บทที่ 8
การยุบตัวของดิน
(Consolidation)

8.1 เนื้อหาโดยย่อ

8.1.1 ส่วนนำ (Introduction)

เมื่อมีแรงกระทำจากภายนอก (applied external load) หรือน้ำหนักของสิ่งปลูกสร้างกระทำเพิ่มขึ้นต่อชั้นดิน เช่น แรงที่ถ่ายเทมาจากฐานรากอาคาร ดินคันทาง (embankment) ดังรูปที่ 8.1.1 จะส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรง (induced stress) ในชั้นดินที่รองรับสิ่งปลูกสร้างดังกล่าว ทำให้ชั้นดินเกิดการยุบตัว (deformation) ซึ่งโดยปกติจะประกอบด้วยการยุบตัวจาก

ก. การทรุดตัวของเม็ดดิน
ข. การเคลื่อนที่ของเม็ดดิน
ค. การไหลซึมของน้ำที่แทรกอยู่ในช่องว่างระหว่าง solid phase ในเนื้อดิน (soil)

ทั้งนี้ การยุบตัวของชั้นดินที่เกิดจาก external load จะทำให้เกิดการยุบตัวในแนวดิ่ง (total vertical deformation หรือ total settlement) ซึ่งประกอบขึ้นจาก settlement 3 ส่วน คือ

1. Immediate Settlement (S_i)

เป็นการทรุดตัวที่เกิดจากคุณสมบัติยืดหยุ่น (elastic property) ของดิน โดยที่ปริมาตรของดินไม่มีการเปลี่ยนแปลง (no soil volume change) ดังนั้น ในบางกรณี จึงมีการเรียกว่า elastic settlement (S_e)

การทรุดตัวจากคุณสมบัติยืดหยุ่นนี้ จะเกิดขึ้นทันทีที่ชั้นดินได้รับ external load ดังนั้น ในทางปฏิบัติ สำหรับงานวิเคราะห์และออกแบบฐานราก ให้ถือว่า S_i เกิดเต็มที่และเสร็จสมบูรณ์ ณ เวลาที่สิ้นสุดงานก่อสร้าง

ปริมาณ S_i ที่เกิดขึ้น สามารถคำนวณหาได้จากความสัมพันธ์ ที่พัฒนามาจากทฤษฎี Elasticity เช่น Janbu (1956) และ Harr (1966) ซึ่งสามารถหารายละเอียดได้จากตำราทาง Soil Mechanics หรือ Foundation โดยทั่วไป

2. Primary Consolidation Settlement (S_c)

การทรุดตัวแบบนี้ เป็นผลมาจากการเกิดกระบวนการ 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) แต่เนื้อจากเนื้อดินที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำ (saturated soil) ประกอบขึ้นจาก solid phase และ water phase ที่เกิดการยุบตัว (deformation) ภายใต้ 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 และนำไปสู่การระบายน้ำ ออกจากช่องว่าง (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 และไม่มีแรงประจุไฟฟ้า ยึดเหนี่ยวระหว่าง solid phase และ water phase ทำให้ primary consolidation settlement เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และถือเสมือนว่าเสร็จสมบูรณ์ ไปพร้อมกับ immediate settlement นั่นคือ การทรุดตัวจาก elastic behavior และ consolidation process จะเกิดหมด ในทันทีที่สิ้นสุดงานก่อสร้าง

ดังนั้น ในทางปฏิบัติให้ถือได้ว่า การวิเคราะห์หา Sc เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ เพราะการบายน้ำออกจาก pore ด้วยแรงดันน้ำส่วนเกิน (excess pore water pressure) จะพิจารณาเฉพาะแต่ในกรณีที่เป็นดินเหนียว (clay) เท่านั้น ทั้งนี้ ขอแนะนำให้ผู้อ่านทบทวนนิยามของ clay ที่ใช้ใน soil mechanics ให้แม่นยำว่า clay ครอบคลุมมากกว่า กรณีที่เป็นดินเหนียวล้วนๆ (pure clay) และ clay ก็ไม่ได้หมายถึง ดินที่มีขนาดเท่ากับ clay size

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

สำหรับเวลา ที่ S_c เกิดเต็มที่และเสร็จสมบูรณ์นั้น ให้คิด ณ เวลาที่ น้ำได้ระบายออกจากช่องว่าง (pore) จนกระทั่ง excess pore pressure กลับมามีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งในทางปฏิบัติ น้ำจะระบายออกไปได้เร็วหรือช้า ก็จะขึ้นอยู่กับขนาดและลักษณะของช่องว่าง (pore) และชนิดของ solid phase ตัวอย่างเช่น หากเป็นดินเหนียวที่ประกอบด้วย gravel และ/หรือ sand เป็นจำนวนมาก การระบายน้ำออกจากช่องว่าง จะเกิดเร็วกว่า กรณีที่เป็น pure clay เป็นอย่างมาก

ปริมาณ S_c ที่เกิดขึ้นทั้งหมด สามารถคำนวณหาได้จากความสัมพันธ์ ที่พัฒนามาพฤติกรรมการยุบตัว (deformation behavior) ของชั้นดิน และขนาดของแรงเค้นสูงสุดที่ชั้นดินนั้น เคยรับมาในอดีต (maximum past pressure, P_c) ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 8.1.3

3. Secondary Consolidation Settlement (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

สำหรับเวลา ที่ S_s เกิดเต็มที่และเสร็จสมบูรณ์นั้น จะไม่สามารถกำหนดได้ เพราะ creep behavior จะทำให้เกิด S_s มากขึ้นอย่างต่อเนื่องไปตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น ทางเลือกหนึ่งในการวิเคราะห์ก็คือ ให้ใช้อายุการใช้งานของสิ่งปลูกสร้าง มากำหนดเวลาสิ้นสุด สำหรับการคำนวณหา S_s

อย่างไรก็ตาม สิ่งที่มักจะพบในงานออกแบบจริงก็คือ เวลาที่สิ้นสุด consolidation process หรือ เวลาที่แรงดันน้ำส่วนเกิน กลับมามีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งส่วนมากจะเกิดภายหลังอายุการใช้งานของสิ่งก่อสร้าง ดังนั้นในบางกรณีจึงไม่นำมาพิจารณา

8.1.2 แบบจำลองการยุบตัวของชั้นดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำ

- จากแบบจำลอง รูปที่ 8.1.1 (a-2) แสดงสภาพชั้นดินเดิมของดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่เวลา $t < t_0$ (ก่อนที่จะมีการก่อสร้าง) โดย $\Delta\sigma$ และ $\Delta u = 0$ เทียบได้กับแบบจำลอง Spring-cylinder (a-1) เมื่อไม่มีแรงกระทำ น้ำภายในไม่เกิดแรงดัน มาตรวัดแรงดันน้ำอ่านค่าได้เท่ากับศูนย์

$$\Delta\sigma = 0$$

$$\Delta u = 0$$

$$(\sigma @ t < t_0) = (\sigma @ t < t_0) + \Delta\sigma$$

$$(\sigma @ t < t_0) = (\sigma' @ t < t_0) + (u @ t < t_0)$$

- จากแบบจำลอง (b-2) แสดงสภาพชั้นดินเหนียวที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำที่เวลา $t = t_0$ (สิ้นสุดการก่อสร้าง) $\Delta\sigma$ เป็นแรงดันที่เกิดขึ้นเนื่องจากสิ่งก่อสร้าง เทียบได้กับแบบจำลอง Spring-cylinder (b-1) ค่า P ในแบบจำลองนี้เท่ากับ $\Delta\sigma$ ในแบบจำลอง (b-2) ซึ่งแรง P ทำให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกิน (Δu) แต่ valve ปิดทำเกิดแรงดันน้ำส่วนเกิน (Δu) ออกจากระบบไม่ได้ ค่าแรงดันน้ำที่อ่านได้จากมาตรวัดมีค่ามากขึ้น

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

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

$$(\sigma @ t = t_0) = (\sigma @ t < t_0) + (\Delta\sigma)$$

$$(\sigma @ t = t_0) = [(\sigma @ t < t_0) + (u' @ t < t_0)] + (\Delta u)$$

- จากแบบจำลอง (c-2) แสดงสภาพชั้นดินเหนียวที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำที่เวลา $t_0 < t < t_{100}$ (ระหว่างการเกิด consolidation settlement) ชั้นดินเหนียวยุบตัวลง เทียบได้กับแบบจำลอง Spring-cylinder (c-1) เมื่อเปิด valve แรงดันน้ำส่วนเกินออกจากระบบมีการถ่ายแรงให้กับ spring (เนื้อดินเหนียว) ในแบบจำลอง ทำให้ spring (เนื้อดินเหนียว) ยุบตัวลง ค่าแรงดันน้ำที่อ่านได้จากมาตรวัดมีค่าลดลง

$$(\sigma @ t_0 < t < t_{100}) = (\sigma @ t < t_0) + (\Delta\sigma @ t_0 < t < t_{100})$$

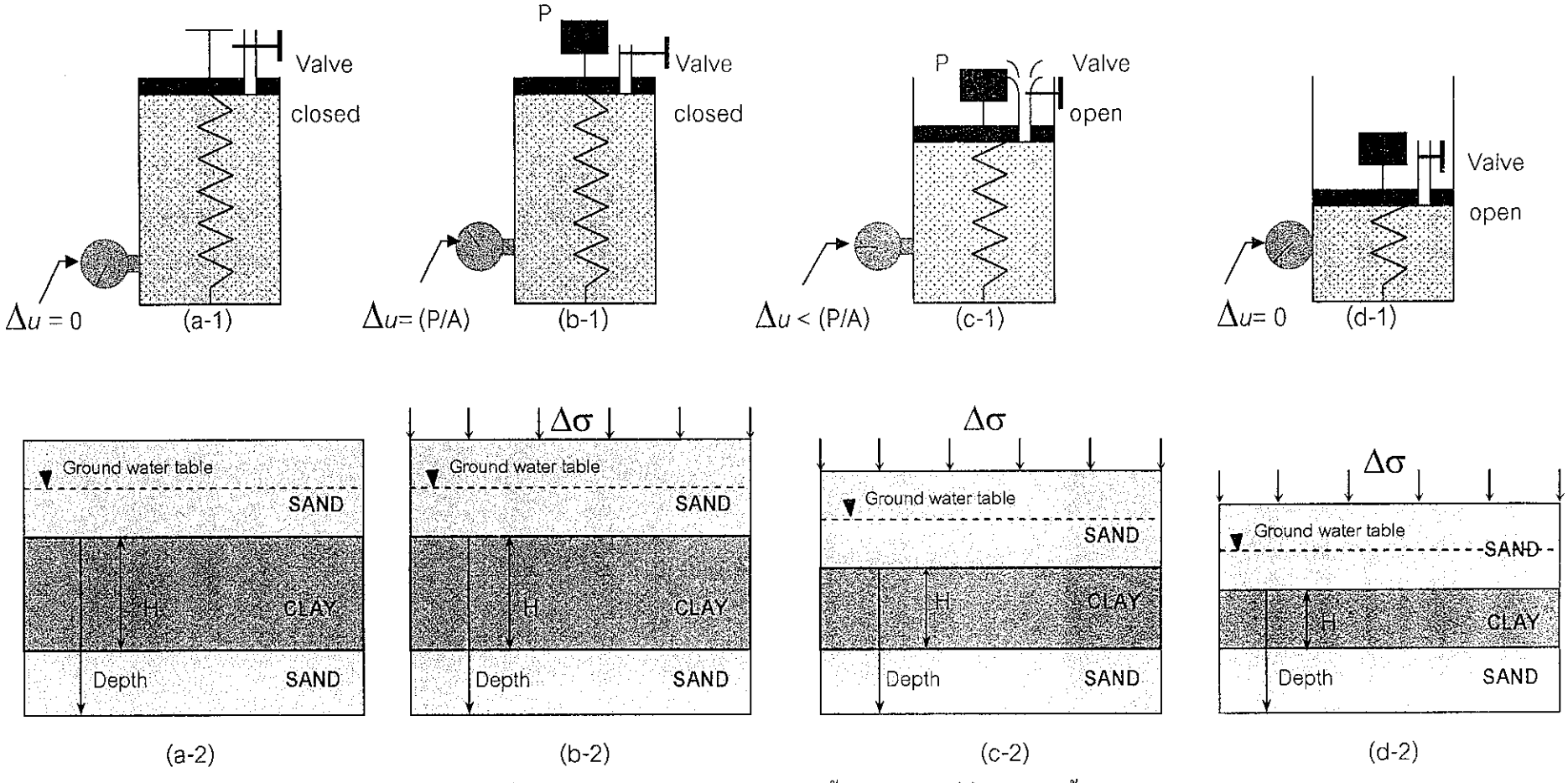
$$(\sigma @ t_0 < t < t_{100}) = (\sigma' @ t < t_0) + (u' @ t < t_0) + (\Delta\sigma @ t_0 < t < t_{100})$$

- จากแบบจำลอง (d-2) แสดงสภาพดินเหนียวอิ่มตัวไปด้วยน้ำที่เวลา $t = t_{100}$ (สิ้นสุดการเกิด consolidation settlement) เทียบได้กับแบบจำลอง Spring-cylinder (d-1) แรงดันน้ำส่วนเกินออกจากระบบหมด ($\Delta u = 0$) spring (เนื้อดินเหนียว) รับแรงทั้งหมด ค่าแรงดันน้ำที่อ่านได้จากมาตรวัดมีค่าเท่ากับศูนย์

จาก $(\Delta\sigma @ t_{100}) = (\Delta\sigma' @ t_{100}) + (\Delta u @ t_{100})$

และ $(\sigma @ t_{100}) = (\sigma @ t < t_0) + (\Delta\sigma @ t_{100})$

$$(\sigma @ t_{100}) = (\sigma' @ t < t_0) + (u @ t < t_0) + (\Delta\sigma' @ t_{100})$$



รูปที่ 8.1.1 แบบจำลองการยุบตัวของชั้นดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำ

8.1.3 **การทรุดตัวเนื่องจากการยุบตัวของดิน** (Total Foundation Settlement, S_T)

$$S_T = S_i + S_C + S_S$$

โดยที่ S_i = immediate settlement

S_C = consolidation settlement

S_S = secondary settlement

1. Primary consolidation settlement (S_C) แบ่งได้ 2 แบบคือ

1.1 Normally consolidated clays

$$S_C = \frac{C_C H}{1+e_0} \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0}$$

โดยที่ C_C = compression index หาได้จากความชันของ e-log p curve

H = ความหนาของชั้นดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำ

P_0 = σ' = หน่วยแรงดันของดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำในสภาพดินเดิมก่อนรับแรงบดอัด

ΔP = หน่วยแรงดันของดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำเนื่องจากแรงบดอัด

1.2 Overconsolidated clays แบ่งเป็น 2 กรณี

- กรณี $P_0 + \Delta P \leq P_C$ สามารถหา S_C ได้จาก

$$S_C = \frac{C_C H}{1+e_0} \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0}$$

- กรณี $P_0 + \Delta P > P_C$ สามารถหา S_C ได้จาก

$$S_C = \frac{C_S H}{1+e_0} \log \frac{P_C}{P_0} + \frac{C_S H}{1+e_0} \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_C}$$

1.3 Time rate of consolidation

การหาค่า consolidation settlement (S_C) สนใจเฉพาะชั้นดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยสามารถหาค่าได้จาก Terzaghi's theory ซึ่งมีสมมติฐาน 6 ข้อดังนี้

1. หน่วยแรงทั้งหมดที่กระทำบนระนาบนอนต้องคงที่ตลอดการเกิด consolidation settlement
2. ดินเหนียวต้องอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated clay)
3. น้ำระบายออกจากดินเหนียวในแนวดิ่งเท่านั้น
4. consolidation settlement (S_C) เกิดจากการที่น้ำซึมออกจากดินเท่านั้น เนื่องจากดินมีปริมาตรคงที่
5. ดินเหนียวไม่สามารถขยายตัวทางด้านข้างได้
6. สามารถใช้ Darcy's law ในการคำนวณได้

ในการคำนวณหาค่าการยุบตัว consolidation settlement (S_C) และ เวลาในการยุบตัว ต้องใช้ค่าต่าง ๆ ดังนี้

- Coefficient of compressibility (m_V)

$$m_V = \frac{\Delta v}{\Delta v_0} \Delta P$$

โดยที่ V_0 = ปริมาตรของดินเดิม

ΔV = ปริมาตรของดินที่เปลี่ยนไป

Δp = แรงอัดเนื่องจากแรงกระทำภายนอก

- Coefficient of consolidation (C_V)

$$C_V = \frac{k}{m_v \gamma_w}$$

โดยที่ k = coefficient of permeability

γ_w = water unit weight

- Compression Index (C_c)

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log p}$$

โดยที่ Δ e = ค่า void ratio ที่เปลี่ยนไป

Δ log p = ค่า log p ที่เปลี่ยนไป

หรืออาจหาค่า C_c จากสมการ

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

โดยที่ LL = ค่า liquid limit ของดินซึ่งการทดสอบหา LL จะทำได้ง่ายกว่า consolidation test และค่าใช้จ่ายในการทดสอบก็จะประหยัดกว่า

- Degree of consolidation (U_v)

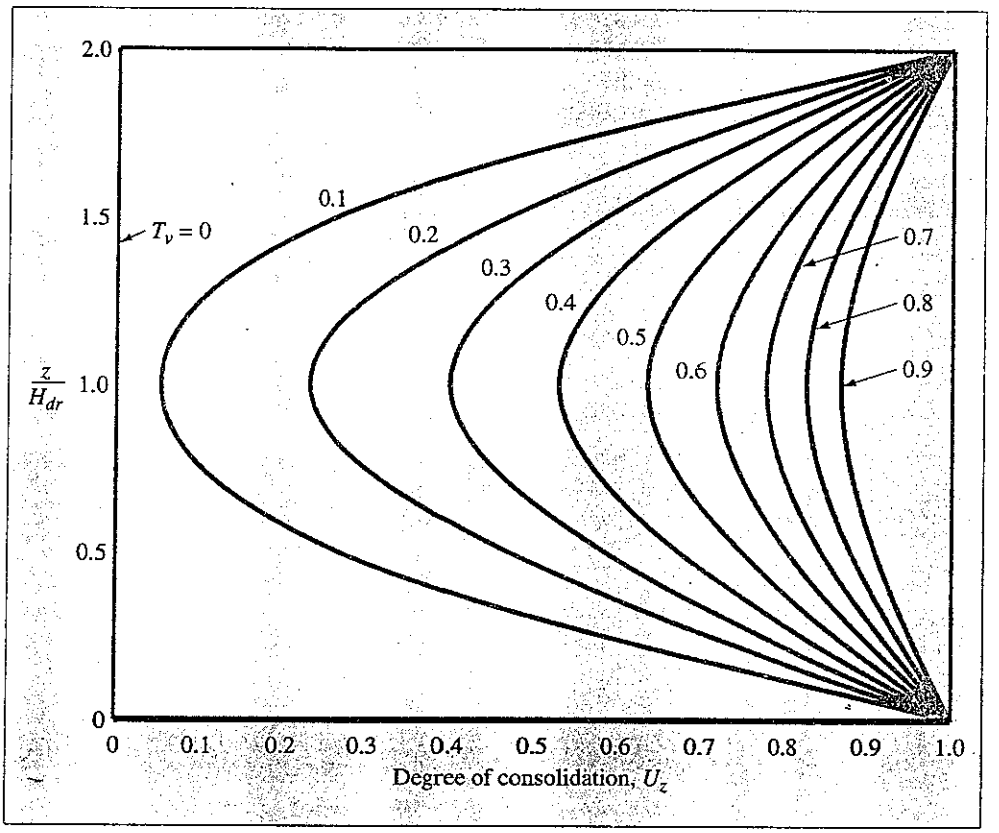
$$U_v = \frac{settlement\ after\quad time\ t}{total\ \ final\ settlement} x100\ \%$$
$$= \frac{S_t}{S_c} x100\ \%$$

1.4 Time factor (T_v)

ค่า Time factor เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับค่า Degree of consolidation, U_v ซึ่งจะต้องพิจารณาเงื่อนไขต่างๆ ที่เกี่ยวข้องดังนี้คือ

1. พิจารณาทิศทางการไหลของน้ำว่าเป็น two – way drainage หรือ one – way drainage
2. ลักษณะแรงดันน้ำส่วนเกินเริ่มแรก (Δu_0)

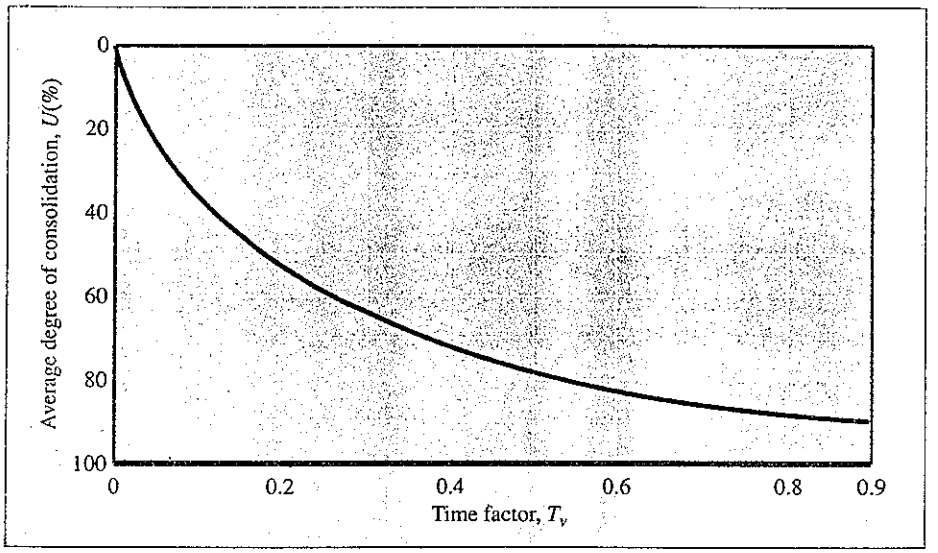
เมื่อพิจารณาเงื่อนไขต่างๆ ได้แล้ว จึงนำไปวิเคราะห์เพื่อหา T_v จากตารางหรือกราฟดังนี้



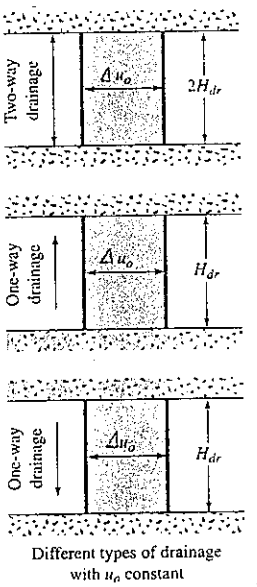
รูปที่ 8.1.2 Variation of U_z with T_v and z / H_{dr}

จากรูป สามารถหาค่า T_v โดยมีเงื่อนไขดังนี้

1) เป็น two – way drainage
2) Δu ไม่คงที่ โดยจะเปลี่ยนแปลงไปตามความลึกของดิน



รูปที่ 8.1.3 Variation of average degree of consolidation with time factor (T_V)



รูปที่ 8.1.4 Difference types of drainage with u_0 constant

จากรูป สามารถใช้หาค่า T_v โดยมีเงื่อนไขดังนี้

1) เป็น two – way drainage หรือ one – way drainage

2) ΔU คงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามความลึกของดิน

ตารางที่ 8.1.1 Variation of average degree of consolidation with time factor (T_v)

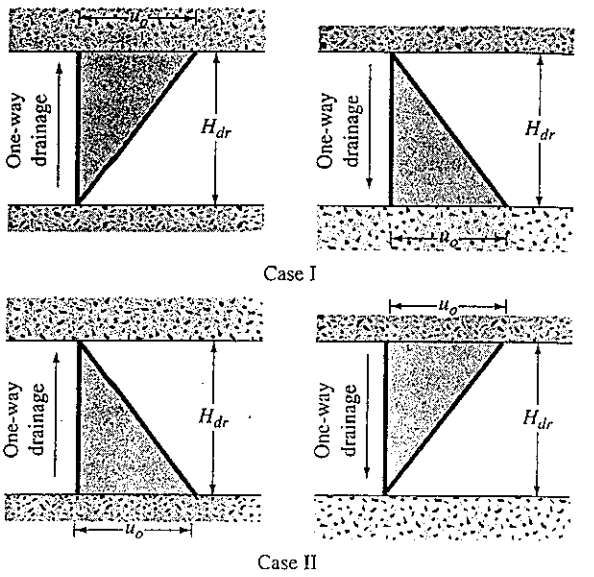
U (%)	T_v	U (%)	T_v	U (%)	T_v	U (%)	T_v
0	0	26	0.0531	52	0.212	78	0.529
1	0.00008	27	0.0572	53	0.221	79	0.547
2	0.0003	28	0.0615	54	0.23	80	0.567
3	0.00071	29	0.066	55	0.239	81	0.588
4	0.00126	30	0.0707	56	0.248	82	0.61
5	0.00196	31	0.0754	57	0.257	83	0.633
6	0.00283	32	0.0803	58	0.267	84	0.658
7	0.00385	33	0.0855	59	0.276	85	0.684
8	0.00502	34	0.0907	60	0.286	86	0.712
9	0.00636	35	0.0962	61	0.297	87	0.742
10	0.00785	36	0.102	62	0.307	88	0.774
11	0.0095	37	0.107	63	0.318	89	0.809
12	0.0113	38	0.113	64	0.329	90	0.848
13	0.0133	39	0.119	65	0.34	91	0.891
14	0.0154	40	0.126	66	0.352	92	0.938
15	0.0177	41	0.132	67	0.364	93	0.993
16	0.0201	42	0.138	68	0.377	94	1.055
17	0.0227	43	0.145	69	0.39	95	1.129
18	0.0254	44	0.152	70	0.403	96	1.219
19	0.0283	45	0.159	71	0.417	97	1.336
20	0.0314	46	0.166	72	0.431	98	1.5
21	0.0346	47	0.173	73	0.446	99	1.781
22	0.038	48	0.181	74	0.461	100	
23	0.0415	49	0.188	75	0.477		
24	0.0452	50	0.197	76	0.493		
25	0.0491	51	0.204	77	0.511		

ที่มา : Braja, M. Das, 1998

ตารางที่ 8.1.2 Variation of time factor (T_V) with degree of consolidation

Degree of consolidation U (%)	Time factor T_V	
	Case I	Case II
0	0	0
10	0.003	0.047
20	0.009	0.1
30	0.024	0.158
40	0.048	0.221
50	0.092	0.294
60	0.16	0.383
70	0.271	0.5
80	0.44	0.665
90	0.72	0.94
100	∞	∞

