

# คุณสมบัติการยุบอัดตัวของดินเหนียวกรุงเทพฯระดับลึก

## CONSOLIDATION PROPERTIES OF DEEP BANGKOK CLAY

พรสวรรค์ วงศ์วิวัฒน์ (Pornsawat Wongwiwat)<sup>1</sup>

วารากร ไม้เรียง (Warakorn Mairaing)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Email address: [pornsawat2765@yahoo.com](mailto:pornsawat2765@yahoo.com)

<sup>2</sup> รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

**บทคัดย่อ :** ดินกรุงเทพฯและปริมณฑลในระดับลึกประกอบด้วยชั้นดินทรายสลับกับชั้นดินเหนียวทำให้เกิดเป็นชั้นน้ำบาดาลหลายชั้น เมื่อมีการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้มากเกินไปจนเกินกว่าสมมูลที่น้ำจากธรรมชาติจะไหลเข้ามาทดแทนได้ทันจะทำให้เกิดการทรุดตัวของแผ่นดินอันเกิดจากการยุบอัดตัวของชั้นดินเหนียวเป็นหลัก บทความนี้นำเสนอการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติการยุบอัดตัวของชั้นดินเหนียวระดับลึกระหว่าง 70 - 600 เมตร โดยการเจาะสำรวจเก็บตัวอย่างดินระดับลึกที่ เขตบางขุนเทียน กรุงเทพฯ ด้วยวิธี Wired Line และมีการทำ Electric Logging เพื่อทราบถึงชนิดของดินพร้อมกำหนดตำแหน่งที่จะเก็บตัวอย่างดิน การทดสอบคุณสมบัติการยุบอัดตัวของดินที่มีความลึกสูงสุดประมาณ 600 เมตร จะต้องใช้แรงดันสูงมากถึง 1,800 ตัน/ตารางเมตร ซึ่งมากกว่าที่เครื่องมือปกติจะทดสอบได้จึงต้องทำการพัฒนาเครื่องมือและระบบควบคุมเพื่อใช้สำหรับการทดสอบขึ้นใหม่โดยใช้แหล่งกำเนิดแรงดันจากลมทำให้เกิดแรงดันสูงสุดถึง 2,500 ตัน/ตารางเมตร และใช้คอมพิวเตอร์สำหรับการควบคุมการทดสอบพร้อมทั้งบันทึกผลจากการศึกษาพบว่าลักษณะทั่วไปของชั้นดินระดับลึกประกอบด้วยชั้นดินเหนียวและชั้นกรวดทรายวางตัวสลับกันไป ชั้นดินเหนียวมีค่าปริมาณความชื้นต่ำ (น้อยกว่า 25%) ค่า Plasticity Index มีค่าต่ำลดลงตามความลึก และชั้นดินเหนียวความลึกมากกว่า 100 เมตร จำแนกโดยวิธี Unified Soil Classification จัดเป็นพวก CL จากการทดสอบพบว่าค่า Compression index,  $C_c$  มีค่าต่ำมีค่าอยู่ในช่วง 0.1285 ถึง 0.2225 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามคุณสมบัติทางกายภาพ ( $W_n$ ,  $LL$ ,  $PL$ )

**ABSTRACT:** Deep Bangkok and vicinity subsoils are consisted of the alternative layers of sand and clay creating the ground water aquifers. Due to excessive ground water pumping as comparing to the recovery rate, the land subsidence was occurred mainly from the consolidation of the clay layers. This paper presents the study of both physical and consolidation properties of deep Bangkok subsoil from 70-600 meters depth. The samples are obtained from wired line deep soil boring method at Bangkhunthein area with the corresponding electronic logging. Since the maximum testing pressure for 600 meters sample may required up to 1,800 matric ton/sq.m. exceeding the range of conventional consolidometer. Thus the special design consolidometer was created to test the sample up to 2500 matric ton/sq.m. with fully computerized control and recording systems. The results of physical properties show that on the deep clay layers had low water content less than 25 % and the plasticity index decreasing with depth. The clay layers deeper than 100 meters are classified as CL. The compression indecies ( $C_c$ ) are low between 0.1285 to 0.2225 and tend to increase with the natural water contents liquid limits and plastic limits.

