บทที่ 9
การซึมผ่านของน้ำ
(Hydraulic Conductivity)

9.1 เนื้อหาโดยย่อ

ดินคือสิ่งที่มีน้ำซึมได้โดยตรงโดยผ่านทางช่องว่างของดิน ซึ่งสามารถซึมจากจุดที่มีพลังงานสูงไปสู่จุดที่มีพลังงานต่ำกว่า ดังนั้นการศึกษาถึงการไหลของน้ำที่ซึมอยู่ในดินจึงมีความสำคัญมากในทางปฐพีกลศาสตร์ (Soil mechanics) ซึ่งจำเป็นสำหรับการประมาณค่าของการซึมในขั้นใต้ดินภายใต้เงื่อนไขทางชลศาสตร์ต่างๆ เพื่อการตรวจสอบปัญหาการสูบน้ำออกจากใต้ดินฐานของสิ่งก่อสร้าง และสำหรับการหาค่าความมั่นคง (stability) สำหรับเขื่อนและโครงสร้างกันดินอื่นๆ

ซึ่งความสำคัญของการที่ดินยอมให้น้ำไหลผ่านนี้มีความสำคัญต่องานโยธาที่เกี่ยวข้องกับการซึมของน้ำใต้เขื่อนการระบายน้ำจากพื้นดิน และการลดระดับน้ำใต้ดิน ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการรองรับน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของดินนั่นเอง

1. Bernoulli's Equation

จากกลศาสตร์ของไหล (Fluid mechanics) สามารถบอกได้ว่าค่าความสูญเสียรวม (total head) ซึ่งเกิดจาก pressure, velocity และ elevation head ได้ดังสมการต่อไปนี้

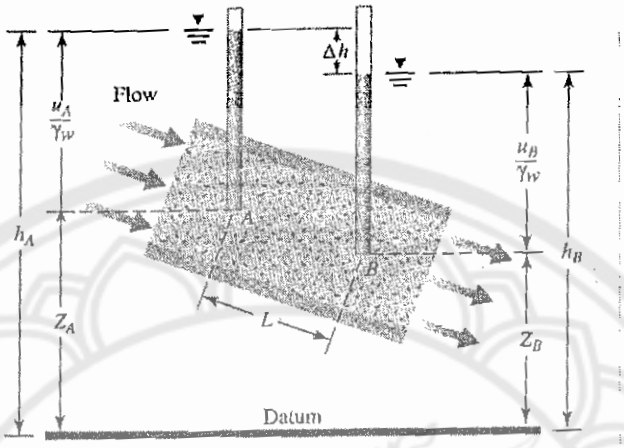
$$h = \frac{u}{\gamma_w} = \frac{V^2}{2g} + z \qquad \text{(สมการที่ 9.1)}$$

โดยที่ h = total head
u = pressure
V = velocity
g = ค่าความเร่งของแรงดึงดูดของโลก
γ_w = หน่วยน้ำหนักของน้ำ

สมการของ Bernoulli นี้ใช้ได้กับการไหลของดินที่มีรูปานกลางหรือมีความพรุนปานกลางและถ้าความเร็วของน้ำมีค่าน้อยมากผลของความสูญเสียที่เกิดจากความเร็วจะไม่เกิดขึ้น โดยการไหลในดินจะเป็นแบบที่กล่าวมาก็คือเป็นการไหลแบบช้าๆ ผ่านไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ดังนั้นจึงได้ว่า

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + z \qquad \text{(สมการที่ 9.2)}$$

ซึ่งสมการที่ 9.2 นี้สามารถนำไปใช้ในเครื่องค่าความสูญเสียรวม (total head) ซึ่งเรียกว่า "Piezometers" ดังแสดงในรูปที่ 9.1



รูปที่ 9.1 ความดัน, ระดับ, และความสูญเสียรวม (total heads) สำหรับการไหลของน้ำผ่านดิน

จากรูปที่ 9.1 ค่าความสูญเสียระหว่าง 2 จุด (A และ B) สามารถหาได้จากสมการ

$$\Delta h = h_A - h_B = \left(\frac{u_A}{\gamma_w} + z_A\right) - \left(\frac{u_B}{\gamma_w} + z_B\right) \qquad \text{(สมการที่ 9.2.1)}$$

โดยค่าความสูญเสียนี้สามารถนำไปหา ค่าความชันของชลศาสตร์ (hydraulic gradient) ; i ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการคำนวณต่อๆ ไปได้จากสมการ

$$i = \frac{\Delta h}{L} \qquad \text{(สมการที่ 9.3)}$$

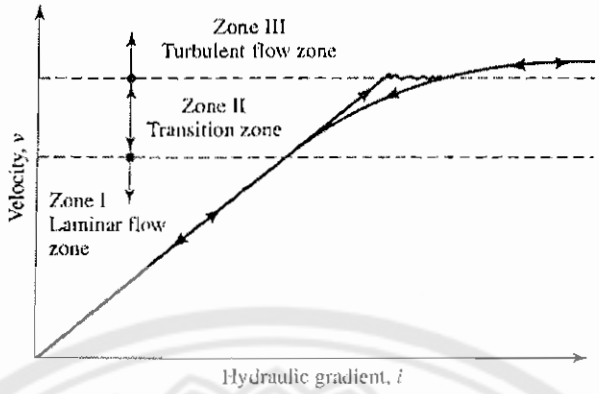
โดยที่ i = ค่าความชันทางชลศาสตร์ (hydraulic gradient)

L = ระยะทางระหว่างจุด A ถึงจุด B

i = ที่ได้ใช้ได้ในกรณีที่การเคลื่อนที่ของน้ำเป็นแบบไม่มีมิติ (Non-dimensional)

ในทั่วไปแล้วค่าความสัมพันธ์ของความเร็ว (Velocity ; v) กับความชันทางชลศาสตร์ (hydraulic gradient ; i) สามารถแสดงในรูปที่ 9.2 ซึ่งในรูปนั้นสามารถแบ่งแยกออกได้เป็น 3 โซน คือ

- Laminar flow (Zone I ; การไหลเรื่อยๆ เอื่อยๆ)
- Transition zone (Zone II)
- Turbulent flow zone (Zone III ; การไหลแบบปั่นป่วน)



รูปที่ 9.2 ธรรมชาติของการเปลี่ยนแปลงค่า v กับค่าความชันทางชลศาสตร์,i

โดยจากรูปค่าความชันทางชลศาสตร์ (hydraulic gradient) จะมีค่าถูกต้องก็จะต้องอ่านค่าใน zone I เท่านั้นแต่ค่าใน zone III จะแสดงถึงค่าที่มากที่สุดของค่าความชันทางชลศาสตร์

ในดินส่วนมากการไหลของน้ำผ่านช่องว่างในดินจะเป็นการไหลแบบเรื่อยๆ เอื่อยๆ (Laminar) โดยที่ความเร็วน้อยมากๆ โดยความสัมพันธ์จะเป็นดังต่อไปนี้

$$V \propto i \qquad \text{(สมการที่ 9.4)}$$

อย่างไรก็ตามในหินแตกหัก, ก้อนหิน, กรวด และทรายที่หยาบมากๆ ซึ่งการไหลของน้ำจะเป็นแบบปั่นป่วน (turbulent) จะไม่สามารถใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ 9.4 ได้

9.1.2 กฎของ Darcy (Darcy's law)

ปริมาณน้ำที่ไหลซึมผ่านมวลดิน คำนวณได้โดยอาศัยกฎของ Darcy ซึ่งสมการเบื้องต้นก็จะเป็นความสัมพันธ์ของความเร็วของน้ำเทียบกับค่าความชันทางชลศาสตร์ ดังสมการที่ 4

$$V \propto i$$

ดังนั้น $$v = ki \qquad \text{(สมการที่ 9.5)}$$

โดยที่ v = ค่าความเร็วของการไหลซึม

k = สัมประสิทธิ์ความซึมได้ (hydraulic conductivity หรือ coefficient of permeability)

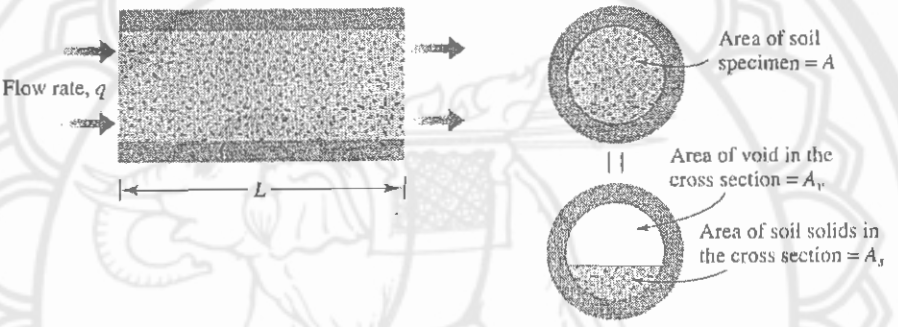
i = ค่าความชันทางชลศาสตร์ (hydraulic gradient)

จากสมการที่ 9.5 v คือค่าความเร็วของการไหลซึมเมื่อน้ำนั้นไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด (gross cross-sectional area) ของดินแต่ถ้าความเร็วของน้ำจริงๆ (Seepage Velocity ; V_s) มีมากกว่า V เนื่องจากเกิดช่องว่างขึ้นดังแสดงในรูปที่ 9.3 ซึ่งก็คือการไหลไม่เต็มพื้นที่นั้นเอง เราสามารถหาปริมาณการไหลของน้ำ (q) ผ่านดินได้จากสมการ

$$q = vA = A_v v_s \qquad \text{(สมการที่ 9.6)}$$

โดยที่ v_s = ค่าความเร็วของน้ำในการไหลจริงๆ (Seepage velocity)

