เอกสารประกอบการเรียนการสอน
430421 ปฐพีกลศาสตร์

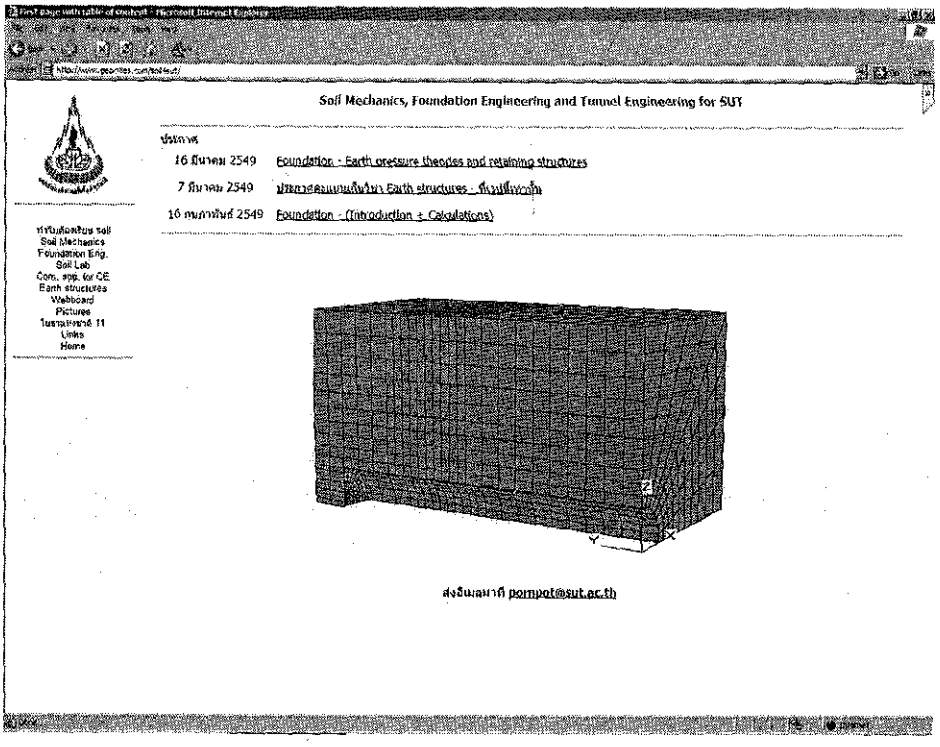
อาจารย์ ดร.พรพจน์ ตันเส็ง

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อภินันทนาการ

สื่อเพื่อการสอน

430 421 วิชาปฐพีกลศาสตร์



อ. ดร. พรพจน์ ตันเส็ง

สาขาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ศูนย์บรรณสารและสื่อการศึกษา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

430321 Soil Mechanics

Chapter 0 Introduction

9 กันยายน 2548

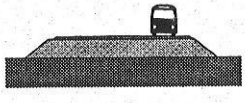
อ.ดร.พรพจน์ ตันเส็ง

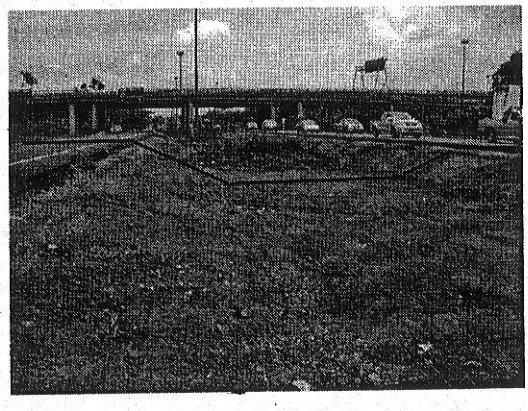
download เอกสารนี้ได้จาก http://www.geocities.com/soil4sut

Soil mechanics คืออะไร?

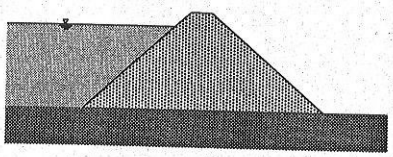
- Soil mechanics คือการนำเอาหลักการและกฎต่าง ๆ ในวิชา Mechanics และ Hydraulic มาประยุกต์ใช้กับปัญหาทางด้านวิศวกรรมที่ต้องเกี่ยวข้องกับดิน
- ในทางวิศวกรรมโครงสร้างที่เกี่ยวกับดินมีสองประเภท

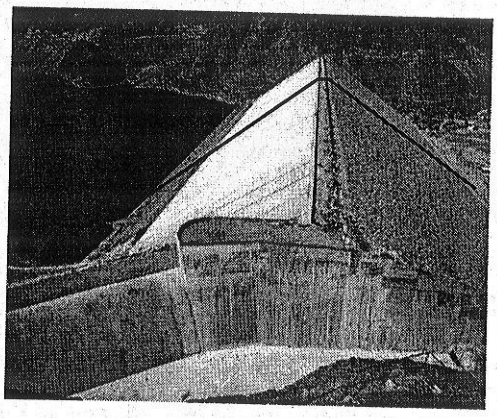
1. โครงสร้างที่ก่อสร้างขึ้นมาจากดิน (Made from earth)



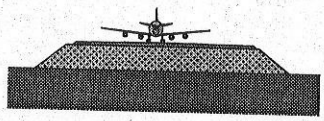


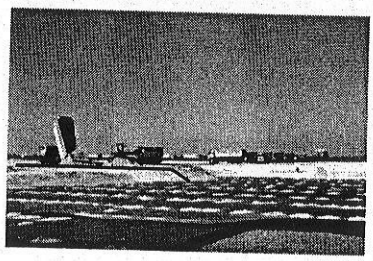
คันทางถนน





เขื่อนดิน

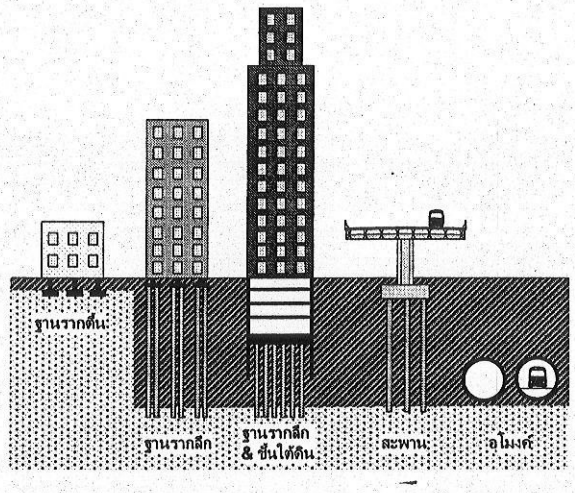




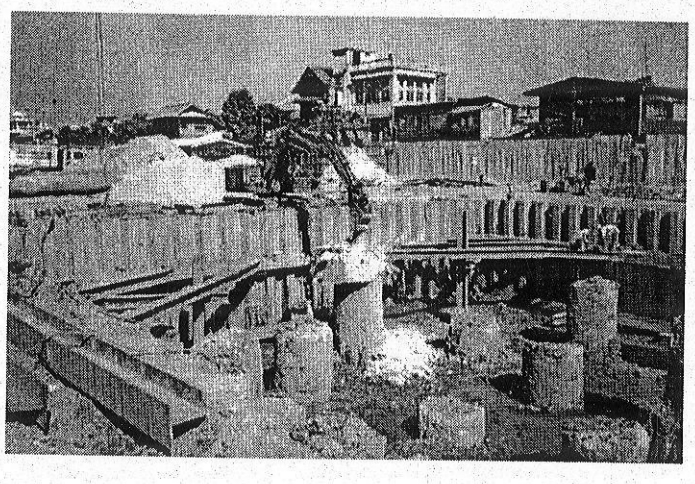
สนามบินสุวรรณภูมิ

2. โครงสร้างที่ก่อสร้างลงไปในดิน (Made in earth)

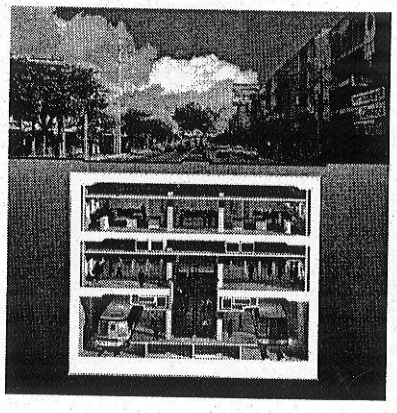
กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือใช้ดินเป็นฐานราก



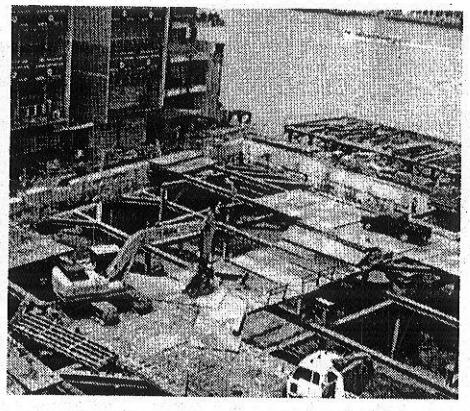
ตัวอย่างโครงสร้างซึ่งก่อสร้างลงไปในดิน



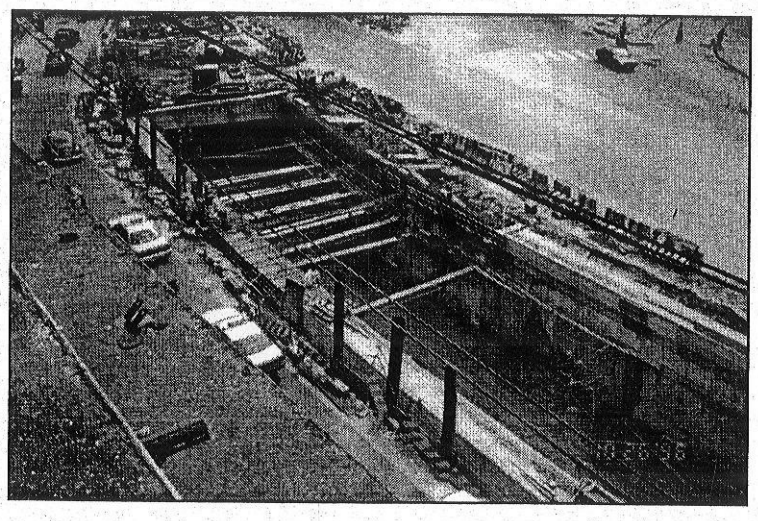
ฐานรากของสะพานพระราม8



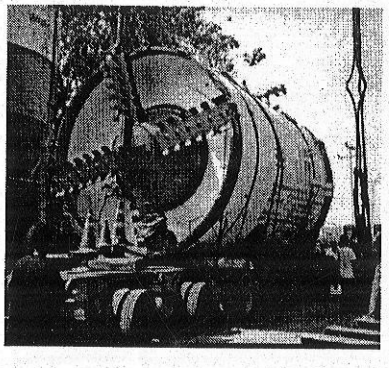
อาคารใต้ดินสำหรับสถานีรถไฟฟ้า

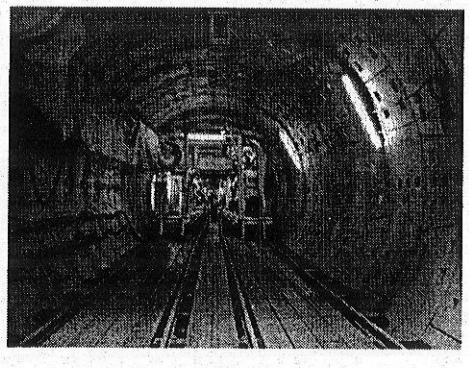


งานขุดเพื่อก่อสร้างชั้นจอดรถใต้ดิน
ของ ม.ธรรมศาสตร์ ท่าพระจันทร์

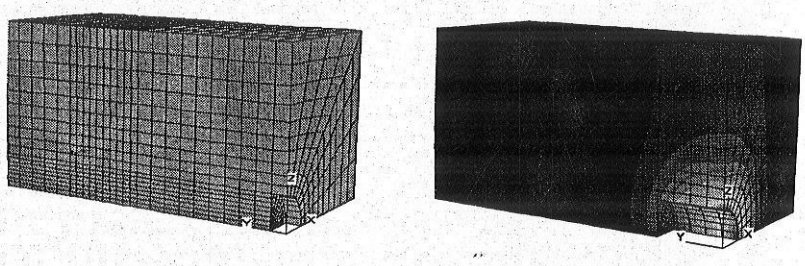


การขุดอุโมงค์สำหรับรถลอดใต้ทางแยก



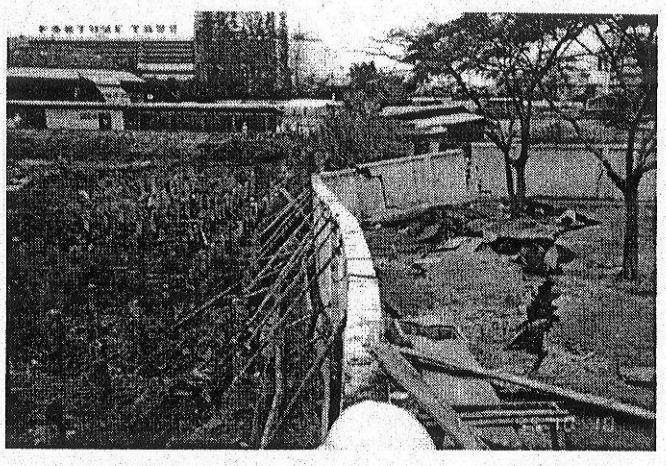


การก่อสร้างอุโมงค์โดยใช้เครื่องเจาะ

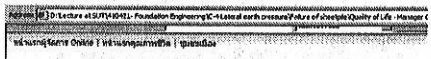


แบบจำลองแบบ 3มิติ ของการเจาะอุโมงค์

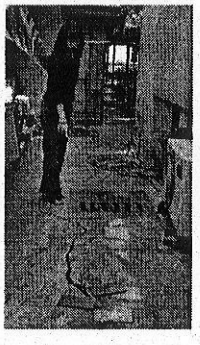
ถ้าไม่เข้าใจพื้นฐานทางปฐพีกลศาสตร์ อาจก่อให้เกิดปัญหาทางวิศวกรรมปฐพี
ดังตัวอย่างเหล่านี้



การวิบัติของขอบคันดินของงานขุด



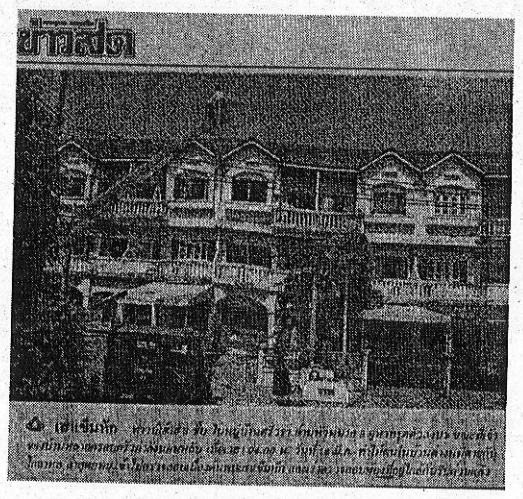
เปิดบ้านร้าวทั้งหลังแล "อิตาเลียนไทย" ยันฟ้องเรียก 21 ล้าน



การวิบัติงานขุดเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดิน

หาดูข่าว onlineได้จาก http://hiptv.mcot.net
รายการถึงลูกถึงคน เรื่อง: สร้างตึก 39 ชั้น ทำบ้านร้าวทั้งหลัง 10 พ.ค. 48

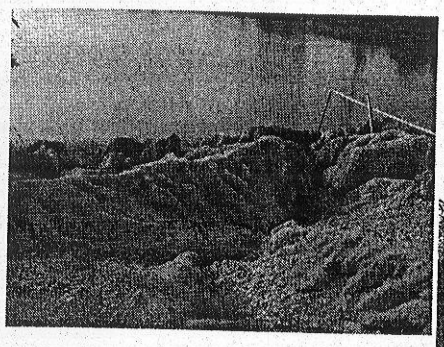
ตึกทรุดเนื่องจากเสาเข็มหัก

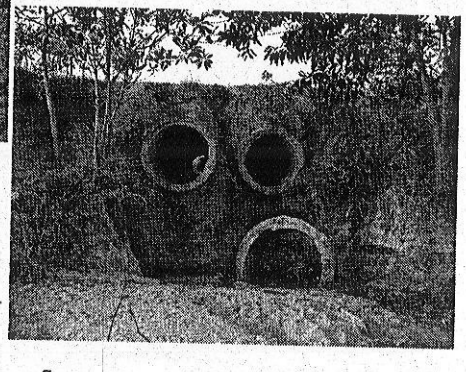


อีกกรณีหนึ่งของการวิบัติเนื่องจากเสาเข็มหัก

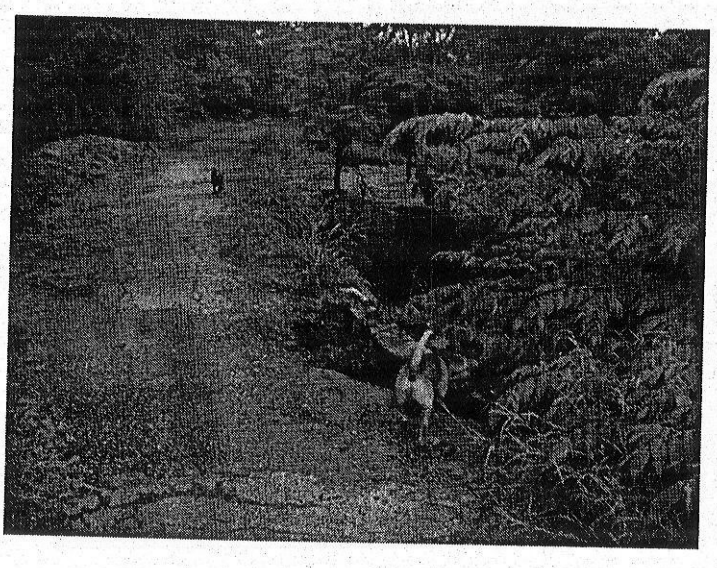
การวิบัติของคันดินของถนน เนื่องจากมีแรงดันดินด้านข้างไม่เพียงพอ

การวิบัติของการก่อสร้างใต้ดินลึก





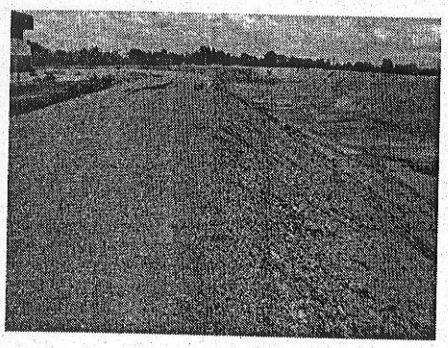
ปัญหาการถูกกัดเซาะของดิน ต.โคกกรวด จ.นครราชสีมา



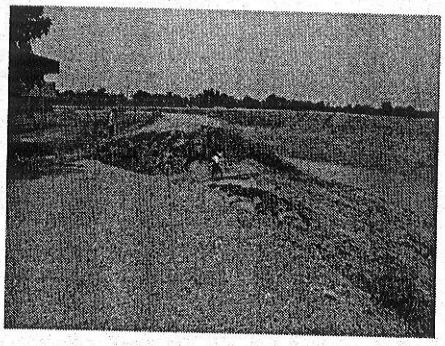
ปัญหาถนนถูกกัดเซาะใน มทส.

การขุดอ่างเก็บน้ำ และก่อสร้างคันดินอ่างเก็บน้ำ

การเคลื่อนตัวของคันดิน เมื่อถมดินในดินเหนียวอ่อน

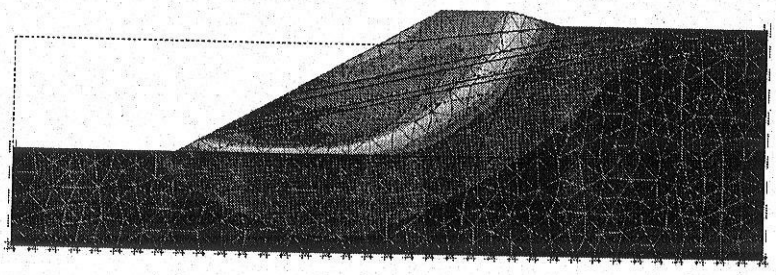


จุดเริ่มต้น



จุดจบ

การขุดอ่างเก็บน้ำ และก่อสร้างคันดินอ่างเก็บน้ำ



ต้องมีการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดินอ่างเก็บน้ำ
ซึ่งจะต้องใช้ความรู้พื้นฐานทางด้านวิศวกรรมปฐพี

ในวิชาปฐพีกลศาสตร์เราจะศึกษาถึงคุณสมบัติและพฤติกรรมของดิน ได้แก่

1. ดินเกิดขึ้นมาได้อย่างไร?
2. คุณสมบัติของดิน
3. การจำแนกประเภทของดินทางด้านวิศวกรรม
4. หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในดิน
5. การไหลของน้ำผ่านดิน
6. การทรุดตัวที่ขึ้นกับเวลา (การอัดตัวคายน้ำ)
7. กำลังรับแรงเฉือนของดิน

จากวิชาปฐพีกลศาสตร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานอื่นๆได้ ตัวอย่างเช่น

Highway engineering

Foundation Engineering

Earth structure

ในบทต่อไปจะศึกษาถึงการกำเนิดของดิน

Chapter 1 Origin of soils

430321 Soil Mechanics

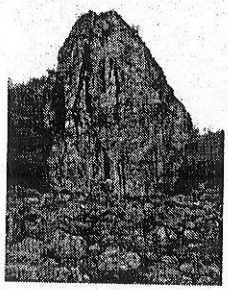
14 กันยายน 2548

อ.ดร.พรพจน์ ตันเส็ง

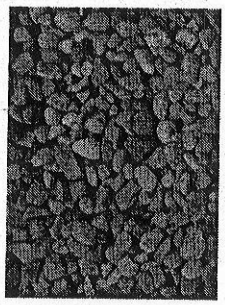
download เอกสารนี้ได้จาก http://www.geocities.com/soil4sut

ดินคืออะไร?

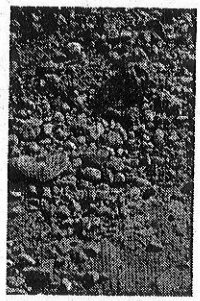
ดินคือ มวลรวมที่ไม่มีการเชื่อมประสานเป็นเนื้อเดียวกัน ดินจะประกอบไปด้วย เม็ดดิน, อินทรีวัตถุ และอาจจะมีน้ำหรืออากาศแทรกอยู่ในระหว่างเม็ดดิน



หิน
ประสานเป็นเนื้อเดียวกัน



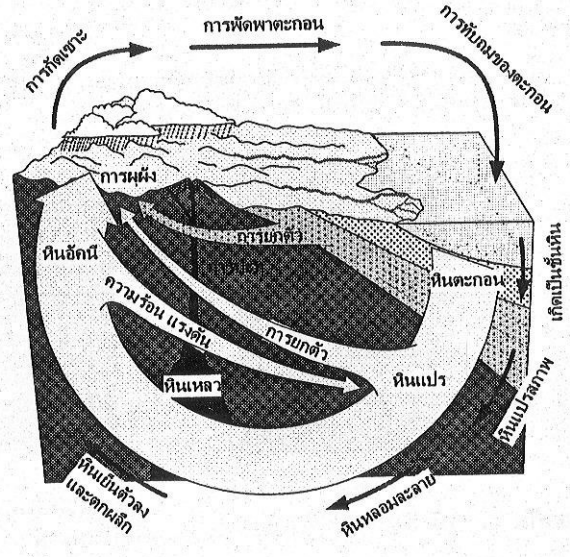
ดินกรวด
เม็ดหินเล็กๆที่ไม่ประสาน



ดินกรวดปนดินเหนียว
เม็ดหินหลายขนาดคละกัน

การกำเนิดของดิน

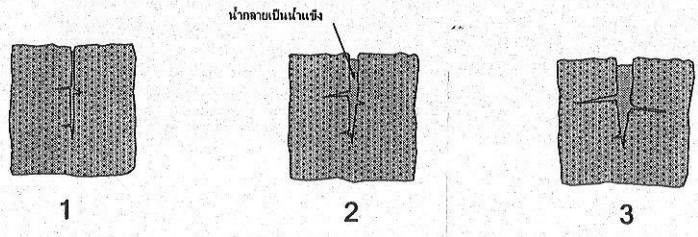
ดินเกิดจาก กระบวนการแตกสลายของหิน (Weathering) ซึ่ง Weathering เป็นกระบวนการแตกสลาย (Disintegration) และผุพัง (Decomposition) ของหินซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการทางกล และกระบวนการทางเคมี



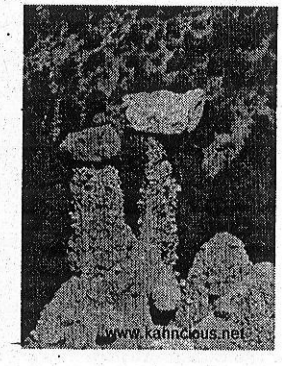
1. การผุกร่อนทางกล (Mechanical weathering)

คือการแตกออกของหินทำให้หินมีขนาดเล็กลงกระบวนการนี้จะทำให้เกิดดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (Cohesionless Soil)

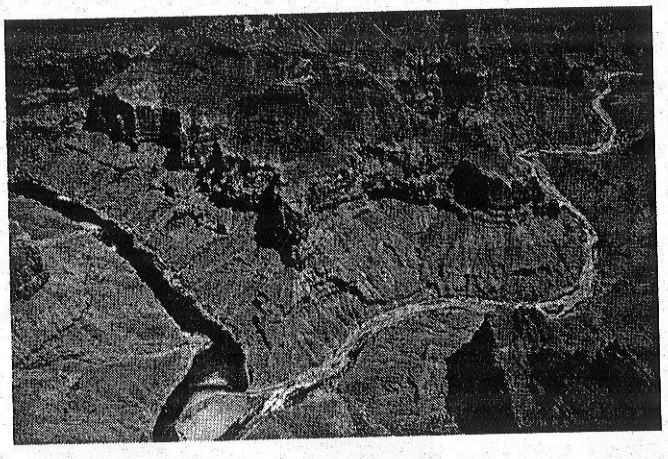
- การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ
  - กลางวันร้อนกลางคืนเย็น
  - น้ำกลายเป็นน้ำแข็ง



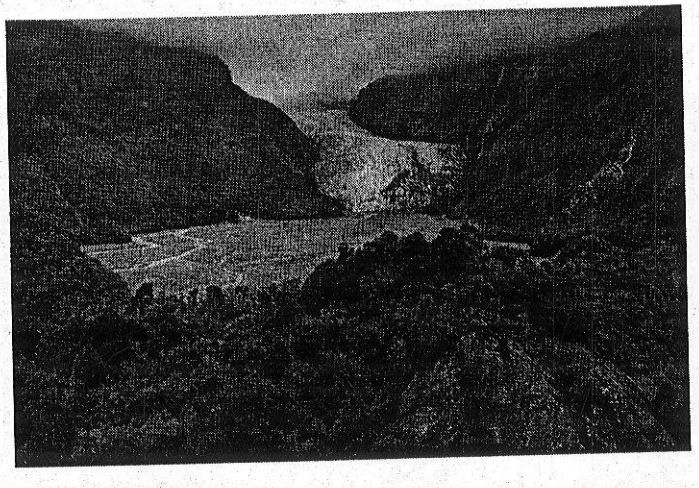
- การกัดเซาะโดยลม



➢ การกัดเซาะโดยน้ำ



➢ การกัดเซาะจากการขัดสีโดยเศษหินจากธารน้ำแข็ง

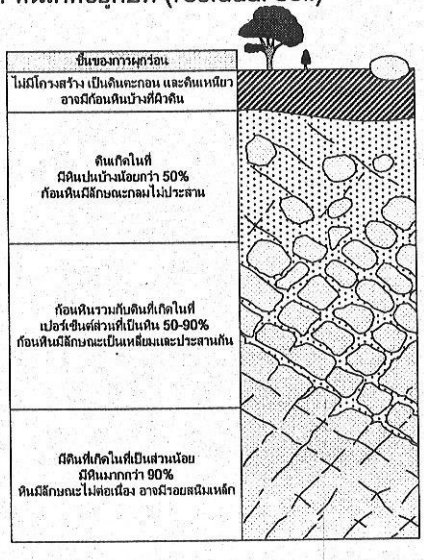


2. การผุกร่อนทางเคมี (Chemical weathering)

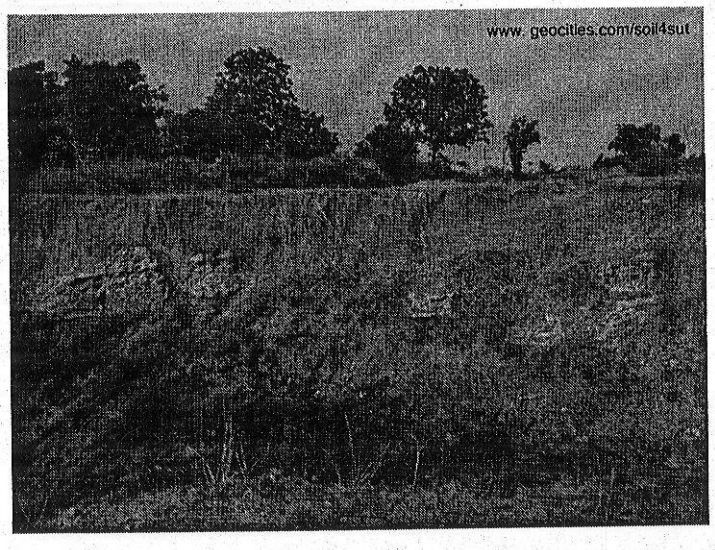
- Oxidation Ion ของ Oxygen ทำปฏิกิริยากับ แร่เหล็กในหินเป็นผลให้เกิดการผุกร่อนของหินขึ้น เหมือนกับการเกิดสนิมในเหล็ก
- Carbonation น้ำฝน + Carbondioxide → Carbonic Acid กรดคาร์บอนิค จะทำปฏิกิริยากับหินปูน ทำให้หินปูนเกิดการผุกร่อน
- Leaching แร่ธาตุในชั้นดินหรือหินถูกซึมซะออกไปกับน้ำในรูปของสารละลาย หินตะกอนถูกชะล้างเอาสารที่เป็นวัสดุประสานออกไปทำให้อนุภาคที่เคยยึดติดกันแยกออกจากกัน

การก่อตัวเป็นชั้นดิน

1. ดินเกิดอยู่กับที่ (residual soil)



เป็นดินที่เกิดจากการผุพังของหินต้นกำเนิดอยู่โดยมีน้ำเป็นตัวทำละลายหลัก การผุพังจะเกิดที่ผิวดินมากกว่าระดับที่อยู่ลึกลงไป เช่นดินที่มีธาตุเหล็ก (Ferrous) ผสมจะมีสีน้ำตาลแดง เรียกว่าลูกรัง (Laterite)



ดินเกิดอยู่กับที่บริเวณทางไปอ่างเก็บน้ำห้วยยาง

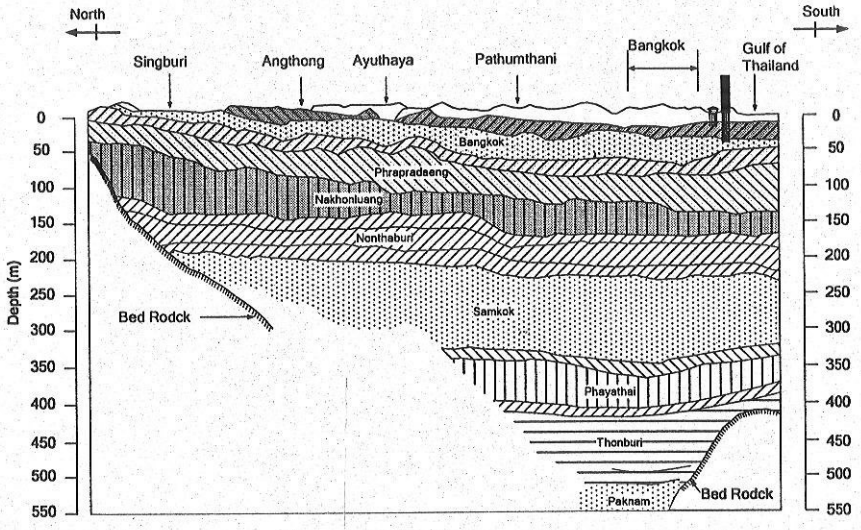
ดินเกิดอยู่กับที่ บริเวณสระบุรี

2. ดินที่เกิดจากการพัดพามาทับถม (Transported soil)

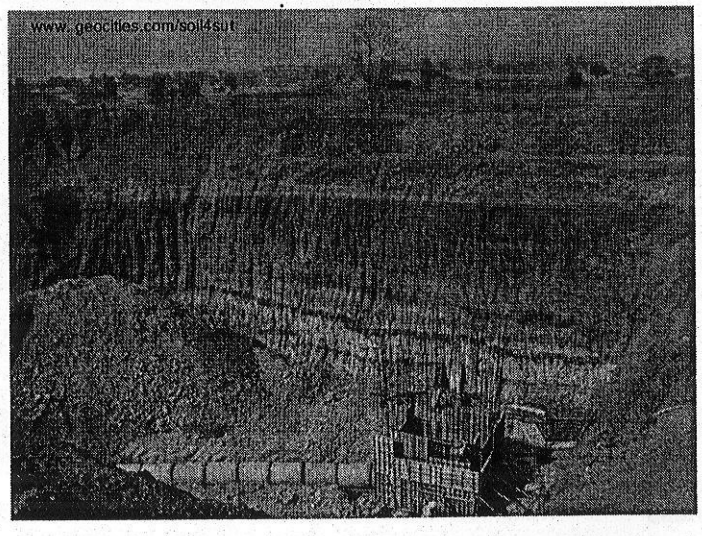
เป็นดินที่เกิดจากการถูกพัดพาจากแหล่งกำเนิดโดยตัวกลางและไปทับถมในอีกที่หนึ่ง ตัวกลางที่พัดพาอาจเป็น น้ำ ลม ธารน้ำแข็ง เมื่อเม็ดดินมาทับถมกันจะเกิดเป็นชั้นดินขึ้น ซึ่งจะมีชื่อเรียกตามลักษณะการถูกพัดพามา

- Alluvium deposit ดินที่เกิดจากการพัดพา และการตกตะกอนในแม่น้ำ
- Marine deposit ดินที่เกิดจากการพัดพาเม็ดดินขนาดเล็กไปตกตะกอนในทะเล
- Lacustrine คือดินที่ตะกอนถูกน้ำพัดพามาทับถม และตกตะกอนในทะเลสาบ
- Gracial Drift เกิดจากการบดโม่และเคลื่อนที่ของธารน้ำแข็ง
- Aeolian เป็นดินที่ถูกพัดพาโดยลมและตกทับถมกัน ตัวอย่างดินเช่น Loess

2. ดินตะกอน (sedimented soil)



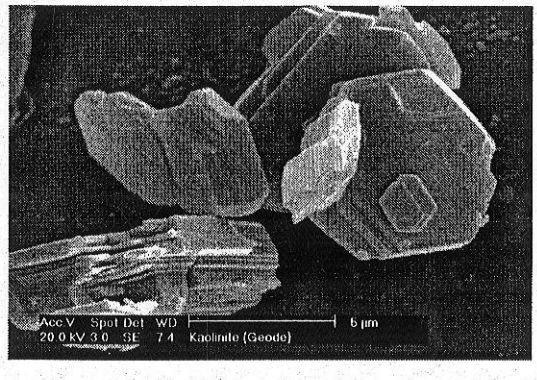
2. ดินตะกอน (sedimented soil)



แร่ดินเหนียว (Clay mineral)

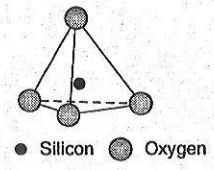
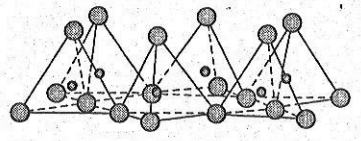
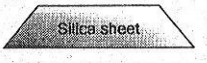
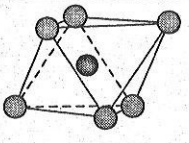
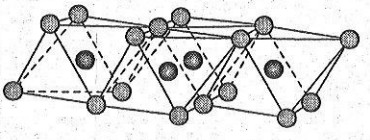
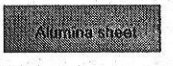
แร่ดินเหนียว (Clay mineral)

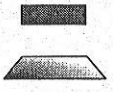
เป็นผลจากกระบวนการผุพังทางเคมี (Chemical Weathering) ซึ่งเม็ดดินจะเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก มีขนาดไม่เกิน 0.002 มม. หรืออาจเล็กกว่านี้

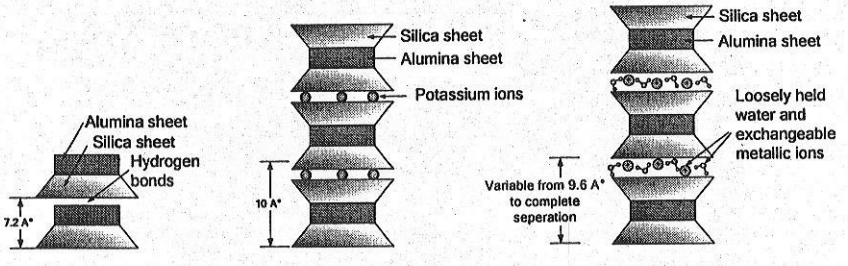


เม็ดดิน Kaolinite ขนาดประมาณ 6 µm (เล็กกว่าเหรียญบาทประมาณ 3333 เท่า)

Oxygen และ Silicon จะประกอบกันเป็นหน่วยย่อยๆ และหน่วยย่อยๆเหล่านี้จะประกอบเป็นแร่ดินเหนียว

โครงสร้างเดี่ยว	โครงสร้างแผ่น	สัญลักษณ์
		
		

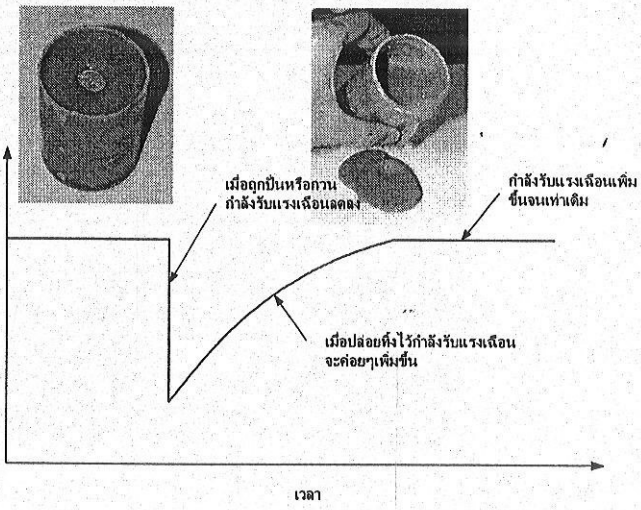




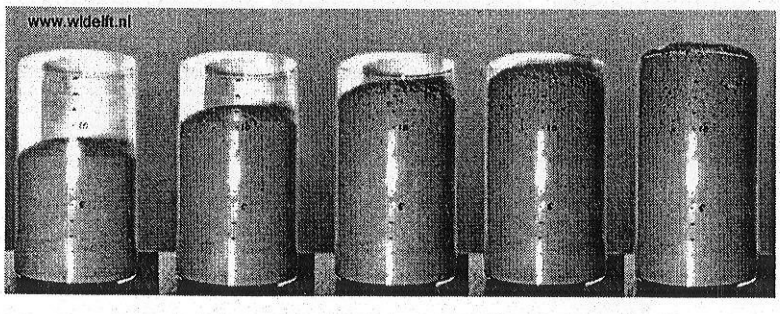
a) kaolinite b) illite c) montmorillonite

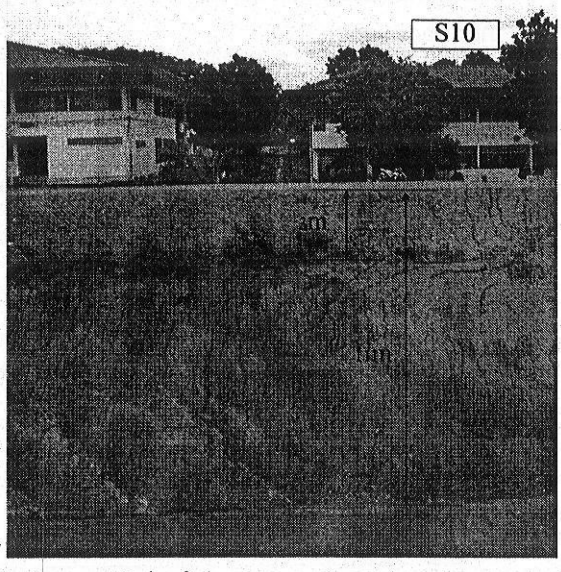
c) montmorillonite

➢ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นจะต่ำมากทำให้มีสภาพไม่เสถียร



➢ montmorillonite สามารถดูดน้ำได้มากและทำให้เกิดมีการบวมตัวปริมาณสูง ถ้าปลูกสร้างอาคารบนดินที่ประกอบไปด้วยแร่มอนมอลิลโอไนท์จะต้องคำนึงถึงการบวมตัวด้วย





ชั้นดินถม

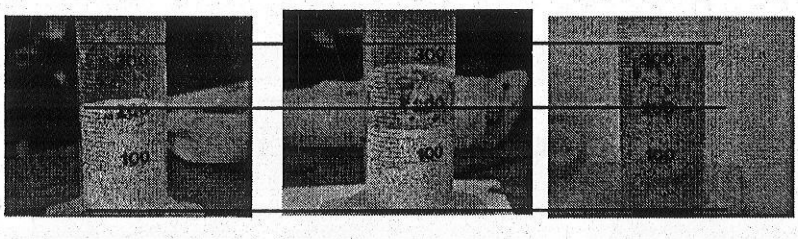
ชั้นดินอินทรีย์

ชั้นกรวดปนดินเหนียว

ชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง สีแดง มีชั้นดินเหนียวอ่อนมากสีขาว เอียงตัวประมาณ 45° แทรกอยู่

ดินบวมตัวที่พบใน มทส.

การทดสอบการบวมตัวแบบไม่ถูกกดทับ ดินบวมตัวใน มทส.



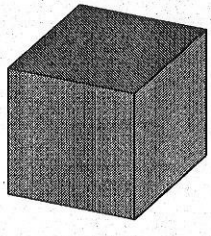
ดินแห้ง ดินแช่น้ำ 30 นาที ดินแช่น้ำ 24 ชั่วโมง

➢ มอนท์มอลิลโอไนท์จะใช้ในงานหลุมเจาะเพื่อป้องกันดินพังทลาย เช่นหลุมเจาะน้ำมัน หลุมเจาะสำรวจดิน หรือหลุมเจาะเพื่อก่อสร้างเสาเข็ม เป็นต้น

แรงที่ผิวของเม็ดดินและ adsorbed water

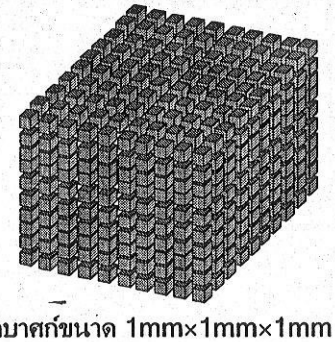
แรงที่เกิดจากประจุไฟฟ้าขึ้นอยู่กับปริมาณพื้นที่ผิวของเม็ดดิน

พิจารณาวัตถุชนิด วัตถุที่เล็กกว่าจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าวัตถุที่ใหญ่กว่าเมื่อมีปริมาตรเท่ากัน



ลูกบาศก์ขนาด 1cm×1cm×1cm

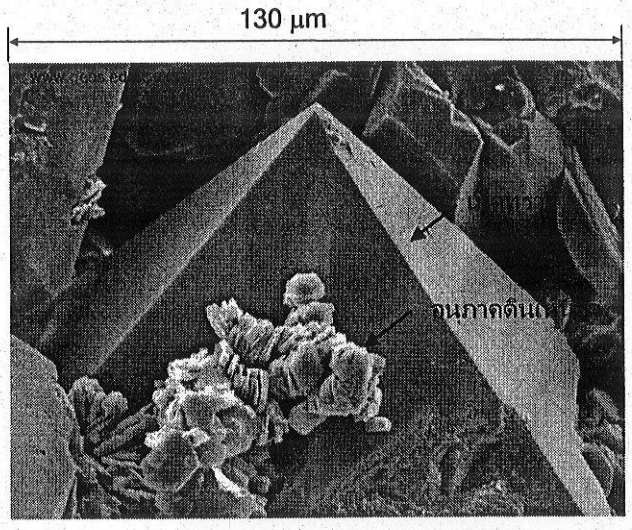
พื้นที่ผิว 6 cm^2



ลูกบาศก์ขนาด 1mm×1mm×1mm

พื้นที่ผิวรวม 60 cm^2

ศูนย์บรรณสารและสื่อการศึกษา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

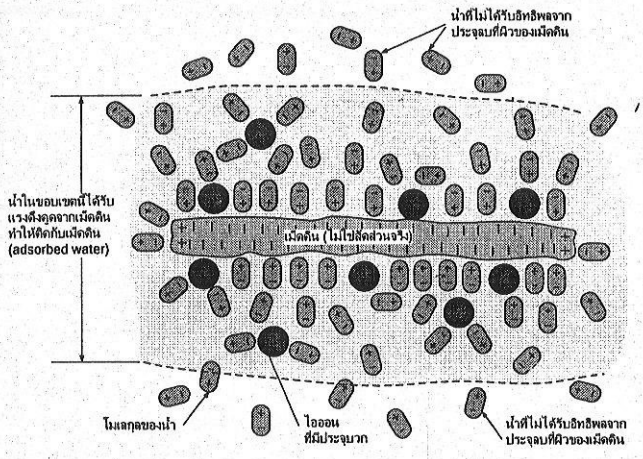


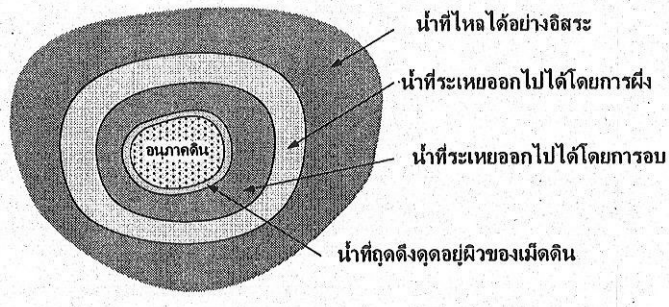
เปรียบเทียบขนาดของเม็ดทรายกับอนุภาคดินเหนียวเมื่อดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลคทรอน

นั่นหมายความว่า ดินเม็ดละเอียดจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าดินเม็ดหยาบ ถ้ามีน้ำหนักเท่ากัน เราเรียกพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักของดินว่า specific surface

ชนิดของดิน	พื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนัก (m^2/g)
ทราย	0.01
montmorillonite	1000
illite	65 ถึง 100
kaolinite	10 ถึง 20

น้ำเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว และผิวของเม็ดดินจะมีประจุเป็นลบ (anions) ดังนั้นเม็ดดินจะมีผิวเคลือบด้วยน้ำที่ถูกดึงดูดเอาไว้ ซึ่งเราเรียกว่า adsorbed water





น้ำที่ล้อมรอบเม็ดดิน

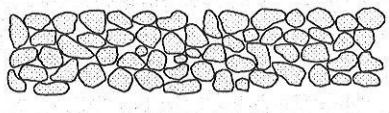
ในทางวิศวกรรมโยธา เราจะสนใจคุณสมบัติทางกายภายและคุณสมบัติทางกลของดินเป็นหลัก เราจะไม่ศึกษาลึกลงไปในทางคุณสมบัติทางเคมี

คุณสมบัติทางเคมีของดินอาจจะได้ศึกษาในระดับสูงขึ้นต่อไป

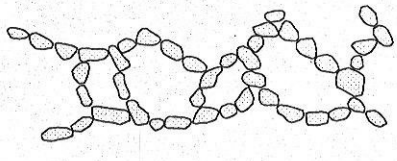
โครงสร้างดิน (soil fabric)

1. ดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (cohesionless soil)

ได้แก่ดินเม็ดหยาบที่มีขนาดเม็ดดินใหญ่กว่า 0.074mm และดินทรายแป้งที่ไม่มีสภาพพลาสติก (Non plastic silt) โครงสร้างของดินชนิดนี้จะมีอยู่ 2 ลักษณะคือ



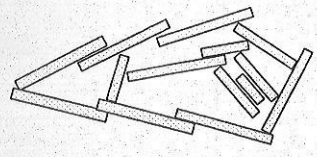
โครงสร้างของดินแบบเม็ดเดี่ยว - เม็ดดินแต่ละเม็ดจะสัมผัสกับดินที่อยู่รอบ ๆ ขนาดและตำแหน่งของเม็ดดินจะมีผลต่อความแน่นของมวลดิน



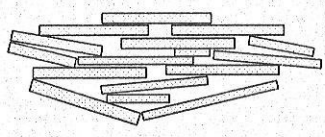
โครงสร้างแบบรังผึ้ง
การเรียงตัวแบบนี้ทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นมาก แต่ถ้ารับน้ำหนักบรรทุกมากจะทำให้โครงสร้างดินพังปริมาตรของดินจะลดลงอย่างมากทำให้เกิดการทรุดตัว

2. ดินที่มีความเชื่อมแน่น (cohesive soil)

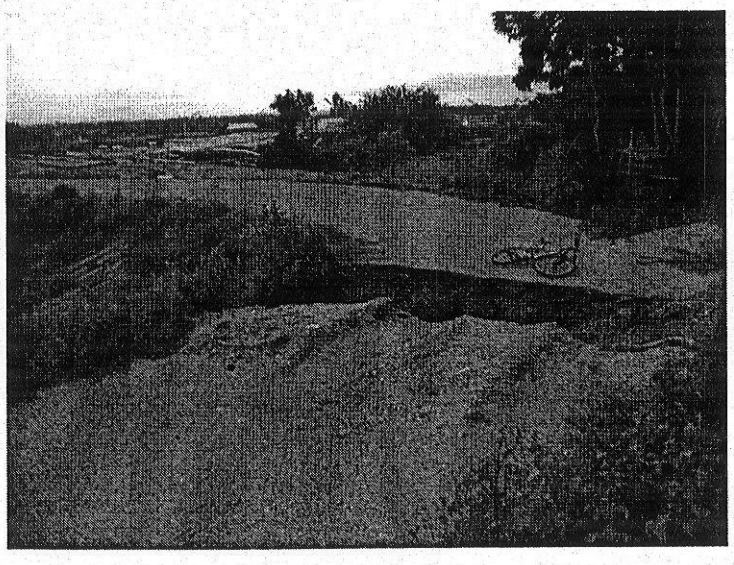
ได้แก่ดินที่มีขนาดเม็ดดินเล็กกว่า 0.074mm เช่นดินเหนียว (Clay) และดินทรายแป้งที่มีสภาพเป็นพลาสติก (Plastic silt) ซึ่งมีโครงสร้างสองชนิดหลักๆคือ



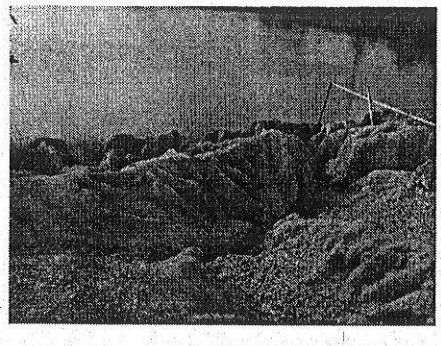
Flocculated structure
อนุภาคดินเรียงตัวไม่ขนานกัน
ดินที่มีโครงสร้างแบบ floculant จะมีหน่วยน้ำหนักน้อยซึ่งเกิดเนื่องจากมีช่องว่างในดินมาก

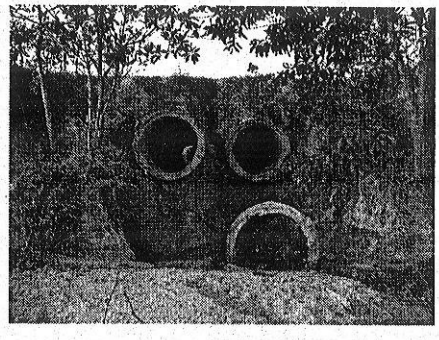


Dispersed structure
อนุภาคดินส่วนใหญ่เรียงตัวขนานกัน



ปัญหาดินกระจายตัวที่พบในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ





ปัญหาดินกระจายตัวที่พบในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ในบทต่อไปจะศึกษาการจำแนกดินในทางวิศวกรรม

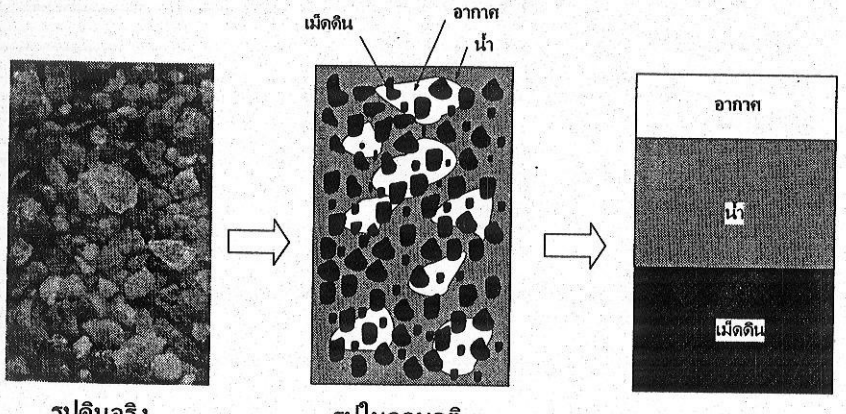
Chapter 2: Soil properties and physical index

430321 Soil Mechanics

14 กันยายน 2548 (แก้ไขข้อผิดพลาดแล้ว)

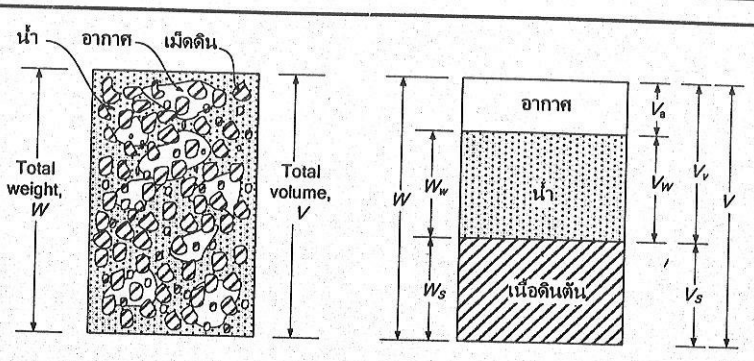
อ.ดร.พรพจน์ ตันเส็ง

download เอกสารนี้ได้จาก http://www.geocities.com/soil4sut



รูปดินจริง รูปในอุดมคติ แผนภาพ

ดินประกอบขึ้นจากเม็ดดินซึ่งเป็นของแข็งน้ำและอากาศ



ปริมาตรช่องว่าง $V_v = V_w + V_a$

ปริมาตรรวม $V = V_v + V_s$

น้ำหนักทั้งหมด $W = W_s + +W_w$ น้ำหนักอากาศ → 0

ความสัมพันธ์ระหว่างมวล & ปริมาตร $W = \gamma V$

คำจำกัดความ

Void ratio (อัตราส่วนช่องว่าง)

คืออัตราส่วนระหว่างปริมาตรของช่องว่างในก้อนดินต่อปริมาตรของดินส่วนที่เป็นของแข็ง

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

Porosity (ความพรุน)

คืออัตราส่วนระหว่างปริมาตรของช่องว่างในก้อนดินต่อปริมาตรของก้อนดินทั้งหมด

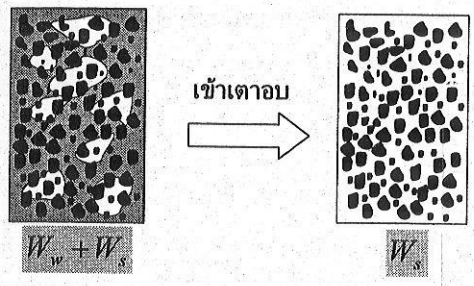
$$n = \frac{V_v}{V}$$

Moisture content or water content (ปริมาณความชื้นในดิน)

คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของน้ำต่อน้ำหนักของเนื้อดิน

$$w = \frac{W_w}{W_s}$$

วิธีการทดสอบเพื่อหาปริมาณความชื้นในดินทำได้โดยการนำดินไปอบด้วยอุณหภูมิ 100±5 °C เป็นเวลา 18-24 ชั่วโมง



น้ำหนักที่หายไปคือ W_w

Degree of saturation (ดีกรีความอิ่มตัว)

ระหว่างปริมาตรของน้ำในก้อนดินต่อปริมาตรของช่องว่างในก้อนดิน

$$S = \frac{V_w}{V_v}$$

ดินมีน้ำไม่เต็มช่องว่าง $V_w < V_v$ แสดงว่าดิน<u>ไม่อิ่ม</u>ตัวด้วยน้ำ $S < 100\%$

ดินมีน้ำอยู่เต็มช่องว่าง $V_w = V_v$ แสดงว่าดิน<u>อิ่ม</u>ตัวด้วยน้ำ $S = 100\%$

Specific gravity, G_s (ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน)

คืออัตราส่วนระหว่างหน่วยน้ำหนักโดยเฉลี่ยของเม็ดดินต่อหน่วยน้ำหนักของน้ำที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$ หรือ $$G_s = \frac{W_s}{V \cdot \gamma_w}$$

ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินจะขึ้นอยู่กับแร่ที่เป็นต้นกำเนิดของดิน

Mineral	G_s
Kaolinite	2.60
Illite	2.80
Montmorillonite	2.65 - 2.80

Total unit weight (หน่วยน้ำหนักรวม)

คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของดินต่อปริมาตรของดิน

$$\gamma_t = \frac{W_{total}}{V}$$

Dry unit weight (หน่วยน้ำหนักแห้ง)

คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของดิน<u>อบแห้ง</u>ต่อปริมาตรของดิน

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{\gamma_t}{1+w}$$

ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density)

ใช้ระบุความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดินเม็ดหยาบ (ทราย)

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$$

e	อัตราส่วนช่องว่างของดินเม็ดหยาบที่กำลังพิจารณา
e_{max}	อัตราส่วนช่องว่างมากที่สุด (ดินหลวมที่สุด)
e_{min}	อัตราส่วนช่องว่างน้อยที่สุด (ดินแน่นที่สุด)

- วิธีทดสอบหา e_{max}

หาได้โดยใช้การโปรยทรายแห้งลงในแบบที่รู้ปริมาตรโดยใช้กรวย จากนั้นชั่งน้ำหนักทรายที่อยู่ในแบบคำนวณช่องว่างในดินจาก

$$e_{max} = G_s \gamma_w \left(\frac{V}{W}\right) - 1$$

- วิธีทดสอบหา e_{min}

หาได้โดยการเขย่าทรายเป็นเวลา 8 นาทีด้วยความถี่ในการเขย่า 3600Hz และแอมปลิจูด 0.064mm บนผิวต้องมีน้ำหนักกดซึ่งก่อให้เกิดหน่วยแรง 13.8kPa ด้วย

จากนั้นชั่งน้ำหนักทราย (W_1) และหาปริมาตร (V_1) ช่องว่างในดินคำนวณได้จาก

$$e_{min} = G_s \gamma_w \left(\frac{V_1}{W_1}\right) - 1$$

ถ้าความหนาแน่นสัมพัทธ์มากแสดงว่าดินมีกำลังสูงกว่าดินที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์น้อยกว่า

ตารางคำอธิบายลักษณะดินตามเปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นสัมพัทธ์

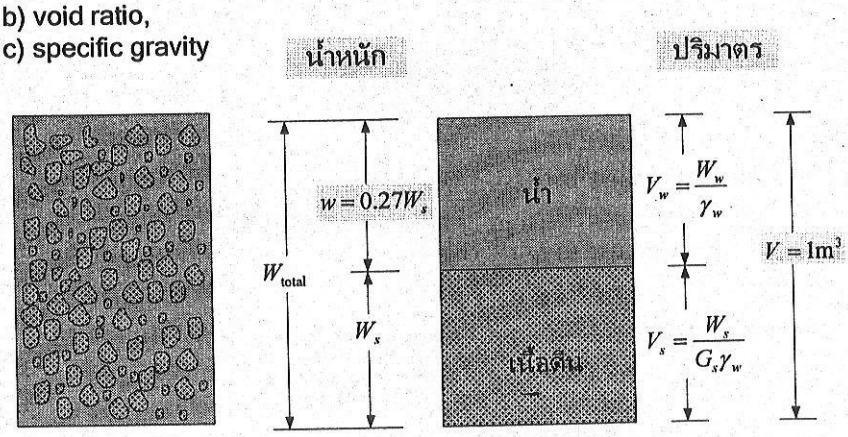
D_r (%)	ลักษณะดิน
0 - 15	ดินหลวมมาก
15 - 35	ดินหลวม
35 - 65	ดินแน่นปานกลาง
65 - 85	ดินแน่น
85 - 100	ดินแน่นมาก

ตัวอย่างที่ 1 ดินซึ่งอิ่มตัวด้วยน้ำมี water content = 27% มีหน่วยน้ำหนักรวม 1.97 t/m^2 และมีปริมาตร 1 m^3 จงคำนวณหา

a) หน่วยน้ำหนักแห้ง,

b) void ratio,

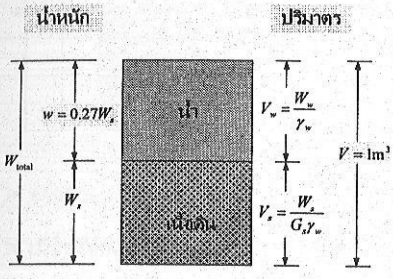
c) specific gravity



จากโจทย์ water content = 27%

$$\frac{W_w}{W_s} = 0.27 \qquad W_w = 0.27W_s$$

จากโจทย์ หน่วยน้ำหนักรวม = 1.97 m³



$$\gamma_t = \frac{W_s + W_w}{1m^3} = 1.97t/m^3$$

$$W_s + 0.27W_s = 1.97$$

$$W_s = 1.55tons$$

จะได้น้ำหนักของเนื้อดิน = 1.55 tons

a) หน่วยน้ำหนักดินแห้ง

$$\gamma_t = \frac{W_s}{V} \qquad \gamma_t = \frac{1.55}{1.0} = 1.55t/m^3$$

b) Void ratio, *e*

$$V_v = \frac{W_w}{\gamma_w} = \frac{(0.27)(1.55)}{1} = 0.42m^3$$

$$V_s = V - V_v = 1.0 - 0.42 = 0.58m^3$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{0.42}{0.58} = 0.724$$

c) Specific gravity, G_s

$$V_s = \frac{W_s}{G_s\gamma_w} = 0.58$$

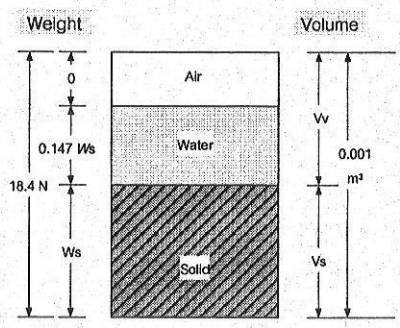
$$G_s = \frac{1.55}{0.58 \times 1.0} = 2.67$$

ตัวอย่างที่ 2.1 ดินตัวอย่างมี Water content 14.7% และมีปริมาตร 0.001m³ มีน้ำหนัก 18.4 N จงคำนวณหา (G_s=2.72, γ_w=9.81kN/m³)

a) Unit weight,

b) Void ratio,

c) Degree of saturation



คำนวณน้ำหนักของดิน

$$W_s + 0.147W_s = 18.4,$$

$$W_s = 16.04\text{N}$$

คำนวณน้ำหนักของน้ำ

$$W_w = (16.04)(0.147) = 2.36\text{N}$$

a) Unit weight

$$\gamma_t = \frac{W}{V} = \frac{18.4}{0.001\text{m}^3} = 18.4\text{kN/m}^3$$

b) Void ratio

$$V_s = \frac{W_s}{G_s\gamma_w} = \frac{16.04}{(2.72)(9.81\times1000)} = 6.011\times10^{-4}\text{m}^3$$

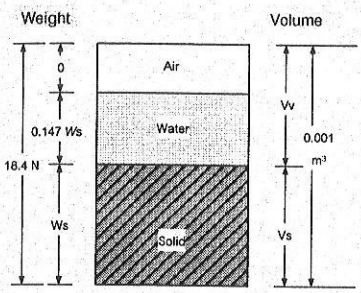
$$V_v = 0.001 - V_s = (0.001) - (6.011\times10^{-4}) = 3.989\times10^{-4}\text{m}^3$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{3.989\times10^{-4}}{6.011\times10^{-4}} = 0.663$$

c) Degree of saturation

$$S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{2.406\times10^{-4}}{3.989\times10^{-4}}\times100 = 60.3\%$$

Ex 2.2 จากตัวอย่างที่ผ่านมา ถ้าดินมี void ratio เท่าเดิมแต่อิ่มตัวด้วยน้ำ (S=100%) จงคำนวณหา (a) unit weight, (b) water content



➢ จากตัวอย่างที่แล้ว V_v=3.989×10^{-4} m^3

➢ เมื่อ S=100% V_w=V_v

คำนวณ unit weight

$$W_w = \gamma_w V_w$$

$$W_w = (9.81)(1000)(3.989\times10^{-4}) = 3.913\text{N}$$

$$\gamma_t = \frac{W_t}{V} = \frac{16.04+3.913}{(0.001)(1000)} = 19.95\text{kN/m}^3$$

คำนวณ water content

$$w = \frac{W_w}{W_s}$$

$$w = \frac{3.913}{16.04}\times100 = 24.4\%$$

Ex. 2.3 ตัวอย่าง จากโจย์ที่ผ่านมา ถ้านำดินนี้ไปอบจนแห้ง unit weight จะเป็นเท่าไร?

