

บทที่ 11

หน่วยแรงในมวลดิน

(Stresses in a Soil Mass)

11.1 เนื้อหาโดยสรุป

ดินประกอบด้วยส่วนของเม็ดดิน ช่องว่างระหว่างเม็ดดิน น้ำที่มีอยู่ระหว่างอากาศ จากความสัมพันธ์ของน้ำหนักและปริมาณของดิน (weight-volume relationship) ดังที่กล่าวมาแล้ว ดังนั้นเมื่อพิจารณาในหนึ่งหน่วยปริมาตรของดิน อนุภาคของเนื้อดิน (soil particles) และการกระจายตัว (distribute) อย่างไม่เป็นระเบียบ ทำให้เกิดช่องว่าง (void spaces) ระหว่างอนุภาคของเนื้อดิน เหล่านั้น ช่องว่างนี้จะต่อเนื่องกันและเต็มไปด้วยน้ำ (water) และ/หรืออากาศ (air)

11.1.1 หน่วยแรงประสิทธิผลในดิน (Effective stress in soil)

ในการวิเคราะห์ปัญหาทางปฐพีกลศาสตร์ (soil Mechanics) เช่นการวิเคราะห์ประมาณหาค่าการทรุดตัวดังที่กล่าวต่อไป เราก็จะต้องคำนวณหาแรงดันที่เพิ่มขึ้นจากแรงกระทำจากภายนอก (applied external load) หรือน้ำหนักจากสิ่งปลูกสร้าง กระทำเพิ่มขึ้นต่อชั้นดิน โดยสิ่งจำเป็นต่อการหาค่าการทรุดตัวที่สำคัญคือค่าหน่วยแรงประสิทธิผล (effective stress) โดยการคำนวณหา effective stress นั้นเราจะต้องทราบถึงพฤติกรรมของการกระจายตัว (nature of the distribution) ของแรงรวม

11.1.1.1 หน่วยแรงรวม (Total stress ; σ)

จากดินที่แสดงในรูปที่ 11.1 หน่วยแรงดันรวม ณ จุด A ประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญด้วยกันคือ

1. หน่วยแรงดันส่วนที่เกิดจากน้ำ (water) ในช่องว่าง (void spaces) ที่ต่อเนื่องระหว่างอนุภาคของเนื้อดิน (soil particles) ซึ่งแรงดันส่วนนี้กระทำเท่าๆ กันทุกทิศทางโดยแรงดันส่วนนี้
2. หน่วยแรงส่วนที่เกิดจากอนุภาคของเนื้อดิน (Solid particles) ที่จุดสัมผัสของเม็ดดิน (Intergranular Force) เหล่านั้นคือผลรวมของแรงตามแนวตั้ง (vertical components of the force) ที่จัดสัมผัสดังกล่าวต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ภาคตัดทแยงของมวลดิน (soil mass) เรียกแรงดันส่วนนี้ว่าแรงประสิทธิผล (effective stress; σ') โดยที่หาได้จากสมการโดยดูตามรูปที่ 11.1

$$\sigma' = \frac{P_{1(v)} + P_{2(v)} + P_{3(v)} + P_{4(v)} + \dots + P_{n(v)}}{A'}$$

โดยที่ σ' = หน่วยแรงประสิทธิผลที่จุด A

A' = พื้นที่หน้าตัดของมวลดิน

$P_{1(v)} = P_{2(v)}, P_{3(v)}, P_{4(v)}, \dots, P_{n(v)}$ = ส่วนประกอบของแรงในแนวตั้งระหว่างจุดสัมผัสระหว่างเม็ดดิน ถ้า a_s คือพื้นที่หน้าตัด ณ จุดสัมผัสระหว่างเม็ดดินนั้นคือ

$a_s = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + \dots + a_n$ ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดรวมของส่วนที่เป็นน้ำจะเท่ากับ $A' - a_s$

ดังนั้นจะเขียนสมการเขียนได้ว่า

$$\sigma = \sigma' + \frac{u(A' - a_s)}{A'} \quad (\text{สมการที่ 11.1})$$

$$\sigma = \sigma' + u(1 - a'_s) \quad (\text{สมการที่ 11.2})$$

เมื่อ $a'_s = a_s / A'$

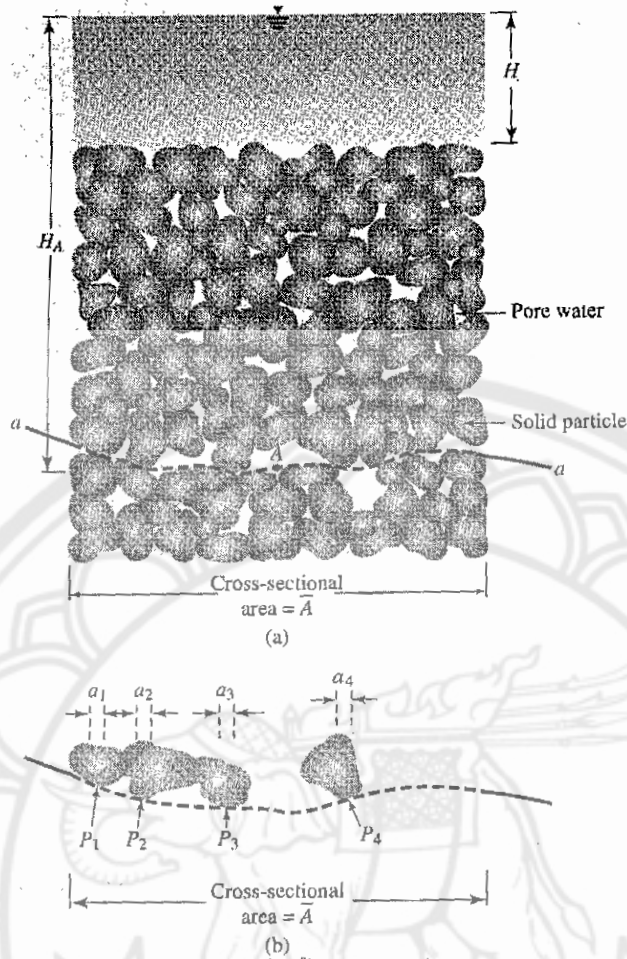
แต่โดยปกติแล้วค่า a'_s มีค่าน้อยมากและสามารถตัดทิ้งได้ในทางปฏิบัติดังนั้นสมการจึงเป็น

$$\sigma = \sigma' + u \quad (\text{สมการที่ 11.3})$$

โดยที่ σ = หน่วยแรงรวม (Total stress)

σ' = หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress)

u = แรงแดันที่เกิดจากน้ำ (Pore water pressure)



รูปที่ 11.1 การพิจารณามวลดินอิ่มน้ำในกรณี que ทุกจุดในดินมี head ต่างกัน

- 11.1.1.2 การนำสมการไปใช้งาน (practical application) แบ่งออกได้เป็นกรณีต่างๆ ดังต่อไปนี้

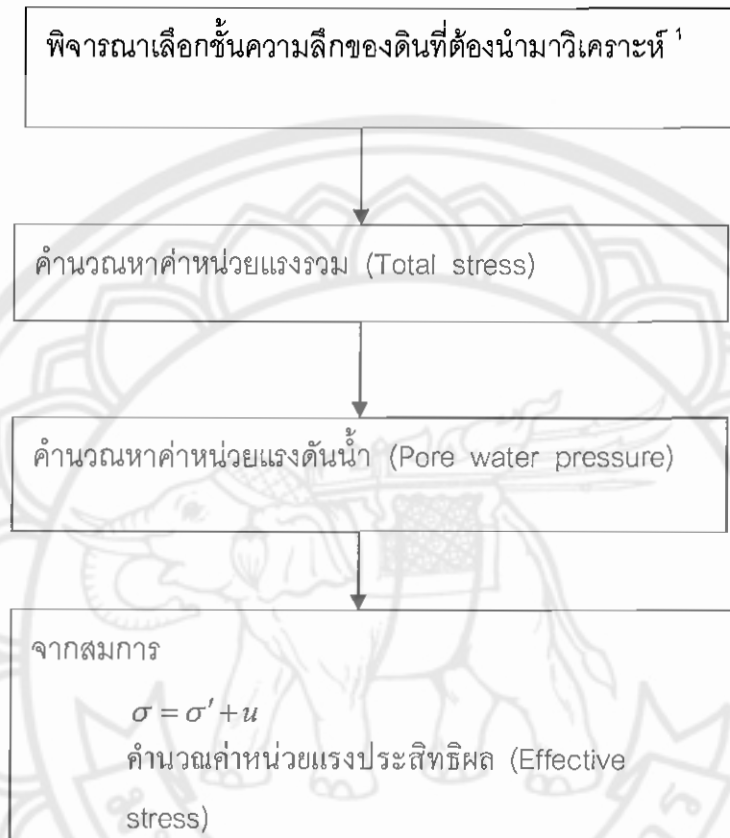
1. กรณีหน่วยแรงรวม (Total stress) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (steady state) เช่นในการวิเคราะห์ดินชั้นตามธรรมชาติ (in-situ soil)

$$\sigma_{(x,y,z)} = \sigma'_{(x,y,z)} + u_{(x,y,z)} \tag{สมการที่ 11.4}$$

2. กรณีหน่วยแรงรวม (Total stress) , หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress) หรือแรงดันน้ำ (pore water pressure) มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time condition)

$$\sigma_{(x,y,z,t)} = \sigma'_{(x,y,z,t)} + u_{(x,y,z,t)} \tag{สมการที่ 11.5}$$

- 11.1.1.3 ขั้นตอนการหาค่าหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress) สามารถเขียนเป็น Flowchart ได้ดังนี้



¹ การเลือกชั้นความลึกของดินนี้จะต้องครอบคลุมจุดต่างๆ ดังนี้

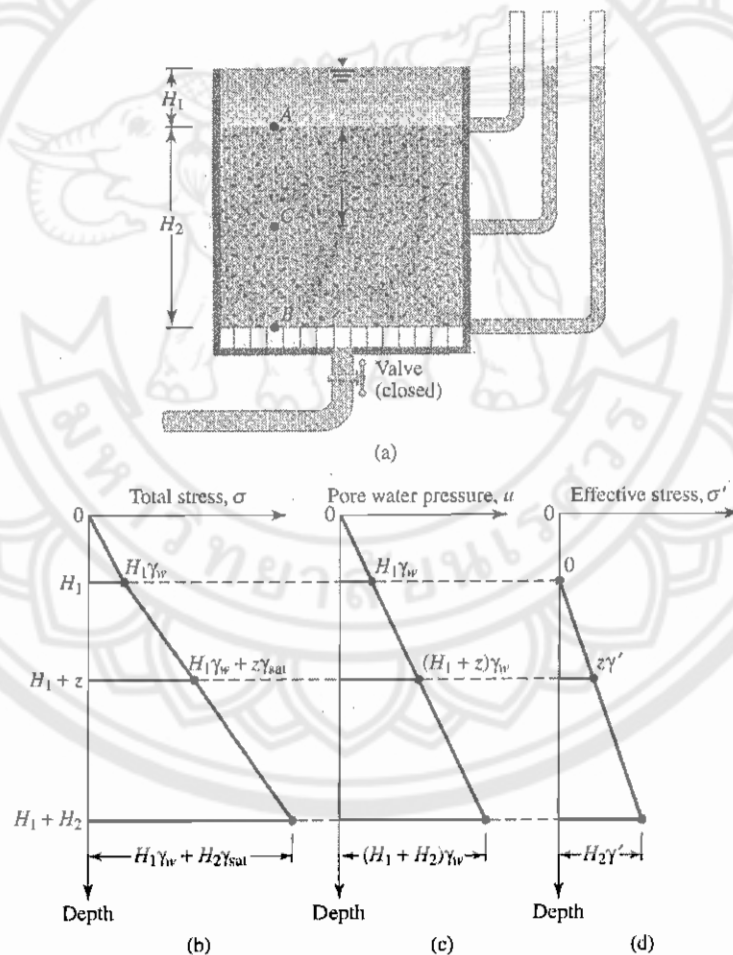
1. ผิวดิน
2. จุดเปลี่ยนชั้นดิน
3. ระดับน้ำใต้ดิน (ground water table) กรณีที่มีข้อมูลระดับน้ำใต้ดินหลายค่าจะคัดเลือกระดับน้ำใต้ดินที่มีสูงต่ำสุดมาวิเคราะห์ (worst case) เพราะยิ่งระดับน้ำใต้ดินยิ่งสูง ค่าแรงเฉื่อย (shear strength) และค่าแรงประสิทธิผล (Effective stress) จะยังมีค่าต่ำ
4. ระดับอื่นที่สนใจ เช่นที่ชั้นความลึกกึ่งกลางชั้นดินเหนียว (mid layer of clay), บริเวณใต้ฐานรากหรือก้นหลุมของการขุด (bottom of excavation)

11.1.2 หน่วยแรงในดิน in-situ (In Situ stress)

ในดินตามธรรมชาติกรณีที่มี effective stress จะมีค่าน้อยที่สุด ก็ต่อเมื่อดินนั้นอยู่ในกรณีที่เลวร้ายที่สุด (worst case) นั่นก็คือในกรณีที่ดินอิ่มตัวไปด้วยน้ำ (Saturated Soil) นั่นเองโดยสามารถวิเคราะห์ได้เป็น 3 กรณีดังต่อไปนี้

- 11.1.2.1 กรณีที่ดินอิ่มตัวและไม่มีการไหลของน้ำ (No seepage)

ดังแสดงตามรูปที่ 11.2



รูปที่ 11.2 แสดงการคำนวณหาค่าหน่วยแรงรวม หน่วยแรงดันน้ำ หน่วยแรงประสิทธิผล ในดินตามความลึกของชั้นดิน กรณีไม่มีการไหลของน้ำ

ในทางปฏิบัติตามธรรมชาติเราจะไม่สามารถจัดหน่วยแรงประสิทธิผลได้โดยตรง แต่จะหาได้จากหน่วยแรงรวมและแรงดันของน้ำในมวลดิน ดังนั้นหน่วยแรงประสิทธิผลที่ชั้นดินแต่ละชั้นแสดงได้ตามรูปที่ 11.2 โดยที่จากสมการที่ 11.3

$$\sigma' = \sigma - u$$

(สมการที่ 11.6)

ที่จุด A

total Stress = $\sigma_A = H_1 \gamma_w$

Pore Water pressure = $u_A = H_1 \gamma_w$

Effective stress = $\sigma'_A = 0$

ที่จุด B

total Stress = $\sigma_B = H_1 \gamma_w + z \gamma_{sat}$

Pore Water pressure = $u_B = H_1 \gamma_w + H_2 \gamma_w = (H_1 + H_2) \gamma_w$

Effective stress = $\sigma'_B = H_2 \gamma' ; \gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$

ที่จุด C

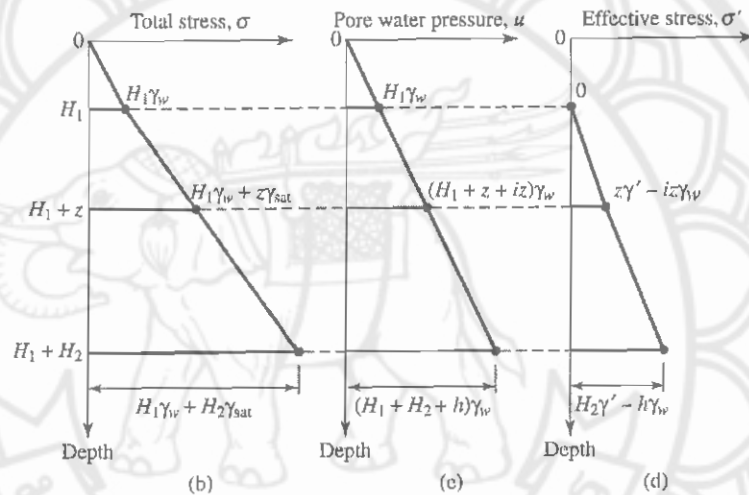
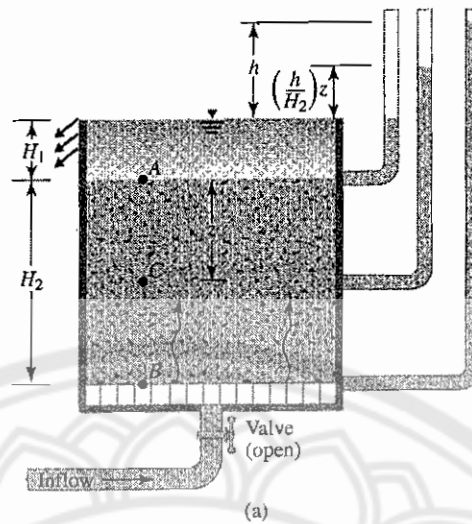
total Stress = $\sigma_c = H_1 \gamma_w + H_2 \gamma_{sat}$

Pore Water pressure = $u_c = H_1 \gamma_w + z \gamma_w = (H_1 + z) \gamma_w$

Effective stress = $\sigma'_c = z \gamma'$

- 11.1.2.2 กรณีที่ดินอิ่มตัวและน้ำไหลขึ้นทางด้านบน (Upward Seepage)

ดังแสดงตามรูปที่ 11.3



รูปที่ 11.3 แสดงการคำนวณหาค่าหน่วยแรงรวม หน่วยแรงดันน้ำ หน่วยแรงประสิทธิผล ในดิน ตามความลึกของชั้นดิน กรณีน้ำไหลขึ้นทางด้านบน

การไหลของน้ำในทิศทางขึ้นนี้มีผลทำให้ค่า effective stress ลดลงดังนั้นจากสมการที่ 11.6 เราสามารถประยุกต์หา effective stress ได้ดังต่อไปนี้

ที่จุด A

$$\text{Total Stress} = \sigma_A = H_1 \gamma_w$$

$$\text{Pore Water pressure} = u_A = H_1 \gamma_w$$

$$\text{Effective stress} = \sigma'_A = 0$$

ที่จุด B

$$\text{Total Stress} = \sigma_B = H_1 \gamma_w + H_2 \gamma_{\text{sat}}$$

$$\text{Pore Water pressure} = u_B = H_1 \gamma_w + H_2 \gamma_w + h \gamma_w = (H_1 + H_2 + h) \gamma_w$$

$$\text{Effective stress} = \sigma'_B = H_2 \gamma' - h \gamma_w$$

ที่จุด C

$$\text{Total Stress} = \sigma_c = H_1 \gamma_w + z \gamma_{\text{sat}}$$

$$\text{Pore Water pressure} = u_c = H_1 \gamma_w + z \gamma_w + \left(\frac{h}{H_2} \right) z \gamma_w = (H_1 + z + iz) \gamma_w$$

$$\text{Effective stress} = \sigma'_c = z \gamma' - iz \gamma_w$$

โดยที่ $i = \text{hydraulic gradient} = \text{ความชันทางชลศาสตร์ดังที่กล่าวมาแล้ว}$

ดังจะเห็นได้ว่าหน่วยแรงประสิทธิผล ณ จุดใดๆ ในดินจะมีค่าลดลงเนื่องจากการไหลขึ้นของน้ำ โดยจะลดลงเล็กน้อยเพียงใดก็จะขึ้นกับสภาพความแตกต่างๆ ของระดับน้ำ หรือความชันทางชลศาสตร์ หากมีค่ามากจนทำให้หน่วยแรงประสิทธิผลในดินมีค่าเป็นศูนย์

$$\sigma'_c = z \gamma' - i_{cr} z \gamma_w = 0$$

ดังนั้น

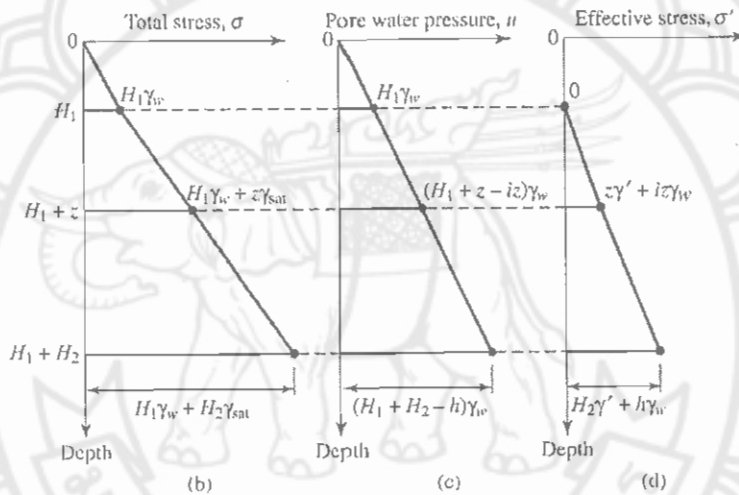
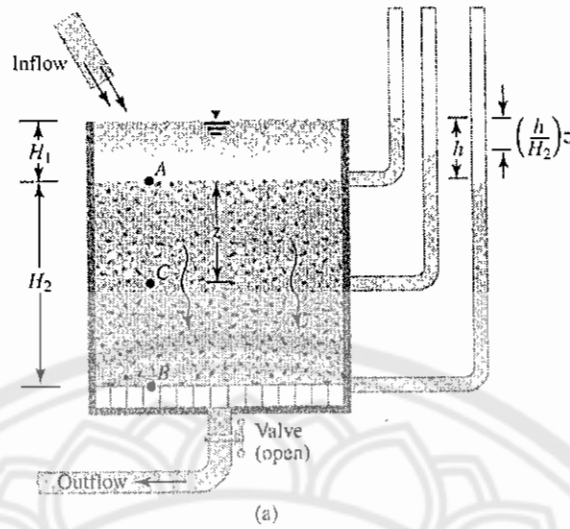
$$i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w}$$

เมื่อ $i_{cr} = \text{ความชันทางชลศาสตร์วิกฤติ (Critical Hydraulic gradient)}$

ซึ่งภายใต้สภาวะของดินที่มีหน่วยแรงประสิทธิผลมีค่าเท่ากับ 0 เราเรียกสภาวะนี้ว่า "สภาวะเดือด" (Boiling condition หรือ Quick Condition) ซึ่ง i_{cr} จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.9 ถึง 1.1 โดยค่าเฉลี่ยจะมีค่าประมาณ 1.0 ในดินทั่วไป

- 11.1.2.3 กรณีที่ดินอิ่มตัวและน้ำไหลลงทางด้านล่าง (Downward Seepage)

ดังแสดงตามรูปที่ 11.4



รูปที่ 11.4 แสดงการคำนวณหาค่าหน่วยแรงรวม หน่วยแรงดินน้ำ หน่วยแรงประสิทธิผล ในดิน ตามความลึกของชั้นดิน กรณีน้ำไหลลงทางด้านล่าง

การไหลของน้ำในทิศทางลงมีผลทำให้ค่า effective stress เพิ่มขึ้น ดังนั้นจากสมการที่ 11.6 เราสามารถประยุกต์หา effective stress ได้ดังต่อไปนี้

ที่จุด A

$$\text{Total Stress} = \sigma_A = H_1 \gamma_w$$

$$\text{Pore Water pressure} = u_A = H_1 \gamma_w$$

$$\text{Effective stress} = \sigma'_A = 0$$

ที่จุด B

$$\text{Total Stress} = \sigma_B = H_1 \gamma_w + H_2 \gamma_{\text{sat}}$$

$$\text{Pore Water pressure} = u_B = H_1 \gamma_w + H_2 \gamma_w - h \gamma_w = (H_1 + H_2 - h) \gamma_w$$

$$\text{Effective stress} = \sigma'_B = H_2 \gamma' + h \gamma_w$$

ที่จุด C

$$\text{Total Stress} = \sigma_c = H_1 \gamma_w + z \gamma_w$$

$$\text{Pore Water pressure} = u_c = H_1 \gamma_w + z \gamma_w - \left(\frac{h}{H_2} \right) z \gamma_w = (H_1 + z - iz) \gamma_w$$

$$\text{Effective stress} = \sigma'_c = z \gamma' + iz \gamma_w$$

$$\text{โดยที่ } i = \frac{h}{H_2} = \text{Hydraulic Gradient}$$

- 11.1.2.4 แรงซึมผ่าน (Seepage Force)

ในหัวข้อที่แล้วได้กล่าวถึงแรงประสิทธิผลที่จุดใดๆ ในดินในสถานะที่มีการไหลของน้ำ โดยมันจะมีค่าลดลงเมื่อน้ำไหลขึ้น (Upward Seepage) และจะเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำไหลลง (Downward Seepage) ซึ่งค่าที่ลดลงหรือเพิ่มขึ้นนั้นคือค่า $iz \gamma_w$ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 11.5 จากรูปจะเห็นว่าแรงกระทำในทิศทางขึ้นเมื่อน้ำไหลขึ้น และมีทิศทางตรงกันข้ามเมื่อน้ำไหลลง

ในรูปที่ 11.2 กรณีที่ไม่มีการไหลของน้ำค่าแรงประสิทธิผล (Effective Force) จะมีค่าเท่ากับหน่วยแรงประสิทธิผล (effective stress) คูณด้วยพื้นที่ A ดังนั้น

$$P'_1 = z \gamma' A \quad (\text{สมการที่ 11.7})$$

ต่อมาเมื่อน้ำไหลขึ้น (Upward) ค่าแรงประสิทธิผล (Effective Force) จะมีค่าเท่ากับ

$$P'_2 = (z \gamma' - iz \gamma_w) A \quad (\text{สมการที่ 11.8})$$

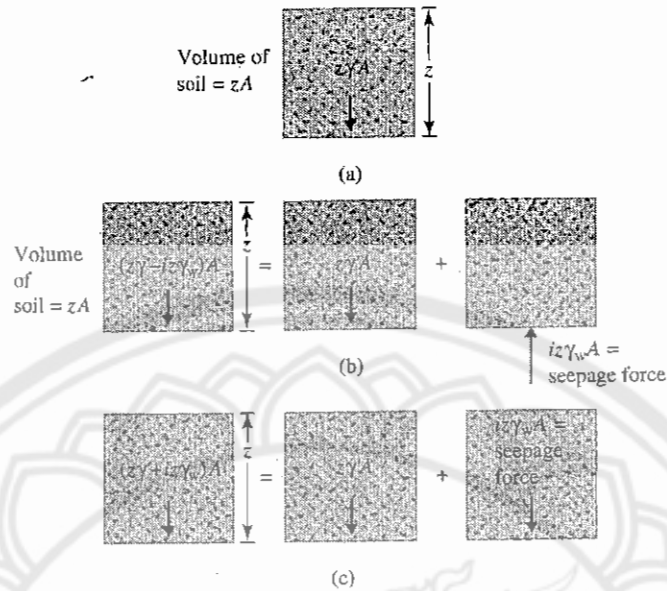
ดังนั้นแรงซึมผ่าน (Seepage Force) มีค่าเท่ากับ

$$P'_1 - P'_2 = iz \gamma_w A \quad (\text{สมการที่ 11.9})$$

$$\text{โดยที่ } ZA = \text{ปริมาตร (V)}$$

จะได้ว่าแรงซึมผ่านต่อหรือหนึ่งหน่วยปริมาตรของดินจะเท่ากับ

$$\frac{\text{แรงซึมผ่าน}}{\text{ปริมาตรของดิน}} = \frac{P'_1 - P'_2}{\text{Volume of soil}} = \frac{iz \gamma_w A}{zA} = i \gamma_w \quad (\text{สมการที่ 11.10})$$



รูปที่ 11.5 แรงที่ (a) กรณีไม่มีการไหลของน้ำ (b) กรณีน้ำไหลขึ้น (c) กรณีน้ำไหลลง ในปริมาตรของดิน

ซึ่งแรงซึมผ่านต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของดินนี้ จะใช้ในการพิจารณาเสถียรภาพต่อสภาพเดือด (Boiling) จากการปูด (Heave) ซึ่งเกิดการที่แรงซึมผ่านของน้ำที่ไหลขึ้นมีค่ามากกว่าน้ำหนักกดทับของดิน ซึ่งจะทำให้ดินมีสภาพคล้ายว่ากำลังเดือดอยู่ ถ้าหากดินไหลหนีไปจนเกิดเป็นรูพรุน (Pipe) เรียกว่า "piping" โดยจะกล่าวต่อไป

- 11.1.2.5 เสถียรภาพจากสภาพเดือด (Factor of safety of boiling)

หาได้จาก
$$FS = \frac{W'}{U} \quad (\text{สมการที่ 11.11})$$

โดยที่ FS = Factor of safety
 W' = น้ำหนักพยุ่งของดินในโซนที่เกิดการ Boiling แสดงได้ตามรูปที่ 11.5 (Submerged weight)

$$= D (D/2) (\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w)$$

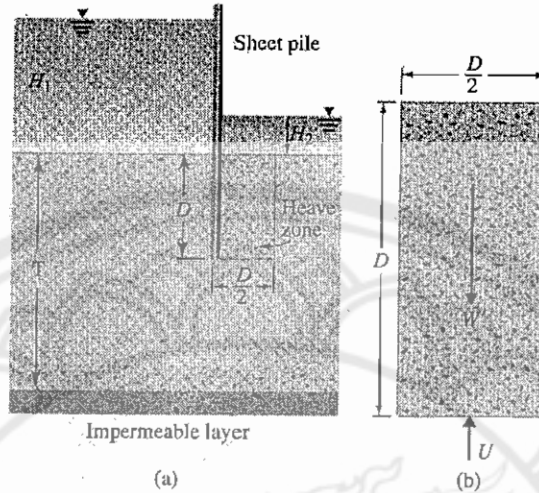
$$= \frac{1}{2} D^2 \gamma'$$

U = แรงซึมผ่านของการไหลของน้ำในทิศทางขึ้น (Uplifting Seepage Force)

จากสมการที่ 11.10 จะได้

$$U = (\text{ปริมาตรของดิน}) \times (i_{\text{av}} \gamma_w) = \frac{1}{2} D^2 i_{\text{av}} \gamma_w$$

โดยที่ i_{av} = ความดันทางชลศาสตร์เฉลี่ยระหว่างจุดด้านล่างของ heave zone²



รูปที่ 11.6 (a) แสดงการตรวจสอบการ heaving ของการไหลลงของน้ำที่อยู่ใต้ฐานของ Sheet pile (b) แสดงโซน heave

² heave zone = โซนที่จะเกิด Boiling ได้จากการทดลองหลายๆ ครั้งจนกำหนดได้ตามรูปที่

11.6

ดังนั้นจากสมการที่ 11.11 จะได้

$$FS = \frac{W'}{U}$$

$$= \frac{\frac{1}{2} D^2 \gamma'}{\frac{1}{2} D^2 i_{av} \gamma_w}$$

$$FS = \frac{\gamma'}{i_{av} \gamma_w}$$

(สมการที่ 11.12)

สำหรับกรณีการไหลของ Sheet pile ในดินเนื้อเดียวกัน (homogeneous soil) ดังแสดงในรูปที่ 11.6 สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{U}{0.5 \gamma_w D (H_1 - H_2)} = C_0$$

โดยที่ C_0 จะเป็นฟังก์ชันจาก ดูจากตารางที่ 11.1 ดังนั้นจากสมการที่ 11.11

$$FS = \frac{W'}{U} = \frac{0.5 D^2 \gamma'}{0.5 C_0 \gamma_w D (H_1 - H_2)} = \frac{D \gamma'}{C_0 \gamma_w D (H_1 - H_2)} \quad \text{(สมการที่ 11.13)}$$

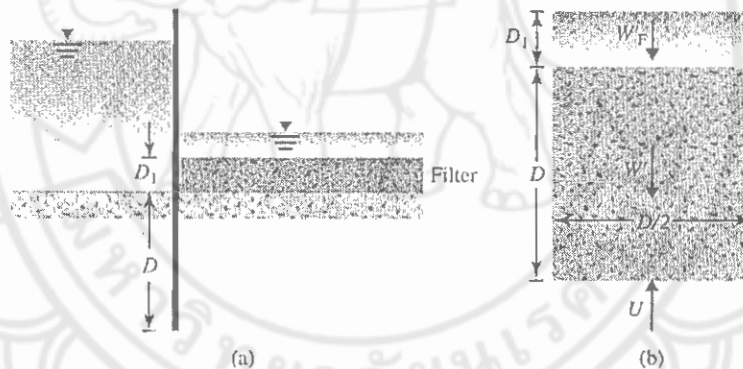
ซึ่งจะใช้ในกรณีที่ไม่ทราบค่า γ ของดินนั้นเองเราก็จะใช้สมการนี้หาค่าเสถียรภาพจากสภาพเดือด

ตารางที่ 11.1 แสดงค่า C_o ที่ D/T ต่างๆ

D/T	C_o
0.1	0.385
0.2	0.365
0.3	0.359
0.4	0.353
0.5	0.347
0.6	0.339
0.7	0.327
0.8	0.309
0.9	0.274

- 11.1.2.6 การใช้วัสดุกรองในการเพิ่มเสถียรภาพต่อสภาพเคี้ยว

การเพิ่มเสถียรภาพต่อสภาพเคี้ยวสามารถทำได้โดยการเพิ่มชั้นวัสดุกรอง (Filter) บริเวณหัวน้ำ ด้านหลังของ Sheet Pile ดังแสดงในรูปที่ 11.6.1



รูปที่ 11.6.1 FS ของการ heave กับการใช้วัสดุกรอง

โดยปกติแล้ววัสดุกรองจะเป็นจำนวนดินเม็ดหยาบ (Granular Material) ที่มีการคัดเลือกขนาด คละให้เหมาะสมโดยมีหลักการคือ ขนาดช่องว่างระหว่างเม็ดดินของวัสดุกรองต้องเล็กพอที่จะสามารถ ป้องกันการไหลของดิน และต้องใหญ่พอที่จะให้น้ำไหลผ่านได้ง่าย

จากรูปที่ 11.6.1 น้ำหนักพยุลงของดิน (Submerged weight) ของดินและวัสดุกรอง (Filter) ใน heave zone ค่าตามยาวของ Sheet pile จะเท่ากับ $W' = W'_F$ โดยที่

$$W' = D \left(\frac{D}{2} \right) (\gamma_{sat} - \gamma_w) = \frac{1}{2} D^2 \gamma' \quad (\text{สมการที่ 11.14})$$

$$W'_F = D \left(\frac{D}{2} \right) (\gamma'_F) = \frac{1}{2} D \gamma'_F \quad (\text{สมการที่ 11.15})$$

โดยที่ γ'_F = หน่วยน้ำหนักประสิทธิภาพของวัสดุกรอง (effective unit weight of the Filter)