**KEYWORDS:** Consolidation properties, High pressure consolidation test, Deep Bangkok clay.

## 1. บทนำ

ได้แผ่นดินกรุงเทพฯ ลงไปมีชั้นดินทรายสลับกับชั้นดินเหนียว โดยชั้นดินอุ้มน้ำอยู่เป็นชั้นดินกรวด ทราย ซึ่งเรียกว่า ชั้นน้ำบาดาล (Aquifers) และชั้นน้ำบาดาลแต่ละชั้นจะถูกแบ่งกันโดยดินเหนียว เรียกว่า ชั้นดิน (Aquitards) การสูบน้ำบาดาลเริ่มมีมาตั้งแต่ประมาณปี พ.ศ. 2450 โดยนำน้ำบาดาลขึ้นมาเพื่อใช้ในการอุปโภคและบริโภค ต่อมามีการสูบน้ำบาดาลเพื่อการอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้น เมื่อการสูบน้ำบาดาลปริมาณเพิ่มมากขึ้นเกินสมดุลกว่าที่น้ำจากธรรมชาติจะไหลเข้ามาทดแทนได้ทัน ทำให้ระดับน้ำบาดาลลดลงอย่างต่อเนื่องและไม่คืนตัวก่อให้เกิดผลกระทบสำคัญคือ การทรุดตัวของแผ่นดิน การศึกษาเพื่อวางแผนทางลดผลกระทบดังกล่าว จะต้องทราบถึงคุณสมบัติด้านการยุบอัดตัวคายน้ำสำหรับดินเหนียวตลอดทุกชั้นน้ำบาดาลที่มีการสูบน้ำขึ้นมาใช้ สามารถทำได้โดยการเจาะเก็บตัวอย่างดินและทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะการวางตัวของชั้นดินเหนียว และชั้นน้ำบาดาลจากข้อมูลวิจัยโดย Asian Institute of Technology, AIT ในปี ค.ศ. 1981 และมีการเจาะสำรวจเพิ่มเติมในรายละเอียดของชั้นดินในพื้นที่เป้าหมายที่เลือก เพื่อศึกษาคงสมบัติของดินทางด้านกายภาพ และการยุบอัดตัวคายน้ำของชั้นดินเหนียว ที่อยู่ในระดับลึก 0 ถึง 600 เมตร ได้ระดับผิวดิน

## 2. สภาพชั้นน้ำบาดาลในแอ่งลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนล่าง

สภาพธรณีวิทยาของที่ราบลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนล่างเป็นแอ่งหินอยู่ที่ลึกประมาณ 2,000 เมตร และมีการตกตะกอนของชั้นดินบนแอ่งหินนี้ ซึ่งพบว่ามีชั้นดินทรายซึ่งเป็นแหล่งเก็บน้ำใต้ดินที่มีความหนาแน่นข้างมากสลับกับชั้นดินเหนียว ตลอดตามความลึก โดยสามารถแบ่งได้จำนวน 8 ชั้นน้ำ ดังนี้

1. ชั้นน้ำกรุงเทพ (BK) ความลึกประมาณ 50 เมตร ส่วนบนสุดของชั้นน้ำวางทับอยู่ด้วยชั้นดินเหนียวที่เรียกว่า “ชั้นดินเหนียวกรุงเทพ” ชั้นน้ำหนาประมาณ 20-30 เมตร
2. ชั้นน้ำพระประแดง (PD) ความลึกประมาณ 100 เมตร ระดับบนสุดของชั้นน้ำอยู่ที่ระดับความลึกประมาณ 60-80 เมตร ความหนาของชั้นน้ำประมาณ 20-50 เมตร
3. ชั้นน้ำนครหลวง (NL) ความลึกประมาณ 150 เมตร ระดับความลึกถึงระดับบนสุดของชั้นน้ำอยู่ลึกจากผิวดินประมาณ 100-140 เมตร ชั้นน้ำหนา 50-70 เมตร

4. ชั้นน้ำนนทบุรี (NB) ความลึกประมาณ 200 เมตร ระดับความลึกของชั้นน้ำจากผิวดินประมาณ 170-200 เมตร ความหนาของชั้นน้ำประมาณ 30-70 เมตร

5. ชั้นน้ำสามโคก (SK) ความลึกประมาณ 300 เมตร ระดับบนสุดของชั้นน้ำพบที่ประมาณ 240-250 เมตร ความหนาของชั้นน้ำประมาณ 40-80 เมตร

