.8
P.L., %	15-29.6	17.3-25.9	15.9-25.1	13.7-25.5	18.7-20.7	23.4-28.9
PI, %	9-33.6	25.9-46.6	28.2-46.8	22.5-38.7	19.2-29.3	19.6-38.2
LI	-0.47-0.99	-0.03-0.15	0.01-0.08	0.01-0.28	-0.03-0.28	-0.32-0.07
$\gamma_t$ , t/m <sup>3</sup>	1.75-2.77	1.9-2.06	1.89-2.09	1.96-2.12	1.99-2	1.87-2.42
$e_0$	0.762	-	0.490	-	0.668	0.542
$G_s$	2.64	2.63	2.62	-	2.68	2.70
$S_u(UC)$ , t/m <sup>2</sup>	6-17.6	10.2-18.5	9.2-20.2	16-19	10.2	9.4-16.15
$S_u(PP)$ , t/m <sup>2</sup>	6-13.22	12.42-13.5	10.08-11.7	9.88-14.1	14.85	-
$C_c$	0.355	-	0.238	-	-	0.124
CR	0.168	0.263	0.043	-	0.128	-
RR	0.023	0.049	-	-	0.025	-
$\sigma'_p$ , t/m <sup>2</sup>	59.9	89	56	-	56.2	68.1
$\sigma'_{v0}$ , t/m <sup>2</sup>	52.6	56	56	-	56.8	68.3
OCR	1.13	1.58	1	-	1	1

เจ็ดพันธุ (2553) ได้ทำการศึกษาชั้นดินกรุงเทพฯ ซึ่งพบว่า Stiff to Very Stiff Clay พบได้ตั้งแต่ระดับ -17 ถึง -22 เมตรจากระดับปากหลุมมีค่าค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน  $w_n$  เท่ากับ  $24.51 \pm 6.47$  % ค่า PI เท่ากับ  $27.10 \pm 10.69$  % ค่า  $\gamma_t$  เท่ากับ  $1.99 \pm 0.12$  t/m<sup>3</sup> ค่า  $s_u$  เท่ากับ  $12.68 \pm 5.45$  t/m<sup>2</sup> ค่า  $C_c$  เท่ากับ  $0.153 \pm 0.045$  และค่า OCR เท่ากับ  $0.718 \pm 0.231$

Somsak (1986) ทำการรวบรวมและคัดเลือกข้อมูลดินเหนียวแข็งชั้นแรก และดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง พบว่าคุณสมบัติทั่วไปและคุณสมบัติในการยุบอัดตัวจะมีค่าลดลง และค่าแรงดันสูงสุดที่ดินเคยรับในอดีต (Maximum past pressure,  $\sigma'_p$ ) จะสูงขึ้นเมื่อความลึกมากขึ้น และพบอีกว่าความชื้นตามธรรมชาติเป็นสมบัติพื้นฐานที่มีสหสัมพันธ์ค่อนข้างสูงกับพารามิเตอร์ของความสามารรถในกาขยายอัดตัว ( $C_c$  และ  $C_r$ )

จากการศึกษาคุณสมบัติของดินเหนียวในพื้นที่กรุงเทพฯ ที่ผ่านมา จึงรวบรวมสมการความสัมพันธ์ระหว่าง Compressibility index กับคุณสมบัติทางกายภาพ แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 สมการความสัมพันธ์ทางด้านการยุบอัดตัวสำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯ

สมการลดถอย	ผู้วิจัย	ประเภทของดิน
$C_c = 0.000195(w_n^2) + 0.00671(w_n - 0.014)$	Muktabhant et al. (1966)	All Clays
$C_c = -0.014 + 0.010(w_n)$		
$C_c = -0.015 + 0.38(e_0)$	Adikari (1977)	All Clays
$C_c = -0.28 + 0.012(LL)$		
$C_c = -0.965 + 0.029(w_n)$		
$C_c = -0.847 + 0.024(LL)$	Tonyagate (1978)	All Clays
$C_c = -0.941 + 1.057(e_0)$		
$C_c = 0.54 (2.6(w_n) - 0.35)$	Cox (1968)	Stiff Clays
$C_c = -0.08 + 0.01(w_n)$		
$C_c = -0.11 + 0.47(e_0)$	Adikari (1977)	Stiff Clays
$C_c = -0.2346 + 0.02(w_n)$		
$C_c = -0.2874 + 0.8602(e_0)$	Parentela (1983)	2 <sup>nd</sup> Stiff Clays Layer
$C_c = 0.027 (w_n - 14.86)$		
$C_r = 0.005 (w_n - 17.75)$	Somsak (1986)	2 <sup>nd</sup> Stiff Clays Layer
$CR = -0.037 + 0.00566(w_n)$		
$CR = -0.013 + 0.00463(LL)$	Tonyagate (1978)	All Clays
$CR = 0.0025(w_n)$ for $w_n < 40\%$		
$RR = 0.0030 (w_n - 10)$	A.I.T. (1981)	Stiff Clays
$CR = -0.2152 + 0.0146(w_n)$		
$CR = -0.2068 + 0.5039(e_0)$	Parentela (1983)	2 <sup>nd</sup> Stiff Clays Layer
$CR = 0.012 (PL - 13.71)$		
$RR = 0.0035 (w_n - 22.90)$	Somsak (1986)	1 <sup>st</sup> Stiff Clays Layer

นอกจากสมการความสัมพันธ์ระหว่าง Compressibility index กับคุณสมบัติกายภาพ สำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯ ยังมีสมการความสัมพันธ์สำหรับดิน Normally consolidated clay ของ Terzaghi and Peck (1967) ดังสมการต่อไปนี้

$$C_c = 0.009(LL - 10)$$

ในคุณสมบัติด้านกำลังมีสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่าง Undrained Shear Strength ( $S_u$ ) และ Effective overburden pressure ( $\sigma'_{v0}$ ) กับคุณสมบัติกายภาพ สำหรับดิน Normally consolidated clays แสดงดังตารางที่ 9 และในตารางที่ 10 แสดงค่าพารามิเตอร์ด้านกำลัง ของดินเหนียวกรุงเทพฯ จากการทดสอบ Triaxial compression test และ Direct shear test

ตารางที่ 9 สมการความสัมพันธ์ทางด้านกำลังสำหรับดิน Normally consolidated clay

สมการถดถอย	ผู้วิจัย	ประเภทของดิน
$S_u/\sigma'_{v0} = 0.11 + 0.0037(PI)$	Skempton (1957)	Normally consolidated clay
$S_u/\sigma'_{v0} = 0.045(PI)^{0.5}$ เมื่อ $PI > 5\%$	Bjerrum and Simons (1960)	Normally consolidated clay
$S_u/\sigma'_{v0} = 0.005(LL)$ เมื่อ $LL > 20\%$	Karlsson and Viberg (1967)	Normally consolidated clay

ตารางที่ 10 แสดงค่าพารามิเตอร์ด้านกำลังของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ จากการทดสอบ Triaxial compression test (TX) และ Direct shear test (DS)

ผู้วิจัย	สถานที่	ความลึก (m)	การทดสอบ	Parameter	
				$c'$ (t/m <sup>2</sup> )	$\phi'$ (deg.)
Hasan (1976)	Nong Ngoo Hao	17.0 - 17.6	TX,CIU	4.4	23.5
			TX,CID	3	26
Sarker (1980)	Rangsit	9.5 - 10.1	TX,CAUKo*	0	21.4
			TX,CAUKo"	2.07	18.3
		10.5 - 11.1	TX,CAUKo*	0	23.1
			TX,CAUKo"	2.2	19.3
Parentela (1983)	Shangri la Hotel	18	DS	6.9 (c)	9 ( $\phi$ )

หมายเหตุ: \* - Normally consolidated range , " - Heavily overconsolidated range

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์
2. โปรแกรม Microsoft Office
3. โปรแกรม Arcview GIS 3.2a
4. ข้อมูลผลการเจาะสำรวจชั้นดินในพื้นที่กรุงเทพฯ

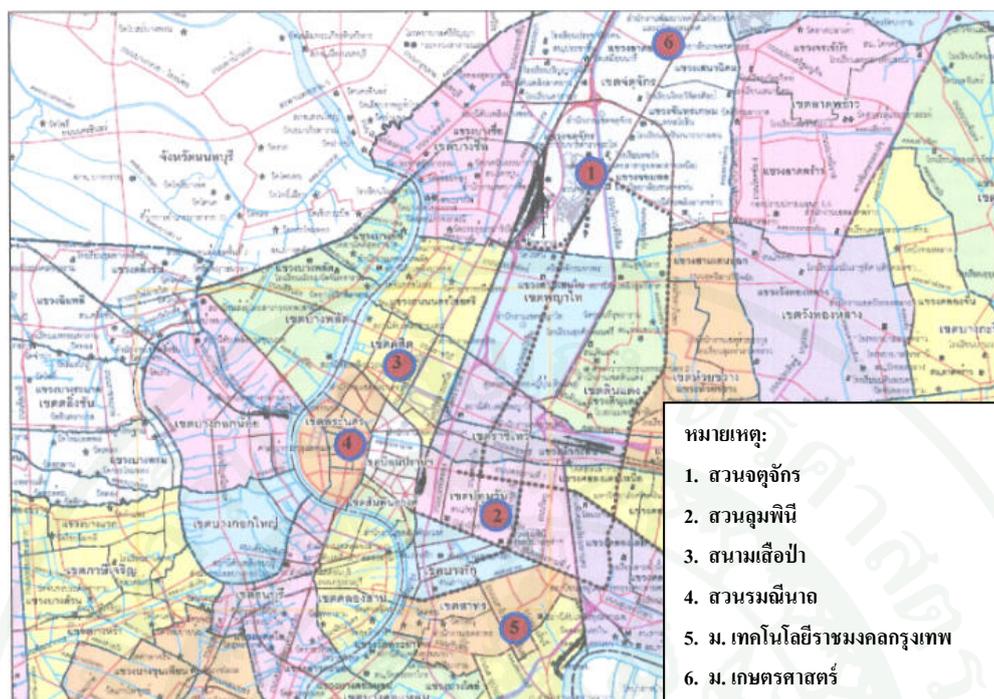
### วิธีการ

#### การเก็บรวบรวมข้อมูล

##### 1. แหล่งที่มาของข้อมูล

ข้อมูลในการเจาะสำรวจชั้นดิน โดยเลือกเฉพาะข้อมูลที่มีการเก็บตัวอย่างแบบคงสภาพในชั้นดินเหนียวแข็ง (ดินเหนียวแข็งที่ศึกษานี้หมายถึงดินเหนียวแข็งชั้นแรก) ในพื้นที่กรุงเทพฯ ซึ่งแหล่งข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ ฐานข้อมูลชั้นดินทางวิศวกรรมของศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และโครงการศึกษาผลกระทบต่อโครงสร้างใต้ดินเนื่องจากการคืบตัวของแรงดันน้ำในชั้นน้ำบาดาล บริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล โดยบริษัท เซเวน แอสโซซิเอต คอนซัลแตนต์ จำกัด

สำหรับโครงสร้างใต้ดินเนื่องจากการคืบตัวของแรงดันน้ำในชั้นน้ำบาดาล ได้ทำการเจาะสำรวจชั้นดินจำนวน 6 หลุมเจาะ เหตุผลที่กำหนดตำแหน่งหลุมเจาะสำรวจทดสอบ เพื่อให้เป็นตัวแทนพื้นที่ที่มีปัญหาโครงสร้างใต้ดินแตกต่างกัน ซึ่งหลุมเจาะทั้งหมดนี้ ได้มีการเก็บตัวอย่างดินเหนียวแข็งแบบคงสภาพมาทำการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 10

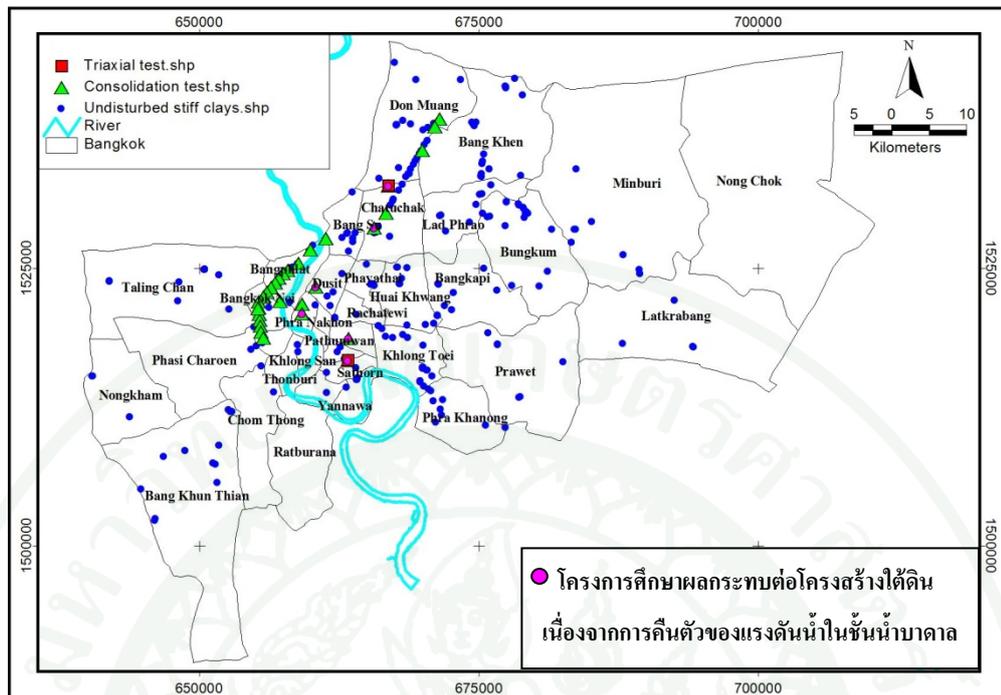


ภาพที่ 10 แสดงตำแหน่งหลุมเจาะ โครงการศึกษาผลกระทบต่อโครงสร้างใต้ดินเนื่องจากการคืนตัวของแรงดันน้ำในชั้นน้ำบาดาล

## 2. การพิจารณาเลือกข้อมูลดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ

เลือกข้อมูลเฉพาะในส่วนชั้นดินเหนียวแข็ง ซึ่งในการกำหนดขอบเขตชั้นดินนี้ จะพิจารณาคุณสมบัติของดินที่ได้จากการเจาะสำรวจและนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยดินเหนียวแข็งที่มีการเก็บตัวอย่างแบบคงสภาพ (Undisturbed) พิจารณาที่ค่า Undrained shear strength ( $S_u$ ) ที่ได้จากการทดสอบ Unconfined compression test โดยต้องมีค่ามากกว่า 5 ตันต่อตารางเมตร และสำหรับดินเหนียวแข็งที่มีการเก็บตัวอย่างแบบถูกรบกวน (Disturbed) จะพิจารณาที่ค่า SPT-N ได้จากการทดสอบ Standard penetration test โดยต้องมีค่ามากกว่า 8 ครั้งต่อฟุต ดังตารางที่ 1 ตามเกณฑ์การแบ่งชั้นดินตาม Soil consistency สำหรับดินเหนียวของ Terzaghi and Peck (1967)

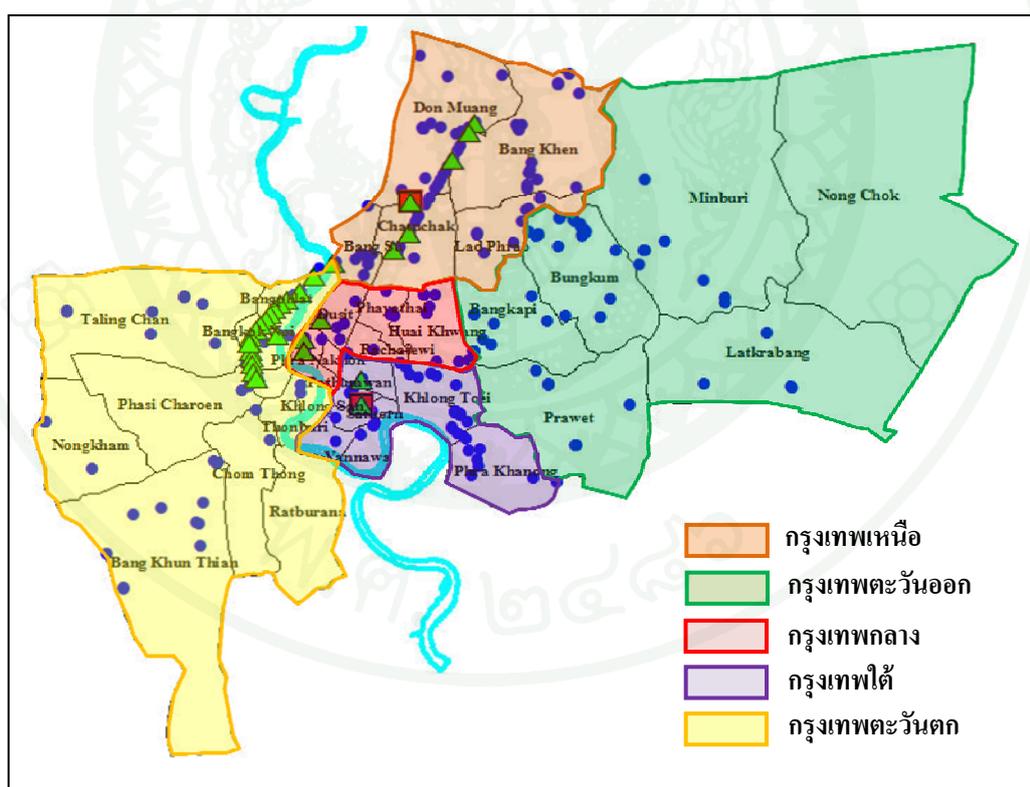
โดยข้อมูลที่ทำกรเลือกจากแหล่งข้อมูลส่วนใหญ่กระจายอยู่ในพื้นที่กรุงเทพฯ มีจำนวน 247 หลุมเจาะ ในการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของดินเหนียวแข็ง จะทำการแบ่งกลุ่มของพื้นที่กรุงเทพฯ เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ และมีข้อมูลบางพื้นที่สำหรับวิเคราะห์คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ แสดงดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 แสดงพื้นที่ของข้อมูลหลุมเจาะในการศึกษาครั้งนี้

## ผลและวิจารณ์

จากการศึกษาจำนวนข้อมูลหลุมเจาะเบื้องต้น ทำให้ทราบว่าข้อมูลที่รวบรวมมาได้ในส่วน  
ของตัวอย่างดินเหนียวแข็งแบบคงสภาพกระจายอยู่ในพื้นที่กรุงเทพฯ ไม่มากนัก และคุณสมบัติของ  
ดินเหนียวแข็งต่างก็มีความหลากหลายไม่ว่าจะอยู่ในบริเวณใกล้หรือไกลของแต่ละตัวอย่างดิน จึง  
ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวแข็ง รวมถึงค่า Undrained shear strength ( $S_u$ )  
โดยแบ่งกลุ่มในพื้นที่กรุงเทพฯ ออกเป็น 5 กลุ่ม ได้แก่ กรุงเทพมหานคร กรุงเทพมหานคร  
กลาง กรุงเทพมหานคร และกรุงเทพมหานคร ดังภาพที่ 12 และสำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติทาง  
วิศวกรรมของดินเหนียวแข็งที่ได้จากการทดสอบ Triaxial compression test และ Consolidation test  
ทำการพิจารณาโดยแบ่งเป็นเขตของพื้นที่กรุงเทพฯ เนื่องจากจำนวนข้อมูลมีน้อย ซึ่งรายละเอียด  
ของจำนวนข้อมูลที่ทำการศึกษาแสดงในตารางผนวกที่ 1

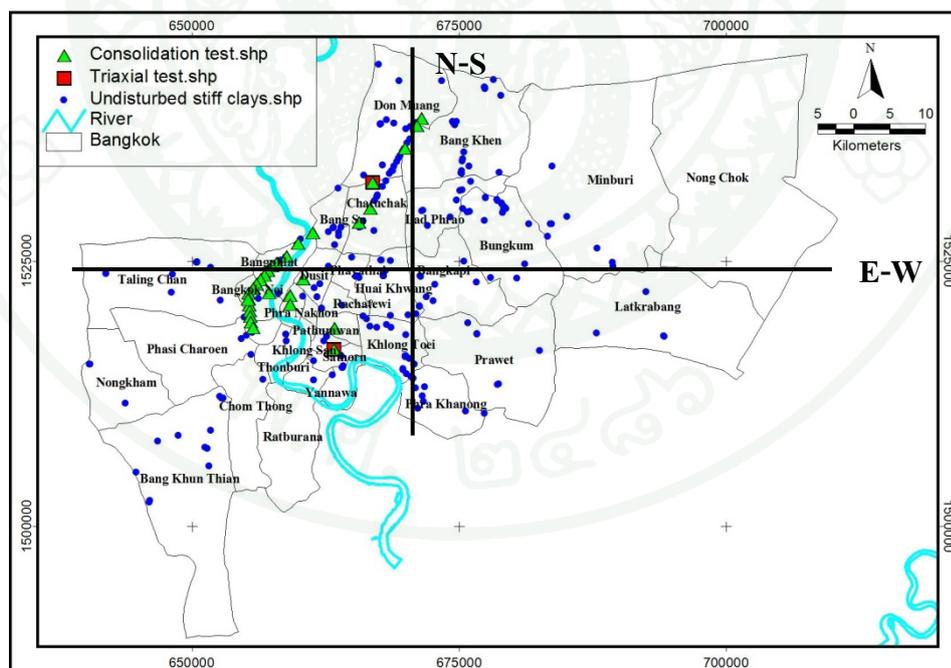


ภาพที่ 12 แสดงการแบ่งกลุ่มพื้นที่กรุงเทพฯ ในการศึกษาครั้งนี้

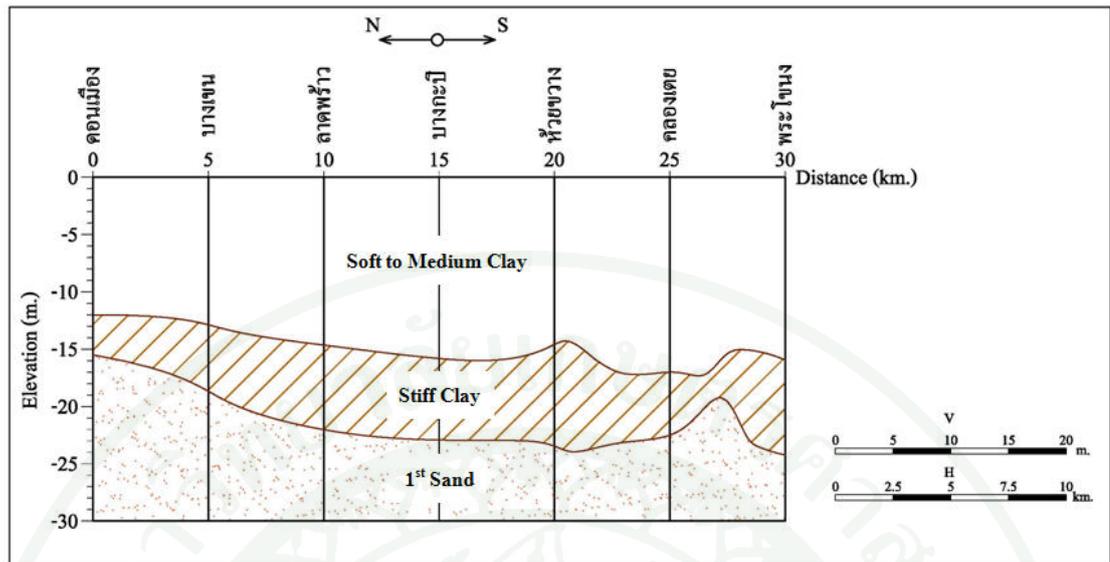
### ลักษณะชั้นดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ

จากการศึกษาข้อมูลหลุมเจาะที่กระจายอยู่ในพื้นที่กรุงเทพฯ พบว่าความหนาของชั้นดินเหนียวแข็ง มีความลึกเฉลี่ยเท่ากับ 15 ถึง 23 เมตร เมื่อทำการศึกษาแนว Profile ของชั้นดินเหนียวแข็งในพื้นที่กรุงเทพฯ (ภาพที่ 13) พบว่าแนวเหนือ (เขตดอนเมือง) - ใต้ (เขตพระโขนง) จากเขตดอนเมือง ความลึกชั้นดินเหนียวแข็งอยู่ที่ 12 ถึง 15 เมตร โดยความหนาค่อยๆ เพิ่มขึ้น และขอบเขตของชั้นดินดังกล่าวลดระดับความลึกลงไปอยู่ที่ 15 ถึง 23 เมตร ที่เขตห้วยขวาง และความหนาลดลงในเขตคลองเตย ซึ่งความลึกอยู่ที่ 15 ถึง 18 เมตร เมื่อถึงเขตพระโขนงความหนากลับมาเพิ่มขึ้น โดยความลึกอยู่ที่ 15 ถึง 23 เมตร (ภาพที่ 14ก)

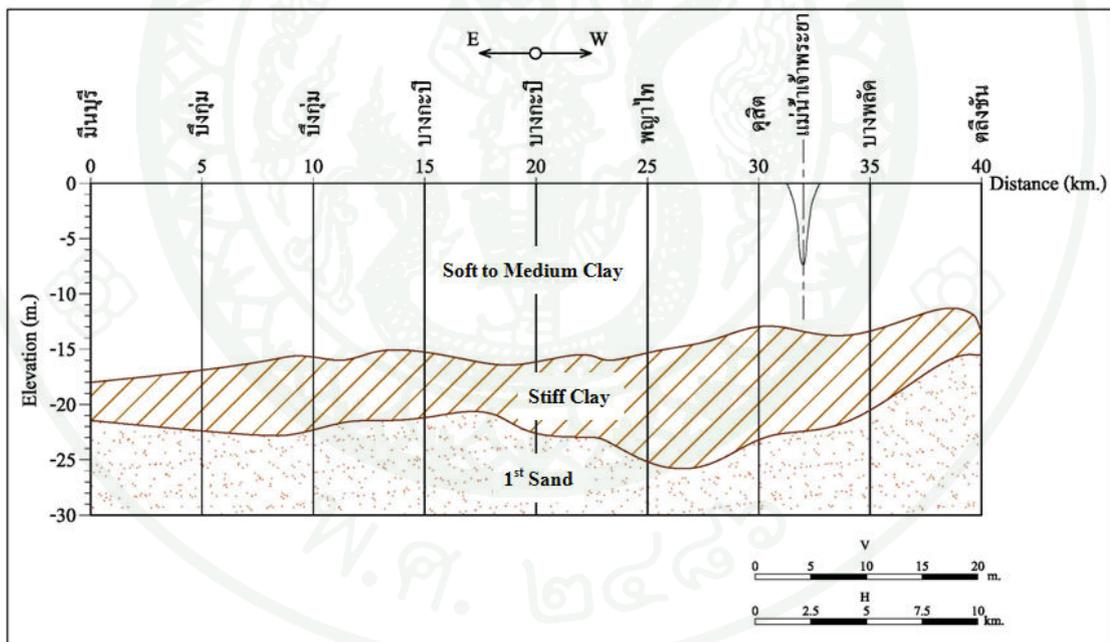
สำหรับแนวตะวันออก (เขตมีนบุรี) - ตะวันตก (เขตตลิ่งชัน) จากเขตมีนบุรี ความลึกอยู่ที่ 18 ถึง 21 เมตร ความหนาจึงเพิ่มขึ้นถึงที่เขตบางกะปิ ที่ความลึก 16 ถึง 23 เมตร จากนั้นความหนาค่อยๆ ลดลง และความหนาเพิ่มมากขึ้นบริเวณใกล้แม่น้ำเจ้าพระยา ที่ความลึก 14 ถึง 26 เมตร และความหนาค่อยๆ ลดลงจนถึงเขตตลิ่งชัน (ภาพที่ 14ข)



ภาพที่ 13 แสดงแนว Profile ของชั้นดินเหนียวแข็งเหนียวแข็งในพื้นที่กรุงเทพฯ



(ก)



(ข)

ภาพที่ 14 ลักษณะชั้นดินเหนียวแข็งแนวเหนือ-ใต้ (ก) และแนวตะวันออก-ตะวันตก (ข) ในพื้นที่ กรุงเทพฯ

### คุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ

จากข้อมูลหลุมเจาะในแต่ละกลุ่มพื้นที่ได้ทำการตรวจสอบคุณสมบัติดินเหนียวแข็งเบื้องต้นแล้ว จึงทำการหาค่าเฉลี่ย (Mean), ค่าต่ำสุด (Min), ค่าสูงสุด (Max), ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) และสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (COV) ของคุณสมบัติดินเหนียวแข็ง เพื่อแสดงค่าทางสถิติของความแตกต่างของคุณสมบัติดินที่มาจากแต่ละกลุ่มพื้นที่ และพื้นที่กรุงเทพฯ ทั้งหมด ดังแสดงในตารางที่ 11 ถึงตารางที่ 17

ตารางที่ 11 ค่าเฉลี่ยและขอบเขตความลึกชั้นดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ แต่ละกลุ่มพื้นที่

ลำดับ	กลุ่มพื้นที่ศึกษา	ขอบเขตความลึก (m)			Average Thickness (m)
		Mean	Upper	Lower	
1	กรุงเทพเหนือ	14 - 19.8	11	27.5	5.8
2	กรุงเทพตะวันออก	15.3 - 21	11	24.5	5.7
3	กรุงเทพกลาง	14.6 - 24.7	12	30.5	10.1
4	กรุงเทพใต้	15.4 - 26.2	13	32.5	10.8
5	กรุงเทพตะวันตก	15.8 - 23.8	11	32	8

ตารางที่ 12 ค่าทางสถิติของคุณสมบัติทางกายภาพดินเหนียวแข็งในกลุ่มพื้นที่กรุงเทพเหนือ

Statistical Values	$w_n$ (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	LI (%)	$\gamma_t$ (t/m <sup>3</sup> )	$G_s$
No. of Data	396	246	246	246	246	277	33
Mean	27.11	54.73	22.82	31.91	13.42	1.97	2.65
Min	13.60	25.20	12.10	8.00	-27.46	1.57	2.58
Max	64.40	98.30	38.10	68.30	49.68	2.28	2.74
SD	7.86	17.18	5.27	12.85	14.48	0.13	0.03
COV (%)	28.99	31.38	23.11	40.27	107.92	6.62	1.32

