

บทที่ 4 การวิเคราะห์การทรุดตัวบริเวณเชิงลาดสะพาน

4.1 บทนำ

การวิเคราะห์การทรุดตัวของโครงสร้างปรับการทรุดตัวชนิด Approach Slab on Ground และ Approach Slab on Pile Foundation ที่ก่อสร้างบนดินอ่อน นิยมใช้ทฤษฎี Consolidation (Terzaghi 1922, 1943) ซึ่งเป็นการทรุดตัวจากขบวนการอัดตัวคายน้ำ ร่วมกับการใช้หลักการกระจายหน่วยแรงกดด้วย Elastic Theory และฐานรากสมมูลย์ (Terzaghi and Peck, 1948) และปรับแก้ค่า Coefficient of Consolidation ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ $[c_{v(lab)}]$ โดยมีหลักการวิเคราะห์ดังนี้

4.2 การวิเคราะห์การทรุดตัวโดยใช้ Consolidation Theory และหลักการฐานรากสมมูลย์

Terzaghi (1922, 1943) เสนอ One-dimensional Consolidation Theory สำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมทรุดตัวของดินเม็ดละเอียดเนื่องจากการระบายออกของน้ำในช่องว่างของมวลดิน ค่าปริมาณการทรุดตัวเนื่องจากการระบายน้ำออกจากมวลดินหรือ Primary Settlement สามารถคำนวณจากสมการที่ 4.1 และ สมการที่ 4.2 สำหรับดินประเภท Normally Consolidated และ Overconsolidated ตามลำดับ

$$S_p = \frac{C_c}{1+e_o} L_o \log \left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_p} \right) \quad (4.1)$$

$$S_p = \frac{L_o}{1+e_o} \left[C_r \log \left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_{vo}} \right) + C_c \log \left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_p} \right) \right] \quad (4.2)$$

โดยที่

S_p = ปริมาณการทรุดตัวของชั้นดินที่พิจารณาในช่วง Primary Consolidation

C_c = Compression Index

C_r = Recompression Index

e_o = Initial Void Ratio

L_o = ความหนาของชั้นดินที่พิจารณา

σ'_{vo} = Initial Effective Vertical Stress

σ'_p = Preconsolidation Pressure

σ'_{vf} = Final Effective Vertical Stress

ในการวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวของดินเนื่องจากกระบวนการ Consolidation ใช้สมการที่ 4.3

$$t = \frac{TH^2}{c_v} \quad (4.3)$$

โดยที่

t = ระยะเวลาการทรุดตัว

T = Time Factor (ค่าองค์ประกอบเวลา)

c_v = Coefficient of Consolidation (สัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำ)

H = Maximum Drainage Distance (ระยะทางยาวที่สุดที่น้ำระบายออก)

ค่า Time Factor (T) นั้นขึ้นอยู่กับ Degree of Consolidation (U) และ Drainage Condition ดังแสดงภาพที่ 4.1 และ ภาพที่ 4.2 ตามลำดับ สำหรับค่า Coefficient of Consolidation (c_v) ซึ่งใช้วิเคราะห์อัตราการทรุดตัวของดินนั้น ควรมีการปรับแก้เนื่องจากสภาวะการระบายน้ำในสนามซับซ้อนกว่าที่เกิดขึ้นในห้องปฏิบัติการ อาทิ ธีรชาติ และ จอม (2545) แนะนำให้ใช้เท่ากับ 16 เท่าของค่าที่ได้จากการทดสอบดินในห้องปฏิบัติการ [$c_{v(lab)}$], ษยยุทธ และคณะ (2540) แนะนำให้ใช้ 10 ถึง 16 เท่าของ [$c_{v(lab)}$], Bergado et al. (1990) พบว่า ค่า Coefficient of Consolidation ในสนาม [$c_{v(field)}$] มีค่าสูงถึง 26 เท่าของ [$c_{v(lab)}$], ทินกร (2528) แนะนำความสัมพันธ์ $c_{v(lab)}$ เท่ากับ 59 ถึง 104 เท่าของ $c_{v(field)}$, สุรฉัตร (2548) แนะนำให้วิเคราะห์ค่า $c_{v(field)}$ โดย Asaoka Method (1978) ซึ่งได้จากการเก็บข้อมูลการทรุดตัวกับเวลาในสนาม เป็นต้น

