

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ทฤษฎีการอัดตัวระบายน้ำมิติเดียวของ Terzaghi (1923)

Terzaghi (1923) (อ้างอิงจาก Terzaghi (1943)) เป็นคนแรกที่ตั้งทฤษฎีการอัดตัวระบายน้ำมิติเดียว ซึ่งตั้งอยู่บนสมมติฐานดังต่อไปนี้

1. ดินอึดตัว
2. น้ำและเม็ดดินเป็นวัสดุที่อัดตัวไม่ได้
3. น้ำในดินไหลซึมตามกฎของ Darcy
4. สัมประสิทธิ์การซึมได้ของดินมีค่าคงตัว ขณะที่เกิดการอัดตัวระบายน้ำ
5. การอัดตัวระบายน้ำทั้งหมดเกิดจากการซึมได้ต่ำของดิน ทำให้น้ำไหลซึมออกช้า
6. ดินถูกจำกัดการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง
7. ความเค้นทั้งหมดและความเค้นตั้งฉากประสิทธิผลมีค่าเดียวกันทุกๆจุดบนภาคตัดขวางตามแนวราบผ่านชั้นดิน และทุกขณะที่เกิดการอัดตัวระบายน้ำ เป็นเหตุให้น้ำในดินไหลซึมในแนวดิ่งเพียงแนวเดียว
8. สัมประสิทธิ์การอัดตัวได้ของดินมีค่าคงตัว ขณะที่เกิดการอัดตัวระบายน้ำ

สมการควบคุมการอัดตัวระบายน้ำ

พิจารณาก่อนดินที่จุด P ในชั้นดินที่เกิดการอัดตัวระบายน้ำ สมมติว่าในดินซึมตามแนวดิ่ง z แนวเดียวสมการควบคุมการอัดตัวระบายน้ำขึ้นอยู่กับสมดุลของก่อนดินการอัดตัวได้ของดินและการไหลซึมอย่างต่อเนื่องของน้ำ ตามสมการพื้นฐานสำหรับการไหลซึมของน้ำในดินเอกพันธุ์สมการการต่อเนื่องสำหรับการไหลในแนวดิ่ง z ในดินอึดตัวกลายเป็น

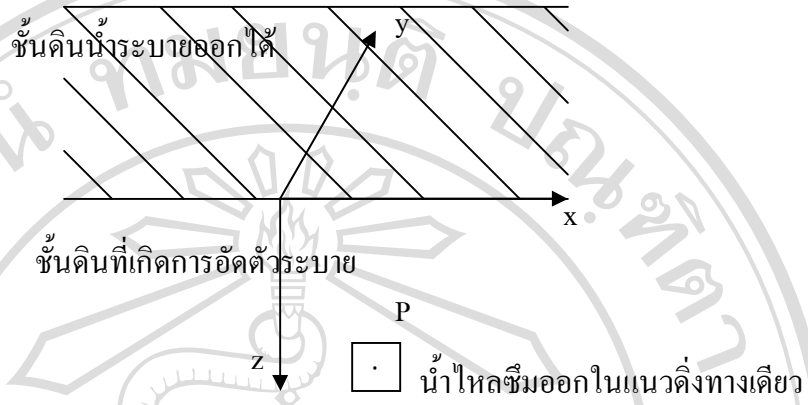
$$k \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.1)$$

เมื่อ k = สัมประสิทธิ์การซึมได้ของดินในแนวแกนดิ่ง

h = หัวทั้งหมด (Total Head)

e = อัตราส่วนช่องว่าง

t = เวลา



รูป 2.1 การอัดตัวระบายน้ำมิติเดียว

จากการอัดตัวได้ของดิน

$$\frac{\partial e}{\partial \sigma} = -a_v \quad (2.2)$$

เมื่อ a_v = สัมประสิทธิ์การอัดตัวได้ของดิน

$\bar{\sigma}$ = ความเค้นกดอัดประสิทธิภาพผลขณะใด ๆ

รวมสมการ (2.1) และ (2.2) เข้าด้วยกันได้

$$\frac{k(1+e)}{a_v} \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = - \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\text{เนื่องจาก } h = h_s + \frac{u}{\gamma_w} = h_e + \frac{(u_s + \bar{u})}{\gamma_w} \quad (2.4)$$

โดยที่ h_e = หัวระดับ (Elevation Head)

u_s = ความดันน้ำสถิต

$\bar{u}$ = ความดันน้ำส่วนเกิน

γ_w = หน่วยน้ำหนักของน้ำ

เพราะฉะนั้น $\frac{\partial^2 h_e}{\partial z^2} = 0$ และ $\frac{\partial^2 u_s}{\partial z^2} = 0$ เพราะความดันน้ำสถิตแปรตามความลึก z

เขียนสมการ (2.3) ใหม่โดยเปลี่ยนหัวทั้งหมดเป็นความดันและหัวระดับตามสมการ (2.4) ได้

$$\frac{k(1+e)}{\gamma_w a_v} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} = - \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial t} \quad (2.5)$$

$$\text{ให้ } c_v = \frac{k(1+e)}{\gamma_w a_v} = \frac{k}{\gamma_w m_v} \quad (2.6)$$

โดยที่ m_v = สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตร

c_v = สัมประสิทธิ์การอัดตัวระบายน้ำ

เปลี่ยนสมการ (2.5) เป็นสมการในรูปความเค้นทั้งหมดและความดันส่วนเกิน ได้สมการควบคุมการอัดตัวระบายน้ำมิติเดียวของ Terzaghi (1923) เป็น

$$c_v \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} - \frac{\partial \sigma}{\partial t} \quad (2.7)$$

เนื่องจาก $\bar{\sigma} = \sigma - u_s - \bar{u}$ และ $\frac{\partial u_s}{\partial t} = 0$

2.1.2 ทฤษฎีการอัดตัวระบายน้ำมิติเดียวของ Davis and Raymond (1965)

พฤติกรรมไม่เชิงเส้นของดินเกิดขึ้นระหว่างการอัดตัวระบายน้ำ Davis and Raymond (1965) ได้พัฒนาทฤษฎีการอัดตัวระบายน้ำมิติเดียวรวมพฤติกรรมไม่เชิงเส้นของดินเข้าไว้ โดยอาศัยสมมติฐานดังต่อไปนี้

- 1) ดินเอกพันธุ์และอิมตัว
- 2) เมื่อดินและน้ำเป็นวัสดุอัดตัวไม่ได้
- 3) เกิดการอัดตัวมิติเดียว
- 4) การอัดตัวได้ของดินเป็นไปตามสมการ

$$e = e_0 - C_c \log \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_0} \quad (2.8)$$

โดยที่ e_0 = อัตราส่วนช่องว่างภายใต้ความเค้นกกดอัดประสิทธิผล $\bar{\sigma}_0$

e = อัตราส่วนช่องว่างภายใต้ความเค้นกกดอัดประสิทธิผล $\bar{\sigma}$

$\bar{\sigma}_0$ = ความเค้นกกดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้นการอัดตัวระบายน้ำ

$\bar{\sigma}$ = ความเค้นกกดอัดประสิทธิผลขณะใด ๆ

C_c = ดัชนีการอัดตัวได้ของดินมีค่าคงตัว

5) ระหว่างที่เกิดการอัดตัวระบายน้ำปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume) $1+e$ เปลี่ยนไปน้อย ถือได้ว่ามีค่าคงตัว

6) การไหลของน้ำในดินเป็นไปตามกฎของ Darcy

7) สัมประสิทธิ์การอัดตัวระบายน้ำ $c_v = \frac{k}{m_v \gamma_w}$ มีค่าคงตัว

โดยที่ k = สัมประสิทธิ์การซึมได้

m_v = สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Coefficient of Volume Change)