A_v = พื้นที่หน้าตัดของช่องว่าง



รูปที่ 9.3 Derivation สมการที่ 9.6

จากรูปที่ 9.3 ถ้า

$$A = A_v + A_s \qquad \text{(สมการที่ 9.7)}$$

โดยที่ A_s = พื้นที่หน้าตัดของดินส่วนที่เป็นของแข็ง

จากสมการที่ 9.6 และสมการที่ 9.7 จะได้

$$q = v(A_v + A_s) = A_v v_s$$

หรือ $$v_s = \frac{v(A_v + A_s)}{A_v} = \frac{v(A_v + A_s)L}{A_v L} = \frac{v(V_v + V_s)}{V_v} \qquad \text{(สมการที่ 9.8)}$$

โดยที่ V_v = ปริมาตรของช่องว่าง

V_s = ปริมาตรของดิน

จากสมการที่ 9.8 จะได้

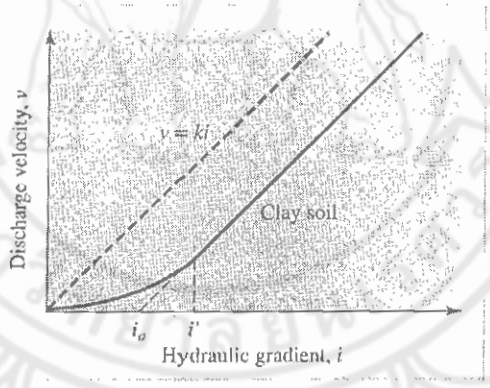
$$v_s = v\left[\frac{1+\left(\frac{V_v}{V_s}\right)}{V_v/V_s}\right] = v\left(\frac{1+e}{e}\right) = \frac{v}{\eta} \qquad \text{(สมการที่ 9.9)}$$

โดยที่ e = อัตราส่วนช่องว่าง (void ratio)

η = ค่าความพรุน (porosity)

จากกฎของ Darcy ตามสมการที่ 9.5 เมื่อเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วของการไหลซึม (v) เทียบกับค่าความชันทางชลศาสตร์ (i) สามารถเขียนได้ดังแสดงในรูปที่ 9.4 แต่อย่างไรก็ตามในธรรมชาติของดินที่ถูกรบกวนกราฟที่ได้จะไม่เป็นเส้นตรงที่เริ่มต้นจากศูนย์ ดังนั้นจะต้องทำการปรับแก้เป็นดังสมการ

$$v = k(i - i_0) \text{ สำหรับ } i \geq i' \qquad \text{(สมการที่ 9.10)}$$



รูปที่ 9.4 เปรียบเทียบค่า discharge velocity, v กับ ค่าความชันทางชลศาสตร์,i

9.1.4 ค่าความซึมได้ของน้ำในดิน (Hydraulic conductivity หรือ Coefficient of Permeability ; k)

จากหัวข้อที่ผ่านๆ มาตัวแปรที่สำคัญในสมการของกฎของ Darcy คือค่าความซึมได้ของน้ำในดิน (Hydraulic conductivity หรือ Coefficient of Permeability ; k) นั่นเองซึ่งสามารถหาได้หลายวิธีดังต่อไปนี้

1. การทดสอบในห้องปฏิบัติการหรือในสนาม
2. จากข้อมูลเก่าหรือข้อมูลที่มีมา
3. จากการคำนวณหรือความสัมพันธ์ต่างๆ

ในหัวข้อนี้นั้นจะพูดถึงการหาค่าความซึมได้ของน้ำในดิน (k) ที่หามาจากข้อมูล (Database) ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นในตารางที่ 9.1

ตารางที่ 9.1 ค่าของ k แยกตามชนิดของดินที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำ

	k	
Soil type	cm/sec	ft/min
Clean gravel	100–1.0	200–2.0
Coarse sand	1.0–0.01	2.0–0.02
Fine sand	0.01–0.001	0.02–0.002
Silty clay	0.001–0.00001	0.002–0.00002
Clay	<0.000001	<0.000002

อย่างไรก็ตามค่าในตารางเป็นค่าในการประมาณเท่านั้น ในการหาให้แน่นอนยิ่งขึ้นคือการหาโดยความสัมพันธ์ของความหนืด (Viscosity ; η) ของน้ำนั่นเอง ซึ่งความหนืดของน้ำนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความหนืดก็จะลดลง ทำให้น้ำไหลซึมผ่านได้ง่ายค่าความซึมได้ก็จะมากขึ้นนั่นเอง โดยอุณหภูมิมาตรฐานที่จะใช้บอกค่าความซึมได้ของน้ำในดินคือที่ 20 ° C โดยเป็นไปตามสมการคือ

$$k_{20^\circ C} = \left(\frac{\eta_{T^\circ C}}{\eta_{20^\circ C}}\right) k_{T^\circ C} \qquad \text{(สมการที่ 9.11)}$$

โดยที่ $k_{20^\circ C}$ = Hydraulic conductivity ที่อุณหภูมิ = 20 ° C

$k_{T^\circ C}$ = Hydraulic conductivity ที่อุณหภูมิ = T ° C ใดๆ

$\eta_{20^\circ C}$ = ค่าความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิ = 20 ° C

$\eta_{T^\circ C}$ = ค่าความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิ = T ° C ใดๆ

ซึ่งค่า $\left(\frac{\eta_{T^\circ C}}{\eta_{20^\circ C}}\right)$ สามารถแสดงได้ในตารางที่ 9.2 เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ

ตารางที่ 9.2 แสดงค่า $\left(\eta_{T^\circ C}/\eta_{20^\circ C}\right)$

Temperature, T (°C)	$\eta_{T^\circ C}/\eta_{20^\circ C}$	Temperature, T (°C)	$\eta_{T^\circ C}/\eta_{20^\circ C}$
15	1.135	23	0.931
16	1.106	24	0.910
17	1.077	25	0.889
18	1.051	26	0.869
19	1.025	27	0.850
20	1.000	28	0.832
21	0.976	29	0.814
22	0.953	30	0.797

อย่างไรก็ตามในหัวข้อนี้เป็นการประมาณค่าเท่านั้น ถ้าต้องการให้ละเอียดกว่านี้ควรทดสอบด้วยวิธีในห้องปฏิบัติการ

9.1.5 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ของความซึมได้

ในการทำงานจริงวิธีการหาค่า k สามารถหาได้ทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนามจริงซึ่งสามารถแสดงถึงรายละเอียดของวิธีการหาได้ดังต่อไปนี้

9.1.5.1 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ของความซึมได้ในห้องปฏิบัติการ

สามารถทำได้ 2 วิธีคือ

- แบบความดันน้ำคงที่ (Constant-head test) เหมาะสำหรับดินเม็ดหยาบ เช่น กรวด ทราย
- แบบความดันน้ำเปลี่ยน (Falling-head test) เหมาะสำหรับดินเม็ดละเอียด เช่น Silt Clay

- 9.1.5.1.1 Constant-head test (ความดันน้ำคงที่)

ใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Constant head permeameter ดังแสดงในรูปที่ 9.5 ทำได้โดยการปล่อยน้ำที่มีความดันน้ำคงที่ให้ไหลผ่านตัวอย่างดินที่อยู่ในหลอดใส่ตัวอย่างพื้นที่หน้าตัด A ตลอดเวลา แล้วจัดปริมาณน้ำ Q ที่ไหลผ่านตัวอย่างดินในช่วงเวลา t ซึ่งรองรับไว้ในถ้วยตวง อ่านค่าการสูญเสียความดันหรือระดับน้ำ h ในช่วงความยาวของการไหลซึม L จากนั้นสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำจากสมการ

$$Q = Avt = A(ki)t \qquad \text{(สมการที่ 9.12)}$$

แต่ $i = \frac{h}{L}$

ดังนั้น $Q = A\left(k\frac{h}{L}\right)t$

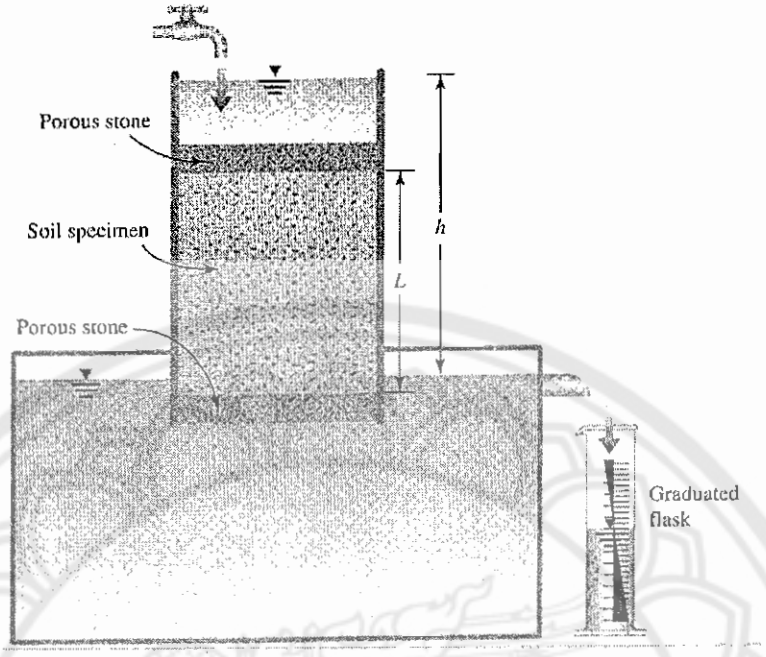
จะได้ $k = \frac{QL}{Aht}$ (สมการที่ 9.13)

