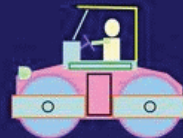


SOIL MECHANICS

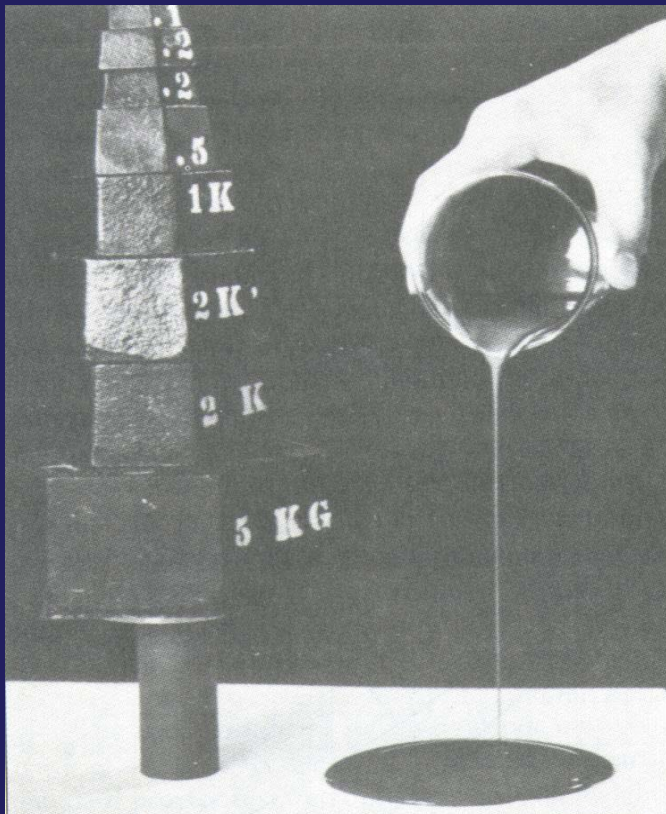
ปฐพีกลศาสตร์



บทที่ **1**

บทนำ

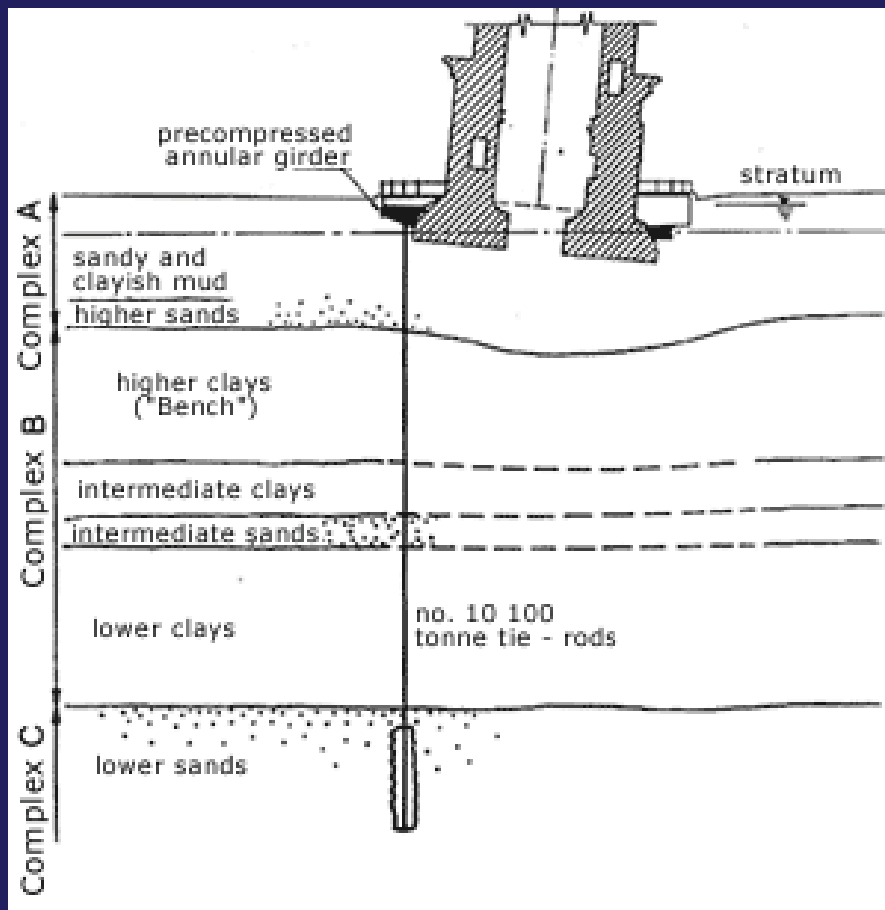
Introduction to Soil Mechanics

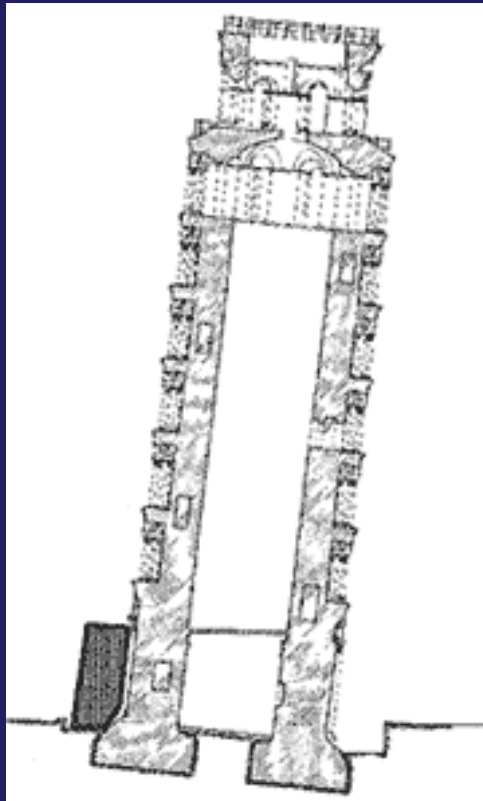


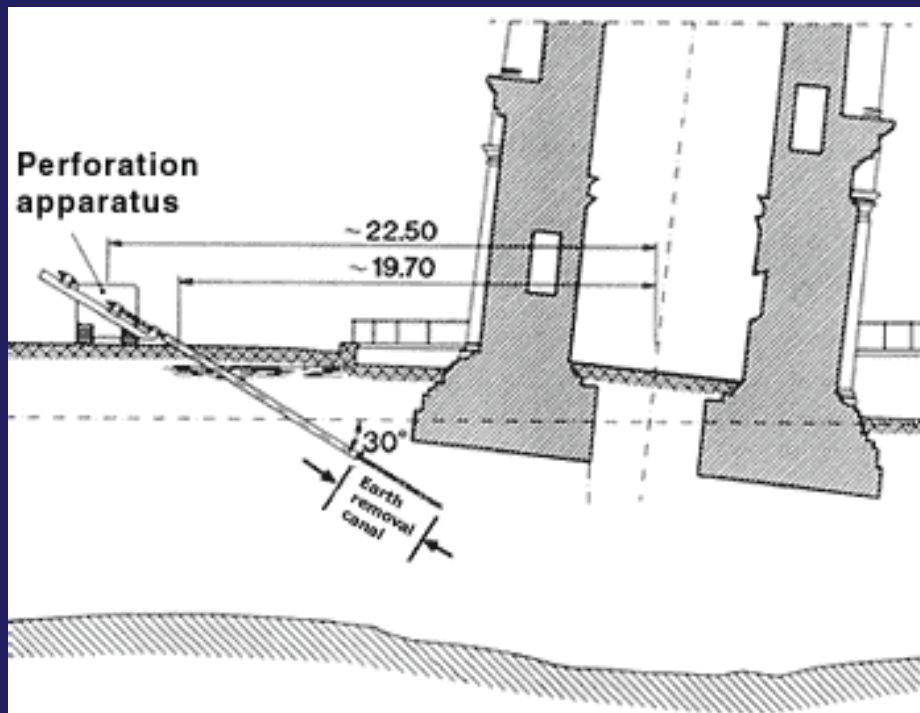
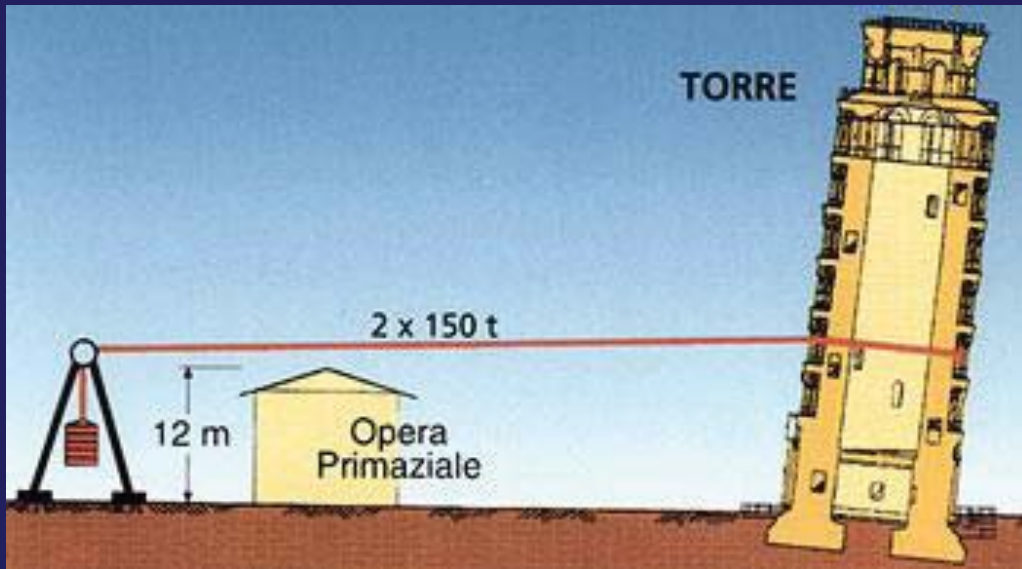
ดินชนิดเดียวกัน มีค่า
ปริมาณความชื้นเท่ากันแต่
ด้านخواงกระทบกระเทือน
มีค่า $S = 1500+$



หอเอนเมือง Pisa (The leaning tower of Pisa)
 ช่วงเวลาก่อสร้าง ค.ศ. 1173 – 1350 สูง 55.863 m. ฐานกว้าง 15.484 m. หนัก 14700 ตัน เอียง ประมาณ 10 องศา





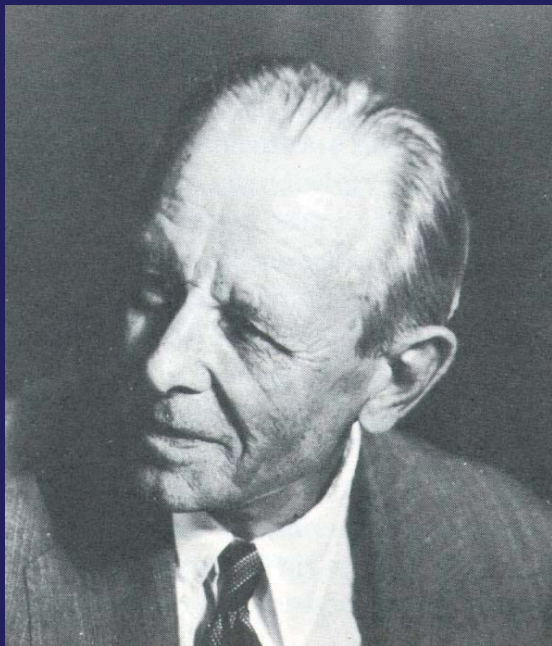






La Conchita

California



Karl Terzaghi (1883 – 1963)

**บิดาแห่ง Soil Mechanics ชาว
ออสเตรีย เขียนหนังสือเกี่ยวกับ
Soil Mechanics เล่มแรกเมื่อ
ค.ศ. 1925**

กำเนิดของดิน

ดินสามารถแบ่งตามคุณสมบัติต่าง ๆ ได้หลายแบบ

เช่น

แบ่งตามขนาด

แบ่งตามความเหนียว

แบ่งตามความดันที่เคยกดทับ

ดินยังสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด ตามสารที่ผสมอยู่ในดิน คือ

ดินอินทรีย์สาร (*Organic soil*)

ดินอนินทรีย์สาร (*Inorganic soil*)

ดินอินทรีย์สาร (*Organic soil*)

คือ ดินที่มีสารอินทรีย์ (ซากพืชซากสัตว์) เจือปนอยู่





ดินอินทรีย์สาร (Organic soil)

ดินอนินทรีย์สาร (*Inorganic soil*)

คือ ดินที่ไม่มีซากพืชซากสัตว์เจือปนอยู่



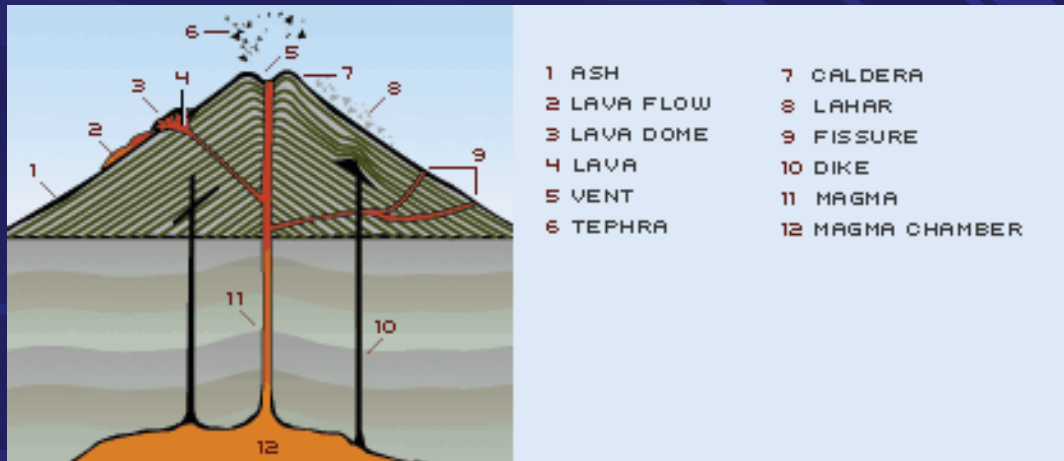
ดินอนินทรีย์สาร (Inorganic soil)



ดินอนินทรีย์สาร (Inorganic soil)
เกิดจากการย่อยสลายของหินหลัก
(Parent rock) ต่อไปนี้

หินอัคนี (Igneous rock)

เกิดจากการแข็งตัวของลาวา





Basalt



Granite



Rhyolite



Pumice
(From Burirum)

หินชั้น (Sedimentary rock)

เกิดจากการตกตะกอนเป็นชั้น ๆ ของหินต่าง ๆ เนื่องจาก
การพาของตัวกลาง

ตัวกลางต่าง ๆ เช่น

น้ำ

อากาศ

แรงโน้มถ่วง



Sand stone

from Lum ta kong



Arkose (sandstone > 25 % feldspar grains)



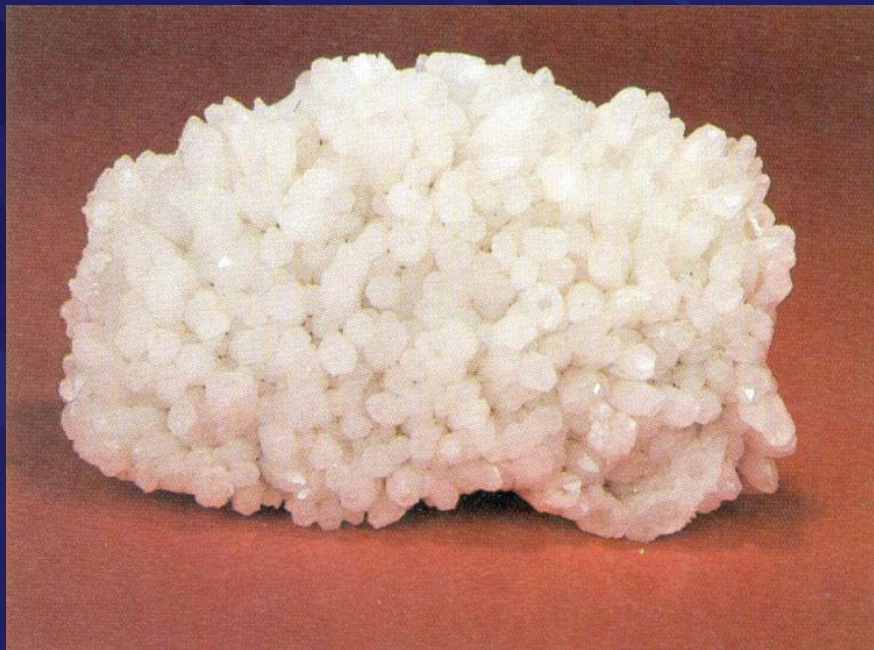
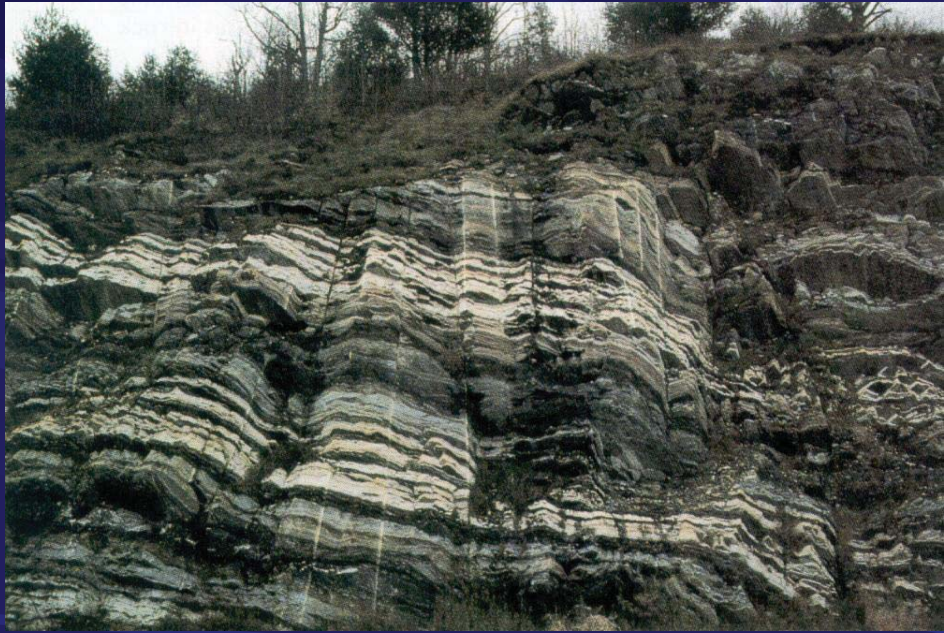
Chalk



Shale

หินแปร (Metamorphic rock)

เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หรือ ความดัน ทำให้หินอัคนี และหรือหินชั้น เปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปจากเดิม



Quartz



Quartz
(แก้วขนเหล็ก)



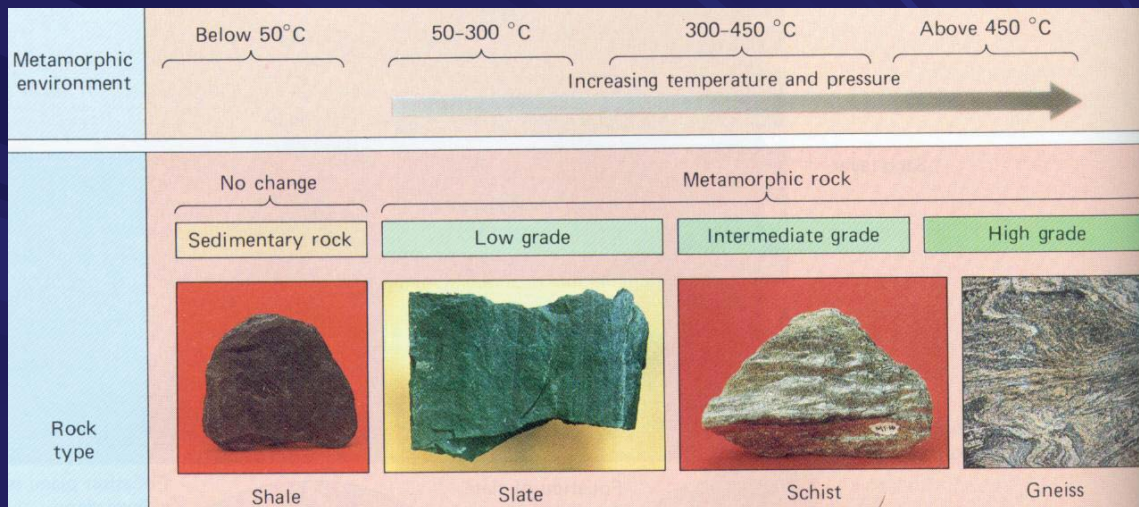
Mylonite



Slate



Gneiss อ่านว่า ไนซ์



หินเหล่านี้เกิดการย่อยสลาย หรือ ผุกร่อน
 (Weathering) จนกลายเป็นดิน

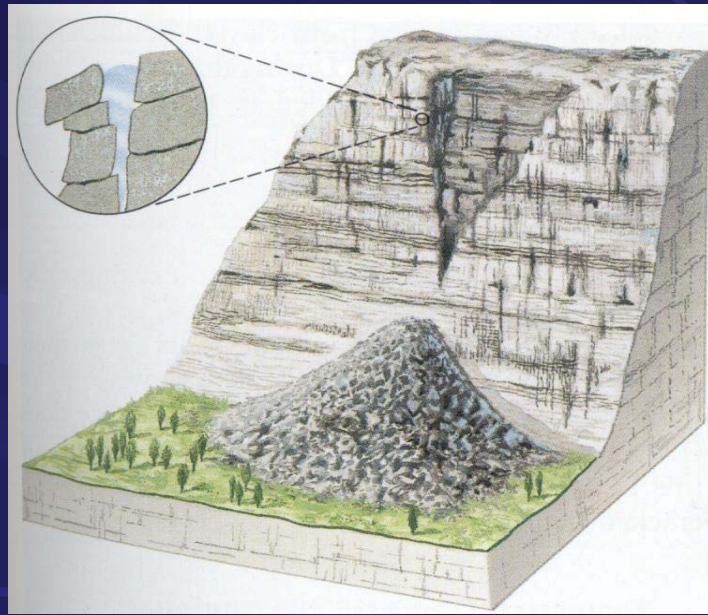
การผุกร่อน (Weathering)

Physical Weathering

Chemical Weathering

Physical Weathering

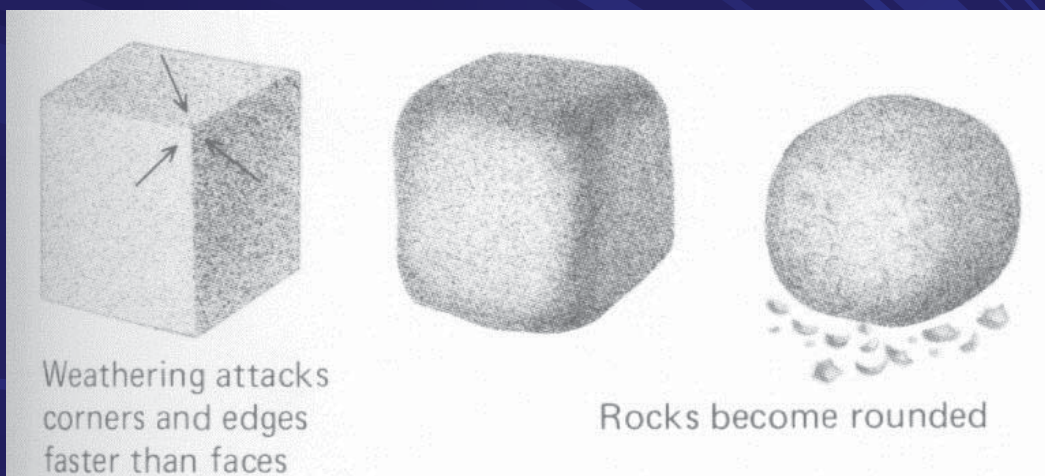
มักเกิดจากสภาวะร้อนสลับหนาว จะทำให้หินเกิดการขยายและหดตัว จนเกิดรอยแตกกว้างขึ้น จากนั้นน้ำจะซึมเข้าไปในรอยแตก และเมื่อน้ำกลายเป็นน้ำแข็งจะเกิดการขยายปริมาตร ทำให้หินแตกออกเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อย



Chemical Weathering

ในบางครั้งการผุกร่อนเกิดจากปฏิกิริยาเคมี เช่น น้ำกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากันเป็นกรดคาร์บอนิก แล้วทำปฏิกิริยากับหินบางชนิดทำให้เกิดการผุกร่อน

การผุกร่อนแบบนี้ มักจะเริ่มที่บริเวณตรงมุม หรือขอบของหิน โดยจะทำให้หินที่มีเหลี่ยมมากกลายเป็นหินมนลงในที่สุด





นอกจากนี้ ดินยังสามารถแบ่งได้ตามลักษณะการเกิด ดังนี้ คือ

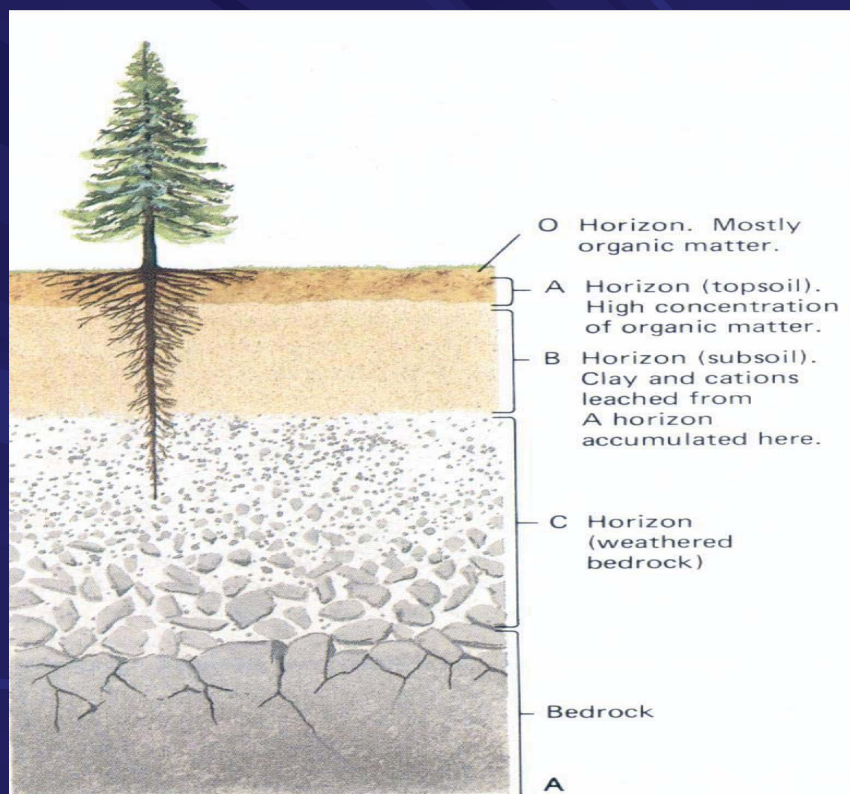
Residual soil

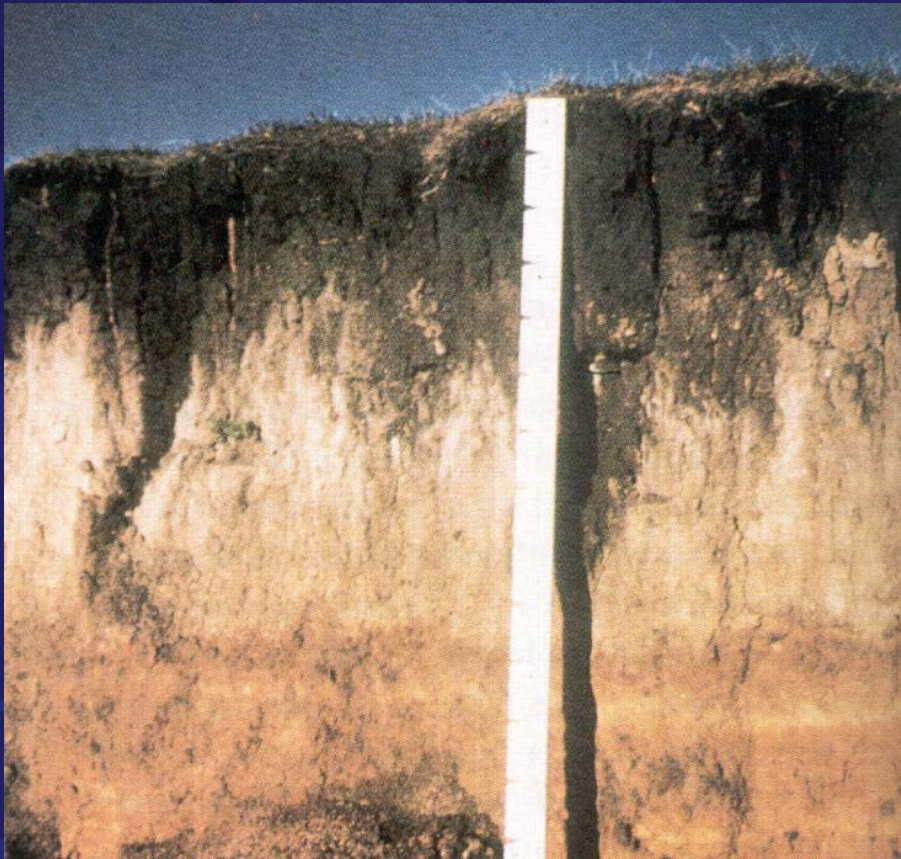
Transported soil

Residual soil

คือ ดินที่แตกตัว หรือย่อยสลายจากหินหลักโดยไม่ได้เคลื่อนที่ไปยังบริเวณอื่น หรือเกิดจากอัตราการย่อยสลายของหินมากกว่าอัตราการพัดพา

ลักษณะพิเศษของดินนี้ คือจะมีเม็ดดินขนาดเล็กที่ผิวดินและขนาดของเม็ดดินจะใหญ่ขึ้นตามความลึก





Transported soil

คือ ดินที่เกิดจากการพาไปของตัวกลางต่าง ๆ เช่น

น้ำ

ลม

แรงโน้มถ่วง

ธารน้ำแข็ง

ผลกระทบ คือ

เปลี่ยนแปลงรูปร่าง ขนาด ลักษณะของผิวของเม็ดดิน

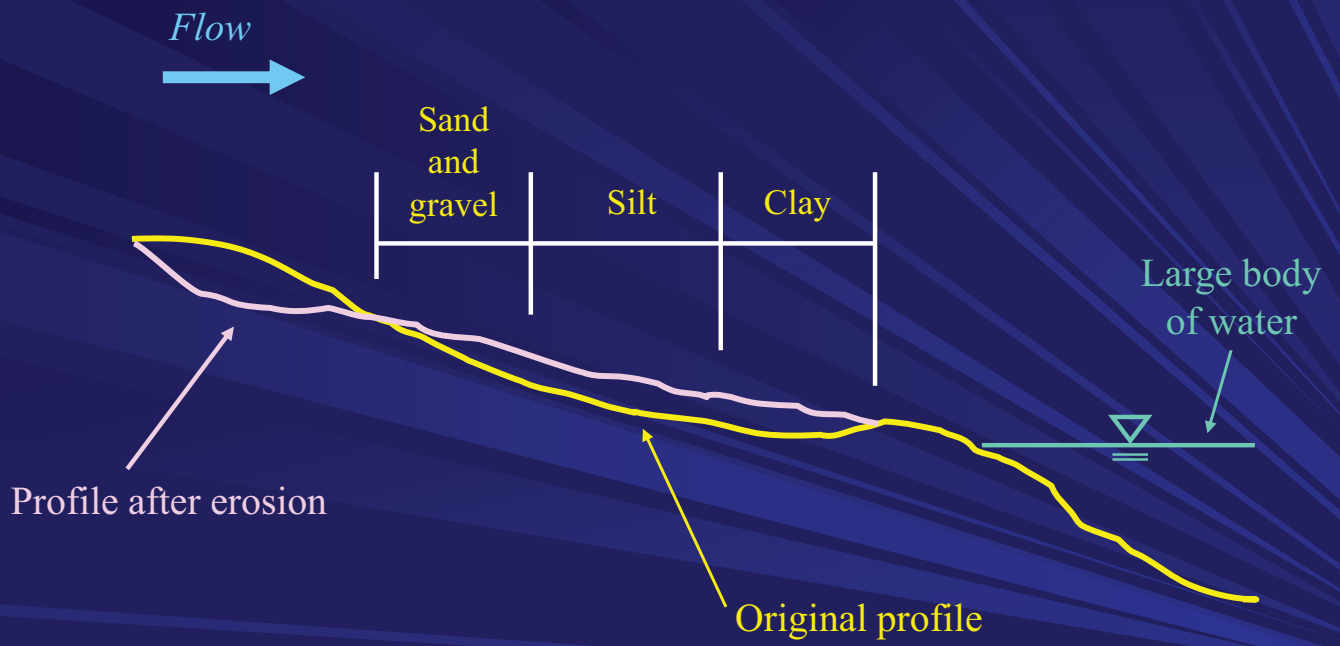
มีการจัดเรียงขนาดของเม็ดดิน

Transported soil ที่สำคัญ คือ

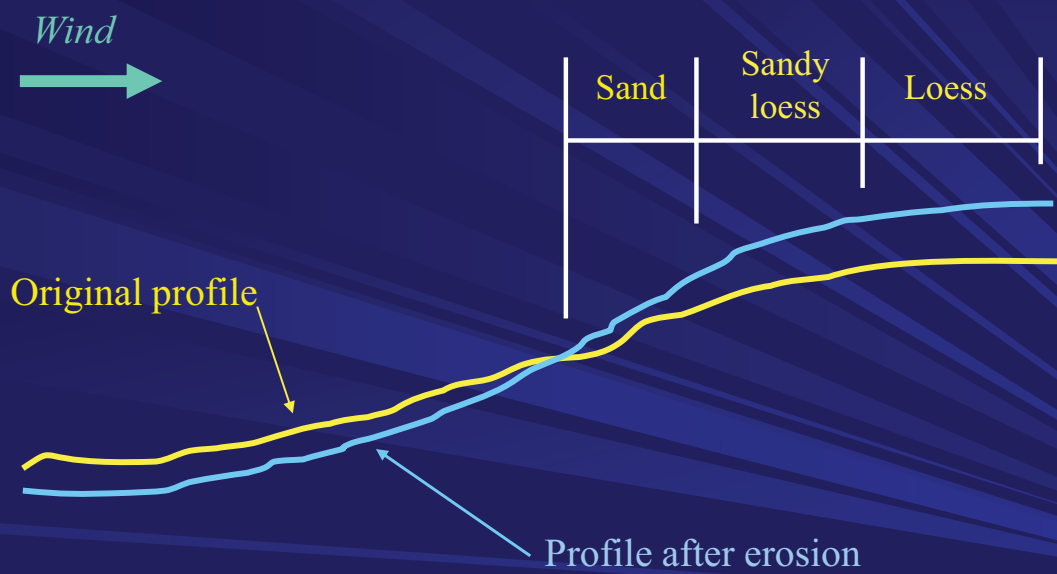
Water transported soil

Wind transported soil

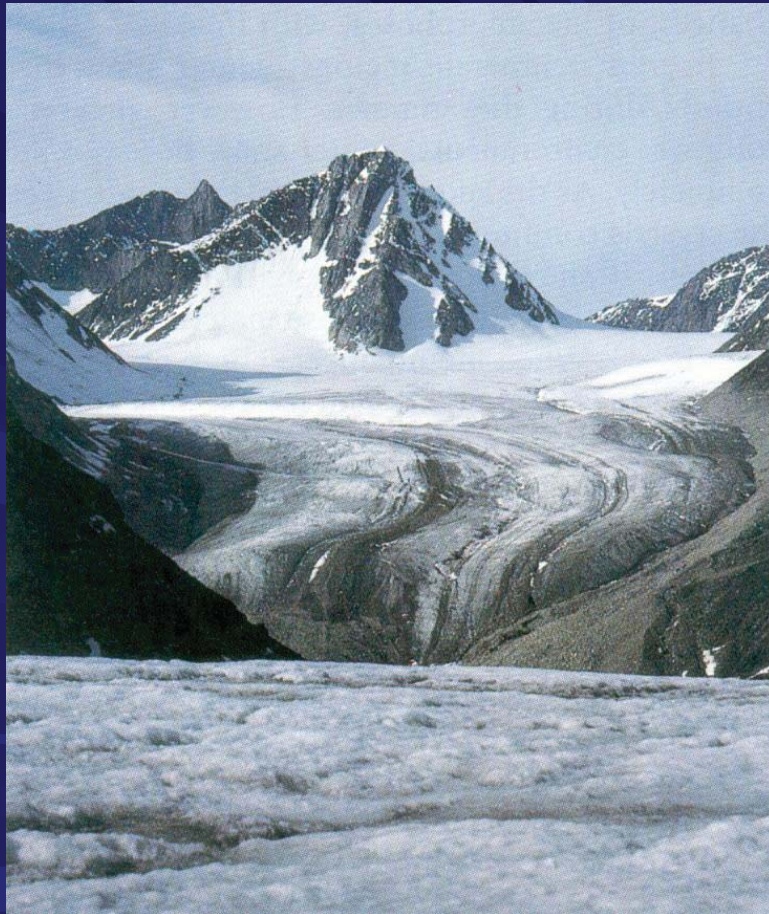
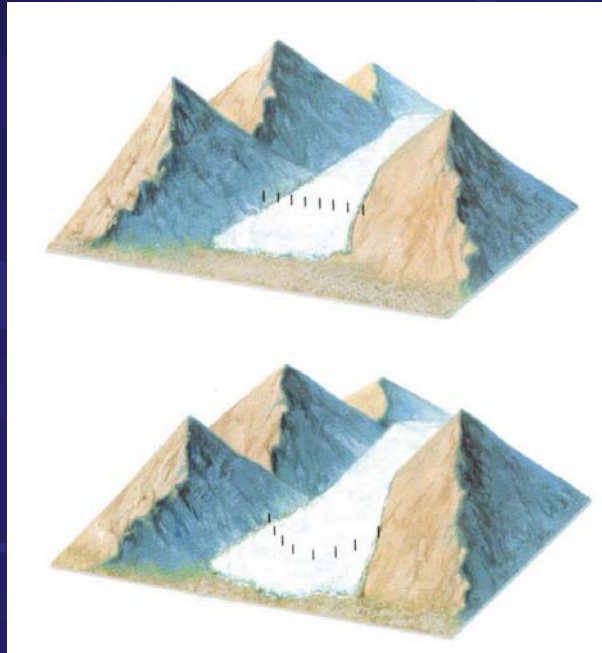
Water transported soil



Wind transported soil



Glacier



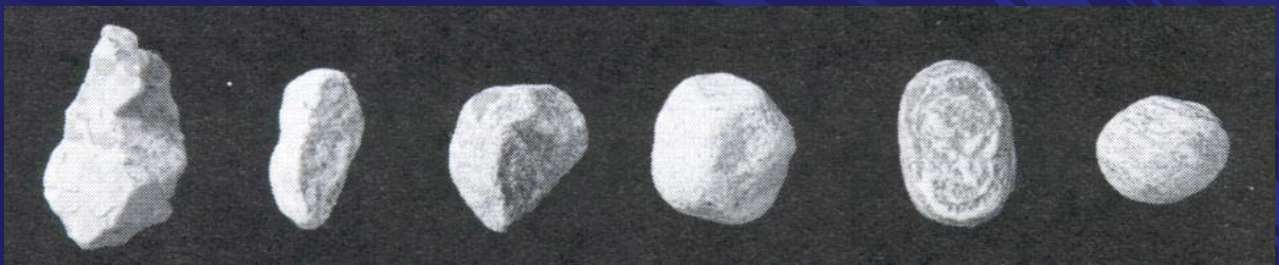
รูปร่างของเม็ดดิน

ดินที่ไม่มีความเหนียว (Cohesionless soil)

กรวด (Gravel)

ทราย (Sand)

ดินตะกอน (Silt)



Very
angular

Angular

Subangular

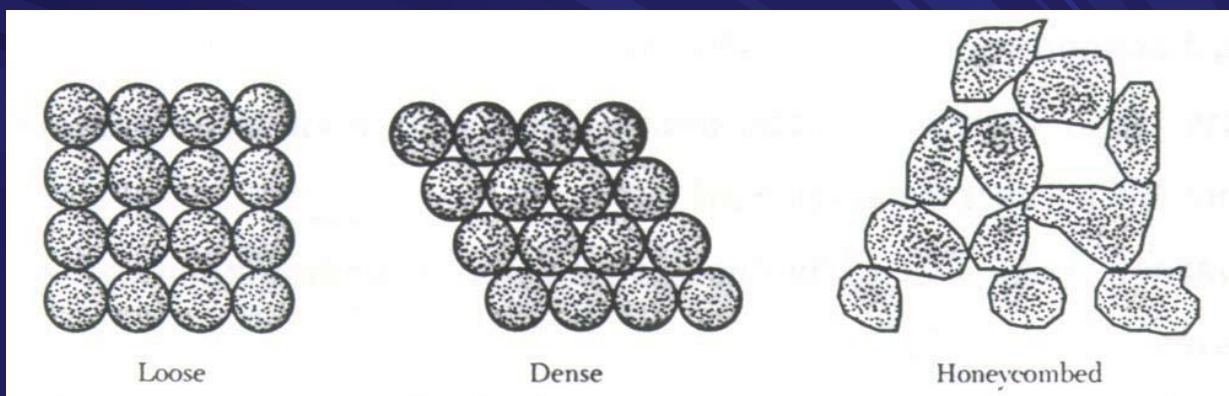
Subrounded

Rounded

Well
rounded

- เม็ดดินที่มีเหลี่ยม (Angular particles) มักจะพบในที่ที่ใกล้กับหินที่เป็นต้นกำเนิด
- เม็ดดินที่มีลักษณะค่อนข้างกลม (Rounded particles) มักจะพบในบริเวณที่ไกลจากแหล่งกำเนิด
- เม็ดดินที่มีเหลี่ยม (Angular particles) จะมีคุณสมบัติต้านทานแรงเฉือนได้ดีกว่า

ลักษณะการเรียงตัว



ดินที่มีความเชื่อมแน่น (Cohesive soil)

ดินเหนียว (Clay)

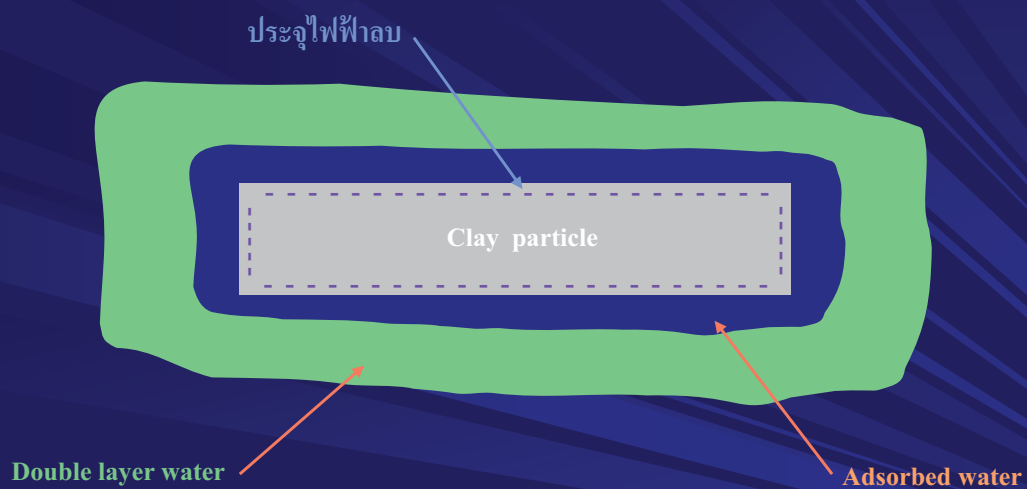
เม็ดดินเหนียวมีลักษณะเป็นแผ่นแบนยาว ประกอบด้วยแร่ดินเหนียว จึงทำให้อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักต่อแรงดึงดูดที่ผิว้น้อยมาก ทำให้เม็ดดินเหนียวแสดงประจุไฟฟ้า (ลบ) ออกมาที่บริเวณผิว

จึงทำให้มีความสามารถดูดโมเลกุลของน้ำเข้ามารวมได้

โมเลกุลของน้ำที่หุ้มเม็ดดิน เรียกว่า → Double layer water

โมเลกุลของน้ำส่วนที่อยู่ติดกับเม็ดดิน จะมีความหนืดสูงกว่าน้ำธรรมดา ซึ่งเรียกว่า → Adsorbed water

ดังนั้นดินเหนียวจึงเป็นดินที่มี
ความเชื่อมแน่น (Cohesive soil) และ
คุณสมบัติจึงขึ้นอยู่กับปริมาณ
ความชื้นในดิน



แร่ดินเหนียวมีหลายชนิดแต่ที่สำคัญแร่ดินเหนียวจะประกอบด้วยผลึก 2 ชนิด คือ



Silica tetrahedron



Aluminium octahedron

**Silica
tetrahedron**



Silica sheet

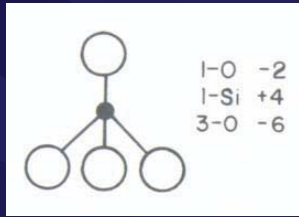
**Aluminium
octahedron**



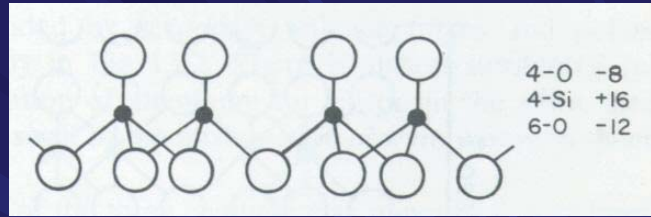
**Octrahedral
sheet**

or

Gibbsite sheet



Silica tetrahedron

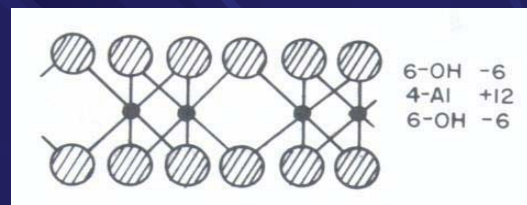
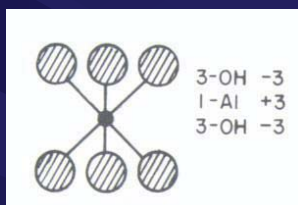


Atomic structure of Silica sheet

Symbolic structure of Silica sheet



Aluminium octrahedron



Atomic structure of Gibbsite sheet

Symbolic structure of Gibbsite sheet

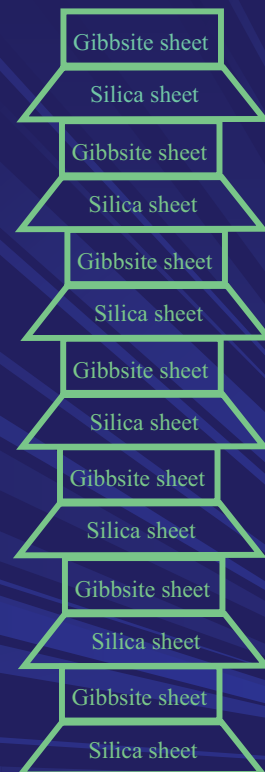
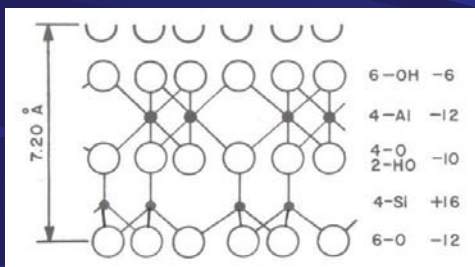


แร่ดินเหนียวที่สำคัญ คือ

- Kaolinite
- Montmorillonite
- Illite

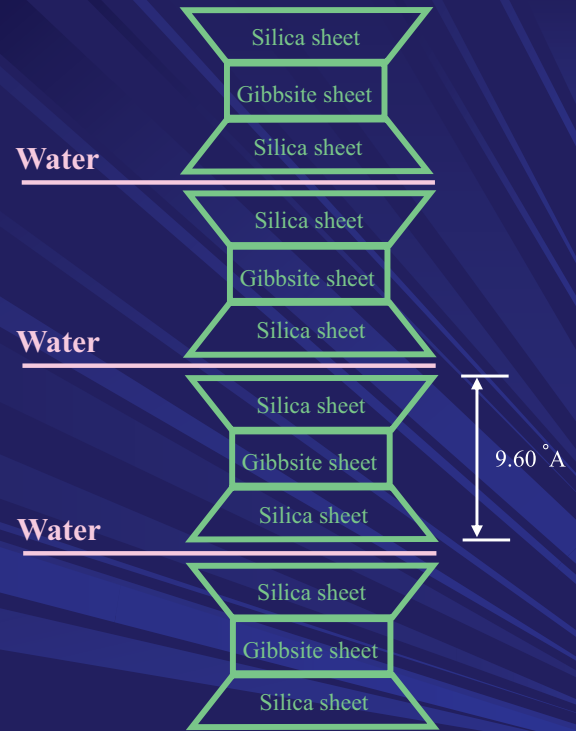
Kaolinite

เป็นการจับตัวเรียงกันเป็นชุดของ silica และ gibbsite sheets แล้วเรียงต่อกันเป็นชั้นอีกหนึ่ง การจับตัวระหว่างชุดแข็งแรงมาก ดังนั้นดินเหนียวนี้จะไม่มีการบวมตัวเมื่อมีความชื้นมากระทำ



Montmorillonite

ประกอบด้วย silica sheets 2 แผ่นและ gibbsite sheet 1 แผ่นรวมเป็นหนึ่งชุด การจับตัวกันของแต่ละชุดไม่แข็งแรง เมื่อโดนน้ำจะทำให้เกิดการบวมตัวสูง

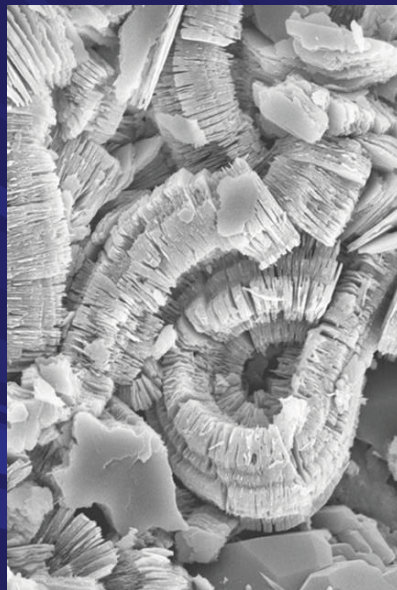
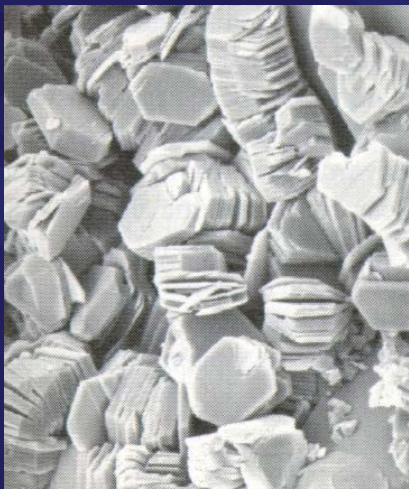


Illite

มีองค์ประกอบคล้าย montmorillonite แต่มี potassium ions คอยเชื่อมประสานทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมากกว่า montmorillonite

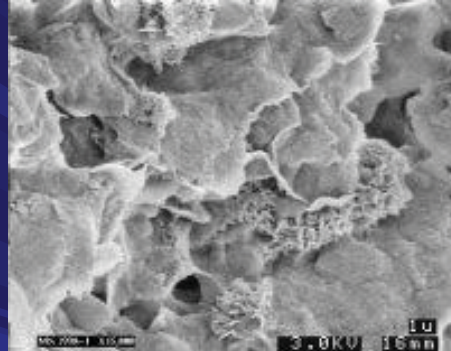


Kaolinite



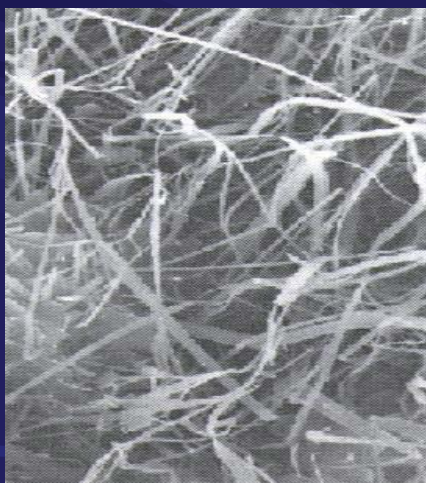
Kaolinite

Montmorillonite

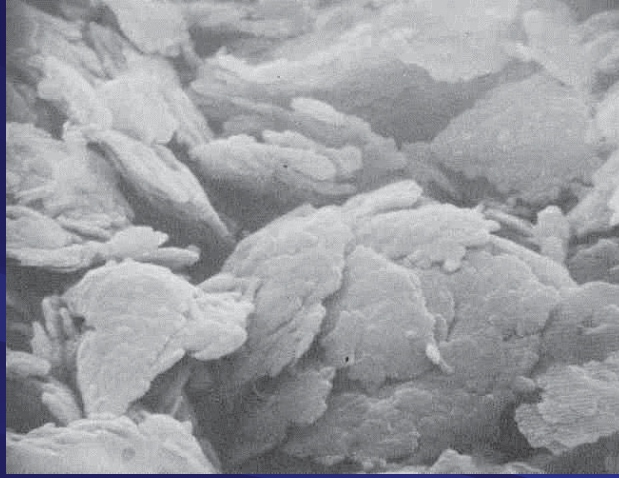


ภาพขยาย 15000 เท่า

Illite

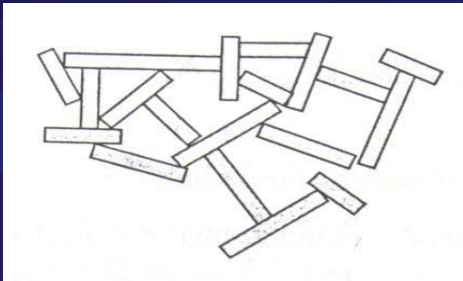


Illite

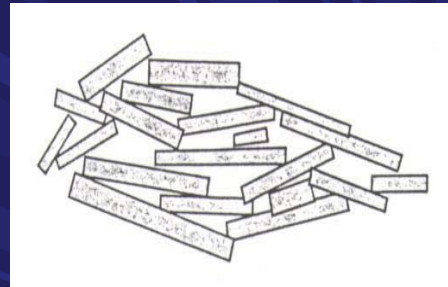


ภาพขยาย 1500 เท่า

ลักษณะการเรียงตัว



Flocculated structure



Dispersed structure

ดินที่มีการเรียงตัวแบบ **Flocculated structure**
จะมีความแข็งแรง และค่าความซึมผ่านมากกว่าดินที่มี
การเรียงตัวแบบ **Dispersed structure**

ดินที่มีการเรียงตัวแบบ **Flocculated structure**
จะมีการทรุดตัวน้อยกว่าดินที่มีการเรียงตัวแบบ
Dispersed structure

ขนาดเม็ดดิน

ใหญ่



เล็ก

กรวด (Gravel)

ทราย (Sand)

ดินตะกอน (Silt)

ดินเหนียว (Clay)

ดินเม็ดหยาบ

(Coarse grained soil

or Granular soil)

ดินเม็ดละเอียด

(Fine grained soil)

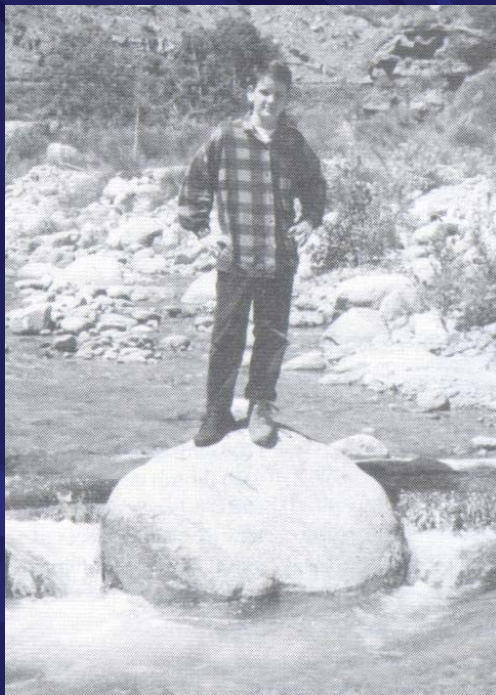
ขนาดของเม็ดดิน

ASTM ระบุว่าดินที่มีเม็ดใหญ่กว่า 3 นิ้ว (75 mm)

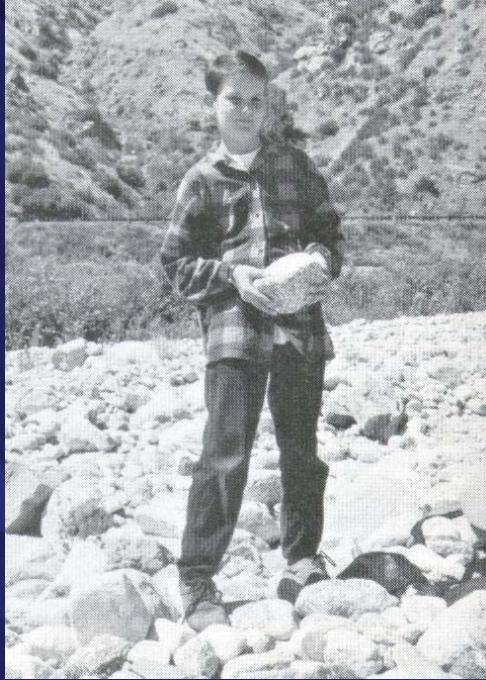


ROCK

เซ่น



Boulder



Cobble

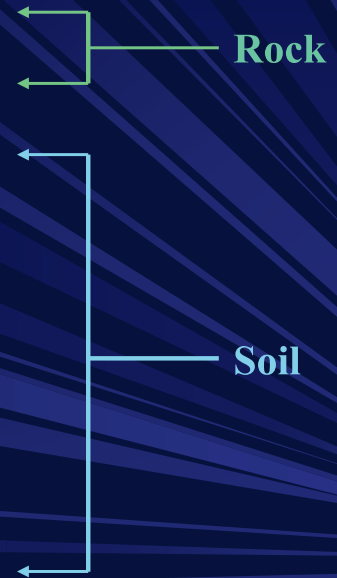
ดังนั้น

วิศวกรจึงเกี่ยวข้องกับดินที่มีขนาด

เม็ดเล็กกว่า 3 นิ้ว

ASTM ระบุขนาดของเม็ดดินดังนี้

| Particle size, mm | Soil type |
|-------------------|---------------------|
| > 350 | Boulder |
| 350 – 75.0 | Cobble |
| 75.0 – 19.0 | Coarse gravel |
| 19.0 – 4.75 | Fine gravel |
| 4.75 – 2.00 | Coarse sand |
| 2.00 – 0.425 | Medium sand |
| 0.425 – 0.075 | Fine sand |
| < 0.075 | Fines (Silt + Clay) |



ขนาดเม็ดดินใหญ่กว่า 4.75 mm

Gravel



ขนาดเม็ดดิน 4.75 – 0.075 mm

Sand



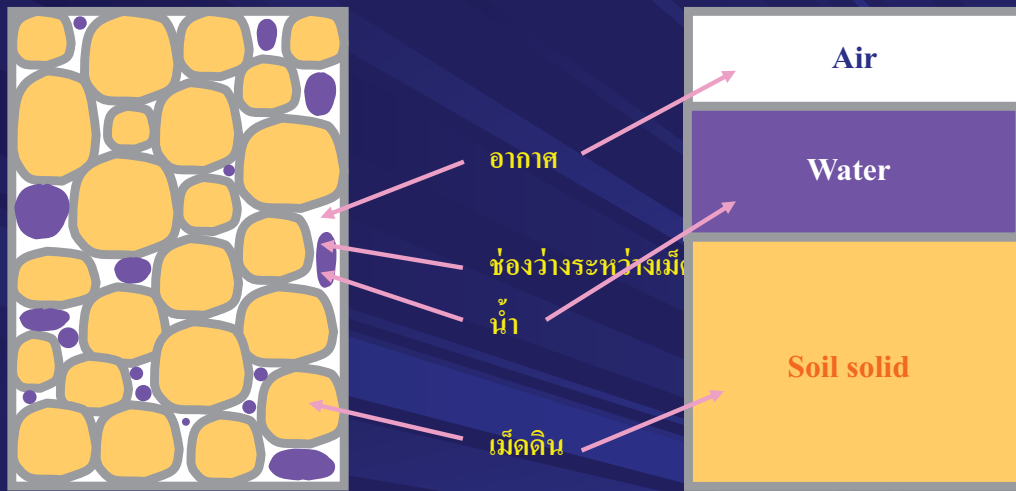
ขนาดเม็ดดินเล็กกว่า 0.075 mm

Fines (Silt + clay)



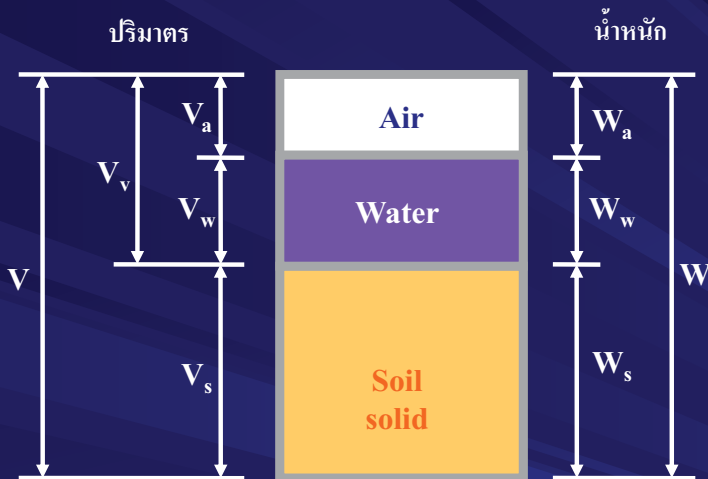
| Name of organization | Grain size (mm) | | | |
|---|-----------------|---------------|--|--------|
| | Gravel | Sand | Silt | Clay |
| Massachusetts Institute of Technology (MIT) | >2 | 2 to 0.06 | 0.06 to 0.002 | <0.002 |
| U.S. Department of Agriculture (USDA) | >2 | 2 to 0.05 | 0.05 to 0.002 | <0.002 |
| American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) | 76.2 to 2 | 2 to 0.075 | 0.075 to 0.002 | <0.002 |
| Unified Soil Classification System (U.S. Army Corps of Engineers, U.S. Bureau of Reclamation) | 76.2 to 4.75 | 4.75 to 0.075 | Fines (i.e., silts and clays) <0.075 | |

ความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักกับปริมาตรของดิน



ดิน 1 กอง

Phase diagram



V_s = ปริมาตรของเม็ดดิน

V_v = ปริมาตรของช่องว่างระหว่างเม็ดดิน

V_w = ปริมาตรของน้ำในช่องว่าง

V_a = ปริมาตรของอากาศในช่องว่าง

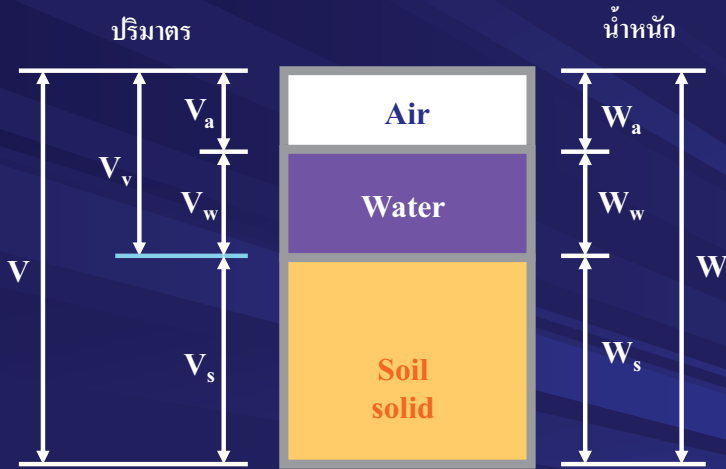
W_s = น้ำหนักของเม็ดดิน

W_w = น้ำหนักของน้ำในช่องว่าง

W_a = น้ำหนักของอากาศในช่องว่าง

V = ปริมาตรทั้งหมดของก้อนดิน

W = น้ำหนักทั้งหมดของก้อนดิน



$$V = V_s + V_v$$

$$V_v = V_w + V_a$$

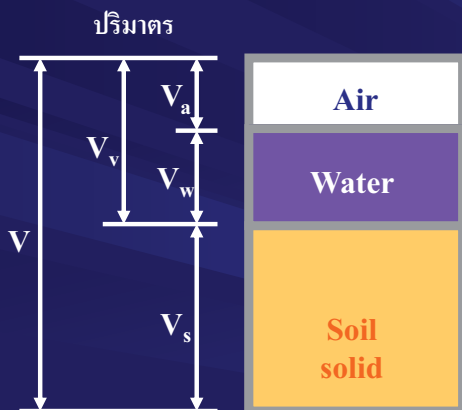
$$V = V_s + V_w + V_a$$

$$W = W_s + W_w + W_a$$

$$W_a = 0$$

$$W = W_s + W_w$$

ความสัมพันธ์โดยปริมาตร



Void ratio, e

$$e = V_v/V_s$$

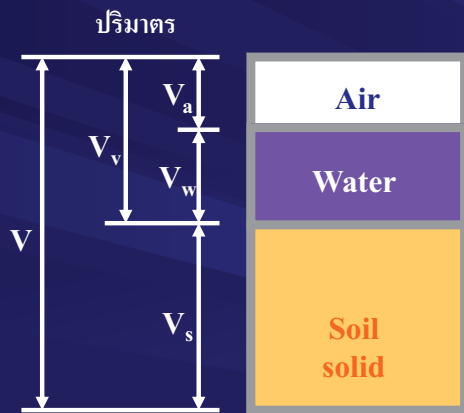
Porosity, n

$$n = V_v/V$$

Degree of saturation, S

$$S = V_w/V_v$$

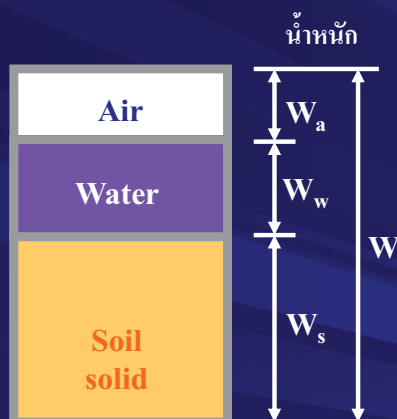
ความสัมพัทธ์โดยปริมาตร



$$n = e / (1 + e)$$

$$e = n / (1 - n)$$

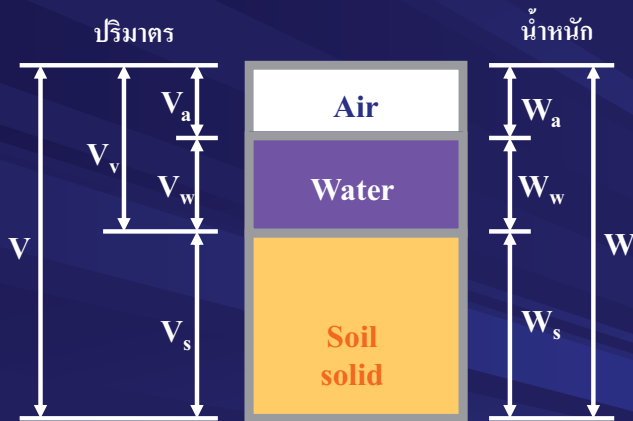
ความสัมพัทธ์โดยน้ำหนัก



Moisture content, m

$$m = W_w / W_s$$

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับน้ำหนัก



Density, γ

$$\gamma = W/V$$

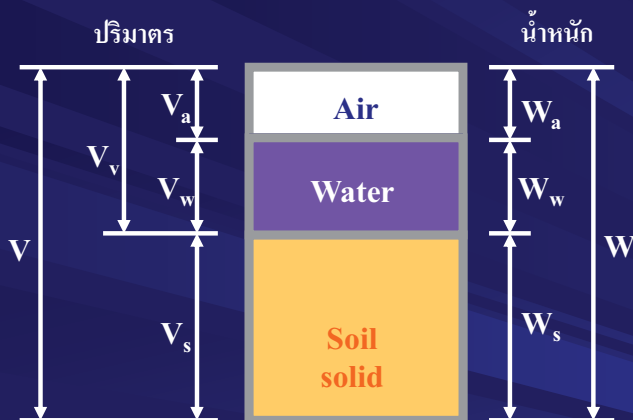
Dry density, γ_d

$$\gamma_d = W_s/V$$

Density of solid particle, γ_s

$$\gamma_s = W_s/V_s$$

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับน้ำหนัก



Specific gravity, G_s

$$G_s = \gamma_s / \gamma_w$$

Submerged density, γ_{sub}

$$\gamma_{sub} = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

Relative density, D_r

$$D_r = \{(e_{max} - e)/(e_{max} - e_{min})\} \times 100$$

นอกจากนี้ยังมีสูตรอื่น ๆ อีก ดังนี้

$$S.e = m.G_s$$

$$\gamma = G_s \cdot \gamma_w (1 + m) / (1 + e)$$

$$\gamma = \gamma_w (G_s + S.e) / (1 + e)$$

$$\gamma_d = G_s \cdot \gamma_w / (1 + e)$$

$$\gamma_d = \gamma / (1 + m)$$

ตัวอย่างที่ 1.3

A saturated clay has a weight of 152.6 g, and its oven dry weight is 105.3 g. If the specific gravity of this clay is 2.71, determine the moisture content, void ratio, porosity and unit weight of this soil.

ดินเหนียวอิ่มตัว (Saturated clay) ก้อนหนึ่งหนัก 152.6 กรัม นำมาอบในตู้อบจนแห้งสนิท แล้วนำไปชั่งได้หนัก 105.3 กรัม ถ้าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินเท่ากับ 2.71 จงหาค่า m , e , n และ γ

ตัวอย่างที่ 1.3

ดินเหนียวอิ่มตัว (Saturated clay) ก้อนหนึ่งหนัก 152.6 กรัม นำมาอบในตู้อบจนแห้งสนิท แล้วนำไปชั่งได้หนัก 105.3 กรัม ถ้าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินเท่ากับ 2.71 จงหาค่า m , e , n และ γ

วิธีทำ

$$S = 1.0, W = 152.6 \text{ g}, W_s = 105.3 \text{ g}, G_s = 2.71, \gamma_w = 1.0 \text{ g/cc}$$

กำหนดให้

$$S = 1.0$$

$$W = 152.6 \text{ g}$$

$$W_s = 105.3 \text{ g}$$

$$G_s = 2.71$$

$$\gamma_w = 1.0 \text{ g/cc}$$

หาค่า

m, e, n และ γ

จากสมการ 1.10, $m = (W_w/W_s) \times 100$

แทนค่า $m = [(152.6 - 105.3)/105.3] \times 100$

$$m = 44.9 \%$$

Ans.

กำหนดให้

$$S = 1.0$$

$$W = 152.6 \text{ g}$$

$$W_s = 105.3 \text{ g}$$

$$G_s = 2.71$$

$$\gamma_w = 1.0 \text{ g/cc}$$

หาค่า

m, e, n และ γ

$$m = 44.9 \%$$

จากสมการ 1.17, $S.e = m.G_s$

แทนค่า $1.0 \times e = 0.449 \times 2.71$

$$e = 1.22$$

Ans.

กำหนดให้

$$S = 1.0$$

$$W = 152.6 \text{ g}$$

$$W_s = 105.3 \text{ g}$$

$$G_s = 2.71$$

$$\gamma_w = 1.0 \text{ g/cc}$$

หาค่า

m, e, n และ γ

$$m = 44.9 \%$$

$$e = 1.22$$

$$\text{จากสมการ 1.8, } n = e/(1 + e)$$

$$\text{แทนค่า } n = 1.22/(1 + 1.22)$$

$$n = 0.55 \text{ หรือ } 55.0 \%$$

Ans.

กำหนดให้

$$S = 1.0$$

$$W = 152.6 \text{ g}$$

$$W_s = 105.3 \text{ g}$$

$$G_s = 2.71$$

$$\gamma_w = 1.0 \text{ g/cc}$$

หาค่า

m, e, n และ γ

$$m = 44.9 \%$$

$$e = 1.22$$

$$n = 0.55$$

$$\text{จากสมการ 1.19, } \gamma = \gamma_w (G_s + S.e)/(1 + e)$$

$$\text{แทนค่า } \gamma = 1.0 \times (2.71 + 1.0 \times 1.22)/(1 + 1.22)$$

$$\gamma = 1.77 \text{ g/cc}$$

Ans.

กำหนดให้

$$S = 1.0$$

$$W = 152.6 \text{ g}$$

$$W_s = 105.3 \text{ g}$$

$$G_s = 2.71$$

$$\gamma_w = 1.0 \text{ g/cc}$$

หาค่า

m , e , n และ γ

$$m = 44.9 \%$$

$$e = 1.22$$

$$n = 0.55$$

$$\gamma = 1.77 \text{ g/cc}$$

Ans.

ตัวอย่างที่ 1.4

A silty clay in its natural state has a volume of 15.8 cc. and weighs 30.9 g. The oven-dried weight of this soil is 26.6 g and its specific gravity is 2.68 Calculate for e , n , S , γ and γ_d

ดินเหนียวปนดินตะกอนในสภาพธรรมชาติก้อนหนึ่ง มีปริมาตร 15.8 ลบ.ซม.หนัก 30.9 กรัม นำตัวอย่างดินมาอบในตู้อบจนแห้งสนิท แล้วนำไปชั่งได้ 26.6 กรัม ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินเท่ากับ 2.68 จงหาค่า e , n , S , γ และ γ_d

ตัวอย่างที่ 1.4

ดินเหนียวปนดินตะกอนในสภาพธรรมชาติก้อนหนึ่ง มีปริมาตร 15.8 ลบ.ซม.หนัก 30.9 กรัม นำตัวอย่างดินมาอบในตู้อบจนแห้งสนิท แล้วนำไปชั่งได้ 26.6 กรัม ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินเท่ากับ 2.68 จงหาค่า e , n , S , γ และ γ_d

วิธีทำ

$$V = 15.8 \text{ cc}, \quad W = 30.9 \text{ g}, \quad W_s = 26.6 \text{ g}, \quad G_s = 2.68, \quad \gamma_w = 1.0 \text{ g/cc}$$

กำหนดให้

$$V = 15.8 \text{ cc}$$

$$W = 30.9 \text{ g}$$

$$W_s = 26.6 \text{ g}$$

$$G_s = 2.68$$

$$\gamma_w = 1.0 \text{ g/cc}$$

หาค่า

$$e, n, S, \gamma \text{ และ } \gamma_d$$

$$\text{จากสมการ 1.4, } W = W_s + W_w$$

$$\text{แทนค่า } 30.9 = 26.6 + W_w$$

$$W_w = 4.3 \text{ g}$$

กำหนดให้

$$V = 15.8 \text{ cc}$$

$$W = 30.9 \text{ g}$$

$$W_s = 26.6 \text{ g}$$

$$G_s = 2.68$$

$$\gamma_w = 1.0 \text{ g/cc}$$

หาค่า

e, n, S, γ และ γ_d

$$W_w = 4.3 \text{ g}$$

$$\text{จาก } \gamma_w = W_w / V_w$$

$$\text{แทนค่า } 1.0 = 4.3 / V_w$$

$$V_w = 4.3 \text{ cc}$$

กำหนดให้

$$V = 15.8 \text{ cc}$$

$$W = 30.9 \text{ g}$$

$$W_s = 26.6 \text{ g}$$

$$G_s = 2.68$$

$$\gamma_w = 1.0 \text{ g/cc}$$

หาค่า

e, n, S, γ และ γ_d

$$W_w = 4.3 \text{ g}$$

$$V_w = 4.3 \text{ cc}$$

$$\text{จากสมการ 1.14, } G_s = \gamma_s / \gamma_w$$

$$\text{และจากสมการ 1.13, } \gamma_s = W_s / V_s$$

$$\text{จะได้ } G_s = W_s / (V_s \cdot \gamma_w)$$

$$\text{แทนค่า } 2.68 = 26.6 / (V_s \times 1.0)$$

$$V_s = 9.9 \text{ cc}$$

กำหนดให้

$$W_w = 4.3 \text{ g}$$

$$V_w = 4.3 \text{ cc}$$

$$V_s = 9.9 \text{ cc}$$

$$V = 15.8 \text{ cc}$$

$$W = 30.9 \text{ g}$$

$$W_s = 26.6 \text{ g}$$

$$G_s = 2.68$$

$$\gamma_w = 1.0 \text{ g/cc}$$

จากสมการ 1.1, $V = V_s + V_w + V_a$

แทนค่า $15.8 = 9.9 + 4.3 + V_a$

หาค่า

$$V_a = 1.6 \text{ cc}$$

e, n, S, γ และ γ_d

กำหนดให้

$$W_w = 4.3 \text{ g}$$

$$V_w = 4.3 \text{ cc}$$

$$V_s = 9.9 \text{ cc}$$

$$V_a = 1.6 \text{ cc}$$

$$V = 15.8 \text{ cc}$$

$$W = 30.9 \text{ g}$$

$$W_s = 26.6 \text{ g}$$

$$G_s = 2.68$$

$$\gamma_w = 1.0 \text{ g/cc}$$

จากสมการ 1.2, $V_v = V_w + V_a$

แทนค่า $V_v = 4.3 + 1.6$

หาค่า

$$V_v = 5.9 \text{ cc}$$

e, n, S, γ และ γ_d

กำหนดให้

$$W_w = 4.3 \text{ g}$$

$$V_w = 4.3 \text{ cc}$$

$$V_s = 9.9 \text{ cc}$$

$$V_a = 1.6 \text{ cc}$$

$$V = 15.8 \text{ cc}$$

$$V_v = 5.9 \text{ cc}$$

$$W = 30.9 \text{ g}$$

$$W_s = 26.6 \text{ g}$$

$$G_s = 2.68$$

$$\gamma_w = 1.0 \text{ g/cc}$$

จากสมการ 1.5, $e = V_v / V_s$

แทนค่า $e = 5.9/9.9$

หาค่า

$$e = 0.60$$

Ans.

e, n, S, γ และ γ_d

กำหนดให้

$$W_w = 4.3 \text{ g}$$

$$V_w = 4.3 \text{ cc}$$

$$V_s = 9.9 \text{ cc}$$

$$V_a = 1.6 \text{ cc}$$

$$V = 15.8 \text{ cc}$$

$$V_v = 5.9 \text{ cc}$$

$$W = 30.9 \text{ g}$$

$$W_s = 26.6 \text{ g}$$

$$G_s = 2.68$$

$$\gamma_w = 1.0 \text{ g/cc}$$

จากสมการ 1.6, $n = V_v / V$

แทนค่า $n = 5.9/15.8$

หาค่า

$$n = 0.37$$

Ans.

e, n, S, γ และ γ_d

กำหนดให้

$$W_w = 4.3 \text{ g}$$

$$V_w = 4.3 \text{ cc}$$

$$V_s = 9.9 \text{ cc}$$

$$V_a = 1.6 \text{ cc}$$

$$V = 15.8 \text{ cc}$$

$$V_v = 5.9 \text{ cc}$$

$$W = 30.9 \text{ g}$$

$$W_s = 26.6 \text{ g}$$

$$G_s = 2.68$$

$$\gamma_w = 1.0 \text{ g/cc}$$

$$\text{จากสมการ 1.7, } S = (V_w/V_v) \times 100$$

$$\text{แทนค่า } S = (4.3/5.9) \times 100$$

หาค่า

$$S = 72.9 \%$$

Ans.

e, n, S, γ และ γ_d

กำหนดให้

$$W_w = 4.3 \text{ g}$$

$$V_w = 4.3 \text{ cc}$$

$$V_s = 9.9 \text{ cc}$$

$$V_a = 1.6 \text{ cc}$$

$$V = 15.8 \text{ cc}$$

$$V_v = 5.9 \text{ cc}$$

$$W = 30.9 \text{ g}$$

$$W_s = 26.6 \text{ g}$$

$$G_s = 2.68$$

$$\gamma_w = 1.0 \text{ g/cc}$$

$$\text{จากสมการ 1.11, } \gamma = W/V$$

$$\text{แทนค่า } \gamma = 30.9/15.8$$

หาค่า

$$\gamma = 1.9 \text{ g/cc}$$

Ans.

e, n, S, γ และ γ_d

กำหนดให้

$$W_w = 4.3 \text{ g}$$

$$V_w = 4.3 \text{ cc}$$

$$V_s = 9.9 \text{ cc}$$

$$V_a = 1.6 \text{ cc}$$

$$V = 15.8 \text{ cc}$$

$$V_v = 5.9 \text{ cc}$$

$$W = 30.9 \text{ g}$$

$$W_s = 26.6 \text{ g}$$

$$G_s = 2.68$$

$$\gamma_w = 1.0 \text{ g/cc}$$

$$\text{จากสมการ 1.11, } \gamma_d = W_s/V$$

$$\text{แทนค่า } \gamma_d = 26.6/15.8$$

หาค่า

$$\gamma_d = 1.68 \text{ g/cc}$$

Ans.

e, n, S, γ และ γ_d

กำหนดให้

$$W_w = 4.3 \text{ g}$$

$$V_w = 4.3 \text{ cc}$$

$$V_s = 9.9 \text{ cc}$$

$$V_a = 1.6 \text{ cc}$$

$$V = 15.8 \text{ cc}$$

$$V_v = 5.9 \text{ cc}$$

$$W = 30.9 \text{ g}$$

$$W_s = 26.6 \text{ g}$$

$$G_s = 2.68$$

$$\gamma_w = 1.0 \text{ g/cc}$$

$$e = 0.60$$

$$n = 0.37$$

$$S = 72.9 \%$$

$$\gamma = 1.96 \text{ g/cc}$$

หาค่า

$$\gamma_d = 1.68 \text{ g/cc}$$

Ans.

e, n, S, γ และ γ_d

ตัวอย่างที่ 1.5

The weight of moist soil sample which compacted into a mold that has a volume of 1/30 cu.ft. is 4.1 lb. If the moisture content of this soil is 21.0 % and the specific gravity is 2.67 Determine the value of n , e , S and γ_{sat}

ตัวอย่างดินชื้น ถูกบดอัดลงในกระบอกตัวอย่างซึ่งมีปริมาตร 1/30 ลบ.ฟุต จนเต็ม จากนั้นนำไปชั่งได้น้ำหนักดินเท่ากับ 4.1 ปอนด์ ถ้าปริมาณความชื้นของดินเท่ากับ 21.0 % และค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินเท่ากับ 2.67 จงหาค่า n , e , S และ γ_{sat}

ตัวอย่างที่ 1.5

ตัวอย่างดินชื้น ถูกบดอัดลงในกระบอกตัวอย่างซึ่งมีปริมาตร 1/30 ลบ.ฟุต จนเต็ม จากนั้นนำไปชั่งได้น้ำหนักดินเท่ากับ 4.1 ปอนด์ ถ้าปริมาณความชื้นของดินเท่ากับ 21.0 % และค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินเท่ากับ 2.67 จงหาค่า n , e , S และ γ_{sat}

วิธีทำ

$$V = 1/30 \text{ cu.ft}, W = 4.1 \text{ lb}, m = 21.0 \%,$$

$$G_s = 2.67, \gamma_w = 62.4 \text{ lb/cu.ft}$$

กำหนดให้

$$V = 1/30 \text{ cu.ft}$$

$$W = 4.1 \text{ lb}$$

$$m = 21.0 \%$$

$$G_s = 2.67$$

$$\gamma_w = 62.4 \text{ lb/cu.ft}$$

หาค่า

$$n, e, S \text{ และ } \gamma_{\text{sat}}$$

จากสมการ 1.11 และ 1.12 คือ $\gamma = W/V$ และ $\gamma_d = W_s/V$ แทนค่าลงในสมการที่ 1.21 จะได้

$$W_s = W/(1 + m)$$

$$\text{แทนค่า } W_s = 4.1/(1 + 0.21)$$

$$W_s = 3.39 \text{ lb}$$

กำหนดให้

$$V = 1/30 \text{ cu.ft}$$

$$W = 4.1 \text{ lb}$$

$$m = 21.0 \%$$

$$G_s = 2.67$$

$$\gamma_w = 62.4 \text{ lb/cu.ft}$$

หาค่า

$$n, e, S \text{ และ } \gamma_{\text{sat}}$$

และจากสมการ 1.10, $m = (W_w/W_s) \times 100$

$$\text{แทนค่า } 21.0 = (W_w/3.39) \times 100$$

$$W_w = 0.71 \text{ lb}$$

กำหนดให้

$$V = 1/30 \text{ cu.ft}$$

$$W = 4.1 \text{ ls}$$

$$m = 21.0 \%$$

$$G_s = 2.67$$

$$\gamma_w = 62.4 \text{ lb/cu.ft}$$

หาค่า

$$n, e, S \text{ และ } \gamma_{\text{sat}}$$

$$W_s = 3.39 \text{ lb} \quad W_w = 0.71 \text{ lb}$$

$$\text{จากสมการ 1.14, } G_s = \gamma_s / \gamma_w$$

$$\text{และจากสมการ 1.13, } \gamma_s = W_s / V_s$$

$$\text{จะได้ } G_s = W_s / (V_s \cdot \gamma_w)$$

$$\text{แทนค่า } 2.67 = 3.39 / (V_s \times 62.4)$$

$$V_s = 0.02035 \text{ ft}^3$$

กำหนดให้

$$V = 1/30 \text{ cu.ft}$$

$$W = 4.1 \text{ ls}$$

$$m = 21.0 \%$$

$$G_s = 2.67$$

$$\gamma_w = 62.4 \text{ lb/cu.ft}$$

หาค่า

$$n, e, S \text{ และ } \gamma_{\text{sat}}$$

$$W_s = 3.39 \text{ lb} \quad W_w = 0.71 \text{ lb} \quad V_s = 0.02035 \text{ ft}^3$$

$$\text{จาก } \gamma_w = W_w / V_w$$

$$\text{แทนค่า } 62.4 = 0.71 / V_w$$

$$V_w = 0.01138 \text{ ft}^3$$

กำหนดให้

$$V = 1/30 \text{ cu.ft}$$

$$W = 4.1 \text{ ls}$$

$$m = 21.0 \%$$

$$G_s = 2.67$$

$$\gamma_w = 62.4 \text{ lb/cu.ft}$$

หาค่า

$$n, e, S \text{ และ } \gamma_{\text{sat}}$$

$$W_s = 3.39 \text{ lb} \quad W_w = 0.71 \text{ lb} \quad V_s = 0.02035 \text{ ft}^3 \quad V_w = 0.01138 \text{ ft}^3$$

$$\text{จากสมการ 1.1, } V = V_s + V_w + V_a$$

$$\text{แทนค่า } 1/30 = 0.02035 + 0.01138 + V_a$$

$$V_a = 0.0016 \text{ ft}^3$$

กำหนดให้

$$V = 1/30 \text{ cu.ft}$$

$$W = 4.1 \text{ ls}$$

$$m = 21.0 \%$$

$$G_s = 2.67$$

$$\gamma_w = 62.4 \text{ lb/cu.ft}$$

หาค่า

$$n, e, S \text{ และ } \gamma_{\text{sat}}$$

$$W_s = 3.39 \text{ lb} \quad W_w = 0.71 \text{ lb} \quad V_s = 0.02035 \text{ ft}^3 \quad V_w = 0.01138 \text{ ft}^3$$

$$V_a = 0.0016 \text{ ft}^3$$

$$\text{จากสมการ 1.2, } V_v = V_w + V_a$$

$$\text{แทนค่า } V_v = 0.01138 + 0.0016$$

$$V_v = 0.01298 \text{ ft}^3$$

กำหนดให้

$$V = 1/30 \text{ cu.ft}$$

$$W = 4.1 \text{ ls}$$

$$m = 21.0 \%$$

$$G_s = 2.67$$

$$\gamma_w = 62.4 \text{ lb/cu.ft}$$

หาค่า

$$n, e, S \text{ และ } \gamma_{\text{sat}}$$

$$W_s = 3.39 \text{ lb} \quad W_w = 0.71 \text{ lb} \quad V_s = 0.02035 \text{ ft}^3 \quad V_w = 0.01138 \text{ ft}^3$$

$$V_a = 0.0016 \text{ ft}^3 \quad V_v = 0.01298 \text{ ft}^3$$

$$\text{จากสมการ 1.6, } n = V_v / V$$

$$\text{แทนค่า } n = 0.01298 / (1/30)$$

$$n = 0.39$$

Ans.

กำหนดให้

$$V = 1/30 \text{ cu.ft}$$

$$W = 4.1 \text{ ls}$$

$$m = 21.0 \%$$

$$G_s = 2.67$$

$$\gamma_w = 62.4 \text{ lb/cu.ft}$$

หาค่า

$$n, e, S \text{ และ } \gamma_{\text{sat}}$$

$$W_s = 3.39 \text{ lb} \quad W_w = 0.71 \text{ lb} \quad V_s = 0.02035 \text{ ft}^3 \quad V_w = 0.01138 \text{ ft}^3$$

$$V_a = 0.0016 \text{ ft}^3 \quad V_v = 0.01298 \text{ ft}^3$$

$$\text{จากสมการ 1.5, } e = V_v / V_s$$

$$\text{แทนค่า } e = 0.01298 / 0.02035$$

$$e = 0.64$$

Ans.

กำหนดให้

$$V = 1/30 \text{ cu.ft}$$

$$W = 4.1 \text{ ls}$$

$$m = 21.0 \%$$

$$G_s = 2.67$$

$$\gamma_w = 62.4 \text{ lb/cu.ft}$$

หาค่า

$$n, e, S \text{ และ } \gamma_{\text{sat}}$$

$$W_s = 3.39 \text{ lb} \quad W_w = 0.71 \text{ lb} \quad V_s = 0.02035 \text{ ft}^3 \quad V_w = 0.01138 \text{ ft}^3$$

$$V_a = 0.0016 \text{ ft}^3 \quad V_v = 0.01298 \text{ ft}^3$$

$$\text{จากสมการ 1.7, } S = (V_w/V_v) \times 100$$

$$\text{แทนค่า } S = (0.01138/0.01298) \times 100$$

$$S = 87.7 \%$$

Ans.

กำหนดให้

$$V = 1/30 \text{ cu.ft}$$

$$W = 4.1 \text{ ls}$$

$$m = 21.0 \%$$

$$G_s = 2.67$$

$$\gamma_w = 62.4 \text{ lb/cu.ft}$$

หาค่า

$$n, e, S \text{ และ } \gamma_{\text{sat}}$$

$$W_s = 3.39 \text{ lb} \quad W_w = 0.71 \text{ lb} \quad V_s = 0.02035 \text{ ft}^3 \quad V_w = 0.01138 \text{ ft}^3$$

$$V_a = 0.0016 \text{ ft}^3 \quad V_v = 0.01298 \text{ ft}^3$$

$$\text{จากสมการ 1.11, } \gamma_{\text{sat}} = W/V \text{ เมื่อ } V_a = 0$$

$$\text{ดังนั้น } \gamma_{\text{sat}} = (W_s + V_v \cdot \gamma_w) / V$$

$$\text{แทนค่า } \gamma_{\text{sat}} = (3.39 + 0.01298 \times 62.4) / (1/30)$$

$$\gamma_{\text{sat}} = 126.0 \text{ lb/ft}^3$$

Ans.

กำหนดให้

$$V = 1/30 \text{ cu.ft}$$

$$W = 4.1 \text{ ls}$$

$$m = 21.0 \%$$

$$G_s = 2.67$$

$$\gamma_w = 62.4 \text{ lb/cu.ft}$$

หาค่า

$$n, e, S \text{ และ } \gamma_{\text{sat}}$$

$$W_s = 3.39 \text{ lb} \quad W_w = 0.71 \text{ lb} \quad V_s = 0.02035 \text{ ft}^3 \quad V_w = 0.01138 \text{ ft}^3$$

$$V_a = 0.0016 \text{ ft}^3 \quad V_v = 0.01298 \text{ ft}^3$$

$$n = 0.39$$

$$e = 0.64$$

$$S = 87.7 \%$$

$$\gamma_{\text{sat}} = 126.0 \text{ lb/ft}^3$$

Ans.

ตัวอย่างที่ 1.6

From the compaction test, the soil sample has a density of 18.6 kN/cu.m and has a moisture content of 30.0 % If the specific gravity of this soil is 2.7 Determine the value of e and S of this soil.

จากการทดสอบการบดอัด พบว่าดินตัวอย่างมีความหนาแน่นรวมเท่ากับ 18.6 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร มีปริมาณความชื้น 30.0 เปอร์เซ็นต์ และค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินเท่ากับ 2.7 จงหาค่า e และ S

ตัวอย่างที่ 1.6

จากการทดสอบการบดอัด พบว่าดินตัวอย่างมีความหนาแน่นรวมเท่ากับ 18.6 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร มีปริมาณความชื้น 30.0 เปอร์เซ็นต์ และค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินเท่ากับ 2.7 จงหาค่า e และ S

วิธีทำ

$$m = 30.0 \%, \quad \gamma = 18.6 \text{ kN/m}^3, \quad G_s = 2.7, \quad \gamma_w = 9.81 \text{ kN/m}^3$$

กำหนดให้

$$m = 30.0 \%$$

$$\gamma = 18.6 \text{ kN/m}^3$$

$$G_s = 2.7$$

$$\gamma_w = 9.81 \text{ kN/m}^3$$

$\gamma = 18.6 \text{ kN/m}^3$ หมายความว่า ถ้าดินก้อนนี้มีปริมาตร 1 ลบ.เมตร จะหนัก 18.6 kN

ดังนั้น $V = 1.0 \text{ m}^3$ และ $W = 18.6 \text{ kN}$

หาค่า

e และ S

กำหนดให้

$$m = 30.0 \%$$

$$\gamma = 18.6 \text{ kN/m}^3$$

$$G_s = 2.7$$

$$\gamma_w = 9.81 \text{ kN/m}^3$$

หาค่า

e และ S

$$V = 1.0 \text{ m}^3 \quad W = 18.6 \text{ kN}$$

จากสมการ 1.4, $W = W_s + W_w$

แทนค่า $18.6 = W_s + W_w$

และจากสมการ 1.10, $m = (W_w / W_s) \times 100$

แทนค่า $30.0 = (W_w / W_s) \times 100$

จะได้ $W_s = 14.3 \text{ kN}$

$$W_w = 4.3 \text{ kN}$$

กำหนดให้

$$m = 30.0 \%$$

$$\gamma = 18.6 \text{ kN/m}^3$$

$$G_s = 2.7$$

$$\gamma_w = 9.81 \text{ kN/m}^3$$

หาค่า

e และ S

$$V = 1.0 \text{ m}^3 \quad W = 18.6 \text{ kN} \quad W_s = 14.3 \text{ kN} \quad W_w = 4.3 \text{ kN}$$

จากสมการ 1.14, $G_s = \gamma_s / \gamma_w$

และจากสมการ 1.13, $\gamma_s = W_s / V_s$

จะได้ $G_s = W_s / (V_s \cdot \gamma_w)$

แทนค่า $2.7 = 14.3 / (V_s \times 9.81)$

$$V_s = 0.54 \text{ m}^3$$

กำหนดให้

$$V = 1.0 \text{ m}^3 \quad W = 18.6 \text{ kN} \quad W_s = 14.3 \text{ kN} \quad W_w = 4.3 \text{ kN} \quad V_s = 0.54 \text{ m}^3$$

$$m = 30.0 \%$$

$$\gamma = 18.6 \text{ kN/m}^3$$

$$G_s = 2.7$$

$$\gamma_w = 9.81 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{จาก } \gamma_w = W_w / V_w$$

$$\text{แทนค่า } 9.81 = 4.3 / V_w$$

$$V_w = 0.44 \text{ m}^3$$

หาค่า

e และ S

กำหนดให้

$$V = 1.0 \text{ m}^3 \quad W = 18.6 \text{ kN} \quad W_s = 14.3 \text{ kN} \quad W_w = 4.3 \text{ kN} \quad V_s = 0.54 \text{ m}^3$$

$$V_w = 0.44 \text{ m}^3$$

$$m = 30.0 \%$$

$$\gamma = 18.6 \text{ kN/m}^3$$

$$G_s = 2.7$$

$$\gamma_w = 9.81 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{จากสมการ 1.1, } V = V_s + V_w + V_a$$

$$\text{แทนค่า } 1.0 = 0.54 + 0.44 + V_a$$

$$V_a = 0.02 \text{ m}^3$$

หาค่า

e และ S

กำหนดให้

$$m = 30.0 \%$$

$$\gamma = 18.6 \text{ kN/m}^3$$

$$G_s = 2.7$$

$$\gamma_w = 9.81 \text{ kN/m}^3$$

หาค่า

e และ S

$$V = 1.0 \text{ m}^3 \quad W = 18.6 \text{ kN} \quad W_s = 14.3 \text{ kN} \quad W_w = 4.3 \text{ kN} \quad V_s = 0.54 \text{ m}^3$$

$$V_w = 0.44 \text{ m}^3 \quad V_a = 0.02 \text{ m}^3$$

$$\text{จากสมการ 1.2, } V_v = V_w + V_a$$

$$\text{แทนค่า } V_v = 0.44 + 0.02$$

$$V_v = 0.46 \text{ m}^3$$

กำหนดให้

$$m = 30.0 \%$$

$$\gamma = 18.6 \text{ kN/m}^3$$

$$G_s = 2.7$$

$$\gamma_w = 9.81 \text{ kN/m}^3$$

หาค่า

e และ S

$$V = 1.0 \text{ m}^3 \quad W = 18.6 \text{ kN} \quad W_s = 14.3 \text{ kN} \quad W_w = 4.3 \text{ kN} \quad V_s = 0.54 \text{ m}^3$$

$$V_w = 0.44 \text{ m}^3 \quad V_a = 0.02 \text{ m}^3 \quad V_v = 0.46 \text{ m}^3$$

$$\text{จากสมการ 1.5, } e = V_v / V_s$$

$$\text{แทนค่า } e = 0.46/0.54$$

$$e = 0.85$$

Ans.

กำหนดให้

$$m = 30.0 \%$$

$$\gamma = 18.6 \text{ kN/m}^3$$

$$G_s = 2.7$$

$$\gamma_w = 9.81 \text{ kN/m}^3$$

$$V = 1.0 \text{ m}^3 \quad W = 18.6 \text{ kN} \quad W_s = 14.3 \text{ kN} \quad W_w = 4.3 \text{ kN} \quad V_s = 0.54 \text{ m}^3$$

$$V_w = 0.44 \text{ m}^3 \quad V_a = 0.02 \text{ m}^3 \quad V_v = 0.46 \text{ m}^3$$

$$\text{จากสมการ 1.7, } S = (V_w/V_v) \times 100$$

$$\text{แทนค่า } S = (0.44/0.46) \times 100$$

หาค่า

e และ S

$$S = 95.6 \%$$

Ans.

กำหนดให้

$$m = 30.0 \%$$

$$\gamma = 18.6 \text{ kN/m}^3$$

$$G_s = 2.7$$

$$\gamma_w = 9.81 \text{ kN/m}^3$$

$$V = 1.0 \text{ m}^3 \quad W = 18.6 \text{ kN} \quad W_s = 14.3 \text{ kN} \quad W_w = 4.3 \text{ kN} \quad V_s = 0.54 \text{ m}^3$$

$$V_w = 0.44 \text{ m}^3 \quad V_a = 0.02 \text{ m}^3 \quad V_v = 0.46 \text{ m}^3$$

$$e = 0.85$$

$$S = 95.6 \%$$

หาค่า

e และ S

Ans.

การวิเคราะห์ห้ขนาดของเม็ดดิน

การวิเคราะห์ห้ขนาดเม็ดดินสามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ

Sieve analysis → สำหรับเม็ดดิน $> 0.075 \text{ mm}$

Hydrometer analysis → สำหรับเม็ดดิน $< 0.075 \text{ mm}$

Sieve analysis

เป็นการทดสอบหาขนาดการกระจายของเม็ดดินโดยร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน (U.S. standard sieve) ขนาดต่าง ๆ

ตะแกรงจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20.32 เซ็นติเมตร มีขอบสูง ทำด้วยทองเหลือง ช่องของรูเปิด จะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส

ตะแกรงที่มีรูเปิด (Sieve opening) ขนาดใหญ่จะเรียกขนาดของตะแกรงตามขนาดรูเปิด เช่น ตะแกรงขนาด 1 นิ้ว

ตะแกรงที่มีรูเปิดขนาดเล็กจะเรียกขนาดของตะแกรงเป็นเบอร์ เช่น ตะแกรงเบอร์ 4 (sieve #4 = 4 opening/inch)

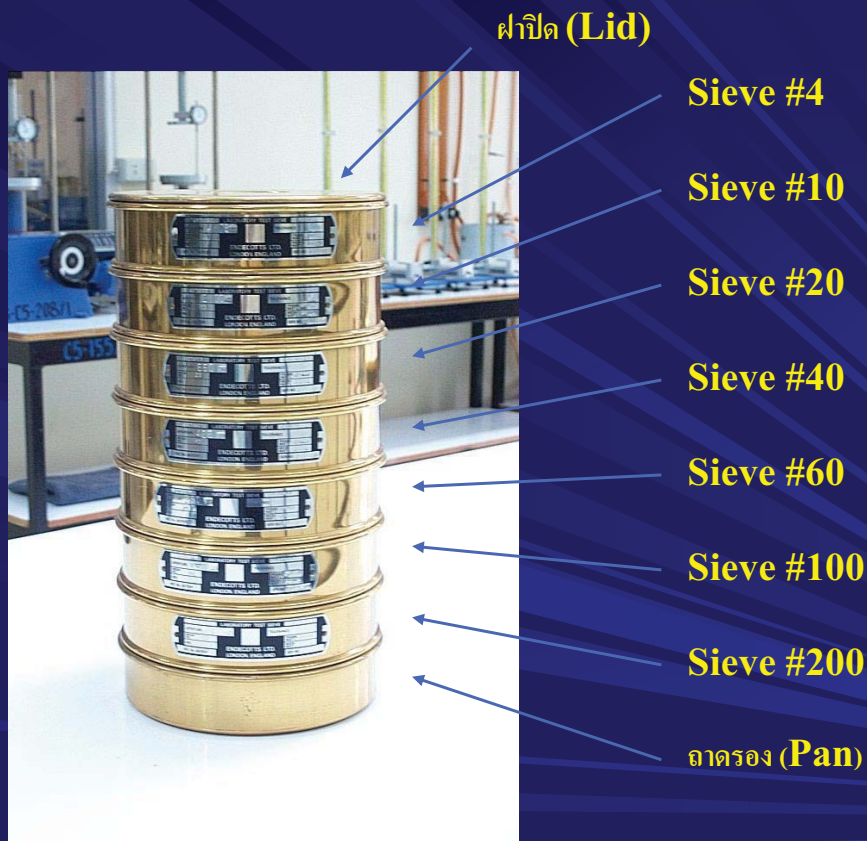
Sizes of sieves

Set #1

| Sieve | Size, mm |
|----------|----------|
| 3 inch | 75.0 |
| 2 inch | 50.0 |
| 1 ½ inch | 37.5 |
| 1 inch | 25.0 |
| ¾ inch | 19.0 |
| 3/8 inch | 9.5 |

Set #2

| Sieve no. | Size, mm |
|-----------|----------|
| 4 | 4.75 |
| 10 | 2.00 |
| 20 | 0.85 |
| 40 | 0.425 |
| 60 | 0.250 |
| 100 | 0.150 |
| 200 | 0.075 |

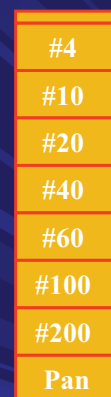


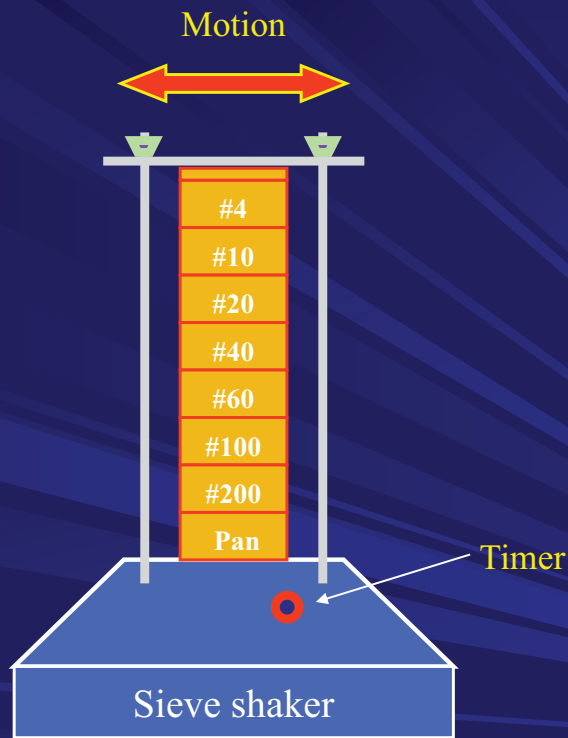
หลังจากทำความสะอาด
ตะแกรงและชั่งน้ำหนักแต่ละอัน
แล้ว นำตะแกรงเหล่านั้นมาวาง
ซ้อนกันโดยเรียงจากขนาดที่มีรู
เปิดเล็กไปหาใหญ่

จากนั้นเทตัวอย่างดินลงไป
ในชุดตะแกรง

ปิดฝา แล้วนำไปเข้าเครื่อง
สั่นตะแกรง (Sieve shaker machine)

ตัวอย่างดิน





หลังจากสั่นเรียบร้อยแล้ว นำชุดตะแกรงออกจากเครื่องสั่น แล้วชั่งน้ำหนักของแต่ละตะแกรงที่มีดินค้างอยู่

นำน้ำหนักดินที่ค้างตะแกรงไปคำนวณหา

เปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรง (*Percent passing*)

บางครั้งตัวอย่างดินมีขนาดเม็ดดินที่เล็กกว่า 0.075 mm อยู่มาก

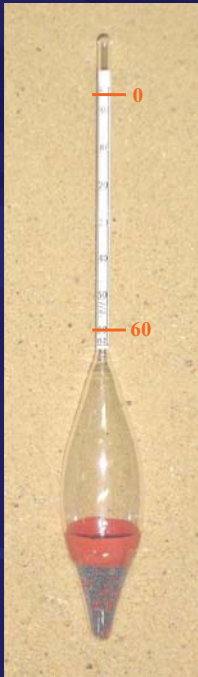


Wet sieve analysis

Wet sieve analysis

ก่อนที่จะนำดินตัวอย่างใส่ลงไปบนตะแกรง ตัวอย่างดินจะถูกนำมาล้างผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ก่อน จากนั้นนำตัวอย่างดินที่ค้างตะแกรงเบอร์ 200 เข้าตู้อบจนแห้งแล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงต่าง ๆ ต่อไป

Hydrometer analysis



เป็นการทดลองสำหรับหาขนาดเม็ดดินที่เล็กกว่า 0.075 mm การทดลองอาศัยหลักการตกตะกอนของวัตถุซึ่งอ้างอิงกฎของสโตรค (Stokes's law) จากการทดลองจะสามารถหาค่า เปอร์เซ็นต์ละเอียดกว่า (*Percent finer*) กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดดินได้

กฎของสโตรค

“ความเร็วของวัตถุทรงกลมที่จมลงในของเหลว มีความสัมพันธ์กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของวัตถุนั้น ยกกำลังสอง”

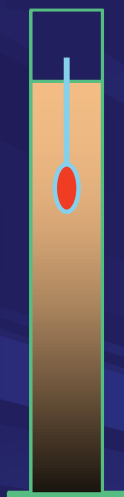


Soil + water
+ dispersing agent

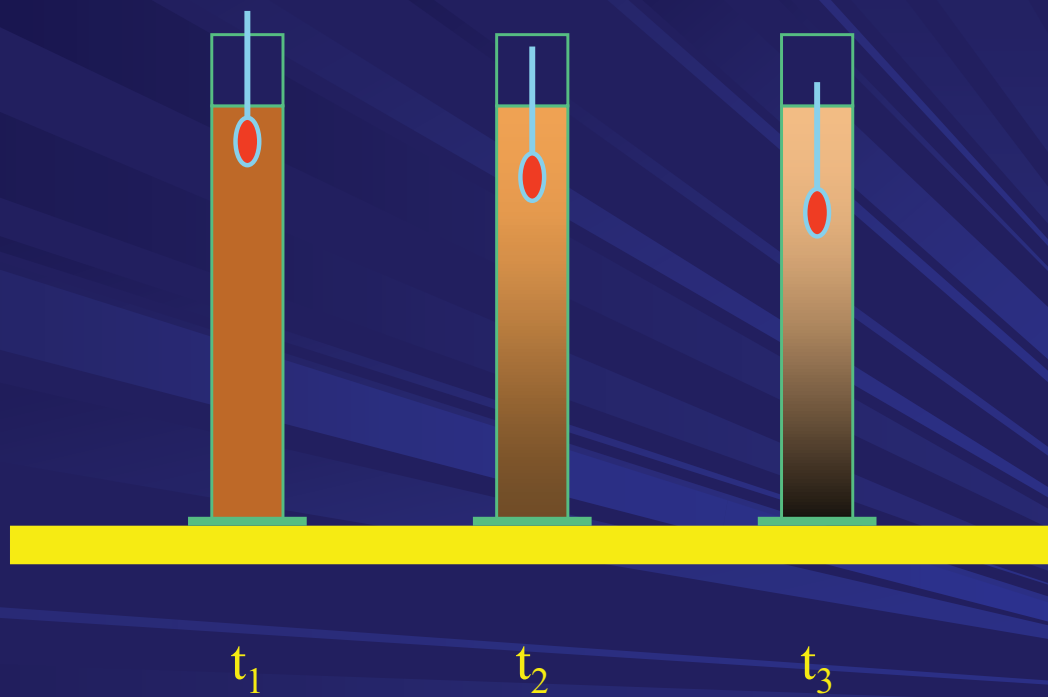
Sedimentation
cylinder 1000 cc



Hydrometer



ที่เวลา = t_3



การปรับแก้จากการทดลอง **Hydrometer analysis**

- ▲ *Specific gravity*
- ▲ *Meniscus correction*
- ▲ *Viscosity (Temperature)*
- ▲ *Dispersing agent*
- ▲ *% finer than #200 sieve*

กราฟการกระจายขนาดเม็ดดิน

จากการทดลอง :

→ **Sieve analysis**

No. of sieve (sieve opening) & % passing

→ **Hydrometer analysis**

Diameter of grain & % finer

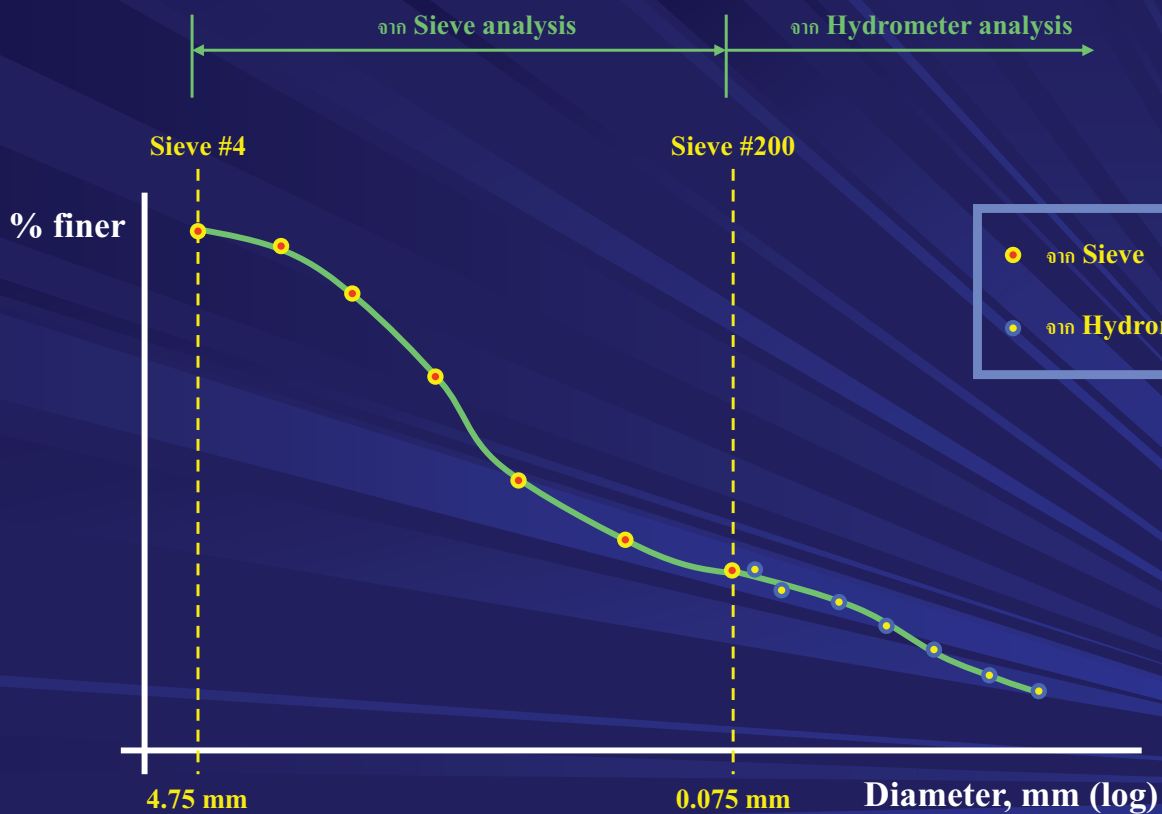
จากข้อมูลทั้งหมดนำมาพล็อตลงในตารางกึ่งล็อก

(Semi-log graph)



กราฟการกระจายขนาดเม็ดดิน

Grain size distribution curve



สำหรับดินเม็ดหยาบถ้าเม็ดดินมีขนาดเท่าหรือเกือบเท่ากัน



Uniform soil

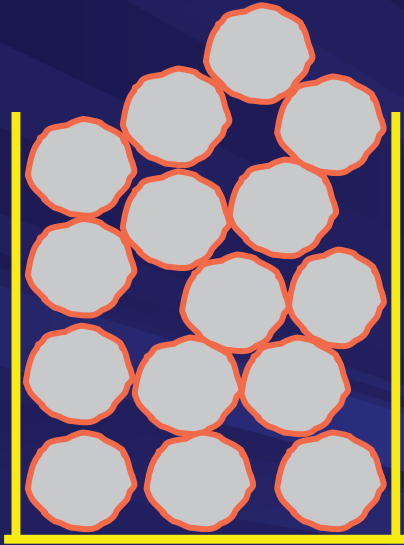
or

Poorly graded soil

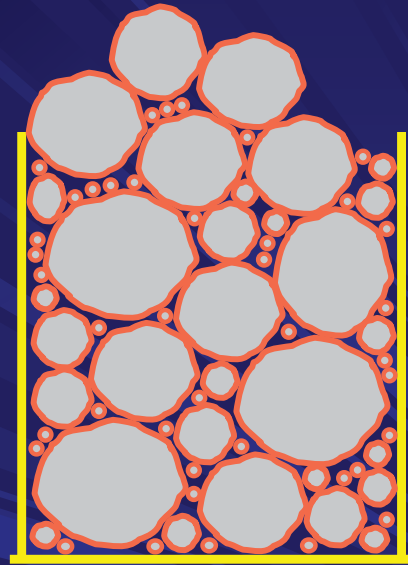
สำหรับดินเม็ดหยาบถ้าเม็ดดินมีขนาดแตกต่างกัน



Well graded soil



Uniform soil



Well graded soil



Uniform soil



Well graded soil

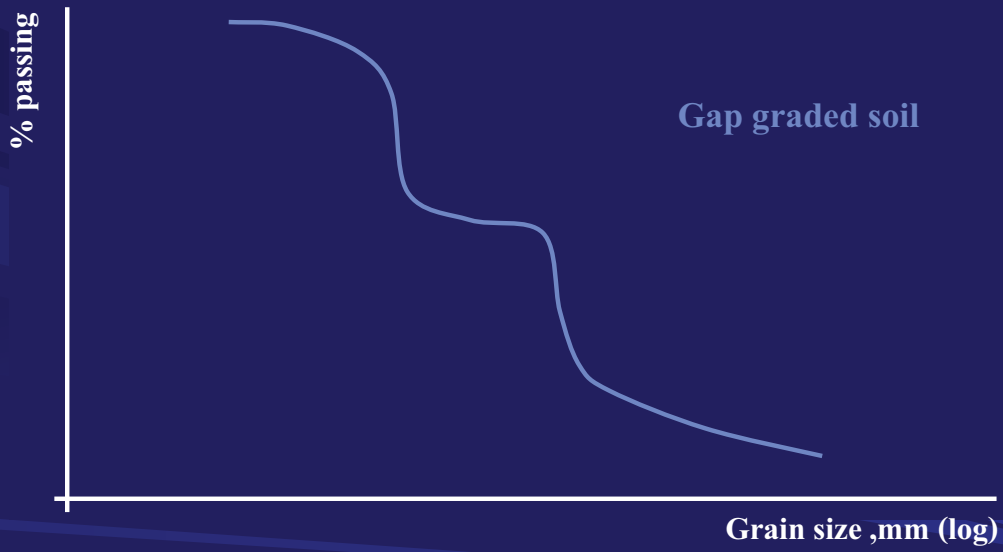
Uniform soil or Poorly graded soil

- ระบายน้ำได้ดี
- ความหนาแน่นต่ำเมื่อถูกบดอัด
- ความต้านทานแรงเฉือนต่ำ

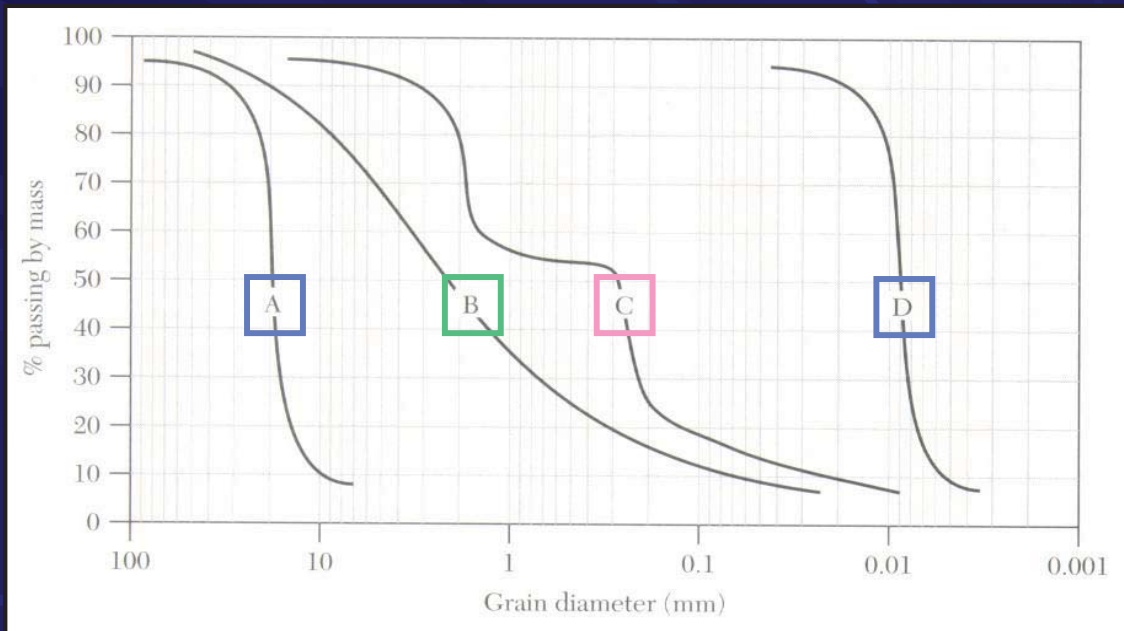
Well graded soil

- ระบายน้ำไม่ดี
- ความหนาแน่นสูงเมื่อถูกบดอัด
- ความต้านทานแรงเฉือนสูงกว่า

Grain size distribution curve



Grain size distribution curve



Uniform soil

Well grade soil

Gap grade soil

Soil Parameter

⇒ Effective size, D_{10}

⇒ Coefficient of uniformity, C_u

⇒ Coefficient of curvature, C_c

Effective size



D_{10} = grain size that corresponds to 10 % passing

Coefficient of uniformity

$$C_u = D_{60}/D_{10}$$

D_{10} = grain size that corresponds to 10 % passing

D_{60} = grain size that corresponds to 60 % passing

$C_u > 4.0 = \textit{Well graded soil}$

Coefficient of curvature

$$C_c = D_{30}^2/(D_{10} \cdot D_{60})$$

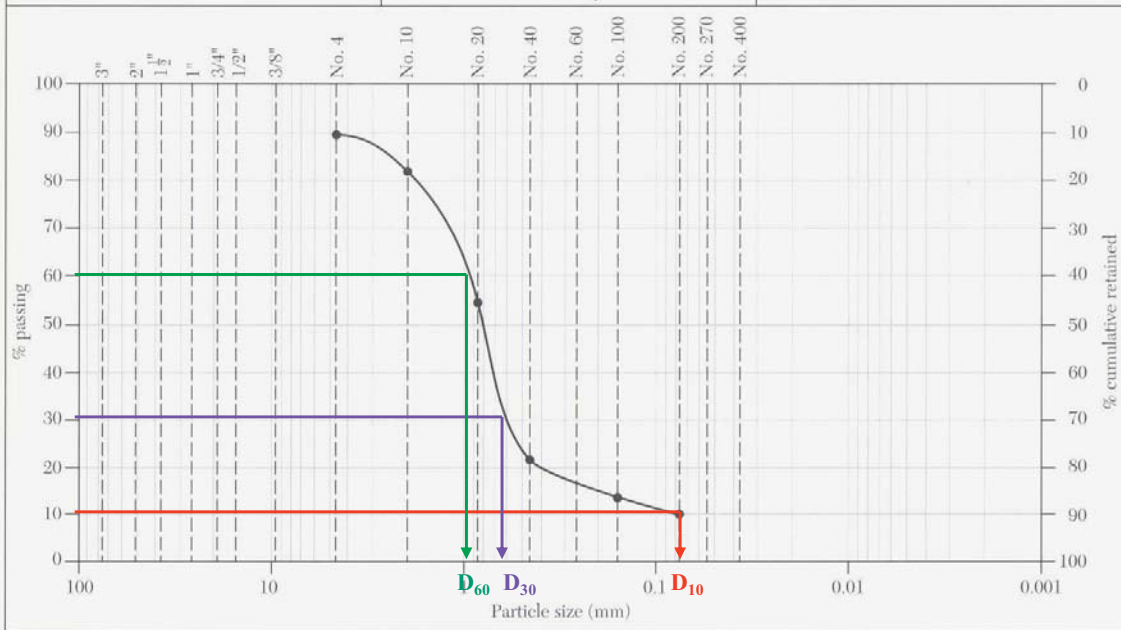
D_{10} = grain size that corresponds to 10 % passing

D_{30} = grain size that corresponds to 30 % passing

D_{60} = grain size that corresponds to 60 % passing

$C_c \text{ between } 1 - 3 = \textit{Well graded soil}$

| | | |
|-------------------|----------------|-----------------|
| Project no. _____ | Date _____ | Tested by _____ |
| Project _____ | Boring # _____ | ASTM _____ |
| Location _____ | Sample # _____ | AASHTO _____ |
| | Depth _____ | Remarks _____ |



| | | | | | | | |
|---------|---------------|-------------|-------------|-------------|-----------|------|------|
| Cobbles | Coarse gravel | Fine gravel | Coarse sand | Medium sand | Fine sand | Silt | Clay |
|---------|---------------|-------------|-------------|-------------|-----------|------|------|

การใช้งาน

Selection of fill materials

Embankment, earth dam

Subbase materials

Roads, runway

Drainage filter

Groundwater drainage

Grouting and chemical injection

Concrete materials

etc.

ตัวอย่างที่ 1.7

In grain size analysis by sieve, the dry soil weight 500 g is washed through no. 200 sieve and the soil retained on this sieve is oven-dried and has a weight of 472.5 g. Bring this soil to perform sieve analysis, and the results are given in the table

| ตะแกรงเบอร์ | ขนาดรูเปิด, mm | นน.ดินค้างตะแกรง, g |
|-------------|----------------|---------------------|
| 4 | 4.750 | 9.7 |
| 10 | 2.000 | 39.5 |
| 20 | 0.840 | 71.6 |
| 40 | 0.425 | 129.1 |
| 60 | 0.250 | 107.4 |
| 100 | 0.150 | 105.0 |
| 200 | 0.075 | 8.5 |
| Pan | | 1.3 |

Determine the percent passing and effective size of this soil

Calculate C_c and C_u and check whether the soil is well grade or uniform.

ตัวอย่างที่ 1.7

ในการทดลองการวิเคราะห์หาขนาดเม็ดดินโดยใช้ตะแกรงนำดินอบแห้งมา 500 กรัม ล้างผ่านตะแกรงเบอร์ 200 แล้วนำดินส่วนที่ค้างตะแกรงมาอบจนแห้งสนิท จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักได้ 472.5 กรัม นำดินส่วนนี้ไปร่อนโดยตะแกรงมาตรฐานเบอร์ต่างๆ ได้ผลดังนี้

| ตะแกรงเบอร์ | ขนาดรูเปิด, mm | นน.ดินค้างตะแกรง, g |
|-------------|----------------|---------------------|
| 4 | 4.750 | 9.7 |
| 10 | 2.000 | 39.5 |
| 20 | 0.840 | 71.6 |
| 40 | 0.425 | 129.1 |
| 60 | 0.250 | 107.4 |
| 100 | 0.150 | 105.0 |
| 200 | 0.075 | 8.5 |
| Pan | | 1.3 |

จงหา

ค่า % ผ่านตะแกรงต่างๆ ขนาดประสิทธิภาพ ค่า C_c
และ C_u และดินนี้เป็นดินที่มีขนาดแบบใด

วิธีทำ

น้ำหนักดินแห้งก่อนล้างผ่านตะแกรงเบอร์ 200 = 500.0 กรัม

น้ำหนักดินแห้ง(หลังล้าง) ที่ค้างตะแกรงเบอร์ 200 = 472.5 กรัม

ดังนั้นน้ำหนักดินแห้งที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เนื่องจากการล้าง

$$500.0 - 472.5 = 27.5 \text{ กรัม}$$

และน้ำหนักดินแห้งที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 = 1.3 กรัม

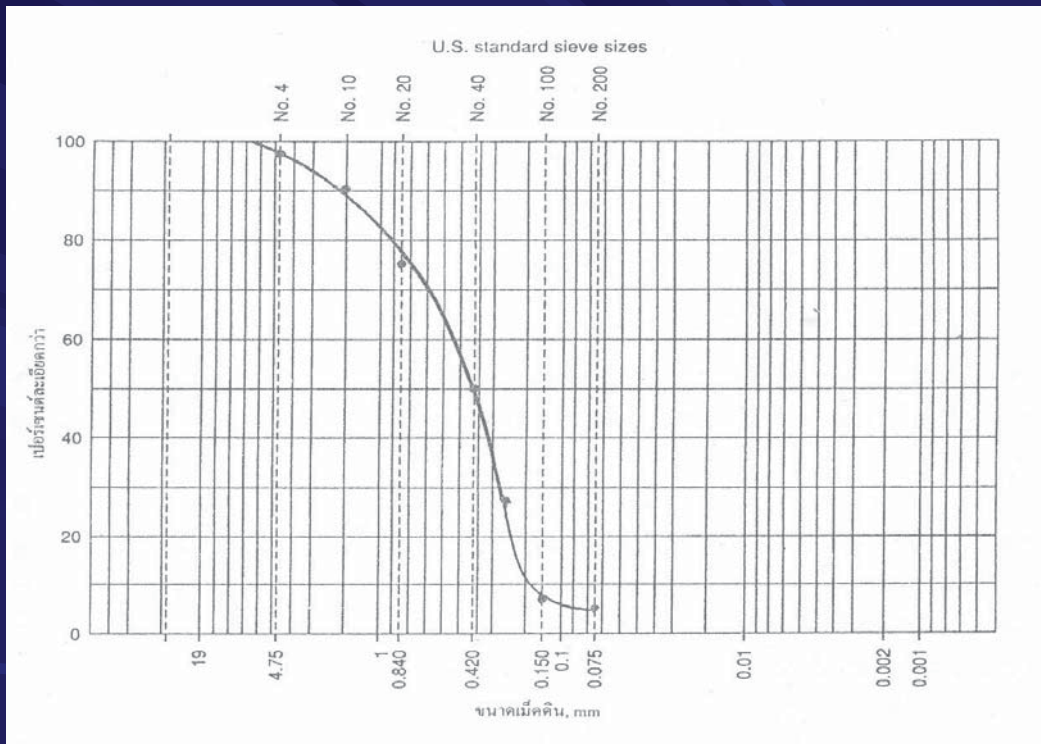
ดังนั้นน้ำหนักดินแห้งที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ทั้งหมด = $1.3 + 27.5$

$$= 28.8 \text{ กรัม}$$

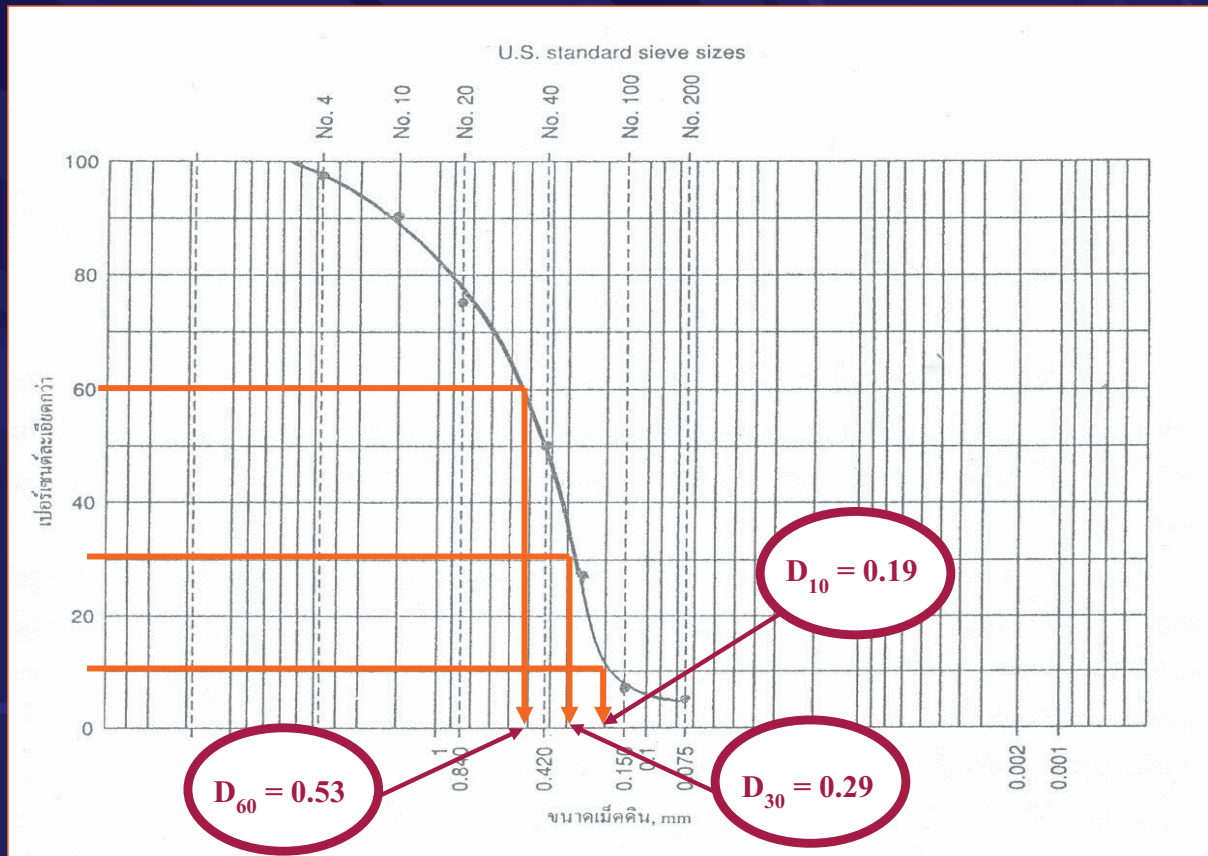
| ตะแกรงเบอร์ | ขนาดรูเปิด, mm | นน.ดินค้าง ตะแกรง, g | % ค้าง ตะแกรง | % ค้างตะแกรง สะสม | % ผ่าน ตะแกรง |
|-------------|-------------------|-------------------------|------------------|----------------------|------------------|
| 4 | 4.750 | 9.7 | 1.9 | 1.9 | 98.1 |
| 10 | 2.000 | 39.5 | 7.9 | 9.8 | 90.2 |
| 20 | 0.840 | 71.6 | 14.3 | 24.1 | 75.9 |
| 40 | 0.425 | 129.1 | 25.8 | 49.9 | 50.1 |
| 60 | 0.250 | 107.4 | 21.5 | 71.4 + 27.5 | 28.6 |
| 100 | 0.150 | 105.0 | 21.0 | 92.4 | 7.6 |
| 200 | 0.075 | 8.5 | 1.7 | 94.1 | 5.9 |
| Pan | | 28.8 | 5.8 | 99.9 | 0.1 |

% สิ้นสุดของผลรวมคือ % ค้างตะแกรงสะสม

นำ ตะแกรงเบอร์ (ขนาดรูเปิด) กับ เเปอร์เซ็นต์ผ่าน
ตะแกรง มาพล็อตลงในตารางกึ่งล็อก โดยให้
เปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรง อยู่ในแกนตั้ง



จากนั้นหาค่า D_{10} , D_{30} และ D_{60}



จากตารางกึ่งล็อก จะได้

$$D_{10} = 0.19$$

$$D_{30} = 0.29$$

$$D_{60} = 0.53$$

จากสมการ 1.28, $C_u = D_{60}/D_{10}$

แทนค่า $C_u = 0.53/0.19$

$$C_u = 2.8$$

จากสมการ 1.29, $C_c = D_{30}^2/(D_{10} \cdot D_{60})$

แทนค่า $C_c = (0.29)^2/(0.19 \times 0.53)$

$$C_c = 0.8$$

ดังนั้น ดินชนิดนี้มีค่า

$$C_u = 2.8 \text{ และ } C_c = 0.8$$

และ ถ้า

$$C_u > 4.0 = \textit{Well graded soil}$$

$$C_c \text{ between } 1 - 3 = \textit{Well graded soil}$$

ดังนั้น ดินชนิดนี้เป็น

ดินที่มีขนาดคละกันไม่ดี

(*Uniform soil หรือ Poorly graded soil*)

สรุป ดินชนิดนี้ มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$D_{10} = 0.19 \quad D_{30} = 0.29 \quad D_{60} = 0.53$$

$$C_u = 2.8 \text{ และ } C_c = 0.8$$

ดินชนิดนี้เป็น ดินที่มีขนาดคละกันไม่ดี

(Uniform soil หรือ Poorly graded soil)

Ans.

สถานะของดินเหนียว

ดินเหนียวโดยทั่วไปจะมีเม็ดขนาดเล็กกว่า **0.002 mm**

คำนิยามของดินเหนียวคือ เม็ดดินที่สามารถอยู่ในสภาพพลาสติกเมื่อถูกผสมด้วยปริมาณน้ำจำนวนหนึ่ง (Those particles which develop plasticity when mixed with a limited amount of water)

เนื่องจากเม็ดดินมีขนาดเล็กมากและประกอบด้วยแร่ดินเหนียวอีกทั้งยังมีรูปทรงเป็นแผ่นแบนยาวดังนั้นจึงมีความพยายามจะจับโมเลกุลของน้ำเข้ามารวมกับเม็ดดิน

ซึ่งทำให้ดินชนิดนี้เป็นดินที่มีความเชื่อมแน่น (Cohesive soil) และพฤติกรรมของดินนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น

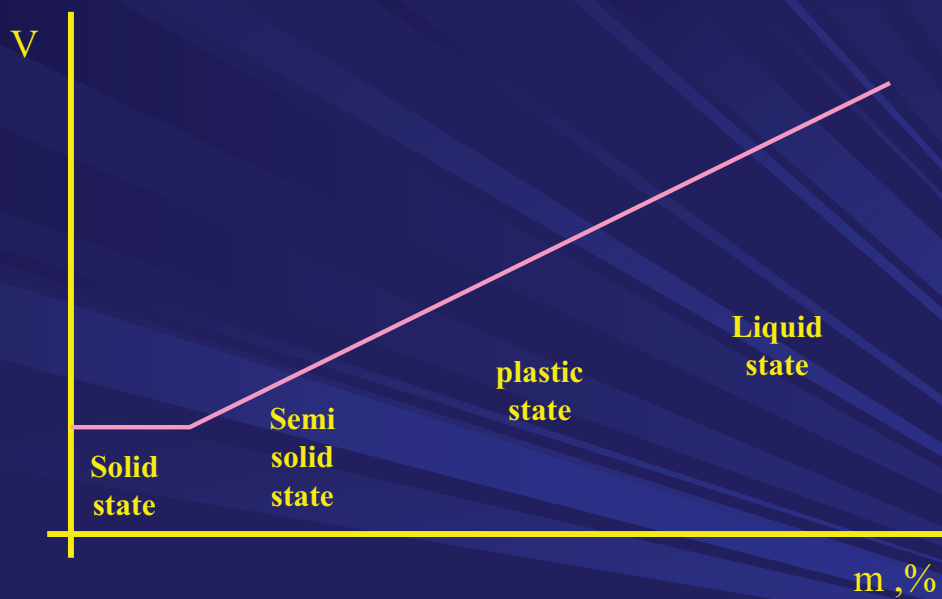
สถานะของดินที่มีความชื้นแน่นสามารถแบ่งได้เป็น 4 สถานะ คือ

○ **Liquid state** → นมข้นหวาน

○ **Plastic state** → ดินน้ำมัน

○ **Semi solid state** → ยางลบ

○ **Solid state** → Halls



พิกัดออตเทอร์เบอร์ก

ในปี ค.ศ. 1911 นักวิทยาศาสตร์ชาวสวีเดนชื่อ *Albert Atterberg* ได้ศึกษาสถานะต่าง ๆ ของดินที่มีความเชื่อมแน่นกับปริมาณความชื้น

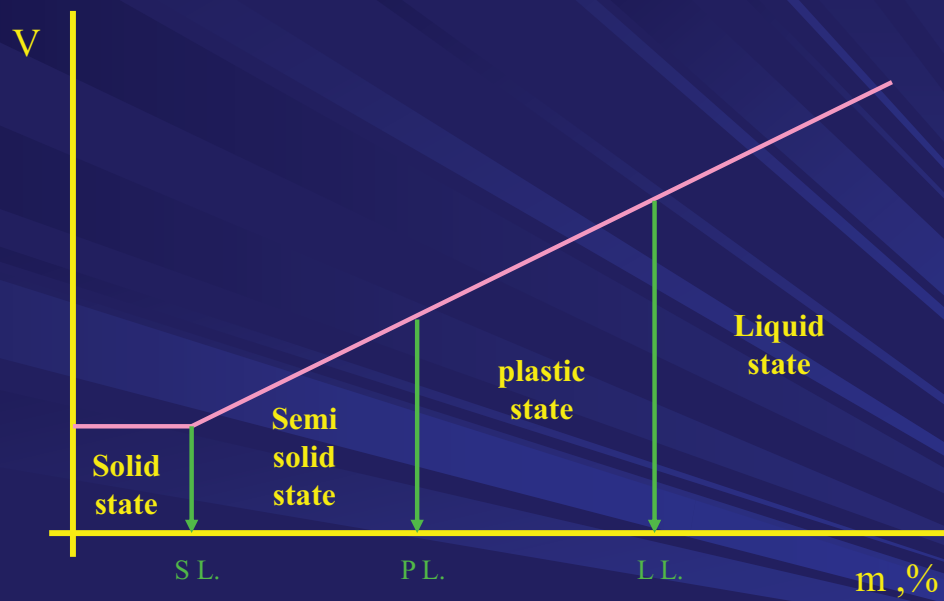
ในปี ค.ศ.1930, Karl Terzaghi และ Arthur Casagrande ได้นำผลงานของ Atterberg มาใช้กับงานทางด้านวิศวกรรม



ขอบเขตของสถานะต่าง ๆ นั้นเรียกว่า
พิกัดอัตราเบอร์ก *Atterberg limits*

Atterberg limits

- ⇒ พิกัดเหลว (Liquid Limit, LL.)
- ⇒ พิกัดพลาสติก (Plastic Limit, PL.)
- ⇒ พิกัดหดตัว (Shrinkage Limit, SL.)



Liquid Limit, LL.

คือ ค่าปริมาณความชื้นที่น้อยที่สุดที่ดินจะอยู่ในสภาพของเหลวได้





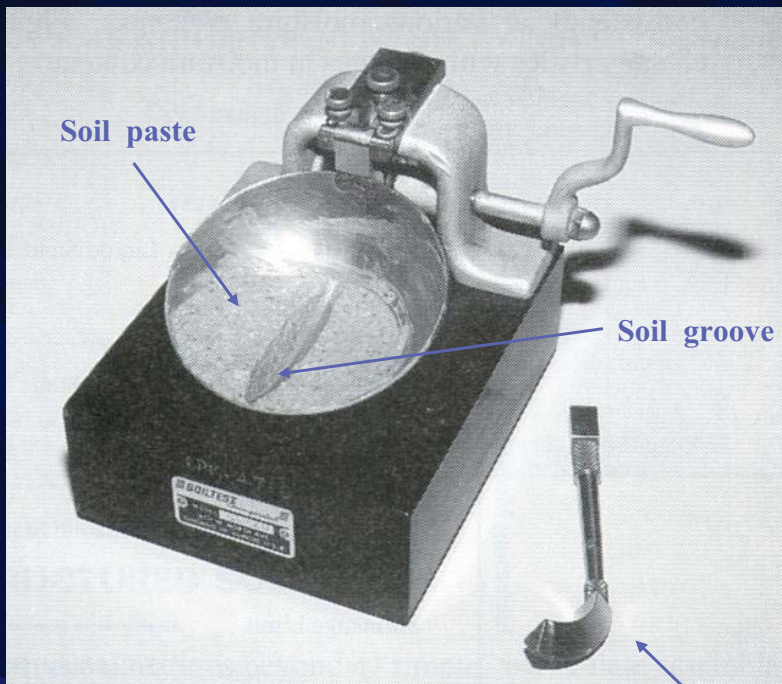
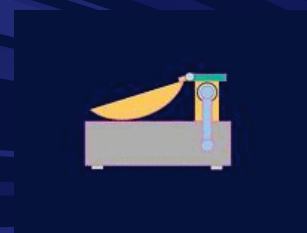
ในการทดลองหาค่าพิกัดเหลวจะใช้ดินที่มีขนาดเม็ดเล็กกว่า 0.42 mm. (no. 40 sieve)

ตัวอย่างดินจะถูกผสมกับน้ำแล้วป้ายลงบนถ้วยทองเหลืองของเครื่องมือหาค่าพิกัดเหลวนั้นดินจะถูกตัดเป็นร่องด้วยเครื่องตัดร่อง (Grooving tool)

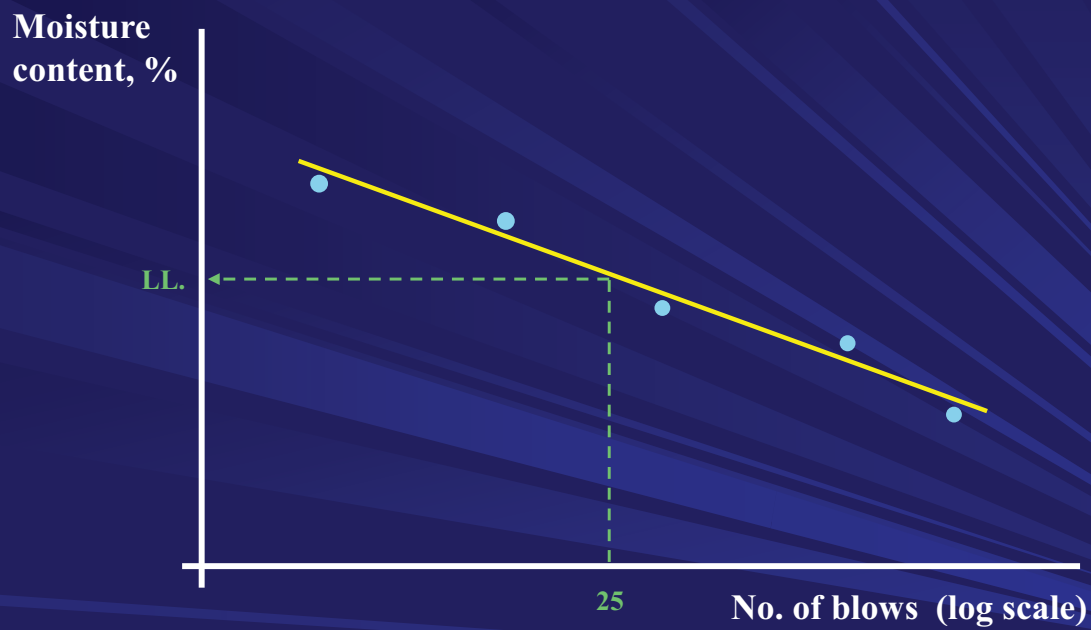
ถ้วยทองเหลืองจะถูกยกขึ้นสูง 10 mm และตกกระทากลบนบนแผ่นยางแข็ง ด้วยความเร็ว 2 รอบต่อวินาที

นับจำนวนครั้งของการเคาะจนกระทั่งร่องดินชิดกันยาว 12.7 mm

ปริมาณความชื้น (เป็นเปอร์เซ็นต์) ที่ทำให้อ่างดินชิดกัน 12.7 mm
ที่การเคาะ 25 ครั้ง คือ ค่าพิกัดเหลว



Grooving tool



One point method

Waterways Experiment Station in Vicksburg, Mississippi ได้คิดสมการจากการทดลองเพื่อหาค่า Liquid limit โดยการทดลองเพียงครั้งเดียว

$$LL = m (N/25)^{\tan \beta}$$

N = จำนวนครั้งที่เคาะถ้วยทองเหลืองให้ดินชิดกัน 0.5 นิ้ว (20 – 30 ครั้ง)

m = ปริมาณความชื้นของดินที่ถูกเคาะ

$\tan \beta$ มีค่าประมาณ 0.121

Plastic Limit, PL.