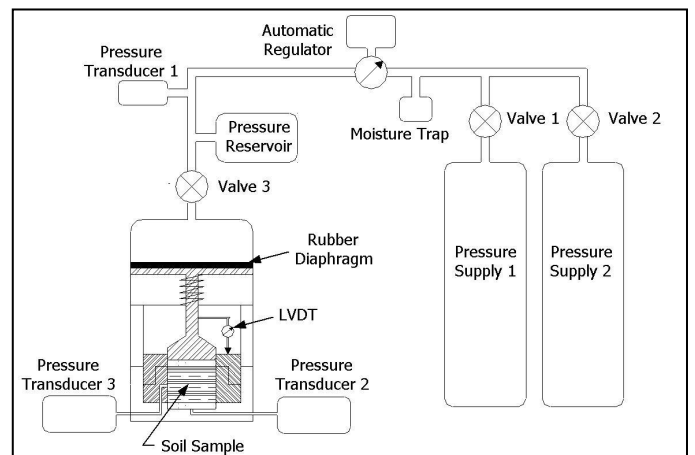
6. ชั้นน้ำพญาไท (PT) ความลึกประมาณ 350 เมตร ระดับบนสุดของชั้นน้ำลึกประมาณ 275-350 เมตร ความหนาของชั้นน้ำประมาณ 40-60 เมตร

7. ชั้นน้ำธนบุรี (TB) ความลึกประมาณ 450 เมตร ความหนาชั้นน้ำรวมกันประมาณ 50-100 เมตร

8. ชั้นน้ำปากน้ำ (PN) ความลึกประมาณ 550 เมตร ระดับบนสุดของชั้นน้ำอยู่ลึกจากผิวดินประมาณ 420-500 เมตร

## 3. วิธีการวิจัย

การทดสอบคุณสมบัติการยุบอัดตัวคายน้ำ สำหรับตัวอย่างดินเหนียวในระดับลึกสูงสุดประมาณ 600 เมตร จะต้องใช้แรงดันสูงมากถึง 1,800 ตัน/ตารางเมตร ซึ่งมากกว่าที่เครื่องมือทดสอบปกติจะกระทำได้ ต้องทำการพัฒนาเครื่องมือและระบบควบคุมเพื่อใช้สำหรับการทดสอบ ดังรูปที่ 1 โดยใช้แหล่งกำเนิดแรงดันจากลมทำให้เกิดแรงดันสูงสุดได้ถึง 2,500 ตัน/ตารางเมตร ดังรูปที่ 2 และใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุมและตรวจวัดผลการทดสอบ เช่น Linear Vertical Displacement Transducer (LVDT) ใช้วัดค่าการทรุดตัว Analog Interface 200 (AI 200) ใช้แปลงสัญญาณและบันทึกผลทดสอบ Digital Pressure Regulator ใช้ควบคุมการเพิ่ม-ลด แรงดัน และควบคุมการทดสอบผ่านโปรแกรมในคอมพิวเตอร์



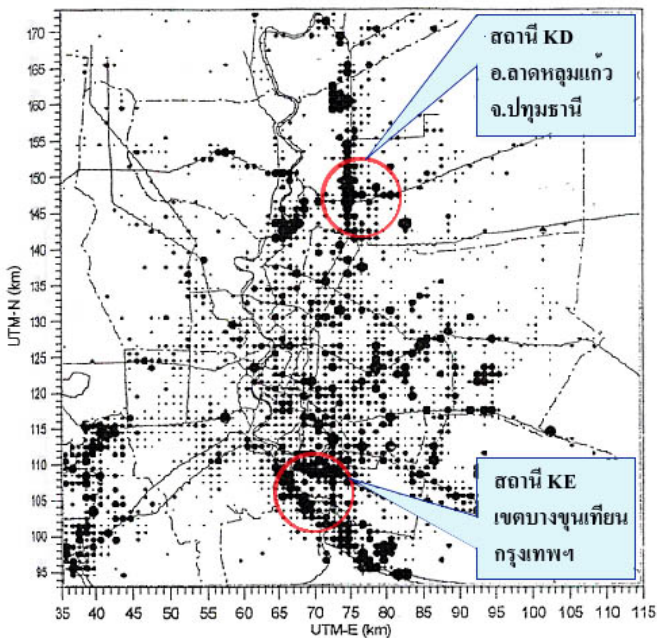
รูปที่ 1 แผนผังเครื่องมือทดสอบ High Pressure Consolidation



