

บทที่ 2

ทฤษฎีและสมมุติฐาน

2.1 คุณสมบัติของดินในทางปฐพีวิศวกรรม

การศึกษาผลของการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การยุบอัดตัวของดิน สิ่งที่ควรทราบเกี่ยวกับด้านปฐพีวิศวกรรมได้แก่

2.1.1 การทดสอบหาขนาดเม็ดดิน (Grain size analysis)

2.1.2 การทดสอบหาค่าขีดจำกัดแอสเตอร์เบิร์ก (Atterberg's limits)

2.1.3 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)

2.1.4 การทดสอบหาค่าการยุบอัดตัวของดิน (Consolidation test)

2.2 ลักษณะของการทรุดตัว

ปัญหาส่วนใหญ่ในทางด้านปฐพีวิศวกรรมได้แก่เรื่องการทรุดตัวของดินที่ขึ้นกับเวลา ดังนั้นการประมาณค่าการทรุดตัวของชั้นดินนั้นเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการคาดคะเนการทรุดตัวของชั้นดินในอนาคต การทรุดตัวในดินอาจแยกออกเป็นลักษณะใหญ่ ๆ ได้ 2 ลักษณะคือ

2.2.1 การทรุดตัวที่เกิดขึ้นทันทีเมื่อดินได้รับน้ำหนักจากแรงภายนอกกระทำ
(Immediate settlement, s_i)

การทรุดตัวชนิดนี้มีความสำคัญมาก สำหรับดินที่มีเม็ดดินขนาดใหญ่ หรือดินที่ไม่มีความเหนียว เช่น กรวด ทราย และ Non Plastic Silt ในดินพวกนี้จะเกิดขึ้นทันทีแม้ว่าความเครียดในดินจะมีลักษณะ 1 มิติ หรือ 3 มิติก็ตาม การทรุดตัวชนิดนี้เป็นการทรุดตัวเกือบทั้งหมด การทรุดตัวชนิดนี้เรียกว่าการทรุดตัวคายน้ำ สำหรับดินเม็ดเล็ก เช่น ดินเหนียวและ Plastic

Shape and Rigidity Factor I for Loaded Area on an Elastic Half-Space of Limited Depth Over a Rigid Base						
H/B	Center of Rigid Circular Area Diameter = B	Corner of Flexible Rectangular Area				
		L/B = 1	L/B = 2	L/B = 5	L/B = 10	(strip) L/B = ∞
for $\nu = 0.50$						
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	0.14	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04
1.0	0.35	0.15	0.12	0.10	0.10	0.10
1.5	0.48	0.23	0.22	0.18	0.18	0.18
2.0	0.54	0.29	0.29	0.27	0.26	0.26
3.0	0.62	0.36	0.40	0.39	0.38	0.37
5.0	0.69	0.44	0.52	0.55	0.54	0.52
10.0	0.74	0.48	0.64	0.76	0.77	0.73
for $\nu = 0.33$						
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	0.20	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08
1.0	0.40	0.19	0.18	0.16	0.16	0.16
1.5	0.51	0.27	0.28	0.25	0.25	0.25
2.0	0.57	0.32	0.34	0.34	0.34	0.34
3.0	0.64	0.38	0.44	0.46	0.45	0.45
5.0	0.70	0.46	0.56	0.60	0.61	0.61
10.0	0.74	0.49	0.66	0.80	0.82	0.81

ตารางที่ 2.1 ค่า Shape และ Rigidity Factor ในการคำนวณหาการทรุดตัว ณ จุดต่าง ๆ บนพื้นที่แรงกระทำ ที่ผิวหน้าของ Elastic Half-Space (After DM - 7.1)

silt ถ้าดินอิ่มตัวเต็มที่ การทรุดตัวทันทีได้ต่อเมื่อลักษณะแรงภายนอกกระทำในลักษณะ 2 และ 3 มิติ เท่านั้น การทรุดตัวประเภทนั้นจะมีการขยายตัวทางด้านข้าง เพราะดินไม่สามารถเปลี่ยนแปลงปริมาตรได้ทันทีการทรุดตัวชนิดนี้เรียกว่า การทรุดตัวไม่คายน้ำ

การทรุดตัวที่เกิดขึ้นทันที คำนวณได้โดยวิธีอิลาสติก

$$p_i = \Delta q B (1 - \mu^2) \cdot I / E_s \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

ในเมื่อ Δq คือ ความเค้นภายนอกกระทำในแนวตั้ง

B คือ ความกว้างที่น้อยที่สุดของแรงภายนอกกระทำ

μ คือ Poisson's ratio

I คือ Shape factor และ Rigidity factor ดังแสดงในตารางที่ 2.1

E คือ โมดูลัสของดิน (Soil Modulus)

สำหรับดินเหนียวใช้ Undrained Modulus (E_u) สำหรับดินซึ่ง

ไม่มีความเหนียวใช้ Drained Modulus (E_s) ดังตารางที่ 2.2

และ ตารางที่ 2.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 แสดงค่า E_u/S_u สำหรับดินเหนียว (DM-7)

OCR	E_u/S_u		
	$PI < 30$	$30 < PI < 50$	$PI > 50$
< 3	600	300	125
3 - 5	400	200	75
> 5	150	75	50

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ Consolidated Undrained Triaxial Compression Test และจากในสนามสำหรับดินอ่อนกรุงเทพฯ ค่า E_u/S_u ประมาณ 150 ถึง 300 เมื่อไม่คิดผลของการเคลื่อนตัวแบบไม่คายน้ำ และการวิบัติเฉพาะแห่งของดิน

ตารางที่ 2.3 แสดงค่า E_s/N สำหรับดินซึ่งไม่มีความเหนียวเมื่อ N คือ ค่าที่ได้จากการทดสอบ SPT ในสนาม

ชนิดของดิน	E_s/N
ทรายแข็ง	40
ทรายแข็งปนทราย	70
ทรายกรวดถึงกรวดขนาดเล็ก	100
ทรายเม็ดใหญ่ถึงกรวด	120

2.2.2 การทรุดตัวที่เป็นฟังก์ชันกับเวลา (Time Dependent Settlement, p_t)
การทรุดตัวชนิดนี้ส่วนใหญ่สภาพดินจะเป็นดินเหนียวและพวกทรายแข็ง

