

## บทที่ 12

### ความสามารถในการยุบอัดตัวของดิน

#### Compressibility of Soil

##### 12.1 เนื้อหาโดยสรุป

ดินทุกชนิดต้องเกิดการยุบตัวหรือทรุดตัวเมื่อได้รับแรงหรือน้ำหนักกระทำ การยุบตัวของดินเป็นส่วนสำคัญที่จะต้องคำนึงในการออกแบบโครงสร้าง เนื่องจากจะมีผลทำให้โครงสร้างเสียหายได้ ถ้าหากว่าการยุบตัวของดินมีค่ามากโดยทั่วไปแล้วชั้นดินที่เกิดการยุบตัวจะประกอบไปด้วยการยุบตัวจาก

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

ในทางวิศวกรรมมักจะพิจารณา ค่าการทรุดตัวของชั้นดินที่เกิดจากแรงกระทำภายนอก (External load) จะทำให้เกิดการยุบตัวในแนวตั้ง (settlement) ซึ่งประกอบขึ้นจากการทรุดตัว 3 ส่วน คือ

1. การทรุดตัวที่เกิดขึ้นทันทีทันใด (Immediate settlement หรือ elastic settlement ;  $S_e$ )

คือในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ในตอนเริ่มต้นการทรุดตัวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่มากกระทำ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในมวลดิน 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) เมื่อได้รับแรงภายนอกมากกระทำ ทำให้โครงสร้างของดินเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม การทรุดตัวแบบนี้ยังไม่มีทฤษฎีที่สามารถอธิบายได้อย่างแน่นอน มีแต่เพียงวิธีการประมาณ (Empirical) เท่านั้นที่ใช้ในการคำนวณหาค่า

ดังนั้นการทรุดตัวที่เกิดขึ้นทั้งหมด (Total Settlement) ก็คือผลรวมของการทรุดตัวของการทรุดตัวทั้งสามแบบข้างต้นดังสมการ

$$S_T = S_e + S_c + S_s \quad (\text{สมการที่ 12.1})$$

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

อย่างไรก็ตามกรณีพื้นฐานรากของสิ่งก่อสร้างวางอยู่บนดินเหนียว (clays) การทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ (Primary consolidation Settlement) จะมีค่ามากและใช้เวลาในการเกิดนานที่สุดมากกว่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นทันทีทันใด (elastic Settlement)

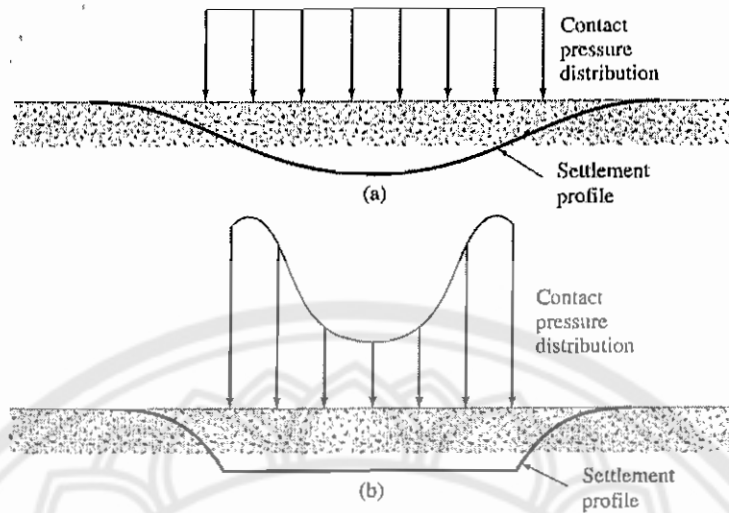
### 12.1.1 การทรุดตัวที่เกิดขึ้นทันทีทันใด (Immediate settlement ; $S_e$ )

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

โดยค่าการยุบตัวนี้จะมีผลกระทบต่อสิ่งก่อสร้างน้อยมากเมื่อเทียบกับ Consolidation Settlement ซึ่งค่า  $S_c$  จะขึ้นอยู่กับลักษณะของฐานรากและชนิดของดินบริเวณที่ก่อสร้าง โดยลักษณะของฐานรากจะมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

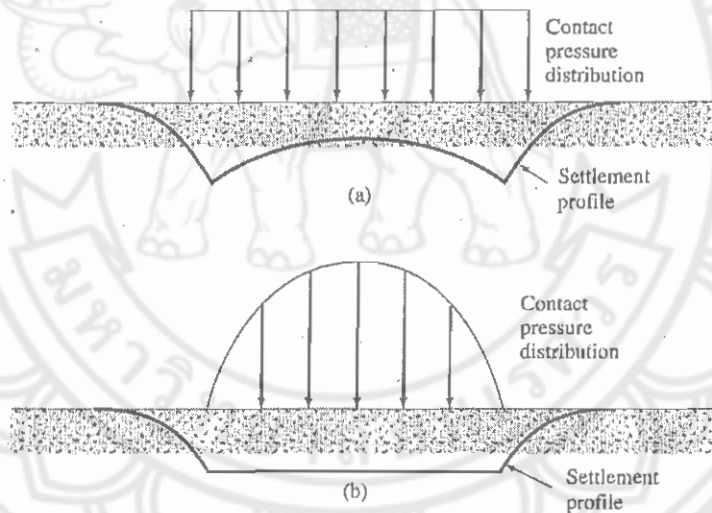
- ฐานรากที่ยืดหยุ่นได้ (flexible foundation)
- ฐานรากที่คงรูป (Rigid foundation)

และชนิดของดินที่แบ่งแยกนั้นก็จะมีอยู่ 2 ชนิดเช่นกันคือดินเหนียวและดินทราย โดยสามารถแสดงการกระจายแรงดันจากฐานรากและ Immediate settlement profile ดังแสดงดังรูปที่ 12.1 และรูปที่ 12.2 ซึ่งรูปที่ 12.1 แสดงคือชนิดของดินเหนียว รูปที่ 12.2 แสดงถึงชนิดของดินทราย



รูปที่ 12.1 Profile ของการทรุดตัวแบบพื้นที่ที่หั่นใดและแรงดันที่กระทำของดินเหนียว

(a) ฐานรากแบบยึดหยุ่นได้ (b) แบบไม่ยึดหยุ่น



รูปที่ 12.2 Profile ของการทรุดตัวแบบพื้นที่ที่หั่นใดและแรงดันที่กระทำของดินทราย

(a) ฐานรากแบบยึดหยุ่นได้ (b) แบบไม่ยึดหยุ่น

- 12.1.1.1 ความสัมพันธ์ในการหา Immediate settlement

การประมาณการทรุดตัวที่เกิดขึ้นทันทีอาศัยพื้นฐานจากการคำนวณการยึดหดตัวของวัสดุยึดหยุ่นภายใต้แรงกระทำโดยสามารถหาได้จากสมการคือ

$$S_e = \Delta\sigma B \frac{1-\mu^2}{E_s} I_p \quad (\text{สมการที่ 12.2})$$

- โดยที่  $S_e$  = Immediate settlement  
 $\Delta\sigma$  = แรงดันสุทธิที่กระทำกับฐานราก (Net pressure applied)  
 $B$  = ความกว้างของฐานราก (width of foundation)  
 = เส้นผ่านศูนย์กลางกรณีที่เป็นวงกลม (diameter of circular foundation)  
 $\mu_s$  = อัตราส่วนปัวซองของดิน (Poisson's ratio of soil) ดังแสดงในตาราง 12.3  
 $E_s$  = โมดูลัสความยืดหยุ่นของดิน (modulus of elasticity of soil) ดังแสดงในตาราง 12.2  
 $I_p$  = ตัวคูณไร้มิติ (non-dimensional influence factor) ซึ่งกำหนดได้จากรูปร่างและความคงตัวของฐานราก ดังแสดงในตาราง 12.1

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

$$I_p = \frac{1}{\pi} \left[ m_1 \ln \left( \frac{1 + \sqrt{m_1^2 + 1}}{m_1} \right) + \ln \left( m_1 + \sqrt{m_1^2 + 1} \right) \right] \quad (\text{สมการที่ 12.3})$$

โดยที่  $m_1$  = ความยาว / ความกว้างของฐานราก  
 สามารถแสดงค่า  $I_p$  ตามตารางที่ 12.1

ตารางที่ 12.1 ค่า Influence Factors สำหรับฐานรากตามสมการที่ 12.3

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 12.2 โดยเป็นค่าประมาณของโมดูลัสยืดหยุ่น ( $E_s$ ) จากดินหลายชนิด

ตารางที่ 12.2 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินหลายๆชนิด

Soil type	$E_s$	
	kN/m <sup>2</sup>	lb/in. <sup>2</sup>
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  $\mu_s$  ตามตารางที่ 12.3 ซึ่งเป็นค่าประมาณอัตราส่วนบัวของของดินหลายๆชนิด

ตารางที่ 12.3 ค่าอัตราส่วนบัวของของดินหลายๆชนิด

Type of soil	Poisson's ratio, $\mu_s$
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

### 12.1.2 การทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Settlement)

การอธิบายพฤติกรรมของการทรุดตัวแบบการอัดตัวคายน้ำ จะใช้แบบจำลองของสปริงและลูกสูบ (Spring-cylinder model) โดยแบบจำลองประกอบไปด้วย ถังซึ่งบรรจุไปด้วยน้ำ โดยมีสปริงและลูกสูบและวาล์วสำหรับเปิดหรือปิดดังแสดงในรูปที่ 12.3 โดยสปริงจะเปรียบเสมือนเม็ดดิน และวาล์วเปรียบเสมือนความชื้นน้ำได้ของดิน

โดยการรับแรงของสปริงเปรียบได้กับการรับหน่วยแรงประสิทธิผลของดิน (Effective stress) และการยุบตัวของสปริงเปรียบเสมือนการยุบตัวของดินเนื่องจากกระบวนการอัดตัวคายน้ำ จะเห็นได้ว่าการเกิดขบวนการนี้ช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับคุณสมบัติความชื้นน้ำได้ในดิน โดยสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

- จากแบบจำลองรูปที่ 12.3.1 (a) แสดงสภาพชั้นดินเดิมของดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่เวลา  $t < t_0$  (ก่อนที่จะมีการก่อสร้าง) โดย  $\Delta\sigma$  และ  $\Delta u = 0$  เทียบได้กับรูปที่ 12.3 (a) เมื่อไม่มีแรงมากระทำ ดังนั้นน้ำภายในไม่เกิดแรงดัน มาตรการแรงดันที่อ่านค่าได้เท่ากับศูนย์

$$\Delta\sigma = 0$$

$$\Delta u = 0$$

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

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

- จากแบบจำลองรูปที่ 12.3.1 (b) แสดงสภาพดินเหนียวที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำที่เวลา  $t = t_0$  (สิ้นสุดการก่อสร้าง)  $\Delta\sigma$  เป็นแรงดันที่เกิดขึ้นเนื่องจากสิ่งก่อสร้างเทียบได้กับแบบจำลองรูปที่ 12.3 (b) ค่า  $p$  ในแบบจำลองที่  $\Delta\sigma$  ในแบบจำลองรูปที่ 4 (b) ซึ่งแรง  $p$  ทำให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกิน ( $\Delta u$ ) แต่แล้วขีดทำให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกิน ( $\Delta u$ ) 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 12.3.1 (c) แสดงสภาพชั้นดินเหนียวที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำที่เวลา  $t_0 < t < t_{\infty}$  (ระหว่างการเกิด consolidation settlement) ชั้นดินเหนียวยุบตัวลง เทียบได้กับแบบจำลองรูปที่ 12.3 (c) เมื่อเปิดวาล์วแรงดันน้ำส่วนเกินออกจากระบบมีการถ่ายแรงให้กับ Spring (เนื้อดินเหนียว) ในแบบจำลองทำให้ Spring (เนื้อดินเหนียว) ยุบตัวลงค่าแรงดันน้ำที่อ่านได้จากมาตรได้มีค่าลดลง

$$\sigma_{t_0 < t < t_{\infty}} = \sigma_{t < t_0} + \Delta\sigma_{t_0 < t < t_{\infty}}$$

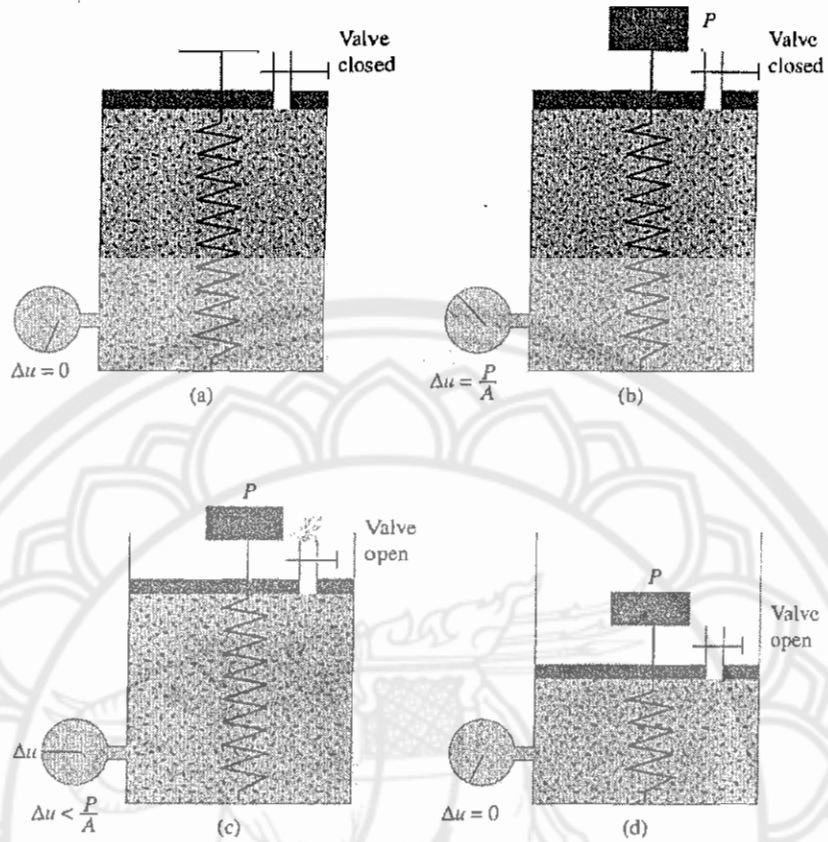
$$\sigma_{t_0 < t < t_{\infty}} = \sigma'_{t < t_0} + u'_{t < t_0} + \Delta\sigma_{t_0 < t < t_{\infty}}$$

- จากแบบจำลองรูปที่ 12.3.1 (d) แสดงสภาพชั้นดินเหนียวที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำที่เวลา  $t_0 = t_{\infty}$  (สิ้นสุดการเกิด consolidation settlement) เทียบได้กับแบบจำลองรูปที่ 12.3(d) แรงดันน้ำส่วนเกินออกจากระบบหมด ( $\Delta u = 0$ ) Spring (เนื้อดินเหนียว) รับแรงทั้งหมด ค่าแรงดันน้ำที่อ่านได้จากมาตรวัดมีค่าเท่ากับศูนย์

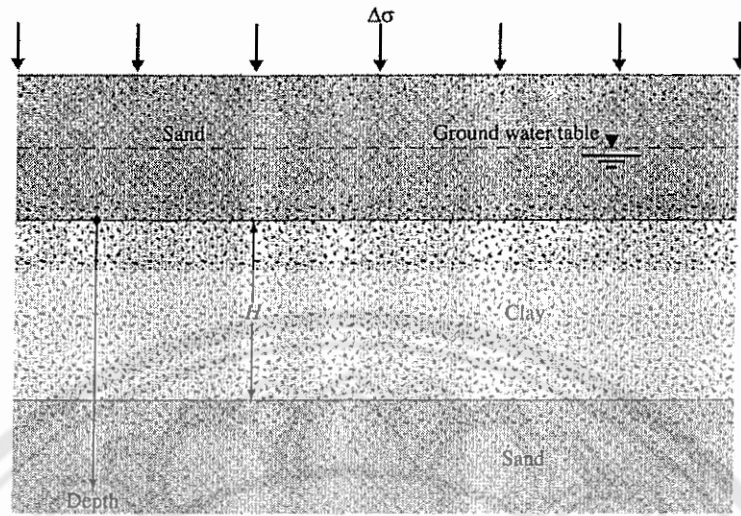
จาก  $\Delta\sigma_{t_{\infty}} = \Delta\sigma'_{t_{\infty}} + \Delta u_{t_{\infty}}$

และ  $\sigma_{t_{\infty}} = \sigma_{t < t_0} + \Delta\sigma_{t_{\infty}}$

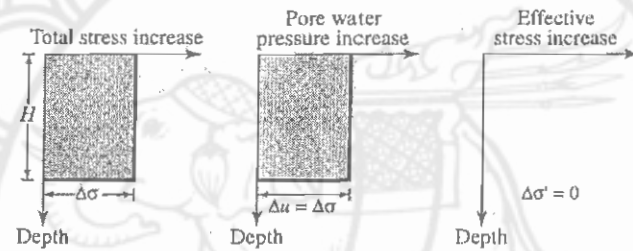
$$\sigma_{t_{\infty}} = \sigma'_{t < t_0} + u_{t < t_0} + \Delta\sigma'_{t_{\infty}}$$



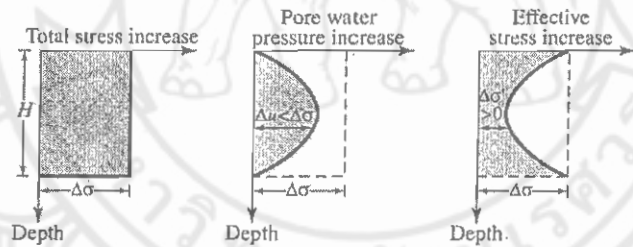
รูปที่ 12.3 Spring-cylinder model



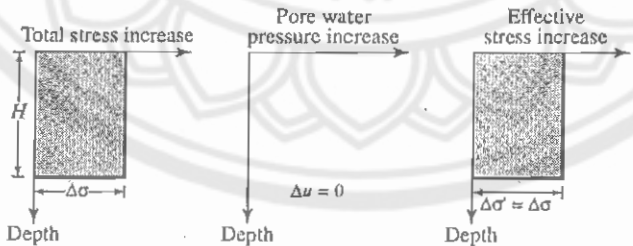
(a)