สำหรับในกรณีที่ชั้นดินเหนียว อยู่ระหว่างชั้นดินที่ไม่ยุบตัว (Incompressible Layer) และไม่สามารถจำแนกได้ชัดเจนว่าเป็น Free Drainage Layer หรือ Impermeable Layer ดังแสดงในภาพที่ 4.3 อัตราการทรุดตัวสามารถวิเคราะห์จากความสัมพันธ์ระหว่าง Average Degree of Consolidation (U) และ Time Factor (T) ของกรณี Partially Drainage Boundary ดังแสดงในภาพที่ 4.4 (Mesri, 1973) โดยที่

$$R_1 = \frac{k_{v1}L}{k_vL_1} \quad (4.4)$$

และ

$$R_2 = \frac{k_{v2}L}{k_vL_2} \quad (4.5)$$

ค่าพารามิเตอร์ R_1 และ R_2 แสดงถึงความสามารถในการระบายน้ำของชั้นดินซึ่งประกบด้านบนและด้านล่างของชั้นดินเหนียว ค่าพารามิเตอร์ R เท่ากับ 0 แสดงถึงชั้นดังกล่าวมีสมบัติเป็น Impervious Boundary และมีค่าเท่ากับ ∞ แสดงถึง Free Drainage Boundary Mesri (1973) สรุปว่า สำหรับการวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวในงานวิศวกรรมปฐพีทั่วไปนั้น ชั้นดินซึ่งประกบชั้นดินเหนียวสามารถกำหนดให้เป็น Incompressible Drainage Layer เมื่อ R มีค่าน้อยกว่า 0.1 และสามารถพิจารณาให้เป็น Incompressible Free Drainage Layer เมื่อ R มีค่ามากกว่า 100

Barden and Younan (1969) เสนอวิธีการประมาณอัตราการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวมากกว่า 1 ชั้น ซึ่งมีค่า c_v ต่างๆ 3 วิธี ดังนี้

(1) Crude Approximations

- ถ้ามีชั้นดินอ่อนมากกว่าหรือเท่ากับ 2 ชั้นซึ่งประกบด้วย Free Drainage Boundary Layer แล้วนั้น ให้สมมติให้ชั้นดินที่มีค่า Permeability สูงสามารถระบายน้ำออกได้ทันที และชั้นดินที่มีค่า Permeability ที่ต่ำจะเป็นตัวกำหนดอัตราการทรุดตัวของชั้นดินอ่อนทั้งหมด (หรือใช้ค่า c_v ที่ต่ำที่สุด และความหนาของชั้นดินนั้น ในการคำนวณอัตราการทรุดตัว)
- สมมติให้ชั้นดินอ่อนทั้งหมดมีค่า c_v เท่ากับชั้นดินที่มี Permeability ต่ำที่สุด และความหนาของชั้นดินเท่ากับผลรวมของความหนาของแต่ละชั้น
- ถ้ามีชั้นดินอ่อนเท่ากับ 2 ชั้นซึ่งประกบด้วย Free Drainage Boundary ให้พิจารณาอัตราการทรุดตัวของดินแต่ละชั้นแยกกัน และมี Drainage Boundary ประเภท Single Drainage

(2) Average Soil Properties

คำนวณค่าเฉลี่ยของค่า $[c_v]_{avg}$ ดังนี้

$$[c_v]_{avg} = \frac{[k_v]_{avg}}{\gamma_w m_{avg}} \tag{4.6}$$

โดยที่

$$m_{avg} = \sum_{j=1}^n \frac{H_j}{H} m_j$$

$$H = \sum_{j=1}^n H_j$$

$$k_{avg} = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{H_j}{H k_j}}$$

(3) Transforming Soil Properties

วิธีนี้เป็นการกำหนดให้ชั้นดินหนึ่งชั้นมีค่า c_v และความหนา H ไม่เปลี่ยนแปลง และเปลี่ยนความหนาของชั้นดินอื่นๆ ตามสมการที่ 4.7 และกำหนดให้ใช้ชั้นดินอื่นๆมีค่า c_v เท่ากับ ค่า c_v ของชั้นดินที่ไม่ได้เปลี่ยนความหนา

