

บทที่ 8

การยุบตัวของดิน (Consolidation)

8.1 เนื้อหาโดยสรุป

ดินทุกชนิดต้องเกิดการยุบตัวหรือทรุดตัวเมื่อได้รับแรงหรือน้ำหนักกระทำ ปริมาตรของมันก็จะลดลง แต่เนื่องจากทั้งเนื้อดินและน้ำที่อยู่ในช่องว่างถือว่าไม่สามารถยุบอัดตัวลงได้ (Incompressible) ดังนั้น ปริมาตรที่เปลี่ยนไปจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินสามารถระบายออกไปได้ ทำให้ช่องว่างลดลง เม็ดดินเคลื่อนตัวเข้าใกล้กัน กระบวนการนี้เรียกว่า การยุบอัดตัวของดิน การยุบตัวของดินเป็นส่วนสำคัญที่จะต้องคำนึงในการออกแบบโครงสร้าง เนื่องจากจะมีผลทำให้โครงสร้างเสียหายได้ ถ้าหากว่าการยุบตัวของดินมีค่ามาก โดยทั่วไปแล้วชั้นดินที่เกิดการยุบตัวจะประกอบไปด้วยการยุบตัวจาก

1. การทรุดตัวของเม็ดดิน
2. การเคลื่อนที่ของเม็ดดิน
3. การไหลซึมของน้ำที่แทรกอยู่ในช่องว่างระหว่าง Solid phase ในเนื้อดิน

ในทางวิศวกรรมมักจะพิจารณา ค่าการทรุดตัวของชั้นดินที่เกิดจากแรงกระทำภายนอก (External load) จะทำให้เกิดการยุบตัวในแนวตั้ง (settlement) ซึ่งประกอบขึ้นจากการทรุดตัว 3 ส่วนคือ

1. การทรุดตัวที่เกิดขึ้นทันทีทันใด (Immediate settlement หรือ elastic settlement ; S_e) คือในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ในตอนเริ่มต้นการทรุดตัวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่มากกระทำ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในมวลดิน (Water Content) โดยดินจะประพฤติตัวตามกฎของ Hook ซึ่งก็คือเป็นการทรุดตัวที่เกิดจากคุณสมบัติยืดหยุ่น (elastic property)
2. การทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำ (Primary Consolidation settlement ; S_c) คือ การทรุดตัวที่เกิดเนื่องจากการระบายน้ำ (Drain) ออกจากดินแล้วทำให้ดินเกิดการยุบตัวเนื่องจากปริมาตรของดินลดลง

3. การทรุดตัวจากการอัดตัวคายน้ำครั้งที่สอง (Secondary consolidation settlement ; S_s) เป็นการทรุดตัวที่เกิดจากการจัดเรียงตัวของอนุภาคดินให้อยู่ในสภาวะมั่นคง (stable) เมื่อได้รับแรงภายนอกกระทำ ทำให้โครงสร้างของดินเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม การทรุดตัวแบบนี้ยังไม่มีทฤษฎีที่สามารถอธิบายได้อย่างแน่นอน มีแต่เพียงวิธีการประมาณ (Empirical) เท่านั้นที่ใช้ในการคำนวณหาค่า

ดังนั้นการทรุดตัวที่เกิดขึ้นทั้งหมด (Total Settlement) ก็คือผลรวมของการทรุดตัวของการทรุดตัวทั้งสามแบบข้างต้นดังสมการ

$$S_T = S_e + S_c + S_s \quad (\text{สมการที่ 8.1})$$

โดยที่ S_T = การทรุดตัวที่เกิดขึ้นทั้งหมด (total Settlement)
 S_e = การทรุดตัวที่เกิดทันทีทันใด (elastic Settlement)
 S_c = การทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำ (Primary consolidation Settlement)
 S_s = การทรุดตัวแบบอัดครั้งที่สอง (Secondary consolidation Settlement)

อย่างไรก็ตามกรณีพื้นฐานรากของสิ่งก่อสร้างวางอยู่บนดินเหนียว (clays) การทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ (Primary consolidation Settlement) จะมีค่ามากและใช้เวลานานในการเกิดนานที่สุด มากกว่าการทรุดตัวที่เกิดทันทีทันใด (elastic Settlement)

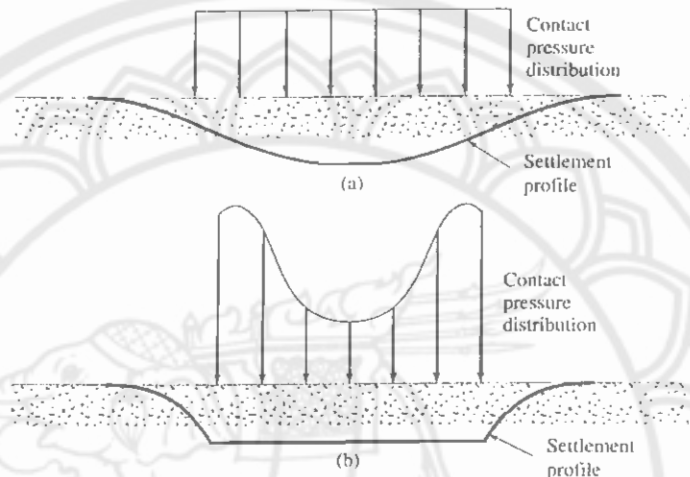
8.1.1 การทรุดตัวที่เกิดขึ้นทันทีทันใด (Immediate settlement ; S_e)

การทรุดตัวแบบนี้จะเกิดจากคุณสมบัติยืดหยุ่น จะเกิดขึ้นทันทีที่ชั้นดินได้รับแรงกระทำจากภายนอก (external load) ดังนั้นในทางปฏิบัติสำหรับการวิเคราะห์และออกแบบฐานราก ให้ถือว่า S_e เกิดเต็มที่และเสร็จสมบูรณ์ ณ เวลาที่สิ้นสุดงานก่อสร้าง

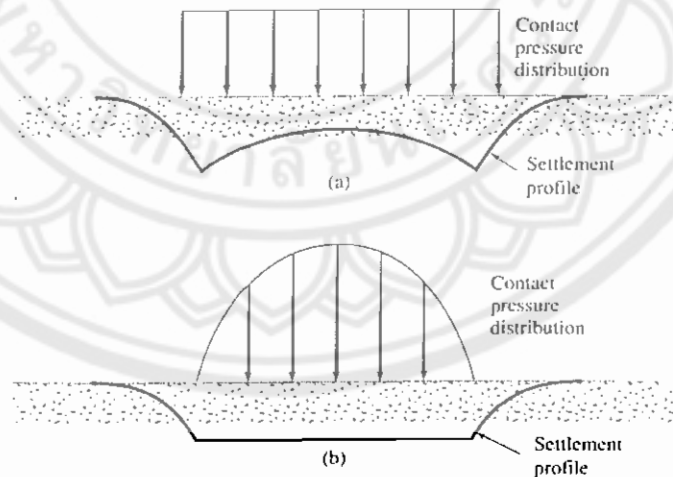
โดยค่าการยุบตัวนี้จะมีผลกระทบต่อสิ่งก่อสร้างน้อยมากเมื่อเทียบกับ Consolidation Settlement ซึ่งค่า S_e จะขึ้นอยู่กับลักษณะของฐานรากและชนิดของดินบริเวณที่ก่อสร้าง โดยลักษณะของฐานรากจะมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

- ฐานรากที่ยืดหยุ่นได้ (flexible foundation)
- ฐานรากที่คงรูป (Rigid foundation)

และชนิดของดินที่แบ่งแยกนั้นก็จะมีอยู่ 2 ชนิดเช่นกันคือดินเหนียวและดินทราย โดยสามารถแสดงการกระจายแรงดันจากฐานรากและ Immediate settlement profile ดังแสดงดังรูปที่ 8.1 และรูปที่ 8.2 ซึ่งรูปที่ 8.1 แสดงคือชนิดของดินเหนียว รูปที่ 8.2 แสดงถึงชนิดของดินทราย



รูปที่ 8.1 Profile ของการทรุดตัวแบบทันทีทันใดและแรงดันที่กระทำของดินเหนียว
(a) ฐานรากแบบยึดหยุ่นได้ (b) แบบไม่ยึดหยุ่น



รูปที่ 8.2 Profile ของการทรุดตัวแบบทันทีทันใดและแรงดันที่กระทำของดินทราย
(a) ฐานรากแบบยึดหยุ่นได้ (b) แบบไม่ยึดหยุ่น

- 8.1.1.1 ความสัมพันธ์ในการหา Immediate settlement

การประมาณการทรุดตัวที่เกิดขึ้นทันทีอาศัยพื้นฐานจากการคำนวณการยึดหดตัวของวัสดุ
ยึดหยุ่นภายใต้แรงกระทำโดยสามารถหาได้จากสมการคือ

$$S_i = \Delta\sigma B \frac{1-\mu^2}{E_s} I_p \quad (\text{สมการที่ 8.2})$$

โดยที่ S_i = Immediate settlement

$\Delta\sigma$ = แรงดันสุทธิที่กระทำกับฐานราก (Net pressure applied)

B = ความกว้างของฐานราก (width of foundation)

= เส้นผ่านศูนย์กลางกรณีที่เป็นวงกลม (diameter of circular foundation)

μ_s = อัตราส่วนปัวซองของดิน (Poisson's ratio of soil) ดังแสดงในตาราง 8.3

E_s = โมดูลัสความยืดหยุ่นของดิน (modulus of elasticity of soil) ดังแสดงในตาราง 8.2

I_p = ตัวคูณไร้มิติ (non-dimensional influence factor) ซึ่งกำหนดได้จาก
รูปร่างและความคงตัวของฐานราก ดังแสดงในตาราง 8.1

โดยตัวคูณไร้มิติ (non-dimensional influence factor) สามารถหาได้จากสมการ
Schleicher (1926) ซึ่งใช้สำหรับมุมของฐานรากแบบ flexible ดังสมการ

$$I_p = \frac{1}{\pi} \left[m_1 \ln \left(\frac{1 + \sqrt{m_1^2 + 1}}{m_1} \right) + \ln \left(m_1 + \sqrt{m_1^2 + 1} \right) \right] \quad (\text{สมการที่ 8.3})$$

โดยที่ m_1 = ความยาว / ความกว้างของฐานราก

สามารถแสดงค่า I_p ตามตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 ค่า Influence Factors สำหรับฐานรากตามสมการที่ 8.3

Shape	m_1	I_p		
		Flexible		Rigid
		Center	Corner	
Circle	—	1.00	0.64	0.79
Rectangle	1	1.12	0.56	0.88
	1.5	1.36	0.68	1.07
	2	1.53	0.77	1.21
	3	1.78	0.89	1.42
	5	2.10	1.05	1.70
	10	2.54	1.27	2.10
	20	2.99	1.49	2.46
	50	3.57	1.8	3.0
	100	4.01	2.0	3.43

สามารถแสดงค่า E_s ตามตารางที่ 8.2 โดยเป็นค่าประมาณของโมดูลัสยืดหยุ่น (E_s) จากดินหลายชนิด

ตารางที่ 8.2 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินหลายชนิด

Soil type	E_s	
	kN/m ²	lb/in. ²
Soft clay	1,800–3,500	250–500
Hard clay	6,000–14,000	850–2,000
Loose sand	10,000–28,000	1,500–4,000
Dense sand	35,000–70,000	5,000–10,000

สามารถแสดงค่า μ_s ตามตารางที่ 8.3 ซึ่งเป็นค่าประมาณอัตราส่วนบัวของของดินหลายชนิด

ตารางที่ 8.3 ค่าอัตราส่วนบัวของของดินหลายชนิด

Type of soil	Poisson's ratio, μ_s
Loose sand	0.2–0.4
Medium sand	0.25–0.4
Dense sand	0.3–0.45
Silty sand	0.2–0.4
Soft clay	0.15–0.25
Medium clay	0.2–0.5

8.1.2 การทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Settlement)

การอธิบายพฤติกรรมของการทรุดตัวแบบการอัดตัวคายน้ำ จะใช้แบบจำลองของสปริงและลูกสูบ (Spring-cylinder model) โดยแบบจำลองประกอบไปด้วย ถังซึ่งบรรจุไปด้วยน้ำ โดยมีสปริงและลูกสูบและวาล์วสำหรับเปิดหรือปิดดังแสดงในรูปที่ 8.3 โดยสปริงจะเปรียบเสมือนเม็ดดินและวาล์วเปรียบเสมือนความชื้นน้ำได้ของดิน

โดยการรับแรงของสปริงเปรียบได้กับการรับหน่วยแรงประสิทธิผลของดิน (Effective stress) และการยุบตัวของสปริงเปรียบเสมือนการยุบตัวของดินเนื่องจากกระบวนการอัดตัวคายน้ำ จะเห็นได้ว่าการเกิดกระบวนการนี้ช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับคุณสมบัติความชื้นน้ำได้ของน้ำในดิน โดยสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

- จากแบบจำลองรูปที่ 8.3.1 (a) แสดงสภาพชั้นดินเดิมของดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่เวลา $t < t_0$ (ก่อนที่จะมีการก่อสร้าง) โดย $\Delta\sigma$ และ $\Delta u = 0$ เทียบได้กับรูปที่ 8.3 (a) เมื่อไม่มีแรงกระทำ ดังนั้นน้ำภายในไม่เกิดแรงดัน มาตราวัดแรงดันที่อ่านค่าได้เท่ากับศูนย์

$$\Delta\sigma = 0$$

$$\Delta u = 0$$

$$\sigma_{t < t_0} = \sigma'_{t < t_0} + \Delta\sigma$$

$$\sigma_{t < t_0} = \sigma'_{t < t_0} + u_{t < t_0}$$

- จากแบบจำลองรูปที่ 8.3.1 (b) แสดงสภาพดินเหนียวที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำที่เวลา $t = t_0$ (สิ้นสุดการก่อสร้าง) $\Delta\sigma$ เป็นแรงดันที่เกิดขึ้นเนื่องจากสิ่งก่อสร้างเทียบได้กับแบบจำลองรูปที่ 8.3 (b) ค่า p ในแบบจำลองที่ $\Delta\sigma$ ในแบบจำลองรูปที่ 8.3 (b) ซึ่งแรง p ทำให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกิน (Δu) แต่แล้วขีดทำให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกิน (Δu) ออกจากระบบไม่ได้ ค่าแรงดันน้ำที่อ่านได้จากมาตรวัดจะมีค่ามากขึ้น

$$\Delta\sigma' = 0 \text{ (เนื่องจากน้ำรับแรงดันส่วนเกินทั้งหมด)}$$

$$\Delta\sigma = \Delta u$$

$$\sigma_{t=t_0} = \sigma'_{t < t_0} + \Delta\sigma$$

$$\sigma_{t=t_0} = [\sigma'_{t < t_0} + u'_{t < t_0}] + \Delta u$$

- จากแบบจำลองรูปที่ 8.3.1 (c) แสดงสภาพชั้นดินเหนียวที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำที่เวลา $t_0 < t < t_{\infty}$ (ระหว่างการเกิด consolidation settlement) ชั้นดินเหนียวยุบตัวลง เทียบได้กับแบบจำลองรูปที่ 8.3 (c) เมื่อเปิดวาล์วแรงดันน้ำส่วนเกินออกจากระบบมีการถ่ายแรงให้กับ Spring (เนื้อดิน

เหนียว) ในแบบจำลองทำให้ Spring (เนื้อดินเหนียว) ยุบตัวลงค่าแรงดันน้ำที่อ่านได้จากมาตรได้มีค่าลดลง

$$\sigma_{t_0 < t < t_x} = \sigma_{t_0} + \Delta\sigma_{t_0 < t < t_x}$$

$$\sigma_{t_0 < t < t_x} = \sigma'_{t_0} + u'_{t_0} + \Delta\sigma_{t_0 < t < t_x}$$

- จากแบบจำลองรูปที่ 8.3.1 (d) แสดงสภาพชั้นดินเหนียวที่อึดตัวไปด้วยน้ำที่เวลา $t_0 = t_{\infty}$ (สิ้นสุดการเกิด consolidation settlement) เทียบได้กับแบบจำลองรูปที่ 8.3(d) แรงดันน้ำส่วนเกินออกจากระบบหมด ($\Delta u = 0$) Spring (เนื้อดินเหนียว) รับแรงทั้งหมด ค่าแรงดันน้ำที่อ่านได้จากมาตรวัดมีค่าเท่ากับศูนย์