เมื่ออบตัวอย่างจนน้ำในดินระเหยออกไปจนหมด น้ำหนักที่เหลือจะเป็นน้ำหนักของเนื้อดินเท่านั้น ซึ่ง W_s = 16.04 N

ส่วนปริมาตรของดินนั้นเรายังคงสมมุติให้มีปริมาตรเท่าเดิม V_t = 0.001m^3

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_t}$$

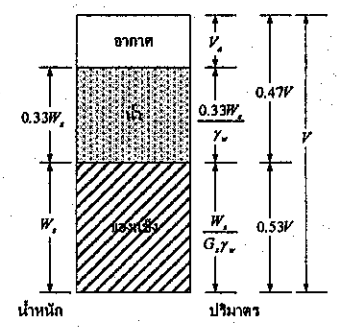
$$\gamma_d = \frac{16.04\ (\text{N})}{0.001\ (\text{m}^2)} = 16.04\,\text{kN/m}^3$$

จากตัวอย่างที่ 2 สรุปได้ดังตาราง

	ตัวอย่าง 2.1	ตัวอย่าง 2.2	ตัวอย่าง 2.3
Degree of saturation (%)	60.3	100.0	0.0
Water content (%)	14.7	24.4	0.0
Unit weight (kN/m^3)	18.4	20.0	16.0

จะเห็นได้ว่า เมื่อมีน้ำในดินเพิ่มขึ้นจะทำให้ความอิ่มตัวเพิ่มขึ้น และหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้นด้วย

ตัวอย่างที่ 3 ดินมีค่า porosity, n =0.47 water content, w = 0.33 และ Specific gravity, G_s = 2.68 จงคำนวณ (a) unit weight, (b) dry unit weight, (c) void ratio, (d) degree of saturation

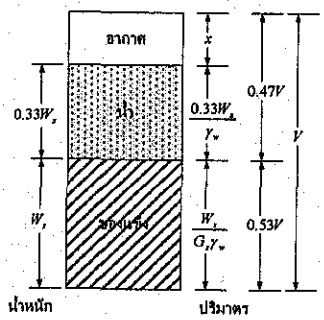


➢ คำนวณค่า V_a โดยใช้ $e=V_v/V_s$ เป็นตัวช่วย

$$e = \frac{0.33W_s/\gamma_w + x}{W_s/\gamma_w} = \frac{0.47}{0.53}$$

$$V_a = 0$$

แสดงว่าช่องว่างเต็มไปด้วยน้ำ



➢ คำนวณ total unit weight

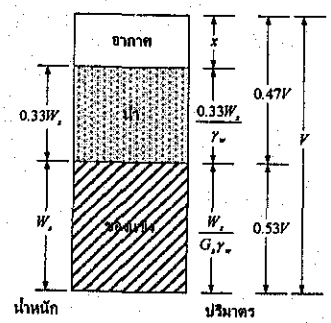
$$\gamma_t = \frac{W}{V} = \frac{W_s + 0.33W_s}{\frac{0.33W_s}{\gamma_w} + \frac{W_s}{G_s\gamma_w}}$$

$$\gamma_t = \frac{1+0.33}{\frac{0.33}{9.81} + \frac{1}{2.68\times 9.81}} = 18.55\text{kN/m}^3$$

➢ คำนวณ dry unit weight

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{W_s}{\frac{0.33W_s}{\gamma_w} + \frac{W_s}{G_s\gamma_w}}$$

$$\gamma_d = \frac{1}{\frac{0.33}{9.81} + \frac{1}{2.68\times 9.81}} = 13.95\text{kN/m}^3$$



➢ Void ratio

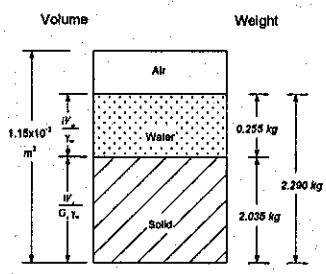
$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{0.47V}{0.53V} = 0.887$$

➢ Degree of saturation

$$S = \frac{V_w}{V_w} = \frac{\frac{0.33W_s}{\gamma_w}}{\frac{0.33W_s}{\gamma_w} + x}$$

$$S = 1.0$$

ตัวอย่างที่ 4 ดินในสภาพธรรมชาติมีน้ำหนัก 2.290kg และมีปริมาตร $1.15\times10^{-3}m^3$ หลังจากนำไปอบให้แห้งน้ำหนักของดินเหลือ 2.035kg และ G_s=2.68 จงคำนวณ, a) Unit weight, b) Water content, c) Void ratio, d) Porosity, e) Degree of saturation



$$V_w = \frac{W_w}{\gamma_w} = \frac{0.255}{1000} = 2.55\times10^{-4}\,m^3$$

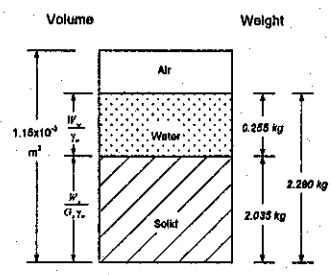
$$V_s = \frac{W_s}{\gamma_w G_s} = \frac{2.035}{(1000)(2.68)} = 7.593\times10^{-4}\,m^3$$

$$V_v = V - V_s$$

$$V_v = 1.15\times10^{-3} - 7.593\times10^{-4} = 3.907\times10^{-4}\,m^3$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{3.907\times10^{-4}}{7.593\times10^{-4}} = 0.517$$

$$\gamma_t = \frac{2.29}{1.15\times10^{-3}} = 1.99\ t/m^3$$



$$w = \frac{W_w}{W_s} = \frac{0.255}{2.035}\times100 = 12.5\%$$

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{3.907\times10^{-4}}{1.15\times10^{-3}} = 0.34$$

$$S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{2.55\times10^{-4}}{3.907\times10^{-4}}\times100 = 65.3\%$$

แบบฝึกหัด

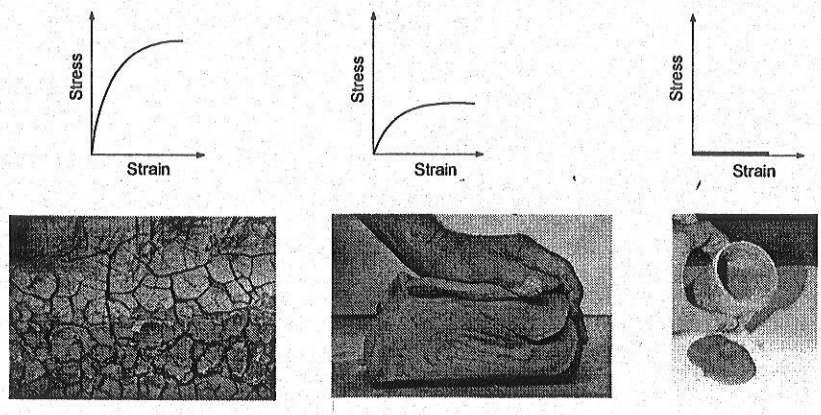
ดูรายการคำนวณได้จาก www.geocities.com/soil4sut

1. ดินมีหน่วยน้ำหนักรวม 19.1 kN/m^3 และมี Water content 9.5% จงคำนวณ
   a) ปริมาตรช่องว่างในดิน (Void ratio)
   b) Degree of saturation ในดิน
   c) ถ้าดินยังมี void ratio เท่าเดิมแต่อิ่มตัวไปด้วยน้ำ หน่วยน้ำหนัก และ water content ของดินจะเป็นเท่าใด (กำหนดให้ G_s = 2.7)
   (a) e=0.518, (b) S=49.47% (c) γ_t=20.79kN/m^3, w=19.2%

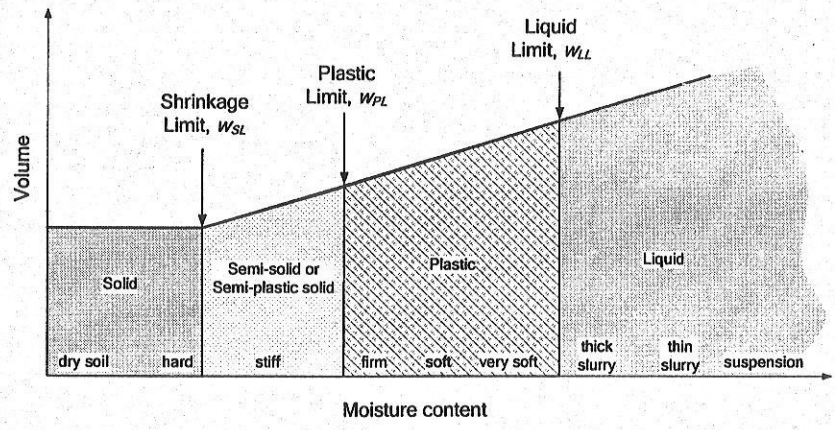
2. ในการทดสอบตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (S=100%) ตัวอย่างหนึ่งได้ผลดังนี้
   ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน G_s = 2.7
   น้ำหนักของดินก่อนอบ=5N
   น้ำหนักของดินหลังอบ=4N
   จงคำนวณ (a) water content, (b) void ratio, (c) bulk unit weight, (d) dry unit weight
   คำตอบ (a) w=25%, (b) e=0.675, (c) γ_t=19.76kN/m^3, (d) γ_d=15.81kN/m^3

3. เก็บตัวอย่างทรายธรรมชาติมาทำการทดสอบหาค่า maximum void ratio, e_{max} = 0.78 และ minimum void ratio, e_{min} = 0.43 จงคำนวณหาหน่วยน้ำหนักดินแห้งของทรายตัวอย่างนี้เมื่อความหนาแน่นสัมพัทธ์เท่ากับ 65% (กำหนดให้ G_s = 2.67) คำตอบ: γ_d=16.87kN/m^3

คุณสมบัติทางกายภาพของดินเม็ดละเอียด



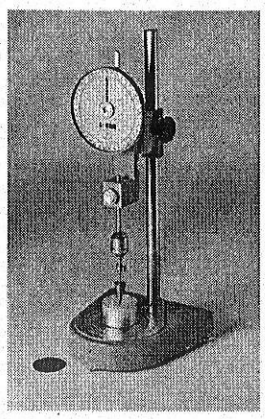
ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้กำลังลดลง

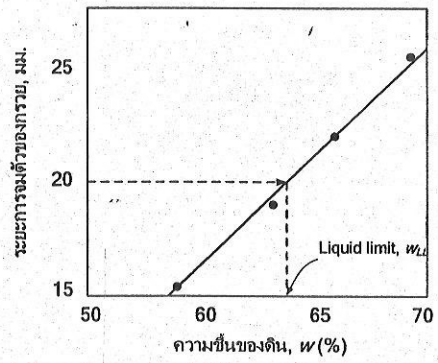


ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับความชื้นในดิน

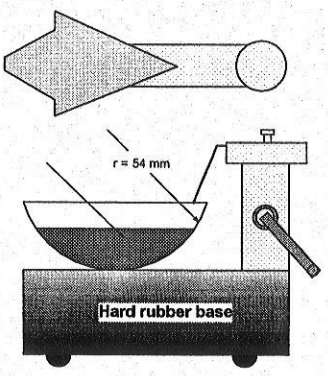
การทดสอบหาค่า Liquid limit มี 2 วิธีที่นิยมใช้

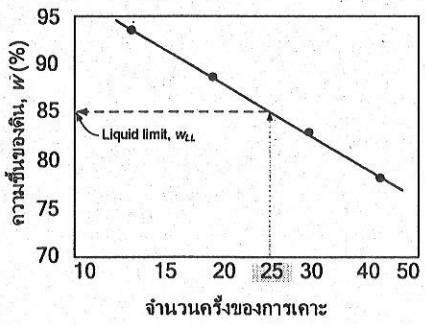
วิธีที่ 1: Cone penetration method (BS 1377:1975)





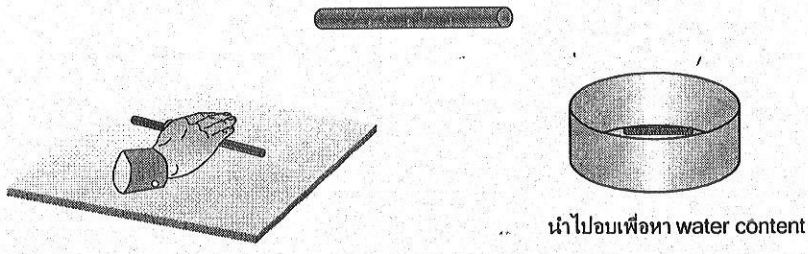
วิธีที่ 2: ใช้ Casagrande Method (ASTM D 4318)





การทดสอบหาค่า Plastic limit (ASTM D 4318)

ปั้นดินให้เป็นเส้นยาวมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.2 มม. แล้วดินเริ่มร่วนและแตก



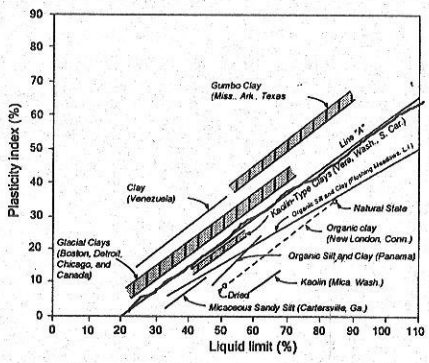
จากนั้นนำดินไปหาความชื้นในดิน ความชื้นที่จุดนี้คือ Plastic limit

จากผลการทดสอบ liquid limit และ plastic limit เรานำมาคำนวณค่า plasticity index

$$I_p = w_l - w_p$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง Plasticity index กับ Liquid limit

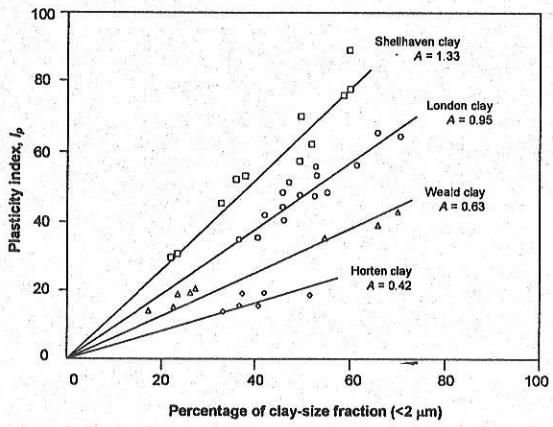
- Casagrande ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Liquid limit กับ Plasticity index ของ Clay และ Silt จากตัวอย่างดินหลายๆแหล่ง



- สามารถสรุปได้ว่ามีความสัมพันธ์กัน จากการค้นพบนี้จะนำไปใช้ในการจำแนกดินทางวิศวกรรม ซึ่งจะได้กล่าวในบทถัดไป

Activity ของดิน

สำหรับดินเหนียวแต่ละชนิด Plasticity index จะสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับปริมาณเม็ดดินที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 2 μm



จากความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรง Skempton (1953) ได้นิยามค่า Activity ไว้ดังสมการ

$$A = \frac{\text{Plasticity Index}}{\text{\% of clay size particle (by weight)}}$$

Activity ใช้เป็นตัวบอกว่า ดินเหนียวนี้จะมีโอกาสเกิดการบวมตัวมากเพียงไร, ถ้า Activity มากการบวมตัวก็จะมากด้วย

ค่า Activity ของดินเหนียวชนิดต่าง ๆ

Group		Typical value	
Description	Activity	Soil/mineral	Activity
Inactive	< 0.75	Kaolinite	0.4
Normal	0.75-1.25	Illite	0.9
Active	1.25 - 2.0	Calcium Montmorillonite	1.5
Highly active	> 2.0	Sodium Montmorillonite (Bentonite)	7

Ca^{++}

Na^{+}

ใน มทส. เราพบว่าดินบางส่วนบริเวณ S10 มีค่า Activity ~ 1.9 ซึ่งแสดงว่า ดินน่าจะมีองค์ประกอบของ Calcium Montmorillonite ปนอยู่ ซึ่งจะทำให้ดินมีโอกาสที่จะบวมตัวเมื่อมีความชื้นสูงขึ้น

บทต่อไปจะศึกษาถึงการจำแนกดินเพื่อใช้ในทางวิศวกรรม

Chapter 3 : Classification of soil and compaction

430321 Soil Mechanics

22 กันยายน 2548

อ.ดร.พรพจน์ ตันเส็ง

download เอกสารนี้ได้จาก http://www.geocities.com/soil4sut

ในวิชาปฐพีกลศาสตร์ เราสนใจในคุณสมบัติของดินทางวิศวกรรม ซึ่งคุณสมบัติสำคัญที่ต้องพิจารณาคือ

- ความสามารถในการยอมให้น้ำซึมผ่าน (Permeability)
- การเปลี่ยนรูปร่างเมื่อถูกแรงกระทำ (Deformability)
- กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของดิน (Strength)

ในงานจริงวิศวกรจะได้รับรายงานการเจาะสำรวจดิน ดินที่ใช้ทดสอบนั้นจะเก็บมาจากใต้ดินลึกมากซึ่งเราไม่สามารถที่จะสัมผัสดินเหล่านั้นได้โดยตรง ดังนั้นเราต้องทราบสัญลักษณ์ของการจำแนกดิน เพื่อที่อย่างน้อยเราจะสามารถอ่านรายงานได้

FIELD LOG

Project : [illegible]
Location : [illegible]
Inspector : [illegible]
Driller :
Helper :
Rig no. : [illegible]

Boring no. : BSH-3
Date started : 19/02/42
Date completed : 21/02/42
Surface elev. :
Offset : :
Weather :

SB size
ID: 34.9mm OD: 50.8mm
Hammer: 63.5kg Drop: 760mm
ST size
ID: 71.6mm OD: 76.4mm
Length: 500mm Casing used: 3.00 m

Sheet: / of: [illegible]
Water Level Observation
WL: WS or WD
WL: BCR
WL: 5mm AB @ hr AB
WL: 4.5m 24 hr AB

Sample no.	Depth / Elevation From	Depth / Elevation To		Standard Penetration Test: Split Spoon 150 mm / 150 mm / 150 mm / 150 mm	N	Blows per 305 mm	R Recovered (m) Length	Hand Tests: Pocket Penetrometer Reading (KSC)	Pocket Penetrometer Corrected (KSC)	Tor-Vane shear Reading (KSC)	Tor-Vane shear Corrected (KSC)	Sample Descriptions
-	0.00	1.50	100									
ST-1	1.50	2.00	ST				-					no recovery (clay and gravel)
	1.50	3.00	100									
ST-2	3.00	3.50	ST				0.45					very soft clay, grey
	3.00	4.50	100									
ST-3	4.50	5.00	ST				-					no recovery (may be very soft clay)
	4.50	6.00	100									
ST-4	6.00	6.50	ST				0.45					very soft clay, grey
	6.00	7.50	100									
ST-5	7.50	8.00	ST				0.45					very soft clay, greenish grey
	7.50	9.00	100									
ST-6	9.00	9.50	ST				0.50					very soft clay, trace of shell fragments, greenish grey
	9.00	10.50	100									
ST-7	10.50	11.00	ST				0.50					soft clay, trace of shell fragments, grey
	10.50	12.00	100									

Boring Location

Abbreviations
FT = Fish Tail
RO = Rock Out
ST = Shelby Tube
SS = Split Spoon
DB = Diamond Bit
PA = Power Auger
RB = Rock Bit
WS = Wash Sampling
WD = Wash Drilling
BCR = After Casing Removal
AB = After Boring

ตารางบันทึกข้อมูลโดยผู้เจาะสำรวจ

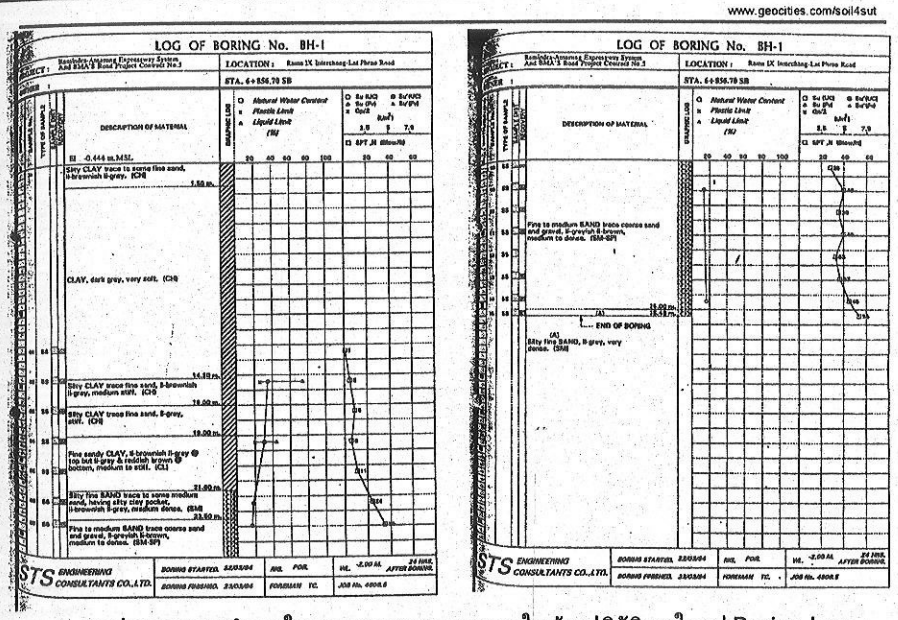
STS ENGINEERING CONSULTANTS CO.,LTD.
SUMMARY OF TEST RESULTS

PROJECT Ramindra-Atarong Expressway System And BMA'S Road Project, Contract No. 3 | LOCATION Sta. 6+856.70 SB, Rama IX Interchange-Lat Phrao Road

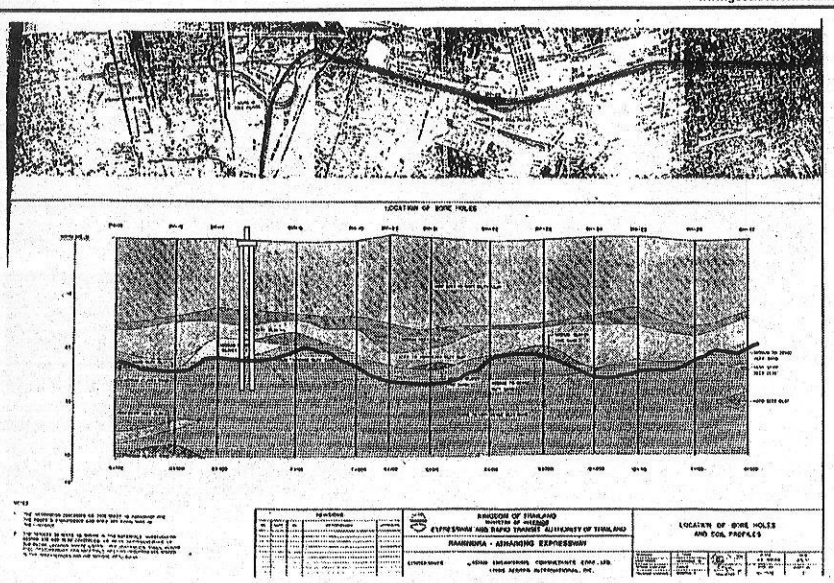
DATE 04/04/94 | BORING No. SB-1 | JOB No. 4608.5 | BY CK | OBSERVED W.L. -2.00 M.

SAMPLE No.	DEPTH M. FROM	DEPTH M. TO	WATER CONTENT %	ATTERBERG LIMIT % LL	PL	PI	PASS #200 %	SIEVE ANALYSIS % FINER No. 3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200	CLASSIFICATION	UNDRAINED SHEAR STRENGTH t/m2 UNCONFINED SHEAR Qu/2	Qu'/2	FIELD VANE SHEAR Qr	Qr'	UU TEST Su	1/2Qp	POCKET PENETROMETER	STANDARD PENETRATION (blows)
SB-01	12.00	12.45											CH						2.0		3
SB-02	14.00	14.45	38.80	76.50	28.90	47.10	1.85						CH						0.0		5
SB-03	16.00	16.45											CH						12.5		9
SB-04	18.00	18.45	31.20	44.80	23.00	22.60				100	99	64	CL								6
SB-05	20.00	20.45											CL						7.5		11
SB-06	22.00	22.45	18.70							106	66	19	SM								24
SB-07	23.50	23.95	17.20						100	99	65	8	SM-SP								35
SB-08	25.00	25.45											SM-SP								28
SB-09	26.50	26.95	14.20					97	93	79	37	7	SM-SP								40
SB-10	28.00	28.45											SM-SP								36
SB-11	29.50	29.95											SM-SP								40
SB-12	31.00	31.45											SM-SP								32
SB-13	32.50	32.95											SM-SP								37
SB-14	34.00	34.45	17.20					100	99	90	31	6	SM-SP								45
SB-15	35.00	35.45											SM								56

ตารางบันทึกข้อมูลจากห้องปฏิบัติการ

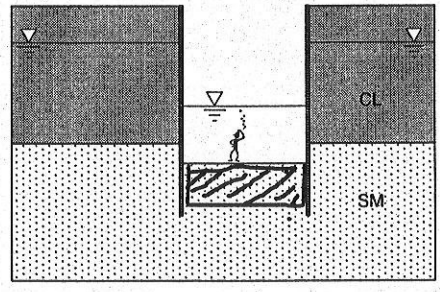


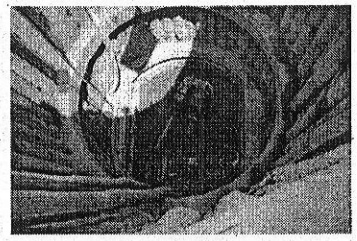
สรุปผลการเจาะสำรวจในสนามและผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการในรูป Boring Log

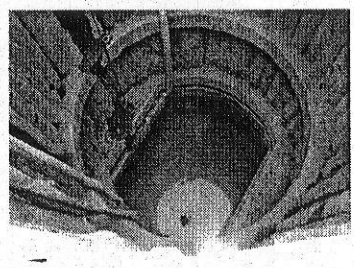


จาก Boring log หลายๆหลุม นำมาเขียนเป็นรูปตัดชั้นดิน เพื่อใช้ในการออกแบบ

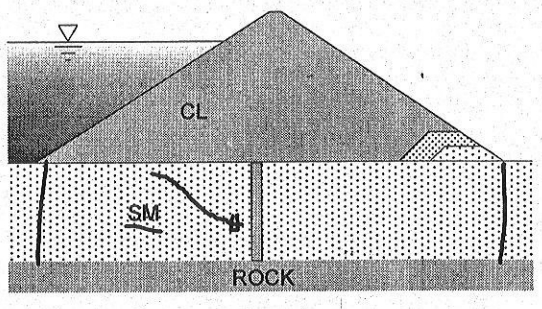
สัญ-ลักษณ์	ชื่อเรียก	คุณสมบัติที่สำคัญ			
		Permeability when compacted	Shearing strength when compacted and saturated	Compressibility when compacted and saturated	Workability as a construction material
GW	Well-graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines	Pervious	Excellent	Negligible	Excellent
GP	Poorly-graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines.	Very pervious Semipervious To impervious	Good	Negligible	Good
GM	Silty gravels, poorly graded gravel-sand-silt mixture		Good	Negligible	Good
GC	Clayey gravels, poorly graded gravel-sand-clay mixture	Impervious	Good to fair	Very low	Good
SW	Well-graded sands, gravelly-sands, little or no fines	Pervious	Excellent	Negligible	Excellent
SP	Poorly-graded gravels, gravelly sands, little or no fines.	Pervious	Good	Very low	Fair
SM	Silty sands, poorly graded sand-silt mixtures	Semipervious to impervious	Good	Low	Fair
SC	Clayey sands, poorly graded sand-clay mixture	Impervious	Good to fair	Low	Good
ML	Inorganic silts and very fine sands, rock flour, silty or clayey fine sands with slight plasticity	Semipervious to impervious	Fair	Medium	Fair
CL	Inorganic clays of low to medium plasticity, gravelly clays, sandy clays, silty clays, lean clays	Impervious	Fair	Medium	Good to fair
OL	Organic silts and organic silt-clays of low plasticity	Semipervious to impervious	Poor	Medium	Fair
MH	Inorganic silts, micaceous or diatomaceous fine sandy or silty soils, elastic silts	Semipervious to impervious	Fair to poor	High	Poor



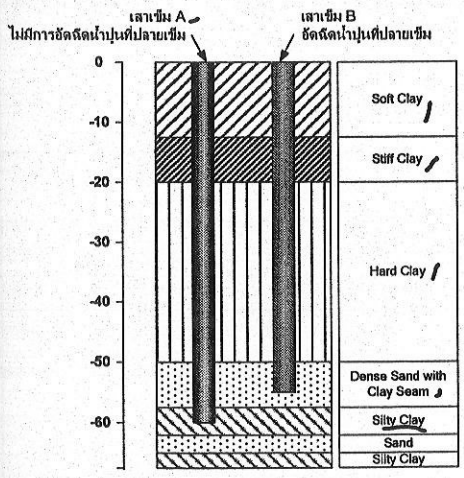


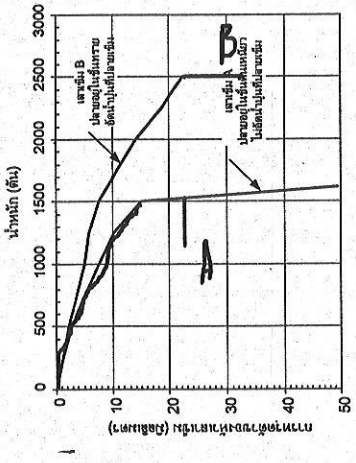


ทำไมจึงต้องศึกษาเรื่องการจำแนกดิน



ทำไมจึงต้องศึกษาเรื่องการจำแนกดิน





เทคนิคการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเข็มทำให้กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มสูงขึ้น (ณรงค์ และคณะ 2542)

ทำไมจึงต้องศึกษาเรื่องการจำแนกดิน

ตัวอย่างจากตาราง

GW

Well-graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines

Permeability when compacted	Pervious
Shearing strength when compacted and saturated	Excellent
Compressibility when compacted and saturated	Negligible

ดินชนิดนี้น้ำซึมผ่านได้ มีกำลังรับแรงเฉือนสูงและเมื่อรับน้ำหนักดินจะถูกบีบอัดตัวให้มีปริมาตรลดลงน้อยมากจนไม่ถือว่าปริมาตรลดลง

ตัวอย่างจากตาราง

CL

Inorganic clays of low to medium plasticity, gravelly clays, sandy clays, silty clays, lean clays

Permeability when compacted	Impervious
Shearing strength when compacted and saturated	Fair
Compressibility when compacted and saturated	Medium

ดินชนิดนี้ทึบน้ำ มีกำลังรับแรงเฉือนพอใช้ และเมื่อรับน้ำหนักจะถูกบีบอัดตัวให้มีปริมาตรลดลงได้ปานกลาง

ในการจำแนกดินมีข้อมูลที่จำเป็น 2 อย่าง

1. การกระจายขนาดของเม็ดดิน (Grain size distribution)

2. ความข้นเหลวของดิน สำหรับดินเม็ดละเอียด

Liquid limit, w_{LL}

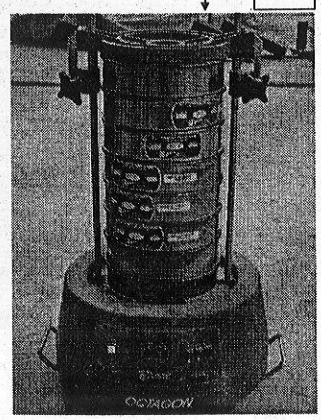
Plastic limit, w_{PL}

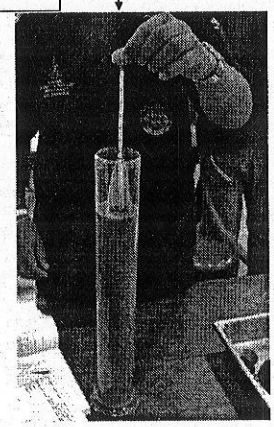
Plasticity index, I_P

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ขนาดของเม็ดดินใหญ่กว่า 75 μm หรือไม่?

ใช่ | ไม่ใช่

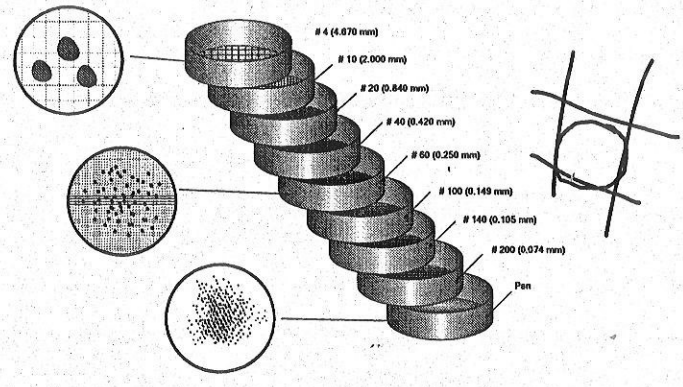




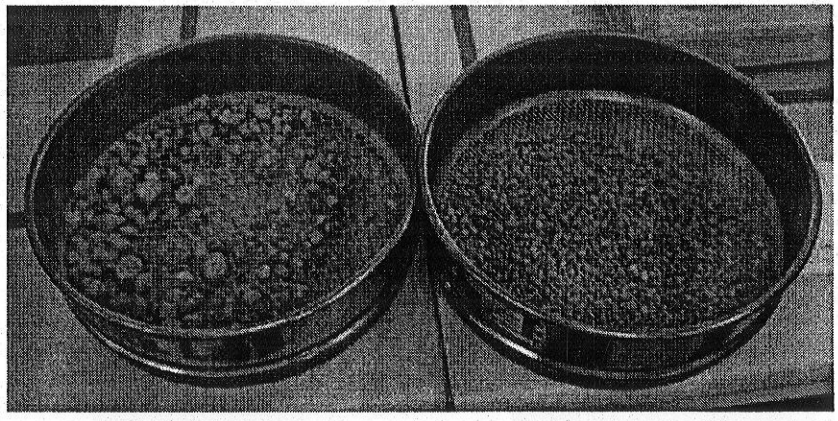
ใช้การร่อนด้วยตะแกรง

ใช้การวิเคราะห์ด้วยไฮโดรมิเตอร์

การร่อนด้วยตะแกรง



- ตะแกรงแต่ละอันจะมีหมายเลขซึ่งใช้บอกจำนวนช่องสี่เหลี่ยมต่อความยาวหนึ่งนิ้ว
- เมื่อนำดินมาทดสอบด้วยเครื่องเขย่า หลังจากนั้นปริมาณดินที่ค้างบนตะแกรงจะคำนวณโดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของดินทั้งหมด



ตัวอย่างดินที่ค้างอยู่บนตะแกรง

มาตรฐาน : ASTM

ขนาดรูเปิด : 4.75mm

ตะแกรงเบอร์: 4

ตัวอย่างดินที่ค้างอยู่บนตะแกรง

เปอร์เซ็นต์ดินที่ค้างบนตะแกรงใดๆ

$$\%\ \text{Retained on } i^{th} \text{ sieve} = \frac{W_i}{W} \times 100$$

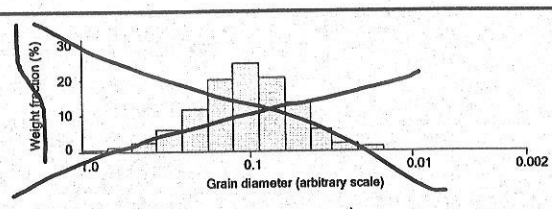
จากเปอร์เซ็นต์ที่ค้างอยู่ นำมาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ลอดผ่านตะแกรงเบอร์ใดๆ

$$\%\ \text{Finer than } i^{th} \text{ sieve} = 100 - \sum_{i=1} \left(\%\ \text{Retained on } i^{th} \text{ sieve}\right)$$

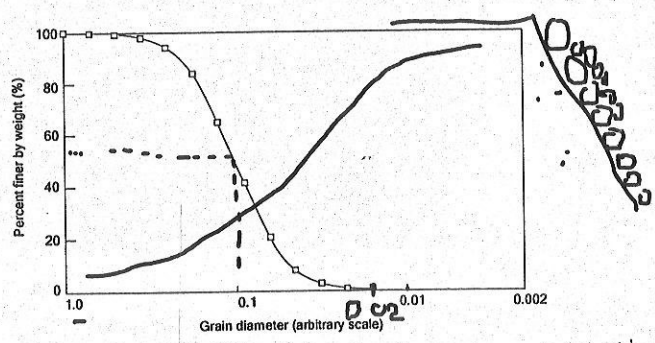
- จากผลที่ได้นำมาพล็อทกราฟระหว่างเปอร์เซ็นต์ของเม็ดดินที่ลอดผ่าน (ไม่ใช่เปอร์เซ็นต์ของดินที่ค้างอยู่) ตะแกรงเบอร์นั้นๆ กับขนาดของเม็ดดิน

ดิน / ตัง

/ ดินลอดผ่าน



Histogram แสดงเปอร์เซ็นต์ของดินที่ค้างอยู่บนตะแกรงแต่ละเบอร์



จาก histogram ซึ่งแสดงถึงเปอร์เซ็นต์ที่ค้างอยู่นำมาเขียนเป็นกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ที่ลอดผ่าน

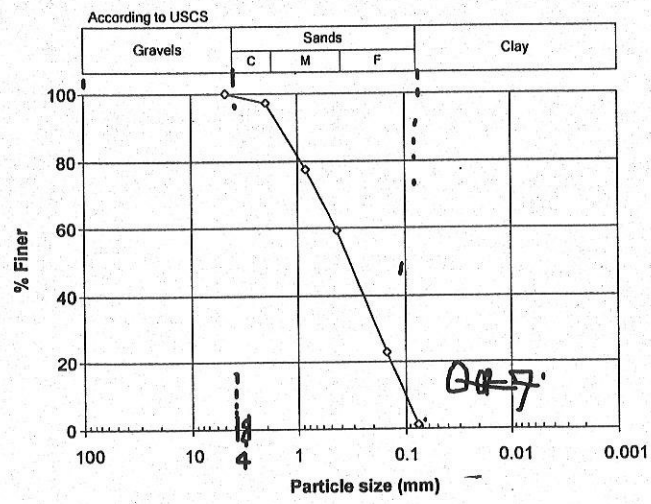
ตัวอย่าง การทดสอบเพื่อหาการกระจายขนาดของเม็ดดินโดยใช้ดิน 500g ได้ผลดังตาราง จงเขียนเส้นโค้งการกระจายขนาดเม็ดดิน (grain size distribution curve)

เบอร์ตะแกรง	ขนาดช่องเปิด (mm)	น้ำหนักดินที่ค้างอยู่ (g)
4	4.75	0
10	2.00	14.8
20	0.85	98
40	0.425	90.1
100	0.15	181.9
200	0.075	108.8
ถาดรองรับ		6.1

ควรจะใช้ตารางในการคำนวณ

เบอร์ตะแกรง	น้ำหนักดินที่ค้างอยู่ (g)	%ดินค้าง	Σ(%ดินค้าง)	%ลอดผ่าน
4	0	0	0	100 - 0 =100
10	14.8	3.0	3.0	100 - 3.0=97.0
20	98	19.6	22.6	100 - 22.6=77.4
40	90.1	18.0	40.6	100 - 40.6=59.4
100	181.9	36.4	77.0	100 - 77=23.0
200	108.8	21.8	98.8	100-98.8=1.2
ถาดรองรับ	6.1	1.2	100.0	

จากนั้นพล๊อทกราฟระหว่างขนาดช่องเปิดและเปอร์เซ็นต์ลอดผ่านบนกระดาษ semi-logarithmic



เราได้อะไรจากเส้นโค้งการกระจายขนาดเม็ดดิน?

➢ ได้ค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งแสดงถึงการกระจายขนาดของเม็ดดินได้แก่ C_u และ C_c ซึ่งเป็นค่าบ่งชี้ถึงการกระจายขนาดของเม็ดดิน

1. Uniformity coefficient, C_u

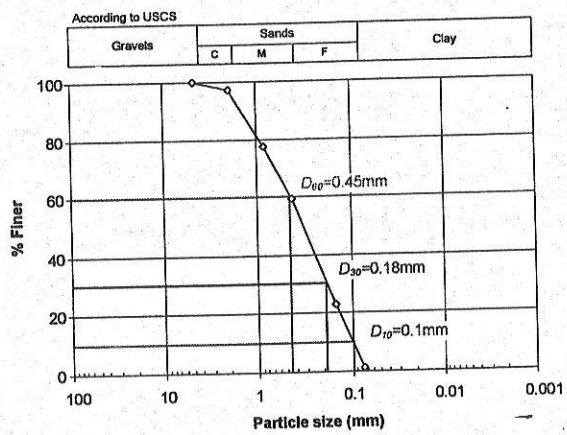
$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

2. Coefficient of curvature, C_c

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

D_{10}, D_{30} และ D_{60} คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ. Percent finer = 10%, 30% และ 60% ตามลำดับ

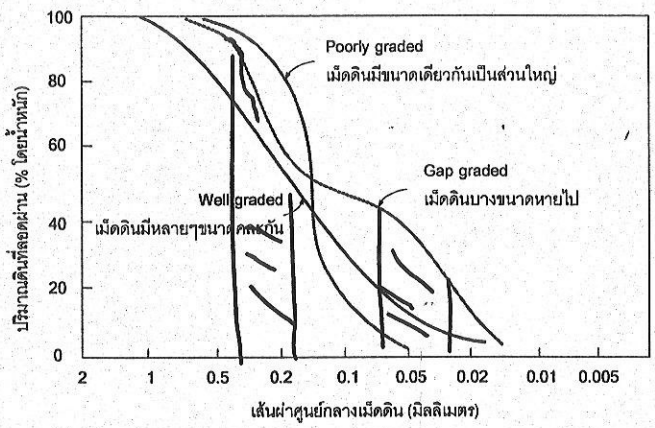
จากตัวอย่างการกระจายขนาดของเม็ดดิน จงคำนวณ C_u และ C_c



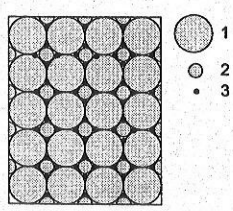
$$C_u = \frac{0.45\text{mm}}{0.1\text{mm}} = 4.5$$

$$C_c = \frac{0.18^2}{0.1 \times 0.45} = 0.72$$

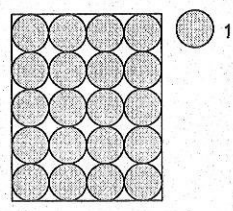
ขนาดคละของดินเมื่อดูจากจากเส้นโค้งการกระจายขนาดเม็ดดิน



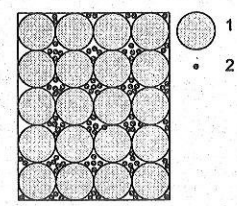
แผนภาพอธิบายการกระจายขนาดเม็ดดิน โดยสมมุติให้เม็ดดินเป็นทรงกลม



Well graded
เม็ดดินหลาย
ขนาดคละกัน



Poorly graded
เม็ดดินมีขนาด
เดียวเป็นส่วนใหญ่

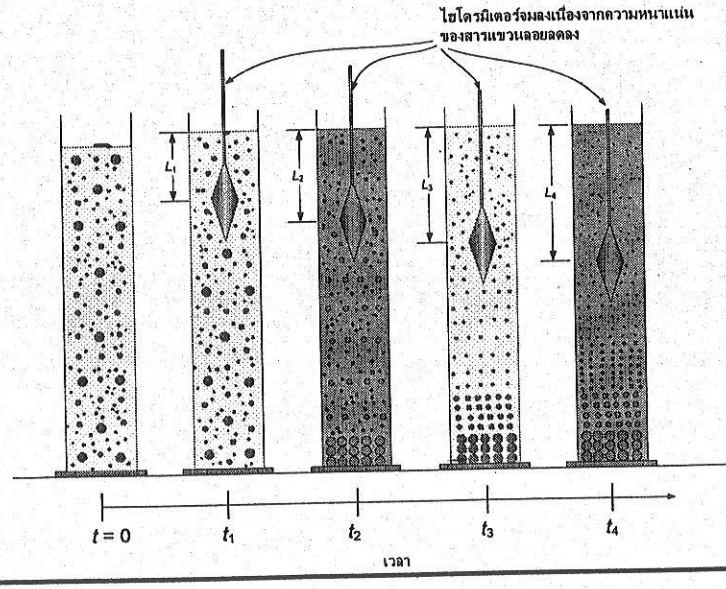


Gap graded
ไม่มีเม็ดดินบาง
ขนาด

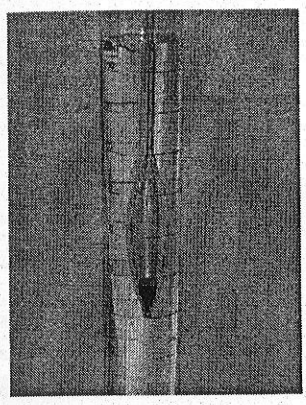
วิธีวิเคราะห์โดยใช้ไฮโดรมิเตอร์

- เนื่องจากวิเคราะห์ด้วยตะแกรงร่อนไม่สามารถแยกดินเม็ดเล็กมากๆ เช่น ดินเหนียวและซิลท์ได้
- ถ้าจะหาขนาดต้องนำดินเม็ดเล็กที่จะทดสอบมาผสมน้ำให้เป็นสารแขวนลอยแล้วปล่อยให้ดินตกตะกอน ดินเม็ดใหญ่จะตกตะกอนเร็วกว่าดินเม็ดเล็ก
- ไฮโดรมิเตอร์จะใช้ในการวัดความหนาแน่นของสารแขวนลอย ณ. เวลาต่างๆ ซึ่งนำมาคำนวณหาปริมาณของเม็ดดินที่ค้างอยู่ในสารแขวนลอยได้

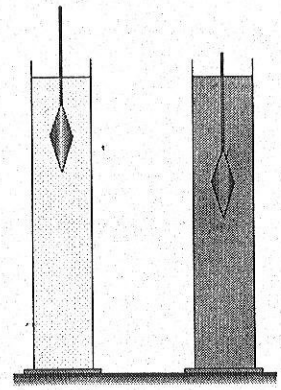
หลักการของการวิเคราะห์ด้วยไฮโดรมิเตอร์



วิธีวิเคราะห์โดยใช้ไฮโดรมิเตอร์



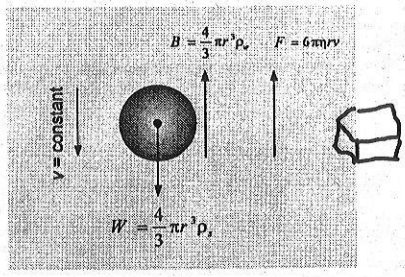
ไฮโดรมิเตอร์คือเครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดความหนาแน่นของของเหลว



ความหนาแน่นสูงแรงลอยตัวสูง ก้านลอยพ้นผิวน้ำมาก

ทฤษฎีการคำนวณ

"ความเร็วในการเคลื่อนที่ในของเหลวของวัตถุทรงกลม จะขึ้นกับขนาดของวัตถุทรงกลมนั้น และความหนืดของของไหล"



Free body diagram

$$W = B + F$$

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_s = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_w + 6\pi\eta r v$$

$$v = \frac{\rho_s - \rho_w}{18\eta} D^2$$

การทำการทดสอบเราจะทราบขนาดของเม็ดดินที่ยังคงเหลืออยู่ ณ. ตำแหน่งกะเปาะไฮโดรมิเตอร์ ณ. เวลา t_D ได้จากสมการ

$$D = \sqrt{\frac{18\eta z}{(G_s - 1)\gamma_w t_D}}$$

η คือความหนืดของน้ำ (10.09 millipoises ณ. 20°C)

G_s คือความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน

z คือความลึก

γ_w คือหน่วยน้ำหนักของน้ำ

ระบบการจำแนกดินที่นิยมใช้ในทางวิศวกรรม

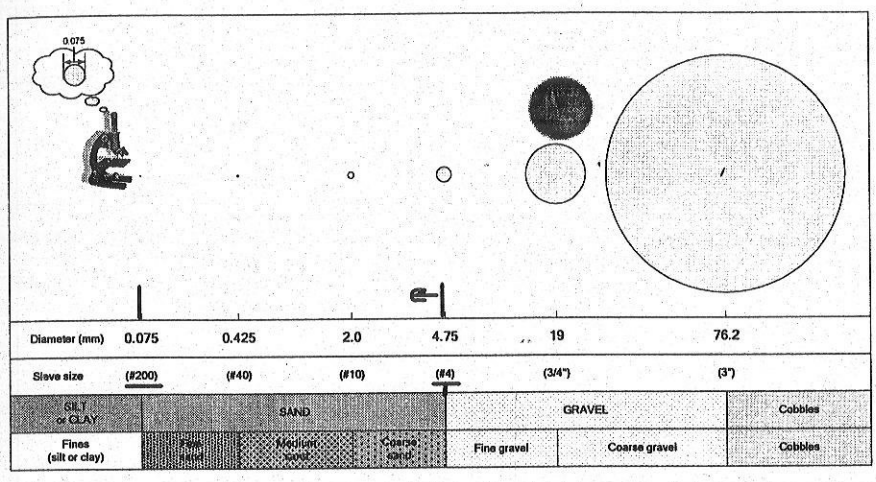
USCS (Unified Soil Classification System)

เป็นระบบซึ่งได้รับการพัฒนาขึ้นโดยกองทัพสหรัฐในระหว่างสงครามโลกครั้งที่สองเพื่อใช้ในการก่อสร้างสนามบิน ซึ่งต่อมาได้รับการพัฒนาขึ้นอีกหลายครั้งในปัจจุบันนิยมใช้ระบบนี้ในการจำแนกดินในงานวิศวกรรมปฐพี

AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)

เป็นระบบที่มีพื้นฐานจากการศึกษาสมรรถนะของดินใต้ผิวจราจร ซึ่งวิธีนี้จะนิยมใช้ในงานวิศวกรรมการทาง

การจำแนกดินทางวิศวกรรมจะใช้ขนาดของเม็ดดินเป็นเกณฑ์



ขั้นตอนการจำแนกดินด้วยระบบ USCS

Step 1

หาเปอร์เซ็นต์ของดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ #200 = F

ถ้า $F < 50\%$ เป็นดินเม็ดหยาบ

ถ้า $F \geq 50\%$ เป็นดินเม็ดละเอียด

Step 2

ถ้าเป็นดินเม็ดหยาบ คำนวณเปอร์เซ็นต์ของดินเม็ดหยาบ = $100-F$

หาเปอร์เซ็นต์ของดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ #4 และค้างบนตะแกรงเบอร์ #200 = F_1

ถ้า $F_1 < (100-F)/2$ ดินเป็นดินกรวดคำนำหน้าคือ G

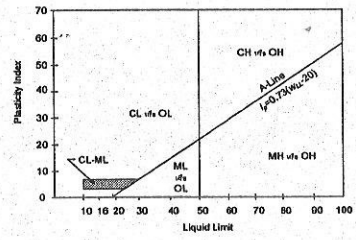
ถ้า $F_1 \geq (100-F)/2$ ดินเป็นดินทรายคำนำหน้าคือ S

