

อัตราการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวระบายน้ำของชั้นดินเหนียว ภายใต้การมีน้ำหนักรบรรทุกเกิน

Rate of Consolidation Settlement of Clay Layer Under Overloading

ชยานันท์ ทองดี* และ สุเทพ นิมนวล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

239 ถ.ห้วยแก้ว อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200 โทรศัพท์: 053-944156-66 โทรสาร: 053-892376

Chayanant Thongdee* and Suthep Nimmual

Department of Civil Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, 50200, Thailand

E-mail : Guide_Chu@hotmail.com*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์อัตราการทรุดตัว เนื่องจากการอัดตัวระบายน้ำมีเดียของชั้นดินเหนียวเอกพันธุ์ ที่มีความหนาจำกัด อัดตัว ภายใต้การมีน้ำหนักรบรรทุกเกิน น้ำระบายออกจากผิวบนของชั้นดินได้ แต่ระบายออกจากผิวล่างไม่ได้ ชั้นดินเป็นดินอัดตัวปกติ ไม่เกิดการอัดตัวกลับกลาน มีอัตราส่วนดัชนีการซึมได้ต่อดัชนีการอัดตัวของดินเท่ากับ 0.5, 1, 2 ดัชนีการอัดตัวเข้าสู่ต่อดัชนีการอัดตัวได้ของดินเท่ากับ 0.5 ใช้ น้ำหนักรบรรทุกร้อยละ 10 และ 20 อัตราส่วนน้ำหนักรบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้างต่อความเค้นกอดอัดประสิทธิภาพลดตอนเริ่มต้นเท่ากับ 0.5, 1, 2 ตัวประกอบเวลาซึ่งตรงกับเวลาที่เพิ่มน้ำหนักรบรรทุกแผ่กระจายถึงค่า น้ำหนักรบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง เท่ากับ 0.005, 0.02, 0.05, 0.2, 1 ตัวประกอบเวลาที่ตรงกับเวลาที่ลดน้ำหนักรบรรทุก 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, 2, 3, 4 (มากกว่าตัวประกอบเวลาซึ่งตรงกับเวลาที่เพิ่มน้ำหนักรบรรทุกแผ่กระจายถึงค่า น้ำหนักรบรรทุก) วิเคราะห์โดยระเบียบวิธีผลต่างอันตะ คัดการอัดตัวระบายน้ำตามทฤษฎีของ เมสรี และรีออร์ฮ์ซาร์

ผลการวิเคราะห์พบว่าในช่วงการมีน้ำหนักรบรรทุกเกินเมื่อร้อยละของการบรรทุกน้ำหนักรเกินมากขึ้นการทรุดตัวเร็วขึ้น แต่ในช่วงการลดน้ำหนักรบรรทุก การทรุดตัวกลับช้าลง

เมื่ออัตราส่วนน้ำหนักรบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้างต่อความเค้นกอดอัดประสิทธิภาพลดตอนเริ่มต้นมีค่ามากขึ้น อิทธิพลของอัตราส่วนน้ำหนักรบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้างต่อความเค้นกอดอัดประสิทธิภาพลดตอนเริ่มต้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนดัชนีการซึมได้ต่อดัชนีการอัดตัวได้ของดิน และจำแนกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ 1) ถ้าดัชนีการซึมได้น้อยกว่าดัชนีการอัดตัวได้ของดิน การทรุดตัวช้าลง ตลอดในช่วงการมีน้ำหนักรบรรทุกเกินและในช่วงที่ลดน้ำหนักรบรรทุกเกินเป็นน้ำหนักรบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง 2) ถ้าดัชนีการซึมได้เท่ากับดัชนีการอัดตัวได้ของดิน การทรุดตัวมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงการมีน้ำหนักรบรรทุกเกิน แต่ในช่วงการลดน้ำหนักรบรรทุกเกินเป็นน้ำหนักรบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้างการทรุดตัวช้าลง 3) ถ้าดัชนีการซึมได้มากกว่าดัชนีการอัดตัวได้ของดิน การทรุดตัวเร็วขึ้นในช่วงการมีน้ำหนักรบรรทุกเกิน แต่ในช่วงการลดน้ำหนักรบรรทุกเกินเป็นน้ำหนักรบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้างการทรุดตัวช้าลง

ABSTRACT

The purpose of this research is to determine rate of consolidation settlement, due to one-dimensional consolidation of homogeneous, saturated, finite layer clay subjected to overloading. Upper surface of the soil layer is permeable while bottom surface is impermeable. The soil layer is normally consolidated without creep having the ratio of permeability index to compression index of 0.5, 1, 2 and ratio of recompression index to compression index of 5. Use 10 and 20 percentages overload. Ratio of distributed load before construction to initial effective stress is 0.5, 1 and 2. Time factor, corresponding to interval of loading time to distributed load before construction, are 0.005, 0.02, 0.05, 0.2, 1. Time factor, corresponding to unloading time, are 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, 2, 3 and 4 (greater than time factor corresponding to overloading time). The problems are analysed by the method of finite difference considering the process of consolidation according to the consolidation theory of Mesri and Rokhsar.

The analytical results indicate that during overloading, rate of consolidation settlement increases as percentages of overloading increases but during unloading rate of consolidation settlement slows down.

As the ratio of distributed load before construction to initial effective stress increases, the influence of the ratio of distributed load before construction to initial effective stress depends on the ratio of permeability index to compression index and can be classified into 3 groups namely: 1) rate of consolidation settlement decreases if permeability index is less than compression index, 2) rate of consolidation settlement is nearly the same during overloading but decrease during unloading if permeability index is equal to compression index and 3) rate of consolidation settlement increases during overloading but decrease during unloading if permeability index is greater than compression index.

1. บทนำ

การทรุดตัวมากเกินไปในระยะทรุดตัวที่ยอมรับให้ได้เป็นปัญหาใหญ่ปัญหาหนึ่ง ที่วิศวกรฐานรากจะต้องเผชิญในงานฐานรากบนดินเหนียวอ่อน วิธีแก้ปัญหานี้วิธีหนึ่งก็คือใช้วิธีบรรเทาทุกน้ำหนักภายใต้การมีน้ำหนักบรรทุกมากเกินไป (Overloading) เพื่อเร่งให้ชั้นดินฐานรากทรุดตัวลงไปส่วนหนึ่งก่อนเริ่มการก่อสร้างโครงการ

ในการวางแผนทำการบรรเทาทุกน้ำหนักรวม โดยทั่วไปวิศวกรฐานรากใช้ทฤษฎีการอัดตัวระบายน้ำมิติเดียวของ Terzaghi (1943) ซึ่งตั้งอยู่บนสมมติฐานว่า สัมประสิทธิ์การซึมได้ และสัมประสิทธิ์การอัดตัวได้ของดินมีค่าคงตัว ขณะที่เกิดการอัดตัวระบายน้ำตามความเป็นจริงที่เกิดขึ้น ในขณะที่เกิดการอัดตัวระบายน้ำ อัตราส่วนช่องว่างของดินลดลง ความเค้นกกดอัดประสิทธิผล (Effective Stress) ในดินเพิ่มขึ้น ทำให้สัมประสิทธิ์การซึมได้ของดินเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนช่องว่าง และการอัดตัวได้ของดินเปลี่ยนแปลงตามความเค้นกกดอัดประสิทธิผลและประวัติการรับความเค้น (Stress History) ของดิน

งานวิจัยนี้จึงมุ่งวิเคราะห์หาอัตราการทรุดตัวจากการอัดตัวระบายน้ำของชั้นดินเหนียวภายใต้การมีน้ำหนักบรรทุกมากเกินไป โดยคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์

การซึมได้ และการอัดตัวได้ของดินขณะที่เกิดการอัดตัวระบายน้ำ ตามทฤษฎีการอัดตัวระบายน้ำมิติเดียวของ Mesri และ Rokhsar (1974)

2. วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวที่มีความหนาจำกัด ภายใต้การมีน้ำหนักบรรทุกมากเกินไป คำนึงถึงการอัดตัวระบายน้ำที่เป็นไปตามทฤษฎีการอัดตัวระบายน้ำมิติเดียวของ Mesri และ Rokhsar (1974)

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาทฤษฎีการอัดตัวระบายน้ำมิติเดียวของ Mesri และ Rokhsar (1974) โดยละทิ้งการอัดตัวที่กลับกลายภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงตัวขึ้นมาใหม่เพื่อให้ใช้ได้ภายใต้น้ำหนักบรรทุกเพิ่มทีละน้อย นำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์การอัดตัวระบายน้ำ แล้วคำนวณหาอัตราการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวเอกพันธ์

สมมติฐานสำหรับสร้างสมการควบคุมการอัดตัวระบายน้ำมิติเดียวตามแนวแกนตั้ง (z_0) เหมือนกับสมมติฐานที่ใช้ในการสร้างทฤษฎีการอัดตัวระบายน้ำมิติเดียวละทิ้งการอัดตัวที่กลับกลายของ Mesri และ Rokhsar