**ตารางที่ 13** ค่าทางสถิติของคุณสมบัติทางกายภาพดินเหนียวแข็งในกลุ่มพื้นที่กรุงเทพมหานครตะวันออก

Statistical Values	$w_n$ (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	LI (%)	$\gamma_t$ (t/m <sup>3</sup> )	$G_s$
No. of Data	242	173	173	173	173	205	2
Mean	26.50	50.70	21.89	28.80	13.70	1.99	2.65
Min	14.00	25.00	12.00	6.10	-37.20	1.57	2.65
Max	50.70	90.30	37.50	57.30	49.81	2.25	2.65
SD	6.85	14.80	4.60	11.42	16.68	0.13	0.00
COV (%)	25.84	29.19	21.02	39.63	121.75	6.34	0.00

**ตารางที่ 14** ค่าทางสถิติของคุณสมบัติทางกายภาพดินเหนียวแข็งในกลุ่มพื้นที่กรุงเทพมหานครกลาง

Statistical Values	$w_n$ (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	LI (%)	$\gamma_t$ (t/m <sup>3</sup> )	$G_s$
No. of Data	232	159	159	159	159	143	22
Mean	26.64	55.56	23.79	31.77	8.57	1.96	2.65
Min	15.60	25.00	14.00	8.00	-35.48	1.62	2.57
Max	53.90	89.00	38.60	56.10	49.40	2.26	2.70
SD	7.02	15.90	5.46	11.29	12.83	0.12	0.04
COV (%)	26.36	28.62	22.94	35.52	149.61	6.33	1.35

**ตารางที่ 15** ค่าทางสถิติของคุณสมบัติทางกายภาพดินเหนียวแข็งในกลุ่มพื้นที่กรุงเทพใต้

Statistical Values	$w_n$ (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	LI (%)	$\gamma_t$ (t/m <sup>3</sup> )	$G_s$
No. of Data	321	184	184	184	184	233	22
Mean	27.41	55.83	24.18	31.65	11.82	1.96	2.65
Min	14.00	24.20	14.91	6.22	-25.75	1.56	2.52
Max	57.60	94.70	39.40	65.10	46.49	2.28	2.72
SD	7.59	18.06	5.91	13.06	14.66	0.13	0.04
COV (%)	27.69	32.35	24.45	41.27	124.05	6.47	1.58

ตารางที่ 16 ค่าทางสถิติของคุณสมบัติทางกายภาพดินเหนียวแข็งในกลุ่มพื้นที่กรุงเทพมหานคร

Statistical Values	$w_n$ (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	LI (%)	$\gamma_t$ (t/m <sup>3</sup> )	$G_s$
No. of Data	331	183	183	183	183	236	34
Mean	27.17	52.24	23.44	28.80	9.53	1.96	2.66
Min	14.00	24.35	12.80	6.46	-38.28	1.52	2.63
Max	64.82	94.00	38.40	58.90	45.12	2.26	2.71
SD	7.37	14.44	5.29	10.44	17.35	0.13	0.02
COV (%)	27.11	27.64	22.59	36.25	182.07	6.81	0.91

ตารางที่ 17 ค่าทางสถิติของคุณสมบัติทางกายภาพดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ทั้งหมด

Statistical Values	$w_n$ (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	LI (%)	$\gamma_t$ (t/m <sup>3</sup> )	$G_s$
No. of Data	1,522	945	945	945	945	1,094	113
Mean	27.02	53.87	23.20	30.67	11.59	1.96	2.65
Min	13.60	24.20	12.00	6.10	-38.28	1.52	2.52
Max	64.82	98.30	39.40	68.30	49.81	2.28	2.74
SD	7.41	16.31	5.37	12.00	15.37	0.13	0.03
COV (%)	27.44	30.28	23.15	39.15	132.66	6.58	1.28

### 1. Natural water content ( $w_n$ ), Liquid limit (LL) และ Plastic limit (PL)

จากตารางที่ 12 ถึงตารางที่ 16 เมื่อพิจารณาทั้ง 5 กลุ่มพื้นที่ พบว่า  $w_n$ , LL และ PL มีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 26.50-27.41%, 50.70-55.83% และ 21.89-24.18% ตามลำดับ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) มีค่าอยู่ในช่วง 6.85-7.86%, 14.44-18.06% และ 4.60-5.91% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าข้อมูลของ PL มีค่าเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยน้อยสุด และข้อมูลของ LL มีค่าเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยมากที่สุด และทั้ง 3 ค่านี้มีค่า SD น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของค่าเฉลี่ย โดยทั่วไปถือว่าคุณค่าเฉลี่ยดังกล่าวสามารถเป็นตัวแทนของข้อมูลทั้งหมดได้ดี และค่า COV มีค่าอยู่ในช่วง 25.84-28.99%, 28.62-32.35% และ 21.02-24.45% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าคุณค่าของ PL มีการกระจายของข้อมูลน้อยสุด และ LL มีการกระจายของข้อมูลมากที่สุด แต่ค่า COV ของ  $w_n$ , LL และ PL ถือได้ว่ามีค่าค่อนข้าง

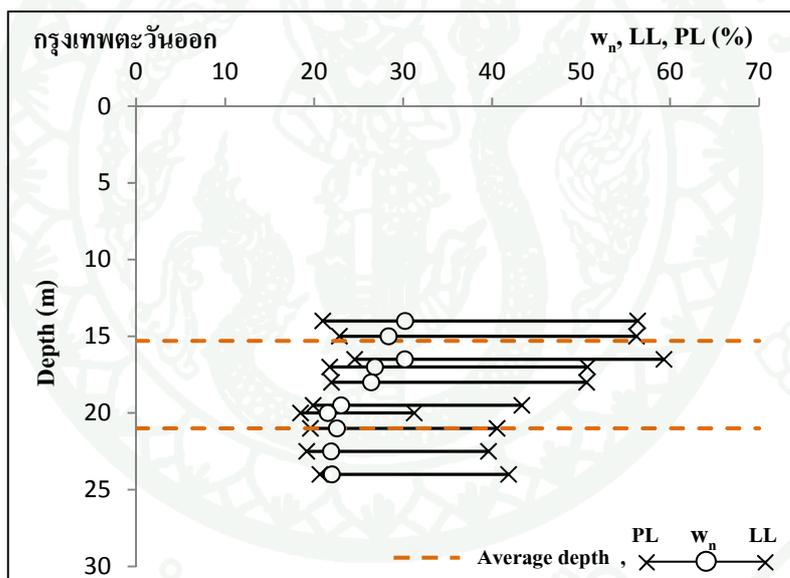
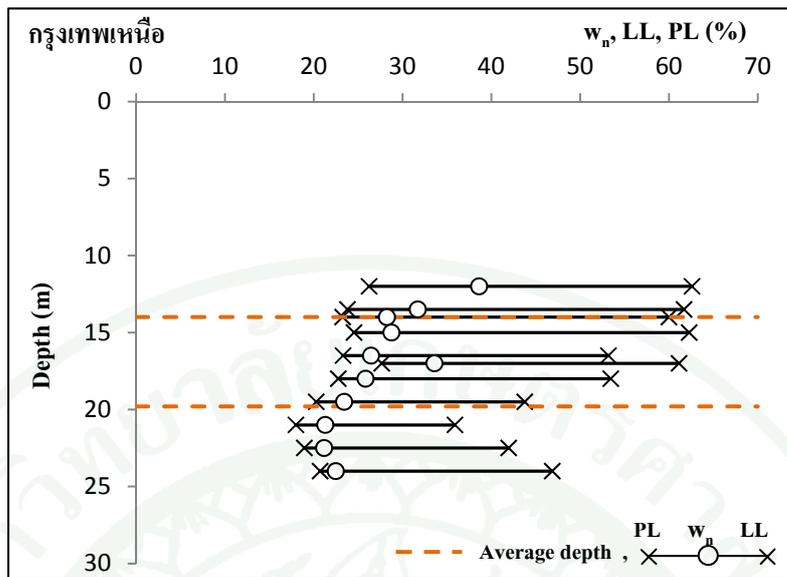
กระจาย เพราะมีค่าเกิน 20% ซึ่งก็สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงไปตามความลึกดังที่ได้ทำการพล็อตค่าเฉลี่ย  $w_n$ , LL และ PL กับความลึก แต่ละกลุ่มพื้นที่ แสดงในภาพที่ 15

จากภาพที่ 15 จะเห็นได้ว่า กลุ่มพื้นที่กรุงเทพเหนือและกรุงเทพตะวันออก ค่า  $w_n$  และ PL มีแนวโน้มลดลงตามความลึกที่เพิ่มขึ้น แต่กลุ่มพื้นที่กรุงเทพกลาง, กรุงเทพใต้ และกรุงเทพตะวันตก ที่ความลึกประมาณ 14 ถึง 19 เมตร มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และที่ความลึกประมาณ 20 เมตร ลงไปมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่า LL ของทุกกลุ่มพื้นที่มีความแปรปรวนกับความลึกค่อนข้างมาก

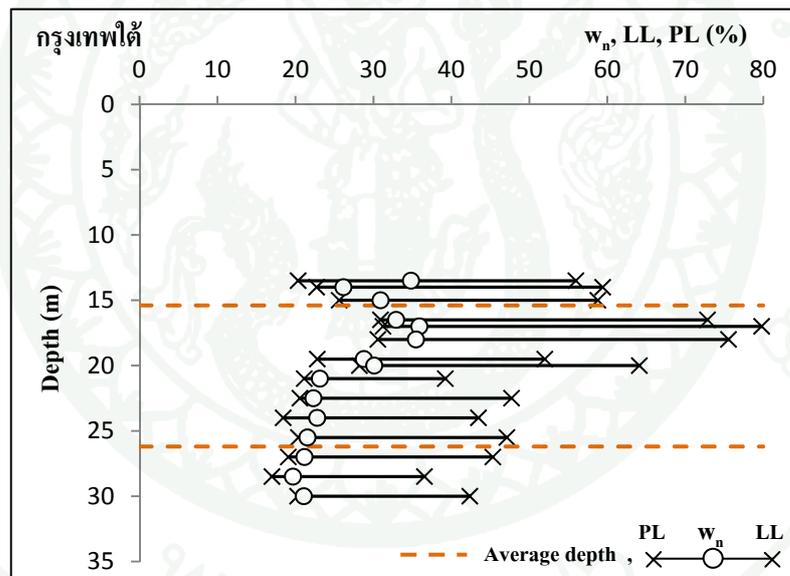
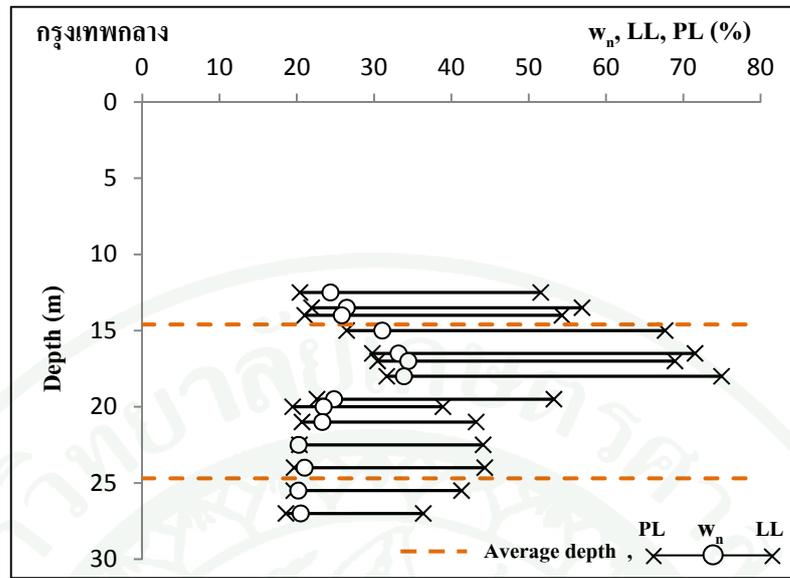
สำหรับค่า  $w_n$  ถือได้ว่าเป็นคุณสมบัติทางกายภาพที่สามารถบ่งชี้ถึงช่องว่างของดิน ซึ่งนำไปสู่การพิจารณาในคุณสมบัติด้านการยุบอัดตัวของดิน และที่ได้ทำการวิเคราะห์ไปแล้ว จากภาพที่ 15 จะเห็นได้ชัดเจนว่าแต่ละกลุ่มพื้นที่มีการแบ่งช่วงค่า  $w_n$  ตามขอบเขตความลึก ที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงทำการกำหนดขอบเขตชั้นดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ออกเป็น 2 ส่วน โดยพิจารณาจากค่า  $w_n$  ดังตารางที่ 18 ซึ่งดินเหนียวแข็งส่วนที่ 1 มีความแปรปรวนของค่า  $w_n$  มากกว่าดินเหนียวแข็งส่วนที่ 2

**ตารางที่ 18** การแบ่งขอบเขตชั้นดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ โดยพิจารณาจากค่า  $w_n$

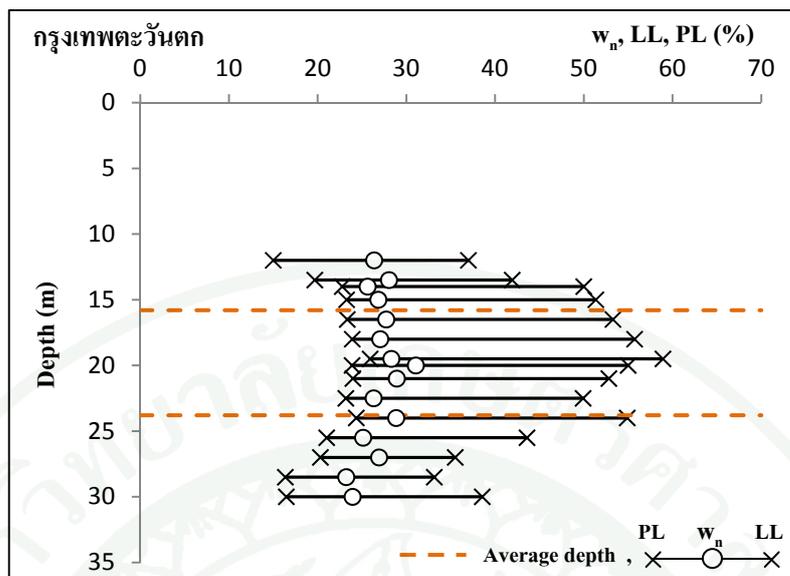
ชื่อเรียก	ขอบเขตความลึกชั้นดิน (m)	$w_n$ (%)
ดินเหนียวแข็งส่วนที่ 1	12 - 18	24.35 - 38.60
ดินเหนียวแข็งส่วนที่ 2	19 - 30	19.67 - 31.06



ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $w_n$ , LL และ PL กับความลึกชั้นดินเหนียวแข็งแต่ละกลุ่มพื้นที่



ภาพที่ 15 (ต่อ)



ภาพที่ 15 (ต่อ)

## 2. Plasticity index (PI) และ Liquidity index (LI)

จากตารางที่ 12 ถึงตารางที่ 16 เมื่อพิจารณาทั้ง 5 กลุ่มพื้นที่ พบว่า PI และ LI มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 28.80-31.91% และ 8.57-13.7% ตามลำดับ ค่า SD อยู่ในช่วง 10.44-13.06% และ 12.83-17.35% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าค่า PI มีค่า SD น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของค่าเฉลี่ย แสดงว่าค่าเฉลี่ยสามารถเป็นตัวแทนได้ดี แต่สำหรับค่า LI มีค่า SD มากกว่าครึ่งหนึ่งของค่าเฉลี่ย แสดงว่าค่าเฉลี่ยเป็นตัวแทนได้ไม่ดี เนื่องจากข้อมูลเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยมาก และค่า COV อยู่ในช่วง 35.52-41.27% และ 107.92-182.07% ตามลำดับ ซึ่งทั้งสองค่ามีการกระจายตัวของข้อมูลมาก และการเปลี่ยนแปลงของค่า PI และ LI กับความลึก ซึ่งแสดงในภาพที่ 16 โดยที่ PI แสดงแนวโน้มลดลง ขณะที่ LI ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงไปตามความลึกที่เพิ่มขึ้น

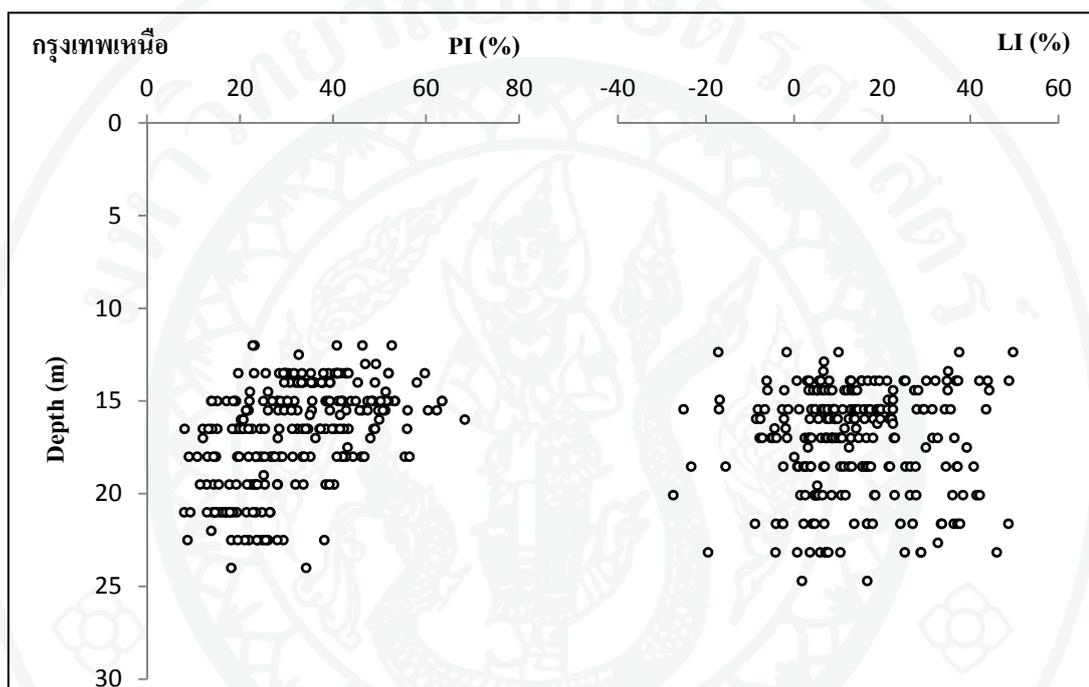
สำหรับข้อมูลค่า LI ในพื้นที่กรุงเทพฯ ทั้งหมดดังตารางที่ 17 มีค่าอยู่ในช่วง -38.28% ถึง 49.81% จากจำนวน 945 ข้อมูล ซึ่งสำหรับดินเหนียวแข็งจะมีค่าไม่เกิน 50% จากการจำแนกดิน Over consolidated จากค่า LI ของ Terzaghi (1936)

ความสัมพันธ์ระหว่าง PI กับ LL ของดินเหนียวแข็งในพื้นที่กรุงเทพฯ ทำการพล็อตใน Plasticity chart (Casagrande, 1932) ดังภาพที่ 17 ซึ่งข้อมูลส่วนใหญ่อยู่เหนือเส้น A-line พบว่าดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ อยู่ช่วงของดินประเภท CH และ CL (Wagner, 1957) ซึ่งบอกได้ว่าเป็นดินที่

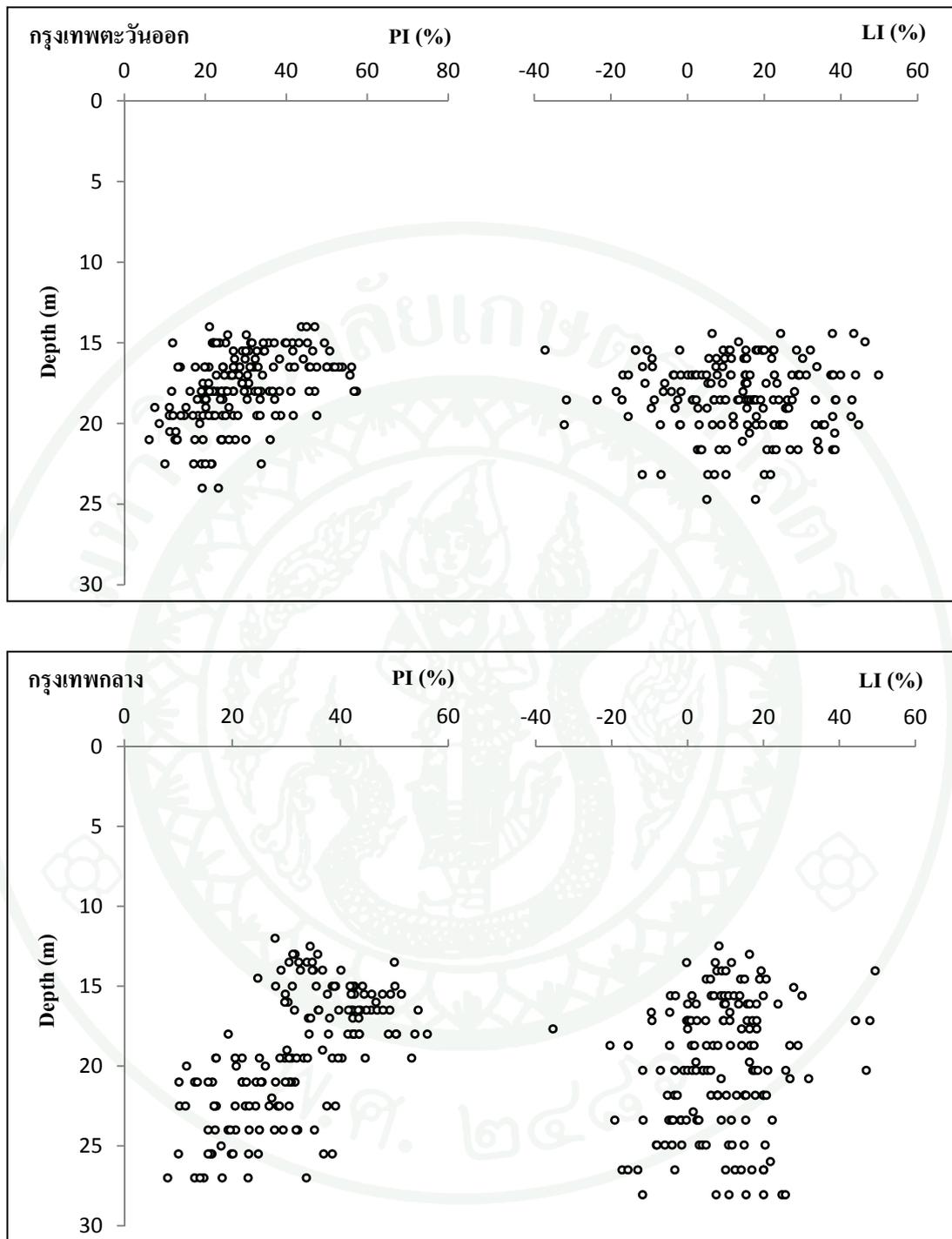
ไม่มีสารอินทรีย์ และจำแนกชนิดแร่ในดินเหนียวได้ว่าส่วนใหญ่เป็นแร่ Illites (Casagrande,1948 and Mitchell,1976) โดยความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$PI = 0.717(LL - 11.06)$$

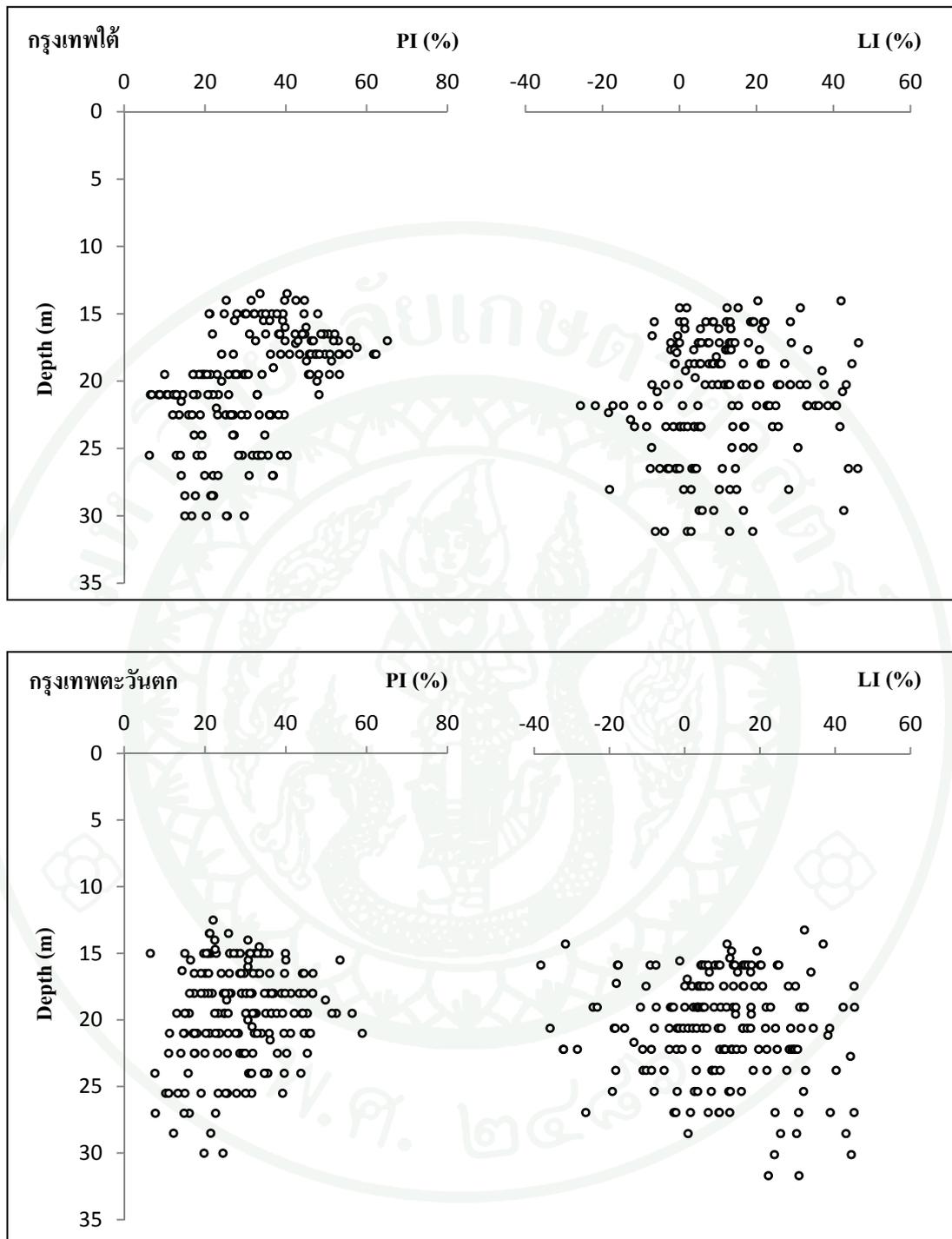
สมการความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นนี้มีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $r^2$ ) เท่ากับ 0.948



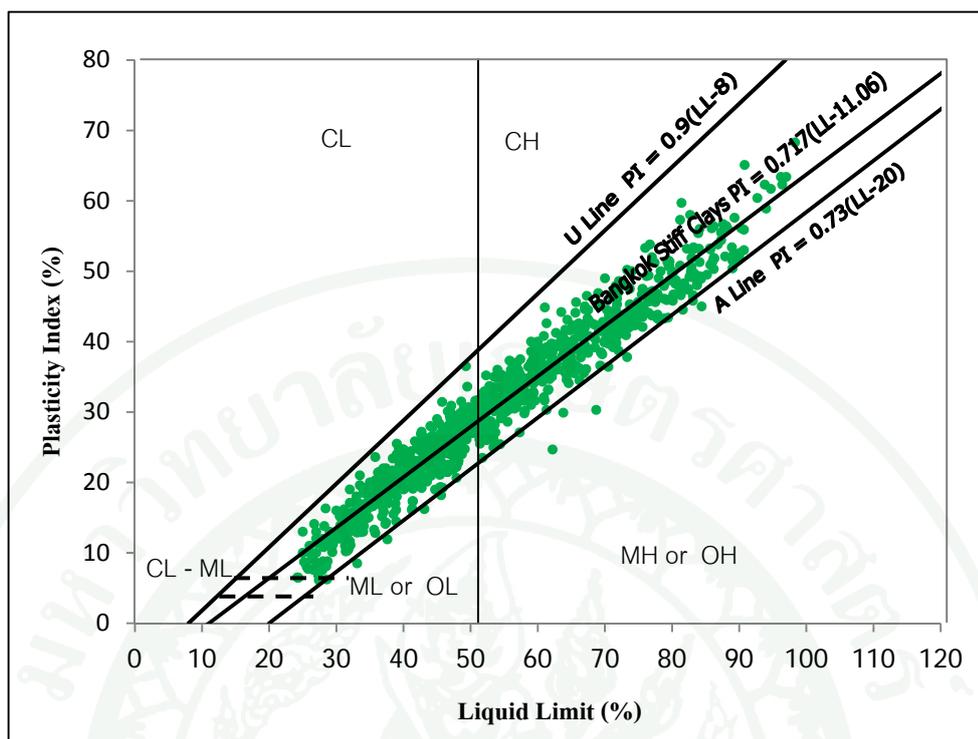
ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่าง PI และ LI กับระดับความลึกชั้นดินเหนียวแข็งแต่ละกลุ่มพื้นที่



ภาพที่ 16 (ต่อ)



ภาพที่ 16 (ต่อ)