ที่มา : Braja, M. Das, 1998



รูปที่ 8.1.5 ทิศทางการไหลของน้ำ ใน case I กับ case II

ค่าจากตารางที่ 8.1.2 สามารถใช้หาค่า T_V โดยมีเงื่อนไขดังนี้

1) เป็น one – way drainage

2) ΔU ไม่คงที่ เปลี่ยนแปลงไปตามความลึกของดิน

1.5 Rate of consolidation (t)

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

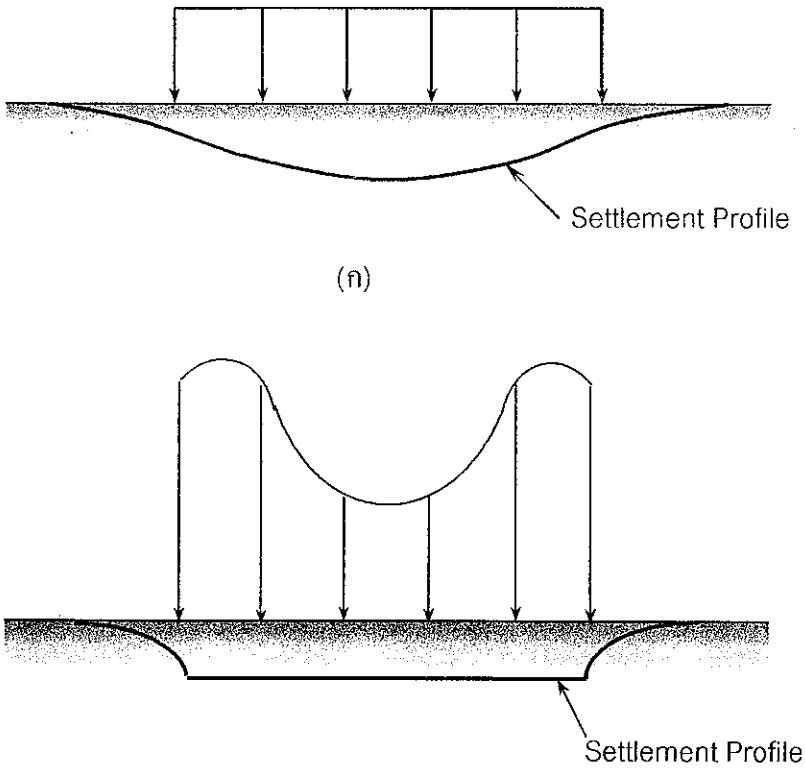
โดยที่ t = เวลาที่น้ำซึมออกจากดิน ช่วงที่ดินมีการยุบตัว

H_{dr} = drainage condition

- สำหรับ two – way drainage ใช้ $H_{dr} = \frac{H}{2}$
- สำหรับ one – way drainage ใช้ $H_{dr} = H$

2. Immediate settlement (S_i)

Immediate settlement **เป็นค่าการยุบตัวของดินตั้งแต่เริ่มก่อสร้างจนกระทั่งสิ้นสุดการก่อสร้าง โดยค่าการยุบตัวนี้มีผลกระทบต่อสิ่งก่อสร้างน้อยมากเมื่อเทียบกับ** consolidation settlement **ค่า S_i จะขึ้นอยู่กับลักษณะของฐานรากและชนิดของดินบริเวณที่ก่อสร้าง**



รูปที่ 8.1.6 Immediate settlement profile **และการกระจายของแรงดันจากฐานราก** (ก) flexible foundation; (ข) rigid foundation

เราสามารถคำนวณหาค่า Immediate settlement ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$S_i = \rho B \frac{1-\mu^2}{E} I_p$$

โดยที่ ρ = แรงดันสุทธิที่กระทำกับฐานราก

B = ความกว้างของฐานราก (หรือเส้นผ่าศูนย์กลางในกรณีฐานรากกลม)

μ = Poisson's ratio หาได้จากตารางที่ 8.1.5 ซึ่งแตกต่างกันไปตามชนิดดิน

E = โมดูลัสความยืดหยุ่นของดิน หาได้จากตารางที่ 8.1.4

I_p = nondimensional influence factor หาได้จากตารางที่ 8.1.3 ซึ่งกำหนดได้จากรูปร่างและความคงตัวของฐานราก (rigidity and flexibility)

ตารางที่ 8.1.3 Influence factors for foundations

		I_p		
		Flexible		
Shape	**m_1**	**Center**	**Corner**	**Rigid**
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	1.80	3.00
	100	4.01	2.00	3.43

ที่มา : Braja, M. Das, 1998

ตารางที่ 8.1.4 Representative values of the modulus of elasticity

Type of soil	Modulus of Elasticity	
	psi	kN/m^2
Soft clay	250-500	1,725-3,450
Hard clay	850-2,000	5,865-13,800
Loose sand	1,500-4,000	10,350-27,600
Dense sand	5,000-10,000	34,500-69,000

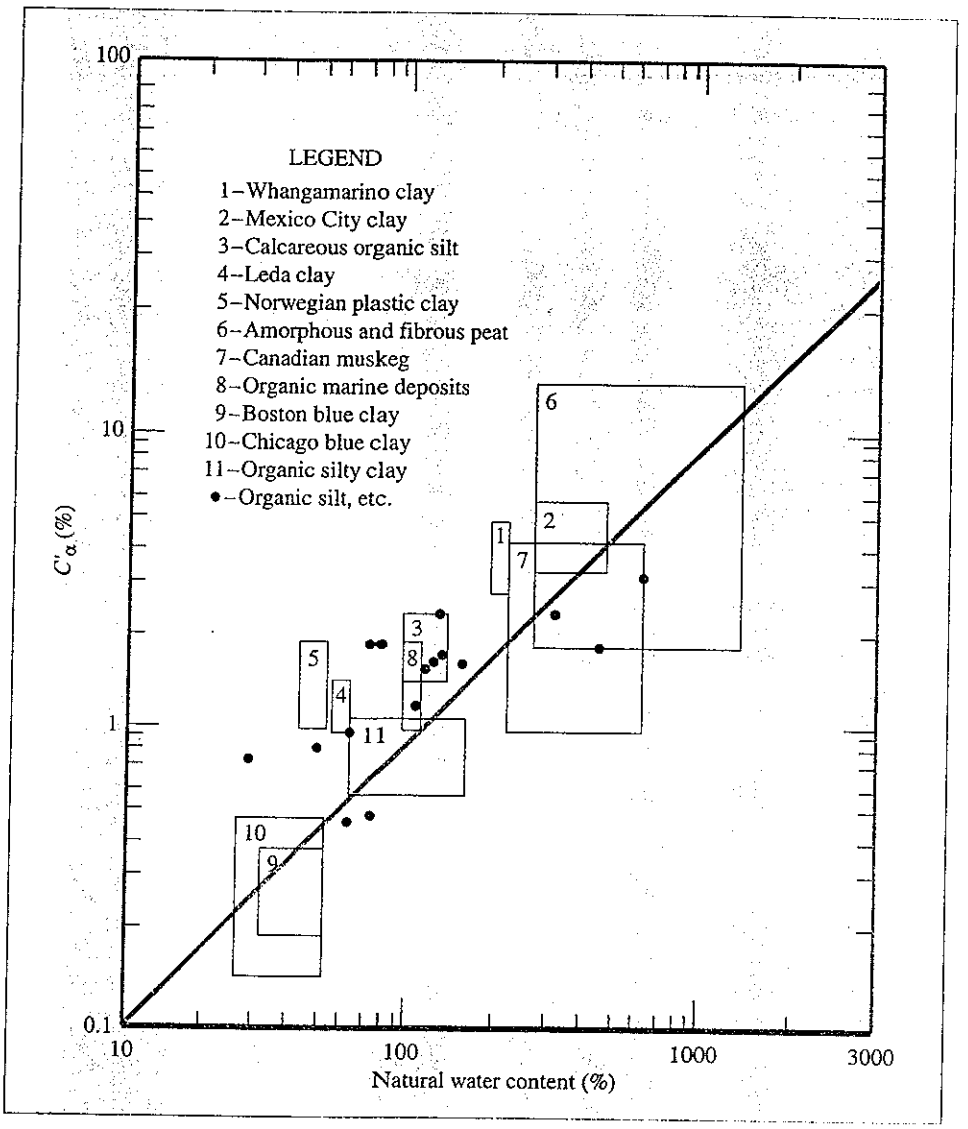
1 psi = 6.9 kN/m^2

ที่มา : Braja, M. Das, 1998

ตารางที่ 8.1.5 Representative values of Poisson's ratio

Type of soil	Poisson's ratio, μ
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

ที่มา : Braja, M. Das, 1998



รูปที่ 8.1.7 C'_α for natural soil deposits

3. Secondary consolidation settlement (S_s)

Secondary consolidation settlement เกิดหลังจาก primary consolidation settlement เป็นการยุบตัวที่เกิดจากการล้า (creep) ของเนื้อดิน

$$S_s = C'_\alpha H \log (t_2/t_1)$$

และ $$C'_\alpha = \frac{C_\alpha}{1+e_p}$$

โดยที่ C'_α = หาได้จาก รูปที่ 8.1.7 C'_α นี้จะขึ้นอยู่กับการตกตะกอนทับถมของดินตามธรรมชาติ

e_ρ = อัตราส่วนช่องว่างขณะสิ้นสุด primary consolidation settlement

H = ความหนาของชั้นดินเหนียว

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\log(t_2/t_1)}$$

โดยที่ C_α = Secondary compression index หาได้จาก e-log t curve

Δe = ผลต่างของอัตราส่วนช่องว่าง

t_1, t_2 = เวลาที่เกิด Δe

8.1.4 Time-settlement curve

ดินเหนียว เป็นดินซึ่งมีความสำคัญและเป็นปัญหามากที่สุดทางปฐพีกลศาสตร์ ทำให้เกิดการทรุดตัวของฐานรากอาคาร เนื่องจากดินเหนียวนั้นน้ำซึมผ่านได้ยาก ทำให้การยุบตัวเกิดเป็นเวลานานอย่างต่อเนื่อง รวมทั้งการกระจายแรงดันไม่เท่ากัน การทรุดตัวจึงไม่สม่ำเสมอ

ในการวิเคราะห์การยุบตัวของชั้นดินเหนียว สามารถใช้ Time-settlement curve ทำนายค่าการยุบตัวที่เวลาต่าง ๆ ได้ โดยจะพิจารณาเฉพาะช่วง primary consolidation settlement เท่านั้น เพราะการยุบตัวของชั้นดินเหนียวในช่วงนี้มีผลต่อการทรุดตัวของโครงสร้างมากที่สุด โดยกำหนดให้ t_0 คือเวลาที่สิ้นสุดงานก่อสร้างหรือเวลาที่เริ่มเกิดการยุบตัวแบบ consolidation settlement (0% consolidation) และ t_{100} คือเวลาที่การยุบตัวแบบ consolidation settlement สิ้นสุดลง (100% consolidation) แต่ t_{100} จะเกิดเมื่อเวลาผ่านไปยาวนานมาก จึงพิจารณาค่าการยุบตัวที่เวลา t_{90} (90% consolidation)

8.1.5 Consolidation Test

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ของดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated Clay) ซึ่งได้แก่ค่า C_c, C_s, C_v, และค่า P_c แล้วนำค่าเหล่านี้ไปคำนวณหาค่าการยุบตัวของชั้นดินเหนียวนั้น ดินเหนียวที่ใช้ทดสอบควรมีสภาพใกล้เคียงกับสภาพเดิมที่สุด เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ที่ถูกต้อง

วิธีการเก็บตัวอย่างดินที่ถูกต้อง จะต้องเก็บมาจากกึ่งกลางของชั้นดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยอาจพิจารณาการเก็บตัวอย่างดินทดสอบได้ดังนี้

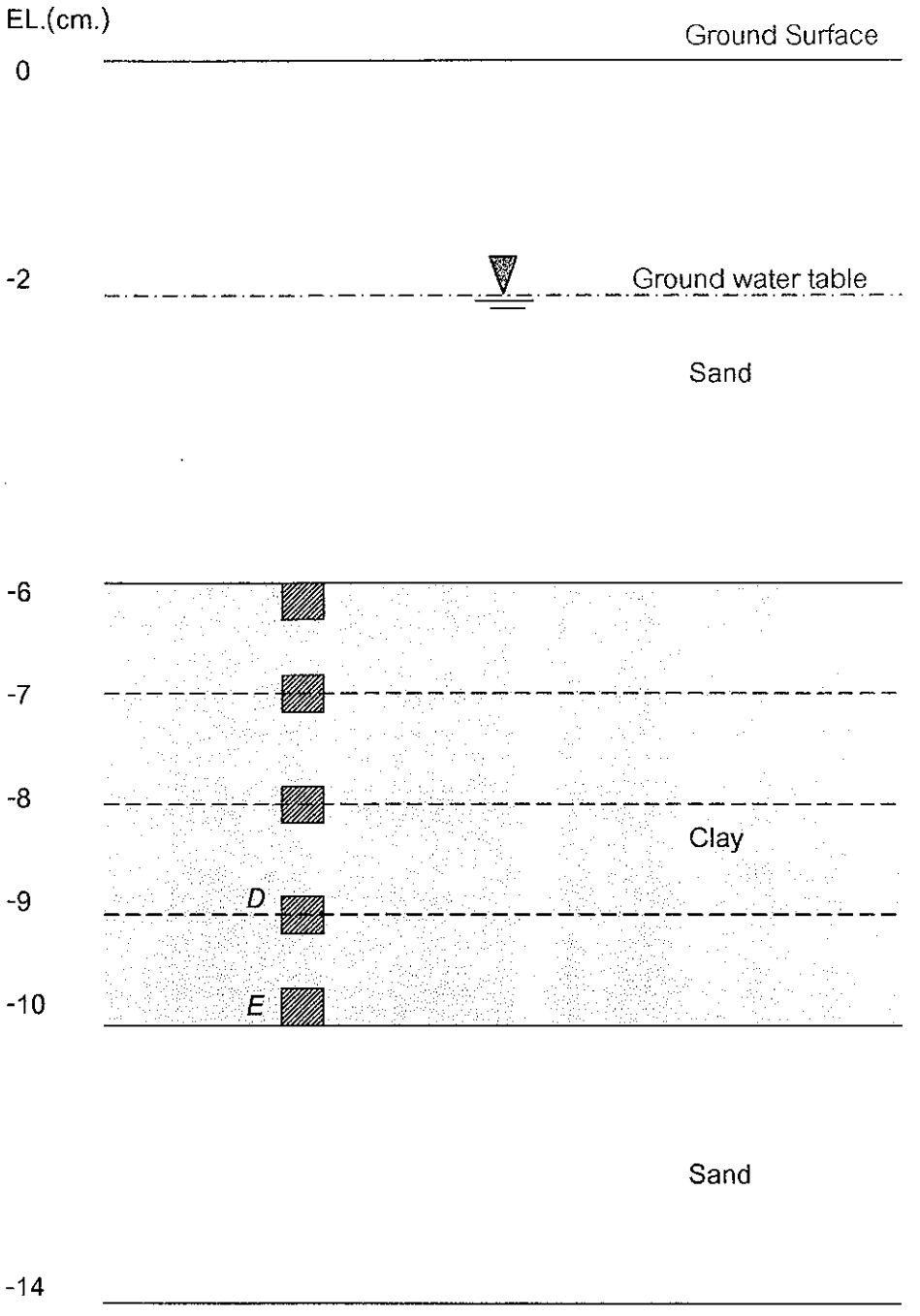
กรณีที่ 1 หากมีงบประมาณในการเจาะสำรวจและทดสอบมาก ควรเก็บดินเหนียวมาทดสอบทุก ๆ ความลึก 1 เมตรดังรูป ดังนั้นจะได้ดินตัวอย่าง 5 ก้อน เมื่อนำมาทดสอบและได้ค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ของดินเหนียวทดสอบแล้ว ให้นำค่าเหล่านั้นมาเฉลี่ยโดยหารด้วยจำนวนตัวอย่างทดสอบ แล้วจึงนำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการเฉลี่ยไปใช้งาน

กรณีที่ 2 หากมีงบประมาณในการเจาะสำรวจและทดสอบดิน 3 ก้อน ควรเลือกเก็บตัวอย่างทดสอบก้อน B, C, และ D มาทดสอบ แล้วนำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดสอบมาเฉลี่ย

กรณีที่ 3 หากมีงบประมาณในการเจาะสำรวจและทดสอบดิน 2 ก้อน ควรเลือกเก็บตัวอย่างทดสอบก้อน B และ D เพราะอยู่กึ่งกลางชั้นดินที่สุด แล้วนำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดสอบมาเฉลี่ย

กรณีที่ 4 หากมีงบประมาณในการสำรวจและทดสอบเพียง 1 ก้อน ควรเลือกเก็บตัวอย่างทดสอบก้อน C เพราะอยู่กึ่งกลางชั้นดินเหนียว

เมื่อได้ดินเหนียวที่จะนำไปทดสอบแล้ว ควรรีบห่อดินเหนียวตัวอย่างทดสอบทันที เพื่อให้ดินคงสภาพใกล้เคียงสภาพดินเดิม (In-situ condition) ที่สุด

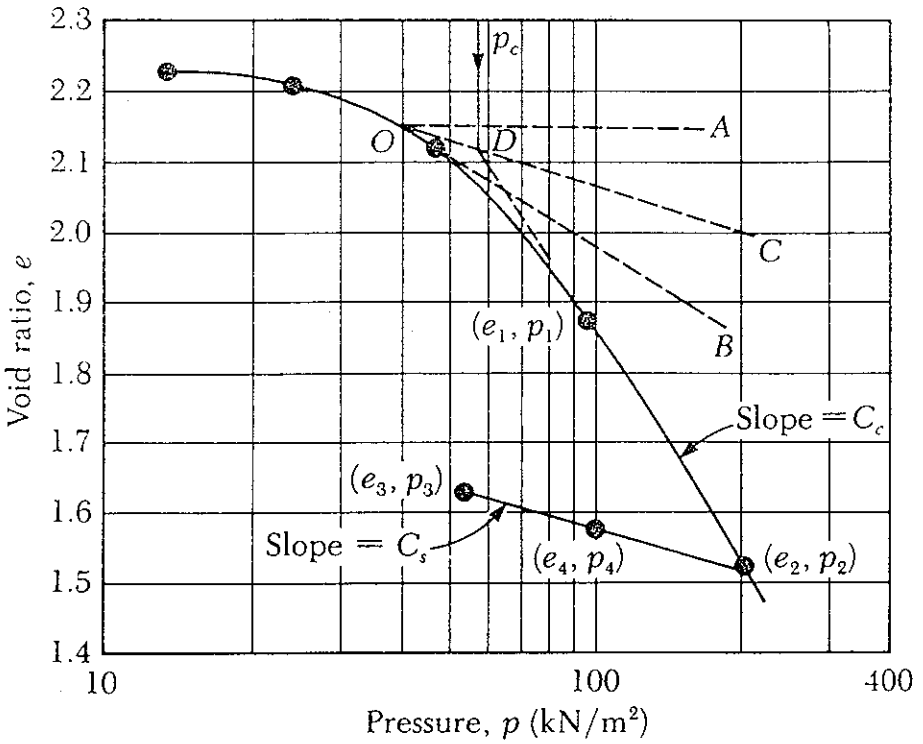


รูปที่ 8.1.8 แสดงการเลือกเก็บตัวอย่างดิน

หลังการทดสอบจะได้กราฟ e – log P ที่สร้างขึ้นมาเพื่อหาค่า C_c, C_s และ P_c ตัวอย่างเช่น จากการทดสอบ consolidation test ของดินเหนียวก้อนหนึ่ง ได้ค่า e – log P ดังตาราง

ตารางที่ 8.1.6 แสดงค่า P และ e

P (kN/m^2)	14	24	46	95	200	100	53
e	2.22	2.2	2.12	1.87	1.52	1.58	1.63



รูปที่ 8.1.9 e – log P curve for a soft clay

8.1.6 วิธีการหา P_c จากกราฟ e – log P

1. เลือกจุด O ซึ่งเป็นจุดที่มีรัศมีโค้งน้อยที่สุด
2. ลากเส้น OA
3. ลาก OB ซึ่งจะแบ่งเส้นสัมผัสโค้งที่จุด O
4. ลาก OC ซึ่งจะแบ่งครึ่งมุม AOB
5. ลากเส้นสัมผัสส่วนของเส้นตรงไปตัดกับเส้น OC ที่จุด D
6. ลากเส้นตรงจากจุด D ลงมาตัดกับแกน X ที่จุดใด ค่าความดันที่อ่านได้ที่จุดนั้น คือค่า P_c

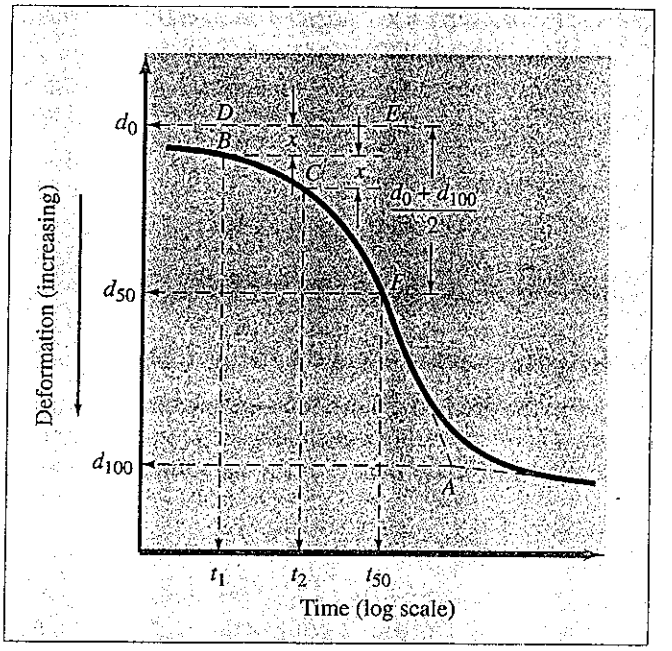
C_c คือ ความชันของเส้นกราฟส่วนที่เป็นเส้นตรง เมื่อเพิ่มความดัน

C_s คือ ความชันของเส้นกราฟส่วนที่เป็นเส้นตรงเมื่อลดความดัน

จาก consolidation test เราสามารถหาค่า C_v ได้ 2 วิธี คือ

1. Logarithm of time method หาค่า t_{50} เพื่อนำไปหาค่า C_v
2. Square root of time method หาค่า t_{90} เพื่อนำไปหาค่า C_v

8.1.7 การหาค่า t_{50} จาก Logarithm of time method



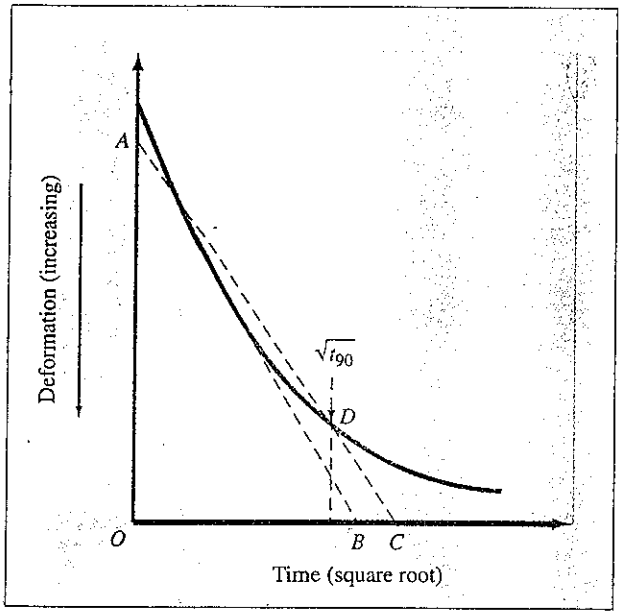
รูปที่ 8.1.10 Logarithm – of – time method for determining coefficient of consolidation

จากกราฟที่ได้จากการทดสอบ consolidation test

1. ลากเส้นตรงที่สัมผัสเส้นกราฟของช่วง primary consolidation และช่วง secondary consolidation มาตัดกันที่จุด A แล้วลากเส้นตรงขนานกับแกน x จากจุด A ไปตัดแกน y จะได้ค่า d_{100}
2. เลือกจุด B (จุดใด ๆ บนเส้นกราฟ) 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} โดย $d_{50} = \frac{d_0 + d_{100}}{2}$
6. ลากเส้นจาก d_{50} ไปตัดเส้นกราฟ ที่จุด F ลากเส้นจากจุด F ลงมาตัดกับแกน x จะได้ค่า t_{50}
7. จาก $T_{50} = \frac{C_v t_{50}}{H d r^2}$; $T_{50} = 0.197$

   จะได้ $C_v = 0.197 \frac{H d r^2}{t_{50}}$

8.1.8 การหา t_{90} จาก Square-root of time method



รูปที่ 8.1.11 Square – root – of - time method

จากกราฟที่ได้จากการทดสอบ consolidation test

1. ลากเส้น AB ซึ่งเป็นเส้นที่สัมผัสเส้นกราฟมากที่สุด
2. ลากเส้น AC โดย $\overline{OC} = 1.15\overline{OB}$ จะได้จุดตัดเส้นกราฟที่จุด D
3. ลากเส้นกราฟจากจุด D มาตัดแกน ซึ่งค่าที่จุดตัด คือ ค่า t_{90}
4. จาก $$T_{90} = 0.848 = \frac{C_v t_{90}}{H_{dr}^2}$$

จะได้ $$C_v = \frac{0.848\, H_{dr}^2}{t_{90}}$$

ค่า C_v ที่ได้จากทั้งสองวิธีจะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งควรเลือกใช้ C_v ค่ามากกว่า เพราะจากสมการข้างต้นจะเห็นว่าหากค่า C_v มาก ระยะเวลาการเกิดการยุบตัวเต็มที่ของดินจะสั้นกว่าเมื่อค่า C_v น้อย (worst case)

8.2 โจทย์ทบทวนความรู้ ความเข้าใจในหลักการพื้นฐานของเนื้อหาที่เรียน

1. กรุณาอธิบายความหมายของ consolidation, compaction, และ settlement

Consolidation คือ การลดปริมาตร (volume decrease) หรือการยุบตัวของมวลดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated soils) เนื่องจากน้ำที่แทรกอยู่ในช่องว่าง (pore) ระหว่างเนื้อดิน (solid phase) ไหลออกไป ด้วยแรงดันน้ำส่วนเกิน (excess pore water pressure) ที่ถูกทำให้เกิดขึ้น (induced) จากน้ำหนักภายนอก (external) ที่มากดทับชั้นดิน

