

Chapter 6

• Flow Through Porous Media

บรรยายโดย : อ.พลช ตั้งฐานทรัพย์

Flow Through Porous Media

ระดับน้ำใต้ดิน และแรงดันน้ำในดิน

ระดับน้ำใต้ดินและแรงดันน้ำในดิน (Pore water pressure)

$$U = g_w \cdot h$$

ระดับผิวน้ำ

- ระดับน้ำใต้ดิน (Water table)
- ที่ระดับใดๆ ก็ตาม ความดันน้ำในดิน = ความดันบรรยากาศ

กรณีระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าผิวดิน

- Capillary Attraction และ Surface tension ระหว่างโมเลกุลน้ำกับช่องว่างในดิน
 - Capillary saturation (น้ำ)
 - Partial saturation (น้ำ+อากาศ)
 - Contact moisture

Flow Through Porous Media

หน่วยแรงประสิทธิผล

หน่วยแรงรวม (Total Stress) กรณีไม่มีสิ่งก่อสร้างบนผิวดินนั้น

$$P_0 = s_v = g_t \cdot z$$

หน่วยแรงรวม = ความดันจากน้ำหนักดิน (Overburden Pressure)

$$s_v = s'_v + U$$

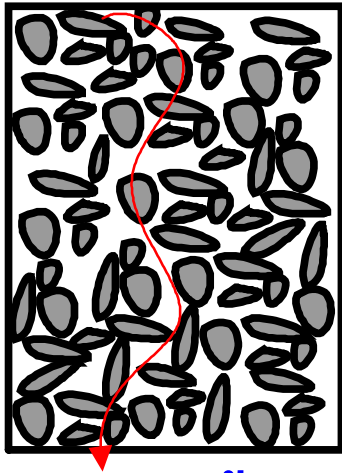
หน่วยแรงประสิทธิผล

$$s'_v = s_v - U$$

Flow Through Porous Media

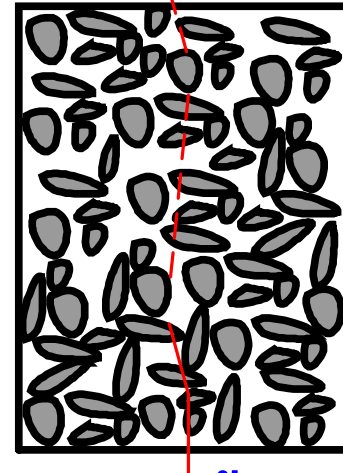
ความสามารถในการไหลซึมผ่านของดิน

Flow



- การไหลของน้ำธรรมชาติ
 - คดเคี้ยวตามช่องว่างในดิน
 - ความเร็วเปลี่ยนแปลงตามขนาดช่องว่าง

Flow



- การไหลของน้ำทางทฤษฎี
 - ผ่านมวลดินเป็นเส้นตรง
 - ความเร็วคงที่
 - ดินเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous)

การไหลซึมของน้ำผ่านดิน

ลักษณะการไหลที่เกี่ยวข้องกับปัญหาทางด้านวิศวกรรมปฐพี

- การไหลแบบคงตัว (Steady State)

ความเร็วของการไหลที่จุดจุดหนึ่งในมวลดินจะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเวลา

- การไหลแบบแลมมินาร์ (Laminar)

น้ำไหลผ่านดินด้วยความเร็วที่ช้ามาก



เกิดจากการเสียดทาน
ระหว่างน้ำที่ไหลกับเม็ดดิน

น้ำไหลซึมผ่านดิน

เกิดแรงซึมผ่าน (Seepage Force) ในมวลดิน

กลายเป็นแรงจากน้ำที่เกิดขึ้นภายในมวลดิน

เกิดการเปลี่ยนแปลงในหน่วยแรง
ประสิทธิผล

ความดันน้ำในมวลดิน

มีปัญหาต่อเสถียรภาพของมวลดิน!!

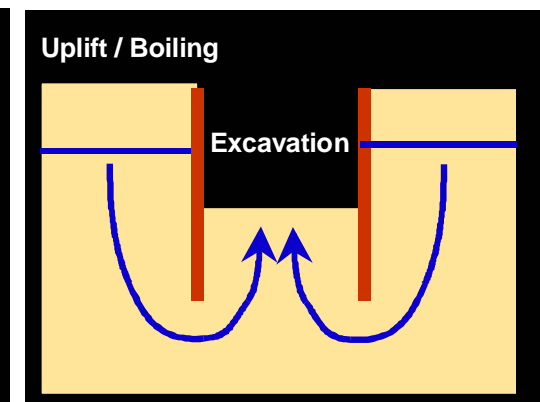
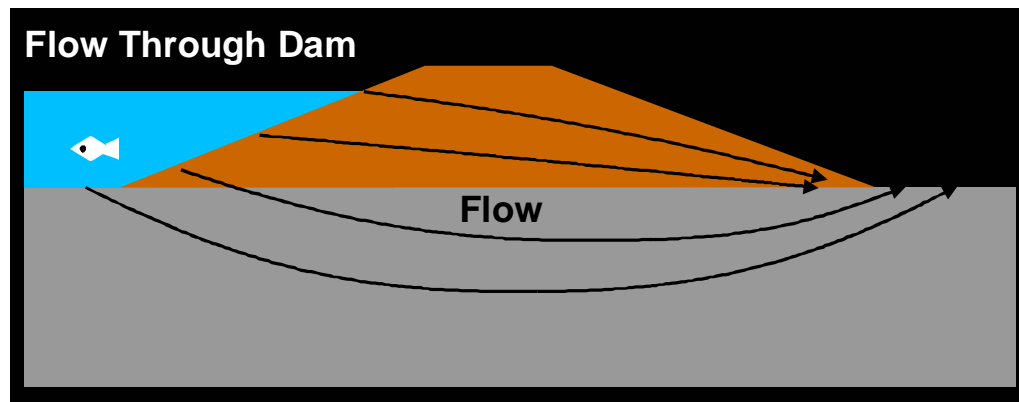
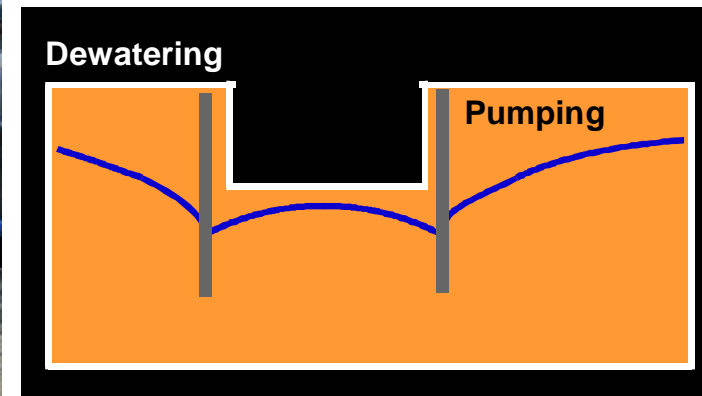
ทฤษฎีการไหลซึมของน้ำผ่านดิน

มีความสำคัญต่องานด้านวิศวกรรมปฐพี ดังนี้

- หาปริมาณน้ำที่ไหลผ่านโครงสร้างดิน
- การหาความดันน้ำในดินเพื่อตรวจสอบเสถียรภาพของมวลดิน
- การป้องกันมิให้น้ำไหลด้วยความเร็วที่สูงเกินไป และนำดินเม็ดละเอียดไปด้วย (Piping)
- การป้องกันมิให้ดินเกิดสภาพไร้แรงเฉือน หรือสภาพเดือด (Boiling Condition)

ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการไหลซึมของน้ำผ่านมวลดิน

- Flow through Soil
 - Dams
 - Dewatering
 - Uplift / Boiling
- Need k value

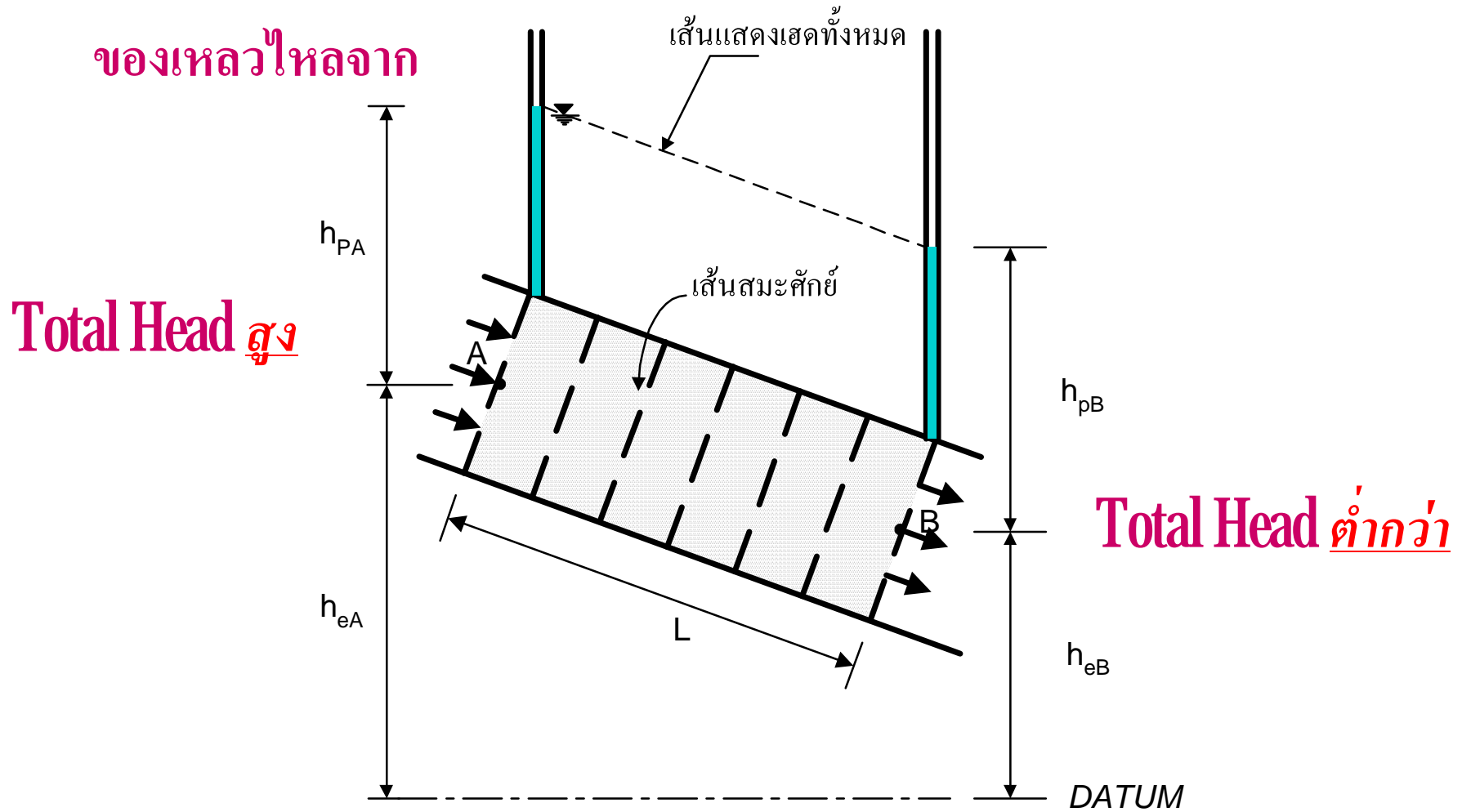


กฎการไหลซึมของน้ำผ่านดิน

- กฎพลังงานของการไหล
- กฎของดาร์ซี (Darcy's Law) ซึ่งมีพื้นฐานมาจากการทดลอง
- กฎการต่อเนื่องของการไหล หรือสมการของลาปลาซ

