บทที่ 7
การไหลซึมของน้ำในดิน
(Seepage)

7.1 เนื้อหาโดยสรุป

ในบทนี้จะเป็นเนื้อหาต่อจากบท Hydraulic Conductivity (ความซึมได้ของดิน) คือ เปลี่ยนจากการไหลแบบมิติเดียว (One-dimension flow) เป็นการไหลแบบในงานจริงคือการไหลทุกทิศทุกทางหรือสามมิตินั่นเองแต่ในการวิเคราะห์จะใช้การวิเคราะห์แบบสองมิติ (Tow-dimension flow) เท่านั้นเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์โจทย์ปัญหาต่อไป โดยกำหนดให้น้ำใต้ดินเคลื่อนที่ได้ทั้งในแนวตั้งและแนวนอน โดยการเคลื่อนที่ในแนวนอนของน้ำใต้ดินเกิดจากระดับความดันของน้ำที่ต่างกัน เช่นการไหลลงสู่อ่างเก็บน้ำเป็นต้น ส่วนการเคลื่อนที่ ในแนวตั้งอาจเกิดขึ้นตามฤดูกาลของฝน เป็นต้น

ซึ่งการไหลซึมของน้ำโดยอาศัยแรงดันนี้มีความสำคัญต่องานด้านวิศวกรรมโยธา ในส่วนที่เกี่ยวกับเขื่อน (Dam) หรืออ่างเก็บน้ำ (Reservoir) การระบายน้ำในดิน ความสามารถในการรองรับน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของดินซึ่งจะกล่าวถึงในบทต่อๆ ไป

7.1.1 *สมการความต่อเนื่อง* (Continuity Equation)

จากเสาเข็มพืด (Sheet pile) ดังแสดงในรูปที่ 7.1 (a) แสดงถึงการไหลซึมผ่านของน้ำผ่านดินที่สามารถให้น้ำไหลซึมผ่านได้ ซึ่งจะไหลลงผ่านเสาเข็มพืด (sheet pile) แล้วผ่านไปยังชั้นดินด้านบน แสดงถึงการไหลแบบสองมิติ (Tow-dimension flow) ดังนั้นจากการไหล ณ จุด A ถ้าเราพิจารณาดินเป็นชั้นเล็กๆ ในชิ้นเล็กๆ นั้นจะมีมิติคือ dx, dy, dz โดยที่ dy คือความยาวของดินที่ลึกเข้าไปในกระดาษ ดังแสดงในรูป 7.1 (b) ถ้า V_x เท่ากับความเร็วของน้ำในแนวราบ และ V_z เท่ากับความเร็วของน้ำในแนวดิ่ง ดังนั้นอัตราการไหลเข้าและออก ($q_{(in)}$ และ $q_{(out)}$) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

Case 1 การไหลในแนวราบ (horizontal direction)

$$q_{x(in)} = v_x A_{v_x} = v_x dzdy \qquad \text{(สมการที่ 7.1)}$$

$$\downarrow$$

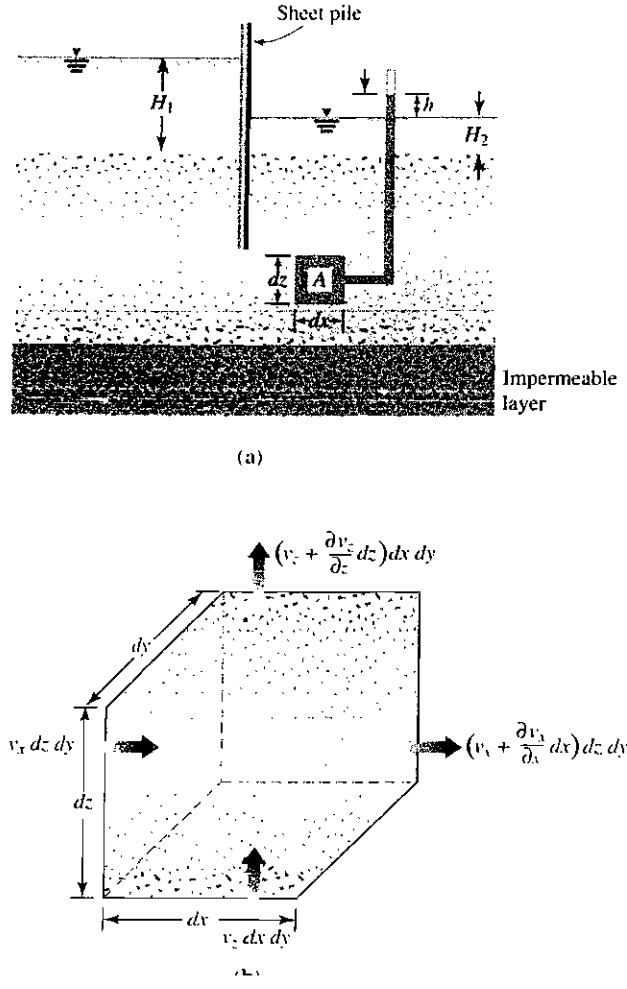
$$q_{x(out)} = \left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx \right) dzdy \qquad \text{(สมการที่ 7.2)}$$

Case 2 การไหลในแนวดิ่ง (Vertical direction)

$$q_{z\,(in)} = v_z A_{v_z} = v_z dx dz \qquad \text{(สมการที่ 7.3)}$$

$$\downarrow$$

$$q_{z\,(out)} = \left(v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz\right) dx dy \qquad \text{(สมการที่ 7.4)}$$



รูปที่ 7.1 (a) Sheet Pile 1 อันที่วางอยู่บนชั้นดินที่น้ำซึมผ่านได้ (b) การไหลที่จุด A

ถ้ากำหนดให้ น้ำไม่สามารถแบ่งแยกได้ และไม่เปลี่ยนแปลงปริมาตรของมวลดิน เราสามารถสรุปอัตราการไหลเข้ารวม (inflow flow rate) เท่ากับอัตราการไหลออกรวม (outflow flow rate)

rate of inflow = rate of outflow

จะได้ $q_{x(in)} + q_{z(in)} = q_{x(out)} + q_{z(out)}$

$$v_x dzdy + v_z dxdy = \left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx \right) dzdy + \left(v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz \right) dxdy$$

$$0 = \left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx - v_x \right) dzdy + \left(v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz \right) dxdy$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} dxdzdy + \frac{\partial v_z}{\partial z} dxdzdy = 0$$

ดังนั้น

$$\boxed{\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0} \qquad \text{(สมการที่ 7.5)}$$

จากสมการที่ 7.5 ถ้าอ้างอิงจากกฎของ Darcy แล้ว จะได้

Case 1 การไหลในแนวราบ

$$v_x = k_x i_x = k_x \frac{\partial h}{\partial x} \qquad \text{(สมการที่ 7.6)}$$

Case 2 การไหลในแนวดิ่ง

$$v_z = k_z i_z = k_z \frac{\partial h}{\partial z} \qquad \text{(สมการที่ 7.7)}$$

โดยที่ k_x และ k_z เท่ากับความซึมได้ในการไหลในแนวราบและแนวดิ่งตามลำดับ และจากสมการที่ 7.5, สมการที่ 7.6, สมการที่ 7.7 แล้วจะได้

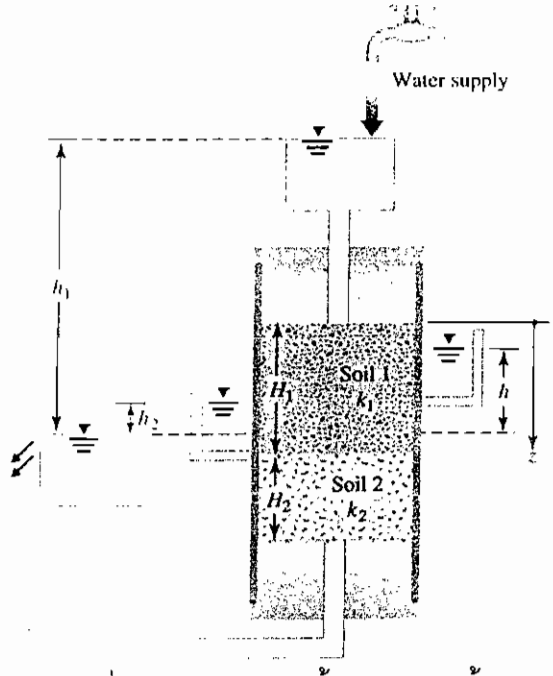
$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

ถ้าดินเป็นแบบคุณสมบัติเดียวกัน (isotropic) ดังนั้นจะทำให้ความซึมได้ (Hydraulic Conductivity) ทั้งในแนวดิ่งและแนวราบเท่ากัน ($k_x = k_z$) ฉะนั้นจะสามารถได้ว่า สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) สำหรับการไหลแบบสองมิติ (two-dimensional flow) คือ

$$\boxed{\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0} \qquad \text{(สมการที่ 7.8)}$$

7.1.2 การแก้ปัญหาขั้นต้นโดยใช้สมการความต่อเนื่อง (Solution of Simple Problems using Continuity Equation)

จากสมการความต่อเนื่องของการไหลแบบสองมิติคือสมการที่ 7.8 สามารถใช้แก้ปัญหาการไหลเบื้องต้นได้ ในกรณีการไหลเป็นแบบมิติเดียว (one-dimensional flow) ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นตามรูปที่ 7.2



รูปที่ 7.2 การไหลของน้ำผ่านดิน 2 ชั้น

จากรูปที่ 7.2 ถ้าการไหลเกิดในทิศทาง z อย่างเดียว (one-dimensional flow) แล้วจากสมการความต่อเนื่องในสมการที่ 7.8 จะได้

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0 \qquad \text{(สมการที่ 7.9)}$$

ดังนั้นสามารถหา h ได้จากสมการที่ 7.9 คือ

$$h = A_1 z + A_2 \qquad \text{(สมการที่ 7.10)}$$

โดยสามารถหาค่า A_1และ A_2 สำหรับการไหลผ่านดินชั้นที่1(Soil 1) จากเงื่อนไข 2เงื่อนไขคือ

<u>เงื่อนไขที่ 1</u>(Condition 1); ที่ $z = 0$, $h - h_1$

จะได้ $A_2 = h_1$ (สมการที่ 7.11)

<u>เงื่อนไขที่ 2</u>(Condition 2); ที่ $z = H_1$, $h - h_2$ จากสมการที่ 7.10 และสมการที่ 7.11

จะได้ $h_2 = A_1 H_1 + h_1$

ซึ่ง $A_1 = -\left(\frac{h_1 - h_2}{H_1}\right)$ (สมการที่ 7.12)

จากสมการที่ 7.10, สมการที่ 7.11, สมการที่ 7.12 แล้วจะได้

$h = -\left(\frac{h_1 - h_2}{H_1}\right) z + h_1$; สำหรับ $0 \le z \le H_1$ (สมการที่ 7.13)

และสามารถหาค่า A_1 และ A_2 จากการไหลผ่านดินชั้นที่ 2 (Soil 2) จากเงื่อนไข 2 เงื่อนไข คือ

<u>เงื่อนไขที่ 1</u> (Condition 1) : ที่ $z = H_1$, $h = h_2$

จะได้ $A_2 = h_2 - A_1 H_1$ (สมการที่ 7.14)

<u>เงื่อนไขที่ 2</u> (Condition 2) : ที่ $z = H_1+H_2, h = 0$ จากสมการที่ 7.10 และสมการที่ 7.14

จะได้ $A_1 (H_1+H_2) + (h_2 - A_1 H_1) = 0$

$A_1H_1+A_1H_2 + h_2 - A_1 H_1 = 0$

ซึ่ง $A_1 = \frac{h_2}{H_2}$ (สมการที่ 7.15)

จากสมการที่ 7.10, สมการที่ 7.14, สมการที่ 7.15 แล้วจะได้

$h = -\left(\frac{h_2}{H_2}\right) + h_2\left(1 + \frac{H_1}{H_2}\right)$; สำหรับ $H_1 \le z \le H_1+H_2$ (สมการที่ 7.16)

สำหรับทุกเวลาการไหลผ่านดินชั้นที่ 1 จะเท่ากับการไหลผ่านดินชั้นที่ 2 ดังนั้น

$$q = k_1\left(\frac{h_1 - h_2}{H_1}\right)A = k_2\left(\frac{h_2 - 0}{H_2}\right)A \quad \text{(สมการที่ 7.17)}$$