Compaction คือ การใช้แรงกระทำ ปรับปรุงคุณภาพดิน โดยการบดอัดส่วนที่เป็นเนื้อดิน (solid phase) ให้เข้ามาอยู่ใกล้ชิดกันมากขึ้น เพื่อทำให้ unit weight (γ) และ void ratio (e) ของดินเปลี่ยนไป

Settlement คือ ระยะการยุบตัวในแนวดิ่ง (vertical deformation) ของชั้นดิน ซึ่งถ้าหากเป็น settlement ที่เกิดจากการลดปริมาตรจากกระบวนการ consolidation ก็จะเรียกว่า consolidation settlement

2. กรุณาอธิบายความแตกต่างของ consolidation และ compaction

consolidation จะเกิดเฉพาะในชั้นดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยการลดปริมาตร (volume decrease) จะค่อยๆเกิดมากขึ้นตามเวลา นับจากที่มีแรงกระทำภายนอกมากระทำ ขณะที่ compaction จะสนใจที่การเปลี่ยนแปลง unit weight ของดิน ที่การบดอัดดินด้วย water content ที่แตกต่างกัน

3. กรุณา sketch phase diagram 3 รูป พร้อมทั้งอธิบาย เพื่อแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของ water, air, และ solid ในเนื้อดิน (soil) นับจากช่วงก่อนเกิด consolidation, ระหว่างเกิด consolidation, ไปจนถึงหลังเกิด consolidation

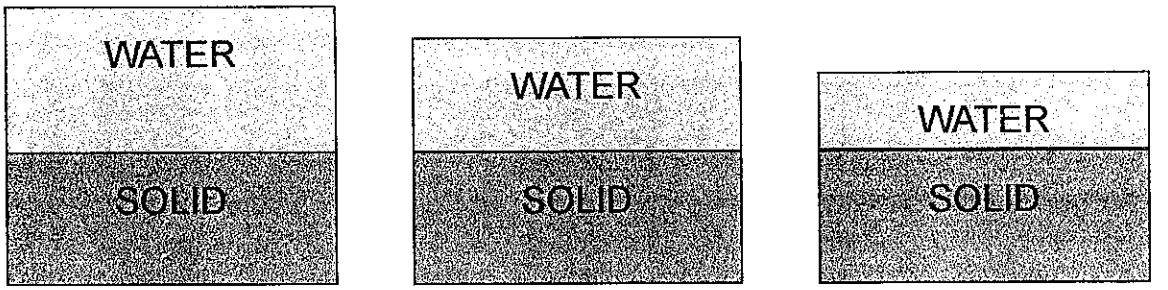
เพราะเหตุว่า consolidation คือ การลดปริมาตร (volume decrease) หรือการยุบตัวของมวลดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated soils) ดังนั้น ขณะก่อนเกิด consolidation เนื้อดิน (soil) จะมีลักษณะที่สามารถแสดงได้ดังรูป (a) คือประกอบด้วยเพียง 2 phase คือ water และ solid เท่านั้น

เมื่อเริ่มเกิด consolidation น้ำที่แทรกอยู่ในช่องว่าง (pore) ระหว่าง solid phase ของเนื้อดิน (soil) จะระบายออกไป ด้วยแรงดันน้ำส่วนเกิน (excess pore water pressure) ที่ถูกทำให้เกิดขึ้น (induced) จากน้ำหนักภายนอก (external) ที่มากดทับชั้นดิน ดังนั้น ในระหว่างเกิด consolidation เนื้อดิน (soil) จะมีลักษณะที่สามารถแสดงได้ดังรูป (b) กล่าวคือ

- ประกอบด้วยเพียง 2 phase คือ water และ solid เหมือนกับรูป (a)
- เกิดการลดปริมาตร (volume decrease) ลงจากรูป (a) โดยปริมาตรที่ลดลง เกิดจากปริมาตรของ water ที่ระบายออกไป โดย solid phase ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

หลังจากเกิด consolidation เรียบร้อยแล้ว น้ำที่แทรกอยู่ในช่องว่าง (pore) ระหว่าง solid phase ของเนื้อดิน (soil) จะไม่มีแรงดันน้ำส่วนเกิน (excess pore water pressure) หลงเหลืออยู่ นั่นคือ จะไม่มีการระบายน้ำออกจากช่องว่าง (pore) อีกต่อไป ทำให้มีลักษณะเนื้อดิน (soil) ที่แสดงได้ดังรูป (c) คือ

- ประกอบด้วยเพียง 2 phase คือ water และ solid เหมือนกับรูป (a) และ (b)
- เกิดการลดปริมาตร (volume decrease) ลงจากรูป (a) และ (b) โดยปริมาตรที่ลดลงเกิดจากปริมาตรของ water ที่ระบายออกไป โดย solid phase ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเช่นกัน



(a) ก่อนเกิด (b) ระหว่างเกิด (c) หลังเกิด

รูปที่ 8.2.1 Phase diagram แสดงการเปลี่ยนแปลงของ water และ solid phase ในเนื้อดินนับจาก (a) ขณะก่อนเกิด, (b) ระหว่างเกิด, และ (c) หลังเกิด consolidation

8.3 โจทย์ทดสอบความสามารถในการคิดวิเคราะห์เพื่อประยุกต์ใช้ความรู้

1. ผลการสำรวจชั้นดินบริเวณโครงการก่อสร้างทางหลวงแผ่นดิน หมายเลข 117 ช่วงแยกเก้าเลี้ยว ถึง อ. วชิรบารมี พบว่าชั้นดินรองรับดินคันทาง (embankment) แสดงได้ดังรูปที่ 8.3.1

GRAVEL	3 m thick	γ_{dry} = 1.8 T/m^3	γ_T = 2 T/m^3	γ_{sat} = 2.2 T/m^3
▼	E = 7.5 T/m^2	μ = 0.425	G_S = 2.7	e_0 = 0.5
SAND	5 m thick,	γ_{dry} = 1.7 T/m^3	γ_T = 1.8 T/m^3	γ_{sat} = 2 T/m^3
	E =3.6 T/m^2	μ = 0.4	G_S = 2.65	e_0 = 0.6
CLAY	4 m thick	γ_{dry} = 1.4 T/m^3	γ_T = 1.6 T/m^3	γ_{sat} = 1.8 T/m^3
	E = 1 T/m^2	μ = 0.375	G_S = 2.71	e_0 =1
	C_v = 0.003 cm^2/s	C_c = 0.5,	C_s = 0.1	P_c = 26.5 T/m^2
SAND	5 m thick,	γ_{dry} = 1.77 T/m^3	γ_T = 1.88 T/m^3	γ_{sat} = 2.1 T/m^3
	E = 4 T/m^2	μ = 0.42	G_S = 2.67	e_0 = 0.5

รูปที่ 8.3.1 ชั้นดินรองรับดินคันทาง

ในฐานะวิศวกรโยธา ที่ได้รับมอบหมายให้คำนวณหา Total Settlement (St) กรุณาอธิบายว่า

- ชั้นดินที่จะใช้คำนวณหา consolidation settlement มีกี่ชั้น? ประกอบด้วยชั้นดินใดบ้าง? เพราะเหตุใด?
- เงื่อนไขในการระบายแรงดันน้ำส่วนเกิน (drainage condition) ออกจากแต่ละชั้นดิน ที่เกิด consolidation เป็นแบบ 4- way หรือ 3- way หรือ 2- way หรือ 1- way drainage condition? เพราะเหตุใด?
- Longest drainage path (H_{dr}) ของแต่ละชั้นดินที่เกิด consolidation มีค่าเท่าใด? เพราะเหตุใด?

ตอบ

- ชั้นดินที่จะใช้คำนวณหา consolidation settlement มีเพียง 1 ชั้น คือชั้น clay ที่อยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดิน เพราะเป็นดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated clays)
- เป็น 2- way drainage condition เพราะน้ำที่แทรกอยู่ระหว่างเนื้อดินในชั้น saturated clay สามารถระบายผ่านชั้น sand ที่อยู่เหนือและใต้ชั้น clay นั้นได้โดยง่าย ($k_{sand} >> k_{clay}$)
- H_{dr} มีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่ง ของความหนาของชั้น saturated clay = 4/2 = 2 เมตร เพราะเป็น 2- way drainage condition

2. โครงการก่อสร้างคอนโดมิเนียมของบริษัท กชกรการโยธา เป็นอาคารคอนโดมิเนียมสูง 50 ชั้น ตั้งอยู่ใจกลางกรุงเทพมหานคร ซึ่งบริเวณที่จะก่อสร้างนั้น เกิดปัญหาดินทรุดมาก ก่อนทำการออกแบบฐานรากของอาคารคอนโดมิเนียม วิศวกรผู้ออกแบบได้นำดินเหนียวที่ได้จากการสำรวจชั้นดิน บริเวณที่จะทำการก่อสร้างมาทำการทดสอบ consolidation test พบว่า

ตารางที่ 8.3.1 ผลการทดสอบดินตัวอย่างบริเวณที่จะทำการก่อสร้าง

Pressure ,P (ton/m^2)	void ratio, e	remark
0.25	1.03	loading
0.5	1.02	loading
1	0.98	loading
2	0.91	loading
4	0.81	loading
8	0.71	loading
16	0.62	loading
8	0.64	unloading
4	0.66	unloading
2	0.67	unloading

เพื่อที่จะนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบไปคำนวณหา consolidation settlement (S_c) ของฐานรากที่จะเกิดขึ้นตลอดอายุการใช้งานของอาคารคอนโดมิเนียม ในฐานะวิศวกรผู้ออกแบบกรุณา

2.1 หาค่า preconsolidation pressure (P_c) จาก e – log P curve ซึ่งได้จาก consolidation test

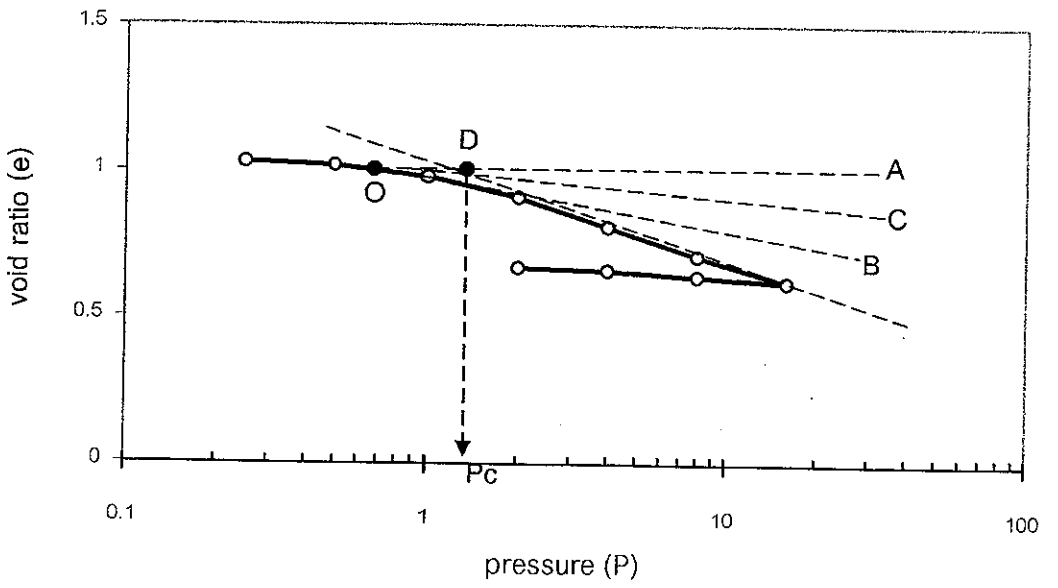
2.2 หาค่า compression index (C_c), swell index (C_s) และอัตราส่วนของ C_s / C_c จาก e – log P curve ซึ่งได้จาก consolidation test

2.3 เนื่องจาก C_c = 0.009 (LL – 10) และ $C_s \approx \frac{1}{5}c_c$ ถึง $\frac{1}{10}c_c$ หากนำดินเหนียวที่ได้จากการเจาะสำรวจบริเวณที่จะทำการก่อสร้างมาทดสอบหาค่า liquid limit (LL) พบว่าค่าของ liquid limit (LL) เท่ากับ 45 กรุณาคำนวณหาค่า C_c และ C_s ที่ได้จากสมการข้างต้น

<u>วิธีทำ</u>

2.1 หาค่า preconsolidation pressure (P_c) จาก e – log P curve

<u>ขั้นที่1</u> นำค่า pressure (P) และ void ratio (e) ที่ได้จากการทดสอบ consolidation test มาเขียนกราฟ โดยแกน x คือ pressure (P) และแกน y คือ void ratio (e)



รูปที่ 8.3.2 e – log P curve

ขั้นที่2 หาค่า P_c จากกราฟ e – log P curve ดังนี้

- กำหนดจุด a ซึ่งเป็นจุดที่มีรัศมีความโค้งน้อยที่สุดจากการประมาณด้วยสายตา
- ลาก $\overline{OA}$ โดย $\overline{OA}$ จะลากขนานกับแกน x
- ลาก $\overline{OB}$ โดย $\overline{OB}$ เป็นเส้นที่ลากสัมผัสกับจุด O
- ลาก $\overline{OC}$ โดย $\overline{OC}$ จะแบ่งครึ่งมุม $A\hat{O}B$
- ลากเส้นสัมผัส กราฟ e – log P curve ส่วนที่ความชันคงที่ไปตัด $\overline{OC}$ จะได้จุด D
- ลากเส้นตรงจากจุด D โดยลากขนานแกน Y ไปตัดกับแกน X จะได้ค่าของ preconsolidation pressure (P_c) ซึ่งมีค่าประมาณ 1.7 ton/m^2

2.2 หาค่า compression index (C_c), swell index (C_s) และอัตราส่วนของ C_s / C_c จาก e – log P curve ซึ่งได้จาก consolidation test

ขั้นที่1 คำนวณค่า compression index (C_c) ซึ่งได้จาก consolidation test

- นำค่า void ratio (e) และค่า pressure (P) จากการทดสอบ consolidation test แบบ loading มา 2 ค่า โดยเลือกค่าจากจุดที่เส้นกราฟ e – log P มีความชันคงที่

ตารางที่ 8.3.2 ผลการทดสอบ consolidation test แบบ loading

pressure, P (ton/m^2)	void ratio, e
2	0.9
4	0.8

- คำนวณค่า compression index (C_c) ซึ่งได้จาก consolidation test

จาก $$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log \frac{P_2}{P_1}}$$

$$= \frac{0.8 - 0.9}{\log\left(\frac{4\,T/m^2}{2\,T/m^2}\right)}$$

$$= 0.33$$

ขั้นที่2 คำนวณค่า swell index (C_s) ซึ่งได้จาก consolidation test

- นำค่า void ratio (e) และค่า pressure (P) จากการทดสอบ consolidation test แบบ unloading มา 2 ค่า โดยเลือกค่าจากจุดที่เส้นกราฟ e – log P มีความชันคงที่

ตารางที่ 8.3.3 ผลการทดสอบ consolidation test แบบ unloading

pressure, P (ton/m^2)	void ratio, e
2	0.66
4	0.67

- คำนวณค่า swell index (C_s)

จาก $C_s = \dfrac{e_1 - e_2}{\log \dfrac{P_2}{P_1}}$

$= \dfrac{0.66 - 0.67}{\log\left(\dfrac{4\,T/m^2}{2\,T/m^2}\right)}$

$= 0.05$

ขั้นที่3 คำนวณหาอัตราส่วนของ C_s / C_c จาก e – log P curve ซึ่งได้จาก consolidation test

จาก $C_s = 0.05$

$C_c = 0.33$

จะได้ $C_s / C_c = 0.15$

2.3 เมื่อ liquid limit (LL) เท่ากับ 45 กรุณาคำนวณหาค่า C_c และ C_s จากสมการ

ขั้นที่1 คำนวณค่า compression index (C_c)

จาก $C_c = 0.009\,(LL - 10)$

$= 0.009\,(45 - 10)$

$= 0.32$

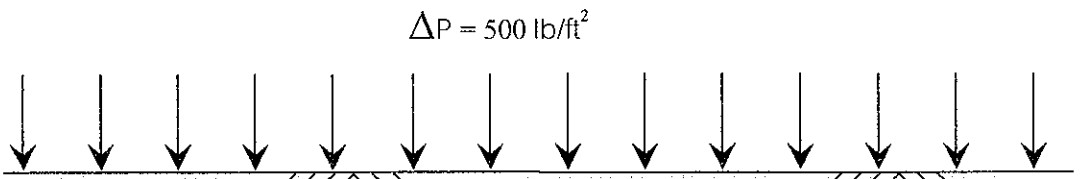
<u>ขั้นที่2</u> คำนวณค่า swell index (C_s)

จาก $C_s \approx \frac{1}{5}C_C$ ถึง $\frac{1}{10}C_C$

$\approx \frac{1}{5}(0.32)$ ถึง $\frac{1}{10}(0.32)$

$\approx$ 0.06 ถึง 0.032

3. โครงการก่อสร้างเคหะชุมชนใหม่ รอบมหาวิทยาลัยนเรศวร วางแผนถมดินในบริเวณพื้นที่โครงการ ซึ่งทำให้เกิดแรงกระทำภายนอกแบบกระจายสม่ำเสมอเต็มพื้นที่ (uniform distributed load) บนชั้นดิน ดังแสดงในรูปที่ 8.3.3 ในฐานะวิศวกรประจำโครงการ ท่านได้รับมอบหมายให้คำนวณหา consolidation settlement (S_c) เพื่อทางโครงการจะได้ใช้วางแผนการออกแบบระบบระบายน้ำ



GRAVEL	10 ft thick	γ_{dry} = 112 lb/ft³	γ_T = 120 lb/ft³	γ_{sat} = 133 lb/ft³
	E = 10,000 psi	μ = 0.425	G_S = 2.7	e_0 = 0.5
SAND	15 ft thick	γ_{dry} = 104 lb/ft³	γ_T = 116 lb/ft³	γ_{sat} = 127 lb/ft³
	E = 5,000 psi	μ = 0.4	G_S = 2.65	e_0 = 0.6
NC CLAY	20 ft thick	γ_{dry} = 77 lb/ft³	γ_T = 95 lb/ft³	γ_{sat} = 111 lb/ft³
	E = 1,750 psi	μ = 0.375	G_S = 2.71	e_0 =1.2
	C_v = 0.003 cm²/s	LL = 50%	PL = 30%	SL = 26%
SAND	18 ft thick	γ_{dry} = 112 lb/ft³	γ_T = 124 lb/ft³	γ_{sat} = 132 lb/ft³
	E = 6,500 psi	μ = 0.42	G_S = 2.67	e_0 = 0.5

รูปที่ 8.3.3 ชั้นดินในบริเวณพื้นที่โครงการ

ขั้นที่1 พิจารณา consolidation settlement (S_c) ในลักษณะ $P_0 \approx P_c$ หรือ NC clay (กำหนดให้)

$$S_c = \frac{C_c H}{1+e_0} \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0}$$

ขั้นที่ 2 พิจารณากำหนด แนวทางการวิเคราะห์หา consolidation settlement (S_c) ดังนี้

- คิด consolidation settlement (S_c) ที่ midlayer ของชั้น clay
- คิดว่า induced stress มีการกระจายตัวเป็นแบบเส้นตรง (linear distribution) ในชั้น clay
- ดังนั้น จะคำนวณหา P_0 และ ΔP เฉพาะที่ระดับ midlayer ของชั้น clay

ขั้นที่ 3 กำหนดคุณสมบัติของชั้นดิน clay ที่จะใช้ในการคำนวณหา S_c

γ_{sat}	=	111 lb / ft^3	(given)
e_0	=	1.2	(given)
C_c	=	0.009 (LL – 10) เมื่อ LL = 50	(given)
	=	0.009 (50-10)	
	=	0.36	
H	=	20 ft	

ขั้นที่ 4 คำนวณหา P_0 และ ΔP ที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ S_c (ที่ระดับ midlayer ของชั้น clay)

ΔP	=	induced effective stress at midlayer
	=	500 lb/ft^2 เท่ากับแรงกระทำภายนอก
P_0	=	effective overburden effective stress at midlayer
	=	(10 ft)($\gamma_{T\text{-}1st\ sand}$) + (10 ft)($\gamma_{sat\text{-}2\ nd\ sand} - \gamma_w$) + $\frac{20\pi}{2}$ ($\gamma_{sat\text{-}clay} - \gamma_w$)
	=	(10 ft)(120 lb/ft^3)+(15 ft)(127 - 62.4) lb/ft^3 + (10 ft)(111 - 62.4) lb/ft^3
	=	2655 lb/ft^2

ขั้นที่5 คำนวณหา S_c ของชั้น NC clay

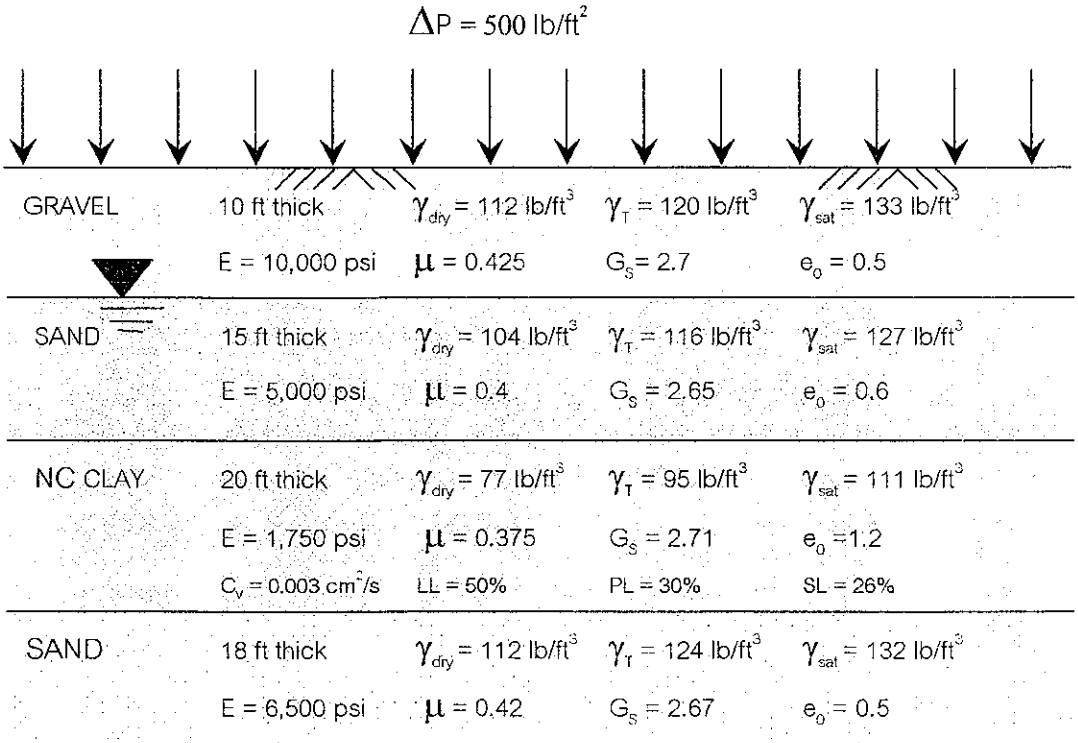
$$S_C = \frac{C_C H}{1+e_0} \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0}$$

$$= \frac{0.36(20\,ft)}{1+1.2} \log \frac{(2655+500)\,lb/ft^2}{2655\,lb/ft^2}$$

= 0.245 ft

= 2.3 inch

4. หลังจากได้รับผล consolidation test ของตัวอย่างทดสอบที่เก็บมาจากระดับความลึก midlayer ของชั้น saturated clay ในโครงการก่อสร้างเคหะชุมชนใหม่ รอบมหาวิทยาลัยนเรศวร ดังแสดงในรูปที่ 8.3.4 ทางโครงการ ได้ทราบผลว่า preconsolidation pressure (P_c) = 3,000 lb/ft^2 ในฐานะวิศวกรประจำโครงการ ได้รับมอบหมายให้ทบทวนการคำนวณหา S_c



รูปที่ 8.3.4 ชั้นดินบริเวณโครงการ

<u>ขั้นที่ 1</u> พิจารณาจำแนกชั้นดิน saturated clay ว่าจะต้องหา consolidation settlement (S_c) ในลักษณะ normally consolidated (NC) หรือ over-consolidated (OC) clay

P_c = 3000 lb/ft^2

P_0 = effective overburden effective stress at midlayer

$$= (10\text{ ft})(\gamma_{T\text{-1st sand}}) + (10\text{ ft})(\gamma_{\text{sat-2 nd sand}} - \gamma_w) + \frac{20\text{ ft}}{2}(\gamma_{\text{sat-clay}} - \gamma_w)$$

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

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

เพราะ $P_0 < P_C$ ดังนั้น คำนวณหา S_C ในแบบ OC clay นั่นคือ

$$S_C = \frac{C_S H}{1+e_0}\log\frac{P_0+\Delta P}{P_0} \quad \text{หรือ}$$

$$S_C = \frac{C_S H}{1+e_0}\log\frac{P_C}{P_0} + \frac{C_c H}{1+e_0}\log\frac{P_0+\Delta P}{P_C}$$

ทั้งนี้ การเลือกใช้สมการใด จะพิจารณาโดยการเปรียบเทียบ $P_0 + \Delta P$ กับ P_C

<u>ขั้นที่ 2</u> พิจารณากำหนด แนวทางการวิเคราะห์หา consolidation settlement (S_C) ดังนี้

- คิด consolidation settlement (S_C) ที่ midlayer ของชั้น clay
- คิดว่า induced stress มีการกระจายตัวเป็นแบบเส้นตรง (linear distribution) ในชั้น clay
- ดังนั้น จะคำนวณหา P_0 และ ΔP เฉพาะที่ระดับ midlayer ของชั้น clay

<u>ขั้นที่ 3</u> กำหนดคุณสมบัติของชั้นดิน clay ที่จะใช้ในการคำนวณหา S_C

γ_{sat}	=	111 lb / ft^3		(given)
e_0	=	1.2		(given)
C_C	=	0.009 (LL – 10) เมื่อ	LL = 50	(given)
	=	0.009 (50-10)		
	=	0.36		
C_S	=	(1/5) Cc		
	=	(1/5) (0.36)	= 0.072	
H	=	20 ft		

<u>ขั้นที่ 4</u> คำนวณหา P_0 และ ΔP ที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ S_C (ที่ระดับ midlayer ของชั้น clay)