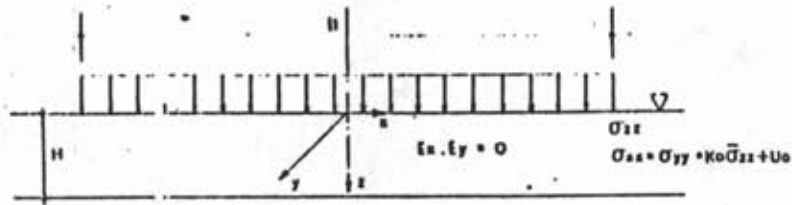
2.2.2.1 การทรุดตัวเนื่องจากการบีบอัดเฉพาะแห่ง

การเคลื่อนตัวไม่คายน้ำเกิดขึ้นเนื่องจากมวลดินบางส่วนได้รับแรงเค้นเฉือนจากภายนอกสูงมาก ๆ จนกระทั่งค่าแรงเค้นเฉือน มีค่าเท่ากับแรงเค้นเฉือนแบบไม่คายน้ำของดิน ทำให้ดินมีการเคลื่อนตัว ดินจะหยุดการเคลื่อนตัวเมื่อการยุบตัวคายน้ำเกิดขึ้น

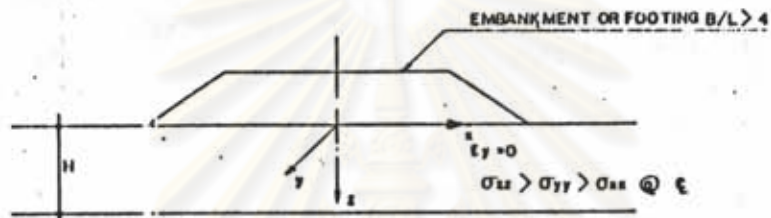
2.2.2.2 การทรุดตัวเนื่องจากการยุบอัดตัวคายน้ำ (p_c)

การทรุดตัวชนิดนี้เกิดจากการที่ดินมีค่าความดันน้ำในโพรงเพิ่มเกิดขึ้นเนื่องจากมีแรงภายนอกกระทำน้ำในมวลดินที่ถูกแรงภายนอกกระทำจะมีความดันน้ำมากกว่ามวลดินภายนอก ทำให้เกิดการไหลของน้ำจากมวลดินที่มีค่าความดันน้ำสูงกว่าไปยังดินที่มีค่าความดันต่ำกว่า จึงเกิดการยุบอัดตัวของดิน และการไหลของน้ำให้ช่องว่างระหว่างเม็ดดินมีขนาดลดลงทำให้เกิดการยุบตัวในมวลดิน การไหลของน้ำเกิดขึ้นได้ในลักษณะ 1 มิติ 2 มิติ และ 3 มิติ ขบวนการยุบอัดตัวจะสิ้นสุดเมื่อไม่มีแรงดันน้ำในโพรงเพิ่มเกิดขึ้น หมายถึง ความดันน้ำทั้งภายนอกและภายในที่มีแรงกระทำมีค่าเท่ากัน รูปที่ 2.1 แสดงถึง ลักษณะการเกิดแรงกระทำลักษณะต่าง ๆ กันและรูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการเกิดขบวนการยุบอัดตัวคายน้ำ

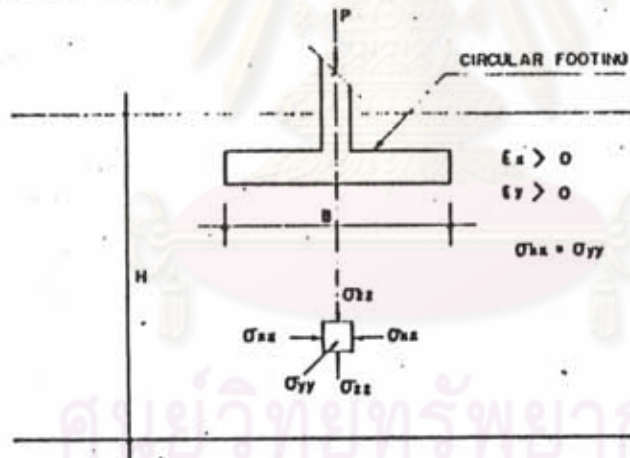
การทรุดตัวเนื่องจากการยุบอัดตัวคำนวณได้สองวิธี แต่ละวิธีมีพื้นฐานมาจากการ



(ก) LOADING CONDITION ที่ทำให้เกิดความเค้นในลักษณะ 1 มิติ
 $B \gg H$ ($\epsilon_x, \epsilon_y > 10$ เป็นพัน)



(ข) LOADING CONDITION ในลักษณะ 2 มิติ



(ค) LOADING CONDITION ในลักษณะ 3 มิติ

รูปที่ 2.1 แสดง Loading Condition ในมิติต่าง ๆ

ทดสอบการยุบอัดตัวและใช้ค่าปรับแก้ของ Skempton and Bjerrum (1957) ผลการวิเคราะห์ของการทรุดตัวของวิธีทั้งสองใกล้เคียงมาก

2.2.2.3 การทรุดตัวเนื่องจากผลของการทรุดตัวอัดแน่นชั้นที่สอง (p_s)

การทรุดตัวชนิดนี้เกิดขึ้นทั้ง ๆ ที่ไม่มีความคั่นน้ำในโพรงเดิมเกิดขึ้นในมวลดิน การเคลื่อนตัวของดินเกิดจากการที่น้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินไหลออกมาซึ่งเป็นผลของการเรียงตัวหรือการจัดตัวใหม่ของเม็ดดิน การทรุดตัวที่เกิดขึ้นในขณะที่หน่วยแรงเค้นประสิทธิผลที่มีค่านี้เรียกว่า การทรุดตัวอัดแน่นชั้นที่สอง ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งจะมีผลเมื่อการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำได้เสร็จสิ้นลงก่อนอายุใช้งานของสิ่งก่อสร้าง ปัจจุบันยังสรุปไม่ได้ว่าการทรุดตัวอัดแน่นชั้นที่สองเกิดขึ้นพร้อมกัน หรือหลังจากการทรุดตัวเนื่องจากอัดตัวคายน้ำ องค์ประกอบที่สำคัญที่ทำให้เกิดการทรุดตัวอัดแน่นชั้นที่สองมีดังนี้ (Ladd 1971)

1. ชนิดของดินได้แก่ความไว ปริมาณสารอินทรีย์ในมวลดินและความเป็นพลาสติก (Plasticity)
2. ประวัติหน่วยแรงของดิน (Stress history, σ_{vc}/σ_{vm})
3. อัตราการเติมน้ำหนักที่มากกระทำ
4. ขนาดของน้ำหนักที่มากกระทำ
5. ขนาดความกว้าง ความยาว ของพื้นที่ ๆ น้ำหนักมากกระทำเปรียบเทียบกับความหนาชั้นดิน

