



พฤติกรรม POST-SURCHARGE SECONDARY SETTLEMENT ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ :

กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 7

BEHAVIOR POST-SURCHARGE SECONDARY SETTLEMENT OF SOFT BANGKOK

CLAY : A CASE STUDY OF BANGKOK-CHONBURI HIGHWAY CONSTRUCTION

อรุณ ปราบมาก (Arun Prabmak)¹บารเมศ วรธนะภูติ (Barames Vardhanabhuti)²จutha สุนิตย์สกุล (Jutha Sunitsakul)³อรรถดิษฐ์ สวัสดิ์พานิช (Attasit Sawatparnich)⁴¹นิสิตปริญญาโท, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ prabmak_ar@hotmail.com²อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ fengbmv@ku.ac.th³วิศวกรโยธา สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง jutha@gmail.com⁴วิศวกรโยธา สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง attasit.doh@gmail.com

บทคัดย่อ : การก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 7 [กรุงเทพฯ-ชลบุรี (สายใหม่)] โดยใช้ Prefabricate Vertical Drain ร่วมกับการใช้เทคนิค Surcharge นั้นเป็นการเร่งการทรุดตัวของ Primary Settlement ให้หมดไปในระหว่างก่อสร้าง ถ้าค่า σ'_{vs} มีค่าใกล้เคียงกับค่า σ'_{vf} (R'_s ใกล้เคียงศูนย์) เมื่อเปิดใช้งานทำให้เกิดการทรุดตัวแบบ Secondary Settlement ตามมาอย่างรวดเร็ว จากการทดสอบ Oedometer Surcharging ในห้องปฏิบัติการที่ Effective Surcharge Ratio (R'_s) เท่ากับ 0-1.0 พบว่าอัตราระหว่าง C_α และ C_c ของดินเหนียวอ่อน กรุงเทพฯมีค่าเท่ากับ 0.044, c_{vs} มีค่าประมาณ 2-10 $m^2/year$, และเมื่อ R'_s มากขึ้น C''_α / C_α มีแนวโน้มน้อยลงและ t_v/t_{pr} มีแนวโน้มมากขึ้น ดังนั้นการเพิ่ม R'_s ในการก่อสร้างจะยืดระยะเวลาการทรุดตัวแบบ Secondary Settlement รวมทั้งลดอัตราการทรุดตัวในระยะยาวลงได้

ABSTRACT : The Prefabricated Vertical Drains (PVD) with surcharge loading technique was used to speed up primary consolidation process during construction of new Bangkok-Chonburi Highway (Motor way). If σ'_{vs} is near σ'_{vf} (or R'_s is closed to zero), the secondary settlement will show up few years after the highway construction. Series of oedometer surcharging test on undisturbed soft Bangkok Clay specimens with R'_s in the range of 0 to 1.0 revealed that C_α/C_c is equal to 0.044, and the c_{vs} value ranges from 2 to 10 $m^2/year$. As R'_s increase, the C''_α / C_α and t_v/t_{pr} values tends to decrease and increases, in respective order. Therefore, an increase in R'_s value could significantly reduce magnitude and rate of post-surcharge secondary settlement.

KEYWORDS : Surcharging, Effective surcharge ratio, Secondary settlement

1. บทนำ

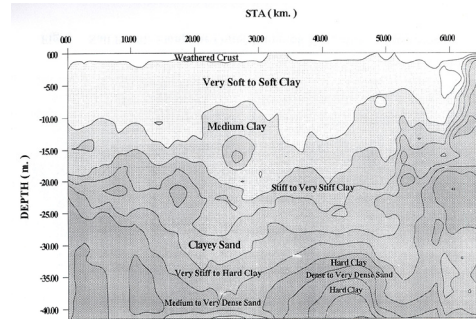
การก่อสร้างถนนบนดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ นั้นมักประสบปัญหาการทรุดตัวของถนนอย่างต่อเนื่อง ทำให้หน่วยงานที่รับผิดชอบ เช่น กรมทางหลวง ได้นำวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินมาแก้ปัญหา ได้แก่ การใช้ Soil-Cement Column, และ การใช้ Prefabricated Vertical Drain (PVD) ร่วมกับการใช้เทคนิค Surcharge เป็นต้น แต่ปัญหาการทรุดตัวของถนนในระยะยาวภายหลังจากเปิดใช้งานยังคงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง

การใช้ PVD ร่วมกับเทคนิค Surcharge นั้นเป็นการใช้น้ำหนักกดทับบนดินฐานรากในระหว่างการก่อสร้างให้มากกว่าน้ำหนักการใช้งาน หรือทำให้ดินอยู่ในสภาพ Overconsolidated ในช่วงของการใช้งาน นอกจากนี้ยังช่วยเร่งการระบายน้ำออกจากดินและลดเวลาก่อสร้าง ซึ่งวิธีนี้ได้ถูกนำไปใช้ในโครงการก่อสร้างต่างๆ เช่น Kansai International Airport (Japan), Changi East Reclamation Project (Singapore) สำหรับในประเทศไทย กรมทางหลวงได้นำเทคนิคนี้มาใช้ในการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 7 เป็นแห่งแรก และเปิดใช้งานเมื่อ พ.ศ. 2540 แต่พฤติกรรมทรุดตัวของดินหลังจากการทำ Surcharge ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ยังไม่เป็นที่ชัดเจน บทความนี้จึงได้มีการนำเสนอพฤติกรรมของ Post-Surcharge Secondary Settlement จากผลการทดสอบ Oedometer Surcharging ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ชนิดคงสภาพจำนวน 21 ตัวอย่าง และผลการทดสอบดินภาคสนาม ได้แก่ Standard Penetration Test (SPT), In-Situ Field Vane Shear Test [$S_{U(FV)}$], และการตรวจวัดแรงดันน้ำใต้ดินพร้อมทั้งสรุปค่าพารามิเตอร์และแนวทางที่ใช้ในการวิเคราะห์ Post-Surcharge Secondary Settlement ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

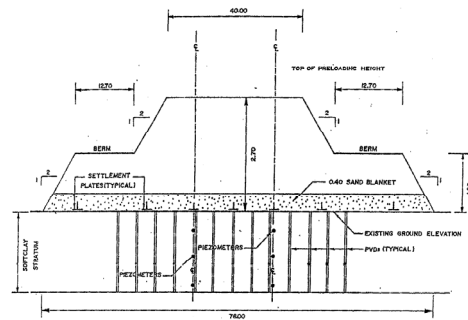
2. การปรับปรุงคุณภาพดินของโครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 7

ทางหลวงหมายเลข 7 มีจุดเริ่มต้นที่ถนนศรีนครินทร์และสิ้นสุดที่ถนนชลบุรี-พัทยาระยะทางยาวประมาณ 82 km เป็นถนน 4 ช่องจราจร ไหล่ทางกว้าง 2.5 m และมี Frontage Road ขนานไปกับถนนหลัก (Lin, 1999; ขงยุทธ เต๋สศิริ, 2545) เนื่องจากโครงการตั้งอยู่ในบริเวณที่มีดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมาก (Very Soft to Soft Clay) หนาประมาณ 11 m ดังแสดงในภาพที่ 1 ดังนั้นจึงมีการใช้ PVD ร่วมกับเทคนิค Surcharge โดยการ

ก่อสร้างมีการถมคันดินสูง 2.7 m กว้าง 40 m มีการถม Berm สูง 1.65 m กว้าง 12.7 m และติดตั้ง PVD ลึก 10 m (กิโลเมตรที่ 6+650) ดังภาพที่ 2



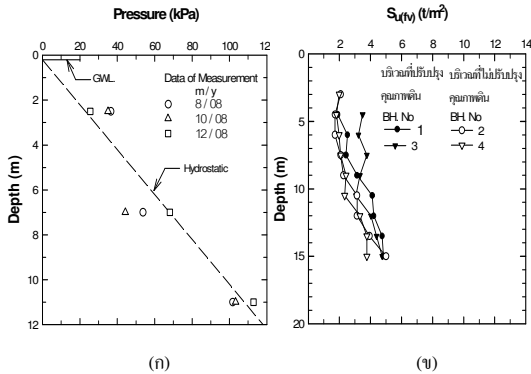
ภาพที่ 1 ลักษณะชั้นดินทางหลวงหมายเลข 7 (ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์, 2539)



ภาพที่ 2 รูปตัดการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 7 กิโลเมตรที่ 6+650 (ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์, 2539)

ภายหลังจากการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 7 และเปิดบริการเป็นเวลา 11 ปี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ร่วมกับสำนักวิเคราะห์และตรวจสอบกรมทางหลวง ได้ดำเนินการตรวจวัดแรงดันน้ำใต้ดินและค่า Undrain Shear Strength ของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ บริเวณกิโลเมตรที่ 6+650 ถึง 21+175 ดังแสดงในภาพที่ 3 ผลการวิเคราะห์ค่าแรงดันน้ำใต้ดินจาก Electronic Piezometer (KU-type) และ Observation Well ติดตั้งห่างจากไหล่ทางประมาณ 3 m พบว่าระดับน้ำใต้ดิน (GWL) อยู่ที่ -0.20 m จากผิวดิน และมีสถานะ Hydrostatic ผลการวิเคราะห์ค่า Undrain Shear Strength โดย In-Situ Field Vane Shear Test [$S_{U(FV)}$] ของชั้นดินเหนียวอ่อนตรวจวัด ณ บริเวณไหล่ทางและเปรียบเทียบกับค่า $S_{U(FV)}$ ของตรวจวัดห่างจากไหล่ทางประมาณ 100 m พบว่าค่า $S_{U(FV)}$ ของ

ดินเหนียวอ่อนบริเวณไหล่ทางซึ่งมีการปรับปรุงคุณภาพดินมีค่าสูงกว่า $S_{U(FV)}$ ของดินเหนียวอ่อนบริเวณนอกไหล่ทางที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพดินประมาณ 1.17 เท่า (บารเมศ วรรณะภูติ และคณะ, 2551)



ภาพที่ 3 (ก) ผลการตรวจวัดแรงดันน้ำใต้ดินกิโลเมตรที่ 6+650 ที่ระดับความลึก 2.5, 7, และ 11 m และ (ข) $S_{U(FV)}$ ของหลุมเจาะสำรวจดินที่ 1-4 (ข้อมูล $S_{U(FV)}$ จากสำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ, 2550)

3. ประสิทธิภาพการทำ Surcharge

เทคนิค Surcharge สามารถแสดงในรูปของ Total Surcharge Ratio (R_s) และ Surcharge Time Ratio ดังสมการที่ 1 และ 2

$$R_s = \left(\frac{\sigma'_{vs}}{\sigma'_{vf}} \right) - 1 \quad (1)$$

$$\text{Surcharge Time Ratio} = \frac{t'_s}{t'_{ps}} \quad (2)$$

เมื่อ

$$\sigma_{vs} = \sigma'_{vf} + \Delta\sigma_{vs}$$

σ'_{vf} = Final Effective Vertical Stress ภายหลังจากการเอา

Surcharge ออก

$\Delta\sigma_{vs}$ = Total Surcharge Pressure

t'_s = เวลาที่ทำให้ Surcharge

t'_{ps} = เวลาที่จุด End-Of-Primary (EOP) ภายใต้อการทำให้ Surcharge

นอกจากค่า R_s แล้วประสิทธิภาพของการทำ Surcharge อาจสามารถแสดงโดยค่า Effective Surcharge Ratio (R'_s) ดังสมการที่ 3 (Mesri and Feng, 1991)

$$R'_s = \left(\frac{\sigma'_{vs}}{\sigma'_{vf}} \right) - 1 \quad (3)$$

σ'_{vs} = ค่า Effective Vertical Stress สูงสุดก่อนการนำ Surcharge ออก

4. การทดสอบ Oedometer Surcharging

คณะวิจัยได้รับความอนุเคราะห์จาก สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง ในการเจาะสำรวจและเก็บตัวอย่างดินคงสภาพ (Undisturbed Sample) ในบริเวณโครงการทางหลวงหมายเลข 7 จำนวนทั้งสิ้น 6 หลุม บริเวณกิโลเมตรที่ 6+650, 21+675, และ 46+175 ตัวอย่างผลการเจาะสำรวจและทดสอบ SPT กับ $S_{U(FV)}$ แสดงในภาพที่ 4 ผลการทดสอบหาค่าดัชนีทางวิศวกรรม (Engineering Index) ในห้องปฏิบัติการสำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนมาก (2.0-9.0 m) พบว่าค่า Natural Water Content (w_n) เท่ากับ 90-110 %, Liquid Limit (w_l) เท่ากับ 100-115 %, Plastic Limit (w_p) เท่ากับ 35-45 % และในชั้นดินเหนียวอ่อน (10-18 m) พบว่าค่า w_n เท่ากับ 60-80 %, w_l เท่ากับ 60-75 %, w_p เท่ากับ 20-30 % ตามลำดับ สำหรับค่า Specific Gravity (G_s) ของชั้นดินเหนียวอ่อนมากและชั้นดินเหนียวอ่อน มีค่าประมาณ 2.66