กฎการไหลซึมของน้ำผ่านดิน

กฎพลังงานของการไหล



กฎการไหลซึมของน้ำผ่านดิน

กฎพลังงานของการไหล (ต่อ)

ทั่วไป พลังงานที่ควบคุมการไหลของน้ำในดินที่จุดจุดหนึ่ง

- พลังงานศักย์
- พลังงานความดัน
- พลังงานจลน์

เฮดทั้งหมด = เฮดเนื่องจากระดับสูงต่ำ + เฮดเนื่องจากความดันน้ำ + เฮดจากความเร็ว
(พลังงานทั้งหมด) (พลังงานศักย์) (พลังงานความดันน้ำ) (พลังงานจลน์)

$$H = h_e + \frac{u}{g_w} + \frac{v^2}{2g}$$

กฎการไหลซึมของน้ำผ่านดิน กฎพลังงานของการไหล (ต่อ)

ในดิน การไหลของน้ำในมวลดิน **ช้ามาก!!**

เฮดทั้งหมด = เฮดเนื่องจากระดับสูงต่ำ + เฮดเนื่องจากความดันน้ำ + เฮดจากความเร็ว

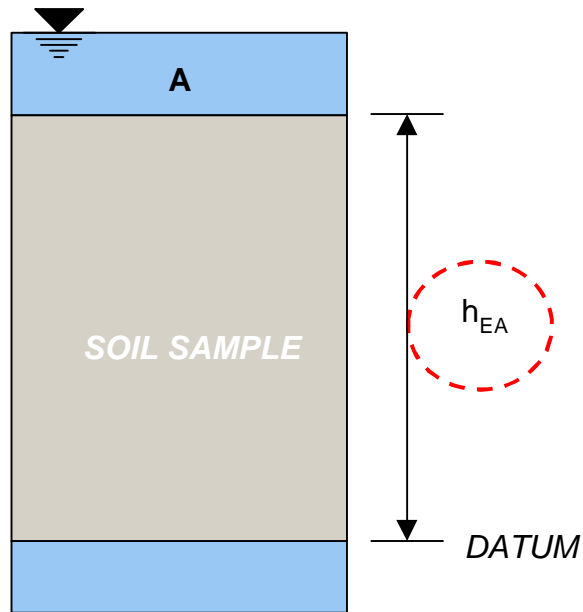
$$H = h_e + \frac{U}{\gamma_w} + \cancel{\frac{V^2}{2g}} \quad 0$$

จะได้

$$H = h_e + \frac{U}{\gamma_w}$$

กฎพลังงานของการไหล (ต่อ)
นิยามของ *ELEVATION HEAD, (h_E)*

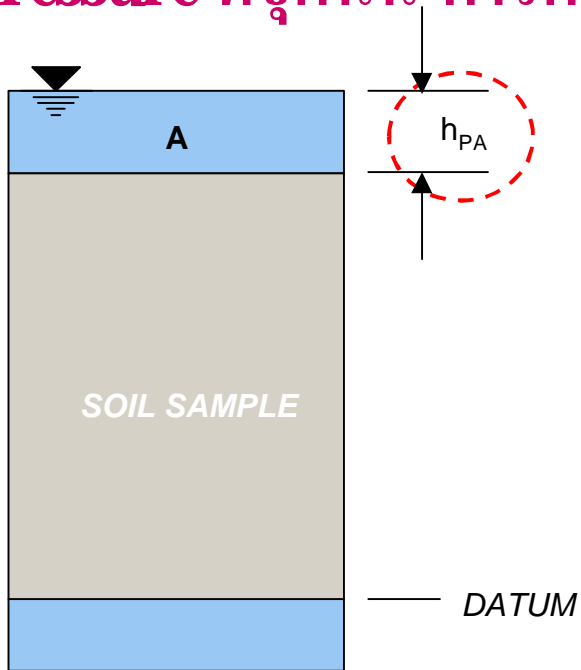
ความสูงวัดจากเส้น DATUM ถึงจุดที่ต้องการหา Energy



$$H = h_{eA} + \frac{U}{\gamma_w}$$

กฎพลังงานของการไหล (ต่อ)
นิยามของ *PRESSURE HEAD*, (h_p)

ความสูงของน้ำที่จุดที่ต้องการหา Energy หรือ เท่ากับ Water Pressure ที่จุดนั้นหารด้วย γ_w

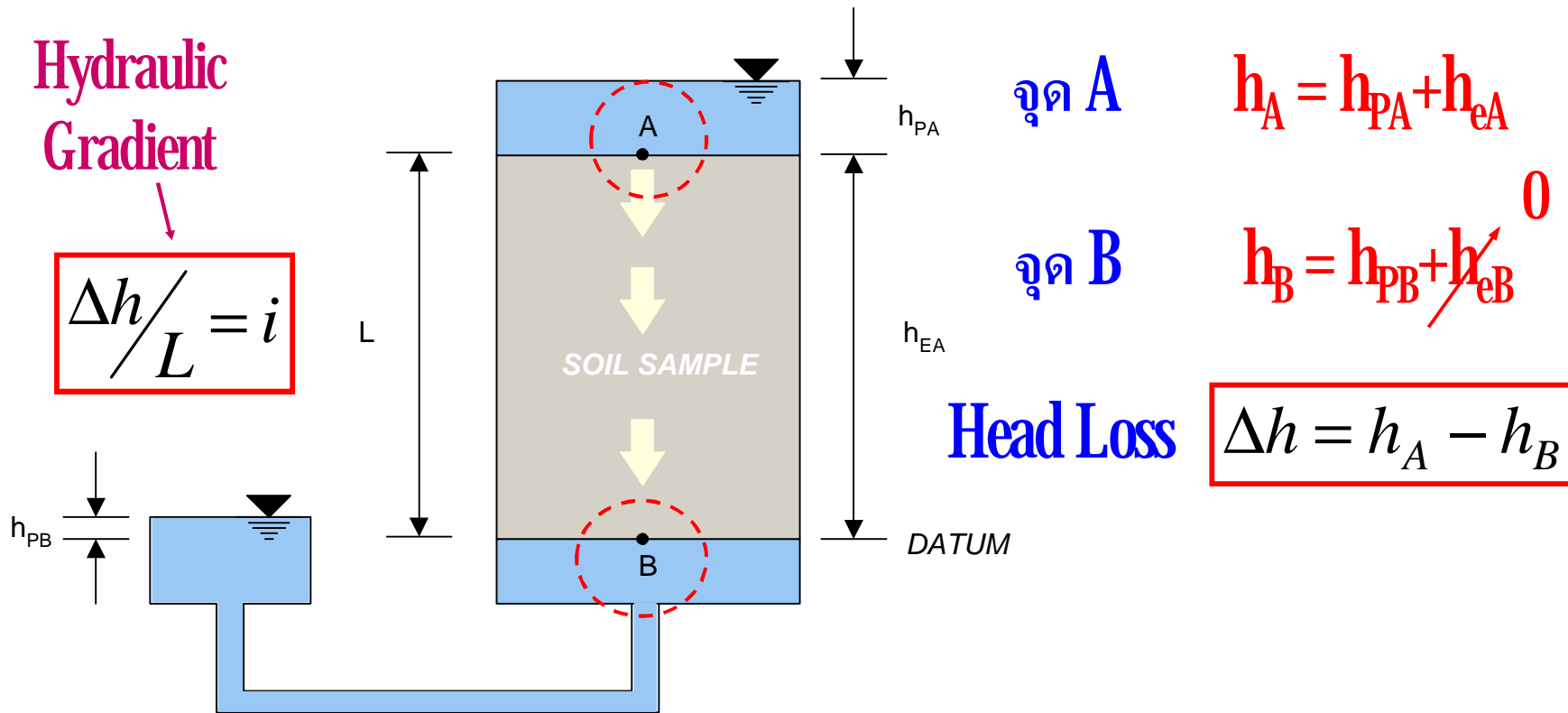


$$H = h_{eA} + \frac{U}{\gamma_w}$$

h_{PA}

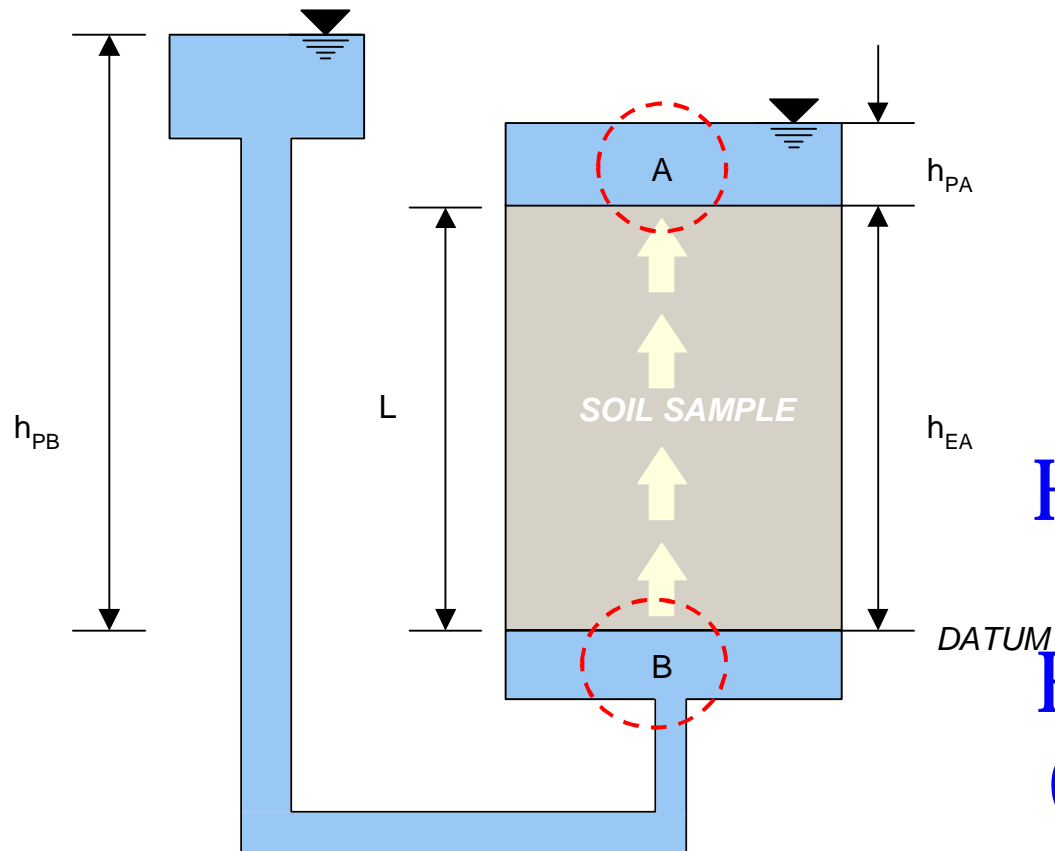
กฎพลังงานของการไหล (ต่อ)
ทิศทางการไหลลงจากจุด A ไปจุด B