ดินที่มีการทรุดตัวเนื่องจากการยุบอัดตัวครั้งที่สอง จะมีมากในดินที่มีค่า Plasticity Index สูงและพวกที่มีอินทรีย์วัตถุอยู่มาก ดินที่มีสภาพอัดตัวปกติ (Normally consolidated) จะมีการทรุดตัวมากกว่าดินที่อยู่ในสภาพอัดแน่นเกินตัว (Overconsolidated) ดังรูปที่ 2.4 จากลักษณะการทรุดตัวดังกล่าว การทรุดตัวที่เกิดขึ้นทั้งหมดในมวลดิน (p_t) สามารถคำนวณได้จาก

ก) ในดินซึ่งไม่มีความเหนียว $p_t = p_i$ (2.2)

ข) ในดินเหนียว

ข.1) กรณีลักษณะความเครียดเกิดขึ้นในลักษณะ 1 มิติ

$p_t = p_c + p_s$ (2.3)

ข.2) กรณีลักษณะความเครียดเกิดขึ้นในลักษณะ 2 - 3 มิติ

$$p_t = p_i + p_u + p_c + p_s \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

ในดินทั่ว ๆ ไป p_u น้อยมาก จึงสามารถเขียนใหม่ดังนี้

$$p_t = p_i + p_c + p_s \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

2.3 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์อัตราการทรุดตัว

2.3.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การยุบตัวด้วยเครื่องมือพิโซโพรบ (Piezo-Probe)

การศึกษาค่าความดันน้ำในโพรงเดิมโดยเครื่องมือพิโซโพรบ ณ จุดใด ๆ ทำได้โดยการหยุดการกดเครื่องมือพิโซโพรบจะพบว่าค่าความดันน้ำในโพรงเดิมจะค่อยๆ ลดลงตามเวลา และจะลดลงช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับสภาพดินแต่ละประเภท รูปที่ 2.5 แสดงค่าความดันน้ำของดินที่มีองค์ประกอบต่าง ๆ กัน 3 ตัวอย่าง ดินที่มีช่องว่างระหว่างเม็ดดินมาก เช่น ดินทรายแข็ง ตั้งตัวอย่างดินหมายเลข 1 จะใช้เวลาในการปรับสู่สภาพสมดุลน้อย สำหรับดินที่มีสภาพเป็นพลาสติกสูงจะใช้เวลาในการเข้าสู่สภาพสมดุลของน้ำนานกว่า ตั้งตัวอย่างดินหมายเลข 2 และ 3 ซึ่งสามารถเปรียบเทียบดินแต่ละลักษณะได้โดยเปรียบเทียบเวลา t_{50} ของดินแต่ละตัวอย่าง ดังรูปที่ 2.6

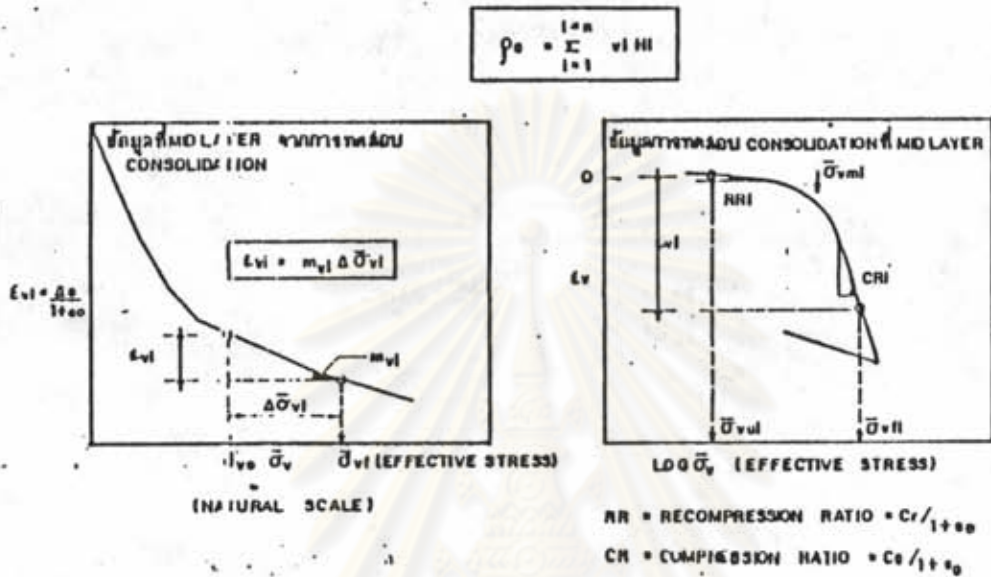
สมมุติฐานในการพิจารณาค่าความดันน้ำในโพรงเดิมของเครื่องมือพิโซโพรบนั้น (Hill, 1950) กำหนดให้ดินบริเวณปลายหัวพิโซโพรบกระทำเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็น 2 บริเวณ ได้แก่ บริเวณพลาสติก (Plastic zone) ซึ่งเกิดขึ้นรอบ ๆ หัวพิโซโพรบเป็นส่วนที่ดินมีการถูกรบกวน และบริเวณอีลาสติก (Elastic zone) ซึ่งอยู่ถัดมาจะเป็นส่วนที่ไม่ถูกรบกวน ดังรูปที่ 2.7

สมการแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.7 สามารถเขียนได้ดังนี้

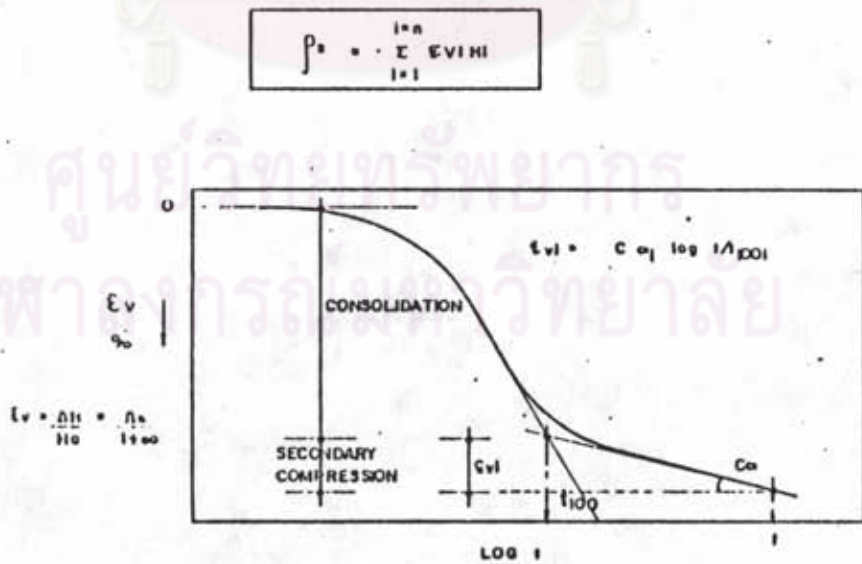
$$\text{ก) } \frac{\partial r}{\partial r} + 2. \left[\frac{(\sigma_r - \sigma_\theta)}{r} \right] = 0$$