ดินตัวอย่างจากชั้นดินเหนียวอ่อนมากที่ความลึก 7.5-9.0 m ถูกนำมาทดสอบ Oedometer Surcharging ในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาพฤติกรรม Post-Surcharge Secondary Settlement, สมบัติการยุบตัวในช่วง Primary Settlement, และ Secondary Settlement ได้แก่ Compression Index (C_c), Secondary Compression Index (C_{cs}) Coefficient of Consolidation (c_v), Coefficient of Expansion (c_{vs}) เป็นต้น ขนาดดินตัวอย่างที่ใช้ทดสอบมีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 60 mm และสูง 19 mm สำหรับโปรแกรมการทดสอบประกอบด้วย 2 โปรแกรม ดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2

โปรแกรมทดสอบที่ 1 : ดินตัวอย่างที่ 1 และ 2 ถูกกดด้วยหน่วยแรงสูงสุด (σ'_{vf}) เท่ากับ 796 และ 771 kPa ตามมาตรฐาน ASTM 2435 มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติการยุบตัวในช่วง Primary Settlement และดินตัวอย่างที่ 3 ถูกกดด้วยหน่วยแรงสูงสุด (σ'_{vf}) เท่ากับ 95 kPa โดยค้าง σ'_{vf} ไว้ประมาณ 3 เดือน (500 เท่าของ c_p) มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทรุดตัว

ในช่วง Secondary Settlement ในกรณีที่ไม่มีการใช้เทคนิค Surcharge ($R'_s = 0$)

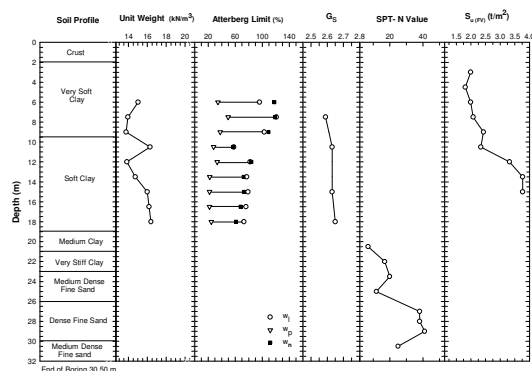
โปรแกรมทดสอบที่ 2 : ดินตัวอย่างถูกหน่วยแรงเนื่องจาก Surcharge (σ'_{vs}) เท่ากับ 102-306 kPa จนถึงสิ้นสุด EOP หลังจากนั้นนำน้ำหนักออกจนมีค่า σ'_{vf} เท่ากับ 85-255 kPa มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทรุดภายหลังจากการทำ Surcharge ที่ $R'_s = 0.2-1.0$

ตารางที่ 1 โปรแกรมการทดสอบที่ 1

R'_s	ความลึก (m)	σ'_{vf} (kPa)	ปริมาณการทดสอบ
0	7.5 - 8.1	796	1
0	7.5 - 8.1	771	1
0	7.5 - 8.1	95	1

ตารางที่ 2 โปรแกรมการทดสอบที่ 2

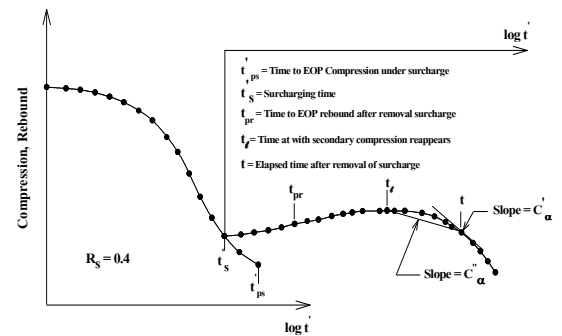
R'_s	ความลึก (m)	σ'_{vf} (kPa)	σ'_{vs} (kPa)	ปริมาณการทดสอบ
0.2	7.5 - 9.6	85	102	3
	3.0-3.6	170	204	1
	3.0-3.6	255	306	1
0.3	7.5 - 9.6	85	111	1
	7.5 - 9.6	85	119	3
0.6	7.5 - 9.6	85	136	3
	7.5 - 9.6	85	153	3
1.0	7.5 - 9.6	85	170	3



