

สัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคาน้ำในแนวราบและแนวรัศมีของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ

COEFFICIENT OF HORIZONTAL AND RADIAL CONSOLIDATION OF SOFT BANGKOK CLAY

ไทรภพ คนชม (Tribhop Khonchom)

นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรโยธา 4 สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง tribhop@hotmail.com

ก่อโชค จันทวารงกูร (Korchoke Chantawarangul)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ fengccc@ku.ac.th

บทคัดย่อ : การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพด้วยระบบ Sand Drain (SD) หรือ Prefabricated Vertical Drain (PVD) เพื่อเร่งการทรุดตัวในระหว่างการก่อสร้างนั้น จำเป็นต้องใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคาน้ำในลักษณะเดียวกับสภาพความเป็นจริง แต่การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคาน้ำมักจะทำการทดสอบในแนวตั้ง ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคาน้ำซึ่งได้จากการทดสอบตัวอย่างในแนวราบ และแนวรัศมี และแนวรัศมีร่วมกับแนวตั้ง เปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคาน้ำในแนวตั้ง ผลการวิจัยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคาน้ำในแนวราบมากกว่าแนวตั้งอยู่ระหว่าง 1-1.5 เท่า และแนวรัศมีมากกว่าแนวตั้งอยู่ระหว่าง 4-12 เท่า และแนวรัศมีร่วมกับแนวตั้งมากกว่าแนวตั้งอยู่ระหว่าง 12-44 เท่า เนื่องจากทิศทางของแรงกระทำและทิศทางของการระบายน้ำมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคาน้ำ และจากการศึกษาพฤติกรรมทรุดตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพเมื่อปรับปรุงด้วยระบบ PVD พบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ย้อนกลับโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคาน้ำในแนวรัศมีสอดคล้องกับพฤติกรรมทรุดตัวในสนาม

ABSTRACT : In the process of improving the quality of soft Bangkok clay by using the Sand Drain (SD) or Prefabricated Vertical Drain (PVD) to accelerate the settlement during construction, it requires the use of coefficient of consolidation which is close to actual condition. Normally, coefficient of consolidation is identified by vertical specimen test. This study compared the values of coefficient of consolidation obtained by using horizontal, radial, a combination of radial and vertical methods with the values identified by the conventional vertical method. It was found that the value of coefficient of horizontal consolidation is 1-1.5 times higher than that of the vertical; the value obtained from radial method is 4-12 times higher than that of the vertical, while the result of the combination method (radial and vertical) yields the value which is 12-44 times higher than that of the vertical. It is concluded that loading direction and drainage direction are factors dictating the variation in the values obtained from these different testing methods. Also, from the back analysis study of soft Bangkok clay when using PVD for settlement acceleration, the use of coefficient of radial consolidation is in line with the field performance.

KEYWORDS : CONSOLIDATION, PERMEABILITY, ANISOTROPY, SOFTCLAY

1. บทนำ

ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพเกิดในพื้นที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่างของประเทศไทย ครอบคลุมพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ความหนาของชั้นดินประมาณ 10 – 15 เมตร มีคุณสมบัติในการยุบตัวสูง ความสามารถในการซึมน้ำต่ำ ทำให้การทรุดตัวเกิดขึ้นมากและใช้เวลายาวนาน

การก่อสร้างถนนบนดินเหนียวอ่อนกรุงเทพในระยะแรกไม่มีการปรับปรุงดินฐานรากแต่อย่างใด เช่นสายบางนา – บางปะกง ประมาณ กม. 28 – 30 ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมาเกิดการทรุดตัวมากกว่า 2 เมตร (Bergado et al., 1990) ทำให้เสียทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการยกระดับถนนภายหลังการก่อสร้างอยู่หลายครั้ง

ต่อมากรมทางหลวงได้นำเทคนิคการปรับปรุงดินฐานรากโดยวิธีเร่งการระบายน้ำออกจากชั้นดินเหนียวอ่อนมาใช้กับโครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษ กรุงเทพฯ – ชลบุรี (สายใหม่) เป็นโครงการแรก ทำให้การทรุดตัวของดินฐานรากในขณะที่ก่อสร้างรวดเร็วยิ่งขึ้น แต่จากการศึกษาผลการคาดคะเนปริมาณการทรุดตัวและอัตราการทรุดตัวก่อนการก่อสร้างพบว่าแตกต่างจากที่วัดได้ในสนามมาก ทั้งนี้เนื่องจากสาเหตุหลัก 2 ประการ คือ ทฤษฎีและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การทรุดตัว

ปัจจุบันทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์การทรุดตัวได้รับการพัฒนาไปมากจนใกล้เคียงกับพฤติกรรมทรุดตัวในสนาม แต่พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ยังไม่ได้รับการพัฒนาเท่าที่ควร บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการทดสอบและการหาค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมทรุดตัวในสนาม โดยการทดสอบการอัดตัวคายน้ำในแนวราบ แนวตั้ง และแนวตั้งร่วมกับแนวตั้ง ซึ่งผลการวิจัยจะทำให้การวิเคราะห์การทรุดตัวแม่นยำยิ่งขึ้น

สัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำเป็นพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวของดิน ซึ่งพารามิเตอร์นี้เป็นค่าสัมประสิทธิ์ประกอบรวมของค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดิน และสัมประสิทธิ์การยุบตัวของดิน โดยปกติจะหาจากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างในแนวตั้ง c_v เท่ากับ $k_v(1+e)/a_v\gamma_w$

ในกรณีที่ดินมีลักษณะแอนไอโซโทรปิก ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำด้านแนวราบ c_h จะเท่ากับ $k_h/(1+e)/a_h\gamma_w$ ซึ่งได้จากการทดสอบดินตัวอย่างในแนวราบ และค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำในแนวตั้งเมื่อมีแรงกระทำในแนวตั้ง c_v จะเท่ากับ $k_v(1+e)/a_v\gamma_w$

2. วิธีการวิจัย

การวิจัยนี้ได้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำในแนวตั้ง แนวราบ แนวตั้ง และแนวตั้งร่วมกับแนวตั้ง จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำตามมาตรฐาน ASTM D 2435-65T และเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ย้อนกลับ โครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษ กรุงเทพฯ – ชลบุรี (สายใหม่)

2.1 ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบ

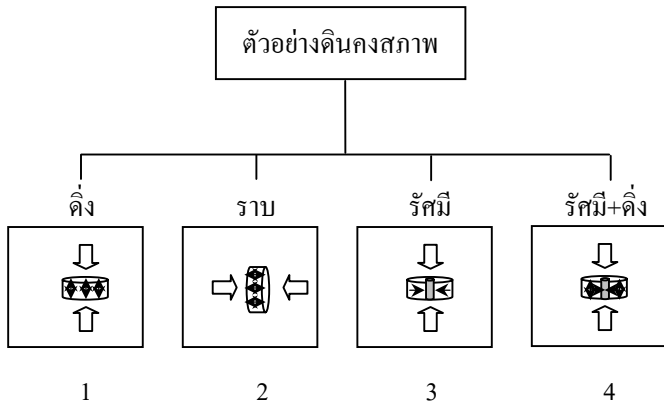
ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบเป็นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพคงสภาพ ซึ่งได้จากการเจาะสำรวจแบบชนิดล้าง และเก็บตัวอย่างด้วยกระบอกเปลือกบางขนาด 2.5 นิ้ว ที่ระดับความลึก 6.50 เมตร

2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

ในการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบ่งตัวอย่างออกเป็น 4 ตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างที่ 1 ทดสอบการอัดตัวคายน้ำในแนวตั้ง ตัวอย่างที่ 2 ทดสอบการอัดตัวคายน้ำในแนวราบ ตัวอย่างที่ 3 ทดสอบการอัดตัวคายน้ำในแนวตั้ง และตัวอย่างที่ 4 ทดสอบการอัดตัวคายน้ำในแนวตั้งร่วมกับแนวตั้ง

การเตรียม Pipe Drain ใช้ใยสังเคราะห์ในก้นกรองบุหรีเนื่องจากมีการระบายน้ำได้ดีและมีการขยายตัวด้านข้างน้อย และมีความสามารถในการซึมน้ำสูงกว่าดินที่อยู่รอบๆมาก