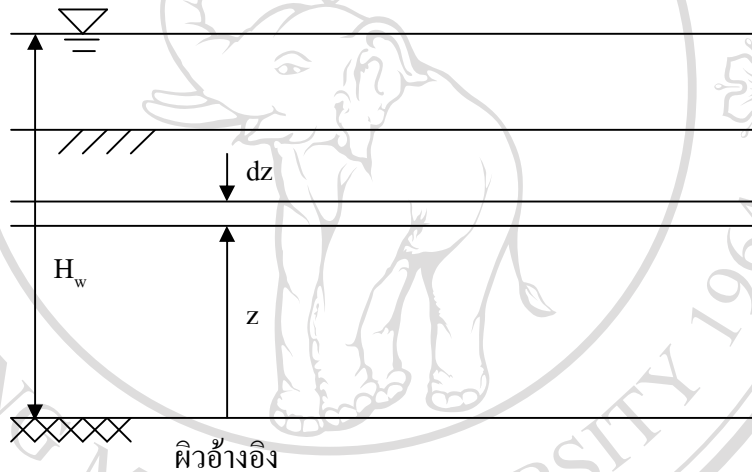
γ_w = หน่วยน้ำหนักของน้ำ

8) ไม่เกิดการอัดตัวถึบคลาน (Creep)

อาศัยสมมติฐาน สมการการต่อเนื่องและความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น- ความเครียด Davis and Raymond (1965) หาสมการควบคุมการอัดตัวระบายน้ำมิติเดียวได้ดังนี้

สมการการต่อเนื่อง

พิจารณาการอัดตัวมิติเดียวของชั้นดินหนา dz ดังรูป 2.2



รูป 2.2 การอัดตัวมิติเดียวของชั้นดิน

ให้ z = พิกัดบอกตำแหน่งของจุดต่าง ๆ ในชั้นดินในขณะเวลา t ใด ๆ

H_w = ตำแหน่งของระดับน้ำใต้ดิน

h = หัว (Head) ทั้งหมดที่ตำแหน่ง z

u = ความดันน้ำทั้งหมดที่ตำแหน่ง z

$\bar{u}$ = ความดันน้ำส่วนเกินที่ตำแหน่ง z

u_s = ความดันน้ำในสภาวะคงที่ที่ตำแหน่ง z

$$\therefore u = u_s + \bar{u} \quad (2.9)$$

$$u_s = (H_w - z)\gamma_w \quad (2.10)$$

$$h = z + \frac{u}{\gamma_w} = z + \left(\frac{u_s}{\gamma_w} + \frac{\bar{u}}{\gamma_w} \right) = z + (H_w - z) + \frac{\bar{u}}{\gamma_w} = H_w + \frac{\bar{u}}{\gamma_w} \quad (2.11)$$

ความลาดทางชลศาสตร์ $i = -\frac{\partial h}{\partial z} = -\frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}$

จากสมมติฐานข้อที่ 6

อัตราการไหลสุทธิของน้ำออกจากชั้นดินหนา dz (พื้นที่หน้าตัด 1 หน่วย) $= \frac{\partial}{\partial z} (ki) dz$

$$= \frac{\partial}{\partial z} \left(-\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) dz$$

$$= -\frac{\partial}{\partial z} \left(m_v C_v \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) dz \quad (2.12)$$

ให้ ε_v = ความเครียดเชิงปริมาตร (Volumetric Strain)

$\therefore$ อัตราการลดลงของปริมาตรของชั้นดินหนา dz (พื้นที่หน้าตัด 1 หน่วย) $= \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} dz$

จากเงื่อนไขการต่อเนื่อง

อัตราการไหลสุทธิของน้ำออกจากชั้นดินหนา dz (พื้นที่หน้าตัด 1 หน่วย) = อัตราการลดลงของปริมาตรชั้นดินหนา dz (พื้นที่หน้าตัด 1 หน่วย)

$$-\frac{\partial}{\partial z} \left(m_v C_v \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) dz = \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} dz \quad (2.13)$$

หรือได้สมการการต่อเนื่องเป็น

$$-\frac{\partial}{\partial z} \left(m_v C_v \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial \sigma} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial t} = m_v \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial t} \quad (2.14)$$

สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น- ความเครียด

จากคำจำกัดความ $m_v = \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial \sigma} = -\frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial \sigma}$ (2.15)

หาอนุพันธ์ของ e ในส่วนตัวแปร $\bar{\sigma}$ จากสมการ (2.8) แล้วแทนลงในสมการ (2.15) ได้

$$m_v = \frac{0.434 C_c}{(1+e)\bar{\sigma}} \quad (2.16)$$

แทนค่า m_v จากสมการ (2.16) ลงในสมการ (2.14) และใช้สมมติฐานข้อที่ 5 ได้สมการควบคุมการอัดตัวระบายน้ำ

$$-c_v \left[\frac{1}{\bar{\sigma}} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} - \left(\frac{1}{\bar{\sigma}} \right)^2 \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial z} \right] = \frac{1}{\bar{\sigma}} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial t} \quad (2.17)$$

จากคำจำกัดความความเค้นประสิทธิภาพ

$$\sigma = \bar{\sigma} + u \quad (2.18)$$

โดยที่ σ = ความเค้นกดอัดทั้งหมด

หาอนุพันธ์ของ σ ในส่วนตัวแปร z จากสมการ (2.18) ได้

$$\frac{\partial \sigma}{\partial z} = \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial u_s}{\partial z} \quad (2.19)$$

ถ้าชั้นดินบางละทิ้งน้ำหนักของดินได้

$$\frac{\partial \sigma}{\partial z} = \frac{\partial u_s}{\partial z} = 0 \quad (2.20)$$

แทนค่า $\frac{\partial \sigma}{\partial z}$ และ $\frac{\partial u_s}{\partial z}$ จากสมการ (2.20) ลงในสมการ (2.19) ได้

$$\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial z} = -\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \quad (2.21)$$

แทนค่า $\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial z}$ จากสมการ (2.21) ลงในสมการ (2.17) ได้

$$-c_v \left[\frac{1}{\sigma} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} + \left(\frac{1}{\sigma} \right)^2 \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)^2 \right] = \frac{1}{\sigma} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial t} \quad (2.22)$$

ให้ $w = \log \frac{\sigma}{\sigma_f}$ (2.23)

โดยที่ $\bar{\sigma}_f$ = ความเค้นกดอัดประสิทธิผลตอนสิ้นสุดการอัดตัวระบายน้ำ

ถ้าน้ำหนักบรรทุกคงตัว $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_f - \bar{u}$ ดังนั้น

$$w = \log \frac{\bar{\sigma}_f - \bar{u}}{\bar{\sigma}_f} \quad (2.24)$$

หาอนุพันธ์ของ w ในส่วนตัวแปร z จากสมการ (2.24) ได้

$$\frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{0.434}{\bar{\sigma}} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = -\frac{0.434}{\bar{\sigma}} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} - \frac{0.434}{(\bar{\sigma})^2} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)^2 \quad (2.26)$$

หาอนุพันธ์ของ w ในส่วนตัวแปร t จากค่าจำกัดความ w สมการ (2.23) ได้

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{0.434}{\bar{\sigma}} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial t} \quad (2.27)$$

กำจัด $\bar{u}$ และ $\bar{\sigma}$ ออกจากสมการ (2.22), (2.25), (2.26) และ (2.27) ได้สมการควบคุมการอัดตัวระบายน้ำสำหรับชั้นดินบางภายใต้้น้ำหนักบรรทุกคงตัวเป็น

$$c_v \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = \frac{\partial w}{\partial t} \quad (2.28)$$

ซึ่งมีรูปแบบเหมือนกับสมการควบคุมการอัดตัวระบายน้ำมิติเดียวของ Terzaghi (1943)

2.1.3 ทฤษฎีการอัดตัวระบายน้ำมิติเดียวของ Mesri and Rokhsar (1974)

ในงานวิจัยนี้ใช้ทฤษฎีการอัดตัวระบายน้ำมิติเดียวของ Mesri and Rokhsar (1974) ภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงตัว มาประยุกต์ใช้ในการหาอัตราการกระจายความดันน้ำส่วนเกินและเปอร์เซ็นต์การอัดตัวระบายน้ำเฉลี่ยแล้วคำนวณหาอัตราการทรุดตัว