ภาพที่ 4 ตัวอย่างผลการผลการเจาะสำรวจดินและค่า Engineering Index จากหลุมเจาะ BH 4 (บารเมศ วรรณระภูติ และคณะ, 2551)

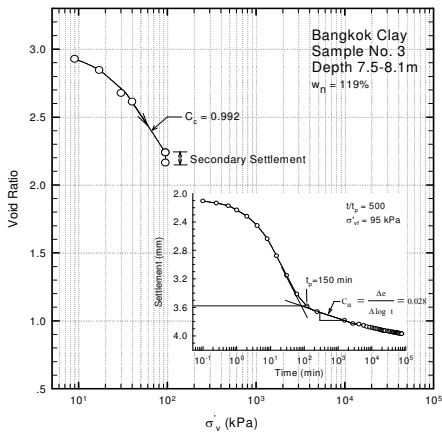
5. พฤติกรรม Post-Surcharge Secondary Settlement

พฤติกรรม Post-Surcharge Secondary Settlement แสดงโดยภาพที่ 5 เมื่อมีการทำ Surcharge ทำให้ดินมีการทรุดตัวจนกระทั่งถึง t'_s จากนั้นมีการเอา Surcharge บางส่วนออก ดินมีอัตราการบวมตัวเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งถึง t'_{pr} และอัตราการบวมตัวของดินมีค่าลดลงจนหยุดนิ่งซึ่งเป็นการบวมตัวที่สูงสุดเมื่อถึง t'_r จากนั้นดินเริ่มปรากฏการทรุดตัวอีกครั้งโดยอัตราการทรุดตัวค่อยๆเพิ่มขึ้นเรื่อยๆนับจาก t'_r ไปจนกระทั่งมีอัตราการทรุดตัวคงที่เมื่อระยะเวลาผ่านไป การทรุดตัวจากการทำ Post-Surcharge Secondary Settlement แสดงโดยค่า Post-Surcharge Secondary Compression Index (C'_α) ซึ่งมีค่าน้อยและค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ค่า C'_α สามารถหาได้จาก Slope ณ เวลาที่ต้องการ (t) หรือแสดงโดยค่า C''_α สามารถหาได้จากเวลาที่เริ่มปรากฏการทรุดตัวภายหลังจากการทำ Surcharge (t'_s) ไปจนกระทั่งถึงเวลาที่ต้องการ (t)



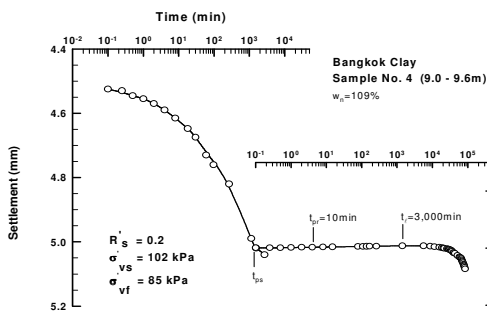
ภาพที่ 5 พฤติกรรม Post-Surcharge Secondary Settlement (Mesri and Feng, 1991)

ภาพที่ 6 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบ Oedometer โดยโปรแกรมที่ 1 (กรณี $R'_s = 0$) ดินตัวอย่างที่มีความลึก 7.5-8.1 m มีค่า In Situ Effective Vertical Stress (σ'_{vo}) เท่ากับ 33 kPa ถูกเพิ่มน้ำหนักกดทับ ($\Delta\sigma'_{vs}$) เท่ากับ 62 kPa และ σ'_{vf} เท่ากับ 95 kPa (σ'_{vf} ประมาณเท่ากับความสูงของดินทางและน้ำหนักบรรทุก) ทำให้ดินมีการทรุดตัวเนื่องจาก Primary Settlement เท่ากับ 3.5 mm และมีค่า $t_p = 150$ นาที เมื่อ $t = 500t_p$ ดินยังคงมีการทรุดตัวอย่างต่อเนื่องจาก Secondary Settlement