ดังนั้นแรงซึมผ่านของการไหลของน้ำในทิศทางขึ้น (Uplifting force) จะหาได้จากสมการ

$$U = \frac{1}{2} D^2 i_{av} \gamma_w \quad (\text{สมการที่ 11.16})$$

ดังนั้นจะได้ว่าเสถียรภาพต่อความเดือด (Factor of safety against boiling)

$$FS = \frac{W' + W'_F}{U} = \frac{\frac{1}{2} D^2 \gamma' + \frac{1}{2} D_1 D \gamma'_F}{\frac{1}{2} D^2 i_{av} \gamma_w} = \frac{\gamma' + \left(\frac{D_1}{D}\right) \gamma'_F}{i_{av} \gamma_w} \quad (\text{สมการที่ 11.17})$$

จะเห็นว่าค่าเสถียรภาพต่อความเดือดมีค่ามากขึ้นจากสมการที่ 11.12

- 11.1.2.7 การเลือกใช้วัสดุของ (Selection of Filter Material)

วัสดุกรองสำหรับใช้ทำชั้นวัสดุกรอง (Filter) เมื่อพิจารณารูปที่ 7 เมื่อ Filter ทางอยู่บน Base Materials แล้วจะสามารถคัดเลือกตามข้อกำหนดของ Terzaghi และ Peck (1948) ได้ดังต่อไปนี้

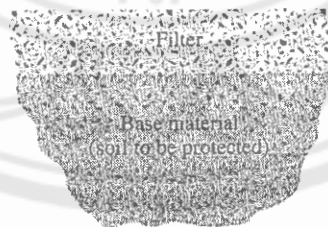
$$(1) \frac{D_{15(F)}}{D_{85(B)}} < 4$$

$$(2) \frac{D_{15(F)}}{D_{15(B)}} > 4$$

โดยที่ $D_{15(F)}$ = เส้นผ่านศูนย์กลางที่ % Finer = 15% ของวัสดุกรอง (Filter)

$D_{15(B)}$ = เส้นผ่านศูนย์กลางที่ % Finer = 15% ของ Base Materials

$D_{85(B)}$ = เส้นผ่านศูนย์กลางที่ % Finer = 85% ของ Base Materials



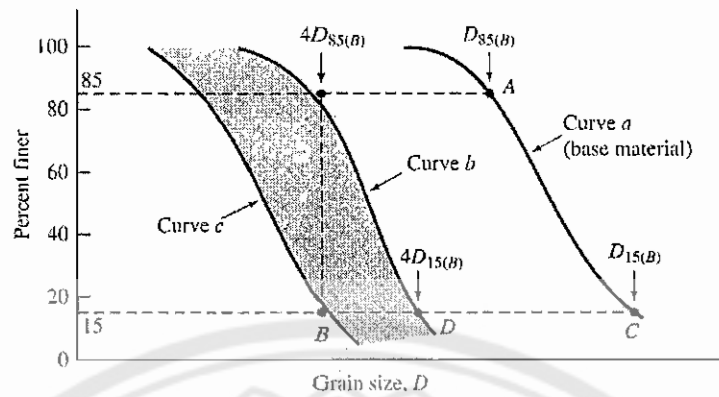
รูปที่ 11.7 แสดงถึงรูปตัดของ base material และ filter material

จากข้อกำหนดข้างต้นสามารถแปลงได้เป็น

$$(1) D_{15(F)} < 4 D_{85(B)}$$

$$(2) D_{15(F)} > 4 D_{15(B)}$$

จากนั้นเราจะใช้กราฟการกระจายตัวของเม็ดดินดังแสดงดังรูปที่ 11.8



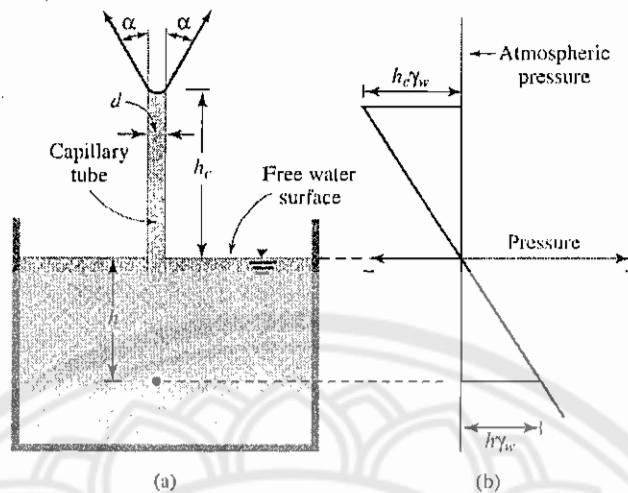
รูปที่ 11.8 ข้อกำหนดในการเลือกใช้ Filter

จากรูปที่ 11.8 เส้นกราฟ a (curve a) แสดงขนาดคละของดิน Base Material ดังนั้นจากข้อกำหนดแรกที่ว่า $D_{15(F)} < 4 D_{85(B)}$ ค่า $D_{85(B)}$ คือที่จุด A และจากนั้นจะหาจุด B ได้จาก $4 D_{85(B)}$ และ % Finer เป็น 15% และนำไปพล็อตบนกราฟจะแสดงได้ตามรูปที่ 6

จากข้อกำหนดที่สองคือ $D_{15(F)} > 4 D_{15(B)}$ เราก็สามารถจะหาจุด C คือ $D_{15(B)}$ ซึ่งก็จะหาจุด D ได้จาก $4 D_{15(B)}$ ดังนั้นเมื่อได้จุด B และ D แล้วก็ให้ลากเส้นกราฟ b (curve b) และเส้นกราฟ c (curve c) โดยจะต้องเป็นเส้นขนานกับกราฟ a (curve a) โดยที่พื้นที่ระหว่างเส้นกราฟ b และเส้นกราฟ c ดังแสดงดังรูปที่ 11.8 คือพื้นที่ของวัสดุกรองที่ดีซึ่งควรมีขนาดคละของเม็ดดินอยู่ในช่วงระหว่างเส้นกราฟ b และเส้นกราฟ c

- 11.1.2.8 แรงดึงผิวในดิน (Capillary Rise in Soils)

ในดินจะประกอบไปด้วยช่องว่างระหว่างเม็ดดินจำนวนมากมาต่อเนื่องกัน ขนาดของช่องว่างจะเล็กมากจึงประพฤติตัวเหมือนหลอดเล็กๆ ที่จมอยู่ในน้ำ แรงดึงผิวนี้อาจทำให้น้ำถูกดึงขึ้นไปเหนือระดับน้ำใต้ดินได้ รูปที่ 11.9 แสดงถึงหลักการแรงดึงผิว โดยแรงดึงผิวจะสัมพันธ์ค่าหน่วยน้ำหนักของน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดแก้วและความสูงของน้ำที่ถูกดึงด้วยแรงดึงผิว



รูปที่ 11.9 (a) แรงดึงผิวของหลอดแก้ว (b) กราฟแรงดันที่ความสูงเท่ากับจุดที่เกิดแรงดึงผิวของหลอดแก้ว

จากรูปที่ 11.9

$$\left(\frac{\pi}{4}d^2\right)h_c\gamma_w = \pi dT\cos\alpha$$

$$h_c = \frac{4T \cos \alpha}{d\gamma_w} \quad (\text{สมการที่ 11.18})$$

โดยที่ T = แรงดึงผิว (Surface tension)

α = มุมที่แรงดึงผิวกระทำ (angle of contact)

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอด (diameter of capillary tube)

γ_w = หน่วยน้ำหนักของน้ำ (unit weight of water)

h_c = ความสูงของระดับน้ำในหลอดแก้วที่เกิดจากแรงดึงผิว

แต่ในกรณีที่น้ำสะอาดและ Tube สะอาด จะได้ $\alpha = 0$ จากสมการที่ 11.18 จะได้

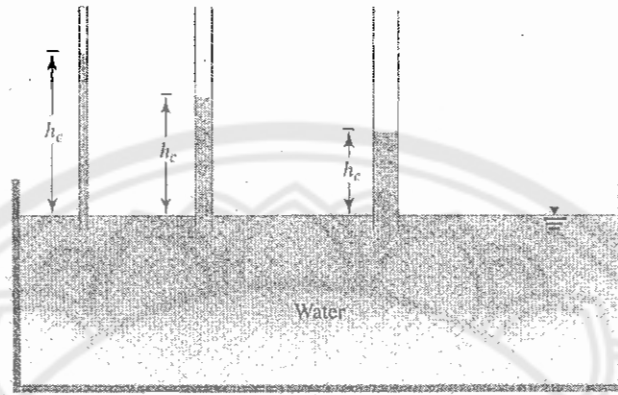
$$h_c = \frac{4T}{d\gamma_w} \quad (\text{สมการที่ 11.19})$$

สำหรับ น้ำ T = 72 mN/m จากสมการที่ 11.19 จะได้ว่า

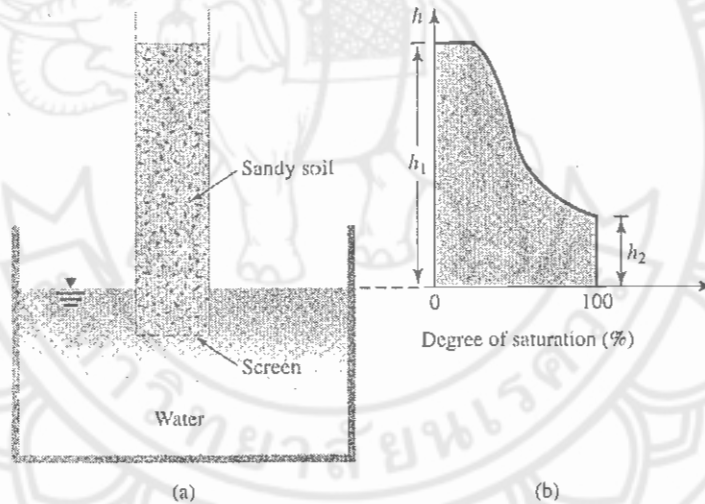
$$h_c \propto \frac{1}{d} \quad (\text{สมการที่ 11.20})$$

แต่ในกรณีของดิน หน่วยแรงดันน้ำในโซนของแรงดึงผิวจะไม่แปรผันกับความสูงเป็นเส้นตรงเหมือนกรณีของหลอดในรูปที่ 11.9 เนื่องจากในดินประกอบด้วยช่องว่างที่แปรผันมากนั่นเองโดยจะทำให้ h_c สูงไม่เท่ากันดังแสดงตามรูปที่ 11.10 ซึ่งจะเป็นกรณีเดียวกับที่หลอดแก้วมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่

เท่ากัน รูปที่ 11.11 แสดงการทดลองของแท่งดินทรายบนน้ำ เมื่อผ่านไปช่วงเวลานึงจะพบว่าดีกรีความอิ่มตัวในแท่งดินทรายมีค่าแตกต่างกันไปตามระดับจากผิวน้ำ



รูปที่ 11.10 ธรรมชาติของแรงดึงผิวที่เส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดแตกต่างกัน



รูปที่ 11.11 ผลกระทบของแรงดึงผิวในดินทราย (a) แท่งดินแต่มีบางส่วนแช่อยู่ในน้ำ (b) การเปลี่ยนแปลงของค่า Degree of Saturation ของน้ำในแท่งดิน

ดังนั้น Hazen (1930) ได้ให้สมการประมาณค่าความสามารถแรงดึงผิวในดินดังนี้

$$h_1 \text{ (mm)} = \frac{C}{eD_{10}} \quad \text{(สมการที่ 11.21)}$$

โดยที่ D_{10} = ขนาดประสิทธิผลของดิน (effective size)

e = อัตราส่วนของว่าง (void ratio)

C = มีค่าคงที่ประมาณ $10\text{-}50 \text{ mm}^2$

จากสมการที่ 11.21 แสดงให้เห็นว่าความสูงของระดับน้ำจะแปรผกผันกับขนาดช่องว่างของเม็ดดินดังแสดงในตารางที่ 11.2 ซึ่งแสดงถึงช่วงความสูงของระดับน้ำ (h_c) ในโซนของแรงดึงผิวกับดินชนิดต่างๆ

ตารางที่ 11.2 ซึ่งแสดงถึงช่วงความสูงของระดับน้ำ (h_c) ในโซนของแรงดึงผิวกับดินชนิดต่างๆ

Soil type	Range of capillary rise	
	m	ft
Coarse sand	0.1–0.2	0.3–0.6
Fine sand	0.3–1.2	1–4
Silt	0.75–7.5	2.5–25
Clay	7.5–23	25–75

- 11.1.2.9 หน่วยแรงประสิทธิผลในโซนของแรงดึงผิว

จากสมการของหน่วยแรงรวม (total stress) คือสมการที่ 11.3

$$\sigma = \sigma' + u \quad \text{(สมการที่ 11.3)}$$

แต่ในทาง Soil mechanic จะกำหนดให้หน่วยแรงกดมีค่าเป็นบวก ดังนั้นแรงดึงผิวซึ่งเป็นแรงดึงจึงมีค่าเป็นลบ หน่วยแรงดันน้ำในโซนของแรงดึงผิวจึงมีค่าเป็นลบ โดยเท่ากับ $-h\gamma_w$ เมื่อ h คือความสูงของน้ำเหนือระดับน้ำใต้ดิน (groundwater table)

ดังนั้นถ้าหน่วยแรงดันน้ำในโซนของแรงดึงผิวจะมีค่าเป็นลบ แล้วจะมีขนาดแปรผันตามดีกรีความอิ่มตัวดังสมการต่อไปนี้

$$u = -\left(\frac{S(\%)}{100}\right)\gamma_w h \quad \text{(สมการที่ 11.22)}$$

เมื่อ S = ดีกรีความอิ่มตัวของดินในโซนของแรงดึงผิวเหนือระดับน้ำใต้ดิน

และนำค่านี้ไปแทนค่าลงในสมการที่ 11.3 จะได้

$$\sigma' = \sigma + \left(\frac{S(\%)}{100}\right)\gamma_w h \quad \text{(สมการที่ 11.23)}$$

11.1.3 หน่วยแรงในมวลดิน (stresses in a Soil mass)

เมื่อมีน้ำหนักกระทำต่อดิน จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงสุทธิ (net stress) ในดิน โดยจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยหน่วยแรงสุทธิที่เพิ่มขึ้นนี้ เราจะเป็นต้องพิจารณาหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำหนักกระทำนี้เพื่อไปคำนวณการวิเคราะหาค่าการทรุดตัว (settlement) ดังจะกล่าวในบทต่อไป ดังนั้นเราจำเป็นจะต้องประมาณค่าหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นให้ได้ ภายใต้สมมติฐานว่า

- ดินมีความยืดหยุ่น (elastic)
- ดินมีแรงกระทำเท่ากันทุกทิศทาง (isotropic)
- ดินมีความเป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด (homogeneous)

ภายใต้สมมติฐานนี้เราจะสามารถประมาณค่าหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นโดยทฤษฎียืดหยุ่น (theory of elasticity) ดังนั้นค่าหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นในแนวตั้งเนื่องจากน้ำหนักกระทำจึงขึ้นอยู่กับตำแหน่ง, ค่าของน้ำหนักที่กระทำ, รูปร่างของน้ำหนักที่กระทำ และคุณสมบัติของดินบริเวณที่พิจารณา โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\Delta\sigma = f_n(x, y, z, p, \text{shape of loading}, \mu, E)$$

ซึ่งก็คือหน่วยแรงที่มีผลต่อการทรุดตัวของดินมากที่สุดคือ หน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นในแนวตั้ง (vertical stress increase) โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุดใต้บริเวณที่น้ำหนักกระทำโดยตรง

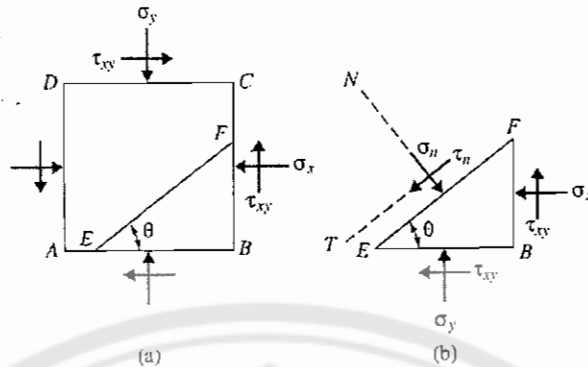
- 11.1.3.1 หน่วยแรงตั้งฉากและหน่วยแรงเฉือนบนระนาบ

จากรูปที่ 11.12 แสดงหน่วยแรงที่กระทำบนอนุภาคเล็กๆ ในลักษณะ 2 มิติ ซึ่งเป็นการพิจารณาในระบบพิกัดฉาก หน่วยแรงที่กระทำต่อมวลดินประกอบด้วยหน่วยแรงตั้งฉาก (Normal Stress ; σ_n) และหน่วยแรงเฉือน (Shearing stress ; τ_n)

ในการพิจารณาถ้าให้หน่วยแรงในแนวตั้ง (σ_y) มีค่ามากกว่าหน่วยแรงตั้งฉาก (σ_x) ถ้าพิจารณาบนระนาบ EF ที่ทำมุม θ กับระนาบ AB ดังนั้นเราจะต้องสร้าง Free body diagram ของสามเหลี่ยม EFB ดังแสดงในรูปที่ 11.12 (b)

$$\overline{EB} = \overline{EF} \cos \theta$$

และ $\overline{FB} = \overline{EF} \sin \theta$



รูปที่ 11.12 (a) ชิ้นส่วนของดินที่มี normal และ shear stresses มากกระทำ
(b) Free Body Diagram ของสามเหลี่ยม EFB ใน (a)

*** จากผลรวมของแรงในแนวแกน N จะได้

$$\sigma_n = \sigma_x \sin^2 \theta + \sigma_y \cos^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta$$

ดังนั้นหน่วยแรงตั้งฉาก (normal stress ; σ_n) มีค่าเท่ากับ

$$\sigma_n = \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} + \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (\text{สมการที่ 11.24})$$

*** จากผลรวมของแรงในแนวแกน T จะได้

$$\tau_n = \sigma_y \sin \theta \cos \theta - \sigma_x \sin \theta \cos \theta - \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)$$

ดังนั้นหน่วยแรงเฉือน (shear stress ; τ_n) มีค่าเท่ากับ

$$\tau_n = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \sin 2\theta - \tau_{xy} \cos 2\theta \quad (\text{สมการที่ 11.25})$$

จากสมการที่ 25 ถ้าแทนค่า $\tau_n = 0$ จะได้

$$\tan 2\theta = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_y - \sigma_x} \quad (\text{สมการที่ 11.26})$$

โดยสมการที่ 11.26 นี้สำหรับหาระนาบที่หน่วยแรงเฉือนที่กระทำมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งเรียกว่าระนาบหลัก (Principal planes) และจะได้ค่ามุมออกมาสองค่าคือ θ และ $\theta + 90^\circ$ ซึ่งตั้งฉากต่อกัน โดยที่หน่วยแรงตั้งฉาก (normal stress) กระทำระนาบหลัก (principal planes) เราเรียกว่า "หน่วยแรงหลัก (principal stresses) ซึ่งสามารถหาค่าได้จากการแทน $\tan 2\theta$ ในสมการที่ 11.24 ลงในสมการที่ 11.24 จะได้

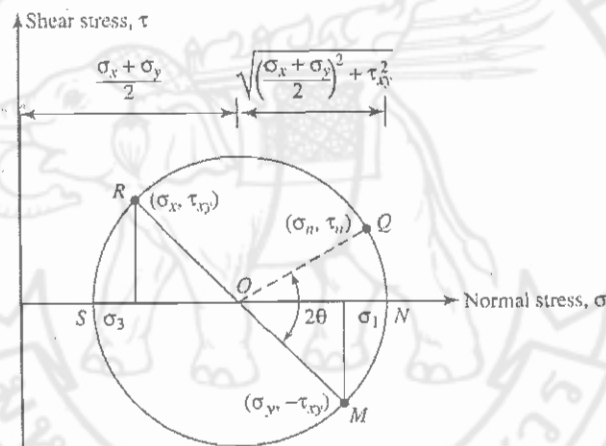
1. หน่วยแรงหลักมากที่สุด (Major principal stress) :

$$\sigma_n = \sigma_1 = \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} + \sqrt{\left[\frac{(\sigma_y - \sigma_x)}{2}\right]^2 + \tau_{xy}^2} \quad (\text{สมการที่ 11.27})$$

2. หน่วยแรงหลักน้อยที่สุด (Minor principal stress) :

$$\sigma_n = \sigma_3 = \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} - \sqrt{\left[\frac{(\sigma_y - \sigma_x)}{2}\right]^2 + \tau_{xy}^2} \quad (\text{สมการที่ 11.28})$$

นอกจากนี้เราจะสามารถหาค่าหน่วยแรงบนระนาบใดๆ โดยใช้วงกลมของมอร์ (Mohr's Circle) ดังแสดงในรูปที่ 11.13



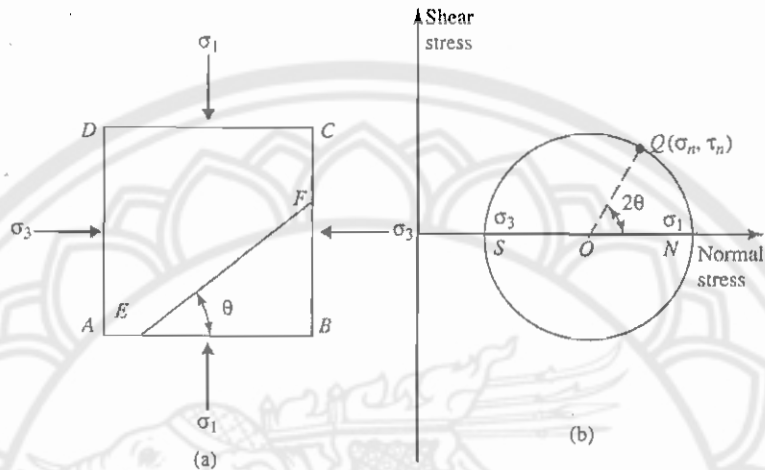
รูปที่ 11.13 ทฤษฎีของวงกลม Mohr

วงกลมของมอร์ใช้แสดงสถานะของหน่วยแรงที่กระทำต่ออนุภาคในรูปแบบแผนภาพ โดยมีกำหนดเครื่องหมาย (Sign Convention) คือหน่วยแรงตั้งฉากที่เป็นแรงกด (Counterclockwise) มีเครื่องหมายเป็นบวก ส่วนหน่วยแรงเฉือนที่กระทำในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (Counterclockwise) มีเครื่องหมายเป็นบวก

จากหน่วยแรงกระทำบนมวลดินในรูปที่ 11.12 เมื่อนำพล็อตตามข้อกำหนดเครื่องหมายแล้ววาดวงกลมของมอร์ผ่านจุดทั้งสองจะได้ตามรูปที่ 11.13 โดยที่รัศมีของวงกลม (R) มีค่าเท่ากับ

$$R = \sqrt{\left[\frac{(\sigma_y - \sigma_x)}{2}\right]^2 + \tau_{xy}^2} \quad (\text{สมการที่ 11.29})$$

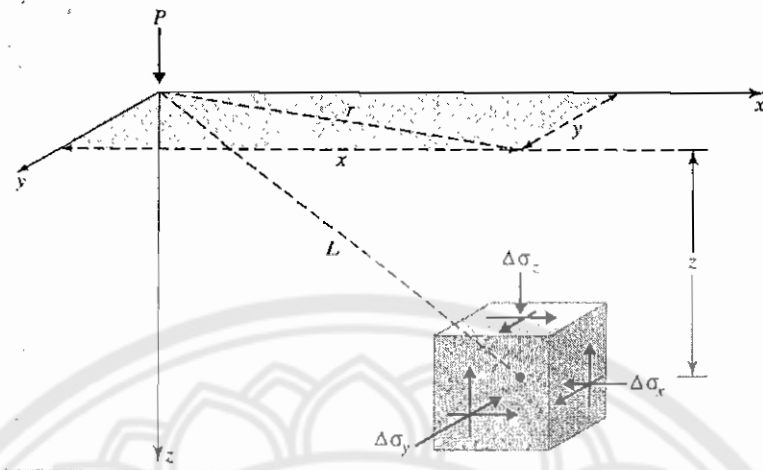
เราจะสามารถหาหน่วยแรงบนระนาบใดๆ ได้ เช่นเมื่อต้องการหาค่าหน่วยแรงบนระนาบที่ทำมุม θ กับระนาบที่ตั้งฉากกับแกน Y ก็ให้วัดจาก $(\sigma_y - \tau_{xy})$ ไปเท่ากับ 2θ โดยหลักการนี้เราจึงสามารถหาหน่วยแรงหลัก และระนาบของหน่วยแรงหลักได้ ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ 11.14



รูปที่ 11.14 (a) ชิ้นส่วนดินที่ AB คือ major principle plane และ AD คือ minor principle plane (b) วงกลมของ Mohr ที่เขียนจากดินใน (a)

- 11.1.3.1 หน่วยแรงที่เกิดจากน้ำหนักกระทำแบบเป็นจุด (Stress Caused by a Point Load)

สามารถหาหน่วยแรงได้โดยอาศัยสมการที่เสนอโดย Boussinesq (1883) ซึ่งพิจารณาให้ดินเป็นลักษณะกึ่งอนันต์ (semi - infinite medium) โดยอาศัยกฎของ Hook เป็นกฎพื้นฐานในการวิเคราะห์พิจารณารูปที่ 11.15 แสดงแรงกระทำเป็นจุดที่กระทำที่ผิวดิน ทำให้เกิดหน่วยแรงบนมวลดินที่อยู่ลงไปเป็นระยะ z ห่างจากแนวแรงตามแนวแกน x เท่ากับ x และห่างจากแนวแรงตามแนวแกน y เท่ากับ y



รูปที่ 11.15 หน่วยแรงที่เกิดจากน้ำหนักกระทำแบบจุด

จากรูปเราสามารถคำนวณหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นที่จุด A ($\Delta\sigma$) เนื่องจากแรงกระทำแบบเป็นจุดมีค่าเท่ากับ P โดยจะได้

$$\Delta\sigma_x = \frac{P}{2\pi} \left\{ \frac{3x^2z}{L^5} - (1-2\mu) \left[\frac{x^2-y^2}{L \cdot r^2(L+z)} + \frac{x^2z}{L^3r^2} \right] \right\} \quad (\text{สมการที่ 11.30})$$

$$\Delta\sigma_y = \frac{P}{2\pi} \left\{ \frac{3y^2z}{L^5} - (1-2\mu) \left[\frac{y^2-x^2}{L \cdot r^2(L+z)} + \frac{y^2z}{L^3r^2} \right] \right\} \quad (\text{สมการที่ 11.31})$$

และ

$$\Delta\sigma_z = \frac{3P}{2\pi} \frac{z^3}{L^5} = \frac{3P}{2\pi} \frac{z^3}{(r^2+z^2)^{(5/2)}} \quad (\text{สมการที่ 11.32})$$

โดยที่ $r = \sqrt{x^2+y^2}$
 $L = \sqrt{x^2+y^2+z^2} = \sqrt{r^2+z^2}$
 $\mu =$ อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio)

ซึ่งสมการที่ 11.32 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\Delta\sigma_z = \frac{P}{z^2} \left\{ \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{1}{[(r/z)^2+1]^{(5/2)}} \right\} = \frac{P}{z^2} I_1 \quad (\text{สมการที่ 11.33})$$

โดยที่ $I_1 = \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{1}{[(r/z)^2+1]^{(5/2)}}$

ซึ่ง I_z จะแปรผันตาม r/z โดยสามารถแสดงค่า I_z ตามตารางที่ 11.3 ดังต่อไปนี้

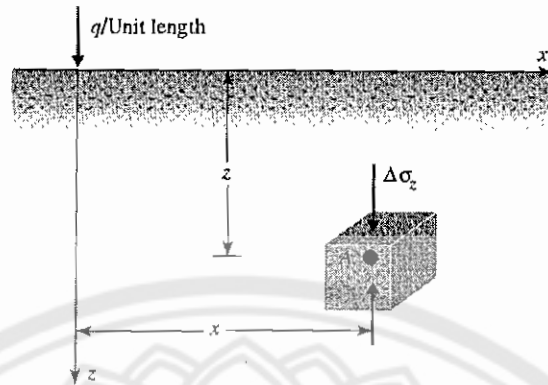
ตารางที่ 11.3 แสดงค่า I_z ที่ค่า r/z ต่างๆ

r/z	I_z	r/z	I_z
0	0.4775	0.75	0.1565
0.02	0.4770	0.80	0.1386
0.04	0.4765	0.85	0.1226
0.06	0.4723	0.90	0.1083
0.08	0.4699	0.95	0.0956
0.10	0.4657	1.00	0.0844
0.12	0.4607	1.20	0.0513
0.14	0.4548	1.40	0.0317
0.16	0.4482	1.60	0.0200
0.18	0.4409	1.80	0.0129
0.20	0.4329	2.00	0.0085
0.22	0.4242	2.20	0.0058
0.24	0.4151	2.40	0.0040
0.26	0.4050	2.60	0.0029
0.28	0.3954	2.80	0.0021
0.30	0.3849	3.00	0.0015
0.32	0.3742	3.20	0.0011
0.34	0.3632	3.40	0.00085
0.36	0.3521	3.60	0.00066
0.38	0.3408	3.80	0.00051
0.40	0.3294	4.00	0.00040
0.45	0.3011	4.20	0.00032
0.50	0.2733	4.40	0.00026
0.55	0.2466	4.60	0.00021
0.60	0.2214	4.80	0.00017
0.65	0.1978	5.00	0.00014
0.70	0.1762		

- 11.1.3.2 หน่วยแรงในแนวตั้งเนื่องจากน้ำหนักกระทำแบบเป็นแนว (Vertical stress Caused by a Line Load)

พิจารณารูปที่ 11.16 เราสามารถคำนวณหาค่าหน่วยแรงดันในแนวตั้งในวิธีของ Boussinesq (1883) ซึ่งคำนวณหน่วยแรงที่เพิ่มเป็นเนื่องจากน้ำหนัก (q) กระทำต่อหน่วยความยาวของกำแพงโดยอาศัยทฤษฎียืดหยุ่น (theory of elasticity) จะได้เป็นสมการดังนี้

$$\Delta\sigma_z = \frac{2qz^3}{\pi(x^2 + z^2)^2} \quad (\text{สมการที่ 11.34})$$



รูปที่ 11.16 แสดงถึงแรงกระทำเป็นแนวที่กระทำต่อผิวของมวลดินโดยความยาวของแนวไม่จำกัด

และสมการที่ 11.34 สามารถเขียนได้เป็น

$$\Delta\sigma_z = \frac{2q}{\pi z \left[\left(\frac{x}{z} \right)^2 + 1 \right]^2} \quad (\text{สมการที่ 11.35})$$

หรือ

$$\frac{\Delta\sigma_z}{(q/z)} = \frac{2}{\pi \left[\left(\frac{x}{z} \right)^2 + 1 \right]^2} \quad (\text{สมการที่ 11.36})$$

โดยมีค่า $\frac{\Delta\sigma_z}{(q/z)}$ สามารถแสดงได้ตามการแปรผันของ (x/z) นั้นเอง ดังแสดงในตารางที่ 11.4

ตารางที่ 11.4 ค่าของ $\frac{\Delta\sigma_z}{(q/z)}$ ที่ค่า (x/z) ต่างๆกัน

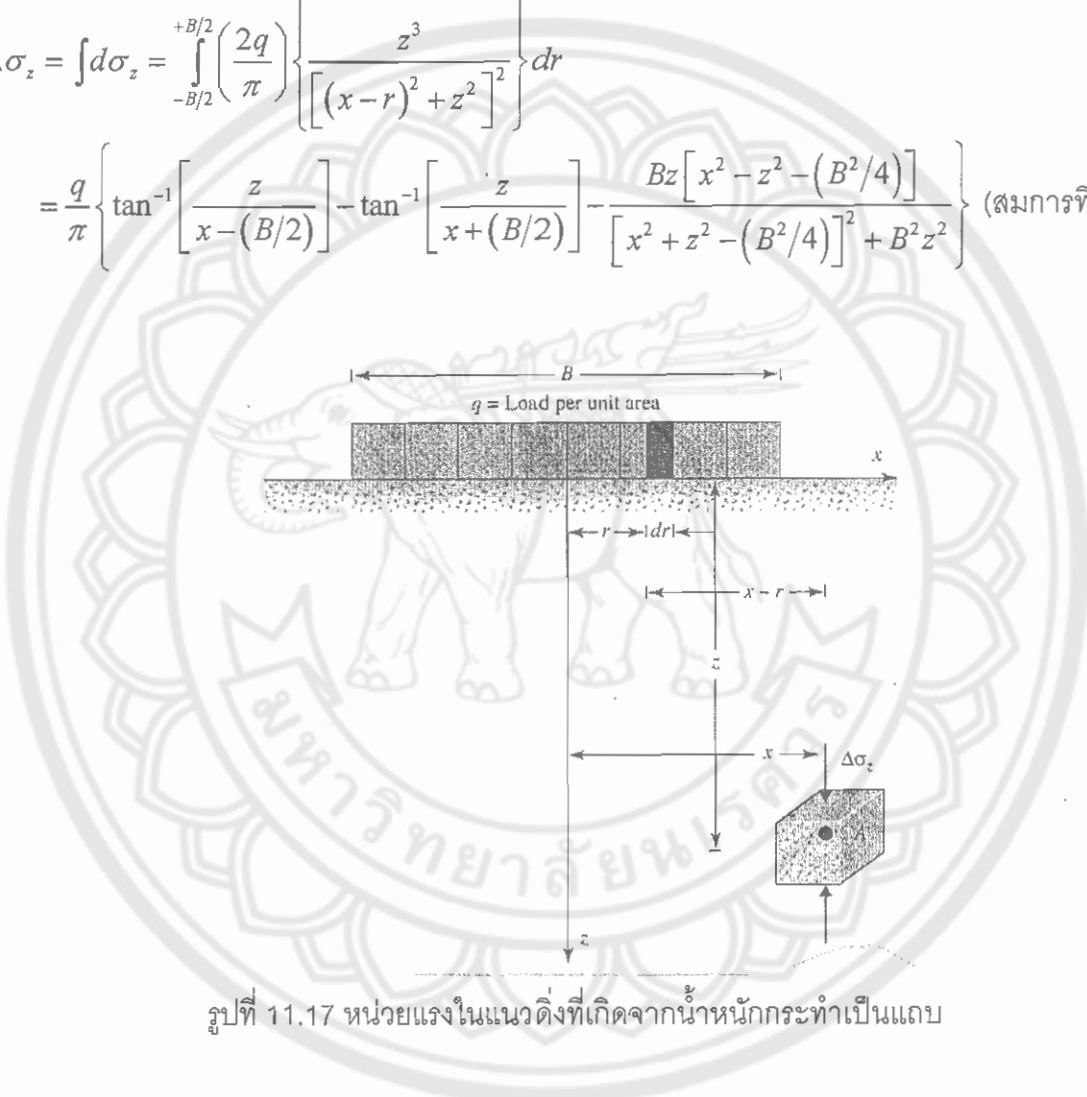
x/z	$\Delta\sigma_z/(q/z)$	x/z	$\Delta\sigma_z/(q/z)$
0	0.637	1.3	0.088
0.1	0.624	1.4	0.073
0.2	0.589	1.5	0.060
0.3	0.536	1.6	0.050
0.4	0.473	1.7	0.042
0.5	0.407	1.8	0.035
0.6	0.344	1.9	0.030
0.7	0.287	2.0	0.025
0.8	0.237	2.2	0.019
0.9	0.194	2.4	0.014
1.0	0.159	2.6	0.011
1.1	0.130	2.8	0.008
1.2	0.107	3.0	0.006