โดยที่ A = น้ำหนักหน้าตัดของดิน

k_1 = hydraulic conductivity บนดินชั้นที่ 1

k_2 = hydraulic conductivity บนดินชั้นที่ 2

ดังนั้นเราจะสามารถหาค่า h_2 ได้จาก

$$h_2 = \frac{h_1 k_1}{H_1\left(\frac{k_1}{H_1} + \frac{k_2}{H_2}\right)} \quad \text{(สมการที่ 7.17)}$$

และจากสมการที่ 7.17 และสมการที่ 7.13 จะได้

$$h = h_1\left(1 - \frac{k_2 z}{k_1 H_2 + k_2 H_1}\right)$$; สำหรับ $0 \le z \le H_1$ (สมการที่ 7.18)

และจากสมการที่ 7.17 และสมการที่ 7.16 จะได้

$$h = h_1\left[\left(\frac{k_1}{k_1 H_2 + k_2 H_2}\right)(H_1 + H_2 - z)\right]$$; สำหรับ $H_1 \le z \le H_1 + H_2$ (สมการที่ 7.19)

7.1.3 ตาข่ายการไหลของน้ำ (Flow nets)

ในเขื่อนเก็บกักน้ำทั่วไป ยกเว้นเขื่อนที่มีการทำฐานรากเชื่อมต่อลงไปจนถึงชั้นหินที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ ย่อมต้องมีการไหลของน้ำภายในตัวเขื่อนนั้น เนื่องจากความสูงต่างของระดับน้ำด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำ หรือเนื่องจากการรั่วซึม การไหลของน้ำนี้เป็นการไหลขึ้นทางด้านท้ายน้ำ และอาจจะมีจำนวนมากจนเกิดสภาพ Piping ซึ่งจะสามารถหาต่อไป โดยสภาพ Piping นี้เป็นอันตรายอย่างยิ่ง เพราะจะเป็นสาเหตุทำให้เขื่อนเกิดการชำรุดพัง เสียหายได้ โดยการไหลรั่วซึมนี้สามารถคำนวณได้โดยใช้ของ Flow nets ซึ่งก็คือแนวการไหลของน้ำหรือทางเดินของน้ำผ่านวัสดุใต้อาคาร ซึ่งประกอบไปด้วย

1. Flow Lines

เป็นเส้นแสดงแนวการไหลของน้ำผ่านมวลดิน ซึ่งมีจำนวนมากมายหลายเส้นไม่จำกัดและแต่ละเส้นจะไม่ตัดกัน และแต่ละเส้นก็จะขนานกันโดยประมาณ โดยเส้นขอบเขตที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ถือว่าเป็นเส้น Flow Lines เส้นหนึ่งดังแสดงในรูป 7.3 (a)

2. Equipotential Lines

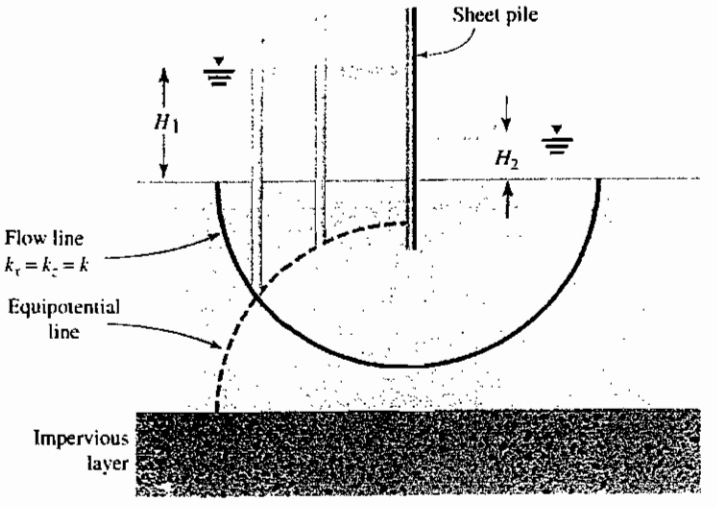
เป็นเส้นแสดงถึงความดันของน้ำที่ระดับความลึกต่างๆ กัน เส้นๆ หนึ่งจะแทนความดันของน้ำที่มีค่าเท่ากันเส้นขอบเขตที่น้ำไหลเข้าและไหลออกจากดินถือเป็น Equipotential Lines เส้นหนึ่งดังแสดงตามรูปที่ 7.3 (a)

โดยความสัมพันธ์ Flow Lines และ Equipotential Lines สามารถสรุปได้เป็นดังนี้

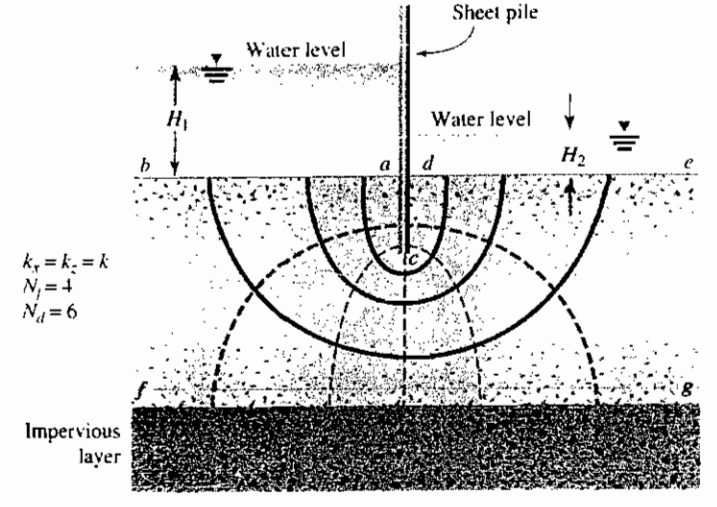
- Flow Lines กับ Equipotential Lines จะต้องตัดกันเป็นมุมฉากเสมอ
- ทั้งสองเส้นตัดกันจะได้รูปสี่เหลี่ยมเล็กๆ ซึ่งเรียกว่า "field"
- Fields ที่ได้นี้จะต้องเขียนให้ได้เป็นประมาณสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรืออย่างน้อยก็ต้องพยายามให้เส้นแบ่งครึ่งด้านตัดกันเป็นมุมฉาก
- Fields บางอันที่เส้นขอบเขตไม่สามารถจะเขียนให้เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสได้จะเรียกว่า "Singular fields"

7.1.3.1 การสร้างตาข่ายการไหลของน้ำ (Flow nets) สามารถกระทำได้ดังนี้

1. เขียนรูปตัดของสถานที่และอาคารตามมาตรส่วน
2. Flow Lines ($k_x = k_z = k$)
   - ทำมุมตั้งฉากกับผิวทางเข้าและทางออก
   - จะไม่ตัดกันและขนานกันกับเส้นที่ผ่านมาโดยประมาณ
   - เส้นขอบเขตที่น้ำไหลซึมผ่านไม่ได้ถือเป็น Flow Lines ดังแสดงในรูปที่ 7.3 (b) คือเส้น fg
3. Equipotential lines
   - จะตัดเส้น Flow lines เป็นมุมฉากเสมอ
   - จะตั้งฉากกับผนังที่น้ำไม่สามารถซึมผ่านได้
   - เขียน Equipotential lines เพื่อให้ได้ fields เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยประมาณ
   - เส้นขอบเขตที่น้ำไหลเข้าและไหลออกคือเป็น Equipotential lines โดยจากรูป 7.3 (b) คือ เส้น ab และ de



(a)



(b)

รูปที่ 7.3 (a) แสดงให้เห็นถึงเส้น flow lines และ equipotential lines

(b) แสดงการเขียน Flow net ที่เสร็จสมบูรณ์

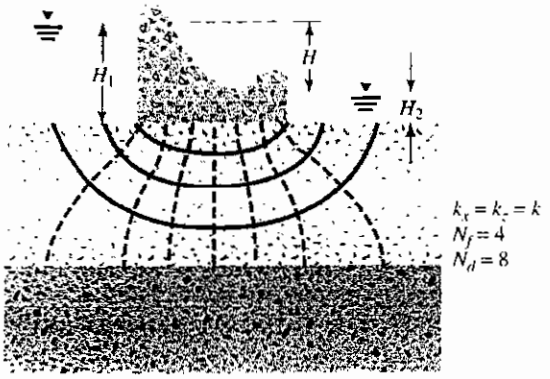
จากรูปที่ 7.3 (b) สามารถให้

N_f เป็น จำนวนช่องของการไหลของน้ำ (flow channels)

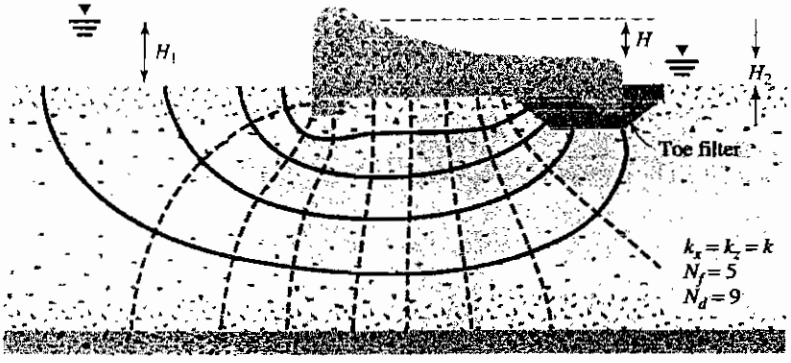
N_d เป็น จำนวนช่องของความดันของน้ำที่ลดลง (potential drop)

เราสามารถแบ่งแยก flow net ออกเป็นหลายกรณีดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 7.4 และรูปที่ 7.5 ซึ่งแสดง flow net ในการไหลแบบ isotropic เพียงแต่ในรูปที่ 7.5 มีแผ่นกรองมีส่วนหน้า

ของฐานราก (toe filter) ทำให้เพิ่มความยาวของระยะทางการไหลของน้ำให้มากขึ้นจะทำให้การซึมไหลได้น้อยลง



รูปที่ 7.4 แสดง Flow nets ที่ใต้เขื่อน



รูปที่ 7.5 แสดง Flow nets ที่ใต้เขื่อนที่วัสดุกรองอยู่หน้าเขื่อน (toe filter)

7.1.4 การคำนวณหาการไหลซึม (Seepage) จาก Flow net

จาก Flow net ที่สามารถเขียนได้ในหัวข้อที่แล้วสามารถนำไปคำนวณหาอัตราการไหลซึมของน้ำจากอ่างเก็บน้ำหรือปริมาณน้ำที่ไหลผ่านใต้เขื่อน ซึ่งจะกล่าวต่อไป

- 7.1.4.1 ถ้าเขียน fields เป็นรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสซึ่งสามารถเขียนได้ยาก

จากรูปที่ 7.6.1 แสดงถึง flow channel ซึ่งก็คือ flow line สองเส้นที่ใกล้กันนั่นเองโดย h_1, h_2, h_3, h_4,..., h_n คือระดับ piezometer ซึ่งสามารถหาได้จาก Equipotential lines นั่นเอง ดังนั้นอัตราการไหลซึม (rate of seepage) ที่ผ่าน flow channel ต่อหน่วยความยาว สามารถทำได้จาก

$$\Delta q_1 = \Delta q_2 = \Delta q_3 = \ldots = \Delta q_1 \qquad \text{(สมการที่ 7.20)}$$

จากกฎของ Darcy จากสมการ

$$q = kiA$$

ดังนั้น

$$\Delta q = k\left(\frac{h_1 - h_2}{l_1}\right)l_1 = k\left(\frac{h_2 - h_3}{l_2}\right)l_2 = k\left(\frac{h_3 - h_4}{l_3}\right)l_3 = \ldots \qquad \text{(สมการที่ 7.21)}$$

จากสมการที่ 7.21 ถ้าการไหลผ่านสี่เหลี่ยมจัตุรัส การลดลงของระดับ piezometric ระหว่าง equipotantial lines ที่อยู่ใกล้กันหรือที่เหมือนกัน เราเรียกว่า "potential drop" ซึ่งก็คือ

$$h_1\text{-}h_2 = h_2\text{-}h_3 = h_3\text{-}h_4 = \ldots = \frac{H}{N_d}$$

และ

$$\Delta q = k\frac{H}{N_d} \text{ ต่อหนึ่งหน่วยความยาวเขื่อน} \qquad \text{(สมการที่ 7.22)}$$