Mesri and Rokhsar (1974) ได้นำทฤษฎีการอัดตัวระบายน้ำมิติเดียวสำหรับดินอิ่มตัว เอกพันธ์ และไร้น้ำหนักของ Rokhsar (1973) มาเผยแพร่ ทฤษฎีของ Mesri and Rokhsar (1974) พิจารณาถึงการอัดตัวที่คลาน การลดลงของการอัดตัวได้ของดิน การซึมได้ของน้ำขณะที่เกิดการอัดตัวระบายน้ำ อิทธิพลของความเค้นกดอัดประสิทธิผลสูงสุดในอดีต (Maximum Effective Preconsolidation Stress) และผลของความเครียดมาก (Large Strain) รวมเข้าไปด้วย

สมมติฐานสำหรับสร้างสมการควบคุมการอัดตัวระบายน้ำมิติเดียวตามแนวแกนตั้ง (z) มีดังนี้

1. ดินเป็นตัวกลางต่อเนื่อง (Continuum) อิ่มตัว และ เอกพันธ์ (Homogeneous) และ ไร้น้ำหนัก
2. เมื่อดินและน้ำเป็นวัสดุอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Material)
3. ความเครียดที่เกิดขึ้นมีค่ามาก (Large Strain)
4. เกิดการอัดตัวมิติเดียว (One Dimensional Compression)
5. การอัดตัวของโครงสร้างก่อดิน (Soil Skeleton) ขึ้นอยู่กับประวัติการรับแรงในอดีต (Stress History) ตามสมการ

กรณีดินอัดตัวตามปกติ (NC, Normally Consolidated Soil); $\bar{\sigma} > \bar{\sigma}_c$

$$C_c = -\frac{\partial e}{\partial \log \bar{\sigma}} \quad (2.29)$$

โดยที่ e = อัตราส่วนช่องว่างขณะใด ๆ

$\bar{\sigma}$ = ความเค้นกดอัดประสิทธิผล (Effective Stress)

$\bar{\sigma}_c$ = ความเค้นกดอัดประสิทธิผลสูงสุดในอดีต (Maximum Effective Preconsolidation Stress)

C_c = ดัชนีการอัดตัวได้ของดินในช่วงอัดตัวปกติ (Compression Index) มีค่าคงตัว

กรณีดินอัดตัวเกินปกติ (OC, Overconsolidated Soil); $\bar{\sigma} \leq \bar{\sigma}_c$

$$C_r = -\frac{\partial e}{\partial \log \sigma} \quad (2.30)$$

โดยที่ C_r = ดัชนีการอัดตัวซ้ำของดิน (Recompression Index) มีค่าคงตัวดังรูป 2.1

6. การอัดตัวที่ปลายของดินเป็นไปตามสมการ

$$\Delta e = -\beta \cdot C_\alpha \Delta \log t \quad (2.31)$$

$$\beta = \frac{e_o - e}{e_o - e_p} \quad (2.32)$$

โดยที่ C_α = ดัชนีการอัดตัวที่ปลายมีค่าคงตัว
 e_o = อัตราส่วนช่องว่างของดินตอนเริ่มต้นการอัดตัวระบายน้ำ
 e_p = อัตราส่วนช่องว่างของดินภายใต้ความเค้นกดอัดประสิทธิผลตอนสิ้นสุดการอัดตัวระบายน้ำ

β = อัตราส่วนการอัดตัวระบายน้ำ (Consolidation Ratio)

t = เวลา

7. การไหลของน้ำในดินเป็นไปตามกฎของ Darcy

8. สัมประสิทธิ์การซึมได้ตามแกนตั้ง (k) เปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio) ตามสมการ

$$C_k = \frac{e_p - e_o}{\log(k_o / k_p)} \quad (2.33)$$

โดยที่

k_o = สัมประสิทธิ์การซึมได้ของดินตอนเริ่มต้นการอัดตัวระบายน้ำ

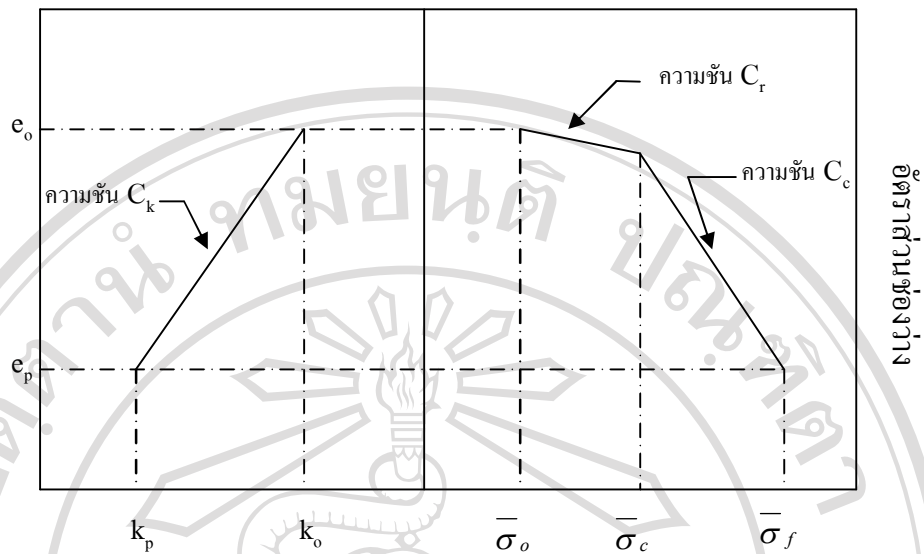
k_p = สัมประสิทธิ์การซึมได้ของดินที่อัตราส่วนช่องว่าง e_p

C_k = ดัชนีการซึมได้ ดังรูป 2.3

อาศัยสมมติฐาน สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น – ความเครียด (Stress–Strain Relationship) Mesri and Rokhsar (1974) หาสมการควบคุมการอัดตัวระบายน้ำมิติเดียวได้ดังนี้

สมการการต่อเนื่อง (ถ้าไม่เกิดการอัดตัวที่ปลาย)

พิจารณาการอัดตัวมิติเดียวของก้อนดิน $A_0B_0C_0D_0$ ในขณะเริ่มต้นไปเป็นก้อนดิน $ABCD$ ในขณะเวลาใด ๆ ดังรูป 2.4



ลอการิทึม(สัมประสิทธิ์การซึมได้) ลอการิทึม(ความเค้นกดอัดประสิทธิผล)

รูป 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมได้, อัตราส่วนช่องว่าง และ ความเค้นกดอัดประสิทธิผล

ที่มา : Mesri and Rokhsar (1974)

จากสมมติฐานข้อ 4

$$\overline{A_0B_0} = \overline{AB}$$

ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดของก้อนดินไม่เปลี่ยนแปลง

ให้ a = พื้นที่หน้าตัดของก้อนดิน $A_0B_0C_0D_0$ และ $ABCD$

e_0 และ e = อัตราส่วนช่องว่างของก้อนดิน $A_0B_0C_0D_0$ และ $ABCD$ ตามลำดับได้

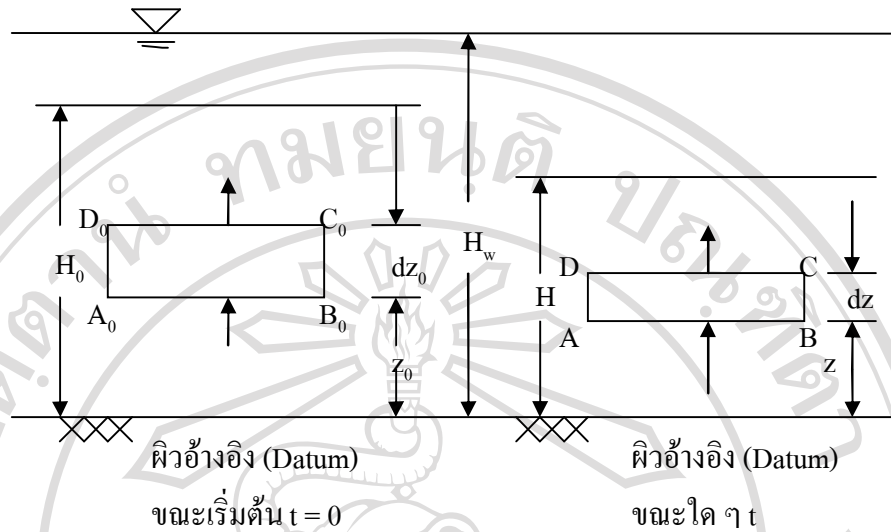
ปริมาตรก้อนดิน $A_0B_0C_0D_0 = adz_0$

จากความสัมพันธ์ระหว่างสถานะ (Phase Relationship)

$$\text{ปริมาตรเนื้อดินในก้อนดิน } A_0B_0C_0D_0 = \frac{adz_0}{1+e_0}$$

ในทำนองเดียวกัน

$$\text{ปริมาตรเนื้อดินในก้อนดิน } ABCD = \frac{adz}{1+e} \quad \text{มีค่าคงตัวตลอดเวลา}$$