การบังคับการไหลในแนวตั้งทำโดยใช้แผ่นพลาสติกใสที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับแผ่นหินปูนเจาะรูตรงกลางขนาดเท่ากับ Pipe Drain ติดตั้งระหว่างตัวอย่างดินกับแผ่นหินปูน



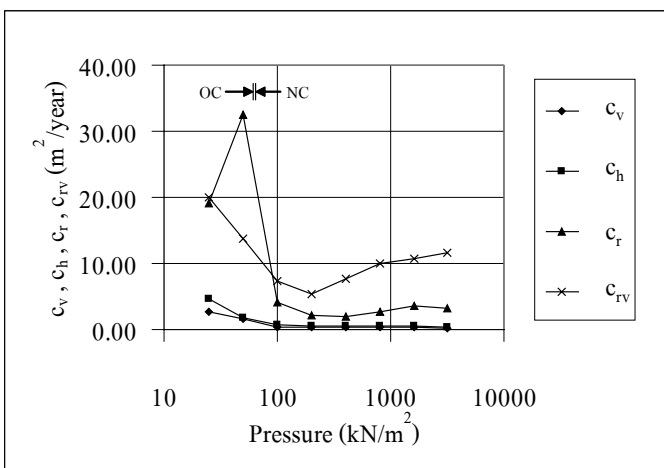
รูปที่ 1 แผนภูมิการเตรียมตัวอย่างทดสอบการอัดตัวคายน้ำ

3. ผลและการวิจารณ์

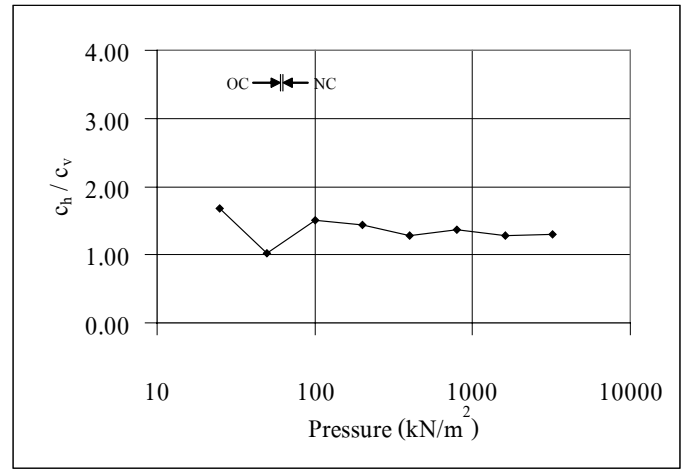
จากผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ สามารถเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำในแนวต่างๆ ได้ดังนี้

3.1 สัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำในแนวตั้งและแนวราบ

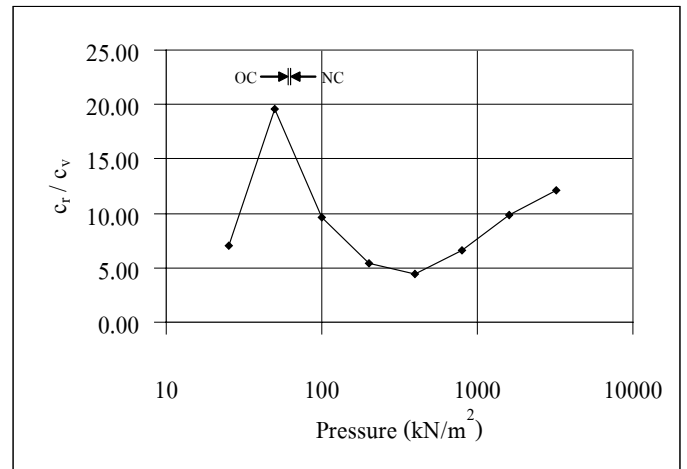
จากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าค่า c_h มากกว่าค่า c_v อยู่ระหว่าง 1-1.5 เท่า เนื่องจากโครงสร้างของดินในแนวราบยอมให้น้ำไหลผ่านได้ดีกว่าโครงสร้างของดินในแนวตั้ง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ อรรถสิทธิ์ และคณะ (2545) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำของดินในแนวราบมีค่าสูงกว่าแนวตั้งประมาณ 1.10-2.50 เท่า



