

บทที่ 14

แรงดันดินด้านข้าง

(Lateral Earth Pressure)

14.1 เนื้อหาโดยสรุป

โครงสร้างกันดิน (Retaining Structures) ในทางวิศวกรรม จะมีทั้งโครงสร้างแบบชั่วคราว หรือ โครงสร้างแบบถาวร การออกแบบโครงสร้างกันดิน เช่น กำแพงดิน (Retaining walls) จำเป็นต้องทราบ พฤติกรรมแรงดันด้านข้าง (Lateral Earth Pressure) ที่กระทำต่อโครงสร้างกันดินนั้นๆ เพื่อให้สามารถ ออกแบบโครงสร้างกันดินได้โดยปลอดภัย ทั้งนี้แรงดันดินด้านข้างที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งได้เป็นแบบต่างๆ ตามสภาวะการเคลื่อนตัวของดินได้แก่

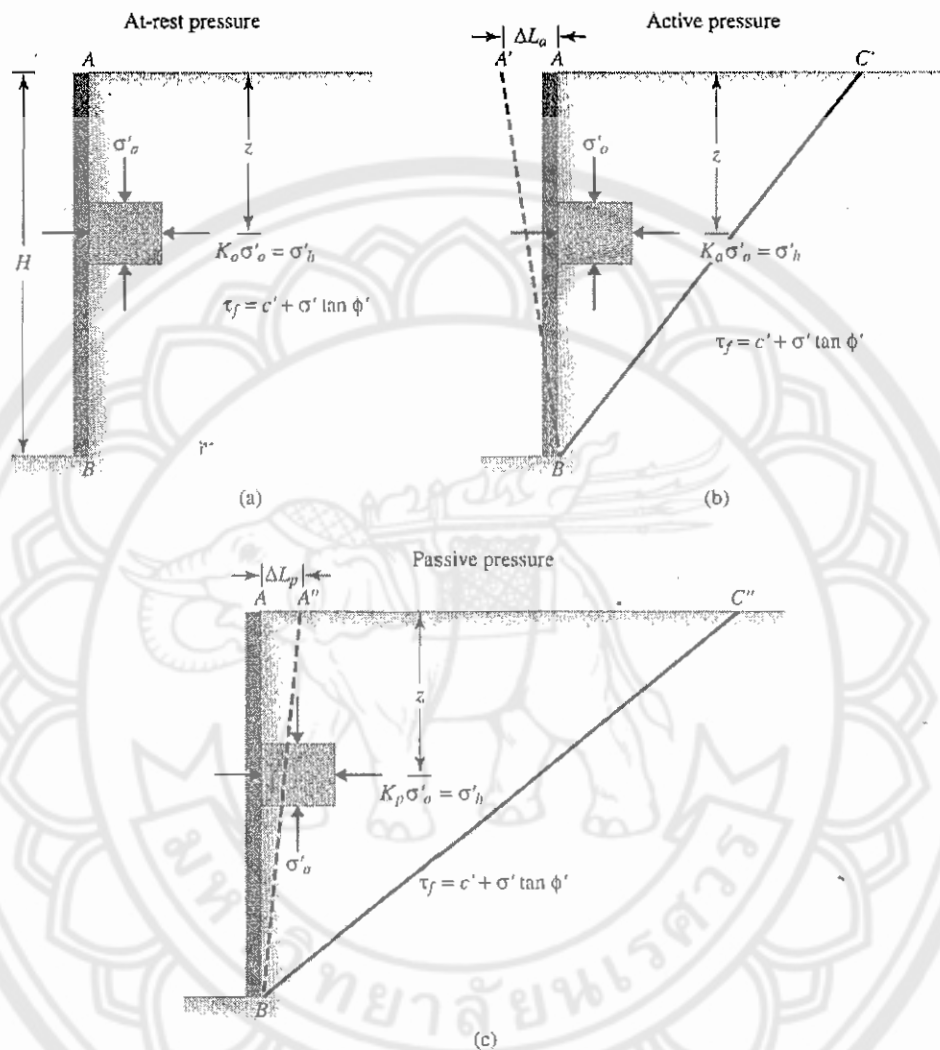
1. สภาวะสถิต (At-Rest Condition)
2. สภาวะ Active (Active Condition)
3. สภาวะ Passive (Passive Condition)

โดยแต่ละสภาวะจะมีผลทำให้เกิดแรงดันกระทำต่อโครงสร้างแตกต่างกันซึ่งจะได้อธิบายได้ใน หัวข้อต่อไปนี นอกจากนี่สิ่งที่เราจะต้องพิจารณาเสมอและละเลยไม่ได้เลย คือผลจากแรงดันโพรงของน้ำ (Pore water pressure) และผลจากการรับน้ำหนักบรรทุกด้วย โดยทฤษฎีในการคำนวณแรงดัน ด้านข้าง และการออกแบบโครงสร้างกันดินมีมาตั้งแต่หลายร้อยปีมาแล้ว ได้แก่ทฤษฎีของแรนคิน (Rankine's Theory) และทฤษฎีของคูลอมบ์ (Coulomb's Theory) ซึ่งทั้งสองทฤษฎีนี้ใช้เป็นพื้นฐาน สำหรับวิเคราะห์แรงดันด้านข้างมาจนถึงปัจจุบัน

14.1.1 แรงดันที่สภาวะสถิต สภาวะ Active และสภาวะ Passive (At-Rest, Active, and Passive Pressure)

พิจารณาดินในรูปที่ 14.1 (a) ซึ่งดินได้ถมอยู่หลังกำแพงที่ไม่มีแรงเสียดทาน (frictionless wall) ที่มีความสูง AB จากนั้นพิจารณาชั้นส่วนดินอันเล็กๆ (Soil element) ที่ความลึก z ดังนั้นแรงดัน ประสิทธิภาพในแนวตั้ง (Vertical effective pressure ; σ_v) และแรงดันประสิทธิภาพทางแนวราบ (Horizontal effective pressure ; σ_h) ซึ่งต้องสมมติให้ที่ทั้งระนาบตั้งและระนาบราบของ Soil element ไม่มีหน่วยแรงเฉือน (Shear stresses) ดังนั้นเราสามารถหาอัตราส่วนของ σ_h และ σ_v ในรูป ของ K ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$K = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_o} \quad (\text{สมการที่ 14.1})$$



รูปที่ 14.1 ค่าแรงดันกรณิ At-rest, Active, Passive (ซึ่งกำแพง AB ไม่มีแรงเสียดทาน)

พิจารณาความเป็นไปได้ของการเคลื่อนที่ของกำแพงกันดิน (Retaining wall) ได้เป็น 3 ลักษณะดังต่อไปนี้คือ

- 14.1.1.1 สภาวะ At-rest

ถ้าให้กำแพง AB ที่ไม่มีการเคลื่อนที่ (Static) ซึ่งเราจะเรียกกำแพงกันดินนี้อยู่ในสถานะที่เรียกว่า "Static Equilibrium" ในกรณีนี้ σ'_h จะเรียกว่า "At-rest pressure" โดยสามารถแสดงให้เห็นในรูปที่ 14.1 (a) ดังนี้

$$K = K_o = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_o} \quad (\text{สมการที่ 14.2})$$

โดยที่ K_o = สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างในสภาวะสถิต (At-Rest earth pressure coefficient)

- 14.1.1.2 สภาวะ Active

ถ้ากำแพงที่ไม่มีแรงเสียดทาน (frictionless wall) เคลื่อนที่โดยมีจุดหมุนอยู่ที่ด้านล่างของฐาน กำแพง ดังแสดงดังรูปที่ 14.1 (b) ซึ่งจะแสดงตามเส้น A'B' ดังนั้นหลังจากการเคลื่อนตัวจะเกิดสามเหลี่ยมของมวลดินคือ ABC' ที่อยู่ใกล้ๆ กำแพง ซึ่งเวลานี้กำแพงจะอยู่ในสภาวะ "Plastic Equilibrium" และจุดที่จะเกิดการวิบัติจากการเคลื่อนตัว (Sliding) จะอยู่ได้ระนาบ BC' ดังนั้น ณ เวลา นี้หน่วยแรงประสิทธิผลทางแนวราบ (horizontal effective stress ; σ'_h) จะเท่ากับ σ'_a ซึ่งเรียกว่า "Active pressure" ดังนี้

$$K = K_a = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_o} = \frac{\sigma'_a}{\sigma'_o} \quad (\text{สมการที่ 14.3})$$

โดยที่ K_a = สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างในสภาวะActive (Active earth pressure coefficient)

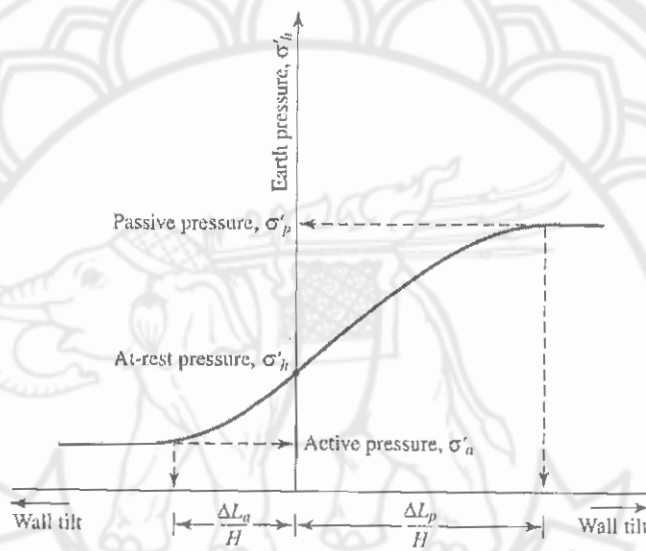
- 14.1.1.3 สภาวะ Passive

ถ้ากำแพงที่ไม่มีแรงเสียดทาน (frictionless wall) เคลื่อนที่โดยมีจุดหมุนอยู่ที่ด้านล่างของฐาน กำแพงดังแสดงดังรูปที่ 14.1 (c) ซึ่งแสดงตามเส้น A"B' ดังนั้น หลังจากการเคลื่อนที่ที่เกิดสามเหลี่ยมของมวลดินคือ ABC" ซึ่งสถานะนี้จะอยู่ที่สถานะ "plastic Equilibrium" เช่นกัน และจุดที่เกิดการวิบัติการเคลื่อนตัว (sliding) จะอยู่บนระนาบ BC" ดังนั้น ณ จุดนี้หน่วยแรงเค้นประสิทธิผลทางแนวราบ (Horizontal effective stress ; σ'_h) จะเท่ากับ σ'_p ซึ่งเรียกว่า "Passive pressure" โดยที่

$$K = K_p = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_o} = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_o} \quad (\text{สมการที่ 14.4})$$

โดยที่ K_p = สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างในสภาวะPassive (Passive earth pressure coefficient)

และจากรูปที่ 14.2 แสดงถึงผลของการเคลื่อนตัวของกำแพงต่อปริมาณแรงดันด้านข้าง ซึ่งค่า $\Delta L_a/H$ (ΔL_a = ความยาวจาก AA' จากรูปที่ 14.1 (b)) และ $\Delta L_p/H$ (ΔL_p = ความยาวจาก AA'' จากรูปที่ 14.1 (c)) จะเห็นได้ว่า ในสภาวะที่กำแพงไม่มีการเคลื่อนตัว แรงดันที่เกิดขึ้นจะเรียกว่า At-rest pressure (σ'_h) ส่วนสภาวะที่กำแพงเคลื่อนตัวออกจากดินที่มีค่าเท่ากับ $\Delta L_a/H$ แรงดันด้านข้างจะลดลงจนถึงค่ามากที่สุดที่ดินจะเกิดการวิบัติพอดี จะเรียกแรงดัน ณ จุดนี้ว่า Active pressure (σ'_a) และแรงดันที่เกิดจากกำแพงเคลื่อนตัวเข้าหาดินเท่ากับ $\Delta L_p/H$ ซึ่งจะถึงจุดสูงสุดที่ดินจะรับได้เรียกแรงดันนี้ว่า Passive pressure (σ'_p)



รูปที่ 14.2 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลง Magnitude ของแรงดันดินด้านข้างกับ Wall tilt

ดังนั้นจากรูปที่ 14.2 เราสามารถหาค่า $\Delta L_a/H$ และค่า $\Delta L_p/H$ ของดินหลายๆ ชนิดได้ตามตารางที่ 14.1

ตารางที่ 14.1 แบ่งแยกชนิดของดินตามค่า $\Delta L_a/H$ และค่า $\Delta L_p/H$

| Soil type | $\Delta L_a/H$ | $\Delta L_p/H$ |
|------------|----------------|----------------|
| Loose sand | 0.001–0.002 | 0.01 |
| Dense sand | 0.0005–0.001 | 0.005 |
| Soft clay | 0.02 | 0.04 |
| Stiff clay | 0.01 | 0.02 |

14.1.2 แรงดันดินด้านข้างที่กรณี At-Rest (At-Rest Lateral Earth Pressure)

สามารถแบ่งออกได้เป็นหลายกรณีดังต่อไปนี้

- 14.1.2.1 แรงดันดินกรณีสภาวะสถิต (Earth Pressure At-rest)

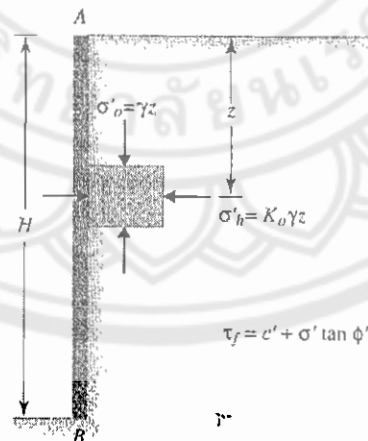
หลักการในการหาแรงดันดินกรณี At-Rest เราสามารถหาได้จากค่าจำกัดความของสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างกรณีสภาวะสถิต (At-Rest earth pressure coefficient; K_0) ซึ่งจากรูปที่ 14.3 ได้แสดงถึงกำแพงกันดิน AB ในดินแห้ง (Dry Soil) ที่มีหน่วยน้ำหนักคือ γ โดยที่กำแพงไม่มีการเคลื่อนที่ (Static) ดังพื้นที่ความลึก z จะได้

หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Vertical effective stress) = $\sigma'_0 = \gamma z$

หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ (Horizontal effective stress) = $\sigma'_h = K_0 \gamma z$

ดังนั้น

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_0} = \text{At-Rest earth pressure coefficient}$$



รูปที่ 14.3 แรงดันดินกรณี At-rest

สำหรับดินที่มีเนื้อหยาบ (coarse-grained soil) ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างกรณีสถิต (Coefficient of earth pressure at rest) สามารถประมาณได้จากการความสัมพันธ์ดังนี้ (จาก Jaky (1944))

$$K_0 = 1 - \sin \phi' \quad (\text{สมการที่ 14.5})$$

โดยที่ ϕ' = มุมเสียดทานระบายน้ำ (drained friction angle)

แต่อย่างไรก็ตามสมการที่ 14.5 นี้ เหมาะสมกับดินด้านหลังก้ำแพงที่เป็นชนิดดินทรายหลวม (loose sand) เท่านั้น แต่ถ้ากรณีดินทรายแน่น (dense sand) เป็นดินถมด้านหลังก้ำแพง ค่าของสมการในสมการที่ 14.5 จะเปลี่ยนเป็น

$$K_0 = (1 - \sin \phi) + \left[\frac{\gamma_d}{\gamma_{d(\min)}} - 1 \right] \quad (\text{สมการที่ 14.6})$$

โดยที่ γ_d = หน่วยน้ำหนักแห้งของดินทรายที่บดอัดด้านหลังก้ำแพง
(actual compacted dry unit weight of the sand behind the wall)

$\gamma_{d(\min)}$ = หน่วยน้ำหนักแห้งของดินทรายในสถานะหลวมที่สุด
(dry unit weight of the sand in the loose state)

สำหรับดินเม็ดละเอียด (fine-grained) ชนิดดินที่ถูกอัดแน่นแบบปกติ (Normally consolidated soils) มีคนเสนอสมการในการหา K_0 คือ Massarsch (1979) คือ

$$K_0 = 0.44 + 0.42 \left[\frac{PI(\%)}{100} \right] \quad (\text{สมการที่ 14.7})$$

สำหรับดินชนิดถูกอัดแน่นเกินปกติ (Over-consolidated clay) ค่า K_0 สามารถประมาณได้คือ

$$K_{0(\text{overconsolidated})} = K_{0(\text{normally consolidated})} = \sqrt{OCR} \quad (\text{สมการที่ 14.8})$$

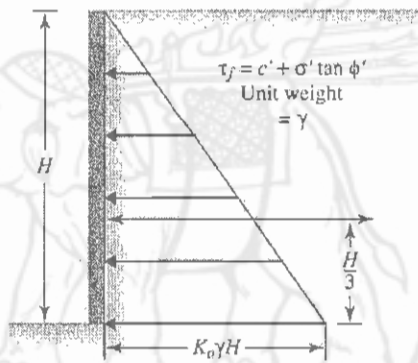
โดยที่ OCR = อัตราส่วนอัดแน่นเกินปกติ (over-consolidation ratio) ซึ่งสามารถหาได้จาก การหดตัวของดิน (compressibility of soil) ดังสมการคือ

$$OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} \quad (\text{สมการที่ 14.9})$$

ในรูปที่ 14.4 แสดงถึงการกระจายตัวของแรงดันดินด้านข้างกรณีสถิต (Lateral earth pressure at rest) บนกำแพงที่มีความสูงเท่ากับ H ซึ่งดินด้านหลังกำแพงเป็นดินแห้งที่มีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ γ ดังนั้น แรงทั้งหมดต่อหน่วยความยาวของกำแพง (P_0) ซึ่งสามารถหาได้จากพื้นที่ของ pressure diagram ดังนั้น

$$P_0 = \frac{1}{2} K_0 \gamma H^2 \quad (\text{สมการที่ 14.10})$$

โดยแรงนี้จะกระทำที่จุดศูนย์ถ่วงของรูปการกระจายของแรงดันคือที่ระยะ $\frac{H}{3}$ จากข้างล่างของกำแพง



รูปที่ 14.4 การกระจายตัวของแรงดันดินด้านข้างกรณี At-rest บนกำแพง

- 14.1.2.2 แรงดันดินในสถานะสถิตสำหรับดินที่บางส่วนแช่น้ำ (Earth Pressure at Rest for Partially Submerged Soil)

จากรูปที่ 14.5 (a) ได้แสดงถึงกำแพงความสูงเท่ากับ H ซึ่งมีระดับน้ำใต้ดิน (groundwater table) ที่อยู่ใต้ความลึกเท่ากับ H_1 ใต้ระดับผิวดิน (ground surface) ซึ่งระดับน้ำจะสัมผัสกับด้านข้างของกำแพงตลอดความยาว ดังนั้นสำหรับความลึก $z \leq H_1$ แรงดันดินด้านข้างกรณีสถิต (lateral earth pressure at rest) สามารถหาได้จากสมการ $\sigma'_h = K_0 \gamma_z$ ซึ่งการกระจายตัวของแรงดันดินเป็นไปตามรูปสามเหลี่ยม ACE ซึ่งแสดงให้เห็นในรูป 14.5 (a)

แต่อย่างไรก็ตามถ้าความลึก $z \geq H_1$ (ใต้ระดับน้ำใต้ดิน) แล้ว แรงดันบนกำแพงสามารถหาได้จากหน่วยแรงประสิทธิผล (effective stress) และหน่วยแรงดันที่เกิดจากน้ำ (Pore water pressure) โดยจะสามารถหาได้จากสมการ

หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (effective vertical pressure) $= \sigma'_0 = \gamma H_1 + \gamma'(z - H_1)$
 (สมการที่ 14.11)

โดยที่ $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w =$ หน่วยน้ำหนักประสิทธิผลของดิน (effective unit weight of soil)

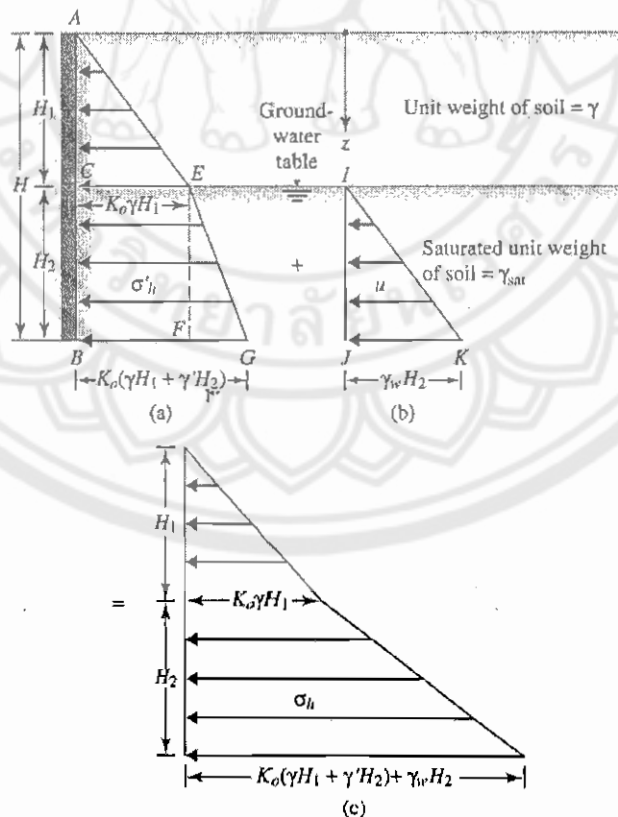
ดังนั้นแรงดันดินด้านข้างประสิทธิผล (effective lateral pressure) กรณีสถิต (At-rest) คือ

$$\sigma'_h = K_0 \sigma'_0 = K_0 [\gamma H_1 + \gamma'(z - H_1)] \quad \text{(สมการที่ 14.12)}$$

ซึ่งค่า σ'_h ที่ความลึกนี้สามารถแสดงได้จากรูป CEGB ในรูปที่ 14.5 (a) โดยจะได้แรงดันดินด้านข้างที่เกิดจากน้ำ (pore water) สามารถหาได้จาก

$$u = \gamma_w(z - H_1) \quad \text{(สมการที่ 14.13)}$$

ซึ่งค่า u ที่ความลึกใดๆ จะแสดงได้จากรูปที่ 14.5 (b)



รูปที่ 14.5 การกระจายตัวของแรงดันดินด้านข้างกรณี At-rest ที่ดินบางส่วนแช่น้ำ

ดังนั้น ผลรวมของแรงดันดินด้านข้าง (total lateral pressure) จากดิน (earth) และน้ำ (water) ที่ทุกๆ ความลึก $z \geq H_1$ สามารถหาได้โดย

$$\sigma_h = \sigma'_h + u = K_0 [\gamma H_1 + \gamma'(z - H_1)] + \gamma_w (z - H_1) \quad (\text{สมการที่ 14.14})$$

ซึ่งแรงต่อหน่วยความยาวของกำแพงสามารถหาได้จาก ผลรวมของพื้นที่ของการกระจายตัวของแผนภาพของความดัน (Pressure Diagram) ในรูปที่ 14.5 (a) และรูปที่ 14.5 (b) ซึ่งจะเท่ากับพื้นที่ที่แสดงในรูป 14.5 (c) นั่นก็คือ

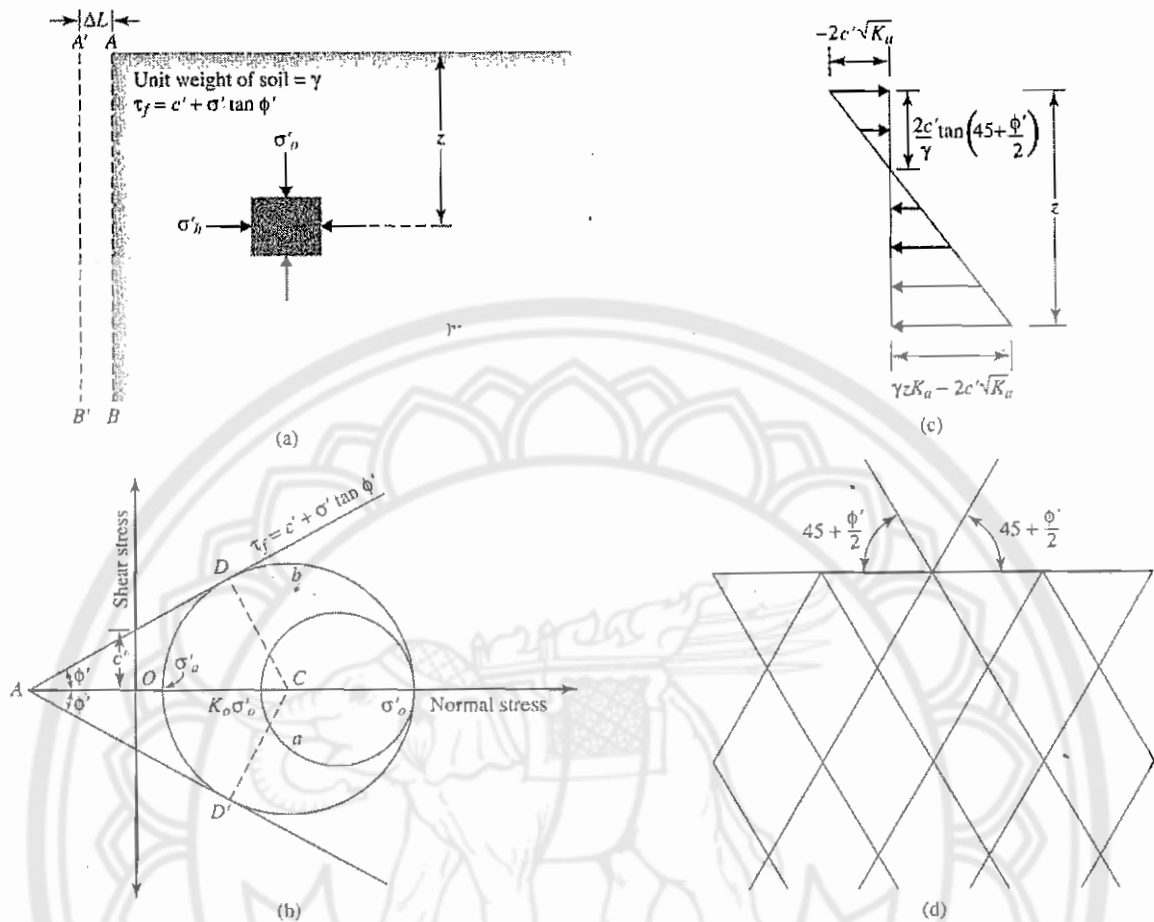
$$P_0 = \underbrace{\frac{1}{2} K_0 \gamma H_1^2}_{\text{Area ACE}} + \underbrace{K_0 \gamma H_1 H_2}_{\text{Area CEFB}} + \underbrace{\frac{1}{2} (K_0 \gamma' + \gamma_w) H_2^2}_{\text{Area EFG and Area IJK}} \quad (\text{สมการที่ 14.15})$$

14.1.3 แรงดันดินด้านข้างของ Rankine (Rankine's Lateral Earth Pressure)

โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณีคือ Active และ Passive ซึ่งสามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้

- 14.1.3.1 ทฤษฎีของ Rankine ของแรงดันดินแบบ Active (Rankine's Theory of Active Pressure)