คือค่าปริมาณความชื้นที่น้อยที่สุดที่ดินจะอยู่ในสภาพพลาสติกได้

ในการทดลองหาค่าพิกัดพลาสติกจะใช้ดินที่มีขนาดเม็ดเล็กกว่า 0.42 mm (no. 40 sieve)

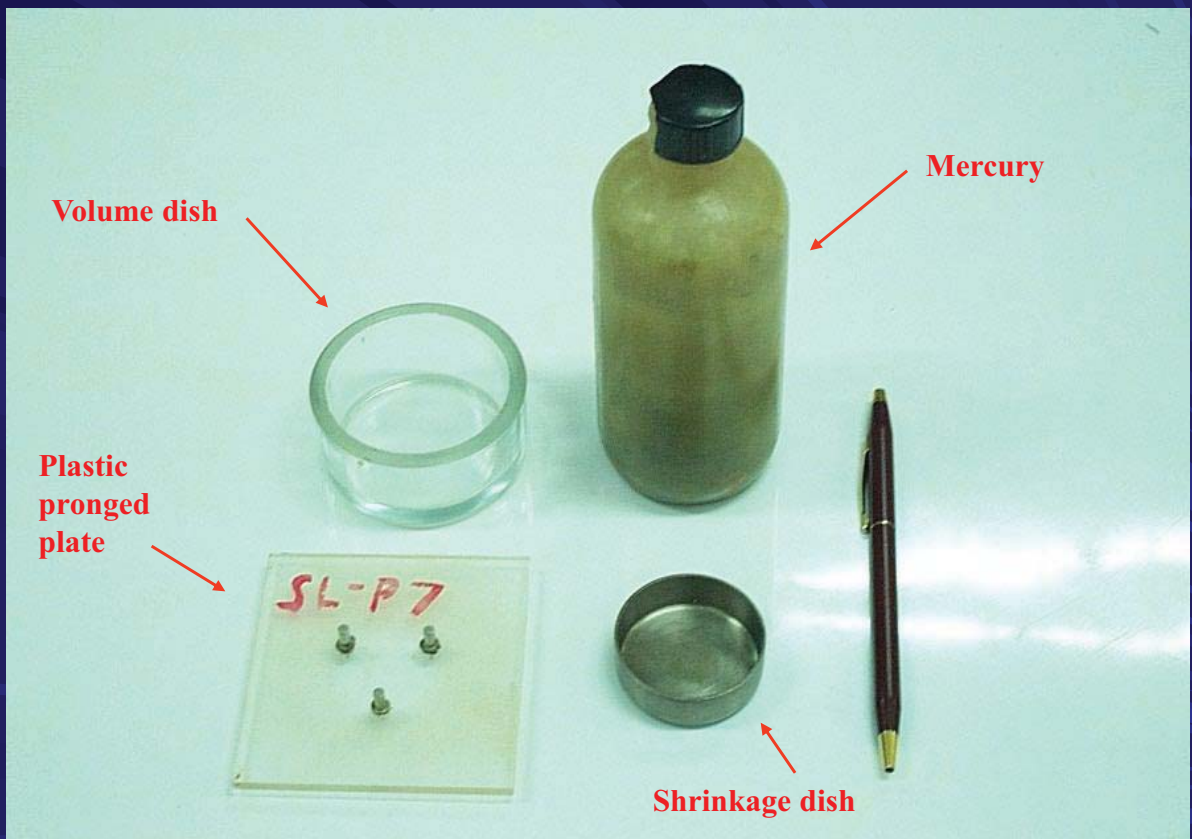
ตัวอย่างดินจะถูกผสมกับน้ำแล้วปั้นเป็นเส้นยาวมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.2 mm

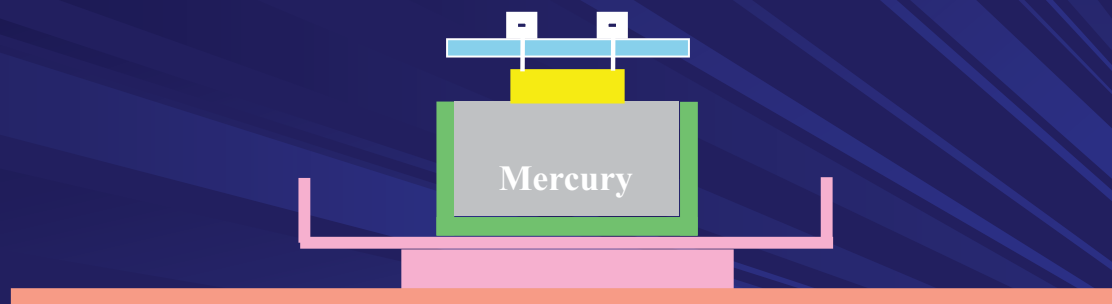
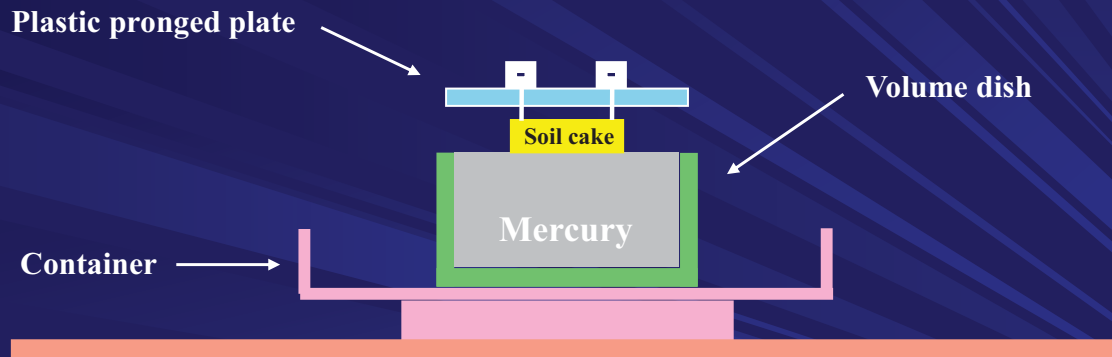
ปริมาณความชื้นที่ดินเริ่มแตกจากกัน (Just crumbled)
คือค่า พิกัดพลาสติก

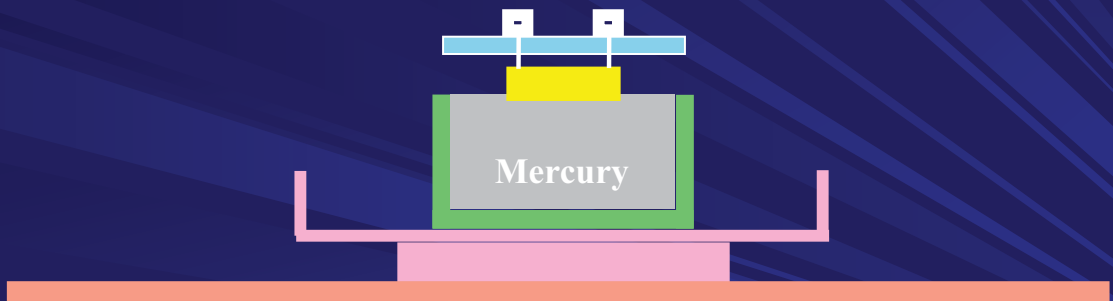
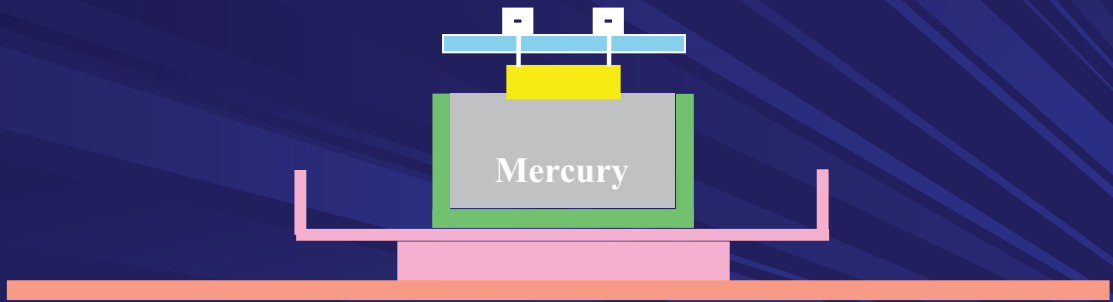
Shrinkage Limit, SL.

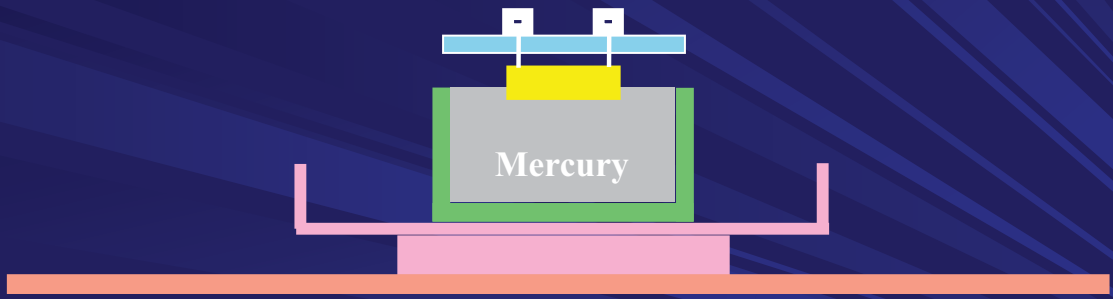
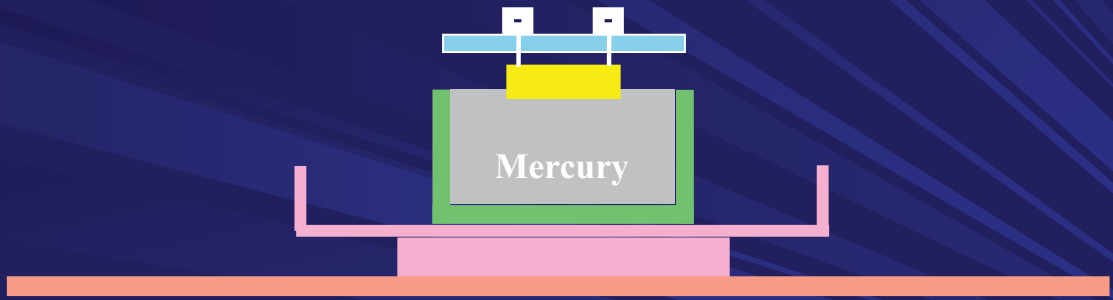
คือค่าปริมาณความชื้นที่มากที่สุดที่ดินจะอยู่ในสภาพของแข็งได้

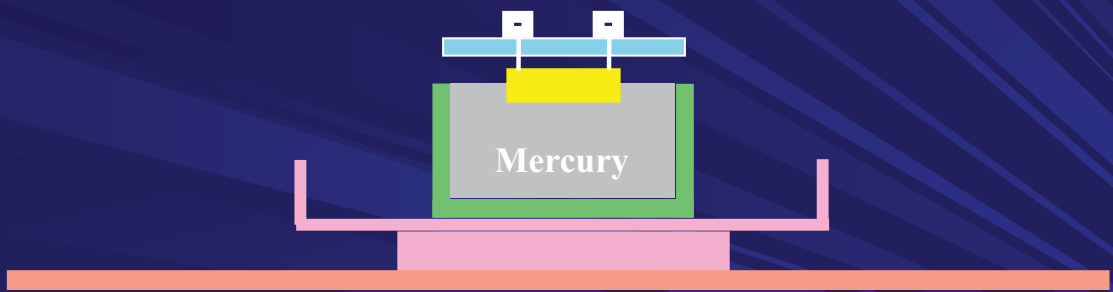
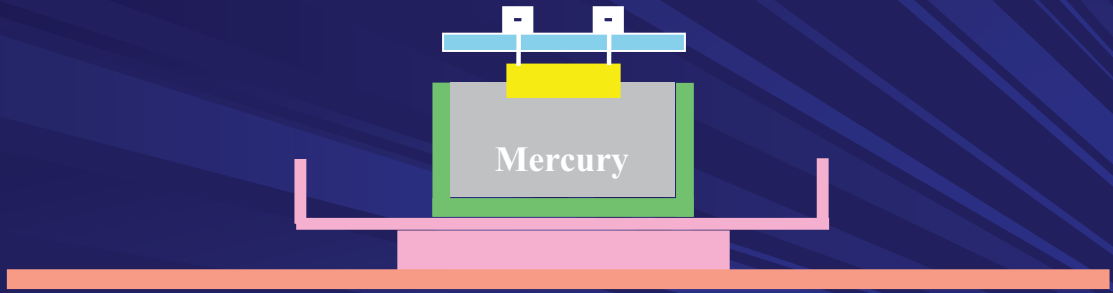
ในการทดลองหาค่าพิกัณฑ์จะใช้ดินที่มีขนาดเม็ดเล็ก
กว่า 0.42 mm (no. 40 sieve)

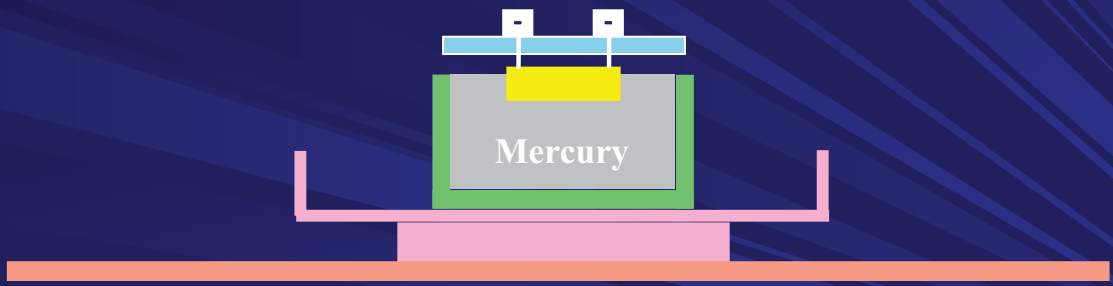
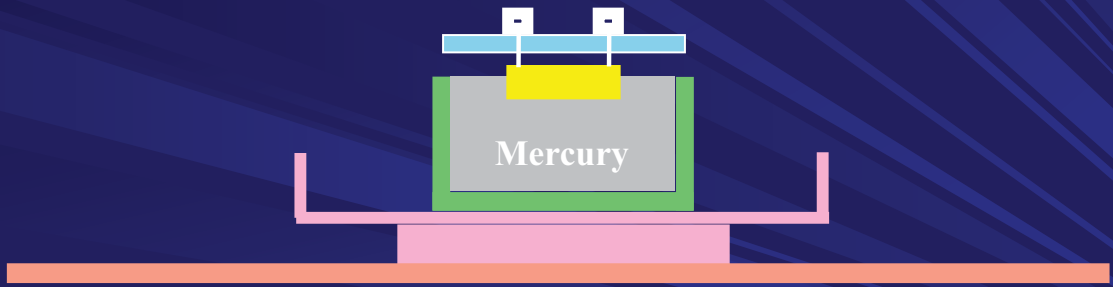


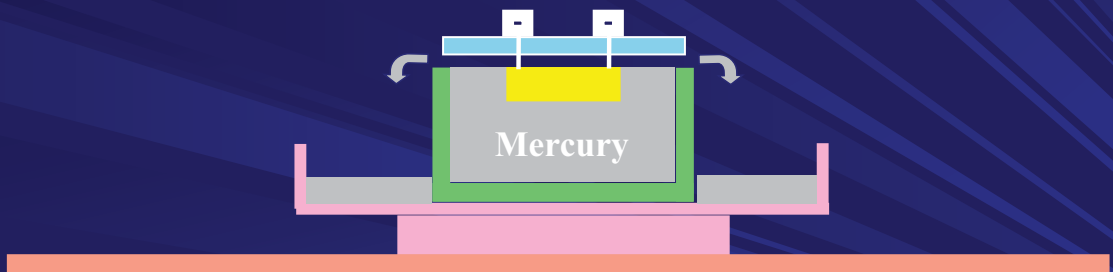
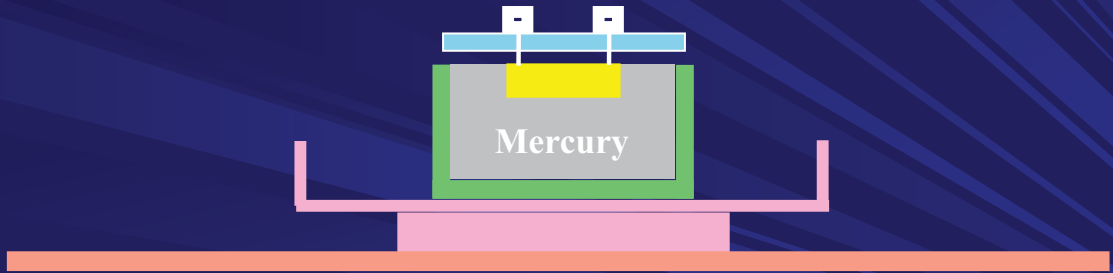












$$SL. = [W_w - (V_i - V_f)\gamma_w] \times 100/W_s$$

W_w = Weight of water in soil cake

V_i = Volume of soil cake before oven dried

V_f = Volume of soil cake after oven dried

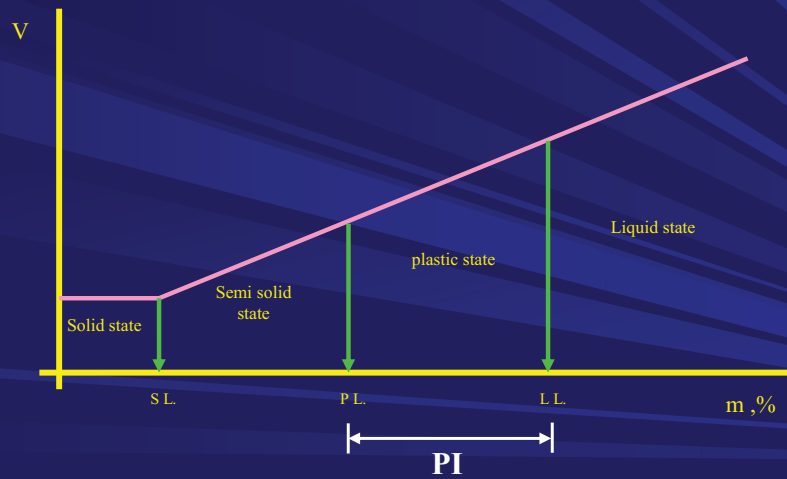
W_s = Weight of dry soil cake

Soil Parameter

- Plasticity Index
- Liquidity Index
- Activity
- Flow Index

Plasticity Index, PI.

$$PI. = LL. - PL.$$



Liquidity Index, LI.

$$LI. = (m - PL.)/(LL. - PL.)$$

m = in situ moisture content, %

LI. = 0 หมายความว่า

ค่าปริมาณความชื้นของดินขณะนั้นเท่ากับค่า Plastic limit

LI. = 1.0 หมายความว่า

ค่าปริมาณความชื้นของดินขณะนั้นเท่ากับค่า Liquid limit

LI. มีค่าน้อยกว่าศูนย์ได้

Activity, A_c

$$A_c = PI./(\% \text{ finer than } 0.002 \text{ mm})$$

ค่า Activity ใช้เป็นตัวชี้ถึงความสามารถในการบวมตัว (Swelling) ของดิน

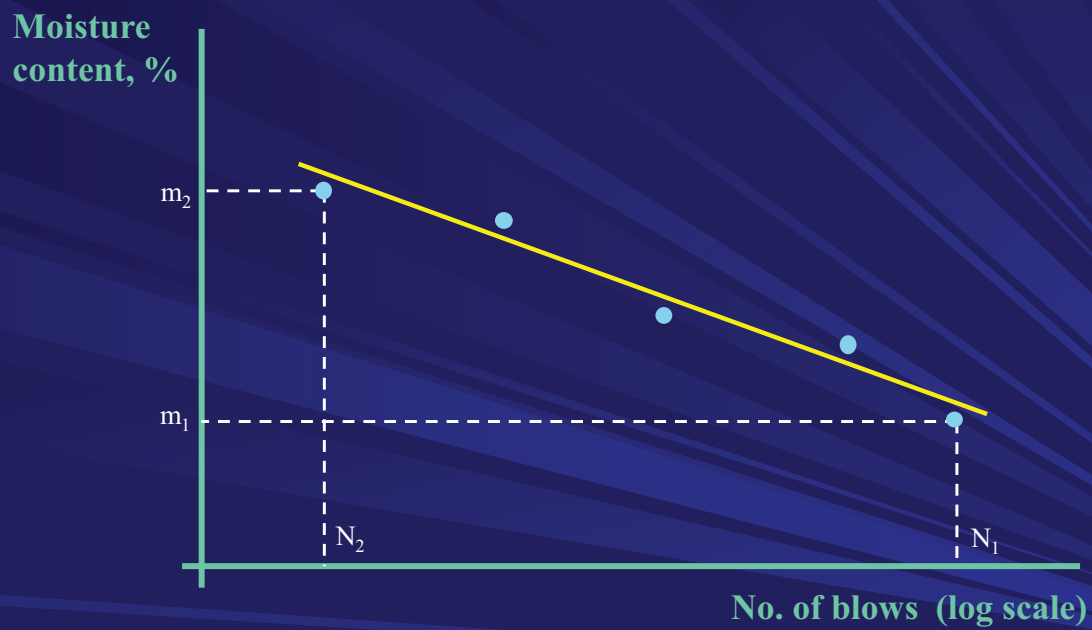
| Activity, A_c | Classification | Note |
|-------------------|----------------|----------------|
| $A_c < 0.7$ | Inactive clay | Kaolinite |
| $0.7 < A_c < 1.2$ | Normal clay | Illite |
| $A_c > 1.2$ | Active clay | Monmorillonite |

Flow Index, F_i

$$F_i = (m_1 - m_2) / \log (N_2 / N_1)$$

m_1 = moisture content (%) at N_1 drops

m_2 = moisture content (%) at N_2 drops



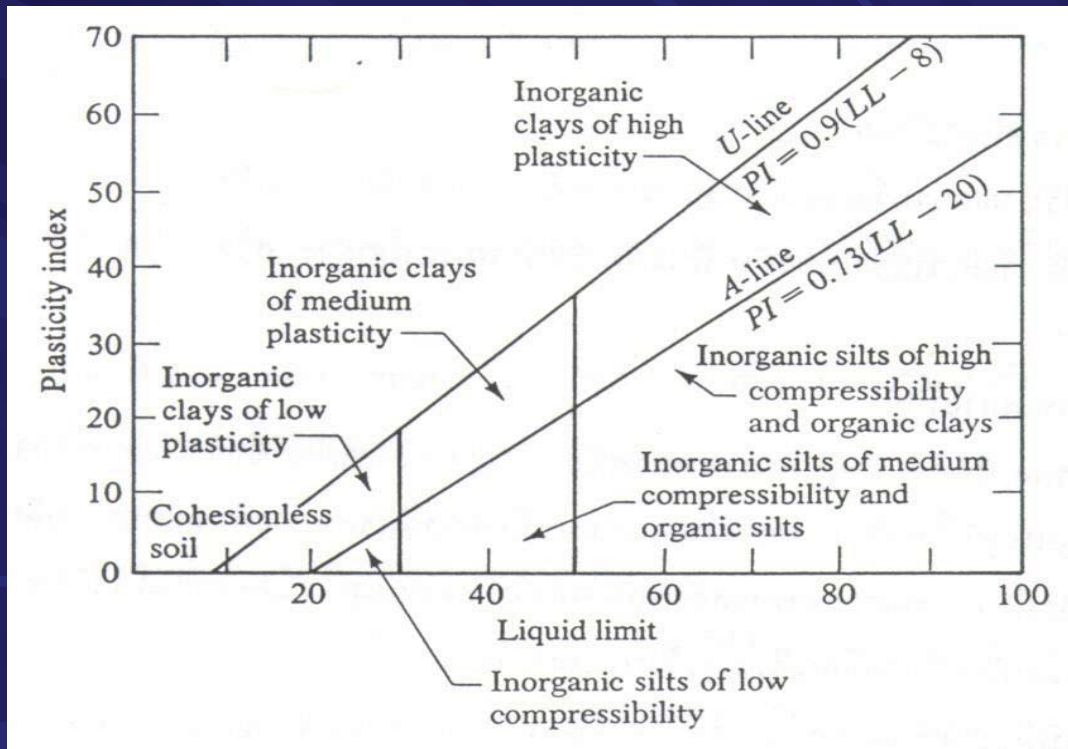
แผนภูมิสภาพพลาสติก

Casagrande ได้คิดแผนภูมิสภาพพลาสติก (Plasticity chart) สำหรับแยกชนิดของดินระหว่าง ดินตะกอนกับดินเหนียวโดยใช้ค่า

◇ Liquid limit

◇ Plasticity index

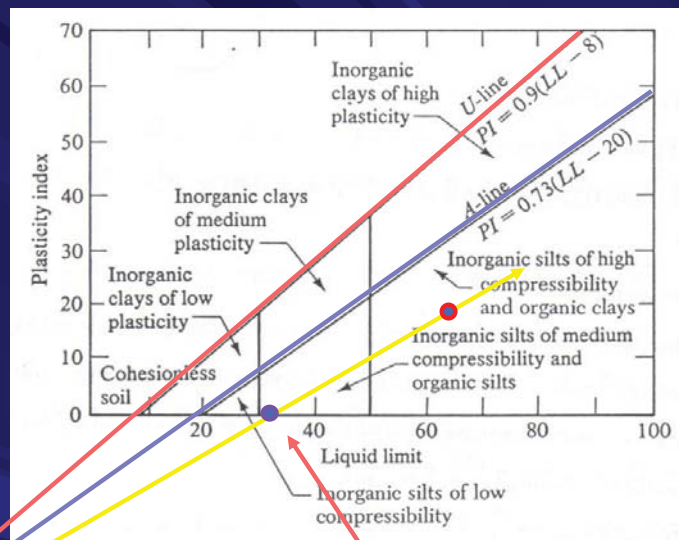
Plasticity chart



สมการ ของ A-line \longrightarrow $PI = 0.73(LL - 20)$

สมการ ของ U-line \longrightarrow $PI = 0.9(LL - 8)$

นอกจากนี้ แผนภูมิสภาพพลาสติกยังสามารถ
หาค่า Shrinkage limit ของดินได้อย่างคร่าว ๆ



Shrinkage limit

LL. = -43.5 %

PI. = -46.5 %

บทที่ 2

ระบบการจำแนกดิน

การจำแนกดินมีประโยชน์สำหรับเรียกชื่อดินให้เป็นที่เข้าใจใน
ความหมายเดียวกัน

ในระยะแรกการจำแนกดินได้ใช้ขนาดของเม็ดดินเป็นตัวพิจารณา
อย่างเดียว เช่น

ระบบของ **MIT**

ระบบของ **USDA**

ระบบของ MIT

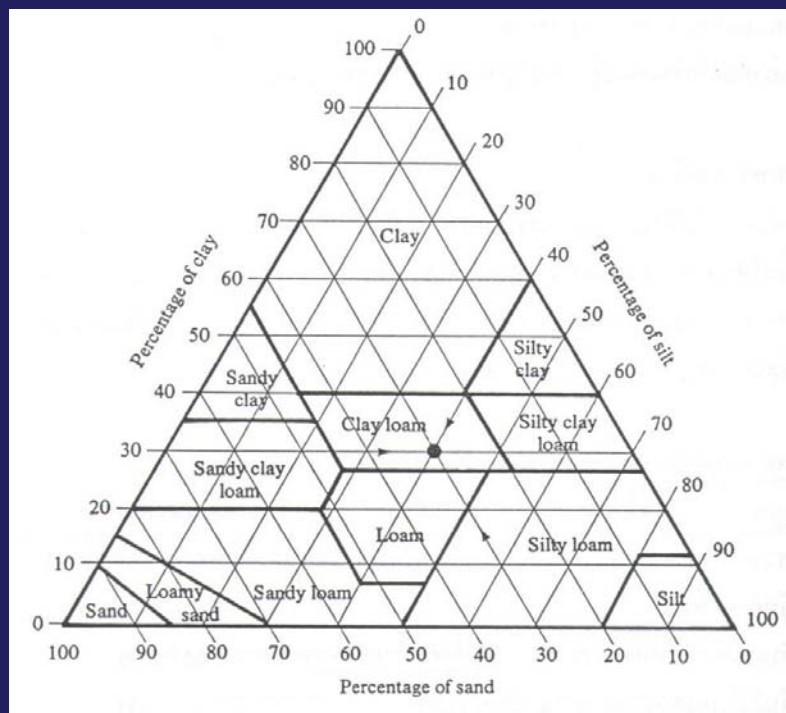
| ชนิดของดิน | ขนาด |
|------------------|-------------------|
| กรวด (Gravel) | ใหญ่กว่า 2.0 mm |
| ทราย (Sand) | 2.0 – 0.06 mm |
| ดินตะกอน (Silt) | 0.06 – 0.002 mm |
| ดินเหนียว (Clay) | เล็กกว่า 0.002 mm |

ระบบของ USDA

U.S. Department of Agriculture (USDA) ได้คิดระบบการจำแนกดิน โดยอาศัยรูป สามเหลี่ยมจำแนกดิน (Triangular soil classification chart) ซึ่งก่อนจะใช้สามเหลี่ยมจำแนกดินจะต้องแยกว่าดินชนิดนี้มีเปอร์เซ็นต์ของทราย ดินตะกอน และดินเหนียวอยู่เท่าไร

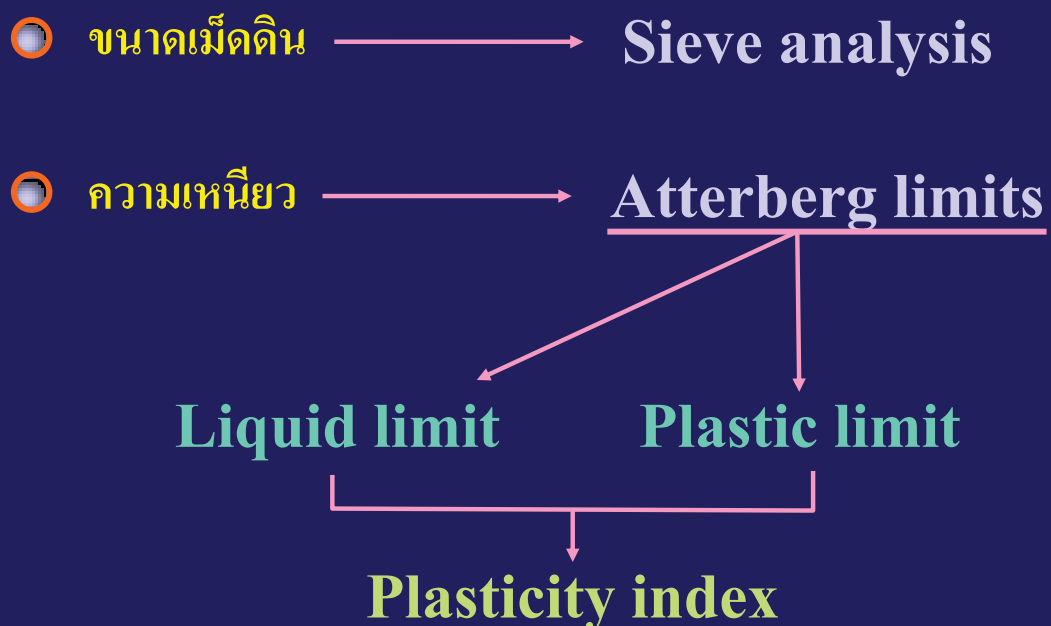
ซึ่งขนาดของเม็ดดินในระบบ USDA ดังแสดงในตาราง

| ชนิดของดิน | ขนาด |
|------------------|-------------------|
| กรวด (Gravel) | ใหญ่กว่า 2.0 mm |
| ทราย (Sand) | 2.0 – 0.05 mm |
| ดินตะกอน (Silt) | 0.05 – 0.002 mm |
| ดินเหนียว (Clay) | เล็กกว่า 0.002 mm |



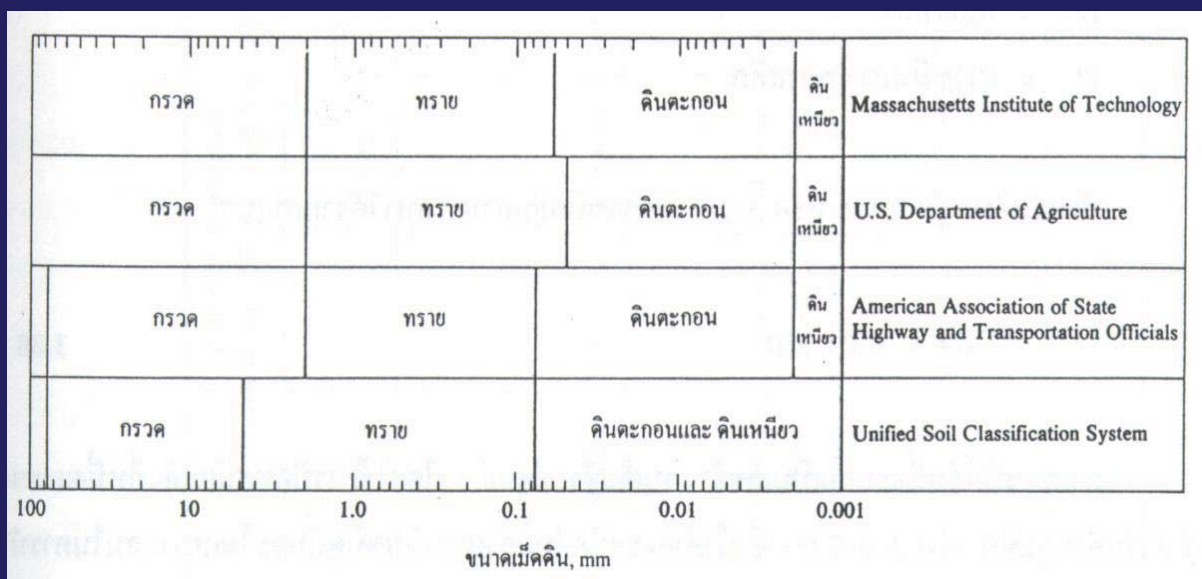
ต่อมาระบบจำแนกดินได้นำค่าความเหนียวของดินมาร่วมพิจารณาด้วยซึ่งทำให้การจำแนกดินละเอียดขึ้น

คุณสมบัติของดินที่ใช้จำแนก



ตารางเปรียบเทียบขนาดเม็ดดินตามระบบการจำแนกดินต่าง ๆ

| Name of organization | Grain size (mm) | | | |
|---|------------------------|---------------|--------------------------------------|--------|
| | Gravel | Sand | Silt | Clay |
| Massachusetts Institute of Technology (MIT) | >2 | 2 to 0.06 | 0.06 to 0.002 | <0.002 |
| U.S. Department of Agriculture (USDA) | >2 | 2 to 0.05 | 0.05 to 0.002 | <0.002 |
| American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) | 76.2 to 2 75 | 2 to 0.075 | 0.075 to 0.002 | <0.002 |
| Unified Soil Classification System (U.S. Army Corps of Engineers, U.S. Bureau of Reclamation) | 76.2 to 4.75 | 4.75 to 0.075 | Fines (i.e., silts and clays) <0.075 | |



AASHTO Soil classification system

ย่อมาจาก American Association of State Highway and Transportation Official แต่สมัยก่อน ไม่มี Transportation เลยย่อว่า AASHO

ระบบจำแนกดินระบบนี้ใช้กับงานที่เกี่ยวข้องกับถนน เช่นงานก่อสร้าง หรือออกแบบถนน

ใช้สัญลักษณ์ A-1 ถึง A-8

ระบบจำแนกดิน AASHTO จะแบ่งดินออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

- ดินเม็ดหยาบ (ผ่านตะแกรง #200 < 35 %) → A-1 ถึง A-3
- ดินเม็ดละเอียด (ผ่านตะแกรง #200 > 35 %) → A-4 ถึง A-7
- ดินอินทรีย์สาร → A-8

ขนาดของเม็ดดินในระบบ AASHTO

| ชนิดของดิน | ขนาด, mm |
|------------------|--------------|
| กรวด (Gravel) | 76.2 – 2.00 |
| ทราย (Sand) | 2.00 – 0.05 |
| ดินตะกอน (Silt) | 0.05 – 0.002 |
| ดินเหนียว (Clay) | < 0.002 |

Table 3.1 Classification of Highway Subgrade Materials

| General classification | Granular materials (35% or less of total sample passing no. 200) | | | | | | |
|--|---|---------|-------------------|---------------------------------|---------|---------|---------|
| | A-1 | | | A-2 | | | |
| Group classification | A-1-a | A-1-b | A-3 | A-2-4 | A-2-5 | A-2-6 | A-2-7 |
| Sieve analysis (percent passing) | | | | | | | |
| No. 10 | 50 max. | | | | | | |
| No. 40 | 30 max. | 50 max. | 51 min. | | | | |
| No. 200 | 15 max. | 25 max. | 10 max. | 35 max. | 35 max. | 35 max. | 35 max. |
| Characteristics of fraction passing no. 40 | | | | | | | |
| Liquid limit | | | | 40 max. | 41 min. | 40 max. | 41 min. |
| Plasticity index | 6 max. | | NP | 10 max. | 10 max. | 11 min. | 11 min. |
| Usual types of significant constituent materials | | | | | | | |
| | Stone fragments, gravel and sand | | Fine sand | Silty or clayey gravel and sand | | | |
| General subgrade rating | | | Excellent to good | | | | |

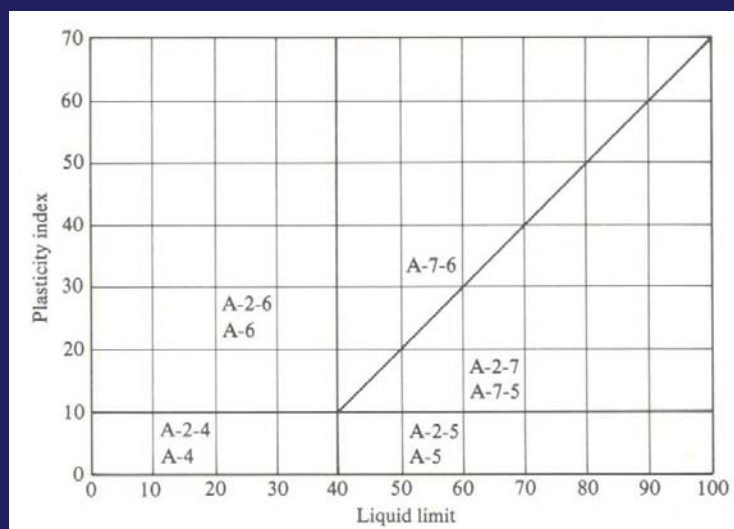
Sieve analysis

Atterberg limits

| General classification | Silt-clay materials (More than 35% of total sample passing no. 200) | | | |
|---|--|---------|--------------|---|
| | A-4 | A-5 | A-6 | A-7 A-7-5 ^a A-7-6 ^b |
| Sieve analysis (percent passing) | | | | |
| No. 10 | | | | |
| No. 40 | | | | |
| No. 200 | 36 min. | 36 min. | 36 min. | 36 min. |
| Characteristics of fraction passing no. 40 | | | | |
| Liquid limit | 40 max. | 41 min. | 40 max. | 41 min. |
| Plasticity index | 10 max. | 10 max. | 11 min. | 11 min. |
| Usual types of significant constituent materials | Silty soils | | Clayey soils | |
| General subgrade rating | Fair to poor | | | |

^a For A-7-5, $PI \leq LL - 30$

^b For A-7-6, $PI > LL - 30$



นอกจากนี้ ในการจำแนกดิน ยังต้องมี **Group index** วงเล็บไว้ข้างหลังกลุ่มด้วย เช่น **A - 4(5)** ซึ่ง **GI** นี้สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$GI = 0.2A + 0.005A.C + 0.01B.D$$

A = % ผ่านตะแกรง #200 ที่มากกว่า 35%

B = % ผ่านตะแกรง #200 ที่มากกว่า 15%

C = ค่า LL. ที่มากกว่า 40%

D = ค่า PI. ที่มากกว่า 10%

หรือ

$$GI = (F - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(F - 15)(PI - 10)$$

F = % ผ่านตะแกรง #200

ในกรณีดินกลุ่ม **A-2-6** และ **A-2-7** จะหา **GI** จากสมการ

$$GI = 0.01 B.D$$

สำหรับดินกลุ่ม

A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5 และ A-3

ค่า GI จะเท่ากับ ศูนย์ เสมอ

ค่า GI จะเป็นเลขจำนวนเต็มบวก มีค่าตั้งแต่ศูนย์
เป็นต้นไป

ค่า GI จะเป็นตัวช่วยจำแนกดินให้ละเอียดมากขึ้น
ซึ่งถ้าดินในกลุ่มเดียวกัน มีค่า GI ต่างกัน ดินที่มีค่า GI
น้อย จะเหมาะสมในการทำชั้น Subgrade มากกว่า

Unified soil classification system

ระบบ (USCS) นี้ ถูกนำเสนอโดย Casagrande และได้รับการปรับปรุงโดย U.S. Bureau of Reclamation และได้ใช้มาจนถึงปัจจุบัน ซึ่งจะใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมทั่วไป เช่นงานเจาะสำรวจดิน ออกแบบฐานราก

สัญลักษณ์ที่ใช้ จะเป็นอักษรอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่ 2 ตัวคู่กัน

สัญลักษณ์ของดิน

| | |
|-----------------------------|---|
| G = กรวด (Gravel) | O = ดินอินทรีย์สาร (Organic soil) |
| S = ทราย (Sand) | L = มีสภาพพลาสติกต่ำ (Low plasticity) |
| M = ดินตะกอน (Silt) | H = มีสภาพพลาสติกสูง (High plasticity) |
| C = ดินเหนียว (Clay) | W = มีขนาดละเอียดดี (Well graded) |
| | P = มีขนาดละเอียดไม่ดี (Poorly graded) |

ตัวอย่างของชนิดดิน

GW = Well graded gravel




SM = Silty sand

MH = High plastic silt (Elastic silt)

CL = Low plastic clay (Lean clay)

CH = High plastic clay (Fat clay)

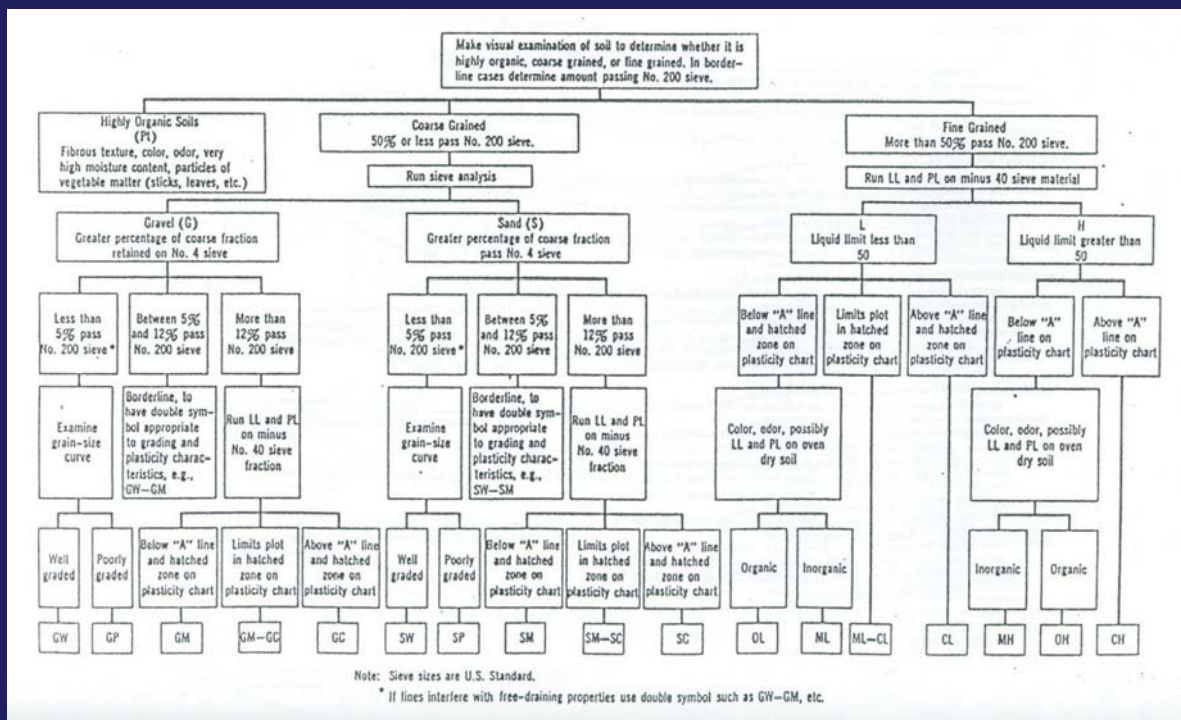
ระบบนี้จะแบ่งดินเป็น 3 กลุ่ม คือ

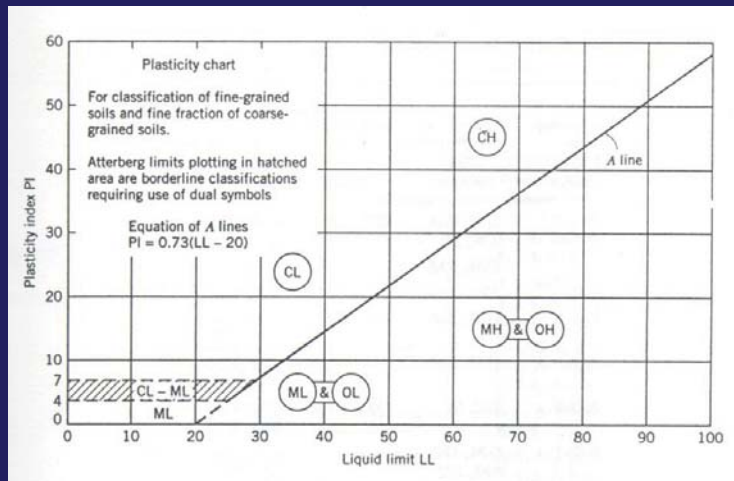
-  ดินเม็ดหยาบ (Coarse grained soil) → ค้าง #200 มากกว่า 50 %
-  ดินเม็ดละเอียด (Fine grained soil) → ผ่าน #200 มากกว่า 50 %
-  ดินพีท (Peat) → $LLR < 0.75$

$LLR = \text{Liquid limit ratio}$ อัตราส่วนของ LL ที่ใช้ตัวอย่างอบแห้งต่อตัวอย่างเปียก

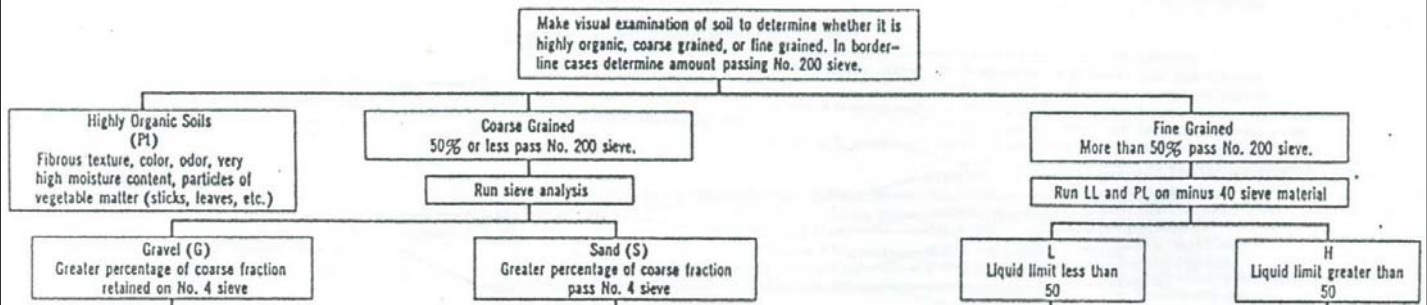
ขนาดของเม็ดดินในระบบ USCS

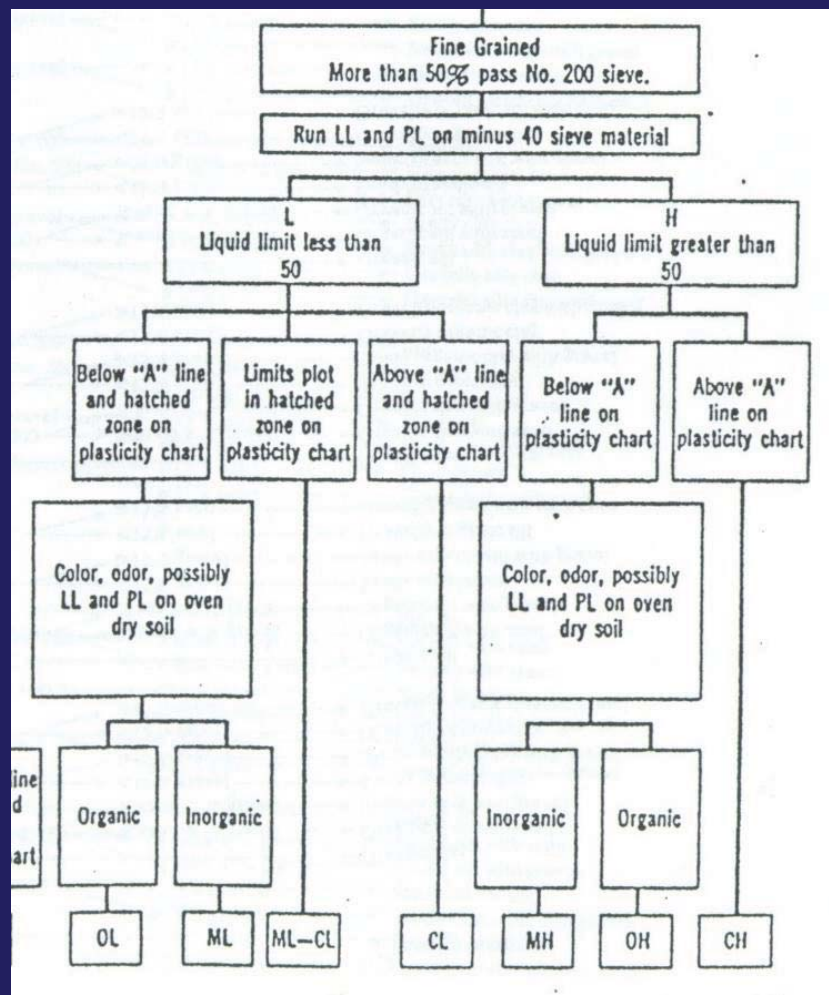
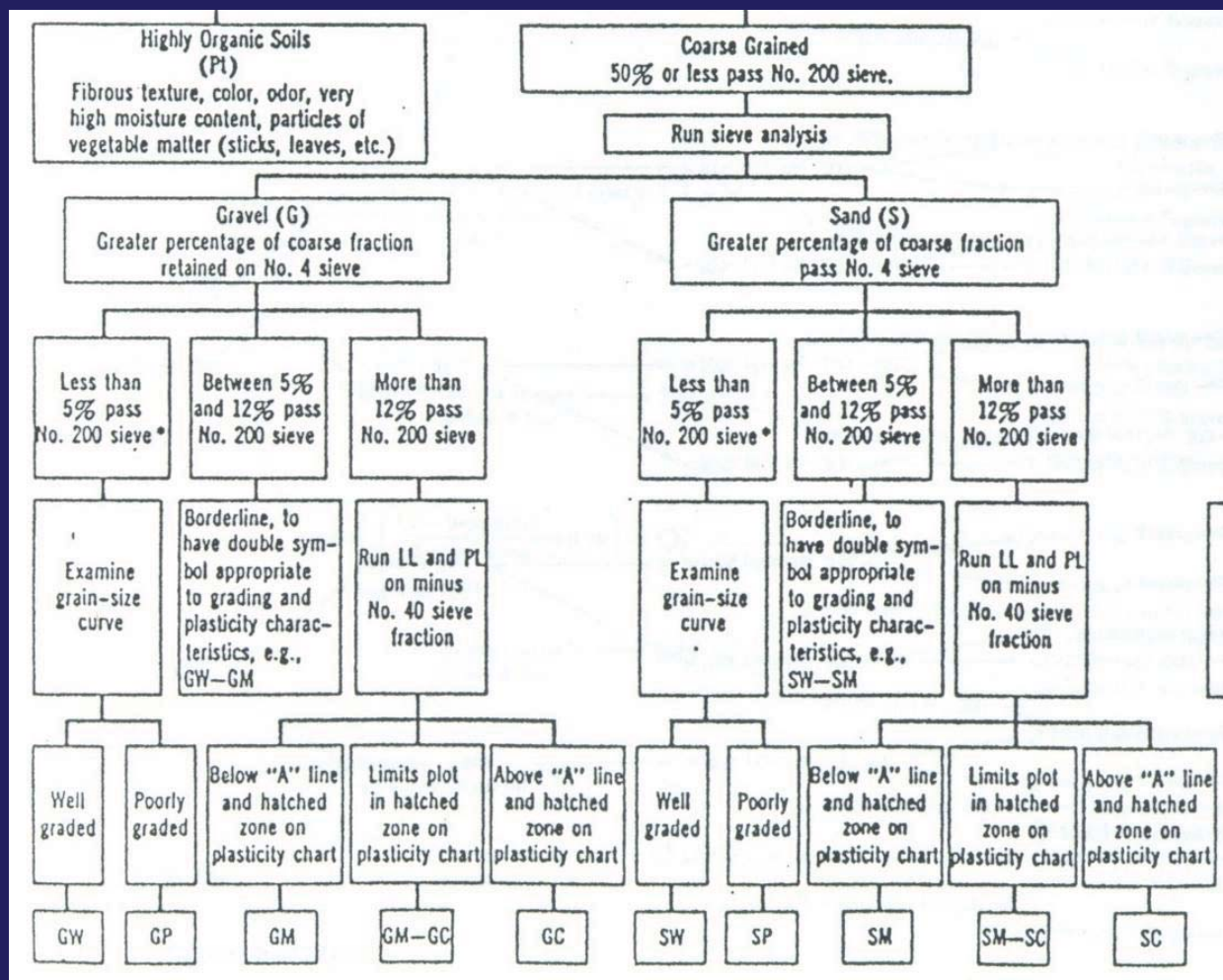
| ชนิดของดิน | ขนาด, mm. |
|-------------------------------|---------------------|
| กรวด (Gravel) | 76.2 – 4.75 |
| ทราย (Sand) | 4.75 – 0.075 |
| ดินเม็ดละเอียด (Fines) | < 0.075 |

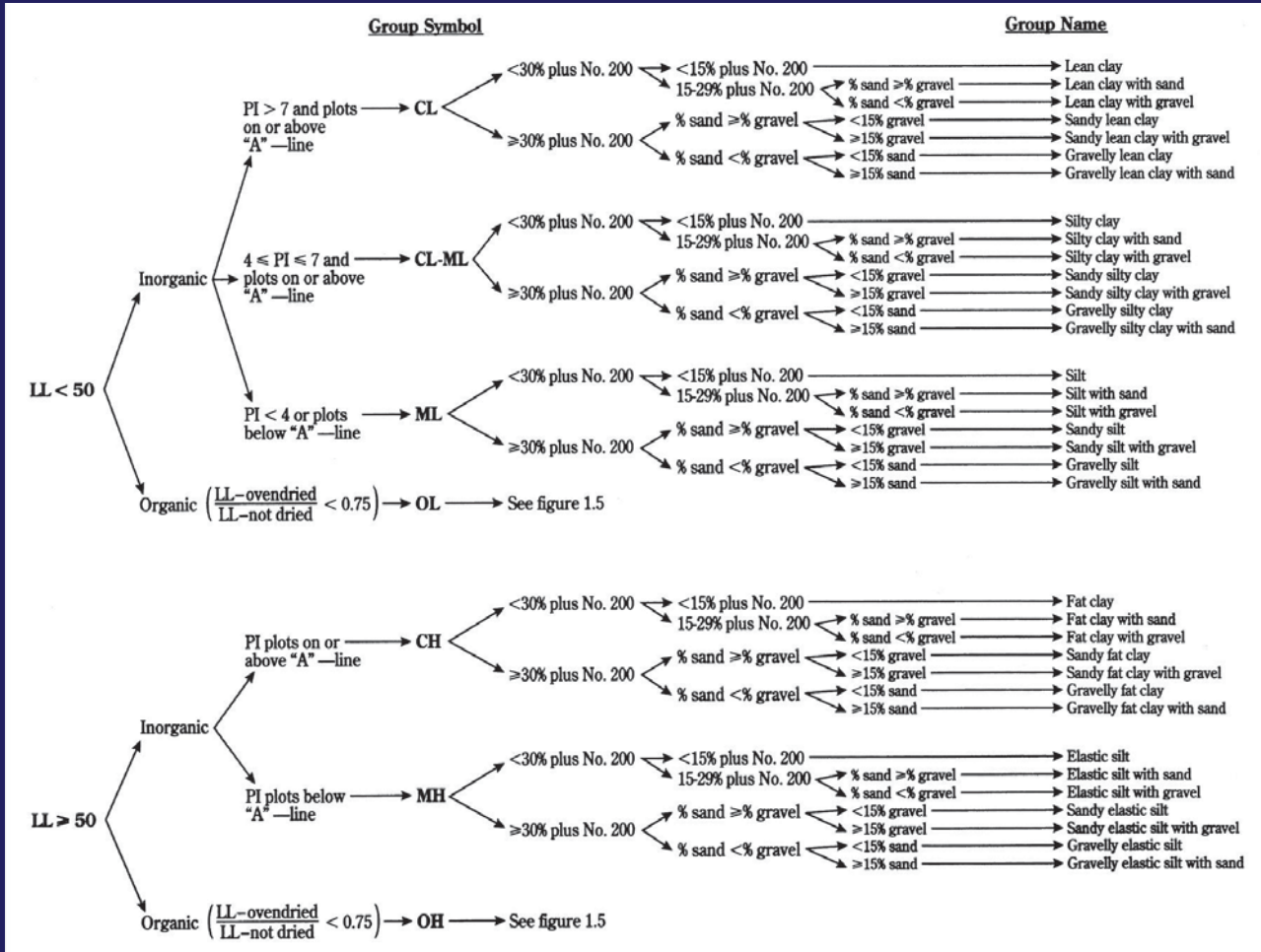
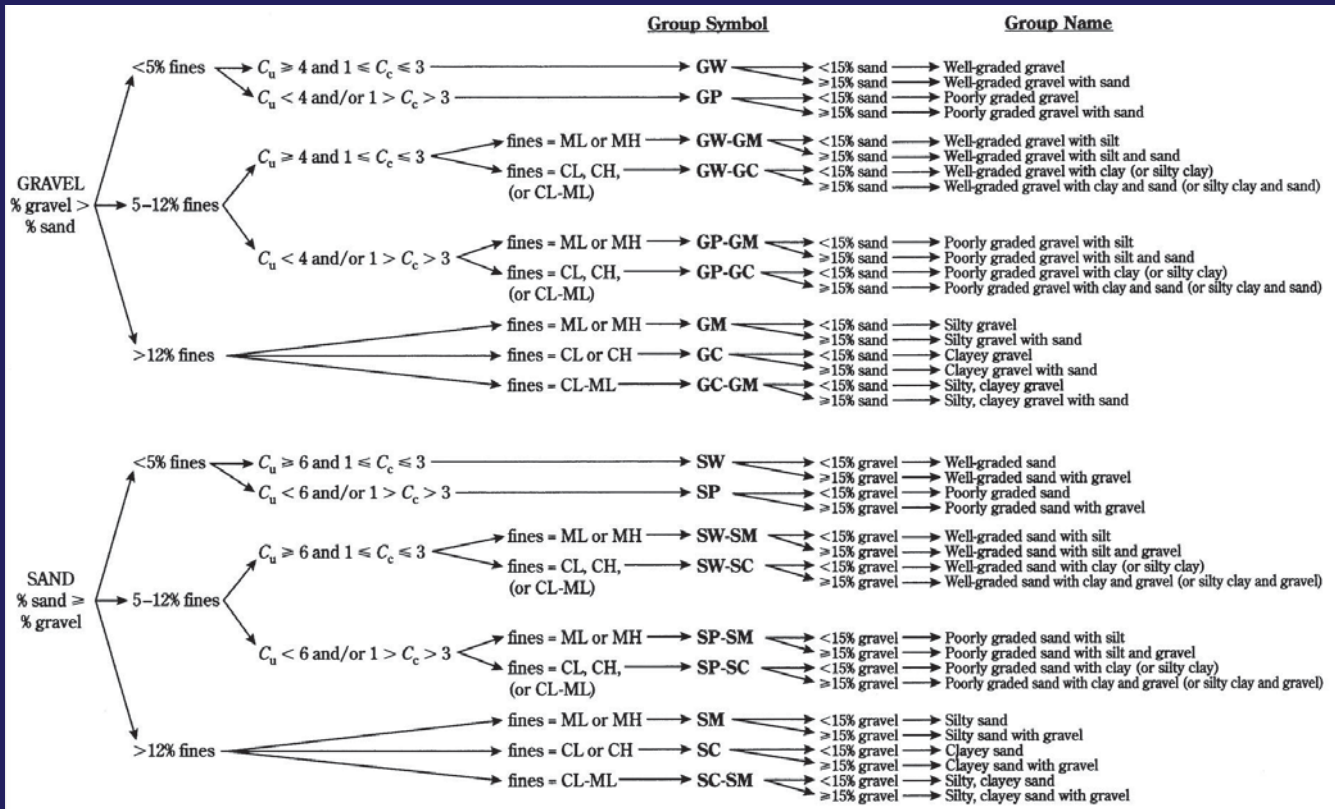


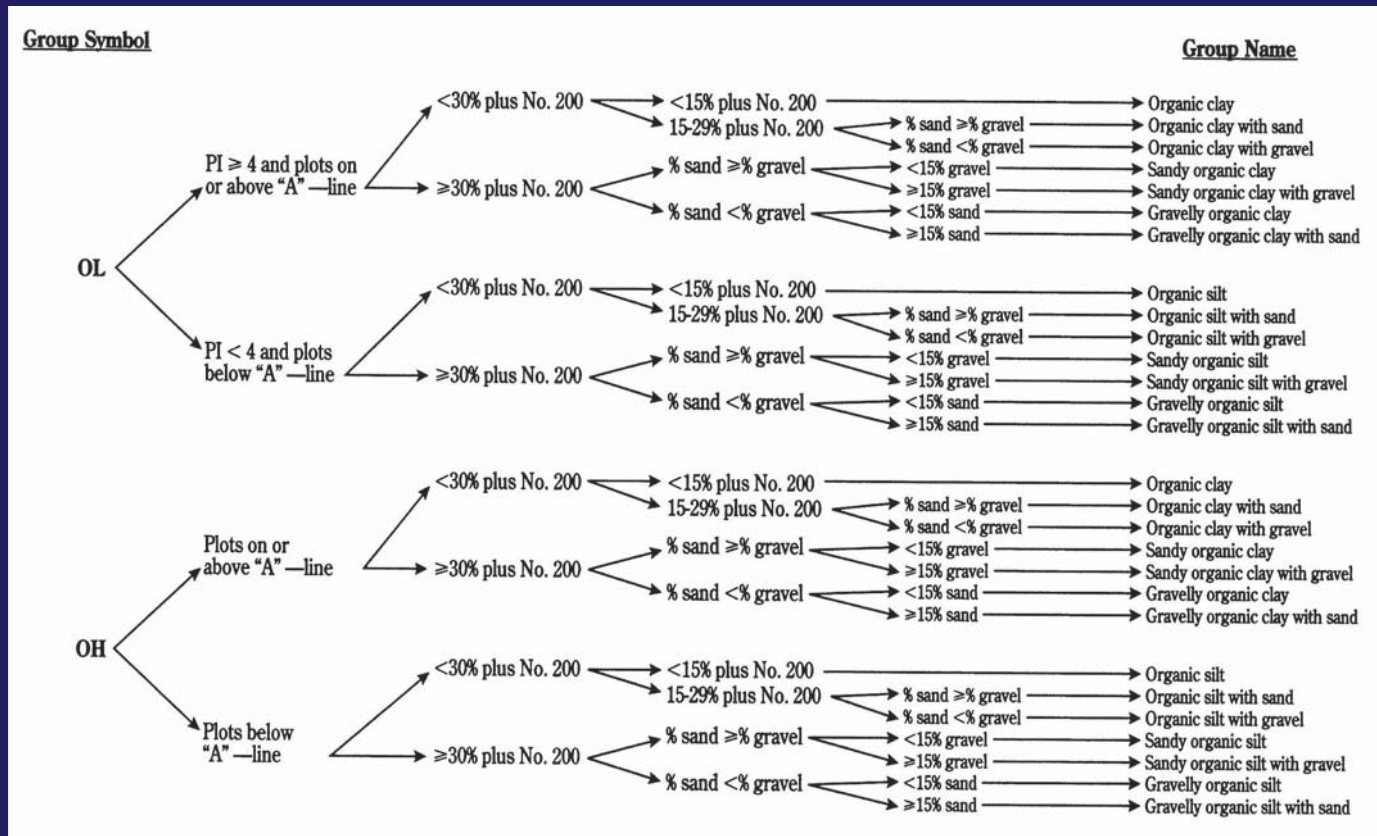


Plasticity chart



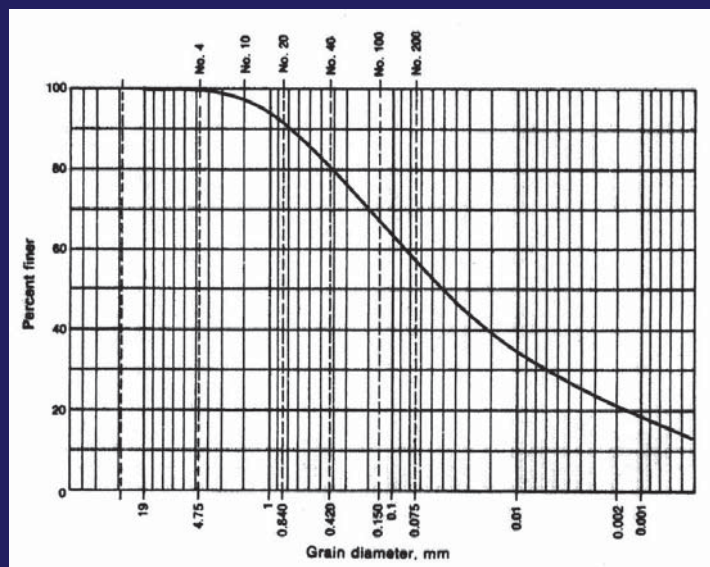






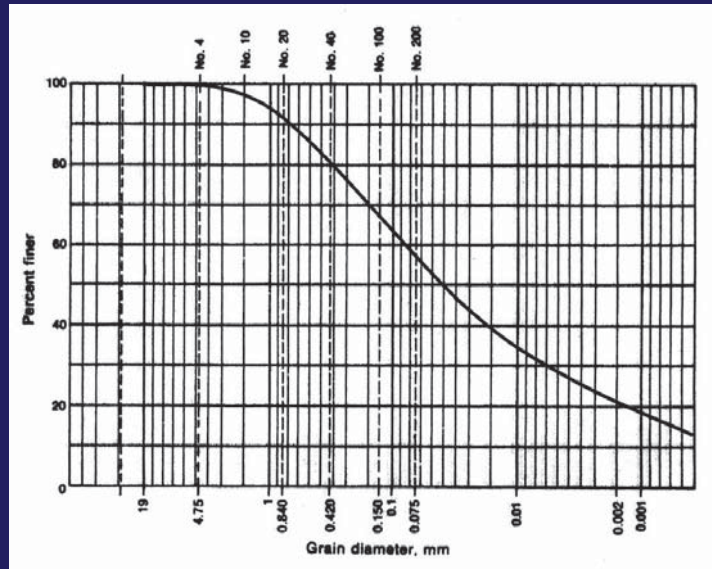
ตัวอย่างที่ 2.1

From grain size distribution curve, determine the soil group by using Triangular soil classification chart and MIT system to check for grain size.



ตัวอย่างที่ 2.1

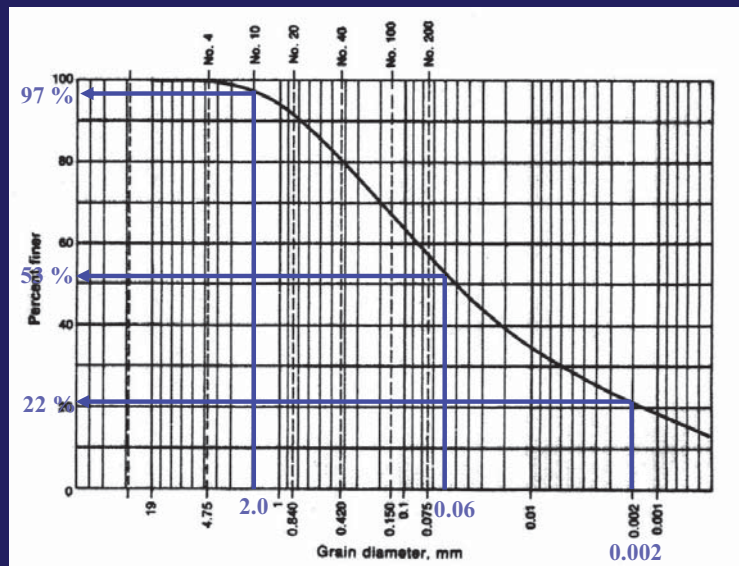
จากกราฟการกระจายของเม็ดดิน จงจำแนกดินชนิดนี้ โดยใช้รูปสามเหลี่ยมจำแนกดิน ซึ่งการแบ่งขนาดของเม็ดดิน ให้ใช้ระบบ MIT



วิธีทำ

ขนาดของดินในระบบ MIT

| ชนิดของดิน | ขนาด, mm |
|------------------|----------------|
| กรวด (Gravel) | ใหญ่กว่า 2.0 |
| ทราย (Sand) | 2.0 – 0.06 |
| ดินตะกอน (Silt) | 0.06 – 0.002 |
| ดินเหนียว (Clay) | เล็กกว่า 0.002 |



% ละเอียดกว่า 2 mm. = 97 %

% ละเอียดกว่า 0.06 mm. = 53 %

% ละเอียดกว่า 0.002 mm. = 22 %

ขนาดของดินในระบบ MIT

| ชนิดของดิน | ขนาด, mm |
|---------------------|----------------|
| กรวด (Gravel) | ใหญ่กว่า 2.0 |
| ทราย (Sand) | 2.0 – 0.06 |
| ดินตะกอน (Silt) | 0.06 – 0.002 |
| ดินเหนียว (Clay) | เล็กกว่า 0.002 |

% ละเอียดกว่า 2 mm. = 97 %

% ละเอียดกว่า 0.06 mm. = 53 %

% ละเอียดกว่า 0.002 mm. = 22 %

จากกราฟ :

% ละเอียดกว่า 2.0 mm = 97 %

หมายความว่าดินมีเม็ดเล็กกว่า 2.0 mm อยู่ 97 % ของทั้งหมด

แสดงว่าดินมีเม็ดใหญ่กว่า 2.0 mm อยู่ $100 - 97 = 3 %$

ดินนี้มีกรวด = 3 %

ขนาดของดินในระบบ MIT

| ชนิดของดิน | ขนาด, mm |
|---------------------|----------------|
| กรวด (Gravel) | ใหญ่กว่า 2.0 |
| ทราย (Sand) | 2.0 – 0.06 |
| ดินตะกอน (Silt) | 0.06 – 0.002 |
| ดินเหนียว (Clay) | เล็กกว่า 0.002 |

% ละเอียดกว่า 2 mm. = 97 %

% ละเอียดกว่า 0.06 mm. = 53 %

% ละเอียดกว่า 0.002 mm. = 22 %

จากกราฟ :

% ละเอียดกว่า 2.0 mm = 97 %

หมายความว่าดินมีเม็ดเล็กกว่า 2.0 mm อยู่ 97 % ของทั้งหมด

และมีดินที่เม็ดเล็กกว่า 0.06 mm อยู่ 53 % ของทั้งหมด

แสดงว่ามีเม็ดดินขนาด 2.0 – 0.06 mm อยู่ $97 - 53 = 44 %$

ดินนี้มีทราย = 44 %

ขนาดของดินในระบบ MIT

| ชนิดของดิน | ขนาด, mm |
|---------------------|----------------|
| กรวด (Gravel) | ใหญ่กว่า 2.0 |
| ทราย (Sand) | 2.0 – 0.06 |
| ดินตะกอน (Silt) | 0.06 – 0.002 |
| ดินเหนียว (Clay) | เล็กกว่า 0.002 |

% ละเอียดกว่า 2 mm. = 97 %

% ละเอียดกว่า 0.06 mm. = 53 %

% ละเอียดกว่า 0.002 mm. = 22 %

จากกราฟ :

% ละเอียดกว่า 0.06 mm = 53 %

หมายความว่าดินมีเม็ดเล็กกว่า 0.06 mm
อยู่ 53 % ของทั้งหมด

และมีดินที่เม็ดเล็กกว่า 0.002 mm อยู่
22 % ของทั้งหมด

แสดงว่ามีเม็ดดินขนาด 0.06 – 0.002 mm อยู่
53 – 22 = 31 %

ดินนี้มีดินตะกอน = 31 %

ขนาดของดินในระบบ MIT

| ชนิดของดิน | ขนาด, mm |
|---------------------|----------------|
| กรวด (Gravel) | ใหญ่กว่า 2.0 |
| ทราย (Sand) | 2.0 – 0.06 |
| ดินตะกอน (Silt) | 0.06 – 0.002 |
| ดินเหนียว (Clay) | เล็กกว่า 0.002 |

% ละเอียดกว่า 2 mm. = 97 %

% ละเอียดกว่า 0.06 mm. = 53 %

% ละเอียดกว่า 0.002 mm. = 22 %

จากกราฟ :

% ละเอียดกว่า 0.002 mm = 22 %

หมายความว่าดินมีเม็ดเล็กกว่า 0.002 mm
อยู่ 22 % ของทั้งหมด

ดินนี้มีดินเหนียว = 22 %

ขนาดของดินในระบบ MIT

| ชนิดของดิน | ขนาด, mm |
|---------------------|----------------|
| กรวด (Gravel) | ใหญ่กว่า 2.0 |
| ทราย (Sand) | 2.0 – 0.06 |
| ดินตะกอน (Silt) | 0.06 – 0.002 |
| ดินเหนียว (Clay) | เล็กกว่า 0.002 |

สรุป :

ดินนี้มีกรวด = 3 %

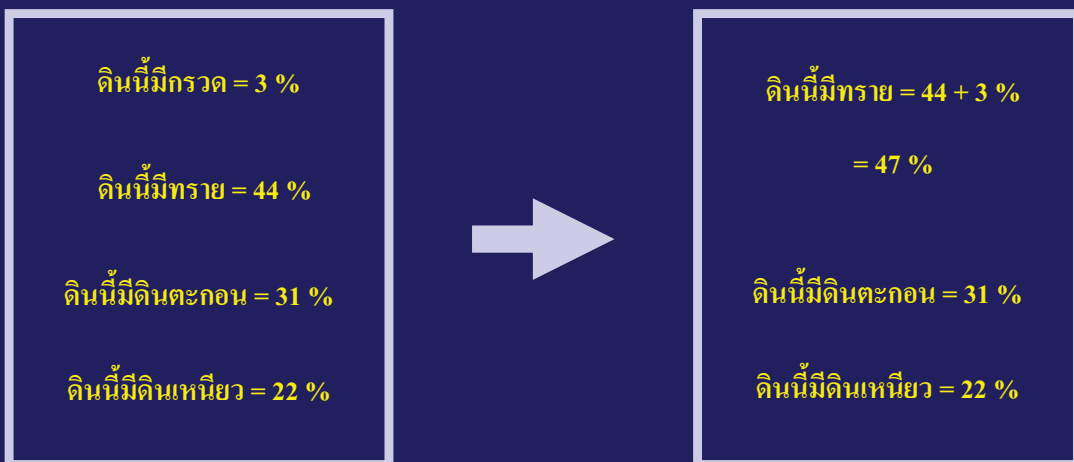
ดินนี้มีทราย = 44 %

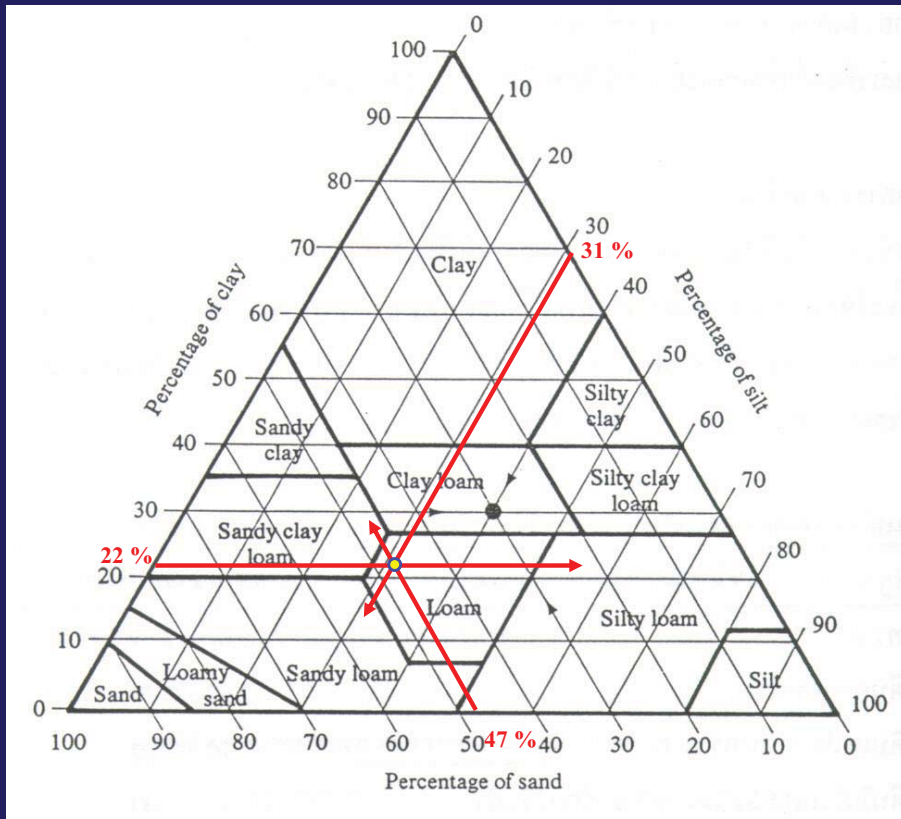
ดินนี้มีดินตะกอน = 31 %

ดินนี้มีดินเหนียว = 22 %

แบ่งตามขนาดของระบบ MIT

เนื่องจากรูปสามเหลี่ยมจำแนกดิน จะใช้ดินเพียง 3 ชนิดในการจำแนกเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องปรับแก้จำนวนของดินใหม่

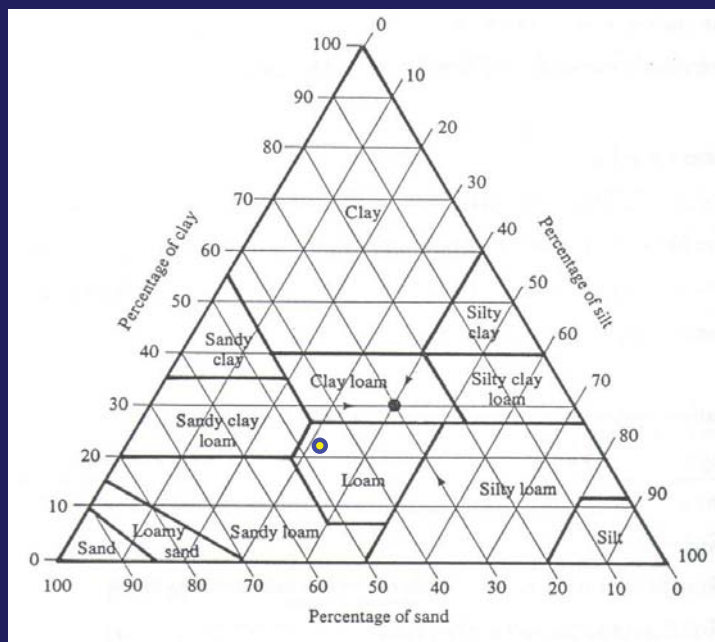




ดินนี้มีทราย = 47 %

ดินนี้มีดินตะกอน = 31 %

ดินนี้มีดินเหนียว = 22 %



ดังนั้นดินนี้จึงเรียกว่า *Loam*

Ans.

ตัวอย่างที่ 2.2

การทดสอบดินในห้องปฏิบัติการได้ให้ค่าต่าง ๆ ดังนี้

| ตะแกรงเบอร์ | % ผ่าน |
|-------------|--------|
| 10 | 88.2 |
| 40 | 67.9 |
| 200 | 56.3 |

จงจำแนกดินโดยระบบ

AASHTO

| | |
|-----|--------|
| LL. | 53.2 % |
| PL. | 33.7 % |

วิธีทำ

| ตะแกรงเบอร์ | % ผ่าน |
|-------------|--------|
| 10 | 88.2 |
| 40 | 67.9 |
| 200 | 56.3 |

$$\begin{aligned} \text{PI.} &= \text{LL.} - \text{PL.} \\ &= 53.2 - 33.7 \\ &= 19.5 \% \end{aligned}$$

| | |
|-----|--------|
| LL. | 53.2 % |
| PL. | 33.7 % |

| ตะแกรงเบอร์ | % ผ่าน |
|-------------|--------|
| 10 | 88.2 |
| 40 | 67.9 |
| 200 | 56.3 |

| | |
|-----|--------|
| LL. | 53.2 % |
| PI. | 19.5 % |

Table 3.1 Classification of Highway Subgrade Materials

| General classification | Granular materials (35% or less of total sample passing no. 200) | | | | | | |
|--|---|---------|-----------|---------------------------------|---------|---------|---------|
| | A-1 | | | A-2 | | | |
| Group classification | A-1-a | A-1-b | A-3 | A-2-4 | A-2-5 | A-2-6 | A-2-7 |
| Sieve analysis (percent passing) | | | | | | | |
| No. 10 | 50 max. | | | | | | |
| No. 40 | 30 max. | 50 max. | 51 min. | | | | |
| No. 200 | 15 max. | 25 max. | 10 max. | 35 max. | 35 max. | 35 max. | 35 max. |
| Characteristics of fraction passing no. 40 | | | | | | | |
| Liquid limit | | | | 40 max. | 41 min. | 40 max. | 41 min. |
| Plasticity index | 6 max. | | NP | 10 max. | 10 max. | 11 min. | 11 min. |
| Usual types of significant constituent materials | | | | | | | |
| | Stone fragments, gravel and sand | | Fine sand | Silty or clayey gravel and sand | | | |
| General subgrade rating | | | | | | | |
| | Excellent to good | | | | | | |

| ตะแกรงเบอร์ | % ผ่าน |
|-------------|--------|
| 10 | 88.2 |
| 40 | 67.9 |
| 200 | 56.3 |

| | |
|-----|--------|
| LL. | 53.2 % |
| PI. | 19.5 % |

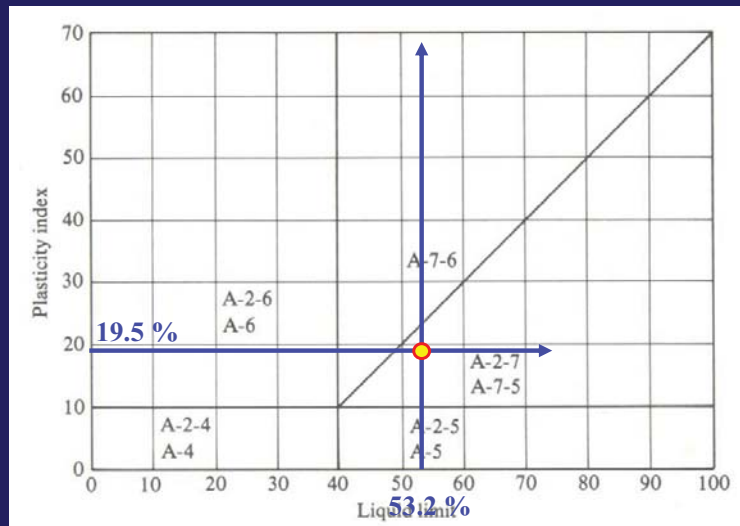
| General classification | Silt-clay materials (More than 35% of total sample passing no. 200) | | | |
|--|--|---------|--------------|---|
| | A-4 | A-5 | A-6 | A-7 A-7-5 ^a A-7-6 ^b |
| Group classification | | | | |
| Sieve analysis (percent passing) | | | | |
| No. 10 | | | | |
| No. 40 | | | | |
| No. 200 | 36 min. | 36 min. | 36 min. | 36 min. |
| Characteristics of fraction passing no. 40 | | | | |
| Liquid limit | 40 max. | 41 min. | 40 max. | 41 min. |
| Plasticity index | 10 max. | 10 max. | 11 min. | 11 min. |
| Usual types of significant constituent materials | | | | |
| | Silty soils | | Clayey soils | |
| General subgrade rating | | | | |
| | Fair to poor | | | |

^a For A-7-5, $PI \leq LL - 30$

^b For A-7-6, $PI > LL - 30$

| ตะแกรงเบอร์ | % ผ่าน |
|-------------|--------|
| 10 | 88.2 |
| 40 | 67.9 |
| 200 | 56.3 |

| | |
|-----|--------|
| LL. | 53.2 % |
| PI. | 19.5 % |



ดังนั้นดินกลุ่มนี้ คือ **A-7-5**

หรือจาก $LL. = 53.2\%$ และ $PI. = 19.5\%$

ดังนั้น $LL. - 30 = 53.2 - 30 = 23.2$ ซึ่งมากกว่า $PI.$ หรือ

$$PI. \leq LL. - 30$$

ดังนั้นดินกลุ่มนี้ คือ **A-7-5**

จาก

$$GI = (F - 35)[0.2 + 0.005(LL. - 40)] + 0.01(F - 15)(PI. - 10)$$

$$F = \% \text{ ผ่านตะแกรง \#200} = 56.3 \%$$

$$LL. = 53.2 \%$$

$$PI. = 19.5 \%$$

$$GI = (56.3 - 35)[0.2 + 0.005(53.2 - 40)] + 0.01(56.3 - 15)(19.5 - 10)$$

$$GI = 9.6 \longrightarrow GI = 10$$

ดังนั้นดินชนิดนี้ คือ

A-7-5 (10)

Ans.

ตัวอย่างที่ 2.3

การทดสอบดินในห้องปฏิบัติการได้ให้ค่าต่าง ๆ ดังนี้

| ตะแกรงเบอร์ (ขนาด,mm) | % ผ่าน |
|-----------------------|--------|
| 4 (4.75) | 78.0 |
| 200 (0.075) | 4.0 |

จงจำแนกดินโดย

ระบบ USCS

| | |
|----------|---------|
| D_{10} | 0.30 mm |
| D_{30} | 0.73 mm |
| D_{60} | 1.27 mm |

วิธีทำ

| ตะแกรงเบอร์ | % ผ่าน |
|-------------|--------|
| 4 | 78.0 |
| 200 | 4.0 |

เนื่องจากมีดินผ่านตะแกรง #200 เพียง 4 % ซึ่งแสดงว่า มีเม็ดใหญ่กว่า #200 อยู่ $100 - 4 = 96 %$

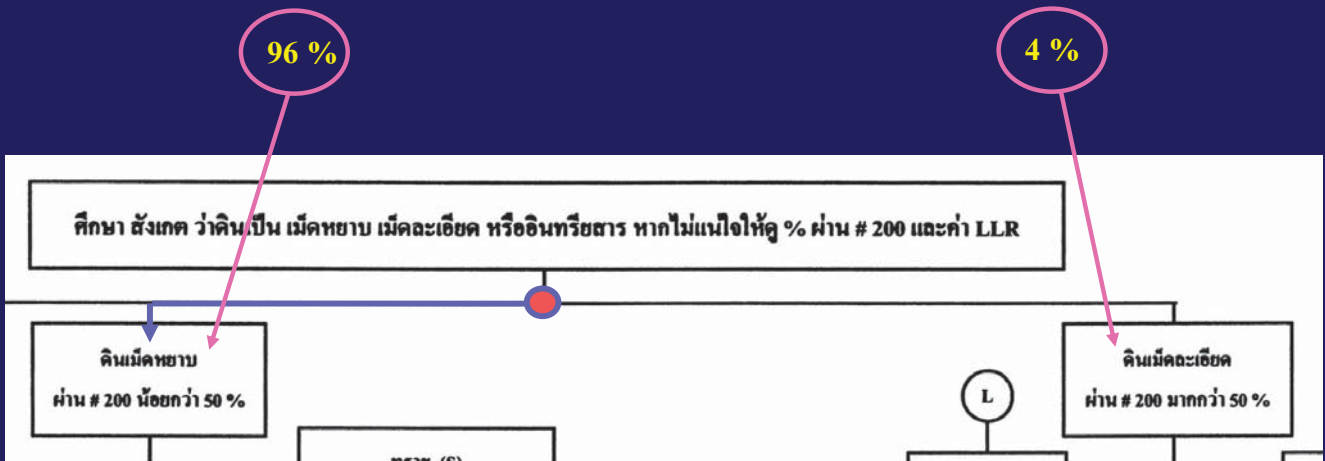


ดินเม็ดหยาบ



G หรือ S

| | |
|----------|---------|
| D_{10} | 0.30 mm |
| D_{30} | 0.73 mm |
| D_{60} | 1.27 mm |



| ตะแกรงเบอร์ | % ผ่าน |
|-------------|--------|
| 4 | 78.0 |
| 200 | 4.0 |

เนื่องจากมีดินผ่านตะแกรง #4 = 78.0 %
ซึ่งแสดงว่า มีเม็ดใหญ่กว่า #4 อยู่

$$100 - 78.0 = 22.0 \%$$

| | |
|----------|---------|
| D_{10} | 0.30 mm |
| D_{30} | 0.73 mm |
| D_{60} | 1.27 mm |

↓

$$G = 22.0 \%$$

| ตะแกรงเบอร์ | % ผ่าน |
|-------------|--------|
| 4 | 78.0 |
| 200 | 4.0 |

เนื่องจากมีดินผ่านตะแกรง #4 = 78.0 % และผ่าน #200 อยู่ 4 % ซึ่งแสดงว่ามีเม็ดเล็กกว่า #4 และใหญ่กว่า #200 อยู่ $78.0 - 4.0 = 74.0$ %

| | |
|----------|---------|
| D_{10} | 0.30 mm |
| D_{30} | 0.73 mm |
| D_{60} | 1.27 mm |



$$S = 74.0 \%$$

เพราะฉะนั้นดินชนิดนี้ มี

$$G = 22.0 \%$$

$$S = 74.0 \%$$

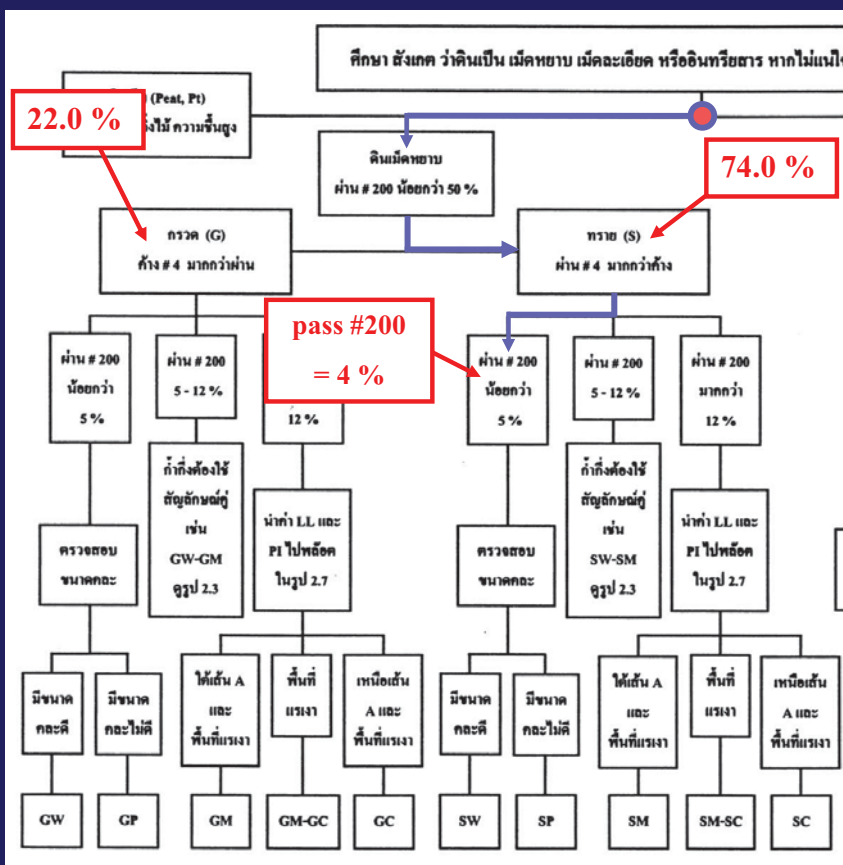
$$\text{Fines} = 4.0 \%$$

ดังนั้นดินชนิดนี้จึงมีสัญลักษณ์ S

G = 22.0 %

S = 74.0 %

Fines = 4.0 %



จากนั้นทำการตรวจสอบขนาดตะ

| ตะแกรงเบอร์ | % ผ่าน |
|-------------|--------|
| 4 | 78.0 |
| 200 | 4.0 |

$$C_u = D_{60}/D_{10}$$

$$= 1.27/0.30$$

$$= 4.23$$

$C_u > 4.0 =$ Well graded soil

| | |
|----------|---------|
| D_{10} | 0.30 mm |
| D_{30} | 0.73 mm |
| D_{60} | 1.27 mm |

$$C_c = D_{30}^2/(D_{10} \cdot D_{60})$$

$$= 0.73^2/(0.30 \times 1.27)$$

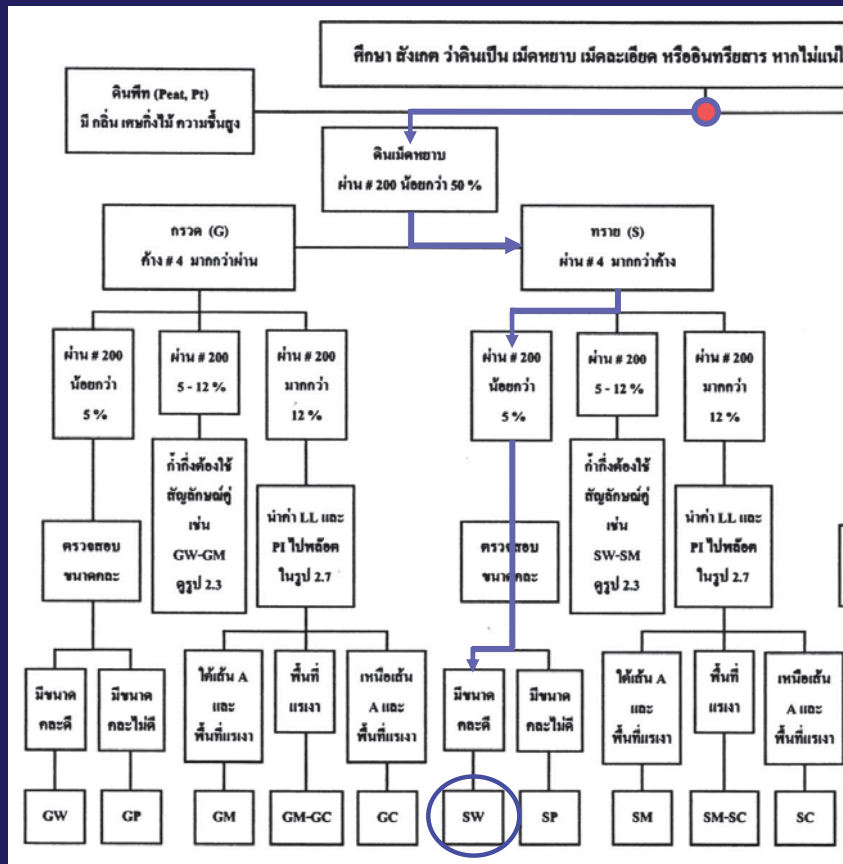
$$= 1.92$$

C_c between 1 – 3 = Well graded soil

ดังนั้นดินชนิดนี้เป็น

ดินที่มีขนาดคละกัันดี

Well graded soil



ดังนั้นดินชนิดนี้ คือ

SW

Ans.

ตัวอย่างที่ 2.4

การทดสอบดินในห้องปฏิบัติการได้ให้ค่าต่าง ๆ ดังนี้

| ตะแกรงเบอร์ | % ผ่าน |
|-------------|--------|
| 4 | 91.5 |
| 200 | 62.3 |

จงจำแนกดินโดย

ระบบ USCS

| | |
|-----|--------|
| LL. | 27.4 % |
| PL. | 19.1 % |

วิธีทำ

เนื่องจากมีดินผ่านตะแกรง #200 = 62.3 % ซึ่ง
แสดงว่า

| ตะแกรง เบอร์ | % ผ่าน |
|-----------------|-----------|
| 4 | 91.5 |
| 200 | 62.3 |

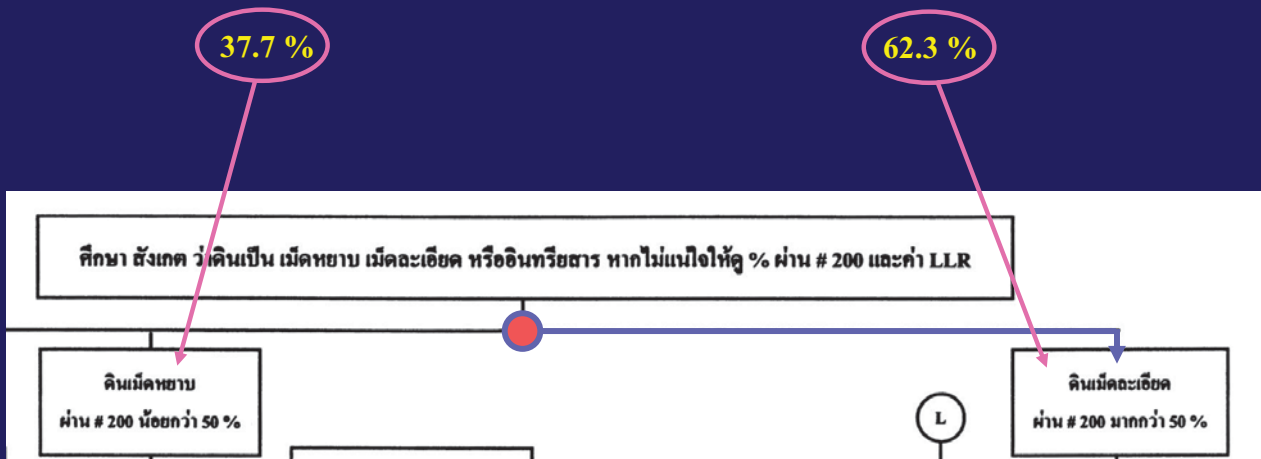
มีดินเม็ดหยาบ = 37.7 %

มีดินเม็ดละเอียด = 62.3 %

ดังนั้นจึงเป็นดินเม็ดละเอียด



L หรือ H



| ตะแกรงเบอร์ | % ผ่าน |
|-------------|--------|
| 4 | 91.5 |
| 200 | 62.3 |

| | |
|-----|--------|
| LL. | 27.4 % |
| PL. | 19.1 % |

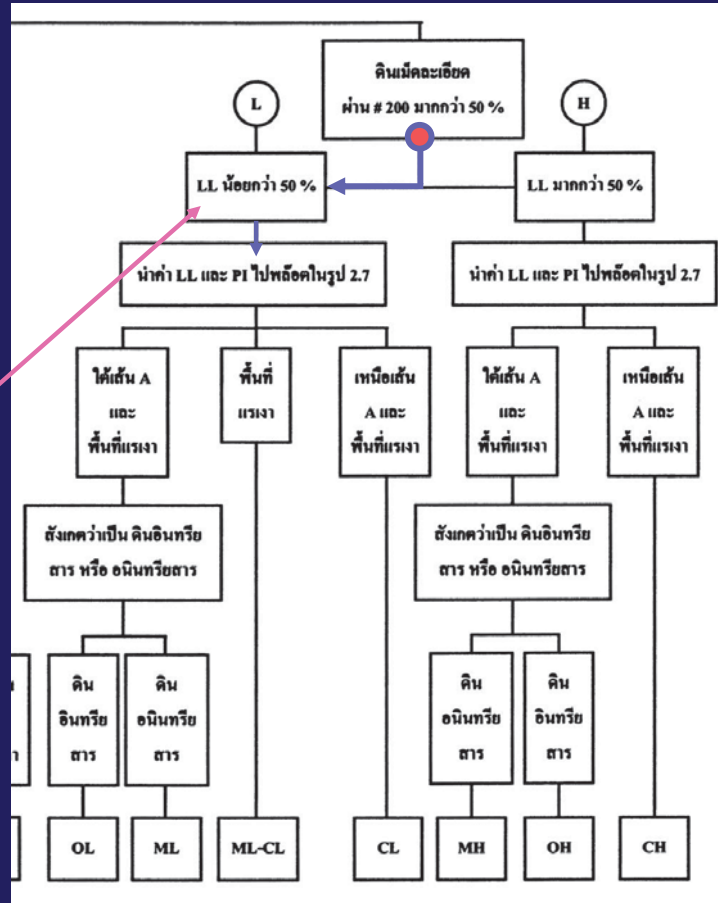
$$PI = LL. - PL.$$

$$= 27.4 - 19.1$$

$$= 8.3 \%$$

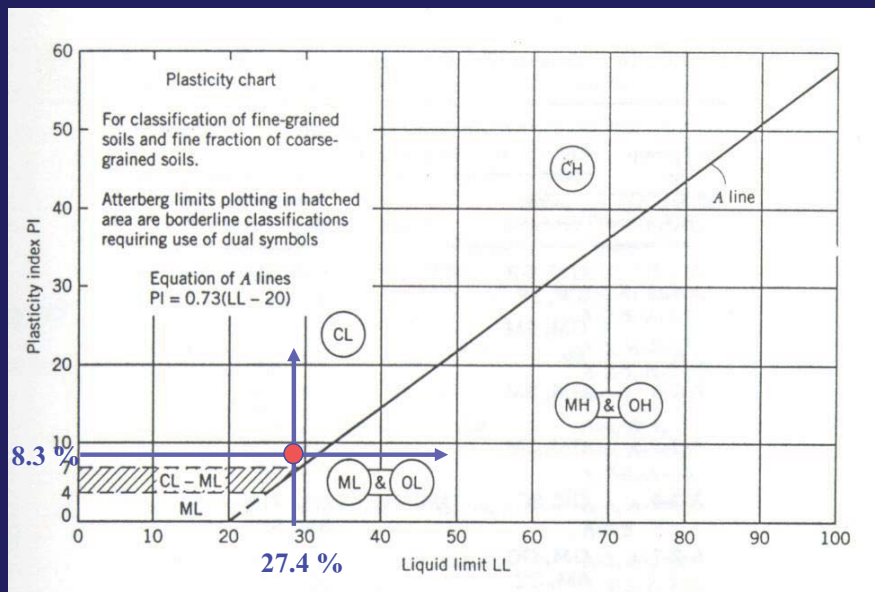
| ตะแกรงเบอร์ | % ผ่าน |
|-------------|--------|
| 4 | 91.5 |
| 200 | 62.3 |

| | |
|-----|--------|
| LL. | 27.4 % |
| PI. | 8.3 % |



| ตะแกรงเบอร์ | % ผ่าน |
|-------------|--------|
| 4 | 91.5 |
| 200 | 62.3 |

| | |
|-----|--------|
| LL. | 27.4 % |
| PI. | 8.3 % |



หรือใช้สมการ $PI. = 0.73(LL. - 20)$

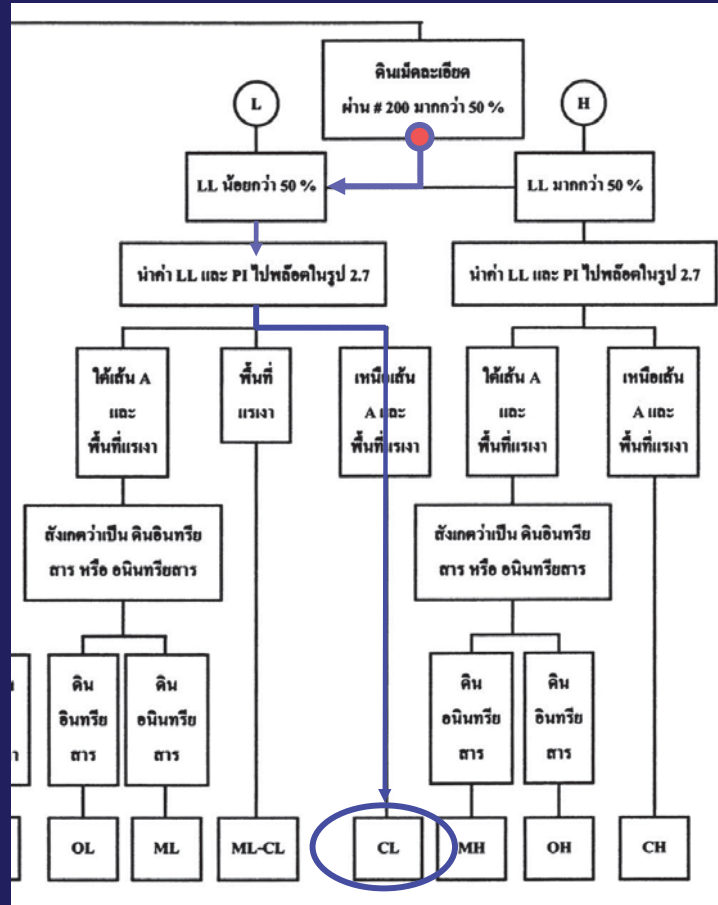
แทนค่า $PI. = 0.73(27.4 - 20)$

จะได้ $PI. = 5.4$ ซึ่ง น้อยกว่า $PI.$ ของดิน (8.3 %)

ดังนั้น ค่า $LL.$ และ $PI.$ อยู่ เหนือเส้น A

| ตะแกรงเบอร์ | % ผ่าน |
|-------------|--------|
| 4 | 91.5 |
| 200 | 62.3 |

| | |
|-----|--------|
| LL. | 27.4 % |
| PI. | 8.3 % |



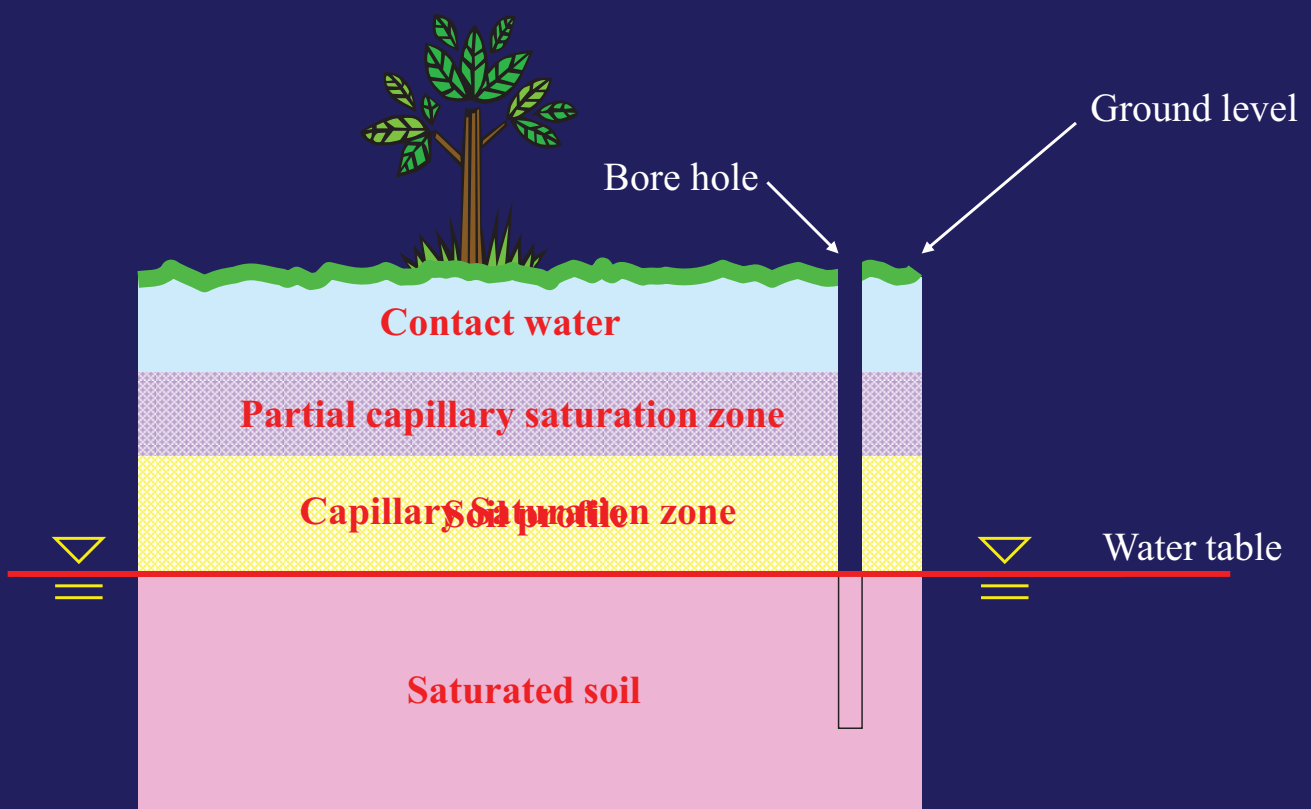
ดังนั้นดินชนิดนี้ คือ

CL

Ans.

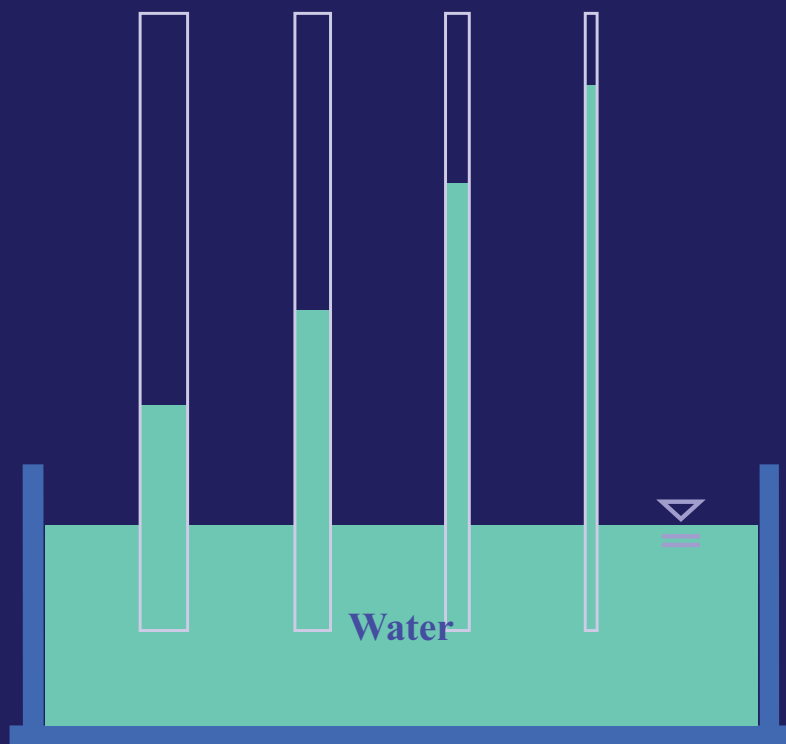
บทที่ 3

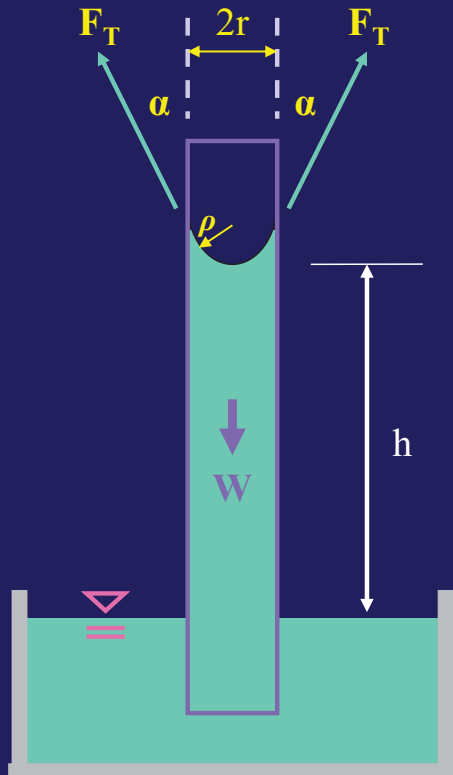
การไหลของน้ำในดิน



สภาพคาพิลลารี (Capillary)

เกิดจากแรงตึงผิว(Surface tension) ของของเหลว ทำให้ของเหลวที่อยู่ในหลอดถูกดึงให้มีระดับสูงขึ้นกว่าบริเวณอื่น





$$W = F_T \cos \alpha$$

$$\gamma_w (\pi \cdot r^2 \cdot h) = T_s (2 \pi r) \cos \alpha$$

$$h = (2 T_s / \gamma_w \cdot r) \cos \alpha$$

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความสูงเฉลี่ยของสภาพคาปิลารี กับดินชนิดต่างๆ

| ชนิดของดิน | ความสูง (cm) |
|--------------|--------------|
| กรวดขนาดเล็ก | 2 - 10 |
| ทรายหยาบ | 15 - 25 |
| ทรายละเอียด | 30 - 100 |
| ดินตะกอน | 100 - 1000 |
| ดินเหนียว | 1000 - 3000 |

การไหลของน้ำ

ลักษณะการไหลของน้ำในดินโดยทั่วไปมี 2 แบบ คือ

● *Turbulent flow*

● *Laminar flow*

Turbulent flow

ลักษณะการไหลของน้ำแบบนี้จะทำให้พลังงานที่สูญเสียไปเป็นสัดส่วนกับความเร็วในการไหลยกกำลังสอง ลักษณะการไหลจะทำให้อนุภาคของน้ำเดินทางแบบสับสนวุ่น

Laminar flow

ลักษณะการไหลของน้ำแบบนี้จะทำให้พลังงานที่สูญเสียไปเป็นสัดส่วนกับความเร็วในการไหล ลักษณะการไหลจะทำให้อนุภาคของน้ำเดินทางราบเรียบต่อกันไป

เขตทางชลศาสตร์ในดิน

**เฮด (Head) หมายถึง พลังงานต่อหน่วย
มวล (Energy per unit mass) มีหน่วยเป็น
ความยาว**

เฮดที่สำคัญมีดังนี้

เฮดความดัน (Pressure head)

เฮดระดับน้ำ (Elevation head)

เฮดความเร็ว (Velocity head)

เฮดทั้งหมด (Total head), h

Bernoulli ได้นิยามค่า เฮดทั้งหมด ว่าเป็นผลรวมของเฮดต่าง ๆ สมการนี้เรียกว่า Bernoulli's equation

$$h = h_p + h_e + h_v$$

เฮดความดัน (Pressure head), h_p

$$h_p = u/\gamma_w$$

เมื่อ

u = ความดันของน้ำที่จุดที่พิจารณา

γ_w = หน่วยน้ำหนักของน้ำ

เฮดระดับน้ำ (Elevation head), h_e

$$h_e = z$$

เมื่อ

z = ระยะทางวัดจาก Datum ถึงจุดที่พิจารณา

เฮดความเร็ว (Velocity head), h_v

$$h_v = v^2/2g$$

เมื่อ

v = ความเร็วในการไหลซึม

g = ความเร่ง

แต่เนื่องจากในดิน ค่าความเร็วในการไหลซึมของน้ำน้อยมาก
($v \gg 0$) ดังนั้น จึงให้ $h_v = 0$

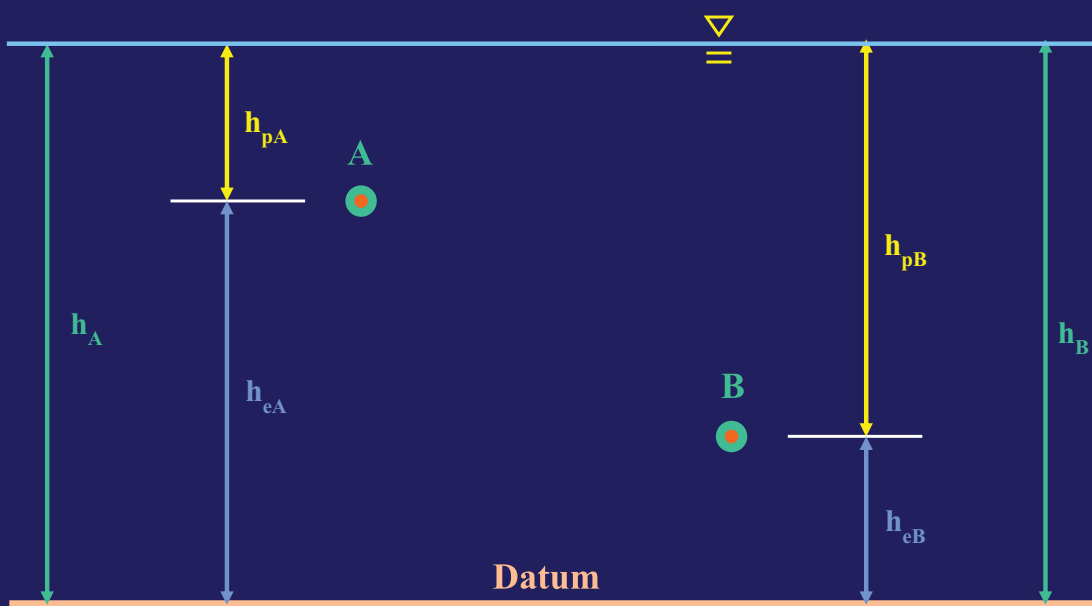
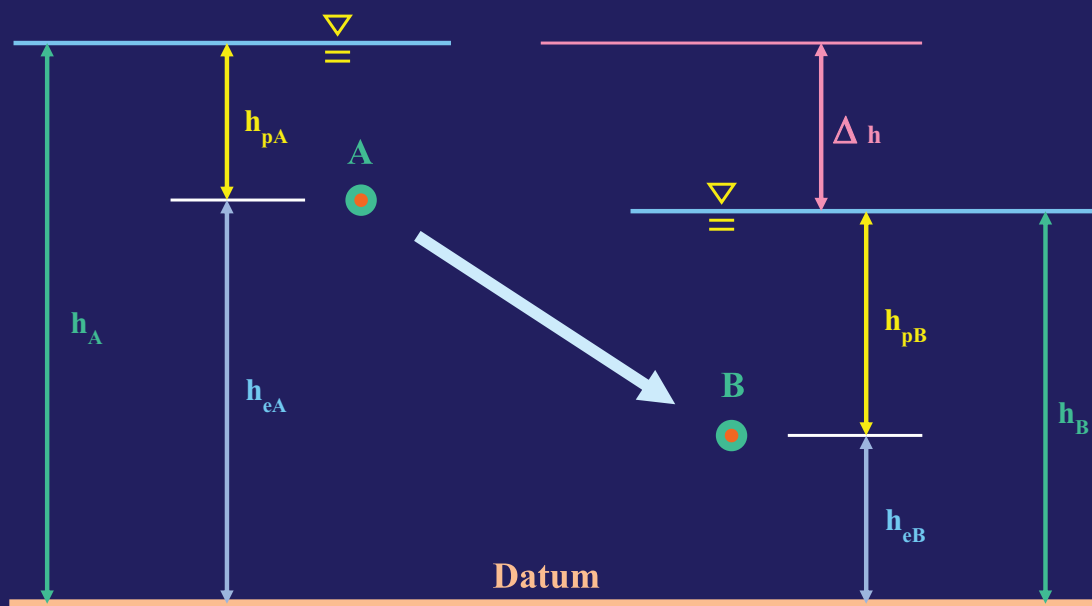


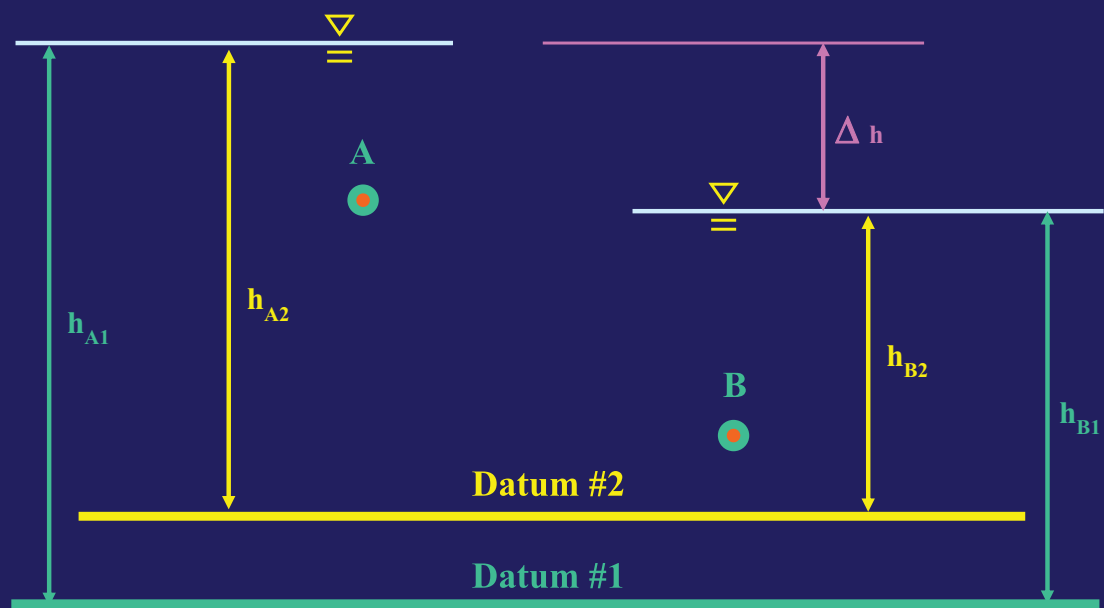
$$h = h_p + h_e$$

การสูญเสียเฮด (Head loss), Δh

เมื่อน้ำไหลจากด้านที่มี Total head สูงไปยังด้านที่มี Total head ต่ำ น้ำจะต้องสูญเสียพลังงาน ซึ่งเรียกว่า การสูญเสียเฮด

$$\Delta h = h_A - h_B$$

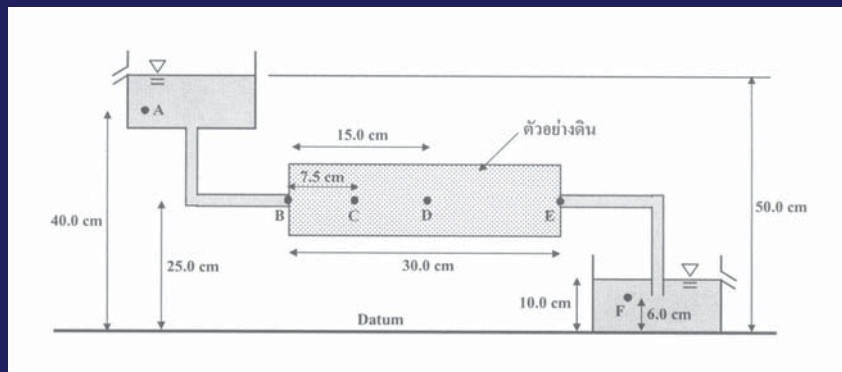




เนื่องจากค่า Pressure head ในดินนั้นหายาก ดังนั้น
 การหาจึงต้องหา Total head และ Elevation head แล้ว
 นำมาลบกันเพื่อหา Pressure head

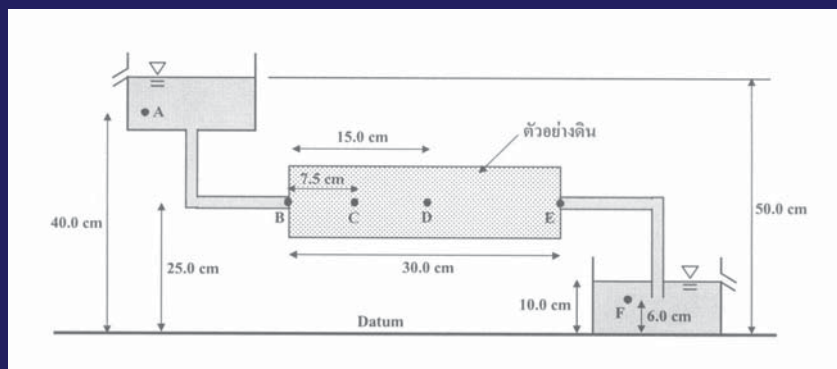
ตัวอย่างที่ 3.1

From the figure shown, a homogeneous soil is placed in the uniform cylinder and the water flow from left to right. The water level at both sides are kept constant during the test. If datum is assumed at the bottom of the lower water tank. Determine total heads, elevation heads and pressure heads at point A, B, C, D, E and F

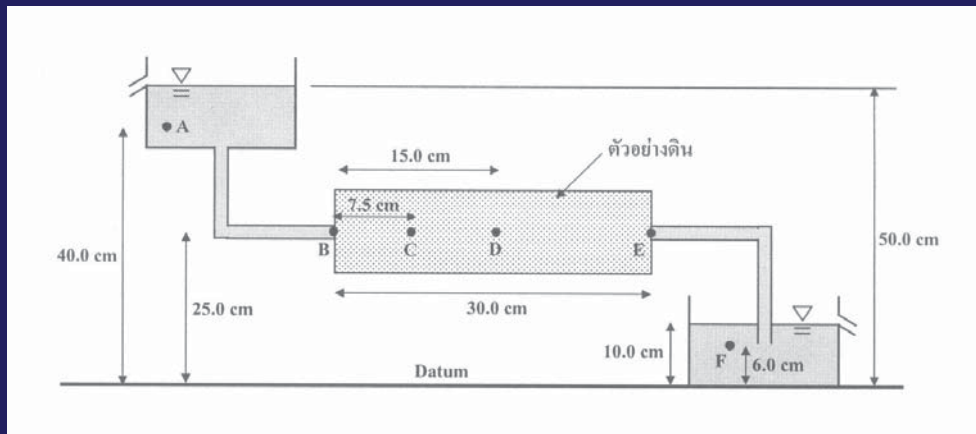


ตัวอย่างที่ 3.1

จากอุปกรณ์ดังรูป ตัวอย่างดินที่ถูกบรรจุอยู่มีคุณสมบัติและพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอตลอดความยาว จากการทดลองจะพบว่าน้ำไหลผ่านดินจากด้านซ้ายไปด้านขวา และระดับน้ำทั้งสองด้านถูกทำให้คงที่ตลอดการทดลอง ถ้าให้ระดับอ้างอิง (Datum) อยู่ที่ก้นถังใบล่าง จงหาค่าเฮดทั้งหมด เฮดระดับน้ำและเฮดความดันที่จุด A B C D E และ F

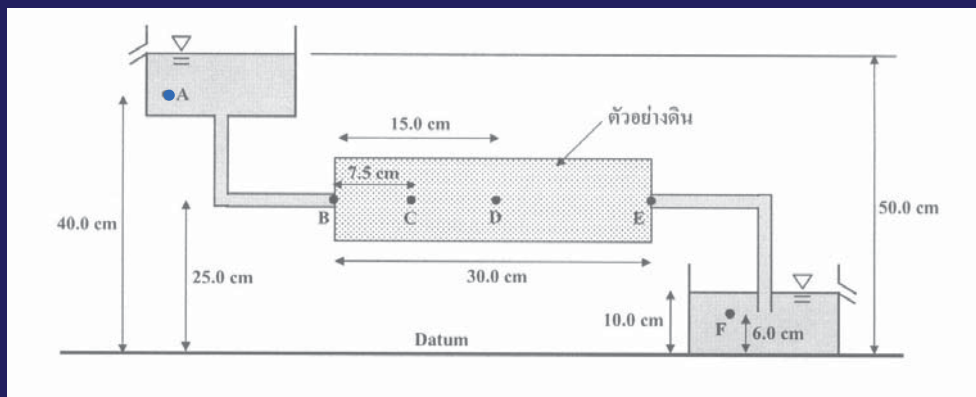


วิธีทำ



น้ำไหลจากซ้ายไปขวา = Total head ด้านซ้าย (50.0 cm) มากกว่า ด้านขวา (10.0 cm)

$$\Delta H (\text{Head loss}) = 50.0 - 10.0 = 40.0 \text{ cm}$$

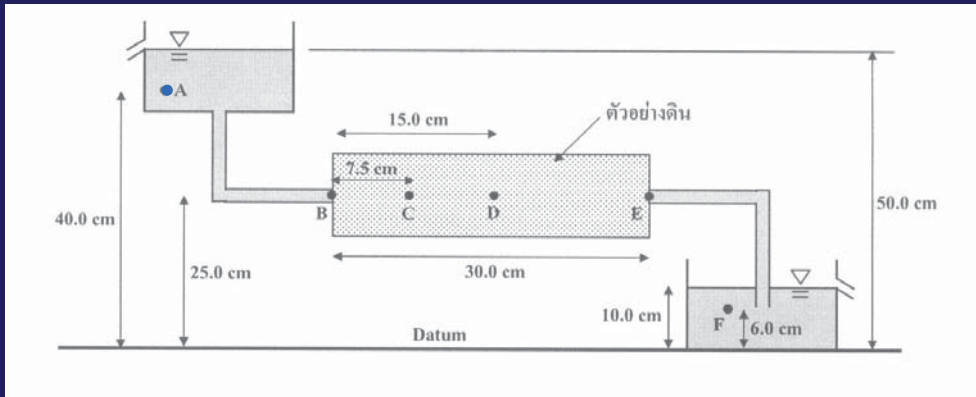


พิจารณาที่จุด A

จากสมการ 3.5, $h_p = u/\gamma_w$

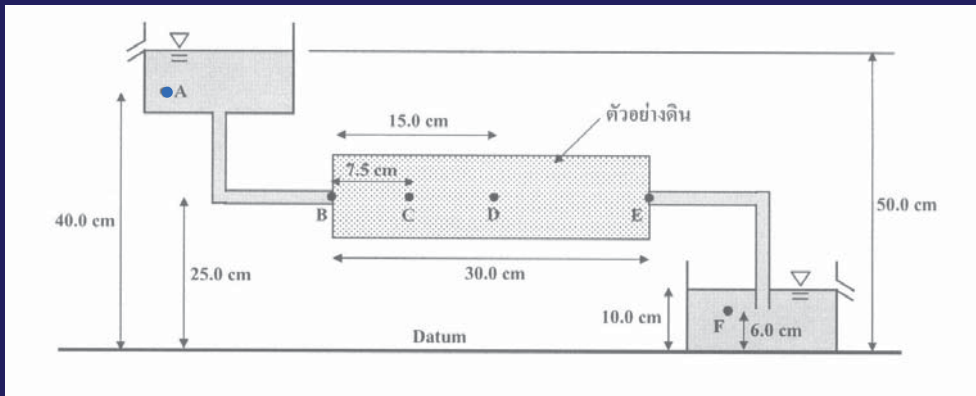
$$h_p = (50.0 - 40.0) \cdot \gamma_w / \gamma_w$$

$$h_p = 10.0 \text{ cm (เท่ากับระยะทางจากระดับน้ำถึงจุด A)}$$



พิจารณาที่จุด A

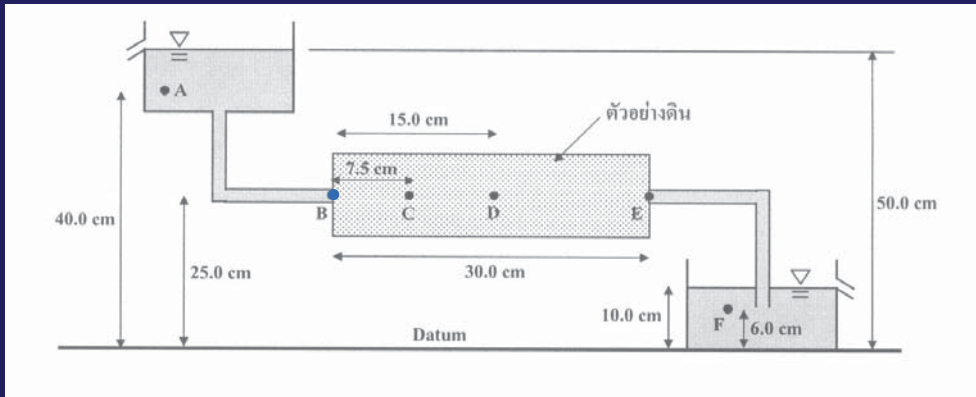
$h_e = 40.0 \text{ cm}$ (เท่ากับระยะทางจากระดับอ้างอิงถึงจุด A)



พิจารณาที่จุด A

จากสมการ 3.8, $h = h_p + h_e$ แทนค่า

$$h = 10.0 + 40.0 = 50.0 \text{ cm}$$

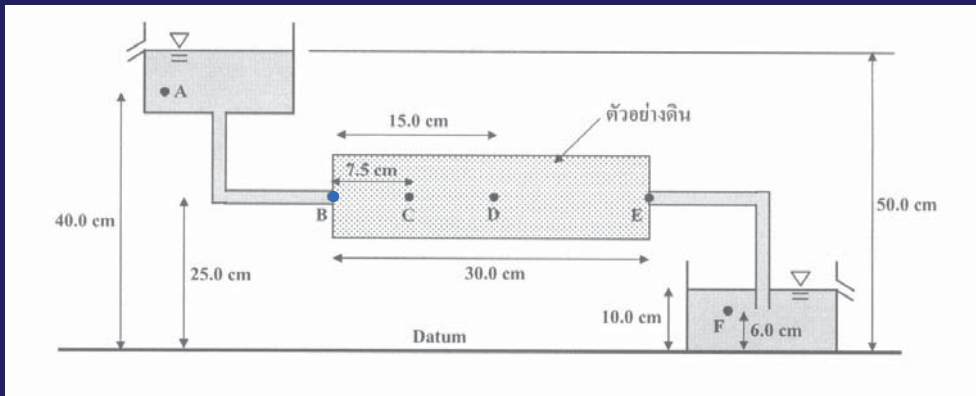


พิจารณาที่จุด B

จากสมการ 3.5, $h_p = u/\gamma_w$

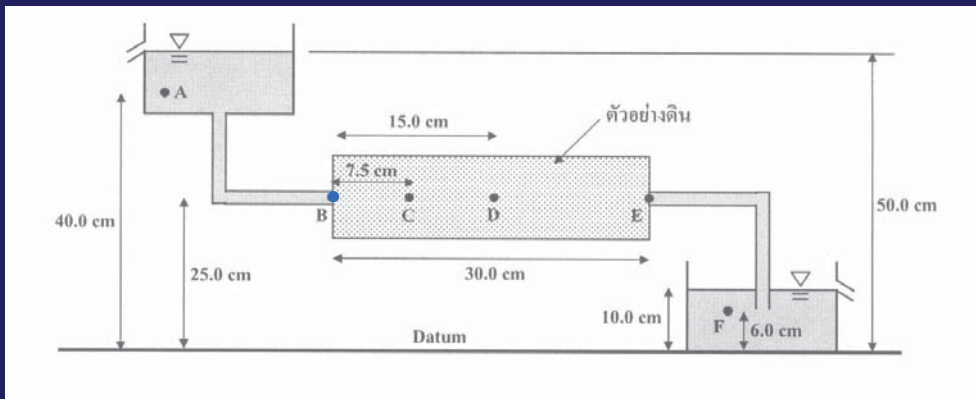
$$h_p = (50.0 - 25.0) \cdot \gamma_w / \gamma_w$$

$$h_p = 25.0 \text{ cm (เท่ากับระยะทางจากระดับน้ำถึงจุด B)}$$



พิจารณาที่จุด B

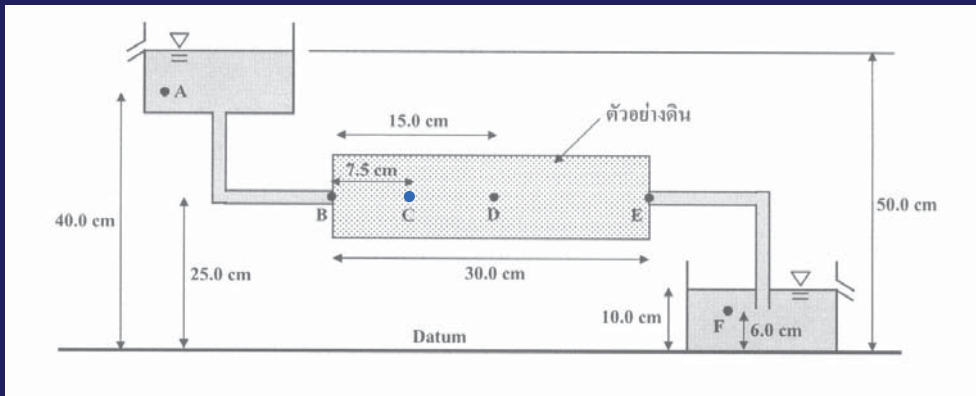
$$h_e = 25.0 \text{ cm (เท่ากับระยะทางจากระดับอ้างอิงถึงจุด B)}$$



พิจารณาที่จุด B

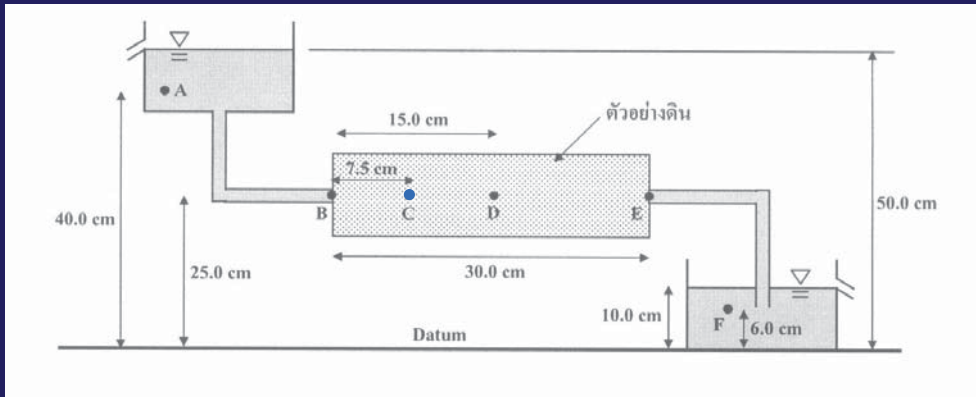
จากสมการ 3.8, $h = h_p + h_c$ แทนค่า

$$h = 25.0 + 25.0 = 50.0 \text{ cm}$$



พิจารณาที่จุด C

เนื่องจากจุด C อยู่ในตัวอย่างดินห่างจากจุด B เท่ากับ 7.5 cm หรือ $\frac{1}{4}$ ของความยาวทั้งหมด ซึ่งการไหลผ่านดินจาก B ไป E จะทำให้มีการสูญเสียเฮดเท่ากับ 40.0 cm ดังนั้นการสูญเสียเฮดเนื่องจากการไหล $\frac{1}{4}$ ของความยาวทั้งหมดจะเท่ากับ $40.0/4 = 10.0 \text{ cm}$

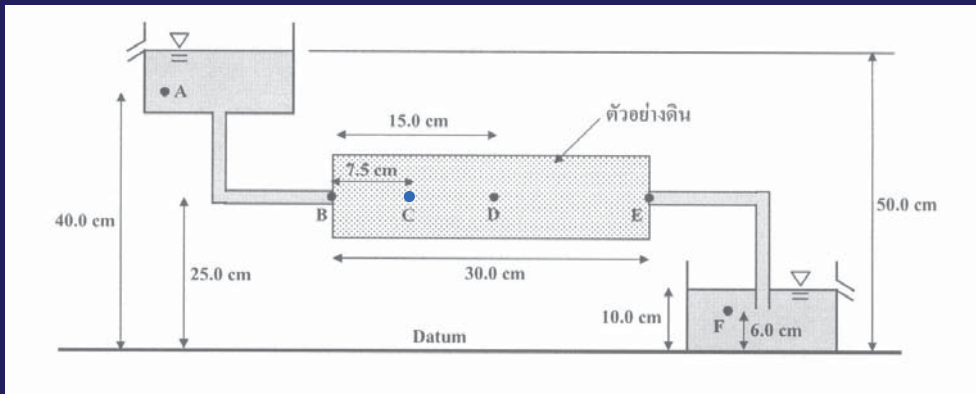


พิจารณาที่จุด C

Total head ที่จุด C = Total head ที่จุด B – Head loss เนื่องจากการไหลของน้ำจาก B ไป C

$$\text{Total head ที่จุด C} = 50.0 - 10.0$$

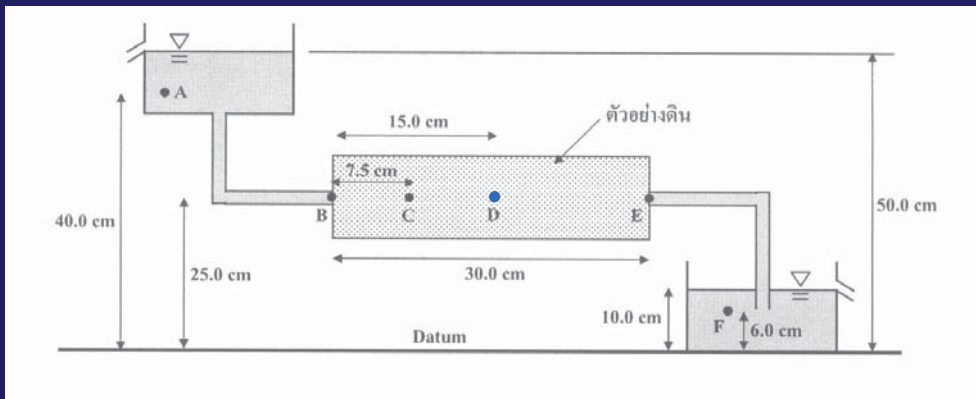
$$\text{Total head ที่จุด C} = 40.0 \text{ cm}$$



พิจารณาที่จุด C

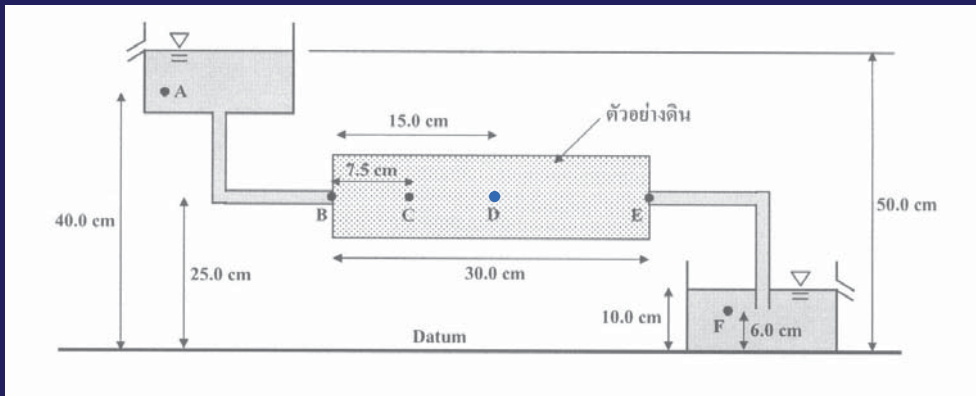
$$h_e = 25.0 \text{ cm (เท่ากับระยะทางจากระดับอ้างอิงถึงจุด C)}$$

$$\text{ดังนั้น } h_p = 40.0 - 25.0 = 15.0 \text{ cm}$$



พิจารณาที่จุด D

เนื่องจากจุด D อยู่ในตัวอย่างดินห่างจากจุด C เท่ากับ 7.5 cm หรือ $\frac{1}{4}$ ของความยาวทั้งหมด ซึ่งการไหลผ่านดินจาก B ไป E จะทำให้มีการสูญเสียเฮดเท่ากับ 40.0 cm ดังนั้นการสูญเสียเฮดเนื่องจากการไหล $\frac{1}{4}$ ของความยาวทั้งหมดจะเท่ากับ $40.0/4 = 10.0$ cm

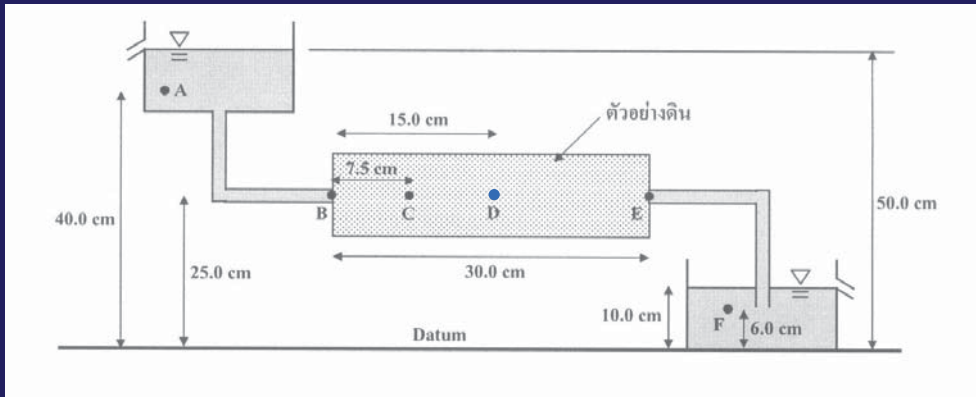


พิจารณาที่จุด D

Total head ที่จุด D = Total head ที่จุด C – Head loss เนื่องจากการไหลของน้ำจาก C ไป D

$$\text{Total head ที่จุด D} = 40.0 - 10.0$$

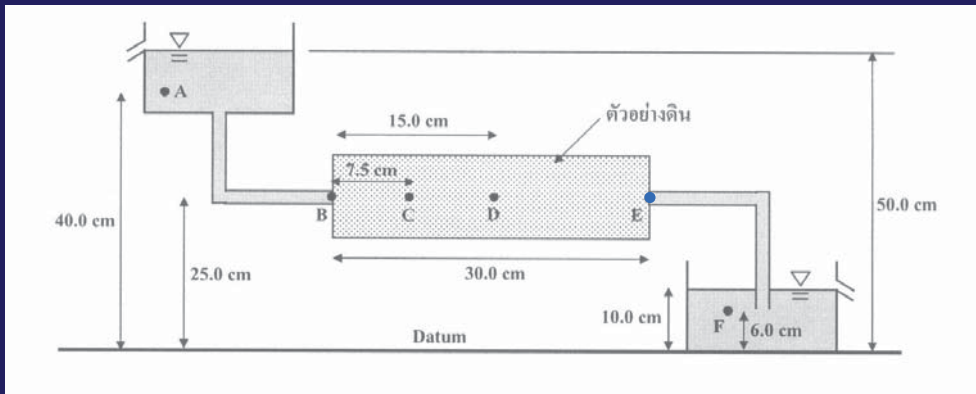
$$\text{Total head ที่จุด D} = 30.0 \text{ cm}$$



พิจารณาที่จุด D

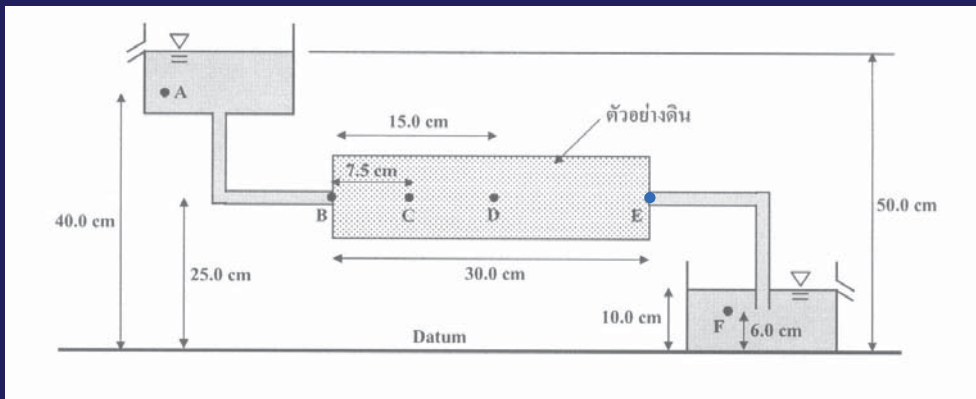
$h_e = 25.0 \text{ cm}$ (เท่ากับระยะทางจากระดับอ้างอิงถึงจุด D)

ดังนั้น $h_p = 30.0 - 25.0 = 5.0 \text{ cm}$



พิจารณาที่จุด E

เนื่องจากจุด E อยู่ในตัวอย่างดินห่างจากจุด D เท่ากับ 15.0 cm หรือ 1/2 ของความยาวทั้งหมด ซึ่งการไหลผ่านดินจาก B ไป E จะทำให้มีการสูญเสียเฮดเท่ากับ 40.0 cm ดังนั้นการสูญเสียเฮดเนื่องจากการไหล 1/2 ของความยาวทั้งหมดจะเท่ากับ $40.0/2 = 20.0 \text{ cm}$

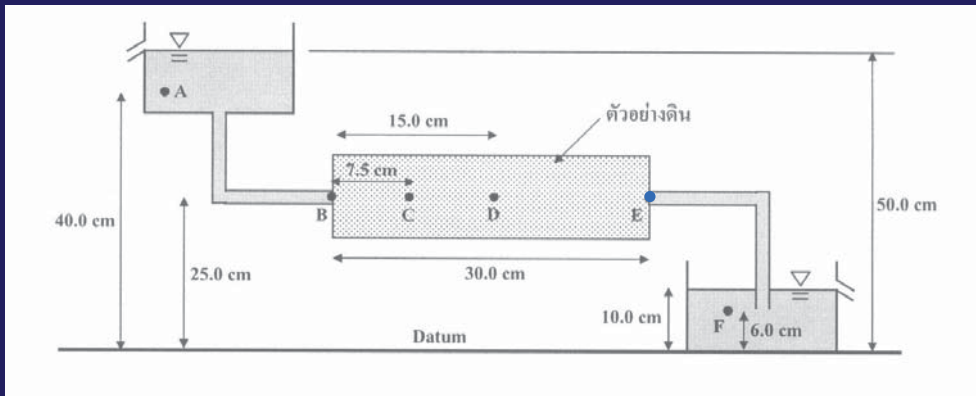


พิจารณาที่จุด E

Total head ที่จุด E = Total head ที่จุด D – Head loss เนื่องจากการไหลของน้ำจาก D ไป E

$$\text{Total head ที่จุด E} = 30.0 - 20.0$$

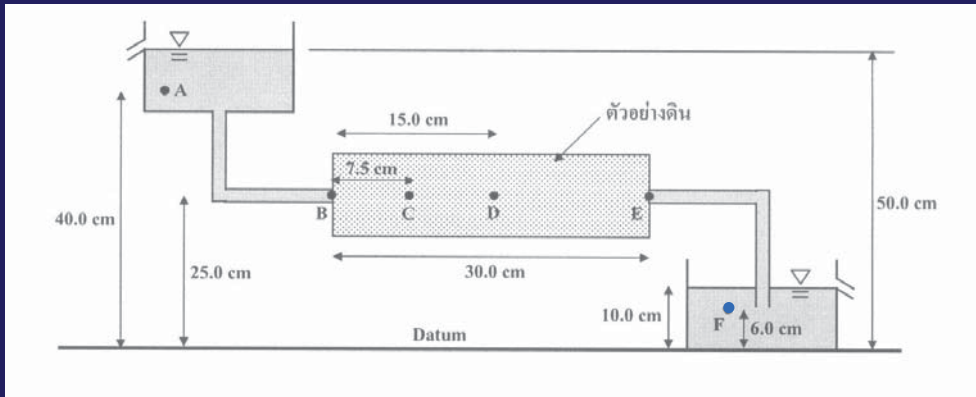
$$\text{Total head ที่จุด E} = 10.0 \text{ cm}$$



พิจารณาที่จุด E

$$h_e = 25.0 \text{ cm (เท่ากับระยะทางจากระดับอ้างอิงถึงจุด E)}$$

$$\text{ดังนั้น } h_p = 10.0 - 25.0 = -15.0 \text{ cm}$$

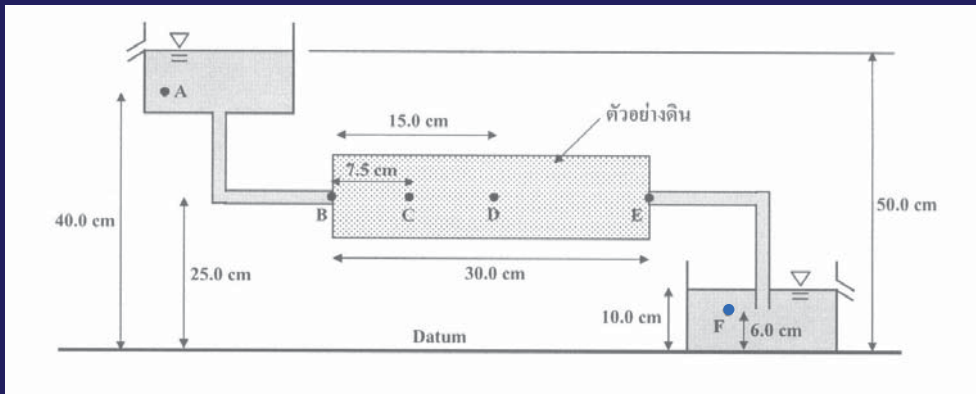


พิจารณาที่จุด F

จากสมการ 3.5, $h_p = u/\gamma_w$

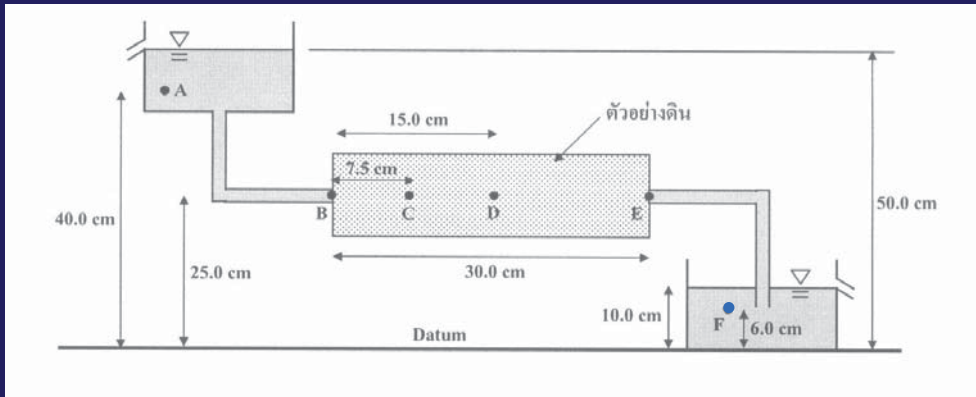
$$h_p = (10.0 - 6.0) \cdot \gamma_w / \gamma_w$$

$$h_p = 4.0 \text{ cm (เท่ากับระยะทางจากระดับน้ำถึงจุด F)}$$



พิจารณาที่จุด F

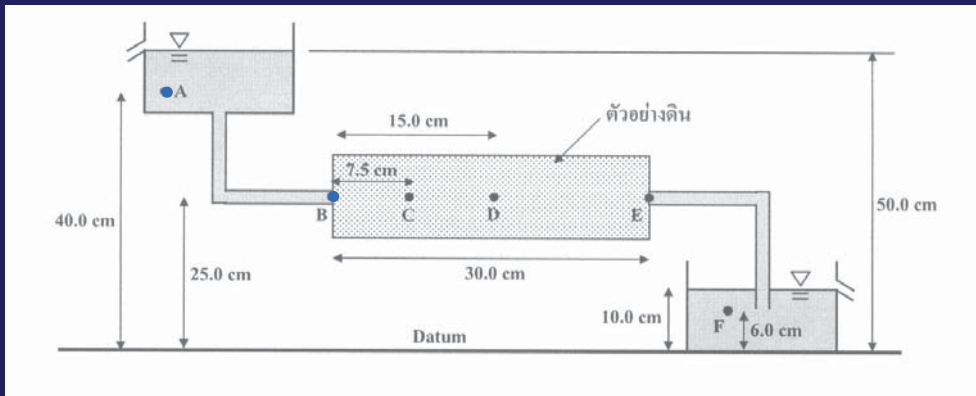
$$h_e = 6.0 \text{ cm (เท่ากับระยะทางจากระดับอ้างอิงถึงจุด F)}$$



พิจารณาที่จุด F

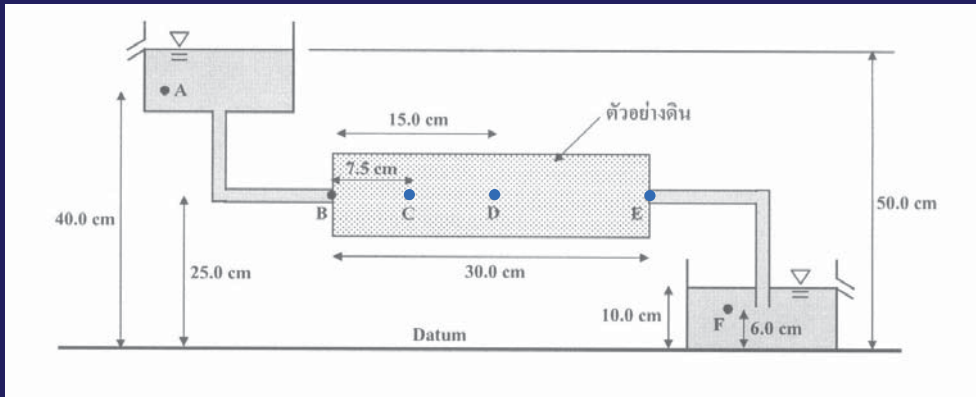
จากสมการ 3.8, $h = h_p + h_c$ แทนค่า

$$h = 4.0 + 6.0 = 10.0 \text{ cm}$$



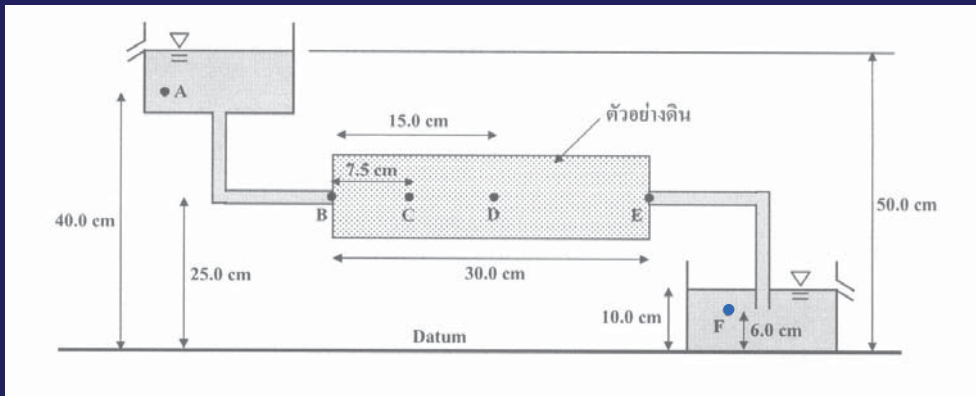
สรุป

| จุด | Total head, cm | Elev. head, cm | Pre. Head, cm |
|-----|----------------|----------------|---------------|
| A | 50.0 | 40.0 | 10.0 |
| B | 50.0 | 25.0 | 25.0 |



สรุป

| จุด | Total head, cm | Elev. head, cm | Pre. head, cm |
|-----|----------------|----------------|---------------|
| C | 40.0 | 25.0 | 15.0 |
| D | 30.0 | 25.0 | 5.0 |
| E | 10.0 | 25.0 | -15.0 |



สรุป

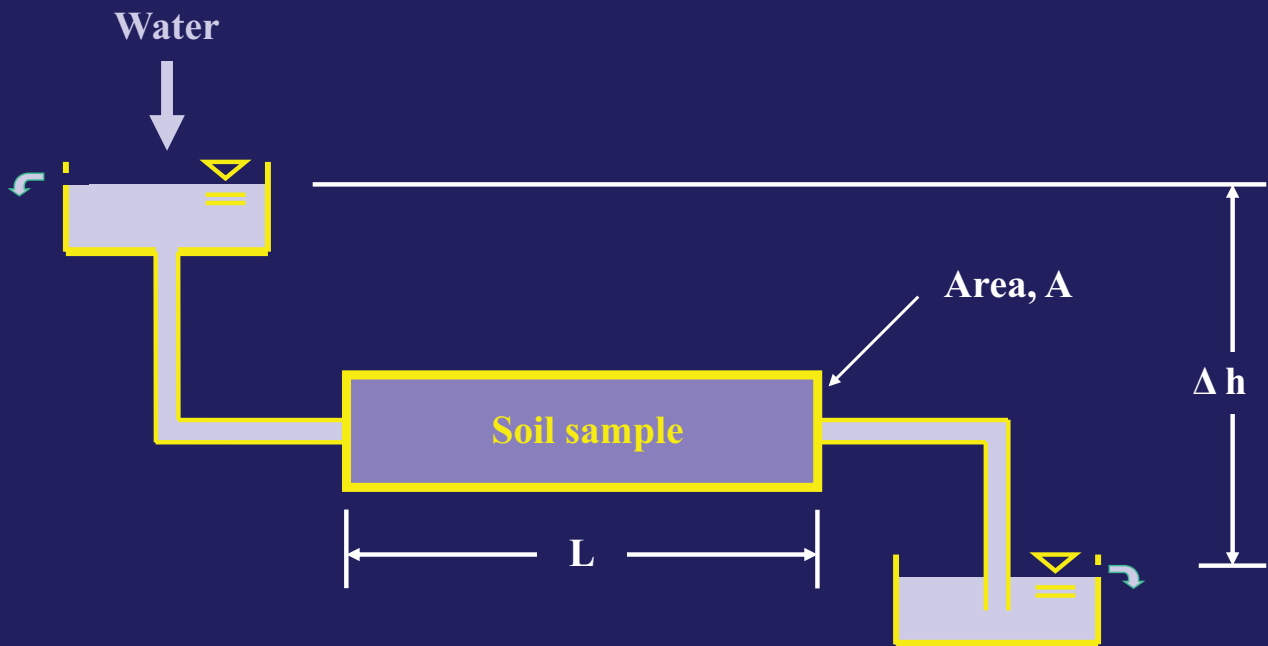
| จุด | Total head, cm | Elev. head, cm | Pre. Head, cm |
|-----|----------------|----------------|---------------|
| F | 10.0 | 6.0 | 4.0 |

Ans.