- 11.1.3.3 หน่วยแรงในแนวดิ่งเนื่องจากน้ำหนักกระทำแบบเป็นแถบ (Vertical Stress Caused by a strip Load)

พิจารณารูปที่ 11.17 หน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นในแนวดิ่ง ($\Delta\sigma_z$) ที่จุด A ซึ่งเกิดจากน้ำหนักกระทำแบบแถวยาวและความกว้างมีค่าเท่ากับ B สามารถหาค่าได้จากสมการดังนี้

$$\Delta\sigma_z = \int d\sigma_z = \int_{-B/2}^{+B/2} \left(\frac{2q}{\pi} \right) \left\{ \frac{z^3}{[(x-r)^2 + z^2]^2} \right\} dr$$

$$= \frac{q}{\pi} \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{z}{x-(B/2)} \right] - \tan^{-1} \left[\frac{z}{x+(B/2)} \right] - \frac{Bz [x^2 - z^2 - (B^2/4)]}{[x^2 + z^2 - (B^2/4)]^2 + B^2 z^2} \right\} \text{ (สมการที่ 11.37)}$$



รูปที่ 11.17 หน่วยแรงในแนวดิ่งที่เกิดจากน้ำหนักกระทำเป็นแถบ

โดยตารางที่ 11.5 แสดงถึงค่าหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นในแนวดิ่งต่อหน่วยน้ำหนัก $\left(\frac{\Delta\sigma_z}{q} \right)$ ที่ค่า $2z/B$ และค่า $2x/B$ ต่างๆ โดยแสดงได้ดังนี้

ตารางที่ 11.5 แสดงค่าหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นในแนวตั้งต่อหน่วยน้ำหนัก $\left(\frac{\Delta\sigma_z}{q}\right)$

ที่ค่า $2z/B$ และค่า $2x/B$ ต่างๆ

$2z/B$	$2x/B$										
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.00	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.10	1.000	1.000	0.999	0.999	0.999	0.998	0.997	0.993	0.980	0.909	0.500
0.20	0.997	0.997	0.996	0.995	0.992	0.988	0.979	0.959	0.909	0.775	0.500
0.30	0.990	0.989	0.987	0.984	0.978	0.967	0.947	0.908	0.833	0.697	0.499
0.40	0.977	0.976	0.973	0.966	0.955	0.937	0.906	0.855	0.773	0.651	0.498
0.50	0.959	0.958	0.953	0.943	0.927	0.902	0.864	0.808	0.727	0.620	0.497
0.60	0.937	0.935	0.928	0.915	0.896	0.866	0.825	0.767	0.691	0.598	0.495
0.70	0.910	0.908	0.899	0.885	0.863	0.831	0.788	0.732	0.662	0.581	0.492
0.80	0.881	0.878	0.869	0.853	0.829	0.797	0.755	0.701	0.638	0.566	0.489
0.90	0.850	0.847	0.837	0.821	0.797	0.765	0.724	0.675	0.617	0.552	0.485
1.00	0.818	0.815	0.805	0.789	0.766	0.735	0.696	0.650	0.598	0.540	0.480
1.10	0.787	0.783	0.774	0.758	0.735	0.706	0.670	0.628	0.580	0.529	0.474
1.20	0.755	0.752	0.743	0.728	0.707	0.679	0.646	0.607	0.564	0.517	0.468
1.30	0.725	0.722	0.714	0.699	0.679	0.654	0.623	0.588	0.548	0.506	0.462
1.40	0.696	0.693	0.685	0.672	0.653	0.630	0.602	0.569	0.534	0.495	0.455
1.50	0.668	0.666	0.658	0.646	0.629	0.607	0.581	0.552	0.519	0.484	0.448
1.60	0.642	0.639	0.633	0.621	0.605	0.586	0.562	0.535	0.506	0.474	0.440
1.70	0.617	0.615	0.608	0.598	0.583	0.565	0.544	0.519	0.492	0.463	0.433
1.80	0.593	0.591	0.585	0.576	0.563	0.546	0.526	0.504	0.479	0.453	0.425
1.90	0.571	0.569	0.564	0.555	0.543	0.528	0.510	0.489	0.467	0.443	0.417
2.00	0.550	0.548	0.543	0.535	0.524	0.510	0.494	0.475	0.455	0.433	0.409
2.10	0.530	0.529	0.524	0.517	0.507	0.494	0.479	0.462	0.443	0.423	0.401
2.20	0.511	0.510	0.506	0.499	0.490	0.479	0.465	0.449	0.432	0.413	0.393
2.30	0.494	0.493	0.489	0.483	0.474	0.464	0.451	0.437	0.421	0.404	0.385
2.40	0.477	0.476	0.473	0.467	0.460	0.450	0.438	0.425	0.410	0.395	0.378
2.50	0.462	0.461	0.458	0.452	0.445	0.436	0.426	0.414	0.400	0.386	0.370
2.60	0.447	0.446	0.443	0.439	0.432	0.424	0.414	0.403	0.390	0.377	0.363
2.70	0.433	0.432	0.430	0.425	0.419	0.412	0.403	0.393	0.381	0.369	0.355
2.80	0.420	0.419	0.417	0.413	0.407	0.400	0.392	0.383	0.372	0.360	0.348
2.90	0.408	0.407	0.405	0.401	0.396	0.389	0.382	0.373	0.363	0.352	0.341
3.00	0.396	0.395	0.393	0.390	0.385	0.379	0.372	0.364	0.355	0.345	0.334
3.10	0.385	0.384	0.382	0.379	0.375	0.369	0.363	0.355	0.347	0.337	0.327
3.20	0.374	0.373	0.372	0.369	0.365	0.360	0.354	0.347	0.339	0.330	0.321
3.30	0.364	0.363	0.362	0.359	0.355	0.351	0.345	0.339	0.331	0.323	0.315
3.40	0.354	0.354	0.352	0.350	0.346	0.342	0.337	0.331	0.324	0.316	0.308
3.50	0.345	0.345	0.343	0.341	0.338	0.334	0.329	0.323	0.317	0.310	0.302
3.60	0.337	0.336	0.335	0.333	0.330	0.326	0.321	0.316	0.310	0.304	0.297
3.70	0.328	0.328	0.327	0.325	0.322	0.318	0.314	0.309	0.304	0.298	0.291
3.80	0.320	0.320	0.319	0.317	0.315	0.311	0.307	0.303	0.297	0.292	0.285
3.90	0.313	0.313	0.312	0.310	0.307	0.304	0.301	0.296	0.291	0.286	0.280
4.00	0.306	0.305	0.304	0.303	0.301	0.298	0.294	0.290	0.285	0.280	0.275
4.10	0.299	0.299	0.298	0.296	0.294	0.291	0.288	0.284	0.280	0.275	0.270
4.20	0.292	0.292	0.291	0.290	0.288	0.285	0.282	0.278	0.274	0.270	0.265
4.30	0.286	0.286	0.285	0.283	0.282	0.279	0.276	0.273	0.269	0.265	0.260
4.40	0.280	0.280	0.279	0.278	0.276	0.274	0.271	0.268	0.264	0.260	0.256
4.50	0.274	0.274	0.273	0.272	0.270	0.268	0.266	0.263	0.259	0.255	0.251
4.60	0.268	0.268	0.268	0.266	0.265	0.263	0.260	0.258	0.254	0.251	0.247
4.70	0.263	0.263	0.262	0.261	0.260	0.258	0.255	0.253	0.250	0.246	0.243
4.80	0.258	0.258	0.257	0.256	0.255	0.253	0.251	0.248	0.245	0.242	0.239
4.90	0.253	0.253	0.252	0.251	0.250	0.248	0.246	0.244	0.241	0.238	0.235
5.00	0.248	0.248	0.247	0.246	0.245	0.244	0.242	0.239	0.237	0.234	0.231

ตารางที่ 11.5 (ต่อ) แสดงค่าหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นในแนวตั้งต่อหน่วยน้ำหนัก $\left(\frac{\Delta\sigma_z}{q}\right)$

ที่ค่า $2z/B$ และค่า $2x/B$ ต่างๆ

$2z/B$	$2x/B$									
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.10	0.091	0.020	0.007	0.003	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
0.20	0.225	0.091	0.040	0.020	0.011	0.007	0.004	0.003	0.002	0.002
0.30	0.301	0.165	0.090	0.052	0.031	0.020	0.013	0.009	0.007	0.005
0.40	0.346	0.224	0.141	0.090	0.059	0.040	0.027	0.020	0.014	0.011
0.50	0.373	0.267	0.185	0.128	0.089	0.063	0.046	0.034	0.025	0.019
0.60	0.391	0.298	0.222	0.163	0.120	0.088	0.066	0.050	0.038	0.030
0.70	0.403	0.321	0.250	0.193	0.148	0.113	0.087	0.068	0.053	0.042
0.80	0.411	0.338	0.273	0.218	0.173	0.137	0.108	0.086	0.069	0.056
0.90	0.416	0.351	0.291	0.239	0.195	0.158	0.128	0.104	0.085	0.070
1.00	0.419	0.360	0.305	0.256	0.214	0.177	0.147	0.122	0.101	0.084
1.10	0.420	0.366	0.316	0.271	0.230	0.194	0.164	0.138	0.116	0.098
1.20	0.419	0.371	0.325	0.282	0.243	0.209	0.178	0.152	0.130	0.111
1.30	0.417	0.373	0.331	0.291	0.254	0.221	0.191	0.166	0.143	0.123
1.40	0.414	0.374	0.335	0.298	0.263	0.232	0.203	0.177	0.155	0.135
1.50	0.411	0.374	0.338	0.303	0.271	0.240	0.213	0.188	0.165	0.146
1.60	0.407	0.373	0.339	0.307	0.276	0.248	0.221	0.197	0.175	0.155
1.70	0.402	0.370	0.339	0.309	0.281	0.254	0.228	0.205	0.183	0.164
1.80	0.396	0.368	0.339	0.311	0.284	0.258	0.234	0.212	0.191	0.172
1.90	0.391	0.364	0.338	0.312	0.286	0.262	0.239	0.217	0.197	0.179
2.00	0.385	0.360	0.336	0.311	0.288	0.265	0.243	0.222	0.203	0.185
2.10	0.379	0.356	0.333	0.311	0.288	0.267	0.246	0.226	0.208	0.190
2.20	0.373	0.352	0.330	0.309	0.288	0.268	0.248	0.229	0.212	0.195
2.30	0.366	0.347	0.327	0.307	0.288	0.268	0.250	0.232	0.215	0.199
2.40	0.360	0.342	0.323	0.305	0.287	0.268	0.251	0.234	0.217	0.202
2.50	0.354	0.337	0.320	0.302	0.285	0.268	0.251	0.235	0.220	0.205
2.60	0.347	0.332	0.316	0.299	0.283	0.267	0.251	0.236	0.221	0.207
2.70	0.341	0.327	0.312	0.296	0.281	0.266	0.251	0.236	0.222	0.208
2.80	0.335	0.321	0.307	0.293	0.279	0.265	0.250	0.236	0.223	0.210
2.90	0.329	0.316	0.303	0.290	0.276	0.263	0.249	0.236	0.223	0.211
3.00	0.323	0.311	0.299	0.286	0.274	0.261	0.248	0.236	0.223	0.211
3.10	0.317	0.306	0.294	0.283	0.271	0.259	0.247	0.235	0.223	0.212
3.20	0.311	0.301	0.290	0.279	0.268	0.256	0.245	0.234	0.223	0.212
3.30	0.305	0.296	0.286	0.275	0.265	0.254	0.243	0.232	0.222	0.211
3.40	0.300	0.291	0.281	0.271	0.261	0.251	0.241	0.231	0.221	0.211
3.50	0.294	0.286	0.277	0.268	0.258	0.249	0.239	0.229	0.220	0.210
3.60	0.289	0.281	0.273	0.264	0.255	0.246	0.237	0.228	0.218	0.209
3.70	0.284	0.276	0.268	0.260	0.252	0.243	0.235	0.226	0.217	0.208
3.80	0.279	0.272	0.264	0.256	0.249	0.240	0.232	0.224	0.216	0.207
3.90	0.274	0.267	0.260	0.253	0.245	0.238	0.230	0.222	0.214	0.206
4.00	0.269	0.263	0.256	0.249	0.242	0.235	0.227	0.220	0.212	0.205
4.10	0.264	0.258	0.252	0.246	0.239	0.232	0.225	0.218	0.211	0.203
4.20	0.260	0.254	0.248	0.242	0.236	0.229	0.222	0.216	0.209	0.202
4.30	0.255	0.250	0.244	0.239	0.233	0.226	0.220	0.213	0.207	0.200
4.40	0.251	0.246	0.241	0.235	0.229	0.224	0.217	0.211	0.205	0.199
4.50	0.247	0.242	0.237	0.232	0.226	0.221	0.215	0.209	0.203	0.197
4.60	0.243	0.238	0.234	0.229	0.223	0.218	0.212	0.207	0.201	0.195
4.70	0.239	0.235	0.230	0.225	0.220	0.215	0.210	0.205	0.199	0.194
4.80	0.235	0.231	0.227	0.222	0.217	0.213	0.208	0.202	0.197	0.192
4.90	0.231	0.227	0.223	0.219	0.215	0.210	0.205	0.200	0.195	0.190
5.00	0.227	0.224	0.220	0.216	0.212	0.207	0.203	0.198	0.193	0.188

- 11.1.3.4 หน่วยแรงในแนวดิ่งเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกของดินถม (Vertical Stress Due to Embankment Lading)

พิจารณารูปที่ 11.18 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในดินที่จุด A สามารถคำนวณหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\Delta\sigma_z = \frac{q_0}{\pi} \left[\left(\frac{B_1 + B_2}{B_2} \right) (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{B_1}{B_2} (\alpha_2) \right] \quad (\text{สมการที่ 11.38})$$

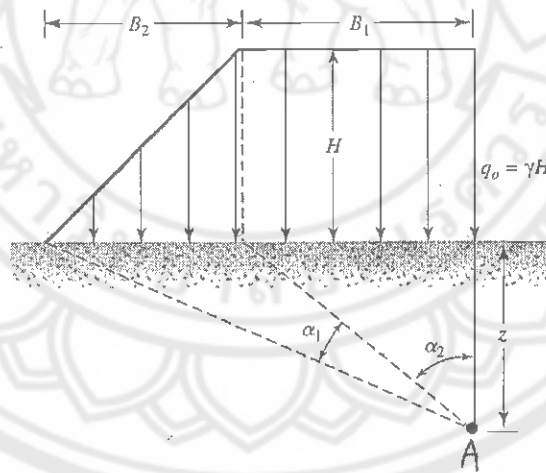
โดยที่ $q_0 = \gamma H$

γ = หน่วยน้ำหนักของดินถม (unit weight of the embankment soil)

H = ความสูงของดินถม (height of the embankment)

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left(\frac{B_1 + B_2}{z} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{B_1}{z} \right) \quad (\text{สมการที่ 11.39})$$

$$\alpha_2 = \tan^{-1} \left(\frac{B_1}{z} \right) \quad (\text{สมการที่ 11.40})$$



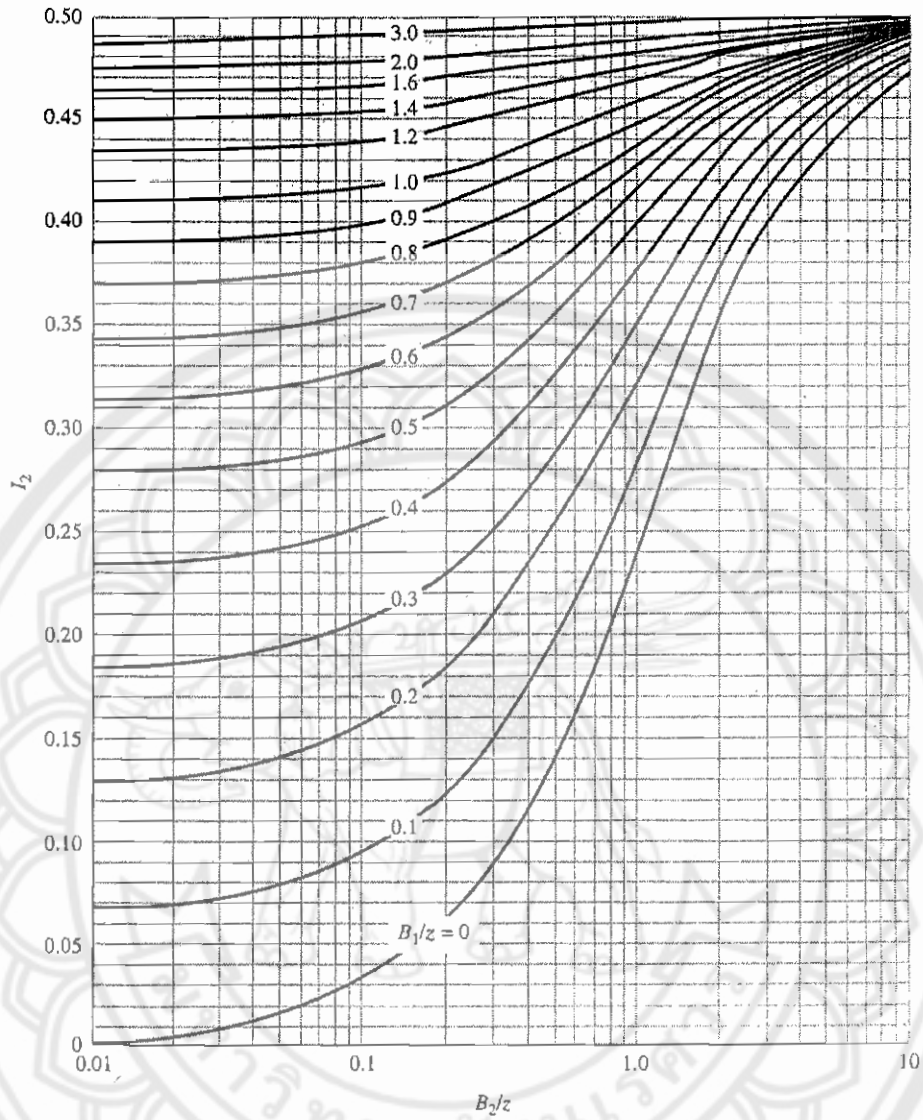
รูปที่ 11.18 แสดงน้ำหนักกระทำแบบ embankment

จากสมการที่ 11.38 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\Delta\sigma_z = q_0 I_2 \quad (\text{สมการที่ 11.41})$$

โดยที่ I_2 = เป็นฟังก์ชันจาก B_1/z และ B_2/z

โดยสามารถแสดงค่า I_2 ที่แปรผันตาม B_1/z และ B_2/z ได้ตามรูปที่ 11.19



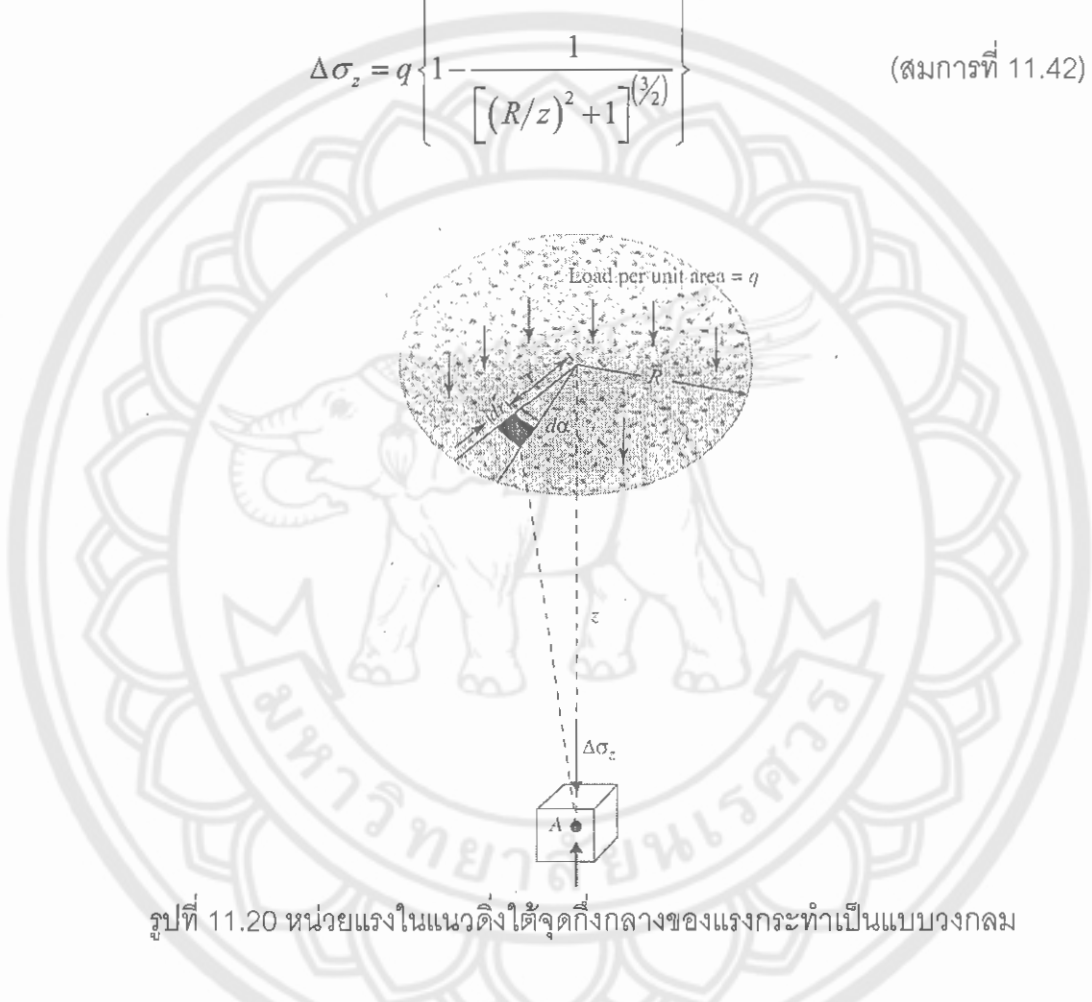
รูปที่ 11.19 แสดงแผนภูมิ Osterberg ของหน่วยแรงในแนวตั้งของน้ำหนักระทำแบบ embankment

- 11.1.3.5 หน่วยแรงในแนวตั้งที่ได้ศูนย์กลางของน้ำหนักกระทำสม่ำเสมอเป็นพื้นที่วงกลม

(Vertical Stress Below the Center of a Uniformly Loaded Circular Area)

พิจารณารูปที่ 11.20 ค่าหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นที่จุด A เนื่องจากน้ำหนักกระทำ สามารถหาได้จากสมการ

$$\Delta\sigma_z = q \left\{ 1 - \frac{1}{\left[\left(\frac{R}{z} \right)^2 + 1 \right]^{3/2}} \right\} \quad (\text{สมการที่ 11.42})$$



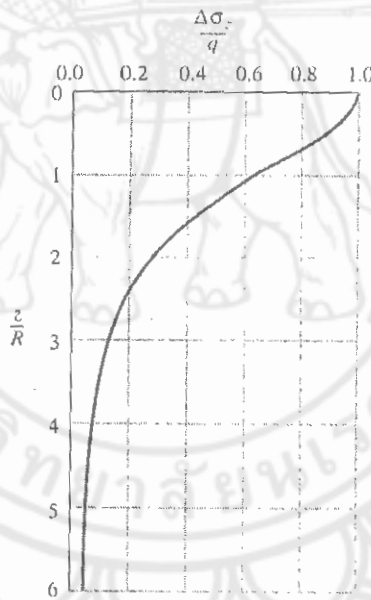
รูปที่ 11.20 หน่วยแรงในแนวตั้งใต้จุดกึ่งกลางของแรงกระทำเป็นแบบวงกลม

ตารางที่ 11.6 แสดงค่า $\left(\frac{\Delta\sigma_z}{q} \right)$ กับค่า z/R ที่วิเคราะห์มาจากสมการที่ 11.42 และรูปที่

11.21 แสดงการนำค่าจากตารางที่ 11.6 มาพล็อตค่าของหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้น ($\Delta\sigma_z$) จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วตามความลึกที่เพิ่มขึ้นของชั้นดิน ที่ความลึก $z = 5R$ จะมีค่า ๆ เท่ากับ 6% ซึ่งเป็นค่าหน่วยแรงที่ผิวดิน

ตารางที่ 11.6 ค่า $\left(\frac{\Delta\sigma_z}{q}\right)$ ที่ค่า z/R ต่างๆ

z/R	$\Delta\sigma_z$
0	1
0.02	0.9999
0.05	0.9998
0.10	0.9990
0.2	0.9925
0.4	0.9488
0.5	0.9106
0.8	0.7562
1.0	0.6465
1.5	0.4240
2.0	0.2845
2.5	0.1996
3.0	0.1436
4.0	0.0869
5.0	0.0571



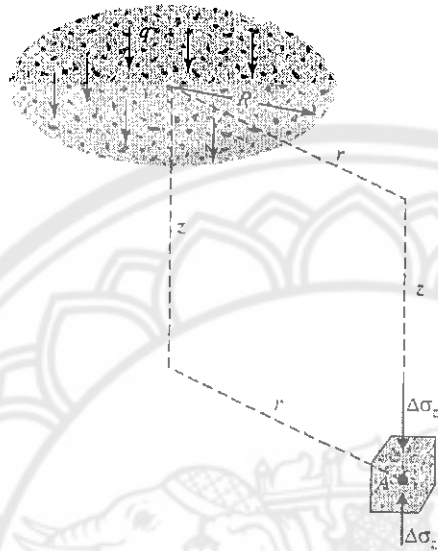
รูปที่ 11.21 หน่วยแรงได้น้ำหนักกระทำแบบวงกลมโดยนำค่าจากตารางที่ 11.6 มาพล็อต

-11.1.3.6 หน่วยแรงในแนวดิ่งที่ได้จุดใดๆ ของน้ำหนักกระทำสม่ำเสมอเป็นพื้นที่วงกลม
(Vertical Stress at any Point Below a Uniformly Loaded Circular Area)

พิจารณารูปที่ 11.22 แสดงหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นที่จุด A ใดๆ ที่ความลึก z เป็นระยะ r จากศูนย์กลางของพื้นที่ของน้ำหนักกระทำ โดยสามารถหาค่าได้จากสมการดังนี้

$$\Delta\sigma_z = q(A' + B') \quad (\text{สมการที่ 11.43})$$

โดยที่ A' และ B' เป็นฟังก์ชันของ z/R และ r/R โดยดูได้จากตารางที่ 11.7 และตารางที่ 11.8 ตามลำดับ



รูปที่ 11.22 หน่วยแรงในแนวตั้งที่จุดใดๆ ได้นำหน้ากระทำแบบสม่ำเสมอของวงกลม



ตารางที่ 11.7 ค่า A' ที่ค่า z/R และ r/R ต่างๆ

z/R	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.5	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14
0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
0.1	0.90050	0.89748	0.88679	0.86126	0.78797	0.43015	0.09645	0.02787	0.00856	0.00211	0.00064	0.00042	0.00042	0.00042	0.00042	0.00042	0.00042	0.00042
0.2	0.80388	0.79824	0.77884	0.73483	0.63014	0.38369	0.15435	0.05251	0.01680	0.00419	0.00167	0.00083	0.00048	0.00030	0.00020	0.00020	0.00020	0.00020
0.3	0.71265	0.70518	0.68316	0.62690	0.52081	0.34335	0.17964	0.07199	0.02440	0.00622	0.00250	0.00125	0.00063	0.00038	0.00025	0.00015	0.00010	0.00007
0.4	0.62861	0.62015	0.59241	0.53767	0.44329	0.31048	0.19709	0.08593	0.03118	0.00913	0.00407	0.00209	0.00118	0.00071	0.00053	0.00035	0.00025	0.00019
0.5	0.55279	0.54403	0.51622	0.46448	0.38290	0.28156	0.18556	0.09499	0.03700	0.01013	0.00407	0.00209	0.00118	0.00071	0.00053	0.00035	0.00025	0.00019
0.6	0.48550	0.47691	0.45078	0.40427	0.33676	0.25588	0.17952	0.10010	0.03700	0.01013	0.00407	0.00209	0.00118	0.00071	0.00053	0.00035	0.00025	0.00019
0.7	0.42654	0.41874	0.39491	0.35428	0.29839	0.21727	0.17124	0.10228	0.03700	0.01013	0.00407	0.00209	0.00118	0.00071	0.00053	0.00035	0.00025	0.00019
0.8	0.37531	0.36832	0.34729	0.31243	0.26581	0.21297	0.16206	0.10228	0.03700	0.01013	0.00407	0.00209	0.00118	0.00071	0.00053	0.00035	0.00025	0.00019
0.9	0.33104	0.32492	0.30669	0.27707	0.23832	0.19488	0.15253	0.10094	0.03700	0.01013	0.00407	0.00209	0.00118	0.00071	0.00053	0.00035	0.00025	0.00019
1	0.29289	0.28763	0.27005	0.24697	0.21468	0.17868	0.14429	0.09849	0.03700	0.01013	0.00407	0.00209	0.00118	0.00071	0.00053	0.00035	0.00025	0.00019
1.2	0.25178	0.24795	0.23162	0.19890	0.17026	0.15101	0.12570	0.09192	0.03700	0.01013	0.00407	0.00209	0.00118	0.00071	0.00053	0.00035	0.00025	0.00019
1.5	0.16795	0.16552	0.15877	0.14804	0.13436	0.11892	0.10296	0.08048	0.03700	0.01013	0.00407	0.00209	0.00118	0.00071	0.00053	0.00035	0.00025	0.00019
2	0.10557	0.10453	0.10140	0.09647	0.09111	0.08269	0.07471	0.06275	0.03700	0.01013	0.00407	0.00209	0.00118	0.00071	0.00053	0.00035	0.00025	0.00019
2.5	0.07152	0.07098	0.06947	0.06698	0.06373	0.05974	0.05555	0.04880	0.03700	0.01013	0.00407	0.00209	0.00118	0.00071	0.00053	0.00035	0.00025	0.00019
3	0.05132	0.05101	0.05022	0.04886	0.04707	0.04487	0.04241	0.03839	0.03700	0.01013	0.00407	0.00209	0.00118	0.00071	0.00053	0.00035	0.00025	0.00019
4	0.02986	0.02976	0.02907	0.04886	0.04707	0.04487	0.04241	0.03839	0.03700	0.01013	0.00407	0.00209	0.00118	0.00071	0.00053	0.00035	0.00025	0.00019
5	0.01942	0.01938	0.01907	0.02802	0.02832	0.02749	0.02651	0.02490	0.02193	0.01592	0.01109	0.00770	0.00527	0.00384	0.00282	0.00214	0.00160	0.00113
6	0.01361	0.01361	0.01307	0.01307	0.01168	0.00983	0.00795	0.00628	0.00468	0.00319	0.00194	0.00124	0.00084	0.00061	0.00045	0.00033	0.00025	0.00019
7	0.01005	0.00976	0.00976	0.00976	0.00894	0.00784	0.00661	0.00548	0.00445	0.00360	0.00291	0.00234	0.00188	0.00145	0.00113	0.00084	0.00061	0.00045
8	0.00772	0.00755	0.00755	0.00755	0.00703	0.00635	0.00554	0.00472	0.00398	0.00332	0.00276	0.00229	0.00188	0.00145	0.00113	0.00084	0.00061	0.00045
9	0.00612	0.00612	0.00612	0.00612	0.00566	0.00520	0.00466	0.00409	0.00353	0.00301	0.00256	0.00214	0.00179	0.00145	0.00113	0.00084	0.00061	0.00045
10					0.00473	0.00465	0.00438	0.00397	0.00352	0.00301	0.00256	0.00214	0.00179	0.00145	0.00113	0.00084	0.00061	0.00045

* After Ahlbin and Utery (1962)

ตารางที่ 11.8 ค่า B' ที่ค่า z/R และ r/R ต่างๆ

z/R	0	0.2	0.4	0.5	0.8	1	1.2	1.5	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1	0.09852	0.10140	0.11138	0.115424	0.18796	0.05388	-0.07899	-0.02672	-0.00845	-0.00210	-0.00084	-0.00042	-0.00024	-0.00015	-0.00010				
0.2	0.18857	0.19306	0.20772	0.25524	0.25983	0.08513	-0.07759	-0.04448	-0.01393	-0.00442	-0.00166	-0.00083							
0.3	0.26362	0.26787	0.28018	0.29483	0.27257	0.10757	-0.04316	-0.04999	-0.02166	-0.00599	-0.00245								
0.4	0.32016	0.32259	0.32748	0.32273	0.26925	0.12404	-0.00766	-0.04535	-0.02522										
0.5	0.35777	0.35752	0.35923	0.33106	0.26236	0.13591	0.02165	-0.05455	-0.02651	-0.00991	-0.00388	-0.00199	-0.00116	-0.00073	-0.00049	-0.00025	-0.00014	-0.00009	-0.00009
0.6	0.37831	0.37531	0.36808	0.32822	0.25411	0.14440	0.04457	-0.02101											
0.7	0.38487	0.37962	0.36072	0.31929	0.24638	0.14986	0.06209	-0.00702	-0.02329										
0.8	0.38091	0.37408	0.35133	0.30699	0.23779	0.15292	0.07530	0.00614											
0.9	0.36962	0.36275	0.33734	0.29299	0.22891	0.15404	0.08507	0.01795											
1	0.35355	0.34555	0.32075	0.27819	0.21978	0.15355	0.09210	0.02814	-0.01005	-0.01115	-0.00608	-0.00544	-0.00210	-0.00135	-0.00092	-0.00048	-0.00028	-0.00018	-0.00018
1.2	0.31485	0.30730	0.28481	0.24836	0.20113	0.14915	0.10002	0.04378	0.00023	-0.00995	-0.00632	-0.00378	-0.00236	-0.00156	-0.00107				
1.5	0.25602	0.25025	0.23338	0.20694	0.17368	0.13752	0.10193	0.05745	0.01385	-0.00669	-0.00600	-0.00401	-0.00265	-0.00181	-0.00126	-0.00068	-0.00040	-0.00026	-0.00026
2	0.17889	0.18144	0.16644	0.15198	0.13375	0.11331	0.09254	0.06371	0.02836	-0.00028	-0.00410	-0.00371	-0.00278	-0.00202	-0.00148	-0.00084	-0.00050	-0.00033	-0.00033
2.5	0.12807	0.12633	0.12126	0.11327	0.10298	0.09130	0.07869	0.06022	0.04929	0.00661	-0.00130	-0.00271	-0.00250	-0.00201	-0.00156	-0.00094	-0.00059	-0.00039	-0.00039
3	0.09487	0.09394	0.09099	0.08635	0.08033	0.07325	0.06551	0.05354	0.03511	0.01112	0.00157	-0.00134	-0.00192	-0.00179	-0.00151	-0.00099	-0.00065	-0.00046	-0.00046
4	0.05707	0.05666	0.05562	0.05383	0.05145	0.04773	0.04532	0.03995	0.03066	0.01515	0.00395	0.00155	-0.00029	-0.00094	-0.00109	-0.00070	-0.00068	-0.00050	-0.00049
5	0.03772	0.03760							0.02474	0.01522	0.00810	0.00371	0.00152	0.00013	-0.00043	-0.00070	-0.00061	-0.00049	-0.00049
6	0.02566								0.01968	0.01380	0.00867	0.00496	0.00254	0.00110	0.00028	-0.00037	-0.00047	-0.00045	-0.00045
7	0.01980								0.01577	0.01204	0.00842	0.00547	0.00332	0.00185	0.00095	-0.00029	-0.00029	-0.00037	-0.00037
8	0.01526								0.01279	0.01034	0.00779	0.00554	0.00372	0.00236	0.00141	0.00055	-0.00029	-0.00029	-0.00029
9	0.01212								0.01054	0.00888	0.00705	0.00533	0.00386	0.00265	0.00178	0.00088	0.00012	0.00012	0.00012
10									0.00879	0.00764	0.00631	0.00501	0.00382	0.00281	0.00199	0.00112	0.00066	0.00012	0.00012

* Source: From "Tabulated Values for Determining the Complete Pattern of Stresses, Strains, and Deflections Beneath a Uniform Circular Load on a Homogeneous Half Space," by R. G. Altair and H. H. Uery, in *Highway Research Bulletin 342*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 1962.