ΔP	=	induced effective stress at midlayer
	=	500 lb/ft^2 เท่ากับแรงกระทำภายนอก
P_0	=	effective overburden effective stress at midlayer
	=	(10 ft)($\gamma_{T\text{-}1st\ sand}$) + (10 ft)($\gamma_{sat\text{-}2\ nd\ sand} - \gamma_W$) + $\frac{20\,ft}{2}$ ($\gamma_{sat\text{-}clay} - \gamma_W$)
	=	(10 ft)(120 lb/ft^3)+(15 ft)(127 - 62.4) lb/ft^3 + (10 ft)(111 - 62.4) lb/ft^3
	=	2655 lb/ft^2

<u>ขั้นที่ 5</u> คำนวณหา S_c ของชั้น OC clay

ΔP = 500 lb / ft^2

$P_0 + \Delta P$ = 3155 lb/ft^2

> P_c (3000 lb/ft^2)

ดังนั้น การยุบตัวจะเกิดครอบคลุมทั้งช่วง Re-compression และ vergin compression นั่นคือ

$$S_C = \frac{C_s H}{1+e_0}\log\frac{P_C}{P_0} + \frac{C_c H}{1+e_0}\log\frac{P_0+\Delta P}{P_C}$$

$$= \frac{0.072\ (20ft)}{1+1.2}\log\frac{3000lb/ft^2}{2655lb/ft^2} + \frac{0.36(20ft)}{1+1.2}\log\frac{3155lb/ft^2}{3000lb/ft^2}$$

= 0.11 ft = 1.32 inch

5.โครงการก่อสร้างกลุ่มอาคารวิทยาศาสตร์สุขภาพของมหาวิทยาลัยนเรศวร ก่อนทำการออกแบบฐานรากของโครงการนี้ วิศวกรผู้ออกแบบได้นำดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturate clay) ที่ได้จากการเจาะสำรวจชั้นดินบริเวณโครงการ มาทดสอบ consolidation test โดยค่าความดัน (pressure) ที่ได้จาก dial gauge เป็นค่าที่ได้จากการเพิ่มความดัน (pressure) จาก 1.1 ถึง 1.2 kips / ft^2 พบว่า

Time (min)	Dial guage reading (inch x 10^4)
0	1565
0.1	1670
0.25	1615
0.5	1625
1	1640
2	1663
4	1692
8	1740
16	1800
30	1865
60	1938
120	2000
240	2050
480	2080
960	2100
1440	2112

เพื่อคำนวณหาเวลาที่เกิด consolidation settlement (S_c) โดยที่ความสูงเฉลี่ยของดินตัวอย่างทดสอบ เท่ากับ 0.88 inch และน้ำซึมออกได้ทั้งด้านบนและด้านล่าง (two – way drainage) ในฐานะวิศวกรกรุณา

5.1 หาค่า coefficient of consolidation (C_v) โดยใช้วิธี logarithm of time method

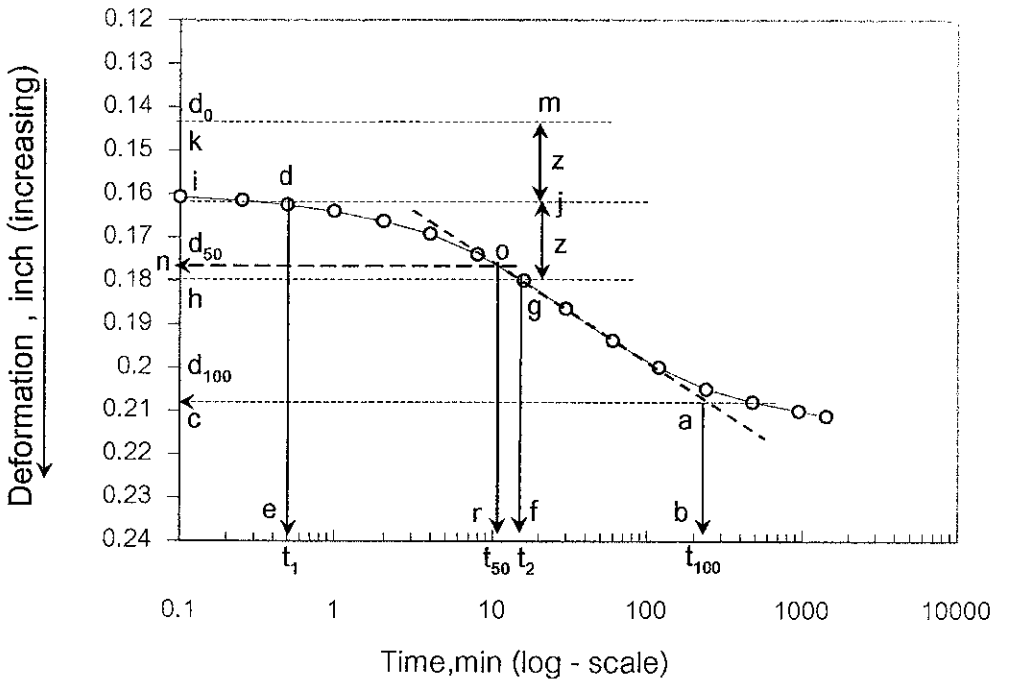
5.2 หาค่า coefficient of consolidation (C_v) โดยใช้วิธี square root of time method

5.3 พิจารณาเลือกค่า coefficient of consolidation (C_v) ที่จะใช้ในการคำนวณหาเวลาที่เกิด consolidation settlement (S_c) พร้อมทั้งให้เหตุผล

<u>วิธีทำ</u>

5.1 หาค่า coefficient of consolidation (C_v) โดยใช้วิธี logarithm of time method

<u>ขั้นที่ 1</u> plot กราฟ ระหว่าง time กับ deformation โดยที่ แกน x คือ time (log – scale) และแกน y คือ deformation (increasing)



รูปที่ 8.3.5 กราฟระหว่าง time (log – scale) กับ deformation

<u>ขั้นที่ 2</u> หาค่า t_{50} จากกราฟ ดังนี้

- หาจุด a โดยลากเส้นตรงจากจุดที่ค่าของ deformation เพิ่มขึ้นคงที่ มาตัดกับเส้นตรงที่ลากจากจุดที่ค่าของ deformation เริ่มที่จะไม่เปลี่ยนแปลง จุดตัดระหว่างเส้นทั้งสองคือจุด a
- ลาก $\overline{ab}$ โดยที่จุด b คือเวลาที่เกิด consolidation 100 % (t_{100})

- ลาก $\overline{ac}$ โดยที่จุด c คือ 100 % consolidation settlement (d_{100})
- กำหนดจุด d โดยเลือกค่าจากช่วงเริ่มต้นของกราฟ ลาก $\overline{ij}$ แล้ว ลาก $\overline{de}$ มาตัดกับแกน x จุดตัดคือ t_1
- หาจุด t_2 ซึ่งเท่ากับ $4t_1$ (จุด f) ลาก $\overline{fg}$ แล้วลาก $\overline{gh}$ ระยะห่างจาก $\overline{gh}$ กับ $\overline{ij}$ มีค่าเท่ากับ z
- ลาก $\overline{km}$ โดยที่ระยะห่างระหว่าง $\overline{km}$ กับ $\overline{gh}$ มีค่าเท่ากับ z จุดที่ $\overline{km}$ ตัดกับแกน y คือ 0 % consolidation settlement (d_0)
- คำนวณหาค่า $d_{50} = \frac{d_0 + d_{100}}{2}$ เมื่อได้ค่า d_{50} แล้ว ลาก $\overline{no}$ และ $\overline{or}$ ตามลำดับ เมื่อ $\overline{or}$ ตัดกับแกน x จุดนั้นคือ t_{50} ซึ่งมีค่าประมาณ 11 นาที

<u>ขั้นที่ 3</u> คำนวณค่า coefficient of consolidation (C_V)

จาก $T_{50} = \frac{C_V t_{50}}{H_{dr}^2}$

- พิจารณาค่า T_{50} จากตารางที่ 8.1.1 พบว่า T_{50} เท่ากับ 0.197
- พิจารณาค่า H_{dr} เนื่องจากเป็น two – way drainage

  ดังนั้น $H_{dr} = H / 2 = 0.88 \text{ inch} / 2 = 0.44 \text{ inch}$
- พิจารณาค่า t_{50} จากกราฟ t_{50} มีค่าประมาณ 11 นาที
- คำนวณค่า coefficient of consolidation (C_V)

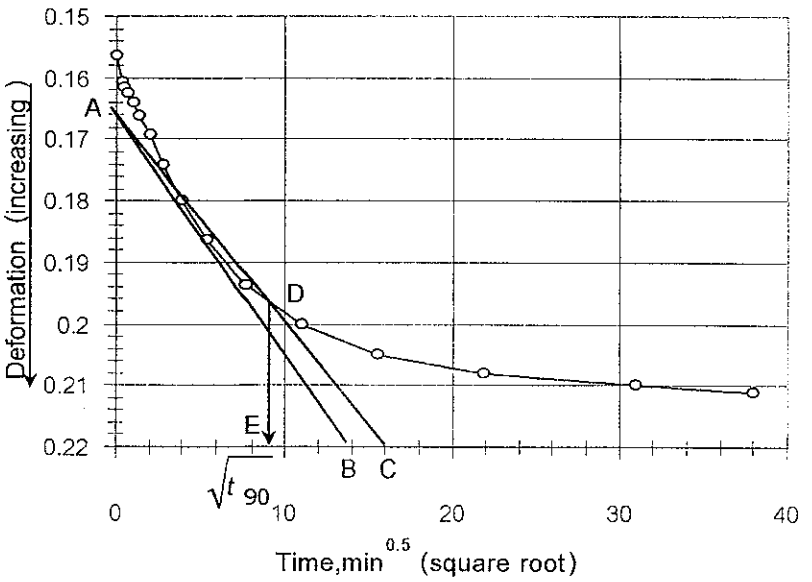
$$T_{50} = \frac{C_V t_{50}}{H_{dr}^2}$$

$$0.197 = \frac{C_V (11 \text{ min}) (12\ inch)^2 (1\ hr) (1\ day)}{(0.44\ inch)^2 (1\ ft)^2 (60 \text{ min}) (24\ hr)}$$

$$C_V = 1.20 \times 10^{-4} \quad ft^2 / day$$

5.2 หาค่า coefficient of consolidation (C_v) โดยใช้วิธี square root of time method

<u>ขั้นที่ 1</u> plot กราฟ ระหว่าง time กับ deformation โดยที่ แกน x คือ time (square root) และแกน y คือ deformation (increasing)



Square-root-of-time fitting method

รูปที่ 8.3.6 กราฟระหว่าง time (square root) กับ deformation

<u>ขั้นที่ 2</u> หาค่า t_{90} จากกราฟ ดังนี้

- ลาก $\overline{AB}$ ซึ่งเป็นเส้นที่ลากสัมผัสส่วนโค้งมากที่สุด
- ลาก $\overline{AC}$ โดยที่ $\overline{OC}$ = 1.15 $\overline{OB}$ จะได้จุด D ซึ่งได้จากการลาก $\overline{AC}$ ตัดกราฟ
- ลาก $\overline{DE}$ ตัดกับแกน x จุดตัดนั้นคือ $\sqrt{t_{90}}$ มีค่าประมาณ 9.2 min$^{0.5}$
- คำนวณค่า t_{90} เท่ากับ (9.2 min$^{0.5}$)^2 เท่ากับ 85 min

<u>ขั้นที่ 3</u> คำนวณค่า coefficient of consolidation (C_v)

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

- พิจารณาค่า T_{90} จากตารางที่ 8.1.1 พบว่า T_{90} เท่ากับ 0.848
- พิจารณาค่า H_{dr} เนื่องจากเป็น two – way drainage

ดังนั้น

H_{dr} = H / 2 = 0.88 inch / 2 = 0.44 inch

- พิจารณาค่า t_{90} จากกราฟ t_{90} มีค่าประมาณ 85 นาที
- คำนวณค่า coefficient of consolidation (C_V)

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

$$0.848 = \frac{C_V\ (85\ \text{min})\ (12\ inch)^2\ (1\ hr)\ (1\ day)}{(0.44\ inch)^2\ (1\ ft)^2\ (60\ \text{min})\ (24\ hr)}$$

C_V = 1.93×10^{-2} ft^2 / day

5.3 พิจารณาเลือกค่า coefficient of consolidation (C_V) ที่จะใช้ในการคำนวณหาเวลาที่เกิด consolidation settlement (S_C)

- พิจารณา ค่า C_V จาก t_{50} (ข้อ 5.1) พบว่า $C_V = 1.20 \times 10^{-4}$ ft^2/day
- พิจารณา ค่า C_V จาก t_{90} (ข้อ 5.2) พบว่า $C_V = 1.93 \times 10^{-2}$ ft^2 / day
- พบว่า C_V จาก t_{90} มีค่ามากกว่า C_V จาก t_{50} เนื่องจากเวลาในการเกิด consolidation settlement (S_C) ของดิน ; $t = \frac{t_V H_{dr}^2}{C_V}$ ดังนั้นควรเลือกค่า C_V ที่มากที่สุด เพราะในการออกแบบหาเวลาที่เกิด consolidation settlement (S_C) จะเร็วที่สุด

6. ชั้นดินรองรับตอม่อ (footing) รองรับโกดังคลังสินค้าการเกษตร ที่ ต. วัดพริก อ. เมือง จ. พิษณุโลกประกอบด้วยชั้น normally consolidated (NC) clay หนา 4 เมตร วางตัวแทรกอยู่ใต้ชั้นดินทราย และรองรับ (underlying) ด้วยชั้นหินดินดาน (shale) หากผลการคำนวณพบว่า consolidation settlement (S_C) ที่จะเกิดทั้งหมด มีค่าเท่ากับ 80 mm กรุณาหาว่า

6.1 ค่าเปอร์เซ็นต์การยุบตัว(U%) ของชั้น NC clay เป็นเท่าใด? เมื่อ S_C = 35 mm

6.2 ถ้าผลจาก consolidation test พบว่า C_V = 0.003 cm^2/s, t_{90} มีค่าเท่าใด?

6.3 หากปรากฏว่า ชั้นดินที่รองรับชั้น NC clay ไม่ใช่ shale แต่เป็น gravel, t_{90} มีค่าเท่าใด? เมื่อ C_V = 0.003 cm^2/s

6.1 $U\% = \frac{consolidation\ settlement\ at\ time\ t}{consolidation\ settlement} \times 100\ \%$

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

$= 43.75\ \%$

6.2 $T_V = \frac{C_v t}{H_{dr}^2}$

T_{90} = 0.848 (จากตารางที่ 8.1.1)

H_{dr} = 400 cm เพราะเป็น 1-way drainage condition จากการระบายน้ำทางชั้น sand

C_V = 0.003 cm^2/s

$\therefore\ t = \frac{(0.848)(400cm)^2}{0.003cm^2/\sec}$

= 45227000 sec = 1.43 yrs

6.3 $T_V = \frac{C_v t}{H_{dr}^2}$

T_{90} = 0.848 (จากตารางที่ 8.1.1)

H_{dr} = 400/2 cm (เป็น 2-way drainage condition โดยระบายน้ำผ่าน sand และ gravel)

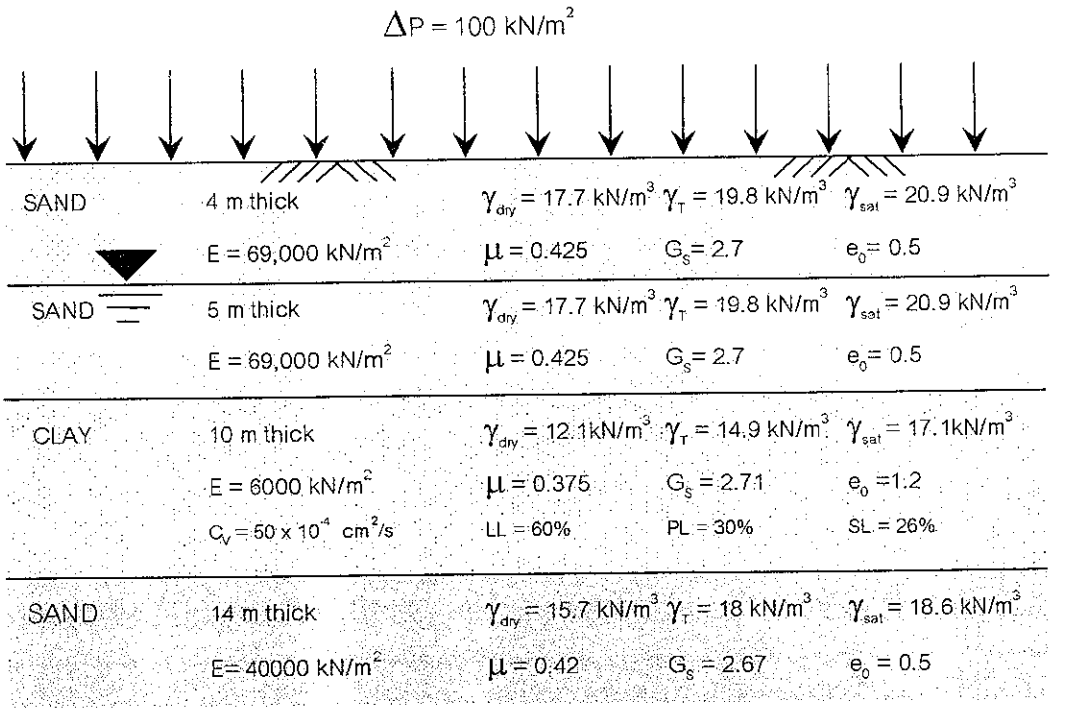
C_v = 0.003 cm^2/s

$\therefore$ $t = \dfrac{(0.848)(200\,cm)^2}{0.003\,cm^2/\text{sec}}$

= 11307000 sec

= 0.36 year

7. โครงการก่อสร้างกลุ่มอาคารคณะสหเวชศาสตร์, พยาบาลศาสตร์, และทันตแพทยศาสตร์ ในพื้นที่มหาวิทยาลัยนเรศวร วางแผนถมดินเพื่อปรับระดับพื้นที่บริเวณโครงการ ซึ่งทำให้เกิดแรงกระทำภายนอกแบบกระจายสม่ำเสมอเต็มพื้นที่ (uniform distributed load) บนชั้นดิน ดังแสดงในรูปที่ 8.3.7



รูปที่ 8.3.7 ชั้นดินบริเวณโครงการก่อสร้าง

ในฐานะวิศวกรประจำกองแผนงาน ของมหาวิทยาลัยนเรศวร ท่านได้รับมอบหมายให้คำนวณหา consolidation settlement (S_c) และ sketch time-consolidation settlement curve สำหรับ 3 กรณี ดังนี้

7.1 กรณีที่ 1 หากสมมติว่าเป็นชั้นดินเหนียวแบบ normally consolidated (NC) clay

7.2 กรณีที่ 2 หากผล consolidation test ของตัวอย่างทดสอบที่เก็บมาจากระดับความลึก midlayer ของชั้น saturated clay ได้ผลว่า preconsolidation pressure (P_C) = 300 kN/m^2

7.3 กรณีที่ 3 หากผล consolidation test ของตัวอย่างทดสอบที่เก็บมาจากระดับ midlayer ของชั้น saturated clay ที่กองแผนงาน ขอความอนุเคราะห์ให้ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ทำการทดสอบเพื่อตรวจทานซ้ำ ได้ผลว่า preconsolidation pressure (P_C) = 180 kN/m^2

นอกจากนั้น เพื่อให้ทางโครงการ สามารถวางแผนการออกแบบระบบระบายน้ำและระบบป้องกันน้ำท่วม ได้อย่างถูกต้องและประหยัด ตลอดอายุการใช้งาน กรุณาให้คำแนะนำว่า ควรจะออกแบบเผื่อสำหรับ consolidation settlement (S_C) เท่าใด? เพราะเหตุใด?

ก. คำนวณหา S_C สำหรับทั้ง 3 กรณี

7.1 กรณีที่ 1 หากสมมติว่าเป็นชั้นดินเหนียวแบบ normally consolidated (NC) clay

<u>ขั้นที่1</u> พิจารณา consolidation settlement (S_C) เป็นแบบ NC clay ∵ กำหนดให้ นั่นคือ $P_c \approx P_0$ และ

$$S_C = \frac{C_C H}{1+e_0} \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0}$$

<u>ขั้นที่ 2</u> พิจารณากำหนด แนวทางการวิเคราะห์หา consolidation settlement (S_C) ดังนี้

- คิด S_C ที่ระดับ midlayer ของชั้น saturated clay
- คิดว่า induced stress มีการกระจายตัวเป็นแบบเส้นตรง (linear distribution) ในชั้น clay
- ∴ จะคำนวณหา P_0 และ ΔP เฉพาะที่ระดับ midlayer ของชั้น clay

ขั้นที่ 3 กำหนดคุณสมบัติของชั้นดิน clay ที่จะใช้ในการคำนวณหา S_C

γ_{sat} = 17.1 kN/m^3 (given)

e_0 = 1.2 (given)

C_C = 0.009 (LL – 10) when LL = 60 (given)

= 0.009 (60-10) = 0.45

H = 10 m

ขั้นที่ 4 คำนวณหา Po และ ΔP ที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ S_C (ที่ระดับ midlayer ของชั้น clay)

ΔP = induced effective stress at midlayer = 100 kN/m^2 เท่ากับแรงกระทำภายนอก

P_0 = effective overburden effective stress at midlayer

= $(4\text{ m})(\gamma_{T\text{-}1st\ sand}) + (5\text{ m})(\gamma_{sat\text{-}2\ nd\ sand} - \gamma_W) + \frac{10_m}{2}(\gamma_{sat\text{-}clay} - \gamma_W)$

= (4 m)(19.8 kN/m^3) + (5 m)(20.9 – 9.81) kN/m^3 + (5 m)(17.1 – 9.81) kN/m^3

= 171.1 kN/m^2

ขั้นที่ 5 คำนวณหา S_C ของชั้น NC clay

$$S_C = \frac{C_C H}{1+e_0}\log\frac{P_0+\Delta P}{P_0}$$

$$= \frac{(0.45)\,(10m)}{1+1.2}\log\frac{(171.1+100)\,kN/m^2}{171.1\ kN/m^2}$$

= 0.410 m = 410 mm

7.2 กรณีที่ 2 consolidation test ของดินตัวอย่างจากระดับ midlayer ได้ผลว่า P_C = 300 kN/m^2

<u>ขั้นที่ 1</u> พิจารณาจำแนกชั้นดิน saturated clay ว่าจะต้องหา consolidation settlement (S_C) ในลักษณะ normally consolidated (NC) หรือ over-consolidated (OC) clay

P_0 = effective overburden effective stress at midlayer

= 171.1 kN/m^2 (จากขั้นที่ 4 ในข้อ 7.1)

< Pc ∴ คำนวณหา Sc ในแบบ OC clay นั่นคือ

ทั้งนี้ $P_0+\Delta P$ = 171.1 + 100 kN/m^2

< Pc ∴ คำนวณหา Sc ในแบบ OC clay เฉพาะในช่วง Re-compression นั่นคือ

$$S_C = \frac{C_S H}{1+e_0}\log\frac{P_0+\Delta P}{P_0}$$

<u>ขั้นที่ 2</u> พิจารณากำหนด แนวทางการวิเคราะห์หา S_C เหมือนขั้นที่ 2 ในข้อ 7.1

<u>ขั้นที่ 3</u> กำหนดคุณสมบัติของชั้นดิน clay ที่จะใช้ในการคำนวณหา S_C

γ_{sat}	=	17.1 kN / m^3	(given)
e_0	=	1.2	(given)
C_C	=	0.009 (LL – 10) when LL = 60	(given)
	=	0.009 (60-10) = 0.45	
C_S	=	(1/5) C_C = (1/5) (0.45) = 0.09	
H	=	10 m	

<u>ขั้นที่ 4</u> คำนวณหา P_0 และ ΔP ที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ S_C (ที่ระดับ midlayer ของชั้น clay)

ΔP	=	induced effective stress at midlayer = 100 kN/m^2
P_0	=	effective overburden effective stress at midlayer
	=	159.5 kN/m^2 (จากขั้นที่ 4 ในข้อ 7.1)

ขั้นที่ 5 คำนวณหา S_C ของชั้น OC clay เฉพาะในช่วง Re-compression

$$S_C = \frac{C_S H}{1+e_0}\log\frac{P_0+\Delta P}{P_0}$$

$$= \frac{0.09\,(10\,m)}{1+1.2}\log\frac{171.1+100\,kN/m^2}{171.1\,kN/m^2}$$

$$= 0.082 \text{ m}$$

$$= 82 \text{ mm}$$

7.3 กรณีที่ 3 หากผล consolidation test ของดินที่เก็บจาก midlayer ได้ผลว่า P_C = 180 kN/m^2

ขั้นที่ 1 พิจารณาจำแนกชั้นดิน saturated clay ว่าจะต้องหา S_C ในลักษณะ NC หรือ OC clay

P_0 = effective overburden effective stress at midlayer

= 171.1 kN/m^2 (จากขั้นที่ 4 ในข้อ 10.1)

< P_C ∴ คำนวณหา S_C ในแบบ OC clay

ทั้งนี้ $P_0+\Delta P$ = 171.1 + 100 kN/m^2

> P_C ∴ คำนวณหา S_C ในแบบ OC clay ทั้งช่วง Re-compression และ vergin compression นั่นคือ

$$S_C = \frac{C_S H}{1+e_0}\log\frac{P_C}{P_0}+\frac{C_c H}{1+e_0}\log\frac{P_0+\Delta P}{P_C}$$

ขั้นที่ 2 พิจารณากำหนด แนวทางการวิเคราะห์หา S_C เหมือนขั้นที่ 2 ในข้อ 7.1

ขั้นที่ 3 กำหนดคุณสมบัติของชั้นดิน clay ที่จะใช้ในการคำนวณหา S_C เหมือนขั้นที่ 3 ในข้อ 7.2

γ_{sat} = 17.1 kN / m^3 (given)

e_0 = 1.2 (given)

C_C = 0.009 (LL – 10) = 0.009 (60-10) = 0.45

C_S = (1/5) C_C = (1/5) (0.45) = 0.09

H = 10 m

ขั้นที่ 4 คำนวณหา P_0 และ ΔP ที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ S_C (ที่ระดับ midlayer ของชั้น clay)

ΔP = induced effective stress at midlayer = 100 kN/m^2

P_0 = 171.1 kN/m^2 (จากขั้นที่ 4 ในข้อ 10.1)

ขั้นที่ 5 คำนวณหา S_C ของชั้น OC clay ทั้งช่วง Re-compression และ vergin compression นั่นคือ

$$S_C = \frac{C_s H}{1+e_0}\log\frac{P_C}{P_0} + \frac{C_c H}{1+e_0}\log\frac{P_0+\Delta P}{P_C}$$

$$= \frac{0.09\,(10m)}{1+1.2}\log\frac{180\ kN/m^2}{171.1\ kN/m^2} +$$

$$\frac{0.45\,(10m)}{1+1.2}\log\frac{171.1+100\ kN/m^2}{180\ kN/m^2}$$

= 0.373 m

= 373 mm

B. คำนวณหาอัตราการเกิด (time rate) S_C สำหรับทั้ง 3 กรณี

ขั้นที่ 1 พิจารณากำหนด แนวทางการคำนวณหา time rate of consolidation settlement (S_C) ดังนี้