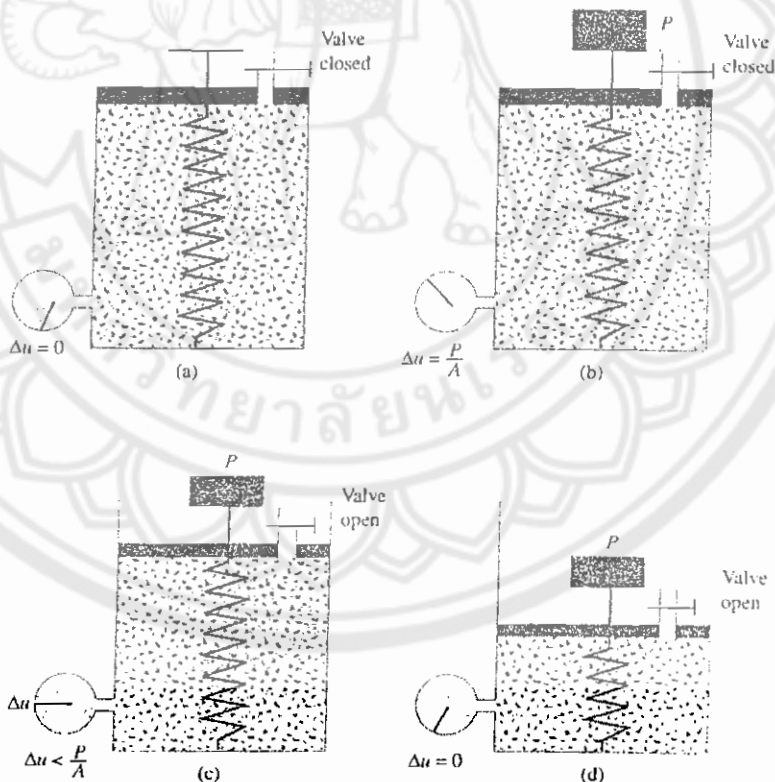
จาก

$$\Delta\sigma_x = \Delta\sigma'_x + \Delta u_x$$

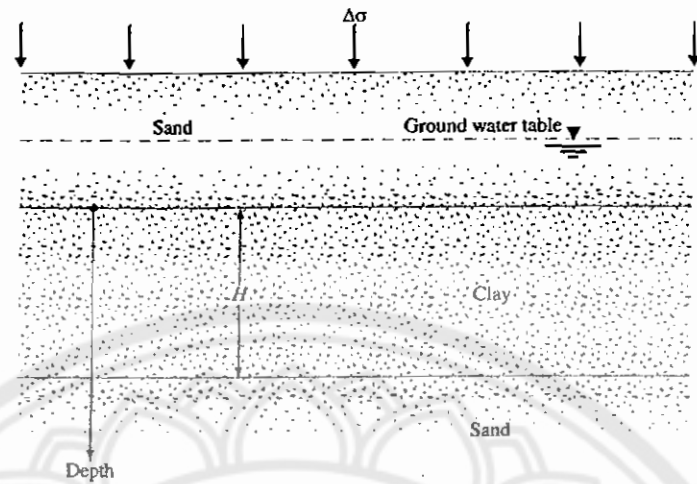
และ

$$\sigma_x = \sigma_{t_0} + \Delta\sigma_x$$

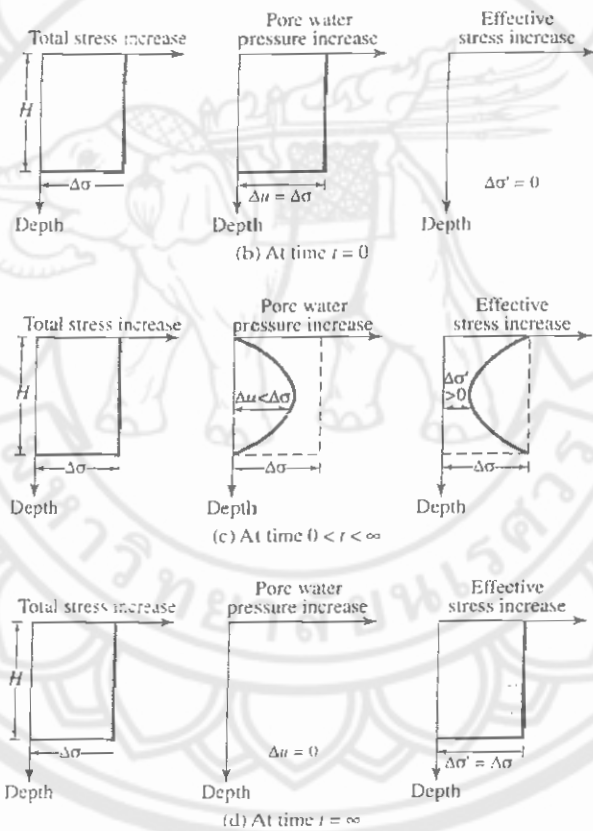
$$\sigma_x = \sigma'_{t_0} + u'_{t_0} + \Delta\sigma'_x$$



รูปที่ 8.3 Spring-cylinder model



(a)



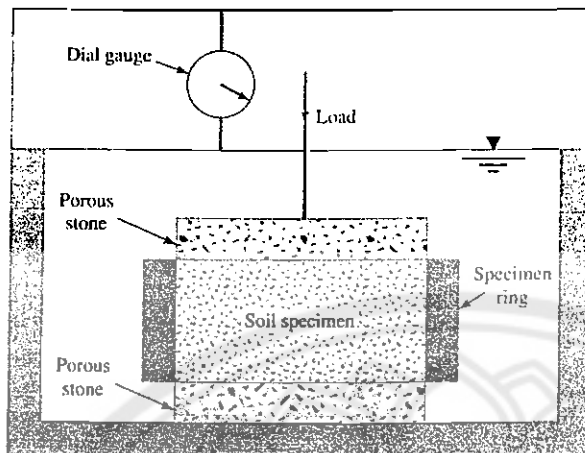
รูปที่ 8.3.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงเค้นรวม, หน่วยแรงดันน้ำ, หน่วยแรงประสิทธิผล ในชั้นดินเหนียวที่มีการไหลของน้ำผ่านด้านบนลงสู่ด้านล่าง โดยมีการใส่หน่วยแรง $\Delta\sigma$ เข้าไป

-8.1.2.1 การทดลองการยุบตัวของดินทางเดียว

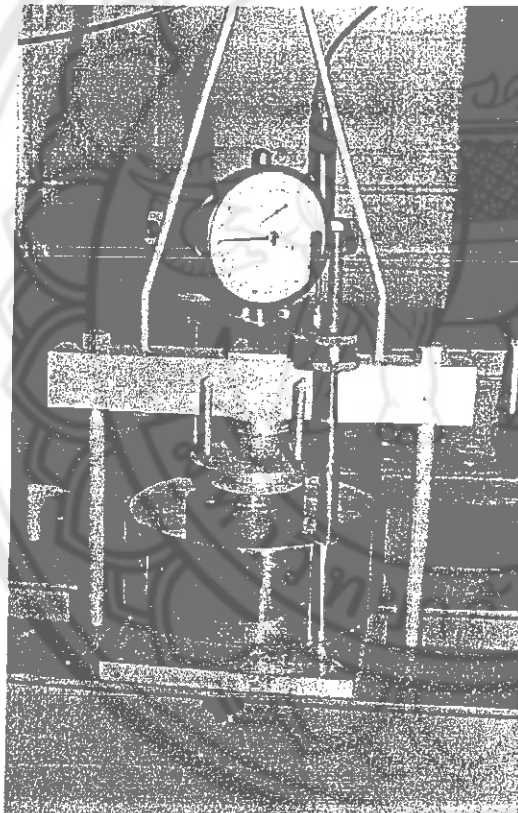
(One-dimensional Laboratory Consolidation Test)

เทอร์ซาจิกิ (Terzaghi) ได้ประดิษฐ์เครื่องมือสำหรับการทดสอบคุณสมบัติการทรุดตัวแบบ การอัดตัวคายน้ำของดิน (consolidometer หรือ odometers) โดยดัดแปลงรูปที่ 8.4 (b) โดยการทดลองนี้กล่าวโดยสรุปคือ จะนำตัวอย่างดินคงสภาพ (Undisturbed Sample) มาตัดแต่งเป็น แหน่งรูปทรงกระบอกให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้วและสูง 1 นิ้ว แล้วนำตัวอย่างดินใส่ในวงแหวน เหล็ก ซึ่งมีหินพรุน (porous stone) ประกอบอยู่ทั้งบนและล่างเพื่อให้ระบายน้ำออกจากตัวอย่าง ได้ จากนั้นนำตุ้มน้ำหนักมาวางดินจะได้รับน้ำหนักกดทับโดยผ่านทางแขนคานวัด (Lever arm) จากนั้นวัดค่าพร้อมจุดบันทึกการยุบตัวของดิน ณ เวลาต่างๆ จนกระทั่งดินไม่เกิดการยุบตัว หรือ ยุบตัวน้อยมาก ซึ่งใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมงจากนั้นเพิ่มน้ำหนักกดทับในดินอีก 4 ครั้ง โดย น้ำหนักที่เพิ่มแต่ละครั้งจะเป็น 2 เท่าของน้ำหนักที่กดครั้งก่อนหน้า

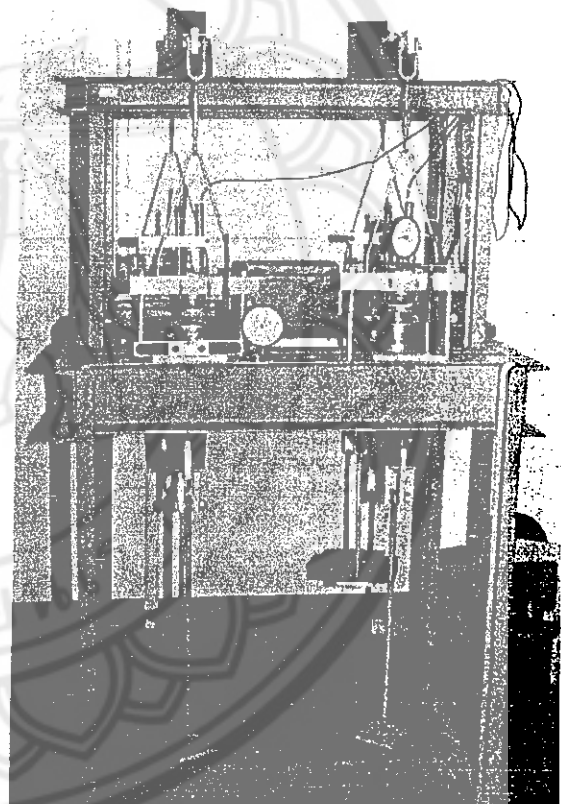
โดยมีจุดสำคัญคือดินที่นำมาทดสอบจะต้องเป็นดินที่อิ่มน้ำ และในขณะที่ทดสอบต้องอยู่ใน สภาพอิ่มน้ำตลอดเวลาตามทฤษฎีของเทอร์ซาจิกิ



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 8.4 (a) รูปตัดของ consolidometer (b) รูปถ่ายของ consolidometer
(c) วิธีการทดลอง consolidation

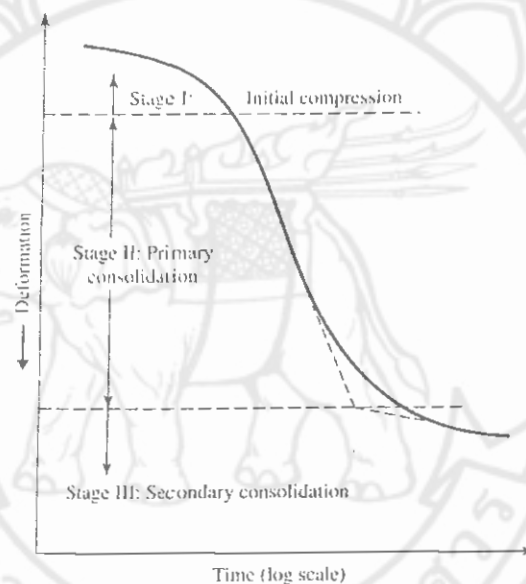
จากนั้นนำค่าที่ได้มาวาดกราฟการทรุดตัวหรือการเปลี่ยนแปลงตัว (Deformation) เทียบกับเวลา (time) โดยแบ่งออกเป็น 3 Stage ใหญ่ๆตามลักษณะของกราฟดังต่อไปนี้คือ

Stage I : การทรุดตัวที่เกิดขึ้นทันทีทันใด

Stage II : การทรุดตัวจากการยุบอัดตัวคายน้ำ

Stage III : การทรุดตัวจากการยุบตัวครั้งที่สอง

โดยแสดงลักษณะกราฟตามรูปที่ 8.5

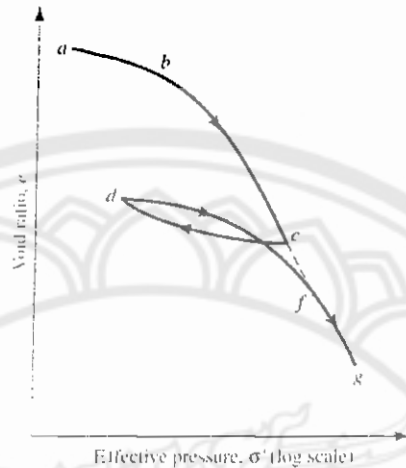


รูปที่ 8.5 การวาดกราฟ Time-deformation ที่ได้จากการทดลอง consolidation ที่ได้จากการใส่น้ำหนักเข้าไป

- 8.1.2.2 ดินเหนียวสภาพอัดแน่นแบบปกติ (Normally consolidated Clay) และดินเหนียวสภาพอัดแน่นเกินปกติ (Over-consolidated Clay)

ดินเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเฉพาะที่มีความซับซ้อนมาก ประวัติการได้รับหน่วยน้ำหนักกดทับ (Overburden Pressure) มีผลต่อคุณสมบัติในด้านต่างๆ ของดิน ดินแต่ละแห่ง แต่ละความลึกมีคุณสมบัติต่างกันไปทั้งสิ้นดินในสภาพธรรมชาติที่ระดับความลึกใดๆ อาจจะได้รับหน่วยน้ำหนัก

กตัทับสูงกว่าหรือต่ำกว่าที่ได้รับอยู่ในปัจจุบันก็ได้ การทรุดตัวของดินมักเกิดจากการเปลี่ยนแปลงหน่วยน้ำหนักกตัทับของดินในรูปหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective pressure)



รูปที่ 8.6 กราฟที่วาดระหว่าง e กับ $\log \sigma'$ ที่แสดงถึง loading, unloading และ reloading

จากรูปที่ 8.6 ดินซึ่งไม่เคยได้รับหน่วยน้ำหนักกตัทับสูงกว่าที่ดินนั้นได้รับในปัจจุบัน เรียกว่าดินเหนียวสภาพอัดแน่นปกติ (Normally Consolidated Clay ; NC) ซึ่งเมื่อดินเหนียวสภาพอัดแน่นปกติที่จุด a ได้รับหน่วยน้ำหนักกตัทับเพิ่มขึ้น จะได้กราฟช่วง abc เมื่อดินที่จุด c เกิดการลดขนาดของหน่วยน้ำหนักกตัทับลง จะได้กราฟในช่วง cd หากเพิ่มหน่วยน้ำหนักกตัทับแก่ดินที่จุด d ก็จะเป็นไปตามกราฟช่วง dfg จะได้ว่าดินที่จุด d คือดินเหนียวสภาพอัดแน่นปกติ (NC) ส่วนดินที่จุด d คือดินเหนียวสภาพอัดเกินแน่นปกติ (Over-consolidated Clay) เนื่องจากว่าดินที่จุด d เคยได้รับหน่วยน้ำหนักกตัทับสูงสุดในอดีตเท่ากับหน่วยน้ำหนักกตัทับที่จุด c ซึ่งมากกว่าหน่วยน้ำหนักกตัทับในปัจจุบัน

8.1.2.2.1 Normally consolidated

หมายถึงดินซึ่งได้เคยได้รับหน่วยน้ำหนักกตัทับสูงกว่าที่ดินนั้นเคยได้รับในปัจจุบัน

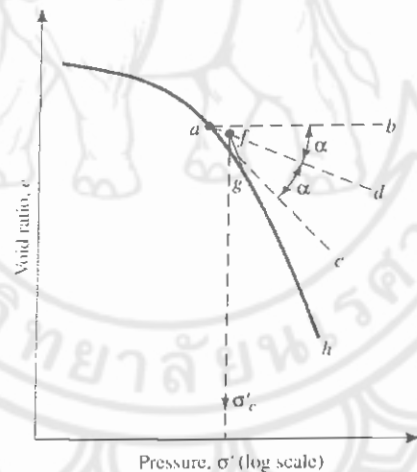
8.1.2.2.2 Over-consolidated

หมายถึงดินซึ่งในอดีตเคยได้รับหน่วยน้ำหนักกตัทับสูงกว่าที่ดินนั้นได้รับในปัจจุบัน

Casagrande (1936) ได้คิดวิธีที่จะหาค่าหน่วยน้ำหนักกตัทับสูงสุดในอดีตโดยใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักกตัทับอัตราส่วนช่วงว่าง ($e-\log \sigma'$) เรียกว่าหน่วยน้ำหนักกตัทับ

ทับสูงสุดในอดีต (Preconsolidation Pressure ; σ'_c) โดยสามารถแสดงวิธีการหาเป็นขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