โดยที่ สมการที่ 7.22 = สมการสำหรับ 1 flow channel

H = ความต่างของระดับน้ำที่ upstream และ downstream

N_d = จำนวน potential drop

ในรูปที่ 7.3 (a) สำหรับทุกๆ flow channel จะได้ $H = H_1 - H_2$ และ $N_d = 6$

ถ้าจำนวน flow channel ใน flow net เรียกว่า N_f ดังนั้นอัตราการไหลรวม (total rate of flow) ที่ไหลผ่านทุก flow channel ต่อหน่วยความยาวสามารถหาได้จาก

$$q = kH\frac{N_f}{N_d} \qquad \text{(สมการที่ 7.23)}$$

- 7.1.4.2 ถ้าเขียน field เป็นรูปสี่เหลี่ยม (rectangular) หรือเรียกว่า "Singular field"

จากรูปที่ 7.6.2 แสดงถึง width-to-length ratios สำหรับทุกๆ สี่เหลี่ยมดังนั้น จากสมการที่ 7.21 สามารถแก้ไขได้เป็นสมการที่ 7.24 คือ

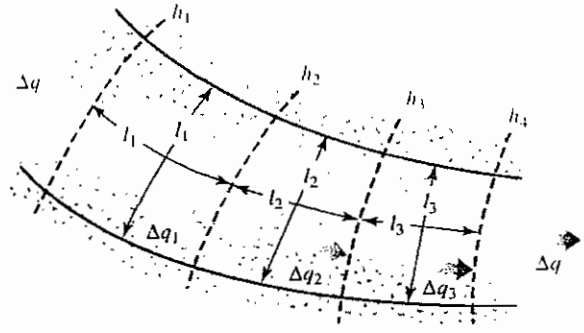
$$\Delta q = k\left(\frac{h_1 - h_2}{\ell_1}\right) b_1 = k\left(\frac{h_2 - h_3}{\ell_1}\right) b_2 = k\left(\frac{h_3 - h_4}{\ell_3}\right) b_3 = \ldots \qquad \text{(สมการที่ 7.24)}$$

โดยถ้า $\frac{b_1}{\ell_1} = \frac{b_2}{\ell_2} = \frac{b_3}{\ell_3} = \ldots = n$ สมการที่ 7.22 และสมการที่ 7.23 สามารถแก้ไขปรับปรุงได้เป็น

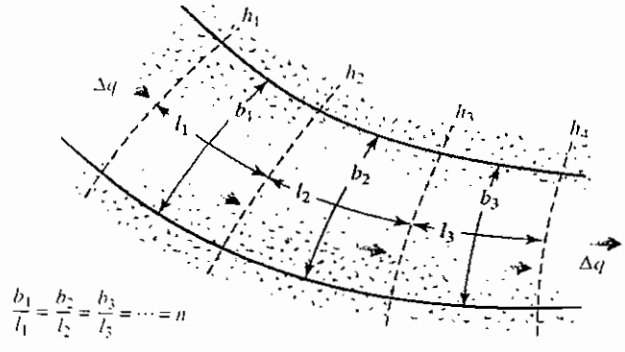
$$\Delta q = kH\left(\frac{n}{N_d}\right)$$ ต่อหนึ่งหน่วยความยาวเขื่อน (สมการที่ 7.25)

หรือ

$$q = kH\left(\frac{N_f}{N_d}\right)n$$ ต่อหนึ่งหน่วยความยาวเขื่อน (สมการที่ 7.26)



รูปที่ 7.6.1 การไหลซึมผ่าน Flow channel ที่พื้นที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส



รูปที่ 7.6.2 การไหลซึมผ่านของน้ำผ่าน Flow channel ที่พื้นที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก

อนึ่งในรูปที่ 7.7 แสดงถึง Flow net สำหรับการไหลซึมผ่าน Sheet pile 1 อัน โดยที่ Flow Channel 1 และ 2 เป็นพื้นที่รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังนั้นอัตราการไหลสำหรับ 2 Flow Channel นี้เป็นไปตามสมการที่ 7.22

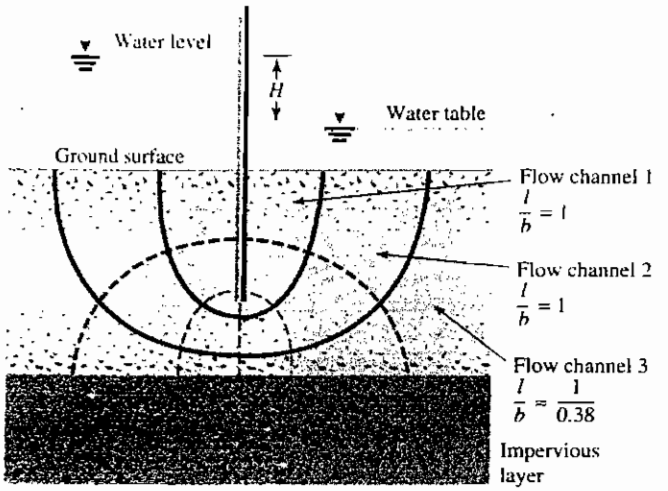
$$\Delta q_1 + \Delta q_2 = \frac{k}{N_d}H + \frac{k}{N_d}H = \frac{2kH}{N_d}$$

แต่สำหรับ Flow Channel ที่ 3 พื้นที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยที่พื้นที่นี้มีอัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความยาว (width-to-length ratio) เท่ากับ 0.38 ดังนั้นจากสมการที่ 7.25 จะได้

$$\Delta q_3 = \frac{k}{N_d} H(0.38)$$

ดังนั้น อัตราการไหลรวมจะเท่ากับ

$$q = \Delta q_1 + \Delta q_2 + \Delta q_3 = 2.38 \frac{kH}{N_d}$$



รูปที่ 7.7 Flow net สำหรับการไหลซึมรอบๆ ฐานของ Sheet pile

7.1.5 Flow Nets ในด้านที่คุณสมบัติไม่เหมือนกัน (Anisotropic soil)

จากที่กล่าวมาแล้วในสมการที่ 7.23 และสมการที่ 7.26 นั้นกำหนดให้ดินมีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทุกทาง (isotropic) ซึ่งก็คือ $k_x = k_z = k$ แต่ในธรรมชาติหรือในความเป็นจริงแล้วเป็นไปได้ยากดังนั้นเราจึงต้องปรับปรุงสมการที่ 7.23 และสมการที่ 7.24 โดยอ้างอิงจาก Continuity Equation

จาก continuity equation ของการไหลแบบสองมิติ (two- dimension flow)

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0$$

ถ้าดินแบบ Anisotropic จะทำให้ $k_x \neq k_z$ ดังนั้นจะได้สมการที่ 10.27

$$\frac{\partial^2 h}{(k_z/k_x)\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \qquad \text{(สมการที่ 7.27)}$$

แทนค่า $x' = \sqrt{k_z/k_x}\,x$ แล้วจะได้

$$\frac{\partial^2 h}{(\partial x')^2}+\frac{\partial^2 h}{\partial z^2}=0 \qquad \text{(สมการที่ 7.28)}$$

ซึ่งจากสมการที่ 7.28 นี้คล้ายคลึงกับสมการที่ 7.8 โดยที่แตกต่างกันตรงเปลี่ยน x เป็น x ' ซึ่งก็คือการเปลี่ยน (transformed) ของหน้าตัดให้กลับมาทำให้ $k_x = k_z$ โดยการหา Flow nets โดยการ transformed นี้สามารถหาได้โดย

1. ใช้ Vertical scale (แกน z) สำหรับการเขียนรูปตัด (cross section)
2. ใช้ horizontal scale (แกน x) คือ

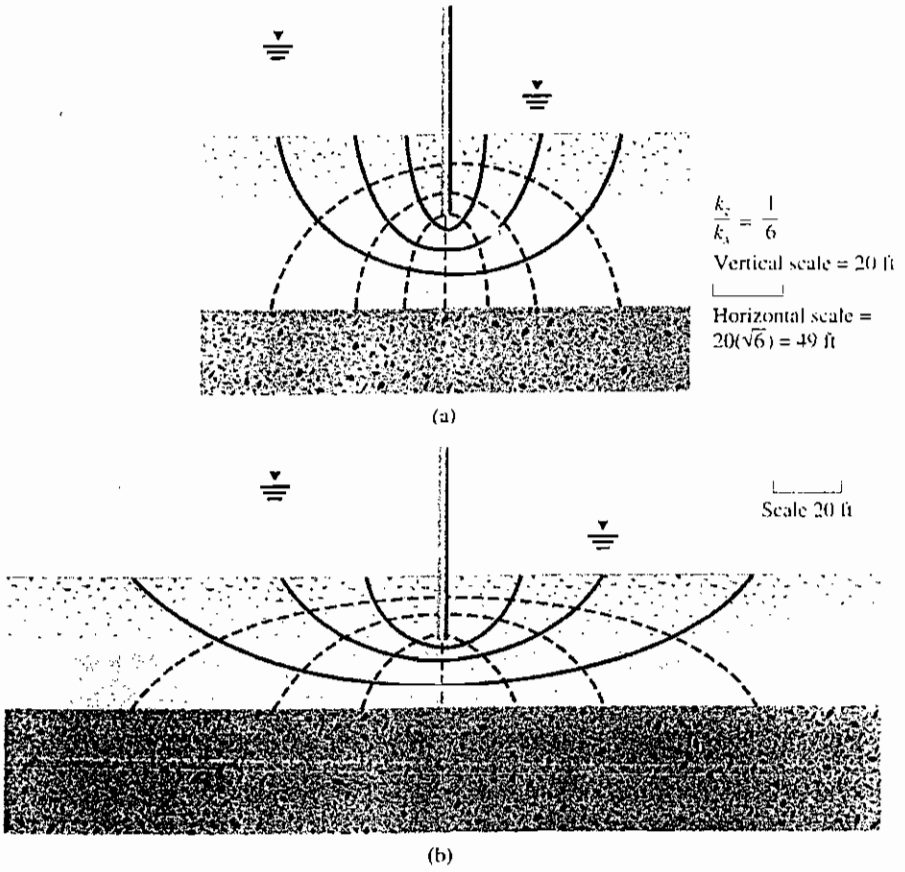
   horizontal scale = $\sqrt{k_z / k_x}$ คูณกับ horizontal scale ที่ต้องการแปลง
3. เขียน Vertical scale ผ่านชั้นดินที่ซึมน้ำได้ขนานกับทิศทางกับการไหล
4. เขียน Flow net สำหรับดินที่ซึมน้ำได้ที่หน้าตัด (section) ที่แปลงแล้วดังแสดงในรูปที่ 10.8 (a) จากนั้นเราก็นำมาหาอัตราการไหลซึมของน้ำต่อหนึ่งหน่วยความยาวจากสมการ

$$q=\sqrt{k_x k_z}\,\frac{HN_f}{N_d} \qquad \text{(สมการที่ 7.29)}$$

โดยที่ H = head loss รวม

N_f = จำนวน flow channels

N_d = จำนวน potential drops จากการเขียน Flow net ในขั้นตอนที่ 4

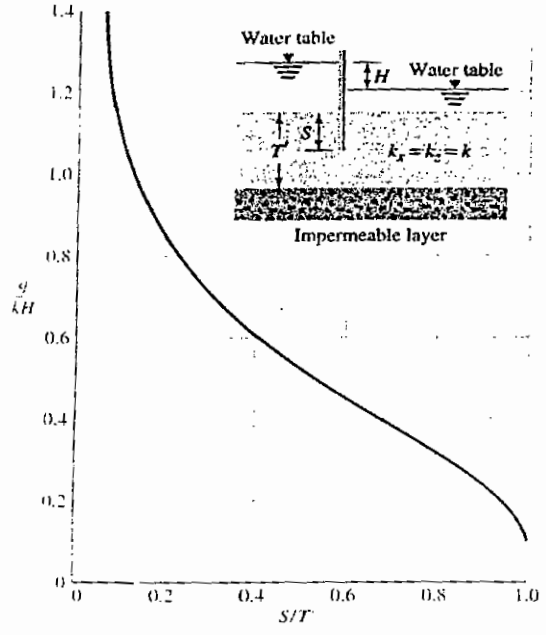


รูปที่ 7.8 Flow element ในดินแบบ Anisotropic (a) ในหน้าตัดแปลง (b) ในหน้าตัดจริง

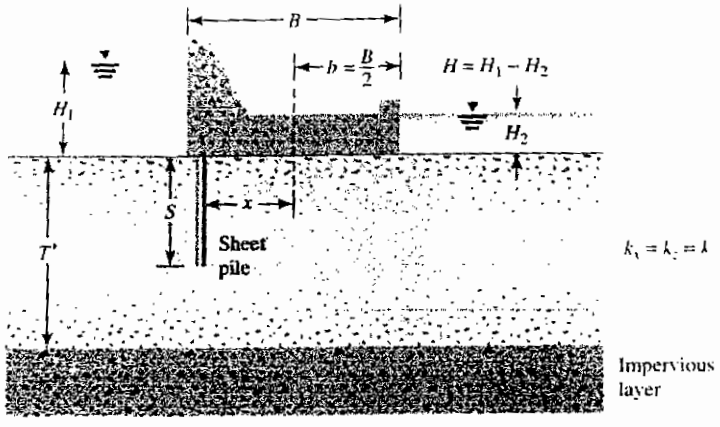
หมายเหตุ : จาก Flow nets ที่เขียนลงในหน้าตัดแปลง (transformed section) ในกรณีที่ดินที่มีคุณสมบัติไม่เท่ากัน (Anisotropic soil) Flow lines และ Equipotential line คือเส้นที่ตั้งฉากกัน แต่ถ้าเขียนลงในหน้าตัดจริง (true section) จะทำให้ทั้งสองเส้นนี้ไม่ตั้งฉากกันดังแสดงในรูป 7.8 (b) นั่นเอง ดังนั้นในการคำนวณจึงต้องแปลงหน้าตัดก่อน