กฎของดาร์ซี (Darcy's law)

นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ชื่อ Henri Darcy ได้ศึกษาการไหลซึมของน้ำผ่าน Clean sands ในปี 1856 และสรุปว่า

ถ้าการไหลของน้ำผ่านดินเป็นการไหลแบบราบเรียบ (*Lamina flow*) ปริมาณการไหลของน้ำ จะเป็นสัดส่วนกับพื้นที่หน้าตัดของดินและค่าความลาดเชิงชลศาสตร์ (*Hydraulic gradient*)



$$q \propto A.i$$

$$q = k.A.i$$

เมื่อ

q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินต่อช่วงเวลา

A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดินที่น้ำไหลผ่าน

i = ความลาดเชิงชลศาสตร์ = $\Delta h/L$

k = สัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Coefficient of permeability)

$$v = k.i$$

$$v_e = q/(n.A)$$

เมื่อ

v = ความเร็วในการไหลตามผิว (Superficial velocity)

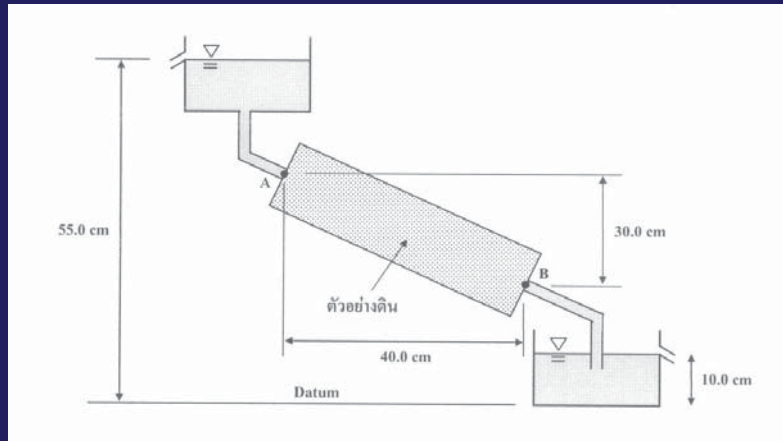
v_e = ความเร็วในการไหลซึม

n = ค่าความพรุน

A = พื้นที่หน้าตัดของดิน

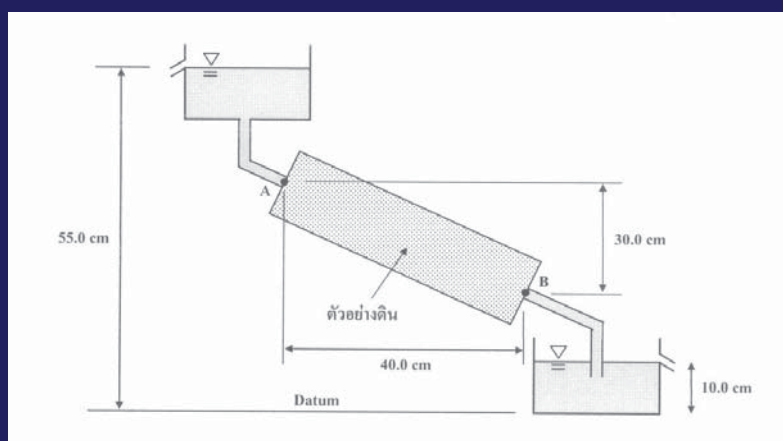
ตัวอย่างที่ 3.2

An isotropic soil having the coefficient of permeability 4.0×10^{-5} cm/s is placed in the uniform cylinder which has a diameter of 10.0 cm ,as figure. Determine the amount of water that flow through this soil.

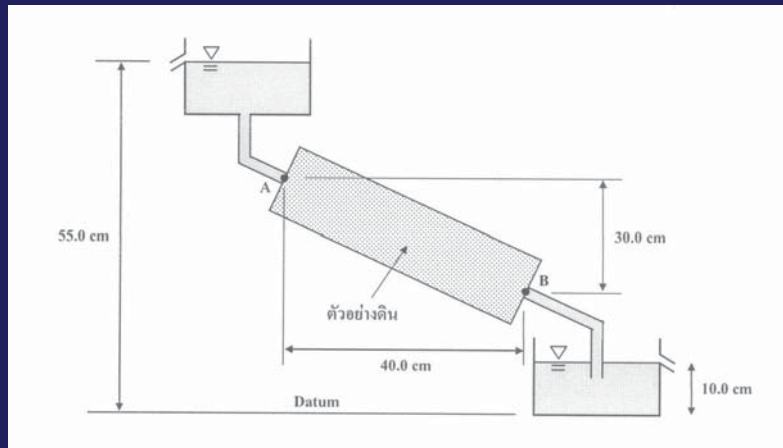


ตัวอย่างที่ 3.2

ตัวอย่างดินมีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง มีค่าความซึมผ่านเท่ากับ 4.0×10^{-5} cm/s ถูกบรรจุอยู่ในกระบอกตัวอย่างมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10.0 cm และถูกติดตั้งอยู่กับอุปกรณ์ทดลองในตำแหน่งดังรูป จงหาปริมาณน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างดินนี้

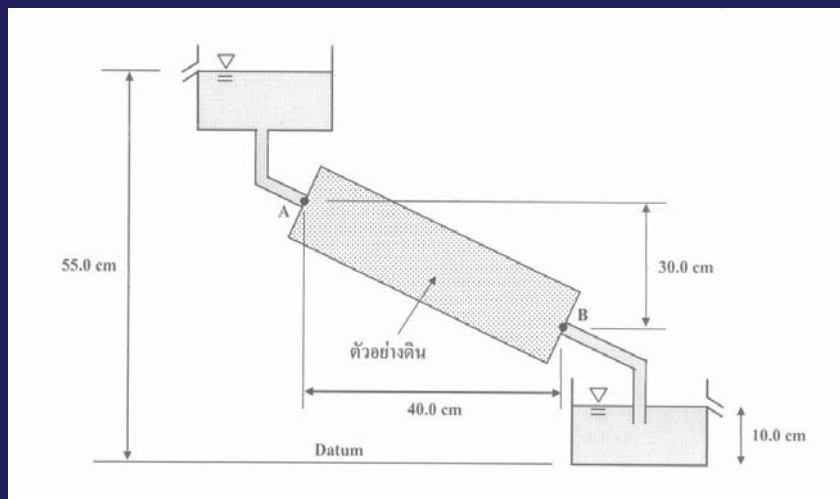


วิธีทำ

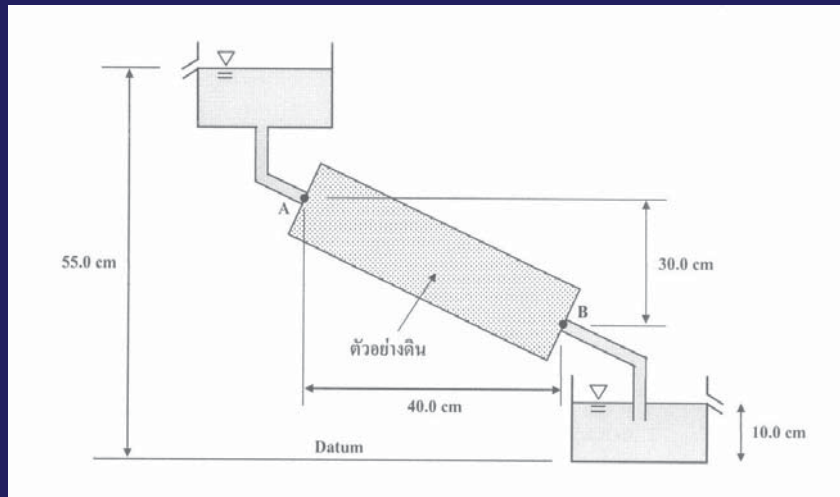


ให้ระดับอ้างอิงอยู่ที่ก้นอ่างใบล่าง ดังนั้น $\Delta h = 55.0 - 10.0 = 45.0 \text{ cm}$

$$\text{ระยะ } AB = (30^2 + 40^2) = 50.0 \text{ cm}$$



จาก $i = \Delta h/L$ แทนค่า $i = 45.0/50.0 = 0.9$



จากสมการ 3.9, $q = k.A.i$ แทนค่า

$$q = 4.0 \times 10^{-5} \times (\pi \times 10^2/4) \times 0.9$$

$$q = 2.83 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{s}$$

Ans.

สัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน

สัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน, k

ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Coefficient of permeability) หรือค่าความซึมผ่าน (Permeability) เป็นตัวบอกลักษณะสมบัติของดินที่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้ยากหรือง่าย ค่านี้มีหน่วยเป็นความเร็ว ขนาดของค่าขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ความหนืดของน้ำ ลักษณะของเม็ดดินและขนาดของช่องว่างระหว่างเม็ดดิน

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณลักษณะของค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน และชนิดของดิน

| คุณลักษณะ | ค่า k (mm/sec) | ชนิดของดิน |
|--|---------------------------------------|-------------------|
| ซึมผ่านได้ง่าย (Very permeable) | มากกว่า 1 | กรวดหยาบ |
| ซึมผ่านได้ปานกลาง (Medium permeability) | 1×10^{-2} | ทราย, ทรายละเอียด |
| ซึมผ่านได้ต่ำ (Low permeability) | $1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-4}$ | ดินตะกอนทราย |
| ซึมผ่านได้ต่ำมาก (Very low permeability) | $1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-6}$ | ดินตะกอน |
| ซึมผ่านไม่ได้ (Impervious) | น้อยกว่า 1×10^{-6} | ดินเหนียว |

A. Hazen ได้เสนอสมการหาค่า k ของทราย

$$k = c (D_{10})^2$$

เมื่อ

k = สัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน เป็น เซนติเมตร/วินาที

c = ค่าคงที่

D_{10} = ขนาดประสิทธิผล เป็น เซนติเมตร (0.1 – 3.0 mm)

ตารางที่ 2.3 แสดงค่า C

| C | ลักษณะของทราย |
|-----------|---|
| 40 - 80 | ทรายละเอียดมาก, มีขนาดคละกัณฑ์หรือมีดินเม็ดละเอียดปน |
| 80 - 120 | ดินเม็ดหยาบปานกลาง, มีขนาดสม่ำเสมอหรือดินเม็ดหยาบมีขนาดคละกัณฑ์ |
| 120 - 150 | ดินเม็ดหยาบขนาดใหญ่, มีขนาดสม่ำเสมอ, กรวด |

เนื่องจากค่า k มีขนาดเล็กมากทำให้ความหนืดของน้ำมีผลต่อค่า k มาก ดังนั้นเวลาอ้างอิง จึงต้องอ้างอิงที่อุณหภูมิมาตรฐานคือที่ 20 องศาเซลเซียส

$$k_{20^{\circ}\text{c}} = k_{T^{\circ}\text{c}} (\eta_{T^{\circ}\text{c}} / \eta_{20^{\circ}\text{c}})$$

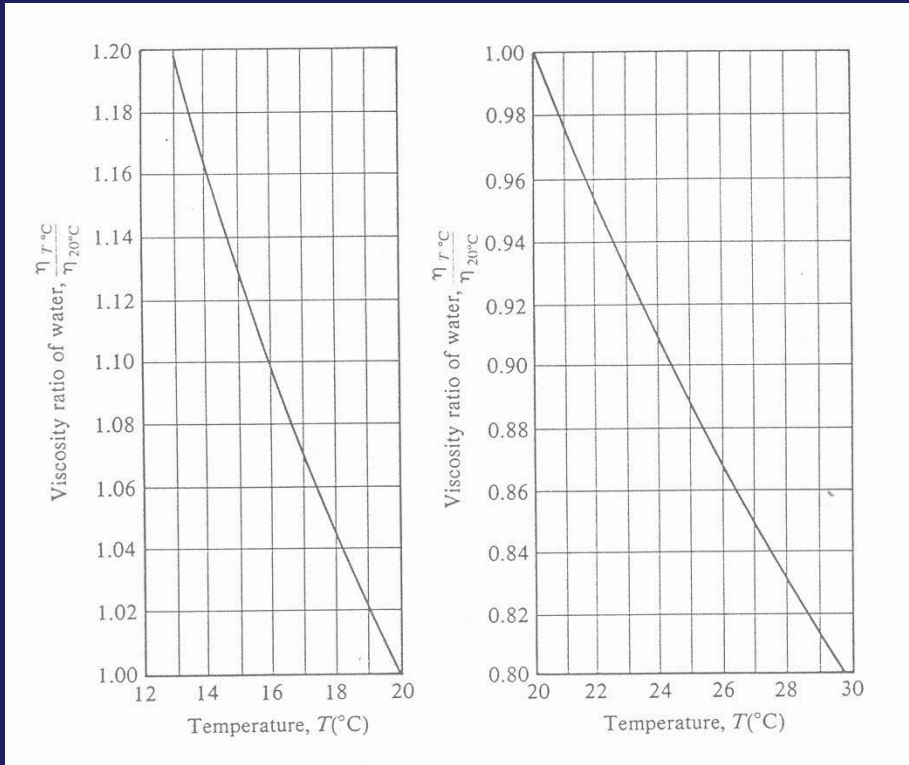
เมื่อ

$k_{20^{\circ}\text{c}}$ = ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านที่ 20°C

$\eta_{T^{\circ}\text{c}}$ = ค่าความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิตดลอง

$k_{T^{\circ}\text{c}}$ = ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านที่อุณหภูมิตดลอง

$\eta_{20^{\circ}\text{c}}$ = ค่าความหนืดของน้ำที่ 20°C



การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นผ่าน

การทดลองในห้องปฏิบัติการ

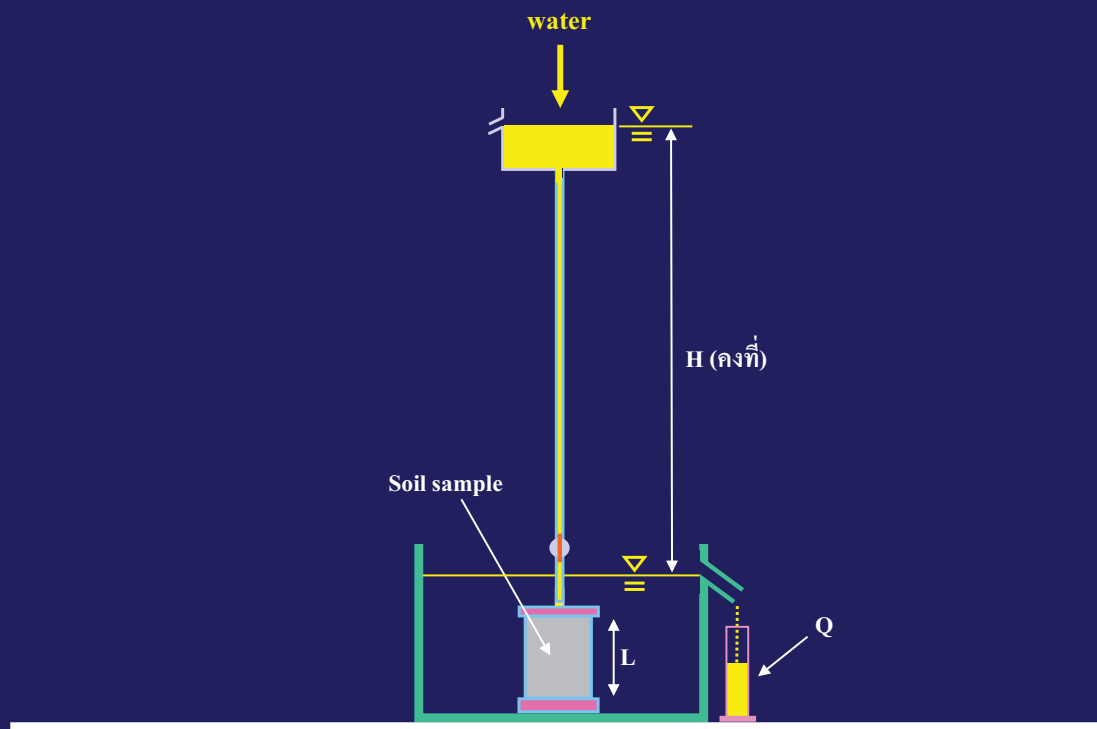
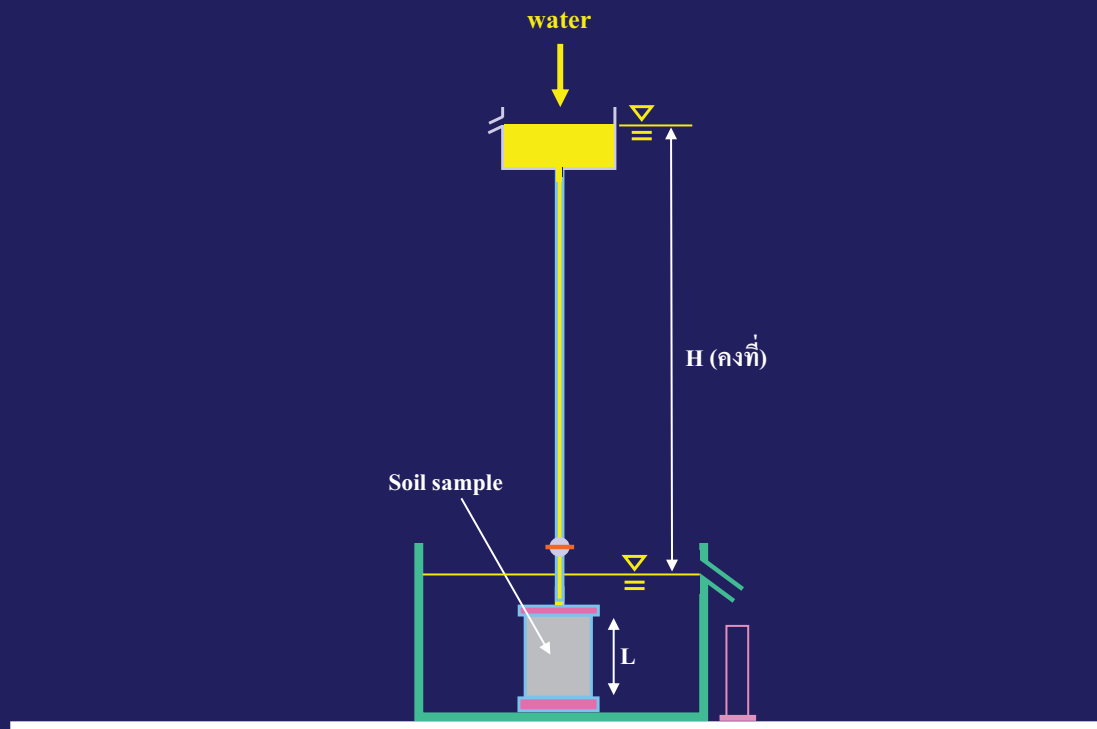
เนื่องจากค่า k มีขนาดเล็กมาก การทดลองในห้องปฏิบัติการจึงต้องมีความระมัดระวังอย่างมาก เช่น เครื่องมือต้องอยู่ในสภาพที่ดี และอาจจะต้องมีการควบคุมอุณหภูมิในห้องปฏิบัติการเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำขณะทดลอง การทดลองในห้องปฏิบัติการมี 2 วิธี คือ

1. Constant head test

2. Falling head test

Constant head test

ใช้ทดลองกับดินเม็ดหยาบ เช่น กรวด ทราย ที่มีค่า k มากกว่า 10^{-3} cm/s



$$k = Q.L/(t.H.A)$$

เมื่อ

Q = ปริมาณน้ำที่ไหลในเวลา t

L = ความหนาของตัวอย่างดิน

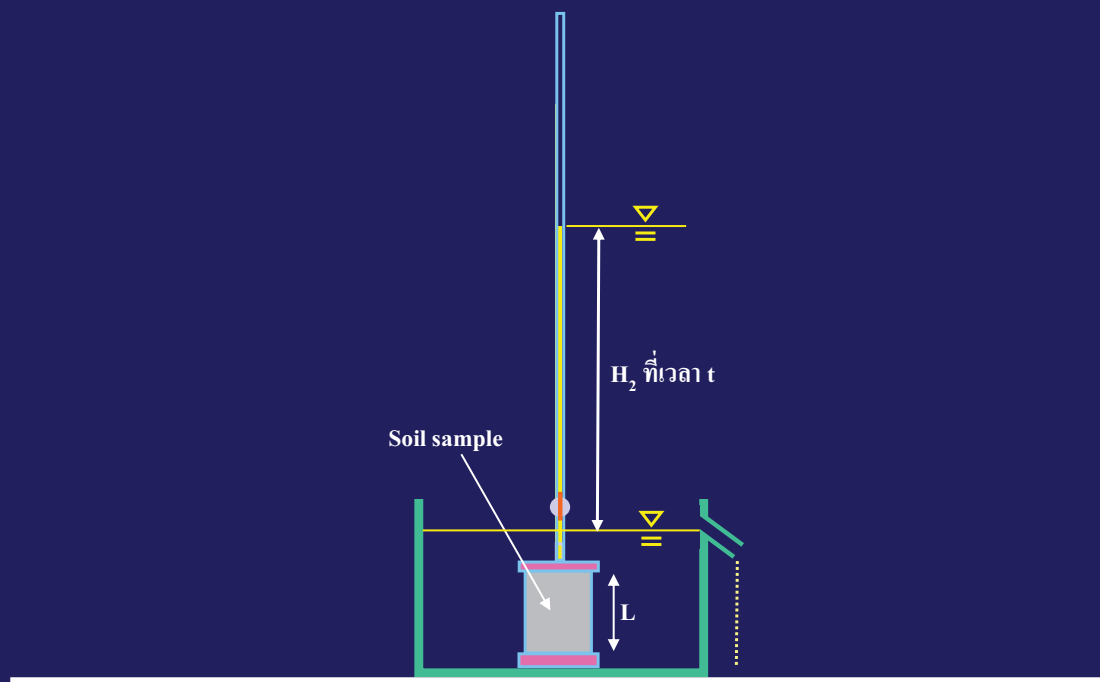
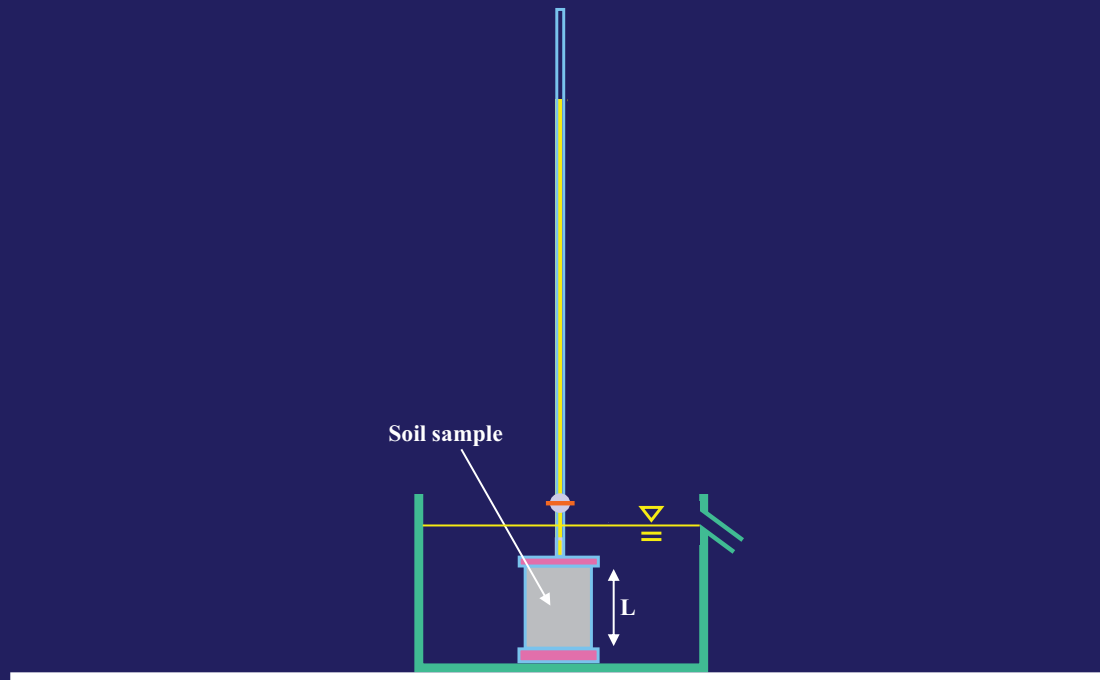
H = ระยะแตกต่างของระดับน้ำ

A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง

t = ระยะเวลาที่ทดลอง

Falling head test

ใช้ทดลองกับดินเม็ดละเอียด เช่น ดินตะกอน ที่มีค่า k
น้อยกว่า 10^{-3} cm/sec



$$k = \{a.L/(A.t)\} \ln (H_1/H_2) \quad \text{หรือ} \quad k = \{2.3 a.L/(A.t)\} \log (H_1/H_2)$$

เมื่อ

a = พื้นที่หน้าตัดของ Standpipe

A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดิน

L = ความหนาของตัวอย่าง

H_1 = ระดับน้ำที่เริ่มต้น เมื่อ $t = 0$

H_2 = ระดับน้ำที่สิ้นสุด

t = ระยะเวลาที่น้ำลดจาก H_1 มายัง H_2

การทดลองในสนาม

1. Pumping test
2. Seepage velocity
3. Open end pipe

Pumping test

เป็นการทดลองที่นิยมใช้มานาน กระทำโดยการสูบน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาล (Pumping well) ด้วยอัตราการที่จนกระทั่งระดับน้ำในบ่อสังเกตการณ์ (Observation well) อยู่ในระดับคงที่ ลักษณะการไหลของน้ำจะเป็นการไหลแบบรัศมี (Radial flow)

Unconfined flow

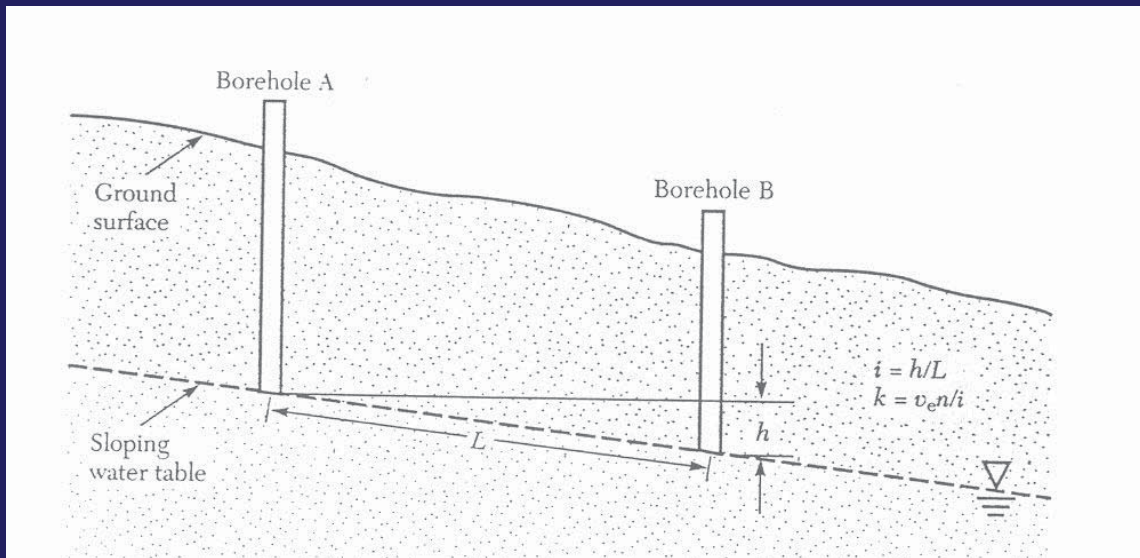
$$k = \frac{q \cdot \ln(r_2/r_1)}{[\pi(h_2^2 - h_1^2)]}$$

Confined flow

$$k = q \cdot \ln(r_2/r_1) / [2 \cdot \pi \cdot D(h_2 - h_1)]$$

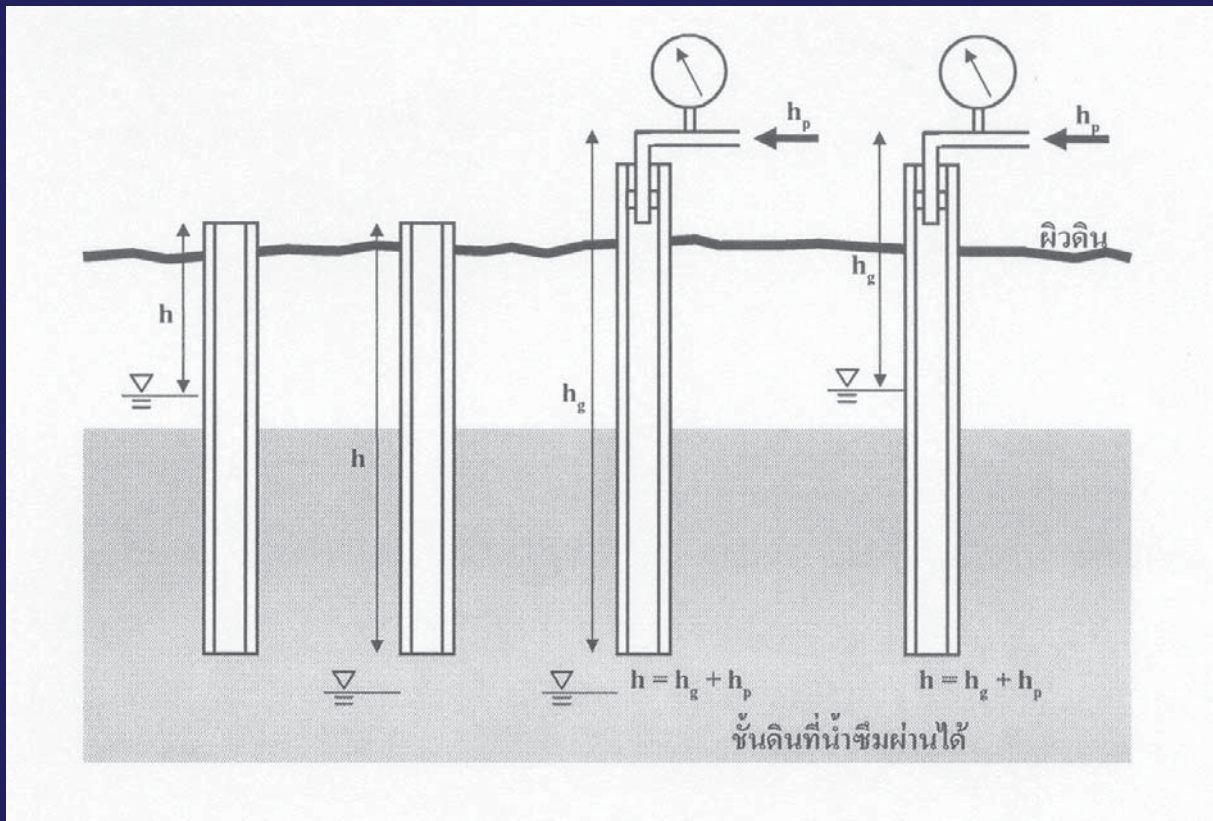
Seepage velocity

การทดลองวิธีนี้เหมาะกับดินเม็ดหยาบ การทดลองทำโดยการเจาะบ่อสังเกตการณ์ 2 บ่อให้ห่างกันพอประมาณ จากนั้นใส่สารเคมีหรือสารเรืองแสงที่บ่อแรก และใช้เครื่องมือสำหรับตรวจจับสารดังกล่าวที่บ่อที่ 2 จับเวลาที่สารเดินทางมาถึง แล้วนำไปคำนวณหาค่า k



Open end pipe

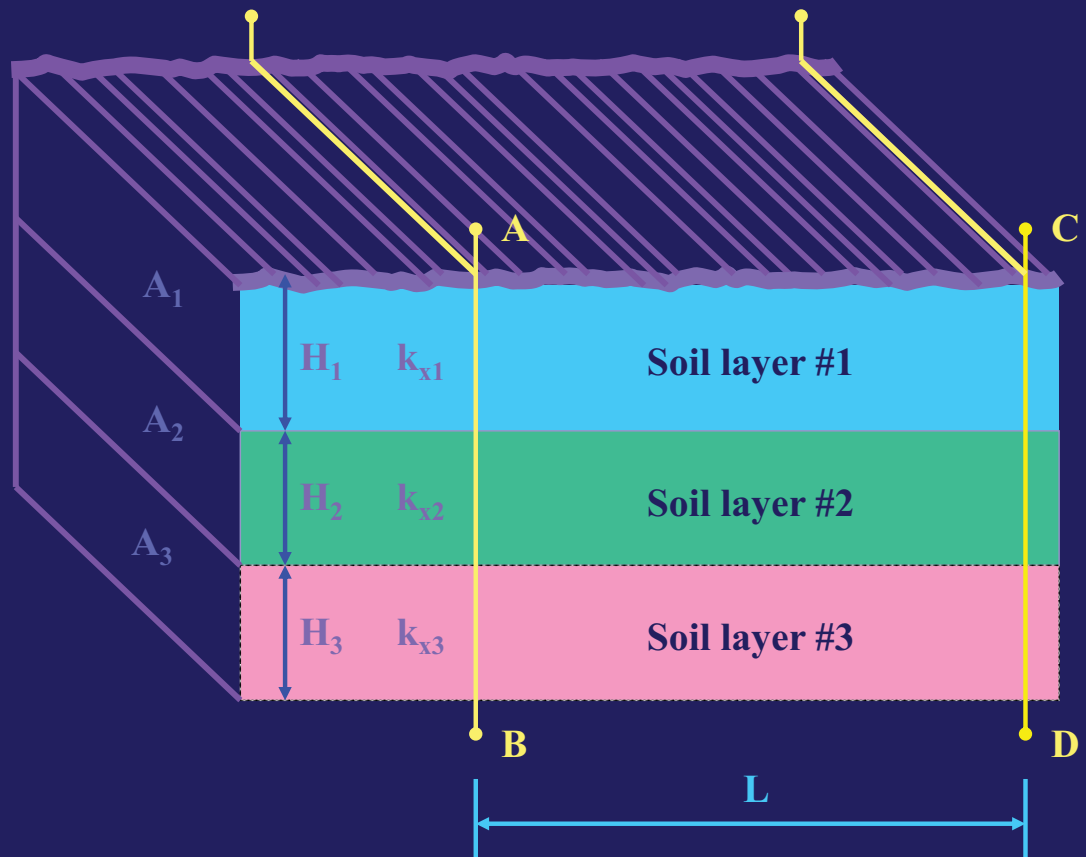
หลักการทดลองของวิธีนี้ คือความสามารถในการรับน้ำที่ใส่ลงในท่อปลายเปิดที่ฝังอยู่ในชั้นดินที่ต้องการหาค่า k ในกรณีที่ดินมีค่า k ต่ำอาจจะต้องใช้ความดันอัดน้ำลงไปด้วย



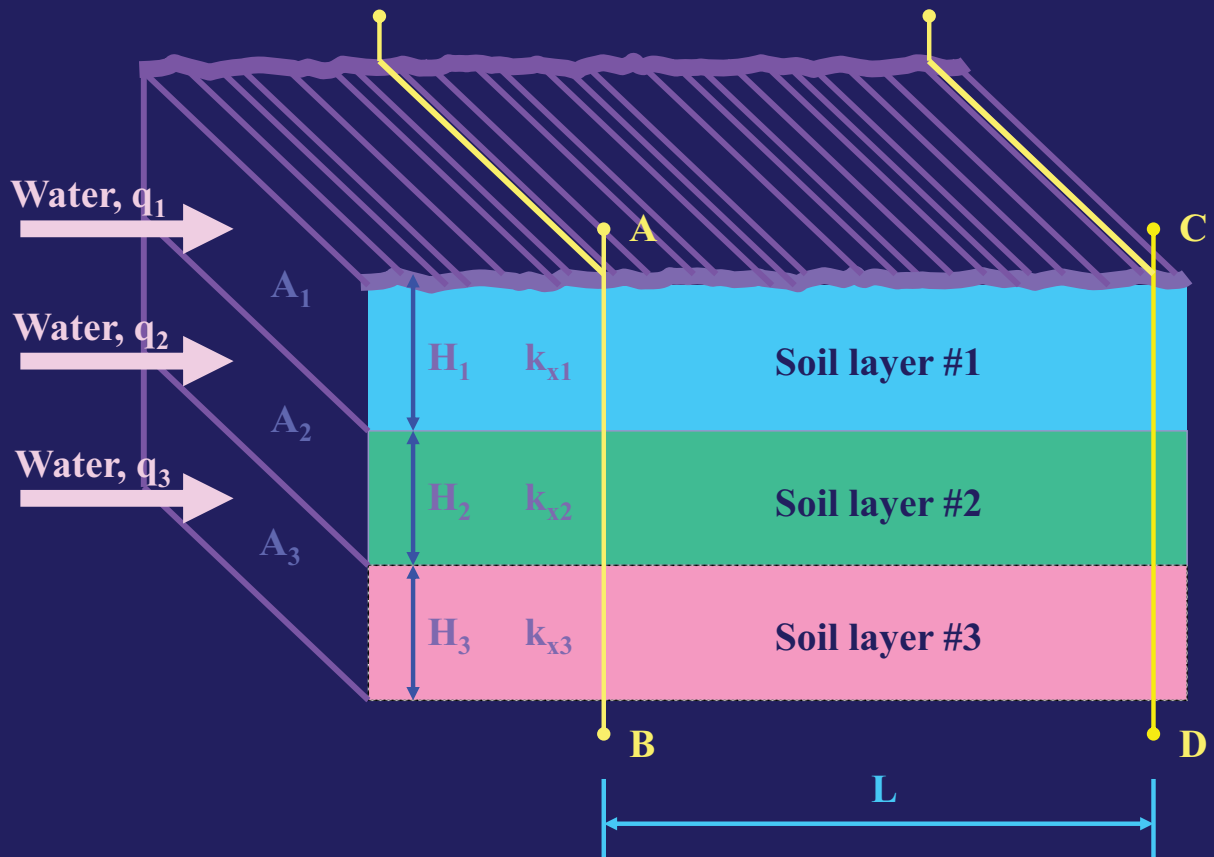
ค่าความซึมผ่านของดินที่มีคุณสมบัติไม่สม่ำเสมอ

ในบางกรณี ชั้นดินที่พิจารณาไม่ได้มีลักษณะ
สม่ำเสมอ (Nonhomogeneous) ทำให้ค่า k มีหลาย
ค่า ดังนั้นจึงต้องหาค่า k เฉลี่ย ซึ่งค่านี้จะไม่
เท่ากันในแต่ละทิศทาง

การหาค่า k ในแนวนอนกับชั้นดิน



จากรูปจะเห็นชั้นดิน 3 ชั้น แต่ละชั้นมีค่า k_x ไม่เท่ากัน ถ้าให้ เสดทั้งหมดมีค่าคงที่ตลอดแนว AB และ CD แต่ค่าเสดทั้งหมดที่แนว CD น้อยกว่า AB ดังนั้นน้ำจะไหลจากแนว AB ไปยัง CD



ข้อกำหนด

- ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านจาก AB ไปยัง CD
= ปริมาณน้ำไหลผ่านชั้นที่ 1 + ชั้นที่ 2 + ชั้นที่ 3

หรือ $q = q_1 + q_2 + q_3$

- ความลาดเชิงชลศาสตร์ระหว่าง AB ถึง CD เท่ากัน

หรือ $i = i_1 = i_2 = i_3$

- ถ้าชั้นดินกว้าง 1 หน่วย

ดังนั้น $A_1 = 1 \times H_1$, $A_2 = 1 \times H_2$, $A_3 = 1 \times H_3$

จาก $q = q_1 + q_2 + q_3$ และ $q = k.A.i$

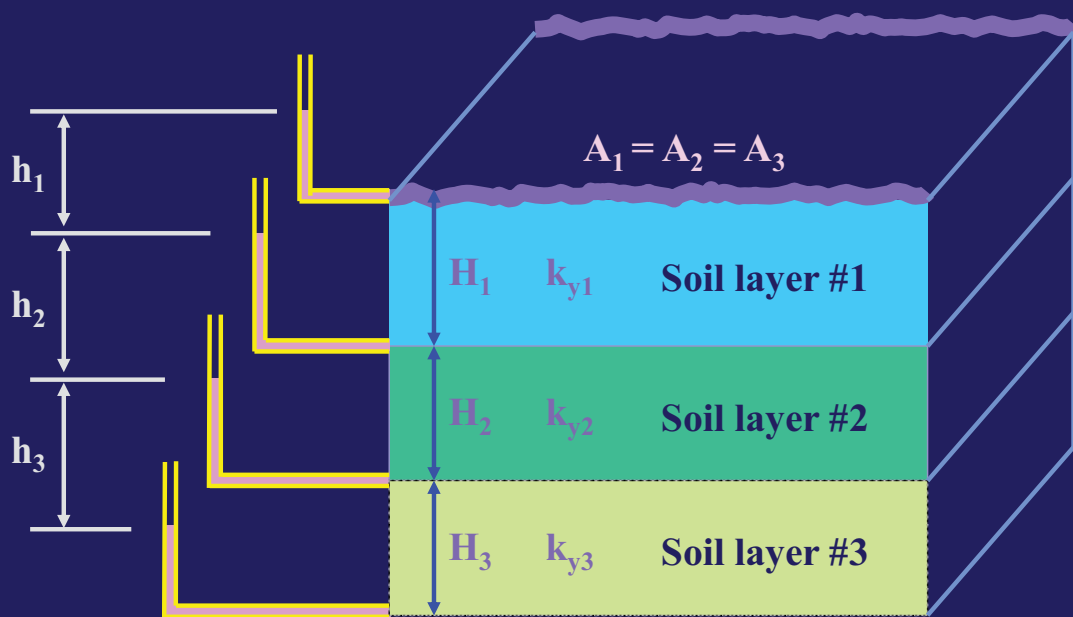
$$\text{จะได้ } k_x.i.(A_1+A_2+A_3) = k_{x1}.i_1.A_1 + k_{x2}.i_2.A_2 + k_{x3}.i_3.A_3$$

จาก $i = i_1 = i_2 = i_3$ และ $A_1 = 1 \times H_1$, $A_2 = 1 \times H_2$, $A_3 = 1 \times H_3$

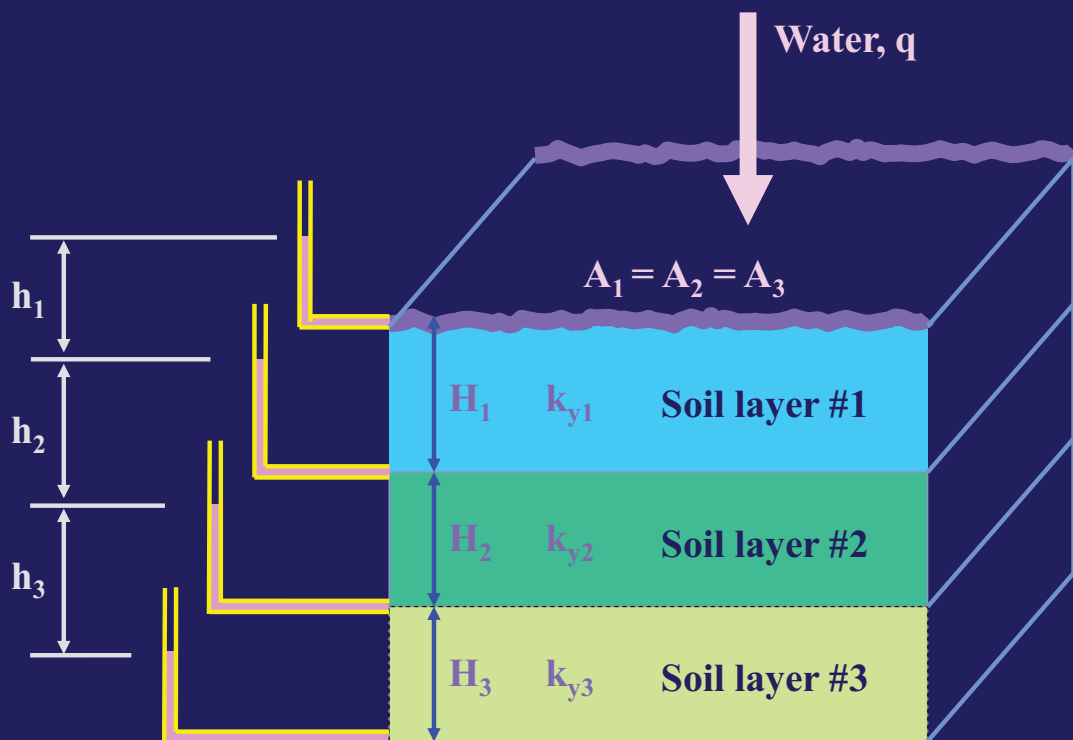
$$\text{จะได้ } k_x.i.(H_1+H_2+H_3) = k_{x1}.i.H_1 + k_{x2}.i.H_2 + k_{x3}.i.H_3$$

$$k_x = \frac{\sum_{j=1}^n (k_x.H)_j}{\sum_{j=1}^n H_j}$$

การหาค่า k ในแนวตั้งจากกับชั้นดิน



จากรูปจะเห็นชั้นดิน 3 ชั้น แต่ละชั้นมีค่า k_y ไม่เท่ากัน ถ้าให้การไหลของน้ำจากด้านบนลงล่าง แสดงว่าเฮดทั้งหมดที่ด้านบนมากกว่าด้านล่าง และการไหลผ่านแต่ละชั้นทำให้สูญเสียเฮดเท่ากับ h_1 , h_2 และ h_3 ตามลำดับ



ข้อกำหนด

✦ ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านจากชั้นที่ 1 ไปยังชั้นที่ 3

$$= \text{ปริมาณน้ำไหลผ่านชั้นที่ 1} = \text{ชั้นที่ 2} = \text{ชั้นที่ 3}$$

$$\text{หรือ } q = q_1 = q_2 = q_3$$

✦ ความลาดเชิงชลศาสตร์ของแต่ละชั้นเท่ากับ

$$i_1 = h_1/H_1, \quad i_2 = h_2/H_2, \quad i_3 = h_3/H_3$$

✦ พื้นที่หน้าตัดของชั้นดินเท่ากันทุกชั้น

$$\text{ดังนั้น } A = A_1 = A_2 = A_3$$

จาก $k = q/(A \cdot i)$

$$\text{จะได้ } k_y = (q/A) \cdot [H_1 + H_2 + H_3] / [h_1 + h_2 + h_3]$$

$$\text{แต่ } i_1 = h_1/H_1, \quad i_2 = h_2/H_2, \quad i_3 = h_3/H_3$$

$$\text{จะได้ } k_y = (q/A) \cdot [H_1 + H_2 + H_3] / [i_1 \cdot H_1 + i_2 \cdot H_2 + i_3 \cdot H_3]$$

และจาก $i = q/(A \cdot k)$ จะได้

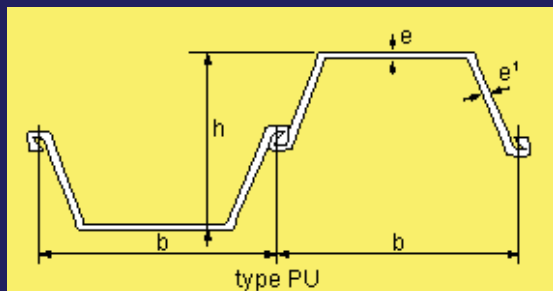
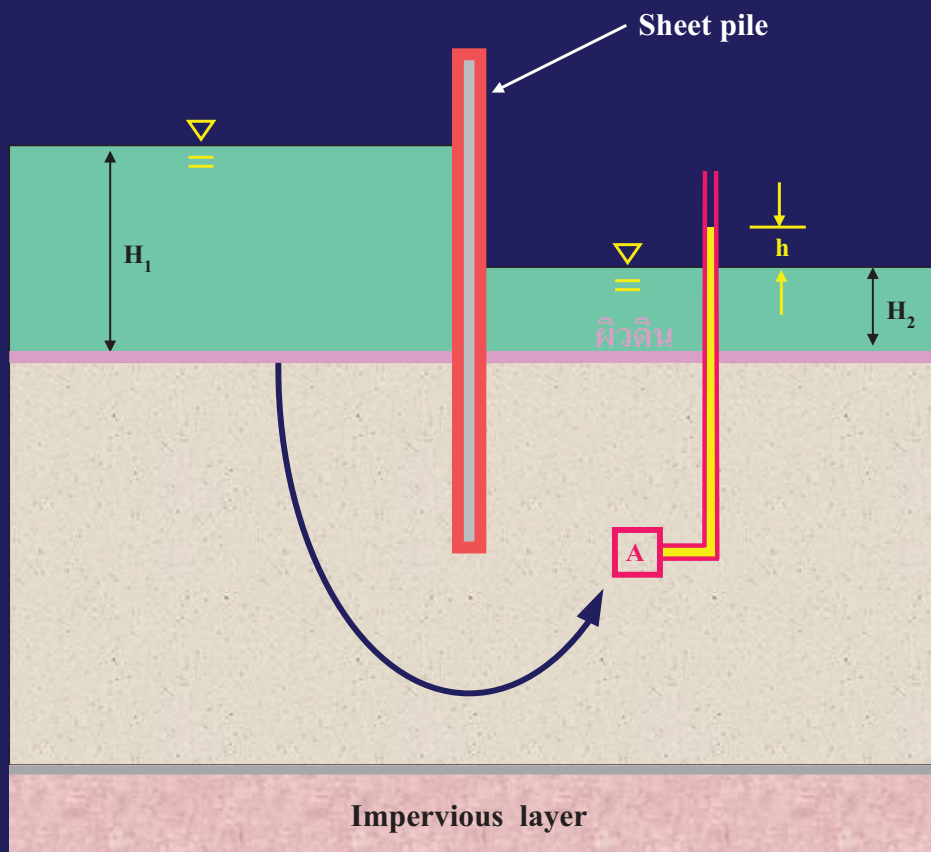
$$k_y = (q/A) \cdot [H_1 + H_2 + H_3] / [q_1 \cdot H_1 / (A_1 \cdot k_1) + q_2 \cdot H_2 / (A_2 \cdot k_2) + q_3 \cdot H_3 / (A_3 \cdot k_3)]$$

จะได้

$$k_y = [H_1 + H_2 + H_3] / [H_1/k_1 + H_2/k_2 + H_3/k_3]$$

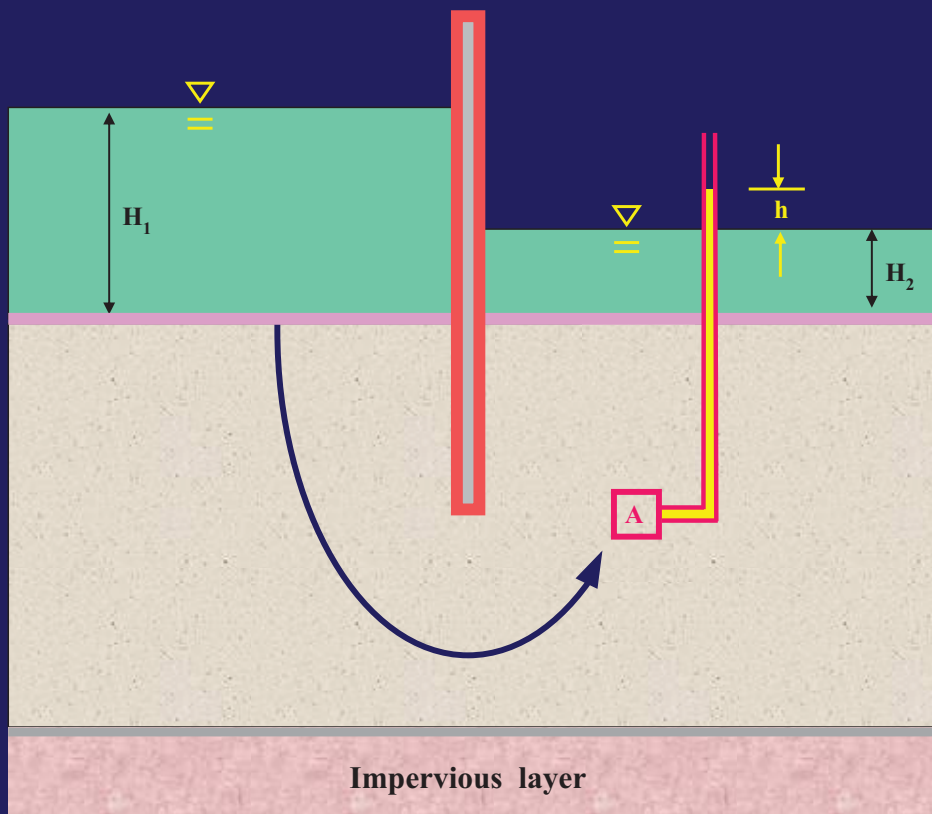
$$k_y = \frac{\sum_{j=1}^n H_j}{\sum_{j=1}^n (H/k_y)_j}$$

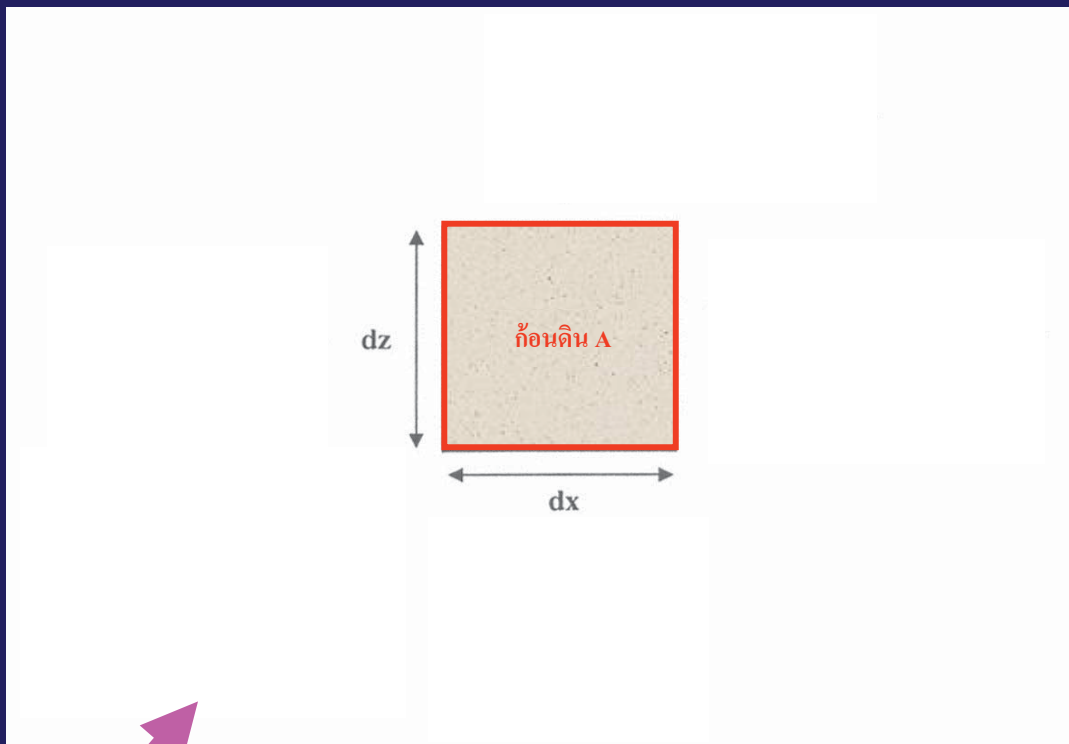
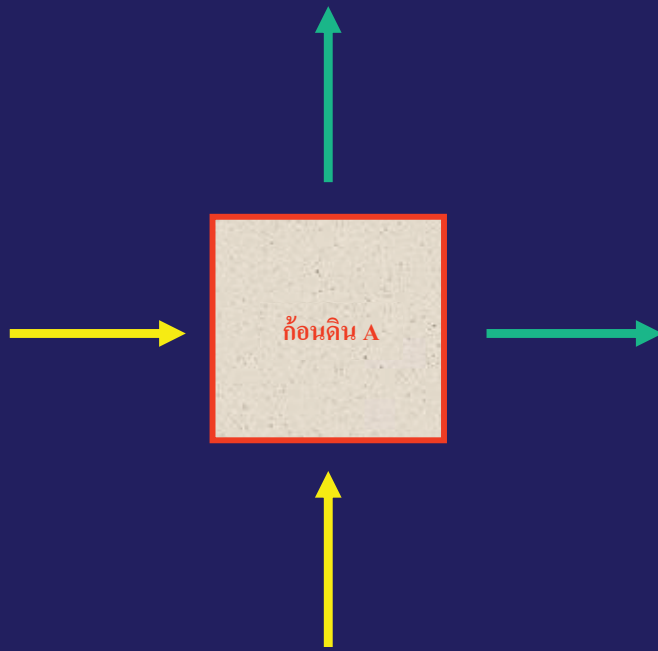
การไหลของน้ำในดินสองทิศทาง



Sheet pile







ในการวิเคราะห์สามารถกระทำได้โดยสมมุติให้จุดที่พิจารณาคือจุด A ในรูปที่ 3.13 ก ซึ่งจากรูปจะเห็นทิศทางการไหลซึมเข้าของน้ำจะอยู่ในแนวแกน x และ z เท่านั้น นำจุด A มาพิจารณาดังรูปที่ 3.13 ข จะได้เป็นรูปลูกบาศก์ ให้แต่ละด้านยาวเท่ากับ dx dy และ dz และเนื่องจากการไหลของน้ำในลักษณะนี้จะเป็นแบบ 2 ทิศทาง ดังนั้นน้ำจะไหลเข้าสู่ดินก่อนนี้ในแนว x และ z เท่านั้น ถ้าให้ความเร็วในการไหลเข้าของน้ำทั้งสองทิศทางเท่ากับ v_x และ v_z ดังนั้นความเร็วในการไหลออกของน้ำจะเท่ากับ ความเร็วในการไหลเข้ารวมกับการเปลี่ยนแปลงของความเร็วในระยะทางที่น้ำไหลผ่าน ดังนั้นความเร็วในการไหลออกในแนวแกน x จะเท่ากับ $v_x + (\partial v_x / \partial x) dx$ และความเร็วในการไหลออกในแนวแกน z จะเท่ากับ $v_z + (\partial v_z / \partial z) dz$ ซึ่งถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของก้อนดินนี้ และกำหนดให้น้ำไม่สามารถอัดตัวได้ จะได้ว่าอัตราการไหลเข้าของน้ำจะเท่ากับอัตราการไหลออกของน้ำ เมื่ออัตราการไหลของน้ำเท่ากับความเร็วในการไหลคูณด้วยพื้นที่หน้าตัด ดังนั้น

$$v_x \cdot dz \cdot dy + v_z \cdot dx \cdot dy = [v_x + (\partial v_x / \partial x) dx] dz \cdot dy + [v_z + (\partial v_z / \partial z) dz] dx \cdot dy$$

ดังนั้นจะได้

$$(\partial v_x / \partial x) + (\partial v_z / \partial z) = 0 \quad (3.23)$$

จากสมการที่ 3.10, $v = k \cdot i$ ดังนั้น $v_x = k_x \cdot (\partial h / \partial x)$ และ $v_z = k_z \cdot (\partial h / \partial z)$ แทนค่าลงในสมการ 3.23 จะได้

$$k_x \cdot (\partial^2 h / \partial x^2) + k_z \cdot (\partial^2 h / \partial z^2) = 0 \quad (3.24)$$

จากสมการ 3.24 ค่า k_x และ k_z เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านในแนว x และ z ของดิน และถ้าให้ดินที่พิจารณามีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง ดังนั้น สมการที่ 3.24 จึงกลายเป็นรูปแบบสมการของลาปลาซ (Laplace's equation)

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 h}{\partial z^2}\right) = 0 \quad (3.25)$$

จากสมการที่ 3.25 แสดงให้เห็นว่า ผลรวมของการเปลี่ยนแปลงความลาดเชิงศาสตรในแนวแกน x กับการเปลี่ยนแปลงความลาดเชิงศาสตรในแนวแกน z เท่ากับศูนย์ ซึ่งการแก้ไขสมการของลาปลาซนี้มีหลายวิธีด้วยกัน แต่วิธีที่ง่ายและได้ผลน่าเชื่อถือพอสมควร คือวิธีการวาดรูปตาข่ายการไหล

ตาข่ายการไหล

ตาข่ายการไหล (Flow net) เป็นวิธีการหาปริมาณน้ำที่ไหลผ่านตลอดได้เขียน โดย Forcheimer ได้คิดขึ้น และถูกปรับปรุงโดย Casagrande เมื่อปี 1937 หลักการวิเคราะห์ได้มาจาก กฎของดาร์ซี และ สมการของลาปลาซ

การวาดตาข่ายการไหล เป็นวิธีการ ลองผิด ลองถูก (Trial and errors) ดังนั้นการวาดจะต้องอาศัยความชำนาญ และการสังเกต

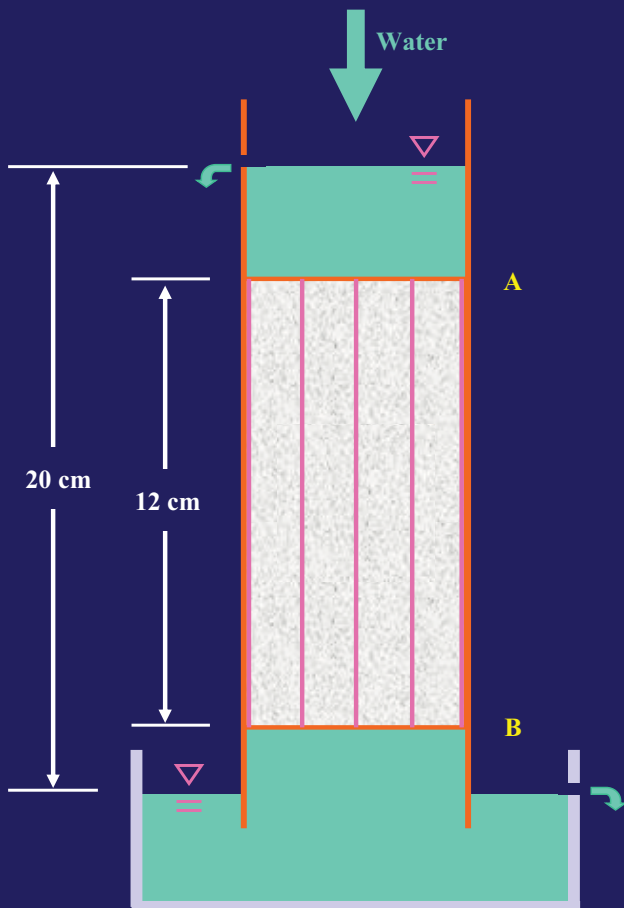
สมมุติฐานของการวิเคราะห์

- ดินอยู่ในสภาพ Saturated
- ดิน Homogeneous & Isotropic
- ปริมาณของน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินมีค่าคงที่ตลอดการซึมผ่าน

ตาข่ายการไหล ประกอบด้วยเส้น 2 ชุด คือ

เส้นการไหล (Flow line) เป็นเส้นที่แสดงการไหลซึมของน้ำจากด้านที่มีเฮดทั้งหมดสูงไปยังด้านที่มีเฮดทั้งหมดต่ำ เส้นการไหลจะไม่ตัดกัน และเส้นการไหล 2 เส้นจะประกอบกันเป็นช่องการไหล (Flow channel) ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าช่องการไหลแต่ละช่องจะเท่ากัน

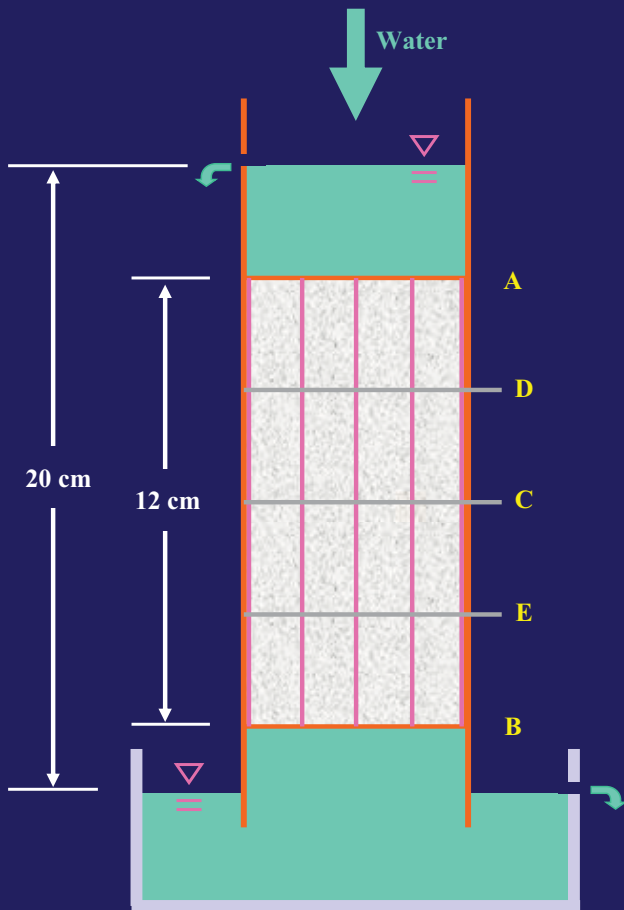
เส้นสมศักย์ (Equipotential line) เป็นเส้นที่ลากผ่านจุดที่มีเฮดทั้งหมด (Total head) เท่ากันในดิน เส้นนี้จะตัดกับเส้นการไหลเป็นมุมฉาก เส้นสมศักย์จะแบ่งการสูญเสียเฮดเป็นช่วงๆเท่าๆกัน เรียกว่า การสูญเสียสมศักย์ (Equipotential drop)



จากรูป จะเห็นว่า มีตัวอย่างดิน Homogeneous ยาว 12 cm และน้ำจะไหลจาก A ไป B โดยมี Head loss = 20 cm

ถ้าให้ปริมาณน้ำไหลจาก A ไป B เท่ากับ q และแบ่งดินตามยาวจาก A ไป B เป็น 2 ช่อง ดังนั้นในแต่ละช่องจะมีน้ำไหลเท่ากับ $q/2$

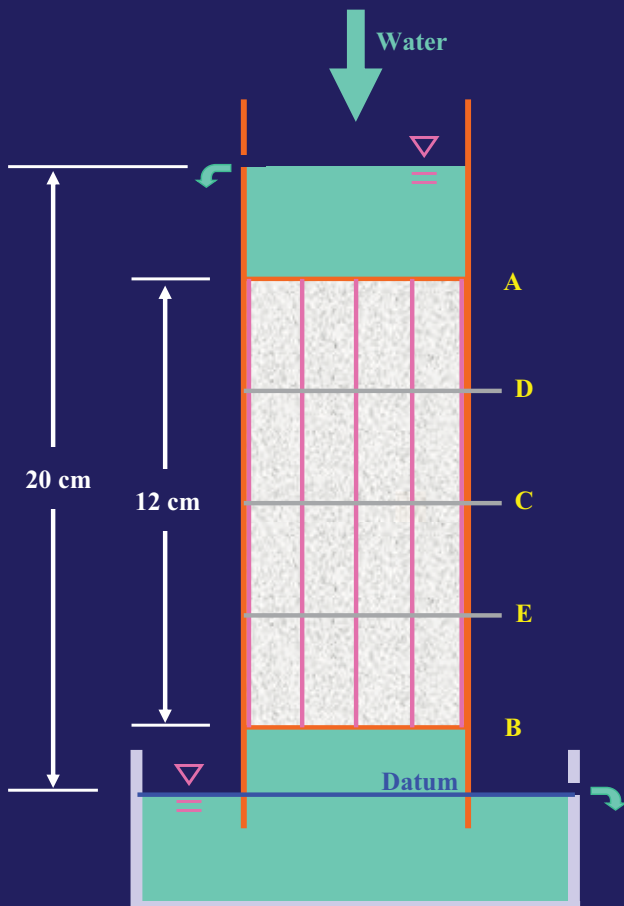
และถ้าแบ่งดินจาก A ไป B เป็น 4 ช่อง ดังนั้นในแต่ละช่องจะมีน้ำไหลเท่ากับ $q/4$



จากรูป จะเห็นว่า น้ำจะไหลจาก A ไป B และมี Head loss = 20 cm

ถ้าแบ่งดินตรงแนว C ที่ระยะ AB/2 (6 cm) จะได้ว่า น้ำไหลจาก A ไป C มี Head loss = 10 cm และน้ำไหลจาก C ไป B มี Head loss = 10 cm

และถ้าแบ่งดินตรงแนว D และ E ที่ระยะ AB/4 (3 cm) จะได้ว่า น้ำไหลจาก A ไป D, D ไป C, C ไป E และ E ไป B จะมี Head loss = 5 cm



ถ้าให้ Datum อยู่ที่ผิวน้ำด้านล่างจะได้ แนว A มี Total head = 20 cm และ แนว B มี Total head = 0 cm

ดังนั้น จะได้

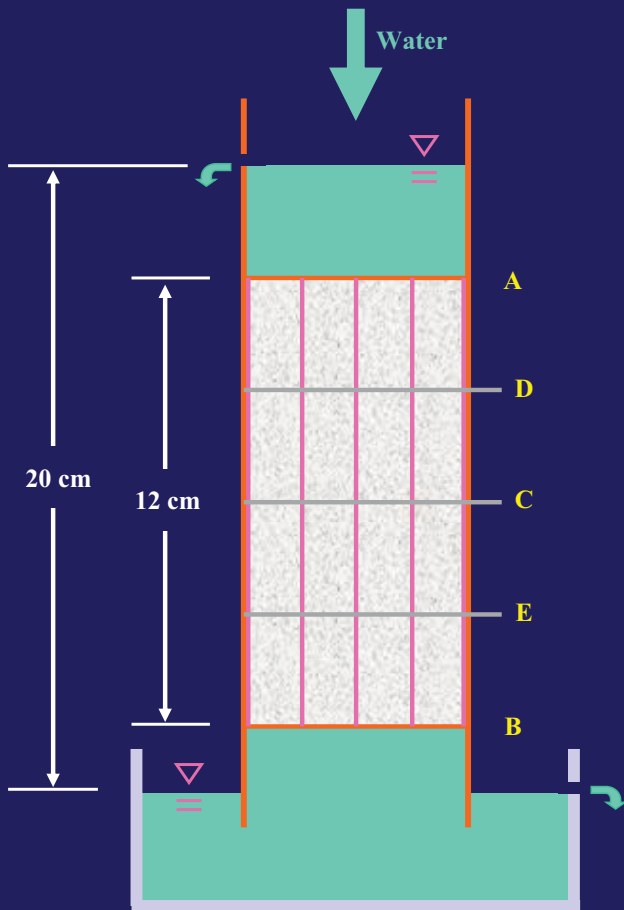
Total head ที่ A = 20 cm

Total head ที่ D = 15 cm

Total head ที่ C = 10 cm

Total head ที่ E = 5 cm

Total head ที่ B = 0 cm

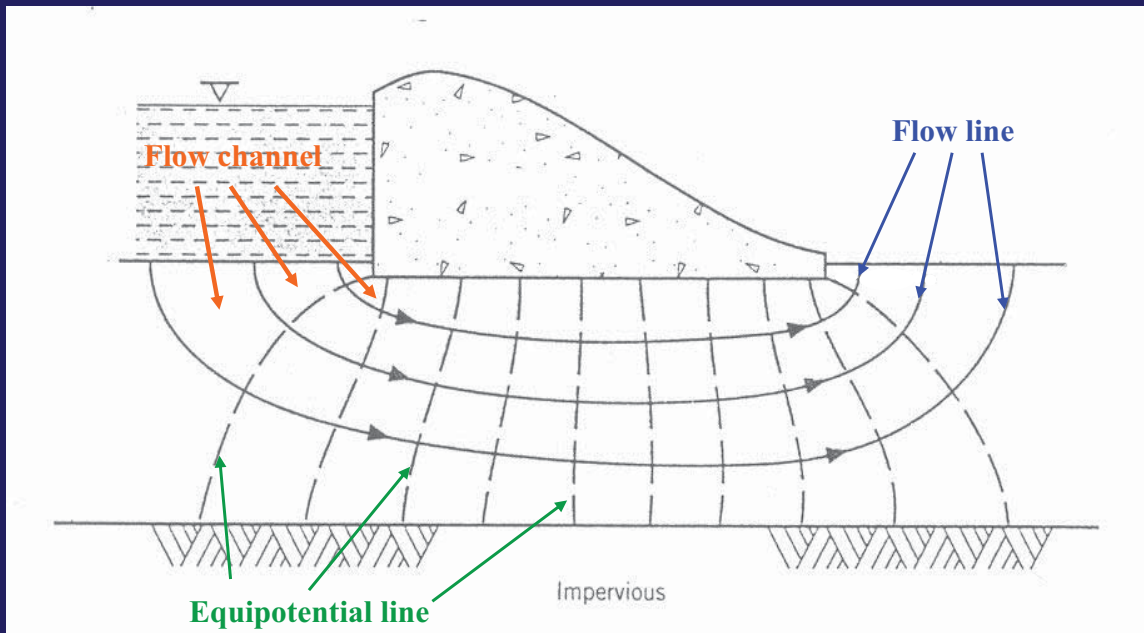


เส้นตรงสีชมพู = Flow line

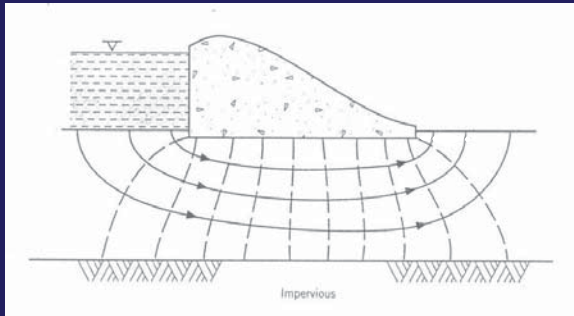
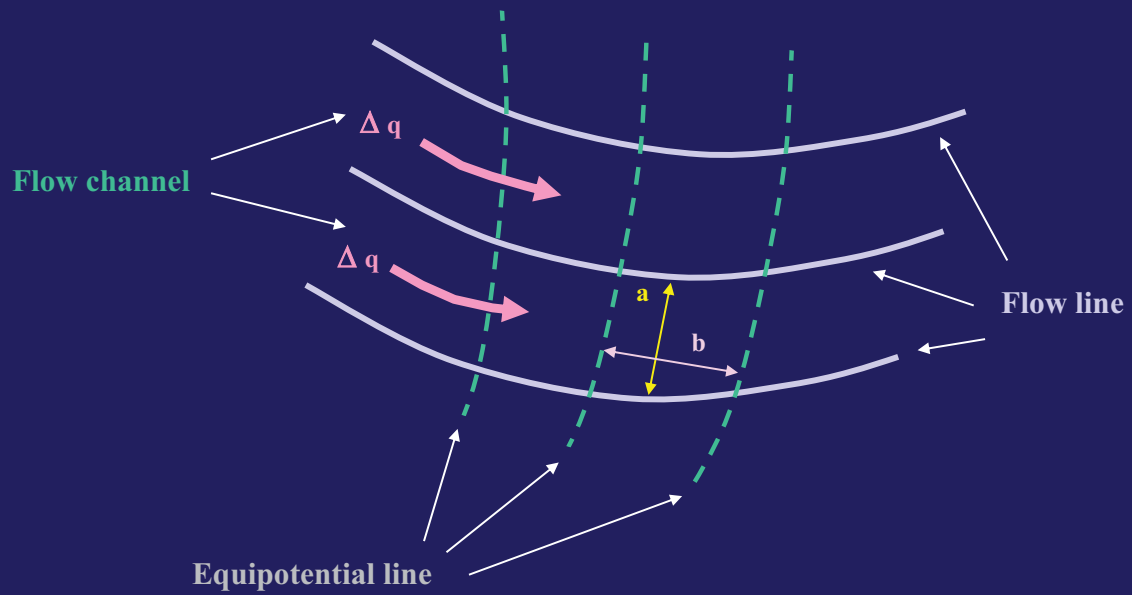
เส้นตรงสีเทา = Equipotential line

ตารางทั้งหมด = Flow net

แต่เนื่องจากการไหลของน้ำ
 ลอดใต้เขื่อน เป็นการไหลแบบ 2
 ทิศทาง ดังนั้น Flow net จึงต้อง
 ปิดเบี้ยวบ้าง



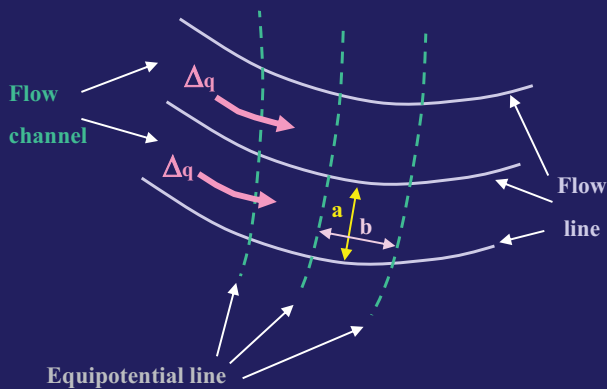
Flow net ของเขื่อนคอนกรีต



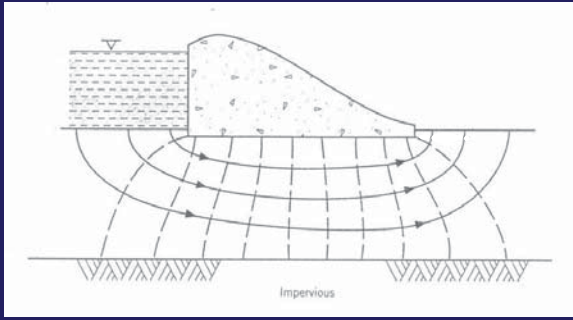
พิจารณาส่วนของ Flow net ถ้าให้

N_f = จำนวน Flow channel

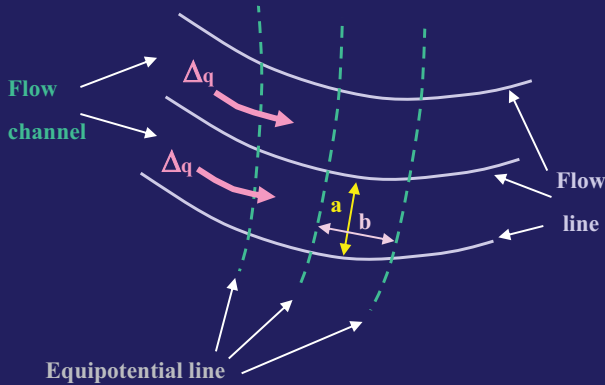
N_d = จำนวน Equipotential drop



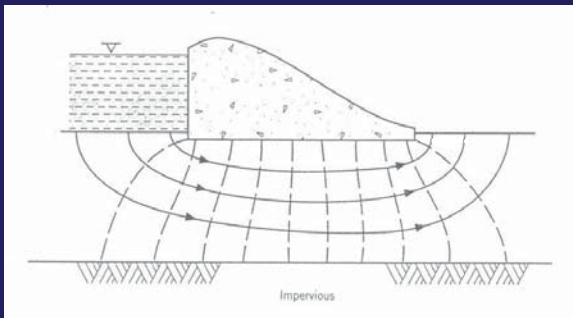
จะได้ $\Delta q = q/N_f$



ถ้าให้ Δh เป็น Head loss
เนื่องจากน้ำซึมลอดใต้เขื่อน
และ $\Delta\Delta h$ เป็น Head loss ต่อ
ช่อง Equipotential drop



ดังนั้น $\Delta\Delta h = \Delta h / N_d$



ดังนั้น i ต่อ Equipotential drop

$$= \Delta\Delta h / b$$

แทนค่า จะได้

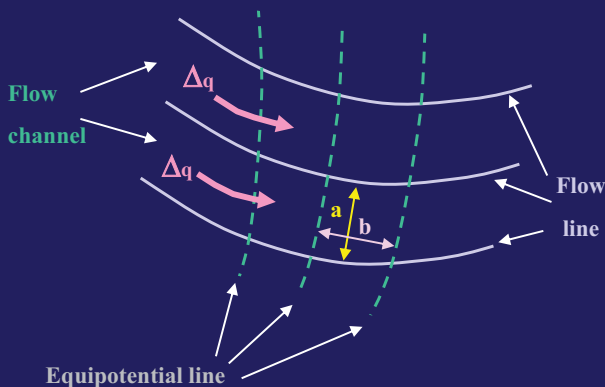
$$i = \Delta h / (b \cdot N_d)$$

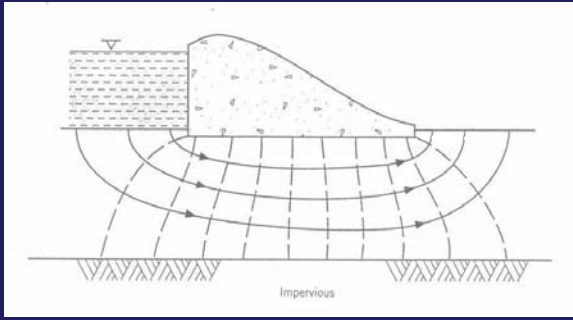
ถ้าพิจารณาดินกว้าง 1 หน่วย

และจากสมการ $q = k \cdot A \cdot i$ จะได้

$$\Delta q = k (a \times 1) (\Delta h / b \cdot N_d)$$

$$q = k \cdot \Delta h (a/b) (N_f / N_d)$$



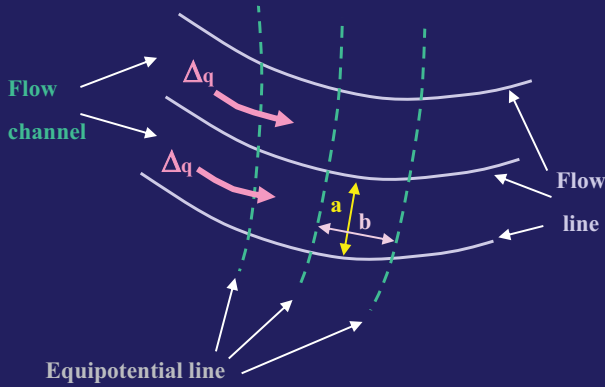


ถ้าให้ $a = b$ (สี่เหลี่ยมจตุรัส) จะได้

$$q = k \cdot \Delta h (N_f/N_d)$$

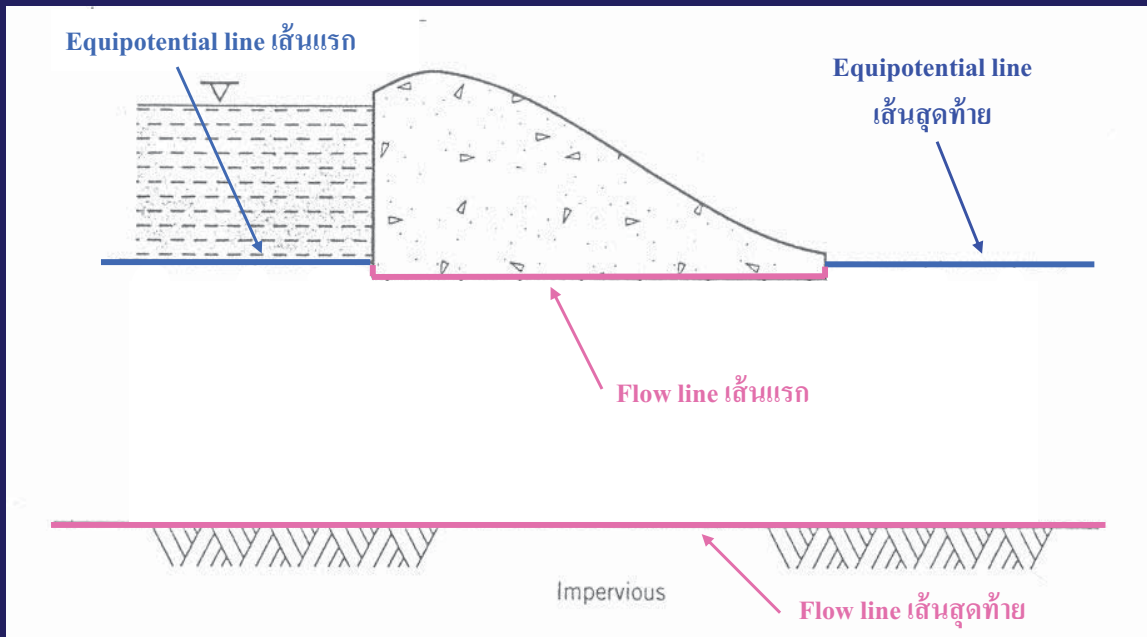
เมื่อ

q = ปริมาณน้ำที่ไหลลอดได้
 เชื่อมต่อหนึ่งหน่วยความ
 กว้าง



Boundary condition

1. ให้เส้นระดับผิวดิน เป็น Equipotential line โดยด้านที่ Total head สูง เป็นเส้นแรก และ ด้าน Total head ต่ำ เป็นเส้นสุดท้าย
2. ให้โครงสร้างของเขื่อนที่อยู่ในดินเป็น Flow line เส้นแรก
3. ให้ชั้น Impervious layer เป็น Flow line เส้นสุดท้าย

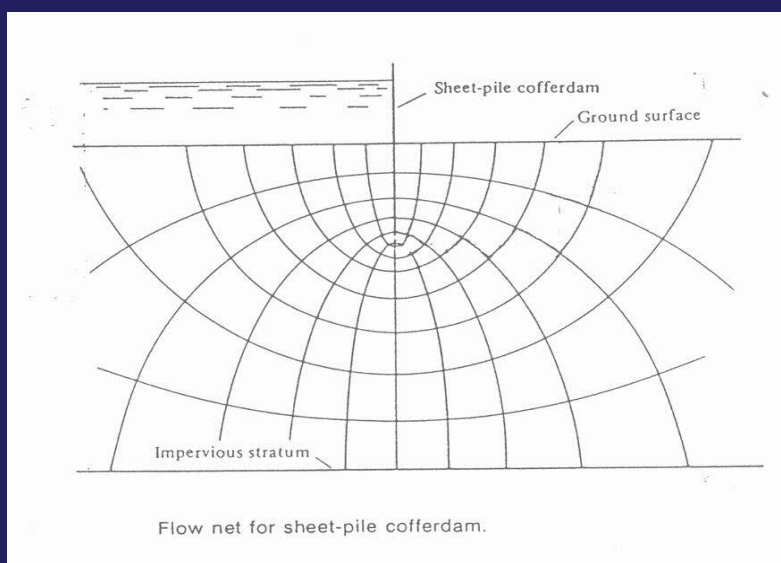


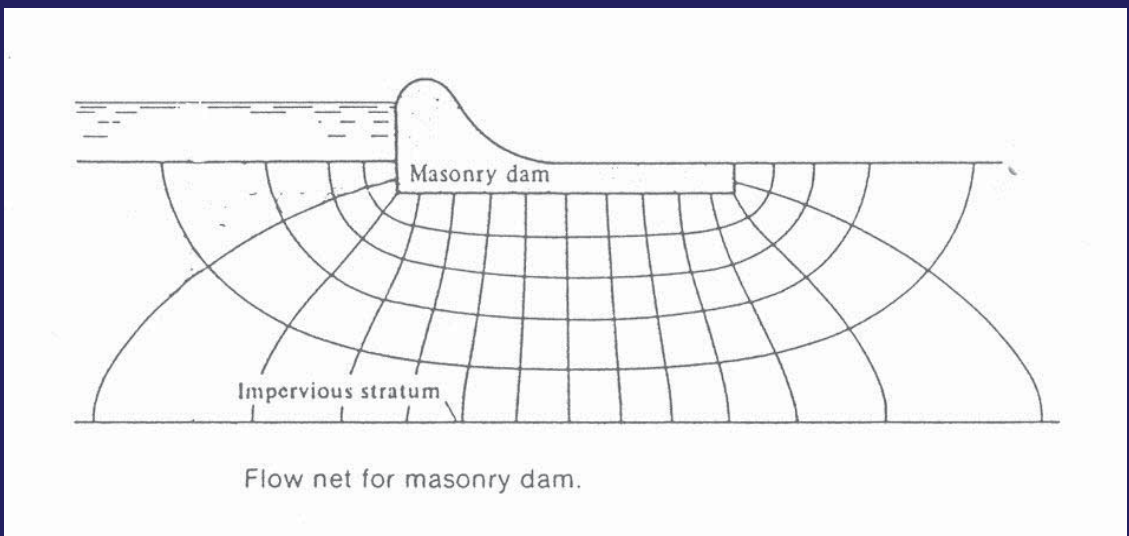
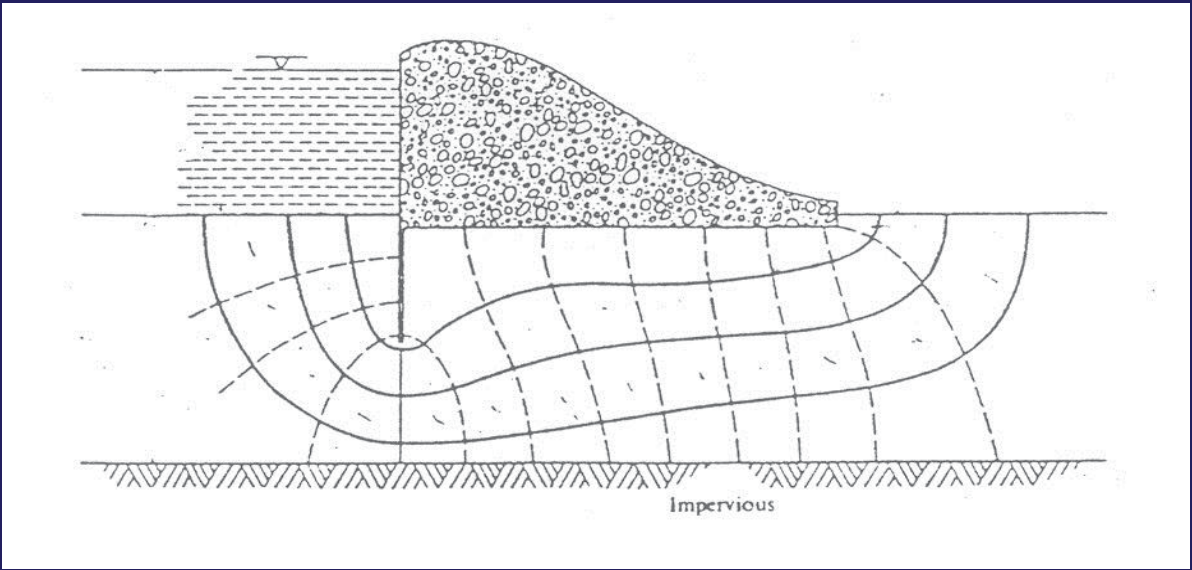
Flow net ของเขื่อนคอนกรีต

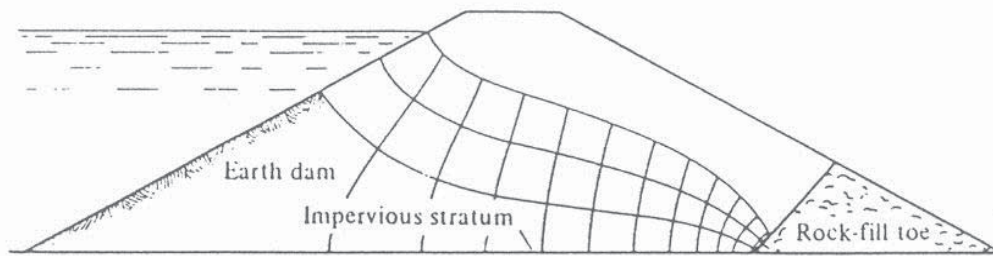
วิธีการวาด

1. วาดรูปหน้าตัดของเขื่อนให้ได้ตามสัดส่วน
2. พิจารณา Boundary condition
3. ลาก Flow line จากด้าน Total head สูงไปหาต่ำ
4. ลากเส้น Equipotential line โดยพยายามลากให้ตัดกับเส้น Flow line เป็นมุมฉาก และให้เป็นสี่เหลี่ยมจตุรัส

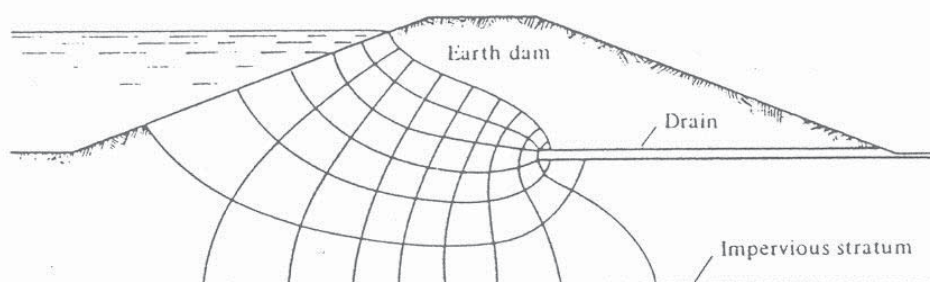
ตัวอย่างรูป Flow net



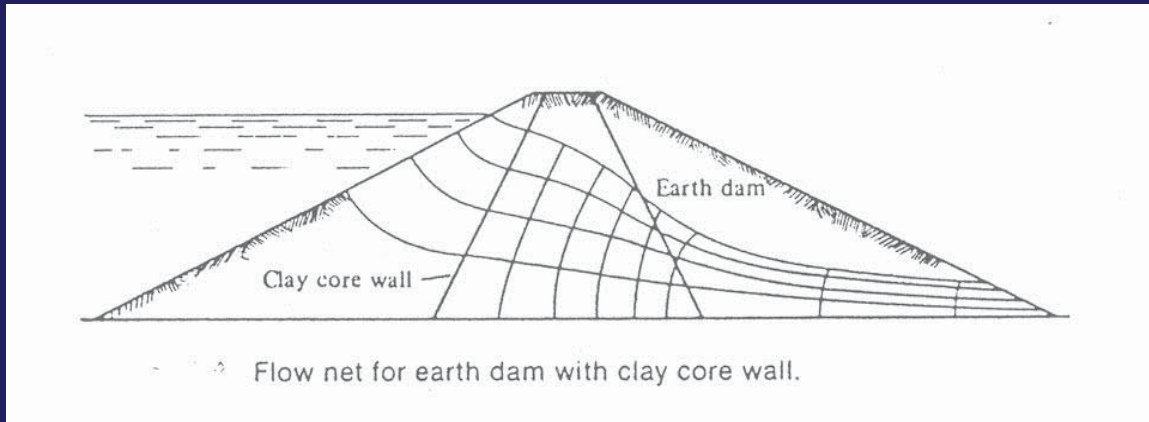




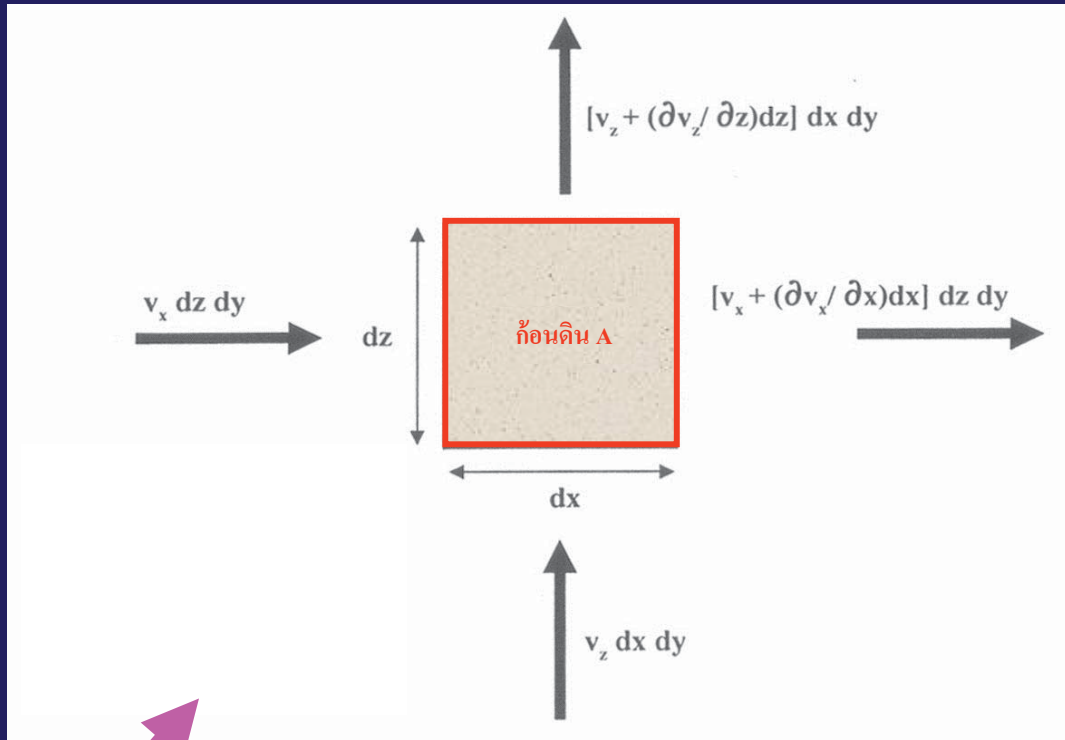
Flow net for earth dam with rockfill toe.



Flow net for earth dam with downstream drain.



การไหลของน้ำในดินที่มีคุณสมบัติไม่เท่ากันทุกทิศทาง



$$v_x \cdot dz \cdot dy + v_z \cdot dx \cdot dy = [v_x + (\partial v_x / \partial x) dx] dz \cdot dy + [v_z + (\partial v_z / \partial z) dz] dx \cdot dy$$

ดังนั้นจะได้

$$(\partial v_x / \partial x) + (\partial v_z / \partial z) = 0 \quad (3.23)$$

จากสมการที่ 3.10, $v = k \cdot i$ ดังนั้น $v_x = k_x \cdot (\partial h / \partial x)$ และ $v_z = k_z \cdot (\partial h / \partial z)$ แทนค่าลงในสมการ 3.23 จะได้

$$k_x \cdot (\partial^2 h / \partial x^2) + k_z \cdot (\partial^2 h / \partial z^2) = 0 \quad (3.24)$$

$$[(\partial^2 h / ((k_z/k_x) \partial x^2))] + (\partial^2 h / \partial z^2) = 0 \quad (3.29)$$

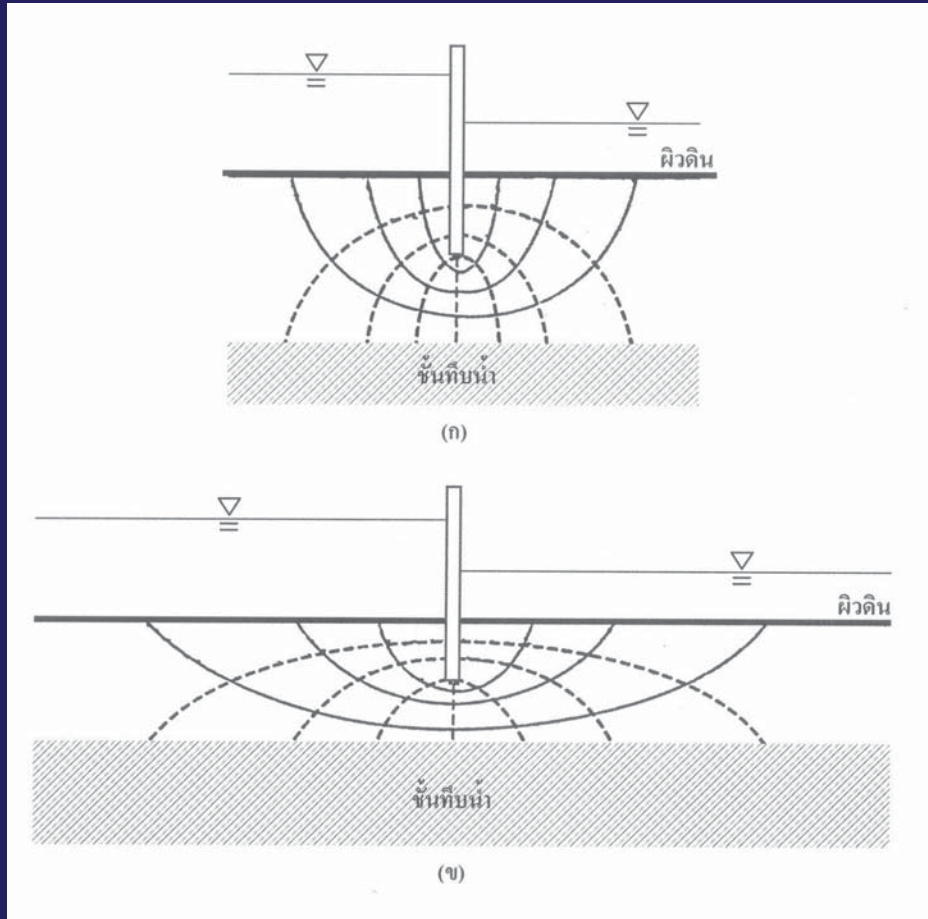
และให้ $x' = (k_z/k_x)^{1/2} x$ แทนลงในสมการ 3.29 จะได้

$$(\partial^2 h / \partial x'^2) + (\partial^2 h / \partial z^2) = 0 \quad (3.30)$$

จะเห็นว่าสมการ 3.30 มีลักษณะเหมือนกับสมการที่ 3.24 โดยที่มีการแปลง (Transform) ค่าจาก x ไปเป็น x' ซึ่งการแปลงนี้สามารถอธิบายได้จากรูปที่ 3.18 โดยรูปที่ 3.18 ก เป็นรูปตาข่ายการไหลหลังจากแปลงแล้ว และรูปที่ 3.18 ข เป็นรูปตาข่ายการไหลที่แท้จริง

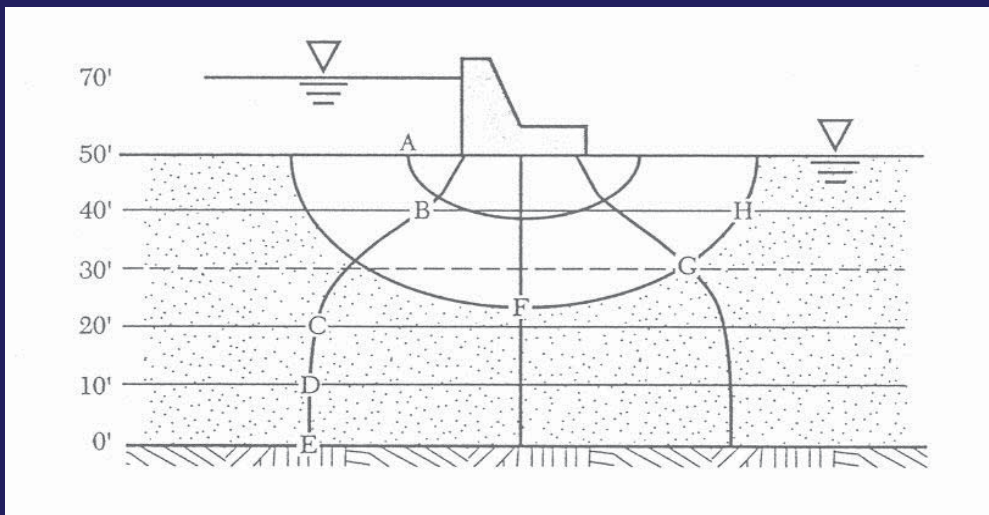
$$x' = (k_z/k_x)^{1/2} \cdot x$$

$$k_e = (k_x \cdot k_z)^{1/2}$$



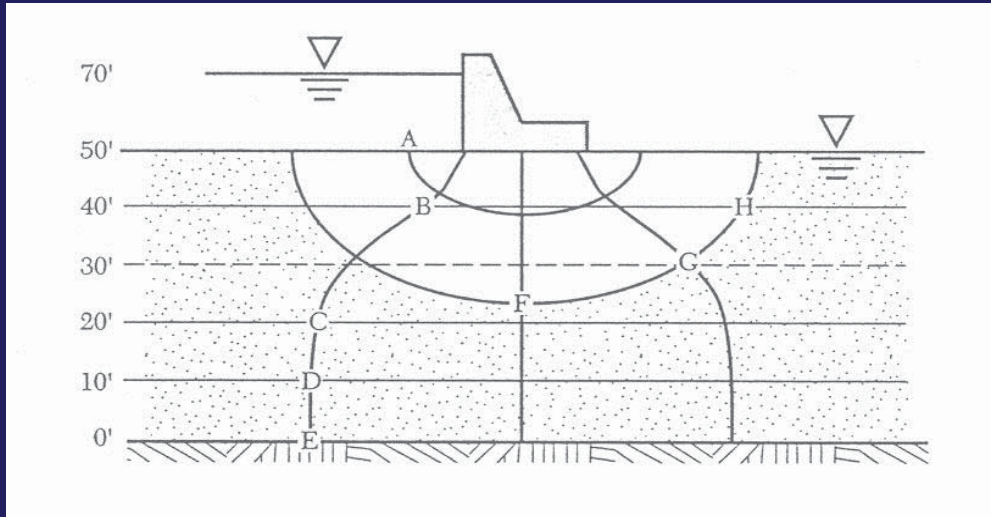
ตัวอย่างที่ 3.5

If the flow net is as figure, determine the pressure head at point A through H. Assume that the soil is homogeneous and datum is at the top of rock layer.



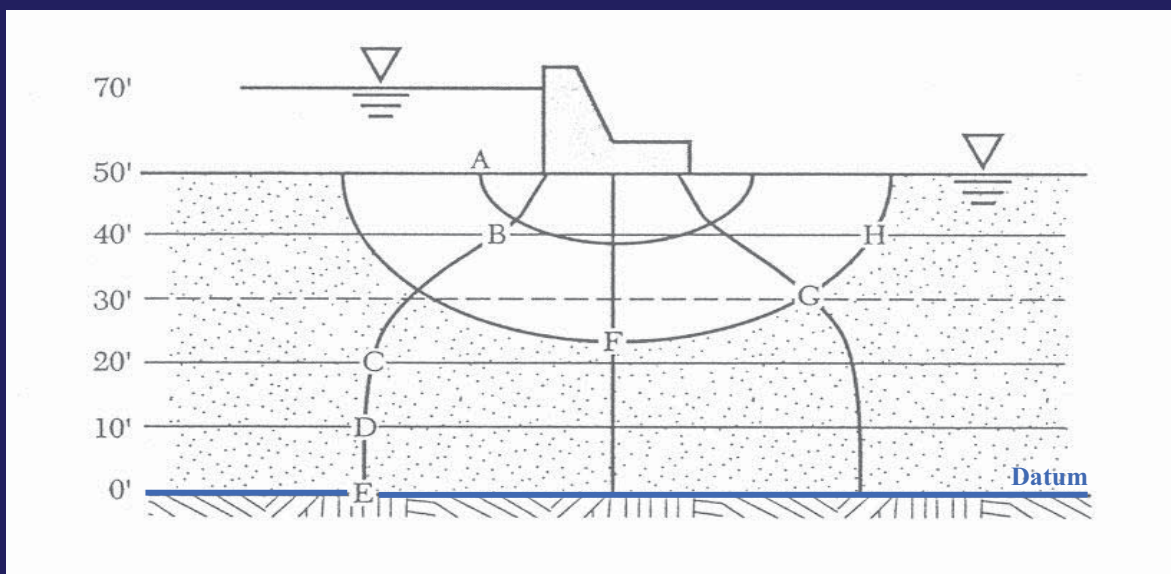
ตัวอย่างที่ 3.5

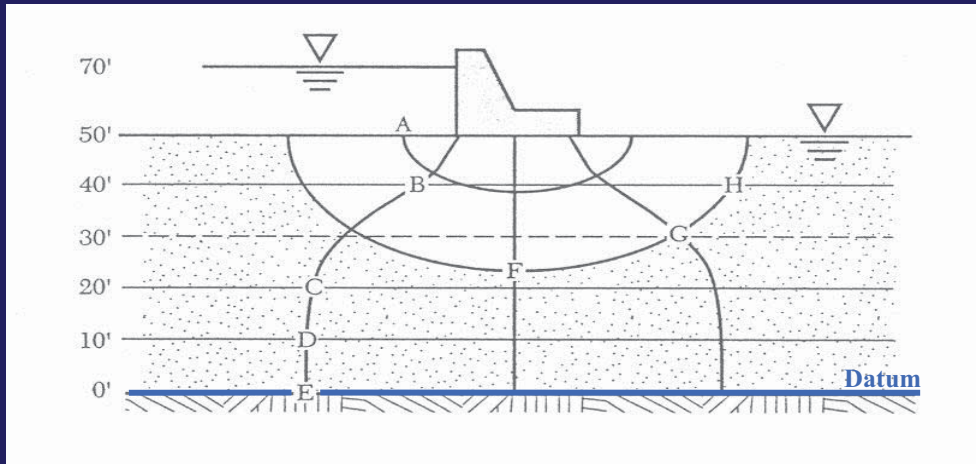
ถ้าต่าข่ายการไหลของเขื่อนคอนกรีตเป็นดังรูป จงหาค่า
เฮ็ดความดันที่จุด A ถึง H สมมุติดิน Homogeneous และ
ให้ Datum อยู่ที่ชั้นหินแข็ง



วิธีทำ

ให้ Datum อยู่ที่ชั้นหินแข็ง



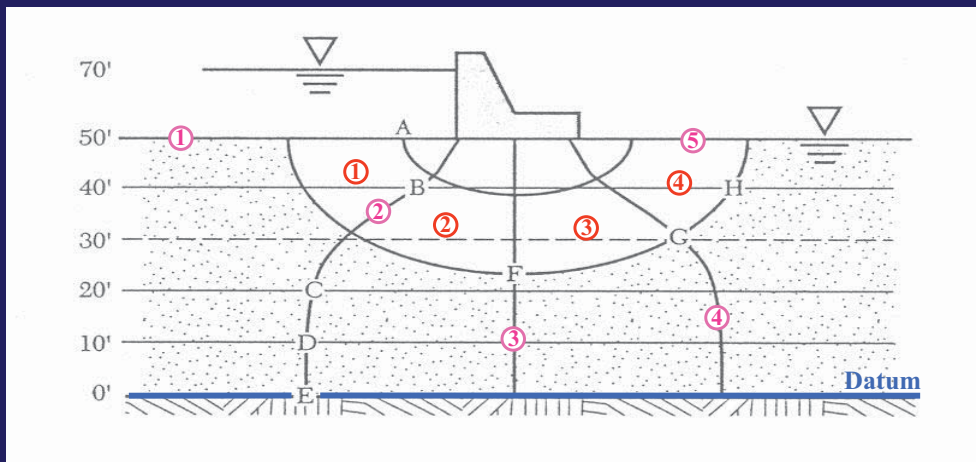


ถ้า Datum อยู่ที่ชั้นหินแข็ง ดังนั้น

ด้านหน้าเขื่อนจะมี Total head = 70 ft

และด้านหลังเขื่อนมี Total head = 50 ft

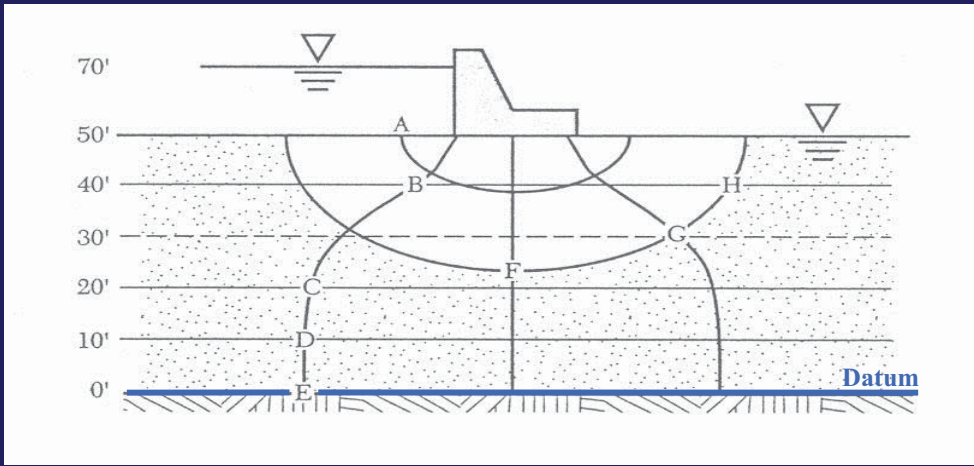
ดังนั้น Head loss (ΔH) = 70 - 50 = 20 ft



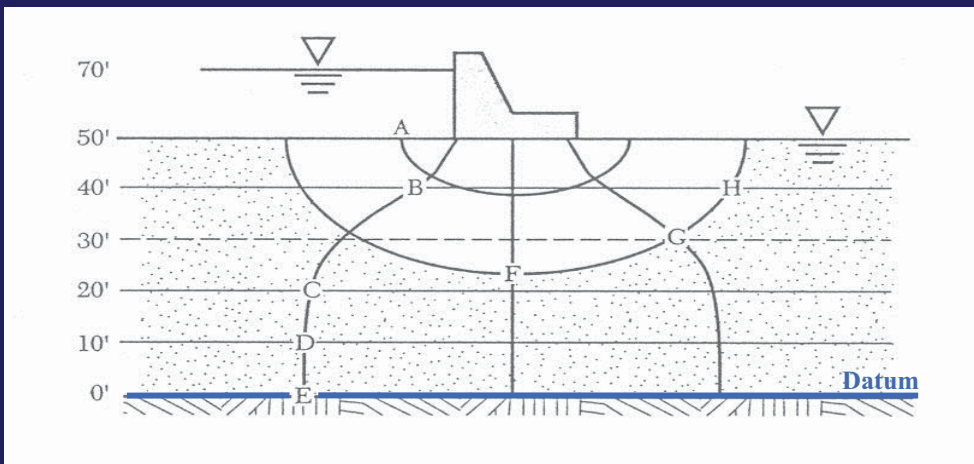
จากรูป จะเห็น Equipotential line 5 เส้น

และทำให้มี Equipotential drop (N_d) 4 ช่อง

ดังนั้น Head loss ต่อ Equipotential drop = $20/4 = 5$ ft/ช่อง



| ຈຸດ | Total head, ft | Elev. head, ft | Pre. head, ft |
|-----|----------------|----------------|----------------|
| A | 70 | 50 | $70 - 50 = 20$ |
| B | $70 - 5 = 65$ | 40 | $65 - 40 = 25$ |
| C | $70 - 5 = 65$ | 20 | $65 - 20 = 45$ |
| D | $70 - 5 = 65$ | 10 | $65 - 10 = 55$ |

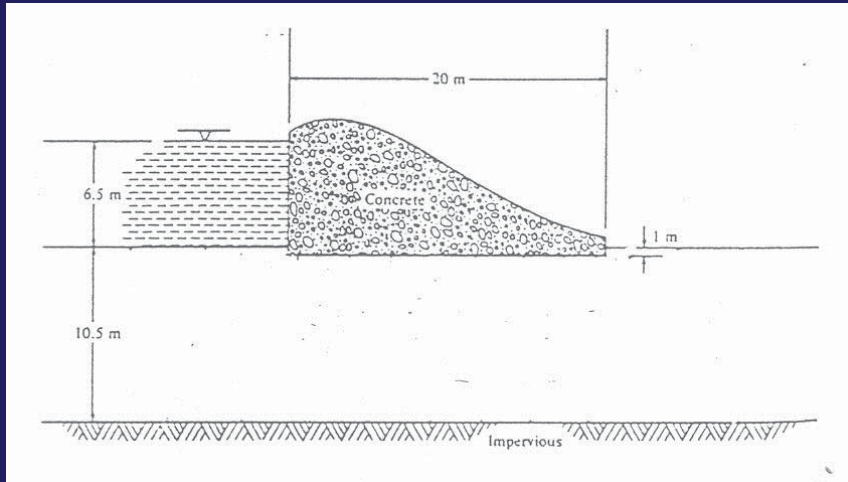


| ຈຸດ | Total head, ft | Elev. head, ft | Pre. head, ft |
|-----|----------------------------|----------------|--------------------|
| E | $70 - 5 = 65$ | 0 | $65 - 0 = 65$ |
| F | $70 - 2 \times 5 = 60$ | 23 | $60 - 23 = 37$ |
| G | $70 - 3 \times 5 = 55$ | 30 | $55 - 30 = 25$ |
| H | $70 - 3.5 \times 5 = 52.5$ | 40 | $52.5 - 40 = 12.5$ |

Ans.

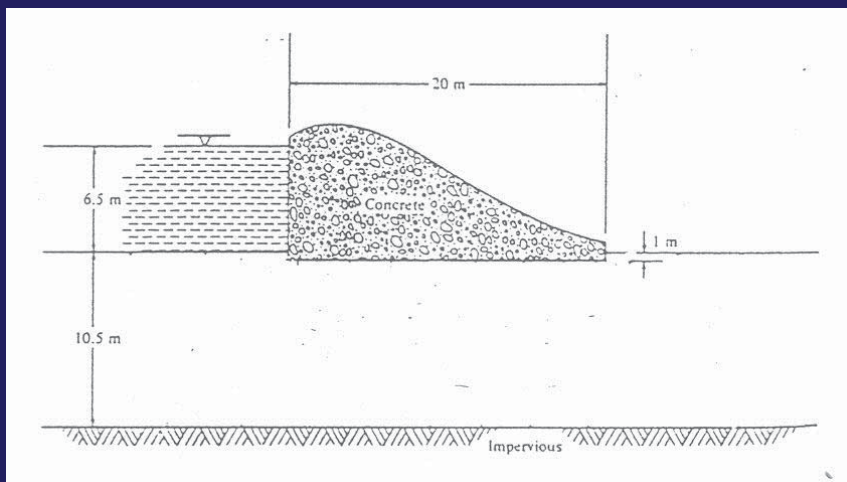
ตัวอย่างที่ 3.6

The cross section of a concrete dam is as shown, if the coefficient of permeability of the soil under this dam is equal to 3.0×10^{-3} cm/s in both directions. Determine the amount of water that seep under this dam per meter of dam width. (m^3/s)



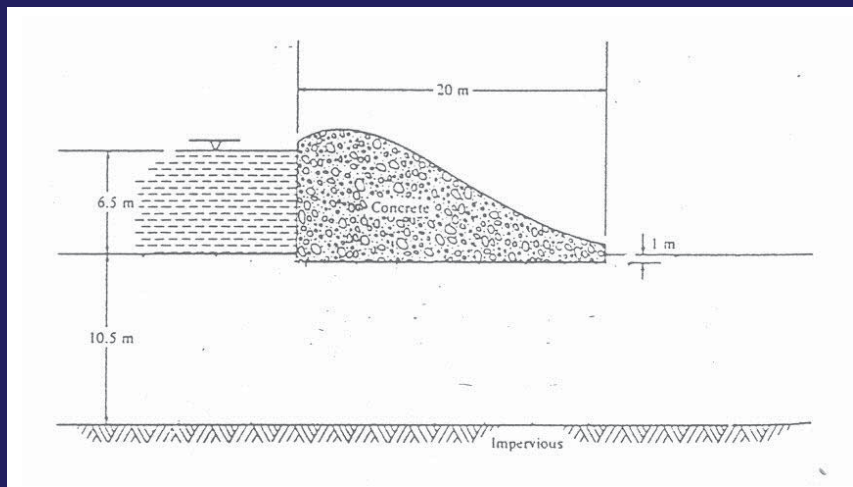
ตัวอย่างที่ 3.6

หน้าตัดของเขื่อนคอนกรีตเป็นดังรูป ถ้าค่า k ของดินทั้งสองทิศทางเท่ากับ 3.0×10^{-3} cm/s จงหาปริมาณน้ำที่ซึมผ่านเขื่อนต่อความกว้างของเขื่อน 1 เมตร โดยใช้หน่วย m^3/s



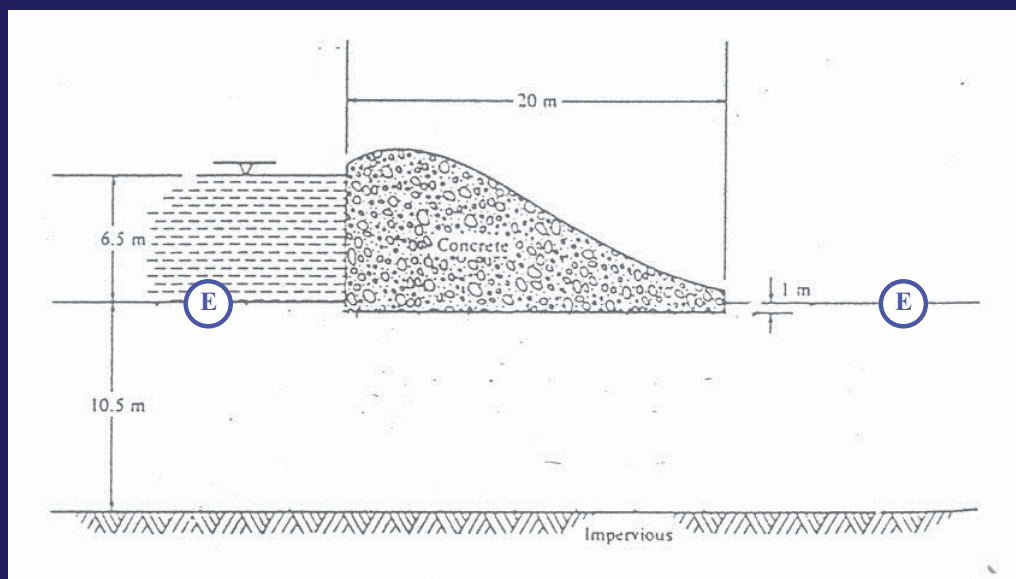
วิธีทำ

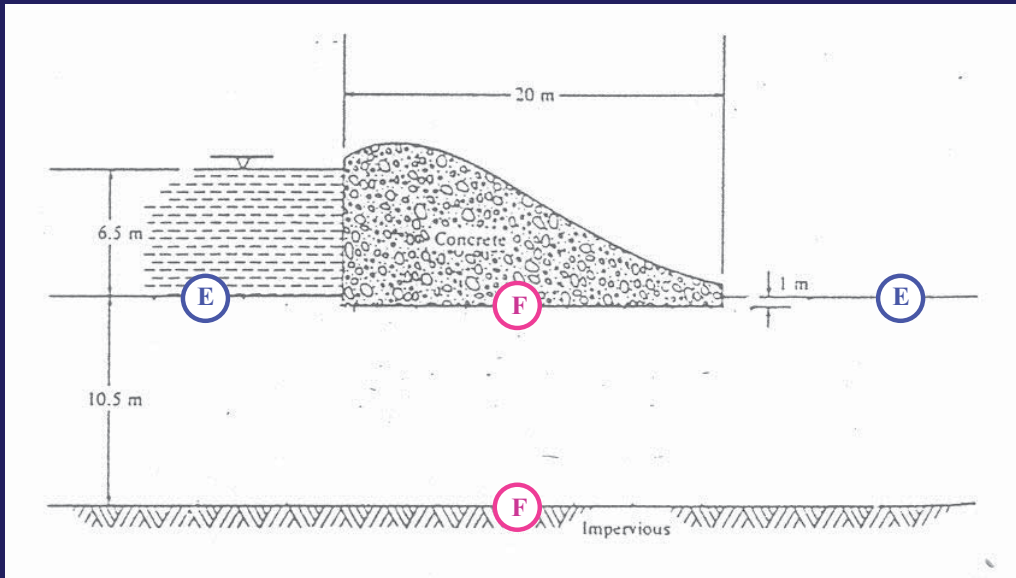
1. วาดรูปหน้าตัดของเขื่อนให้ได้ตามสัดส่วน



2. พิจารณา Boundary condition ซึ่งจะเห็นว่า

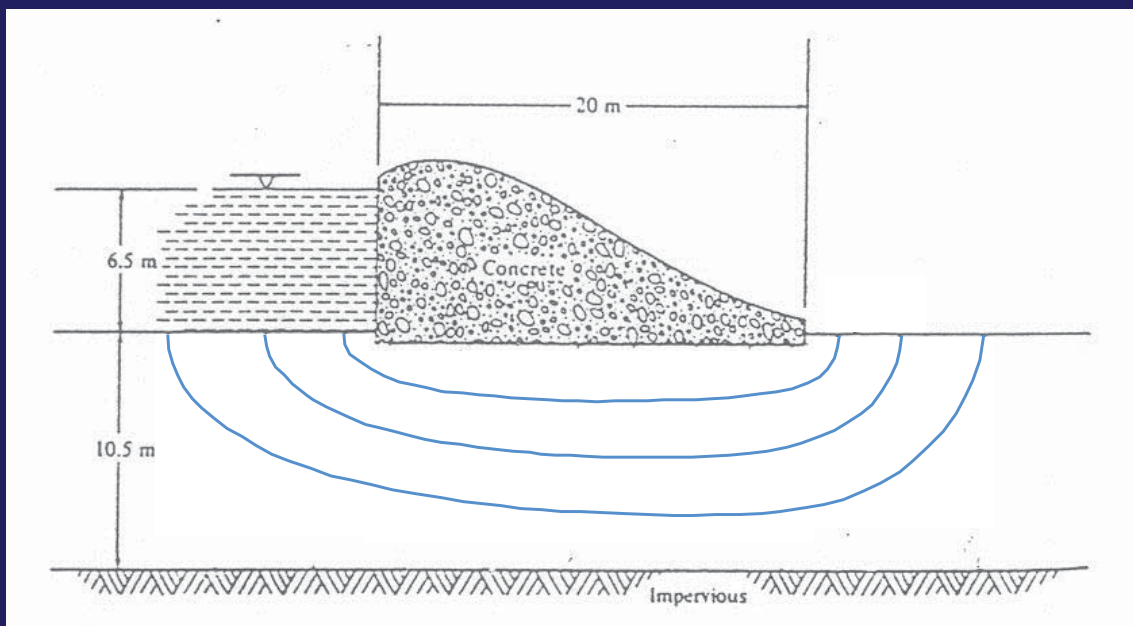
เส้นระดับผิวดิน เป็น Equipotential line โดยด้านที่ Total head สูง เป็นเส้นแรก และ ด้าน Total head ต่ำ เป็นเส้นสุดท้าย



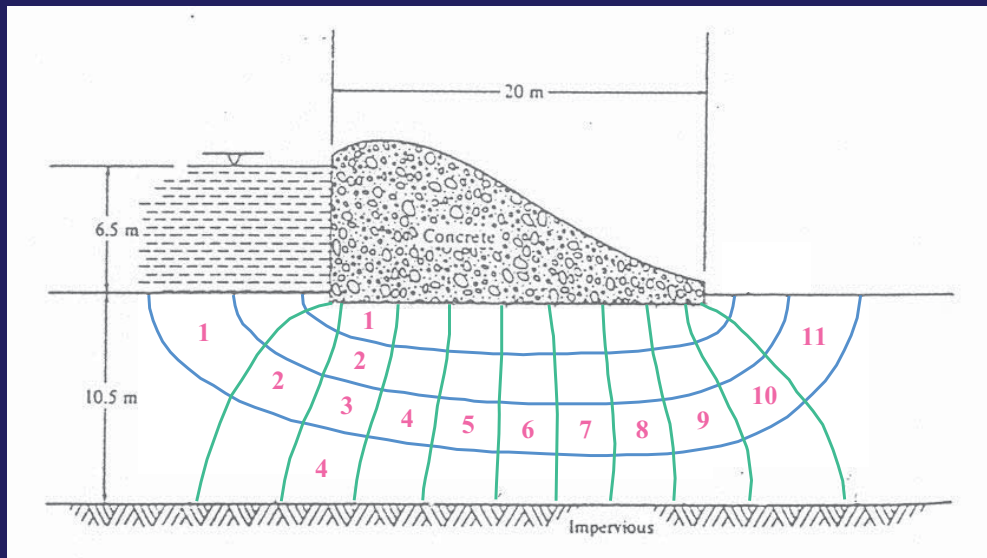
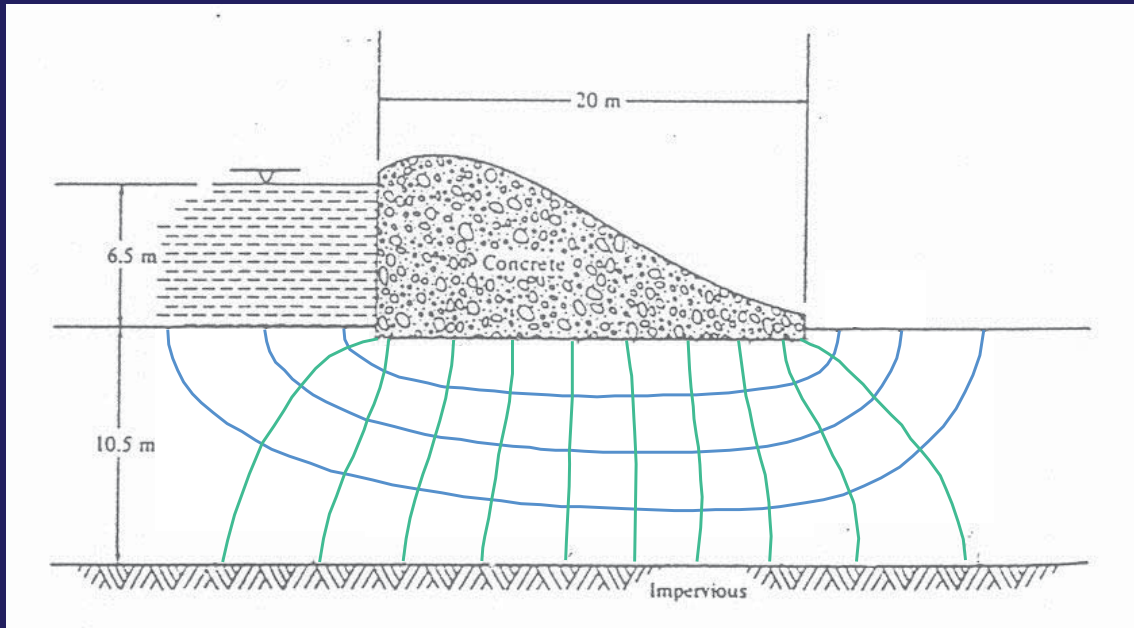


ให้โครงสร้างของเขื่อนที่อยู่ในดินเป็น **Flow line** เส้นแรก และให้ชั้น **Impervious layer** เป็น **Flow line** เส้นสุดท้าย

3. ลากเส้น **Flow line** จากด้าน **Total head** สูงไปหาต่ำ



4. ลากเส้น Equipotential line โดยพยายามลากให้ตัดกับ
เส้น Flow line เป็นมุมฉาก และให้เป็นสี่เหลี่ยมจตุรัส



จากรูป จะได้

Flow channel (N_f) = 4 ช่อง Equipotential drop (N_d) = 11 ช่อง

จากสมการ $q = k \cdot \Delta h (N_f/N_d)$

แทนค่า $q = 3.0 \times 10^{-3} \times 6.5 \times (4/11) \times (100 \times 100)$

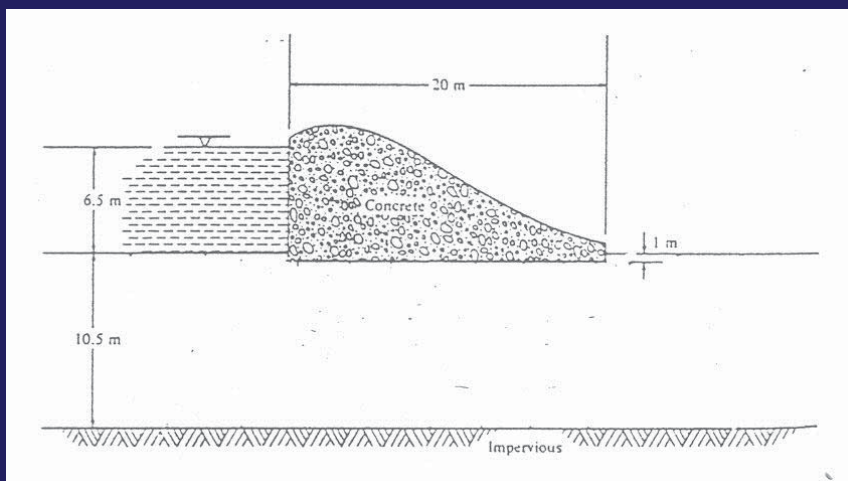
$$q = 70.9 \text{ cm}^3/\text{s}/\text{m}$$

$$\text{หรือ } 7.1 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$$

Ans.