1. Plot ค่าอัตราส่วนช่องว่างกับหน่วยน้ำหนักกดทับลงบนกระดาษ Semi-log โดยหาค่าจากการทดสอบการยุบตัวของดินทางเดียว
2. จากกราฟหาจุดที่มีรัศมีความโค้งต่ำสุด (smallest Radius of Curvature) ซึ่งสังเกตได้จากจุดที่คล้ายเส้นตรงมากที่สุด
3. ลากเส้น ab ในแนวระดับ
4. ลากเส้น ac โดยจะต้องสัมผัสกับเส้นตรง ab ที่จุด a
5. ลากเส้น ad ซึ่งจะต้องแบ่งครึ่งมุมที่เส้นตรง ab และ ac กระทบกันโดยจะแบ่งครึ่งมุม bac
6. Project เส้นตรงจากกราฟช่วงที่สองคือเส้น gh แล้วไปตัดกับ ad ตรงไหนเรียกจุดนั้นว่าจุด f ซึ่งก็คือหน่วยน้ำหนักกดทับสูงสุดในอดีต (Preconsolidation Pressure ; σ'_c) โดยเส้นต่างๆ ที่แสดงวิธีการลากแสดงให้เห็นในรูปที่ 8.7



รูปที่ 8.7 วิธีการหา preconsolidation pressure โดยใช้วิธีการกราฟฟิก

ดังนั้นอัตราส่วนอัดแน่นเกินปกติ (Overconsolidated ratio ; OCR) สามารถหาได้จาก

$$OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} \quad (\text{สมการที่ 8.4})$$

โดยที่ σ'_c = หน่วยแรงกดทับสูงสุดในอดีตโดยหาได้จากวิธีการข้างต้น

σ'_0 = หน่วยแรงกดทับที่ดินได้รับในปัจจุบันซึ่งจะกล่าวต่อไป

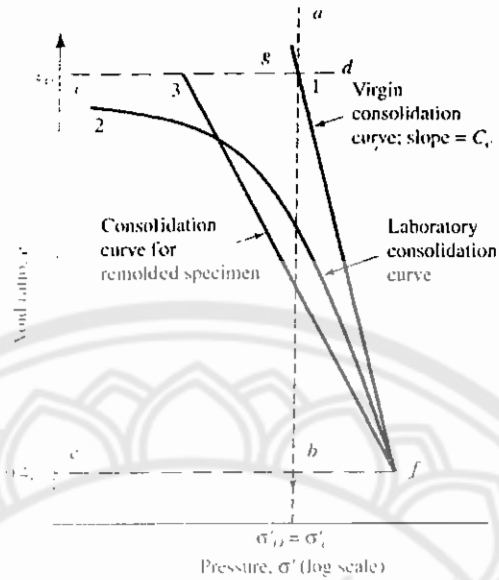
จะสามารถบอกได้ว่าการแบ่งแยกดินเป็นแบบใดสามารถบอกได้จากกรณีว่า ดินในอดีตที่เคยได้รับน้ำหนักกดทับสูงกว่าที่ดินได้รับในปัจจุบันดังนั้นแสดงว่าถ้าดินเป็นแบบ OC แล้ว $\sigma'_c < \sigma'_c$ นั้นเอง และถ้าดินเป็นแบบ NC แล้ว $\sigma'_c \geq \sigma'_c$

- 8.1.2.2 ผลกระทบต่อการรบกวนบนอัตราส่วนช่องว่าง (Effect of Disturbance on Void ratio)

ก็คือผลกระทบจากรบกวนในธรรมชาตินั่นเอง นั่นคือกรณีที่เรทำการทดลองในห้องปฏิบัติการกับดินในธรรมชาติจะไม่เหมือนกันเนื่องจากดินในธรรมชาติจะถูกรบกวนจากปัจจัยต่างๆ ในธรรมชาติ โดยสามารถแบ่งแยกดินเหนียวออกเป็น 2 ชนิดคือ

- 8.1.2.2.1 Normal Consolidated Clay

1. ในรูปที่ 12.8 เส้นโค้งที่ 2 เราได้จากการพล็อตกราฟในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเราสามารถหาหน่วยน้ำหนักกดทับสูงสุดในอดีต (Preconsolidation pressure ; σ'_c) = σ'_c เนื่องจากเป็นดินแบบ NC จากนั้นเมื่อเราทราบ $\sigma'_c = \sigma'_c$ แล้วเราก็ลากเส้น ab
2. หาอัตราส่วนช่องว่างในสนาม (C_0) จากนั้นเขียนเส้น cd ในแนวระดับ
3. หา $0.4 C_0$ แล้วเขียน cf โดยที่ f คือจุดที่ติดกับเส้นโค้งอันที่ 2
4. เชื่อมจุด fg เข้าหากันโดยที่จุด g คือจุดที่ ab ติดกับเส้น cd โดยเรียกเส้นตรงนี้ว่า "Virgin compression curve"



รูปที่ 8.8 Consolidation characteristics ของดินเหนียวแบบ NC แบบ low-medium sensitivity

-8.1.2.2.2 Overconsolidated clay

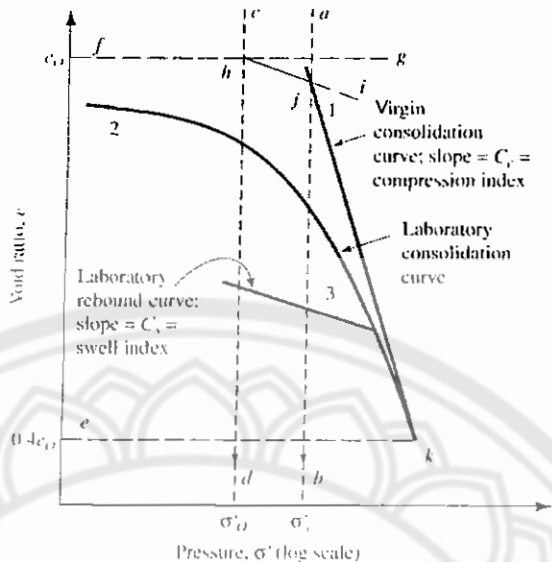
1. ในรูปที่ 8.9 เส้นโค้งที่ 2 ได้จากการพล็อตกราฟในห้องปฏิบัติการในการเพิ่มแรง (loading) และเส้นโค้งที่ 3 ก็คือการพล็อตจากการเอาน้ำหนักออก (Unloading) จากเส้นโค้งที่ 2 เราสามารถหา Preconsolidation pressure ; σ'_c ได้จากนั้นเราก็ลากเส้น ab

2. หา σ'_c ในสนามแล้วก็ลากเส้น c σ'_d

3. หาอัตราส่วนช่องว่างในสนาม (C_c) แล้วลากเส้น fg โดยที่จุดตัดระหว่าง fg และ cd คือจุด h

4. เขียนเส้น hi โดยให้ขนาดเท่ากับเส้นโค้งที่ 3 โดยที่จุดตัดระหว่าง hi และ ab คือจุด j

5. ลากเส้นต่อกันระหว่างจุด j และ k โดยที่จุด k อยู่บนเส้นโค้งอันที่ 2 ซึ่งก็คือจุดที่ติดกับ $0.4 C_c$ นั้นเอง



รูปที่ 8.9 Consolidation characteristics ของดินเหนียวแบบ OC แบบ low-medium sensitivity

จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อดินเป็นแบบ OC แล้วค่า $\sigma'_c > \sigma'_i$ จากที่กล่าวมาแล้วและจะมีค่า slope ที่นำมาเกี่ยวข้อง 2 ตัวคือ C_c และ C_s โดยค่านี้จะนำไปใช้ในกรณีประมาณค่าการทรุดตัวต่อไป

อย่างไรก็ตามในกรณีดินแบบ NC ค่า $\sigma'_c \approx \sigma'_i$ หรือน้อยกว่าเล็กน้อยและจะมีค่า Slope ที่นำมาเกี่ยวข้องเพียงตัวเดียวคือ C_c เท่านั้นเพราะมีเส้นตรงที่ 1 เพียงเส้นเดียวไม่มีการหักมุมอย่างกรณีของดินแบบ OC โดยจะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อต่อไป

- 8.1.2.3 การหาค่าการทรุดตัวจาก One-Dimensional Primary Consolidation ; S_c

การทรุดตัวแบบนี้เป็นผลมาจากการเกิดกระบวนการ consolidation ที่ทำให้เกิดการลดปริมาตรของเนื้อดิน (soil volume decrease) เพราะการไหลซึมออกมาของน้ำบางส่วน ที่เคยแทรกอยู่ในช่องว่าง (pore) ระหว่าง Solid phase ในเนื้อดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated soil)

ทั้งนี้ สาเหตุที่ทำให้เกิดการระบายน้ำดังกล่าว ก็คือ แรงกระทำจากภายนอก (applied external load) ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของแรงเค้นในเนื้อดิน (induced stress in soil mass) แต่เนื่องจากเนื้อดินที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำ (saturated soil) ประกอบขึ้นจาก solid phase และ water phase ที่เกิดการยุบตัว (deformation) ภายใต stress ได้ง่ายกว่า solid phase เป็นอย่างมาก ดังนั้น ในขณะที่ consolidation process เริ่มเกิด induced stress ทั้งหมด จะถูกแบกรับโดย

water phase นั่นคือ การเพิ่มแรงดันในน้ำที่แทรกอยู่ในช่องว่าง หรือที่เรียกว่า แรงดันน้ำส่วนเกิน (excess pore water pressure) แล้วส่งผลให้เกิดความแตกต่างของ total head และนำไปสู่การระบายน้ำออกจากช่องว่าง (pore) ระหว่าง solid phase

อย่างไรก็ตาม การระบายน้ำออกจากช่องว่าง (pore) ระหว่าง solid phase ของดิน (soil) จะเกิดขึ้นช้าเร็วต่างกัน ตามขนาดและลักษณะของช่องว่าง (pore) และชนิดของ solid phase ดังนั้น หากเป็นชั้นดินกรวด (gravel) ดินทราย (sand) และทรายเม็ดละเอียดหรือทรายป็น (silt) จะมีอัตราส่วนช่องว่างค่อนข้างมาก และไม่มีแรงประจุไฟฟ้ายึดเหนี่ยวระหว่าง solid phase และ water phase ทำให้ primary consolidation settlement เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และถือเสมือนว่าเสร็จสมบูรณ์ ไปพร้อมกับ immediate settlement นั่นคือ การหลุดตัวจาก elastic behavior และ consolidation process จะเกิดหมด ในทันทีที่สิ้นสุดงานก่อสร้าง

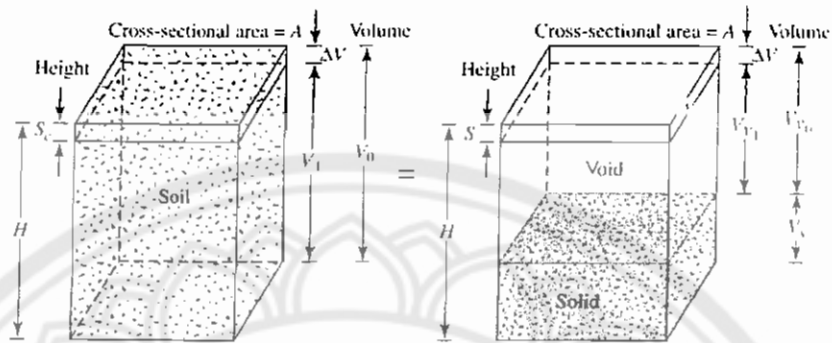
ดังนั้นในทางปฏิบัติให้ถือว่าได้การวิเคราะห์หา S_c เนื่องการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ เพราะการระบายน้ำออกจาก pore ด้วยแรงดันน้ำส่วนเกิน (excess pore water pressure) จะพิจารณาเฉพาะแต่ในกรณีที่เป็นดินเหนียว (clay) เท่านั้น ทั้งนี้ ขอแนะนำให้อ่านบททวนนิยามของ clay ที่ใช้ใน soil mechanics ให้แม่นยำว่า clay ครอบคลุมมากกว่า กรณีที่เป็นดินเหนียวล้วนๆ (pure clay) และ clay ก็ไม่ได้หมายถึงดินที่มีขนาดเท่ากับ clay size

ในทางวิเคราะห์และออกแบบฐานรากโดยทั่วไป ให้ถือว่า การหลุดตัวจาก consolidation process จะเริ่มเกิดขึ้นหลังจากที่ชั้นดินเหนียวอิ่มตัว (saturated clay) ได้รับแรงกระทำภายนอกเต็มที่ (full external load) ซึ่งในทางปฏิบัติก็คือ นับจากสิ้นสุดงานก่อสร้าง

สำหรับเวลาที่ S_c เกิดเต็มที่และเสร็จสมบูรณ์นั้น ให้คิด ณ เวลาที่น้ำได้ระบายออกจากช่องว่าง (pore) จนกระทั่ง excess pore pressure กลับมามีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งในทางปฏิบัติน้ำจะระบายออกไปได้เร็วหรือช้าก็จะขึ้นอยู่กับขนาดและลักษณะของช่องว่าง (pore) และชนิดของ solid phase ตัวอย่างเช่น หากเป็นดินเหนียวที่ประกอบด้วย grave และ/หรือ sand เป็นจำนวนมาก การระบายน้ำออกจากช่องว่าง จะเกิดเร็วกว่ากรณีที่เป็น pure clay เป็นอย่างมาก

ปริมาณ S_c ที่เกิดขึ้นทั้งหมด สามารถคำนวณหาได้จากความสัมพันธ์ที่พัฒนามาพฤติกรรม การยุบตัว (deformation behavior) ของชั้นดินและขนาดของหน่วยแรงสูงสุดที่ชั้นดินนั้น เคยรับมาในอดีต (σ_c') ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 8.1.2.2

การคำนวณหาปริมาณการทรุดตัวแบบอัดตัวคายนํ้าทำได้โดยใช้ไดอะแกรมที่แสดงในรูปที่ 8.10 โดยในรูปแสดงถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่จำเป็นที่จะต้องใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 8.10 การทรุดตัวของ one-dimension consolidation

จากรูปถ้า S_c = Primary Settlement การเปลี่ยนแปลงปริมาตรจะได้

$$\begin{aligned}\Delta V &= V_0 - V_1 \\ &= HA - (H - S_c)A \\ &= S_c A\end{aligned}\quad (\text{สมการที่ 8.5})$$

โดยที่ V_0 = ปริมาตรเริ่มต้น (initial volume)

V_1 = ปริมาตรสุดท้าย (final volume)

อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงปริมาตรก็จะเท่ากับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของอากาศ

(ΔV_v) ด้วยดังนั้น

$$\begin{aligned}\Delta V &= S_c A \\ &= V_{v0} - V_{v1} \\ &= \Delta V_v\end{aligned}\quad (\text{สมการที่ 8.6})$$

โดยที่ V_{v0} = ปริมาตรเริ่มต้น (initial void volume)

V_{v1} = ปริมาตรสุดท้ายของช่องว่าง (final void volume)

ดังนั้นจากสมการของอัตราส่วนช่องว่าง (Δe) จะได้

$$\Delta e = \frac{\Delta V_v}{V_s}$$

$$\Delta V_v = \Delta e V_s \quad (\text{สมการที่ 8.7})$$

โดยที่ Δe = การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนช่องว่าง แต่

$$V_s = \frac{V_0}{1+e_0} = \frac{AH}{1+e_0} \quad (\text{สมการที่ 8.8})$$

โดยที่ e_0 = อัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้นที่ปริมาตร V_0

ดังนั้นจากสมการที่ 8.5 และ 8.8 จะได้

$$\Delta V = S_c A$$

$$= \Delta e V_s$$

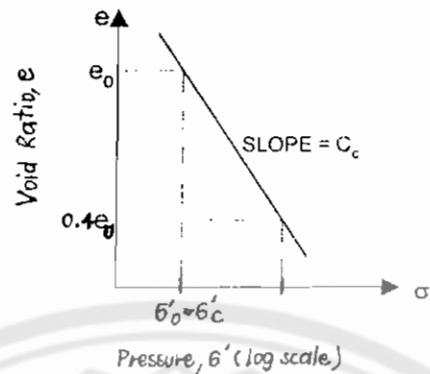
$$= \frac{AH}{1+e_0} \Delta e$$

$$\therefore S_c = H \frac{\Delta e}{1+e_0} \quad (\text{สมการที่ 8.9})$$

จากสมการที่ 8.9 ถ้าแบ่งแยกชนิดของดินเหนียวเป็นสองแบบคือแบบที่ 1 Normally consolidated และ 2 Over-consolidated แล้วสมการในการหาค่า S_c (Primary Consolidation) สามารถเปลี่ยนได้ดังต่อไปนี้

-8.1.2.3.1 กรณี Normally consolidated clays

จากรูปที่ 8.8 ค่า Δe (ค่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนช่องว่าง) สามารถได้จากค่า slope ของ Virgin consolidation curve นั่นก็คือ C_c = ดัชนีการอัดตัว (compression Index) ดังแสดงตามรูปที่ 12.11



รูปที่ 8.11 แสดง Virgin consolidation Curve

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } C_c &= \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'} \\ \Delta e &= C_c \Delta \log \sigma' \\ \Delta e &= C_c [\log (\sigma' + \Delta \sigma') - \log \sigma'_0] \\ \Delta e &= C_c \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma'}{\sigma'_0} \right) \end{aligned}$$

แทนค่า Δe ลงในสมการที่ 8.9 แล้วจะได้

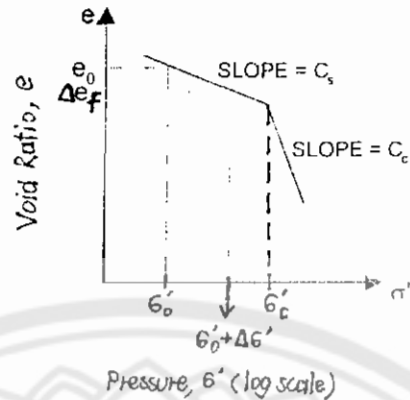
$$S_c = \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma'}{\sigma'_0} \right) \quad (\text{สมการที่ 8.10})$$