(b) At time  $t = 0$



(c) At time  $0 < t < \infty$



(d) At time  $t = \infty$

รูปที่ 12.3.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงเค้นรวม, หน่วยแรงดินน้ำ, หน่วยแรงประสิทธิผล ในชั้นดินเหนียวที่มีการไหลของน้ำผ่านด้านบนลงสู่ด้านล่าง โดยมีการใส่หน่วยแรง  $\Delta\sigma$  เข้าไป

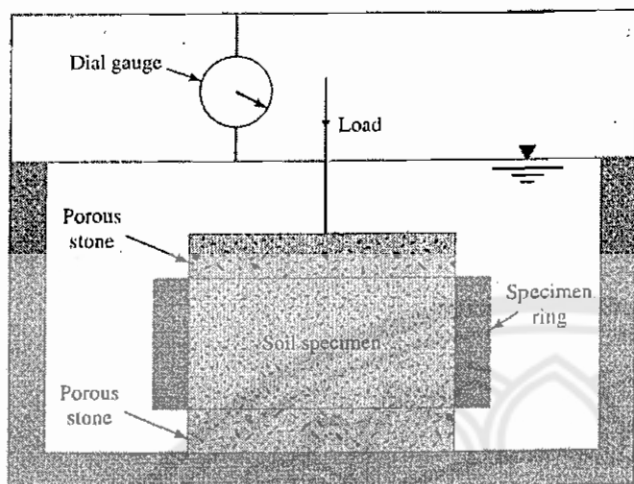


## -12.1.2.1 การทดลองการยุบตัวของดินทางเดียว

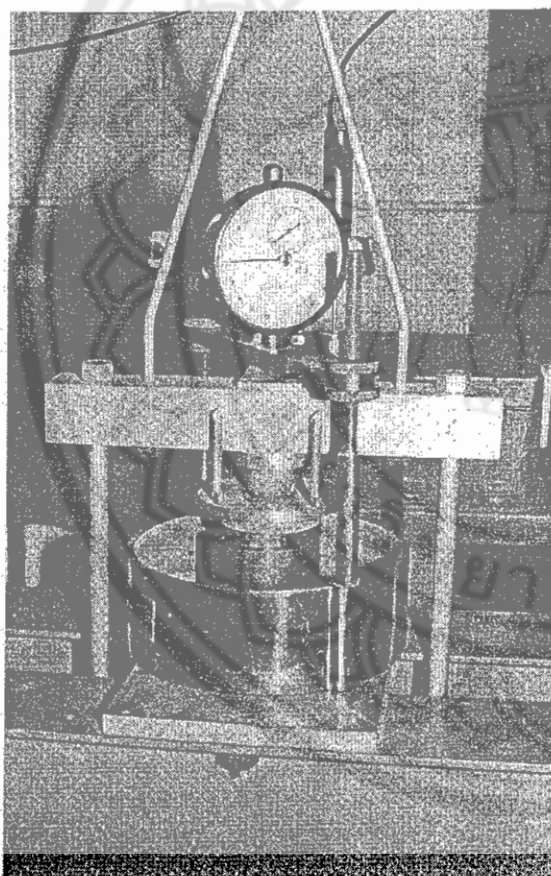
(One-dimensional Laboratory Consolidation Test)

เทอร์ซากิ (Terzaghi) ได้ประดิษฐ์เครื่องมือสำหรับการทดสอบคุณสมบัติการทรุดตัวแบบการอัดตัวคายน้ำของดิน (consolidometer หรือ odometers) โดยดังแสดงดังรูปที่ 12.4 (b) โดยการทดลองนี้กล่าวโดยสรุปคือ จะนำตัวอย่างดินคงสภาพ (Undisturbed Sample) มาตัดแต่งเป็นแท่งรูปทรงกระบอกให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้วและสูง 1 นิ้ว แล้วนำตัวอย่างดินใส่ในวงแหวนเหล็ก ซึ่งมีหินพรุน (porous stone) ประกอบอยู่ทั้งบนและล่างเพื่อให้ระบายน้ำออกจากตัวอย่างได้ จากนั้นนำตุ้มน้ำหนักมาวางดินจะได้รับน้ำหนักกดทับโดยผ่านทางแขนคานวัด (Lever arm) จากนั้นวัดค่าพร้อมจดบันทึกการยุบตัวของดิน ณ เวลาต่างๆ จนกระทั่งดินไม่เกิดการยุบตัว หรือยุบตัวน้อยมาก ซึ่งใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง จากนั้นเพิ่มน้ำหนักกดทับในดินอีก 4 ครั้ง โดยน้ำหนักที่เพิ่มแต่ละครั้งจะเป็น 2 เท่าของน้ำหนักที่กดครั้งก่อนหน้า

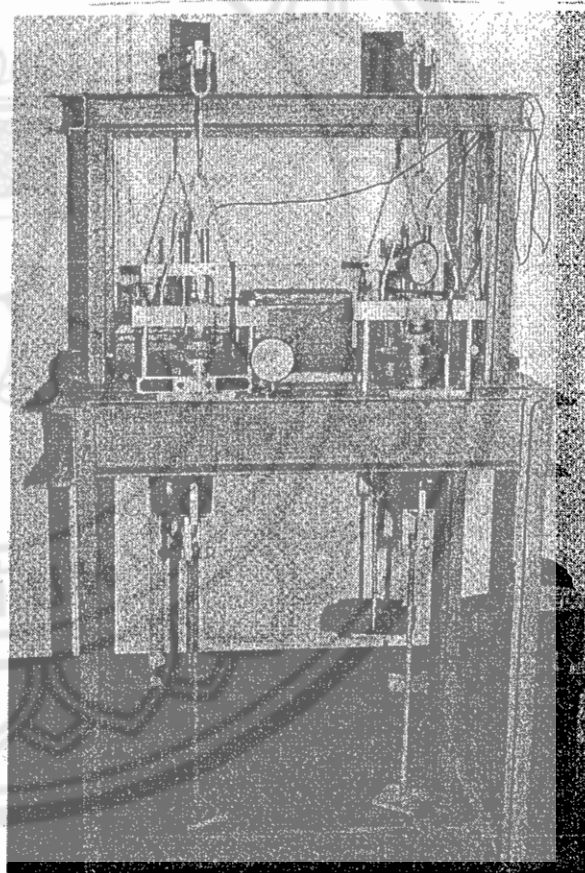
โดยมีจุดสำคัญคือดินที่นำมาทดสอบจะต้องเป็นดินที่อิ่มน้ำ และในขณะทดสอบต้องอยู่ในสภาพอิ่มน้ำตลอดเวลาตามทฤษฎีของเทอร์ซากิ



(a)



(b)



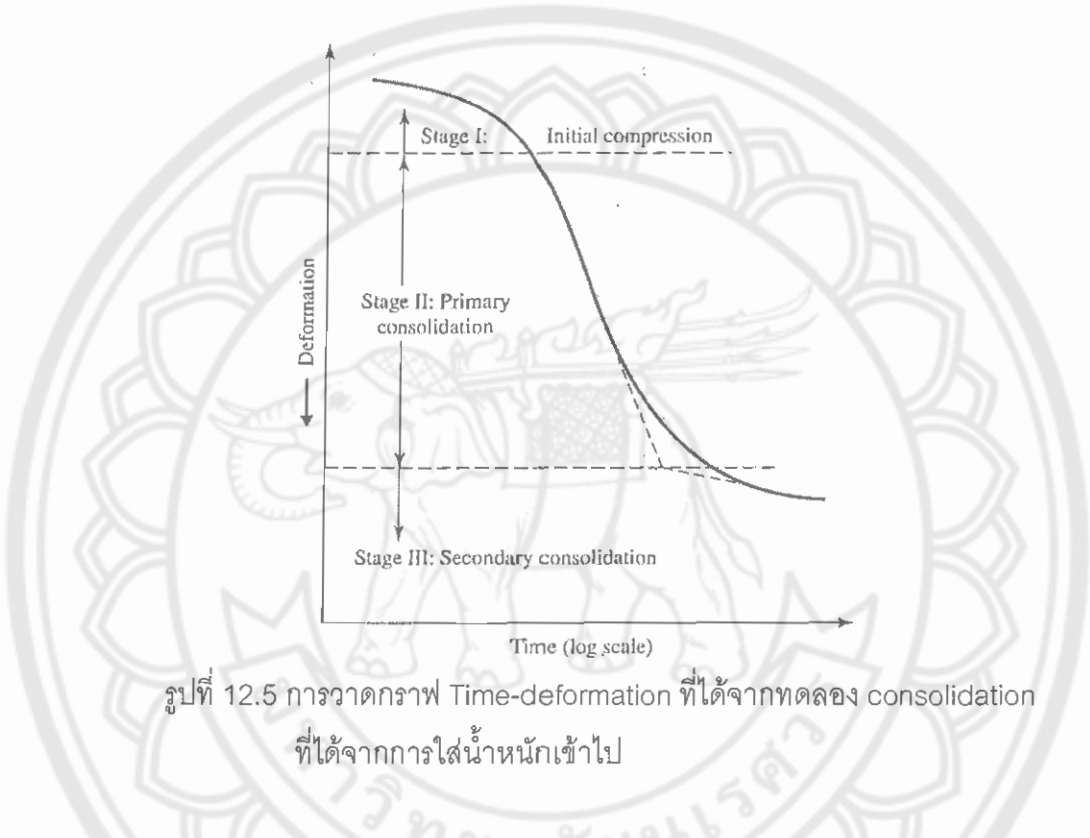
(c)

รูปที่ 12.4 (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

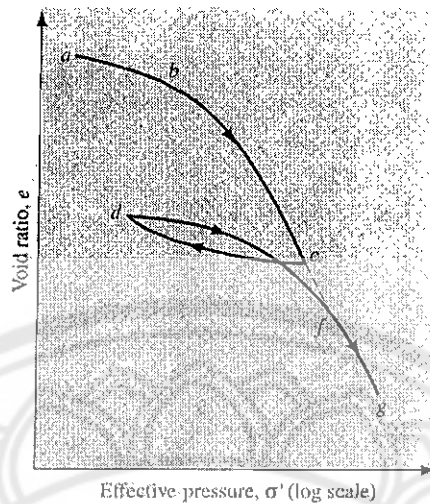
โดยแสดงลักษณะกราฟตามรูปที่ 12.5



รูปที่ 12.5 การวาดกราฟ Time-deformation ที่ได้จากการทดลอง consolidation ที่ได้จากการใส่น้ำหนักเข้าไป

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

ดินเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเฉพาะที่มีความซับซ้อนมาก ประวัติการได้รับหน่วยน้ำหนักกดทับ (Overburden Pressure) มีผลต่อคุณสมบัติในด้านต่างๆ ของดิน ดินแต่ละแห่ง แต่ละความลึกมีคุณสมบัติต่างกันไปทั้งสิ้นดินในสภาพธรรมชาติที่ระดับความลึกใดๆ อาจเคยเคยได้รับหน่วยน้ำหนักกดทับสูงกว่าหรือต่ำกว่าที่ได้รับอยู่ในปัจจุบันก็ได้ การทรุดตัวของดินมักเกิดจากการเปลี่ยนแปลงหน่วยน้ำหนักกดทับของดินในรูปหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective pressure)



รูปที่ 12.6 กราฟที่วาดระหว่าง  $e$  กับ  $\log \sigma'$  ที่แสดงถึง loading, unloading และ reloading

จากรูปที่ 12.6 ดินซึ่งไม่เคยได้รับหน่วยน้ำหนักกดทับสูงกว่าที่ดินนั้นได้รับในปัจจุบัน เรียกว่าดินเหนียวสภาพอัดแน่นปกติ (Normally Consolidated Clay ; NC) ซึ่งเมื่อดินเหนียวสภาพอัดแน่นปกติที่จุด  $a$  ได้รับหน่วยน้ำหนักกดทับเพิ่มขึ้น จะได้กราฟช่วง  $abc$  เมื่อดินที่จุด  $c$  เกิดการลดขนาดของหน่วยน้ำหนักกดทับลง จะได้กราฟในช่วง  $cd$  หากเพิ่มหน่วยน้ำหนักกดทับแก่ดินที่จุด  $d$  ก็จะเป็นไปตามกราฟช่วง  $dfg$  จะได้ว่าดินที่จุด  $d$  คือดินเหนียวสภาพอัดแน่นปกติ (NC) ส่วนดินที่จุด  $c$  คือดินเหนียวสภาพอัดเกินแน่นปกติ (Over-consolidated Clay) เนื่องจากว่าดินที่จุด  $d$  เคยได้รับหน่วยน้ำหนักกดทับสูงสุดในอดีตเท่ากับหน่วยน้ำหนักกดทับที่จุด  $c$  ซึ่งมากกว่าหน่วยน้ำหนักกดทับในปัจจุบัน

#### 12.1.2.2.1 Normally consolidated

หมายถึงดินซึ่งได้เคยได้รับหน่วยน้ำหนักกดทับสูงกว่าที่ดินนั้นเคยได้รับในปัจจุบัน

#### 12.1.2.2.2 Over-consolidated

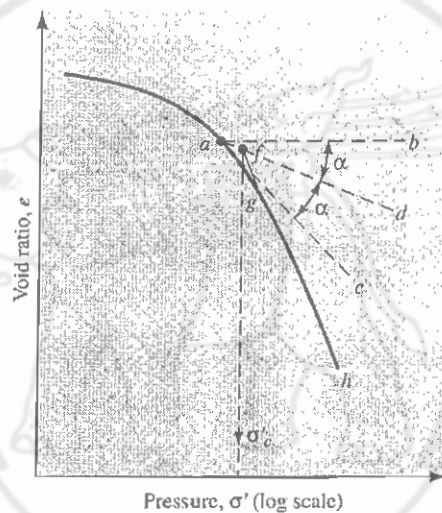
หมายถึงดินซึ่งในอดีตเคยได้รับหน่วยน้ำหนักกดทับสูงกว่าที่ดินนั้นได้รับในปัจจุบัน

Casagrande (1936) ได้คิดวิธีที่จะหาค่าหน่วยน้ำหนักกดทับสูงสุดในอดีตโดยใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักกดทับอัตราส่วนช่วงว่าง ( $e-\log \sigma'_v$ ) เรียกว่าหน่วยน้ำหนักกดทับสูงสุดในอดีต (Preconsolidation Pressure ;  $\sigma'_{vc}$ ) 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  $\hat{bac}$
6. Project เส้นตรงจากกราฟช่วงที่สองคือเส้น  $gh$  แล้วไปตัดกับ  $ad$  ตรงไหนเรียกจุดนั้นว่าจุด  $f$  ซึ่งก็คือหน่วยน้ำหนักกดทับสูงสุดในอดีต (Preconsolidation Pressure ;  $\sigma'_c$ )

โดยเส้นต่างๆ ที่แสดงวิธีการลากแสดงให้เห็นในรูปที่ 12.7



รูปที่ 12.7 วิธีการหา preconsolidation pressure โดยใช้วิธีการกราฟฟิก

ดังนั้นอัตราส่วนอัดแน่นเกินปกติ (Overconsolidated ratio ; OCR) สามารถหาได้จาก

$$OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} \quad (\text{สมการที่ 12.4})$$

โดยที่  $\sigma'_c$  = หน่วยแรงกดทับสูงสุดในอดีตโดยหาได้จากวิธีการข้างต้น

$\sigma'_0$  = หน่วยแรงกดทับที่ดินได้รับในปัจจุบันซึ่งจะกล่าวต่อไป

จะสามารถบอกได้ว่าการแบ่งแยกว่าดินเป็นแบบใดสามารถบอกได้จากกรณีว่า ดินในอดีตที่เคยได้รับน้ำหนักกดทับสูงกว่าที่ดินได้รับในปัจจุบันดังนั้นแสดงว่าถ้าดินเป็นแบบ OC แล้ว  $\sigma'_c < \sigma'_0$  นั่นเอง และถ้าดินเป็นแบบ NC แล้ว  $\sigma'_c \geq \sigma'_0$

- 12.1.2.2 ผลกระทบต่อการรบกวนบนอัตราส่วนช่องว่าง (Effect of Disturbance on Void ratio)

ก็คือผลกระทบจากรบกวนในธรรมชาตินั่นเอง นั่นคือกรณีที่เรทำการทดลองในห้องปฏิบัติการกับดินในธรรมชาติจะไม่เหมือนกันเนื่องจากดินในธรรมชาติจะถูกรบกวนจากปัจจัยต่างๆ ในธรรมชาติ โดยสามารถแบ่งแยกดินเหนียวออกเป็น 2 ชนิดคือ

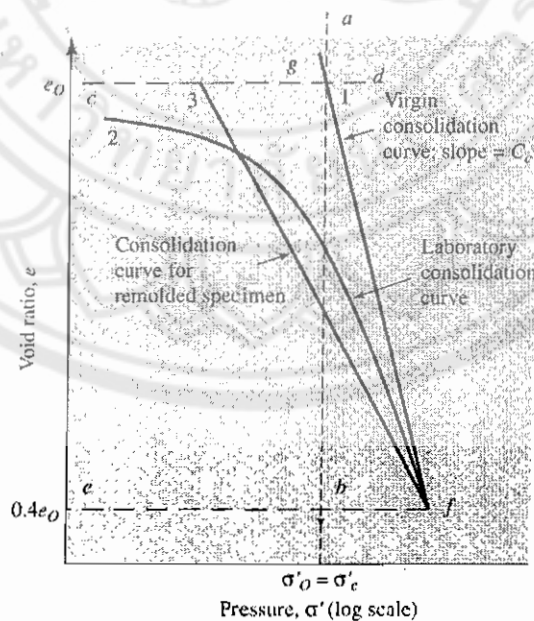
- 12.1.2.2.1 Normal Consolidated Clay

1. ในรูปที่ 12.8 เส้นโค้งที่ 2 เราได้จากการพล็อตกราฟในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเราสามารถหาหน่วยน้ำหนักกดทับสูงสุดในอดีต (Preconsolidation pressure ;  $\sigma'_c$ ) =  $\sigma'_o$  เนื่องจากเป็นดินแบบ NC จากนั้นเมื่อเราทราบ  $\sigma'_c = \sigma'_o$  แล้วเราก็ลากเส้น ab