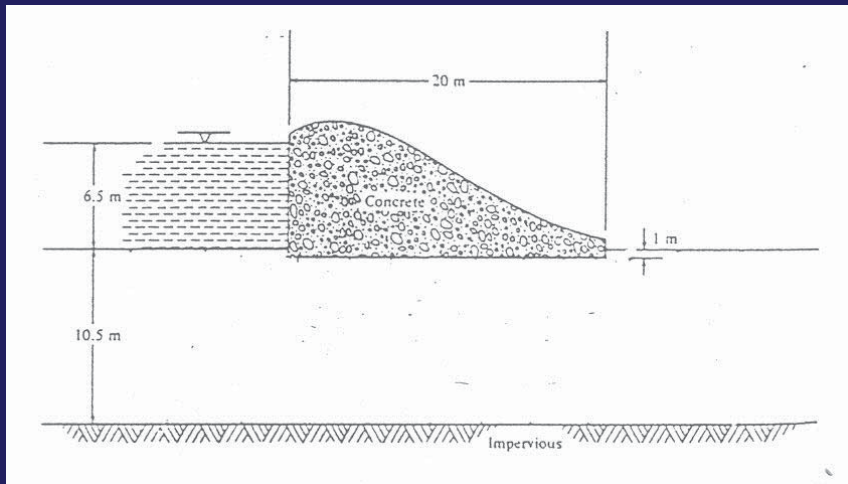
ตัวอย่างที่ 3.7

The cross section of a concrete dam is as shown, if the coefficient of permeability of the soil under this dam is equal to $k_x = 3.0 \times 10^{-3}$ cm/s and $k_z = 6.0 \times 10^{-4}$ cm/s Determine the amount of water that seep under this dam per meter of dam width. (m^3/s)



ตัวอย่างที่ 3.7

หน้าตัดของเขื่อนคอนกรีตเป็นดังรูป ถ้าค่า $k_x = 3.0 \times 10^{-3}$ cm/s และ $k_z = 6.0 \times 10^{-4}$ cm/s จงหาปริมาณน้ำที่ซึมผ่านเขื่อนต่อความกว้างของเขื่อน 1 เมตร โดยใช้หน่วย m^3/s



วิธีทำ

แปลงความยาวของเขื่อนในแนวแกน x ให้เป็น x' โดยใช้สมการ

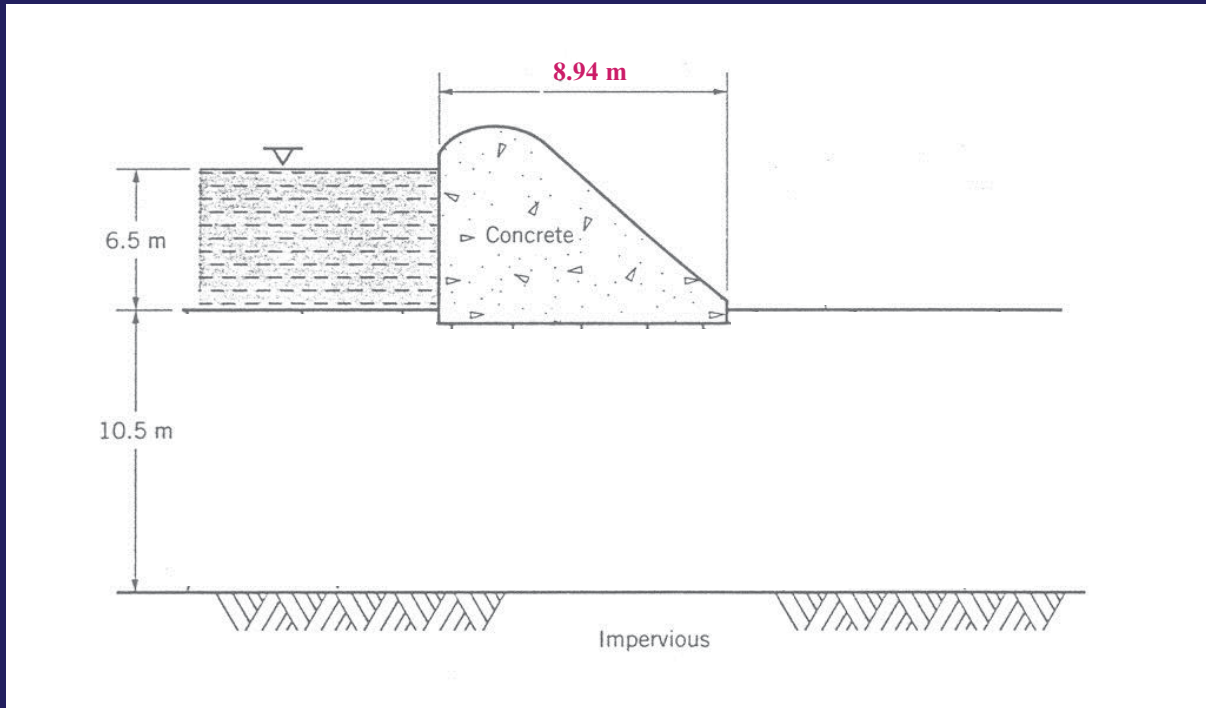
$$x' = (k_z/k_x)^{1/2} \cdot x$$

$$x' = [(6.0 \times 10^{-4})/(3.0 \times 10^{-3})]^{1/2} \times 20$$

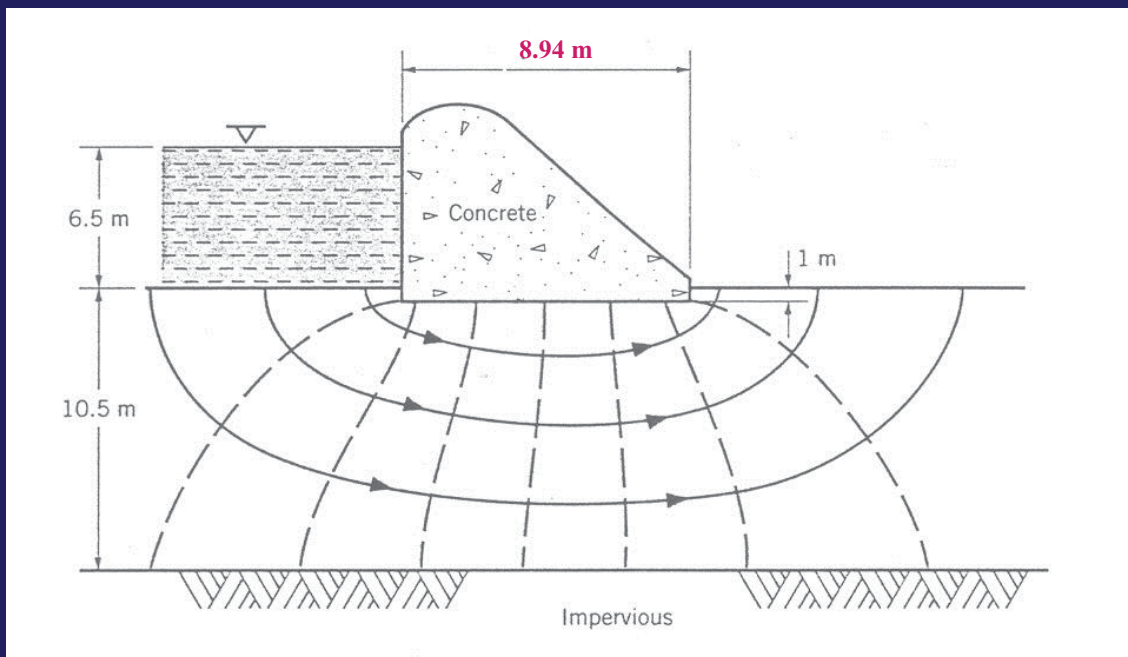
$$x' = 8.94 \text{ m}$$

จากนั้นวาดรูปหน้าตัดของเขื่อนให้ได้ตามสัดส่วน

โดยเขื่อนจะยาว = 8.94 m



พิจารณา Boundary condition จากนั้นวาด Flow net ได้ดังรูป



จากรูป จะได้

Flow channel = 4 ช่อง

Equipotential drop = 8 ช่อง

คำนวณค่า k เหนือ จากสมการ $k_e = (k_x \cdot k_z)^{1/2}$ แทนค่า

$$k_e = [(6.0 \times 10^{-4}) \times (3.0 \times 10^{-3})]^{1/2}$$

$$k_e = 1.3 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$$

จากสมการ $q = k_e \cdot \Delta h (N_f/N_d)$

แทนค่า $q = 1.3 \times 10^{-3} \times 6.5 \times (4/8) \times (100 \times 100)$

$$q = 42.2 \text{ cm}^3/\text{s}/\text{m}$$

$$\text{หรือ } 4.2 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$$

Ans.

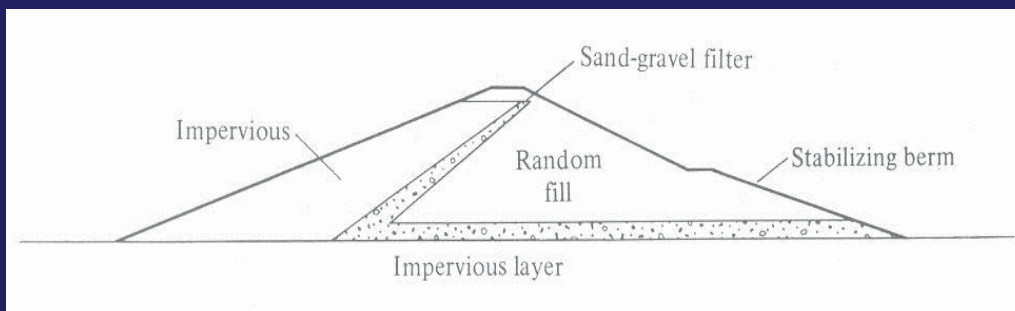
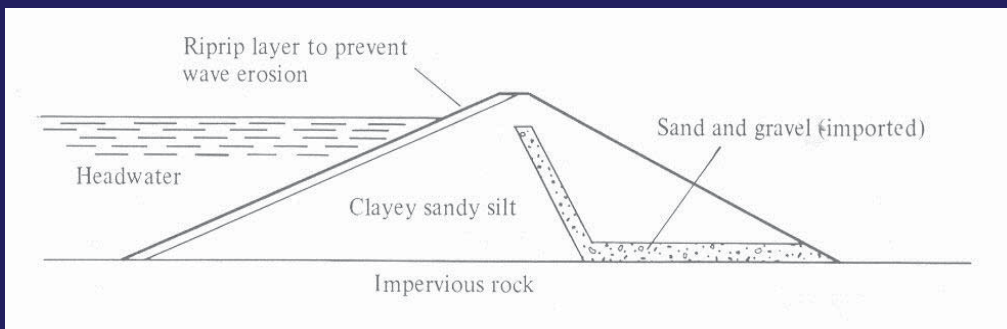
การไหลของน้ำในเขื่อนดิน

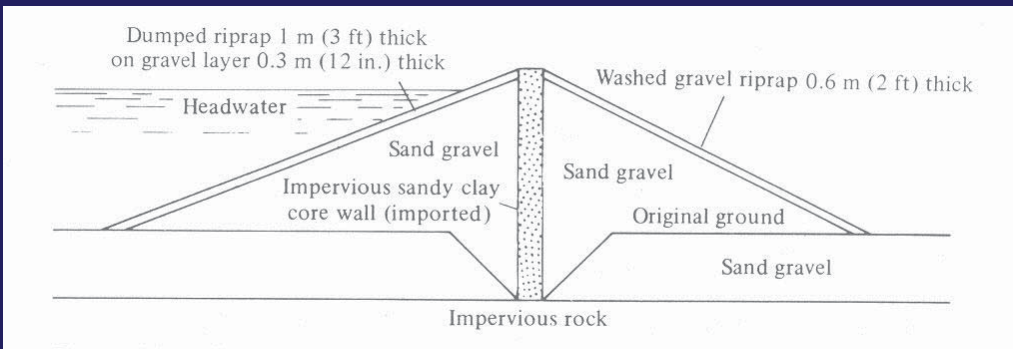
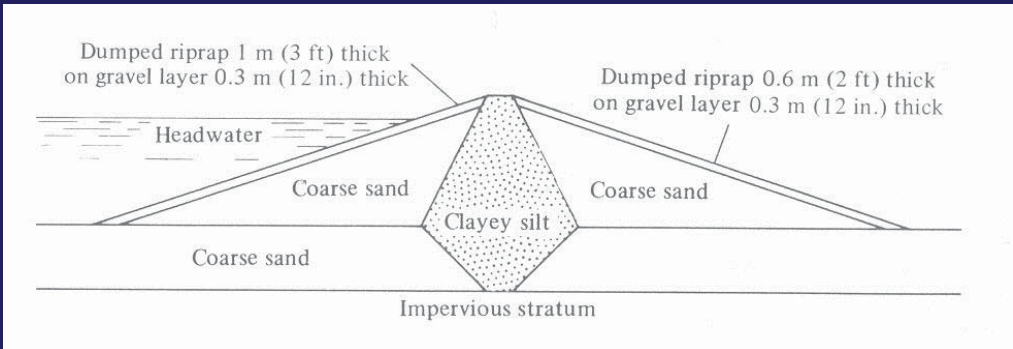
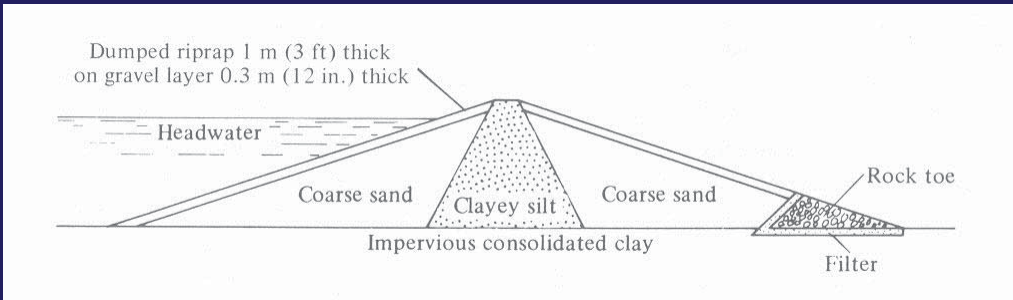
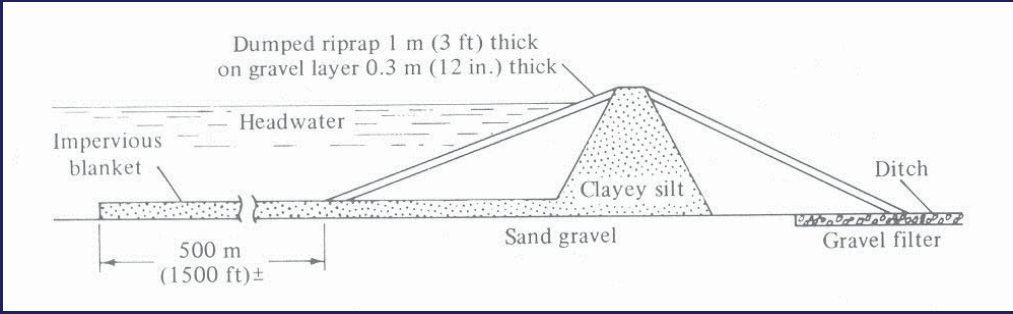
เขื่อนดิน (Earth dam) เป็นโครงสร้างที่ใช้ในการเก็บกักน้ำ โดยมีวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างเป็นส่วนประกอบของดิน เช่น กรวด ดินเหนียว เขื่อนดินสามารถสร้างได้โดยใช้วัสดุชนิดเดียว หรือหลายชนิดเป็นชั้นป้องกันน้ำไหลซึมผ่านเขื่อนดิน







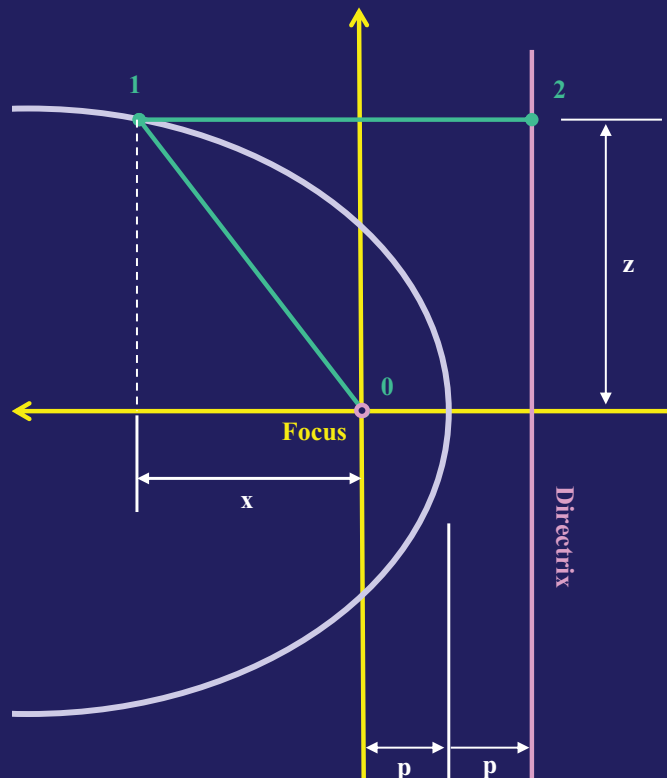


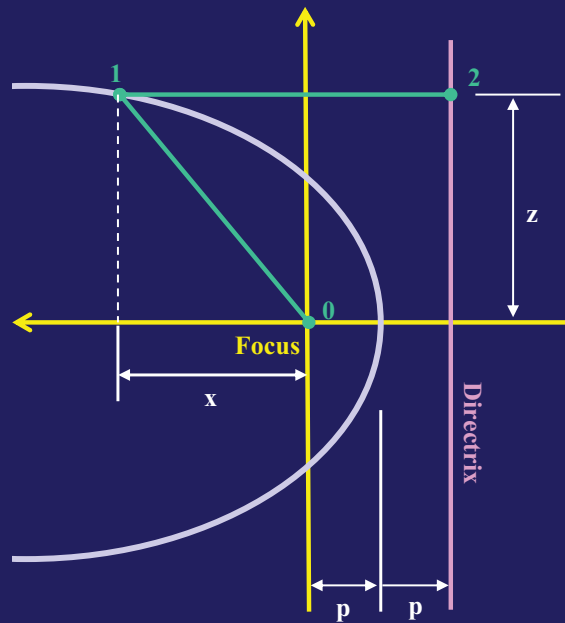


เขื่อนดินจะมีการไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนที่ไม่มีขอบเขตที่ชัดเจน ทั้งนี้เพราะมีเพียงเส้นการไหลสิ้นสุดท้ายเท่านั้น คือที่ระดับผิวดินเดิม และเส้นสมมุติเส้นสิ้นสุดท้าย คือผิวน้ำของเขื่อนดินเท่านั้น

ปัญหา คือการหาเส้นการไหลเส้นแรก
ที่เรียกว่า เส้นการไหลบนสุด (Top flow
line) หรือ ผิวน้ำพิเรียดิก (Phreatic surface)

Casagrande แนะนำว่า เส้น Top flow line มีลักษณะโค้งแบบ Basic parabola





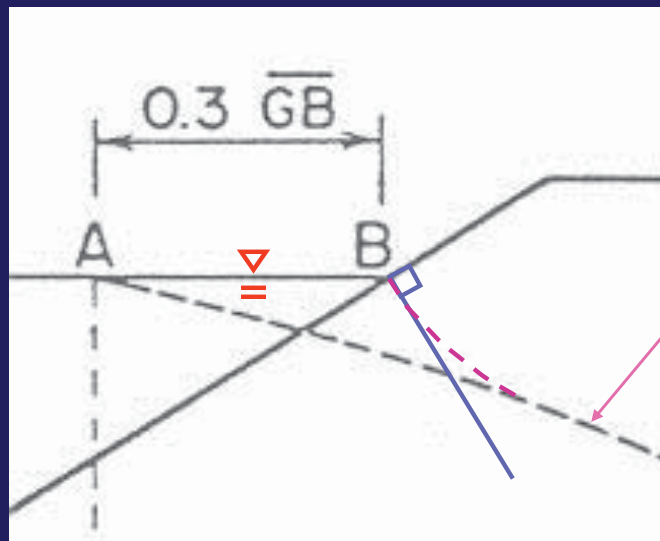
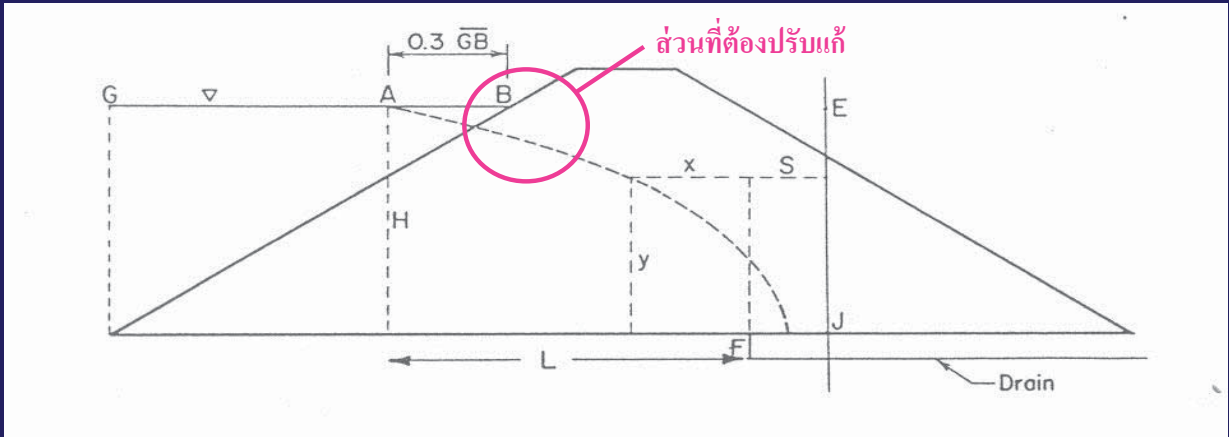
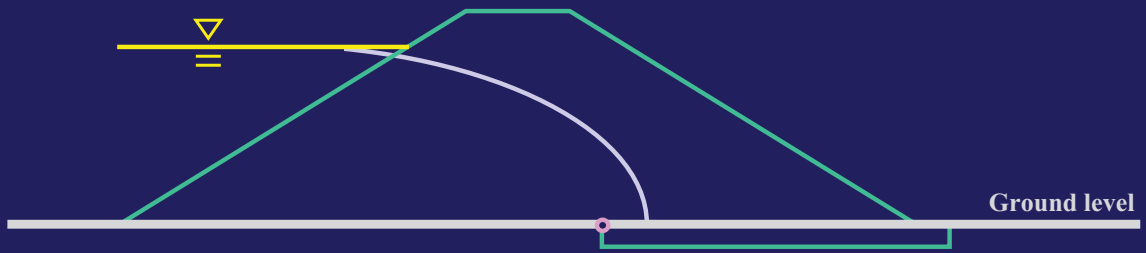
ระยะ 01 จะเท่ากับ 12 เสมอ หรือ

$$(x^2 + z^2)^{1/2} = 2p + x$$

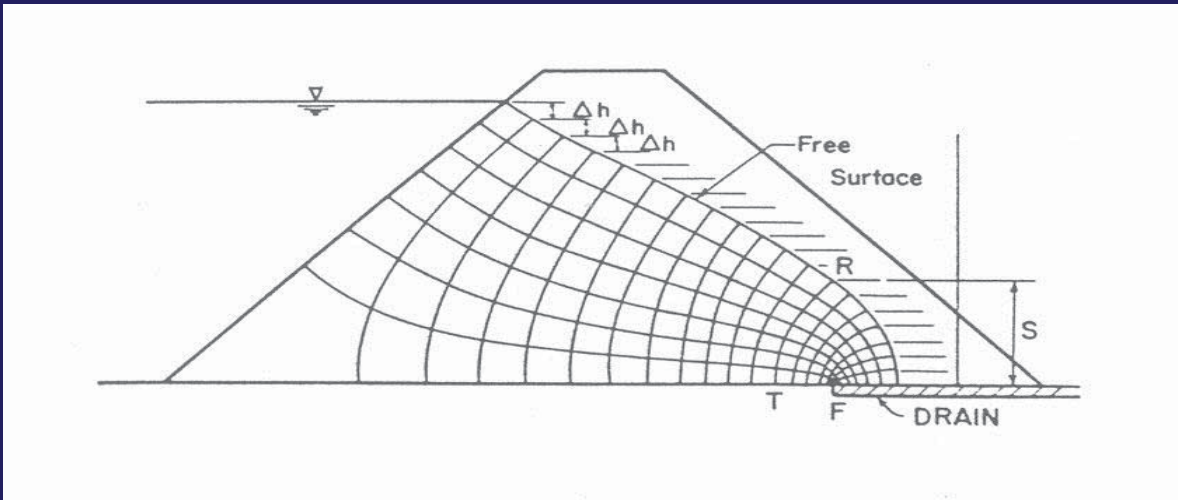
เขื่อนดินที่มีการระบายน้ำ



การวิเคราะห์หาเส้น Top flow line สามารถกระทำได้โดยนำจุดโฟกัสของพาราโบลาไปวางไว้ที่จุดเริ่มต้นของช่องระบายน้ำ จากนั้นวาดเส้นพาราโบลา แล้วต้องทำการปรับแก้ตรงบริเวณหน้าเขื่อนอีกครั้ง



ภาพขยายส่วนที่ต้องปรับแก้



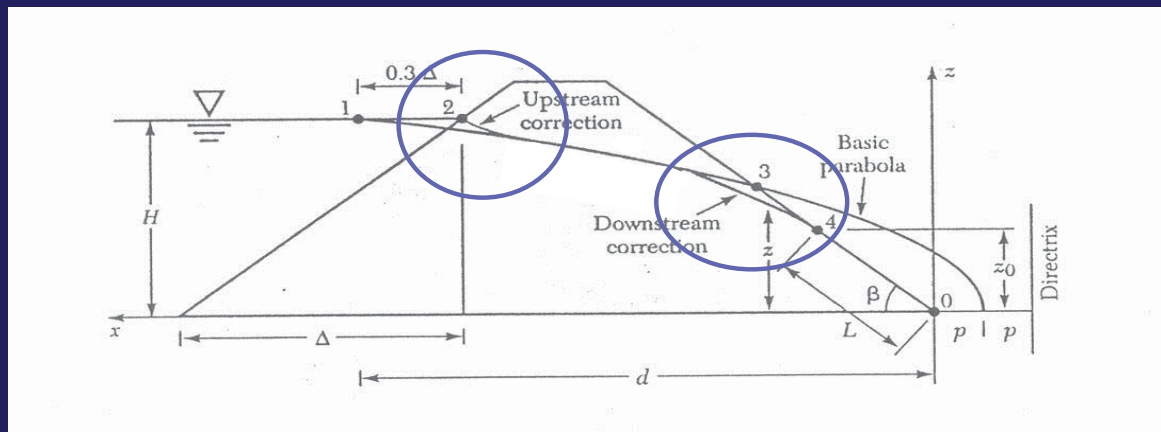
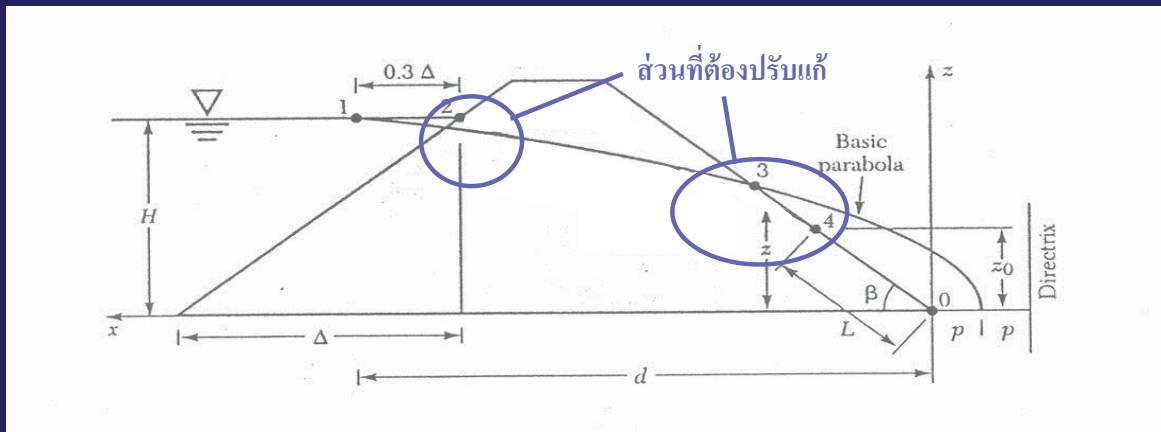
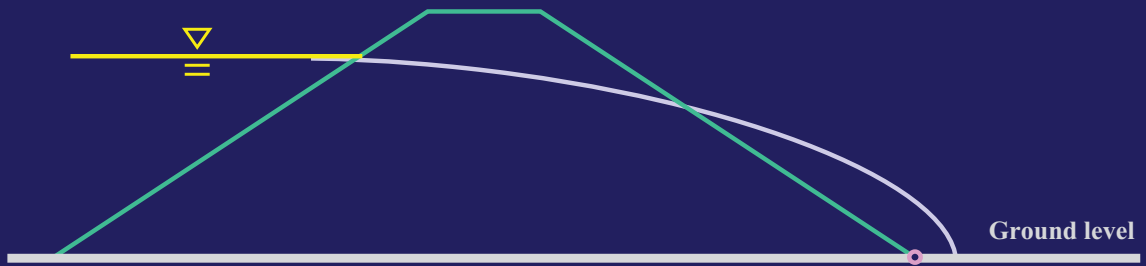
จากการศึกษาพบว่าสามารถ หาค่า q อย่างคร่าว ๆ ได้จากสมการ

$$q = k.S$$

เขื่อนดินที่ไม่มีการระบายน้ำ



การวิเคราะห์หาเส้น Top flow line สามารถกระทำได้โดยนำจุดโฟกัสของพาราโบลาไปวางไว้ที่ท้ายเขื่อน จากนั้นวาดเส้นพาราโบลา แล้วต้องทำการปรับแก้ตรงบริเวณหน้าเขื่อนและท้ายเขื่อนอีกครั้ง

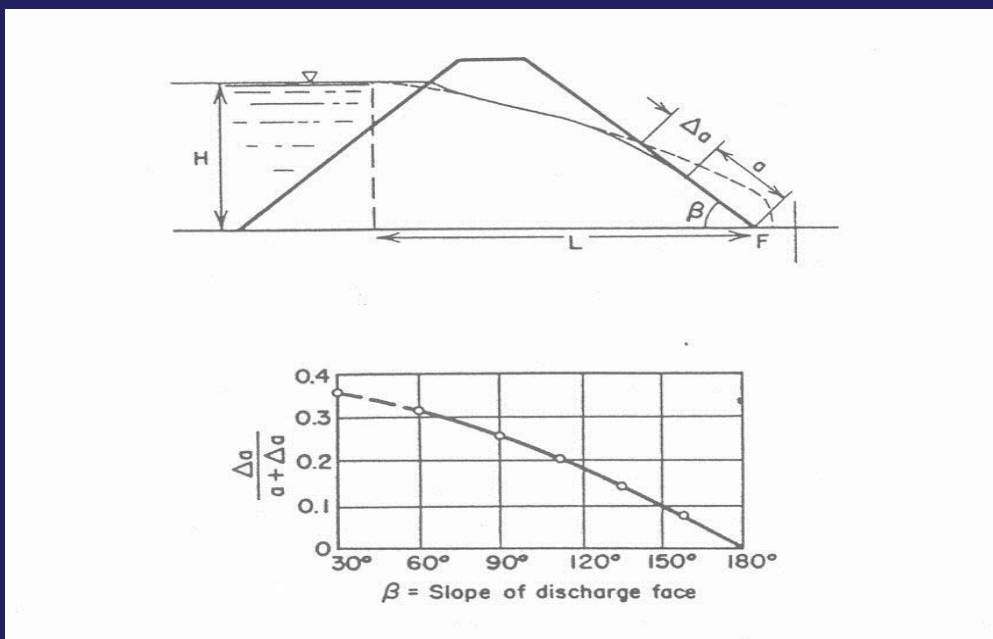


การปรับแก้

การหาปริมาณน้ำไหลซึมผ่านเขื่อนดินประเภทนี้ สามารถหาค่า
ได้อย่างคร่าว ๆ จากสมการ

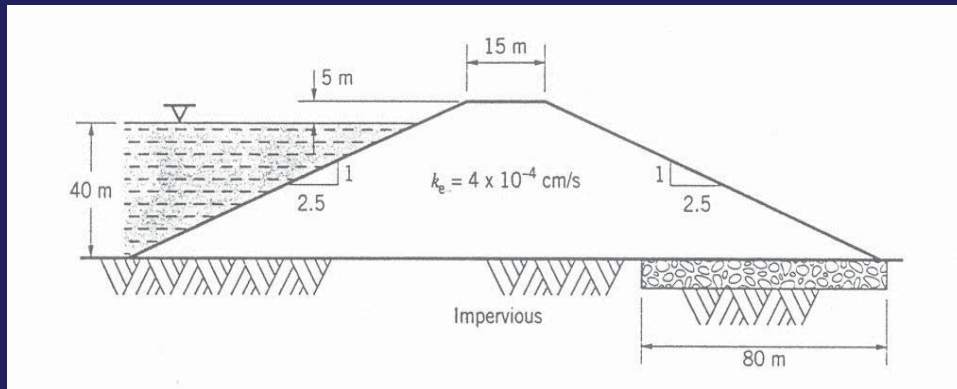
$$q = k.a. \sin \beta . \tan \beta$$

ถ้า β มากกว่า 30° จะสามารถปรับแก้เส้นกราฟเส้นแรกได้จากกราฟ



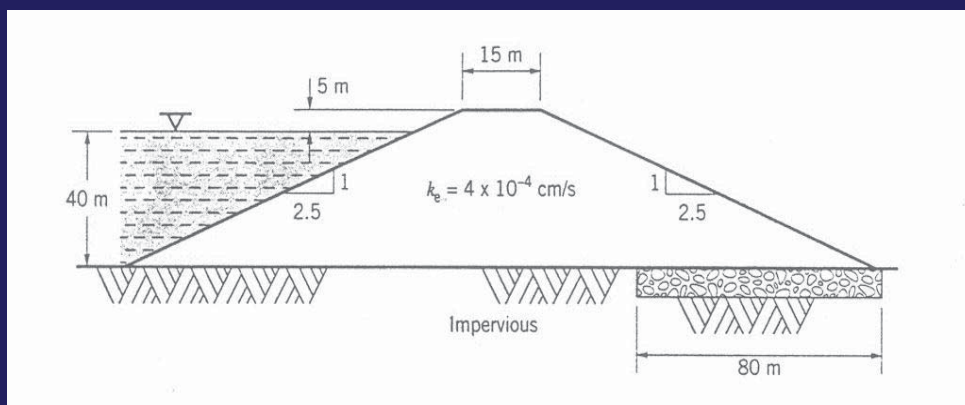
ตัวอย่างที่ 3.8

Determine the amount of water that seep through this earth dam if the coefficient of permeability of this dam is 4.0×10^{-4} cm/s



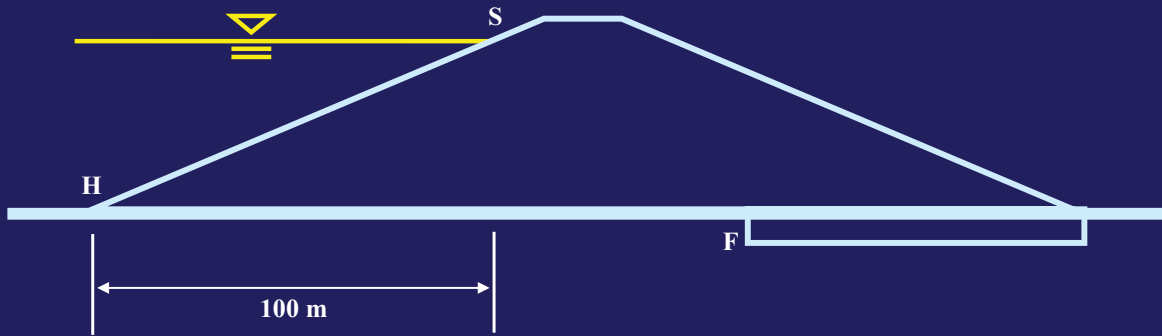
ตัวอย่างที่ 3.8

จงหาปริมาณน้ำที่ไหลผ่านเขื่อนดินดังรูป ถ้าค่า k ของเขื่อนดินเท่ากับ 4.0×10^{-4} cm/s



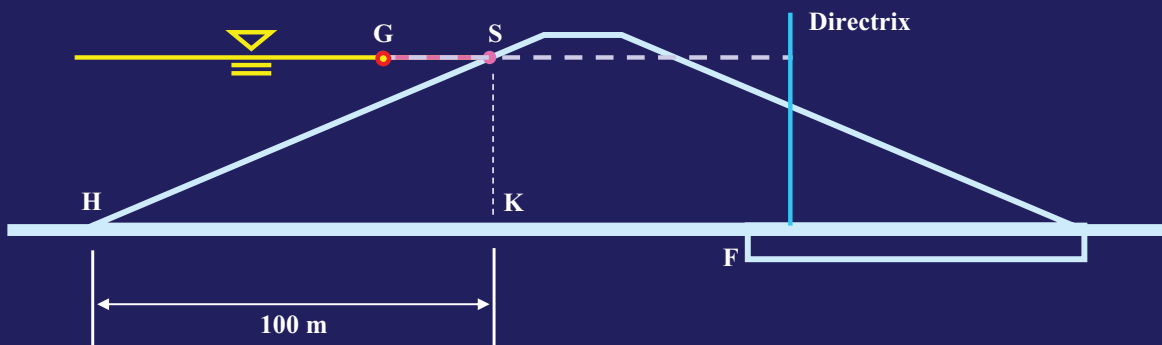
วิธีทำ

1. วาดรูปตามสัดส่วน



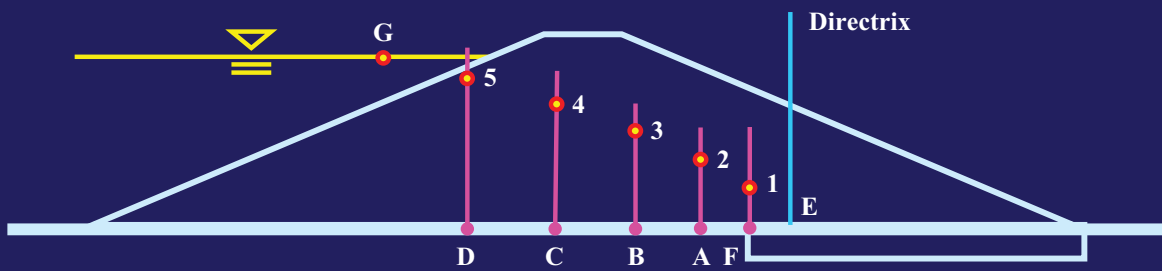
2. หาระยะ GS ซึ่งเท่ากับ $0.3 HK = 30$ m

3. จาก G ลากเส้นขนานกับแนวนอนให้ยาวเท่ากับ GF แล้วลากเส้นตั้งฉาก เส้นตั้งฉากนั้นคือ เส้น **Directrix**



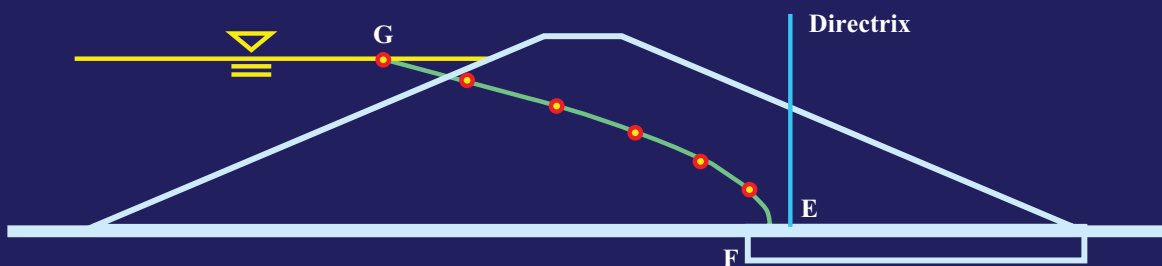
4. ที่จุด F ลากเส้นตั้งฉาก และกำหนดจุด A, B, C และ D ที่ตำแหน่งใด ๆ บนผิวดิน แล้วลากเส้นตั้งฉาก

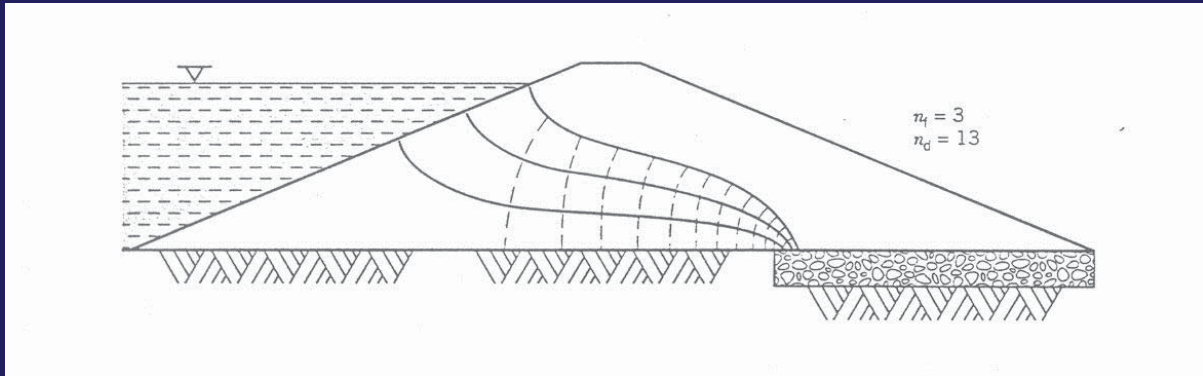
5. ให้ F เป็นจุดศูนย์กลาง ทางวงเวียนรัศมี FE, EA, EB, EC และ ED ไปตัดเส้นตั้งฉากต่าง ๆ ที่จุด 1, 2, 3, 4 และ 5



6. เชื่อมต่อจุด 1, 2, 3, 4, และ 5 จะได้เส้น Top flow line

7. ปรับแก้บริเวณที่ Top flow line พบกับระดับน้ำ แล้วทำการวาดตาข่ายการไหล





จากรูปได้ $N_f = 3$, $N_d = 13$

จากสมการ $q = k \cdot \Delta h (N_f/N_d)$ แทนค่า จะได้

$$q = 4.0 \times 10^{-4} \times 40 \times (3/13) \times 100 \times 100$$

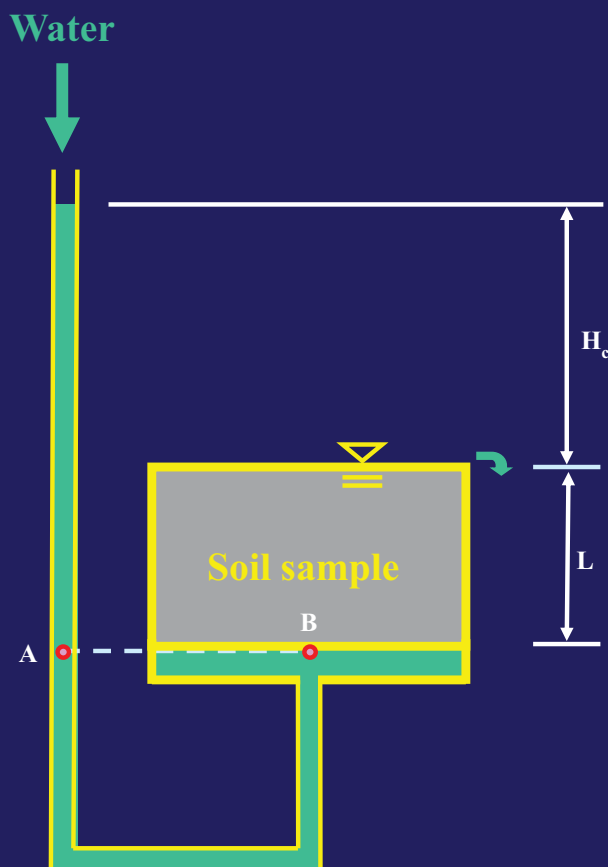
$$q = 36.9 \text{ cm}^3/\text{s}/\text{m} \quad \text{Ans.}$$

หรือ จะใช้สมการ $q = k \cdot S$ เมื่อ $S = FE = 9.5 \text{ m}$ (จากการวัด)

แทนค่า $q = 4.0 \times 10^{-4} \times 9.5 \times 100 \times 100$

$$q = 38.0 \text{ cm}^3/\text{s}/\text{m} \quad \text{Ans.}$$

ความลาดเชิงชลศาสตร์วิกฤติ



จากรูป ความดันของน้ำที่
จุด B เท่ากับจุด A

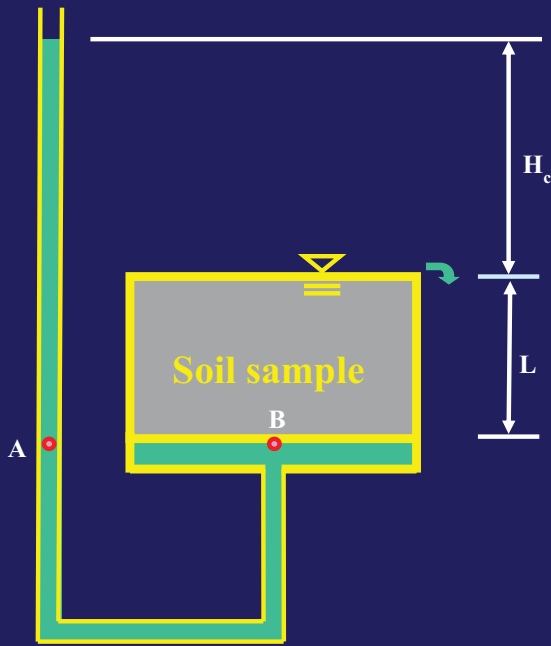
ซึ่งเท่ากับ $u_A = \gamma_w(H_c + L)$

ถ้าเพิ่มระดับน้ำในท่อ
จนถึงจุดที่ความดันที่ B สูง
พอดีที่จะพยุงก้อนดินนี้ (H_c)

ดังนั้น $W = u_A \cdot A$

เมื่อ $u_A = \gamma_w(H_c + L)$

ถ้าระดับน้ำในท่อถูกเพิ่มขึ้นให้สูงกว่า H_c ดินจะถูกน้ำพัดพาไปและอาจเกิด Sand boil หรือ Piping ได้



สถานการณ์ที่ $W = u_A \cdot A$ นี้เรียกว่าดินอยู่ในสภาพไม่มั่นคง (Quick condition) เช่น เกิดทรายดูด (Quick sand) และค่า i ในขณะนั้นเรียกว่า ค่าความลาดเชิงชลศาสตร์วิกฤติ (Critical hydraulic gradient)



จาก $W = u_A \cdot A$ หรือ

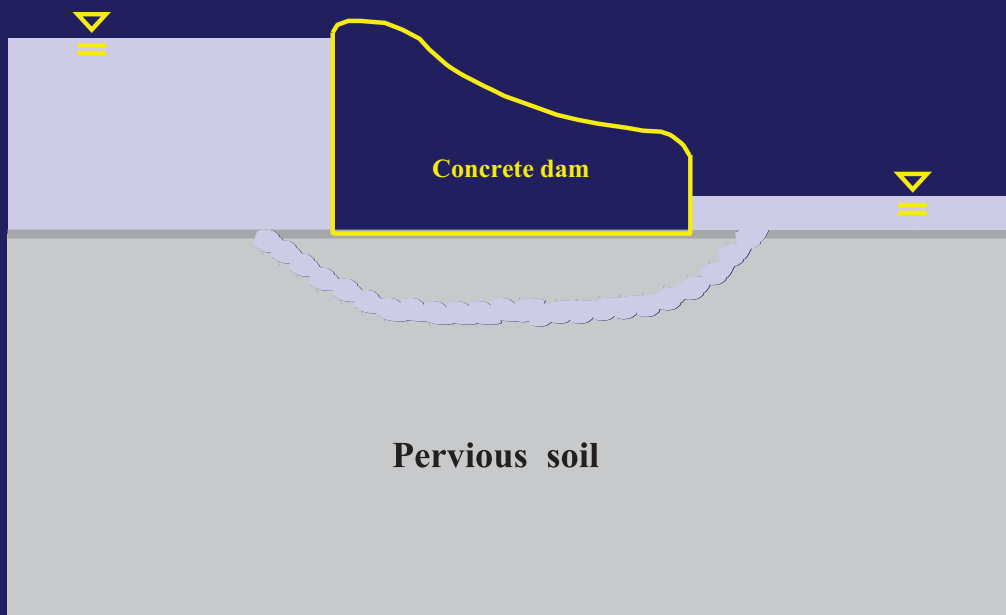
$$[(G_s + S \cdot e)/(1 + e)] \gamma_w \cdot A \cdot L = \gamma_w (H_c + L) \cdot A$$

ถ้าให้ $i_c = H_c/L$ จะได้

$$i_c = (G_s - 1)/(1 + e)$$

เมื่อ $i_c = \text{Critical hydraulic gradient}$

การเกิดสภาพไม่มั่นคง จะเกิดในบริเวณที่น้ำซึมจากด้านล่างขึ้นสู่บนเท่านั้น ซึ่งการเกิดเหตุการณ์นี้ในธรรมชาติ มักจะเกิดในบริเวณด้านท้ายของเขื่อน ซึ่งหากเกิดขึ้นจะทำให้มีโอกาสเกิด Piping และจะทำให้เขื่อนไม่สามารถเก็บน้ำได้ในที่สุด



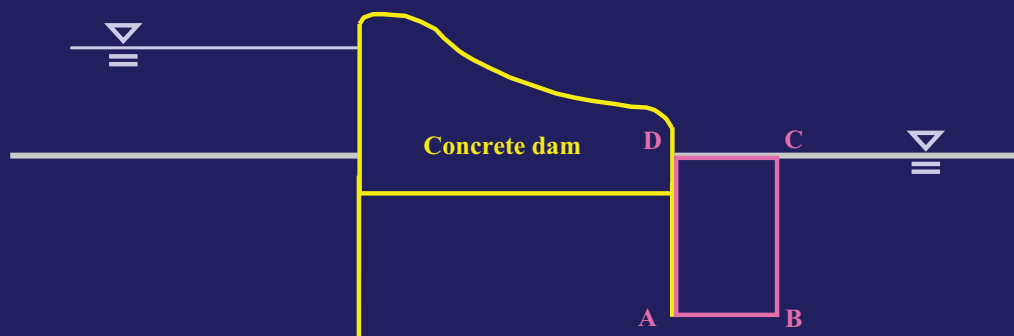
การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการเกิด Piping

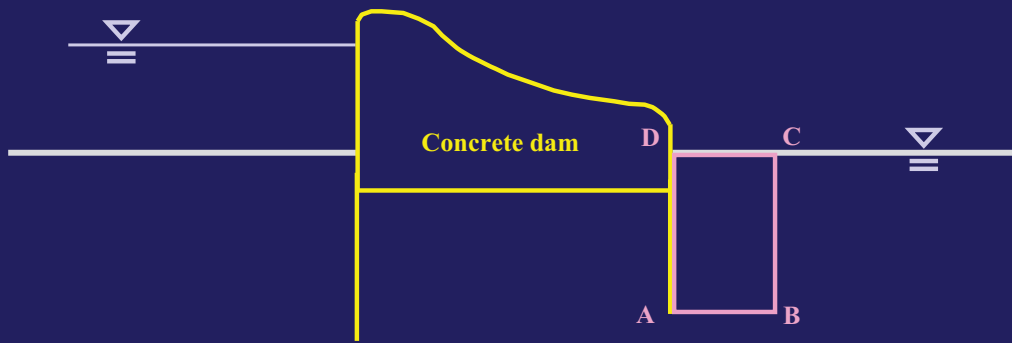
การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการเกิด Piping สามารถ กระทำได้หลายวิธี

- วิธีของ Terzaghi & Peck
- วิธีของ Lane
- วิธีของ Hanza

วิธีของ Terzaghi & Peck

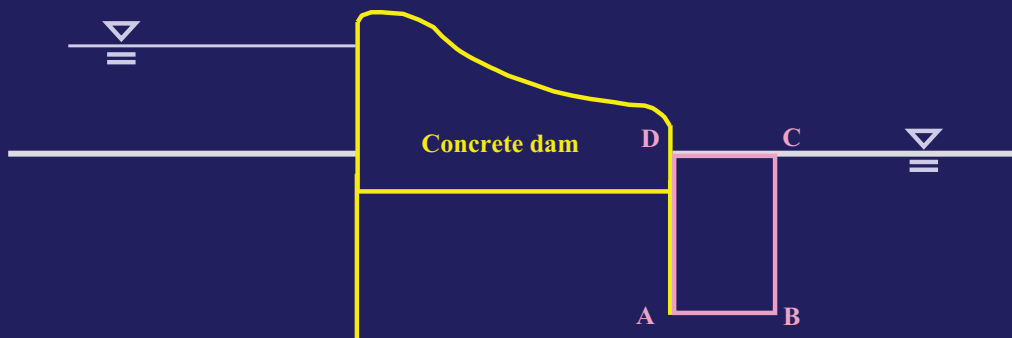
จากการศึกษาของ Terzaghi & Peck พบว่าการเกิด Piping มักจะเกิดขึ้นท้ายเขื่อนในบริเวณจำกัด คือ ที่บริเวณพื้นที่ สี่เหลี่ยมผืนผ้าท้ายเขื่อนโดยมีความกว้างของบริเวณเท่ากับ ครึ่งหนึ่งของความลึก เช่นบริเวณ ABCD ดังรูป





ซึ่ง ระยะ $AB = AD/2$

ดังนั้นวิธีการตรวจสอบ จึงเป็นการหาค่า i ในช่วงบริเวณดังกล่าวเทียบกับค่า i_c ให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนปลอดภัย (Factor of safety) หากเกิน 3.0 ถือว่าเขื่อนปลอดภัยจากการเกิด Piping



$$FS = i_c / i_{av}$$

เมื่อ

i_c = Critical hydraulic gradient

i_{av} = ค่า Hydraulic gradient จาก AB ถึง CD

วิธีของ Lane

จากการศึกษาของ Lane พบว่าในเขื่อนคอนกรีต เมื่อระยะทางในการซึมผ่านเพิ่มขึ้น โอกาสการเกิด Piping จะน้อยลง ดังนั้น Lane จึงคิดค่า Weighted creep ratio, WCR ขึ้น ซึ่งค่านี้จะนำมาเทียบกับค่า Weighted creep ratio critical, WCR_{CR}

หาก ค่า WCR มากกว่า WCR_{CR} แสดงว่าเขื่อนนั้นปลอดภัยจากการเกิด Piping

ตารางที่ 3.5 แสดงค่าอัตราส่วนการคืบเฉลี่ยวิกฤติ

| วัสดุ | WCR_{CR} |
|---------------------------|------------|
| ทรายละเอียด ถึง ดินตะกอน | 8.5 - 7.0 |
| ทรายหยาบ ถึง ทรายปานกลาง | 6.0 - 5.0 |
| กรวดละเอียด ถึง หยาบ | 4.0 - 3.0 |
| หินก้อนใหญ่ ถึง กรวด | 2.5 |
| ดินเหนียวอ่อน ถึง ปานกลาง | 3.0 - 2.0 |
| ดินเหนียวแข็ง ถึง แข็งมาก | 1.8 - 1.6 |

$$WCR = WCD/h_L$$

เมื่อ $WCD = \text{Weighted creep distance}$

ถ้าเป็นแนวตั้ง = ระยะทางที่วัดได้

ถ้าเป็นแนวนอน = ระยะทาง/3

ถ้าน้ำไม่ได้ไหลเกาะ = ระยะทาง x 2

$h_L = \text{Head loss}$

วิธีของ Hanza

วิธีนี้ใช้หลักการเดียวกันกับวิธีแรก แต่คิดค่า Hydraulic gradient (i_{exit}) ช่วงของ Equipotential line 2 เส้นสุดท้าย

$$i_{\text{exit}} = \Delta h/d$$

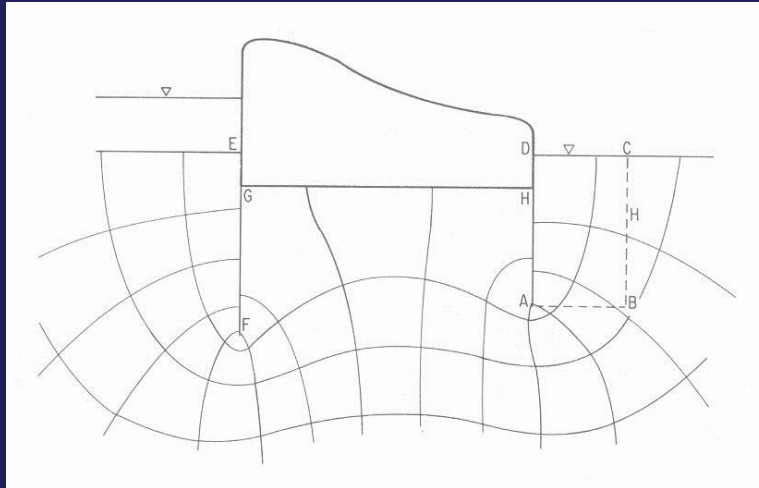
$$FS = i_c/i_{\text{exit}}$$

เมื่อ $\Delta h = \text{Head loss ต่อ Equipotential drop}$

$d = \text{ระยะห่างของ Equipotential line 2 เส้นสุดท้าย}$

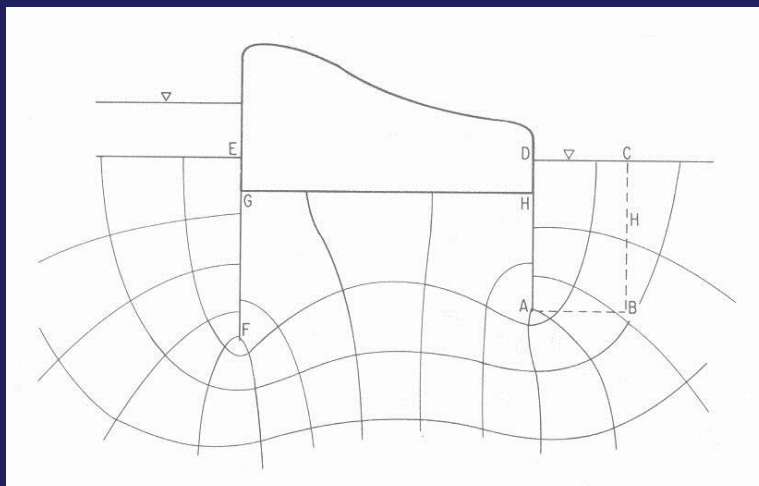
ตัวอย่างที่ 3.9

If the silty sand under this concrete dam has $G_s = 2.65$ and $e = 0.60$ and if the water level at the face of this dam is 5.5 m above the ground. Determine whether this dam is safe from piping.



ตัวอย่างที่ 3.9

จากรูป ชั้นดินตะกอนทรายมีค่า G_s เท่ากับ 2.65 ค่าอัตราส่วนช่องว่างเท่ากับ 0.60 และถ้าระดับน้ำหน้าเขื่อนสูง 5.5 เมตร จงตรวจสอบหาความปลอดภัยของเขื่อนจากการเกิด Piping



วิธีทำ

$$G_s = 2.65, e = 0.60, H = 5.5 \text{ m}$$

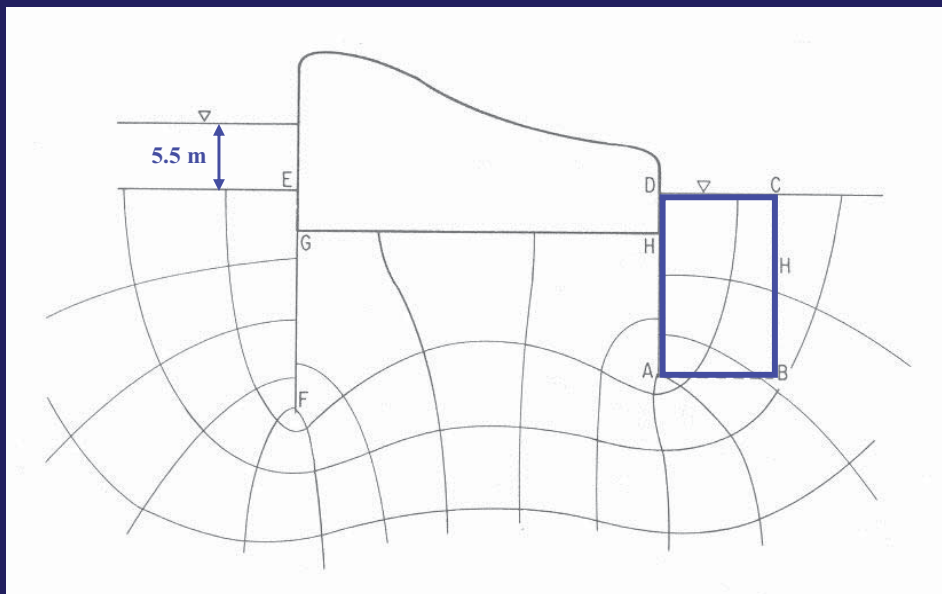
$$\text{จากสมการ } i_c = (G_s - 1)/(1 + e)$$

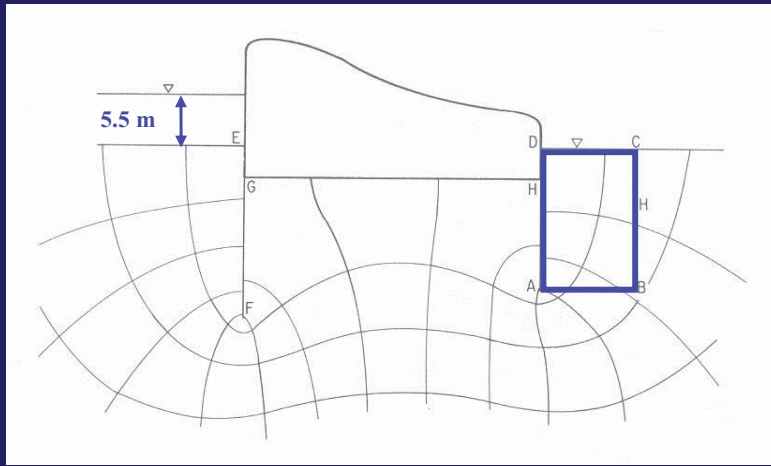
$$\text{แทนค่า } i_c = (2.65 - 1)/(1 + 0.60)$$

$$i_c = 1.03$$

วิธี Terzaghi & Peck

การเกิด Piping จะเกิดที่ ABCD โดย $AB = AD/2$

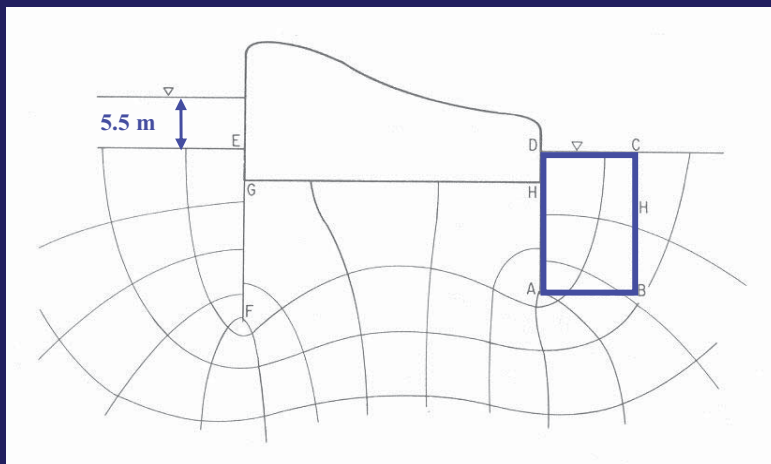




ถ้าให้ Datum อยู่ที่ระดับผิวดิน จะได้ $h_D = h_C = 0$ (Total head)

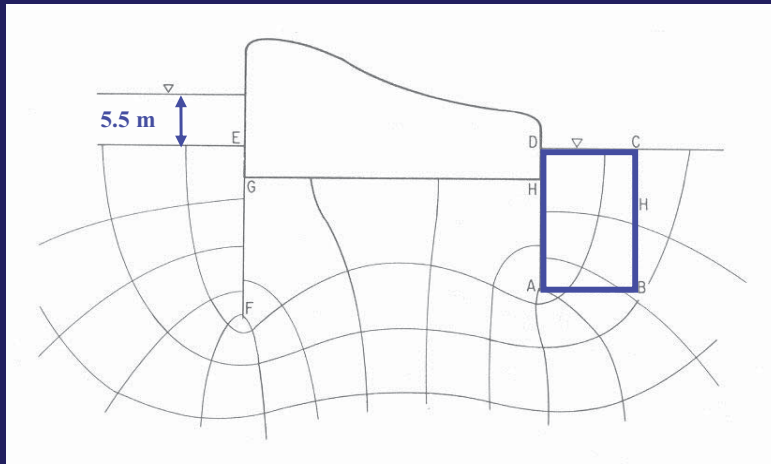
จากรูป จะได้ Equipotential drop = 14 ช่อง

ดังนั้น Head loss/ช่อง = $5.5/14 = 0.39$ m/ช่อง



ดังนั้น $h_A = 5.5 - 0.39 \times 10 = 1.6$ m

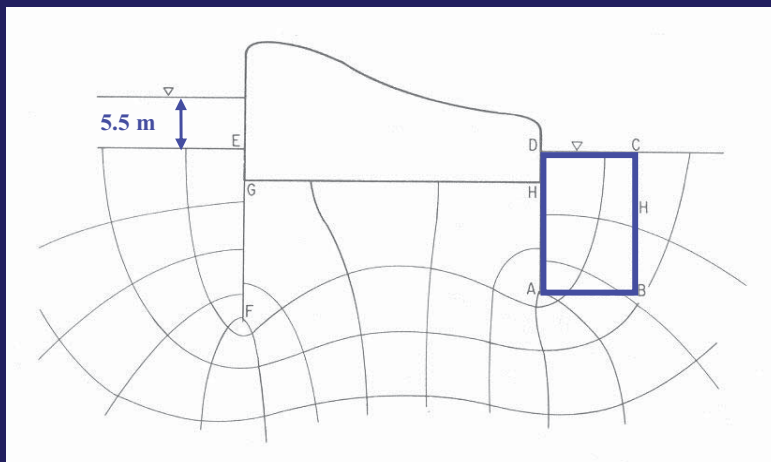
ดังนั้น $h_B = 5.5 - 0.39 \times 12.2 = 0.74$ m



จาก $i = \Delta h/L$ หรือ $i_{av} = \{[(h_A + h_B)/2] - [(h_C + h_D)/2]\}/AD$

แทนค่า $i_{av} = \{[(1.6 + 0.74)/2] - [(0 + 0)/2]\}/15.0$

$$i_{av} = 0.078$$



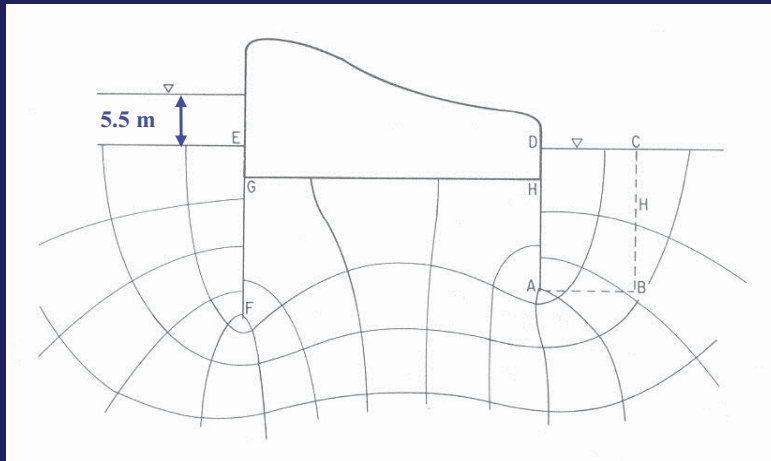
จาก $FS = i_c/i_{av}$ แทนค่า $FS = 1.03/0.078$

$$FS = 13.2 \text{ มากกว่า } 3.0$$

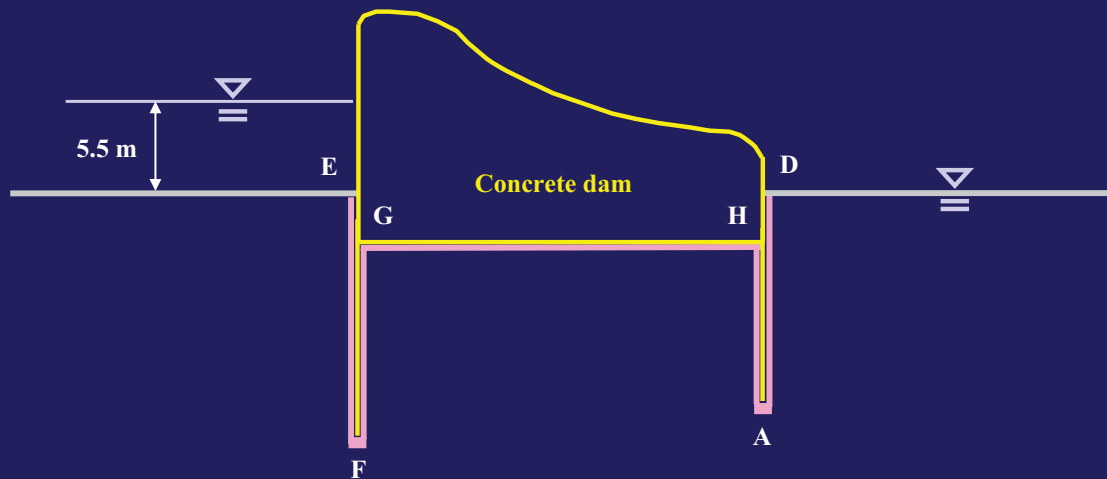
แสดงว่าเขื่อนนี้ปลอดภัยจากการเกิด Piping

Ans.

วิธี Lane



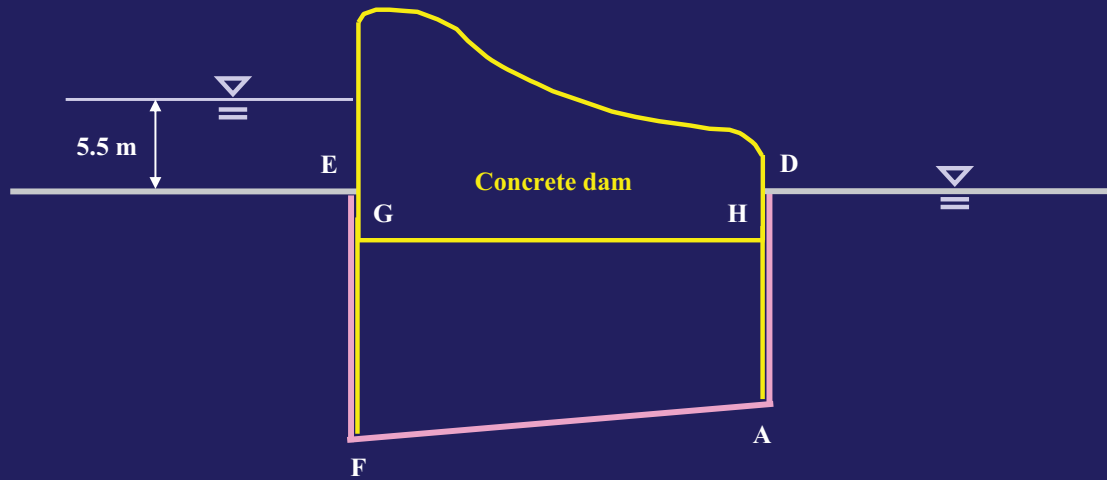
จากรูป หาระยะ WCD ที่สั้นที่สุด



จากรูป $WCD_{EFGHAD} = EF + FG + (GH/3) + HA + AD$

จากการวัด แทนค่า $WCD_{EFGHAD} = 18.7 + 15.3 + 29.0/3 + 12.2 + 15.0$

$$WCD_{EFGHAD} = 70.9$$



จากรูป $WCD_{EFAD} = EF + 2FA + AD$

จากการวัด แทนค่า $WCD_{EFAD} = 18.7 + 2 \times 29.1 + 15.0$

$$WCD_{EFAD} = 91.9$$

ดังนั้นค่า WCD ที่น้อยที่สุด คือ 70.9

จากสมการ $WCR = WCD/h_L$ แทนค่า $WCR = 70.9/5.5 = 12.89$

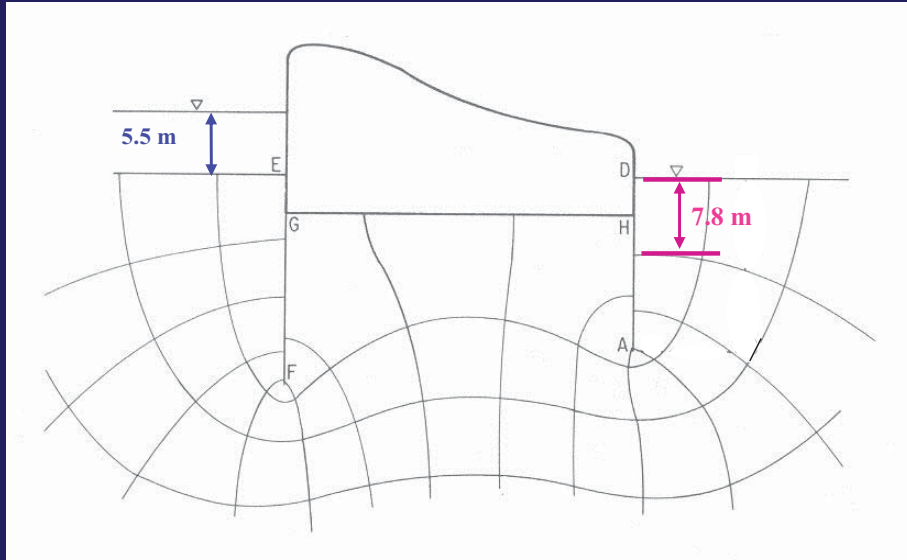
จาก ตารางที่ 3.5 สำหรับดินตะกอนทราย $WCR_{CR} = 8.5 - 7.0$

ดังนั้น เชื่อนี้จึงปลอดภัยจากการเกิด Piping

Ans.

วิธี Hanza

จากรูป หาระยะระหว่างเส้น Equipotential line 2 เส้นสุดท้าย



จากรูป ระยะระหว่างเส้น Equipotential line 2 เส้นสุดท้าย = 7.8 m

$$\text{จาก } i_{\text{exit}} = \Delta h/d \text{ แทนค่า } i_{\text{exit}} = 0.39/7.8 = 0.05$$

$$\text{จาก } FS = i_c/i_{\text{exit}} \text{ แทนค่า } FS = 1.03/0.05$$

$$FS = 20.6 \text{ มากกว่า } 3.0$$

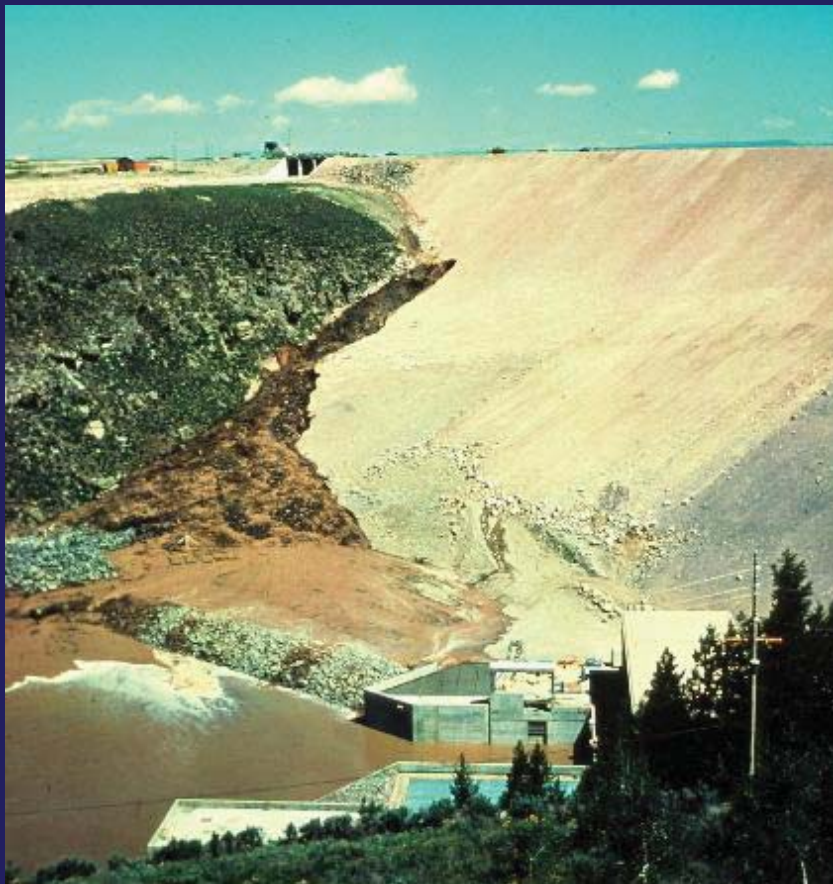
แสดงว่า เชื่อนี้ปลอดภัยจากการเกิด Piping

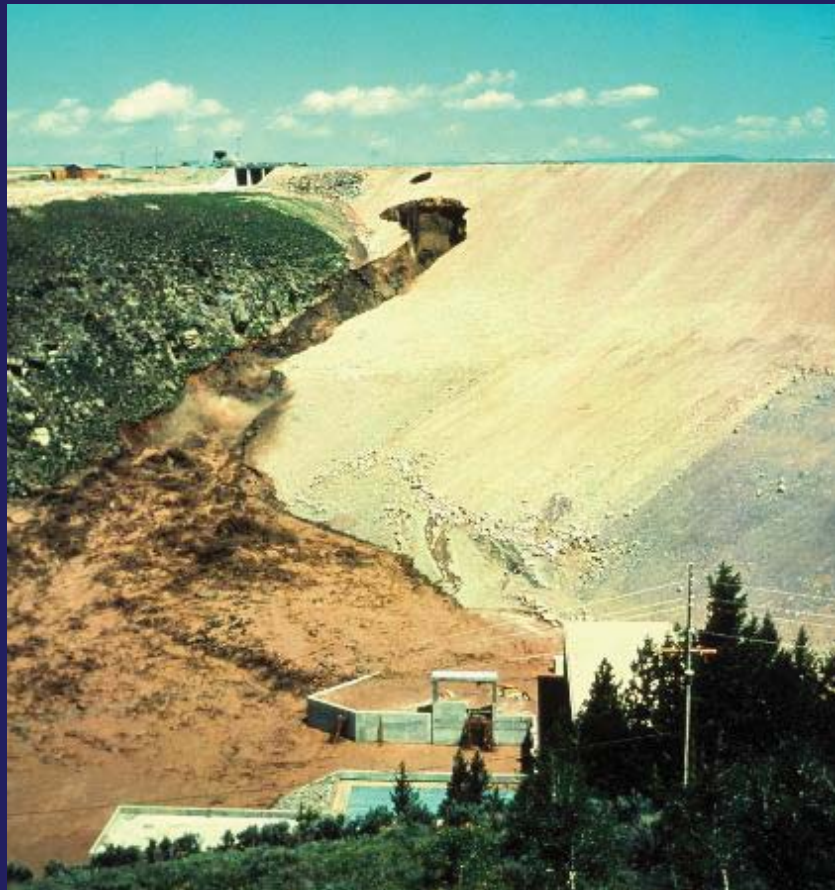
Ans.

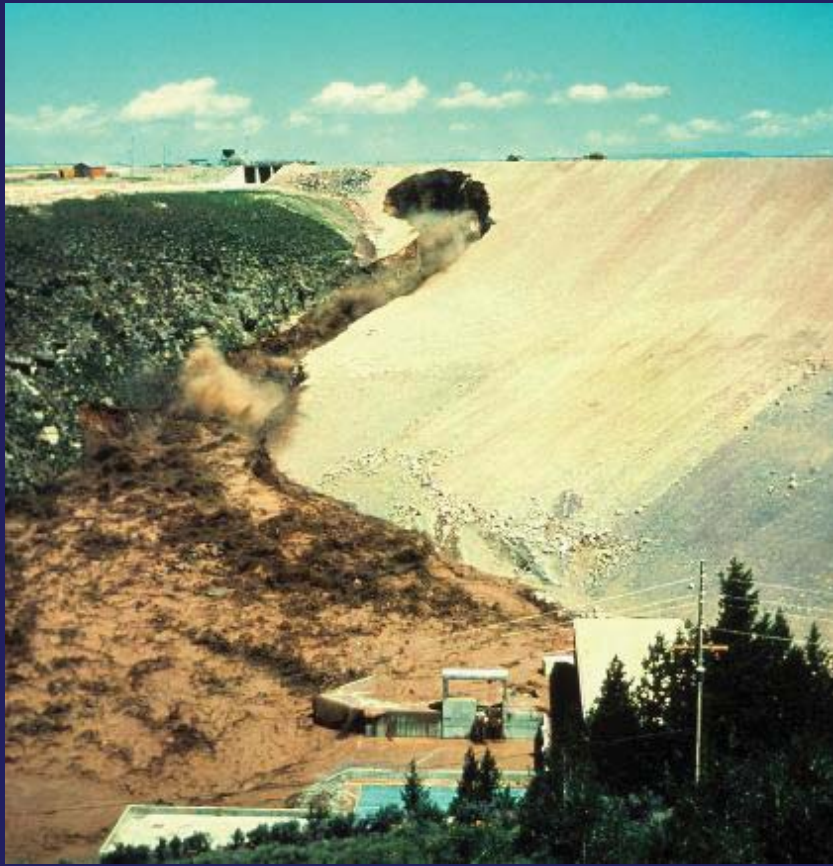
การวิบัติของเขื่อน Teton

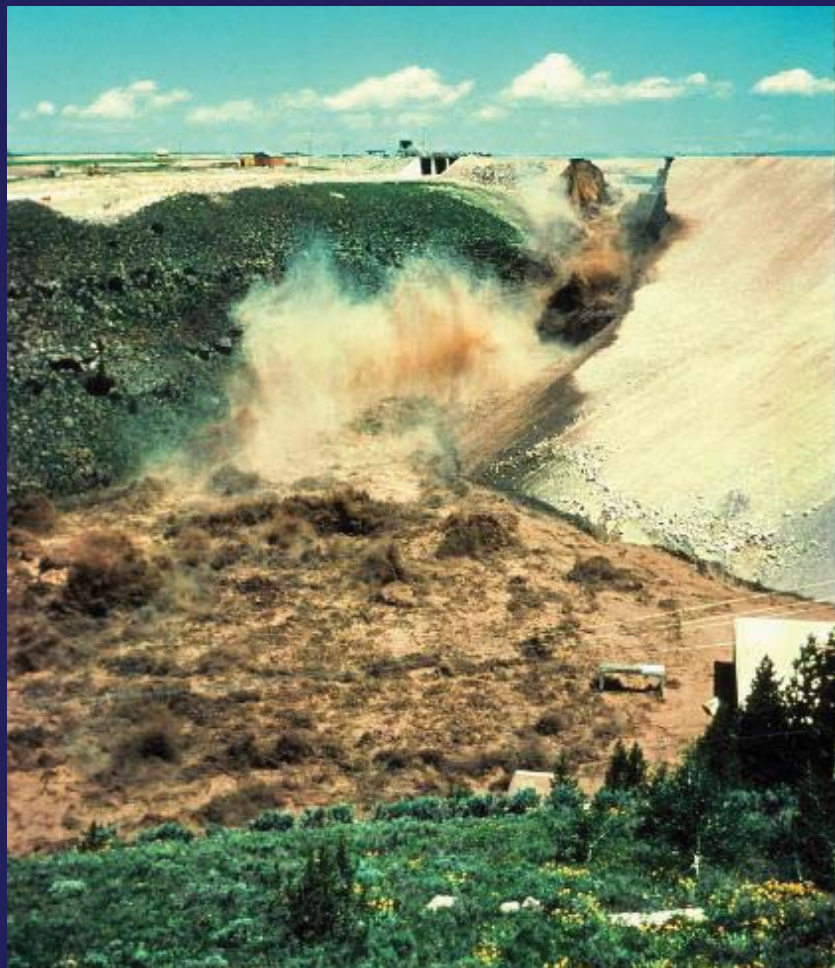
เขื่อน Teton ตั้งอยู่ที่ แม่น้ำ Teton ทางทิศตะวันออกเหนือของเมือง Newdale รัฐ Idaho USA เป็นเขื่อนดินที่มีแกนกลางที่บดน้ำ เมื่อสร้างเสร็จเขื่อนจะมีความสูง 93 เมตร และจุน้ำได้ 356 ล้านลูกบาศก์เมตร เขื่อนนี้วิบัติเมื่อ 10.30 -11.00 น. วันที่ 5 มิถุนายน 1976 ในขณะที่ก่อสร้างยังไม่เสร็จแต่น้ำไหลเข้าเขื่อนมากเกินไป กําหนด สาเหตุของการวิบัติเกิดจาก Piping

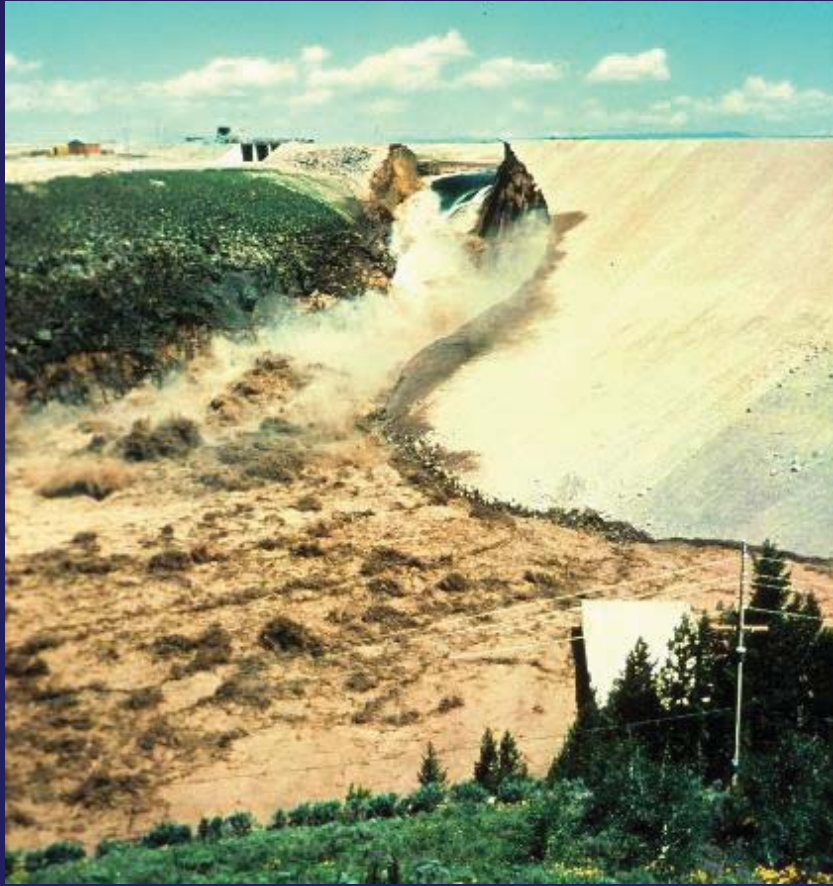














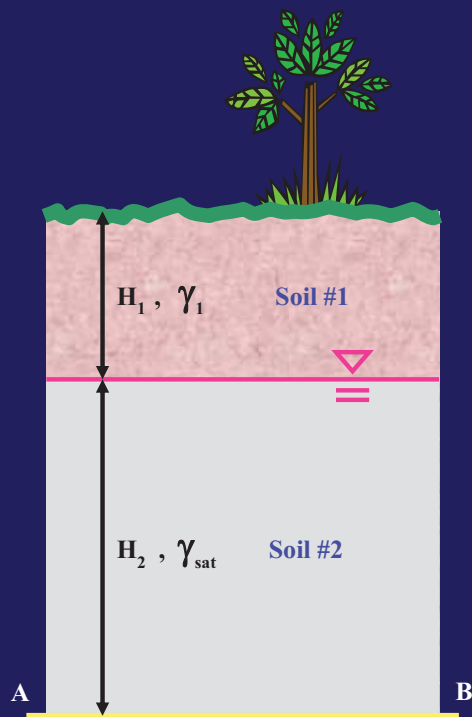




บทที่ **4**

ความเค้นในดิน

ความเค้นรวม (Total stress)



น้ำหนักของดินที่ทับอยู่บน
ระนาบ AB จะเท่ากับน้ำหนักของ
ดินชั้นที่ 1 รวมกับน้ำหนักของชั้น
ดินชั้นที่ 2

$$W_{AB} = W_1 + W_2$$

$$W_{AB} = \gamma_1 \cdot H_1 \cdot A + \gamma_{sat} \cdot H_2 \cdot A$$

ดังนั้นความเค้นที่ระนาบ AB
จะเท่ากับ W_{AB}/A

ดังนั้น

$$W_{AB}/A = \gamma_1 \cdot H_1 + \gamma_{sat} \cdot H_2 \quad \text{หรือ}$$

$$\sigma = \gamma_1 \cdot H_1 + \gamma_{sat} \cdot H_2 \quad \text{หรือ}$$

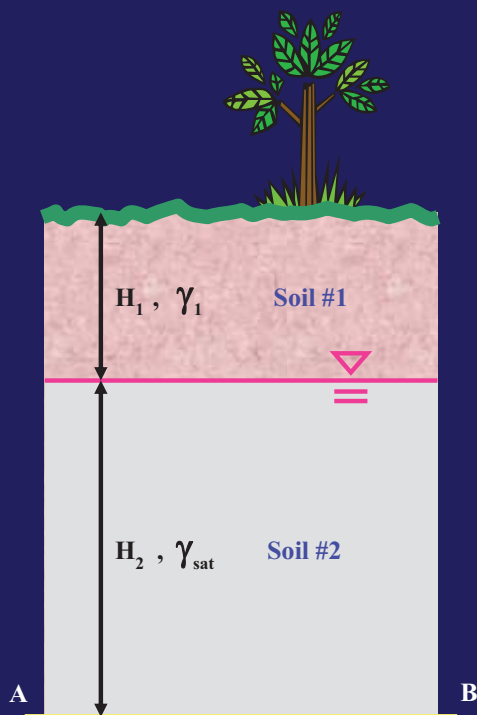
$$\sigma = \sum_{i=1}^n H_i \cdot \gamma_i$$

เมื่อ

σ = Total stress

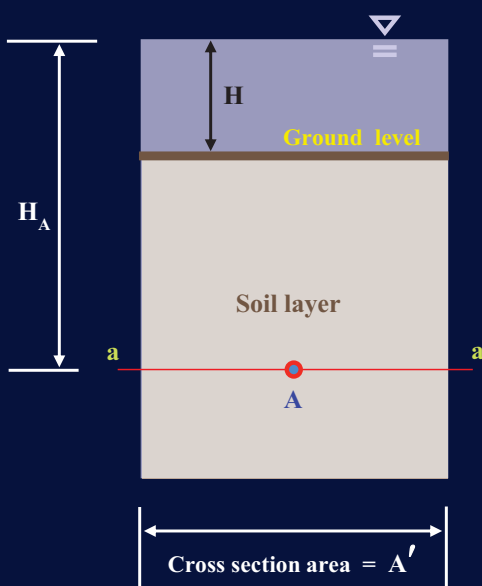
γ_i = Unit weight

H_i = Thickness



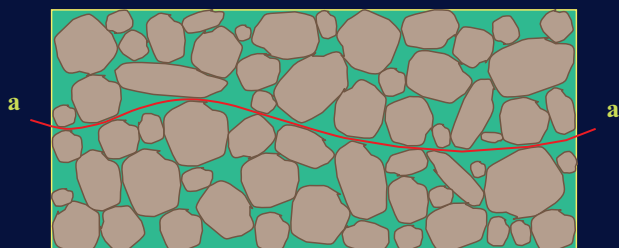
ความเค้นประสิทธิผล (Effective stress)

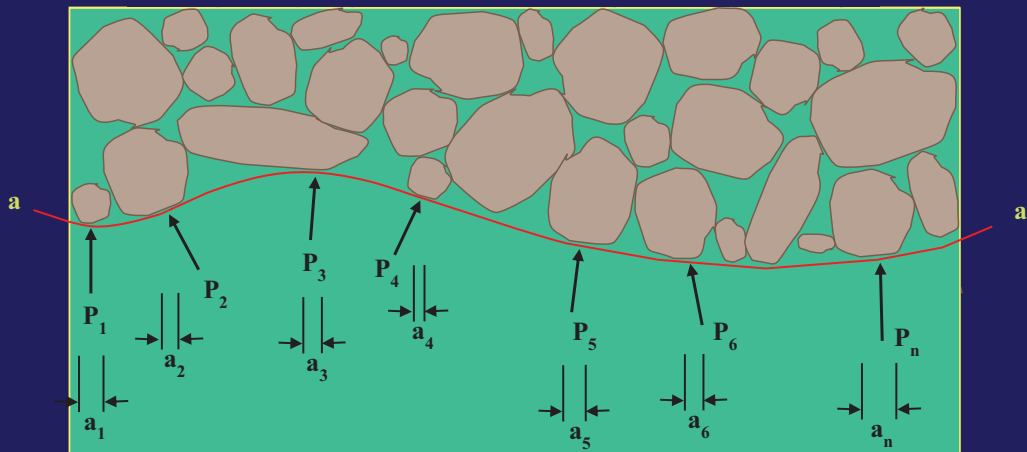
Terzaghi ได้แนะนำทฤษฎีของความเค้นประสิทธิผล (Theory of effective stress) “สิ่งต่างๆที่เกิดขึ้นในดิน เช่น การอัดตัวแล้วแต่เกี่ยวข้องกับ การเปลี่ยนแปลงของความเค้นประสิทธิผลทั้งสิ้น”



พิจารณาจุด A ในชั้นดิน จะเปรียบเสมือนพิจารณาชั้นดินในระดับ a-a

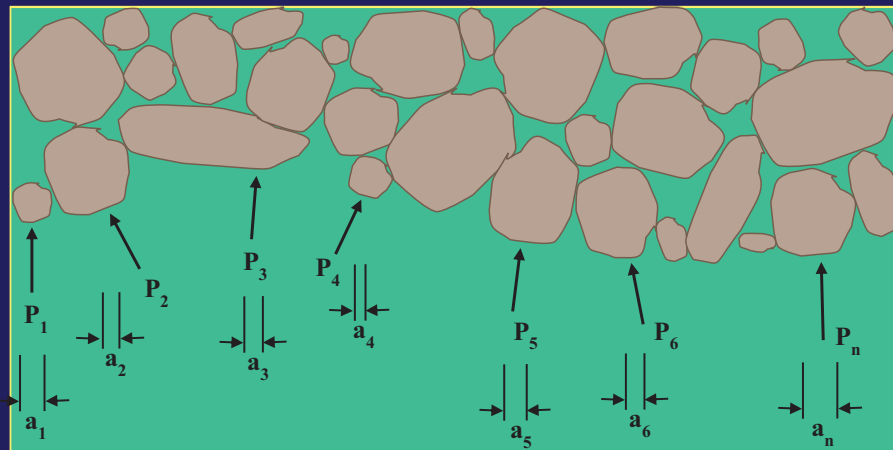
ซึ่งระดับ a-a จะผ่านจุดสัมผัสของเม็ดดินไม่ได้ตัดผ่านเม็ดดิน





จากรูป ค่า ความเค้นประสิทธิผล (σ') ที่ระนาบ a-a คือ

$$\sigma' = [P_1(v) + P_2(v) + P_3(v) + \dots P_n(v)]/A'$$

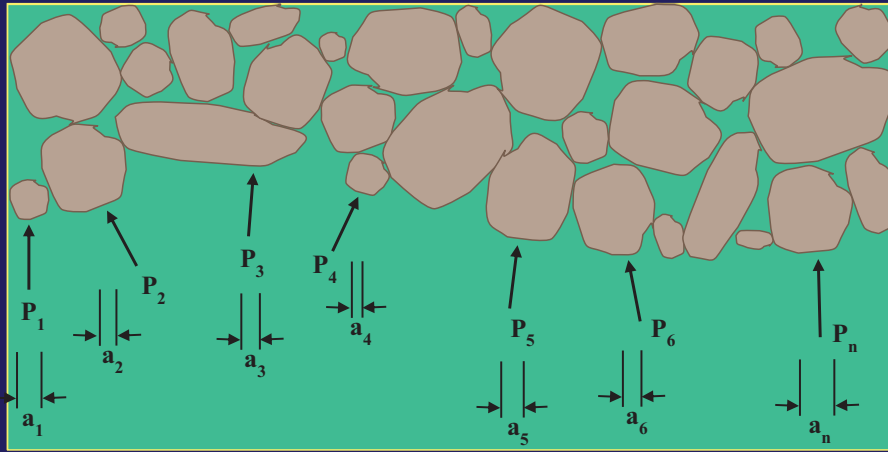


$$\sigma' = [P_1(v) + P_2(v) + P_3(v) + \dots P_n(v)]/A'$$

เมื่อ

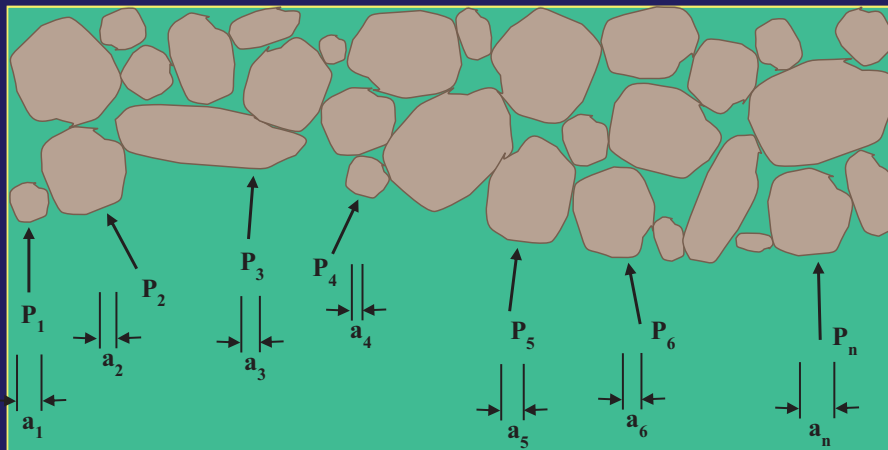
$P_1(v), P_2(v), \dots P_n(v)$ = แรงในแนวตั้งของ $P_1, P_2, \dots P_n$

A' = พื้นที่หน้าตัดของดินทั้งหมด



ถ้าให้ $a_s = a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n$ ดังนั้น พื้นที่หน้าตัดของน้ำ
 ในระนาบ a-a จะเท่ากับ $A' - a_s$ ดังนั้น จึงเขียนเป็นสมการได้

$$\sigma \cdot A' = \sigma' \cdot A' + u \cdot (A' - a_s)$$

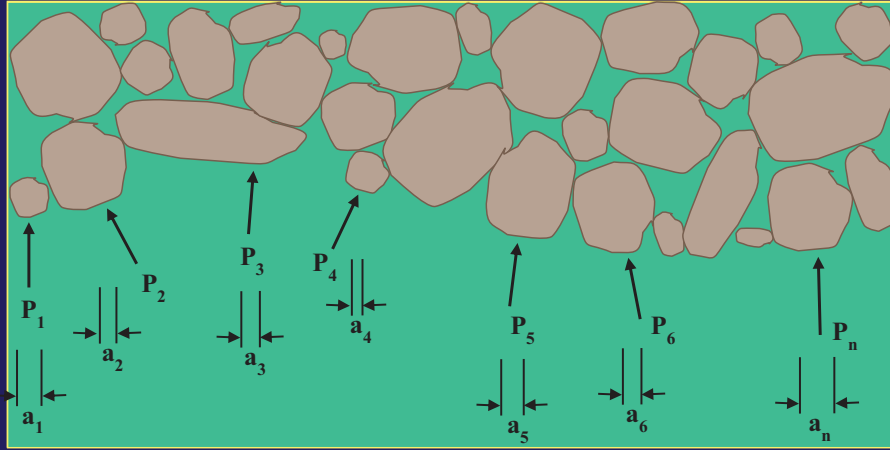


หรือ $\sigma = \sigma' + u \cdot (1 - a'_s)$

เมื่อ

u = ความดันโพรง (Pore water pressure)

$$a'_s = a_s / A'$$



a_s' มีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการจึงกลายเป็น $\sigma = \sigma' + u$ หรือ

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

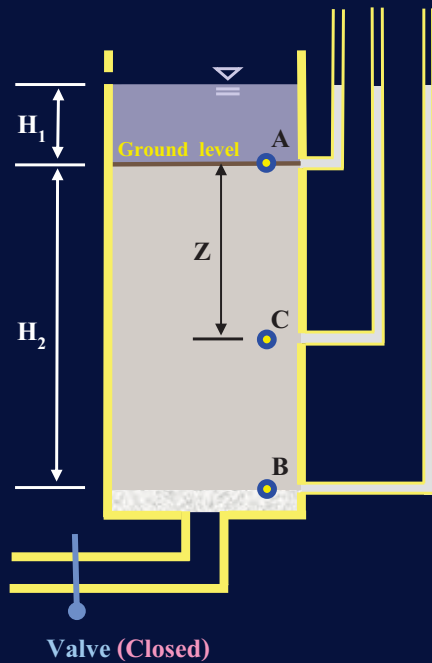
การหาค่าความเค้นประสิทธิผล

ในการหาค่า Effective stress สามารถแบ่งการหาได้ดังนี้

- กรณีดินอิ่มตัวด้วยน้ำ
 - กรณีไม่มีการไหลของน้ำ
 - กรณีการไหลซึมขึ้นของน้ำ
 - กรณีการไหลซึมลงของน้ำ
- กรณีดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

กรณีไม่มีการไหลของน้ำ



$$\text{Total stress } \sigma = \sum_{i=1}^n H_i \cdot \gamma_i$$

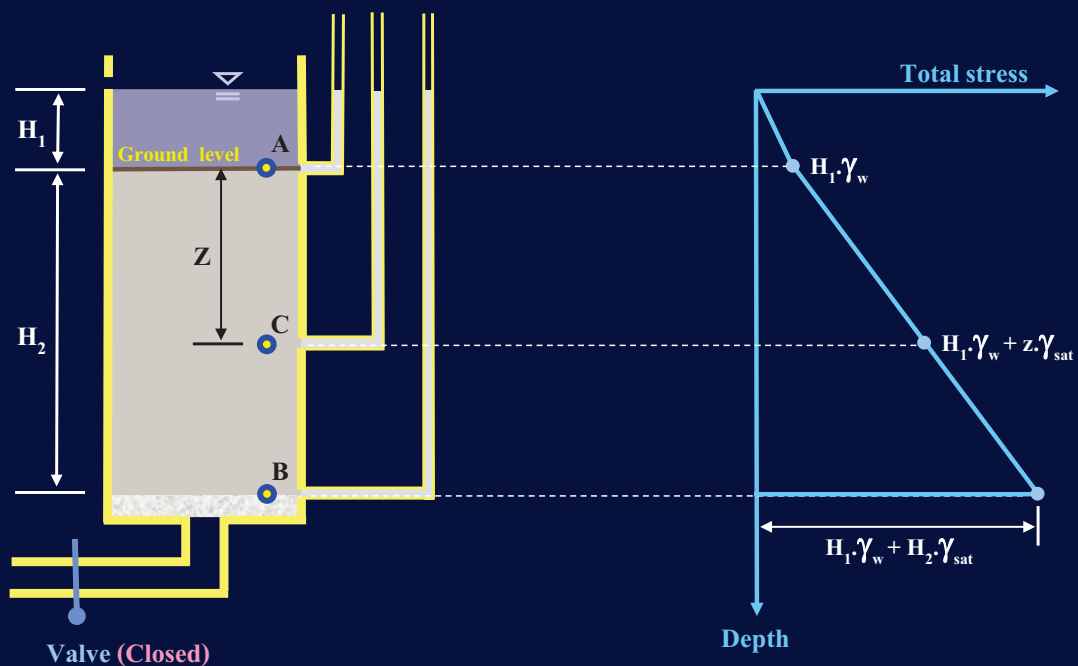
$$\text{จุด A, } \sigma = H_1 \cdot \gamma_w$$

$$\text{จุด B, } \sigma = H_1 \cdot \gamma_w + H_2 \cdot \gamma_{\text{sat}}$$

$$\text{จุด C, } \sigma = H_1 \cdot \gamma_w + z \cdot \gamma_{\text{sat}}$$

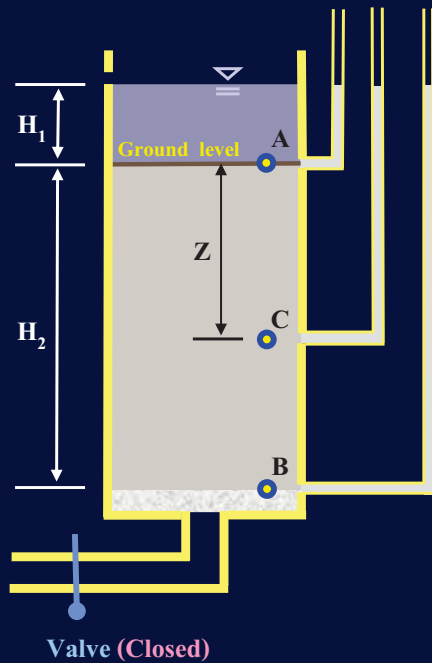
ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

กรณีไม่มีการไหลของน้ำ



ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

กรณีไม่มีการไหลของน้ำ



Pore water pressure $u = H \cdot \gamma_w$

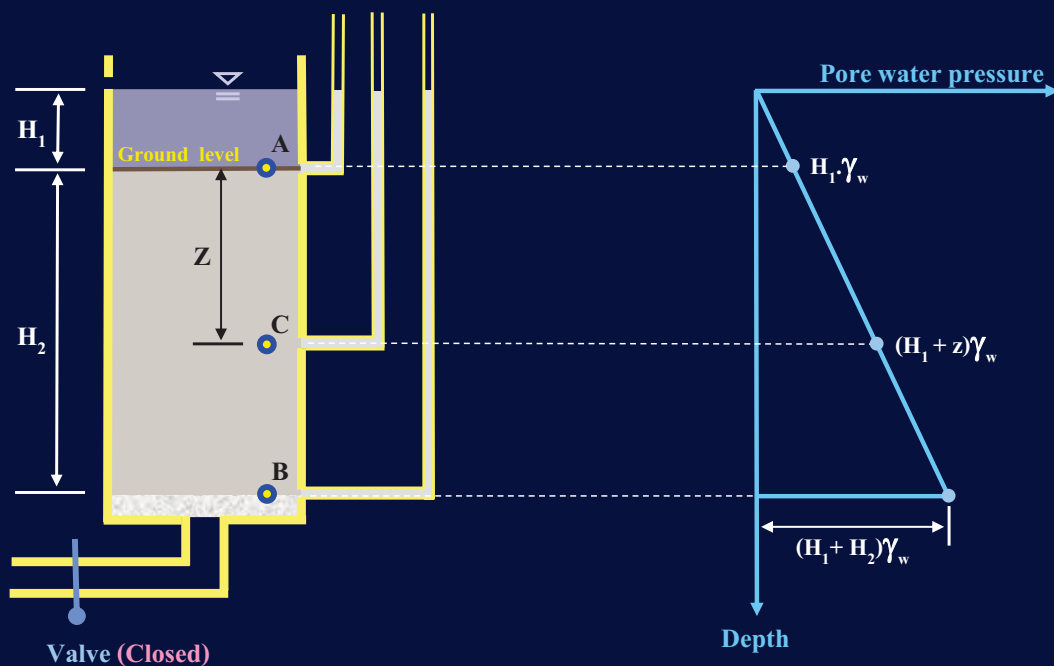
จุด A, $u = H_1 \cdot \gamma_w$

จุด B, $u = (H_1 + H_2) \gamma_w$

จุด C, $u = (H_1 + z) \gamma_w$

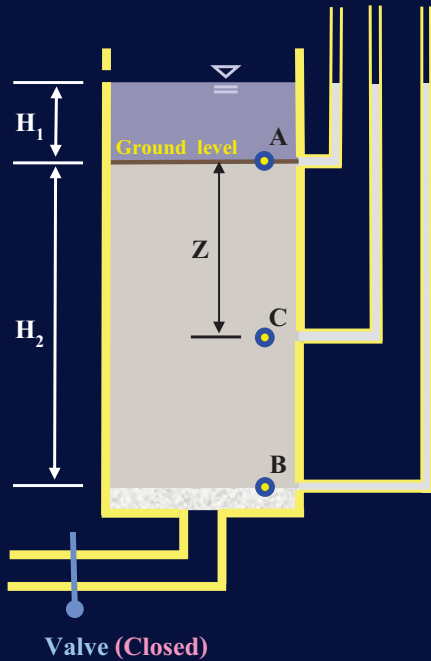
ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

กรณีไม่มีการไหลของน้ำ



ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

กรณีไม่มีการไหลของน้ำ



Effective stress $\sigma' = \sigma - u$

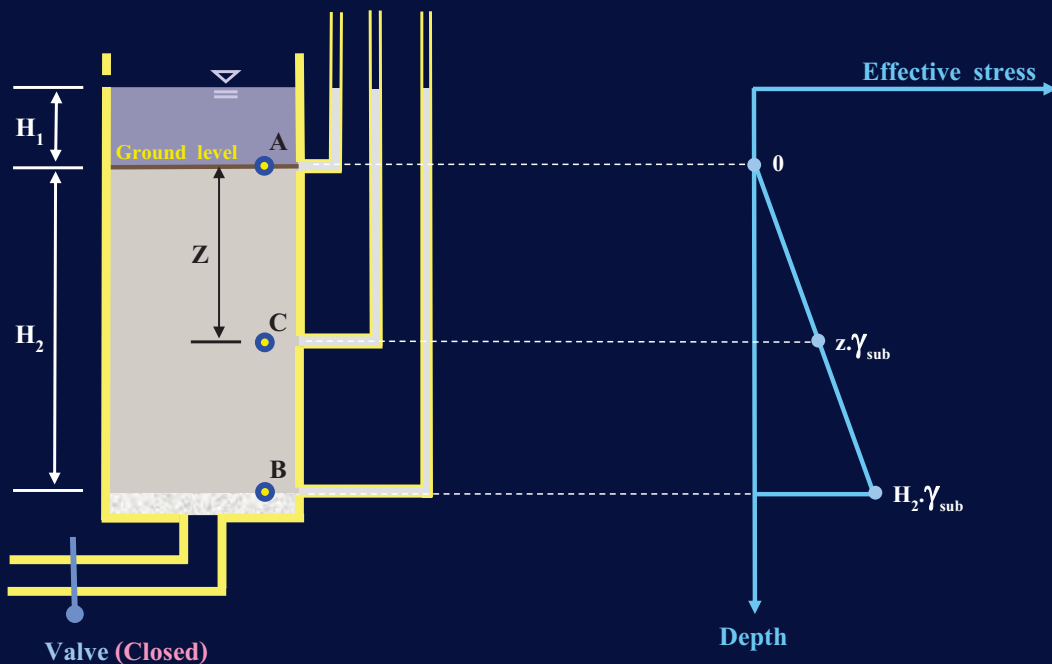
จุด A, $\sigma' = H_1 \cdot \gamma_w - H_1 \cdot \gamma_w = 0$

จุด B, $\sigma' = H_1 \cdot \gamma_w + H_2 \cdot \gamma_{sat} - (H_1 + H_2) \gamma_w$
 $= H_2 \cdot \gamma_{sat} - H_2 \cdot \gamma_w = H_2 \cdot \gamma_{sub}$

จุด C, $\sigma' = H_1 \cdot \gamma_w + z \cdot \gamma_{sat} - (H_1 + z) \gamma_w$
 $= z \cdot \gamma_{sat} - z \cdot \gamma_w = z \cdot \gamma_{sub}$

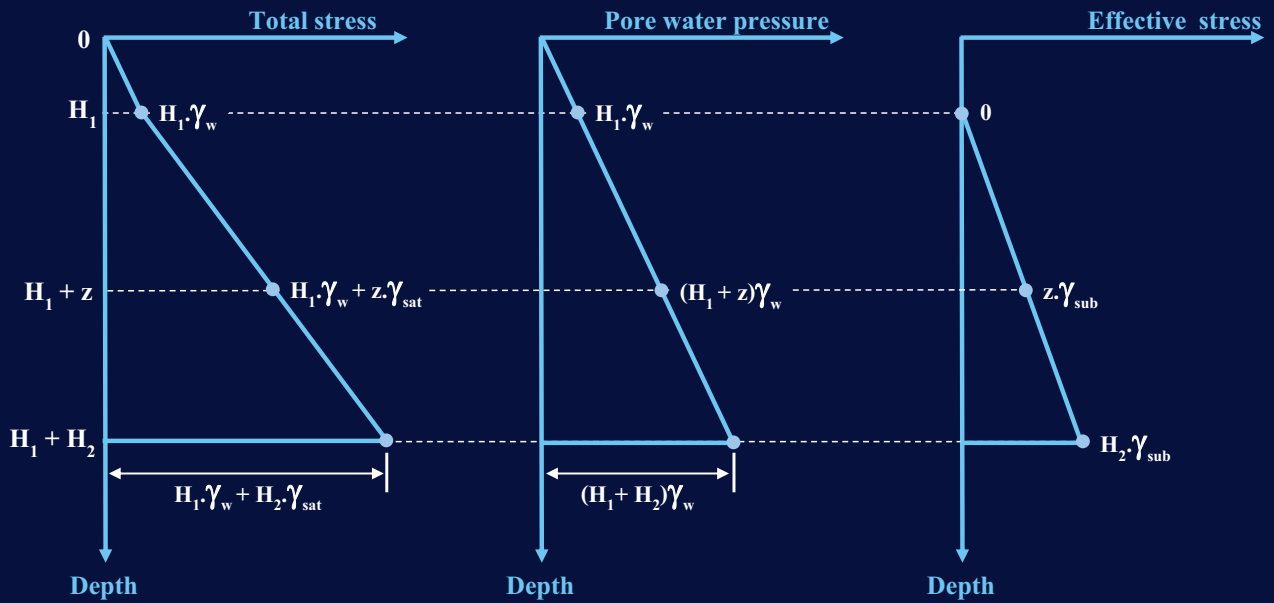
ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

กรณีไม่มีการไหลของน้ำ



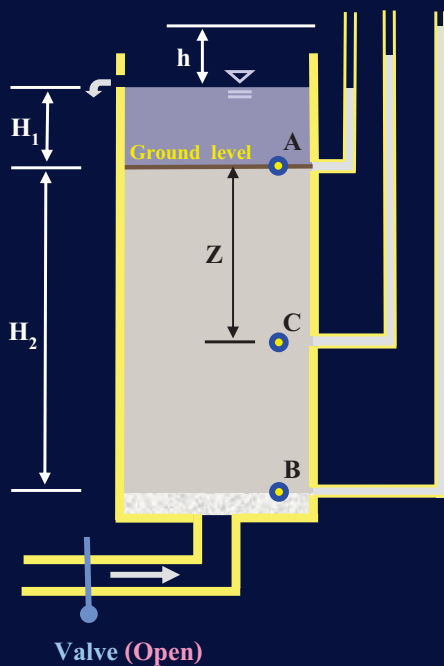
ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

กรณีไม่มีการไหลของน้ำ



ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

กรณีการไหลซึมขึ้นของน้ำ



Total stress $\sigma = \sum_{i=1}^n H_i \cdot \gamma_i$

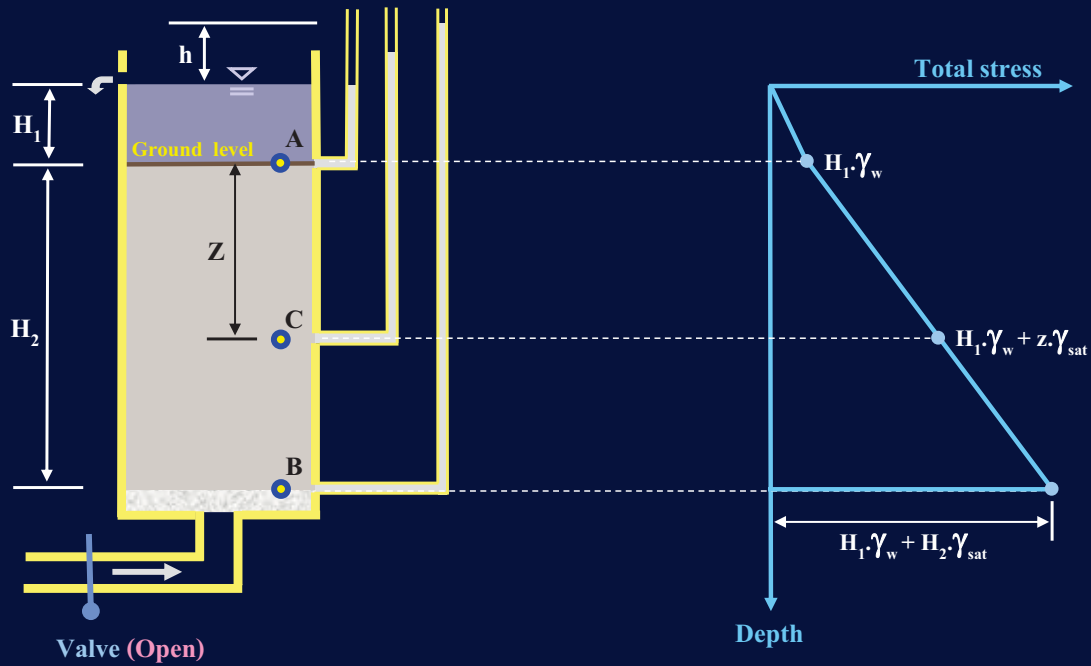
จุด A, $\sigma = H_1 \cdot \gamma_w$

จุด B, $\sigma = H_1 \cdot \gamma_w + H_2 \cdot \gamma_{sat}$

จุด C, $\sigma = H_1 \cdot \gamma_w + z \cdot \gamma_{sat}$

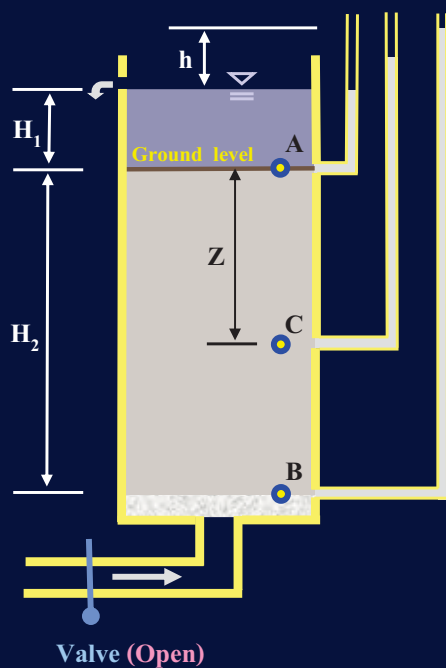
ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

กรณีการไหลซึมขึ้นของน้ำ



ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

กรณีการไหลซึมขึ้นของน้ำ



Pore water pressure $u = H \cdot \gamma_w$

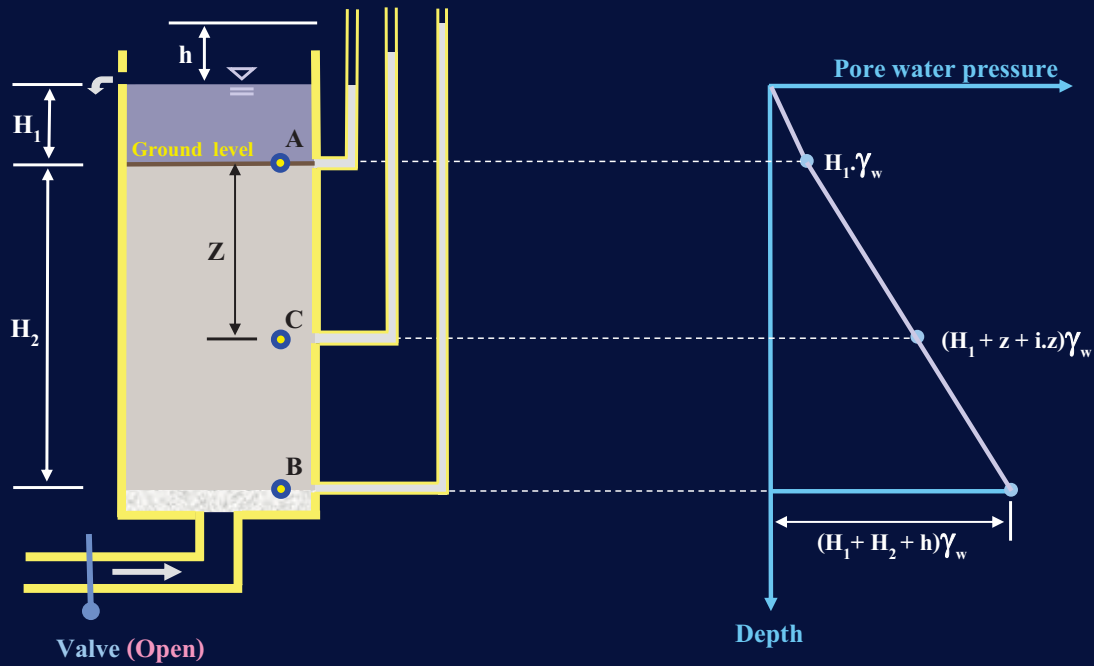
จุด A, $u = H_1 \cdot \gamma_w$

จุด B, $u = (H_1 + H_2 + h) \gamma_w$

จุด C, $u = (H_1 + z + i.z) \gamma_w$

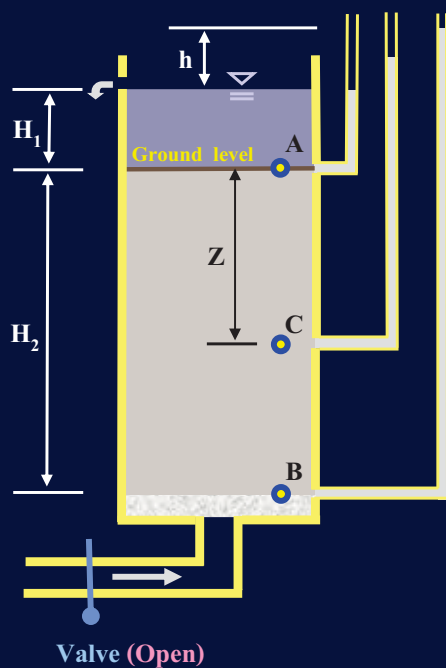
ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

กรณีการไหลซึมขึ้นของน้ำ



ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

กรณีการไหลซึมขึ้นของน้ำ



Effective stress $\sigma' = \sigma - u$

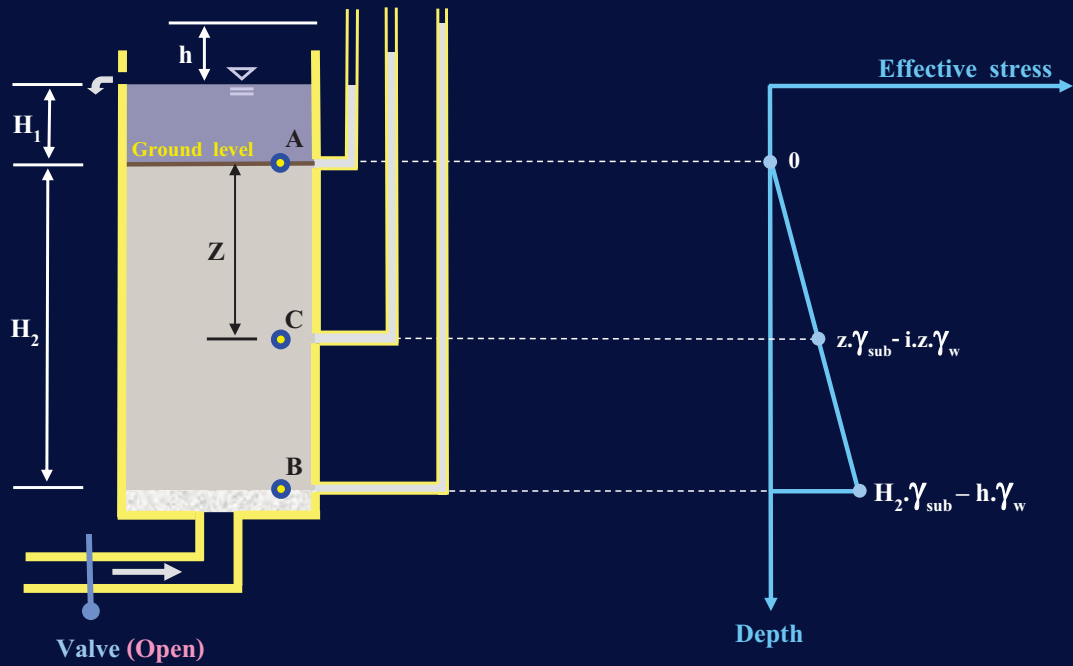
จุด A, $\sigma' = H_1 \cdot \gamma_w - H_1 \cdot \gamma_w = 0$

จุด B, $\sigma' = H_1 \cdot \gamma_w + H_2 \cdot \gamma_{sat} - (H_1 + H_2 + h) \gamma_w$
 $= H_2 \cdot \gamma_{sat} - H_2 \cdot \gamma_w - h \cdot \gamma_w$
 $= H_2 \cdot \gamma_{sub} - h \cdot \gamma_w$

จุด C, $\sigma' = H_1 \cdot \gamma_w + z \cdot \gamma_{sat} - (H_1 + z + i \cdot z) \gamma_w$
 $= z \cdot \gamma_{sat} - z \cdot \gamma_w - i \cdot z \cdot \gamma_w = z \cdot \gamma_{sub} - i \cdot z \cdot \gamma_w$

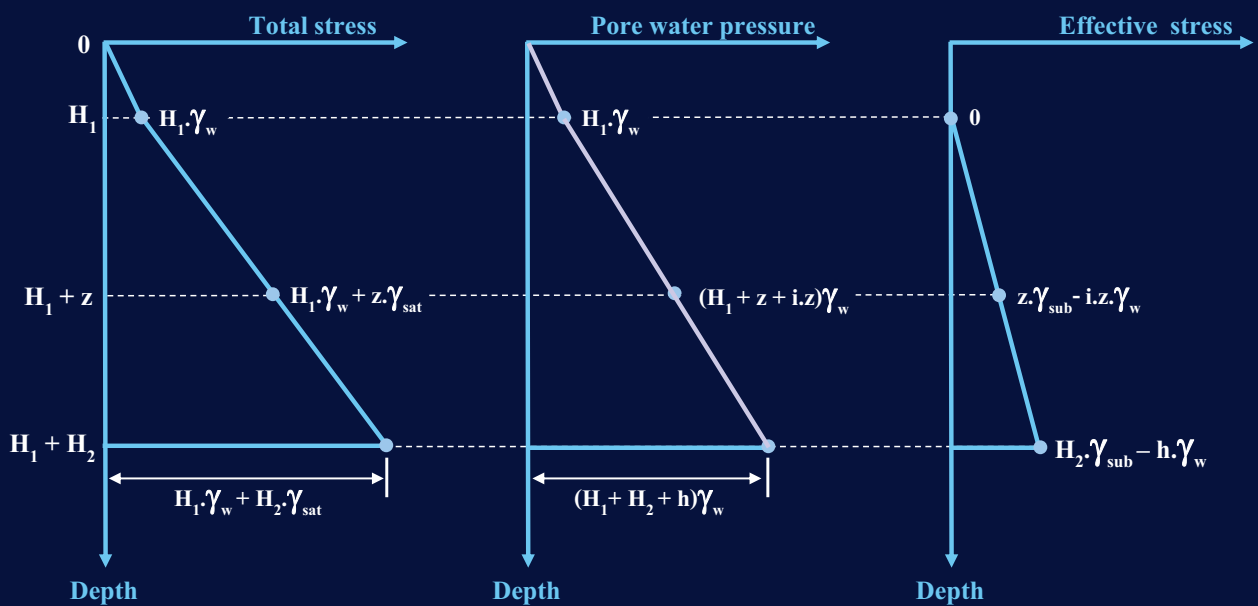
ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

กรณีการไหลซึมขึ้นของน้ำ



ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

กรณีการไหลซึมขึ้นของน้ำ



ในบางกรณีการซึมขึ้นของน้ำจะทำให้ Effective stress เท่ากับ ศูนย์ หรือที่ความลึกใด ๆ (จุด C) $z \cdot \gamma_{\text{sub}} - i \cdot z \cdot \gamma_w = 0$ หรือ

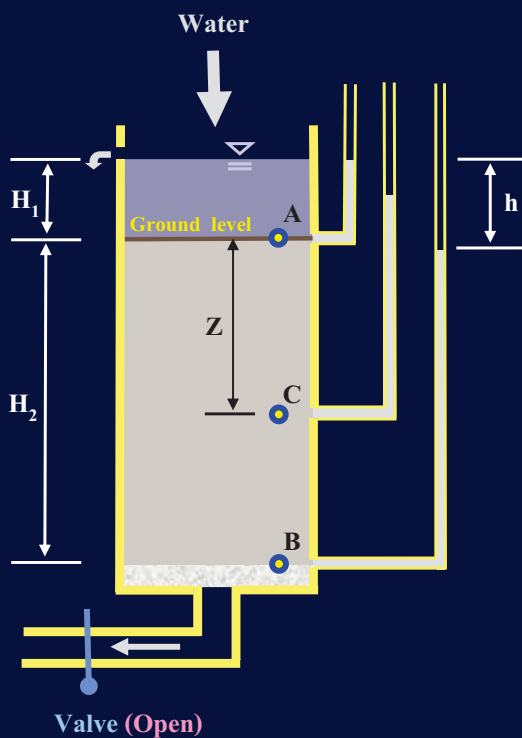
$$i_c = \gamma_{\text{sub}} / \gamma_w$$

เมื่อ

$i_c = \text{Critical hydraulic gradient}$

ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

กรณีการไหลซึมลงของน้ำ



Total stress $\sigma = \sum_{i=1}^n H_i \cdot \gamma_i$

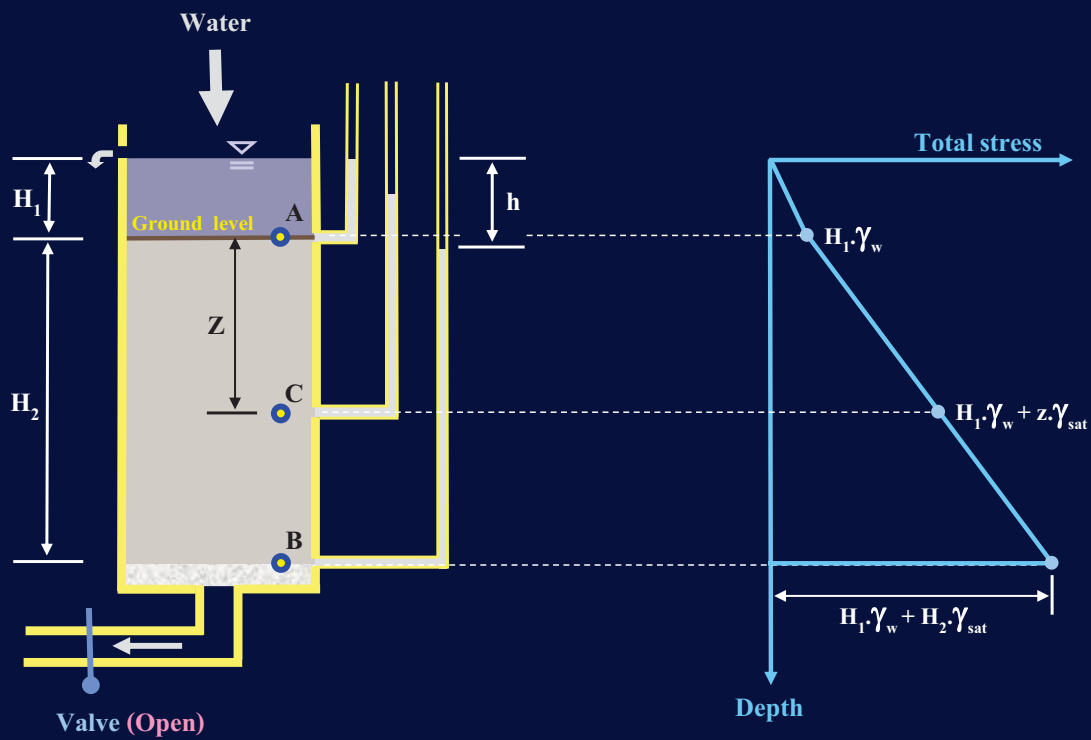
จุด A, $\sigma = H_1 \cdot \gamma_w$

จุด B, $\sigma = H_1 \cdot \gamma_w + H_2 \cdot \gamma_{\text{sat}}$

จุด C, $\sigma = H_1 \cdot \gamma_w + z \cdot \gamma_{\text{sat}}$

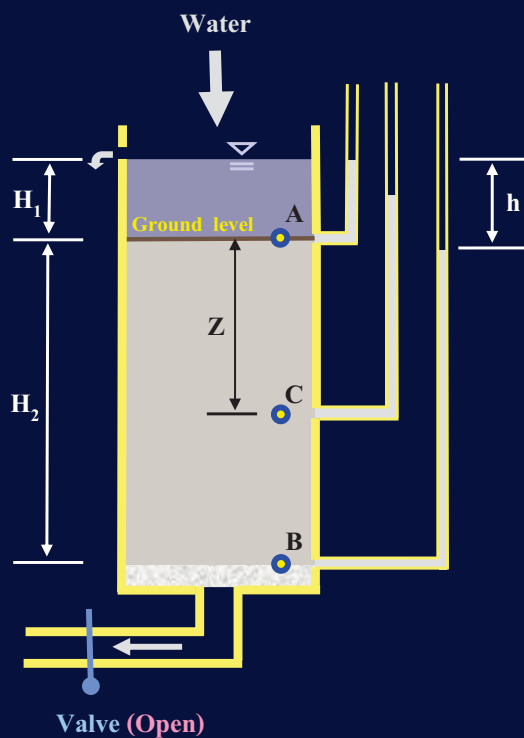
ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

กรณีการไหลซึมลงของน้ำ



ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

กรณีการไหลซึมลงของน้ำ



Pore water pressure $u = H \cdot \gamma_w$

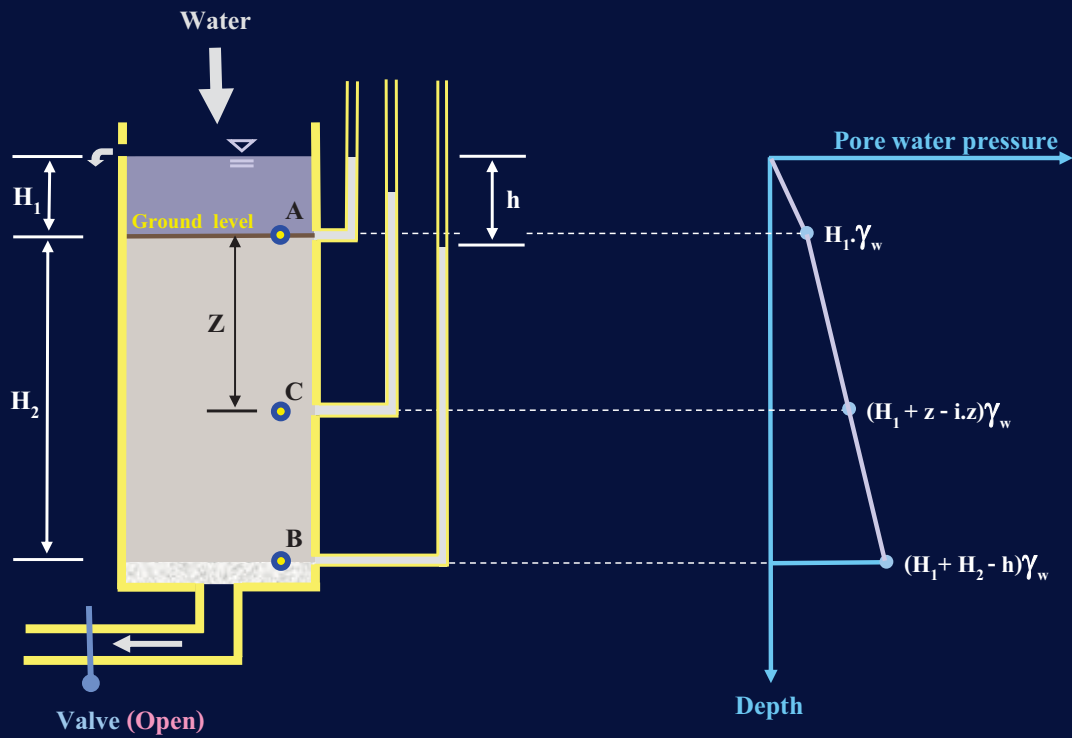
จุด A, $u = H_1 \cdot \gamma_w$

จุด B, $u = (H_1 + H_2 - h) \gamma_w$

จุด C, $u = (H_1 + z - i \cdot z) \gamma_w$

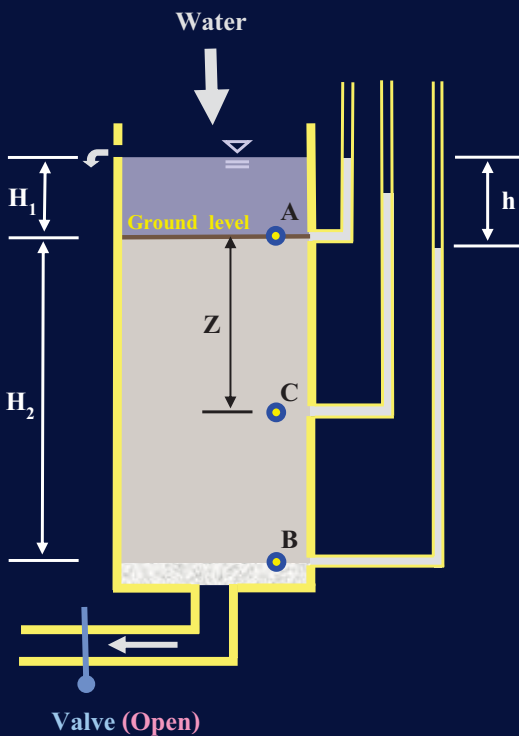
ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

กรณีการไหลซึมลงของน้ำ



ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

กรณีการไหลซึมลงของน้ำ



Effective stress $\sigma' = \sigma - u$

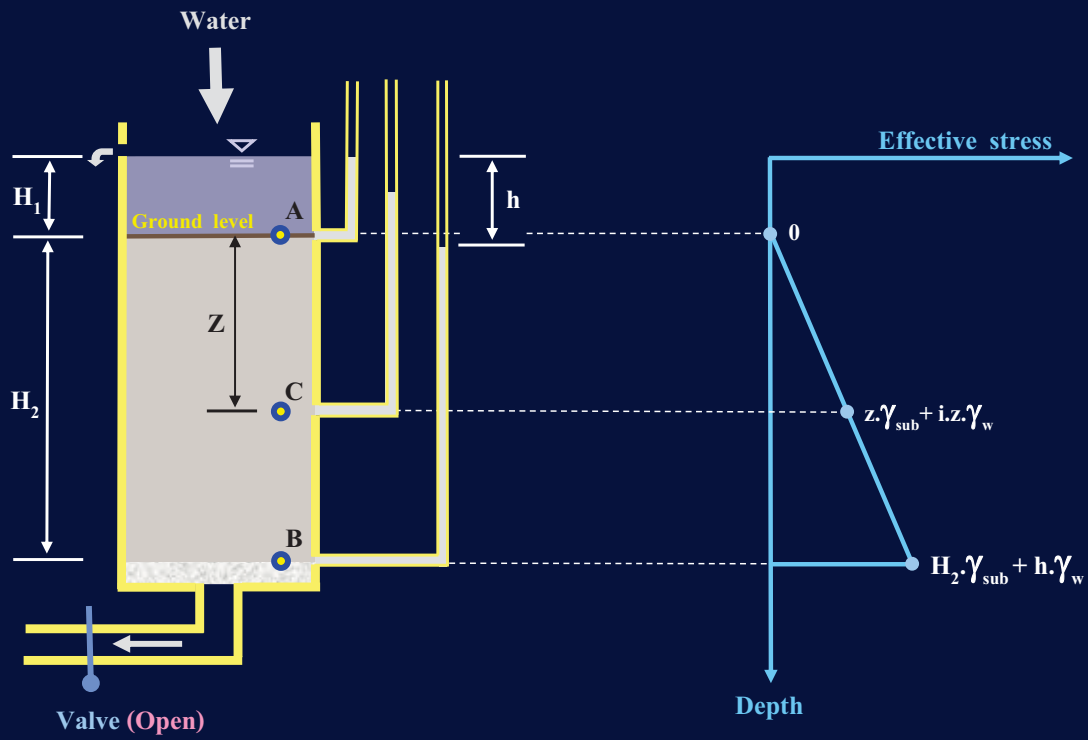
จุด A, $\sigma' = H_1 \cdot \gamma_w - H_1 \cdot \gamma_w = 0$

จุด B, $\sigma' = H_1 \cdot \gamma_w + H_2 \cdot \gamma_{sat} - (H_1 + H_2 - h) \gamma_w$
 $= H_2 \cdot \gamma_{sat} - H_2 \cdot \gamma_w + h \cdot \gamma_w$
 $= H_2 \cdot \gamma_{sub} + h \cdot \gamma_w$

จุด C, $\sigma' = H_1 \cdot \gamma_w + z \cdot \gamma_{sat} - (H_1 + z - i \cdot z) \gamma_w$
 $= z \cdot \gamma_{sat} - z \cdot \gamma_w + i \cdot z \cdot \gamma_w = z \cdot \gamma_{sub} + i \cdot z \cdot \gamma_w$

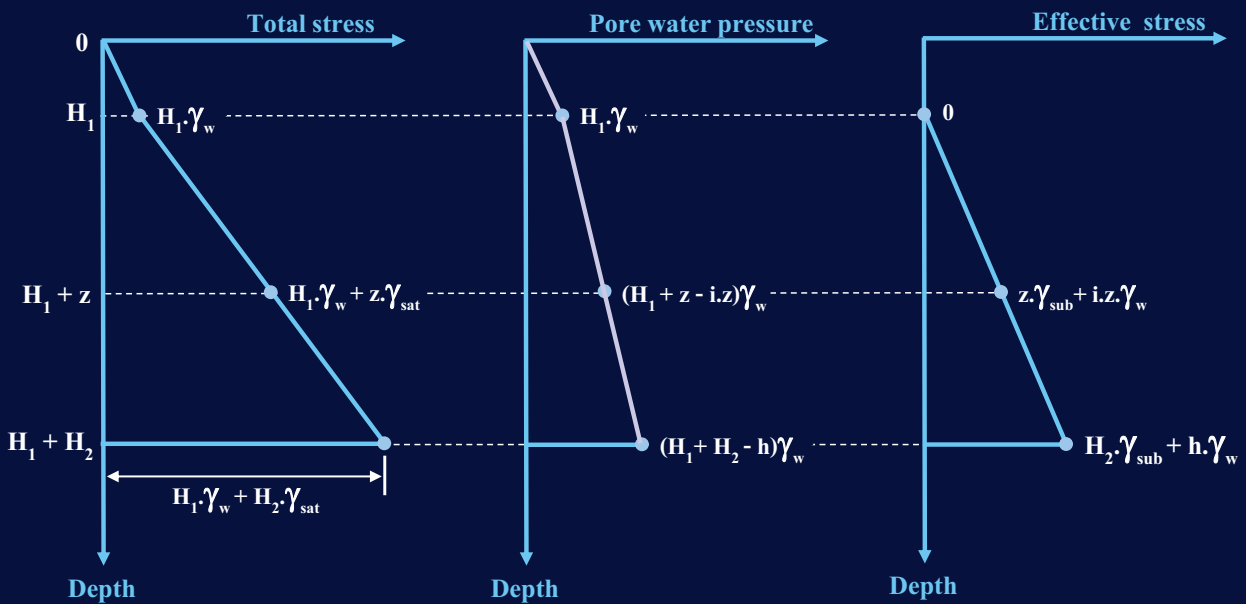
ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

กรณีการไหลซึมลงของน้ำ



ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

กรณีการไหลซึมลงของน้ำ



กรณีดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

Bishop ได้แนะนำสมการสำหรับหาค่าความเค้นประสิทธิผล
ในกรณีที่ดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

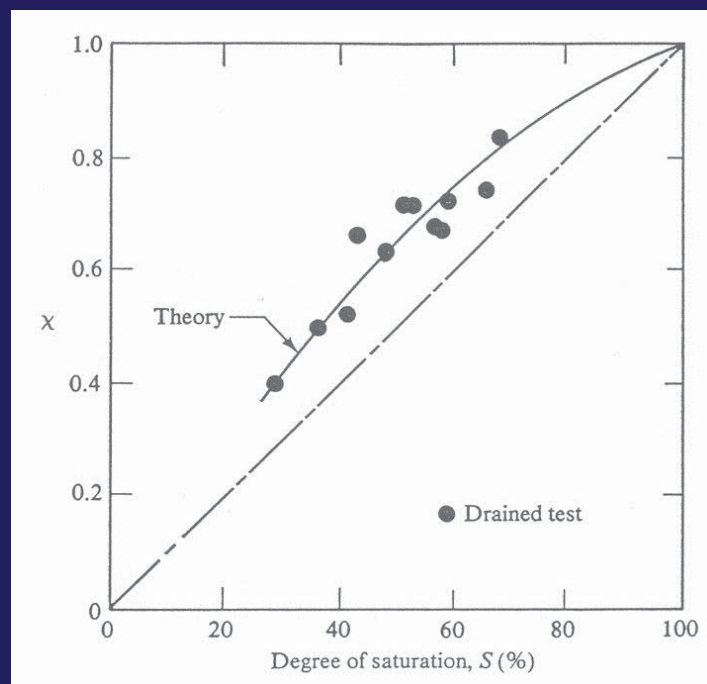
$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w)$$

เมื่อ

χ = ค่าจากรูปกราฟ

u_a = ความดันของอากาศในช่องว่าง

u_w = ความดันโพรง



ความดันโพรงเนื่องจากสภาพคาพิวลารี

$$u = - S \cdot \gamma_w \cdot h / 100$$

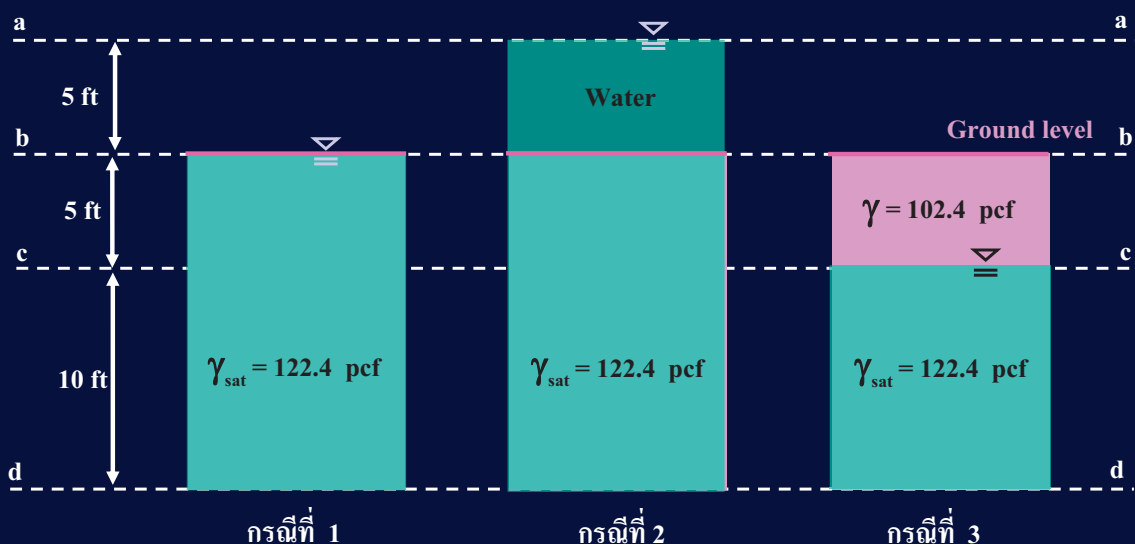
เมื่อ

u = ความดันโพรง

S = ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำในบริเวณคาพิวลารี, %

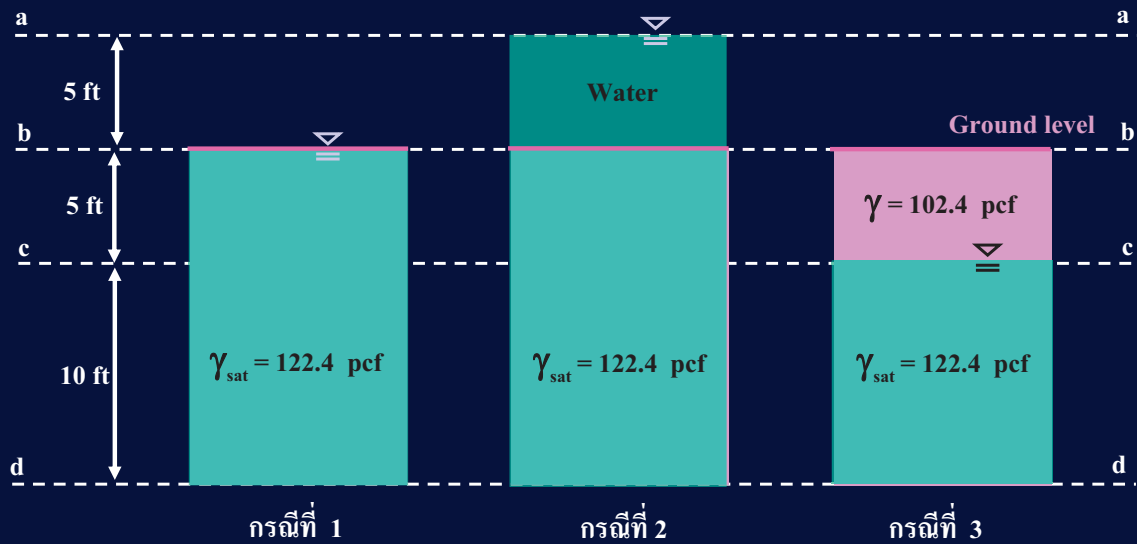
ตัวอย่างที่ 4.1

Determine total stress, pore water pressure and effective stress of this soils.