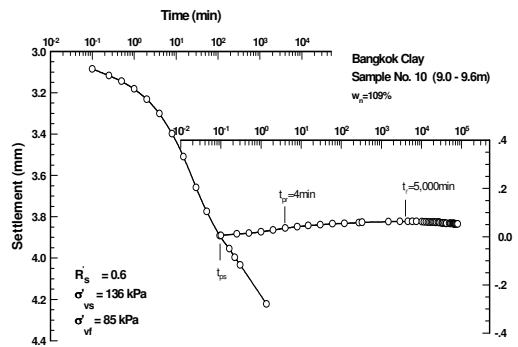


ภาพที่ 6 พฤติกรรมการทรุดตัวของดินเมื่อไม่มีการทำ R'_s (บาร์เมส วรธนะภูติ และคณะ, 2551)

ภาพที่ 7 และ 8 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบ Oedometer Surcharging โดยโปรแกรมที่ 2 มีค่า $R'_s = 0.2$ และ 0.6 ตามลำดับ สำหรับกรณี $R'_s = 0.2$ (ภาพที่ 7) ดินตัวอย่างถูกเพิ่มน้ำหนัก (σ'_{vs}) เท่ากับ 102 kPa (เท่ากับความสูงของคันทาง 3.24 m) ค่า $t_{ps} = 1,300$ นาที และเมื่อน้ำหนักออกจนเหลือ 85 kPa (ประมาณเท่ากับความสูงของคันทาง 2.7 m) ดินมีการบวมตัวโดยที่ค่า $t_{pr} = 10$ นาที และเมื่อเวลา $t_r = 3,000$ นาที ดินเริ่มมีการทรุดตัวอีกครั้งเนื่องจาก Post-Surcharge Secondary Settlement โดยค่า C'_α มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น สำหรับกรณี $R'_s = 0.6$ (ภาพที่ 8) ดินถูกเพิ่มน้ำหนัก (σ'_{vs}) เท่ากับ 136 kPa (ประมาณเท่ากับความสูงของคันทาง 4.32 m) ค่า $t_{ps} = 90$ นาที และเมื่อน้ำหนักออกจนเหลือ 85 kPa ดินมีการบวมตัวโดยที่ค่า $t_r = 4$ นาที และเมื่อเวลา $t_r = 5,000$ นาที ดินมีการทรุดตัวอีกครั้งแต่มีอัตราการทรุดตัว (C'_α) น้อยกว่าที่ $R'_s = 0.2$



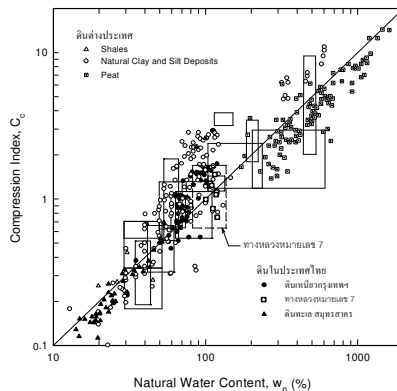
ภาพที่ 7 พฤติกรรมการทรุดตัวของดินเมื่อมีการทำ R'_s เท่ากับ 0.2 (บาร์เมส วรธนะภูติ และคณะ, 2551)



ภาพที่ 8 พฤติกรรมการทรุดตัวของดินเมื่อมีการทำ R'_s เท่ากับ 0.6 (บาร์เมส วรธนะภูติ และคณะ, 2551)

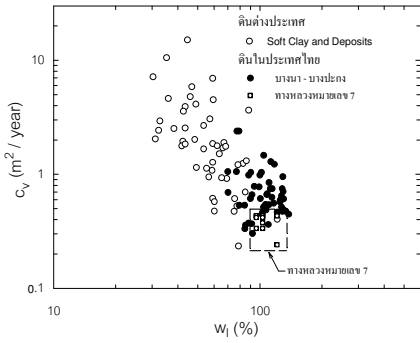
สมบัติการยุบตัวต่างๆของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯที่ทำการทดสอบนั้นแสดงโดยภาพที่ 9-11 ซึ่งได้มีการเปรียบเทียบกับสมบัติของดินเหนียวต่างประเทศดังต่อไปนี้

ภาพที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ของค่า C_c กับ w_n ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯกับดินเหนียวต่างประเทศ, Peat, และ Shale พบว่ามีค่า C_c ประมาณ $0.7-1.5$