Total Head ที่จุด A > Total Head ที่จุด B



กฎพลังงานของการไหล (ต่อ)
ทิศทางการไหลขึ้นจากจุด B ไปจุด A

Total Head ที่จุด B > Total Head ที่จุด A



จุด A $h_A = h_{PA} + h_{eA}$

จุด B $h_B = h_{PB} + h_{eB}$

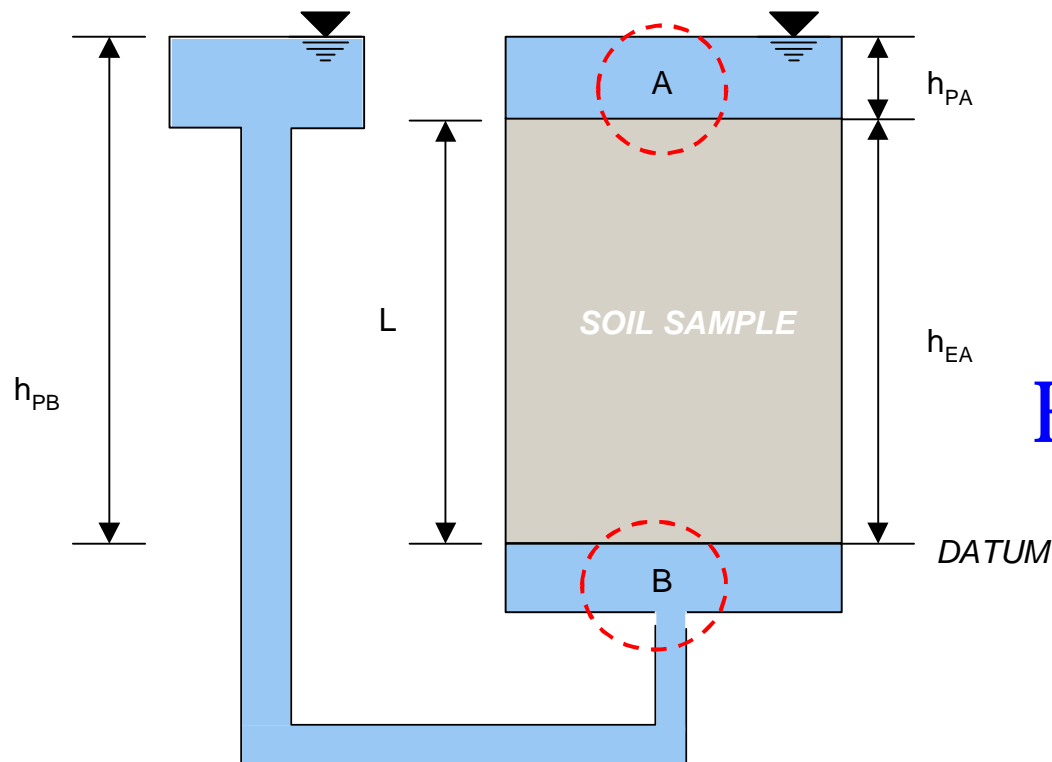
Head Loss $\Delta h = h_B - h_A$

Hydraulic Gradient $i = (h_B - h_A) / L$

กฎพลังงานของการไหล (ต่อ)

Hydrostatic Case (No Flow)

Total Head ที่จุด B = Total Head ที่จุด A



จุด A $h_A = h_{pA} + h_{eA}$

จุด B $h_B = h_{pB} + h_{eB}$

Head Loss $\Delta h = h_B - h_A = 0$

Hydraulic Gradient $i = \Delta h / L = 0$

กฎการไหลซึมของน้ำผ่านดิน

กฎของดาร์ซี

Darcy (1856) ทำการทดลองในทราย โดยให้น้ำไหลผ่านทรายที่อิ่มตัวด้วยน้ำ และพบว่า

สัมประสิทธิ์ของการซึม

ความเร็วของการไหล

$$v = ki$$

ความชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic Gradient)

ปริมาณอัตราการไหล (q)

พื้นที่หน้าตัดของดินที่น้ำไหลผ่านในทิศตั้งฉากกับทิศการไหลของน้ำ

$$q = vA = kiA$$

*** กฎดาร์ซีใช้ได้ดีในดินเม็ดหยาบ ***

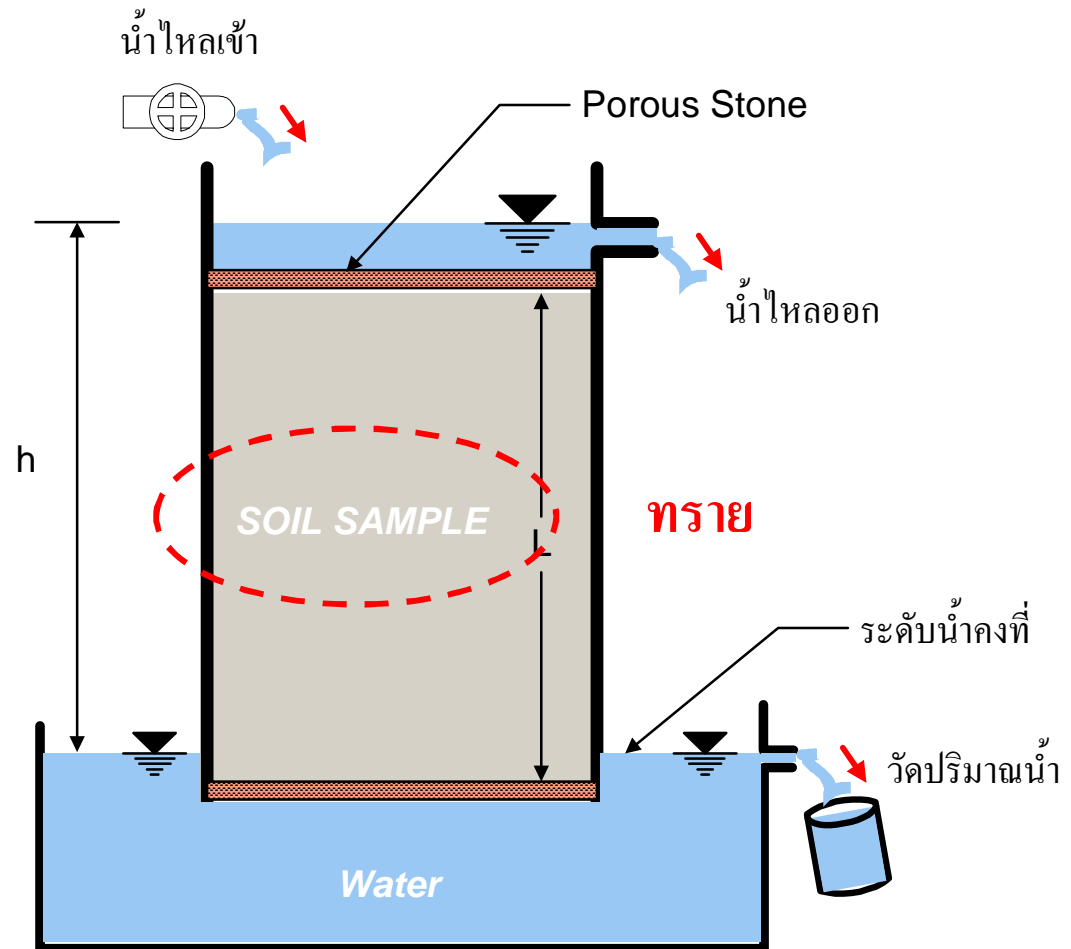
กฎการไหลซึมของน้ำผ่านดิน

กฎของดาร์ซี (ต่อ)

สัมประสิทธิ์ของการซึมผ่าน

$$q = kiA = kA \Delta h / L$$

อัตราการไหล (l^3/t)



กฎการไหลซึมของน้ำผ่านดิน

กฎของดาร์ซี (ต่อ)

ความเร็วของน้ำที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน
พื้นที่หน้าตัดจริง (A_v) น้อยกว่าพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด (A)

ความเร็วของการไหล

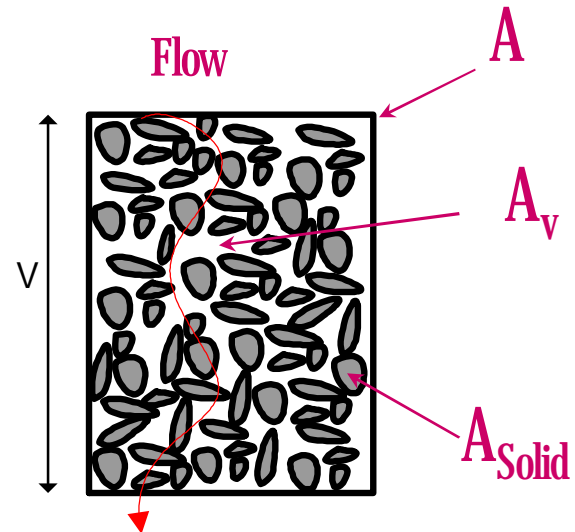
$$q = vA = v_s A_v$$

เมื่อ

Seepage
Velocity

ความพรุน

$$v_s = v/n = ki/n$$



กฎของดาร์ซี (ต่อ)