ตัวอย่างที่ 4.1

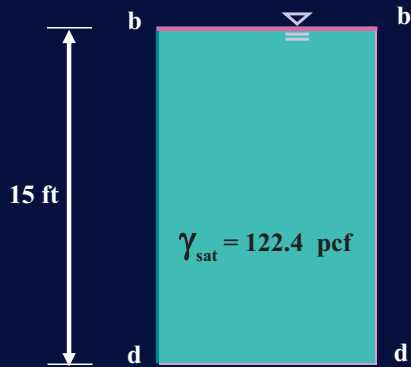
จงหาค่า ความเค้นรวม ความดันโพรง และ ความเค้น
ประสิทธิผล ของดิน 3 กรณีดังรูป



วิธีทำ

สมมติให้ หน่วยน้ำหนักของน้ำ = 62.4 pcf

กรณีที่ 1



ที่ระดับ b - b

$$\sigma = 0$$

$$u = 0$$

$$\sigma' = 0$$

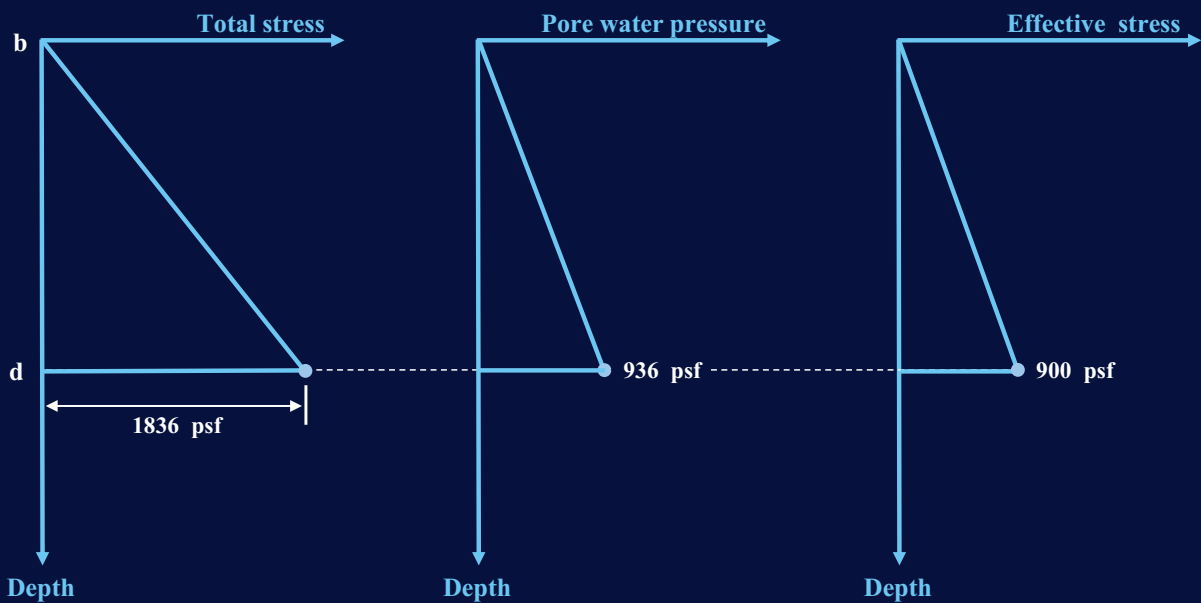
ที่ระดับ d - d

$$\sigma = 122.4 \times 15 = 1836 \text{ psf}$$

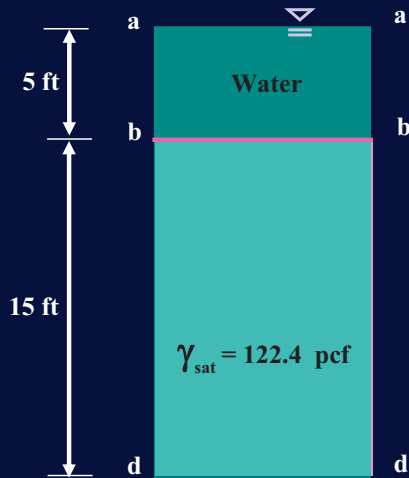
$$u = 62.4 \times 15 = 936 \text{ psf}$$

$$\sigma' = 1836 - 936 = 900 \text{ psf}$$

กรณีที่ 1



กรณีที่ 2



ที่ระดับ a - a

$$\sigma = 0$$

$$u = 0$$

$$\sigma' = 0$$

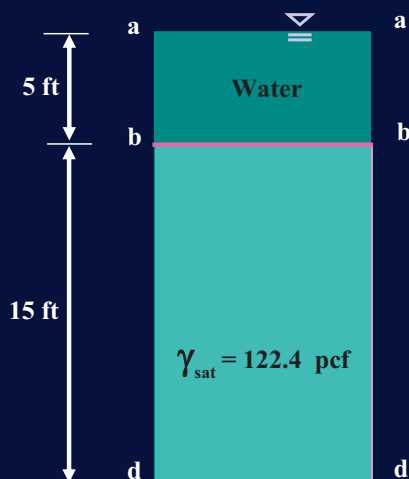
ที่ระดับ b - b

$$\sigma = 62.4 \times 5 = 312 \text{ psf}$$

$$u = 62.4 \times 5 = 312 \text{ psf}$$

$$\sigma' = 312 - 312 = 0 \text{ psf}$$

กรณีที่ 2



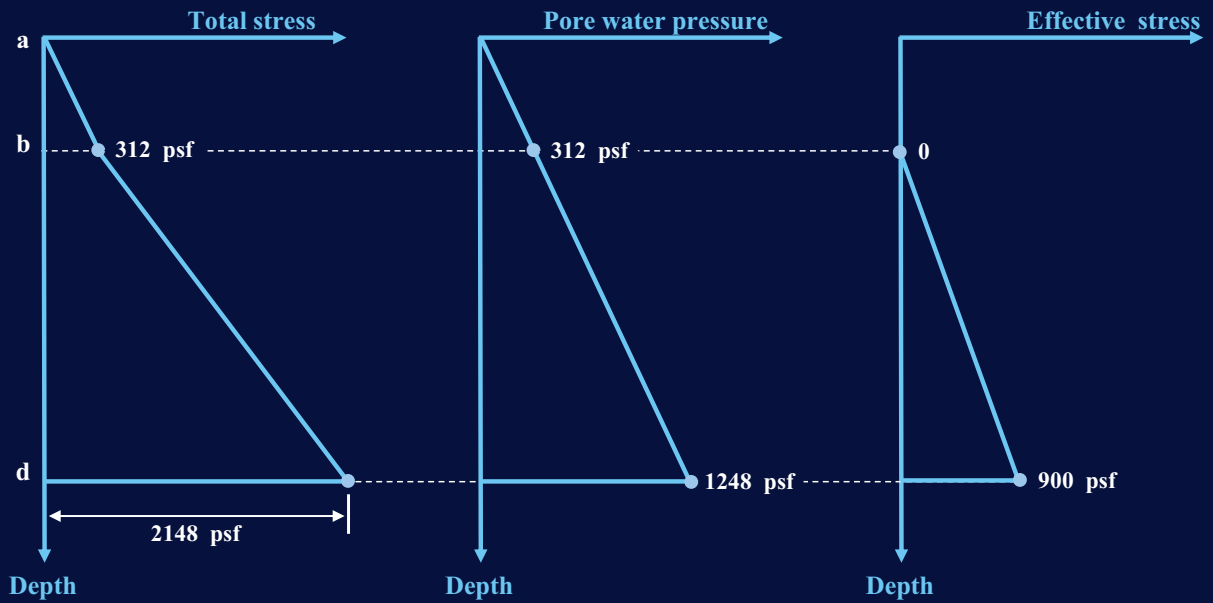
ที่ระดับ d - d

$$\sigma = 62.4 \times 5 + 122.4 \times 15 = 2148 \text{ psf}$$

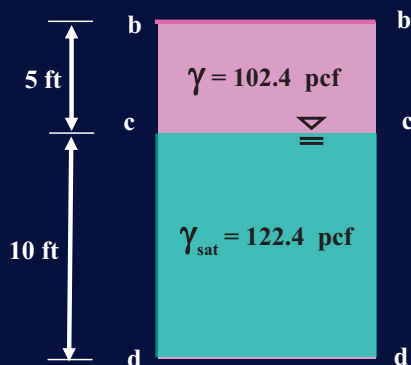
$$u = 62.4 \times 20 = 1248 \text{ psf}$$

$$\sigma' = 2148 - 1248 = 900 \text{ psf}$$

กรณีที 2



กรณีที 3



ที่ระดับ b - b

$$\sigma = 0$$

$$u = 0$$

$$\sigma' = 0$$

ที่ระดับ c - c

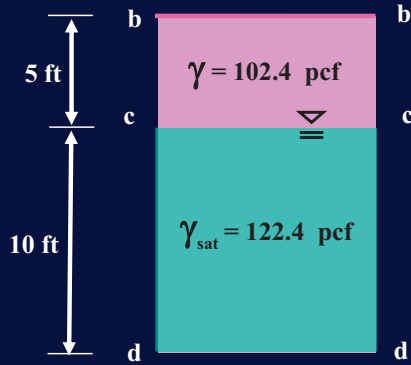
$$\sigma = 102.4 \times 5 = 512 \text{ psf}$$

$$u = 0$$

$$\sigma' = 512 - 0 = 512 \text{ psf}$$

กรณีที่ 3

ที่ระดับ d - d

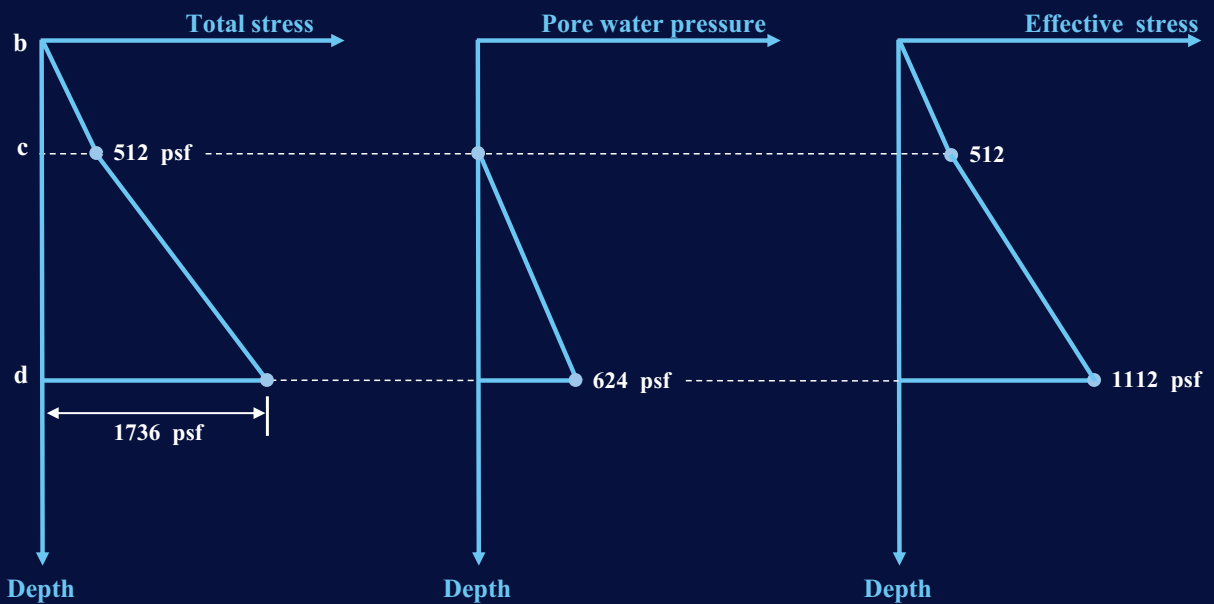


$$\sigma = 102.4 \times 5 + 122.4 \times 10 = 1736 \text{ psf}$$

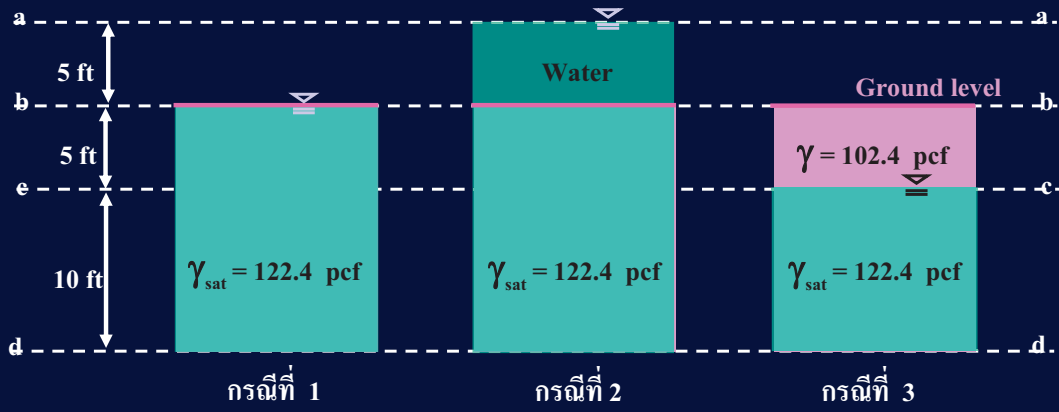
$$u = 62.4 \times 10 = 624 \text{ psf}$$

$$\sigma' = 1736 - 624 = 1112 \text{ psf}$$

กรณีที่ 3



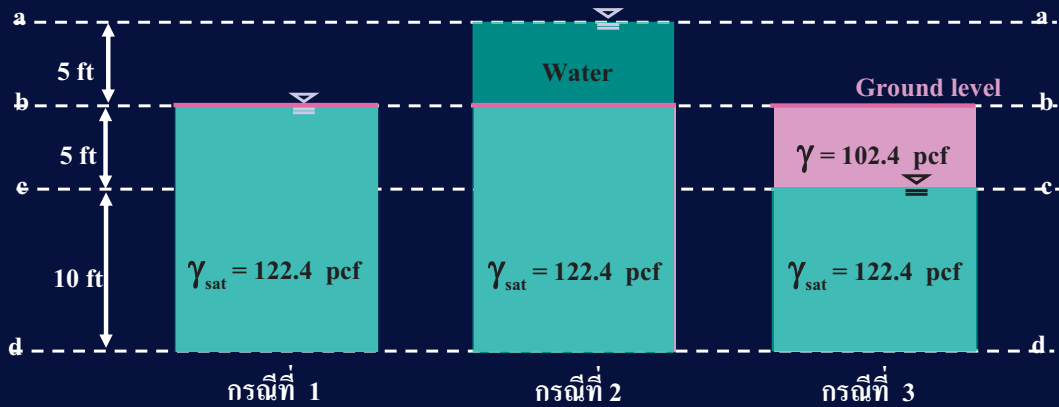
Total stress



| จุด | กรณีที่ 1, psf | กรณีที่ 2, psf | กรณีที่ 3, psf |
|-----|----------------|----------------|----------------|
| a | | 0 | |
| b | 0 | 312 | 0 |
| c | | | 512 |
| d | 1836 | 2148 | 1736 |

Ans

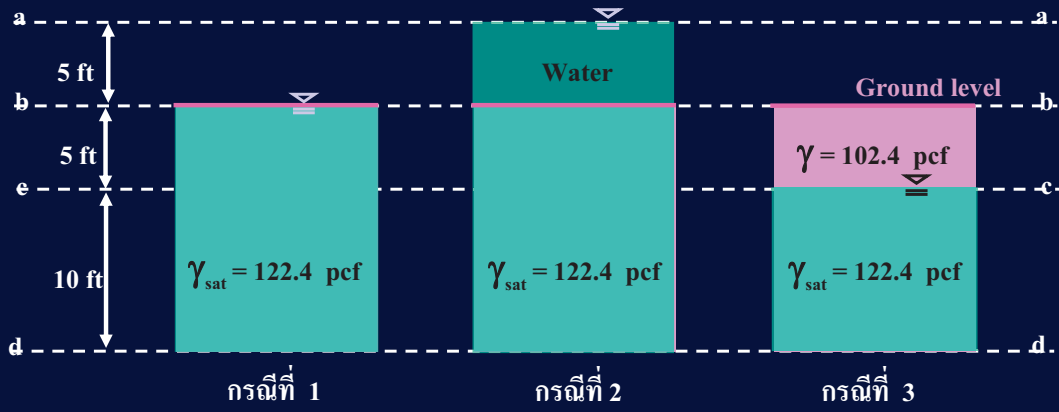
Pore water pressure



| จุด | กรณีที่ 1, psf | กรณีที่ 2, psf | กรณีที่ 3, psf |
|-----|----------------|----------------|----------------|
| a | | 0 | |
| b | 0 | 312 | |
| c | | | 0 |
| d | 936 | 1248 | 624 |

Ans

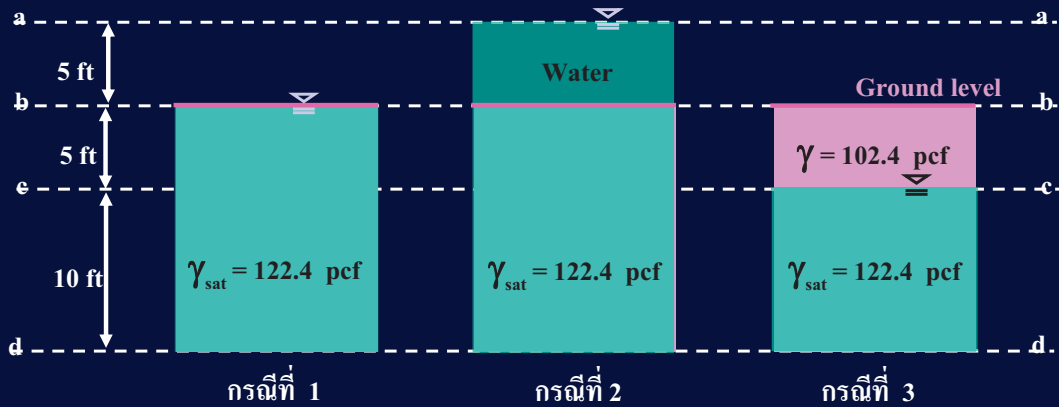
Effective stress



| จุด | กรณีที่ 1, psf | กรณีที่ 2, psf | กรณีที่ 3, psf |
|-----|----------------|----------------|----------------|
| a | | | |
| b | 0 | 0 | 0 |
| c | | | 512 |
| d | 900 | 900 | 1112 |

Ans

สรุป ที่ ระนาบ d - d



| | กรณีที่ 1, psf | กรณีที่ 2, psf | กรณีที่ 3, psf |
|----------------------------|----------------|----------------|----------------|
| Total stress | 1836 | 2148 | 1736 |
| Pore water pressure | 936 | 1248 | 624 |
| Effective stress | 900 | 900 | 1112 |

Ans

ความเค้นที่เกิดจากน้ำหนักกระทำที่ผิวดิน

เมื่อน้ำหนักมากกระทำที่ผิวดิน น้ำหนักเหล่านี้จะส่งผลให้ดินที่อยู่ข้างใต้ได้รับความเค้นอันหนึ่ง ซึ่งความเค้นที่สำคัญคือความเค้นในแนวดิ่ง (Vertical stress)

การหาค่า Vertical stress มีหลายวิธี แต่ที่นิยมมี 2 วิธี คือ

- Boussinesq's method

- Approximate solution

Boussinesq's method

Joseph Boussinesq (1842 – 1929) เป็นนักคณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศส

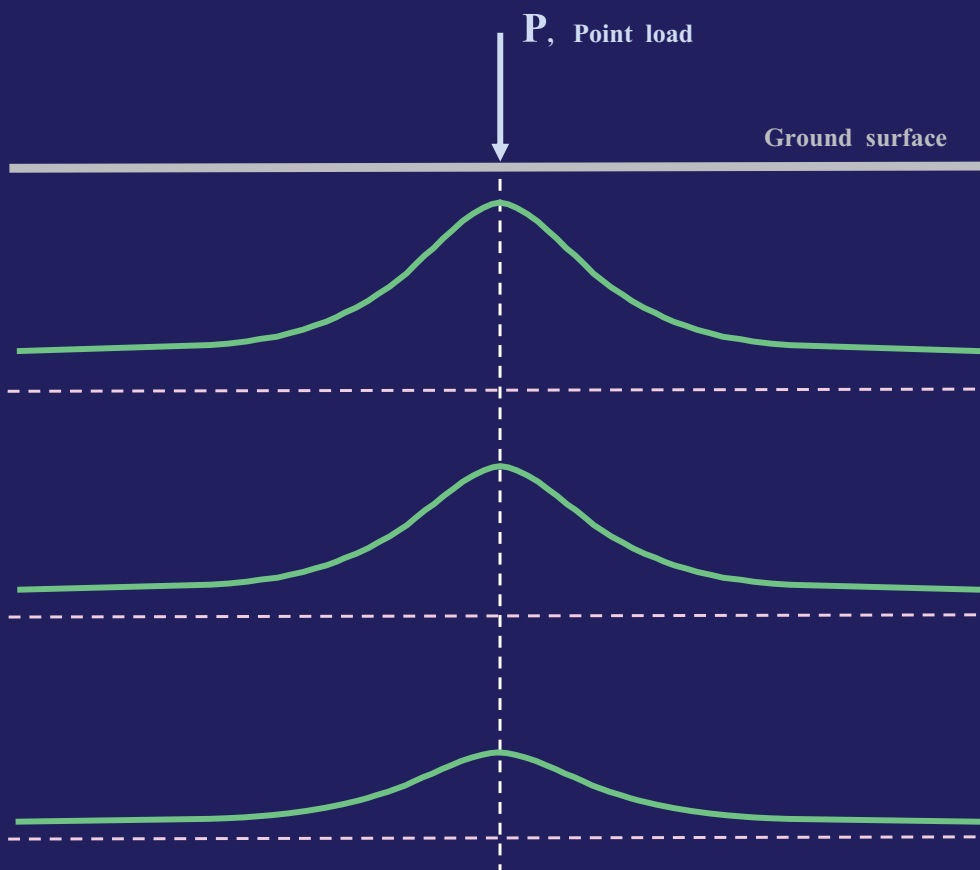
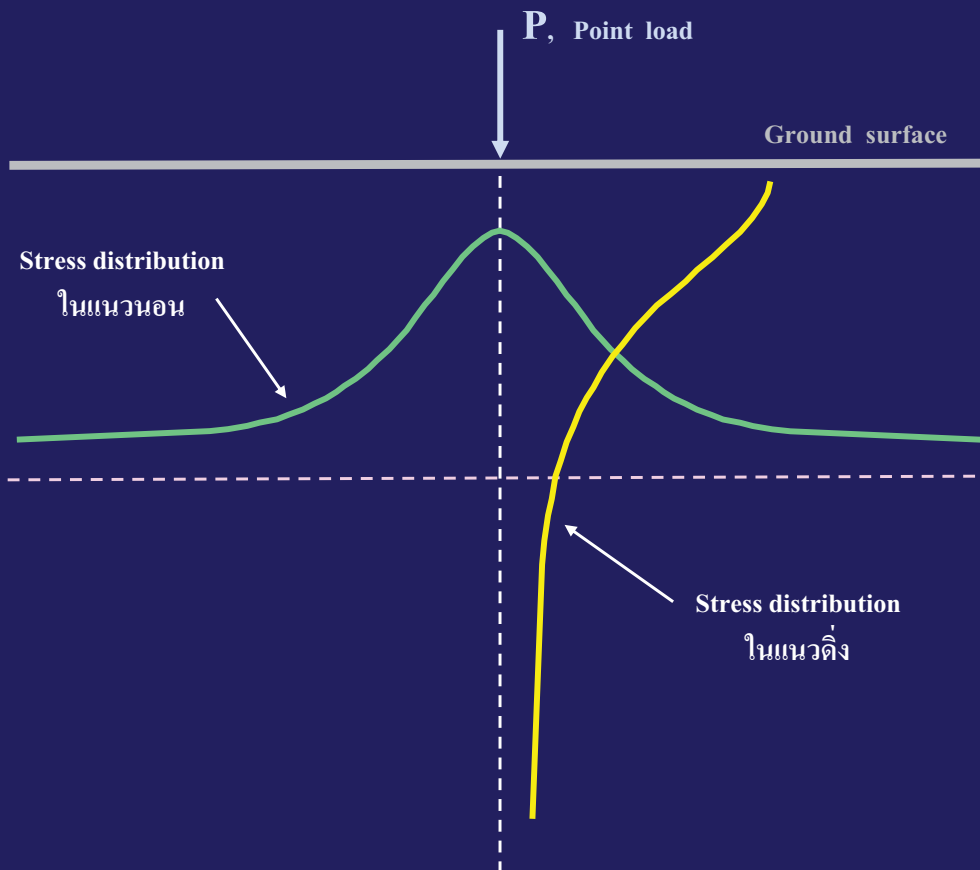
ได้แนะนำวิธีการหาความเค้นใน Infinite elastic half space ของน้ำหนักกระทำเป็นจุด (Point load) ที่ผิวของวัสดุ ในปี ค.ศ. 1885 โดยไม่ได้คำนึงถึงคุณสมบัติของวัสดุนั้น

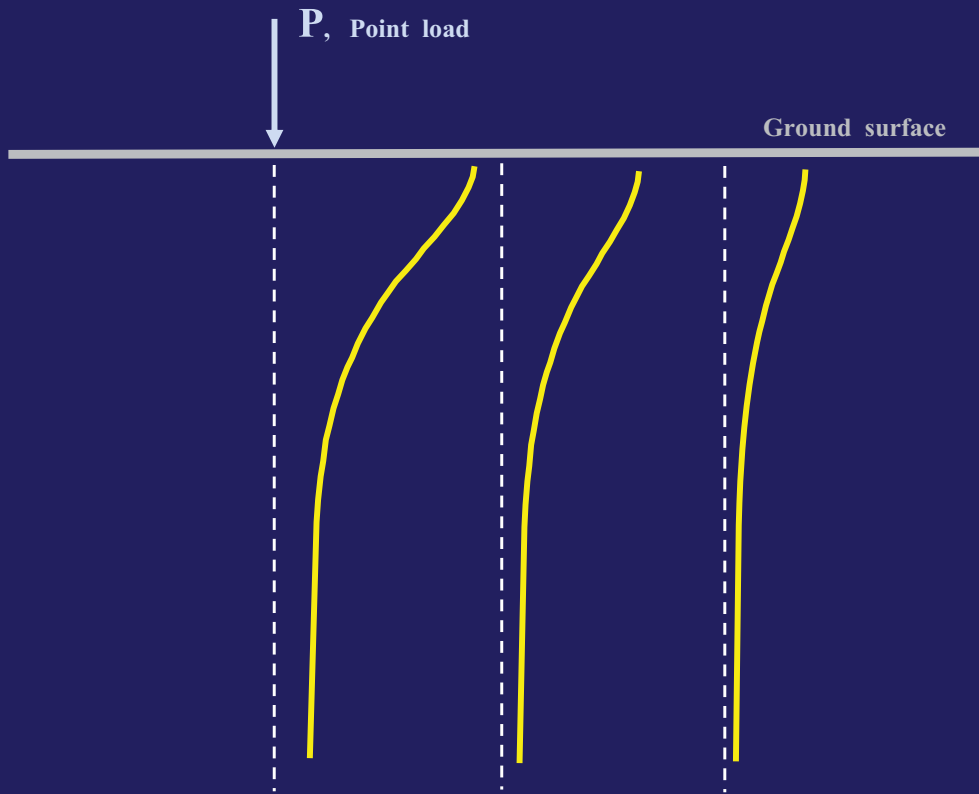
สมมติฐานของวัสดุ

- ▲ Elastic material
- ▲ Homogeneous and isotropics
- ▲ Unlimited depth

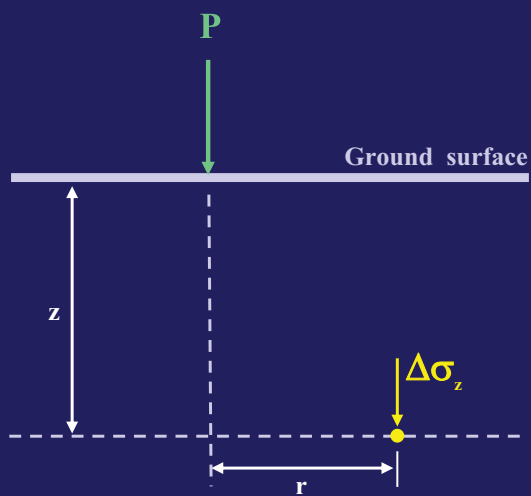
วัสดุที่ Boussinesq ได้กำหนดไว้ มีคุณสมบัติคล้ายกับ Homogeneous clay deposit ซึ่งทำให้การคำนวณมีความผิดพลาดประมาณ 25 %

Boussinesq จะใช้หลักการวิเคราะห์ โดยให้จุดที่อยู่ใกล้กับบริเวณที่น้ำหนักกระทำ จะมีค่าความเค้นสูง ในขณะที่จุดที่ไกลออกไปความเค้นจะลดลงไปเรื่อย ๆ จนเป็นศูนย์ที่อนันต์





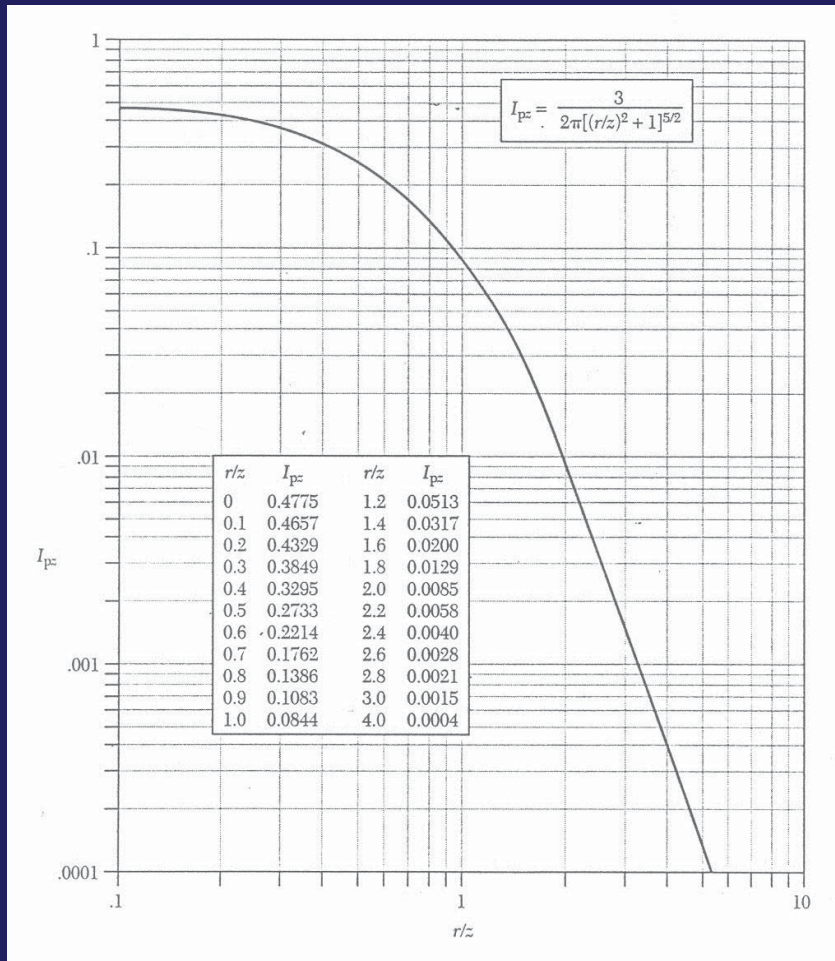
น้ำหนักแบบ Point load



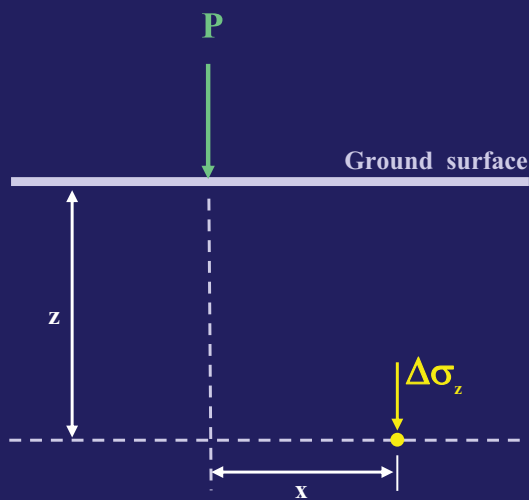
P = Point load มีหน่วยเป็น
น้ำหนักเช่น นิวตัน, ปอนด์,
กิโลกรัม, ตัน

$$\Delta\sigma_z = 3.P.z^3/[2. \pi(r^2 + z^2)^{2.5}]$$

$$\Delta\sigma_z = I_{pz}.P/z^2$$



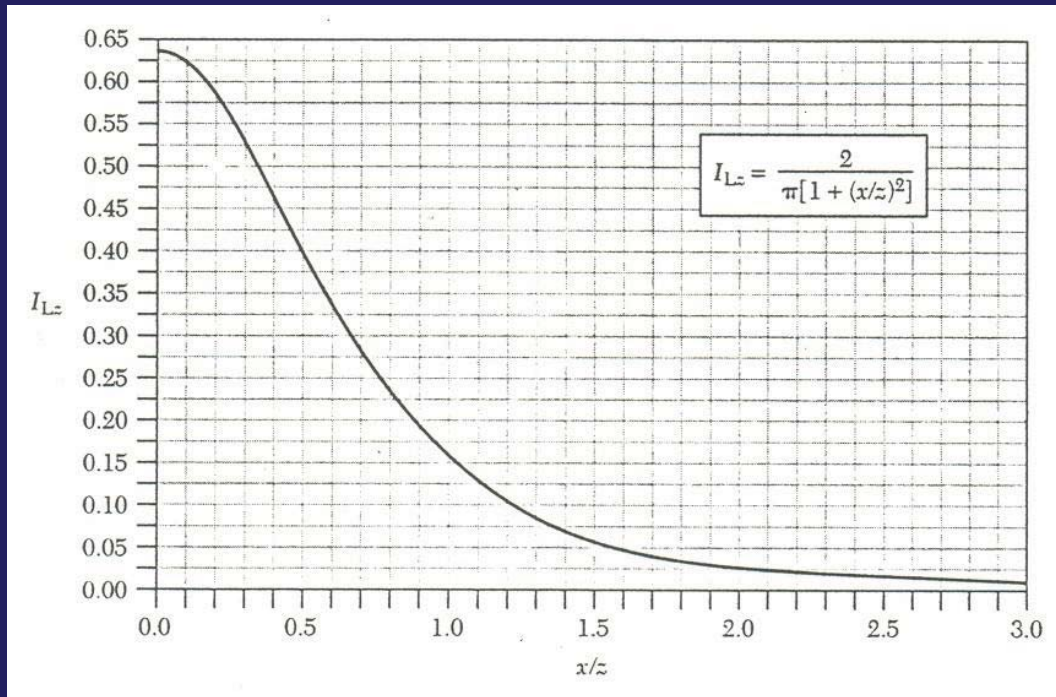
น้ำหนักแบบ Infinite line load



P = น้ำหนักที่กระทำ มีหน่วย
เป็นน้ำหนัก/ความยาวเช่น
นิวตัน/เมตร, ปอนด์/ฟุต,
กิโลกรัม/เมตร, ตัน/เมตร

$$\Delta\sigma_z = \frac{2.P.z^3}{[\pi(z^2 + x^2)^2]}$$

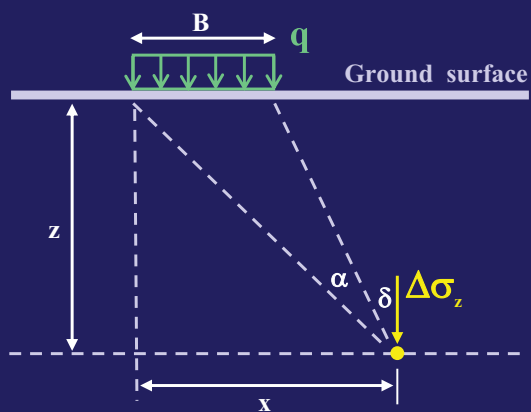
$$\Delta\sigma_z = I_{Lz} \cdot P/z$$



เช่น



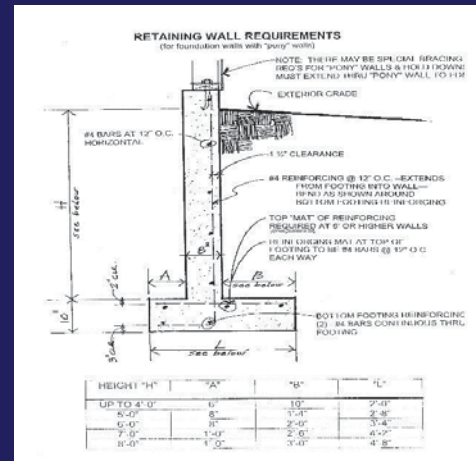
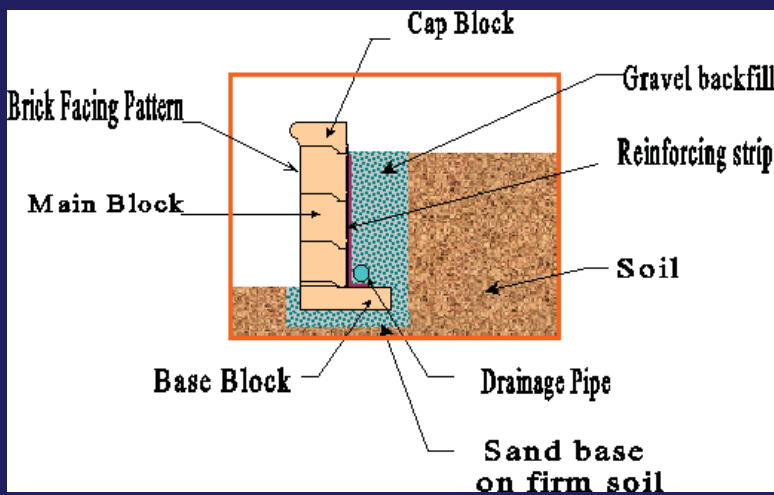
น้ำหนักแบบ Infinite strip load



q = น้ำหนักที่กระทำ มีหน่วย
เป็นน้ำหนัก/พื้นที่ เช่น นิวตัน/ตารางเมตร, ปอนด์/ตารางฟุต

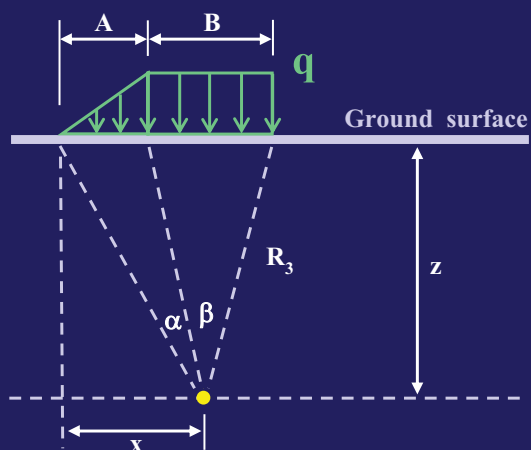
$$\Delta\sigma_z = q[\alpha + \sin \alpha \cdot \cos(\alpha + 2\delta)]/\pi$$

เช่น





น้ำหนักแบบ Embankment load



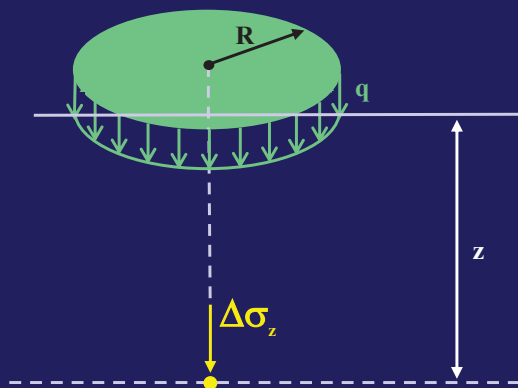
q = น้ำหนักที่กระทำ มีหน่วย
เป็นน้ำหนัก/พื้นที่ เช่น นิว
ตัน/ตารางเมตร, ปอนด์/
ตารางฟุต

$$\Delta\sigma_z = q[\beta + (x.\alpha/A) + [z(A + B - x)/R_3^2]]/\pi$$

เช่น



น้ำหนักแบบ Uniformly loaded circular area



q = น้ำหนักที่กระทำ มีหน่วย เป็นน้ำหนัก/พื้นที่ เช่น นิวตัน/ตารางเมตร, ปอนด์/ตารางฟุต

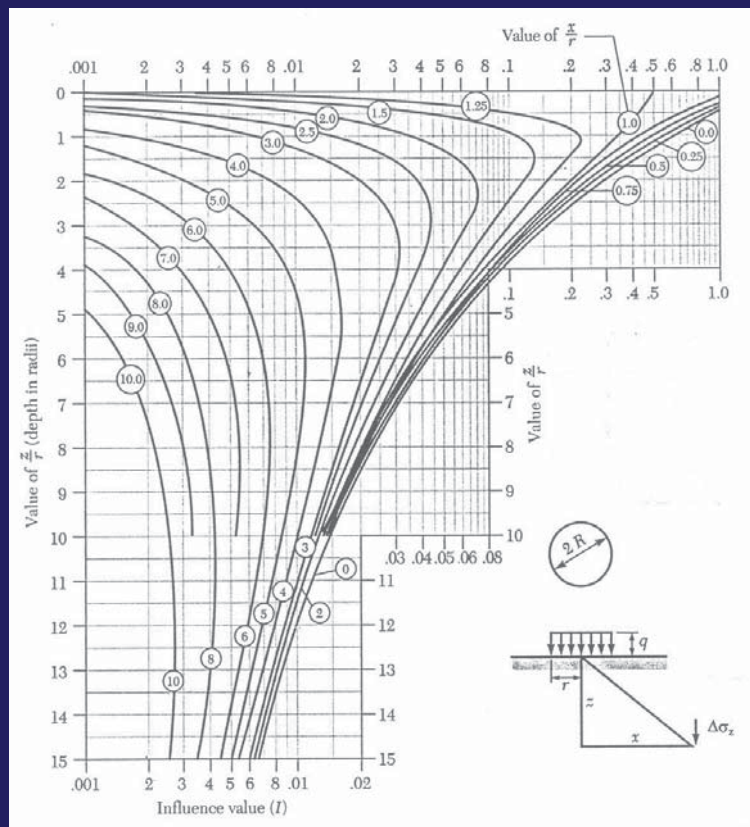
$$\Delta\sigma_z = q[1 - 1/[1 + (R/z)^2]^{3/2}]$$

U.S. Navy ได้คิดกราฟสำหรับหาความเค้นที่จุดต่าง ๆ โดยใช้สมการ

$$\Delta\sigma_z = I \cdot q$$

เมื่อ

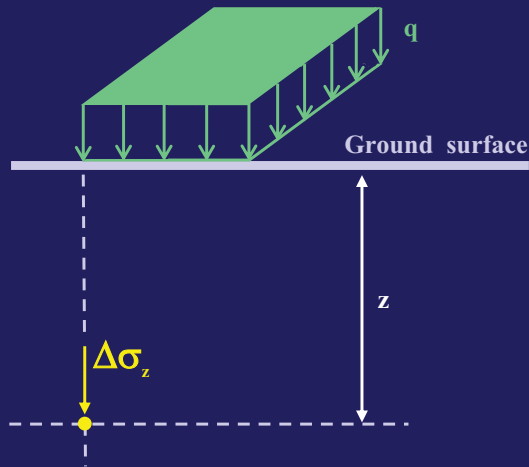
I = Influence value



เชน



น้ำหนักแบบ Uniformly loaded rectangular area



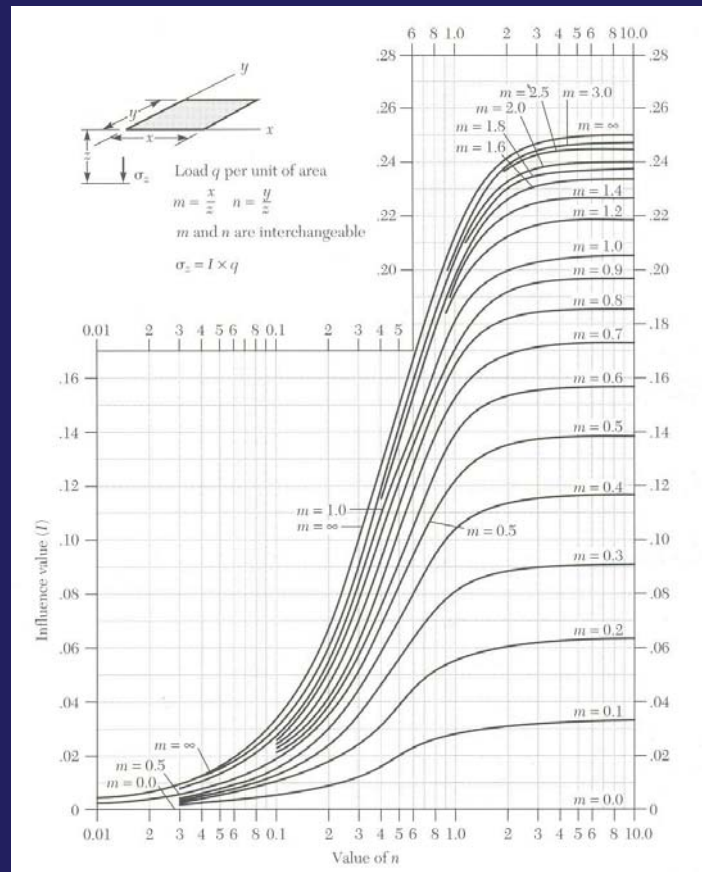
q = น้ำหนักที่กระทำ มีหน่วยเป็นน้ำหนัก/พื้นที่ เช่น นิวตัน/ตารางเมตร, ปอนด์/ตารางฟุต

U.S. Navy ได้คิดกราฟสำหรับหาความเค้นที่ความลึกต่างๆ ตรงมุมของรูปโดยใช้สมการ

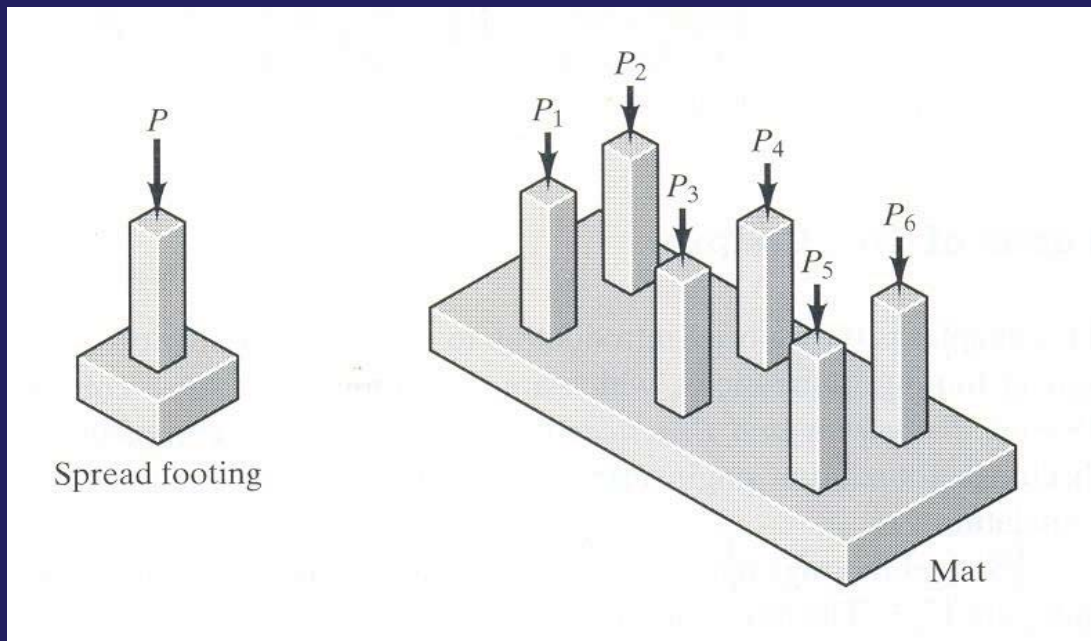
$$\Delta\sigma_z = I \cdot q$$

เมื่อ

I = Influence value

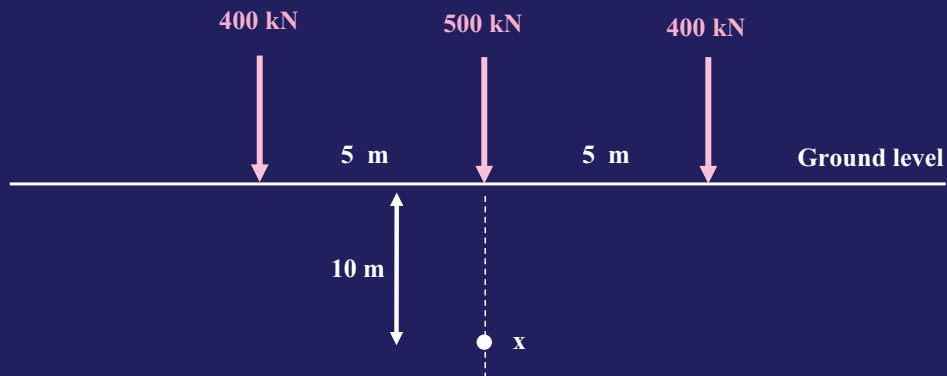


เช่น



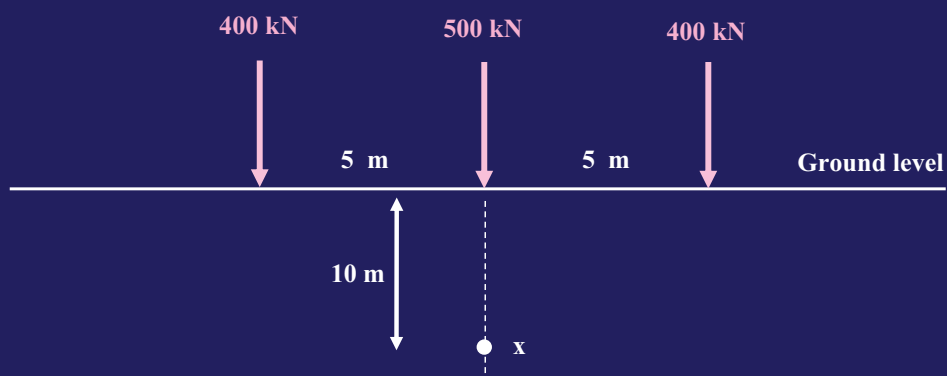
ตัวอย่างที่ 4.2

Determine the vertical stress at point X 10 meters under the ground level due to these 3 point loads.

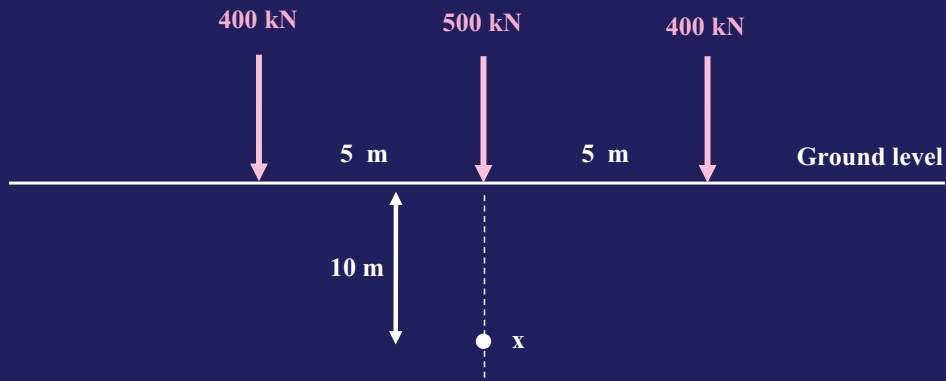


ตัวอย่างที่ 4.2

จงหาค่า ความเค้นในแนวตั้งที่จุด x ลึกลงไปจากผิวดิน 10.0 m เนื่องจากน้ำหนักกระทำ 3 จุด ดังรูป

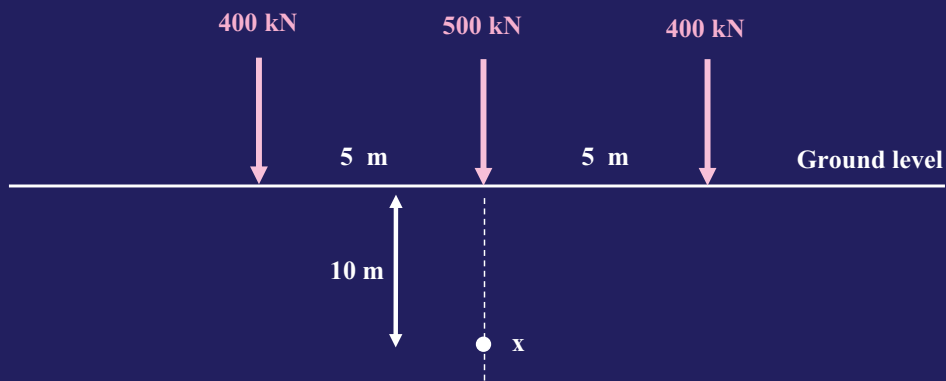


วิธีทำ



จากรูป จะเห็นว่า ความเค้นที่จุด x จะมีผลมาจาก แรง 500 kN และ 400 kN แต่เนื่องจากแรง 400 kN ทั้งสองมีระยะห่าง และความลึกเท่ากัน ดังนั้น ความเค้นที่เกิดขึ้นจะเท่ากัน

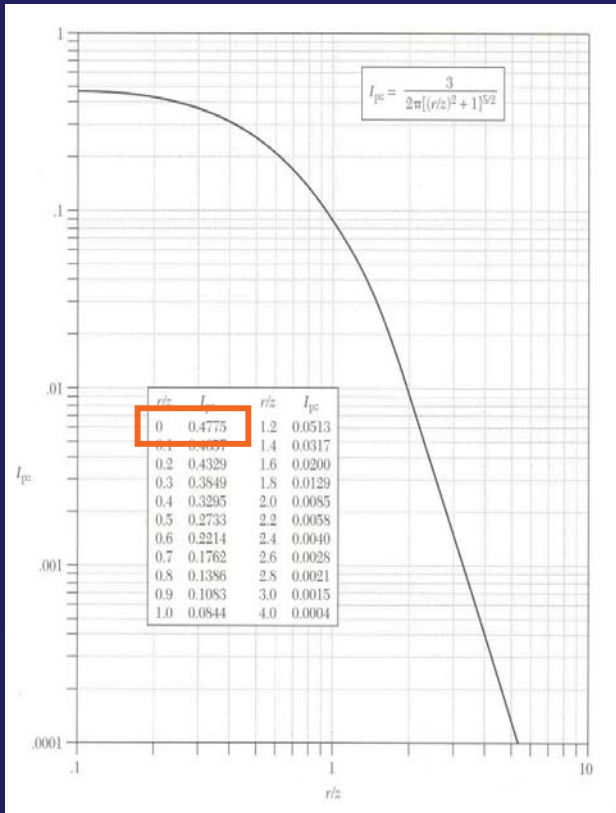
ดังนั้น
$$\Delta\sigma_{zx} = \Delta\sigma_{z500} + 2 \times \Delta\sigma_{z400}$$



หาค่า $\Delta\sigma_{z500}$

จากรูป $r = 0, z = 10 \text{ m}$

ดังนั้น $r/z = 0$



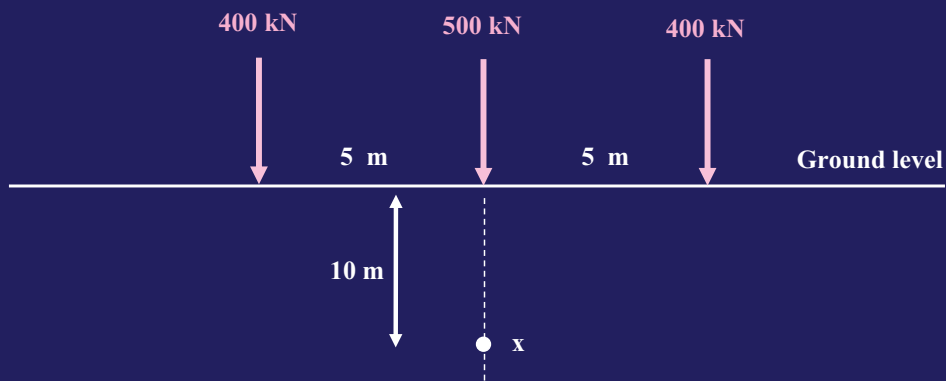
$r = 0, z = 10 \text{ m}, r/z = 0$

จากรูป 4.8 จะได้ $I_{pz} = 0.4775$

จากสมการ $\Delta\sigma_z = I_{pz} \cdot P/z^2$

แทนค่า $\Delta\sigma_{z500} = 0.4775 \times 500/10^2$

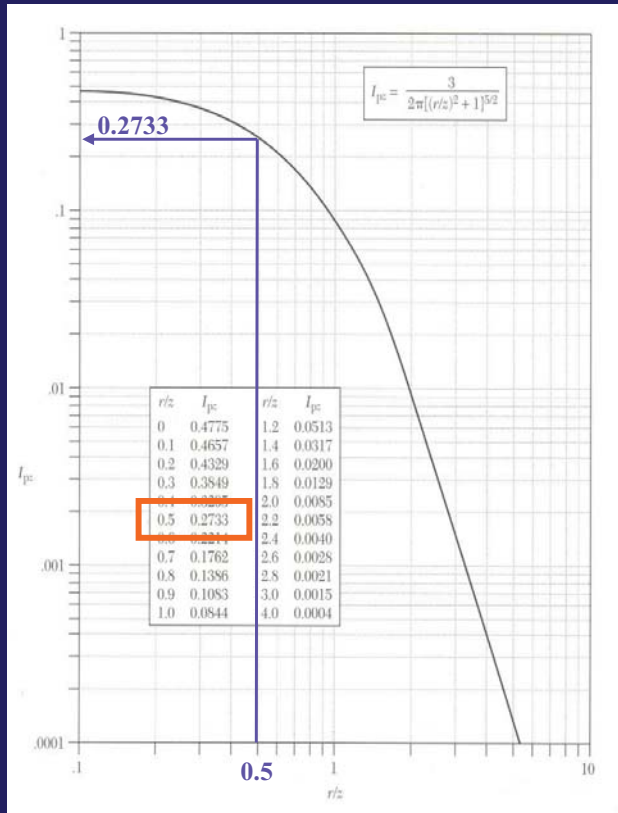
$\Delta\sigma_{z500} = 2.39 \text{ kN/m}^2$



หาค่า $\Delta\sigma_{z400}$

จากรูป $r = 5 \text{ m}, z = 10 \text{ m}$

ดังนั้น $r/z = 0.5$



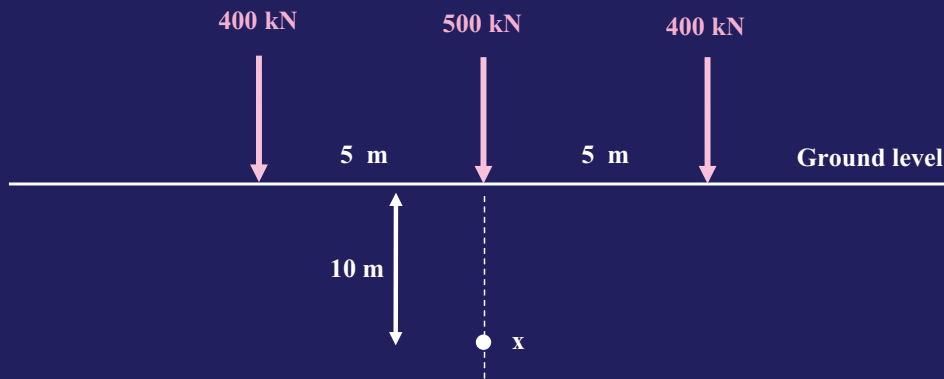
$r = 5 \text{ m}, z = 10 \text{ m}, r/z = 0.5$

จากรูป 4.8 จะได้ $I_{pz} = 0.2733$

จากสมการ $\Delta\sigma_z = I_{pz} \cdot P/z^2$

แทนค่า $\Delta\sigma_{z400} = 0.2733 \times 400/10^2$

$\Delta\sigma_{z400} = 1.09 \text{ kN/m}^2$



จากสมการ $\Delta\sigma_{zx} = \Delta\sigma_{z500} + 2 \times \Delta\sigma_{z400}$

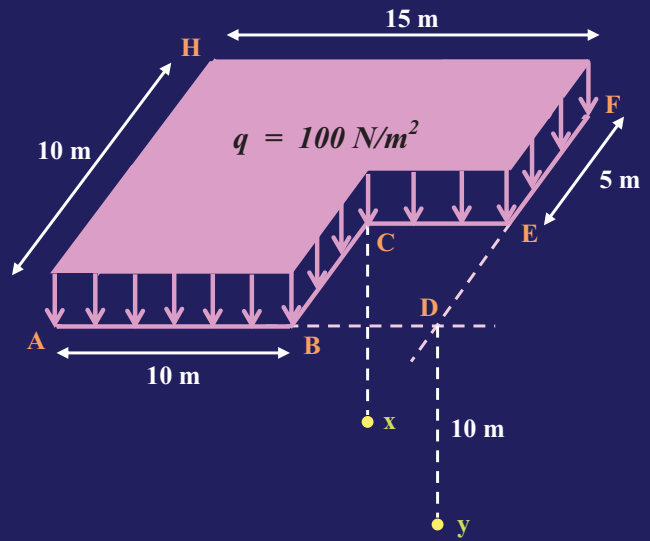
แทนค่า $\Delta\sigma_{zx} = 2.39 + 2 \times 1.09$

$\Delta\sigma_{zx} = 4.57 \text{ kN/m}^2$

Ans

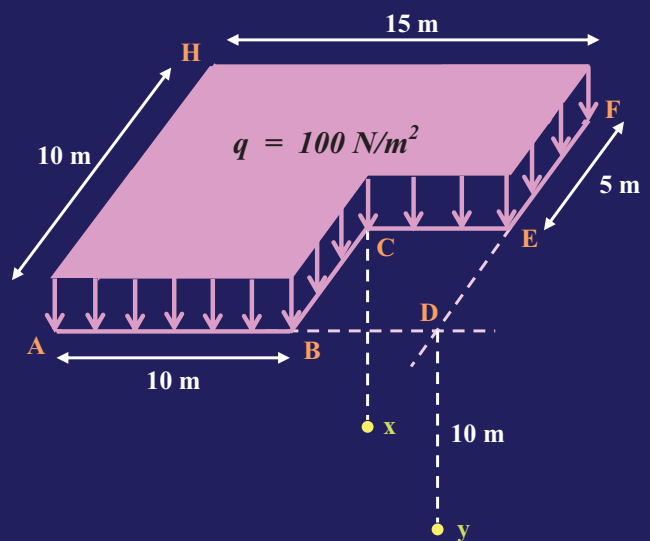
ตัวอย่างที่ 4.3

Determine the vertical stresses due to uniformly loaded area 100 N/m^2 , at point x and y , 10 m below ground level.



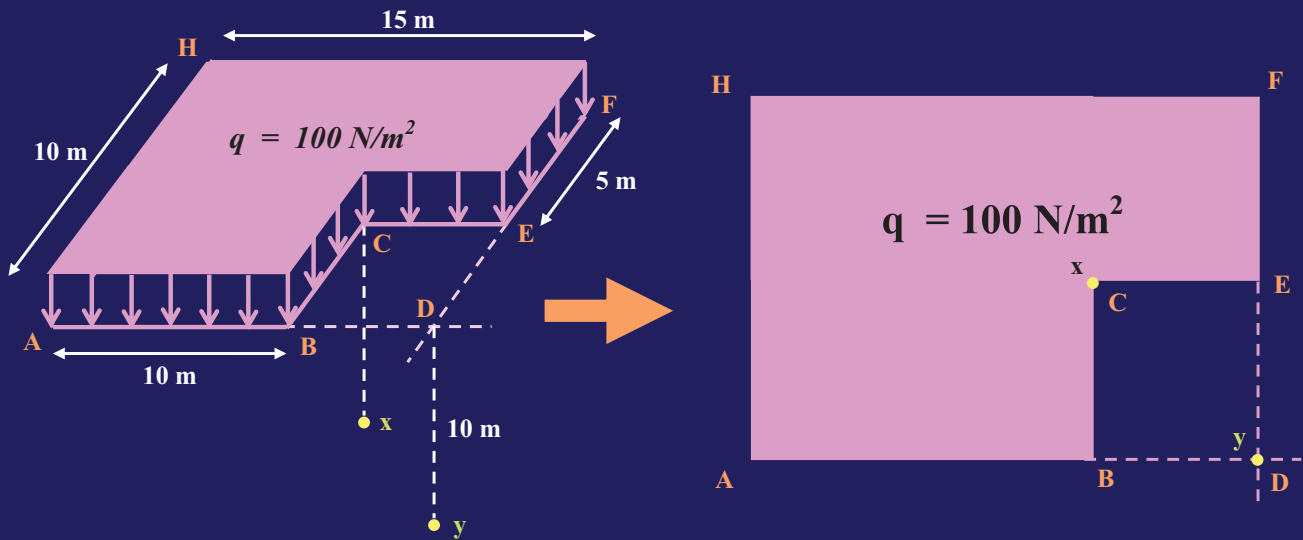
ตัวอย่างที่ 4.3

จงหาค่า ความเค้นในแนวตั้งที่จุด x และ y ลึกลงไปจากผิวดิน 10 เมตร เนื่องจากน้ำหนักแผ่กระจายสม่ำเสมอมีขนาด 100 N/m^2 ดังรูป



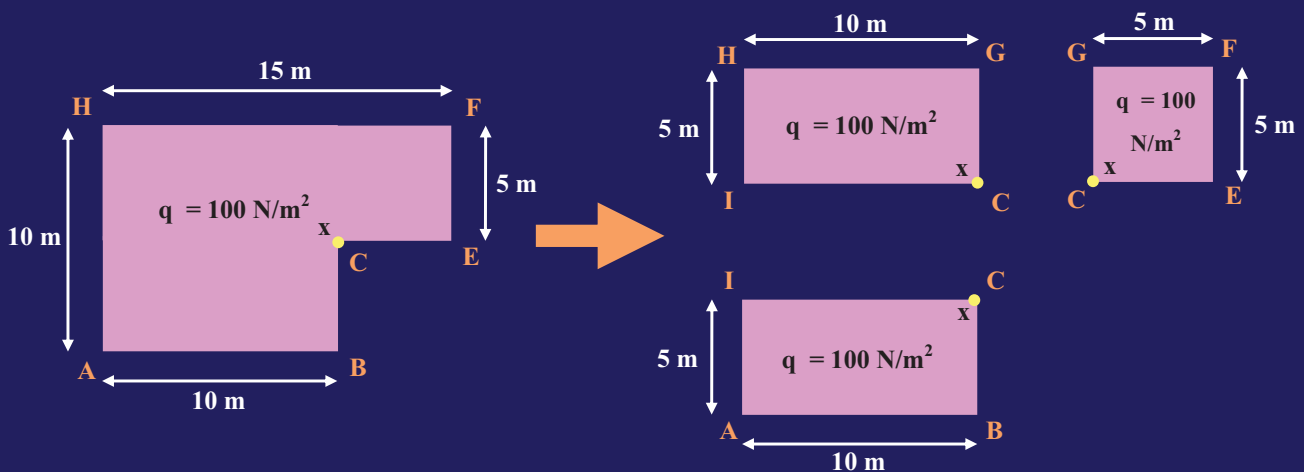
วิธีทำ

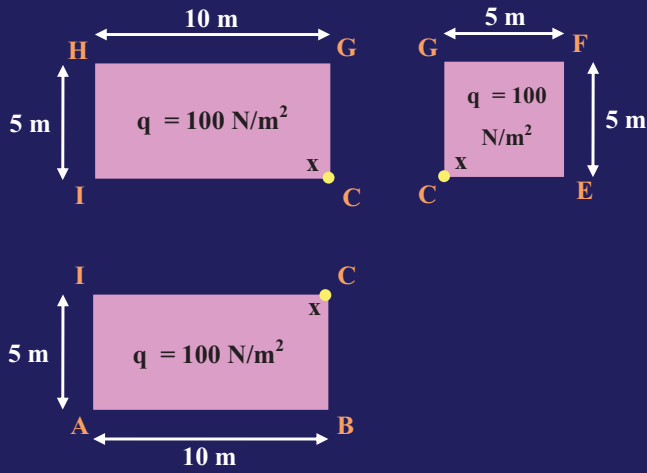
จากรูป หากมองจาก Top view ลงมา จะเห็นว่ารูปหน้าหนักเป็น
ดังรูป



หาค่า ความเค้นในแนวดิ่งที่จุด x

จากรูป จะเห็นว่า รูป ABCEFH จะประกอบด้วยรูปสี่เหลี่ยม 3 รูป ที่มีจุด C หรือ x อยู่ตรงมุม คือ สี่เหลี่ยม CGHI, CIAB และ CEFG



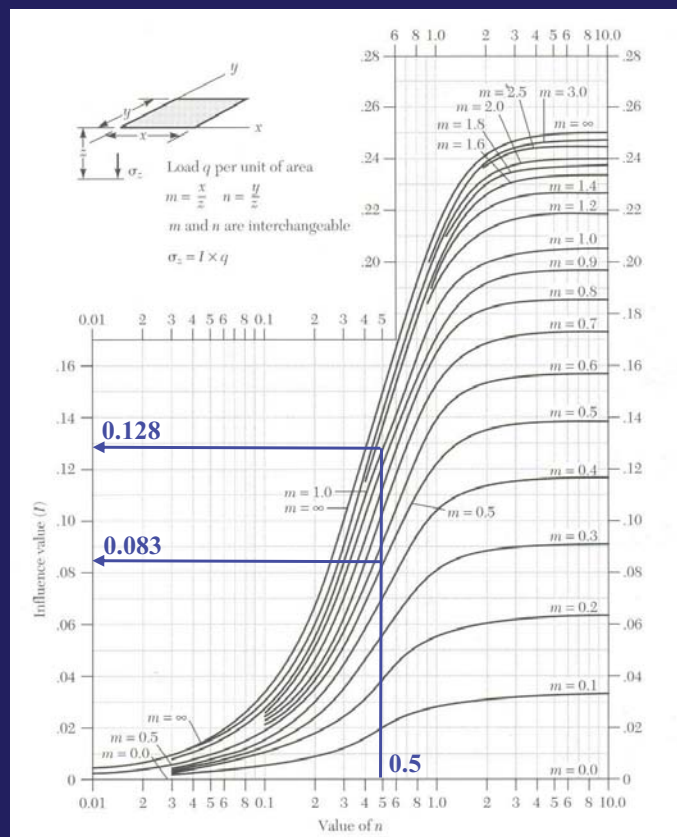


ดังนั้น ความเค้นที่จุด x จะเท่ากับ ความเค้นเนื่องจากสี่เหลี่ยมทั้งสาม รวมกัน

หาค่า Influence value จากรูป 4.16

| รูป | x (m) | y (m) | z (m) | x/z | y/z |
|------|-------|-------|-------|-----|-----|
| CGHI | 10 | 5 | 10 | 1.0 | 0.5 |
| CIAB | 10 | 5 | 10 | 1.0 | 0.5 |
| CEFG | 5 | 5 | 10 | 0.5 | 0.5 |

| รูป | CGHI | CIAB | CEFG |
|-----|-------|-------|-------|
| x/z | 1.0 | 1.0 | 0.5 |
| y/z | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| I | 0.128 | 0.128 | 0.083 |



| รูป | x (m) | y (m) | z (m) | x/z | y/z | I | $\Delta\sigma_z$ (N/m ²) |
|------|-------|-------|-------|-----|-----|-------|---|
| CGHI | 10 | 5 | 10 | 1.0 | 0.5 | 0.128 | 12.8 |
| CIAB | 10 | 5 | 10 | 1.0 | 0.5 | 0.128 | 12.8 |
| CEFG | 5 | 5 | 10 | 0.5 | 0.5 | 0.083 | 8.3 |

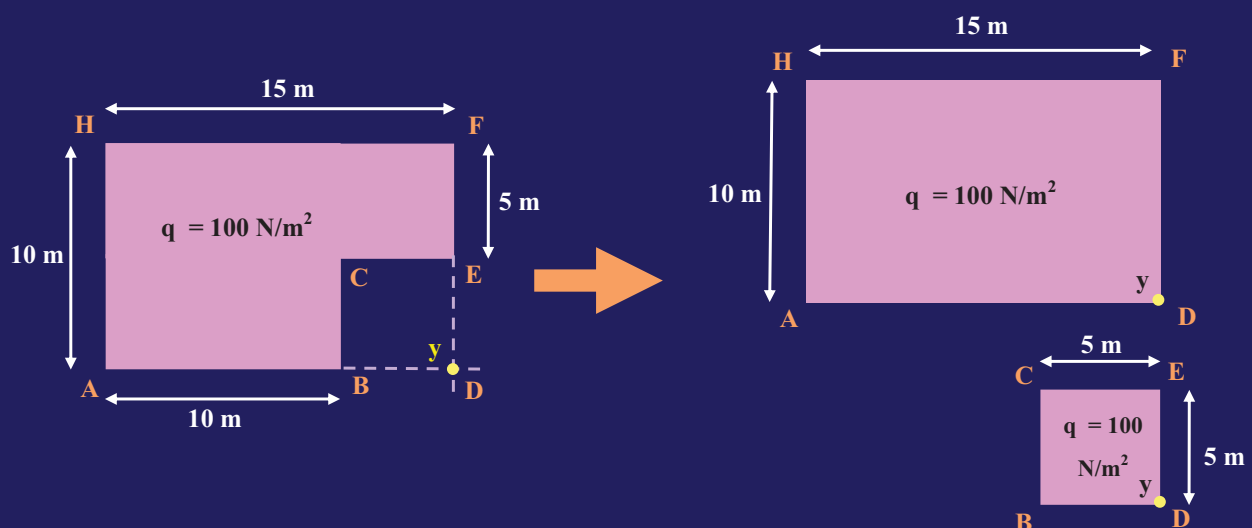
หมายเหตุ $\Delta\sigma_z = I \cdot q$ $q = 100 \text{ N/m}^2$

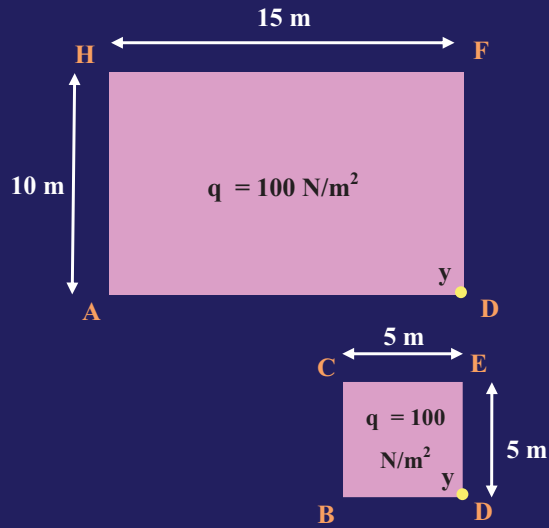
ดังนั้น ความเค้นในแนวดิ่งที่จุด x = $12.8 + 12.8 + 8.3 = 33.9 \text{ N/m}^2$

Ans

หาค่า ความเค้นในแนวดิ่งที่จุด y

จากรูป จะเห็นว่า รูป ABCEFHD จะประกอบด้วยรูปสี่เหลี่ยม 2 รูป ที่มีจุด D หรือ y อยู่ตรงมุม คือ สี่เหลี่ยม DFHA และ DECB



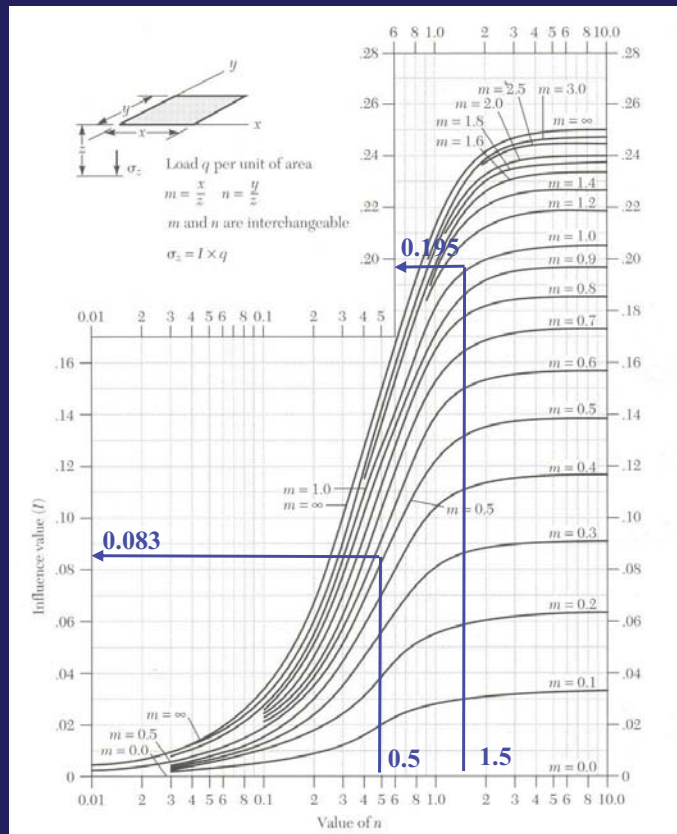


ดังนั้น ความเค้นที่จุด y จะเท่ากับ ความเค้นเนื่องจากสี่เหลี่ยม DFHA ลบด้วยความเค้นเนื่องจากสี่เหลี่ยม DECB

หาค่า Influence value จากรูป 4.16

| รูป | x (m) | y (m) | z (m) | x/z | y/z |
|------|-------|-------|-------|-----|-----|
| DFHA | 15 | 10 | 10 | 1.5 | 1.0 |
| DECB | 5 | 5 | 10 | 0.5 | 0.5 |

| รูป | DFHA | DECB |
|-----|-------|-------|
| x/z | 1.5 | 0.5 |
| y/z | 1.0 | 0.5 |
| I | 0.195 | 0.083 |



| รูป | x (m) | y (m) | z (m) | x/z | y/z | I | $\Delta\sigma_z$ (N/m ²) |
|------|-------|-------|-------|-----|-----|-------|---|
| DFHA | 15 | 10 | 10 | 1.5 | 1.0 | 0.195 | 19.5 |
| DECB | 5 | 5 | 10 | 0.5 | 0.5 | 0.083 | 8.3 |

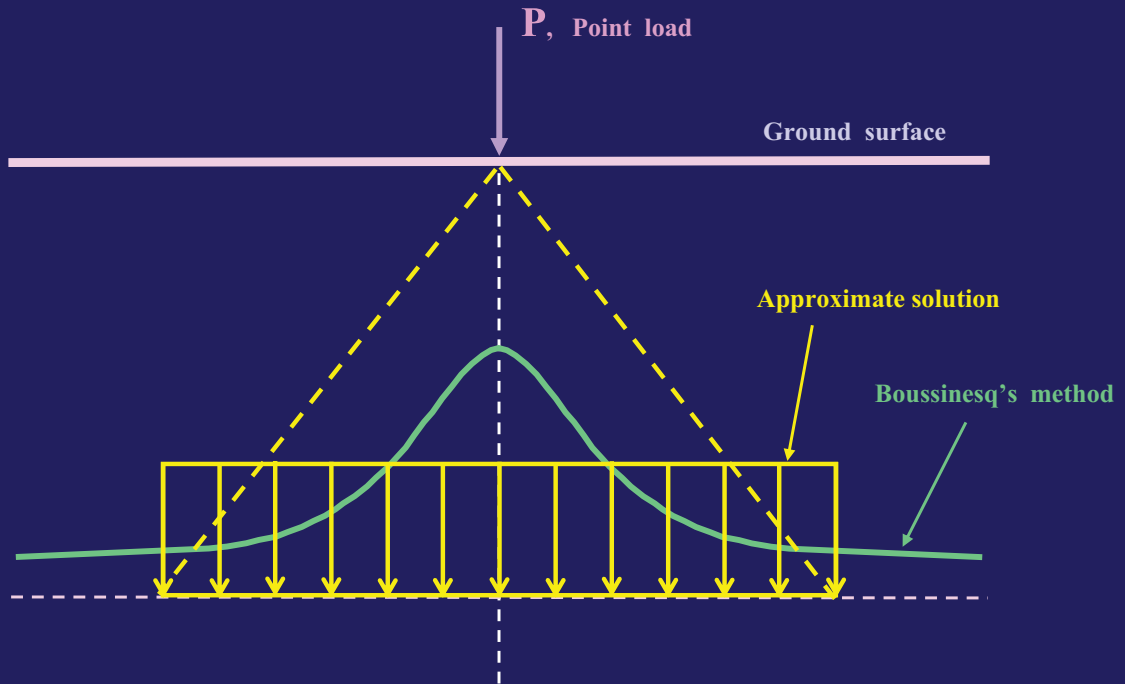
หมายเหตุ $\Delta\sigma_z = I \cdot q$ $q = 100 \text{ N/m}^2$

ดังนั้น ความเค้นในแนวดิ่งที่จุด y = $19.5 - 8.3 = 11.2 \text{ N/m}^2$

Ans

Approximate solution

วิธีการวิเคราะห์ จะสมมุติให้ความเค้นที่ความลึกระดับเดียวกันเท่ากัน ซึ่งทำให้ค่าความเค้นที่ได้จากวิธีนี้ใกล้เคียงกับวิธีของ Boussinesq ที่ความลึกมาก ๆ เท่านั้น



การวิเคราะห์ใช้หลักการของความดันเท่ากับแรง
หารด้วยพื้นที่ ซึ่งพื้นที่นี้จะเป็นพื้นที่ที่แรงที่ผิวดิน
ส่งผลไปถึง วิธีนี้สามารถกระทำได้กับน้ำหนักที่ผิวดิน
2 รูปแบบ คือ

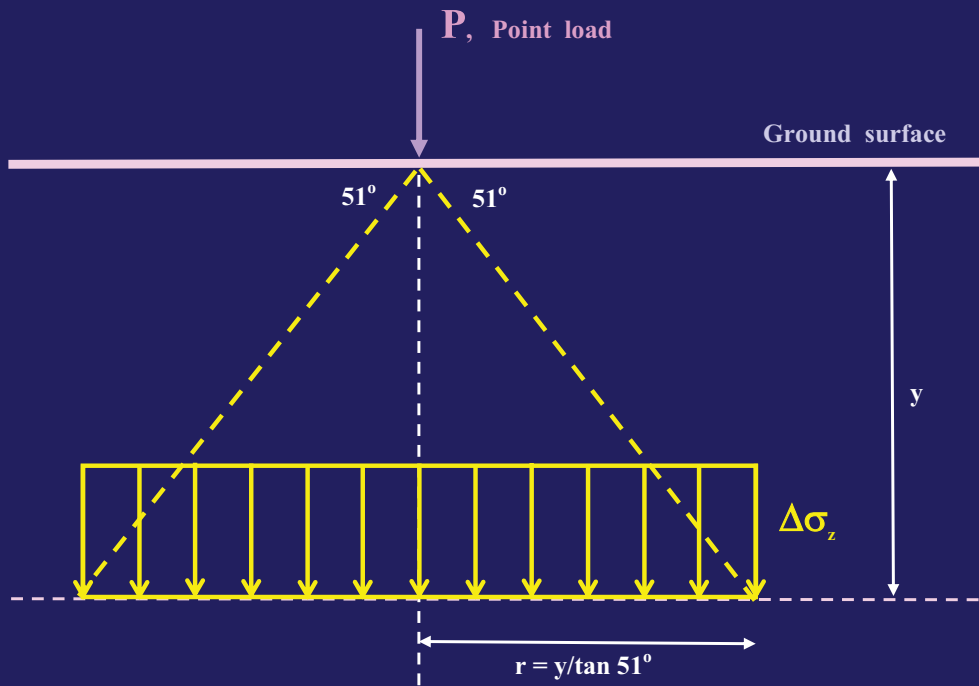


น้ำหนักกระทำเป็นจุด

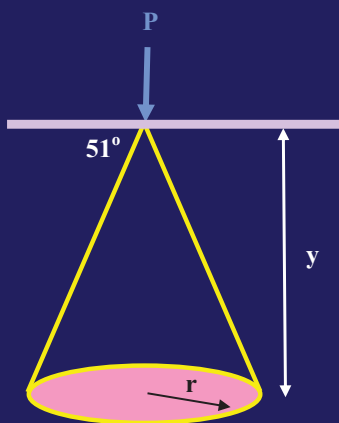


น้ำหนักกระทำสม่ำเสมอสี่เหลี่ยม

น้ำหนักกระทำเป็นจุด



จากรูป จะเห็นการแผ่ความเค้น
เนื่องจากน้ำหนัก (P) เป็นลักษณะรูป
กรวยโดยมีมุมที่แผ่ออกมาเท่ากับ 51
องศา ดังนั้นสมการที่ใช้คำนวณหาค่า
ความเค้นที่จุดใด ๆ ภายในรูปกรวย
จะเป็น

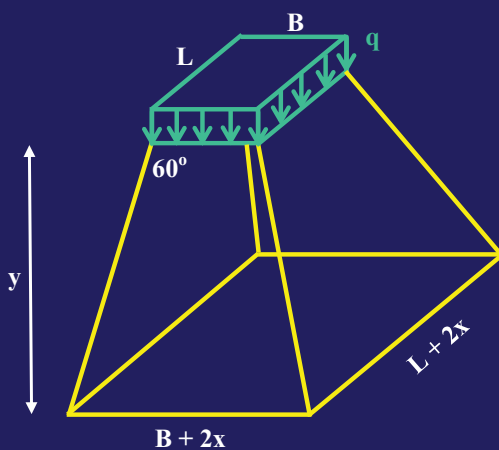
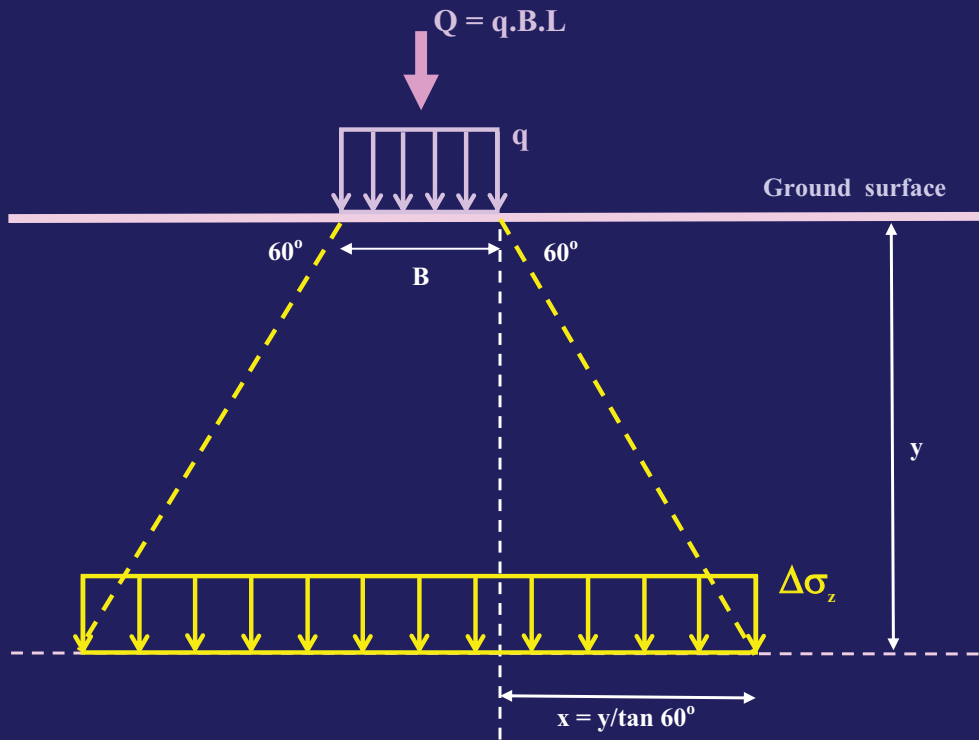


$$\Delta\sigma_z = P/\pi.r^2$$

เมื่อ

$$r = y/\tan 51^\circ$$

น้ำหนักกระทำสม่ำเสมอสี่เหลี่ยม



จากรูป จะเห็นการแผ่ความเค้น
เนื่องจากน้ำหนัก (q) เป็นลักษณะรูป
สี่เหลี่ยมปิรามิดโดยมีมุมที่แผ่ออกมา
เท่ากับ 60 องศา ดังนั้นสมการที่ใช้
คำนวณหาค่าความเค้นที่จุดใด ๆ ภายใน
รูปสี่เหลี่ยมจะเป็น

$$\Delta\sigma_z = Q / [(B + 2x)(L + 2x)]$$

เมื่อ

$$Q = q.B.L$$

$$x = y / \tan 60^\circ$$

แผนภูมิอิทธิพล

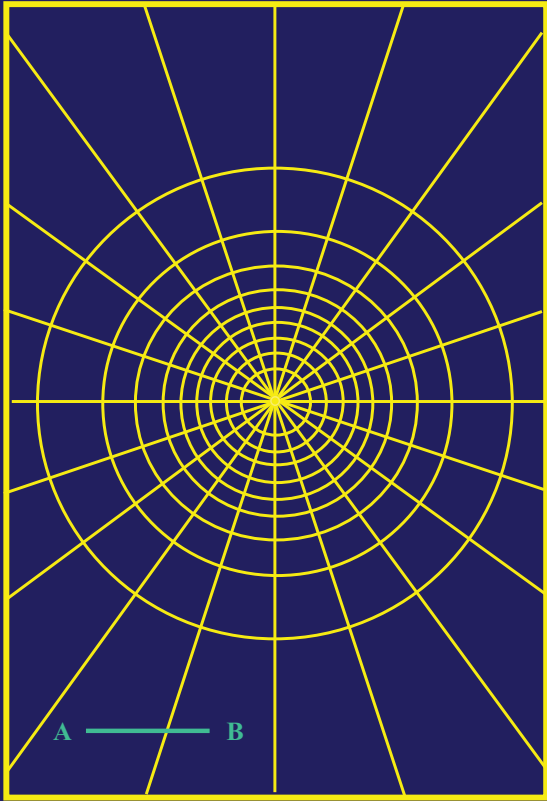
ในกรณีที่รูปของน้ำหนักที่กระทำที่ผิวดินไม่เป็นรูปมาตรฐาน เช่นรูป สามเหลี่ยม ครึ่งวงกลม Newmark ได้คิดแผนภูมิอิทธิพล (Influence chart) เพื่อใช้หาค่า ความเค้นโดยใช้สมการที่ 4.22 มาแปลงเป็น

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

จากสมการดังกล่าว Newmark ได้หาความสัมพันธ์ ระหว่าง $\Delta\sigma_z/q$ กับ R/z ได้ดังตาราง

| | | | | | | | | | | | |
|--------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|
| $\Delta\sigma_z/q$ | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.0 |
| R/z | 0.0 | 0.27 | 0.40 | 0.52 | 0.64 | 0.77 | 0.92 | 1.11 | 1.39 | 1.91 | ∞ |

จากนั้นกำหนดขนาดสเกลขึ้นแล้วนำค่าเหล่านี้มาวาดเป็นวงกลมให้มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน ได้ 9 วง แล้วแบ่งวงกลมดังกล่าว ให้ระยะห่างของเส้นที่แบ่งเท่า ๆ กัน แล้วนับจำนวนช่องทั้งหมด

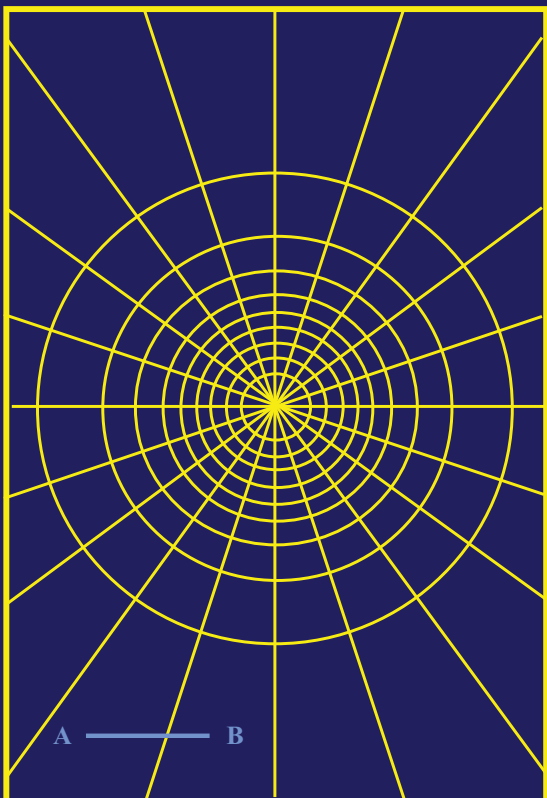


วิธีสร้าง Newmark chart

ตั้งสเกล **AB** ให้เท่ากับ 1 หน่วย

เขียนวงกลมที่มีจุดศูนย์กลาง
ร่วมกัน โดยให้มีรัศมีดังตาม
ตาราง

แบ่งวงกลมดังกล่าว ให้
ระยะห่างของเส้นที่แบ่งเท่า ๆ
กัน



นับจำนวนช่องทั้งหมดได้
200 ช่อง ดังนั้นค่าอิทธิพล
(Influence value) เท่ากับ $1/200$
หรือ 0.005

ดังนั้น Influence chart รูป
หนึ่ง จะต้องมีสเกล และ ค่า
Influence value กำกับอยู่เสมอ

การคำนวณ จะใช้สมการ

$$\Delta\sigma_z = I_n \cdot N \cdot q$$

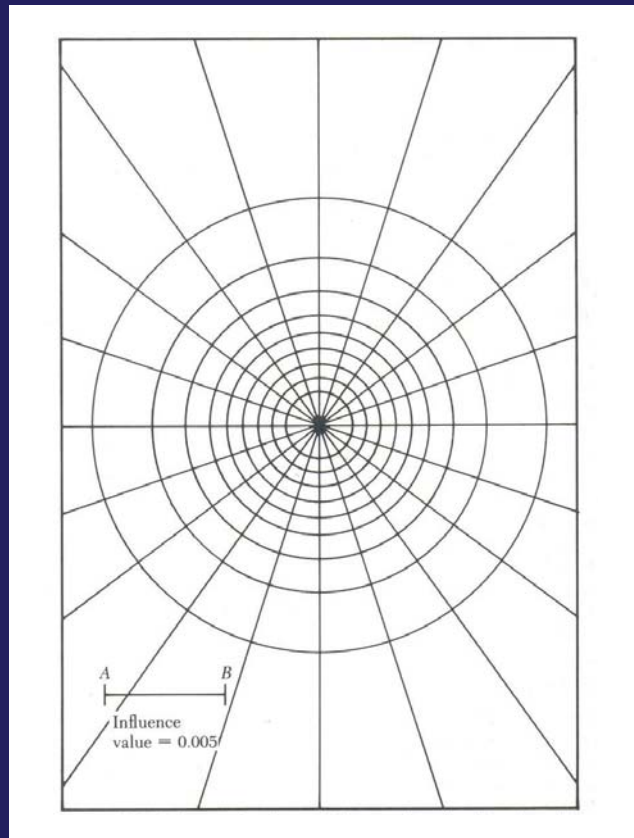
เมื่อ

I_n = Influence value

N = จำนวนช่องที่รูปล้อมอยู่

รูปตัวอย่าง Newmark

Influence chart 

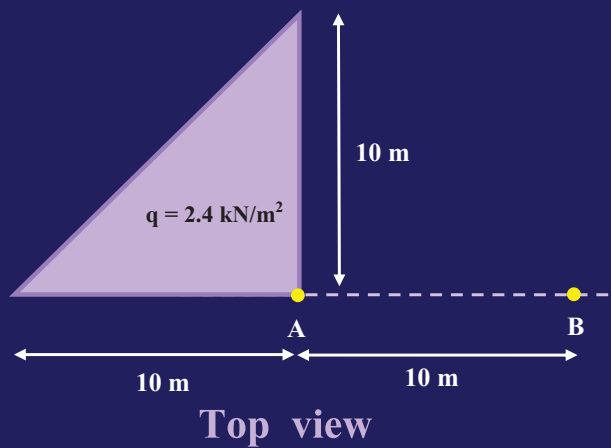


วิธีใช้งาน

- ◆ ให้ระยะ AB เท่ากับความลึกจากผิวดินถึงจุดที่ต้องการหาความเค้น
- ◆ วาดรูปพื้นที่ที่นำหน้ากระทำตามสเกล AB
- ◆ จากนั้น นำรูปดังกล่าวมาวางลงบน Newmark influence chart โดยให้จุดที่ต้องการหาความเค้นอยู่ที่จุดศูนย์กลางของวงกลม
- ◆ นับจำนวนช่องทั้งหมดที่รูปของนำหน้าล้อมอยู่ (N) แล้วนำไปคำนวณ

ตัวอย่างที่ 4.4

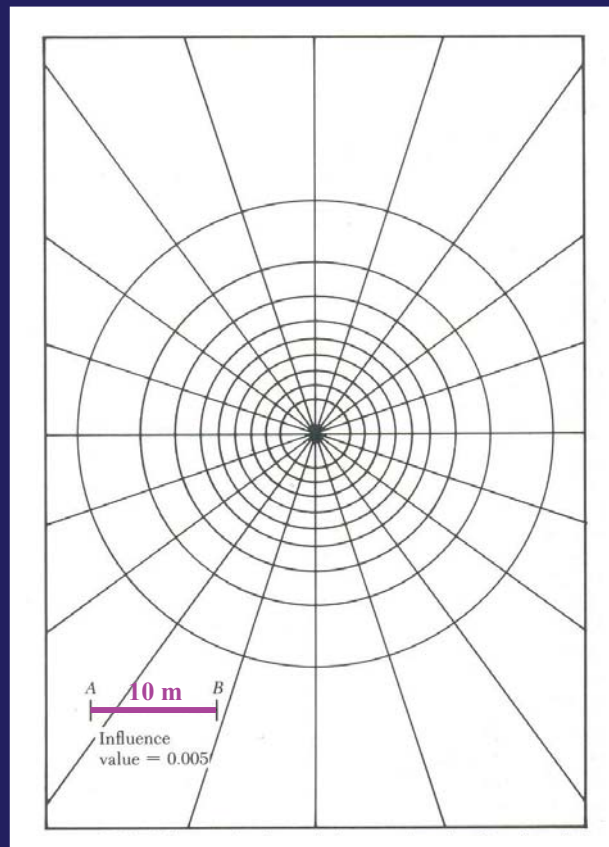
จงหาค่า ความเค้นในแนวดิ่งที่จุด A และ B ลึกลงไปจากผิวดิน 10 m เนื่องจากน้ำหนักแผ่กระจายสม่ำเสมอรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก มีขนาด 2.4 kN/m^2 ดังรูป



วิธีทำ

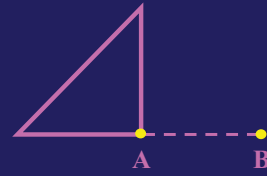
เนื่องจากรูปของน้ำหนักที่กระทำที่ผิวดินเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก จึงต้องใช้ Newmark chart ในการวิเคราะห์

ให้ ระยะ AB เท่ากับความลึกที่ต้องการหาความเค้นคือ 10 m

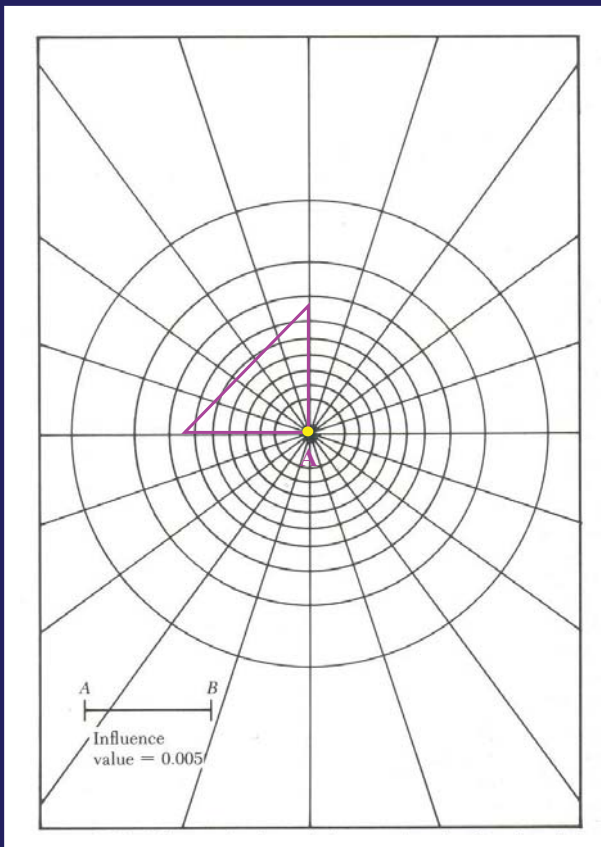


วาดรูปน้ำหนักตามสเกล

10 m



นำรูปที่วาดไปวางบน Newmark chart โดยให้จุดที่ต้องการหาความเค้นทับจุดศูนย์กลางของรูป



หาค่าความเค้นที่จุด A ลึก 10 m

นับจำนวนช่องที่ถูกล้อมรอบด้วยรูป (N) = 25.6 ช่อง

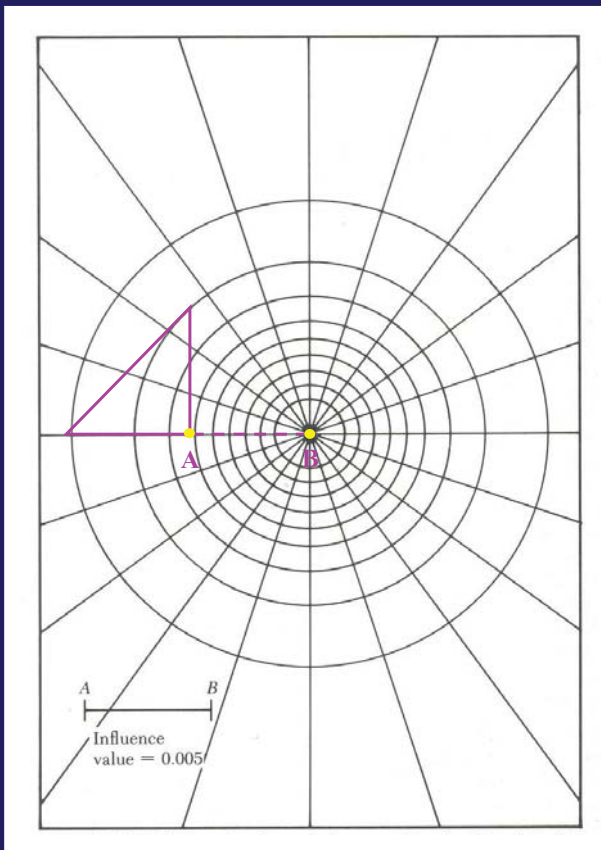
จากสมการ $\Delta\sigma_z = I_n \cdot N \cdot q$

แทนค่า

$$\Delta\sigma_z = 0.005 \times 25.6 \times 2400$$

$$\Delta\sigma_z = 307.2 \text{ N/m}^2$$

Ans



หาค่าความเค้นที่จุด B ลึก 10 ฟุต

นับจำนวนช่องที่ถูกล้อมรอบ
ด้วยรูป (N) = 3.5 ช่อง

จากสมการ $\Delta\sigma_z = I_n \cdot N \cdot q$

แทนค่า

$$\Delta\sigma_z = 0.005 \times 3.5 \times 2400$$

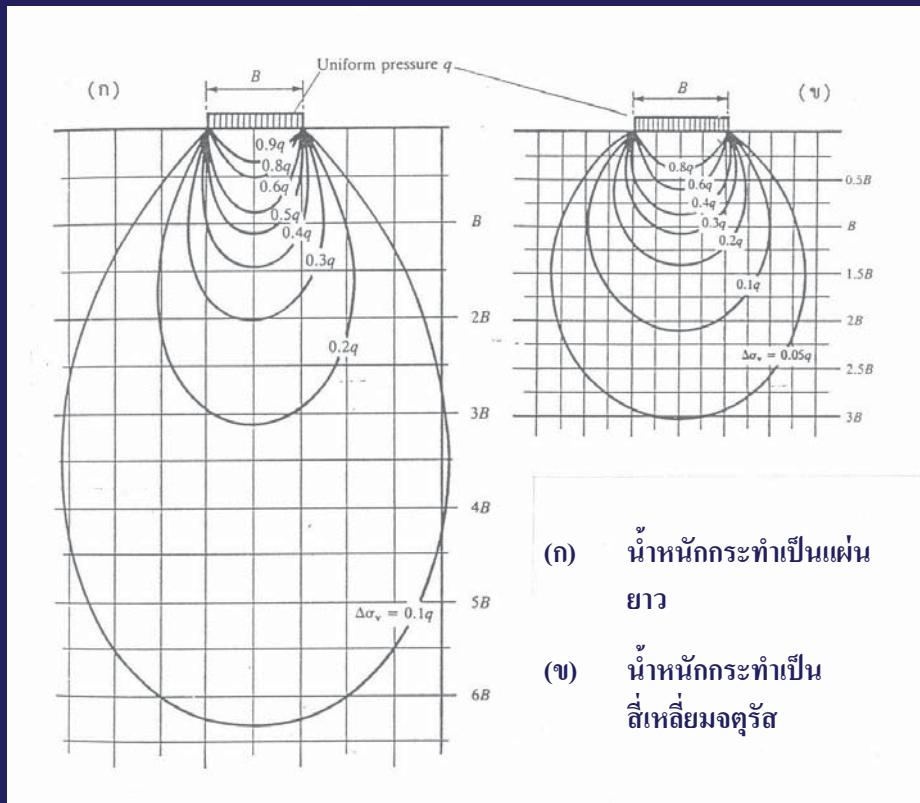
$$\Delta\sigma_z = 42.0 \text{ N/m}^2$$

Ans

กระเปาะความเค้น

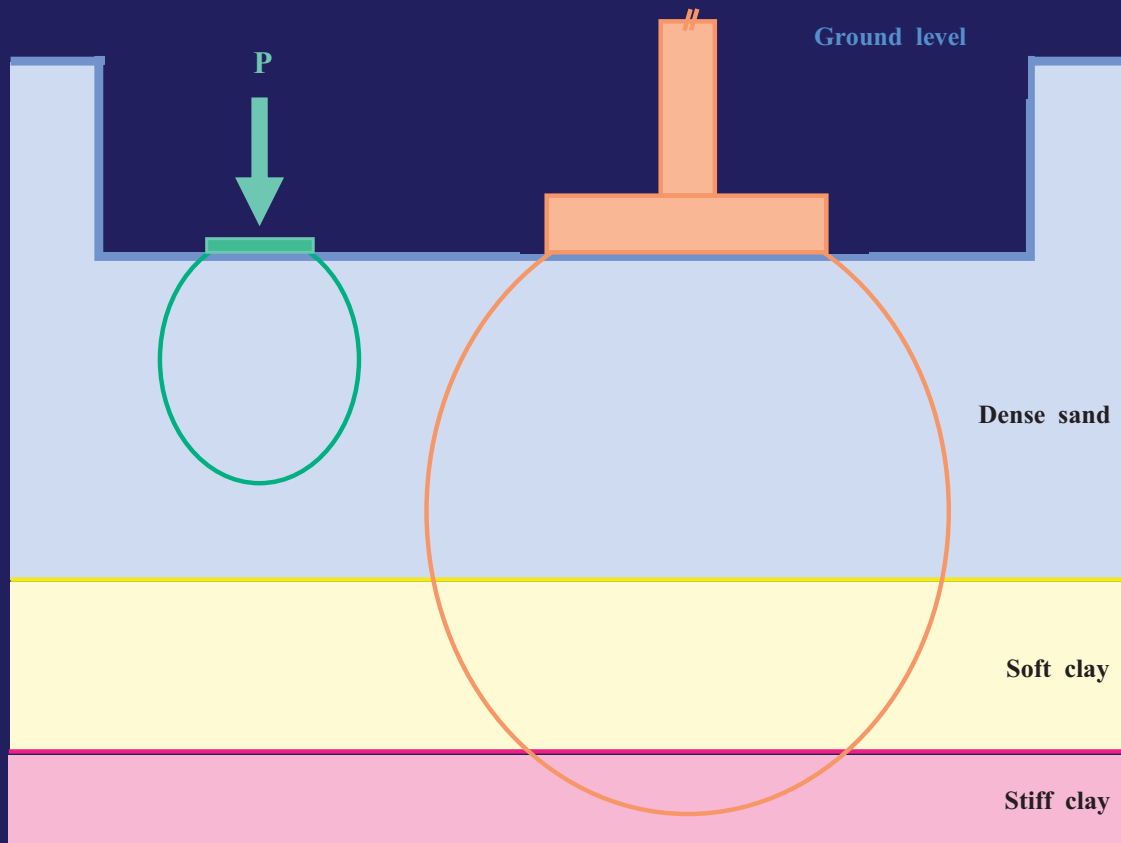
เมื่อน้ำหนักมากระทำที่ผิวดิน จะทำให้เกิดความเค้นในดินขึ้น ถ้าลากเส้นผ่านจุดที่มีค่าความเค้นที่เท่ากันในดิน จะได้เส้นของความเค้นที่เท่ากันนี้คล้ายกับกระเปาะ ดังนั้นจึงเรียกเส้นเหล่านี้ว่า กระเปาะความเค้น (Stress bulb) หรือ Isobar

Stress bulb มีประโยชน์เพื่อศึกษาการกระจายของน้ำหนักที่กระทำที่ผิวดิน ซึ่งถ้าน้ำหนักที่ผิวดินมีรูปต่างกัน Stress bulb ก็จะแตกต่างกันด้วย



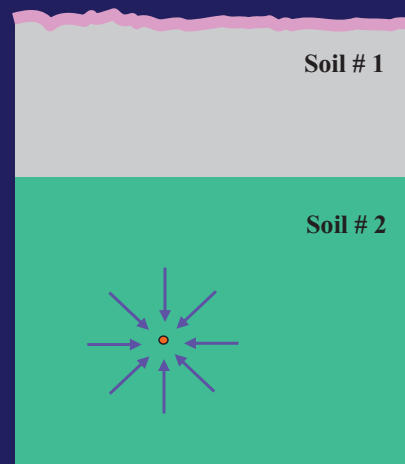
ประโยชน์ของ Stress bulb

เช่น

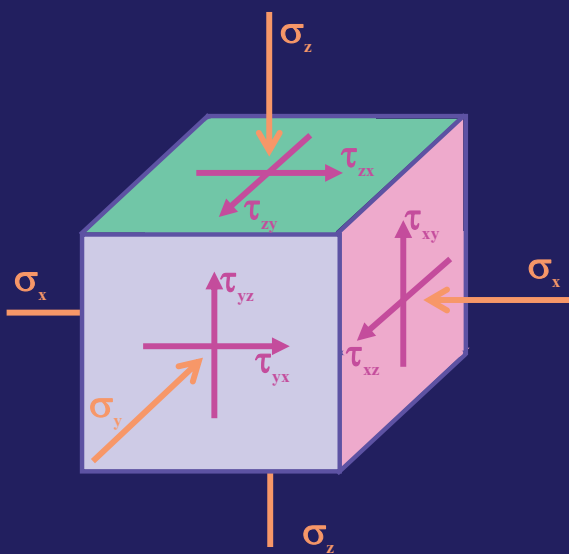
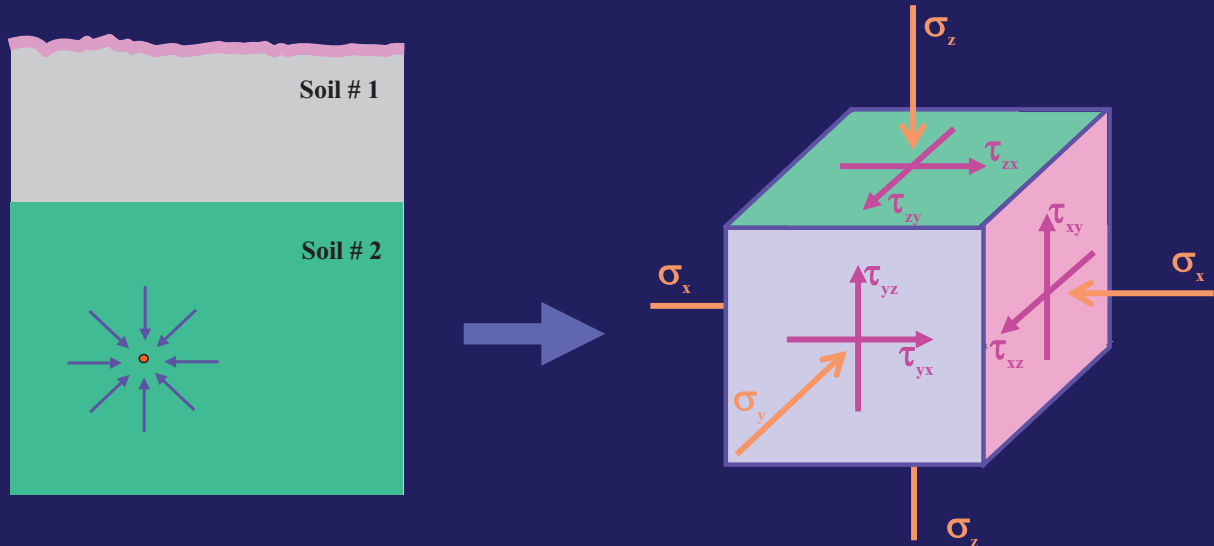


ความเค้นที่จุด

พิจารณาจุด A ในชั้นดิน ดังรูป จะเห็นว่า ดินที่จุด A นี้ถูกอัดด้วยความเค้นรอบด้าน เนื่องจากน้ำหนักของดินเอง และหรือความเค้นด้านข้าง ฯลฯ

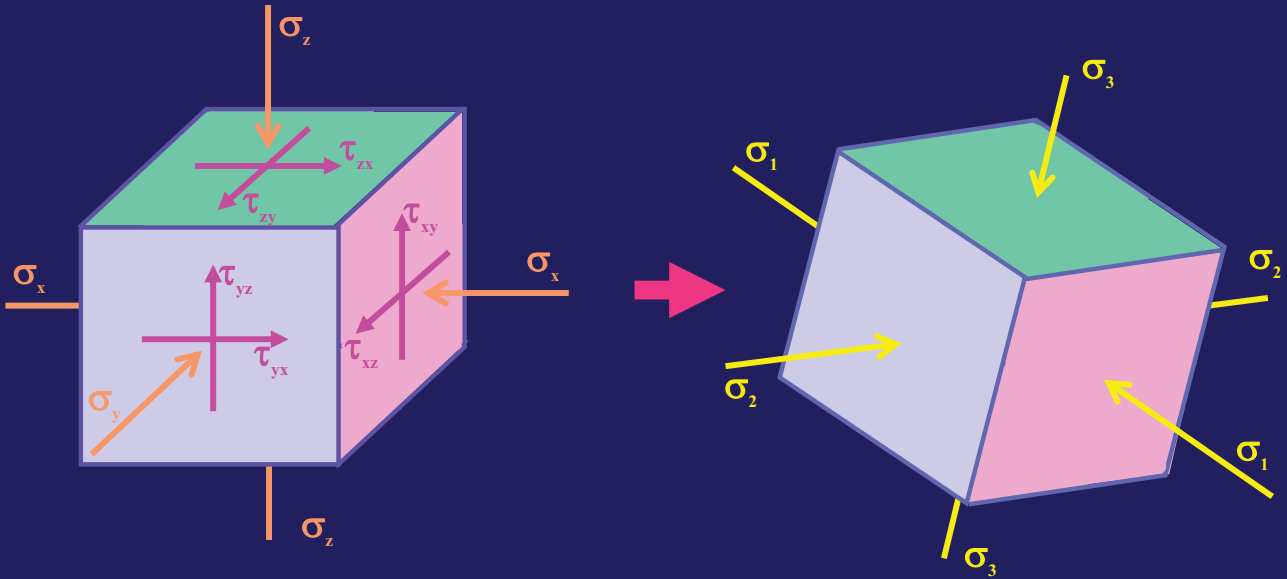


เมื่อนำจุด A มาพิจารณาให้อยู่ในรูปของลูกบาศก์ แล้วแตก
ความเค้นเหล่านั้นเข้าไปอยู่ในแนวแกน x, y และ z จะได้

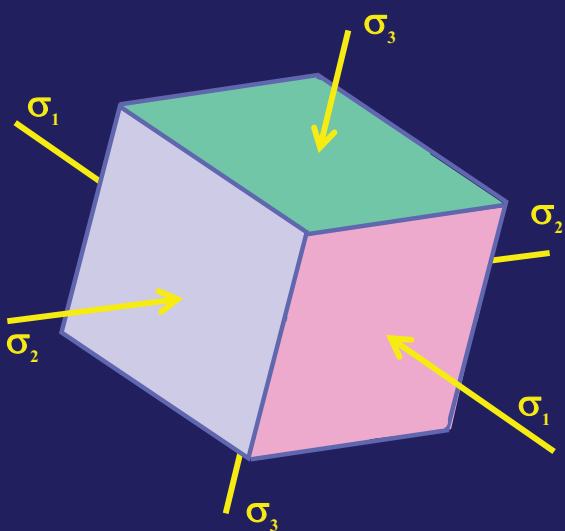


จะเห็นว่าในแต่ละระนาบ
(Plane) จะมีความเค้นอยู่ 3
อัน คือ ความเค้นตั้งฉาก
(Normal stress, σ) 1 อัน
และความเค้นเฉือน (Shear
stress, τ) 2 อัน

ในการวิเคราะห์ เพื่อให้เป็นการง่าย จะทำการหมุนลูกบาศก์
 ดินไปยัง Principal plane ซึ่งจะทำให้ Shear stress ที่อยู่ในแต่ละ
 ระนาบ เท่ากับศูนย์



จากรูป จะเห็นว่าค่า Principal stress ที่ตั้งฉากกับระนาบทั้งสามไม่
 เท่ากัน

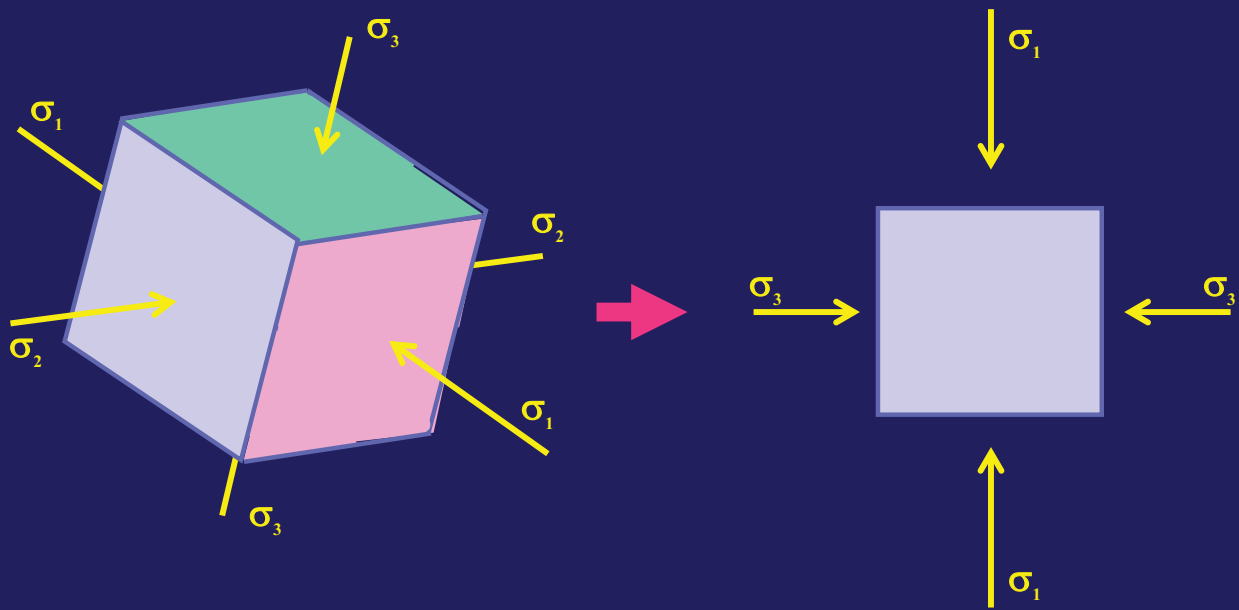


ให้ค่ามากที่สุด เป็น Major
 principal stress, σ_1

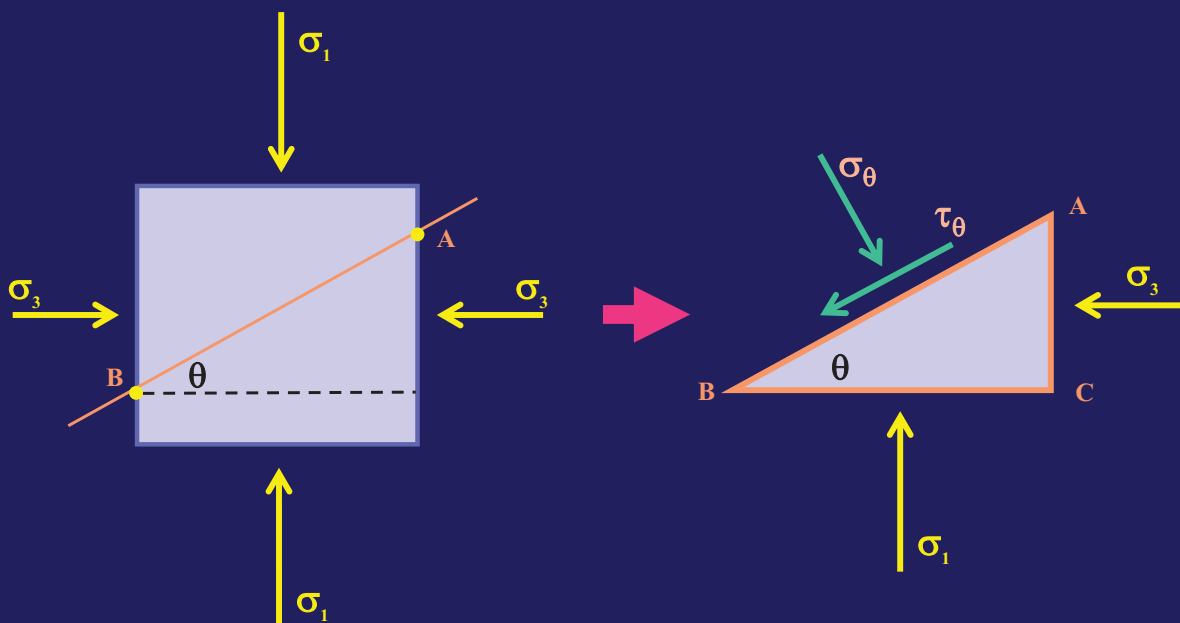
ให้ค่าน้อยที่สุด เป็น Minor
 principal stress, σ_3

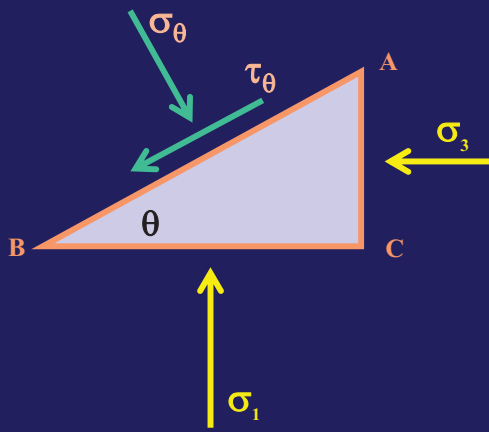
ให้ค่าที่อยู่ระหว่าง เป็น
 Intermediate principal stress, σ_2

ต่อมา ปรับรูปลูกบาศก์ดิน ให้กลายเป็นรูปสองมิติ โดยทั่วไปมัก
 นิยมให้ σ_1 อยู่ในแกนตั้ง และ σ_3 อยู่ในแกนนอน



จากรูป พิจารณาระนาบ AB ที่ทำมุม θ กับแนวนอน จะเห็นว่า
 บนระนาบนี้มีค่าความเค้นอยู่ 2 อัน คือ σ_θ และ τ_θ



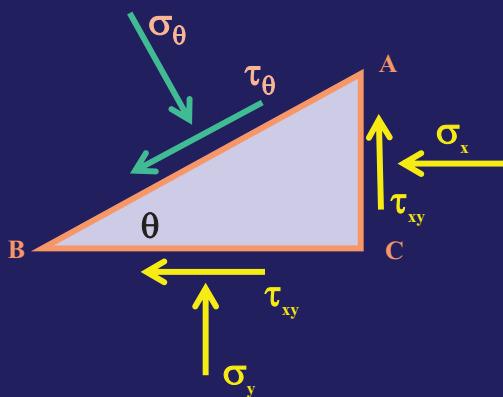


สมการที่ใช้หาค่าความเค้นที่อยู่ในระนาบที่เอียงทำมุม θ (σ_θ และ τ_θ) กับแนวนอน คือ

$$\sigma_\theta = (\sigma_1 + \sigma_3)/2 + [(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\theta]/2$$

$$\tau_\theta = [(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\theta]/2$$

ในบางครั้ง การวิเคราะห์ไม่จำเป็นต้องหมุนลูกบาศก์ดินไปที่ Principal plane ทำให้ตัวอย่างดินมีความเค้นเพิ่มขึ้นอีก 2 อัน



สมการที่ใช้หาค่าความเค้นที่อยู่ในระนาบที่เอียงทำมุม θ (σ_θ และ τ_θ) กับแนวนอน คือ

$$\sigma_\theta = (\sigma_y + \sigma_x)/2 + [(\sigma_y - \sigma_x)\cos 2\theta]/2 + \tau_{xy} \cdot \sin 2\theta$$

$$\tau_\theta = [(\sigma_y - \sigma_x) \sin 2\theta]/2 - \tau_{xy} \cdot \cos 2\theta$$

สำหรับค่า σ_1 และ σ_3 สามารถหาได้จากสมการ

$$\sigma_1 = (\sigma_y + \sigma_x)/2 + [[(\sigma_y - \sigma_x)/2]^2 + \tau_{xy}^2]^{1/2}$$

$$\sigma_3 = (\sigma_y + \sigma_x)/2 - [[(\sigma_y - \sigma_x)/2]^2 + \tau_{xy}^2]^{1/2}$$

วงกลมมอร์

นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ชื่อ Otto Mohr ได้คิดวิธีวาดรูปสำหรับวิเคราะห์หาความเค้นในระนาบใด ๆ ที่ต้องการ การวาดจะสมมุติให้แกนนอนเป็น Normal stress และแกนตั้งเป็น Shear stress

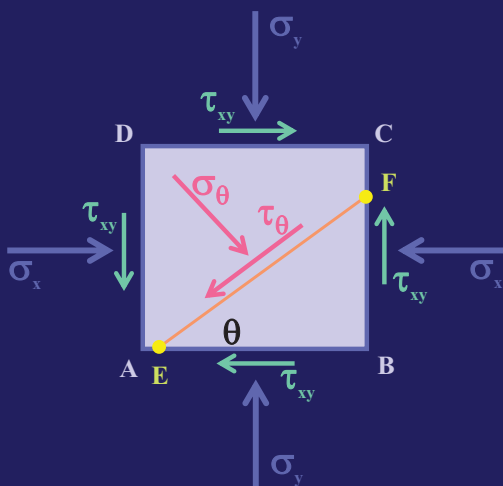
เครื่องหมายที่ใช้ในการวาด

ให้ Compressive normal stress เป็น +

ให้ Shear stress ที่ชี้ไปในทิศทางที่ทำให้วัตถุหมุนทวนเข็มนาฬิกา เป็น +

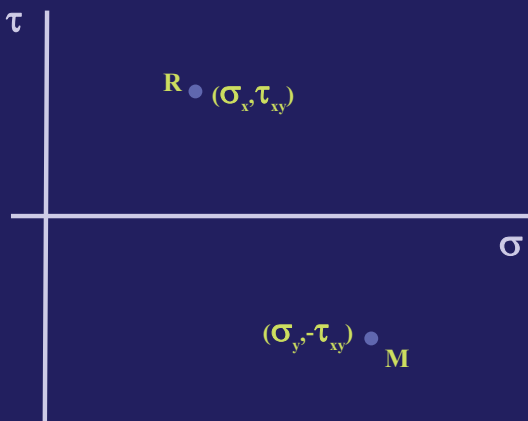
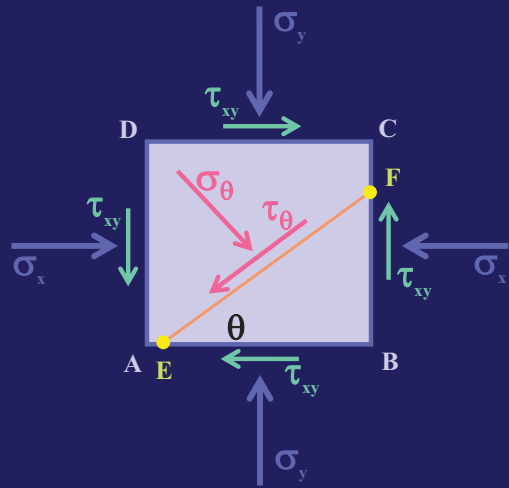
ให้ทิศทางของการวัดมุมทวนเข็มนาฬิกา เป็น +

การใช้งาน



จากรูป จะเห็นก่อนดิน ABCD
ที่มีความเค้นกระทำ 2 ชนิด คือ
Normal stress, σ และ Shear
stress, τ ค่าความเค้นที่เกิดขึ้น
บนระนาบ EF ที่ทำมุมกับ
แนวนอน θ คือ

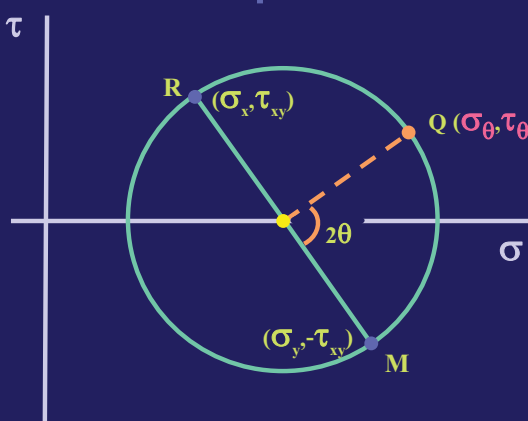
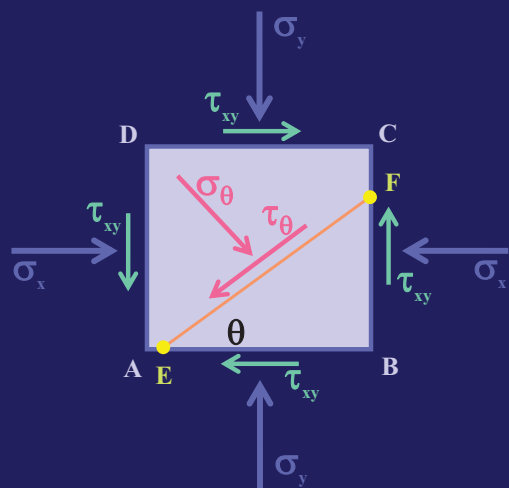
σ_{θ} และ τ_{θ}



ซึ่งการหาค่า Normal stress และ Shear stress บนระนาบ EF สามารถกระทำได้โดยใช้ Mohr circle ดังนี้

ตั้งแกน x และ y โดยให้แกน x เป็น Normal stress, σ และ แกน y เป็น Shear stress, τ

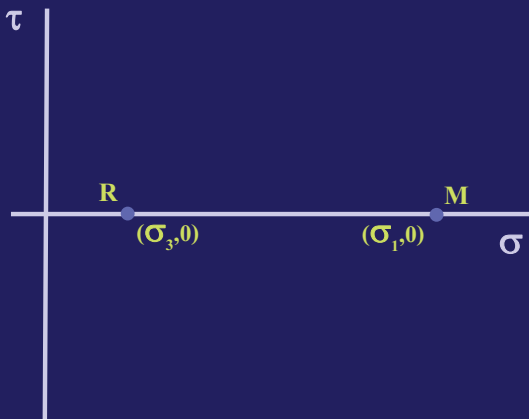
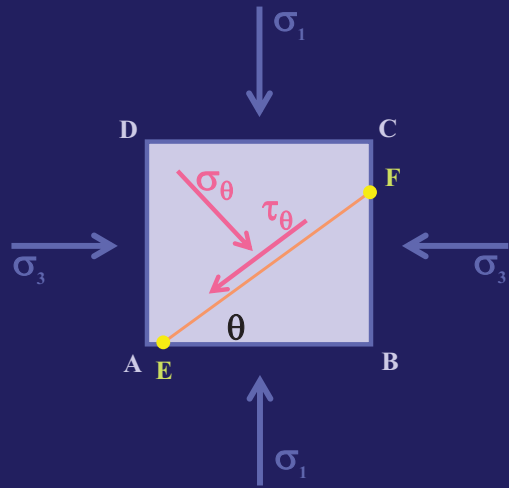
นำค่า ความเค้นบนระนาบ AD และ AB มาพล็อตได้จุด R และ M ตามลำดับ



วาดวงกลมให้ผ่าน 2 จุดนี้ และให้จุดศูนย์กลางของวงกลมอยู่ที่ แกน x วงกลมนี้ คือ Mohr circle

ลากเส้นจากจุด R และ M ไปยัง จุดศูนย์กลางของวงกลม

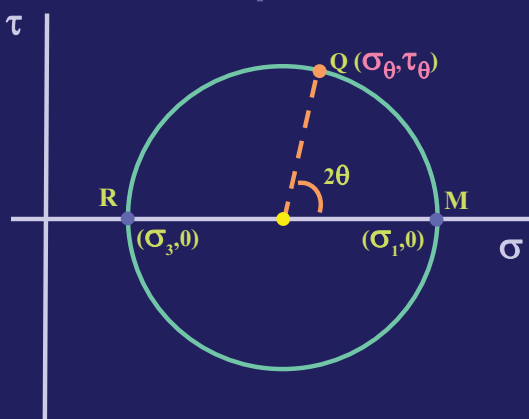
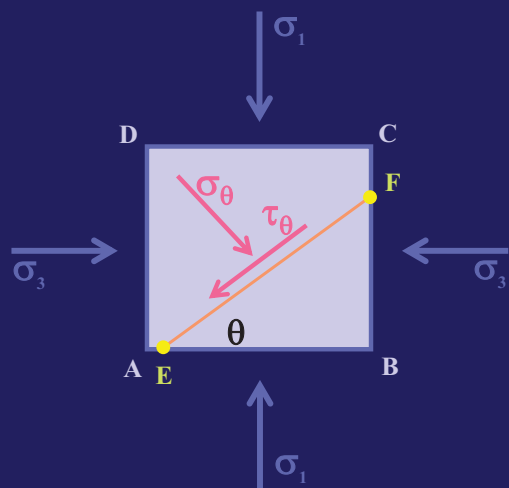
จากจุด M วัดมุมที่จุดศูนย์กลาง เท่ากับ 2θ ทวนเข็มนาฬิกา แล้วลากเส้นตรงไปตัดวงกลมที่จุด Q พิกัดที่จุด Q คือ ค่าความเค้นบนระนาบ EF ($\sigma_\theta, \tau_\theta$)



ในบางครั้งการหาค่า Normal stress และ Shear stress บนระนาบ EF ที่ตั้งอยู่ใน Principal plane สามารถกระทำได้โดยใช้ Mohr circle ดังนี้

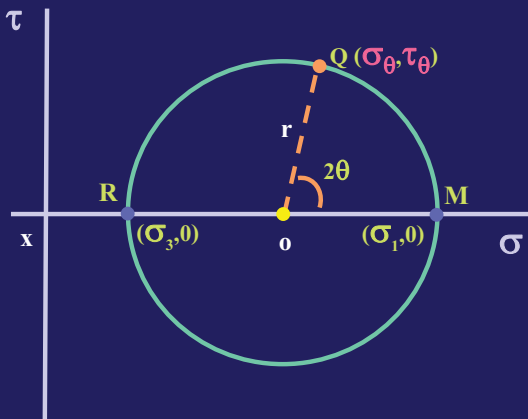
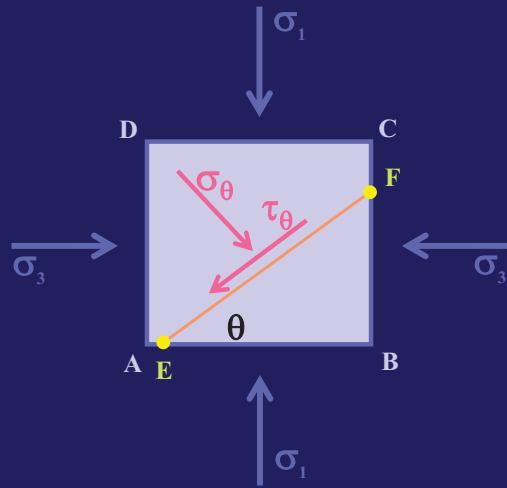
ตั้งแกน x และ y โดยให้แกน x เป็น Normal stress, σ และ แกน y เป็น Shear stress, τ

นำค่า ความเค้นบนระนาบ AD และ AB มาพล็อตได้จุด R และ M ตามลำดับ



วาดวงกลมให้ผ่าน 2 จุดนี้ และให้จุดศูนย์กลางของวงกลมอยู่ที่แกน x วงกลมนี้ คือ Mohr circle

จากจุด M วัดมุมที่จุดศูนย์กลางเท่ากับ 2θ ทวนเข็มนาฬิกา แล้วลากเส้นตรงไปตัดวงกลมที่จุด Q พิกัดที่จุด Q คือ ค่าความเค้นบนระนาบ EF ($\sigma_\theta, \tau_\theta$)



จากรูป Mohr circle จะได้

$$ox = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$$

$$r = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$$

เมื่อ

ox = ระยะจาก x ถึงจุดศูนย์กลาง

r = รัศมีของวงกลมมอร์

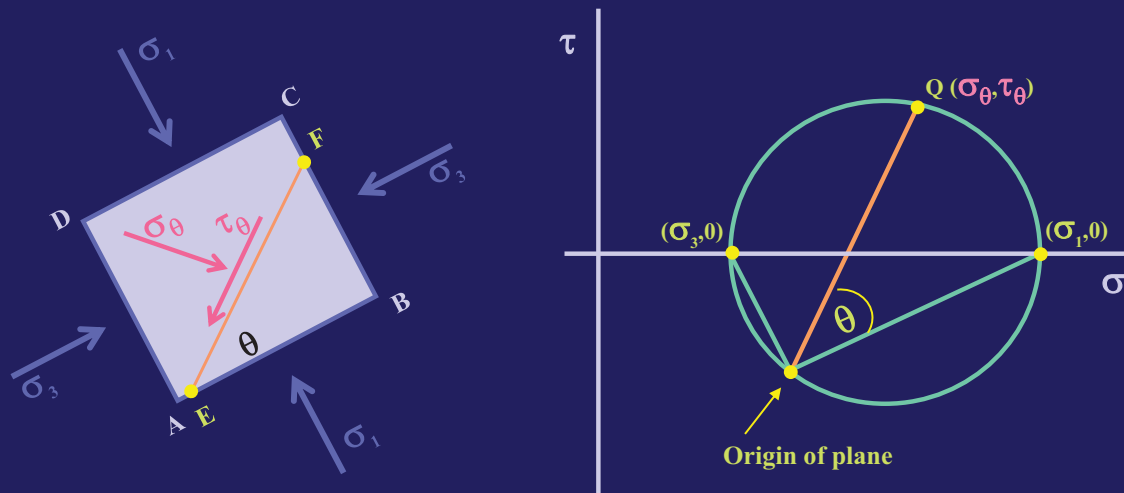
σ_1 = Major principal stress

σ_3 = Minor principal stress

จุดกำเนิดของระนาบ

ในการหาค่าความเค้นในระนาบใดๆ จะเป็นการง่ายถ้าหาก
จะหา จุดกำเนิดของระนาบ (Origin of plane, The pole)

จุดกำเนิดของระนาบ คือ จุดหนึ่งบนวงกลมมอร์ ซึ่งเมื่อลากเส้นตรงจากจุดนี้ ไปยังอีกจุดหนึ่งบนวงกลมมอร์ ค่าพิกัดที่จุดนั้นจะเป็นค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนระนาบที่ขนานกับเส้นนั้น



ตัวอย่างที่ 4.5

ถ้าค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในระนาบของก้อนดินมีค่าดังตาราง
จงหาค่า Major principal stress และ Minor principal stress

| ระนาบ | σ , kN/m ² | τ , kN/m ² |
|-------|------------------------------|----------------------------|
| a | 800 | 235 |
| b | 125 | -100 |

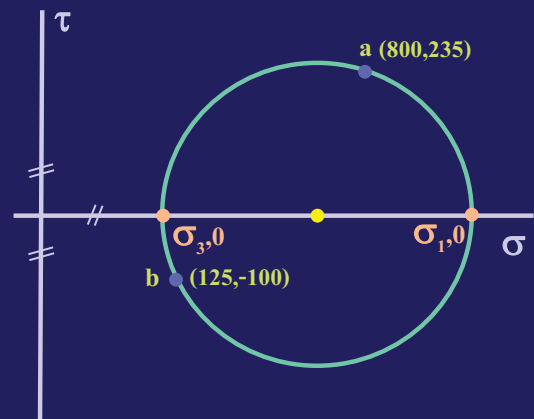
วิธีทำ

ตั้งแกน x และ y คือ σ และ τ

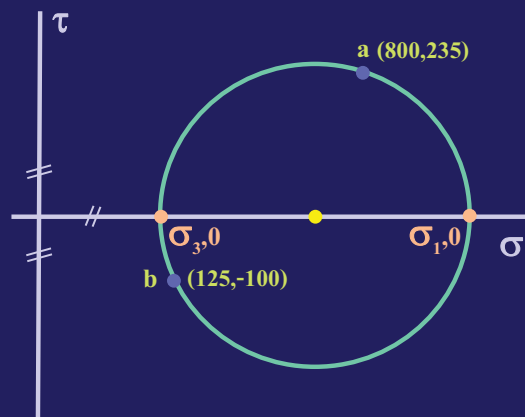
นำค่าความเค้นที่ระนาบ a และ b มาพล็อตลงในแกน

หาจุดศูนย์กลางของวงกลมที่ผ่าน 2 จุดนี้ โดยจุดศูนย์กลางจะต้องอยู่บนแกน x

วาดวงกลมมอร์ผ่าน 2 จุดนี้



อ่านค่า σ_1 และ σ_3 ที่วงกลมมอร์ ตัดกับแกน x



จากรูป จะได้

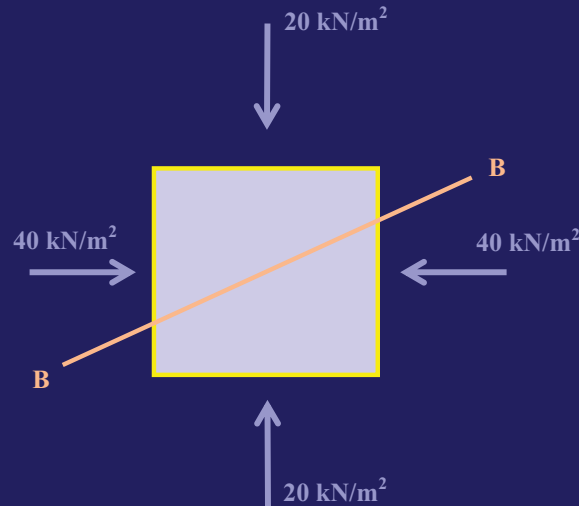
$$\sigma_1 = 870 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_3 = 105 \text{ kN/m}^2$$

Ans.