รูป 2.4 การอัดตัวมิติเดียวของชั้นดิน

ให้ H_0 = ความหนาของชั้นดินตอนเริ่มต้นการอัดตัวระบายน้ำ
 H = ความหนาของชั้นดินขณะใด ๆ
 z_0 = พิกัดบอกตำแหน่งของก้นดินตอนเริ่มต้นการอัดตัวระบายน้ำ
 z = พิกัดบอกตำแหน่งของก้นดินขณะใด ๆ
 H_w = ตำแหน่งของระดับน้ำใต้ดิน

จากสมมติฐานข้อที่ 2

ปริมาตรเนื้อดินในก้อนดิน $A_0B_0C_0D_0$ = ปริมาตรเนื้อดินในก้อนดิน $ABCD$ ดังนั้น

$$\frac{adz_0}{1+e_0} = \frac{adz}{1+e} \quad (2.34)$$

หรือ

$$\frac{dz_0}{dz} = \frac{1+e_0}{1+e} \quad (2.35)$$

ให้

h = หัว (Head) ทั้งหมดที่หน้าตัด AB

u = ความดันน้ำทั้งหมดที่หน้าตัด AB

$\bar{u}$ = ความดันน้ำส่วนเกินที่หน้าตัด AB

u_s = ความดันน้ำในสภาวะคงที่ที่หน้าตัด AB

γ_w = หน่วยน้ำหนักของน้ำ

$$\therefore u = u_s + \bar{u}$$

$$u_s = (H_w - z)\gamma_w$$

$$h = z + \frac{u}{\gamma_w} = z + \left(\frac{u_s}{\gamma_w} + \frac{\bar{u}}{\gamma_w} \right) = z + (H_w - z) + \frac{\bar{u}}{\gamma_w} = H_w + \frac{\bar{u}}{\gamma_w} \quad (2.36)$$

ความลาดทางชลศาสตร์ $i = -\frac{\partial h}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\bar{u}}{\gamma_w} \right)$ (2.37)

จากสมมติฐานข้อที่ 7

อัตราการไหลสุทธิของน้ำออกจากก้อนดิน $ABCD = \frac{\partial}{\partial z} (ki)adz$ (2.38)

จากความสัมพันธ์ระหว่างสถานะ (Phase Relationship)

อัตราการลดลงของน้ำในก้อนดิน $ABCD = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{ea}{1+e} dz \right)$ (2.39)

จากเงื่อนไขการต่อเนื่อง

อัตราการไหลสุทธิของน้ำออกจากก้อนดิน $ABCD =$ อัตราการลดลงของน้ำในก้อนดิน $ABCD$

$$\frac{\partial}{\partial z} (ki)adz = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{ea}{1+e} dz \right) = -\frac{adz}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.40)$$

หรือ

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[k \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\bar{u}}{\gamma_w} \right) \right] = \left(\frac{1}{1+e} \right) \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.41)$$

จากสมมติฐานข้อ 2 γ_w มีค่าตัว และหาอนุพันธ์ในส่วนตัวแปร z_0 ได้

$$\frac{\partial}{\partial z_0} \left(\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z_0} \frac{dz_0}{dz} \right) \frac{dz_0}{dz} = \frac{1}{(1+e)} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.42)$$

แทนค่า $\frac{dz_0}{dz}$ ได้

$$\frac{(1+e_0)^2}{\gamma_w} \frac{\partial}{\partial z_0} \left(\frac{k}{1+e} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z_0} \right) = \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.43)$$

ให้ $\left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)_p =$ ค่า $\frac{\partial e}{\partial t}$ อันเนื่องมาจากการอัดตัวระบายน้ำหลัก (Primary Consolidation)

สมการการต่อเนื่อง (Continuity Equation) เขียนได้ดังนี้

$$\left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)_p = \frac{(1+e_0)^2}{\gamma_w} \frac{\partial}{\partial z_0} \left(\frac{k}{1+e} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z_0} \right) \quad (2.44)$$

โดยที่

$t =$ เวลา

$k =$ สัมประสิทธิ์การซึมได้

$\bar{u} =$ ความดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore Water Pressure)

นำสมการที่ (2.5) มาเขียนใหม่ได้เป็น

$$k = k_o b^\beta \quad (2.45)$$

โดยที่
$$b = \frac{k_p}{k_o} = \left(\frac{\bar{\sigma}_f}{\bar{\sigma}_o} \right)^{-\frac{C_c}{C_k}} \quad (2.46)$$

เขียนให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติได้โดยกำหนดตัวแปรไร้มิติดังต่อไปนี้

$$\lambda = \frac{z_o}{H_o} \quad (2.47)$$

$$\mu = \frac{\bar{u}}{\Delta p} \quad (2.48)$$

$$\Delta p = \bar{\sigma}_f - \bar{\sigma}_o$$

$$T = \frac{k_o(1+e_o)\bar{\sigma}_o t}{0.434\gamma_w C_c H_o^2} \quad (2.49)$$

โดยที่ $\bar{\sigma}_f$ = ความเค้นกกดอัดประสิทธิผลตอนสิ้นสุดการอัดตัวระบายน้ำ (Final Effective Stress)

$\bar{\sigma}_o$ = ความเค้นกกดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้น (Initial Effective Stress)

กำจัด k ออกจากสมการ (2.44) และ (2.45) แล้วเปลี่ยนตัวแปรใหม่ให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ โดยใช้สมการ (2.47), (2.48) และ (2.49) ได้สมการการอัดตัวระบายน้ำมิติเดียวในรูปตัวแปรไร้มิติ ดังนี้

$$D \frac{1+e_o}{1+e} b^\beta \left[(\ln b + \frac{e_o - e_p}{1+e}) \frac{\partial \beta}{\partial \lambda} \frac{\partial \mu}{\partial \lambda} + \frac{\partial^2 \mu}{\partial \lambda^2} \right] = \left(\frac{\partial \beta}{\partial T} \right)_p \quad (2.50)$$

โดยที่

$$D = \frac{0.434}{E} \left(1 - \frac{\bar{\sigma}_f}{\bar{\sigma}_o} \right) \quad (2.51)$$

$$E = \frac{C_r}{C_c} \log\left(\frac{\bar{\sigma}_c}{\bar{\sigma}_o}\right) + \log\left(\frac{\bar{\sigma}_f}{\bar{\sigma}_c}\right) \quad (2.52)$$

และ $\left(\frac{\partial \beta}{\partial T} \right)_p$ = ค่า $\left(\frac{\partial \beta}{\partial T} \right)$ อันเนื่องมาจากการอัดตัวระบายน้ำหลัก

ในกรณีความเครียดน้อยสมการ (2.50) ลดรูปลงได้เป็น

$$D b^\beta \left((\ln b) \frac{\partial \beta}{\partial \lambda} \frac{\partial \mu}{\partial \lambda} + \frac{\partial^2 \mu}{\partial \lambda^2} \right) = \frac{\partial \beta}{\partial T} \quad (2.53)$$