ข้อจำกัดการใช้กฎของดาร์ซี

ใช้ได้

- การไหลแบบคงตัว (Steady State) Laminar Flow
- การไหลแบบลามินาร์ (Laminar Flow)

ใช้ไม่ได้

- กรณีเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) เช่นการไหลผ่าน
กรวด หรือทรายหยาบ
- Gas Flow ที่ความเร็วสูงมาก หรือ ต่ำมาก



กฎการไหลซึมของน้ำผ่านดิน

กฎการต่อเนื่องของการไหล

พิจารณาถึงการไม่สูญหายของน้ำในมวลดิน จึงทำให้เกิดสมการที่ครอบคลุมการไหลซึมผ่านมวลดิน อยู่ในรูปสมการของลาปลาซ

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad \text{กรณี 2 มิติ}$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0 \quad \text{หรือ} \quad \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad \text{กรณี 1 มิติ}$$

ใช้สมการในการหาค่าเฮด (h) \rightarrow หาคความดันน้ำ \rightarrow ความชันทางชลศาสตร์

กฎการต่อเนื่องของการไหล (ต่อ) วิธีการหาค่าเสด (h)

การหาค่าเสดโดยการแก้สมการทำได้ลำบาก เนื่องจากขอบนอกมวลดินมีรูปร่างที่ไม่สามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ จึงมักทำโดยวิธีอื่น โดยพฤติกรรมการไหลยึดตามสมการของลาปลาซ วิธีการต่างๆ มีดังนี้

- การใช้ตาข่ายการไหล (Flow Net)
- การใช้ Numerical Analysis เช่น วิธี Finite Element และ Finite Different
- การทำแบบจำลองชลศาสตร์ (Hydraulic Model)
- การใช้ Electric Analogy Model ควบคู่กับเขียนตาข่ายการไหล

ค่าทั่วไปของสัมประสิทธิ์การซึม, k

ชนิดของดิน	k (cm/s)	การซึมผ่าน
กรวด	$1 - 10^2$	ดีมาก
กรวดเม็ดละเอียด ทรายหยาบ	$1 - 10^3$	ดีปานกลาง
ทรายละเอียดและซิลต์ที่ไม่อัดแน่น	$10^3 - 10^5$	ค่อนข้างต่ำ
ซิลต์อัดแน่นและซิลต์ปนดินเหนียว	$10^5 - 10^6$	ต่ำมาก
ดินเหนียวปนซิลต์และดินเหนียว	$10^6 - 10^9$	ที่บ่น้ำ

ตัวประกอบที่มีผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์การซึม

ค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมขึ้นกับตัวประกอบหลายอย่าง ดังนี้

- ความหนืด (Viscosity) และความหนาแน่นของของเหลวที่ไหล
- คุณสมบัติของเม็ดดิน
 - ขนาดและรูปร่างของเม็ดดิน
 - โครงสร้างการเรียงตัวของเม็ดดิน
 - อัตราส่วนช่องว่างและความหนาแน่นของดิน
- การอิมตัวด้วยน้ำ
- ส่วนประกอบของชนิดของดิน
- การต่อเนื่องและการเป็นเนื้อเดียวกันของชนิดของดินในธรรมชาติ

การวัดสัมประสิทธิ์ของการซึม

ทำได้ 2 วิธี คือ

- การวัดสัมประสิทธิ์ของการซึมในห้องทดลอง
- การวัดสัมประสิทธิ์ของการซึมในสนาม

การวัดสัมประสิทธิ์ของการซึม

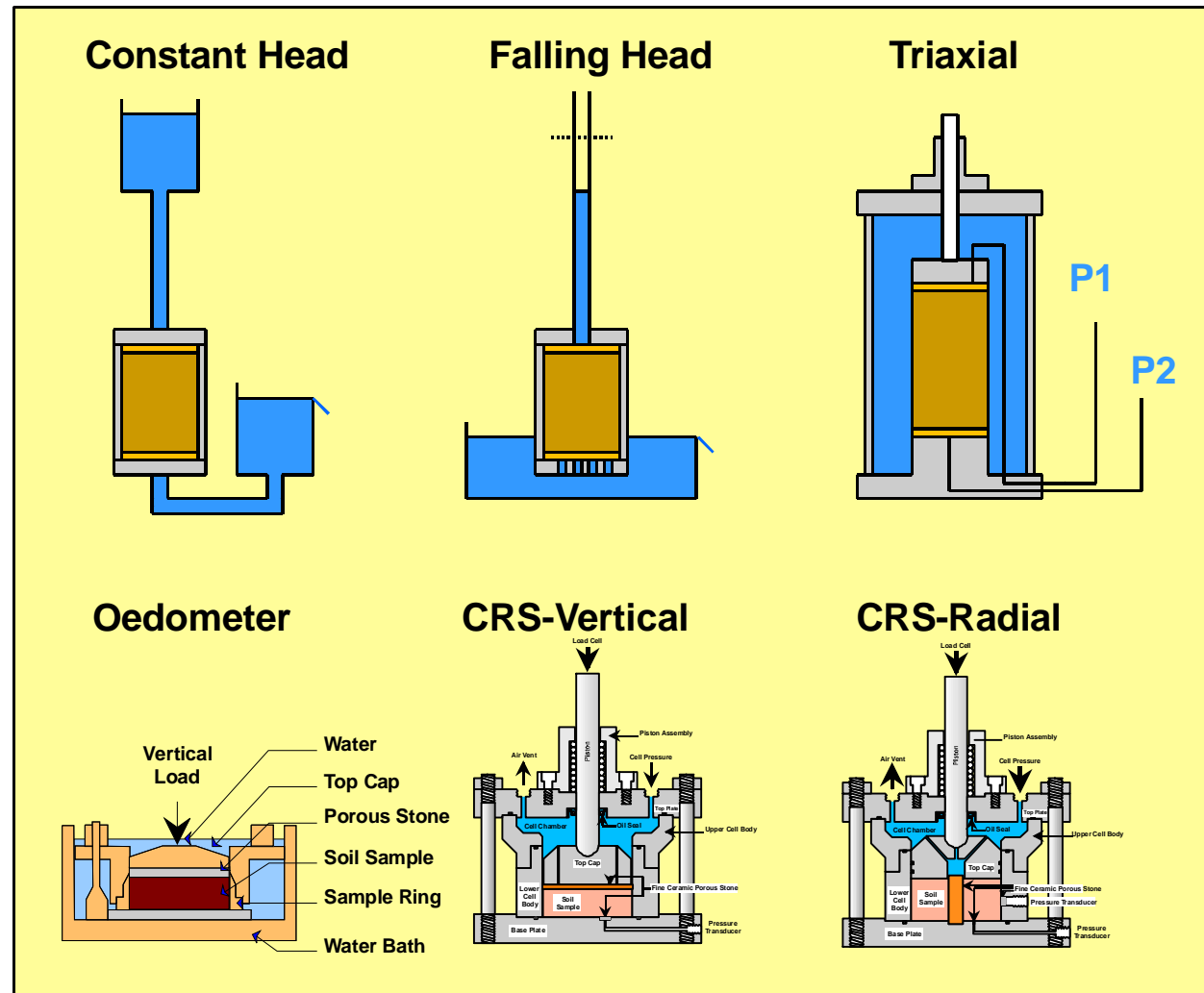
การวัดสัมประสิทธิ์ของการซึมในห้องทดลอง

ทำได้ 6 วิธี คือ


- การทดสอบแบบเฮดคงที่ (Constant Head)
- การทดสอบแบบเฮดเปลี่ยนแปลง (Falling Head)
- การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) ทางอ้อม
- การทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) ทางอ้อม
- Constant Rate of Strain Consolidation - Vertical ทางอ้อม
- Constant Rate of Strain Consolidation - Radial ทางอ้อม

Types of Laboratory Tests

- n Constant Head
- n Falling Head
- n Consolidation
 - n Oedometer
 - n CRS
- n Triaxial



Selection of Laboratory Tests



Type	Soil	Sample Type	Price (Baht)
Constant Head	Sandy Soils	Compacted, Reconstituted	1,000-3,000
Falling Head	Sandy (Clayey) Soils	Compacted, Reconstituted	1,000-2,000
Consolidation	Cohesive Soils	Undisturbed, Compacted	1,500-2,500
Triaxial Tests	Cohesive and Sandy Soils	Undisturbed, Compacted	3,000-8,000

การวัดสัมประสิทธิ์ของการซึมในห้องทดลอง (ต่อ)

การทดสอบแบบเฮดคงที่

ประกอบด้วย

- เครื่องมือที่ทำให้เฮดที่แตกต่างกันระหว่างจุดที่น้ำเข้าและออกเท่ากัน
- การไหลอยู่ในสภาพคงตัวตลอด
- ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated Soil)
- ทดสอบกับดินที่มีค่า k สูง

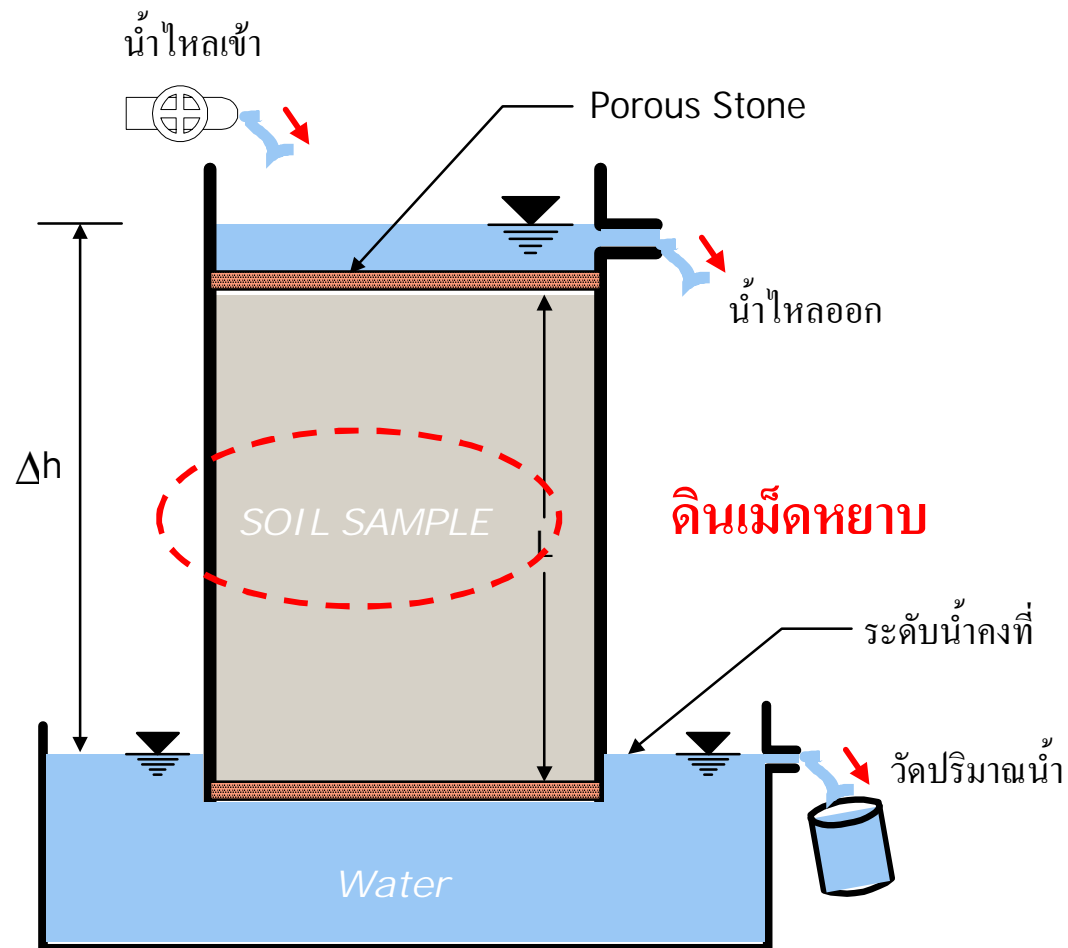
การวัดสัมประสิทธิ์ของการซึมในห้องทดลอง (ต่อ)