(Spherical cavity)(2.6)

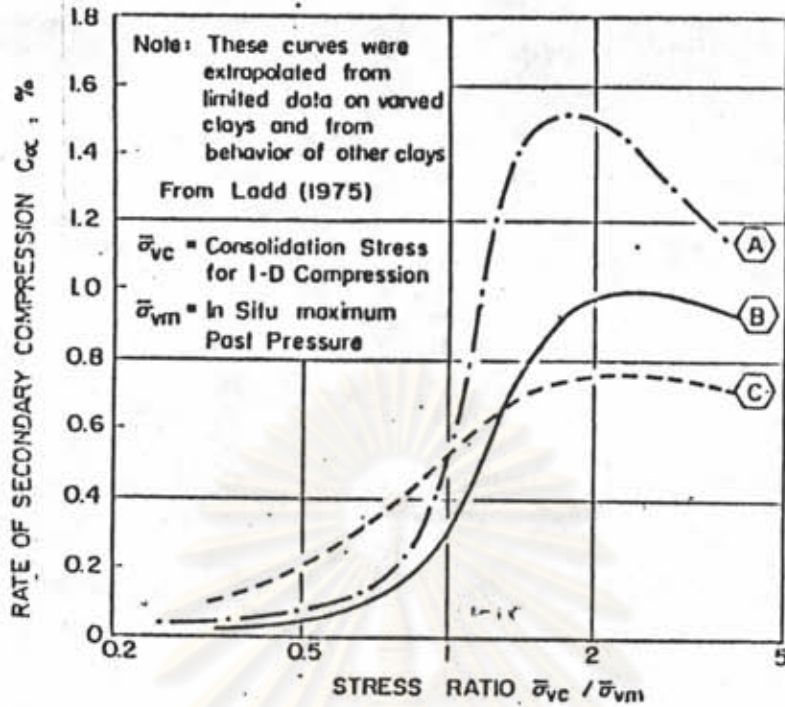
$$\text{ข) } \frac{\partial r}{\partial r} + \left[\frac{(\sigma_r - \sigma_\theta)}{r} \right] = 0$$



รูปที่ 2.2 หลักการในการคำนวณการทรุดตัวเนื่องจาก Consolidation Process

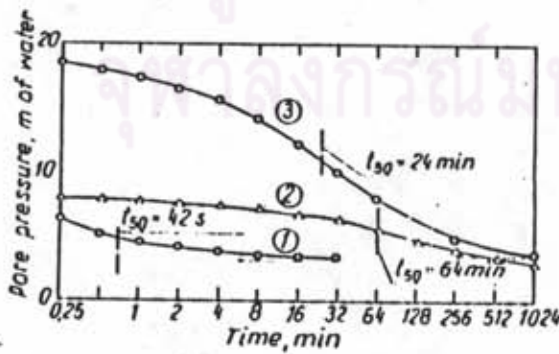


รูปที่ 2.3 แสดงวิธีการคำนวณการทรุดตัวเนื่องจาก Secondary Compression

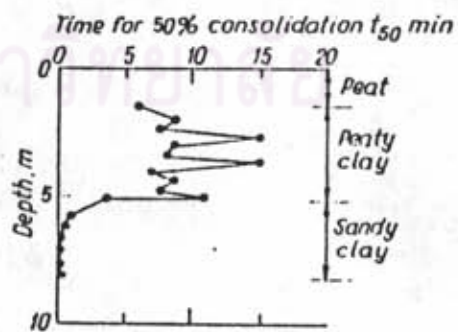


- (A) No Disturbance, High Sensitivity, CR = 0.4 → 0.25
- (B) No Disturbance, Moderate Sensitivity, CR = 0.3 → 0.25
- (C) Some Disturbance, Moderate Sensitivity, CR = 0.25

รูปที่ 2.4 Factor ต่าง ๆ ที่มีผลต่ออัตราการทรุดตัวเนื่องจาก Secondary Compression



รูปที่ 2.5 แสดงค่าการกระจายของน้ำในดินแต่ละลักษณะ



รูปที่ 2.6 ค่าเวลา t_{50} เปรียบเทียบกับความลึก

$$\text{(Cylindrical cavity)} \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

เมื่อ r คือ ระยะทางจากจุดศูนย์กลาง

ในการเกิดการเกิดแรงเฉือนไม่คายน้ำ (Undrained shear) สมมุติฐานของการเกิดการวิบัติในส่วนของดินที่มีสภาพเป็นพลาสติก สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\sigma_r - \sigma_o = 2 \tau_f \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

เมื่อ τ_f คือ หน่วยแรงเฉือนไม่คายน้ำของดิน

เมื่อไม่คิดผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรในส่วนของดินที่มีสภาพพลาสติกหรือไม่นำ-การขยายตัวของดินมาพิจารณา จะได้ว่า

$$r_p / r_o = \sqrt[3]{E/2(1+\mu)\tau_f} \quad \text{(Spherical cavity)} \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

$$r_p / r_o = \sqrt{E/2(1+\mu)\tau_f} \quad \text{(Cylindrical cavity)} \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

เมื่อ r_p คือ รัศมีของดินที่มีสภาพพลาสติก

r_o คือ รัศมีของหัวฉีดไซโครบ

E คือ โมดูลัสของการเปลี่ยนรูปร่าง

μ คือ Poisson's ratio ของดิน (= 0.5)

จากสมการ (2.6) ถึง สมการ (2.10) สามารถหาค่าแรงดันน้ำสุทธิ (Ultimate cavity pressure, Δp_u) ได้ดังนี้

$$\Delta p_u = \frac{4}{3} \tau_f \{1 + \ln [E / 2\tau_f(1+\mu)]\} \quad \text{(Spherical cavity)} \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

$$\Delta p_u = \tau_f \{1 + \ln [E / 2\tau_f(1+\mu)]\} \quad \text{(Cylindrical cavity)} \quad \dots\dots\dots(2.12)$$

ในดินลักษณะอัดแน่นปกติ การเกิดความดันน้ำในโพรงเพิ่ม (Δu) ในส่วนของดินที่มีสภาพ

พลาสติกมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยของแรงเค้นที่กระทำ ($\Delta \bar{\sigma}$)

$$\Delta u = \Delta \bar{\sigma} = 1/3 (\Delta \bar{\sigma}_r + \Delta \bar{\sigma}_\theta + \Delta \bar{\sigma}_z) \quad \dots\dots\dots(2.13)$$