- 11.1.3.7 หน่วยแรงในแนวตั้งเนื่องจากน้ำหนักกระทำแบบเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉาก
(Vertical Stress Caused by a Rectangularly Loaded Area)

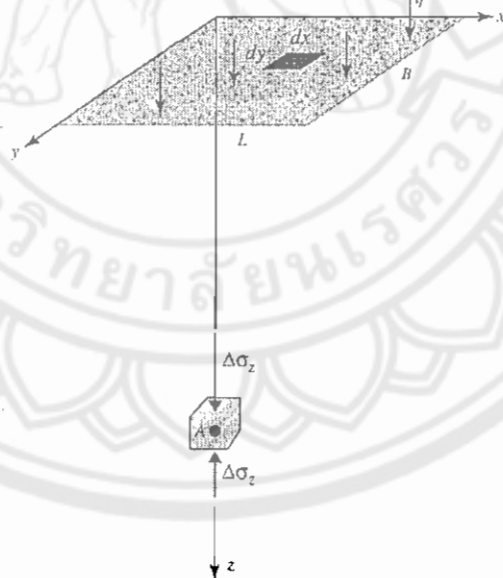
จากรูปที่ 11.23 เราสามารถหาค่าหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นในแนวตั้งได้ตามสมการดังนี้

$$\Delta\sigma_z = \int d\sigma_z = \int_{y=0}^B \int_{x=0}^L \frac{3qz^3 (dxdy)}{2\pi (x^2 + y^2 + z^2)^{(5/2)}} = qI_3 \quad (\text{สมการที่ 11.44})$$

$$\text{โดยที่ } I_3 = \frac{1}{4\pi} \left[\frac{2mn\sqrt{m^2 + n^2 + 1}}{m^2 + n^2 + m^2n^2 + 1} \left(\frac{m^2 + n^2 + 2}{m^2 + n^2 + 1} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{2mn\sqrt{m^2 + n^2 + 1}}{m^2 + n^2 - m^2n^2 + 1} \right) \right] \quad (\text{สมการที่ 11.45})$$

$$m = \frac{B}{z} \quad (\text{สมการที่ 11.46})$$

$$n = \frac{L}{z} \quad (\text{สมการที่ 11.47})$$



รูปที่ 11.23 หน่วยแรงในแนวตั้งตรงมุมของน้ำหนักกระทำแบบสี่เหลี่ยม

โดยที่ I_3 แสดงได้ตามตารางที่ 11.9 ดังนี้

ตารางที่ 11.9 แสดงค่า I_3 ที่ค่า m และ n ต่างๆ

n	m									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.1	0.0047	0.0092	0.0132	0.0168	0.0198	0.0222	0.0242	0.0258	0.0270	0.0279
0.2	0.0092	0.0179	0.0259	0.0328	0.0387	0.0435	0.0474	0.0504	0.0528	0.0547
0.3	0.0132	0.0259	0.0374	0.0474	0.0559	0.0629	0.0686	0.0731	0.0766	0.0794
0.4	0.0168	0.0328	0.0474	0.0602	0.0711	0.0801	0.0873	0.0931	0.0977	0.1013
0.5	0.0198	0.0387	0.0559	0.0711	0.0840	0.0947	0.1034	0.1104	0.1158	0.1202
0.6	0.0222	0.0435	0.0629	0.0801	0.0947	0.1069	0.1168	0.1247	0.1311	0.1361
0.7	0.0242	0.0474	0.0686	0.0873	0.1034	0.1169	0.1277	0.1365	0.1436	0.1491
0.8	0.0258	0.0504	0.0731	0.0931	0.1104	0.1247	0.1365	0.1461	0.1537	0.1598
0.9	0.0270	0.0528	0.0766	0.0977	0.1158	0.1311	0.1436	0.1537	0.1619	0.1684
1.0	0.0279	0.0547	0.0794	0.1013	0.1202	0.1361	0.1491	0.1598	0.1684	0.1752
1.2	0.0293	0.0573	0.0832	0.1063	0.1263	0.1431	0.1570	0.1684	0.1777	0.1851
1.4	0.0301	0.0589	0.0856	0.1094	0.1300	0.1475	0.1620	0.1739	0.1836	0.1914
1.6	0.0306	0.0599	0.0871	0.1114	0.1324	0.1503	0.1652	0.1774	0.1874	0.1955
1.8	0.0309	0.0606	0.0880	0.1126	0.1340	0.1521	0.1672	0.1797	0.1899	0.1981
2.0	0.0311	0.0610	0.0887	0.1134	0.1350	0.1533	0.1686	0.1812	0.1915	0.1999
2.5	0.0314	0.0616	0.0895	0.1145	0.1363	0.1548	0.1704	0.1832	0.1938	0.2024
3.0	0.0315	0.0618	0.0898	0.1150	0.1368	0.1555	0.1711	0.1841	0.1947	0.2034
4.0	0.0316	0.0619	0.0901	0.1153	0.1372	0.1560	0.1717	0.1847	0.1954	0.2042
5.0	0.0316	0.0620	0.0901	0.1154	0.1374	0.1561	0.1719	0.1849	0.1956	0.2044
6.0	0.0316	0.0620	0.0902	0.1154	0.1374	0.1562	0.1719	0.1850	0.1957	0.2045

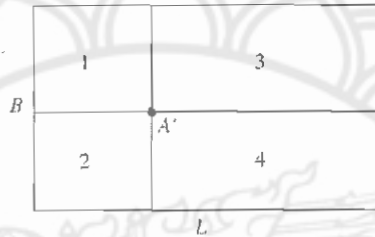
ตารางที่ 11.9 (ต่อ) แสดงค่า I_3 ที่ค่า m และ n ต่างๆ

	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0
0.0293	0.0301	0.0306	0.0309	0.0311	0.0314	0.0315	0.0316	0.0316	0.0316	0.0316
0.0573	0.0589	0.0599	0.0606	0.0610	0.0616	0.0618	0.0619	0.0620	0.0620	0.0620
0.0832	0.0856	0.0871	0.0880	0.0887	0.0895	0.0898	0.0901	0.0901	0.0901	0.0902
0.1063	0.1094	0.1114	0.1126	0.1134	0.1145	0.1150	0.1153	0.1154	0.1154	0.1154
0.1263	0.1300	0.1324	0.1340	0.1350	0.1363	0.1368	0.1372	0.1374	0.1374	0.1374
0.1431	0.1475	0.1503	0.1521	0.1533	0.1548	0.1555	0.1560	0.1561	0.1561	0.1562
0.1570	0.1620	0.1652	0.1672	0.1686	0.1704	0.1711	0.1717	0.1719	0.1719	0.1719
0.1684	0.1739	0.1774	0.1797	0.1812	0.1832	0.1841	0.1847	0.1849	0.1850	0.1850
0.1777	0.1836	0.1874	0.1899	0.1915	0.1938	0.1947	0.1954	0.1956	0.1957	0.1957
0.1851	0.1914	0.1955	0.1981	0.1999	0.2024	0.2034	0.2042	0.2044	0.2044	0.2045
0.1958	0.2028	0.2073	0.2103	0.2124	0.2151	0.2163	0.2172	0.2175	0.2175	0.2176
0.2028	0.2102	0.2151	0.2184	0.2206	0.2236	0.2250	0.2260	0.2263	0.2263	0.2264
0.2073	0.2151	0.2203	0.2237	0.2261	0.2294	0.2309	0.2320	0.2323	0.2323	0.2325
0.2103	0.2183	0.2237	0.2274	0.2299	0.2333	0.2350	0.2362	0.2366	0.2366	0.2367
0.2124	0.2206	0.2261	0.2299	0.2325	0.2361	0.2378	0.2391	0.2395	0.2395	0.2397
0.2151	0.2236	0.2294	0.2333	0.2361	0.2401	0.2420	0.2434	0.2439	0.2439	0.2441
0.2163	0.2250	0.2309	0.2350	0.2378	0.2420	0.2439	0.2455	0.2461	0.2461	0.2463
0.2172	0.2260	0.2320	0.2362	0.2391	0.2434	0.2455	0.2472	0.2479	0.2479	0.2481
0.2175	0.2263	0.2324	0.2366	0.2395	0.2439	0.2460	0.2479	0.2486	0.2486	0.2489
0.2176	0.2264	0.2325	0.2367	0.2397	0.2441	0.2463	0.2482	0.2489	0.2489	0.2492

พิจารณารูปที่ 11.24 เมื่อแรงกระทำไม่ตรงกลางและแสดงค่าหน่วยแรงที่จุดใดๆ ได้จุด A' ที่ความลึก z เราสามารถแบ่งพื้นที่ของน้ำหนักระทำออกเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากสี่รูป จุด A' เป็นมุมร่วมของสี่เหลี่ยมมุมฉากทั้ง 4 รูปแล้วหาค่าหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นได้จากสมการที่ 11.48

$$\Delta\sigma_z = q [I_{3(1)} + I_{3(2)} + I_{3(3)} + I_{3(4)}] \quad (\text{สมการที่ 11.48})$$

โดยที่ $I_{3(1)}, I_{3(2)}, I_{3(3)}, I_{3(4)}$ คือค่า I_3 ของสี่เหลี่ยมมุมฉาก 1, 2, 3, และ ตามลำดับ



รูปที่ 11.24 การเพิ่มค่าหน่วยแรงที่จุดใดๆ ได้แรงกระทำแบบสี่เหลี่ยม

แต่โดยทั่วไปเรามักจะต้องคำนวณค่าหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นได้ศูนย์กลางของน้ำหนักระทำสี่เหลี่ยมมุมฉากดังแสดงในรูปที่ 11.25 ซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังนี้

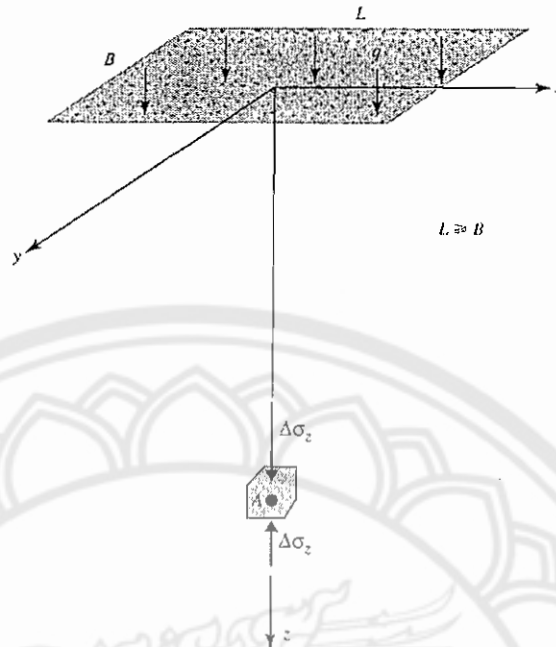
$$\Delta\sigma_z = qI_4 \quad (\text{สมการที่ 11.49})$$

$$\text{โดยที่ } I_4 = \frac{2}{\pi} \left[\frac{m_1 n_1}{\sqrt{1+m_1^2+n_1^2}} \cos^{-1} \frac{1+m_1^2+2n_1^2}{(1+n_1^2)(m_1^2+n_1^2)} \right] + \sin^{-1} \frac{m_1}{\sqrt{m_1^2+n_1^2} \sqrt{1+n_1^2}} \quad (\text{สมการที่ 11.50})$$

$$m_1 = \frac{L}{B} \quad (\text{สมการที่ 11.51})$$

$$n_1 = \frac{z}{B} \quad (\text{สมการที่ 11.52})$$

$$b = \frac{B}{z} \quad (\text{สมการที่ 11.53})$$



รูปที่ 11.25 หน่วยแรงในแนวตั้งตรงจุดกึ่งกลางของน้ำหนักกระทำแบบสี่เหลี่ยม โดยค่า I_4 แสดงได้ตามตารางที่ 11.10 ตามการเปลี่ยนแปลงค่า m_1 และ n_1 คือ

ตารางที่ 11.10 แสดงค่า I_4 ตามการเปลี่ยนแปลงของค่า m_1 และ n_1

n_1	m_1									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.20	0.994	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997
0.40	0.960	0.976	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977
0.60	0.892	0.932	0.936	0.936	0.937	0.937	0.937	0.937	0.937	0.937
0.80	0.800	0.870	0.878	0.880	0.881	0.881	0.881	0.881	0.881	0.881
1.00	0.701	0.800	0.814	0.817	0.818	0.818	0.818	0.818	0.818	0.818
1.20	0.606	0.727	0.748	0.753	0.754	0.755	0.755	0.755	0.755	0.755
1.40	0.522	0.658	0.685	0.692	0.694	0.695	0.695	0.696	0.696	0.696
1.60	0.449	0.593	0.627	0.636	0.639	0.640	0.641	0.641	0.641	0.642
1.80	0.388	0.534	0.573	0.585	0.590	0.591	0.592	0.592	0.593	0.593
2.00	0.336	0.481	0.525	0.540	0.545	0.547	0.548	0.549	0.549	0.549
3.00	0.179	0.293	0.348	0.373	0.384	0.389	0.392	0.393	0.394	0.395
4.00	0.108	0.190	0.241	0.269	0.285	0.293	0.298	0.301	0.302	0.303
5.00	0.072	0.131	0.174	0.202	0.219	0.229	0.236	0.240	0.242	0.244
6.00	0.051	0.095	0.130	0.155	0.172	0.184	0.192	0.197	0.200	0.202
7.00	0.038	0.072	0.100	0.122	0.139	0.150	0.158	0.164	0.168	0.171
8.00	0.029	0.056	0.079	0.098	0.113	0.125	0.133	0.139	0.144	0.147
9.00	0.023	0.045	0.064	0.081	0.094	0.105	0.113	0.119	0.124	0.128
10.00	0.019	0.037	0.053	0.067	0.079	0.089	0.097	0.103	0.108	0.112

- 11.1.3.8 แผนภูมิอิทธิพลสำหรับการหาค่าแรงดันในแนวดิ่ง (Influence Chart for Vertical Pressure)

จากสมการที่ 11.42 สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{R}{z} = \sqrt{\left(1 - \frac{\Delta\sigma_z}{q}\right)^{-2/3}} - 1 \quad (\text{สมการที่ 11.54})$$

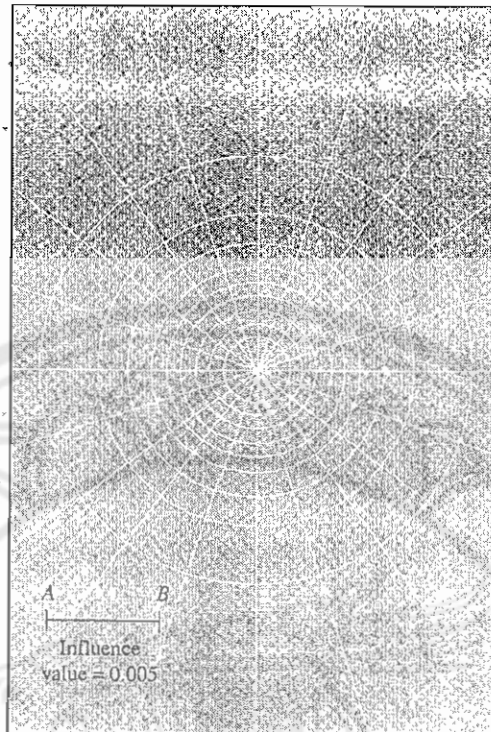
ซึ่ง R/z และ $\Delta\sigma_z/q$ เป็นความสัมพันธ์ระหว่างเทอมไร้มิติ สามารถแสดงได้ตามตารางที่ 11.11

ตารางที่ 11.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง R/z กับอัตราส่วน Various pressure

$\Delta\sigma_z/q$	R/z	$\Delta\sigma_z/q$	R/z
0	0	0.55	0.8384
0.05	0.1865	0.60	0.9176
0.10	0.2698	0.65	1.0067
0.15	0.3383	0.70	1.1097
0.20	0.4005	0.75	1.2328
0.25	0.4598	0.80	1.3871
0.30	0.5181	0.85	1.5943
0.35	0.5768	0.90	1.9084
0.40	0.6370	0.95	2.5232
0.45	0.6997	1.00	∞
0.50	0.7664		

จากความสัมพันธ์ระหว่าง R/z และ $\Delta\sigma_z/q$ นีวมาร์ค (Newmark, 1942) ได้นำมา สร้างแผนภูมิที่สามารถนำมาใช้หาหน่วยแรงในแนวดิ่งที่จุดใดๆ ในดินที่เกิดจากน้ำหนักแผ่สม่ำเสมอรูปร่างใดๆ ก็ได้

จากรูปที่ 11.26 แสดงถึง Influence chart ที่สร้างขึ้นโดยการวาดวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกันโดยรัศมีของวงกลมจะมีค่าเท่ากับค่า R/z ที่ขึ้นอยู่กับค่า $\Delta\sigma_z/q$ ที่เท่ากับ 0, 0.1, 2.0,...1 หน่วยความยาวที่ใช้ในการวาดวงกลมให้วัดจากเส้นตรง AB วงกลมจะถูกแบ่งออกเป็นระยะเท่าๆ กันตามแนวรัศมี ค่าอิทธิพลคือ $1/N$ โดยที่ N มีค่าเท่ากับจำนวนส่วนประกอบที่อยู่ในแผนภูมิเช่นในรูปที่ 11.26 มีจำนวนส่วนประกอบทั้งหมด 200 ส่วน ดังนั้นค่าอิทธิพล (Influence Value ; IV) = $\left(\frac{1}{200}\right) = 0.005$



รูปที่ 11.26 Influence Chart สำหรับหน่วยแรงในแนวตั้งที่อยู่บนพื้นฐานทฤษฎีของ Boussinesq

-11.1.3.8.1 ขั้นตอนในการหาแรงดันในแนวตั้งที่จุดใดๆ ได้พื้นที่น้ำหนักกระทำ

1. วิเคราะห์หาความลึก (z) ได้พื้นที่น้ำหนักกระทำอย่างสม่ำเสมอ ที่ต้องการทราบค่าหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้น
2. วาดรูปพื้นที่ของน้ำหนักกระทำด้วยมาตราส่วนที่ z เท่ากับหน่วยความยาวของแผนภูมิซึ่งเท่ากับ AB
3. วาดรูปพื้นที่ของน้ำหนักกระทำที่ตัดได้จากขั้นตอนที่ 2 ลงบนแผนภูมิอิทธิพล (Influence chart) โดยให้จุดที่ต้องการทราบค่าหน่วยแรงตรงกับจุดศูนย์กลางของแผนภูมิ
4. นับจำนวนช่อง (M) ของแผนภูมิภายในผังพื้นที่ของน้ำหนักกระทำเมื่อได้จำนวนช่องแล้วค่าหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นที่จุดใดๆ ได้น้ำหนักกระทำสามารถหาได้จาก

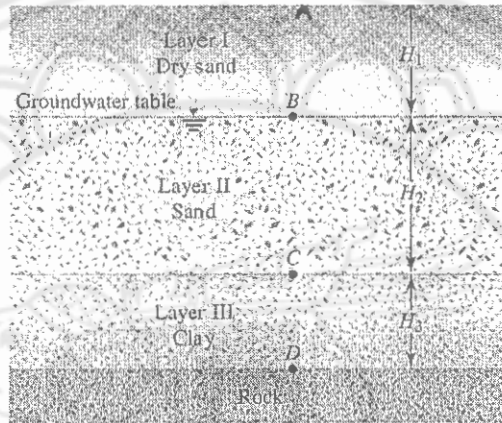
$$\Delta\sigma_z = (IV)qM \quad (\text{สมการที่ 11.55})$$

โดยที่ IV = ค่าอิทธิพล (Influence Value)

q = แรงดันบนพื้นที่ที่น้ำหนักกระทำ (pressure on the loaded area)

11.2 โจทย์ทบทวนความรู้ ความเข้าใจในหลักการพื้นฐานที่เรียน

11.2.1 จากชั้นดินที่แสดงตามรูปที่ 11.27 จงหาค่า หน่วยแรงรวม (σ) , แรงดันที่เกิดขึ้นจากน้ำ (u) และ หน่วยแรงประสิทธิผล (σ') ที่จุด A, B, C และ D พร้อมทั้งเขียนกราฟค่าความเปลี่ยนแปลงของ σ , u และ σ' ที่ทุกๆ ความลึกด้วย โดยที่



รูปที่ 11.27 ชั้นดินที่ใช้ในข้อที่ 11.2.1

Layer no.	Thickness (ft)	Unit weight (lb/ft ³)
I	$H_1 = 5$	$\gamma_d = 112$
II	$H_2 = 6$	$\gamma_{sat} = 120$
III	$H_3 = 8$	$\gamma_{sat} = 125$

วิธีทำ

สามารถกระทำได้ดังต่อไปนี้

1. หาค่าต่างๆ ที่จุด A

$$\sigma = 0$$

$$u = 0$$

$$\sigma' = \sigma - u = 0$$

2. หาค่าต่างๆ ที่จุด B

$$\sigma = (\gamma_d)(H_1) = (112)(5) = 560 \text{ lb/ft}^2$$

$$u = 0$$

$$\sigma' = \sigma - u = 560 - 0 = 560 \text{ lb/ft}^2$$

3. หาค่าต่างๆ ที่จุด C

$$\sigma = (\gamma_d)(H_1) + (\gamma_{sat})(H_2) = (112)(5) + (120)(6) = 1280 \text{ lb/ft}^2$$

$$u = (\gamma_w)(H_2) = (62.4)(6) = 374.4 \text{ lb/ft}^2$$

$$\sigma' = \sigma - u = 1280 - 374.4 = 905.6 \text{ lb/ft}^2$$

4. หาค่าต่างๆ ที่จุด D

$$\sigma = (\gamma_d)(H_1) + (\gamma_{sat})(H_2) + (\gamma_{sat})(H_3)$$

$$= (112)(5) + (120)(6) + (128)(8) = 2280 \text{ lb/ft}^2$$

$$u = (\gamma_w)(H_2) + (\gamma_w)(H_3) = (62.4)(6) + (62.4)(8) = 873.6 \text{ lb/ft}^2$$

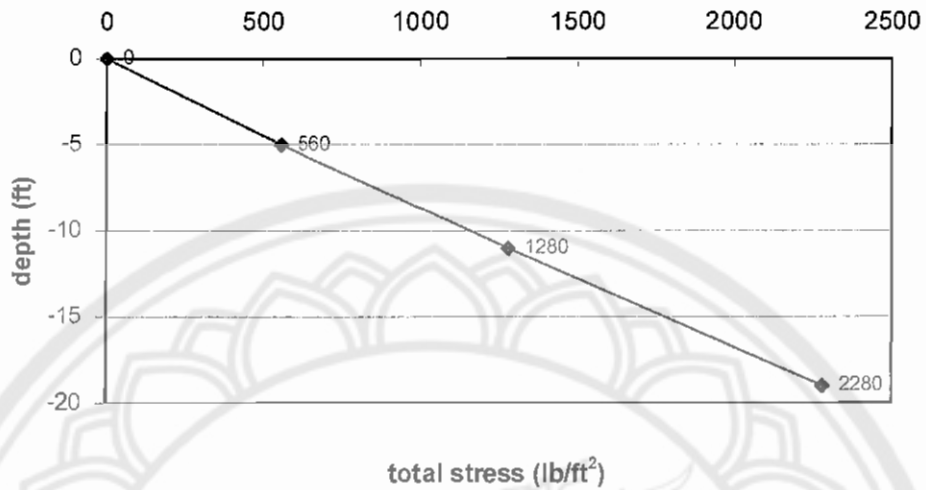
$$\sigma' = \sigma - u = 2280 - 873.6 = 1406.4 \text{ lb/ft}^2$$

ซึ่งสามารถสรุปเป็นตารางเป็นค่า σ , u และ σ' ที่ระดับความลึกต่างๆ ดังนี้

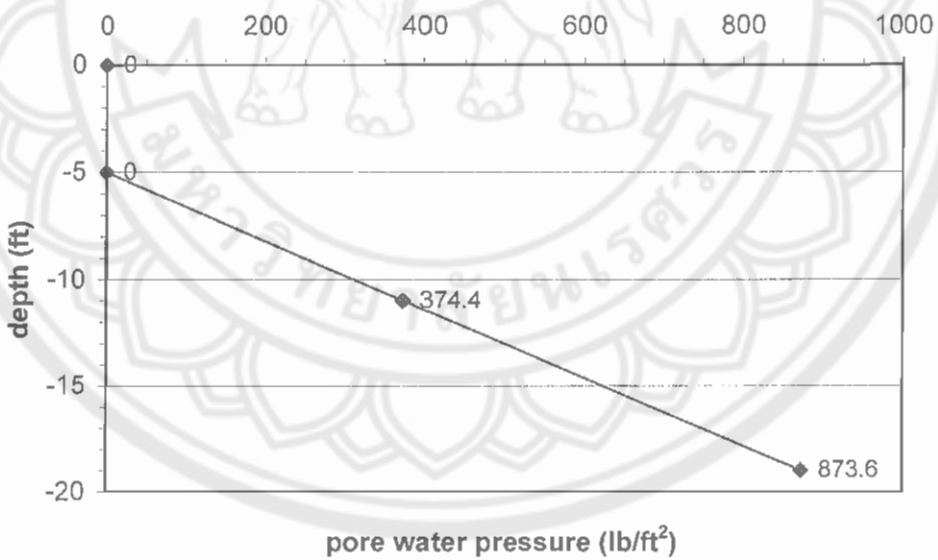
ตารางที่ 11.12 ค่า total stress (σ), pore water pressure (u), effective stress (σ') ที่ระดับความลึกต่าง

Point	Depth (m)	σ (lb/ft ²)	u (lb/ft ²)	σ' (lb/ft ²)
A	0	0	0	0
B	5	560	0	560
C	11	1280	374.4	905.6
D	19	2280	873.6	1406.4

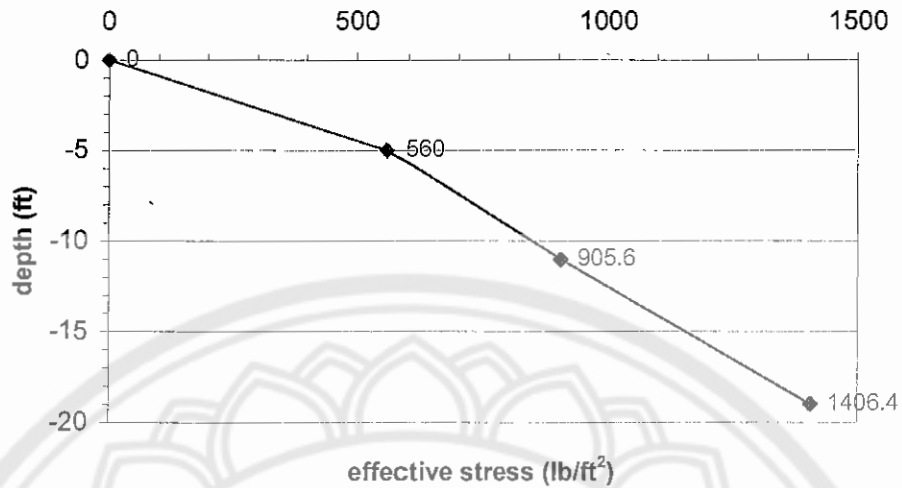
จากนั้นนำไปเขียนกราฟแสดงค่า total Stress (σ), pore water pressure (u) และ effective stress (σ') ที่ระดับความลึกต่างๆ ที่คำนวณได้ในตารางข้างต้น



รูปที่ 11.28 ค่า total stress ที่ระดับความลึกต่างๆ



รูปที่ 11.29 ค่า pore water pressure ที่ระดับความลึกต่างๆ

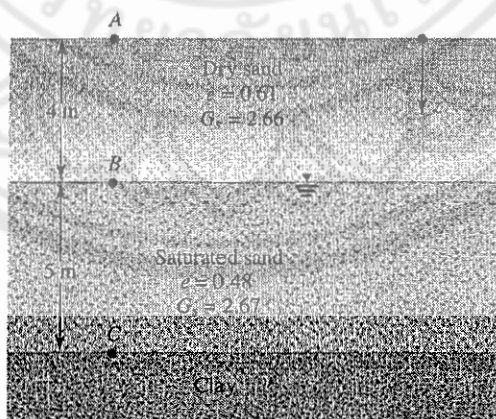


รูปที่ 11.30 ค่า effective stress ที่ระดับความลึกต่างๆ

11.3.2 จากชั้นดินที่แสดงตามรูปที่ 11.31 จงคำนวณหา

11.3.2.1 คำนวณหา total stress (σ), pore water pressure (u) และ effective stress (σ') ที่จุด A, B และ C

11.3.2.2 ความสูงของระดับน้ำใต้ดินถ้าหน่วยแรงเค้นประสิทธิผล (effective stress) ที่จุด C = 105 kN/m²



รูปที่ 11.31 รูปชั้นดินที่ใช้ในข้อที่ 11.3.2

วิธีทำ 11.3.2.1 สามารถทำตามขั้นตอนดังนี้

1. คำนวณหาค่าหน่วยน้ำหนักของดินที่ชั้นดิน I และ II

- คำนวณหาค่า γ_d ของ layer I ตามสมการคือ

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e}$$

$$\gamma_d = \frac{(2.66)(9.81)}{1 + (0.61)} = 16.21 \text{ kN/m}^3$$

- คำนวณหาค่า γ_{sat} ของ layer II ตามสมการคือ

$$\gamma_{sat} = \frac{(G_s + e) \gamma_w}{1 + e}$$

$$\gamma_{sat} = \frac{(2.67 + 0.48)(9.81)}{1 + (0.48)} = 20.88 \text{ kN/m}^3$$

2. คำนวณหาค่า total Stress (σ), pore water pressure (u) และ effective stress (σ') ที่จุดต่างๆ

- ที่จุด A จะได้

$$\sigma = 0$$

$$u = 0$$

$$\sigma' = \sigma - u = 0$$

- ที่จุด B จะได้

$$\sigma = (\gamma_d)(H_1) = (16.12)(4) = 64.84 \text{ kN/m}^2$$

$$u = 0$$

$$\sigma' = \sigma - u = 64.84 - 0 = 64.84 \text{ kN/m}^2$$

- ที่จุด C จะได้

$$\sigma = (\gamma_d)(H_1) + (\gamma_{sat})(H_2) = (16.12)(4) + (20.88)(5)$$

$$= 169.24 \text{ kN/m}^2$$

$$u = (\gamma_w)(H_1) + (\gamma_{sat})(H_2) = (16.12)(4) + (20.88)(5)$$

$$= 169.24 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma' = \sigma - u = (\gamma_d)(H_1) + (\gamma_{sat})(H_2) - (\gamma_w)(H_2) = (\gamma_d)(H_1) + (\gamma')(H_2)$$

$$= 169.24 - 49.05 = 120.19 \text{ kN/m}^2$$

โดยสามารถสรุปเป็นตารางดังนี้

ตารางที่ 11.13 ค่า total stress (σ), pore water pressure (u), effective stress (σ')
ที่ระดับความลึกต่าง

Point	Depth (m)	σ (kN/m ²)	u (kN/m ²)	σ' (kN/m ²)
A	0	0	0	0
B	4	64.84	0	64.84
C	9	169.24	49.05	120.19

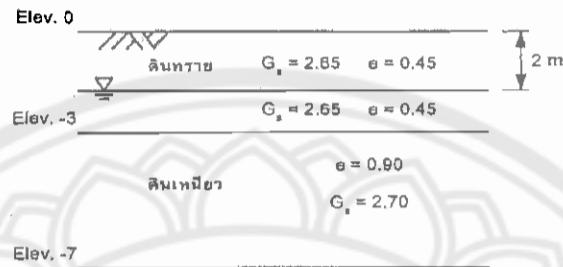
11.3.2.2 ดังนั้นความสูงของระดับน้ำใต้ดิน (H_2) = ? ถ้า $\sigma'_c = 105$ kN/m² โดยที่ความสูงรวม (H) = 9 m

จากการหาสมการของ σ' จากข้อ 11.3.2.1 แล้วจะได้

$$\begin{aligned} \sigma' &= \gamma_d H_2 + \gamma' H_2 = \gamma_d (H - H_2) + (\gamma_{sat} - \gamma_d) (H_2) \\ 105 &= (16.21)(9 - H_2) + (20.88 - 16.21)(H_2) \\ 105 &= 145.89 - 16.21 H_2 + 4.67 H_2 \\ 11.54 H_2 &= 40.89 \\ H_2 &= 3.5433 \approx 3.54 \text{ m} \end{aligned}$$