2. หาอัตราส่วนช่องว่างในสนาม ( $C_o$ ) จากนั้นเขียนเส้น cd ในแนวระดับ

3. หา  $0.4 C_o$  แล้วเขียน cf โดยที่ f คือจุดที่ติดกับเส้นโค้งอันดับที่ 2

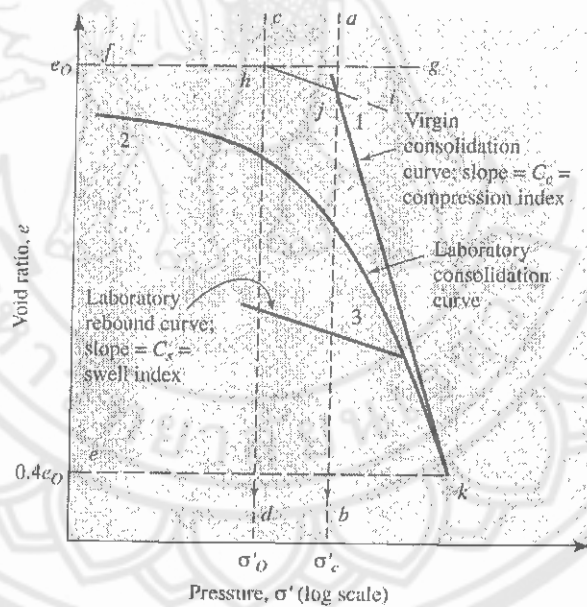
4. เชื่อมจุด fg เข้าหากันโดยที่จุด g คือจุดที่ ab ติดกับเส้น cd โดยเรียกเส้นตรงนี้ว่า "Virgin compression curve"



รูปที่ 12.8 Consolidation characteristics ของดินเหนียวแบบ NC แบบ low-medium sensitivity

-12.1.2.2.2 Overconsolidated clay

1. ในรูปที่ 12.9 เส้นโค้งที่ 2 ได้จากการพล็อตกราฟในห้องปฏิบัติการในการเพิ่มแรง (loading) และเส้นโค้งที่ 3 ก็คือการพล็อตจากการเอาน้ำหนักออก (Unloading) จากเส้นโค้งที่ 2 เราสามารถหา Preconsolidation pressure ;  $\sigma'_c$  ได้จากนั้นเราก็ลากเส้น ab
2. หา  $\sigma'_o$  ในสนามแล้วก็ลากเส้น c  $\sigma'_d$
3. หาอัตราส่วนช่องว่างในสนาม ( $C_o$ ) 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  $0.4 C_o$  นั่นเอง



รูปที่ 12.9 Consolidation characteristics ของดินเหนียวแบบ OC แบบ low-medium sensitivity

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

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

- 12.1.2.3 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) ภายใต้อstress ได้ง่ายกว่า solid phase เป็นอย่างมาก ดังนั้น ในขณะที่ consolidation process เริ่มเกิด induced stress ทั้งหมด จะถูกแบกรับโดย water phase นั่นคือ การเพิ่มแรงดันในน้ำที่แทรกอยู่ในช่องว่าง หรือที่เรียกว่า แรงดันน้ำส่วนเกิน (excess pore water pressure) แล้วส่วนผลให้เกิดความแตกต่างของ 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) และทรายเม็ดละเอียดหรือทรายปน (silt) จะมีอัตราส่วนช่องว่างค่อนข้างมาก และไม่มีแรงประจุไฟฟ้ายึดเหนี่ยวระหว่าง solid phase และ water phase ทำให้ primary consolidation settlement เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และถือเสมือนว่าเสร็จสมบูรณ์ไปพร้อมกับ immediate settlement นั่นคือ การทรุดตัวจาก 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

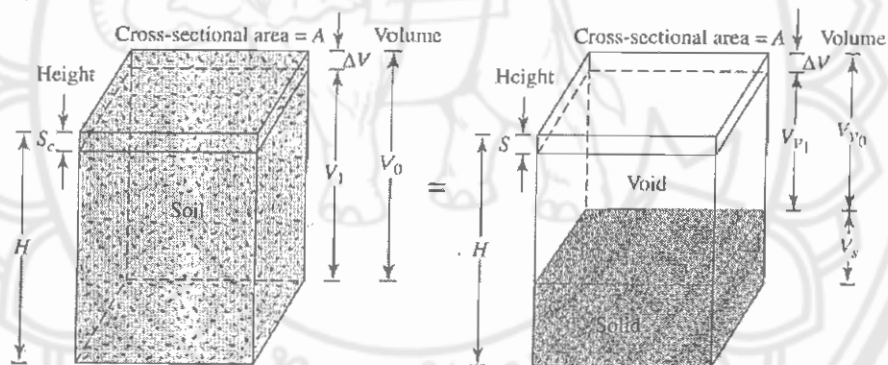
ในงานวิเคราะห์และออกแบบฐานรากโดยทั่วไป ให้ถือว่า การทรุดตัวจาก consolidation process จะเริ่มเกิดขึ้นหลังจากที่ชั้นดินเหนียวอิ่มตัว (saturated clay) ได้รับแรงกระทำภายนอกเต็มที่ (full external load) ซึ่งในทางปฏิบัติก็คือ นับจากสิ้นสุดงานก่อสร้าง



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 สามารถคำนวณหาได้จากความสัมพันธ์ที่พัฒนามาพฤติกรรมการยุบตัว (deformation behavior) ของชั้นดินและขนาดของหน่วยแรงสูงสุดที่ชั้นดินนั้น เคยรับมาในอดีต ( $\sigma'_c$ ) ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 12.1.2.2

การคำนวณหาปริมาณการทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำทำได้โดยใช้ไดอะแกรมที่แสดงในรูปที่ 12.10 โดยในรูปแสดงถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่จำเป็นที่จะต้องใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 12.10 การทรุดตัวของ one-dimension consolidation

จากรูปถ้า  $S_c =$  Primary Settlement การเปลี่ยนแปลงปริมาตรจะได้

$$\begin{aligned} \Delta V &= V_0 - V_1 \\ &= HA - (H - S_c)A \\ &= S_c A \end{aligned} \quad \text{(สมการที่ 12.5)}$$

โดยที่  $V_0 =$  ปริมาตรเริ่มต้น (initial volume)

$V_1 =$  ปริมาตรสุดท้าย (final volume)

อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงปริมาตรก็จะเท่ากับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของอากาศ ( $\Delta V_v$ ) ด้วยดังนั้น

$$\begin{aligned} \Delta V &= S_c A \\ &= V_{v_0} - V_{v_1} \\ &= \Delta V_v \end{aligned} \quad \text{(สมการที่ 12.6)}$$

โดยที่  $V_{v_0}$  = ปริมาตรเริ่มต้น (initial void volume)

$V_{v_1}$  = ปริมาตรสุดท้ายของช่องว่าง (final void volume)

ดังนั้นจากสมการของอัตราส่วนช่องว่าง ( $\Delta e$ ) จะได้

$$\begin{aligned} \Delta e &= \frac{\Delta V_v}{V_s} \\ \Delta V_v &= \Delta e V_s \end{aligned} \quad \text{(สมการที่ 12.7)}$$

โดยที่  $\Delta e$  = การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนช่องว่าง แต่

$$V_s = \frac{V_0}{1+e_0} = \frac{AH}{1+e_0} \quad \text{(สมการที่ 12.8)}$$

โดยที่  $e_0$  = อัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้นที่ปริมาตร  $V_0$

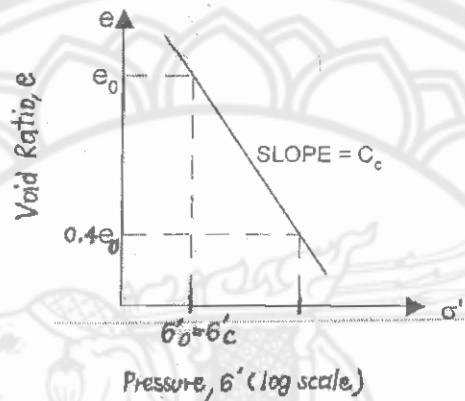
ดังนั้นจากสมการที่ 12.5 และ 12.8 จะได้

$$\begin{aligned} \Delta V &= S_c A \\ &= \Delta e V_s \\ &= \frac{AH}{1+e_0} \Delta e \end{aligned} \quad \therefore \boxed{S_c = H \frac{\Delta e}{1+e_0}} \quad \text{(สมการที่ 12.9)}$$

จากสมการที่ 12.9 ถ้าแบ่งแยกชนิดของดินเหนียวเป็นสองแบบคือแบบที่ 1 Normally consolidated และ 2 Over-consolidated แล้วสมการในการหาค่า  $S_c$  (Primary Consolidation) สามารถเปลี่ยนได้ดังต่อไปนี้

-12.1.2.3.1 กรณี Normally consolidated clays

จากรูปที่ 12.8 ค่า  $\Delta e$  (ค่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนช่องว่าง) สามารถได้จากค่า slope ของ Virgin consolidation curve นั่นก็คือ  $C_c =$  ดัชนีการอัดตัว (compression Index) ดังแสดงตามรูปที่ 12.11



รูปที่ 12.11 แสดง Virgin consolidation Curve

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

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

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

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

แทนค่า  $\Delta e$  ลงในสมการที่ 12.9 แล้วจะได้

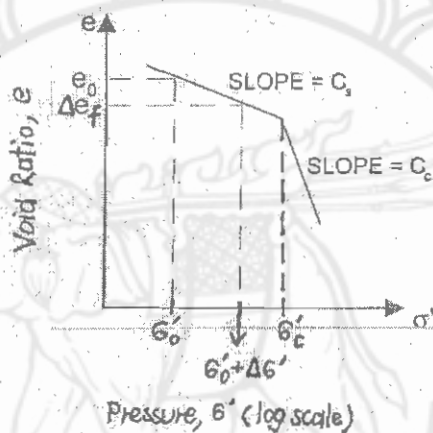
$$S_c = \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \left( \frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma'}{\sigma'_0} \right) \quad (\text{สมการที่ 12.10})$$

- 12.1.2.3.2 กรณี Over-consolidated Clays

จากรูปที่ 12.9 ค่า  $\Delta e$  สามารถหาได้ 2 กรณีดังต่อไปนี้คือ

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

โดยพื้นที่จะอยู่ในเส้น  $h_j$  ซึ่งสามารถให้ค่า slope แค่เพียงอันเดียวคือค่า slope ของ Laboratory Rebound curve นั่นก็คือ  $C_s$  = ดัชนีการบวมตัว (Swell Index) ดังแสดงตามรูปที่ 12.12 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนช่องว่างหลังจากสิ้นสุดการยุบตัว ( $e_r$ ) ไม่มากพอที่จะไปถึงเส้น curve ของ Virgin consolidation ทำให้ทั้งอัตราส่วนช่องว่างตอนเริ่มต้น ( $e_0$ ) และอัตราส่วนช่องว่างหลังสิ้นสุดการยุบตัว ( $e_r$ ) มีพฤติกรรมอยู่ใน curve ของ  $C_s$



รูปที่ 12.12 แสดงถึงพฤติกรรมของดินแบบ  $\sigma'_0 + \Delta\sigma' \leq \sigma'_c$

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

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

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

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

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

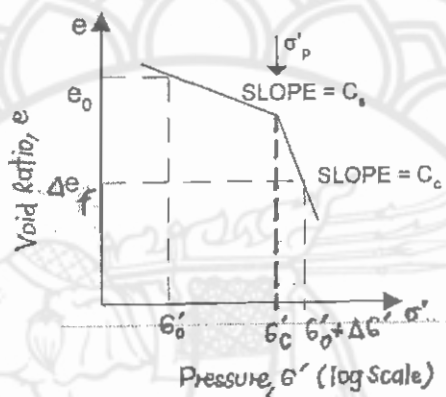
แทนค่า  $\Delta e$  ลงในสมการที่ 12.9 แล้วจะได้

$$S_c = \frac{C_s H}{1 + e_0} \log \left( \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \right) \quad (\text{สมการที่ 12.11})$$

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

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

โดยพื้นที่จะมีผลครอบคลุม Slope ทั้งสอง Slope ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 12.9 ดังนั้นเราจะต้องใช้ Slope ของทั้งสอง Curve ดังแสดงตามรูปที่ 12.13 นั่นก็คือค่าอัตราส่วนช่องว่างหลังสิ้นสุดการยุบตัว ( $e_1$ ) มีพฤติกรรมอยู่ใน Curve ของ  $C_u$  และอัตราส่วนช่องว่างก่อนการให้แรง ( $e_0$ ) มีพฤติกรรมอยู่ใน Curve ของ  $C_s$  นั่นเอง



รูปที่ 12.13 แสดงพฤติกรรมของดินแบบ  $\sigma'_0 + \Delta\sigma' > \sigma'_c$

ดังนั้นการหา  $\Delta e_1$  ใช้ Curve ของ  $C_s$  และการหา  $\Delta e_2$  ใช้ Curve ของ  $C_c$  จะได้ว่า

$$S_c = H \frac{\Delta e_1}{1+e_0} + H \frac{\Delta e_2}{1+e_0} \quad (\text{สมการที่ 12.12})$$

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

โดยที่อัตราการเปลี่ยนแปลง  $\sigma'$  ( $\Delta \log \sigma'$ ) อยู่ในช่วง  $\sigma'_0 \rightarrow \sigma'_c$  โดยดูได้จากรูปที่ 12.13

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

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

โดยที่ อัตราการเปลี่ยนแปลง  $\sigma'$  ( $\Delta \log \sigma'$ ) อยู่ในช่วง  $\sigma'_0 \rightarrow \sigma'_c = \sigma'_0 + \Delta\sigma'$  โดยดูได้จากรูปที่ 12.13

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

แทนค่า  $\Delta e_1$  และ  $\Delta e_2$  ลงในสมการที่ 12.12 จะได้

$$S_c = \frac{C_s H}{1+e_0} \log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} + \frac{C_c H}{1+e_0} \log \left( \frac{\sigma'_c + \Delta \sigma'}{\sigma'_c} \right) \quad (\text{สมการที่ 12.13})$$

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

### - 12.1.2.3.3 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 12.8 และรูปที่ 12.9 นั่นก็คือการหาค่าจาก slope ของการทดลองในห้องปฏิบัติการ แต่ในกรณีที่เราไม่มีผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการเราสามารถประมาณการหาค่าดัชนีต่างๆ ได้ตามทฤษฎีของแต่ละบุคคลที่คิดค้นขึ้นมาดังต่อไปนี้

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

$$C_c = 0.009 (LL - 10) \quad (\text{สมการที่ 12.14})$$

โดยที่ LL = ชีดจำกัดความชื้นเหลว (Liquid Limit)

Rendon – Herrero (1983) ได้สังเกตจึ้งพื้นฐานของดินเหนียวในธรรมชาติ (Natural Clays) แล้วก็เสนอความสัมพันธ์ของการหาดัชนีการอัดตัว (compression Index) ได้ตามสมการ

$$C_c = 0.141 G_s^{1.2} \left( \frac{1+e_0}{G_s} \right)^{2.38} \quad (\text{สมการที่ 12.15})$$

โดยที่  $G_s$  = ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity)

$e_0$  = อัตราส่วนของว่างของดิน in-situ

อีก 2 ปีต่อมา Nagaral และ Murty (1985) ได้เสนอวิธีการหาค่าดัชนีการอัดตัว (compression Index)

$$C_c = 0.2343 \left[ \frac{LL(\%)}{100} \right] G_s \quad (\text{สมการที่ 12.16})$$

ส่วนค่าดัชนีการบวม (swell Index) ก็จะมีค่าน้อยกว่าดัชนีการอัดตัวมากโดยจากการทดลองในห้องปฏิบัติการส่วนมากค่าดัชนีการบวม (Swell Index) จะมีค่าประมาณดังสมการ

$$C_s \approx \frac{1}{5} \text{ to } \frac{1}{10} C_c \quad (\text{สมการที่ 12.17})$$

อย่างไรก็ตาม Nagarai และ Murty (1985) ก็ได้เสนอสมการในการหาค่าดัชนีการบวมคือ

$$C_s = 0.0463 \left[ \frac{LL(\%)}{100} \right] G_s \quad (\text{สมการที่ 12.18})$$

- 12.1.2.4 ค่าการทรุดตัวจาก Secondary Consolidation ;  $S_s$

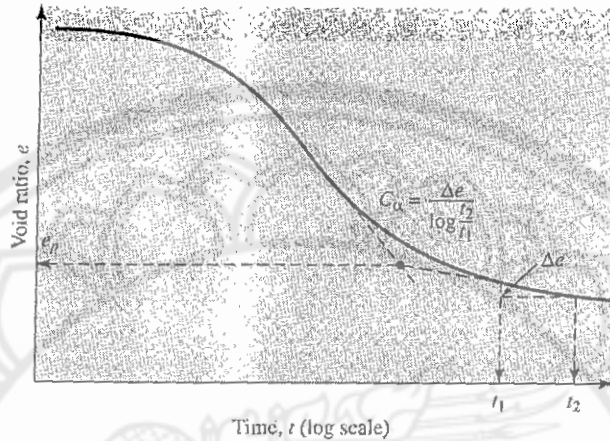
เป็นการทรุดตัวที่คิดเฉพาะในชั้นดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated clay) มีสาเหตุจากการล้า (creep) ของเม็ดดิน (solid phase) ที่รับน้ำหนักกระทำจากภายนอก (applied external load) อยู่เป็นเวลานาน ทำให้เกิดการยุบตัว (deformation) ของ solid phase หรืออาจจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ (re-arrangement) ของ solid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

การหดตัวของขบวนการอัดตัวครั้งที่สองสามารถหาได้โดยการพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับเวลา ( $e - \log t$ ) ตามรูปที่ 12.14 โดยสามารถหา Slope ของ Curve ซึ่งก็คือดัชนีการอัดตัวครั้งที่ 2 (Secondary Compression Index ;  $C_{\alpha}$ )



รูปที่ 12.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $e$  และ  $\log t$  ภายใต้การลดลงของน้ำหนักรวม และแสดงถึงวิธีการหาค่า Secondary consolidation index

ดังนั้นเราสามารถหาอัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนช่องว่าง ( $\Delta e$ ) ได้จากสมการ

$$C_{\alpha} = \frac{\Delta e}{\Delta \log t} \quad (\text{สมการที่ 12.19})$$

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

$$\Delta e = C_{\alpha} \log \left( \frac{t_2}{t_1} \right) \quad (\text{สมการที่ 12.20})$$