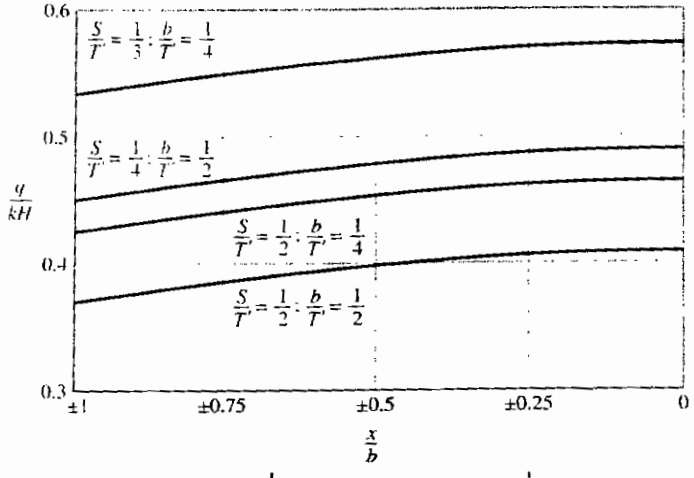
7.1.6 การคำนวณการไหลซึม (seepage)จากวิธีการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical)

การไหลซึม (seepage) ใต้โครงสร้างทางชลศาสตร์ (hydraulic structure) สามารถหาได้โดยวิธีการทางคณิตศาสตร์ได้โดยหาได้จากหลายๆ เงื่อนไข โดยรูปที่ 7.9 แสดงถึงการพล็อตอัตราการไหลซึมรอบๆ sheet pile เดี่ยวแต่เป็นการพล็อตแบบ non-dimensional และในรูปที่ 7.10 แสดงถึงการพล็อตอัตราการไหลซึมใต้เขื่อน โดยจากรูปทั้งสองสามารถนำไปหาค่า $\frac{q}{kH}$ เมื่อนำค่า kH ลงไปแทนแล้ว ก็จะได้อัตราการไหลซึมได้นั่นเอง



รูปที่ 7.9 แสดงการ plot ค่า $\frac{q}{kH}$ กับค่า $\frac{S}{T'}$ สำหรับการไหลผ่านใต้ฐานของ Sheet pile



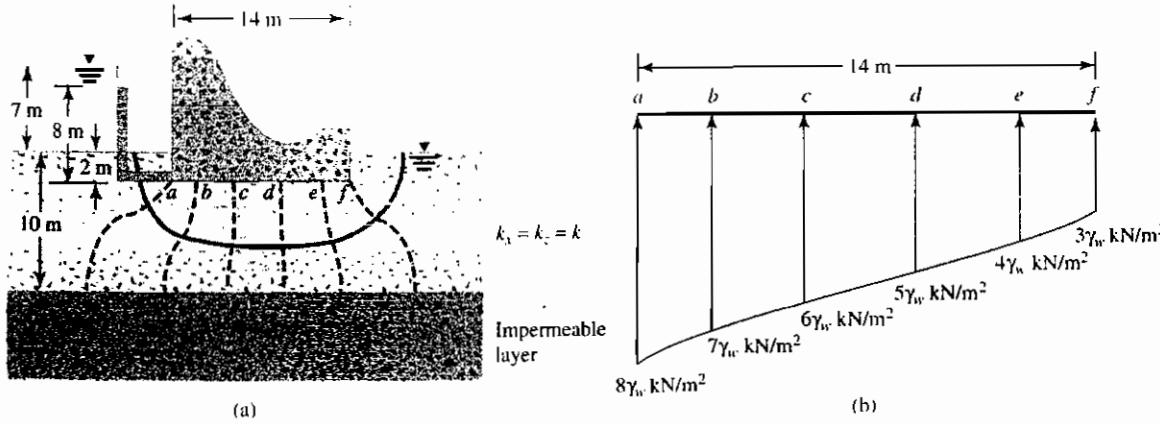


รูปที่ 7.10 การไหลซึมใต้เขื่อน

7.1.7 แรงดันยกขึ้นใต้สิ่งก่อสร้างทางชลศาสตร์(Uplift Pressure under Hydraulic Structures)

ตาข่ายการไหลของน้ำ (Flow nets) สามารถหาแรงดันยกขึ้น (Uplift Pressure) ที่ฐานของสิ่งก่อสร้างทางชลศาสตร์ (hydraulic structure) ได้ โดยรูปแบบการหาทั่วไปสามารถหาได้จากตัวอย่างเบื้องต้นโดยรูป 7.11 (a) แสดงรูปฝาย โดยมีฐานลึกลงไป 2 m จากพื้นดิน ซึ่ง Flow nets ที่เห็นในรูปเขียนในดินแบบ isotropic คือ $k_x = k_z = k$

และสามารถเขียนการกระจายตัวของแรงดัน (pressure distribution diagram) ใต้ฐานของฝายโดยจากตำแหน่งของ equipotential line สามารถแสดงได้โดยรูปที่ 7.11 (b)



รูปที่ 7.11 (a) แสดงรูปตัดของฝาย (b) แรงดันยกขึ้นใต้โครงสร้างทางชลสาสตร์

จากรูปที่ 7.11 N_d = 7 ความต่างของระดับน้ำ (H) = 7 m ดังนั้น 1 drops จะเท่ากับ $\frac{H}{N_d}$ = 1.0 ดังนั้นแรงดันยกขึ้น (uplift pressure) ที่จัดต่างๆ หาได้จาก

uplift pressure = (Pressure head) x γ_w (สมการที่ 7.30)

ดังนั้นจุดที่ a → Pressure head= H_T – 1 drop = (7+2)-1 = 8

uplift pressure = 8 γ_w

b → Pressure head= H_T – 2 drop = (7+2)-2 = 7

uplift pressure = 7 γ_w

f → Pressure head= H_T – 6 drop = (7+2)-6(1) = 3

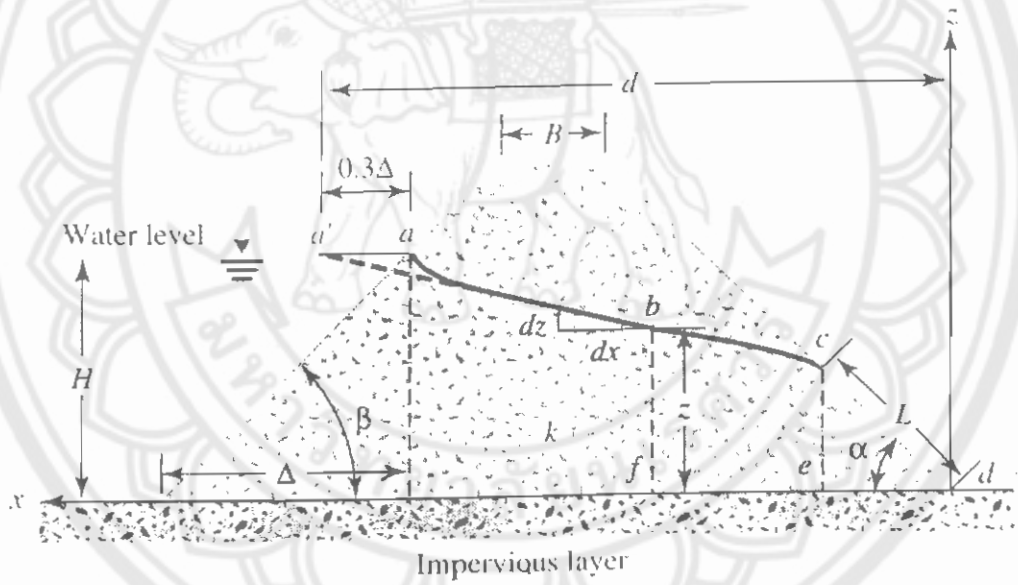
uplift pressure = 3 γ_w

จากนั้นนำไปเขียนกราฟ uplift pressure ตามรูปที่ 7.11 (b) ดังนั้นแรงยกขึน (Uplift force) ต่อหน่วยความยาวที่หาได้ตลอดความยาวของฝายสามารถหาได้จากพื้นที่ของ Pressure diagram ซึ่งจากรูปเท่ากับ $77\,\gamma_w$ kN / m นั่นเอง

7.1.8 การไหลซึมผ่านเขื่อนดินบนชั้นดินไม่ซึมน้ำ (Impervious Base)

จากรูปที่ 7.12 แสดงเขื่อนดินเนื้อเดียวกันซึ่งวางอยู่บนชั้นดินที่ไม่ซึมน้ำ (Impervious base) ซึ่งเนื้อในของเขื่อนจะมีค่า k อยู่ค่าหนึ่งดังนั้นค่าความชันทางชลศาสตร์ (i) สามารถหาได้จาก

$$i \cong \frac{d_z}{d_x} \qquad \text{(สมการที่ 7.31)}$$



รูปที่ 7.12 การไหลของน้ำผ่านโครงสร้างเขื่อนที่วางก่อสร้างอยู่บนชั้น Impervious

เมื่อพิจารณาสามเหลี่ยม cde จากรูป เราสามารถหาอัตราการไหลซึมต่อหน่วยความยาวของเขื่อนได้จากกฎของ Darcy

$$q = kiA \qquad \text{ซึ่ง } i = \frac{dz}{dx} = \tan\alpha$$

$$A = \left(\overline{ce}\right)(1) = L\sin\alpha$$

จะได้ $q = k\,(\tan\alpha)\,(L\sin\alpha)$

$$q = kL \tan\alpha \sin\alpha \qquad \text{(สมการที่ 7.32)}$$

อนึ่งอัตราการไหลซึมต่อหนึ่งหน่วยความยาวของเขื่อนจากหน้าตัด bf คือ

$$q = kiA$$

จะได้

$$q = k\left(\frac{dz}{dx}\right)(z \times 1)$$

$$q = kz\frac{dz}{dx} \qquad \text{(สมการที่ 7.33)}$$

ถ้าการไหลเป็นแบบต่อเนื่อง (continuous flow) จะได้

$$q_{(eq.32)} = q_{(eq.33)}$$

หรือ $$KL\tan\alpha\sin\alpha = kz\frac{dz}{dx}$$

ดังนั้น $$\int_{x=L\cos\alpha}^{x=d}(KL\tan\alpha\sin\alpha)dx = \int_{z=L\sin\alpha}^{z=H} k\cdot z\cdot dz\frac{dx}{dx}$$

$$L\tan\alpha\sin\alpha(d - L\cos\alpha) = 0.5\left(H^2 - L^2\sin^2\alpha\right)$$

$$L = \frac{d}{\cos\alpha} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2\alpha} - \frac{H^2}{\sin^2\alpha}} \qquad \text{(สมการที่ 7.34)}$$