ดังนั้นถ้า effective stress ที่จุด C = 105 kN/m² จะมีระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ 3.54 m นับจากชั้นดินเหนียว

11.2.3 ชั้นดินทรายหนา 3 m วางอยู่บนชั้นดินเหนียวหนา 4 m ดังแสดงในรูปที่ 11.32 ระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าระดับผิวดินเป็น ระยะ 2 m จงพล็อตการกระจายตัวของหน่วยแรงรวม หน่วยแรงดันน้ำในโพรง และหน่วยแรงประสิทธิผลต่อความลึกของชั้นดิน



รูปที่ 11.32 ชั้นดินที่ใช้ในโจทย์ข้อ 11.2.3

วิธีทำ

$$\gamma_{d(sand)} = \frac{2.65 \times 9.81}{1 + 0.45} = 17.93 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{sat(sand)} = \frac{9.81(2.65 + 0.45 \times 1.0)}{1 + 0.45} = 20.97 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{sat(clay)} = \frac{9.81(2.70 + 0.90 \times 1.0)}{1 + 0.90} = 18.59 \text{ kN/m}^3$$

ที่ระดับ 0 m : $\sigma = 0 = \sigma' = u$

ที่ระดับ -2 m : $\sigma = 17.93 \times 2 = 35.86 \text{ kN/m}^2$

$u = 0 \text{ kN/m}^2$

$\sigma' = \sigma - u = 35.86 \text{ kN/m}^2$

ที่ระดับ -3 m : $\sigma = 35.86 + 20.97 \times 1 = 56.83 \text{ kN/m}^2$

$u = 9.81 \times 1 = 9.81 \text{ kN/m}^2$

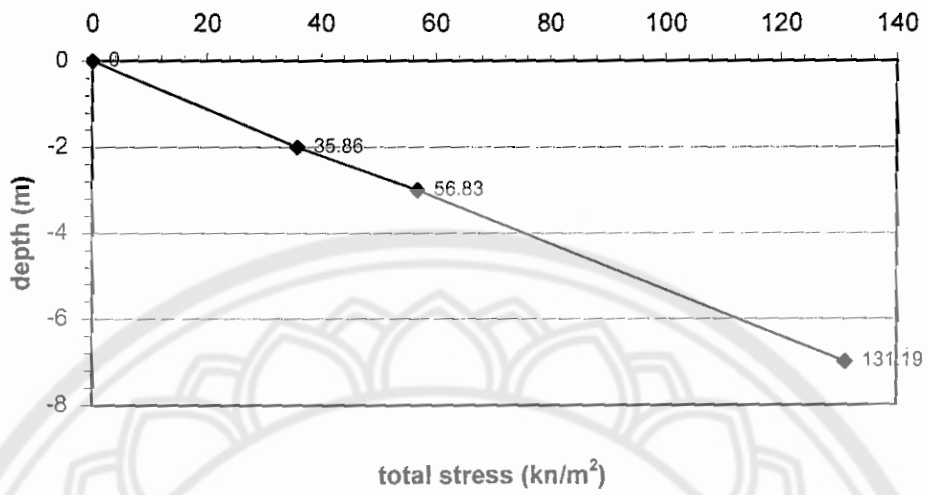
$\sigma' = 56.83 - 9.81 = 47.02 \text{ kN/m}^2$

ที่ระดับ -7 m : $\sigma = 56.83 + 18.59 \times 4 = 131.19 \text{ kN/m}^2$

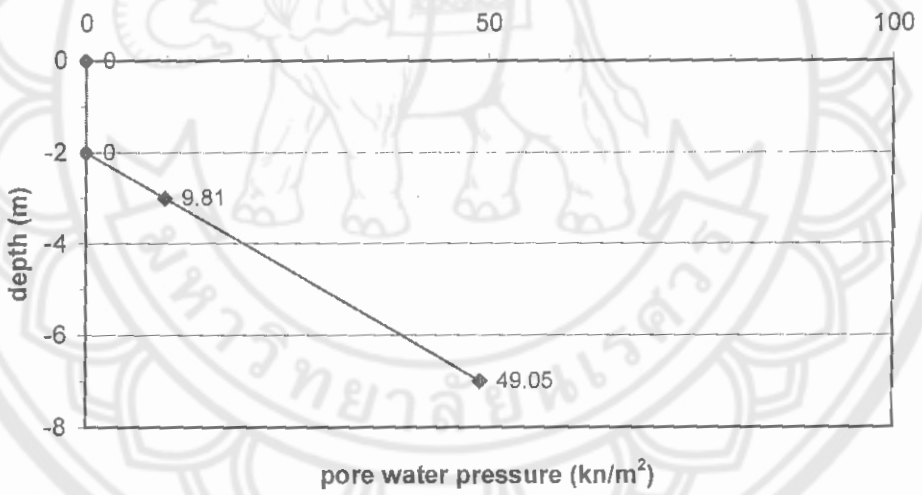
$u = 9.81 \times 5 = 49.05 \text{ kN/m}^2$

$\sigma' = 131.19 - 49.05 = 82.14 \text{ kN/m}^2$

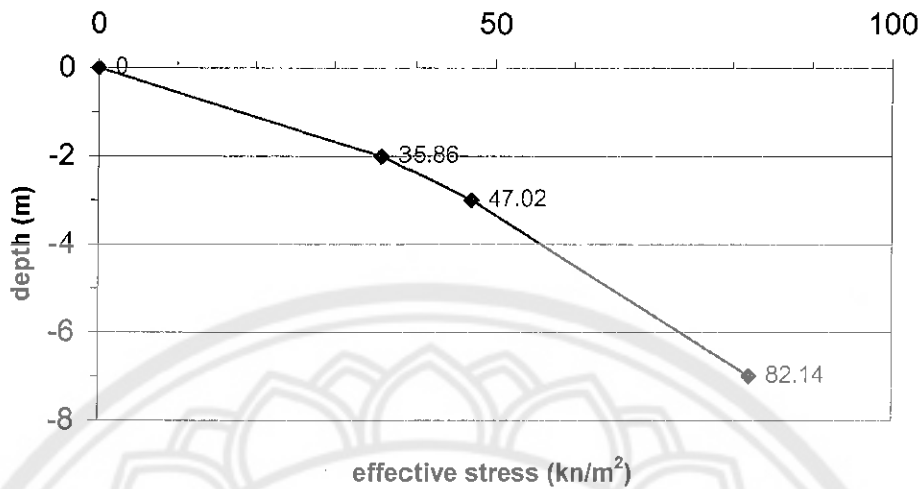
จากนั้นนำไปเขียนกราฟแสดงค่า total Stress (σ), pore water pressure (u) และ effective stress (σ') ที่ระดับความลึกต่างๆ ที่คำนวณได้ในข้างต้น



รูปที่ 11.33 ค่า total stress ที่ระดับความลึกต่างๆ

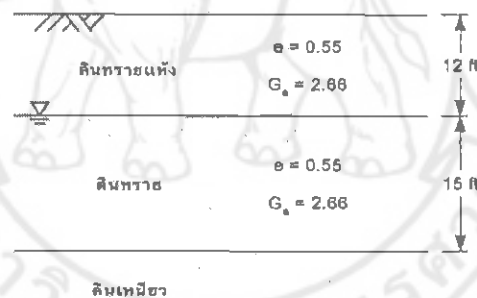


รูปที่ 11.34 ค่า pore water pressure ที่ระดับความลึกต่างๆ



รูปที่ 11.35 ค่า effective stress ที่ระดับความลึกต่างๆ

11.2.4 ชั้นดินมีลักษณะดังในรูปที่ 11.36 ข้างล่าง



รูปที่ 11.36 ชั้นดินที่ใช้ในข้อที่ 11.2.4

จงพล็อตการกระจายตัวของหน่วยแรงรวม หน่วยแรงดันน้ำในโพรง และหน่วยแรงประสิทธิผล กับความลึกในระยาะต่างๆ

วิธีทำ

ดินทรายแห้ง :

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e} = \frac{2.66 \times 62.4}{1 + 0.55} = 107.09 \text{ lb/ft}^3$$

ดินทรายอิ่มน้ำ :

$$\gamma_{sat} = \frac{(G_s + e) \gamma_w}{1 + e} = \frac{(2.66 + 0.55) \times 62.4}{1 + 0.55} = 129.23 \text{ lb/ft}^3$$

ที่ระยะลึก 0 ft :

$$\begin{aligned}\sigma &= 0 \\ u &= 0 \\ \sigma' &= \sigma - u = 0\end{aligned}$$

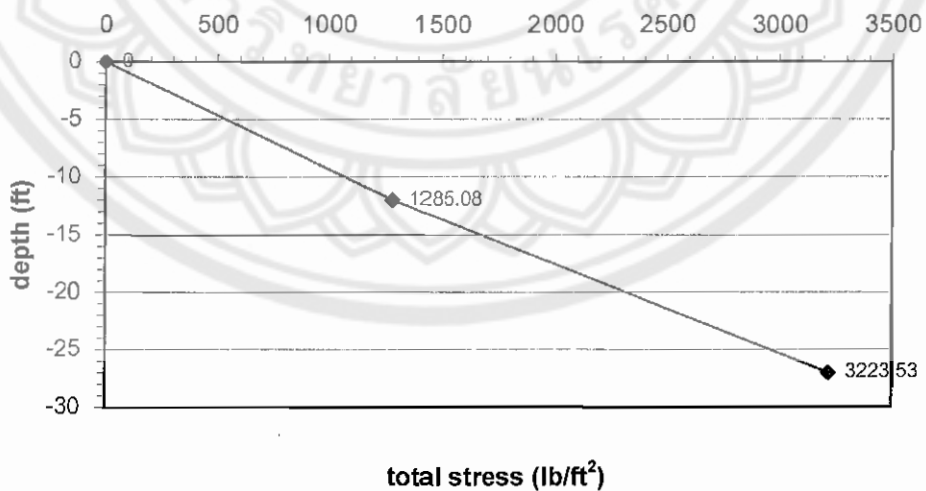
ที่ระยะลึก 12 ft :

$$\begin{aligned}\sigma &= 107.09 \times 12 = 1,285.08 \text{ lb/ft}^2 \\ u &= 0 \\ \sigma' &= \sigma - u = 1,285.08 \text{ lb/ft}^2\end{aligned}$$

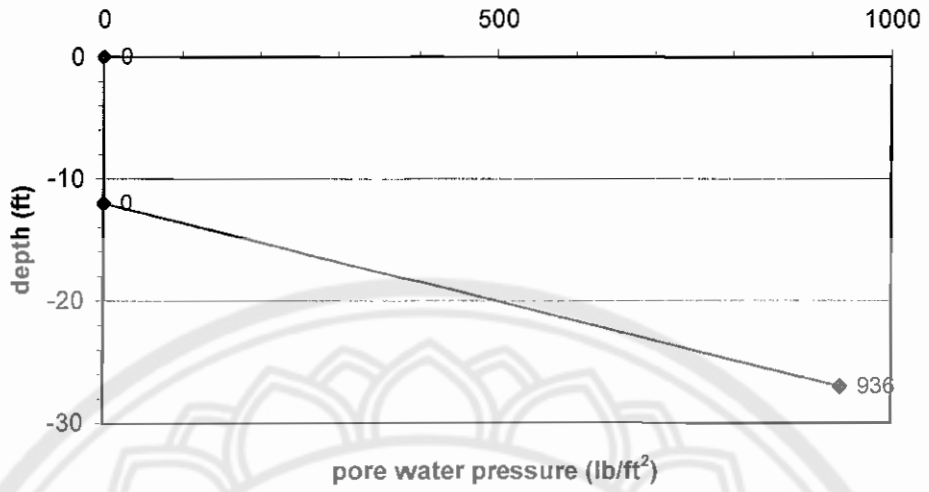
ที่ระยะลึก 27 ft :

$$\begin{aligned}\sigma &= 107.09 \times 12 + 129.23 \times 15 = 3,223.53 \text{ lb/ft}^2 \\ u &= 62.4 \times 15 = 936 \text{ lb/ft}^2 \\ \sigma' &= \sigma - u = 2,287.53 \text{ lb/ft}^2\end{aligned}$$

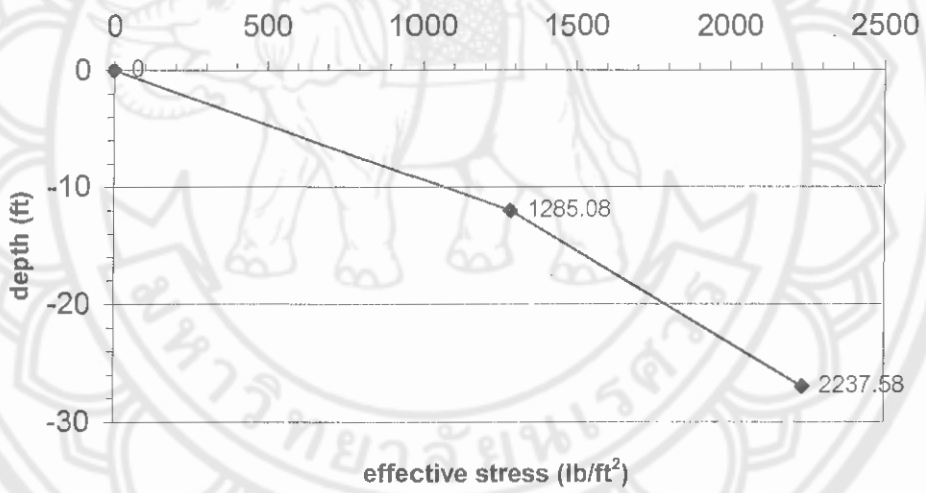
จากนั้นนำไปเขียนกราฟแสดงค่า total Stress (σ), pore water pressure (u) และ effective stress (σ') ที่ระดับความลึกต่างๆ ที่คำนวณได้ในข้างต้น



รูปที่ 11.37 ค่า total stress ที่ระดับความลึกต่างๆ

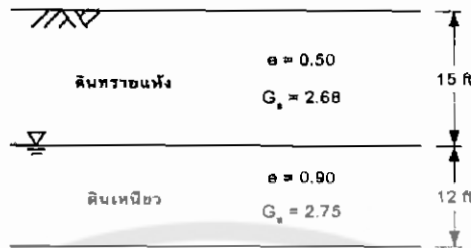


รูปที่ 11.38 ค่า pore water pressure ที่ระดับความลึกต่างๆ



รูปที่ 11.39 ค่า effective stress ที่ระดับความลึกต่างๆ

11.2.5 จากรูปแสดงรูปตัดของชั้นดิน



รูปที่ 11.40 ชั้นดินที่ใช้ในข้อที่ 11.2.5

- 11.2.5.1 จงพล็อตการกระจายของหน่วยแรงรวม หน่วยแรงดันน้ำในโพรง และหน่วยแรงประสิทธิผลกับความลึก
- 11.2.5.2 ถ้าระดับน้ำใต้ดินสูงขึ้นถึงระดับผิวดิน ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลที่เปลี่ยนแปลงไปที่จุดล่างสุดของชั้นดินเหนียวเป็นเท่าไร

วิธีทำ

ดินทรายแห้ง :

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} = \frac{2.68 \times 62.4}{1+0.5} = 111.5 \text{ lb/ft}^3$$

ดินเหนียว :

$$\gamma_{sat} = \frac{(G_s + e) \gamma_w}{1+e} = \frac{(2.75 + 0.9) \times 62.4}{1+0.9} = 119.9 \text{ lb/ft}^3$$

ที่ระยะลึก 0 ft : $\sigma = 0$

$u = \sigma' = 0$

ที่ระยะลึก 15 ft : $\sigma = 111.5 \times 5 = 1,672.5 \text{ lb/ft}^2$

$u = 0$

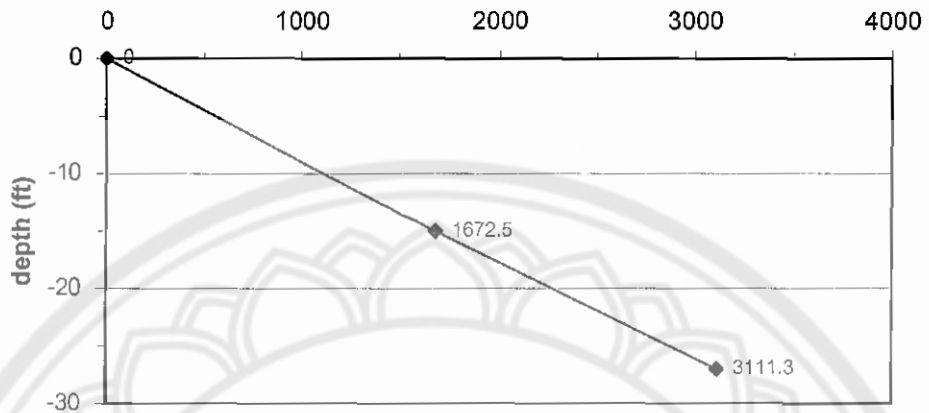
$\sigma' = \sigma - u = 1,672.5 \text{ lb/ft}^2$

ที่ระยะลึก 27 ft : $\sigma = 111.5 \times 5 + 119.9 \times 12 = 3,113 \text{ lb/ft}^2$

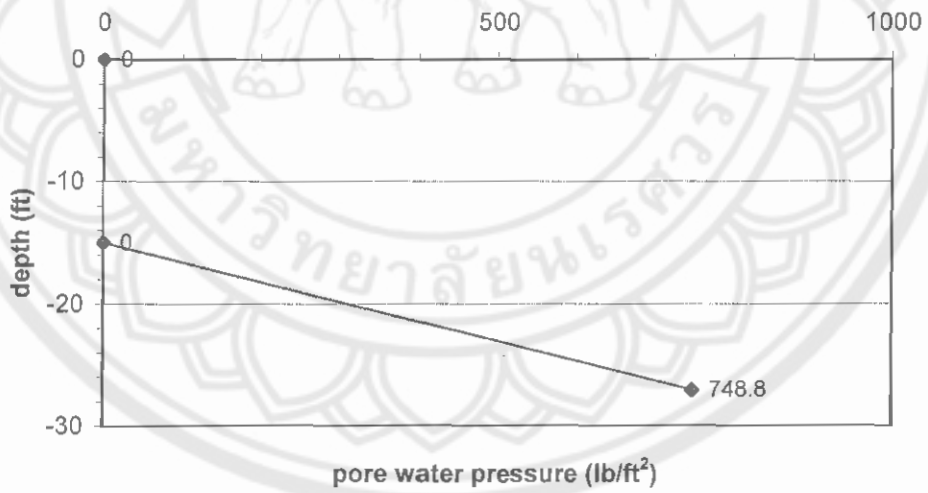
$u = 62.4 \times 12 = 748.8 \text{ lb/ft}^2$

$\sigma' = \sigma - u = 2,362.5 \text{ lb/ft}^2$

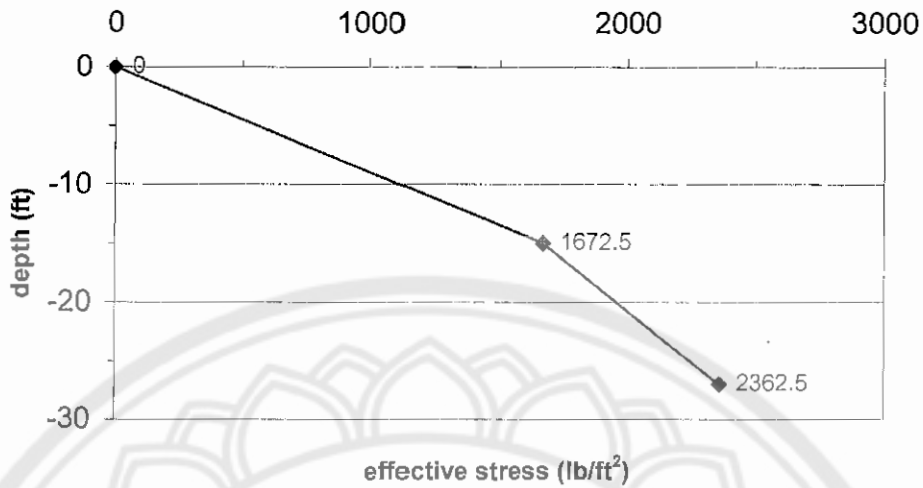
จากนั้นนำไปเขียนกราฟแสดงค่า total Stress (σ), pore water pressure (u) และ effective stress (σ') ที่ระดับความลึกต่างๆ ที่คำนวณได้ในข้างต้น



รูปที่ 11.41 ค่า total stress ที่ระดับความลึกต่างๆ



รูปที่ 11.42 ค่า pore water pressure ที่ระดับความลึกต่างๆ



รูปที่ 11.43 ค่า effective stress ที่ระดับความลึกต่างๆ

ถ้าระดับน้ำสูงจนถึงระดับผิวดิน

ดินทราย :

$$\gamma_{sat} = \frac{(G_s + e)\gamma_w}{1 + e} = \frac{(2.68 + 0.5) \times 62.4}{1 + 0.5} = 132.3 \text{ lb/ft}^3$$

ที่จุดล่างสุดของดินเหนียว

$$\sigma = 132.3 \times 15 + 119.9 \times 12 = 3,423.3 \text{ lb/ft}^2$$

$$u = 62.4 \times (15 + 12) = 1,684.8 \text{ lb/ft}^2$$

$$\sigma' = 3,423.3 - 1,684.8 = 1,738.5 \text{ lb/ft}^2$$

$$\therefore \text{หน่วยแรงประสิทธิผลจะลดลงไป } 2,362.5 - 1,738.5 = 624 \text{ lb/ft}^2$$

11.2.6 จงหาแรงดันของน้ำในโพรง และหน่วยแรงประสิทธิผลในดินที่ระยะลึก 15 เมตรจากระดับผิวดิน ถ้าระดับน้ำใต้ดินอยู่ลึก 3 เมตรจากระดับผิวดิน กำหนดให้เม็ดดินมีความถ่วงจำเพาะเป็น 2.65 อัตราส่วนโพรง 0.70 และปริมาตรความชื้นเหนือระดับน้ำใต้ดินเท่ากับ 5%

วิธีทำ

เหนือระดับน้ำใต้ดิน :

$$\gamma_t = \frac{G_s \gamma_d (1 + w)}{1 + e} = \frac{2.65 \times 1.00 (1 + 0.05)}{1 + 0.70} = 1.637 \text{ t/m}^3$$

ได้ระดับน้ำใต้ดิน :

$$\gamma_{sat} = \frac{(G_s + e)\gamma_w}{1 + e} = \frac{(0.70 + 2.65) \times 1.00}{1 + 0.70} = 1.971 \text{ t/m}^3$$

ดังนั้นจะได้

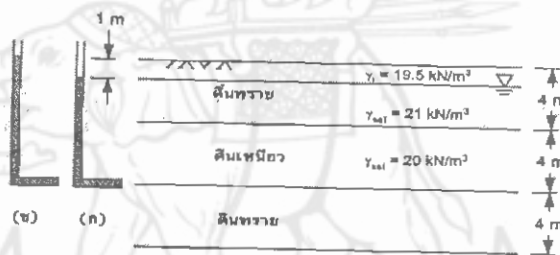
$$\sigma = 1.637 \times 3 + 1.971 \times 12 = 28.563 \text{ t/m}^3$$

$$u = 1.00 \times 12 = 12 \text{ t/m}^3$$

$$\sigma' = \sigma - u = 16.563 \text{ t/m}^3$$

หรือ $\sigma' = 1.637 \times 3 + (1.971 - 1.0) \times 12 = 16.563 \text{ t/m}^3$

11.2.7 สภาพชั้นดินในบริเวณก่อสร้างอาคารแห่งหนึ่ง มีลักษณะดังรูปที่ 11.44



รูปที่ 11.44 ชั้นดินที่ใช้ในรูปที่ 11.2.7

จงหาหน่วยแรงประสิทธิผลที่จุดล่างสุดของชั้นดินเหนียวเมื่อ

11.2.7.1 ระดับน้ำในพิไซมิเตอร์ที่วัดที่จุดล่างสุดของดินเหนียวกับระดับน้ำใต้ดินดังแสดง
ในรูป (ก)

11.2.7.2 ระดับน้ำในพิไซมิเตอร์ที่วัดที่จุดล่างสุดของดินเหนียว ระดับน้ำสูงกว่าระดับน้ำ
ใต้ดินอยู่ 1 เมตรดังแสดงในรูป (ข)

วิธีทำ

รูป ก

$$\sigma = 19.5 \times 1 + 21 \times 3 + 20 \times 4 = 162.5 \text{ kN/m}^2$$

$$u = 9.81 \times 7 = 68.67 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma' = \sigma - u = 162.5 - 68.67 = 93.83 \text{ kN/m}^2$$

รูป ข

$$\sigma = 19.5 \times 1 + 21 \times 3 + 20 \times 4 = 162.5 \text{ kN/m}^2$$

$$u = 9.81 \times 7 = 78.67 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma' = \sigma - u = 162.5 - 78.67 = 84.02 \text{ kN/m}^2$$

11.2.8 จากรูปแสดงรูปตัดของชั้นดินโดยตอนเริ่มต้นมีระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ระดับผิวดินเมื่อมีการระบายน้ำออกทำให้ระดับน้ำใต้ดินลดลงมาอยู่ที่ 20 ft ต่ำจากผิวดิน โดยมีดีกรีความอิ่มตัวของดินทรายที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินเป็น 20% จงพล็อตค่าหน่วยแรงประสิทธิผลกับความลึกเมื่อ

11.2.8.1 ก่อนลดระดับน้ำใต้ดิน

11.2.8.2 หลังลดระดับน้ำใต้ดิน

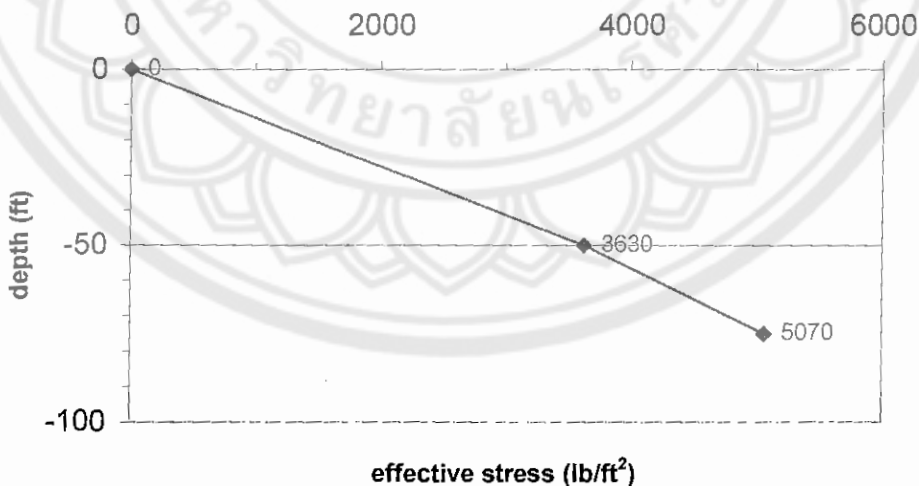
วิธีทำ

11.2.8.1 ก่อนลดระดับน้ำใต้ดิน

จุดบนสุดของชั้นดินทราย : $\sigma' = 0 \text{ lb/ft}^2$

จุดบนสุดของชั้นดินเหนียว : $\sigma' = (135 - 62.4) \times 50 = 3,630 \text{ lb/ft}^2$

จุดล่างสุดของชั้นดินเหนียว : $\sigma' = (135 - 62.4) \times 50 + (120 - 62.4) \times 25 = 5,070 \text{ lb/ft}^2$



รูปที่ 11.45 แสดง effective stress ก่อนลดระดับน้ำใต้ดิน

11.2.8.2 หลังลดระดับน้ำใต้ดิน

เนื่องจาก

$$\gamma_{sat} = \frac{\gamma_w (G_s + e)}{1 + e} = \frac{G_s \gamma_w (1 + w)}{1 + e} = 135 \text{ lb/ft}^3$$

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e} = 120 \text{ lb/ft}^3$$

$$\therefore \gamma_d = \frac{\gamma_{sat}}{1 + w} \Rightarrow w = \frac{135}{120} - 1 = 0.125 (12.5\%) \text{ ในขณะที่ } S = 100\%$$

$$135 = \frac{G_s \times 62.4 \times (1 + 0.125)}{(1 + G_s \times 0.125)}$$

$$\therefore G_s = 2.532$$

$$e = 2.532 \times 0.125 = 0.3165$$

$$\therefore \gamma_t = \frac{\gamma_w (G_s + eS)}{1 + e} = \frac{62.4 \times (2.532 + 0.3165 \times 0.2)}{1 + 0.3165} = 123.01 \text{ lb/ft}^3$$

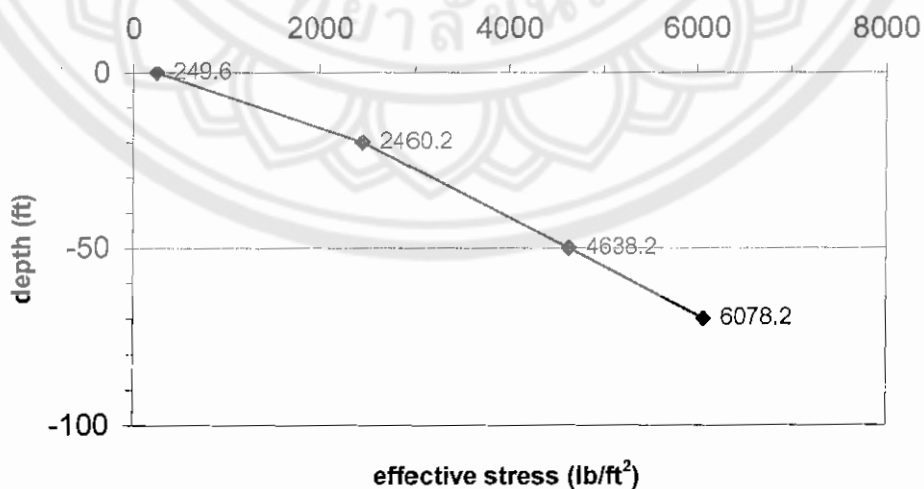
ดังนั้น

จุดบนสุดของชั้นดินทราย : $\sigma' = 0 - (-20 \times 62.4 \times 0.20) = 249.6 \text{ lb/ft}^2$

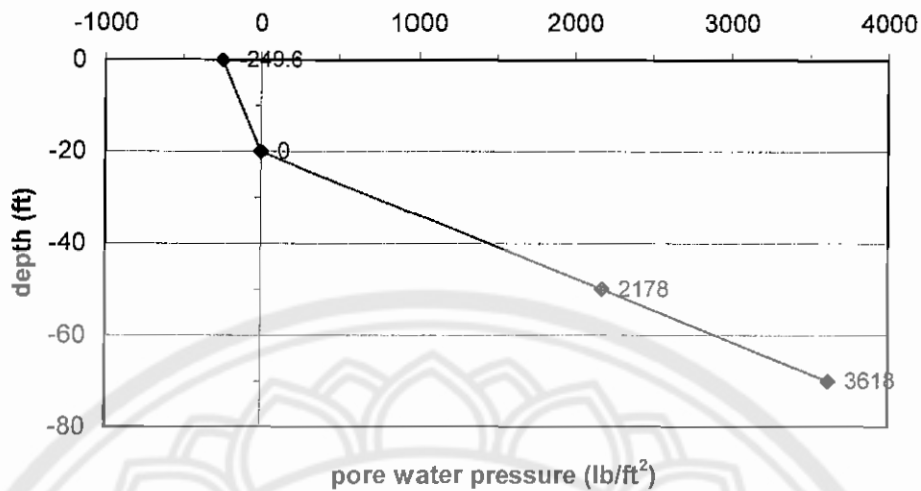
ต่ำจากจุดบนสุดของชั้นดินทราย : $\sigma' = 123.01 \times 20 = 2,460.2 \text{ lb/ft}^2$

จุดบนสุดของชั้นดินเหนียว : $\sigma' = 123.01 \times 20 + (135 - 62.4) \times 30 = 4,638.2 \text{ lb/ft}^2$

จุดล่างสุดของชั้นดินเหนียว : $\sigma' = 123.01 \times 20 + (135 - 62.4) \times 30 + (120 - 62.4) \times 25 = 6,078.2 \text{ lb/ft}^2$



รูปที่ 11.46 แสดง effective stress หลังลดระดับน้ำใต้ดิน



รูปที่ 11.47 แสดง pore water pressure หลังลดระดับน้ำใต้ดิน

11.2.9 จากรูปแสดงรูปตัดของชั้นดินที่แสดงในรูป 11.47



รูปที่ 11.47 แสดงรูปตัดของชั้นดินที่ใช้ในรูปที่ 11.2.9

จงหาหน่วยแรง ความดันน้ำในโพรง และหน่วยแรงประสิทธิผลที่จุด A และ B

วิธีทำ

กรณีนี้ น้ำไหลขึ้น โดยมี $i = \frac{\Delta h}{L} = \frac{2}{3}$

ที่จุด A : $\sigma = 1.6 \times 5 + 1.9 \times 3 = 13.7 \text{ t/m}^2$
 $u = (2 + 3) \times 1.0 = 5.0 \text{ t/m}^2$
 $\sigma' = \sigma - u = 8.70 \text{ t/m}^2$

ที่จุด B : $\sigma = 1.6 \times 5 + 1.9 \times 1 = 9.90 \text{ t/m}^2$

ความสูงของระดับน้ำในพิไซมิเตอร์ = $(1 + 2/3 \times 1) = 1.667 \text{ m}$

(เนื่องจากการไหลแบบคงที่)

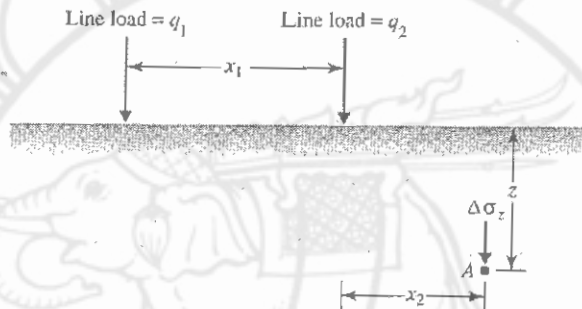
$$u = 1.667 \times 1.0 = 1.667 \text{ t/m}^2$$

$$\sigma' = \sigma - u = 8.233 \text{ t/m}^2$$

หรือ $\sigma' = 1.6 \times 5 + (1.9 - 1) \times 1 - 2/3 \times 1 \times 1 = 8.233 \text{ t/m}^2$