- เงื่อนไขการระบายน้ำออกจากเนื้อดิน (soil) ในชั้น saturated clay เป็นแบบ two-way
- $\therefore$ H_{dr} = ครึ่งหนึ่งของความหนาของชั้น saturated clay
  = H/2 = 10 m/2 = 5 m
- คิดว่าการกระจายตัว (distribution) ของ induced stress ในชั้น clay เป็นแบบเส้นตรง ดังนั้น สามารถหาค่า T_v @ U% ใดๆ เช่น 10, 20, ..., 90% ได้จากตารางที่ 8.1.1
- @ U% = 100, S_C ของแต่ละกรณี มีค่าเท่ากับ S_C ที่คำนวณได้ในข้อที่ 7.1 - 7.3

ขั้นที่ 2 พิจารณากำหนดคุณสมบัติของชั้นดิน clay ที่จะใช้ในการคำนวณหา time rate of S_C

C_v = $50x10^{-4}$ cm^2/s (given)

ขั้นที่ 3 เพื่อใช้ sketch times-S_C curve, คำนวณหาเวลา t ที่เกิด @ U% ต่างๆ เช่น 10, 20, ..., 90% นั่นคือ @ any U%

$$C_v = \frac{T_{v@U\%} H_{dr}^{\ 2}}{t_{@U\%}}$$

$$t_{@U\%} = \frac{T_{v@U\%} H_{dr}^{\ 2}}{C_v}$$

$$= \frac{T_{v@U\%} (500cm)^2}{50x10^{-4} cm^2/\sec} x \frac{1day}{24x60x60\sec}$$

= ค่า $t_{@U\%}$ ที่แสดงในตารางที่ 8.3.5

ขั้นที่ 4 เพื่อใช้ sketch times-S_C curve, คำนวณหา S_C ที่เกิด @ U% ต่างๆ เช่น 10, 20, ..., 90%

$$U\% = \frac{S_{t@U\%}}{S_C} x100\%$$

$$S_{t@U\%} = \frac{U\%}{100\%} x S_C$$

= ค่า $S_{t@U\%(7.1)}$ ที่แสดงในตารางที่ 8.3.5 สำหรับกรณีที่ 1

= ค่า $S_{t@U\%(7.2)}$ ที่แสดงในตารางที่ 8.3.5 สำหรับกรณีที่ 2

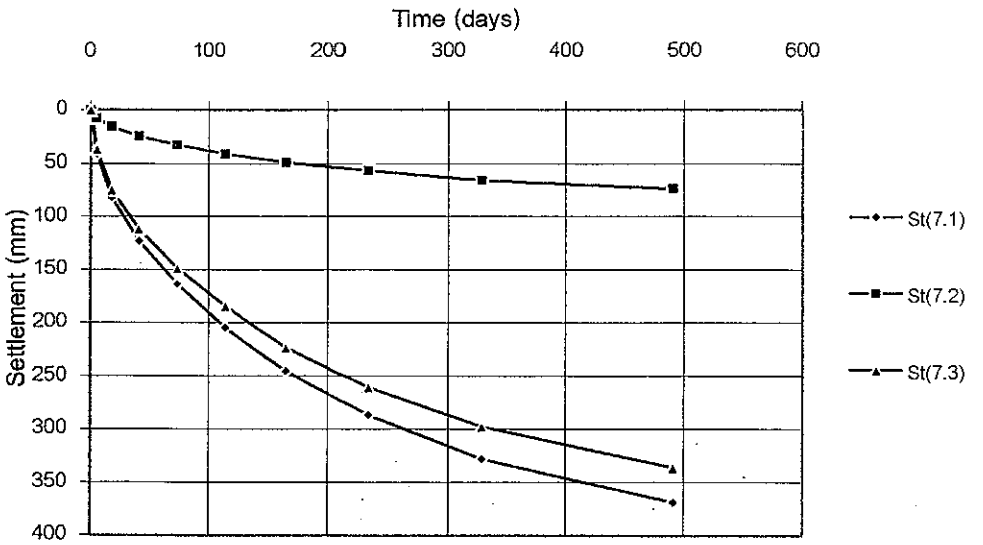
= ค่า $S_{t@U\%(7.3)}$ ที่แสดงในตารางที่ 8.3.5 สำหรับกรณีที่ 3

C. ทางโครงการ ควรออกแบบเผื่อสำหรับ S_C = 41 cm เพราะเป็นค่าที่อยู่ด้านปลอดภัย (conservative) สำหรับการใช้ P_C จากผลของ consolidation test

ตารางที่ 8.3.5 ตารางที่ 8.3.5 ค่า consolidation settlement สำหรับทั้ง 3 กรณี

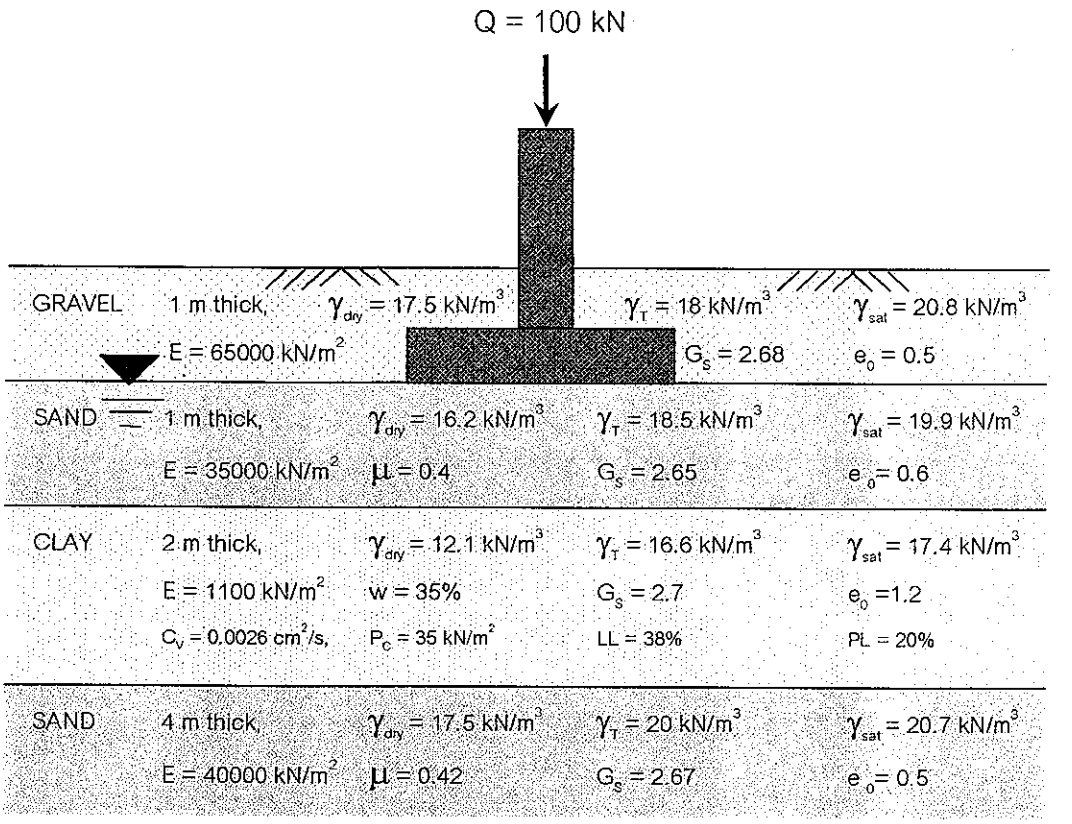
U%	$T_{v\ @U\%}$	$t_{@U\%}$ (days)	$S_{t\ (7.1)}$ (mm)	$S_{t\ (7.2)}$ (mm)	$S_{t\ (7.3)}$ (mm)
0	0	0	0	0	0
10	0.00785	5	41	8	37
20	0.0314	18	82	16	75
30	0.0707	41	123	25	112
40	0.126	73	164	33	149
50	0.197	114	205	41	187
60	0.286	166	246	49	224
70	0.403	233	287	57	261
80	0.567	328	328	66	298
90	0.848	491	369	74	336

<u>ขั้นที่ 5</u> sketch time-consolidation settlement curve



รูปที่ 8.3.8 Primary consolidation curve

8. โครงการก่อสร้างหอพัก "เดียงน่าน" ในพื้นที่ ต. ท่าโพธิ์ อ. เมือง จ. พิษณุโลก ออกแบบฐานรากเป็นแบบ square isolated footing ขนาด 1x1 ม^2 เพื่อรับน้ำหนักกระทำ Q = 100 kN ในฐานะนายช่างของทางโครงการ กรุณาคำนวณหา consolidation settlement



รูปที่ 8.3.9 ชั้นดินบริเวณโครงการ

<u>ขั้นที่1</u> พิจารณาจำแนกชั้นดิน saturated clay ว่าจะต้องหา S_C ในลักษณะ NC หรือ OC clay

P_C = 35 kN/m^2

P_0 = effective overburden effective stress at midlayer

= (1 m)($\gamma_{T\text{-1st sand}}$) + (1 m)($\gamma_{sat\text{-2 nd sand}} - \gamma_W$) + $\frac{2m}{2}$($\gamma_{sat\text{-clay}} - \gamma_W$)

= (1 m)(18 kN/m^3) + (1 m)(19.9 – 9.81) kN/m^3 + (1 m)(17.4 – 9.81) kN/m^3

= 35.7 kN/m^2

เพราะ $P_0 \sim P_C$ ดังนั้น คำนวณหา S_C ในแบบ NC clay นั่นคือ

$$S_C = \frac{C_C H}{1+e_0} \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0}$$

<u>ขั้นที่ 2</u> พิจารณากำหนด แนวทางการวิเคราะห์หา consolidation settlement (S_C) ดังนี้

- คิด S_C ที่ระดับ midlayer ของชั้น saturated clay
- คิดว่า induced stress มีการกระจายตัวเป็นแบบเส้นตรง (linear distribution) ในชั้น clay แต่ให้ประมาณ ΔP ที่ระดับ midlayer ของชั้น clay โดย

  $$\Delta P_{avg} = \frac{\Delta P_{top} + 4\Delta P_{mid} + \Delta P_{bottom}}{6}$$

- $\therefore$ จะคำนวณหา S_C โดยใช้ P_0 และ ΔP เฉพาะที่ระดับ midlayer ของชั้น clay

<u>ขั้นที่ 3</u> หาคุณสมบัติของชั้นดิน clay ที่จะใช้ในการคำนวณหา S_C

e_0 = $w G_S$
= (0.35) (2.7)
= 0.945

C_C = 0.009 (LL – 10) when LL = 38 (given)
= 0.009 (38-10)
= 0.252

H = 2 m

<u>ขั้นที่ 4</u> คำนวณหา P_0 และ ΔP ที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ S_c (ที่ระดับ midlayer ของชั้น clay)

P_0 = effective overburden effective stress at midlayer
= 35.7 kN/m^2 (จากขั้นที่ 1)

ΔP = $\Delta P_{avg} = \frac{\Delta P_{top} + 4\Delta P_{mid} + \Delta P_{bottom}}{6}$

โดย ΔP_{top}, ΔP_{mid}, และ ΔP_{bottom} หาได้ดังตารางที่ 8.3.6 โดยที่ m_1 = L/B = 1m/1m = 1

ตารางที่ 8.3.6 ค่า ΔP_{top}, ΔP_{mid}, และ ΔP_{bottom}

@ level	M	Z (m)	b=B/2 (m)	n_1=Z/b	q (kN/m^2)	I_4 (ตาราง)	$\Delta P=I_4 q$ (kN/m^2)
Top	1	1	0.5	2	100	0.336	33.6 = ΔP_{top}
Midlayer	1	2	0.5	4	100	0.108	10.8 = ΔP_{mid}
Bottom	1	3	0.5	6	100	0.051	5.1 = ΔP_{bottom}

ดังนั้น

$$\Delta P_{avg} = \frac{\Delta P_{top} + 4\Delta P_{mid} + \Delta P_{bottom}}{6}$$

$$= \frac{33.6\,kN/m^2 + 4(10.8\,kN/m^2) + 5.1\,kN/m^2}{6}$$

$$= 13.65 \quad kN/m^2$$

ขั้นที่ 5 คำนวณหา S_C ของชั้น NC clay

$$S_C = \frac{C_C H}{1+e_0} \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0}$$

$$= \frac{(0.252)(2m)}{1+1.2} \log \frac{(35.7+13.65)kN/m^2}{35.7\ kN/m^2}$$

= 0.032 m = 3.2 cm

8.4 โจทย์ทดสอบความสามารถในการนำความรู้ไปใช้ในการทำงานจริง

1. บริษัทวีระการโยธา ได้วางแผนการก่อสร้างหอพัก ซึ่ง induced external stress ที่กึ่งกลางของแต่ละชั้นดินที่รองรับหอพัก แสดงไว้พร้อมกับผลการเจาะสำรวจชั้นดิน ดังรูปที่ 8.4.1 ทั้งนี้ ผลจาก consolidation test แบบ two-way drainage ของตัวอย่างทดสอบหนา 25.4 mm. ที่เก็บจากกึ่งกลางชั้นดินเหนียว (midlayer of clay) พบว่า P_C = 148 kN/m^2, t_{50} = 5 นาที และได้ค่าของ pressure (P) กับ void ratio (e) ดังตารางที่ 8.4.1

SAND	3 m thick	γ_{dry} = 19.5 kN/m^3	γ_T = 22.4 kN/m^3	γ_{sat} = 22.6 kN/m^3
	G_S = 2.7	e_0 = 0.36	ΔP@ midlayer = 113 kN/m^2	w_n = 15 %
SAND	7 m thick	γ_{dry} = 18.3 kN/m^3	γ_T = 20.4 kN/m^3	γ_{sat} = 21.3 kN/m^3
	G_S = 2.7	e_0 = 0.45	ΔP@ midlayer = 107 kN/m^2	w_n = 16 %
CLAY	3 m thick,	γ_{dry} = 13.7 kN/m^3	γ_T = 18.0 kN/m^3	γ_{sat} = 18.3 kN/m^3
	C_s = 1/5 C_c	LL = 50%	PL = 30%	SL = 26%
	G_S = 2.65	e_0 = 0.9	ΔP@ midlayer = 73 kN/m^2	w_n = 30 %
SAND	15 m thick,	γ_{dry} = 19.6 kN/m^3	γ_T = 22.0 kN/m^3	γ_{sat} = 22.2 kN/m^3
	G_S = 2.7	e_0 = 0.35	ΔP@ midlayer = 17 kN/m^2	w_n = 16 %

รูปที่ 8.4.1 ผลการเจาะสำรวจชั้นดิน

ตารางที่ 8.4.1 ค่าของ pressure (P) กับ void ratio (e)

Pressure, P (kN/m^2)	Void ratio at the end of consolidation, e
145	0.90
218	0.84

ในฐานะวิศวกรของบริษัท กรุณาคำนวณหาปริมาณ consolidation settlement ที่จะเกิดตลอดช่วงอายุการใช้งานนาน 25 ปี ของหอพัก

<u>วิธีทำ</u>

ในการหาคำตอบว่า "ปริมาณ consolidation settlement (S_C) ที่จะเกิด ตลอดช่วงอายุการใช้งาน นาน 25 ปี ของหอพัก เป็นเท่าใด?" วิศวกรจะต้องสามารถคำนวณหา S_C ที่จะเกิดในชั้น saturated clay ณ เวลา 25 ปี หลังจากก่อสร้างหอพักแล้วเสร็จ นั่นคือ ทำการคำนวณ โดย 3 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

- คำนวณหา consolidation settlement (S_C) ทั้งหมดที่จะเกิดขึ้น จาก induced stress ที่เกิดจาก น้ำหนักกระทำจากหอพัก
- สร้าง Time-consolidation settlement curve
- หาค่า S_C ที่เวลา 25 ปี หลังจากเริ่มเกิด consolidation (หลังงานโครงสร้างแล้วเสร็จ) จาก Time-consolidation settlement curve

ทั้งนี้ รายการคำนวณ (calculation sheet) แสดงได้ดังนี้

<u>ขั้นตอนหลักที่ 1</u> คำนวณหา consolidation settlement (S_C)

<u>ขั้นที่1</u> พิจารณา consolidation settlement (S_C) ของ normally consolidated clay ดังนี้

- P_0 @ mid layer ของชั้น clay เท่ากับ 145 kN/m^2
- P_C จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการเท่ากับ 148 kN/m^2
- $P_0 \approx P_C$ ดังนั้น เป็น normally consolidated clay

<u>ขั้นที่2</u> พิจารณากำหนดลักษณะการวิเคราะห์ consolidation settlement (S_C) ดังนี้

- คิด consolidation settlement (S_C) ที่ mid layer ของชั้น clay
- คิดว่าการกระจาย (distribution) ของ Induce stress ในชั้น clay เป็นแบบเส้นตรง

ดังนั้น คำนวณหา P_0 และ ΔP ที่ mid layer

<u>ขั้นที่3</u> พิจารณาคุณสมบัติของ clay ที่จะใช้ในการคำนวณหา consolidation settlement (S_C) จากผลการทดลองนำมาหาค่า C_C จาก

$$C_C = \frac{\Delta e}{\log \frac{P_2}{P_1}}$$
$$= \frac{(0.90 - 0.84)}{\log \frac{218 kN/m^2}{145 kN/m^2}}$$
$$= 0.339$$

<u>ขั้นที่4</u> คำนวณหา P_0 และ ΔP ที่ mid layer ของชั้น clay เฉพาะที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์หา consolidation settlement (S_C)

- ΔP = 73 kN / m^2
- P_0 = 145 kN / m^2

<u>ขั้นที่5</u> คำนวณหา consolidation settlement (S_C) ที่ mid layer ของชั้น clay เนื่องจากเป็น normally consolidated clay

ดังนั้น $S_C = \frac{C_C H}{1+e_0} \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0}$

$$S_C = \frac{0.339\,(3.0m)}{1+0.9} \log \frac{218\ kN/m^2}{145\ kN/m^2}$$
$$= 0.0948\ \ m$$
$$= 94.8\ \ mm$$

ขั้นตอนหลักที่ 2 สร้าง time settlement curve

ขั้นที่ 1 วิเคราะห์หาค่า C_V ที่จะใช้ในการคำนวณหาเวลาที่ % consolidation ต่างๆ

จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แบบ two-way drainage พบว่า

t_{50} = 5 min

$H_{dr} = \frac{H}{2} = \frac{25.4\ mm}{2} 12.7\ mm$

T_{50} = 0.197 จากตารางที่ 8.1.1

$$C_V = \frac{T_{50} H_{dr}^{\ 2}}{t_{50}}$$

$$= \frac{0.197(12.7mm.)^2}{5\,\text{min.}}$$

$$= 6.355 \quad mm^2/\text{min}$$

ขั้นที่ 2 วิเคราะห์หาค่า T_V ที่จะใช้ในการคำนวณหาเวลาที่ % consolidation ต่างๆ

- ชั้น clay เป็นแบบ two-way drainage
  ดังนั้น H_{dr} = H/ 2 = 25.4 mm / 2 = 12.7 mm
- คิดว่าการกระจายตัว (distribution) ของ Induced stress ในชั้น clay เป็นแบบเส้นตรง

ดังนั้นใช้ค่า T_V ได้จากตารางที่ 8.1.1

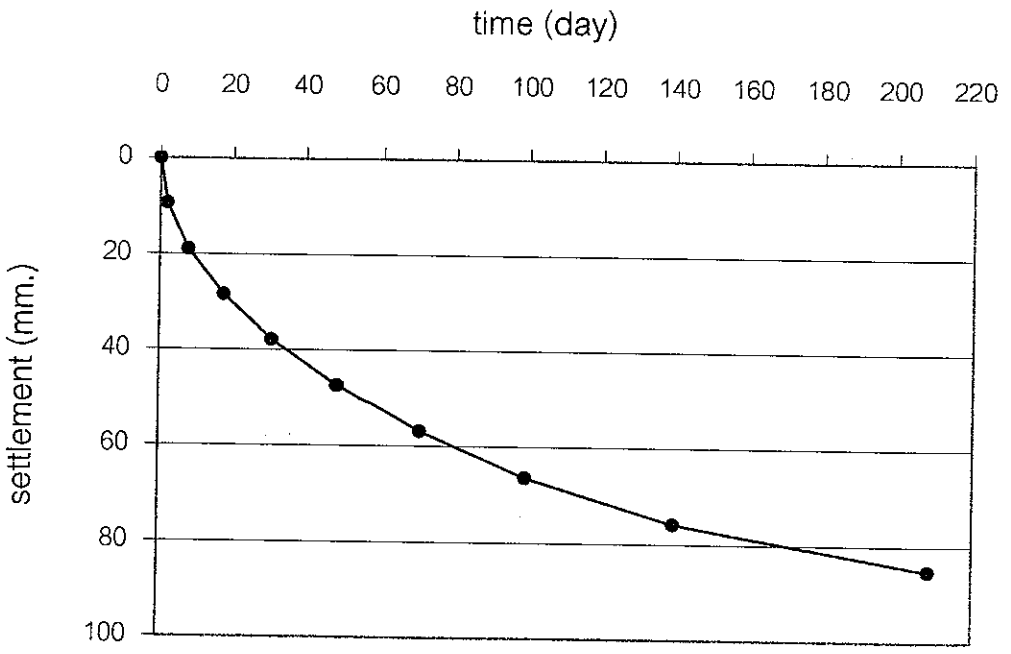
ขั้นที่ 3 วิเคราะห์หาค่า S_C ที่จะใช้ในการคำนวณหาเวลาที่ % consolidation ต่างๆ

S_C = 94.8 mm

<u>ขั้นที่4</u> สร้าง time settlement curve

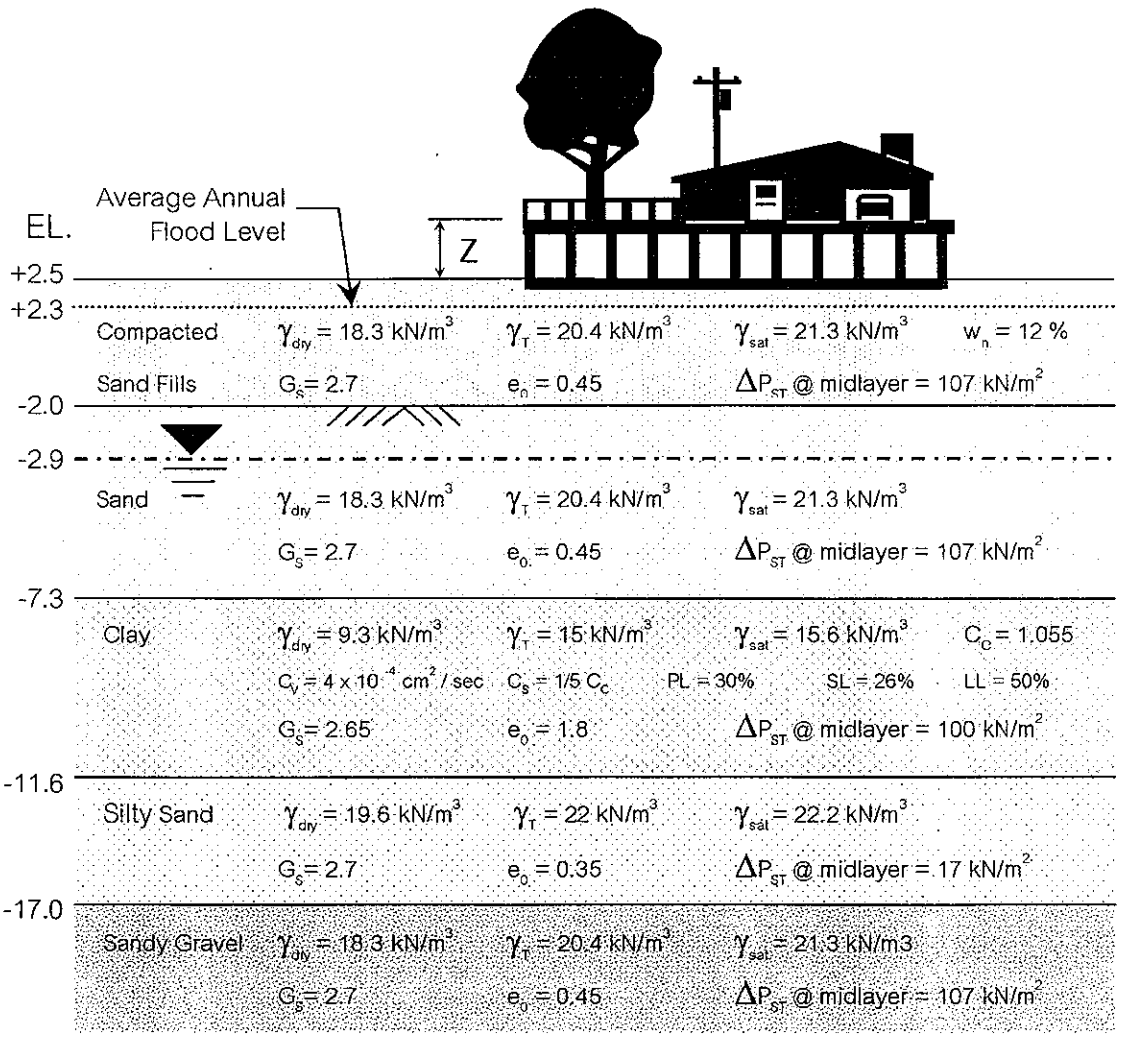
ตารางที่ 8.4.2 เวลาที่ % consolidation ต่างๆ

U (%)	T_v	$t_u=[(T_v)(H_{dr})^2] / C_v$ day	$S_u=(U)(S_c)$ (mm)
0	0	0	0
10	0.00785	1.93	9.48
20	0.0314	7.72	18.96
30	0.0707	17.38	28.44
40	0.126	30.98	37.92
50	0.197	48.44	47.40
60	0.286	70.32	56.88
70	0.403	99.08	66.40
80	0.567	139.41	75.80
90	0.848	208.5	85.32