ค่าแรงดันน้ำในโพรงเพิ่มมากที่สุดจะเกิดบริเวณหัวนิชโซโพรบกับดิน สามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta u = 4/3 \tau_f \ln [E / 2\tau_f(1+\mu)] \quad \text{(Spherical cavity)} \quad \dots\dots(2.14)$$

$$\Delta u = \tau_f \ln [E / 2\tau_f(1+\mu)] \quad \text{(Cylindrical cavity)} \quad \dots\dots(2.15)$$

ค่า E มีค่าอยู่ระหว่าง $100 < E/\tau_f < 500$ และค่าแรงดันน้ำในโพรงเพิ่มมากที่สุดมีค่าอยู่ระหว่าง

$$4.7 < \Delta U/\tau_f < 6.7 \quad \text{(Spherical cavity)}$$

$$3.5 < \Delta U/\tau_f < 5.0 \quad \text{(Cylindrical cavity)}$$

การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การยุบตัวของดินแต่ละชั้นดินสามารถประมาณได้จาก อัตราการกระจายแรงดันน้ำในโพรงเพิ่มสมการที่แสดงค่าการยุบตัวรอบ ๆ หัวนิชโซโพรบที่มีรัศมี r_0 ในดินที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันตลอดสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_s \left[\frac{2 \cdot \partial u}{r \cdot \partial r} + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right) \right] \quad \text{(Spherical cavity)} \quad \dots\dots\dots(2.16)$$

$(r > r_0)$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_h \left[\frac{1 \cdot \partial u}{r \cdot \partial r} + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right) \right] \quad \text{(Cylindrical cavity)} \quad \dots\dots\dots(2.17)$$

เมื่อ C คือ ค่าสัมประสิทธิ์การยุบตัวของดิน กรณีการกระจายของน้ำทุกทิศทุกทาง

C_h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การยุบตัวของดิน กรณีการกระจายของน้ำในแนว

ระนาบ ดังรูปที่ 2.8 และ 2.9

สำหรับดินอัดแน่นปกติกำหนดให้ ΔU_0 ที่เวลา $t = 0$ มีค่าดังนี้ $\Delta U_0 = \Delta \sigma_v$ เมื่อ $\Delta \sigma_v$ คือ การเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยแรงเค้นได้จากการสมมุติให้การเปลี่ยนแปลงเวลาที่ $t = 0$ สำหรับแรงดันน้ำในโพรงเพิ่มนอกส่วนของดินสภาพพลาสติกมีค่าเท่ากับ 0 ค่าแรงดันน้ำในโพรงเพิ่ม ณ เวลา $t = 0$ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\Delta U_0 = 4 \tau_f \ln.(r_p/r) \quad (\text{Spherical cavity}) \quad \dots(2.18)$$

$$\Delta U_0 = 2 \tau_f \ln.(r_p/r) \quad (\text{Cylindrical cavity}) \quad \dots(2.19)$$

เมื่อ r_p คือ รัศมีของส่วนของดินที่มีสภาพเป็นพลาสติก

r คือ ระยะทางใด ๆ วัดจากจุดศูนย์กลางหัวนิชโซไฟรบ

สมมุติให้ฉิวระหว่างหัวนิชโซไฟรบ และดินไปต่อเนื่องกันค่าความสัมพันธ์ระหว่างเวลาของการยุบอัดตัว (t) และปริมาณ ro^2/c โดยสมมุติให้ค่า E ของดินมีค่าเท่ากับ $200 \tau_f$ เวลาที่ t_{50} สามารถคำนวณได้ดังนี้

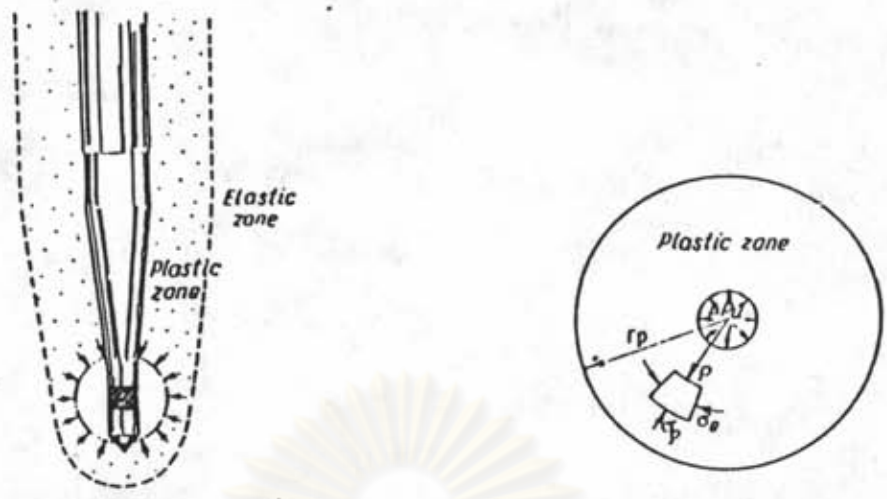
$$t_{50} = 0.5 ro^2/C \quad (\text{spherical cavity}) \quad \dots(2.20)$$

$$t_{50} = 2. ro^2/Ch \quad (\text{cylindrical cavity}) \quad \dots(2.21)$$

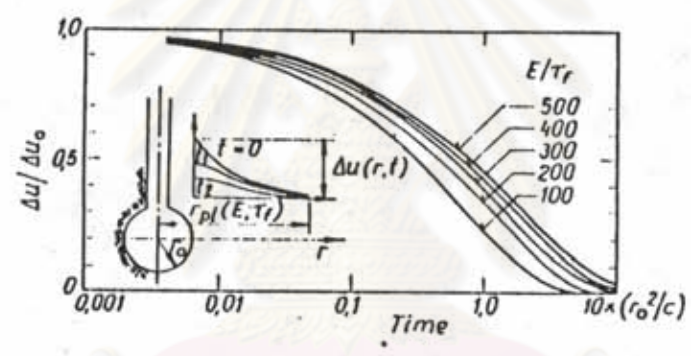
2.3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การยุบอัดตัวด้วยวิธีการของเทอร์ซากิ (Terzaghi's theory)