- 8.1.2.3.2 กรณี Over-consolidated Clays

จากรูปที่ 8.9 ค่า Δe สามารถหาได้ 2 กรณีดังต่อไปนี้คือ

1. กรณีที่ $\sigma'_0 + \Delta \sigma' \leq \sigma'_c$

โดยพื้นที่จะอยู่ในเส้น h_j ซึ่งสามารถใช้ค่า slope แต่เพียงอันเดียวคือค่า slope ของ Laboratory Rebound curve นั่นก็คือ C_s = ดัชนีการบวมตัว (Swell Index) ดังแสดงตามรูปที่ 12.12 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนช่องว่างหลังจากสิ้นสุดการยุบตัว (e_c) ไม่มากพอที่จะไปถึงเส้น curve ของ Virgin consolidation ทำให้ทั้งอัตราส่วนช่องว่างตอนเริ่มต้น (e_0) และอัตราส่วนช่องว่างหลังสิ้นสุดการยุบตัว (e_c) มีพฤติกรรมอยู่ใน curve ของ C_s



รูปที่ 8.12 แสดงถึงพฤติกรรมของดินแบบ $\sigma'_0 + \Delta\sigma' \leq \sigma'_c$

ดังนั้น
$$C_s = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'}$$

โดยที่ อัตราการเปลี่ยนแปลง σ' ($\Delta \log \sigma'$) อยู่ในช่วง $\sigma'_0 \rightarrow \sigma' = \sigma'_0 + \Delta\sigma'$

$$\Delta e = C_s \Delta \log \sigma'$$

$$\Delta e = C_s [\log(\sigma'_0 + \Delta\sigma') - \log \sigma'_0]$$

$$\Delta e = C_s \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \right)$$

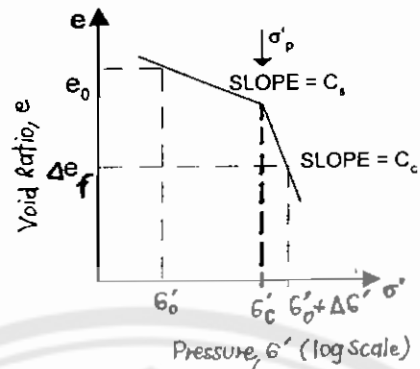
แทนค่า Δe ลงในสมการที่ 8.9 แล้วจะได้

$$S_c = \frac{C_s H}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \right) \quad (\text{สมการที่ 8.11})$$

โดยที่ $\sigma'_0 + \Delta\sigma' \leq \sigma'_c$

2. กรณีที่ $\sigma'_0 + \Delta\sigma' > \sigma'_c$

โดยพื้นที่จะมีผลครอบคลุม Slope ทั้งสอง Slope ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 8.9 ดังนั้นเราจะต้องใช้ Slope ของทั้งสอง Curve ดังแสดงตามรูปที่ 8.13 นั่นก็คือค่าอัตราส่วนช่องว่างหลังสิ้นสุดการยุบตัว (e_c) มีพฤติกรรมอยู่ใน Curve ของ C_c และอัตราส่วนช่องว่างก่อนการใช้แรง (e_0) มีพฤติกรรมอยู่ใน Curve ของ C_s นั่นเอง



รูปที่ 8.13 แสดงพฤติกรรมของดินแบบ $\sigma'_0 + \Delta\sigma' > \sigma'_c$

ดังนั้นการหา Δe_1 ใช้ Curve ของ C_s และการหา Δe_2 ใช้ Curve ของ C_c

จะได้ว่า

$$S_c = H \frac{\Delta e_1}{1+e_0} + H \frac{\Delta e_2}{1+e_0} \quad (\text{สมการที่ 8.12})$$

$$\text{โดยที่ } C_s = \frac{\Delta e_1}{\Delta \log \sigma'}$$

โดยที่ อัตราการเปลี่ยนแปลง σ' ($\Delta \log \sigma'$) อยู่ในช่วง $\sigma'_0 \rightarrow \sigma'_c$ โดยดูได้จากรูปที่ 8.13

$$\begin{aligned} \Delta e_1 &= C_s \Delta \log \sigma' \\ &= C_s [\log \sigma'_c - \log \sigma'_0] \\ &= C_s \log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} \end{aligned}$$

$$\text{และ } C_c = \frac{\Delta e_2}{\Delta \log \sigma'}$$

โดยที่ อัตราการเปลี่ยนแปลง σ' ($\Delta \log \sigma'$) อยู่ในช่วง $\sigma'_0 \rightarrow \sigma'_c + \Delta\sigma' = \sigma'_0 + \Delta\sigma'$ โดยดูได้จากรูปที่ 8.13

$$\begin{aligned} \Delta e_2 &= C_c \Delta \log \sigma' \\ &= C_c [\log (\sigma'_c + \Delta\sigma') - \log \sigma'_c] \\ &= C_c \log \left(\frac{\sigma'_c + \Delta\sigma'}{\sigma'_c} \right) \end{aligned}$$

แทนค่า Δe_1 และ Δe_2 ลงในสมการที่ 8.12 จะได้

$$S_c = \frac{C_c H}{1+e_0} \log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} + \frac{C_c H}{1+e_0} \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma'}{\sigma'_c} \right) \quad (\text{สมการที่ 8.13})$$

โดยที่ $\sigma'_0 + \Delta \sigma' > \sigma'_c$

- 8.1.2.3.3 ดัชนีการอัดตัว (Compression Index ; C_c) และดัชนีการบวม (Swell Index ; C_s)

ในการหาค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index; C_c) และดัชนีการบวม (Swell Index ; C_s) เราสามารถหาค่าโดยวิธีการทาง Graphic (Graphic solution) ดังแสดงในรูปที่ 8.8 และรูปที่ 8.9 นั่นก็คือการหาค่าจาก slope ของการทดลองในห้องปฏิบัติการ แต่ในกรณีที่เราไม่มีผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการเราสามารถประมาณการหาค่าดัชนีต่างๆ ได้ตามทฤษฎีของแต่ละบุคคลที่คิดค้นขึ้นมาดังต่อไปนี้

Skempton (1944) ได้คิดหาวิธีการประมาณค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index) สำหรับตัวอย่างดินเหนียวคงสภาพ (undisturbed clay) ได้ตามสมการ

$$C_c = 0.009 (LL - 10) \quad (\text{สมการที่ 8.14})$$

โดยที่ LL = ชีดจำกัดความชื้นเหลว (Liquid Limit)

Rendon - Herrero (1983) ได้สังเกตจึพื้นฐานของดินเหนียวในธรรมชาติ (Natural Clays) แล้วก็เสนอความสัมพันธ์ของการหาดัชนีการอัดตัว (compression Index) ได้ตามสมการ

$$C_c = 0.141 G_s^{1.2} \left(\frac{1+e_0}{G_s} \right)^{2.38} \quad (\text{สมการที่ 8.15})$$

โดยที่ G_s = ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity)

e_0 = อัตราส่วนช่องว่างของดิน in-situ

อีก 2 ปีต่อมา Nagral และ Murty (1985) ได้เสนอวิธีการหาดัชนีการอัดตัว (compression Index)

$$C_c = 0.2343 \left[\frac{LL(\%)}{100} \right] G_s \quad (\text{สมการที่ 8.16})$$

ส่วนค่าดัชนีการบวม (swell Index) ก็จะมีค่าน้อยกว่าดัชนีการอัดตัวมากโดยจากการทดลองในห้องปฏิบัติการส่วนมากค่าดัชนีการบวม (Swell Index) จะมีค่าประมาณดังสมการ

$$C_s \approx \frac{1}{5} \text{ to } \frac{1}{10} C_c \quad (\text{สมการที่ 8.17})$$

อย่างไรก็ตาม Nagarai และ Murty (1985) ก็ได้เสนอสมการในการหาค่าดัชนีการบวมคือ

$$C_s = 0.0463 \left[\frac{LL(\%)}{100} \right] G, \quad (\text{สมการที่ 8.18})$$

- 8.1.2.4 ค่าการทรุดตัวจาก Secondary Consolidation ; S_s

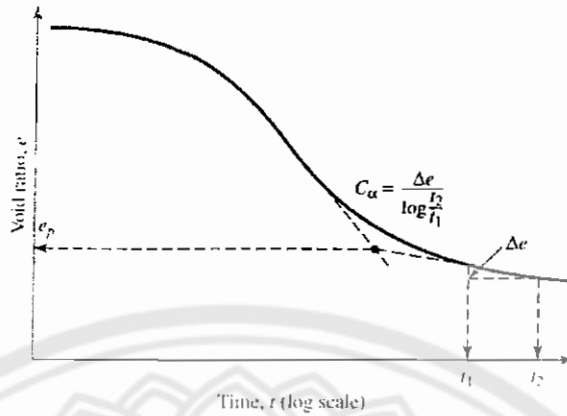
เป็นการทรุดตัวที่คิดเฉพาะในชั้นดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated clay) มีสาเหตุจากการล้า (creep) ของเม็ดดิน (solid phase) ที่รับน้ำหนักกระทำจากภายนอก (applied external load) อยู่เป็นเวลานาน ทำให้เกิดการยุบตัว (deformation) ของ solid phase หรืออาจจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ (re-arrangement) ของ solid phase

ในงานวิเคราะห์และออกแบบฐานรากโดยทั่วไป ให้ถือว่า การทรุดตัวจาก creep หรือ S_s จะเริ่มเกิดขึ้นหลังจากที่ชั้นดินเหนียวอิ่มตัว (saturated clay) ได้ระบายน้ำออกจากช่องว่าง (pore) จนกระทั่ง excess pore pressure กลับมามีค่าเป็นศูนย์ นั่นก็คือ สิ้นสุด Consolidation process

สำหรับเวลาที่ S_s เกิดเต็มที่และเสร็จสมบูรณ์นั้น จะไม่สามารถกำหนดได้เพราะ creep behavior จะทำให้เกิด S_s มากขึ้นอย่างต่อเนื่องไปตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น ทางเลือกหนึ่งในการวิเคราะห์ก็คือ ให้ใช้อายุการใช้งานของสิ่งปลูกสร้างมากำหนดเวลาสิ้นสุด สำหรับการคำนวณหา S_s

อย่างไรก็ตาม สิ่งที่มีมักจะพบในงานออกแบบจริงก็คือ เวลาที่สิ้นสุด consolidation process หรือ เวลาที่แรงดันน้ำส่วนเกิน กลับมามีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งส่วนมากจะเกิดภายหลังจากอายุการใช้งานของสิ่งก่อสร้าง ดังนั้นในบางกรณีจึงไม่นำมาพิจารณา

การทรุดตัวของขบวนการอัดตัวครั้งที่สองสามารถหาได้โดยการพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับเวลา (e -log t) ตามรูปที่ 8.14 โดยสามารถหา Slope ของ Curve ซึ่งก็คือดัชนีการอัดตัวครั้งที่ 2 (Secondary Compression Index ; C_{∞})



รูปที่ 8.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง e และ $\log t$ ภายใต้การลดลงของน้ำหนัก และแสดงถึงวิธีการหาค่า Secondary consolidation index

ดังนั้นเราสามารถหาอัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนช่องว่าง (Δe) ได้จากสมการ

$$C_{\alpha} = \frac{\Delta e}{\Delta \log t} \quad (\text{สมการที่ 8.19})$$

$$\Delta e = C_{\alpha} [\log t_2 + \log t_1]$$

$$\Delta e = C_{\alpha} \log \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (\text{สมการที่ 8.20})$$

แทนค่า Δe ลงในสมการที่ 8.9

ดังนั้นปริมาณการทรุดตัวจากการอัดตัวครั้งที่สอง (S_s) สามารถหาได้จากสมการ

$$S_s = \frac{C_{\alpha} H}{1 + e_p} \log \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (\text{สมการที่ 8.21})$$

โดยที่ C_{α} = อัตราส่วนช่องว่างหลังจากจบ Primary Consolidation

(ดูจากรูปที่ 8.14)

H = ความหนาของชั้นดินเหนียว

แต่เราสามารถรวบรวมสมการได้ดังนี้คือ

$$S_s = C'_{\alpha} H \log \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (\text{สมการที่ 8.22})$$

โดยที่
$$C'_\alpha = \frac{C_\alpha}{1 + C_p}$$

ซึ่งค่า C'_α สามารถประมาณค่าได้ดังต่อไปนี้

- Over-consolidated Clays = 0.001 หรือมากกว่านั้น
- Normally Consolidated Clays = 0.005 ถึง 0.03
- Organic soil = 0.04 หรือมากกว่า

8.1.3 อัตราการทรุดตัวของดินแบบอัดตัวคายน้ำ (Time Rate of Consolidation)

ระยะเวลาการทรุดตัวของดินแบบอัดตัวคายน้ำจะช้าหรือเร็ว ขึ้นกับความดันน้ำภายในช่องว่างระหว่างเม็ดดินที่เพิ่มขึ้นสามารถลดลงด้วยอัตราเร็วเท่าไร ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับความซึมน้ำได้ (Permeability) ของดินนั่นเอง สำหรับดินเหนียว (เป็นดินชนิด Fined Grain Soils) จะมีอัตราการทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำช้ามาก เนื่องจากสัมประสิทธิ์การซึมได้ที่ต่ำซึ่งใช้เวลานานมากกว่าการทรุดตัวจะสิ้นสุด การศึกษาค่าการทรุดตัวจึงมีความสำคัญยิ่ง เนื่องจากวิศวกรจำเป็นต้องทราบปริมาณการทรุดตัวที่ระยะเวลาต่าง โดยจะพล็อตลงกราฟซึ่งเรียกว่า "Time Settlement curve" ซึ่งจะกล่าวต่อไปโดยปริมาณการทรุดตัวที่ระยะเวลาต่างๆ จะใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบโครงสร้างได้โดยปลอดภัยทั้งในระยะสั้น และระยะยาวเนื่องจากว่าการทรุดตัว (Settlement) จะทำให้โครงสร้างเสียหายได้ถ้าไม่มีการป้องกัน

การหาอัตราการทรุดตัว (Time Rate of Consolidation) สามารถหาได้จากทฤษฎีของ Terzaghi (1925) โดยมีสมมุติฐานสำคัญ 6 ประการคือ

1. ชั้นดินมีลักษณะเป็นเนื้อเดียว (Homogeneous)
2. ดินมีลักษณะอิ่มตัวด้วยน้ำสมบูรณ์ (Saturation)
3. น้ำระบายออกจากดินเหนียวในแนวตั้งเท่านั้น
4. Consolidation Settlement (S_c) เกิดจากการที่น้ำซึมออกจากดินเท่านั้น เนื่องจากดินมีปริมาตรคงที่
5. ดินเหนียวไม่สามารถขยายตัวด้านข้างได้
6. สามารถใช้กฎของ Darcy (Darcy's law) ในการคำนวณได้

ในการคำนวณค่าอัตราการทรุดตัว (Time Rate of Consolidation) จะใช้ค่าต่างๆ ในการคำนวณดังนี้

- 8.1.3.1 Coefficient of volume compressibility ; m_v

คือการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินต่อหน่วยปริมาตรเดิม เนื่องจากน้ำหนักหรือหน่วยแรงกดอัดที่เพิ่มขึ้น

$$m_v = \frac{\Delta V}{V_o \Delta P} \quad (\text{สมการที่ 8.23})$$

โดยที่ V_o = ปริมาตรเดิมของดิน

ΔV = ปริมาตรของดินที่เปลี่ยนไป

ΔP = น้ำหนักหรือแรงกดอัดที่เพิ่มขึ้น

- 8.1.3.2 สัมประสิทธิ์ของการยุบตัวของดิน (Coefficient of consolidation ; C_v)

$$C_v = \frac{k}{m_v \gamma_w} \quad (\text{สมการที่ 8.24})$$

โดยที่ k = สัมประสิทธิ์ความซึมได้ (Coefficient of permeability)

γ_w = หน่วยน้ำหนักของน้ำ

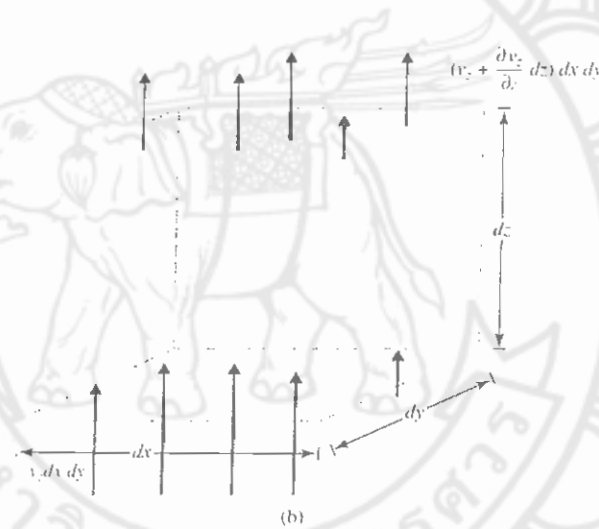
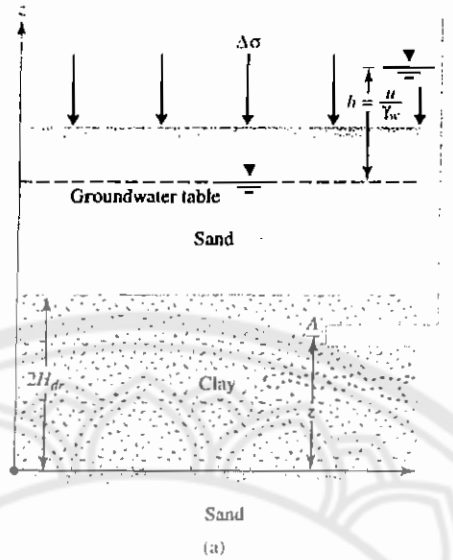
- 8.1.3.3 ระดับขั้นการยุบอัดตัวของดิน (Degree of Consolidation ; U)