รูปที่ 8.4.2 time settlement curve

2. บริษัท มานะ Turnkey Construction จำกัด ได้รับงานออกแบบและก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรร ที่สถาปนิกและเจ้าของโครงการได้ตกลงวางรูปแบบการก่อสร้างโครงการ ด้วยการใช้ฐานรากแผ่ (spread footing) วางบนชั้นทรายที่ถมและบดอัดทั่วทั้งโครงการ (compacted sand fills over large area) เพื่อรองรับโครงสร้างของอาคารแต่ละหลัง ที่ต้องการออกแบบโดยการยกระดับพื้นชั้นล่าง เพื่อเผื่อไว้สำหรับเลี่ยงน้ำท่วมในแต่ละปี (annual flood) ตามรายละเอียดแสดงได้ดังรูปที่ 8.4.3 พร้อมผลเจาะสำรวจชั้นดินบริเวณโครงการ



รูปที่ 8.4.3 ผลเจาะสำรวจชั้นดินบริเวณโครงการ

ในฐานะวิศวกรที่ปรึกษา กรุณาช่วยทางบริษัทหาคำตอบว่า จะต้องยกระดับพื้นชั้นล่าง (Z) ขึ้นจากระดับผิวบนของดินถม สูงเท่าใด? จึงจะไม่โดนน้ำท่วมตลอดอายุการใช้งาน 35 ปี โดยระดับน้ำท่วมในแต่ละปีมีค่าเฉลี่ย อยู่ที่ + 2.3 เมตร และผลจากน้ำหนักโครงสร้างของอาคารแต่ละหลังจะทำให้เกิด induced stress ที่กึ่งกลางของแต่ละชั้นดิน (ΔP_{ST} @ midlayer)

<u>วิธีทำ</u>

ในการหาคำตอบว่า จะต้องยกระดับพื้นชั้นล่าง (Z) ขึ้นจากระดับผิวบนของดินถม สูงเท่าใด ? จึงจะไม่โดนน้ำท่วมตลอดอายุการใช้งาน 35 ปี วิศวกรจะต้องสามารถคำนวณหา consolidation settlement ที่จะเกิดในชั้น saturated clay ณ เวลา 35 ปี หลังงานโครงสร้างแล้วเสร็จ นั่นคือ วิศวกรจะต้องคำนวณโดย 3 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

- คำนวณหา consolidation settlement (S_C) ทั้งหมดที่จะเกิดขึ้น จาก induced stress ที่เกิดจาก น้ำหนักกระทำจากโครงสร้าง และน้ำหนักกระทำจากทรายถมบดอัด
- สร้าง Time-consolidation settlement curve
- หาค่า S_C ที่เวลา 35 ปี หลังจากเริ่มเกิด consolidation (หลังงานโครงสร้างแล้วเสร็จ) จาก Time-consolidation settlement curve

ทั้งนี้ รายการคำนวณ (calculation sheet) แสดงได้ดังนี้

<u>ขั้นตอนหลักที่ 1</u> คำนวณหา consolidation settlement (S_C)

<u>ขั้นที่ 1</u> พิจารณา consolidation settlement (S_C) ของ overconsolidated clay ดังนี้

ที่กึ่งกลางชั้นclay ซึ่งอิ่มตัวด้วยน้ำ

P_0 = $(20.4\ kN/m^3)(0.9\ m) + (21.3 - 9.81)\ kN/m^3\ (4.4\ m) +$
$(15.6 - 9.81)\ kN/m^3(4.3\ m/2)$

= $81.4\ kN/m^2$

P_C = $100\ kN/m^2$

$P0 < P_C$ ดังนั้นเป็น overconsolidated clay

ขั้นที่2 พิจารณากำหนดลักษณะการวิเคราะห์ consolidation settlement (S_C) ดังนี้

- คิด consolidation settlement (S_C) ที่ mid layer ของชั้น clay
- คิดว่าการกระจายตัว (distribution) ของ Induce stress ในชั้น clay เป็นแบบเส้นตรง

ดังนั้น คำนวณหา P_0และ ΔP ที่ mid layer

ขั้นที่3 พิจารณาคุณสมบัติของชั้นดิน clay ที่จะใช้คำนวณหา consolidation settlement (S_C)

e_0 = 1.8

γ_T = 15 kN / m^2

C_C = 1.055

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

H = 4.3 m

ขั้นที่4 คำนวณหา P_0 และ ΔP ที่ mid layer ของชั้น clay เฉพาะที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์หา consolidation settlement (S_C)

P_0 = 81.4 kN / m^2

ΔP ได้จาก sand fill

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

ΔP = (20.4 kN/m^3)(4.5 m) = 91.8 kN/m^2

ขั้นที่5 คำนวณหา consolidation settlement (S_C) ที่ mid layer ของชั้น clay เนื่องจากเป็น overconsolidated clay

P_0 = 81.4 kN/m^2

P_C = 100 kN/m^2

ΔP = 91.8 kN / m^2

$P_0 + \Delta P$ = 173.2 kN / m^2 > P_C = 100 kN / m^2

ดังนั้น

$$S_C = \frac{C_s H}{1+e_0}\log\frac{P_C}{P_0} + \frac{C_c H}{1+e_0}\log\frac{P_0+\Delta P}{P_C}$$

$$= \frac{0.211\,(4.3m)}{1+1.8}\log 81.4\frac{100\ kN/m^2}{67.22\ kN/m^2} + \frac{1.055\,(4.3m)}{1+1.8}\log\frac{173.2\ kN/m^2}{100\ kN/m^2}$$

$$= 0.42 \quad m$$

$$= 42 \quad cm$$

<u>ขั้นตอนหลักที่ 2</u> สร้าง Time-settlement curve

<u>ขั้นที่ 1</u> วิเคราะห์หาค่า C_V ที่จะใช้ในการคำนวณหาเวลาที่ % consolidation ต่างๆ

- $C_V = 4 \times 10^{-4}$ cm^2 / sec

<u>ขั้นที่ 2</u> วิเคราะห์หาค่า T_V ที่จะใช้ในการคำนวณหาเวลาที่ % consolidation ต่างๆ

- ชั้น clay เป็นแบบ two-way drainage

  ดังนั้น H_{dr} = H/2 = 4.3 m / 2 = 2.15 m

- คิดว่าการกระจายตัว (distribution) ของ Induced stress ในชั้น clay เป็นแบบเส้นตรง

  ดังนั้นใช้ค่า T_V ได้จากตารางที่ 8.1.1

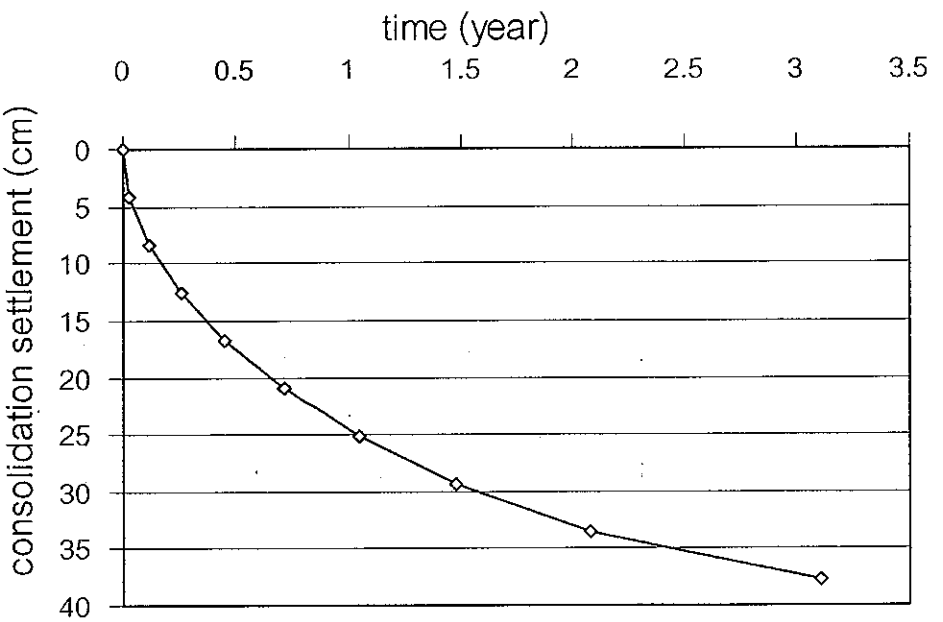
<u>ขั้นที่ 3</u> วิเคราะห์หาค่า S_Cที่จะใช้ในการคำนวณหาเวลาที่ % consolidation ต่างๆ

S_C = 42 cm

ขั้นที่4 **สร้าง** time settlement curve

ตารางที่ 8.4.3 **ค่าการยุบตัวและเวลาที่ใช้ในการยุบตัวที่** % consolidation **ต่างๆ**

U (%)	T_v	$t_{@U} = (T_v H_{dr}^2) / C_v$ (year)	$S_{t@U} = (U)(S_c)$ (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

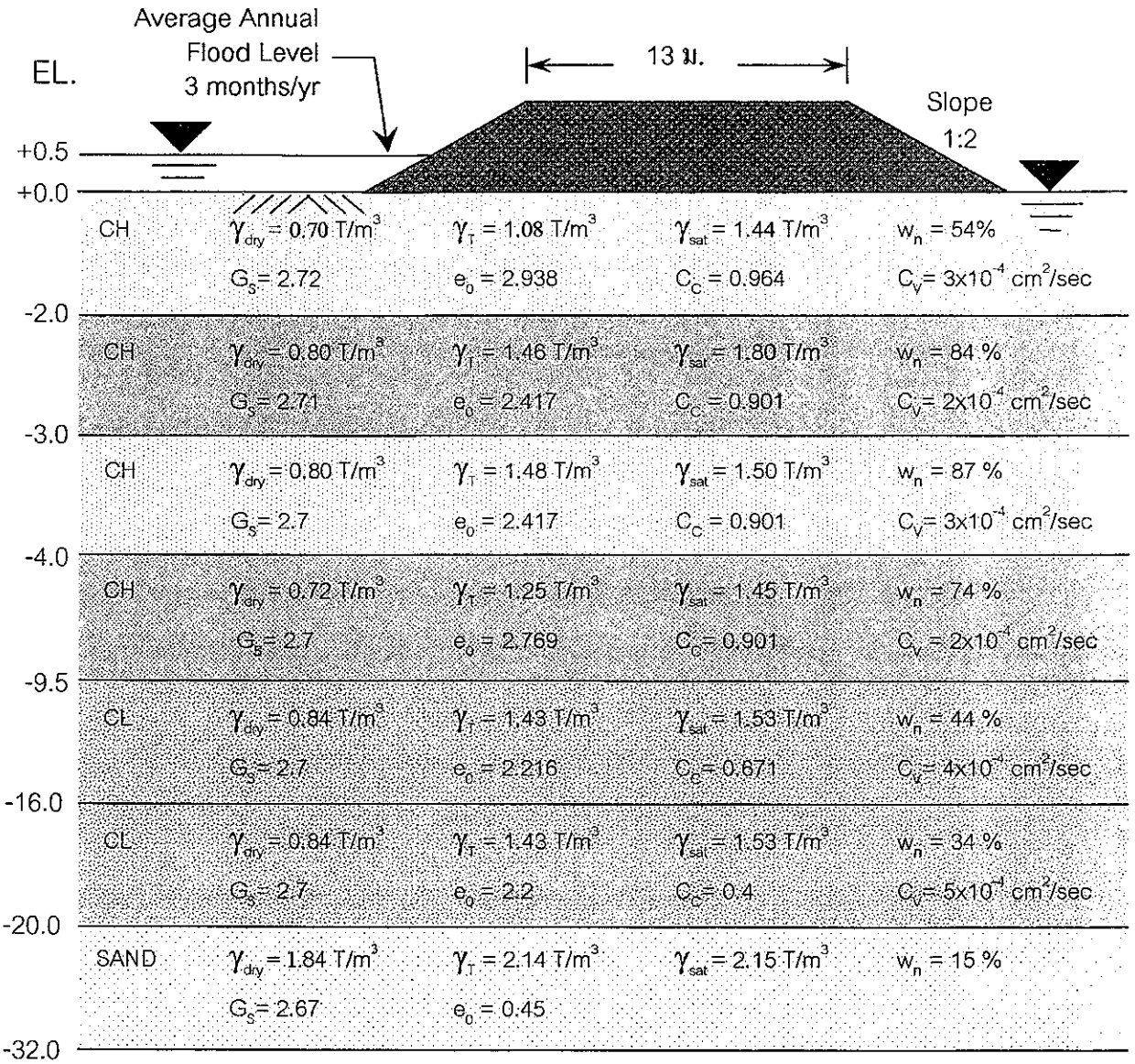


รูปที่ 8.4.4 Time-settlement curve

<u>ขั้นตอนหลักที่ 3</u> ถ้าน้ำท่วมที่ระดับ +2.3 เมตร ทุก ๆ ปี จะต้องยกพื้นชั้นล่างขึ้นเท่าใดจึงจะไม่โดนน้ำท่วม ตลอดอายุการใช้งาน 35 ปี

จากขั้นตอนหลักที่ 2 พบว่า t_{90} = 3.107 ปี และ S_{90} = 39 cm ซึ่งทางบริษัทถมดินหนีน้ำไปแล้ว 20 cm ดังนั้น ในฐานะวิศวกรของบริษัท มานะ construction แนะนำว่า ควรจะยกพื้นชั้นล่างอย่างน้อย เท่ากับ 39 cm - 20 cm = 19 cm บ้านจึงจะไม่โดนน้ำท่วมตลอดอายุการใช้งาน 35 ปี

3. แขวงการทางสมุทรปราการทำการปรับปรุงเส้นทางสายบางนา-บางปะกง ระยะทางยาวประมาณ 15 กม. โดยก่อสร้างคันทาง (embankment) ใหม่ ให้มีความสูง (รวมผิวทาง) หลังสิ้นสุดงานก่อสร้าง (H) หนา 1.5 ม. จากระดับดินเดิม ทั้งนี้ ผลการสำรวจชั้นดินรองรับคันทางพบว่าชั้นดินเหนียวใต้ดินคันทางทุกชั้นเป็น normally consolidated clay และมีคุณสมบัติตามสรุปดังรูปที่ 8.4.5



รูปที่ 8.4.5 ชั้นดินเหนียวใต้ดินคันทาง

ในฐานะวิศวกรที่ปรึกษาของโครงการ กรุณาให้คำแนะนำว่า อายุการใช้งาน (design life) ที่ใช้ออกแบบผิวทาง (surface) ควรเป็นเท่าใด?

<u>วิธีทำ</u>

ในการหาคำตอบว่า "อายุการใช้งาน (design life) ที่ใช้ออกแบบผิวทาง (surface) ควรเป็นกี่ปี?" ผู้ออกแบบต้องตระหนักว่า เพื่อไม่ให้ผิวทางถูกน้ำท่วมนานปีละ 3 เดือน ดังนั้น คันทาง (embankment) จะต้องถูกถมยกระดับครั้งใหม่ ทันทีที่คันทางเกิดการทรุดตัว (settlement) จนกระทั่งระดับผิวทาง (+1.5 ม.) เสมอกับระดับ annual flood level (+ 0.5 ม.) นั่นคือ จะต้องคำนวณหาเวลาที่เกิด consolidation settlement (S_c) = 1.5 - 0.5 = 1 ม. โดยใช้ 3 ขั้นตอนหลักดังนี้

- คำนวณหา consolidation settlement (S_c) ทั้งหมดที่จะเกิดขึ้น จาก induced stress ที่เกิดจาก น้ำหนักกระทำจาก embankment
- สร้าง Time-consolidation settlement curve
- ใช้ time-consolidation settlement curve อ่านค่าเวลา (หลังก่อสร้างแล้วเสร็จ) ที่เกิด S_c = 1 ม.

อนึ่ง ในการคำนวณ ไม่จำเป็นต้องหา initial or elastic settlement เพราะความหนา (H) 1.5 ม. เป็นการกำหนด ณ เวลาสิ้นสุดงานก่อสร้าง ซึ่ง elastic settlement ได้เกิดไปหมดแล้ว

ทั้งนี้ รายการคำนวณ (calculation sheet) แสดงได้ดังนี้

<u>ขั้นตอนหลักที่ 1</u> คำนวณหา consolidation settlement (S_c)

<u>ขั้นที่1</u> พิจารณา consolidation settlement (S_c) ของ normally consolidated clay ดังนี้

- $P_0 \approx P_c$ ดังนั้น เป็น normally consolidated clay

<u>ขั้นที่2</u> พิจารณากำหนดลักษณะการวิเคราะห์ consolidation settlement (S_c) ดังนี้

- คิด consolidation settlement (S_c) ที่ mid layer ของชั้น clay แต่ละชั้น

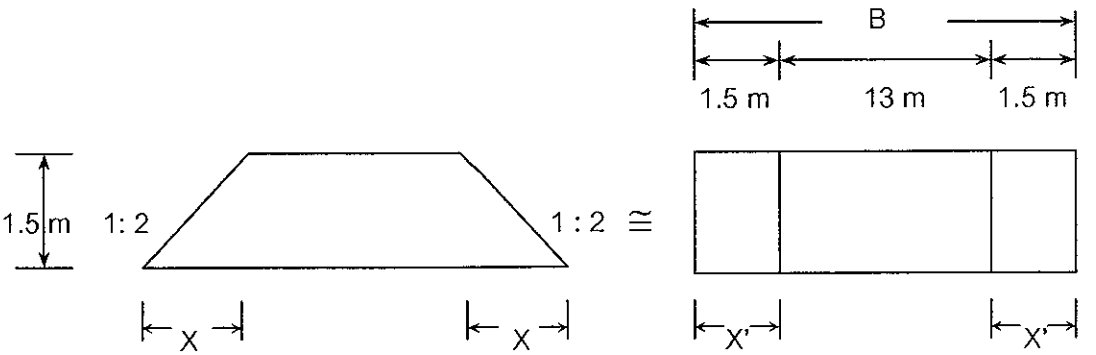
- คิดว่าการกระจายตัว (distribution) ของ Induce stress ในชั้น clay แต่ละชั้นเป็นแบบเส้นตรง
  ดังนั้น คำนวณหา P_0 และ ΔP ที่ mid layer ของชั้น clay แต่ละชั้น

ขั้นที่3 พิจารณาคุณสมบัติของ clay ที่จะใช้ในการคำนวณหา consolidation settlement (S_c)

e_0 ในแต่ละชั้นเป็นไปดังข้อมูลจากรูปข้างต้น

C_c ในแต่ละชั้นเป็นไปดังข้อมูลจากรูปข้างต้น

ขั้นที่4 คำนวณหา P_0 และ ΔP ที่ mid layer ของชั้น clay เฉพาะที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์หา consolidation settlement (S_c) ดินถมคันทางให้อยู่ในรูปของ strip load ก่อน



Strip Load

Y = 1.5 m

X = 2(1.5 m) = 3 m

จาก พื้นที่สามเหลี่ยมมุมฉาก = (1/2) x ฐาน x สูง

จะได้ (1/2)(3 m)(1.5 m) = X' (1.5 m)

X' = 1.5 m

$\therefore$ B = 16 m

จาก q = load per unit area

= (1.8 T/m^3)(1.5 m)

= 2.7 T/m^2

หาค่า ΔP/q ของ strip load จากตาราง

ตารางที่ 8.4.4 ค่า ΔP/q ของ strip load

ชั้น Clay	z (m)	2z/B	2X/B	ΔP/q	ΔP Tsm	P_0@ midlayer Tsm
1	1	0.125	0	0.999	2.697	0.44
2	2.5	0.312	0	0.988	2.668	1.25
3	3.5	0.438	0	0.970	2.619	1.93
4	6.75	0.844	0	0.867	2.341	3.64
5	12.75	1.594	0	0.644	1.739	6.16

<u>ขั้นที่5</u> คำนวณหา consolidation settlement (S_c) ที่ midlayer ของชั้น clay แต่ละชั้น

$$S_c = \sum S_{ci}$$

เนื่องจากเป็น normally consolidated clay

ดังนั้น $S_c = \dfrac{C_c H}{1+e_0} \log \dfrac{P_0 + \Delta P}{P_0}$

ตารางที่ 8.4.5 ค่า consolidation settlement (S_c) ที่ midlayer ของชั้น clay แต่ละชั้น

ชั้น clay	C_c	e_0	H (m)	P_0 (Tsm)	ΔP (Tsm)	$P_0 + \Delta P$ (Tsm)	S_c (m)
1	0.964	2.938	2	0.44	2.697	3.137	0.418
2	0.901	2.417	1	1.25	2.668	3.918	0.131
3	0.901	2.417	1	1.93	2.619	4.549	0.098
4	0.901	2.769	5.5	3.64	2.341	5.981	0.284
5	0.671	2.216	6.5	6.16	1.739	7.899	0.146

หมายเหตุ: เนื่องจาก clay ชั้นที่ 6 มีค่า C_c ต่ำมาก การเกิด S_c ของดินชั้นนี้จึงมีผลน้อยมาก ต่อการยุบตัวของคันทาง ดังนั้นจึงไม่คิด S_c ในชั้นนี้

จาก $S_c = \sum S_{ci}$

จะได้ $S_c = (0.418 + 0.131 + 0.098 + 0.284 + 0.146)$ m

$= 1.077$ m

<u>ขั้นตอนหลักที่ 2</u> สร้าง time settlement curve

<u>ขั้นที่ 1</u> วิเคราะห์หาค่า C_v ที่จะใช้ในการคำนวณหาเวลาที่ % consolidation ต่างๆ

หาค่า C_v average โดยวิธี weight average

$$C_{V\,ave} = \frac{\Sigma(H_i C_{Vi})}{\Sigma H_i} = 3x10^{-4}\,cm^2/\sec$$

<u>ขั้นที่ 2</u> วิเคราะห์หาค่า T_v ที่จะใช้ในการคำนวณหาเวลาที่ % consolidation ต่างๆ

ชั้น clay เป็นแบบ two-way drainage

$$H_{dr} = \frac{\Sigma H_i}{2}$$

ดังนั้น $$= \frac{(2+1+1+5.5+6.5)\,m}{2}$$

$$= 8 \quad m$$

กำหนดการกระจายตัว (distribution) ของ Induced stress ในชั้น clay เป็นแบบเส้นตรง ดังนั้นใช้ค่า T_v ได้จากตาราง 8.1.1

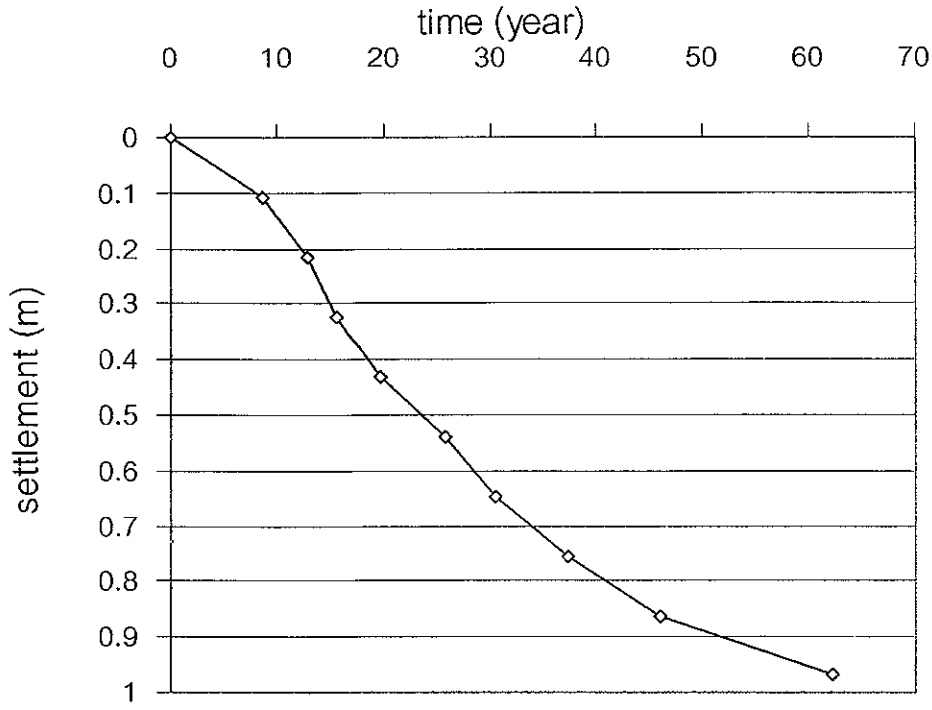
ขั้นที่ 3 วิเคราะห์หาค่า S_c ที่จะใช้ในการคำนวณหาเวลาที่ % consolidation ต่างๆ

S_c = 1.077 m

ขั้นที่4 สร้าง time settlement curve

ตารางที่ 8.4.6 ค่าการยุบตัวและเวลาที่ใช้ในการยุบตัวที่ % consolidation ต่างๆ

U(%)	T_v	$t=T_vH_{dr}^2/C_v$ (year)	$S_t=US_c$ (m)
0	0	0	0
10	0.13	8.79	0.108
20	0.19	12.85	0.215
30	0.23	15.56	0.323
40	0.29	19.62	0.431
50	0.38	25.71	0.538
60	0.45	30.44	0.646
70	0.55	37.21	0.754
80	0.68	46	0.862
90	0.92	62.24	0.969



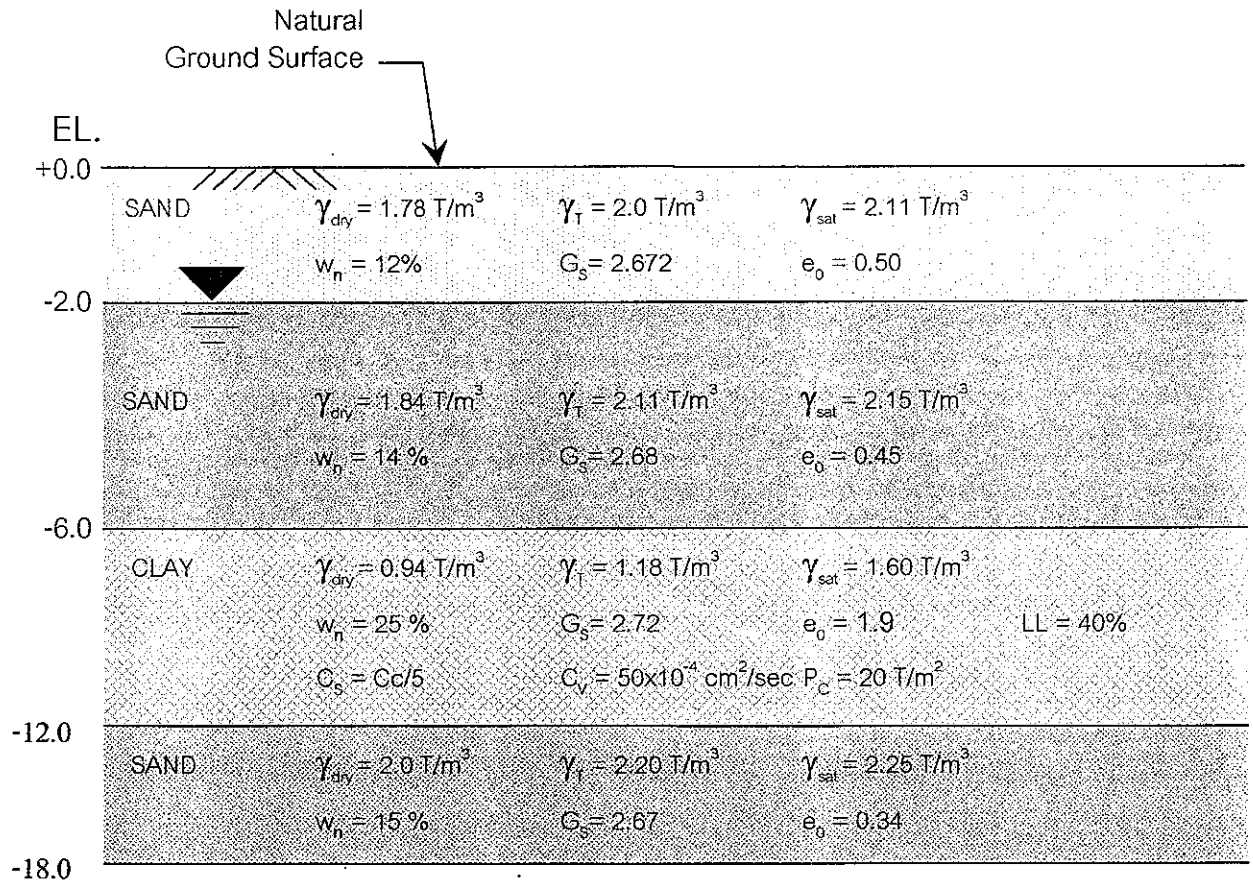
รูปที่ 8.4.7 time settlement curve

<u>ขั้นตอนหลักที่ 3</u> **ใช้** time settlement curve **อ่านค่าเวลาที่เกิด** S_c = 1 m

ปัจจุบันน้ำท่วมที่ระดับ 0.5 **เมตร จาก** ground surface **เหลืออีก** 1 **เมตร น้ำจะท่วมคันทาง จาก** time settlement curve **ดินจะยุบตัว** 1 **เมตรเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ** 63 **ปี ดังนั้น อีก** 63 **ปี น้ำจึงจะท่วมผิวคันทาง**

4. บริษัท ปีติการโยธา เจ้าของโครงการก่อสร้างอาคารพาณิชย์ ได้วางแผนถมดิน (γ_T = 1.8 T/m^3) ให้มีระดับหลังการถม สูงจากดินเดิม 1.5 ม. เป็นบริเวณกว้างทั่วทั้งโครงการ แล้วทิ้งไว้ 1 ปี ก่อนที่จะก่อสร้างอาคาร เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดระดับพื้นชั้นล่าง เจ้าของโครงการต้องการทราบว่า หลังจากถมดินนาน 1 ปีดังกล่าว ดินถมจะยุบตัวลงไปทั้งหมดเท่าใด?