ตัวอย่างที่ 4.6

จากก้อนดินลูกบาศก์ ดังรูป จงหาค่าความเค้นในระนาบ B - B



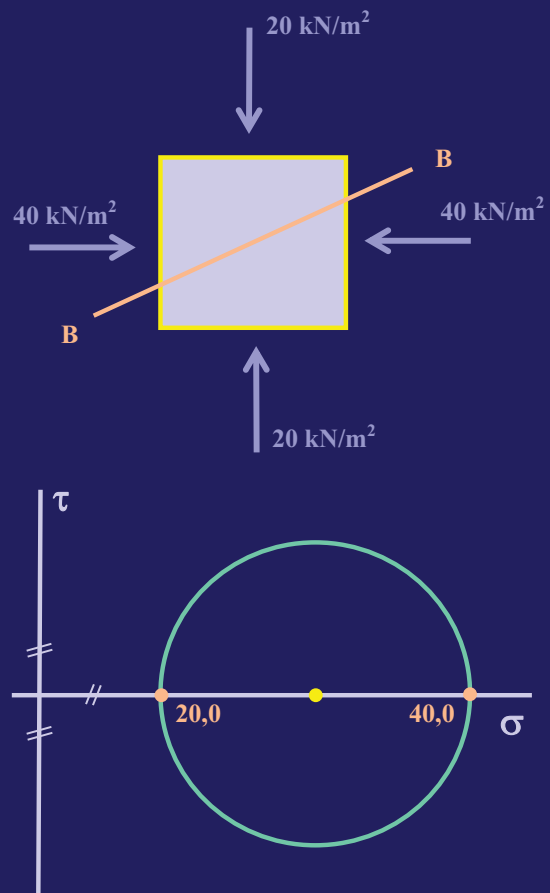
วิธีทำ

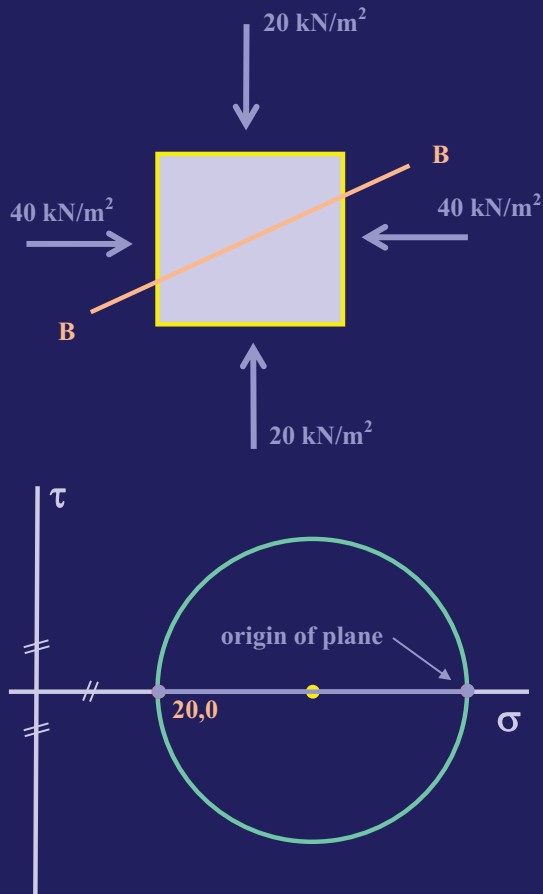
ตั้งแกน x และ y คือ σ และ τ

นำค่าความเค้นที่ระนาบทั้งสอง
คือ 40,0 และ 20,0 มาพล็อตลงใน
แกน

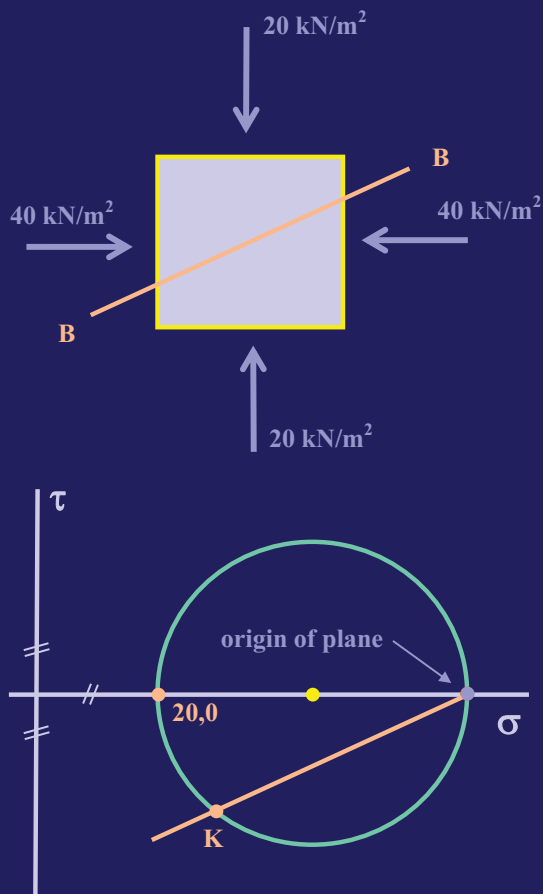
หาจุดศูนย์กลางของวงกลมที่ผ่าน
2 จุดนี้ โดยจุดศูนย์กลางจะต้อง
อยู่บนแกน x

วาดวงกลมมอร์ผ่าน 2 จุดนี้





หาจุดกำเนิดของระนาบ โดยการที่เราทราบว่าระนาบที่มีค่าความเค้นเท่ากับ 20,0 อยู่ในแนวอน (พิจารณาจากรูปลูกบาศก์ดิน) ดังนั้นจากวงกลมมอร์ ลากเส้นตรงจากพิกัด 20,0 ขนานกับระนาบแนวอน เส้นตรงนี้จะไปตัดวงกลมมอร์ที่จุดกำเนิดของระนาบ คือ จุด 40,0



จากจุด Origin of plane ลากเส้นขนานกับระนาบ B - B ไปตัดวงกลมมอร์ที่จุด K พิกัดที่จุด K คือค่าของความเค้นที่ระนาบ B - B

จากรูป จะได้

$$\sigma_{\theta} = 25 \text{ kN/m}^2$$

$$\tau_{\theta} = -8.7 \text{ kN/m}^2$$

Ans.

บทที่ 5

ความแข็งแรงของดิน

ความแข็งแรงของดินจะอยู่ในรูปของความต้านทานแรงเฉือน (Shear strength) เนื่องจากการวิบัติของดินจะเกิดจากแรงเฉือน แต่เนื่องจากหน่วยแรงเฉือน (Shear stress) ในดินมีค่าไม่คงที่ เนื่องจากหน่วยแรงเฉือนขึ้นอยู่กับหน่วยแรงกด (Normal stress) ดังนั้นการกล่าวถึงความแข็งแรงในดินจะกล่าวถึง

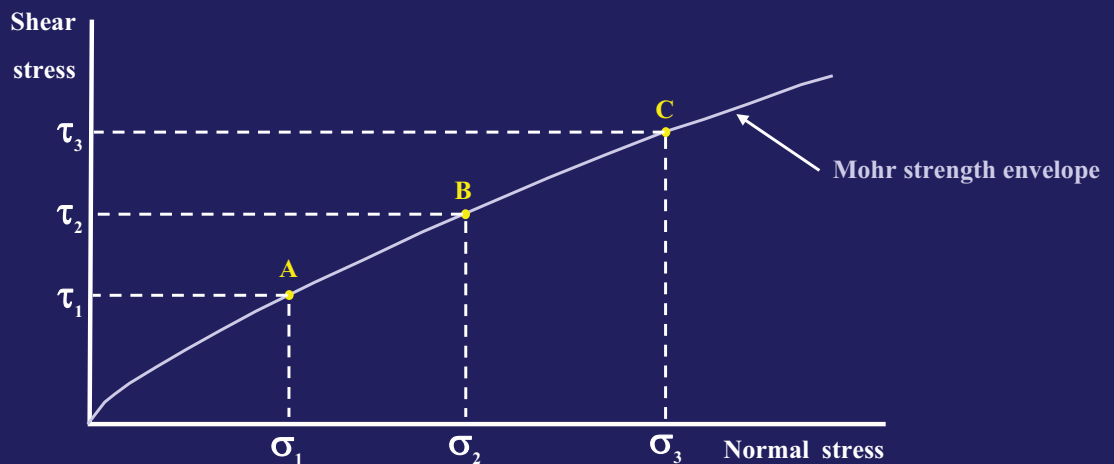
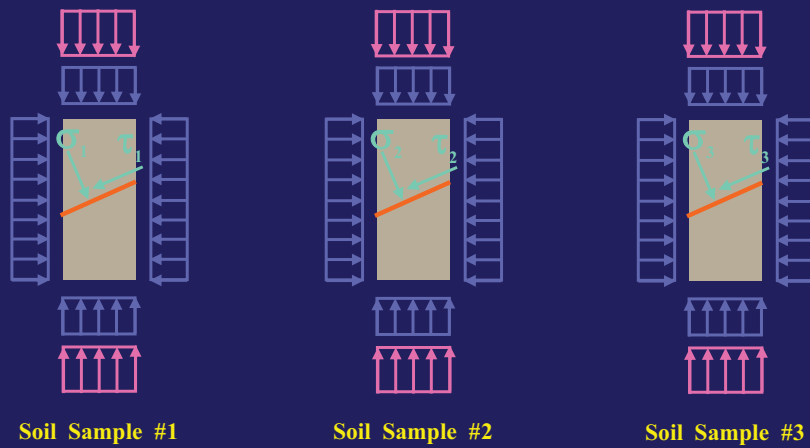
ตัวประกอบของแรงเฉือน (Shear strength parameter)

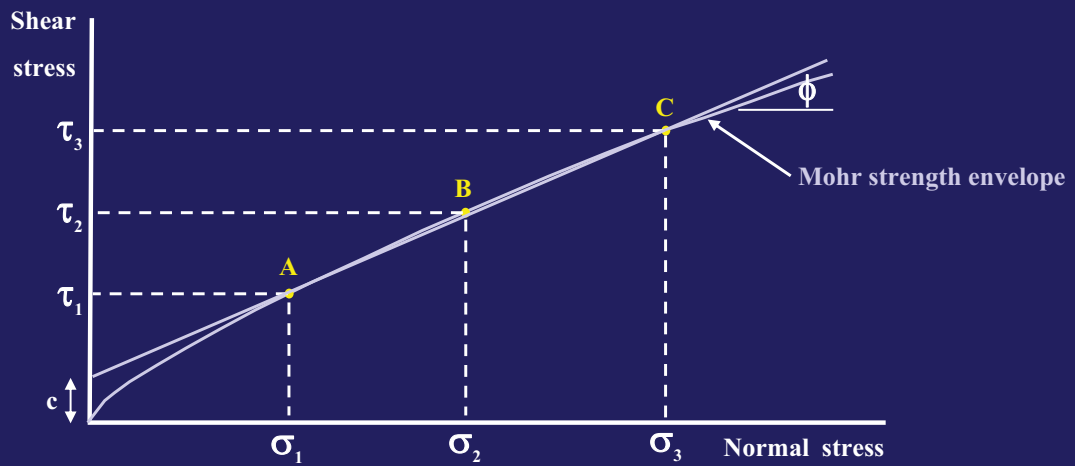
หากนำตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำรูปทรงกระบอกมาให้
ได้รับความดันอันหนึ่งคงที่ไว้ น้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน
จะเกิดความดันและจะพยายามไหลหนี หลังจากน้ำไหลหนี
จนหยุดแล้ว เพิ่มความเค้นในแนวตั้งจนกระทั่งตัวอย่างดินนี้
วิบัติในระนาบที่อ่อนแอที่สุด จากนั้นหาค่าความเค้นใน
ระนาบที่วิบัติ คือ Normal stress, σ และ Shear stress, τ
นำมาพล็อตลงในกราฟ Normal scale ให้ σ อยู่ในแกนนอน
และ τ อยู่ในแกนตั้ง จะได้ จุด A

จากนั้นนำตัวอย่างอันใหม่มาทดลองอีกอย่างน้อย 2
ตัวอย่าง โดยตัวอย่างเหล่านี้ต้องเป็นตัวอย่างที่เหมือนเดิม
การทดลองครั้งใหม่นี้จะใช้ความดันที่ให้กับดินมากกว่าเดิม
เมื่อดินวิบัติแล้วหาค่าความเค้นในระนาบที่วิบัติมาพล็อตลงใน
กราฟ จะได้จุด B, C ตามลำดับ

ลากเส้นผ่านจุด A, B, C จะได้เส้นเกือบตรง เส้นนี้เรียกว่าเส้น

Mohr strength envelope

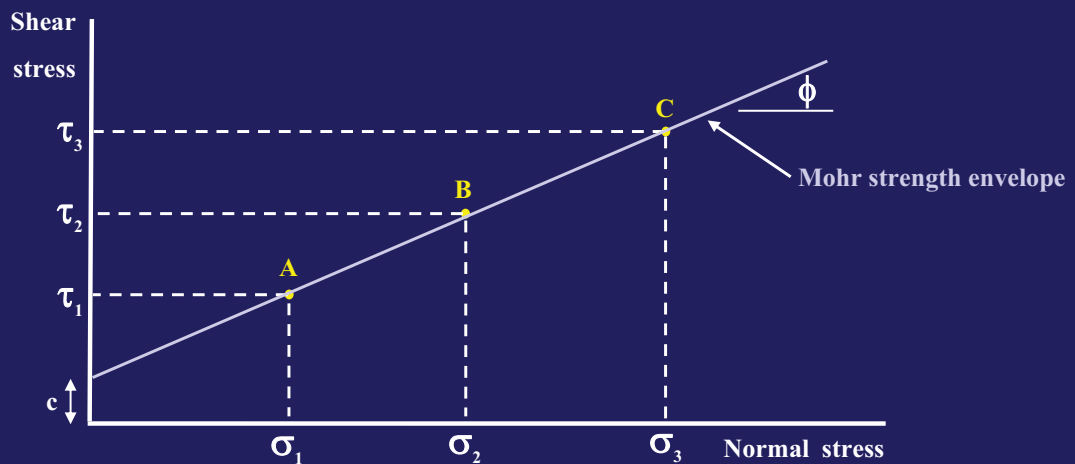




แต่ในการวิเคราะห์ จะถือว่าเส้นนี้เป็นเส้นตรง

โดยเอียงทำมุม ϕ และ ตัดแกน y ที่ c

ค่า c และมุม ϕ เรียกว่าค่า Shear strength parameters



Shear strength parameters

ค่า c เรียกว่า แรงยึดเหนี่ยว (Cohesion)

ค่ามุม ϕ เรียกว่า มุมเสียดทานภายใน (Angle of internal friction)

จากกราฟ Mohr สามารถสรุปเป็น Mohr strength theory ว่า การบีบอัดของดินไม่ได้เกิดขึ้นในระนาบที่มีค่าความเค้นเฉือนที่มากที่สุด แต่จะเกิดขึ้นในระนาบที่วิกฤติเนื่องจากผลของความเค้นในแนวตั้งฉากและความเค้นเฉือนรวมกัน

ตัวอย่างดิน

● Disturbed sample

คือ ตัวอย่างดินที่เก็บมาแล้วมีสภาพไม่เหมือนเดิม

● Undisturbed sample

คือ ตัวอย่างดินที่มีสภาพเหมือนกับในสนาม

Disturbed sample ใช้ทดสอบ

Specific gravity

Atterberg limits

Sieve analysis

Hydrometer analysis

Compaction test

etc.

Undisturbed sample ใช้ทดสอบ

Direct shear test

Triaxial compression test

Unconfined compression test

Consolidation test

การหาค่าความต้านทานแรงเฉือน

สามารถหาได้ทั้งในห้องปฏิบัติการ และในสนาม

การหาค่าความต้านทานแรงเฉือนในห้องปฏิบัติการ

ดินเป็นวัสดุธรรมชาติที่เกิดจากการทับถมของเม็ดดินเป็นเวลานาน ถ้าหากดินถูกกระทบกระเทือน โครงสร้างที่เคยเกาะกันอาจจะเกิดความเสียหาย ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความแข็งแรงของดิน ดังนั้นในการหาค่าความแข็งแรงของดินในห้องปฏิบัติการจะต้องใช้ตัวอย่างดินแบบ **Undisturbed sample**

การทดลองโดยวิธีแรงเฉือนตรง

Direct shear test จะใช้ตัวอย่างดินคงสภาพที่มีพื้นที่หน้าตัดค่อนข้างใหญ่ โดยทั่วไปจะใช้เป็นรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส ตัวอย่างดินจะถูกใส่ลงใน Shear box ซึ่ง Shear box นี้จะมี 2 ส่วน คือ Shear box ส่วนบน และ ล่าง

จากนั้น นำน้ำหนักมากดทับ(ความเค้นในแนวตั้ง) แล้วยึด Shear box ส่วนล่างให้คงที่ จากนั้นดัน Shear box ส่วนบนให้เลื่อนในแนวนอน วัดแรงสูงสุดที่ทำให้ตัวอย่างดินขาดจากกัน นำไปคำนวณหาความเค้นเฉือนสูงสุด

จากการทดลองกับตัวอย่างดิน 1 ชิ้น จะได้

ค่าความเค้นในแนวตั้ง (Normal stress)

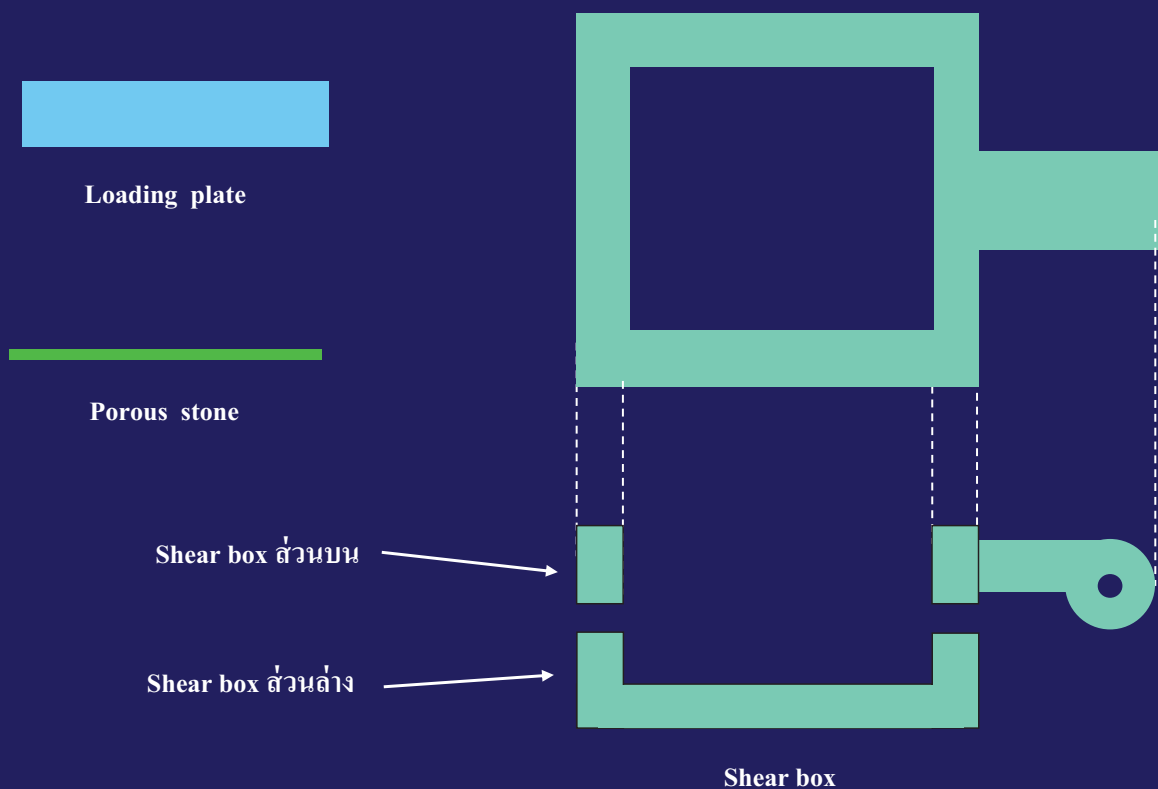
และ

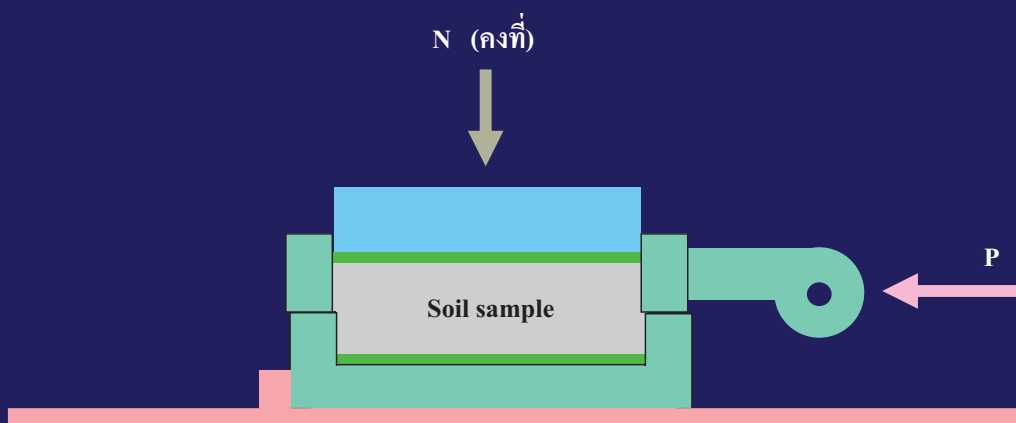
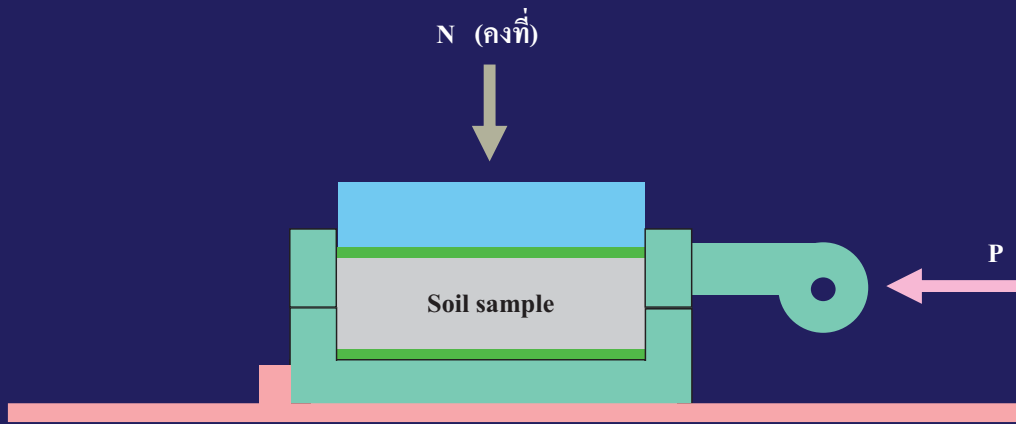
ความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum shear stress)

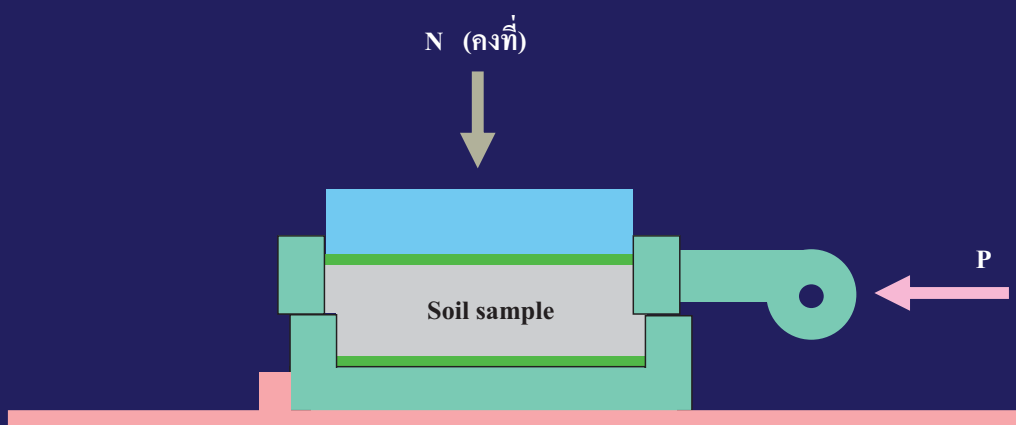
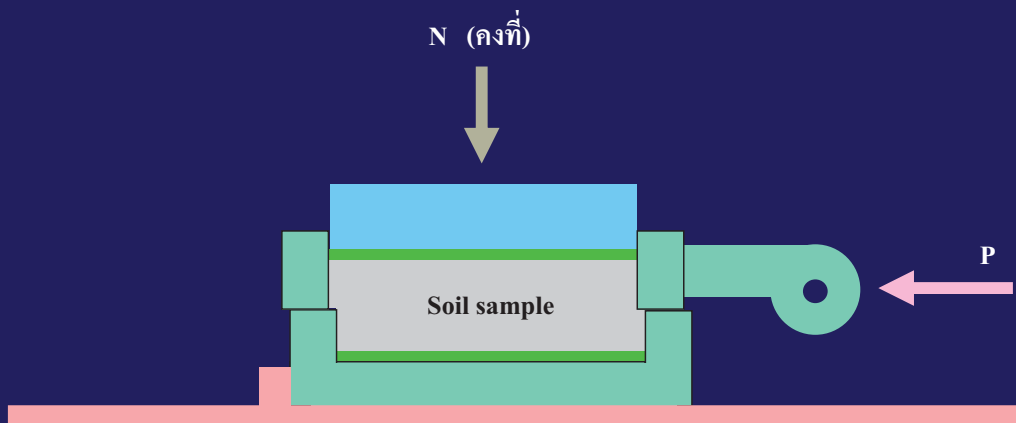
(ความเค้นเฉือนสูงสุด = ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นบนระนาบที่ดินวิบัติ)

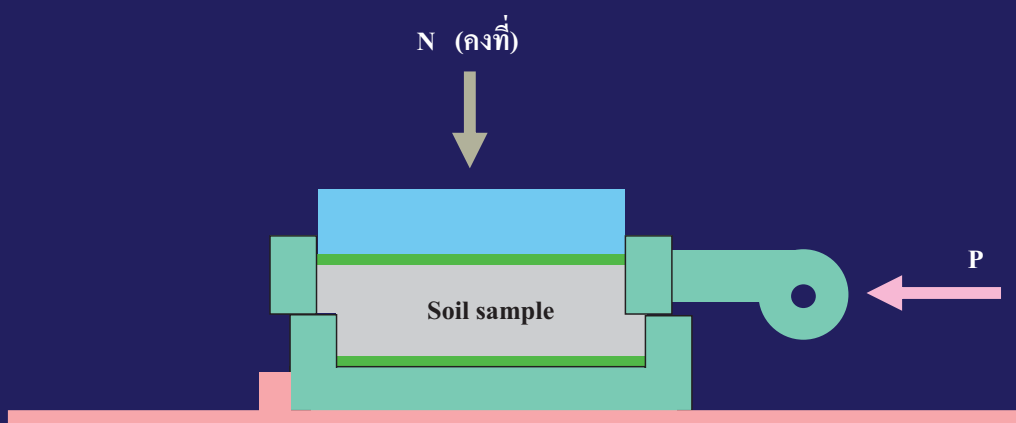
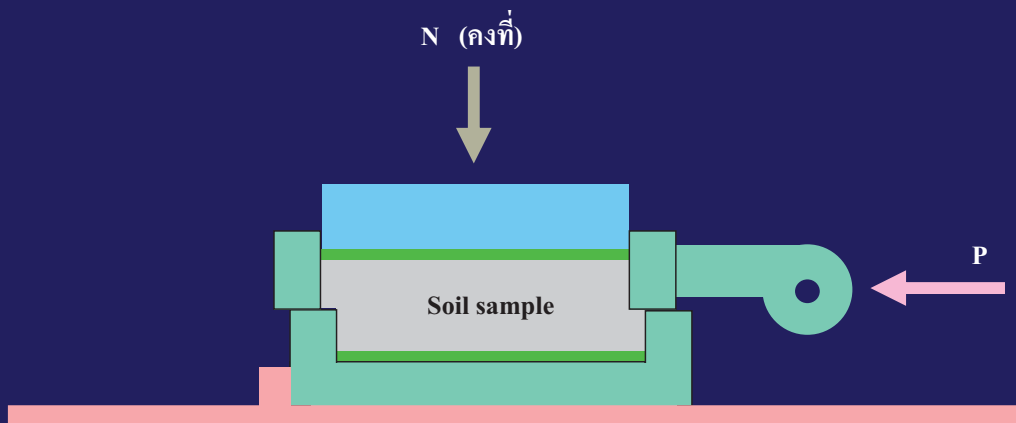
ทำการทดลองกับตัวอย่างดินชนิดเดียวกันอย่างน้อย 3 ชั้น จะทำให้ได้ข้อมูลอย่างน้อย 3 ชุด แล้วนำมาพล็อตลงในกราฟระหว่าง Normal stress กับ Shear stress ดากเส้นผ่านจุด จะได้ Strength envelope และจะสามารถหาค่า Strength parameter ได้ในที่สุด

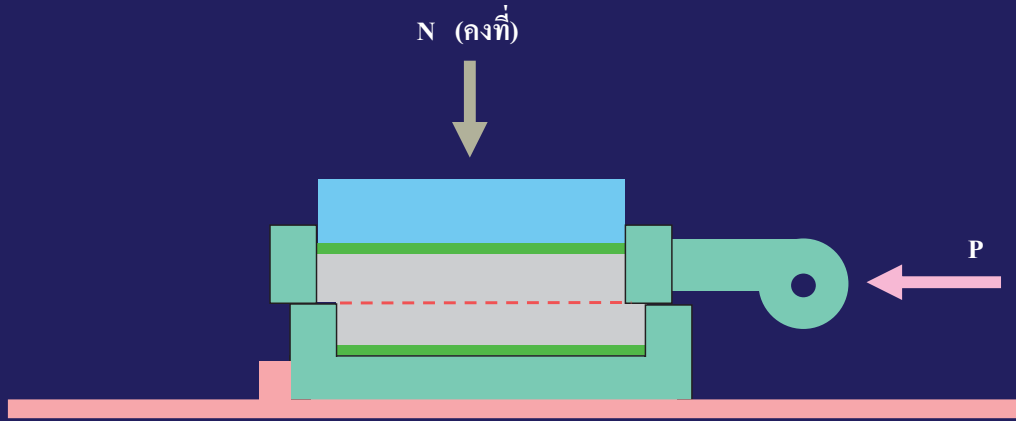
อุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง







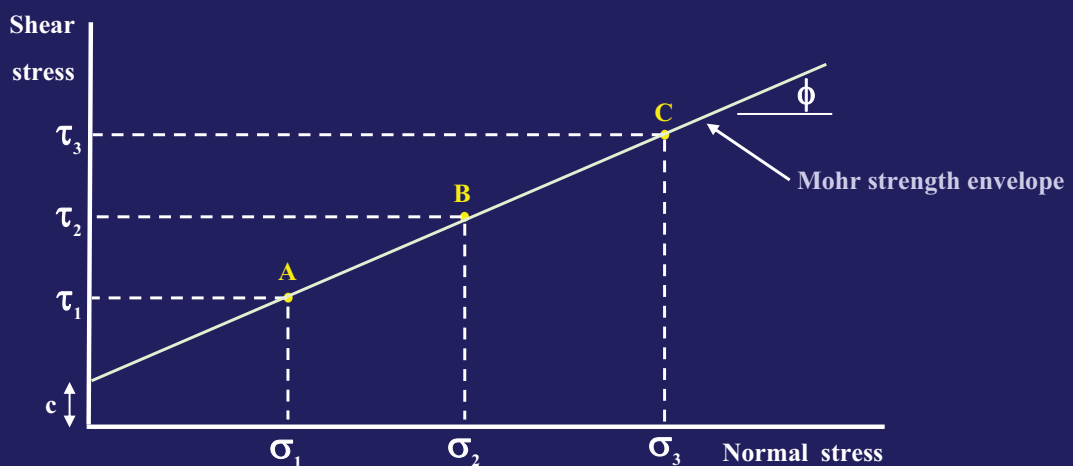




จากรูปจะเห็นว่า ตัวอย่างดินถูกบังคับให้เฉือนไปตามแนวอน (เส้นประสีแดง) ซึ่งค่า N และ P (สูงสุด) จะเป็นค่าแรงที่เกิดขึ้นบนระนาบที่ดินวิบัติ

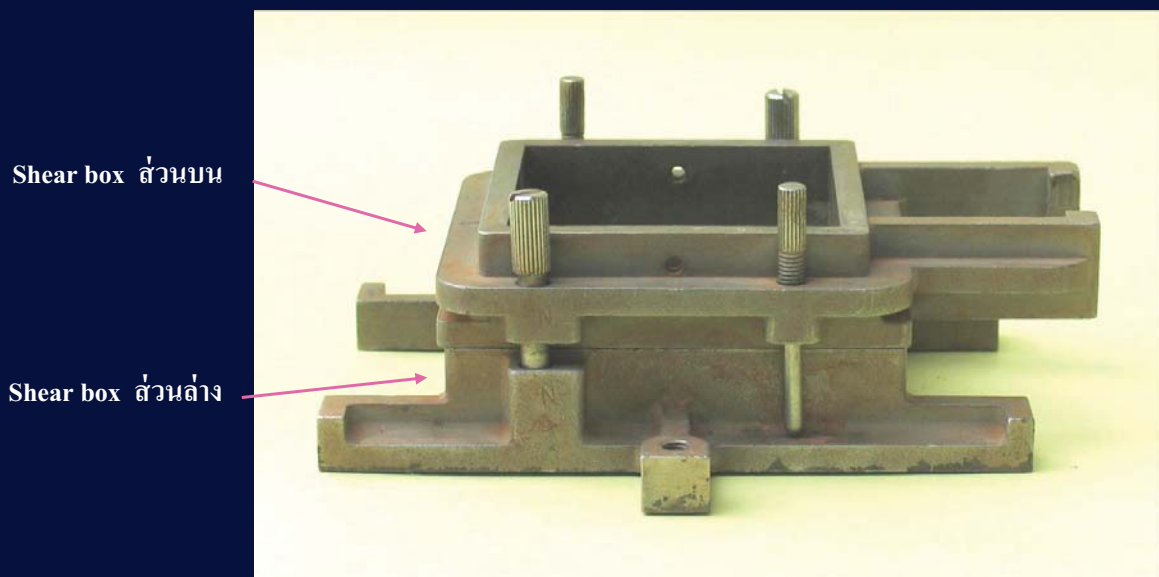
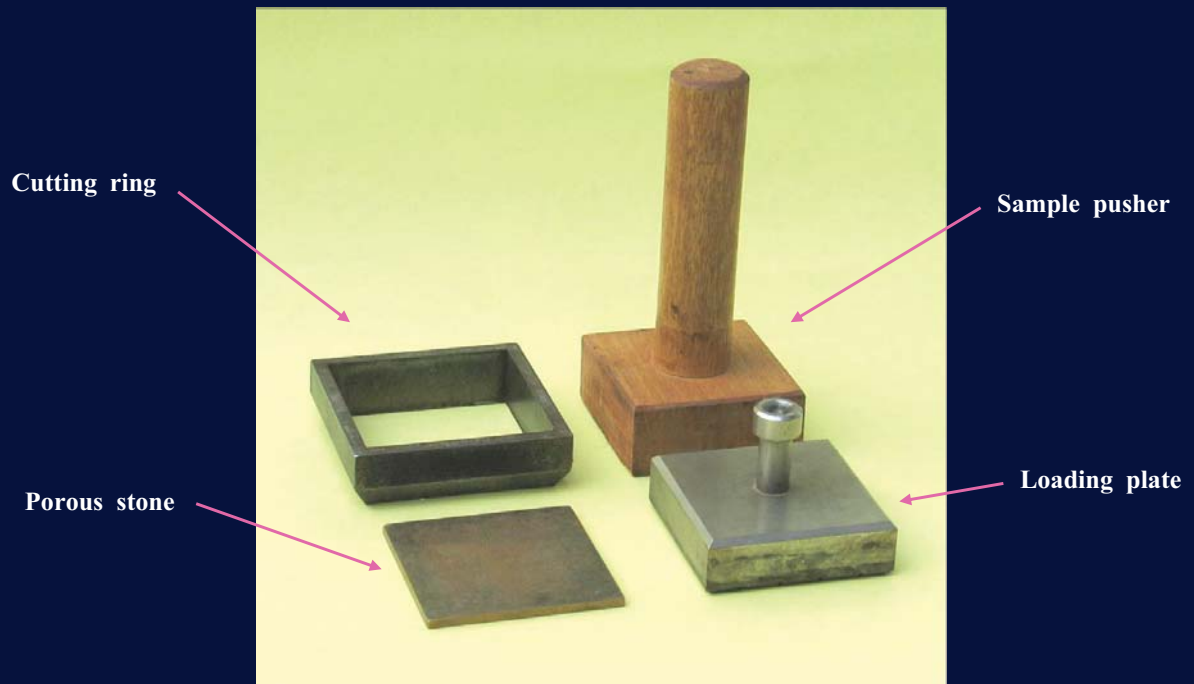
นำค่า N และ P (สูงสุด) มาหารด้วยพื้นที่หน้าตัด จะได้ค่า Normal stress, σ กับ Shear stress, τ ที่เกิดขึ้นบนระนาบที่ดินวิบัติ

นำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟ จะได้



A, B, C = ค่า Stress ของตัวอย่างดินชั้นที่ 1, 2 และ 3

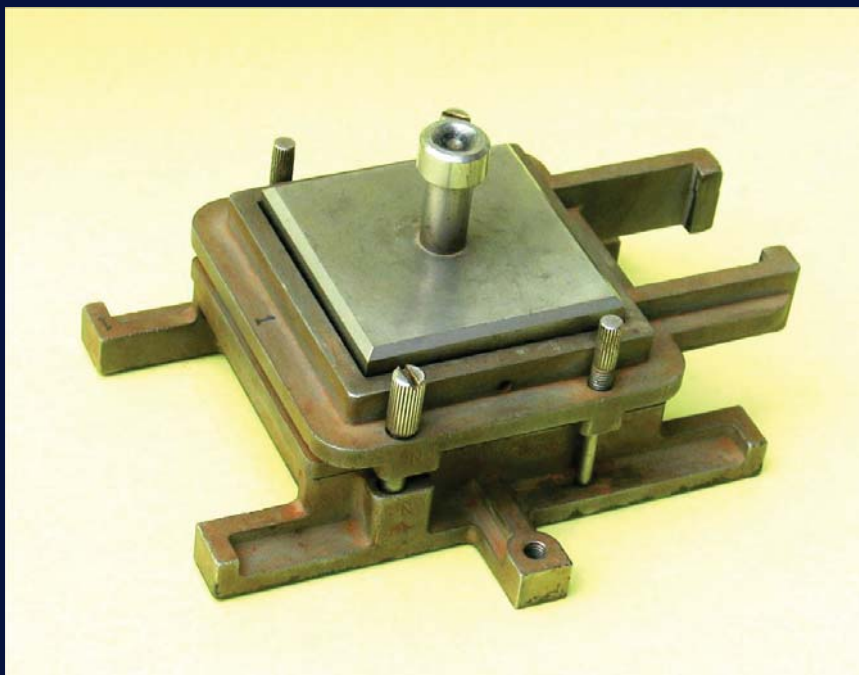
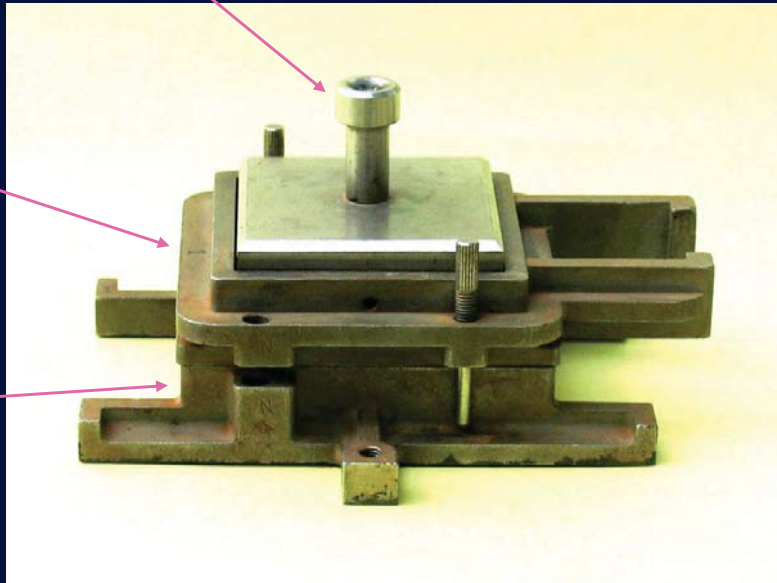
อุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง



Loading plate

Shear box ส่วนบน

Shear box ส่วนล่าง





แท่งตัวอย่างเมื่อการทดสอบเสร็จสิ้นแล้ว

การทดลอง Direct shear test มีข้อเสีย ดังนี้

- ▲ เป็นการบังคับให้ตัวอย่างดินวิบัติในระนาบแนวนอนเท่านั้น
- ▲ ไม่สามารถหาตัวประกอบอื่น ๆ ได้
- ▲ ต้องใช้ตัวอย่างที่มีพื้นที่หน้าตัดใหญ่

แต่การทดลอง Direct shear test ก็มีข้อดี ดังนี้

▲ ค่าที่ได้มีความน่าเชื่อถือพอสมควร

▲ ราคาถูก

▲ รวดเร็ว

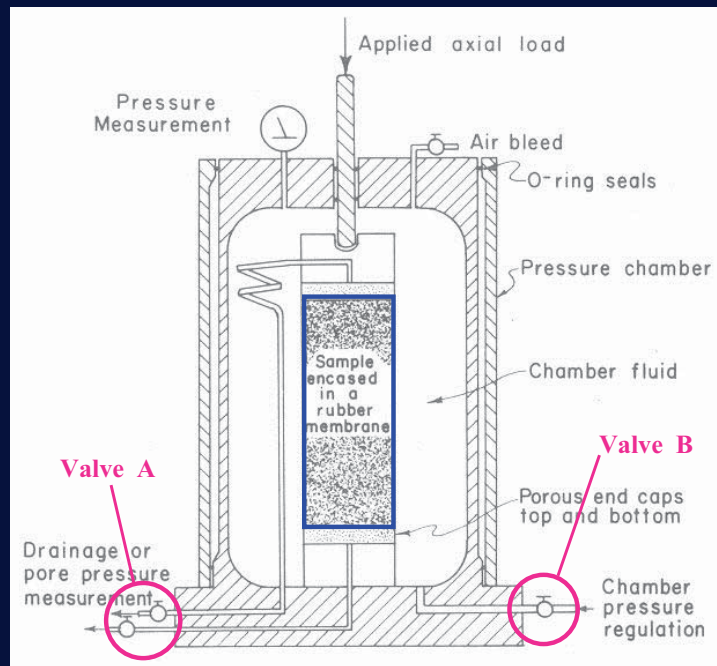
เนื่องจากการทดลองนี้เป็นการบังคับให้ดินวิบัติในระนาบ
แนวนอนเท่านั้น ซึ่งอาจไม่ใช่ระนาบที่อ่อนแอที่สุด ดังนั้น ค่า
Shear strength parameter ที่ได้ จึงมักจะมีค่าสูงกว่าความ
เป็นจริงเล็กน้อย

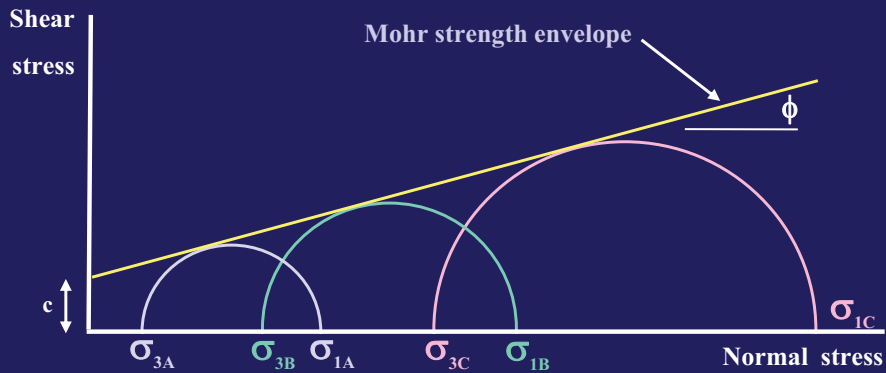
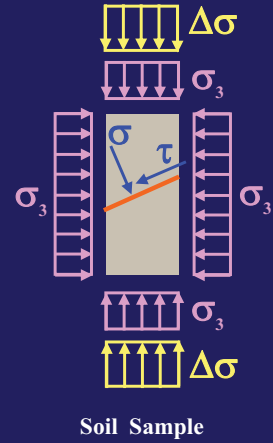
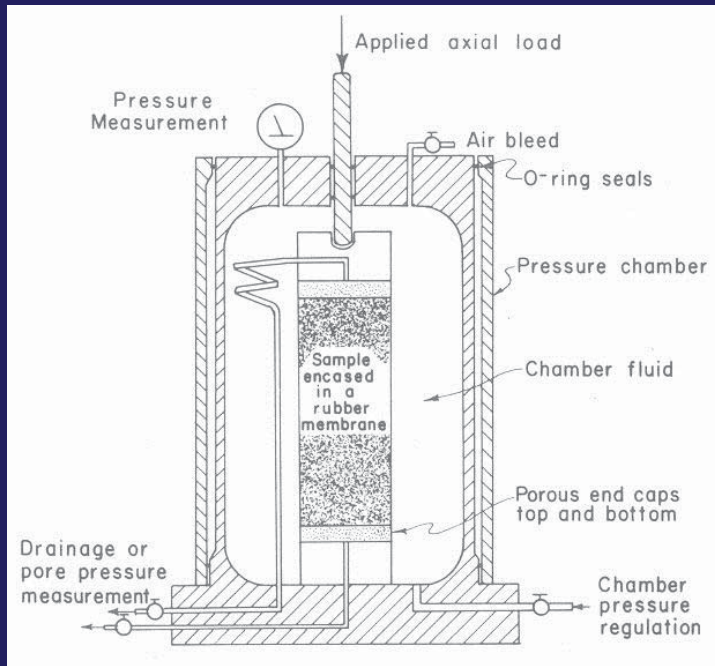
การทดลองโดยวิธีแรงอัดสามแกน

Triaxial compression test เป็นการทดลองที่เป็นมาตรฐานใน
การอ้างอิงถึงความแข็งแรงของดิน วิธีการทดลองสามารถแบ่งได้
เป็น 2 ขั้นตอน คือ

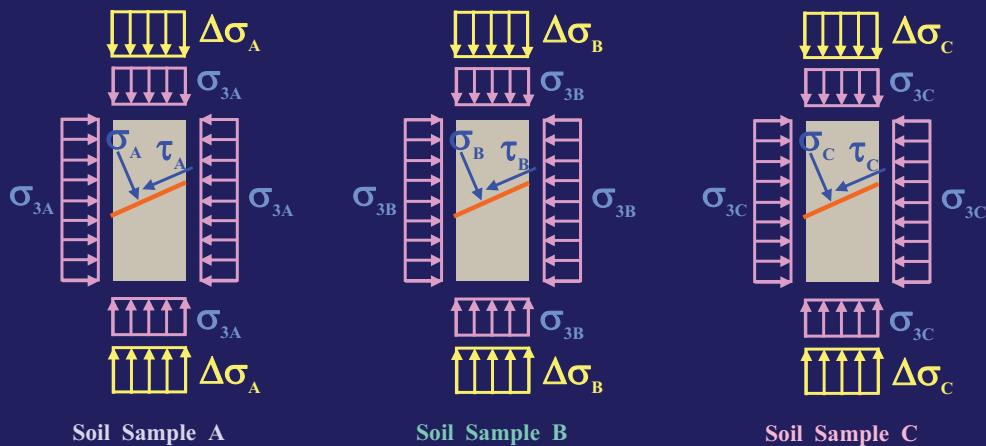
ขั้นตอนที่ 1 นำดินตัวอย่างคงสภาพมาอัดด้วยความดันรอบด้าน
คงที่อันหนึ่ง ซึ่งคือ *Minor principal stress, σ_3*

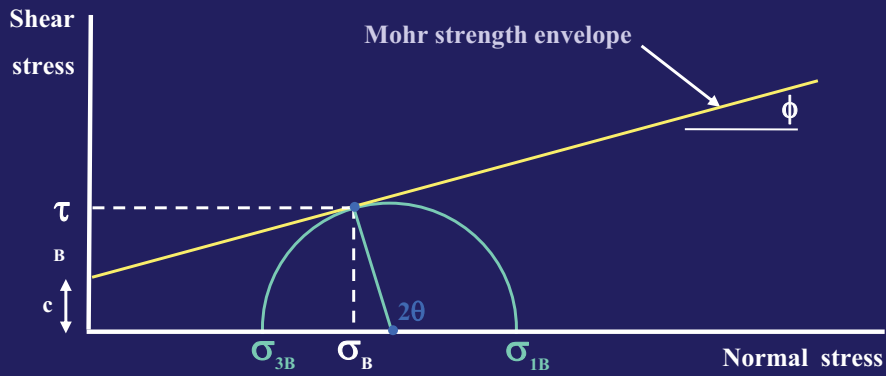
ขั้นตอนที่ 2 กดด้วยความดันอีกอันหนึ่งลงมา (Deviator stress,
 $\Delta\sigma$) จนกระทั่งตัวอย่างดินวิบัติ นำค่า σ_3 และ $\Delta\sigma$ ที่สูงสุดมา
รวมกัน จะได้ *Major principal stress, σ_1*



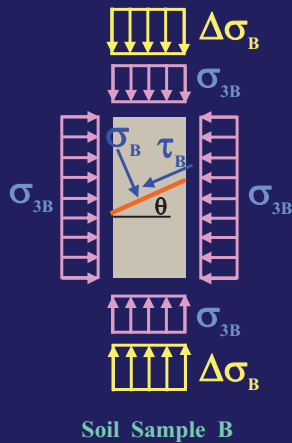


$$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma$$





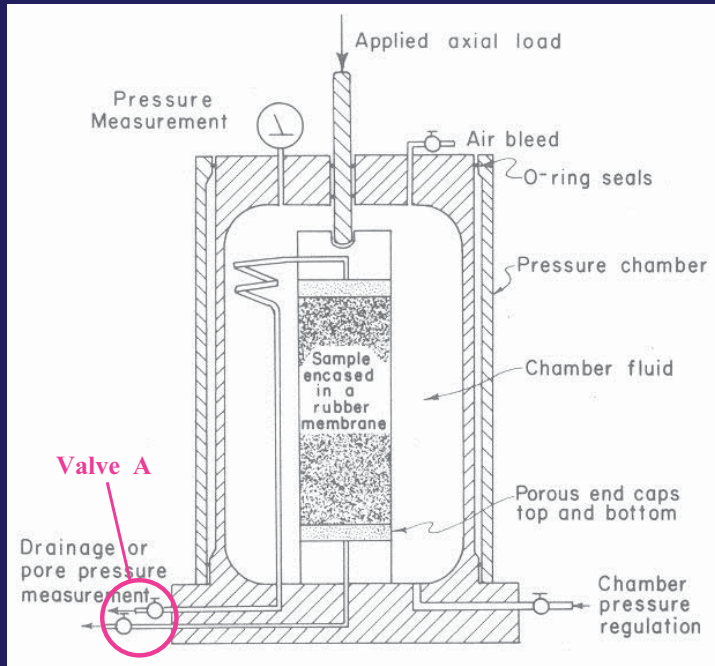
$$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma$$



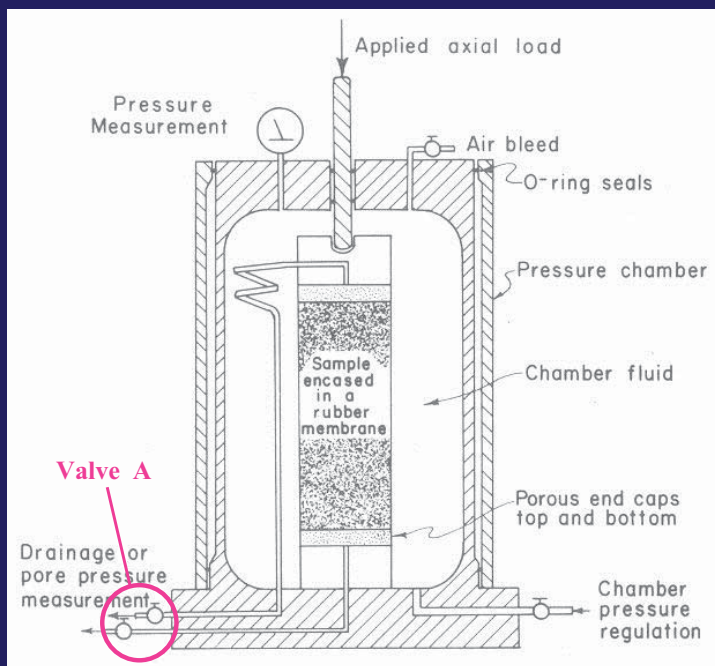
การทดลอง Triaxial compression test สามารถกระทำได้ 3 ลักษณะ คือ

- 🔴 Unconsolidated Undrained test, UU test
- 🔴 Consolidated Undrained test, CU test
- 🔴 Consolidated Drained test, CD test

Unconsolidated Undrained test, UU test

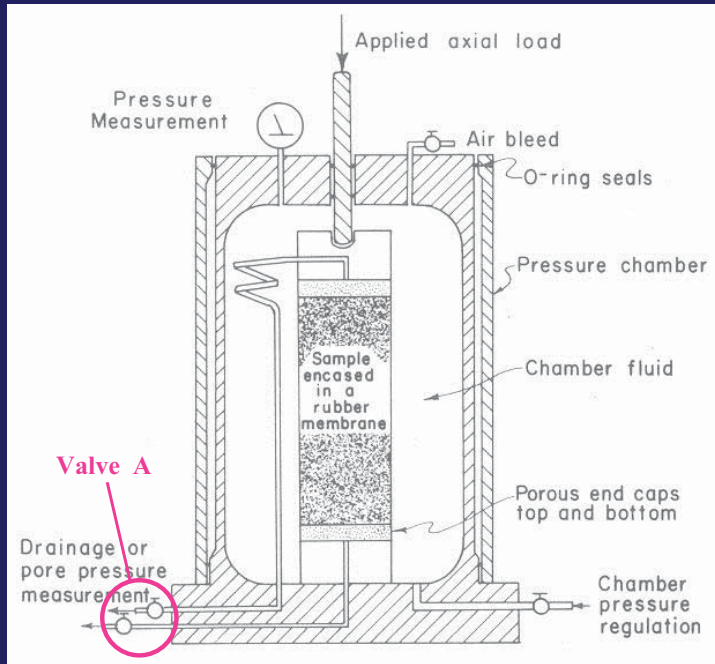


การทดลองลักษณะนี้ ในขั้นตอนที่ 1 และ 2 Valve A จะถูกปิดอยู่ตลอดเวลา เมื่อน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินเกิดความดันก็จะไม่สามารถไหลหนีออกไปได้

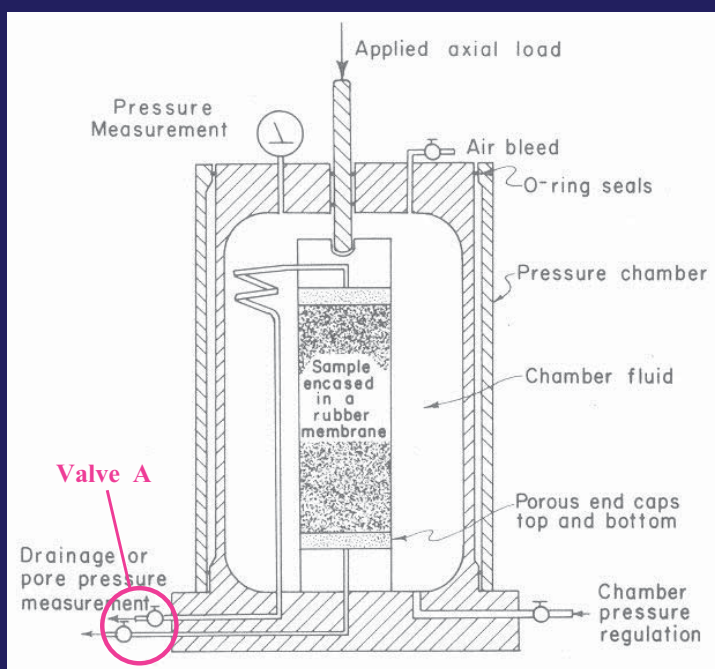


จากนั้น ในขั้นตอนที่ 2 ให้กด $\Delta\sigma$ ลงมาอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งตัวอย่างดินวิบัติ

Consolidated Undrained test, CU test

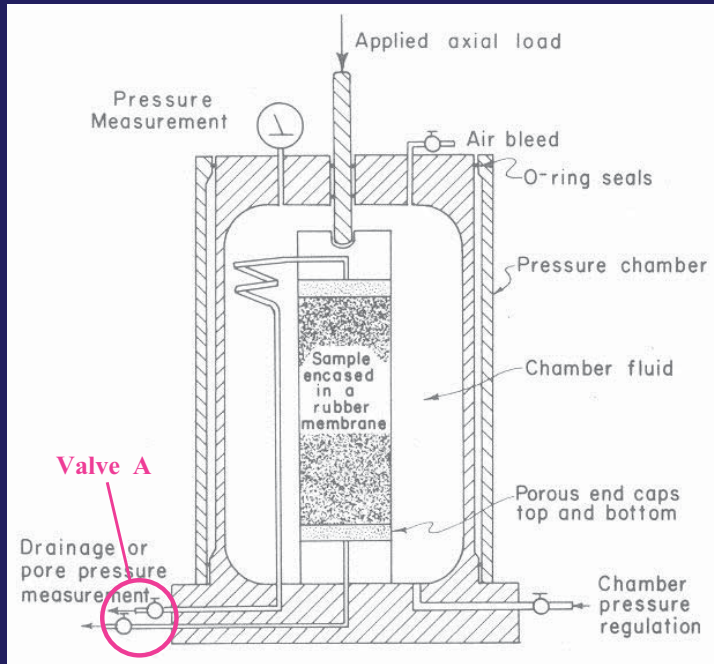


การทดลองลักษณะ
นี้ ในขั้นตอนที่ 1
Valve A จะถูกเปิด
อยู่ตลอดเวลา เมื่อน้ำ
ในช่องว่างระหว่างเม็ด
ดินเกิดความดันก็จะ
ไหลหนีออกไปจน
หยุด

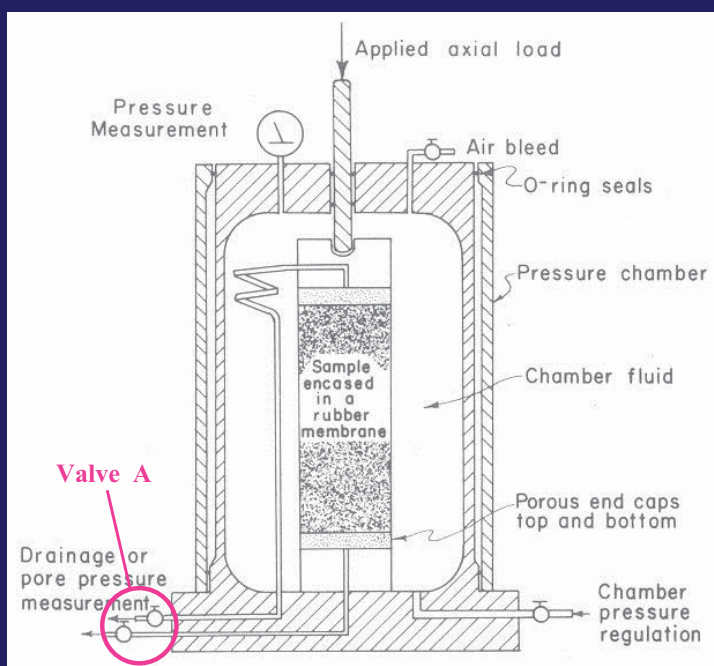


จากนั้น ในขั้นตอน
ที่ 2 ให้ปิด Valve A
แล้วกด $\Delta\sigma$ ลงมา
อย่างรวดเร็วจนดิน
วิบัติ

Consolidated Drained test, CD test



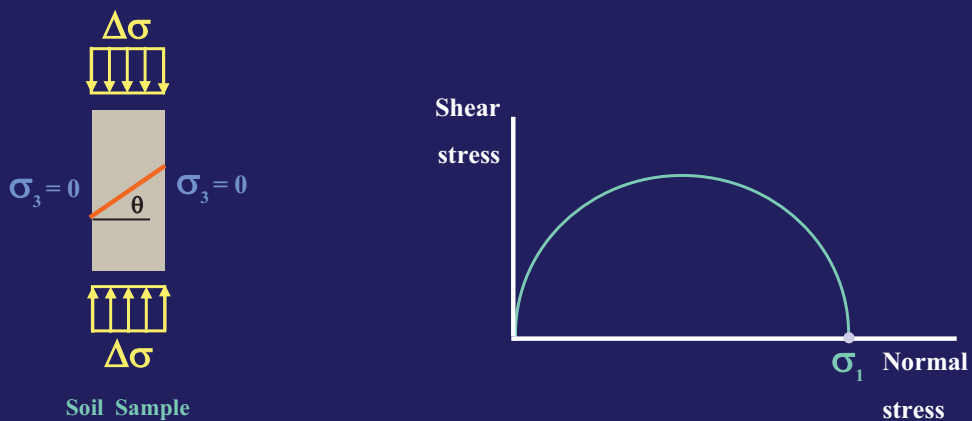
การทดลองลักษณะ
นี้ ในขั้นตอนที่ 1 และ
2 Valve A จะถูกเปิด
อยู่ตลอดเวลา เมื่อน้ำ
ในช่องว่างระหว่างเม็ด
ดินเกิดความดันก็จะ
ไหลหนีออกไปจน
หยุด



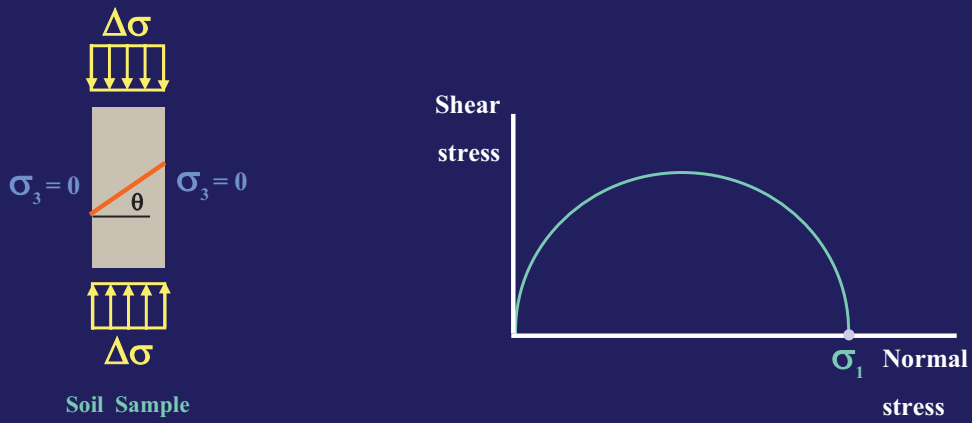
จากนั้น ในขั้นตอน
ที่ 2 ให้กด $\Delta\sigma$ ลงมา
อย่างช้า ๆ จนกระทั่ง
ตัวอย่างดินวิบัติ

การทดลองโดยวิธีแรงอัดแบบไม่มีขอบเขตจำกัด

การทดลอง Unconfined compression test คือ การทดลอง
Triaxial compression test แบบ UU test ที่ให้ $\sigma_3 = 0$



จาก $\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma$ ซึ่ง $\sigma_3 = 0$ ดังนั้น $\sigma_1 = \Delta\sigma$ วาด
วงกลมมอร์รี่ได้ดังรูป



ค่า σ_1 เรียกว่า ค่า *Unconfined compressive strength, q_u*

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความต้านทานแรงอัดแบบไม่มีขอบเขตจำกัดกับคุณสมบัติของดินเหนียว

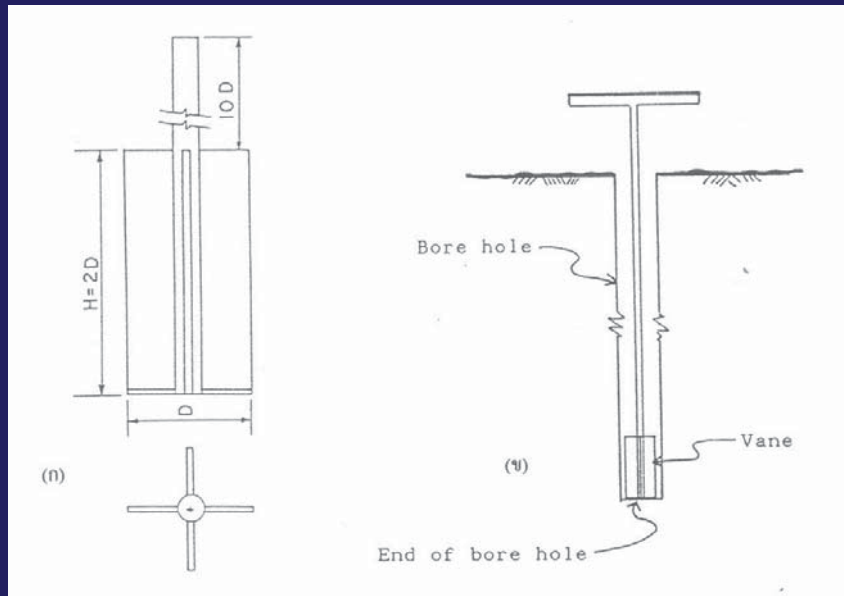
| ลักษณะของดินเหนียว | ค่าความต้านทานแรงอัดแบบไม่มีขอบเขตจำกัด (kN/m ²) |
|----------------------|--|
| อ่อนมาก (Very soft) | < 24 |
| อ่อน (Soft) | 24 - 48 |
| ปานกลาง (Medium) | 48 - 96 |
| แข็ง (Stiff) | 96 - 192 |
| แข็งมาก (Very stiff) | 192 - 388 |
| แข็งมากที่สุด (Hard) | > 388 |

การหาค่าความต้านทานแรงเฉือนในสนาม

ข้อดีของการทดลองในสนาม คือ ตัวอย่างดินที่ใช้ทดลอง เป็นตัวอย่างดินที่อยู่ในสภาพจริง แต่การทดลองในสนาม มักจะมาจากประสบการณ์ที่วิศวกรเคยทำมา แล้วนำมาเสนอ เป็นวิธีทดลอง ซึ่งค่าต่าง ๆ ที่ได้มาจึงมักจะต้องการปรับแก้ เสียก่อน

การทดลองหาแรงเฉือนโดยใช้ใบพัด

Vane shear test จะมีลักษณะอุปกรณ์เป็นรูปใบพัด (Vane) ซึ่งจะต่อเข้ากับก้านเจาะ หลังจากใช้สว่านเจาะดินไปถึงระดับที่ต้องการทดสอบแล้ว จึงนำใบพัดดังกล่าวที่ต่อกับก้านเจาะแล้ว หย่อนลงในหลุมเจาะ จากนั้นกดใบพัดให้จมลงในดินก้นหลุม แล้วบิดจนดินขาด วัดแรงบิดที่ใช้ แล้วนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานแรงเฉือน



$$S_u = T / [\pi \cdot D^2 \cdot ((H/2) + (D/6))]$$

เมื่อ

S_u = Undrained shear strength

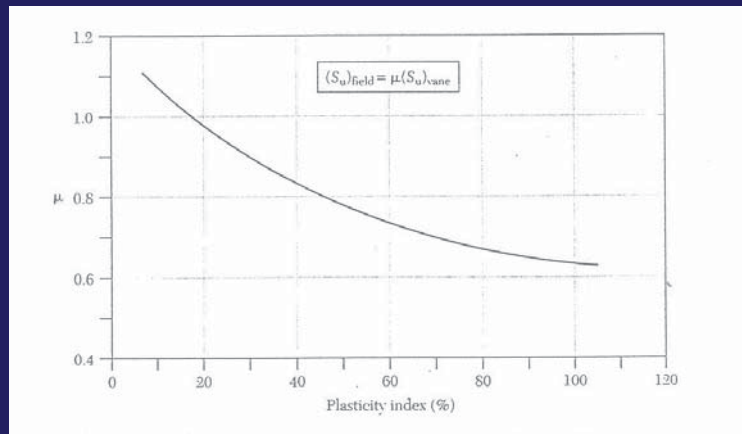
T = แรงบิดสูงสุด

H = ความสูงของใบพัด

D = ความกว้างของใบพัด = H/2

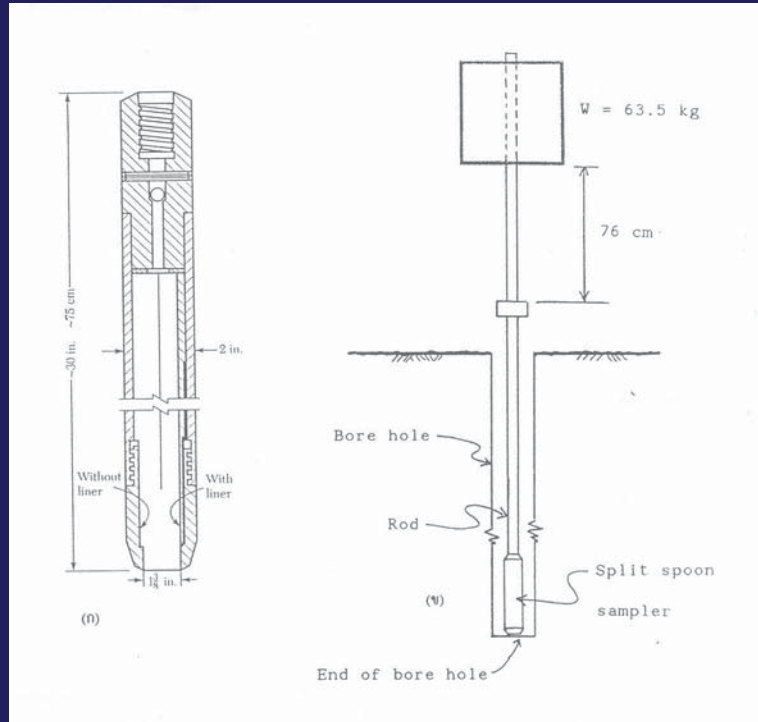
Bjerrum ได้เสนอค่าปรับแก้ค่า S_u ก่อนนำไปวิเคราะห์เกี่ยวกับเสถียรภาพของดิน

$$(S_u)_{\text{Design}} = \mu \cdot (S_u)_{\text{Vane}}$$



การทดสอบหาแรงเฉือนโดยใช้การทะลุทะลวง

Standard penetration test (SPT) คล้ายกับการทดสอบโดยวิธี Vane shear test แต่จะใช้ Split spoon sampler แทนใบพัดต่อเข้ากับก้านเจาะ หลังจากใช้สว่านเจาะดินไปถึงระดับที่ต้องการทดสอบแล้ว จึงนำ Split spoon sampler ดังกล่าวที่ต่อกับก้านเจาะแล้วหย่อนลงในหลุมเจาะ จากนั้นใช้น้ำหนัก 63.5 กิโลกรัม ยกสูง 76 เซนติเมตรกระแทกให้ Split spoon sampler จมลงในดินก้นหลุม 30 เซนติเมตร จำนวนครั้งในการตอกเรียกว่า ค่า Blow count, N



ค่า Blow count นี้ จะสามารถบอกค่าความแข็งแรงของ ดินอย่างคร่าว ๆ ได้จากตาราง

| ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของทราย | | ความแข็งแรงของดินเหนียว | |
|----------------------------|---------------------|-------------------------|---|
| จำนวนครั้งใน การตอก | ความหนาแน่นสัมพัทธ์ | จำนวนครั้งใน การตอก | ค่าความต้านแรงอัด แบบไม่มีขอบเขต จำกัด (kN/m ²) |
| 0 - 4 | หลวมมาก | < 2 | < 24 |
| 4 - 10 | หลวม | 2 - 4 | 24 - 48 |
| 10 - 30 | ปานกลาง | 4 - 8 | 48 - 96 |
| 30 - 50 | แน่น | 8 - 15 | 96 - 192 |
| > 50 | แน่นมาก | 15 - 30 | 192 - 388 |

พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดิน

เนื่องจากดินมีค่า E ไม่สูงมาก ดังนั้นเมื่อทำการทดลอง Triaxial compression test ตัวอย่างดินจะมีการเสียรูป ซึ่งจะทำให้พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดินเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยพื้นที่หน้าตัดใหม่สามารถหาได้จาก

$$A_c = A_0 [1 - \Delta V/V_0] / [1 - \Delta L/L_0]$$

$$A_c = A_0 [1 - \Delta V/V_0] / [1 - \Delta L/L_0]$$

เมื่อ

A_c = พื้นที่หน้าตัดใหม่ (Corrected area)

A_0 = พื้นที่หน้าตัดเดิม

ΔV = ปริมาตรของตัวอย่างดินที่เปลี่ยนแปลงไป

V_0 = ปริมาตรเดิมของตัวอย่างดิน

ΔL = ความสูงของตัวอย่างดินที่เปลี่ยนแปลงไป

L_0 = ความสูงเดิมของตัวอย่างดิน

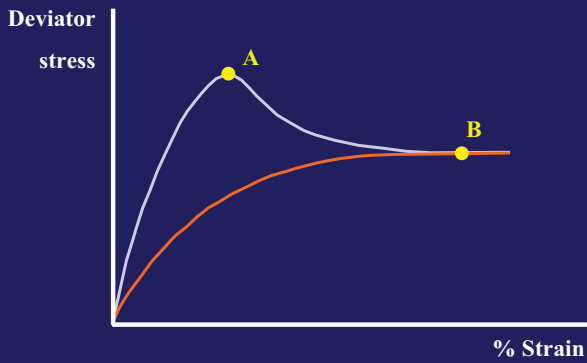
ในการทดลองบางแบบ เช่น UU test ปริมาตรของตัวอย่างดินจะคงที่ตลอดการทดลอง ดังนั้น $\Delta V = 0$ ทำให้สมการกลายเป็น

$$A_c = A_0 / [1 - \Delta L / L_0]$$

ความต้านทานแรงเฉือนของดินเม็ดหยาบ

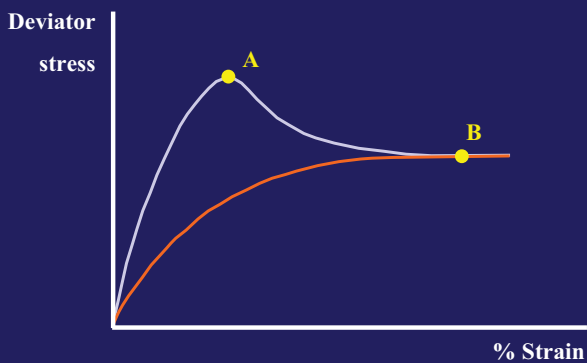
หากนำดินเม็ดหยาบมาทดลองแบบ CD test โดยแบ่งดินนี้เป็น 2 ตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างแรกทำให้ดินอยู่ในสภาพแน่น (Dense condition) และอีกตัวอย่างทำให้อยู่ในสภาพหลวม (Loose condition)

นำผลการทดลองของดินทั้ง 2 ตัวอย่าง (ซึ่งเป็นดินชนิดเดียวกัน) มาพล็อตกราฟระหว่าง Deviator stress กับ Percent strain และ Percent volume change กับ Percent strain ดังแสดงในรูป



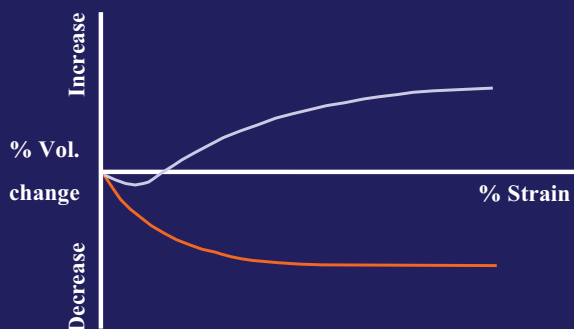
ถ้าให้เส้นสีฟ้าแทนตัวอย่างดิน
ในสภาพแน่น และเส้นสีแดงแทน
ตัวอย่างดินในสภาพหลวม

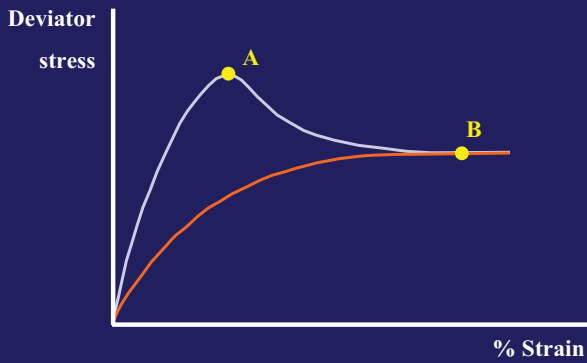
จะเห็นว่าดินในสภาพแน่นจะมี
จุดยอด (Peak point) คือจุด A ซึ่ง
เป็นจุดที่ดินวิบัติ ในขณะที่ดินใน
สภาพหลวมจะวิบัติที่จุด B ซึ่งจุด
B นี้จะเป็นจุดของค่า Ultimate
stress



ถ้าให้เส้นสีฟ้าแทนตัวอย่างดิน
ในสภาพแน่น และเส้นสีแดงแทน
ตัวอย่างดินในสภาพหลวม

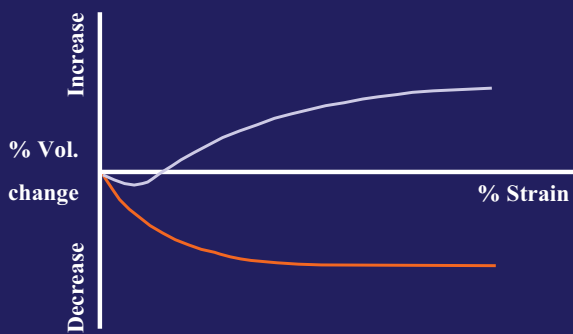
จากรูป จะเห็นว่าดินในสภาพ
แน่นจะมีการลดลงของปริมาตรใน
ขณะที่เริ่มกด Deviator stress แต่
หลังจากนั้นปริมาตรของดินกลับ
เพิ่มขึ้น ซึ่งเรียกว่า Dilatancy
ในขณะที่ดินในสภาพหลวมจะมี
การลดลงของปริมาตรตลอดการ
ทดลอง





ถ้าให้เส้นสีฟ้าแทนตัวอย่างดิน
ในสภาพแน่น และเส้นสีแดงแทน
ตัวอย่างดินในสภาพหลวม

สาเหตุที่ทำให้ดินเกิด
Dilatancy เนื่องจากดินอยู่ใน
สภาพที่แน่นอยู่แล้วเมื่อได้รับแรง
กระทำเม็ดดินก็จะพยายาม
เคลื่อนที่ แต่เนื่องจากไม่มีที่ว่างจึง
ทำให้เม็ดดินดันกันจนทำให้เกิด
การขยายปริมาตร

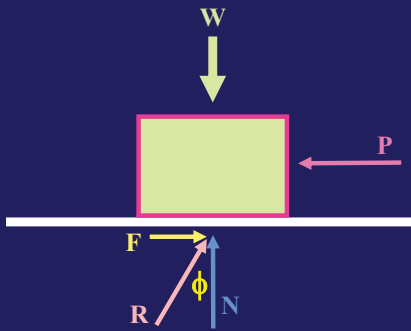


จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าความต้านทานแรงเฉือน
ของดินเม็ดหยาบ มีองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ

- ความต้านทานเนื่องจากความฝืด (Friction)
- ความต้านทานเนื่องจากการขัดกัน (Interlock)

ความต้านทานเนื่องจากความฝืด (Friction)

สามารถอธิบายได้จากรูป



เมื่อมีแรง P มากกระทำที่วัตถุ และถ้าพื้นมีความฝืดจะทำให้เกิดมีแรงเสียดทานเท่ากับ F และถ้า R เป็นแรงลัพธ์ของ F และ N

จากรูป จะได้ $F = N \tan \phi$ หรือ

วัตถุก้อนหนึ่งมีน้ำหนัก W เมื่อวางบนพื้นจะมีแรงปฏิกิริยาเท่ากับ N

$$S = \sigma \cdot \tan \phi$$

$$S = \sigma \cdot \tan \phi$$

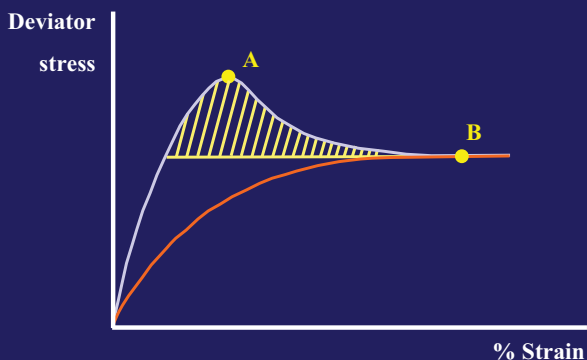
เมื่อ

S = ค่าความต้านทานแรงเฉือนเนื่องจากความฝืด

σ = ความเค้นในแนวตั้งฉาก

ϕ = มุมเสียดทานภายในที่สูงที่สุด

ความต้านทานเนื่องจากการขัดกัน (Interlock)



ถ้าให้เส้นสีฟ้าแทนตัวอย่างดิน
ในสภาพแน่น และเส้นสีแดงแทน
ตัวอย่างดินในสภาพหลวม

จากรูปแสดงให้เห็น
ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator
stress กับ % strain ของดินชนิด
เดียวกันแต่อยู่คนละสภาพ ซึ่ง
จากกราฟดินสภาพแน่นจะมี
Peak point (จุด A) ดังนั้นความ
ต้านทานแรงเฉือนเนื่องจากการ
ขัดกันของเม็ดดินก็คือบริเวณ
พื้นที่ระหว่างจุด A กับจุด B

ความต้านทานแรงเฉือนของดินเหนียว

การหาความต้านทานแรงเฉือนของดินเหนียวมักจะอ้างอิง
จากการทดลอง Triaxial compression test และเนื่องจาก
สภาพการระบายน้ำและประวัติการถูกอัดตัวของดินเหนียวมี
ผลต่อความต้านทานแรงเฉือน ดังนั้นจึงต้องแบ่งการวิเคราะห์
ดินเป็น 2 ชนิด คือ

★ ดินแบบ *Normally consolidated clay (NCC)*

★ ดินแบบ *Overconsolidated clay (OCC)*

ความต้านทานแรงเฉือนของดินเหนียว

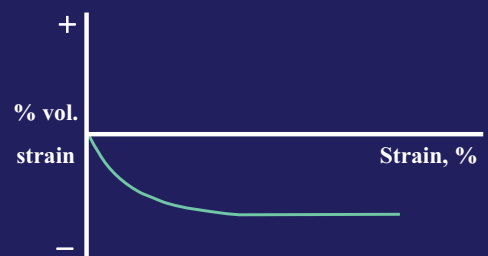
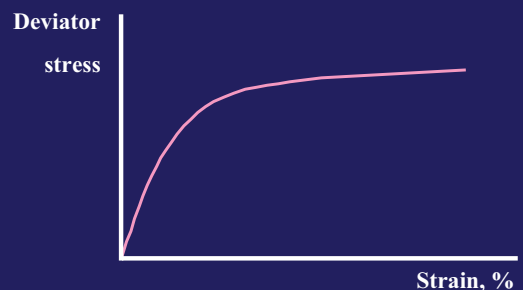
ดินแบบ *Normally consolidated clay (NCC)*

ดินแบบ NCC หมายถึงดินเหนียวที่มีความเค้นกดทับในอดีตเท่ากับในปัจจุบัน ซึ่งดินเหนียวชนิดนี้จะแสดงพฤติกรรมต่างๆ สอดคล้องกับทฤษฎีพื้นฐาน

ดินแบบ *Normally consolidated clay (NCC)*

การทดลองแบบ CD test

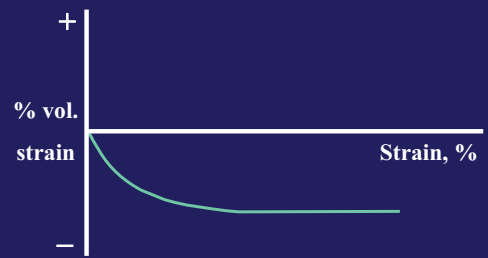
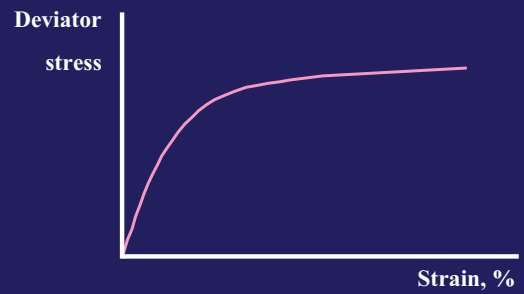
การทดลองวิธีนี้ นำในตัวอย่างดินจะถือว่าไม่มีความดันโพรง ($u = 0$) เนื่องจากในขณะที่กด Deviator stress อย่างช้าๆ นั้น วาล์ว A จะถูกเปิดอยู่ ทำให้น้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินค่อยๆ ไหลออกไป และจะทำให้ปริมาตรของตัวอย่างดินลดลง ดังแสดงในกราฟ



ดินแบบ *Normally consolidated clay (NCC)*

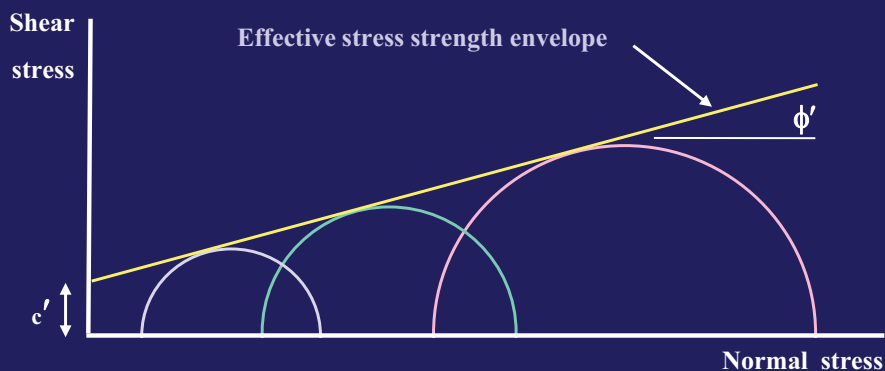
การทดลองแบบ CD test

ดังนั้นค่าความเค้นทั้งหมด (σ_1 และ σ_3) จะอยู่ในรูปของความเค้นประสิทธิผล (Effective stress) ซึ่งเมื่อทดลองกับตัวอย่างดินครบทั้ง 3 ตัวอย่างแล้ว นำค่าความเค้นมาวาดวงกลมมอร์ แล้วลากเส้นสัมผัสวงกลมทั้งสาม จะได้ Strength envelope อยู่ในรูปของความเค้นประสิทธิผล



ดินแบบ *Normally consolidated clay (NCC)*

การทดลองแบบ CD test

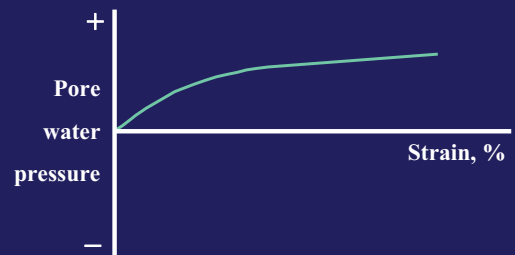
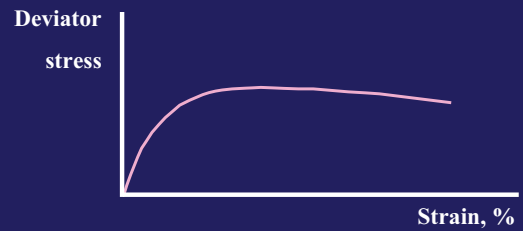


ดังนั้นค่า แรงยึดเหนี่ยว (Cohesion, c) และ มุมเสียดทานภายใน (Angle of internal friction, ϕ) จะอยู่ในรูปของความเค้นประสิทธิผล หรือ c' และ ϕ'

ดินแบบ *Normally consolidated clay (NCC)*

การทดลองแบบ CU test

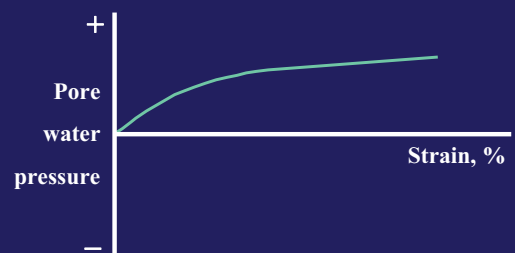
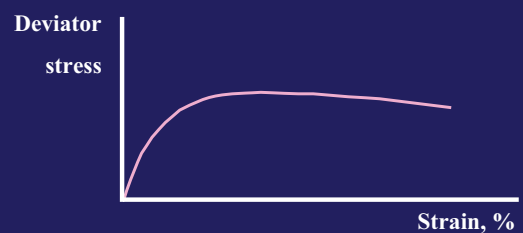
การทดลองวิธีนี้ นำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินจะถูกอัดตัวและปริมาตรของตัวอย่างดินจะคงที่เนื่องจากในขณะที่กด Deviator stress นั้น วาล์ว A ถูกปิดอยู่ ซึ่งจะให้น้ำในตัวอย่างดินเกิดความดันโพรงมากขึ้นเรื่อย ๆ (u เป็น +) ดังแสดงในรูปกราฟ



ดินแบบ *Normally consolidated clay (NCC)*

การทดลองแบบ CU test

เนื่องจากการวัดค่าความดันโพรง (u) ตลอดการทดลองจึงทำให้สามารถทราบค่าความดันโพรงในขณะที่ดินวิบัติ ดังนั้นในการวาดวงกลมมอร์จึงสามารถแสดงผลได้ทั้งในรูปของ Total stress และ effective stress



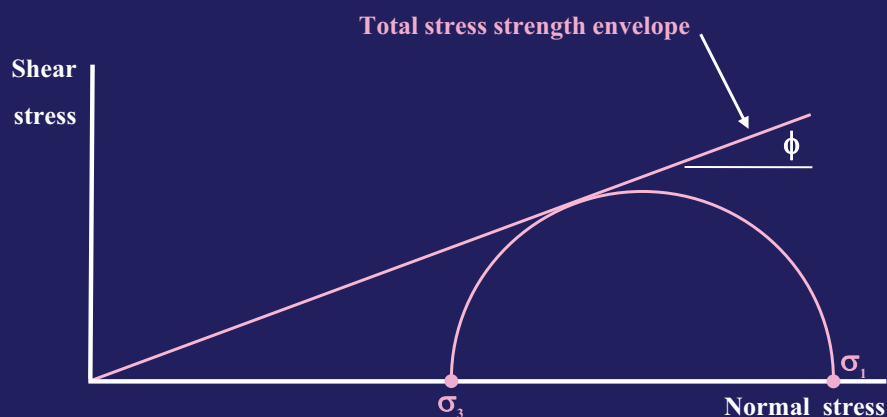
ดินแบบ *Normally consolidated clay (NCC)*

การทดลองแบบ CU test

เมื่อทำการทดลองเสร็จแล้ว จึงนำค่า σ_3 และ σ_1 ($\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma$) ที่ได้มาพล็อตลงในกราฟและวาดวงกลมมอร์ ซึ่งหากทดลองกับดิน 3 ตัวอย่างก็จะได้วงกลมมอร์ 3 วง และจะสามารถลากเส้น Strength envelope ได้ ซึ่งจะอยู่ในรูปของ Total stress strength envelope, c และ ϕ (ในรูปแสดงเพียงวงกลมมอร์วงเดียว)

ดินแบบ *Normally consolidated clay (NCC)*

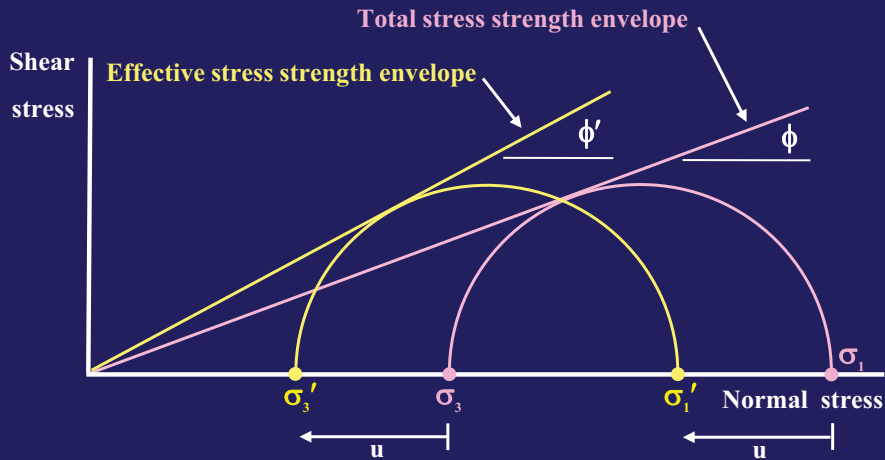
การทดลองแบบ CU test



เนื่องจากการทดลองแบบ CU จะมีการวัดค่าความดันโพรง จึงทำให้สามารถหาค่าความเค้นต่าง ๆ (σ_1 และ σ_3) ในรูปของ Effective stress ได้

ดินแบบ *Normally consolidated clay (NCC)*

การทดลองแบบ CU test

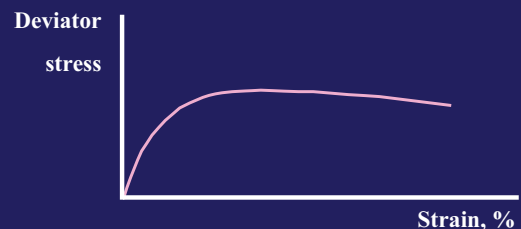


จากสมการ $\sigma' = \sigma - u$ จะได้ว่าถ้าค่า u เป็น + จะทำให้ค่า σ' น้อยกว่า σ ดังนั้นวงกลมมอร์จะขยับมาทางด้านซ้าย ดังแสดงด้วยวงกลมสีเหลือง และเมื่อลากเส้นสัมผัสจะได้เป็น Effective stress strength envelope, c' และ ϕ'

ดินแบบ *Normally consolidated clay (NCC)*

การทดลองแบบ UU test

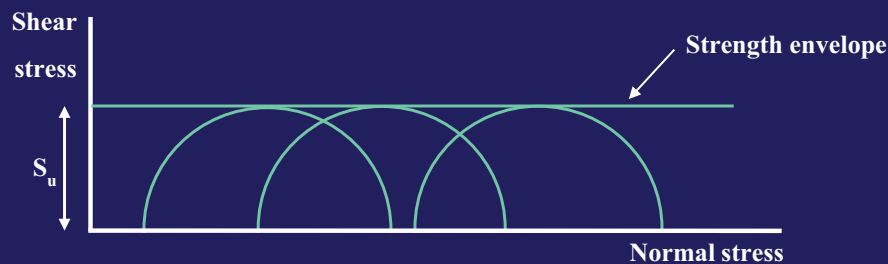
การทดลองวิธีนี้ จะกระทำอย่างรวดเร็ว น้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินจะถูกอัดตัวและปริมาตรของตัวอย่างดินจะคงที่ แต่จะไม่มีการวัดค่าความดันโพรง ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator stress กับ % Strain จะคล้ายกับการทดลองแบบ CU



ดินแบบ *Normally consolidated clay (NCC)*

การทดลองแบบ UU test

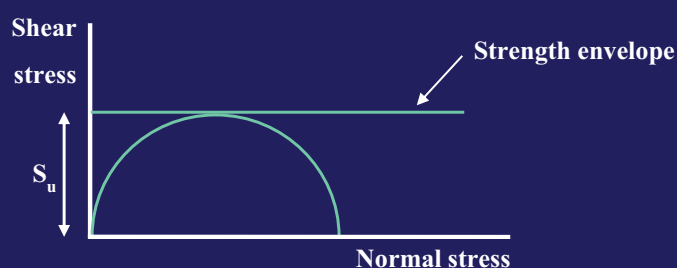
เมื่อนำผลการทดลองหลาย ๆ ตัวอย่างมาพล็อตวงกลมมอร์ จะพบว่าวงกลมมอร์มีขนาดเท่ากัน ดังนั้นเส้น **Strength envelope** จึงขนานกับแกน x และไปตัดแกน y ที่ค่าความต้านทานแรงเฉือนค่าหนึ่ง ซึ่งเรียกว่าค่า *Undrained shear strength, S_u*



ดินแบบ *Normally consolidated clay (NCC)*

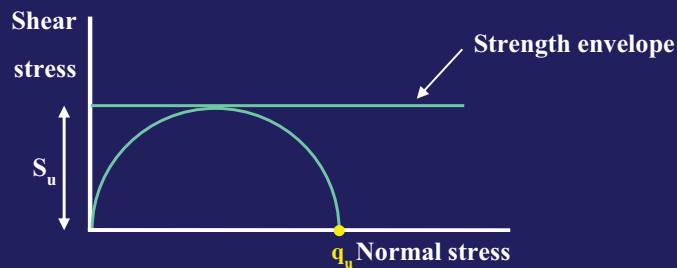
การทดลองแบบ UU test

ในบางครั้งการทดลองแบบ UU test อาจถูกแทนที่โดยการทดลอง **Unconfined compression test** เนื่องจากการทดลอง **Unconfined compression test** จะทดลองเพียงตัวอย่างเดียวแล้วลากเส้น **Strength envelope** ให้สัมผัสกับวงกลมมอร์และขนานกับแกน x ก็จะสามารถหาค่า **Undrained shear strength, S_u** ได้



ดินแบบ *Normally consolidated clay (NCC)*

การทดลองแบบ UU test

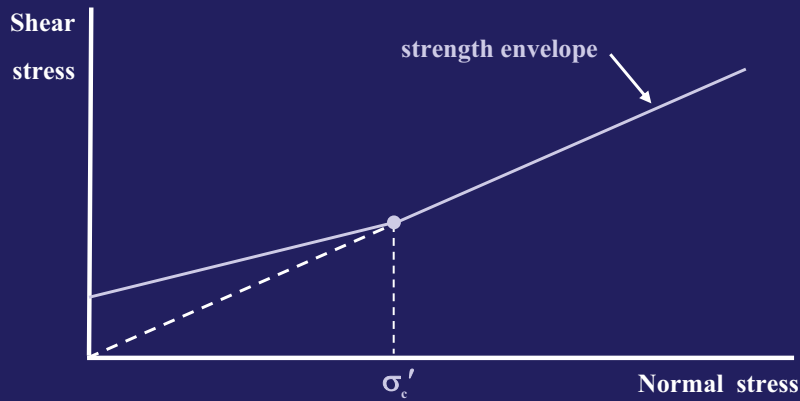


จากรูป จะได้ $S_u = q_u/2$

ความต้านทานแรงเฉือนของดินเหนียว

ดินแบบ *Overconsolidated clay (OCC)*

ดินแบบ OCC หมายถึงดินเหนียวที่มีความเค้นกดทับในอดีตมากกว่าในปัจจุบัน ซึ่งดินเหนียวชนิดนี้จะแสดงพฤติกรรมต่าง ๆ ที่ผิดปกติกับทฤษฎีพื้นฐาน คือเส้น Strength envelope จะไม่เป็นเส้นตรงเดียวกันแต่จะเป็นเหมือนเส้นตรง 2 เส้นต่อกัน โดยที่จุดที่เส้นตรงต่อกันนั้นจะมีค่าเท่ากับความเค้นที่เคยกดทับในอดีต (Preconsolidation pressure) ของดินชนิดนี้



เมื่อ

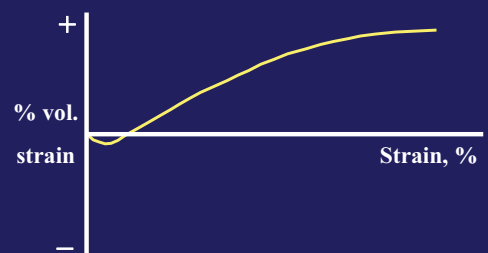
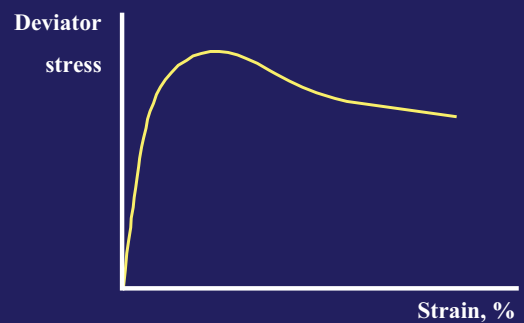
σ'_c = ค่าความเค้นที่กดทับดินในอดีต (ซึ่งอยู่บนระนาบที่ดินวิบัติ เนื่องจากพิกัดบน Strength envelope คือค่าความเค้นบนระนาบที่ดินวิบัติ)

ดินแบบ *Overconsolidated clay (OCC)*

การทดลองแบบ CD test

ลักษณะความสัมพันธ์ของ Deviator stress กับ % strain และ % volume strain กับ % strain เป็นดังรูป

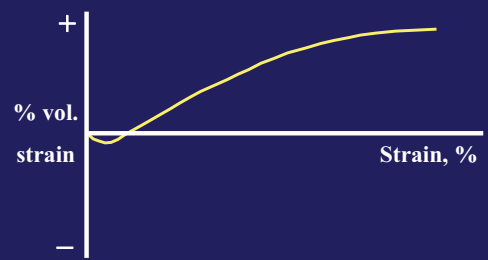
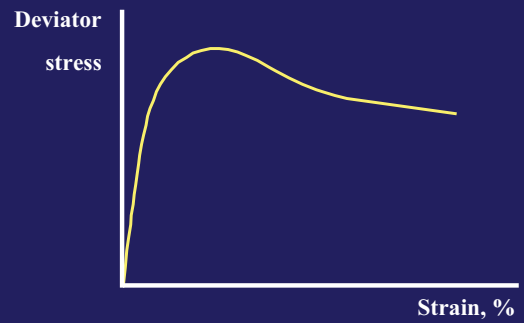
ซึ่งจากความสัมพันธ์ระหว่าง % volume strain กับ % strain จะเห็นว่าเมื่อมีความเค้นมากกระทำในช่วงแรก ปริมาตรของตัวอย่างดินจะลดลง จากนั้นปริมาตรของตัวอย่างดินจะเพิ่มขึ้น



ดินแบบ *Overconsolidated clay (OCC)*

การทดลองแบบ CD test

ที่เป็นดังนี้เพราะดินเหนียวแบบ OCC เป็นดินเหนียวที่มีความพยายามจะขยายปริมาตร เนื่องจากในอดีตถูกอัดด้วยความเค้นที่มากกว่าในปัจจุบัน แต่เนื่องจากเม็ดดินถูกล็อคอยู่ จึงไม่สามารถขยายตัวได้ ต่อเมื่อมีความเค้นมากกระทำเหมือนกับมากระเทือนให้เม็ดดินคลายล็อคออกจากกัน จึงทำให้ดินนี้เพิ่มปริมาตรขึ้น

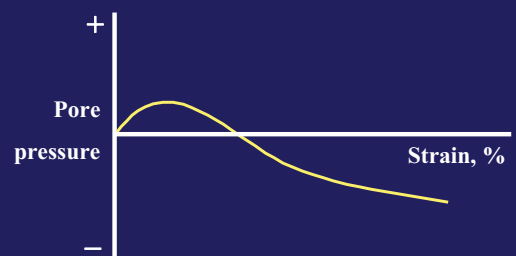
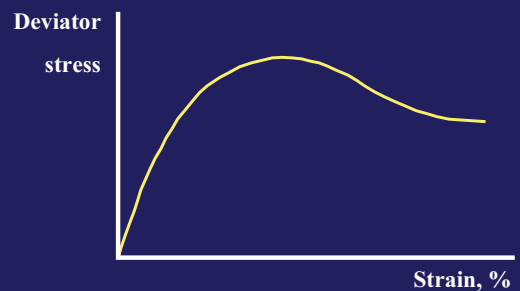


ดินแบบ *Overconsolidated clay (OCC)*

การทดลองแบบ CU test

ลักษณะความสัมพันธ์ของ Deviator stress กับ % strain และ Pore water pressure กับ % strain เป็นดังรูป

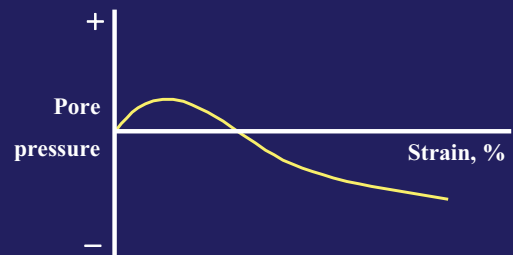
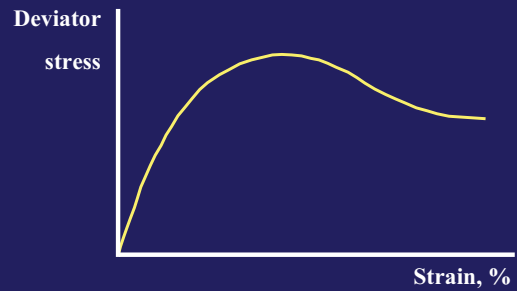
จากรูปความสัมพันธ์ของ Pore water pressure กับ % strain ในช่วงแรก เมื่อมีความเค้นมากกระทำ เปรียบเหมือนตัวอย่างดินถูกอัด ทำให้น้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินเกิดความดันพยายามจะไหลออก (u เป็น +)



ดินแบบ *Overconsolidated clay (OCC)*

การทดลองแบบ CU test

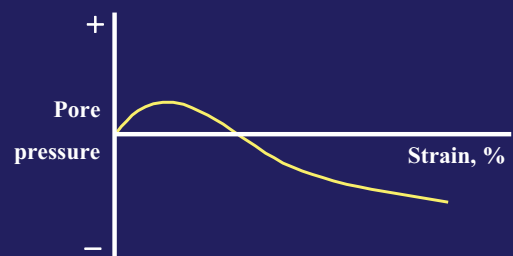
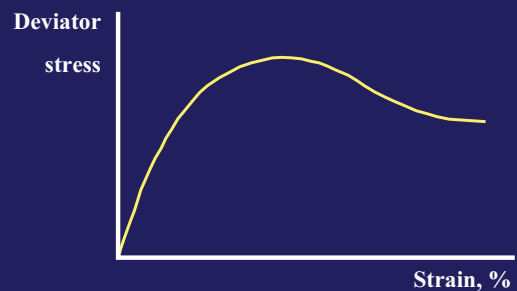
แต่เนื่องจากตัวอย่างดินนี้เป็นแบบ OCC ซึ่งเป็นดินที่มีความพยายามจะขยายตัวอยู่แล้ว ดังนั้นเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น จึงไปกระเทือนโครงสร้างของดินเหมือนกับไปปลดล็อก ทำให้ตัวอย่างดินพยายามขยายปริมาตร และมีความพยายามจะดูดน้ำเข้า จึงทำให้ ค่า u เป็น ลบ



ดินแบบ *Overconsolidated clay (OCC)*

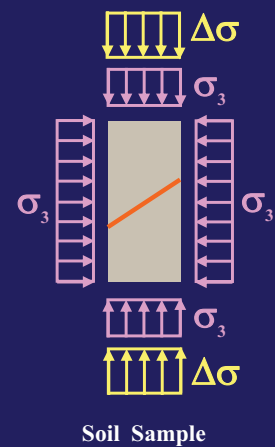
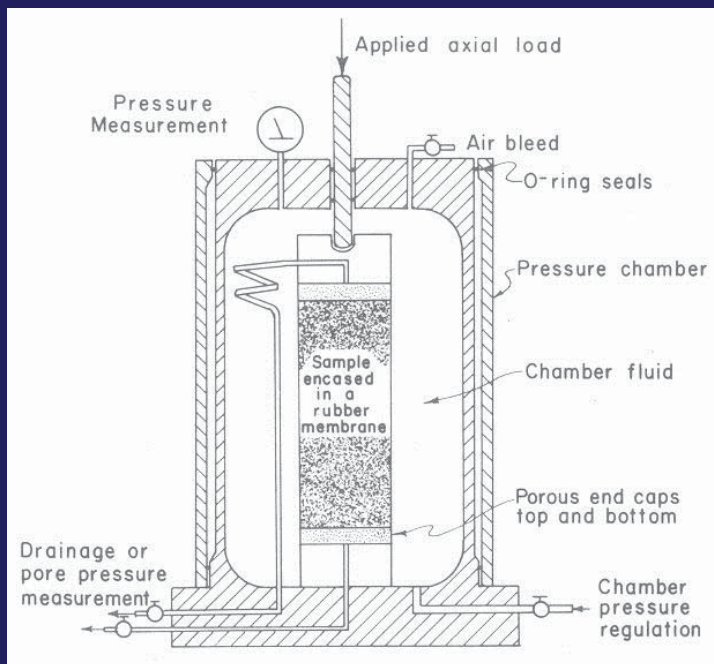
การทดลองแบบ CU test

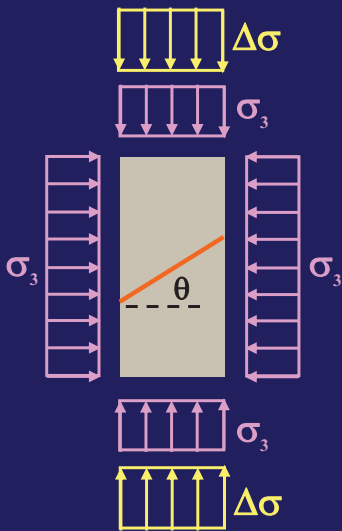
ซึ่งหากค่า Pore water pressure เป็นลบจะทำให้วงกลมมอร์ของ Effective stress ขยับไปทางด้านขวาของวงกลมมอร์ Total stress และทำให้ค่า Shear strength parameter ของ Effective stress น้อยกว่าของ Total stress จึงทำให้การทดลอง แบบ CU และ UU test กับดินแบบ OCC ไม่น่าเชื่อถือ



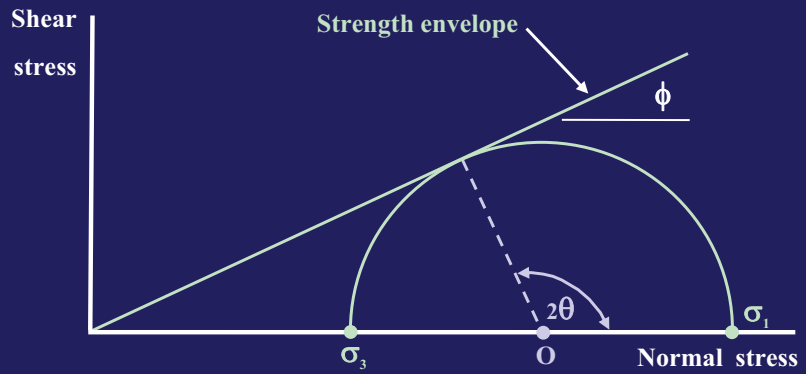
ระนาบของการบีบอัด

เมื่อนำตัวอย่างดินทรงกระบอกมาทดลอง **Triaxial compression test** จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทานภายใน กับมุมบีบอัดของตัวอย่างได้



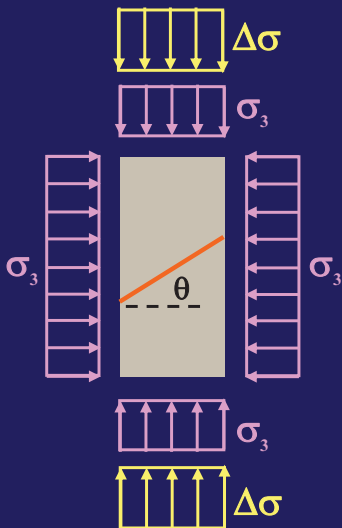


จากรูป ถ้าให้มุมที่วัดได้เท่ากับ θ และ $\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma$ จะสามารถวาดวงกลมมอร์รี่ได้

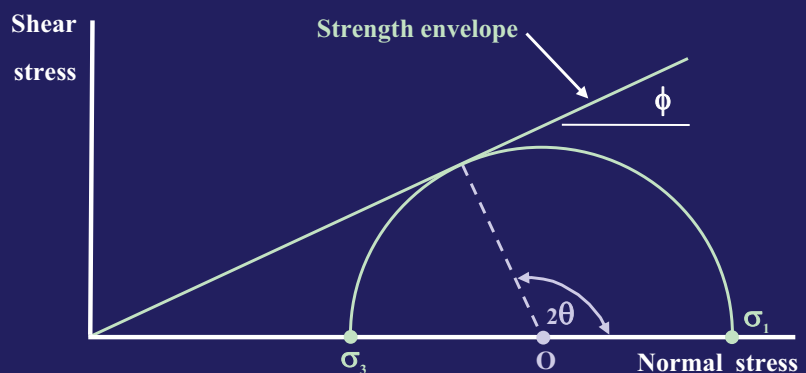


ถ้าจุด O เป็นจุดศูนย์กลางของวงกลมมอร์รี่ลากเส้นไปที่จุดสัมผัสของวงกลมกับ Strength envelope จะได้ มุมที่จุด O เท่ากับ 2θ และจะได้

$$\theta = 45^\circ + \phi/2$$



จากรูป ถ้าให้มุมที่วัดได้เท่ากับ θ และ $\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma$ จะสามารถวาดวงกลมมอร์รี่ได้



ในกรณีการทดลองแบบ UU test หรือการทดลอง Unconfined compression test จะได้มุม $\phi = 0$ ดังนั้น จะได้

$$\theta = 45^\circ$$

สมการของคูลอมบ์

ในปี ค.ศ. 1773 วิศวกรทหารชาวฝรั่งเศส ชื่อ C.A. Coulomb ได้คิดสมการความต้านทานแรงเฉือนของวัสดุใด ๆ (Coulomb's equation) เป็นสมการเส้นตรง

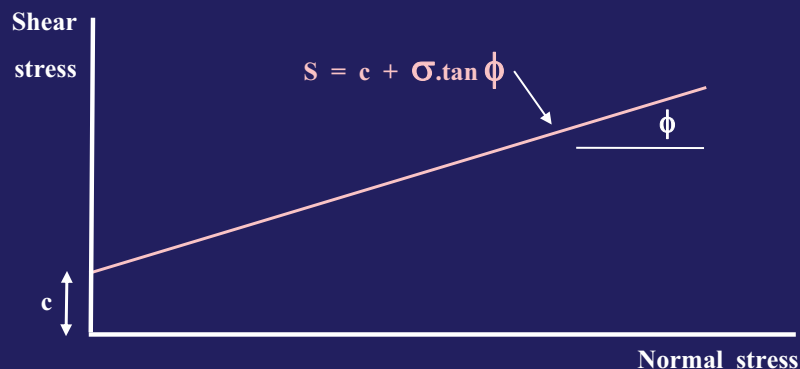
$$S = c + \sigma \cdot \tan \phi$$

เมื่อ

c = แรงยึดเหนี่ยว (Cohesion)

σ = ความเค้นในแนวตั้งฉาก

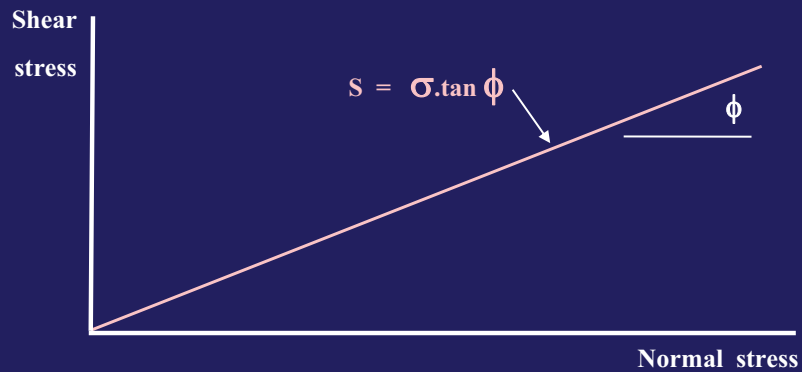
ϕ = มุมเสียดทานภายใน



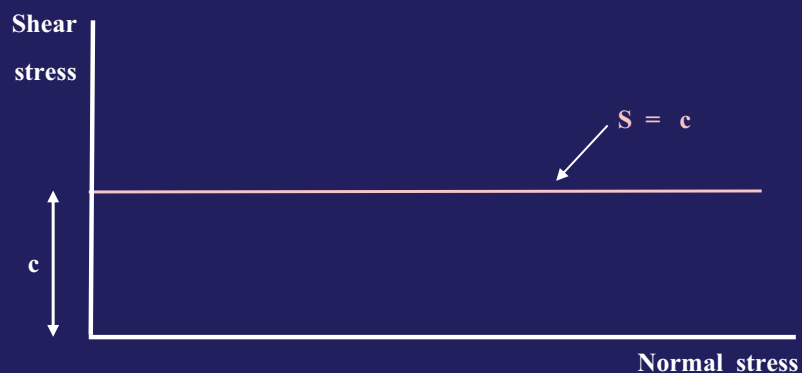
ซึ่งจากสมการ $S = c + \sigma \cdot \tan \phi$ จะได้ว่าความต้านทานแรงเฉือนของวัสดุมีองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ ความเหนียว (c) และ ความฝืด ($\sigma \cdot \tan \phi$)

และจากเส้นกราฟ $S = c + \sigma \cdot \tan \phi$ จะเห็นว่ามีความเหมือนกับ Strength envelope ในดิน

ดังนั้นจึงอาจสามารถเปรียบเทียบได้ในกรณีของดินทรายซึ่งไม่มีความเหนียว ($c = 0$) สมการของคูลอมบ์จะกลายเป็น $S = \sigma \cdot \tan \phi$ และจะได้กราฟดังรูป



และสำหรับดินเหนียวจะไม่มีค่าความฝืด ($\sigma \cdot \tan \phi = 0$) ซึ่งจะทำให้สมการของคูลอมบ์กลายเป็น $S = c$ และจะได้กราฟดังรูป



ความไวตัวของดิน

เมื่อโครงสร้างของดินถูกรบกวนกระท่อนจะทำให้คุณสมบัติของดินเปลี่ยนแปลงไป โดยเฉพาะความต้านทานแรงเฉือน วิศวกรจึงได้คิดค่า ความไวตัวของดิน (Sensitivity, S) ขึ้น

$$S = q_{u1}/q_{u2}$$

เมื่อ

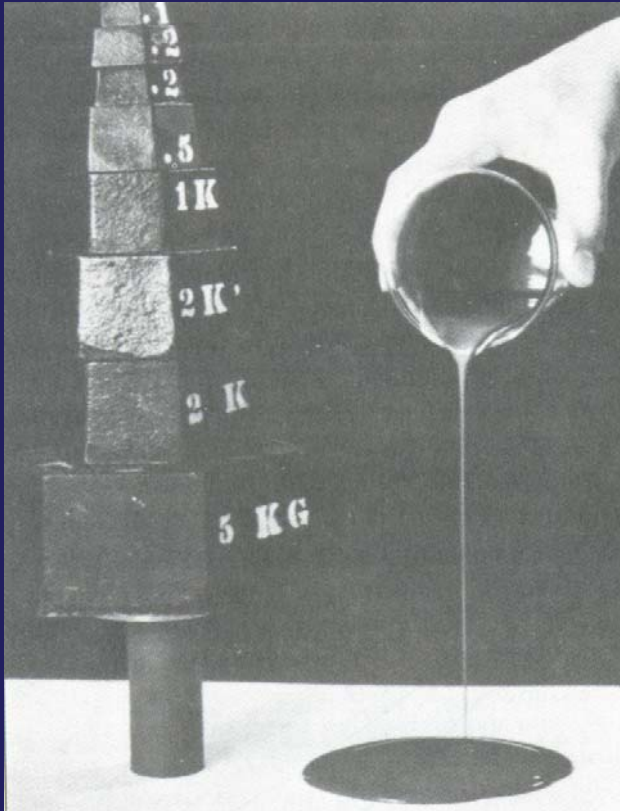
q_{u1} = Unconfined compressive strength of undisturbed sample

q_{u2} = Unconfined compressive strength of remolded sample

ค่า Sensitivity มีค่ามากกว่า 1 เสมอ ยิ่งค่านี้สูง วิศวกรยิ่งต้องเพิ่มความระมัดระวังมาก

ดินที่มีค่า $S = 10$ หมายความว่า เมื่อดินถูกรบกวนกระท่อนจะทำให้ความแข็งแรงลดลง 10 เท่า

| ค่าความไวตัว | คุณลักษณะ |
|--------------|----------------------------|
| 2 - 4 | ดินเหนียวทั่วไป |
| 4 - 8 | ดินเหนียวที่มีความไวตัว |
| 8 - 16 | ดินเหนียวที่มีความไวตัวสูง |

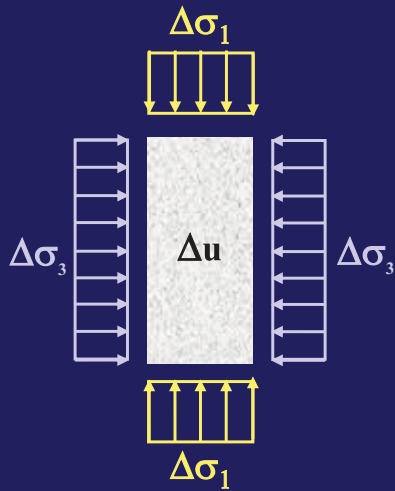


ดินชนิดเดียวกัน (Leda clay, Ottawa, Ontario Canada) ความชื้นเท่ากันแต่
ด้านขวาถูกกระทบกระเทือน
มีค่า Sensitivity > 1500

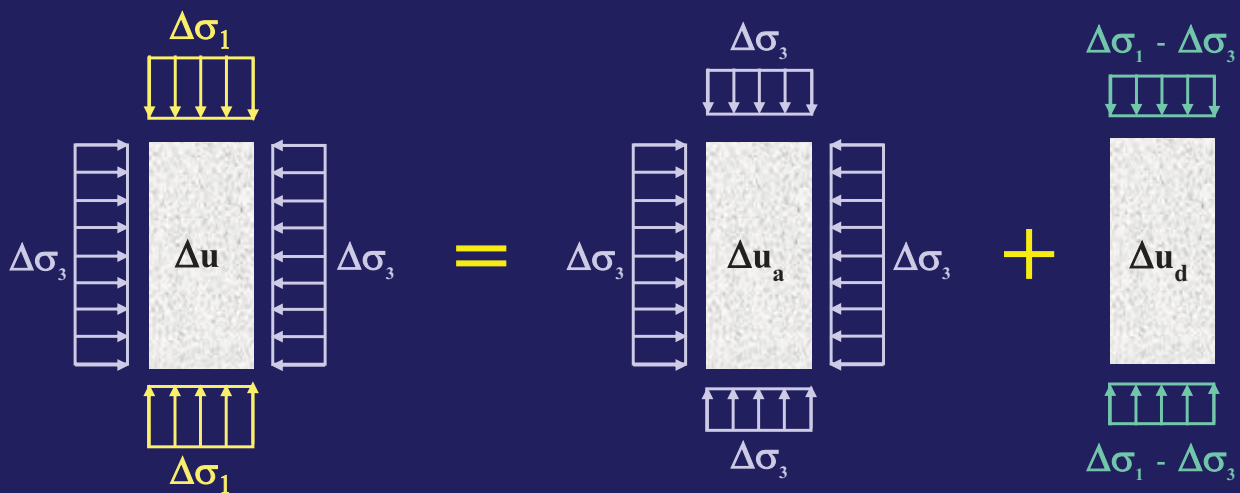
ตัวประกอบความดันโพรง

ในการทดลอง Triaxial compression test นอกจากจะ
สามารถหาค่า Shear strength parameter ได้แล้ว ยังสามารถ
หาค่า ตัวประกอบความดันโพรง (Pore pressure parameter)
ได้อีกด้วย

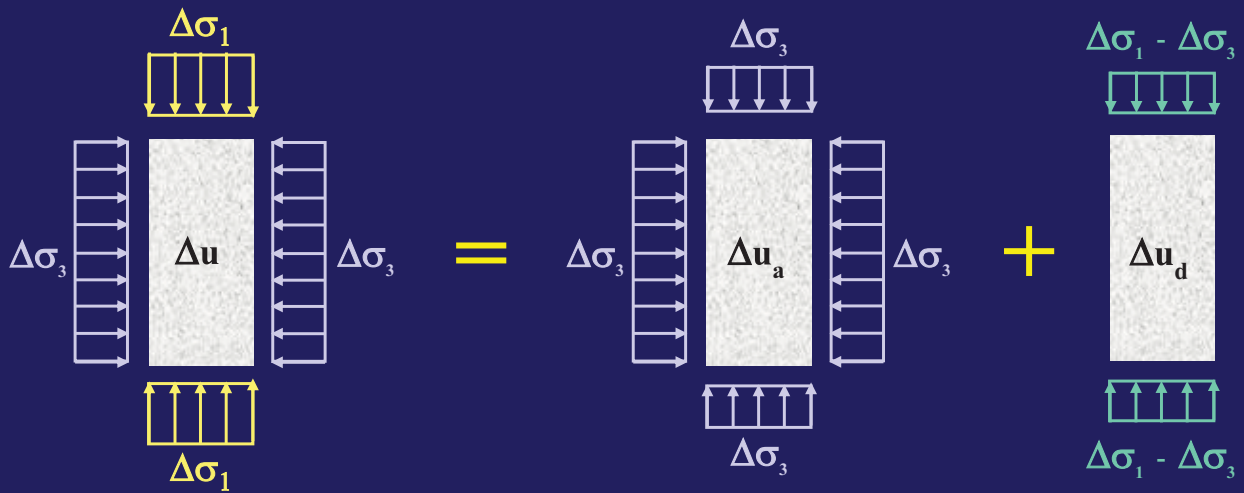
ค่า Pore pressure parameter มีประโยชน์กับงานทางด้าน
วิเคราะห์เสถียรภาพของดินเป็นอย่างมาก



ในการทดลอง Triaxial compression test จะเห็นว่าตัวอย่างดินถูกอัดด้วยความดันรอบข้าง ($\Delta\sigma_3$) คงที่ และถูกกดด้วยความเค้นในแนวตั้ง คือ $\Delta\sigma_1$ ซึ่งจะทำให้มีน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินเกิดความดันโพรงเท่ากับ Δu

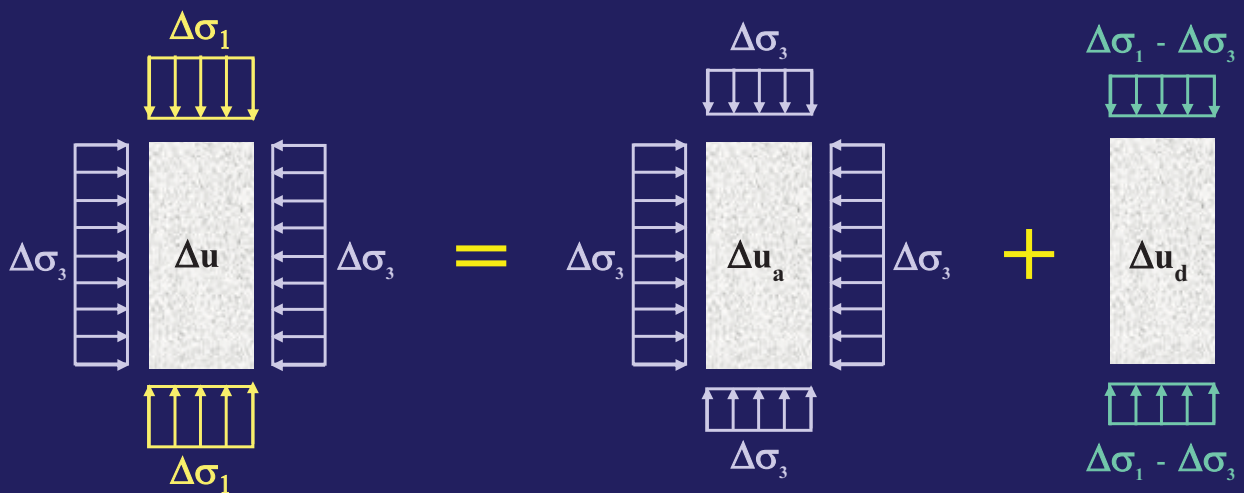


ซึ่ง Δu จะสามารถแบ่งได้ว่าเป็นเกิดจาก Δu_a และ Δu_d โดย Δu_a คือ ความดันโพรงซึ่งเกิดจาก $\Delta\sigma_3$ (All around pressure) และ Δu_d คือความดันโพรงที่เกิดจาก $\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3$ (Deviator stress)



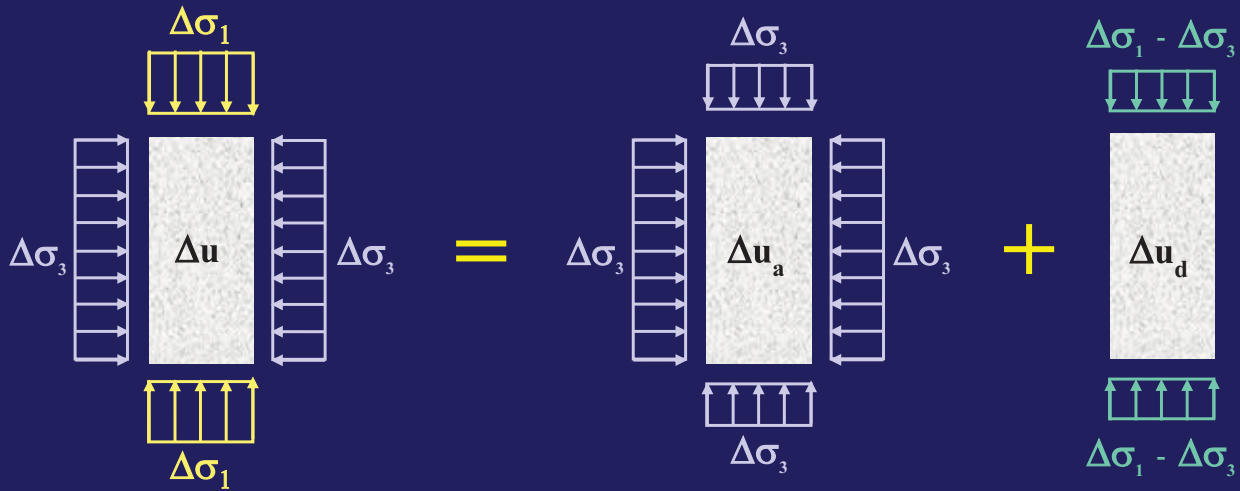
ถ้าให้ความดันโพรง เป็นสัดส่วนกับความเค้นที่กระทำ จะได้

$$\Delta u_a = B \cdot \Delta \sigma_3 \quad \text{และ} \quad \Delta u_d = \bar{A} \cdot (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)$$



ถ้าให้ $\Delta u = \Delta u_a + \Delta u_d$ ดังนั้น

$$\Delta u = B \cdot \Delta \sigma_3 + \bar{A} \cdot (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)$$



หรือ
$$\Delta u = B[\Delta\sigma_3 + A.(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)]$$

เมื่อ A และ B = ตัวประกอบความดันโพรง

ค่า Pore pressure parameter A จะสามารถหาได้จากการเพิ่มของความดันโพรงเมื่อตัวอย่างดินถูกกดด้วยความเค้นเบี่ยงเบน

ตารางที่ 4.5 แสดงค่า A_f กับชนิดของดิน

| ชนิดของดิน | A_f |
|---------------------------------------|------------|
| ดินเหนียวมีความไวตัว (Sensitive clay) | 1.5 - 2.5 |
| ดินเหนียวอัดตัวปกติ | 0.7 - 1.3 |
| ดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติเล็กน้อย | 0.3 - 0.7 |
| ดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติมาก | -0.5 - 0.0 |

A_f = Pore pressure parameter A at failure

ค่า Pore pressure parameter B จะสามารถหาได้จาก การเพิ่มของความดันโพรงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความดันรอบข้าง มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

Pore pressure parameter $B = 0$ กรณีดินแห้ง

Pore pressure parameter $B = 1$ กรณีดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

ตัวอย่างที่ 5.1

ในการทดลอง Triaxial compression test แบบ CU test กับตัวอย่าง แบบคงสภาพของดินเหนียวอิ่มตัว (NCC) ได้ผลการทดลองดังนี้

| ตัวอย่างที่ | σ_3 , kN/m ² | $\Delta\sigma$, kN/m ² | u เมื่อวิบัติ, kN/m ² |
|-------------|-----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 200.0 | 227.0 | 68.1 |
| 2 | 400.0 | 421.4 | 126.4 |
| 3 | 600.0 | 615.7 | 184.7 |

จงหาค่า Shear strength parameter ในรูปของ Effective stress

วิธีทำ

จากข้อมูลที่ได้ จะสามารถคำนวณหาค่าต่าง ๆ ได้ ดังนี้

| ตัวอย่างที่ | σ_3 , kN/m ² | $\Delta\sigma$, kN/m ² | u เมื่อวิบัติ, kN/m ² | σ_1 , kN/m ² |
|-------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 200.0 | 227.0 | 68.1 | 427.0 |
| 2 | 400.0 | 421.4 | 126.4 | 821.4 |
| 3 | 600.0 | 615.7 | 184.7 | 1215.7 |

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma$$

วิธีทำ

จากข้อมูลที่ได้ จะสามารถคำนวณหาค่าต่าง ๆ ได้ ดังนี้

| ตัวอย่างที่ | σ_3 , kN/m ² | $\Delta\sigma$, kN/m ² | u เมื่อวิบัติ, kN/m ² | σ_1 , kN/m ² | σ_3' , kN/m ² |
|-------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 1 | 200.0 | 227.0 | 68.1 | 427.0 | 131.9 |
| 2 | 400.0 | 421.4 | 126.4 | 821.4 | 273.6 |
| 3 | 600.0 | 615.7 | 184.7 | 1215.7 | 415.3 |

$$\sigma_3' = \sigma_3 - u \text{ เมื่อวิบัติ}$$

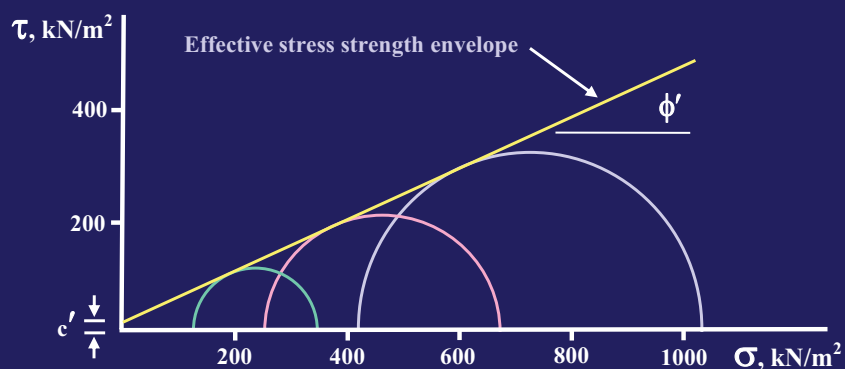
วิธีทำ

จากข้อมูลที่ได้ จะสามารถคำนวณหาค่าต่าง ๆ ได้ ดังนี้

| ตัวอย่างที่ | σ_3' kN/m ² | $\Delta\sigma$, kN/m ² | u เมื่อวิบัติ, kN/m ² | σ_1 , kN/m ² | σ_3' , kN/m ² | σ_1' , kN/m ² |
|-------------|----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 1 | 200.0 | 227.0 | 68.1 | 427.0 | 131.9 | 358.9 |
| 2 | 400.0 | 421.4 | 126.4 | 821.4 | 273.6 | 695.0 |
| 3 | 600.0 | 615.7 | 184.7 | 1215.7 | 415.3 | 1031.0 |

$$\sigma_1' = \sigma_1 - u \text{ เมื่อวิบัติ}$$

นำค่า σ_1' และ σ_3' มาพล็อตวงกลมมอร์



จากวงกลมมอร์ จะได้ $c' = 15 \text{ kN/m}^2$ และ $\phi' = 24^\circ$

Ans.