ในกรณีที่ดินอยู่ในสถานะพลาสติก (plastic equilibrium in soil) ซึ่งจากการพิจารณามวลดิน กรณีที่เกิดการวิบัติ Rankine (1857) ได้เสนอเงื่อนไขของหน่วยแรง (stress condition) ของดินในกรณี Plastic equilibrium นั่นคือหน่วยแรงเชื่อมแน่น (cohesion) เป็นศูนย์และมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันตลอด (homogeneous) และพิจารณาให้กำแพงมีผิวสัมผัสตรงตั้งและไม่มีแรงเสียดทานระหว่างกำแพงกับดิน



รูปที่ 14.6 แรงดันดินด้านข้างกรณี Active ของ Rankine

จากรูปที่ 14.6 (a) แสดงถึงมวลดินที่อยู่หลังกำแพง AB โดยมีความยาว AB มีความสูงไม่มีขอบเขต (infinite depth) ดังนั้นหน่วยแรงหลักประสิทธิผลในแนวดิ่งและหน่วยแรงหลักประสิทธิผลในแนวราบ (vertical and horizontal effective principal stress) บนมวลดิน (soil mass) ที่ความลึก z ซึ่งก็คือ σ'_o และ σ'_h โดยเราสามารถหาได้จากหัวข้อที่ผ่านมา ดังนั้นถ้ากำแพงไม่เคลื่อนที่ค่า σ'_h จะเท่ากับ $K_o \sigma'_o$

แต่ในเงื่อนไขของหน่วยแรง (stress condition) ในดินชั้นเล็กๆ (soil element) สามารถหาได้จากวงกลมของ Mohr รูป a ซึ่งแสดงในรูปที่ 14.6 (b) อย่างไรก็ตามถ้ากำแพงเคลื่อนที่ออกจากมวลดิน (move away from soil mass) จะทำให้ค่าหน่วยแรงเค้นหลักในแนวราบ (horizontal principal stress) มีค่าลดลง ซึ่งที่สภาวะประลัย (Ultimately state) จะสามารถหาค่าหน่วยแรงหลักในแนวราบจากวงกลมของ Mohr รูป b นั่นคือที่สภาวะ plastic equilibrium และที่จุดวิบัติของมวลดินนั่นเอง โดยในสภาวะที่พูดมาทั้งหมดนี้จะเรียกว่า "สภาวะ Active ของ Rankine (Rankine's active state) ซึ่งแรงดันประสิทธิผล (effective pressure ; σ'_a) บนระนาบดิ่ง (vertical plane) ซึ่งก็คือระนาบหลัก

(principal plane) ก็จะเรียกว่า "แรงดันดินของ Rankine กรณี Active (Rankine's active earth pressure) ซึ่งจะสามารถแสดง σ'_a ในรูปของ γ, z, c' , และมุม ϕ' จากรูปที่ 14.6 (b) ได้ดังต่อไปนี้

$$\text{ถ้า } \sin \phi' = \frac{CD}{AC} = \frac{CD}{AD + DC} \quad (\text{สมการที่ 14.16})$$

แต่ $CD =$ รัศมีของวงกลมวิบัติ (วงกลม b) $= \frac{\sigma'_o - \sigma'_a}{2}$

$$AD = c' \cot \phi'$$

และ

$$DC = \frac{\sigma'_o + \sigma'_a}{2}$$

ดังนั้นจากสมการที่ 14.16

$$\sin \phi' = \frac{\frac{\sigma'_o - \sigma'_a}{2}}{c' \cot \phi' + \frac{\sigma'_o + \sigma'_a}{2}}$$

จะได้ $c' \cot \phi' + \frac{\sigma'_o + \sigma'_a}{2} \sin \phi' = \frac{\sigma'_o - \sigma'_a}{2}$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\sigma'_a = \sigma'_o \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'} - 2c' \frac{\cos \phi'}{1 + \sin \phi'} \quad (\text{สมการที่ 14.17})$$

แต่ $\sigma'_o =$ แรงดันแนวตั้งประสิทธิผลจากดินด้านบน (Vertical effective overburden pressure)

$$\text{และ } \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'} = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi'}{2} \right)$$

$$\text{และ } \frac{\cos \phi'}{1 + \sin \phi'} = \tan \left(45 - \frac{\phi'}{2} \right)$$

ดังนั้นสมการที่ 14.17 สามารถแปลงได้เป็นสมการต่อไปนี้

$$\sigma'_a = \gamma z \tan^2 \left(45 - \frac{\phi'}{2} \right) - 2c' \tan \left(45 - \frac{\phi'}{2} \right) \quad (\text{สมการที่ 14.18})$$

ซึ่งค่า σ'_a ทุกๆ ความลึกซึ่งแสดงตามรูปที่ 14.6 (c) สำหรับดินที่ไม่มีคุณสมบัติเชื่อมแน่น (Cohesionless soils) ซึ่งค่า $c' = 0$ ดังนั้นจะได้

$$\sigma'_a = \sigma'_o \tan^2 \left(45 - \frac{\phi'}{2} \right) \quad (\text{สมการที่ 14.19})$$

ค่าอัตราส่วนระหว่าง σ'_a กับ σ'_o เราเรียกว่า "สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างกรณี Active ของ Rankine (coefficient of Rankine's active earth pressure)" ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$K_a = \frac{\sigma'_a}{\sigma'_o} = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi'}{2} \right) = \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'} \quad (\text{สมการที่ 14.20})$$

จากรูปที่ 14.6 (b) เราสามารถเห็นระนาบวิบัติ (failure planes) ของดินซึ่งจะเท่ากับ $\pm \left(45 - \frac{\phi'}{2} \right)$ ซึ่งก็คือ มุมที่กระทำกับระนาบหลักมากที่สุด (major principal plane) ซึ่งก็คือแนวราบ (horizontal) นั่นเอง ซึ่งเราเรียกระนาบนี้ว่า "slip planes" โดยแสดงตามรูปที่ 14.6 (d)

อีกอย่างที่สำคัญสำหรับการนำไปใช้สำหรับค่า σ'_a จะคล้ายคลึงบนพื้นฐานของพารามิเตอร์ของหน่วยแรงเฉือนรวม (total stress shear strength parameters) ซึ่งก็คือ $\tau_f = c + \sigma \tan \phi$ ดังที่กล่าวมาแล้ว ดังนั้นสำหรับกรณีนี้จะได้

$$\sigma_a = \gamma z \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) - 2c \tan \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (\text{สมการที่ 14.21})$$

- 14.1.3.2 ทฤษฎีของ Rankine ของแรงดันดินแบบ Passive (Rankine's Theory of Passive Pressure)

ทฤษฎีของ Rankine กรณีสภาวะ Passive เราสามารถแสดงให้เห็นดังรูปที่ 14.7 AB คือ กำแพงที่ไม่มีรอยยึดที่มีความลึกไม่มีสิ้นสุด (infinite depth) ดังแสดงตามรูปที่ 14.7 (a) ในกรณีสภาวะแรงเค้นเริ่มต้น (Initial stress condition) บนชั้นส่วนของดินเล็กๆ สามารถแสดงให้เห็นในวงกลมของ Mohr รูป a ดังแสดงในรูปที่ 14.7 (b)

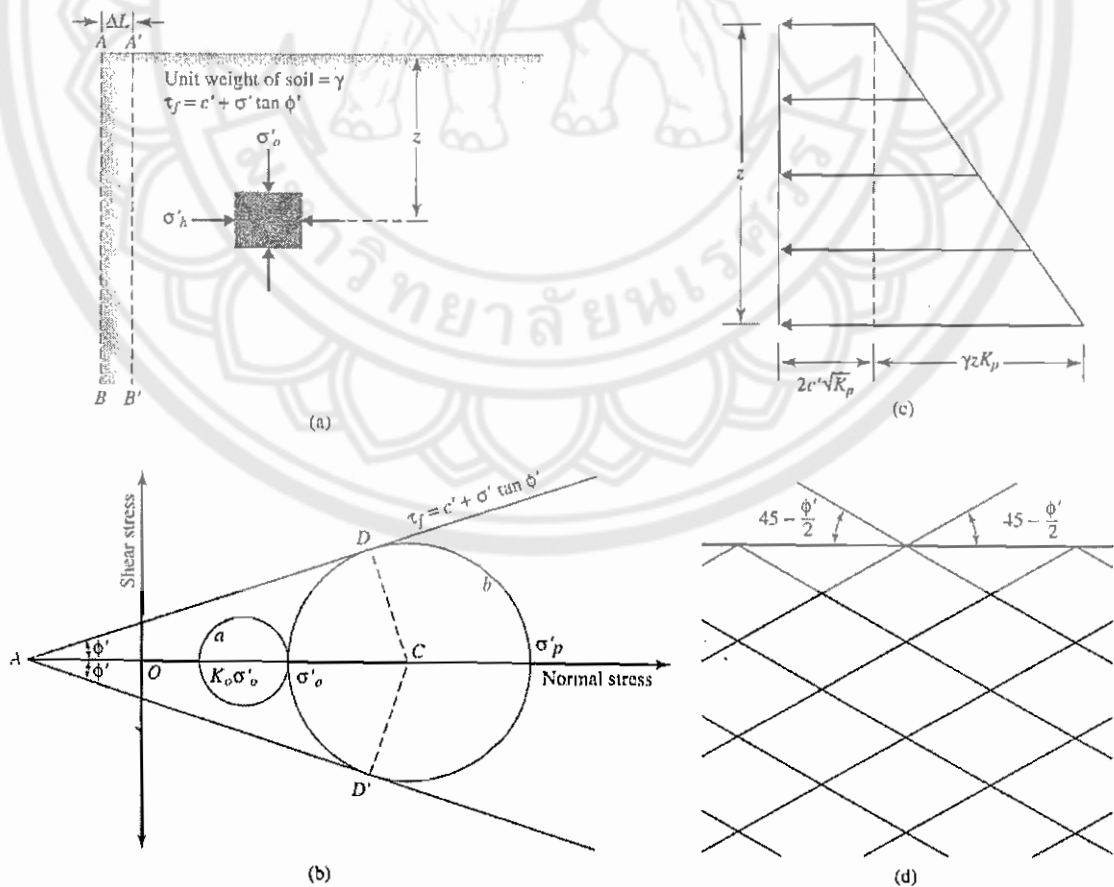
ถ้ากำแพงถูกกดด้วยมวลดิน (Pushed into soil mass) หรือเคลื่อนที่เข้าหามวลดิน ค่าหน่วยแรงหลักประสิทธิผล (effective principal stress ; σ'_2) จะเพิ่มขึ้น โดยที่สภาวะประลัย (Ultimately) จะสามารถหาค่าหน่วยแรงดันหลักในแนวราบจากวงกลม Mohr รูป b ซึ่ง ณ เวลานี้จะเรียกว่าดินถึงจุดวิบัติ ซึ่งสภาวะนี้จะเรียกว่า "สถานะ Passive ของ Rankine (Rankine's passive state)" ดังนั้นค่าแรงดันดินด้านข้าง (Lateral earth pressure ; σ'_p) คือหน่วยแรงหลักสูงสุด (major principal stress) เราจะเรียกว่า "แรงดันดินด้านข้างกรณี Passive ของ Rankine (Rankine's passive earth pressure)" จากรูปที่ 14.7 (b) สามารถแสดงได้โดย

$$\sigma'_p = \sigma'_0 \tan^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right) + 2c' \tan \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right)$$

$$= \gamma z \tan^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right) + 2c' \tan \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right)$$

(สมการที่ 14.22)

ซึ่งวิธีการหาสมการที่ 14.22 สามารถหาได้จากการหาในกรณี Active ของ Rankine



รูปที่ 14.7 แรงดันดินด้านข้างกรณี Passive ของ Rankine

จากรูปที่ 14.7 (c) แสดงถึงค่าแรงดัน Passive (passive pressure) ที่ความลึก ณ จุดใดๆ สำหรับกรณีที่ดินไม่มีความเชื่อมแน่น (cohesionless soil ; $c' = 0$) แล้ว

$$\sigma'_p = \sigma'_o \tan^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right)$$

หรือ

$$\frac{\sigma'_p}{\sigma'_o} = K_p = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right) = \left(\frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \right) \quad (\text{สมการที่ 14.23})$$

โดยที่ K_p (คืออัตราส่วนของหน่วยแรงประสิทธิผล) ซึ่งจากสมการข้างต้นเราจะเรียกว่า "สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างกรณี Passive ของ Rankine (coefficient of Rankine's passive earth pressure)

จากจุด D ถึง D' บนวงกลมวิถีคือวงกลม b (แสดงได้ในรูปที่ 14.7 (b) ซึ่ง slip planes ในดินในสถานะ Passive ของ Rankine ซึ่งสามารถสร้างได้จาก $\pm \left(45 - \frac{\phi'}{2} \right)$ ซึ่งทำมุมกับระนาบหลักน้อยที่สุด (minor principal plane) ซึ่งก็คือแนวราบ (horizontal) นั่นเอง โดยรูปที่ 14.7 (d) แสดงถึงการกระจายตัวของ slip planes ในมวลดิน

14.1.4 แผนภาพสำหรับการกระจายตัวของแรงดันดินด้านข้างของกำแพงกันดิน (Diagrams for Lateral Earth Pressure Distribution against Retaining Walls)

แผนภาพของการกระจายตัวของแรงดันดินด้านข้างแบ่งออกเป็นหลายกรณีดังต่อไปนี้

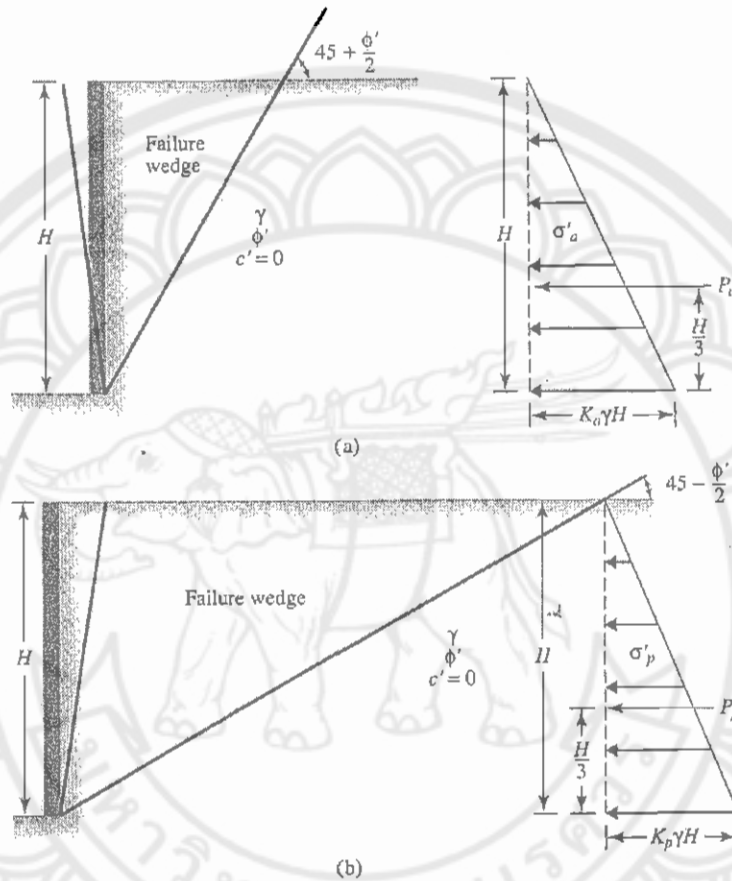
- 14.1.4.1 กรณีดินถมด้านหลังเป็นแบบไม่มีแรงเชื่อมแน่นและผิวดินถมเป็นแนวราบ (Backfill -- Cohesionless Soil with Horizontal Ground Surface)

- 14.1.4.1.1 กรณี Active (Active Case)

ในรูปที่ 14.8 (a) แสดงถึงกำแพงกันดินซึ่งมีดินถมเป็นแบบดินที่ไม่มีแรงเชื่อมแน่น (Cohesionless soil backfill) และผิวดินถมเป็นแนวราบ (horizontal ground surface) ซึ่งหน่วยน้ำหนัก (unit weight) และมุมเสียดทาน (angle of friction) คือ γ และ ϕ' ตามลำดับ

สำหรับสถานะ Active ของ Rankine ค่าแรงดันดินในทุกๆ ความลึก z ของกำแพงกันดินสามารถหาได้จากสมการที่ 14.24 คือ

$$\sigma'_a = K_a \gamma z; c' = 0 \quad (\text{สมการที่ 14.24})$$



รูปที่ 14.8 การกระจายตัวของแรงดันหลัง Retaining Wall ที่มีดินถมเป็นดินแบบไม่มีความเชื่อมแน่นและระนาบของการถมเป็นแนวราบ

โดยที่ σ'_a จะเพิ่มขึ้นเป็นสมการเส้นตรงในความลึกที่เพิ่มขึ้น และที่ด้านล่างของกำแพง จะได้

$$\sigma'_a = K_a \gamma H \quad (\text{สมการที่ 14.25})$$

ดังนั้นแรงกระทำรวมต่อหน่วยความยาวของกำแพงจะเท่ากับพื้นที่ของแผนภาพแรงดัน ดังนี้

$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 \quad (\text{สมการที่ 14.26})$$

- 14.1.4.1.2 กรณี Passive (Passive case)

จะได้รับการกระจายตัวของแรงดันด้านข้างของกำแพงที่มีความสูง H สำหรับสถานะ Passive ของ Rankine สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 14.8 (b) ซึ่งแรงดันด้านข้างที่ความลึก z ใดๆ จากสมการที่ 14.24 จะได้ $c' = 0$ แล้ว

$$\sigma'_p = K_p \gamma H \quad (\text{สมการที่ 14.27})$$

และแรงกระทำรวมต่อหน่วยความยาวของกำแพงคือ

$$P_p = \frac{1}{2} K_p \gamma H^2 \quad (\text{สมการที่ 14.28})$$

- 14.1.4.2 กรณีดินถมด้านหลังเขื่อนบางส่วนและเป็นดินแบบไม่มีแรงเชื่อมแน่น โดยดินรับแรงกระทำ q (Backfill – Partially Submerged Cohesionless Soil Supporting a Surcharge)

- 14.1.4.2.1 กรณี Active (Active case)

ในรูปที่ 14.9 (a) แสดงถึงดินหลังกำแพงกันดินที่ไม่มีแรงเสียดทาน (Frictionless retaining wall) ที่มีความสูง H และดินถมเป็นดินชนิดที่ไม่มีแรงเชื่อมแน่น โดยที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ความลึกเท่ากับ H, ได้ผิวดินประสิทธิผลกรณี Active ในทุกๆ ความลึกสามารถหาได้โดย

$$\sigma'_a = K_a \sigma'_0 \quad (\text{สมการที่ 14.29})$$

โดยที่ σ'_0 และ σ'_a = แรงดันแนวตั้งประสิทธิผล (effective vertical pressure) และ แรงดันดินด้านข้างกรณี Active (Active Lateral pressure)

ดังนั้นที่ความลึก $z = 0$ จะได้

$$\sigma_0 = \sigma'_0 = q \quad (\text{สมการที่ 14.30})$$

และ

$$\sigma'_a = K_a q \quad (\text{สมการที่ 14.31})$$

ดังนั้นที่ความลึก $z = H_1$ จะได้

$$\sigma'_0 = (q + \gamma H_1) \quad (\text{สมการที่ 14.32})$$

และ

$$\sigma'_a = K_a (q + \gamma H_1) \quad (\text{สมการที่ 14.33})$$

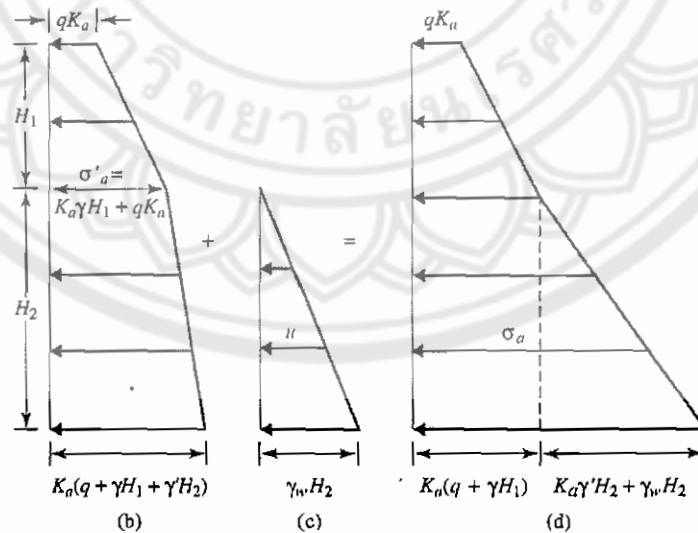
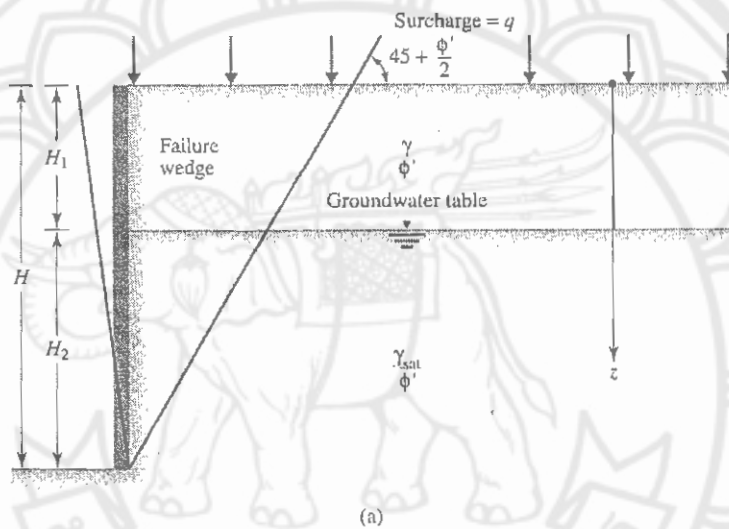
ดังนั้นที่ความลึก $z = H$ จะได้

$$\sigma'_0 = (q + \gamma H_1 + \gamma' H_2) \quad (\text{สมการที่ 14.34})$$

และ

$$\sigma'_a = K_a (q + \gamma H_1 + \gamma' H_2) \quad (\text{สมการที่ 14.35})$$

โดยที่ $\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w$ ซึ่งค่า ที่ความลึกใดๆ แสดงให้เห็นในรูปที่ 14.9 (b)



รูปที่ 14.9 การกระจายตัวของแรงดันดินกรณี Active ของ Rankine ที่กระทำ กับ Retaining Wall ที่มีดินถมด้านหลังเป็นดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น และมีแรง q มากระทำด้วย

ดังนั้นแรงดันด้านข้างบนกำแพงจากน้ำในโพรง (pore water) ที่จุด $z = 0$ และ H_1 จะเท่ากับ 0 แต่ถ้า $z > H_1$ แรงดันน้ำจากโพรงจะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงในความลึกใดๆ (แสดงตามรูปที่ 14.9 (c) ดังนั้นที่ $z = H$ แล้ว

$$u = \gamma_w H_2$$

ดังนั้นผลรวมของแผนภาพของแรงดันด้านข้าง (แสดงในรูป 14.9 (a)) ก็คือผลรวมของแผนภาพแรงดันในรูปของรูปที่ 14.9 (b) และรูปที่ 14.9 (c) ดังนั้นผลรวมของแรงในกรณี Active ต่อหน่วยความยาวของกำแพง นั่นก็คือพื้นที่ของผลรวมของแผนภาพแรงดัน ดังนั้น

$$P_a = K_a qH + \frac{1}{2} K_a \gamma H_1^2 + K_a \gamma H_1 H_2 + \frac{1}{2} (K_a \gamma' + \gamma_w) H_2^2 \quad (\text{สมการที่ 14.36})$$

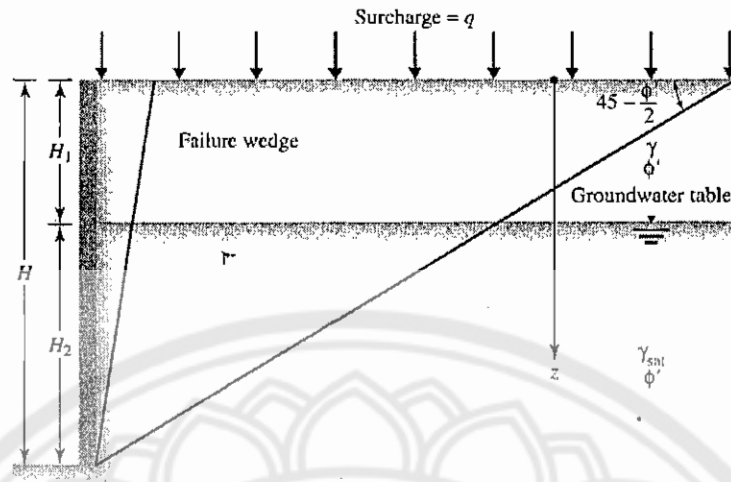
- 14.1.4.2.2 กรณี Passive (Passive Case)

ในรูปที่ 14.10 (a) แสดงถึงกำแพงกันดินเหมือนกับในรูปที่ 14.9 (a) ซึ่งแรงดันกรณี Passive ของ Rankine ในทุกๆ ความลึกสามารถหาได้จากสมการที่ 14.23 คือ

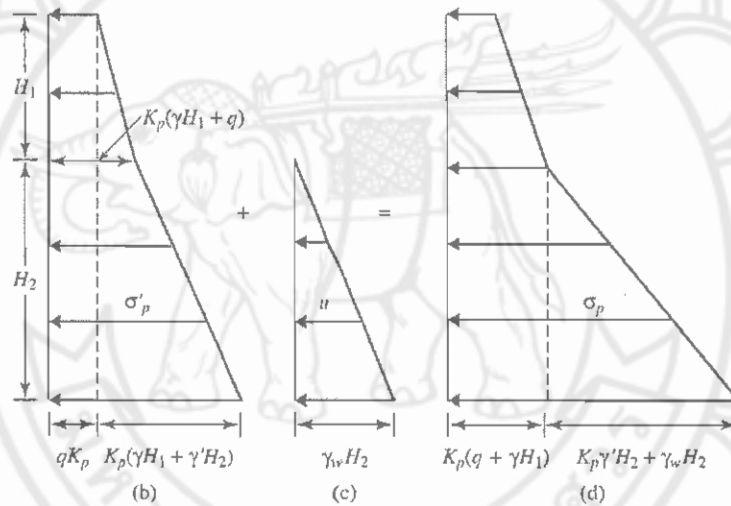
$$\sigma'_p = K_p \sigma'_0$$

ดังสมการข้างต้นเราสามารถหาค่า σ'_p ในความลึกที่แสดงในรูปที่ 14.10 (b) และค่าความดันที่กระทำกับกำแพงที่เกิดจากน้ำในความลึกข้างต้นดังแสดงดังรูปที่ 14.10 (c) และในรูปที่ 14.10 (d) แสดงถึงการกระจายตัวของแรงดันรวม (σ_p) ที่ความลึกตามรูป โดยแรงกระทำรวมกรณี Passive ต่อหน่วยความยาวของกำแพง ซึ่งก็คือผลรวมของพื้นที่ของแผนภาพที่แสดงในรูป 14.10 (d) หรือ

$$P_p = K_p qH + \frac{1}{2} K_p \gamma H_1^2 + K_p \gamma H_1 H_2 + \frac{1}{2} (K_p \gamma' + \gamma_w) H_2^2 \quad (\text{สมการที่ 14.37})$$



(a)



รูปที่ 14.10 การกระจายตัวของแรงดันดินกรณี Passive ของ Rankine ที่กระทำกับ Retaining Wall ที่มีดินถมด้านหลังเป็นดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น และมีแรง q มากกระทำด้วย