โดยที่ Q = ปริมาตรของน้ำ

A = พื้นที่หน้าตัดของ

t = เวลาที่น้ำไหลผ่าน

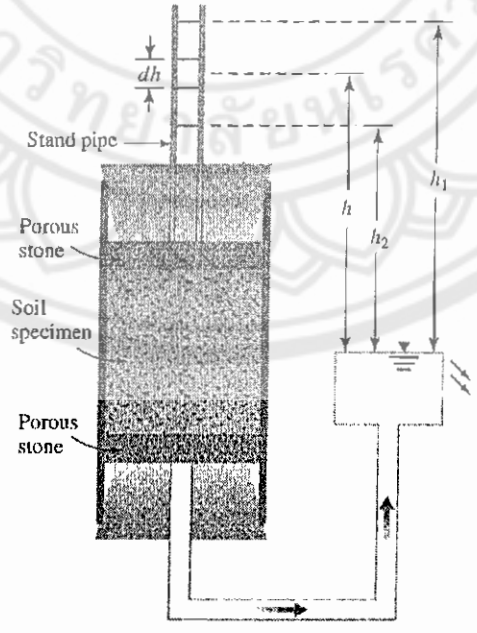
L = ความยาวของ



รูปที่ 9.5 แสดงเครื่องมือในการทดสอบแบบความดันน้ำคงที่

- 9.1.5.1.2 Falling-head test (ความดันน้ำเปลี่ยน)

ใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Falling head permeameter ดังแสดงในรูปที่ 9.6



รูปที่ 9.6 แสดงเครื่องมือในการทดสอบแบบความดันน้ำเปลี่ยน

ซึ้งเหมาะสำหรับพวกดินเม็ดละเอียดที่ยอมให้น้ำไหลผ่านซึมผ่านได้น้อย ซึ่งถ้าใช้เครื่องมือแบบแรกที่กล่าวมาแล้วจะต้องเสียเวลามาก เพราะน้ำไหลซึมผ่านดินได้น้อย โดยเมื่อปล่อยน้ำไหลผ่านมวลดินตัวอย่าง ระดับน้ำในหลอดแก้วจะลดลงในการอ่านค่าระดับน้ำ h_1 และ h_2 ในช่วงเวลา t ก็จะสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมของน้ำได้

โดยที่อัตราการไหลของน้ำในตัวอย่างจะเป็นไปตามสมการ

$$q = kiA = k\left(\frac{h}{L}\right)A \qquad \text{(สมการที่ 9.14)}$$

ในช่วงเวลา dt ถ้าระดับน้ำในหลอดแก้วลดลง dh ดังนั้นปริมาณน้ำที่ไหลผ่านมวลดินในช่วงเวลา dt ก็จะเท่ากับ d x dh ในเมื่อ a เป็นพื้นที่หน้าตัดของหลอดแก้ว ดังนั้นจะได้

$$q = -a\frac{dh}{dt} \qquad \text{(สมการที่ 9.15)}$$

ดังนั้น $k\left(\frac{h}{L}\right)A = -a\frac{dh}{dt}$

$$at = \frac{aL}{Ak}\left(\frac{-dh}{h}\right) \qquad \text{(สมการที่ 9.16)}$$

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 9.16 ในช่วงของ h_1 และ h_2 จะได้

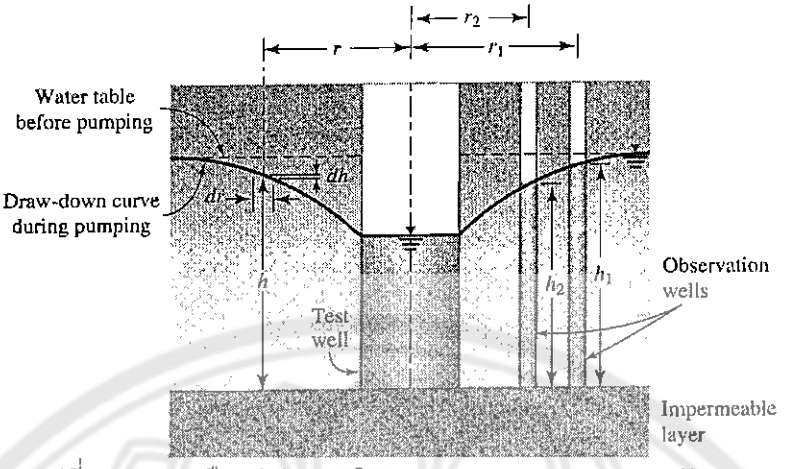
$$t = \frac{aL}{Ak}\log_e\frac{h_1}{h_2}$$

จะได้ $$k = 2.303\frac{aL}{At}\log\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \qquad \text{(สมการที่ 9.17)}$$

9.1.5.2 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ของความซึมได้ในสนาม

สามารถหาได้โดยวิธีการเจาะผังท่อลงไปในดินแล้วสูบน้ำออก ซึ่งเรียกว่า Well-point method นอกจากเป็นวิธีการที่ใช้ลดระดับน้ำใต้ดินแล้วยังใช้หาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ในสนามได้อีกด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งพวกดินเม็ดหยาบซึ่งมีความลำบากในการเก็บตัวอย่างดินคงสภาพ เพื่อนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ จึงต้องหาวิธีการในการทดสอบนั่นก็คือ Well-point นี่เอง

เมื่อเจาะผังท่อลงไปในดินแล้วสูบน้ำออกจาก Well แล้วระดับน้ำใต้ดินจะลดลงเป็นรูปกรวย (Cone) ดังแสดงในรูปที่ 7 และถ้าเจาะหลุมสังเกต (Observation bore hole) ขึ้นอีก 2 หลุม ซึ่งอยู่ห่างจาก Well-point เป็นระยะเท่ากับ r_1 และ r_2 จะได้ระดับน้ำเหนือชั้นดินที่ไม่ยอมให้น้ำไหลซึมผ่านเป็น h_1 และ h_2 จะได้ระดับน้ำเหนือชั้นดินที่ไม่ยอมให้น้ำไหลซึมผ่านเป็น h_1 และ h_2 ตามลำดับ



รูปที่ 9.7 แสดงถึงรูปตัดการทำ Pumping Test จากหลุมตัวอย่าง

ถ้าพิจารณาที่ระยะ r ห่างจากหลุมเจาะ สมมุติให้ระดับน้ำเหนือชั้นดินที่ไม่ยอมให้น้ำไหลผ่านเป็น h พื้นที่ผิวของดินที่ระยะ r ห่างจาก Well-point ซึ่งน้ำไหลผ่านจะเท่ากับพื้นที่ผิวของรูปทรงกระบอกรัศมี r สูง h ดังนั้นพื้นที่ที่น้ำไหลผ่าน (A) = $2\pi rh$

ดังนั้นค่าความลาดชันทางชลศาสตร์ (hydraulic gradient ; i) = $\frac{dh}{dr}$

จากกฎของ Darcy

$$q = kiAt$$

$$= k\left(\frac{dh}{dr}\right)2\pi rh \qquad \text{(สมการที่ 9.18)}$$

จะได้ $$\frac{dr}{r} = k\frac{2\pi}{Q/t}\times h\,dh \qquad \text{(สมการที่ 9.19)}$$

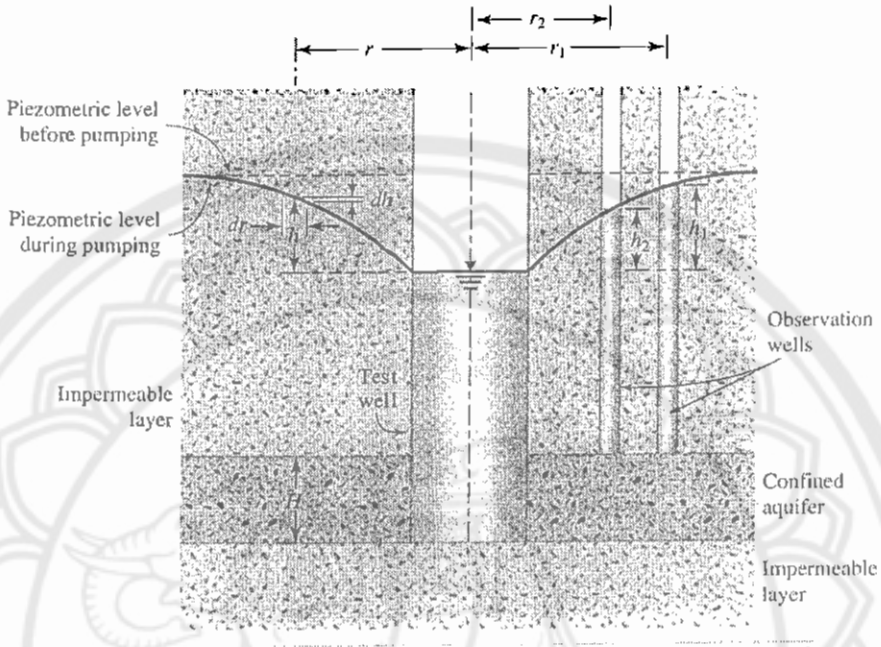
เมื่ออินทิเกรตจาก r_1 ถึง r_2 และจาก h_1 และ h_2 จะได้

$$\int_{r_2}^{r_1}\frac{dr}{r} = \int_{h_2}^{h_1}\frac{2\pi kh}{q}\,dh$$

ดังนั้น $$k = \frac{2.3039q\log\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{\pi\left(h_1^2 - h_2^2\right)} \qquad \text{(สมการที่ 9.20)}$$