ทั้งนี้ ผลการสำรวจชั้นดิน พบว่าชั้นดิน มีลักษณะดังรูปที่8.4.8 ในฐานะวิศวกรที่ปรึกษา กรุณาหาคำตอบดังกล่าวให้กับทางบริษัท



รูปที่ 8.4.8 ผลการสำรวจชั้นดิน

<u>วิธีทำ</u>

เพื่อหาคำตอบว่า "หลังจากถมดิน (γ_T = 1.8 T/m^3) สูงจากระดับดินเดิม 1.5 ม. เป็นบริเวณกว้างทั่วทั้งโครงการ นาน 1 ปี ดินถมจะยุบตัวลงไปทั้งหมดเท่าใด?" ผู้ออกแบบควรเข้าใจว่า

1. การยุบตัวของดินถมทั้งหมด มีค่าเท่ากับ consolidation settlement (S_c) ที่เกิดในชั้น saturated clay
2. อนึ่ง ในการคำนวณ ไม่จำเป็นต้องหา initial or elastic settlement เพราะระดับหลังการถม สูงจากดินเดิม 1.5 ม. เป็นการกำหนด ณ เวลาสิ้นสุดงานก่อสร้าง ซึ่ง elastic settlement ได้เกิดไปหมดแล้ว

นั่นคือ หาคำตอบได้ โดยการคำนวณหา S_c ที่เวลา 1 ปี หลังจากการถมดิน ซึ่งทำได้โดยใช้ 3 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

- คำนวณหา consolidation settlement (S_c) ทั้งหมดที่จะเกิดขึ้น จาก induced stress ที่เกิดจาก น้ำหนักดินถม
- สร้าง Time-consolidation settlement curve
- ใช้ time-consolidation settlement curve อ่านค่า S_c ที่เกิด ณ เวลา 1 ปี หลังจากการถมดิน

ทั้งนี้ รายการคำนวณ (calculation sheet) แสดงได้ดังนี้

<u>ขั้นตอนหลักที่ 1</u> คำนวณหา consolidation settlement (S_c)

<u>ขั้นที่ 1</u> พิจารณา consolidation settlement (S_c) ของ overconsolidated clay ดังนี้

ที่กึ่งกลางชั้นclay ซึ่งอิ่มตัวด้วยน้ำ

P_0 = (2m)($\gamma_{T\,(sand)}$) + (4m)($\gamma_{sat\,(sand)} - \gamma_w$) + (6/2)m ($\gamma_{saty(clay)} - \gamma_w$)

= (2m)(2.0T/m^3) + (4m)(2.15-1)T/m^3 + (3m)(1.6-1)T/m^3

= 10.4 T/m^3

P_c = 20 kN/m^2

P_0 < P_c ดังนั้นเป็น overconsolidated clay

ขั้นที่2 พิจารณากำหนดลักษณะการวิเคราะห์ consolidation settlement (S_c) ดังนี้

- คิด consolidation settlement (S_c) ที่ mid layer ของชั้น clay
- คิดว่าการกระจายตัว (distribution) ของ Induce stress ในชั้น clay เป็นแบบเส้นตรง ดังนั้น คำนวณหา P_0 และ ΔP ที่ mid layer

ขั้นที่3 พิจารณาคุณสมบัติของชั้นดิน clay ที่ใช้ในการคำนวณ consolidation settlement (S_c)

$e_0 = 1.90$

LL =40

$C_c = 0.009 (LL - 10)$

$= 0.009 (40 - 10)$

$=0.27$

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

$H = 6$ m

ขั้นที่4 คำนวณหา P_0 และ ΔP ที่ mid layer ของชั้น clay เฉพาะที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์หา consolidation settlement (S_c)

- $P_0 = 10.4 \text{ T} / \text{m}^2$
- $\Delta P = 2.7 \text{ T} / \text{m}^2$

ขั้นที่5 คำนวณหา consolidation settlement (S_c) ที่ mid layer ของชั้น clay

เนื่องจากเป็น overconsoliidated clay

$P_0 = 10.4 \text{ T} / \text{m}^2$

$P_c = 20 \text{ T} / \text{m}^2$

$\Delta P = 2.7 \text{ T} / \text{m}^2$

$P_0 + \Delta P = 13.1 \text{ T} / \text{m}^2 < P_c = 20 \text{ T} / \text{m}^2$

ดังนั้น

$$S_C = \frac{C_S H}{1+e_0} \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0}$$
$$= \frac{0.054\,(6m)}{1+1.9} \log \frac{13.1\,T/m^2}{10.4\,T/m^2}$$
$$= 0.012 \quad m$$
$$= 12 \quad mm$$

<u>ขั้นตอนหลักที่2</u> สร้าง time settlement curve

<u>ขั้นที่ 1</u> วิเคราะห์หาค่า C_v ที่จะใช้ในการคำนวณหาเวลาที่ % consolidation ต่างๆ

หาค่า C_v average โดยวิธี weight average

$$C_v = 50x10^{-4}\,cm^2/\text{sec}$$

<u>ขั้นที่ 2</u> วิเคราะห์หาค่า T_v ที่จะใช้ในการคำนวณหาเวลาที่ % consolidation ต่างๆ

ชั้น clay เป็นแบบ two-way drainage

$$H_{dr} = \frac{H}{2}$$
$$= \frac{6m}{2}$$
$$= 3 \quad m$$

กำหนดการกระจายตัว (distribution) ของ Induced stress ในชั้น clay เป็นแบบเส้นตรง ดังนั้นใช้ค่า T_v ได้จากตาราง 8.1.1

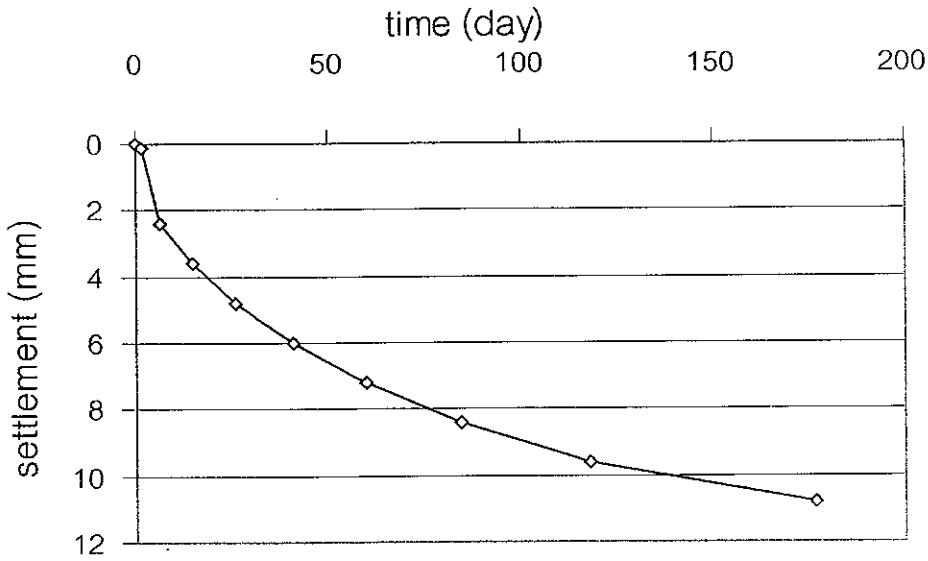
<u>ขั้นที่ 3</u> วิเคราะห์หาค่า S_c ที่จะใช้ในการคำนวณหาเวลาที่ % consolidation ต่างๆ

S_c = 12 mm

ขั้นที่4 สร้าง time settlement curve

ตารางที่ 8.4.7 ค่าการยุบตัวและเวลาที่ใช้ในการยุบตัวที่ % consolidation ต่างๆ

U(%)	T_v	$t=T_vH_{dr}^2/C_v$ (day)	$S_t=US_c$ (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

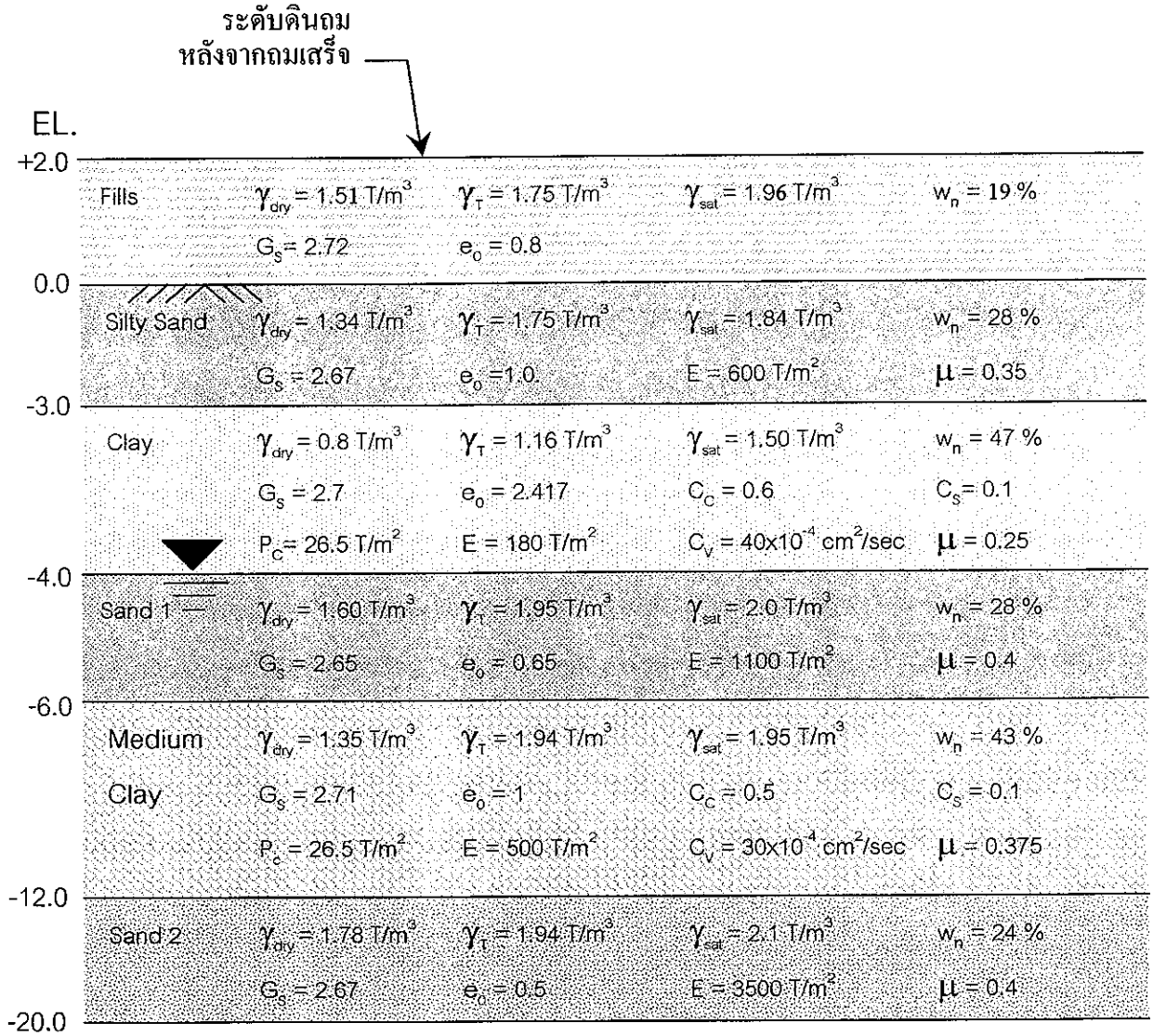


รูปที่ 8.4.9 time settlement curve

<u>ขั้นตอนหลักที่ 3</u> ใช้ time settlement curve อ่านค่า settlement เมื่อเวลาผ่านไป 1 ปี

จากกราฟ เมื่อเวลาผ่านไป 6 เดือน ดินจะยุบตัวประมาณ 1.2 cm หลังจาก 6 เดือนถือว่ายุบตัวน้อยมาก ดังนั้น เมื่อเวลาผ่านไป 1 ปี ดินจะยุบตัวประมาณ 1.2 cm ซึ่งน้อยมาก

5. ในฐานะวิศวกรโยธาของบริษัทรับเหมาก่อสร้าง โรงงานบรรจุผลไม้กระป๋อง ท่านได้รับมอบหมายให้กรุณาช่วยคำนวณหาปริมาณการทรุดตัว (settlement) ณ เวลา 5 ปี หลังจากถมดินสูง 2 เมตร จากดินเดิม (หลังสิ้นสุดการถม) เป็นบริเวณกว้างทั่วทั้งโครงการ ดังรูปที่ 8.4.10



รูปที่ 8.4.10 ผลการสำรวจชั้นดิน

<u>วิธีทำ</u>

ในการหาคำตอบว่า "ปริมาณการทรุดตัว (settlement) ณ เวลา 5 ปี หลังจากถมดินสูง 2 เมตร จากดินเดิม (หลังสิ้นสุดการถม) เป็นบริเวณกว้างทั่วทั้งโครงการ เป็นเท่าใด?" ผู้ออกแบบควรตระหนักว่า

1. การยุบตัวของดินถมทั้งหมด มีค่าเท่ากับ consolidation settlement (S_c) ที่เกิดขึ้นเฉพาะในชั้น saturated medium clay ที่แทรกอยู่ระหว่างชั้น sand 1 และ sand 2
2. ไม่คิด S_c ในชั้น unsaturated clay ที่แทรกอยู่ระหว่างชั้น silty sand และ sand 1 เพราะ consolidation process จะเกิดเฉพาะในชั้นดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำ เท่านั้น
3. อนึ่ง ในการคำนวณ ไม่จำเป็นต้องหา initial or elastic settlement เพราะระดับหลังการถม สูงจากดินเดิม 1.5 ม. เป็นการกำหนด ณ เวลาสิ้นสุดงานก่อสร้าง ซึ่ง elastic settlement ได้เกิดไปหมดแล้ว

นั่นคือ หาคำตอบได้ โดยการคำนวณหา S_cที่เวลา 5 ปี หลังจากการถมดิน ซึ่งทำได้โดยใช้ 3 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

- คำนวณหา consolidation settlement (S_c) ทั้งหมดที่จะเกิดขึ้น จาก induced stress ที่เกิดจาก น้ำหนักดินถม
- สร้าง Time-consolidation settlement curve
- ใช้ time-consolidation settlement curve อ่านค่า S_c ที่เกิด ณ เวลา 5 ปี หลังจากการถมดิน

ทั้งนี้ รายการคำนวณ (calculation sheet) แสดงได้ดังนี้

<u>ขั้นตอนหลักที่ 1</u> คำนวณหา consolidation settlement (S_c)

<u>ขั้นที่ 1</u> พิจารณา consolidation settlement (S_c) ของ overconsolidated clay ดังนี้

ที่กึ่งกลางชั้นclay ซึ่งอิ่มตัวด้วยน้ำ

$$P_0 = 3\ m\ (\gamma_{T(silty\ and)}) + (1\ m)(\gamma_{T(clay)}) + (2\ m)(\gamma_{sat(sand)} - \gamma_w) + \left(\frac{6\ m}{2}\right)(\gamma_{sat(clay)} - \gamma_w)$$

$$= (3\ m)(1.75\ T/m^3) + (1\ m)(1.16\ T/m^3) + (2\ m)\ (2-1)\ T/m^3$$

$$+ (3\ m)\ (1.95-1)\ T/m^3$$

$$= 11.3\quad T/m^3$$

P_c = 26. 5 T/ m^2

$P_0 < P_c$ ดังนั้น เป็น overconsolidated clay

<u>ขั้นที่2</u> พิจารณากำหนดลักษณะการวิเคราะห์ consolidation settlement (S_c) ดังนี้

- คิด consolidation settlement (S_c) ที่ mid layer ของชั้น clay
- คิดว่าการกระจายตัว (distribution) ของ Induce stress ในชั้น clay เป็นแบบเส้นตรง ดังนั้น คำนวณหา P_0 และ ΔP ที่ mid layer

<u>ขั้นที่3</u> พิจารณาคุณสมบัติของชั้นดิน clay ที่ใช้ในการคำนวณ consolidation settlement (S_c)

e_0 = 1

γ_{sat} = 1.95 T / m^2

C_c = 0.5

C_s = **0.1**

H = 6 m

<u>ขั้นที่4</u> คำนวณหา P_0 และ ΔP ที่ mid layer ของชั้น clay เฉพาะที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์หา consolidation settlement (S_C)

P_0 = 16.5 T / m^2

$\Delta p = \gamma_{T(\text{ดินถม})} H$

= (1.75 T/m^3) (2m)

= 3.5 T/ m^2

<u>ขั้นที่5</u> คำนวณหา consolidation settlement (S_C) ที่ mid layer ของชั้น clay

เนื่องจากเป็น overconsoliidated clay

P_0 = 11.3 T / m^2

P_C = 26.5 T/ m^2

ΔP = 3.5 T/ m^2

$P_0 + \Delta P$= 14.8 T / m^2 < P_C = 26.5 T / m^2

ดังนั้น

$$S_C = \frac{C_S H}{1+e_0} \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0}$$

$$S_C = \frac{0.1(4m)}{1+1} \log \left(\frac{11.3\ T/m^2 + 3.5 T/m^2}{11.3 T/m^2} \right)$$

$$S_C = 0.035 \quad m$$

$$= 3.5 \quad cm$$

<u>ขั้นตอนหลักที่ 2</u> สร้าง Time-settlement curve

<u>ขั้นที่ 1</u> วิเคราะห์หาค่า C_Vที่จะใช้ในการคำนวณหาเวลาที่ % consolidation ต่างๆ

- $C_V = 30 \times 10^{-4}$ cm^2 / sec

<u>ขั้นที่ 2</u> วิเคราะห์หาค่า T_V ที่จะใช้ในการคำนวณหาเวลาที่ % consolidation ต่างๆ

- ชั้น clay เป็นแบบ two-way drainage

  ดังนั้น H_{dr} = H/2 = 6 m / 2 = 3 m

- คิดว่าการกระจายตัว(distribution) ของ Induced stress ในชั้นclay เป็นแบบเส้นตรง
  ดังนั้นใช้ค่า T_v ได้จากตาราง 8.1.1

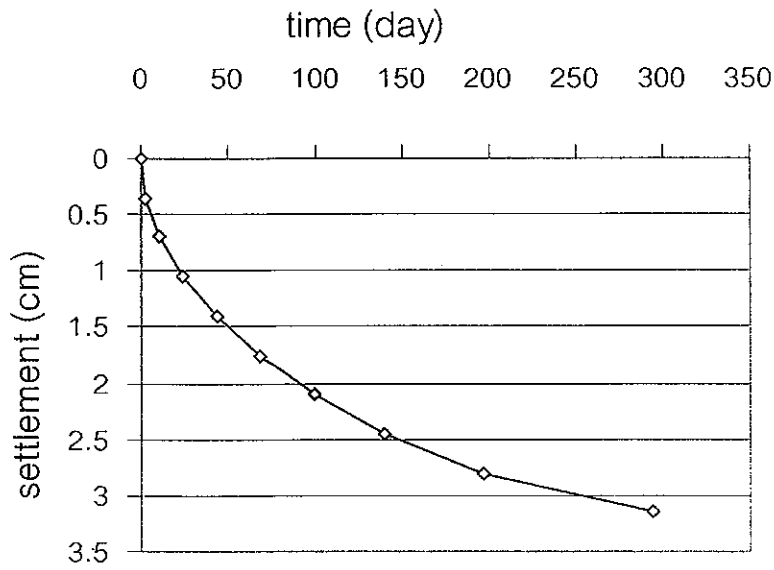
ขั้นที่ 3 วิเคราะห์หาค่า S_c ที่จะใช้ในการคำนวณหาเวลาที่ % consolidation ต่างๆ

S_c = 3.5 cm

ขั้นที่ 4 สร้าง time settlement curve

ตารางที่ 8.4.8 ค่าการยุบตัวและเวลาที่ใช้ในการยุบตัวที่ % consolidation ต่างๆ

U(%)	T_v	$t=T_vH_{dr}^2/C_v$ (วัน)	$S_t=US_c$ (cm)
0	0	0	0
10	0.00785	2.7	0.35
20	0.0314	10.9	0.70
30	0.0707	24.5	1.05
40	0.126	43.8	1.40
50	0.197	68.4	1.75
60	0.286	99.3	2.10
70	0.403	139.9	2.45
80	0.567	196.9	2.80
90	0.848	294.4	3.15



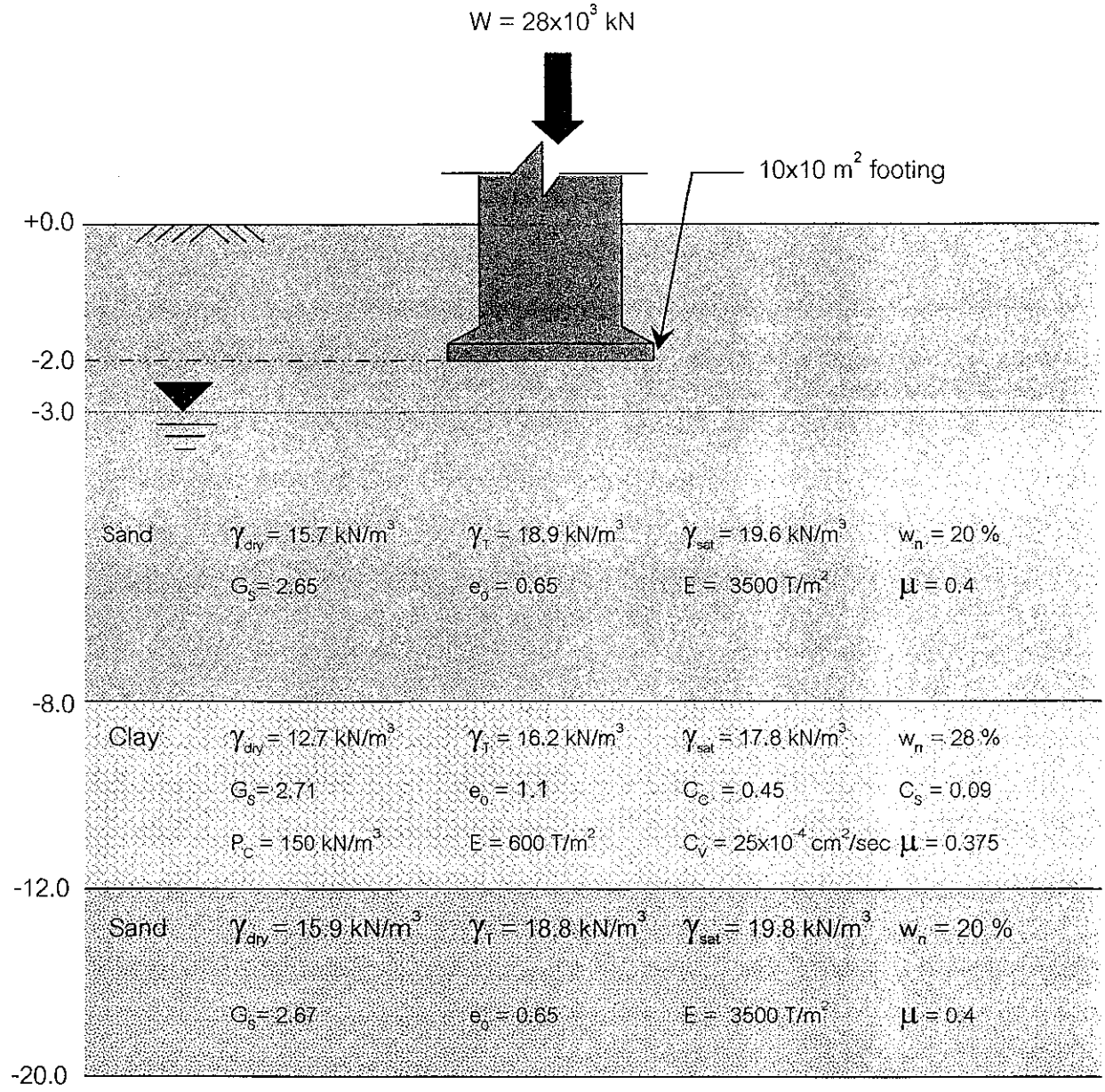
รูปที่ 8.4.11 Time settlement curve โดยที่ $S_i = 0$