เมื่อ $iz\gamma_w = 2/3 \times 1 \times 1$

11.2.10 จากรูปที่ 11.48 ให้ $q_1 = 10 \text{ kN/m}^2$, $x_1 = 3 \text{ m}$, $x_2 = 2 \text{ m}$, และ $z = 1 \text{ m}$ ถ้าหน่วยแรงในแนวตั้งที่จุด A เท่ากับ 3 kN/m^2 ดังนั้นจงหา Line Load (q_2)



รูปที่ 11.48 ชั้นดินที่ใช้ในข้อที่ 11.48

วิธีทำ

จากสมการที่ 11.33 จะได้

$$\Delta\sigma_{z(1)} = \frac{P}{Z^2} I_1 \quad \text{โดยที่ } r/z = s/1 = 5.0$$

ดังนั้นเปิดค่าในตารางที่ 11.3 จะได้ $I_1 = 0.00014$

$$\Delta\sigma_z = \frac{10 \text{ kN/m}}{(1)^2} (0.00014) = 1.4 \times 10^{-3} \text{ kN/m}^2/\text{m}$$

จากสมการที่ 11.34 จะได้

$$\Delta\sigma_{z(2)} = \frac{2qz^3}{\pi(x^2 + z^2)^2}$$

$$= \frac{2(q)(1)^3}{\pi(2^2 + 1^2)^2}$$

$$\Delta\sigma_{z(2)} = 0.0255 q_2$$

ดังนั้น $3 = 0.0255 q_2$

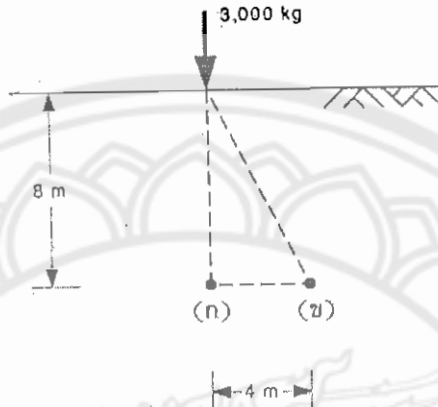
$$\frac{3}{0.0255} = q_2$$

ดังนั้น q_2 เท่ากับ $117.59 \text{ kN/m}^2/\text{m}$

11.2.11 จากรูปที่ 11.49 ถ้าแรงกระทำเป็นจุดขนาด 3,000 kg กระทำที่ผิวดิน จงหาหน่วยแรงในแนวตั้งที่เพิ่มขึ้นที่ระยะความลึก 8 m จากผิวดิน

11.2.11.1 ได้แรงกระทำพอดี

11.2.11.2 ห่างออกไป 4 m จากแรงกระทำ



รูปที่ 11.49 แสดงแรงที่กระทำในข้อที่ 11.2.11

วิธีทำ

จากสมการที่ 11.32 จะได้

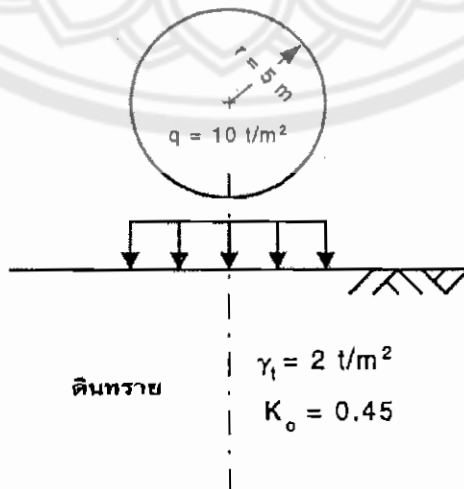
$$\Delta\sigma_z = \frac{3Pz^3}{2\pi L^5}$$

$$\Delta\sigma_{z(11.2.11.1)} = \frac{3 \times 3,000 \times 8^3}{2\pi \times 8^5} = 22.38 \text{ kg/m}^2$$

$$\Delta\sigma_{z(11.2.11.2)} = \frac{3 \times 3,000 \times 8^3}{2\pi \times 8.94^5} = 12.84 \text{ kg/m}^2$$

โดยที่ $8.94 = \sqrt{8^2 + 4^2}$

11.2.12 จากรูปที่ 11.50 แสดงน้ำหนักแผ่นสม่ำเสมอกระทำรูปวงกลมกระทำบนผิวดิน



รูปที่ 11.50 แสดงน้ำหนักกระทำสม่ำเสมอรูปวงกลมที่ใช้ในข้อที่ 11.2.12

จงคำนวณหาหน่วยแรงทั้งก่อนได้รับน้ำหนักกระทำที่ความลึก 0.5 m 1.0 m 2.0 m 4.0 m 6.0 m 8.0 m และ 10 m

วิธีทำ

จากสมการที่ 11.42 จะได้

$$\Delta\sigma_z = q \left[1 - \frac{1}{((r/z)^2 + 1)^{3/2}} \right]$$

$$= 10 \left[1 - \frac{1}{((5/z)^2 + 1)^{3/2}} \right]$$

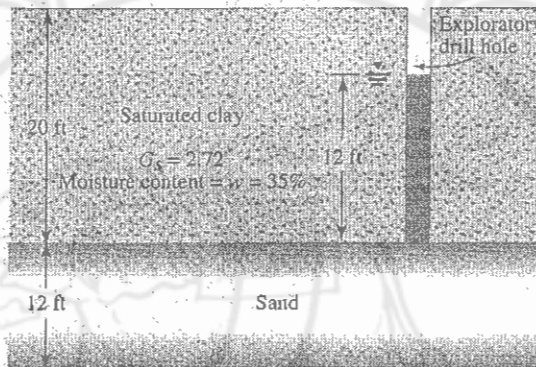
ดังนั้นหน่วยแรงก่อนมีน้ำหนักระทำสามารถแสดงได้ตามตารางดังนี้

ตารางที่ 11.14 แสดงค่าหน่วยแรงก่อนที่มีน้ำหนักระทำ

ความลึก (m)	$\sigma_z = \gamma_z z$ (t/m ²)	$\sigma_z = K_0 \sigma_z$
0.5	1	0.45
1	2	0.9
2	4	1.8
4	8	3.6
6	12	5.4
8	16	7.2
10	20	9

11.3 โจทย์ทดสอบความสามารถในการคิดวิเคราะห์โดยประยุกต์ใช้ความรู้ เพื่อแก้ไข ปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในการทำงาน

11.3.1 จากการเจาะสำรวจชั้นดินที่เจาะสำรวจลงในดินเหนียวอิ่มตัว (Saturated clay) ดังแสดง ในรูปที่ 11.51 ชั้นดินทรายที่อยู่ใต้ชั้นดินเหนียวที่จุดสังเกตอยู่ภายใต้ความชันของ Artesian pressure โดยที่น้ำในหลุมเจาะมีความสูง 12 ft จากจุดบนสุดของชั้นดินทราย ถ้าต้องการเปิดการขุดดินในชั้นดิน เหนียว ความลึกที่สามารถขุดได้ก่อนที่จะเกิดการ heaves จะสามารถขุดได้เท่าไร



รูปที่ 11.51 ชั้นดินที่ใช้ในข้อที่ 11.3.1

วิธีทำ

จากโจทย์หา γ_{sat} ได้

$$\begin{aligned} \gamma_{sat} &= \left(\frac{1+w}{1+wG_s} \right) G_s \gamma_w \\ \gamma_{sat} &= \left(\frac{1+0.35}{1+(0.35)(2.72)} \right) (2.72)(62.4) \\ \gamma_{sat} &= 117.38 \text{ lb/ft}^3 \end{aligned}$$

ดังนั้น γ_{sat} ข้างต้นสามารถหา total Stress (σ), pore water pressure (u) ที่ดินล่างของชั้น ดินเหนียวได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} \sigma &= \gamma_{sat} H = (117.38)(20-H) \\ u &= \gamma_w H = (62.4)(12) \end{aligned}$$

ดังนั้นในกรณีที่ดินเกิดการ Heaves จะทำให้ $\sigma' = 0$ ดังนั้น

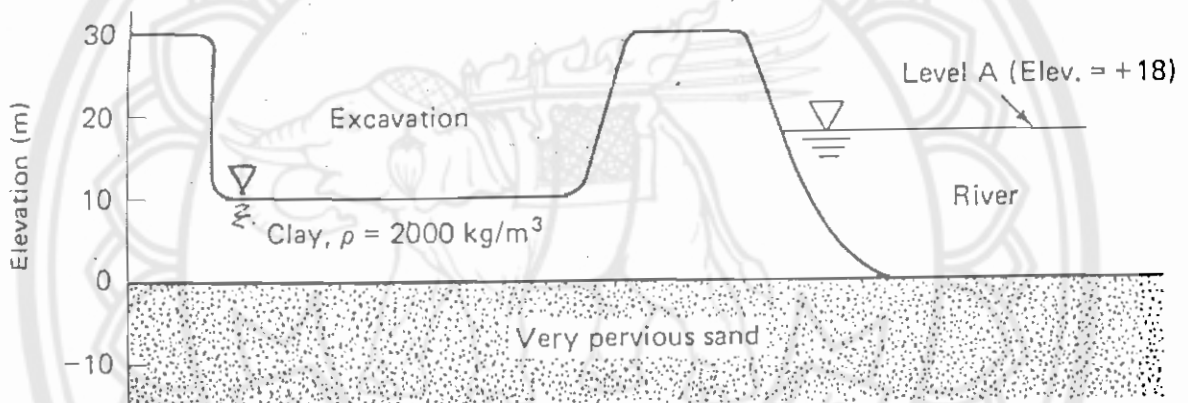
$$\sigma' = \sigma - u$$

$$0 = 117.38(20-H) - 62.4(12)$$

$$H = 13.62 \text{ ft}$$

ดังนั้นความลึกที่สามารถขุดได้ลึกเท่ากับ 13.62 ft ก่อนที่จะเกิดการ heaves

11.3.2 เพื่องานก่อสร้างอาคารศูนย์วิจัยทางวิทยาศาสตร์ ที่มหาวิทยาลัยจัดสร้างเพื่อเปิดให้บริการและช่วยยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชนในเขต 9 จังหวัดภาคเหนือตอนล่าง ผู้รับเหมาก่อสร้างฐานรากวางแผนที่จะขุดดินไปถึงความลึกระดับ +10 ม. ดังแสดงในรูปที่ 11.52



รูปที่ 11.52 รูปที่ใช้ในข้อที่ 11.3.2

ดังนั้นจงคำนวณหา

11.3.2.1 ถ้าระดับน้ำในคลองส่งน้ำด้านข้างมหาวิทยาลัยอยู่ที่ระดับ A (+18 ม.) กรุณา

คำนวณหา Factor of Safety Against Quick Conditions

11.3.2.2 กรุณาคำนวณว่า Quick Conditions จะเกิดขึ้นเมื่อระดับความสูงของน้ำอยู่ที่ระดับเท่าใด

หมายเหตุ

1. ไม่ต้องคิด Vertical Shear ในทุกชั้นดิน

2. คิดว่า Head Loss จาก Flow Through Very Pervious Sand มีค่าน้อยมากๆ

วิธีทำ 11.3.2.1 จากโจทย์ $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$

$$\text{ดังนั้นจะได้ } \gamma_{\text{sat(caly)}} = \frac{2000 \times 9.81}{1000} = 19.62 \text{ kN/m}^3$$

จากนั้นหา σ, u ได้ดังต่อไปนี้

$$\sigma = (30 - H) \gamma_{\text{sat(caly)}} = (30-H)(19.62)$$

$$u = 18 \gamma_w = (18)(9.81) = 176.58 \text{ kN/m}^2$$

ดังนั้นถ้าจะเกิด Quick Conditions จะได้ $\sigma' = 0$ ดังนั้น

$$\sigma - u = 0$$

$$19.62(30-H) = 176.58$$

$$H = 21 \text{ m}$$

ถ้าการขุดจริง = 20 m จะได้ FS ของ Quick Conditions คือ

$$FS = \frac{H_{\text{มั่นคง}}}{H_{\text{ขุด}}} = \frac{21}{20} = 1.05$$

ดังนั้นอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) = 1.05 ในการขุดดินไปถึงความลึกระดับ +10 m

จึงจะเกิด Quick Conditions

11.3.2.2 จากการหา σ, u ได้ดังต่อไปนี้

$$\sigma = (30 - 20) \gamma_{\text{sat(caly)}} = 196.2 \text{ kN/m}^2$$

$$u = \gamma_w H = 9.81H \text{ kN/m}^2$$

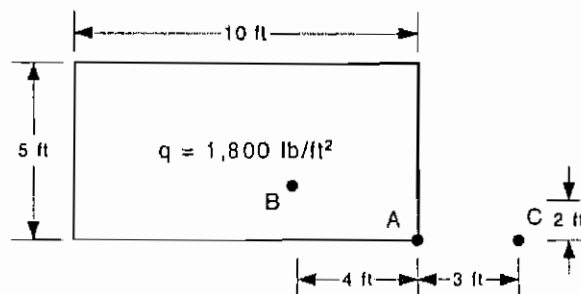
ที่ Quick Conditions ; $\sigma' = 0$

$$\therefore 196.2 - 9.81H = 0$$

$$H = 20 \text{ m}$$

\therefore จะเกิด Quick Conditions ที่ระดับน้ำ = +20 m ที่การขุดดินลึกไปถึงความลึกระดับ +10 m

11.3.3 ถ้ามหาวิทยาลัยนครสวรรค์ต้องการจะสร้างอาคารหอพักที่ใช้ฐานรากแบบแผ่ แต่ผู้รับเหมาได้ก่อสร้างฐานรากเยื้องศูนย์ไป ดังแสดงดังรูปที่ 11.53 ถ้าเราต้องการแก้ไขจะต้องหาหน่วยแรงในแนวตั้งที่เพิ่มขึ้นที่ความลึก 5 ft จากผิวดิน ที่จุดต่างๆ ดังต่อไปนี้คือ ที่จุด A, ที่จุด B, และที่จุด C



รูปที่ 11.53 รูปฐานรากที่ใช้ในข้อที่ 11.3.3

วิธีทำ

จุด A

$$m = 10/5 = 2 \text{ และ } n = 5/5 = 1$$

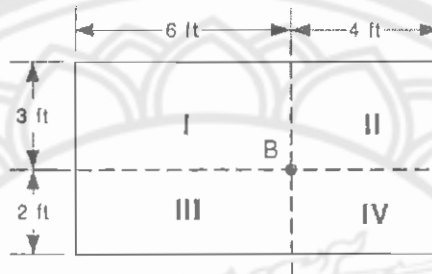
จากตารางที่ 11.9 จะได้

$$I_3 = 0.1999$$

ดังนั้น

$$\therefore \Delta\sigma_z = qI_3 = 1,800 \times 0.1999 = 358.2 \text{ lb/ft}^2$$

จุด B



$$\text{I} : m = 3/5 = 0.06 \text{ และ } n = 6/5 = 1.2 \rightarrow I_3 = 0.148$$

$$\text{II} : m = 3/5 = 0.06 \text{ และ } n = 4/5 = 0.8 \rightarrow I_3 = 0.125$$

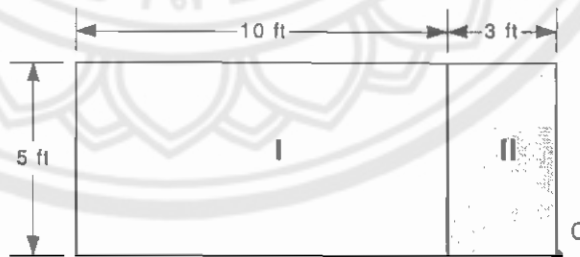
$$\text{III} : m = 2/5 = 0.04 \text{ และ } n = 6/5 = 1.2 \rightarrow I_3 = 0.106$$

$$\text{IV} : m = 2/5 = 0.04 \text{ และ } n = 4/5 = 0.8 \rightarrow I_3 = 0.092$$

ดังนั้น

$$\therefore \Delta\sigma_z = qI_3 = 1,800 \times [0.148 + 0.125 + 0.106 + 0.092] = 847.8 \text{ lb/ft}^2$$

จุด C



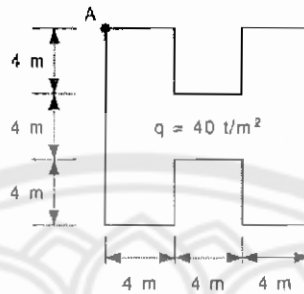
$$\text{I} : m = 5/5 = 1 \text{ และ } n = 13/5 = 2.6 \rightarrow I_3 = 0.202$$

$$\text{II} : m = 3/5 = 0.6 \text{ และ } n = 5/5 = 1 \rightarrow I_3 = 0.137$$

ดังนั้น

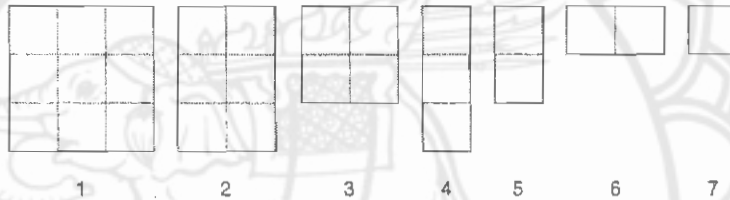
$$\therefore \Delta\sigma_z = qI_3 = 1,800 \times [0.202 - 0.137] = 117 \text{ lb/ft}^2$$

11.3.4 ในการก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรรแห่งหนึ่ง ถ้าฐานรากเป็นฐานรากแผ่รูปตัว H ดังแสดง ดังรูปที่ 11.56 จงหาหน่วยแรงในแนวตั้งที่เพิ่มขึ้นที่จุด A ลึกลงไปเป็นระยะ 10 m เพื่อให้คำนวณหาค่า การทรุดตัวต่อไป



รูปที่ 11.56 แสดงรูปที่ใช้ในข้อที่ 11.3.4

วิธีทำ จากรูปที่ 11.56 เราสามารถแบ่งเป็นส่วนๆ ได้ดังต่อไปนี้



ดังนั้นจะได้

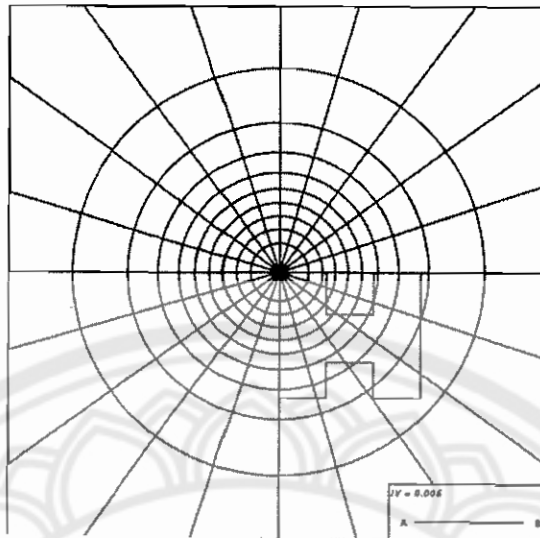
$$\Delta\sigma_z = 1 - 2 + 3 + 4 - 5 - 6 + 7$$

โดยสามารถสร้างตารางได้ ดังแสดงในตารางที่ 11.16

ตารางที่ 11.16 แสดงค่า $\Delta\sigma_z$ ดังนี้

รูปที่	n	m	l_3	$\Delta\sigma_z = q _3$
1	12/10	12/10	0.192	7.68
2	8/10	12/10	0.168	6.72
3	8/10	8/10	0.146	5.84
4	4/10	12/10	0.108	4.32
5	4/10	8/10	0.094	3.76
6	8/10	4/10	0.093	3.72
7	4/10	4/10	0.06	2.4
$\Delta\sigma_z$				6.04 t/m ²

หรือใช้แผนภูมิของนิวมาร์ค

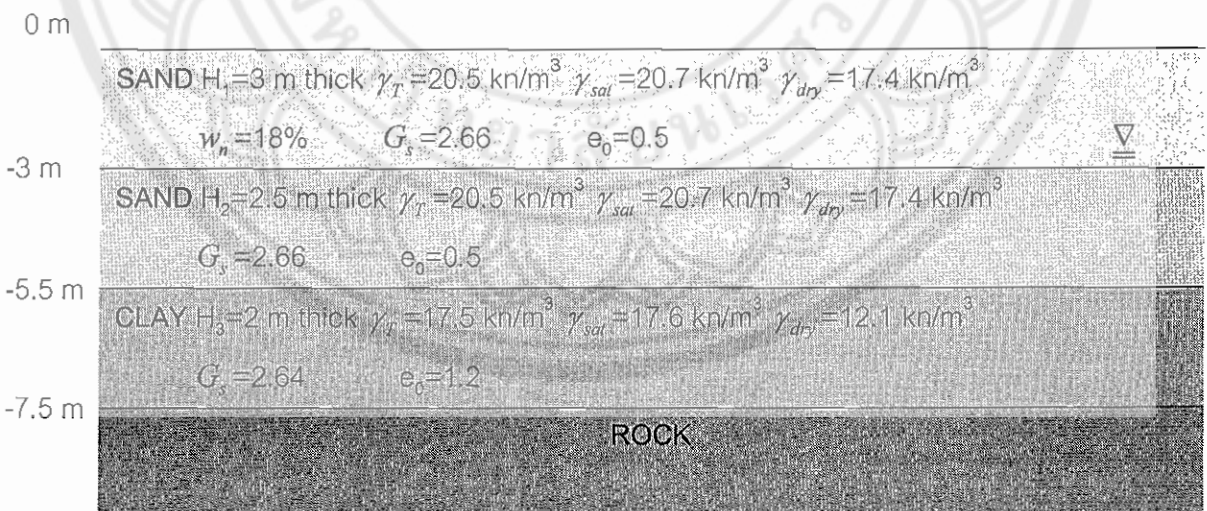


จากรูปจะได้ $N = 30$

$$\therefore \Delta\sigma_z = 40 \times 0.005 \times 30 = 6 \text{ t/m}^2$$

จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้ออกมาจะใกล้เคียงกัน จึงสามารถสรุปได้ว่า $\Delta\sigma_z \approx 6 \text{ t/m}^2$

11.3.5 โครงการก่อสร้างบ้านจัดสรรของห้างหุ้นส่วนจำกัด พอดีพานิช ซึ่งพื้นที่ที่จะก่อสร้างบ้านจัดสรรอยู่ที่จังหวัดกำแพงเพชร ก่อนทำการออกแบบฐานรากของบ้านในโครงการได้มีการเจาะสำรวจชั้นดินบริเวณดังกล่าว พบว่า



รูปที่ 11.57 ชั้นดินที่ใช้ในข้อที่ 11.3.5

ในฐานะวิศวกรผู้ออกแบบฐานรากของบ้านในโครงการ กรุณาเขียนกราฟ แสดงค่า total stress (σ), pore water pressure (u), และ effective stress (σ') ที่ระดับความลึกต่างๆ

วิธีทำ พิจารณาจุดที่มีความจำเป็นต้องคำนวณหาค่า total stress (σ), pore water pressure (u), และ effective stress (σ')

- ที่ระดับผิวดิน (ground surface)
- ระดับน้ำใต้ดิน (ground water table) ที่ระดับความลึก 3 m จากระดับผิวดิน (ground surface)
- จุดเปลี่ยนชั้นดิน ที่ระดับความลึก 5.5 m, และ 7.5 m จากระดับผิวดิน (ground surface)

ดังนั้นจะต้องคำนวณค่า total stress (σ), pore water pressure (u), และ effective stress (σ') ของจุดที่พิจารณา

- ที่ระดับผิวดิน (ground surface)

$$\sigma = 0$$

$$u = 0$$

$$\sigma' = \sigma - u = 0$$

- ที่ระดับน้ำใต้ดิน ความลึก 3 m จากระดับผิวดิน (ground surface)

$$\sigma = (\gamma_{\text{sat}})(H_1) = (20.5 \text{ kN/m}^3)(3 \text{ m}) = 61.5 \text{ kN/m}^2$$

$$u = (\gamma_w)(H_w) = (9.81 \text{ kN/m}^3)(0 \text{ m}) = 0$$

$$\sigma' = \sigma - u = 61.5 \text{ kN/m}^2 - 0 = 61.5 \text{ kN/m}^2$$

- ที่ระดับจุดเปลี่ยนชั้นดิน ระดับความลึก 5.5 m จากระดับผิวดิน (ground surface)

$$\sigma = (\gamma_{\text{T sand}})(H_1) + (\gamma_{\text{sat sand}})(H_2) = (20.5 \text{ kN/m}^3)(3 \text{ m}) + (20.7 \text{ kN/m}^3)(2.5 \text{ m}) = 113.25 \text{ kN/m}^2$$

$$u = (\gamma_w)(H_w) = (9.81 \text{ kN/m}^3)(2.5 \text{ m}) = 24.25 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma' = \sigma - u = (113.25 - 24.5) \text{ kN/m}^2 = 88.75 \text{ kN/m}^2$$

- ที่ระดับจุดเปลี่ยนชั้นดิน ระดับความลึก 7.5 m จากระดับผิวดิน (ground surface)

$$\sigma = (\gamma_{\text{T sand}})(H_1) + (\gamma_{\text{sat sand}})(H_2) + (\gamma_{\text{sat clay}})(H_3) = (20.5 \text{ kN/m}^3)(3 \text{ m}) + (20.7 \text{ kN/m}^3)(2.5 \text{ m}) + (17.6 \text{ kN/m}^3)(2 \text{ m}) = 148.45 \text{ kN/m}^2$$

$$u = (\gamma_w)(H_w) = (9.81 \text{ kN/m}^3)(4.5 \text{ m}) = 44.1 \text{ kN/m}^2$$

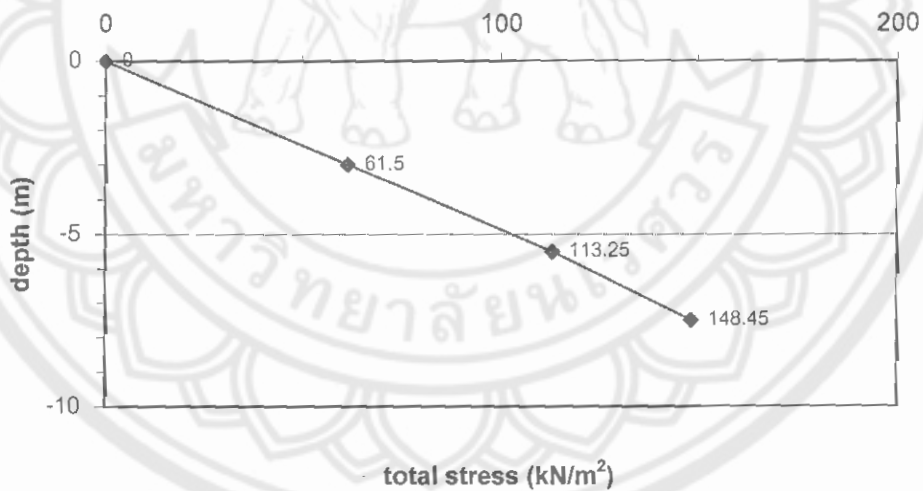
$$\sigma' = \sigma - u = (148.45 - 44.1) \text{ kN/m}^2 = 104.35 \text{ kN/m}^2$$

สรุป total stress (σ), pore water pressure (u), และ effective stress (σ') ที่ระดับความลึกต่างๆ เป็นดังนี้

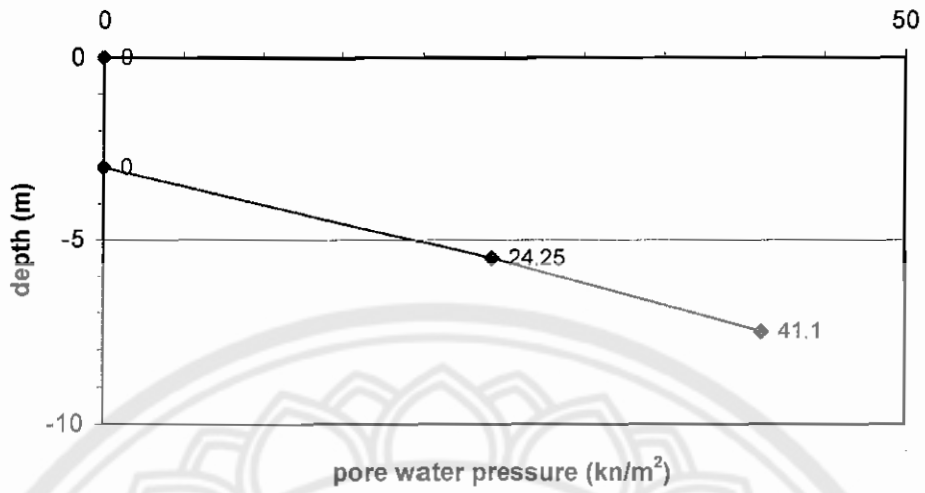
ตารางที่ 11.17 ค่า total stress (σ), pore water pressure (u), และ effective stress (σ') ที่ระดับความลึกต่างๆ

Depth (m)	σ (kN/m ²)	u (kN/m ²)	σ' (kN/m ²)
0	0	0	0
-3	61.5	0	61.5
-5.5	113.25	24.25	88.75
-7.5	148.45	41.1	104.35

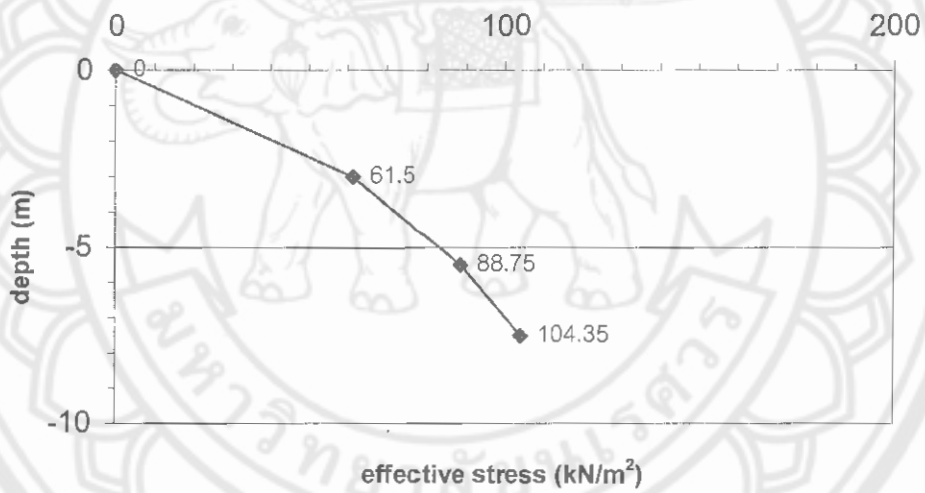
เขียนกราฟ แสดงค่า total stress (σ), pore water pressure (u), และ effective stress (σ') ที่ระดับความลึกต่างๆ ที่คำนวณได้ตามค่าในตาราง



รูปที่ 11.58 ค่า total stress (σ) ที่ระดับความลึกต่างๆ

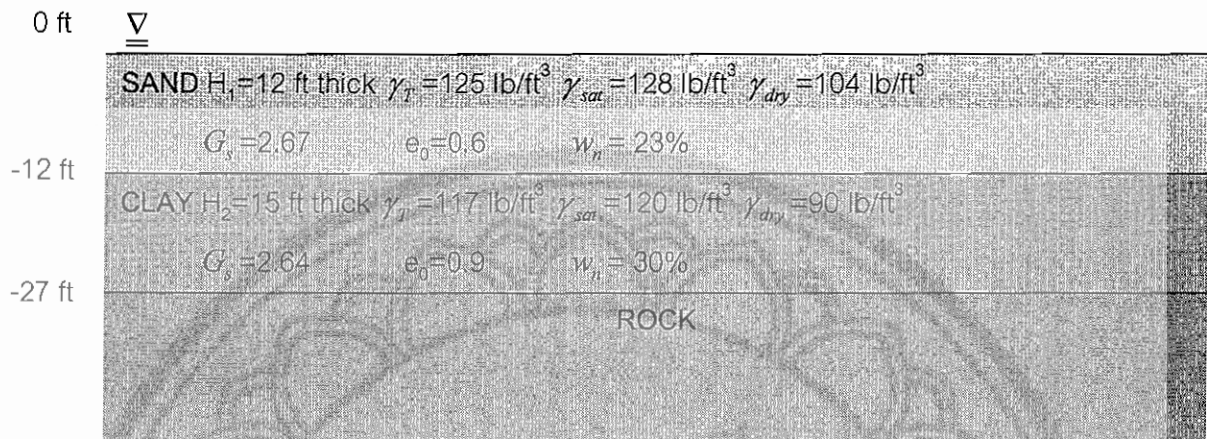


รูปที่ 11.59 ค่า pore water pressure (u) ที่ระดับความลึกต่างๆ



รูปที่ 11.60 ค่า effective stress (σ') ที่ระดับความลึกต่างๆ

11.3.6 จากการสำรวจชั้นดินบริเวณที่จะทำการตัดถนนผ่านหมู่บ้านจุงนางซึ่งถนนยาว 6 กิโลเมตร พบว่า

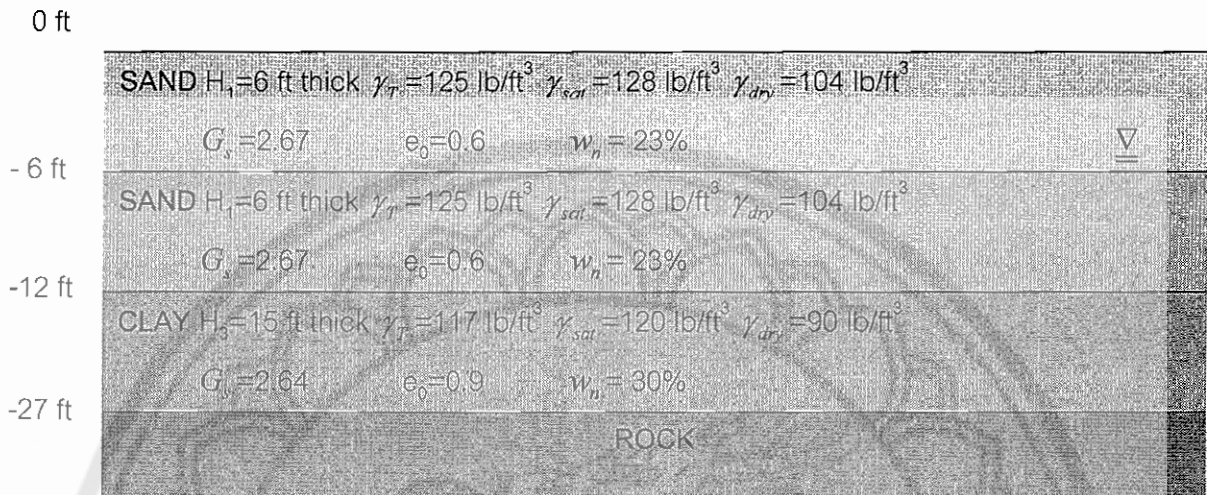


รูปที่ 11.61 ชั้นดินบริเวณที่จะทำการตัดถนนผ่านหมู่บ้านจุงนาง

จากการสอบถามลุงดำซึ่งเป็นคนเก่าแกในหมู่บ้านจุงนาง ทราบว่าในรอบ 1 ปี ระดับน้ำใต้ดิน จะอยู่ที่ระดับ -6 ft, 0 ft และ -12 ft ซึ่งเป็นมานานประมาณ 20 ปีแล้ว เพื่อดำเนินการขุดตัวของดินเมื่อทำการก่อสร้างถนนแล้ว ในฐานะวิศวกรผู้ออกแบบโครงสร้างของถนน กรุณา