โดยผลการทดลองจากวิธีนี้จะเชื่อถือได้มากน้อยแค่ไหน ขึ้นอยู่กับความชำนาญในการปฏิบัติและข้อบกพร่องอาจจะเกิดจากสิ่งต่างๆ ดังนี้ เช่น ดินอาจจะไม่เป็นเนื้อเดียวกันหมด และชั้นดินที่ไม่ยอมให้น้ำไหลซึมผ่านอาจไม่อยู่ในแนวราบ การสูบน้ำออกควรจะต้องสูบจนกระทั่งมีอัตราการไหลคงที่ก่อนที่จะมีการวัดปริมาณน้ำ และหลุมเจาะสังเกตจะต้องไม่ใกล้ Well-point จนเกินไป เพราะดินจะถูกรบกวนและระดับน้ำจะลดลงเร็วเกินไป

ในกรณีชั้นดินที่ต้องการหาค่าความซึมได้อยู่ระหว่างชั้นดินที่น้ำซึมผ่านได้ยาก ดังรูปที่ 9.8 ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้



รูปที่ 9.8 แสดงถึงรูปตัดการทำ Pumping Test จากหลุมตัวอย่างที่มีชั้นดิน Confined aquifer อยู่ระหว่างชั้นดินที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ (Impermeable layer)

จากกฎของ Darcy

$$q = k\left(\frac{dh}{dt}\right)2\pi rH \qquad \text{(สมการที่ 9.21)}$$

หรือ $$\frac{dr}{r} = \frac{2\pi kH}{q}dh$$

เมื่ออินทิเกรตจาก r_1 ถึง r_2 และจาก h_1 และ h_2 จะได้

$$\int_{r_2}^{r_1}\frac{dr}{r} = \int_{h_2}^{h_1}\frac{2\pi kH}{q}dh$$

จะได้ $$k = \frac{q\log\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{2.727H\left(h_1 - h_2\right)} \qquad \text{(สมการที่ 9.22)}$$

9.1.6 ความสัมพันธ์จากประสบการณ์สำหรับ Hydraulic Conductivity

ความสัมพันธ์จากประสบการณ์หลายๆ อย่าง สามารถใช้ประมาณค่า Hydraulic Conductivity ได้ โดยแสดงได้เป็นสมการหลายๆ สมการดังต่อไปนี้

- 9.1.6.1 ใช้ขนาดของเม็ดดินเป็นตัวกำหนด ในกรณีที่เป็นกรวดและทรายที่มีขนาดเดียวกัน (Fairly uniform sand) สามารถหาค่า Hydraulic Conductivity ได้จากสมการของ Hazen (1930)

$$k\,(cm/\sec) = cD_{10}^2 \qquad \text{(สมการที่ 9.23)}$$

โดยที่ c = ค่าคงที่อยู่ในช่วงประมาณ 1.0 – 1.5

D_{10} = ขนาดประสิทธิผล (mm)

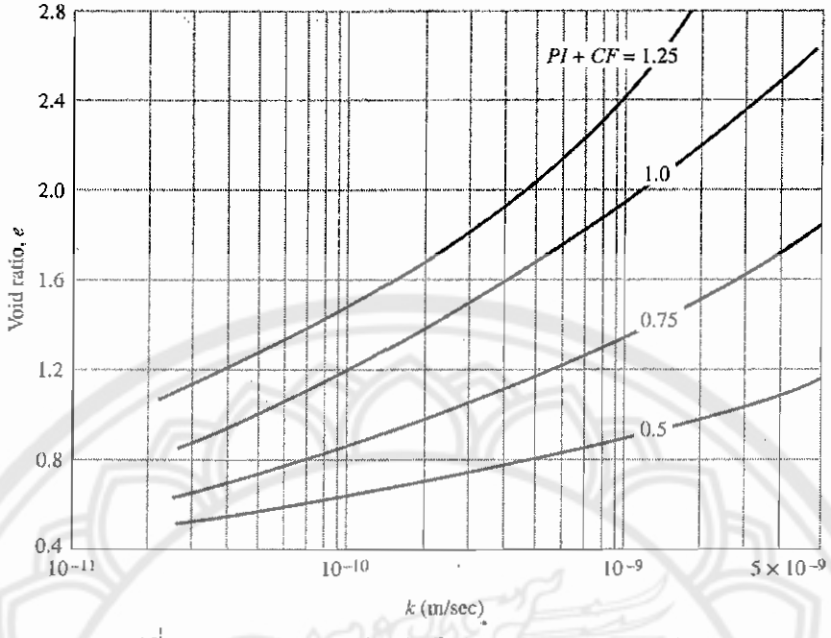
- 9.1.6.2 จากความสัมพันธ์ต่างๆ สามารถประมาณหาค่า Hydraulic Conductivity ได้ตามตารางที่ 9.3

ตารางที่ 9.3 ความสัมพันธ์สำหรับการประมาณหาค่า k

Type of Soil	Source	Relationship[a]	Comments
Sand	Amer and Awad (1974)	$k = C_2 D_{10}^{2.32} C_u^{0.6} \frac{e^3}{1+e}$	
	Shahabi, Das, Tarquin (1984)	$k = 1.2 C_2^{0.735} D_{10}^{0.89} \frac{e^3}{1+e}$	Medium to fine sand
Clay	Mesri and Olson (1971)	$\log k = A' \log e + B'$	
	Taylor (1948)	$\log k = \log k_0 - \frac{e_0 - e}{C_k}$ $C_k \approx 0.5 e_0$	For $e < 2.5$,

[a] D_{10} = effective size
C_u = uniformity coefficient
C_2 = a constant
k_0 = *in situ* hydraulic conductivity at void ratio e_0
k = hydraulic conductivity at void ratio e
C_k = permeability change index

- 9.1.6.3 จากความสัมพันธ์เกี่ยวกับอัตราส่วนช่องว่างและพารามิเตอร์เกี่ยวกับความข้นเหลวของดินสามารถสรุปได้เป็นแผนภูมิตามรูปที่ 9.9



รูปที่ 9.9 กราฟความสัมพันธ์ อัตราส่วนช่องว่าง กับค่า k

สรุปจากหัวข้อนี้ที่ได้กล่าวมา แสดงถึงการสังเกตจากประสบการณ์ของนักวิชาการหลายท่านจนได้สรุปออกมาเป็นสมการ โดยสามารถสรุปได้โดยใช้ตัวแปรที่หาได้จากการทดลองทั่วไปเช่นอัตราส่วนช่องว่าง เป็นต้น แต่คำที่ได้จากสมการหรือแผนภูมิเหล่านี้ เป็นเพียงค่าที่ได้จากการประมาณเท่านั้น เพื่อให้ทราบถึง Hydraulic Conductivity ที่แท้จริงควรจะใช้วิธีการทดลองจากหัวข้อที่กล่าวมาแล้ว

9.1.7 ค่าความซึมได้ของน้ำในดินที่เป็นชั้นๆ

ในสภาพธรรมชาติดินจะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) โดยตลอด ถึงแม้ว่าจะดูเป็นเนื้อเดียวกันแต่ก็อาจจะมีชั้นบางๆ ซึ่งค่าความซึมได้ต่างกันไปแซมอยู่ ชั้นดินในธรรมชาติอาจจะเปลี่ยนแปลงไปได้กว้างมาก จากดินเหนียวซึ่งน้ำสามารถซึมผ่านไปได้ยาก จนถึงชั้นทรายซึ่งน้ำสามารถซึมผ่านไปได้ง่าย ภายในช่องความหนาเพียงเล็กน้อย ซึ่งคล้ายกับตัวกรอง (Filters) ที่ทำขึ้นโดยธรรมชาติ คือมีวัสดุขนาดจากหยาบจนถึงละเอียดเป็นชั้นๆ

การเปลี่ยนแปลงของชั้นดินเหล่านี้จะมีผลทำให้ค่าเฉลี่ยของความซึมได้ในทิศทางขนานกับชั้นดินต่างไปจากค่าเฉลี่ยของความซึมได้ในทิศทางตั้งฉากกับชั้นดินอย่างมากดังจะแสดงให้เห็นต่อไปนี้

- 9.1.7.1 การไหลซึมทางแนวราบ (horizontal direction)

จากรูปที่ 9.10 จากสมการ $q = vA$

จะได้ $q = v[1 \times H]$

ดังนั้นจากรูป $q = q_1 + q_2 + q_3 + ... + q_n$

$$(v \cdot 1 \cdot H) = (v_1 \cdot 1 \cdot H_1) + (v_2 \cdot 1 \cdot H_2) + (v_3 \cdot 1 \cdot H_3) + ... + (v_n \cdot 1 \cdot H_n)$$

(สมการที่ 9.24)

จากกฎของ Darcy จะได้ $v = ki$

$$k_H \cdot i_H \cdot H = (k_1 \cdot i_1 \cdot H_1) + (k_2 \cdot i_2 \cdot H_2) + (k_3 \cdot i_3 \cdot H_3) + ... + (k_n \cdot i_n \cdot H_n)$$

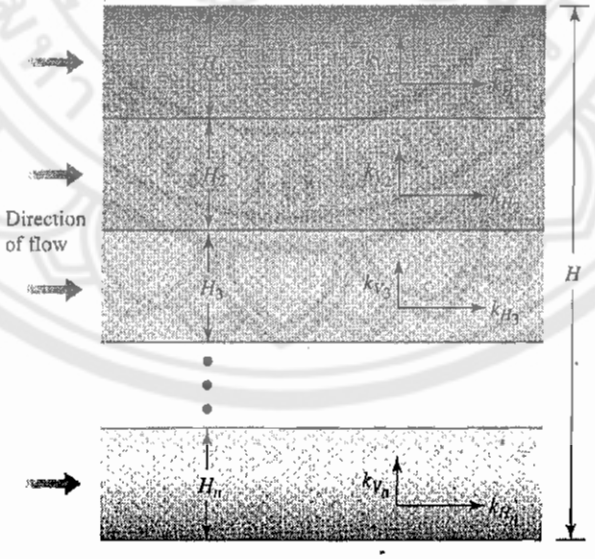
แต่ $i_H = i_1 = i_2 = i_3 = ... = i_n$ จะได้

$$k_H = \frac{1}{H}(k_1 H_1 + k_2 H_2 + k_3 H_3 + ... + k_n H_n) \quad \text{(สมการที่ 9.25)}$$