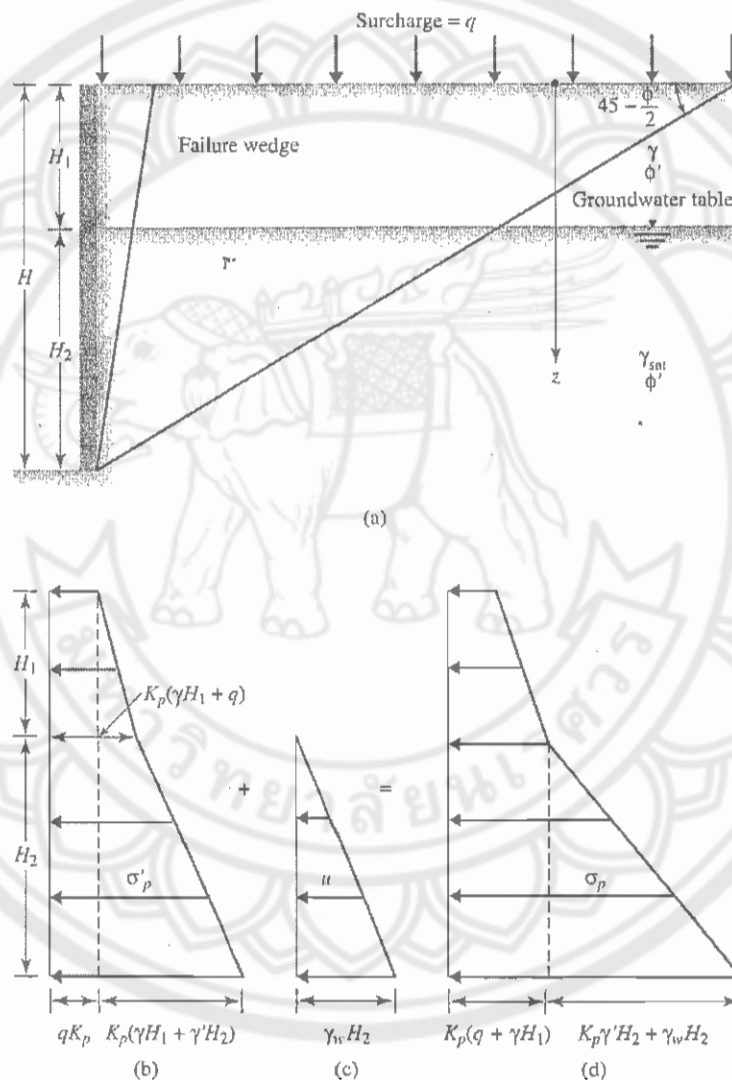
- 14.1.4.3 กรณีดินถมมีหน่วยแรงเชื่อมแน่นและดินถมเป็นแนวราบ (Backfill-Cohesive Soil with Horizontal Backfill)

- 14.1.4.3.1 กรณี Active (Active case)

จากรูปที่ 14.11 (a) แสดงถึงกำแพงที่ผิวกำแพงไม่มีแรงเสียดทานกับดินถมที่เป็นดินแบบมีแรงเชื่อมแน่น ดังนั้นแรงดันแบบ Active ที่กระทำต่อกำแพงในทุกๆ ความลึกได้ดินระดับผิวดินสามารถหาได้จากสมการที่ 14.18 ซึ่งก็คือ

$$\sigma'_a = K_a \gamma_z - 2c' \sqrt{K_a} \quad (\text{สมการที่ 14.18})$$

ซึ่งค่า $K_a \gamma_z$ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 14.11 (b) และค่าของ $2c' \sqrt{K_a}$ สามารถแสดงได้ตามรูป 14.11 (c) โดยที่ $2c' \sqrt{K_a}$ ไม่ใช่ฟังก์ชันของ z ดังนั้นในรูป 14.11 (c) จึงเป็นรูปสี่เหลี่ยม ดังนั้นค่าของผลรวมของค่า σ'_a สามารถพล็อตได้ตามรูปที่ 14.11 (d)



รูปที่ 14.11 การกระจายแรงดันดินด้านข้างกรณี Active ของ Rankine ที่กระทำกับ Retaining Wall ที่ดินถมด้านหลังเป็นดินแบบมีแรงเชื่อมแน่น

ซึ่งในรูป 14.11 (d) จะมีผลกระทบจากแรงเชื่อมแน่น (cohesion) ซึ่งจะทำให้ σ'_a เป็นลบใน ส่วนที่อยู่ด้านบนความลึก z_0 ดังนั้นที่ความลึก z_0 ค่าของแรงดัน Active ก็จะเท่ากับศูนย์ โดยสามารถ อ้างอิงจากสมการที่ 14.18 คือ

$$K_a \gamma z_0 - 2c' \sqrt{K_a} = 0$$

หรือจะได้

$$z_0 = \frac{2c'}{\gamma \sqrt{K_a}} \quad (\text{สมการที่ 14.38})$$

สำหรับกรณีไม่ระบายน้ำ (Undrained condition) ซึ่งก็คือ $\phi = 0$, $K_a = \tan^2 45^\circ = 1$ และ $c = c_u$ (หน่วยแรงเชื่อมแน่นกรณีไม่ระบายน้ำ ; Undrained condition) ดังนั้นจากสมการที่ 14.21 จะ ได้

$$z_0 = \frac{2c_u}{\gamma} \quad (\text{สมการที่ 14.39})$$

ดังนั้น ณ เวลา z_0 ก็คือความลึกของรอยแตกที่เกิดจากแรงดึงนับจากผิวดิน

สำหรับแรงกระทำรวมกรณี Active ต่อหน่วยความยาวของกำแพงสามารถหาได้จากพื้นที่ของ ผลรวมของแผนภาพแรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 14.11 (d) ซึ่งก็คือ

$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 - 2c'H \sqrt{K_a} \quad (\text{สมการที่ 14.40})$$

สำหรับกรณีที่ $\phi = 0$

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 - 2c_u H \quad (\text{สมการที่ 14.41})$$

แต่สำหรับการหาแรงกระทำรวมกรณี Active เราจะต้องคำนึงถึงผลกระทบจากรอยแตก เนื่องจากแรงดึง (tensile cracks) ด้วย เพราะว่าจะไม่มีผลกระทบจากดินที่กระทำต่อกำแพงรอบๆ ความลึก z_0 ดังนั้นการกระจายตัวของแรงดันกรณี Active เราจะต้องคำนึงผลของ $z_0 = \frac{2c'}{\gamma \sqrt{K_a}}$ และ H ดังแสดงในรูปที่ 14.11 (d) ซึ่งในกรณีนี้จะได้จากผลรวมของพื้นที่ในรูปที่ 14.11 (d) นั้นเอง ดังนั้นจะได้

$$P_a = \frac{1}{2} (K_a \gamma H - 2c' \sqrt{K_a}) (H - z_0)$$

$$= \frac{1}{2} (K_a \gamma H - 2c' \sqrt{K_a}) \left(H - \frac{2c'}{\gamma \sqrt{K_a}} \right)$$

$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 - 2c' H \sqrt{K_a} + 2 \frac{(c')^2}{\gamma} \quad (\text{สมการที่ 14.42})$$

สำหรับ $\phi = 0$

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 - 2c_u H + 2 \frac{c_u^2}{\gamma} \quad (\text{สมการที่ 14.43})$$

- 14.1.4.3.2 กรณี Passive (Passive case)

ในรูปที่ 14.12 (a) แสดงถึงกำแพงกันดินที่มีดินถมเหมือนกับรูปที่ 14.11 (a) โดยมีแรงดันดินกรณี Passive ของ Rankine ที่กระทำกับกำแพงในความลึก z สามารถหาได้จากสมการที่ 14.22 ซึ่งก็คือ

$$\sigma'_p = K_p \gamma z + 2c' \sqrt{K_p}$$

ที่ความลึก $z = 0$ จะได้

$$\sigma'_p = 2c' \sqrt{K_p} \quad (\text{สมการที่ 14.44})$$

และที่ความลึก $z = H$ จะได้

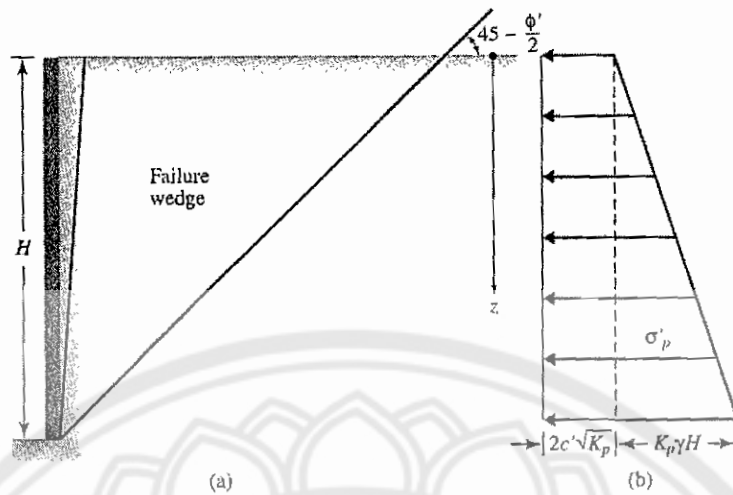
$$\sigma'_p = K_p \gamma H + 2c' \sqrt{K_p} \quad (\text{สมการที่ 14.45})$$

สำหรับค่า σ'_p ที่ความลึก H ดังที่แสดงในรูปที่ 14.12 (b) ก็คือแรงกระทำแบบ Passive ต่อหน่วยความยาวของกำแพงสามารถหาได้จากพื้นที่ของแผนภาพความดันซึ่งก็คือ

$$P_p = \frac{1}{2} K_p \gamma H^2 + 2c' H \sqrt{K_p} \quad (\text{สมการที่ 14.46})$$

สำหรับกรณีที่ $\phi = 0$ และจะได้ $K_p = 1$ แล้วจะได้

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma H^2 + 2c_u H \quad (\text{สมการที่ 14.47})$$



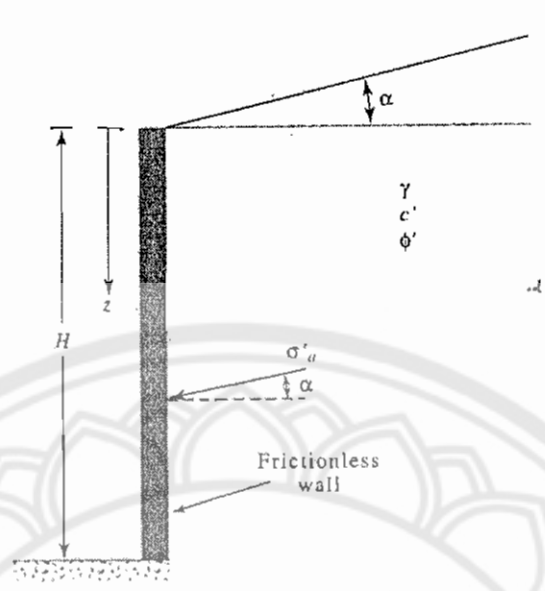
รูปที่ 14.12 การกระจายแรงดันดินด้านข้างกรณี Passive ของ Rankine ที่กระทำกับ Retaining Wall ที่ดินถมด้านหลังเป็นดินแบบมีแรงเชื่อมแน่น

14.1.5 แรงดันกรณี Active และ Passive ของ Rankine กรณีดินถมด้านหลังมีมุมกระทำกับแนวราบ (Rankine Active and Passive Pressure with Sloping Backfill)

แบ่งออกเป็น 2 กรณีดังต่อไปนี้

- 14.1.5.1 กรณีดินที่ $c' = 0$

ในหัวข้อที่ผ่านมา เราได้เรียนรู้ถึงกำแพงกันดิน (Retaining wall) กรณีที่ด้านหลังของกำแพงเป็นแนวตั้ง (Vertical backs) และดินถมด้านหลังเป็นแนวราบ (horizontal backfill) แต่ในกรณีใดๆก็ตามดินถมด้านหลังอาจเกิดความลาด (Sloping) ที่ทำมุม α กับแนวราบดังแสดงตามรูปที่ 14.13



รูปที่ 14.13 กำแพงกันดินที่ตัวกำแพงไม่มีความฝืดและมีดินถมด้านหลังมีมุมกระทำกับแนวราบ

ตั้งนั้นจากรูปถ้าดินถมเป็นดินเม็ดหยาบ (granular soil) และมีมุมเสียดทานแบบระบายน้ำ (drained friction angle ; ϕ') และค่าแรงเชื่อมแน่น (cohesion ; c') เท่ากับศูนย์แล้ว ค่าแรงดันกรณี Active ของ Rankine จะได้

$$\sigma'_a = \gamma_z K_a$$

โดยที่

$$K_a = \text{ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินกรณี Active ของ Rankine}$$

$$= \cos \alpha \frac{\cos \alpha - \sqrt{\cos^2 \alpha - \cos^2 \phi'}}{\cos \alpha + \sqrt{\cos^2 \alpha - \cos^2 \phi'}} \quad (\text{สมการที่ 14.48})$$

และแรงกระทำกรณี Active ต่อหน่วยความยาวของกำแพงสามารถหาได้โดย

$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 \quad (\text{สมการที่ 14.49})$$

ซึ่งแรงที่กระทำจะมีแรงลัพธ์ (Resultant force) ที่จะกระทำกับกำแพง เป็นมุมเท่ากับ α กระทำที่จุด $H/3$ นับจากด้านล่างของกำแพงดังแสดงดังรูปที่ 14.13 และค่า K_a ตามสมการที่ 14.48 สามารถคำนวณได้และแสดงเป็นตารางที่ 14.2

ตารางที่ 14.2 ค่า K_a ตามสมการที่ 14.48

| $\downarrow \alpha$ (deg) | ϕ' (deg) \rightarrow | | | | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 28 | 30 | 32 | 34 | 36 | 38 | 40 |
| 0 | 0.361 | 0.333 | 0.307 | 0.283 | 0.260 | 0.238 | 0.217 |
| 5 | 0.366 | 0.337 | 0.311 | 0.286 | 0.262 | 0.240 | 0.219 |
| 10 | 0.380 | 0.350 | 0.321 | 0.294 | 0.270 | 0.246 | 0.225 |
| 15 | 0.409 | 0.373 | 0.341 | 0.311 | 0.283 | 0.258 | 0.235 |
| 20 | 0.461 | 0.414 | 0.374 | 0.338 | 0.306 | 0.277 | 0.250 |
| 25 | 0.573 | 0.494 | 0.434 | 0.385 | 0.343 | 0.307 | 0.275 |

และจากวิธีการหาแรงดันดินกรณี Passive ของ Rankine สำหรับกำแพงที่มีความสูง H ที่มีดินถมด้านหลังเป็นดินเม็ดหยาบที่มีความลาด (granular sloping backfill) สามารถหาแรงกระทำที่กำแพงได้จากสมการ

$$P_p = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 \quad (\text{สมการที่ 14.50})$$

โดยที่

$$K_p = \cos \alpha \frac{\cos \alpha + \sqrt{\cos^2 \alpha - \cos^2 \phi'}}{\cos \alpha - \sqrt{\cos^2 \alpha - \cos^2 \phi'}} \quad (\text{สมการที่ 14.51})$$

ซึ่ง K_p ก็คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินกรณี Passive ของ Rankine (Passive earth pressure coefficient)

ในกรณีนี้จะเหมือนกับกรณี Active คือค่าแรงลัพธ์ (Resultant force P_p) จะกระทำกับกำแพงเป็นมุมเท่ากับ α ที่จุด $H/3$ นับจากด้านล่างของกำแพงดังแสดงดังรูปที่ 14.13 และค่า K_p ที่อยู่ในฟังก์ชันของ ϕ' และ α สามารถคำนวณแล้วแสดงได้ในตารางที่ 14.3

ตารางที่ 14.3 ค่า K_p ตามสมการที่ 14.51

| $\downarrow \alpha$ (deg) | ϕ' (deg) \rightarrow | | | | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 28 | 30 | 32 | 34 | 36 | 38 | 40 |
| 0 | 2.770 | 3.000 | 3.255 | 3.537 | 3.852 | 4.204 | 4.599 |
| 5 | 2.715 | 2.943 | 3.196 | 3.476 | 3.788 | 4.136 | 4.527 |
| 10 | 2.551 | 2.775 | 3.022 | 3.295 | 3.598 | 3.937 | 4.316 |
| 15 | 2.284 | 2.502 | 2.740 | 3.003 | 3.293 | 3.615 | 3.977 |
| 20 | 1.918 | 2.132 | 2.362 | 2.612 | 2.886 | 3.189 | 3.526 |
| 25 | 1.434 | 1.664 | 1.894 | 2.135 | 2.394 | 2.676 | 2.987 |

14.1.5.2 กรณีดินเหนียวปนทรายที่ $c', \phi' \neq 0$

สามารถหาได้จากการหาจากสมการทางคณิตศาสตร์ของ Mazindrani และ Ganjali (1997) ซึ่งเป็นสมการสำหรับดินถมด้านหลังเป็น $c' - \phi'$

ซึ่งแรงดันกรณี active สามารถหาได้โดยสมการ

$$\sigma'_a = \gamma_z K_a = \gamma_z K''_a \cos \alpha \quad (\text{สมการที่ 14.52})$$

โดยที่ K_a = สัมประสิทธิ์แรงดันดินกรณี active ของ Rankine (Rankine active earth pressure coefficient) และ

$$K''_a = \frac{K_a}{\cos \alpha} \quad (\text{สมการที่ 14.53})$$

และแรงดันกรณี passive สามารถหาได้โดยสมการ

$$\sigma'_p = \gamma_z K_p = \gamma_z K''_p \cos \alpha \quad (\text{สมการที่ 14.54})$$

โดยที่ K_p = สัมประสิทธิ์แรงดันดินกรณี Passive ของ Rankine (Rankine passive earth pressure coefficient) และ

$$K''_p = \frac{K_p}{\cos \alpha} \quad (\text{สมการที่ 14.55})$$

ดังนั้นจะได้

$$K''_a, K''_p = \frac{1}{\cos^2 \phi'} \left[\begin{array}{l} 2 \cos^2 \alpha + 2 \left(\frac{c'}{\gamma z} \right) \cos \phi' \sin \phi' \\ \pm \sqrt{4 \cos^2 \alpha \left(\cos^2 \alpha - \cos^2 \phi' \right) + 4 \left(\frac{c'}{\gamma z} \right) \cos^2 \phi' + 8 \left(\frac{c'}{\gamma z} \right) \cos^2 \alpha \sin \phi' \cos \phi'} \end{array} \right] - 1 \quad (\text{สมการที่ 14.56})$$

ดังจะแสดงค่าในการคำนวณจากสมการที่ 14.56 ของ K''_a และ K''_p จากตัวแปร $\alpha, \frac{c'}{\gamma z}$ และ ϕ'

ได้ตามตารางที่ 14.4

ตารางที่ 14.4 แสดงค่า K_a'', K_p''

| α (deg) | K_a''/K_p'' | $\frac{c'}{\gamma z}$ | | | | | |
|-----------------------------|---------------|-----------------------|--------|--------|--------|---------|---------|
| | | 0.0 | 0.025 | 0.05 | 0.1 | 0.5 | 1.0 |
| <i>a</i> $\phi' = 15^\circ$ | | | | | | | |
| 0 | K_a'' | 0.5888 | 0.5504 | 0.5121 | 0.4353 | -0.1785 | -0.9459 |
| 0 | K_p'' | 1.6984 | 1.7637 | 1.8287 | 1.9590 | 3.0016 | 4.3048 |
| 5 | K_a'' | 0.6069 | 0.5658 | 0.5252 | 0.4449 | -0.1804 | -0.9518 |
| 5 | K_p'' | 1.6477 | 1.7156 | 1.7830 | 1.9169 | 2.9709 | 4.2782 |
| 10 | K_a'' | 0.6738 | 0.6206 | 0.5707 | 0.4769 | -0.1861 | -0.9696 |
| 10 | K_p'' | 1.4841 | 1.5641 | 1.6408 | 1.7882 | 2.8799 | 4.1993 |
| 15 | K_a'' | 1.0000 | 0.7762 | 0.6834 | 0.5464 | -0.1962 | -1.0000 |
| 15 | K_p'' | 1.0000 | 1.2506 | 1.3702 | 1.5608 | 2.7321 | 4.0718 |
| <i>b</i> $\phi' = 20^\circ$ | | | | | | | |
| 0 | K_a'' | 0.4903 | 0.4553 | 0.4203 | 0.3502 | -0.2099 | -0.9101 |
| 0 | K_p'' | 2.0396 | 2.1110 | 2.1824 | 2.3252 | 3.4678 | 4.8959 |
| 5 | K_a'' | 0.5015 | 0.4650 | 0.4287 | 0.3565 | -0.2119 | -0.9155 |
| 5 | K_p'' | 1.9940 | 2.0669 | 2.1396 | 2.2846 | 3.4353 | 4.8669 |
| 10 | K_a'' | 0.5394 | 0.4974 | 0.4564 | 0.3767 | -0.2180 | -0.9320 |
| 10 | K_p'' | 1.8539 | 1.9323 | 2.0097 | 2.1622 | 3.3392 | 4.7812 |
| 15 | K_a'' | 0.6241 | 0.5666 | 0.5137 | 0.4165 | -0.2287 | -0.9599 |
| 15 | K_p'' | 1.6024 | 1.6962 | 1.7856 | 1.9556 | 3.1831 | 4.6422 |
| <i>c</i> $\phi' = 25^\circ$ | | | | | | | |
| 0 | K_a'' | 0.4059 | 0.3740 | 0.3422 | 0.2784 | -0.2312 | -0.8683 |
| 0 | K_p'' | 2.4639 | 2.5424 | 2.6209 | 2.7779 | 4.0336 | 5.6033 |
| 5 | K_a'' | 0.4133 | 0.3805 | 0.3478 | 0.2826 | -0.2332 | -0.8733 |
| 5 | K_p'' | 2.4195 | 2.4989 | 2.5782 | 2.7367 | 3.9986 | 5.5713 |
| 10 | K_a'' | 0.4376 | 0.4015 | 0.3660 | 0.2960 | -0.2394 | -0.8884 |
| 10 | K_p'' | 2.2854 | 2.3680 | 2.4502 | 2.6135 | 3.8950 | 5.4765 |
| 15 | K_a'' | 0.4860 | 0.4428 | 0.4011 | 0.3211 | -0.2503 | -0.9140 |
| 15 | K_p'' | 2.0575 | 2.1474 | 2.2357 | 2.4090 | 3.7264 | 5.3228 |

(continued)

ตารางที่ 14.4 (ต่อ) แสดงค่า K_a'', K_p''

| α (deg) | K_a''/K_p'' | $\frac{c'}{\gamma z}$ | | | | | |
|-----------------------------|---------------|-----------------------|--------|--------|--------|---------|---------|
| | | 0.0 | 0.025 | 0.05 | 0.1 | 0.5 | 1.0 |
| <i>d</i> $\phi' = 30^\circ$ | | | | | | | |
| 0 | K_a'' | 0.3333 | 0.3045 | 0.2756 | 0.2179 | -0.2440 | -0.8214 |
| 0 | K_p'' | 3.0000 | 3.0866 | 3.1732 | 3.3464 | 4.7321 | 6.4641 |
| 5 | K_a'' | 0.3385 | 0.3090 | 0.2795 | 0.2207 | -0.2460 | -0.8260 |
| 5 | K_p'' | 2.9543 | 3.0416 | 3.1288 | 3.3030 | 4.6935 | 6.4282 |
| 10 | K_a'' | 0.3549 | 0.3233 | 0.2919 | 0.2297 | -0.2522 | -0.8399 |
| 10 | K_p'' | 2.8176 | 2.9070 | 2.9961 | 3.1737 | 4.5794 | 6.3218 |
| 15 | K_a'' | 0.3861 | 0.3502 | 0.3150 | 0.2462 | -0.2628 | -0.8635 |
| 15 | K_p'' | 2.5900 | 2.6836 | 2.7766 | 2.9608 | 4.3936 | 6.1489 |
| <i>e</i> $\phi' = 35^\circ$ | | | | | | | |
| 0 | K_a'' | 0.2710 | 0.2450 | 0.2189 | 0.1669 | -0.2496 | -0.7701 |
| 0 | K_p'' | 3.6902 | 3.7862 | 3.8823 | 4.0744 | 5.6112 | 7.5321 |
| 5 | K_a'' | 0.2746 | 0.2481 | 0.2217 | 0.1688 | -0.2515 | -0.7744 |
| 5 | K_p'' | 3.6413 | 3.7378 | 3.8342 | 4.0271 | 5.5678 | 7.4911 |
| 10 | K_a'' | 0.2861 | 0.2581 | 0.2303 | 0.1749 | -0.2575 | -0.7872 |
| 10 | K_p'' | 3.4953 | 3.5933 | 3.6912 | 3.8866 | 5.4393 | 7.3694 |
| 15 | K_a'' | 0.3073 | 0.2764 | 0.2459 | 0.1860 | -0.2678 | -0.8089 |
| 15 | K_p'' | 3.2546 | 3.3555 | 3.4559 | 3.6559 | 5.2300 | 7.1715 |
| <i>f</i> $\phi' = 40^\circ$ | | | | | | | |
| 0 | K_a'' | 0.2174 | 0.1941 | 0.1708 | 0.1242 | -0.2489 | -0.7152 |
| 0 | K_p'' | 4.5989 | 4.7061 | 4.8134 | 5.0278 | 6.7434 | 8.8879 |
| 5 | K_a'' | 0.2200 | 0.1964 | 0.1727 | 0.1255 | -0.2507 | -0.7190 |
| 5 | K_p'' | 4.5445 | 4.6521 | 4.7597 | 4.9747 | 6.6935 | 8.8400 |
| 10 | K_a'' | 0.2282 | 0.2034 | 0.1787 | 0.1296 | -0.2564 | -0.7308 |
| 10 | K_p'' | 4.3826 | 4.4913 | 4.5999 | 4.8168 | 6.5454 | 8.6980 |
| 15 | K_a'' | 0.2429 | 0.2161 | 0.1895 | 0.1370 | -0.2662 | -0.7507 |
| 15 | K_p'' | 4.1168 | 4.2275 | 4.3380 | 4.5584 | 6.3041 | 8.4669 |

* After Mazindrani and Ganjali (1997)

สำหรับกรณี Active จะมีส่วนพิเศษตรงที่จะมีรอยแยกเนื่องจากแรงดึง (tensile crack) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$z_0 = \frac{2c'}{\gamma} \sqrt{\frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'}} \quad (\text{สมการที่ 14.57})$$

จากนั้นก็นำไปหาแรงกระทำกรณี Active (P_a) ตามสมการที่ 14.42 ได้ดังต่อไปนี้

$$P_a = \frac{1}{2} (K_a \gamma H - 2c' \sqrt{K_a}) (H - z_0)$$

ดังที่กล่าวมาแล้วในกรณีดินถมที่มีหน่วยแรงเชื่อมแน่นในหัวข้อที่ผ่านมานั้นเอง

14.1.6 แรงดันดินด้านข้างของ Coulomb (Coulomb's Lateral Earth Pressure)