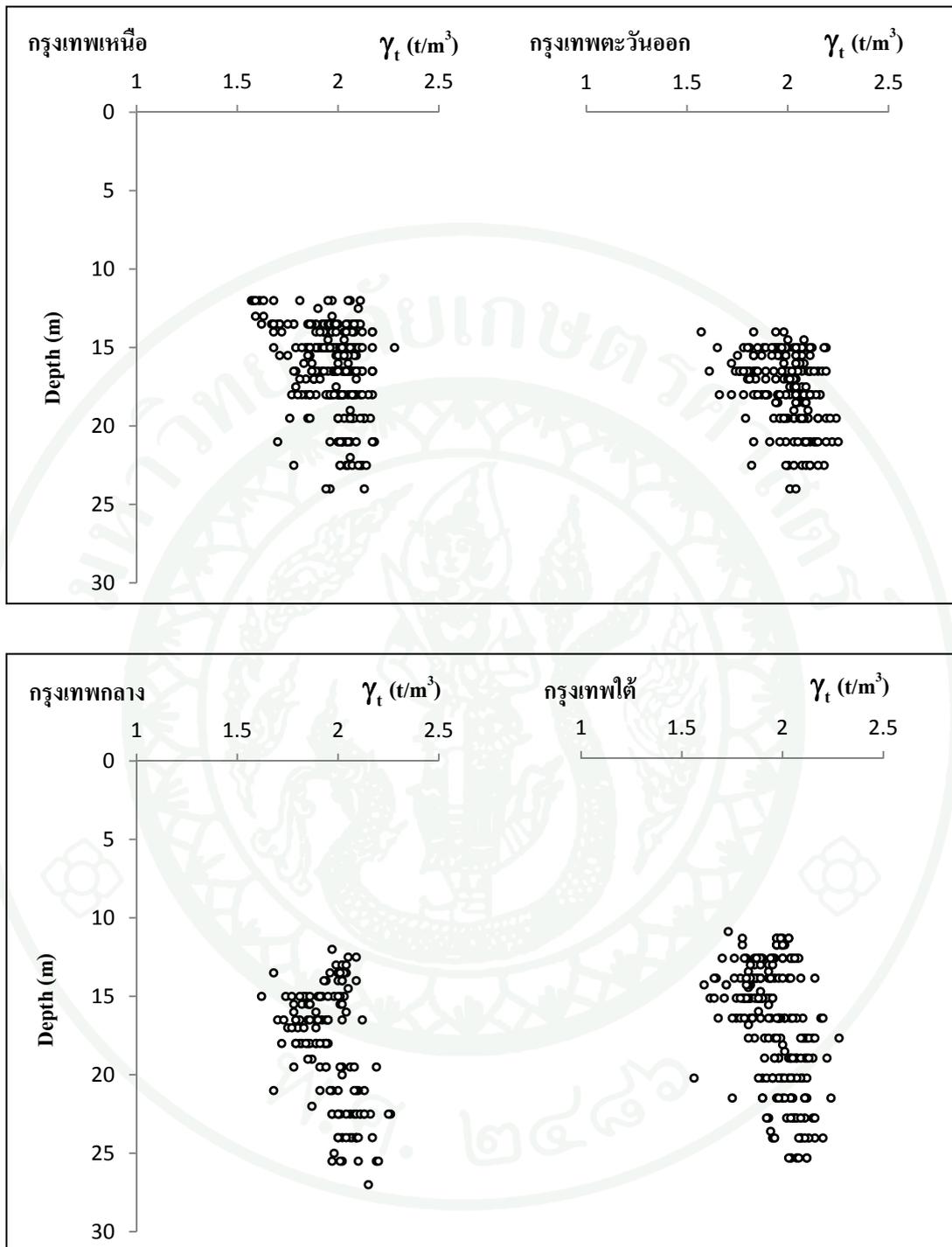


ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่าง PI กับ LL ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ

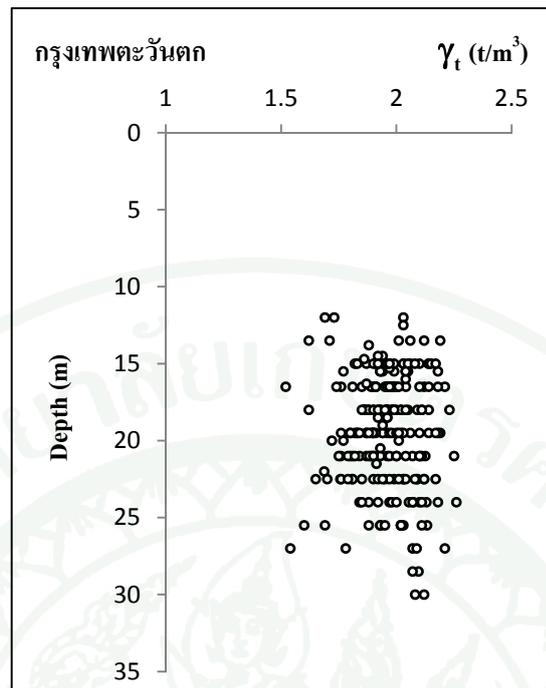
### 3. Total unit weight ( $\gamma_t$ ) และ Specific gravity ( $G_s$ )

จากตารางที่ 12 ถึงตารางที่ 16 เมื่อพิจารณาทั้ง 5 กลุ่มพื้นที่ พบว่า  $\gamma_t$  และ  $G_s$  มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.96-1.99  $t/m^3$  และ 2.65-2.66 ตามลำดับ ค่า SD อยู่ในช่วง 0.12-0.13  $t/m^3$  และ 0-0.04 ตามลำดับ และค่า COV อยู่ในช่วง 6.33-6.81% และ 0-1.58% แสดงให้เห็นว่าค่า  $\gamma_t$  และ  $G_s$  มีค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยน้อย และข้อมูลมีการกระจายน้อยเช่นกัน ซึ่งค่าเฉลี่ยสามารถใช้เป็นตัวแทนได้ดีมาก

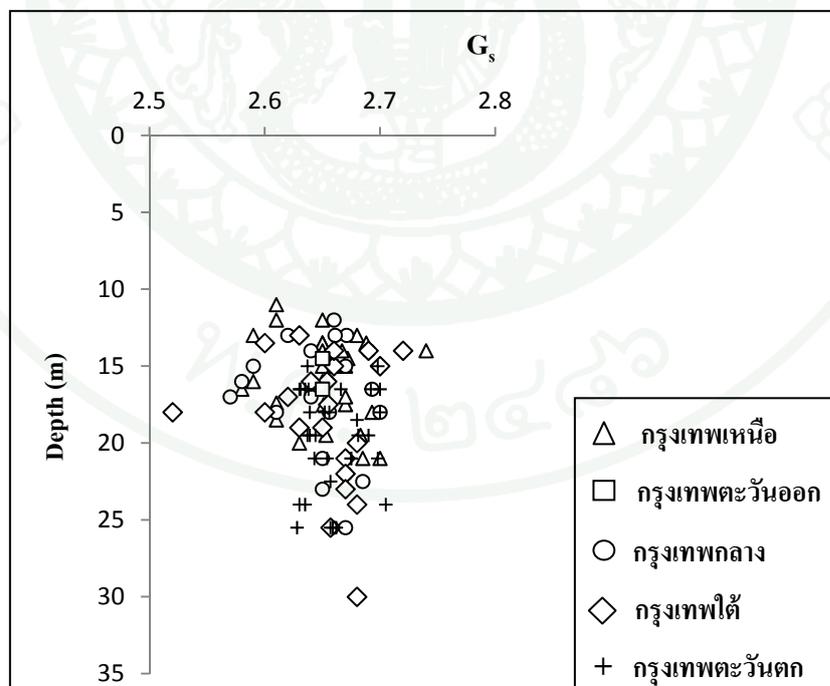
จากภาพที่ 18 และภาพที่ 19 อธิบายได้ว่าค่า  $\gamma_t$  และค่า  $G_s$  ในแต่ละกลุ่มพื้นที่มีค่าใกล้เคียงกัน และคุณสมบัติของดินสองอย่างนี้สามารถสันนิษฐานได้ว่าค่าจะคงที่เมื่อความลึกเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\gamma_t$  กับระดับความลึกชั้นดินเหนียวแข็งแต่ละกลุ่มพื้นที่



ภาพที่ 18 (ต่อ)



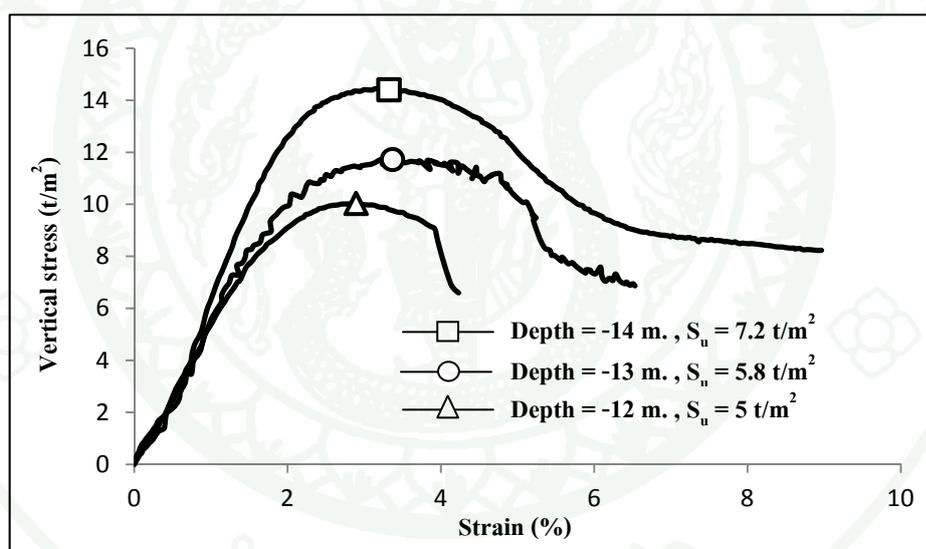
ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $G_s$  กับระดับความลึกชั้นดินเหนียวแข็งแต่ละกลุ่มพื้นที่

## คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ

### 1. คุณสมบัติทางด้านกำลังรับแรงเฉือน

#### 1.1 Undrained shear strength ( $S_u$ )

ข้อมูลผลการทดสอบที่รวบรวมได้มีทั้งหมด 357 ข้อมูล เมื่อทำการพิจารณา Stress-Strain curves จากการทดสอบ Unconfined compression test ลักษณะของเส้นกราฟส่วนใหญ่จะมี Peak strength ที่ชัดเจน แสดงถึงลักษณะดินว่าเป็น Over consolidated clay ซึ่งตัวอย่าง Stress-Strain curves ของหลุมเจาะในเขตจตุจักร แสดงในภาพที่ 20 จากภาพจะเห็นได้ว่าเมื่อความลึกมากขึ้น ทำให้จุด Peak strength มากขึ้น ซึ่งทำให้ได้ค่า  $S_u$  มากขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain จากการทดสอบ Unconfined compression test

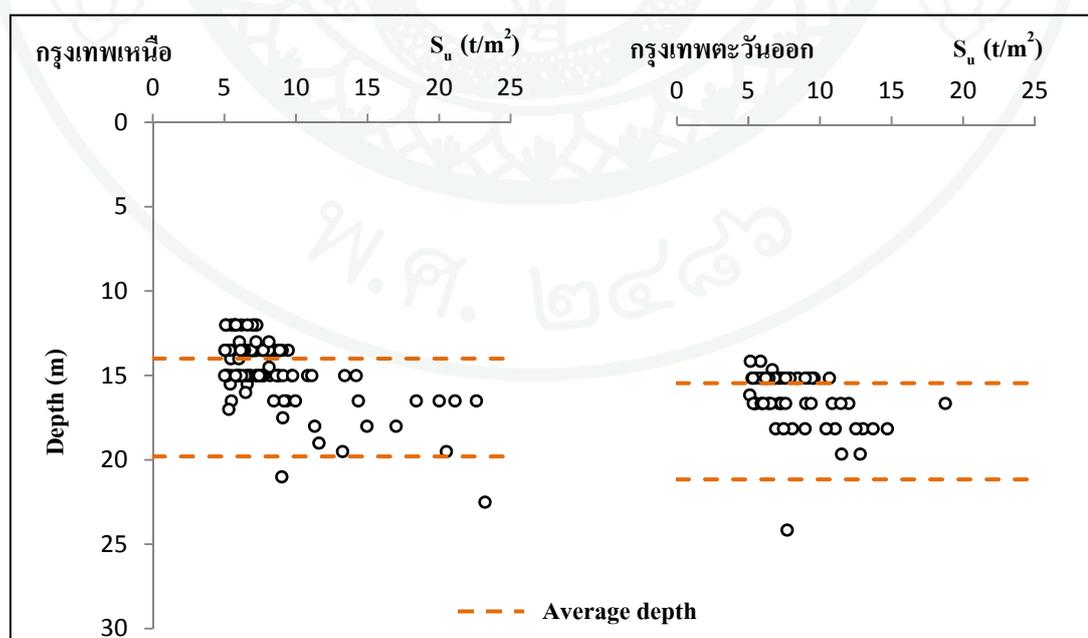
สำหรับค่าทางสถิติของค่า  $S_u$  ในแต่ละกลุ่มพื้นที่ดังตารางที่ 19 เมื่อทำการหาค่าเฉลี่ยในพื้นที่กรุงเทพฯ รวมทั้งหมด ที่ช่วงระดับความลึกตั้งแต่ 11 ถึง 30 เมตร มีค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ  $8.83 \pm 3.57 t/m^2$  และเมื่อเปรียบเทียบกับระดับความลึกของชั้นดินในแต่ละกลุ่มพื้นที่ดังภาพที่ 21 พบว่ากลุ่มพื้นที่กรุงเทพฯเหนือและกรุงเทพฯตะวันออกมีแนวโน้มของค่า  $S_u$  เพิ่มขึ้นตามความลึกที่เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาค่า  $S_u$  ตามระดับความลึกของชั้นดินและประกอบกับ

ค่า  $w_u$  ที่ได้กล่าวไว้ดังตารางที่ 18 สามารถแบ่งเป็นชั้นดินเหนียวแข็งมากที่ความลึกประมาณ 19 เมตร ลงไป และสรุปได้ว่าชั้นดินที่ทำการศึกษาเป็นดินเหนียวแข็งถึงแข็งมาก (Stiff to Very Stiff Clay)

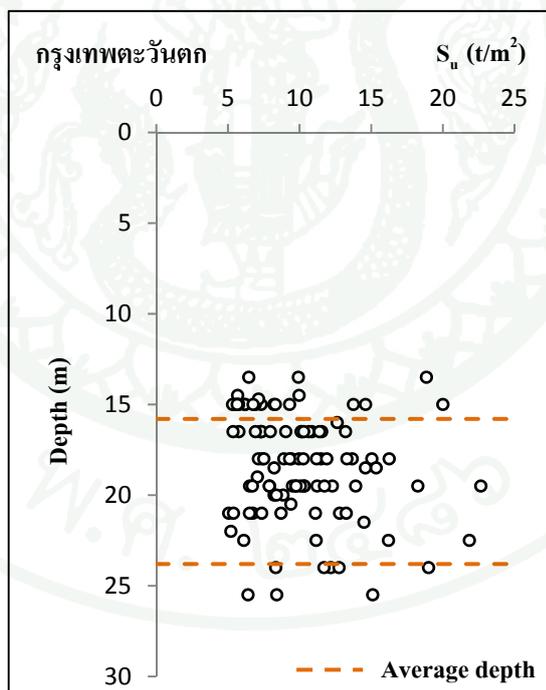
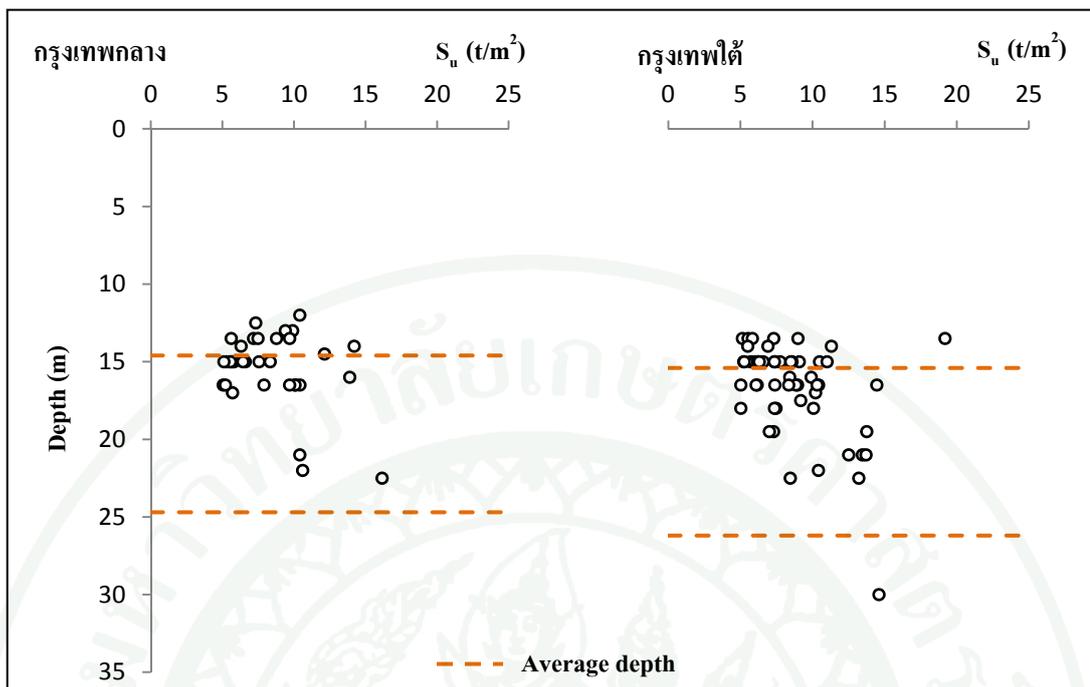
ตารางที่ 19 ค่าทางสถิติของ  $S_u$  ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ

Statistical Values	$S_u$ ( $t/m^2$ )					*ดินเหนียว แข็งกรุงเทพฯ
	กรุงเทพ เหนือ	กรุงเทพ ตะวันออก	กรุงเทพ กลาง	กรุงเทพ ใต้	กรุงเทพ ตะวันตก	
Data	107	57	35	54	104	357
Mean	8.23	8.34	8.31	8.67	9.96	8.83
Min	5.01	5.09	5.05	5.02	5.05	5.01
Max	23.20	18.75	16.15	19.18	22.65	23.20
SD	3.91	2.81	2.86	3.01	3.83	3.57
COV (%)	47.48	33.69	34.41	34.76	38.48	40.41

หมายเหตุ: \*ข้อมูลดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ทั้งหมด



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $S_u$  กับความลึกชั้นดินเหนียวแข็งแต่ละกลุ่มพื้นที่



ภาพที่ 21 (ต่อ)

## 1.2 Undrained modulus of elasticity ( $E_u$ )

ในการศึกษาครั้งนี้ทำการหาค่า  $E_u$  โดยใช้ Secant modulus ที่ 0-50% ของกำลังรับแรงอัด ซึ่งเป็นค่าที่หาจากความชันของเส้นกราฟที่ได้จาก ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain จากการทดสอบ Unconfined compression test จำนวน 26 ตัวอย่าง ดังตารางที่ 20 ซึ่งค่า  $E_u$  เป็นค่าคุณสมบัติของดินที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์การตอบสนองของดินต่อแรงกระทำด้านข้างและการคาดคะเนการทรุดตัวที่เกิดขึ้นทันที

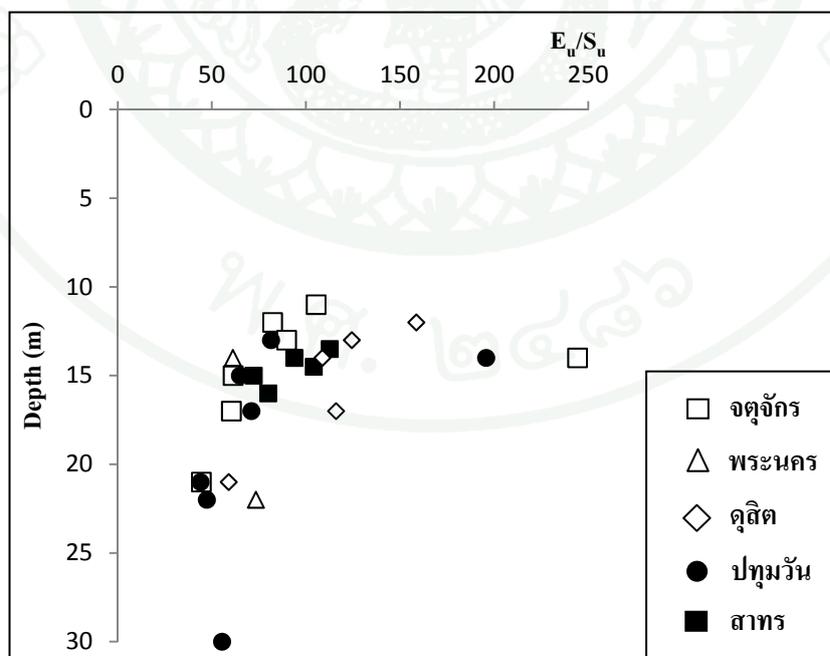
ตารางที่ 20 ค่า Undrained modulus of elasticity ( $E_u$ ) ของเขตพื้นที่กรุงเทพฯ ต่างๆ

เขตพื้นที่	BH	Depth (m)	$E_u$ (t/m <sup>2</sup> )	$S_u$ (t/m <sup>2</sup> )	$E_u/S_u$
จตุจักร	1	11	526.84	5	105.37
		12	476.95	5.8	82.23
		13	645.74	7.2	89.69
		14	1465.60	6	244.27
		21	399.32	9	44.37
	2	15	870.15	14.2	61.28
		17	319.76	5.3	60.33
พระนคร	3	14	385.06	6.3	61.12
		22	777.81	10.6	73.38
คูสิต	4	12	1649.44	10.4	158.60
		13	1230.39	9.9	124.28
		14	1542.94	14.2	108.66
		17	660.98	5.7	115.96
		21	613.16	10.4	58.96
ปทุมวัน	5	13	431.37	5.3	81.39
		14	1350.33	6.9	195.70
		15	408.66	6.3	64.87
		17	723.82	10.2	70.96
		21	601.95	13.7	43.94
		22	491.83	10.4	47.29

ตารางที่ 20 (ต่อ)

เขตพื้นที่	BH	Depth (m)	$E_u$ (t/m <sup>2</sup> )	$S_u$ (t/m <sup>2</sup> )	$E_u/S_u$
ปทุมวัน	5	30	808.61	14.6	55.38
สาทร	6	13.5	821.81	7.3	112.58
		14	516.00	5.5	93.82
		14.5	1176.26	11.3	104.09
		15	793.84	11	72.17
		16	791.23	9.9	79.92

จากตารางที่ 20 สามารถสรุปได้ว่าค่า  $E_u$  ของดินเหนียวแข็งในพื้นที่กรุงเทพฯ ที่ได้จากความชันเส้นกราฟจากความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้น จากการทดสอบ Unconfined compression มีค่าอยู่ในช่วง 319.76-1649.44 t/m<sup>2</sup> และมีค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ  $787.69 \pm 383.58$  t/m<sup>2</sup> โดยเมื่อทำการหาค่าอัตราส่วนระหว่างค่า  $E_u$  กับค่า  $S_u$  มีค่าประมาณอยู่ในช่วง 40-250 และจากภาพที่ 22 แสดงค่า  $E_u/S_u$  เปรียบเทียบกับระดับความลึก พบว่าค่าค่อนข้างแปรปรวนกับระดับความลึก



ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $E_u/S_u$  กับความลึกชั้นดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ

### 1.3 Effective strength parameters

Strength parameters ที่ได้จากการทดสอบ CU Triaxial compression test เมื่อทำการวิเคราะห์ตรวจสอบผลทดสอบทำให้ได้ข้อมูลจำนวน 2 ชุดการทดสอบ (6 ตัวอย่าง) ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator stress ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) กับ Strain ( $\epsilon$ ), Excess pore pressure ( $\Delta u$ ) กับ Strain และ Pore pressure parameter A ( $A = \Delta u / (\sigma_1 - \sigma_3)$ ) กับ Strain ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ได้แสดงไว้ในภาพที่ 23 ถึงภาพที่ 24, ภาพที่ 27 ถึงภาพที่ 28 และภาพที่ 31 ถึงภาพที่ 32 ตามลำดับ และข้อมูลที่ได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ต่างๆ ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 21

ตารางที่ 21 ข้อมูลผลการทดสอบ CU Triaxial compression test สำหรับดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ

เขตพื้นที่	BH	Depth (m)	Sample No.	$\sigma'_c$ (t/m <sup>2</sup> )	At Maximum Deviator Stress ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) <sub>max</sub>						
					$\epsilon$ (%)	$\sigma'_3$ (t/m <sup>2</sup> )	$\sigma_1 - \sigma_3$ (t/m <sup>2</sup> )	$\Delta u$ (t/m <sup>2</sup> )	$A_r$	$\left. \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma'_c} \right _2$	$\left. \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma'_c} \right _2$
สาทร	1	16	1	12	9.01	11.47	18.13	0.62	0.03	9.07	20.53
			2	20	10.33	16.47	21.62	3.37	0.16	10.81	27.28
			3	30	10.03	22.90	33.31	7.30	0.22	16.65	39.55
จตุจักร	2	17	4	10	8.09	8.05	16.90	2.05	0.12	8.45	16.50
			5	20	6.09	17.73	30.36	2.14	0.07	15.18	32.91
			6	30	11.23	21.17	41.12	8.55	0.21	20.56	41.73

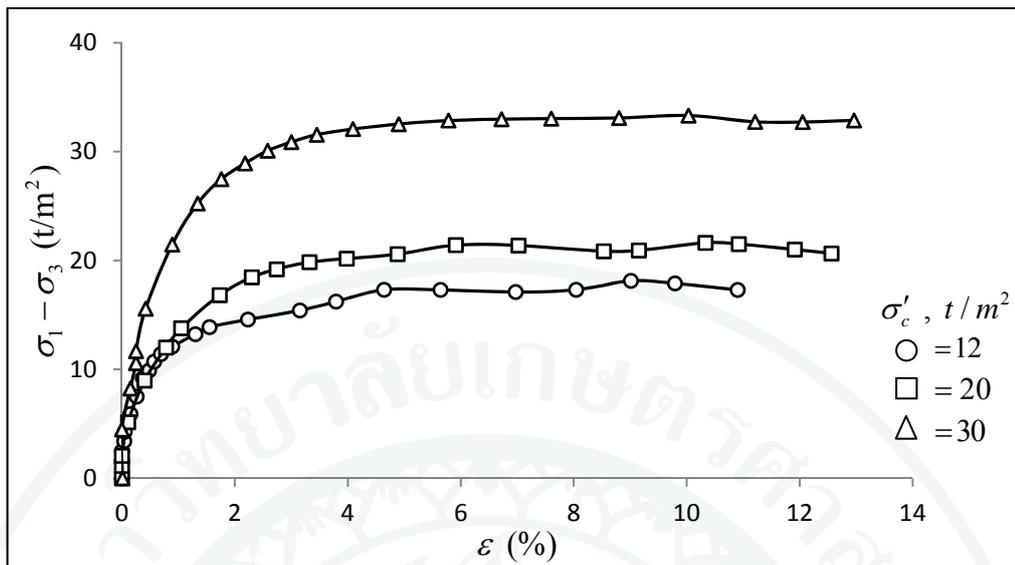
ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator stress กับ Strain ของตัวอย่างดินเหนียวแข็งทั้ง 2 ชุดการทดสอบในพื้นที่กรุงเทพฯ จากข้อมูลผลการทดสอบ Triaxial compression test ที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 23 ถึงภาพที่ 24 แสดงให้เห็นว่า ค่า Deviator stress ของตัวอย่างดินที่ใช้ค่า Confining pressure สูงสุด ในแต่ละชุดการทดสอบ จะได้ค่า Deviator stress สูงสุด ซึ่งทำให้เห็นว่าค่า Confining pressure มีอิทธิพลต่อค่า Deviator stress ที่ได้ในการทดสอบ เมื่อทำการ Normalized deviator stress ตามวิธีของ Ladd (1964) ดังแสดงในภาพที่ 25 ถึงภาพที่ 26 ซึ่งแนวคิดเรื่องการ Normalized ดังกล่าวนี้นี้คือความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized deviator stress กับ Strain ต้องมีเส้นกราฟเป็นเส้นเดียวกัน ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างดินที่เป็น Over consolidated ชัดเจนนั้น ไม่ได้มีพฤติกรรม Normalized ระหว่าง  $(\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma'_c$  และ Axial strain โดยมีค่า  $(\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma'_c$  ที่แตกต่างกันในแต่ละ Confining pressure และกราฟมีแนวโน้มของค่า

$(\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma'_c$  ลดลง เมื่อ Confining pressure เพิ่มขึ้น สำหรับตัวอย่างที่ถูก Confining ภายใต้ Pressure มากกว่า Critical pressure หรือ Maximum past pressure คือตัวอย่างดินจะเป็น Normally consolidated โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized deviator stress กับ Strain จะมีจุดสูงสุดที่ไม่แตกต่างกันมาก ดังแสดงได้ชัดเจนในภาพที่ 26

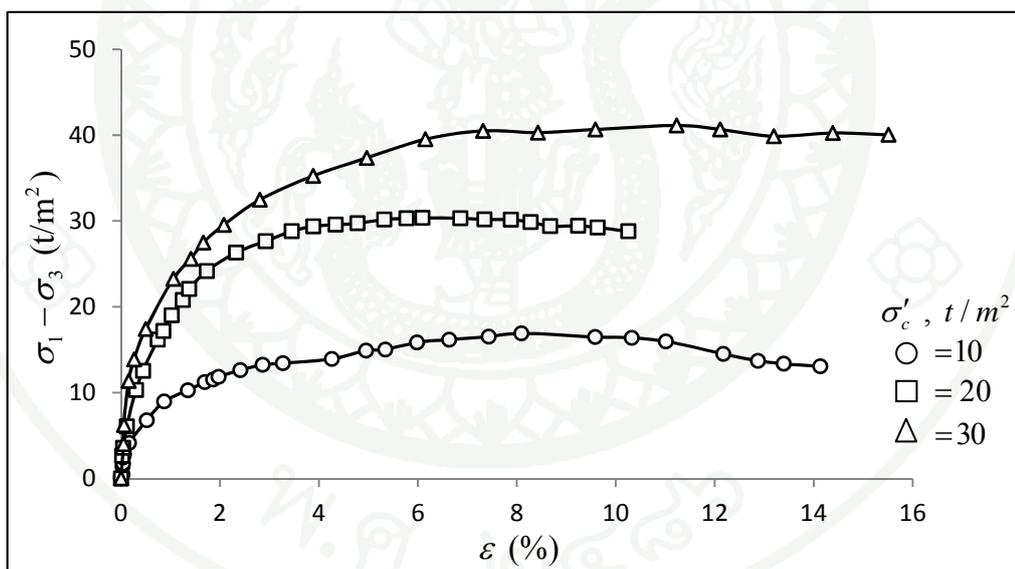
ที่ Confining pressure น้อยๆ ยังมีการพัฒนาความแข็งแรงของพันธะที่ยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินไม่ให้เกิดการพิบัติ ด้วยเหตุนี้ที่ Strain ใดๆ จะมี Normalized deviator stress มากขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างดินที่ถูก Confining ภายใต้ Pressure มากๆ และเมื่อ Confining pressure เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเมื่อเพิ่มขึ้นมากกว่า Maximum past pressure ทำให้ Stress ในตัวอย่างดินน้อยลงโดยการพัฒนาพันธะที่ยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน และตัวอย่างดินดังกล่าวจะแสดงพฤติกรรม Normalized