โดยที่ k_H = ค่าความซึมได้ทางแนวราบ

i = ความชันทางชลศาสตร์รวมทั้งหมด

H = ความหนาทั้งหมดของชั้นดินที่พิจารณา



รูปที่ 9.10 การหาค่า k_H สำหรับการไหลผ่านดินอิ่มตัวในแนวราบ

- 9.1.7.2 การไหลซึมทางแนวตั้ง (Vertical Direction)

จากรูปที่ 9.11 น้ำไหลผ่านแต่ละชั้นด้วยความเร็วและปริมาณการไหลที่เท่ากันตลอด ดังนั้นจะได้

$$V = V_1 = V_2 = V_3 = \ldots = V_n \qquad \text{(สมการที่9.26)}$$

และความสูญเสียรวม (total head) จะเท่ากับ

$$h = h_1 + h_2 + h_3 + \ldots + h_n \qquad \text{(สมการที่ 9.27)}$$

จากกฎของ Darcy ; $v = ki$ ดังนั้นจากสมการที่ 9.26

จะได้ $$k_V \times \left(\frac{h}{H}\right) = k_{V_1} i_1 = k_{V_2} i_2 = k_{V_3} i_3 = \ldots = k_{V_n} i_n \qquad \text{(สมการที่ 9.28)}$$

จากสมการที่ 9.27 จะได้

$$h = H_1 i_1 + H_2 i_2 + H_3 i_3 + \ldots + H_n i_n \qquad \text{(สมการที่ 9.29)}$$

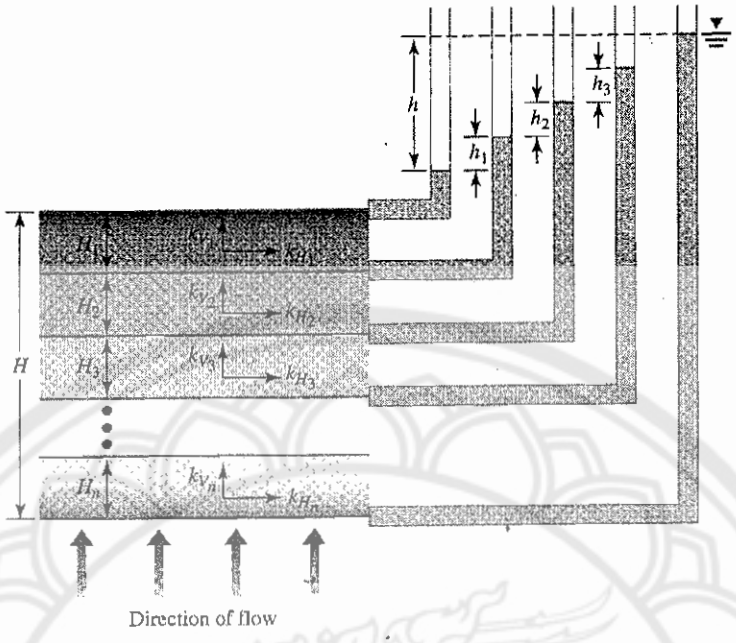
ดังนั้นจากสมการที่ 9.28 และสมการที่ 9.29 จะได้

$$k_V = \frac{H}{\left(\frac{H_1}{k_{V_1}}\right) + \left(\frac{H_2}{k_{V_2}}\right) + \left(\frac{H_3}{k_{V_3}}\right) + \ldots + \left(\frac{H_n}{k_{V_n}}\right)} \qquad \text{(สมการที่ 9.30)}$$

โดยที่ k_V = ค่าความซึมได้ทางแนวตั้ง

i = ค่าความชันทางชลศาสตร์รวมทั้งหมด

$i_1, i_2, i_3, \ldots i_n$ = ค่าความชันทางชลศาสตร์ในแต่ละชั้น



รูปที่ 9.11 การหาค่า k_v สำหรับการไหลผ่านดินอิ่มตัวในแนวดิ่ง

9.2 โจทย์ทบทวนเนื้อหา ความรู้ และความเข้าใจในหลักการพื้นฐานของเนื้อหาที่เรียน

9.2.1 จากการทดลองแบบความดันน้ำคงที่ (Constant-head) ดังแสดงในรูปที่ 9.12 โดยจากการทดลองจะได้

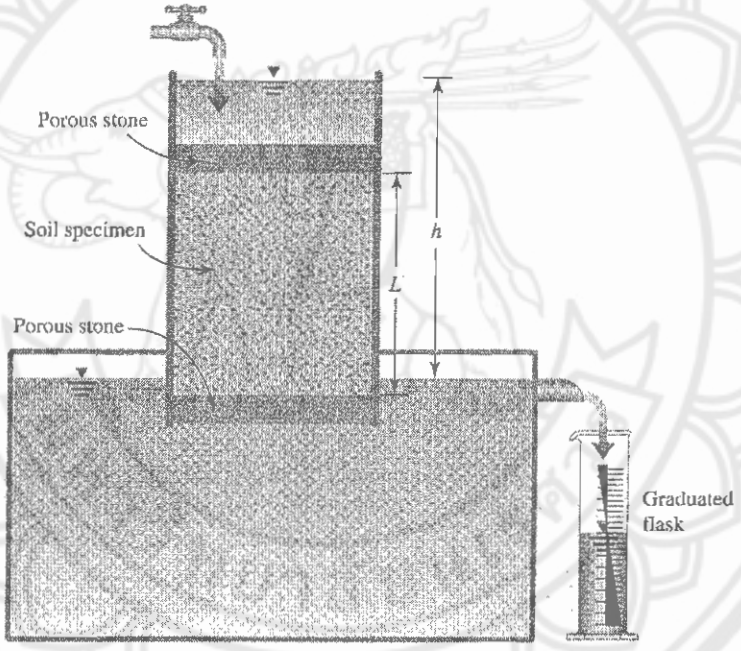
L = 24 in

A = พื้นที่ของตัวอย่าง = 4 in^2

h = ความแตกต่างของ head = 3 in

Q = ปริมาตรของน้ำที่ไหลในเวลา 3 นาที = 25.1 in^2

จงหาค่าความซึมได้ของน้ำ (Hydraulic Conductivity) ในดิน



รูปที่ 9.12 เครื่องมือทดลองลองในข้อที่ 9.2.1

วิธีทำ

จากสมการที่ 9.13 ; $k = \frac{QL}{Aht}$

$= \frac{(25.1)(24)}{(4)(30)(3)}$

$k = 1.67$ in/min

$k = 0.0279$ in/sec

∴ ค่าความซึมได้ของน้ำ (Hydraulic Conductivity) ในดิน = 0.0279 in/sec

9.2.2 จากรูปที่ 9.13 สำหรับการทดลองแบบความดันน้ำคงที่ (Constant-head) ในดินทราย จะได้

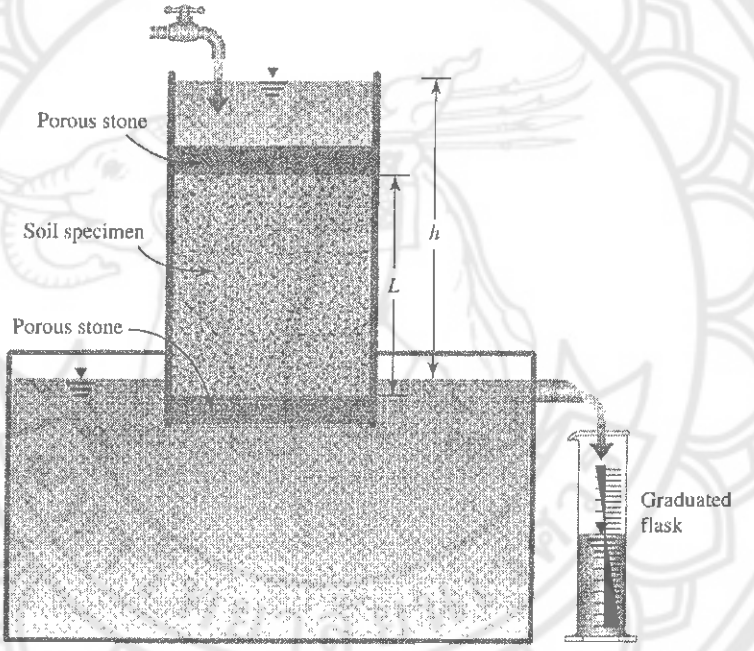
L = 400 mm

A = 135 cm^2

h = 450 mm

ปริมาตรของน้ำที่ไหลในเวลา 3 นาที = 640 cm^3

อัตราส่วนช่องว่างของทราย = .54



รูปที่ 9.13 เครื่องมือทดลองลองในข้อที่ 9.2.2

จงหา 9.2.2.1 ค่าความซึมได้ของน้ำ (Hydraulic Conductivity ; k)

9.2.2.2 ความเร็วการไหลซึมน้ำของดิน (Seepage velocity)

<u>วิธีทำ</u> 9.2.2.1 จากสมการที่ 9.13 ; $k = \frac{QL}{Aht}$

$$= \frac{(640 cm^3)(40 cm)}{(45 cm)(3x\ 60\ \text{sec})(135 cm^2)}$$

$= 23.411 \times 10^{-3}$ cm/sec

$\therefore$ ค่าความซึมได้ของน้ำ (k) = 23.411×10^{-3} cm/sec

9.2.2.2 จากสมการที่ 9.9 ; $v_s = v\left(\frac{1+e}{e}\right)$

แต่จากกฎของ Daray ; $v = ki$

$= k\left(\frac{h}{L}\right)$

ดังนั้น $v = 23.411 \times 10^{-3}$ cm/sec $\left(\frac{450\,mm}{400\,mm}\right)$