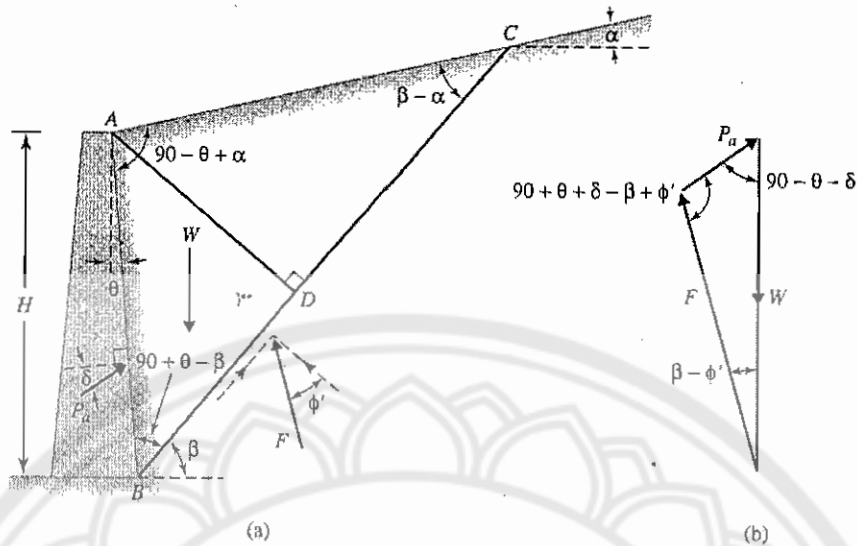
- 14.1.6.1 ทฤษฎีแรงดันดินด้านข้างของ Coulomb (Coulomb's earth pressure theory)

เมื่อ 200 ปีมาแล้ว Coulomb ได้เสนอทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณหาแรงดันดินด้านข้างตั้งแต่ปี 1776 เรียกว่าทฤษฎีของ Coulomb (Coulomb's Theory) ซึ่ง Coulomb ได้ทราบดีว่ากำลังรับแรงเฉือน (shear strength) ซึ่งหาได้จากสมการ $\tau_f = \sigma' \tan \phi'$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าจะมีทั้งเทอมของมุมเสียดทานภายใน (ϕ') และหน่วยแรงเชื่อมแน่น (Cohesion) และระนาบการวิบัติก็เป็นระนาบโค้ง แต่อย่างไรก็ตาม Coulomb ก็ได้สมมุติให้ดินถมหลังกำแพง (backfill) เป็นดินเม็ดหยาบแห้งซึ่งไม่มีหน่วยแรงเชื่อมแน่น (Cohesionless) ดังนั้นตัวแปรที่เหลืออยู่จึงมีแต่มุมเสียดทานภายใน (ϕ') เท่านั้น โดยทั่วไปอาจจะดูคล้ายกับกรณีของ Rankine แต่ Coulomb จะพิจารณาแรงเสียดทานระหว่างกำแพงกับดินถม (wall friction) ด้วย และกำแพงก็ไม่จำเป็นต้องมีผิวสัมผัสกับดินถมหลังกำแพงอยู่ในแนวตั้งก็ได้ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าทฤษฎีของ Coulomb จึงครอบคลุมกว่าทฤษฎีของ Rankine

- 14.1.6.2 แรงดันกรณี Active ของ Coulomb (Coulomb's Active Pressure)

จากความสูงของกำแพง AB (แสดงตามรูปที่ 14.14 (a)) ซึ่งผิวด้านหลังของกำแพงเป็นดินเม็ดหยาบ (granular soil) ซึ่งดินถมด้านหลังทำมุม α กับแนวราบ ดังนั้น BC คือการสมมติผิวของการวิบัติ (failure surface) ในความเป็นไปได้ของเสถียรภาพจากลิ่มของการวิบัติที่เป็นไปได้ (probable failure wedge) ABC จะต้องคำนึงถึงแรง (ต่อหน่วยความยาวของกำแพง) ดังต่อไปนี้

1. W, น้ำหนักของลิ่มดิน ABC
2. F, แรงลัพธ์ของแรงเฉือน (shear) และแรงปกติ (Normal) บนผิวของการวิบัติ, BC ซึ่งแรง F จะทำมุม ϕ' กับระนาบ BC
3. P_a , แรงกระทำกรณี active ต่อหน่วยความยาวของกำแพง ซึ่งค่าแรง P_a จะทำมุม δ กับผิวของกำแพง โดยที่ δ คือมุมเสียดทานระหว่างดินกับกำแพง (angle of friction between the soil and the wall)



รูปที่ 14.14 แรงดันดินกรณี่ Active ของ Coulomb (a) การประมาณค่าลิมการวิบัติ (b) force polygon

ตั้งนั้นแรงสามเหลี่ยม (force triangle) สำหรับลิมแสดงให้เห็นในรูปที่ 14.14 (b) ตั้งนั้นจากกฎของไซน์ (Law of sine's) จะได้

$$\frac{W}{\sin(90 + \theta + \delta - \beta + \phi')} = \frac{P_a}{\sin(\beta - \phi')} \quad (\text{สมการที่ 14.58})$$

หรือจะได้

$$P_a = W \cdot \frac{\sin(\beta - \phi')}{\sin(90 + \theta + \delta - \beta + \phi')} \quad (\text{สมการที่ 14.59})$$

ตั้งนั้นเราสามารถแปลงสมการ 14.59 ได้เป็น

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[\frac{\cos(\theta - \beta) \cos(\theta - \alpha) \sin(\beta - \phi')}{\cos^2 \theta \sin(\beta - \alpha) \sin(90 + \theta + \delta - \beta + \phi')} \right] \quad (\text{สมการที่ 14.60})$$

โดยที่ γ = หนักรน้ำหนักของดินถมหลังกำแพง (Unit weight of the backfill)

ซึ่งค่า γ , H , θ , α , ϕ' และ δ เป็นค่าคงที่ (constant) ซึ่งจะมีค่าเดียวที่เปลี่ยนแปลงคือค่า β ตั้งนั้นในการหาแรง P_a ที่มากที่สุด (maximum P_a) จะต้องหาค่ามุมวิกฤติของ β ให้ได้ ตั้งนั้นถ้า

$$\frac{dP_a}{d\beta} = 0 \quad (\text{สมการที่ 14.61})$$

แก้สมการที่ 14.61 จะได้ความสัมพันธ์ของ β จากสมการที่ 14.60 เป็น “แรงดันดินกรณี Active ของ Coulomb (Coulomb's active earth pressure)” คือ

$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 \quad (\text{สมการที่ 14.62})$$

โดยที่ K_a = สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างกรณี active ของ Coulomb (Coulomb's active earth pressure coefficient) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi' - \theta)}{\cos^2 \theta \cos(\delta + \theta) \left[1 + \frac{\sin(\delta + \phi') \sin(\phi' - \alpha)}{\cos(\delta + \theta) \cos(\theta - \alpha)} \right]^2} \quad (\text{สมการที่ 14.63})$$

อย่างไรก็ตาม $\alpha = 0^\circ$, $\theta = 0^\circ$ และ $\delta = 0^\circ$ แล้วหาค่าสัมประสิทธิ์ K_a ของ Coulomb จะมีค่าเท่ากับ $\frac{(1 - \sin \phi')}{(1 + \sin \phi')}$ ซึ่งนั่นก็จะเท่ากับสัมประสิทธิ์ K_a ของ Rankine นั้นเองจากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

สำหรับค่า K_a กรณีที่กำแพงกันดินมีด้านหลังเป็นแนวตั้ง ($\theta = 0^\circ$) และดินถมด้านหลังเป็นแบบแนวราบ ($\alpha = 0^\circ$) แสดงให้เห็นในตารางที่ 14.5 และตารางที่ 14.5 จะอ้างอิงตามค่า ϕ' เนื่องจากผลจากแรงเสียดทานระหว่างกำแพงกับดินถม (wall friction) ค่อนข้างจะมีผลกระทบน้อยต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างกรณี Active

ตารางที่ 14.5 ค่า K_a ตามสมการที่ 14.63 โดยที่ $\theta = 0^\circ$ และ $\alpha = 0^\circ$

| ϕ' (deg) | δ (deg) → | | | | | |
|---------------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| 28 | 0.3610 | 0.3448 | 0.3330 | 0.3251 | 0.3203 | 0.3186 |
| 30 | 0.3333 | 0.3189 | 0.3085 | 0.3014 | 0.2973 | 0.2956 |
| 32 | 0.3073 | 0.2945 | 0.2853 | 0.2791 | 0.2755 | 0.2745 |
| 34 | 0.2827 | 0.2714 | 0.2633 | 0.2579 | 0.2549 | 0.2542 |
| 36 | 0.2596 | 0.2497 | 0.2426 | 0.2379 | 0.2354 | 0.2350 |
| 38 | 0.2379 | 0.2292 | 0.2230 | 0.2190 | 0.2169 | 0.2167 |
| 40 | 0.2174 | 0.2089 | 0.2045 | 0.2011 | 0.1994 | 0.1995 |
| 42 | 0.1982 | 0.1916 | 0.1870 | 0.1841 | 0.1828 | 0.1831 |

- 14.1.6.3 แรงกระทำกรณี Active บนกำแพงกันดินที่มีแรงจากแผ่นดินไหวมากระทำด้วย
(Active Force on Retaining Walls with Earthquake Forces)

สามารถแบ่งออกเป็น 2 กรณีดังต่อไปนี้คือ

- 14.1.6.3.1 กรณีที่ดินมี $c' = 0$

วิธีการวิเคราะห์ของ Coulomb สำหรับแรงกระทำกรณี Active บนกำแพงกันดินที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อข้างต้นสามารถวิเคราะห์ร่วมกับแรงที่เกี่ยวกับแผ่นดินไหวได้ด้วย ดังที่กล่าวต่อไปนี้ ซึ่งจากกำแพงกันดินที่มีความสูง H และมีดินถมชนิดดินหยาบ (granular backfill) ที่มีความลาด ดังแสดงดังรูปที่ 14.15 (a) โดยที่ค่าหน่วยน้ำหนักและมุมเสียดทานภายในของดินถมหลังกำแพงคือ γ และ ϕ' ตามลำดับ ดังนั้นมุม θ คือมุมเสียดทานระหว่างดินกับกำแพงและ ABC คือการสมมติลิ้มของการวิบัติ (failure wedge)

แรงที่กระทำบนลิ้มของการวิบัติมีดังต่อไปนี้

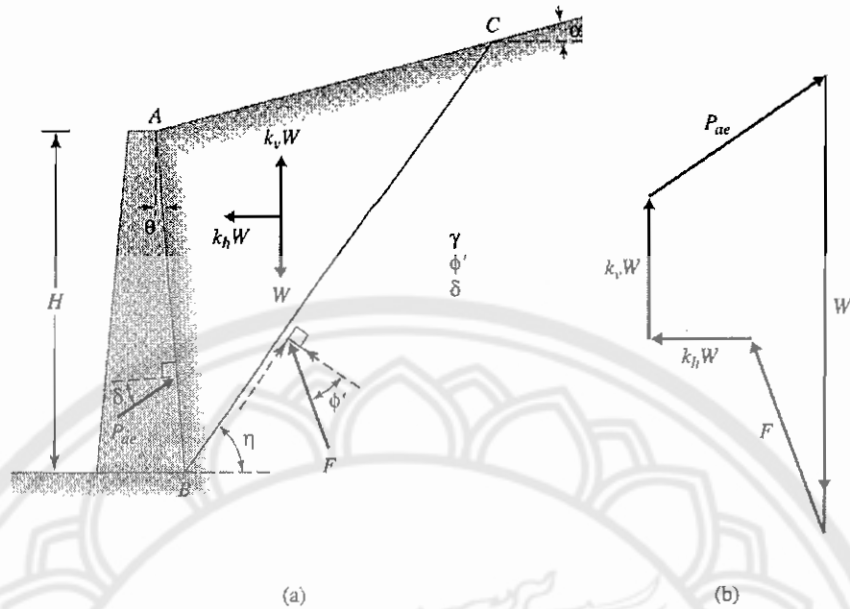
1. W , น้ำหนักของดินในลิ้ม
2. F , แรงลัพธ์ของแรงเฉือน (shear) และแรงหลัก (Normal) บนผิวการวิบัติ BC
3. P_{aa} , แรงกระทำกรณี Active ต่อหน่วยความยาวของกำแพง
4. $K_h W$, แรงเฉือนในแนวราบ (Horizontal inertial force)
5. $K_v W$, แรงเฉือนในแนวตั้ง (Vertical inertial force)

ซึ่งจะได้

$$k_h = \frac{\text{Horizontal component of earthquake acceleration}}{g} \quad (\text{สมการที่ 14.64})$$

$$k_v = \frac{\text{Vertical component of earthquake acceleration}}{g} \quad (\text{สมการที่ 14.65})$$

โดยที่ g = ความเร่งเฉือนจากแรงโน้มถ่วงของโลก (acceleration due to gravity)



รูปที่ 14.15 แรงกระทำกรณี Active กับแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวที่กระทำต่อกำแพงกันดิน

จากโครงสร้างของแรง (force polygon) ซึ่งประกอบด้วยแรงข้างต้น 5 แรงแสดงให้เห็นในรูปที่ 14.15 (b) จะได้ว่าแรงกระทำกรณี Active ที่เปลี่ยนแปลงบนกำแพงก็คือค่ามากที่สุดของ P_{ae} (Maximum value of P_{ae}) บนทุกๆ ลิ่มจะสามารถหาค่าได้โดยสมการ

$$P_{ae} = \frac{1}{2} \gamma H^2 (1 - k_v) K'_a \quad (\text{สมการที่ 14.66})$$

โดยที่

$$K'_a = \frac{\cos^2(\phi' - \theta - \bar{\beta})}{\cos^2 \theta \cos \bar{\beta} \cos(\delta + \theta + \bar{\beta}) \left[1 + \frac{\sin(\delta + \phi') \sin(\phi' - \alpha - \bar{\beta})}{\cos(\delta + \theta + \bar{\beta}) \cos(\theta - \alpha)} \right]^2} \quad (\text{สมการที่ 14.67})$$

และ

$$\bar{\beta} = \tan^{-1} \left(\frac{k_h}{1 - k_v} \right) \quad (\text{สมการที่ 14.68})$$

อย่างไรก็ตามถ้าไม่มีแรงเฉือนจากแผ่นดินไหว (inertia forces from earthquakes) จะทำให้ $\bar{\beta} = 0$ ดังนั้น $K'_a = K_a$ ในสมการที่ 14.63 และจากสมการที่ 14.66 และสมการที่ 14.67 จะเป็นสมการพื้นฐานของ Mononobe Okabe equation ((Mononobe (1929), Dkdab (1926)) ซึ่งค่า K'_a ที่ $\theta = 0^\circ$ และ $k_v = 0$ สามารถแสดงได้ตามตารางที่ 14.6

ตารางที่ 14.6 ค่า K_a' ตามสมการที่ 14.67 โดยที่ $\theta = 0^\circ$ และ $k_v = 0$

| k_h | δ (deg) | α (deg) | ϕ' (deg) | | | | |
|-------|-------------------|----------------|---------------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 28 | 30 | 35 | 40 | 45 |
| 0.1 | 0 | 0 | 0.427 | 0.397 | 0.328 | 0.268 | 0.217 |
| 0.2 | | | 0.508 | 0.473 | 0.396 | 0.382 | 0.270 |
| 0.3 | | | 0.611 | 0.569 | 0.478 | 0.400 | 0.334 |
| 0.4 | | | 0.753 | 0.697 | 0.581 | 0.488 | 0.409 |
| 0.5 | | | 1.005 | 0.890 | 0.716 | 0.596 | 0.500 |
| 0.1 | 0 | 5 | 0.457 | 0.423 | 0.347 | 0.282 | 0.227 |
| 0.2 | | | 0.554 | 0.514 | 0.424 | 0.349 | 0.285 |
| 0.3 | | | 0.690 | 0.635 | 0.522 | 0.431 | 0.356 |
| 0.4 | | | 0.942 | 0.825 | 0.653 | 0.535 | 0.442 |
| 0.5 | | | — | — | 0.855 | 0.673 | 0.551 |
| 0.1 | 0 | 10 | 0.497 | 0.457 | 0.371 | 0.299 | 0.238 |
| 0.2 | | | 0.623 | 0.570 | 0.461 | 0.375 | 0.303 |
| 0.3 | | | 0.856 | 0.748 | 0.585 | 0.472 | 0.383 |
| 0.4 | | | — | — | 0.780 | 0.604 | 0.486 |
| 0.5 | | | — | — | — | 0.809 | 0.624 |
| 0.1 | $\phi/2$ | 0 | 0.396 | 0.368 | 0.306 | 0.253 | 0.207 |
| 0.2 | | | 0.485 | 0.452 | 0.380 | 0.319 | 0.267 |
| 0.3 | | | 0.604 | 0.563 | 0.474 | 0.402 | 0.340 |
| 0.4 | | | 0.778 | 0.718 | 0.599 | 0.508 | 0.433 |
| 0.5 | | | 1.115 | 0.972 | 0.774 | 0.648 | 0.552 |
| 0.1 | $\phi/2$ | 5 | 0.428 | 0.396 | 0.326 | 0.268 | 0.218 |
| 0.2 | | | 0.537 | 0.497 | 0.412 | 0.342 | 0.283 |
| 0.3 | | | 0.699 | 0.640 | 0.526 | 0.438 | 0.367 |
| 0.4 | | | 1.025 | 0.881 | 0.690 | 0.568 | 0.475 |
| 0.5 | | | — | — | 0.962 | 0.752 | 0.620 |
| 0.1 | $\phi/2$ | 10 | 0.472 | 0.433 | 0.352 | 0.285 | 0.230 |
| 0.2 | | | 0.616 | 0.562 | 0.454 | 0.371 | 0.303 |
| 0.3 | | | 0.908 | 0.780 | 0.602 | 0.487 | 0.400 |
| 0.4 | | | — | — | 0.857 | 0.656 | 0.531 |
| 0.5 | | | — | — | — | 0.944 | 0.722 |
| 0.1 | $\frac{2}{3}\phi$ | 0 | 0.393 | 0.366 | 0.306 | 0.256 | 0.212 |
| 0.2 | | | 0.486 | 0.454 | 0.384 | 0.326 | 0.276 |
| 0.3 | | | 0.612 | 0.572 | 0.486 | 0.416 | 0.357 |
| 0.4 | | | 0.801 | 0.740 | 0.622 | 0.533 | 0.462 |
| 0.5 | | | 1.177 | 1.023 | 0.819 | 0.693 | 0.600 |
| 0.1 | $\frac{2}{3}\phi$ | 5 | 0.427 | 0.395 | 0.327 | 0.271 | 0.224 |
| 0.2 | | | 0.541 | 0.501 | 0.418 | 0.350 | 0.294 |
| 0.3 | | | 0.714 | 0.655 | 0.541 | 0.455 | 0.386 |
| 0.4 | | | 1.073 | 0.921 | 0.722 | 0.600 | 0.509 |
| 0.5 | | | — | — | 1.034 | 0.812 | 0.679 |
| 0.1 | $\frac{2}{3}\phi$ | 10 | 0.472 | 0.434 | 0.354 | 0.290 | 0.237 |
| 0.2 | | | 0.625 | 0.570 | 0.463 | 0.381 | 0.317 |
| 0.3 | | | 0.942 | 0.807 | 0.624 | 0.509 | 0.423 |
| 0.4 | | | — | — | 0.909 | 0.699 | 0.573 |
| 0.5 | | | — | — | — | 1.037 | 0.800 |

พิจารณาสมการของแรงกระทำกรณี Active จากสมการที่ 14.66 ถึงสมการที่ 14.68 เราสามารถหาเทอมของ $\sin(\phi' - \alpha - \bar{\beta})$ ในสมการที่ 14.67 ซึ่งมีความสัมพันธ์จะมีความสำคัญอยู่สองประการคือ

1. กรณีที่ $(\phi' - \alpha - \bar{\beta}) < 0$ (หรือเป็นลบ)

สมการที่ 14.67 จะไม่เป็นจริงทันทีที่จะสามารถเป็นไปได้ แต่ในกรณีนี้ทางพีสิคส์เราจะเรียกว่า "เป็นสถานะที่ไม่มีทางออก (equilibrium condition will not exist)" ดังนั้นสำหรับเสถียรภาพค่าลิมิตของความลาด (limiting slope) ของดินถม (backfill) สามารถหาได้โดย

$$\alpha \leq \phi' - \bar{\beta} \quad (\text{สมการที่ 14.69})$$

สำหรับกรณีที่ไม่มีแผ่นดินไหวมาเกี่ยวข้องจะได้ $\bar{\beta} = 0^\circ$ สำหรับเสถียรภาพจากสมการที่ 14.69 สามารถแปลงได้เป็นสมการดังต่อไปนี้

$$\alpha \leq \phi' \quad (\text{สมการที่ 14.70})$$

นั่นคือสามารถสรุปได้ว่าการก่อสร้างกำแพงกันดินค้ำถมของดินถม (Backfill) ; α จะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับมุมเสียดทานของดินถม (ϕ') นั่นเอง

2. กรณีที่ดินถมอยู่ในแนวราบ ($\alpha = 0^\circ$)

สำหรับเสถียรภาพจะได้

$$\bar{\beta} \leq \phi' \quad (\text{สมการที่ 14.71})$$

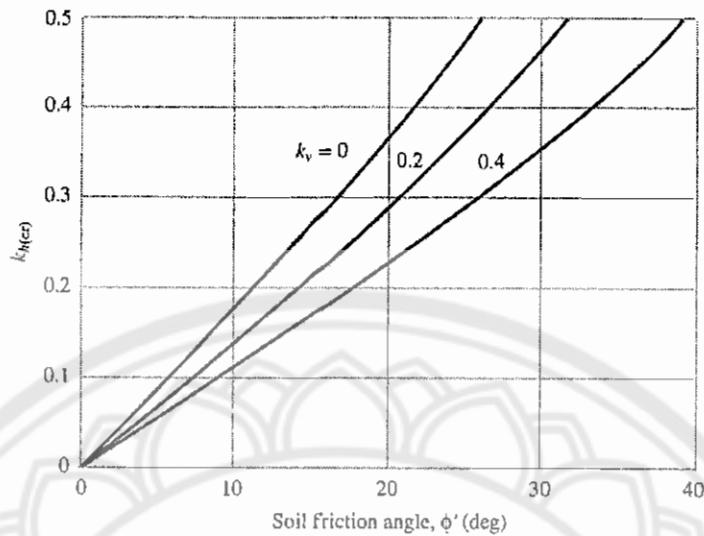
อย่างไรก็ตามค่า $\bar{\beta} = \tan^{-1} \left[\frac{k_h}{(1-k_v)} \right]$ ดังนั้นสำหรับเสถียรภาพจากสมการที่ 14.68 และจากสมการที่ 14.71 แล้วจะได้

$$k_h \leq (1-k_v) \tan \phi' \quad (\text{สมการที่ 14.72.1})$$

ดังนั้นค่าวิกฤติของความเร่งในแนวราบ (horizontal acceleration) สามารถหาได้โดย

$$k_{h(cr)} = (1-k_v) \tan \phi' \quad (\text{สมการที่ 14.72.2})$$

โดยที่ $k_{h(cr)}$ = ความเร่งในแนวราบวิกฤติ (critical of horizontal acceleration) จากรูปที่ 14.16 แสดงถึงการหาค่า $K_{h(cr)}$ ตามสมการที่ 14.72.2



รูปที่ 14.16 แสดงค่า $k_{h(cr)}$ ที่ค่า ϕ' ต่างๆ

และเราสามารถหาจุดที่แรงลัพธ์ P_{ae} กระทำบนกำแพง (Location of Line of Action of Resultant Force, P_{ae}) ได้ตามสมการของ Seed และ Whitman (1970) ได้เสนอตัวอย่างวิธีการหาจุดที่แรงลัพธ์ P_{ae} กระทำกับกำแพง โดยมีวิธีการทำดังนี้

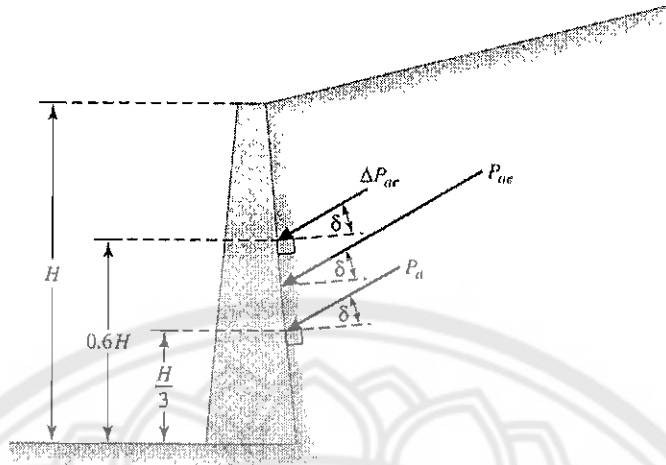
1. จากสมการ

$$P_{ae} = P_a + \Delta P_{ae} \quad (\text{สมการที่ 14.73})$$

โดยที่ P_a = แรงกระทำแบบ Active ของ Coulomb จากสมการที่ 14.62

ΔP_{ae} = แรงกระทำแบบ Active ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากแผ่นดินไหว

2. หาค่า P_a (จากสมการที่ 14.62)
3. หาค่า P_{ae} (จากสมการที่ 14.66)
4. หาค่า $\Delta P_{ae} = P_{ae} - P_a$
5. จากรูปที่ 14.17, ค่า P_a กระทำตรงจุด $H/3$ นับจากฐานของกำแพง ดังนั้น ΔP_{ae} จะกระทำเป็นระยะทาง $= 0.6H$ นับจากฐานของกำแพง



รูปที่ 14.17 จุดที่ P_{ae} กระทำต่อกำแพง

6. สามารถหาจุดที่ P_{ae} กระทำได้จากสมการ

$$\bar{z} = \frac{P_a \left(\frac{H}{3}\right) + \Delta P_{ae} (0.6H)}{P_{ae}} \quad (\text{สมการที่ 14.74})$$

โดยที่ \bar{z} = ระยะทางของจุดที่แรง P_{ae} กระทำนับจากฐานของกำแพงกันดิน

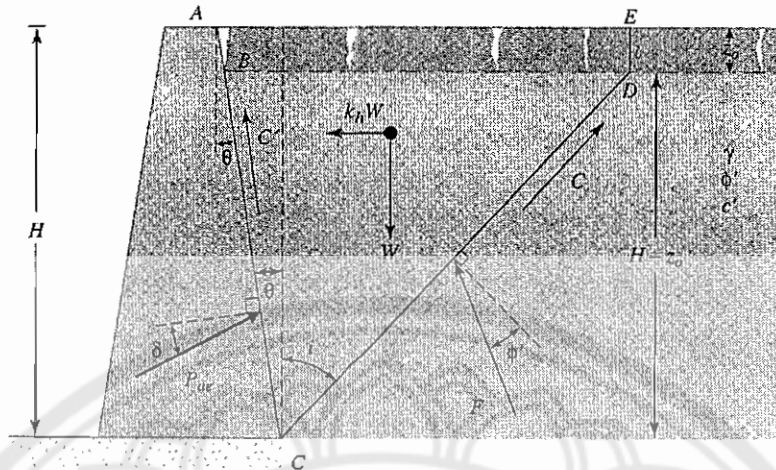
โดยที่แรง P_{ae} ที่กระทำกับกำแพงที่ระยะ \bar{z} นี้จะทำมุม δ กับด้านหลังของกำแพงกันดินดังแสดงดังรูปที่ 14.17 ซึ่งสำคัญมากในการใช้คำนวณหาค่า P_{ae} เพื่อที่จะประมาณการก่อสร้างกำแพงกันดินในการทำงานจริง