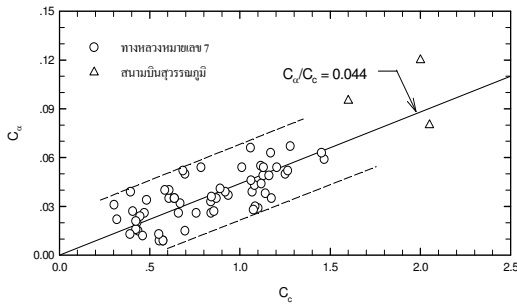
ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง C_c และ w_n (ข้อมูลดินต่างประเทศจาก Terzaghi et al., 1996)

ภาพที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ของ c_v กับ w_i ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯกับดินเหนียวต่างประเทศ พบว่าดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯมีค่า c_v ประมาณ $0.2-0.5 \text{ m}^2/\text{year}$ อยู่ในขอบเขตล่างเมื่อเปรียบเทียบกับดินเหนียวต่างประเทศที่มีค่าประมาณ $0.3-10 \text{ m}^2/\text{year}$



ภาพที่ 10 ค่า c_v กับ w_l (ข้อมูลดินต่างประเทศจาก Terzaghi et al., 1996)

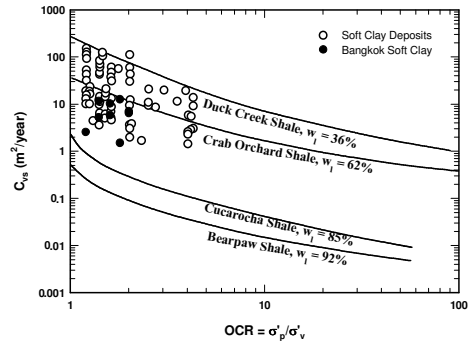
ความสัมพันธ์ระหว่าง C_α กับ C_c เท่ากับ 0.044 ดังแสดงในภาพที่ 11 ซึ่งสอดคล้องกับ Terzaghi et al. (1996) ที่ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง C_α กับ C_c ของดินเหนียวประเภท Inorganic Clay มีค่าเท่ากับ 0.04 ± 0.01



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่าง C_α กับ C_c

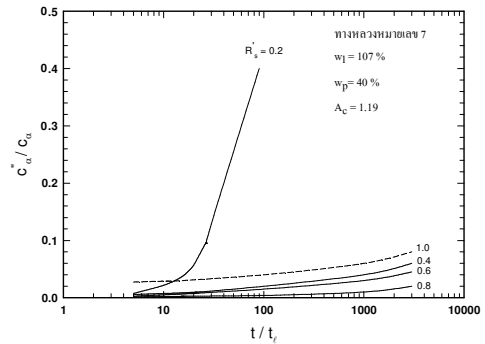
สมบัติการยุบตัวภายหลังจากการทำ Surcharge ที่สำคัญได้แก่ค่า t/t_{pr} , c_{vs} , และ C''_α/C_α ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง t/t_{pr} กับ R'_s พบว่า t/t_{pr} มีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการทำ R'_s ที่มากขึ้นและค่า t/t_{pr} ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯสูงกว่าดินต่างประเทศประมาณ 30 เท่า เนื่องจาก t_c ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯที่ทำการทดสอบมีค่าสูง ซึ่งกำลังดำเนินการทดสอบและศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

ภาพที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง c_{vs} กับ Over Consolidation Ratio (OCR) ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯกับดินเหนียวต่างประเทศและ Shale พบว่า c_{vs} มีค่าประมาณ 2-10 $m^2/year$ อยู่ในขอบเขตล่างของดินต่างประเทศที่มีค่าประมาณ 2-200 $m^2/year$



ภาพที่ 12 ค่า c_{vs} กับ OCR (ข้อมูลดินต่างประเทศจาก Terzaghi et al., 1996)

ภาพที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C''_α/C_α กับ t/t_{pr} ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯพบว่า C''_α/C_α มีค่าน้อยลงเมื่อค่า R'_s มากขึ้น [แต่การทดสอบที่ $R'_s = 1.0$ นั้นเกิดการหักโค้งลงมาอย่างมากหลังจากมีการบวมตัวสูงสุด (ใกล้ t_c) จึงทำให้มีค่าสูงกว่าที่ $R'_s = 0.4$ ถึง 0.8 ซึ่งกำลังดำเนินการทดสอบเพิ่มเติม]



ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่าง C''_α/C_α กับ t/t_{pr} (บรรณสารธรณี และคณะ, 2551)

แนวทางการวิเคราะห์การทรุดตัวของดินในกรณีที่มีการทำ Surcharge นั้น Mestri and Feng (1991) แนะนำว่าควรใช้ค่า Secant Secondary Compression Index (C''_α) เนื่องจากค่า C''_α ไม่คงที่กับเวลา นอกจากนี้ยังสามารถหาค่า C''_α ได้จากความสัมพันธ์ของ C''_α/C_α กับ t/t_{pr} และได้เสนอสมการที่ใช้ในการคำนวณการทรุดตัวภายหลังจากการทำ Surcharge ดังสมการที่ 4

$$S = \frac{C''}{1 + e_0} L_0 \log \frac{t}{t_t} \quad (4)$$

เมื่อ

e_0 = Initial Void Ratio

L_0 = ความหนาของชั้นดินเริ่มต้น

6. สรุปผลการศึกษา

ผลการศึกษาพฤติกรรมการทรุดตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยการทดสอบ Oedometer Surcharging จากจำนวนดินตัวอย่าง 21 ตัวอย่าง บริเวณทางหลวงหมายเลข 7 พบว่าในกรณีไม่มีการปรับปรุงคุณภาพดิน ($R'_s = 0$) ดินเหนียวจะมีปริมาณการทรุดตัวสูงเนื่องจาก Primary Settlement และตามด้วย Secondary Settlement โดยมีค่า C_c , c_v , และ C_α/C_c เท่ากับ 0.7-1.5, 0.2-0.5 $m^2/year$, และ 0.044 ตามลำดับ

สำหรับกรณีที่มีการปรับปรุงคุณภาพดินโดยเทคนิค Surcharge นั้นพบว่าภายหลังจากการทำ Surcharge ดินมีการบวมตัว โดยมีค่า c_{vs} เท่ากับ 2-10 $m^2/year$ และเมื่อถึงเวลา t_t ดินจะมีการทรุดตัวเนื่องจาก Post Surcharge Secondary Settlement และ C''_α/C_α มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อ t/t_t มากขึ้น การทำ Surcharge ที่ $R'_s \geq 0.4$ มีประสิทธิภาพช่วยลดการทรุดตัวเนื่องจาก Secondary Settlement ได้ดี เนื่องจาก C''_α/C_α มีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ การทำ Surcharge ที่ R'_s ต่ำกว่า 0.4

7. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนด้วยดีจากกรมทางหลวงและภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ทั้งเงินทุนการทำวิจัย และการเจาะสำรวจเพื่อเก็บตัวอย่างดินมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] ชีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ (2535). การใช้ Prefabricated vertical Drain (PVD) ในถนนสายกรุงเทพฯ-ชลบุรี สายใหม่. การประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2539, สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ กรมทางหลวง หน้า 118-144
- [2] บารเมศ วรธนะภูติ, ลลนา คงสุขประเสริฐ, และ อรุณ ปราบมาก .2551. โครงการศึกษาการลดการทรุดตัวของถนนบนดินเหนียวอ่อน กรุงเทพฯ โดยวิธี Surcharging. รายงานฉบับสมบูรณ์ สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง, หน้า 73-81

- [3] ชงยุทธ แต้ศิริ และ ดวงดา สันสนีย์เมธา ,2545. การศึกษาพฤติกรรมการทรุดตัวของถนนกรุงเทพฯ-ชลบุรี สายใหม่ (ตอน 2-A/2). ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง, หน้า 4-9
- [4] สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ 2550. รายงานผลการเจาะสำรวจฐานรากทางหลวงหมายเลข 7 โครงการสายกรุงเทพฯ-ชลบุรี กม. 6+650-46+775. กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม
- [5] Lin, P. (1999). *Final report of ground improvement work for reconstruction supervision of bangkok-chonburi new highway project*, Department of Highway, Volume 1-3.
- [6] Mesri, G and T. W. Feng (1991). *Surcharging to reduce secondary settlement*, 359-363.
- [7] Terzaghi, K., Peck, R.B., and Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice*, 3rd, John Wiley & Sans, Inc., 549.