$v = 0.0263$ cm/sec

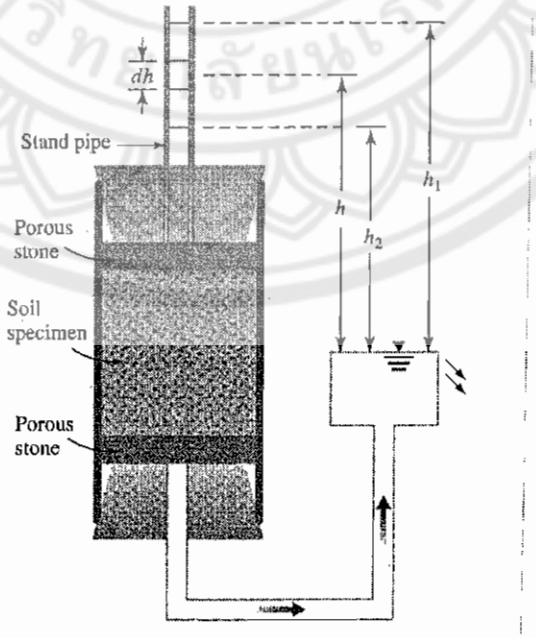
ดังนั้นความเร็วของการไหลซึม$(v_s) = v\left(\frac{1+e}{e}\right)$

$= 0263\left(\frac{1+0.54}{0.54}\right)$

$v_s = 0.075$ cm/sec

$\therefore$ ความเร็วของการไหลซึม $(v_s) = 0.075$ cm/sec

9.2.3 สำหรับการทดลองความดันน้ำเปลี่ยน (Variable-head Test) ดังแสดงตามรูปที่ 9.14 ถ้าความยาวของตัวอย่าง (L) = 380 mm พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (A) = 6.5 cm^2 ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ (k) = 0.175 cm/min ถ้าระดับที่เริ่มต้น (h_1) อ่านได้เท่ากับ 650 cm เมื่อเวลาผ่านไป 8 นาทีแล้วอ่านค่าระดับน้ำในหลอดแก้วได้เท่ากับ 300 cm ดังนั้นจงหาพื้นที่หน้าตัดของหลอดแก้ว (a) ได้เท่ากับ



รูปที่ 9.14 เครื่องมือทดลองลองในข้อที่ 9.2.3

<u>วิธีทำ</u> จากสมการที่ 9.17 จะได้

$$k = 2.303\frac{aL}{At}\log\frac{h_1}{h_2}$$

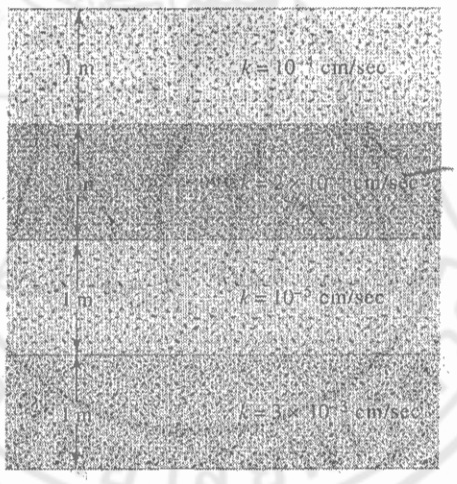
$$0.175 \text{ cm/min} = 2.303\frac{a(380\,mm)}{(6.5cm^3)(8\,\text{min})}\log\left(\frac{6500\,mm}{3000\,mm}\right)$$

$$a = \frac{0.175}{0.565}$$

$$a = 0.31 \text{ cm}^2$$

$\therefore$ พื้นที่หน้าตัดของหลอดแก้ว = 0.31 cm^2

9.1.4 ชั้นดินที่แสดงตามรูปที่ 9.15 ให้ประมาณหาค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความซึมได้ในแนวราบและแนวดิ่ง ; $k_{H(eq)} / k_{V(eq)}$ (ratio of equivalent permeability)



รูปที่ 9.15 แสดงชั้นดินที่ใช้ในข้อที่ 9.2.4

<u>วิธีทำ</u> จากสมการที่ 9.25 จะได้

$$k_{H(eq)} = \frac{1}{H}(k_1H_1 + k_2H_2 + k_3H_3 + \ldots + k_nH_n)$$

$$= \frac{1}{4}\left((10^{-4})(1) + (2\text{x}10^{-4})(1) + (10^{-5})(1) + (3\text{x}10^{-3})(1)\right)$$

$$= 8.275 \text{ x } 10^{-4} \text{ cm/sec}$$

จากสมการที่ 9.30 จะได้

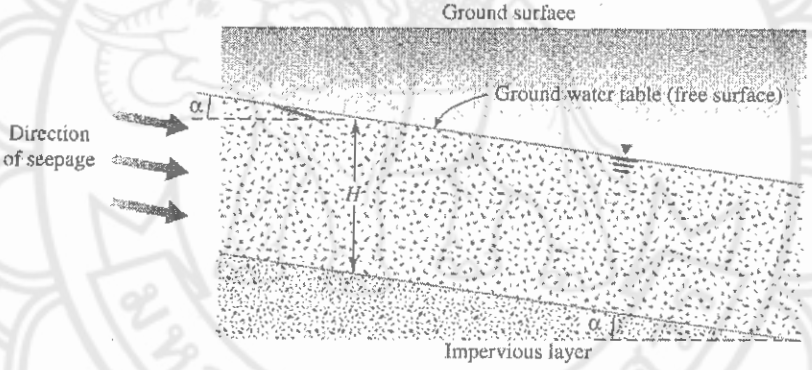
$$k_{v(eq)} = \frac{H}{\frac{H_1}{K_1}+\frac{H_2}{K_2}+\frac{H_3}{K_3}+\frac{H_4}{K_4}}$$

$$= \frac{4}{\frac{1}{10^{-4}}+\frac{1}{2x10^{-4}}+\frac{1_3}{10^{-5}}+\frac{1_4}{3x10^{-3}}}$$

$$= 3.468 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$$

ดังนั้นจะได้ $\frac{k_{H(eq)}}{k_{v(eq)}} = \frac{8.275x10^{-4}}{3.467x10^{-3}} = 23.86$

9.2.5 ชั้นดินซึมน้ำ (Permeable Soil) ที่อยู่บนชั้นทึบน้ำ (Impervious layer) ดังแสดงดังรูปที่ 9.16 ถ้า k = 4.8×10^{-3} cm/sec สำหรับชั้นดินซึมน้ำ จงหาอัตราการไหลของน้ำผ่านชั้นดินถ้า H = 3 m และ $\alpha = 5^{\circ}$



รูปที่ 9.16 แสดงชั้นดินที่ใช้ในข้อที่ 9.2.5

<u>วิธีทำ</u> จากสมการค่าความชันทางชลศาสตร์ (i) $= \frac{\Delta h}{L}$

$$= \frac{L\tan\alpha}{(L/\cos\alpha)} = \sin\alpha$$

จากสมการที่ 9.5 ; v = ki

จากสมการที่ 9.6 ; q = vA

ดังนั้น q = kiA

= 4.8×10^{-3} cm/sec x sinα x (300 cosα x 100)

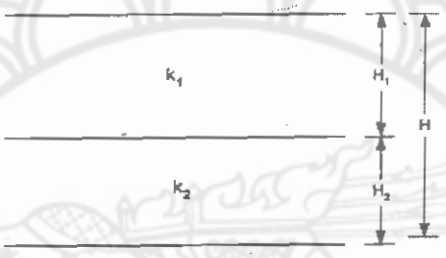
= 12.50 cm^3/sec/cm

$= 12.50 \times 10^{-6} \times 60 \times 60\ m^3/hr/m$

$q = 0.045\ m^3/hr/m$

ดังนั้นอัตราการไหลของน้ำผ่านดิน $= 45 \times 10^{-3}\ m^3/hr/m$

9.2.6 **จงพิสูจน์ว่าสำหรับดินหลายชั้น และในแต่ละชั้นมีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทุกทาง** (Isotropic) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ร่วมในแนวนอน ($k_{H(eq)}$) จะมีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ร่วมในแนวดิ่ง ($k_{V(eq)}$) เสมอโดยพิจารณาตามรูปที่ 9.17



รูปที่ 9.17 แสดงชั้นดินที่ใช้ในข้อที่ 9.2.6

วิธีทำ

จากสมการที่ 9.25 ; $k_{H(eq)} = \dfrac{k_1H_1 + k_2H_2}{H}$

จากสมการที่ 9.30 ; $k_{V(eq)} = \dfrac{H}{\dfrac{H_1}{k_1} + \dfrac{H_2}{k_2}}$

ดังนั้นจาก $\dfrac{k_{H(eq)}}{k_{V(eq)}} = \dfrac{(k_1H_1 + k_2H_2)/H}{H/\left(\dfrac{H_1}{k_1} + \dfrac{H_2}{k_2}\right)}$

$$= \frac{H_1^2 + H_2^2 + [(k_1^2 + k_2^2)/k_1k_2]H_1H_2}{H^2}$$

$$= \frac{H_1^2 + H_2^2 + [(k_1^2 + k^2)/k_1k_2]/H_1H_2}{H_1^2 + H_2^2 + 2H_1H_2} \quad \text{(สมการที่ 9.31)}$$