รูปที่ 2 เครื่องมือทดสอบ High Pressure Consolidation

การเลือกพื้นที่เจาะสำรวจเก็บตัวอย่างจะพิจารณาคัดเลือกพื้นที่ที่มีความหนาแน่นของการขุดเจาะน้ำบาดาลเป็นเป้าหมายหลัก ดังรูปที่ 3 และได้คัดเลือกพื้นที่เป้าหมายจำนวน 2 แห่ง คือ

- พื้นที่ตอนเหนือสุด อ.ลาดหลุมแก้ว จ. ปทุมธานี
- พื้นที่ตอนใต้สุด เขตบางขุนเทียน จ. กรุงเทพฯ



รูปที่ 3 พื้นที่การเจาะบ่อน้ำบาดาลในเขตกรุงเทพฯ และ ปริมณฑล

การเจาะสำรวจเก็บตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบจะใช้วิธี Wired Line และขณะทำการเจาะสำรวจจะมีการทำ Electric Logging เพื่อให้ทราบถึงชนิดและการจัดเรียงตัวของชั้นดิน ตัวอย่างดินที่ได้จากการเจาะเก็บตัวอย่างจะเป็นตัวอย่างดินแบบ Undisturbed

Sample ถูกเก็บในห้องเก็บตัวอย่างซึ่งมีการรักษาอุณหภูมิและความชื้นให้เหมาะสม ตัวอย่างดินจะถูกนำมาทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพเพื่อจำแนกชนิดของดินก่อนที่จะทำการทดสอบคุณสมบัติการยุบอัดตัวของดินเหนียวต่อไป โดยอ้างอิงจากมาตรฐานการทดสอบ ASTM และทำการสรุปผลการทดสอบ

#### 4. ผลการทดสอบ

ตัวอย่างดินและลักษณะที่ตรวจพบด้วยตา สำหรับตัวอย่างดินเหนียวส่วนมากจะเป็นดินเหนียวปนด้วยตะกอนทรายมีเนื้อละเอียดสีน้ำตาลแดงปนเทาหรือสีเหลือง ดังรูปที่ 4 เนื้อดินแข็งมากไม่สามารถคดจิกด้วยเล็บมือได้ บางตำแหน่งความลึกเช่น สถานี KE ความลึก 100 และ 267 เมตร สถานี KD ความลึก 407 และ 475 เมตร พบคราบดินสีขาวแทรกจับตัวเป็นก้อนแข็งอยู่กับเนื้อดิน ทดสอบหยดสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ลงบนเนื้อดินสีขาว พบว่าเกิดฟองฟู สรุปได้ว่าดินสีขาวเป็นดินที่ประกอบด้วยสารแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 ตัวอย่างดินเหนียวระดับความลึกต่างๆ ของสถานี KE