- 14.1.6.3.2 กรณีดินถมเป็นดินเหนียวปนทรายซึ่ง $c', \phi' \neq 0$

จากสมการของ Mononobe-Okabe ใช้ประมาณ P_{ae} สำหรับดินถมชนิดไม่มีค่าแรงเชื่อมแน่น (Cohesionless backfill) ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นในหัวข้อที่ผ่านมา แต่สำหรับดินเหนียวปนทรายแล้วมีสมการของ Prakash และ Saran (1966) ได้แสดงถึงวิธีการหาค่า P_{ae} ไว้โดย โดยรูปที่ 14.18 แสดงถึงกำแพงกันดินความสูง H ที่มีดินถมด้านหลังเป็นชนิด $c' - \phi'$ รวมถึงไม่มีมุมความลาดของดินถมด้วย ดังนั้นความลึกของรอยแตกรับแรงดึง (tensile crack) ของดินแบบ $c' - \phi'$ สามารถหาได้จากสมการที่ 14.38 คือ

$$z_0 = \frac{2c'}{\gamma \sqrt{k_a}} \quad (\text{สมการที่ 14.38})$$

โดยที่ $K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi'}{2} \right)$



รูปที่ 14.18 การประมาณลิมการวิบัติหลังกำแพงกันดินที่มีดินถมด้านหลังเป็นแบบ $c' - \phi'$

จากรูปที่ 14.18 แรงที่กระทำต่อลิ่มดิน (Soil wedge) ดังรูป (ต่อหน่วยความยาวของกำแพง) มีดังต่อไปนี้

1. W , น้ำหนักของลิ่ม ABCDE
2. F , แรงลัพธ์แรงเฉือน (shear) และแรงลัพธ์ปกติ (Normal) ที่กระทำบนผิวการวิบัติ CD
3. P_{ae} , แรงกระทำกรณี Active
4. $K_h W$, แรงเฉือนในแนวราบ (Horizontal inertia force)
5. $c(\overline{CD})$, แรงเชื่อมแน่น (Cohesive force) ตลอดความยาว CD
6. $c(\overline{BC})$, แรงยึดเกาะ (Adhesive force) ตลอดความยาว BC

โดยจะมีความสำคัญในการทำงานจริงอยู่ 2 ประการดังต่อไปนี้คือ

1. แรงเฉือนในแนวตั้ง (Vertical inertia force ; $k_v W$)
2. ค่าของแรงยึดเกาะ (Adhesion) ตลอดความยาวของดินกับกำแพงที่ผิว BC เราจะกำหนดให้เท่ากับค่าแรงเชื่อมแน่น (cohesion ; c) ของดิน

พิจารณาถึงแรงดังกล่าวมาแล้วข้างต้น เราจะสามารถแสดงได้ว่า

$$P_{ae} = \gamma(H - z_0)^2 N'_{ay} - c'(H - z_0) N'_{ac} \quad (\text{สมการที่ 14.75})$$

โดยที่

$$N'_{ac} = \frac{\cos \eta' \sec \theta + \cos \phi' \sec i}{\sin(\eta' + \delta)} \quad (\text{สมการที่ 14.76})$$

$$N'_{ay} = \frac{[(n + 0.5)(\tan \theta + \tan i) + n^2 \tan \theta][\cos(i + \phi') + k_n \sin(i + \phi')]}{\sin(\eta' + \delta)} \quad (\text{สมการที่ 14.77})$$

และมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องคือ

$$\eta' = \theta + i + \phi' \quad (\text{สมการที่ 14.78})$$

$$n = \frac{z_0}{H - z_0} \quad (\text{สมการที่ 14.79})$$

อย่างไรก็ตาม N'_{ac} และ N'_{ay} สามารถหาได้จากจุดสูงสุดของสัมประสิทธิ์ของแต่ละตัว ดังนั้นจากสมการที่ 14.75 ค่าสูงสุดของ P_{ae} จะอยู่ที่สภาวะสถิต (Static Condition) นั่นก็คือ $k_n = 0$ ดังนั้นจะได้

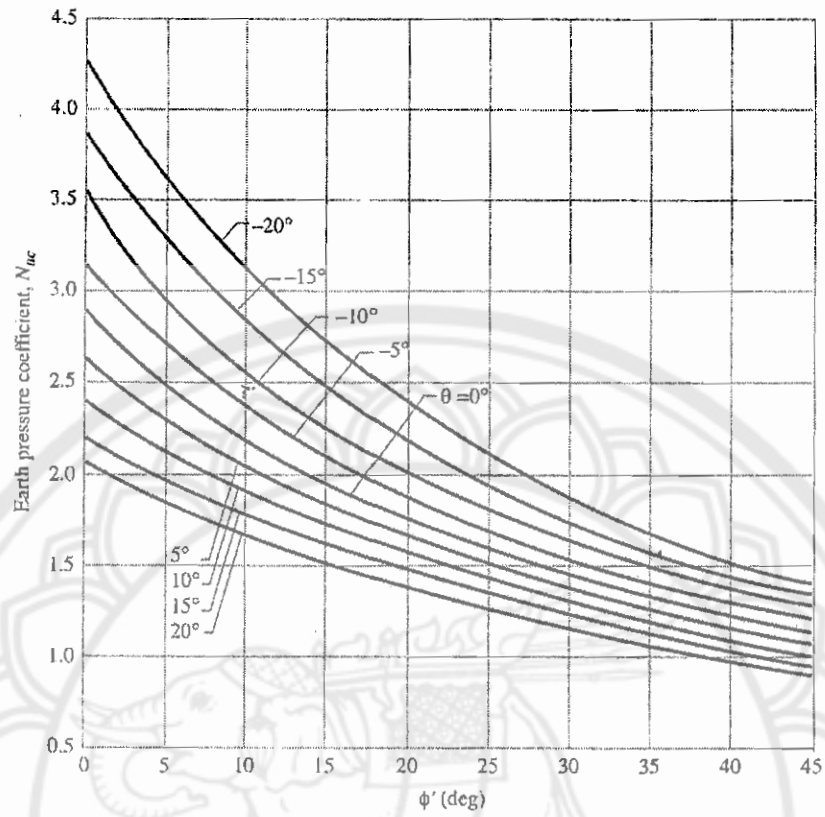
$$P_{ae} = \gamma(H - z_0)^2 N_{ay} - c'(H - z_0) N_{ac} \quad (\text{สมการที่ 14.80})$$

สำหรับความสัมพันธ์สำหรับ N_{ac} และ N_{ay} สำหรับหาค่าจากกรณีที่ $k_n = 0$ สามารถหาค่าได้จากสมการที่ 14.76 และสมการที่ 14.77 ตามลำดับคือ

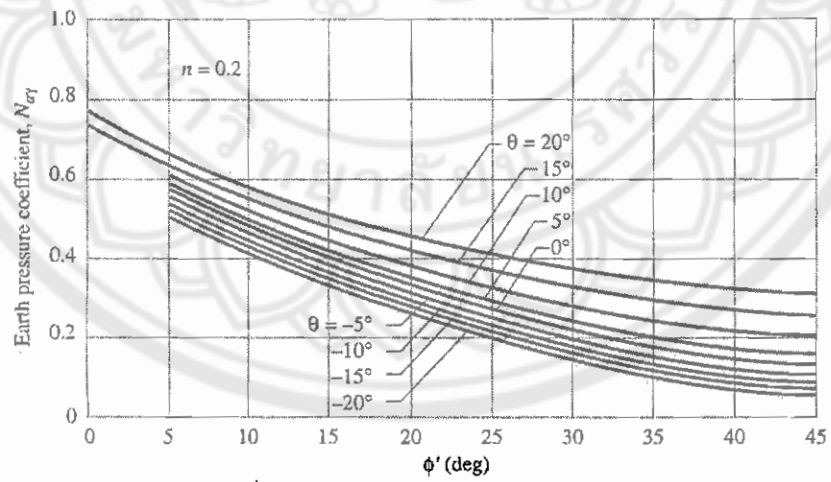
$$N_{ac} = N'_{ac} = \frac{\cos \eta' \sec \theta + \cos \phi' \sec i}{\sin(\eta' + \delta)} \quad (\text{สมการที่ 14.81})$$

$$N_{ay} = \frac{N'_{ay}}{\lambda} = \frac{[(n + 0.5)(\tan \theta + \tan i) + n^2 \tan \theta] \cos(i + \phi')}{\sin(\eta' + \delta)} \quad (\text{สมการที่ 14.82})$$

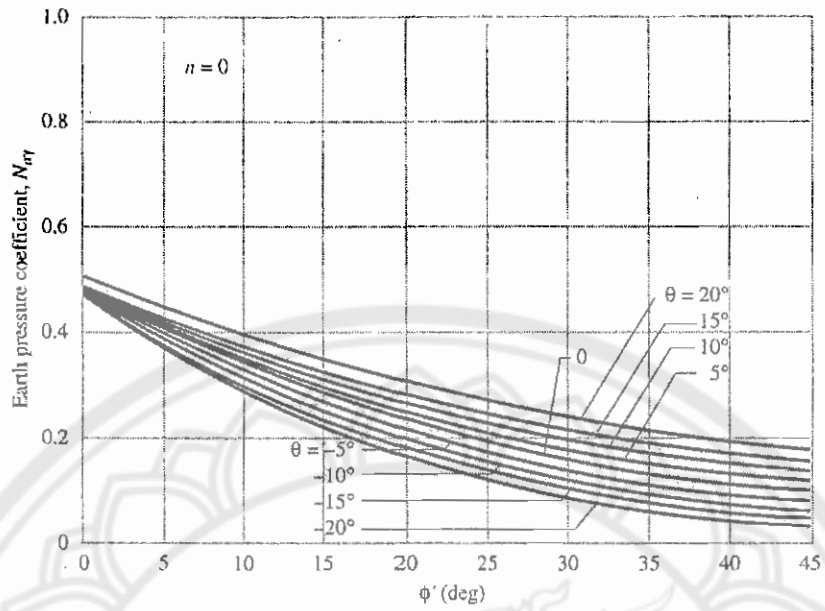
โดยที่ค่า N_{ac} , N_{ay} และ λ and ϕ' และค่ามุม θ สามารถแสดงให้เห็นจากรูปที่ 14.19 ถึงรูปที่ 14.22



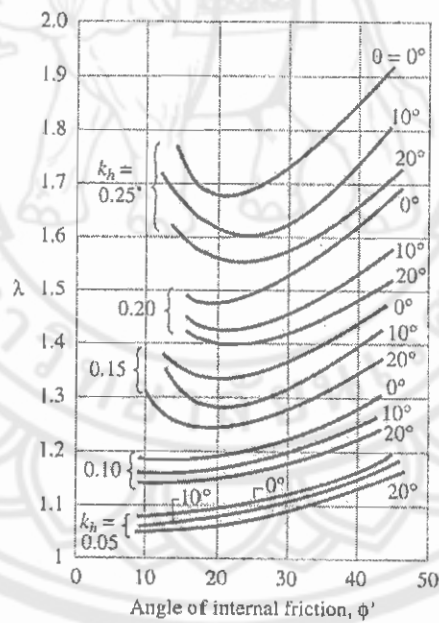
รูปที่ 14.19 ค่าของ $N_{ac} = N'_{ac}$ กับค่า ϕ' และ θ



รูปที่ 14.20 ค่า N_{ay} กับค่า ϕ' และ θ



รูปที่ 14.21 ค่า N_{er} กับค่า ϕ' และค่า θ โดยที่ $n=0$



รูปที่ 14.22 ค่า λ กับค่า k_h , ϕ' , and θ

- 14.1.6.4 แรงดันกรณี Passive ของ Coulomb (Coulomb's Passive Pressure)

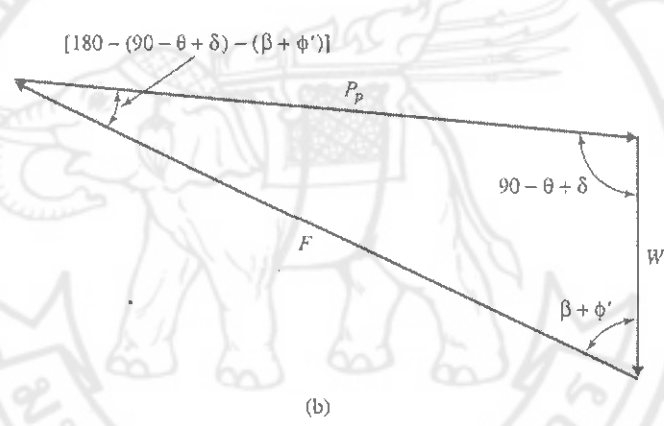
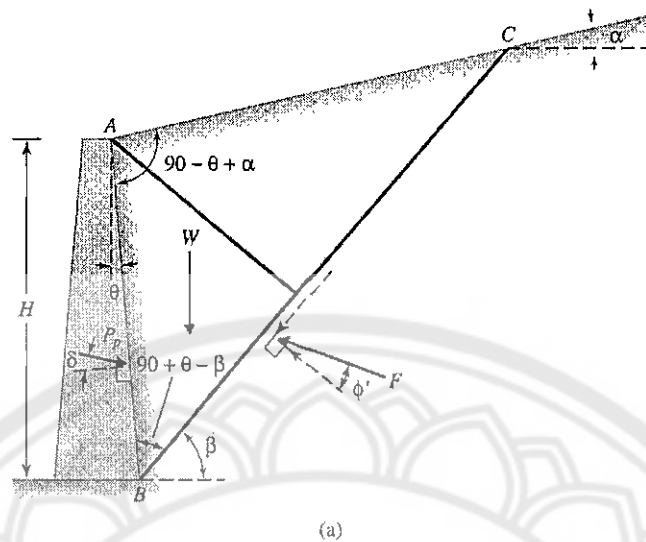
จากรูปที่ 14.23 (a) แสดงถึงกำแพงกันดินที่มีดินถมแบบไม่มีแรงเชื่อมแน่น (cohesionless) และกระทำเป็นมุมกันแนวราบ ซึ่งจะเหมือนกับรูปที่ 14.14 (a) โดยได้โครงสร้างของแรง (force polygon) สำหรับลิ้ม ABC ซึ่งเป็นลิ้มสำหรับสถานะ Passive สามารถแสดงได้ในรูปที่ 14.14 (b) ซึ่งมีค่า P_p ก็จะถือสัญลักษณ์ที่ใช้แทนแรงกระทำกรณี Passive ซึ่งเครื่องหมายที่ใช้นี้จะเหมือนกับที่ใช้ในกรณี Active ดังนั้นจากสมการที่ 14.62 แล้วจะได้

$$P_p = \frac{1}{2} K_p \gamma H^2 \quad (\text{สมการที่ 14.83})$$

โดยที่ K_p = สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างกรณี Passive ของ Coulomb
(Coulomb's passive earth pressure coefficient)

จะได้

$$K_p = \frac{\cos^2(\phi' + \theta)}{\cos^2 \theta \cos(\delta - \theta) \left[1 - \frac{\sin(\phi' - \delta) \sin(\phi' + \alpha)}{\cos(\delta - \theta) \cos(\alpha - \theta)} \right]^2} \quad (\text{สมการที่ 14.84})$$



รูปที่ 14.23 แรงดันดินกรณี Passive ของ Coulomb (a) การประมาณค่าของการวิบัติ (b) Force polygon

แต่สำหรับกำแพงที่ไม่มีแรงเสียดทาน (frictionless) และผิวด้านหลังกำแพงเป็นแบบแนวตั้ง และดินถมเป็นแบบดินเม็ดหยาบ (granular soil) และดินถมไม่ทำมุมกับแนวราบหรือเป็นแนวราบนั่นเอง ซึ่งก็คือ $\theta = 0^\circ$, $\alpha = 0^\circ$ และ $\delta = 0^\circ$ ดังนั้นจากสมการที่ 14.84 จะได้

$$K_p = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right)$$

ซึ่งความสัมพันธ์ข้างต้นจะเหมือนกับสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างกรณี Passive ของ Rankine ในสมการที่ 14.23 โดยค่า K_p ที่มีความสัมพันธ์ระหว่าง ϕ' กับ δ โดยให้ $\theta = 0^\circ$ และ $\alpha = 0^\circ$ แล้วสามารถแสดงได้ในตารางที่ 14.7 ซึ่งจกตารางจะเห็นว่าจากค่า ϕ' แล้วค่า K_p จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีแรงเสียดทานกำแพง (wall friction) มากขึ้น

ตารางที่ 14.7 แสดงค่า K_p ตามสมการที่ 14.84 สำหรับ $\theta = 0, \alpha = 0$

| $\downarrow \phi'$ (deg) | δ (deg) \rightarrow | | | | |
|--------------------------|------------------------------|-------|-------|-------|--------|
| | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| 15 | 1.698 | 1.900 | 2.130 | 2.405 | 2.735 |
| 20 | 2.040 | 2.313 | 2.636 | 3.030 | 3.525 |
| 25 | 2.464 | 2.830 | 3.286 | 3.855 | 4.597 |
| 30 | 3.000 | 3.506 | 4.143 | 4.977 | 6.105 |
| 35 | 3.690 | 4.390 | 5.310 | 6.854 | 8.324 |
| 40 | 4.600 | 5.590 | 6.946 | 8.870 | 11.772 |

- 14.1.6.4.1 แรงกระทำแบบ Passive บนกำแพงกันดินที่มีแรงกระทำจากแผ่นดินไหวกระทำ (Passive Force on Retaining Walls with Earthquake Forces)

จากรูปที่ 14.24 แสดงถึงลิ้มการวิบัติ (failure wedge) สำหรับแรงกระทำกรณี Passive ของกำแพงกันดินความสูง H ที่ดินถมเป็นดินเม็ดหยาบ (granular backfill) และแรงแผ่นดินไหว (earthquake forces) สำหรับสัญลักษณ์ในรูปที่ 14.24 นี้จะเหมือนกับในรูปที่ 14.15 ซึ่งการหาค่าจะคล้ายกันในกรณีของ Active แต่สมการนี้ผู้เสนอคือ Kapila (1962)

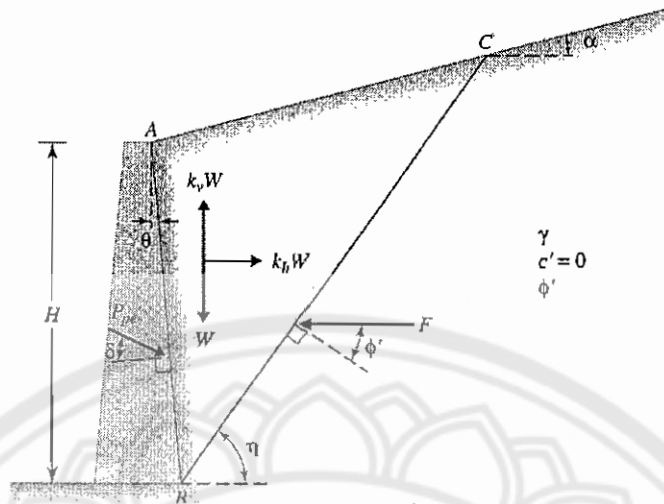
$$P_{pe} = \frac{1}{2} \gamma H^2 (1 - k_v) K'_p \quad (\text{สมการที่ 14.85})$$

โดยที่

$$K'_p = \frac{\cos^2(\phi' + \theta - \bar{\beta})}{\cos^2 \theta \cos^2 \bar{\beta} \cos(\delta - \theta + \bar{\beta}) \left\{ 1 - \sqrt{\frac{\sin(\delta + \phi') \sin(\phi' + \alpha - \bar{\beta})}{\cos(\delta - \theta + \bar{\beta}) \cos(\alpha - \theta)}} \right\}^2} \quad (\text{สมการที่ 14.86})$$

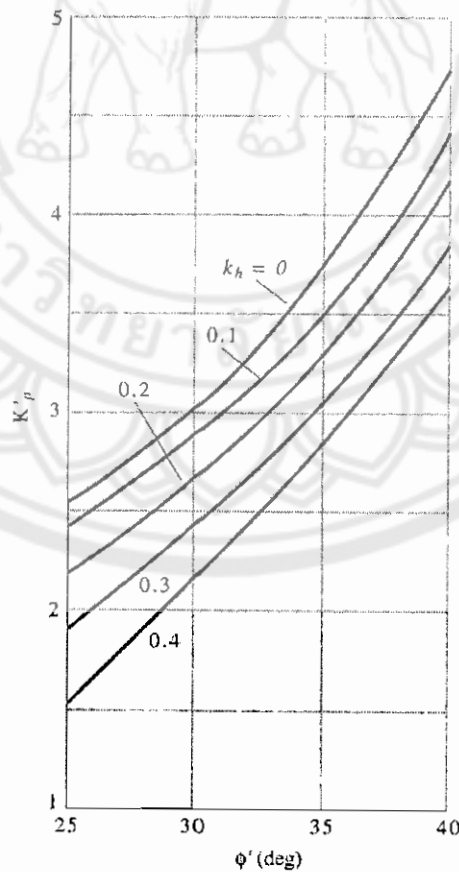
และ

$$\bar{\beta} = \tan^{-1} \left(\frac{k_h}{1 - k_v} \right) \quad (\text{สมการที่ 14.87})$$



รูปที่ 14.24 แรงกรณี Passive บนกำแพงกันดินที่มีแรงจากแผ่นดินไหวมากระทำด้วย

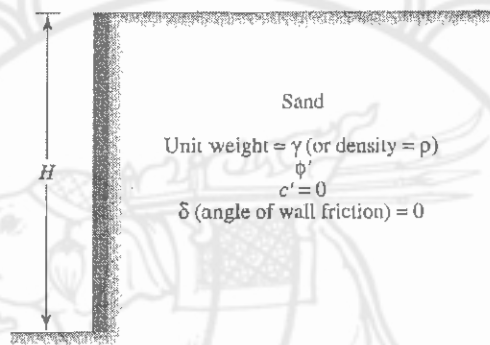
จากรูปที่ 14.25 แสดงถึงการพล็อตค่า K'_p กับ ϕ' สำหรับแต่ละค่า k_h ซึ่งสำหรับค่าที่ $k_v = \alpha = \theta = \delta = 0$ ดังแสดงดังรูป



รูปที่ 14.25 ค่า K'_p กับค่า k_h สำหรับ $k_v = \alpha = \theta = \delta = 0$

14.2 โจทย์ทบทวนเนื้อหา ความรู้ และความเข้าใจในหลักการพื้นฐานของเนื้อหาที่เรียน

14.2.1 ถ้าสมมติกำแพงดังแสดงดังรูปที่ 14.26 ถ้ากำแพงถึงจุด yield พอได้แล้วจงหาแรงต่อหน่วยความยาวของกำแพง (lateral force per unit length of the wall ; P_o) และหาจุดที่แรงนี้กระทำต่อกำแพง (location of the resultant ; \bar{z}) ถ้าความสูงของกำแพง (H) = 10 ft หน่วยน้ำหนักของดิน (γ) = 110 lb/ft³ และมุมเสียดทาน (ϕ') = 32°



รูปที่ 14.26 กำแพงที่ใช้ในข้อที่ 14.2.1

วิธีทำ จากโจทย์จะได้จากสมการที่ 14.5 จะได้

$$K_o = 1 - \sin\phi'$$

$$= 1 - \sin 32^\circ = 0.47$$

ดังนั้น ที่ $z = 0$ จะได้

$$\sigma'_o = 0$$

$$\sigma'_h = 0$$

$$u = 0$$

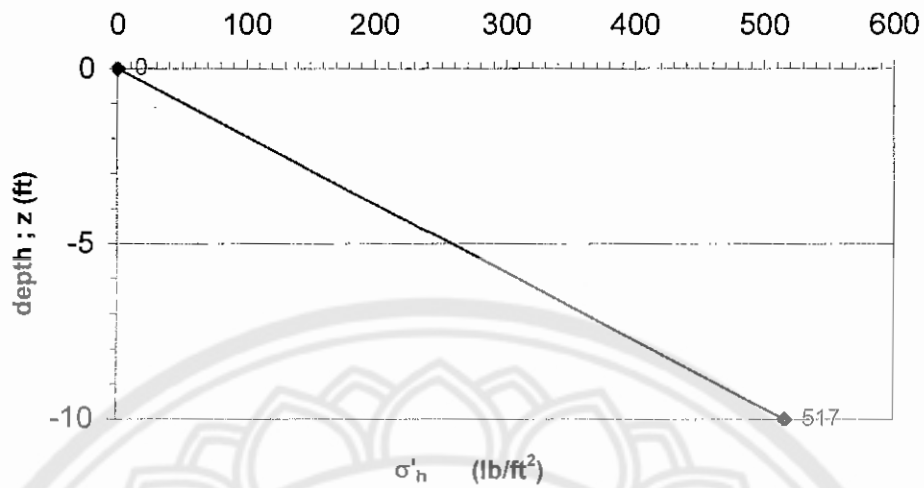
ที่ $z = 10\text{ft}$ จะได้

$$\sigma'_o = (10)(110) = 1100 \text{ lb/ft}^2$$

$$\sigma'_h = K_o \sigma'_o = (0.47)(1100) = 517 \text{ lb/ft}^2$$

$$u = 0$$

ซึ่งสามารถเขียนการกระจายตัวของแรงดันได้ตามรูปดังต่อไปนี้



รูปที่ 14.27 กราฟการกระจายตัวของแรงดันตามข้อที่ 14.2.1

∴ ค่าแรง (Lateral force) จะหาได้จากพื้นที่ของกราฟการกระจายตัวของแรงดัน

$$\begin{aligned}
 P_o &= \frac{1}{2} (\sigma_n')(z) \\
 &= \frac{1}{2} (517)(10)
 \end{aligned}$$

∴ จุดที่แรงกระทำต่อกำแพงนับจากจุดล่างสุดของกำแพงจะได้

$$\begin{aligned}
 \frac{z}{z} &= \frac{\sum \text{moment of Pressure diagram}}{P_o} \\
 &= \frac{P_o \left(\frac{H}{3} \right)}{P_o} \\
 &= \frac{2585 \left(\frac{10}{3} \right)}{2585} \\
 &= 3.33 \text{ ft}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นสรุปได้ว่ามีแรงกระทำต่อกำแพง = 2585 lb/ft ที่จุด 3.33 ft นับจากด้านล่างของกำแพง

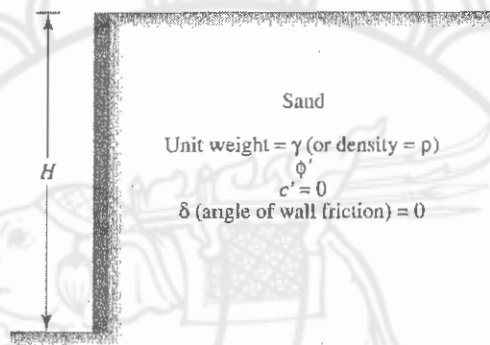
14.2.2 ถ้ากำหนดให้กำแพงกันดินมีลักษณะดังรูปที่ 14.26 โดยกำแพงไม่มีแรงเสียดทานระหว่างผิวกับดิน (frictionless) สำหรับปัญหานี้ จงหา

14.2.2.1 แรงดันดินกรณี Active ของ Rankine ต่อหนึ่งหน่วยความยาวกำแพง (P_a)

14.2.2.2 กราฟการกระจายตัวของแรงดันดินหลังกำแพง

14.2.2.3 จุดที่แรงดันดินกระทำต่อกำแพง (\bar{z})

โดยกำหนดให้ความสูงของกำแพง = 18 ft ซึ่งมีค่าหน่วยน้ำหนักของดิน = 100 lb/ft^3 และค่ามุมเสียดทานของดิน = 32°