เนื่องจาก k_1 และ $k_2 > 0$ เสมอดังนั้นจะได้

$(k_1 - k_2)^2 \geq 0$

หรือ $k_1^2 + k_2^2 \geq 2k_1k_2$

$$\frac{k_1^2 + k_2^2}{k_1k_2} \geq 2$$

ในกรณีที่ $k_1 = k_2$ จะได้

$$\frac{k_1^{\,2} + k_2^{\,2}}{k_1 k_2} = 2$$

แต่ในกรณีทั่วไป $k_1 \neq k_2$ จะได้

$$\frac{k_1^{\,2} + k_2^{\,2}}{k_1 k_2} > 2$$ แทนค่าลงในสมการที่ 9.31

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{k_H}{k_v} > 1$$

$$k_H > k_V$$

9.3 โจทย์ทดสอบความสามารถในการคิดวิเคราะห์โดยประยุกต์ใช้ความรู้ เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในการทำงาน

9.3.1 มหาวิทยาลัยนเรศวรได้ว่าจ้างบริษัทของคุณเป็นผู้ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ (k) ของดินฐานเราที่จะใช้ก่อสร้างอาคารหอพักชาย โดยให้ใช้วิธีการทดลองแบบเปลี่ยนความดันน้ำ (Variable-head Test) ซึ่งเครื่องมือการทดลองมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 2000 mm^2 และพื้นที่ของหลอดแก้วเท่ากับ 200 mm^2 ก่อนที่จะใส่ดินตัวอย่างลงไป ได้ทำการปรับค่าการวัดของเครื่องมือ พบว่าเนื่องจากความต้านทานของหินพรุน (Porous stone) ระดับน้ำในหลอดแก้วใช้เวลา 5 sec. ในการลดระดับจาก 1000 mm ลงไปถึง 150 mm เมื่อใส่ดินตัวอย่างหนา 50 mm ลงไปบนหินพรุน จะต้องใช้เวลาถึง 150 sec. ในการลดระดับน้ำระหว่างช่วงดังกล่าว

ในฐานะวิศวกรของบริษัทจงคำนวณหาค่าความซึมได้ของน้ำในดินตัวอย่างนี้

วิธีทำ **กรณีแรก** : น้ำไหลผ่านหินพรุนอย่างเดียว

จากสมการที่ 9.17 จะได้

$$k_1 = 2.303\frac{aL}{At}\log\frac{h_1}{h_2}$$

ในที่นี้ $k = k$ mm/sec

$a = 200\ mm^2$

$A = 2000\ mm^2$

$L = H_1$ mm

$t = 5$ sec

$h_1 = 1000$ mm

และ $h_2 = 150$ mm

ดังนั้นจะได้

$$k_1 = 2.303\frac{(200)(L_1)}{(2000)(5)}\log\left(\frac{1000}{150}\right)$$

$$\frac{H_1}{k_1} = 26.32$$

กรณีที่สอง น้ำไหลผ่านหินพรุนและดินตัวอย่าง

จากสมการที่ 9.17 จะได้

$$k_1 = 2.303\frac{aL}{At}\log\frac{h_1}{h_2}$$

ในที่นี้ $k = k_v$ mm/sec

$a = 200\ mm^2$

$A = 2000\ mm^2$

$L = H$ mm

$t = 150$ sec

$h_1 = 1000$ mm

และ $h_2 = 150$ mm

ดังนั้นจะได้

$$k_v = 2.303 \frac{(200)(L)}{(2000)(150)} \log\left(\frac{1000}{150}\right)$$

$$\frac{H}{k_v} = 790.53$$

ดังนั้นจากสมการที่ 9.30 จะได้

$$\frac{H}{k_v} = \frac{H_1}{k_1} + \frac{H_2}{k_2}$$

โดยให้ H = ความหนาของตัวอย่างดิน = 50 mm

k_2 = ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของดินตัวอย่าง

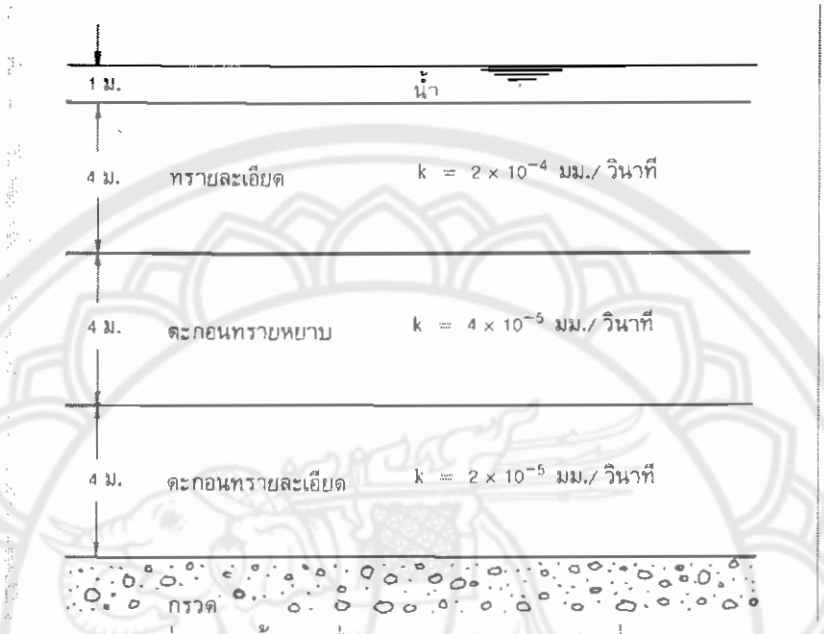
ดังนั้น $$\frac{H}{k_v} = \frac{H_1}{k_1} + \frac{H_2}{k_2}$$

$$790.653 = 26.32 + \frac{(50)}{k_2}$$

$$k_2 = 0.0654 \text{ mm/sec}$$

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของดินตัวอย่าง (k) = 0.0654 mm/sec

9.3.2 บริษัทรับเหมาก่อสร้างแห่งหนึ่ง ได้รับงานออกแบบและก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรร โดยได้สำรวจชั้นดินในบริเวณก่อสร้าง ประกอบด้วยชั้นทรายละเอียด ตะกอนทราย และตะกอนทรายละเอียด เป็นชั้นๆ ในแนวราบดังแสดงดังรูปที่ 9.18



รูปที่ 9.18 ชั้นดินที่ได้จากการสำรวจในข้อที่ 9.3.2

และใต้ชั้นตะกอนทรายละเอียด เป็นชั้นกรวดซึ่งเป็นแหล่งน้ำซึมที่มีแรงดันของน้ำ = 155 kn/m^2 และผิวบนของชั้นทรายมีน้ำท่วมอยู่ลึก 1 m โดยกำหนดหน่วยน้ำหนักของน้ำ = 10 kn/m^2 ดังนั้นจงคำนวณหาปริมาณการไหลของน้ำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เป็น mm^3/sec

<u>วิธีทำ</u> จากสมการที่ 9.30 จะได้

$$k_v = \frac{H}{\frac{H_1}{K_1}+\frac{H_2}{K_2}+\frac{H_3}{K_3}}$$

$$= \frac{12000}{\frac{4000}{2x10^{-4}}+\frac{4000}{4x10^{-5}}+\frac{4000}{2x10^{-5}}}$$

$$= \frac{12.000}{20,000,000+100,000,000+200,000,000}$$

$$= 3.75 \times 10^{-5} \text{ mm/sec}$$

พิจารณาผิวบนของชั้นกรวดเป็น Datum

∴ ความสูงของน้ำเนื่องจากอรงดันน้ำในชั้นกรวด หาได้จาก

$$\frac{\text{แรงดันของน้ำ } (k_g/m^2)}{\text{หน่วยน้ำหนักของน้ำ}(k_g/m_3)} = \frac{155}{10} = 15.5 \text{ m}$$

ความสูงของน้ำเนื่องจากน้ำใต้ดิน = 4+4+4+1 = 13 m

∴ ความสูงที่ทำให้เกิดการไหลของน้ำ = 15.5 – 13 = 2.5 m

∴ ปริมาณการไหลของน้ำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่จะได้

จากสมการที่ 9.5 และ 9.6 จะได้

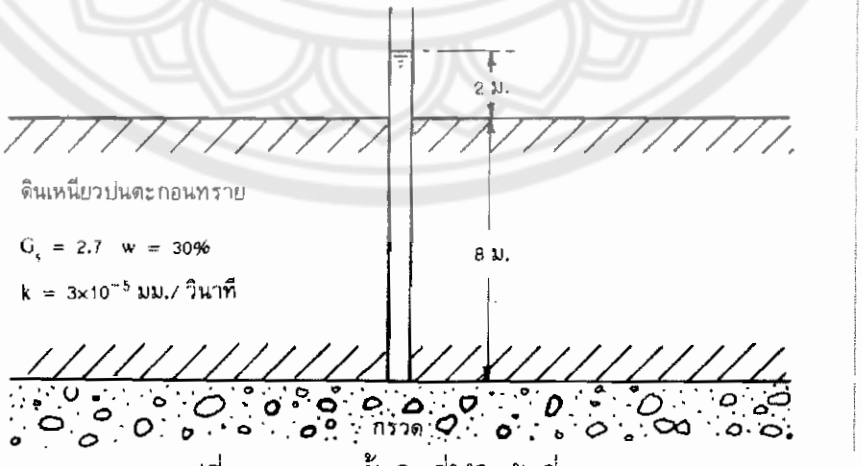
$$q = kiA$$

$$= 37.5 \times 10^{-5} \text{ mm/sec} \times \left(\frac{2.5}{12}\right) \times [1\text{mm} \times 1\text{mm}]$$

$$= 7.813 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{sec}$$

ดังนั้นปริมาณการไหลของน้ำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ = 7.813×10^{-6} mm^3/sec