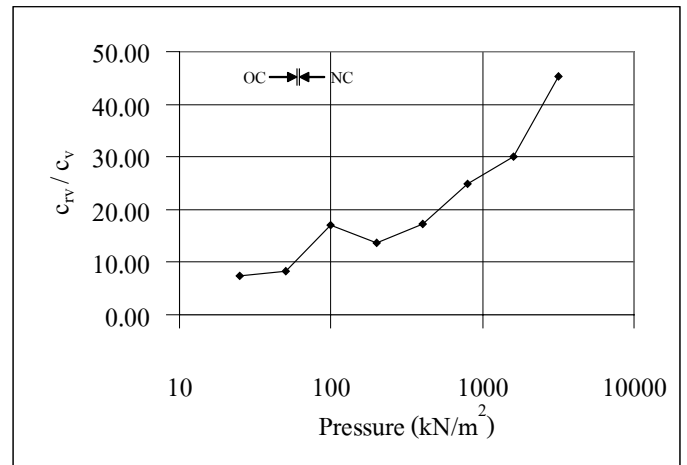
รูปที่ 2 การเปรียบเทียบค่า c_v , c_h , c_r , c_{rv}



รูปที่ 3 อัตราส่วน c_h / c_v



รูปที่ 4 อัตราส่วน c_r / c_v



รูปที่ 5 อัตราส่วน c_{rv} / c_v

3.2 สัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ในแนวรัศมี

Barron (1948) ได้เสนอสมการเชิงอนุพันธ์ในการแก้ปัญหาการอัดตัวคายน้ของดินรูปทรงกระบอกที่ติดตั้ง pipe drain ตรงกลาง ดังสมการที่ 1

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_r \left[\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right] \quad (1)$$

เมื่อ u คือแรงดันน้ำส่วนเกินที่เวลาใดๆ r คือระยะทางในแนวรัศมีจากจุดศูนย์กลางของ Pipe Drain t คือเวลาใดๆ และ c_r คือสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ในแนวรัศมี และ Hansbo (1979) ได้แก้สมการเชิงอนุพันธ์ได้สมการดังต่อไปนี้

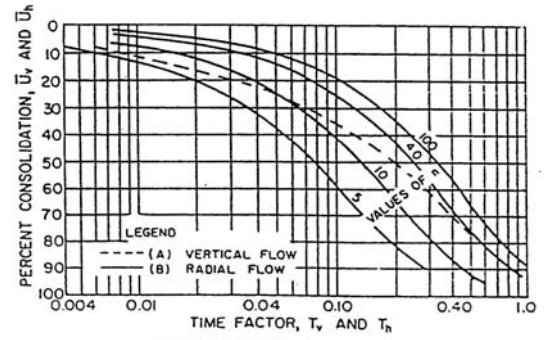
$$U_r = 1 - \exp\left[\frac{-8T_r}{F_n}\right] \quad (2)$$

$$T_r = \frac{c_r t}{D_e^2} \quad (3)$$

$$F_n = \left[\frac{n^2}{n^2 - 1} \right] \left[\ln(n) - \frac{3}{4} + \frac{1}{n^2} \right] \quad (4)$$

$$n = \frac{D_e}{d_w} \quad (5)$$

เมื่อ U_r คือเปอร์เซ็นต์การอัดตัวคายน้ในแนวรัศมี T_r คือค่าคงที่ของเวลาในแนวรัศมี D_e เส้นผ่าศูนย์กลางของดินรูปทรงกระบอก d_w เส้นผ่าศูนย์กลางของ Pipe Drain ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง U_r และ T_r ขึ้นอยู่กับค่า n ดังแสดงในรูปที่ 6 สำหรับการวิจัยนี้ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 ซม. และ Pipe Drain มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.75 ซม. ดังนั้น n มีค่าเท่ากับ 6.67



LEGEND
 (A) VERTICAL FLOW
 (B) RADIAL FLOW
 VALUES OF n
 AVERAGE CONSOLIDATION RATES
 (A) FOR VERTICAL FLOW IN A CLAY STRATUM OF THICKNESS H DRAINED ON BOTH UPPER AND LOWER SURFACES
 (B) FOR RADIAL FLOW TO AXIAL DRAIN WELLS IN CLAY CYLINDERS HAVING VARIOUS VALUES OF n