$$H' = \sqrt{c_{v1}} \sum_{j=1}^n \frac{H_j}{\sqrt{c_{vj}}} \quad (4.7)$$

หรือคำนวณอัตราการทรุดตัวจากค่า $[c_v]_{apparent}$ ดังสมการที่ 4.8 และใช้ความหนาเท่ากับผลรวมของความหนาของดินทุกชั้น

$$[c_v]_{apparent} = \left(\frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{H_j}{H \sqrt{c_{vj}}}} \right)^2 \quad (4.8)$$

สำหรับการกระจายของหน่วยแรงในดินนั้น นิยมใช้หลักการ Stress Distribution in Semi-Infinite Soil Mass โดยสมมุติให้ดินมีสมบัติเป็น Elastic Material (Bousinesq, 1885) โดยมีแรงกระทำลักษณะ Strip Load ดังแสดงในภาพที่ 4.3 ในกรณีโครงสร้างปรับการทรุดตัวประเภท Approach Slab on Pile ซึ่งมีฐานรากเสาเข็มและมีปลายเข็มอยู่ในชั้นดินอ่อนนั้น Terzaghi and Peck (1948) เสนอให้สมมุติว่าหน้ากระทำบนฐานรากสมมูลย์ (Equivalent Mat) ที่ระดับความลึก 2 ใน 3 ของความยาวเข็ม และสมมุติให้ชั้นดินอ่อนที่อยู่ระหว่างหัวเสาเข็มถึงฐานรากสมมูลย์ไม่มีการทรุดตัวเลย และการทรุดตัวเกิดขึ้นในดินใต้ฐานรากสมมูลย์เท่านั้น การกระจายของหน่วยแรงใต้ฐานรากสมมูลย์สามารถใช้หลักการ Stress Distribution in Semi-Infinite Soil Mass ได้ หรือประมาณการกระจายหน่วยแรงเป็นมุม 30 องศาในแนวตั้งดังภาพที่ 4.4 ในกรณีที่ปลายเสาเข็มอยู่บนชั้นดินแข็ง เช่น ชั้นทรายแน่น ระดับฐานรากสมมูลย์อยู่ที่ปลายเข็ม โดยมีการกระจายหน่วยแรงทำมุม 30 องศาในแนวตั้ง ดังแสดงในภาพที่ 4.5 วิศวกรส่วนใหญ่นิยมใช้การกระจายหน่วยแรงโดยทฤษฎี Boussinesq's ร่วมกับการสมมุติฐานราก

โครงการปรับปรุงการออกแบบและมาตรฐานโครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณคอสะพาน (โครงการวิจัยต่อเนื่อง)