การทรุดตัว 1 มิตี เป็นพื้นฐานสำคัญของ Terzaghi (Barden, 1968; Tearens et al, 1979) สมมุติฐานนี้ได้จากการทดสอบการยุบอัดตัวของดินด้วยเครื่อง Oedometer ซึ่งให้ค่าความดันน้ำในโพรงเพิ่มมีค่าเท่ากับขนาดการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงรวม ($\Delta U = \Delta \sigma_v$) โดยสมมุติฐานลักษณะของดินตามทฤษฎีต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้คือ

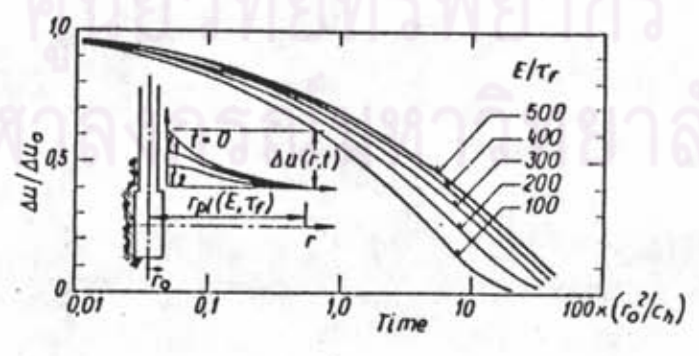
- ก) การอัดตัวเกิดในสภาพ 1 มิตี
- ข) การไหลเกิดในสภาพ 1 มิตี ตามกฎของ Darcy
- ค) ดินมีสภาพเนื้อเดียวตลอดและอิ่มตัวด้วยน้ำอย่างสมบูรณ์
- ง) ไม่พิจารณาการยุบตัวของเม็ดดินและน้ำ



รูปที่ 2.7 แสดงส่วนของ Plastic zone และ Elastic zone



รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\Delta u/\Delta u_0$ กับค่า $t (r^2/c)$ สำหรับค่า E/Tr ต่าง ๆ กรณี Pore pressure probe มีลักษณะทรงกลม



รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\Delta u/\Delta u_0$ กับค่า $t (r^2/c)$ สำหรับค่า E/Tr ต่าง ๆ กรณี Pore pressure probe มีลักษณะทรงกระบอก

- จ) แรงกระทำภายนอกและค่าความซึมได้ของน้ำมีค่าคงที่
 ฉ) ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเค้นประสิทธิผลกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินเป็นแบบเส้นตรง
 ช) มีความต่อเนื่องกันระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาตรใน 1 มิติ และความเร็วการไหลของน้ำ
 ซ) ไม่มีการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาคดินหรือความผิดที่เกิดจากอนุภาคดิน

จากสมมุติฐานข้างต้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$i = -\partial h / \partial z = -\partial u / (\partial w \cdot \partial z) \quad \dots\dots\dots(2.22)$$

เมื่อ i คือ hydraulic gradient

$\partial h / \partial z$ คือ อนุพันธ์ของระดับน้ำเทียบกับระยะทางที่พิจารณา

จากกฎของ Darcy จะได้ว่า

$$v = ik = -k \cdot \partial u / (\partial w \cdot \partial z) \quad \dots\dots\dots(2.23)$$

เมื่อ ∂w คือ หน่วยความหนาแน่นของน้ำ

k คือ ค่าความซึมได้ของน้ำ

v คือ ความเร็วของน้ำผ่านหน้าตัดดินที่พิจารณา

สามารถเขียนสมการให้อยู่ในสมการ Fourier Series ดังนี้

$$U(z,t) = \frac{4}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(2m+1)} \cdot \sin\left\{ \frac{(2m+1)\pi z}{2h} \right\} \cdot \exp\left\{ -(2m+1)^2 \pi^2 T_v / 4 \right\} \right] \quad \dots\dots\dots(2.24)$$

เมื่อ U คือ แรงดันน้ำในโพรงเพิ่ม

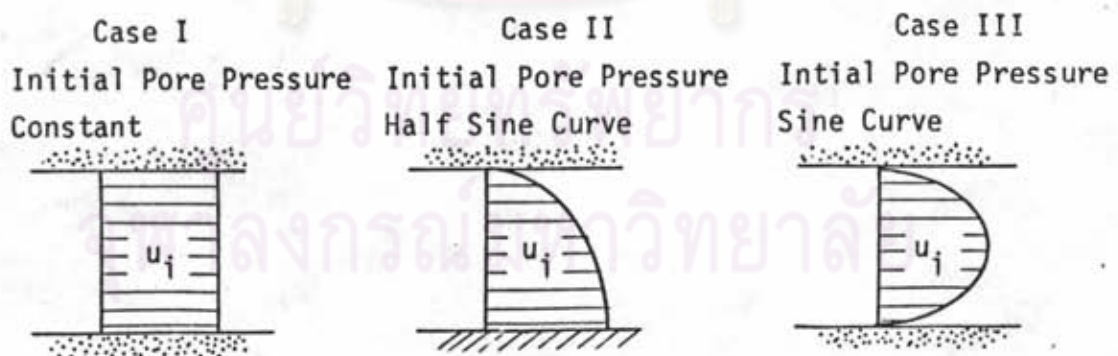
z คือ ระยะทางที่พิจารณาโดยวัดจากจุดอ้างอิง

t คือ เวลาใดๆ ที่พิจารณา

h คือ ระยะทางมากที่สุดที่น้ำเดินทาง

T_v คือ ตัวประกอบเวลา (Time Factor) ดังตารางที่ 2.4

PERCENTAGE OF CONSOLIDATION, U	Time Factor T		
	CASE 1	CASE 2	CASE 3
0	0	0	0
5	0.0020	0.0030	0.0208
10	0.0078	0.0111	0.0427
15	0.0177	0.0238	0.0659
20	0.0314	0.0405	0.0904
25	0.0491	0.0608	0.128
30	0.0707	0.0847	0.145
35	0.0962	0.112	0.187
40	0.126	0.143	0.207
45	0.159	0.177	0.242
50	0.197	0.215	0.281
55	0.239	0.257	0.324
60	0.286	0.305	0.371
65	0.342	0.359	0.435
70	0.403	0.422	0.488
75	0.477	0.495	0.562
80	0.567	0.586	0.652
85	0.674	0.702	0.769
90	0.848	0.867	0.933
95	1.129	1.148	1.214
100	∞	∞	∞



ตารางที่ 2.4 แสดงค่า TIME FACTOR ในลักษณะต่าง ๆ

$$\text{โดย } T_v = C_v t / h^2 \quad \dots\dots\dots (2.25)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง U , T_v , ที่ค่า U_i ต่าง ๆ กัน แสดงไว้ในรูปที่ 2.10