อย่างไรก็ตามในภาพที่ 25 ถึงภาพที่ 26 ในช่วง Normally consolidated พฤติกรรม Normalized ที่เกิดขึ้นไม่แสดงลักษณะเฉพาะอย่างชัดเจน ซึ่งความแตกต่างระหว่างเส้นกราฟอาจทำให้เหตุผลได้ว่า มีความแตกต่างในเรื่องคุณสมบัติของดินนั้นๆ เช่น Water content, Liquid limit และ Total unit weight เป็นต้น

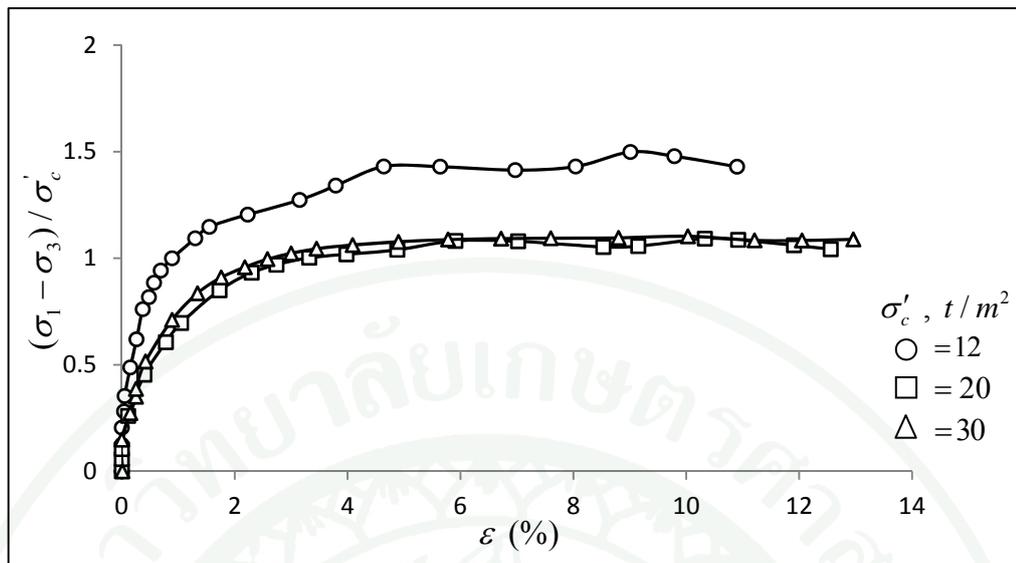
สำหรับค่า Maximum deviator stress หรือ Deviator stress ที่ตัวอย่างดินเกิดการพิบัติ จากตารางที่ 22 จะเห็นได้ว่า BH-1 ที่ความลึก 16 เมตร ค่า Deviator stress ที่ทำให้ตัวอย่างเกิดการพิบัติ จะมีค่าน้อยกว่า BH-2 ที่ความลึก 17 เมตร เป็นเพราะว่าดินจะมีความแข็งแรงมากขึ้นตามระดับความลึกที่เพิ่มขึ้น ซึ่งระดับความลึกที่เพิ่มขึ้นนี้ ทำให้มีผลต่อการใช้ค่า Confining pressure เพิ่มขึ้นในการทดสอบตามไปด้วย



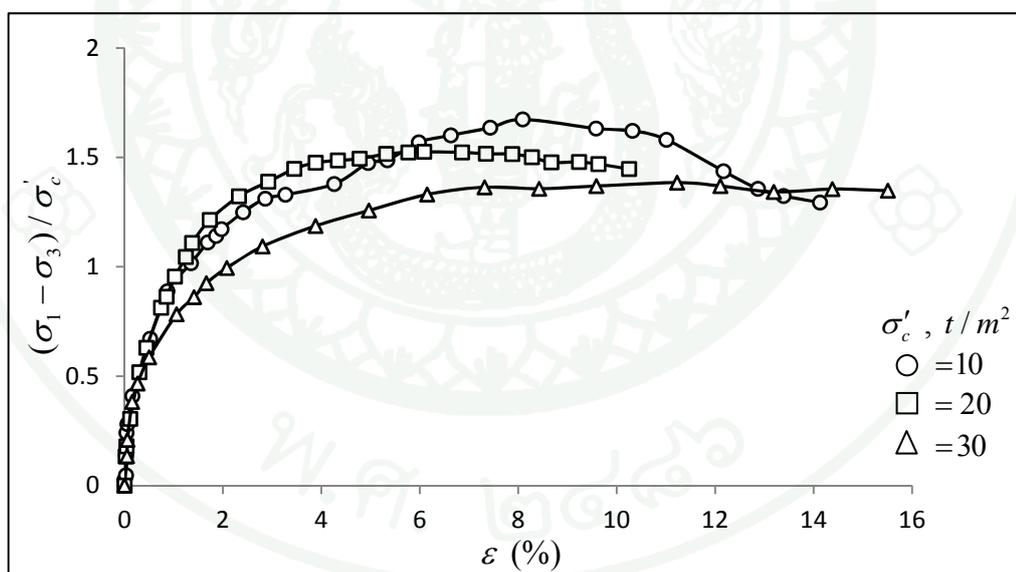
ภาพที่ 23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator stress กับ Strain BH-1 ที่ความลึก 16 เมตร



ภาพที่ 24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator stress กับ Strain BH-2 ที่ความลึก 17 เมตร



ภาพที่ 25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized deviator stress กับ Strain BH-1 ที่ความลึก 16 เมตร

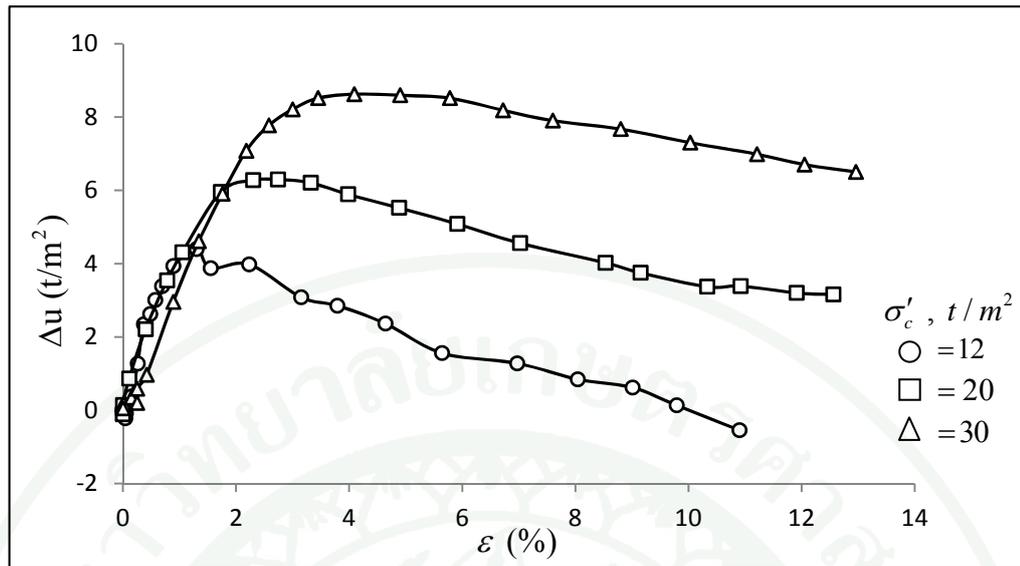


ภาพที่ 26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized deviator stress กับ Strain BH-2 ที่ความลึก 17 เมตร

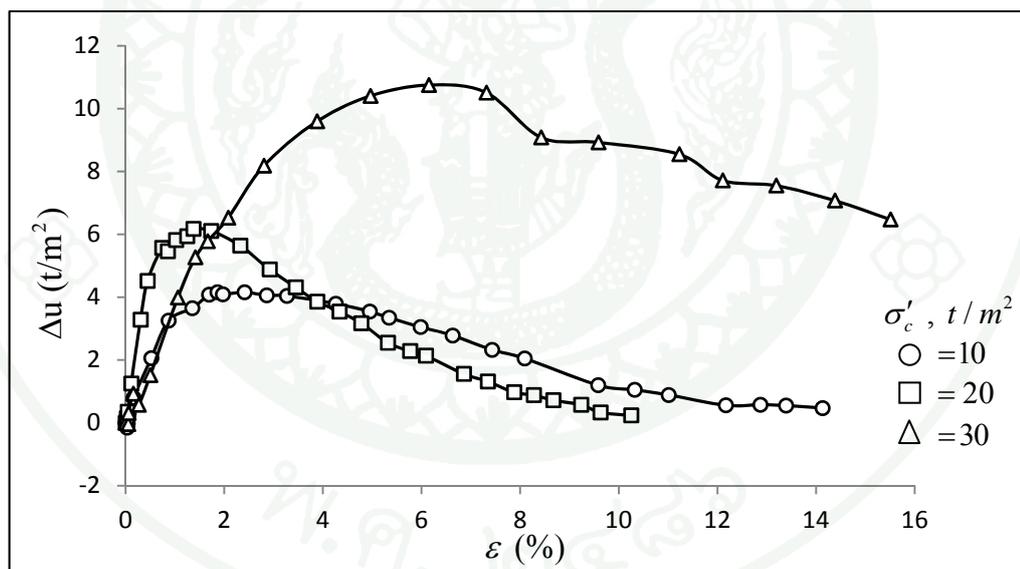
ความสัมพันธ์ระหว่าง Excess pore pressure กับ Strain ตามภาพที่ 27 ถึงภาพที่ 28 แสดงให้เห็นว่าค่า Excess pore pressure ของตัวอย่างดินที่ใช้ค่า Confining pressure สูงสุด ในแต่ละชุดการทดสอบ จะได้ค่า Excess pore pressure สูงสุด ซึ่งค่า Excess pore pressure จะเพิ่มขึ้นอย่าง

รวดเร็วจนถึงค่าสูงสุด ขณะที่ % Strain มีค่าต่ำ จากนั้นจึงลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งแสดงลักษณะของ Over consolidated clay การที่ Excess pore pressure เพิ่มขึ้นในตอนแรกแล้วลดลงทันที สาเหตุมาจากการขยายตัวของตัวอย่างดินเหนียวแข็งในขณะทำการทดสอบ และพบว่า Deviator stress ของตัวอย่างดินมีค่ามากขึ้น ค่า Excess pore pressure ของตัวอย่างนั้นก็จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากตัวอย่างเป็นดินเหนียวแข็งเมื่อตัวอย่างดินได้รับแรงกด น้ำที่อยู่ในตัวอย่างดินไม่สามารถระบายออกได้อย่างรวดเร็ว ทำให้น้ำเป็นตัวที่รับแรงก่อนตัวอย่างดินทำให้เกิด Excess pore pressure ขึ้น โดย Excess pore pressure ขึ้นอยู่กับแรงที่มากระทำบนตัวอย่างดิน ดังนั้นเมื่อมีแรงมากระทำบนตัวอย่างดินสูง ค่า Excess pore pressure ก็จะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย และช่วงแรกค่า Excess pore pressure จะมีค่าติดลบ เนื่องจากเมื่อมีแรงมากระทำบนตัวอย่างดิน เมื่อดินจะเกิดการขยายตัว ทำให้น้ำระบายออกไปได้ ซึ่งเป็นลักษณะของดินเหนียวแข็งหรือดินที่มีการอัดตัวแน่น

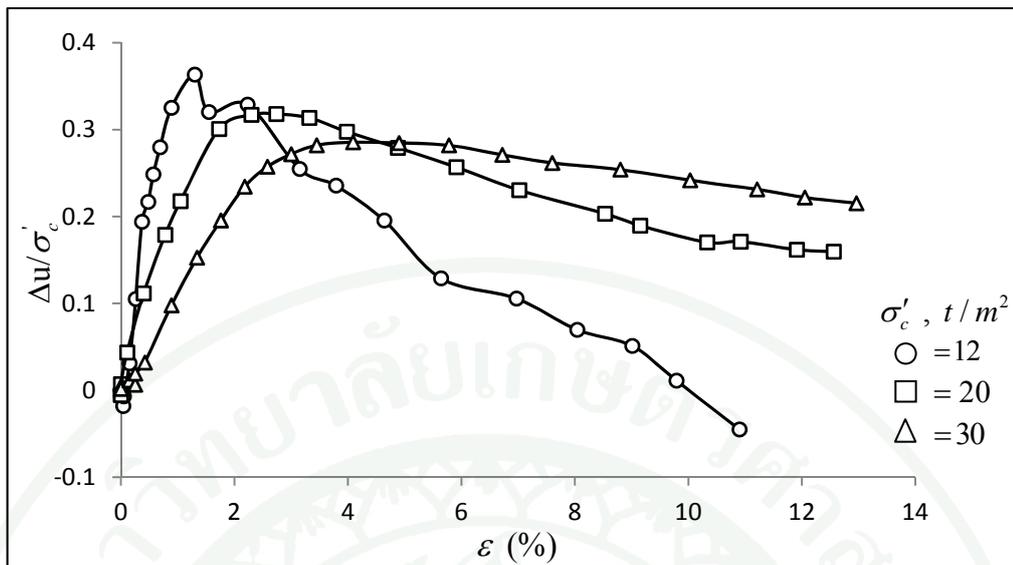
สำหรับความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized excess pore pressure กับ Strain ที่แสดงไว้ในภาพที่ 29 ถึงภาพที่ 30 พบว่าพฤติกรรม Normalized มีแนวโน้มไปทางลักษณะของตัวอย่างดินที่แสดงเป็น Normally consolidated อย่างไรก็ตามในแต่ละ Confining pressure เส้นกราฟส่วนใหญ่ค่อนข้างกระจายกันออกไป ซึ่งอาจจะเป็นเพราะความแตกต่างของคุณสมบัติและโครงสร้างของดินของแต่ละตัวอย่างดินที่ทำการทดสอบและสำหรับตัวอย่างดินที่มีลักษณะเป็น Over consolidated หรือที่ค่า Confining pressure ต่ำ จะทำให้ค่า  $\Delta u / \sigma'_c$  มีอัตราการเพิ่มมากที่สุด เมื่อเทียบกับค่า Confining pressure ที่มากกว่า ในแต่ละชุดการทดสอบ ที่ Strain น้อยๆ จนถึงค่าสูงสุด หลังจากนั้นก็จะลดลง



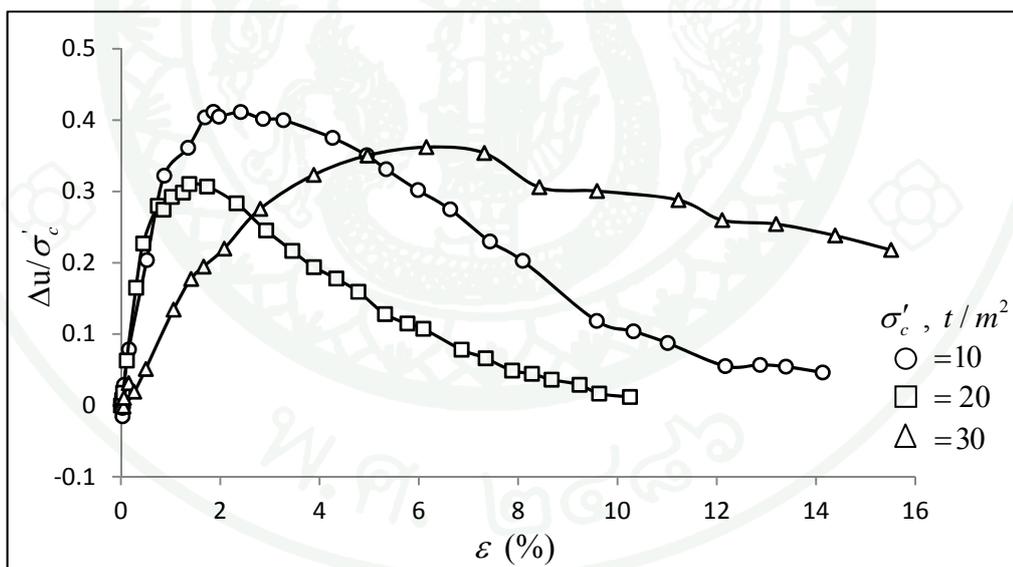
ภาพที่ 27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Excess pore pressure กับ Strain BH-1 ที่ความลึก 16 เมตร



ภาพที่ 28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Excess pore pressure กับ Strain BH-2 ที่ความลึก 17 เมตร



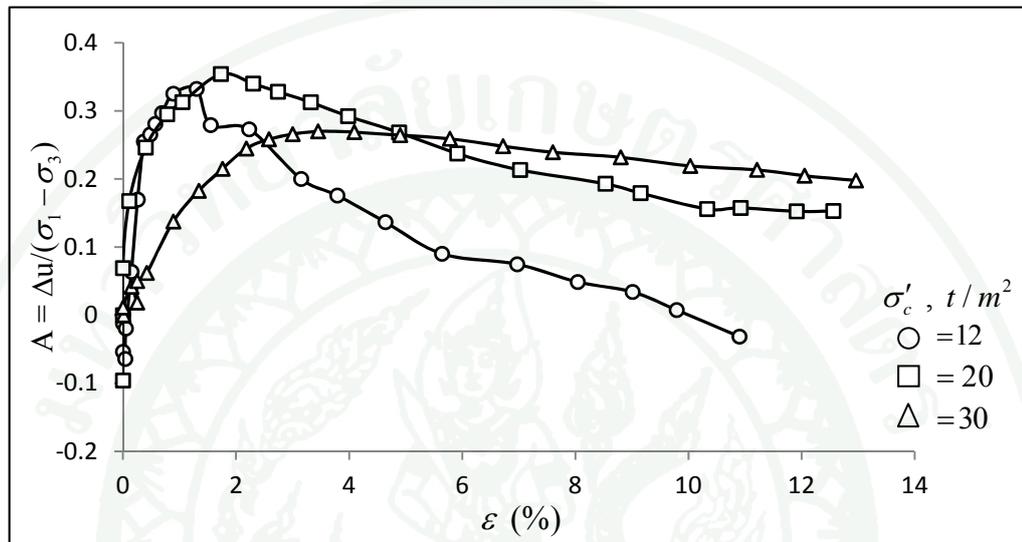
ภาพที่ 29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized excess pore pressure กับ Strain BH-1 ที่ความลึก 16 เมตร



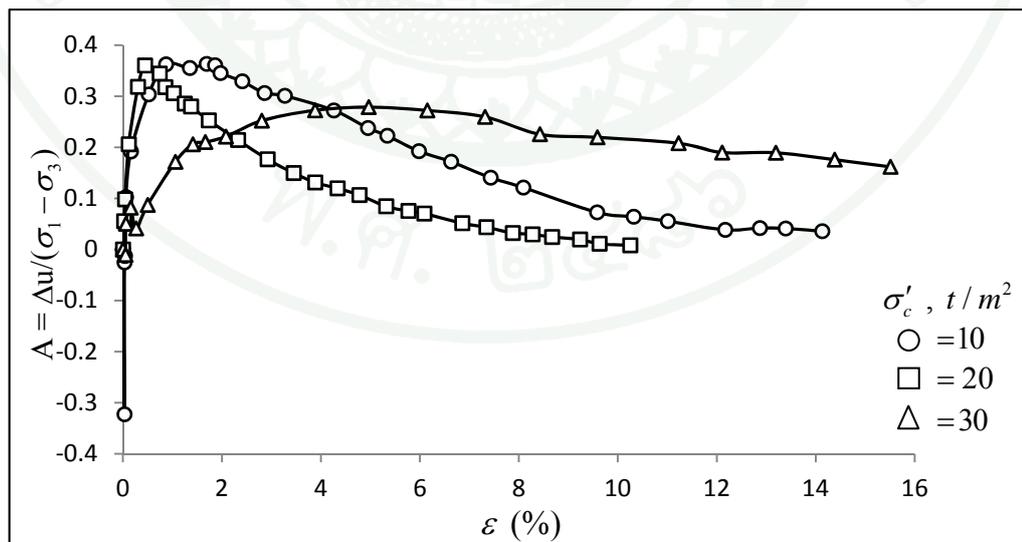
ภาพที่ 30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized excess pore pressure กับ Strain BH-2 ที่ความลึก 17 เมตร

ความสัมพันธ์ระหว่าง Pore pressure parameter A กับ Strain ตามภาพที่ 31 ถึงภาพที่ 32 แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างดินที่ค่า Confining pressure เท่ากับ 10, 12 และ 20 t/m<sup>2</sup> ซึ่งตัวอย่างดินมีลักษณะเป็น Over consolidated จะมีค่า Pore pressure parameter A ติดลบในช่วง Strain น้อย แล้ว

ค่า Pore pressure parameter A จะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุด จากนั้นจึงลดลงในอัตราที่มาก แต่ตัวอย่างดินที่ค่า Confining pressure เท่ากับ  $30 \text{ t/m}^2$  ซึ่งตัวอย่างดินมีลักษณะเป็น Normally consolidated จะมีค่า Pore pressure parameter A ติดลบในช่วง Strain น้อย แล้วค่า Pore pressure parameter A จะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุด และจากนั้นค่าเกือบจะคงที่กับ Strain ที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Pore pressure parameter A กับ Strain BH-1 ที่ความลึก 16 เมตร



ภาพที่ 32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Pore pressure parameter A กับ Strain BH-2 ที่ความลึก 17 เมตร

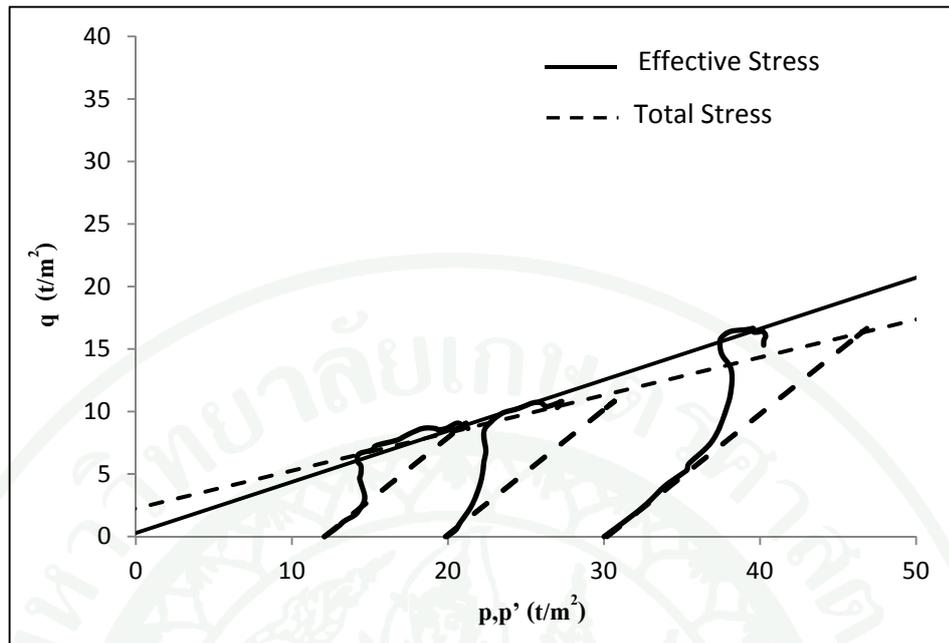
สำหรับ Pore pressure parameter  $A$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันน้ำที่ได้ในขณะที่ทำการทดสอบ Triaxial compression test โดยค่า Parameter  $A$  สามารถใช้แสดงถึงชนิดของดินและสภาพของการรับน้ำหนักบรรทุกที่ผ่านมาในอดีต โดยค่า Parameter  $A$  ที่จุดพิบัติของดินเรียกว่า Parameter  $A$  at failure ( $A_f$ ) ซึ่ง  $A_f$  จากตารางที่ 21 พบว่าเมื่อเพิ่มค่า Confining pressure พบว่าค่า  $A_f$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วยในตัวอย่างที่ระดับความลึกเดียวกัน และพบว่ามีค่า  $A_f$  อยู่ในช่วง 0.03 ถึง 0.22 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า  $A_f$  ของดินเหนียวชนิดต่างๆ จากตารางที่ 22 พบว่าค่า  $A_f$  ของดินเหนียวกรุงเทพฯ มีค่าอยู่ในช่วงของดินประเภท Lightly over consolidated clay

ตารางที่ 22 ค่า Parameter  $A$  at failure ของดินชนิดต่างๆ (Skempton, 1954)

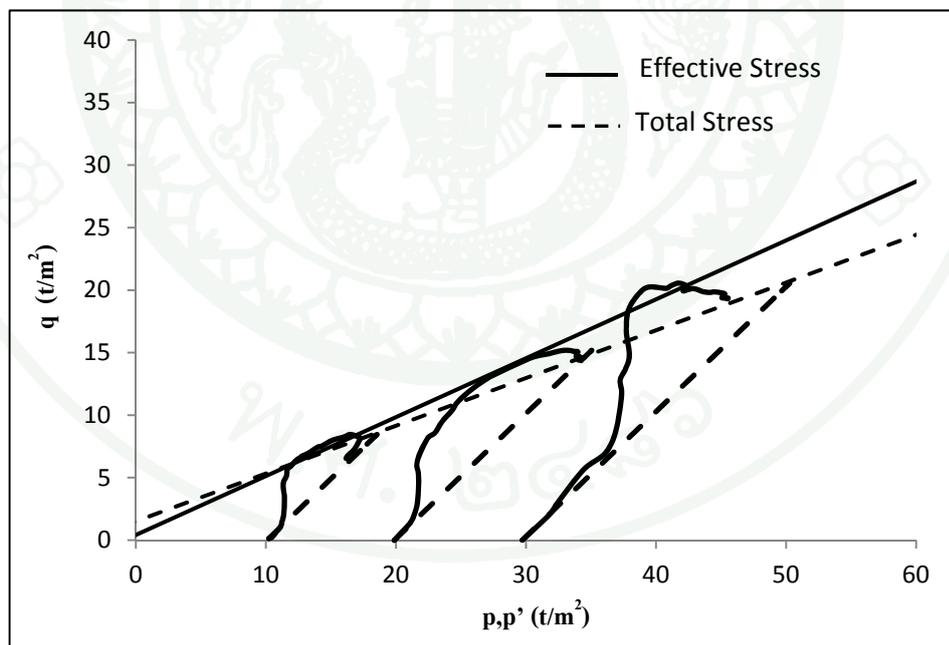
Type of clay	$A_f$
Highly sensitive clay	0.75 to 1.50
Normally consolidated clay	0.50 to 1.00
Compacted sandy clay	0.25 to 0.75
Lightly over consolidated clay	0 to 0.50
Compacted clay-gravel	-0.25 to 0.25
Heavily over consolidated clay	-0.50 to 0

### 1.3.1 Total stress path และ Effective stress path

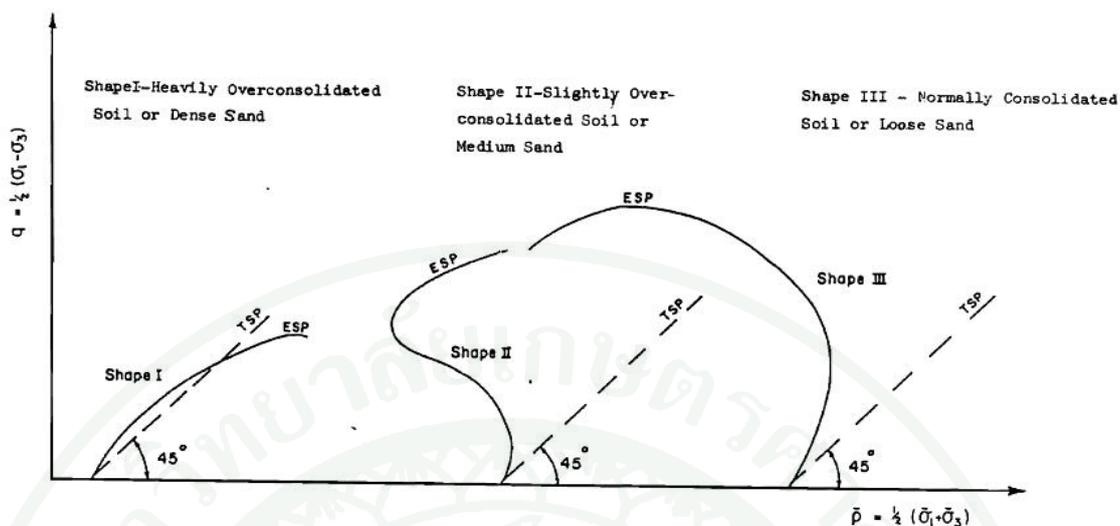
ลักษณะ Stress path ของตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ แสดงในภาพที่ 33 ถึงภาพที่ 34 ซึ่งรูปร่างของ Effective stress paths ที่ Confining pressure ต่างๆ จะมีลักษณะเหมือนกับแบบที่ II (Wissa and Ladd, 1964) ตามภาพที่ 35 ซึ่งเป็นลักษณะของดินประเภท Lightly over consolidated clay



ภาพที่ 33 Total stress path และ Effective stress path BH-1 ที่ความลึก 16 เมตร



ภาพที่ 34 Total stress path และ Effective stress path BH-2 ที่ความลึก 17 เมตร



ภาพที่ 35 การจำแนกรูปปร่างลักษณะของ Effective stress path (Wissa and Ladd, 1964)

### 1.3.2 Effective cohesion ( $c'$ ) และ Effective angle of internal friction ( $\phi'$ )

$c'$  และ  $\phi'$  นี้คำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง  $a'$ ,  $\alpha'$  กับ  $c'$ ,  $\phi'$  ดังต่อไปนี้  
 $\tan \alpha' = \sin \phi'$  และ  $c' = \frac{a'}{\cos \phi'}$  ซึ่งได้จากการพล็อต  $p' - q$  Diagram โดยแสดงให้เห็นเป็นเส้นโค้งทางเดินของ Effective stress paths ซึ่ง  $a'$ ,  $\alpha'$  เป็นค่า Intercept และ Slope ของเส้นตรงที่ลากผ่านจุด  $p'$ ,  $q$  ที่  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$  ของ Effective stress paths แต่ละ Confining pressure ที่ต่างกัน และได้สรุปค่า Cohesion และค่า Angle of internal friction ทั้งแบบ Effective stress และ Total stress ดังตารางที่ 23 ซึ่งพบว่าค่า  $c'$  ของ BH-1 และ BH-2 มีค่าเข้าใกล้ 0 และค่า  $\phi'$  เท่ากับ 28.10 และ 24.10 deg. ตามลำดับ

ตารางที่ 23 ค่า Cohesion และค่า Angle of internal friction ดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ

เขตพื้นที่	BH	Depth (m)	Effective stress		Total stress	
			$c'$ (t/m <sup>2</sup> )	$\phi'$ (deg.)	$c$ (t/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (deg.)
สาทร	1	16	0.48	28.10	1.63	22.45
จตุจักร	2	17	0.31	24.10	2.35	17.59