คืออัตราส่วนของ การหดตัวภายหลังช่วงเวลา t ต่อการหดตัวทั้งหมดโดยพิจารณาจากรูปที่

8.15

$$U = \frac{S_c(t)}{S_c} = 1 - \frac{\left(\frac{1}{2H_{dr}}\right) \int_0^{2H_{dr}} u_z dz}{u_o} = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v} \quad (\text{สมการที่ 8.25})$$

$$\text{โดยที่ } u_z = \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{2u_o}{M} \sin\left(\frac{Mz}{H_{dr}}\right) \right] e^{-M^2 T_v} \quad (\text{สมการที่ 8.26})$$



รูปที่ 8.15 (a) ชั้นดินเหนียวที่เกิดการทรุดตัว (b) การไหลของน้ำผ่านจุด A

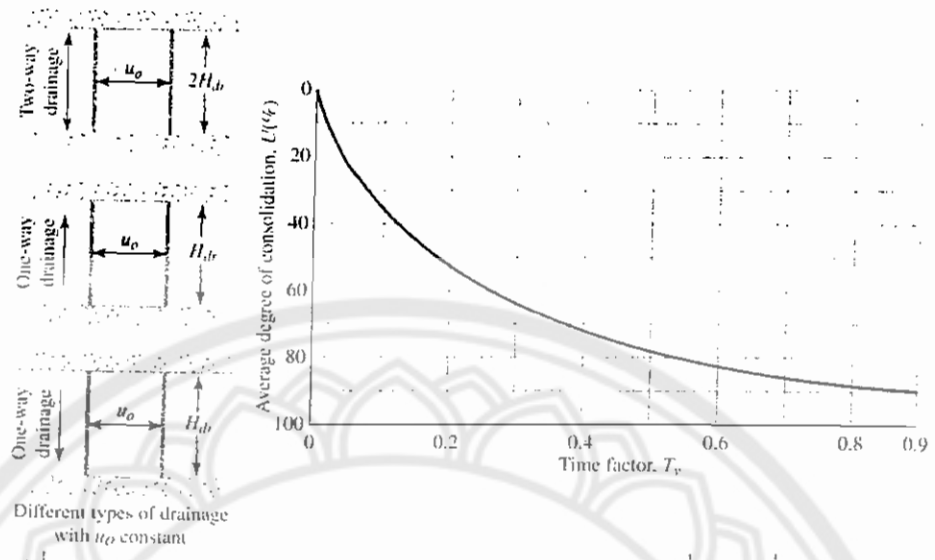
จากการอินทิเกรตในสมการที่ 8.25 ทำให้เราได้ความสัมพันธ์ของตัวประกอบของเวลา (Time factor ; T_v) โดยแสดงความสัมพันธ์เป็นรูปกราฟได้ในรูปที่ 8.16.1 และสามารถประมาณได้จากสมการดังต่อไปนี้

สำหรับ $U = 0$ ถึง 60%

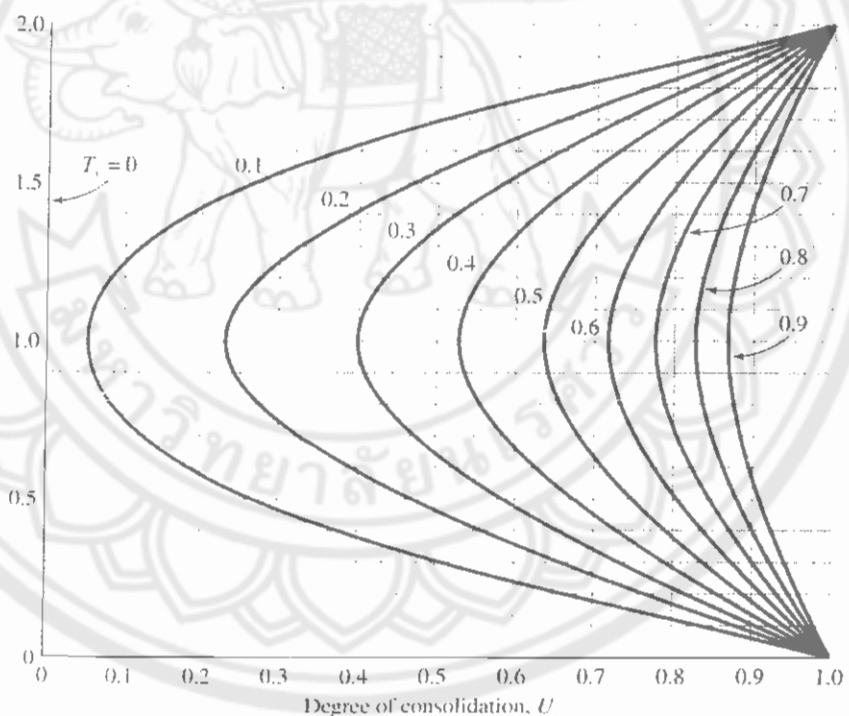
$$T_v = \frac{\pi \left(\frac{U\%}{100} \right)^2}{4} \quad (\text{สมการที่ 8.27})$$

สำหรับ $U > 60\%$

$$T_v = 1.781 - 0.933 \log (\log - u_2(\%)) \quad (\text{สมการที่ 8.28})$$



รูปที่ 8.16.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง U กับ T_v (Time Factor) โดยที่ u_0 คงที่ในทุกๆ ความลึก



รูปที่ 8.16.2 ค่า U_z กับค่า T_v และ z/H_{dr}

ซึ่งจากสมการที่ 8.26 และสมการที่ 8.27 สามารถสรุปเป็นตารางเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณได้ตามตารางที่ 8.4

ตารางที่ 8.4 แสดงค่า T_v ที่ค่า U ต่างๆ

U (%)	T_v	U (%)	T_v	U (%)	T_v
0	0	34	0.0907	68	0.377
1	0.00008	35	0.0962	69	0.390
2	0.0003	36	0.102	70	0.403
3	0.00071	37	0.107	71	0.417
4	0.00126	38	0.113	72	0.431
5	0.00196	39	0.119	73	0.446
6	0.00283	40	0.126	74	0.461
7	0.00385	41	0.132	75	0.477
8	0.00502	42	0.138	76	0.493
9	0.00636	43	0.145	77	0.511
10	0.00785	44	0.152	78	0.529
11	0.0095	45	0.159	79	0.547
12	0.0113	46	0.166	80	0.567
13	0.0133	47	0.173	81	0.588
14	0.0154	48	0.181	82	0.610
15	0.0177	49	0.188	83	0.633
16	0.0201	50	0.197	84	0.658
17	0.0227	51	0.204	85	0.684
18	0.0254	52	0.212	86	0.712
19	0.0283	53	0.221	87	0.742
20	0.0314	54	0.230	88	0.774
21	0.0346	55	0.239	89	0.809
22	0.0380	56	0.248	90	0.848
23	0.0415	57	0.257	91	0.891
24	0.0452	58	0.267	92	0.938
25	0.0491	59	0.276	93	0.993
26	0.0531	60	0.286	94	1.055
27	0.0572	61	0.297	95	1.129
28	0.0615	62	0.307	96	1.219
29	0.0660	63	0.318	97	1.336
30	0.0707	64	0.329	98	1.500
31	0.0754	65	0.304	99	1.781
32	0.0803	66	0.352	100	∞
33	0.0855	67	0.364		

-8.1.3.4 อัตราความเร็วของการยุบตัว (Rate of Consolidation ; t_v)

คือเวลาที่ใช้ในการยุบตัวของดิน (t) หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

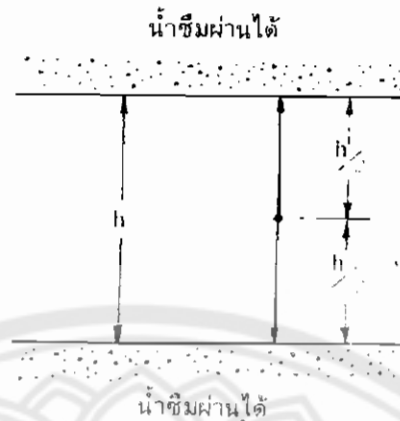
$$t_v = \frac{T_v H_{dr}^2}{C_v} \quad (\text{สมการที่ 8.29})$$

โดยจะต้องพิจารณาเงื่อนไขต่างๆ ที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

- พิจารณาทิศทางการไหลของน้ำว่าเป็น two-way drainage หรือ one-way drainage

1. กรณีเป็น two-way drainage (ดังแสดงในรูปที่ 8.16.1)

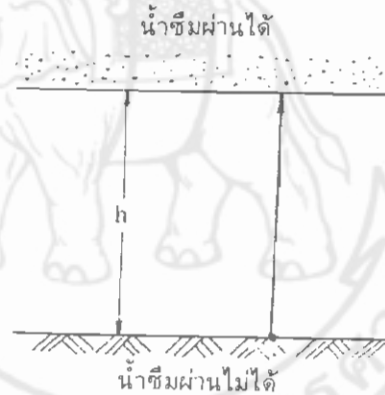
$$H_{dr} \text{ จะเท่ากับครึ่งหนึ่งของความหนาของชั้นดิน} = \frac{h}{2} \text{ ตามรูปที่ 8.17}$$



รูปที่ 8.17 แสดงการระบายน้ำออกจากดิน 2 ทาง

2. กรณีเป็น one-way drainage (ดังแสดงในรูปที่ 8.16.1)

H_{dr} จะเท่ากับความหนาของชั้นดิน = h ตามรูปที่ 8.18



รูปที่ 8.18 แสดงการระบายน้ำออกจากดินทางเดียว

ในการทดสอบการยุบอัดตัวในห้องปฏิบัติการ จะเห็นว่า มีหินพรุนอยู่ทั้งด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างดิน ดังนั้น H_{dr} จึงเท่ากับครึ่งหนึ่งของความหนาของตัวอย่างดิน เพราะเป็นการระบายน้ำออกจากดินแบบ 2 ทาง

- 8.1.3.5 การหาค่า Coefficient of volume compressibility ; m_v)

ค่าสัมประสิทธิ์ของความสามารถในการยุบอัดตัว (m_v) สามารถหาได้จากสมการ 8.23 ดังนี้

$$m_v = \frac{\Delta V}{V_o \Delta P} \quad (\text{สมการที่ 8.23})$$

แต่เนื่องจากดินถูกสมมติว่าไม่ขยายตัวทางด้านข้าง (ทฤษฎีของ Tezaghi) นั่นคือพื้นที่หน้าตัดคงที่ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาตรสามารถเขียนได้ในรูปของความหนาของชั้นดิน h ได้ดังรูปที่ 8.19

$$\therefore m_v = \frac{1}{h_0} \times \frac{\Delta h}{\Delta P} \quad (\text{สมการที่ 8.30})$$

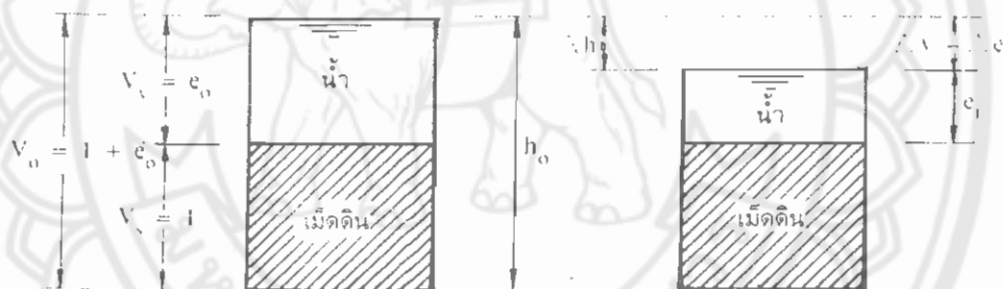
แต่เมื่อดินถูกสมมติให้ว่ามีปริมาตรคงที่ซึ่งไม่สามารถยุบอัดตัวลงได้ (ทฤษฎีของ Tezaghi) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาตรใดๆ ของดิน ก็คือการเปลี่ยนแปลงช่องว่างนั่นเอง ดังรูปที่ 8.19

$$m_v = \frac{1}{1 + e_0} \frac{\Delta e}{\Delta P} \quad (\text{สมการที่ 8.31})$$

โดยที่ e_0 = อัตราส่วนช่องว่างดินเดิม

$1 + e_0$ = ปริมาตรของดินเดิม

Δe = อัตราส่วนช่องว่างที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 8.19 แสดงความสัมพันธ์ในการหา m_v

-8.1.3.6 การหาค่าสัมประสิทธิ์ในการยุบตัวของดิน (Coefficient of Consolidation ; C_v)

จากที่กล่าวมาแล้วจะเห็นได้ว่าคุณสมบัติในการยุบตัวของดิน จะขึ้นอยู่กับค่า m_v แต่ถ้าเรามีผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการเราก็สามารถหาค่า C_v ได้เลย โดยเขียนเส้นความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับการยุบตัวโดยมีการหาอยู่ 2 วิธีคือ

-8.1.3.6.1 วิธีของ Casagrade และ Fadum (1940) เรียกว่า "Logarithm-of-Time Method"

1. เขียนเส้นความสัมพันธ์ที่ระหว่าง $\log t$ กับการยุบตัวดังแสดงดังรูป 8.20 จากนั้นลากเส้นตรงที่สัมผัสเส้นกราฟของช่วง Primary consolidation และช่วง Secondary consolidation มาตัดกันที่จุด A แล้วลากเส้นตรงขนานกับแกน X ($\log t$) จากจุด A ไปตัดแกน y จนได้ค่า d_{100}

2. เลือกจุด B (จุดใดๆ บนกราฟ) ลากเส้นจากจุด B ไปตัดแกน X จะได้ค่า t_1 และ t_2 โดยที่ $t_2 = 4t_1$

3. ลากเส้นตรงตั้งฉากกับแกน X จากจุด t_2 ไปตัดเส้นกราฟที่จุด C จะได้ระยะ X

4. วัดระยะจากจุด B ขึ้นไปเป็นระยะเท่ากับ X ลากเส้นขนานแกน X ไปตัดแกน y ซึ่งจะได้จุดตัดคือ d_0

5. หาค่า $d_{50} = \frac{d_0 + d_{100}}{2}$

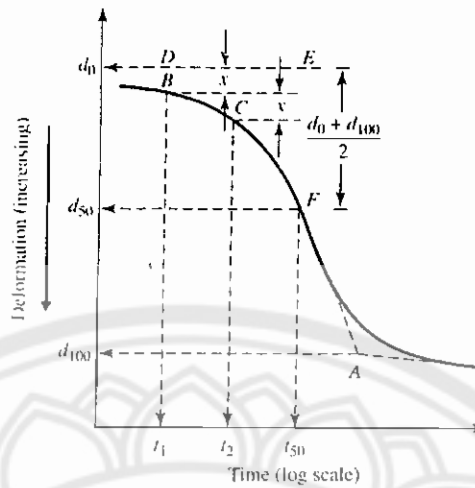
6. ลากเส้นจาก d_{50} ไปตัดเส้นกราฟที่จุด F ลากเส้นจากจุด F มาตัดกับแกน X จะได้ค่า t_{50}

7. จากสมการ

$$t_{50} = \frac{T_{50} H^2}{C_v}$$

จะได้ $C_v = \frac{0.197 H^2}{t_{50}}$ (สมการที่ 8.32)

โดยที่ $T_{50} = 0.197$ จากตารางที่ 8.4



รูปที่ 8.20 วิธีการหาค่า C_v โดยวิธี Logarithm-of-time method

- 8.1.3.6.2 วิธีของ Taylor (1942) เรียกว่า "Square-Root-of-Time Method"

1. เขียนเส้นความสัมพันธ์ระหว่าง \sqrt{t} กับการยุบตัวดังแสดงดังรูป 8.21 จากนั้นลากเส้น AB ซึ่งเป็นเส้นที่สัมผัสเส้นกราฟมากที่สุด