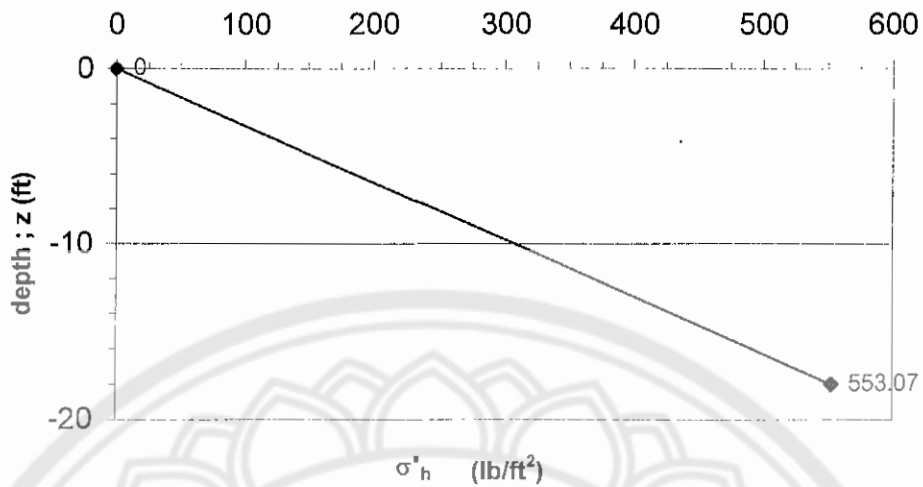


รูปที่ 14.28 กำแพงที่ใช้ในข้อที่ 14.2.2

วิธีทำ 14.2.2.1 ถ้า $c' = 0$ แล้วสามารถหาแรงดันดินกรณี Active ได้จากสมการที่ 6.18

$$\begin{aligned}
 \text{ที่ } z = 18 \text{ ft} \quad \text{จะได้ } \sigma_a' &= k_a \sigma_o' \\
 &= k_a \gamma z \\
 &= \left(\frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'} \right) \gamma z \\
 &= \left(\frac{1 - \sin 32^\circ}{1 + \sin 32^\circ} \right) (100)(18) \\
 &= 553.07 \text{ lb/ft}^2
 \end{aligned}$$

14.2.2.2 ดังนั้นสามารถเขียนกราฟกระจายตัวของแรงดันได้ตามรูปดังต่อไปนี้



รูปที่ 14.29 กราฟการกระจายตัวของแรงดันตามข้อที่ 14.2.2.2

14.2.2.3 จากกราฟการกระจายแรงดันจะได้แรงกรณี Active (Active force) ต่อหน่วยความยาวจะได้จากพื้นที่ของกราฟนั้นคือ

$$\begin{aligned}
 P_a &= \frac{1}{2} (\sigma_h)(z) \\
 &= \frac{1}{2} (553.07)(18) \\
 &= 4977.63 \text{ lb/ft}
 \end{aligned}$$

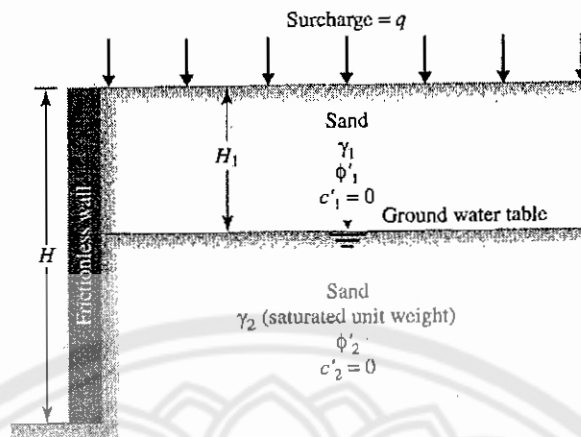
ซึ่งจะได้ \bar{z}

$$\begin{aligned}
 \bar{z} &= \frac{\Sigma M}{P_a} \\
 &= \frac{P_a \left(\frac{H}{3} \right)}{P_a} = \frac{H}{3} = \frac{18}{3} = 6 \text{ ft}
 \end{aligned}$$

14.2.3 กำแพงกันดิน (Retaining wall) ที่แสดงตามรูปที่ 14.30 ถ้ากำหนดให้ $H = 20 \text{ ft}$ และ $H_1 = 6 \text{ ft}$ โดยที่ $\gamma_1 = 110 \text{ lb/ft}^3$, $\gamma_2 = \gamma_{\text{sat}} = 120 \text{ lb/ft}^3$ และมีค่ามุมเสียดทาน $\phi'_1 = 34^\circ$ และ $\phi'_2 = 34^\circ$ โดยดินรับน้ำหนักแยกตาม $(q) = 300 \text{ lb/ft}^2$ ดังนั้นจงหา

14.2.3.1 แรงกระทำกรณี Active ของ Rankine (P_a) พร้อมทั้งจุดที่แรงกระทำ

14.2.3.2 แรงกระทำกรณี Passive ของ Rankine (P_p) พร้อมทั้งจุดที่แรงกระทำ



รูปที่ 14.30 กำแพงและชั้นดินที่ใช้ในข้อที่ 14.2.3

วิธีทำ

14.2.3.1 จากโจทย์ $c'_1 = 0$ และ $c'_2 = 0$ ถ้า

$\sigma'_a = k_a \sigma'_o$ โดยที่กรณีดินชั้นบนจะได้

$$k_a(\text{layer I}) = \frac{1 - \sin \phi'_1}{1 + \sin \phi'_1} = 0.28$$

$$k_o(\text{layer II}) = \frac{1 - \sin \phi'_2}{1 + \sin \phi'_2} = 0.28$$

ดังนั้น ที่จุด $z = 0$ จะได้

$$\sigma'_o = 300 \text{ lb/ft}^2$$

$$\sigma'_a = k_a \sigma'_o = 0.28 (300) = 84 \text{ lb/ft}^2$$

$$u = 0$$

ที่จุด $z = 6 \text{ ft}$ จะได้

$$\sigma'_o = 300 + \gamma_1 H_1 = 300 + (110)(6) = 960 \text{ lb/ft}^2$$

$$\sigma'_a = k_a \sigma'_o = 0.28 (960) = 268.8 \text{ lb/ft}^2$$

$$u = 0$$

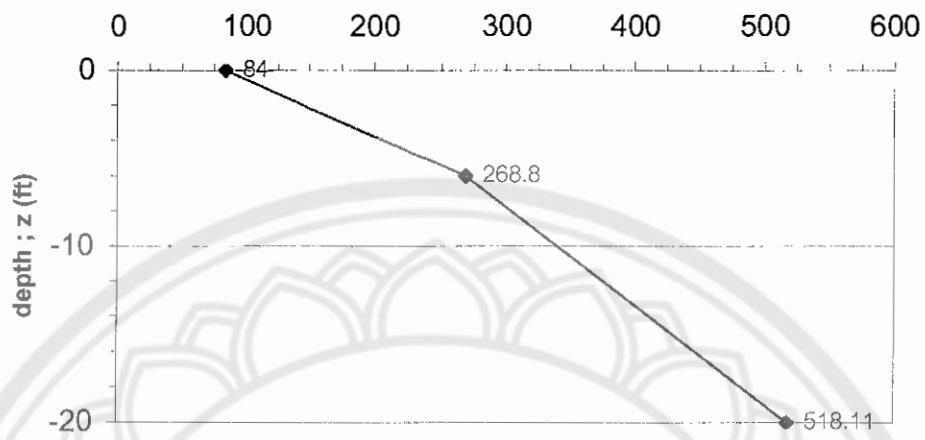
ที่จุด $z = 20 \text{ ft}$ จะได้

$$\sigma'_o = 300 + \gamma' H_2 + q = (110)(6) + (126 - 62.4)(14) + 300 = 1850.4 \text{ lb/ft}^2$$

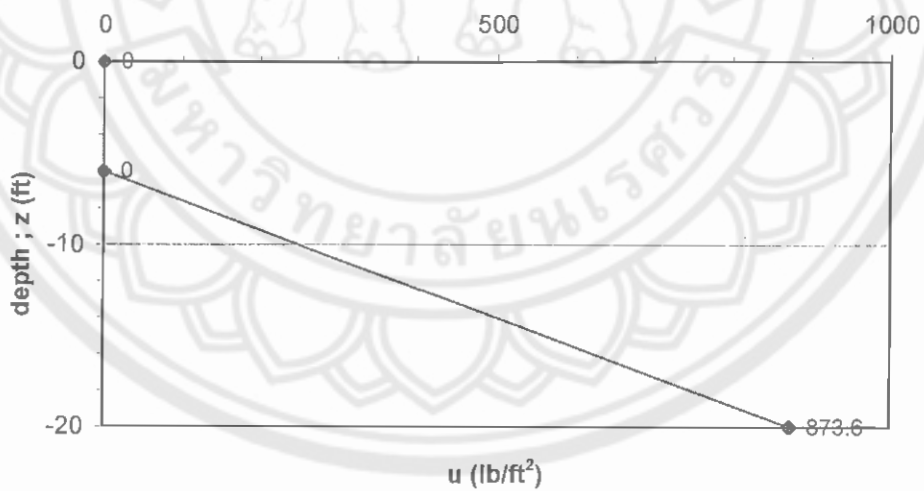
$$\sigma'_a = k_a \sigma'_o = 518.11 \text{ lb/ft}^2$$

$$u = \gamma_w (H - H_1) = 62.4(14) = 873.6 \text{ lb/ft}^2$$

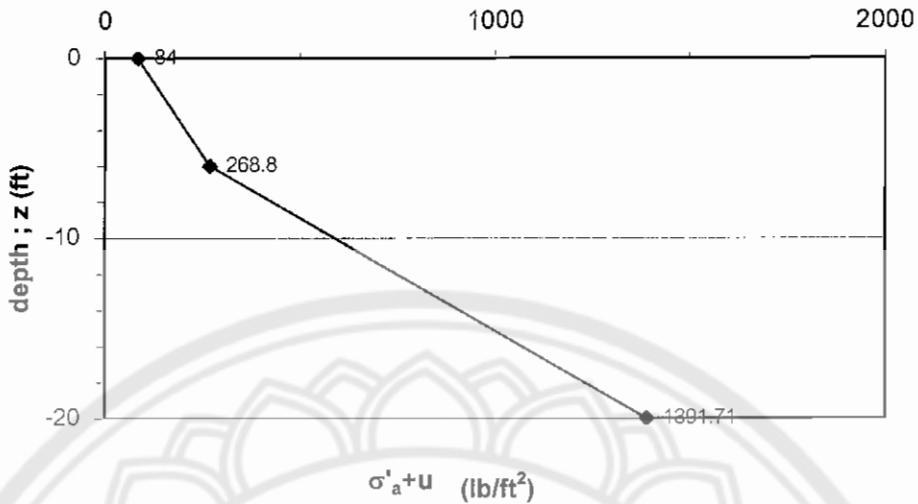
ดังนั้นสามารถเขียนกราฟการกระจายของแรงดันได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 14.31 σ'_a ของข้อที่ 12.2.3.1



รูปที่ 14.32 u ของข้อที่ 12.2.3.1



รูปที่ 14.33 $\sigma'_a + u$ ของข้อที่ 12.2.3.1

จากกราฟกระจายตัวของแรงดันสามารถหา P_a ได้จากพื้นที่ของ $\sigma'_a + u$ ซึ่งจะได้

$$P_a = (84)(6) + (268.8)(14) + (268.8 - 84)(6) + (1391.71 - 268.8)(14)$$

$$= 504 + 3763.2 + 554.4 + 7860.37$$

$$P_a = 12681.97 \text{ lb/ft}$$

\therefore จุดที่แรงกระทำต่อกำแพงนับจากจุดล่างสุดของกำแพงจะได้

$$\bar{z} = \frac{\sum \text{moment of Pressure diagram}}{P_a}$$

$$= \frac{(504)(14 + \frac{6}{2}) + (3763.2)(\frac{14}{2}) + (554.4)(14 + \frac{6}{3}) + (7860.37)(\frac{14}{3})}{12681.97}$$

$$= \frac{685018}{89138.14}$$

$$\bar{z} = 6.35 \text{ ft}$$

สรุปได้ว่ามีแรงกระทำต่อกำแพง = 12681.97 lb/ft ที่จุด 6.35 ft นับจากด้านล่างของกำแพง

14.2.3.2 จากโจทย์ $c'_1 = 0$ และ $c'_2 = 0$ ถ้า

$$\sigma'_p = k_p \sigma'_o$$

$$k_p(\text{layer I}) = \frac{1 + \sin \phi'_1}{1 - \sin \phi'_1} = 3.54$$

$$k_p(\text{layer II}) = \frac{1 + \sin \phi'_2}{1 - \sin \phi'_2} = 3.54$$

ดังนั้น ที่จุด $z = 0$ จะได้

$$\sigma'_0 = 300 \text{ lb/ft}^2$$

$$\sigma'_p = k_p \sigma'_0 = 3.54 (300) = 1062 \text{ lb/ft}^2$$

$$u = 0$$

ที่จุด $z = 6 \text{ ft}$ จะได้

$$\sigma'_0 = 300 + \gamma_1 H_1 = 300 + (110)(6) = 960 \text{ lb/ft}^2$$

$$\sigma'_p = k_p \sigma'_0 = 3.54 (960) = 3398.4 \text{ lb/ft}^2$$

$$u = 0$$

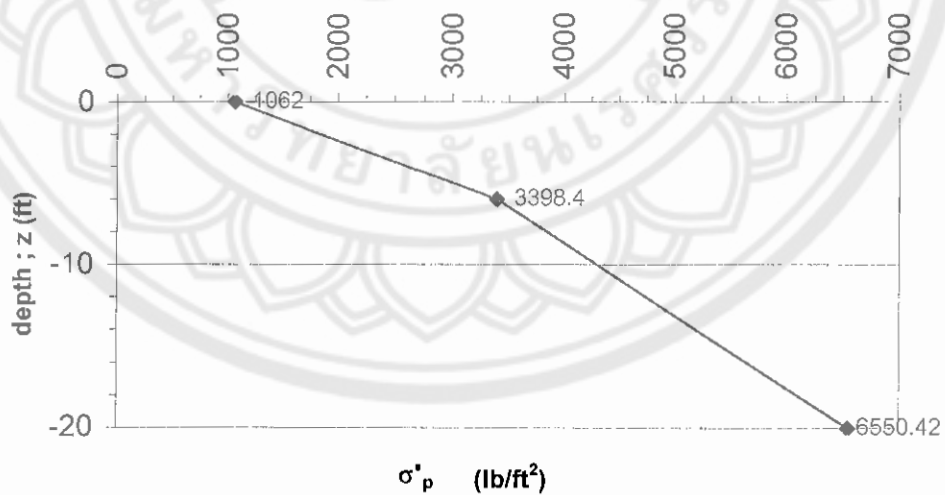
ที่จุด $z = 20 \text{ ft}$ จะได้

$$\sigma'_0 = q + \gamma_1 H_2 + \gamma' H_2 = 300 + (110)(6) + (126 - 62.4)(14) = 1850.4 \text{ lb/ft}^2$$

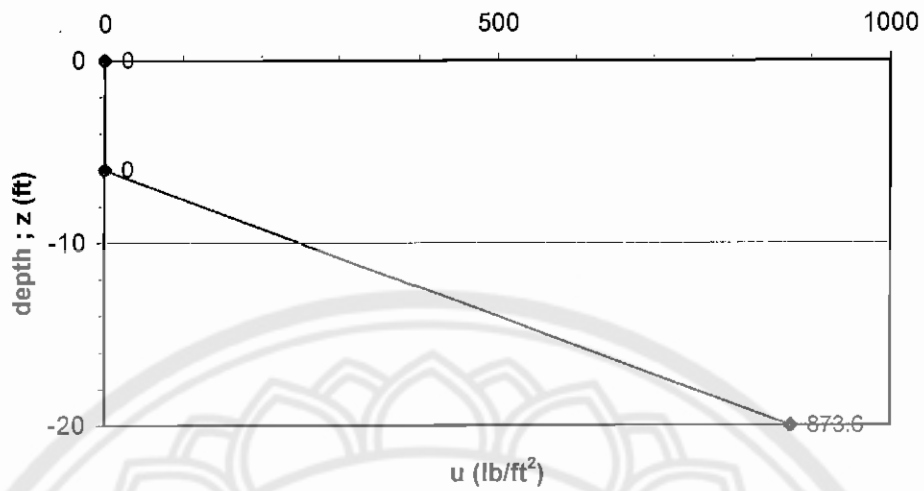
$$\sigma'_p = k_p \sigma'_0 = 3.54 (1850.4) = 6550.42 \text{ lb/ft}^2$$

$$u = \gamma_w (H - H_1) = 62.4 (14) = 873.6 \text{ lb/ft}^2$$

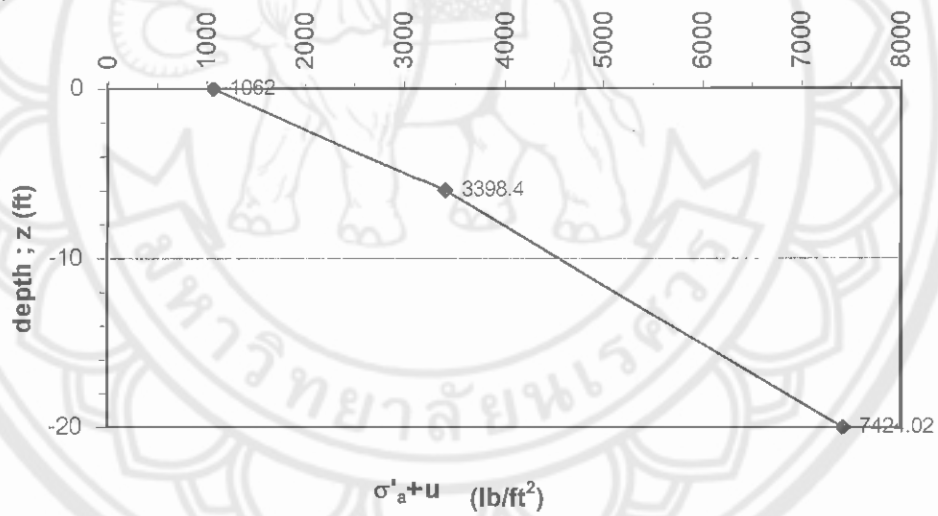
ดังนั้นสามารถเขียนกราฟการกระจายของแรงดันได้



รูปที่ 14.34 σ'_p ของข้อที่ 12.2.3.2



รูปที่ 14.35 u ของข้อที่ 12.2.3.2



รูปที่ 14.36 σ'_a + u ของข้อที่ 12.2.3.2

จากกราฟกระจายตัวของแรงดันสามารถหา P_p ได้จากพื้นที่ของ $\sigma'_a + u$ ซึ่งจะได้

$$\begin{aligned}
 P_p &= (1062)(6) + (3398.4 - 1062)(6) + (3398.4)(14) + (7424.02 - 3398.4)(14) \\
 &= 6372 + 7009.2 + 47577.6 + 28179.34 \\
 &= 89138.14 \text{ lb/ft}
 \end{aligned}$$

∴ จุดที่แรงกระทำต่อกำแพงนี้จากจุดล่างสุดของกำแพงจะได้

$$z = \frac{\sum M}{P_p}$$

$$= \frac{(6372)\left(14 + \frac{6}{2}\right) + (7009.2)\left(14 + \frac{6}{3}\right) + (47577.6)\left(\frac{14}{2}\right) + (28179.34)\left(\frac{14}{3}\right)}{89138.14}$$

$$z = 7.68 \text{ ft}$$

สรุปได้ว่ามีแรงกระทำต่อกำแพง = 89138.14 lb/ft ที่จุด 7.68 ft นับจากด้านล่างของกำแพง

14.2.4 จงหาแรงดันดินแบบ Active ที่กระทำต่อกำแพงกันดินสูง 5 m ดังรูปที่ 14.37 โดยใช้สมการของ Rankine ก่อนเกิดรอยแตก



รูปที่ 14.37 กำแพงกันดินที่ใช้ในข้อที่ 14.2.4

วิธีทำ จากสมการเมื่อแทนค่า ϕ' จากโจทย์จะได้ว่า

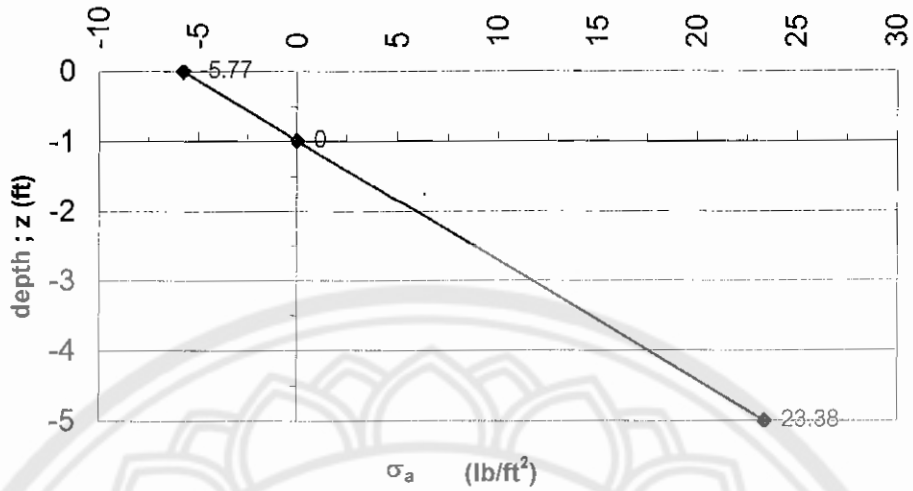
$$K_a = \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'} = 0.333$$

จากสมการ $\sigma_a = K_a \gamma Z - 2c'$ แทนค่าโดยใช้ข้อข้างต้นจะได้

$$\sigma_a = 0.333 \times 17.5 \times Z - 2 \times 5 \times \sqrt{0.333}$$

หรือ $\sigma_a = 5.83 \times z - 5.77$

ดังนั้นสามารถเขียนกราฟการกระจายตัวของแรงดันได้ดังนี้



รูปที่ 14.38 กราฟการกระจายตัวของแรงดันของข้อที่ 14.2.4

พิจารณาจากรูปจะได้ว่า

ที่ตำแหน่งบนสุด $Z = 0$ จะได้ $\sigma_a = -5.77 \text{ kN/m}^2$

จุด B มีค่า $\sigma_a = 0.0$

จะได้ว่า $5.83Z - 5.77 = 0$

$Z = 0.99 \text{ m}$

ที่ตำแหน่งล่างสุด $Z = 5 \text{ m}$

จะได้ค่า $\sigma_a = 5.83 \times 5 - 5.77 = 23.38 \text{ kN/m}^2$

ดังนั้นถ้าก่อนเกิดรอยแตก จะได้

แรงดันด้านลบ

$$P_1 = 0.5 \times 0.99 \times 5.77 = 2.89 \text{ kN/m}$$

แรงดันด้านบวก

$$P_2 = 0.5 \times 4.01 \times 23.38 = 46.88 \text{ kN/m}$$

∴ ดังนั้นจะได้แรงดันดินแบบ Active รวมเท่ากับ

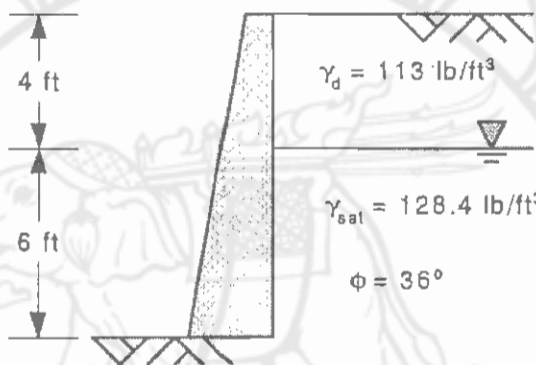
$$P_a = 46.88 - 2.86 = 44.02 \text{ kN/m}$$

∴ จุดที่แรงกระทำต่อกำแพงนับจากจุดล่างสุดของกำแพงจะได้

$$z = \frac{\sum M}{P_p}$$

$$z = \frac{(46.88)\left(\frac{4.01}{3}\right) - (2.86)(4.01 + 0.33)}{44.02} = 1.14 \text{ ft}$$

14.2.5 จากรูปแสดงกำแพงกันดินที่มีความสูง 10 ft จงหาแรงดันแบบ Active ที่กระทำต่อกำแพง และตำแหน่งที่แรงกระทำ



รูปที่ 14.38 กำแพงกันดินที่ใช้ในข้อที่ 14.2.5

วิธีทำ จากสมการสามารถหา $K_a = (1 - \sin 36^\circ) / (1 + \sin 36^\circ) = 0.26$

- แรงดันดิน

ที่ 0' : $\sigma_a' = 0 \text{ lb/ft}^2$

ที่ -4' : $\sigma_a' = 0.26 \times 113 \times 4 = 117.52 \text{ lb/ft}^2$

ที่ -10' : $\sigma_a' = 0.26 \times 113 \times 4 + 0.26 \times (128.4 - 62.4) \times 6 = 220.48 \text{ lb/ft}^2$