9.3.3 บริษัท อัครชาติการโยธา จำกัด ได้วางแผนก่อสร้างหอพักที่สถาปนิกและเจ้าของโครงการได้ตกลงวางรูปแบบการก่อสร้างโครงการ ด้วยการใช้ฐานรากแผ่ (Spread footing) โดยการสำรวจชั้นดินประกอบไปด้วยดังนี้คือชั้นดินเป็นดินเหนียวปนตะกอนทรายหนา 8 m วางอยู่บนชั้นกรวดซึ่งเป็นแหล่งน้ำบาดาล โดยเมื่อเจาะท่อฝังลึกลงไปจนถึงชั้นกรวด น้ำในท่อจะขึ้นสูงถึงระดับ 2 m เหนือผิวของชันดินเหนียวปนตระกอนทรายดังรูปที่ 9.19



รูปที่ 9.19 แสดงชั้นดินที่ใช้ในข้อที่ 9.3.3

โดยดินเหนียวปนตะกอนทรายมีความถ่วงจำเพาะ (G_s) = 2.7 ค่าความชื้นตามธรรมชาติ (ω) = 30% สัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำ (k) เท่ากับ 3×10^{-5} mm/sec

ซึ่งจะต้องขุดดินออกลึก 2 m เพื่อก่อสร้างฐานราก ซึ่งเมื่อก่อสร้างเสร็จจะมีน้ำหนักแผ่สม่ำเสมอ 100 kn/m^2 กระทำต่อชั้นดินนี้ ดังนั้นทางบริษัทได้มอบหมายให้นายช่างสุวิทย์ คำนวณ

9.3.3.1 อัตราการไหลซึมของน้ำผ่านชั้นดินเหนียวปนตะกอนทรายก่อนงานก่อสร้างจะเริ่ม

9.3.3.2 หาอัตราส่วนความปลอดภัยของการก่อสร้างทั้งเมื่อขุดดิน และหลังจากก่อสร้างฐานรากเสร็จแล้ว (กำหนดหน่วยน้ำหนักของน้ำเท่ากับ 10 kn/m^3)

วิธีทำ

9.3.3.1 สมมติให้ว่าระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวของชั้นดิน

ดังนั้นการสูญเสียระดับ (Head Loss) ในชั้นดินเหนียวปนตะกอนทราย (Δh) = 10 – 8 = 2m

จากสมการที่ 9.5 และ 9.6 จะได้

$q = kiA$

พิจารณาพื้นที่ 1 m^2 ดังนั้น $q = \frac{3x\,10^{-5}}{1000} \times \left(\frac{2}{8}\right)$

$= 7.5 \times 10^{-9}$ m/sec

$= 0.237$ m^3/year/พื้นที่ผิว 1 m^2

9.3.3.2 <u>กรณีแรก</u> เมื่อขุดดินเสร็จ

จากกรณีดินอิ่มตัว (s = 1) ถ้า V_s =1 แล้วจะได้

$e = \omega G_s$

$= (0.30)(2.7) = 0.81$

และ $\gamma_{sat} = \frac{Gs + e}{1 + e}\gamma_w$

$= \frac{2.7 + 0.81}{1 + 0.81}(10) = 19.4$ kn/m^3

$\therefore$ ความสูงของชั้นดินที่เหลือเหนือชั้นกรวดหลังขุดดินเสร็จ = 8- 2 = 6 m.

ดังนั้น แรงดันขึ้น (Uplift Pressure)7 ของน้ำ

$= \gamma_w h = 10 \times 10 = 100$ kn/m^2

แรงกดลงของชั้นดิน $= \gamma_{sat} h = 19.4 \times 6 = 116.4$ kn/m^2

$\therefore$ อัตราส่วนความปลอดภัย $= \frac{\text{แรงกดลง}}{\text{แรงดันขึ้น}} = \frac{116.4}{100} = 1.164$

<u>กรณีที่สอง</u> หลังก่อสร้างเสร็จแล้ว

แรงดันขึ้นของน้ำ $= \gamma_w h = 10 \times 10 = 100$ kn/m^2

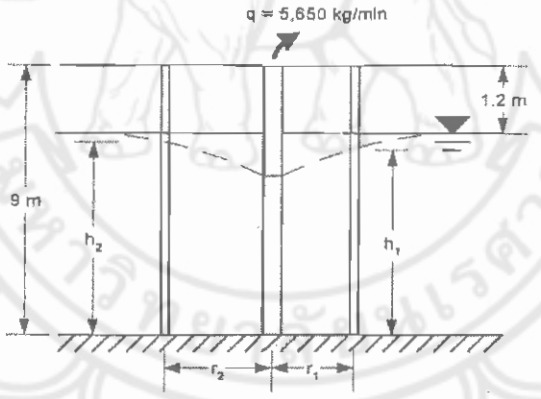
แรงกดลงของชั้นดิน $= \gamma_{sat}\, h$ + แรงกดจากฐานราก = (19.4 x 6) + 100

$= 216.4\ kn/m^2$

$$\therefore \text{อัตราส่วนความปลอดภัย} = \frac{\text{แรงกดลง}}{\text{แรงดันขึ้น}} = \frac{216.4}{100} = 2.164$$

9.3.4 ในการเจาะสำรวจดินเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำดังรูป 9.20 ได้ผลการเจาะสำรวจดังนี้ ชั้นดินทรายหนา 9 m วางอยู่บนชั้นทึบน้ำ (Impermeable layer) ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ระดับ 1.20 m ต่ำจากผิวดิน (ground surface)

การทดสอบการหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำ (k) ทำโดยการสูบน้ำออกจากบ่อทดสอบด้วยอัตรา 5,650 kg/min จากนั้นได้ขุดหลุมสังเกตซึ่งอยู่ห่างออกไป 3.05 m มีระดับน้ำในหลุมเป็น 4.57 m ต่ำจากผิวดิน ส่วนหลุมสังเกตที่อยู่ห่างออกไปอีก 1 หลุม คือ 30.5 m มีระดับน้ำในหลุมเป็น 2.13 m ต่ำจากผิวดิน ดังนั้นในฐานะคุณเป็นวิศวกรที่ปรึกษาโครงการ จงคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ของดิน



รูปที่ 9.20 ชั้นดินที่ได้จากการเจาะสำรวจดินในข้อที่ 9.3.4

<u>วิธีทำ</u> จากสมการที่ 9.20 จะได้

$$k = 2.303\left[\frac{q \log\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{\pi(h_1^{\,2} - h_2^{\,2})}\right]$$

โดยในที่นี้ $q = 5.65\ m^3/min$

$$r_2 = \frac{5650}{1000} = 30.5\ m^3/min$$

$r_1 = 3.05\ m$

$h_2 = 9 - 2.13 = 6.87$ m

$h_1 = 9 - 4.57 = 4.43$ m

แทนค่าลงในสมการข้างต้นแล้ว จะได้

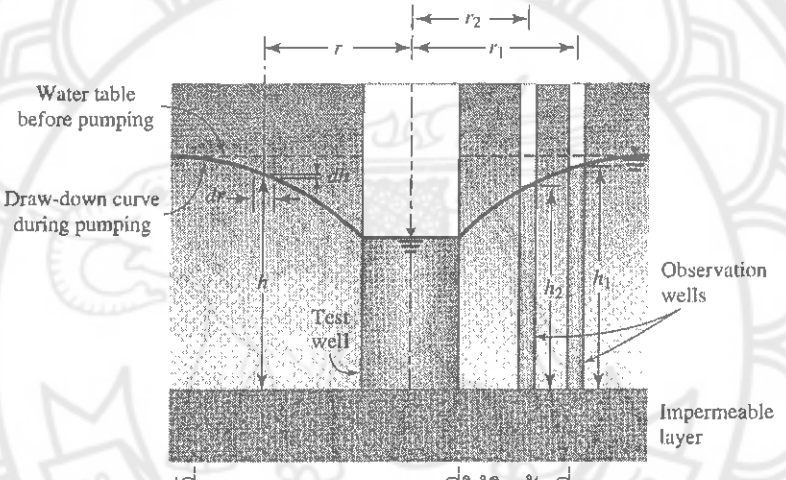
$$\therefore \quad k = 2.303\left[\frac{(5.65)\log\left(\frac{3.05}{30.5}\right)}{\pi(4.43^2 - 6.87^2)}\right]$$

$$= 2.303\left(\frac{-5.65}{-86.62}\right)$$

$$= 0.15 \text{ m/min} = 2.5036 \times 10^{-3} \text{ m/sec}$$

9.4 โจทย์ทดสอบความสามารถในการนำความรู้ไปใช้ในงานจริง

9.4.1 ทางมหาวิทยาลัยนเรศวร ได้ว่าจ้างบริษัท สมทรง การโยธา จำกัด ให้ทำการก่อสร้างลานจอดรถใต้ดิน ดังนั้นจึงให้บริษัทหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำ (k) ของชั้นทรายหนา 10 เมตร ที่วางอยู่บนชั้นหินดังแสดงดังรูปที่ 9.21 โดยการเจาะทดสอบบ่อเจาะ โดยใช้ปั๊มดูดน้ำด้วยอัตรา 180 ลิตร/นาที จนกระทั่งน้ำหยุดนิ่ง โดยบ่อสังเกตการณ์อีก 2 บ่อ อยู่ห่างจากบ่อทดสอบ 12 เมตร และ 24 เมตร ตามลำดับหลังจากนั้นได้ทำการวัดระดับน้ำเหนือระดับชั้นหิน พบว่า h_2 มีค่าเท่ากับ 4.2 และ h_1 มีค่าเท่ากับ 6.3 เมตร



รูปที่ 9.21 แสดงหลุมเจาะที่ใช้ในข้อที่ 9.4.1

ในฐานะที่คุณเป็นวิศวกรที่ปรึกษาของบริษัท จงทำตามที่มหาวิทยาลัยต้องการ