## 2. คุณสมบัติทางด้านการยุบอัดตัว

ค่าคุณสมบัติการยุบอัดตัวของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ที่จะกล่าวถึงได้มาจากข้อมูลผลการทดสอบจาก Consolidation test จำนวน 60 ข้อมูล และได้สรุปค่าคุณสมบัติการยุบอัดตัวในแต่ละตัวอย่างและแต่ละเขตพื้นที่ดังตารางที่ 24

ตารางที่ 24 คุณสมบัติทางด้านการยุบอัดตัวของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ

เขตพื้นที่	BH	Depth (m)	$e_0$	$C_c$	CR	$C_r$	RR	$C_v$ (m <sup>2</sup> /yr)	$\sigma'_p$ (t/m <sup>2</sup> )	$\sigma'_{v0}$ (t/m <sup>2</sup> )	OCR
ดอนเมือง	1	15	0.881	0.231	0.123	0.075	0.061	0.500	18.03	10.33	1.75
	2	15	0.652	0.132	0.080	0.065	0.058	2.938	29.47	11.70	2.52
	3	15	0.637	0.103	0.063	0.036	0.033	3.494	17.13	11.24	1.52
จตุจักร	4	15.5	0.719	0.174	0.101	0.063	0.054	1.209	28.69	11.78	2.44
	5	13.9	0.713	0.134	0.078	0.016	0.014	1.058	30.75	8.97	3.02
		15	0.675	0.114	0.068	0.023	0.021	0.400	25.40	10.46	2.26
		16	0.585	0.090	0.057	0.020	0.018	0.344	21.75	11.52	1.76
		18	0.642	0.111	0.068	0.029	0.026	3.280	23.08	13.97	1.62
	6	14.9	0.882	0.173	0.092	0.025	0.021	1.630	26.31	9.88	2.66
		15.65	0.864	0.204	0.110	0.033	0.028	0.790	29.67	10.65	2.79
		19.3	0.964	0.211	0.107	0.028	0.023	2.317	34.81	14.10	2.47
		20.8	0.731	0.206	0.119	0.027	0.023	2.160	55.69	15.60	3.57
	21.8	0.657	0.159	0.096	0.044	0.038	0.906	51.72	16.80	3.08	
พระนคร	7	13.5	0.636	0.154	0.094	0.059	0.051	0.510	24.25	10.55	2.30
8	15	0.687	0.213	0.126	0.036	0.029	0.738	21.06	10.21	2.06	
	16	0.580	0.165	0.104	0.034	0.029	1.557	26.56	11.04	2.40	
	18	0.661	0.109	0.066	0.012	0.011	1.615	31.25	12.75	2.45	
	23	0.686	0.194	0.115	0.026	0.022	3.318	50.57	17.16	2.95	
	24	0.583	0.142	0.090	0.035	0.031	3.131	56.20	18.01	3.12	

ตารางที่ 24 (ต่อ)

เขตพื้นที่	BH	Depth (m)	$e_0$	$C_c$	CR	$C_r$	RR	$C_v$ (m <sup>2</sup> /yr)	$\sigma'_p$ (t/m <sup>2</sup> )	$\sigma'_{v0}$ (t/m <sup>2</sup> )	OCR	
คูทิศ	9	12.8	0.623	0.125	0.077	0.025	0.023	1.904	35.81	8.82	4.06	
		13.9	0.608	0.170	0.106	0.041	0.035	0.397	38.41	10.59	3.63	
		14.6	0.605	0.087	0.054	0.016	0.010	1.167	32.88	11.35	2.90	
		16	0.852	0.166	0.089	0.058	0.032	1.311	25.15	12.40	2.03	
		19	0.851	0.210	0.113	0.061	0.033	3.442	26.56	15.00	1.77	
		22	0.578	0.079	0.050	0.016	0.010	3.144	40.98	17.92	2.29	
ปทุมวัน	10	13.9	0.871	0.201	0.107	0.030	0.016	2.796	22.38	9.03	2.48	
		14.9	0.646	0.081	0.049	0.014	0.008	3.578	35.35	10.03	3.52	
		16	0.861	0.151	0.081	0.038	0.020	0.634	18.74	10.90	1.72	
		17.75	0.853	0.205	0.111	0.009	0.005	2.858	29.08	12.35	2.35	
		19	0.736	0.101	0.058	0.022	0.013	3.264	25.78	13.32	1.94	
		20	0.735	0.101	0.058	0.036	0.021	1.904	29.57	14.20	2.08	
		21	0.696	0.061	0.036	0.010	0.006	2.329	42.58	15.03	2.83	
		24	0.643	0.135	0.082	0.013	0.008	3.122	54.92	17.95	3.06	
สาทร	11	13.9	0.715	0.212	0.124	0.021	0.012	1.432	33.61	9.60	3.50	
		14.54	0.623	0.144	0.089	0.026	0.016	2.215	33.85	10.09	3.36	
		14.9	0.740	0.205	0.118	0.025	0.015	1.081	26.81	11.30	2.37	
		16	0.735	0.143	0.082	0.062	0.036	1.135	21.40	12.30	1.74	
		17	0.782	0.169	0.095	0.027	0.015	3.302	26.73	13.23	2.02	
		20	0.594	0.104	0.065	0.020	0.013	2.029	23.81	16.54	1.44	
บางพลัด	12	15	0.732	0.183	0.105	0.081	0.047	0.493	24.60	11.05	2.23	
		13	15.5	0.885	0.203	0.107	0.040	0.021	3.176	30.70	10.43	2.94
		14	15.5	0.928	0.220	0.114	0.047	0.025	0.432	23.97	11.16	2.15
			18.5	0.759	0.132	0.075	0.064	0.036	0.540	23.05	14.02	1.64
		15	17	0.681	0.122	0.073	0.043	0.025	1.926	25.99	11.48	2.26
		16	17.5	0.724	0.180	0.104	0.044	0.026	0.598	24.57	11.99	2.05
		17	18.5	0.742	0.156	0.090	0.046	0.027	0.834	23.46	12.88	1.82

ตารางที่ 24 (ต่อ)

เขต พื้นที่	BH	Depth (m)	$e_0$	$C_c$	CR	$C_r$	RR	$C_v$ ( $m^2/yr$ )	$\sigma'_p$ ( $t/m^2$ )	$\sigma'_{v0}$ ( $t/m^2$ )	OCR
บาง พลัด	18	20	0.725	0.128	0.074	0.064	0.037	0.408	23.91	14.80	1.62
	19	21	0.949	0.186	0.095	0.057	0.029	2.210	26.53	15.93	1.67
	20	24.5	0.824	0.121	0.066	0.064	0.035	0.478	27.63	10.42	2.65
บางกอก น้อย	21	17	0.702	0.170	0.100	0.050	0.029	0.512	27.31	11.22	2.43
	22	18.5	0.740	0.179	0.103	0.068	0.039	0.313	20.98	12.11	1.73
	23	18.5	0.615	0.146	0.091	0.090	0.055	1.055	26.40	12.49	2.11
	24	18.5	0.749	0.108	0.062	0.056	0.032	1.986	23.02	12.74	1.81
	25	18.5	0.709	0.157	0.092	0.105	0.062	1.261	26.41	13.99	1.89
	26	20	0.809	0.145	0.080	0.070	0.039	2.937	22.80	14.89	1.53
	27	20	0.984	0.190	0.096	0.099	0.050	0.835	26.83	13.67	1.96
	28	21.5	0.857	0.205	0.110	0.104	0.056	0.316	24.51	14.72	1.67
บางกอก ใหญ่	29	19	0.626	0.160	0.098	0.094	0.058	1.188	31.44	14.78	2.13
		19.5	0.785	0.139	0.078	0.070	0.039	0.389	26.13	15.25	1.71
	30	24.5	0.886	0.203	0.108	0.060	0.032	1.152	28.48	18.67	1.53

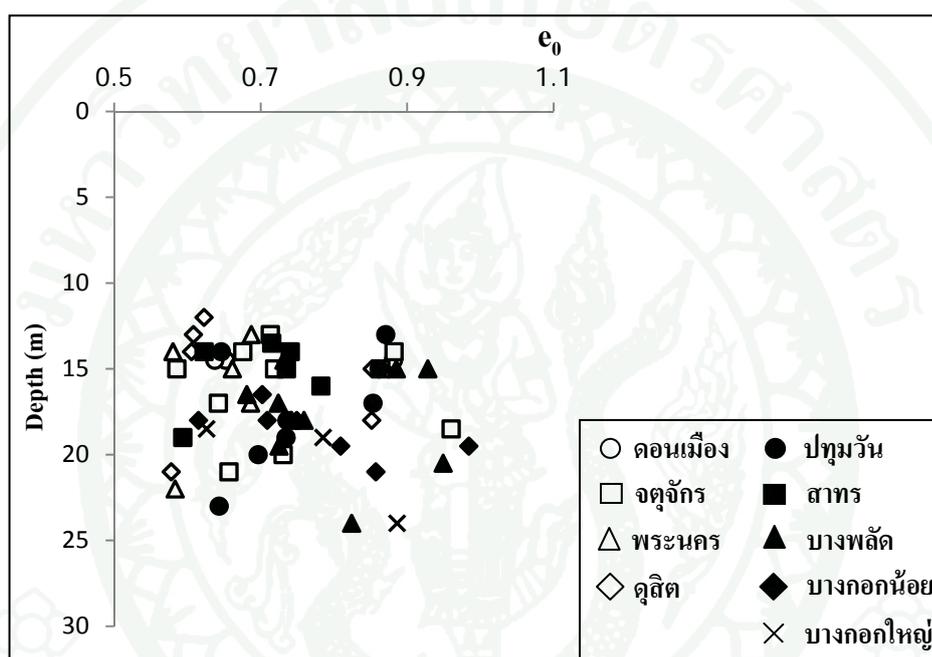
จากตารางที่ 24 ทำการหาค่าทางสถิติของข้อมูลคุณสมบัติทางด้านการยุบอัดตัวของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ดังตารางที่ 25

ตารางที่ 25 ค่าทางสถิติของคุณสมบัติทางด้านการยุบอัดตัวของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ

Statistical Values	$e_0$	$C_c$	CR	$C_r$	RR	$C_v$ ( $m^2/year$ )	$\sigma'_p$ ( $t/m^2$ )	OCR
Data	60	60	60	60	60	60	60	60
Mean	0.737	0.155	0.089	0.045	0.029	1.63	29.43	2.33
Min	0.578	0.061	0.036	0.009	0.005	0.313	17.13	1.44
Max	0.984	0.231	0.126	0.105	0.062	3.58	56.20	4.06
SD	0.108	0.042	0.021	0.025	0.015	1.07	9.03	0.64
COV (%)	14.65	27.07	24.22	55.91	51.72	65.43	30.67	27.20

## 2.1 Initial void ratio ( $e_0$ )

จากตารางที่ 25 พบว่า  $e_0$  มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.737 ค่า SD เท่ากับ 0.108 และค่า COV เท่ากับ 14.65% แสดงว่าค่า  $e_0$  มีค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยน้อย และข้อมูลมีการกระจายไม่มากนัก เนื่องจากค่า COV น้อยกว่า 20% และจากภาพที่ 36 แสดงให้เห็นว่าค่า  $e_0$  มีความแปรปรวนกับระดับความลึก

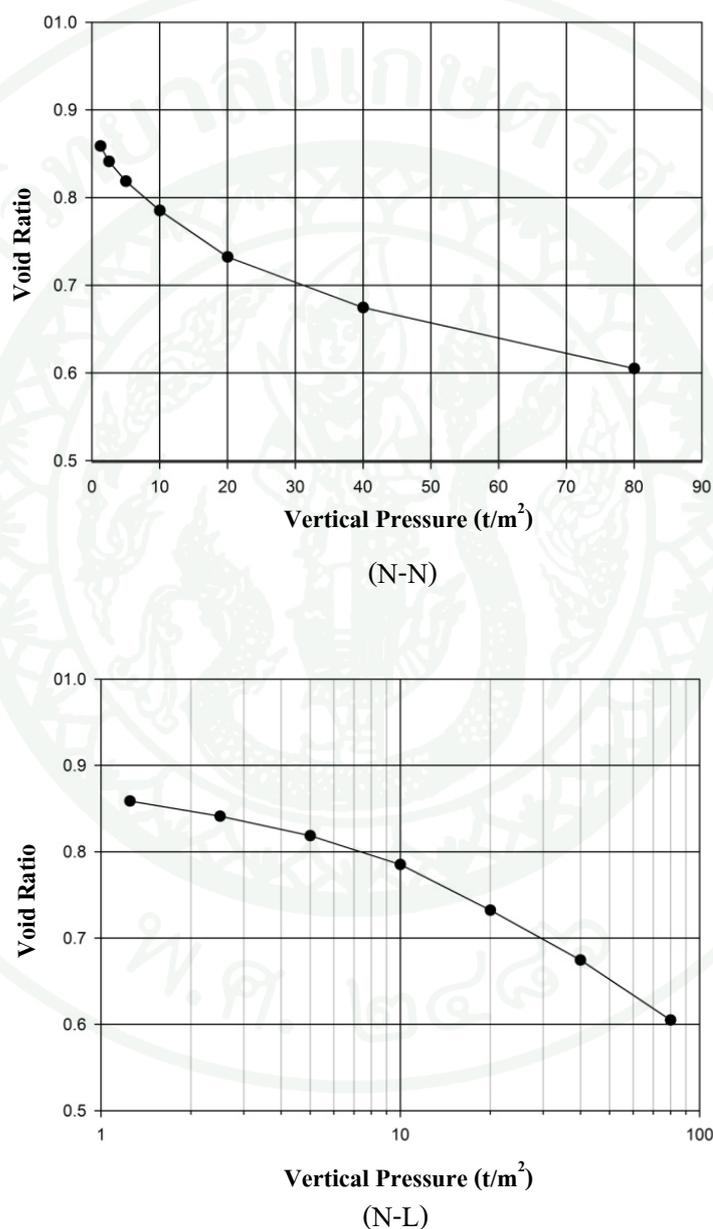


ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $e_0$  กับระดับความลึกชั้นดินเหนียวแข็งแต่ละเขตพื้นที่

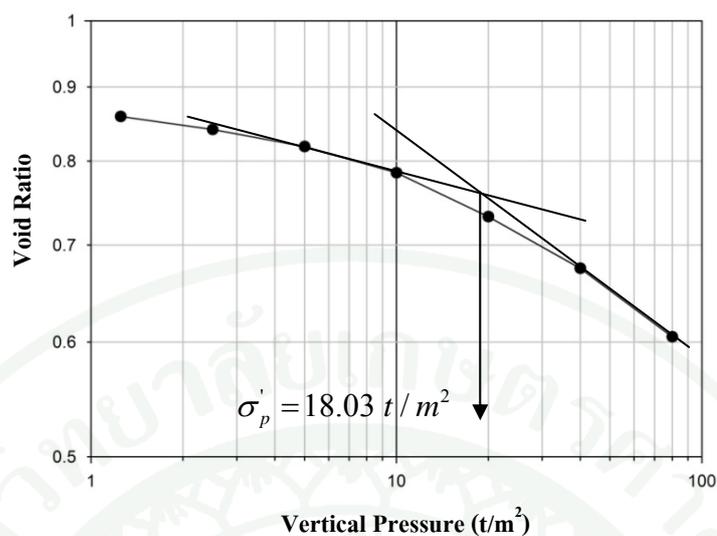
## 2.2 Maximum past pressure ( $\sigma'_p$ )

คือค่าหน่วยแรงสูงสุดที่ดินเคยถูกกดทับหรือถูกกระทำมาในอดีต ซึ่งบ่งชี้พฤติกรรมของดินว่าเป็นดินประเภท Normally Consolidated clay หรือ Over consolidated clay ในการศึกษาครั้งนี้ เมื่อทำการพิจารณากราฟ  $e - \log \sigma'_v$  ที่ได้จากการทดสอบ Consolidation test สำหรับดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ดังภาพผนวกที่ 1 ผลที่ได้ลักษณะของเส้นกราฟจะค่อนข้างราบเรียบ ทำให้การประมาณค่า  $\sigma'_p$  ด้วยวิธีของ Casagrande (1936) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย พบว่ามีความไม่แน่นอนสูงในการกำหนดจุดที่มีรัศมีโค้งน้อยที่สุด และจากการศึกษาของไตรภพ (2546) จึงเลือกใช้วิธี Log-Log (Jose, 1989)

การประมาณค่า  $\sigma'_p$  โดยวิธี Log-Log จะแสดงการเปลี่ยนแปลงของการกระจายจุดข้อมูลของตัวอย่างดินเหนียวแข็งในเขตดอนเมือง BH-1 ที่ความลึก 15 เมตร จากกราฟ Normal-Normal scale (N-N), Normal-Log scale (N-L) และ Log-Log scale (L-L) ดังแสดงในภาพที่ 37 และสำหรับกราฟ Log - Log scale จะแสดงพร้อมกับการประมาณค่า  $\sigma'_p$



ภาพที่ 37 แสดงการเปลี่ยนแปลงของการกระจายจุดข้อมูลของตัวอย่างดินเหนียวแข็ง BH-1 ที่ความลึก 15 เมตรจากกราฟประเภทต่างๆ

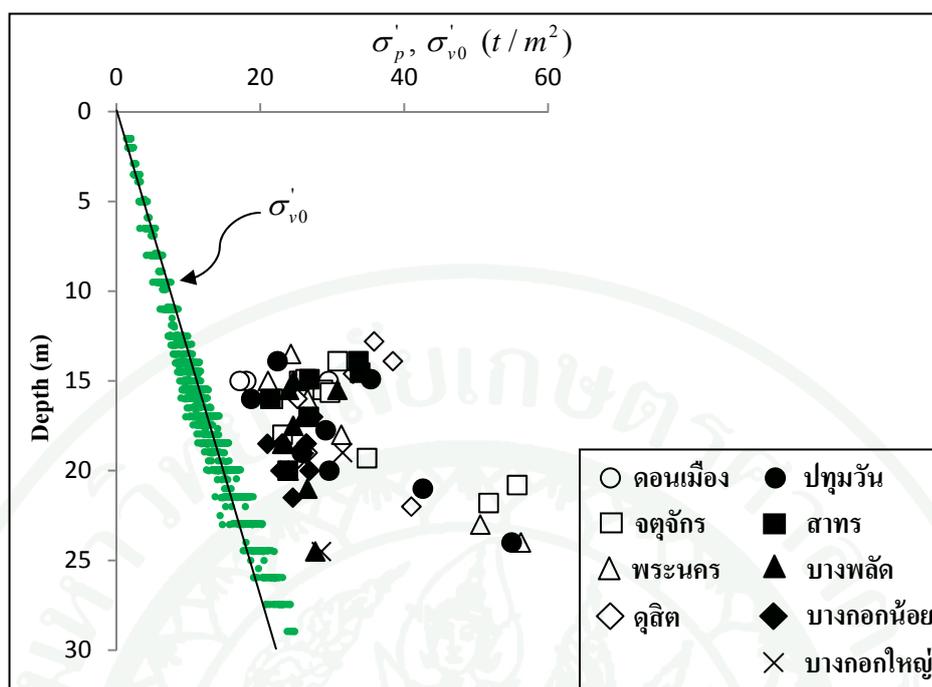


(L-L)

ภาพที่ 37 (ต่อ)

จากภาพที่ 37 เห็นได้ว่าลักษณะของจุดข้อมูลของกราฟ Normal-Normal scale มีความสัมพันธ์เป็น Exponential ค่า Void ratio และค่า Vertical stress มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างช้าๆ ซึ่งเหมาะสมในการนำมาพล็อตใน Log scale สำหรับกราฟ Normal-Log scale ปรับมาเป็นกราฟ Log-Log scale จะทำให้การเปลี่ยนแปลงของจุดข้อมูลชัดเจนมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของไตรภพ (2546) ในการศึกษาครั้งนี้จึงทำการสรุปค่า  $\sigma_p$  ด้วยวิธี Log-Log

จากตารางที่ 25 พบว่า  $\sigma_p$  มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $29.43 \text{ t/m}^2$  ค่า SD เท่ากับ  $9.03 \text{ t/m}^2$  ซึ่งมีค่าเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยไม่มาก และค่า COV เท่ากับ  $30.67\%$  ซึ่งมีความแปรปรวนค่อนข้างมาก เมื่อพิจารณาค่า  $\sigma_p$  เปรียบเทียบกับระดับความลึกและ  $\sigma_{v0}$  แสดงในภาพที่ 38 พบว่าที่ความลึกในช่วงแรก (12.5 เมตร) มีแนวโน้มลดลงถึงประมาณความลึกที่ 15.5 เมตร และหลังจากนั้นค่า  $\sigma_p$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความลึกที่เพิ่มขึ้น และค่า  $\sigma_p$  ทั้งหมดมีค่ามากกว่า  $\sigma_{v0}$  แสดงให้เห็นว่าเป็นดินประเภท Lightly over consolidated clay



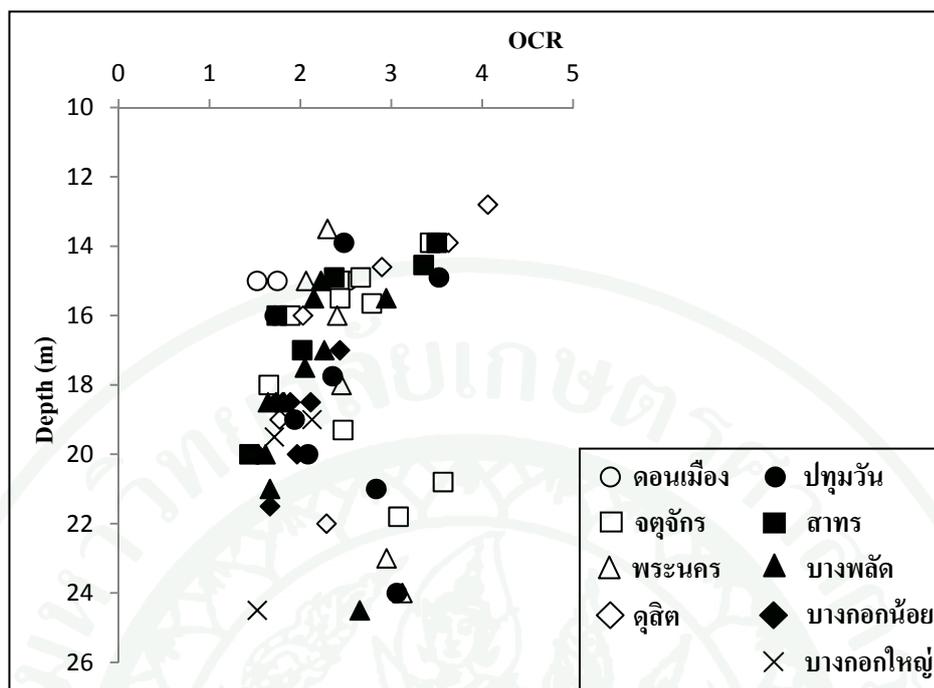
ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\sigma'_p$  และ  $\sigma'_{v0}$  กับความลึกชั้นดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ

### 2.3 Effective overburden pressure ( $\sigma'_{v0}$ )

ค่า  $\sigma'_{v0}$  ที่ช่วงความลึก 11 ถึง 32 เมตร ซึ่งเป็นชั้นดินเหนียวแข็ง จำนวนข้อมูลทั้งหมด 1,217 ข้อมูล โดยมีค่า  $\sigma'_{v0}$  อยู่ในช่วง 7.77-26.44  $t/m^2$  มีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึกที่เพิ่มขึ้น

### 2.4 Over consolidation ratio (OCR)

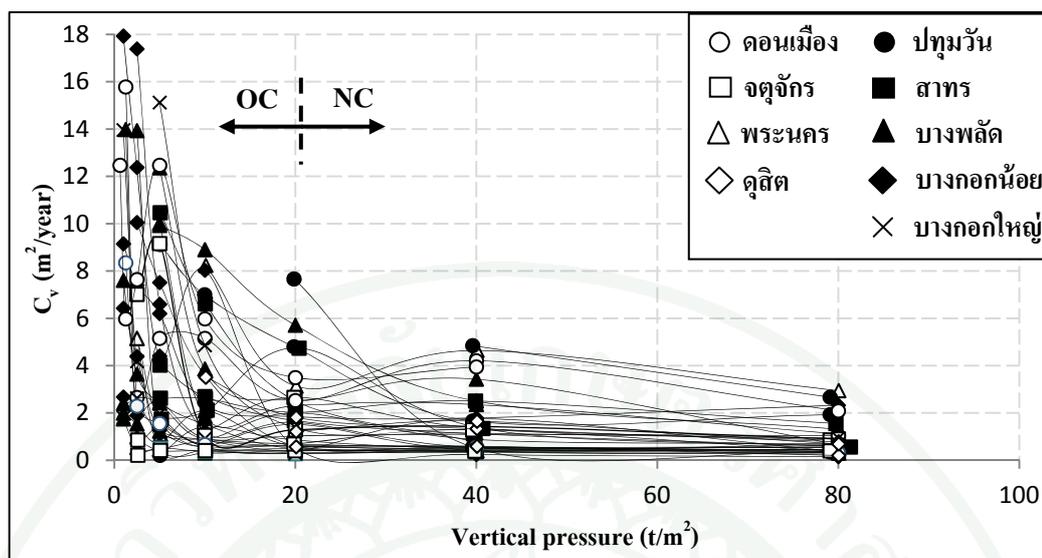
จากตารางที่ 25 พบว่า OCR มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.33 ค่า SD เท่ากับ 0.64 ซึ่งแสดงว่าดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ส่วนใหญ่ เป็นดินประเภท Lightly over consolidated clay ซึ่งบ่งบอกได้ว่าในอดีตที่มามีดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ อาจเกิดการกัดเซาะ ละลายผิวหน้าของดินหายไป ในช่วงที่มีการถอยร่นของระดับทะเล และพบว่าในอดีตชั้นดินเหนียวแข็งดังกล่าวนี้ มีลักษณะพื้นที่เปิดโล่ง ซึ่งอาจทำให้เกิดการผุกร่อนจากแสงแดด และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับระดับความลึก แสดงในภาพที่ 39 พบว่าค่า OCR มีแนวโน้มลดลงตามความลึกที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่าง OCR กับกับระดับความลึกชั้นดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ

### 2.5 Coefficient of consolidation ( $C_v$ )

ในการศึกษาดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ นี้ พิจารณาค่า  $C_v$  ที่การยุบอัดตัว 90 % ( $t_{90}$ ) และที่ช่วงของการรับแรงแบบ Normally consolidated (NC) จากตารางที่ 25 พบว่ามีค่า  $C_v$  อยู่ในช่วง 0.313-3.587  $m^2/year$  และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.63  $m^2/year$  โดยค่า  $C_v$  สามารถบอกได้ว่าดินเหนียวมีการทรุดตัวเร็วหรือช้า โดยค่ามากจะแสดงว่าดินสามารถทรุดตัวได้เร็วกว่าเมื่อใช้น้ำหนักกดทับที่เท่ากัน และเมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_v$  กับแรงดัน พบว่าเมื่อทำการเพิ่มแรงดันให้เพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ค่า  $C_v$  จะลดต่ำลง จนถึงจุดๆหนึ่งซึ่งใกล้เคียงกับตำแหน่งของค่า Maximum past pressure หลังจากนั้นค่า  $C_v$  มีแนวโน้มคงที่ ดังแสดงในภาพที่ 40



ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_v$  กับ Pressure ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ

## 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Void ratio กับ Pressure

จากภาพผนวกที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ของกราฟ  $e - \log \sigma'_v$  ในช่วง Recompression curve และ Virgin curve โดยลักษณะความชันของเส้นกราฟในช่วง Virgin curve ค่อนข้างราบเรียบ และค่าความชันทั้งสองช่วงไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงไปตามความลึกที่เพิ่มขึ้น

## 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain กับ Pressure

จากภาพผนวกที่ 2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ในช่วง Recompression curve และ Virgin curve ซึ่ง Strain เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนที่ Pressure ตั้งแต่  $2 \text{ t/m}^2$  ขึ้นไป และที่ Pressure ในช่วง  $0-160 \text{ t/m}^2$  มีค่า Strain เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง  $0-16\%$

## 2.8 Compression index ( $C_c$ )

จากความสัมพันธ์ของกราฟ  $e - \log \sigma'_v$  ในช่วง Virgin curve ดังภาพผนวกที่ 1 ทำให้สามารถหาค่า  $C_c$  จากความชันของเส้นกราฟ และจากตารางที่ 25 พบว่ามีค่า  $C_c$  อยู่ในช่วง  $0.061-0.231$  ค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.155$  และค่า SD เท่ากับ  $0.042$  ซึ่งถือได้ว่ามีค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยไม่มาก

เมื่อพิจารณาค่า  $C_c$  เปรียบเทียบกับระดับความลึกของชั้นดิน พบว่าค่อนข้างแปรปรวนกับความลึก

## 2.9 Recompression index ( $C_r$ )

จากความสัมพันธ์ของกราฟ  $e - \log \sigma'_v$  ในช่วง Recompression curve สามารถหาค่า  $C_r$  จากความชันของเส้นกราฟ และจากตารางที่ 25 พบว่ามีค่า  $C_r$  อยู่ในช่วง 0.009-0.105 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.045 และค่า SD เท่ากับ 0.025 ซึ่งมีค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยค่อนข้างมาก และมีความแปรปรวนกับความลึก

### การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นของคุณสมบัติดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ

จากข้อมูลคุณสมบัติทางวิศวกรรมและคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ที่ได้รวบรวมไว้ นำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติต่างๆ ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ โดยใช้วิธีทางสถิติทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ การเลือกใช้ตัวแปรในการหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางวิศวกรรมกับคุณสมบัติทางกายภาพ จะทำการวิเคราะห์เชิงมิติโดยวิธี Buckingham pi method (Buckingham, 1914) ซึ่งอาศัยหลักการที่ว่า สมการใดๆ ที่มีความสัมพันธ์กันทางกายภาพ ปริมาณต่างๆ จะต้องมิติต่อกันทั้ง 2 ข้าง เมื่อทำการวิเคราะห์โดยวิธีดังกล่าวสุดท้ายจะได้รับความสัมพันธ์ของตัวแปรออกมาเป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติ โดยงานวิจัยนี้จะแสดงเฉพาะกลุ่มตัวแปรไร้มิติ

ซึ่งความน่าเชื่อถือของสมการจะแสดงในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination,  $r^2$ ) สำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปร ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจในการวิเคราะห์แนะนำโดย Draper and Smith (1966)