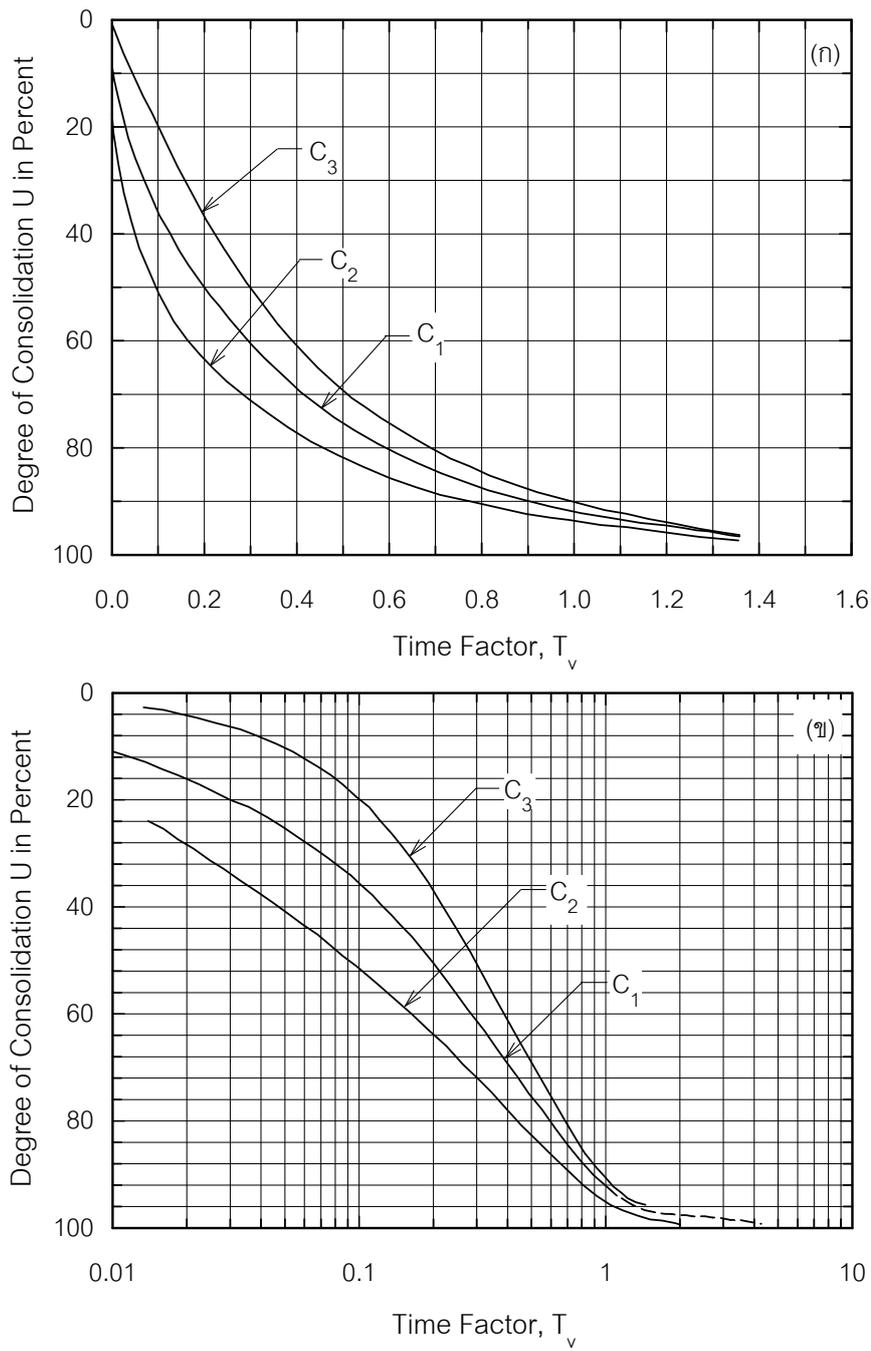
สมมูลบนชั้นดินอ่อน ซึ่งสมการการกระจายหน่วยแรงในแนวดิ่งจะใช้สมการที่ 4.9 หรือสมการที่ 4.10 (สมการในรูปอย่างง่าย)

$$\sigma_z = \frac{q}{\pi} \left[\tan^{-1} \frac{z}{x-b} - \tan^{-1} \frac{z}{x+b} - \frac{2bz(x^2 - b^2 - z^2)}{(x^2 - b^2 + z^2) + 4b^2 z^2} \right] \quad (4.9)$$

$$\sigma_z = \frac{q}{\pi} [\beta + \sin \beta \cos(\beta + 2\delta)] \quad (4.10)$$