ค่าอัตราการทรุดตัวตามทฤษฎีของ Terzaghi มักจะให้ค่าที่น้อยเกินไปในกรณีที่สามารถไหลได้ทั้งในลักษณะ 2-3 มิติ

2.3.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การยุบตัวของดินโดยวิธี Asaoka (Asaoka's graphical method, 1978)

Asaoka (1978) ได้เสนอวิธีหาขนาดการทรุดตัว และอัตราการทรุดตัวจากข้อมูลการทรุดตัว ในสนามที่แบ่งเวลาแน่นอน ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งจะได้

$$p_j = p_0 + p_1 \cdot p_{j-1} \quad \dots\dots\dots (2.26)$$

p_j : การทรุดตัวที่เวลา t_j

p_{j-1} : การทรุดตัวที่เวลา t_{j-1} เมื่อ j เป็นเลขจำนวนเต็มใดๆ

$$p_j = p_{j-1} = p_f \quad \dots\dots\dots (2.27)$$

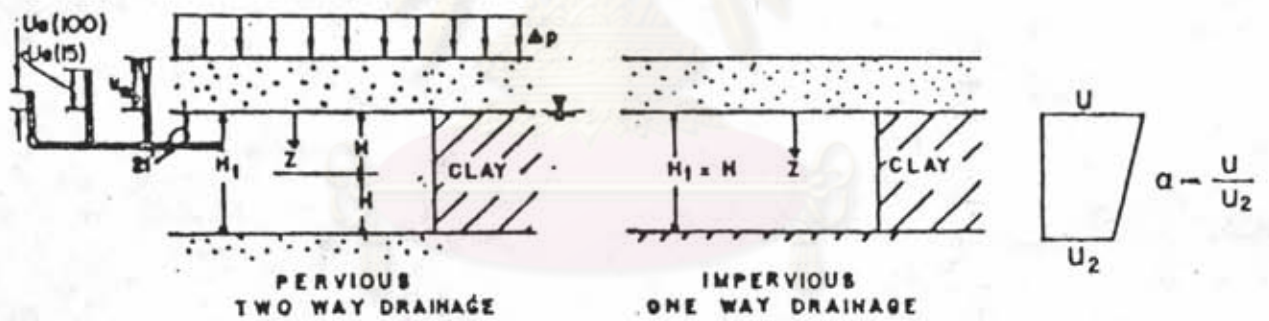
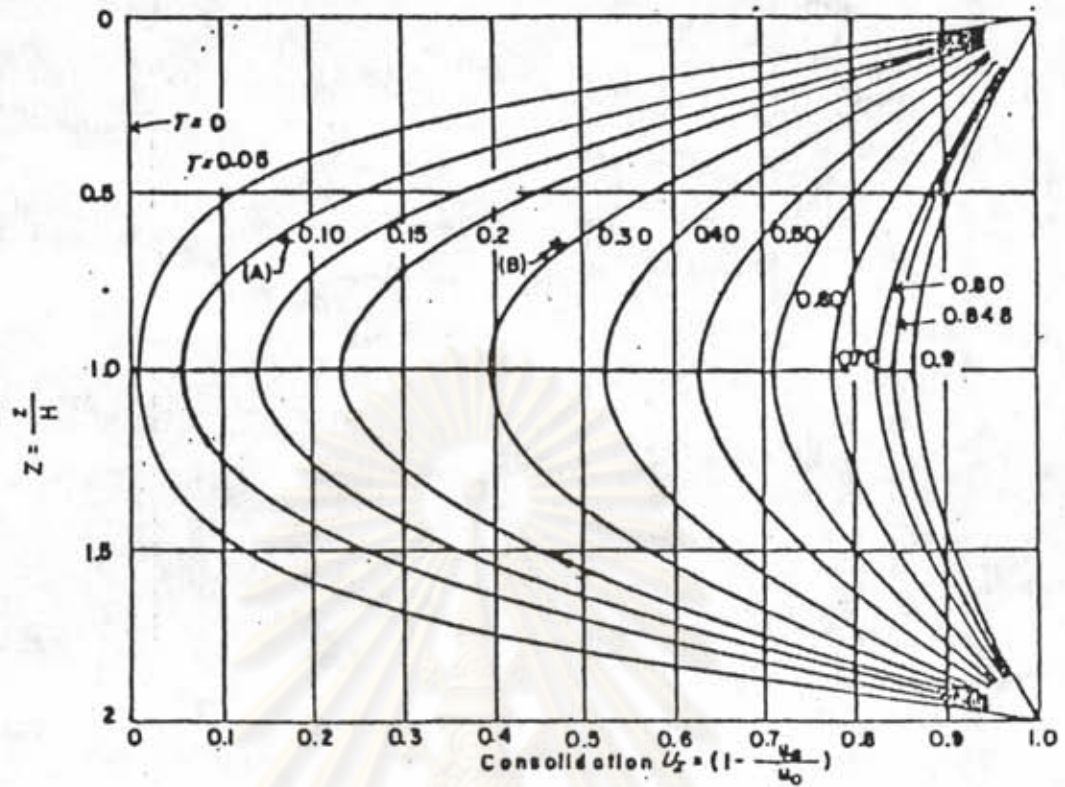
p_f : การทรุดตัวสุดท้าย (Final Settlement) นั่นคือ

$$p_f = p_0 / (1 - p) \quad \dots\dots\dots (2.28)$$

ค่า p_f จะเป็นค่าการทรุดตัวรวม (p_t) และจะเป็นค่าการทรุดตัวเนื่องจากการยุบอัดตัวคายน้ำ (p_c) เมื่อ ไม่รวมการทรุดตัวทันที (p_i) การทรุดตัวที่คาดคะเนได้จะแน่นอนมากหรือน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับความถี่ของช่วงเวลา Δt

Magnan และ Mieussens (1980) ได้ลำดับขั้นตอนวิธีของ Asaoka ดังนี้

ก) ทำการวัดค่าการทรุดตัวในสนามอย่างต่อเนื่อง และลงจุด p_j ที่เวลา t_j ต่าง ๆ บนกราฟ (รูปที่ 2.11ก) โดยแบ่งเวลา Δt ช่วงละเท่า ๆ กัน Δt ควรมีค่า



$$U_z = 1 - \frac{u_e}{u_0} \text{ (consolidation ratio)}$$

u_e = Excess pore pressure at some time t

u_0 = Excess pore pressure at time $t = 0$ (due to external loading)

รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง U , Z/H และ T (After DM-7.1)