เส้นทางของความเค้น

ในการทดลอง Triaxial compression test ยังสามารถนำเสนอผลการทดลองได้อีกรูปแบบหนึ่งนอกเหนือจากการวาดวงกลมมอร์ คือการใช้ เส้นทางของความเค้น (Stress path)

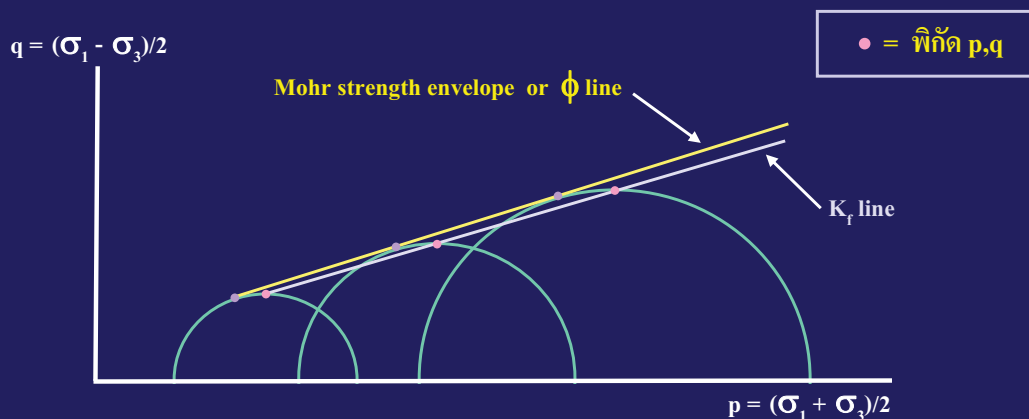
หลักการของ Stress path จะแนะนำค่า p และ q โดยที่

$$p = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$$

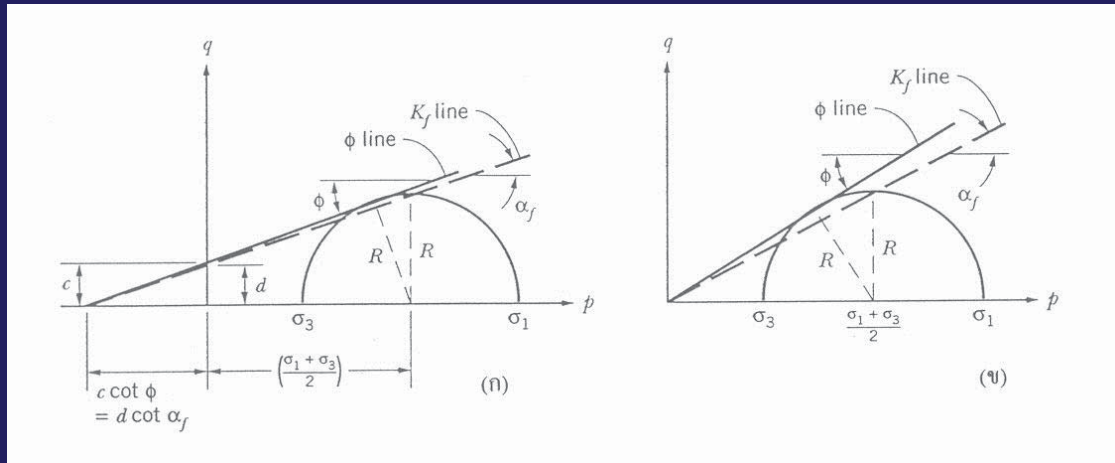
$$q = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$$

ค่า p จะพล็อตอยู่ในแกนนอนและ q อยู่ในแกนตั้งนี้ ซึ่งทั้งสองค่านี้ คือค่าพิกัดจุดยอดของวงกลมมอร์นั่นเอง

หากการทดลองชุดหนึ่งใช้ตัวอย่างดิน 3 ตัวอย่าง จะทำให้ได้วงกลมมอร์ 3 วง และจะได้พิกัด p, q 3 จุด ซึ่งถ้าลากเส้นผ่าน 3 จุดนี้ จะได้เส้นตรง คือ เส้น Stress path หรือ K_f line หรือ $p-q$ diagram



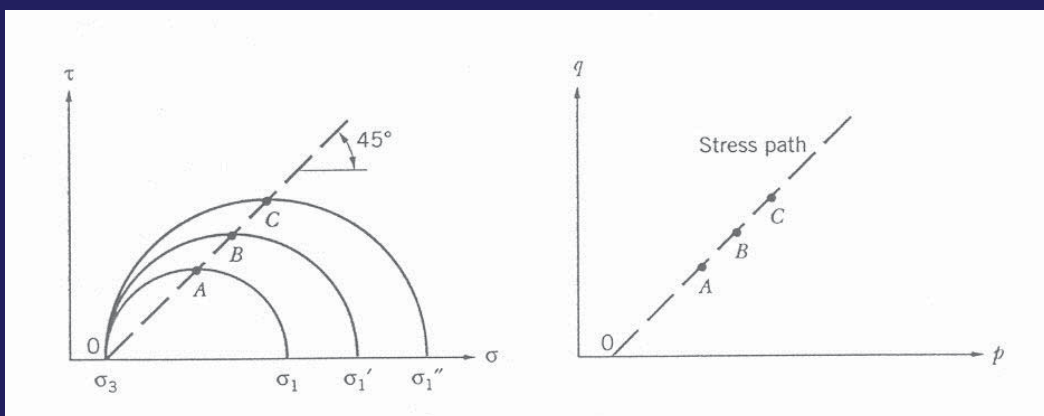
ความสัมพันธ์ระหว่างเส้น ϕ และ K_f สามารถอธิบายได้จากรูป



$$\sin \phi = \tan \alpha_f \quad \text{หรือ} \quad \phi = \sin^{-1}(\tan \alpha_f)$$

$$c = d / \cos \phi$$

นอกจากนี้ Stress path ยังสามารถนำเสนอในรูปแบบอื่น ๆ ได้
อีก ดังแสดงในรูป



แสดง Stress path กรณี σ_3 คงที่ และ $\sigma_1 > \sigma_3$

บทที่ 6

การทรุดตัวของดิน

ชนิดของการทรุดตัว

- Immediate settlement → Elastic deformation
- Primary settlement → Consolidation ★★ ★
- Secondary settlement → Plastic deformation

การอัดตัวคายน้ำ

Primary settlement เกิดจากการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) โดยหากเกิดกับดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำแล้วจะทำให้ขนาดและระยะเวลาในการทรุดตัวนานมาก ซึ่งวิศวกรต้องการหลีกเลี่ยงปัญหาต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้นตามมา ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาที่ละเอียดเพื่อจะได้เข้าใจถึงกลไกในการเกิด Consolidation

กลไกในการอัดตัวคายน้ำ

เมื่อดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated soil) ได้รับความเค้นเพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำหนักกระทำที่ผิวดิน น้ำที่อยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินจะเกิดความดันขึ้น ความดันนี้เรียกว่าความดันโพรงที่เพิ่มขึ้น (Excess pore water pressure) และเนื่องจากน้ำอัดตัวไม่ได้ จึงทำให้น้ำพยายามหนีออกจากช่องว่างระหว่างเม็ดดินไปยังบริเวณอื่น

ถ้าน้ำหนึ่ออกได้ปริมาตรของดินก็จะลดลง ซึ่งจะเห็นอยู่ในรูปของขนาดการทรุดตัว แต่เนื่องจากค่า k ของดินต่ำมาก ทำให้การไหลหนึ่ของน้ำช้ามากด้วย ซึ่งทำให้การทรุดตัวของดินเกิดช้าตามไปด้วย

กระบวนการนี้เรียกว่า การอัดตัวคายน้ำ (*Consolidation*) ซึ่งสามารถอธิบายกลไกในการเกิดได้จากอุปกรณ์ต่าง ๆ เหล่านี้

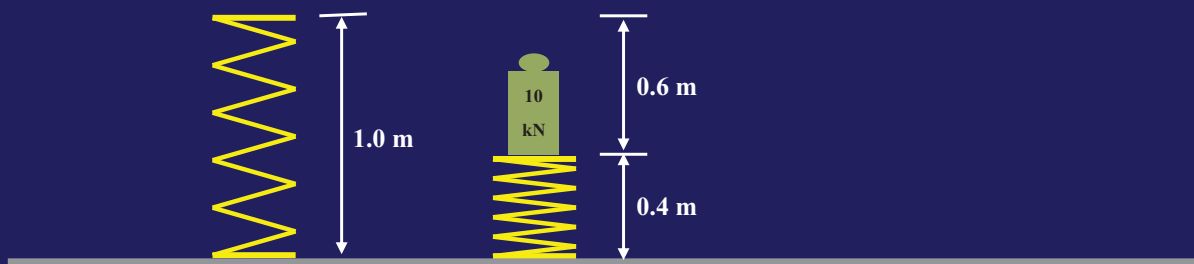
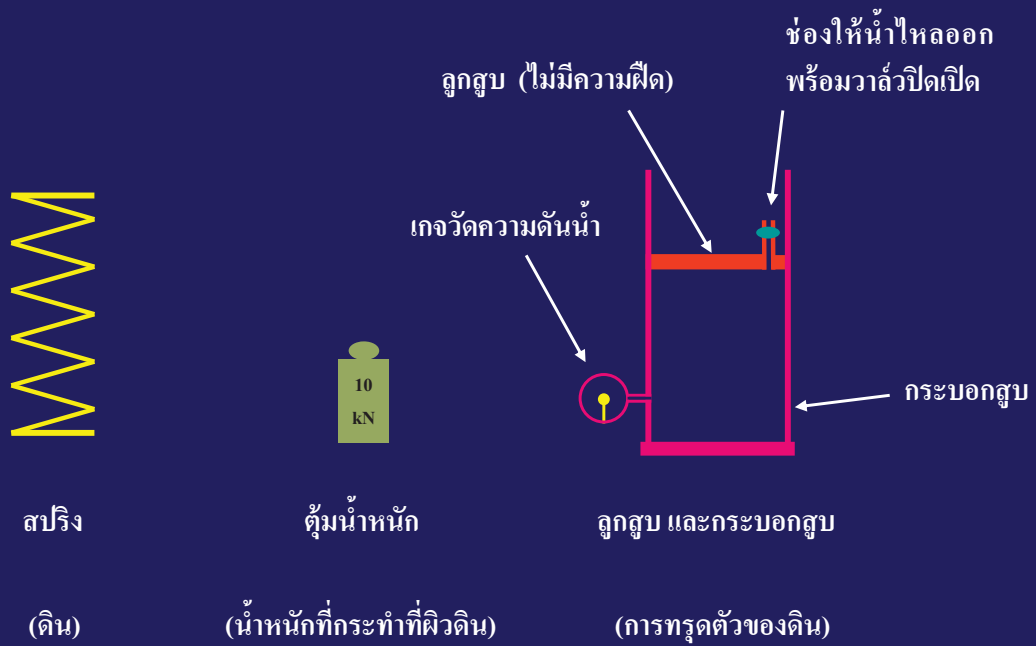
อุปกรณ์ที่ใช้

สปริง → ดิน

ลูกสูบ และกระบอกสูบ → การทรุดตัวของดิน

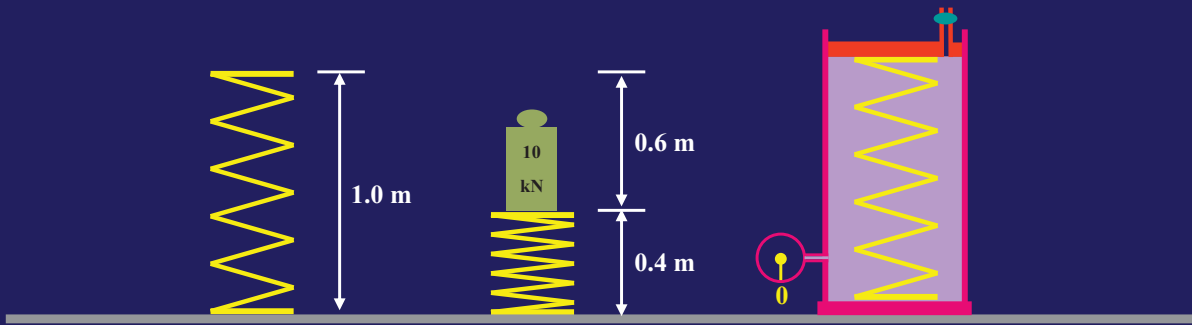
น้ำ → น้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน

ตุ้มน้ำหนัก → น้ำหนักที่กระทำที่ผิวดิน



รูปที่ 1 สปริงอันหนึ่งเมื่อไม่มีน้ำหนักมากระทำ จะยาว 1.0 เมตร

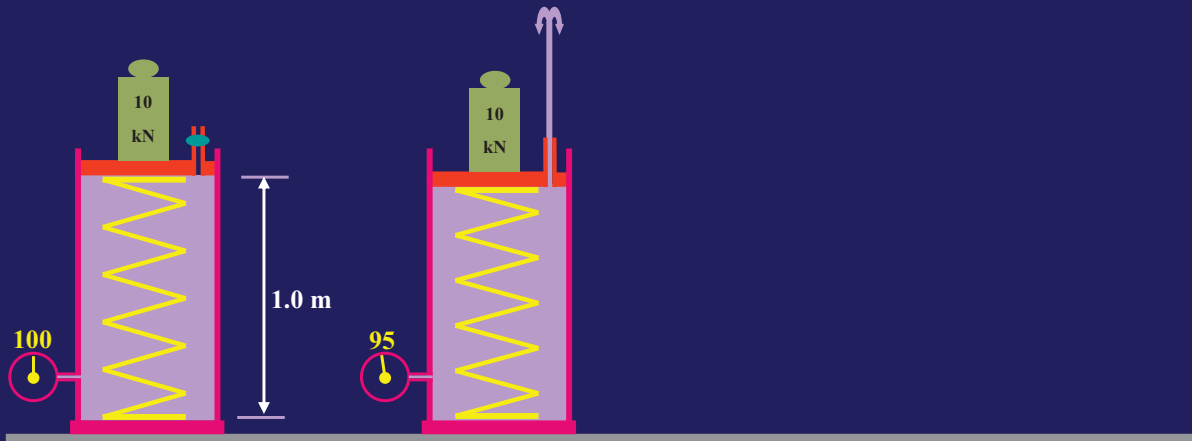
รูปที่ 2 เมื่อสปริงถูกน้ำหนัก 10 kN ทับ จะยุบลงมา 0.6 เมตร เหลือความยาวเพียง 0.4 เมตร



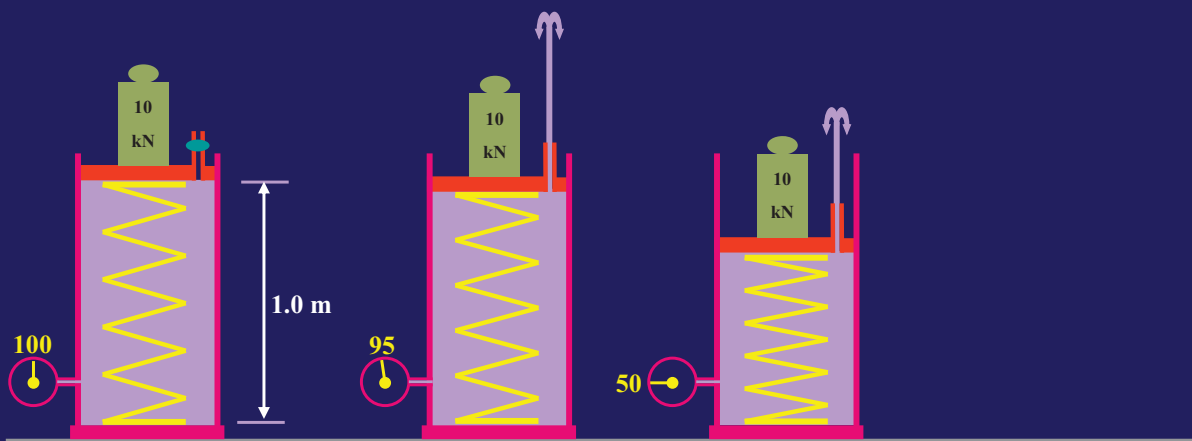
รูปที่ 3 นำสปริงไปใส่ในกระบอกสูบ แล้วเติมน้ำให้เต็ม จากนั้นปิดด้วยลูกสูบที่ไม่มีคามฝืด ซึ่งจากรูปนี้เปรียบเหมือนดินอิมตัวด้วยน้ำ ในขณะที่ไม่มีน้ำหนักกระทำที่ผิวดิน ดังนั้นค่าความดันโพรงที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 0



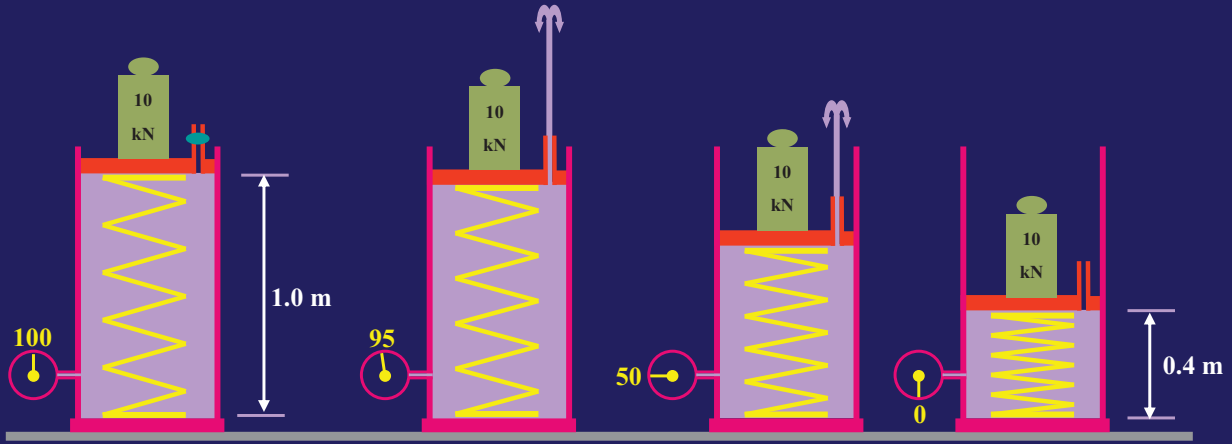
รูปที่ 1 เมื่อนำตุ้มน้ำหนัก 10 kN มาวางบนลูกสูบในขณะที่ช่องให้น้ำไหลถูกปิด จะทำให้น้ำไม่สามารถหนีออกจากกระบอกสูบ และทำให้น้ำเกิดความดันขึ้น (Excess pore water pressure) 100 % จะเห็นว่าสปริงไม่ได้ยุบตัวเลย (สปริงไม่ได้รับน้ำหนัก) ดังนั้นน้ำจะเป็นตัวรับน้ำหนัก 10 kN (100 %)



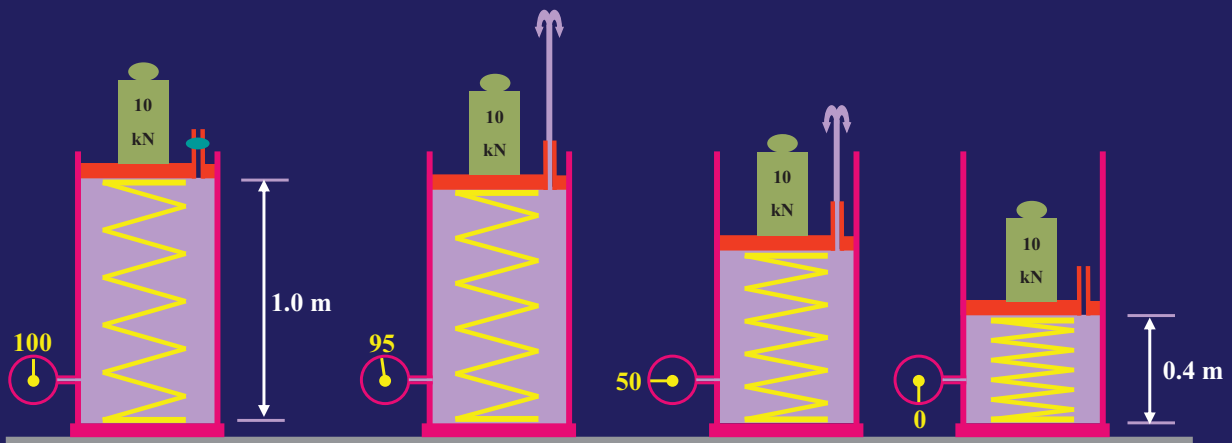
รูปที่ 2 เมื่อเปิดช่องให้น้ำไหล จะทำให้น้ำสามารถหนีไปยังบริเวณอื่นได้ ดังนั้นสปริงจึงเริ่มทรุดตัว ความดันของน้ำเริ่มลดลงเหลือ 95 % หมายความว่า สปริงรับน้ำหนัก 5 % และน้ำรับน้ำหนัก 95 %



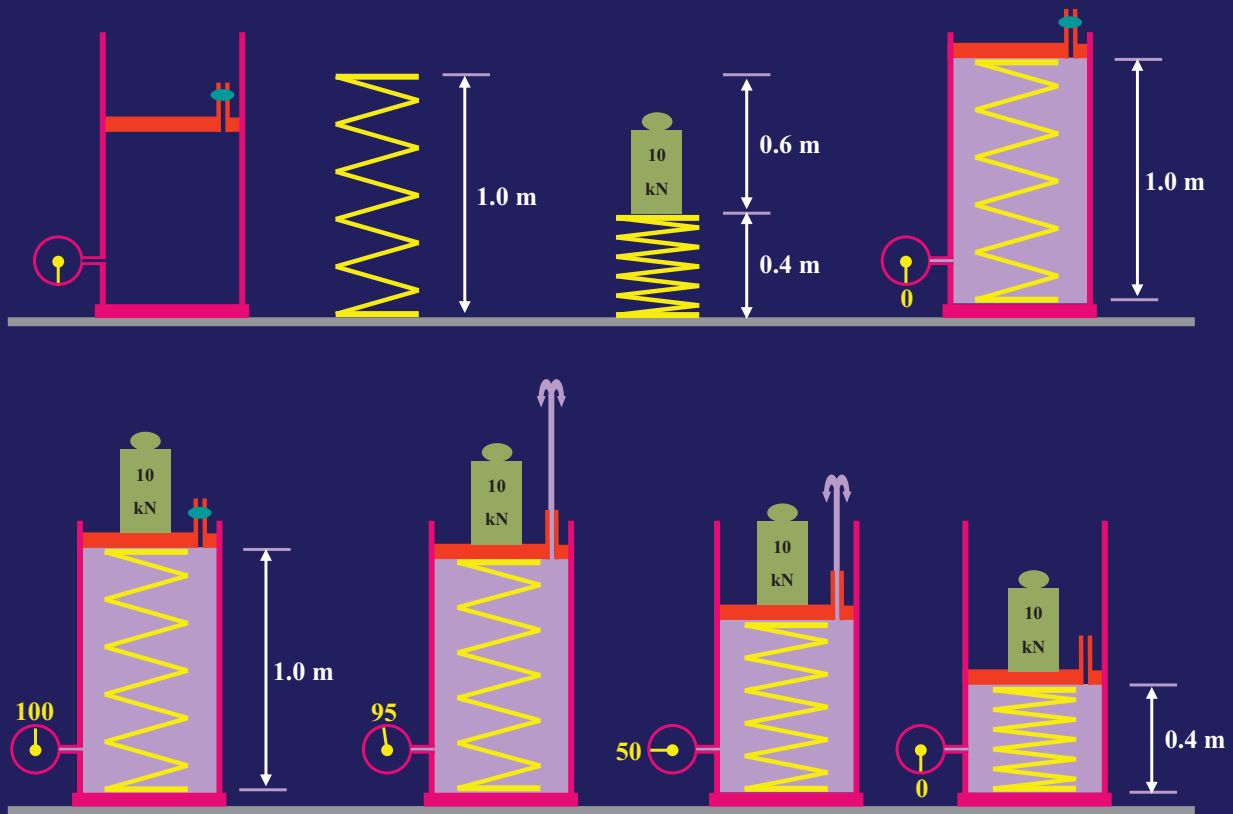
รูปที่ 3 เมื่อเวลาผ่านไปเรื่อยๆ น้ำก็จะไหลออกมากขึ้น ทำให้ความดันของน้ำลดลงไปเรื่อยๆ จะเห็นว่าขณะนี้ความดันของน้ำที่เพิ่มขึ้น (Excess pore water pressure) เหลือแค่ 50 % ดังนั้นสปริงจะรับน้ำหนัก 50 % และจะยุบตัวลงมาเท่ากับครึ่งหนึ่งของ 0.6 เมตร



รูปที่ 4 เมื่อเวลาผ่านไปเรื่อยๆ น้ำก็จะไหลออกจนหยุดเนื่องจากความดันของน้ำเท่ากับศูนย์ ดังนั้นสปริงจะรับน้ำหนัก 100 % และจะยุบตัวลงมาเท่ากับ 0.6 เมตร



สิ้นสุดกระบวนการอัดตัวคายนํ้า



การทดลองการอัดตัวคายน้ำ

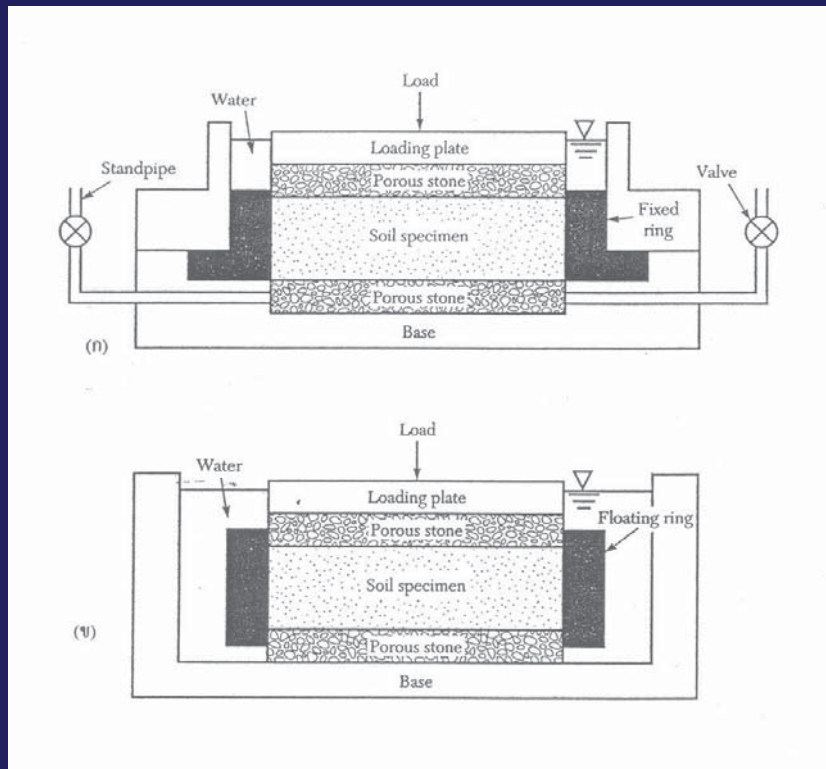
เครื่องมือที่ใช้เรียกว่า Odometer หรือ Consolidometer มี 2 แบบ

แบบ Fixed ring

แบบ Floating ring

เป็นการทดลองแบบ One dimensional consolidation

สามารถทำการทดลองได้ทั้งแบบ Single และ Double drainage



การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากข้อมูลของการทดลอง Consolidation test สามารถแบ่งกลุ่มข้อมูลได้ 2 กลุ่ม คือ

ข้อมูลระหว่าง การยุบตัว กับเวลา ต่อน้ำหนักกดทับ 1 ค่า

ข้อมูลระหว่างการยุบตัวทั้งหมดใน 24 ชั่วโมง กับน้ำหนักกดทับ

นำ ข้อมูลระหว่างการยุบตัวทั้งหมดใน 24 ชั่วโมง กับน้ำหนักกดทับ มาวิเคราะห์หาค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

- ▲ Coefficient of volume compressibility, m_v
- ▲ Coefficient of compressibility, a_v
- ▲ Preconsolidation pressure, σ_p'
- ▲ Compression index, C_c
- ▲ Swell index, C_e

Coefficient of volume compressibility, m_v

นำค่า การยุบตัวทั้งหมดใน 24 ชั่วโมง มาแปลงให้เป็น ความเครียด (Strain) มาพล็อตลงในตาราง Normal scale โดยให้อยู่ในแกนตั้ง และค่าความเค้นที่กดทับ (แปลงจากน้ำหนักที่กดทับให้อยู่ในรูปของ Effective stress) อยู่ในแกนนอน ค่าความลาดชันของเส้นกราฟนี้คือค่า Coefficient of volume compressibility

$$m_v = \Delta\varepsilon / \Delta\sigma'$$

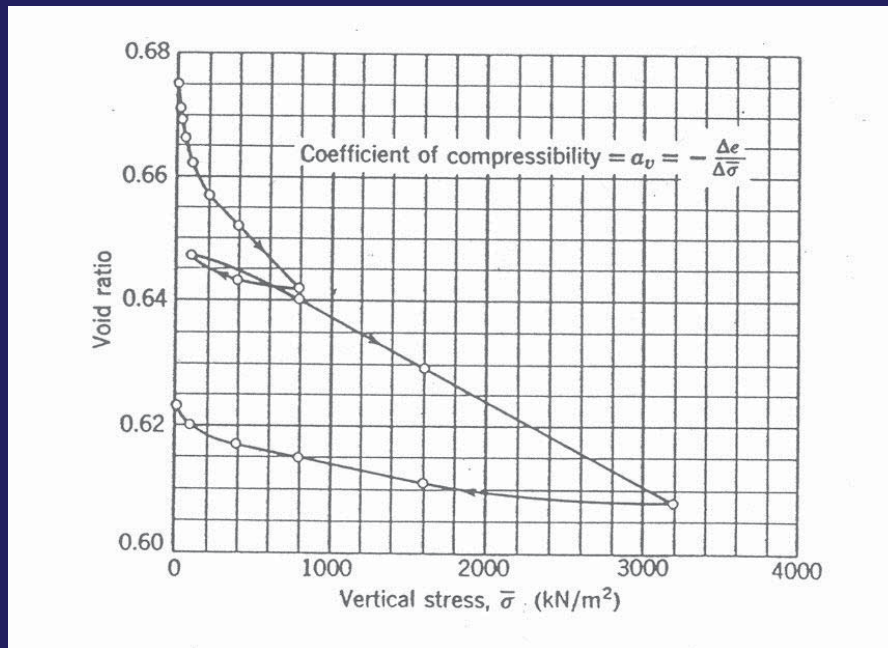
m_v เป็นส่วนกลับของค่า E และมีค่าไม่คงที่เนื่องจากกราฟเป็นเส้นโค้ง

Coefficient of compressibility, a_v

นำค่า การยุบตัวทั้งหมดใน 24 ชั่วโมง มาแปลงให้เป็นค่า Void ratio มาพล็อตลงในตาราง Normal scale โดยให้อยู่ในแกนตั้ง และค่าความเค้นที่กดทับ (แปลงจากน้ำหนักที่กดทับให้อยู่ในรูปของ Effective stress) อยู่ในแกนนอน ค่าความลาดชันของเส้นกราฟนี้คือค่า Coefficient of compressibility

$$a_v = \Delta e / \Delta\sigma'$$

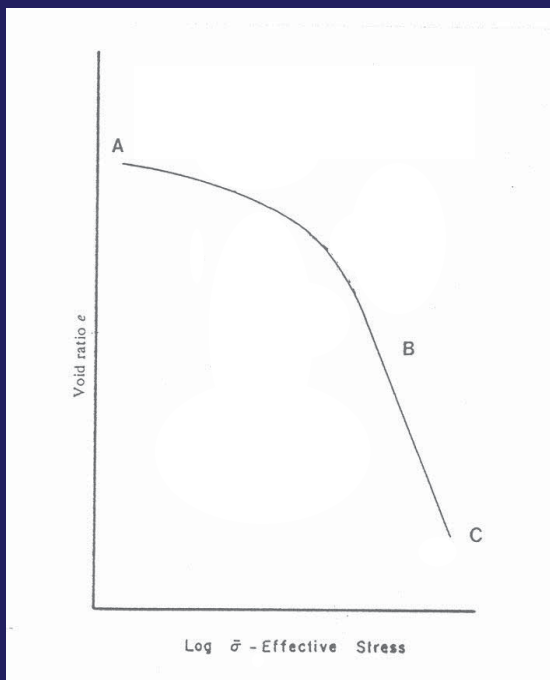
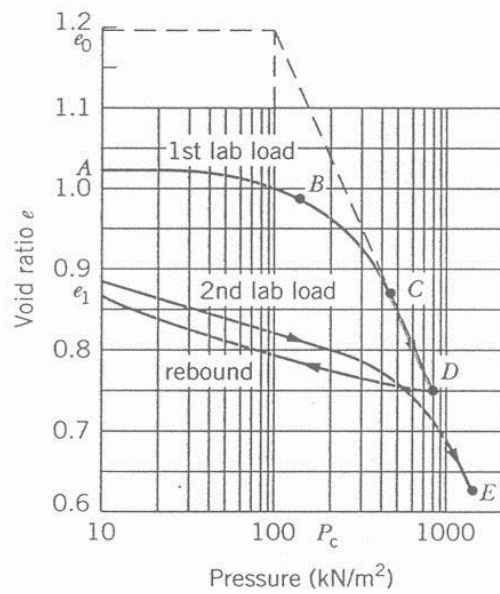
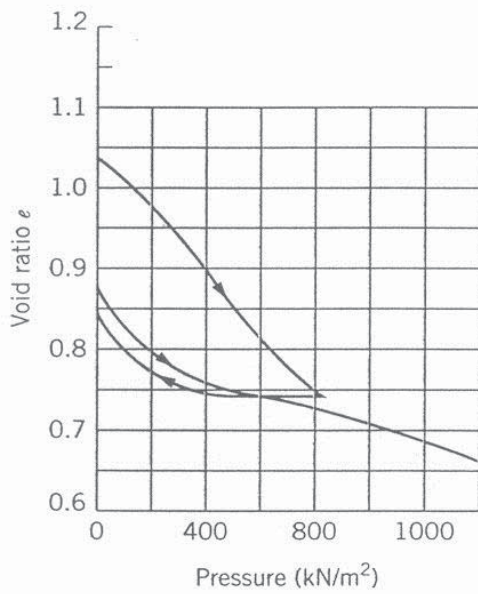
a_v มีค่าไม่คงที่เนื่องจากกราฟเป็นเส้นโค้ง



$$a_v = m_v(1 + e)$$

e – log p curve

นำค่า การยุบตัวทั้งหมดใน 24 ชั่วโมง มาแปลงให้เป็นค่า Void ratio มาพล็อตลงในตาราง semi - log scale โดยให้อยู่ในแกนตั้ง และค่าความเค้นที่กดทับ (แปลงจากน้ำหนักที่กดทับให้อยู่ในรูปของ Effective stress) อยู่ในแกนนอน จะได้รูปกราฟลักษณะพิเศษ เรียกกราฟรูปนี้ว่า e – log p curve



$e - \log p$ curve

AB จะเป็นเส้นโค้ง Parabola

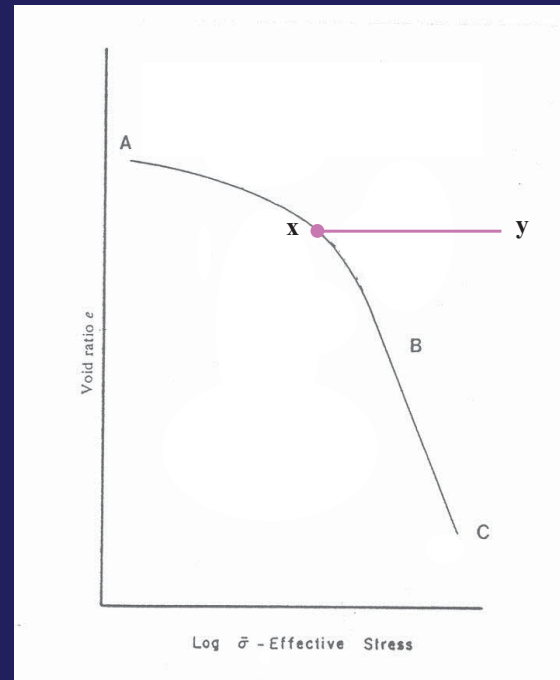
BC จะเป็นเส้นตรง

Preconsolidation pressure, σ'_p

ความดันที่เคยกดทับในอดีต สามารถหาได้โดยใช้กราฟ $e - \log p$

พิจารณาส่วน AB หาจุดที่มีรัศมีความโค้งน้อยที่สุดได้จุด x

จากจุด x ลากเส้นขนานกับแนวอนได้เส้น xy

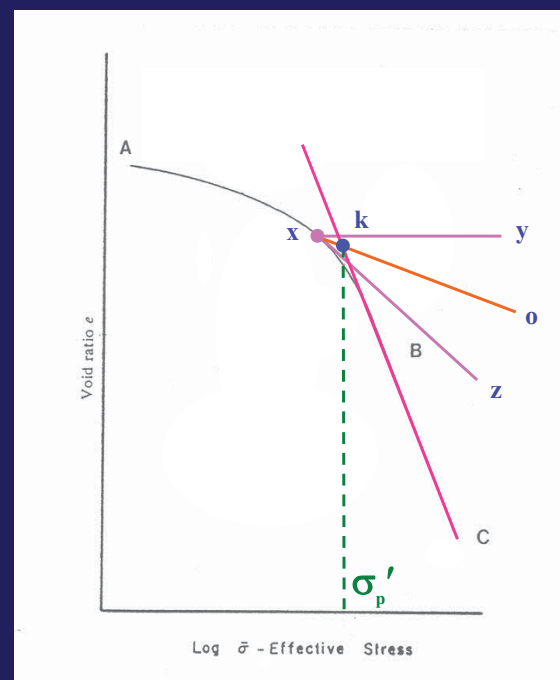


จากจุด x ลากเส้นสัมผัสกับส่วนโค้งที่จุด x ได้เส้น xz

แบ่งครึ่งมุม yxz ได้เส้น xo

จากช่วงเส้นตรง BC ลากเส้นตรงไปตัด xo ที่ k

จากจุด k ลากเส้นตรงลงมาตัดแกน x จะได้ค่า Preconsolidation pressure



Compression index, C_c

คือ ค่าความลาดชันของส่วน BC ของกราฟ $e - \log p$

$$C_c = \Delta e / \Delta \log \sigma'$$

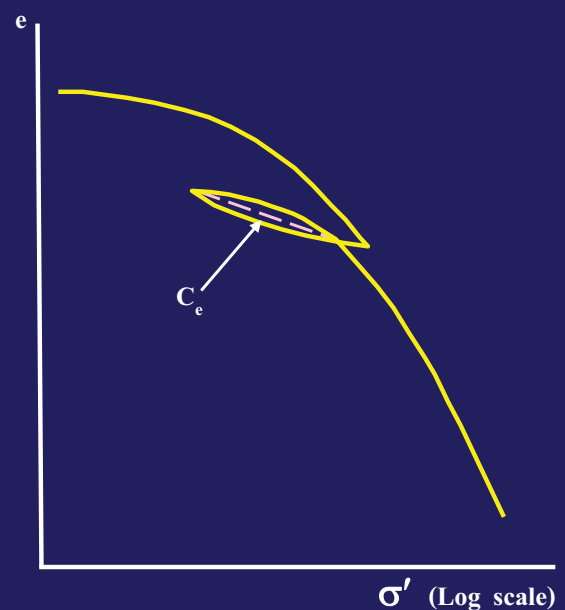
Terzaghi & Peck ได้ศึกษาผลงานของ Skempton ได้
สมการหาค่า C_c จากดินที่มีค่า $PI < 30\%$

$$C_c = 0.009(LL - 10)$$

Swell index, C_e

คือ ค่าความลาดชันของช่วง
คลายตัวของกราฟ $e - \log p$ ค่านี้
มักจะมีค่าน้อยกว่า C_c ประมาณ
5 - 10 เท่า

$$C_e = 0.0463(LL.G_s/100)$$

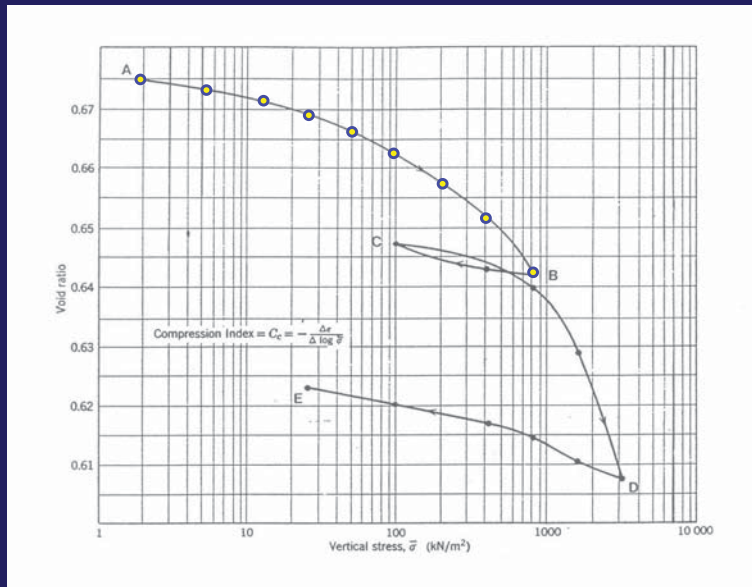


ตารางที่ 5.1 แสดงค่าพิกัดเหลว, พิกัดพลาสติก, ธรรมชาติการอัดตัว และธรรมชาติการบวมตัวของดินชนิดต่าง ๆ

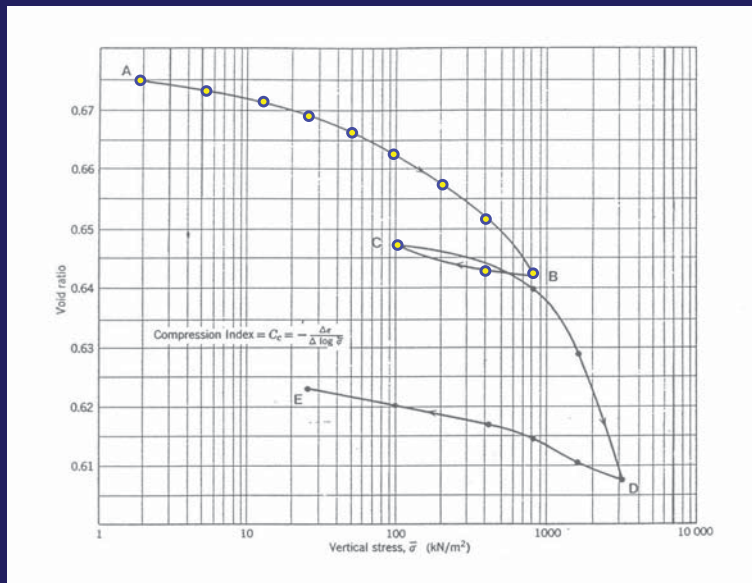
| ชนิดของดิน | LL, (%) | PL, (%) | C_c | C_e |
|--------------------------|---------|---------|-------|-------|
| Boston Blue clay | 41 | 20 | 0.35 | 0.07 |
| Chicago clay | 60 | 20 | 0.40 | 0.07 |
| Ft. Gordon clay, Georgia | 51 | 26 | 0.12 | |
| New Orleans clay | 80 | 25 | 0.30 | 0.05 |
| Montana clay | 60 | 28 | 0.21 | 0.05 |

การอัดและคลายตัวของดิน

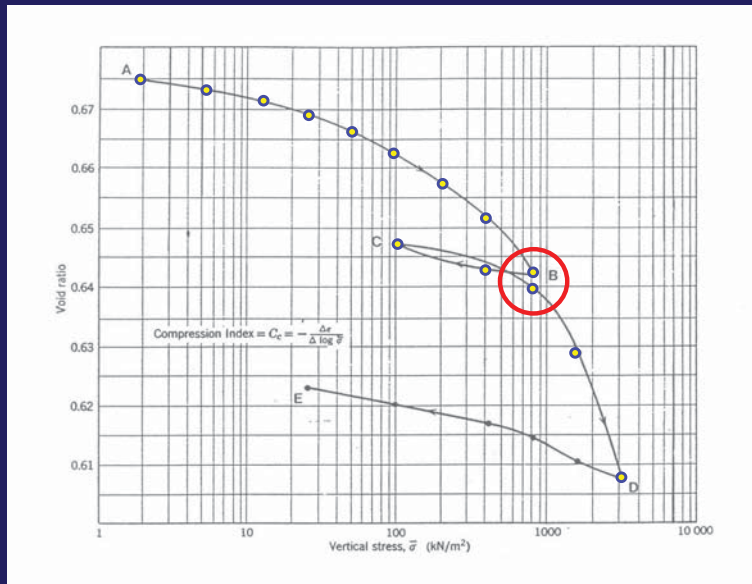
พิจารณาจากผลการทดลอง Consolidation โดยนำค่า e กับ ความเค้นที่กดทับ (อยู่ในรูป Effective stress) มาพล็อตลงในตาราง semi - log



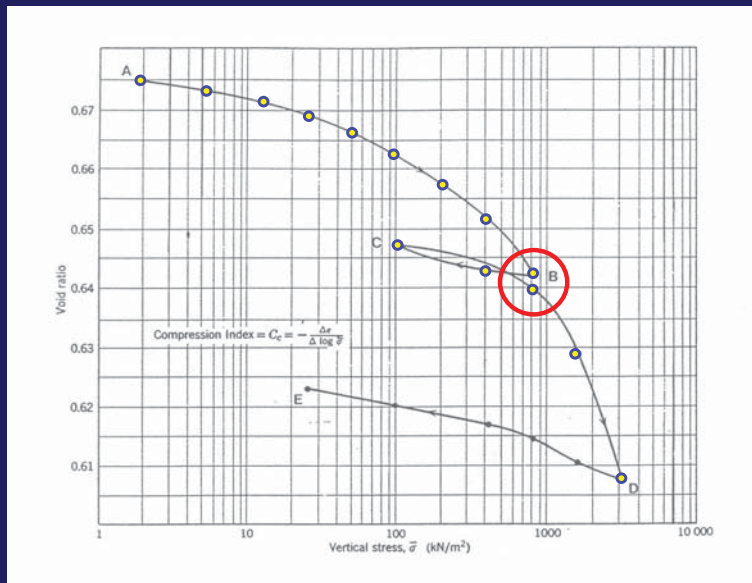
จากจุด A เมื่อมีการเพิ่มน้ำหนักที่กดทับทีละค่า จะทำให้ค่า e ลดลงจนกระทั่งถึงจุด B ซึ่งมีค่า Effective stress = 830 kN/m²



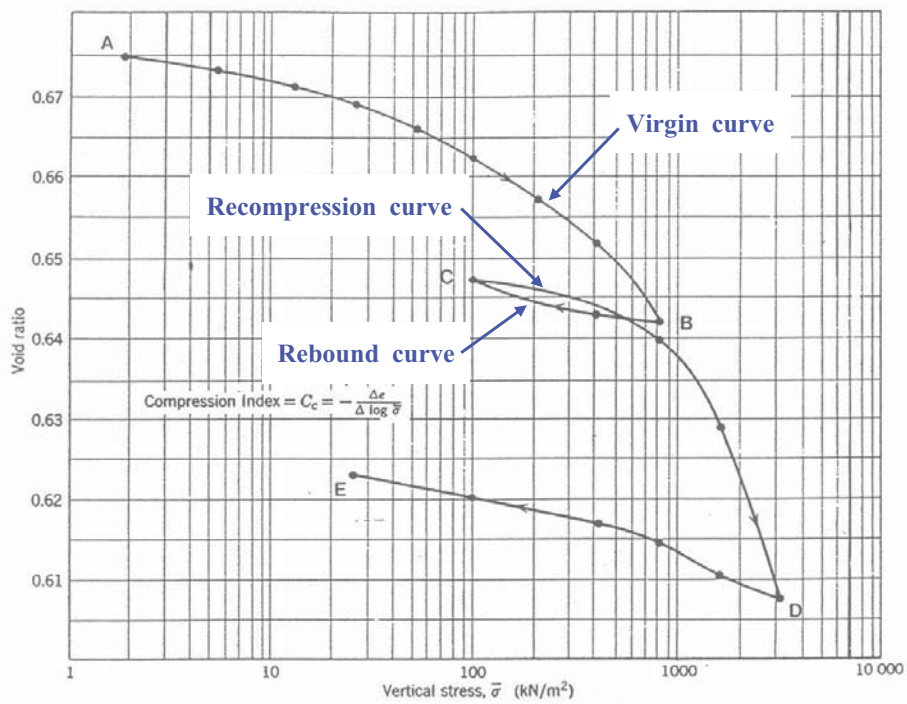
เมื่อคลายน้ำหนักที่กดทับออกทีละค่าจนถึงจุด C จะเห็นว่าค่า e จะไม่เพิ่มขึ้นกลับไปเท่าเดิม (เส้นกราฟไม่ทับเส้นเดิม)



และเมื่อเพิ่มน้ำหนักที่กดทับทีละค่าจะได้กราฟดังรูป ข้อสังเกต ที่ค่า Effective stress = 830 kN/m² จะเห็นว่าค่า e จะลดลงจากเดิม คือไม่เท่ากับค่า e ที่จุด B



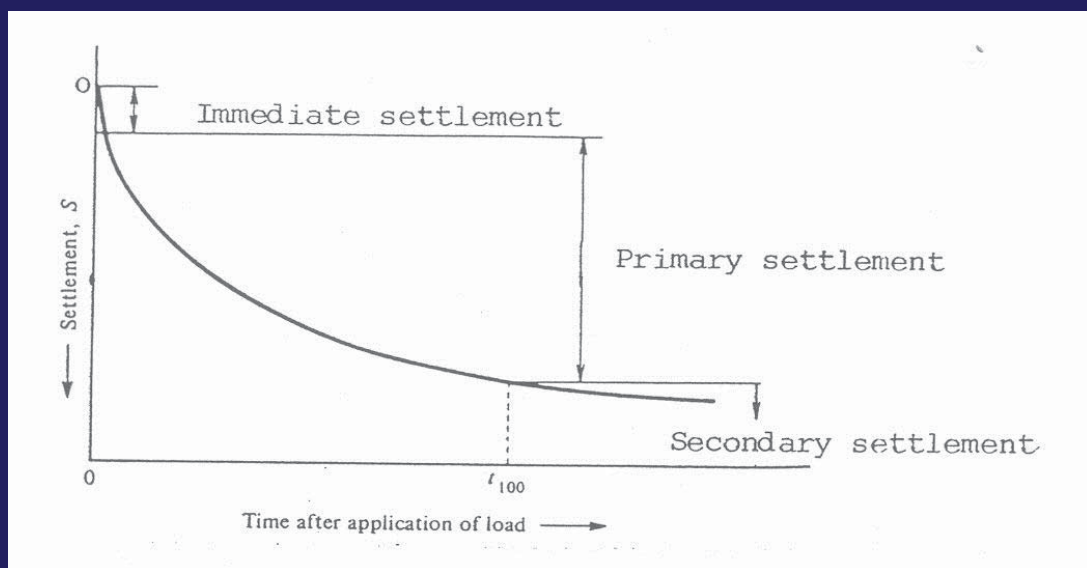
สาเหตุที่ทำให้ค่า e ไม่เท่าเดิมเนื่องจากดินไม่ได้เป็น Elastic material ดังนั้นเมื่อถูกน้ำหนักกระทำแล้วเกิดการยุบตัว จะมีการคลายตัวไม่เท่าเดิม



การทรุดตัวของดินเหนียว

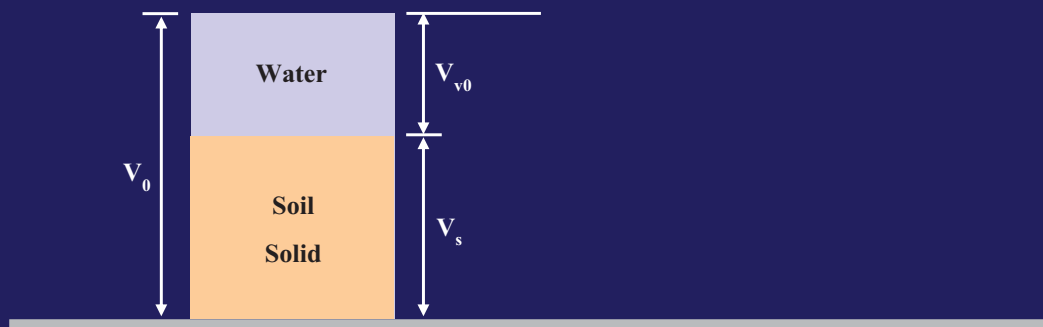
ชนิดของการทรุดตัว

- Immediate settlement → Elastic deformation
- Primary settlement → Consolidation ★★
- Secondary settlement → Plastic deformation

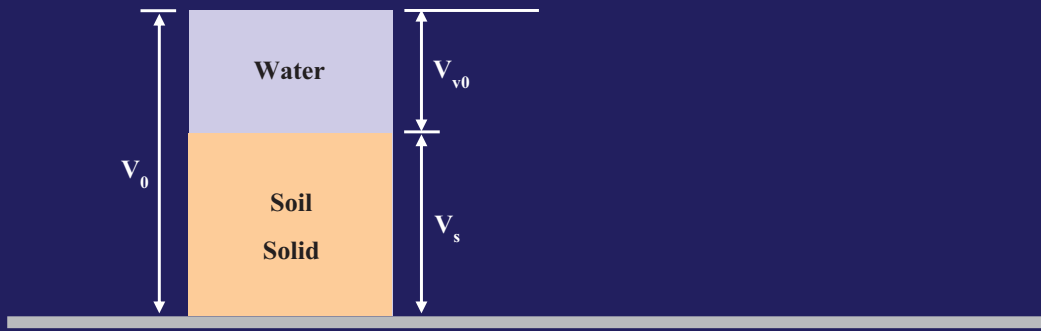


การทรุดตัวขั้นแรก

ในการวิเคราะห์หาค่าขนาดของ Primary settlement ซึ่งเกิดจากการอัดตัวคายนํ้า (Consolidation) จะถือว่าเป็นการเกิดแบบ One dimensional consolidation โดยหากเกิดกับดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยนํ้า เมื่อมีนํ้าหนักมากกระทำที่ผิวดิน นํ้าในช่องว่างระหว่างเม็ดดินจะเกิดความดันขึ้น และจะพยายามหนีออกไปยังบริเวณอื่น และจะทำให้ปริมาตรทั้งหมดของดินลดลง

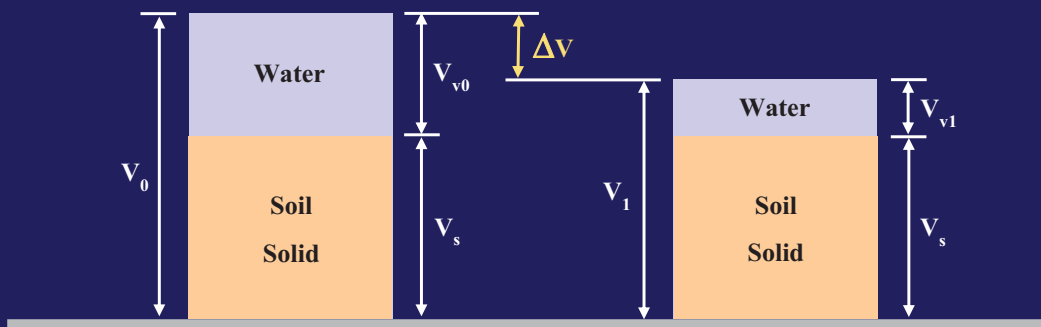


รูปที่ 1 แทนดินที่อิ่มตัวด้วยนํ้าก่อนที่จะเกิดการอัดตัวคายนํ้า ดินจะมีปริมาตรทั้งหมดเท่ากับ V_0 มีปริมาตรเม็ดดิน V_s และมีปริมาตรนํ้าในช่องว่างระหว่างเม็ดดินเท่ากับ V_{v0}

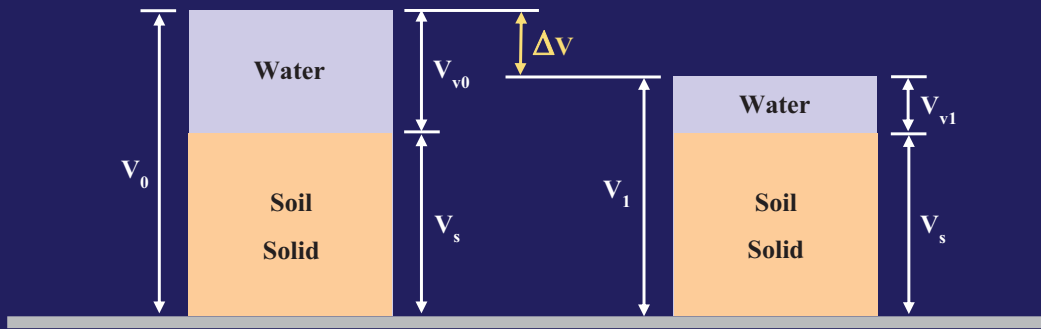


ดังนั้น $e_0 = V_{v0}/V_s$ หรือ $V_{v0} = e_0 \cdot V_s$

จาก $V_0 = V_{v0} + V_s$ ดังนั้น $V_0 = V_s(1 + e_0)$

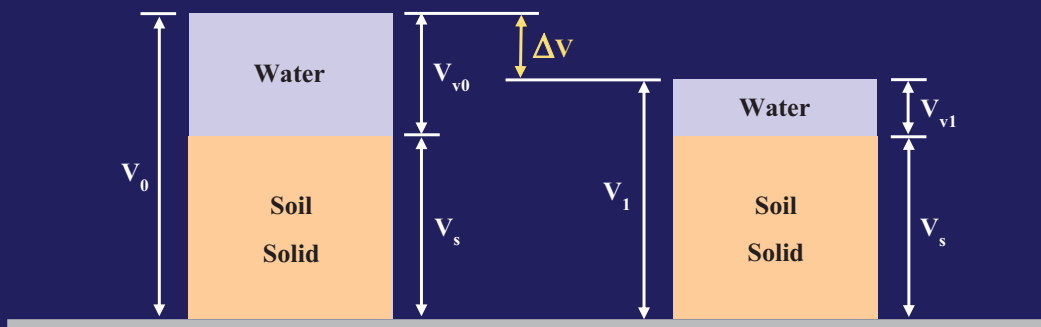


รูปที่ 2 แทนดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำหลังจากการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดลง ดินจะมีปริมาตรทั้งหมดลดลงเหลือ V_1 มีปริมาตรเม็ดดินเท่าเดิม V_s และมีปริมาตรน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินลดลงเหลือ V_{v1} ดังนั้นปริมาตรที่ลดลงจะเท่ากับ Δv



ดังนั้น $e_1 = V_{v1}/V_s$ หรือ $V_{v1} = e_1 \cdot V_s$

จาก $V_1 = V_{v1} + V_s$ ดังนั้น $V_1 = V_s(1 + e_1)$

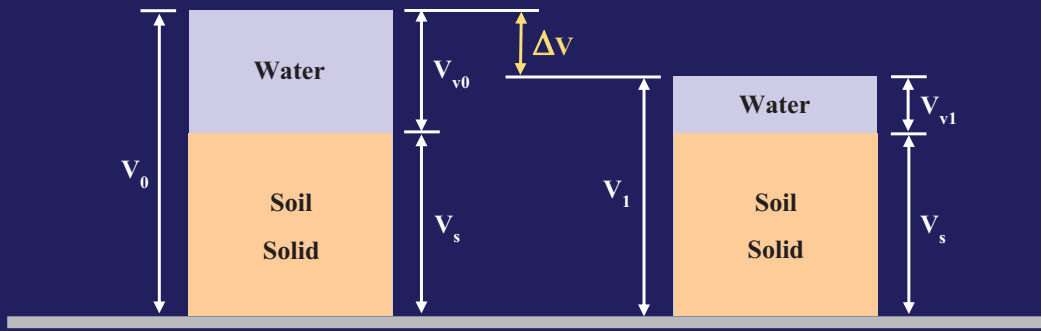


จากรูป $\Delta v = V_0 - V_1$ และ $\Delta v/V_0 = (V_0 - V_1)/V_0$

แทนค่า $\Delta v/V_0 = (V_s(1 + e_0) - V_s(1 + e_1))/V_s(1 + e_0)$

$$\Delta v/V_0 = (e_0 - e_1)/(1 + e_0)$$

$$\Delta v/V_0 = \Delta e/(1 + e_0)$$

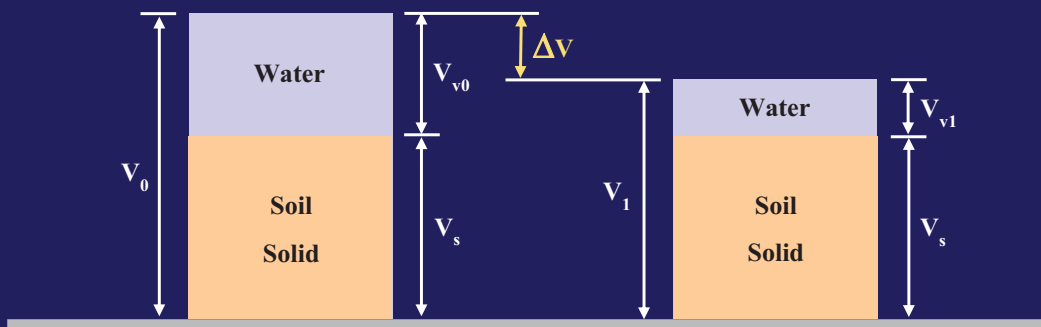


ถ้าให้ดินก้อนนี้มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ A จะได้ $\Delta V/V_0 = \Delta H \cdot A / (H_0 \cdot A)$

จะได้ $\Delta V/V_0 = \Delta H/H_0$ แทนค่าลงใน $\Delta V/V_0 = \Delta e / (1 + e_0)$

จะได้ $\Delta H/H_0 = \Delta e / (1 + e_0)$ หรือ

$$\Delta H = \Delta e \cdot H_0 / (1 + e_0)$$



$$\Delta H = \Delta e \cdot H_0 / (1 + e_0)$$

เมื่อ

ΔH = ขนาดการทรุดตัวของดิน

H_0 = ความหนาของชั้นดินก่อนเกิดการอัดตัวคายน้ำ

e_0 = Void ratio ของดินก่อนเกิดการอัดตัวคายน้ำ

สำหรับ Δe คือ การเปลี่ยนแปลง Void ratio เนื่องจากการเพิ่มของความเค้นในดิน (เนื่องจากน้ำหนักกระทำที่ผิวดิน) จาก ความเค้นเนื่องจากน้ำหนักดิน (σ'_0) ไปเป็นความเค้นเนื่องจากน้ำหนักดินร่วมกับความเค้นเนื่องจากน้ำหนักกระทำที่ผิวดิน ($\sigma'_0 + \Delta\sigma$) ซึ่งจะสามารถหาได้จากค่า C_c ที่ได้มาจากกราฟ $e - \log p$

จากการศึกษาเพิ่มเติมพบว่า ค่า C_c ซึ่งได้มาจากกราฟ $e - \log p$ ควรจะต้องมีการปรับแก้กราฟจาก Lab. virgin compression curve เป็น Field virgin compression curve เพื่อให้ได้ค่า C_c ที่ถูกต้องยิ่งขึ้น โดยจะแบ่งการปรับแก้เป็น 2 กรณี เนื่องจากความดันที่เคยกดทับดิน

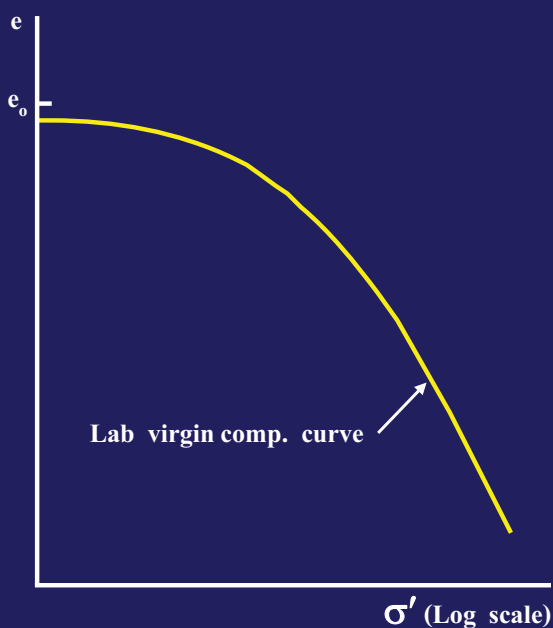
▲ กรณีที่ 1 ดิน Normally consolidated clay (NCC)

▲ กรณีที่ 2 ดิน Overconsolidated clay (OCC)

กรณีที่ 1 ดิน Normally consolidated clay (NCC)

ดิน NCC คือดินที่มีความดันที่กดทับในอดีต (Preconsolidation pressure, σ_p') เท่ากับความดันที่กดทับในปัจจุบัน (Overburden pressure, σ_0') ซึ่งทำให้ดินแบบนี้แสดงพฤติกรรมออกมาในรูปแบบที่เป็นปกติ ดังนั้นในการปรับแก้จึงกระทำได้ง่าย

วิธีการปรับแก้ ดินแบบ NCC

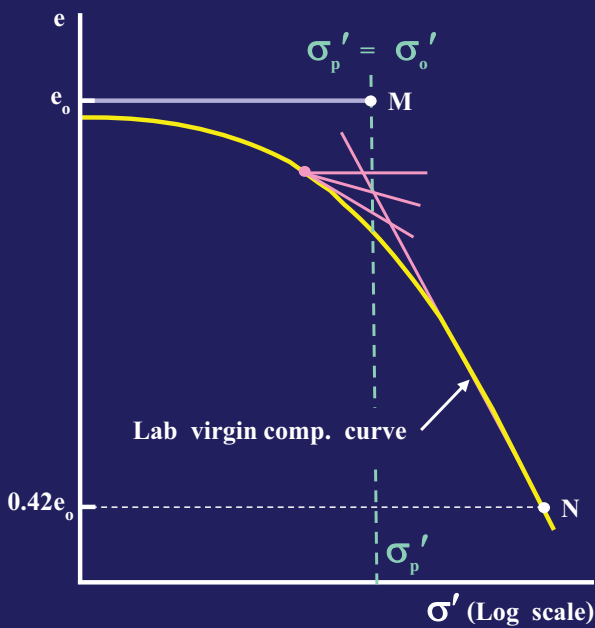


จากรูป จะเห็นกราฟ $e - \log p$ ซึ่งมีลักษณะเป็นส่วนโค้งในช่วงต้น และเป็นเส้นตรงในช่วงท้าย ถ้าหากหาค่าความลาดชันส่วนนี้จะได้ค่า C_c ที่ไม่ถูกต้องนัก เส้นกราฟนี้เรียกว่า Lab. virgin compression curve

หาค่า Preconsolidation pressure เนื่องจากดินเป็น NCC ดังนั้น $\sigma'_p = \sigma'_o$

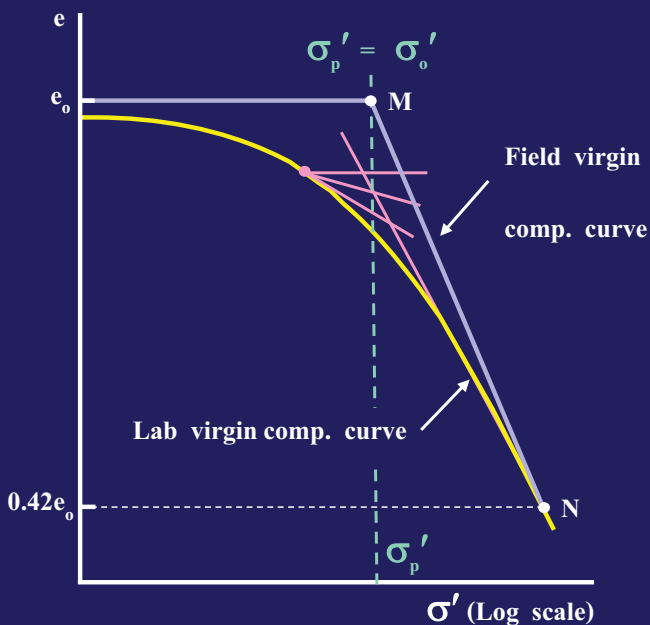
จาก e_o ลากเส้นขนานกับ แกน e มาตัด Preconsolidation pressure ที่ M

หาค่า $0.42e_o$ แล้วลากเส้นขนานกับ แกน e มาตัด เส้นกราฟที่จุด N

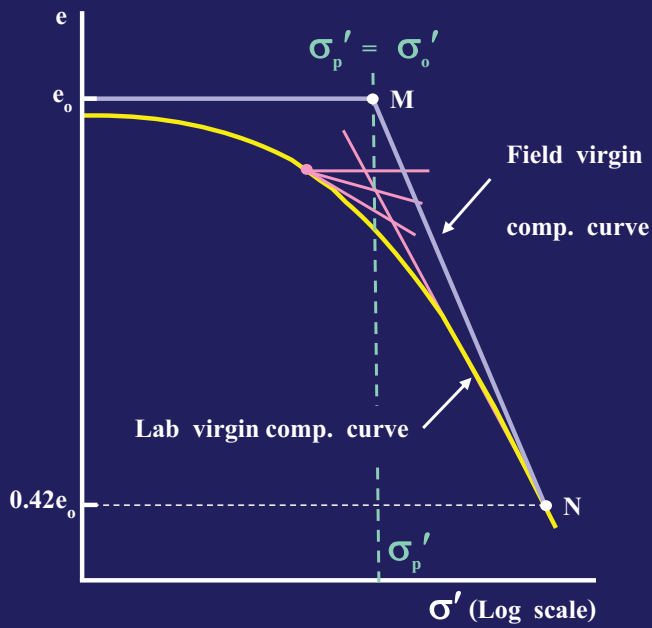


ลากเส้นตรงจากจุด N ไปยังจุด M เส้นนี้จะเรียกว่าเส้น Field virgin compression curve

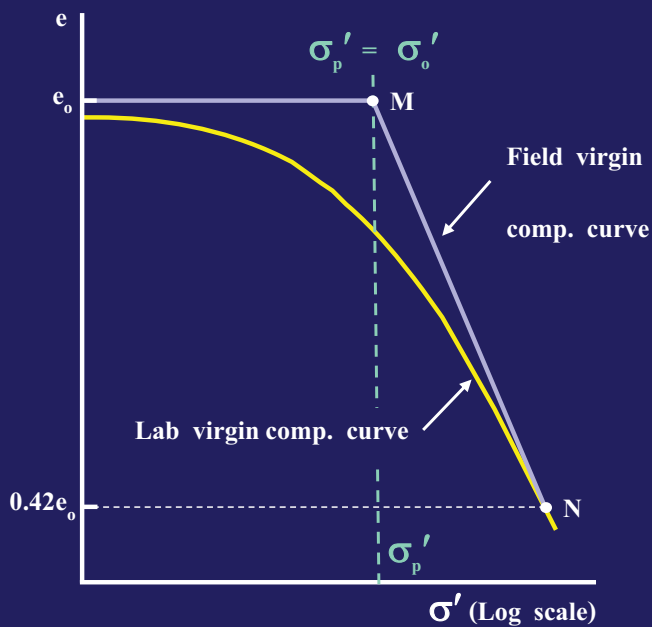
ดังนั้นจะเห็นว่าจากการปรับ Lab. เป็น Field virgin comp. curve เส้น MN (Slope = C_c) จะมีความลาดชันที่แตกต่างจากเส้น Lab. virgin comp. curve



เมื่อปรับแก้กราฟจาก Lab.
เป็น Field virgin comp.
curve ได้แล้ว ขั้นตอนต่อไป
คือหาค่า การเปลี่ยนแปลง
Void ratio, Δe

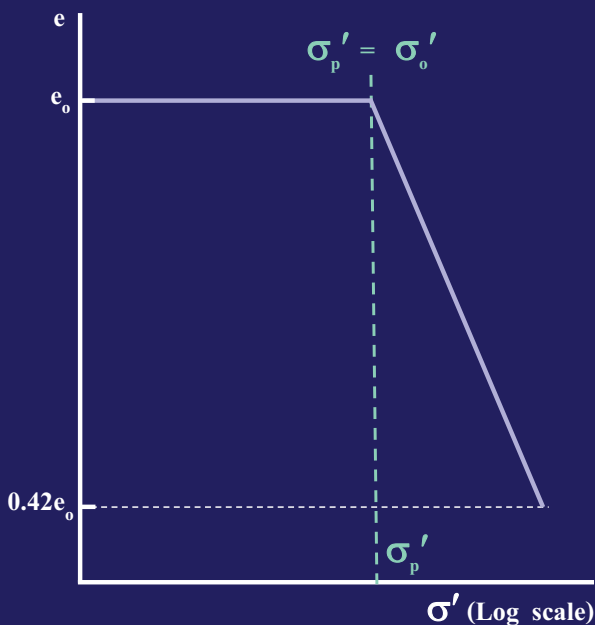
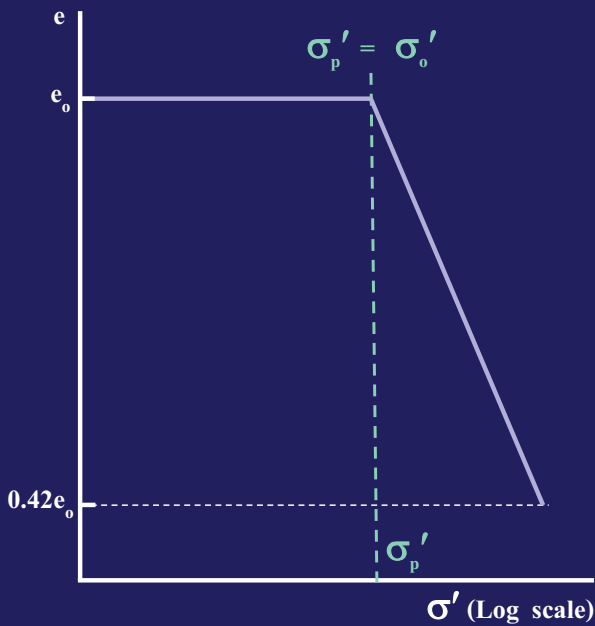


เมื่อปรับแก้กราฟจาก Lab.
เป็น Field virgin comp.
curve ได้แล้ว ขั้นตอนต่อไป
คือหาค่า การเปลี่ยนแปลง
Void ratio, Δe



เมื่อปรับแก้กราฟจาก Lab. เป็น Field virgin comp. curve ได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือหาค่า การเปลี่ยนแปลง Void ratio, Δe

ค่า Δe ที่ต้องการ จะอยู่ในช่วงของการเปลี่ยนแปลง Void ratio เนื่องจากการเพิ่มความเค้นในดิน



การเพิ่มความเค้นในดิน (เนื่องจากร้ำหนักกระทำที่ผิวดิน) มีช่วงจาก ความเค้นเนื่องจากร้ำหนักดิน (σ'_0) ถึงความเค้นเนื่องจากร้ำหนักดินรวมกับความเค้นเนื่องจากร้ำหนักกระทำที่ผิวดิน ($\sigma'_0 + \Delta\sigma$)

จากรูปหาค่า $\sigma'_0 + \Delta\sigma$
แล้วลากเส้นขึ้นไปตัดกราฟ

Field virgin comp. curve

จากสมการ

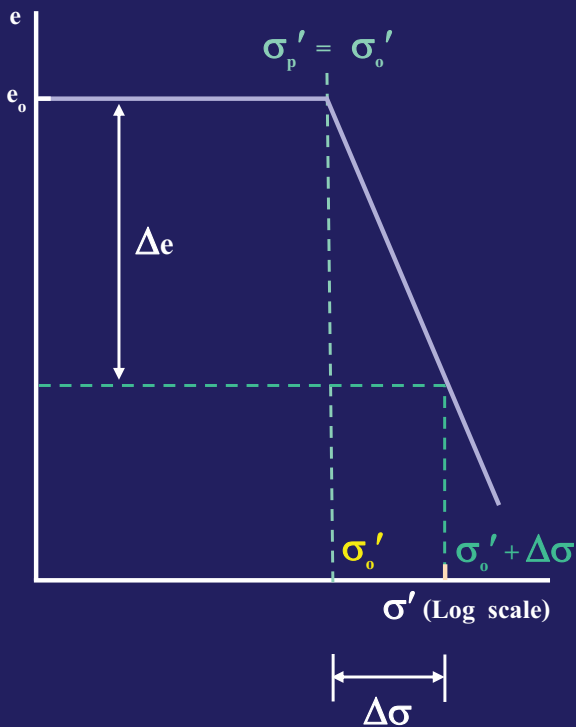
$$C_c = \Delta e / \Delta \log \sigma'$$

แทนค่า

$$\Delta e = C_c \cdot \Delta \log \sigma'$$

$$\Delta e = C_c [\log (\sigma'_0 + \Delta\sigma) - \log \sigma'_0]$$

$$\Delta e = C_c \cdot \log (\sigma'_0 + \Delta\sigma) / \sigma'_0$$



นำสมการ $\Delta e = C_c \cdot \log (\sigma'_0 + \Delta\sigma) / \sigma'_0$ แทนลงในสมการ
 $\Delta H = \Delta e \cdot H_0 / (1 + e_0)$ จะได้

$$\Delta H = C_c \cdot H_0 \cdot \log [(\sigma'_0 + \Delta\sigma) / \sigma'_0] / (1 + e_0)$$

เมื่อ

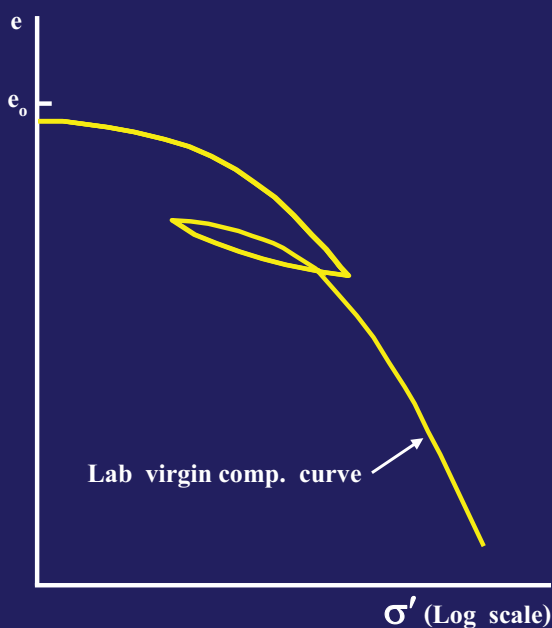
σ'_0 = ความเค้นประสิทธิผลเนื่องจากน้ำหนักดิน

$\Delta\sigma$ = ความเค้นในแนวตั้งเนื่องจากน้ำหนักกระทำที่ผิวดิน

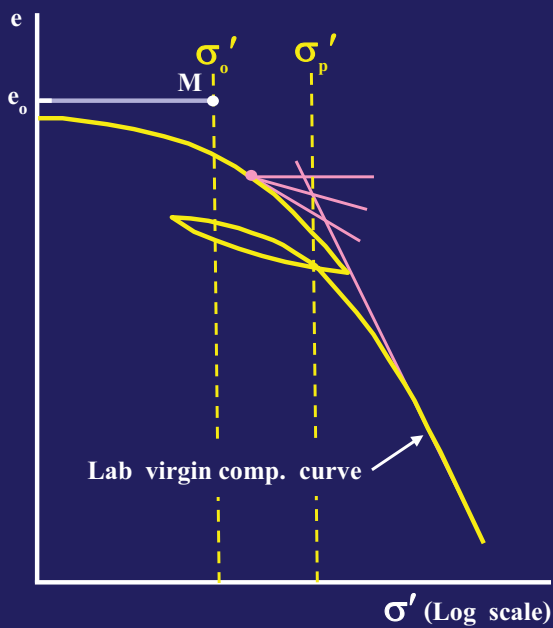
กรณีที่ 2 ดิน Overconsolidated clay (OCC)

ดิน OCC คือดินที่มีความดันที่กดทับในอดีต (Preconsolidation pressure, σ_p') มากกว่าความดันที่กดทับในปัจจุบัน (Overburden pressure, σ_o') ซึ่งทำให้ดินแบบนี้แสดงพฤติกรรมออกมาในรูปแบบที่ผิดปกติ ดังนั้นในการปรับแก้จึงกระทำได้ค่อนข้างยุ่งยาก

วิธีการปรับแก้ ดินแบบ OCC

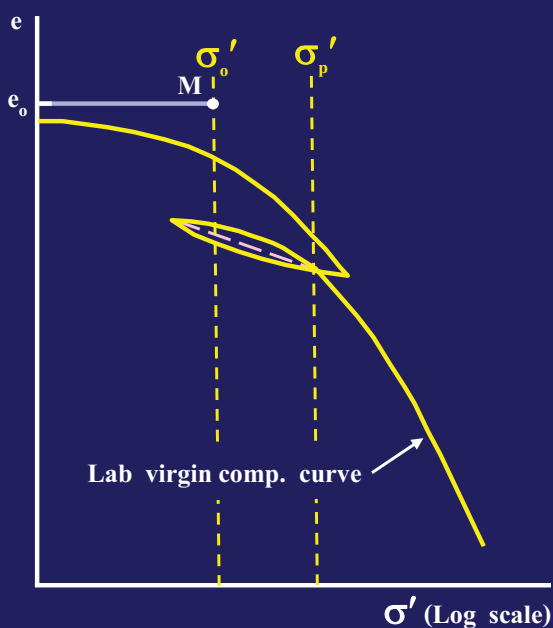


จากรูป จะเห็นกราฟ $e - \log p$ ซึ่งมีลักษณะเป็นส่วนโค้งในช่วงต้น และ เป็นเส้นตรงในช่วงท้าย ถ้าหากหาค่าความลาดชันส่วนนี้จะได้ค่า C_c ที่ไม่ถูกต้องนัก เส้นกราฟนี้เรียกว่า Lab. virgin compression curve



หาค่า Preconsolidation pressure และ Overburden pressure เนื่องจากดินเป็น OCC ดังนั้น $\sigma'_p > \sigma'_0$

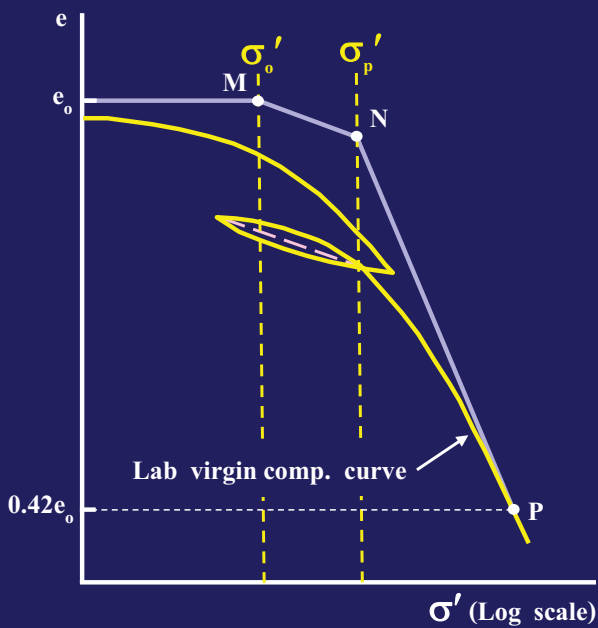
จาก e_0 ลากเส้นขนานกับแนวนอนมาตัด Overburden pressure ที่ M



หาค่า Preconsolidation pressure และ Overburden pressure เนื่องจากดินเป็น OCC ดังนั้น $\sigma'_p > \sigma'_0$

จาก e_0 ลากเส้นขนานกับแนวนอนมาตัด Overburden pressure ที่ M

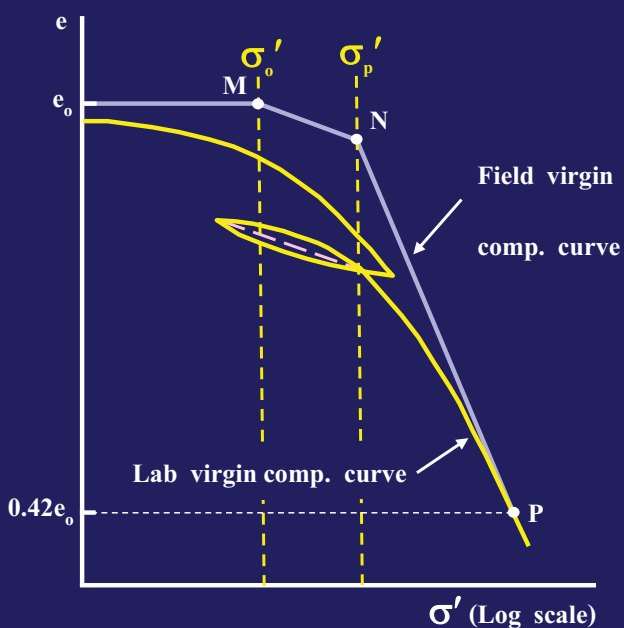
จากช่วง Rebound curve ลากเส้นตรง (Slope = C_c)



จากจุด M ลากเส้นขนาน
กับเส้นตรง Rebound curve
ไปตัดค่า Preconsolidation
pressure ที่ N

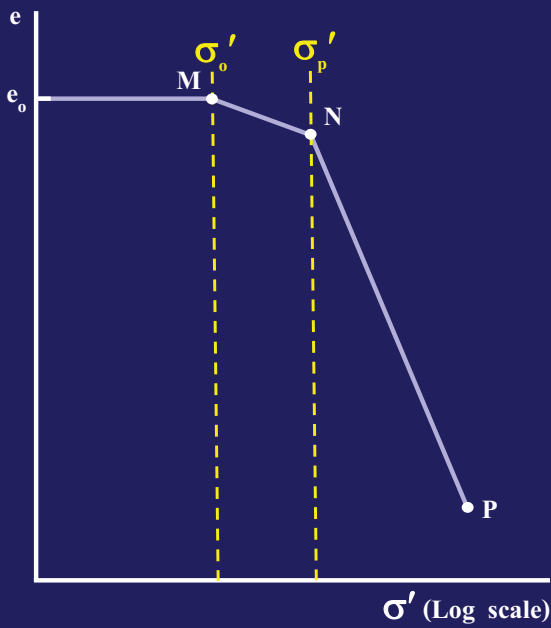
หาค่า $0.42e_0$ แล้วลากเส้น
ขนานกับแนวอนมาตัด
เส้นกราฟที่จุด P

ลากเส้นตรง PN



ดังนั้นจะเห็นว่ากราฟ Field
virgin comp. curve จะมึ
ความลาดชัน 2 ค่า คือ ช่วง
MN (Slope = C_c) และช่วง NP
(Slope = C_c)

เมื่อปรับแก้กราฟจาก Lab.
เป็น Field virgin comp.
curve ได้แล้ว ขั้นตอนต่อไป
คือหาค่า Δe



เนื่องจากค่า $\Delta\sigma$ ขึ้นอยู่กับ
ความลึกที่พิจารณา กล่าวคือ
ถ้ายิ่งพิจารณาที่ความลึกมาก
ค่า $\Delta\sigma$ จะยิ่งน้อย ดังนั้นใน
การหาความลาดชัน จึงต้อง
แบ่งเป็น 2 กรณี คือ

$$\sigma'_0 + \Delta\sigma > \sigma'_p$$

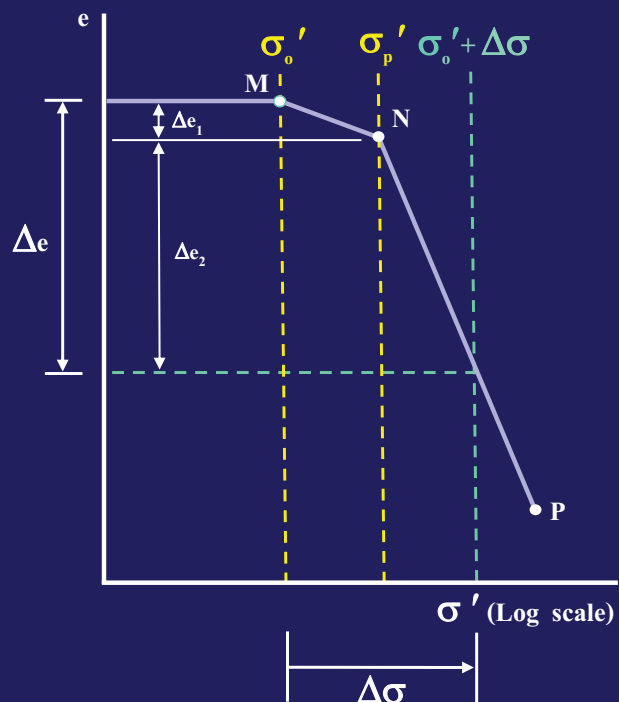
$$\sigma'_0 + \Delta\sigma \leq \sigma'_p$$

$$\sigma'_0 + \Delta\sigma > \sigma'_p$$

การเกิดกรณีนี้มักจะเกิดใน
บริเวณที่ใกล้กับผิวดิน ซึ่งค่า
 $\Delta\sigma$ มีค่ามาก ทำให้ค่า $\sigma'_0 + \Delta\sigma$
มีค่ามากกว่า σ'_p ดังรูป

ซึ่งจากรูปจะเห็นว่ามีความ
ลาดชัน 2 ช่วง คือ MN
และ NP หรือ

$$\Delta e = \Delta e_1 + \Delta e_2$$



$$\sigma'_o + \Delta\sigma > \sigma'_p$$

จากรูป

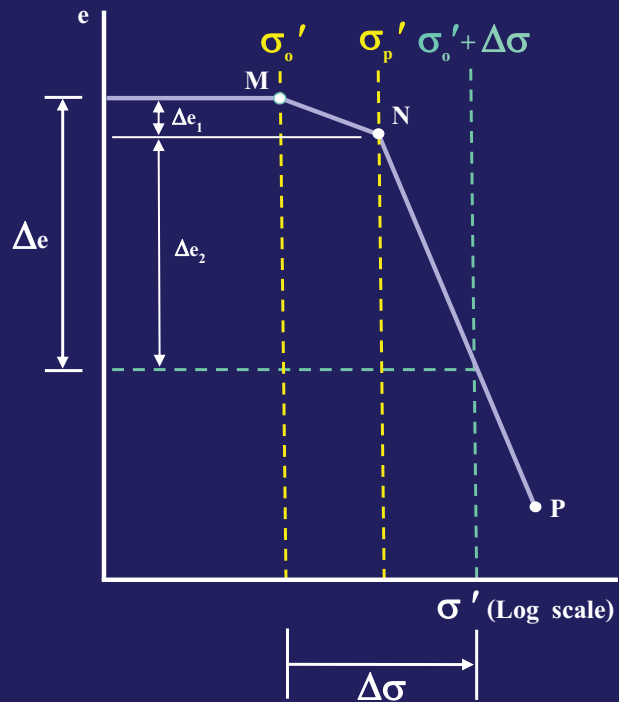
ความลาดชัน MN คือ C_e

ความลาดชัน NP คือ C_c

ดังนั้น

$$\Delta e_1 = C_e \cdot \log (\sigma'_p / \sigma'_o)$$

$$\Delta e_2 = C_c \cdot \log [(\sigma'_o + \Delta\sigma) / \sigma'_p]$$



แทนลงใน $\Delta H = \Delta e \cdot H_0 / (1 + e_0)$ จะได้

$$\Delta H = H_0 [C_e \cdot \log (\sigma'_p / \sigma'_o) + C_c \cdot \log [(\sigma'_o + \Delta\sigma) / \sigma'_p]] / (1 + e_0)$$

เมื่อ

C_e = Swell index

C_c = Compression index

σ'_o = Overburden pressure

H_0 = Depth of soil layer

$\Delta\sigma$ = Stress due to load

e_0 = Initial void ratio

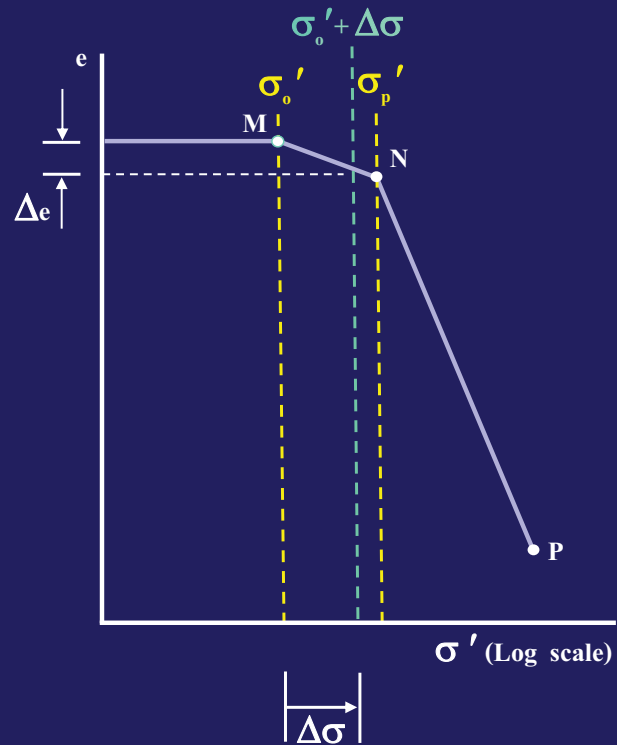
σ'_p = Preconsolidation pressure

$$\sigma'_0 + \Delta\sigma \leq \sigma'_p$$

การเกิดกรณีนี้มักจะเกิดในบริเวณที่ลึกจากผิวดินมาก ซึ่งค่า $\Delta\sigma$ มีค่าน้อย ทำให้ค่า $\sigma'_0 + \Delta\sigma$ มีค่าน้อยกว่า σ'_p ดังรูป

ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าค่า Δe อยู่ในช่วงความลาดชันของ MN (C_e) ดังนั้น

$$\Delta e = C_e \cdot \log [(\sigma'_0 + \Delta\sigma)/\sigma'_0]$$



แทนลงใน $\Delta H = \Delta e \cdot H_0 / (1 + e_0)$ จะได้

$$\Delta H = H_0 \cdot C_e \cdot \log [(\sigma'_0 + \Delta\sigma)/\sigma'_0] / (1 + e_0)$$

เมื่อ

C_e = Swell index

H_0 = Depth of soil layer

σ'_0 = Overburden pressure

e_0 = Initial void ratio

$\Delta\sigma$ = Stress due to load

สรุป

ดิน NCC

$$\Delta H = C_c \cdot H_0 \cdot \log [(\sigma'_0 + \Delta\sigma)/\sigma'_0] / (1 + e_0)$$

ดิน OCC

$$\sigma'_0 + \Delta\sigma > \sigma'_p$$

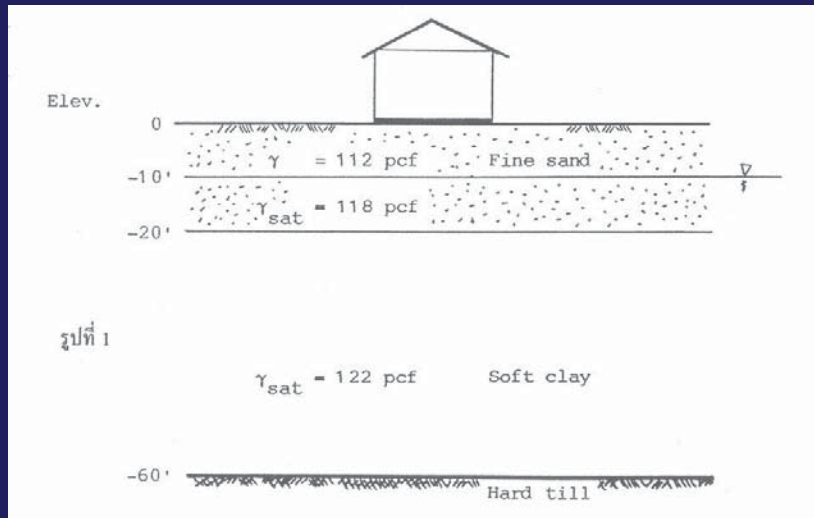
$$\Delta H = H_0 [C_c \cdot \log (\sigma'_p / \sigma'_0) + C_c \cdot \log [(\sigma'_0 + \Delta\sigma) / \sigma'_p]] / (1 + e_0)$$

$$\sigma'_0 + \Delta\sigma \leq \sigma'_p$$

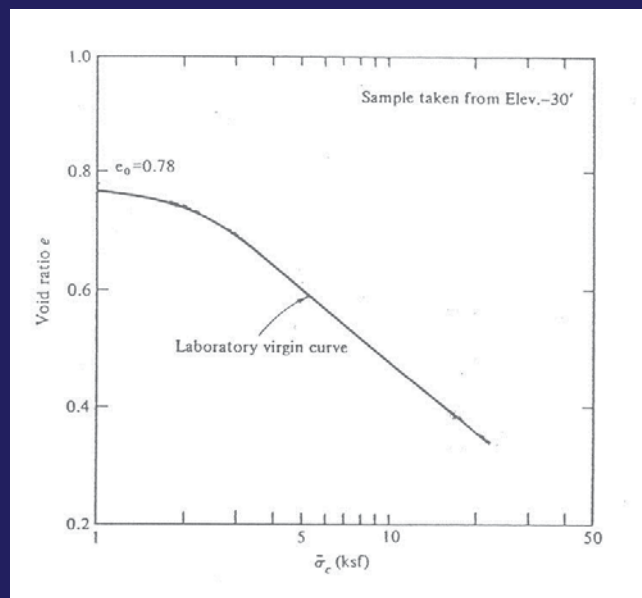
$$\Delta H = H_0 \cdot C_c \cdot \log [(\sigma'_0 + \Delta\sigma) / \sigma'_0] / (1 + e_0)$$

ตัวอย่างที่ 6.4

คลังสินค้ามีขนาด 40 x 100 ฟุต ถูกสร้างลงบนชั้นดินดังรูปที่ 1 ฐานรากของคลังสินค้าเป็นแบบ Mat foundation ถ้าสมมุติให้ฐานรากถ่ายน้ำหนักลงสม่ำเสมอ โดยเกิดความเค้นที่ผิว 2000 ปอนด์ต่อตารางฟุต และถ้าผลการทดลองการอัดตัวคายนํ้าเป็นดังรูปที่ 2 จงหาขนาดการทรุดตัวที่บริเวณกึ่งกลางอาคาร เนื่องจากการอัดตัวคายนํ้าของชั้นดินเหนียวอ่อน NCC

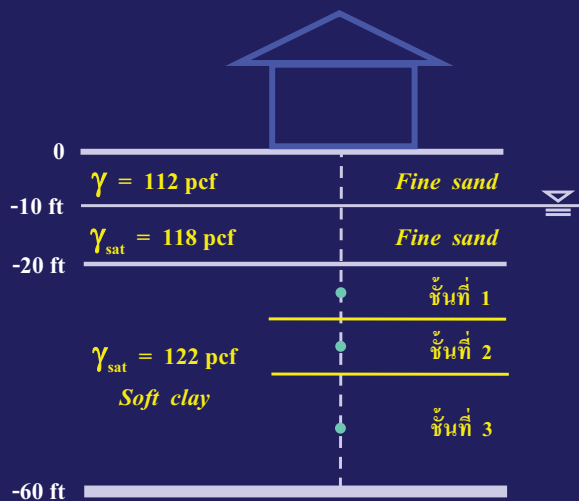


รูปที่ 1



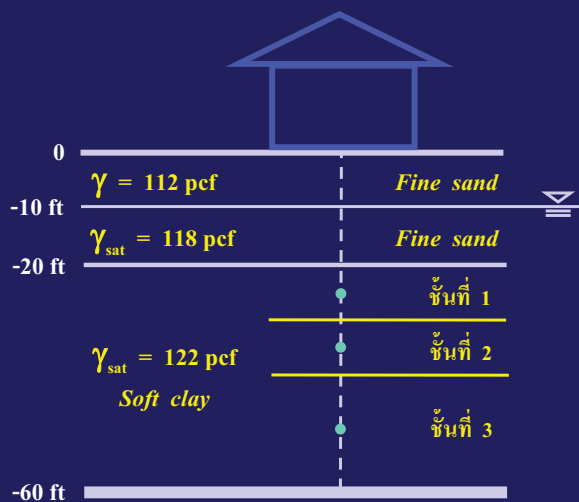
รูปที่ 2

วิธีทำ



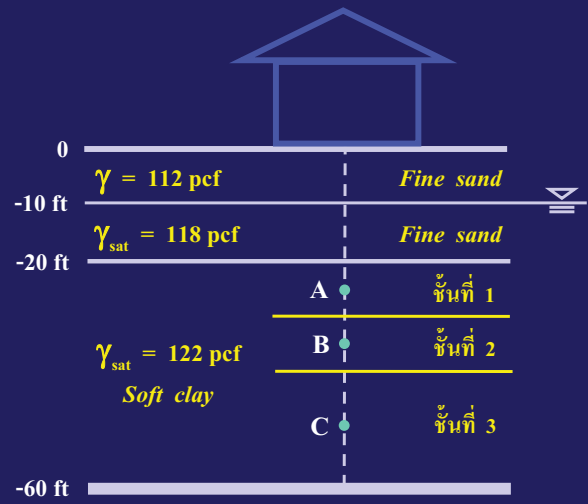
แบ่งชั้น Soft clay ออกเป็น 3 ชั้น โดยให้ชั้นที่ 1 และ 2 หนา 10 ฟุต และชั้นที่ 3 หนา 20 ฟุต

เนื่องจากโจทย์ต้องการหาขนาดการทรุดตัวที่บริเวณกึ่งกลางอาคาร ดังนั้นจึงต้องหาความเค้นบริเวณดังกล่าวที่จุดกึ่งกลางของชั้นดินทั้ง 3 ดังรูป



ความเค้นที่ต้องการหา คือ Overburden pressure, σ'_0 และ Stress due to load, $\Delta\sigma$

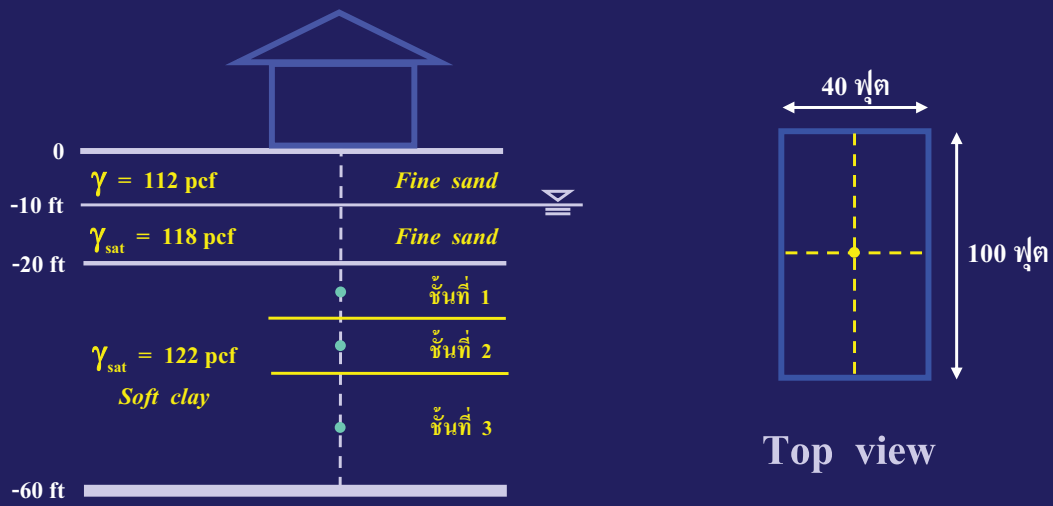
จากรูป จะได้ค่า Overburden pressure ดังแสดงในตาราง



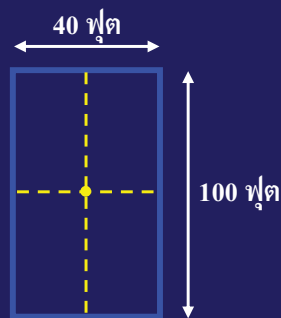
| จุด | ความลึก, ft | Overburden pressure, σ_o' , psf |
|-----|-------------|---|
| A | 25 | $112 \times 10 + 118 \times 10 + 122 \times 5 - 62.4 \times 15 = 1974$ |
| B | 35 | $112 \times 10 + 118 \times 10 + 122 \times 15 - 62.4 \times 25 = 2570$ |
| C | 50 | $112 \times 10 + 118 \times 10 + 122 \times 30 - 62.4 \times 40 = 3464$ |

จากนั้น หาค่า

Stress due to load, $\Delta\sigma$



ค่า $\Delta\sigma$ จะหาตรงบริเวณกึ่งกลางอาคาร ที่ความลึก 25, 35 และ 50 ฟุต ตามลำดับ ซึ่งจากการสังเกต จะเห็นว่าการหาค่า $\Delta\sigma$ ตรงกลางอาคารขนาด 40 x 100 ฟุต เปรียบเหมือนการหา $\Delta\sigma$ ของสี่เหลี่ยมขนาด 20 x 50 ฟุต ที่ตรงมุม 4 รูปรวมกัน

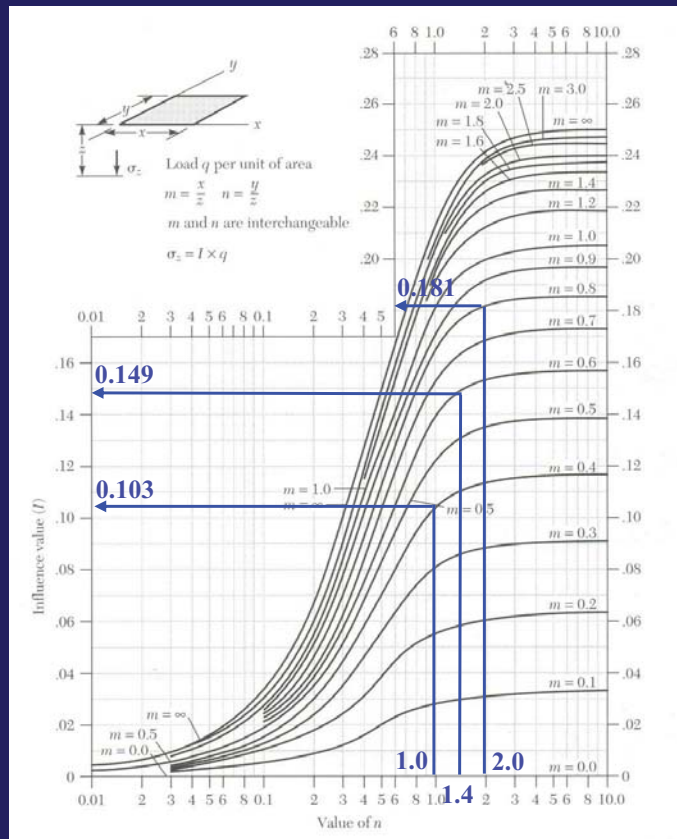


Top view

หาค่า Influence value จากรูป 4.16

| รูปขนาด | x (ft) | y (ft) | z (ft) | m = x/z | n = y/z |
|------------|--------|--------|--------|---------|---------|
| 20 x 50 ft | 20 | 50 | 25 | 0.8 | 2.0 |
| 20 x 50 ft | 20 | 50 | 35 | 0.57 | 1.4 |
| 20 x 50 ft | 20 | 50 | 50 | 0.40 | 1.0 |

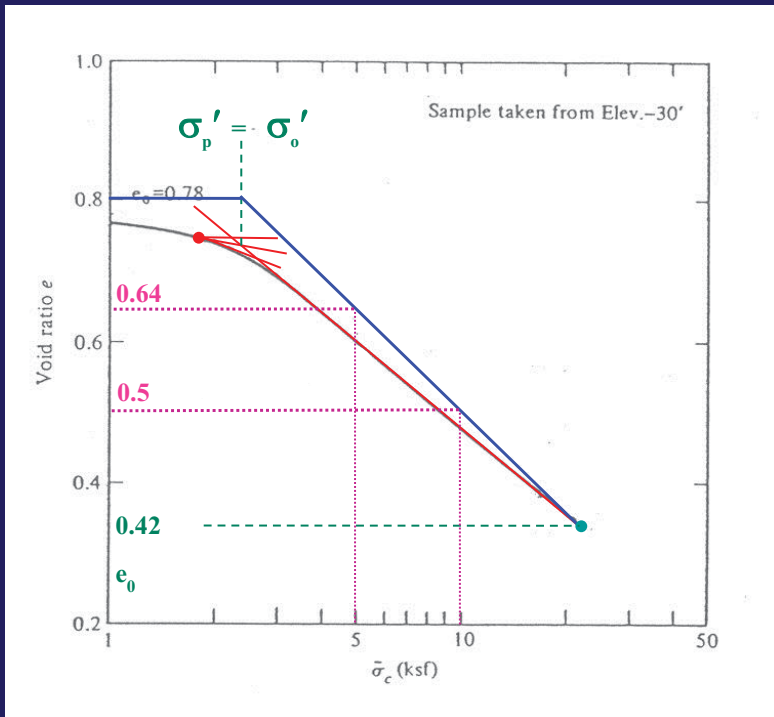
| | | | |
|-----------|-------|-------|-------|
| ลึก | 25 ft | 35 ft | 50 ft |
| $m = x/z$ | 0.8 | 0.57 | 0.4 |
| $n = y/z$ | 2.0 | 1.4 | 1.0 |
| I | 0.181 | 0.149 | 0.103 |



| รูป | x (ft) | y (ft) | z (ft) | $m = x/z$ | $n = y/z$ | I | $4 \times \Delta\sigma_z$ (psf) |
|------------|--------|--------|--------|-----------|-----------|-------|---------------------------------|
| 20 x 50 ft | 20 | 50 | 25 | 0.8 | 2.0 | 0.181 | 1448 |
| 20 x 50 ft | 20 | 50 | 35 | 0.57 | 1.4 | 0.149 | 1192 |
| 20 x 50 ft | 20 | 50 | 50 | 0.4 | 1.0 | 0.103 | 824 |

หมายเหตุ $\Delta\sigma_z = I \cdot q$, $q = 2000$ psf

หาค่า C_c จากกราฟ $e - \log p$



ปรับแก้กราฟ

หาค่าความลาดชัน

$$C_c = \Delta e / \Delta \log \sigma'$$

$$C_c = (0.64 - 0.5) / \log (10/5)$$

$$C_c = 0.46$$

หาขนาดการทรุดตัวของดินชั้นต่าง ๆ

| ชั้นที่ | ความหนา, (ft) | σ'_o (psf) | $\Delta\sigma$ (psf) | ΔH (ft) |
|---------|---------------|-------------------|----------------------|-----------------|
| 1 | 10 | 1974 | 1448 | 0.62 |
| 2 | 10 | 2570 | 1192 | 0.43 |
| 3 | 20 | 3464 | 824 | 0.48 |

$$\text{หมายเหตุ } \Delta H = C_c \cdot H_0 \cdot \log [(\sigma'_o + \Delta\sigma) / \sigma'_o] / (1 + e_0)$$

$$C_c = 0.46, e_0 = 0.78$$

$$\text{ดังนั้นขนาดการทรุดตัวทั้งหมด} = 0.62 + 0.43 + 0.48 = \mathbf{1.53 \text{ ft}} \quad \text{Ans}$$

ตัวอย่างที่ 6.5

จากตัวอย่างที่ 6.4 ถ้าดินเหนียวอ่อนเป็น OCC และจากการทดลองพบว่า ค่า Preconsolidation pressure มากกว่า Overburden pressure อยู่ 1000 psf ตลอดความลึก ค่าต่าง ๆ ของดินแสดงในตาราง จงหาขนาดการทรุดตัวที่บริเวณกึ่งกลางอาคาร เนื่องจากการอัดตัวคายน้ำของชั้นดินเหนียวอ่อนนี้

| ความลึก (ft) | C_c | C_e | e_0 |
|--------------|-------|-------|-------|
| 25 | 0.42 | 0.03 | 0.81 |
| 35 | 0.50 | 0.042 | 0.76 |
| 50 | 0.46 | 0.034 | 0.68 |

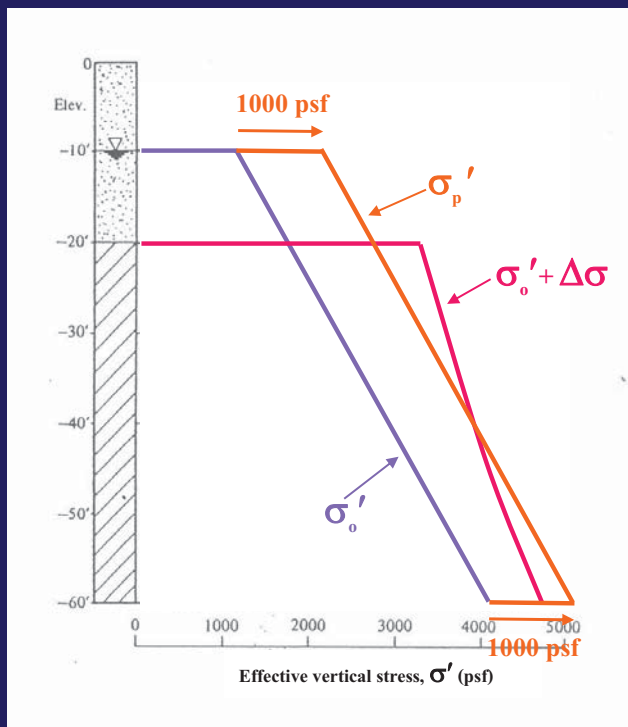
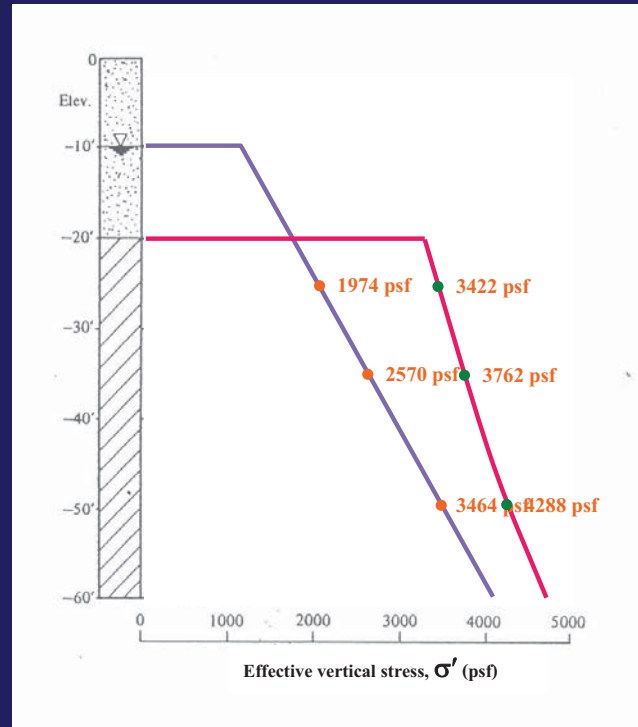
วิธีทำ

จากตัวอย่าง 6.4 นำค่า σ'_0 และ $\Delta\sigma$ มาหาค่า $\sigma'_0 + \Delta\sigma$

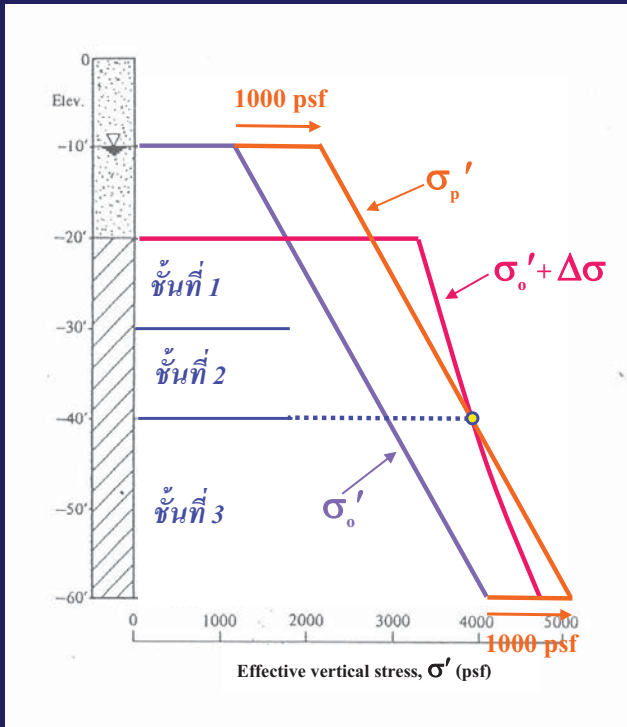
| ชั้นที่ | ความลึก (ft) | σ'_0 (psf) | $\Delta\sigma$ (psf) | $\sigma'_0 + \Delta\sigma$ (psf) |
|---------|--------------|-------------------|----------------------|----------------------------------|
| 1 | 25 | 1974 | 1448 | 3422 |
| 2 | 35 | 2570 | 1192 | 3762 |
| 3 | 50 | 3464 | 824 | 4288 |

พล็อตกราฟระหว่าง ความ
ลึกกับค่าความเค้นต่าง ๆ ที่ได้
จากตาราง

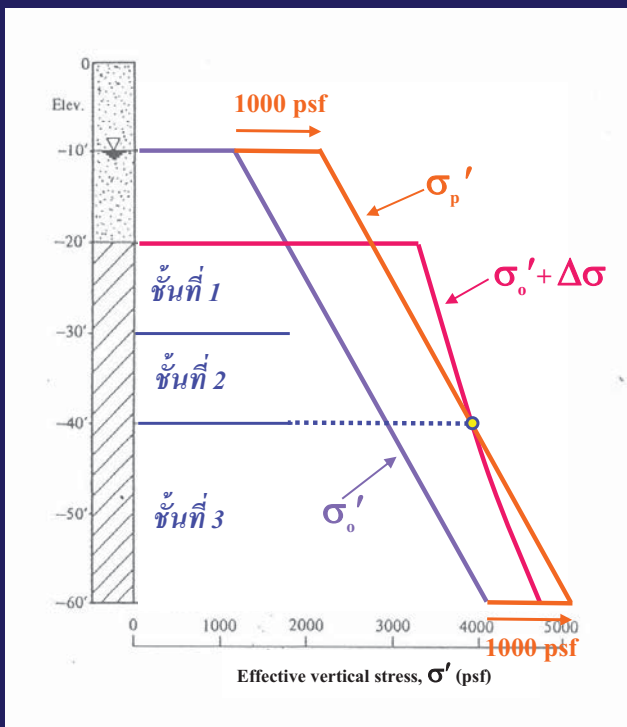
| ความลึก (ft) | σ'_0 (psf) | $\sigma'_0 + \Delta\sigma$ (psf) |
|-----------------|-------------------|-------------------------------------|
| 25 | 1974 | 3422 |
| 35 | 2570 | 3762 |
| 50 | 3464 | 4288 |



จากโจทย์ ดินเป็น OCC
และมีค่า $\sigma'_p > \sigma'_0$ อยู่
1000 psf ตลอดความลึก
ดังนั้น ลากเส้น σ'_p ลงในรูป



จากรูปจะเห็นว่าจุดตัด
ของเส้น σ'_p กับเส้น $\sigma'_0 + \Delta\sigma$
 อยู่บริเวณเส้นแบ่ง
ของชั้นที่ 2 และ 3 พอดี



แสดงว่า

ดินชั้นที่ 1 และ 2 มีค่า

$$\sigma'_0 + \Delta\sigma > \sigma'_p$$

และดินชั้นที่ 3 มีค่า

$$\sigma'_0 + \Delta\sigma \leq \sigma'_p$$

ดังนั้น ดินชั้นที่ 1 และ 2 จะใช้สมการ

$$\Delta H = H_0 [C_e \cdot \log (\sigma_p' / \sigma_o') + C_c \cdot \log [(\sigma_o' + \Delta\sigma) / \sigma_p']] / (1 + e_0)$$

และ ดินชั้นที่ 3 จะใช้สมการ

$$\Delta H = H_0 \cdot C_e \cdot \log [(\sigma_o' + \Delta\sigma) / \sigma_o'] / (1 + e_0)$$

หาขนาดการทรุดตัวของดินชั้นที่ 1 และ 2

| ชั้นที่ | ความ หนา (ft) | σ_o' (psf) | σ_p' (psf) | $\Delta\sigma$ (psf) | ΔH (ft) |
|---------|------------------|-------------------|-------------------|----------------------|--------------------|
| 1 | 10 | 1974 | 2974 | 1448 | 0.17 |
| 2 | 10 | 2570 | 3570 | 1192 | 0.06 |

หมายเหตุ

$$\Delta H = H_0 [C_e \cdot \log (\sigma_p' / \sigma_o') + C_c \cdot \log [(\sigma_o' + \Delta\sigma) / \sigma_p']] / (1 + e_0)$$

| ชั้นที่ | C_c | C_e | e_0 |
|---------|-------|-------|-------|
| 1 | 0.42 | 0.03 | 0.81 |
| 2 | 0.50 | 0.042 | 0.76 |

หาขนาดการทรุดตัวของดินชั้นที่ 3

| ชั้นที่ | ความหนา (ft) | σ'_0 (psf) | $\Delta\sigma$ (psf) | ΔH (ft) |
|---------|--------------|-------------------|----------------------|-----------------|
| 3 | 20 | 3464 | 824 | 0.04 |

หมายเหตุ

$$\Delta H = H_0 \cdot C_e \cdot \log [(\sigma'_0 + \Delta\sigma) / \sigma'_0] / (1 + e_0)$$

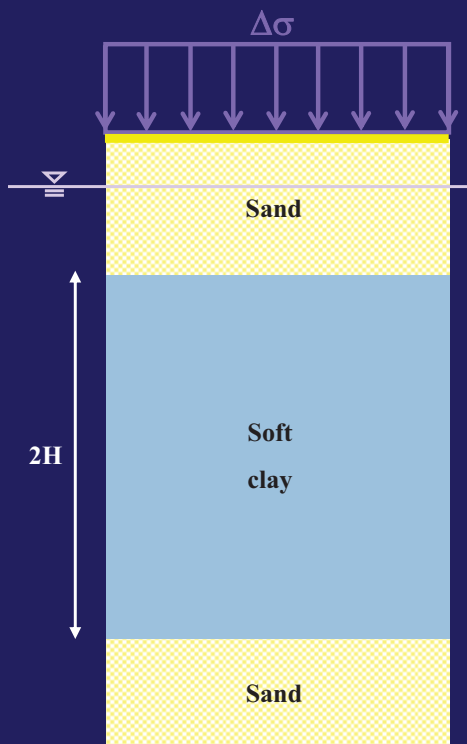
| ชั้นที่ | C_e | e_0 |
|---------|-------|-------|
| 3 | 0.034 | 0.68 |

ดังนั้นขนาดการทรุดตัวทั้งหมด

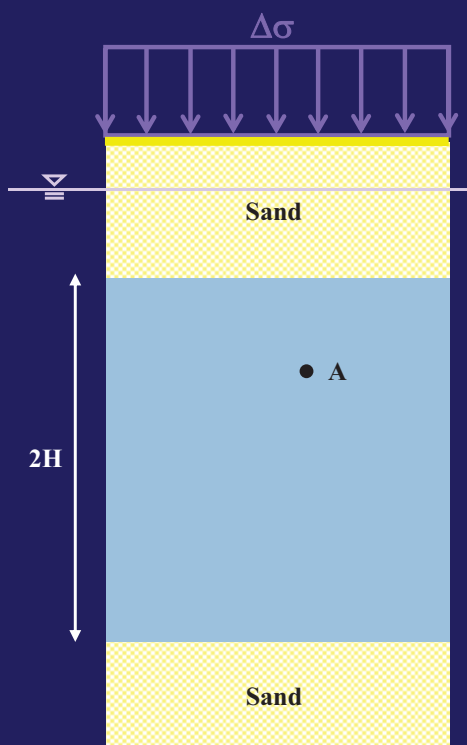
$$= 0.17 + 0.06 + 0.04 = 0.27 \text{ ft}$$

Ans

อัตราการอัดตัวคายนํ้า

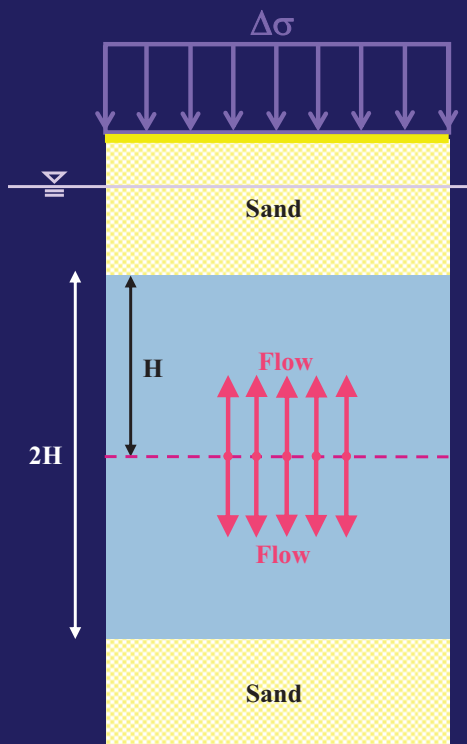


เมื่อดินเหนียวอ่อนหนา $2H$ อยู่ในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำและมีชั้นทรายประกบอยู่ทั้งสองด้าน ภูคนํ้าหนักแผ่กระจายสม่ำเสมอเป็นบริเวณกว้าง ($\Delta\sigma$) กระทำที่ผิวดินดังรูป นํ้าในช่องว่างระหว่างเม็ดดินจะเกิดความดันขึ้น และจะพยายามหนีออกไปบริเวณอื่น



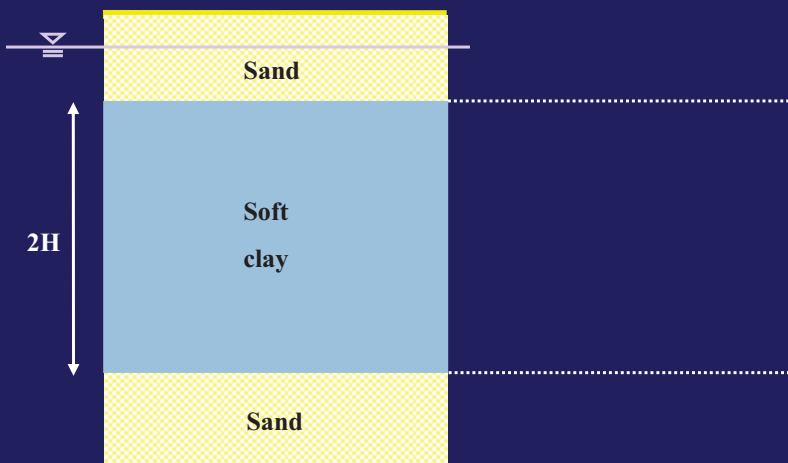
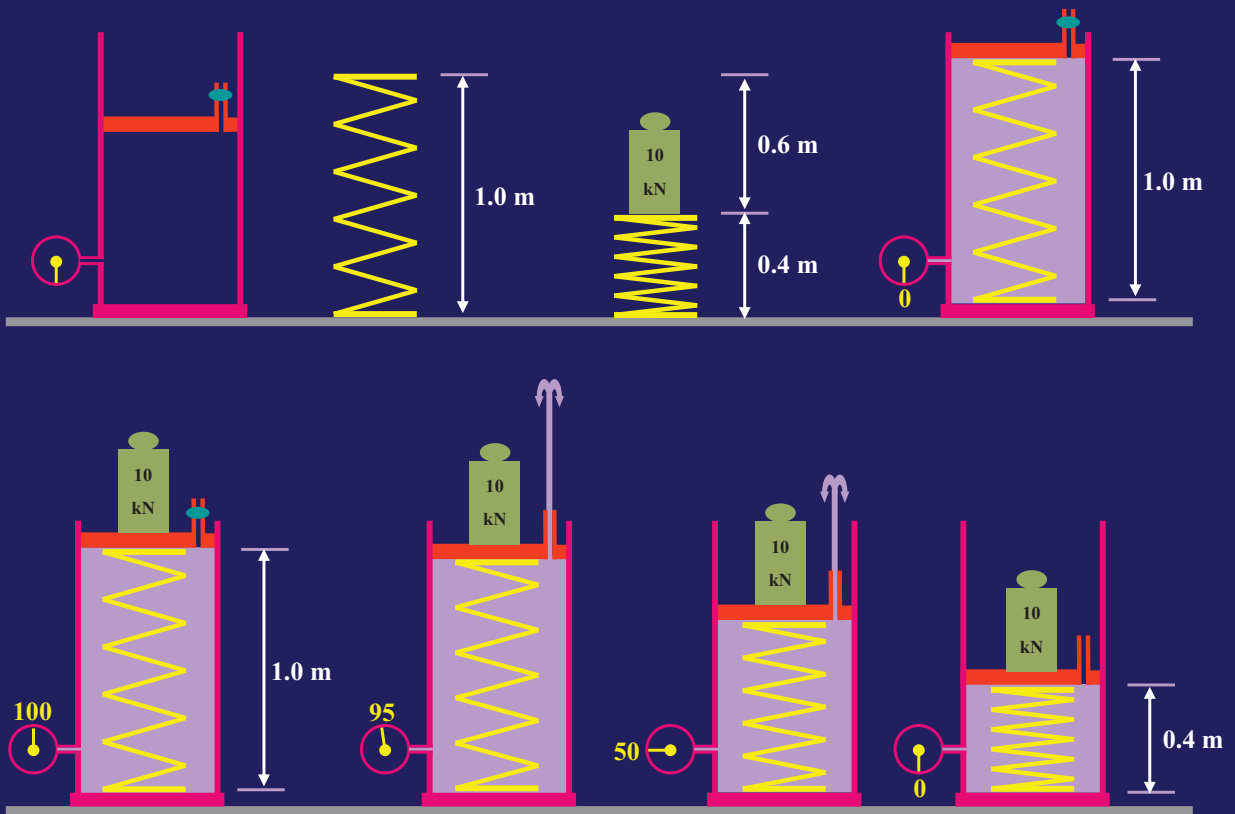
การไหลหนีของน้ำ จะไหลไปในบริเวณที่หนีออกไปได้เร็วที่สุด ซึ่งหากชั้นดินเหนียวอ่อน กว้าง ยาวไม่สิ้นสุด ดังนั้นน้ำจะไหลหนีไปยังชั้นทรายที่ประกบอยู่ คือไหลขึ้นและลง

หากดินเหนียวอ่อน Homogeneous จะทำให้การไหลหนีของน้ำออกไปได้เร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับระยะทาง ดังนั้นหากพิจารณาที่จุด A เราจะสมมุติว่าน้ำจะไหลขึ้นข้างบนเพราะระยะทางสั้นกว่าการไหลลงข้างล่าง

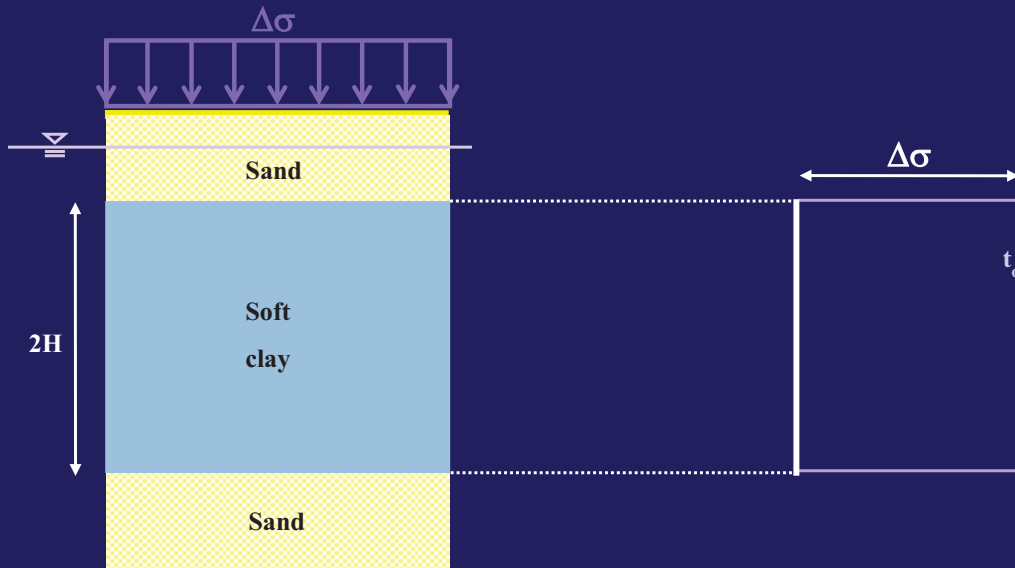


หากพิจารณาที่จุดกึ่งกลางของชั้นดินเหนียวอ่อน จะได้ว่าระยะทางที่สั้นที่สุดที่น้ำจะไหลหนีออกไปได้ คือ H (ถ้าหากเป็นการระบายน้ำแบบ Double drainage)

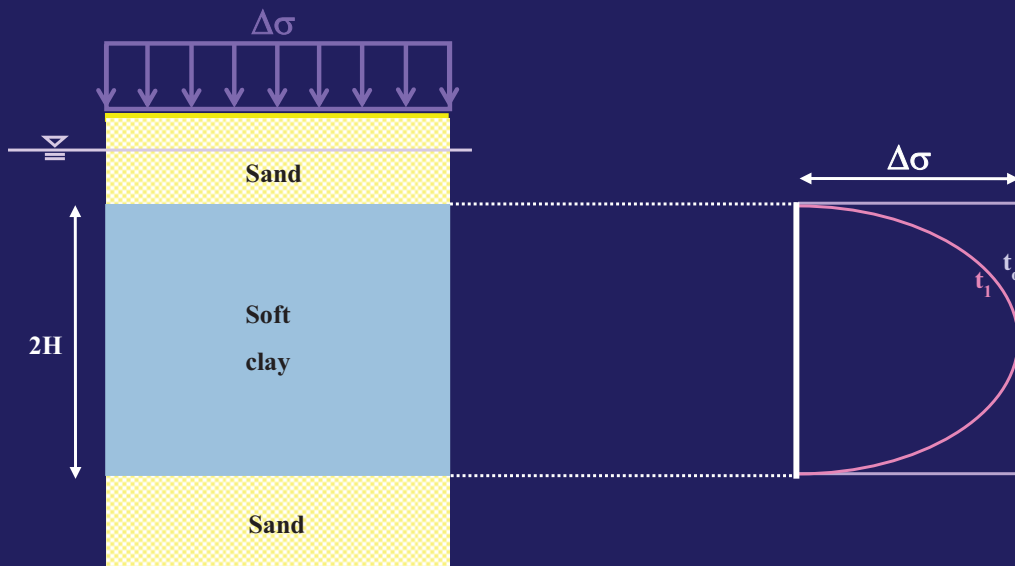
หากนำค่าความดันโพรงที่เพิ่มขึ้น (Excess pore water pressure) ของชั้นดินเหนียวอ่อนมาพล็อตกราฟตามเวลาต่าง ๆ จะทำให้เข้าใจ อัตราการอัดตัวคายน้ำ (Rate of consolidation) มากขึ้น



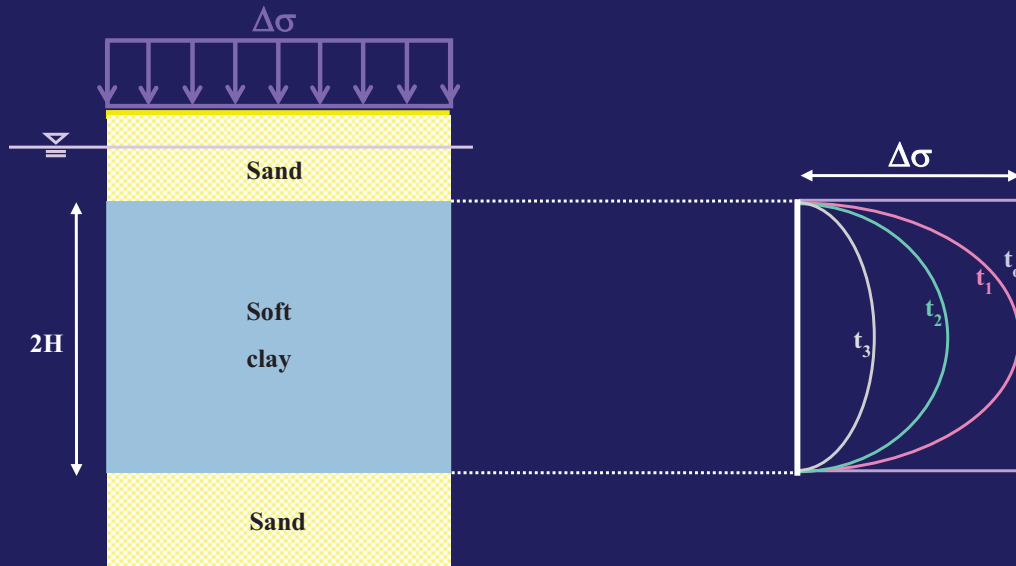
จากรูป จะเห็นชั้นดินเหนียวอ่อนอิ่มตัวด้วยน้ำ เมื่อไม่มีน้ำหนักกระทำบนผิวดินจะทำให้ค่า Excess pore water pressure = 0 ตลอดความหนาของชั้นดิน ดังแสดงในเส้นกราฟสีขาว



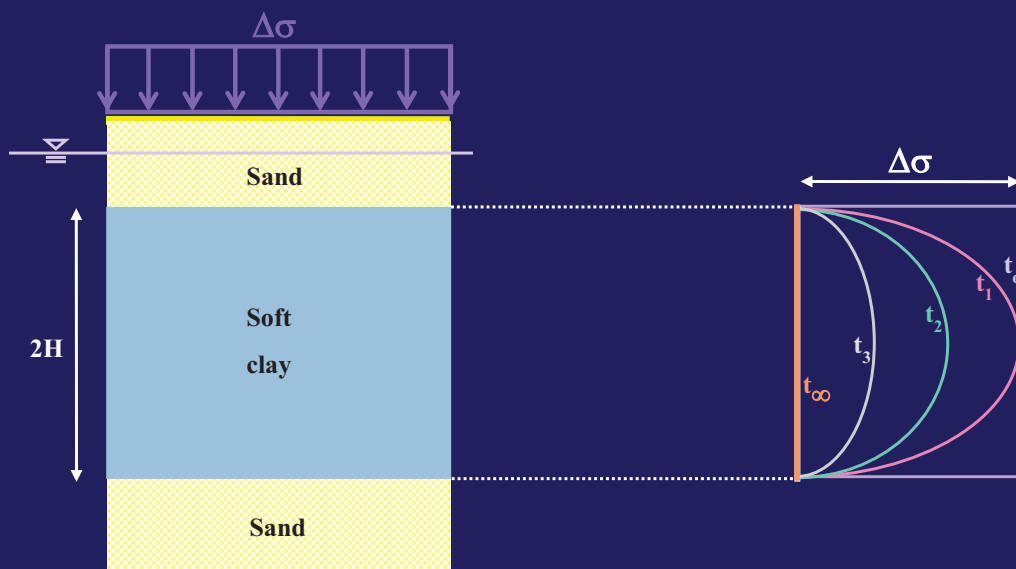
เมื่อมีน้ำหนักแผ่กระจายสม่ำเสมอ ภาระทำบนผิวดินเป็นบริเวณกว้าง ที่เวลา t_0 น้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินจะเกิดความดันขึ้น (Excess pore water pressure) เท่ากันตลอดความหนาเท่ากับ $\Delta\sigma$ และจะพยายามหนีออกไป