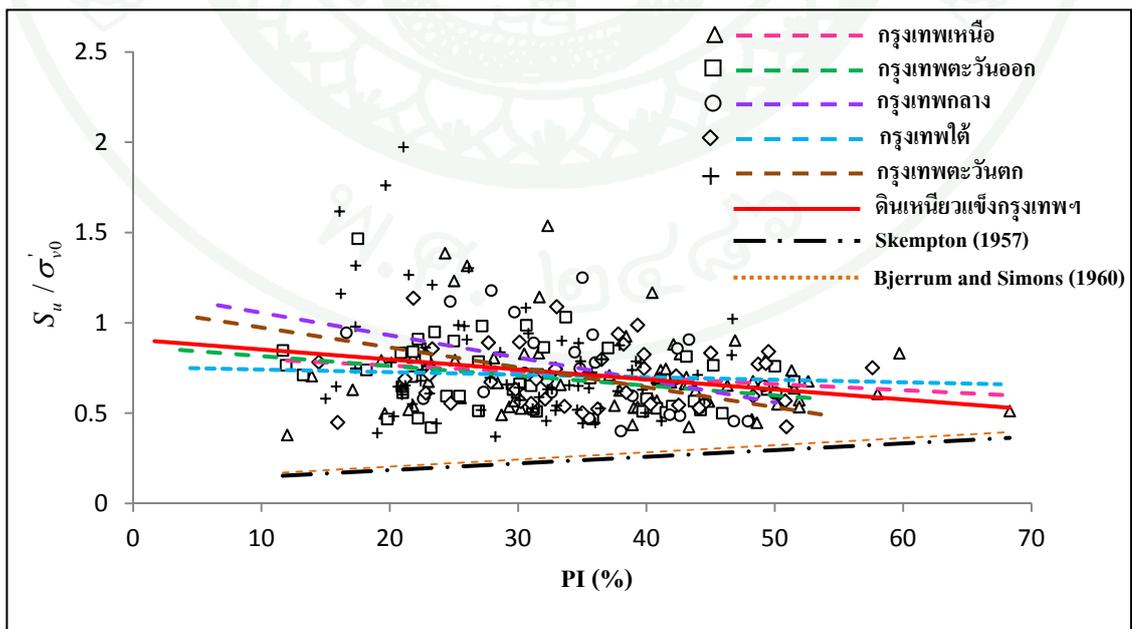
$r^2$	<	0.25	มีความสัมพันธ์กันน้อย
$r^2$	=	0.25-0.50	มีความสัมพันธ์กันปานกลาง
$r^2$	=	0.50-0.80	มีความสัมพันธ์กันดี
$r^2$	>	0.80	มีความสัมพันธ์กันดีมาก

## 1. ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางด้านกำลังกับคุณสมบัติทางกายภาพ

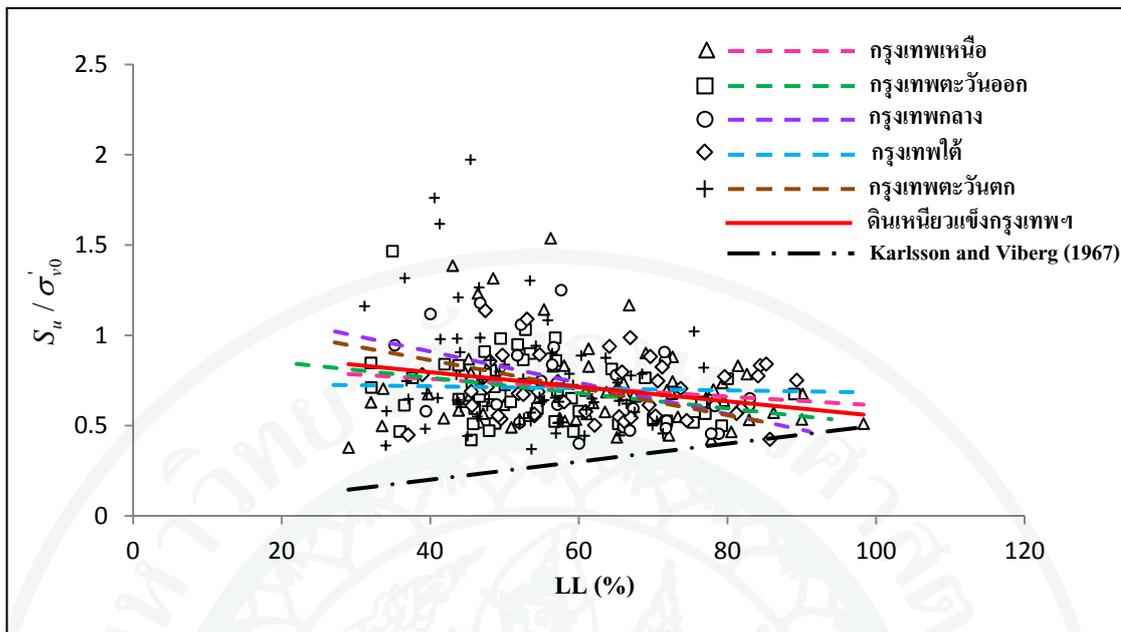
ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางด้านกำลังกับคุณสมบัติทางกายภาพ ทำการแบ่งออกเป็นกลุ่มพื้นที่ 5 กลุ่ม ได้แก่ กรุงเทพมหานคร กรุงเทพมหานครนอก กรุงเทพมหานครกลาง กรุงเทพมหานครใต้ กรุงเทพมหานครตะวันออก และความสัมพันธ์ของข้อมูลดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ทั้งหมด โดยจะใช้ชื่อเรียกว่า ดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ และจากการวิเคราะห์เชิงมิติหาความสัมพันธ์ของตัวแปร โดยวิธี Buckingham pi method ทำให้ได้ ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

- ความสัมพันธ์ระหว่าง  $S_u/\sigma'_{v0}$  กับ PI
- ความสัมพันธ์ระหว่าง  $S_u/\sigma'_{v0}$  กับ LL
- ความสัมพันธ์ระหว่าง  $S_u/\sigma'_{v0}$  กับ  $w_n$

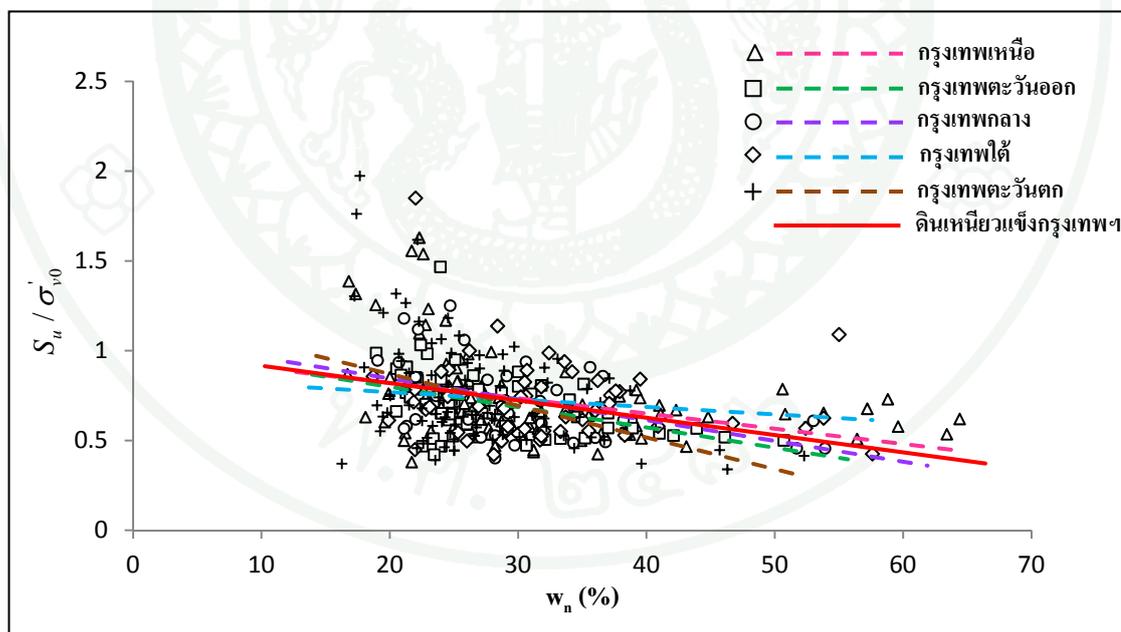
พร้อมเปรียบเทียบกับสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $S_u/\sigma'_{v0}$  กับ PI ของ Skempton (1957) และ Bjerrum and Simons (1960) และความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $S_u/\sigma'_{v0}$  กับ LL ของ Karlsson and Viberg (1967) ซึ่งได้แสดงสมการความสัมพันธ์ไว้ในบทการตรวจเอกสารแล้ว โดยลักษณะความสัมพันธ์ทั้งหมดแสดงในภาพที่ 41 ถึงภาพที่ 43 และสมการความสัมพันธ์แสดงในตารางที่ 26 ถึงตารางที่ 28



ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $S_u/\sigma'_{v0}$  กับ PI ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ และผลวิจัยอื่น



ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $S_u / \sigma'_{v0}$  กับ LL ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ และผลวิจัยอื่น



ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $S_u / \sigma'_{v0}$  กับ  $w_n$  ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ

ตารางที่ 26 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง  $S_u/\sigma'_{v0}$  กับ P.I. ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ

กลุ่มพื้นที่	สมการถดถอย	$r^2$	จำนวนข้อมูล
กรุงเทพเหนือ	$S_u/\sigma'_{v0} = 0.832 - 0.0034(PI)$	0.033	70
กรุงเทพตะวันออก	$S_u/\sigma'_{v0} = 0.870 - 0.0054(PI)$	0.084	47
กรุงเทพกลาง	$S_u/\sigma'_{v0} = 1.179 - 0.0124(PI)$	0.206	29
กรุงเทพใต้	$S_u/\sigma'_{v0} = 0.755 - 0.0014(PI)$	0.007	42
กรุงเทพตะวันตก	$S_u/\sigma'_{v0} = 1.085 - 0.0111(PI)$	0.087	71
ดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ	$S_u/\sigma'_{v0} = 0.908 - 0.0055(PI)$	0.06	259

ตารางที่ 27 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง  $S_u/\sigma'_{v0}$  กับ L.L. ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ

กลุ่มพื้นที่	สมการถดถอย	$r^2$	จำนวนข้อมูล
กรุงเทพเหนือ	$S_u/\sigma'_{v0} = 0.855 - 0.0024(LL)$	0.029	70
กรุงเทพตะวันออก	$S_u/\sigma'_{v0} = 0.935 - 0.0043(LL)$	0.087	47
กรุงเทพกลาง	$S_u/\sigma'_{v0} = 1.257 - 0.087(LL)$	0.233	29
กรุงเทพใต้	$S_u/\sigma'_{v0} = 0.74 - 0.0006(LL)$	0.002	42
กรุงเทพตะวันตก	$S_u/\sigma'_{v0} = 1.167 - 0.076(LL)$	0.072	71
ดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ	$S_u/\sigma'_{v0} = 0.957 - 0.004(LL)$	0.056	259

ตารางที่ 28 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง  $S_u/\sigma'_{v0}$  กับ  $w_n$  ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ

กลุ่มพื้นที่	สมการถดถอย	$r^2$	จำนวนข้อมูล
กรุงเทพเหนือ	$S_u/\sigma'_{v0} = 0.989 - 0.0085(w_n)$	0.137	105
กรุงเทพตะวันออก	$S_u/\sigma'_{v0} = 1.025 - 0.0113(w_n)$	0.201	57
กรุงเทพกลาง	$S_u/\sigma'_{v0} = 1.076 - 0.0116(w_n)$	0.208	35
กรุงเทพใต้	$S_u/\sigma'_{v0} = 0.852 - 0.0041(w_n)$	0.025	54
กรุงเทพตะวันตก	$S_u/\sigma'_{v0} = 1.223 - 0.0177(w_n)$	0.159	97
ดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ	$S_u/\sigma'_{v0} = 1.012 - 0.096(w_n)$	0.12	348

จากภาพที่ 41 ถึงภาพที่ 43 และตารางที่ 26 ถึงตารางที่ 28 แสดงให้เห็นว่า  $S_u/\sigma'_{v0}$  กับ PI, LL และ  $w_n$  มีความสัมพันธ์กันน้อย เนื่องจากมีค่า  $r^2$  น้อยมาก ตามข้อแนะนำของ Draper and Smith (1966) แต่  $S_u/\sigma'_{v0}$  จะมีแนวโน้มลดลง เมื่อ PI, LL และ  $w_n$  เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับผลวิจัยอื่นที่ได้แสดงในภาพที่ 41 และภาพที่ 42 เห็นได้ว่า  $S_u/\sigma'_{v0}$  จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อ PI, LL เพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งมีลักษณะความสัมพันธ์ที่ตรงกันข้ามกับดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ เนื่องจากผลวิจัยอื่นที่ได้ใช้นั้นเหมาะกับดินประเภท Normally consolidated clay แต่สำหรับดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ที่ทำการศึกษานี้เป็นดินประเภท Over consolidated clay จึงทำให้มีความสัมพันธ์ที่แตกต่างกัน

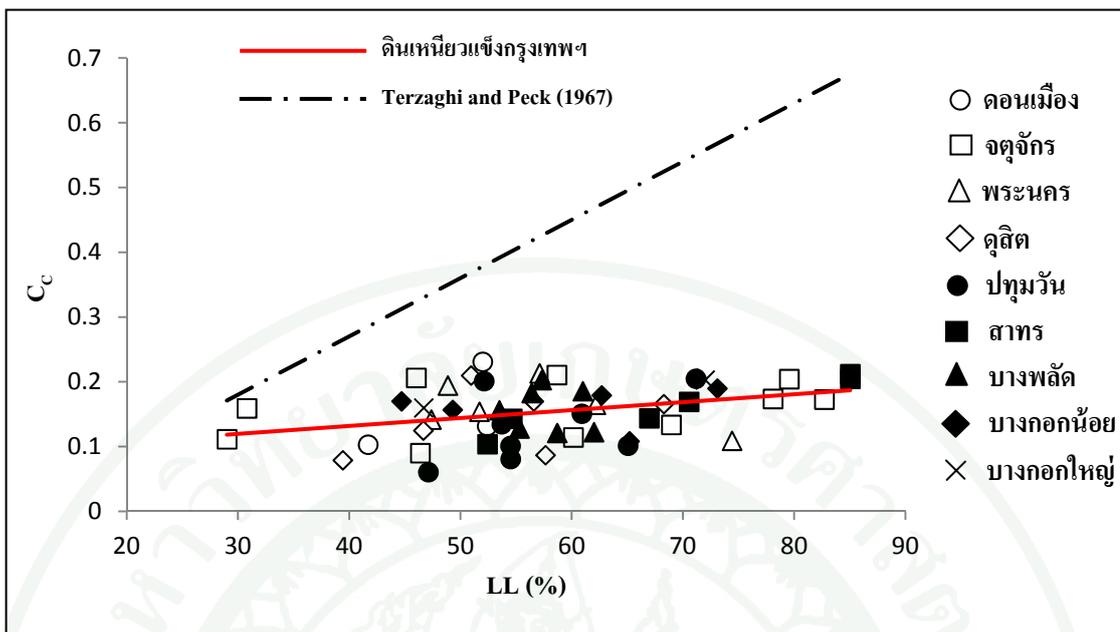
## 2. ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางด้านการยุบอัดตัวกับคุณสมบัติทางกายภาพ

### 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Compression index กับคุณสมบัติทางกายภาพ

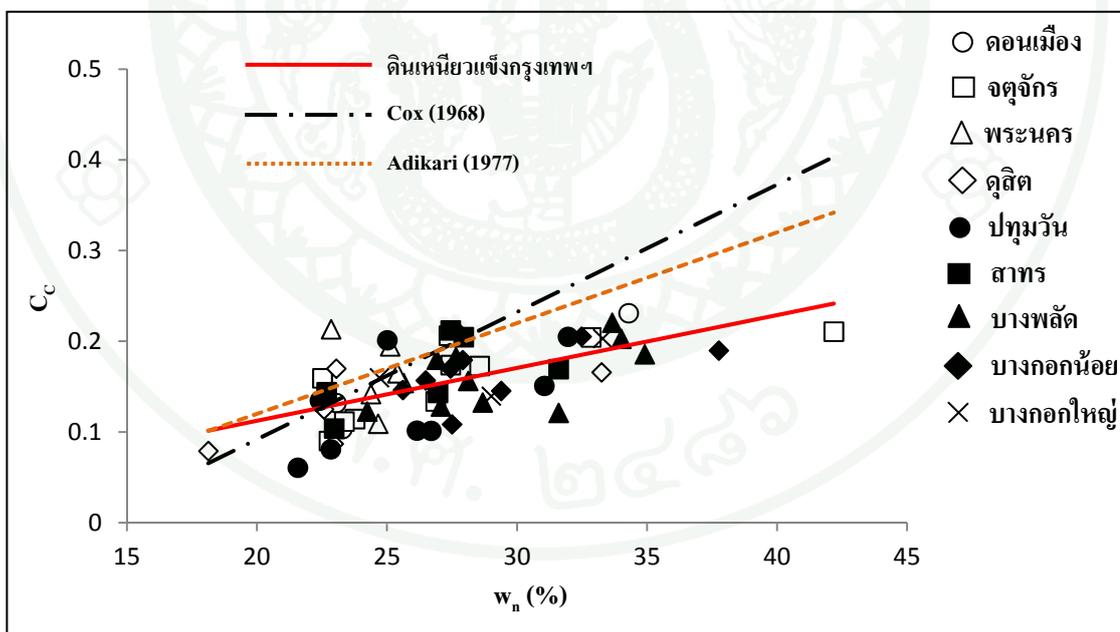
จากการวิเคราะห์เชิงมิติหาความสัมพันธ์ของตัวแปร โดยวิธี Buckingham pi method ทำให้ได้ ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

- ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_c$  กับ LL
- ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_c$  กับ  $w_n$
- ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_c$  กับ  $e_0$

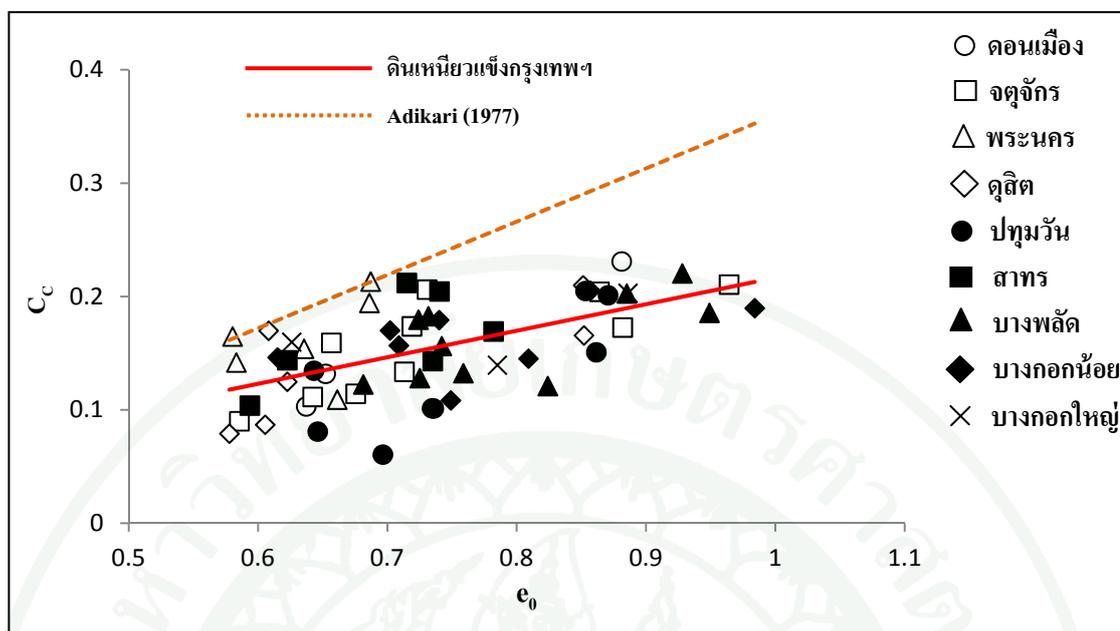
พร้อมเปรียบเทียบกับสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $C_c$  กับ LL ของ Terzaghi and Peck (1967), ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $C_c$  กับ  $w_n$  ของ Cox (1968) และ Adikari (1977) และความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $C_c$  กับ  $e_0$  ของ Adikari (1977) ซึ่งได้แสดงสมการความสัมพันธ์ไว้ในบทการตรวจสอบเอกสารแล้ว โดยลักษณะความสัมพันธ์ทั้งหมดแสดงในภาพที่ 44 ถึงภาพที่ 46 และสมการความสัมพันธ์แสดงในตารางที่ 29



ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_c$  กับ LL ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ และผลวิจัยอื่น



ภาพที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_c$  กับ  $w_n$  ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ และผลวิจัยอื่น



ภาพที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_c$  กับ  $e_0$  ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ และผลวิจัยอื่น

ตารางที่ 29 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_c$  กับคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ

สมการถดถอย	$R^2$	จำนวนข้อมูล
$C_c = 0.001(LL) + 0.083$	0.126	54
$C_c = 0.0058(w_n) - 0.0042$	0.384	60
$C_c = 0.234(e_0) - 0.017$	0.363	60

จากภาพที่ 44 และตารางที่ 29 แสดงลักษณะและสมการความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_c$  กับ LL ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ซึ่งเป็นดินประเภท Over consolidated clay พร้อมเปรียบเทียบกับเส้นกราฟที่ได้จากสมการความสัมพันธ์สำหรับดินประเภท Normally consolidated clay ของ Terzaghi and Peck (1967) จะเห็นได้ว่า  $C_c$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อ LL เพิ่มขึ้น แต่ไม่มากเมื่อเทียบกับความสัมพันธ์กับดิน Normally consolidated clay และสามารถบอกได้ว่าดิน Normally consolidated clay มีความสัมพันธ์ที่ชัดเจนกว่าดิน Over consolidated clay และความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_c$  กับ LL มีค่า  $r^2$  เท่ากับ 0.126 ซึ่งแสดงว่ามีความสัมพันธ์กันน้อยตามข้อเสนอแนะของ Draper and Smith (1966)

จากภาพที่ 45 และตารางที่ 29 แสดงลักษณะและสมการความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_c$  กับ  $w_n$  พร้อมเปรียบเทียบกับเส้นกราฟที่ได้จากสมการความสัมพันธ์สำหรับดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ เช่นกัน ซึ่งเป็นผลวิจัยของ Cox (1968) และ Adikari (1977) เห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_c$  กับ  $w_n$  สำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้  $C_c$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อ  $w_n$  เพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นนี้ใกล้เคียงกับผลวิจัยของ Cox (1968) และ Adikari (1977) แต่ให้ค่า  $C_c$  ที่น้อยกว่า และความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_c$  กับ LL มีค่า  $r^2$  เท่ากับ 0.384 ซึ่งแสดงว่ามีความสัมพันธ์กันปานกลาง

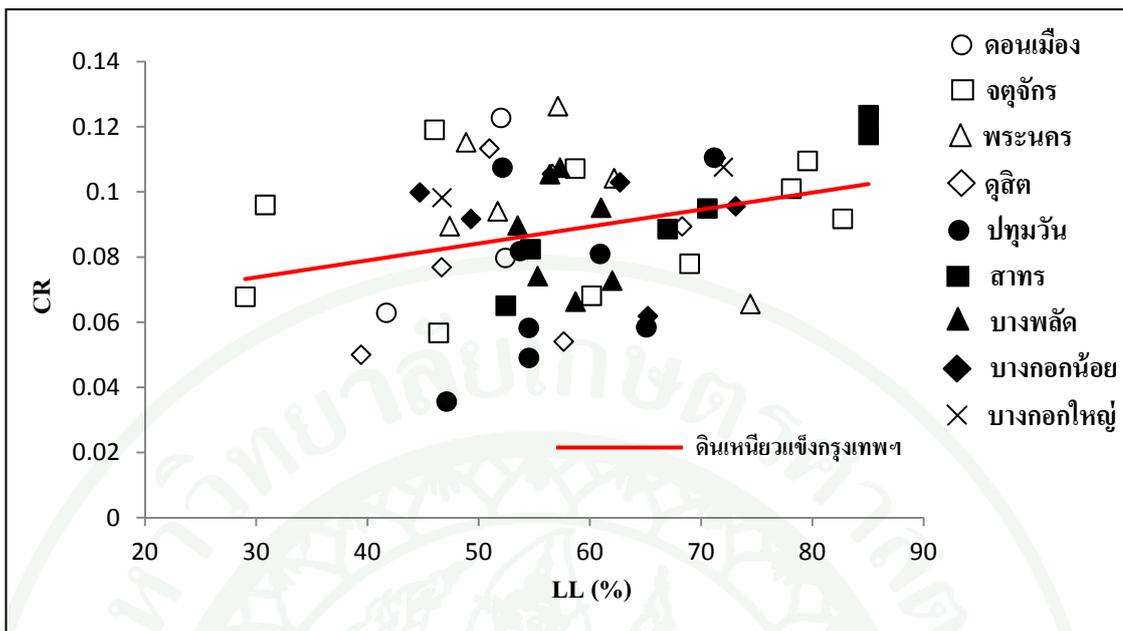
จากภาพที่ 46 และตารางที่ 29 แสดงลักษณะและสมการความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_c$  กับ  $e_0$  พร้อมเปรียบเทียบกับเส้นกราฟที่ได้จากสมการความสัมพันธ์สำหรับดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ เช่นกัน ซึ่งเป็นผลวิจัยของ Adikari (1977) เห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_c$  กับ  $e_0$  สำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้  $C_c$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อ  $e_0$  เพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นนี้ใกล้เคียงกับผลวิจัยของ Adikari (1977) แต่ให้ค่า  $C_c$  ที่น้อยกว่า และความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_c$  กับ  $e_0$  มีค่า  $r^2$  เท่ากับ 0.363 ซึ่งแสดงว่ามีความสัมพันธ์กันปานกลาง

## 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Compression ratio กับคุณสมบัติทางกายภาพ

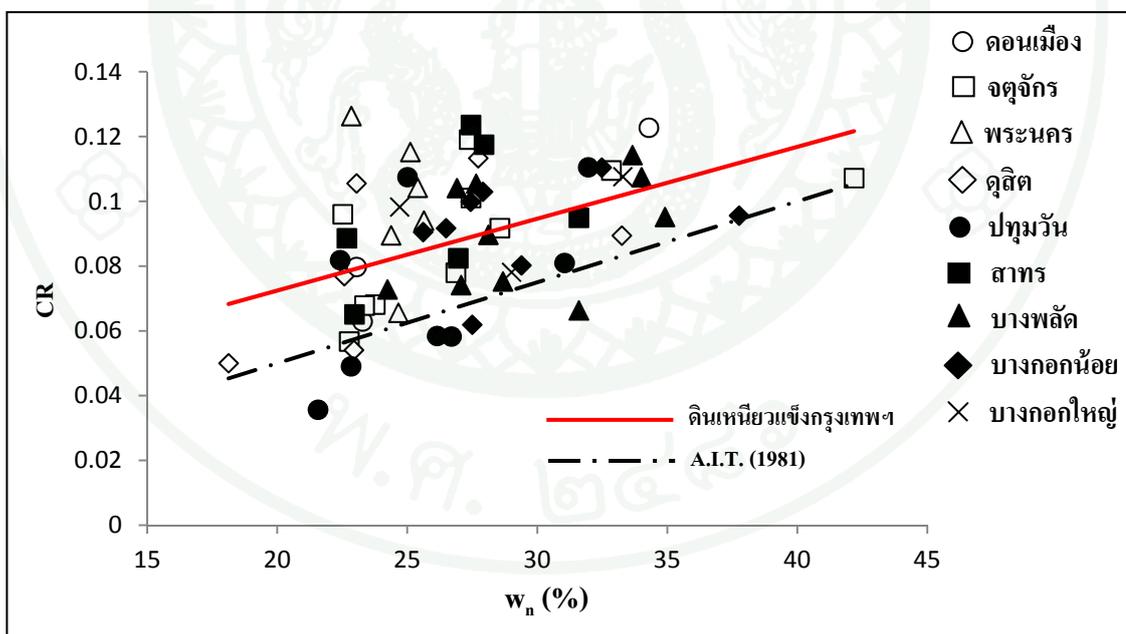
จากการวิเคราะห์เชิงมิติหาความสัมพันธ์ของตัวแปร โดยวิธี Buckingham pi method ทำให้ได้ ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

- ความสัมพันธ์ระหว่าง CR กับ LL
- ความสัมพันธ์ระหว่าง CR กับ  $w_n$
- ความสัมพันธ์ระหว่าง CR กับ  $e_0$

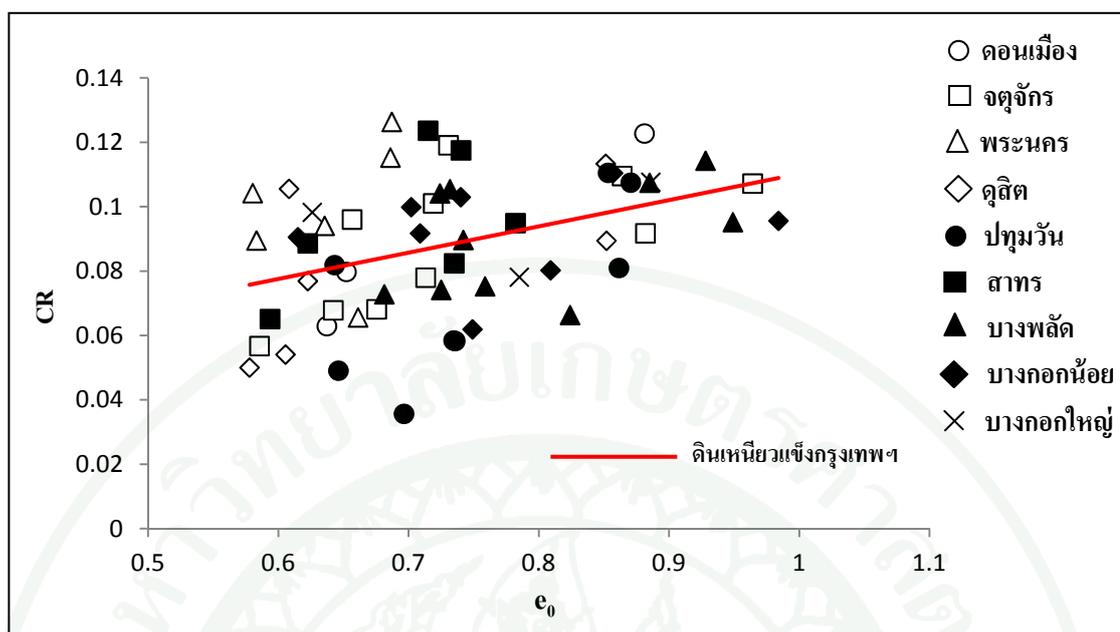
พร้อมเปรียบเทียบกับสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า CR กับ  $w_n$  ของ A.I.T. (1981) ซึ่งได้แสดงสมการความสัมพันธ์ไว้ในบทความตรวจเอกสารแล้ว โดยลักษณะความสัมพันธ์ทั้งหมดแสดงในภาพที่ 47 ถึงภาพที่ 49 และสมการความสัมพันธ์แสดงในตารางที่ 30