การทดสอบแบบเฮดคงที่

$$k = \frac{QL}{\Delta htA}$$

ปริมาณน้ำ

เวลา



การวัดสัมประสิทธิ์ของการซึมในห้องทดลอง (ต่อ)

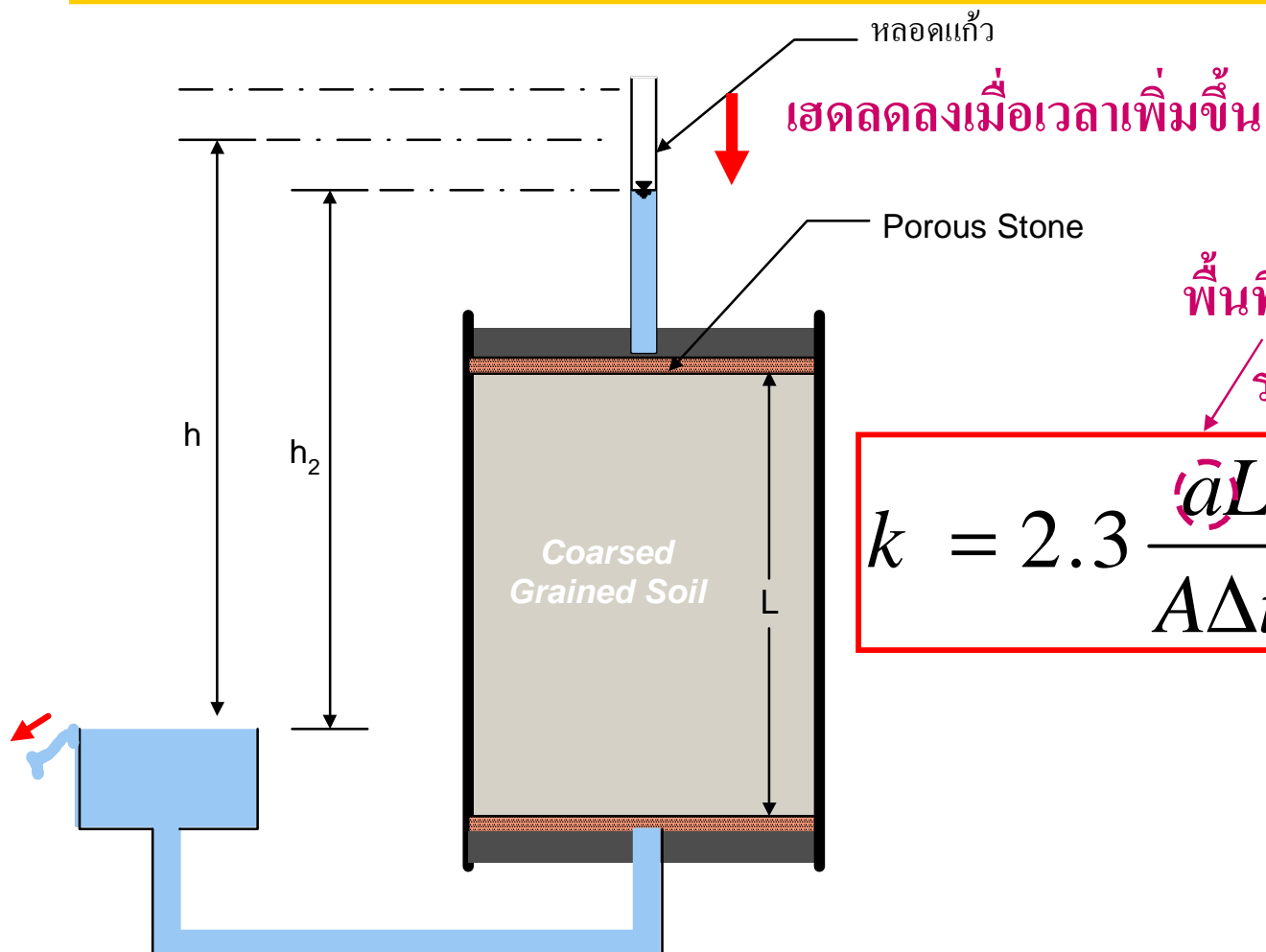
การทดสอบแบบเสดเปลี่ยนแปลง

ประกอบด้วย

- การไหลของน้ำในหลอดแก้วจะต้องเป็นการไหลแบบคงตัว
- แม้ว่าเสดระหว่างจุดที่น้ำเข้าและน้ำออกจะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ดินที่ทดสอบยังคงต้องอิ่มตัวด้วยน้ำ
- ทดสอบกับดินที่มีค่า k ต่ำ

การวัดสัมประสิทธิ์ของการซึมในห้องทดลอง (ต่อ)

การทดสอบแบบเฮดเปลี่ยนแปลง



พื้นที่ของหลอดแก้วที่
ระดับน้ำลดลง

$$k = 2.3 \frac{aL}{A\Delta t} \log(h_1 / h_2)$$

การวัดสัมประสิทธิ์ของการซึมในห้องทดลอง (ต่อ)

การทดสอบการอัดตัวคายนํ้า

- ผลทดสอบการอัดตัวคายนํ้า ให้ค่า C_v สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายนํ้า (Coefficients of Consolidation)

- ค่า C_v นำมาใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ โดยใช้ทฤษฎีของเทอร์ซากิ

- ค่า k จะขึ้นอยู่กับหน่วยแรงประสิทธิผลที่กระทำ

Time Factor ที่การทรุดตัว
เกิดขึ้น 50% เท่ากับ 0.198

เวลาที่ใช้ในการทรุดตัว
ที่ 50%

$$k = \frac{T_{v50} g_w \Delta e H_d^2}{t_{50} \Delta \bar{S} (1 + e_0)}$$

การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน
ของช่องว่างระหว่างเม็ดดิน

อัตราส่วนช่องว่างของดินใน
ธรรมชาติ

การวัดสัมประสิทธิ์ของการซึม

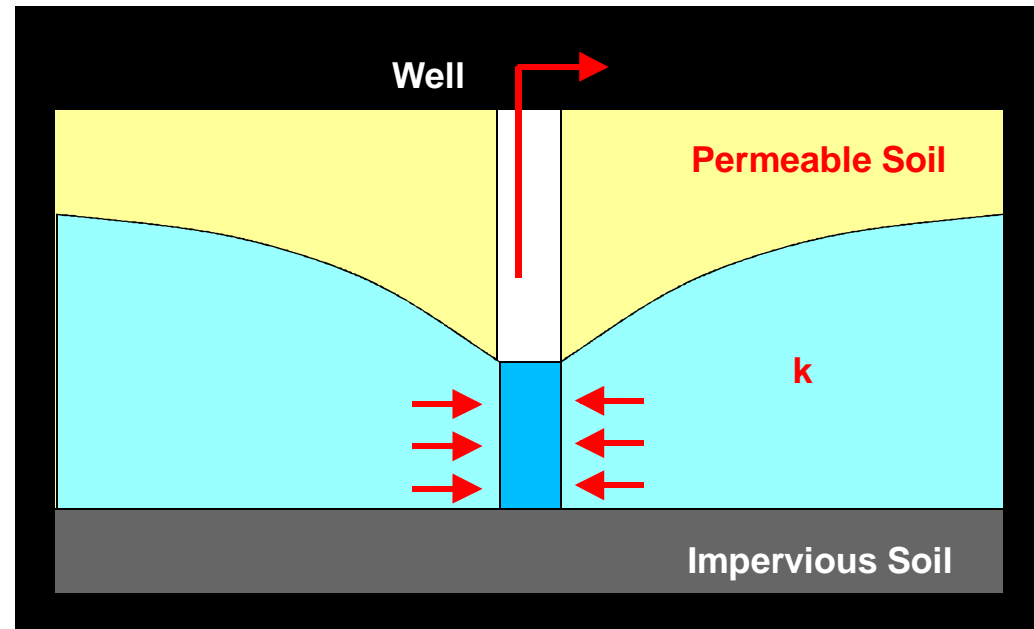
การวัดสัมประสิทธิ์ของการซึมในสนาม

ทำได้ 5 วิธี คือ

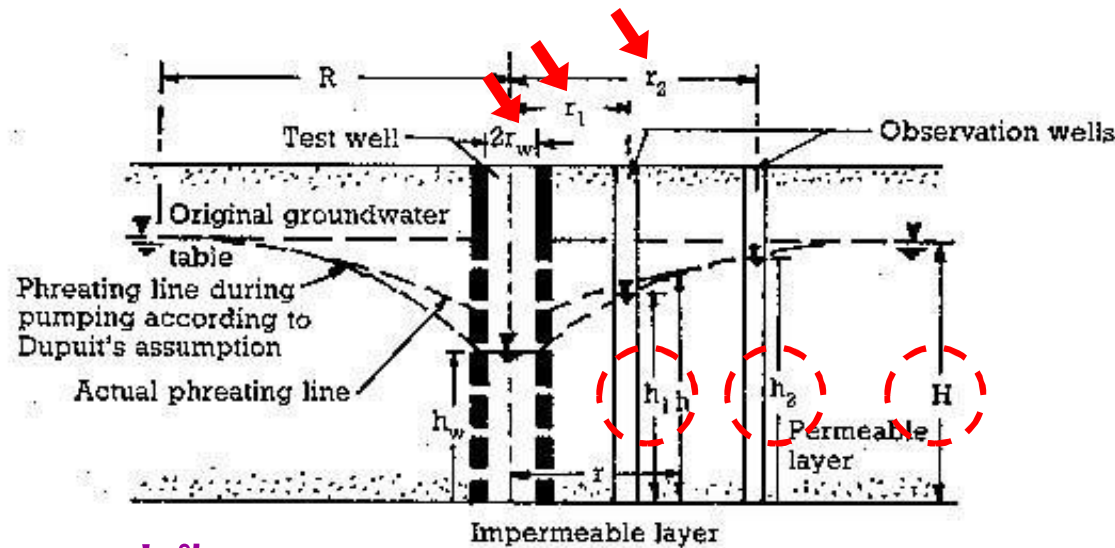
- การทดสอบโดยการสูบน้ำออกจากดินในสนาม
- การทดสอบในหลุมเจาะที่ป้องกันดินถล่มด้วยปลอกเหล็ก ด้วย
เสดคองที่
- การทดสอบในหลุมที่ป้องกันดินถล่ม ในลักษณะเสดเปลี่ยนแปลง
- การทดสอบโดยใช้ Piezometer หรือ Observation Well ของ
Hvorslev
- การทดสอบโดยใช้ Packer กัน