เพราะ $\frac{(1+e)}{(1+e_o)} = 1$ และ $\frac{(e_o - e_p)}{(1+e)} = 0$

สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น - ความเครียด-เวลา

เนื่องจากอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดดินเป็นฟังก์ชันของความเค้นกดอัดประสิทธิผลและเวลา และความเค้นกดอัดประสิทธิผลเป็นฟังก์ชันของ z_0 และเวลา ตามแคลคูลัสสมการเส้นโค้งการอัดตัวได้เขียนได้เป็น

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)_{z_0} = \left(\frac{\partial e}{\partial \sigma} \right)_t \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial t} + \left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)_{\bar{\sigma}} = \left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)_p + \left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)_{\bar{\sigma}} \quad (2.54)$$

โดยที่ $\left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)_{z_0}$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนช่องว่างเมื่อ z_0 คงตัว $= \frac{\partial e}{\partial t}$

$\left(\frac{\partial e}{\partial \sigma} \right)_t \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial t} = \left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)_p$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนช่องว่างอันเนื่องมาจากการอัดตัวระบายน้ำหลัก

$\left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)_{\bar{\sigma}}$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนช่องว่างอันเนื่องมาจากการอัดตัวกักคาน

หรือ

$$\frac{\partial \beta}{\partial T} = \left(\frac{\partial \beta}{\partial T} \right)_p + \left(\frac{\partial \beta}{\partial T} \right)_{\bar{\sigma}} \quad (2.55)$$

โดยที่ $\left(\frac{\partial \beta}{\partial T} \right)_p$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการอัดตัวระบายน้ำอันเนื่องมาจากการอัดตัวระบายน้ำหลัก

$\left(\frac{\partial \beta}{\partial T} \right)_{\bar{\sigma}}$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการอัดตัวระบายน้ำอันเนื่องมาจากการอัดตัวกักคาน

จากสมการที่ (2.29), (2.30) และ (2.31) โดยใช้กฎลูกโซ่ (Chain rule) จะได้

$$\left(\frac{\partial e}{\partial \sigma} \right)_t = -\frac{0.434 C_r}{\bar{\sigma}} \quad \bar{\sigma} \leq \bar{\sigma}_c \quad (2.56)$$

$$\left(\frac{\partial e}{\partial \sigma} \right)_t = -\frac{0.434 C_c}{\bar{\sigma}} \quad \bar{\sigma} \geq \bar{\sigma}_c \quad (2.57)$$

$$\left(\frac{\partial \beta}{\partial \sigma} \right)_{\bar{\sigma}} = -\frac{0.434 \beta C_\alpha}{t} \quad (2.58)$$

$$\left(\frac{\partial \beta}{\partial T} \right)_{\bar{\sigma}} = -\frac{0.434 \beta C_\alpha}{T \Delta e} \quad (2.59)$$

โดยที่

$$\Delta e = e_0 - e_p$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกอดอัดประสิทธิภาพความเครียดและความดันน้ำส่วนเกินภายใต้
น้ำหนักบรรทุกทุกแผ่กระจายสม่ำเสมอเพิ่มน้ำหนักแล้วคงตัว q_0 ได้สมการสมดุล

$$q_0 = \bar{u} + (\bar{\sigma} - \bar{\sigma}_0) \quad (2.60)$$

ดังนั้น
$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial t} \quad (2.61)$$

แทนสมการ (2.56),(2.57),(2.59)และ(2.61) ลงในสมการ(2.54) แล้วเขียนในรูปตัวแปรไร้มิติได้
กรณีดินอัดตัวเกินปกติ $\bar{\sigma} \leq \bar{\sigma}_c$ ได้

$$\frac{\partial \mu}{\partial T} = \frac{1}{D\left(\frac{C_r}{C_c}\right)} \left(\mu + \frac{\bar{\sigma}_f}{\bar{\sigma}_o} (1 - \mu) \right) \left[\frac{\partial \beta}{\partial T} - \frac{0.434 \frac{C_\alpha}{C_c} \beta}{E T} \right] \quad (2.62)$$

กรณีดินอัดตัวปกติ $\bar{\sigma} > \bar{\sigma}_c$ ได้

$$\frac{\partial \mu}{\partial T} = \frac{1}{D} \left(\mu + \frac{\bar{\sigma}_f}{\bar{\sigma}_o} (1 - \mu) \right) \left[\frac{\partial \beta}{\partial T} - \frac{0.434 \frac{C_\alpha}{C_c} \beta}{E T} \right] \quad (2.63)$$

สมการ (2.50), (2.62) หรือ (2.63) เป็นสมการควบคุมการอัดตัวระบายน้ำ

2.2 ผลเฉลย

2.2.1 ผลเฉลยของ Olson (1977)

เนื่องจากสมการควบคุมการอัดตัวระบายน้ำและเงื่อนไขขอบเขตเป็นสมการเชิงเส้น (Linear)

Olson (1977) ได้หาสูตรที่ถูกต้องและสอดคล้องกับทฤษฎีการอัดตัวระบายน้ำมิติเดียวของ
Terzaghi (1923) สำหรับความดันน้ำส่วนเกินภายใต้ น้ำหนักบรรทุกทุกเพิ่มเชิงเส้นแล้วคงตัวดังรูป

2.5 โดยนำผลเฉลยความดันน้ำส่วนเกินกรณีน้ำหนักบรรทุกทุกน้อยเพิ่มขึ้นน้ำหนักแล้วคงตัวมา
ซ้อนทับ

ความดันน้ำส่วนเกินภายใต้ น้ำหนักบรรทุกทุกเพิ่มน้ำหนักแล้วคงตัว dp มีค่าเท่ากับ $d\bar{u}$

$$d\bar{u} = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2dp}{M} \sin \frac{Mz}{H} \exp(-M^2 T) \quad (2.64)$$

โดยที่
$$M = \frac{1}{2} \pi (2m + 1)$$

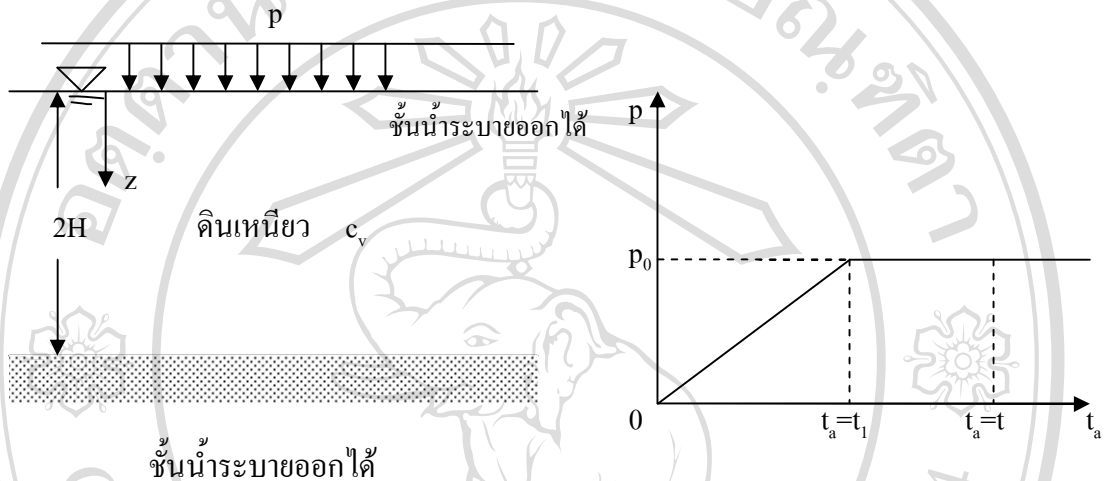
$$m = 0, 1, 2, \dots$$

$$T = \frac{c_v t}{H^2} = \text{ตัวประกอบเวลา}$$

c_v = สัมประสิทธิ์ของการอัดตัวระบายน้ำ

H = ระยะระบายออกไกลสุด

t = เวลานั้นตั้งแต่น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำ



รูป 2.5 การอัดตัวระบายน้ำภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกเพิ่มเชิงเส้นแล้วคงตัว
ฟังก์ชันน้ำหนักบรรทุกทุก p เขียนได้เป็น

$$p = \frac{p_0}{t_0} t_a \quad \text{เมื่อ } t_a \leq t_0$$

$$p = p_0 \quad \text{เมื่อ } t_a > t_0$$
(2.65)