ดังนั้น step-by-step ถึงวิธีการปฏิบัติในการหาอัตราการไหลซึม (Seepage rate ; q) ต่อหน่วยความยาวของเขื่อนดังต่อไปนี้คือ

1. หาค่า α
2. คำนวณหาค่า Δ (โดยดูรูป 7.12) และค่า 0.3Δ
3. คำนวณหาค่า d
4. ถ้ารู้ค่า d ก็คำนวณหาค่า q จากสมการที่ 7.34
5. ถ้าไม่รู้ค่า d ก็คำนวณหาค่า q จากสมการที่ 7.32

7.1.9 การคำนวณหาการไหลซึมผ่านเขื่อนดินโดยวิธีของ L. Casagrande

จากสมการที่ 7.34 ถ้า Derive สมการจากพื้นฐานของ Dupuit (คือ $i \approx dz/dx$) แล้วจากรูปที่ 7.12 ถ้า α มีค่ามากกว่า 30° แล้วสามารถหาอัตราการไหลซึม (rate of seepage) ได้คือ

ถ้า $$i = \frac{dz}{ds} = \sin\alpha$$ (สมการที่ 7.35)

โดยที่ $$ds = \sqrt{dx^2 + dz^2}$$

จากสมการที่ 7.32 จะได้

$$q = kiA = k \sin\alpha (L \sin\alpha) = KL\sin^2\alpha$$ (สมการที่ 7.36)

อนึ่ง $$q = kiA = k\left(\frac{dz}{ds}\right)(z \times 1)$$ (สมการที่ 7.37)

จากสมการที่ 7.36 และสมการที่ 7.37 จะได้

$$\int_{L\sin\alpha}^{H} z \cdot dz = \int_{L}^{S} L\sin^2\alpha \cdot ds$$

โดยที่ S = ความยาวของส่วนโค้ง a ' bc

จะได้ $0.5(H^2 + L^2 \sin^2\alpha) = L\sin^2\alpha (S - L)$

หรือ $$L = S - \sqrt{S^2 - \frac{H^2}{\sin^2\alpha}}$$ (สมการที่ 7.38)

จากความผิดพลาดที่ยอมรับได้อยู่ที่ 4-5% สามารถหาค่า s ได้จาก

$$S = \sqrt{d^2 + H^2}$$

แทนค่า S ในสมการที่ 7.38 จะได้

$$L = \sqrt{d^2 + H^2} - \sqrt{d^2 + H^2 + \cot^2\alpha}$$ (สมการที่ 7.39)

จากค่า L ที่สามารถหาได้จากสมการที่ 7.39 จะสามารถหาอัตราการไหลซึม จากสมการที่ 7.40 ดังต่อไปนี้

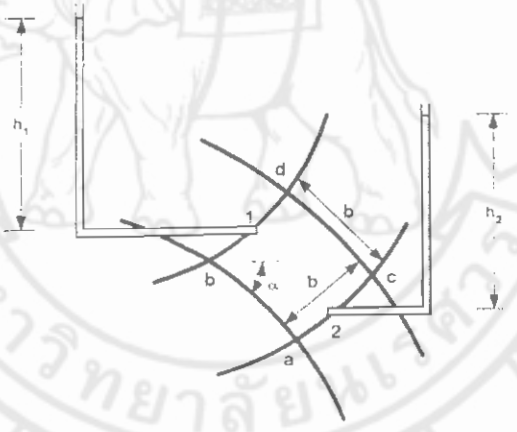
$$q = KL \sin^2\alpha$$ (สมการที่ 7.40)

จากบทนี้เราได้ทราบถึงสมการความต่อเนื่อง (continuity equation) และการประยุกต์ใช้เพื่อแก้ไขปัญหาในการหาการไหลซึม และจากสมการความต่อเนื่องนี้เรายังสามารถนำไปเขียน Flow nets โดยที่ Flow nets นี้เป็นเครื่องมือสำคัญในการหาอัตราการไหลซึม (rate of seepage) และแรงดันยกขึ้น (Uplift pressure) ใต้อาคารก่อสร้างทางชลศาสตร์ (hydraulic structure)

ส่วนในหัวข้อ 7.1.8 และ 7.1.9 **ใช้ในการหาการไหลซึมผ่านเขื่อนที่วางอยู่บนชั้นดินที่ไม่ซึมน้ำโดยที่หัวข้อที่** 7.1.8 **นั้นวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ของการไหลซึมบนพื้นฐานของสมมติฐานของ** Dupuit **ซึ่งกล่าวถึงความชันทางชลศาสตร์นั้นเองจากนั้นจึงนำมาใช้ในขบวนการหาการไหลซึมโดยวิธีของ** L.casagrande **ในหัวข้อที่** 7.1.9

7.2 โจทย์ทบทวนเนื้อหา ความรู้ และความเข้าใจ ในหลักการพื้นฐานของเนื้อหาที่เรียน

7.2.1 จากรูปที่ 7.13 ตาข่ายการไหลของน้ำ (Flow net) ที่มีความกว้าง (b) = 1 cm **วัด**ความสูงของระดับน้ำในพิโซมิเตอร์ที่จุด 1 จะได้ h_1 = 4.5 cm และจุดที่ 2 จะได้ h_2 = 4.0 cm และสามารถวัดค่ามุม α ได้เท่ากับ 20° จงหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ (k) สำหรับดินชนิดนี้ เมื่อปริมาณการไหลของน้ำผ่านช่วงต่อเวลาต่อหนึ่งหน่วยความลึกเท่ากับ 4.03×10^{-7} cm^3 /sec



รูปที่ 7.13 แสดงรูปที่ใช้ในข้อที่ 7.2.1

<u>วิธีทำ</u> จากกฎของดาร์ซี่ (Darcy's Law) จะได้

$$q = kiA$$

$$\text{ดังนั้น} \quad k = \frac{q}{iA}$$

จากสมการของค่าความชันทางชลศาสตร์ (i)

$$= \frac{\Delta H}{L}$$

$$= \frac{h_1 + b \sin\alpha - h_2}{b}$$

$$= \frac{4.5 + (1.0)(\sin 20^o) - 4.0}{1.0}$$

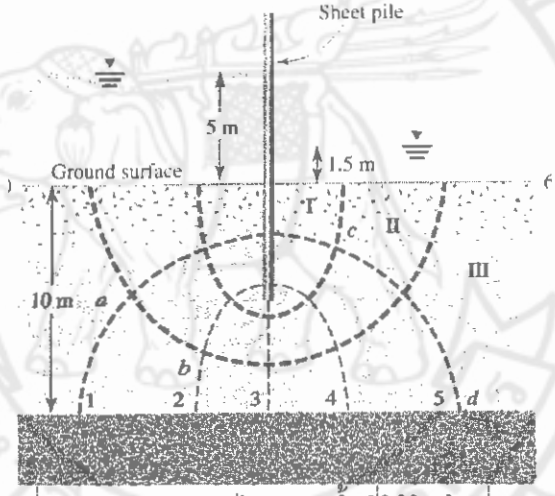
$$= 0.842$$

ดังนั้นจะได้ $k = \frac{q}{iA} = \frac{4.03x10^{-7} cm^3/sec/cm}{(0.842)(1.0cm^2)} = 4.78 \times 10^{-7}$ cm/sec

7.2.2 จากรูปตาข่ายการไหลของน้ำ (Flow net) ที่ไหลผ่าน Sheet Piles ที่ฝังอยู่บนชั้นดินซึมน้ำดังแสดงในรูป 10.14 โดยให้ $k_x = k_z = k = 4.2 \times 10^{-7}$ cm/sec ดังนั้นจงหา

7.2.2.1 ความสูง (เหนือจากระดับผิวดิน) ของน้ำถ้าเราติดตั้งพิโซมิเตอร์ที่จุด a, b, c, d

7.2.2.2 อัตราการไหลของน้ำผ่าน Sheet pile ที่ช่อง II ต่อหน่วยความยาว



รูปที่ 7.14 ตาข่ายการไหลของน้ำที่ใช้ในข้อที่ 7.2.2

วิธีทำ

7.2.2.1 จากรูปที่ 7.14 เราจะได้ว่า $N_f = 3$

$N_d = 6$

โดยที่ความต่างของน้ำเหนือ Sheet pile กับน้ำใต้ Sheet pile = 3.5 m ดังนั้น head loss สำหรับการดร็อป 1 ครั้งเท่ากับ 3.5/6 = 0.583 m

ที่จุด a. อยู่ในเส้น equipotential เส้นที่ 1 ดังนั้นการดร็อฟที่จุด a เท่ากับ 1 ดร็อป

$\therefore H_{ta}$ = 5 m – 1 drop = 5 m – 0.583 m = 4.417 m

ที่จุด b. อยู่ในเส้น equipotential เส้นที่ 2 ดังนั้นการดร็อฟที่จุด b เท่ากับ 2 ดร็อป

$\therefore H_{tb}$ = 5 m – 2 drop = 5 m – (2 x 0.583 m) = 3.834 m

ที่จุด c. อยู่ในเส้น equipotential เส้นที่ 5 ดังนั้นการดร็อฟที่จุด c เท่ากับ 5 ดร็อป

$\therefore$ H_{ic} = 5 m – 5 drop = 5 m – (2 x 0.583 m) = 2.085 m

ที่จุด d. อยู่ในเส้น equipotential เส้นที่ 5 ดังนั้นการดร็อฟที่จุด d เท่ากับ 5 ดร็อป

$\therefore$ H_{id} = 5 m – 5 drop = 5 m – (2 x 0.583 m) = 2.085 m

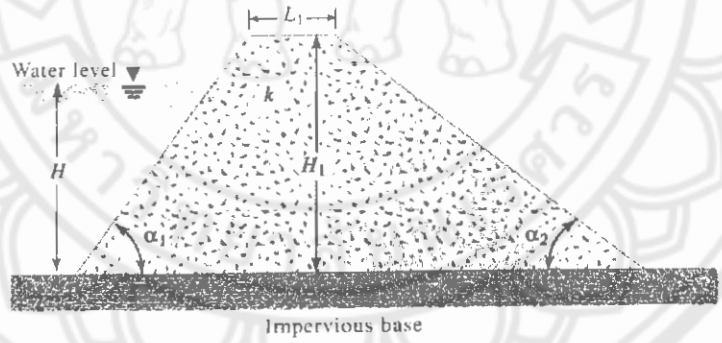
7.2.2.2 อัตราการไหลของน้ำผ่านช่องที่ II จะเป็นไปตามสมการคือ

$$\Delta q = k\frac{H}{N_d}$$

$$= (4.2 \times 10^{-3} \times 10^{-2} \text{ m/sec})\left(\frac{3.5m}{6}\right)$$

Δq = 2.45×10^{-3} m^3/sec/ความยาว 1 m ของ Sheet pile

7.2.3 จากรูปของเขื่อนดิน (earth dam) ที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 7.15 จงหาอัตราไหลของน้ำที่ไหลซึม (Seepage rate) ในหน่วย m^3/day/ความยาว(m) โดยให้ $\alpha_1 = \alpha_2 = 45^o$, L_1 = 5m, H = 10m, H_1 = 13 m และ k = 2×10^{-4} cm/sec



รูปที่ 7.15 แสดงรูปตัดของเขื่อนดินที่ใช้ในข้อที่ 7.2.3

<u>วิธีทำ</u> จากรูปที่ 7.12 จะได้ $\Delta = \frac{H}{\tan \alpha_1} = \frac{10m}{\tan 45^o}$ = 10 m

ดังนั้น 0.3 Δ = 0.3(10) = 3 m

$$d = 0.3\ \Delta + \frac{(H_1 - H)}{\tan \alpha_1} + L_1 + \frac{(H_1)}{\tan \alpha_1}$$

$$= 3 \text{ m} + \frac{(13-10)}{\tan 45^o} + 5 \text{ m} + \frac{(13)}{\tan 45^o}$$

= 3m + 3m + 5m + 13m = 24 m

จากสมการ $L = \frac{d}{\cos\alpha_2} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2\alpha} - \frac{H^2}{\sin^2\alpha}}$

$= \frac{24}{\cos 45^o} - \sqrt{\frac{24^2}{(\cos 45^o)_2} - \frac{10^{10}}{(\sin 45^o)^2}}$