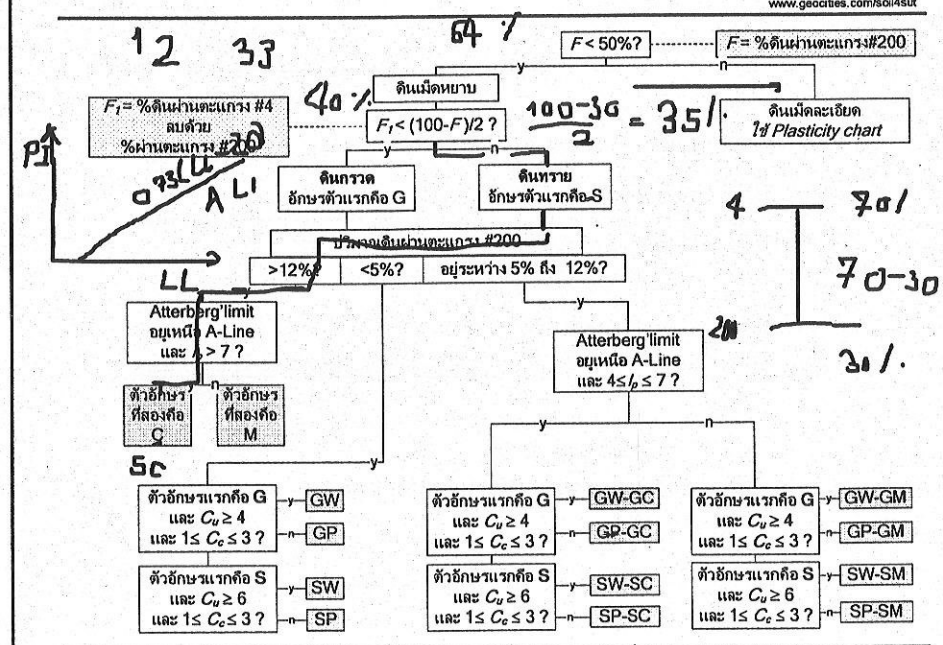
Step 3

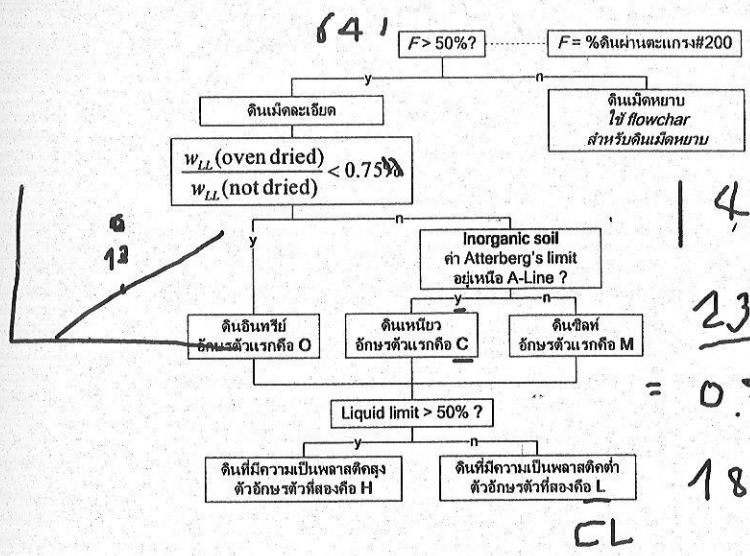
ถ้าเป็นดินเม็ดละเอียดใช้ Plasticity chart ในการตัดสินใจ

Major division			Group symbol	Typical name	Laboratory classification criteria	
Coarse grained soils (more than half of material is larger than No. 200 sieve size)	Gravels: More than half of coarse fraction is larger than 4 mm sieve size	Clean gravels (little or no fines)	GW	Well graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines	$C_u = D_{60}/D_{10}$; $C_c = (D_{30})^2/(D_{10}D_{60})$	Greater than 4; Between 1 and 3
			GP	Poorly graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines	Not meeting all gradation requirements for GW	
		Gravels with fine (appreciable amount of fines)	GM	Silty gravels, poorly graded gravel-sand-silt mixtures	Atterberg's limits below "A" line, or *PI* less than 4	Above "A" line with PI between 4 and 7 are borderline cases requiring use of dual symbol
			GC	Clayey gravels, poorly graded gravel-sand-clay mixtures	Atterberg's limits above "A" line with *PI* greater than 7	
	Sands: More than half of coarse fraction is smaller than 4 mm sieve size	Clean sands (little or no fines)	SW	Well graded sands, gravelly sands, little or no fines	$C_u = D_{60}/D_{10}$; $C_c = (D_{30})^2/(D_{10}D_{60})$	Greater than 6; Between 1 and 3
			SP	Poorly graded sands, gravelly sands, little or no fines	Not meeting all gradation requirements for SW	
		Sands with fines (appreciable amount of fines)	SM	Silty sands, poorly graded sand-silt mixtures	Atterberg's limits below "A" line, or *PI* less than 5	Above "A" line with PI between 4 and 7 are borderline cases requiring use of dual symbol
			SC	Clayey sands, poorly graded sand-clay mixtures	Atterberg's limits above "A" line with *PI* greater than 7	
Fine-grained soils (more than half of material is smaller than No. 200 sieve size)	Silts and clays: liquid limit less than 50		ML	Inorganic silts and very fine sands, rock flour, silty or clayey fine sands with slight plasticity		
			CL	Inorganic clay of low to medium plasticity, gravelly clays sandy clays, silty clays, lean clays		
			OL	Organic silts and organic silt-clays of low plasticity		
	Silts and clays: liquid limit greater than 50		MH	Inorganic silts, micaceous or diatomaceous fine sandy or silty soils, elastic silts		
			CH	Inorganic clays of high plasticity, fat clays		
			OH	Organic clays of medium to high plasticity		
Highly organic soils			Pt	Peat and other highly organic soils		

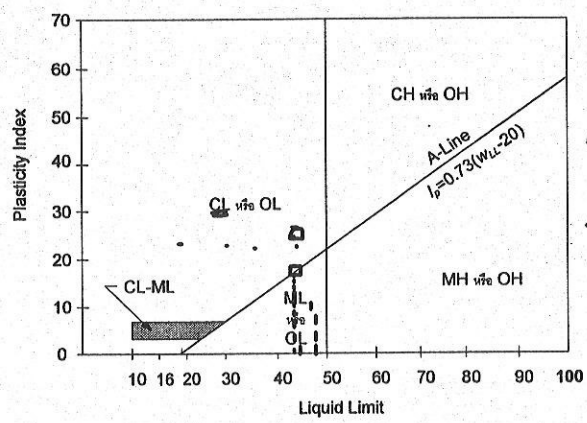
Determine percentage of gravel and sand from grain size curve. Depending on percentage of fines (fraction smaller than No. 200 sieve) coarse grained soils are classified as follows:
Less than 5% GW, GP, SW, SP
More than 12% GM, GC, SM, SC
5% to 12% Borderline cases requiring use of dual symbols







ข้อแนะนำ: ใช้ Plasticity chart ประกอบการจำแนก



Plasticity chart

ตัวอย่าง จงจำแนกดินซึ่งมีผลการทดสอบดังนี้ ด้วยระบบ USCS

ผ่านตะแกรงเบอร์ #4	70%
ผ่านตะแกรงเบอร์ # 200	30%
Liquid limit	33%
Plastic limit	21%

คำแนะนำ: ใช้ flowchart ช่วยในการจำแนก

1.) F = 30% < 50% เป็นดินเม็ดหยาบ

2.) F_1 = %ดินผ่านตะแกรง #4 - %ดินผ่านตะแกรง#200 = 70-30=40%

3.) เปรียบเทียบ F_1 กับค่า (100-30)/2=35

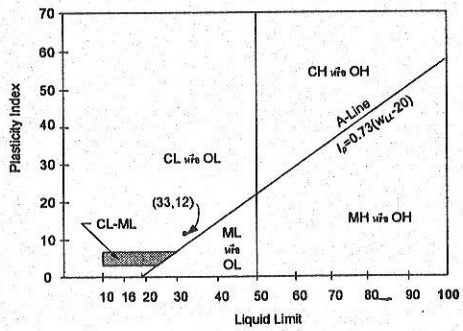
F1 = 40 > 35 ดังนั้นอักษรตัวแรกคือ S

4.) ปริมาณดินที่ผ่านตะแกรง #200 >12% ต้องใช้ plasticity chart

5.) Atterberg's limit อยู่เหนือ A-line เมื่อพล็อทลงใน plasticity chart

ข้อควรระวัง: ค่าที่ทดสอบได้คือ plastic limit และ liquid limit แต่ใน plasticity chart จะใช้ liquid limit กับ plasticity index = 33-21 =12%

จะได้จุดอยู่เหนือเส้น A Line ดังนั้นตัวอักษรที่สองคือ C



จำแนกดินชนิดนี้เป็น SC

ตัวอย่าง จงจำแนกดินซึ่งมีผลการทดสอบดังนี้ ด้วยระบบ USCS

ผ่านตะแกรงเบอร์ #4	90%
ผ่านตะแกรงเบอร์ # 200	8%
Liquid limit	39%
Plastic limit	31%
Uniformity coefficient, C_u	3.9
Coefficient of curvature, C_c	2.1

คำแนะนำ: ใช้ flowchart ช่วยในการจำแนก

1.) F = 8% < 50% เป็นดินเม็ดหยาบ

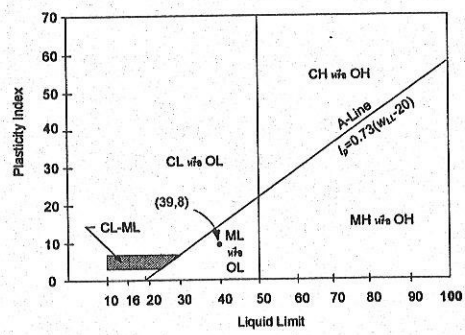
2.) F_1= %ดินผ่านตะแกรง #4 - %ดินผ่านตะแกรง#200 = 90-8 = 82%

3.) เปรียบเทียบ F_1 กับค่า (100-8)/2=46

F1 = 82 > 46 ดังนั้นอักษรตัวแรกคือ S

4.) ปริมาณดินที่ผ่านตะแกรง #200=8% ซึ่งอยู่ระหว่าง 5% ถึง 12% จะเป็นสัญลักษณ์คู่

5.) เมื่อพล็อทค่า Atterberg's limit ลงบน plasticity chart จะได้จุดอยู่ต่ำกว่า A-line ซึ่งอาจเป็น SW-SM หรือ SP-SM



6.) C_u=3.9 < 4 และ C_c=2.1 ซึ่งอยู่ระหว่าง 1 ถึง 3 ดังนั้นจำแนกดินชนิดนี้ได้เป็น SP-SM

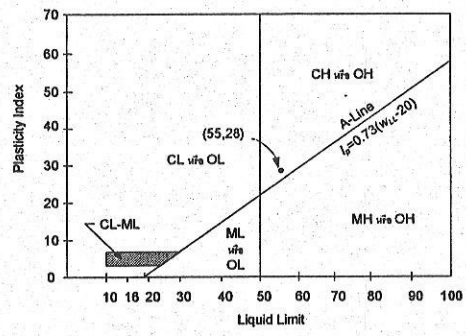
ตัวอย่าง จงจำแนกดินซึ่งมีผลการทดสอบดังนี้ ด้วยระบบ USCS

ผ่านตะแกรงเบอร์ #4	100%
ผ่านตะแกรงเบอร์ # 200	86%
Liquid limit	55%
Plastic limit	27%

1.) $F = 86\% > 50\%$ เป็นดินเม็ดละเอียด

2.) เนื่องจากไม่ได้บอกค่า w_{LL} (oven dried) จึงถือว่าดินชนิดนี้เป็น inorganic clay

3.) เมื่อพล็อทค่า Atterberg's limit ลงบน plasticity chart จะได้จุดอยู่เหนือเส้น A-line ดังนั้นตัวอักษรแรกคือ C



4.) พิจารณา liquid limit > 50% ดังนั้นตัวอักษรที่สองคือ H

5.) สัญลักษณ์คือ CH เป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติคสูง

ขั้นตอนการจำแนกดินด้วยระบบ AASHTO

การจำแนกดินด้วยวิธีนี้แบ่งดินเป็น 7 กลุ่มหลักใหญ่ ๆ คือ

ดินเม็ดหยาบ
ปริมาณดินลอดผ่านตะแกรงเบอร์ #200 < 35%

- A-1
- A-2
- A-3

ดินเม็ดละเอียด
ปริมาณดินลอดผ่านตะแกรงเบอร์ #200 > 35%

- A-4
- A-5
- A-6
- A-7

วิธีที่การจำแนกที่สะดวกที่สุดคือใช้ตาราง

ในการจำแนกจะใช้ผลการทดสอบ

1. Grain size distribution
2. Atterberg's limits

นำข้อมูลทั้งสองมา พิจารณาเปรียบเทียบค่าจากตารางซ้ายสุดไปขวาสุด
จนกระทั่งอยู่ในกลุ่มที่เหมาะสม

การจำแนกโดยใช้ AASHTO

General classification	Granular materials (35% or less of total sample passing No. 200)							Silt-clay materials (More than 35% of total sample passing No. 200)			
Group classification	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1a	A-1b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5[a] A-7-6[b]
Sieve analysis Percent passing: No. 10 No. 40 No. 200	≤ 50 ≤ 30 ≤ 15	≤ 50 ≤ 25	> 51 ≤ 10	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	> 35	> 35	> 35	> 35
Characteristic of fraction passing No. 40 Liquid limit: Plasticity index	≤ 6		NP	≤ 40 ≤ 10	> 41 ≤ 10	≤ 40 > 11	> 41 >11	≤ 40 ≤ 10	> 41 ≤ 10	≤ 40 > 11	> 41 > 11
Group index	0		0	0		≤ 4		≤ 8	≤ 12	≤ 16	≤ 20
Usual types of significant constituent materials	Stone fragments, gravel, and sand		Fine sand	Silty or clayey gravel and sand				Silty soils		Clayey soils	
General rating as subgrade	Excellent to good							Fair to poor			

(a) For A-7-5, PI ≤ LL -30;
(b) For A-7-6, PI > LL - 30

ตัวอย่าง จงจำแนกดินที่กำหนดให้ในตารางต่อไปนี้

ดินชนิดที่	ผล Sieve analysis (% finer)			Plasticity สำหรับส่วนที่ผ่าน # 40	
	# 10	# 40	# 200	Liquid limit	Plasticity index
1	100	82	38	42	23
2	48	29	8	-	2
3	100	80	64	47	29
4	90	76	34	37	12

ดินชนิดที่ 1

1. พบว่าดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ #200=38% ซึ่งมากกว่า 35% จึงเลื่อนไปพิจารณาตารางส่วนที่เป็น silt-clay materials

2. Liquid limit > 41 และ plasticity index >11 ซึ่งตรงกับช่องสุดท้าย

3. Plasticity index > Liquid limit - 30 ดังนั้นจัดอยู่ใน A-7-6

ดินชนิดที่ 2

1. พบว่าดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ #200=8% ซึ่งน้อยกว่า 35% จึงพิจารณาตารางส่วนที่เป็น granular materials

2. พิจารณาปริมาณดินที่ผ่านตะแกรง #10, #40 และ #200 แล้วพบว่าตรงกับช่อง A-1-a

ผ่านตะแกรง #10 = 48 < 50%

ผ่านตะแกรง #40 = 29 < 30%

ผ่านตะแกรง #200 = 15 < 35%

Plasticity index = 2 < 6%

ดินชนิดที่ 3

1. พบว่าดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ #200=64% ซึ่งมากกว่า 35% จึงพิจารณาตารางส่วนที่เป็น silt-clay materials

2. Liquid limit > 41 และ plasticity index >11 ซึ่งตรงกับช่องสุดท้าย

3. Plasticity index > Liquid limit - 30 ดังนั้นจัดอยู่ใน A-7-6

ดินชนิดที่ 4

1. พบว่าดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ #200=34% ซึ่งน้อยกว่า 35% จึงพิจารณาตารางส่วนที่เป็น granular materials

2. พิจารณาปริมาณดินที่ผ่านตะแกรง #10, #40 และ #200 แล้วพบว่าตรงกับช่อง A-2-?

   ผ่านตะแกรง #10 = 90 > 50%

   ผ่านตะแกรง #40 = 76 >50%

   ผ่านตะแกรง #200 = 15 < 35%

3. พิจารณา Atterberg's limit ซึ่งตรงกับช่อง A-2-6

   Liquid limit = 37 < 40%

   Plasticity index = 12 > 11%

3.1 การบดอัดดิน

430321 Soil Mechanics

23 กันยายน 2548

อ.ดร.พรพจน์ ตันเส็ง

download เอกสารนี้ได้จาก http://www.geocities.com/soil4sut

การทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการ

สำหรับโครงสร้างที่สร้างขึ้นมาจากดินนั้น เราจะต้องขนย้ายวัสดุจากบริเวณอื่นเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง

จากกระบวนการขุดดินเพื่อขนย้ายวัสดุจะทำให้ดินหลวม ดังนั้นเราจึงต้องทำการบดอัดเพื่อให้ดินแน่นขึ้น ซึ่งเมื่อดินแน่นขึ้นแล้วจะมีความหนาแน่นสูงขึ้น

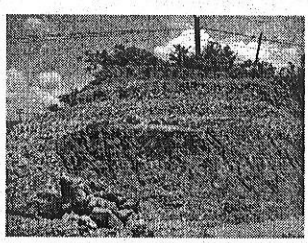
นอกจากนี้แล้วยังจะทำให้กำลังและความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างของดินสูงขึ้นด้วย

ขั้นตอนการทำการบดอัด

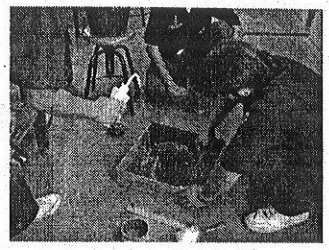
1. นำดินจากแหล่งที่จะใช้มาทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการเพื่อหาความหนาแน่นแห้งสูงสุด และ ปริมาณน้ำที่เหมาะสม

2. นำดินจากแหล่งที่จะใช้ไปบดอัดในสนาม

3. ตรวจสอบว่าดินที่บดอัดในสนามมีความหนาแน่นแห้งใกล้เคียงกับความหนาแน่นแห้งในห้องปฏิบัติการแล้วหรือยัง

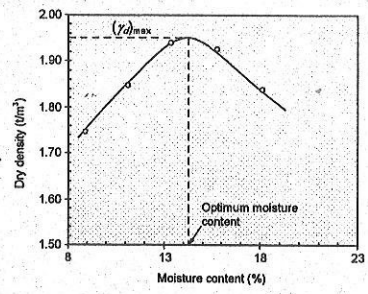


แหล่งดินที่จะนำมาใช้



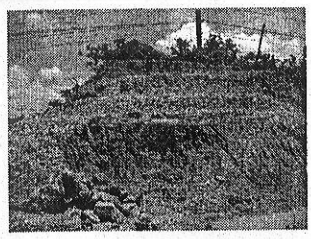
คลุกดินกับน้ำ

บดอัดในห้องปฏิบัติการ

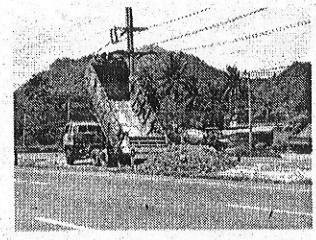


ผลการทดสอบ

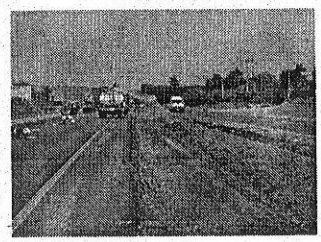
การบดอัดในสนามและการตรวจสอบคุณภาพ



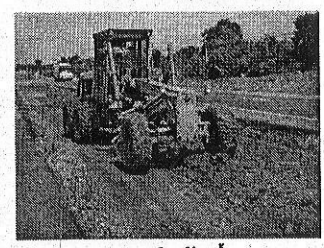
แหล่งดินที่จะนำมาใช้



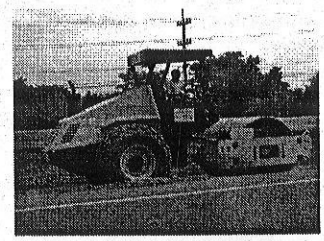
ขนย้ายดินจากแหล่งดินมายังจุดที่ต้องการ



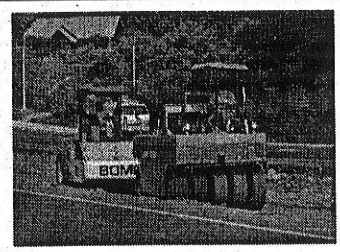
ผสมน้ำ



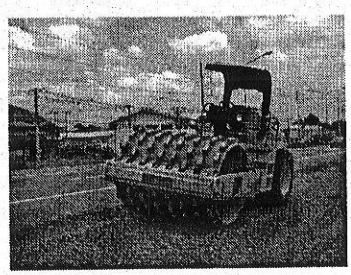
คลุกดินกับน้ำ



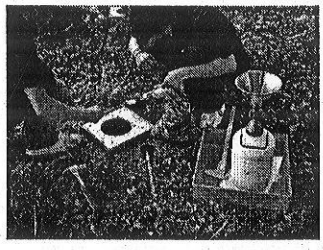
บดอัดด้วยรถบดแบบล้อเหล็กผิวเรียบ



บดอัดด้วยรถบดแบบล้อยาง

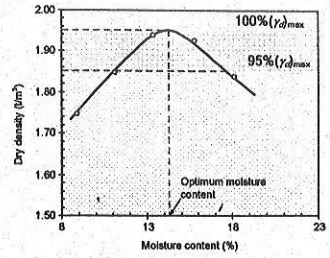


หรือบดอัดด้วยรถบดล้อเหล็กแบบผิวไม่เรียบ

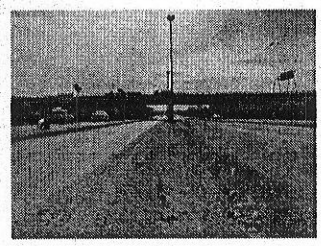


ตรวจสอบคุณภาพของดินที่บดอัด
$(\gamma_d)_{field}$ ด้วยวิธีกรวยทราย

+



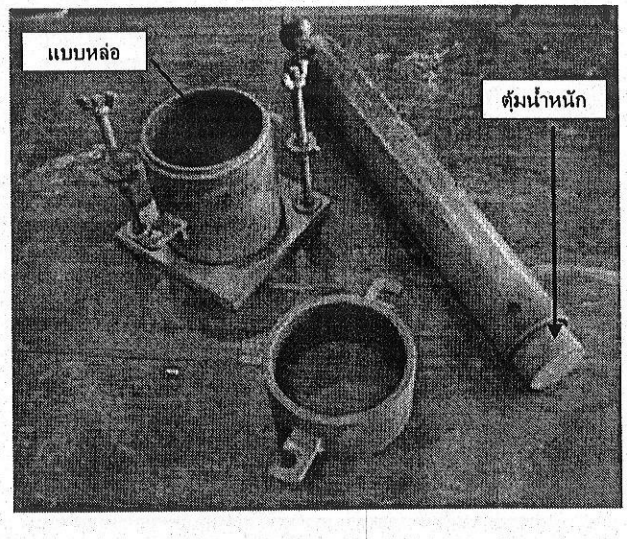
If $(\gamma_d)_{field} > 0.95(\gamma_d)_{lab}$ OK



คันดินที่บดอัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว

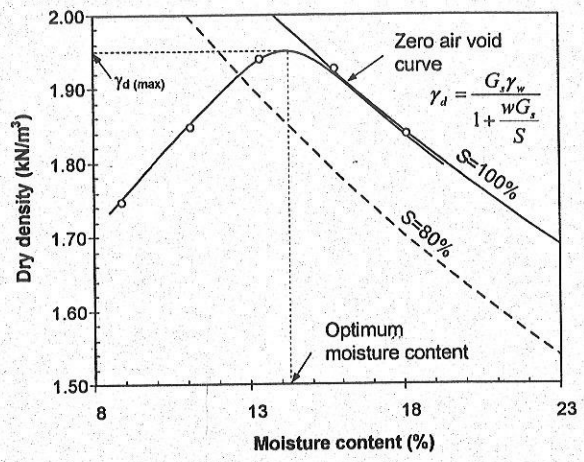
การทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน ASTM D-698

Standard Proctor test	Modified Proctor test
แบบที่ใช้ในการบดอัด เส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6mm ความสูง 116.4 mm	แบบที่ใช้ในการบดอัด เส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6mm ความสูง 116.4 mm
ลูกตุ้มตอก หนัก 2.5kg ระยะยก 305mm	ลูกตุ้มตอก หนัก 4.54kg ระยะยก 457.2mm
จำนวนครั้งของการตอก แบ่งการตอกเป็น 3 ชั้น ตอก 25 ครั้งต่อ 1 ชั้น	จำนวนครั้งของการตอก แบ่งการตอกเป็น 5 ชั้น ตอก 25 ครั้งต่อ 1 ชั้น
พลังงานที่ใช้ = 592.5kJ/m^3	พลังงานที่ใช้ = 2693.3kJ/m^3



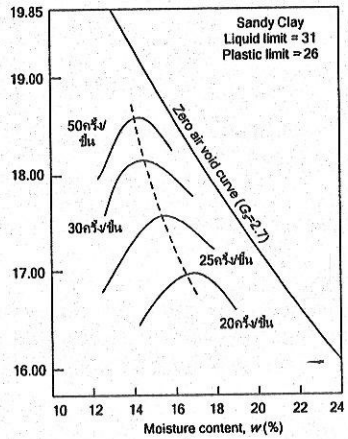
แบบหล่อและลูกตุ้มน้ำหนักแบบ Standard Proctor

- นำดินที่ต้องการจะทดสอบไปบดอัดในแบบ ตามมาตรฐาน Standard Proctor หรือ Modified Proctor
- จากนั้นนำดินไปชั่งน้ำหนักหาน้ำหนักดินในแบบหล่อและคำนวณปริมาตรของแบบหล่อ แล้วคำนวณความหนาแน่นเปียก
- จากนั้นแบ่งดินจำนวนหนึ่งไปอบเพื่อหา moisture content คำนวณความหนาแน่นแห้ง
- ในการทดสอบจะใช้ความชื้นที่แตกต่างกัน 5 ถึง 6 ค่า
- นำข้อมูลที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในดินกับความหนาแน่นแห้ง จากกราฟจะได้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (maximum dry density, $\gamma_{d(max)}$) และความชื้นเหมาะสมที่ทำให้ได้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Optimum moisture content, w_{opt})

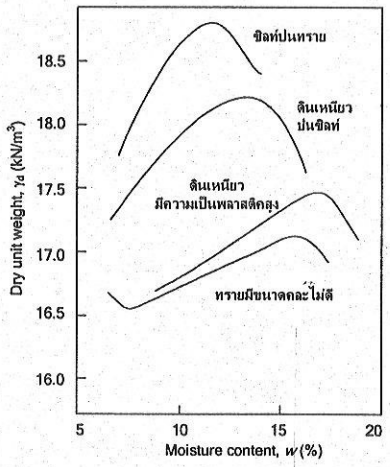


กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในดินกับหน่วยน้ำหนักดินแห้ง

- ถ้าเพิ่มพลังงานในการบดอัด เช่นเพิ่มจำนวนครั้งของการตอกลูกตุ้มจะทำให้ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงขึ้นและมีความชื้นเหมาะสมลดลง



- ชนิดและคุณสมบัติของดินก็มีผลต่อการบดอัด โดยการบดอัดจะทำให้ดินเหนียวมีความหนาแน่นได้สูงขึ้นมากกว่าดินทราย



ในบทต่อไปจะศึกษาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในมวลดิน

Chapter 4: Stress in soil mass

430321 Soil Mechanics

2 ตุลาคม 2548

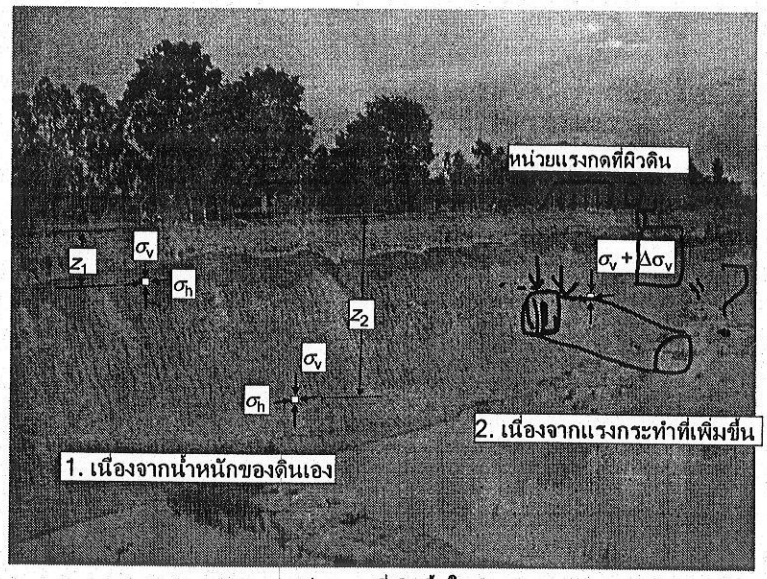
อ.ดร.พรพจน์ ตันเส็ง

download เอกสารนี้ได้จาก http://www.geocities.com/soil4sut

หน่วยแรงในดินแบ่งเป็นสองประเภทคือ

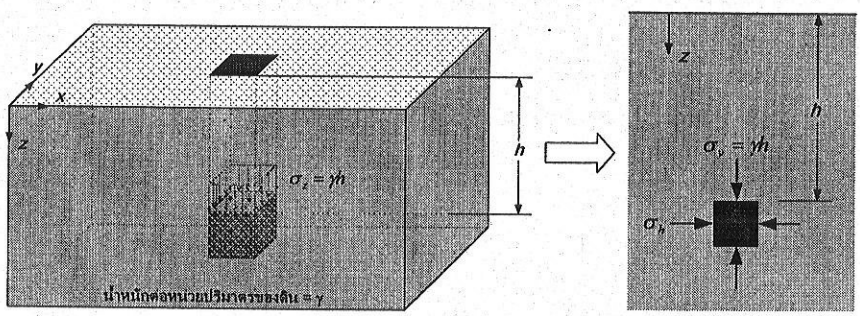
1. หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักกดทับจากตัวดินเอง (overburden pressure)

2. หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงภายนอกกระทำ (applied load)



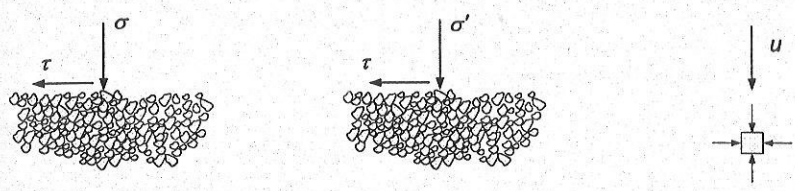
หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในดิน

1. หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักกดทับของดิน (overburden pressure)



3 มิติ

พิจารณาใน 2 มิติ



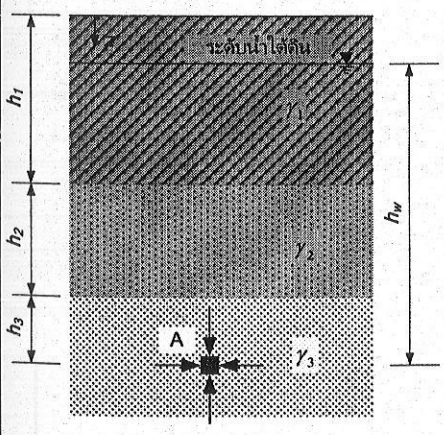
หน่วยแรงรวม (Total stress) = หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress) + แรงดันน้ำในดิน (Pore water pressure)

หน่วยแรงตั้งฉาก $\sigma'_v = \sigma_v - u$

หน่วยแรงเฉือน $\tau_{(effective)} = \tau_{(total)}$

หลักการของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress)

ณ. จุด A



Total vertical stress

$\sigma_v = \gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \gamma_3 h_3$

Effective vertical stress

$\sigma'_v = \sigma_v - u$

Pore pressure

$u = \gamma_w h_w$

Effective horizontal stress
คำนวณได้จาก σ'_v เท่านั้น

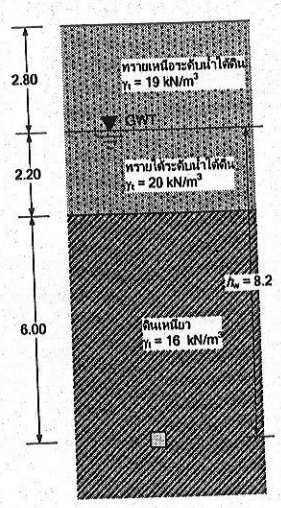
$\sigma'_h = K_0 \sigma'_v$

ตัวอย่าง ชั้นดินจากการสำรวจเพื่อทำฐานรากของโครงการหนึ่งประกอบไปด้วยชั้นทรายหนา 5.0 เมตรถัดลงไปเป็นชั้นดินเหนียวหนา 13.0 เมตร และระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ระดับ 4.8 เมตรจงคำนวณหา

a) หน่วยแรงรวมในแนวดิ่ง (vertical total stress)
b) หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง (vertical effective stress)
c) หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ (horizontal effective stress)
d) หน่วยแรงรวมในแนวราบ (horizontal total stress)

ที่ความลึก 11.0 เมตรจากผิวดิน

กำหนดให้: γ_w = 10 kN/m³ และ K_0 = 0.7



$$\sigma_v = \Sigma \gamma_i h_i$$

$$\sigma_v = 19 \times 2.8 + 20 \times 2.2 + 16 \times 6 = 193.2\text{kPa}$$

$$u = \gamma_w h_w$$

$$u = 10 \times 8.2 = 82\text{kPa}$$

$$\sigma'_v = \sigma_v - u$$

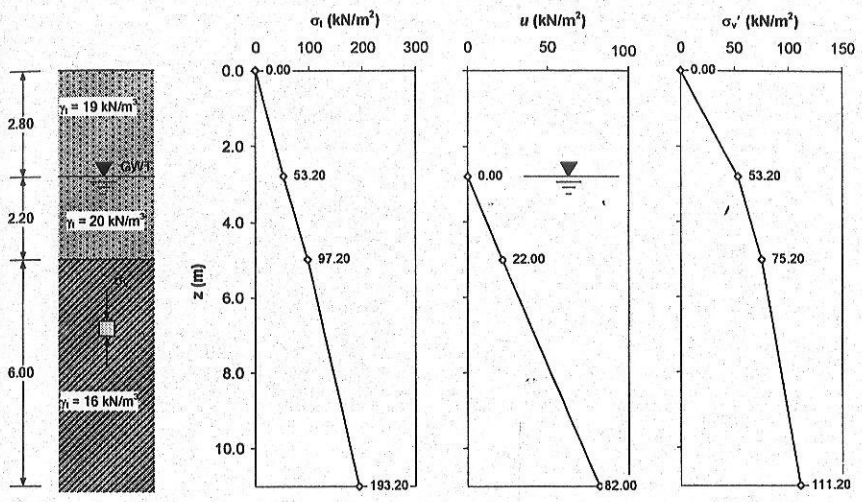
$$\sigma'_v = 193.2 - 82 = 111.2\text{kPa}$$

$$\sigma'_h = K_o \sigma'_v$$

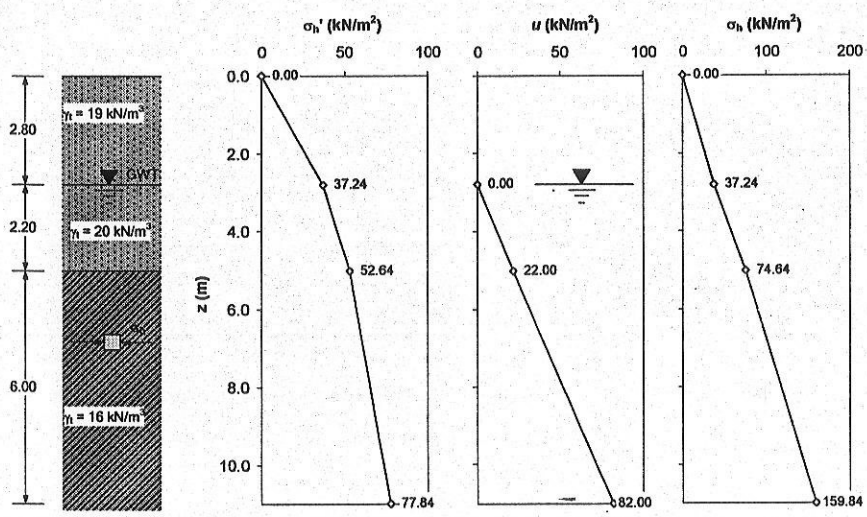
$$\sigma'_h = 0.7 \times 111.2 = 77.84\text{kPa}$$

$$\sigma_h = \sigma'_h + u$$

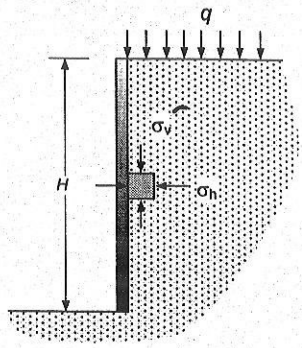
$$\sigma_h = 77.84 + 82 = 159.84\text{kPa}$$

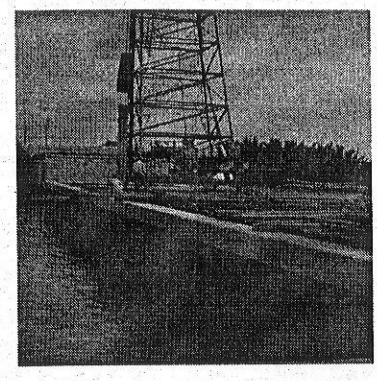


เพื่อความสะดวกในการใช้งาน มักจะนิยมเขียนเป็น stress profile

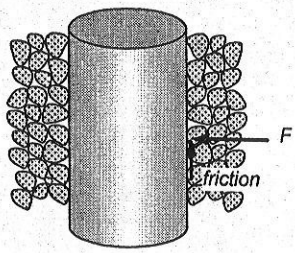


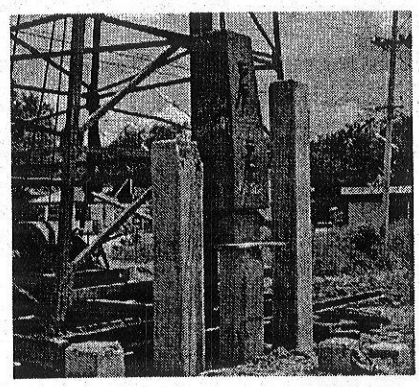
Horizontal stress profile





คำนวณแรงดันดินด้านข้าง

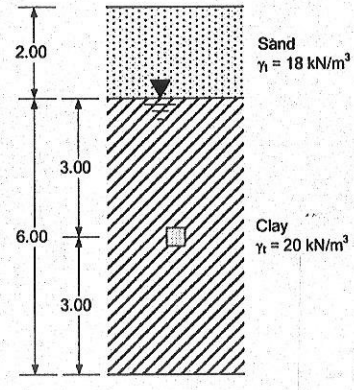




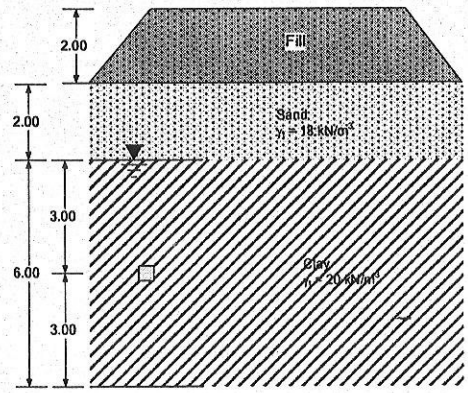
คำนวณแรงเสียดทานของเสาเข็ม

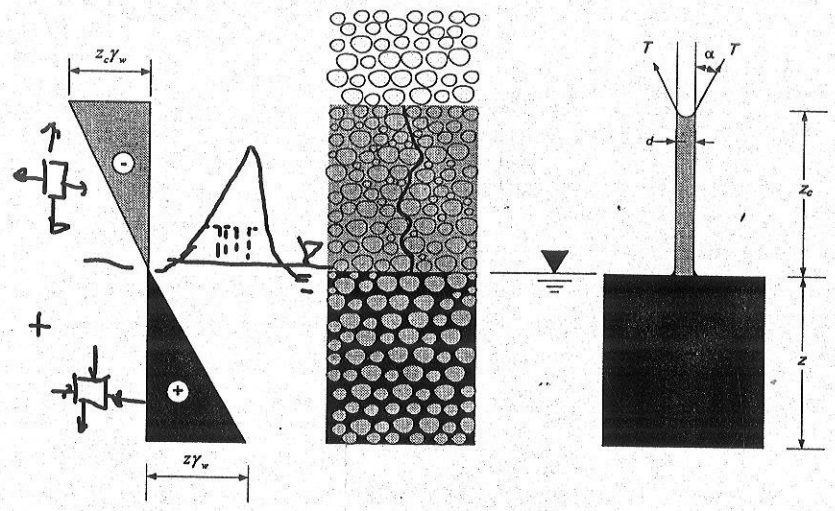
โครงการหนึ่งประกอบด้วยชั้นดินทรายหนา 4.0 เมตร ถัดลงไปเป็นชั้นดินเหนียวหนา 6.0 เมตร มีระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ระดับ 2.0 เมตรจากผิวดินและมีหน่วยน้ำหนักดังรูป จงเขียน stress profile ของ

a) หน่วยแรงรวมในแนวดิ่ง (Vertical total stress)
b) หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง (Vertical effective stress)



จากตัวอย่างที่แล้ว ถ้านำทราย (γ_t = 20 kN/m^3) มาถมเป็นพื้นที่กว้างหนา 2.0 เมตร จงเขียน stress profile เมื่อเวลาผ่านไปนานมากจนความดันน้ำอยู่ในสภาพ Hydrostatic ที่ระดับเดิม และไม่คิดถึงผลเนื่องจากการทรุดตัว





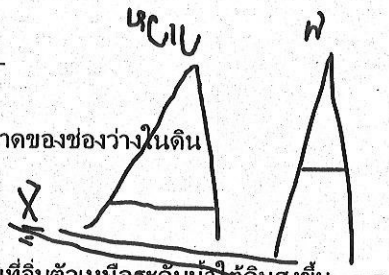
รูปจำลองการเกิด capillary ในดิน

คิดสมดุลย์ของแรงตึงผิวกับน้ำหนักในท่อ

$$z_c = \frac{4T\cos\alpha}{d\gamma_w}$$

พิจารณาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ d เป็นขนาดของช่องว่างในดิน

$$z_c \propto \frac{1}{d}$$



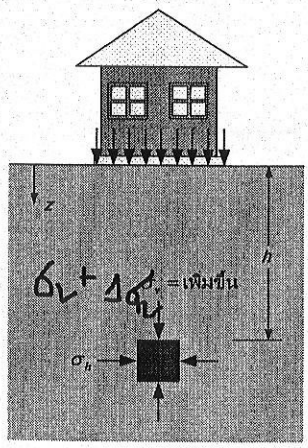
ดังนั้นถ้าช่องว่างในดินมีขนาดเล็กๆ จะทำให้ดินที่อิ่มตัวเหนือระดับน้ำใต้ดินสูงขึ้นด้วย นั่นคือถ้าเป็นดินทรายละเอียด capillary zone จะสูงกว่าดินทรายหยาบ

- แรงดันน้ำเนื่องจาก capillary นี้จะมีค่าเป็นลบ ค่า Effective stress จึงเพิ่มขึ้น

$$\sigma' = \sigma - (-z\gamma_w)$$

$$\sigma' = \sigma + z\gamma_w$$

2. หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก (applied load)



a) คำนวณโดยใช้วิธี Analytical

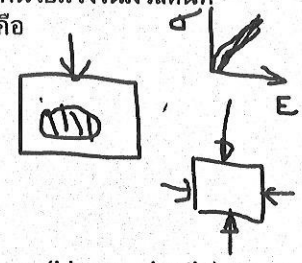
คำนวณจาก close form solution
ใช้ได้กับปัญหาที่ไม่มีความซับซ้อน
ใช้คำนวณหน่วยแรงถูกต้องได้ทุกจุด

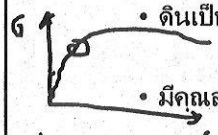
b) คำนวณโดยใช้วิธี Numerical

คำนวณโดยแบ่งดินเป็นอิลิเมนต์ย่อยๆ
วิธีนี้สามารถคำนวณปัญหาในรูปแบบซับซ้อนได้ หน่วยแรงที่คำนวณได้เป็นการประมาณ

การคำนวณโดยใช้วิธี Analytical

ในปี 1885 Boussinesq ได้เสนอสมการสำหรับหาหน่วยแรงในมวลดินที่เกิดจากแรงภายนอกกระทำที่ผิวดิน โดยมีสมมุติฐานคือ



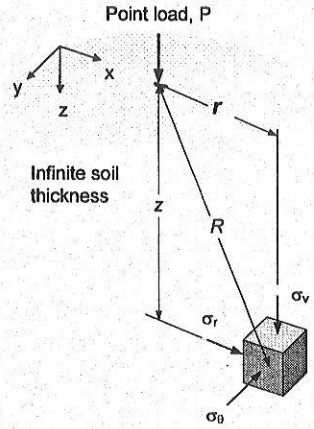


- ดินเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous)
- มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง (Isotropic)

- ดินมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงอิลาสติค และเป็นเส้นตรง (Linear elastic)
- ดินมีความกว้างจำกัดแต่ความลึกไม่จำกัด (Semi-infinite)

1. หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำที่เป็นจุด
2. หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงที่กระจายเป็นเส้นตรง
3. หน่วยแรงในมวลดินเมื่อมีแรงกระทำแบบ Uniform strip pressure กระทำที่ผิวดิน
4. หน่วยแรงในมวลดินเมื่อใต้ฐานรากรูปวงกลม
5. หน่วยแรงในมวลดินใต้ฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า
   - ใช้แผนภาพ
   - คำนวณจากสมการ closed form โดยตรง
   - ใช้วิธีกราฟฟิค
   - ใช้วิธีการประมาณอย่างหยาบ

แบบที่ 1 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำที่เป็นจุด



เขียนในเทอมของ R และ z

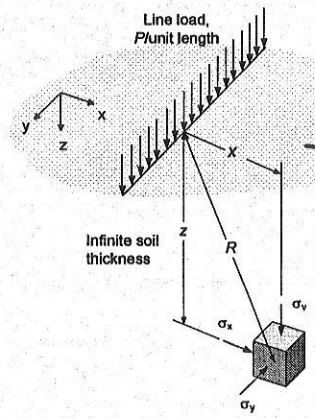
$$\sigma_v = \frac{3Pz^3}{2\pi R^5}$$

$\frac{N, m^3}{m^5}$

เขียนในเทอมของ r และ z

$$\sigma_v = \frac{3P}{2\pi z^2\left[1+\left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{5/2}}$$

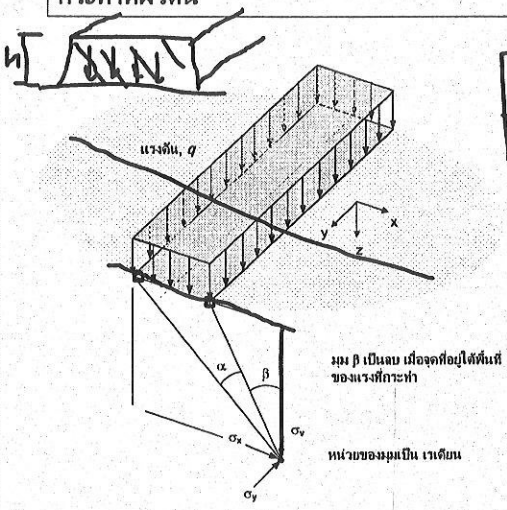
แบบที่ 2 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงที่กระจายเป็นเส้นตรง



$$\sigma_v = \frac{2Pz^3}{\pi R^4}$$

$\frac{N}{m}\ \frac{}{m}$

แบบที่ 3 หน่วยแรงในมวลดินเมื่อมีแรงกระทำแบบ Uniform strip pressure กระทำที่ผิวดิน

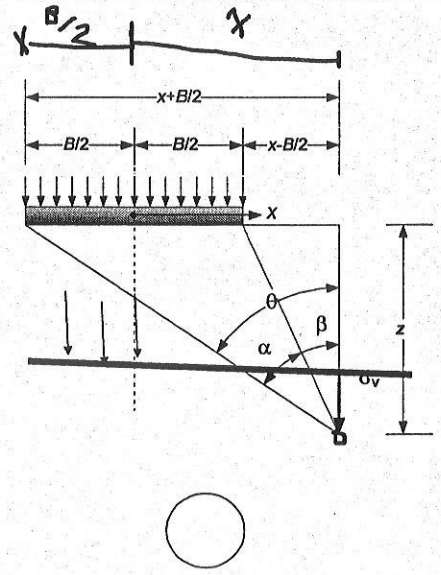


$$\Delta\sigma_v = \frac{q}{\pi}[\alpha + \sin\alpha\cos(\alpha + 2\beta)]$$

$$\Delta\sigma_x = \frac{q}{\pi}[\alpha - \sin\alpha\cos(\alpha + 2\beta)]$$

$$\Delta\tau_{xy} = \frac{q}{\pi}(\sin\alpha\sin(\alpha + 2\beta))$$

$$\sigma_y = \frac{2q}{\pi}v\alpha$$

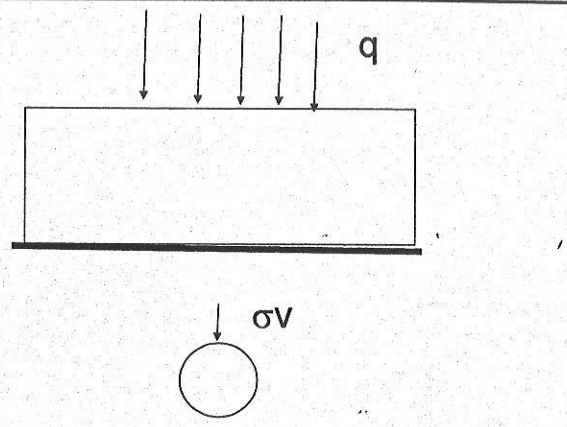


$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{x - B/2}{z}\right)$$

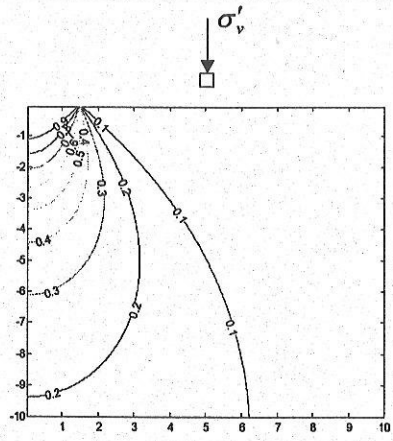
$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{x + B/2}{z}\right)$$

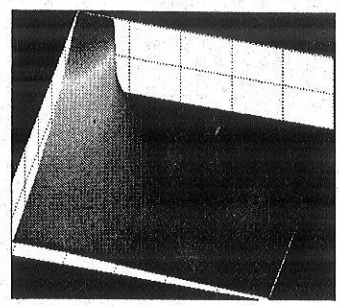
$$\alpha = \theta - \beta$$

$$\sigma_v = \frac{q}{\pi}(\alpha + \sin\alpha\cos(\alpha + 2\beta))$$



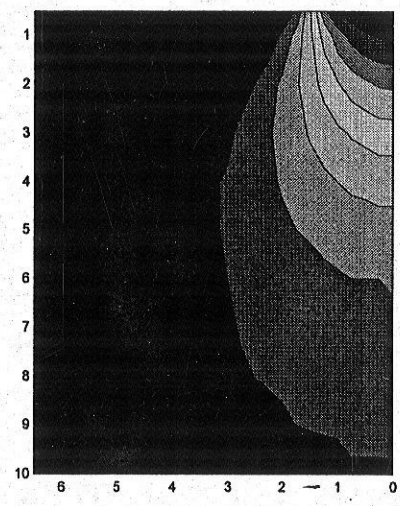

```
% plot principle stress contour under a strip footing
% by Pornpot Tanseng, Suranaree university of technology
clear
%Input
B = 3;
q = 1;
% calculation
for runz = 1:1:200
for runx = 1:1:200
   x = (runx-1)/20;
   z = (runz-0.9)/20;
 beta = atan((x-0.5*B)/z);
 theta = atan((x+0.5*B)/z);
 alpha = theta - beta;
 sig_v = (q/pi)*(alpha + sin(alpha)*cos(alpha+2*beta));
 sig_h = (q/pi)*(alpha - sin(alpha)*cos(alpha+2*beta));
 tau_vh = (q/pi)*sin(alpha)*sin(alpha+2*beta);

 xco(runx,runz) = x;
 zco(runx,runz) = -z;
 ico(runx, runz) = sig_v;
 end
end
% plot contour
contour(xco, zco, ico)
view (2)
[C,h]=contour(xco, zco, ico);
clabel(C,h);
```





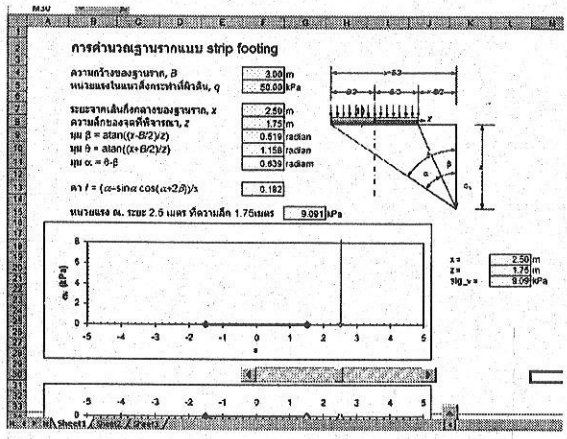
หน่วยแรงในแนวดิ่ง

ผลลัพธ์ที่ได้จาก close form solution โดยใช้ MATLAB

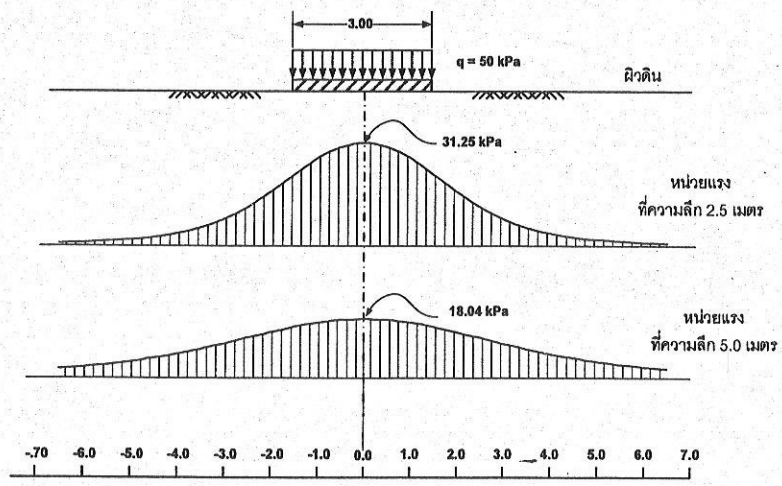


Contour ของหน่วยแรงใต้ฐานรากแบบ strip footing

ตัวอย่างแบบที่ 3 ฐานรากแบบ strip footing กว้าง 3 เมตร ก่อให้เกิดหน่วยแรง 50kPa ที่ผิวดิน จงเขียนการกระจายของหน่วยแรงในแนวดิ่งเนื่องจากแรงกระทำนี้ที่ความลึก 2.5 เมตร และ 5.0 เมตร



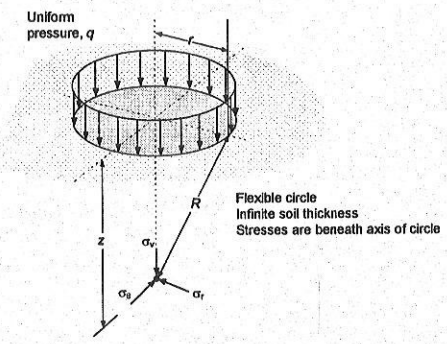
เป็นวิธีการแทนค่าสมการอย่างตรงไปตรงมา ไม่ยาก จะแสดงด้วยการใช้โปรแกรมเสปรดชีท เช่น Excel ในการคำนวณ



แบบที่ 4 หน่วยแรงในมวลดินเมื่อใต้ฐานรากรูปวงกลม

อาศัยสมการของ Boussinesq และอินทริเกรททั้งพื้นที่วงกลม

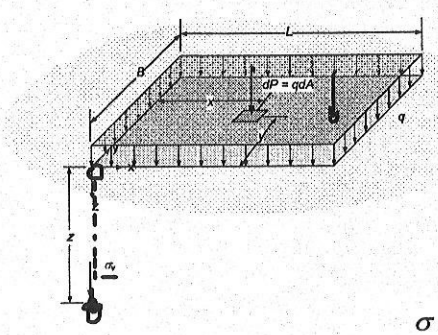
influence factor



$$\sigma_v = q\left[1-\left\{\frac{1}{1+\left(\frac{r}{z}\right)^2}\right\}^{3/2}\right]$$

แบบที่ 5 หน่วยแรงในมวลดินใต้ฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า

สมการที่ใช้คำนวณหาแรงใต้ฐานรากรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าได้มาจากการ Integrate สมการที่ใช้หาหน่วยแรงเนื่องจาก Point load



$$dP = qdA = q(dxdy)$$

$$\sigma_v = \frac{3Pz^3}{2\pi R^5}$$

$$d\sigma_v = \frac{3q(dxdy)z^3}{2\pi\left(x^2+y^2+z^2\right)^{5/2}}$$

$$\sigma_v = \int_{y=0}^{L}\int_{x=0}^{B}\frac{-3q\cdot(dx\cdot dy)z^3}{2\pi(x^2+y^2+z^2)^{5/2}} = q\cdot I$$

สมการที่ใช้คำนวณหาแรงใต้มุมของฐานรากรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าได้มาจากการ Integrate สมการที่ใช้หาหน่วยแรงเนื่องจาก Point load

$$d\sigma_v = \frac{3q(dxdy)z^3}{2\pi\left(x^2+y^2+z^2\right)^{5/2}}$$

$$\sigma_v = \int_{y=0}^{L}\int_{x=0}^{B} \frac{3q(dxdy)z^3}{2\pi(x^2+y^2+z^2)^{5/2}} = qI$$

โดยที่ *I* คือ influence factor

ถ้า $m^2+n^2+1 \geq m^2n^2$

$$I = \frac{1}{4\pi}\left(\frac{2mn\sqrt{m^2+n^2+1}}{m^2+n^2+m^2n^2+1}\cdot\frac{m^2+n^2+2}{m^2+n^2+1} + \tan^{-1}\left(\frac{2mn\sqrt{m^2+n^2+1}}{m^2+n^2+1-m^2n^2}\right)\right)$$

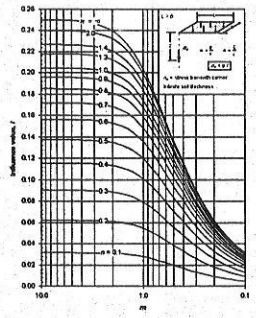
ถ้า $m^2+n^2+1 < m^2n^2$

$$I = \frac{1}{4\pi}\left(\frac{2mn\sqrt{m^2+n^2+1}}{m^2+n^2+m^2n^2+1}\cdot\frac{m^2+n^2+2}{m^2+n^2+1} + \tan^{-1}\left(\frac{2mn\sqrt{m^2+n^2+1}}{m^2+n^2+1-m^2n^2}\right) + \pi\right)$$