30-100 วัน

- ข) ลงจุดค่าการทรุดตัว $p_1, p_2, p_3 \dots$ โดยลงจุดระหว่าง (p_{j-1}, p_j)
 ดังรูป (2.11 ข)
 ค) ลากเส้นตรงผ่านจุดต่าง ๆ เหล่านั้น จุดที่เส้นนี้ตัดกับเส้นตรงที่ทำมุม 45
 ที่ลากจากจุดเริ่มแรก (Origin) เป็นตำแหน่งที่ให้ค่า $p_j = p_{j-1} = p_c$ และจะได้

$$C_v = -5/12 \cdot H_d^2 \cdot (\ln p_1 / \Delta t) \quad \dots\dots(2.29)$$

C_v : สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายนํ้า (Coefficient of Consolidation)

H_d : ระยะทางระบายน้ำ (Drainage length)

Δt : ช่วงเวลาที่แบ่ง (วัน)

2.3.4 การหาค่าสัมประสิทธิ์การยุบอัดตัวด้วยวิธี $\log t$ ของ Casagrande (Casagrande's logarithm of time method)

วิธีนี้ได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง Compression dial reading กับ $\log t$ การกำหนดค่า R_0 (Zero primary consolidation) โดยการกำหนดจุด 2 จุด ช่วงแรกของกราฟให้มีอัตราส่วน 1:4 ความแตกต่างของ 2 จุดนี้จะมีค่าเท่ากับความแตกต่างที่จุดแรก ค่า R_{100} หาได้จากจุดที่ตัดกันของเส้นตรงที่ลากต่อจากส่วนที่เป็นเส้นตรงของการทรุดตัวชั้นที่สองกับเส้นตรงที่ลากสัมผัสกับแนวไม่โค้งบนกราฟดังรูป 2.12 ข R_{50} , t_{50} ได้จากค่าเฉลี่ยระหว่าง R_0 กับ R_{100} ค่า C_v (Coefficient of consolidation) สามารถหาได้ดังนี้

$$H_{50} = (H_0 - R_{50})/2 \quad \dots\dots(2.30)$$

$$C_v = T_{v50}(H_{50})^2/t_{50} \quad \dots\dots(2.31)$$

2.3.5 การหาค่าสัมประสิทธิ์การยุบอัดตัวด้วยวิธี \sqrt{t} ของ Taylor (Taylor's square root of time method)

วิธีนี้ได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง Compression dial reading กับ \sqrt{t} ในช่วงแรกของกราฟจะเป็นแบบพาราโบลา ต่อจากนั้นจะเป็นเส้นตรงเมื่อต่อเส้นตรงกลับไปยังที่ $t=0$ จะได้ค่า R_0 ค่า t_{90} ที่อยู่บน Theoretical curve จะมีค่าเป็น 1.15 เท่าของค่า t ที่อยู่บนเส้นตรงที่ต่อออกมาจากเส้นของกราฟ จุดตัดของเส้นตรงที่ออกมา 1.15 เท่า นั้นคือค่า R_{90}

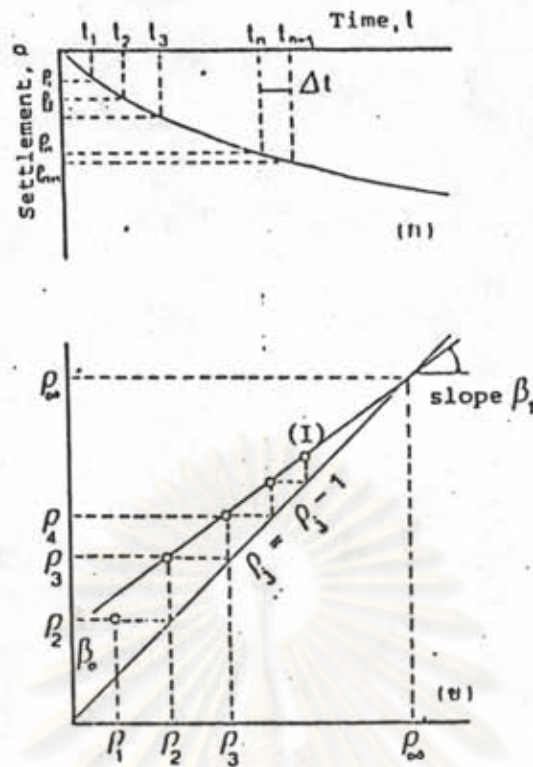
ผังรูปที่ 2.12ก สามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$H_{90} = (H_0 - R_{90})/2 \quad \dots\dots\dots(2.32)$$

$$C_v = T_{r90} (H_{90})^2 / \epsilon_{90} \quad \dots\dots\dots(2.33)$$

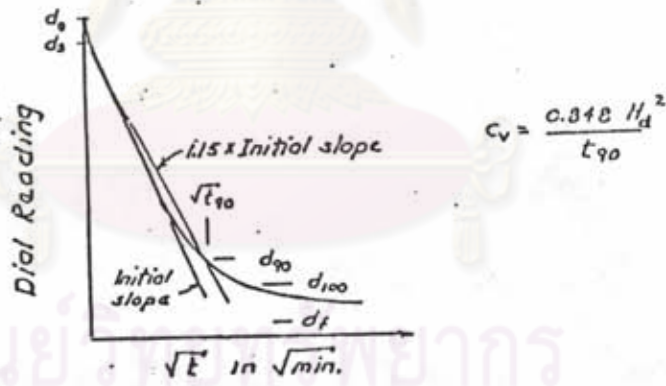


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

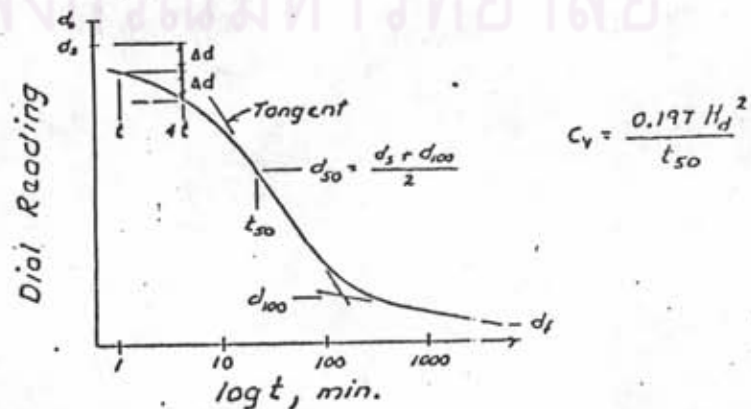


รูปที่ 2.11 การหาค่าการทรุดตัววิธีของ Asoka

n1 15 / t. ของ Taylor



n1 15 log t. ของ Casagrande



รูปที่ 2.12 หลักการหาค่าสัมประสิทธิ์การยุบตัว