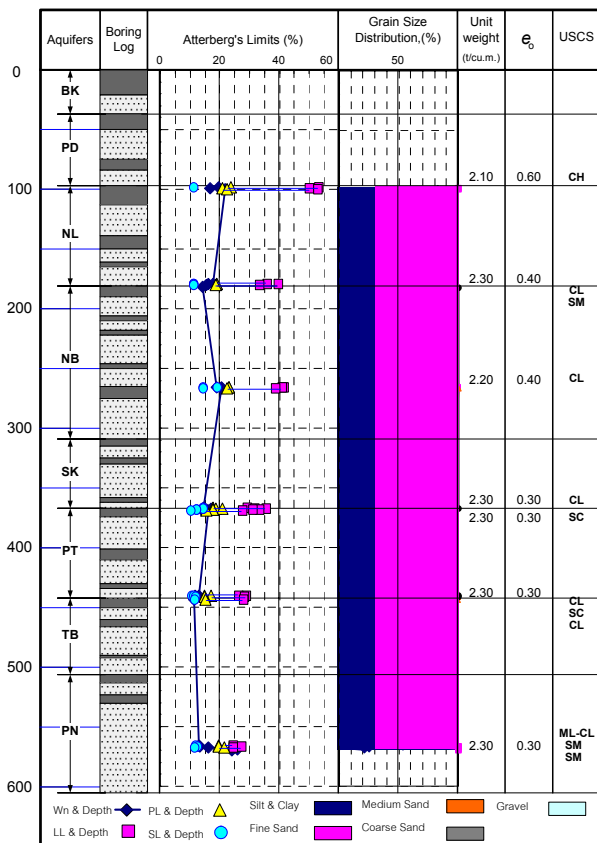


รูปที่ 5 ตัวอย่างดินความลึก 474 เมตร สถานี KD พบดินสีขาวปะปน

#### 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของดินระดับลึก

ผลของการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพซึ่งได้แก่ ความชื้นตามธรรมชาติ( $W_n$ ), Atterberg's limits (LL, PL, SL), Specific Gravity ( $G_s$ ), Grain Size Distribution และ Soil Classification (USCS) สำหรับหลุมเจาะที่บางขุนเทียน (KE) และหลุมเจาะที่ลาดหลุมแก้ว (KD) พบว่าความชื้นตามธรรมชาติของดินเหนียวมีค่าต่ำอยู่ในช่วง 10-25 เปอร์เซ็นต์, ค่า Liquid Limit, Plastic Limit, Shrinkage Limit และ Plastic Index มีแนวโน้มที่จะลดลงตามความลึก, ค่า Specific Gravity ของดินเหนียวมีค่าอยู่ในช่วง 2.60-2.80 สำหรับขนาดเม็ดดินจะเป็นดินเหนียวและทรายแป้งเป็นส่วนมาก อาจมีทรายละเอียดและทรายหยาบปะปนอยู่ชั้นดินเหนียวอยู่บ้าง แต่ผลของการทดสอบชั้นทรายที่พบจะเห็นว่าเป็นดินทราย SM, SC หรือ SM-SC เป็นส่วนใหญ่ สามารถสรุปโดยเสนอเป็น Boring Logs ได้ในรูปแบบที่ 6 และรูปที่ 7

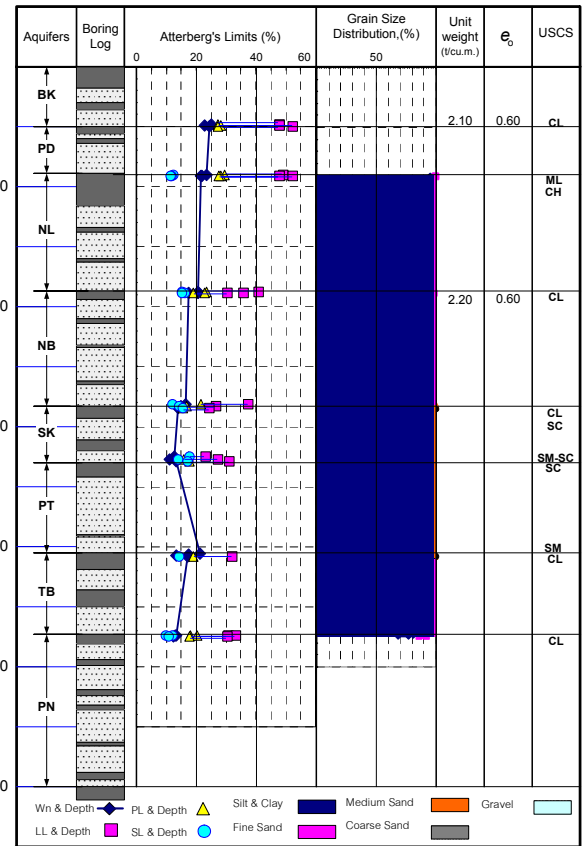
Boring Log for KE-PN



รูปที่ 6 Boring Log และคุณสมบัติทางกายภาพของ หลุมเจาะ KE

กราฟของ Plasticity Chart (A-line) ของดินเหนียวในชั้นน้ำต่างๆ ที่แสดงในรูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่า ชั้นดินเหนียวในระดับลึกตั้งแต่ชั้นน้ำบนทูลิ่งไป ส่วนใหญ่จัดอยู่ในกลุ่มดินชนิด CL คือเป็นดินที่มีค่า Liquid Limit ต่ำอยู่ในช่วง 20-50 เปอร์เซ็นต์

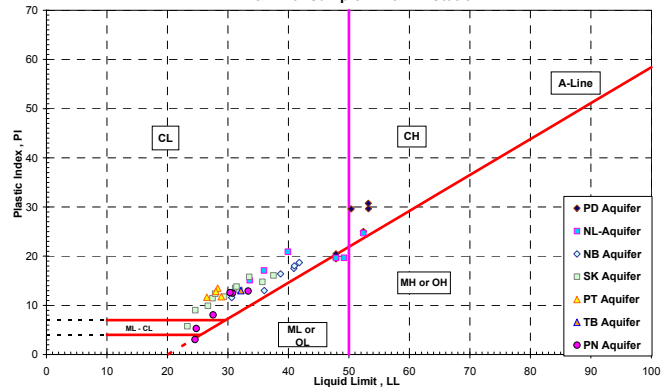
Boring Log for KD-PN



รูปที่ 7 Boring Log และคุณสมบัติทางกายภาพของ หลุมเจาะ KD

และมีค่า Plastic Index ที่สูงกว่าเส้นกราฟ A-Line และดินที่อยู่ในชั้นน้ำประประแดงและนครหลวงส่วนใหญ่จัดอยู่ในกลุ่มดินชนิด CH จะมีค่า Liquid Limit สูงกว่า 50 เปอร์เซ็นต์