แทนค่า  $\Delta e$  ลงในสมการที่ 12.9

ดังนั้นปริมาณการหดตัวจากการอัดตัวครั้งที่สอง ( $S_s$ ) สามารถหาได้จากสมการ

$$S_s = \frac{C_{\alpha} H}{1 + e_p} \log \left( \frac{t_2}{t_1} \right) \quad (\text{สมการที่ 12.21})$$

โดยที่  $C_{\alpha}$  = อัตราส่วนช่องว่างหลังจากจบ Primary Consolidation

(ดูจากรูปที่ 12.14)

$H$  = ความหนาของชั้นดินเหนียว



แต่เราสามารถรวบรวมสมการได้ดังนี้คือ

$$S_s = C'_\alpha H \log \left( \frac{t_2}{t_1} \right) \quad (\text{สมการที่ 12.22})$$

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

ซึ่งค่า  $C'_\alpha$  สามารถประมาณค่าได้ดังต่อไปนี้

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

### -12.1.3 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

- 12.1.3.1 Coefficient of volume compressibility ;  $m_v$

คือการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินต่อหน่วยปริมาตรเดิม เนื่องจากน้ำหนักหรือหน่วยแรงกดอัดที่เพิ่มขึ้น

$$m_v = \frac{\Delta V}{V_o \Delta P} \quad (\text{สมการที่ 12.23})$$

โดยที่  $V_o$  = ปริมาตรเดิมของดิน

$\Delta V$  = ปริมาตรของดินที่เปลี่ยนไป

$\Delta P$  = น้ำหนักหรือแรงกดอัดที่เพิ่มขึ้น

- 12.1.3.2 สัมประสิทธิ์ของการยุบตัวของดิน (Coefficient of consolidation ;  $C_v$ )

$$C_v = \frac{k}{m_v \gamma_w} \quad (\text{สมการที่ 12.24})$$

โดยที่  $k$  = สัมประสิทธิ์ความซึมได้ (Coefficient of permeability)

$\gamma_w$  = หน่วยน้ำหนักของน้ำ

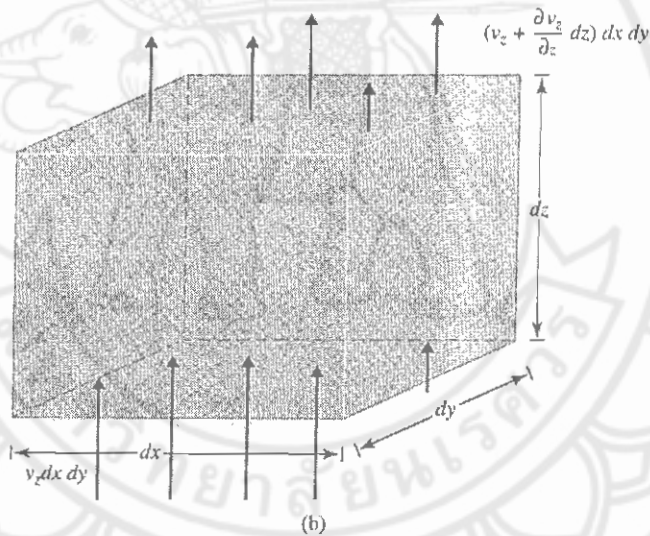
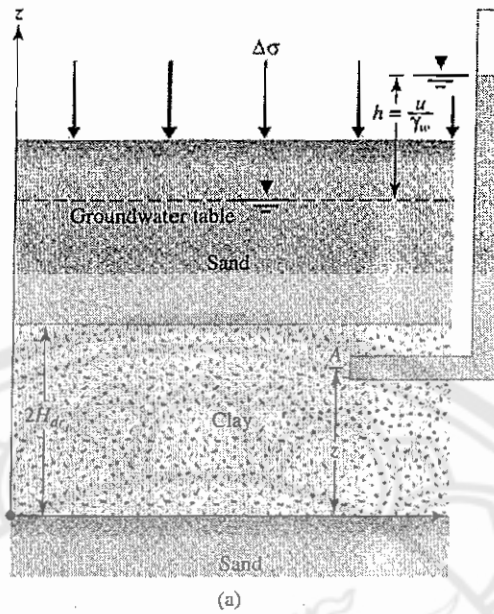
- 12.1.3.3 ระดับขั้นการยุบอัดตัวของดิน (Degree of Consolidation ;  $U$ )

คืออัตราส่วนของการทรุดตัวภายหลังช่วงเวลา  $t$  ต่อการทรุดตัวทั้งหมดโดยพิจารณาจากรูปที่

12.15

$$U = \frac{S_c(t)}{S_c} = 1 - \frac{\left(\frac{1}{2H_{dr}}\right) \int_0^{2H_{dr}} u_z dz}{u_o} = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v} \quad (\text{สมการที่ 12.25})$$

$$\text{โดยที่ } u_z = \sum_{m=0}^{\infty} \left[ \frac{2u_o}{M} \sin\left(\frac{M_z}{H_{dr}}\right) \right] e^{-M^2 T_v} \quad (\text{สมการที่ 12.26})$$



รูปที่ 12.15 (a) ชั้นดินเหนียวที่เกิดการทรุดตัว (b) การไหลของน้ำผ่านจุด A

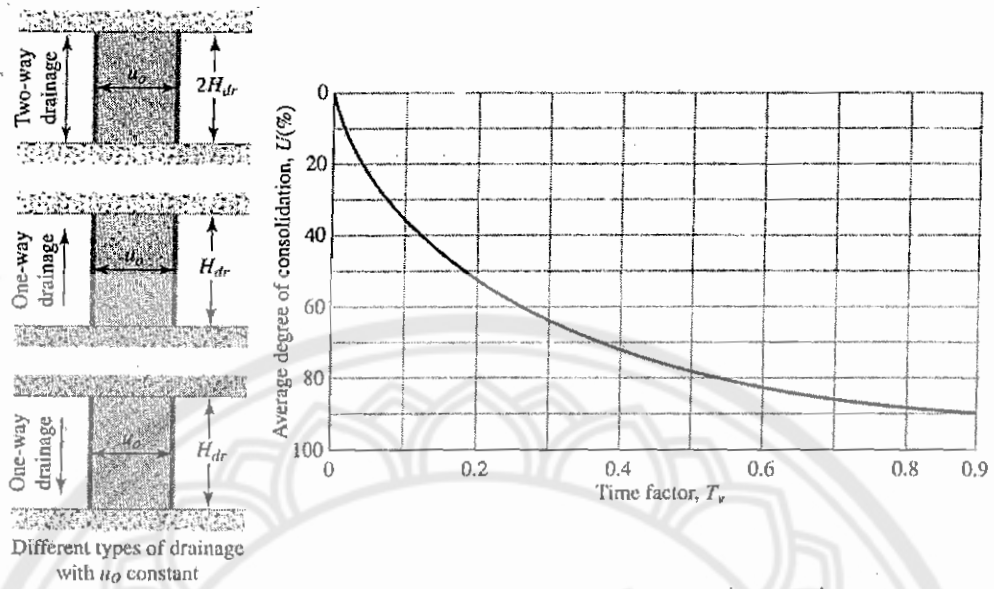
จากการอินทิเกรตในสมการที่ 12.25 ทำให้เราได้ความสัมพันธ์ของตัวประกอบของเวลา (Time factor ;  $T_v$ ) โดยแสดงความสัมพันธ์เป็นรูปกราฟได้ในรูปที่ 12.16 และสามารถประมาณได้จากสมการดังต่อไปนี้

สำหรับ  $U = 0$  ถึง 60%

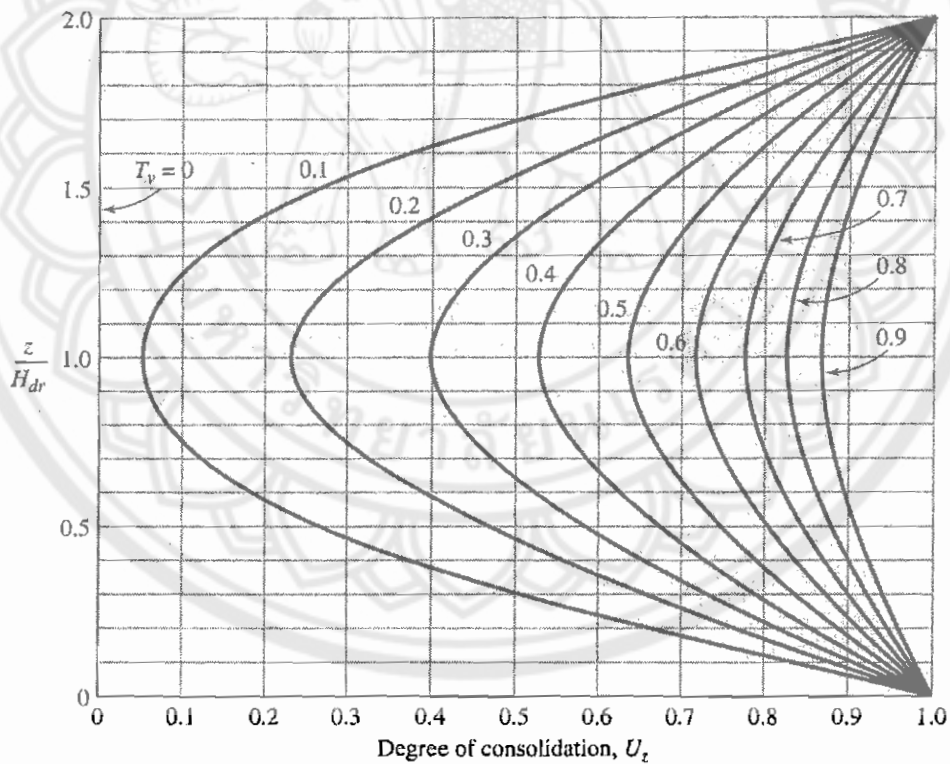
$$T_v = \frac{\pi \left( \frac{U\%}{100} \right)^2}{4} \quad (\text{สมการที่ 12.27})$$

สำหรับ  $U > 60\%$

$$T_v = 1.781 - 0.933 \log (\log - u_z(\%)) \quad (\text{สมการที่ 12.28})$$



รูปที่ 12.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $U$  กับ  $T_v$  (Time Factor) โดยที่  $u_0$  คงที่ในทุกๆความลึก



รูปที่ 12.16.1 ค่า  $U_z$  กับค่า  $T_v$  และ  $z/H_{dr}$

ซึ่งจากสมการที่ 12.26 และสมการที่ 12.27 สามารถสรุปเป็นตารางเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณได้ตามตารางที่ 12.4

ตารางที่ 12.4 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	$\infty$
33	0.0855	67	0.364		

-12.1.3.4 อัตราความเร็วของการยุบตัว (Rate of Consolidation ;  $t_v$ )

คือเวลาที่ใช้ในการยุบตัวของดิน ( $t$ ) หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

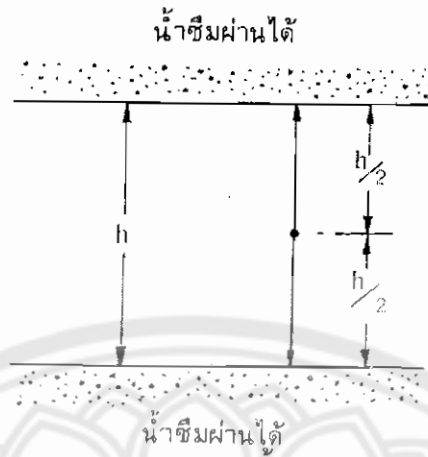
$$t_v = \frac{T_v H_{dr}^2}{C_v} \quad (\text{สมการที่ 12.29})$$

โดยจะต้องพิจารณาเงื่อนไขต่างๆ ที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

- พิจารณาทิศทางการไหลของน้ำว่าเป็น two-way drainage หรือ one-way drainage

1. กรณีเป็น two-way drainage (ดังแสดงในรูปที่ 12.16)

$$H_{dr} \text{ จะเท่ากับครึ่งหนึ่งของความหนาของชั้นดิน} = \frac{h}{2} \text{ ตามรูปที่ 12.17}$$



รูปที่ 12.17 แสดงการระบายน้ำออกจากดิน 2 ทาง  
 2. กรณีเป็น one-way drainage (ดังแสดงในรูปที่ 12.16)

$H_{dr}$  จะเท่ากับความหนาของชั้นดิน =  $h$  ตามรูปที่ 12.18



รูปที่ 12.18 แสดงการระบายน้ำออกจากดินทางเดียว

ในการทดสอบการยุบอัดตัวในห้องปฏิบัติการ จะเห็นว่ามีหินพรุนอยู่ทั้งด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างดิน ดังนั้น  $H_{dr}$  จึงเท่ากับครึ่งหนึ่งของความหนาของตัวอย่างดิน เพราะเป็นการระบายน้ำออกจากดินแบบ 2 ทาง

- 12.1.3.5 การหาค่า Coefficient of volume compressibility ;  $m_v$ )

ค่าสัมประสิทธิ์ของความสามารถในการยุบอัดตัว ( $m_v$ ) สามารถหาได้จากสมการ 12.23 ดังนี้

$$m_v = \frac{\Delta V}{V_o \Delta P} \quad (\text{สมการที่ 12.23})$$

แต่เนื่องจากดินถูกสมมติว่าไม่ขยายตัวทางด้านข้าง (ทฤษฎีของ Tezaghi) นั่นคือพื้นที่หน้าตัดคงที่ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาตรสามารถเขียนได้ในรูปของความหนาของชั้นดิน  $h$  ได้ดังรูปที่ 12.19

$$\therefore m_v = \frac{1}{h_0} \times \frac{\Delta h}{\Delta P} \quad (\text{สมการที่ 12.30})$$

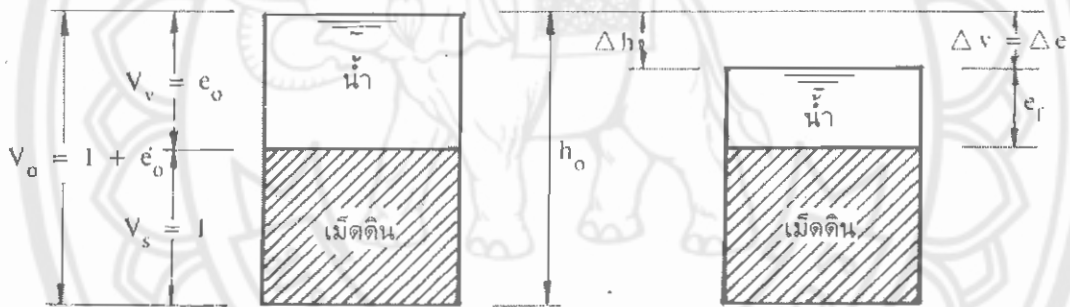
แต่เมื่อดินถูกสมมติให้ว่ามีปริมาตรคงที่ซึ่งไม่สามารถยุบอัดตัวลงได้ (ทฤษฎีของ Tezaghi) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาตรใดๆ ของดิน ก็คือการเปลี่ยนแปลงช่องว่างนั่นเอง ดังรูปที่ 12.19

$$m_v = \frac{1}{1 + e_0} \frac{\Delta e}{\Delta P} \quad (\text{สมการที่ 12.31})$$

โดยที่  $e_0$  = อัตราส่วนช่องว่างดินเดิม

$1 + e_0$  = ปริมาตรของดินเดิม

$\Delta e$  = อัตราส่วนช่องว่างที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 12.19 แสดงความสัมพันธ์ในการหา  $m_v$

- 12.1.3.6 การหาค่าสัมประสิทธิ์ในการยุบอัดตัวของดิน (Coefficient of Consolidation ;  $C_v$ )

จากที่กล่าวมาแล้วจะเห็นได้ว่าคุณสมบัติในการยุบตัวของดิน จะขึ้นอยู่กับค่า  $m_v$  แต่ถ้าเรามีผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการเราก็สามารถหาค่า  $C_v$  ได้เลย โดยเขียนเส้นความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับการยุบตัวโดยมีการหาอยู่ 2 วิธีคือ

-12.1.3.6.1 วิธีของ Casagrade และ Fadum (1940) เรียกว่า "Logarithm-of-Time Method"

1. เขียนเส้นความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log t$  กับการยุบตัวดังแสดงดังรูป 12.20 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  $d_{50} = \frac{d_0 + d_{100}}{2}$

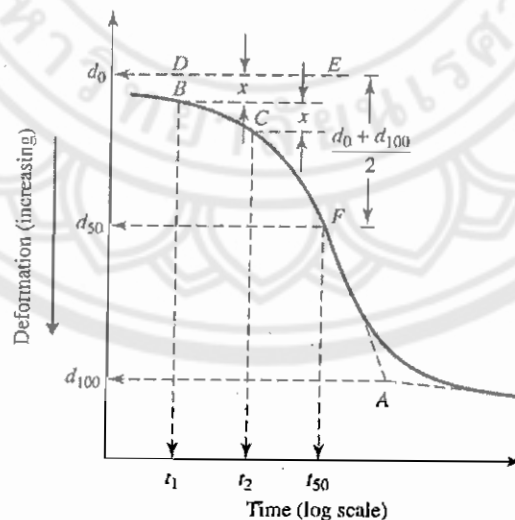
6. ลากเส้นจาก  $d_{50}$  ไปตัดเส้นกราฟที่จุด F ลากเส้นจากจุด F มาตัดกับแกน X จะได้ค่า  $t_{50}$

7. จากสมการ

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

จะได้  $C_v = \frac{0.197 H^2}{t_{50}}$  (สมการที่ 12.32)