เมื่อ $t \leq t_1$ หรือ $T \leq T_1$ โดยที่ $T_1 = C_v \frac{t_0}{H^2}$ แทนค่า p จากสมการ (2.65) ลงในสมการ

(2.64) แล้วหาปริพันธ์ได้

$$\bar{u} = \int_0^t \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M} \frac{p_0}{t_0} \sin \frac{Mz}{H} \exp\left(-\frac{M^2 C_v (t - t_a)}{H^2}\right) dt_a \quad (2.66)$$

หรือ

$$\bar{u} = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2p_0}{M^3 T_0} \sin \frac{Mz}{H} (1 - \exp(-M^2 T)) \quad (2.67)$$

และระดับการอัดตัวระบายน้ำ U

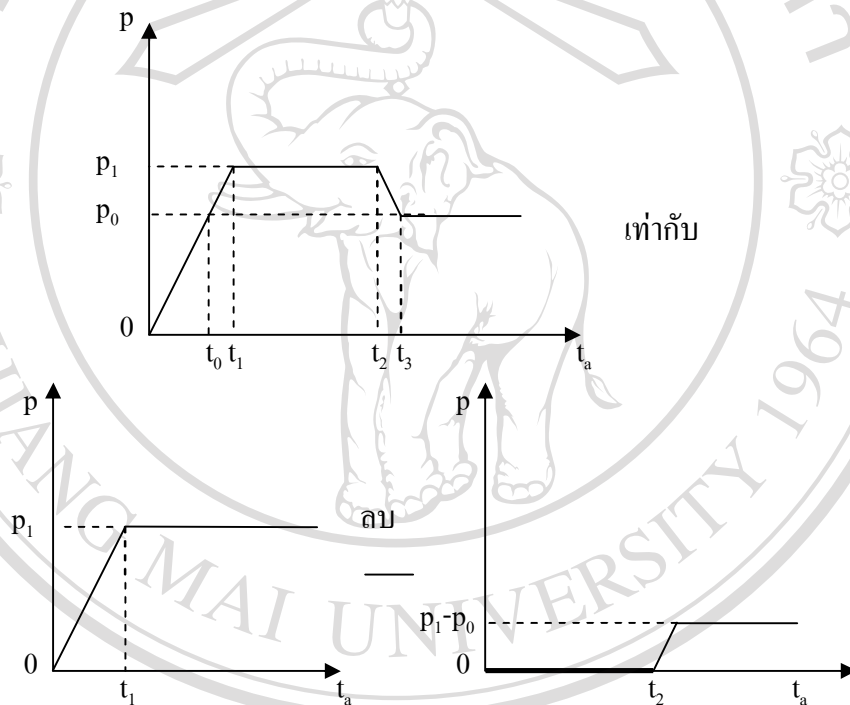
$$U = \frac{2H \frac{t}{t_0} p_0 - \int_0^{2H} u dz}{2Hp_0} = \frac{T}{T_0} \left\{ 1 - \frac{2}{T} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{M^4} [1 - \exp(-M^2 T)] \right\} \quad (2.68)$$

เมื่อ $t > t_1$ หรือ $T > T_1$ หาความดันน้ำส่วนเกินและระดับการอัดตัวระบายน้ำในทำนองเดียวกันได้

$$\bar{u} = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2p_0}{M^3 T_0} (\exp(-M^2 T_0) - 1) \sin \frac{Mz}{H} \exp(-M^2 T) \quad (2.69)$$

$$U = 1 - \frac{2}{T_0} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{M^4} (\exp(M^2 T_0) - 1) \exp(-M^2 T) \quad (2.70)$$

สำหรับการลดน้ำหนักรทุกเป็นน้ำหนักรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้างดังรูป 2.6 การหาผลเฉลยสามารถทำได้โดยการซ้อนทับน้ำหนักรทุกให้ทับกันตามเวลา

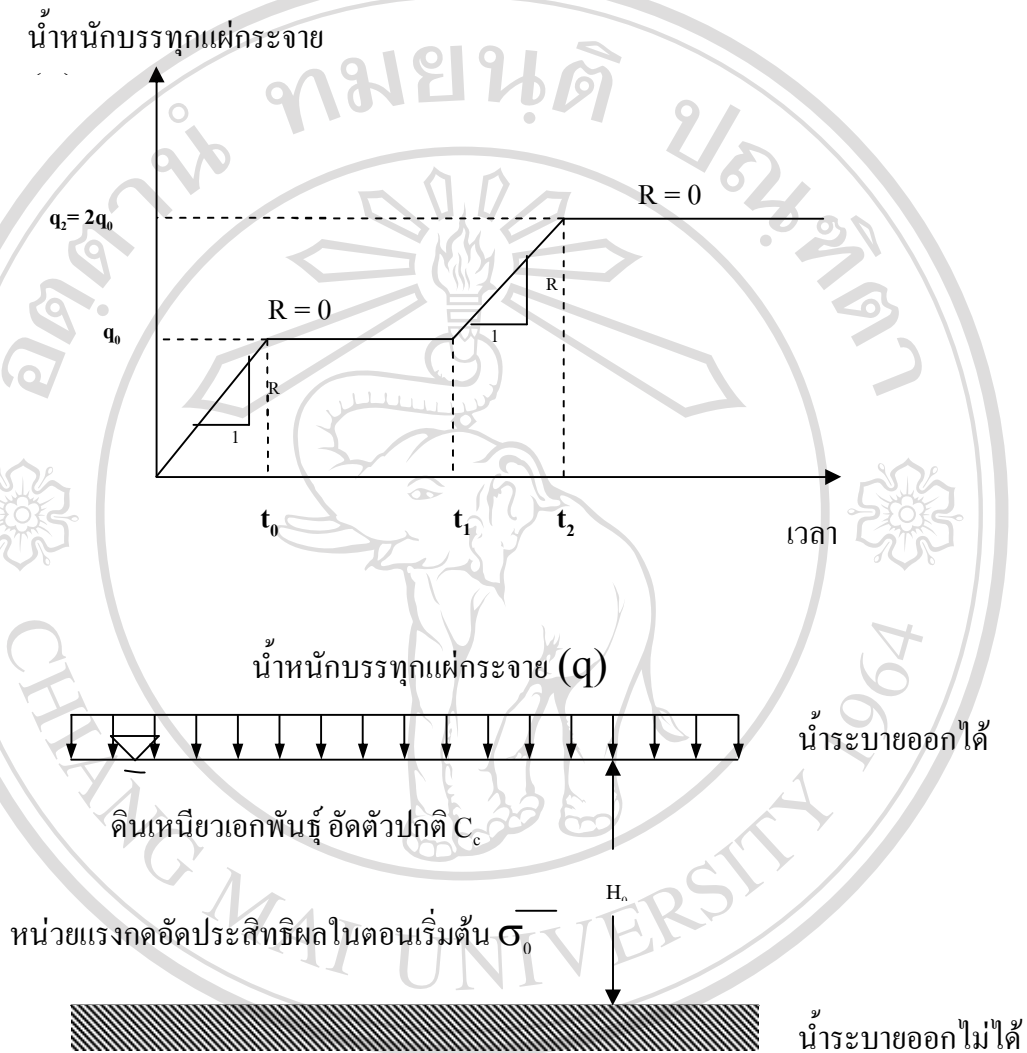


รูป 2.6 การอัดตัวระบายน้ำภายใต้การมีน้ำหนักรทุกเกิน

2.2.2 ผลเฉลยของอรระวี (2551)