2. ลากเส้น OC โดยที่ $OC = 1.15OB$ จากนั้นลากเส้น AC มาตัดกับเส้นกราฟที่จุด D

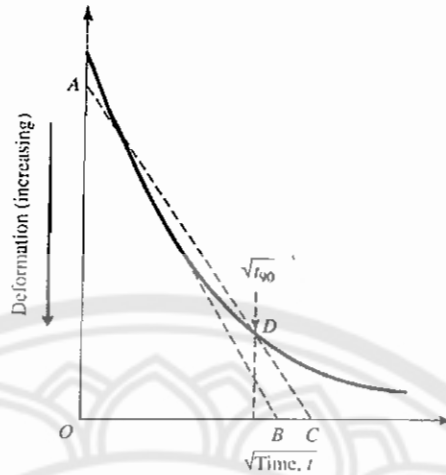
3. ลากเส้นจากจุด D มาตัดแกน ซึ่งจะได้อ่านค่าที่ตัดคือ T_{90}

4. จากสมการ

$$t_{90} = \frac{T_{90} H_{dr}^2}{C_v}$$

จะได้ $C_v = \frac{0.848 H_{dr}^2}{t_{90}}$ (สมการที่ 8.33)

โดยที่ $T_{90} = 0.848$ จากตารางที่ 8.4



รูปที่ 8.21 วิธีการหาค่า C_v โดยวิธี Square-root-of-time fitting method

อย่างไรก็ตามค่า C_v ที่ได้จากทั้งสองวิธีจะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งควรเลือกใช้ C_v ที่มีค่ามากกว่าเพราะจากสมการข้างต้นจะเห็นว่าถ้าหากว่าค่า C_v มาก ระยะเวลาการเกิดการยุบตัวเต็มที่จะสั้นกว่าเมื่อค่า C_v น้อย (worst case)

8.1.4 Time Settlement Curve

ดินเหนียว เป็นดินซึ่งมีความสำคัญและเป็นปัญหามากที่สุดทางปฐพีกลศาสตร์ (Soil Mechanics) ทำให้เกิดการทรุดตัวของฐานรากอาคาร เนื่องจากดินเหนียวนั้นน้ำซึมผ่านได้ยาก ทำให้การยุบตัวเกิดเป็นเวลานานต่อเนื่อง รวมทั้งการกระจายแรงดันไม่เท่ากัน การทรุดตัวจึงไม่สม่ำเสมอ

ในการวิเคราะห์การยุบตัวของชั้นดินเหนียว สามารถใช้ Time-settlement curve ทำนัยค่าการยุบตัวที่เวลาต่างๆ ได้ โดยพิจารณาเฉพาะช่วง Primary consolidation Settlement เท่านั้นโดยการสร้าง Time-settlement curve นั้นสามารถสร้างจากสมการที่ 8.29

$$t_v = \frac{T_v H_{dr}^2}{C_v} \quad (\text{สมการที่ 8.29})$$

โดยใช้ t_v ณ ช่วง U ต่างๆ ตามตารางที่ 8.4 จากนั้นนำ Primary Consolidation settlement (S_c) มาหาค่าในช่วง U ต่างๆ ด้วย โดยจะกำหนดให้ t_0 คือเวลาที่สิ้นสุดการก่อสร้างหรือเวลาที่เริ่มต้นการเกิดการยุบตัวแบบ Consolidation settlement (0% Consolidation) และ t_{100} คือเวลาที่การยุบตัวแบบ Consolidation settlement สิ้นสุด (100% Consolidation) แต่ t_{100} จะเกิดเมื่อเวลาผ่านไปยาวนานมาก (t_{100} ถึง t_{∞}) ดังนั้นจึงพิจารณาค่าการยุบตัวที่เวลา t_{90} (90%

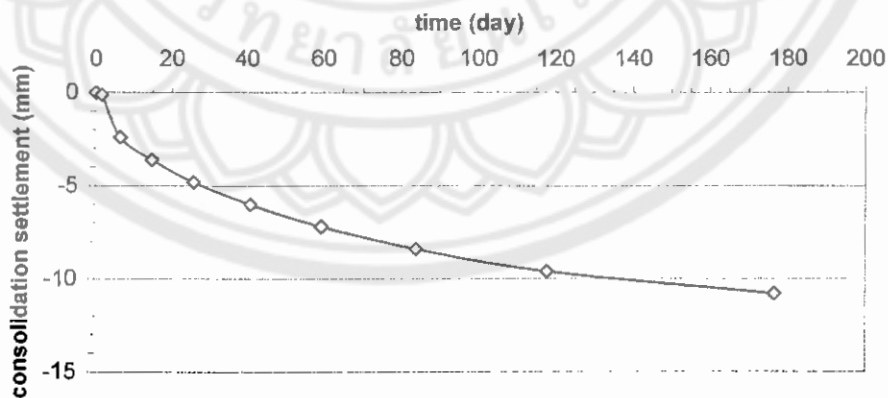
Consolidation) เมื่อนำค่าแล้วนำไปพล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง Settlement ณ ช่วง U ต่างๆ กับ Time ณ ช่วง U เดียวกันกับ Settlement นั้นเอง ดังแสดงตัวอย่างเป็นตารางและ curve ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 8.5 ตัวอย่างการคำนวณค่าต่างๆ ในตารางที่ใช้วาด Time Settlement Curve

U (%)	T_v (จากตารางที่ 12.4)	$t_{@U} = \frac{(T_v H_{dr}^2)}{C_v}$ (day)	$S_{@U} = (U)(S_c)$ (mm)
0	0	0	0
10	0.00785	1.6	0.12
20	0.0314	6.5	2.4
30	0.0707	14.7	3.6
40	0.123	25.6	4.8
50	0.197	41.0	6.0
60	0.286	59.6	7.2
70	0.403	84.0	8.4
80	0.567	118.0	9.6
90	0.848	176.7	10.8

หมายเหตุ : กำหนดให้ S_c เท่ากับ 12 mm

ซึ่งจากตารางข้างต้นสามารถสร้าง Time Settlement Curve ได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 8.22 แสดงตัวอย่างกราฟ Time Settlement Curve ที่สร้างจากตารางที่ 8.5

จากกราฟจะเห็นได้ว่าถ้าเราต้องการทราบค่าการทรุดตัวเมื่อเวลาผ่านไปเท่ากับ 100 วัน เราก็รู้ได้ว่า การทรุดตัวทรุดไปประมาณ 9 mm เป็นต้น ซึ่งเหมาะจะใช้ประมาณค่าการทรุดตัวในการก่อสร้าง

8.1.5 การหาค่าการยุบตัวได้ฐานราก (Calculation of Consolidation Settlement under a Foundation)

ในทุกๆ ความลึก (z) ถ้าการทรุดตัวเป็นแบบ One-dimensional Settlement ก่อนที่เราจะใช้สมการในการหาค่า Primary Consolidation Settlement (S_c) ในสมการที่ 8.10, สมการที่ 8.11, สมการที่ 8.13 ค่า $\Delta\sigma'$ ที่นำมาแทนค่าในสมการจะต้องเป็นจุดเท่านั้น แต่กรณีในการทำงานจริงชั้นดินเหนียวมีความหนา ดังนั้นเราจะต้องหาค่าเฉลี่ยก่อนนำมาแทนค่าในสมการดังกล่าว ซึ่งสามารถ

$\Delta\sigma'_{เฉลี่ย}$ หรือ $\Delta\sigma'_{av}$ ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta\sigma'_{av} = \frac{\Delta\sigma'_t + 4\Delta\sigma'_m + \Delta\sigma'_b}{\sigma} \quad (\text{สมการที่ 8.34})$$

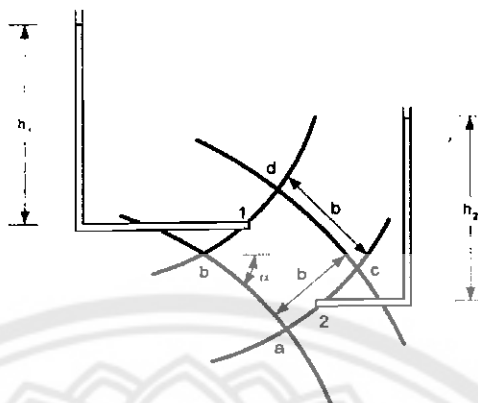
โดยที่ $\Delta\sigma'_t$ = หน่วยแรงประสิทธิผลที่ด้านบนของชั้นดิน

$\Delta\sigma'_m$ = หน่วยแรงประสิทธิผลที่กึ่งกลางของชั้นดิน

$\Delta\sigma'_b$ = หน่วยแรงประสิทธิผลที่ใต้สุดของชั้นดิน

8.2 โจทย์ทบทวนเนื้อหา ความรู้ และความเข้าใจ (Example)

8.2.1 จากรูปที่ 8.23 ตารางการไหลของน้ำ (Flow net) ที่มีความกว้าง (b) = 1 cm วัดความสูงของระดับน้ำในพิโซมิเตอร์ที่จุด 1 จะได้ $h_1 = 4.5$ cm และจุดที่ 2 จะได้ $h_2 = 4.0$ cm และสามารถวัดค่ามุม α ได้เท่ากับ 20° จงหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ (k) สำหรับดินชนิดนี้ เมื่อปริมาณการไหลของน้ำผ่านช่วงต่อเวลาต่อหนึ่งหน่วยความลึกเท่ากับ 4.03×10^{-7} cm³/sec



รูปที่ 8.23 แสดงรูปที่ใช้ในข้อที่ 8.2.1

วิธีทำ จากกฎของดาร์ซี (Darcy's Law) จะได้

$$q = kiA$$

$$\text{ดังนั้น } k = \frac{q}{iA}$$

จากสมการของค่าความชันทางชลศาสตร์ (i)

$$= \frac{\Delta H}{L}$$

$$= \frac{h_1 + b \sin \alpha - h_2}{b}$$

$$= \frac{4.5 + (1.0)(\sin 20^\circ) - 4.0}{1.0}$$

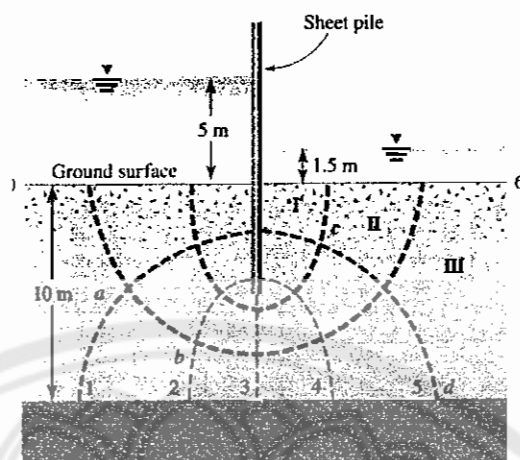
$$= 0.842$$

$$\text{ดังนั้นจะได้ } k = \frac{q}{iA} = \frac{4.03 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 / \text{sec} / \text{cm}}{(0.842)(1.0 \text{ cm}^2)} = 4.78 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$$

8.2.2 จากรูปตาข่ายการไหลของน้ำ (Flow net) ที่ไหลผ่าน Sheet Piles ที่ฝังอยู่บนชั้นดินชุ่มน้ำดังแสดงในรูป 10.14 โดยให้ $k_x = k_z = k = 4.2 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ ดังนั้นจงหา

8.2.2.1 ความสูง (เหนือจากระดับผิวดิน) ของน้ำถ้าเราติดตั้งพิโซมิเตอร์ที่จุด a, b, c, d

8.2.2.2 อัตราการไหลของน้ำผ่าน Sheet pile ที่ช่อง II ต่อหน่วยความยาว



รูปที่ 8.24 ตาข่ายการไหลของน้ำที่ใช้ในข้อที่ 8.2.2

วิธีทำ 8.2.2.1 จากรูปที่ 8.24 เราจะได้ว่า $N_f = 3$ $N_d = 6$

โดยที่ความต่างของน้ำเหนือ Sheet pile กับน้ำใต้ Sheet pile = 3.5 m ดังนั้น head loss สำหรับการดริอป 1 ครั้งเท่ากับ $3.5/6 = 0.583$ m

ที่จุด a. อยู่ในเส้น equipotential เส้นที่ 1 ดังนั้นการดริอฟที่จุด a เท่ากับ 1 ดริอป

$$\therefore H_a = 5 \text{ m} - 1 \text{ drop} = 5 \text{ m} - 0.583 \text{ m} = 4.417 \text{ m}$$

ที่จุด b. อยู่ในเส้น equipotential เส้นที่ 2 ดังนั้นการดริอฟที่จุด b เท่ากับ 2 ดริอป

$$\therefore H_b = 5 \text{ m} - 2 \text{ drop} = 5 \text{ m} - (2 \times 0.583 \text{ m}) = 3.834 \text{ m}$$

ที่จุด c. อยู่ในเส้น equipotential เส้นที่ 5 ดังนั้นการดริอฟที่จุด c เท่ากับ 5 ดริอป

$$\therefore H_c = 5 \text{ m} - 5 \text{ drop} = 5 \text{ m} - (5 \times 0.583 \text{ m}) = 2.085 \text{ m}$$

ที่จุด d. อยู่ในเส้น equipotential เส้นที่ 5 ดังนั้นการดริอฟที่จุด d เท่ากับ 5 ดริอป

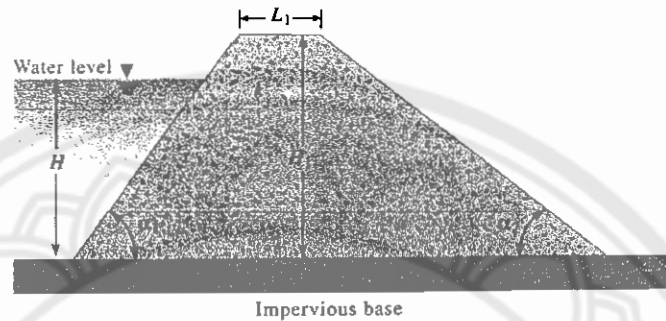
$$\therefore H_d = 5 \text{ m} - 5 \text{ drop} = 5 \text{ m} - (5 \times 0.583 \text{ m}) = 2.085 \text{ m}$$

8.2.2.2 อัตราการไหลของน้ำผ่านช่องที่ II จะเป็นไปตามสมการคือ

$$\begin{aligned} \Delta q &= k \frac{H}{N_d} \\ &= (4.2 \times 10^{-3} \times 10^{-2} \text{ m/sec}) \left(\frac{3.5 \text{ m}}{6} \right) \end{aligned}$$

$$\Delta q = 2.45 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}/\text{ความยาว } 1 \text{ m ของ Sheet pile}$$

8.2.3 จากรูปของเขื่อนดิน (earth dam) ที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 8.25 จงหาอัตราการไหลของน้ำที่ไหลซึม (Seepage rate) ในหน่วย $\text{m}^3/\text{day}/\text{ความยาว}(\text{m})$ โดยให้ $\alpha_1 = \alpha_2 = 45^\circ$, $L_1 = 5\text{m}$, $H = 10\text{m}$, $H_1 = 13\text{m}$ และ $k = 2 \times 10^{-4} \text{cm}/\text{sec}$



รูปที่ 8.25 แสดงรูปตัดของเขื่อนดินที่ใช้ในข้อที่ 8.2.3

วิธีทำ จากรูปที่ 8.25 จะได้ $\Delta = \frac{H}{\tan \alpha_1} = \frac{10\text{m}}{\tan 45^\circ} = 10\text{m}$

ดังนั้น $0.3 \Delta = 0.3(10) = 3\text{m}$

$$\begin{aligned} d &= 0.3 \Delta + \frac{(H_1 - H)}{\tan \alpha_1} + L_1 + \frac{(H_1)}{\tan \alpha_1} \\ &= 3\text{m} + \frac{(13 - 10)}{\tan 45^\circ} + 5\text{m} + \frac{(13)}{\tan 45^\circ} \\ &= 3\text{m} + 3\text{m} + 5\text{m} + 13\text{m} = 24\text{m} \end{aligned}$$

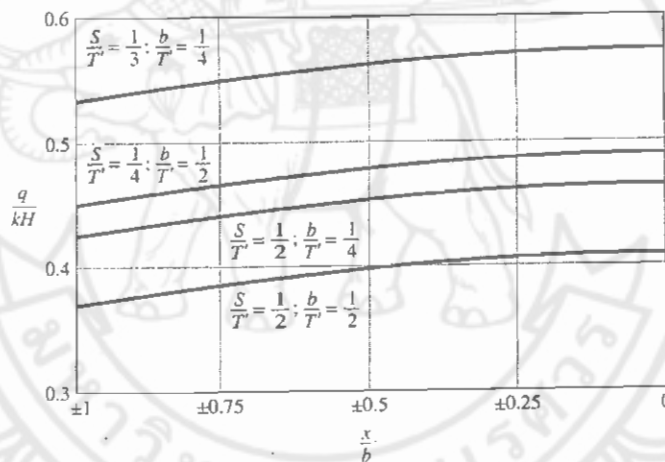
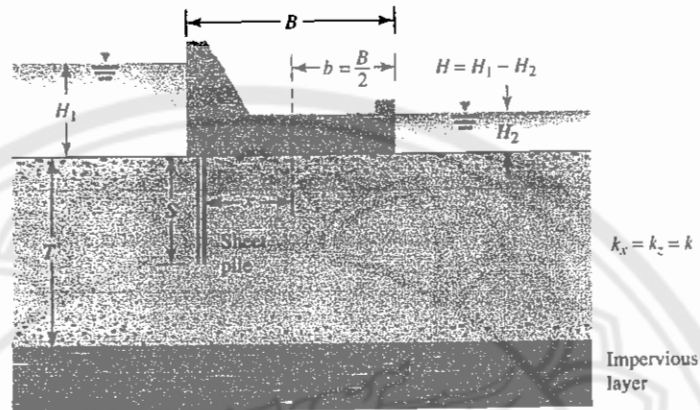
จากสมการ

$$\begin{aligned} L &= \frac{d}{\cos \alpha_2} \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2 \alpha} - \frac{H^2}{\sin^2 \alpha}} \\ &= \frac{24}{\cos 45^\circ} \sqrt{\frac{24^2}{(\cos 45^\circ)^2} - \frac{10^{10}}{(\sin 45^\circ)^2}} \\ &= 33.94 - \sqrt{1152 - 200} \\ &= 3.09\text{m} \end{aligned}$$