โดยที่  $T_{50} = 0.197$  จากตารางที่ 12.4



รูปที่ 12.20 วิธีการหาค่า  $C_v$  โดยวิธี Logarithm-of-time method



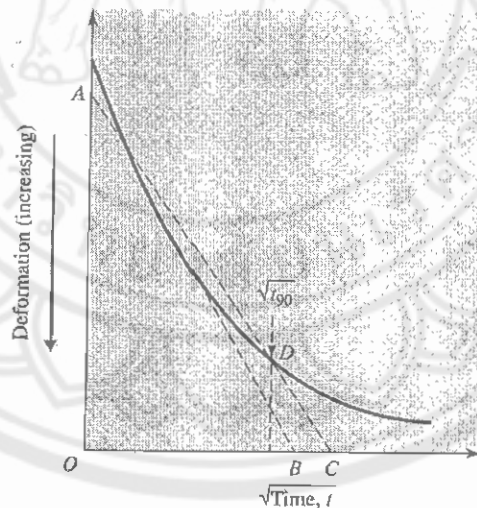
- 12.1.3.6.2 วิธีของ Taylor (1942) เรียกว่า "Square-Root-of-Time Method"

1. เขียนเส้นความสัมพันธ์ระหว่าง  $\sqrt{t}$  กับการยุบตัวดังแสดงดังรูป 12.21 จากนั้นลากเส้น AB ซึ่งเป็นเส้นที่สัมผัสเส้นกราฟมากที่สุด
2. ลากเส้น OC โดยที่  $OC = 1.15OB$  จากนั้นลากเส้น AC มาตัดกับเส้นกราฟที่จุด D
3. ลากเส้นจากจุด D มาตัดแกน ซึ่งจะได้อ่านค่าที่ขีดตัดคือ  $T_{90}$
4. จากสมการ

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

จะได้  $C_v = \frac{0.848 H_{dr}^2}{t_{90}}$  (สมการที่ 12.33)

โดยที่  $T_{90} = 0.848$  จากตารางที่ 12.4



รูปที่ 12.21 วิธีการหาค่า  $C_v$  โดยวิธี Square-root-of-time fitting method

อย่างไรก็ตามค่า  $C_v$  ที่ได้จากทั้งสองวิธีจะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งควรเลือกใช้  $C_v$  ที่มีค่ามากกว่า เพราะจากสมการข้างต้นจะเห็นว่าถ้าหากว่าค่า  $C_v$  มาก ระยะเวลาการเกิดการยุบตัวเต็มที่จะสั้นกว่าเมื่อค่า  $C_v$  น้อย (worst case)

12.1.4 Time Settlement Curve

ดินเหนียว เป็นดินซึ่งมีความสำคัญและเป็นปัญหามากที่สุดทางปฐพีกลศาสตร์ (Soil Mechanics) ทำให้เกิดการทรุดตัวของฐานรากอาคาร เนื่องจากดินเหนียวนั้นน้ำซึมผ่านได้ยาก ทำให้การยุบตัวเกิดเป็นเวลานานต่อเนื่อง รวมทั้งการกระจายแรงดันไม่เท่ากัน การทรุดตัวจึงไม่สม่ำเสมอ

ในการวิเคราะห์การยุบตัวของชั้นดินเหนียว สามารถใช้ Time-settlement curve ทำนายค่าการยุบตัวที่เวลาต่างๆ ได้ โดยพิจารณาเฉพาะช่วง Primary consolidation Settlement เท่านั้นโดยการสร้าง Time-settlement curve นั้นสามารถสร้างจากสมการที่ 12.29

$$t_v = \frac{T_v H_{dr}^2}{C_v} \quad (\text{สมการที่ 12.29})$$

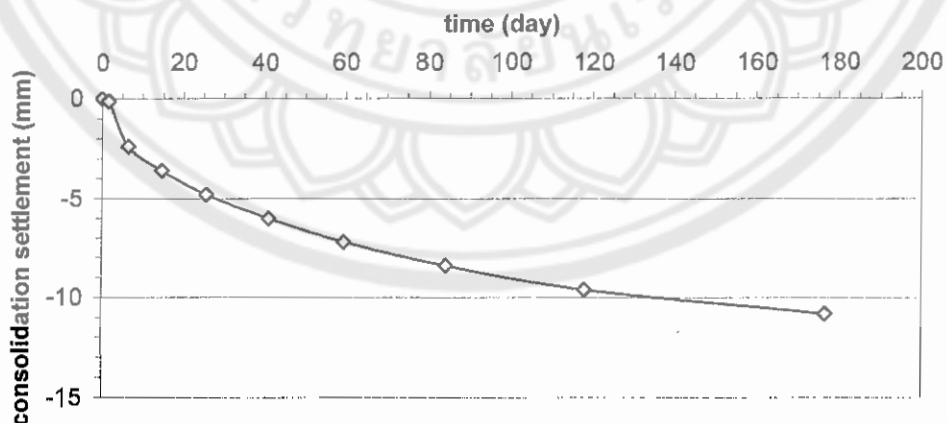
โดยใช้  $t_v$  ณ ช่วง  $U$  ต่างๆ ตามตารางที่ 12.4 จากนั้นนำ Primary Consolidation settlement ( $S_c$ ) มาหาค่าในช่วง  $U$  ต่างๆ ด้วย โดยจะกำหนดให้  $t_0$  คือเวลาที่สิ้นสุดการก่อสร้างหรือเวลาที่เริ่มต้นการเกิดการยุบตัวแบบ Consolidation settlement (0% Consolidation) และ  $t_{100}$  คือเวลาที่การยุบตัวแบบ Consolidation settlement สิ้นสุด (100% Consolidation) แต่  $t_{100}$  จะเกิดเมื่อเวลาผ่านไปยาวนานมาก ( $t_{100}$  ถึง  $t_{\infty}$ ) ดังนั้นจึงพิจารณาค่าการยุบตัวที่เวลา  $t_{90}$  (90% Consolidation) เมื่อหาค่าแล้วนำไปพล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง Settlement ณ ช่วง  $U$  ต่างๆ กับ Time ณ ช่วง  $U$  เดียวกันกับ Settlement นั้นเอง ดังแสดงตัวอย่างเป็นตารางและ curve ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 12.5 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 12.22 แสดงตัวอย่างกราฟ Time Settlement Curve ที่สร้างจากตารางที่ 12.5

จากกราฟจะเห็นได้ว่าถ้าเราต้องการทราบค่าการทรุดตัวเมื่อเวลาผ่านไปเท่ากับ 100 วัน เราก็รู้ได้ว่า การทรุดตัวทรุดไปประมาณ 9 mm เป็นต้น ซึ่งเหมาะจะใช้ประมาณค่าการทรุดตัวในการก่อสร้าง

12.1.5 การหาค่าการยุบตัวได้ฐานราก (Calculation of Consolidation Settlement under a Foundation)

ในทุกๆ ความลึก (z) ถ้าการทรุดตัวเป็นแบบ One-dimensional Settlement ก่อนที่เราจะใช้สมการในการหาค่า Primary Consolidation Settlement ( $S_c$ ) ในสมการที่ 12.10, สมการที่ 12.11, สมการที่ 12.13 ค่า  $\Delta\sigma'$  ที่นำมาแทนค่าในสมการจะต้องเป็นจุดเท่านั้น แต่กรณีในการทำงานจริงชั้นดินเหนียวมีความหนา ดังนั้นเราจะต้องหาค่าเฉลี่ยก่อนนำมาแทนค่าในสมการดังกล่าว ซึ่งสามารถ  $\Delta\sigma'$  เฉลี่ย หรือ  $\Delta\sigma'_{av}$  ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta\sigma'_{av} = \frac{\Delta\sigma'_t + 4\Delta\sigma'_m + \Delta\sigma'_b}{\sigma} \quad (\text{สมการที่ 12.34})$$

โดยที่  $\Delta\sigma'_t$  = หน่วยแรงประสิทธิผลที่ด้านบนของชั้นดิน

$\Delta\sigma'_m$  = หน่วยแรงประสิทธิผลที่กึ่งกลางของชั้นดิน

$\Delta\sigma'_b$  = หน่วยแรงประสิทธิผลที่ใต้สุดของชั้นดิน



**12.2 โจทย์บททวนเนื้อหา ความรู้ และความเข้าใจในหลักการพื้นฐานของเนื้อหาที่เรียน**

12.2.1 จากข้อมูลการทดสอบการทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำ ได้ผลดังแสดงตามตารางที่ 12.6 ดังนี้

ตารางที่ 12.6 ผลการทดลองที่ใช้ในข้อที่ 12.2.1

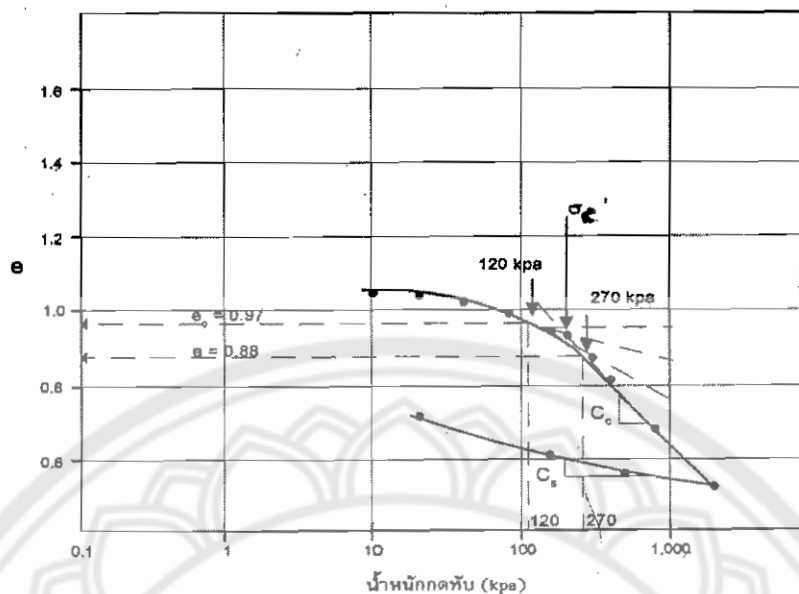
อัตราส่วนช่องว่าง : e	น้ำหนักกดทับ (kPa)	อัตราส่วนช่องว่าง : e	น้ำหนักกดทับ (kPa)
1.079	0	0.881	300
1.059	10	0.821	400
1.049	20	0.690	800
1.029	40	0.530	2000
1.000	80	0.570	500
0.959	160	0.620	160
0.940	200	0.717	20

ดังนั้นจงหา 12.2.1.1 จงหา Compression index ( $C_c$ ) และ Swelling index ( $C_s$ )

12.2.1.2 น้ำหนักกดทับสูงสุดในอดีต

12.2.2.3 ถ้าในชั้นดินธรรมชาติหนา 6 ม มีน้ำหนักกดทับประสิทธิผล 120 kPa ที่กึ่งกลางชั้นดิน น้ำหนักจากโครงสร้างทำให้กึ่งกลางชั้นดินมีหน่วยแรงในแนวตั้งเพิ่มขึ้น 150 kPa

**วิธีทำ** 12.2.1.1 สามารถเขียนกราฟระหว่างอัตราส่วนช่องว่าง และน้ำหนักกดทับได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 12.23 กราฟที่ได้จากการเขียนตามตารางที่ 12.6

จากกราฟจะได้  $C_c = \frac{0.8 - 0.7}{\log\left(\frac{740}{450}\right)} = 0.463$

$$C_s = \frac{0.61 - 0.56}{\log\left(\frac{800}{200}\right)} = 0.083$$

12.2.1.2 จากกราฟ ถ้าอาศัยวิธีของ Casagrande (1936) จะได้

$$\sigma'_c \approx 200 \text{ kPa}$$

12.2.1.3 การทรุดตัวจะสามารถหาได้จากสมการ

$$S_c = \frac{\Delta e}{1 + e_0} H = \frac{0.97 - 0.88}{1 + 0.97} \times 6 = 0.274 \text{ m (27.4 cm)}$$

12.2.2 จงประมาณค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นทันทีที่พื้นใด (Immediate Settlement) ของชั้นดินเหนียว โดยฐานรากที่เป็น Rigid มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 ft และมีน้ำหนักถ่ายลงสู่ฐานรากเท่ากับ 40,000 lb ถ้าดินเหนียวมีค่า  $E = 1,000 \text{ lb/in}^2$  และ  $\mu = 0.2$

**วิธีทำ** จากสมการของการหาการทรุดตัว

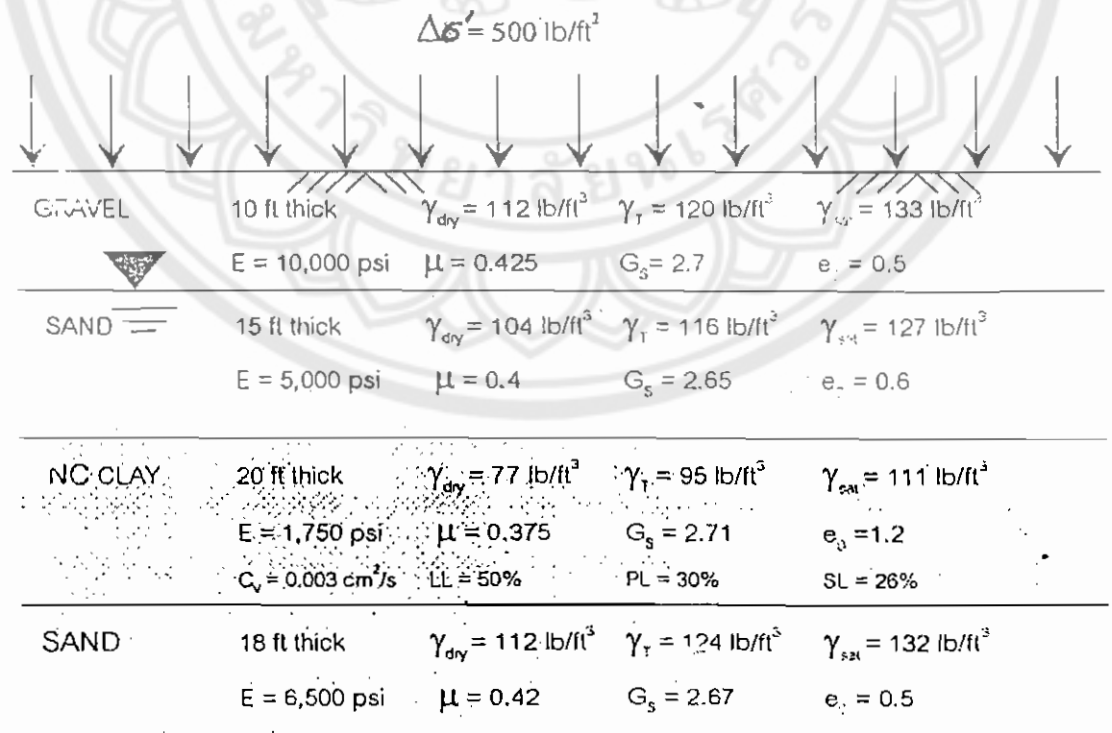
$$S_e = \Delta\sigma B \frac{1-\mu^2}{E_s} I_p$$

โดยที่  $\Delta\sigma = \frac{40000}{\frac{\pi}{4}(4^2)} = 3183.1 \text{ lb/ft}^2$

จากตารางที่ 12.1 จะได้  $I_p = 0.79$

ดังนั้น  $S_e = 3183.1 \times 4 \times \frac{(1-0.2^2)}{1000 \times 144} \times 0.79$   
 $= 0.067 \text{ in.}$

12.2.3 จากชั้นดินในรูปที่ 12.24 ด้านล่าง ได้มีการวางแผนถมที่ให้มีความกระทำภายนอกแบบกระจายสม่ำเสมอเต็มพื้นที่ (uniform distributed load) บนชั้นดิน ดังนั้นจึงคำนวณหา Primary Consolidation Settlement



รูปที่ 12.24 ชั้นดินที่ใช้ในข้อที่ 12.2.3

**วิธีทำ**

จากสมการของ Primary Consolidation Settlement จะได้

$$S_c = \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0}$$

ดังนั้นคำนวณหาค่าตัวแปรที่จำเป็นลงในสมการ

$$C_c = 0.009(LL-10)$$

$$= 0.009 (50-10)$$

$$= 0.36$$

$\Delta\sigma'$  = induce effective stress at midlayer

$$= 500 \text{ lb/ft}^2 \quad \text{เท่ากับแรงกระทำภายนอก}$$

$\sigma'_0$  = effective overburden effective stress at midlayer

$$= (10 \text{ ft})(\gamma_{\text{soil}}) + (15 \text{ ft})(\gamma_{\text{soil}} - \gamma_w) + \left(\frac{20 \text{ ft}}{2}\right)(\gamma_{\text{soil}} - \gamma_w)$$

$$= (10 \text{ ft})(120 \text{ lb/ft}^3) + (15 \text{ ft})(127 - 62.4) \text{ lb/ft}^3 + (10 \text{ ft})(111 - 62.4) \text{ lb/ft}^3$$

$$= 2655 \text{ lb/ft}^2$$

สามารถคำนวณหาค่าการทรุดตัวได้จากสมการข้างต้น

$$S_c = \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0}$$

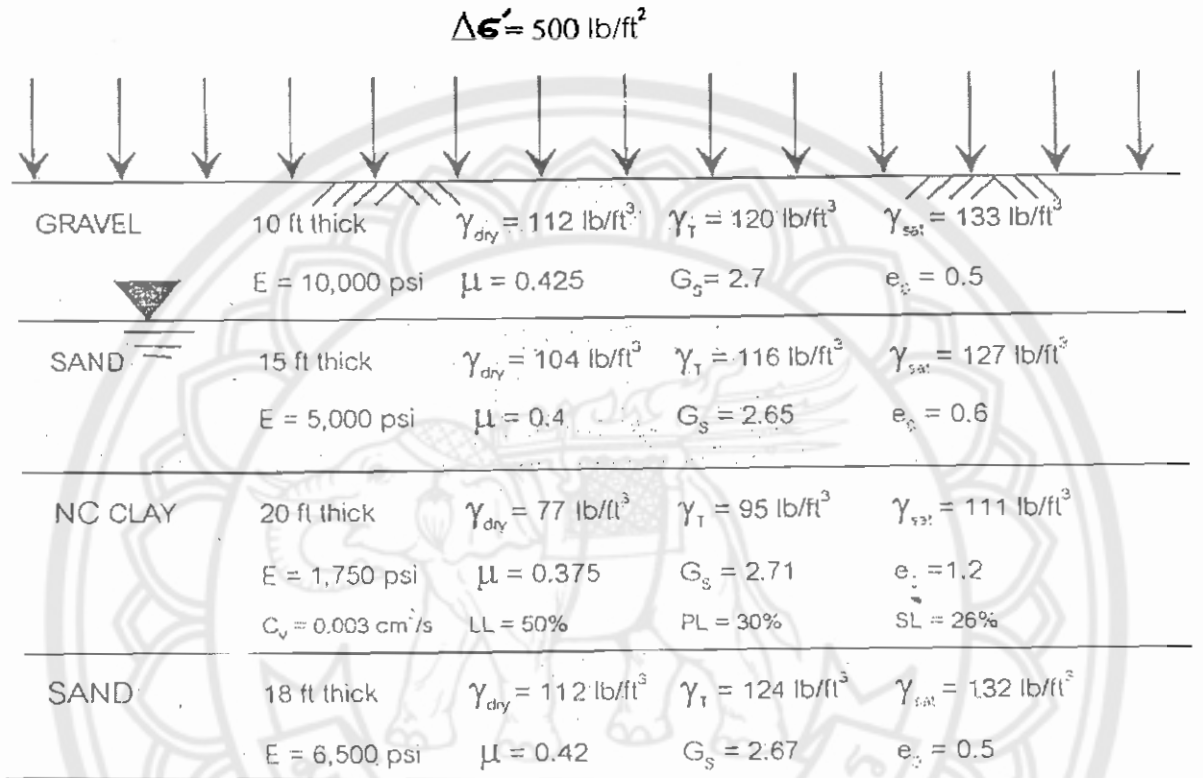
$$= \frac{0.36(20)}{1 + 1.2} \log \frac{2655 + 500}{2655}$$

$$= 0.245 \text{ ft}$$

$$= 2.9 \text{ in.}$$



12.2.4 จากผลการทดลอง Consolidation Test ของตัวอย่างที่เก็บมาจากความลึกที่ 35 ft ดังแสดงดังรูปที่ โดยได้ทราบว่าน้ำหนักกดทับสูงสุดในอดีต (Preconsolidation pressure) มีค่า 3000 lb/ft<sup>2</sup> ดังนั้นจงคำนวณหาค่า  $S_c$