และ $m = \frac{B}{z}$ $n = \frac{L}{z}$

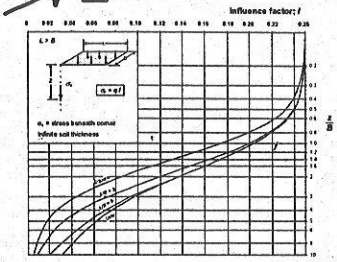
ค่ามุม ($\tan^{-1}$) เป็นเรเดียน

ในอดีตมีผู้ทำการคำนวณค่า influence factor และนำเสนอในรูปของกราฟ



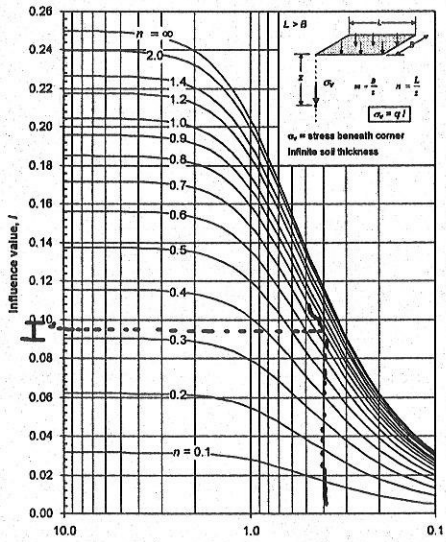
B L → I

Z



ในปัจจุบันสามารถโปรแกรมสมการลงในคอมพิวเตอร์ และคำนวณค่า influence factor ได้อย่างง่ายดาย

B, *L* และ *z* ⇨  ⇨ *Influence factor*



สิ่งที่ทราบ

- ขนาดของฐานราก $B \times L$
- ความลึกของจุดที่ต้องการทราบค่าหน่วยแรง, z

↓

คำนวณค่า m และ n

$$m = \frac{B}{z} \qquad n = \frac{L}{z}$$

↓

อ่านค่า influence value จากกราฟ

↓

คำนวณค่าหน่วยแรงใต้ฐานราก

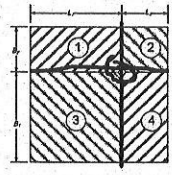
$$\Delta\sigma_v = qI$$

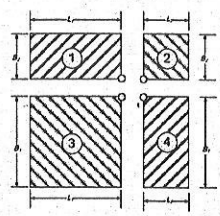
m: B

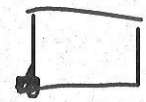
Fadum's Chart

ถ้าฐานรากมีรูปร่างเป็นแบบอื่นๆ ที่ไม่ได้อยู่ในกรณีข้างต้น

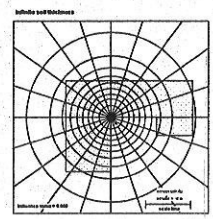
1. ใช้วิธี Superposition

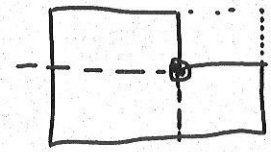




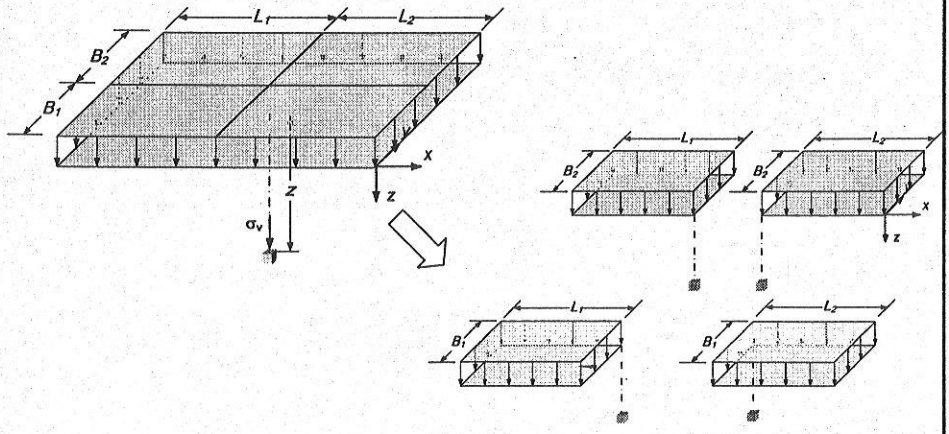


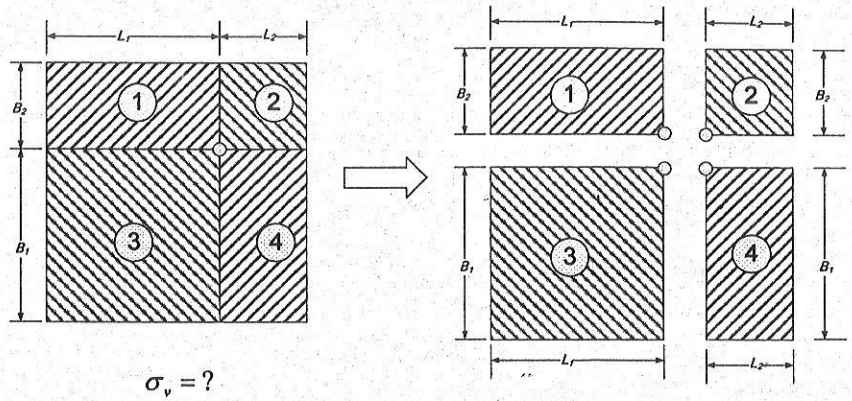
2. ใช้ Newmark's chart ซึ่งเป็นวิธีกราฟฟิค





ค่าที่เปิดจาก chart จะเป็นหน่วยแรงใต้มุมของฐานรากเท่านั้น ถ้าจะคำนวณหน่วยแรงที่จุดอื่นๆ ที่ไม่ใช่มุมของฐานรากจะต้องใช้หลักการ superposition



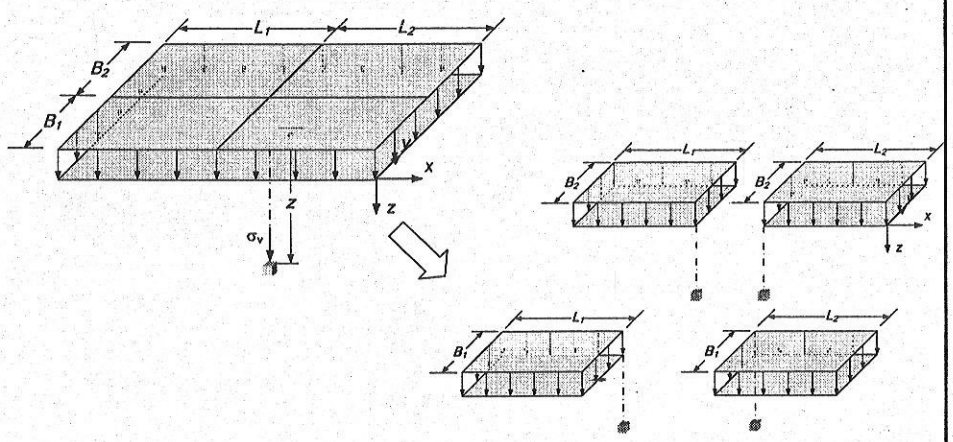


$\sigma_v = ?$

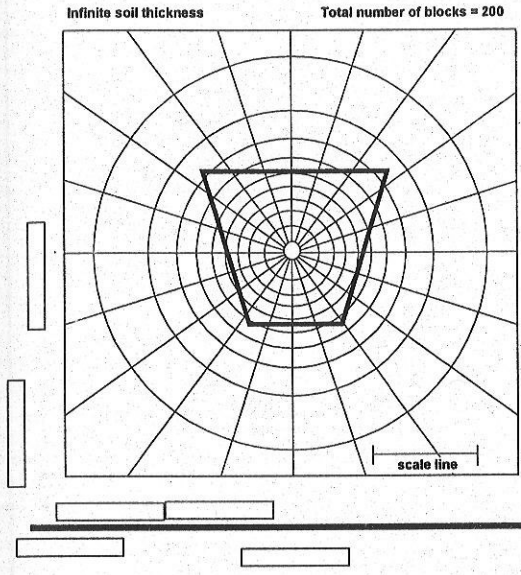
คำนวณ stress ใต้มุมของทุกรูปแล้ว
นำมารวมกัน

$$\sigma_v = qI_1 + qI_2 + qI_3 + qI_4$$

ค่าที่เปิดจาก chart จะเป็นหน่วยแรงใต้มุมของฐานรากเท่านั้น ถ้าจะคำนวณ
หน่วยแรงที่จุดอื่นๆ ที่ไม่ใช่มุมของฐานรากจะต้องใช้หลักการ superposition



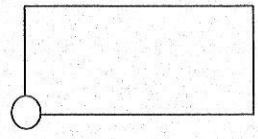
การใช้ Newmark's chart



Influence value ต่อ 1 ช่อง

$$I_N = \frac{1}{200} = 0.005$$

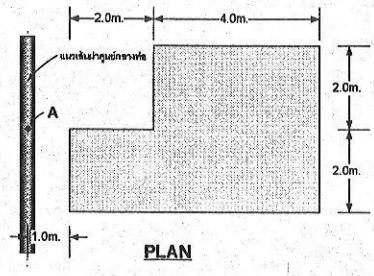
ใช้ความลึกของจุดที่ต้องการทราบหน่วยแรงมาเป็น สเกล

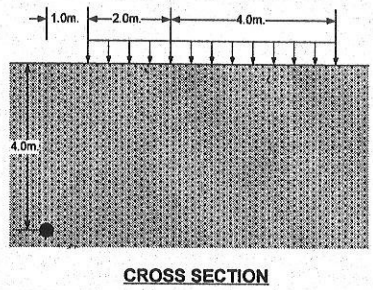


1. กำหนดสเกล โดยให้ระยะตามแนวดิ่งจากใต้ฐานรากถึงจุดที่ต้องการหาหน่วยแรงเป็นระยะ z ให้เท่ากับความยาวของเส้น Scale line
2. วาดรูปฐานรากลงบน Newmark's chart โดยให้จุดที่ต้องการหาหน่วยแรงอยู่ที่จุดศูนย์กลางของ chart
3. นับจำนวนช่องที่รูปฐานรากทับอยู่ (ส่วนที่ไม่เต็มช่องให้รวมกันโดยประมาณ)
4. หน่วยแรงในแนวดิ่งที่เกิดขึ้นคำนวณได้จาก

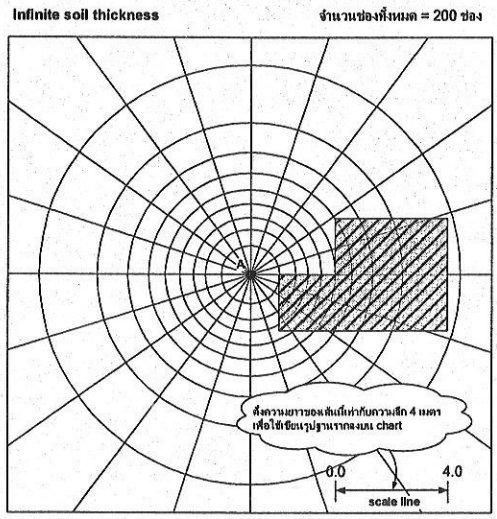
$$\sigma_v = (N)(I_N)(q)$$

ตัวอย่าง ท่อฝังอยู่ที่ความลึก 4.0 เมตรถ้าต้องการสร้างฐานรากดังรูปโดยฐานรากจะมีแรงกดลงที่ผิวดินเป็น 40 kPa จงคำนวณหาหน่วยแรงกดในแนวดิ่งบนท่อที่จุด A





จะใช้วิธีการคำนวณ โดยวิธีกราฟฟิค (Newmark's chart) และวิธี superposition



จำนวนช่องที่นับได้ = 21.5 ช่อง

Influence value ต่อ 1 ช่อง

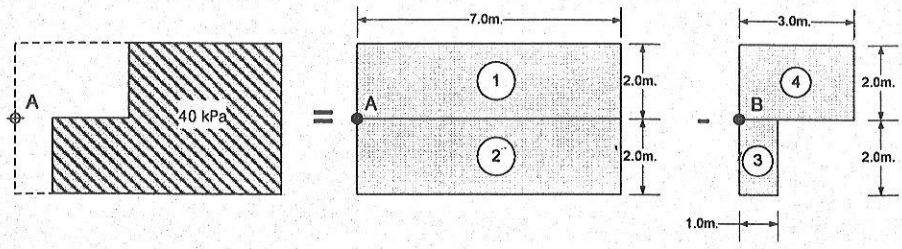
= 1/(200) = 0.05

$$\sigma_v = (N)(I_N)(q)$$

$$\sigma_v = (21.5)(0.05)(40\,\text{kPa})$$

$$\sigma_v = 4.3\,\text{kPa}$$

ใชวิธี superposition



	B (m)	*L* (m)	*m=B/z*	*n=L/z*	*I*
1	2.0	7.0	2.0/4.0=0.5	7.0/4.0=1.75	0.134
2	2.0	7.0	2.0/4.0=0.5	7.0/4.0=1.75	0.134
3	1.0	2.0	1.0/4.0=0.25	2.0/4.0=0.5	0.048
4	2.0	3.0	2.0/4.0=0.5	3.0/4.0=0.75	0.107

$$\sigma_v = qI_1 + qI_2 - qI_3 - qI_4 = 40(0.133 + 0.133 - 0.048 - 0.107)$$

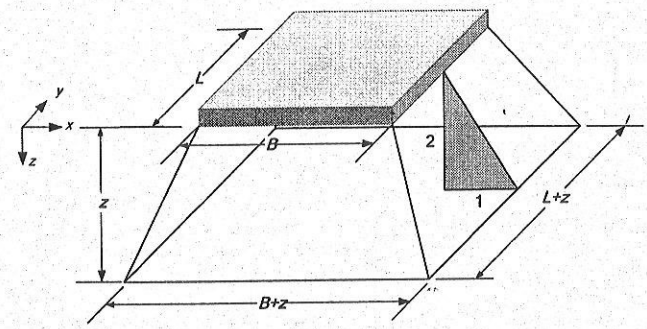
$$\sigma_v = 4.44\text{kPa}$$

สรุปผลการคำนวณเปรียบเทียบ

วิธี	σ_v (kPa)
Newmark's chart	4.3
superposition	4.4

- วิธี Newmark's chart มีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากจากการประมาณจำนวนช่องที่ไม่เต็ม
- ดังนั้นถ้าฐานรากเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากวิธี superposition จะเป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วกว่า

วิธีการประมาณอย่างหยาบสำหรับฐานรากรูปสี่เหลี่ยม



วิธีนี้เป็นวิธีการประมาณอย่างคร่าวๆเท่านั้น โดยสมมุติให้การกระจายของหน่วยแรงเป็นรูปปิรามิดที่มีอัตราส่วน 2:1

หน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นโดยประมาณอย่างหยาบมีค่าเท่ากับ

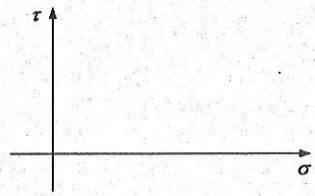
$$\Delta\sigma_z = \frac{qBL}{\left(B+\frac{z}{2}+\frac{z}{2}\right)\left(L+\frac{z}{2}+\frac{z}{2}\right)}$$

$$\Delta\sigma_z = \frac{qBL}{(B+z)(L+z)}$$

วิธีนี้จะให้ค่าใกล้เคียงกับ closed form solution ของ Boussinesq เมื่อ $z > B$

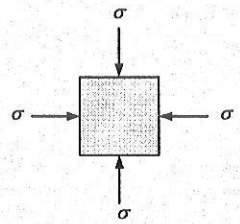
การคำนวณสถานะของหน่วยแรง (State of stress) โดยใช้ Mohr's circle

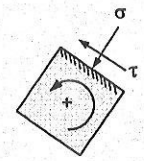
- ในเนื้อหาระดับนี้จะใช้วิธี Mohr's circle ในการคำนวณสถานะของหน่วยแรงในระนาบใดๆ หรือคำนวณสถานะของหน่วยแรงสูงสุด-ต่ำสุด

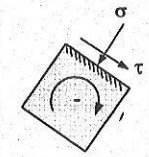


- เหมือนกับวิชา Mechanics of materials ต่างกันเพียงเครื่องหมาย เนื่องจากดินรับแรงดึงได้ไม่ดี หน่วยแรงที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ในดินจึงเป็นหน่วยแรงอัด เราจึงสมมุติให้หน่วยแรงอัดมีค่าเป็นบวก
- เพื่อป้องกันความสับสนที่นักศึกษาจะได้รับ จะใช้วิธีกราฟฟิคผสมผสานกับการคำนวณ เนื่องจากสะดวกในการนำไปใช้ และไม่ยากต่อการทำความเข้าใจ

Sign convention



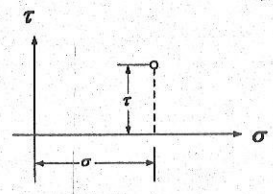


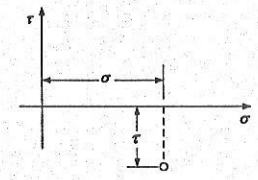


หน่วยแรงอัด
มีค่าเป็นบวก

หน่วยแรงเฉือน
ทวนเข็ม เป็นบวก

หน่วยแรงเฉือน
ตามเข็มเป็นลบ

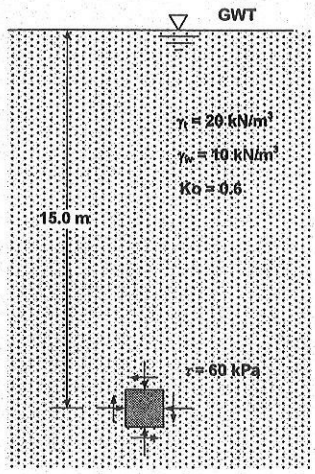




สิ่งที่ต้องการหาโดยใช้ Mohr's circle

- Major principle stress (หน่วยแรงหลักที่มากที่สุด)
- Minor principle stress (หน่วยแรงหลักที่น้อยที่สุด)
- Stress in Arbitrary Plane (สถานะของหน่วยแรงที่ระนาบใด ๆ)

ตัวอย่าง จากชั้นดินดังรูปถ้ามีหน่วยแรงเฉือนเกิดขึ้นในดินเท่ากับ 60 kPa ดังรูปจงคำนวณ a) Principle stress b) State of stress ที่ระนาบทำมุม 45°กับแกน x (ทวนเข็ม)

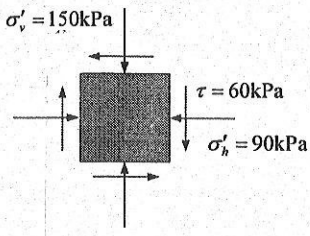


คำนวณ vertical effective stress

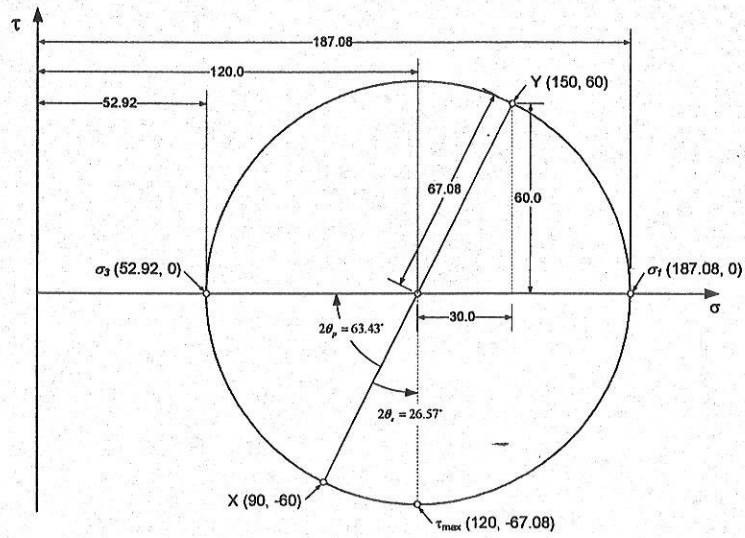
$$\sigma'_v = (20)(15) - (10)(15) = 150\text{kPa}$$

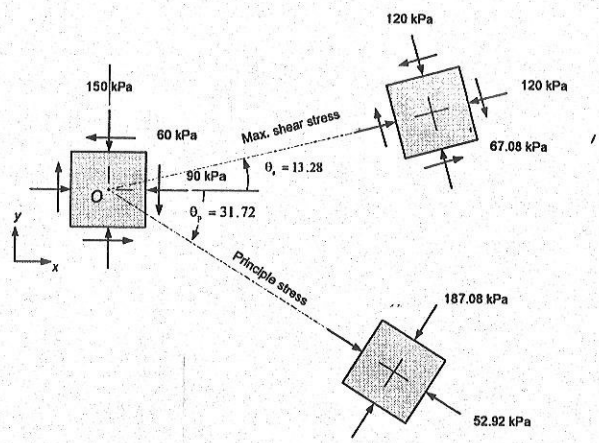
คำนวณ horizontal effective stress

$$\sigma'_h = (0.6)(150) = 90\text{kPa}$$

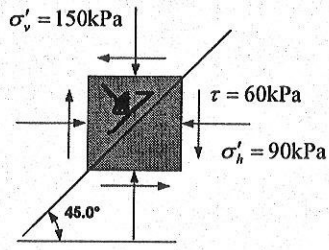


a) Principle stress

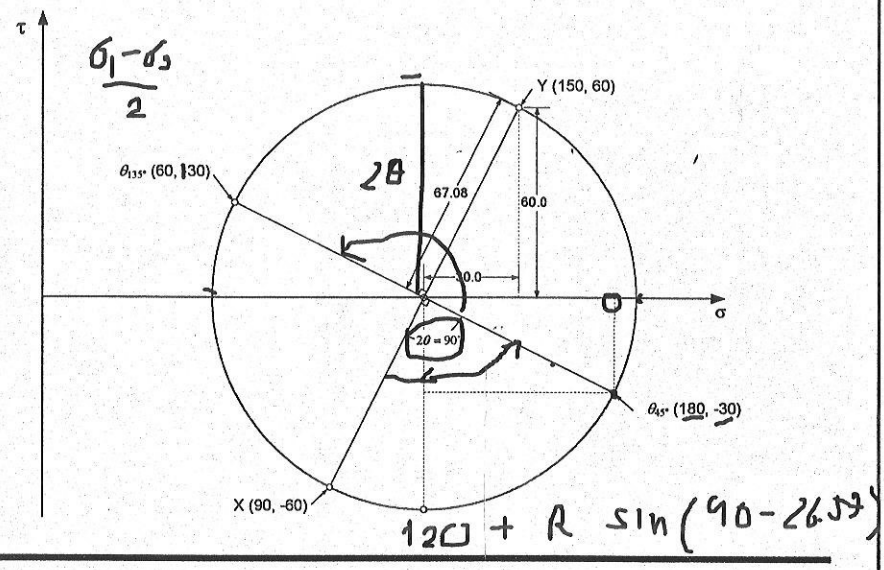


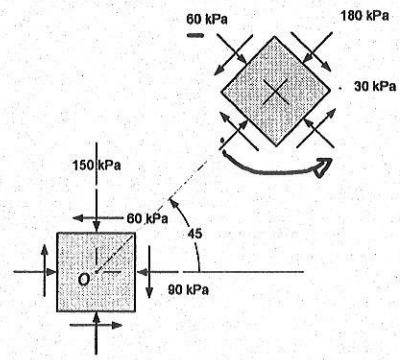


b) State of stress ที่ระนาบทำมุม 45°กับแกน x ในทิศทางทวนเข็ม



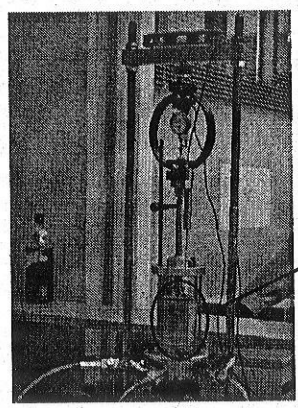
b) State of stress ที่ระนาบทำมุม 45° กับแกน x ในทิศทางทวนเข็ม



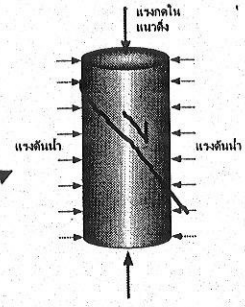


ตัวอย่างการนำความรู้เรื่อง Mohr's circleไปประยุกต์ใช้

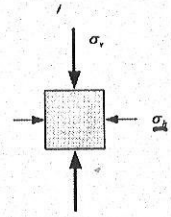
Mohr's circle จะใช้ในเรื่องกำลังรับแรงเฉือนของดิน



การทดสอบดินในห้องทดลอง

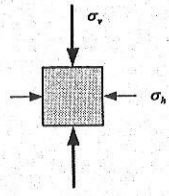


Free body diagram

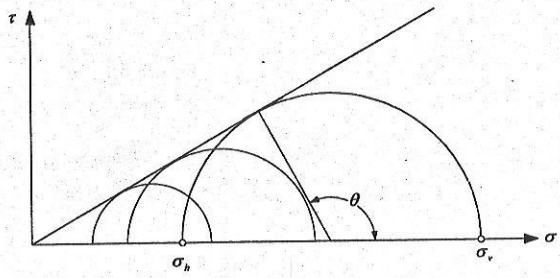


State of stress

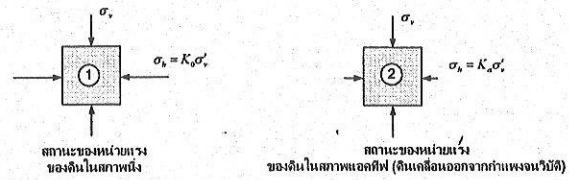
Mohr's circle จะใช้ศึกษากำลังรับแรงเฉือนของดิน

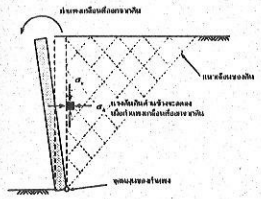


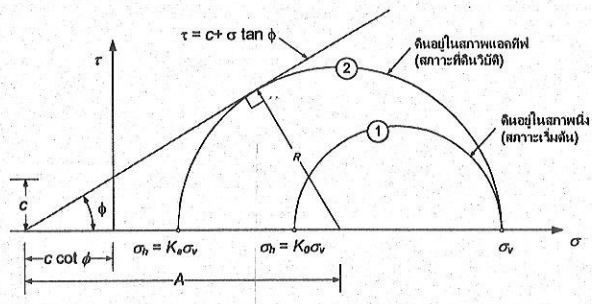
State of stress



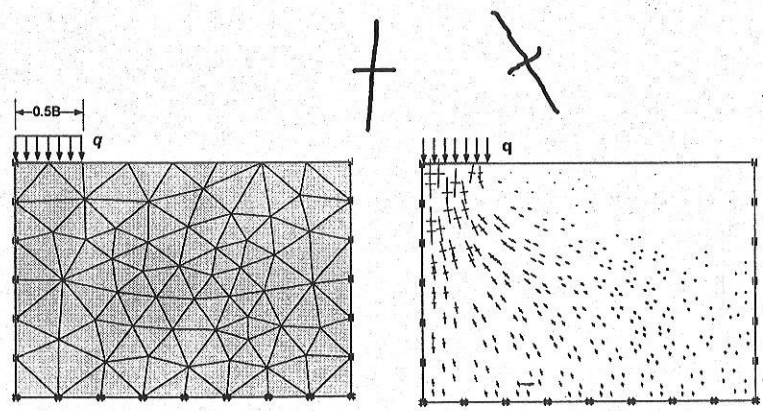
ใช้ในการพัฒนาสมการสำหรับแรงดันดินที่กระทำต่อกำแพง







ใช้เขียนหน่วยแรงหลักซึ่งเกิดขึ้นในมวลดินเมื่อคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลข



ในบทต่อไปจะศึกษาเรื่องการซึมของน้ำผ่านดิน

Chapter 5 Permeability and seepage

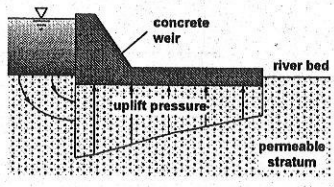
430321 Soil Mechanics

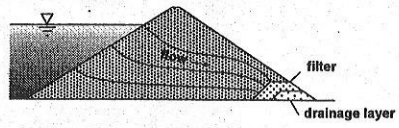
12 ตุลาคม 2548

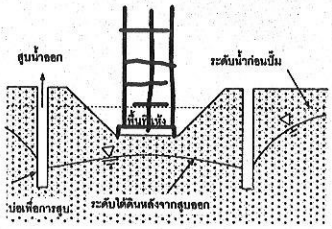
อ.ดร.พรพจน์ ตันเส็ง

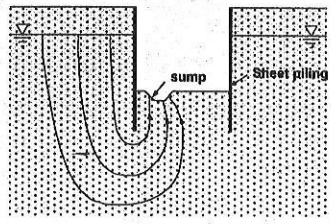
download เอกสารนี้ได้จาก http://www.geocities.com/soil4sut

ปัญหาเกี่ยวกับการไหลของน้ำใต้ดิน

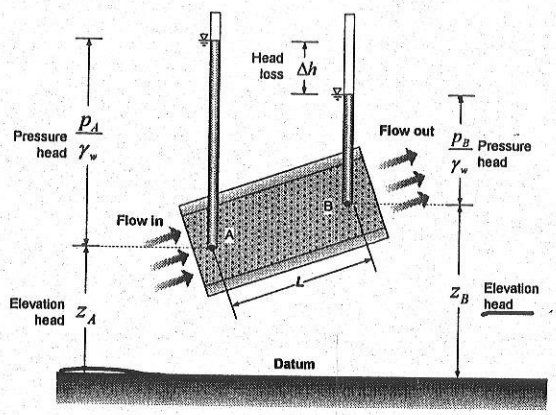








Pressure and head



Total head ณ. จุด A

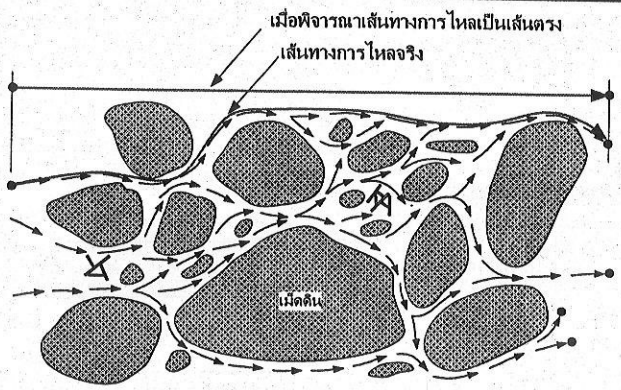
$$z_A + \frac{p_A}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g}$$

Total head ณ. จุด B

$$z_B + \frac{p_B}{\gamma_w}$$

Head loss ระหว่างจุด A และ B

$$\Delta h = \left(z_A + \frac{p_A}{\gamma_w}\right) - \left(z_B + \frac{p_B}{\gamma_w}\right)$$



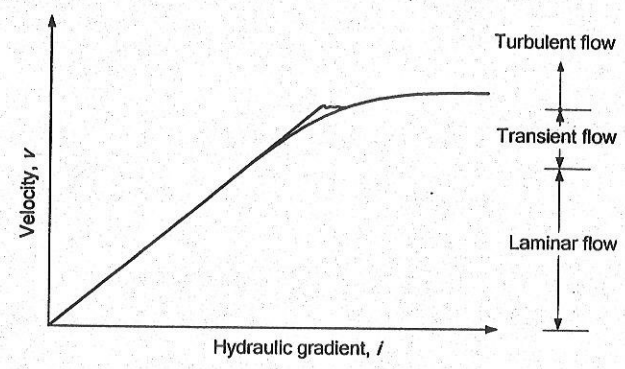
การไหลของน้ำในดินขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่างระหว่างเม็ดดิน

- ดินเหนียวมีช่องว่างระหว่างเม็ดดินเล็ก จะเห็นว่าการไหลของน้ำทำให้ไหลได้ช้า
- ดินทรายช่องว่างระหว่างเม็ดดินใหญ่กว่าดินเหนียว การไหลของน้ำในช่องว่างสะดวกขึ้น น้ำไหลเร็วขึ้น

เมื่อนำ Head loss มาหารด้วยระยะทางระหว่าง 2 จุด

$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

i	hydraulic gradient
Δh	head loss
L	ระยะทางระหว่างจุดที่เกิด head loss



ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับ hydraulic gradient

- สำหรับดินส่วนใหญ่ เราจะคิดว่าการไหลของน้ำผ่านช่องว่างในดินเป็นแบบ laminar flow นั่นคือความเร็วของการไหลแปรผันตรงกับ hydraulic gradient

Darcy's law

ในปี ค.ศ. 1856 (พ.ศ. 2399) Darcy ได้เสนอว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการไหลแปรผันตรงกับ hydraulic gradient

$$v \propto i$$

$$v = ki$$

k คือ coefficient of permeability มีหน่วยเป็นระยะทางต่อเวลา

i คือ hydraulic gradient

ค่าสัมประสิทธิ์ k ได้มาอย่างไร?

- ใช้ค่าประมาณจากสมการเชิงประสบการณ์ (empirical formula)
- ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

  การทดสอบแบบระดับน้ำคงที่ (constant head) - ดินทราย

  การทดสอบแบบระดับน้ำเปลี่ยนแปลง (variable head) - ดินเหนียว
- ได้จากการทดสอบในสนาม - ทดลองสูบน้ำจากบ่อแล้ววัดระดับน้ำที่ลดลง

  กรณีที่ชั้นน้ำถูกจำกัด (confined aquifer)

  กรณีที่ชั้นน้ำไม่ถูก (confined aquifer)

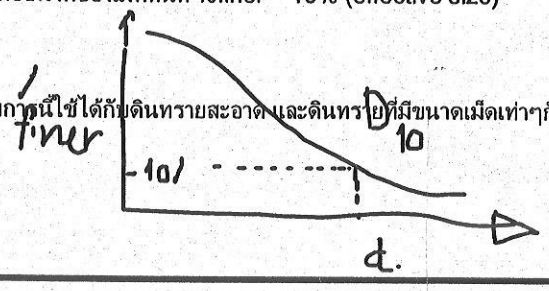
ค่าประมาณจาก empirical formula

สมการที่ใช้กันทั่วไปได้แก่สมการซึ่งเสนอโดย Hazen (1930)

$$k = C(D_{10})^2 \text{ cm/s}$$

C คือค่าคงที่ซึ่งมีค่าระหว่าง 0.4 ถึง 1.2

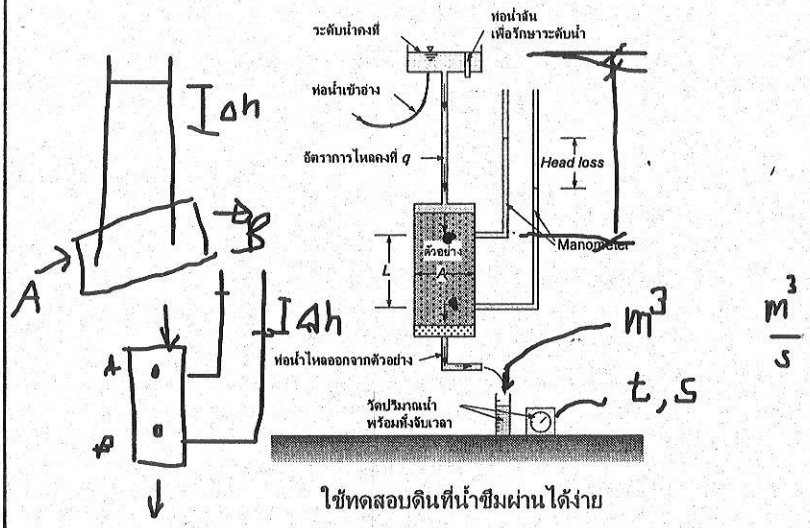
D_{10} คือขนาดของเม็ดดินที่ %finer = 10% (effective size)



➢ สมการนี้ใช้ได้กับดินทรายสะอาด และดินทรายที่มีขนาดเม็ดเท่าๆกัน

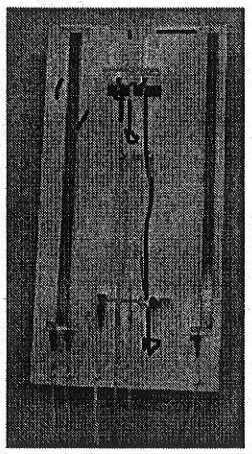
การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบแบบระดับน้ำคงที่ (constant head)



ใช้ทดสอบดินที่น้ำซึมผ่านได้ง่าย

การทดสอบแบบระดับน้ำคงที่ (constant head)



ใช้ทดสอบดินที่น้ำซึมผ่านได้ง่าย

การคำนวณผลการทดลองของกรณี constant head

$$Q = A(ki)t$$

$\frac{Q}{t} = vA$ A

จาก $i = \Delta h/L$

$$k = \frac{QL}{Aht}$$

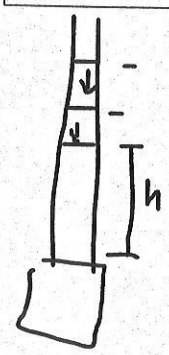
ในการทดสอบจะได้ผลการวัดคือ

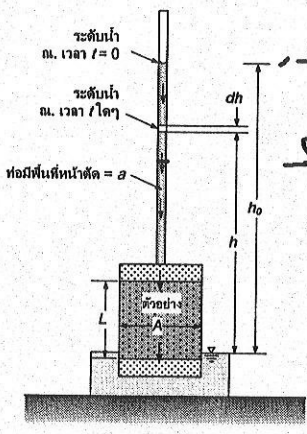
- Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่าง
- L = ระยะห่างระหว่าง Manometer
- h = head loss
- t = เวลาที่น้ำไหลผ่านตัวอย่าง
- A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง

$Q = vAt$

$Q = k\frac{\Delta h}{L}At$

การทดสอบแบบระดับน้ำเปลี่ยนแปลง (variable head)





$t = 0$

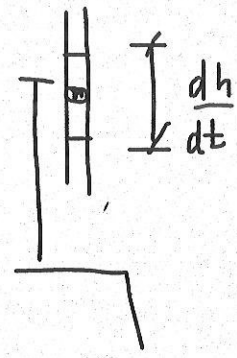
$t = t_1$

$Q\,t$

ใช้ทดสอบดินที่น้ำซึมผ่านได้ยาก

การคำนวณผลการทดลองของกรณี variable head

$Q = vA$ $\quad Q = k\frac{h}{L}A$ และ $Q = -a\frac{dh}{dt}$



$$k\frac{h}{L}A = -a\frac{dh}{dt}$$

$$\int_{t=t_0}^{t=t_1} \frac{Ak}{aL}\,dt = \int_{h=h_0}^{h=h_1} -\frac{dh}{h}$$

$$\frac{Ak}{aL}(t_1 - t_0) = \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right)$$

$$k = 2.303\frac{aL}{A(t_1 - t_0)}\log\left(\frac{h_0}{h_1}\right)$$

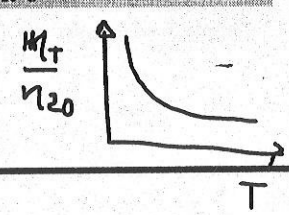
ในการรายงานผลการทดสอบนั้น จะรายงานผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 20°C ทั้งนี้ เนื่องจากความหนืดของน้ำมีลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

ดังนั้นถ้าในขณะทดสอบน้ำมีอุณหภูมิ T°C จะปรับแก้ค่า $k_{T°C}$ ได้จาก

$$k_{20°C} = k_{T°C}\frac{\eta_{T°C}}{\eta_{20°C}}$$

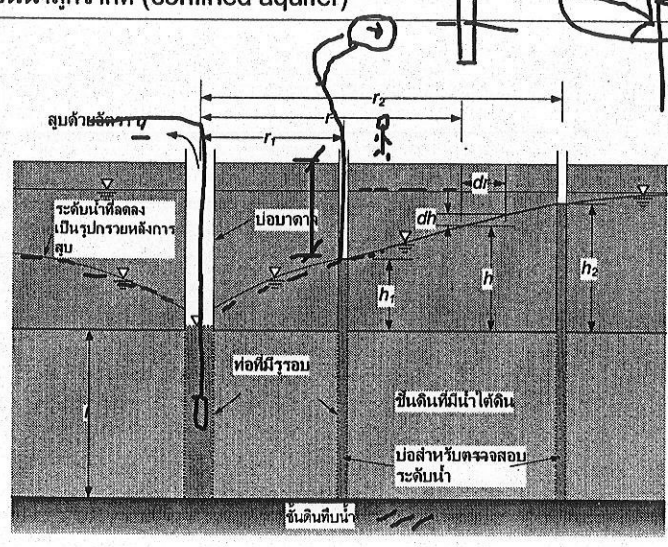
โดยที่ค่า $\frac{\eta_{T°C}}{\eta_{20°C}}$ คำนวณได้จาก

$$\frac{\eta_{T°C}}{\eta_{20°C}} = 2.42 - 0.475\ln(T)$$

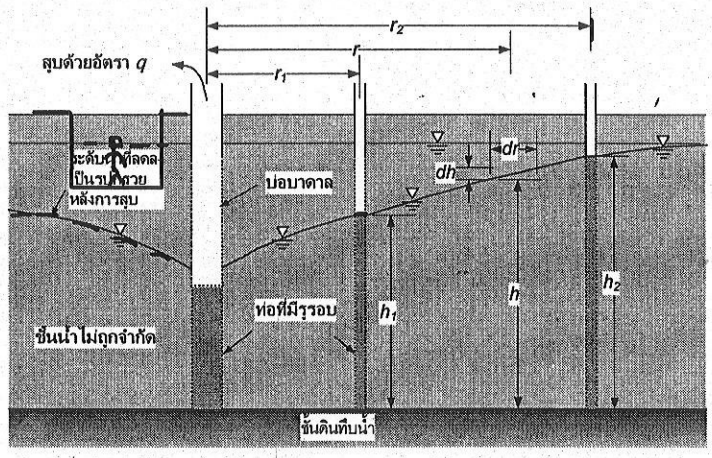


การทดสอบในสนาม

กรณีที่ชั้นน้ำถูกจำกัด (confined aquifer)



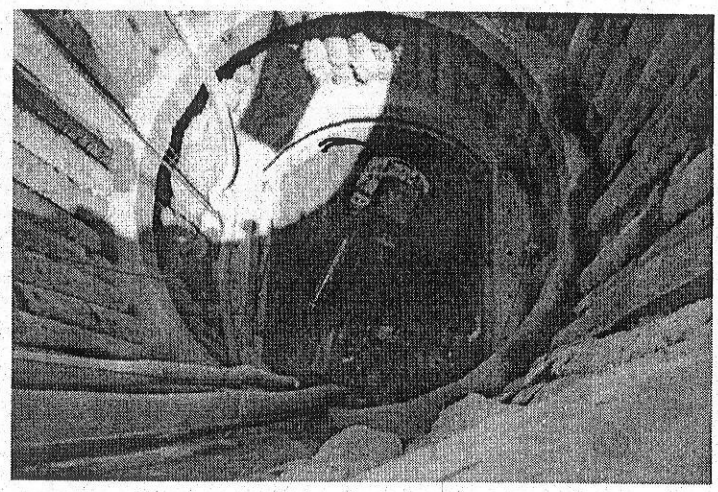
การณีที่ชั้นน้ำไม่ถูกจำกัด (unconfined aquifer)



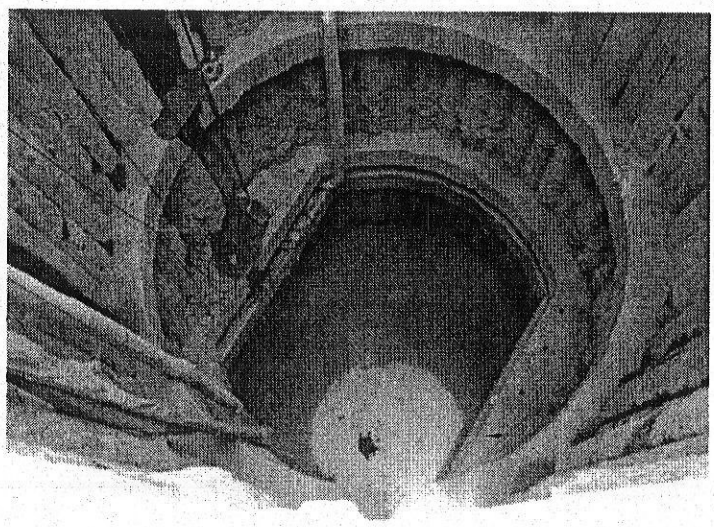
Coefficient of permeability (สัมประสิทธิการซึมผ่าน)

	Coefficient of Permeability k in cm per sec (log scale)											
	10^2	10	1.0	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
Drainage	Good							Poor	Practically impervious			
Soil type	Clean gravel		Clean sand, clean sand and gravel mixture			Very fine sand, organic and inorganic silts, mixtures of sand silt and clay, glacial till, stratified clay deposits, etc.					"Impervious" soils, e.g., homogeneous clays below zone of weathering	
					"Impervious" soils modified by effects of vegetation and weathering							
Direct determination of k	Direct testing of soil in its original position-pumping tests. Reliable if properly conducted. Considerable experience required											
	Constant-head permeameter. Little experience required											
Indirect determination of k			Falling-head permeameter. Reliable. Little of no experience required			Falling-head permeameter. Unreliable. Much experience required			Falling head permeameter. Fairly reliable. Considerable experience necessary			
	Computation from grain-size distribution, i.e., Hazen's formula. Applicable only to clean cohesionless sands and gravels										Computation based on results of consolidation tests. Reliable. Considerable experience required	

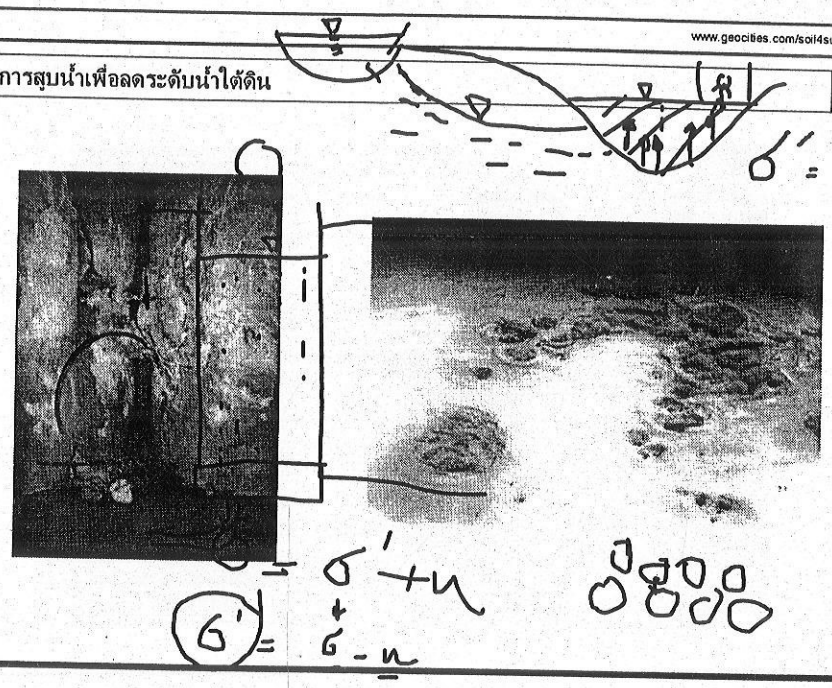
การสูบน้ำเพื่อลดระดับน้ำใต้ดิน



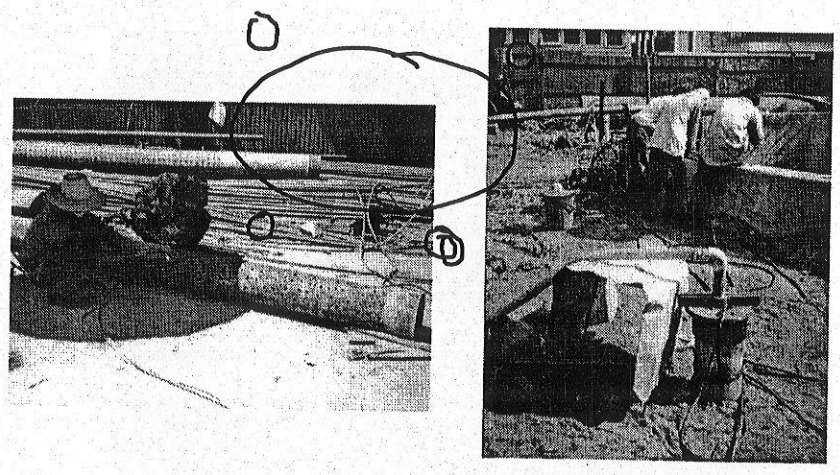
การสูบน้ำเพื่อลดระดับน้ำใต้ดิน



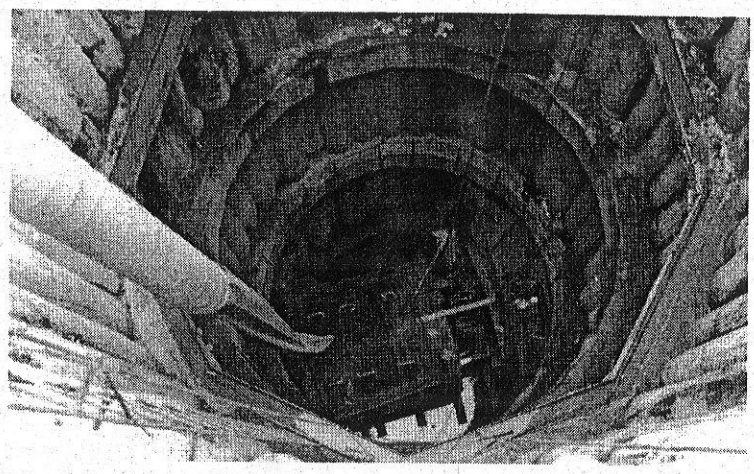
การสูบน้ำเพื่อลดระดับน้ำใต้ดิน



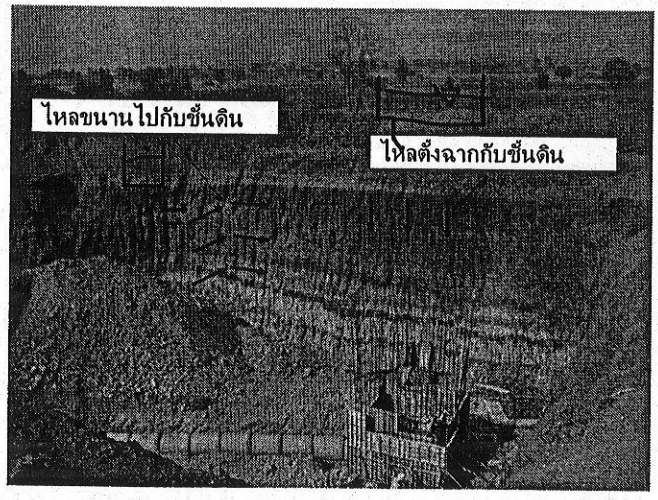
การสูบน้ำเพื่อลดระดับน้ำใต้ดิน



การสูบน้ำเพื่อลดระดับน้ำใต้ดิน

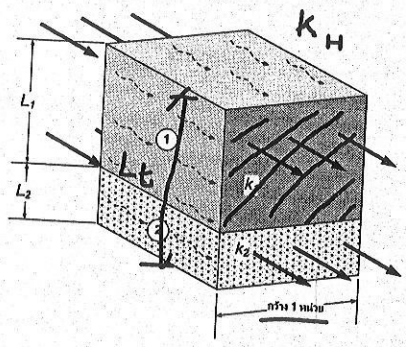


การซึมของน้ำผ่านดินที่เป็นชั้น



กรณีที่น้ำไหลขนานไปกับชั้นดิน

การไหลของน้ำในแนวราบในดินชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 จะมี head loss เท่ากันดังนั้นจะมี Hydraulic gradient, *i* เท่ากัน



$$q_v = Av = (1.0 \times L_t)(k_H i)$$

$$q_v = (1 \times L_1)k_1 i + (1 \times L_2)k_2 i + \cdots + (1 \times L_n)k_n i$$

$$L_t k_H i = (1 \times L_1)k_1 i + (1 \times L_2)k_2 i + \cdots + (1 \times L_n)k_n i$$

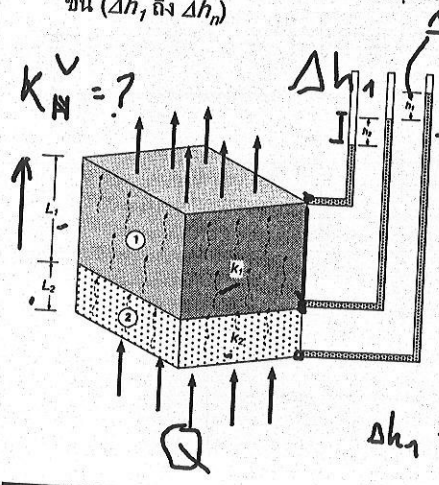
$$Q = q_1 + q_2 + \cdots q_n$$

$$k_H = \frac{1}{L_t}(L_1 k_1 + L_2 k_2 + \cdots + L_n k_n)$$

$$L_t = \sum L$$

กรณีที่น้ำไหลตั้งฉากกับชั้นดิน

ในกรณีนี้ค่า head loss รวมของดินทุกชั้น (Δh) จะเป็นผลรวมของ head loss ของดินแต่ละชั้น (Δh_1 ถึง Δh_n)



$$\Delta H = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \cdots + \Delta h_n$$

อัตราการไหลผ่านดินแต่ละชั้นจะเท่ากัน

$$k_v \frac{\Delta H}{L_t} = k_1 \frac{\Delta h_1}{L_1} = k_2 \frac{\Delta h_2}{L_2} = \cdots = k_n \frac{\Delta h_n}{L_n}$$

$$Q = kiA$$

เมื่อนำไปแทนค่าลงในสมการ head loss รวมจะได้

$$\Delta H = k_v \frac{\Delta H}{L_t}\left(\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \cdots + \frac{L_n}{k_n}\right)$$

$$\Delta h_1 = \left(\frac{k_v \Delta H}{L_t}\right)\frac{L_2}{k_2}$$

$$k_v = \frac{L_t}{\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \cdots + \frac{L_n}{k_n}}$$

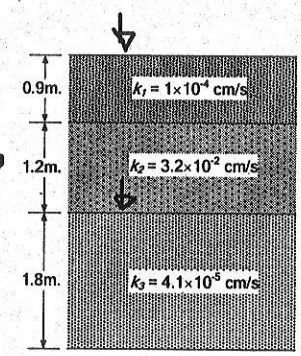
ตัวอย่าง จากชั้นดินและข้อมูลดังรูป จงคำนวณหา

a) $(k_V)_{eq}$

b) $(k_H)_{eq}$

c) $(k_H)_{eq}/(k_V)_{eq}$

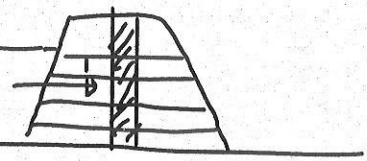
$v = ki$



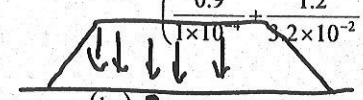
$$(k_H)_{eq} = \frac{1}{L_t}(L_1k_1 + L_2k_2 + \cdots + L_nk_n)$$

$$(k_H)_{eq} = \frac{(0.9)(1\times10^{-4}) + (1.2)(3.2\times10^{-2}) + (1.8)(4.1\times10^{-5})}{0.9+1.2+1.8} = 9.888\times10^{-3}\,\text{cm/s}$$

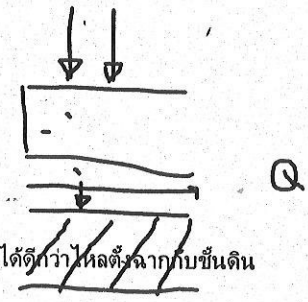
$$(k_v)_{eq} = \frac{L_t}{\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \cdots + \frac{L_n}{k_n}}$$



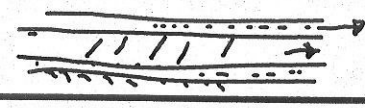
$$(k_v)_{eq} = \frac{0.9+1.2+1.8}{\left(\frac{0.9}{1\times10^{-4}} + \frac{1.2}{3.2\times10^{-2}} + \frac{1.8}{4.1\times10^{-5}}\right)} = 7.367\times10^{-5}\ \text{cm/s}$$



$$\frac{(k_H)_{eq}}{(k_v)_{eq}} = \frac{9.888\times10^{-3}}{7.367\times10^{-5}} = 134.2$$

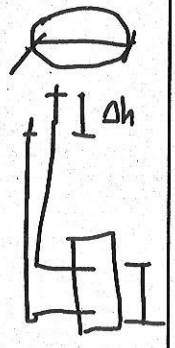


จากตัวอย่างนี้จะเห็นได้ว่าน้ำจะไหลขนานไปกับชั้นดินได้ดีกว่าไหลตั้งฉากกับชั้นดิน



ตัวอย่างที่ 2 ในการทดสอบหาสัมประสิทธิการซึมผ่านโดยใช้วิธี Constant-head ได้ข้อมูลการทดสอบและผลการทดสอบดังตาราง จงคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินนี้ที่ 20°C

อุณหภูมิของน้ำ	17 °C
เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่าง	100 mm
ระยะระหว่าง Manometer	150 mm
ความแตกต่างของระดับน้ำใน Manometer	76 mm
ปริมาตรของน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่างในเวลา 2 นาที	541 ml



จากสมการ $$k = \frac{QL}{hAt}$$

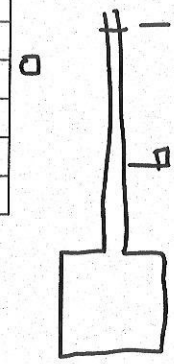
แทนค่าในสมการ $$k_{17^\circ C} = \frac{(541\times10^3)(150)}{(76)(0.25\pi100^2)(2\times60)} = 1.13\text{mm/s}$$

ปรับแก้ค่าเนื่องจากผลของอุณหภูมิต่อความหนืดของน้ำ $$\frac{\eta_{17^\circ C}}{\eta_{20^\circ C}} = 1.09$$

$$k_{20} = 1.13\times1.09 = 1.23\text{mm/s}$$

ตัวอย่างที่ 2 ในการทดสอบหาสัมประสิทธิการซึมผ่านโดยใช้วิธี variable head ได้ข้อมูลการทดสอบและผลการทดสอบดังตาราง จงคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินนี้ที่ 20°C