$= 33.94 - \sqrt{1152 - 200}$

$= 3.09m$

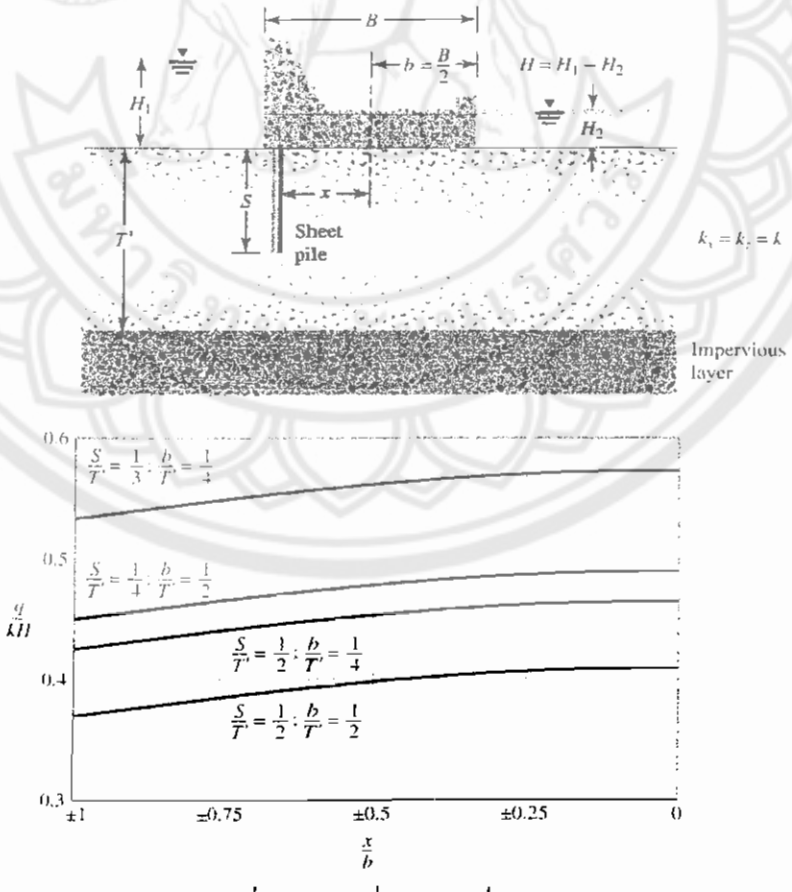
จากสมการ $q = k(\tan\alpha_2)(L\sin\alpha_2)$

$= kL\tan\alpha_2 \sin\alpha_2$

$= 2x10^{-4}$cm/secx3.09 mxtan45°xsin45°

$q = 0.378\ m^3$/day/ความยาว(m)

7.2.4 จากรูปที่ 7.16 ถ้าทางตำแหน่ง Sheet pile ไว้ในตำแหน่งที่ x = 50 m(อยู่ริมฐานเขื่อน) ดังนั้นปริมาณน้ำไหลซึมผ่านใต้เขื่อน (q) เท่ากับเท่าไหร่ถ้า S = 25 m, T = 100, H_1 = 40 m, H_2 = 10 m ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำ (k) = k_x = k_y = k_z = 0.001 m/sec



รูปที่ 7.16 รูปที่ใช้ในข้อที่ 7.2.4

<u>วิธีทำ</u>

หา $\frac{S}{T} = \frac{25}{100} = \frac{1}{4}$

$\frac{b}{T'} = \frac{B/2}{T'} = \frac{100/2}{100} = \frac{1}{2}$

ดังนั้นถ้าทาง x = 50 m (อยู่ริมฐานเขื่อน) จะได้ $\frac{x}{b} = \frac{50}{100/2} = 1$

จากรูปที่ 7.16 แล้วจะได้ $\frac{q}{kH(1m)} = 0.45$

ดังนั้น $q = 0.45\ (0.001\ m/s)(H_1 - H_2)(1\ m)$

$= 0.45(0.001\ m/s)(40 - 10)\ (1\ m)$

$q = 0.0135\ m^3/sec/m$

7.3 โจทย์ทดสอบความสามารถในการคิดวิเคราะห์โดยประยุกต์ใช้ความรู้ เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในการทำงาน

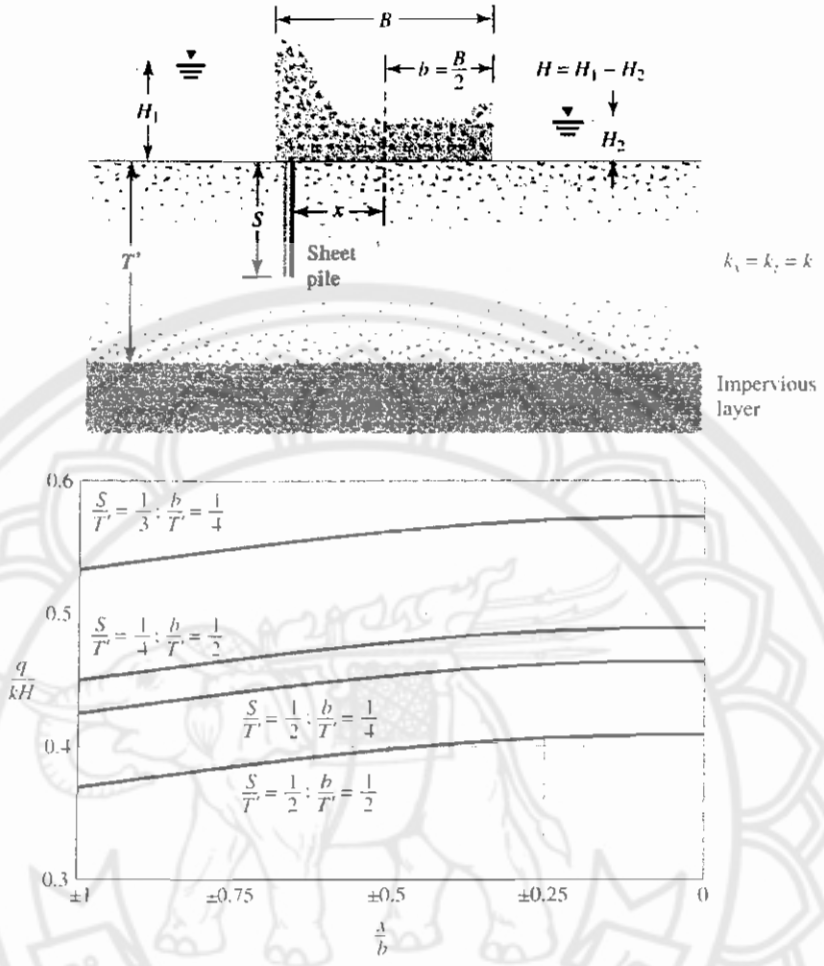
7.3.1 ในฐานะที่คุณอัครชาติเป็นวิศวกรที่ปรึกษาของบริษัทแห่งหนึ่งในจังหวัดพิษณุโลก กรุณาให้คำแนะนำพร้อมให้เหตุผลอย่างสั้นๆ หรือแสดงรายการคำนวณประกอบ (หากจำเป็น) ว่า

7.3.1.1 ควรวางตำแหน่ง Sheet Pile ในทางแนวราบไว้ที่ใด (ที่ x = ?) เพื่อจะได้ลดปริมาณน้ำไหลซึมผ่านเขื่อนในรูปที่ 7.17 ให้เหลือน้อยสุดเมื่อความยาวของเขื่อน $(B) = 100$ m

7.3.1.2 ควรวางตำแหน่ง Sheet Pile ในทางแนวราบไว้ที่ใด (ที่ x = ?) เพื่อจะได้ลดปริมาณน้ำไหลซึมผ่านเขื่อนในรูปที่ 7.17 ให้เหลือน้อยสุดเมื่อความยาวของเขื่อน $(B) =$ 50 m

ภายใต้เงื่อนไปในการออกแบบที่ประกอบไปด้วย

- S = 50 m, T' = 100 m
- H_1 = 40 m, H_2 = 10 m
- ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของดิน (k) = $k_x = k_y = k_z$ = 0.001 m/sec



รูปที่ 7.17 แสดงรูปที่ใช้ในข้อที่ 7.3.1

<u>วิธีทำ</u> จากรูปที่ 7.17 จะเห็นได้ว่าจะต้องให้ เท่ากับ $\pm$ 1 เท่านั้นจึงจะทำให้น้ำไหลซึมผ่านเขื่อนน้อยที่สุดดังนั้นจะได้

7.3.1.1 หาค่า $\frac{S}{T'} = \frac{50}{100} = \frac{1}{2}$

$$\frac{b}{T'} = \frac{100/2}{100} = \frac{1}{2}$$

ดังนั้นถ้าจะให้ $\frac{x}{b} = \pm 1$ จะต้องมี

- x = 50 m จะทำให้ $\frac{x}{b}$ + 1
- x = -50 m จะทำให้ $\frac{x}{b}$ - 1

ซึ่งจะทำให้ q = kH(0.37)(1 m)

= (0.001 m/sec)(40 m – 10 m)(0.37)(1 m)

= 0.0111 m^3/sec/m

ดังนั้นจะต้องวางไว้ที่ตำแหน่งที่ x = 50 m **(คือด้านหน้าของเขื่อนพอดี) และ** x = -50 m **(คือด้านหลังของเขื่อนพอดี) จึงจะทำให้น้ำไหลซึมผ่านเขื่อนน้อยที่สุด**

7.3.1.2 หาค่า $\frac{S}{T'} = \frac{50}{100} = \frac{1}{2}$

$$\frac{b}{T'} = \frac{50/2}{100} = \frac{1}{4}$$

ดังนั้นถ้าจะให้ $\frac{x}{b} = \pm 1$ จะต้องมี

- x = 25 m จะทำให้ $\frac{x}{b} = +1$
- x = -25 m จะทำให้ $\frac{x}{b} = -1$

ซึ่งจะทำให้ q = kH(1 m) (0.42)

= (0.001 m/sec)(40 m – 10 m)(1 m)(0.42)

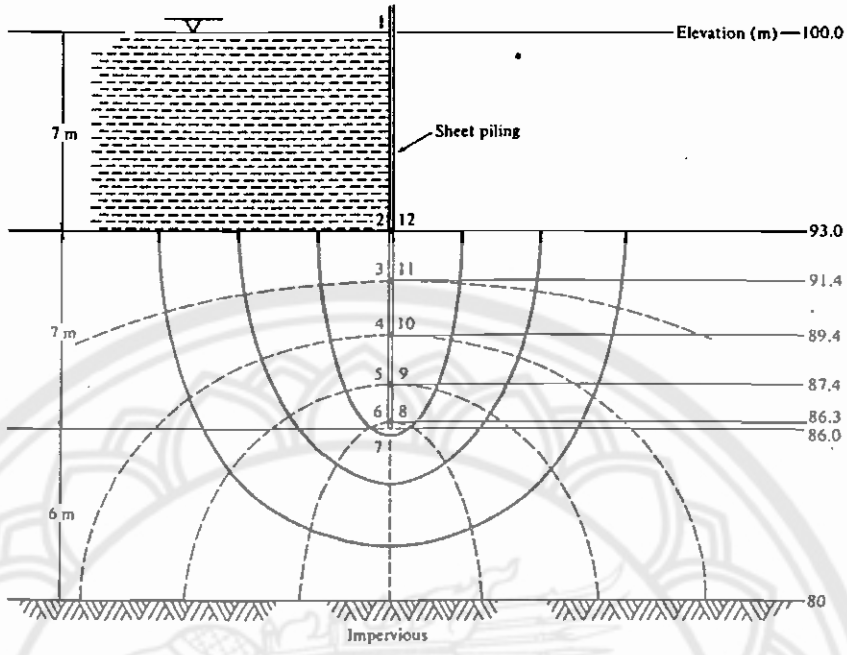
= 0.216 m^3/sec/m

ดังนั้นจะต้องวางไว้ที่ตำแหน่งที่ x = 25 m (คือด้านหน้าของเขื่อนพอดี) และ x = -25 m (คือด้านหลังของเขื่อนพอดี) จึงจะทำให้น้ำไหลซึมผ่านเขื่อนน้อยที่สุด

7.3.2 เพื่อวางแผนป้องกันน้ำท่วมเข้าบริเวณมหาวิทยาลัยนเรศวร ส่วนหนองอ้อ วิศวกรที่ปรึกษาของมหาวิทยาลัยนเรศวร ได้เสนอให้ออกแบบก่อสร้างเข็มพืด (Sheet Pile) ดังแสดงในรูปที่ 7.18 ในฐานะวิศวกรโยธาของบริษัทฯ กรุณาคำนวณ