(1974) แต่คิดการอัดตัวระบายน้ำของดินภายใต้ น้ำหนักบรรทุกเพิ่มทีละน้อย มีดังต่อไปนี้

1. ดินเป็นตัวกลางต่อเนื่อง (Continuum) อิมตัวเอกพันธ์ (Homogeneous)
2. เม็ดดิน และ น้ำ เป็น วัสดุ อัดตัว ไม่ได้ (Incompressible Material)
3. การไหลของน้ำในดินเป็นไปตามกฎของ Darcy

$$v_z = k_z i_z \quad (1)$$

โดยที่ v_z = ความเร็วเต็มพื้นที่
 k_z = สัมประสิทธิ์การซึมได้
 ของดิน

$$i_z = \text{ความลาดทางชลศาสตร์}$$

4. เกิดการอัดตัวมิติเดียว (One Dimensional Compression)
5. การเคลื่อนที่ของเม็ดดินและการไหลซึมของน้ำเข้ามา ดินอยู่ในสภาวะสมดุล ขณะเกิดการอัดตัวระบายน้ำ
6. ความเครียดในดินเกิดขึ้นน้อย
7. ดินอัดตัวปกติ การอัดตัวได้ของก้อนดิน (Soil Skeleton) เป็นไปตามสมการ

$$C_c = \frac{\partial e}{\partial \log \sigma} \quad \bar{\sigma} \geq \bar{\sigma}_c \quad (2)$$

$$C_r = -\frac{\partial e}{\partial \log \sigma} \quad \bar{\sigma} \leq \bar{\sigma}_c \quad (3)$$

โดยที่ $\bar{\sigma}_c$ = ความเค้นกวดอัดประสิทธิผล
 สูงสุดในอดีต

$\bar{\sigma}$ = ความเค้นกวดอัดประสิทธิผล

e = อัตราส่วนช่องว่าง

C_c = ดัชนีการอัดตัว (Compression Index)

C_r = ดัชนีการอัดตัวซ้ำของดิน (Recompression Index)

8. สัมประสิทธิ์การซึมได้ตามแนวตั้ง (k_z) เปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio) ตามสมการ

$$C_k = \frac{e_o - e_p}{\log(k_o / k_p)} \quad (4)$$

โดยที่ e_o = อัตราส่วนช่องว่างตอนเริ่มต้น

ก่อนเกิดการอัดตัวระบายน้ำ

e_p = อัตราส่วนช่องว่างตอนหลังสิ้นสุด

การอัดตัวระบายน้ำภายใต้ น้ำหนักบรรทุกเกิน

k_o = สัมประสิทธิ์การซึมได้ตอนเริ่มต้น

ก่อนเกิดการอัดตัวระบายน้ำ

k_p = สัมประสิทธิ์การซึมได้ตอนหลัง

สิ้นสุดการอัดตัวระบายน้ำภายใต้ น้ำหนักบรรทุกเกิน

C_k = ดัชนีการซึมได้

9. ไม่คิดการอัดตัวคืบคลาน (Creep) ของดิน
10. คิดการอัดตัวระบายน้ำของดินภายใต้ น้ำหนักบรรทุกเพิ่มทีละขั้น

สมการการต่อเนื่อง (Continuity Equation) ตามทฤษฎีการอัดตัวระบายน้ำของ Mesri และ Rokhsar (1974) และ ไม่คิดการอัดตัวคืบคลานเขียนแทนด้วยสมการได้ดังนี้

$$\left[\frac{\partial e}{\partial t} \right] = \frac{(1 + e_o)^2}{\gamma_w} \frac{\partial}{\partial z_o} \left[\frac{k}{(1 + e)} \frac{\partial u}{\partial z_o} \right] \quad (5)$$

โดยที่ t = เวลา

k = สัมประสิทธิ์การซึมได้

u = ความดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore

Water Pressure)

e = อัตราส่วนช่องว่างขณะใดๆ

e_o = อัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้น

z_o = พิกัดตามแกนตั้ง มีจุดกำเนิดเริ่มจากผิวดิน

ตอนเริ่มต้นเกิดการอัดตัวระบายน้ำดังลงมา

เขียนสมการ (3) ใหม่ ได้เป็น

$$k = k_o b^\beta \quad (6)$$

โดยที่

$$b = \frac{k_p}{k_o} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{e_o - e}{e_o - e_p} = \text{อัตราส่วนการอัดตัวระบายน้ำ} \quad (8)$$

e_p = อัตราส่วนช่องว่างตอนหลังสิ้นสุดการอัดตัว
ระบายน้ำ ภายใต้การมีน้ำหนักรวมทุกเกิน
เขียนในรูปตัวแปรไร้มิติโดยใช้สมการดังนี้

$$\lambda = \frac{z_0}{H_0} \quad (9)$$

$$\mu = \frac{u}{\Delta p} \quad (10)$$

$$T = \frac{k_o(1+e_o)\bar{\sigma}_o t}{0.434\gamma_w C_c H_o^2} = \text{ตัวประกอบเวลา} \quad (11)$$

โดยที่ $\Delta p = q_1$ (12)

H_0 = ความหนาแน่นดินตอนเริ่มต้นก่อนเกิดการอัดตัว
ระบายน้ำ

q_1 = น้ำหนักบรรทุกแก่กระจายภายใต้การมีน้ำหนัก
บรรทุกเกิน

$\bar{\sigma}_o$ = ความเค้นกกดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้นก่อน
เกิดการอัดตัวระบายน้ำ

γ_w = หน่วยน้ำหนักของน้ำ

แทนค่าต่าง ๆ ในสมการ (5) แล้วหาอนุพันธ์ใน

ส่วนตัวแปรไร้มิติได้สมการการต่อเนื่อง

$$\left[\frac{\partial e}{\partial t} \right] = \frac{(1+e_o)^2}{\gamma_w} \cdot \frac{k_o \Delta p}{H_o^2} \cdot \frac{b^\beta}{(1+e)} \left[\frac{\partial \mu}{\partial \lambda} \cdot \frac{\partial \beta}{\partial \lambda} \left(\ln b + \frac{e_o - e_p}{1+e} \right) + \frac{\partial^2 \mu}{\partial \lambda^2} \right] \quad (13)$$

เขียนอนุพันธ์ $\left[\frac{\partial e}{\partial t} \right]$ ให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ และตัว

ประกอบเวลาได้

$$\left[\frac{\partial e}{\partial t} \right] = -(e_o - e_p) \frac{\partial \beta}{\partial T} = -(e_o - e_p) \frac{\partial \beta}{\partial T} \left[\frac{k_o(1+e_o)\bar{\sigma}_o}{0.434\gamma_w C_c H_o^2} \right] \quad (14)$$

เขียนสมการการต่อเนื่อง (13) ใหม่โดยแทนสมการที่ (14)
ลงในสมการที่ (13) ได้สมการการอัดตัวระบายน้ำมิติเดียว
ในรูปตัวแปรไร้มิติดังนี้

$$\frac{\partial \beta}{\partial T} = D \frac{1+e_o}{1+e} b^\beta \left[\left(\ln b + \frac{e_o - e_p}{1+e} \right) \frac{\partial \beta}{\partial \lambda} \frac{\partial \mu}{\partial \lambda} + \frac{\partial^2 \mu}{\partial \lambda^2} \right] \quad (15)$$

โดยที่

$$D = \frac{0.434}{\log \left(\frac{\bar{\sigma}_f}{\bar{\sigma}_o} \right)} \left[1 - \frac{\bar{\sigma}_f}{\bar{\sigma}_o} \right] \quad (16)$$

$$\bar{\sigma}_f = \bar{\sigma}_o + q_1 \quad (17)$$

ในกรณีที่เกิดความเครียดน้อย อัตราส่วนช่องว่างเปลี่ยน
เล็กน้อย สมการ(14) ลดรูปลงเป็น

$$\frac{\partial \beta}{\partial T} = D b^\beta \left(\ln b \frac{\partial \beta}{\partial \lambda} \frac{\partial \mu}{\partial \lambda} + \frac{\partial^2 \mu}{\partial \lambda^2} \right) \quad (18)$$

ขณะที่เกิดการอัดตัวระบายน้ำภายใต้ น้ำหนักบรรทุก
(q) ดินอยู่ในสภาวะสมดุล เขียนสมการสมดุลละทิ้ง
น้ำหนักดินได้

$$q = \Delta \bar{\sigma} + \bar{u} \quad (19)$$

โดยที่

q = น้ำหนักบรรทุกแก่กระจาย \bar{u}
= ความดันน้ำส่วนเกิน

$\Delta \bar{\sigma}$ = ส่วนเพิ่มของความเค้นกกดอัดประสิทธิผล
(Effective Stress Increment)