<u>ขั้นตอนหลักที่ 3</u> ใช้ time settlement curve อ่านค่า settlement เมื่อเวลาผ่านไป 5ปี

จากกราฟ เมื่อเวลาผ่านไป 10 เดือน ดินจะยุบตัวประมาณ 4 cm หลังจาก 10 เดือนถือว่ายุบตัวน้อยมาก ดังนั้น เมื่อเวลาผ่านไป 5 ปี ดินจะยุบตัวประมาณ 4 cm ซึ่งน้อยมาก

6. วิศวกรผู้ออกแบบโครงสร้าง พบว่าตอม่อรองรับ girder สะพานข้ามแม่น้ำน่าน ช่วงทางลาดต้องสามารถรับน้ำหนัก (w) ให้ได้ $28x10^3$ kN (รวมน้ำหนักของ footing แล้ว) ซึ่งวิศวกรฐานรากได้พิจารณาเลือกออกแบบเป็นฐานรากตื้น (shallow foundation) แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $10x10$ m^2 เพื่อถ่ายแรงลงสู่ชั้นดินที่รองรับดังรูปที่ 8.4.12

เพื่อวางแผนงานซ่อมบำรุงทางลาดเชื่อมช่วงถนน-คอสะพาน ทางโครงการได้มอบหมายให้ท่าน ช่วยกรุณาประมาณหาการทรุดตัวของ footing ณ เวลา 5, 10, 15, และ 20 ปี หลังจากก่อสร้าง footing แล้วเสร็จ



รูปที่ 8.4.12 **ผลการสำรวจชั้นดิน**

<u>**วิธีทำ**</u>

เพื่อหาคำตอบว่า "การทรุดตัวของ footing **ณ เวลา** 5, 10, 15, **และ** 20 **ปี หลังจากก่อสร้าง** footing **แล้วเสร็จ เป็นเท่าใด?" ผู้ออกแบบ จะต้องดำเนินการคำนวณ โดยมีเงื่อนไขว่า**

1. **การทรุดตัวทั้งหมด** (total settlement) **ของ** footing **มีค่าเท่ากับ** consolidation settlement (S_C) **ที่เกิดในชั้น** saturated clay

2. ในการคำนวณ ไม่จำเป็นต้องหา initial or elastic settlement เพราะคำถามคือ "การทรุดตัวของ footing หลังจากก่อสร้าง footing แล้วเสร็จ" ซึ่ง elastic settlement ได้เกิดหมดไปแล้ว

นั่นคือ หาคำตอบโดยคำนวณหา S_c ที่เวลา 5, 10, 15, และ 20 ปี หลังจากก่อสร้าง ซึ่งทำได้โดยใช้ 3 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

- คำนวณหา consolidation settlement (S_c) ทั้งหมดที่จะเกิดขึ้น จาก induced stress ที่เกิดจาก น้ำหนักที่ถ่ายลง footing (w)
- สร้าง Time-consolidation settlement curve
- ใช้ time-consolidation settlement curve อ่านค่า S_c ที่เวลา 5, 10, 15, และ 20 ปี

ทั้งนี้ รายการคำนวณ (calculation sheet) แสดงได้ดังนี้

<u>ขั้นตอนหลักที่ 1</u> คำนวณหา consolidation settlement (S_c)

<u>ขั้นที่1</u> พิจารณา consolidation settlement (S_c) ของ overconsolidated clay ดังนี้
ที่กึ่งกลางชั้นclay ซึ่งอิ่มตัวด้วยน้ำ

$$P_0 = (3\ m)(\gamma_{T\,(sand)}) + (5\ m)(\gamma_{sat\,(sand)} - \gamma_W) + \left(\frac{4\ m}{2}\right)(\gamma_{sat\,(clay)} - \gamma_W)$$

$$= (3\ m)(18.9\ kN/m^3) + (5m)(19.6 - 9.81)\ kN/m^3 + (2m)(17.8 - 9.81)kN/m^3$$

$$= 121.6 \quad kN/m^2$$

P_c = 150 kN / m^2

$P_0 < P_c$ ดังนั้นเป็น overconsolidated clay

<u>ขั้นที่2</u> พิจารณากำหนดลักษณะการวิเคราะห์ consolidation settlement (S_c) ดังนี้

- คิด consolidation settlement (S_c) ที่ mid layer ของชั้น clay
- คิดว่าการกระจายตัว (distribution) ของ Induce stress ในชั้น clay เป็นแบบเส้นตรง
  ดังนั้น คำนวณหา P_0 และ ΔP ที่ mid layer

ขั้นที่3 **พิจารณาคุณสมบัติของชั้นดิน clay ที่ใช้ในการคำนวณ** consolidation settlement (S_c)

$e_0 = 1.1$

$\gamma_{sat} = 17.8\ kN / m^2$

$C_c = 0.45$

$C_s = 0.009$

$H = 4\ m$

ขั้นที่4 **คำนวณหา** P_0 **และ** ΔP **ที่** mid layer **ของชั้น** clay **เฉพาะที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์หา** consolidation settlement (S_c)

$P_0 = 121.6\ kN / m^2$

$$\Delta P_{ave} = \frac{\Delta P_{top} + 4\Delta P_{mid} + \Delta P_{bottom}}{6}$$

$m_1 = L/B = 1$

$q = W/A = (28 \times 10^3\ kN) / (10\ m \times 10\ m) = 280\ kN/m^2$

ตารางที่ 8.4.9 **ค่า** ΔP **ที่** mid layer **ของชั้น** clay

m_1	z (m)	b=B/2	$n_1 = z/b$	q (kN/m^2)	I_4 (**จากตาราง**)	$\Delta P = qI_4$ (kN/m^2)
1	8	5	1.6	280	0.449	125.72(top)
1	10	5	2.0	280	0.336	94.08(mid)
1	12	5	2.4	280	0.273	76.44(bottom)

$\Delta P_{ave} = [125.72 kN/m^2 + 4(94.08 kN/m^2) + 76.44\ kN/m^2)]/6$

$= 96.41\ kN/m^2$

ขั้นที่5 **คำนวณหา** consolidation settlement (S_c) **ที่** mid layer **ของชั้น** clay

เนื่องจากเป็น overconsoliidated clay

$P_0 = 121.6\ kN / m^2$

P_c = 150 kN / m^2

ΔP= 96.4 kN / m^2

$P_0 + \Delta P$ = 218 kN / m^2 > P_c = 150 kN / m^2

ดังนั้น

$$S_C = \frac{C_s H}{1+e_0}\log\frac{p_C}{p_0} + \frac{C_C H}{1+e_0}\log\left(\frac{p_0+\Delta p}{p_C}\right)$$

$$= \frac{0.009(4\,m)}{1+1.1}\log\left(\frac{150\,kN/m^2}{121.6\,kN/m^2}\right) + \frac{0.45(4m)}{1+1.1}\log\left(\frac{121.6\,kN/m^2 + 96.4\,kN/m^2}{150\,kN/m^2}\right)$$

$$= 0.155 \quad m$$

$$= 15.5 \quad cm$$

ขั้นตอนหลักที่ 2 สร้าง Time-settlement curve

ขั้นที่ 1 วิเคราะห์หาค่า C_Vที่จะใช้ในการคำนวณหาเวลาที่ % consolidation ต่างๆ

- $C_V = 25 \times 10^{-4}$ cm^2 / sec

ขั้นที่ 2 วิเคราะห์หาค่า T_V ที่จะใช้ในการคำนวณหาเวลาที่ % consolidation ต่างๆ

- ชั้น clay เป็นแบบ two-way drainage

  ดังนั้น H_{dr} = H/2 = 4 m / 2 = 2 m

- คิดว่าการกระจายตัว(distribution) ของ Induced stress ในชั้น clay เป็นแบบเส้นตรง

  ดังนั้นใช้ค่า T_V ได้จากรูปที่ 8.1.2

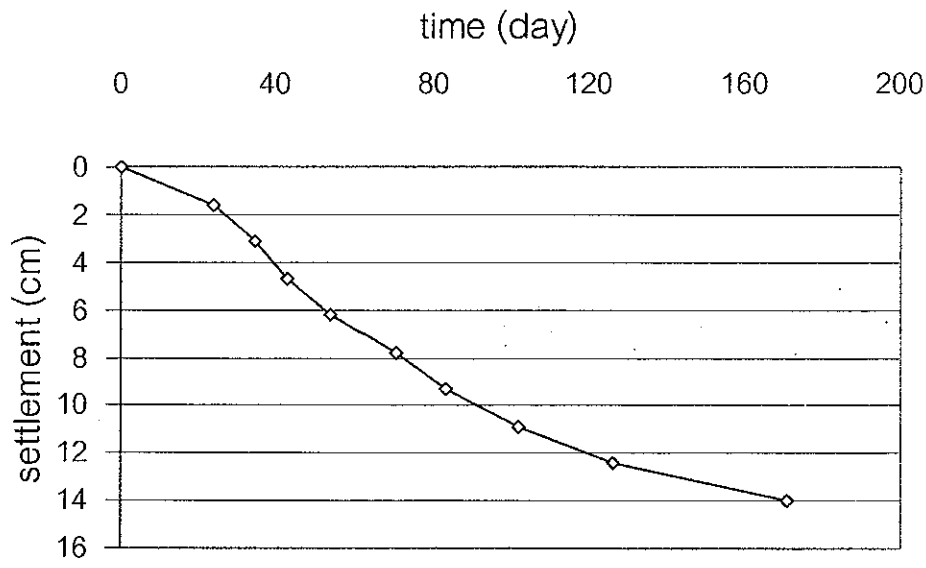
ขั้นที่ 3 วิเคราะห์หาค่า S_C ที่จะใช้ในการคำนวณหาเวลาที่ % consolidation ต่างๆ

S_C = 15.5 cm

ขั้นที่ 4 สร้าง time settlement curve

ตารางที่ 8.4.10 ค่าการยุบตัวและเวลาที่ใช้ในการยุบตัวของดินที่ค่า %U ต่าง ๆ

U(%)	T_v	$t=T_vH_{dr}^2/C_v$ (วัน)	$S_t=US_c$ (cm)
0	0	0	0
10	0.13	24	1.55
20	0.19	35	3.10
30	0.23	43	4.65
40	0.29	54	6.20
50	0.38	70	7.75
60	0.45	83	9.30
70	0.55	102	10.85
80	0.68	126	12.40
90	0.92	171	13.95



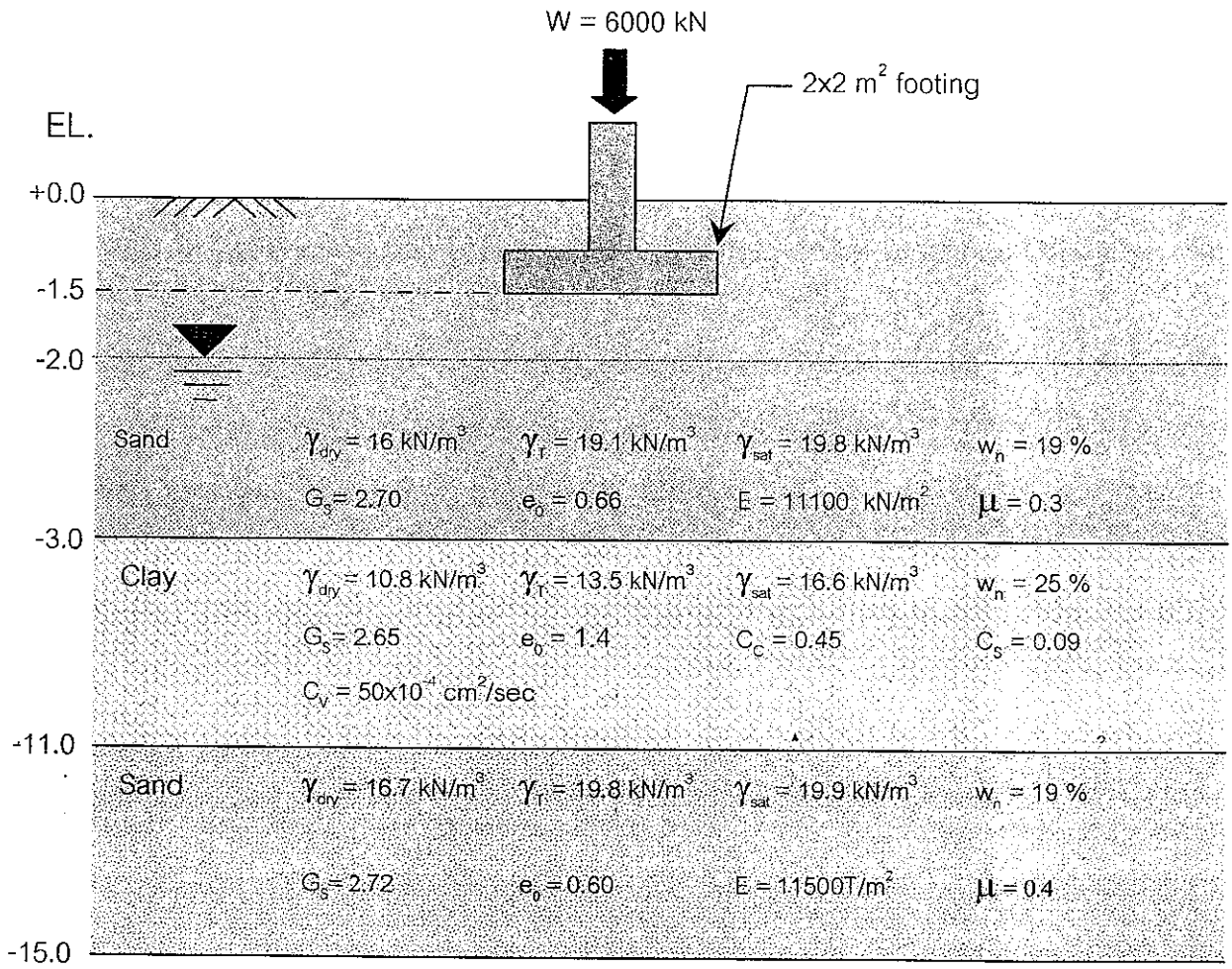
รูปที่ 8.4.13 Time settlement curve

ขั้นตอนหลักที่ 3 ใช้ time settlement curve อ่านค่า settlement เมื่อเวลาผ่านไป 5,10, 15 และ 20 ปี

จากกราฟ เมื่อเวลาผ่านไป 6 เดือน ดินจะยุบตัวประมาณ 14 cm หลังจาก 6 เดือนถือว่ายุบตัวน้อยมาก ดังนั้น ปริมาณการทรุดตัวของ footing เมื่อเวลาผ่านไป 5,10, 15 และ 20 ปี หลังการก่อสร้างเสร็จ ประมาณ 14 cm

7. บริษัท เพชรการโยธา จำกัด ต้องการก่อสร้างอาคารพาณิชย์ 30 คูหา ในเขต อ. เมือง จ. พิจิตร วิศวกรของทางบริษัท ได้ออกแบบฐานรากตื้นขนาด 2 x2 m^2 ระดับความลึก 1.5 m จากระดับผิวดิน เพื่อรองรับแรง 6000 kN ที่ถ่ายเทจากโครงสร้างอาคารพาณิชย์ เพื่อวางแผนการกำหนดระดับพื้นชั้นล่าง ให้ปลอดภัยจากระดับน้ำท่วมตลอดอายุการใช้งาน 30 ปี ทางบริษัท ได้มอบหมายให้ท่านประมาณหา การทรุดตัวของอาคาร ณ เวลา 30 ปีหลังจากงานก่อสร้างแล้วเสร็จ

ทั้งนี้ ผลการสำรวจชั้นดินบริเวณก่อสร้างอาคารพาณิชย์ พบว่าสรุปได้ดังรูปที่ 8.4.14 และผลการทดสอบตัวอย่างดินเหนียว ที่เก็บจากชั้น saturated clay สรุปได้ดังตารางที่ 8.4.11



รูปที่ 8.4.14 ผลการสำรวจชั้นดิน

ตารางที่ 8.4.11 ผลการทดสอบตัวอย่างดินเหนียว ที่เก็บจากชั้น saturated clay

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

<u>วิธีทำ</u>

เพื่อหาคำตอบว่า "การทรุดตัวของอาคาร ณ เวลา 30 ปีหลังจากงานก่อสร้างแล้วเสร็จ เป็นเท่าใด?" ผู้ออกแบบสามารถประมาณหา ได้โดยใช้แนวทาง ดังนี้

1. การทรุดตัวทั้งหมด (total settlement) ของอาคาร มีค่าเท่ากับ consolidation settlement (S_c) ที่เกิดในชั้น saturated clay
2. ในการคำนวณ ไม่จำเป็นต้องหา initial or elastic settlement เพราะคำถามคือ "การทรุดตัวของ footing หลังจากก่อสร้าง footing แล้วเสร็จ" ซึ่ง elastic settlement ได้เกิดหมดไปแล้ว

นั่นคือ หาคำตอบโดยคำนวณหา S_c ที่เวลา 30 ปีหลังจากงานก่อสร้างแล้วเสร็จ ซึ่งทำได้โดยใช้ 5 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

- ใช้ graphical solution ประมาณหาค่า pre-consolidation pressure (P_c) โดยใช้ข้อมูลผลการทดสอบตัวอย่าง saturated clay ในตารางที่ 8.4.11
- ประมาณหาค่า induced stress ที่ midlayer ของชั้น saturated clay ซึ่งอาจเลือกใช้ approximation method (slope 1:2 method)
- คำนวณหา consolidation settlement (S_c) ทั้งหมดที่จะเกิดขึ้น จาก induced stress ที่เกิดจาก น้ำหนักที่ถ่ายลง footing (w)
- สร้าง Time-consolidation settlement curve
- ใช้ time-consolidation settlement curve อ่านค่า S_c ที่เวลา 30 ปี

ทั้งนี้ รายการคำนวณ (calculation sheet) แสดงได้ดังนี้

<u>ขั้นตอนหลักที่ 1</u> คำนวณหา consolidation settlement (S_c)

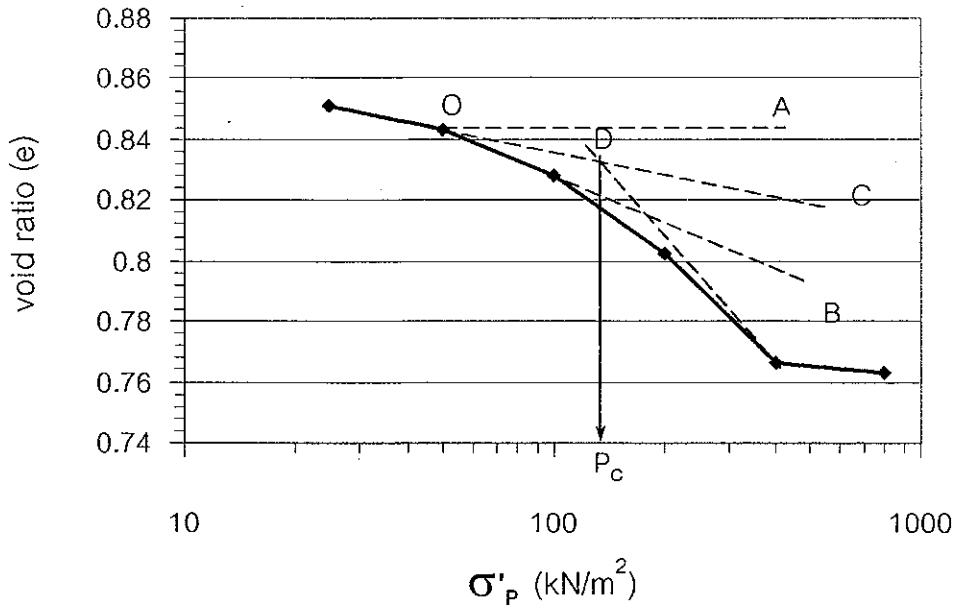
<u>ขั้นที่ 1</u> พิจารณา consolidation settlement (S_c) ของ overconsolidated clay ดังนี้

ที่กึ่งกลางชั้นclay ซึ่งอิ่มตัวด้วยน้ำ

$P_0 = (19.1\ kN/m^3)(2m) + (19.8 - 9.81)\ kN/m^3\ (1m) + (16.6 - 9.81)\ kN/m^3(8\ m\ /2m)$

$= 75.35\ kN/m^2$

จากข้อมูลนำมา plot graph ระหว่าง e – log σ'_p



รูปที่ 8.4.15 e – log σ'_p curve

จากกราฟได้ $P_c \approx 145\ kN/m^2$

$P_0 < P_c$ ดังนั้น เป็น overconsolidated clay

<u>ขั้นที่2</u> พิจารณากำหนดลักษณะการวิเคราะห์ consolidation settlement (S_c) ดังนี้

- คิด consolidation settlement (S_c) ที่ mid layer ของชั้น clay
- คิดว่าการกระจายตัว (distribution) ของ Induce stress ในชั้น clay เป็นแบบเส้นตรง ดังนั้น คำนวณหา P_0 และ ΔP ที่ mid layer

<u>ขั้นที่3</u> พิจารณาคุณสมบัติของชั้นดิน clay ที่ใช้ในการคำนวณ consolidation settlement (S_c)

e_0 = 1.4

γ_{sat} = 16.6 kN / m^3

C_c = 0.45

C_s = 0.09

H = 8 m

<u>ขั้นที่4</u> คำนวณหา P_0 และ ΔP ที่ mid layer ของชั้น clay เฉพาะที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์หา consolidation settlement (S_c)

P_0 = (19.1 kN/m^3)(2m) + (19.8 – 9.81) kN/m^3 (1m) + (16.6 –9.81) kN/m^3(8 m /2m)

= 75.35 kN/m^2

จาก $\Delta P_{ave} = \dfrac{\Delta P_{top} + 4\Delta P_{mid} + \Delta P_{bottom}}{6}$

m_1 = L/B = 2 m / 2 m = 1

ตารางที่ 8.4.12 ΔP ที่ mid layer ของชั้น clay

m_1	z(m)	b =B/2(m)	n_1=z/b	q(kN/m^2)	I_4(จากตาราง)	$\Delta P=qI_4$(kN/m^2)
1	3	1	3	1500	0.179	268.5 (top)
1	7	1	7	1500	0.038	57.0 (mid)
1	11	1	11	1500	≈ 0.011	16.5 (bottom)

ΔP_{ave} = [(268.5 kN / m^2) + (4)(57.0 kN / m^2) + (16.5 kN / m^2)] / 6

= 85.5 kN/m^2

ขั้นที่5 คำนวณหา consolidation settlement (S_c) ที่ mid layer ของชั้น clay

เนื่องจากเป็น overconsolidated clay

P_c = 145 kN / m^2

P_0 = 75.35 kN / m^2

ΔP = 85.5 kN / m^2

$P_0 + \Delta P$ = 160.85 kN / m^2 > P_c = 145 kN / m^2

ดังนั้น

$$S_C = \frac{C_S H}{1+e_0}\log\frac{P_C}{P_0} + \frac{C_C H}{1+e_0}\log\left(\frac{P_0+\Delta P}{p_C}\right)$$

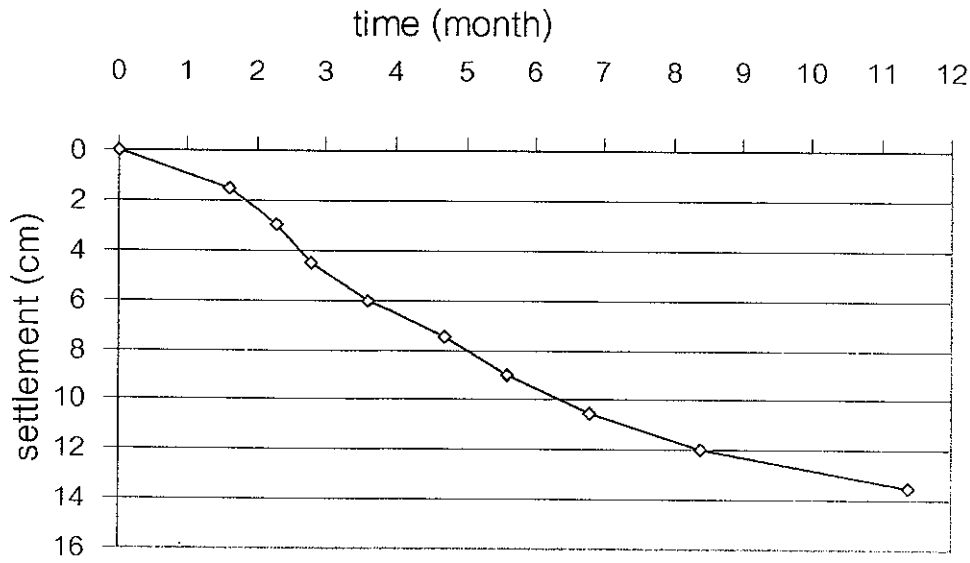
$$= \frac{0.009\,(8\,m)}{1+1.4}\log\left(\frac{145\,kN/m^2}{75.35\,kN/m^2}\right) + \frac{0.45\,(8\,m)}{1+1.4}\log\left(\frac{160.85\,kN/m^2}{145\,kN/m^2}\right)$$

$$= 0.15 \quad m$$

ขั้นที่ 4 สร้าง time settlement curve

ตาราง 8.4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง settlement และ time

U(%)	T_v	$t=T_v H_{dr}^2/C_v$ (month)	$S_t=US_c$ (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	11.4	13.5



รูปที่ 8.4.16 Time settlement curve

<u>ขั้นตอนหลักที่ 3</u> ใช้ time settlement curve อ่านค่า settlement เมื่อเวลาผ่านไป 30 ปี

จากกราฟ เมื่อเวลาผ่านไป 11.4 เดือน ดินจะยุบตัวประมาณ 14 cm หลังจาก 11.4 เดือนถือว่ายุบตัวน้อยมาก ปริมาณการทรุดตัวของ footing เมื่อเวลาผ่านไป 30 ปี หลังการก่อสร้างเสร็จประมาณ 14 cm ดังนั้น ควรออกแบบความสูงอาคารชั้นล่างเหนือระดับน้ำใต้ดินอย่างน้อย 15 cm