รูปที่ 12.25 ชั้นดินที่ใช้ในข้อที่ 12.2.4

**วิธีทำ** จากโจทย์จะได้ว่า  $\sigma'_c = 3000 \text{ lb/ft}^2$

$$\begin{aligned} \sigma'_0 &= \text{effective overburden effective stress at midlayer} \\ &= (10 \text{ ft})(\gamma_{T_{\text{gravel}}}) + (15 \text{ ft})(\gamma_{\text{sat}_{\text{sand}}} - \gamma_w) + \left(\frac{20 \text{ ft}}{2}\right)(\gamma_{\text{sat}_{\text{clay}}} - \gamma_w) \\ &= (10)(120) + (15)(127 - 62.4) + (10)(111 - 62.4) \\ &= 2655 \text{ lb/ft}^2 \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ว่า  $\sigma'_c > \sigma'_0$  ดังนั้นจะต้องคำนวณหาค่า  $S_c$  ในแบบ OC Clay ดังนั้นคำนวณหาค่าที่จำเป็นคือ

$$\begin{aligned} C_c &= 0.009(\text{LL}-10) \\ &= 0.009(50-10) \\ &= 0.36 \end{aligned}$$

$$C_s = \frac{1}{5} C_c = 0.072$$

$\Delta\sigma'$  = induce effective stress at midlayer

= 500 lb/ft<sup>2</sup> เท่ากับแรงกระทำภายนอก

$\sigma'_o$  = 2655 lb/ft<sup>2</sup> จากการหามาจากข้างต้น

∴ จะได้  $\sigma'_o + \Delta\sigma' = (2655 + 500) = 3155 \text{ lb/ft}^2$  ซึ่งมากกว่า  $\sigma'_c = 3000 \text{ lb/ft}^2$  จึงต้องใช้สมการดังต่อไปนี้

$$S_c = \frac{C_s H}{1+e_0} \log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_o} + \frac{C_c H}{1+e_0} \log \left( \frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'}{\sigma'_c} \right)$$

$$= \frac{0.072(20)}{1+1.2} \log \frac{3000}{2655} + \frac{0.36(20)}{1+1.2} \log \frac{3155}{3000}$$

$$= 0.11 \text{ ft} \quad = 1.32 \text{ in.}$$

12.2.5 ชั้นดินรองรับต่อม่อของโกดัง ประกอบด้วยชั้นดิน NC Clay หนา 4 เมตร ที่วางตัวแทรกอยู่ใต้ชั้นดินทราย และรองรับด้วยชั้นหินดินดาน หากผลการคำนวณพบว่า Primary Consolidation Settlement ( $S_c$ ) ที่เกิดขึ้นทั้งหมดเท่ากับ 80 mm ดังนั้นจงหา

12.2.5.1 ค่าเปอร์เซ็นต์การยุบตัว (%U) ของชั้นดินเหนียวเป็นเท่าใด เมื่อ  $S_c = 35 \text{ mm}$

12.2.5.2 ถ้าผลจาก Consolidation Test พบว่า  $C_v = 0.003 \text{ cm}^2/\text{s}$  ดังนั้น  $t_{90}$  มีค่าเท่าใด

12.2.5.3 หากปรากฏว่าผลการสำรวจชนิดผลาด ทำให้ชั้นดินที่รองรับดินเหนียวไม่ใช่หินดินดานแต่เป็น gravel ดังนั้น ค่า  $t_{90}$  จะมีค่าเท่าใดเมื่อ  $C_v = 0.003 \text{ cm}^2/\text{s}$

วิธีทำ 12.2.5.1 สามารถหา U% ได้จากสมการ

$$U\% = \frac{\text{consolidation settlement at time } t}{\text{consolidation settlement}} \times 100\%$$

$$= \frac{35}{80} \times 100$$

$$43.75 \%$$

12.2.5.2 จากสมการ

$$T_v = \frac{C_v t}{H_{dr}^2}$$

$T_{90} = 0.848$  จากตารางที่ 12.4

$H^{dr} = 400 \text{ cm}$  เพราะเป็น 1-Way drainage condition

$C_v = 0.003 \text{ cm}^2/\text{s}$

$$\text{ดังนั้นจะได้ } t = \frac{(0.848)(400)^2}{0.003}$$

$$= 45257000 \text{ sec}$$

$$= 1.43 \text{ years}$$

### 12.2.5.3 จากสมการ

$$T_v = \frac{C_v t}{H_{dr}^2}$$

$$T_{90} = 0.848 \text{ จากตารางที่ 12.4}$$

$$H^{dr} = 200 \text{ cm เพราะเป็น 2-Way drainage condition}$$

$$C_v = 0.003 \text{ cm}^2/\text{s}$$

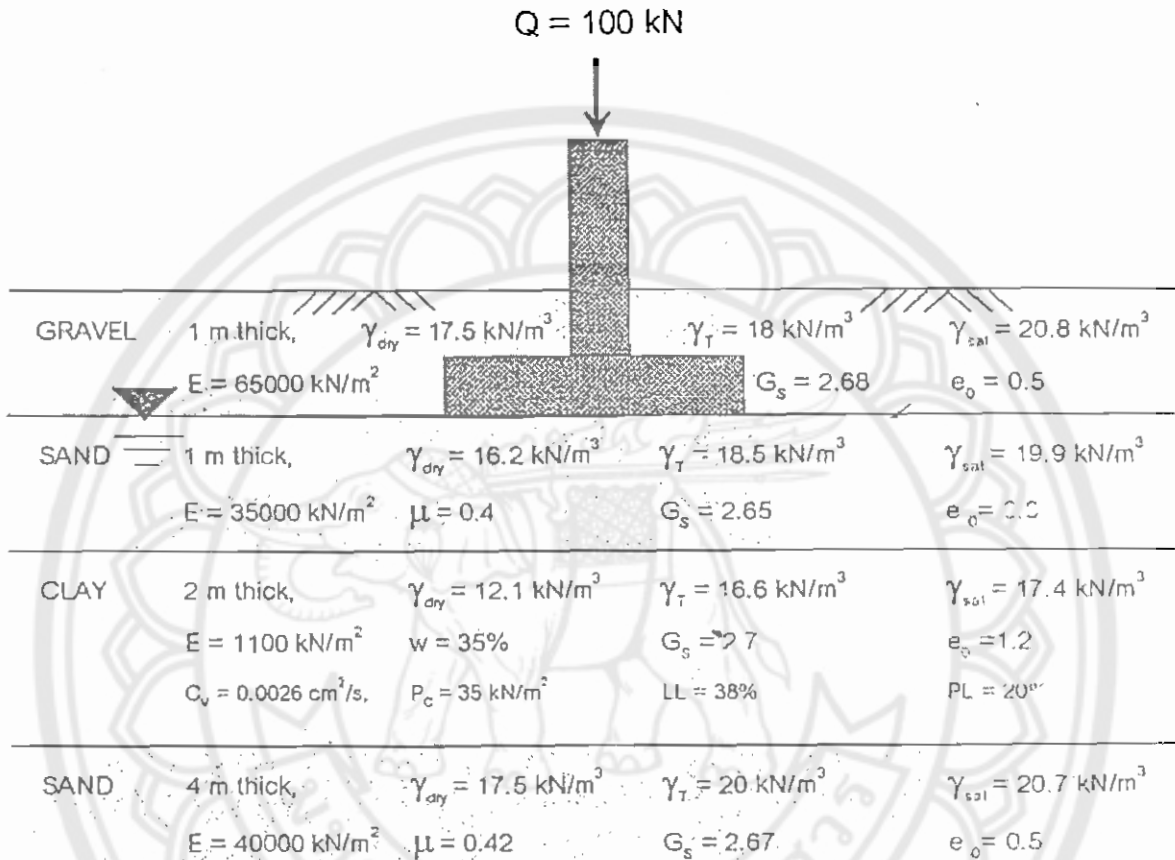
$$\text{ดังนั้นจะได้ } t = \frac{(0.848)(200)^2}{0.003}$$

$$= 11307000 \text{ sec}$$

$$= 0.36 \text{ years}$$



12.2.6 ชั้นดินที่รองรับฐานรากแห่งหนึ่งดังแสดงดังรูป ซึ่งฐานรากเป็นแบบ square isolated footing ขนาด  $1 \times 1 \text{ m}^2$  เพื่อรับน้ำหนักกระทำ  $Q = 100 \text{ kN}$  ดังนั้นจงคำนวณหา Primary consolidation settlement



รูปที่ 12.26 ชั้นดินที่ใช้ในข้อที่ 12.2.6

วิธีทำ จากโจทย์จะได้

$$\sigma'_c = 35 \text{ kN/m}^2$$

$\sigma'_0$  = effective overburden effective stress at midlayer

$$= (1\text{m})(\gamma_{T_{\text{gravel}}}) + (1\text{m})(\gamma_{\text{sat}_{\text{sand}}} - \gamma_w) + \left(\frac{2\text{m}}{2}\right)(\gamma_{\text{sat}_{\text{clay}}} - \gamma_w)$$

$$= (1)(18) + (1)(19.9 - 9.81) + (1)(17.4 - 9.81)$$

$$= 35.7 \text{ kN/m}^2$$

ดังนั้นจะได้ว่า  $\sigma'_0 \approx \sigma'_c$  ดังนั้นดินจึงเป็นแบบ NC Clay

หาค่าตัวแปรที่จำเป็นดังต่อไปนี้

$$e_0 = \omega G_s$$

$$= (0.35)(2.7) = 0.945$$

$$C_c = 0.009(LL-10) \\ = 0.009(38-10) = 0.252$$

$$H = 2 \text{ m}$$

$$\sigma'_0 = 35.7 \text{ kN/m}^2 \text{ จากการคำนวณข้างต้น}$$

$$\Delta\sigma' = \Delta\sigma'_{av} = \frac{\Delta\sigma'_t + 4\Delta\sigma'_m + \Delta\sigma'_b}{\sigma}$$

ซึ่งสามารถหาได้ตามตารางดังนี้

ตารางที่ 12.7 หาค่าที่  $\Delta\sigma'$  ที่ตำแหน่งต่างๆ

@ Layer	$m_1$	$z$ (m)	$b=B/2$ (m)	$n_1=z/b$	$q$ (kN/m <sup>2</sup> )	$I_4$ (จากตาราง)	$\Delta\sigma' = I_4 q$ (kN/m <sup>2</sup> )
Top	1	1	0.5	2	100	0.336	33.6
Mid	1	2	0.5	4	100	0.108	10.8
Bottom	1	3	0.5	6	100	0.051	5.1

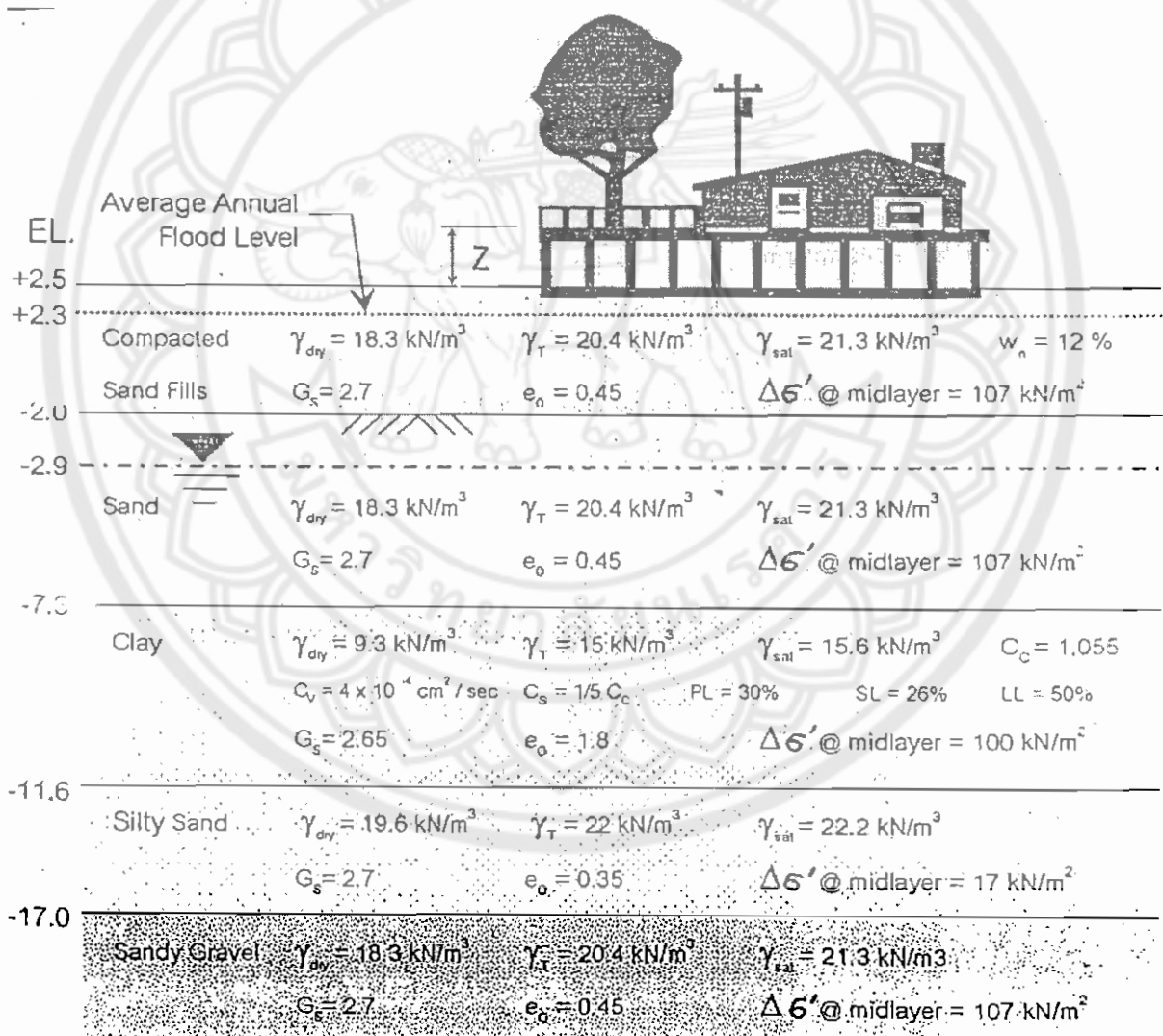
$$\text{ดังนั้น } \Delta\sigma' = \Delta\sigma'_{av} = \frac{\Delta\sigma'_t + 4\Delta\sigma'_m + \Delta\sigma'_b}{\sigma} \\ = \frac{33.6 + 4(10.8) + 5.1}{6} \\ = 13.65 \text{ kN/m}^2$$

คำนวณหาค่า  $S_c$  ได้จากสมการของชั้น NC Clay

$$S_c = \frac{C_c H}{1+e_0} \log \left( \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \right) \\ = \frac{0.252(2)}{1+0.945} \log \frac{35.7+13.65}{35.7} \\ = 0.036 \text{ m} = 3.6 \text{ cm}$$

### 12.3 โจทย์ทดสอบความสามารถในการคิดวิเคราะห์โดยประยุกต์ใช้ความรู้ เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในการทำงาน

14.3.1 บริษัท จิรายุทธ Construction จำกัด (มหาชน) ได้รับการว่าจ้างให้ออกแบบและก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรร อุตสาหกรรม วิลล่า ที่สถาปนิกและเจ้าของโครงการได้ตกลงวางรูปแบบการก่อสร้างโครงการ โดยใช้วิธีใช้ฐานรากแผ่ (Spread footing) วางบนชั้นทรายที่ถมและบดอัดทั่วโครงการ เพื่อรองรับโครงสร้างบ้านแต่ละหลัง ที่ต้องการออกแบบโดยการยกระดับพื้นชั้นล่าง เพื่อเพื่อไว้สำหรับเลี้ยงน้ำท่วมในแต่ละปี (annual flood) ตามรายละเอียดที่แสดงไว้ดังรูปที่ 12.27



รูปที่ 12.27 ชั้นดินที่ได้จากการสำรวจในข้อที่ 12.3.1

ในฐานะวิศวกรเจ้าของโครงการ ให้หาคำตอบว่า จะต้องยกற்பดับพื้นที่ชั้นล่าง (Z) ขึ้นจากระดับผิวบนของดินถม สูงเท่าใด จึงไม่โดนน้ำท่วมตลอดอายุโครงการนาน 35 ปี โดยระดับน้ำท่วมในแต่ละปีอยู่ที่ 2.3 เมตร และผลจากน้ำหนักของอาคารในแต่ละหลังจะทำให้เกิด Induce stress ที่กึ่งกลางของแต่ละชั้นดิน ( $\Delta\sigma' @ midlayer$ )