จากความเค้นกกดอัดประสิทธิผลเริ่มต้น

$$\therefore \bar{\sigma} = \Delta \bar{\sigma} + \bar{\sigma}_o \quad (20)$$

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

$\bar{\sigma}$ = ความเค้นกกดอัดประสิทธิผล

กำจัด $\Delta \bar{\sigma}$ ออกจากสมการ(19) และสมการ (20) ได้

$$q = \bar{\sigma} - \bar{\sigma}_o + \bar{u} \quad (21)$$

หาอนุพันธ์ในส่วนตัวแปร t แล้วจัดสมการใหม่ได้

$$\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial t} - \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \quad (22)$$

เนื่องจากอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดดินเป็นฟังก์ชัน
ของความเค้นกกดอัดประสิทธิผลและเวลา และความเค้นกกด
อัดประสิทธิผลเป็นฟังก์ชันของ z_0 และเวลา ตาม

แคลคูลัสสมการเส้นโค้งการอัดตัวได้เขียนได้เป็น

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)_{z_0} = \left(\frac{\partial e}{\partial \sigma} \right)_t \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial t} + \left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)_\sigma = \left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)_p + \left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)_\sigma \quad (23)$$

โดยที่

$\left(\frac{\partial e}{\partial t}\right)_{z_0}$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนช่องว่าง

เมื่อ z_0 คงตัว $= \frac{\partial e}{\partial t}$

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

อัตราส่วนช่องว่างอันเนื่องมาจากการอัดตัวระบายน้ำ

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

อันเนื่องมาจากการอัดตัวคืบคลาน

ละทิ้งการอัดตัวคืบคลาน ได้สมการ

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \left(\frac{\partial e}{\partial \sigma}\right)_t \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial t} = \left(\frac{\partial e}{\partial t}\right)_p \quad (24)$$

จากกฎลูกโซ่ได้

$$\left(\frac{\partial e}{\partial \sigma}\right)_t = -\frac{0.434C_c}{\bar{\sigma}} \quad \bar{\sigma} \geq \bar{\sigma}_c \quad (25)$$

$$\left(\frac{\partial e}{\partial \sigma}\right)_t = -\frac{0.434C_r}{\bar{\sigma}} \quad \bar{\sigma} \leq \bar{\sigma}_c \quad (26)$$

แทนค่าสมการ (24) ได้

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \left(\frac{-0.434C_c}{\bar{\sigma}}\right) \left(\frac{\partial q}{\partial t} - \frac{\partial \bar{u}}{\partial t}\right) \quad \bar{\sigma} \geq \bar{\sigma}_c \quad (27)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \left(\frac{-0.434C_r}{\bar{\sigma}}\right) \left(\frac{\partial q}{\partial t} - \frac{\partial \bar{u}}{\partial t}\right) \quad \bar{\sigma} \leq \bar{\sigma}_c \quad (28)$$

เปลี่ยนตัวแปร e เป็น β t เป็น T และ \bar{u} เป็น μ จากคำจำกัดความของ β T และ μ

เมื่อ $\bar{\sigma} \geq \bar{\sigma}_c$

$$\log \left(\frac{\bar{\sigma}_f}{\bar{\sigma}_0}\right) \frac{\partial \beta}{\partial T} = \frac{0.434}{\bar{\sigma}} \left(\frac{\partial q}{\partial T} - \Delta p \frac{\partial \mu}{\partial T}\right) \quad (29)$$

เมื่อ $\bar{\sigma} \leq \bar{\sigma}_c$

$$\log \left(\frac{\bar{\sigma}_f}{\bar{\sigma}_0}\right) \frac{\partial \beta}{\partial T} = \frac{0.434}{\bar{\sigma}} \left(\frac{C_r}{C_c}\right) \left(\frac{\partial q}{\partial T} - \Delta p \frac{\partial \mu}{\partial T}\right) \quad (30)$$

รวมสมการความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด-เวลา และ สมการสมดุลเข้าด้วยกัน แบ่งออกได้เป็น 4 ช่วง ดังนี้

ก) ช่วงนำหนักบรรทุกทุกเพิ่มเชิงเส้น ($0 \leq t \leq t_1$ หรือ $0 \leq T \leq T_1$)

$$q = \frac{q_1}{t_1} t = \frac{q_1}{T_1} T \quad \text{และ} \quad q = \frac{q_0}{t_0} t = \frac{q_0}{T_0} T \quad (31)$$

$$\text{โดยที่} \quad T_0 = \frac{k_0(1+e_0)\bar{\sigma}_0 t_0}{0.434\gamma_w C_c H_0^2}$$

แทนค่าต่างในสมการ (29) กำจัดตัวแปรได้

$$\frac{1}{D} \left[\left(\frac{q_1}{\bar{\sigma}_0}\right) \left(\frac{T}{T_1} - \mu\right) + 1 \right] \frac{\partial \beta}{\partial T} + \frac{1}{T_1} = \frac{\partial \mu}{\partial T} \quad (32)$$

ข) ช่วงนำหนักบรรทุกคงตัวขั้นที่ 1 ($t_1 \leq t \leq t_2$ หรือ $T_1 \leq T \leq T_2$)

$$q = q_1 \quad (33)$$

แทนค่าต่างในสมการ (29) กำจัดตัวแปรได้

$$\frac{1}{D} \left[1 + \left(\frac{q_1}{\bar{\sigma}_0}\right) (1 - \mu) \right] \frac{\partial \beta}{\partial T} = \frac{\partial \mu}{\partial T} \quad (34)$$

ค) ช่วงนำหนักบรรทุกทุกลดเชิงเส้น ($t_2 \leq t \leq t_3$ หรือ $T_2 \leq T \leq T_3$)

$$q = q_1 - \frac{q_0}{t_0} (t - t_2) \quad \text{และ} \quad q = q_1 - \frac{q_0}{T_0} (T - T_2)$$

(35)

$$\text{โดยที่} \quad T_2 = \frac{k_0(1+e_0)\bar{\sigma}_0 t_2}{0.434\gamma_w C_c H_0^2}$$

แทนค่าต่างในสมการ (29) (30) กำจัดตัวแปรได้

ดินอัดตัวปกติ

$$\frac{1}{D} \left[1 + \left(\frac{q_0}{\bar{\sigma}_0}\right) \left((1 - \mu) \frac{q_1}{q_0} - \frac{(T - T_2)}{T_0} \right) \right] \frac{\partial \beta}{\partial T} - \frac{1}{T_0} \frac{q_0}{q_1} = \frac{\partial \mu}{\partial T}$$

(36)

ดินอัดตัวเกินปกติ

$$\frac{1}{D} \left[1 + \left(\frac{q_0}{\bar{\sigma}_0}\right) \left((1 - \mu) \frac{q_1}{q_0} - \frac{(T - T_2)}{T_0} \right) \right] \left(\frac{C_c}{C_r}\right) \frac{\partial \beta}{\partial T} - \frac{1}{T_0} \frac{q_0}{q_1} = \frac{\partial \mu}{\partial T}$$

(37)

ง) ช่วงน้ำหนักรบรรทุกคงตัว ($t_3 \leq t$ หรือ $T_3 < T$)

$$q = q_0 \quad (38)$$

ดินอัดตัวปกติ

$$\frac{1}{D} \left[1 + \left(\frac{q_1}{\sigma_0} \right) (1 - \mu) \right] \frac{\partial \beta}{\partial T} = \frac{\partial \mu}{\partial T} \quad (39)$$

ดินอัดตัวเกินปกติ

$$\frac{1}{D} \left[1 + \left(\frac{q_1}{\sigma_0} \right) (1 - \mu) \right] \left(\frac{C_c}{C_r} \right) \frac{\partial \beta}{\partial T} = \frac{\partial \mu}{\partial T} \quad (40)$$

4. วิธีดำเนินการวิจัย

นำปัญหาการอัดตัวระบายน้ำของชั้นดินเหนียวเอกพันธุ์ อัดตัวปกติ ภายใต้การมีน้ำหนักบรรทุกเกิน น้ำระบายออกจากผิวบนของชั้นดินได้ แต่ผิวล่างไม่สามารถระบายออกได้ มาวิเคราะห์หาค่าเปอร์เซ็นต์การทรุดตัว ($\bar{\beta}$) เริ่มต้นจากการสร้างสมการควบคุมการอัดตัวระบายน้ำ ภายใต้การมีน้ำหนักบรรทุกเกิน โดยอาศัยทฤษฎีการอัดตัวระบายน้ำของ Mesri and Rokhsar (1974) ไม่คิดการอัดตัวระบายน้ำสืบคลาน แล้วหาผลเฉลยโดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างอันตะ (Finite Difference) ตรวจสอบผลเฉลย ภายใต้การมีน้ำหนักบรรทุกเกินกับผลเฉลยของออร์เรวี (2551) กรณีความเครียดน้อย และตรวจสอบผลเฉลยภายหลังจากการลดน้ำหนักบรรทุกเกิน กรณีดัชนีการซึมได้ (C_k) ต่อดัชนีการอัดตัวของดิน (C_c) เท่ากับ 1 และอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) ต่อความเค้นกดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้น ($\bar{\sigma}_0$) เท่ากับ 0.01 กับผลเฉลยของ Olson (1977)