ภาพที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่าง CR กับ LL ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ



ภาพที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่าง CR กับ  $w_n$  ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ และผลวิจัยอื่น



ภาพที่ 49 ความสัมพันธ์ระหว่าง CR กับ  $e_0$  ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ

ตารางที่ 30 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง CR กับคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ

สมการถดถอย	$R^2$	จำนวนข้อมูล
$CR = 0.0005(LL) + 0.0582$	0.086	54
$CR = 0.0022(w_n) + 0.028$	0.213	60
$CR = 0.0816(e_0) + 0.0286$	0.169	60

จากภาพที่ 47 และตารางที่ 30 แสดงลักษณะและสมการความสัมพันธ์ระหว่าง CR กับ LL เห็นได้ว่า CR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อ LL เพิ่มขึ้น และความสัมพันธ์ระหว่าง CR กับ LL มีค่า  $r^2$  เท่ากับ 0.086 ซึ่งแสดงว่ามีความสัมพันธ์กันน้อย

จากภาพที่ 48 และตารางที่ 30 แสดงลักษณะและสมการความสัมพันธ์ระหว่าง CR กับ  $w_n$  พร้อมเปรียบเทียบกับเส้นกราฟที่ได้จากสมการความสัมพันธ์สำหรับดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ เช่นกัน ซึ่งเป็นผลวิจัยของ A.I.T. (1981) เห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่าง CR กับ  $w_n$  สำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้ CR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อ  $w_n$  เพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นนี้ใกล้เคียง

กับผลวิจัยของ A.I.T. (1981) แต่ให้ค่า CR ที่มากกว่า และความสัมพันธ์ระหว่าง CR กับ L.L. มีค่า  $r^2$  เท่ากับ 0.213 ซึ่งแสดงว่ามีความสัมพันธ์กันน้อย

จากภาพที่ 49 และตารางที่ 30 แสดงลักษณะและสมการความสัมพันธ์ระหว่าง CR กับ  $e_0$  พร้อมเปรียบเทียบกับเส้นกราฟที่ได้จากสมการความสัมพันธ์สำหรับดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ เช่นกัน ซึ่งเป็นผลวิจัยของ Adikari (1977) เห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่าง CR กับ  $e_0$  สำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้ CR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อ  $e_0$  เพิ่มขึ้น และความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_c$  กับ  $e_0$  มีค่า  $r^2$  เท่ากับ 0.169 ซึ่งแสดงว่ามีความสัมพันธ์กันน้อย

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลจำนวน 247 หลุมเจาะ บริเวณพื้นที่กรุงเทพฯ ซึ่งผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

ชั้นดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ มีความลึกเฉลี่ยเท่ากับ 15 ถึง 23 เมตร ซึ่งความหนาของชั้นดินในกลุ่มพื้นที่กรุงเทพฯกลางกับกรุงเทพฯใต้ มีความหนาเฉลี่ยมากที่สุดเท่ากับ 10 เมตร รองลงมาคือกรุงเทพฯตะวันตกมีความหนาเฉลี่ยเท่ากับ 8 เมตร และกรุงเทพฯเหนือกับกรุงเทพฯตะวันออกมีความหนาเฉลี่ยเท่ากับ 5.8 เมตร

คุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ได้แก่ Natural water content, Liquid limit, Plastic limit, Plasticity index, Liquidity index, Unit weight และ Specific gravity ซึ่งในแต่ละกลุ่มพื้นที่กรุงเทพฯ มีค่าต่างๆ ใกล้เคียงกัน โดยสรุปคุณสมบัติต่างๆ ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ทั้งหมดเป็นค่าเฉลี่ย  $\pm$  ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ได้ดังตารางที่ 31 ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง Plasticity index กับ Liquid limit ใน Plasticity chart พบว่าดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ อยู่ช่วงของดินประเภท CH และ CL และสามารถจำแนกชนิดแร่ในดินเหนียวได้ว่าส่วนใหญ่เป็นแร่ Illites และสมการความสัมพันธ์ระหว่าง Plasticity index กับ Liquid limit แสดงดังสมการที่ (1) มีค่า  $r^2$  เท่ากับ 0.948

$$PI = 0.717(LL - 11.06) \quad (1)$$

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ซึ่งทำการวิเคราะห์ทางด้านกำลังและการยุบอัดตัวของดิน โดยสรุปคุณสมบัติต่างๆ ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ เป็นค่าเฉลี่ย  $\pm$  ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ได้ดังตารางที่ 31 ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา

ตารางที่ 31 สรุปคุณสมบัติของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ

คุณสมบัติดิน	จำนวนข้อมูล	ค่าเฉลี่ย
Natural water content, $w_n$ (%)	1,522	$27.02 \pm 7.41$
Liquid limit, LL (%)	945	$53.87 \pm 16.31$
Plastic limit, PL (%)	945	$23.20 \pm 5.37$
Plasticity index, PI (%)	945	$30.67 \pm 12.00$
Liquidity index, LI	945	$0.12 \pm 0.15$
Total unit weight, $\gamma_t$ ( $t/m^3$ )	1,094	$1.96 \pm 0.13$
Specific gravity, $G_s$	113	$2.65 \pm 0.03$
Undrained shear strength, $S_u$ ( $t/m^2$ )	357	$8.83 \pm 3.57$
Undrained modulus of elasticity, $E_u$ ( $t/m^2$ )	26	$787.69 \pm 383.58$
Initial void ratio, $e_0$	60	$0.737 \pm 0.108$
Compression index, $C_c$	60	$0.155 \pm 0.042$
Compression ratio, CR	60	$0.089 \pm 0.021$
Recompression index, $C_r$	60	$0.045 \pm 0.025$
Recompression ratio, RR	60	$0.029 \pm 0.015$
Coefficient of consolidation, $C_v$ ( $m^2/year$ )	60	$1.63 \pm 1.07$
Maximum past pressure, $\sigma'_p$ ( $t/m^2$ )	60	$29.43 \pm 9.03$
Over consolidation ratio, OCR	60	$2.33 \pm 0.64$

รูปร่างลักษณะ Stress path เมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 35 และค่า Parameter A at failure อยู่ใน ช่วง 0.03 ถึง 0.22 เมื่อเปรียบเทียบกับตารางที่ 22 พบว่าดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ เป็นดินประเภท Lightly over consolidated clay

ค่าเฉลี่ย OCR ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.33 แสดงว่าเป็นดินประเภท Lightly over consolidated clay

ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางวิศวกรรมกับคุณสมบัติทางกายภาพที่ทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ด้วยการวิเคราะห์เชิงมิติโดยวิธี Buckingham pi method และนำตัวแปรสัมพันธ์กันมาหาสมการความสัมพันธ์สำหรับดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ซึ่งรายละเอียดความสัมพันธ์มีดังนี้คือ

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $S_u/\sigma'_{v0}$  กับ PI แสดงดังสมการที่ (2) มีค่า  $r^2$  เท่ากับ 0.06 จึงมีความสัมพันธ์กันน้อย และจากการวิเคราะห์ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่าดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ที่ศึกษานี้เป็นดินประเภท Lighty over consolidated clay เมื่อเปรียบเทียบกับสมการความสัมพันธ์สำหรับดินประเภท Normally consolidated clay ผลวิจัยของ Skempton (1957) และ Bjerrum and Simons (1960) พบว่ามีความสัมพันธ์ที่ตรงกันข้ามกัน

$$S_u/\sigma'_{v0} = 0.908 - 0.0055(PI) \quad (2)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $S_u/\sigma'_{v0}$  กับ LL แสดงดังสมการที่ (3) มีค่า  $r^2$  เท่ากับ 0.056 จึงมีความสัมพันธ์กันน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับสมการความสัมพันธ์สำหรับดินประเภท Normally consolidated clay ผลวิจัยของ Karlsson and Viberg (1967) พบว่ามีความสัมพันธ์ที่ตรงกันข้ามกัน

$$S_u/\sigma'_{v0} = 0.957 - 0.004(LL) \quad (3)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $S_u/\sigma'_{v0}$  กับ  $w_n$  แสดงดังสมการที่ (4) มีค่า  $r^2$  เท่ากับ 0.12 จึงมีความสัมพันธ์กันน้อย

$$S_u/\sigma'_{v0} = 1.012 - 0.0096(w_n) \quad (4)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_c$  กับ LL แสดงดังสมการที่ (5) มีค่า  $r^2$  เท่ากับ 0.126 จึงมีความสัมพันธ์กันน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับสมการความสัมพันธ์สำหรับดินประเภท Normally consolidated clay ผลวิจัยของ Terzaghi and Peck (1967) พบว่า  $C_c$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อ LL เพิ่มขึ้นทั้งสองความสัมพันธ์ แต่ดินเหนียวแข็งที่ศึกษานี้ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไม่มาก

$$C_c = 0.001(LL) + 0.083 \quad (5)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_c$  กับ  $w_n$  แสดงดังสมการที่ (6) มีค่า  $r^2$  เท่ากับ 0.384 จึงมีความสัมพันธ์กันปานกลาง เมื่อเปรียบเทียบกับสมการความสัมพันธ์ดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ผลวิจัยของ Cox (1968) และ Adikari (1977) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_c$  กับ  $w_n$  สำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้  $C_c$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อ  $w_n$  เพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นนี้ใกล้เคียงกับผลวิจัยของ Cox (1968) และ Adikari (1977) แต่ให้ค่า  $C_c$  ที่น้อยกว่า

$$C_c = 0.0058(w_n) - 0.0042 \quad (6)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_c$  กับ  $e_0$  แสดงดังสมการที่ (7) มีค่า  $r^2$  เท่ากับ 0.363 จึงมีความสัมพันธ์กันปานกลาง เมื่อเปรียบเทียบกับสมการความสัมพันธ์ดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ผลวิจัยของ Adikari (1977) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_c$  กับ  $e_0$  สำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้  $C_c$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อ  $e_0$  เพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นนี้ใกล้เคียงกับผลวิจัยของ Adikari (1977) แต่ให้ค่า  $C_c$  ที่น้อยกว่า

$$C_c = 0.234(e_0) - 0.017 \quad (7)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง CR กับ LL แสดงดังสมการที่ (8) มีค่า  $r^2$  เท่ากับ 0.086 จึงมีความสัมพันธ์กันน้อย

$$CR = 0.0005(LL) + 0.0582 \quad (8)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง CR กับ  $w_n$  แสดงดังสมการที่ (9) มีค่า  $r^2$  เท่ากับ 0.213 จึงมีความสัมพันธ์กันน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับสมการความสัมพันธ์ดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ผลวิจัยของ A.I.T. (1981) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง CR กับ  $w_n$  สำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้ CR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อ  $w_n$  เพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นนี้ใกล้เคียงกับผลวิจัยของ A.I.T. (1981) แต่ให้ค่า CR ที่มากกว่า

$$CR = 0.0022(w_n) + 0.028 \quad (9)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง CR กับ  $e_0$  แสดงดังสมการที่ (10) มีค่า  $r^2$  เท่ากับ 0.169 จึงมีความสัมพันธ์กันน้อย

$$CR = 0.0816(e_0) + 0.0286 \quad (10)$$

สำหรับการนำค่าคุณสมบัติดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ไปใช้สามารถไปเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับวิศวกรผู้ออกแบบเพื่อประกอบการวิเคราะห์ห่ออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมปฐพี ในพื้นที่กรุงเทพฯ

#### ข้อเสนอแนะ

1. ในการเจาะสำรวจเก็บตัวอย่างดินและการทดสอบดินถ้ามีมาตรฐานที่ดีแล้ว จะทำให้การนำค่าคุณสมบัติของดินไปใช้มีประสิทธิภาพมากขึ้น
2. การศึกษาครั้งนี้ข้อมูลทางด้านกำลังของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ จากการทดสอบ Triaxial compression test มีน้อย จึงควรมีการทดสอบเพิ่มเติม เพื่อสามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้ความถูกต้องมากยิ่งขึ้น
3. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของดิน ควรเพิ่มข้อมูลทางด้านการยุบอัดตัวของดิน เพื่อให้เห็นแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของดินชัดเจนมากขึ้น

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมทรัพยากรธรณี. 2542. **ธรณีวิทยาประเทศไทย**. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

กำธร เชิดจระพงษ์. 2529. **แผนภูมิชั้นดินกรุงเทพฯ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ชิดชัย อนันตเศรษฐ์. 2528. Preconsolidation Pressure ของดินเหนียวอ่อน. **วิศวกรรมโยธาและการก่อสร้าง 2 (2): 209-223.**

เชิดพันธุ์ อมรกุล. 2553. **ฐานข้อมูลชั้นดินทางวิศวกรรมบริเวณที่ราบภาคกลางตอนล่างของประเทศไทย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ไทรภพ คนชม. 2546. **พฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำและความชื้นน้ำที่แปรตามทิศทางของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ประทีป ดวงเดือน. 2531. **Physical Properties of Soil**. เอกสารประกอบการเรียนการสอนวิชา ปฐพีกลศาสตร์. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วรากร ไม้เรียง. 2543. **ฐานข้อมูลดินทางวิศวกรรมโดยระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์. การสัมมนาฐานราก 2000**. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.

วิชาญ ภู่อพัฒน์. 2546. **สภาพทางปฐพีและฐานราก ภาคกลางและกรุงเทพฯ**. การสัมมนาวิศวกรรมฐานราก 2546. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.). 2546. **ข้อมูลสภาพดินบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง**. บริษัท จุดทอง จำกัด, กรุงเทพฯ.

สมศักดิ์ ภู่วัฒนานุสรณ์. 2529. การวิเคราะห์เชิงสถิติของข้อมูลความสามารถในการยุบอัดตัวได้ของดินเหนียวแข็งชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ของดินกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์.

Adikari, G.S.N. 1977. **Statistical Evaluations of Strength and Deformation Characteristics of Bangkok Clays.** M. Eng. Thesis, AIT.

Asian Institute of Technology (AIT). 1981. **Investigation of Land Subsidence Caused by Deep Well Pumping in Bangkok Area.** Vol. 2 GTE RR No. 91, Bangkok.

Becker, D. E. 1987. Work as a criterion for determining in situ and yield stresses in clays. **CGJ** 24: 549-564.

Biswas, B. 1973. **Quaternary Changes in Sea Level in the South China Sea.** Geological Society of Malaysia, Bulletin 6: 229-255.

Bjerrum, L. and N.E. Simons. 1960. Comparison of Shear Strength Characteristics of Normally Consolidated Clay. **Proceedings of Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils.** ASCE: 711-726.

Bowles, J.E. 1996. **Foundation Analysis and Design.** 5th ed. McGraw-Hill, North America.

Brand, E.W. 1971. Investigation at the Site of Memorial Bridge, Bangkok. **AIT Report,** Submitted to Public Works Department, Bangkok. 160 p.

Buckingham, E. 1914. On Physically Similar Systems, Illustrations of the Use of Dimensional Equations. **Physical Review** 4: 345-376.

Casagrande, A. 1936. Determination of the preconsolidation load and its practical Significance. **Proceedings of First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering Mass 3**. Cambridge: 60-64.

Casagrande, A. 1948. **Classification and Identification of Soils**. ASCE, Vol. 113.

Chaimanee, Y. 1997. **Plio-Pleistocene rodents of Thailand**. Ph.D. Thesis, Montpellier University.

Cox, J.B. 1968. A Review of the Engineering Characteristics of the Recent Marine Clays in Southeast Asia. **Research Report No. 6**. AIT, Bangkok.

Draper, N.R. and H. Smith 1966. **Applied Regression Analysis**. John Wiley and Son, New York: 407.

Hasan, Z. 1976. **Stress Strain Behaviour and Shear Strength Characteristics of Stiff Bangkok Clays**. M. Eng. Thesis No. 904, AIT.

Hengchaovanich, D. 1969. **Shear Strength Characteristics of Stiff Bangkok Clays**. M. Eng. Thesis, AIT.

Jose, B. T. 1989. Log-Log method for determination of preconsolidation pressure. **Journal of Geotechnical Engineering 12**: 230-237.

Karlsson, R. and L. Viberg 1967. Ratio  $c/p'$  in Relation to Liquid Limit and Plasticity Index with Special Reference to Swedish Clays. **Proceedings of Geotechnical Conference 1<sup>st</sup> ed.** Norway: 43-47.

Kerdsuwan, T. 1984. **Basic Properties and Compressibility Characteristics of First and Second Layers of Bangkok Subsoils**. M.Eng. Thesis, AIT.

Ladd, C.C. 1964. Stress Strain Behavior Characteristics and Basic Strength Principles.

**Research Report R 64-17.** Deptt. of Civil Engg., MIT, Cambridge, Mass.

Mitchell, J.K. 1976. **Foundamentals of Soil Behavior.** University of California Berkeley, John Wiley & Sons Inc.

Muktabhant, C., Teerawong, P. and Tenggamnuay. 1966. **Engineering Properties of Bangkok Subsoils Report.** Chulalongkorn University.

Natalaya, P. and J.L. Rau. 1983. **Geomorphology and Land Subsidence in Bangkok,** Thailand. p. 181-202. In Guidebook for Field Trip Itinerary in the Short Course on Applied Quaternary Geology. AIT, Bangkok.

Parentela, M. 1983. **Engineering Properties of Stiff Bangkok Clays.** M. Eng. Thesis No. 82-1. AIT.

Rujivipat, V. 1980. **Consolidation Properties of Soft and Stiff Bangkok Subsoils Related to Land Subsidence.** M. Eng. Thesis No. GT-79-18, AIT.

Sarker, Md. 1980. **Strength and Deformation Characteristics of Bangkok Subsoils under In-Situ Stress Conditions.** M. Eng. Thesis No. GT-79-20, AIT.

Sathiamurthy, E. and K. Voris. 2006. Maps of Holocene Sea Level Transgression and Submerged Lakes on the Sunda Shelf, Supplement 2. **The Natural History Journal of Chulalongkorn University:** 1-44.

Sinsakul, Sin. 2000. Late Quaternary geology of the Lower Central Plain, Thailand: A review. **Journal of Southeast Asian Earth Sciences** 18 (2000): 415-426.

Skempton, A.W. 1954. The Pore Water Coefficients A and B. **Geotechnique**, Volume 4: 143-147.

Skempton, A.W. 1957. **Proceeding of the Institution of Civil Engineering**, Volume 7: 305-307.

Terzaghi, K. 1936. **Proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng.**, Vol. 1: 161-165.

Terzaghi, K. and R. B. Peck. 1967. **Soil Mechanics in Engineering Practice**. John Wiley & Sons, New York.

Tonyagate, W. 1978. **Geotechnical Properties of Bangkok Subsoils for Subsidence Analysis**, M. Eng. Thesis No. 1298, AIT.

Vongthreeres, D. 1966. **An Evaluation of Pile Foundation in the Bangkok Area**. M. Eng. Thesis No. 131, SEATO Graduate School of Engineering Bangkok.

Wagner, A.A. 1957. The Use of the Unified Soil Classification System by the Bureau of Reclamation, Vol. I, pp. 125-134. **Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**. London.

Wissa, A.E.A. and C.C. Ladd 1964. Effective Stress Strength Behavior of Compacted Stabilized Soils. **Research Report R 64-32**. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, U.S.A.

Wongsomsak, S and S. Theyapunte 1987. **Geology of Pk Hai and Lad Lum Kaow Map Sheets Ayutthaya Province Geological Survey Report**. DMR, Bangkok: 115.



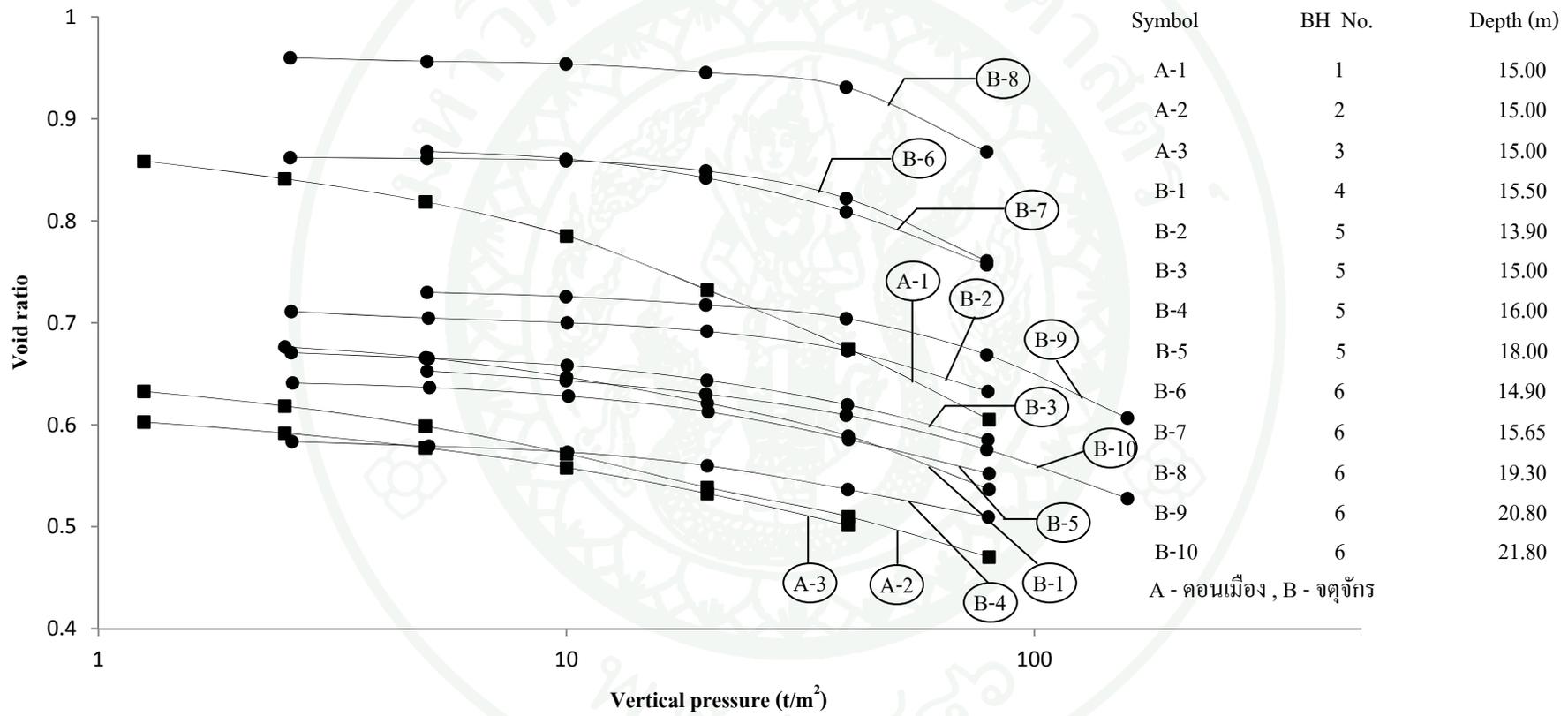
ตารางผนวกที่ 1 สรุปจำนวนข้อมูลดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ

กลุ่ม	เขต	ทดสอบทางห้องปฏิบัติการ						
		$w_n$	AT	$\gamma_t$	$G_s$	$S_u$	TX	CT
กรุงเทพฯเหนือ	ดอนเมือง	112	71	78	8	33	-	3
	บางเขน	113	56	76	2	32	-	-
	บางซื่อ	50	37	29	-	15	-	-
	จตุจักร	80	57	62	23	17	1	10
	ลาดพร้าว	41	25	32	-	10	-	-
<u>รวมทั้งหมด</u>		<u>396</u>	<u>246</u>	<u>277</u>	<u>33</u>	<u>107</u>	<u>1</u>	<u>13</u>
กรุงเทพฯตะวันออก	บึงกุ่ม	109	91	89	2	28	-	-
	มีนบุรี	37	28	28	-	10	-	-
	ลาดกระบัง	21	16	24	-	5	-	-
	ประเวศ	37	21	30	-	7	-	-
	บางกะปิ	38	17	34	-	7	-	-
<u>รวมทั้งหมด</u>		<u>242</u>	<u>173</u>	<u>205</u>	<u>2</u>	<u>57</u>	-	-
กรุงเทพฯกลาง	พระนคร	34	23	21	11	3	-	6
	ดุสิต	38	23	31	11	10	-	6
	ห้วยขวาง	90	55	62	-	15	-	-
	พญาไท	44	39	11	-	5	-	-
	ราชเทวี	26	19	18	-	2	-	-
<u>รวมทั้งหมด</u>		<u>232</u>	<u>159</u>	<u>143</u>	<u>22</u>	<u>35</u>	-	<u>12</u>

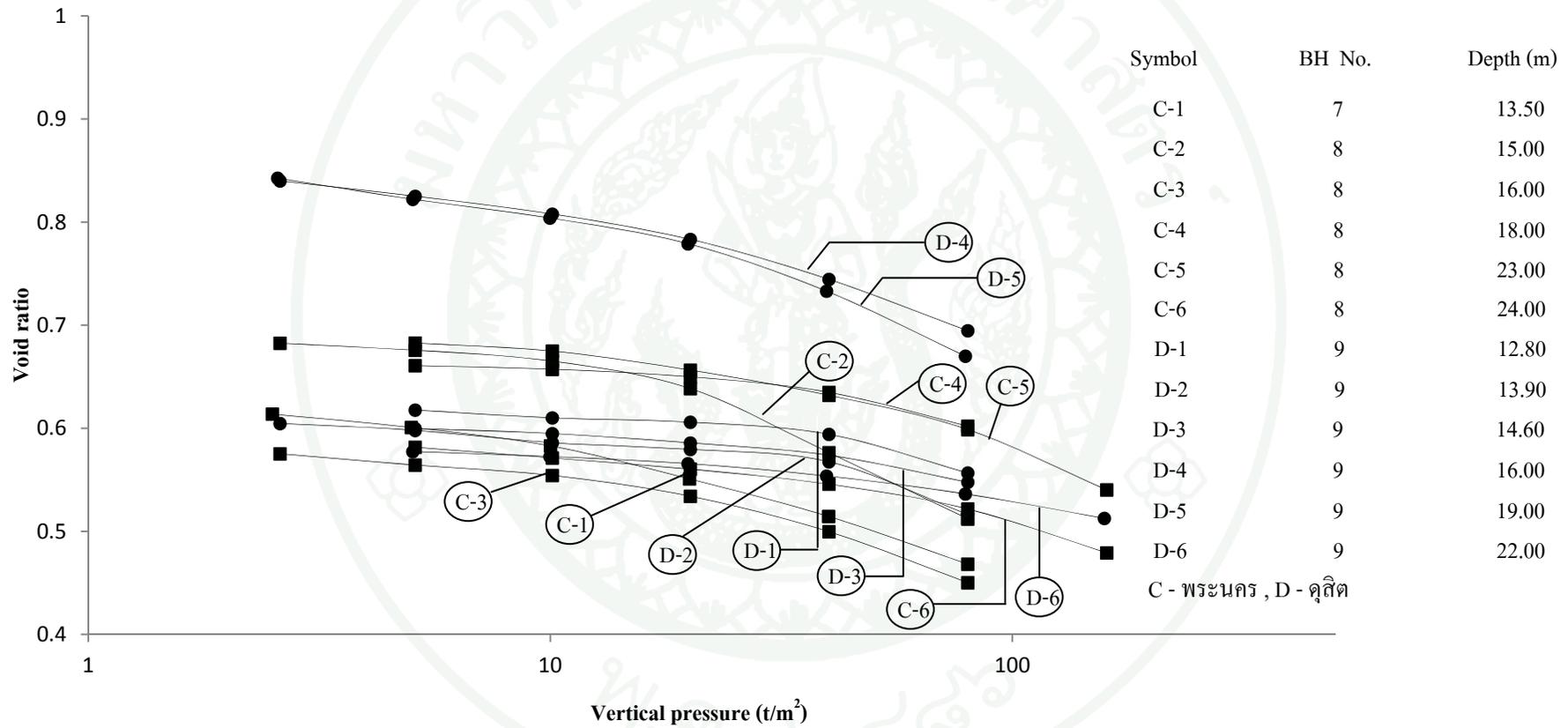
ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

กลุ่ม	เขต	ทดสอบทางห้องปฏิบัติการ						
		$w_n$	AT	$\gamma_t$	$G_s$	$S_u$	TX	CT
กรุงเทพใต้	ปทุมวัน	9	9	11	12	6	-	8
	บางรัก	19	10	20	-	5	-	-
	สาทร	31	22	26	7	12	1	6
	บางคอแหลม	7	3	6	-	1	-	-
	ยานนาวา	28	11	24	-	2	-	-
	คลองเตย	162	75	102	-	18	-	-
	พระโขนง	43	32	27	3	6	-	-
	บางนา	22	22	17	-	4	-	-
<u>รวมทั้งหมด</u>		<u>321</u>	<u>184</u>	<u>233</u>	<u>22</u>	<u>54</u>	<u>1</u>	<u>14</u>
กรุงเทพตะวันออก	ธนบุรี	7	2	5	-	1	-	-
	คลองสาน	5	3	2	-	2	-	-
	จอมทอง	11	6	15	-	6	-	-
	บางพลัด	107	51	76	17	26	-	10
	บางกอกน้อย	69	29	33	11	19	-	8
	บางกอกใหญ่	16	5	10	3	6	-	3
	คลองจั่น	32	27	37	-	17	-	-
	ภาษีเจริญ	13	6	11	1	7	-	-
	หนองแขม	14	13	7	-	3	-	-
	บางขุนเทียน	57	41	40	2	17	-	-
	<u>รวมทั้งหมด</u>		<u>331</u>	<u>183</u>	<u>236</u>	<u>34</u>	<u>104</u>	-
จำนวนข้อมูลทั้งหมด		1,522	945	945	113	357	2	60