In-Situ Permeability Tests

- **Falling Head**
- **Constant Head**
- **Pumping Tests**
 - Stratified Soils
 - See Handout
- **Need for:**
 - Excavation
 - Shallow Foundation
 - Underground Structures

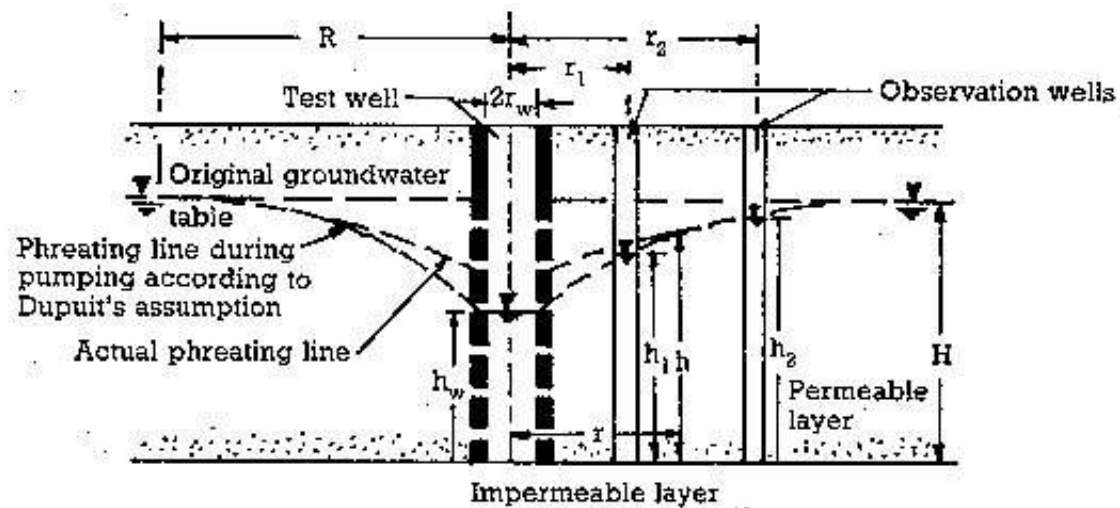


การทดสอบโดยการสูบน้ำออกจากดินในสนาม
เมื่อบ่อที่ทำการทดสอบเจาะทะลุชั้นดินที่ไหลซึมได้ง่าย



- สูบน้ำในดินที่น้ำไหลซึมได้สะดวกสามารถหาค่า k' ได้
- การไหลอยู่ในสภาพคงตัว (Steady State)
- วัดระยะทาง r_w , r_1 , r_2 และ h_1 , h_2 จาก Observation Well และ H ที่ระยะทาง R

การทดสอบโดยการสูบน้ำออกจากดินในสนาม (ต่อ)
 เมื่อบ่อที่ทำการทดสอบเจาะทะลุชั้นดินที่ไหลซึมได้ง่าย (ต่อ)



อัตราการไหล (ก) เมื่อบ่อที่ทำการทดสอบเจาะทะลุชั้นดินที่ไหลซึมได้ง่าย

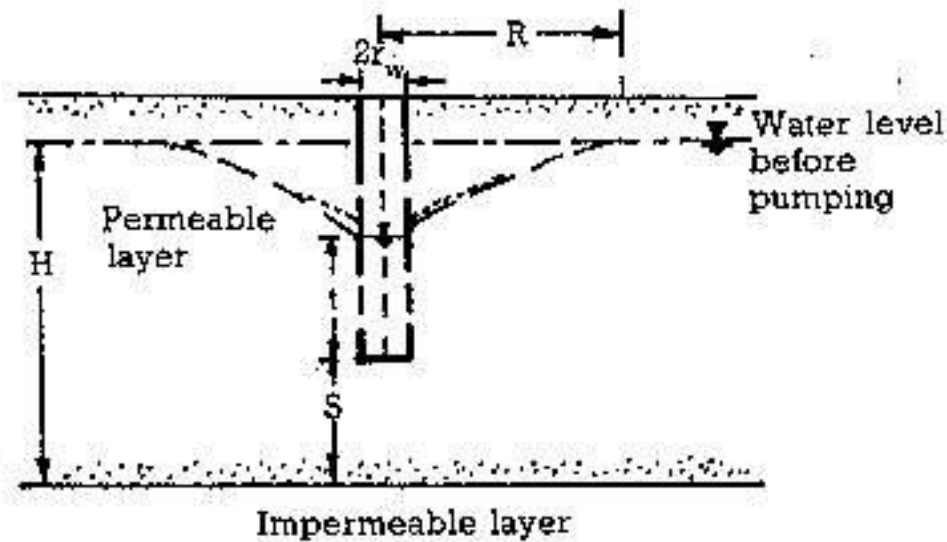
$$k = \frac{2.303q \log(r_2/r_1)}{\pi(h_2^2 - h_1^2)}$$
 โดยที่

$$R = \sqrt{\frac{12t}{n} \sqrt{qk/\pi}}$$
 ,

$$k = \frac{2.303q \log(R/r_w)}{\pi(H^2 - h_w^2)}$$

อัตราการไหล

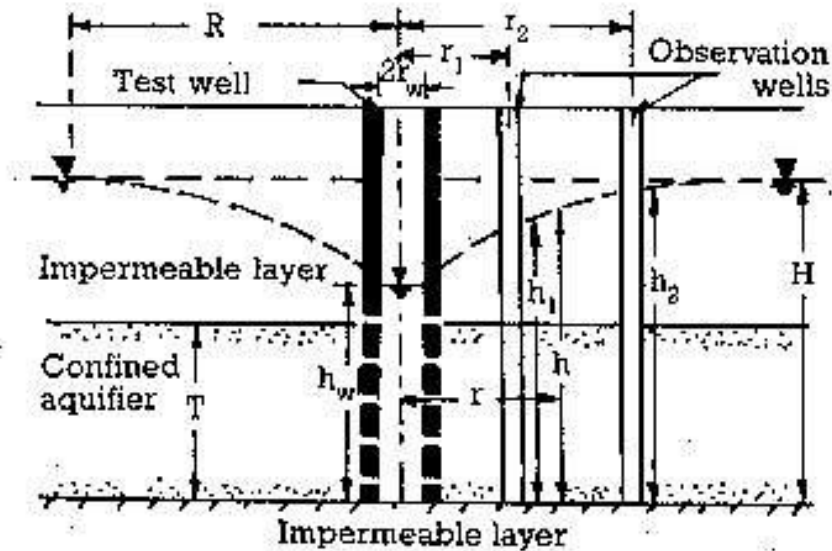
การทดสอบโดยการสูบน้ำออกจากดินในสนาม (ต่อ)
เมื่อบ่อที่ทำการทดสอบเจาะไม่ทะลุชั้นดินที่ทำการทดสอบ



Mansur และ Kaufman (1962) พบว่า

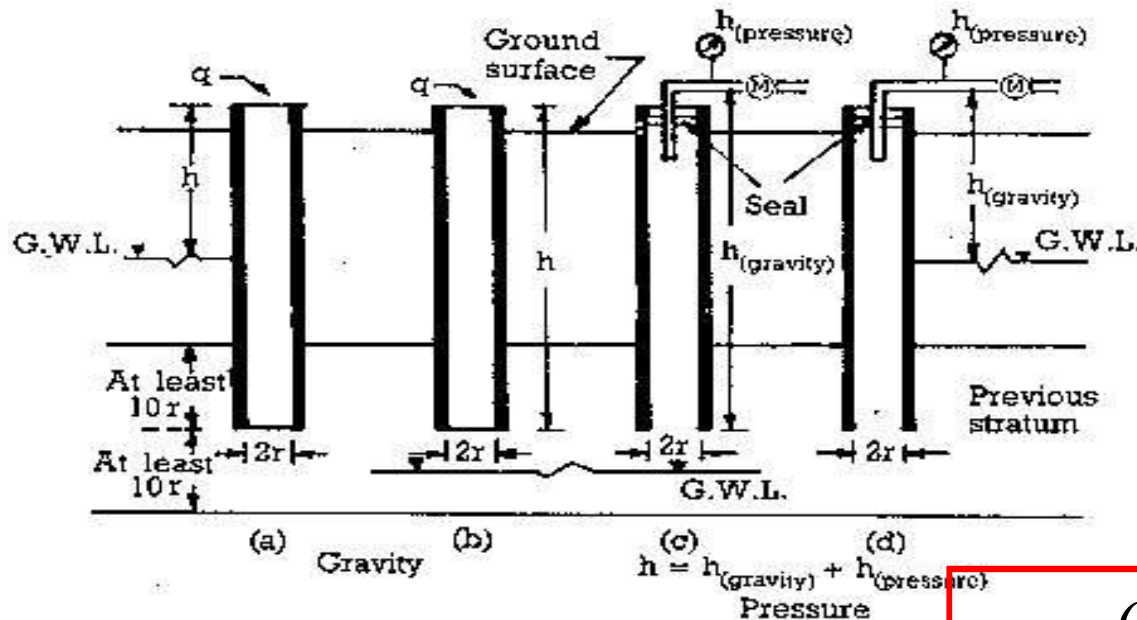
$$q = \frac{pk[(H - S)^2 - t^2]}{2.303 \log(R / r_w)} \left[1 + \left(0.3 + \frac{10r_w}{H} \right) \sin \frac{1.8S}{H} \right]$$