**วิธีทำ** ต้องคำนวณหาค่า Consolidation settlement ของชั้นดินเหนียว ดังนั้นจะได้ที่จุดกึ่งกลางของชั้นดินเหนียว

$$\begin{aligned}\sigma'_0 &= (20.4)(0.9) + (21.3 - 9.81)(4.4) + (15.6 - 9.81)(4.3) \\ &= 81.4 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

$$\sigma'_c = 100 \text{ kN/m}^2$$

จะเห็นได้ว่า  $\sigma'_0 < \sigma'_c$  ดังนั้นดินเป็นแบบ OC Clay

ดังนั้นคำนวณค่าที่จำเป็นดังต่อไปนี้

$$e_0 = 1.8$$

$$\gamma_T = 15 \text{ kN/m}^2$$

$$C_c = 1.055$$

$$C_s = \frac{1}{5} C_c = \frac{1.055}{5} = 0.211$$

$$H = 4.3 \text{ m}$$

$$\sigma'_0 = 81.4 \text{ kN/m}^2 \text{ จากการคำนวณข้างต้น}$$

$$\Delta\sigma' = \text{ได้จากการถมดินทราย}$$

$$= (\gamma_{T(sand\ fill)}) (H_{sand\ fill})$$

$$= (20.4)(4.5) = 91.8 \text{ kN/m}^2$$

ดังนั้นคำนวณหาค่า  $S_c$  จากสมการของ OC Clay

$$\text{โดยที่ } \sigma'_0 + \Delta\sigma' = 173.2 \text{ kN/m}^2 > \sigma'_c = 100 \text{ kN/m}^2$$

ดังนั้นใช้สมการ

$$\begin{aligned}S_c &= \frac{C_s H}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} + \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \left( \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_c} \right) \\ &= \frac{0.211(4.3)}{1 + 1.8} \log \frac{100}{81.4} + \frac{1.055(4.3)}{1 + 1.8} \log \frac{173.2}{100} \\ &= 0.42 \text{ m} \\ &= 4.2 \text{ cm}\end{aligned}$$

สามารถสร้าง Time settlement curve ได้ดังต่อไปนี้

- จากโจทย์
- $C_v = 4 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 / \text{sec}$
  - $H_{dr} =$  ชั้นดินเป็นแบบ 2-way drainage condition
  - $= \frac{H}{2} = \frac{4.3}{2} = 2.15 \text{ m}$

- คิดว่าการกระจายตัวของ Induces stress ในชั้นดินเหนียวเป็นแบบเส้นตรง ใช้ค่า  $T_v$  ตามตารางที่ 12.4

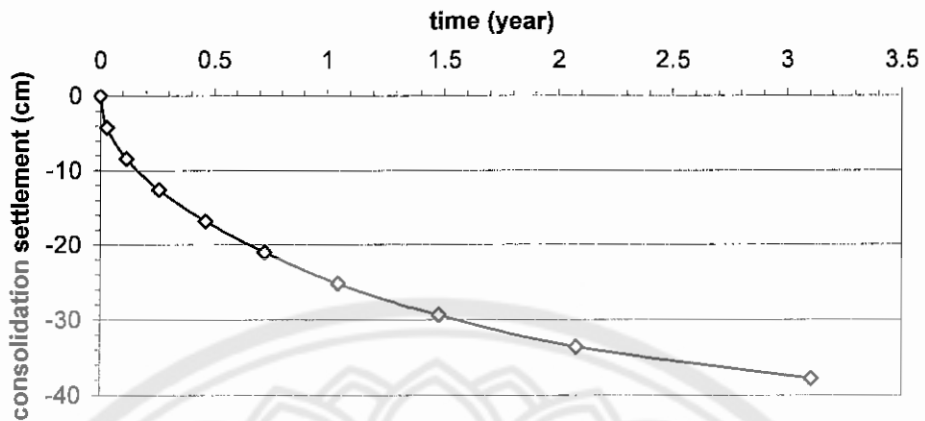
ดังนั้นสามารถสรุปเป็นตารางที่ 12.8 ได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 12.8 ค่าการยุบตัวที่และเวลาที่ใช้ในการยุบตัวที่ % Consolidation ต่างๆ

U (%)	$T_v$ (จากตาราง)	$t_{@U} = \frac{(T_v H_{dr}^2)}{C_v}$ (year)	$S_{@U} = (U)(S_c)$ (cm)
0	0	0	0
10	0.00785	0.029	4.2
20	0.0314	0.115	8.4
30	0.0707	0.259	12.6
40	0.123	0.462	16.8
50	0.197	0.722	21.0
60	0.286	1.048	25.2
70	0.403	1.477	29.4
80	0.567	2.078	33.6
90	0.848	3.107	37.8

ซึ่งสามารถสร้าง Time Settlement Curve ได้ดังต่อไปนี้



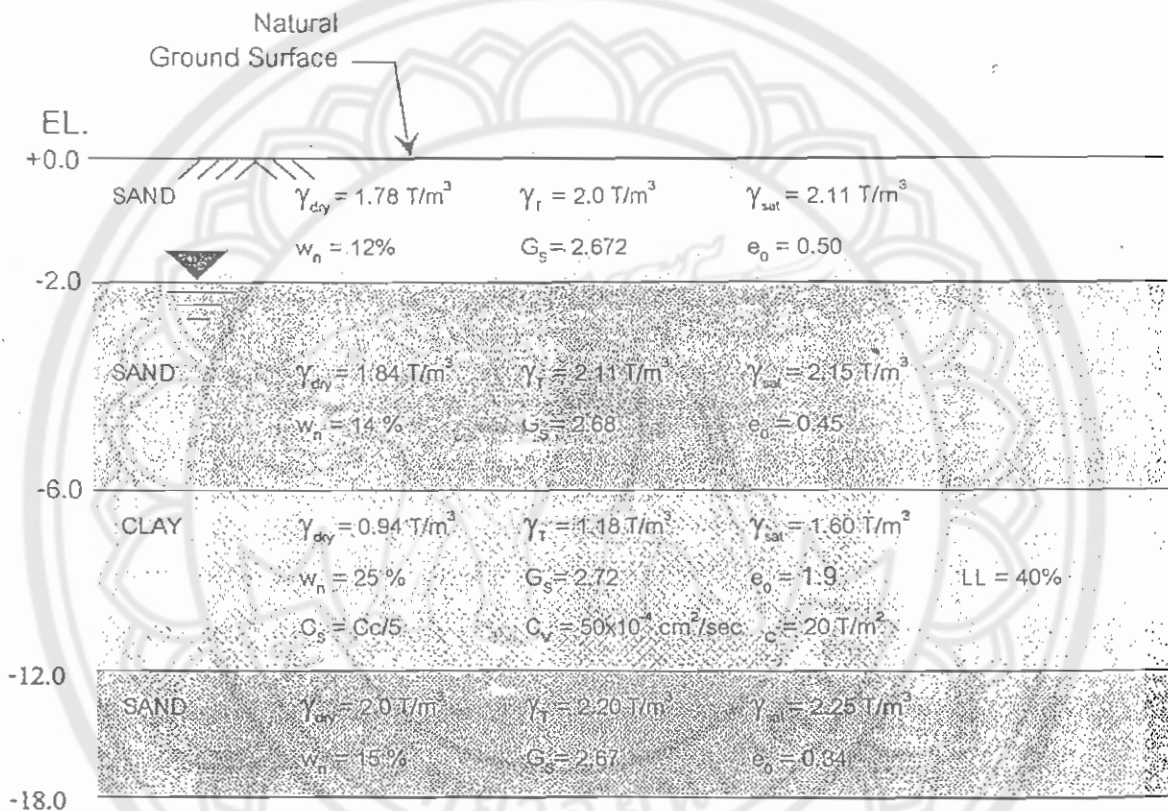


รูปที่ 12.28 Time Settlement Curve ของข้อที่ 12.3.1

จากกราฟจะเห็นได้ว่า  $t_{90} = 3.107$  ปี และ  $S_{90} = 39$  cm ซึ่งก็คือการทรุดตัวจะทรุดสิ้นสุดที่ 3.107 ปี โดยจะทรุดตัวไป 39 cm นั้นเอง แต่จากรูปที่ บริษัทได้ถมดินเพิ่มไปแล้ว 20 cm ดังนั้นควรยกพื้นขึ้นอีก =  $39 - 20 = 19$  cm บ้านก็จะไม่โดนน้ำท่วมตลอดอายุโครงการนาน 35 ปี

13.3.2 ทางองค์การบริหารส่วนจังหวัดพิจิตร ได้วางแผนถมดินที่หน่วยน้ำหนักรวมเท่ากับ  $1.8 \text{ T/m}^2$  ให้มีระดับหลังการถมสูงจากดินเดิม 1.5 เมตร เป็นบริเวณกว้างทั่วทั้งโครงการ แล้วทิ้งไว้ทั้งหมด 1 ปี ก่อนที่จะก่อสร้างอาคาร เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดระดับพื้นชั้นที่ 1 ดังนั้นทางองค์การฯ จึงได้ว่าจ้างคุณให้คำนวณหาว่า หลังจากถมดินนาน 1 ปีดังกล่าว ดินถมจะยุบตัวไปทั้งหมดเท่าใด

ทั้งนี้ผลการเจาะสำรวจดินบริเวณโครงการมีลักษณะดังรูปที่ 12.29



รูปที่ 12.29 ชั้นดินที่ใช้ในข้อที่ 12.3.2

**วิธีทำ** ในการคำนวณไม่ต้องคำนวณหา Elastic Settlement เพราะระดับหลังการถม สูงจากดินเดิม 1.5 เมตร เป็นการกำหนดว่า เป็นเวลาสิ้นสุดงานก่อสร้าง ซึ่ง Elastic Settlement ได้เกิดขึ้นไปหมดแล้ว

ดังนั้น พิจารณาดินเหนียวว่าเป็นดินชนิดอะไร

ที่กึ่งกลางชั้นดินเหนียวอิมตัว จะได้

$$\begin{aligned} \sigma'_0 &= (2m)(\gamma_{r(sand)}) + (4m)(\gamma_{sat(sand)} - \gamma_w) + \left(\frac{6}{2}m\right)(\gamma_{sat(clay)} - \gamma_w) \\ &= (2)(2) + (4)(2.15 - 1) + (3)(1.6 - 1) \\ &= 10.4 \text{ T/m}^2 \end{aligned}$$

$$\sigma'_c = 20 \text{ T/m}^2$$

ดังนั้นจะได้ว่า  $\sigma'_0 < \sigma'_c$  แสดงว่าดินเป็นแบบ OC Clay

ดังนั้น คำนวณหาค่าที่จำเป็นสำหรับการคำนวณ

$$e_0 = 1.90$$

$$LL = 40$$

$$C_c = 0.009(LL-10)$$

$$= 0.009(40-10)$$

$$= 0.27$$

$$C_s = \frac{1}{5} C_c = \frac{0.27}{5} = 0.054$$

$$H = 6 \text{ m}$$

$$\sigma'_0 = 10.4 \text{ T/m}^2 \text{ ได้จากการคำนวณข้างต้น}$$

$$\Delta\sigma' = 2.7 \text{ T/m}^2$$

พิจารณาว่าจะใช้สมการไหนในการพิจารณา

$$\text{จากการคำนวณจะได้ } \sigma'_0 + \Delta\sigma' = 13.1 \text{ T/m}^2 < \sigma'_c = 20 \text{ T/m}^2$$

จึงจะต้องใช้สมการ

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

$$= \frac{0.54(6)}{1+1.9} \log \frac{13.1}{10.4}$$

$$= 0.012 \text{ m}$$

$$= 12 \text{ mm}$$

สามารถสร้าง Time settlement curve ได้ดังต่อไปนี้

$$\text{จากโจทย์ } - C_v = 50 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 / \text{sec}$$

$$- H_{dr} = \text{ชั้นดินเป็นแบบ 2-way drainage condition}$$

$$= \frac{H}{2} = \frac{6}{2} = 3 \text{ m}$$

- คิดว่าการกระจายตัวของ Induces stress ในชั้นดินเหนียวเป็น

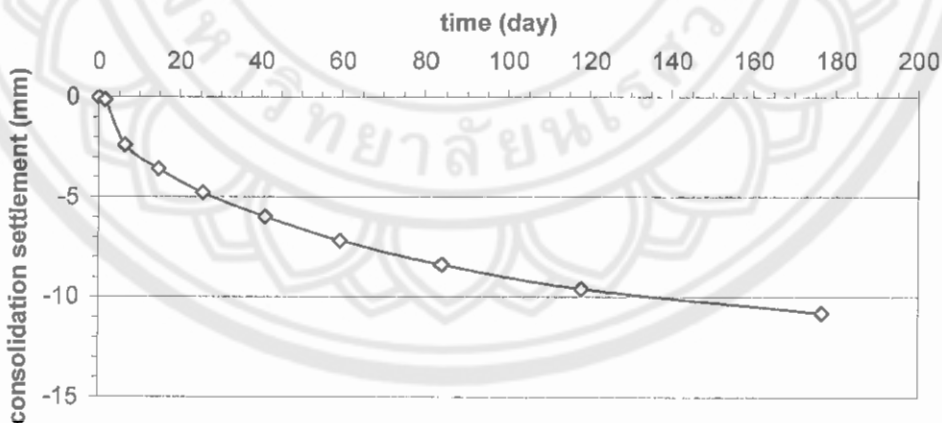
แบบเส้นตรง ใช้ค่า  $T_v$  ตามตารางที่ 12.4

ดังนั้นสามารถสรุปเป็นตารางที่ ได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 12.9 ค่าการยุบตัวที่และเวลาที่ใช้ในการยุบตัวที่ % Consolidation ต่างๆ

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

ซึ่งสามารถสร้าง Time Settlement Curve ได้ดังต่อไปนี้



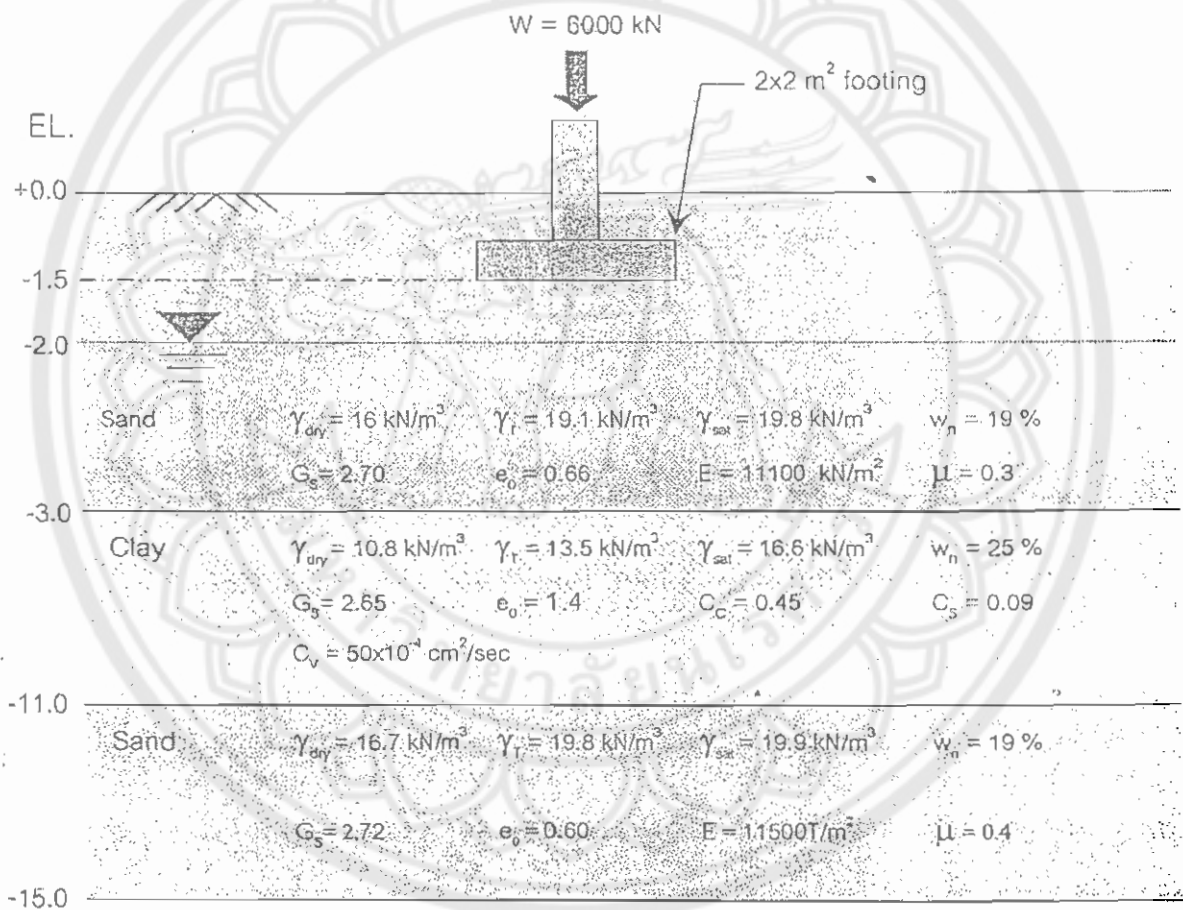
รูปที่ 12.30 Time Settlement Curve ของข้อที่ 12.3.2

จากกราฟจะเห็นได้ว่าที่ 180 วันซึ่งประมาณ 6 เดือนจะมีการทรุดตัวประมาณ =12 mm ซึ่งก็เพราะว่าการทรุดตัวจะถือว่าทรุดตัวสิ้นสุดที่ 176.7 วัน โดยจะทรุดตัวไป 10.8 cm นั้นเอง เพราะหลังจากนั้นการทรุดตัวจะเกิดขึ้นน้อยมาก ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า การทรุดตัวเมื่อระยะเวลาผ่านไป 1 ปีจะประมาณ 12 mm เท่านั้น