อรระวี (2551) ได้วิเคราะห์อัตราการทรุดตัว เนื่องจากการอัดตัวระบายน้ำของชั้นดินเหนียวเอกพันธ์ที่มีความหนาจำกัด อัดตัว ไร้น้ำหนัก ภายใต้ น้ำหนักรทุกเพิ่มทีละชั้น เท่า ๆ กัน 2 ชั้นดังรูป 2.7 น้ำระบายออกจากผิวบนของชั้นดินได้ แต่ระบายออกจากผิวล่างไม่ได้ ชั้นดินเป็นดินอัดตัวปกติ ไม่เกิดการอัดตัวกลับคลาน มีอัตราส่วนดัชนีการซึมได้ต่อดัชนีการอัดตัวของดินเท่ากับ 0.5 , 1 , 2

และอัตราส่วนความเค้นกกดอัดประสิทธิผลตอนสิ้นสุดการอัดตัวระบายน้ำต่อความเค้นกกดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้นเท่ากับ 1.1 , 1.5 , 2 , 3 น้ำหนักบรรทุกทุกแผ่กระจายเพิ่มเชิงเส้นทีละน้อย



รูป 2.7 การบรรทุกน้ำหนักเพิ่มทีละขั้นเท่าๆกัน 2 ขั้น จนถึงค่าสูงสุดของขั้นที่ 1 ที่ตัวประกอบเวลาตรงกับเวลาสิ้นสุดการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกเชิงเส้น เท่ากับ 0.005 , 0.01 , 0.02 , 0.03 , 0.04 , 0.05 , 0.06 , 0.07 , 0.08 , 0.09 , 0.1 , 0.2 , 0.3 , 0.4 , 0.5 , 0.6 , 0.7 , 0.8 , 0.9 , 1 น้ำหนักบรรทุกขั้นที่ 2 เหมือนขั้นที่ 1 แต่เริ่มหลังจากสิ้นสุดการเพิ่ม น้ำหนักบรรทุกขั้นที่ 1 ทั้งนี้ รองจนกว่าอัตราส่วนความดันน้ำส่วนเกินที่ผิวชั้นล่างลดลงทุก ๆ 0.1

วิเคราะห์โดยระเบียบวิธีผลต่างอันตะ คัดการอัดตัวระบายน้ำตามทฤษฎีของ Mesri and Rokhsar

ผลการวิเคราะห์พบว่าเปอร์เซ็นต์การทรุดตัวเพิ่มขึ้น ตามอัตราส่วนดัชนีการซึมได้ต่อดัชนี

การอัดตัวของดิน เมื่ออัตราส่วนความเค้นกอดอัดประสิทธิผลตอนสิ้นสุดการอัดตัวระบายน้ำต่อความเค้นกอดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้นเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การทรุดตัวภายใต้น้ำหนักบรรทุกขั้นที่ 2 ลดลง เปอร์เซ็นต์การทรุดตัวภายใต้น้ำหนักบรรทุกขั้นที่ 1 ลดลง เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เพิ่มขึ้น ถ้าอัตราส่วนดัชนีการซึมได้ต่อดัชนีการอัดตัวของดินน้อยกว่า เท่ากับ มากกว่า 1 ตามลำดับ

ผลเฉลยกรณีความเครียดน้อย $\varepsilon = 0\%$ $\frac{C_k}{C_c} = 0.5, 1, 2$ $\frac{q_0}{\sigma_0} = 0.5$ และ $T_0 = 0.005, 0.02,$

$0.05, 0.2, 1$ มีดังต่อไปนี้

ตาราง 2.1 เปอร์เซ็นต์การทรุดตัว ($\bar{\beta}$) และตัวประกอบเวลา (T) ที่อัตราส่วนดัชนีการซึมได้ (C_k) ต่อดัชนีการอัดตัวของดิน (C_c) เท่ากับ 0.5 อัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) ต่อความเค้นกอดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้น (σ_0) เท่ากับ 0.5

ตัวประกอบ เวลา(T)	ตัวประกอบเวลาที่เวลาสิ้นสุดการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก เชิงเส้น(T_0) = 0.005
	% การทรุดตัว
0.005	5.02
0.165	40.1
0.2461	49
0.3326	56.73
0.4304	63.89
0.545	70.66
0.6843	77.09
0.8628	83.22
1.113	89.07
1.538	94.65

* ที่มา: อรรถะวี (2551)

ตาราง 2.2 เปอร์เซ็นต์การทรุดตัว ($\bar{\beta}$) และตัวประกอบเวลา (T) ที่อัตราส่วนดัชนีการซึมได้ (C_k) ต่อดัชนีการอัดตัวของดิน (C_c) เท่ากับ 1.0 อัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) ต่อความเค้นกอดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้น (σ_0) เท่ากับ 0.5

ตัวประกอบ เวลา(T)	ตัวประกอบเวลาที่เวลาสิ้นสุดการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก เชิงเส้น(T_0) = 0.005
	% การทรุดตัว
0.005	5.53
0.1439	42.45
0.2064	50.92

0.2709	58.19
0.3421	64.95
0.4242	71.37
0.5224	77.53
0.6464	83.46
0.8181	89.17
1.1061	94.68

* ที่มา: อร์ระวี (2551)

ตาราง 2.3 เปอร์เซ็นต์การทรุดตัว ($\bar{\beta}$) และตัวประกอบเวลา (T) ที่อัตราส่วนดัชนีการซึมได้ (C_k) ต่อดัชนีการอัดตัวของดิน (C_c) เท่ากับ 2.0 อัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) ต่อความเค้นกอดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้น ($\bar{\sigma}_0$) เท่ากับ 0.5

ตัวประกอบ เวลา(T)	ตัวประกอบเวลาที่เวลาสิ้นสุดการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก เชิงเส้น(T_0) = 0.005
	% การทรุดตัว
0.005	5.81
0.134	43.67
0.1886	51.91
0.2439	58.95
0.3045	65.49
0.3737	71.74
0.4559	77.76
0.5593	83.58
0.7013	89.22
0.9384	94.69

* ที่มา: อร์ระวี (2551)

ตาราง 2.4 เปอร์เซ็นต์การทรุดตัว ($\bar{\beta}$) และตัวประกอบเวลา (T) ที่อัตราส่วนดัชนีการซึมได้ (C_k) ต่อดัชนีการอัดตัวของดิน (C_c) เท่ากับ 0.5 อัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) ต่อความเค้นกอดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้น ($\bar{\sigma}_0$) เท่ากับ 0.5

ตัวประกอบ เวลา(T)	ตัวประกอบเวลาที่เวลาสิ้นสุดการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก เชิงเส้น(T_0) = 0.005
	% การทรุดตัว
0.0200	10.03
0.1715	40.09
0.2526	49.00

0.3391	56.73
0.4369	63.89
0.5515	70.66
0.6908	77.09
0.8694	83.22
1.1194	89.06
1.5444	94.65

* ที่มา: อร์ระวี (2551)

ตาราง 2.5 เปอร์เซ็นต์การทรุดตัว ($\bar{\beta}$) และตัวประกอบเวลา (T) ที่อัตราส่วนดัชนีการซึมได้ (C_k) ต่อดัชนีการอัดตัวของดิน (C_c) เท่ากับ 1.0 อัตราส่วนน้ำหนักรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) ต่อความเค้นกดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้น ($\bar{\sigma}_0$) เท่ากับ 0.5

ตัวประกอบ เวลา(T)	ตัวประกอบเวลาที่เวลาสิ้นสุดการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก เชิงเส้น(T_0) = 0.02
	% การทรุดตัว
0.0200	11.06
0.1508	42.43
0.2134	50.91
0.2779	58.19
0.3492	64.95
0.4312	71.37
0.5294	77.53
0.6535	83.46
0.8251	89.17
1.1130	94.68

* ที่มา: อร์ระวี (2551)

ตาราง 2.6 เปอร์เซ็นต์การทรุดตัว ($\bar{\beta}$) และตัวประกอบเวลา (T) ที่อัตราส่วนดัชนีการซึมได้ (C_k) ต่อดัชนีการอัดตัวของดิน (C_c) เท่ากับ 2.0 อัตราส่วนน้ำหนักรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) ต่อความเค้นกดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้น ($\bar{\sigma}_0$) เท่ากับ 0.5