4.1 ปัญหาที่นำมาวิจัย

วิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์การทรุดตัว ($\bar{\beta}$) ของชั้นดินเหนียวเอกพันธุ์ อัดตัวปกติ ภายใต้การมีน้ำหนักบรรทุกเกิน ดังรูป 1 และ 2 ใช้ทฤษฎีการอัดตัวระบายน้ำของ

Mesri and Rokhsar (1974) ไม่คิดการอัดตัวสืบคลาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) อัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายภายใต้การมีน้ำหนักบรรทุกเกิน (q_1) ต่อน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) ใช้ค่าตาม OECD Road Research Group (1979)

$$\frac{q_1}{q_0} = 1.0, 1.1, 1.2$$

- 2) อัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) ต่อความเค้นกดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้น ($\bar{\sigma}_0$) ใช้ค่าตาม Mesri และ Rokhsar (1974)

$$\frac{q_0}{\bar{\sigma}_0} = 0.5, 1, 2$$

- 3) ตัวประกอบเวลา ซึ่งตรงกับเวลาที่เพิ่มน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายถึงค่าน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง T_0

$$\left(T_0 = \frac{k_o(1+e_o)\bar{\sigma}_o t_o}{0.434\gamma_w C_c H^2} \right) \text{ ใช้ค่าตาม}$$

Schiffman (1958)

$$T_0 = 0.005, 0.02, 0.05, 0.2, 1$$

- 4) ตัวประกอบเวลาซึ่งตรงกับเวลาเริ่มต้นการบรรทุกน้ำหนักภายใต้การมีน้ำหนักบรรทุกเกิน T_1

$$T_1 = \frac{q_1}{q_0} T_0$$

- 5) ตัวประกอบเวลาซึ่งตรงกับเวลาเริ่มลดน้ำหนักบรรทุก T_2

$T_2 = 0.005, 0.01, 0.02, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 2, 3, 4$ (แต่ใช้ค่า T_2 มากกว่าหรือเท่ากับ T_1)

- 6) อัตราส่วนดัชนีการซึมได้ (C_k) ต่อดัชนีการอัดตัวได้ของดิน (C_c) ใช้ค่าตาม Berry and Wilkinson (1969)

$$\frac{C_k}{C_c} = 0.5, 1, 2$$

7.) อัตราส่วนดัชนีการอัดตัวซ้ำ (C_r) ต่อดัชนีการอัดตัวได้ของดิน (C_c) ใช้ค่าตาม Ladd (1971)

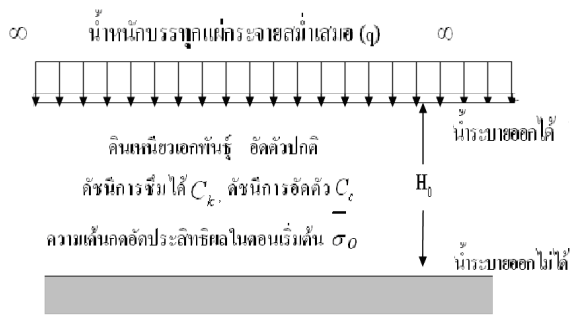
$$\frac{C_r}{C_c} = 0.5$$

8.) ต้องการหาเปอร์เซ็นต์การทรุดตัวที่ตัวประกอบเวลา

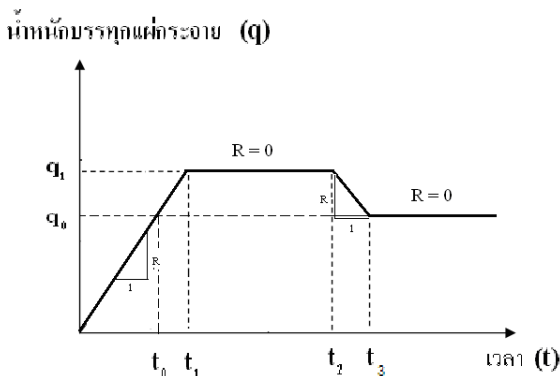
T

$T = 0.005, 0.01, 0.02, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 2, 3, 4$ และ T_1, T_2, T_3

โดยที่ $T_3 = \left(\frac{q_1}{q_0} - 1 \right) T_0 + T_2$



รูปที่ 1 ปัญหาที่นำมาวิเคราะห์



รูปที่ 2 การบรรทุคน้ำหนักภายใต้การมีน้ำหนักรวมที่เกิน

4.2 การหาผลเฉลย

หาผลเฉลยโดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างอันดับ (Finite Difference) กำหนดพิทัก λ เพิ่มขึ้นตามความลึกสมการควบคุมการอัดตัวระบายน้ำยังคงเดิมเหมือนกับพิทัก λ ลดลงตามความลึก เริ่มต้นจากการเขียนสมการควบคุมการ

อัดตัวระบายน้ำ เงื่อนไขเริ่มต้น และเงื่อนไขขอบเขตในรูปแบบต่างอันดับได้สมการชุดใหม่ในรูปแบบสมการพีชคณิตแล้วหาผลเฉลยของชุดสมการพีชคณิต

ก) ช่วงน้ำหนักรวมที่เพิ่มเชิงเส้น ($0 \leq T \leq T_1$)

สมการควบคุมการอัดตัวระบายน้ำภายใต้ น้ำหนักรวมที่เพิ่มขึ้น

ใช้สมการ (18) กับ (32)

เงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Conditions)

พิจารณาทางกายภาพ เริ่มต้นยังไม่มีน้ำหนักรวมที่กระทำ อัตราส่วนช่องว่างและความดันน้ำส่วนเกินในตอนเริ่มต้นเท่ากับศูนย์ทั้งหมด

$$\bar{u}(z_0, 0) = 0 \quad H_0 \geq z_0 \geq 0 \quad (41)$$

$$\beta(z_0, 0) = 0 \quad H_0 \geq z_0 \geq 0 \quad (42)$$

เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions)

ที่ผิวบนน้ำระบายออกได้

$$e(0, t) - e_p = C_c \log \frac{\sigma_0 + q_1}{\sigma} \quad t \geq 0 \quad (43)$$

$$\bar{u}(0, t) = 0 \quad t \geq 0 \quad (44)$$

ที่ผิวล่างน้ำระบายออกไม่ได้

อัตราส่วนช่องว่างเพิ่มขึ้นตามความลึกและมีค่าสูงสุดที่ผิวล่าง ความลาดทางชลศาสตร์เท่ากับศูนย์ที่ผิวล่าง

$$\left(\frac{\partial e}{\partial z_0} \right)_{z_0=H_0} = 0 \quad t \geq 0 \quad (45)$$

$$\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z_0} \right)_{z_0=H_0} = 0 \quad t \geq 0 \quad (46)$$

ข) ช่วงน้ำหนักรวมคงตัว ($T_1 \leq T \leq T_2$)

สมการควบคุมการอัดตัวระบายน้ำภายใต้ น้ำหนักรวมคงตัว

ใช้สมการ (18) กับ (34)

เงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Conditions)

ใช้เงื่อนไขที่เวลาสิ้นสุดช่วงน้ำหนักรวมที่เพิ่มเชิงเส้นถึงช่วงบรรทุคน้ำหนักเกิน เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นของช่วงน้ำหนักรวมคงตัว

เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions)

ที่ผิวบนน้ำระบายออกได้

$$e(0,t) = e_p \quad t \geq 0 \quad (47)$$

$$\bar{u}(0,t) = 0 \quad t \geq 0 \quad (48)$$

ที่ผิวล่างน้ำระบายออกไม่ได้

อัตราส่วนช่องว่างเพิ่มขึ้นตามความลึกและมีค่าสูงสุด

ที่ผิวล่าง ความลาดทางชลศาสตร์เท่ากับศูนย์ที่ผิวล่าง

$$\left(\frac{\partial e}{\partial z_0} \right)_{z_0=H_0} = 0 \quad t \geq 0 \quad (49)$$

$$\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z_0} \right)_{z_0=H_0} = 0 \quad t \geq 0 \quad (50)$$

ก) ช่วงน้ำหนักบรรทุกลดเชิงเส้น ($T_2 \leq T \leq T_3$)

สมการควบคุมการอัดตัวระบายน้ำภายใต้น้ำหนัก

บรรทุกลดทีละน้อย

ใช้สมการ (18) กับ (36) (37)

เงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Conditions)

ใช้เงื่อนไขที่เวลาสิ้นสุดช่วงการมีน้ำหนักบรรทุกเกิน เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นของช่วงน้ำหนักบรรทุกเท่ากับน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง

เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions)

ที่ผิวบนน้ำระบายออกได้

$$\bar{u}(0,t) = 0 \quad t \geq 0 \quad (51)$$

$$q = q_0 + \frac{(T-T_1)}{T_0} q_0 \quad t \geq 0 \quad (52)$$

$$e(0,t) - e = C_c \log \left(\frac{\bar{\sigma}_0 + q_1}{\sigma_0} \right) - C_r \log \left(\frac{\bar{\sigma}_0 + q}{\sigma_0 + q} \right) \quad t \geq 0 \quad (53)$$

$$e(0,t) - e_p = C_c \log \left(\frac{\bar{\sigma}_0 + q_1}{\sigma_0} \right) \quad t \geq 0 \quad (54)$$

ที่ผิวล่างน้ำระบายออกไม่ได้

ในทำนองเดียวกัน

$$\left(\frac{\partial \beta}{\partial \lambda} \right)_{\lambda=1} = 0 \quad t \geq 0 \quad (55)$$

$$\left(\frac{\partial \mu}{\partial \lambda} \right)_{\lambda=1} = 0 \quad t \geq 0 \quad (56)$$

ง) ในช่วงน้ำหนักบรรทุกคงตัว ($T_3 \leq T$)

สมการควบคุมการอัดตัวระบายน้ำภายใต้น้ำหนัก

บรรทุกคงตัว

ใช้สมการ (18) กับ (39) (40)

ในทำนองเดียวกัน เขียนสมการควบคุมการอัดตัวระบายน้ำ เงื่อนไขขอบเขต และเงื่อนไขเริ่มต้น ใช้เงื่อนไขที่เวลาสิ้นสุดช่วงการลดน้ำหนักบรรทุก เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นของช่วงน้ำหนักบรรทุกเท่ากับน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้างได้

หาผลเฉลยโดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างอันดับดูรายละเอียดได้จาก ชญานันท์ (2554)

คำนวณเปอร์เซ็นต์การทรุดตัว $\bar{\beta}$

กำหนดให้เปอร์เซ็นต์การทรุดตัว $\bar{\beta}_1$ เท่ากับระยะทรุดตัวขณะใดๆ หาค่าด้วยระยะทรุดตัวจากการอัดตัวระบายน้ำทั้งหมดภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงตัว q_1 โดยที่ชั้นดินยังคงเป็นดินอัดตัวปกติทั้งชั้น ฐานด้วย 100 เปอร์เซ็นต์ การทรุดตัวมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยตลอดชั้นดินของค่าอัตราส่วนการอัดตัวระบายน้ำ β

$$\bar{\beta}_1 = \int_0^1 \beta d\lambda \times 100\% \quad (57)$$

กำหนดให้เปอร์เซ็นต์การทรุดตัว $\bar{\beta}$ เท่ากับระยะทรุดตัวขณะใดๆ หาค่าด้วยระยะทรุดตัวจากการอัดตัวระบายน้ำทั้งหมดภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงตัว q_0 โดยที่ชั้นดินยังคงเป็นดินอัดตัวปกติทั้งชั้น ฐานด้วย 100

$$\therefore \frac{\bar{\beta}}{\bar{\beta}_1} = \frac{e_0 - e_p}{e_0 - e_{p0}} = \frac{\log \left(\frac{\bar{\sigma}_0 + q_1}{\sigma_0} \right)}{\log \left(\frac{\bar{\sigma}_0 + q_0}{\sigma_0} \right)} = \frac{\ln \left(1 + \left(\frac{q_1}{q_0} \right) \left(\frac{q_0}{\sigma_0} \right) \right)}{\ln \left(1 + \frac{q_0}{\sigma_0} \right)} \quad (58)$$

โดยที่

e_{p0} = อัตราส่วนช่องว่างตอนสิ้นสุดการอัดตัวระบายน้ำภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงตัว

เมื่อ $\frac{q_0}{\sigma_0}$ เข้าใกล้ 0 ตามหลักเกณฑ์ของโลปีตาล
 (L'Hospital) $\frac{\bar{\beta}}{\beta_1}$ เข้าใกล้ $\frac{q_1}{q_0}$

5. ผลการวิจัย

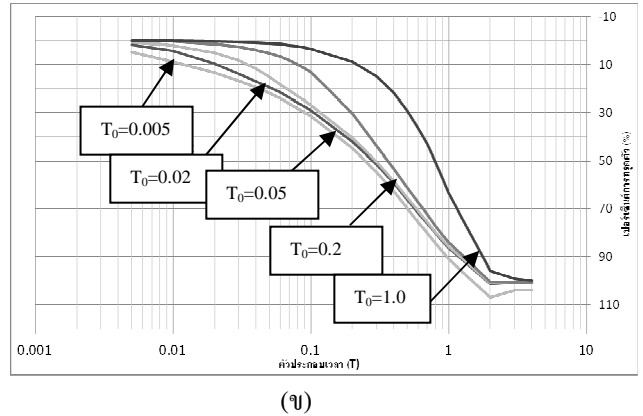
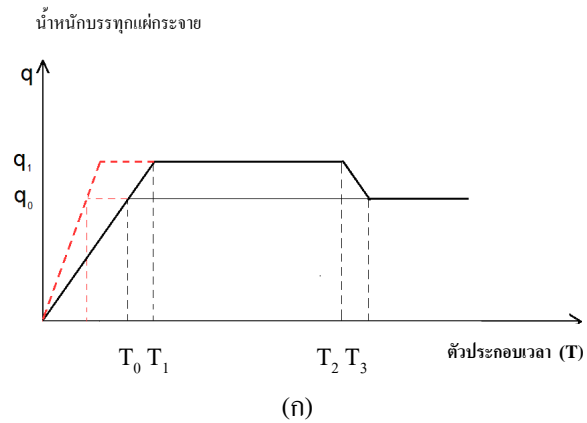
5.1 อิทธิพลของน้ำหนักบรรทุก ต่อเปอร์เซ็นต์การทรุดตัว

น้ำหนักบรรทุกกำหนดได้จากตัวแปรในรูปตัวประกอบเวลา 2 ค่า คือ T_0 และ T_2 เมื่อ T_0 เป็นตัวประกอบเวลาที่เพิ่มน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายถึงค่าน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง q_0 และ T_2 เป็นตัวประกอบเวลาซึ่งตรงกับเวลาสิ้นสุดการบรรทุกน้ำหนักเกิน t_2

5.1.1 อิทธิพลของตัวประกอบเวลาที่เพิ่มน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายถึงค่าน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายเกิน

รูปที่ 3 เมื่อ T_0 เป็นตัวประกอบเวลาที่เพิ่มน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายถึงค่าน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง พบว่า T_0 มีค่าน้อยการทรุดตัวเร็วกว่า T_0 มีค่ามาก

เนื่องจาก T_0 มีค่าน้อยน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายตลอดระยะเวลาที่บรรทุกน้ำหนักเกินมีค่ามากกว่าจึงได้การทรุดตัวเร็วกว่า



รูปที่ 3 (ก) น้ำหนักบรรทุกแผ่กระจาย(q) กับตัวประกอบเวลา (T) และ (ข) เปอร์เซ็นต์การทรุดตัว ($\bar{\beta}$) กับตัวประกอบเวลา (T) ในช่วงเวลาที่น้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายภายใต้การมีน้ำหนักบรรทุกเกิน ไปจนถึงช่วงลดน้ำหนักบรรทุกเท่ากับน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง เมื่อตัวประกอบเวลา ซึ่งตรงกับเวลาที่เพิ่มน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายถึงค่าน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง T_0 เท่ากับ 0.005 ,0.02 , 0.05 , 0.2 , 1.0

5.1.2 อิทธิพลของตัวประกอบเวลาซึ่งตรงกับเวลา t_2 (เวลาสิ้นสุดการบรรทุกน้ำหนักเกิน)