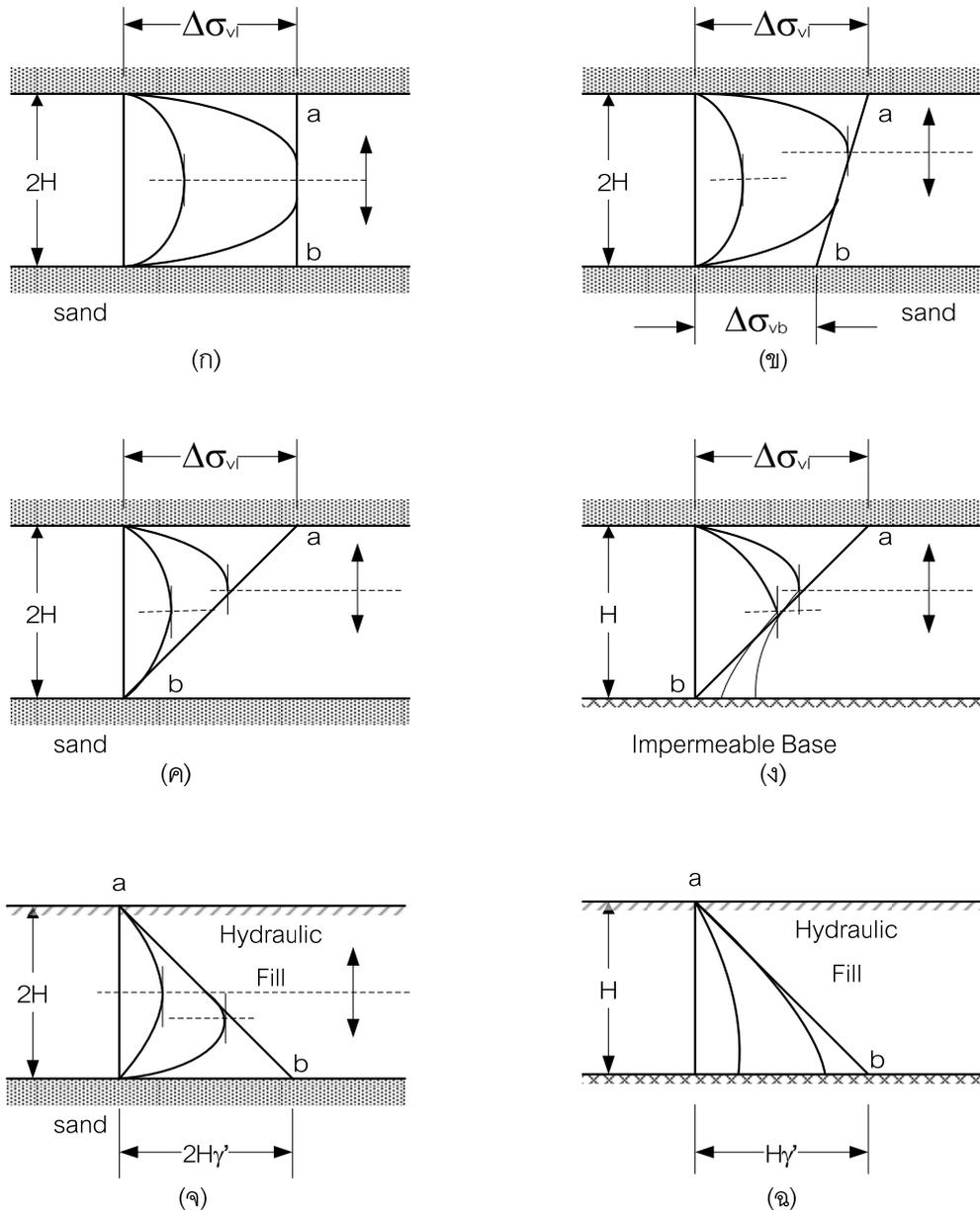
โดยที่

- σ_z = หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในมวลดิน
- q = หน่วยแรงกระทำฐานราก
- z = ระยะลึกจากระดับฐานราก
- x = ระยะทางด้านข้างจากกึ่งกลางฐานรากต่อเนื่อง
- b = ความกว้างของฐานรากต่อเนื่องเมื่อเทียบจากกึ่งกลางฐานราก ($b=B/2$)