7.3.2.1 ปริมาณน้ำ (cm^3/s/m) ที่จะไหลอดใต้ Sheet Pile เข้ามาในบริเวณมหาวิทยาลัย เพื่อที่มหาวิทยาลัยจะได้เตรียมจำนวนและขนาด Pump สำหรับสูบน้ำออกได้พอเพียง โดยกำหนดให้ $k_x = k_z = 22 \times 10^{-4}$ cm/s

7.3.2.2 Elevation head, Head loss, Total head, Pressure heads (Pore pressure) สำหรับตำแหน่งทุกตำแหน่งทั้ง 12 จุด ดังแสดงในรูปที่ 7.18 โดยยกตัวอย่างการคำนวณมา 1 ตำแหน่ง



รูปที่ 7.18 แสดงรูปที่ใช้ในข้อที่ 7.3.2

<u>วิธีทำ</u> 7.3.2.1 สามารถแสดงการคำนวณหาปริมาณน้ำได้ดังนี้

จากรูปที่ 7.18 N_f = 4 (จำนวนช่องการไหลที่บังคับในแนวดิ่ง)

N_d = 10 (จำนวนช่องการไหลที่บังคับในแนวนอน)

จากสมการที่ 7.23

จะได้ $q = k\frac{N_f}{N_d}H$

$= (22 \times 10^{-4}\ \frac{cm}{s})\left(\frac{4}{10}\right)(7\ m)(100\frac{cm}{s})$

$= 0.616\ cm^3/s/cm$

$q = 61.60\ cm^3/s/cm$

∴ ปริมาณน้ำที่จะลอดใต้ Sheet Pile จะเท่ากับ 61.60 cm^3/s/cm #

7.3.2.2 จากโจทย์จะได้ว่า 1 drop = $\frac{H}{N_d}$ = 7/10 = 0.7

ดังนั้นจะสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 7.1 แสดงค่าต่างที่ต้องคำนวณในข้อที่ 7.3.2.2

ตำแหน่งที่	Elevation Head (m)	Head Loss (m)	Total Head (m)	Pressure Head (m)
1	100.00	0.0	100-0.0=100.0	100-100=0.00
2	93.00	0.0	100-0.0=100.0	100-93=7.00
3	91.40	1 drop = 0.70	100-0.7=99.30	99.3-91.4=7.90
4	89.40	2 drop = 1.40	100-1.4=98.60	98.6-89.4=9.20
5	87.40	3 drop = 2.10	100-2.1=97.90	97.9-87.4=10.50
6	86.30	4 drop = 2.80	100-2.8=97.20	97.2-86.3=10.90
7	86.00	5 drop = 3.50	100-3.5=95.80	96.5-86.0=10.50
8	86.30	6 drop = 4.20	100-4.9=95.10	95.8-86.3=9.50
9	87.40	7 drop = 4.90	100-4.9=95.10	95.1-87.4=7.70
10	89.40	8 drop = 5.60	100-5.6=94.40	94.4-89.4=5.00
11	91.40	9 drop = 6.30	100-6.3=93.70	93.7-91.4=2.30
12	93.00	10 drop = 7.00	100-7.0=93.00	93.0-93.0=0.0

ยกตัวอย่าง จากโจทย์ที่ตำแหน่งที่ 5 สามารถหาค่าต่างๆ ได้ดังนี้

จากรูปที่จุดที่ 5 อ่านค่า Elevation Head = 87.40 m

$\therefore$ Head Loss = 3 drop = 2.10 m

Total Head = ความสูงของระดับน้ำ = Head Loss

= 100 – 2.10 = 97.90 m

ดังนั้น Pressure Head = Total Head - Elevation Head

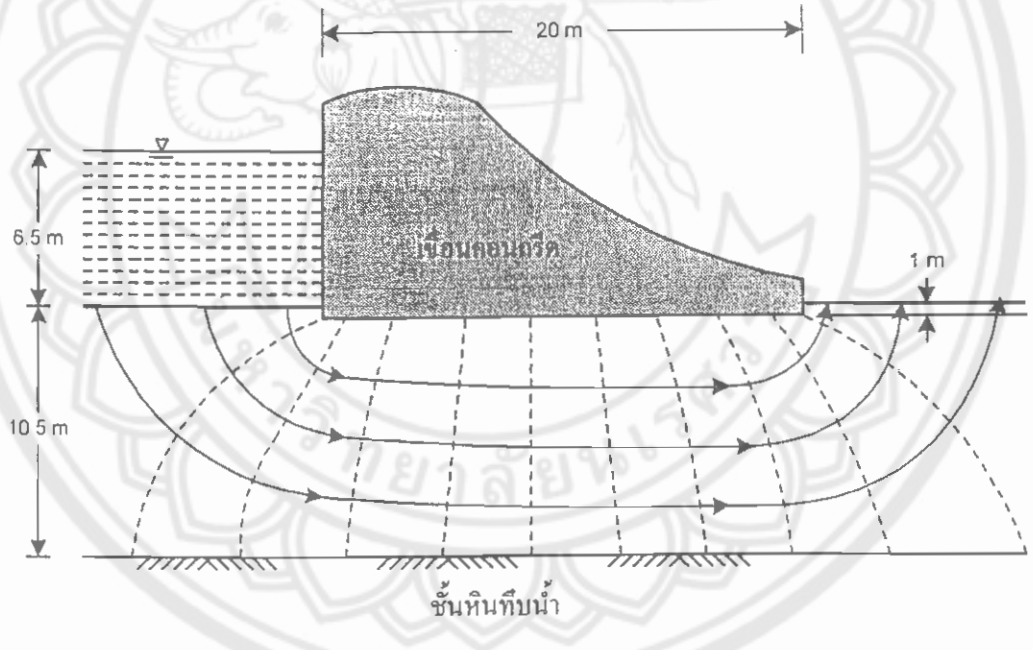
= 97.90 – 87.40

= 10.50 m

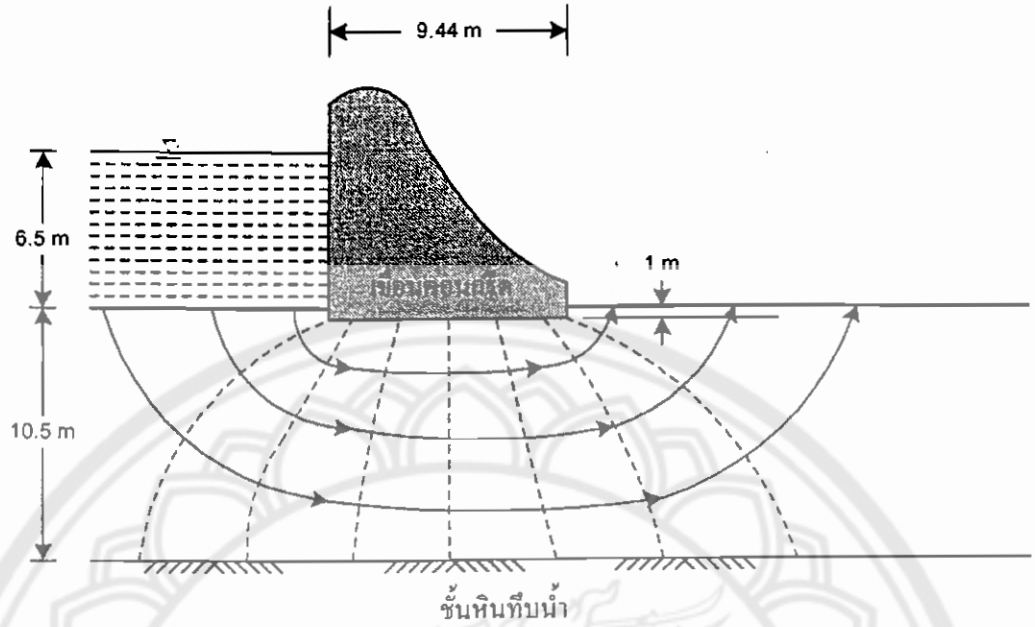
7.3.3 **เพื่อสำรองปริมาณน้ำใช้ในบริเวณมหาวิทยาลัยนเรศวร วิทยาเขตพะเยา กอง** แผนงานได้ว่าจ้างบริษัทวิศวกรที่ปรึกษาสำรวจและออกแบบเพื่อก่อสร้างเขื่อน ดังแสดงในรูปที่ 7.19.1 ซึ่งผลการสำรวจขั้นต้น (Preliminary Design) พบว่าชั้นดินฐานรากใต้เขื่อน มีค่า $k_x = k_z = 30 \times 10^{-4}$ cm/s

7.3.3.1 ในฐานะวิศวกรโยธาประจำกองแผนงาน กรุณาประมาณหาค่าปริมาณน้ำ ($cm^3/s/m$ width) ที่ลอดใต้ชั้นเขื่อน

7.3.3.2 หากการสำรวจรายละเอียด (Detailed Design) พบว่า $k_x = 30 \times 10^{-4}$ cm/s และ $k_z = 6 \times 10^{-4}$ cm/s ซึ่ง Flow net บน Transformed Scale สามารถแสดงได้ในรูป 7.19.2 กรุณาประมาณหาปริมาณน้ำ ($cm^3/s/m$ width) ที่ลอดใต้สันเขื่อน



รูปที่ 7.19.1 รูปที่ใช้ในข้อที่ 7.3.3



รูปที่ 7.19.2 รูปที่ใช้ในข้อที่ 7.3.3

<u>วิธีทำ</u> 7.3.3.1 จากตาข่ายการไหลในรูป 7.19.1 จะได้ $N_f = 4$

$N_d = 11$

แทนค่าในสมการที่ 7.23

$$q = kH\frac{N_f}{N_d}$$

$$= (30 \times 10^{-4}\ cm/s)(6.5)(100\ cm/m)\left(\frac{4}{11}\right)$$

$$= 0.7091\ cm^3/s/cm$$

$$q = 70.91\ cm^3/s/cm$$

$\therefore$ ค่าปริมาณน้ำที่ลอดใต้สันเขื่อน = 70.91 $cm^3/s/cm$

7.3.3.2 จากโจทย์ค่า $k_x \neq k_z$ ซึ่งจะได้วาจะมีคุณสมบัติแบบ Asisotropic Soil ดังนั้นจะต้องทำการแปลงหน้าตัด (transformed) โดยจะใช้ horizontal scale (ความกว้างของเขื่อน) $= \sqrt{\frac{k_z}{k_x}}$ x ความกว้างเดิม

ดังนั้น ความกว้างของเขื่อนในหน้าตัดแปลง = $\sqrt{\frac{k_z}{k_x}}$ (20 cm) = 9.44 m (ดังแสดงในรูปที่ 7.19.2)