การทดสอบโดยการสูบน้ำออกจากดินในสนาม (ต่อ)
 เมื่อบ่อประกอบด้วยดินสองชั้นและดินชั้นบนไหลซึมได้น้อย



$$k = \frac{q \log(R / r_w)}{2.727T(H - h_w)}$$

การทดสอบในหลุมเจาะที่ป้องกันดินถล่มด้วยปลอกเหล็ก
โดยวิธีใช้เสดคกที่



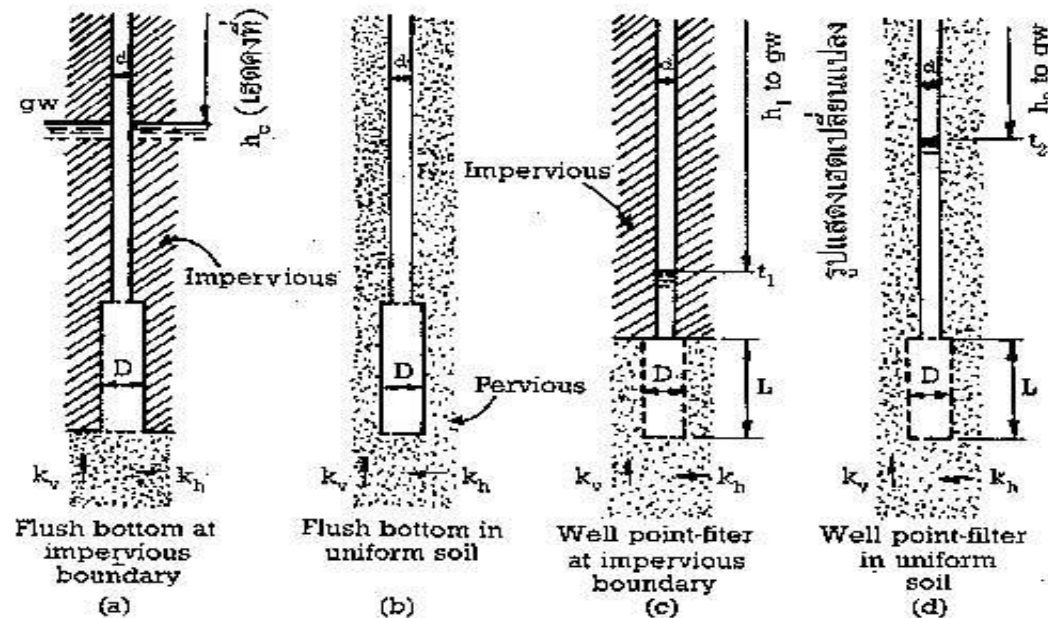
เสนอโดย U.S. Bureau of Reclamation ในปี 1961

$$k = \frac{q \log(R / r_w)}{2.727T(H - h_w)}$$

Cedergren (1968) ทดลองโดยใช้แบบจำลองด้วยหลักไฟฟ้า

$$k = \frac{q}{5.5rh}$$

การทดสอบโดยใช้ Piezometer หรือ Observation Wells ของ Hvorslev



- ปล่อยให้ น้ำไหลจากดินเข้ามาในหรือออกจากหลอด Piezometer
- อ่านค่า h_1 , h_2 และเวลา t_1 , t_2 ที่น้ำไหลเข้ามาทำให้เกิดสภาพสมดุลย์
- ทำให้สามารถหาค่า k ในลักษณะการทดสอบแบบเฮดเปลี่ยนแปลงได้

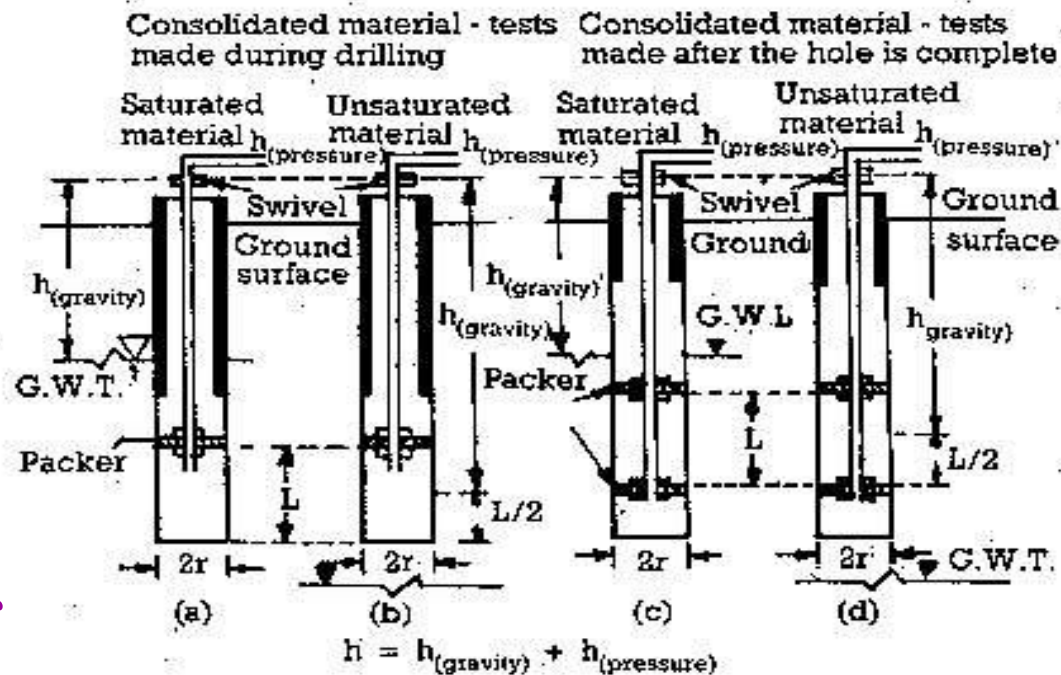
การทดสอบโดยใช้ Packer กัน

$$k = \frac{q}{2pLh} \log(L/r)$$

สำหรับ $L \geq 10r$

$$k = \frac{q}{2pLh} \sin^{-1}(L/2r)$$

สำหรับ $10r > L \geq r$



รูปที่ 5.9 การทดสอบใช้ packer

- เหมาะกับดินหรือหินที่สามารถเจาะหลุมได้ โดยไม่ต้องใช้ปลอกเหล็ก

ความเหมาะสมของการทดสอบสัมประสิทธิ์การซึม

วิธีการที่หาค่าสัมประสิทธิ์การซึมที่ดีที่สุด คือการทดสอบในสนาม

ในชั้นดินกรุงเทพฯ การทดสอบที่เหมาะสมในการหาค่า k ได้แก่

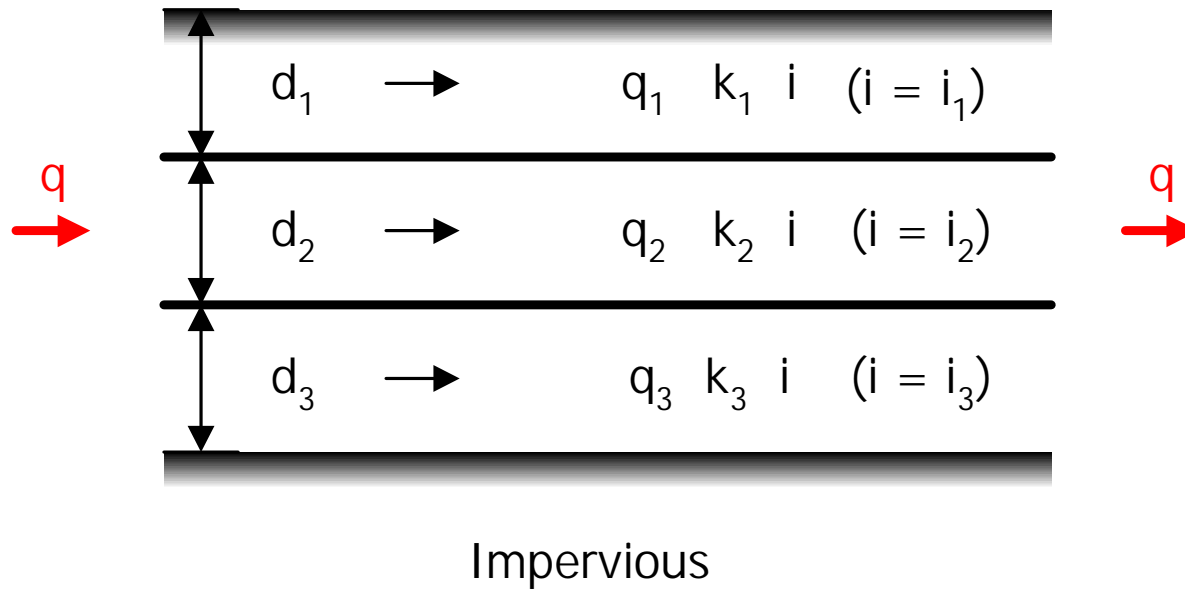
- การใช้ Piezometer โดยทดสอบแบบเสดเปลี่ยนแปลงในชั้นดินอ่อน หรือ ชั้นทราย
- การทดสอบในหลุมเจาะที่ใส่ปลอกเหล็กตลอด และทดสอบแบบเสดเปลี่ยนแปลง

เนื่องจากชั้นทรายในกรุงเทพฯ มีเสดความดันต่ำมาก การทดสอบจึงจำเป็นต้องทำแบบ กรอกน้ำลง และค่า H คือ ผลต่างของเสดความดันของระดับน้ำที่กรอก กับเสดความดันในชั้นทรายชั้นแรก

อีกวิธีหนึ่งคือ เอาค่า C_v จากสนามมาใช้ ข้อมูลการทรุดตัวกับเวลาของคันดินที่ตั้งอยู่บนดินอ่อน ทำให้ได้ C_v และค่า k ที่ใกล้เคียงความจริง

การหาค่า k ของดินที่เป็นชั้น

กรณี 1 ทิศทางการไหลของน้ำ // ขนานกับชั้นดิน



$$q = q_1 + q_2 + q_3$$

การหาค่า k ของดินที่เป็นชั้น (ต่อ)

กรณี 1 ทิศทางการไหลของน้ำ // ขนานกับชั้นดิน (ต่อ)