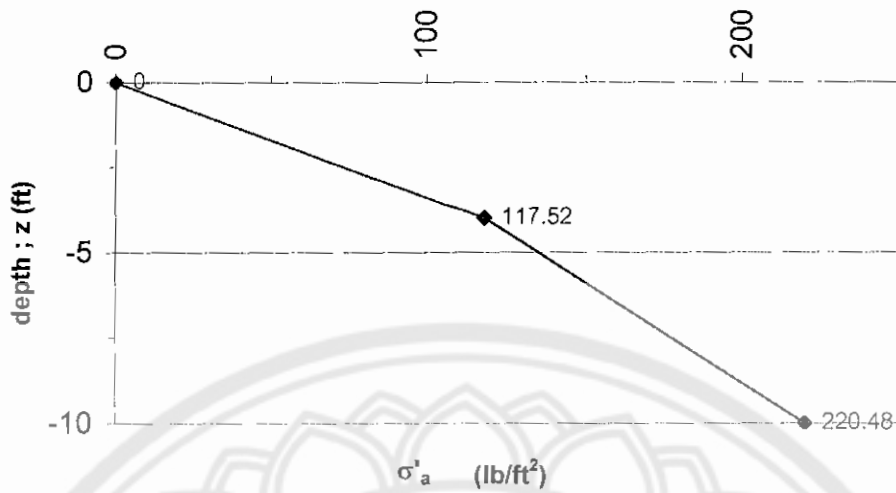
- แรงดันน้ำ

ที่ -0' : $u = 0 \text{ lb/ft}^2$

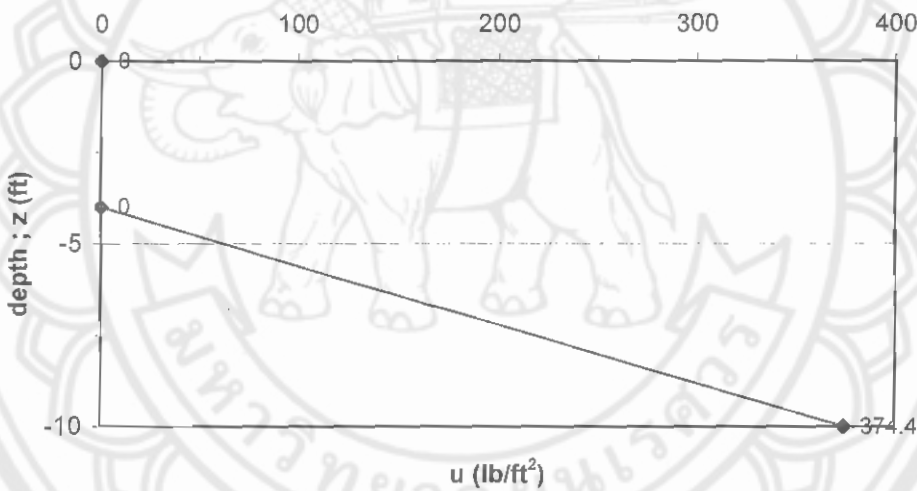
ที่ -4' : $u = 0 \text{ lb/ft}^2$

ที่ -10' : $u = 62.4 \times 6 = 374.4 \text{ lb/ft}^2$

ซึ่งสามารถเขียนกราฟการกระจายตัวของแรงดันได้ดังนี้



รูปที่ 14.39 กราฟการกระจายตัวของแรงดันประสิทธิผลของดิน



รูปที่ 14.40 กราฟการกระจายตัวของแรงดันของน้ำ

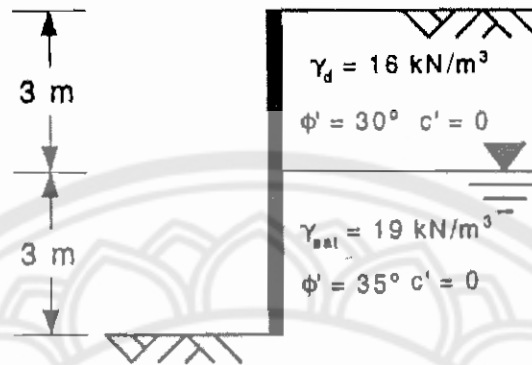
จากกราฟจะได้

$$\therefore P_a = \frac{1}{2} \times 117.52 \times 4 + \frac{1}{2} \times (117.52 \times 220.48) \times 6 + \frac{1}{2} \times 374.4 \times 6 = 2,372.24 \text{ lb/ft}$$

$$P_a x = \frac{1}{2} \times 117.52 \times 4 \times \left(\frac{4}{3} + 6\right) + \frac{1}{2} \times (220.48 - 117.52) \times 6 \times \frac{6}{3} + 117.52 \times 6 \times \frac{6}{2} + \frac{1}{2} \times 374.4 \times 6 \times \frac{6}{3}$$

$$x = 2.83 \text{ ft}$$

14.2.6 จากรูปที่ 14.41 จงหาแรงดันแบบ Active ที่กระทำต่อกำแพง และตำแหน่งที่แรงกระทำ



รูปที่ 14.41 แสดงกำแพงกันดินที่ใช้ในข้อที่ 14.2.6

วิธีทำ

เหนือระดับน้ำใต้ดิน : $K_a = (1 - \sin 30^\circ) / (1 + \sin 30^\circ) = 0.333$

ใต้ระดับน้ำใต้ดิน : $K_a = (1 - \sin 35^\circ) / (1 + \sin 35^\circ) = 0.271$

จะได้

- แรงดันดิน

ที่ 0 m : $\sigma_a' = 0 \text{ kN/m}^2$

ที่ 3 m : $\sigma_a' = 0.333 \times 16 \times 3 = 16 \text{ kN/m}^2$

$\sigma_a' = 0.271 \times 16 \times 3 = 13 \text{ kN/m}^2$

ที่ 6 m : $\sigma_a' = 0.27 \times 16 \times 3 + 0.27 \times (19 - 9.81) \times 3 = 20.4 \text{ kN/m}^2$

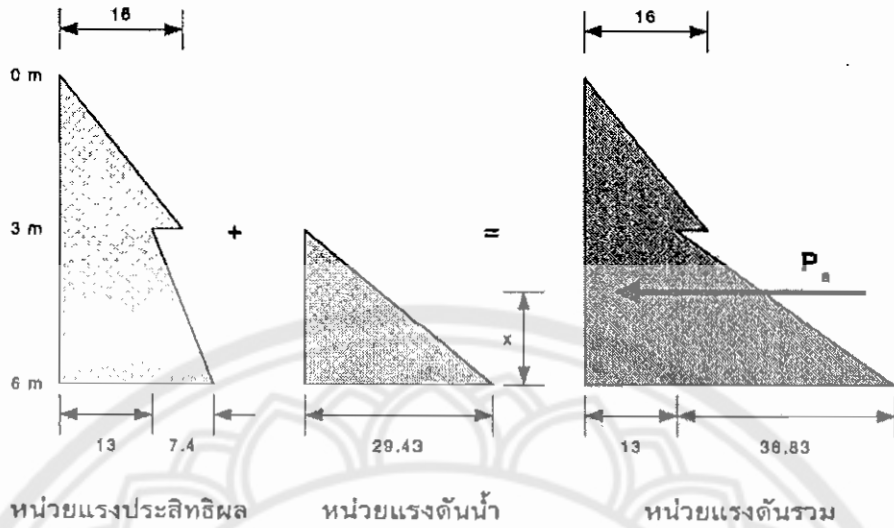
- แรงดันน้ำ

ที่ 0 m : $u = 0 \text{ kN/m}^2$

ที่ 3 m : $u = 0 \text{ kN/m}^2$

ที่ 6 m : $u = 9.81 \times 3 = 29.43 \text{ kN/m}^2$

สามารถเขียนกราฟการกระจายตัวของแรงดันได้ดังนี้



รูปที่ 14.42 กราฟการกระจายตัวของแรงดันของข้อที่ 14.2.6

จากกราฟกระจายตัวของแรงดันสามารถหา P_a ได้จากพื้นที่ของแรงดันรวมซึ่งจะได้

$$\therefore P_a = \frac{1}{2} \times 3 \times 16 + 3 \times 13 + \frac{1}{2} \times (49.83 - 13) \times 3 = 118.25 \text{ kN/m}$$

$$P_a \cdot x = \frac{1}{2} \times 16 \times 3 \times \left(\frac{3}{3} + 3\right) + 3 \times 13 \times \frac{3}{2} + \frac{1}{2} \times 3 \times (49.83 - 13) \times \frac{3}{3}$$

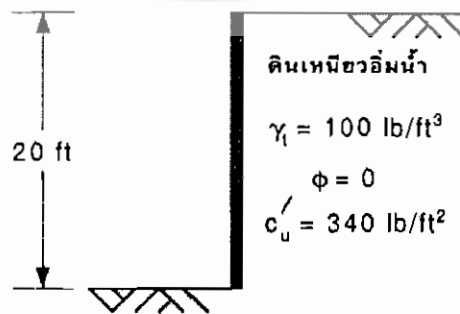
$$x = 1.77 \text{ m}$$

14.2.7 จากรูปที่ 14.43 แสดงโครงสร้างกันดินสำหรับดินเหนียวอิ่มน้ำ ถ้ากำแพงเคลื่อนออกจากดินถม จงหา

14.2.7.1 ระยะความลึกของรอยแตกเนื่องจากแรงดึง

14.2.7.2 แรงกระทำต่อกำแพง (ก่อนเกิดรอยแตกเนื่องจากแรงดึง)

14.2.7.3 แรงกระทำต่อกำแพง (หลังเกิดรอยแตกเนื่องจากแรงดึง)



รูปที่ 14.43 กำแพงที่ใช้ในข้อที่ 14.2.7

วิธีทำ จากสมการจะได้

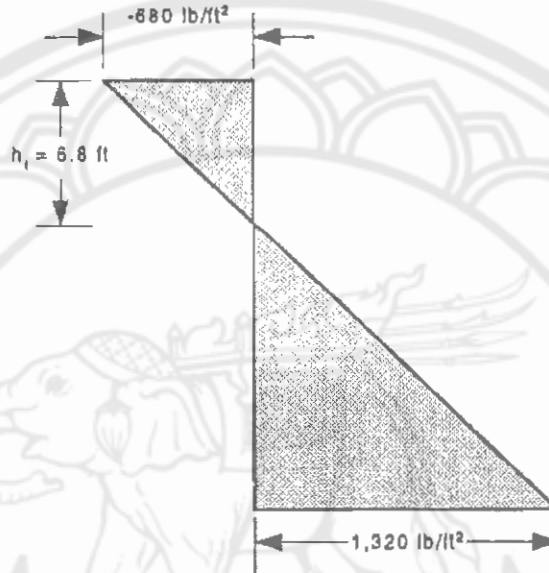
$$K_a = (1 - \sin 0^\circ) / (1 + \sin 0^\circ) = 1.0$$

ดังนั้น

$$\text{ที่ } 0' : \sigma'_a = 0 - 2 \times 340 = -680 \text{ lb/ft}^2$$

$$\text{ที่ } 20' : \sigma'_a = 100 \times 20 - 2 \times 340 = 1,320 \text{ lb/ft}^2$$

สามารถเขียนกราฟการกระจายตัวของแรงดันได้ดังนี้



รูปที่ 14.44 กราฟการกระจายตัวของแรงดันในข้อที่ 14.2.7

ดังนั้นจะได้

14.2.7.1 ระยะรอยแตกเนื่องจากแรงดึง

$$Z_o = \frac{2c'}{\gamma \sqrt{K_a}} = \frac{2 \times 340}{100} = 6.8 \text{ ft}$$

14.2.7.2 แรงกระทำต่อกำแพง (ก่อนเกิดรอยแตกเนื่องจากแรงดึง)

สามารถหาได้จาก

$$P_a = \frac{1}{2} \times 1,320 \times (20 - 6.8) - \frac{1}{2} \times 680 \times 6.8 = 6,400 \text{ lb/ft}$$

หรือ

$$P_a = \frac{1}{2} \times 100 \times 20^2 - 2 \times 340 \times 20 = 6,400 \text{ lb/ft}$$

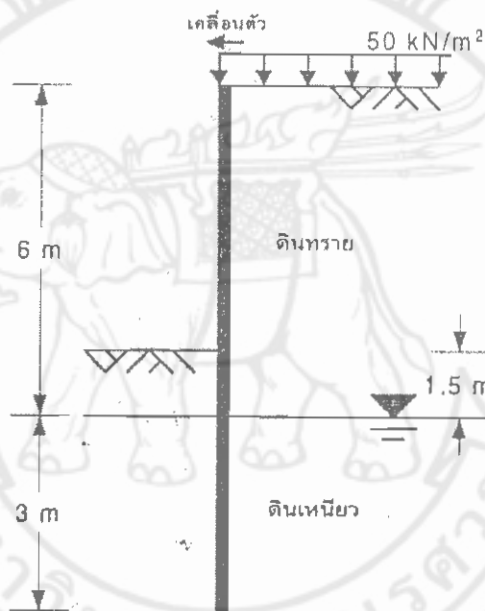
14.2.7.3 แรงกระทำต่อกำแพง (หลังเกิดรอยแตกเนื่องจากแรงดึง)

สามารถหาได้จาก

$$P_a = \frac{1}{2} \times (20 - 6.8) \times 1,320 = 8,712 \text{ lb/ft}$$

14.3 โจทย์ทดสอบความสามารถในการคิดวิเคราะห์โดยประยุกต์ใช้ความรู้ เพื่อแก้ไข ปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในการทำงาน

14.3.1 ในการก่อสร้าง Sheet pile กันดินที่มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ วิทยาเขตพะเยา เพื่อกันดินถล่ม ดังแสดงดังรูปที่ 14.45 แสดงชั้นดินที่ได้จากการสำรวจ ประกอบด้วยชั้นดินสองชั้น ชั้นบนอยู่เหนือระดับ น้ำใต้ดินเป็นดินทรายที่มี $c' = 0$ $\phi' = 28^\circ$ และ $\gamma_{sat} = 19.5 \text{ kN/m}^3$ และชั้นล่างคือดินเหนียว ดังนั้นใน ฐานะวิศวกรที่ปรึกษาของมหาวิทยาลัย จึงพล็อตการกระจายของหน่วยแรงดัน กับความลึกที่แสดงดังรูป



รูปที่ 14.45 ชั้นดินที่ได้จากการสำรวจในข้อที่ 14.3.1

วิธีทำ จะได้ว่า

ดินทราย : $K_a = (1 - \sin 38^\circ) / (1 + \sin 38^\circ) = 0.24$ $K_p = (1 + \sin 38^\circ) / (1 - \sin 38^\circ) = 4.17$

ดินเหนียว : $K_a = (1 - \sin 28^\circ) / (1 + \sin 28^\circ) = 0.36$ $K_p = (1 + \sin 28^\circ) / (1 - \sin 28^\circ) = 2.78$

ดังนั้น

1. แรงดันแบบแอกทีฟกระทำต่อกำแพง (ขวามือ)

- แรงดันดิน

ที่ 0 m : $\sigma_a' = 0.24 \times 50 = 12 \text{ kN/m}^2$

ที่ 6 m : $\sigma_{a(-)}' = 0.24 \times 50 + 0.24 \times 18 \times 6 = 37.9 \text{ kN/m}^2$

ที่ 6 m : $\sigma_{a(+)}' = 0.6 \times (50 + 18 \times 6) - 2 \times 10 \times \sqrt{0.36} = 44.9 \text{ kN/m}^2$

$$\begin{aligned} \text{ที่ } 9 \text{ m : } \sigma'_a &= 0.6 \times (50 + 18 \times 6) - 2 \times 10 \times \sqrt{0.36} + 0.36 \times (19.5 - 9.81) \times 3 \\ &= 55.35 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

2. แรงดันแบบพาสทีฟกระทำต่อกำแพง (ซ้ายมือ)

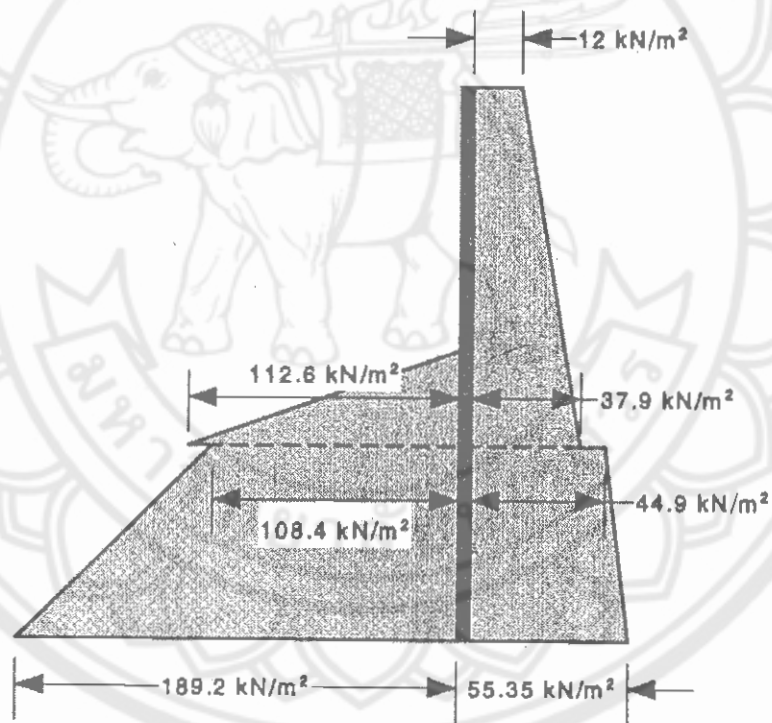
- แรงดันดิน

$$\text{ที่ } 0 \text{ m : } \sigma'_a &= 0 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{ที่ } 1.5 \text{ m : } \sigma'_{a(-)} &= 4.17 \times 18 \times 1.5 = 112.6 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{ที่ } 1.5 \text{ m : } \sigma'_{a(+)} &= 2.78 \times 18 \times 1.5 + 2 \times 10 \times \sqrt{2.78} = 108.4 \text{ kN/m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{ที่ } 4.5 \text{ m : } \sigma'_a &= 2.78 \times 18 \times 1.5 + 2 \times 10 \times \sqrt{2.78} + 2.78 \times (19.5 - 9.81) \times 3 \\ &= 189.2 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$



รูปที่ 14.46 แสดงกราฟการกระจายตัวของแรงดันของ Sheet Pile ในข้อที่ 14.3.1

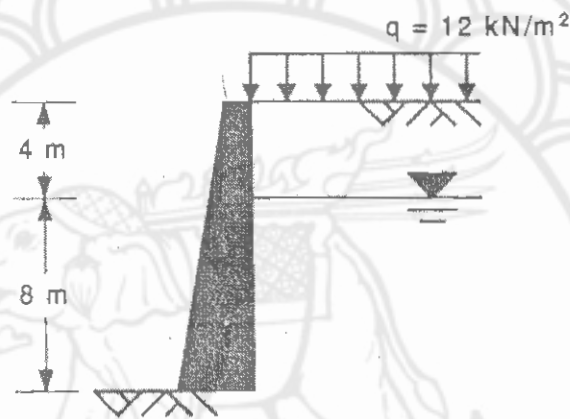
หมายเหตุ จะสังเกตได้ว่าแรงดันน้ำจากด้านซ้าย และด้านขวาจะหักล้างกันพอดี

14.3.2 ในการก่อสร้างกำแพงกันดินที่กันดินทั้งตามริมแม่น้ำนาน จังหวัดพิษณุโลก ดังแสดงดังรูปที่ 14.47 ถ้าดินถมด้านหลังกำแพงเป็นดินที่มีความเชื่อมแน่น (Cohesive Soil) ที่มีหน่วยแรงเชื่อมแน่นเท่ากับ 24 kN/m^2 และมุมเสียดทานภายใน 8° ดินมีความหนาแน่นแห้ง $1,640 \text{ kN/m}^3$ และความหนาแน่นในสภาพอิ่มน้ำ $2,000 \text{ kN/m}^3$ ดังนั้นในฐานะวิศวกรควบคุมโครงการก่อสร้าง จงหา

14.3.2.1 แรงดันแบบแอกทีฟที่กระทำต่อกำแพง

14.3.2.2 ความลึกของรอยแตกเนื่องจากแรงดึง

14.3.2.3 ตำแหน่งที่แรงกระทำต่อกำแพง



รูปที่ 14.47 กำแพงกันดินที่ใช้ในการก่อสร้าง ในข้อที่ 14.3.2

เพื่อไปออกแบบอัตราส่วนความปลอดภัยต่อไป อีกทั้งไปคำนวณหาค่าอัตราการทรุดตัวของดิน

วิธีทำ 14.3.2.1 จากโจทย์จะได้ $K_a = (1 - \sin 8^\circ) / (1 + \sin 8^\circ) = 0.756$

ดังนั้นจะได้

1. แรงกระทำต่อกำแพง

- แรงดันดิน

ที่ 0 m จะได้

$$\sigma_a' = 2 \times 24 \times \sqrt{0.756} = -41.74 \text{ kN/m}^2$$

ที่ 4 m จะได้

$$\sigma_a' = 0.756 \times (16.09 \times 4) - 2 \times 24 \times \sqrt{0.756} = 6.92 \text{ kN/m}^2$$

ที่ 12 m จะได้

$$\sigma_a' = 0.756 \times (16.09 \times 4) + 0.756 \times (19.62 - 9.81) \times 8 -$$

$$2 \times 24 \times \sqrt{0.756}$$

$$= 66.25 \text{ kN/m}^2$$

- แรงดันน้ำ

ที่ 0 m : $u = 0 \text{ kN/m}^2$

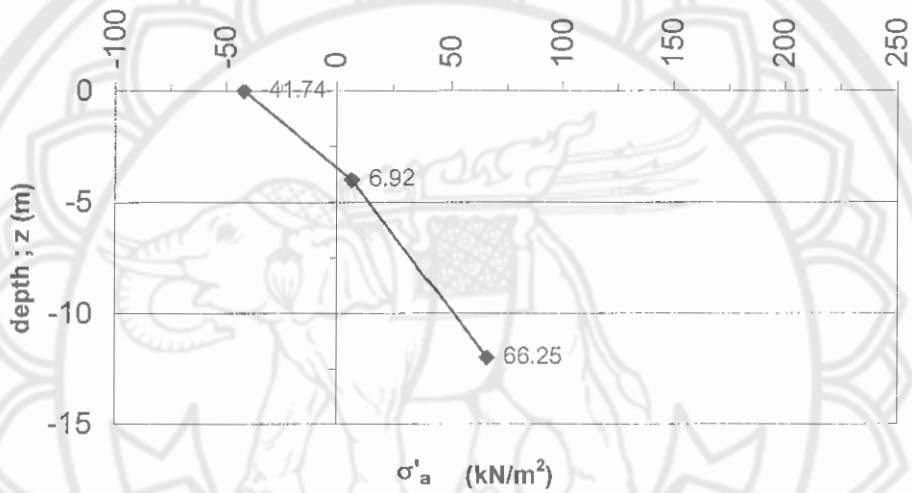
ที่ 4 m : $u = 0 \text{ kN/m}^2$

ที่ 12 m : $u = 9.81 \times 8 = 78.48 \text{ kN/m}^2$

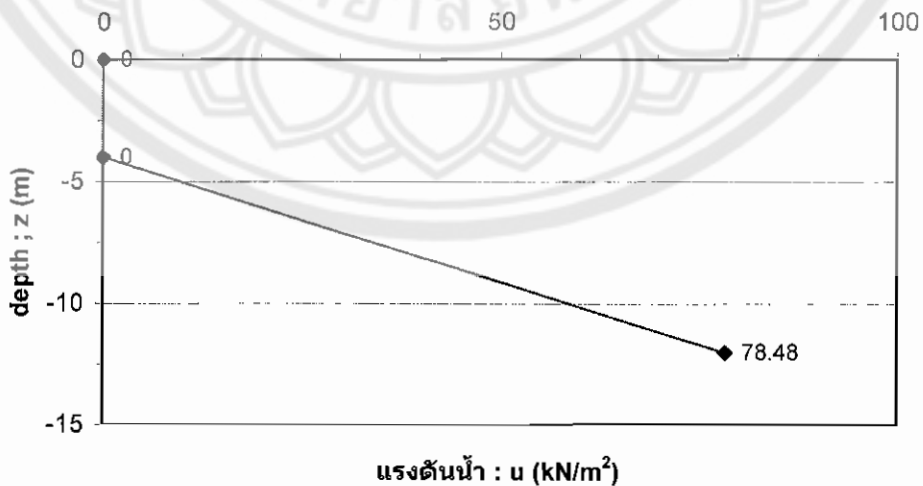
- แรงดันจากน้ำหนักบรรทุก

มีค่าเท่ากับ $12 \times 7.56 \rightarrow 9.04 \text{ kN/m}^3$ ตลอดความลึก

สามารถเขียนกราฟการกระจายตัวของแรงดันได้ดังนี้

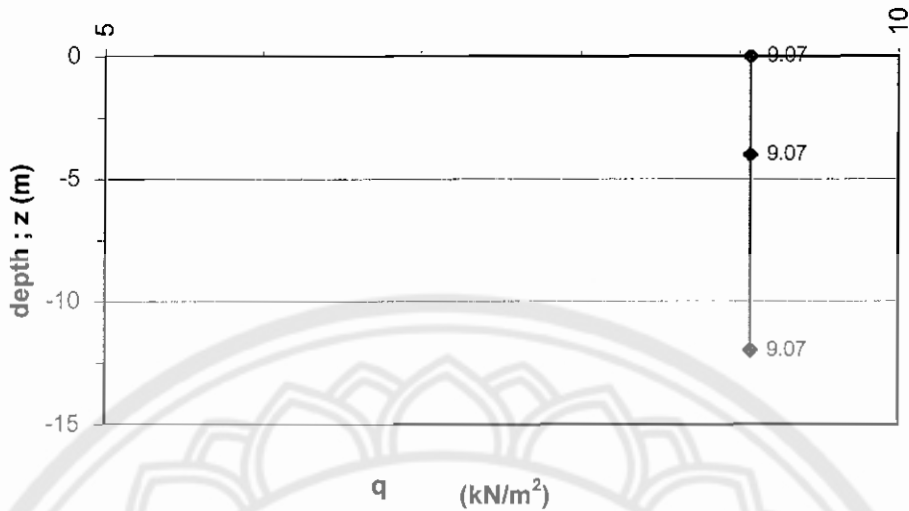


รูปที่ 14.48 แสดงการกระจายตัวของแรงดันดิน



รูปที่ 14.49 แสดงการกระจายตัวของแรงดันน้ำ

+



รูปที่ 14.50 แสดงการกระจายตัวของแรงจากน้ำหนักบรรทุก

จากกราฟแรงดันแบบ Active จะเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟของกราฟทั้งสามบวกกัน

$$\therefore P_a = -\frac{1}{2} \times 3.43 \times 41.74 + \frac{1}{2} \times (4 - 3.43) \times 6.92 + \frac{1}{2} \times (6.92 + 66.25) \times 8 + \frac{1}{2} \times 78.48 \times 8 + 9.07 \times 12 = 645.83 \text{ kN/m}$$

14.3.2.2 รอยแตกเนื่องจากแรงดึง

$$h_c = \frac{2c}{\gamma \sqrt{K_a}} = \frac{2 \times 24}{16.09 \sqrt{0.756}} = 3.43 \text{ m}$$

14.3.2.3 ตำแหน่งที่แรงกระทำ

$$P_a \cdot x = -\frac{1}{2} (3.43) (41.74) \times \left(\frac{2}{3} \times 3.43 + 8.57 \right) + \frac{1}{2} (0.57) (6.92) \left(\frac{0.57}{3} + 8 \right) + (6.92) (8) \left(\frac{8}{2} \right) + \frac{1}{2} (66.25) (8) \left(\frac{8}{3} \right) + \frac{1}{2} (78.48) (8) \left(\frac{8}{3} \right) + (9.07) (12) \left(\frac{12}{2} \right)$$

$$x = 2.57 \text{ m}$$

14.3.3 จากการก่อสร้างกำแพงกันดินเพื่อกันดินถล่มที่ริมแม่น้ำยม อ.สามง่าม จ.พิจิตร แห่งหนึ่ง สูง 6 ม. โดยผนังด้านที่กันดินอยู่ในแนวตั้ง และดินที่กันเป็นดินประเภทไม่มีความเชื่อมแน่นซึ่งมีความหนาแน่นเมื่อแห้งเท่ากับ $1,600 \text{ กก./ม.}^3$ มุมด้านทานต่อแรงเฉือนเท่ากับ 35° และมีอัตราส่วนช่องว่างเท่ากับ 0.68 ผิวดินอยู่ในแนวราบ และระดับสูงเท่ากับสันกำแพง ถ้าไม่คิดความฝืดของกำแพง จงหาแต่ที่แม่น้ำแห่งนี้มีระดับน้ำเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจงหาแรงดันดินทั้งหมดที่กระทำต่อกำแพงต่อเมตรความยาว ใน 2 กรณีดังต่อไปนี้