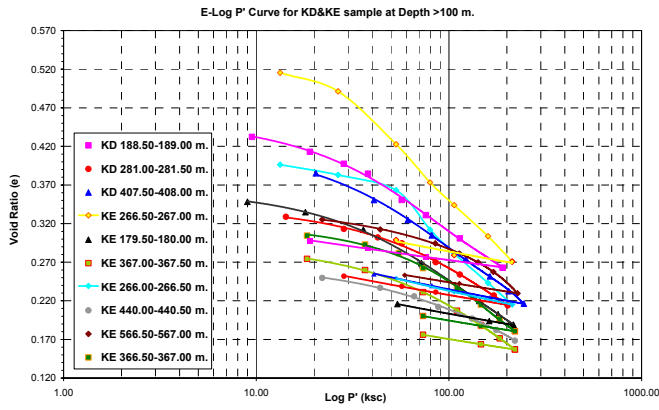
PI & LL of Sample KE & KD Station



รูปที่ 8 Plasticity Chart ของดินเหนียวชั้นน้ำบาดาล

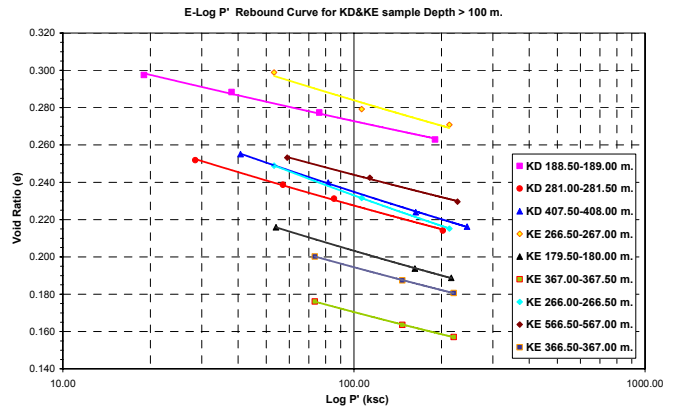
#### 4.2 คุณสมบัติทางด้าน การยุบอัดตัวคายน้ำ

คุณสมบัติการทรุดตัวคายน้ำ (Consolidation Properties) ของชั้นดินเหนียวชั้นน้ำบาดาลซึ่งได้มีการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกดสูง แสดงผลการทดสอบในรูปแบบของ  $e$ -log  $P'$  curve ดังภาพที่ 9 และสามารถสรุปผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 9 แสดงผลการทดสอบการยุบอัดตัวของดินเหนียวที่ระดับความลึกมากกว่า 100 เมตร (e-log P' curve)

การทดสอบการยุบอัดตัวของดินเหนียวในช่วงบวมตัว (Rebound Load) ค่า Swelling Index (Cs) ที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับค่า Recompression Index (Cr) โดยจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.035 ถึง 0.068 ซึ่งถือว่าน้อย ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 แสดง e-Log P' rebound curve ของดินเหนียวชั้นน้ำบาดาลความลึกมากกว่า 100 เมตร

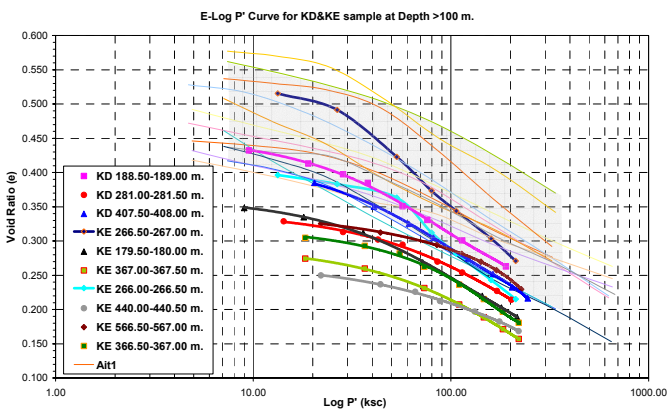
ตารางที่ 1 สรุปผลการทดสอบคุณสมบัติการยุบอัดตัวของชั้นดินเหนียวน้ำบาดาล