ตัวประกอบ เวลา(T)	ตัวประกอบเวลาที่เวลาสิ้นสุดการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก เชิงเส้น(T_0) = 0.02
	% การทรุดตัว
0.0200	11.63
0.1412	43.66
0.1958	51.91

0.2512	58.95
0.3118	65.49
0.3809	71.74
0.4632	77.76
0.5665	83.58
0.7086	89.22
0.9456	94.69

* ที่มา: อร์ระวี (2551)

ตาราง 2.7 เปอร์เซ็นต์การทรุดตัว ($\bar{\beta}$) และตัวประกอบเวลา (T) ที่อัตราส่วนดัชนีการซึมได้ (C_k) ต่อดัชนีการอัดตัวของดิน (C_c) เท่ากับ 0.5 อัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) ต่อความเค้นกอดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้น ($\bar{\sigma}_0$) เท่ากับ 0.5

ตัวประกอบ เวลา(T)	ตัวประกอบเวลาที่เวลาสิ้นสุดการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก เชิงเส้น(T_0) = 0.05
	% การทรุดตัว
0.05	15.86
0.1846	40.07
0.2661	49.02
0.3526	56.75
0.4505	63.92
0.5652	70.69
0.7046	77.12
0.8833	83.24
1.1338	89.09
1.5599	94.67

* ที่มา: อร์ระวี (2551)

ตาราง 2.8 เปอร์เซ็นต์การทรุดตัว ($\bar{\beta}$) และตัวประกอบเวลา (T) ที่อัตราส่วนดัชนีการซึมได้ (C_k) ต่อดัชนีการอัดตัวของดิน (C_c) เท่ากับ 1.0 อัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) ต่อความเค้นกอดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้น ($\bar{\sigma}_0$) เท่ากับ 0.5

ตัวประกอบ เวลา(T)	ตัวประกอบเวลาที่เวลาสิ้นสุดการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก เชิงเส้น(T_0) = 0.05
	% การทรุดตัว
0.05	17.49
0.1649	42.40
0.2278	50.93

0.2923	58.21
0.3637	64.97
0.4457	71.40
0.544	77.56
0.6682	83.48
0.8401	89.19
1.1289	94.70

* ที่มา: อร์ระวี (2551)

ตาราง 2.9 เปอร์เซ็นต์การทรุดตัว ($\bar{\beta}$) และตัวประกอบเวลา (T) ที่อัตราส่วนดัชนีการซึมได้ (C_k) ต่อดัชนีการอัดตัวของดิน (C_c) เท่ากับ 2.0 อัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) ต่อความเค้นกอดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้น ($\bar{\sigma}_0$) เท่ากับ 0.5

ตัวประกอบ เวลา(T)	ตัวประกอบเวลาที่เวลาสิ้นสุดการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก เชิงเส้น(T_0) = 0.05
	% การทรุดตัว
0.05	18.38
0.1557	43.61
0.2107	51.92
0.2661	58.97
0.3267	65.52
0.396	71.76
0.4783	77.78
0.5817	83.60
0.724	89.24
0.9618	94.71

* ที่มา: อร์ระวี (2551)

ตาราง 2.10 เปอร์เซ็นต์การทรุดตัว ($\bar{\beta}$) และตัวประกอบเวลา (T) ที่อัตราส่วนดัชนีการซึมได้ (C_k) ต่อดัชนีการอัดตัวของดิน (C_c) เท่ากับ 0.5 อัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) ต่อความเค้นกอดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้น ($\bar{\sigma}_0$) เท่ากับ 0.5

ตัวประกอบ เวลา(T)	ตัวประกอบเวลาที่เวลาสิ้นสุดการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก เชิงเส้น(T_0) = 0.2
	% การทรุดตัว
0.2	31.72
0.2971	44.98
0.3831	53.48

0.4762	60.93
0.5832	67.87
0.711	74.44
0.8706	80.69
1.0846	86.65
1.4126	92.34
2.1583	97.79

* ที่มา: อร์ระวี (2551)

ตาราง 2.11 เปอร์เซ็นต์การทรุดตัว ($\bar{\beta}$) และตัวประกอบเวลา (T) ที่อัตราส่วนดัชนีการซึมได้ (C_k) ต่อดัชนีการอัดตัวของดิน (C_c) เท่ากับ 1.0 อัตราส่วนน้ำหนักรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) ต่อความเค้นกอดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้น ($\bar{\sigma}_0$) เท่ากับ 0.5

ตัวประกอบ เวลา(T)	ตัวประกอบเวลาที่เวลาสิ้นสุดการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก เชิงเส้น(T_0) = 0.2
	% การทรุดตัว
0.2	34.97
0.2778	47.74
0.3438	55.79
0.4132	62.80
0.4915	69.34
0.5838	75.59
0.6981	81.59
0.8507	87.36
1.0864	92.94
1.668	98.32

* ที่มา: อร์ระวี (2551)

ตาราง 2.12 เปอร์เซ็นต์การทรุดตัว ($\bar{\beta}$) และตัวประกอบเวลา (T) ที่อัตราส่วนดัชนีการซึมได้ (C_k) ต่อดัชนีการอัดตัวของดิน (C_c) เท่ากับ 2.0 อัตราส่วนน้ำหนักรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) ต่อความเค้นกอดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้น ($\bar{\sigma}_0$) เท่ากับ 0.5

ตัวประกอบ เวลา(T)	ตัวประกอบเวลาที่เวลาสิ้นสุดการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก เชิงเส้น(T_0) = 0.2
	% การทรุดตัว
0.2	36.76
0.269	49.21
0.3264	57.02

0.3861	63.79
0.4529	70.14
0.5313	76.22
0.6281	82.09
0.7573	87.78
0.9586	93.29
1.4902	98.64

* ที่มา: อร์ระวี (2551)

ตาราง 2.13 เปอร์เซ็นต์การทรุดตัว ($\bar{\beta}$) และตัวประกอบเวลา (T) ที่อัตราส่วนดัชนีการซึมได้ (C_k) ต่อดัชนีการอัดตัวของดิน (C_c) เท่ากับ 0.5 อัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) ต่อความเค้นกอดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้น ($\bar{\sigma}_0$) เท่ากับ 0.5

ตัวประกอบ เวลา(T)	ตัวประกอบเวลาที่เวลาสิ้นสุดการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก เชิงเส้น(T_0) = 1.0
	% การทรุดตัว
1.0000	66.08
1.1402	73.95
1.2999	80.36
1.5103	86.34
1.8292	92.05
2.5250	97.51

* ที่มา: อร์ระวี (2551)

ตาราง 2.14 เปอร์เซ็นต์การทรุดตัว ($\bar{\beta}$) และตัวประกอบเวลา (T) ที่อัตราส่วนดัชนีการซึมได้ (C_k) ต่อดัชนีการอัดตัวของดิน (C_c) เท่ากับ 1.0 อัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) ต่อความเค้นกอดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้น ($\bar{\sigma}_0$) เท่ากับ 0.5

ตัวประกอบ เวลา(T)	ตัวประกอบเวลาที่เวลาสิ้นสุดการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก เชิงเส้น(T_0) = 1.0
	% การทรุดตัว
1.0000	71.74
1.1148	78.99

1.2497	84.95
1.4410	90.62
1.7943	96.08

* ที่มา: อรรถะวี (2551)

ตาราง 2.15 เปอร์เซ็นต์การทรุดตัว ($\bar{\beta}$) และตัวประกอบเวลา (T) ที่อัตราส่วนดัชนีการซึมได้ (C_k) ต่อดัชนีการอัดตัวของดิน (C_c) เท่ากับ 2.0 อัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) ต่อความเค้นกวดอัดประสิทธิภาพลดตอนเริ่มต้น ($\bar{\sigma}_0$) เท่ากับ 0.5

ตัวประกอบ เวลา(T)	ตัวประกอบเวลาที่เวลาสิ้นสุดการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก เชิงเส้น(T_0) = 1.0
	% การทรุดตัว
1.0000	74.67
1.1048	81.61
1.2321	87.38
1.4255	92.91
1.8952	98.27

* ที่มา: อรรถะวี (2551)