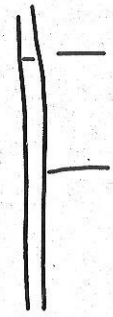
อุณหภูมิของน้ำ	30 °C
เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่าง	100 mm
ความยาวของตัวอย่าง	150 mm
เส้นผ่าศูนย์กลางของ Stand pipe	9 mm
ระดับน้ำใน Stand pipe ที่เวลา t_0	1200 mm
ระดับน้ำใน Stand pipe ที่เวลา t	900 mm
เวลาจาก t_0 ถึง t	177 s



$$k_{30^\circ C} = 2.303\frac{aL}{A(t_1 - t_0)}\log\left(\frac{h_0}{h_1}\right)$$

$$k_{30^\circ C} = 2.303\frac{(0.25\pi 9^2)(150)}{(0.25\pi 100^2)(177)}\log\left(\frac{1200}{900}\right)$$

$$k_{30^\circ C} = 1.975\times 10^{-3}\,\text{mm/s}$$

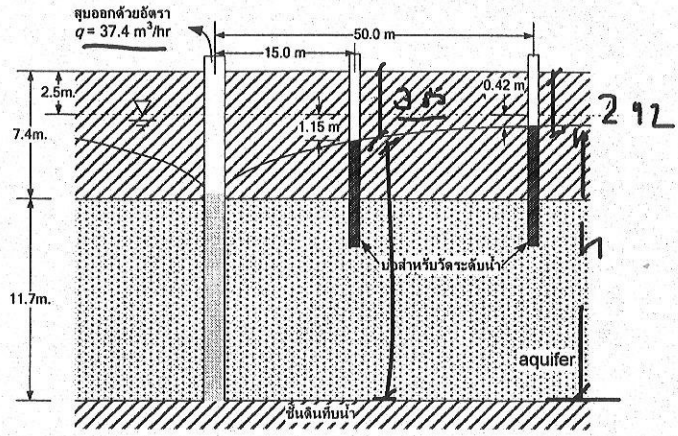


ปรับแก้ค่า k เนื่องจากความหนืดของน้ำ

$$\frac{\eta_{30^\circ C}}{\eta_{20^\circ C}} = 2.42 - 0.475\ln(30) = 0.804$$

$$\eta_{30^\circ C} = (0.804)(1.975\times 10^{-3}) = 1.59\times 10^{-3}\,\text{mm/s}$$

ตัวอย่าง ในการทดสอบหาค่า coeff. of permeability โดยใช้วิธี Pumping test ของชั้นทรายแน่นที่ถูขนาบไว้ด้วยชั้นทึบน้ำ โดยมีอัตราการไหล 37.4 m^3/hr และได้มีการติดตั้ง Pumping well และ Observation well ไว้ตรงตำแหน่งดังรูป จงคำนวณหาค่า k



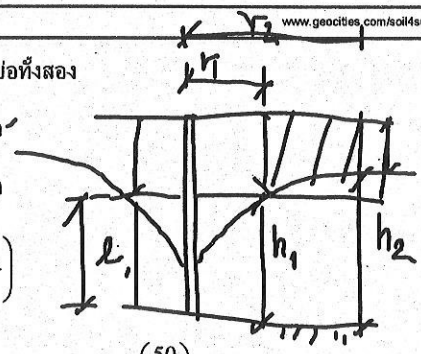
ระยะห่างของบ่อวัดระดับน้ำและระดับน้ำในบ่อทั้งสอง

r_1 = 15 m

h_1 = (11.7+7.4)-(2.5+1.15) = 15.45 m

r_2 = 50 m

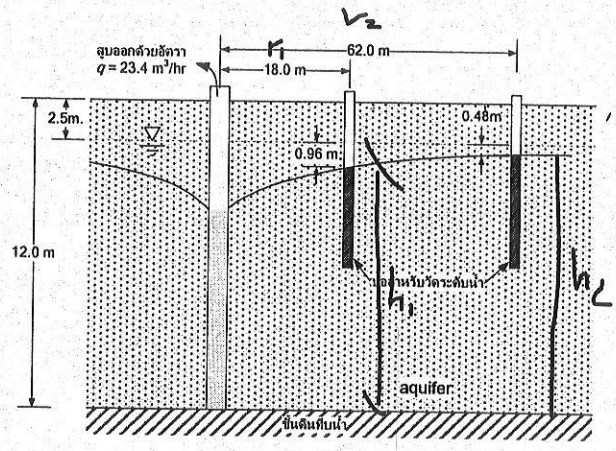
h_2 = (11.7+7.4)-(2.5+0.42) = 16.48 m



$$k = \frac{q}{(2\pi l)(h_2 - h_1)} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

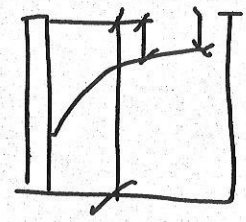
$$k = \frac{(37.4)}{(3600)(2\pi \times 11.7)(16.18 - 15.45)} \ln\left(\frac{50}{15}\right) = 2.33 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

ตัวอย่าง การทดสอบหาค่า coeff. of permeability โดยใช้วิธี Pumping test ของชั้นดินทรายโดยทำการเจาะ Pumping well และ Observation well ดังรูปถ้าอัตราการไหลเป็น 23.4 m³/hr จงคำนวณสัมประสิทธิการไหลซึมผ่าน



คำนวณระดับน้ำโดยใช้ก้นบ่อเป็นจุดอ้างอิง

r_1 = 18 m
h_1 = 12-(2.5+0.48) = 9.02 m
r_2 = 62 m
h_2 = 12-(2.5+0.96) = 8.54 m



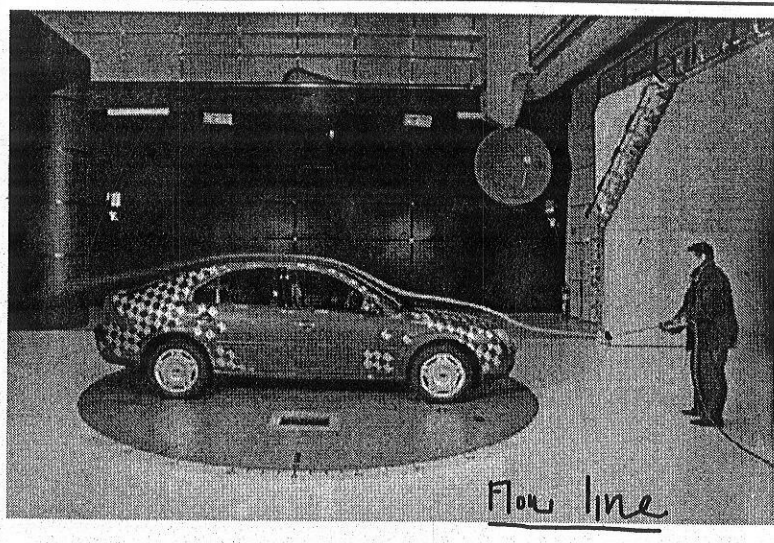
$$k = \frac{q}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

$$k = \frac{23.4}{(3600)\pi(8.54^2 - 9.02^2)} \ln\left(\frac{62}{18}\right) = 3.04 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

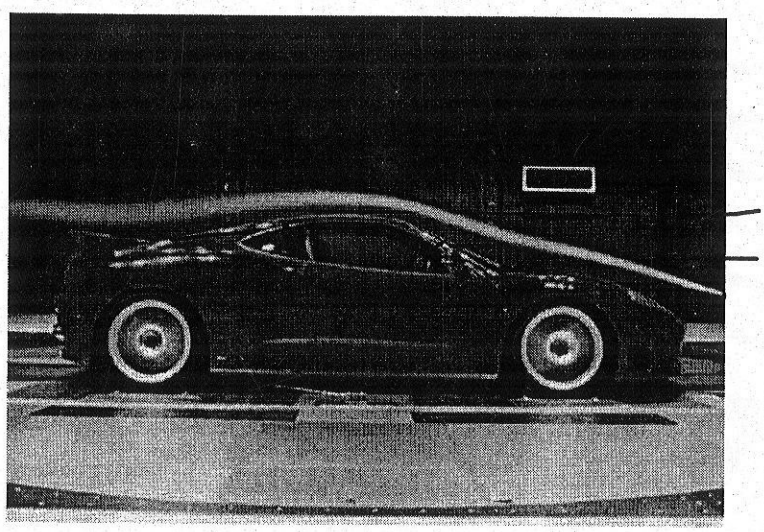
ทฤษฎีการไหลของของไหล (Seepage theory)

ตัวอย่างการใช้อุโมงค์ลม (Wind tunnel) ในการ
ทดสอบเพื่อหาแนวการไหล (Flow line) ของของไหล

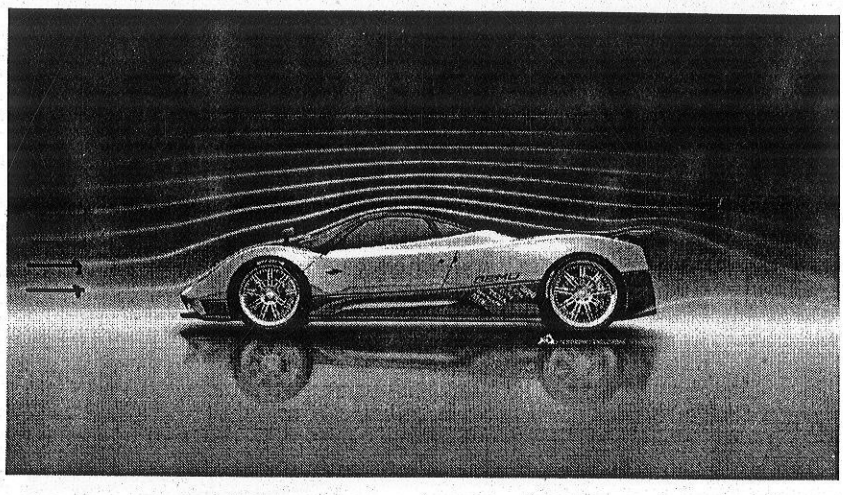
! อากาศก็เป็นของไหลเหมือนกับน้ำ



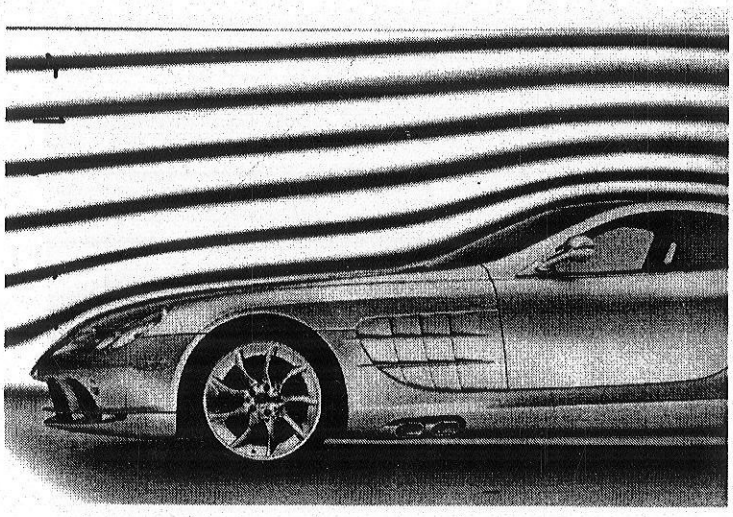
www.cardesignonline.com
Mondeo-wind-tunnel



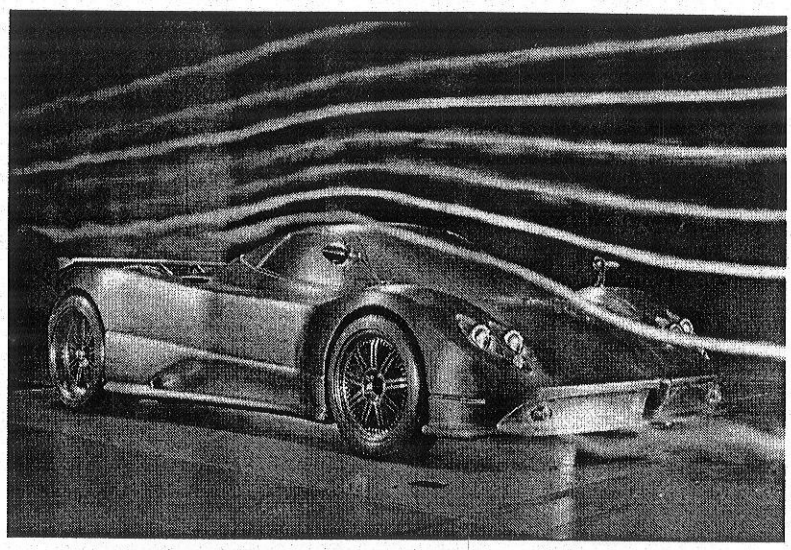
www.cecwheels.com
Ferrari



www.seriouswheels.com



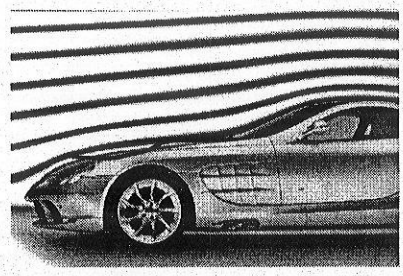
www.autodrome-cannes.com
Mercedes_SLR

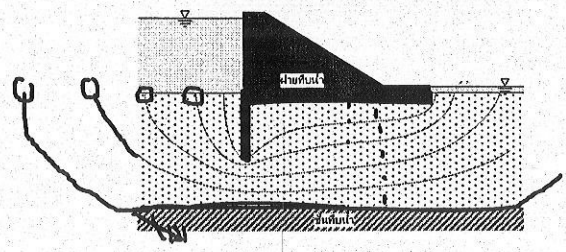


www.seriouswheels.com

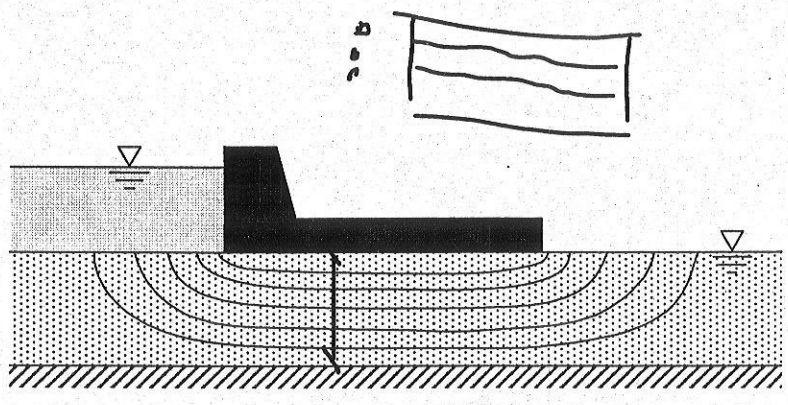
ตัวอย่างเส้นแสดงการไหลของน้ำผ่านดิน

! อากาศก็เป็นของไหลเหมือนกับน้ำ

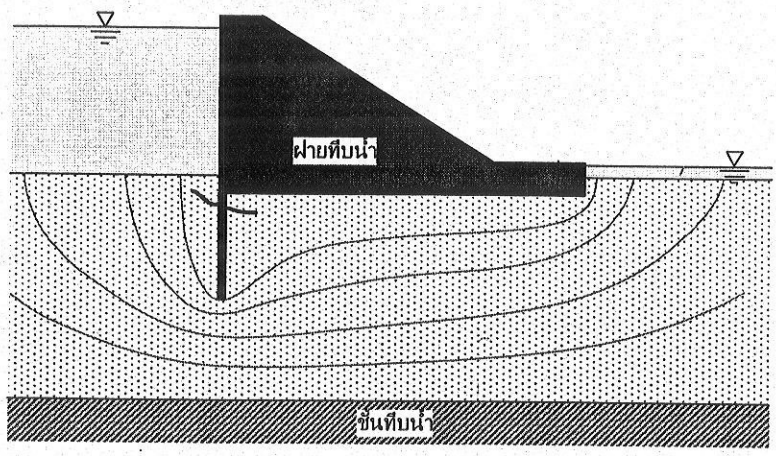




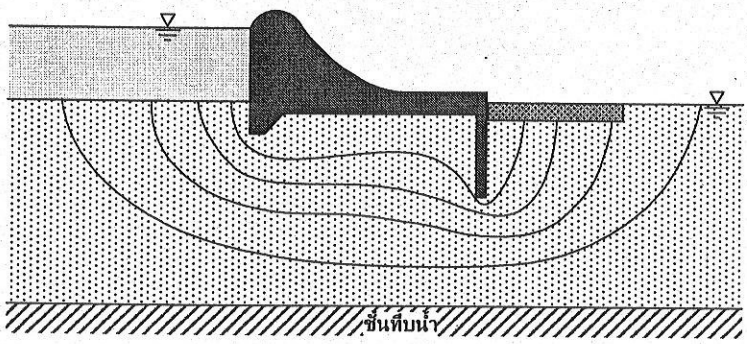
เปรียบเทียบเส้นแนวการไหลของอากาศผ่านรถยนต์กับเส้นแนวการไหลของน้ำผ่านดิน



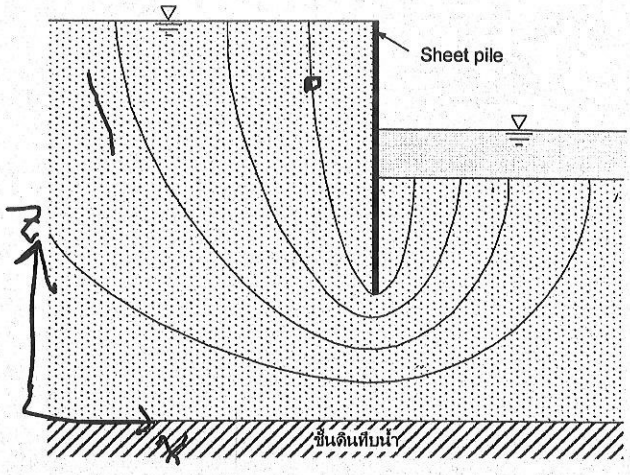
เส้นแนวการไหลของน้ำผ่านดินใต้ฝาย



เส้นแนวการไหลของน้ำผ่านดินใต้ฝาย เมื่อมีกำแพงทึบน้ำขวางอยู่ที่ต้นน้ำ



เส้นแนวการไหลของน้ำผ่านดินใต้ฝาย เมื่อมีกำแพงทึบน้ำขวางอยู่ที่ด้านท้ายน้ำ

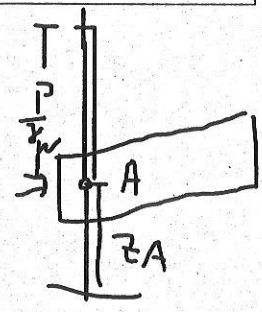


เส้นแนวการไหลของน้ำเมื่อมีกำแพงทึบน้ำขวางอยู่

อธิบายการไหลในระนาบสองมิติโดยใช้สมการคณิตศาสตร์

อธิบายได้ด้วยสมการลาปลาซ

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



H = Total head
k_x = สัมประสิทธิ์การซึมผ่านในแนวแกน x
k_z = สัมประสิทธิ์การซึมผ่านในแนวแกน z

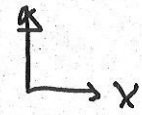
สมการของลาปลาซอธิบายการไหลของน้ำว่า ถ้ามีการเปลี่ยนแปลง hydraulic gradient ในทิศทางใด hydraulic gradient ในทิศทางอื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อปรับระบบให้เข้าสู่สมดุลย์

สมการของลาปลาซตั้งอยู่บนสมมุติฐานคือ

- ดินมีเนื้อสม่ำเสมอ และอิ่มตัว (homogeneous and saturated)
- ดินและน้ำไม่มีการเปลี่ยนปริมาตรเมื่อมีแรงดันมากระทำ (incompressible)
- ไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรในระหว่างการไหล
- การไหลต้องเป็นไปตามกฎของ Darcy

ในกรณีที่ $k_x = k_z$ สมการลาปลาซจะเขียนได้ใหม่เป็น

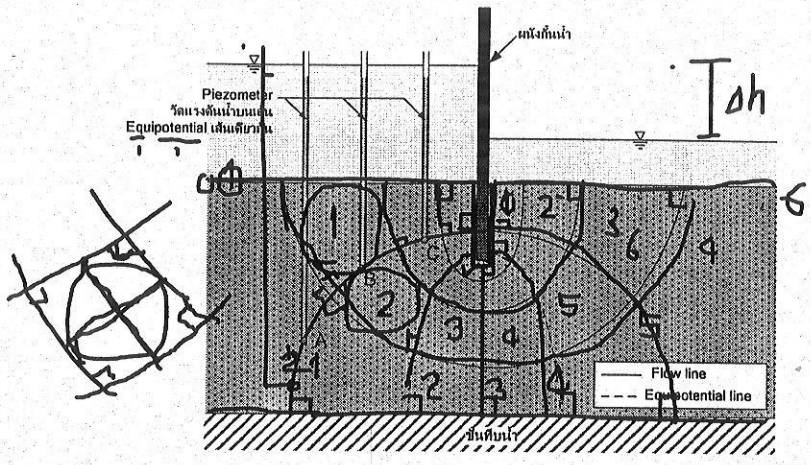
$$\boxed{\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0}$$



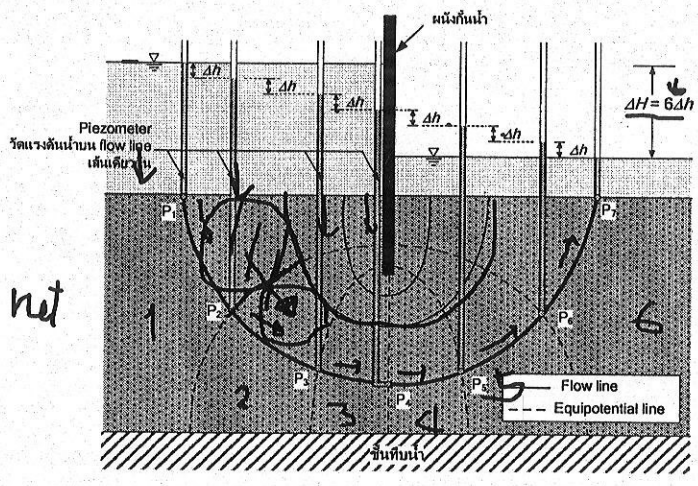
ต้องการจะทราบ Total head ณ. จุดใดๆ $H = f(x,z)$

การแก้สมการนี้จะต้องรู้ขอบเขตของปัญหา ซึ่งในกรณีที่ขอบเขตของปัญหาไม่สามารถอธิบายด้วยคณิตศาสตร์ง่ายๆได้ จึงมักจะนิยมใช้วิธีอื่นแทนการแก้สมการตรงๆ ซึ่งวิธีเหล่านั้นได้แก่

- ✓ วิธีกราฟฟิค เป็นการเขียน flow net
- ✓ วิธีเชิงตัวเลข เช่น Finite element หรือ Finite difference → Advanu



เส้น equipotential เป็นเส้นซึ่งแสดงว่ามี Total head เท่ากัน ถ้าเรานำ piezometer ไปวางไว้บนเส้น equipotential เส้นเดียวกันระดับน้ำใน piezometer จะเท่ากัน



$N_d = 6$

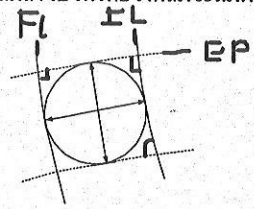
$N_f =$

Flow net

เส้นการไหล (flow line) เป็นเส้นแสดงถึงทิศทางการไหลของน้ำ และจะตั้งฉากกับเส้น equipotential

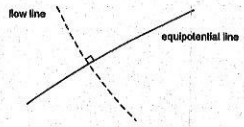
ในการเขียน flow net จะมีกฎเกณฑ์ในการเขียนดังนี้

- พื้นที่ซึ่งล้อมรอบด้วย flow line และ equipotential line จะต้องมีทุกด้านเท่ากัน ซึ่งเราสามารถที่จะเขียนวงกลมลงไปได้โดยวงกลมจะสัมผัสกับเส้นพอดี

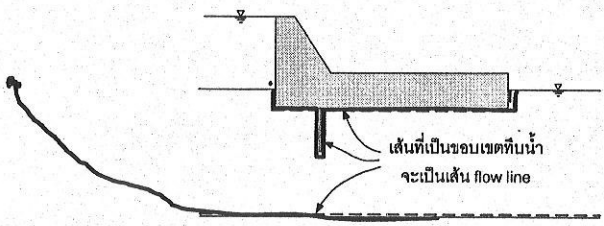


$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0$$

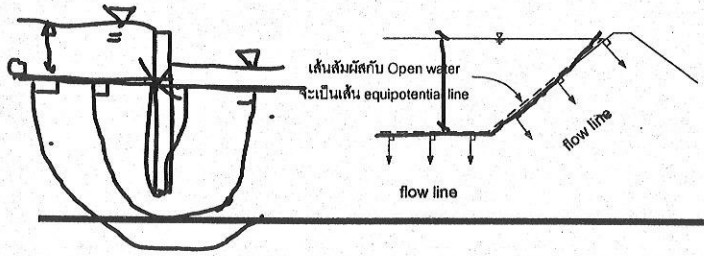
- เส้น Equipotential line และเส้น Flow line จะต้องตัดกันเป็นมุมฉาก



- เนื่องจากขอบเขตที่ทึบน้ำจะไม่มีการไหลของน้ำผ่าน ดังนั้นเส้นขอบเขตทึบน้ำจะเป็นเส้นการไหล 1 เส้น

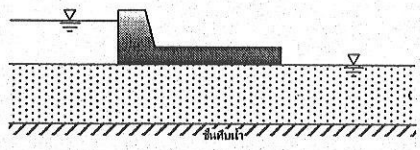


- กรณีที่ขอบเขตของชั้นดินที่น้ำซึมผ่านได้สัมผัสกับ open water จะเป็นเส้น Equipotential line

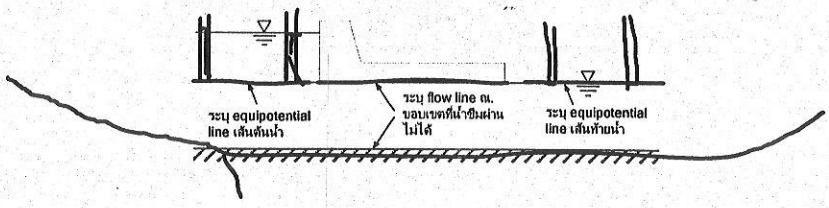


ขั้นตอนการเขียน flow net

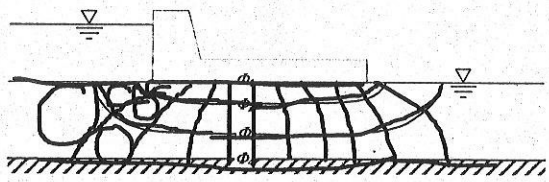
1. เขียนรูปตัดของปัญหาโดยใช้เสกลที่เหมาะสม ซึ่งจะต้องระบุขอบเขตของชั้นดินและโครงสร้างต่างๆ ลงในรูปด้วย



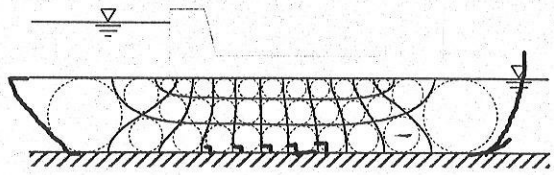
2. ระบุเส้นขอบเขตทึบน้ำ โดยขอบเขตทึบน้ำจะเป็น flow line 1 เส้น เนื่องจากน้ำจะไม่สามารถไหลผ่านเส้นขอบเขตทึบน้ำนี้ได้ จากนั้นระบุ Equipotential line ซึ่งเป็นเส้นที่เราทราบว่ามี Total head เท่ากัน นั่นคือเส้นที่ชั้นดินสัมผัสกับน้ำนั่นเอง



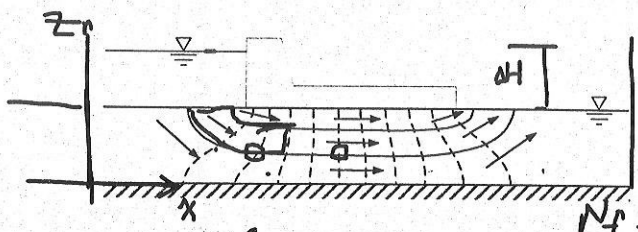
3. เขียนเส้นร่างของ flow line



4. ลากเส้น Equipotential โดยที่ตารางที่เกิดจากการตัดกันของเส้น Equipotential กับ flow line จะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งจัตุรัส (curvilinear square)



5. จากนั้นปรับแก้จนกระทั่งทุกๆ เส้นตัดกันเป็นตารางจัตุรัสทั้งหมด



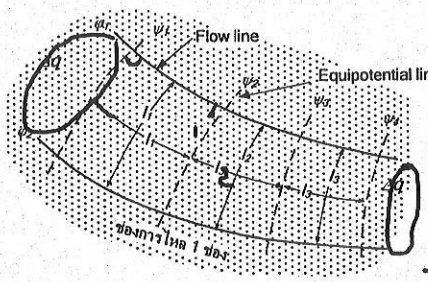
$N_f = 3$

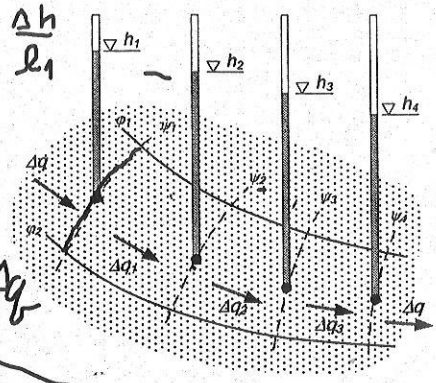
$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0 \qquad N_d = 11$$

$$\Delta h = \frac{\Delta H}{11}$$

การคำนวณปริมาณการไหลของน้ำผ่านดิน

$kL = \frac{\Delta h}{l_1}$

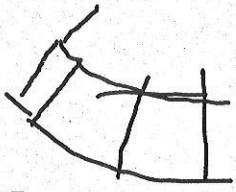




ช่องการไหล 1 ช่อง
ความลึกตั้งฉากกับระนาบ = 1 หน่วย

Total head ณ. จุดกึ่งกลาง
ของช่องการไหล

อัตราการไหลของน้ำผ่าน Flow channel 1 ช่องคือ



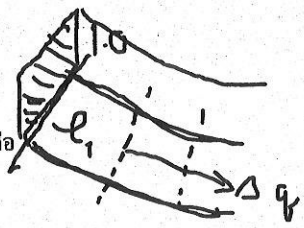
$$\Delta q = \Delta q_1 = \Delta q_2 = \Delta q_3 = \ldots$$

จาก Darcy's law อัตราการไหลของน้ำคือ *kiA* จะได้

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

จากสมการแสดงว่า การลดระดับของ Piezometric level ที่เส้น equipotential line ที่ติดกันจะเท่ากัน ซึ่งเราเรียกว่า potential drop

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



การไหลของน้ำผ่านดินต่อ 1 ช่องการไหล (flow channel) คือ

$$\Delta q = A(ki)$$

$$\Delta q = (1.0)(k\frac{\Delta H}{N_d})$$

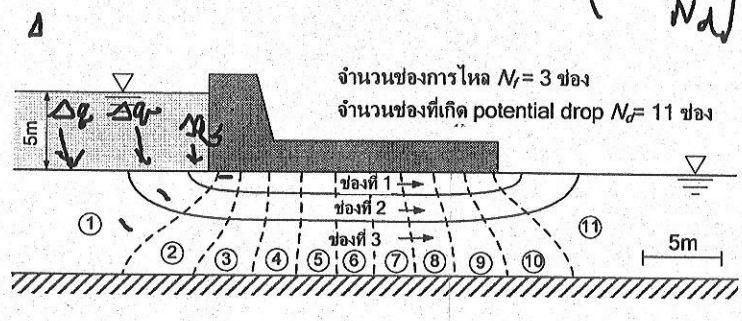
ดังนั้นการไหลของน้ำผ่านดินต่อ N_f ช่องการไหลจะเท่ากับ

$$q = N_f \Delta q$$

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

$N_f \cdot \Delta q$

$q = \left(k\frac{\Delta H}{N_d}\right) N_f$



แรงดันน้ำในดินและแรงดันน้ำใต้ฐานรากที่น้ำซึมผ่าน

เราสามารถใช้ flow net ในการคำนวณหา uplift pressure ใต้โครงสร้างที่น้ำไหลผ่านได้ โดยการคำนวณ Pressure distribution ซึ่งจะคำนวณได้จากระดับ Piezometric level ที่จุดนั้น ๆ

$$H_t = z + \frac{p}{\gamma_w}$$

$H = \Delta H$

Total head บนเส้น equipotential line ใด ๆ Φ_i คำนวณได้จาก

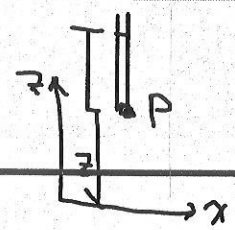
H

$$(H_t)_{\Phi_i} = (H_t)_{\Phi_0} - \frac{H}{N_d} i$$

สุดท้ายเราคำนวณ pressure head ได้จาก

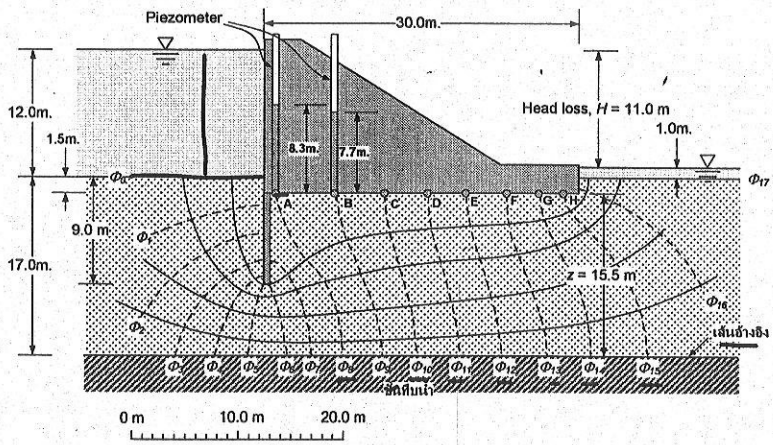
$$p_{\Phi_i} = \left((H_t)_{\Phi_i} - z\right)\gamma_w$$

$H_t = z + \frac{p}{\gamma_w}$



ตัวอย่างการคำนวณอัตราการไหลของน้ำจาก flow net

ตัวอย่าง จากโครงสร้างฝายดังรูปจงคำนวณ
a) อัตราการไหลของน้ำผ่านดินใต้ฝาย
b) แรงดันของน้ำที่กระทำต่อใต้ฝาย
กำหนดให้: Coefficient of permeability, k= 5.2×10^{-5} m/s



จาก flow net ที่กำหนดให้

จำนวนช่องทางการไหล N_f= 4.4 ช่อง

จำนวนช่อง equipotential drop N_d= 17 ช่อง

จากสมการของการไหล ต่อความกว้าง 1หน่วย

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

$$q = (5.2\times10^{-5})(11.0)\left(\frac{4.4}{17}\right) = 1.48\times10^{-4}\ \text{m}^3/\text{s/ความกว้าง 1m}$$

คำนวณแรงดันน้ำใต้ฐานรากของฝาย

เราจะคำนวณแรงดันโดยใช้สมการ

$$p_{\Phi_i} = \left((H_t)_{\Phi_i} - z\right)\gamma_w$$

เส้น equipotential ที่บรรจบกับใต้ฝาย ณ.จุด A ถึง H ได้แก่เส้น Φ_8 ถึง Φ_{15} ตามลำดับ ซึ่งเราจะคำนวณแรงดันน้ำ ณ. จุดเหล่านี้

คำนวณแรงดัน ณ. จุด A head เทียบจากระดับอ้างอิง

$$z_A = 17.5 - 1.5 = 15.5\text{m}$$

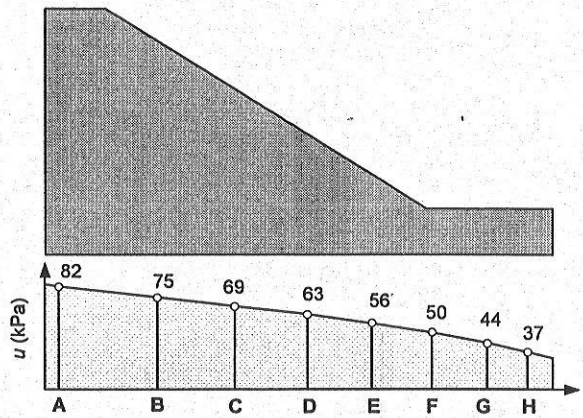
$$(H_t)_{\Phi 8} = \left(17 + 12 - \frac{11}{17} \times 8\right) = 23.82\text{m}$$

$$p_A = (23.82 - 15.5)(9.81) = 81.6\text{kN/m}^2$$

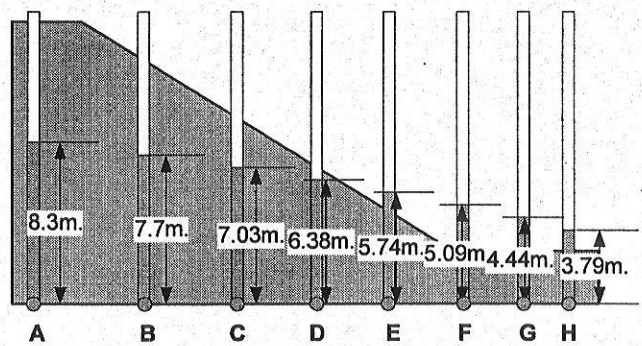
เพื่อความสะดวกและง่ายต่อการตรวจสอบ ควรใช้ตารางในการคำนวณ

จุด	equi. line no.	Total head (m)	Elevation head (m)	Pressure head (m)	u (kPa)
A	Φ_8	23.82	15.5	8.32	82
B	Φ_9	23.18	15.5	7.68	75
C	Φ_{10}	22.53	15.5	7.03	69
D	Φ_{11}	21.88	15.5	6.38	63
E	Φ_{12}	21.24	15.5	5.74	56
F	Φ_{13}	20.59	15.5	5.09	50
G	Φ_{14}	19.94	15.5	4.44	44
H	Φ_{15}	19.29	15.5	3.79	37

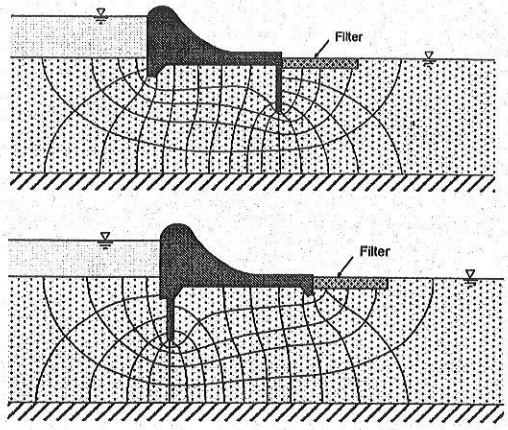
ซึ่งเมื่อนำมาพล็อทเป็นแรงดันที่กระทำใต้ฐานรากของฝายได้ดังรูป



และสมมุติว่าเราเอา piezometer ไปวาง ณ. จุดที่เส้น equipotential ชนกับฐานฝายจะได้ดังรูป

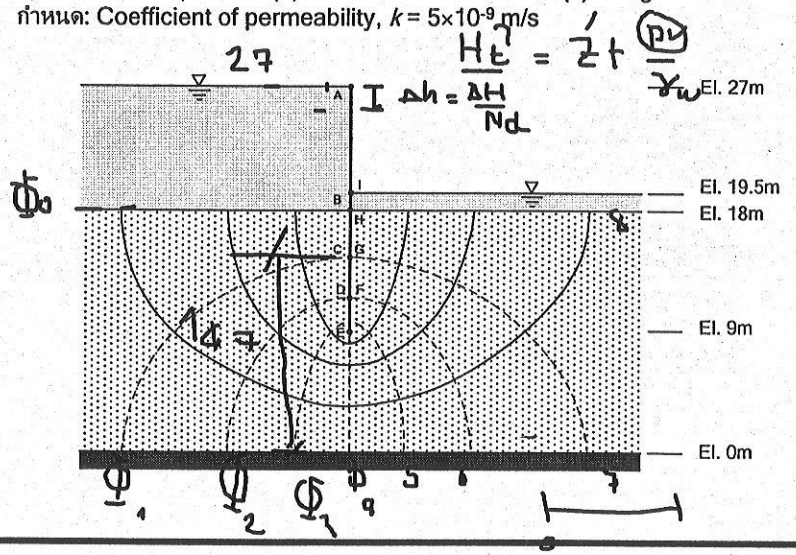


จากการคำนวณทำให้เราทราบว่าเมื่อน้ำไหลผ่านช่องทางเดินยาวๆจะสูญเสียพลังงานไปในการไหล จากความรู้นี้เรานำไปประยุกต์ในงานฝายโดยการเพิ่มระยะทางเดินของน้ำ



ถ้าวาง cut off wall ไว้ด้านเหนือน้ำจะทำให้ระยะทางที่น้ำเดินทางไกลขึ้น และแรงดันน้ำที่กระทำต่อใต้ฝายลดลงด้วย

ตัวอย่าง Sheet pile ใช้เป็นโครงสร้างกันดินมีระดับน้ำดังแสดงจง
a) แรงดันน้ำ ณ. จุด A ถึง I (b) อัตราการไหลของน้ำผ่านดิน (c) exit gradient
กำหนด: Coefficient of permeability, $k = 5\times10^{-9}$ m/s



head loss ของการไหล

$$\Delta h = 27 - 19.5 = 7.5\text{m}$$

จากสมการ

$$p_{\Phi_i} = \left((H_i)_{\Phi_i} - z\right)\gamma_w$$

ณ. จุด A มี total head=27m และ elevation head=27m

$$p_A = (27 - 27)\gamma_w = 0$$

ณ. จุด B มี Total head=27m และ elevation head = 18m

$$p_B = (27 - 18) \times 9.81 = 88.3\text{kN/m}^2$$

ณ. จุด C มี Total head=27-(1/8)Δh และ elevation head = 14.7m

$$p_C = \left(\left(27 - \frac{1}{8}7.5\right) - 14.7\right) \times 9.81 = 111.5\text{kN/m}^2$$

ณ. จุด D มี Total head=27-(2/8)Δh และ elevation head = 11.7m

$$p_D = \left(\left(27 - \frac{2}{8} \times 7.5\right) - 11.7\right) \times 9.81 = 131.7\text{kN/m}^2$$

ณ. จุด E มี Total head=27-(4/8)Δh และ elevation head = 9.0m

$$p_E = \left(\left(27 - \frac{4}{8} \times 7.5\right) - 9.0\right) \times 9.81 = 139.8\text{kN/m}^2$$

ณ. จุด F มี Total head=27-(6/8)Δh และ elevation head = 11.7m

$$p_F = \left(\left(27 - \frac{6}{8} \times 7.5\right) - 11.7\right) \times 9.81 = 94.9\text{kN/m}^2$$

ณ. จุด G มี Total head=27-(7/8)Δh และ elevation head = 14.7m

$$p_G = \left(\left(27 - \frac{7}{8} \times 7.5\right) - 14.7\right) \times 9.81 = 56.3\text{kN/m}^2$$

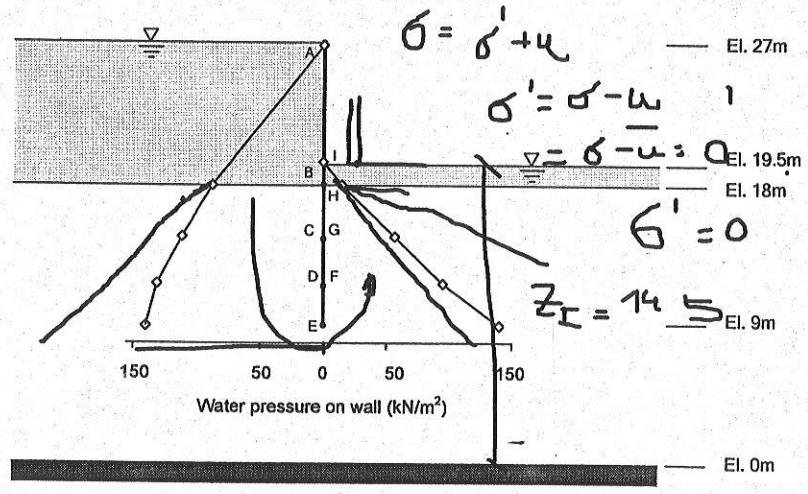
ณ. จุด H มี Total head=27-(8/8)Δh และ elevation head = 18m

$$p_H = \left(\left(27 - \frac{8}{8} \times 7.5\right) - 18\right) \times 9.81 = 14.7\text{kN/m}^2$$

ณ. จุด I มี Total head=19.5m และ elevation head=19.5m

$$p_I = (19.5 - 19.5) \times 9.81 = 0\text{kN/m}^2$$

เมื่อนำแรงดันน้ำที่กระทำต่อผนังมาพล็อทกับค่าระดับจะได้ pore pressure profile ดังรูป



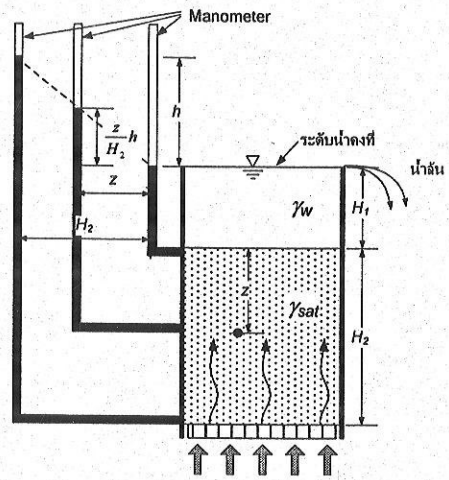
แรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลซึมผ่านของน้ำ
(Seepage force)

ทรายดูด (quicksand), ทรายเดือด (boiling)

จากความรู้เรื่องหน่วยแรงประสิทธิผล เราจะนำมาใช้คำนวณแรงที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของดิน

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

พิจารณาการไหลของน้ำผ่านดินในทิศตรงข้ามกับแรงโน้มถ่วงของโลก



Total stress ที่ระดับ z จากผิวดิน

$$(\sigma_t)_z = \gamma_w H_1 + \gamma_{sat} z$$

Pore pressure ที่ระดับ z จากผิวดิน

$$u_z = (\gamma_w H_1 + \gamma_w z) + \left(\gamma_w \frac{h}{H_2} z\right)$$

Effective stress ที่ระดับ z จากผิวดิน

$$\sigma'_z = (\gamma_w H_1 - \gamma_{sat} z) - \gamma_w H_1 - \gamma_w z - \gamma_w \frac{h}{H_2} z$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\sigma'_z = (\gamma_{sat} - \gamma_w) z - \gamma_w \frac{h}{H_2} z$$

ซึ่งค่า h/H_2 ก็คือค่า Hydraulic gradient นั่นเอง

$$\sigma'_z = (\gamma_{sat} - \gamma_w) z - \gamma_w i z$$

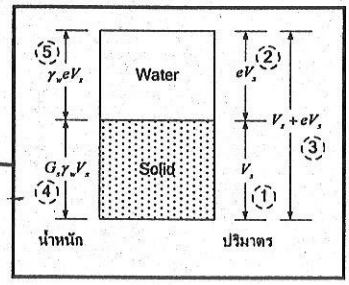
จากสมการหากค่า hydraulic gradient เพิ่มขึ้นจนกระทั่ง effective stress = 0

- ดินจะมีสถานะเป็นของไหล ซึ่งสถานะนี้เรียกว่า Liquefaction หรือมีชื่อเรียกอื่นๆอีก เช่น boiling (ทรายเดือด), quicksand (ทรายดูด)

ถ้า effective stress ของดินเป็นศูนย์ (σ'_z=0) จะได้ค่า i_c ซึ่งเป็น critical hydraulic gradient

$$(\gamma_{sat} - \gamma_w) z - \gamma_w i_c z = 0$$

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \boxed{\frac{G_s - 1}{1 + e}}$$



แรงที่เกิดจากการไหลซึมผ่านต่อหน่วยปริมาตร (Seepage force per unit volume)

1. แรงประสิทธิผลซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจาก effective stress, $P' = \sigma' A$

$$P_1' = \gamma' z A$$

2. แรงประสิทธิผลซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของน้ำในทิศทางตรงข้ามทิศทางแรงโน้มถ่วง

$$P_2' = (\gamma' z - i\gamma_w z)A$$

3. แรงประสิทธิผลที่ลดลงเนื่องจากการไหลในทิศทางขึ้นของน้ำ หรือเรียกอีกอย่างว่า แรงเนื่องจากการไหลของน้ำคือ

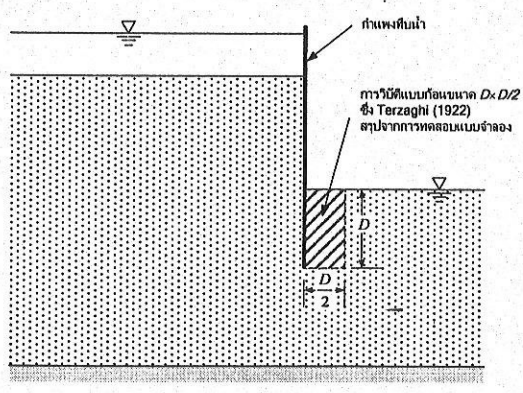
$$P_1' - P_2' = i\gamma_w z A$$

4. คิดเป็นแรงที่เกิดจากการไหลต่อปริมาตรได้เท่ากับ

$$\frac{P_1' - P_2'}{\text{ปริมาตร}, A \times z} = \frac{i\gamma_w z A}{zA} = i\gamma_w$$

ดินบวมซึ่งเกิดจากการไหลของน้ำผ่านกำแพงกั้นน้ำ

- แรงเนื่องจากการไหลซึมผ่านในทิศตรงข้ามกับแรงโน้มถ่วงอาจก่อให้เกิดการวิบัติของดินทางด้านท้ายน้ำ ซึ่ง Terzaghi (1922) สรุปจากการทดสอบแบบจำลองว่าขนาดของการวิบัติจะเท่ากับ $D \times D/2$ ดังรูป



Factor of safety ต่อการบวมของดินเนื่องจากน้ำไหลผ่านดินคือ

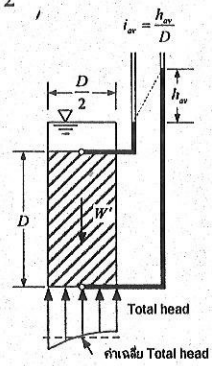
$$FS = \frac{W'}{U}$$

W' = น้ำหนักจมน้ของดินขน าด $D \times D/2$ = $D(D/2)(\gamma_{sat} - \gamma_w) = \frac{1}{2} D^2 \gamma'$

U = แรงดันขึ้นของน้ำต่อดินขนาด $D \times D/2$

= ปริมาตรของดิน × แรงเนื่องจากการไหลต่อปริมาตร

$$= \left(D \times \frac{D}{2}\right)(i_{av}\gamma_w) = \frac{1}{2} D^2 i_{av} \gamma_w$$



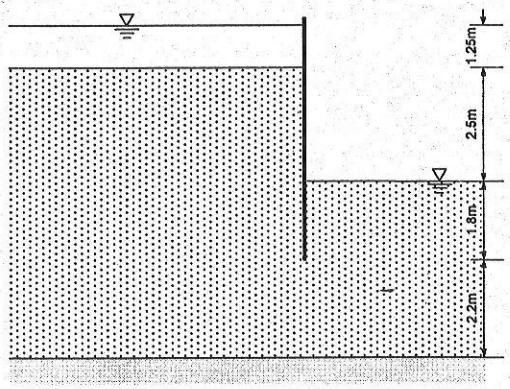
i_{av} = ค่าเฉลี่ยของ hydraulic gradient ใต้ก้อนดินขนาด $(D \times D/2)$

$$FS = \frac{\gamma'}{i_{av}\gamma_w}$$

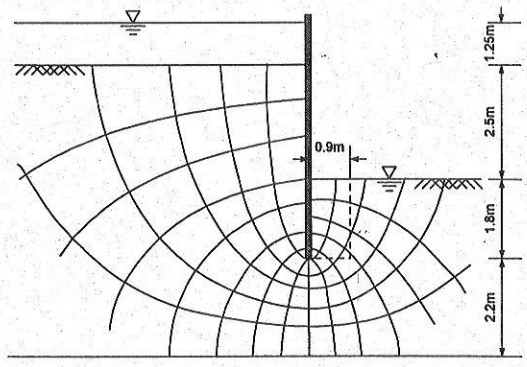
ตัวอย่างการคำนวณ เรื่องการไหลซึมผ่านของน้ำและเสถียรภาพของบ่อขุดดิน

โครงการหนึ่งใช้กำแพงทึบน้ำเพื่อขุดดินดังรูป จงคำนวณปริมาณการไหลซึมผ่านของน้ำในหน่วย m^3/min ต่อกำแพงยาว 1เมตร และตรวจสอบว่าพื้นบ่อขุดมีโอกาสที่จะเกิดการบวมเนื่องจากการไหลซึมผ่านของน้ำหรือไม่

กำหนด สัมประสิทธิการไหลซึมผ่านของดิน = 18×10^{-3} mm/s หน่วยน้ำหนักรวมของดิน γ_{sat} = 18.5 kN/m^3



1. เขียน flow net และขอบเขตของมวลดินซึ่งมีโอกาสเกิดการบวมตัว
2. Head loss ทั้งหมด = 1.25+2.5=3.75m
3. จำนวนช่องของการไหล N_f= 6 ช่อง, จำนวนช่อง equipotential ที่ลดลง N_d=14 ช่อง



ตอบคำถามแรก

ปริมาณการไหลซึมผ่านคำนวณได้จากสมการ

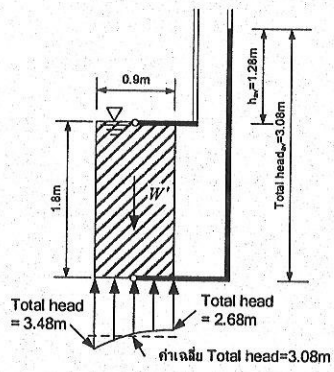
$$q = kH\frac{N_f}{N_d}$$

แทนค่าสมการอย่างตรงไปตรงมา

$$q = \left(18\times10^{-6}\,\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)(3.75)\left(\frac{6}{14}\right) = 2.89\times10^{-5}\,\text{m}^3/\text{s}$$

$$q = \left(2.89\times10^{-5}\right)(60) = 1.74\times10^{-3}\,\text{m}^3/\text{min}$$ ต่อความยาว 1m

วิธีตรวจสอบเสถียรภาพมีหลักการว่าน้ำหนักของมวลดินจะต้องมากกว่าแรงเนื่องจากการไหลของน้ำ โดยเราจะใช้สมการ



$$FS = \frac{W'}{U} = \frac{\gamma'}{i_{av}\gamma_w}$$

i_{av} คือ hydraulic gradient ของการไหลผ่านมวลดิน $D \times D/2 = h_{av}/D = 1.205/1.88 = 0.641$

$$FS = \frac{18.5 - 9.81}{0.64 \times 9.81} = 1.38$$

สรุปว่าดินก้นบ่อมีเสถียรภาพ และมีสัดส่วนความปลอดภัย = 1.38

สรุป

ผลกระทบเนื่องจากการไหลของน้ำผ่านดินเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องตระหนักถึงเมื่อเราออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างด้านวิศวกรรม เช่น เขื่อน ฝาย โครงสร้างกั้นน้ำต่างๆ เป็นต้น

ในบทนี้เราได้ศึกษาถึง

- ทฤษฎีการไหลของน้ำผ่านดิน
- การทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนาม
- การไหลผ่านดินหลายๆชั้น
- การไหลในสองมิติซึ่งอธิบายได้โดยสมการของลาปลาซ ซึ่งในระดับปริญญาตรีเราใช้เทคนิคการเขียน flow net ในการแก้ปัญหาการไหล
- จาก flow net เราสามารถคำนวณปริมาณการไหลของน้ำผ่านดิน และคำนวณแรงดันน้ำในดิน ณ. จุดใดๆได้
- สุดท้ายเราได้ศึกษาถึงความไม่เสถียรของโครงสร้างเนื่องจาก hydraulic gradient เกินกว่า critical hydraulic gradient

แบบฝึกหัด

จบเนื้อหาสำหรับ Mid-term

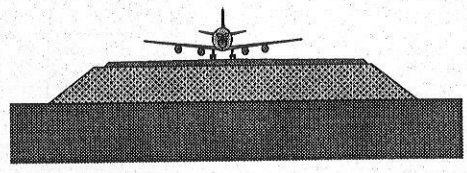
Chapter 6 Consolidation

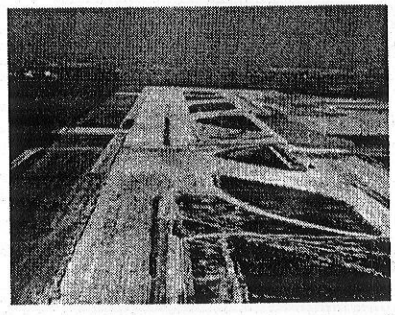
430321 Soil Mechanics

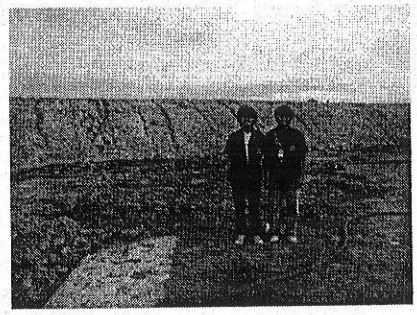
28 ตุลาคม 2548

อ.ดร.พรพจน์ ตันเส็ง

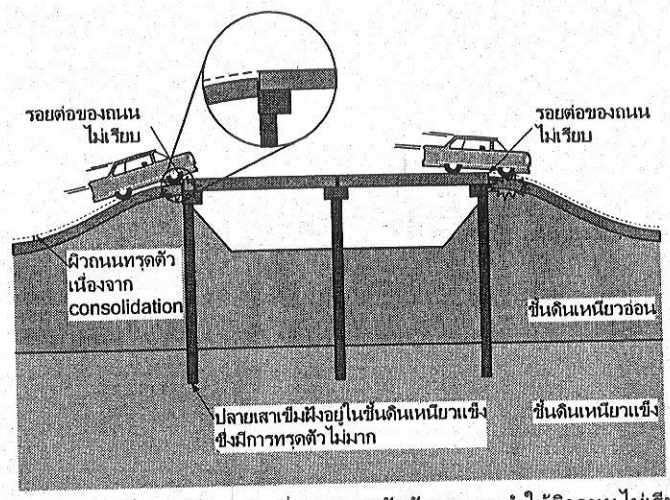
download เอกสารนี้ได้จาก http://www.geocities.com/soil4sut