พิสูจน์สมการ

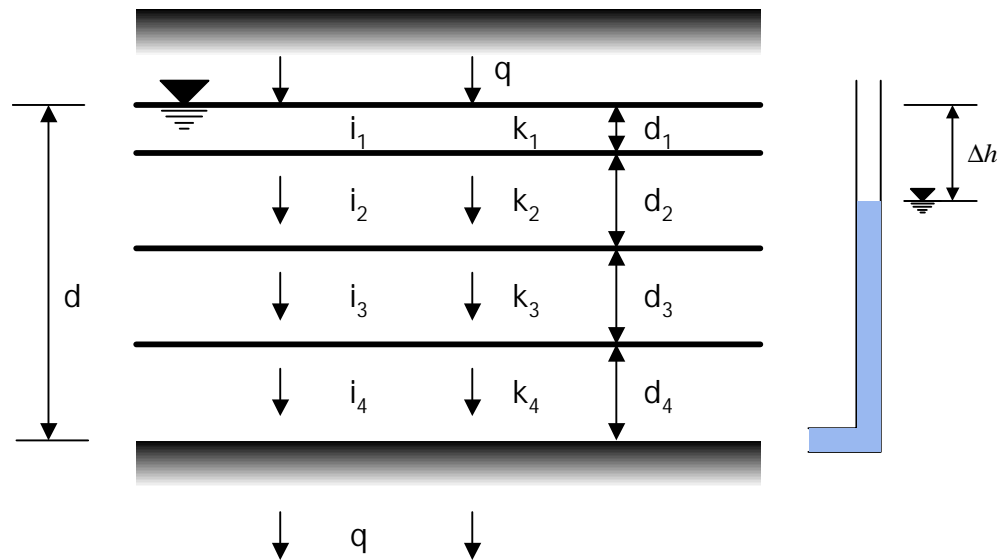
$$q = q_1 + q_2 + q_3$$
$$k_h i d = k_1 i d_1 + k_2 i d_2 + k_3 i d_3$$
$$k_h d = k_1 d_1 + k_2 d_2 + k_3 d_3$$

$$k_h = \frac{k_1 d_1 + k_2 d_2 + k_3 d_3 + \dots + k_n d_n}{d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n}$$

การหาค่า k ของดินที่เป็นชั้น (ต่อ)

กรณี 2 ทิศทางการไหลของน้ำ \perp ตั้งฉากกับชั้นดิน

- อัตราการไหลของน้ำต่อหน่วยพื้นที่คงที่ $\rightarrow Q/t$ คงที่



$$i = \frac{\Delta h}{d}, i_1 = \frac{\Delta h_1}{d_1}, i_2 = \frac{\Delta h_2}{d_2}, i_3 = \frac{\Delta h_3}{d_3}$$

การหาค่า k ของดินที่เป็นชั้น (ต่อ)

กรณี 2 ทิศทางการไหลของน้ำ \perp ตั้งฉากกับชั้นดิน (ต่อ)

พิสูจน์สมการ $id = i_1d_1 + i_2d_2 + i_3d_3 + \dots + i_nd_n = \Delta h$

จาก $i = \frac{Q}{Akt}$

$$\frac{Q}{Ak_v t} d = \frac{Q}{Ak_1 t} d_1 + \frac{Q}{Ak_2 t} d_2 + \frac{Q}{Ak_3 t} d_3$$

การหาค่า k ของดินที่เป็นชั้น (ต่อ)

กรณี 2 ทิศทางการไหลของน้ำ \perp ตั้งฉากกับชั้นดิน (ต่อ)

$$\frac{d}{k_v} = \frac{d_1}{k_1} + \frac{d_2}{k_2} + \frac{d_3}{k_3}$$

ดังนั้น

$$k_v = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_n}{\frac{d_1}{k_1} + \frac{d_2}{k_2} + \dots + \frac{d_n}{k_n}}$$

Effective Stress

- **Effective Stress = Total Stress – Pore Pressure**

$$S' = S - u$$

- **เมื่อวาล์วปิด:**

- ไม่มีการไหลของน้ำ

$$S = u \Rightarrow S' = 0$$

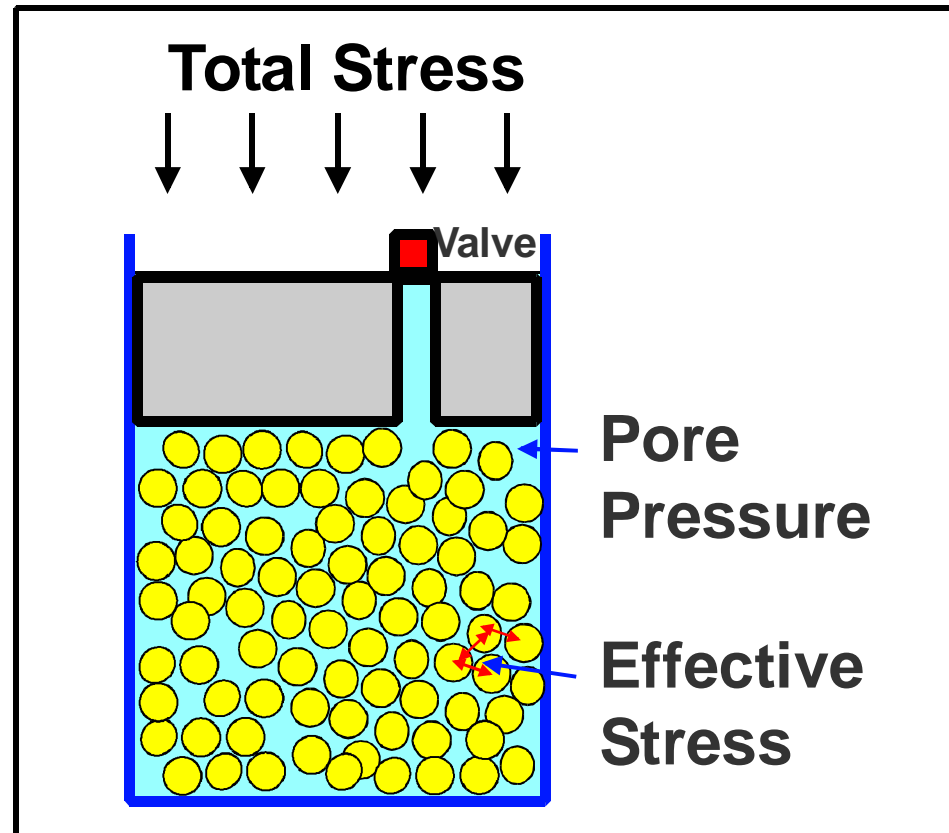
- **Strength = 0**

- **เมื่อวาล์วเปิด:**

- น้ำไหลออก

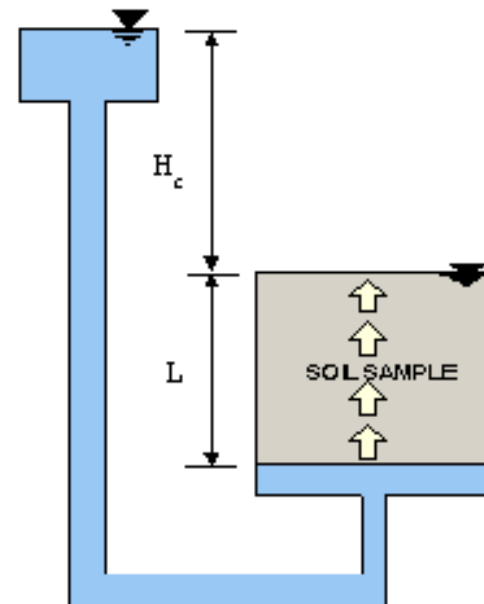
- S' – เพิ่ม

- **Strength** - เพิ่ม



Critical Hydraulic Gradient, i_c

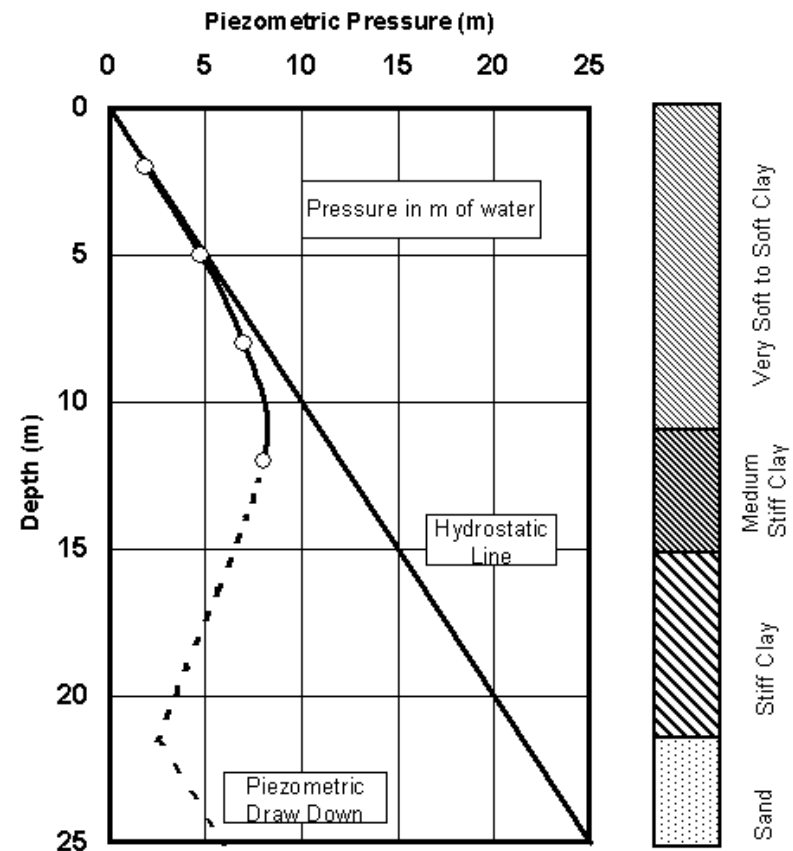
- ภาวะดินเดือด (Boiling)
- **Effective Stress = 0**
- **Strength = 0**
- มีความสำคัญในปัญหางานขุด (Excavation)



$$i_c = \frac{H_c}{L} = \frac{r_{sat} - r_w}{r_w} = \frac{(G_s - 1)}{1 + e}$$

Piezometric Pressure Profile due to Deep Pumping

- ปัญหาจากการสูบน้ำบาดาลในเขตกรุงเทพฯ ปริมาณพล
- **Piezometric Pressure Drawdown**
 - การลดระดับของน้ำใต้ดิน
- มีผลทำให้เกิด:
 - ความดันน้ำ, u ลด (**Total stress** = คงที่)
 - หน่วยแรงประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น, S'
 - เกิดการทรุดตัว (**Settlement**)
 - **Negative Skin Friction**
- การวิเคราะห์:
 - วิเคราะห์ความสามารถในการยอมให้น้ำซึมผ่าน, k ของชั้นดินแต่ละชั้น



Piezometric Pressure

- Multi-Layers
- Constant Head
- k from Oedometer tests