14.3.3.1 ถ้าดินแห้ง กรณีอยู่ในหน้าแล้ง

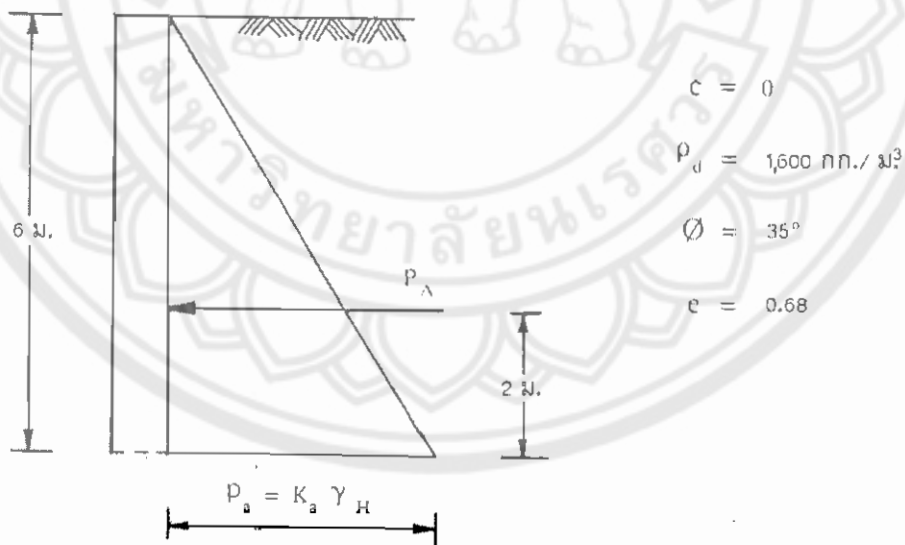
14.3.3.2 ถ้าการระบายน้ำไม่เพียงพอ ทำให้น้ำท่วมถึงระดับ 2.5 ม. ได้ผิวดิน กรณีอยู่ในหน้าฝน หมายเหตุ ให้หาตำแหน่งที่แรงดันกระทำว่าสูงจากฐานกำแพงเท่าไรด้วย

วิธีทำ 14.3.3.1 กรณีดินถมเป็นดินชนิดไม่มีความเชื่อมแน่น

$\therefore c = 0$ และไม่คิดความเสียดทานระหว่างกำแพงกับดิน

$$\therefore K_a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi}; \phi = 35^\circ = 0.271$$

ดังนั้นสามารถลงรายละเอียดในรูปดังนี้



รูปที่ 14.51 รูปกำแพงกันดินที่ลงรายละเอียดแล้ว

ดังนั้น 14.3.3.1 หาพารามิเตอร์ที่จำเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} \gamma_d &= \rho_d g \\ &= 1,600 \times 9.81 \times 10^{-3} = 15.7 \text{ กก./ม.}^3 \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้

$$P_a = K_a \gamma H$$

$$= 0.271 \times 15.7 \times 6 = 25.53 \text{ กน./ม.}^2$$

$$\therefore P_a = 0.5 \times 25.53 \times 6 = 76.6 \text{ กน./ม. ความยาวของกำแพง}$$

ตำแหน่งที่แรงดันดินกระทำต่อกำแพงจะอยู่ที่จุดศูนย์กลางของรูปแรงดัน

นั่นคือ $\frac{6}{3} = 2 \text{ ม.}$ จากฐานกำแพง

14.3.3.2 ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ความลึก 2.5 ม. จากผิวดิน ดังนั้น ดินที่อยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดินจะจมน้ำ ซึ่งความหนาแน่นจะเป็นความหนาแน่นของดินจมน้ำ (ρ') แทนความหนาแน่นแห้ง และจะมีแรงดันน้ำเนื่องจากน้ำใต้ดินด้วย

ดังนั้น แรงดันทั้งหมดที่กระทำต่อกำแพงจะมีดังนี้

- ดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน

$$P_a = K_a \gamma H$$

$$= 0.271 \times 15.7 \times 2.5 = 10.64 \text{ กน./ม.}^3$$

แรงดันจำนวนนี้จะกระทำลงไปจนถึงฐานกำแพงด้วย

- ดินที่อยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดิน

พิจารณาปริมาตรของดิน 1 ม.³

$$e = \frac{V_v}{V_s} = 0.68$$

$$V_v + V_s = 1$$

$$V_v + \frac{V_v}{0.68} = 1$$

$$V_v = 0.405 \text{ ม.}^3$$

เนื่องจากดินจมน้ำ ดังนั้นช่องว่างจะอิมตัว

$$V_w = V_v$$

$$\therefore M_w = V_w \rho_w$$

$$= 0.405 \times 1,000 = 405 \text{ กก.}$$

$$\therefore \rho_d = 1,600 \text{ กก./ม.}^3$$

$$\therefore M_s = 1,600 \text{ กก.}$$

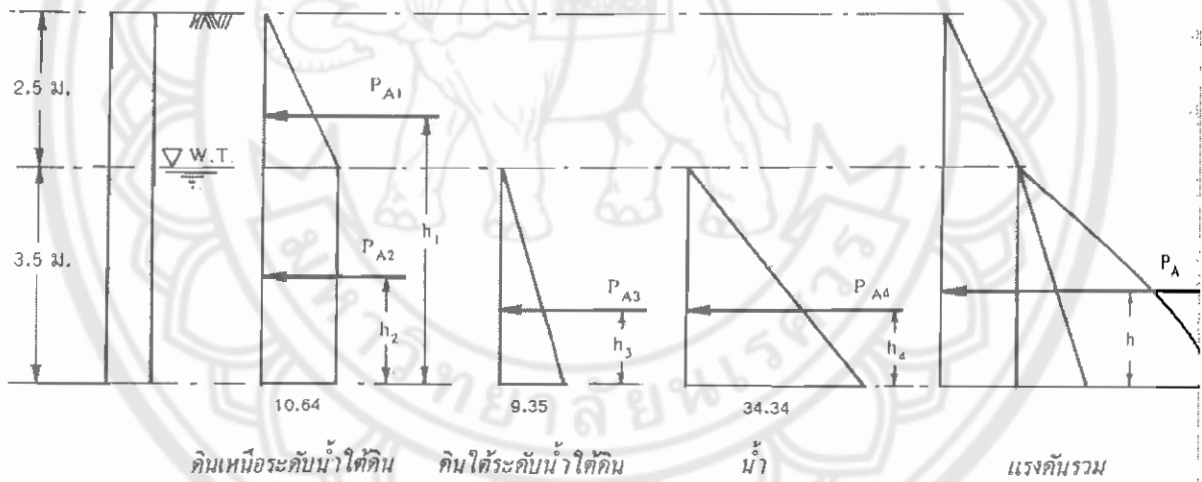
$$\therefore \rho_{sat} = 2,005 \text{ กก./ม.}^3$$

$$\begin{aligned} \rho' &= \rho_{\text{sat}} - \rho_w \\ &= 2,005 - 1,000 = 1,005 \text{ กก./ม.}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_a &= K_a \gamma' H \text{ (สมมติว่า } \phi \text{ ไม่เปลี่ยน)} \\ &= 0.271 (1,005 \times 9.81 \times 10^{-3}) 3.5 \\ &= 9.35 \text{ กก./ม.}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{แรงดันน้ำ} &= (1,000 \times 9.81 \times 10^{-3}) 3.5 \\ &= 34.34 \text{ กก./ม.}^2 \end{aligned}$$

ค่าแรงดันต่างๆ เหล่านี้ สามารถเขียนเป็นแผนผังการกระจายแรงดันในแนวราบ ได้ดังรูปที่ 14.52 พร้อมทั้งแสดงตำแหน่งแรงลัพธ์ของแต่ละแรงดันที่กระทำต่อกำแพง โดยคิดความสูงจากฐาน



รูปที่ 14.52 แสดงแผนผังการกระจายแรงดันในแนวราบ (กก./ม.²)

$$\begin{aligned} P_{A1} &= \frac{1}{2} \times 10.64 \times 2.5 = 13.3 \text{ กก.} \\ h_1 &= 3.5 + \frac{2.5}{3} = 4.33 \text{ ม. จากฐาน} \\ P_{A2} &= 10.64 \times 3.5 = 37.24 \text{ กก.} \\ h_2 &= \frac{3.5}{2} = 1.75 \text{ ม. จากฐาน} \\ P_{A3} &= \frac{1}{2} \times 9.35 \times 3.5 = 16.36 \text{ กก.} \\ h_3 &= \frac{3.5}{3} = 1.167 \text{ ม. จากฐาน} \end{aligned}$$

$$P_{A4} = \frac{1}{2} \times 34.34 \times 3.5 = 60.1 \text{ กน.}$$

$$h_4 = \frac{3.5}{3} = 1.167 \text{ ม. จากฐาน}$$

$$\begin{aligned} P_A &= P_{A1} + P_{A2} + P_{A3} + P_{A4} \\ &= 13.3 + 37.24 + 16.36 + 60.1 \\ &= 127 \text{ กน.} \end{aligned}$$

หาโมเมนต์ รอบฐาน

โดยให้ h = ตำแหน่งความสูงของแรงรวมทั้งหมดจากฐาน ดังนั้นจะได้

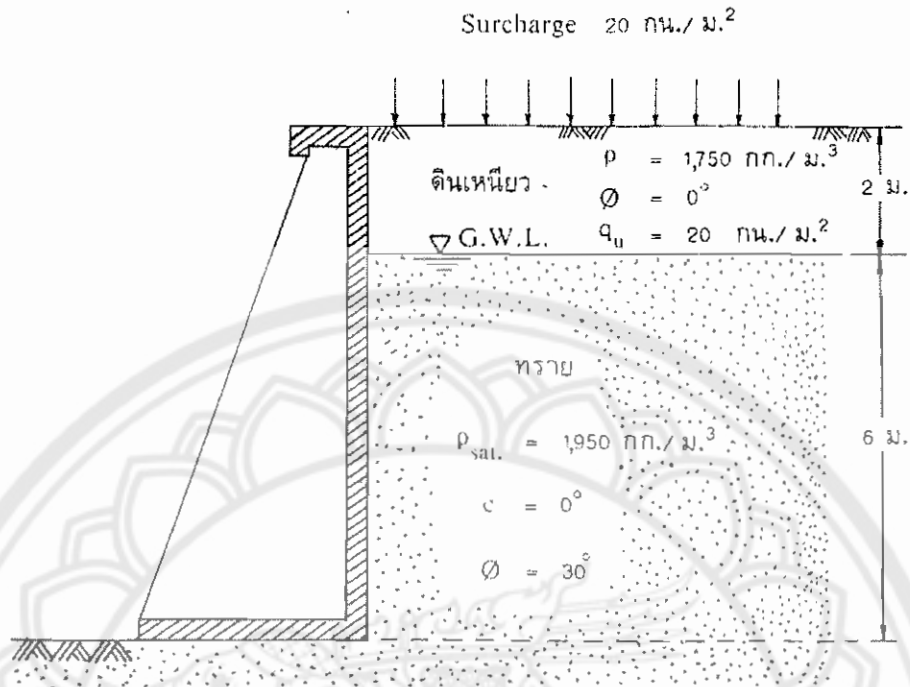
$$\begin{aligned} 127h &= 13.3 \times 4.33 + 37.24 \times 1.75 + 16.36 \times 1.167 + 60.1 \times 1.167 \\ &= 57.59 + 65.17 + 19.1 + 70.14 \\ &= 212 \\ h &= \frac{212}{127} = 1.67 \text{ ม. จากฐานของกำแพง} \end{aligned}$$

14.3.4 กำแพงกันดินอันหนึ่งซึ่งมีผิวด้านหลังกำแพงเรียบและอยู่ในแนวตั้ง มีดินถมด้านหลังกำแพง ดังแสดงในรูปที่ 14.53

14.3.4.1 จงหาค่าลึกลับด้านทานของดินเป็น กน. เพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ของกำแพงออกจากดินถม

14.3.4.2 จงหาตำแหน่งที่แรงรวมในแนวราบกระทำสูงจากฐาน

14.3.4.3 แรงดันรวมด้านหลังกำแพงควรจะเป็นเท่าไร ถ้าระดับน้ำใต้ดินถูกระบายให้ลดต่ำลงจนถึงฐานของกำแพง



รูปที่ 14.53 แสดงกำแพงกันดินที่ใช้ในข้อที่ 14.3.4

วิธีทำ

สำหรับดินเหนียว

$$\phi = 0^\circ$$

ดังนั้นจะได้

$$q_u = 2c$$

$$c = 20/2 = 10 \text{ กน./ม.}^2$$

จากสมการจะได้

$$K_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right)$$

- สำหรับดินเหนียว

$$K_a = \tan^2 (45^\circ - 0^\circ) = 1$$

- สำหรับดินทราย

$$K_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{30^\circ}{2} \right) = \frac{1}{3}$$

14.3.4.1 กำลังต้านทานของดิน จะต้องมาเท่ากับแรงดันที่กระทำต่อผนังด้านหลังของ

กำแพง จึงจะป้องกันการเคลื่อนที่ของกำแพงออกจากดินถมได้

แรงดันทั้งหมดที่กระทำต่อผนังด้านหลังของกำแพงจะมีดังต่อไปนี้

- เนื่องจากน้ำหนัก Surcharge

$$\text{ในชั้นดินเหนียว } P_s = K_a \times \text{Surcharge}$$

$$= 1 \times 20 = 20 \text{ กน./ม.}^2$$

$$\text{ในชั้นทราย } P_s = K_a \times \text{Surcharge}$$

$$= \frac{1}{3} \times 20 = 6.67 \text{ กน./ม.}^2$$

- เนื่องจากดินเหนียว

$$\begin{aligned} \text{ที่ฐานชั้นดินเหนียว } P_a &= K_a \gamma h \\ &= 1 \times \frac{1,750 \times 9.81}{1,000} \times 2 = 34.34 \text{ กน./ม.}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ที่ฐานชั้นทราย } P_a &= K_a \gamma h \\ &= \frac{1}{3} \times 34.34 = 11.45 \text{ กน./ม.}^2 \end{aligned}$$

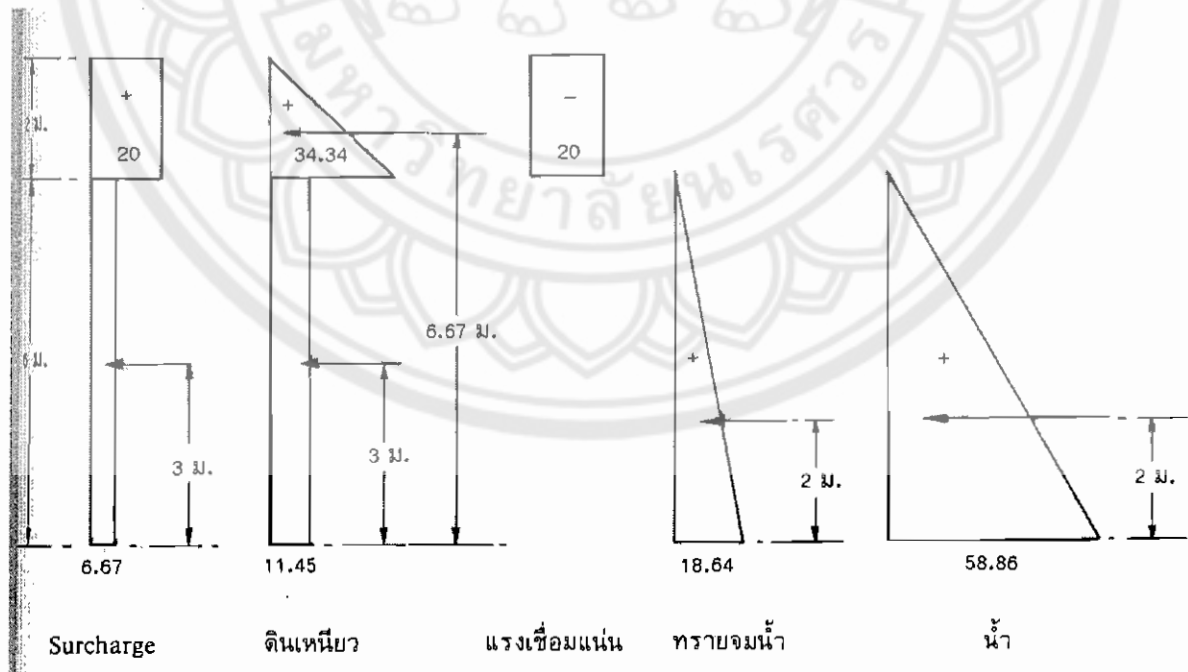
$$\begin{aligned} \text{แรงเชื่อมแน่น} &= 2c \sqrt{K_a} \\ &= 2 \times 10 \times 1 = 20 \text{ กน./ม.}^2 \end{aligned}$$

- เนื่องจากทรายจมน้ำ

$$\begin{aligned} \text{ที่ฐานชั้นทราย } P_a &= K_a \gamma h \\ &= \frac{1}{3} \times \frac{950 \times 9.81}{1,000} \times 6 = 18.64 \text{ กน./ม.}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เนื่องจากน้ำ } P_w &= \gamma_w h \\ &= 9.81 \times 6 = 58.86 \text{ กน./ม.}^2 \end{aligned}$$

ค่าแรงดันต่างๆ เหล่านี้สามารถเขียนเป็นแผนผังแรงดันได้ดังรูปที่ 9.23 พร้อมทั้งแสดงตำแหน่งแรงลัพธ์ของแต่ละแรงดัน จากรฐานไว้ด้วย



รูปที่ 14.54 แสดงการกระจายตัวของแรงดัน (กน./ม.²)

ดังนั้นจากกราฟจะได้

$$\begin{aligned} \therefore \text{แรงดันรวมทั้งหมด} &= 20 \times 2 + 6.67 \times 6 + \frac{1}{2} \times 34.34 \times 2 + 11.45 \times 6 \\ &\quad - 20 \times 2 + \frac{1}{2} \times 18.64 \times 6 + \frac{1}{2} \times 58.86 \times 6 \\ &= 40 + 40.02 + 34.34 + 68.70 - 40 + 55.92 + 176.58 \\ &= 375.56 \text{ กน.} \end{aligned}$$

หมายเหตุ \therefore แรงดันที่เกิดขึ้นเนื่องจาก น.น. Surcharge เท่ากับ แรงดันที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเชื่อมแน่น

\therefore รอยแตกเนื่องจากแรงดึงจึงไม่เกิดขึ้น

14.3.4.2 หาโมเมนต์รอบฐาน

$$\begin{aligned} \text{โดยให้ } h &= \text{ตำแหน่งความสูงของแรงรวมทั้งหมดจากฐาน} \\ 375.56 h &= 6 \times 6.67 \times 3 + \frac{1}{2} \times 34.34 \times 2 \times 6.67 + 6 \times 11.45 \times 3 \\ &\quad + \frac{1}{2} \times 18.64 \times 6 \times 6 + \frac{1}{2} \times 58.86 \times 6 \times 2 \\ &= 120.06 + 229.05 + 206.10 + 111.84353.16 \\ &= 1,020.21 \\ h &= \frac{1020.21}{375.56} = 2.72 \text{ ม.} \end{aligned}$$

14.3.4.3 ผลที่จะกระทบกระเทือนเนื่องจากการระบายน้ำใต้ดิน ก็คือ

(1) แรงดันน้ำ $= \frac{1}{2} \times 58.86 \times 6 = 176.58$ กน. จะต้องไม่นำไปคิด

(2) ทราบจะไม่จมน้ำต่อไป และแรงดันทรายจมน้ำ

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2} \times 18.64 \times 6 = 55.92 \text{ กน. จะเพิ่มเป็น} \\ &\quad \frac{1}{2} \times \frac{1}{3} \times \frac{1,950 \times 9.81}{1,000} \times 6^2 = 114.78 \text{ กน.} \end{aligned}$$

\therefore ถ้าระดับน้ำใต้ดินถูกระบายให้ลดต่ำลงจนถึงฐานของกำแพง

$$\begin{aligned} \text{จะได้ แรงดันรวม} &= 375.56 - 176.58 - 55.92 + 114.78 \\ &= 257.84 \text{ กน.} \end{aligned}$$

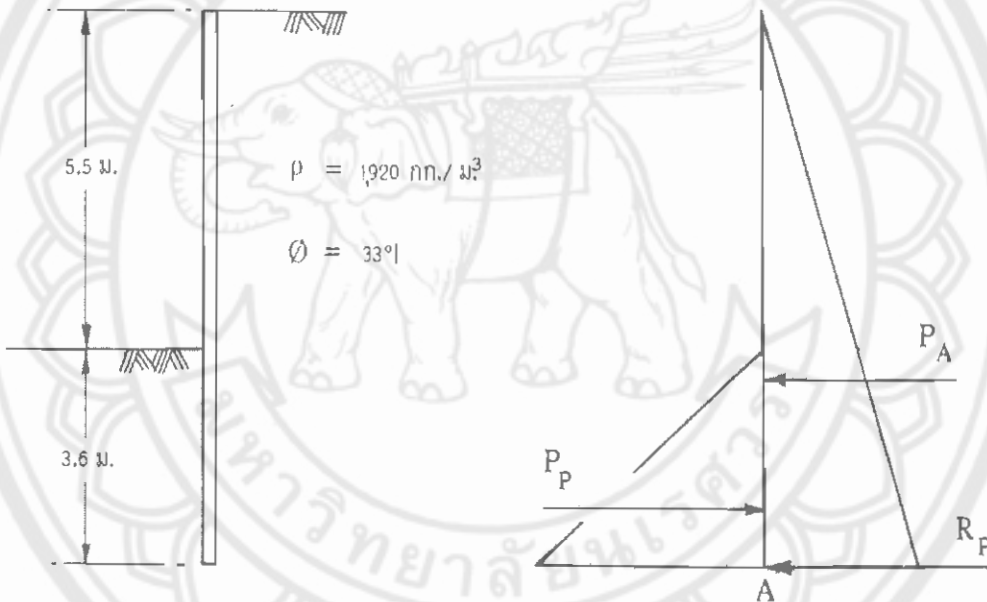
หมายเหตุ : จะเห็นว่าการระบายน้ำให้ค่าแรงดันรวมต่ำกว่า ดังนั้นในการออกแบบกำแพงกันดินจะต้องคำนึงถึงเรื่องการระบายน้ำอยู่เสมอ

14.3.5 ในการขุดดินแห่งหนึ่ง ดินเป็นชนิดที่ไม่มีความเชื่อมแน่น ถูกขุดออกลึก 5.5 ม. เข็มพืดแบบ Cantilever ถูกตอกลงไปในแนวตั้งเพื่อกันดิน ปลายเข็มตอกลึกลงไปจากใต้ฐานดินขุดนี้เป็นระยะ 3.6 ม. ความหนาแน่นของดินเท่ากับ $1,920 \text{ กก./ม.}^3$ และ $\phi = 33^\circ$ ระดับน้ำใต้ดินสมมติว่าอยู่ใต้ปลายเข็มพืดลงไป

14.3.5.1 จะหาแรง Active ที่กระทำบนกำแพงเข็มพืดนี้ต่อความยาว 1 ม. ในแนวราบโดยไม่คิดความฝืดของกำแพง

14.3.5.2 จงหาว่าแรงต้านทาน Passive สูงสุดของเข็มส่วนที่จมลงไปในดินนี้พอที่จะทำให้กำแพงไม่เคลื่อนที่หรือไม่

วิธีทำ



รูปที่ 14.55 เขียนรายละเอียดที่โจทย์ให้มาในข้อที่ 14.3.5

14.3.5.1 คัดความยาวตามแนวราบของเข็ม 1 ม.

$$P_A = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2$$

$$K_a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = \frac{1 - \sin 53^\circ}{1 + \sin 53^\circ} = 0.295$$

$$\therefore P_a = \frac{1}{2} \times 0.295 (1,920 \times 9.81 \times 10^{-3}) (5.5 \times 3.6)^2 = 230 \text{ กน.}$$

= แรง Active ที่กระทำบนกำแพงเข็มพืด / ความยาว 1 ม. ในแนวราบ

14.3.5.2 หาโมเมนต์รอบจุด A

$$P_p \times \frac{3.6}{3} = P_a \times \frac{9.1}{3}$$

$$\therefore P_p = 230 \times \frac{9.1}{3.6}$$

$$= 581 \text{ กน.}$$

=แรงต้านทานPassiveที่ต้องการเพื่อให้เกิดความมั่นคงต่อกำแพง

แรงต้านทาน Passive ของดินหน้ากำแพงเข็มพีต

$$P_p = \frac{1}{2} K_p \gamma D^2$$

$$K_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} = \frac{1 + \sin 33^\circ}{1 - \sin 33^\circ}$$

$$= 3.39$$

$$\therefore P_p = \frac{1}{2} \times 3.39 (1,920 \times 9.81 \times 10^{-3}) \times 3.6^2$$

$$= 414 \text{ กน.} < 581 \text{ กน.}$$

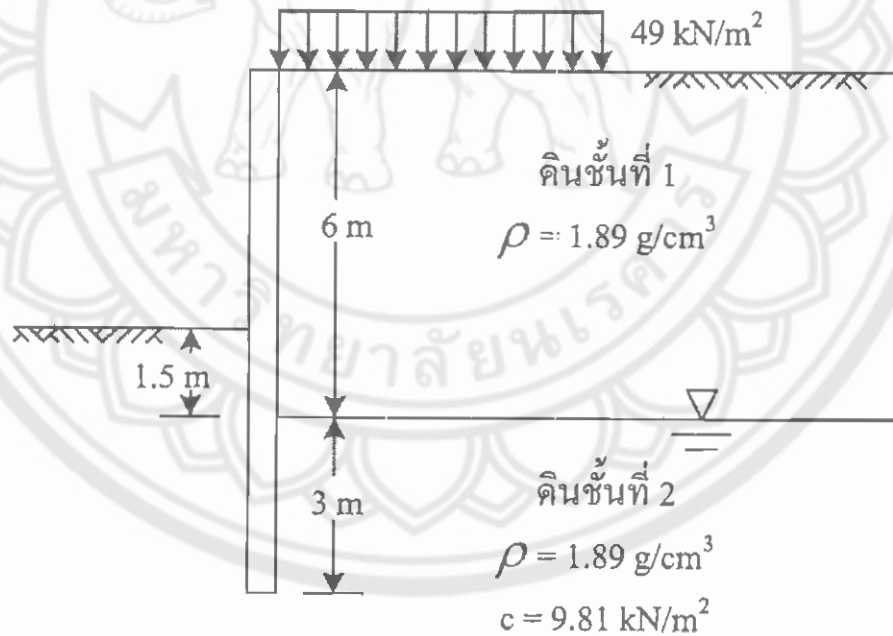
\therefore จะต้องตอกเข็มพีตให้ลึกกว่านี้



14.4 โจทย์ทดสอบความสามารถในการนำความรู้ไปใช้ในงานจริง

14.4.1 กำแพงสูง 10 m ค่าอัตราส่วนช่องว่างและมุมเสียดทานภายในของดินหลังกำแพงมี 0.70 และ 30° ตามลำดับ ในกรณีของทรายหลวม และเป็น 0.40 และ 40° ในกรณีของทรายแน่น จงคำนวณและเปรียบเทียบแรงดันดินแบบ Active และ Passive ของทั้ง 2 ภาวะ โดยค่า $G_s = 2.7$

14.4.2 สภาพดินที่ติดอยู่กับเข็มน้ำที่แสดงในรูป 14.56 โดยดินหลังกำแพงที่ผิวรับแรงดันดิน 49 kN/m² โดยที่ ดินชั้นที่ 1 เป็นดินทรายที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินซึ่งมีค่าแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล และมุมเสียดทานภายในเป็น 0 และ 38° ตามลำดับ ค่าความหนาแน่น 1.8 g/cm³ ดินชั้นที่ 2 เป็นดินอิมตัว มีค่าแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผลและมุมเสียดทานเป็น 9.8 kN/m² และ 28° ตามลำดับ มีค่า γ_{sat} เท่ากับ 19.6 kN/m³ จงลงจุดการกระจายของแรงดันดินแบบ Active ที่กระทำหลังกำแพงและแรงดันดินแบบ Passive ที่กระทำด้านหน้ากำแพง



รูปที่ 14.56 แสดงกำแพงกันดินที่ใช้ในข้อที่ 14.4.2