จากสมการ $q = k(\tan \alpha_2)(L \sin \alpha_2)$

$$\begin{aligned} &= kL \tan \alpha_2 \sin \alpha_2 \\ &= 2 \times 10^{-4} \text{cm}/\text{sec} \times 3.09 \text{m} \times \tan 45^\circ \times \sin 45^\circ \\ q &= 0.378 \text{m}^3/\text{day}/\text{ความยาว}(\text{m}) \end{aligned}$$

8.2.4 จากรูปที่ 8.26 ถ้าทางตำแหน่ง Sheet pile ไว้ในตำแหน่งที่ $x = 50$ m (อยู่ริมฐานเขื่อน) ดังนั้นปริมาณน้ำไหลซึมผ่านได้เขื่อน (q) เท่ากับเท่าไรถ้า $S = 25$ m, $T = 100$, $H_1 = 40$ m, $H_2 = 10$ m ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำ (k) = $k_x = k_y = k_z = 0.001$ m/sec



รูปที่ 8.26 รูปที่ใช้ในข้อที่ 8.2.4

วิธีทำ

$$\text{หา } \frac{S}{T} = \frac{25}{100} = \frac{1}{4}$$

$$\frac{b}{T'} = \frac{B/2}{T'} = \frac{100/2}{100} = \frac{1}{2}$$

ดังนั้นถ้าทาง $x = 50$ m (อยู่ริมฐานเขื่อน) จะได้

$$\frac{x}{b} = \frac{50}{100/2} = 1$$

จากรูปที่ 8.26 แล้วจะได้

$$\frac{q}{kH(1m)} = 0.45$$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น} \quad q &= 0.45 (0.001 \text{ m/s})(H_1 - H_2)(1 \text{ m}) \\
 &= 0.45(0.001 \text{ m/s})(40 - 10) (1 \text{ m}) \\
 q &= 0.0135 \text{ m}^3/\text{sec/m}
 \end{aligned}$$

8.3 โจทย์ทดสอบความสามารถในการคิดวิเคราะห์ (Critical thinking problem)

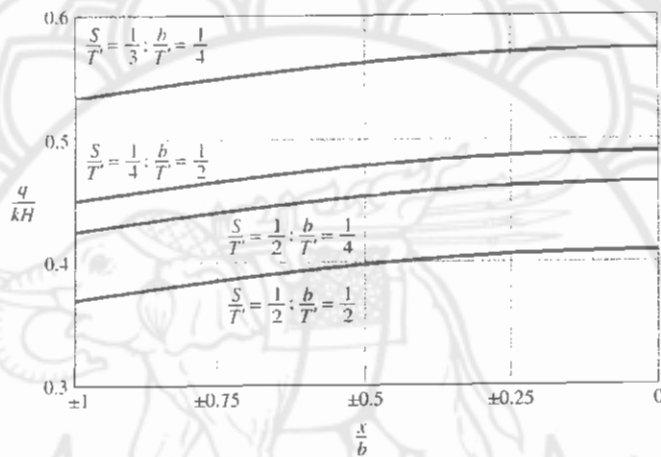
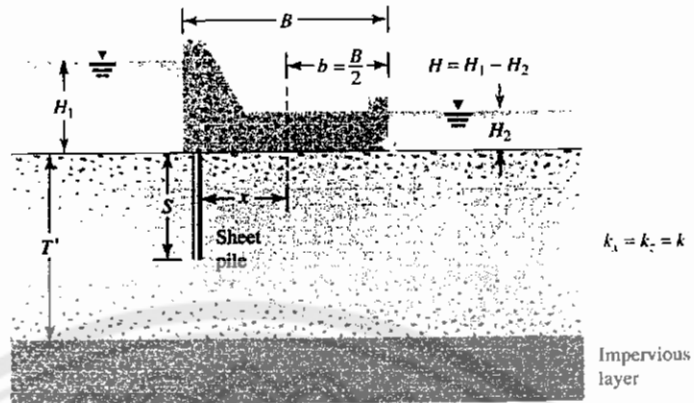
8.3.1 ในฐานะที่คุณอัครชาติเป็นวิศวกรที่ปรึกษาของบริษัทแห่งหนึ่งในจังหวัดพิษณุโลก กรุณาให้คำแนะนำพร้อมให้เหตุผลอย่างสั้นๆ หรือแสดงรายการคำนวณประกอบ (หากจำเป็น) ว่า

8.3.1.1 ควรวางตำแหน่ง Sheet Pile ในทางแนวราบไว้ที่ใด (ที่ $x = ?$) เพื่อจะได้ลดปริมาณน้ำไหลซึมผ่านเขื่อนในรูปที่ 8.27 ให้เหลือน้อยสุดเมื่อความยาวของเขื่อน (B) = 100 m

8.3.1.2 ควรวางตำแหน่ง Sheet Pile ในทางแนวราบไว้ที่ใด (ที่ $x = ?$) เพื่อจะได้ลดปริมาณน้ำไหลซึมผ่านเขื่อนในรูปที่ 8.27 ให้เหลือน้อยสุดเมื่อความยาวของเขื่อน (B) = 50 m

ภายใต้เงื่อนไขในการออกแบบที่ประกอบไปด้วย

- S = 50 m, T' = 100 m
- $H_1 = 40 \text{ m}$, $H_2 = 10 \text{ m}$
- ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของดิน (k) = $k_x = k_y = k_z = 0.001 \text{ m/sec}$



รูปที่ 8.27 แสดงรูปที่ใช้ในข้อที่ 8.3.1

วิธีทำ จากรูปที่ 8.27 จะเห็นได้ว่าจะต้องให้ เท่ากับ ± 1 เท่านั้นจึงจะทำให้น้ำไหลซึมผ่านเขื่อนน้อยที่สุดดังนั้นจะได้

8.3.1.1 หาค่า $\frac{S}{T'} = \frac{50}{100} = \frac{1}{2}$
 $\frac{b}{T'} = \frac{100/2}{100} = \frac{1}{2}$

ดังนั้นถ้าจะให้ $\frac{x}{b} = \pm 1$ จะต้องมี $x = 50 \text{ m}$ จะทำให้ $\frac{x}{b} = +1$
 $x = -50 \text{ m}$ จะทำให้ $\frac{x}{b} = -1$

ซึ่งจะทำให้ $q = kH(0.37)(1 \text{ m})$
 $= (0.001 \text{ m/sec})(40 \text{ m} - 10 \text{ m})(0.37)(1 \text{ m})$
 $= 0.0111 \text{ m}^3/\text{sec/m}$

ดังนั้นจะต้องวางไว้ที่ตำแหน่งที่ $x = 50$ m (คือด้านหน้าของเขื่อนพอดี) และ $x = -50$ m (คือด้านหลังของเขื่อนพอดี) จึงจะทำให้น้ำไหลซึมผ่านเขื่อนน้อยที่สุด

$$8.3.1.2 \text{ หาค่า } \frac{S}{T'} = \frac{50}{100} = \frac{1}{2}$$

$$\frac{b}{T'} = \frac{50/2}{100} = \frac{1}{4}$$

ดังนั้นถ้าจะให้ $\frac{x}{b} = \pm 1$ จะต้องมีการแบ่งกรณี

- $x = 25$ m จะทำให้ $\frac{x}{b} = +1$
- $x = -25$ m จะทำให้ $\frac{x}{b} = -1$

ซึ่งจะทำให้ $q = kH(1 \text{ m})(0.42)$

$$= (0.001 \text{ m/sec})(40 \text{ m} - 10 \text{ m})(1 \text{ m})(0.42)$$

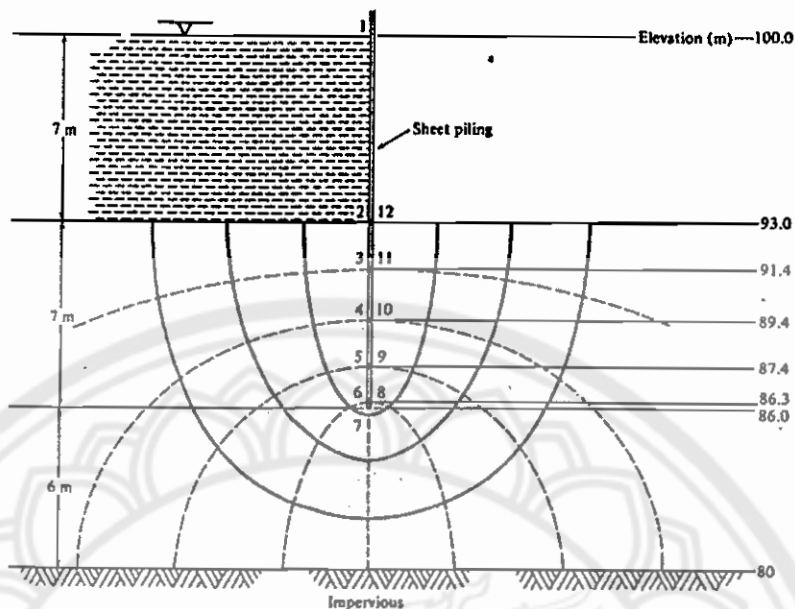
$$= 0.216 \text{ m}^3/\text{sec/m}$$

ดังนั้นจะต้องวางไว้ที่ตำแหน่งที่ $x = 25$ m (คือด้านหน้าของเขื่อนพอดี) และ $x = -25$ m (คือด้านหลังของเขื่อนพอดี) จึงจะทำให้น้ำไหลซึมผ่านเขื่อนน้อยที่สุด

8.3.2 เพื่อวางแผนป้องกันน้ำท่วมเข้าบริเวณมหาวิทยาลัยนครสวรรค์ ส่วนหนองอ้อ วิศวกรที่ปรึกษาของมหาวิทยาลัยนครสวรรค์ ได้เสนอให้ออกแบบก่อสร้างเขื่อนซีต (Sheet Pile) ดังแสดงในรูปที่ 8.28 ในฐานะวิศวกรโยธาของบริษัทฯ กรุณาคำนวณ

8.3.2.1 ปริมาณน้ำ ($\text{cm}^3/\text{s/m}$) ที่จะไหลลอดใต้ Sheet Pile เข้ามาในบริเวณมหาวิทยาลัย เพื่อที่มหาวิทยาลัยจะได้เตรียมจำนวนและขนาด Pump สำหรับสูบน้ำออกได้พอเพียง โดยกำหนดให้ $k_x = k_z = 22 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$

8.3.2.2 Elevation head, Head loss, Total head, Pressure heads (Pore pressure) สำหรับตำแหน่งทุกตำแหน่งทั้ง 12 จุด ดังแสดงในรูปที่ 8.28 โดยยกตัวอย่างการคำนวณมา 1 ตำแหน่ง



รูปที่ 8.28 แสดงรูปที่ใช้ในข้อที่ 8.3.2

วิธีทำ 8.3.2.1 สามารถแสดงการคำนวณหาปริมาณน้ำได้ดังนี้

จากรูปที่ 8.28 $N_r = 4$ (จำนวนช่องการไหลที่บังคับในแนวตั้ง)

$N_d = 10$ (จำนวนช่องการไหลที่บังคับในแนวนอน)

จากสมการ

$$\begin{aligned}
 \text{จะได้ } q &= k \frac{N_r}{N_d} H \\
 &= (22 \times 10^{-4} \frac{\text{cm}}{\text{s}}) \left(\frac{4}{10} \right) (7 \text{ m}) (100 \frac{\text{cm}}{\text{s}}) \\
 &= 0.616 \text{ cm}^3/\text{s}/\text{cm} \\
 q &= 61.60 \text{ cm}^3/\text{s}/\text{cm}
 \end{aligned}$$

∴ ปริมาณน้ำที่จะลอดใต้ Sheet Pile จะเท่ากับ 61.60 cm³/s/cm #

8.3.2.2 จากโจทย์จะได้ว่า $1 \text{ drop} = \frac{H}{N_d} = 7/10 = 0.7$

ดังนั้นจะสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 8.6 แสดงค่าต่างที่ต้องคำนวณในข้อที่ 8.3.2.2

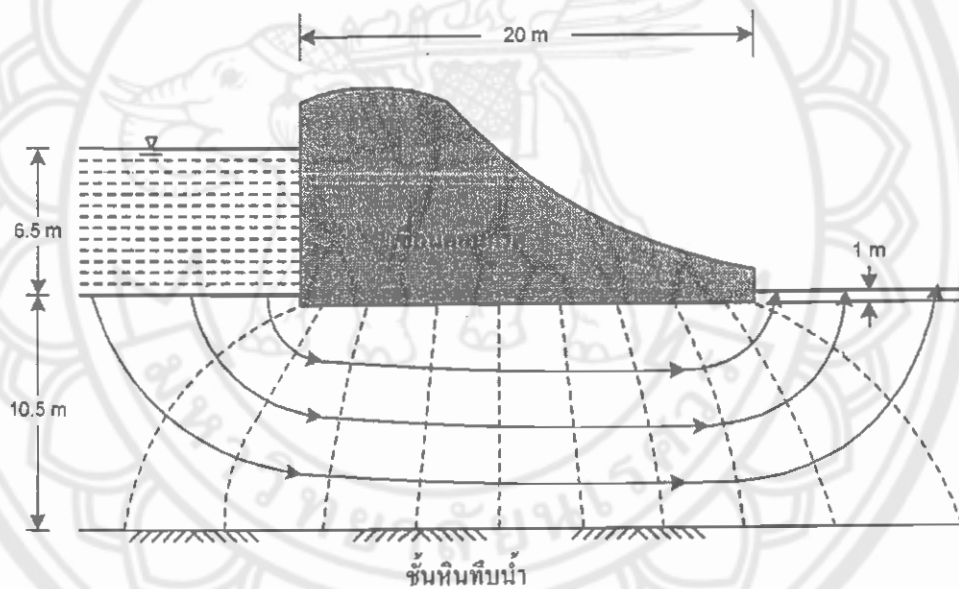
ตำแหน่ง ที่	Elevation Head (m)	Head Loss (m)	Total Head (m)	Pressure Head (m)
1	100.00	0.0	$100-0.0=100.0$	$100-100=0.00$
2	93.00	0.0	$100-0.0=100.0$	$100-93=7.00$
3	91.40	1 drop = 0.70	$100-0.7=99.30$	$99.3-91.4=7.90$
4	89.40	2 drop = 1.40	$100-1.4=98.60$	$98.6-89.4=9.20$
5	87.40	3 drop = 2.10	$100-2.1=97.90$	$97.9-87.4=10.50$
6	86.30	4 drop = 2.80	$100-2.8=97.20$	$97.2-86.3=10.90$
7	86.00	5 drop = 3.50	$100-3.5=95.80$	$96.5-86.0=10.50$
8	86.30	6 drop = 4.20	$100-4.9=95.10$	$95.8-86.3=9.50$
9	87.40	7 drop = 4.90	$100-4.9=95.10$	$95.1-87.4=7.70$
10	89.40	8 drop = 5.60	$100-5.6=94.40$	$94.4-89.4=5.00$
11	91.40	9 drop = 6.30	$100-6.3=93.70$	$93.7-91.4=2.30$
12	93.00	10 drop = 7.00	$100-7.0=93.00$	$93.0-93.0=0.0$

ยกตัวอย่าง จากโจทย์ที่ตำแหน่งที่ 5 สามารถหาค่าต่างๆ ได้ดังนี้
 จากรูปที่จุดที่ 5 อ่านค่า Elevation Head = 87.40 m
 \therefore Head Loss = 3 drop = 2.10 m
 Total Head = ความสูงของระดับน้ำ = Head Loss
 $= 100 - 2.10 = 97.90$ m
 ดังนั้น Pressure Head = Total Head - Elevation Head
 $= 97.90 - 87.40$
 $= 10.50$ m