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง T กับ U

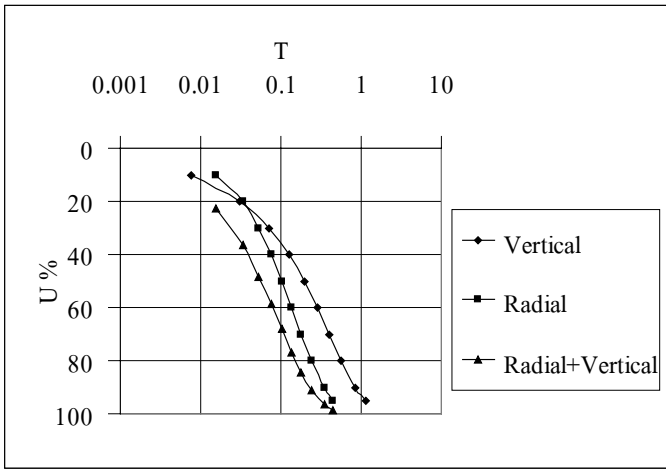
จากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าอัตราส่วน c_r/c_v มีค่าอยู่ระหว่าง 4-12 เท่า เนื่องจากขุมตัวของดินในกระบวนการอัดตัวคายน้ในแนวรัศมีลักษณะโครงสร้างดินในแนวราบยอมให้น้ำไหลผ่านได้ดีกว่าในกระบวนการอัดตัวคายน้ในแนวตั้ง

3.3 สัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ในแนวรัศมีร่วมกับแนวตั้ง

Carillo (1942) ได้เสนอความสัมพันธ์สำหรับการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากการอัดตัวคายน้ในแนวรัศมีร่วมกับแนวตั้งดังนี้

$$U_{av} = 1 - (1 - U_r)(1 - U_v) \quad (6)$$

เมื่อ U_{av} คือเปอร์เซ็นต์การอัดตัวคายน้เฉลี่ย U_r คือเปอร์เซ็นต์การอัดตัวคายน้ในแนวรัศมี และ U_v คือเปอร์เซ็นต์การอัดตัวคายน้ในแนวตั้ง การวิจัยนี้สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง $U(\%)$ และ T ได้ดังแสดงในรูปที่ 7



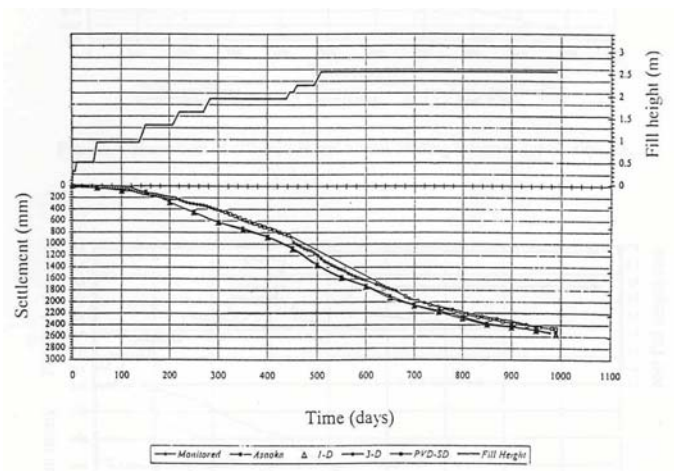
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $U(\%)$ และ T เมื่อ $n = 6.67$

จากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าอัตราส่วน c_r/c_v มีค่าอยู่ระหว่าง 12-44 เท่า เนื่องจากการระบายน้ำออกจากตัวอย่างดินในกระบวนการอัดตัวคายน้ำในแนวรัศมีร่วมกับแนวตั้ง เกิดขึ้นทั้งในแนวรัศมีและแนวตั้ง ซึ่งทำให้ระบายน้ำออกจากตัวอย่างดินมีประสิทธิภาพสูงกว่ากระบวนการอัดตัวคายน้ำในแนวตั้งเพียงอย่างเดียว

ดังนั้นทิศทางการระบายน้ำจึงขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างระยะทางระบายน้ำประสิทธิภาพ (D_e) ต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อระบายน้ำ (d_w) ซึ่งมีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำและความชื้นน้ำของดิน