- 11.3.6.1 เขียนกราฟแสดงค่า total stress (σ), pore water pressure (u), และ effective stress (σ') ที่ระดับความลึก (depth) ต่างๆ เมื่อระดับน้ำใต้ดิน (ground water table) อยู่ที่ระดับ -6 ft
- 11.3.6.2 เขียนกราฟแสดงค่า total stress (σ), pore water pressure (u), และ effective stress (σ') ที่ระดับความลึก (depth) ต่างๆ เมื่อระดับน้ำใต้ดิน (ground water table) อยู่ที่ระดับ 0 ft
- 11.3.6.3 เขียนกราฟแสดงค่า total stress (σ), pore water pressure (u), และ effective stress (σ') ที่ระดับความลึก (depth) ต่างๆ เมื่อระดับน้ำใต้ดิน (ground water table) อยู่ที่ระดับ +6 ft
- 11.3.6.4 ถ้าต้องการนำค่า effective stress (σ') ไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างคันทาง ในฐานะวิศวกรผู้ออกแบบโครงสร้างของถนน ท่านจะเลือกใช้ค่า effective stress (σ') เมื่อระดับน้ำใต้ดิน (ground water table) อยู่ที่ระดับเท่าใด เพราะเหตุใด

วิธีทำ 11.3.6.1 เขียนกราฟแสดงค่า total stress (σ), pore water pressure (u), และ effective stress (σ') ที่ระดับความลึก (depth) ต่างๆ เมื่อระดับน้ำใต้ดิน (ground water table) อยู่ที่ระดับ -6 ft



รูปที่ 11.62 ชั้นดินบริเวณที่จะทำการตัดถนนผ่านหมู่บ้านจุนางเมื่อระดับน้ำใต้ดิน (ground water table) อยู่ที่ระดับ -6 ft

พิจารณาจุดที่มีความจำเป็นต้องคำนวณหาค่า total stress (σ), pore water pressure (u), และ effective stress (σ')

- ที่ระดับผิวดิน (ground surface)
- ระดับน้ำใต้ดิน (ground water table) ที่ระดับความลึก 6 ft จากระดับผิวดิน (ground surface)
- จุดเปลี่ยนชั้นดิน ที่ระดับความลึก 12 ft และ 27 ft จากระดับผิวดิน (ground surface)

ดังนั้น คำนวณค่า total stress (σ), pore water pressure (u), และ effective stress (σ') ของจุดที่พิจารณา

- ที่ระดับผิวดิน (ground surface)

$$\sigma = 0$$

$$u = 0$$

$$\sigma' = \sigma - u = 0$$

- ที่ระดับน้ำใต้ดิน (ground water table) ระดับความลึก 6 ft จากระดับผิวดิน (ground surface)

$$\sigma = (\gamma_{T \text{ sand}})(H_1) = (125 \text{ lb/ft}^3)(6 \text{ ft}) = 750 \text{ lb/ft}^2$$

$$u = (\gamma_w)(H_w) = (62.4 \text{ lb/ft}^3)(0 \text{ ft}) = 0$$

$$\sigma' = \sigma - u = 750 \text{ lb/ft}^2 - 0 = 750 \text{ lb/ft}^2$$

- ที่ระดับน้ำใต้ดิน (ground water table) ระดับความลึก 12 ft จากระดับผิวดิน (ground surface)

$$\begin{aligned} \sigma &= (\gamma_{T \text{ sand}})(H_1) + (\gamma_{\text{sat sand}})(H_2) = (125 \text{ lb/ft}^3)(6 \text{ ft}) + (128 \text{ lb/ft}^3)(6 \text{ ft}) \\ &= 1518 \text{ lb/ft}^2 \end{aligned}$$

$$u = (\gamma_w)(H_w) = (62.4 \text{ lb/ft}^3)(6 \text{ ft}) = 374.4 \text{ lb/ft}^2$$

$$\sigma' = \sigma - u = (1518 - 374.4) \text{ lb/ft}^2 = 1143.6 \text{ lb/ft}^2$$

- ที่ระดับน้ำใต้ดิน (ground water table) ระดับความลึก 27 ft จากระดับผิวดิน (ground surface)

$$\begin{aligned} \sigma &= (\gamma_{T \text{ sand}})(H_1) + (\gamma_{\text{sat sand}})(H_2) + (\gamma_{\text{sat clay}})(H_3) = (125 \text{ lb/ft}^3)(6 \text{ ft}) + (128 \\ &\text{ lb/ft}^3)(6 \text{ ft}) + (120 \text{ lb/ft}^3)(15 \text{ ft}) = 3318 \text{ lb/ft}^2 \end{aligned}$$

$$u = (\gamma_w)(H_w) = (62.4 \text{ lb/ft}^3)(6+15) \text{ ft} = 1310.4 \text{ lb/ft}^2$$

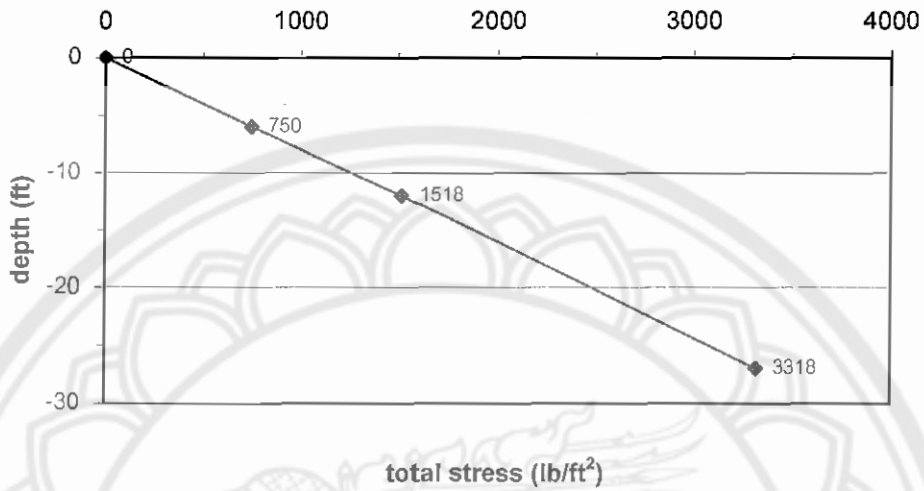
$$\sigma' = \sigma - u = (3318 - 1310.4) \text{ lb/ft}^2 = 2007.6 \text{ lb/ft}^2$$

สรุปเป็นค่า total stress (σ), pore water pressure (u), และ effective stress (σ') ที่ระดับความลึกต่างๆ เป็นดังนี้

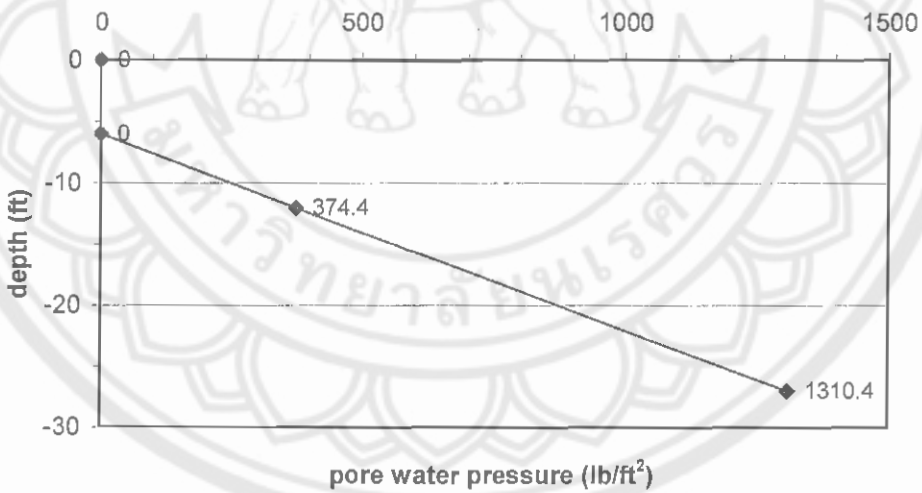
ตารางที่ 11.18 ค่า total stress (σ), pore water pressure (u), และ effective stress (σ') ที่ระดับความลึกต่างๆ

Depth (m)	σ (kN/m ²)	U (kN/m ²)	σ' (kN/m ²)
0	0	0	0
-6	750	0	750
-12	1518	374.4	1143.6
-27	3318	1310.4	2007.6

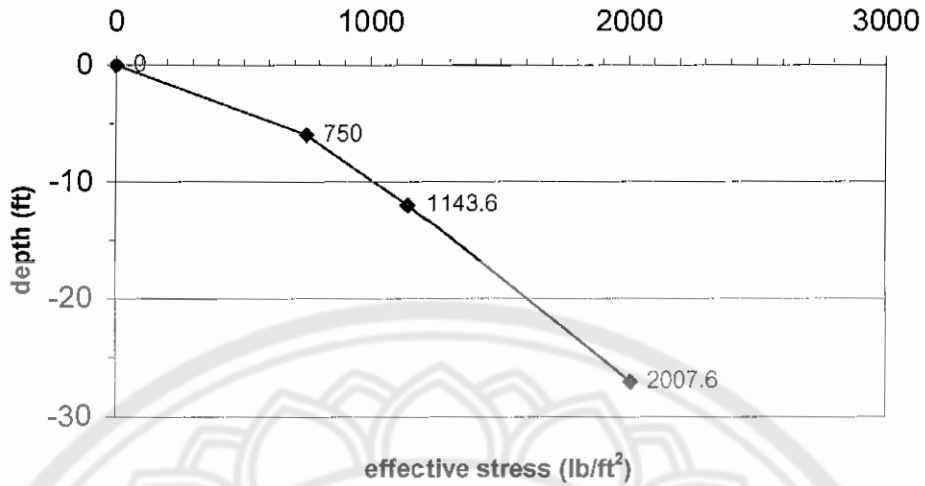
เขียนกราฟ แสดงค่า total stress (σ), pore water pressure (u), และ effective stress (σ') ที่ระดับความลึกต่างๆ ที่คำนวณได้ในตารางข้างต้น



รูปที่ 11.63 ค่า total stress (σ) ที่ระดับความลึกต่างๆ

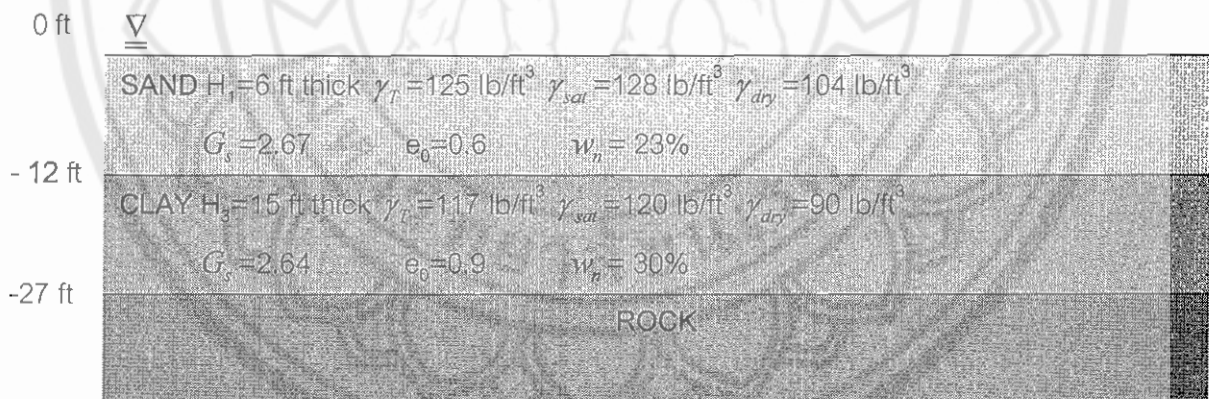


รูปที่ 11.64 ค่า pore water pressure (u) ที่ระดับความลึกต่างๆ



รูปที่ 11.65 ค่า effective stress (σ') ที่ระดับความลึกต่างๆ

11.3.6.2 เขียนกราฟแสดงค่า total stress (σ), pore water pressure (u), และ effective stress (σ') ที่ระดับความลึก (depth) ต่างๆ เมื่อระดับน้ำใต้ดิน (ground water table) อยู่ที่ระดับ 0 ft



รูปที่ 11.66 ชั้นดินบริเวณที่จะทำการตัดถนนผ่านหมู่บ้านจุงนางเมื่อระดับน้ำใต้ดิน (ground water table) อยู่ที่ระดับ 0 ft

ดังนั้นพิจารณาจุดที่มีความจำเป็นต้องคำนวณหาค่า total stress (σ), pore water pressure (u), และ effective stress (σ')

- ที่ระดับผิวดิน (ground surface)
- ระดับน้ำใต้ดิน (ground water table) ซึ่งอยู่ที่ระดับผิวดิน
- จุดเปลี่ยนชั้นดิน ที่ระดับความลึก 12 ft และ 27 ft จากระดับผิวดิน (ground surface)

จะต้องคำนวณค่า total stress (σ), pore water pressure (u), และ effective stress (σ') ของจุดที่พิจารณา

- ที่ระดับผิวดิน และระดับน้ำใต้ดิน (ground water table) ซึ่งอยู่ที่ระดับ 0 ft

$$\sigma = 0$$

$$u = 0$$

$$\sigma' = \sigma - u = 0$$

- ที่ระดับน้ำใต้ดิน (ground water table) ระดับความลึก 12 ft

$$\sigma = (\gamma_{\text{sat sand}})(H_1) = (128 \text{ lb/ft}^3)(12 \text{ ft}) = 1536 \text{ lb/ft}^2$$

$$u = (\gamma_w)(H_w) = (62.4 \text{ lb/ft}^3)(12 \text{ ft}) = 748.8 \text{ lb/ft}^2$$

$$\sigma' = \sigma - u = (1536 - 748.8) \text{ lb/ft}^2 = 787.2 \text{ lb/ft}^2$$

- ที่ระดับจุดเปลี่ยนชั้นดิน ระดับความลึก 27 ft จากระดับผิวดิน (ground surface)

$$\begin{aligned} \sigma &= (\gamma_{\text{sat sand}})(H_1) + (\gamma_{\text{sat clay}})(H_2) = (128 \text{ lb/ft}^3)(12 \text{ ft}) + (120 \text{ lb/ft}^3)(15 \text{ ft}) \\ &= 3338 \text{ lb/ft}^2 \end{aligned}$$

$$u = (\gamma_w)(H_w) = (62.4 \text{ lb/ft}^3)(12+15) \text{ ft} = 1684.8 \text{ lb/ft}^2$$

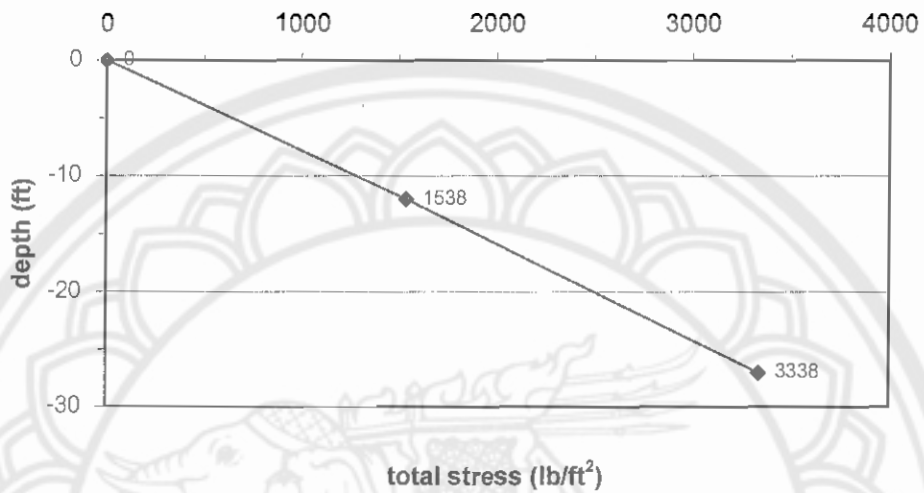
$$\sigma' = \sigma - u = (3336 - 1684.8) \text{ lb/ft}^2 = 1651.2 \text{ lb/ft}^2$$

สรุปเป็นค่า total stress (σ), pore water pressure (u), และ effective stress (σ') ที่ระดับความลึกต่างๆ เป็นดังนี้

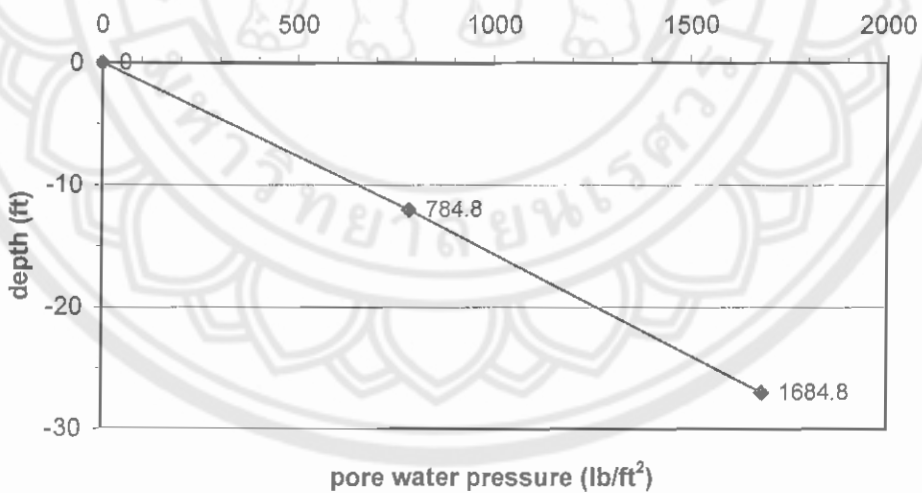
ตารางที่ 11.19 ค่า total stress (σ), pore water pressure (u), และ effective stress (σ') ที่ระดับความลึกต่างๆ

Depth (m)	σ (kN/m ²)	U (kN/m ²)	σ' (kN/m ²)
0	0	0	0
-12	1538	784.8	787.2
-27	3338	1684.8	1651.2

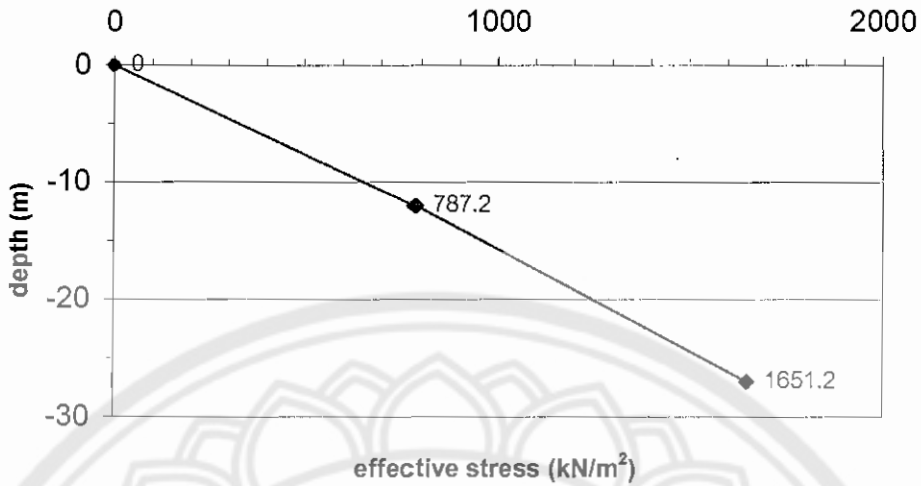
เขียนกราฟ แสดงค่า total stress (σ), pore water pressure (u), และ effective stress (σ') ที่ระดับความลึกต่างๆ ที่คำนวณตามตารางข้างต้น



รูปที่ 11.67 ค่า total stress (σ) ที่ระดับความลึกต่างๆ

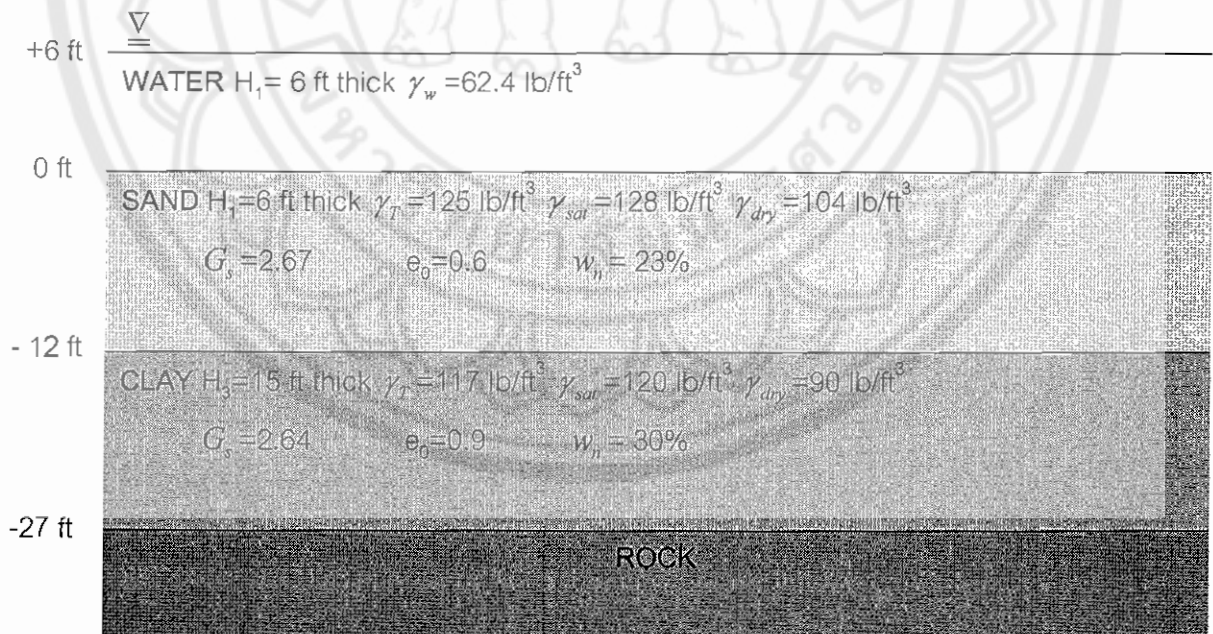


รูปที่ 11.68 ค่า pore water pressure (u) ที่ระดับความลึกต่างๆ



รูปที่ 11.69 ค่า effective stress (σ') ที่ระดับความลึกต่างๆ

11.3.6.3 เขียนกราฟแสดงค่า total stress (σ), pore water pressure (u), และ effective stress (σ') ที่ระดับความลึก (depth) ต่างๆ เมื่อระดับน้ำใต้ดิน (ground water table) อยู่ที่ระดับ +6 ft



รูปที่ 11.70 ชั้นดินบริเวณที่จะทำการตัดถนนผ่านหมู่บ้านจุงนางเมื่อระดับน้ำใต้ดิน (ground water table) อยู่ที่ระดับ +6 ft

ดังนั้นพิจารณาจุดที่มีความจำเป็นต้องคำนวณหาค่า total stress (σ), pore water pressure (u), และ effective stress (σ')

- ที่ระดับน้ำ (water surface)
- ที่ระดับผิวน้ำ (ground surface)
- จุดเปลี่ยนชั้นดิน ที่ระดับความลึก 12 ft และ 27 ft จากระดับผิวดิน (ground surface)

จะต้องการหาค่า total stress (σ), pore water pressure (u), และ effective stress (σ') ของจุดที่พิจารณา

- ที่ระดับน้ำ (water surface)

$$\begin{aligned}\sigma &= 0 \\ u &= 0 \\ \sigma' &= \sigma - u = 0\end{aligned}$$

- ที่ระดับผิวดิน (ground surface)

$$\begin{aligned}\sigma &= (\gamma_w)(H_1) = (62.4 \text{ lb/ft}^3)(6 \text{ ft}) = 374.4 \text{ lb/ft}^2 \\ u &= (\gamma_w)(H_w) = (62.4 \text{ lb/ft}^3)(6 \text{ ft}) = 374.4 \text{ lb/ft}^2 \\ \sigma' &= \sigma - u = (374.4 - 374.4) \text{ lb/ft}^2 = 0\end{aligned}$$

- ที่ระดับจุดเปลี่ยนชั้นดิน ระดับความลึก 12 ft

$$\begin{aligned}\sigma &= (\gamma_w)(H_1) + (\gamma_{\text{sat sand}})(H_2) = (62.4 \text{ lb/ft}^3)(6 \text{ ft}) + (128 \text{ lb/ft}^3)(6 \text{ ft}) \\ &= 1910.4 \text{ lb/ft}^2 \\ u &= (\gamma_w)(H_w) = (62.4 \text{ lb/ft}^3)(12 \text{ ft}) = 1123.2 \text{ lb/ft}^2 \\ \sigma' &= \sigma - u = (1910.4 - 1123.2) \text{ lb/ft}^2 = 787.2 \text{ lb/ft}^2\end{aligned}$$

- ที่ระดับจุดเปลี่ยนชั้นดิน ระดับความลึก 27 ft

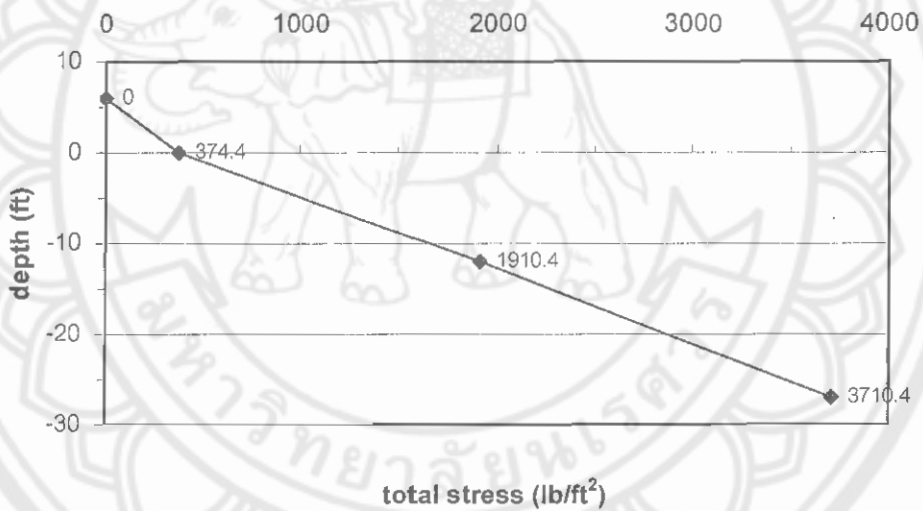
$$\begin{aligned}\sigma &= (\gamma_w)(H_1) + (\gamma_{\text{sat sand}})(H_2) + (\gamma_{\text{sat clay}})(H_3) = (62.4 \text{ lb/ft}^3)(6 \text{ ft}) + \\ &\quad (128 \text{ lb/ft}^3)(6 \text{ ft}) + (120 \text{ lb/ft}^3)(15 \text{ ft}) = 3710.4 \text{ lb/ft}^2 \\ u &= (\gamma_w)(H_w) = (62.4 \text{ lb/ft}^3)(6+12+15) \text{ ft} = 2059.2 \text{ lb/ft}^2 \\ \sigma' &= \sigma - u = (3710.4 - 2059.2) \text{ lb/ft}^2 = 1651.2 \text{ lb/ft}^2\end{aligned}$$

สรุปเป็นค่า total stress (σ), pore water pressure (u), และ effective stress (σ') ที่ระดับความลึกต่างๆ เป็นดังนี้

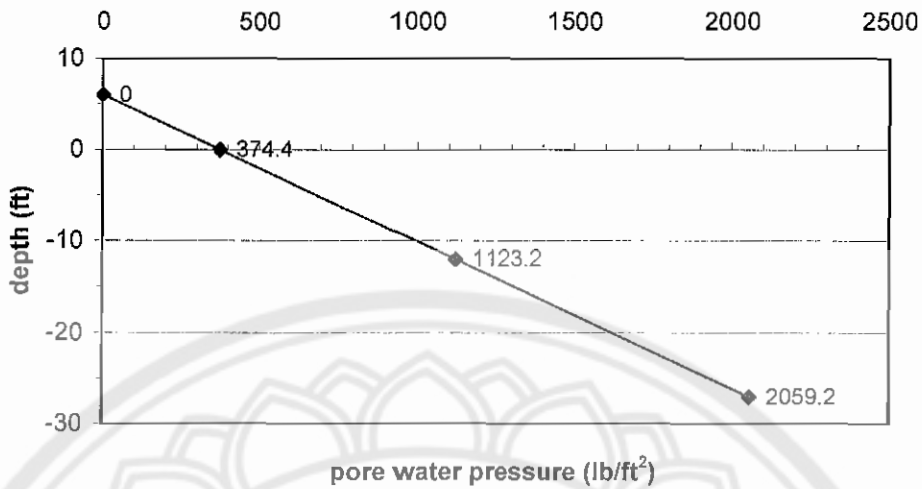
ตารางที่ 11.20 ค่า total stress (σ), pore water pressure (u), และ effective stress (σ') ที่ระดับความลึกต่างๆ

Depth (m)	σ (kN/m ²)	U (kN/m ²)	σ' (kN/m ²)
+6	0	0	0
0	374.4	374.4	0
-12	1910.4	1123.2	787.2
-27	3710.4	2059.2	1651.2

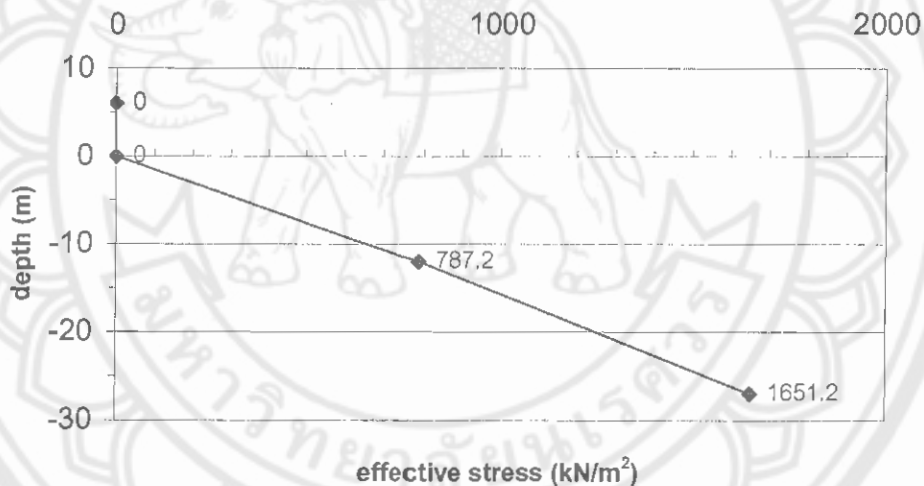
เขียนกราฟ แสดงค่า total stress (σ), pore water pressure (u), และ effective stress (σ') ที่ระดับความลึกต่างๆ ที่คำนวณได้ในตารางข้างต้น



รูปที่ 11.71 ค่า total stress (σ) ที่ระดับความลึกต่างๆ



รูปที่ 11.72 ค่า pore water pressure (u) ที่ระดับความลึกต่างๆ



รูปที่ 11.73 ค่า effective stress (σ') ที่ระดับความลึกต่างๆ

11.3.6.4 ถ้าต้องการนำค่า effective stress (σ') ไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างคันทาง ใน

ฐานวิศวกรรมผู้ออกแบบโครงสร้างของถนน ท่านจะเลือกใช้ค่า effective stress (σ')

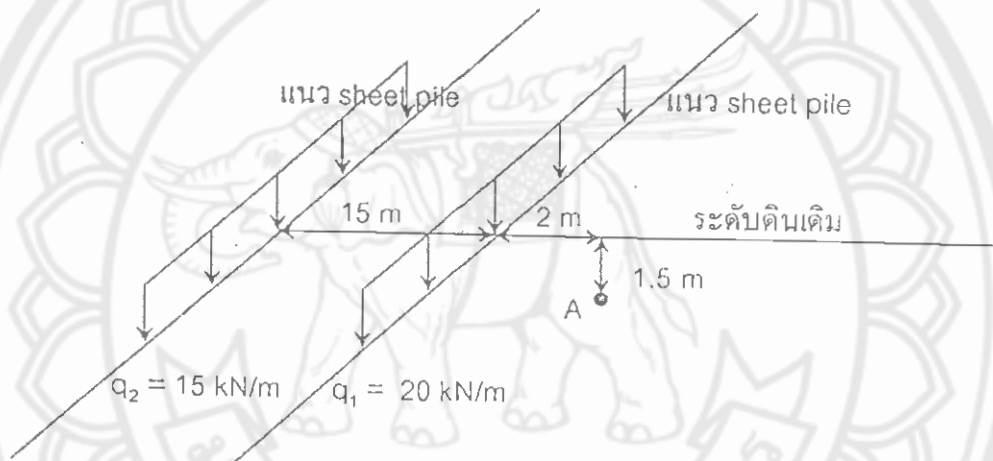
เมื่อระดับน้ำใต้ดิน (ground water table) อยู่ที่ระดับเท่าใด เพราะเหตุใด

ตอบ ในฐานวิศวกรรมผู้ออกแบบโครงสร้างของถนน จะเลือกใช้ค่า effective stress (σ') เมื่อระดับน้ำใต้ดิน (ground water table) อยู่ที่ระดับ 0 ft

เนื่องจากผลการคำนวณค่าของ effective stress (σ') เมื่อระดับน้ำใต้ดิน (ground water table) อยู่ที่ระดับต่างๆ พบว่าค่า effective stress เมื่อระดับน้ำใต้ดิน (ground water table) อยู่ที่ระดับ 0 ft มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งเท่ากับค่า effective stress

(σ') เมื่อระดับน้ำใต้ดิน (ground water table) อยู่ที่ระดับ +6 ft แต่เมื่อระดับน้ำใต้ดิน (ground water table) อยู่ที่ระดับ +6 ft ต้องเสียเวลาในการคำนวณหาค่า effective stress (σ') มากกว่า