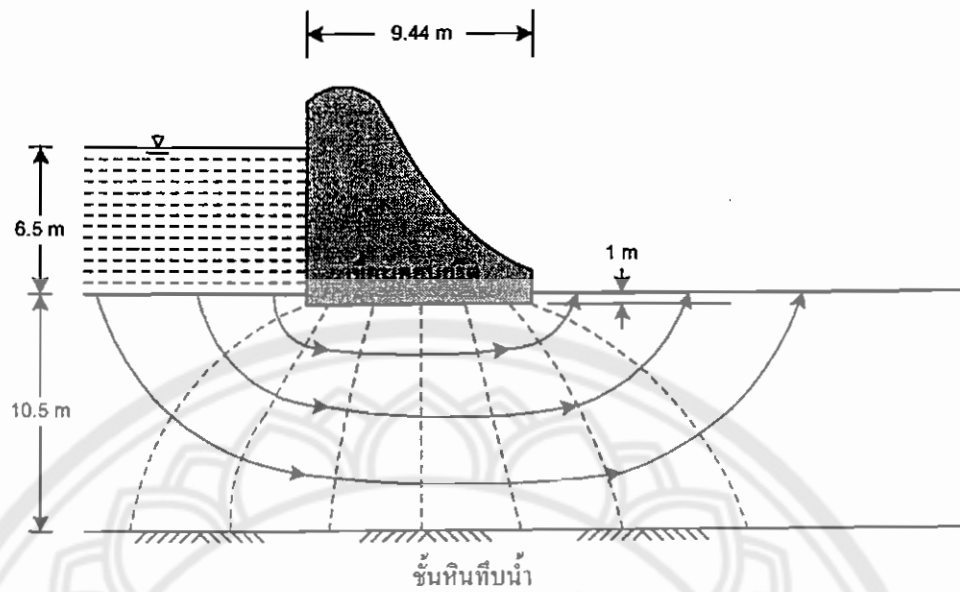
8.3.3 เพื่อสำรวจปริมาณน้ำใช้ในบริเวณมหาวิทยาลัยนครสวรรค์ วิทยาเขตพะเยา กองแผนงานได้ว่าจ้างบริษัทวิศวกรที่ปรึกษาสำรวจและออกแบบเพื่อก่อสร้างเขื่อน ดังแสดงในรูปที่ 8.29.1 ซึ่งผลการสำรวจขั้นต้น (Preliminary Design) พบว่าชั้นดินฐานรากได้เขื่อน มีค่า $k_x = k_z = 30 \times 10^{-4}$ cm/s

8.3.3.1 ในฐานะวิศวกรโยธาประจำกองแผนงาน กรุณาประมาณหาค่าปริมาณน้ำ ($\text{cm}^3/\text{s}/\text{m}$ width) ที่ลอดใต้เขื่อน

8.3.3.2 หากการสำรวจรายละเอียด (Detailed Design) พบว่า $k_x = 30 \times 10^{-4}$ cm/s และ $k_z = 6 \times 10^{-4}$ cm/s ซึ่ง Flow net บน Transformed Scale สามารถแสดงได้ในรูป 8.29.1 กรุณาประมาณหาค่าปริมาณน้ำ ($\text{cm}^3/\text{s}/\text{m}$ width) ที่ลอดใต้สันเขื่อน



รูปที่ 8.29.1 รูปที่ใช้ในข้อที่ 8.3.3



รูปที่ 8.29.2 รูปที่ใช้ในข้อที่ 8.3.3

วิธีทำ 8.3.3.1 จากตาข่ายการไหลในรูป 8.29.1 จะได้ $N_f = 4$
 $N_d = 11$

แทนค่าในสมการที่ 8.23

$$q = kH \frac{N_f}{N_d}$$

$$= (30 \times 10^{-4} \text{ cm/s})(6.5)(100 \text{ cm/m}) \left(\frac{4}{11} \right)$$

$$= 0.7091 \text{ cm}^3/\text{s/cm}$$

$$q = 70.91 \text{ cm}^3/\text{s/cm}$$

\therefore ค่าปริมาณน้ำที่ลอดได้สันเขื่อน = $70.91 \text{ cm}^3/\text{s/cm}$

8.3.3.2 จากโจทย์ค่า $k_x \neq k_z$ ซึ่งจะได้ว่าจะมีคุณสมบัติแบบ Anisotropic Soil ดังนั้นจะต้องทำการแปลงหน้าตัด (transformed) โดยจะใช้ horizontal scale (ความกว้างของเขื่อน) = $\sqrt{\frac{k_z}{k_x}}$ x ความกว้างเดิม

ดังนั้น ความกว้างของเขื่อนในหน้าตัดแปลง = $\sqrt{\frac{k_z}{k_x}} (20 \text{ cm}) = 9.44 \text{ m}$ (ดังแสดงในรูปที่ 8.29.2)

จากรูปที่ 8.29.2 สามารถนับช่องจะได้ $N_f = 4$
 $N_d = 8$

แล้วแทนค่าลงในสมการที่ 8.28

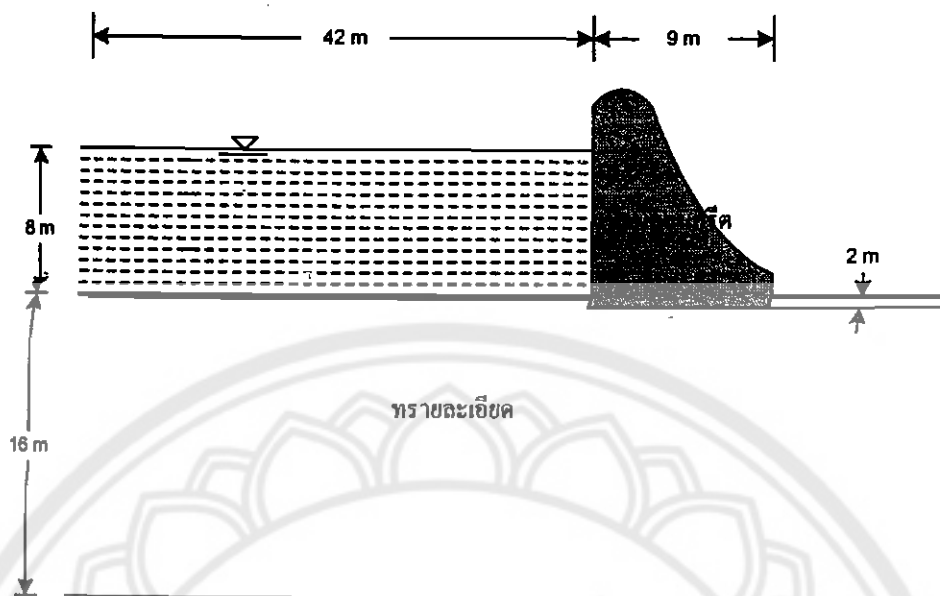
$$\begin{aligned}
 q &= \sqrt{k_z k_x} \cdot H \frac{H_f}{N_d} \\
 &= \sqrt{(30 \times 10^{-4} \text{ cm/s})(6 \times 10^{-4} \text{ cm/s})} \cdot (6.5 \text{ m}) \\
 &\quad (100 \text{ cm/m}) \left(\frac{4}{8}\right) \\
 &= 0.4836 \text{ cm}^3/\text{s}/\text{cm} \\
 q &= 43.60 \text{ cm}^3/\text{s}/\text{m}
 \end{aligned}$$

∴ ปริมาณน้ำที่ลอดได้สั้นเขื่อน = 43.60 cm³/s/cm

8.3.4 เพื่อวางแผนป้องกันน้ำท่วมเข้าบริเวณมหาวิทยาลัยนครสวรรค์ ส่วนหนองอ้อ บริษัทวิศวกรที่ปรึกษาของมหาวิทยาลัยนครสวรรค์ได้เสนอให้ออกแบบก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตที่มีโครงสร้างคอนกรีตที่บ้น้ำรองด้วยชั้นทรายซึ่งมีสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำเท่ากับ $k_x = 5.4 \times 10^{-5}$ m/s และ $k_z = 5.4 \times 10^{-5}$ m/s ในแนวราบ (x) และแนวตั้ง (z) ตามลำดับ ดังรูปที่ 8.30.1 ในฐานะวิศวกรของบริษัทฯ จงคำนวณหา

8.3.4.1 ปริมาณน้ำ (cm³/s/m) ที่จะไหลออกได้เขื่อนเข้ามาในบริเวณมหาวิทยาลัย เพื่อที่มหาวิทยาลัยจะได้เตรียมจำนวนและขนาด Pump สำหรับสูบน้ำออกได้พอเพียง

8.3.4.2 ให้หาแรงดันใต้ฐานรากเขื่อน (Uplift pressure) เพื่อจะได้ใช้หาความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องกับแรงดันน้ำโดยให้หาที่จุด 1, 2 และ ตามรูป 8.30.2

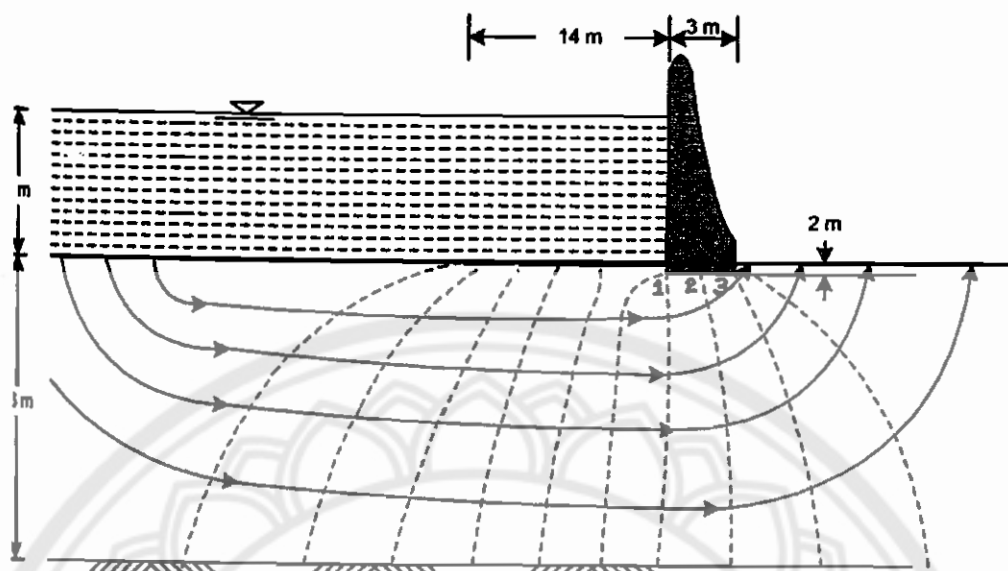


ชั้นหินที่บ้น้ำ
รูปที่ 8.30.1 รูปที่ใช้ในข้อที่ 8.3.4

วิธีทำ 8.3.4.1 จากโจทย์ดินเป็นแบบ Anisotropic ดังนั้นเราต้องแปลง (transformed) หน้าตัดตามหลักเกณฑ์ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ความยาวของเขื่อนในหน้าตัดแปลง} &= \sqrt{\frac{k_x}{k_z}} \times \text{ความยาวของเขื่อนดิน} \\
 &= \sqrt{\frac{6 \times 10^{-6}}{5.4 \times 10^{-5}}} \times 9.0 \text{ m} \\
 &= 3.0 \text{ m}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นสามารถเขียน Flow net บนหน้าตัดแปลงได้ตามรูปที่ 8.30.2



ชั้นหินกั้นน้ำ

รูปที่ 8.30.2 เขียน Flow net ได้ตามรูปต่อไปนี้

จะหาปริมาณน้ำที่ไหลลอดได้เช่นกัน โดยจะหาได้จากสมการที่ 8.28

ซึ่งจากรูปจะได้ $N_f = 5$

$N_d = 11$

$$\therefore q = \sqrt{k_z k_x} \cdot H \frac{N_f}{N_d}$$

$$= \sqrt{(5.4 \times 10^{-5})(6 \times 10^{-6})} \times (8 \text{ m}) \left(\frac{5}{11} \right)$$

$$= 6.55 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{s}/\text{m}$$

ดังนั้นปริมาณน้ำที่ไหลผ่านได้เช่นกัน = $6.55 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{s}/\text{m}$

8.3.4.2 หานแรงดันใต้ฐานเขื่อน (Uplift pressure) ได้คือ

จากรูปที่ 8.30.2 Head Loss สำหรับการดริอป 1 ดริอป

$$\text{เท่ากับ } \frac{H}{N_d} = \frac{8}{11} = 0.727 \text{ m}$$

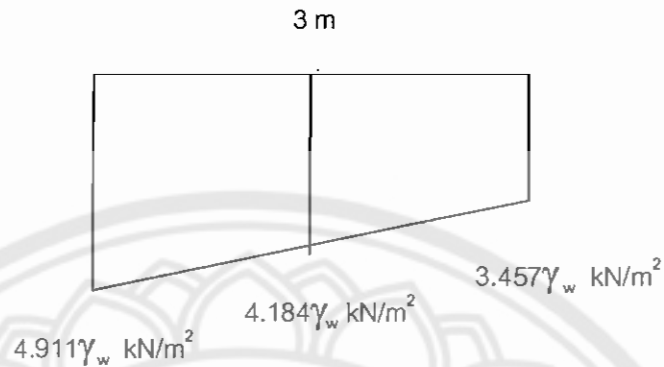
ที่จุด 1 Pressure Head = $H_f - 7 \text{ drops} = (8+2) - 5,089 = 4.911 \text{ m}$

ที่จุด 2 Pressure Head = $H_f - 8 \text{ drops} = (8+2) - 5,816 = 4.184 \text{ m}$

ที่จุด 3 Pressure Head = $H_f - 9 \text{ drops} = (8+2) - 6,543 = 3.457 \text{ m}$

จากสมการที่ 8.30

สามารถเขียนนำไปเขียนกราฟ Uplift pressure Diagram ได้ดังนี้



∴ แรงดันใต้ฐานรากเขื่อนสามารถหาได้จากพื้นที่ของ Uplift pressure Diagram โดยสามารถหาได้ดังนี้

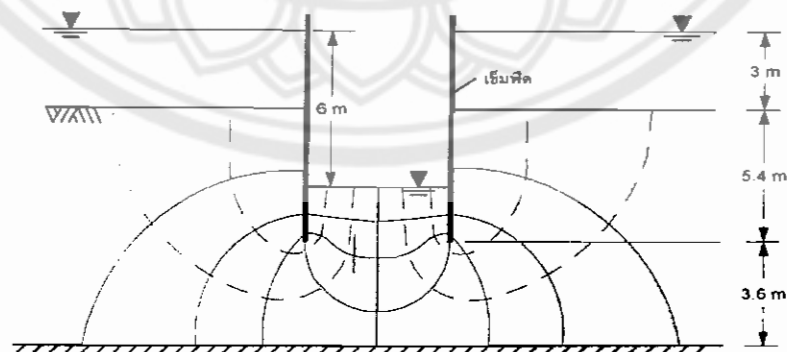
$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{2} \times 9.0 \text{ m} \times [(4.911 \times 9.81) \text{ kN/m}^2 + (3.457 \times 9.81) \text{ kN/m}^2] \\
 &\quad \times 1 \text{ m (width)} \\
 &= 369.4 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

จะได้ว่าแรงดันใต้ฐานรากเขื่อน = 369.41 kN/m

8.3.5 จากรูปตัดของ Cofferdam เข็มพืดแห่งหนึ่งดังแสดงดังรูปที่ 8.21 โดยน้ำจะสามารถไหลเข้าได้ทั้ง 2 ทิศทาง และแสดง Flow net ดังรูป ดังนั้นถ้าฐานของชั้นดินที่พิจารณาอยู่ที่ความลึก 3.6 m โดยที่สัมประสิทธิ์ความซึมได้ $k_x = k_z = 5 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ แล้วจงหา

8.3.5.1 อัตราการซึมของน้ำเข้าไปใน Cofferdam เข็มพืด

8.3.5.2 หาเสถียรภาพของ Cofferdam เข็มพืดที่สร้างด้วยโดยกำหนด $\gamma_{\text{sat}} = 26 \text{ kN/m}^3$



รูปที่ 8.31 แสดงรูปตัดของ Cofferdam ที่ใช้ในข้อที่ 8.3.5

วิธีทำ 8.3.5.1 จากโจทย์จะได้ $N_d = 7$

$$N_f = 3$$

จากสมการ จะได้การซึมของน้ำ 1 ด้านเท่ากับ

$$\begin{aligned} q &= kH \frac{N_f}{N_d} \\ &= 5 \times 10^{-5} \times 6 \times \frac{3}{7} \\ &= 1.29 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sec}/\text{m} \end{aligned}$$

ดังนั้นอัตราการซึมของน้ำเข้าไปใน Cofferdam = $2 \times 1.29 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sec}/\text{m}$

8.3.5.2 จากรูป Flow net

∴ แรงดันขึ้น (Uplift pressure) ของน้ำในดินด้านในที่ฐานของเข็มพีต

โดยประมาณ = $\gamma_w \times \text{Pressure head}$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ Pressure head} &= H_f - 3 \text{ drop} = 8.4 - 3 \left(\frac{H}{N_d} \right) \\ &= 8.4 - 3 \left(\frac{6}{7} \right) \\ &= 5.83 \text{ m} \end{aligned}$$

∴ แรงดันขึ้นของน้ำจะได้เท่ากับ = $\gamma_w \times \text{Pressure head}$

$$= 9.81 \times 5.83$$

$$= 57.192 \text{ kN/m}^2$$

∴ แรงกดที่ฐานของเข็มพีตเนื่องจากดินจมน้ำเท่ากับ = $\gamma' h$

$$= (\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w)(3.6)$$

$$= (26 - 9.81)(3.6)$$

$$= 58.284 \text{ kN/m}^2$$

ดังนั้นจากตัวเลขของแรงดันขึ้นเทียบกับแรงกดจะเห็นว่า Cofferdam เข็มพีตนี้มีเสถียรภาพเนื่องจากเข็มพีตสามารถรับแรงกดได้มากกว่าแรงดันขึ้นจึงไม่ทำให้เกิด Piping