จากรูปที่ 7.19.2 สามารถนับช่องจะได้ N_f = 4

N_d = 8

แล้วแทนค่าลงในสมการที่ 7.28

$$q = \sqrt{k_z k_x} \bullet H \frac{N_f}{N_d}$$

$$= \sqrt{(30x10^{-4}\ cm/s)(6x10^{-4}\ cm/s)} \times 6.5m$$

$$\times (100 = 0.4836\ cm^3/s/cm$$

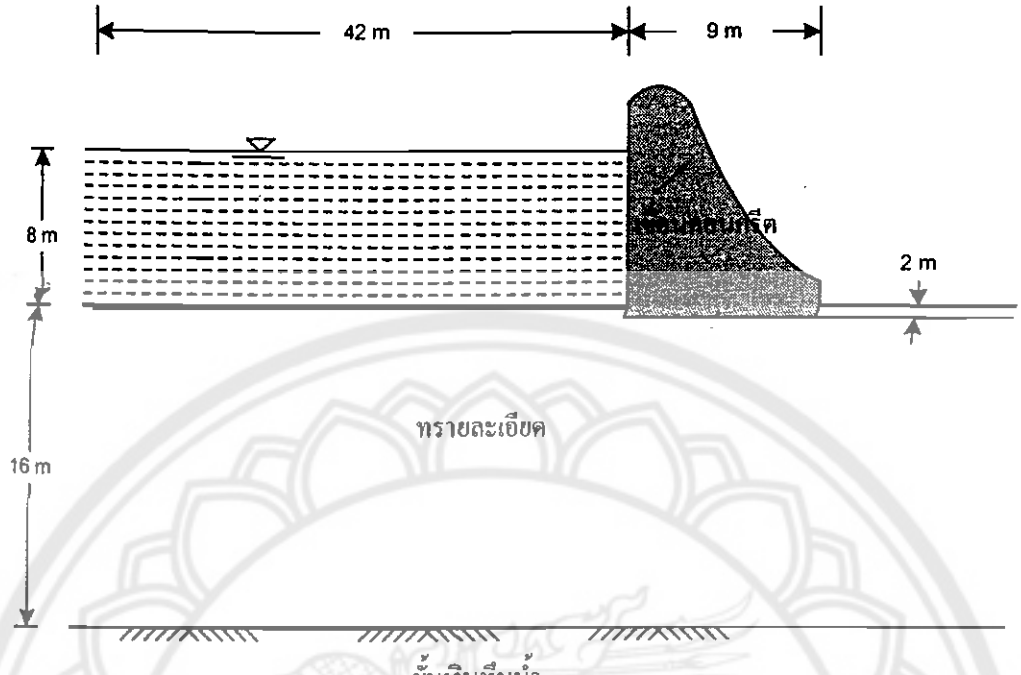
$$q = 43.60\ cm^3/s/m$$

∴ ปริมาณน้ำที่ลอดใต้สันเขื่อน = 43.60 cm^3/s/cm

7.3.4 เพื่อวางแผนป้องกันน้ำท่วมเข้าบริเวณมหาวิทยาลัยนเรศวร ส่วนหนองอ้อ บริษัทวิศวกรที่ปรึกษาของมหาวิทยาลัยนเรศวรได้เสนอให้ออกแบบก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตที่มีโครงสร้างคอนกรีตทึบน้ำรองด้วยชั้นทรายซึ่งมีสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำเท่ากับ k_x = 5.4 x 10^{-5} m/s และ k_z = 5.4 x 10^{-5} m/s ในแนวราบ (x) และแนวดิ่ง (z) ตามลำดับ ดังรูปที่ 7.20.1 ในฐานะวิศวกรของบริษัทฯ จงคำนวณหา

7.3.4.1 ปริมาณน้ำ (cm^3/s/m) ที่จะไหลออกใต้เขื่อนเข้ามาในบริเวณมหาวิทยาลัย เพื่อที่มหาวิทยาลัยจะได้เตรียมจำนวนและขนาด Pump สำหรับสูงน้ำออกได้พอเพียง

7.3.4.2 ให้หาแรงดันใต้ฐานรากเขื่อน (Uplift pressure) เพื่อจะได้ใช้หาความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องกับแรงดันน้ำโดยให้หาที่จุด 1, 2 และ ตามรูป 7.20.2



รูปที่ 7.20.1 รูปที่ใช้ในข้อที่ 7.3.3

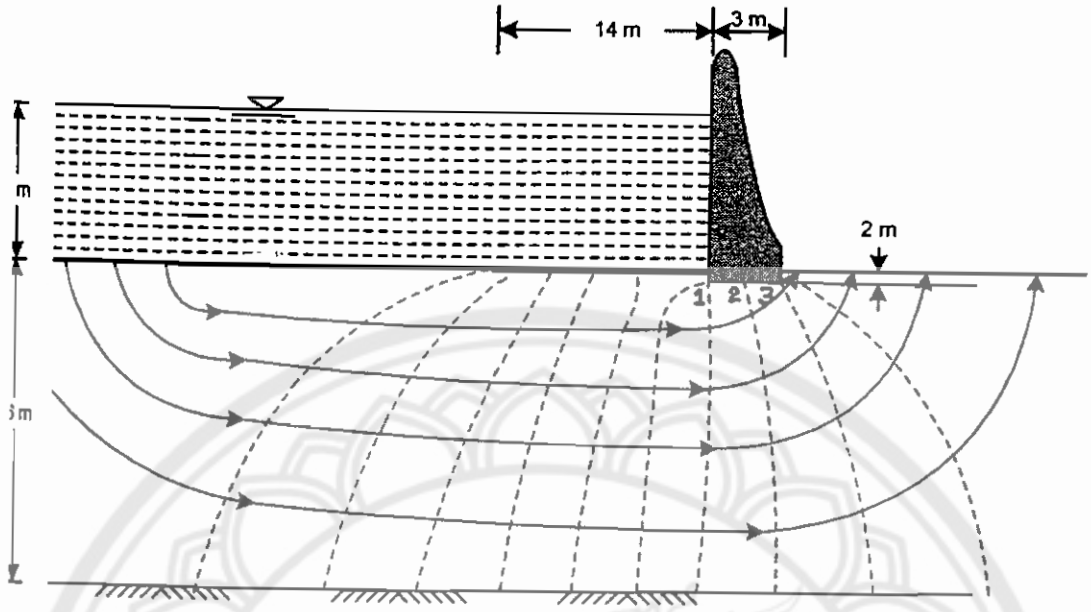
<u>วิธีทำ</u> 7.3.3.1 จากโจทย์ดินเป็นแบบ Asisotropic ดังนั้นเราต้องแปลง (transformed) หน้าตัดตามหลักเกณฑ์ดังนี้

$$\text{ความยาวของเขื่อนในหน้าตัดแปลง} = \sqrt{\frac{k_z}{k_x}} \times \text{ความยาวของเขื่อนดิน}$$

$$= \sqrt{\frac{6x10^{-6}}{5.4x10^{-5}}} \times 9.0 \text{ m}$$

$$= 3.0 \text{ m}$$

ดังนั้นสามารถเขียน Flow net บนหน้าตัดแปลงได้ตามรูปที่ 7.20.2



ชั้นหินทึบน้ำ

รูปที่ 7.20.2 การเขียน Flow net ข้อ7.3.3

จะหาปริมาณน้ำที่ไหลลอดใต้เขื่อน โดยจะหาได้จากสมการที่ 7.28

ซึ่งจากรูปจะได้ $N_f = 5$

$N_d = 11$

$$\therefore \quad q = \sqrt{k_z k_x} \bullet H \frac{N_f}{N_d}$$

$$= \sqrt{(5.4x\,10^{-5})(6x\,10^{-6})}\ x(8\ m)\left(\frac{5}{11}\right)$$

$$= 6.55 \times 10^{-5}\ cm^3/s/m$$

ดังนั้นปริมาณน้ำที่ไหลผ่านใต้เขื่อน $= 6.55 \times 10^{-5}\ cm^3/s/m$

7.3.3.2 หาแรงดันใต้ฐานเขื่อน (Uplift pressure) ได้คือ

จากรูปที่ 7.20.2 Head Loss สำหรับการดร็อป 1 ดร็อป

เท่ากับ $\frac{H}{N_d} = \frac{8}{11} = 0.727\ m$

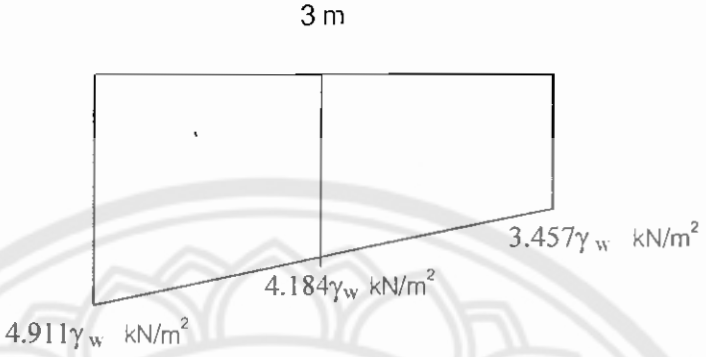
ที่จุด 1 Pressure Head = $H_T - 7$ drops = (8+2) – 5,089 = 4.911 m

ที่จุด 2 Pressure Head = $H_T - 8$ drops = (8+2) – 5,816 = 4.184 m

ที่จุด 3 Pressure Head = $H_T - 9$ drops = (8+2) – 6.543 = 3.457 m

จากสมการที่ 7.30

สามารถเขียนนำไปเขียนกราฟ Uplift pressure Diagram ได้ดังนี้



∴ แรงดันใต้ฐานรากเขื่อนสามารถหาได้จากพื้นที่ของ Uplift pressure Diagram โดยสามารถหาได้ดังนี้

$$= \frac{1}{2} \times 9.0\ m \times [(4.911 \times 9.81)kn/m^2 + (3.457 \times 9.81)\ kn/m^2]$$

$$\times 1\ m\ (width)$$

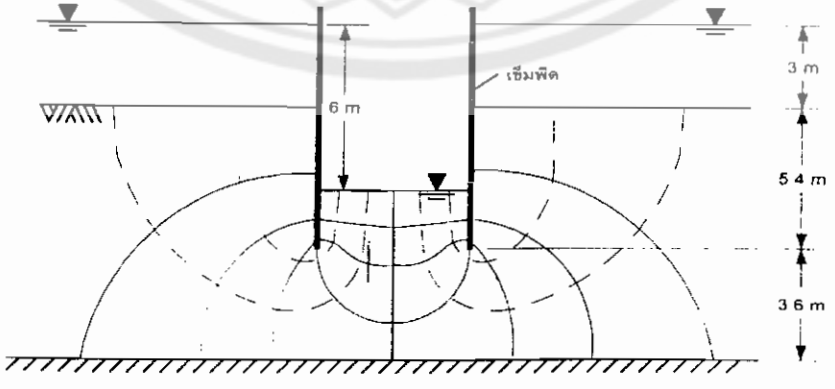
$$= 369.4\ kN/m$$

จะได้ว่าแรงดันใต้ฐานรากเขื่อน = 369.41 kN/m

7.3.5 จากรูปตัดของ Cofferdam เข็มพืดแห่งหนึ่งดังแสดงดังรูปที่ 7.21 โดยน้ำจะสามารถไหลเข้าได้ทั้ง 2 ทิศทาง และแสดง Flow net ดังรูป ดังนั้นถ้าฐานของชั้นดินที่พิจารณาอยู่ที่ความลึก 3.6 m โดยที่สัมประสิทธิ์ความซึมได้ $k_x = k_z = 5 \times 10^{-3}$ cm/sec แล้วจงหา

7.3.5.1 อัตราการซึมของน้ำเข้าไปใน Cofferdam เข็มพืด

7.3.5.2 หาเสถียรภาพของ Cofferdam เข็มพืดที่สร้างด้วยโดยกำหนด $\gamma_{sat} = 26\ kN/m^3$



รูปที่ 7.21 แสดงรูปตัดของ Coffer Dam ที่ใช้ในข้อที่ 7.3.5

วิธีทำ 7.3.5.1 จากโจทย์จะได้ $N_d = 7$

$N_f = 3$

จากสมการที่ 10.23 จะได้การซึมของน้ำ 1 ด้านเท่ากับ

$$q = kH\frac{N_f}{N_d}$$

$$= 5 \times 10^{-5} \times 6 \times \frac{3}{7}$$

$$= 1.29 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sec/m}$$

ดังนั้นอัตราการซึมของน้ำเข้าไปใน Cofferdam $= 2 \times 1.29 \times 10^{-4}$ $m^3/sec/m$

7.3.5.2 จากรูป Flow net

$\therefore$ แรงดันขึ้น (Uplift pressure) ของน้ำในดินด้านในที่ฐานของเข็มพืด โดยประมาณ $= \gamma_w \times$ Pressure head

จะได้ Pressure head $= H_T - 3$ drop $= 8.4 - 3\left(\frac{H}{N_d}\right)$

$$= 8.4 - 3\left(\frac{6}{7}\right)$$

$$= 5.83 \text{ m}$$

$\therefore$ แรงดันขึ้นของน้ำจะได้เท่ากับ $= \gamma_w \times$ Pressure head

$$= 9.81 \times 5.83$$

$$= 57.192 \text{ kN/m}^2$$

$\therefore$ แรงกดที่ฐานของเข็มพืดเนื่องจากดินจมน้ำเท่ากับ $= \gamma' h$

$$= (\gamma_{sat} - \gamma_w)(3.6)$$

$$= (26-981)(3.6)$$

$$= 58.284 \text{ kN/m}^2$$

ดังนั้นจากตัวเลขของแรงดันขึ้นเทียบกับแรงกดจะเห็นว่า Cofferdam เข็มพืดนี้มีเสถียรภาพเนื่องจากเข็มพืดสามารถรับแรงกดได้มากกว่าแรงดันขึ้นจึงไม่ทำให้เกิด Piping