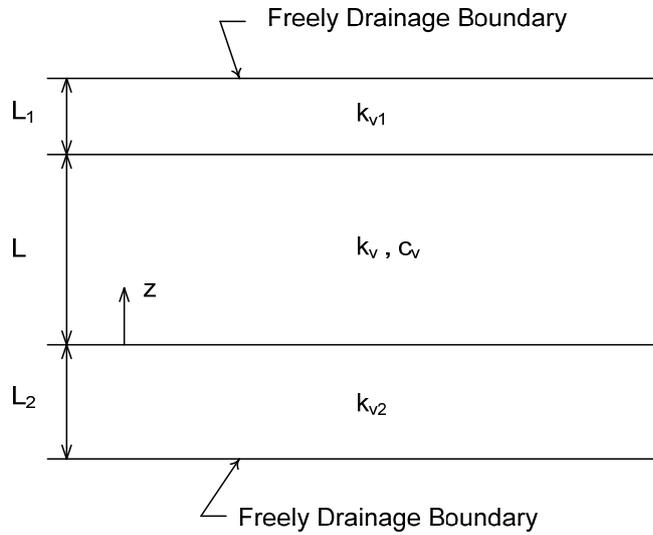


ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Degree of Consolidation และ Time Factor ถ้า Time Factor แสดงใน (ก) Arithmetic Scale และ (ข) Logarithmic Scale เส้น C_1 , C_2 และ C_3 ขึ้นกับ Loading Condition และ Drainage Condition ดังแสดงในภาพที่ 4.2 (Terzaghi and Fröhlich, 1936)

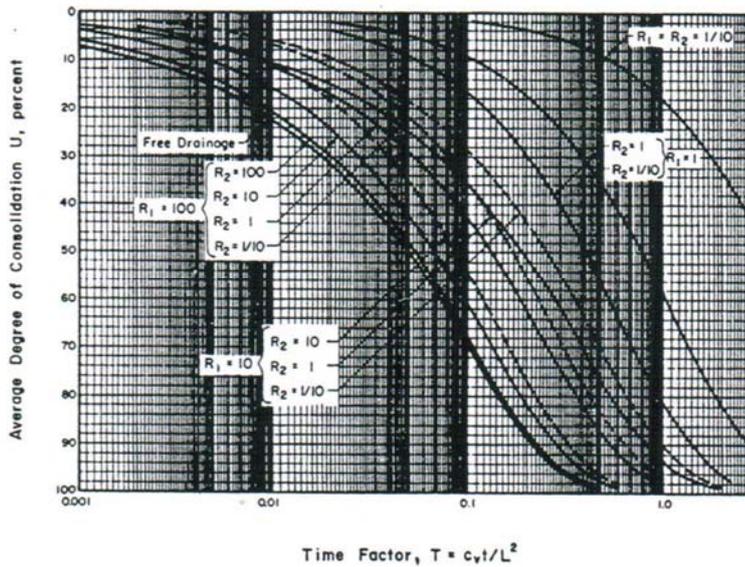
โครงการปรับปรุงการออกแบบและมาตรฐานโครงสร้างปรับการทรุดตัวของบริเวณคอสะพาน (โครงการวิจัยต่อเนื่อง)



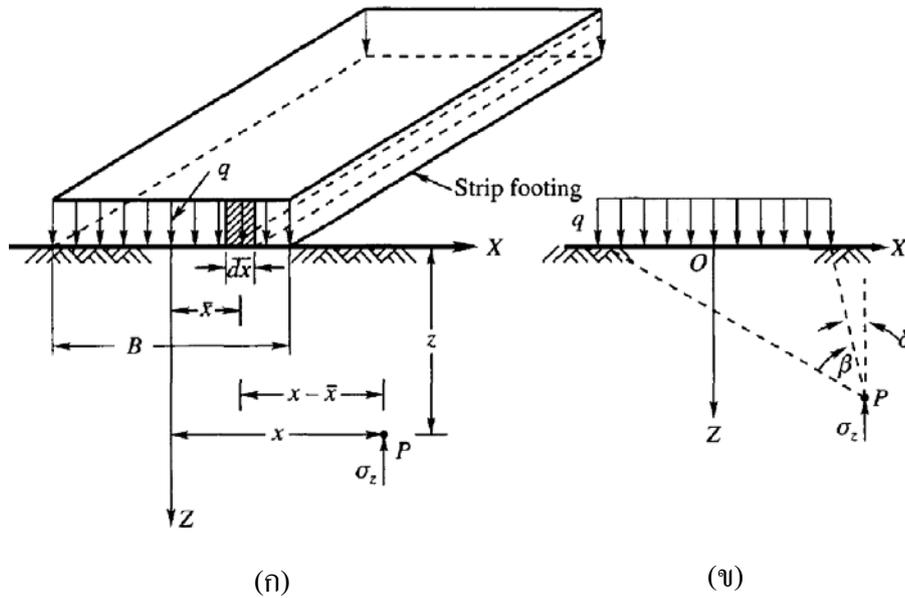
ภาพที่ 4.2 Isochrones แสดงกระบวนการ Consolidation ของชั้นดินเหนียวในกรณี Excess porewater Pressure และ Drainage Boundary Condition ต่างๆ (Terzaghi and Fröhlich, 1936)