12.2.3 เจ้าของโครงการท่านหนึ่ง ต้องการก่อสร้างอาคารพาณิชย์ 10 คูหา ในเขต อ. สามง่าม จ. พิจิตร จึงได้จ้างให้บริษัทของท่านให้ทำการก่อสร้าง โดยวิศวกรได้ออกแบบให้ใช้ฐานรากดินขนาด  $2 \times 2 \text{ m}^2$  ระดับความลึกที่ 1.5 เมตร จากระดับผิวดิน เพื่อรองรับแรง 6000 kN ที่ถ่ายเทจากโครงสร้าง

ดังนั้น เพื่อวางแผนการกำหนดระดับพื้นชั้นล่าง ให้ปลอดภัยจากน้ำท่วมตลอดอายุการใช้งาน 30 ปี ดังนั้นจึงต้องคำนวณหาการทรุดตัวของอาคาร ณ เวลา 30 ปี หลังจากงานก่อสร้างแล้วเสร็จ เพื่อเสนอต่อเจ้าของโครงการให้พิจารณาถึงระดับของพื้นชั้นล่างต่อไป

โดยผลการสำรวจสภาพชั้นดินสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 12.31

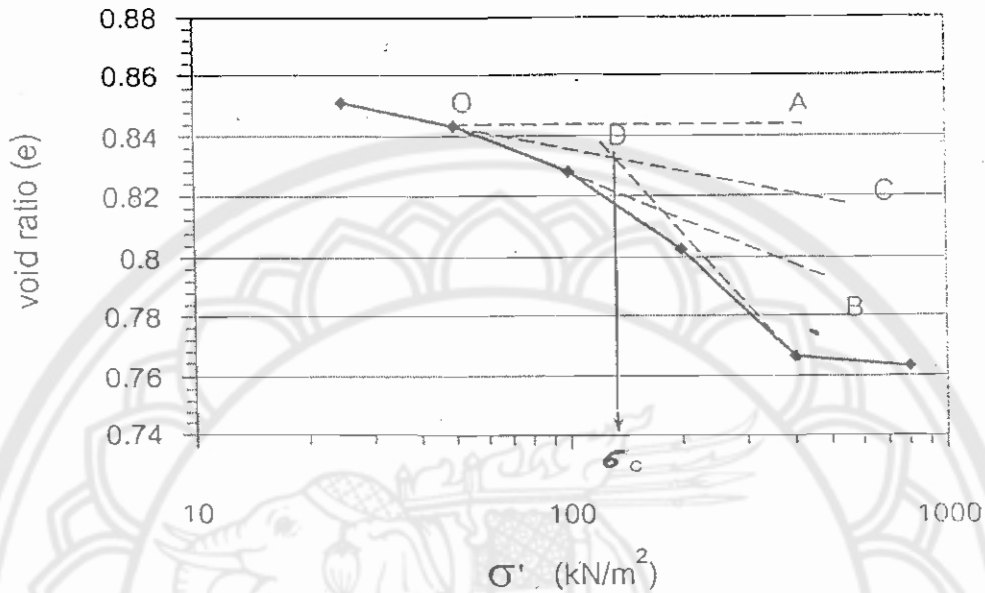


และผลจากการทดสอบตัวอย่างดินในห้องปฏิบัติการเป็นดังนี้

ตารางที่ 12.10 ผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ

$\sigma' \text{ (kN/m}^2\text{)}$	0	25	50	100	200	400	800
Void ratio : e	0.8610	0.8510	0.8435	0.8280	0.8025	0.7660	0.7628

**วิธีทำ** จากข้อมูลของการทดสอบสามารถเขียนกราฟ  $e-\log \sigma'$  ได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 12.32 กราฟ  $e-\log \sigma'$  ของข้อที่ 12.3.3

จากกราฟจะได้  $\sigma'_c \approx 145 \text{ kN/m}^2$

ดังนั้นคำนวณหาค่า  $\sigma'_0$  ได้จาก

$$\begin{aligned} \sigma'_0 &= (19.1)(2) + (19.8 - 9.81)(1) + (16.6 - 9.81) \left( \frac{8}{2} \right) \\ &= 75.35 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

จะได้ว่า  $\sigma'_0 < \sigma'_c$  ดังนั้นดินเป็นแบบ OC Clay

คำนวณค่าที่จำเป็นสำหรับการคำนวณ

$$e_0 = 1.4$$

$$\gamma_{sat} = 16.6 \text{ kN/m}^3$$

$$C_c = 0.45$$

$$C_s = 0.09$$

$$H = 8 \text{ m}$$

$$\sigma'_0 = 75.35 \text{ kN/m}^2 \text{ จากการคำนวณข้างต้น}$$

$$\Delta \sigma' = \Delta \sigma'_{av} = \frac{\Delta \sigma'_t + 4\Delta \sigma'_m + \Delta \sigma'_b}{5}$$

ซึ่งสามารถหาได้ตามตารางที่ 12.11 ดังนี้

ตารางที่ 12.11 หาค่าที่  $\Delta\sigma'$  ที่ตำแหน่งต่างๆ

@ Layer	$m_1$	$z$ (m)	$b=B/2$ (m)	$n_1=z/b$	$q$ (kN/m <sup>2</sup> )	$I_4$ (จากตาราง)	$\Delta\sigma' = I_4 q$ (kN/m <sup>2</sup> )
Top	1	3	1	3	1500	0.179	268.5
Mid	1	7	1	7	1500	0.08	57.0
Bottom	1	11	1	11	1500	0.011	16.5

$$\text{ดังนั้น } \Delta\sigma'_{av} = \frac{\Delta\sigma'_t + 4\Delta\sigma'_m + \Delta\sigma'_b}{\sigma} = 85.5 \text{ kN/m}^2$$

จะได้ว่า  $\sigma'_o + \Delta\sigma' = 160.85 \text{ kN/m}^2 > \sigma'_c = 145 \text{ kN/m}^2$  ดังนั้นใช้สมการ

$$\begin{aligned} S_c &= \frac{C_s H}{1+e_0} \log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_o} + \frac{C_c H}{1+e_0} \log \left( \frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'}{\sigma'_c} \right) \\ &= \frac{0.009(8)}{1+1.4} \log \frac{145}{75.35} + \frac{0.45(8)}{1+1.4} \log \left( \frac{160.85}{145} \right) \\ &= 0.15 \text{ m} \end{aligned}$$

สามารถสร้างเป็น Time Settlement Curve ได้ดังนี้

จากโจทย์ -  $C_v = 50 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 / \text{sec}$

-  $H_{dr}$  = ชั้นดินเป็นแบบ 2-way drainage condition

$$= \frac{H}{2} = \frac{6}{2} = 3 \text{ m}$$

- คิดว่าการกระจายตัวของ Induces stress ในชั้นดินเหนียวเป็น

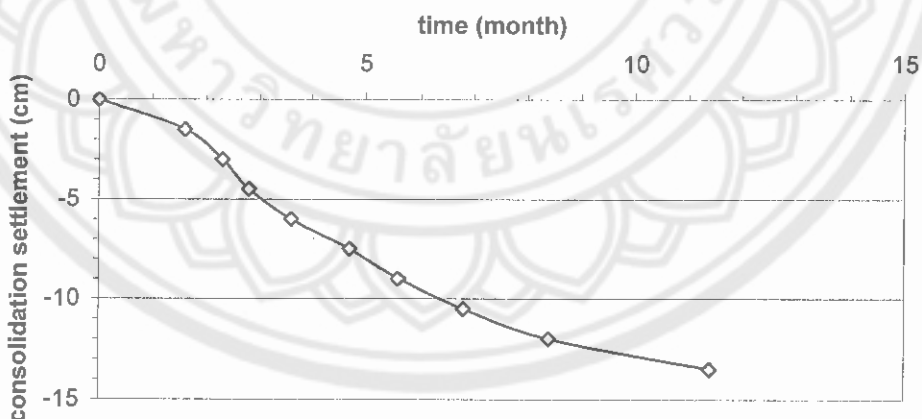
แบบเส้นตรง ใช้ค่า  $T_v$  ตามรูปที่ 12.16.1

สามารถสร้าง Time Settlement Curve ได้ตามตารางที่ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 12.12 ค่าการยุบตัวที่และเวลาที่ใช้ในการยุบตัวที่ % Consolidation ต่างๆ

U (%)	$T_v$ (จากตาราง)	$t_{@U} = \frac{(T_v H_{dr}^2)}{C_v}$ (month)	$S_{@U} = (U)(S_c)$ (cm)
0	0	0	0
10	0.13	1.6	1.5
20	0.19	2.3	3.0
30	0.23	2.8	4.5
40	0.29	3.6	6.0
50	0.38	4.7	7.5
60	0.45	5.6	9.0
70	0.55	6.8	10.5
80	0.68	8.4	12.0
90	0.92	11.1	13.5

ซึ่งสามารถสร้าง Time Settlement Curve ได้ดังรูปที่ ดังต่อไปนี้



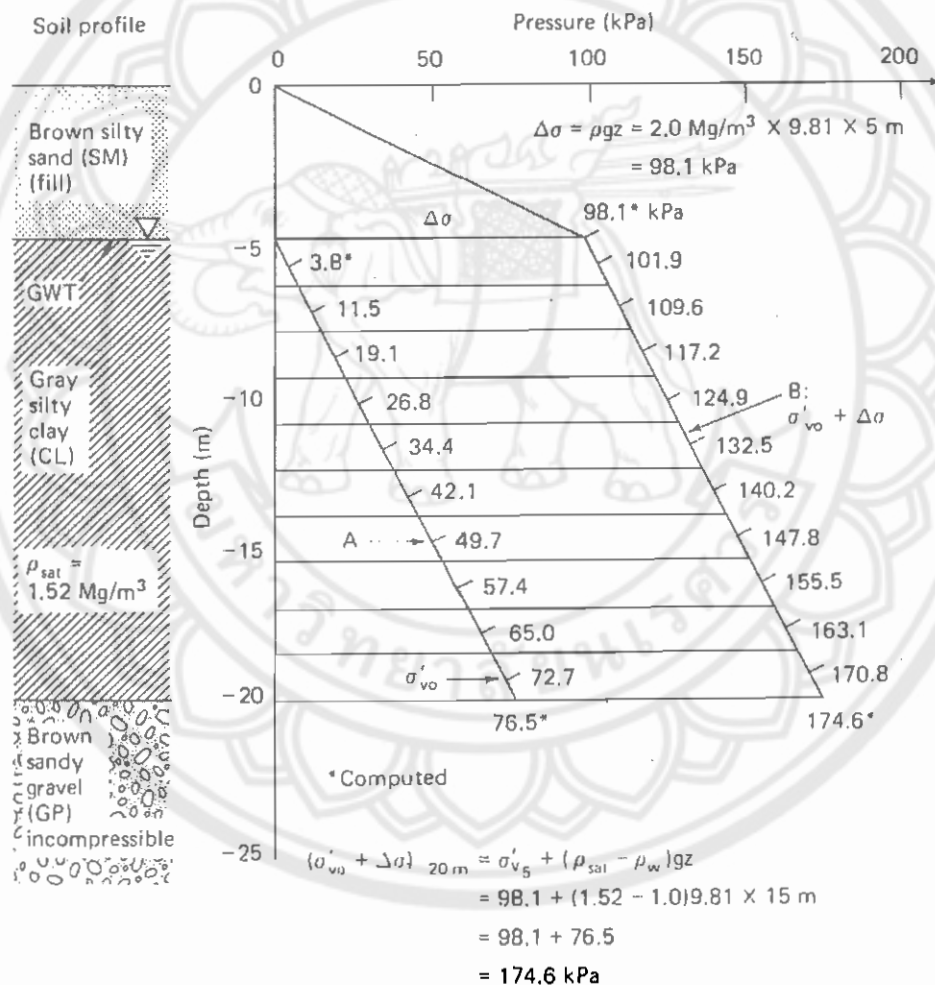
รูปที่ 12.33 Time Settlement Curve ของข้อที่ 12.3.3

จากกราฟเมื่อเวลาผ่านไป 11.4 เดือน ดินจะยุบตัวประมาณ 14 cm หลังจาก 11.4 เดือน ถือว่ายุบตัวน้อยมาก ปริมาณการทรุดตัวของ footing เมื่อเวลาผ่านไป 30 ปี หลังจากก่อสร้างเสร็จประมาณ 14 cm ดังนั้นควรออกแบบความสูงของอาคารชั้นล่างเหนือระดับน้ำใต้ดินอย่างน้อย 15 cm



### 12.4 โจทย์ทดสอบความสามารถในการนำความรู้อื่นไปใช้ในงานจริง

12.4.1 เจ้าของที่ ในพื้นที่ต.ท่าโพธิ์ อ.เมือง จ.พิษณุโลก ด้านหลังมหาวิทยาลัยนเรศวร ส่วนหนองอ้อ ส่วนที่ติดกับถนนเลียบบคลองชลประทาน ต้องการถมที่ดินเพื่อก่อสร้างอาคารที่พักอาศัย และร้านอาหาร ทั้งนี้จากการว่าจ้างบริษัท ธรณีการโยธา จำกัด ผลปรากฏว่าได้สำรวจชั้นดินเป็นไปตามรูปที่ และวิศวกรที่ปรึกษาได้แนะนำให้เจ้าของโครงการ ถมด้วย Brown Silty Sand สูง 5 เมตร เพื่อหนีระดับน้ำท่วม (ที่ระดับ + 4 ม. จากผิวดินของ Gray Silty Clay) ไปได้ตลอดอายุการใช้งานนาน 30 ปี



Initial void ratio,  $e_o = 1.1$ .

Compression index,  $C_c = 0.36$ .

Swell index,  $C_s = 0.07$

Secondary compression index,  $C_\alpha = 0.06$ .

Saturated density,  $\rho_{sat} = 1.52 \text{ Mg/m}^3$ .

Coefficient of consolidation,  $c_v = 0.858 \text{ m}^2/\text{yr}$ .

The density of the silty sand fill,  $\rho$ , is  $2.0 \text{ Mg/m}^3$ , and the ground water table is at the interface of the fill and clay, at  $-5 \text{ m}$ .

รูปที่ 12.34 รูปชั้นดินที่ใช้ในข้อที่ 12.4.1

ดังนั้นจากคำแนะนำของวิศวกรที่ปรึกษา เจ้าของโครงการมีข้อสงสัยให้คุณซึ่งเป็นวิศวกร Site งานดังต่อไปนี้

12.4.2 ช่วยบอกว่าคำแนะนำของวิศวกรนั้นถูกต้องหรือไม่

12.4.3 ช่วยบอกว่า ควรออกแบบโครงสร้างให้มีอายุการใช้งานกี่ปี จึงจะสอดคล้องกับเวลาที่ผิวดินถม สูง 5 ม. จากผิวดินจะทรุดตัวไปอยู่ที่ระดับน้ำท่วมพอดี

- หมายเหตุ :
- สมมุติการทรุดตัวของดินมีค่าน้อยมาก
  - เส้น A แสดง Initial Vertical Overburden Stress ก่อนที่จะมีการถมดินสูง 5 ม.
  - เส้น B แสดง Final Vertical Overburden Stress เมื่อรวมผลกระทบของการถมดินสูง 5 ม. และ Consolidation of Silty Clay Layer ได้สิ้นสุดไปแล้ว (%U=100%)

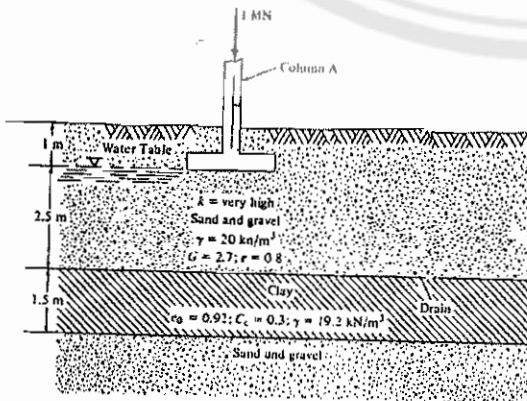
12.4.2 บริษัท วัชรชัย Development จำกัด เจ้าของโครงการหอพักอาศัยบริเวณรอบๆ มหาวิทยาลัยนเรศวร วิทยาเขตพะเยา ได้ดำเนินการก่อสร้างอาคารหอพัก 2 ชั้น โดยใช้ฐานรากตื้น (Shallow Foundation) ซึ่งมี Column A เป็นฐานรากแนวสุดท้ายของอาคารดังแสดงดังรูปที่ 12.35.1 ปรากฏว่าใช้งานได้โดยไม่มีปัญหาข้านาน

แต่เพื่อรองรับปริมาณความต้องการหอพักของนิสิตที่มากขึ้น บริษัทฯ จึงได้ตัดสินใจลงทุนก่อสร้างอาคารหอพักแห่งใหม่โดยมีชั้นจอดรถใต้ดินดังแสดงดังรูปที่ 12.35.2

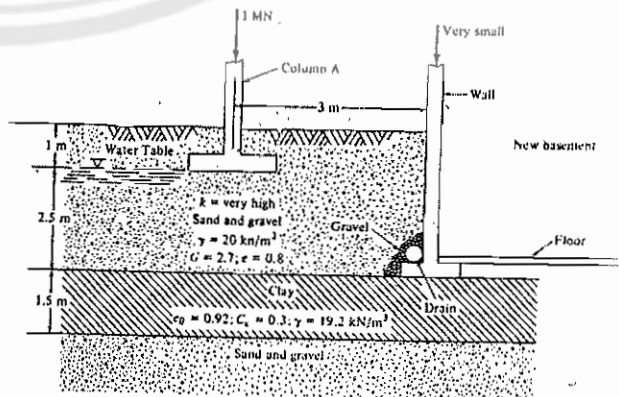
แต่หลังจากที่อาคารใหม่ก่อสร้างไปได้เพียง 6 เดือน ปรากฏว่า Column A ของอาคารหอพักเดิมเกิดการทรุดตัวมากขึ้นอย่างผิดปกติ ฐานะวิศวกรของบริษัท จึงให้เหตุผลว่า

12.4.2.1 อธิบายว่าจะอะไร คือสาเหตุของการทรุดตัวมากขึ้นอย่างผิดปกติของ Column A

12.4.2.2 คำนวณหา Primary Consolidation ที่จะเกิดขึ้นทั้งหมดจากสาเหตุในข้อ 12.4.2.1



รูปที่ 12.35.1 ชั้นดินก่อนการก่อสร้าง



รูปที่ 12.35.2 ชั้นดินหลังการก่อสร้าง