3.4 กรณีศึกษาพฤติกรรมทรุดตัวของทางหลวงพิเศษ กรุงเทพฯ-ชลบุรี สายใหม่

Bergado et al. (1999) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของ PVD โครงการทางหลวงพิเศษ กรุงเทพฯ-ชลบุรี สายใหม่ Section 2B/1 จากผลการตรวจวัดพฤติกรรมทรุดตัวในสนาม เปรียบเทียบกับการคาดคะเนการทรุดตัวโดยวิธีต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 8 จากผลการศึกษาพบว่าวิธี PVD-SD FEM ให้ค่าใกล้เคียงกับการตรวจวัดในสนามเมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำเท่ากับ 4 เท่าของที่ได้จากทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งพบว่าการหาค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำในแนวรัศมี มีค่าอยู่ระหว่าง 4-12 เท่า ของสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำในแนวตั้ง



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลาโดยวิธีต่างๆ ที่มา Bergado (1999)

4. สรุป

จากการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำในแนวราบแนวรัศมี และแนวรัศมีร่วมกับแนวตั้ง ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ พบสรุปได้ดังนี้

1. พฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำและความชื้นน้ำในแนวตั้งและแนวราบของดินไม่สมนัยกัน เนื่องจากโครงสร้างดินในแนวราบยอมให้น้ำไหลผ่านได้ดีกว่าในแนวตั้ง จากการวิจัยพบว่าอัตราส่วน c_h/c_v อยู่ระหว่าง 1.0-1.5 เท่า
2. ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางการทดสอบและทิศทางการระบายน้ำมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำและความชื้นน้ำของดิน จากการวิจัยพบว่าอัตราส่วน c_r/c_v อยู่ระหว่าง 4-12 เท่า
3. ประสิทธิภาพการอัดตัวคายน้ำในแนวรัศมีร่วมกับแนวตั้งดีกว่าการอัดตัวคายน้ำในแนวตั้งเพียงอย่างเดียว เนื่องจากทิศทางของการระบายน้ำเกิดขึ้นอย่างอิสระ จากการวิจัยพบว่าอัตราส่วน c_r/c_v อยู่ระหว่าง 12-44 เท่า
4. จากการศึกษาประมาณพฤติกรรมทรุดตัวของทางหลวงพิเศษ กรุงเทพฯ-ชลบุรี สายใหม่ Section 2B/1 โดยการวิเคราะห์ย้อนกลับใช้ค่าพารามิเตอร์การอัดตัวคายน้ำในแนวรัศมีที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่าสอดคล้องกับพฤติกรรมทรุดตัวในสนาม

เอกสารอ้างอิง

- [1] Baron, R. A. Consolidation of fine-grain soil by drain wells. Proc. ASCE 2346: 718-742, 1948.
- [2] Bergado, D. T., Ahmed, S., Sampaco, C.L. and Balasubramaniam A.S. Settlements of Bangna-Bangpakong Highway on soft Bangkok clay. Journal of Geotechnical Engineering 116(1): 136-155, 1990.
- [3] Bergado, D. T., Balasubramaniam, A.S., Chishti, I.A., Ruenkrairergsa, T. and Taesiri, Y. Evaluation of the PVD performance at the second Bangkok Chonburi highway (SBCH) project. Lowland Technology International 1(2): 55-75, 1999.
- [4] Carillo, N. Simple two-and three-dimensional cases in the theory of consolidation of soils. J. Math. Phys. 21: 1, 1942.
- [5] Hansbo, S. Consolidation of clay by band shaped prefabricated drains. Ground Enggrg. 12(5): 16-25, 1979.
- [6] อรรถสิทธิ์ ศิริสนธิ, วีรยา นิมอ้อย และ Hidehiko Kazama, อัตราส่วนความชื้นน้ำในแนวตั้งต่อแนวราบของดินเหนียวกรุงเทพฯ ณ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ศูนย์รังสิต โดยวิธีการทดสอบกระบวนการอัดตัวคายน้ำ, เอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8 ขอนแก่น วันที่ 23-25 ตุลาคม 2545, หน้า 381-386