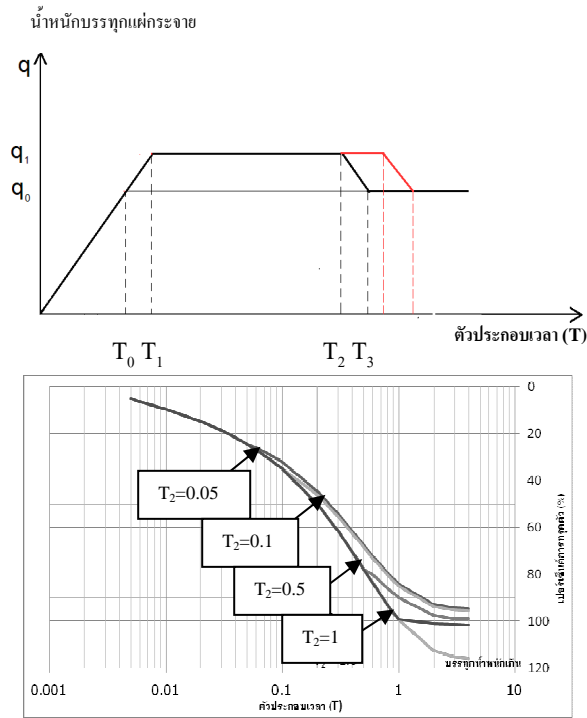
จากรูปที่ 4 เห็นได้ว่า T_2 เป็นตัวประกอบเวลาซึ่งตรงกับเวลา t_2 (เวลาสิ้นสุดการบรรทุกน้ำหนักเกิน) เมื่อ T_2 มีค่ามากการทรุดตัวเร็ว เนื่องจากระยะเวลาที่บรรทุกน้ำหนักเกินที่นานกว่าส่งผลให้ น้ำมีโอกาสระบายออกมากขึ้น การทรุดตัวจึงเร็วกว่าที่ T_2 มีค่าน้อย

5.1.3 อิทธิพลของอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายภายใต้การมีน้ำหนักบรรทุกเกิน ต่อน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง

รูปที่ 5 เมื่ออัตราส่วน น้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายภายใต้การมีน้ำหนักบรรทุกเกิน (q_1) ต่อน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) เพิ่มขึ้น ในช่วงการบรรทุกน้ำหนักแผ่กระจายเกิน การทรุดตัวเร็วขึ้น

ส่วนในช่วงการลดน้ำหนักบรรทุก การทรุดตัวกลับช้าลงเนื่องจากในช่วงการบรรทุกน้ำหนักเกินเมื่ออัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายภายใต้การมีน้ำหนักบรรทุกเกิน (q_1) ต่อน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อน

ก่อสร้าง (q_0) เพิ่มขึ้น (น้ำหนักบรรทุกมาก) ดังนั้น น้ำระบายออกได้มาก การทรุดตัวเร็ว



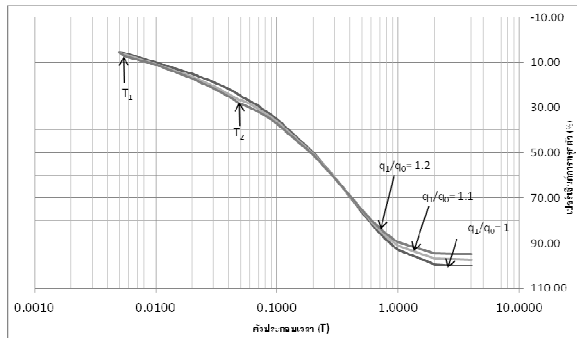
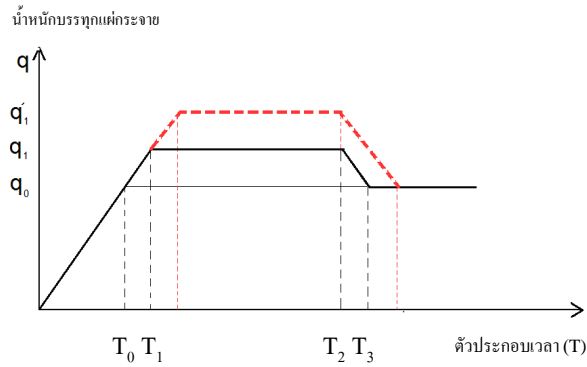
รูปที่ 4 น้ำหนักบรรทุกแผ่กระจาย (q) กับตัวประกอบเวลา (T) และ เปอร์เซนต์การทรุดตัว (β) กับตัวประกอบเวลา (T) ในช่วงเวลาที่น้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายภายใต้การมีน้ำหนักบรรทุกเกินไปจนถึงช่วงลดน้ำหนักบรรทุกเท่ากับน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง เมื่อ T_2 เป็นตัวประกอบเวลาซึ่งตรงกับเวลา t_2 เท่ากับ 0.05, 0.1, 0.5, 1.0 บรรทุกน้ำหนักเกินตลอดเวลา

5.2 อิทธิพลของอัตราส่วนดัชนีการซึมได้ต่อดัชนีการอัดตัวของดินต่อเปอร์เซนต์การทรุดตัวกับอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้างต่อความเค้นกอดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้น

รูปที่ 6 การทรุดตัวเร็วขึ้นตามอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) ต่อความเค้นกอดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้น ($\bar{\sigma}_0$) ที่เพิ่มขึ้นในช่วงการมีน้ำหนักบรรทุกเกิน ถ้า อัตราส่วนระหว่างดัชนีการซึมได้ (C_k) กับดัชนีการอัดตัวของดิน (C_c) มีค่ามากกว่า 1 แต่ในช่วงการลดน้ำหนักบรรทุกลงเท่ากับน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้างการทรุดตัวช้าลง เนื่องจากดัชนีการ

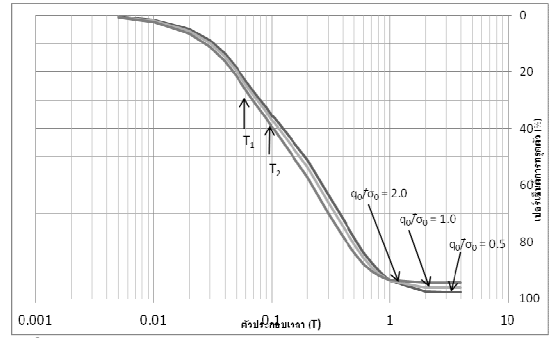
ซึมได้มากหรือดัชนีการอัดตัวได้น้อย ความดันน้ำส่วนเกินน้อยขณะอัดตัวระบายน้ำ การซึมได้ของดินมีค่ามาก ส่งผลให้ในช่วงการมีน้ำหนักบรรทุกเกิน เมื่ออัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) ต่อความเค้นกอดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้น ($\bar{\sigma}_0$) มีค่ามากกว่าการทรุดตัวเร็วด้วย แต่เมื่อมีการลดน้ำหนักบรรทุกเหลือเท่ากับน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง ชั้นดินเกิดการเปลี่ยนแปลงประวัติเป็นดินอัดตัวเกินปกติ ส่งผลให้อัตราส่วนช่องว่างของดินลดลงเนื่องจากดินคืบตัวไม่หมดดินจึงแน่นขึ้น สัมประสิทธิ์การซึมได้จึงลดลง ซึ่งบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงประวัติดินนั้นอยู่ที่ผิวบน ซึ่งเป็นทางน้ำระบายออกเพียงทางเดียวน้ำจึงระบายออกได้ช้า

รูปที่ 7 การทรุดตัวมีค่าใกล้เคียงกันเมื่ออัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) ต่อความเค้นกอดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้น ($\bar{\sigma}_0$) เปลี่ยนแปลงถ้าอัตราส่วนระหว่างดัชนีการซึมได้ (C_k) กับดัชนีการอัดตัวของดิน (C_c) มีค่าเท่ากับ 1 เนื่องจากอิทธิพลของการซึมได้กับการอัดตัวได้ของดินหักล้างกันเมื่อ อัตราส่วนระหว่างดัชนีการซึมได้ (C_k) กับดัชนีการอัดตัวของดิน (C_c) มีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นการทรุดตัวที่ได้จึงมีค่าใกล้เคียงกันไม่ขึ้นกับอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) ต่อความเค้นกอดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้น ($\bar{\sigma}_0$) แต่เมื่อมีการลดน้ำหนักบรรทุกเหลือเท่ากับน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง ชั้นดินเกิดการเปลี่ยนแปลงประวัติเป็นดินอัดตัวเกินปกติ ส่งผลให้อัตราส่วนช่องว่างของดินลดลงเนื่องจากดินคืบตัวไม่หมดดินจึงแน่นขึ้น สัมประสิทธิ์การซึมได้จึงลดลง ซึ่งบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงประวัติดินนั้นอยู่ที่ผิวบน ซึ่งเป็นทางน้ำระบายออกเพียงทางเดียวน้ำจึงระบายออกได้ช้า การทรุดตัวจึงช้าลงตามอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) ต่อความเค้นกอดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้น ($\bar{\sigma}_0$) ที่มาก



รูปที่ 5 น้ำหนักรรทุกแผ่กระจาย (q) กับตัวประกอบเวลา (T) และ เปอร์เซ็นต์การทรุดตัว (\bar{b}) กับตัวประกอบเวลา (T) ในช่วงเวลาที่น้ำหนักรรทุกแผ่กระจายภายใต้การมีน้ำหนักรรทุกเกินไปจนถึงช่วงลดน้ำหนักรรทุกเท่ากับน้ำหนักรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้างเมื่ออัตราส่วนน้ำหนักรรทุกแผ่กระจายภายใต้การมีน้ำหนักรรทุกเกิน (q_1) ต่อน้ำหนักรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) เท่ากับ 1, 1.1, 1.2 $T_1 = 0.005$ $T_2 = 0.05$