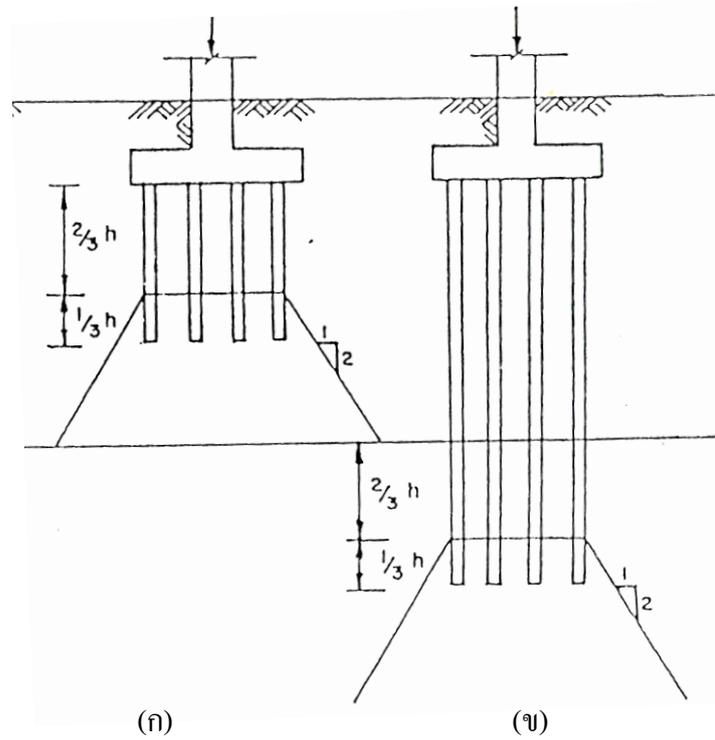
ภาพที่ 4.3 ชั้นดินอ่อนมากกว่า 1 ชั้นประกอบด้วยชั้นดินที่สามารถระบายน้ำได้ดี (Free Drainage Boundary Layer) (Mesri, 1973)



ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ U-T สำหรับชั้นดินอ่อนประกอบด้วยชั้นดินที่สามารถระบายน้ำได้บางส่วน (Partially Drainage Boundary Layer) (Mesri, 1973)

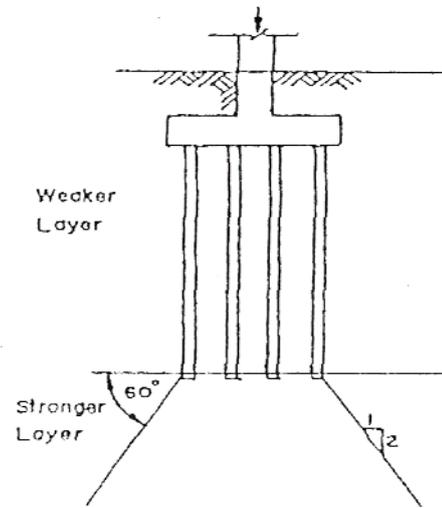


ภาพที่ 4.5 การกระจายหน่วยแรงแบบ Strip Loading



ภาพที่ 4.6 การกระจายหน่วยแรงกรณีปลายเสาเข็มอยู่บนชั้นดินอ่อน

(ก) Uniform Soil และ (ข) Layered Soil (Teng, 1962)