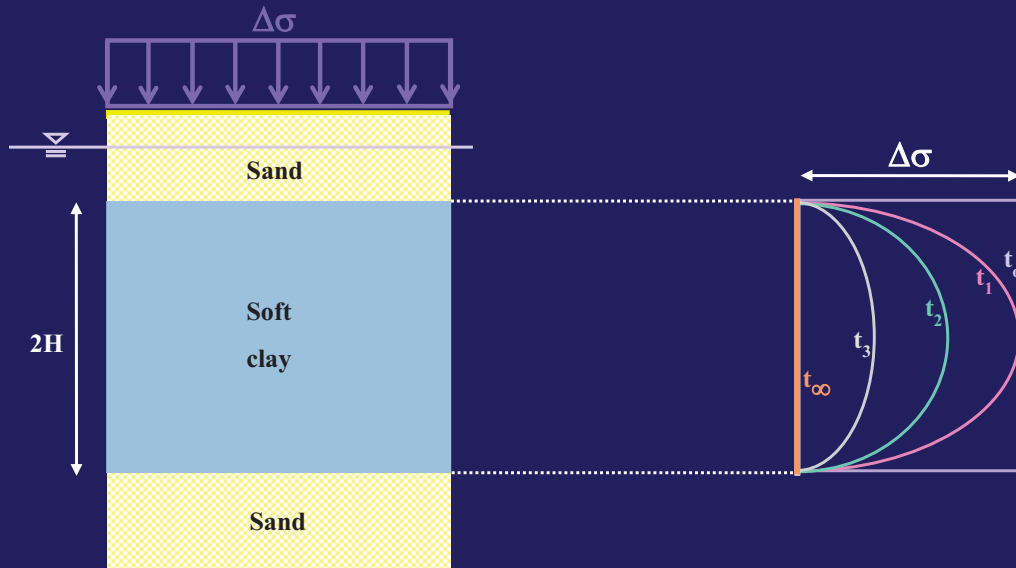
เมื่อเวลาผ่านไปเป็น t_1 น้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินที่อยู่ใกล้ชั้นทรายสามารถหนีออกไปได้เร็วกว่าน้ำในบริเวณอื่น ดังนั้นความดันของน้ำบริเวณใกล้ชั้นทรายจึงเท่ากับ 0 แต่บริเวณอื่นยังมีความดันอยู่



เมื่อเวลาผ่านไปเป็น t_2 และ t_3 น้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินที่บริเวณอื่น สามารถระบายออกได้บ้างแล้ว ทำให้ความดันของน้ำบริเวณนั้นเริ่มลดลง



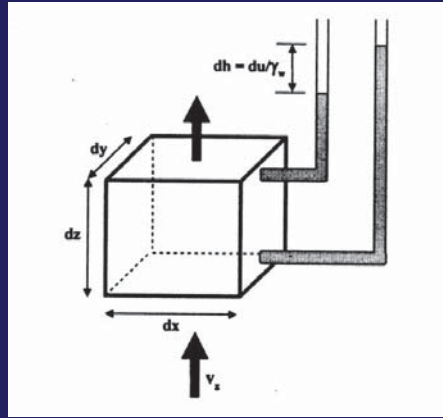
จนกระทั่งเมื่อเวลานานมาก t_∞ น้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (Excess pore water pressure) จะมีความดันเท่ากับ 0 และการอัดตัวคายนํ้าเสร็จสิ้นแล้ว



เส้นกราฟเหล่านี้เรียกว่า Isochrone

Terzaghi ได้เสนอทฤษฎีเกี่ยวกับอัตราการอัดตัวคายน้ำในรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ โดยมีสมมุติฐาน ดังนี้

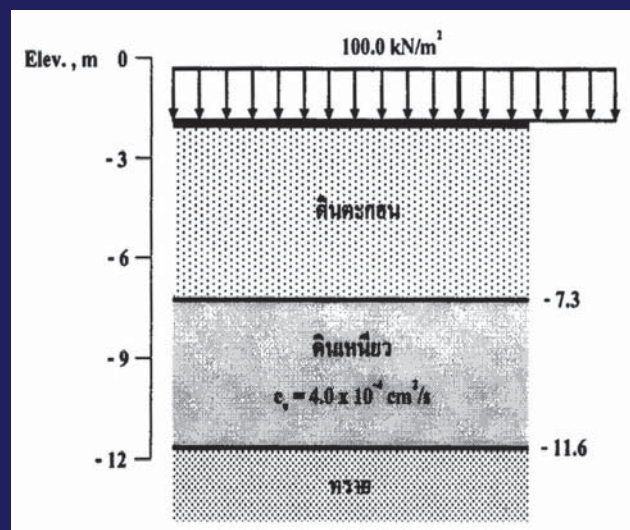
- ดิน Homogeneous
- ดินมีค่า k คงที่
- ดิน Saturated
- ดินและน้ำอัดตัวไม่ได้
- One dimensional consolidation
- One dimensional flow
- การไหลของน้ำเป็นไปตาม Darcy's law



อัตราการไหลออกของน้ำ – อัตราการไหลเข้าของน้ำ = อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตร

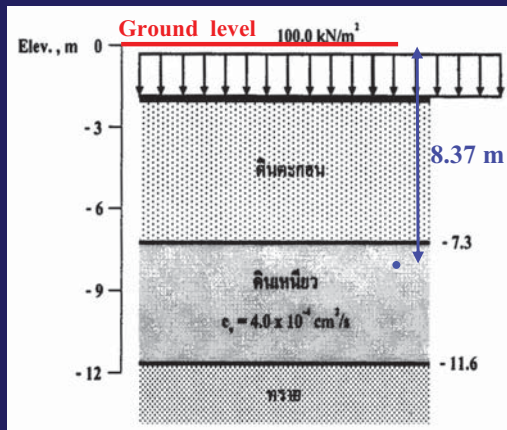
ตัวอย่างที่ 6.6

ชั้นดินประกอบด้วยชั้นบนเป็นดินตะกอนหนา 7.3 เมตร ถูกขุดให้ลึก 2.0 เมตร เพื่อก่อสร้างอาคาร โดยอาคารจะทำให้เกิดความเค้นที่ผิวดินเท่ากับ 100 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร เป็นบริเวณกว้างใต้ชั้นดินตะกอนเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนอิ่มตัวหนา 4.26 เมตร และได้ชั้นดินเหนียวเป็นชั้นทราย ดังรูป หลังจากสร้างอาคารเสร็จ 6 เดือน จงหาค่าความดันโพรงที่เพิ่มขึ้นที่ความลึก 8.37 เมตร



วิธีทำ

เนื่องจากชั้นดินที่ประกบชั้นดินเหนียวอยู่เป็นชั้นดินที่มีค่า k สูงกว่าดินเหนียว ดังนั้นจึงเป็นการระบายน้ำสองทิศทาง (Double drainage)



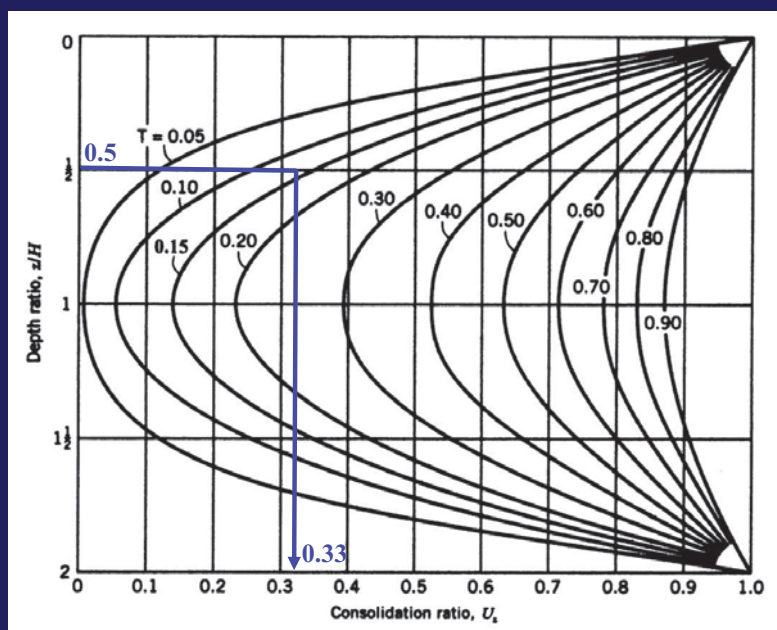
$$\text{ดังนั้น } H = 4.26/2 = 2.13 \text{ m}$$

$$Z/H = (8.37 - 7.30)/2.13 = 0.5$$

$$c_v = 4 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s} = 1.26 \text{ m}^2/\text{yr}$$

$$t = 6 \text{ months} = 0.5 \text{ yr}$$

จากสมการ $T = c_v \cdot t/H^2$ แทนค่า จะได้ $T = 1.26 \times 0.5/(2.13)^2$
 $T = 0.139$ ดังนั้นจากรูป 6.21, $Z/H = 0.5$



จะได้ค่า

$$U_z = 0.33$$

จากสมการ $U_z = 1 - u/u_i$ แทนค่า $u_i = 100 \text{ kN/m}^2$

$$0.33 = 1 - u/100$$

$$u = 67.0 \text{ kN/m}^2$$

Ans

ตัวอย่างที่ 6.7

ชั้นดินเหนียวอิ่มตัวหนา 40 ฟุต มีค่า $c_v = 0.002 \text{ in}^2/\text{min}$ ชั้นดินนี้มีชั้นทรายหยาบประกบอยู่ทั้งสองด้าน เมื่อมีน้ำหนักมากระทำที่ผิวดิน ค่าการกระจายความดันโพรงที่เพิ่มขึ้นจะแปรผันเป็นเส้นตรงกับความลึก จากการวิเคราะห์ทราบว่า การทรุดตัวทั้งหมดเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำเท่ากับ 21.0 นิ้ว จงหาขนาดการทรุดตัวเมื่อเวลาผ่านไป 3 ปี

วิธีทำ

เนื่องจากมีการระบายน้ำสองทิศทาง เพราะมีชั้นทราย
ประกบอยู่ ดังนั้นค่า $H = 40.0/2 = 20.0$ ft, $t = 3$ yrs = $3 \times$
 $365 \times 24 \times 60 = 1,576,800$ min

$$\text{แทนค่าลงในสมการ } T = c_v \cdot t / H^2$$

$$T = 0.002 \times 1,576,800 / (20 \times 12)^2$$

$$T = 0.0548$$

จากการที่มีน้ำหนักมากกระทำที่
ผิวดิน ค่าการกระจายความดัน
โพรงที่เพิ่มขึ้นมีลักษณะแปรผัน
เป็นเส้นตรงกับความลึก ดังนั้น
จึงใช้ตารางที่ 6.5 Case 1 เพื่อหา
ค่า Average degree of
consolidation

เมื่อ $T = 0.0548$ ดังนั้น

$$U = 26.4 \%$$

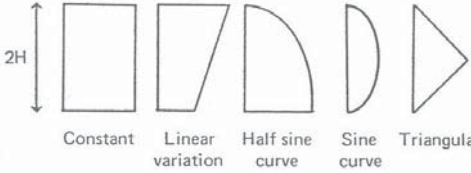


Diagram illustrating pore pressure distribution cases (CASE 1 to CASE 4) for consolidation. The vertical axis is labeled 2H. The cases are: CASE 1 (Constant), CASE 2 (Linear variation), CASE 3 (Half sine curve), CASE 4 (Sine curve), and CASE 5 (Triangular).

| Average Degree of Consolidation, U (%) | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|
| T | Case 1 | Case 2 | Case 3 | Case 4 |
| 0.004 | 7.14 | 6.49 | 0.98 | 0.80 |
| 0.008 | 10.09 | 8.62 | 1.95 | 1.60 |
| 0.012 | 12.36 | 10.49 | 2.92 | 2.40 |
| 0.020 | 15.96 | 13.67 | 4.81 | 4.00 |
| 0.028 | 18.88 | 16.38 | 6.67 | 5.60 |
| 0.036 | 21.40 | 18.76 | 8.50 | 7.20 |
| 0.048 | 24.72 | 21.96 | 11.17 | 9.60 |
| 0.060 | 27.64 | 24.81 | 13.76 | 11.99 |
| 0.072 | 30.28 | 27.43 | 16.28 | 14.36 |
| 0.083 | 32.51 | 29.67 | 18.52 | 16.51 |
| 0.100 | 35.68 | 32.88 | 21.87 | 19.77 |
| 0.125 | 39.89 | 36.54 | 26.54 | 24.42 |
| 0.150 | 43.70 | 41.12 | 30.93 | 28.86 |
| 0.175 | 47.18 | 44.73 | 35.07 | 33.06 |
| 0.200 | 50.41 | 48.09 | 38.95 | 37.04 |
| 0.250 | 56.22 | 54.17 | 46.03 | 44.32 |
| 0.300 | 61.32 | 59.50 | 52.30 | 50.78 |
| 0.350 | 65.82 | 64.21 | 57.83 | 56.49 |
| 0.400 | 69.79 | 68.36 | 62.73 | 61.54 |
| 0.500 | 76.40 | 76.28 | 70.88 | 69.95 |
| 0.600 | 81.56 | 80.69 | 77.25 | 76.52 |
| 0.700 | 85.59 | 84.91 | 82.22 | 81.65 |
| 0.800 | 88.74 | 88.21 | 86.11 | 85.66 |
| 0.900 | 91.20 | 90.79 | 89.15 | 88.80 |
| 1.000 | 93.13 | 92.80 | 91.52 | 91.25 |
| 1.500 | 98.00 | 97.90 | 97.53 | 97.45 |
| 2.000 | 99.42 | 99.39 | 99.28 | 99.26 |

ดังนั้น การทรุดตัวที่ระยะเวลา 3 ปี

$$\text{เท่ากับ } 0.264 \times 21.0 = 5.5 \text{ นิ้ว}$$

Ans

ตัวอย่างที่ 6.8

ชั้นดินเหนียวอิ่มตัวหนา 15.0 เมตร มีค่า $c_v = 0.019 \text{ cm}^2/\text{min}$ ชั้นดินนี้มีชั้นทรายประกอบอยู่ด้านบน ส่วนด้านล่างเป็นชั้นหินแข็งน้ำซึมผ่านไม่ได้ ถ้ากราฟการกระจายความดันโพรงที่เพิ่มขึ้นเป็นรูป Sine curve จงหาว่าจะต้องใช้เวลากี่ปี จึงจะทำให้เกิดการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ 50 % ของทั้งหมด

วิธีทำ

เนื่องจากมีการระบายน้ำทิศทางเดียว เพราะมีชั้นทราย
ประกบอยู่ด้านบนและมีชั้นหินแข็งประกบอยู่ด้านล่าง ดังนั้น
ค่า $H = 15.0 \text{ m}$, $c_v = 0.019 \text{ cm}^2/\text{min}$

และ $U = 50 \%$

จากการที่มีน้ำหนักมากกระทำที่
ผิวดิน ถ้ากราฟการกระจายความ
ดันโพรงที่เพิ่มขึ้นเป็นรูป Sine
curve ดังนั้นจึงใช้ตารางที่ 6.6
Case 3 เพื่อหาค่า Time factor

เมื่อ $U = 50 \%$ ดังนั้น

$$T = 0.281$$

| U (%) | Time Factor T | | | |
|-------|---------------|----------|----------|----------|
| | Case 1 | Case 2 | Case 3 | Case 4 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0.0020 | 0.0030 | 0.0208 | 0.0250 |
| 10 | 0.0078 | 0.0111 | 0.0427 | 0.0500 |
| 15 | 0.0177 | 0.0238 | 0.0659 | 0.0753 |
| 20 | 0.0314 | 0.0405 | 0.0904 | 0.101 |
| 25 | 0.0491 | 0.0608 | 0.117 | 0.128 |
| 30 | 0.0707 | 0.0847 | 0.145 | 0.157 |
| 35 | 0.0962 | 0.112 | 0.175 | 0.187 |
| 40 | 0.126 | 0.143 | 0.207 | 0.220 |
| 45 | 0.159 | 0.177 | 0.242 | 0.255 |
| 50 | 0.239 | 0.257 | 0.281 | 0.294 |
| 55 | 0.286 | 0.305 | 0.324 | 0.336 |
| 60 | 0.342 | 0.359 | 0.371 | 0.384 |
| 65 | 0.403 | 0.422 | 0.425 | 0.438 |
| 70 | 0.477 | 0.495 | 0.488 | 0.501 |
| 75 | 0.567 | 0.586 | 0.562 | 0.575 |
| 80 | 0.684 | 0.702 | 0.652 | 0.665 |
| 85 | 0.848 | 0.867 | 0.769 | 0.782 |
| 90 | 1.129 | 1.148 | 0.933 | 0.946 |
| 95 | | | 1.214 | 1.227 |
| 100 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |

แทนค่าลงในสมการ $T = c_v \cdot t / H^2$

$$0.281 = 0.019 \times t / (15 \times 100)^2$$

$$t = 3.32 \times 10^7 \text{ min} = 63.3 \text{ yrs} \quad \text{Ans}$$

สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ

ค่า Coefficient of consolidation มีรากฐานจากสมการ

$$c_v = k / (\gamma_w \cdot m_v)$$

ซึ่งการหาค่าจากสมการดังกล่าวไม่เป็นที่นิยม แต่มักจะนิยมหาค่า c_v จากสมการ $T = c_v \cdot t / H^2$ ซึ่งการหาค่า t จะหาจากการทดลองการอัดตัวคายน้ำ

การวิเคราะห์ผลการทดลอง Consolidation test

จากข้อมูลของการทดลอง Consolidation test สามารถแบ่งกลุ่มข้อมูลได้ 2 กลุ่ม คือ

ข้อมูลระหว่าง การยุบตัว กับเวลา ต่อน้ำหนักกดทับ 1 ค่า

ข้อมูลระหว่างการยุบตัวทั้งหมดใน 24 ชั่วโมง กับน้ำหนักกดทับ

ในการหาค่า t จะใช้ ข้อมูลระหว่าง การยุบตัว กับเวลา ต่อน้ำหนักกดทับ 1 ค่า ซึ่งในการหาค่านี้มีผู้เสนอวิธีการหาค่า 2 คน คือ

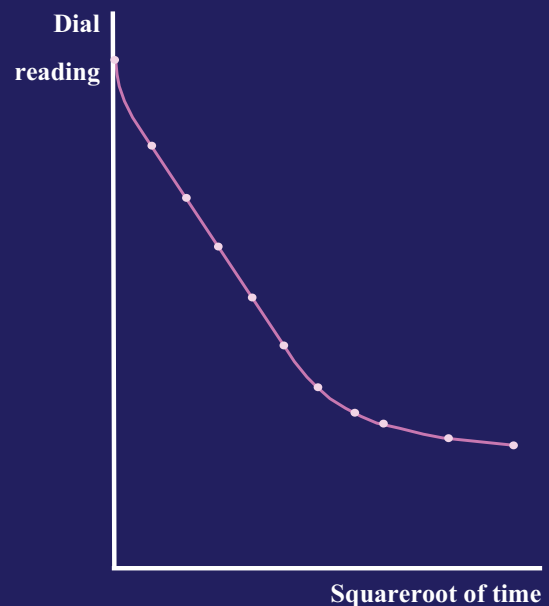
● Taylor → *Squareroot of time fitting method*

● Casagrande → *Log of time fitting method*

Squareroot of time fitting method

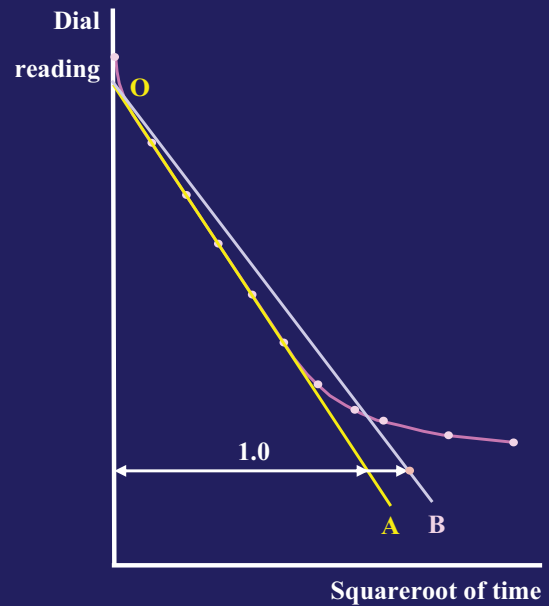
วิธีนี้ Taylor เชื่อว่าการหาค่า c_v ที่ถูกต้องที่สุดจะต้องหาค่าที่เวลา t_{90} (เวลาที่เกิดการอัดตัวคายน้ำ 90 % ของทั้งหมด) ดังนั้น Taylor จึงได้เสนอวิธีการหาค่า t_{90} ดังนี้

นำค่าการทรุดตัว กับเวลา มาพล็อตลงในกราฟ Normal scale โดยให้ขนาดการทรุดตัวอยู่ในแกนตั้ง และค่า Squareroot ของเวลา อยู่ในแกนนอน



พยายามลากเส้นตรงให้ผ่านจุดให้มากที่สุด ได้เส้น OA

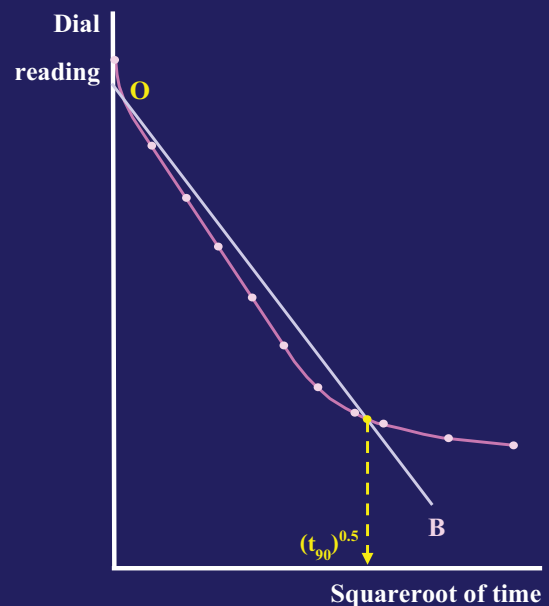
จากจุดใด ๆ ในแกนตั้ง วัดระยะทางในแนวนอนมายังเส้น OA ให้เท่ากับ 1.0 แล้ววัดออกไปอีก 0.15 จากนั้นลากเส้น OB ผ่านจุดที่วัดออกไปอีก 0.15



เส้น OB จะตัดเส้นกราฟที่ Squareroot of time 90 %

จากตาราง 5.6, $U = 90\%$ จะได้ $T = 0.848$ ดังนั้น c_v จะหาได้จากสมการ

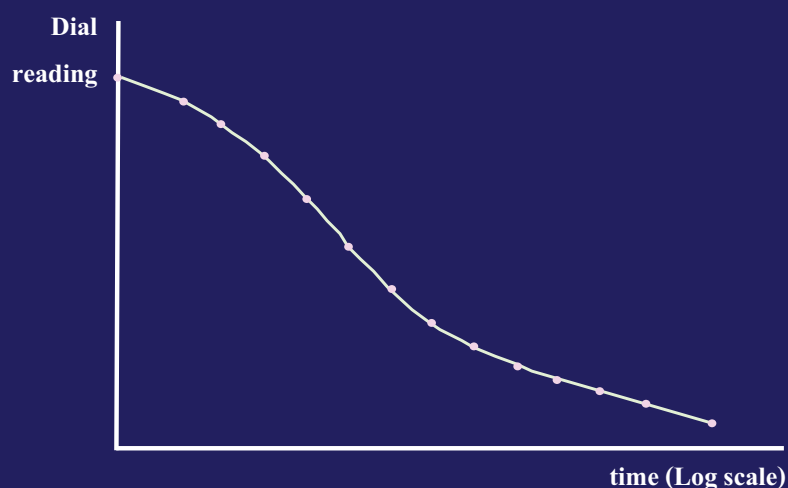
$$c_v = 0.848 H^2/t_{90}$$



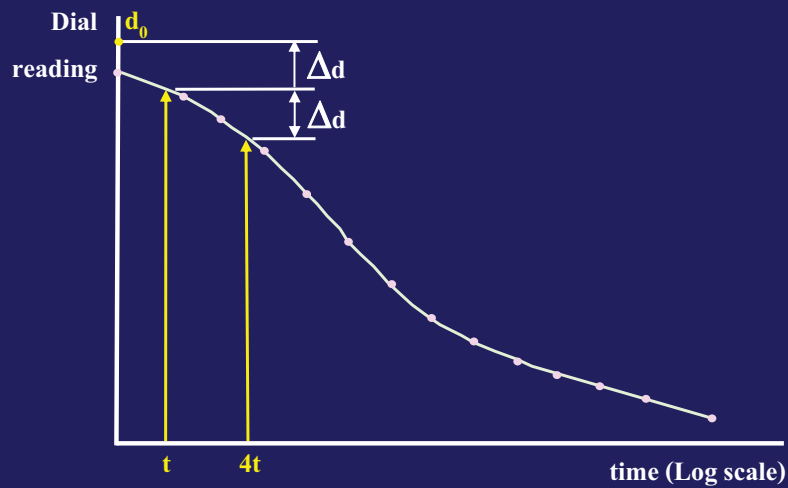
Log of time fitting method

วิธีนี้ Casagrande เชื่อว่าการหาค่า c_v ที่ถูกต้องที่สุดจะต้องหาค่าที่เวลา t_{50} (เวลาที่เกิดการอัดตัวคายน้ำ 50 % ของทั้งหมด) ดังนั้น Casagrande จึงได้เสนอวิธีการหาค่า t_{50} ดังนี้

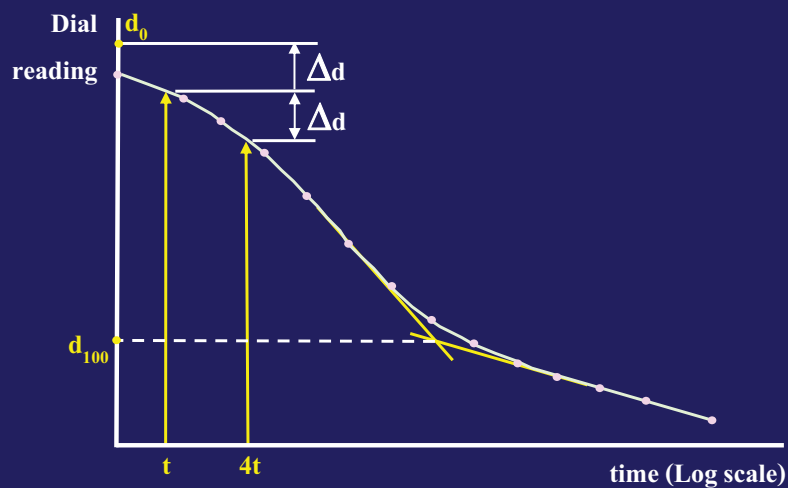
นำค่าการทรุดตัว กับเวลา มาพล็อตลงในกราฟ semi log scale โดยให้ขนาดการทรุดตัวอยู่ในแกนตั้ง และค่าเวลาอยู่ในแกนนอน



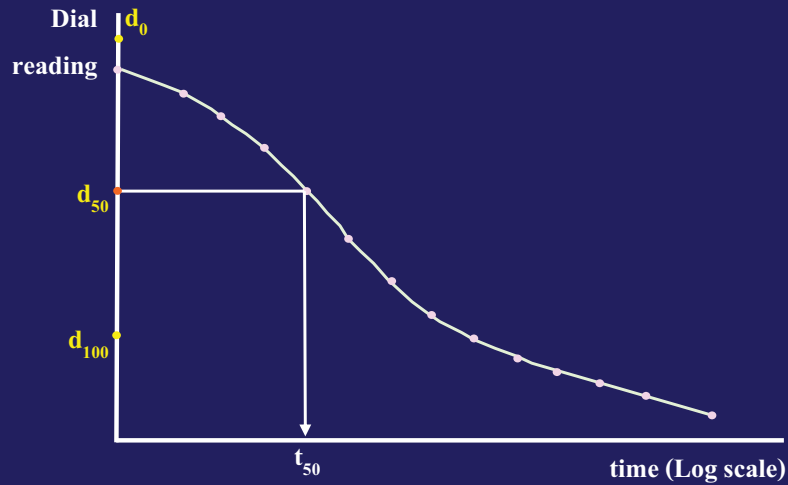
หาค่า t และ $4t$ ลากไปตัดกราฟได้ Δd จากนั้นวัดขึ้นไปอีก Δd
ลากไปตัดแกนตั้งได้ค่า d_0



จากส่วนโค้งส่วนล่าง ลากเส้นสัมผัสมาตัดกันแล้วลากไปตัดแกน
ตั้งได้ค่า d_{100}

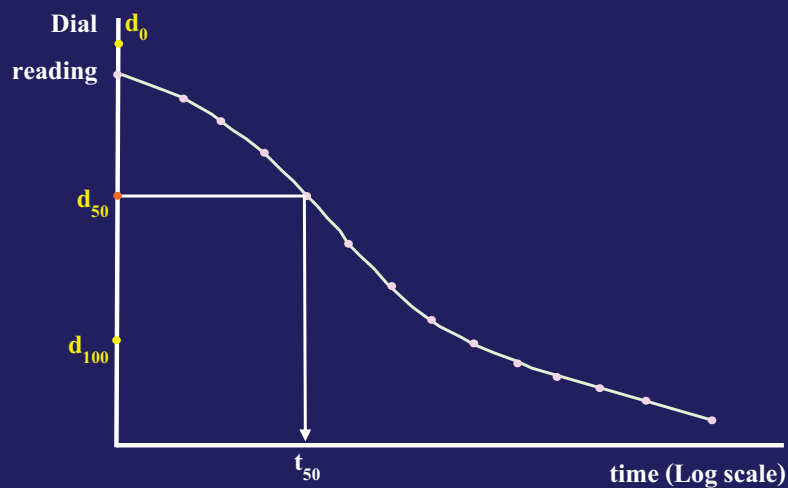


จากค่า d_0 และ d_{100} แบ่งครึ่ง จะได้ค่า d_{50} ลากเส้นตรงไปตัดกราฟ
จะได้ค่า t_{50}



จากตาราง 5.6, $U = 50\%$ จะได้ $T = 0.197$ ดังนั้น c_v จะหาได้
จากสมการ

$$c_v = 0.197 H^2/t_{50}$$



ตารางที่ 5.7 แสดงค่า C_v ที่พิกัดเหลวต่าง ๆ

| ค่าพิกัดเหลว (%) | ค่า C_v (cm^2/sec) |
|------------------|--|
| 30 | 5×10^{-3} |
| 60 | 1×10^{-3} |
| 100 | 2×10^{-3} |

บทที่ 7

การบดอัดดิน

การบดอัดดินเป็นวิธีการปรับปรุงคุณสมบัติของดินที่มีมานานกว่า 2000 ปีแล้ว โดยเริ่มจากนำสัตว์เลี้ยงมาเหยียบย่ำจนในที่สุดได้มีการพัฒนาเป็นเครื่องมือที่ทันสมัย

ผลกระทบที่มีต่อความหนาแน่นของดิน

- ความถ่วงจำเพาะ
- ลักษณะการกระจายขนาดเม็ดดิน
- รูปร่างของเม็ดดิน
- เครื่องมือที่ใช้ในการบดอัด
- ปริมาณความชื้น

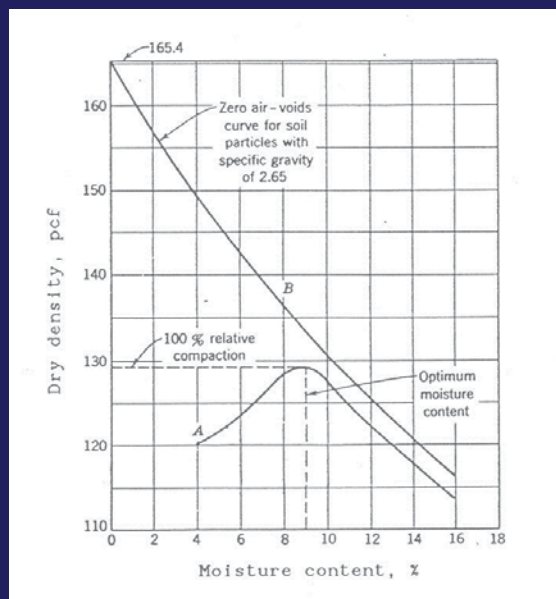
ความหนาแน่นของดิน

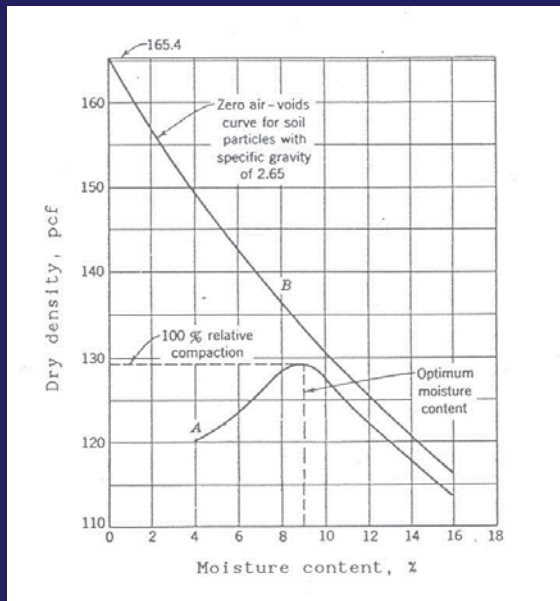


ความหนาแน่นแห้ง

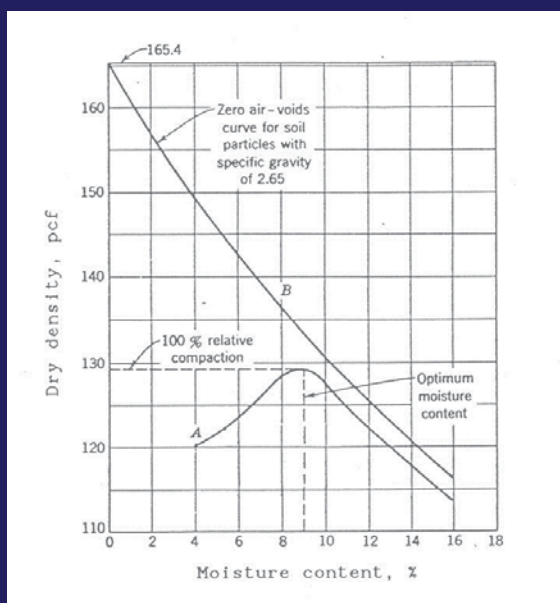
Dry density, γ_d

จากการศึกษาพบว่า ปริมาณความชื้นมีผลกระทบบกับความหนาแน่นของดินเป็นอย่างมาก ซึ่งสามารถอธิบายได้จากรูปกราฟ

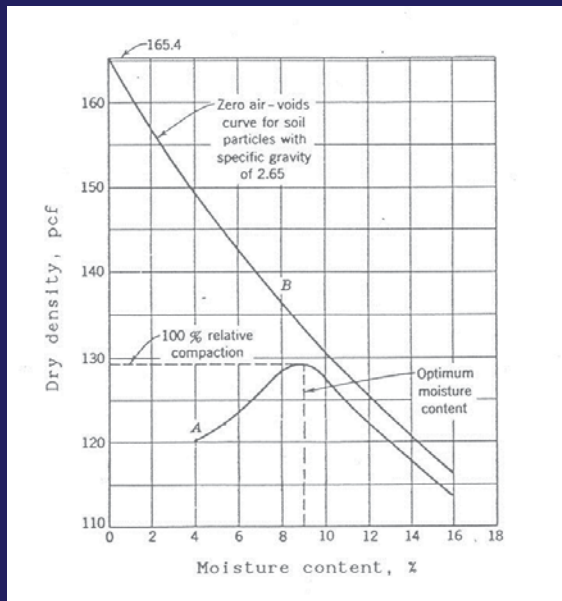




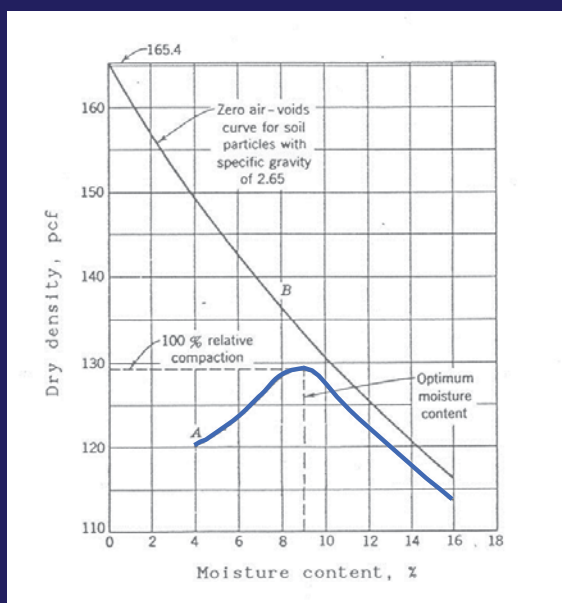
จากรูปจะเห็นกราฟ A คือ กราฟการบดอัดดิน (Compaction curve) ซึ่งจะมีรูปร่างคล้ายระฆังคว่ำ สำหรับกราฟ B เรียกว่า กราฟช่องว่างอากาศเป็นศูนย์ (Zero air void curve, ZAV หรือ Saturation line)



กราฟ A ได้มาจากการนำตัวอย่างดินมาแบ่งเป็นหลายๆกองโดยให้แต่ละกองมีความชื้นที่แตกต่างกัน จากนั้นทำการบดอัดด้วยพลังงานในการบดอัด (Compaction energy) ที่เท่ากัน ซึ่งจะพบว่าค่าความหนาแน่นแห้งของดินแต่ละกองไม่เท่ากัน นำค่าความหนาแน่นแห้ง และปริมาณความชื้น มาพล็อต จะได้กราฟ A

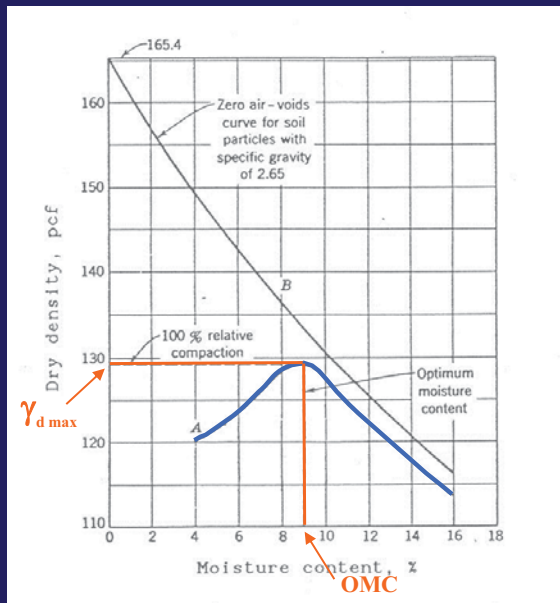


จากกราฟ A สามารถสรุปได้
 ว่าที่ปริมาณความชื้นน้อย ๆ ดิน
 จะอยู่ในสภาพที่ค่อนข้างหลวม
 และเมื่อเพิ่มปริมาณความชื้นขึ้น
 ค่าความหนาแน่นแห้งของดินก็
 จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อถึงจุดหนึ่ง
 เมื่อเพิ่มปริมาณความชื้นขึ้นไปอีก
 จะพบว่าค่าความหนาแน่นแห้ง
 กลับลดลง

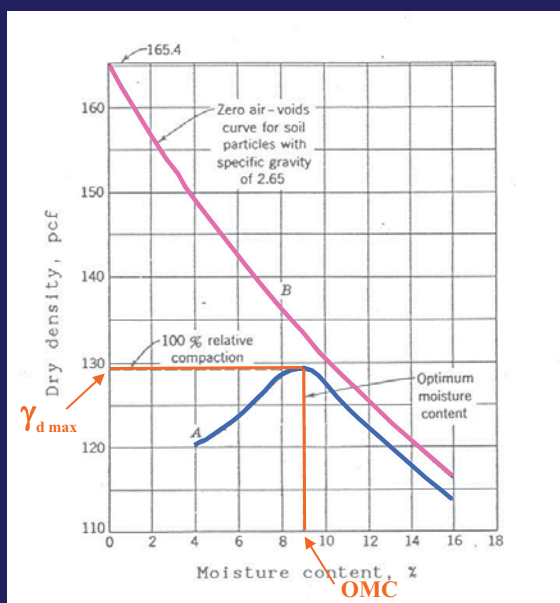


การที่ปริมาณความชื้นน้อย
 ดินจะมีค่าความหนาแน่นแห้ง
 น้อย เนื่องจากปริมาณน้ำมีน้อย
 เกินไปที่จะหล่อลื่นให้เม็ดดินเข้า
 ไปอยู่ชิดกัน

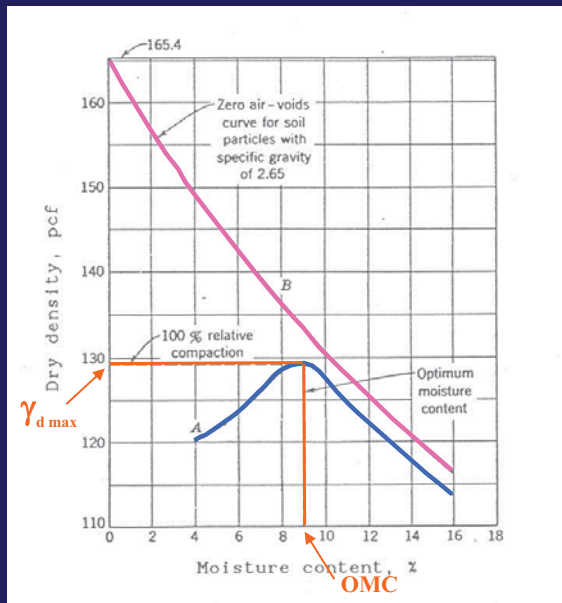
และการที่ปริมาณความชื้นมาก
 ดินจะมีค่าความหนาแน่นแห้ง
 ลดลง เนื่องจากปริมาณน้ำมีมาก
 เกินไปจึงเป็นตัวทำให้เม็ดดินลื่น
 เมื่อถูกบดอัดจึงมีสภาพไม่แน่น



จุดยอดของกราฟ A เรียกว่า ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, $\gamma_{d max}$) และค่าปริมาณความชื้นที่ทำให้เกิด $\gamma_{d max}$ เรียกว่า ค่าความชื้นที่เหมาะสมที่สุด (Optimum moisture content, OMC.)



สำหรับเส้นกราฟ B คือเส้น ZAV ซึ่งจะเป็นเส้นที่ดินไม่มีอากาศอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งเป็นไปได้ยากมาก ดังนั้นเส้นนี้จึงเป็นเส้นสมมุติ แต่มีประโยชน์ในการใช้ตรวจสอบความถูกต้องของ กราฟ A คือ กราฟ A จะไม่ทับกับกราฟ B และด้านขวา (ด้านเปียก) ของกราฟ A จะขนานกับกราฟ B เสมอ



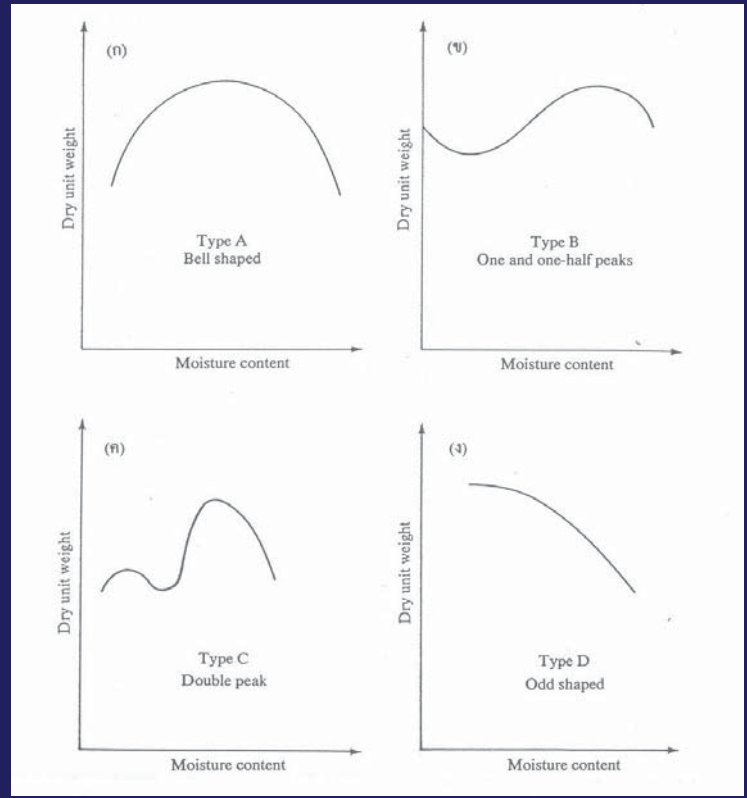
สมการที่ใช้คำนวณหา
เส้นกราฟ A คือ

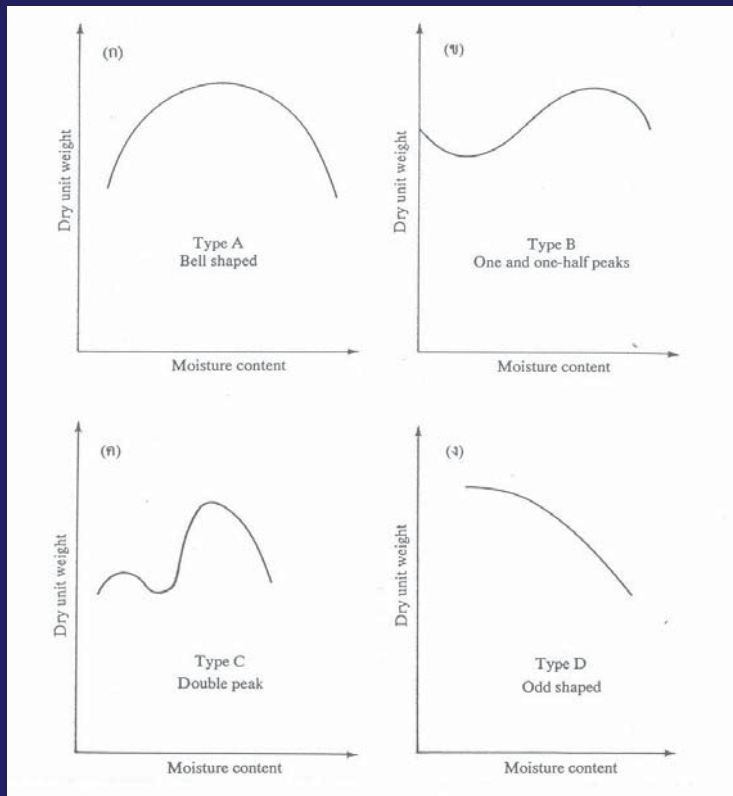
$$\gamma_d = \gamma / (1 + m)$$

และสมการที่ใช้สำหรับหา
เส้นกราฟ B คือ

$$\gamma_d = G_s \cdot \gamma_w / [1 + (m \cdot G_s / S)]$$

ในบางครั้ง กราฟ
การบดอัดไม่เป็นรูป
ระฆังคว่ำ Lee &
Suedkamp ได้ศึกษา
จากดิน 35 ชนิด
สามารถแบ่งรูปกราฟ
ได้เป็น 4 แบบ คือ

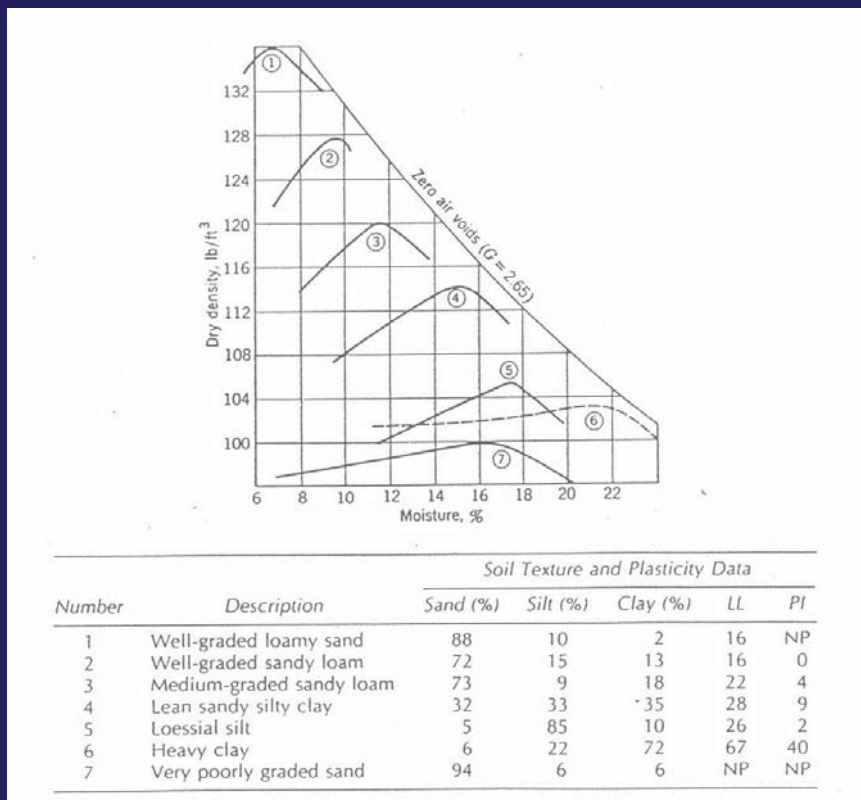




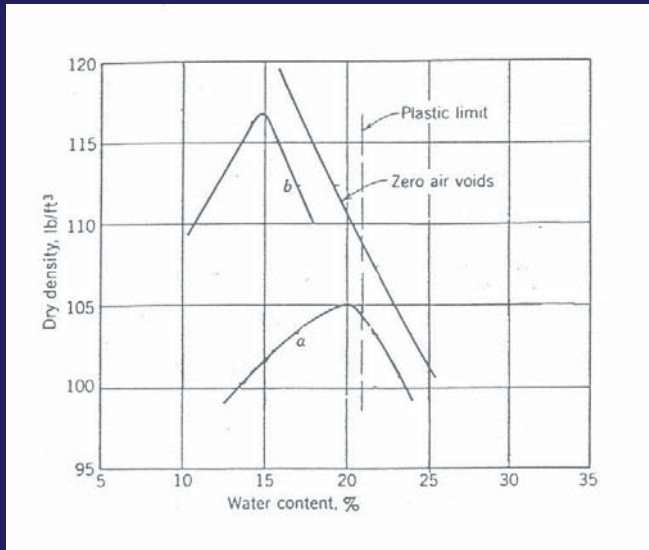
รูป ก เป็นรูปกราฟของดินทั่วไป

รูป ข เป็นรูปกราฟรูปตัว S พบในดินทราย

รูป ค และ ง พบในดินที่มีแร่ Montmorillonites โดยรูป ง จะพบยากกว่ารูป ค



จากรูปแสดงกราฟการบดอัดดินของดินชนิดต่างๆ ที่ใช้พลังงานในการบดอัดเท่ากัน



จากรูป แสดงกราฟการ
บดอัดดินชนิดเดียวกัน แต่ใช้
พลังงานในการบดอัดที่ไม่
เท่ากัน โดยกราฟ a มี
พลังงานในการบดอัดที่ต่ำ
กว่า กราฟ b

ผลของการบดอัดที่มีต่อดิน → ดินเม็ดหยาบ

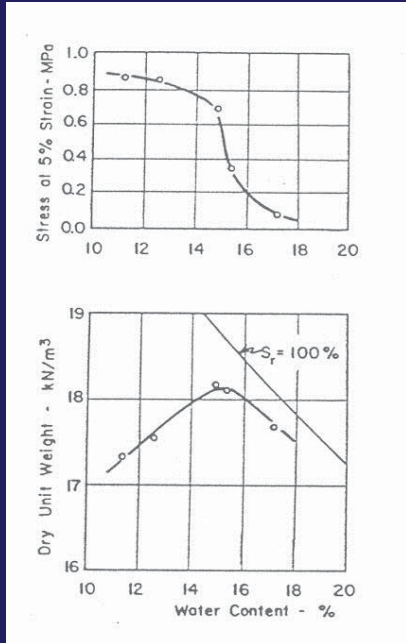
① ความต้านทานแรงเฉือน → เพิ่มขึ้น

① ค่าความซึมได้ → ลดลง

① การอัดตัวได้ → ลดลง

ผลของการบดอัดที่มีต่อดิน → ดินเม็ดละเอียด

❶ ความต้านทานแรงเฉือน



ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดไม่ได้ให้ค่าความแข็งแรงที่สุด แต่ความแข็งแรงจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อใกล้ค่า OMC และจะลดลงอย่างมากหลังจากนั้น ดังแสดงในรูป

ผลของการบดอัดที่มีต่อดิน → ดินเม็ดละเอียด

❶ ค่าความชื้นได้ →

การบดอัดให้มีความชื้นมากกว่า OMC จะทำให้ความชื้นได้ของดินน้อยกว่าการบดอัดที่ความชื้นน้อยกว่า OMC ที่ค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากัน

❶ การอัดตัวได้ →

การบดอัดให้มีความชื้นน้อยกว่า OMC จะทำให้การหดตัวน้อยลงแต่บวมตัวมากเมื่อแช่น้ำ กว่าบดอัดที่ความชื้นมากกว่า OMC

การทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ

วิศวกร ชื่อ R. R. Proctor คิดวิธีทดสอบเมื่อ ปี ค.ศ. 1973 ในงานที่เกี่ยวกับการสร้างเขื่อน ซึ่งต่อมาได้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย การทดสอบที่ Proctor คิด เรียกว่า Standard Proctor test

ต่อมาการก่อสร้างได้ใช้รบบที่มีน้ำหนักมากขึ้น จึงทำให้ The U.S. Army Corp. of Engineers ต้องมีการปรับปรุงวิธีการทดสอบ ซึ่งเรียกการทดสอบที่ปรับปรุงใหม่ว่า Modified Proctor test

| | Standard Proctor test | Modified Proctor test |
|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| เส้นผ่าศูนย์กลางของกระบอก, นิ้ว | 4 | 4 |
| ความสูง, นิ้ว | 4.58 | 4.58 |
| จำนวนชั้นที่บดอัด | 3 | 5 |
| จำนวนกระแทกต่อชั้น | 25 | 25 |
| น้ำหนักลูกตุ้ม, ปอนด์ | 5.5 | 10.0 |
| ระยะกระแทก, นิ้ว | 12 | 18 |
| ปริมาตรของกระบอก, ลบ.ฟุต | 1/30 | 1/30 |
| พลังงานที่ใช้บดอัด, ฟุต-ปอนด์/ลบ.ฟุต | 12,375 | 56,250 |

การคำนวณพลังงานในการบดอัดสามารถหาได้จากสมการ

$$CE = W_h \cdot H_d \cdot N_L \cdot N_d / V$$

เมื่อ

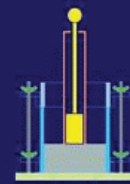
W_h = น้ำหนักที่ใช้ในการบดอัด

H_d = ระยะความสูงในการยกตุ้มน้ำหนัก

N_L = จำนวนชั้นของดินที่บดอัด

N_d = จำนวนครั้งต่อการบดอัด 1 ชั้น

V = ปริมาตรของดินที่ถูกบดอัด



พลังงานที่ใช้ในการบดอัดแบบ Modified

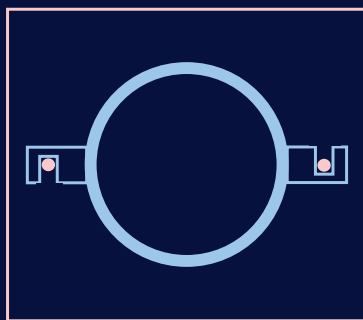
มากกว่าแบบ Standard Proctor test

$$56,250/12,375 \approx 4.5 \text{ เท่า}$$

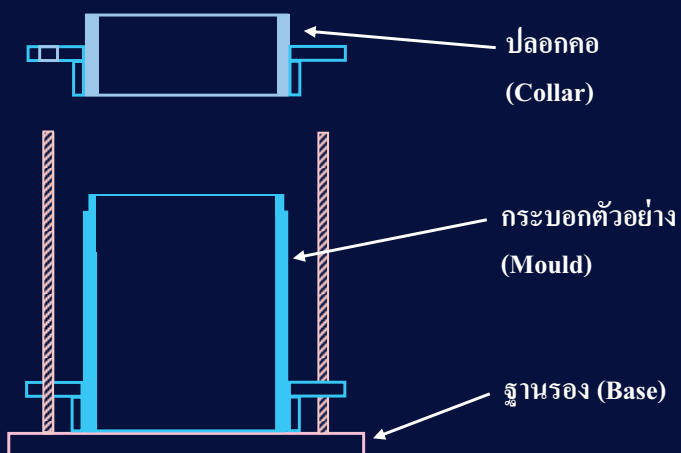
อุปกรณ์ที่ใช้



อุปกรณ์ที่ใช้

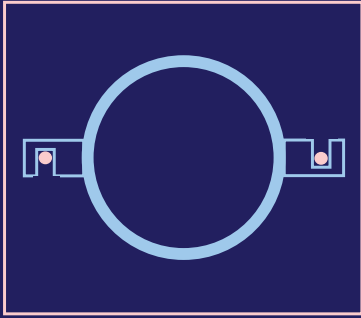


Top view



ลูกตุ้ม

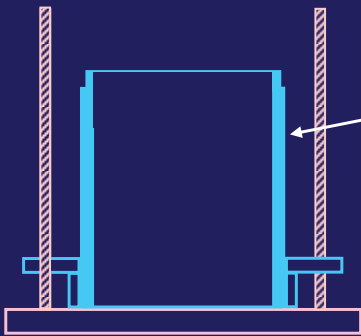
อุปกรณ์ที่ใช้



Top view



ปลอกคอ (Collar)



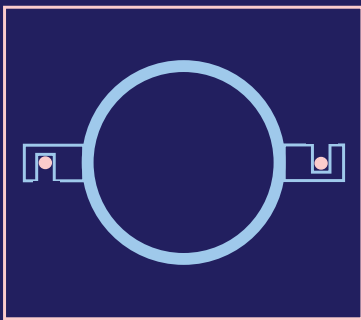
กระบอกตัวอย่าง (Mould)

ฐานรอง (Base)



ลูกตุ้ม

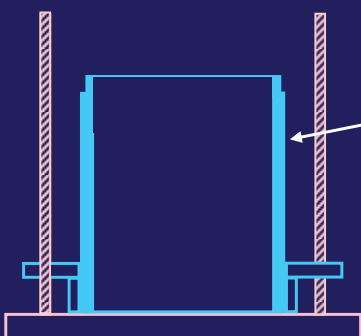
อุปกรณ์ที่ใช้



Top view



ปลอกคอ (Collar)



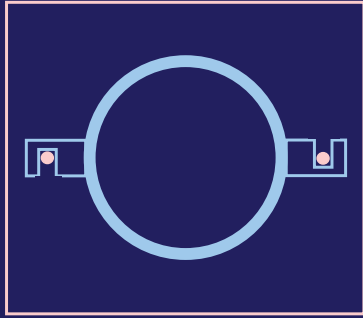
กระบอกตัวอย่าง (Mould)

ฐานรอง (Base)



ลูกตุ้ม

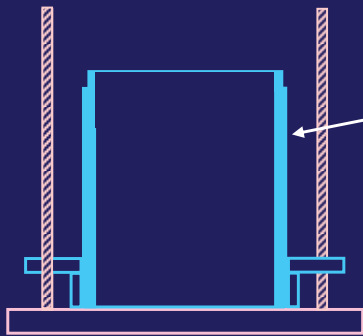
อุปกรณ์ที่ใช้



Top view



ปลอกคอ (Collar)



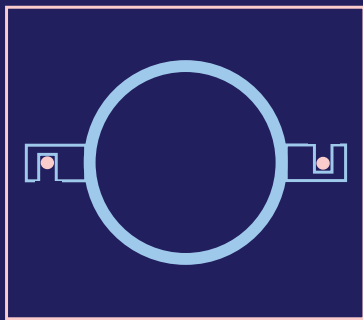
กระบอกตัวอย่าง (Mould)

ฐานรอง (Base)

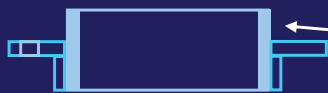


ลูกตุ้ม

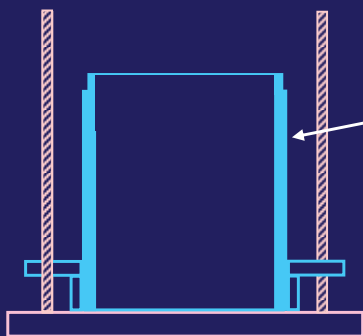
อุปกรณ์ที่ใช้



Top view



ปลอกคอ (Collar)



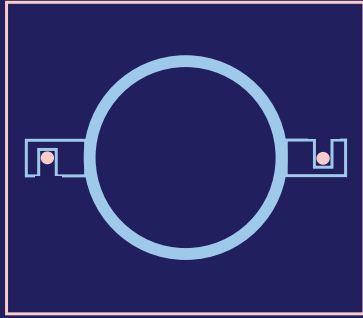
กระบอกตัวอย่าง (Mould)

ฐานรอง (Base)



ลูกตุ้ม

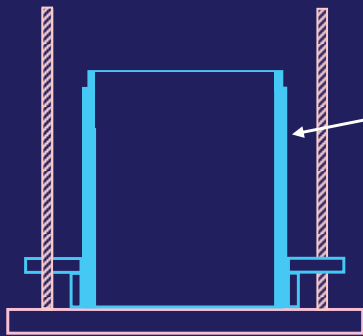
อุปกรณ์ที่ใช้



Top view



ปลอกคอ (Collar)



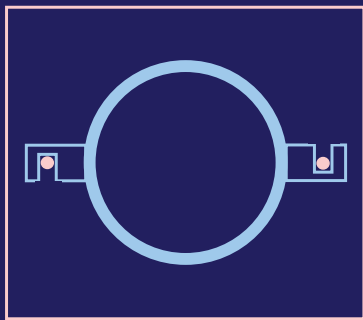
กระบอแก้วตัวอย่าง (Mould)

ฐานรอง (Base)



ลูกตุ้ม

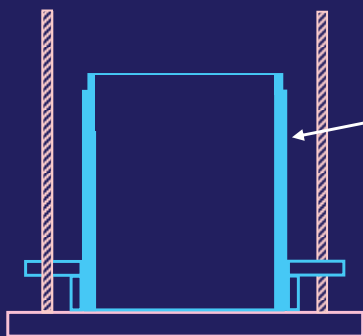
อุปกรณ์ที่ใช้



Top view



ปลอกคอ (Collar)



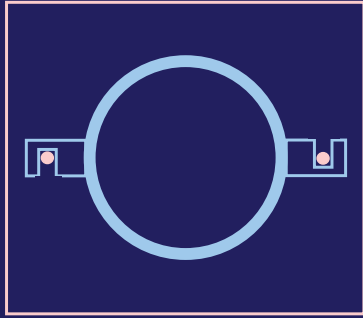
กระบอแก้วตัวอย่าง (Mould)

ฐานรอง (Base)



ลูกตุ้ม

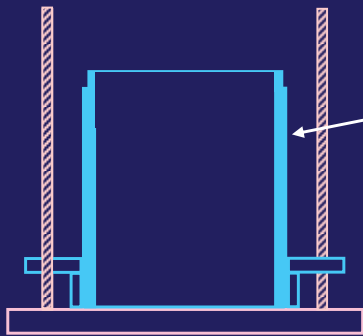
อุปกรณ์ที่ใช้



Top view



ปลอกคอ (Collar)



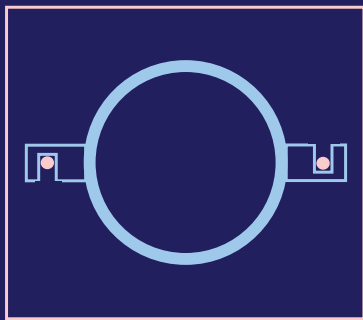
กระบอกรัดตัวอย่าง (Mould)

ฐานรอง (Base)

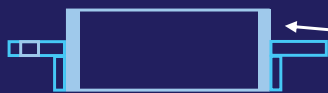


ตุ๊กตุ้ม

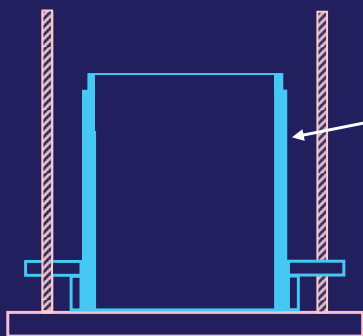
อุปกรณ์ที่ใช้



Top view



ปลอกคอ (Collar)



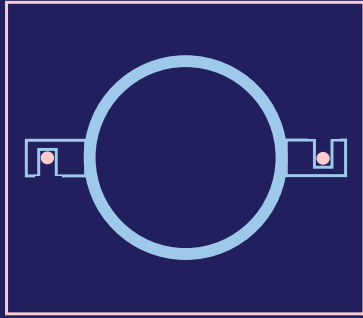
กระบอกรัดตัวอย่าง (Mould)

ฐานรอง (Base)



ตุ๊กตุ้ม

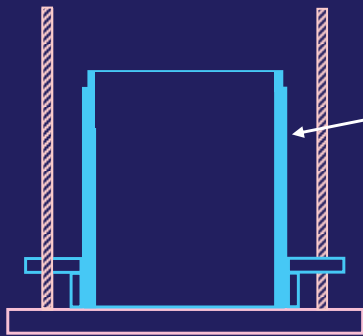
อุปกรณ์ที่ใช้



Top view



ปลอกคอ (Collar)



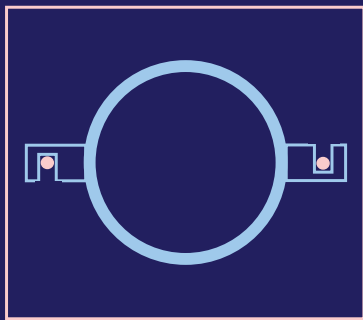
กระบอกรัดตัวอย่าง (Mould)

ฐานรอง (Base)



ลูกตุ้ม

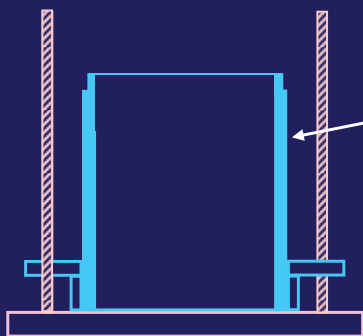
อุปกรณ์ที่ใช้



Top view



ปลอกคอ (Collar)



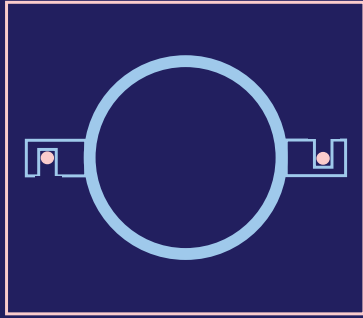
กระบอกรัดตัวอย่าง (Mould)

ฐานรอง (Base)



ลูกตุ้ม

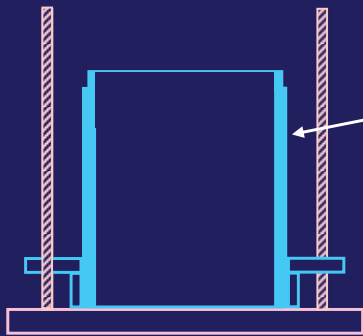
อุปกรณ์ที่ใช้



Top view



ปลอกคอ (Collar)



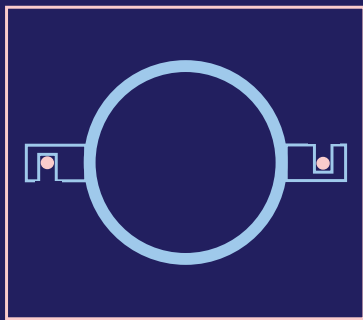
กระบอกตัวอย่าง (Mould)

ฐานรอง (Base)

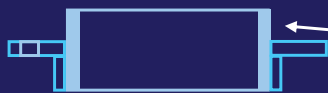


ลูกตุ้ม

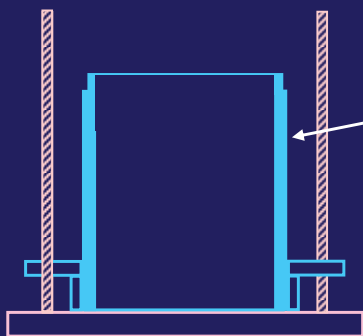
อุปกรณ์ที่ใช้



Top view



ปลอกคอ (Collar)



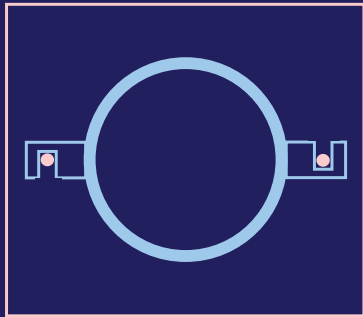
กระบอกตัวอย่าง (Mould)

ฐานรอง (Base)

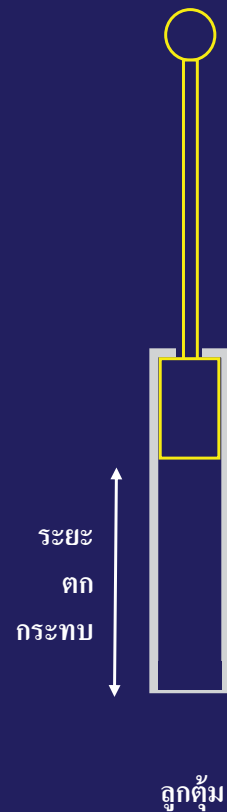
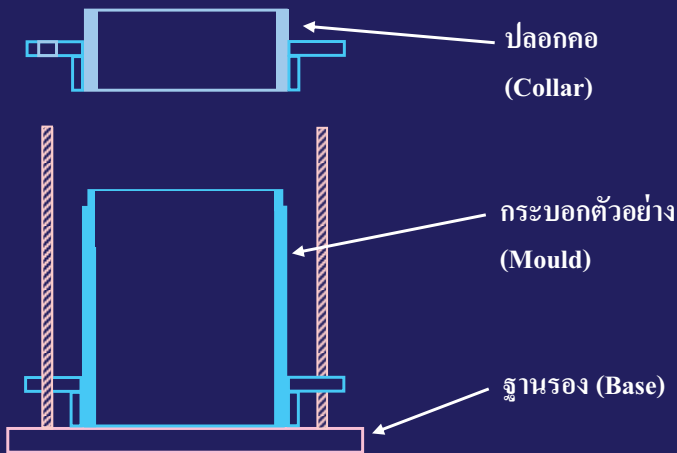


ลูกตุ้ม

อุปกรณ์ที่ใช้



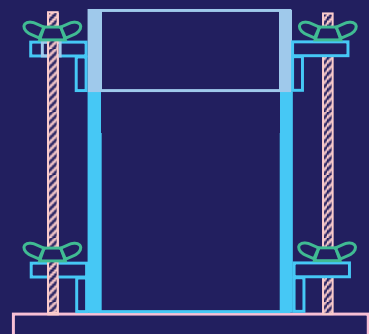
Top view



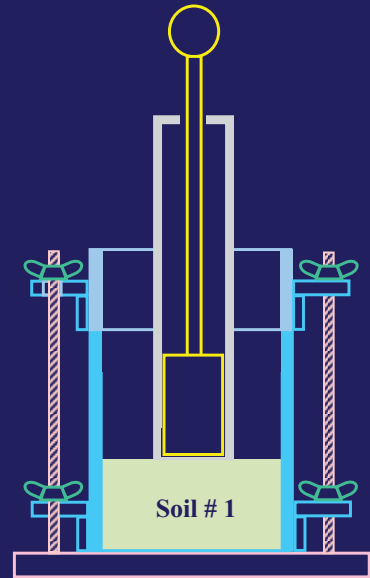
นำฐานรองมาประกอบเข้ากับครอบตัวอย่าง แล้วยึดให้แน่น

จากนั้นนำปลอกคอมาติดตั้งบนครอบตัวอย่างอีกชั้นหนึ่ง แล้วยึดให้แน่น

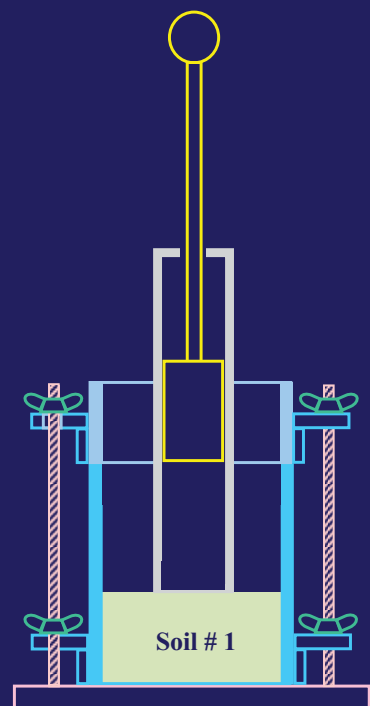
นำดินที่ต้องการทดลองมาใส่หน้าให้มีความชื้นค่าหนึ่ง จากนั้นแบ่งเป็นหลาย ๆ กอง ซึ่งถ้าต้องการทดลองแบบ **Standard Proctor** ให้แบ่งดินเป็น 3 กอง ถ้าทดลองแบบ **Modified Proctor** ให้แบ่งดินเป็น 5 กอง



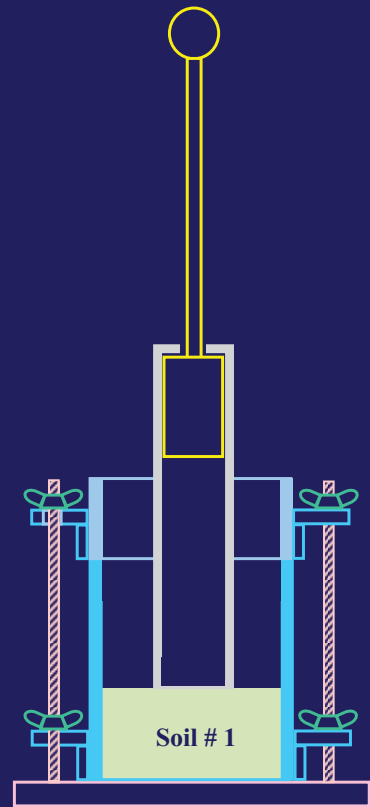
ใส่ดินกองแรกลงไปในกระบอกตัวอย่าง
แล้วบดอัดด้วยลูกตุ้ม จำนวน 25 ครั้งทั่ว
ผิวหน้า



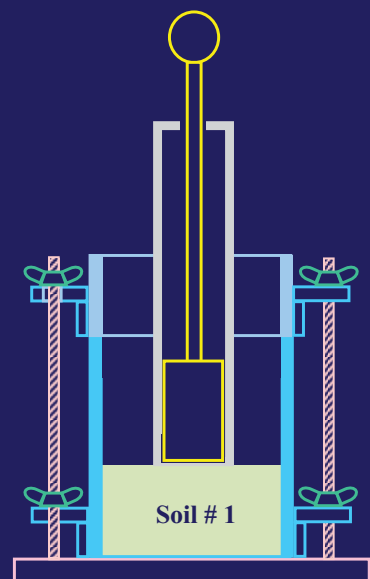
ใส่ดินกองแรกลงไปในกระบอกตัวอย่าง
แล้วบดอัดด้วยลูกตุ้ม จำนวน 25 ครั้งทั่ว
ผิวหน้า



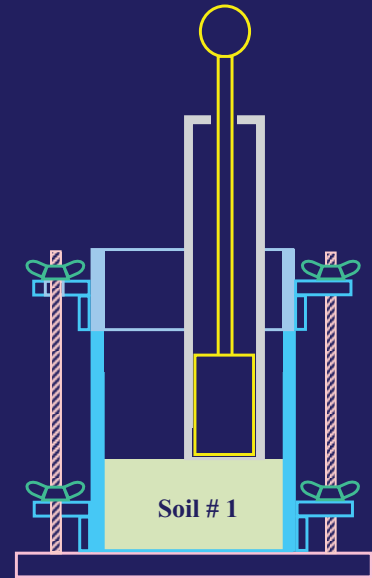
ใส่ดินกองแรกลงไปในกระบอกตัวอย่าง
แล้วบดอัดด้วยลูกตุ้ม จำนวน 25 ครั้งทั่ว
ผิวหน้า



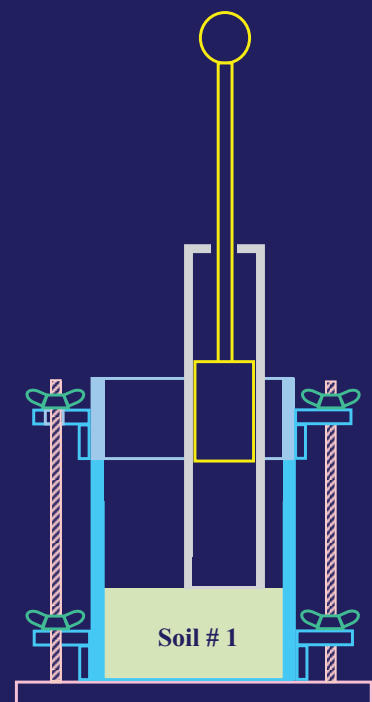
ใส่ดินกองแรกลงไปในกระบอกตัวอย่าง
แล้วบดอัดด้วยลูกตุ้ม จำนวน 25 ครั้งทั่ว
ผิวหน้า



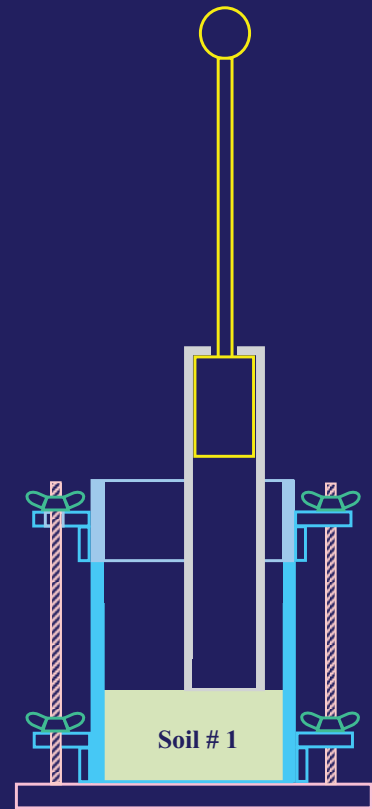
ใส่ดินกองแรกลงไปในกระบอกตัวอย่าง
แล้วบดอัดด้วยลูกตุ้ม จำนวน 25 ครั้งทั่ว
ผิวหน้า



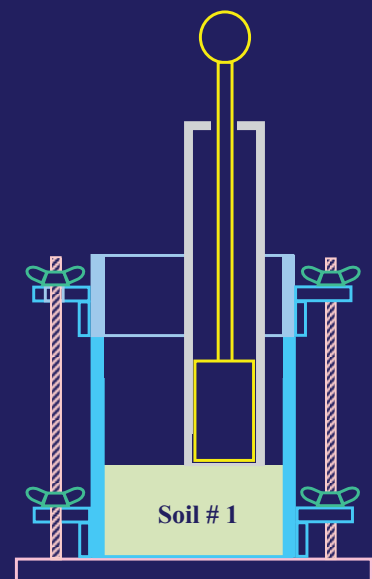
ใส่ดินกองแรกลงไปในกระบอกตัวอย่าง
แล้วบดอัดด้วยลูกตุ้ม จำนวน 25 ครั้งทั่ว
ผิวหน้า



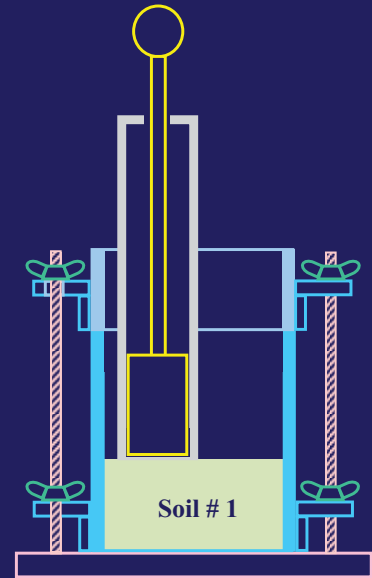
ใส่ดินกองแรกลงไปในกระบอกตัวอย่าง
แล้วบดอัดด้วยลูกตุ้ม จำนวน 25 ครั้งทั่ว
ผิวหน้า



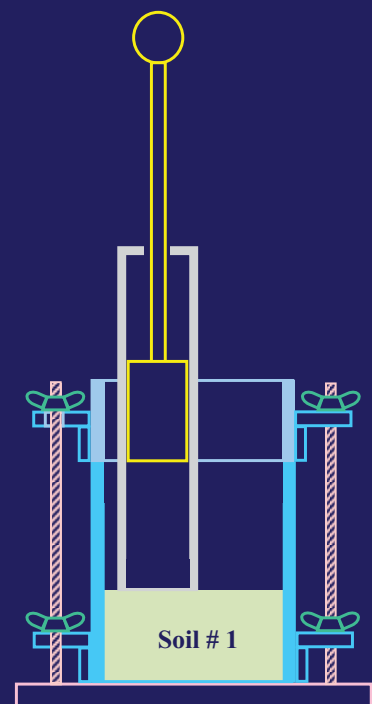
ใส่ดินกองแรกลงไปในกระบอกตัวอย่าง
แล้วบดอัดด้วยลูกตุ้ม จำนวน 25 ครั้งทั่ว
ผิวหน้า



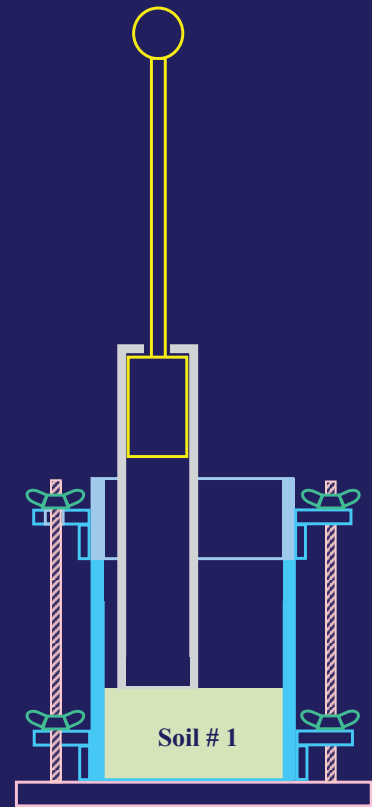
ใส่ดินกองแรกลงไปในกระบอกตัวอย่าง
แล้วบดอัดด้วยลูกตุ้ม จำนวน 25 ครั้งทั่ว
ผิวหน้า



ใส่ดินกองแรกลงไปในกระบอกตัวอย่าง
แล้วบดอัดด้วยลูกตุ้ม จำนวน 25 ครั้งทั่ว
ผิวหน้า

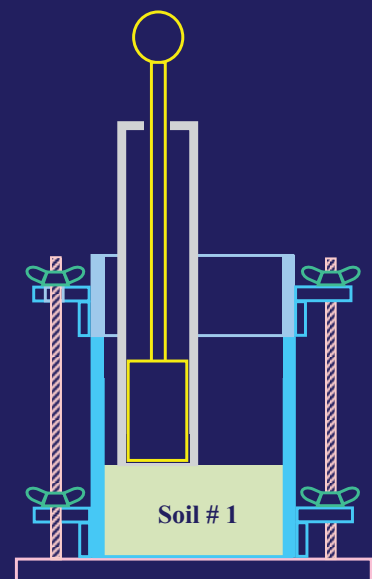


ใส่ดินกองแรกลงไปในกระบอกตัวอย่าง แล้วบดอัดด้วยลูกตุ้ม จำนวน 25 ครั้งทั่ว ผิวหน้า



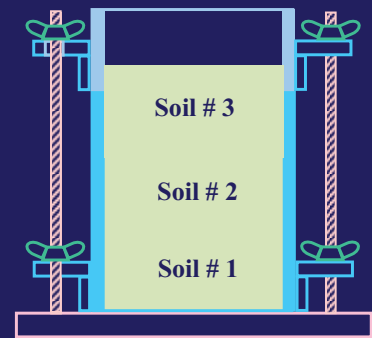
ใส่ดินกองแรกลงไปในกระบอกตัวอย่าง แล้วบดอัดด้วยลูกตุ้ม จำนวน 25 ครั้งทั่ว ผิวหน้า

เมื่อบดอัดดินชั้นที่ 1 ด้วยลูกตุ้มครบ 25 ครั้งทั่วผิวหน้าแล้ว นำดินกองที่ 2 และ 3 (และ หรือ 4 และ 5) ใส่ลงไป แล้วบดอัดด้วยลูกตุ้ม ชั้นละ 25 ครั้งเหมือนเดิม ซึ่งในชั้นที่ 3 (หรือ 5) ผิวหน้าของดินจะต้องอยู่สูงกว่าขอบของ กระบอกตัวอย่างเล็กน้อย

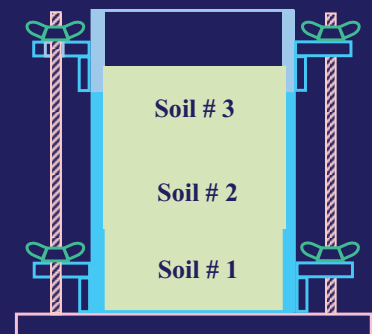


ใส่ดินกองแรกลงไปในกระบอตัวอย่าง
แล้วบดอัดด้วยลูกตุ้ม จำนวน 25 ครั้งทั่ว
ผิวหน้า

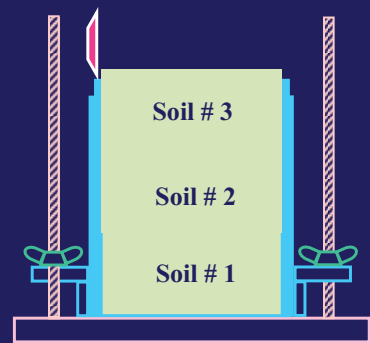
เมื่อบดอัดดินชั้นที่ 1 ด้วยลูกตุ้มครบ 25
ครั้งทั่วผิวหน้าแล้ว นำดินกองที่ 2 และ 3 (และ
หรือ 4 และ 5) ใสลงไป แล้วบดอัดด้วยลูกตุ้ม
ชั้นละ 25 ครั้งเหมือนเดิม ซึ่งในชั้นที่ 3 (หรือ
5) ผิวหน้าของดินจะต้องอยู่สูงกว่าขอบของ
กระบอตัวอย่างเล็กน้อย



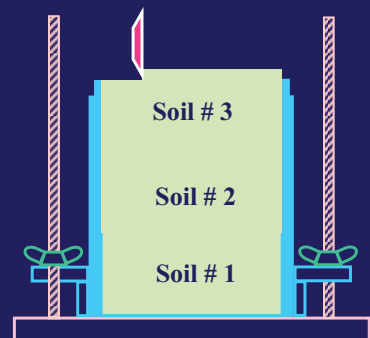
ถอดปลอกค้อออก แล้วใช้ไม้บรรทัดเหล็ก
ปาดดินให้เสมอกับขอบของกระบอตัวอย่าง



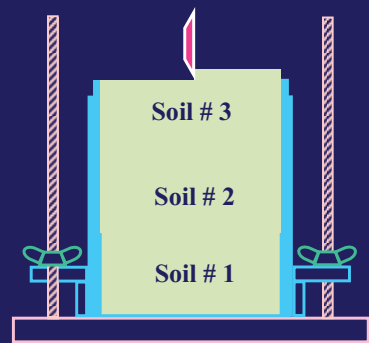
ถอดปลอกค้อออก แล้วใช้ไม้บรรทัดเหล็ก
ปาดดินให้เสมอกับขอบของกระบอกตัวอย่าง



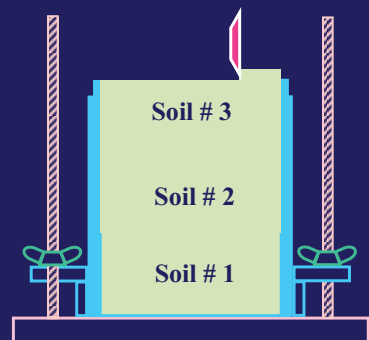
ถอดปลอกค้อออก แล้วใช้ไม้บรรทัดเหล็ก
ปาดดินให้เสมอกับขอบของกระบอกตัวอย่าง



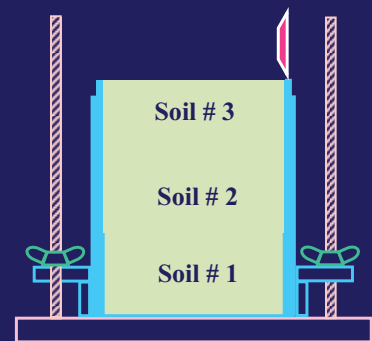
ถอดปลอกค้อออก แล้วใช้ไม้บรรทัดเหล็ก
ปาดดินให้เสมอกับขอบของกระบอกตัวอย่าง



ถอดปลอกค้อออก แล้วใช้ไม้บรรทัดเหล็ก
ปาดดินให้เสมอกับขอบของกระบอกตัวอย่าง



ถอดปลอกค้อออก แล้วใช้ไม้บรรทัดเหล็ก
ปาดดินให้เสมอกับขอบของกระบอกตัวอย่าง

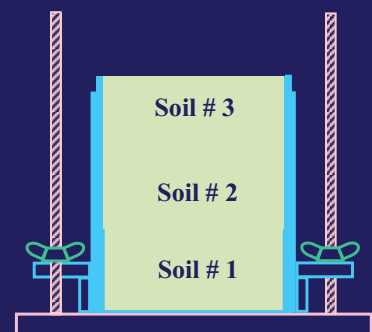


ถอดปลอกค้อออก แล้วใช้ไม้บรรทัดเหล็ก
ปาดดินให้เสมอกับขอบของกระบอกตัวอย่าง

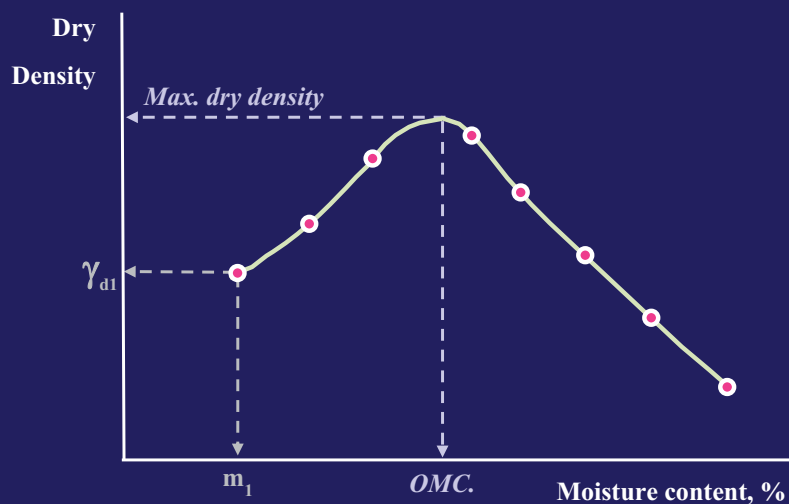
นำกระบอกตัวอย่างที่มีดินอยู่เต็มไปชั่ง
แล้วนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่น กับ
ปริมาณความชื้น จากนั้นนำค่าทั้งสองไป
คำนวณหาค่าความหนาแน่นแห้งจากสมการ

$$\gamma_d = \gamma / (1 + m)$$

จากการทดลองจะได้ค่าความหนาแน่นแห้ง
กับปริมาณความชื้น 1 ชุด



ทำการทดลองวิธีการเดิมกับตัวอย่างดิน แต่ให้ดินมีปริมาณความชื้นที่แตกต่างจากเดิม จะทำให้ได้ค่า ความหนาแน่นแห้ง กับปริมาณความชื้นหลายชุด แล้วนำข้อมูลทั้งหมดมาพล็อตลงในกราฟโดยให้ค่าความหนาแน่นแห้งอยู่ในแกนตั้ง และปริมาณความชื้นอยู่ในแกนนอน



จากกราฟ จะสามารถหาค่า ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, $\gamma_{d \max}$) กับปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OMC.) ได้

ต่อมา ASTM ได้มีการปรับปรุงวิธีการทดลองเนื่องจาก ASTM เห็นว่า กระจกตัวอย่างมีขนาดเล็กเกินไป ไม่เหมาะสมกับตัวอย่างดินที่มีเม็ดขนาดใหญ่ ดังนั้น ASTM จึงแยกย่อยวิธีทดลองแต่ละแบบเป็น A, B และ C โดยใช้ขนาดเม็ดดินเป็นตัวจำแนก ซึ่งถ้าเม็ดดินมีขนาดเล็กก็จะใช้กระจกตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว มีปริมาตร 1/30 ลบ.ฟุต

ตารางที่ 7.1 ลักษณะของดินที่ใช้ทดลองการบดอัดดิน

| วิธี | ลักษณะของดินที่ใช้ทดลอง |
|--------|--|
| วิธี A | ใช้ดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ถ้ามีดินที่เม็ดดินใหญ่กว่าตะแกรงเบอร์ 4 ไม่เกิน 20 % |
| วิธี B | ใช้ดินที่ผ่านตะแกรง 3/8 นิ้ว ถ้ามีดินที่เม็ดดินใหญ่กว่าตะแกรง 3/8 นิ้ว ไม่เกิน 20 % และ ค้างตะแกรงเบอร์ 4 มากกว่า 20 % |
| วิธี C | ใช้ดินที่ผ่านตะแกรง 3/4 นิ้ว ถ้ามีดินที่เม็ดดินค้างตะแกรง 3/8 นิ้ว มากกว่า 20 % และ ค้างตะแกรง 3/4 นิ้ว น้อยกว่า 30 % |

หากเม็ดดินมีขนาดใหญ่ก็จะใช้กระบอกตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว มีปริมาตร 1/13.33 ลบ.ฟุต ซึ่งเมื่อปริมาตรของกระบอกใหญ่ขึ้น จึงทำให้จำนวนครั้งที่ใช้กระแทก/ชั้น เท่ากับ 56 ครั้ง เพื่อให้ตัวอย่างดินมีพลังงานในการบดอัดเท่าเดิม

| | Standard Proctor test | Modified Proctor test |
|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| เส้นผ่าศูนย์กลางของกระบอก, นิ้ว | 4 หรือ 6 | 4 หรือ 6 |
| ความสูง, นิ้ว | 4.58 | 4.58 |
| จำนวนชั้นที่บดอัด | 3 | 5 |
| จำนวนกระแทกต่อชั้น | 25 หรือ 56 | 25 หรือ 56 |
| น้ำหนักลูกตุ้ม, ปอนด์ | 5.5 | 10.0 |
| ระยะกระแทก, นิ้ว | 12 | 18 |
| ปริมาตรของกระบอก, ลบ.ฟุต | 1/30 หรือ 1/13.33 | 1/30 หรือ 1/13.33 |
| พลังงานที่ใช้บดอัด, ฟุต-ปอนด์/ลบ.ฟุต | 12,375 | 56,250 |

การควบคุมการบดอัด

การควบคุมการบดอัดดินสามารถกระทำได้ โดยการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นแห้งของดินในสนาม กับค่า ความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ



Percent compaction

หรือ

Relative compaction

การทดลองหาค่าความหนาแน่นแห้งของดินในสนาม

การทดลองหาค่าความหนาแน่นแห้งของดินในสนาม (Field density) สามารถกระทำได้หลายวิธี ซึ่งสามารถแบ่งตามลักษณะการทดลองได้ 2 แบบ คือ



แบบใช้วัสดุแทนที่



แบบใช้รังสีแกมมา

การทดลองหาค่าความหนาแน่นแห้งของดินในสนาม

แบบใช้วัสดุแทนที่

วิธีการทดลองแบบนี้ จะทำการขุดดินบริเวณที่ต้องการหาความหนาแน่นแห้งให้เป็นหลุม แล้วนำดินที่ขุดไปชั่งหาน้ำหนัก (W) และปริมาณความชื้น (m) และถ้าหากทราบปริมาตร (V) ของดินที่ขุดขึ้นมา จะทำให้สามารถหาค่าความหนาแน่นแห้งของดินได้ จากสมการ

$$\gamma = W/V \quad \text{และ} \quad \gamma_d = \gamma/(1 + m)$$


ในการวิเคราะห์หาปริมาตรของดิน จะสมมุติให้ปริมาตรของดินเท่ากับปริมาตรของหลุมที่ขุด ซึ่งการหาปริมาตรของหลุมสามารถหาได้จากการนำวัสดุที่ทราบความหนาแน่นใส่ลงไปจนเต็ม แล้วชั่งน้ำหนัก แล้วนำมาคำนวณหาปริมาตร จากสมการ $V = W/\gamma$

สำหรับวัสดุที่ใช้หาปริมาณของหลุม มี 2 ชนิด คือ

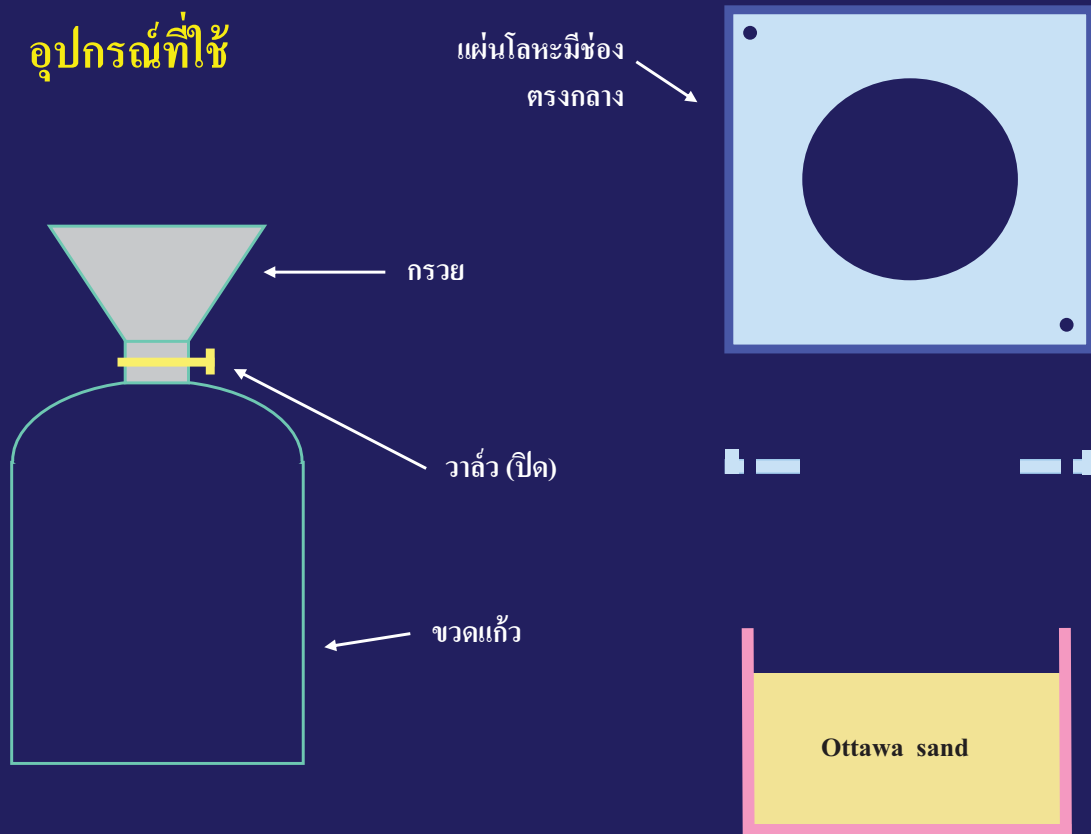


ทราย หรือ น้ำ

การทดลองโดยใช้ทรายแทนที่

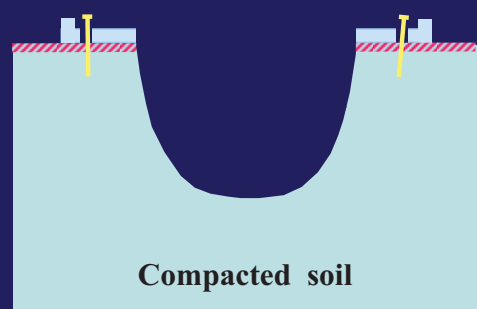
การทดลอง Sand replacement method หรือ Sand cone method จะต้องใช้ทรายที่มีเม็ดกลม ขนาดเท่าๆกัน และมีค่าความหนาแน่นค่อนข้างคงที่ ซึ่งในอดีตจะใช้ทรายจากต่างประเทศ คือ Ottawa sand แต่ปัจจุบันจะใช้ทรายในประเทศมาคัดเกรด

อุปกรณ์ที่ใช้



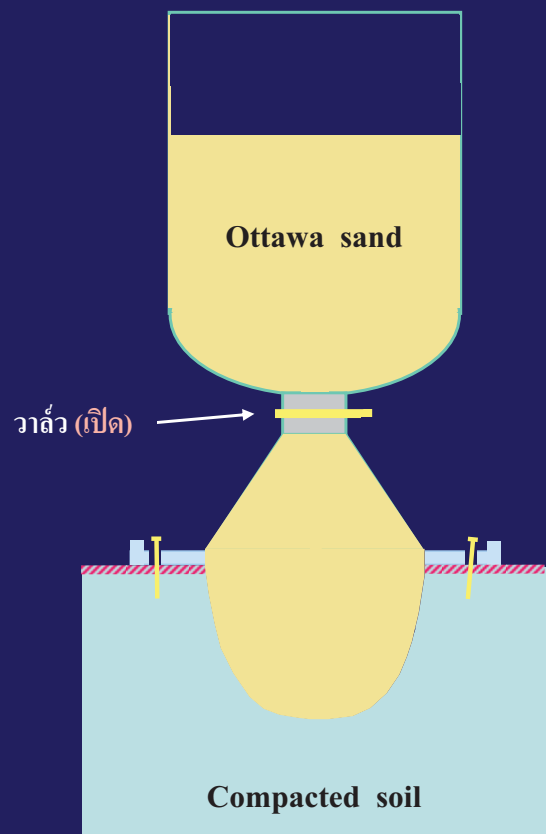
นำแผ่นเหล็กที่มีช่องตรงกลางมาวางบริเวณดินที่ต้องการหาค่าความหนาแน่นแห้ง แล้วยึดให้แน่นด้วยตะปู

จุดหลุมตรงช่องตรงกลางของแผ่นเหล็ก แต่งหลุมให้โค้งมน นำดินส่วนที่ขุดออกไปชั่งน้ำหนัก และหาปริมาณความชื้น



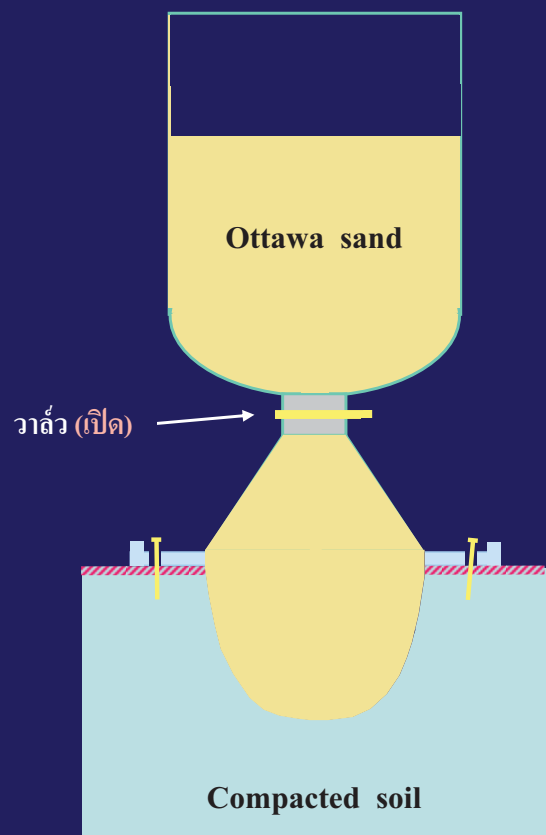
นำขวดแก้วบรรจุ Ottawa sand ให้เต็ม ปิดขวดไว้ให้สนิท แล้วชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำมาคว่ำลงที่ปากหลุม

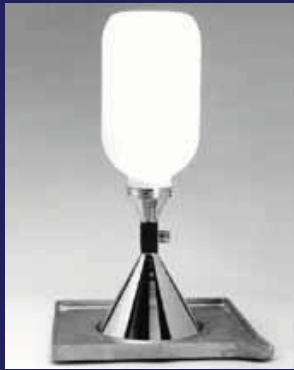
เปิดขวดไว้ให้ทรายไหลลงไป ในหลุมโดยอิสระ รอจนทรายหยุดไหล แล้วปิดขวดและนำขวดแก้วที่มีทรายเหลืออยู่ไปชั่งน้ำหนัก



จากรูป จะเห็นว่าน้ำหนักของทรายในขวดที่หายไป คือน้ำหนักของทรายในหลุม และน้ำหนักของทรายในกรวย

ชั่งน้ำหนักของทรายในกรวยจะเป็นค่ามาตรฐาน ดังนั้นจะสามารถหาน้ำหนักของทรายในหลุมได้ และจะทำให้หาปริมาณของทรายในหลุมได้ในที่สุด (γ ของทรายเป็นค่ามาตรฐาน)



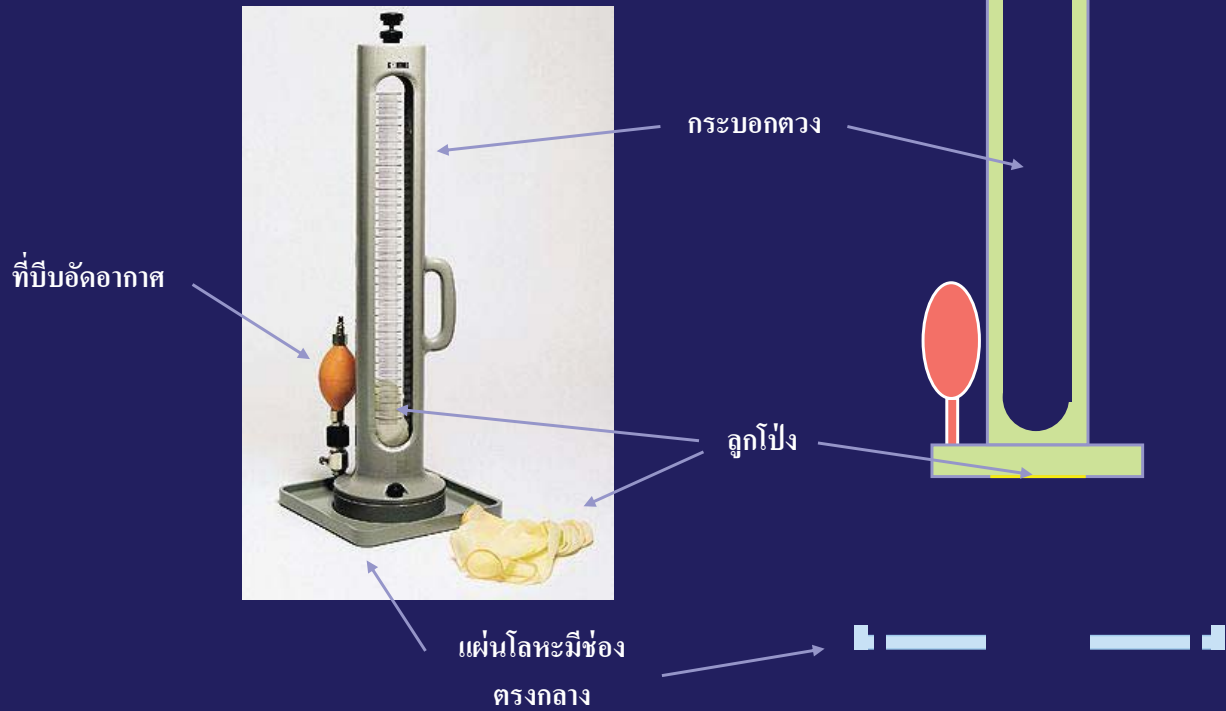


การทดลองโดยใช้น้ำแทนที่

การทดลองวิธีนี้เรียกว่า Water balloon method ซึ่งการทดลองจะคล้ายกับวิธี Sand cone method แต่แทนที่จะเป็นทราย จะใช้น้ำแทน ซึ่งทำให้เครื่องมือไม่เหมือนกับวิธี Sand cone method

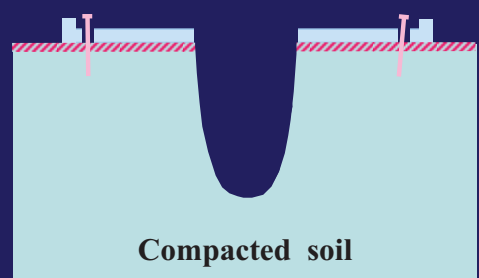
ในปัจจุบันวิธีนี้ไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากตัวลูกโป่งมักจะฉีกขาดเมื่อเก็บไว้เป็นเวลานาน

อุปกรณ์ที่ใช้



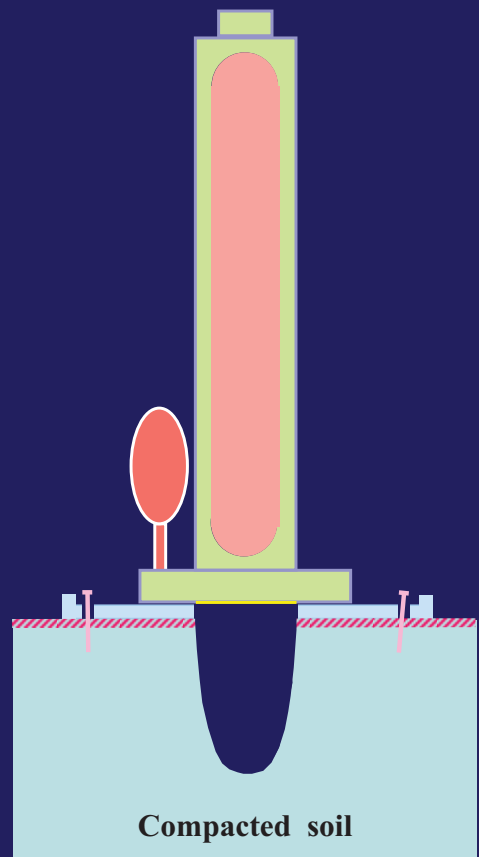
นำแผ่นเหล็กที่มีช่องตรงกลางมาวางบริเวณดินที่ต้องการหาค่าความหนาแน่นแห้ง แล้วยึดให้แน่นด้วยตะปู

จุดหลุมตรงช่องตรงกลางของแผ่นเหล็ก แต่งหลุมให้โค้งมน นำดินส่วนที่ขุดออกไปชั่งน้ำหนัก และหาปริมาตรความชื้น



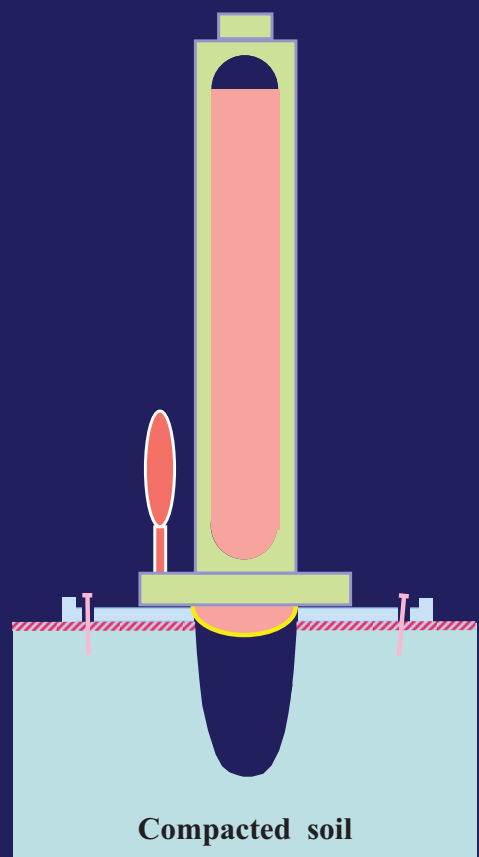
วางอุปกรณ์หาความ
หนาแน่นลงบนหลุม แล้วเติมน้ำ
ให้เต็ม ปิดให้แน่น

บีบที่อัดอากาศเพื่อให้อากาศ
เข้าไปในกระบอกตวงที่ปิดสนิท
จะทำให้อากาศเข้าไปอยู่ใน
กระบอกตวงแล้วดันลูกโป่งซึ่ง
อยู่ที่ส่วนล่างของอุปกรณ์ให้
ย้อยลงไปในหลุม



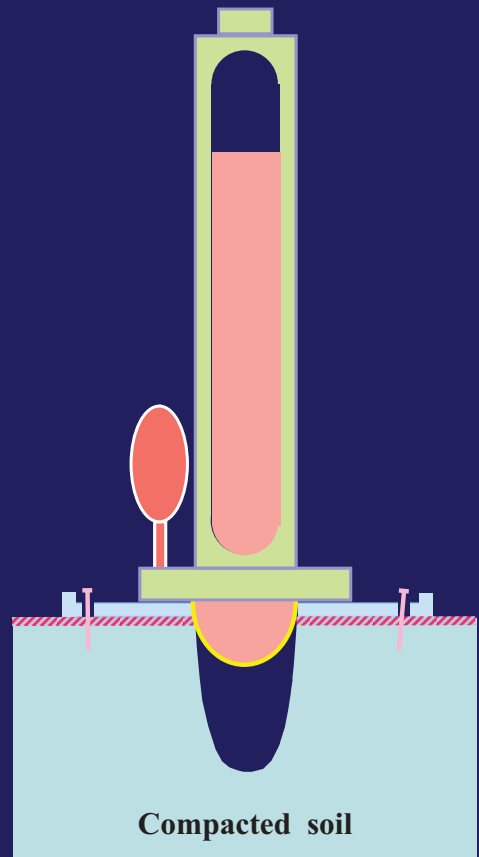
วางอุปกรณ์หาความ
หนาแน่นลงบนหลุม แล้วเติมน้ำ
ให้เต็ม ปิดให้แน่น

บีบที่อัดอากาศเพื่อให้อากาศ
เข้าไปในกระบอกตวงที่ปิดสนิท
จะทำให้อากาศเข้าไปอยู่ใน
กระบอกตวงแล้วดันลูกโป่งซึ่ง
อยู่ที่ส่วนล่างของอุปกรณ์ให้
ย้อยลงไปในหลุม



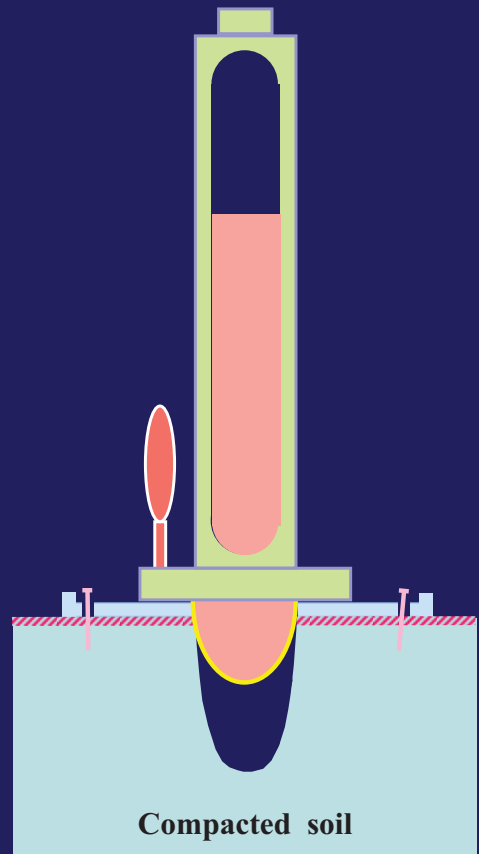
วางอุปกรณ์หาความ
หนาแน่นลงบนหลุม แล้วเติมน้ำ
ให้เต็ม ปิดให้แน่น

บีบที่อัดอากาศเพื่อให้อากาศ
เข้าไปในกระบอกตวงที่ปิดสนิท
จะทำให้อากาศเข้าไปอยู่ใน
กระบอกตวงแล้วดันลูกโป่งซึ่ง
อยู่ที่ส่วนล่างของอุปกรณ์ให้
ย้อยลงไปในหลุม



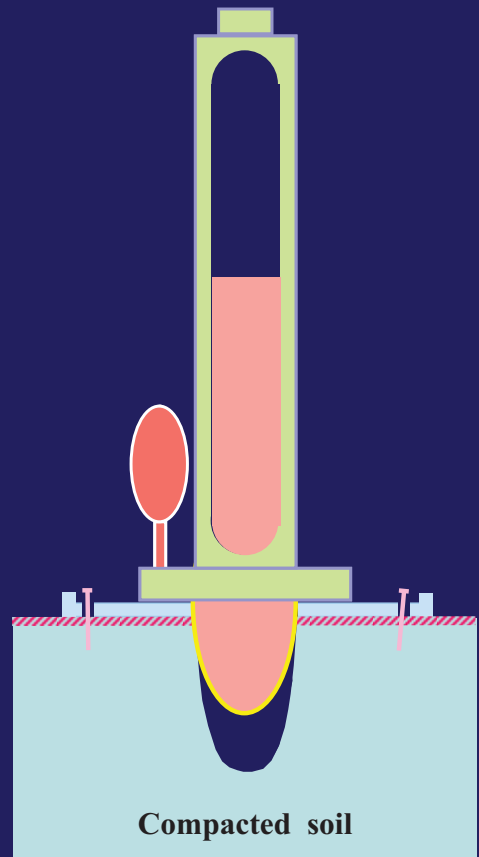
วางอุปกรณ์หาความ
หนาแน่นลงบนหลุม แล้วเติมน้ำ
ให้เต็ม ปิดให้แน่น

บีบที่อัดอากาศเพื่อให้อากาศ
เข้าไปในกระบอกตวงที่ปิดสนิท
จะทำให้อากาศเข้าไปอยู่ใน
กระบอกตวงแล้วดันลูกโป่งซึ่ง
อยู่ที่ส่วนล่างของอุปกรณ์ให้
ย้อยลงไปในหลุม



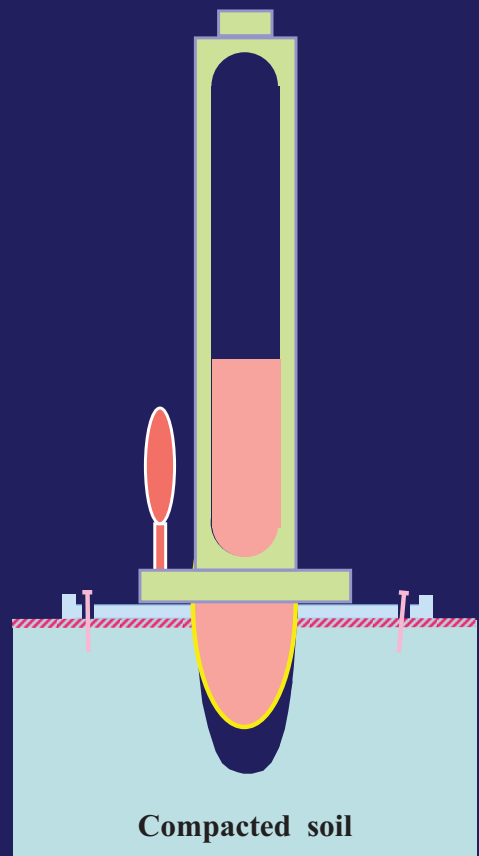
วางอุปกรณ์หาความ
หนาแน่นลงบนหลุม แล้วเติมน้ำ
ให้เต็ม ปิดให้แน่น

บีบที่อัดอากาศเพื่อให้อากาศ
เข้าไปในกระบอกตวงที่ปิดสนิท
จะทำให้อากาศเข้าไปอยู่ใน
กระบอกตวงแล้วดันลูกโป่งซึ่ง
อยู่ที่ส่วนล่างของอุปกรณ์ให้
ย้อยลงไปในหลุม



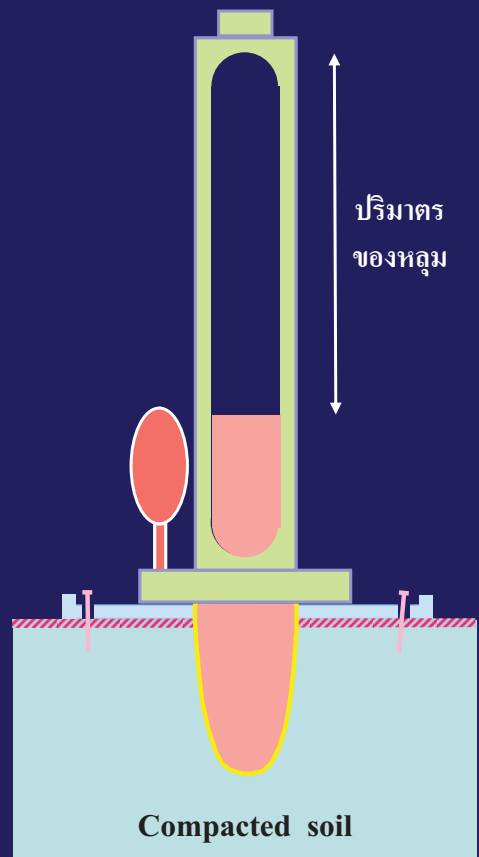
วางอุปกรณ์หาความ
หนาแน่นลงบนหลุม แล้วเติมน้ำ
ให้เต็ม ปิดให้แน่น

บีบที่อัดอากาศเพื่อให้อากาศ
เข้าไปในกระบอกตวงที่ปิดสนิท
จะทำให้อากาศเข้าไปอยู่ใน
กระบอกตวงแล้วดันลูกโป่งซึ่ง
อยู่ที่ส่วนล่างของอุปกรณ์ให้
ย้อยลงไปในหลุม

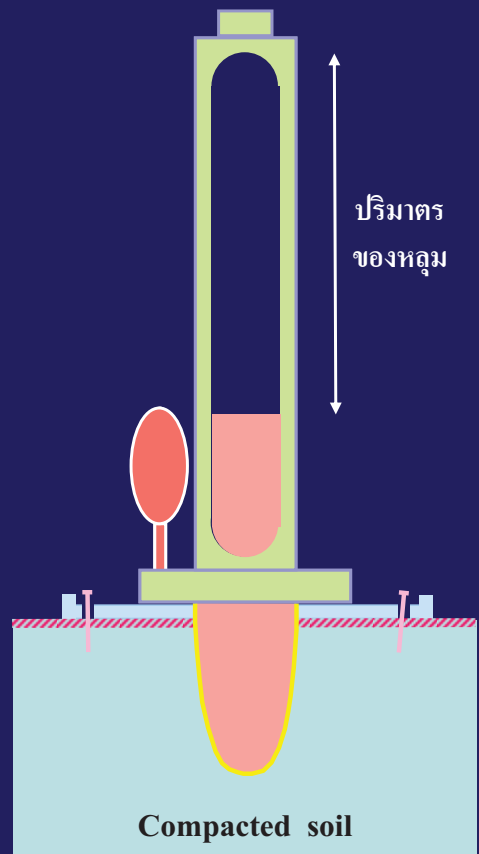


วางอุปกรณ์หาความ
หนาแน่นลงบนหลุม แล้วเติมน้ำ
ให้เต็ม ปิดให้แน่น

บีบที่อัดอากาศเพื่อให้อากาศ
เข้าไปในกระบอกตวงที่ปิดสนิท
จะทำให้อากาศเข้าไปอยู่ใน
กระบอกตวงแล้วดันลูกโป่งซึ่ง
อยู่ที่ส่วนล่างของอุปกรณ์ให้
ย้อยลงไปในหลุม



เมื่อหาปริมาณของหลุมจาก
ปริมาณที่หายไปของน้ำใน
กระบอกตวงได้แล้ว ก็จะสามารถหาความหนาแน่น และ
ความหนาแน่นแห้งของดินได้
ในที่สุด

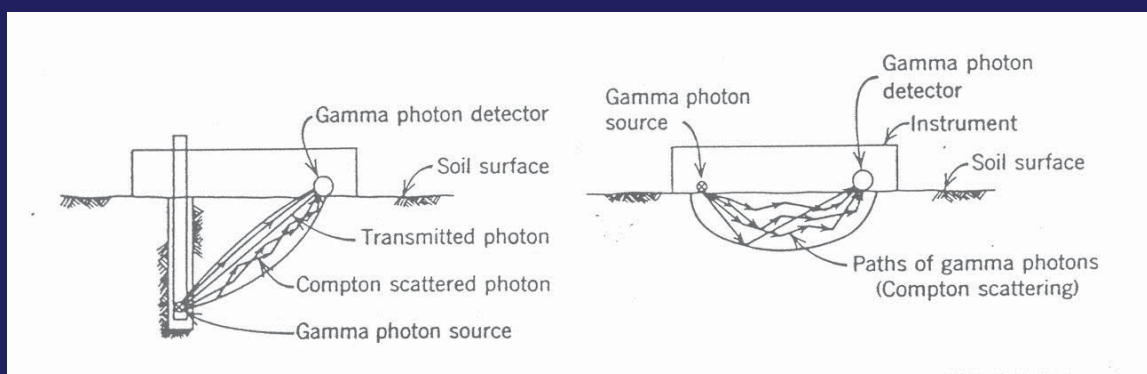


การทดลองหาค่าความหนาแน่นแห้งของดินในสนาม

แบบใช้รังสีแกมมา

วิธีการทดลองแบบนี้ อาศัยหลักการเคลื่อนที่ของรังสีแกมมา และนิวตรอน โดยที่รังสีแกมมาจะเบี่ยงเบนไปในทิศทางต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของวัสดุที่รังสีแกมมาวิ่งผ่าน ในขณะที่นิวตรอนจะเคลื่อนที่ช้าลงเมื่อพบกับอะตอมของไฮโดรเจน การเบี่ยงเบน และการเคลื่อนที่เหล่านี้จะสามารถแปลออกมาเป็นค่าความหนาแน่นแห้งได้ในที่สุด

เครื่องมือที่ใช้หาค่าความหนาแน่นแห้ง สามารถแบ่งตามการกระจายคลื่นได้ 2 แบบ ดังแสดงในรูป คือ



Transmission type

Backscatter type



อุปกรณ์ที่ใช้ในการบดอัด

การบดอัดดินในสนามจะต้องเลือกใช้วิธีการ และอุปกรณ์ที่เหมาะสม ซึ่งการเลือกที่ถูกต้องจะทำให้ประหยัดทั้งเวลาและค่าใช้จ่าย อุปกรณ์ที่ใช้บดอัดกันอยู่ประจำ คือ

➔ *Smooth – wheeled roller*

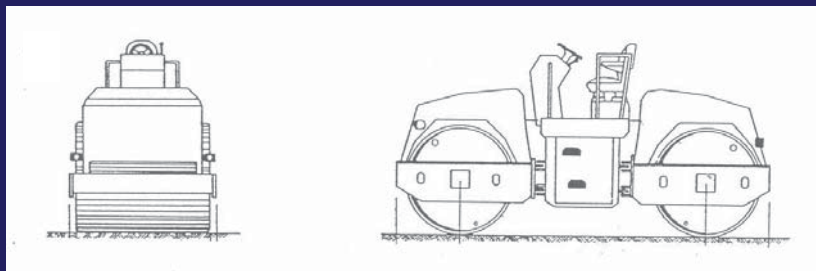
➔ *Sheep foot roller*

➔ *Pneumatic tyred roller*

➔ *Vibratory compactor*

Smooth – wheeled roller

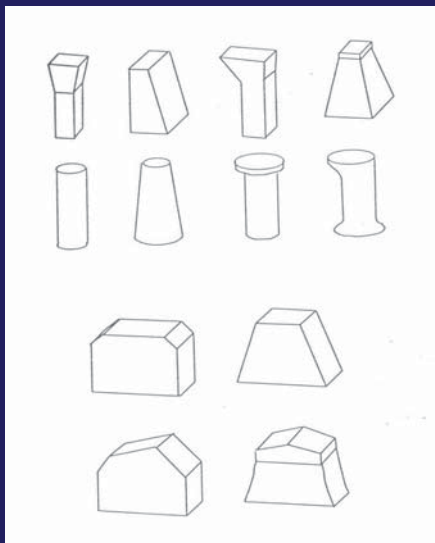
รถบดล้อเรียบเป็นอุปกรณ์ที่เก่าแก่ที่สุด ซึ่งมีการพัฒนามาเรื่อยๆ จนกระทั่งในปัจจุบันใช้เครื่องยนต์ดีเซล รถบดชนิดนี้เหมาะกับดินประเภทเม็ดหยาบ เช่น กรวด ทราย การบดอัดจะให้ความแน่นแข็งแรงเฉพาะผิวหน้าของดิน ดังนั้นจึงควรบดอัดดินเป็นชั้นบาง ๆ ทีละชั้น ประมาณ 15 – 20 เซนติเมตร



Sheep foot roller

รถบดแบบตีนแกะจะมีการบดอัดที่ตรงข้ามกับอุปกรณ์ที่ใช้บดอัดแบบอื่น กล่าวคือจะทำการบดอัดจากข้างล่างขึ้นบน โดยที่ Foot ของรถบดจะกดดินหลวมให้จมลงไปอัดแน่นข้างล่าง ต่อมา Foot อันอื่นจะตามมากกดดินให้แน่นขึ้นซึ่ง Foot จะจมลงน้อยกว่าเดิม เนื่องจากดินข้างล่างแน่นแล้ว

การบดอัดด้วยรถบดแบบนี้จะเหมาะสมกับดินที่มีความเชื่อมแน่น แต่จะทำให้เกิดโพรงในดินมากกว่าการบดอัดวิธีอื่น



ลักษณะของ Foot แบบต่าง ๆ



Pneumatic tyred roller

รถบดล้อยางจะให้ผลการบดอัดดีกว่ารถบดแบบล้อเรียบ ทั้งนี้เพราะรถบดแบบนี้จะทำการนวดดิน (Kneading) จากล้อ ยางอีกด้วย

การบดอัดด้วยรถบดแบบนี้ไม่เหมาะสมสำหรับดินที่มี ขนาดการกระจายสม่ำเสมอ



Vibratory compactor

เครื่องบดอัดดินแบบสั่น มีหลายรูปแบบ ทั้งขนาดใหญ่และเล็ก การบดอัดด้วยอุปกรณ์แบบนี้จะทำให้เม็ดดินหมนุเข้าไปยังช่องว่างระหว่างเม็ดดินเนื่องจากแรงสั่น ซึ่งจะทำให้มวลดินแน่นขึ้น

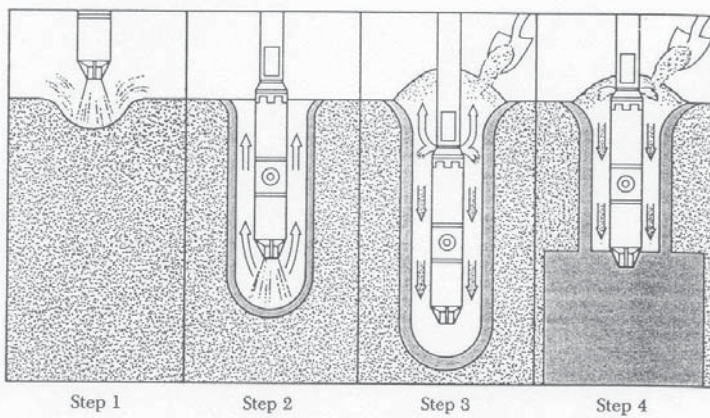
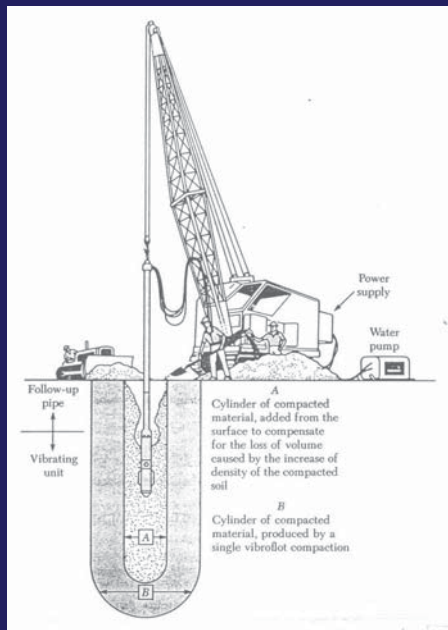




วิธีการบดอัดดินแบบพิเศษ

ในปัจจุบันได้มีการคิดค้นวิธีการบดอัดดินแบบใหม่ ๆ ขึ้น ซึ่งวิธีเหล่านี้เป็นที่แพร่หลายในต่างประเทศ แต่สำหรับในประเทศไทยยังไม่ค่อยเป็นยอมรับ ซึ่งอาจจะเป็นเพราะไม่เหมาะสมกับสภาพดินในประเทศไทย หรือเพราะอุปกรณ์มีราคาแพง

Vibrofloatation



Pounding



Impact roller



ตัวอย่างที่ 7.1

จงหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ความชื้นที่เหมาะสม และเส้นโค้งช่องว่างอากาศเป็นศูนย์ จากการทดลองแบบสแตนด์คาร์ทพรอดเตอร์ โดยทำการแบ่งดินเป็น 5 ส่วน ได้ข้อมูลดังนี้

กระบอกตัวอย่างมีปริมาตร 1/30 ลบ.ฟุต

น้ำหนักของกระบอกตัวอย่าง 4.231 กิโลกรัม

ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน 2.73

| ข้อมูลสำหรับหาปริมาณความชื้น | | | | | |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ดินส่วนที่ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| นน. ดินเปียก + กระป๋อง, g | 168.8 | 144.8 | 157.0 | 177.0 | 180.0 |
| นน. ดินแห้ง + กระป๋อง, g | 157.0 | 132.4 | 140.0 | 153.5 | 152.9 |
| นน. กระป๋อง, g | 39.2 | 40.3 | 36.4 | 37.0 | 34.6 |
| ข้อมูลสำหรับหาความหนาแน่นแห้ง | | | | | |
| นน. ดิน + กระบอกตัวอย่าง, kg | 5.978 | 6.101 | 6.159 | 6.108 | 6.078 |

วิธีทำ หาปริมาณความชื้นของดิน

| ดินส่วนที่ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| นน. ดินเปียก + กระจกป้อง, g | 168.8 | 144.8 | 157.0 | 177.0 | 180.0 |
| นน. ดินแห้ง + กระจกป้อง, g | 157.0 | 132.4 | 140.0 | 153.5 | 152.9 |
| นน. กระจกป้อง, g | 39.2 | 40.3 | 36.4 | 37.0 | 34.6 |
| นน. น้ำในดิน, g | 11.8 | 12.4 | 17.0 | 23.5 | 27.1 |
| นน. ดินแห้ง, g | 117.8 | 92.1 | 103.6 | 116.5 | 118.3 |
| ปริมาณความชื้น, % | 10.0 | 13.5 | 16.4 | 20.2 | 22.9 |

$$\text{ปริมาณความชื้น} = \text{นน. น้ำ} \times 100 / \text{นน. ดินแห้ง}$$

หาค่าความหนาแน่นแห้งของดิน

| ดินส่วนที่ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| นน. ดิน + กระจกบอตัวอย่าง, kg | 5.978 | 6.101 | 6.159 | 6.108 | 6.078 |
| นน. กระจกบอตัวอย่าง, kg | 4.231 | 4.231 | 4.231 | 4.231 | 4.231 |
| นน. ดิน, kg | 1.747 | 1.870 | 1.928 | 1.877 | 1.847 |
| ความหนาแน่นของดิน, pcf | 115.51 | 123.64 | 127.48 | 124.11 | 122.12 |
| ความหนาแน่นแห้งของดิน, pcf | 105.0 | 109.0 | 109.5 | 103.3 | 99.4 |

$$\text{ความหนาแน่นแห้งของดิน} = \text{ความหนาแน่นของดิน} / (1 + (\text{ปริมาณความชื้น} / 100))$$

หาเส้นโค้งช่องว่างอากาศเป็นศูนย์

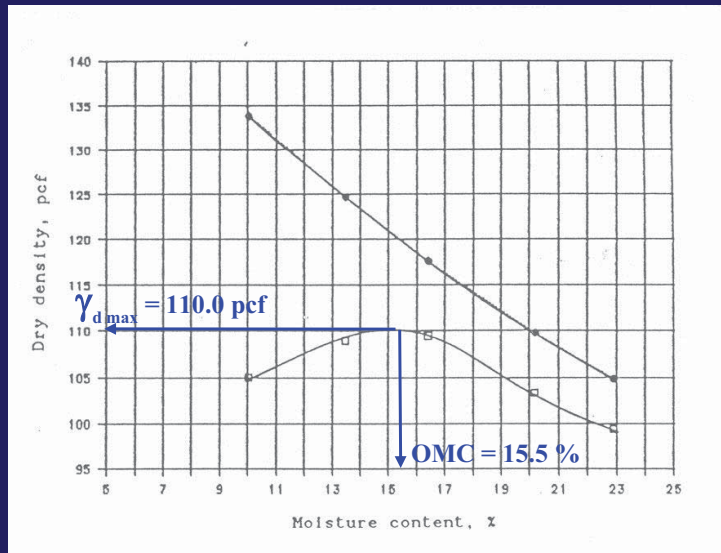
| ดินส่วนที่ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ปริมาณความชื้น, % | 10.0 | 13.5 | 16.4 | 20.2 | 22.9 |
| ความหนาแน่นแห้งที่ $S = 1.0$, pcf | 133.8 | 124.6 | 117.6 | 109.9 | 104.8 |

ความหนาแน่นแห้งหาได้จาก $\gamma_d = G_s \cdot \gamma_w / [1 + (m \cdot G_s / S)]$ เมื่อ $G_s = 2.73$, $\gamma_w = 62.4$, $S = 1.0$

นำข้อมูลทั้งหมดไปพล็อตกราฟ โดยให้ค่าปริมาณความชื้น
อยู่ในแกนนอน และค่าความหนาแน่นแห้งอยู่ในแกนตั้ง

| ดินส่วนที่ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|------|
| ปริมาณความชื้น, % | 10.0 | 13.5 | 16.4 | 20.2 | 22.9 |
| ความหนาแน่นแห้งของดิน, pcf | 105.0 | 109.0 | 109.5 | 103.3 | 99.4 |

| ดินส่วนที่ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ปริมาณความชื้น, % | 10.0 | 13.5 | 16.4 | 20.2 | 22.9 |
| ความหนาแน่นแห้งที่ $S = 1.0$, pcf | 133.8 | 124.6 | 117.6 | 109.9 | 104.8 |



จากรูปจะได้

ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, $\gamma_{d \max}$) = 110.0 pcf

ความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) = 15.5 % **Ans**

ตัวอย่างที่ 7.2

จงคำนวณหาจำนวนครั้งต่อชั้นในการบดอัดดินตะกอนทรายสี
แดง ลงในกระบอกตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 5
นิ้ว จำนวน 6 ชั้น โดยใช้ตุ้มน้ำหนักแบบสแตนดาร์ดพรอคเตอร์
และให้มีพลังงานในการบดอัดเท่ากับการบดอัดแบบโมดิฟายด์
พรอคเตอร์

วิธีทำ

การบดอัดแบบโมดิไฟส์พรอคเตอร์ จะใช้ลูกตุ้มหนัก 10.0 ปอนด์ ระยะการยกตุ้ม 18.0 นิ้ว บดอัด 5 ชั้น ชั้นละ 25 ครั้งบดอัดดินลงในกระบอกตัวอย่างที่มีปริมาตร 1/30 ลบ.ฟุต

จากสมการ $CE = W_h \cdot H_d \cdot N_L \cdot N_d / V$ จะได้ $W_h = 10.0 \text{ lbs}$,
 $H_d = 18.0 \text{ in} = 1.5 \text{ ft}$, $N_L = 5$, $N_d = 25$, $V = 1/30 \text{ ft}^3$

แทนค่า $CE = 10.0 \times 1.5 \times 5 \times 25 / (1/30) = 56,250 \text{ ft-lbs/ft}^3$

ปริมาตรของกระบอกตัวอย่างใหม่ = $\pi \times 6^2 \times 5 / (4 \times 12^3) = 0.082 \text{ ft}^3$

ลูกตุ้มบดอัดแบบสแตนดาร์ดพรอคเตอร์หนัก = 5.5 lbs

มีระยะตกกระทบ = 12 in = 1.0 ft

จากสมการ $CE = W_h \cdot H_d \cdot N_L \cdot N_d / V$ จะได้ $CE = 56250 \text{ ft-lbs/ft}^3$,
 $W_h = 5.5 \text{ lbs}$, $H_d = 12.0 \text{ in} = 1.0 \text{ ft}$, $N_L = 6$, $V = 0.082 \text{ ft}^3$

$N_d = 56250 \times 0.082 / (5.5 \times 1.0 \times 6) = 139.8 = 140$

ดังนั้นต้องบดอัดดิน 140 ครั้งต่อชั้น จำนวน 6 ชั้น เพื่อให้มีพลังงานในการบดอัดแบบโมดิไฟส์พรอคเตอร์

Ans

ตัวอย่างที่ 7.3

จงหาเปอร์เซ็นต์การบดอัดดินในสนามจากข้อมูลการทดลอง
หาค่าความหนาแน่นแห้งของดินในสนามโดยใช้ทรายแทนที่

ข้อมูลในห้องปฏิบัติการ

ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดิน

$$(\text{สแตนด์การ์ดพรอคเตอร์}) = 118.8 \text{ pcf}$$

ข้อมูลในสนาม

นำทรายใส่ขวดที่จะใช้หาความหนาแน่นแห้งของดินในสนามให้เต็ม แล้วนำไปชั่งได้ 17.43 lbs จากนั้นจุดหลุมในบริเวณที่ต้องการหาค่าความหนาแน่นแห้งของดินในสนาม นำดินที่ขุดออกมาชั่งได้หนัก 4.54 lbs แล้วนำเศษดินไปหาปริมาณความชื้น ต่อมานำขวดที่มีทรายเต็มมาคว่ำลงที่ปากหลุม แล้วเปิดวาล์วให้ทรายไหลลงไปในหลุมจนหยุด นำขวดมาชั่งได้หนัก 9.43 lbs

จากการทดลองได้ค่าความหนาแน่นของทรายเท่ากับ 99.93 pcf และน้ำหนักของทรายในกรวยเท่ากับ 4.11 lbs

สรุปข้อมูลในสนาม

| | |
|---------------------------------|-------|
| ข้อมูลปริมาณความชื้น | |
| นน.ดินเปียก + กระป๋อง, g | 156.0 |
| นน.ดินแห้ง + กระป๋อง, g | 138.5 |
| นน. กระป๋อง, g | 36.8 |
| ข้อมูลความหนาแน่นแห้ง | |
| ความหนาแน่นของทราย, pcf | 99.93 |
| นน. ขวด + ทราย (ก่อนทดสอบ), lbs | 17.43 |
| นน. ขวด + ทราย (หลังทดสอบ), lbs | 9.43 |
| นน. ทรายในกรวย, lbs | 4.11 |
| นน. ดินที่ขุดออกจากหลุม, lbs | 4.54 |

วิธีทำ

นำทรายใส่ขวดที่จะใช้หาความหนาแน่นแห้งของดินในสนามให้เต็ม แล้วนำไปชั่ง ได้ 17.43 lbs นำขวดนี้มาคว่ำลงที่ปากหลุม แล้วเปิดขวดให้ทรายไหลลงไปในหลุมจนหยุด นำขวดที่มีทรายเหลืออยู่กลับมาชั่งได้หนัก 9.43 lbs

น้ำหนักที่หายไป = $17.43 - 9.43 = 8.00$ lbs คือน้ำหนักของทรายในหลุมรวมกับทรายในกรวย

น้ำหนักของทรายในกรวยเท่ากับ 4.11 lbs ดังนั้น น้ำหนักของ
ทรายในหลุม = $8.00 - 4.11 = 3.89$ lbs

จากข้อมูล ค่าความหนาแน่นของทราย เท่ากับ 99.93 pcf ดังนั้น
ปริมาตรของทรายในหลุม จะเท่ากับ $3.89/99.93 = 0.04$ ft³ (จาก
สมการ $\gamma = W/V$)

ปริมาตรของทรายในหลุม = ปริมาตรของดินที่ขุดขึ้นมา

ดังนั้น ความหนาแน่นของดิน จากสมการ $\gamma = W/V$

$$\gamma = 4.54/0.04 = 113.5 \text{ pcf}$$

ค่าปริมาณความชื้นของดิน จากสมการ $m = (W_w/W_s) \times 100$

$$m = [(156.0 - 138.5)/(138.5 - 36.8)] \times 100 = 17.2\%$$

ค่าความหนาแน่นแห้งของดินจากสมการ $\gamma_d = \gamma / (1 + m)$

$$\gamma_d = 113.5 / (1 + (17.2/100))$$

$$\gamma_d = 96.8 \text{ pcf}$$

ดังนั้นเปอร์เซ็นต์การบดอัด = $(96.8/118.8) \times 100 = 81.5 \%$

Ans