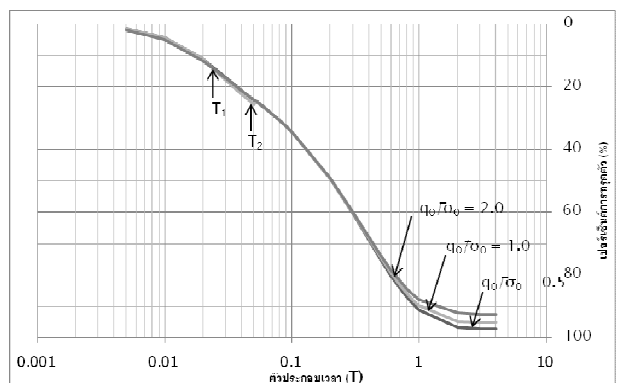
รูปที่ 8 เปอร์เซ็นต์การทรุดตัวมีค่ามากเมื่ออัตราส่วนน้ำหนักรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) ต่อกำลังกวดอัดประสิทธิภาพตอนเริ่มต้น (σ_0) มีค่าน้อย ถ้าอัตราส่วนระหว่างดัชนีการซึมได้ (C_k) กับดัชนีการอัดตัวของดิน (C_c) มีค่าน้อยกว่า 1 เนื่องจากดัชนีการซึมได้น้อยหรือดัชนีการอัดตัวได้มีค่ามาก และดินอัดตัวมาก ความดันน้ำส่วนเกินมากขณะอัดตัวระบายน้ำ เมื่ออัตราส่วนน้ำหนักรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) ต่อกำลังกวดอัดประสิทธิภาพตอนเริ่มต้น (σ_0) มีค่ามาก ดินแน่น เพราะดัชนีการอัดตัวได้มาก (การซึมได้น้อย) เปอร์เซ็นต์การทรุดตัวจึงต่ำ



รูปที่ 6 เปอร์เซ็นต์การทรุดตัว (\bar{b}) กับตัวประกอบเวลา (T) เมื่ออัตราส่วนน้ำหนักรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) ต่อกำลังกวดอัดประสิทธิภาพตอนเริ่มต้น (σ_0) เท่ากับ 0.5, 1.0, 2.0 อัตราส่วนระหว่างดัชนีการซึมได้ (C_k) กับดัชนีการอัดตัวของดิน (C_c) เท่ากับ 2.0 ตัวประกอบเวลาที่เพิ่มน้ำหนักรรทุกแผ่กระจายถึงค่าน้ำหนักรรทุกแผ่กระจายเกิน (T_0) เท่ากับ 0.05

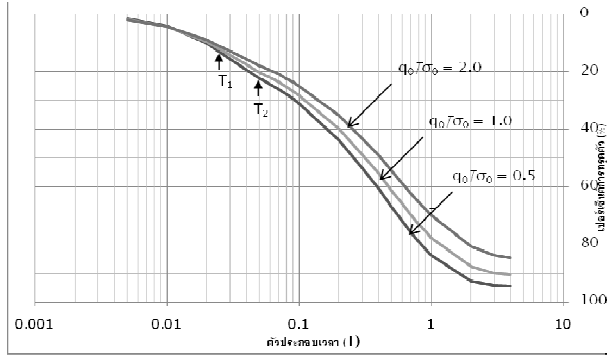
5.3 อิทธิพลของอัตราส่วนกำลังกวดอัดประสิทธิภาพสูงสุดในอดีตต่อกำลังกวดอัดประสิทธิภาพก่อนก่อสร้างกับอัตราส่วนความลึกที่ตัวประกอบเวลา (T)=4.00

รูปที่ 9 ดินเกิดการอัดตัวเกินปกติที่ผิวบนภายหลังจากการลดน้ำหนักรรทุกเกินเป็นน้ำหนักรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง เนื่องจากน้ำระบายออกได้ที่ผิวบนเท่านั้น ดังนั้นน้ำที่ผิวบนระบายออกได้เร็วกว่าที่ผิวล่างทำให้ดินเกิดการอัดตัวเกินปกติที่ผิวบนและเป็นดินอัดตัวปกติที่ผิวล่าง

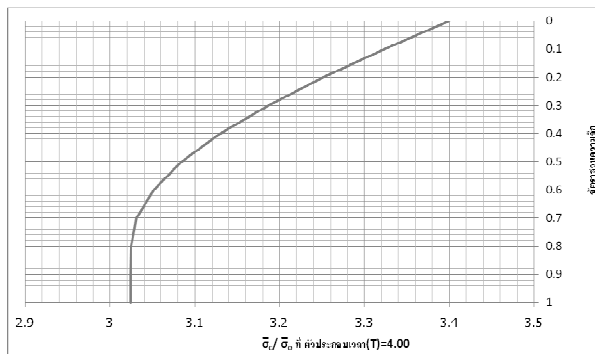


รูปที่ 7 เปอร์เซ็นต์การทรุดตัว (\bar{b}) กับตัวประกอบเวลา (T) เมื่ออัตราส่วนน้ำหนักรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) ต่อกำลังกวดอัดประสิทธิภาพตอนเริ่มต้น (σ_0)

เท่ากับ 0.5, 1.0, 2.0 อัตราส่วนระหว่างดัชนีการซึมได้ (C_k) กับดัชนีการอัดตัวของดิน (C_c) เท่ากับ 1.0 ตัวประกอบเวลาที่เพิ่มน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายถึงค่าน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายเกิน (T_0) เท่ากับ 0.02



รูปที่ 8 เปอร์เซ็นต์การทรุดตัว (β) กับตัวประกอบเวลา (T) เมื่ออัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) ต่อความเค้นกอดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้น (σ_0) เท่ากับ 0.5, 1.0, 2.0 อัตราส่วนระหว่างดัชนีการซึมได้ (C_k) กับดัชนีการอัดตัวของดิน (C_c) เท่ากับ 0.5 ตัวประกอบเวลาที่เพิ่มน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายถึงค่าน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายเกิน (T_0) เท่ากับ 0.02



รูปที่ 9 อัตราส่วนความลึกและอัตราส่วนความเค้นกอดอัดประสิทธิผลในอดีต (σ_c) ต่อความเค้นกอดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้น (σ_0) ที่ตัวประกอบเวลา (T) เท่ากับ 4.00 เมื่อตัวประกอบเวลา ซึ่งตรงกับเวลาที่เพิ่มน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายถึงค่าน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง T_0 เท่ากับ 0.2 อัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายภายใต้การมีน้ำหนักบรรทุกเกิน (q_1) ต่อน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) เท่ากับ 1.2 อัตราส่วนน้ำหนักบรรทุก

แผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) ต่อความเค้นกอดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้น (σ_0) เท่ากับ 2.0 อัตราส่วนระหว่างดัชนีการซึมได้ (C_k) กับดัชนีการอัดตัวของดิน (C_c) เท่ากับ 2.0 อัตราส่วนดัชนีการอัดตัวต่อดัชนีการอัดตัวได้เท่ากับ 0.5

6. สรุปผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีผลต่างอันตะถิดการอัดตัวระบายน้ำตามทฤษฎีของ Mesri และ Rokhsar (1974) ไม่คิดการอัดตัวสืบคลาน หาเปอร์เซ็นต์การทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวระบายน้ำมิติเดียวสำหรับชั้นดินเหนียวเอกพันธ์ น้ำระบายออกจากผิวบนได้แต่ระบายออกจากผิวล่างไม่ได้ ชั้นดินเป็นดินอัดตัวปกติที่มีอัตราส่วนดัชนีการซึมได้ ต่อดัชนีการอัดตัวของดินเท่ากับ 0.5, 1, 2 และอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง ต่อความเค้นกอดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้น เท่ากับ 0.5, 1.0, 2.0 ภายใต้ น้ำหนักบรรทุกเพิ่มเชิงเส้นทีละน้อยจนถึงตัวประกอบเวลา ซึ่งตรงกับเวลาที่เพิ่มน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายถึงค่าน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง เท่ากับ 0.005, 0.02, 0.05, 0.2, 1.0 สรุปได้ดังนี้

1. เมื่อตัวประกอบเวลาที่เพิ่มน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายถึงค่าน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้างเพิ่มขึ้น การทรุดตัวช้า
 2. ตัวประกอบเวลาซึ่งตรงกับเวลา สิ้นสุดการบรรทุกน้ำหนักเกิน มีค่ามากกว่าการทรุดตัวเร็ว
 3. เมื่ออัตราส่วนดัชนีการซึมได้ต่อดัชนีการอัดตัวของดินลดลง การทรุดตัวช้า
 4. ที่อัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้างต่อความเค้นกอดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้น เท่ากับ 0.5 (น้อยกว่า 1) เมื่ออัตราส่วนดัชนีการซึมได้ ต่อดัชนีการอัดตัวของดิน เพิ่มขึ้น การทรุดตัว
- อัตราส่วนระหว่างดัชนีการซึมได้ต่อดัชนีการอัดตัวของดินมีค่ามากกว่า 1 ในช่วงการลดน้ำหนักบรรทุกลง เท่ากับน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้างการทรุดตัวช้า