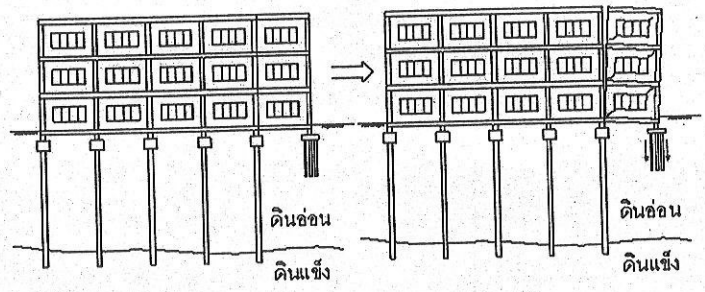


ตัวอย่างโครงการที่ต้องใช้ความรู้ความเข้าใจเรื่อง consolidation (การอัดตัวคายน้ำ)



การทรุดตัวที่ไม่เท่ากันของดินที่คอสะพานกับตัวสะพาน ทำให้ผิวถนนไม่เรียบ

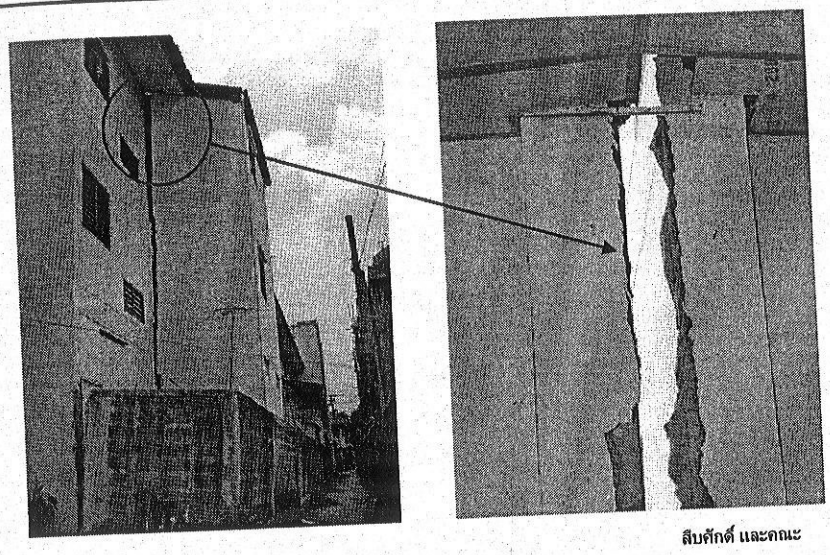
สาเหตุเกิดเนื่องจากเสาเข็มมีปลายวางอยู่บนชั้นดินแข็งจึงมีการทรุดตัวน้อยในขณะที่ดินซึ่งไม่มีเสาเข็มรองรับเกิดการทรุดตัวมาก ดังนั้นคอสะพานจึงมีระดับต่างกันเมื่อรถวิ่งผ่านซึ่งทำให้เกิดการสะเทือนเมื่อรถผ่านรอยต่อ



สืบศักดิ์ และคณะ

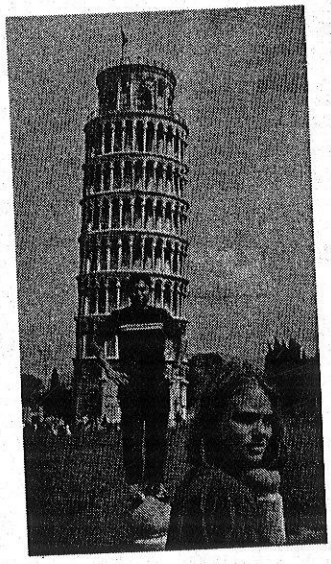
การทรุดตัวที่ไม่เท่ากันของอาคาร ทำให้เกิดรอยแยกระหว่างอาคาร

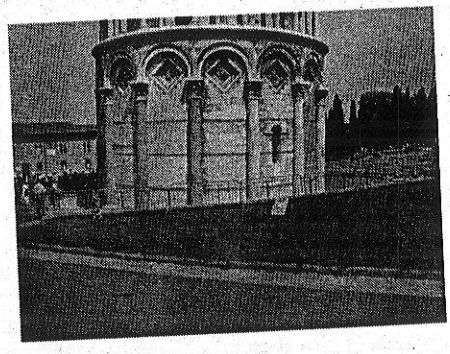
สาเหตุเกิดเนื่องจากการที่ใช้เสาเข็มมีความยาวไม่เท่ากัน โดยอาคารสูงใช้เสาเข็มยาววางอยู่บนชั้นดินแข็งจะทรุดตัวน้อย ส่วนอาคารต่ำใช้เสาเข็มสั้นวางอยู่บนชั้นดินอ่อนจะทรุดตัวมาก เมื่อการทรุดตัวต่างกันจะทำให้อาคารเกิดรอยร้าวแยกจากกัน



สิบศักดิ์ และคณะ

การทรุดตัวที่ไม่เท่ากันของอาคาร ทำให้เกิดรอยแยกระหว่างอาคาร





ปัญหาการทรุดตัวของหอเอน ณ. เมืองปิซ่า อิตาลี

จากเรื่องหน่วยแรงในมวลดิน ดินมีหน่วยแรงเพิ่มขึ้นอาจเนื่องจากฐานรากหรือ จากแรงกระทำใด ๆ จะทำให้ดินมีการเปลี่ยนรูปร่างเกิดขึ้น แต่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของดินจะเกิดเนื่องจาก 3 สาเหตุคือ

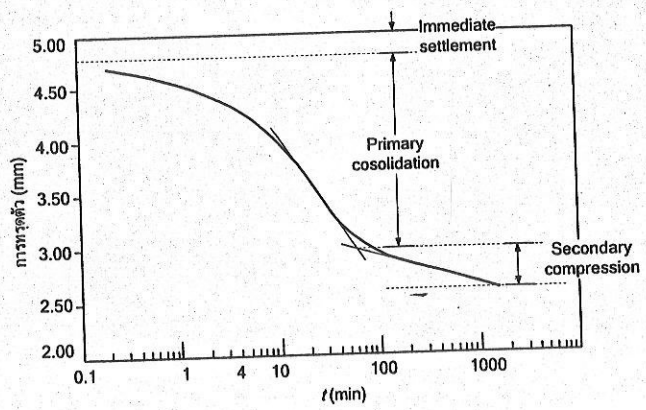
การเปลี่ยนรูปของเม็ดดิน

การที่เม็ดดินจัดเรียงตัวกันใหม่

น้ำในดินถูกบีบออกมาจากช่องว่างในดิน

การทรุดตัวของดินแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ

1. Immediate settlement
2. Primary consolidation settlement - การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำ เนื่องจากน้ำในช่องว่างของดินถูกบีบออกไป
3. Secondary consolidation settlement



เนื่องจากดินทรายมีค่า permeability สูงเมื่อมีแรงดันน้ำเกิดขึ้น น้ำจะระบายออกจากดินอย่างรวดเร็วดังนั้นการทรุดตัวส่วนใหญ่จะเป็นการทรุดตัวทันที (Immediate settlement)

เนื้อหาจะแบ่งเป็นสองส่วนคือ

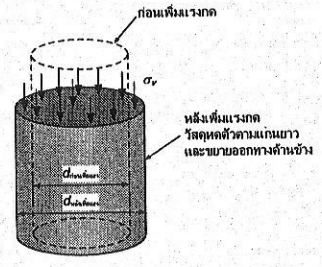
1. การทรุดตัวเนื่องจาก consolidation (การอัดตัวคายน้ำ) ซึ่งจะพิจารณาในกรณีที่สิ้นสุด Primary consolidation (การอัดตัวคายน้ำปฐมภูมิ)

2. การทรุดตัวเนื่องจาก consolidation (การอัดตัวคายน้ำ) ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลา

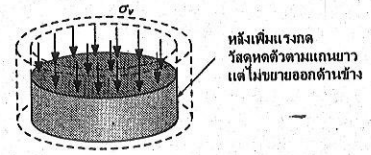
Stress-strain relationship

ชนิดของการทดสอบ

1. Unconfined compression

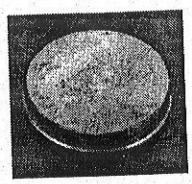


2. Confined compression

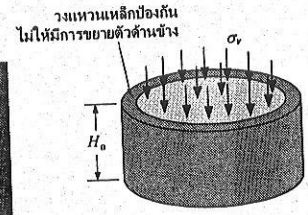


ในบทนี้เราจะกล่าวถึงเรื่อง Confined compression หรือการยุบตัวในทิศทางเดียวเท่านั้น

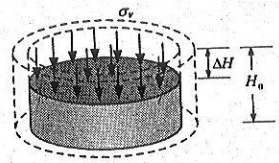
Confined compression คือการกดทดสอบตัวอย่างโดยใช้แรงกระทำในแนวดิ่ง และจะไม่ยอมให้ตัวอย่างขยายตัวออกทางด้านข้าง ดังนั้นจะมีเพียงการยุบตัวในแนวดิ่งเท่านั้น



ตัวอย่างดินบรรจุอยู่ในวงแหวนโลหะ



ก่อนเพิ่มแรงกด

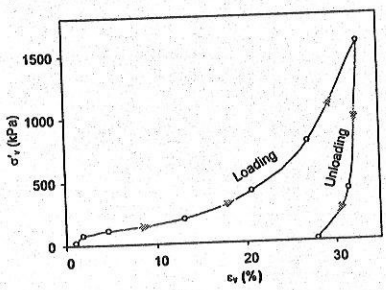


หลังเพิ่มแรงกด

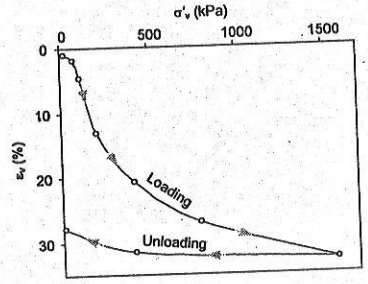
Normal strain คือ $\varepsilon_v = \dfrac{\Delta H}{H_0}$

Normal stress คือ $\sigma'_v = \dfrac{P}{A}$

ซึ่งเมื่อเปลี่ยนแรงกระทำต่อตัวอย่างหลายๆค่า จะได้ผลการทดสอบซึ่งนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stress กับ strain ได้ดังรูป

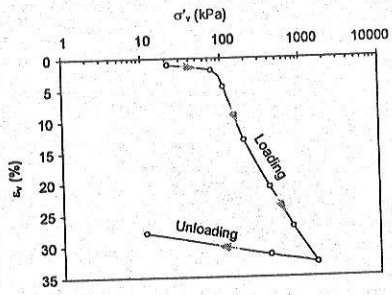


เมื่อให้แกนนอนเป็น ε_v และแกนตั้งเป็น σ'_v

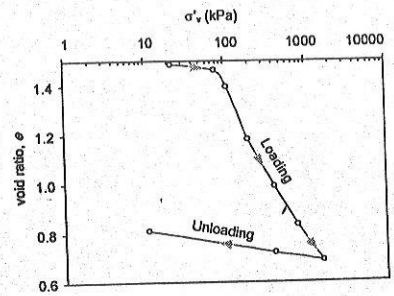


เมื่อหมุนรูปกราฟ 90° ตามเข็มนาฬิกา

จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟเป็นเส้นโค้งจึงได้ใช้แกนของ stress เป็น logarithmic scale เพื่อให้กราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงดังหน้าถัดไป



เมื่อปรับแกนของ stress ให้เป็น logarithmic scale แล้ว

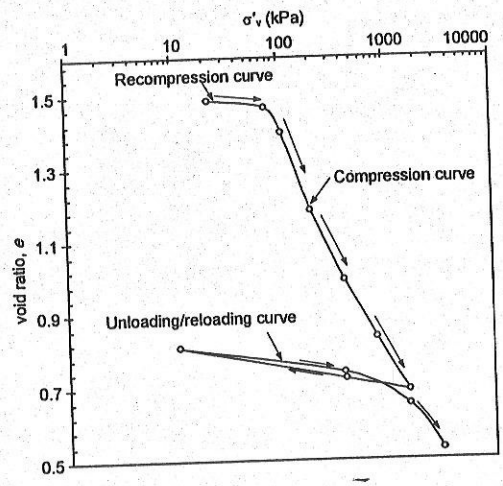


เปลี่ยนแกนจาก strain ให้เป็น void ratio, e

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta e}{1+e_0}$$

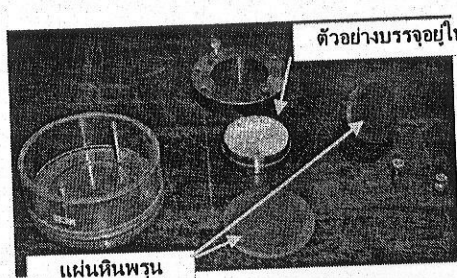
$$\varepsilon_v = \frac{e_0 - e}{1+e_0}$$

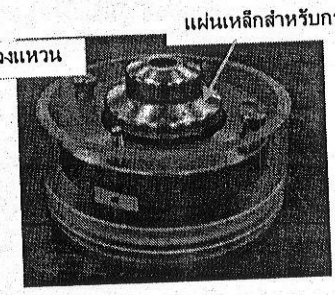
$$e = e_0 - \varepsilon_v(1+e_0)$$

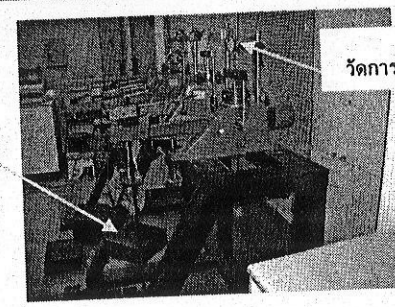


ลักษณะของ consolidation curve

Consolidation test
(การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ)







ขั้นตอนการทดสอบและคำนวณผล

- บรรจุตัวอย่างดินลงใน Rigid ring ทำให้เกิดการทรุดตัวในแนวดิ่งเท่านั้น
- ตัวอย่างถูกประกบไว้ด้วยแผ่นวัสดุที่มีความพรุน (porous disc) เพื่อระบายน้ำออกจากดิน
- การทดสอบต้องเติมน้ำลงในดินเพื่อป้องกันไม่ให้ดินเสียความชื้นตามธรรมชาติในขณะทำการทดสอบ และให้ดินดูดน้ำในกรณีที่เกิดการบวมตัว (Swelling)
- เพิ่มน้ำหนักกดลงบนตัวอย่างแล้วปล่อยไว้จนกระทั่งการทรุดตัวสิ้นสุด ซึ่งดูได้จากค่ายุบตัวของตัวอย่าง
- เพิ่มน้ำหนักกดจนถึงน้ำหนักกดสูงสุดที่ต้องการ แล้วลดน้ำหนักกดลงจนเป็นศูนย์
- เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง หน่วยแรงกดประสิทธิผล และ อัตราส่วนโพรง
- จากผลการทดสอบจะได้ค่า compression index, recompression index, c_v, OCR

การทดสอบ Consolidation test.

ตัวอย่าง จากการทดสอบ Consolidation test ได้ข้อมูลดังตารางข้างล่าง จงเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stress กับ void ratio

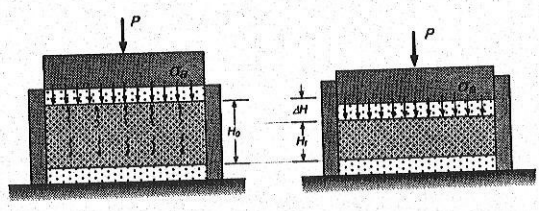
น้ำหนักดินตัวอย่างอบแห้งหลังทดสอบเสร็จ, W_s = 66.6 g

พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง, A = 31.67 cm^2

ความถ่วงจำเพาะ, G_s = 2.71

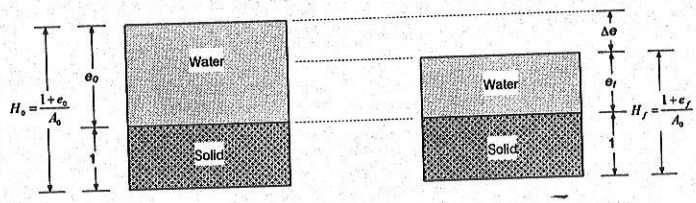
แรงกด (N)	ความสูงของตัวอย่างหลังจากตัวอย่างคายน้ำออกหมดแล้ว (cm)
0	1.900
31.7	1.900
63.3	1.899
126.7	1.874
253.4	1.834
506.7	1.764
1013.4	1.641
2026.9	1.508

จากการทดสอบ consolidation test เมื่อดินถูกอัดและคายน้ำออกจากเนื้อดิน จะทำให้ความสูงของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงไปซึ่งสามารถคำนวณหา Volumetric strain (ε_v) ได้ดังนี้

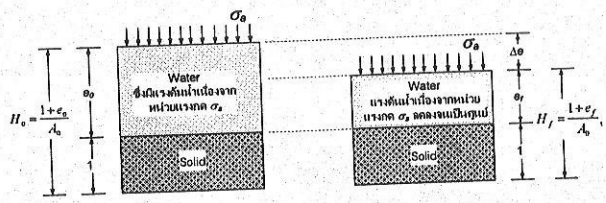


$$\varepsilon_v = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{H_0 - H}{H}$$

$$\frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta e}{1 + e_0}$$



เรายังสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง Effective stress กับ Void ratio ได้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของตัวอย่างกับความสูงของตัวอย่าง



$$\frac{H_0 - H_f}{H_0} = \frac{e_0 - e_f}{1+e_0}$$

$$e_f = e_0 - \left(\frac{H_0 - H_f}{H_0}\right)(1+e_0)$$

คำนวณ Void ratio จากความสูงของตัวอย่าง

$$H_v = H_f - H_s$$

$$e = \frac{H_v}{H_s}$$

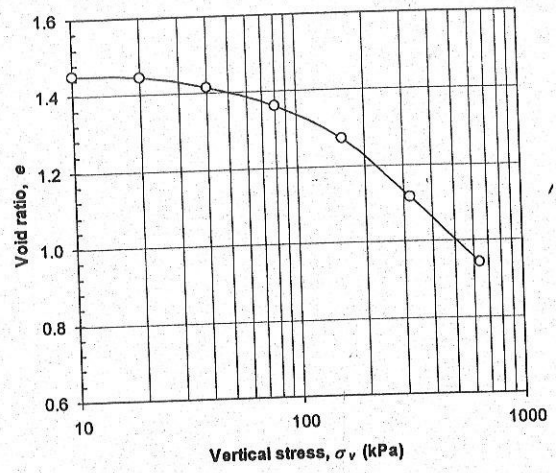
ปริมาณดินแห้งเมื่อคิดเป็นความสูง

$$H_s = \frac{V_s}{A} = \frac{W_s}{\gamma_w G_s A}$$

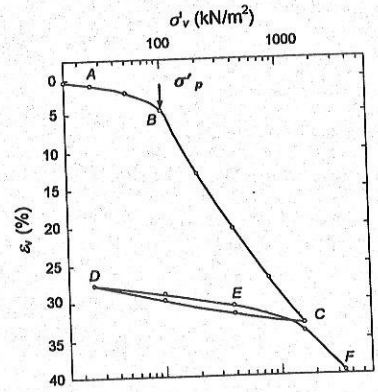
$$H_s = \frac{66.6\text{g}}{(1\text{g/cm}^3)(2.71)(31.67\text{cm}^2)} = 0.776\text{cm}$$

แรงกด (N)	หน่วยแรงกด σ'_v (kPa)	ความสูงของตัวอย่างหลังจากตัวอย่างคายน้ำออกหมดแล้ว, H (cm)	ปริมาตรโพรง $H_v = H - H_s$ (cm)	อัตราส่วนโพรง $e = H_v/H_s$
0	0	1.900	1.900-0.776= 1.124	1.124/0.776=1.448
31.7	10	1.900	1.900-0.776=1.124	1.124/0.776=1.448
63.3	20	1.899	1.899-0.776=1.123	1.123/0.776=1.447
126.7	40	1.874	1.874-0.776=1.098	1.098/0.776=1.415
253.4	80	1.834	1.834-0.776=1.058	1.058/0.776=1.363
506.7	160	1.764	1.764-0.776=0.988	0.988/0.776=1.273
1013.4	320	1.641	1.641-0.776=0.865	0.865/0.776=1.115
2026.9	640	1.508	1.508-0.776=0.732	0.732/0.776=0.943

นำผลลัพธ์ที่ได้ไปเขียนกราฟ



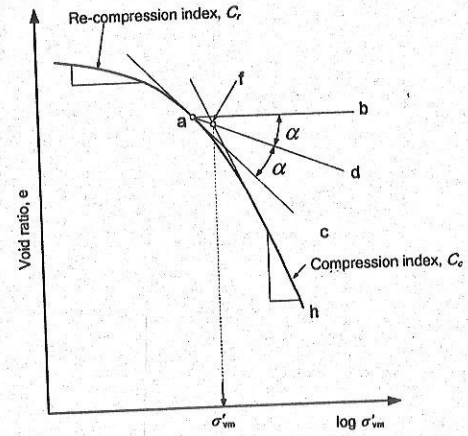
กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง vertical stress กับอัตราส่วนโพรง (void ratio)



ดินเป็นวัสดุที่มีความเป็นพลาสติก ดังนั้นจึงมีพฤติกรรมพลาสติก ซึ่งได้แก่

- ถ้าดินรับแรงจนมี Effective stress อยู่ในช่วง Recompression curve เมื่อปล่อยแรงออกดินจะสามารถคืนตัวได้ (Reversibility) เกือบสมบูรณ์
- ถ้าดินรับแรงจนมี Effective stress อยู่ในช่วง Compression curve เมื่อปล่อยแรงออกดินจะสามารถคืนตัวได้บางส่วนเท่านั้น

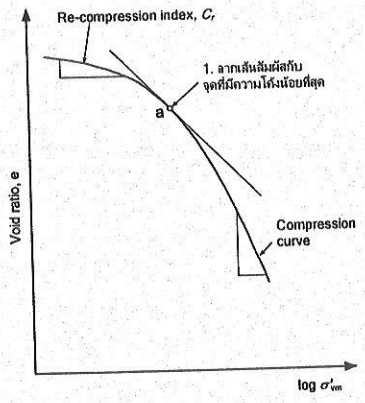
Maximum past pressure คือหน่วยแรงประสิทธิผลที่ดินเคยผ่านมาสูงที่สุด ซึ่งจะเป็นจุดที่แบ่งระหว่าง Compression curve กับ Recompression curve ซึ่งมีความชันต่างกัน



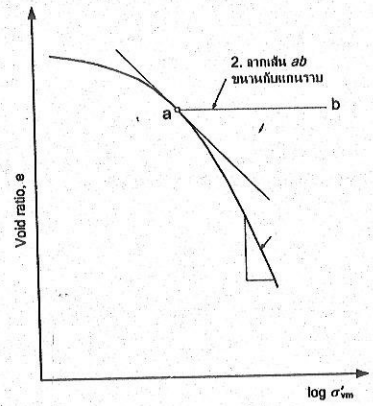
วิธีหา Maximum past pressure, σ'_{vm} ซึ่งเสนอโดย Casagrande มีขั้นตอนดังนี้

1. หาจุดที่มีความโค้งมากที่สุดในกราฟ (จุด *a*) แล้วลากเส้นสัมผัสกับเส้นโค้ง ณ.จุดนี้ เส้น *ac*
2. จากจุดสัมผัสลากเส้นตรง *ab* ขนานกับแกน *x* จะได้มุม *bac*
3. ลากเส้น *ad* แบ่งครึ่งมุม *bac*
4. ลากเส้นสัมผัสกับ Compression curve ไปตัดกับเส้นแบ่งครึ่งมุม *ad* จะได้จุดตัดคือจุด *f* จากจุดตัดลากเส้นตั้งลงมาตัดกับแกนนอนจะได้ค่า Maximum past pressure, σ'_{vm}

สรุปขั้นตอนในการหา Maximum past pressure

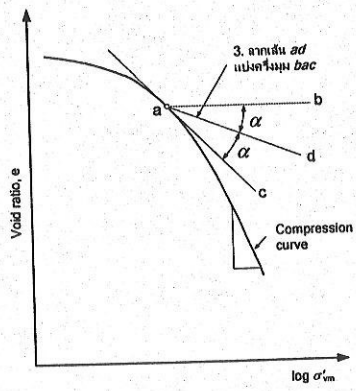


ขั้นตอนที่ 1

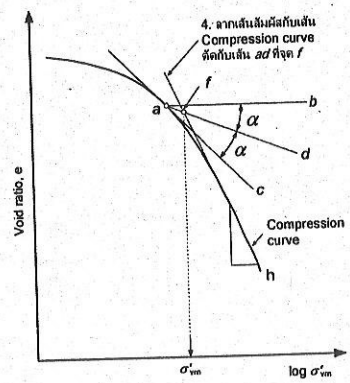


ขั้นตอนที่ 2

สรุปขั้นตอนในการหา Maximum past pressure (ต่อ)



ขั้นตอนที่ 3



ขั้นตอนที่ 4

Overconsolidation ratio

เมื่อหาหน่วยแรงที่ดินเคยถูกกดทับสูงสุดในอดีต (Maximum past pressure, σ'_{vm}) ได้เราจะสามารถหาอัตราส่วนหน่วยแรงสูงสุดที่ดินเคยได้รับต่อหน่วยแรงในปัจจุบัน (Overconsolidation ratio, *OCR*) ได้จาก

$$OCR = \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{v0}}$$

เมื่อ σ'_{v0}, หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective overburden stress) ในปัจจุบัน

Ex. เก็บดินตัวอย่างมาจากความลึก 10 เมตร ซึ่งระดับใต้ดินอยู่ที่ระดับผิวดิน ผลการทดสอบหาหน่วยน้ำหนักรวมได้ 18 kPa และ Maximum past pressure, σ'_{vm} = 100 kPa จงคำนวณค่า *OCR* ของดินชนิดนี้ (γ_w = 10 kPa)

$$\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u$$

$$\sigma'_{v0} = (18 \times 10) - (10 \times 10) = 80\text{kPa}$$

$$OCR = \frac{100\text{kPa}}{80\text{kPa}} = 1.25$$

ถ้าพิจารณาจากค่า *OCR* จะแบ่งดินเหนียวได้เป็น

1. Normally Consolidates Clay (NC Clay) คือดินเหนียวที่มีหน่วยแรงกดทับสูงสุดเท่ากับหน่วยแรงกดทับปัจจุบัน (*OCR* = 1)

$$\sigma'_{v0} = \sigma'_{vm}$$

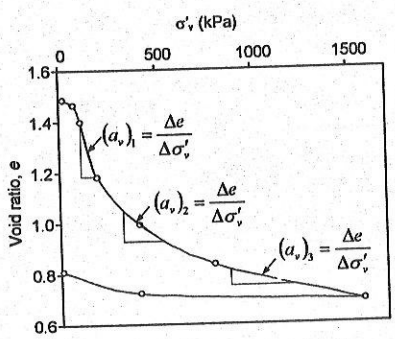
2. Over Consolidated Clay (OC Clay) คือดินเหนียวที่มีหน่วยแรงกดทับในอดีตมากกว่าในปัจจุบัน (*OCR* > 1)

$$\sigma'_{v0} < \sigma'_{vm}$$

3. Heavily Over Consolidated Clay (HOC Clay) คือดินเหนียวที่มีหน่วยแรงกดทับในอดีตสูงมาก (*OCR* > 4)

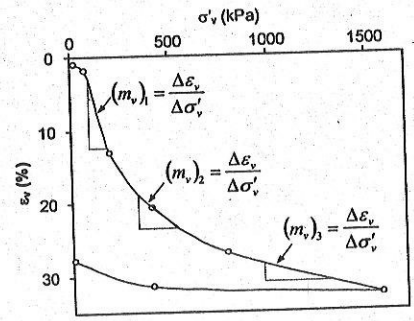
$$\sigma'_{v0} << \sigma'_{vm}$$

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Effective stress กับ Void ratio จะได้ค่า พารามิเตอร์ซึ่งเกี่ยวกับ Consolidation ดังนี้



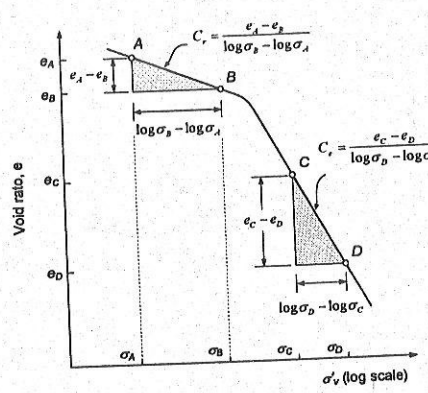
a) Coefficient of compressibility, a_v

$$a_v = -\frac{de}{d\sigma'_v}$$



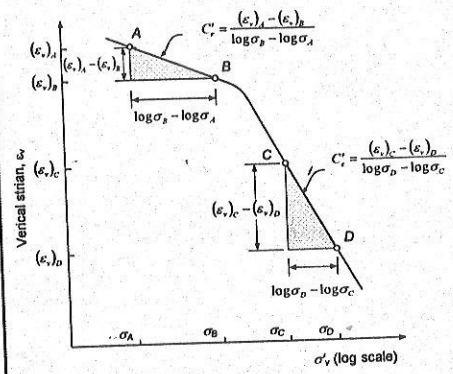
b) Modulus of volume compressibility, m_v

$$m_v = -\frac{d\varepsilon_v}{d\sigma'_v}$$



แกนตั้งเป็น void ratio

$$e = e_0 - \varepsilon_v(1 + e_0)$$



แกนตั้งเป็น Vertical strain

$$\varepsilon_v = \frac{e_0 - e}{1 + e_0}$$

การคำนวณการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำปฐมภูมิ
(Primary consolidation settlement)

เราคำนวณ vertical strain ของ 1-D consolidation ได้จาก

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta e}{1+e_0}$$

ดังนั้นเราคำนวณการยุบตัวของดินได้จาก

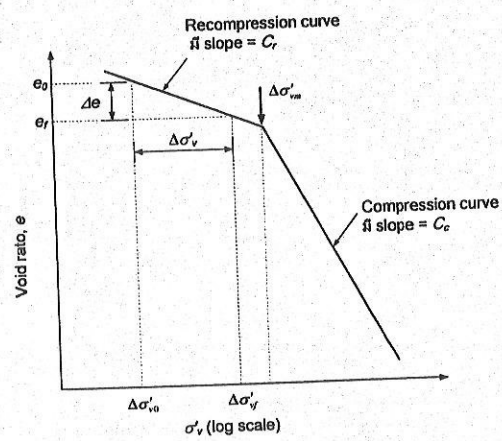
$$\rho = \Delta H$$

$$\rho = (\varepsilon_v)(H)$$

$$\rho = \left(\frac{\Delta e}{1+e_0}\right)(H)$$

สิ่งที่เราต้องการเพื่อมาแทนค่าในสมการข้างต้นคือ Δe ซึ่งได้มาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง e กับ log σ'_v

กรณีที่ 1 หน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นไม่เกิน Maximum past pressure $(\sigma'_v)_f = \sigma'_{v0} + \Delta\sigma_v < \sigma'_{vm}$

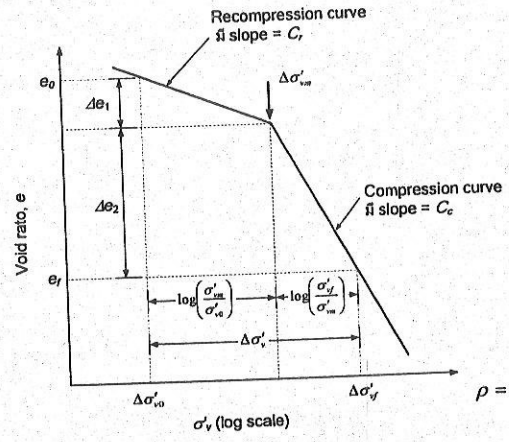


$$\Delta e = C_r \log\left(\frac{\sigma'_{v0}+\Delta\sigma_v}{\sigma'_{v0}}\right)$$

$$\rho = \left(\frac{\Delta e}{1+e_0}\right)(H)$$

$$\rho = \left(\frac{H}{1+e_0}\right)C_r \log\left(\frac{\sigma'_{v0}+\Delta\sigma_v}{\sigma'_{v0}}\right)$$

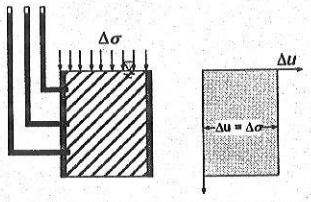
กรณีที่ 2 หน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นเกิน Maximum past pressure $(\sigma'_v)_f = \sigma'_{vo} + \Delta\sigma_v > \sigma'_{vm}$



$$\rho = \left(\frac{H \cdot \Delta e_1}{1+e_0}\right) + \left(\frac{H \cdot \Delta e_2}{1+e_0}\right)$$

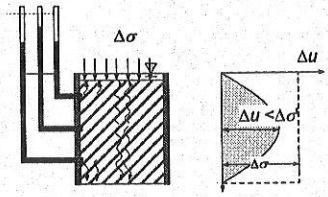
$$\rho = \left[\left(\frac{H}{1+e_0}\right) C_r \log\left(\frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{v0}}\right)\right] + \left[\left(\frac{H}{1+e_0}\right) C_c \log\left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vm}}\right)\right]$$

การทรุดตัวในมิติเดียวที่ขึ้นอยู่กับเวลา



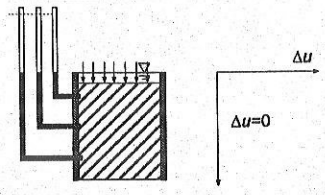
เวลา $t = 0$

แรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นในดินทุกๆจุดจะเท่ากับแรงดันรวมที่เพิ่มขึ้น



เวลา $0 < t < \infty$ (เมื่อเวลาผ่านไป)

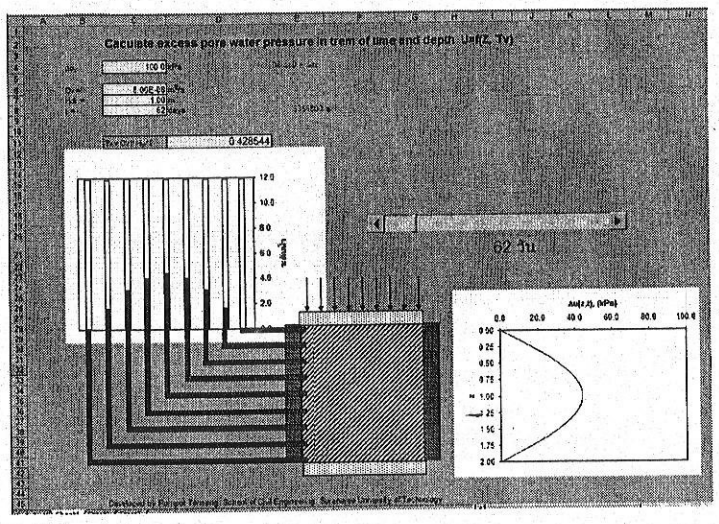
แรงดันน้ำส่วนเกินจะลดลงเพราะไหลออกจากดิน จะเห็นว่าส่วนที่ติดกับจุดระบายน้ำจะมีแรงดันต่ำกว่าจุดที่อยู่ห่างจากจุดระบาย



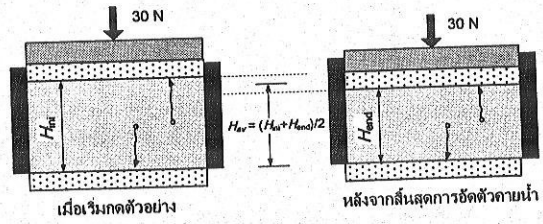
เวลา $t = \infty$ (เมื่อเวลาผ่านไปนานมาก)

แรงดันน้ำส่วนเกินจะไหลออกจากดินจนหมด ซึ่งเมื่อน้ำไหลออกจากดินจะทำให้ดินมีปริมาตรลดลง ซึ่งก่อให้เกิดการทรุดตัว

ตัวอย่าง โปรแกรมเอ็กเซลที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงแรงดันของน้ำในมวลดินที่มีหน่วยแรงรวมกระทำ ณ. เวลาใดๆ

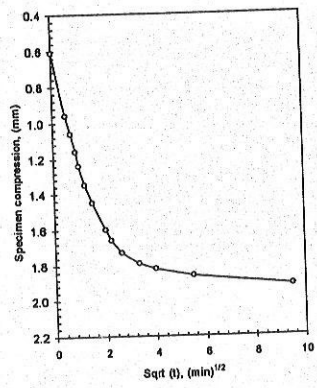


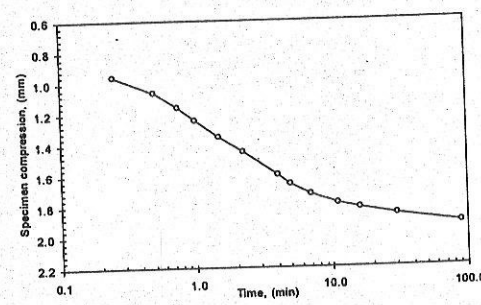
ในการเพิ่มน้ำหนักกดจะบันทึกปริมาณการยุบตัวที่เวลาต่างๆไว้ด้วย เนื่องจากการยุบตัวจะไม่เป็นการยุบตัวทันทีแต่จะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา การทรุดตัวที่คงที่จะถือว่าเป็นการทรุดตัวที่น้ำส่วนเกินไหลออกไปจากดินหมดแล้ว



Time from start of loading (min)	Specimen compression (mm)
0.00	0.61
0.25	0.96
0.50	1.06
0.75	1.16
1.00	1.24
1.50	1.35
2.25	1.45
4.00	1.60
5.00	1.66
7.00	1.73
11.00	1.79
16.00	1.82
30.00	1.86
90.00	1.92

และในการเพิ่มหน่วยแรงกดแต่ละครั้งต้องบันทึกการทรุดตัวที่สัมพันธ์กับเวลาไว้ด้วย





ซึ่งจากกราฟทั้งสองนี้เราจะใช้สำหรับการหาค่า Coefficient of consolidation ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

ทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำ 1 มิติของ Terzaghi

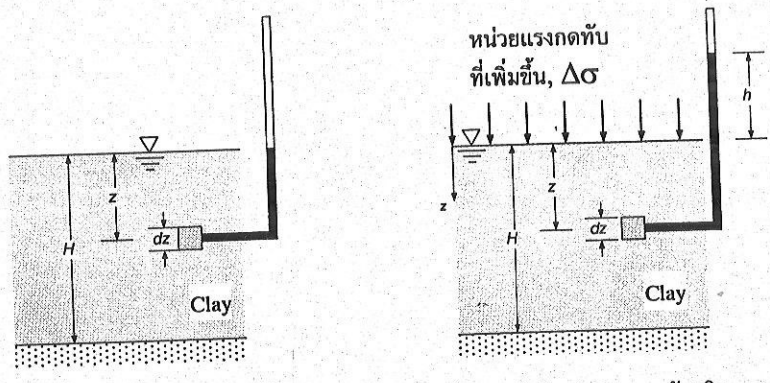
สมมุติฐาน

1. การอัดตัวของดินและการไหลของน้ำในดินเกิดขึ้นใน 1 มิติโดยจะไม่มีการขยายตัวของดินทางด้านข้าง ($\varepsilon_{lateral} = 0$) ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง Vertical strain, ε_v กับ Void ratio, e เป็น

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{e_0 - e}{1 + e_0}$$

2. การไหลของน้ำเป็นไปตามกฎของ Darcy's
3. ค่า Coefficient of permeability และ m_v คงที่ระหว่าง Consolidation
4. ไม่มี Creep เกิดขึ้น (Secondary compression)
5. น้ำหนักกดทับดินทันทีและพื้นที่ของการกดทับจะเป็นบริเวณกว้างมาก

พิจารณา Element A ซึ่งมีขนาด (*dx*, *dy*, *dz*) ในมวลดินเหนียวที่มีพื้นที่ไม่จำกัด



ก่อนมีหน่วยแรงกดทับแรงดันน้ำเป็นแบบ Hydrostatic

หลังมีหน่วยแรงกดทับเกิดแรงดันน้ำเพิ่มขึ้น (Excess pore water pressure)

เมื่อดินถูกกดด้วย $\Delta\sigma$ มีแรงดันน้ำในดินเพิ่มขึ้น ซึ่ง Hydraulic gradient คือ

$$-\frac{\partial h}{\partial z} = \frac{1}{\gamma_w}\frac{\partial u}{\partial z} \qquad \text{(a)}$$

$$-\partial u = \gamma_w \partial h \qquad \text{(b)}$$

จากกฎของ Darcy ความเร็วในการไหลของน้ำในเมื่อพิจารณาการไหลในแนวดิ่งเท่านั้นคือ

$$v = ki = -k\frac{\partial h}{\partial z} = -\frac{k}{\gamma_w}\frac{\partial u}{\partial z} \qquad \text{(c)}$$

Velocity gradient ในแนวดิ่งคือ

$$\frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{k}{\gamma_w}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \qquad \text{(d)}$$

เมื่อน้ำไหลออกจากดินทำให้ปริมาตรรวมของดินลดลงซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินต่อเวลาคือ

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial v}{\partial z}(\partial x \partial y \partial z) \qquad \text{---------- (e)}$$

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{k}{\gamma_w}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}(\partial x \partial y \partial z) \qquad \text{---------- (f)}$$

การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินเกิดจากการที่น้ำถูกบีบออกจากช่องว่างในเม็ดดิน ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่อปริมาตรเริ่มต้นคือ

$$\frac{dV}{\partial x \partial y \partial z} = \frac{\partial e}{1+e_0} \qquad \text{---------- (g)}$$

อัตราเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินต่อเวลา

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial e}{\partial t}\left(\frac{1}{1+e_0}\right)\partial x \partial y \partial z \qquad \text{---------- (h)}$$

จากสมมุติฐานข้อที่ 1 จะเกิดการยุบตัวในแนวดิ่งเท่านั้นโดยไม่มีการขยายตัวออกด้านข้าง

$$m_v = \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial \sigma'_v} = -\frac{\partial e}{\partial \sigma'_v}\frac{1}{1+e_0} \qquad \text{---------- (i)}$$

จากสมมุติฐานข้อที่ 5 น้ำหนักกดทับเกิดขึ้นทันที ดังนั้นแรงดันน้ำจะเพิ่มขึ้นเท่ากับหน่วยแรงกด

$$\partial \sigma'_v = \partial u$$

อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินต่อเวลา แทนในสมการ (g) และ (f) ใน (e) จะได้

$$\frac{dV}{dt} = -m_v \frac{\partial u}{\partial t}(\partial x \partial y \partial z) \qquad \text{---------- (j)}$$

และ (h) = (c)

$$-m_v \frac{\partial u}{\partial t}(\partial x \partial y \partial z) = -\frac{k}{\gamma_w}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}(\partial x \partial y \partial z)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{m_v \gamma_w}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

ถ้าเราตั้ง $c_v = \dfrac{k}{m_v \gamma_w}$ สุดท้ายจะได้สมการ

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \qquad \text{---------- (j)}$$

สมการนี้เป็นสมการดิฟเฟอร์เรนเชียล (Differential equation) สำหรับการอัดตัวคายน้ำในมิติเดียว ซึ่งอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำในตัวอย่างเทียบกับเวลาและระยะทาง

จากสมการ

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

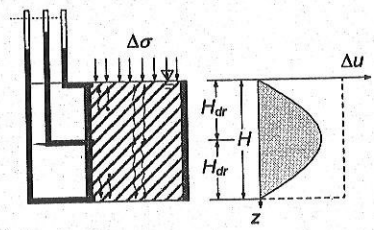
สามารถแก้สมการนี้ได้โดยใช้อนุกรมฟูเรียร์ (Fourier Series) โดยจะต้องมีขอบเขต (Boundary conditions) ดังนี้

เมื่อเวลา t=0 $\qquad \Delta u = \Delta u_0 = \Delta \sigma_v$

ในการแก้ปัญหาสมมุติให้มีการระบายน้ำได้ ทั้งด้านบนและด้านล่างของดิน

ที่ด้านบนของดิน, z=0 $\qquad \Delta u = 0$

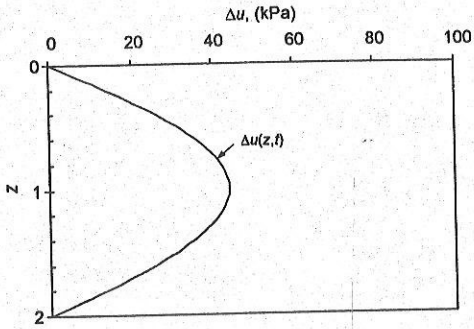
ที่ด้านบนของดิน, $z = H = 2H_{dr}$ $\qquad \Delta u = 0$



จะได้แรงดันน้ำส่วนเกินที่ความลึก z ใดๆ ที่เวลา t ใดๆ

$$\Delta u_z(z,t) = \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2\Delta u_0}{M} \sin\left(\frac{Mz}{H_{dr}}\right) e^{-(M^2 T_v)}$$

โดย $T_v = \dfrac{c_v t}{H_{dr}^2}$ $\quad M = \dfrac{\pi}{2}(2m+1)$



และเราคำนวณ Degree of consolidation ที่ระยะ z ใดๆ ได้จาก

$$U_z = \frac{\Delta u_0 - \Delta u_z}{\Delta u_0} = 1 - \frac{\Delta u_z}{\Delta u_0}$$

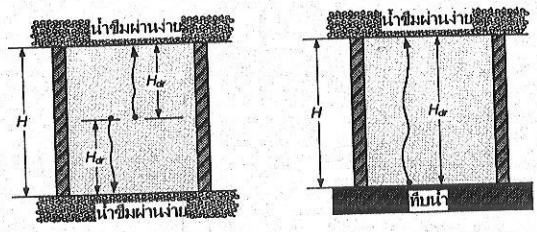
ค่าเฉลี่ยของ Degree of consolidation, U คำนวณได้จาก

$$U = 1 - \frac{\left(\dfrac{1}{2H_{dr}}\right)\displaystyle\int_0^{2H_{dr}} \Delta u_z \, dz}{\Delta u_0}$$

จะได้ค่าเฉลี่ย Degree of consolidation คือ

$$U = 1 - \frac{\left(\frac{1}{2H_{dr}}\right)\int_0^{2H_{dr}} \Delta u_z \, dz}{\Delta u_0}$$

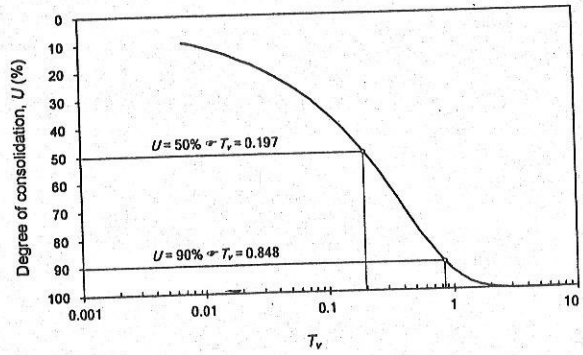
$$U = 1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v}$$



$$U = 1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v}$$

สมการข้างต้นสามารถนำมาเขียนเป็นเส้นกราฟความสัมพันธ์และตารางได้

Degree of consolidation (%)	Time factor, T_v
0	0.000
10	0.008
20	0.031
30	0.071
40	0.126
50	0.197
60	0.287
70	0.403
80	0.567
90	0.848
100	∞



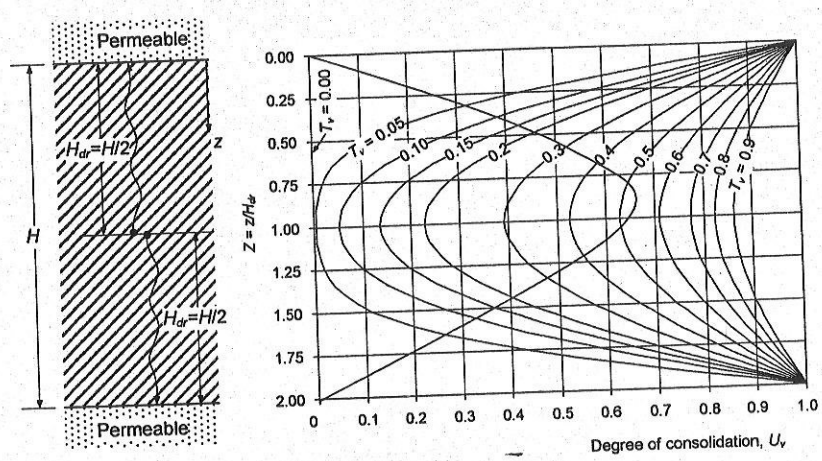
ค่าโดยประมาณของ T_v เมื่อรู้ค่า U

สำหรับ U = 0% ถึง 60%

$$T_v = \frac{\pi}{4}\left(\frac{U\%}{100}\right)^2$$

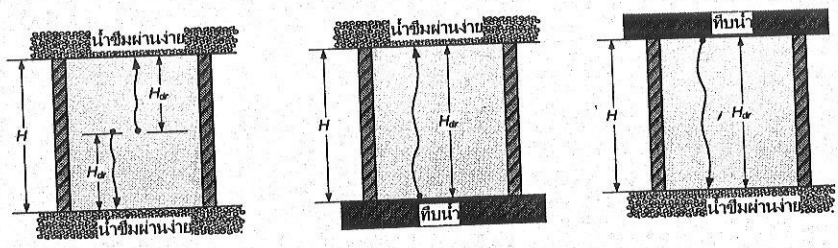
สำหรับ U มากกว่า 60%

$$T_v = 1.781 - 0.993\log(100 - U\%)$$



ความสัมพันธ์ระหว่าง U_v กับ Z ที่เวลา T_v ต่าง ๆ

การเคลื่อนที่ของน้ำออกจากดินในแนวแกนเมื่อมีหน่วยแรงกดทับ



1. น้ำซึมผ่านได้ทั้งสองทางโดยน้ำจะใช้เส้นทางสั้นที่สุด นั่นคือ $H_{dr} = H/2$

2. น้ำซึมผ่านได้ทางเดียว เส้นทางที่สั้นที่สุดคือ $H_{dr} = H$

3. น้ำซึมผ่านได้ทางเดียว เส้นทางที่สั้นที่สุดคือ $H_{dr} = H$

Degree of consolidation

Degree of consolidation แสดงถึงสัดส่วนการคายน้ำของดินเมื่อถูกบีบอัดเทียบกับก่อนถูกบีบอัด สามารถเขียนได้ 3 รูปแบบคือ

รูปแบบที่ 1 การเปลี่ยนแปลง Void ratio ที่เวลา t เทียบกับอัตราส่วนช่องว่างเมื่อสิ้นสุดกระบวนการ Consolidation

$$U = \frac{e_0 - e_t}{e_0 - e_f}$$

e_0 = อัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้น

e_t = อัตราส่วนช่องว่างที่เวลา t

e_f = อัตราส่วนช่องว่างเมื่อสิ้นสุดกระบวนการ Consolidation

รูปแบบที่ 2 การลดลงของแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess pore water pressure) ที่เวลา t เทียบกับความดันน้ำส่วนเกินเริ่มต้น

$$U = \frac{\Delta u_0 - \Delta u_t}{\Delta u_0}$$

$$U = 1 - \frac{\Delta u_t}{\Delta u_0}$$

Δu_i= ความดันน้ำส่วนเกินเริ่มต้น

Δu_t= ความดันน้ำส่วนเกินที่เวลา t

รูปแบบที่ 3 การเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress) ที่เวลา t เทียบกับ Effective stress หลังสิ้นสุดกระบวนการ consolidation

$$U = \frac{\Delta \sigma'_t}{\Delta \sigma'_f}$$

$\Delta \sigma'_t$ หน่วยแรงประสิทธิผลที่เวลา t

$\Delta \sigma'_f$ หน่วยแรงประสิทธิผลเมื่อสิ้นสุดการ Consolidation

Average degree of consolidation

ในการคำนวณหาการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวที่รับน้ำหนักบรรทุกจากผิวดิน จะใช้ค่า เฉลี่ย ของ Degree of consolidation ตลอดความหนาของชั้นดินที่กำลังพิจารณา ณ. เวลาใด ๆ โดย

$$U = \frac{\rho_t}{\rho_c}$$

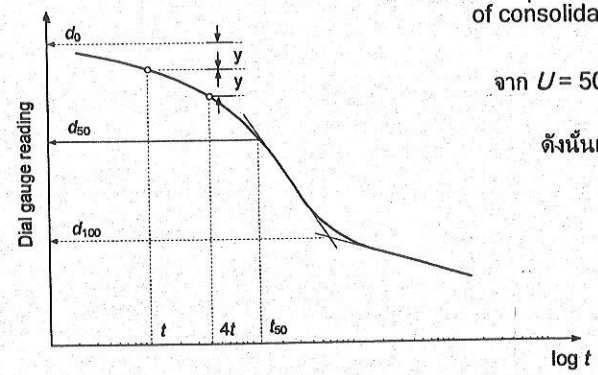
ρ_t การทรุดตัวเนื่องจาก Consolidation ที่เวลา t

ρ_c การทรุดตัวทั้งหมดเนื่องจาก Consolidation

$\overline{U}_v$ ค่าเฉลี่ย Degree of consolidation ที่เวลา t

การหาค่า Coefficient of permeability, c_v
จากผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำในห้องปฏิบัติการ

1. วิธี Logarithm-of-time ซึ่งเสนอโดย Casagrande



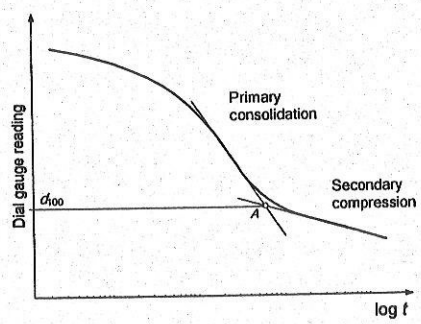
การทรุดตัว = d_{50} หมายถึงการที่ดินมี degree of consolidation, U = 50%

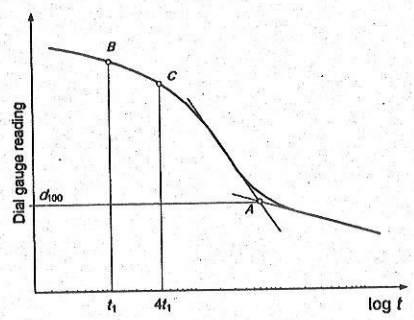
จาก U = 50% จะมี T_v = 0.197

ดังนั้นเราคำนวณ c_v ได้จาก

$$c_v = \frac{T_v H_{dr}^2}{t_{50}}$$

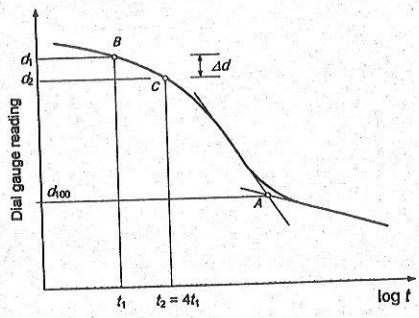
$$c_v = \frac{0.197\, H_{dr}^2}{t_{50}}$$



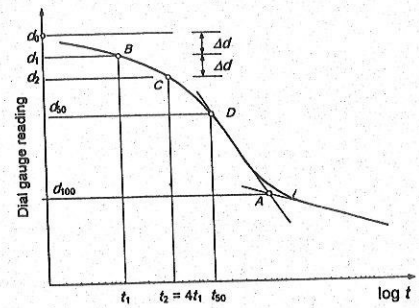


1. ลากเส้นต่อส่วนโค้งจากส่วน primary consolidation และ secondary compression มาตัดกันที่จุด A จุดนี้จะเป็นจุดที่มี U = 100% (d_{100})

2. เลือกจุดจุดหนึ่งบนกราฟที่มี U<60% (ในที่นี้คือจุด B) จากนั้นเลือกอีกจุดหนึ่ง (จุด C) ซึ่งมีค่าเวลาเป็น 4 เท่าของจุด B ($t_2 = 4t_1$)

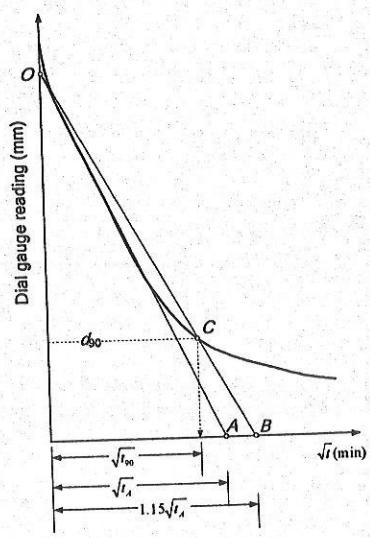


3. คำนวณ $\Delta d = d_1 - d_2$



4. หาจุดเริ่มต้นของการอัดตัวคายน้ำ (d_0) โดยวัดระยะแนวตั้งจากจุด B ขึ้นไปอีกเป็นระยะ Δd จากนั้นเราคำนวณ d_{50} ได้จาก $d_{50}=(d_{100}+d_0)/2$ ลากเส้นมาตัดกราฟที่จุด D จุดตัดแกนราบคือเวลาที่ดินมี U=50% (t_{50})

2. วิธี Square-root-time เสนอโดย Taylor ในปี 1942



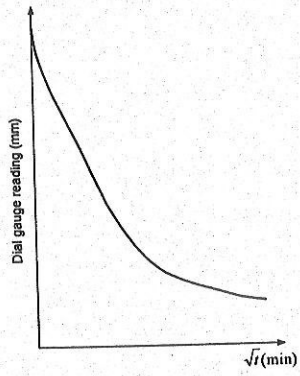
การทรุดตัว = d_{90} หมายถึงการที่ดินมี degree of consolidation, U = 90%

จาก U = 90% จะมี T_v = 0.848

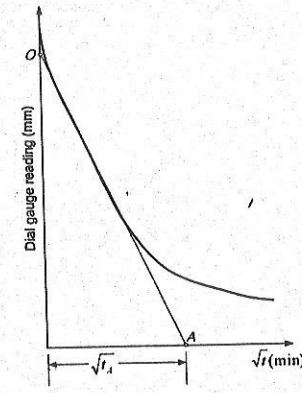
ดังนั้นเราคำนวณ c_v ได้จาก

$$c_v = \frac{T_v H_{dr}^2}{t_{90}}$$

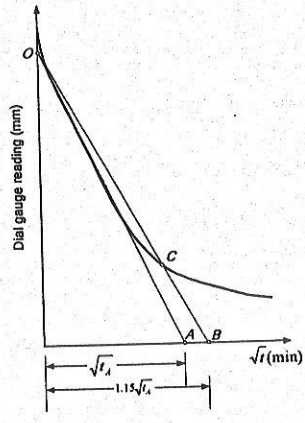
$$c_v = \frac{0.848\, H_{dr}^2}{t_{90}}$$