Station	Depth (m)		$C_v$ (cm <sup>2</sup> /s)	$P_m$ (ksc)	$\gamma_s$ (t/m <sup>3</sup> )	$C_c$	$C_s$	$C_r$	$e_0$	$M_v$ cm <sup>2</sup> /kg	$k$ (cm/s)
	From	To									
KD	49.50	50.00	2.62E-04	19.50	2.088	0.1970	0.0684	0.0398	0.6251	1.00E-03	2.63E-10
KD	49.50	50.00			2.070				0.6374		
KD	188.50	189.00	3.46E-04	37.00	2.162	0.1703	0.0345	0.0640	0.4541	9.82E-04	3.39E-10
KD	281.00	281.50	8.53E-04	55.00	2.250	0.1581	0.0426	0.0483	0.3402	6.25E-04	9.74E-10
KD	407.50	408.00			2.204				0.4072		
KE	99.00	99.50	5.72E-05	27.00	2.147	0.1975	0.0389	0.0240	0.6051	1.21E-03	6.92E-11
KE	179.50	180.00	1.67E-04	33.50	2.255	0.1694	0.0451	0.0437	0.3673	7.97E-04	1.33E-10
KE	266.00	266.50	1.15E-04	50.00	2.166	0.2159	0.0586	0.0511	0.4132	7.41E-04	8.49E-11
KE	366.50	367.00	9.66E-05	62.00	2.262	0.1893	0.0413	0.0432	0.3284	5.48E-04	5.30E-11
KE	367.00	367.50	1.41E-04	55.85	2.272	0.1628	0.0413	0.0483	0.3032	5.66E-04	8.00E-11
KE	440.00	440.50	6.08E-04	72.25	2.325	0.1285			0.2779	4.45E-04	2.71E-10
KE	566.50	567.00	8.71E-05	104.00	2.267	0.2225	0.0387	0.0440	0.3422	3.82E-04	3.33E-11

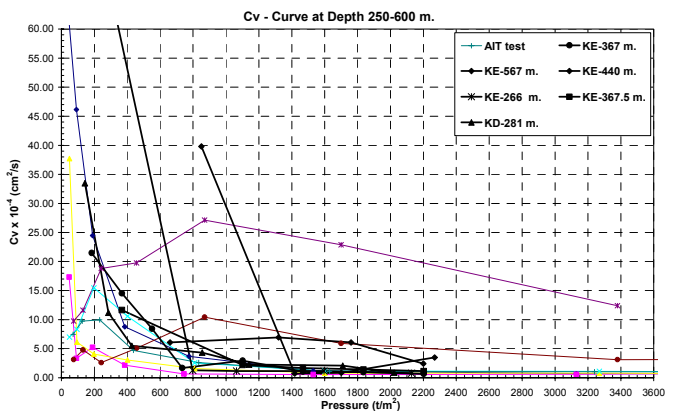
ตารางที่ 1 แสดงผลการทดสอบการยุบอัดตัวของดินเหนียวระดับลึกพบว่า ดินเหนียวระดับลึกจะมีค่า Compression Index (Cc) อยู่ในช่วง 0.1285 ถึง 0.2225 และมี Initial Void Ratio ( $e_0$ ) ที่มีแนวโน้มลดลงตามความลึก การเปรียบเทียบผลการทดสอบครั้งนี้กับผลการทดสอบของ AIT (พื้นที่แรง) เป็นดังภาพที่ 10 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ของค่า Cc มีค่าใกล้เคียงกัน

พฤติกรรมการรับแรงในอดีตสามารถศึกษาได้จากค่า Over Consolidation Ratio (OCR) สำหรับการทดสอบครั้งนี้ดินเหนียวระดับลึกจะมีค่า OCR อยู่ในช่วง 1 ถึง 2 ซึ่งหมายความว่า ดินเหนียวระดับลึกจัดเป็นดินเหนียวที่มีพฤติกรรมการรับแรงในแบบ Normally Consolidated Clay (NCC)

ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการทรุดตัว ( $C_v$ ) ที่สัมพันธ์กับหน่วยแรงกดที่ระดับความลึก 250 ถึง 600 เมตร แสดงไว้ในรูปที่ 12 โดยค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการทรุดตัวในช่วง NCC มีค่าระหว่าง 1 ถึง  $5 \times 10^{-4}$  cm<sup>2</sup>/sec



รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบครั้งนี้ กับ ผลทดสอบของ AIT ดินเหนียวความลึกมากกว่า 100 เมตร (e-log P' compression curve)



รูปที่ 12 แสดงสัมประสิทธิ์ของการอัตราการทรุดตัว ( $C_v$ ) ของดินเหนียวที่ระดับความลึก 250 ถึง 600 เมตร

## 5. สรุปผลการวิจัย

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ แสดงให้เห็นว่า ดินเหนียวในระดับลิกมีค่าความชื้นตามธรรมชาติต่ำ (น้อยกว่า 25 เปอร์เซ็นต์) โดยส่วนมากแล้วจะมีค่าต่ำกว่าค่า Plastic Limit ซึ่งแสดงว่าดินเหนียวอยู่ในสถานภาพกึ่งของแข็ง ค่า Liquid Limit, Plastic Limit, Shrinkage Limit และ Plastic Index มีค่าลดลงตามความลึก ชั้นดินเหนียวความลึกมากกว่า 100 เมตร สามารถจำแนกด้วยวิธี Unified Soil Classification System จัดเป็นพวก Low Plasticity Clay (CL)

ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านการยุบอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวระดับลิกพบว่าค่า Compression Index,  $C_c$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0.1285 ถึง 0.2225 ซึ่งค่อนข้างสูงสำหรับดินเหนียวที่อยู่ในระดับลิก และมี Initial Void Ratio ( $e_0$ ) ที่ลดลงตามความลึก ดินเหนียวระดับลิกจัดเป็นพวก NCC สัมประสิทธิ์ของอัตราการทรุดตัว ( $C_v$ ) ในช่วง NCC มีค่าต่ำมากอยู่ระหว่าง 1 ถึง  $5 \times 10^{-4}$   $\text{cm}^2/\text{sec}$  แสดงให้เห็นว่าการทรุดตัวของดินระดับลิกเมื่อมีแรงกระทำเพิ่มมากขึ้นจากการสูบน้ำบาดาลเกิดขึ้นอย่างช้ามาก

อย่างไรก็ตามยังต้องมีการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติด้านการยุบอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวระดับลิกต่อไป เพื่อประเมินค่าคุณสมบัติด้านการยุบอัดตัวคายน้ำได้อย่างใกล้เคียงเมื่อทราบถึงคุณสมบัติทางกายภาพ ผลการทดสอบคุณสมบัติการยุบอัดตัวคายน้ำที่ได้จะถูกนำไปใช้สร้างแบบจำลองเพื่อทำนายผลการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในอนาคต จากการสูบหรือหยุดสูบน้ำบาดาล อีกทั้งยังสามารถตรวจสอบผลของการทรุดตัวเนื่องจากน้ำบาดาลเปรียบเทียบกับผลจากการทรุดตัวของตัวอาคารเอง.

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ กรมทรัพยากรน้ำบาดาล กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ที่ให้ทุนสนับสนุนงานศึกษาโครงการศึกษาผลกระทบจากการแก้ไขปัญหาการใช้ น้ำบาดาลเกินปริมาณสมดุลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ต่อศูนย์วิจัยวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Asian Institute of Technology (AIT). 1981. Investigation of Land Subsidence Caused by Deep Well Pumping in Bangkok Area. Comprehensive Report 1978-1981. Submitted to National Environment Board, Bangkok. 166 p.
- [2] Head, K.H. 1986. Manual of Soil Laboratory Testing Vol 2. Pentech press Ltd., London. 413 p.
- [3] JICA, DMR and PWD. 1994. The Study on Management of Groundwater and Land Subsidence in the Bangkok Metropolitan Area and its Vicinity, Interim report, 3. Kokusai Kogyo Co.Ltd, Tokyo, Japan.
- [4] วจิ วัฒนรงค์ และสมคิด บัวเพ็ง. 1989. สถานการณ์น้ำบาดาลในปัจจุบันและแนวโน้มการใช้ น้ำบาดาลในอนาคตบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล. Workshop on Bangkok Land Subsidence-What's Next, Bangkok.
- [5] ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2543. รายงานหลักโครงการสำรวจศึกษาเพื่อการวางแผนหลักและกำหนดแนวคิดการออกแบบเบื้องต้น โครงการเติมน้ำลงชั้นน้ำบาดาลเพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อม. รายงานฉบับสมบูรณ์เล่ม 1.