อัตราส่วนระหว่างดัชนีการซึมได้ต่อดัชนีการอัดตัวของดินมีค่าเท่ากับ 1 การทรุดตัวที่ได้จึงมีค่าใกล้เคียงกัน ไม่ขึ้นกับอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้างต่อความเค้นกวดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้น แต่เมื่อมีการลดน้ำหนักบรรทุกเหลือเท่ากับน้ำหนักบรรทุกทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง อัตราส่วนน้ำหนักรบรรทุกทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้างต่อความเค้นกวดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้นมากทรุดตัวช้า

5. ในช่วงการมีบรรทุกน้ำหนักเกินเมื่ออัตราส่วนน้ำหนักรบรรทุกทุกแผ่กระจายภายใต้การมีน้ำหนักบรรทุกเกิน (q_1) ต่อน้ำหนักรบรรทุกทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง (q_0) เพิ่มขึ้น การทรุดตัวเร็ว ในช่วงการลดน้ำหนักบรรทุก การทรุดตัวช้า

7. อักษรย่อและสัญลักษณ์

| | |
|-------|--|
| b | ค่าคงตัว $b = \frac{k_p}{k_o}$ |
| C_c | ดัชนีการอัดตัวได้ของดิน |
| C_k | ดัชนีการซึมได้ |
| C_r | ดัชนีการอัดตัวซ้ำของดิน (Recompression Index) |
| D | ค่าคงตัว $D = \frac{0.434}{\log\left(\frac{\bar{\sigma}_f}{\bar{\sigma}_o}\right)} \left[1 - \frac{\bar{\sigma}_f}{\bar{\sigma}_o}\right]$ |
| e | อัตราส่วนช่องว่างภายใต้ความเค้นกวดอัดประสิทธิผล $\bar{\sigma}$ |
| e_0 | อัตราส่วนช่องว่างภายใต้ความเค้นกวดอัดประสิทธิผล $\bar{\sigma}_0$ |
| e_0 | อัตราส่วนช่องว่างของดินตอนเริ่มต้นการอัดตัวระบายน้ำ |
| e_p | อัตราส่วนช่องว่างของดินภายใต้ความเค้นกวดอัดประสิทธิผลตอนสิ้นสุดการอัดตัวระบายน้ำ |
| H_0 | ความหนาของชั้นดินตอนเริ่มต้นการอัดตัวระบายน้ำ |
| H_w | ตำแหน่งของระดับน้ำใต้ดิน |

| | |
|-------|--|
| i_z | ความลาดทางชลศาสตร์ |
| k | สัมประสิทธิ์การซึมได้ของดินในแนวแกนตั้ง |
| k_0 | สัมประสิทธิ์การซึมได้ของดินตอนเริ่มต้นการอัดตัวระบายน้ำ |
| k_p | สัมประสิทธิ์การซึมได้ของดินที่อัตราส่วนช่องว่าง e_p |
| k_z | สัมประสิทธิ์การซึมได้ของดิน |
| n | จำนวนชั้นย่อย |
| q | น้ำหนักบรรทุกทุกแผ่กระจาย |
| q_0 | น้ำหนักบรรทุกทุกแผ่กระจายภายใต้การมีน้ำหนักบรรทุกเท่ากับน้ำหนักบรรทุกทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง |
| q_1 | น้ำหนักบรรทุกทุกแผ่กระจายภายใต้การมีน้ำหนักบรรทุกเกิน |
| R | อัตราการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก (ความชัน (dq/dt)) |
| t | เวลา |
| t_0 | เวลาซึ่งตรงกับเวลาที่เพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกแผ่กระจายถึงค่าน้ำหนักบรรทุกทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง |
| t_1 | เวลาซึ่งตรงกับเวลาที่เพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกแผ่กระจายถึงค่าน้ำหนักบรรทุกเกิน |
| t_2 | เวลาซึ่งตรงกับเวลาที่สิ้นสุดการบรรทุกน้ำหนักเกิน |
| T | ตัวประกอบเวลา (Time Factor) $T = \frac{k_o(1+e_o)\bar{\sigma}_o t}{0.434\gamma_w C_c H_o^2}$ |
| T_0 | ตัวประกอบเวลา ซึ่งตรงกับเวลาที่เพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกแผ่กระจายถึงค่าน้ำหนักบรรทุกทุกแผ่กระจายก่อนก่อสร้าง $T_0 = \frac{k_o(1+e_o)\bar{\sigma}_0 t_0}{0.434\gamma_w C_c H_o^2}$ |
| T_1 | ตัวประกอบเวลา ซึ่งตรงกับเวลาที่เพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกแผ่กระจายถึงค่าน้ำหนักบรรทุกเกิน |

| | | |
|--|------------------|--|
| $T_1 = \frac{k_0(1+e_0)\bar{\sigma}_0 t_1}{0.434\gamma_w C_c H_0^2}$ | $\bar{\beta}_1$ | เปอร์เซ็นต์การทรุดตัวภายใต้น้ำหนักบรรทุก q_1 |
| T_2 | ε | ความเครียด |
| ตัวประกอบเวลา ซึ่งตรงกับเวลาที่สิ้นสุดการ บรรทุกน้ำหนักเกิน | γ_w | หน่วยน้ำหนักของน้ำ |
| $T_2 = \frac{k_0(1+e_0)\bar{\sigma}_0 t_2}{0.434\gamma_w C_c H_0^2}$ | λ | อัตราส่วนตำแหน่ง $\lambda = \frac{z_0}{H_0}$ |
| u | μ | อัตราส่วนความดันน้ำส่วนเกิน $\mu = \frac{\bar{u}}{\Delta p}$ |
| \bar{u} | σ | ความเค้นกดอัดทั้งหมด |
| ความดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore Water Pressure) | $\bar{\sigma}$ | ความเค้นกดอัดประสิทธิผล (Effective Stress) |
| \bar{u} | $\bar{\sigma}_0$ | ความเค้นกดอัดประสิทธิผลตอนเริ่มต้น (Initial Effective Stress) |
| ความดันน้ำส่วนเกินที่ตำแหน่ง z_0 | $\bar{\sigma}_c$ | ความเค้นกดอัดประสิทธิผลสูงสุดในอดีต (Maximum Effective Preconsolidation Stress) |
| v_z | $\bar{\sigma}_f$ | ความเค้นกดอัดประสิทธิผลตอนสิ้นสุด การอัดตัวระบายน้ำภายใต้การมีน้ำหนักบรรทุก เกิน |
| z_0 | | |
| พิกัดบอกตำแหน่งของก้อนดินตอนเริ่มต้น การอัดตัวระบายน้ำ | | |
| Δp | | |
| ความดันน้ำส่วนเกินตอนเริ่มต้น $\Delta p = q_1$ | | |
| β | | |
| เปอร์เซ็นต์การทรุดตัวภายใต้น้ำหนักบรรทุก q_0 | | |

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชญานันท์ ทองดี (2554). อัตราการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวระบายน้ำของชั้นดินเหนียว ภายใต้การมีน้ำหนักบรรทุกเกิน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [2] อรรณี วิยะพุทธานนท์ (2551). การทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวระบายน้ำของดิน ภายใต้น้ำหนักบรรทุกเพิ่มทีละชั้น ตามทฤษฎีของเมสรี และร็อกซ์ซาร์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [3] Berry , P.L. and Wilkinson , W.B. (1969). The Radial Consolidation of Clay Soils. Geotechnique ,London ,England,Vol. 19, No. 2, pp. 253-284.
- [4]Ladd, C.C. (1971). Settlement Analysis of Cohesive Soils. Soil Publication 272, Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering, Cambridge, Mass., pp.92.
- [5]Mersi ,G., and Rokhsar , A., (1974). Theory of Consolidation of Clay. Journal of The Geotechnical Engineering Division , American Society of Civil Engineers , Vol. 100 , No. 8 , August , pp. 889-904.
- [6]Olson , R.E. , and Ladd , C.C., (1979). One- dimensional Consolidation Problems. Journal of The Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 105, No. 1, January, pp. 11-30.
- [7]Rokhsar, A., (1973). A Theoretical and Experimental Study of One Dimensional Consolidation of Clays. thesis presented to the University of Illinois , at Urbana – Champaign, Ill., in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.
- [8]Schiffman, R.L., (1958).Consolidation of soil under time-dependent loading and varying permeability. Proc., Highway Research Board, Vol.37, pp.584-617.
- [9]Terzaghi , K., (1943). Theoretical Soil Mechanics. John Wiley and Sons , Inc., New York , pp. 285-289.