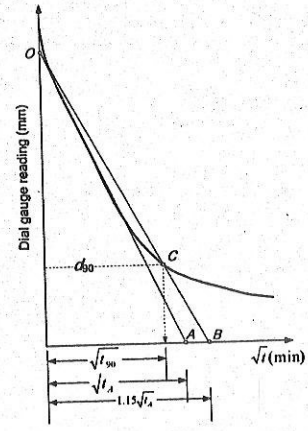
1. เขียนกราฟการทรุดตัวกับ $\sqrt{t}$



2. ลากเส้น OA ทับกับส่วนที่เป็นเส้นตรง ซึ่งจะตัดแกนตั้งที่ O และตัดแกนราบที่ A



3. ลากเส้น OB โดยที่จุด B จะห่างจากจุดกำเนิด 1.15 เท่าของ $\sqrt{t_A}$



4. เส้น OA จะตัดกับเส้นโค้งที่จุด C ซึ่งเป็นจุดที่มี degree of consolidation =90% อ่านค่าเวลา $\sqrt{t_{90}}$

การนำผลการทดสอบ consolidation จากห้องปฏิบัติการ
ไปใช้คำนวณการทรุดตัวในสนาม

ถ้าดินต้องการคำนวณเวลาที่ใช้ในการทรุดตัวให้มี Degree of consolidation เท่ากัน โดยใช้ข้อมูลจากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ถ้าดินในสนามมี degree of consolidation เท่ากับดินในห้องปฏิบัติการจะมี T_v เท่ากัน

$$T_v = \frac{(c_v t)_{\text{lab}}}{(H_{dr}^2)_{\text{lab}}} = \frac{(c_v t)_{\text{field}}}{(H_{dr}^2)_{\text{field}}}$$

และเมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\frac{t_{\text{field}}}{t_{\text{lab}}} = \frac{(H_{dr}^2)_{\text{field}}}{(H_{dr}^2)_{\text{lab}}}$$

โดยทั่วไปตัวอย่างในห้องปฏิบัติการจะหนา 20mm และระบายน้ำสองทาง ถ้านำไปใช้ประมาณการทรุดตัวของชั้นดินหนา 4m และระบายน้ำ 2 ทางเหมือนกันจะได้

$$t_{\text{field}} = \frac{(4000/2)^2}{(20/2)^2} t_{\text{lab}}$$

$$t_{\text{field}} = 40000\, t_{\text{lab}}$$

สมมุติว่าในห้องปฏิบัติการใช้เวลา 10.4 นาทีจึงจะมี Degree of consolidation = 90%
ดังนั้นถ้าจะให้ดินในสนามมี Degree of consolidation = 90% จะต้องใช้เวลา

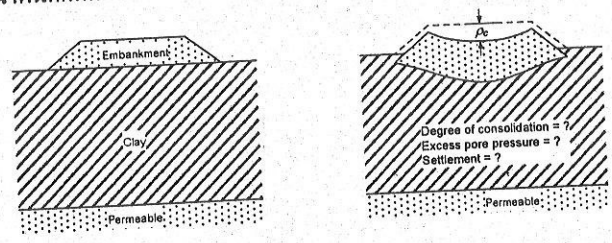
$$t_{\text{field}} = 40000\, t_{\text{lab}}$$

$$t_{\text{field}} = 40000\,(10.4) = 416000 \text{ min}$$

$$t_{\text{field}} = \frac{416000}{60 \times 24} = 289 \text{ days}$$

ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับ consolidation ที่ขึ้นกับเวลา

1. ถ้ามีน้ำหนักกดทับอยากจะทราบว่าที่เวลา t จะมี Degree of consolidation เป็นเท่าไร



หา T_v จาก $Tv = \frac{c_v t}{d^2}$

จาก T_v สามารถนำไปหา U

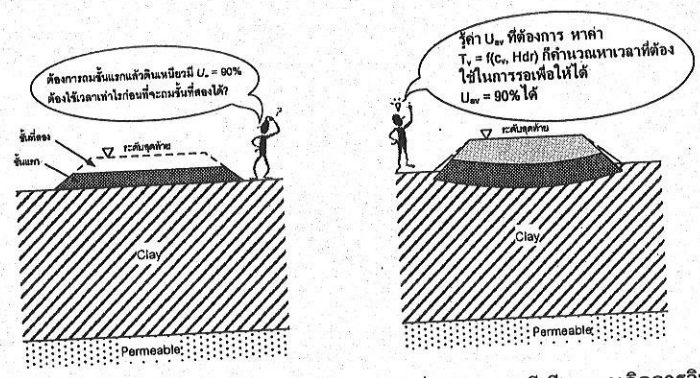
จาก U นำไปใช้หา

Excess pore pressure, Δu

Consolidation settlement, ρ_c

Effective stress, σ'_v

2. ถ้ารู้ค่า Average degree of consolidation ต้องการคำนวณหาว่าค่า Degree of consolidation เท่านี้จะต้องใช้เวลานานเท่าไร

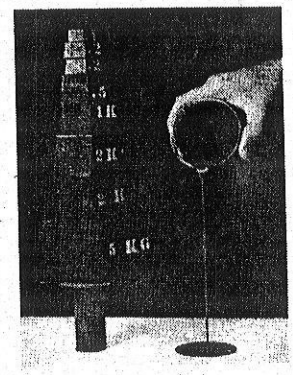


- สร้าง Embankment บนดินเหนียวอ่อน (กำลังต่ำ) ถ้าถมสูงทีเดียวอาจเกิดการวิบัติได้
- การ Consolidation ทำให้ Void ratio ลดลงดินมีกำลังสูงขึ้น
- ดังนั้นค่อย ๆ เพิ่มความสูงโดยปล่อยให้ดิน Consolidate จนกระทั่งมีกำลัง (Effective stress) เพียงพอ ซึ่งดูจาก Degree of consolidation

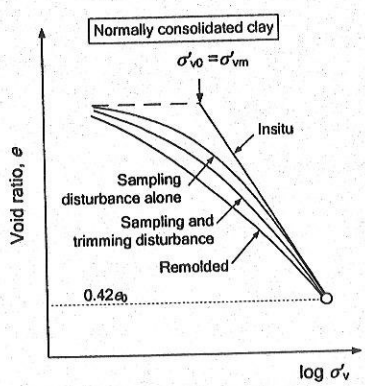
ผลจากการที่ตัวอย่างดินถูกรบกวน (Effect of sample disturbance)

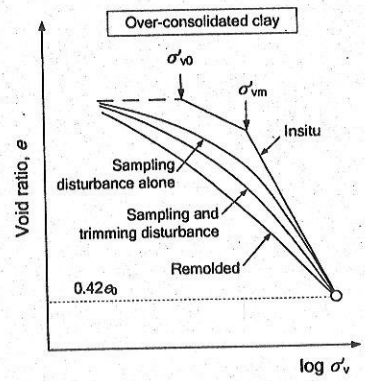
ถ้าดินเหนียวที่มีกำลังต่ำ ดินจะถูกรบกวนในขั้นตอนการเก็บตัวอย่างและการเตรียมตัวอย่างทดสอบ ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อโครงสร้างของดิน เมื่อนำไปใช้คำนวณการทรุดตัวในสนามจริงแล้วพบว่าค่าที่ได้จากการทดลองต่ำจากค่าที่วัดได้จากสนาม

รูปตัดของดินที่ถูกรบกวนในกระบอกเก็บตัวอย่าง
(Powrie, 1997)



ลักษณะของดินที่ถูกรบกวน
(Powrie, 1997)

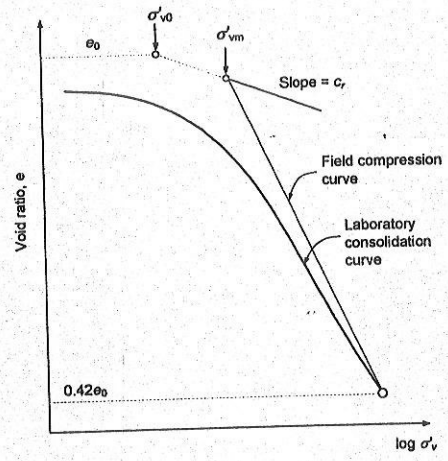




ผลกระทบเนื่องจากการเก็บและการเตรียมตัวอย่าง

การสร้าง Field compression curve

Schmertmann, 1953 ได้เสนอวิธีหาเส้นโค้ง (Field compression curve) ไว้โดยมีวิธีการดังนี้

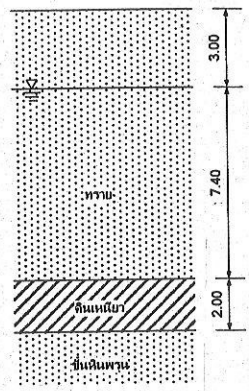


การสร้าง Field consolidation curve สำหรับ Overconsolidated clay

รวมตัวอย่างทั้งหมด

ตัวอย่างที่ 1 จากชั้นดินดังรูปและข้อมูลที่กำหนดให้ จงคำนวณการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ (primary consolidation settlement) เมื่อมีหน่วยแรงกดที่ผิวดินกระทำดังรูป

Void ratio ของทราย = 0.76
Water content ของดินเหนียว Normally consolidated = 43%
C_c = 0.3, G_s = 2.7, γ_w = 9.8 kN/m^3
หน่วยแรงกดที่เพิ่มขึ้น ณ. กึ่งกลางชั้นดินเหนียว, $\Delta\sigma'_v$ = 140 kPa



1. เราต้องคำนวณหน่วยแรงเนื่องจากน้ำหนักกดทับของดินก่อน แต่เนื่องจากโจทย์ไม่ได้กำหนดหน่วยน้ำหนักให้โดยตรง ดังนั้นเราจะคำนวณได้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและปริมาตร

จาก $\gamma_t = \gamma_w\left(\dfrac{e+G_s}{1+e}\right)$ และ $e = wG_s$

$$(\gamma_t)_{\text{clay}} = 9.8\left(\frac{0.43\times 2.7+2.7}{1+0.43\times 2.7}\right) = 17.5\text{kN/m}^3$$

$$(\gamma_t)_{\text{sand}} = 9.8\left(\frac{0.76+2.7}{1+0.76}\right) = 19.3\text{kN/m}^3$$

2. คำนวณหน่วยแรงประสิทธิผลที่กึ่งกลางของชั้นดินเหนียว

$$\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u$$

$$\sigma'_{v0} = (19.3\times 3)+(19.3\times 7.4)+(17.5\times 1)-9.8(7.4+1) = 135.9\text{kPa}$$

3. คำนวณหน่วยแรงประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้นที่กึ่งกลางชั้นดินเหนียว

$\Delta\sigma_v = 140\text{kPa}$ โจทย์กำหนด

4. คำนวณหน่วยแรงประสิทธิผลสุดท้าย

$$(\Delta\sigma_v)_{\text{final}} = 135.9 + 140 = 275.9\text{kPa}$$

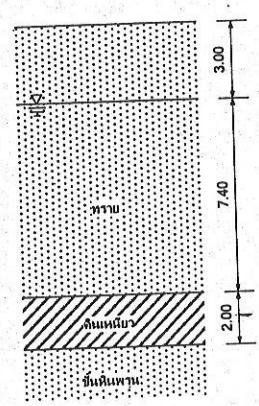
5. คำนวณการทรุดตัวเนื่องจาก primary consolidation

$$\rho_{\text{prim.conso.}} = \frac{H_0}{1+e_0} c_c \log\left(\frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma_v}{\sigma'_{v0}}\right)$$

$$\rho_{\text{prim.conso.}} = \frac{2\text{m}}{1+1.16}(0.3)\log\left(\frac{275.9\text{kPa}}{135.9\text{kPa}}\right) = 85.4\text{mm}$$

ตัวอย่างที่ 2 จากชั้นดินดังรูปและข้อมูลที่กำหนดให้ จงคำนวณการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ (primary consolidation settlement) เมื่อมีหน่วยแรงกดที่ผิวดินกระทำดังรูป

Water content ของดินเหนียว = 38%
Overconsolidation ratio = 2.5
c_c = 0.3, c_r=0.05, G_s = 2.7, γ_w = 9.8 kN/m^3
หน่วยแรงกดที่เพิ่มขึ้น ณ. กึ่งกลางชั้นดินเหนียว, $\Delta\sigma'_v$ = 140 kPa



1. คำนวณหน่วยแรงประสิทธิผลที่กึ่งกลางของชั้นดินเหนียว

$$\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u$$

$$\sigma'_{v0} = (19.3\times3)+(19.3\times7.4)+(18.0\times1)-9.8(7.4+1) = 136.4\text{kPa}$$

2. คำนวณหน่วยแรงประสิทธิผลมากที่สุดที่ดินเคยโดนกดทับ

$$\sigma'_{vm} = \sigma'_{v0}\times OCR$$

$$\sigma'_{vm} = 136.4\times2.5 = 341\text{kPa}$$

3. คำนวณหน่วยแรงประสิทธิผลสุดท้าย

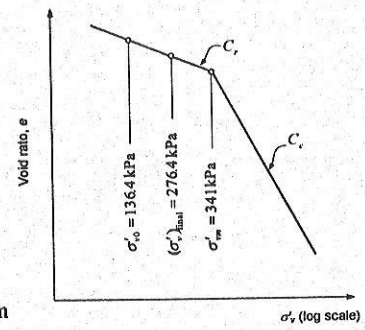
$$(\sigma'_v)_{\text{final}} = \sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_v$$

$$(\sigma'_v)_{\text{final}} = 136.4+140 = 276.4\text{kPa} < \sigma'_{vm}$$

4. คำนวณการทรุดตัวเนื่องจาก primary consolidation

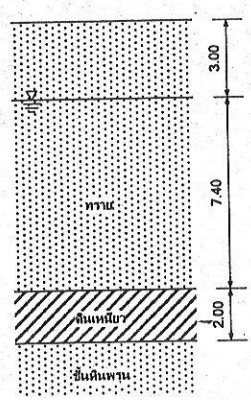
$$\rho_{\text{prim.conso.}} = \frac{H_0}{1+e_0}c_c\log\left(\frac{\sigma'_{v0}+\Delta\sigma_v}{\sigma'_{v0}}\right)$$

$$\rho_{\text{prim.conso.}} = \frac{2\text{m}}{1+1.026}(0.05)\log\left(\frac{276.4\text{kPa}}{136.4\text{kPa}}\right)(1000) = 15\text{mm}$$



ตัวอย่างที่ 3 จากชั้นดินดังรูปและข้อมูลที่กำหนดให้ จงคำนวณการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ (primary consolidation settlement) เมื่อมีหน่วยแรงกดที่ผิวดินกระทำดังรูป

Water content ของดินเหนียว = 38%
Overconsolidation ratio = 1.5
c_c = 0.3, c_r=0.05, G_s = 2.7, γ_w = 9.8 kN/m^3
หน่วยแรงกดที่เพิ่มขึ้น ณ. กึ่งกลางชั้นดินเหนียว, $\Delta\sigma'_v$ = 140 kPa



1. คำนวณหน่วยแรงประสิทธิผลที่กึ่งกลางของชั้นดินเหนียว

$$\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u$$

$$\sigma'_{v0} = (19.3\times3)+(19.3\times7.4)+(18.0\times1)-9.8(7.4+1) = 136.4\text{kPa}$$

2. คำนวณหน่วยแรงประสิทธิผลมากที่สุดที่ดินเคยโดนกดทับ

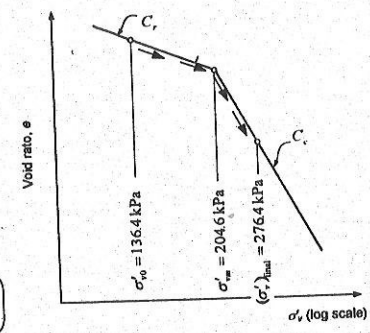
$$\sigma'_{vm} = \sigma'_{v0}\times OCR$$

$$\sigma'_{vm} = 136.4\times1.5 = 204.6\text{kPa}$$

3. คำนวณหน่วยแรงประสิทธิผลสุดท้าย

$$(\sigma'_v)_{\text{final}} = \sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_v$$

$$(\sigma'_v)_{\text{final}} = 136.4+140 = 276.4\text{kPa} > \sigma'_{vm}$$



4. คำนวณการทรุดตัวเนื่องจาก primary consolidation

$$\rho_{\text{prim.conso.}} = \frac{H_0}{1+e_0}c_r\log\left(\frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{v0}}\right)+\frac{H_0}{1+e_0}c_c\log\left(\frac{(\sigma'_v)_{\text{final}}}{\sigma'_{vm}}\right)$$

$$\rho_{\text{prim.conso.}} = \frac{2m}{1+1.026}(0.05)\log\left(\frac{204.6\text{kPa}}{136.4\text{kPa}}\right)+\frac{2m}{1+1.026}(0.3)\log\left(\frac{276.4\text{kPa}}{204.6\text{kPa}}\right) = 0.047\text{m}$$

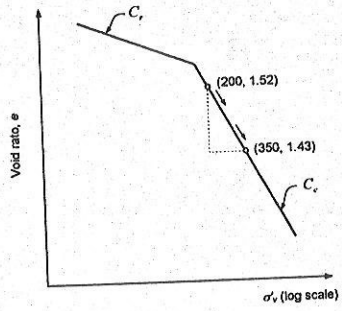
ตัวอย่างที่ 4 ในการทดสอบการอัดตัวคายน้ำที่หน่วยแรงกด 200 kPa คำนวณอัตราส่วนโพรงได้ 1.52 และพบว่าจุดนี้อยู่บนเส้น Normally consolidated line ถ้าเพิ่มหน่วยแรงกดอีก 150 kPa พบว่าอัตราส่วนโพรงเป็น 1.43

a) จงคำนวณ Compression index, c_c

b) ถ้าลดหน่วยแรงกดจนกระทั่งเหลือหน่วยแรงกดกระทำบนตัวอย่างเป็น 200 kPa และอัตราส่วนโพรงเพิ่มขึ้นเป็น 1.45 จงคำนวณ Recompression index, c_r และ OCR

c) ถ้ากดตัวอย่างเพิ่มขึ้นอีกจนมีหน่วยแรงกดเป็น 500 kPa จงคำนวณอัตราส่วนโพรง

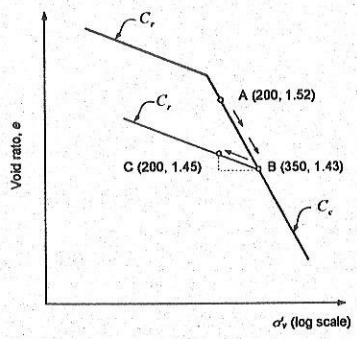
a) ถ้าจุดอยู่บน Normally consolidated line จะได้เส้นกราฟดังรูป



$$c_c = -\frac{\Delta e}{\Delta\log\sigma'_v}$$

$$c_c = -\frac{1.52-1.43}{\log 200-\log 350} = 0.37$$

b) ถ้าลดหน่วยแรงกดจนกระทั่งเหลือหน่วยแรงกดกระทำบนตัวอย่างเป็น 200 kPa



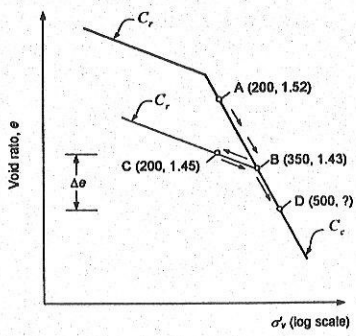
$$c_r = -\frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v}$$

$$c_r = -\frac{1.45 - 1.43}{\log 200 - \log 350} = 0.08$$

$$OCR = \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{v0}} = \frac{350}{200} = 1.75$$

c) ถ้ากดตัวอย่างเพิ่มขึ้นอีกจนหน่วยแรงกดเท่ากับ 500 kPa จงคำนวณอัตราส่วนโพรง

ถ้าเราเพิ่มหน่วยแรงกดจาก 200 kPa ไปเป็น 500 kPa จะผ่านเส้นตรงที่มีความชันต่างกัน ดังนั้น จึงแบ่งการคำนวณออกเป็นสองช่วง ดังสมการ



$$\Delta e = c_r(\log 350 - \log 200) + c_c(\log 500 - \log 350)$$

$$\Delta e = 0.08\left(\log \frac{350}{200}\right) + 0.37\left(\log \frac{500}{350}\right)$$

$$\Delta e = 0.077$$

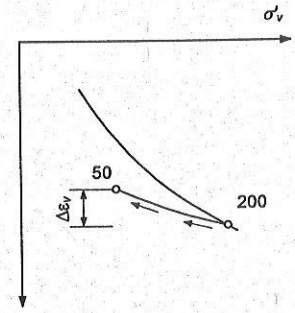
$$e_D = e_C - \Delta e$$

$$e_D = 1.45 - 0.077$$

$$e_D = 1.37$$

ตัวอย่างที่ 6 ในการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ เมื่อกดตัวอย่างด้วยหน่วยแรงกด 200 kPa พบว่าตัวอย่างมีความหนา 18mm ถ้าลดหน่วยแรงกดลงจนเหลือ 50 kPa ทำให้ดินขยายตัวขึ้นมา 0.5mm จงคำนวณ Modulus of volume compressibility (m_v) และ Confined Elastic Modulus E'_c

ในการคำนวณค่า m_v เราจะเขียนกราฟโดยให้แกนราบเป็น σ'_v (ไม่ใช่ log σ'_v) และแกนตั้งเป็น ε_v



1. ที่หน่วยแรงกด 200 kPa ตัวอย่างจะมี ε_v

$$\varepsilon_v = \frac{20-18}{20} = 0.1$$

2. ที่หน่วยแรงกด 50 kPa ตัวอย่างจะมี ε_v

$$\varepsilon_v = \frac{20-18.5}{20} = 0.075$$

3. คำนวณค่า m_v

$$m_v = \frac{\Delta\varepsilon_v}{\Delta\sigma'_v} = \frac{0.1-0.075}{200-50} = 1.67\times10^{-4}\ \frac{\text{m/m}}{\text{kPa}}$$

3. คำนวณค่า E'_c

$$E'_c = \frac{1}{m_v} = \frac{1}{1.67\times10^{-4}} = 5988\ \text{kPa}$$

ตัวอย่างที่ 7 เก็บตัวอย่างขึ้นมาจากความลึก 10m และนำมาทดสอบการอัดตัวคายน้ำโดยใช้ตัวอย่างเส้นผ่านศูนย์กลาง 75mm หนา 20mm ในขณะทำการทดสอบกดด้วยหน่วยแรงกดค่าหนึ่งพบว่าต้องใช้เวลา 15 นาทีจึงจะมี Degree of consolidation= 50%

a) ถ้าชั้นดินจริงหนา 10m มีหน่วยแรงกดและมีการระบายน้ำเหมือนกับตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ จงคำนวณเวลาที่ดินจริงจะมี degree of consolidation = 50%

b) ถ้าชั้นดินจริงหนา 10m มีหน่วยแรงกดเท่ากับหน่วยแรงกดในห้องปฏิบัติการ จงคำนวณเวลาที่ดินจริงจะมี degree of consolidation = 50% ถ้าชั้นดินจริงระบายน้ำได้ทางเดียว

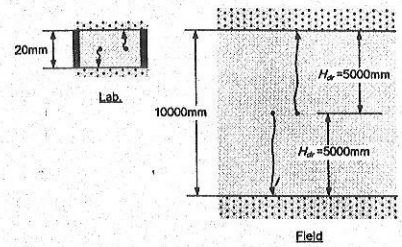
a) ถ้าดินมี Degree of consolidation เท่ากันจะมี T_v เท่ากัน

$$\frac{c_v t_{field}}{\left(H_{dr}^2\right)_{field}} = \frac{c_v t_{lab}}{\left(H_{dr}^2\right)_{lab}}$$

$$t_{field} = \frac{\left(H_{dr}^2\right)_{field}}{\left(H_{dr}^2\right)_{lab}}\left(t_{lab}\right)$$

$$t_{field} = \frac{(10000/2)^2}{(20/2)^2}(15\,\text{min})$$

$$t_{field} = 7.13\text{years}$$

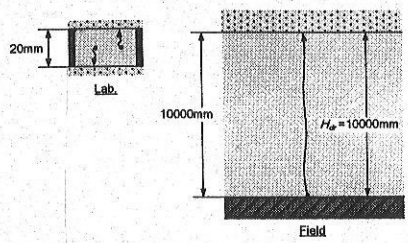


b) ถ้าชั้นดินจริงมีการระบายน้ำได้ทางเดียว

$$t_{field} = \frac{\left(H_{dr}^2\right)_{field}}{\left(H_{dr}^2\right)_{lab}}\left(t_{lab}\right)$$

$$t_{field} = \frac{(10000)^2}{(20/2)^2}(15\,\text{min})$$

$$t_{field} = 28.54\text{years}$$



ตัวอย่างที่ 8 ฐานรากของถังเก็บน้ำวางอยู่บนชั้นดินดังรูป ก่อนก่อสร้างได้เก็บตัวอย่างมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยตัวอย่างมีขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 75mm หนา 20mm และได้ความชื้นในดินก่อนทดสอบ = 62%, Gs = 2.7 ในการทดสอบจะเพิ่มน้ำหนักและรอจนกระทั่งแน่ใจว่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดจากน้ำหนักกดทับระบายออกไปหมด ผลการทดสอบแสดงในตาราง

ถ้าบรรจุน้ำเต็มถังจะเกิดหน่วยแรงกดขึ้นที่ผิวบนของชั้นดินเหนียว 90 kPa และเกิดหน่วยแรงกด 75 kPa ที่ผิวล่างของชั้นดินเหนียว

a) จงคำนวณการทรุดตัวเนื่องจาก primary consolidation เมื่อมีน้ำบรรจุอยู่เต็มถัง

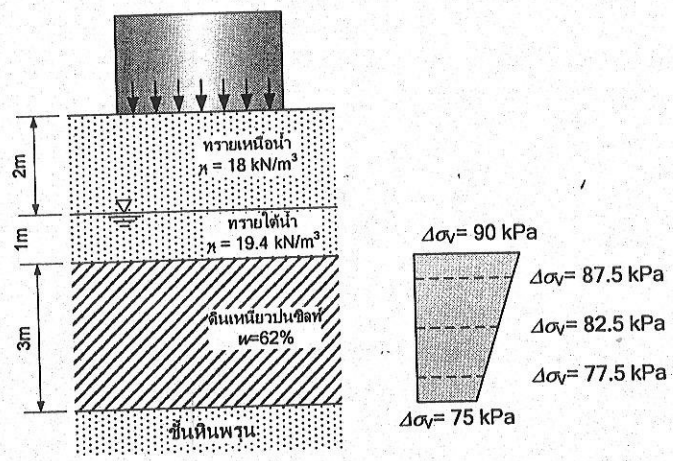
b) จงเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทรุดตัวและเวลา

หน่วยแรงกดกับระยะยุบตัว

σ'_v (kPa)	ระยะยุบของตัวอย่าง (mm)
15	0.10
30	0.11
60	0.21
120	1.13
240	2.17
480	3.15

เวลาและระยะยุบตัวที่หน่วยแรงกด 200 kPa

เวลา (min)	ระยะยุบของตัวอย่าง (mm)
0	0
0.25	0.22
1	0.42
4	0.6
9	0.71
16	0.79
36	0.86
64	0.91
100	0.93



a) คำนวณส่วนที่จำเป็นซึ่งได้แก่

อัตราส่วนโพรงเริ่มต้น $e_0 = wG_s$

$$e_0 = 0.62(2.7) = 1.67$$

หน่วยน้ำหนักของดินเหนียว

$$(\gamma_t)_{clay} = \gamma_w \frac{G_s + e}{1+e}$$

$$(\gamma_t)_{clay} = 9.8\frac{2.7+1.67}{1+1.67}$$

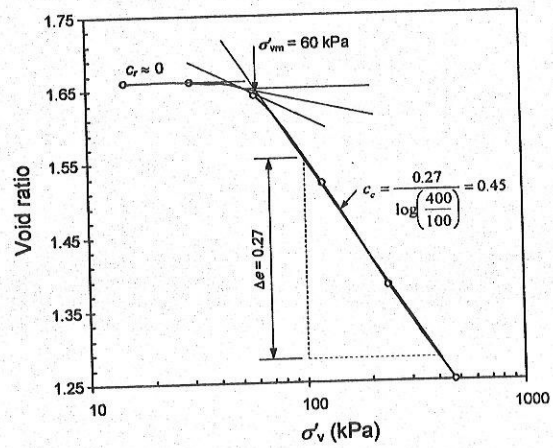
$$(\gamma_t)_{clay} = 16\text{kN/m}^3$$

เขียนกราฟเพื่อหาค่า c_c และ σ'_{vm}

ความหนาตัวอย่างเริ่มต้น, H_0 = 20mm

σ'_v (kPa)	ระยะยุบของตัวอย่าง ΔH, (mm)	ความสูงของตัวอย่าง (mm)	อัตราส่วนโพรง e
15	0.10	19.90	1.66
30	0.11	19.89	1.66
60	0.21	19.79	1.64
120	1.13	18.87	1.52
240	2.17	17.83	1.38
480	3.15	16.85	1.25

$$e = e_0 - \frac{\Delta H}{H_0}(1 + e_0)$$



เพื่อความละเอียดของผลการคำนวณเราจะแบ่งชั้นดินเหนียวออกเป็น 3 ชั้นซึ่งหนาชั้นละ 1 เมตร แล้วคำนวณการทรุดตัวของแต่ละชั้นย่อยจากนั้นนำมารวมกัน

ชั้นที่	σ'_{v0} ที่กึ่งกลางชั้นย่อย (kPa)	$\Delta\sigma'_v$ (kPa)	$\sigma'_{v0}+\Delta\sigma'_v$ (kPa)	ρ prim. conso. (mm)
1	48.7	87.5	136.2	75.3
2	54.9	82.5	137.4	67.1
3	61.1	77.5	138.6	59.9
			รวม	202.3

$$\rho_{\text{prim.conso.}} = \frac{H_0}{1+e_0} c_r \log\left(\frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{v0}}\right) + \frac{H_0}{1+e_0} c_c \log\left(\frac{(\sigma'_v)_{\text{final}}}{\sigma'_{vm}}\right)$$

จากกราฟเราพบว่าค่า c_r น้อยมากๆ จนเกือบจะเท่ากับศูนย์ ในการคำนวณนี้จึงไม่ได้นำส่วนที่เป็น recompression มาคำนวณด้วย

จากข้อ (a) ถ้าเราไม่แบ่งชั้นดินออกเป็นชั้นย่อยๆ แต่คิดความหนาของชั้นดินเป็น 3m จะได้

$$\rho_{\text{prim.conso.}} = \frac{3}{1+1.67}(0.45)\log\left(\frac{137.4}{54.9}\right)$$

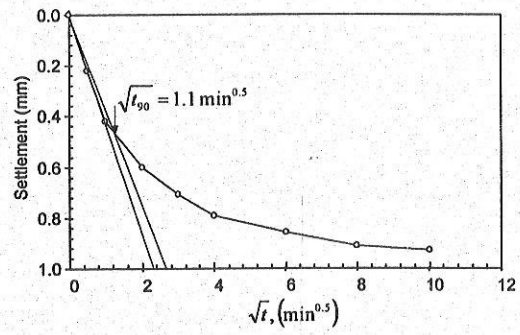
$$\rho_{\text{prim.conso.}} = 201.4\text{mm}$$

จะเห็นได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้แตกต่างจากกรณีที่แบ่งชั้นดินเป็นหลายๆชั้น

b) เขียนกราฟการทรุดตัวที่สัมพันธ์กับเวลา

ในการเขียนกราฟการทรุดตัวเทียบกับเวลา เราจะคำนวณการทรุดตัวที่ U=0% ไปจนถึง U=100% ซึ่งเมื่อเรารู้ค่า U เราจะหาค่า T_v (จากตาราง)ได้ จากนั้นไปคำนวณเป็นเวลา ($t = T_v(H_{dr})^2/c_v$) และการทรุดตัวที่ค่า U ใดๆ คำนวณได้จาก $\rho_t = (U)(\rho_{\text{primary conso.}})$

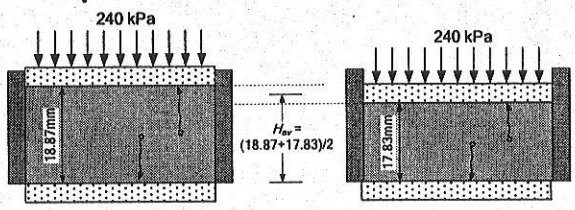
สำหรับค่า c_v เราจะต้องเลือกใช้ค่า c_v ซึ่งสอดคล้องกับหน่วยแรงกดที่เกิดขึ้น ในกรณีนี้เราใช้ค่า c_v ที่หน่วยแรงกดมีค่าเท่ากับ 240 kPa



$$t_{90} = (1.1)^2 = 1.21\text{min}$$

$$c_v = \frac{T_v H_{dr}^2}{t_{90}}$$

H_{dr} เป็นความหนาของตัวอย่าง แต่เนื่องจากความหนาของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงตลอดเราจึงใช้ค่าเฉลี่ยความหนา โดยมีหลักการดังรูป



เมื่อเริ่มกดตัวอย่าง หลังจากสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำ

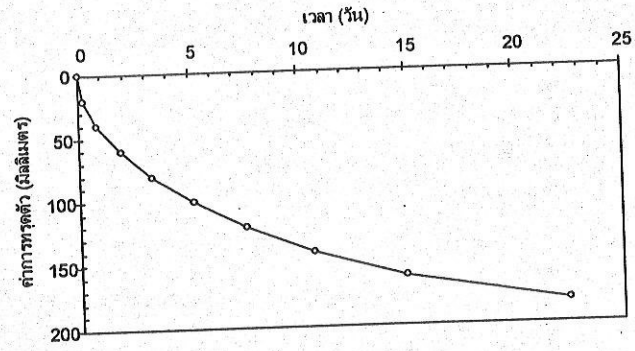
$$H_{av} = \frac{18.87 + 17.83}{2} = 18.35\text{mm}$$

เนื่องจากระบายน้ำสองทาง

$$c_v = \frac{0.848(18.35/2)^2}{1.21} = 58.99\text{mm}^2/\text{min}$$

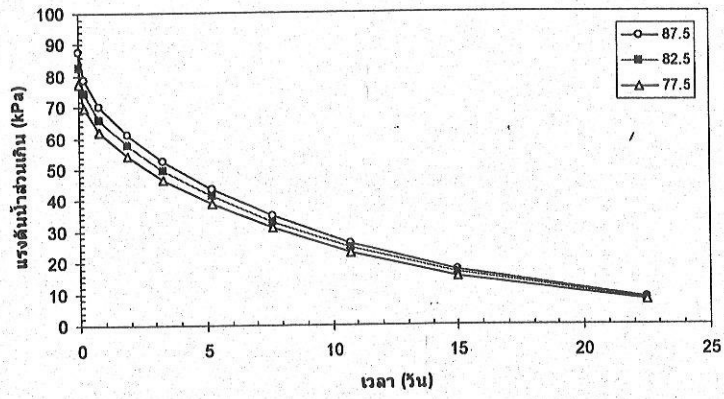
การคำนวณค่าการทรุดตัวที่เวลาใดๆ

U (%)	T_v	$\rho_t = U \times \rho_{prim.\ conso.}$ (mm)	$t = \frac{T_v H_{dr}^2}{c_v} \frac{1}{60 \times 24}$ (วัน)
10	0.008	0.1*202.3=20.2	$(0.008*1.5^2)/58.99 \times 10^{-6} = 0.2$
20	0.031	0.2*202.3=40.5	$(0.031*1.5^2)/58.99 \times 10^{-6} = 0.8$
30	0.071	0.3*202.3=60.7	$(0.071*1.5^2)/58.99 \times 10^{-6} = 1.9$
40	0.126	0.4*202.3=80.9	$(0.126*1.5^2)/58.99 \times 10^{-6} = 3.3$
50	0.197	0.5*202.3=101.2	$(0.197*1.5^2)/58.99 \times 10^{-6} = 5.2$
60	0.287	0.6*202.3=121.4	$(0.287*1.5^2)/58.99 \times 10^{-6} = 7.6$
70	0.403	0.7*202.3=141.6	$(0.403*1.5^2)/58.99 \times 10^{-6} = 10.7$
80	0.567	0.8*202.3=161.8	$(0.567*1.5^2)/58.99 \times 10^{-6} = 15$
90	0.848	0.9*202.3=182.1	$(0.848*1.5^2)/58.99 \times 10^{-6} = 22.5$

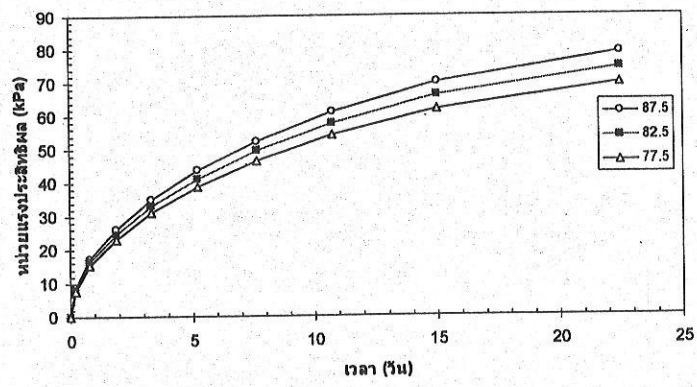


กราฟค่าการทรุดตัวเทียบกับเวลา

ซึ่งเราจะเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันน้ำส่วนเกินที่ชั้นดินใดๆกับเวลา
หรือ
ความสัมพันธ์ระหว่าง หน่วยแรงประสิทธิผลกับเวลาได้เช่นกัน



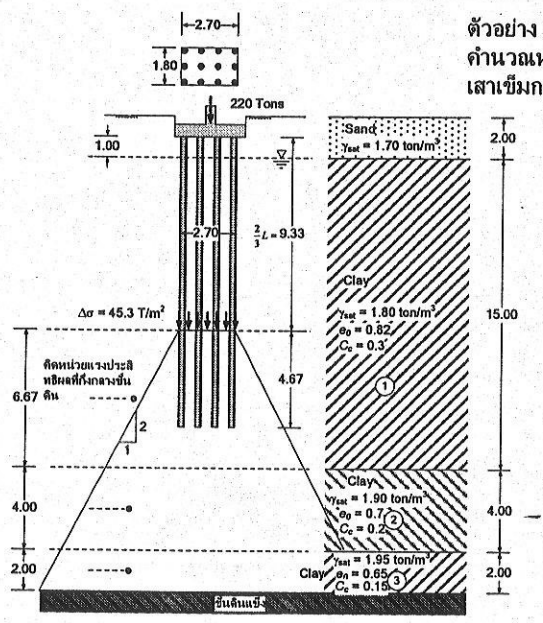
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินที่ชั้นดินใดๆกับเวลา



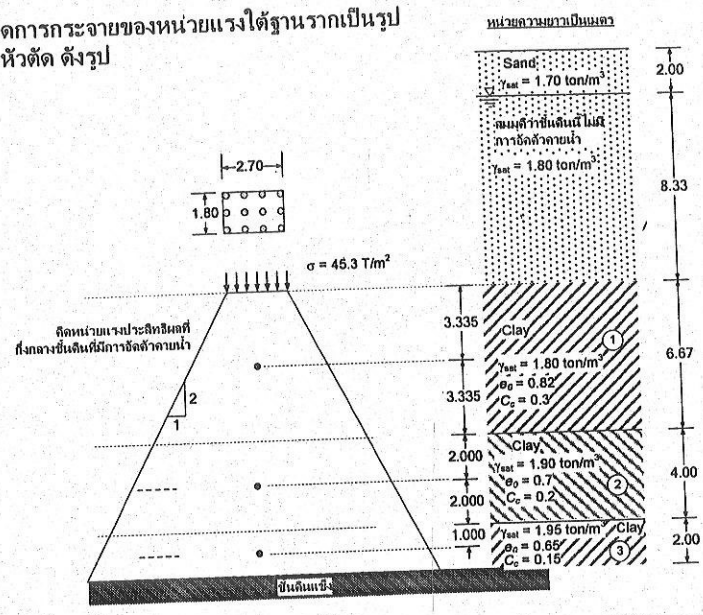
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงประสิทธิผลที่ชั้นดินใดๆกับเวลา

ตัวอย่างจาก Foundation engineering

ตัวอย่าง จากเสาเข็มกลุ่มซึ่งมีข้อมูลดังรูปจง คำนวณหา Consolidation settlement ของเสาเข็มกลุ่มนี้



เราจะคิดการกระจายของหน่วยแรงใต้ฐานรากเป็นรูปปีรามิดหัวตัด ดังรูป



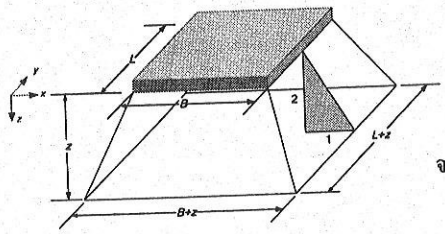
1. คำนวณหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้น ณ. จุดกึ่งกลางชั้นดินที่จะคำนวณการทรุดตัว

$$\Delta\sigma = \frac{Q}{(B+z)(L+z)}$$

$$\Delta\sigma_{v(1)} = \frac{220}{(1.8+3.335)(2.7+3.335)} = 7.1\ \text{t/m}^2$$

$$\Delta\sigma_{v(2)} = \frac{220}{(1.8+8.67)(2.7+8.67)} = 1.85\ \text{t/m}^2$$

$$\Delta\sigma_{v(3)} = \frac{220}{(1.8+11.67)(2.7+11.67)} = 1.13\ \text{t/m}^2$$



จากบทที่ 4 เรื่องหน่วยแรงในมวลดิน

2. คำนวณหน่วยแรงประสิทธิผลของดินเดิม, σ'_{v0}

$$\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u$$

$$\sigma'_{v0(1)} = (1.7\times 2)+(1.8\times(8.33+3.335))-1.0(8.33+3.335) = 12.73\ \text{t/m}^2$$

$$\sigma'_{v0(2)} = (1.7\times 2)+(1.8\times 15)+(1.9\times 2)-1.0(1+15+2) = 16.2\ \text{t/m}^2$$

$$\sigma'_{v0(3)} = (1.7\times 2)+(1.8\times 15)+(1.9\times 4)+(1.95\times 1)-1.0(1+15+4+1) = 18.95\ \text{t/m}^2$$

3. คำนวณการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ

$$\Delta S = \frac{H}{1+e_0} c_c \log\left(\frac{\sigma'_{v0}+\Delta\sigma_v}{\sigma'_{v0}}\right)$$

$$\Delta S_{(1)} = \frac{(0.3)(6.67)}{1+0.82}\log\left(\frac{12.73+7.1}{12.73}\right) = 0.2\ \text{m}$$

$$\Delta S_{(2)} = \frac{(0.2)(4.0)}{1+0.7}\log\left(\frac{16.2+1.85}{16.2}\right) = 0.022\ \text{m}$$

$$\Delta S_{(3)} = \frac{(0.15)(2.0)}{1+0.65}\log\left(\frac{18.95+1.13}{18.95}\right) = 0.00457\ \text{m}$$

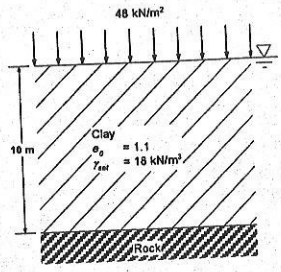
$$\Delta S = \Delta S_{(1)} + \Delta S_{(2)} + \Delta S_{(3)} = 0.2+0.022+0.00457 = 0.23\ \text{m}$$

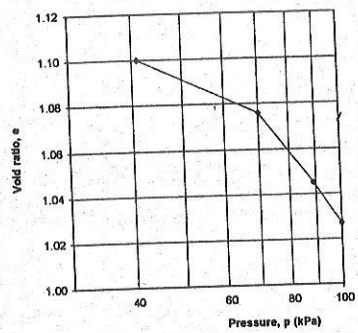
ตัวอย่างเมื่อปี 2543

ตัวอย่างที่ 1 ผลการทดสอบ Consolidation ของตัวอย่างดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำตัวอย่างหนึ่ง แสดงในตาราง ถ้าความหนาของตัวอย่างก่อนทดสอบคือ 19 มม. จงคำนวณหาค่า cv

Time from start of loading (min)	Specimen compression (mm)
0.00	0.61
0.25	0.96
0.50	1.06
0.75	1.16
1.00	1.24
1.50	1.35
2.25	1.45
4.00	1.60
5.00	1.66
7.00	1.73
11.00	1.79
16.00	1.82
30.00	1.86
90.00	1.92

ตัวอย่างที่ 2 ชั้นดินเหนียวหนา 10 เมตรและมีผลการทดสอบ Consolidation ดังรูปถ้าถมดินทำให้มีหน่วยแรงกดที่ผิวดินเป็น 48 kPa จงคำนวณหาการทรุดตัวเนื่องจาก Primary consolidation





ตัวอย่างที่ 4 ในการทดสอบ Consolidation test ของตัวอย่าง ST-5 ในห้องปฏิบัติการได้ผลการทดสอบดังนี้

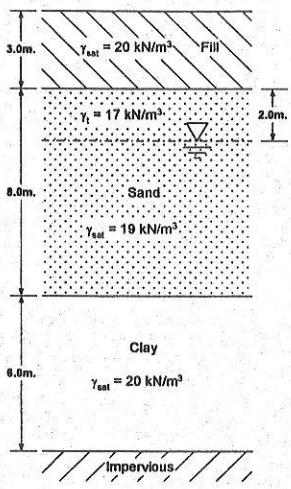
Mean stress, p (kN/m²)	Void ratio at end of consolidation, e
140	0.92
212	0.86

ถ้าตัวอย่างมีความหนาเริ่มต้น 25.4 mm และมีการระบายน้ำ 2 ทาง ระยะเวลาที่ใช้ในการ Consolidate ตัวอย่างให้มี Average degree of consolidation = 50% คือ 4.5 นาที จงคำนวณหา

a) การทรุดตัวที่คาดว่าจะเกิดขึ้นมากที่สุดถ้าชั้นดินมีความหนา 2.8 เมตร และกึ่งกลางชั้นดินมี σ'_{v0} = 140 kPa และ $\Delta\sigma$= 72 kPa

b) ระยะเวลาที่จะเกิดการทรุดตัว = 40 mm. นับตั้งแต่เริ่ม Apply stress

ตัวอย่างที่ 5 จากชั้นดินดังรูปถ้าต้องการถมดินสูง 3 เมตร (γ_t = 20 kN/m³) เป็นบริเวณกว้างมาก



คุณสมบัติของดินเหนียว

σ'_{v0}= 100 kN/m² มี e_0 = 0.88

C_c = 0.32

C_v = 1.26 m²/year

a) จงคำนวณหาการทรุดตัวเนื่องจากการถมดินหลังจากเวลาผ่านไป 3 ปี

b) ถ้าสมมุติว่ามีชั้นทรายซึ่งระบายน้ำได้ดีแทรกอยู่ดังรูป จงคำนวณหาการทรุดตัวเมื่อเวลาผ่านไป 3 ปี

ตัวอย่างที่ 6 ในการสร้างคันดินถมบนชั้นดินอ่อน ซึ่งคาดว่าในอนาคตจะมีหน่วยแรงกดเพิ่มขึ้นในชั้นดินเหนียว $\Delta\sigma$ = 115 kN/m² ถ้า In-situ effective stress (σ'_{v0} = 210 kN/m²) ก่อนทำการก่อสร้างได้มีการเก็บตัวอย่างมาทดสอบในห้องปฏิบัติการได้ผลดังนี้ C_c = 0.28, e_0 = 0.9, C_v = 0.36 m²/month (ถ้าดินเป็นดินแบบ Normally consolidated clay) จงคำนวณหา

a) การทรุดตัวเนื่องจาก Primary consolidation ที่จะเกิดขึ้นในกรณีที่ไม่มี pre-compression
b) Surcharge ที่จะต้องใช้เพื่อเร่งให้เกิด primary consolidation หมดภายใน 9 เดือน

ตัวอย่างที่ 7 Budhu

The soil profile at a site for a proposed office building consists of a layer of fine sand 10.4m thick above a layer of soft normally consolidated clay 2

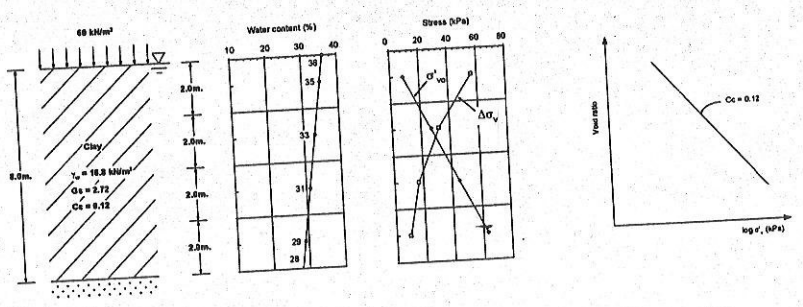
ตัวอย่างที่ 7 ตัวอย่างที่ 3 Normally Consolidated clay หนา 8 เมตร ถ้ามี net uniform pressure 60 kN/m^2 กระทำที่ผิวดิน จงหาปริมาณการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำให้ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ระดับผิวดิน

Bulk unit weight = 18.8 kN/m^2

Specific gravity = 2.72

Compression index (C_c)= 0.12

ความชื้นในดินลดลงเป็นเส้นตรงจาก 36% ที่ระดับผิวดินถึง 28% ที่ความลึก 8 m



Layer	Layer thickness (m)	Depth @ mid layer (m)	σ'_{vo} (kPa)	$\Delta\sigma_v$ (kPa)	$P = log\left(\frac{\sigma'_{vo}+\Delta\sigma}{\sigma'_{vo}}\right)$	$\Delta e = C_c{}^*P$	w_o (%)	$e_o = w^*Gs$	$\Delta H = \left[\frac{Cc}{1+e_o} log\left(\frac{\sigma'_{vo}+\Delta\sigma}{\sigma'_{vo}}\right)\right](H)$
1	2.0	1.0	9.00	56.4	0.861	0.103	35.0	0.952	0.106
2	2.0	3.0	27.00	32.4	0.342	0.041	33.0	0.898	0.043
3	2.0	5.0	45.00	16.8	0.138	0.017	31.0	0.843	0.018
4	2.0	7.0	63.00	9.6	0.062	0.007	29.0	0.789	0.008

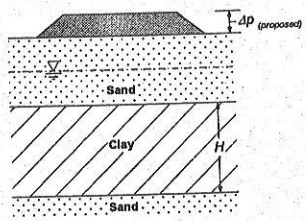
Total settlement = 0.175 m

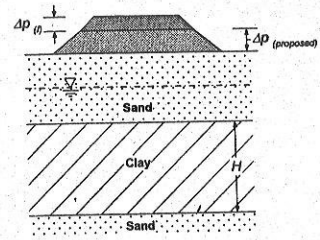
จบเรื่อง Consolidation

การเร่งการทรุดตัว (Pre-compression, Pre-loading)

ถ้าต้องการสร้างโครงสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีการทรุดตัวสูง จะใช้วิธีเร่งการทรุดตัว (Pre-loading) เพื่อลดการทรุดตัวที่อาจจะเกิดขึ้นหลังจากที่ก่อสร้างโครงสร้างไปแล้ว

- ถ้าต้องการสร้างโครงสร้างที่มีหน่วยแรงกด $= \Delta\sigma'_{v\,(proposed)}$
- บนชั้นดินที่มีความหนา $= H_c$
- การทรุดตัวมากที่สุดเนื่องจาก Consolidation $= S_{(proposed)}$ คือ





การทรุดตัวจนหมดจะต้องใช้เวลา t_1

$$\rho_{(\text{proposed})} =$$

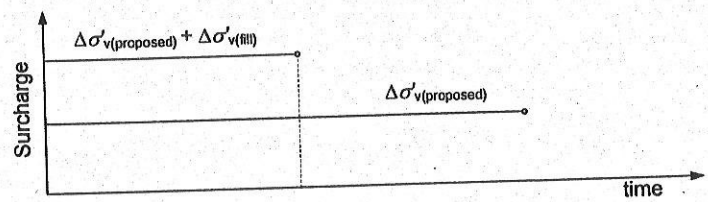
$$\frac{C_c H}{1+e_0}\log\left(\frac{\sigma'_{v0}+\Delta\sigma_{v(\text{proposed})}}{\sigma'_{v0}}\right)$$

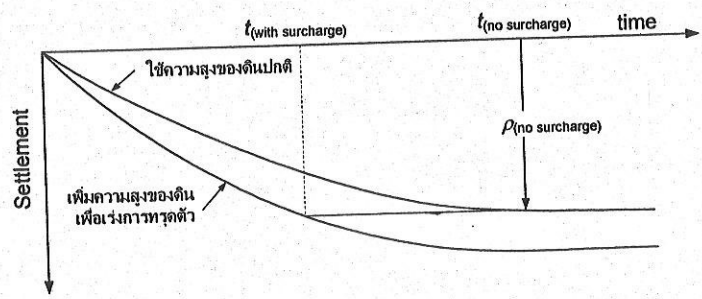
แต่ถ้าต้องการเร่งการทรุดตัวให้เร็วขึ้นจึงเพิ่มหน่วยแรงกด = $\Delta p_{(\text{fill})}$

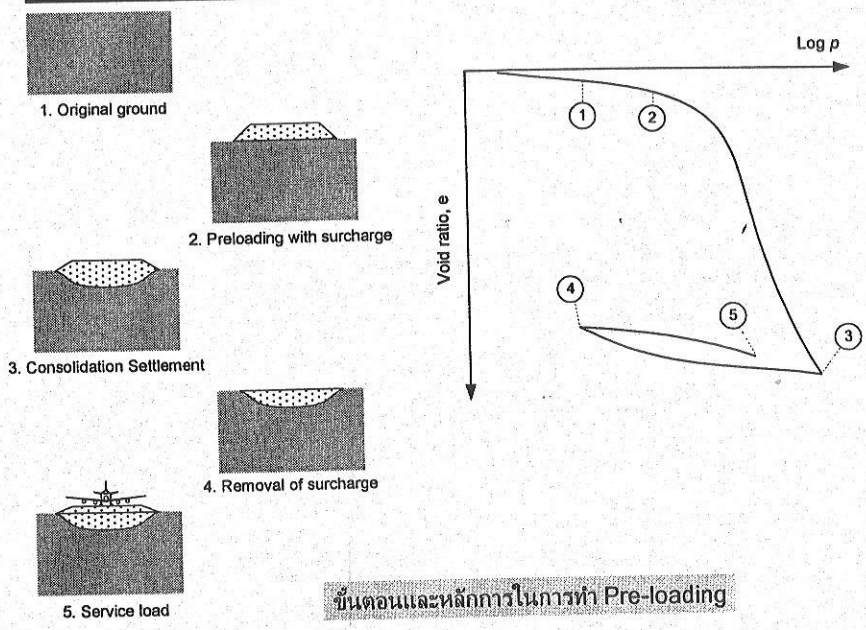
$$\rho_{(proposed\ +fill)} =$$

$$\frac{C_c \cdot H_c}{1+e_0}\log\left(\frac{\sigma'_{v0}+\left(\Delta\sigma'_{v(\text{proposed})}+\Delta\sigma'_{v(\text{fill})}\right)}{\sigma'_{v0}}\right)$$

การทรุดตัวจนหมดใช้เวลา t_2 หลังจากนั้นเอา $\Delta\sigma'_{v(\text{fill})}$ ออกก็จะไม่เกิดการทรุดตัวเพิ่มขึ้นอีก







ขั้นตอนและหลักการในการทำ Pre-loading

Chapter 7 Shear strength of soil

430321 Soil Mechanics

15 พฤศจิกายน 2548

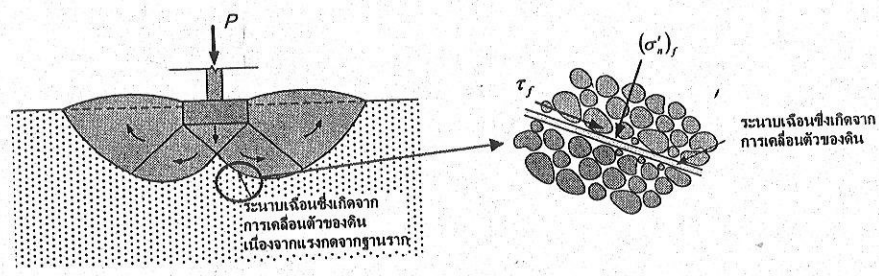
อ.ดร.พรพจน์ ตันเส็ง

download เอกสารนี้ได้จาก http://www.geocities.com/soil4sut

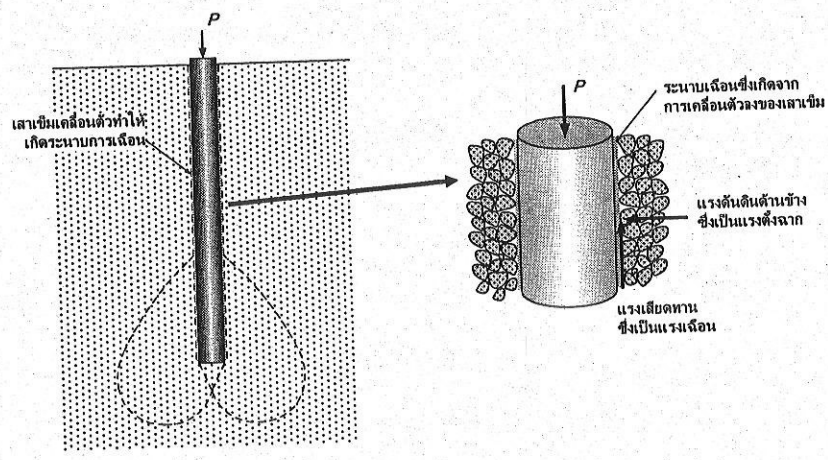
Shear strength of soil

เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำต่อดินจะเกิดหน่วยแรงขึ้นในเนื้อดิน ถ้าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นไม่เกินกำลังรับแรงเฉือนของดินก็จะไม่เกิดการวิบัติขึ้น แต่ถ้าเกินกว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแล้ว การวิบัติก็จะเกิดขึ้น

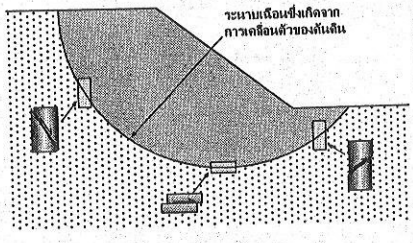
เราต้องศึกษาเรื่องกำลังต้านแรงเฉือนของดินเพื่อที่จะนำไปใช้วิเคราะห์ ปัญหาทางด้าน Soil Engineering เช่น