ภาพที่ 4.7 การกระจายหน่วยแรงกรณีปลายเสาเข็มอยู่บนชั้นดินแข็ง (Teng, 1962)

4.3 เอกสารอ้างอิง

- กฤษณ์ เสาเวียง. 2552. การศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างปรับการทรุดตัวของบริเวณคอสะพาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ชัยพร บัวสรวง. 2551. การศึกษาและเปรียบเทียบในเชิงวิศวกรรมของโครงสร้างปรับการทรุดตัวของบริเวณคอสะพานของสำนักการโยธา กรุงเทพมหานคร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- ทินกร โรจนธรา. 2528. การทำนายการทรุดตัวของคอสะพานในบริเวณดินอ่อนโดยใช้หน่วยเบริง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์ และ จอม จันทร์หิรัญ. 2545. การวิเคราะห์พฤติกรรมของถนนดินอ่อนปรับปรุงคุณภาพด้วย Cement Column ของทางหลวงหมายเลข 34 ตอน บางนา – ชลบุรี. รายงานฉบับที่ วพ. 197. ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง, กรมทางหลวง.
- बारเมศ วรรณะภูติ, อภินิต โชติสังกาศ, สรศักดิ์ เชื้อศิริกุล, กฤษณ์ เสาเวียง, อรุณ ปรามมาก และ คมพันธ์ จินดาววัฒน์. 2553. โครงการปรับปรุงการออกแบบและมาตรฐานโครงสร้างปรับการทรุดตัวของบริเวณคอสะพาน. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- ยงยุทธ แต่ศิริ, สุพจน์ หวลถนอม และ พิชัย ประทุมศรีสาคร. 2540. พฤติกรรมการทรุดตัวของถนนพระรามที่ 2. รายงานฉบับที่ วพ.160. ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง, กรมทางหลวง.
- วิชาญ ภูพัฒน์. 2523. การทรุดตัวของดินถมบริเวณคอสะพานบริเวณดินอ่อน. รายงานฉบับที่ 55. กองวิเคราะห์วิจัย, กรมทางหลวง.
- สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์. 2548. วิศวกรรมปฐพี. พิมพ์ครั้งที่ 2. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.
- Asaoka, A. 1978. Observational Procedure of Settlement Prediction. **Soil and Foundations** 18: 87-101.
- Barden, L. and N.A. Younan. 1969. Consolidation of Layered Clays. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol.6. No.4: 1090-1093.
- Bergado, D. T., S. Ahmed, C. L. Sampaco and A. S. Balasubramaniam. 1990. Settlements of Bangna-Bangpakong Highway on Soft Bangkok Clay. **Journal of Geotechnical Engineering** 116: 136-155.
- Boussinesq, J. 1885. **Application des Potentials a L'Etude de L'Equilibre et due Mouvement des Solides Elastiques**. Gauthier-Villars, Paris.

- Mesri, G. 1973. One-Dimensional Consolidation of a Clay Layer with Impeded Drainage Boundaries. *Water Resource Research*, Vol.9 No.4: 1090-1093
- Seah, T. H. and K. Wongsopit. 2000. A New Approach to Bearing Unit Design : 150-173. **การสัมมนาเรื่องงานฐานราก 2000**. คณะอนุกรรมการสาขาวิศวกรรมปฐพีวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.
- Teng, W. C. 1962. **Foundation Design**. Prentice Hall International. Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- Terzaghi, K. V. 1922. **Soil Failure at Barrages and Its Prevention**. Die Wasserkraft, Special Forchheimer issue. (in German)
- _____. and O. K. Fröhlich 1936. **Theorie der Setzung von Tonschichten**, Franz Deuticke, Leipzig, Germany.
- _____. 1943. **Theoretical of Soil Mechanics**. John Wiley and Sons Inc., New York, USA.
- _____. and R. B. Peck. 1948. **Soil Mechanics in Engineering Practice**. John Wiley and Sons Inc., New York, USA.
- Wood, L. A. 1977. The Economics Analysis of Raft Foundation. **International Journal for Numerical and Analytical Method in Geomechanics** 1: 397-405.
-
-