11.3.7 ในบริเวณที่ต้องทำการซ่อมแซมถนนสายพิษณุโลก-สุโขทัย เป็นระยะทาง 15 กิโลเมตร พบว่าทั้งสองข้างทางเป็นอาคารบ้านเรือน และสิ่งปลูกสร้างของคนบริเวณนั้น วิศวกรผู้ควบคุมโครงการซ่อมแซมถนน แนะนำว่าควรปัก sheet pile บริเวณ 2 ข้างถนนที่มีการซ่อมแซมเพื่อป้องกันการกระทบกระเทือนต่อสิ่งปลูกสร้างบริเวณนั้น ซึ่งจากการวิเคราะห์แรงที่จะเกิดขึ้นเมื่อปัก sheet pile ทั้ง 2 ข้างทางของถนน พบว่า



รูปที่ 11.74 sheet pile บริเวณ 2 ข้างของถนนที่มีการซ่อมแซม

ในฐานะวิศวกรผู้ควบคุมการซ่อมแซมถนน กรุณาตอบคำถามของลุงแดง ซึ่งเป็นคนในบริเวณนั้น ที่ว่า เมื่อสร้าง sheet pile แล้ว จะเกิดแรงกระทำกับฐานรากตื้นของโกดังของเขาหรือไม่ และถ้าเกิดจะมากเท่าใด เมื่อฐานรากโกดังอยู่ที่ระยะลึก 1.5 m จากผิวดินและห่างจาก sheet pile ดังรูปข้างต้น (จุด A)

วิธีทำ

เพราะลักษณะของแรงกระทำภายนอก (applied external load) เป็นแบบการตอก sheet pile เป็นแนวเดียว

ดังนั้น เลือกรูปร่างของการกระทำ (shape of loading) เป็นแบบ line load ดังนั้น คำนวณหา induced vertical stress (Δp_z) โดยใช้สมการ

$$\Delta p_z = \frac{2qz^3}{\pi(x^2 + z^2)^2}$$

$$q_1 = 20 \text{ kN/m}$$

$$q_2 = 15 \text{ kN/m}$$

คำนวณหา Δp_z สำหรับตำแหน่งที่กำหนดให้คือ ณ ระดับความลึก $z = 1.5 \text{ m}$ จากผิวดิน ที่ระยะห่าง (x) เท่ากับ 2 m จาก q_1 , 17 m จาก q_2

$$\Delta p_z = \frac{2qz^3}{\pi(x^2 + z^2)^2}$$

เนื่องจาก Δp_z เกิดจาก q_1 และ q_2 จะได้ว่า $\Delta p_z = \Delta p_{z1} + \Delta p_{z2}$

พิจารณาที่ $q_1 = 20 = \text{kN/m}$

$$x = 2 \text{ m (จากแนว sheet pile)}$$

$$z = 1.5 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \Delta p_{z1} &= \frac{2qz^3}{\pi(x^2 + z^2)^2} \\ &= \frac{2(20 \text{ kN/m})(1.5 \text{ m})^3}{\pi(2^2 \text{ m}^2 + 1.5^2 \text{ m}^2)^2} \\ &= 1.1 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

พิจารณาที่ $q_2 = 15 \text{ kN/m}$

$$x = 17 \text{ m (จากแนว sheet pile)}$$

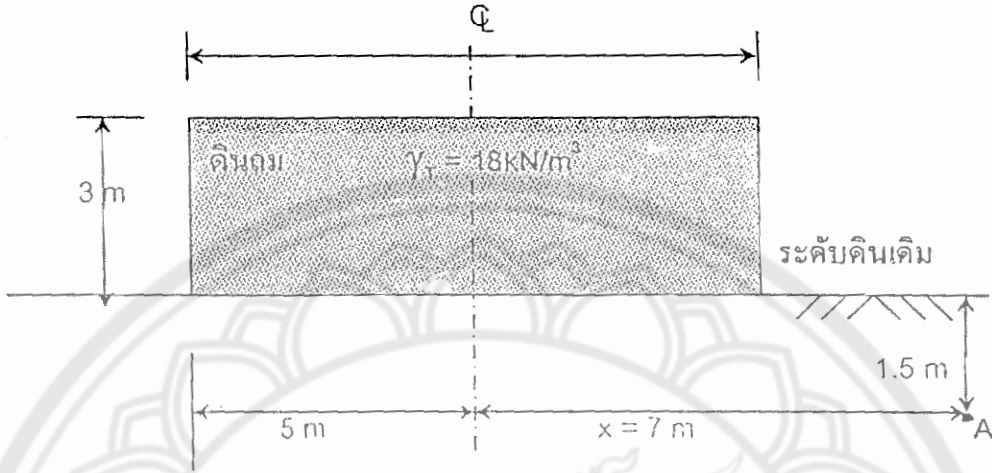
$$z = 1.5 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \Delta p_{z2} &= \frac{2qz^3}{\pi(x^2 + z^2)^2} \\ &= \frac{2(15 \text{ kN/m})(1.5 \text{ m})^3}{\pi(17^2 \text{ m}^2 + 1.5^2 \text{ m}^2)^2} \\ &= 0.4 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } \Delta p_z &= \Delta p_{z1} + \Delta p_{z2} \\ &= (1.1 + 0.0004) \text{ kN/m}^2 \\ &\approx 1.1 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

ดังนั้นในฐานะวิศวกรผู้ควบคุมการซ่อมแซมถนน จะรายงานว่า เมื่อปัก sheet pile แล้ว จะเกิดแรงกระทำกับฐานรากตื้นของโกดังของเขาด้วยแรงประมาณ 1.1 kN/m^2 หรือประมาณ 112 kg/m^2

11.3.8 โครงการก่อสร้างถนนพิเศษโลก-อุตรดิตถ์ สายใหม่เป็นระยะทาง 145 กม. ต้องถมดินเพื่อทำถนนสูง 3 m ยาวตลอดเส้นทาง หน้าตัดของดินถม ซึ่งถนนกว้าง 10 m เป็นดังนี้



รูปที่ 11.75 หน้าตัดของดินถมคันทาง พิษณุโลก-อุตรดิตถ์ สายใหม่

อยากทราบว่า ที่ระยะห่างจาก center line ของถนน 7 m ลึก 1.5 m ซึ่งเป็นฐานรากค้ำของเสาไฟฟ้าต้นหนึ่ง (จุด A) จะได้รับผลกระทบจากการถมดินเพื่อทำถนนหรือไม่ เป็นแรงมากเท่าใด

วิธีทำ

จากรูปลักษณะของแรงกระทำภายนอก (applied external load) เป็นการถมดินเป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมแบบเดียวยาวตลอดเส้นทาง 145 กิโลเมตร ดังนั้น เลือกรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) เป็นแบบ strip load

ดังนั้น คำนวณหา induced vertical stress (Δp_z) โดยหา Δp_z จากตารางที่ 11.3 ซึ่งตำแหน่งที่กำหนดให้คือ ณ ระดับความลึก $z = 1.5 \text{ m}$ จากผิวดิน ที่ระยะห่าง (x) เท่ากับ 7 m จาก center line ถนน

คำนวณหาค่าของ Δp_z ณ ตำแหน่งที่เลือกไว้

$x = 7 \text{ m}$

$z = 1.5 \text{ m}$

$B = 10 \text{ m}$

$\gamma_T = 18 \text{ kN/m}^3$

$q = (18 \text{ kN/m}^3)(3 \text{ m}) = 54 \text{ kN/m}^2$

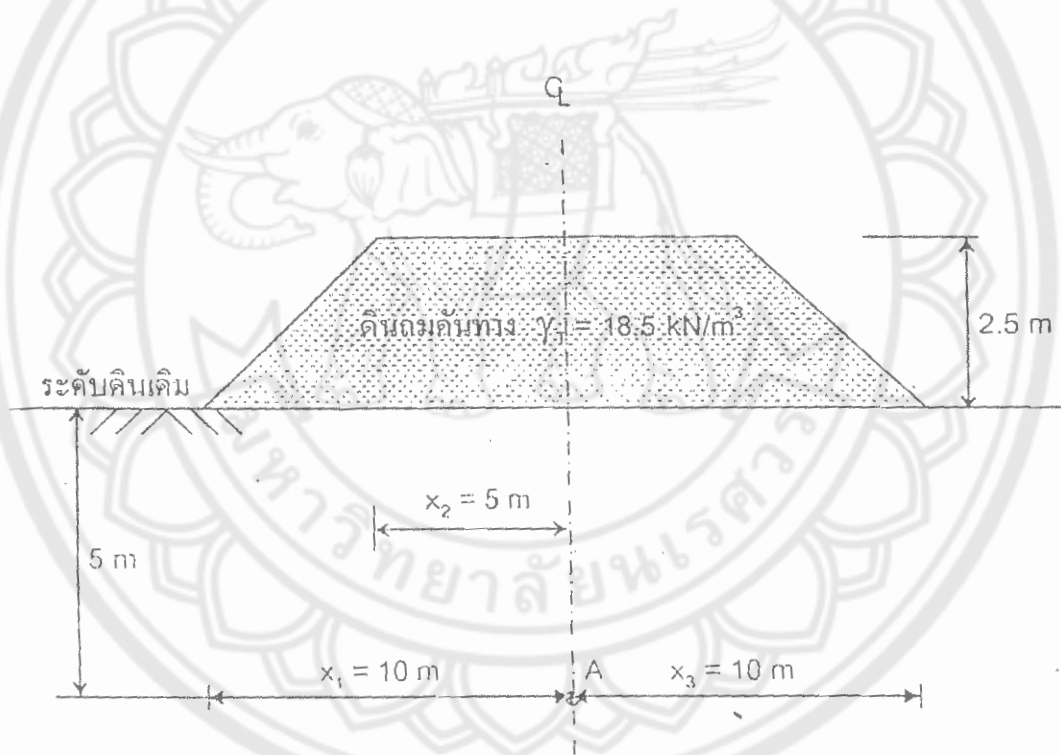
จากตารางเมื่อ $\frac{2z}{B} = 0.3, \frac{2x}{B} = 1.4$ จะได้ $\frac{\Delta p_z}{q} = 0.052$

จะได้

$$\begin{aligned} \Delta p_z &= q (0.052) \\ &= (54 \text{ kN/m}^2)(0.052) \\ &= 2.8 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

ดังนั้นฐานรากตื้นของเสาไฟฟ้าจะได้รับผลกระทบจากแรง Δp_z เท่ากับ 2.8 kN/m^2

11.3.9 โครงการขยายเส้นทางหลวงหมายเลข 12 เส้นทางจาก พิษณุโลก - เพชรบูรณ์ เป็นระยะทาง 200 กิโลเมตร ซึ่งในการก่อสร้างจะต้องมีการถมดิน โดยหน้าตัดของดินถมคันทาง เป็นดังรูปที่ 11.76



รูปที่ 11.76 หน้าตัดของดินถมคันทางทางหลวงหมายเลข 12 เส้นทางจาก พิษณุโลก-เพชรบูรณ์

เพื่อวิเคราะห์หาค่าการทรุดตัวของดินถมคันทาง ในฐานะวิศวกรที่ปรึกษากรุณาคำนวณค่า Δp_z ที่ระยะลึก 5 m ใต้ center line ของดินถมคันทาง (จุด A)

วิธีทำ

เพราะลักษณะของแรงกระทำภายนอก (applied external load) เป็นการถมดินเป็นหน้าตัดดินถมคันทางแบบเดียวยาวตลอดทั้งสนาม ดังนั้น เลือกรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) เป็น 2 แบบคือ linearly increasing และ strip load

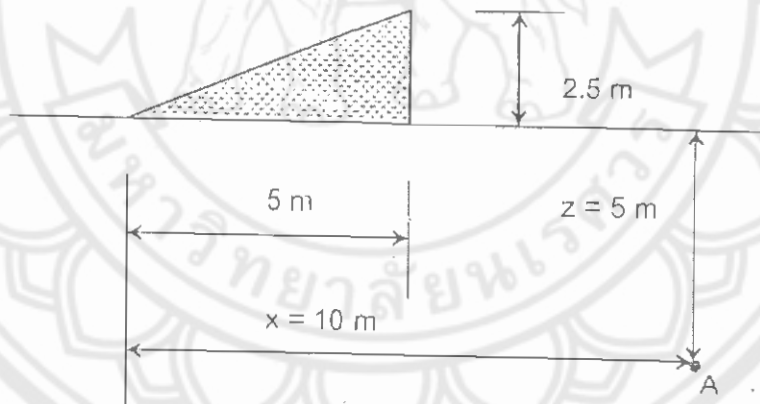
ดังนั้น คำนวณหา induced vertical stress (Δp_z) โดยหาค่า Δp_z จากตารางที่ 11.4 และเพราะเป็น strip load และคำนวณหา induced vertical stress (Δp_z) โดยหาค่า Δp_z จากตารางที่ 11.3

สำหรับตำแหน่งที่กำหนดให้คือ ณ ระดับความลึก $z = 5 \text{ m}$ จากผิวดิน ที่ระยะ (x) เท่ากับ 10 m , 5 m จาก center line ของดินถมคันทาง

เนื่องจาก Δp_z เกิดจากรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) 2 แบบคือ linearly increasing load และ strip load ดังนั้น

$$\Delta p_z = \Delta p_{z(\text{strip load})} + 2\Delta p_{z(\text{linearly increasing load})}$$

สำหรับ Δp_z ของ linearly increasing load คำนวณโดยใช้ตารางที่ 11.4



รูปที่ 11.77 หน้าตัดของ linearly increasing load

$x = 10 \text{ m}$

$z = 5 \text{ m}$

$B = 5 \text{ m}$

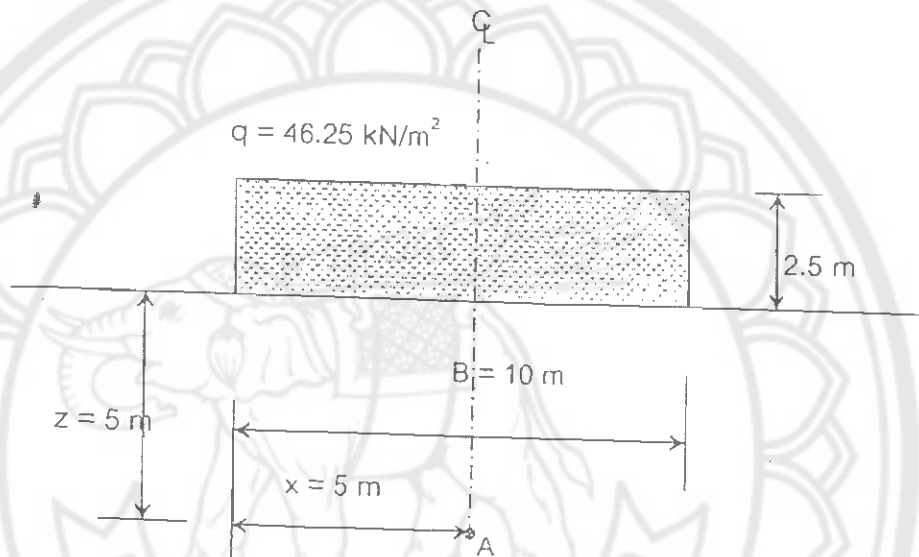
$\gamma_r = 18.5 \text{ kN/m}^3$

$q = (18.5 \text{ kN/m}^3) (2.5 \text{ m}) = 46.25 \text{ kN/m}^2$

จากตารางเมื่อ $\frac{2z}{B} = 4, \frac{2x}{B} = 4$ จะได้ $\frac{\Delta p_z}{q} = 0.0457$

$$\begin{aligned} \Delta p_z &= q(0.0457) \\ &= (46.25 \text{ kN/m}^2)(0.0457) \\ &= 2.11 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

สำหรับ Δp_z ของ strip load คำนวณโดยใช้ตารางที่ 3



รูปที่ 11.78 หน้าตัดของ strip load

$$x = 5 \text{ m}$$

$$z = 5 \text{ m}$$

$$B = 10 \text{ m}$$

$$\gamma_r = 18.5 \text{ kN/m}^3$$

$$q = (18.5 \text{ kN/m}^3)(2.5 \text{ m}) = 46.25 \text{ kN/m}^2$$

จากตารางเมื่อ $\frac{2z}{B} = 1, \frac{2x}{B} = 0$ จะได้ $\frac{\Delta p_z}{q} = 0.818$

จะได้

$$\begin{aligned} \Delta p_z &= q(0.818) \\ &= (46.25 \text{ kN/m}^2)(0.818) \\ &= 37.83 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

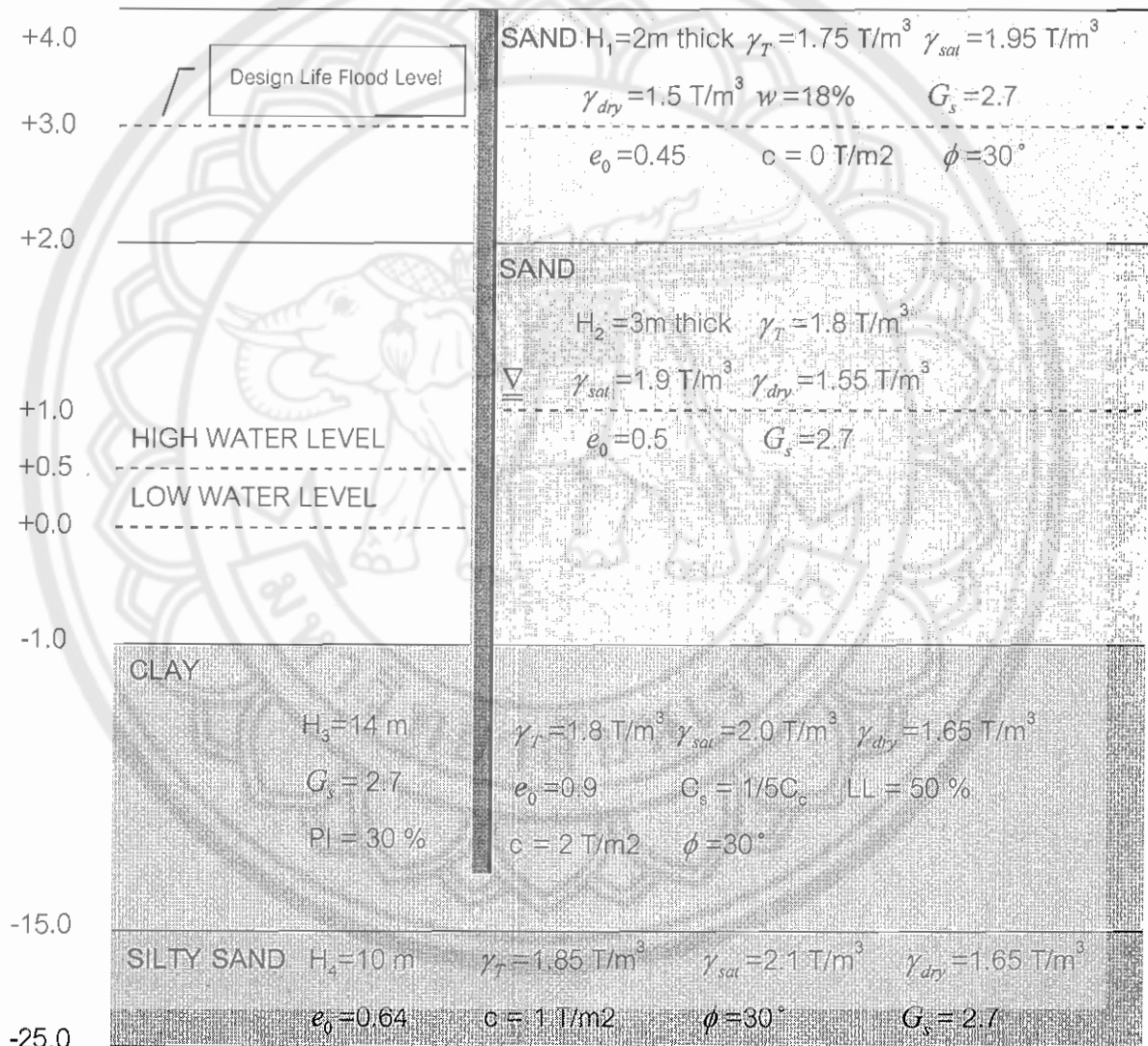
$$\begin{aligned}
 \text{เนื่องจาก } \Delta p_z &= \Delta_{z \text{ strip load}} + 2\Delta_{z \text{ linearly increasing load}} \\
 &= 37.83 \text{ kN/m}^2 + 2(2.11 \text{ kN/m}^2) \\
 &= 42.05 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

ดังนั้นค่า Δp_z ที่ระยะลึก 5 m ใต้ center line ของดินถมคันทาง (จุด A) จะเกิดแรงกระทำ ซึ่งเป็นผลมาจากดินถม ประมาณ 42 kN/m^2



11.4 โจทย์ทดสอบความสามารถในการนำความรู้ไปใช้ในการทำงานจริง

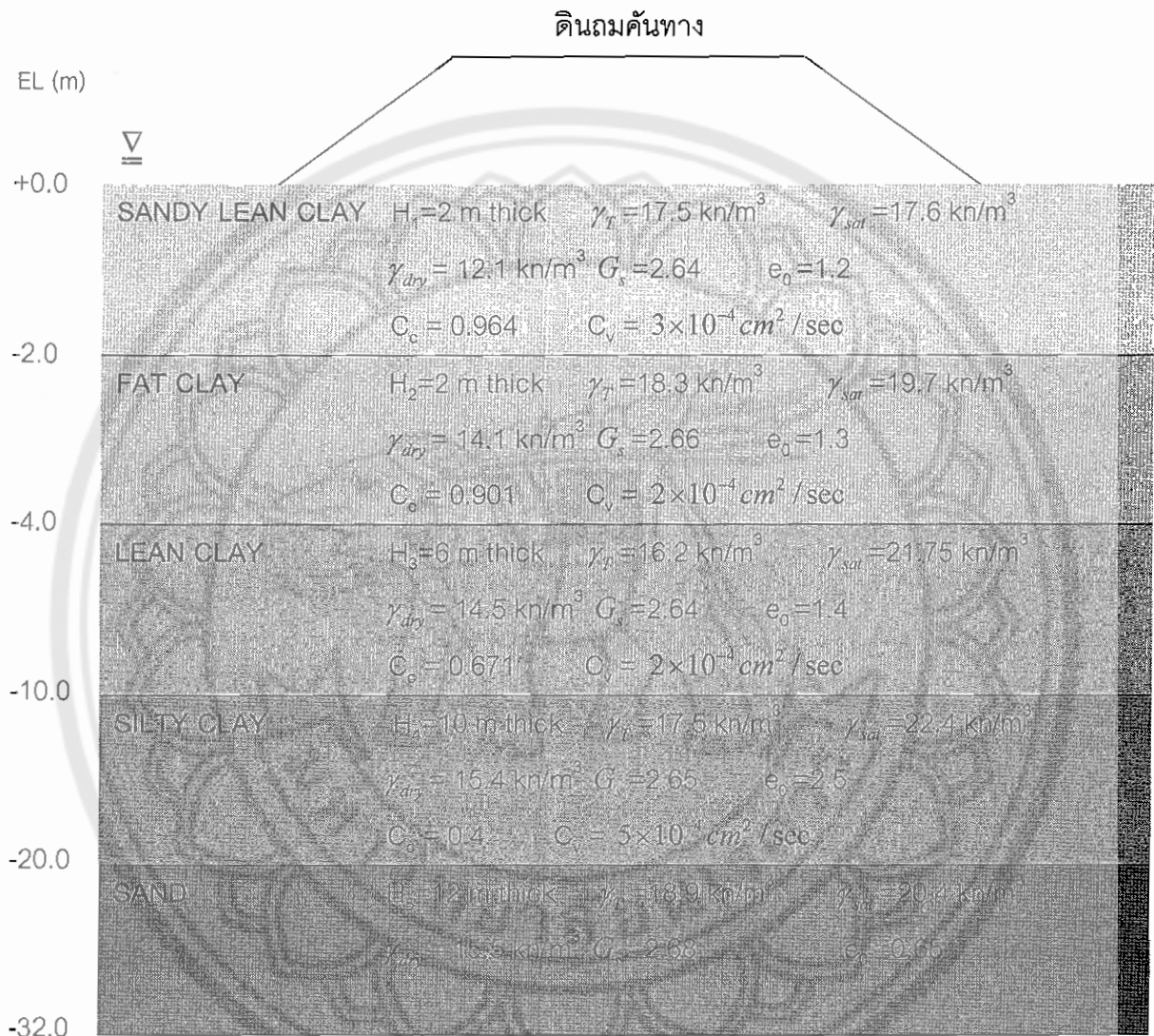
11.4.1 บริษัท พระราม 2 การโยธา จำกัด ได้รับงานโครงการขยายโรงงานผลิตท่อของบริษัทไทย เรืองอุตสาหกรรม จำกัด พื้นที่ของบริษัทตั้งอยู่ในจังหวัดสมุทรปราการ และมีพื้นที่ด้านหนึ่งติดกับทะเล วิศวกรที่ปรึกษาของโครงการได้แนะนำให้ตอก sheet pile ตลอดเขตพื้นที่ของโครงการด้านที่ติดกับทะเล เพื่อป้องกันแนวตลิ่งพัง จากการสำรวจชั้นดินบริเวณพื้นที่โครงการพบว่า



รูปที่ 11.79 ชั้นดินบริเวณพื้นที่โครงการขยายโรงงานผลิตท่อ

ในฐานะวิศวกรของบริษัท พระราม 2 การโยธา จำกัด กรุณาพิจารณาเลือกระดับน้ำทะเลที่จะใช้ในการออกแบบ sheet pile โดยที่ระดับน้ำใต้ดินบริเวณพื้นที่โครงการจะเท่ากับระดับน้ำทะเล

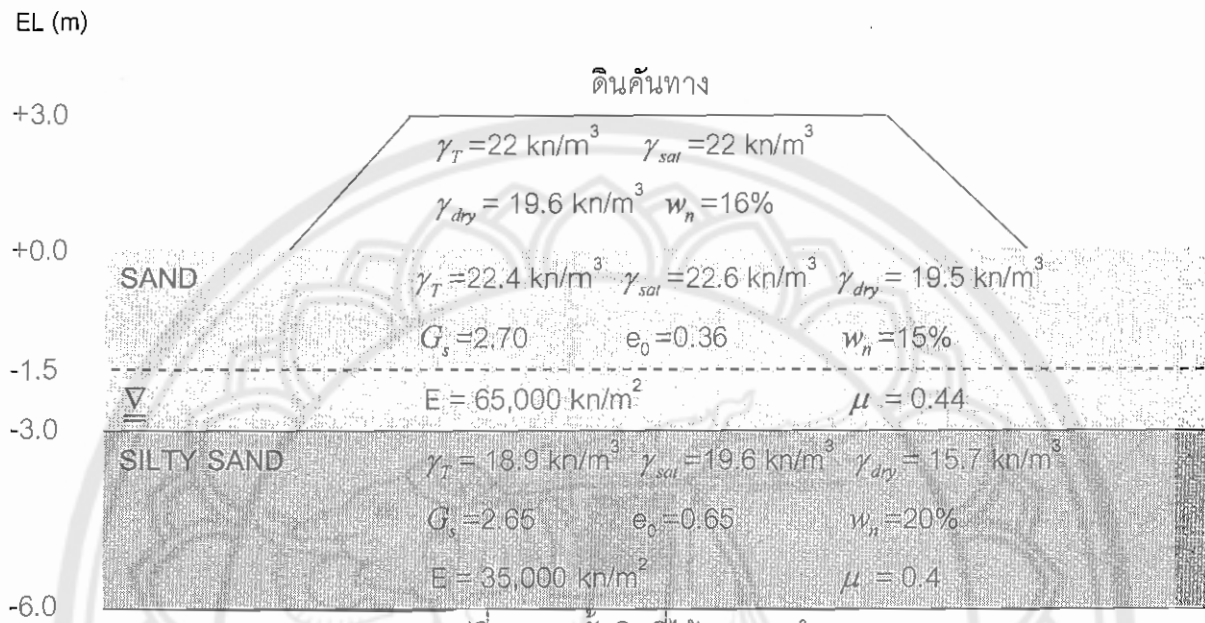
11.4.2 แขวงการทางสมุทรปราการทำการปรับปรุงเส้นทางสายบางนา-บางปะกง ระยะทางยาวประมาณ 15 กิโลเมตร โดยจะทำการก่อสร้างคันทาง (embankment) ใหม่ให้มีความสูง (รวมผิวถนน) หลังสิ้นสุดงานก่อสร้าง 1.5 m จากระดับผิวดินเดิม ทั้งนี้ผลการสำรวจชั้นดินรองรับคันทาง



รูปที่ 11.80 ชั้นดินรองรับคันทางเส้นทางสายบางนา-บางปะกง

ในฐานะวิศวกรผู้ควบคุมการสำรวจชั้นดินรองรับคันทาง กรุณาแสดงค่า total stress (σ), pore water pressure (u), และ effective stress (σ') ของดินที่ระดับความลึกต่างๆ จากข้อมูลที่ได้จากการสำรวจเพื่อนำค่าของ total stress (σ), pore water pressure (u), และ effective stress (σ') ไปใช้ในการออกแบบ (design) และหาค่าการทรุดตัว (settlement) ของคันทาง (embankment)

11.4.3 โครงการขยายทางหลวงหมายเลข 12 พิษณุโลก-หล่มสัก เพื่อขยายเส้นทางเป็นถนน 4 ช่องทางจราจร ระยะทาง 200 กิโลเมตร ซึ่งต้องถมดินสูงจากระดับดินเดิม 3 m ตลอดเส้นทาง ผลจากการสำรวจชั้นดินพบว่า

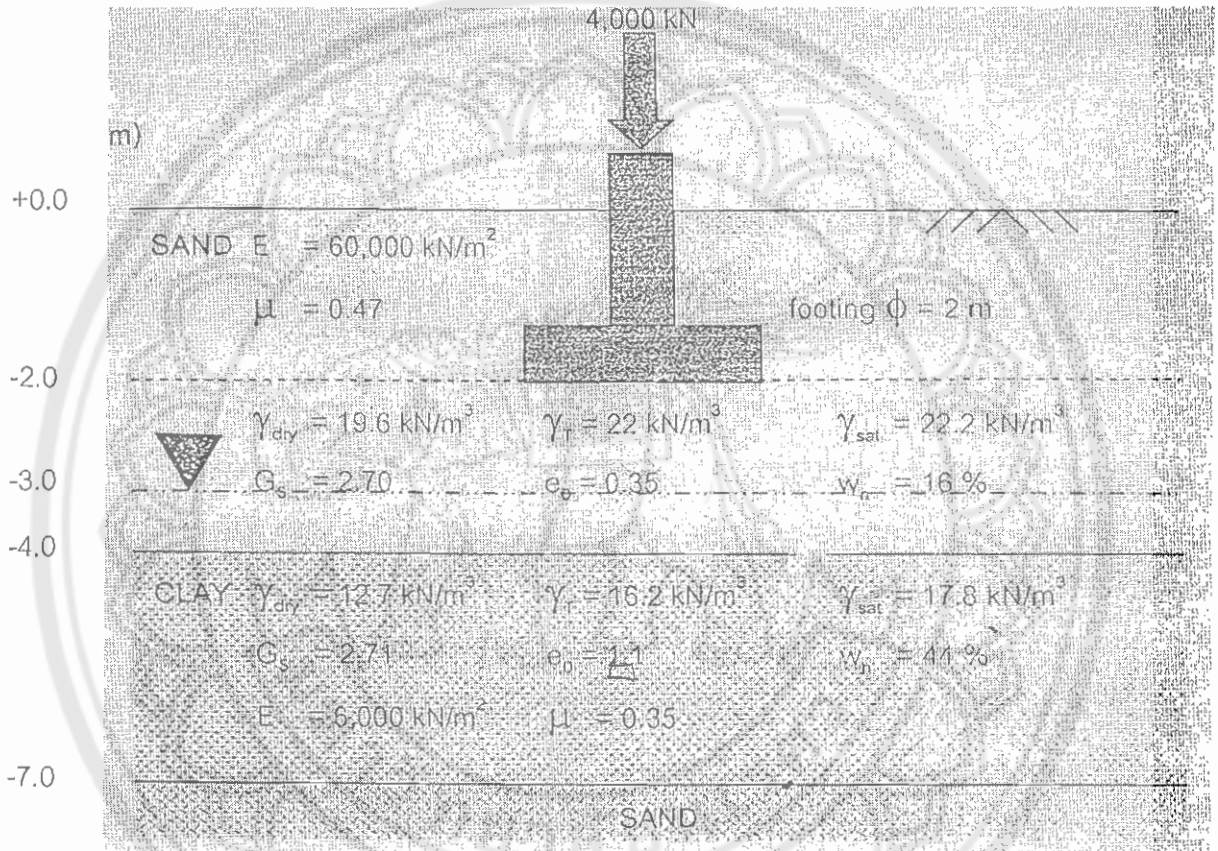


รูปที่ 11.81 ชั้นดินที่ได้จากการสำรวจ

เนื่องจากการขยายเส้นทางจราจร บางพื้นที่ถนนที่ขยายจะเข้าไปติดกับบ้านเรือนของประชาชน ประชาชนบริเวณนั้นจึงมีข้อสงสัยว่า การถมดินเพื่อขยายถนนครั้งนี้จะมีผลกระทบต่อฐานรากของบ้านเรือนของพวกเขาหรือไม่ ซึ่งจากการสำรวจของวิศวกรพบว่า ฐานรากของบ้านเรือนประชาชนที่มีความเสี่ยงมากที่สุด อยู่ที่ระดับความลึก 1.5 m จากระดับผิวดิน อยู่ห่างจาก center line ของถนน 15 m ในฐานะวิศวกรที่ปรึกษาโครงการ กรุณาตอบข้อสงสัยดังกล่าวของประชาชน

11.4.4 โครงการก่อสร้างกลุ่มอาคารพลังงานแสงอาทิตย์ของมหาวิทยาลัยนเรศวร ได้ออกแบบฐานรากตื้นเป็นฐานรากวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 m ที่ระยะลึก 2 m ผลจากการสำรวจชั้นดินบริเวณโครงการก่อสร้างพบว่า

EL (m)



รูปที่ 11.82 ชั้นดินบริเวณโครงการก่อสร้างกลุ่มอาคารพลังงานแสงอาทิตย์ของมหาวิทยาลัยนเรศวร

ในฐานะวิศวกรผู้ออกแบบฐานราก กรุณาคำนวณค่า Δp_z ได้ center ของฐานราก ที่ระยะกึ่งกลางของชั้น clay