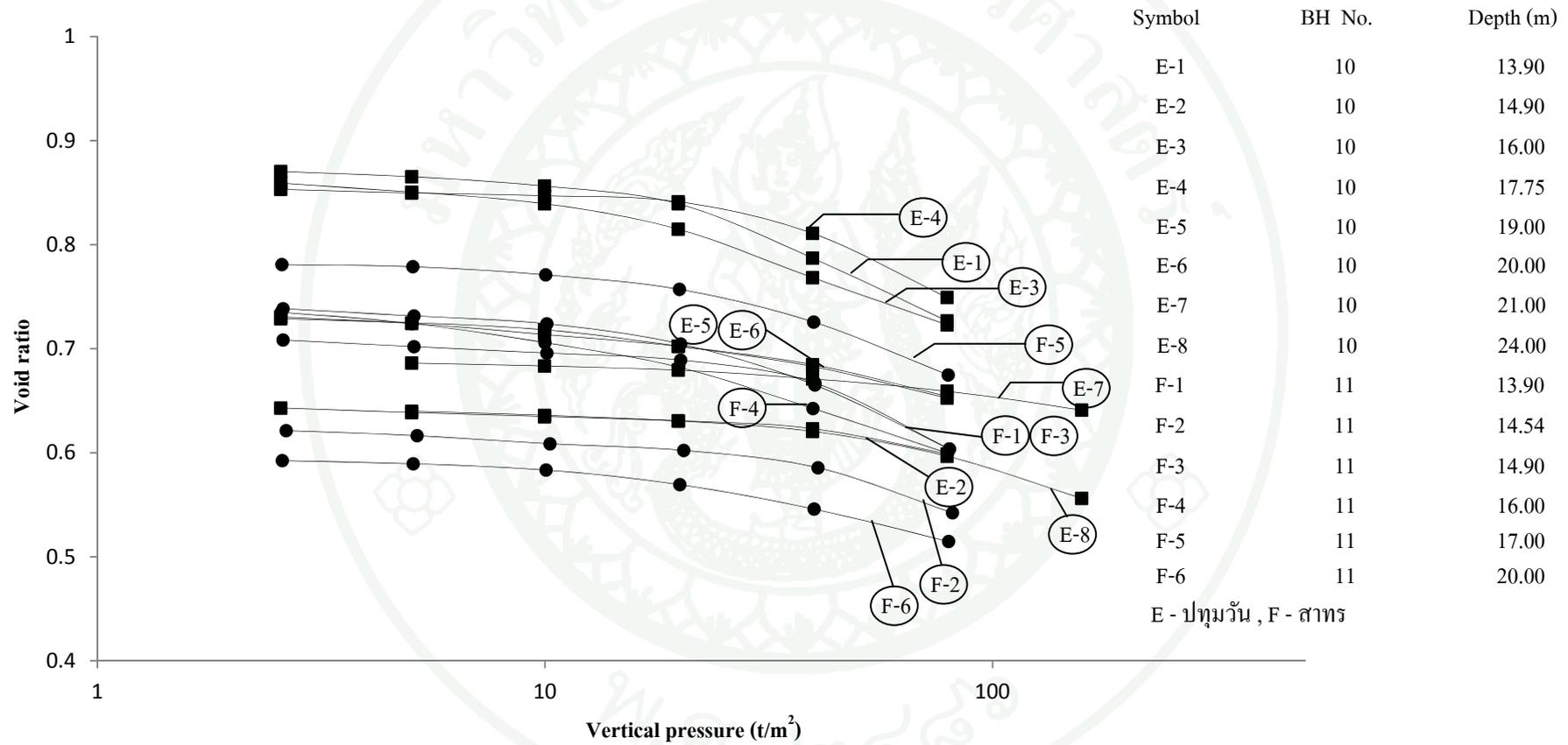
หมายเหตุ:  $w_n$  -Natural water content, AT -การทดสอบ Atterberg's Limits,  $\gamma_t$  -Total unit weight,  $G_s$  -Specific gravity,  $S_u$  -Undrained shear strength (การทดสอบ Unconfined compression test), TX -การทดสอบ Triaxial compression test, CT -การทดสอบ Consolidation test



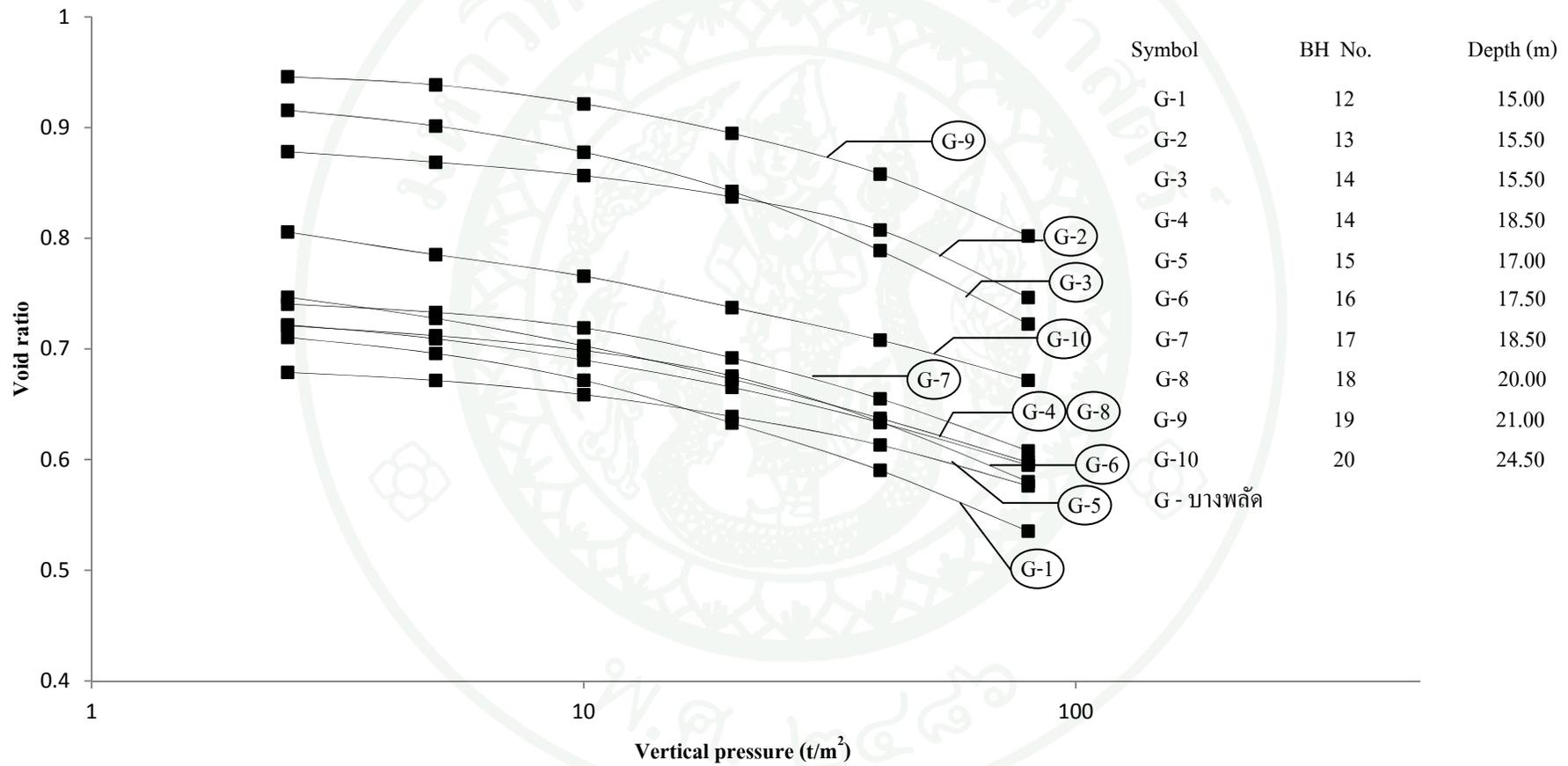
ภาพผนวกที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Void ratio กับ Pressure (Log scale) ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ



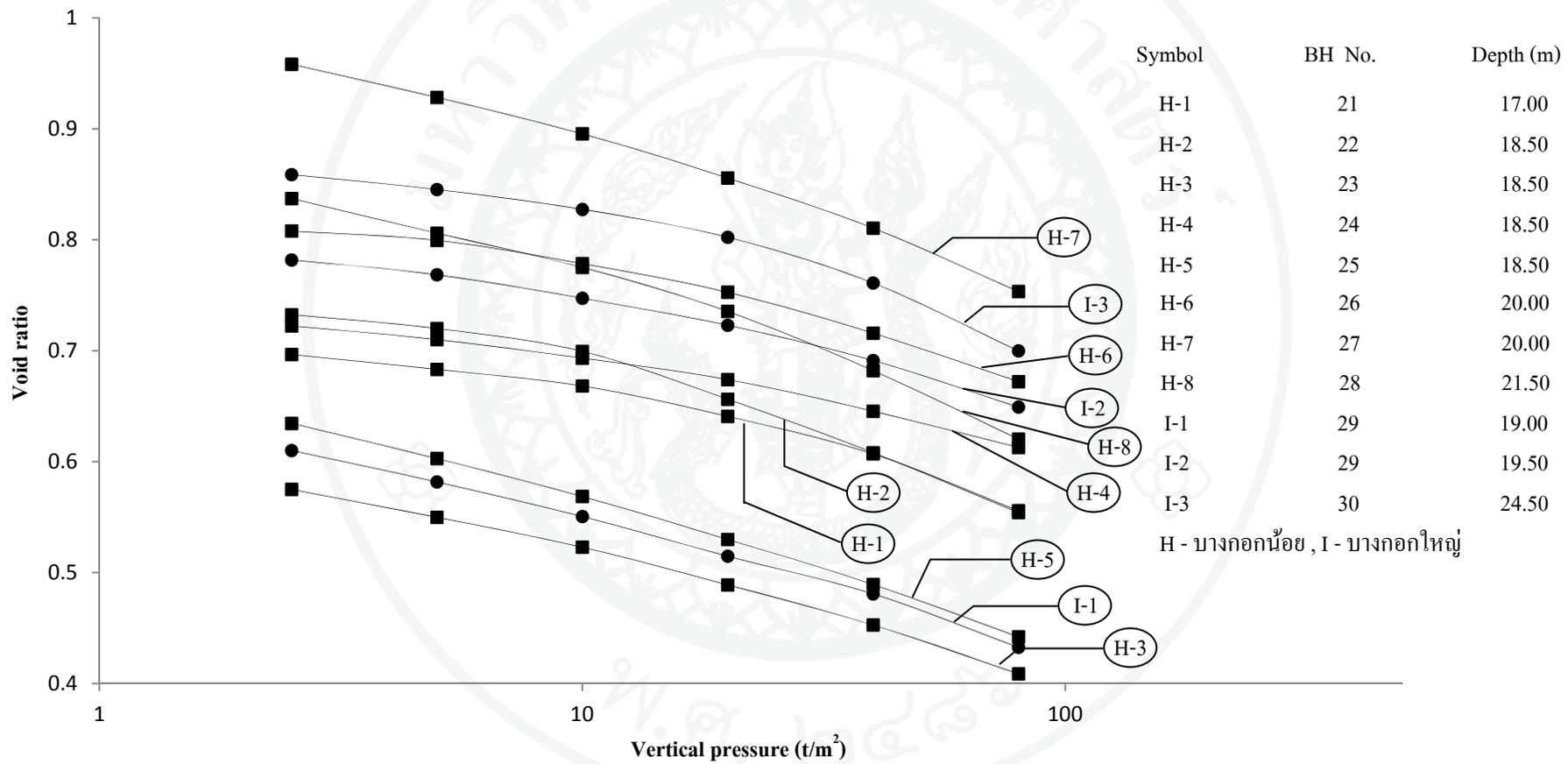
ภาพผนวกที่ 1 (ต่อ)



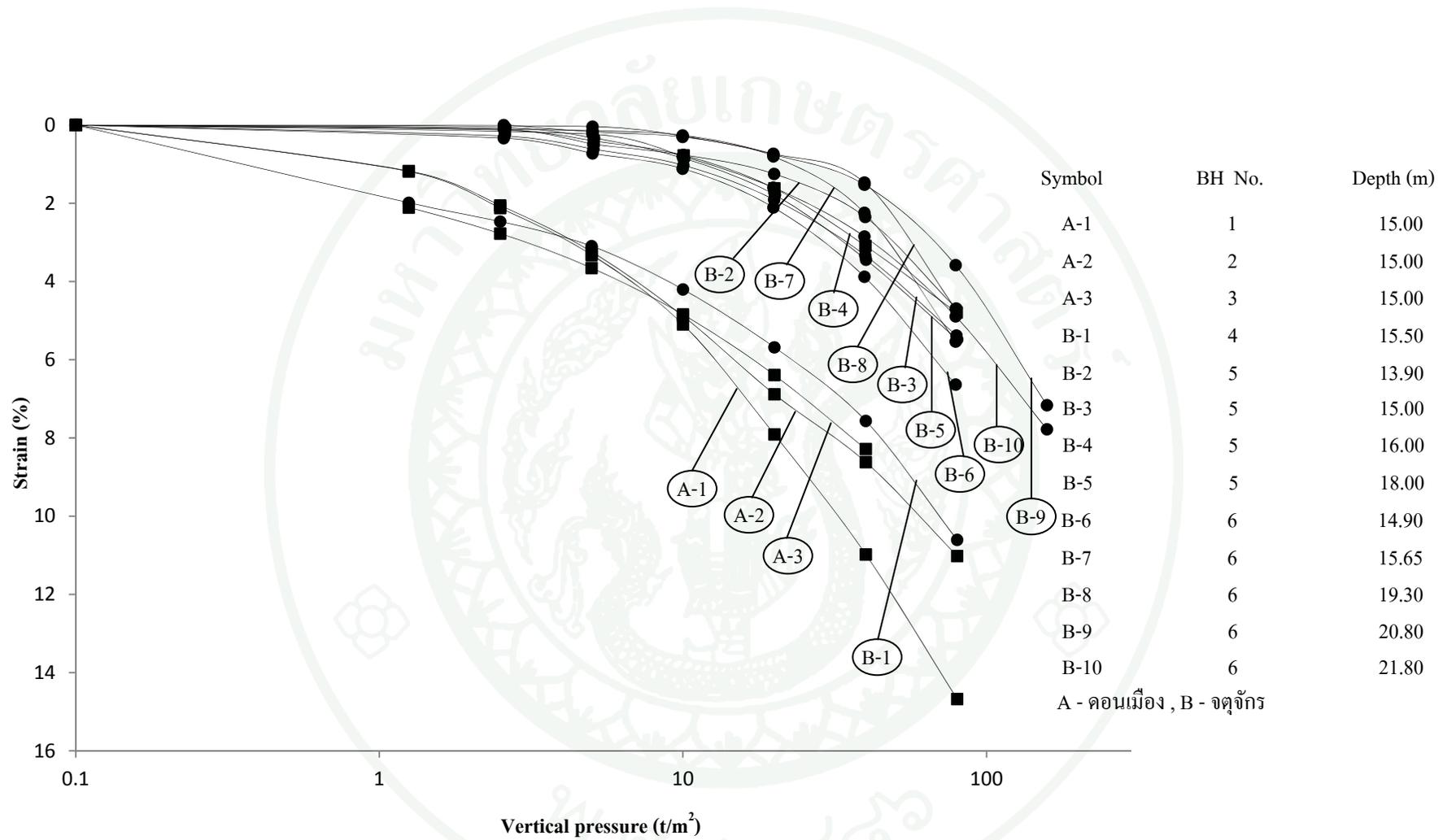
ภาพผนวกที่ 1 (ต่อ)



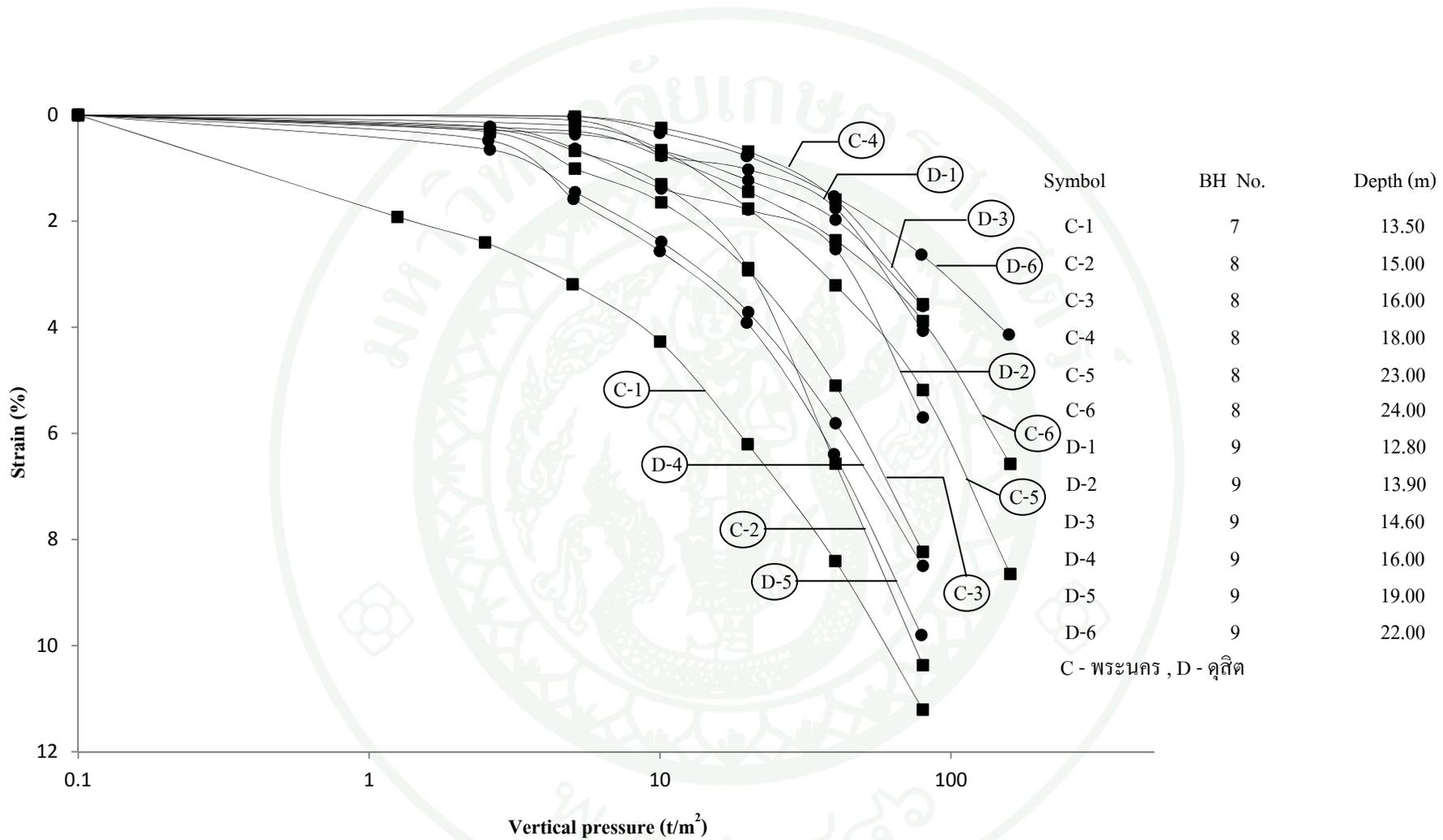
ภาพผนวกที่ 1 (ต่อ)



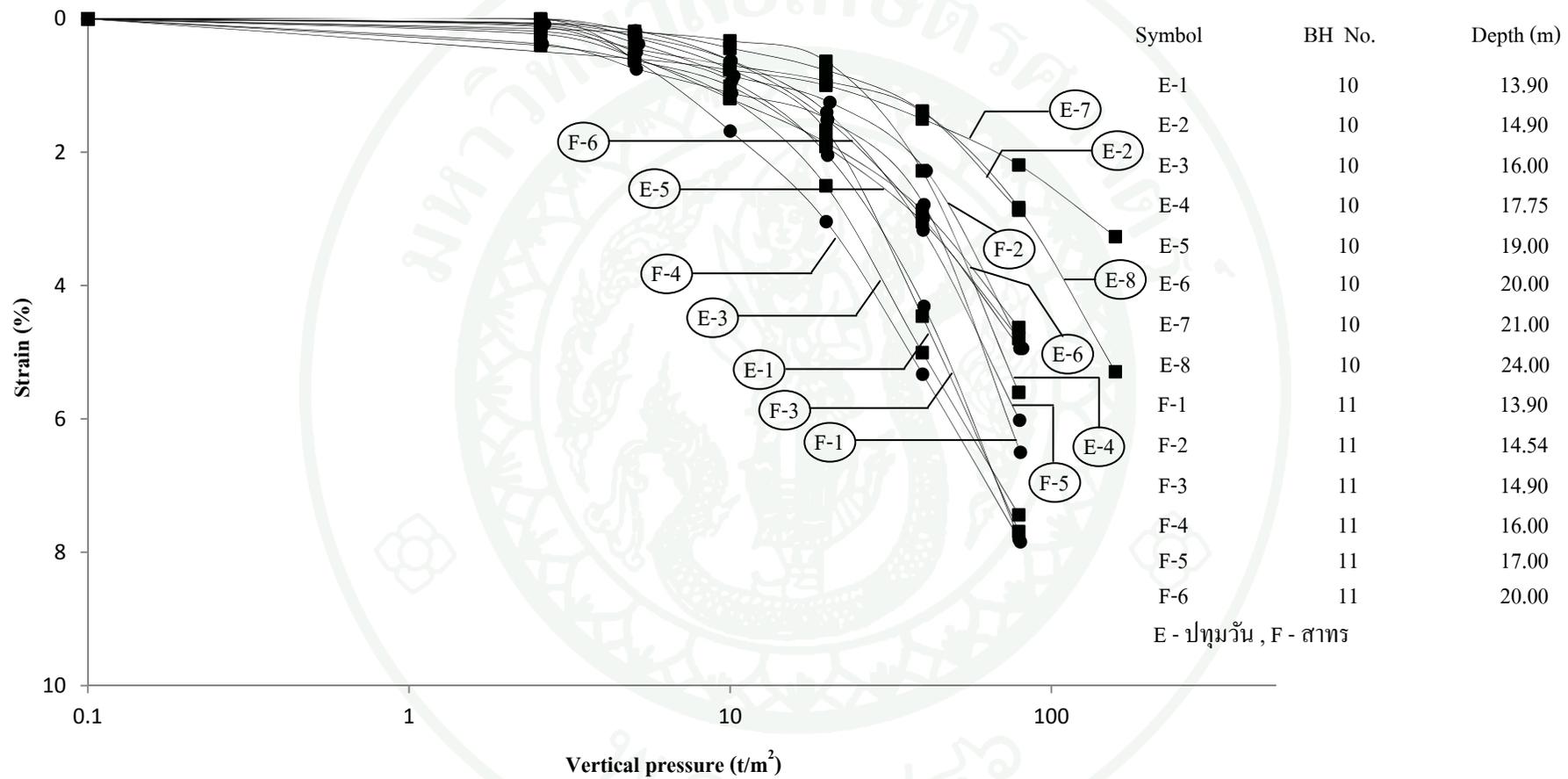
ภาพผนวกที่ 1 (ต่อ)



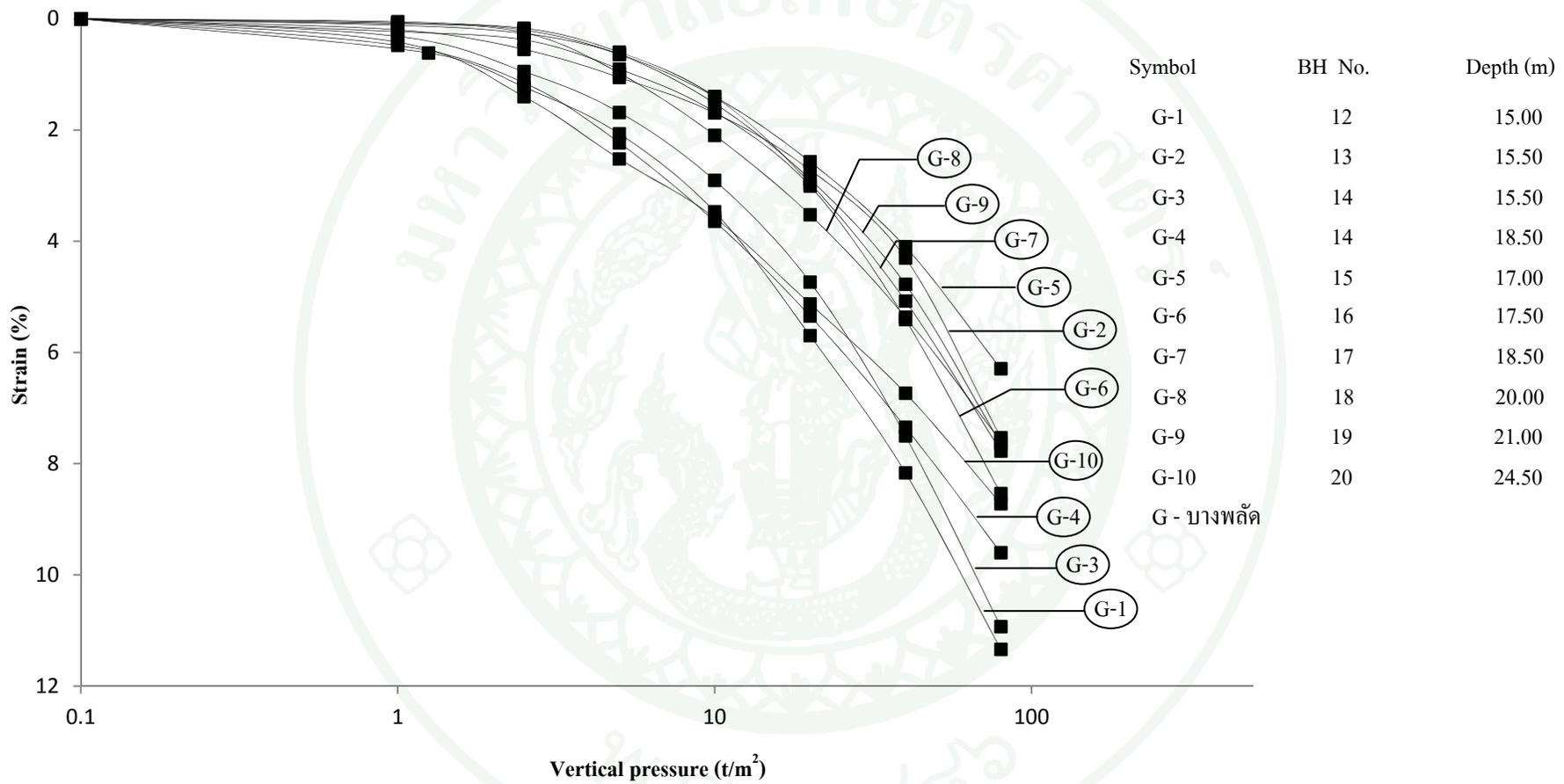
ภาพผนวกที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain กับ Pressure (Log scale) ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ



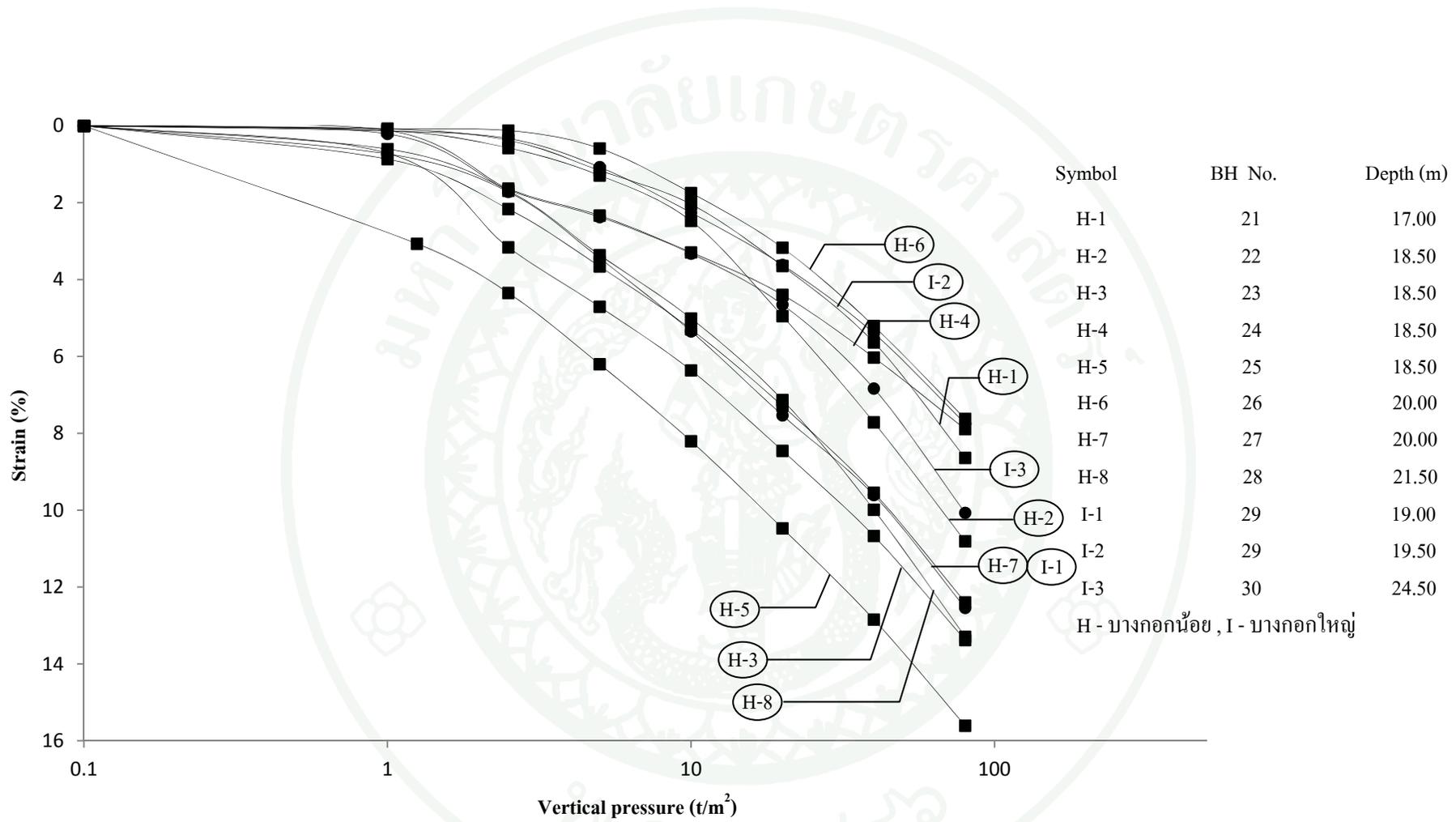
ภาพผนวกที่ 2 (ต่อ)



ภาพผนวกที่ 2 (ต่อ)



ภาพผนวกที่ 2 (ต่อ)



ภาพผนวกที่ 2 (ต่อ)

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ - นามสกุล	นางสาวชนวรรณ วรรณวงษ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	29 กันยายน 2529
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา-ชลประทาน) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-