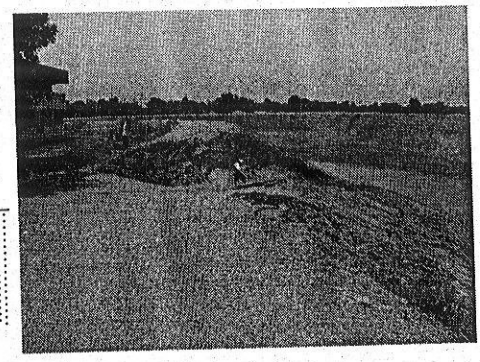


กำลังรับน้ำหนักของฐานรากตื้นเกิดจากแรงต้านทานต่อการเฉือนของดิน

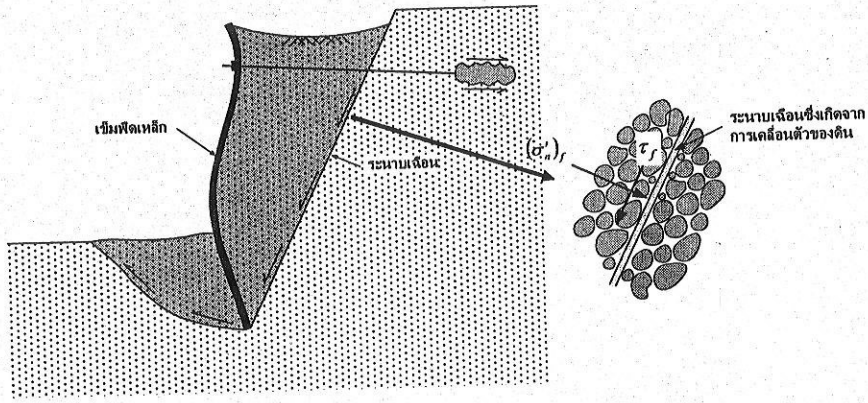


กำลังของเสาเข็มส่วนหนึ่งเกิดจากกำลังต้านการเฉือนของดิน



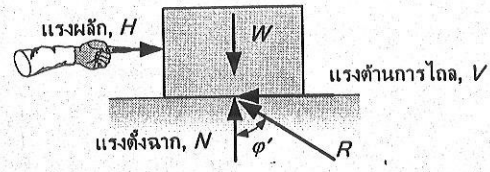


เสถียรภาพของลาดดินดิน (Slope stability)



กำแพงกันดิน

อธิบายกำลังรับแรงเฉือนของดินด้วยวิธีง่ายๆ



จากกฎของแรงเสียดทานของคูลอมบ์ (Coulomb's friction law) จากวิชาสถิตศาสตร์ ถ้าเราดันกล่องไม้ที่วางนิ่งอยู่บนพื้นซึ่งมีความฝืดให้เคลื่อนที่ เราจะต้องใช้แรงดันด้านข้าง H เท่ากับแรงเสียดทานระหว่างพื้นกับกล่อง (R)

$$V = \mu N$$

เมื่อ μ คือสัมประสิทธิความเสียดทานระหว่างพื้นกับกล่องซึ่งเท่ากับ

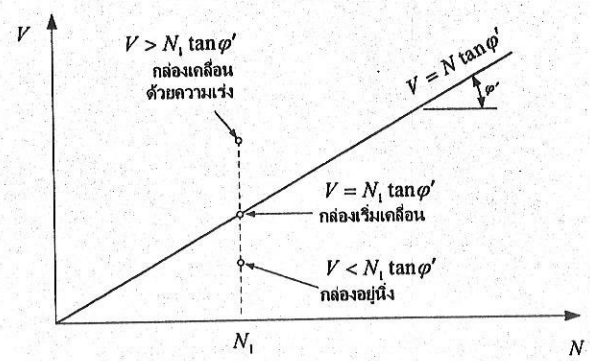
$$\mu = \tan \varphi'$$

ดังนั้น

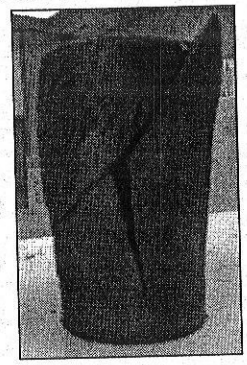
$$V = N \tan \varphi'$$

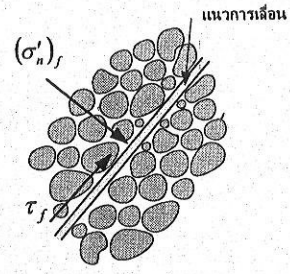
เมื่อ φ' คือ มุมเสียดทาน (angle of friction)

ซึ่งเมื่อเขียนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านการไถลกับแรงต้านทานในแนวดิ่งจะได้



จากสมการของแรงต้านการเคลื่อนที่ในรูปแบบการเฉือนระหว่างกล่องกับพื้น ถ้านำมาใช้พิจารณาหน่วยแรงเฉือนในดินจะได้





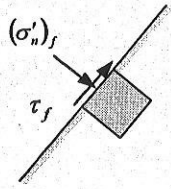
$$\tau_f = (\sigma'_n)_f \tan \varphi'$$

τ_f คือหน่วยแรงเฉือนในขณะที่ดินเริ่มถูกเฉือนให้เคลื่อนจากกัน

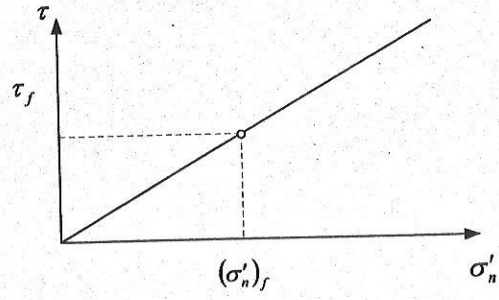
$(\sigma'_n)_f$ คือหน่วยแรงตั้งฉากบนระนาบที่เกิดการเฉือน

Mohr-Coulomb Failure Criterion

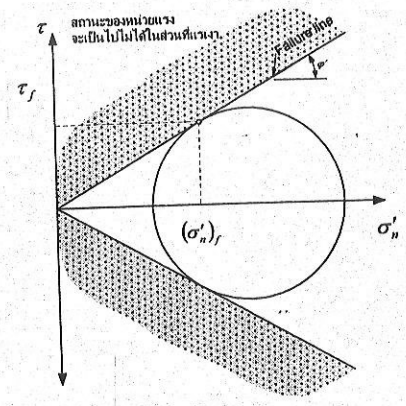
ในระนาบที่เกิดการเฉือนในดินนั้นจะมีทั้งหน่วยแรงตั้งฉากและหน่วยแรงเฉือน ซึ่งเมื่อเรานำมาเขียนจุดในแกน σ-τ จะได้จุดดังรูป



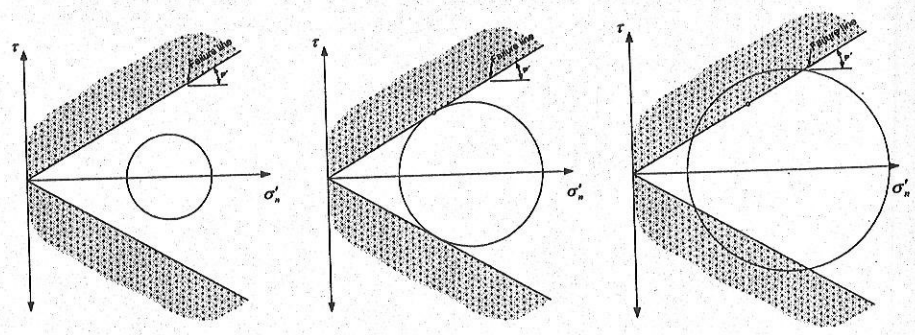
สถานนะของหน่วยแรง
บนระนาบที่เกิดการเฉือน



ซึ่งถ้าเราเขียนวงกลมของ Mohr ให้ผ่านจุดนี้โดยที่ไม่มีส่วนใดของวงกลมเกินเส้น failure line เลยจะได้วงกลมวงเดียวที่สัมผัสกับเส้น failure line ที่จุด $((\sigma'_n)_f, \tau_f)$ เท่านั้น



Mohr's circle ในกรณีของดินที่มี OCR = 1 ถึง 2 (Normally consolidated soil)



✓ (1) เป็นไปได้ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นไม่ทำให้ดินวิบัติ

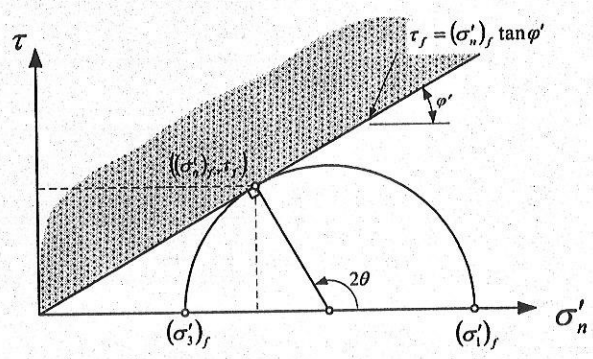
✓ (2) เป็นไปได้ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นทำให้ดินวิบัติ

✗ (3) เป็นไปไม่ได้ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเกินกว่าขอบเขตวิบัติ

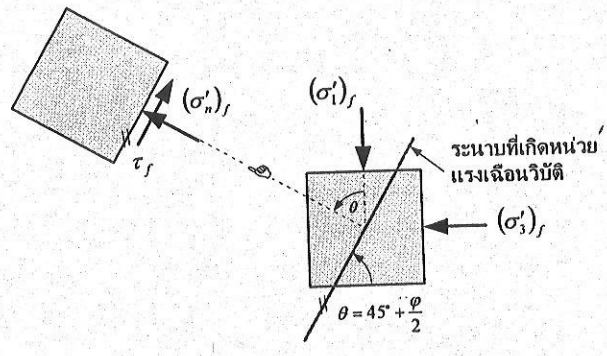
เราจะพิจารณาเฉพาะส่วนที่อยู่เหนือแกนราบขึ้นมาเท่านั้น เนื่องจากความสมมาตร

ถ้าเราทราบหน่วยแรงหลัก (Major principle stress และ Minor principle stress) เราจะหาสิ่งต่อไปนี้ได้

- ระนาบที่เกิดการวิบัติ
- หน่วยแรงตั้งฉากและหน่วยแรงเฉือนบนระนาบที่เกิดการวิบัตินี้



Mohr's circle



State of stress แสดงแนวและสถานะของหน่วยแรงของระนาบวิบัติ

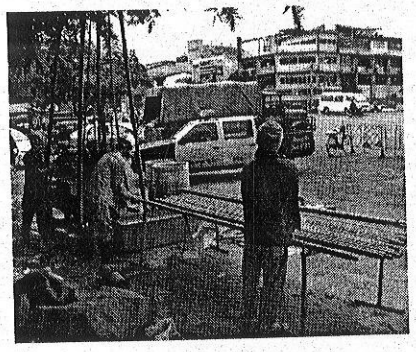
ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain

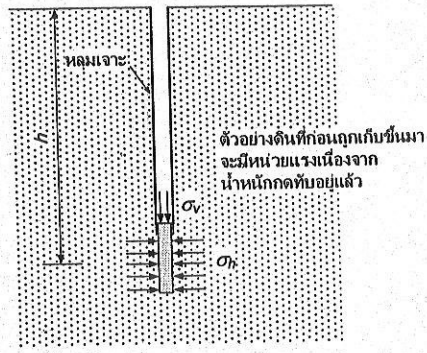
Mechanics of Materials

- หน่วยแรงภายใน (stress) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงภายนอก
- การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (strain) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงภายนอก

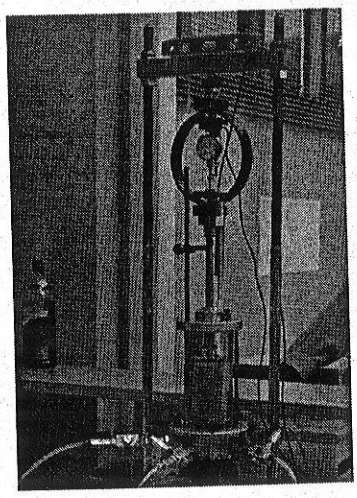
Soil mechanics

Soil mechanics ก็สนใจความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ต่อแรงกระทำเหมือนกัน จึงได้นำดินมาทำการทดสอบ ซึ่งในการทดสอบจะจำลองให้เหมือนกับสภาพธรรมชาติมากที่สุด

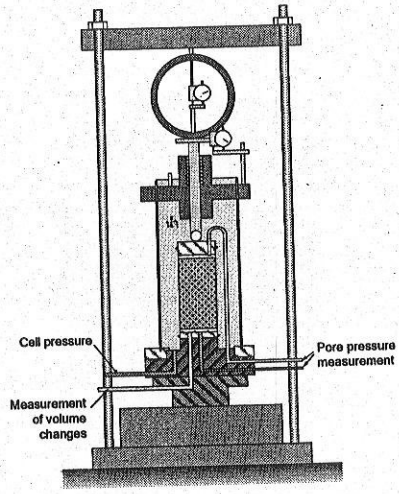




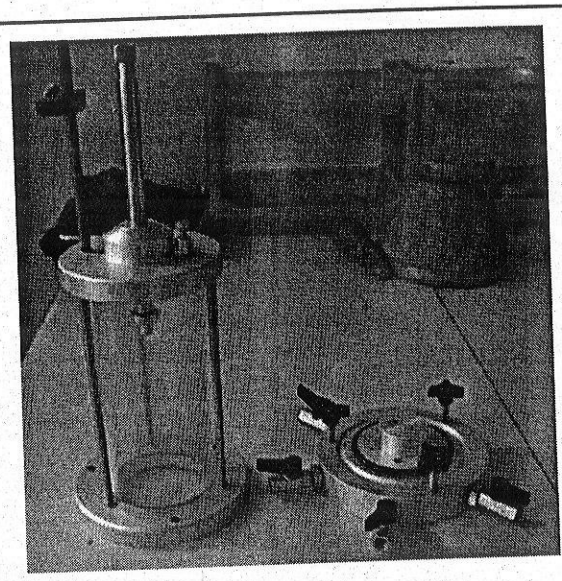
เครื่องมือที่ใช้ทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดิน



การทดสอบดินในห้องทดลอง

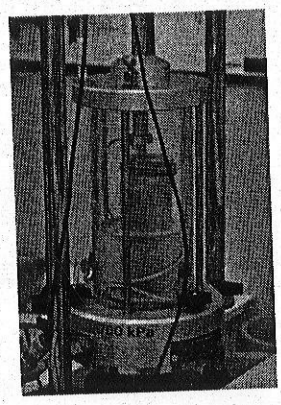


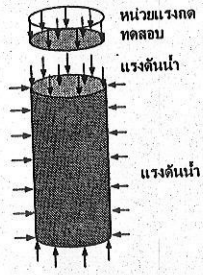
การทดสอบดินในห้องทดลอง



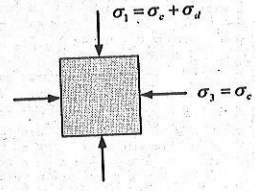
Triaxial cell

Triaxial test
เป็นวิธีการทดสอบหา Shear strength parameter ของดินโดยจำลองสภาพของตัวอย่างดินที่เก็บขึ้นมาให้เหมือนกับสภาพเดิมมากที่สุด

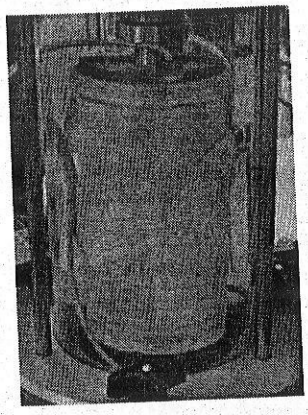


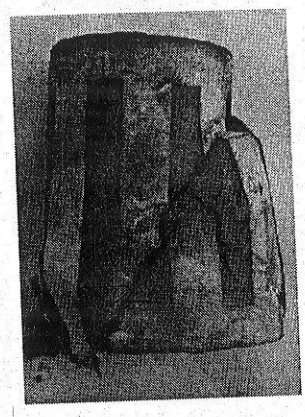


Free body diagram



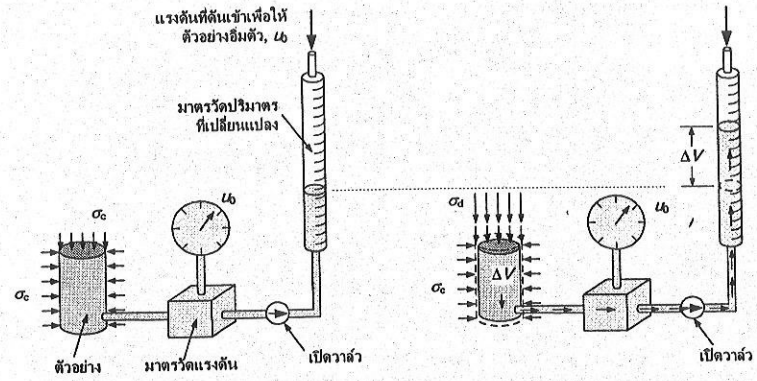
State of stress





ทดสอบจนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ

หลักการทดสอบแบบระบายน้ำ (Drained compression)
และแบบไม่ระบายน้ำ (undrained compression)



(a) ก่อนเพิ่มแรงในแนวดิ่ง

(b) หลังเพิ่มแรงในแนวดิ่ง
แรงดันน้ำไม่เพิ่มขึ้น $\Delta u = 0$
ปริมาตรของตัวอย่างลดลง $\Delta V \neq 0$

การทดสอบแบบระบายน้ำ (Drained compression test) เปิดวาล์วระบายน้ำ

ตัวอย่าง การคำนวณผลการทดสอบ Drained Triaxial

จากตารางข้อมูลการทดสอบ Drained triaxial จงเขียนกราฟ σ_d vs ε_a และ ε_v กับ ε_a

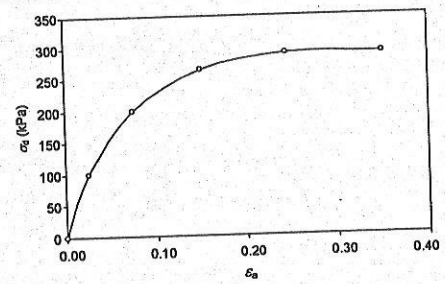
แรงกด (kN)	ความยาวที่เปลี่ยน (mm)	ปริมาตรที่เปลี่ยน ($mm^3 \times 10^3$)	Volumetric strain, ε_v	Axial strain, ε_a	พื้นที่หน้าตัด A (m^2)	Deviatoric stress, σ_d (kPa)
0	0	0.00				
115	-1.95	0.88				
235	-5.85	3.72				
325	-11.7	7.07				
394	-19.11	8.40				
458	-27.3	8.40				

เนื่องจากในขณะที่ตัวอย่างหดตัวขนาดหน้าตัดของตัวอย่างจะเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นเราจะต้องใช้หน้าตัดของตัวอย่างในขณะนั้นสำหรับคำนวณหน่วยแรง

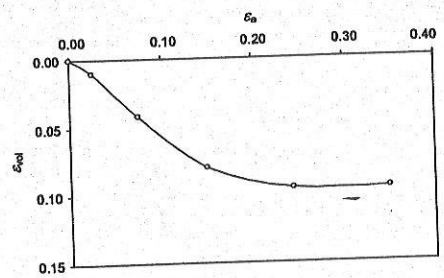
$$A = \frac{V}{H} = \frac{V_0 - \Delta V}{H_0 - \Delta H} = \frac{V_0\left(1 - \frac{\Delta V}{V_0}\right)}{H_0\left(1 - \frac{\Delta H}{H_0}\right)} = A_0\left(\frac{1 - \varepsilon_{\text{volume}}}{1 - \varepsilon_{\text{axial}}}\right)$$

แรงกด (kN)	ความยาวที่เปลี่ยน (mm)	ปริมาตรที่เปลี่ยน ($mm^3 \times 10^3$)	Volumetric strain, ε_v	Axial strain, ε_a	พื้นที่หน้าตัด (m^2)	Deviatoric stress, σ_d (kPa)
0	0	0.00	0.000	0.000	0.001134	0.00
115	-1.95	0.88	0.010	0.025	0.001151	99.86
235	-5.85	3.72	0.042	0.075	0.001174	200.07
325	-11.7	7.07	0.080	0.150	0.001227	264.76
394	-19.11	8.40	0.095	0.245	0.001359	289.83
458	-27.3	8.40	0.095	0.350	0.001579	290.05

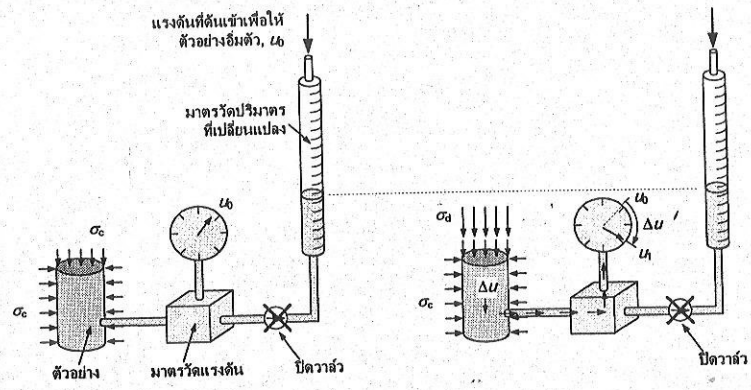
เขียนกราฟ



σ_d VS ε_a



ε_v กับ ε_a



(a) ก่อนเพิ่มแรงในแนวดิ่ง

(b) หลังเพิ่มแรงในแนวดิ่ง
แรงดันน้ำเพิ่มขึ้น $\Delta u \neq 0$
ปริมาตรของตัวอย่างไม่เปลี่ยนแปลง $\Delta V = 0$

การทดสอบแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Compression test) ปิดวาล์วระบายน้ำ

ตัวอย่าง การคำนวณผลการทดสอบ Undrained Triaxial

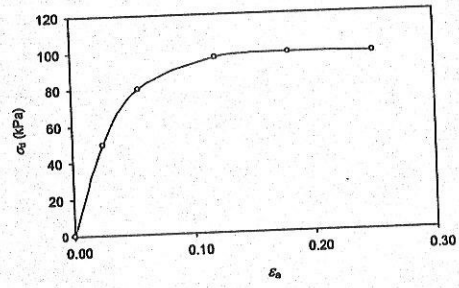
จากตารางข้อมูลการทดสอบ Undrained triaxial จงเขียนกราฟ σ_d vs ε_a และ u กับ ε_a

แรงกด (kN)	ความยาวที่เปลี่ยน (mm)	แรงดันน้ำในตัวอย่าง, u (kPa)	Axial strain, ε_a	พื้นที่หน้าตัด A (m^2)	Deviatoric stress, σ_d (kPa)
0	0	100			
58	-1.95	165			
96	-4.29	200			
124	-9.36	224			
136	-14.04	232			
148	-19.5	232			

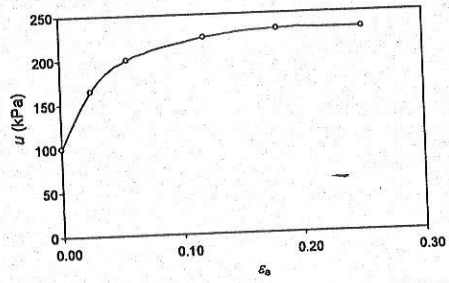
วิธีทำ

แรงกด (kN)	ความยาวที่เปลี่ยน (mm)	แรงดันน้ำในตัวอย่าง, u (kPa)	Axial strain, ε_a	พื้นที่หน้าตัด A (m^2)	Deviatoric stress, σ_d (kPa)
0	0	100	0.000	0.001134	0
58	-1.95	165	0.025	0.001163	50
96	-4.29	200	0.055	0.001200	80
124	-9.36	224	0.120	0.001289	96
136	-14.04	232	0.180	0.001383	98
148	-19.5	232	0.250	0.001512	98

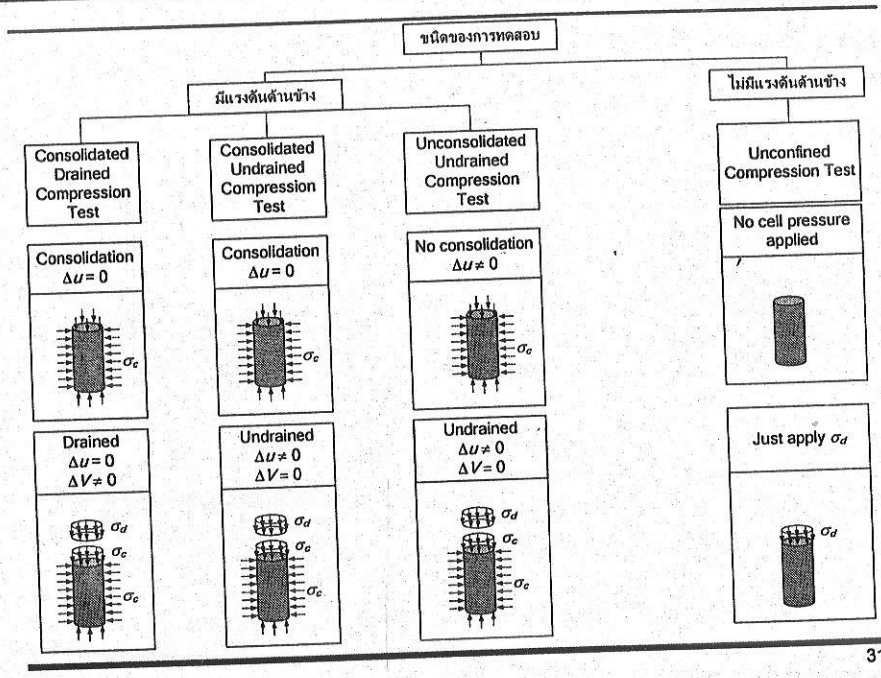
เขียนกราฟ

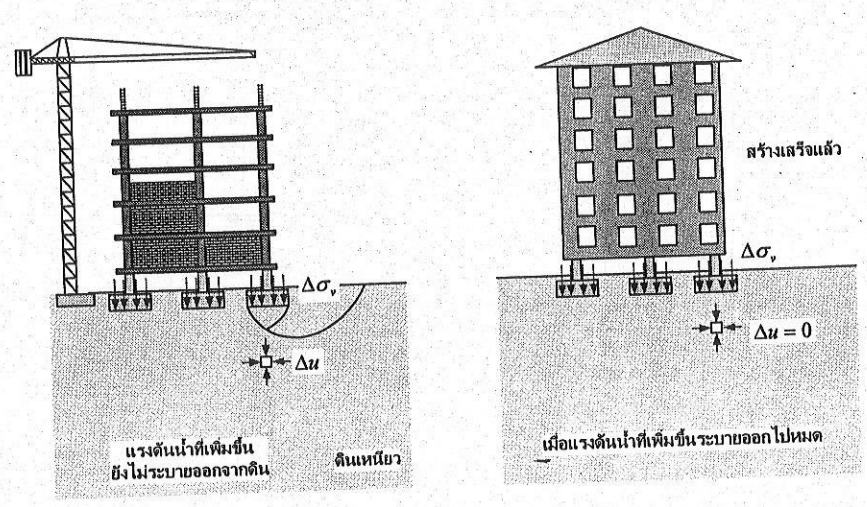


σ_d VS ε_a



u VS ε_a

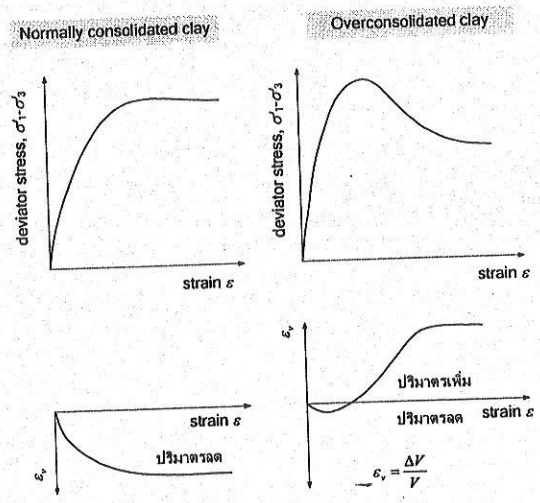

ชนิดของการทดสอบ
มีแรงดันด้านข้าง
ไม่มีแรงดันด้านข้าง
Consolidated Drained Compression Test
Consolidated Undrained Compression Test
Unconsolidated Undrained Compression Test
Unconfined Compression Test
Consolidation $\Delta u = 0$
Consolidation $\Delta u = 0$
No consolidation $\Delta u \neq 0$
No cell pressure applied
Drained $\Delta u = 0$ $\Delta V \neq 0$
Undrained $\Delta u \neq 0$ $\Delta V = 0$
Undrained $\Delta u \neq 0$ $\Delta V = 0$
Just apply σ_d
σ_c
σ_d


$\Delta\sigma_v$
Δu
แรงดันน้ำที่เพิ่มขึ้น
ยังไม่ระบายออกจากดิน
ดินเหนียว
สร้างเสร็จแล้ว
$\Delta\sigma_v$
$\Delta u = 0$
เมื่อแรงดันน้ำที่เพิ่มขึ้นระบายออกไปหมด

ผลที่ได้จากการทดสอบ Consolidated Drained

1. Deviator stress และ Strain

2. การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่าง ในการทดสอบชนิดนี้จะปล่อยให้น้ำไหลออกจากตัวอย่างตลอดการทดสอบ ทำให้ไม่มีแรงดันน้ำส่วนเกินค้างอยู่ในดิน และเมื่อน้ำไหลออกจากดินจะทำให้ปริมาตรเปลี่ยนแปลง

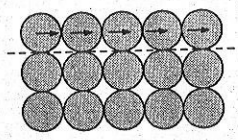


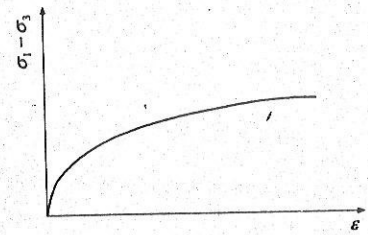
ตัวอย่างผลการทดสอบ Drained triaxial test

การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อดินรับแรงเฉือน

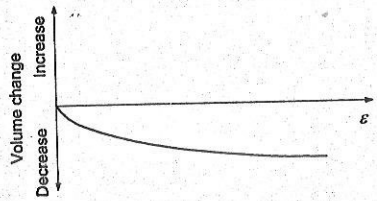
เมื่อดินรับแรงเฉือนอนุภาคของเม็ดดินจะมีการจัดเรียงตัวกันใหม่ให้เหมาะสมเพื่อต้านแรงเฉือน

แต่เม็ดดินก่อนถูกเฉือนเรียงตัวกันอย่างหลวม ๆ เม็ดดินจะเรียงตัวกันให้แน่นขึ้น (Void ratio ลดลง) เมื่อรับแรงเฉือน

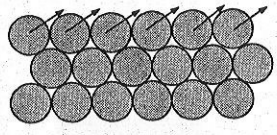


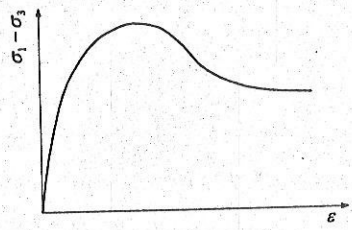


แผนภาพการจัดเรียงตัวของทราย หลวมหรือ Normally consolidated clay เมื่อรับแรงเฉือน

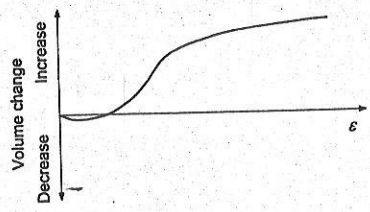


ถ้าเม็ดดินก่อนถูกเฉือนเรียงตัวอย่างแน่น เม็ดดินจะขยายตัวให้หลวมมากขึ้น (Void ratio เพิ่มขึ้น) เมื่อรับแรงเฉือน

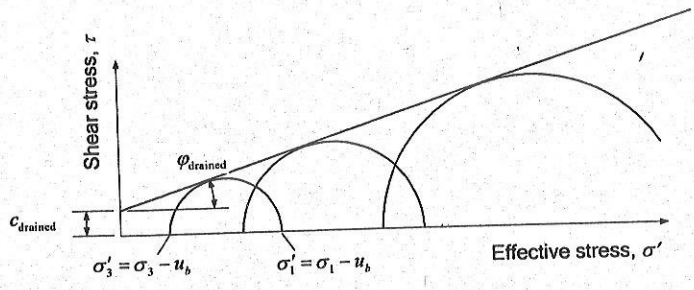




แผนภาพการจัดเรียงตัวของทราย แน่นหรือ Over consolidated clayเมื่อรับแรงเฉือน



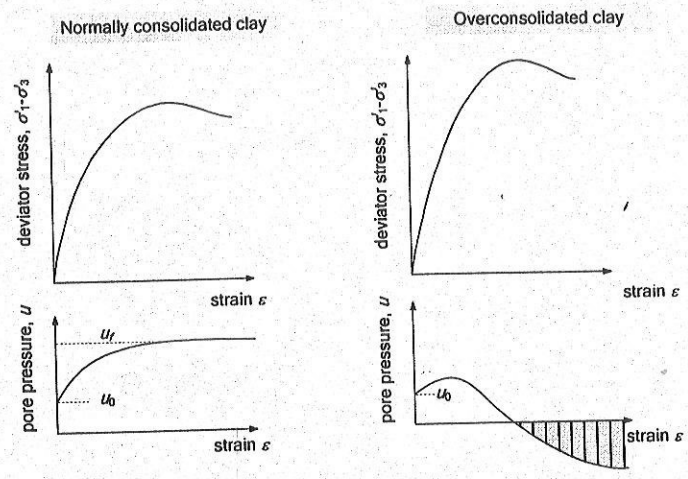
ซึ่งถ้านำหน่วยแรงหลักประสิทธิผล (Principle effective stress) มาเขียนวงกลมของ Mohr และลากเส้นสัมผัสวงกลมจะได้เส้นการวิบัติ



Mohr circle diagram for drained triaxial compression tests in terms of effective stresses (Head)

ผลที่ได้จากการทดสอบ Consolidated Undrained

1. Deviator stress และ Strain
2. แรงดันน้ำซึ่งเกิดจากแรงภายนอกกระทำ จะเห็นได้ว่าในการทดสอบนี้จะไม่ได้ผลการเปลี่ยนแปลงปริมาตร เนื่องจากเราปิดวาล์วน้ำเอาไว้ เมื่อมีแรงกดกระทำแรงดันน้ำจึงเปลี่ยนแปลง

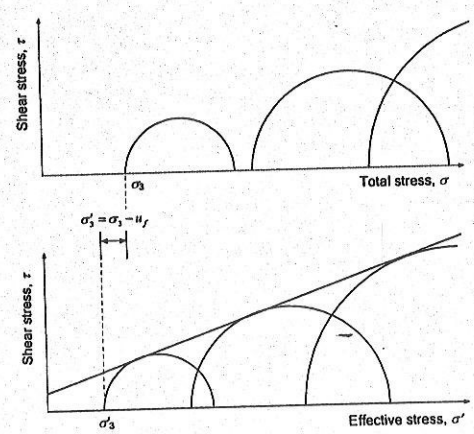


Typical plots of deviator stress, pore pressure change against strain from Undrained triaxial compression test on saturated soil

สำหรับการทดสอบแบบ Undrained จะเกิดแรงดันน้ำขึ้นเนื่องจากแรงกระทำจากภายนอก (หน่วยแรงรวม) ซึ่งเราคำนวณหน่วยแรงประสิทธิผลได้จาก

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

ดังนั้นในกรณีของการทดสอบแบบ CU จะเขียน Mohr's circle ได้ทั้งแบบหน่วยแรงรวมและหน่วยแรงประสิทธิผล



แรงดันน้ำที่เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกระทำแบบ Axisymmeteric undrained กระทำ

แรงดันน้ำในตัวอย่างทดสอบจะเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงกระทำภายนอก ซึ่ง Skempton (1954) เสนอสมการเพื่อให้คำนวณแรงดันน้ำในกรณีสมมาตรรอบแกนหมุน (Axisymmetry)

$$\Delta u = B(\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3))$$

$\Delta\sigma_3$	การเปลี่ยนแปลงแรงดันของ Minor principle stress
$\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3$	การเปลี่ยนแปลงของ Deviatoric stress
B	สัมประสิทธิ์ซึ่งใช้บ่งชี้ว่าดินอิ่มตัวด้วยน้ำหรือไม่
	ถ้าดินอิ่มตัวด้วยน้ำ $B = 1$
	ถ้าดินแห้งไม่มีน้ำอยู่เลย (S=0%) $B = 0$
A	สัมประสิทธิ์แรงดันน้ำส่วนเกิน (excess pore water pressure coefficient)

ถ้าเราจัดรูปสมการจาก

$$\Delta u = B(\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3))$$

ไปเป็น

$$\frac{\Delta u}{\Delta\sigma_3} = B\left(1 + A\left(\frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_3} - 1\right)\right)$$

ซึ่งในการทดสอบ CU compression หรือ CD compression จะต้องเพิ่มแรงดันน้ำกระทำต่อตัวอย่าง ในกรณีที่มีแรงดันน้ำกระทำต่อตัวอย่างเพียงอย่างเดียว $\Delta\sigma_3 = \Delta\sigma_1$

$$\frac{\Delta u}{\Delta\sigma_3} = B$$

ถ้าดินอิ่มตัวด้วยน้ำ B=1 จะทำให้ $\Delta u = \Delta\sigma_3$

ซึ่งหมายความว่าถ้าเราเพิ่มแรงดันดินด้านข้าง $\Delta\sigma_3$ จะทำให้แรงดันน้ำในตัวอย่างเพิ่มขึ้นเท่ากับ $\Delta\sigma_3$

และที่จุดวิบัติ

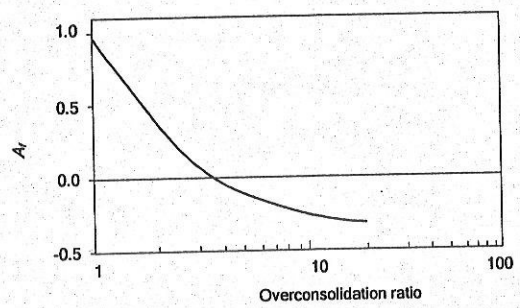
$$A = A_f = \left(\frac{\Delta u_d}{\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3} \right)_f$$

Δu_d แรงดันน้ำเปลี่ยนแปลงซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจาก Deviatoric stress

ตารางค่า A_f จากผลการทดลองของ Skempton (1954)

Type of clay	A_f
Normally consolidated	0.5 to 1
Compacted sandy clay	0.25 to 0.75
Lightly overconsolidated clays	0 to 0.5
Compacted clay-gravel	-0.25 to 0.25
Heavily overconsolidated clays	-0.5 to 0

คัดลอกมาจาก: The measurement of soil properties in the triaxial test, by Bishop and Henkel, Edward Arnold 1962.



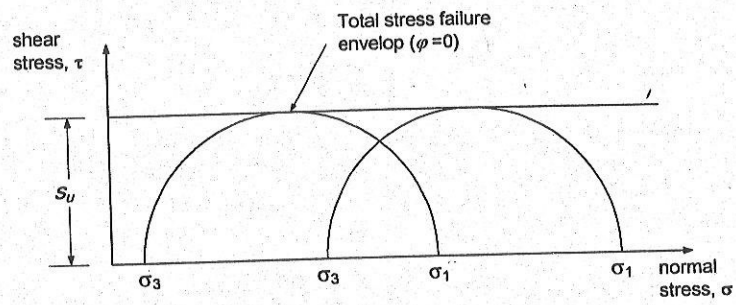
การเปลี่ยนแปลงของค่า A_f ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า OCR

ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า A_f จะแปรเปลี่ยนตามค่า OCR

OCR < 2 แรงดันน้ำส่วนเกินจะเป็นบวก (แรงดัน)

OCR > 2 แรงดันน้ำส่วนเกินจะเป็นลบ (แรงดูด)

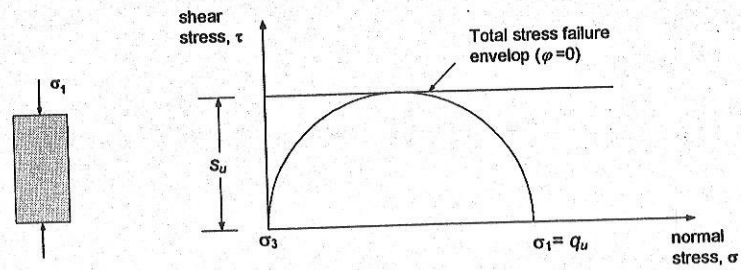
Unconsolidated Undrained (UU test)



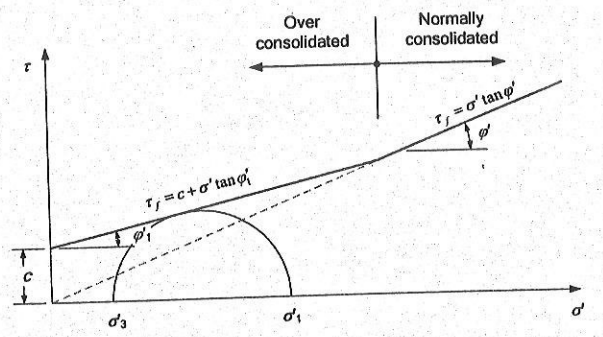
จะเห็นว่า failure envelop เป็นเส้นราบ ($\varphi = 0$) และ $\tau_f = s_u$

Unconfined compression (UC test)

เป็นการทดสอบที่ง่ายที่สุด ไม่มีแรงดันด้านข้าง จึงทำให้ค่า Shear strength ที่ได้จากการทดสอบมีค่าต่ำ



สมการเส้นการวิบัติ (Failure envelope) ของดินเหนียว Overconsolidated



ถ้าที่ดินเหนียวอยู่ใน Overconsolidated สมการเส้นการวิบัติจะเป็น

$$\tau_f = c + \sigma' \tan \varphi'_1$$

ถ้าที่ดินเหนียวอยู่ใน Normally consolidated สมการเส้นการวิบัติจะเป็น

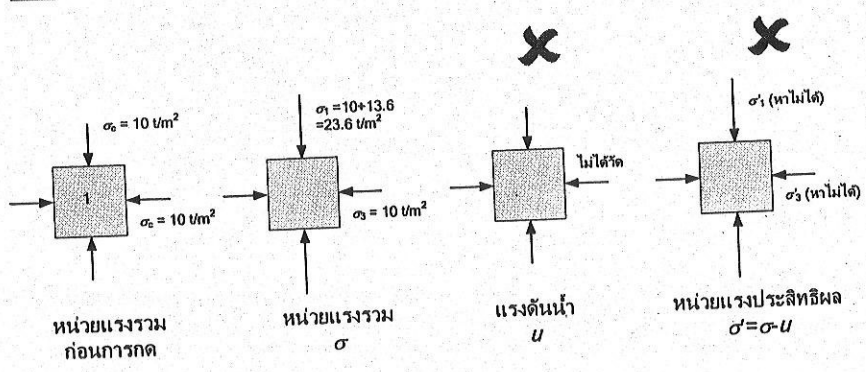
$$\tau_f = \sigma' \tan \varphi'$$

ตัวอย่าง

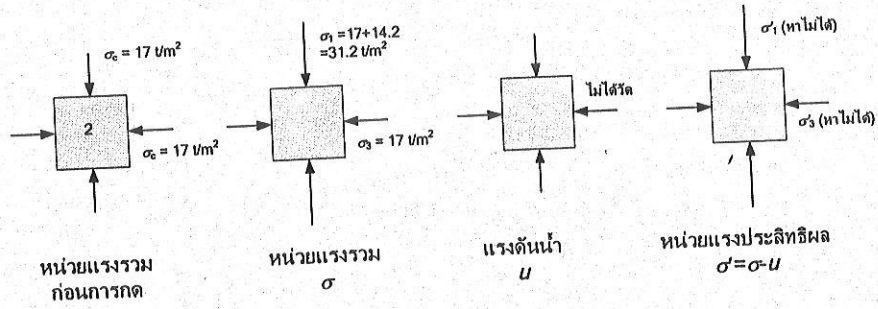
ตัวอย่างที่ 1 จงคำนวณหา Shear strength พารามิเตอร์ จากผลการทดสอบ Unconsolidated Undrained triaxial test

ตัวอย่างที่	Cell pressure, σ_c (t/m^2)	Deviator stress ที่จุดวิบัติ $\sigma_d = (\sigma_1 - \sigma_3)$ (t/m^2)
1	10	13.6
2	17	14.2
3	24	13.4

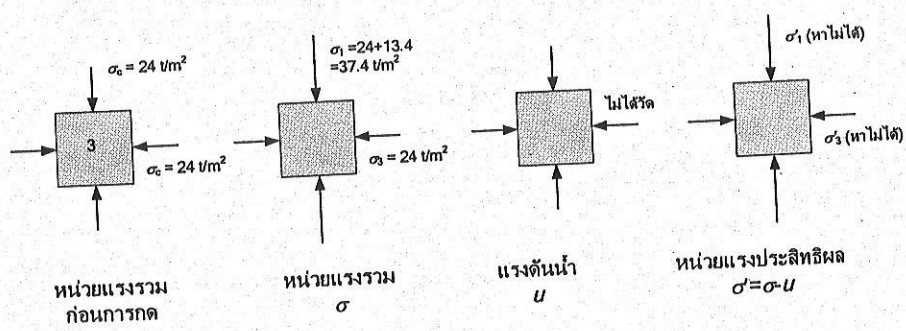
การทดสอบชนิดนี้ไม่มีการวัดแรงดันน้ำในดิน ดังนั้นจึงต้องวิเคราะห์ด้วยวิธีหน่วยแรงรวม เพราะถ้ามีแรงดันน้ำจึงจะคำนวณหน่วยแรงประสิทธิผลได้



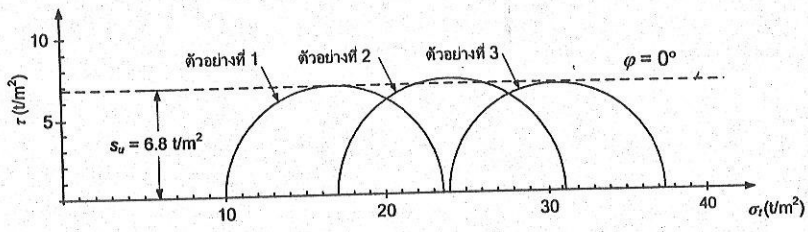
สถานะของหน่วยแรงของตัวอย่างที่ 1 ณ. จุดที่ดินวิบัติ
(Unconsolidated Undrained triaxial test)



สถานะของหน่วยแรงของตัวอย่างที่ 2 ณ. จุดที่ดินวิบัติ
(Unconsolidated Undrained triaxial test)



สถานะของหน่วยแรงของตัวอย่างที่ 3 ณ. จุดที่ดินวิบัติ
(Unconsolidated Undrained triaxial test)

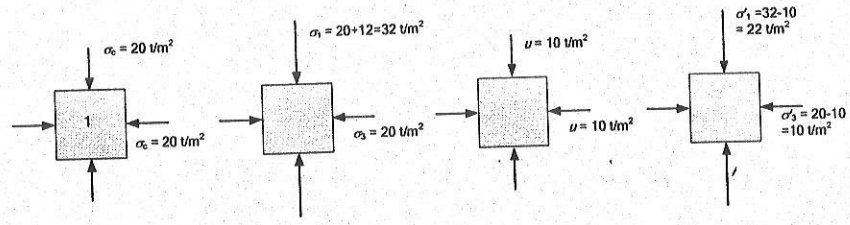


ผลการทดสอบ Unconsolidated undrained triaxial test เมื่อนำมาเขียน Mohr's circle

ตัวอย่างที่ 2 จงคำนวณ Shear strength พารามิเตอร์ จากผลการทดสอบ Consolidated Drained triaxial test

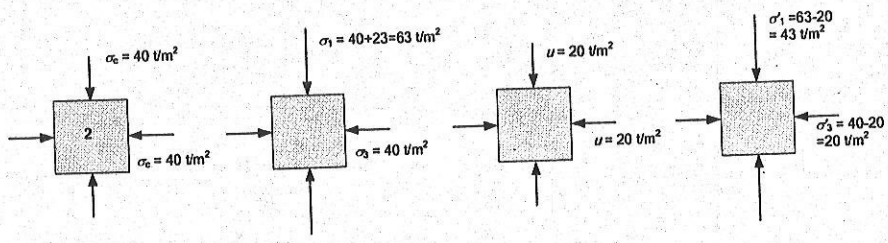
Sample no.	Cell pressure, σ_c (t/m²)	Deviator stress at failure, $\sigma_d = (\sigma_1 - \sigma_3)$, (t/m²)	Pore pressure = Backpressure (u_0) (t/m²)
1	20	12	10
2	40	23	20
3	60	36	30

จากผลการทดสอบ cell pressure เป็นหน่วยแรงรวม เมื่อนำมารวมกับหน่วยแรง Deviator จะได้หน่วยแรงหลักมากที่สุด σ_1 (หน่วยแรงรวม) ส่วนหน่วยแรงหลักน้อยที่สุดจะเท่ากับ σ_3 Cell pressure (หน่วยแรงรวม) ดังแสดงในรูปของสถานะของหน่วยแรงรวมและหน่วยแรงประสิทธิผลในหน้าถัดไป



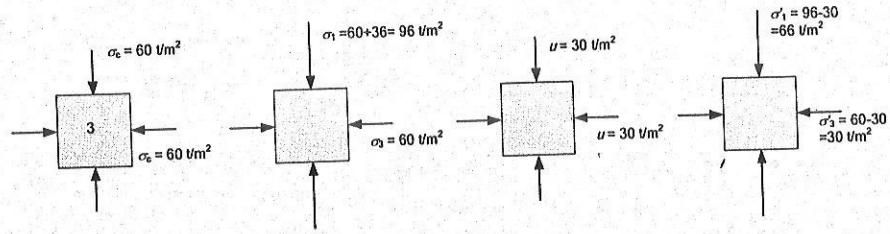
หน่วยแรงรวม ก่อนการกด | หน่วยแรงรวม σ | แรงดันน้ำ u_0 | หน่วยแรงประสิทธิผล $\sigma'=\sigma-u_0$

สถานะของหน่วยแรงของตัวอย่างที่ 1 ณ. จุดที่ดินวิบัติ
(Consolidated Drained Triaxial test)



หน่วยแรงรวม ก่อนการกด | หน่วยแรงรวม σ | แรงดันน้ำ u_0 | หน่วยแรงประสิทธิผล $\sigma'=\sigma-u_0$

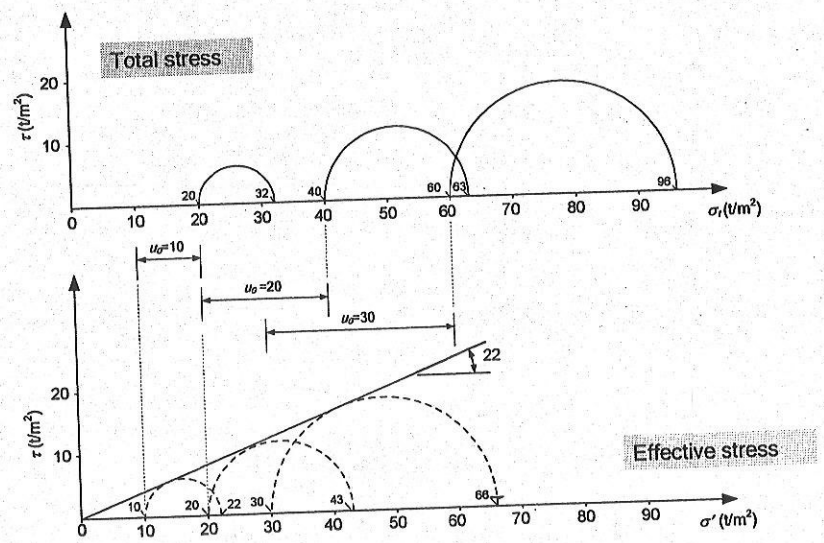
สถานะของหน่วยแรงของตัวอย่างที่ 2 ณ. จุดที่ดินวิบัติ
(Consolidated Drained Triaxial test)



หน่วยแรงรวม ก่อนการกด | หน่วยแรงรวม σ | แรงดันน้ำ u_0 | หน่วยแรงประสิทธิผล $\sigma'=\sigma-u_0$

สถานะของหน่วยแรงของตัวอย่างที่ 3 ณ. จุดที่ดินวิบัติ
(Consolidated Drained Triaxial test)

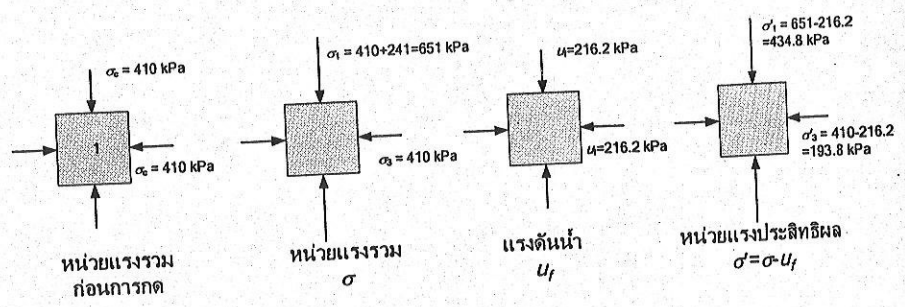
จากสถานะของหน่วยแรงรวม (Total stress) และหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress) จากผลการทดสอบ 3 ตัวอย่างนำไปเขียนลงใน Mohr's circle จะได้



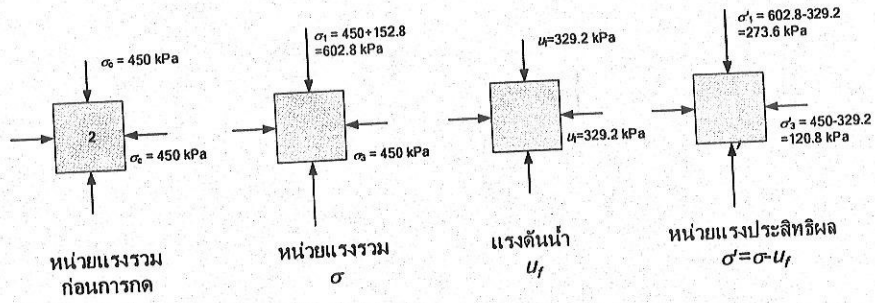
Mohr's circle จากผลการทดสอบ Consolidated Drained Triaxial

ตัวอย่างที่ 3 จงคำนวณ Shear strength พารามิเตอร์ จากผลการทดสอบ Consolidated Undrained triaxial test

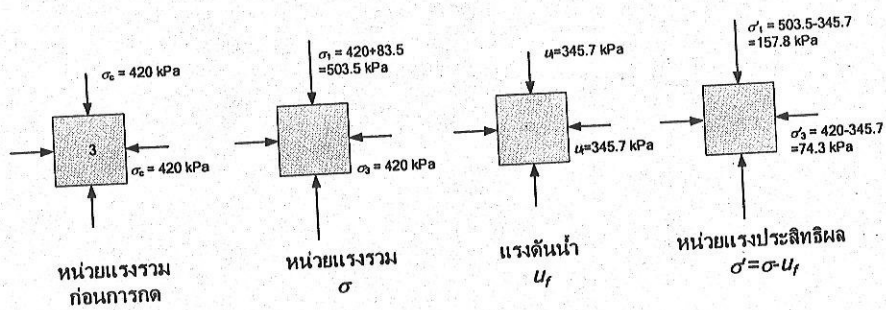
ตัวอย่างที่	Cell pressure, σ_c (kN/m^2)	Deviator stress ที่จุดวิบัติ $\sigma_d = (\sigma_1 - \sigma_3)$ (kN/m^2)	แรงดันน้ำที่วัดได้ที่จุดวิบัติ u_f (kN/m^2)
1	410	241.0	216.2
2	450	152.8	329.2
3	420	83.5	345.7



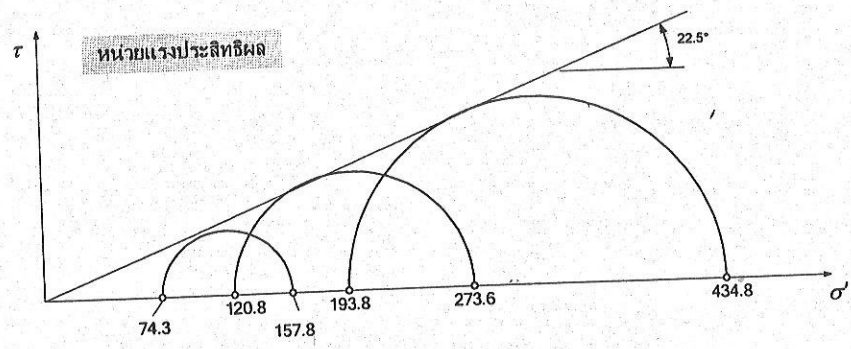
สถานะของหน่วยแรงของตัวอย่างที่ 1 ณ. จุดที่ดินวิบัติ
(Consolidated undrained Triaxial test)



สถานะของหน่วยแรงของตัวอย่างที่ 2 ณ. จุดที่ดินวิบัติ
(Consolidated undrained Triaxial test)



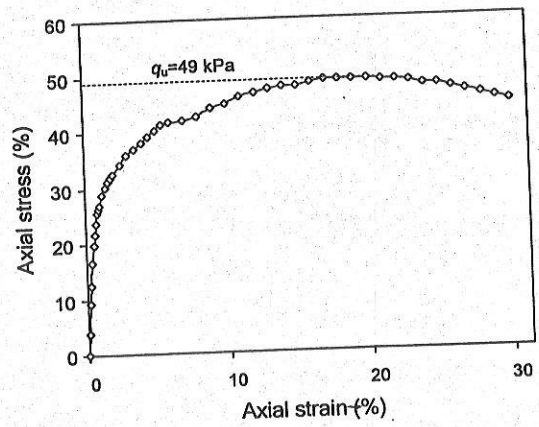
สถานะของหน่วยแรงของตัวอย่างที่ 3 ณ. จุดที่ดินวิบัติ
(Consolidated undrained Triaxial test)



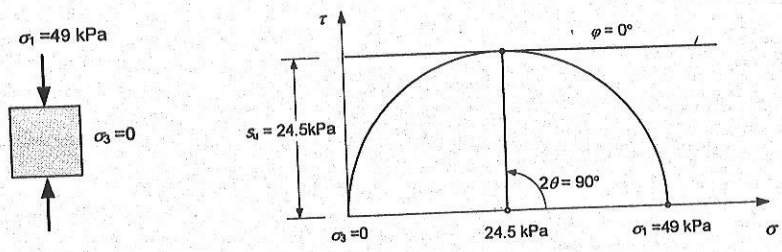
Mohr's circle จากผลการทดสอบ Consolidated undrained Triaxial

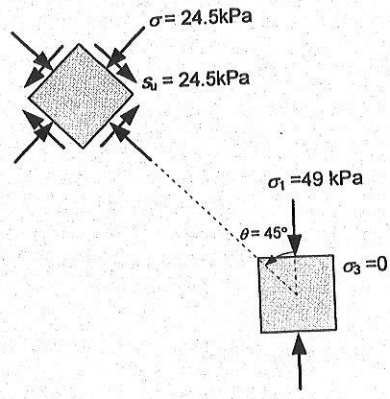
(สำหรับตัวอย่างนี้ไม่ได้เขียนวงกลมของ Mohr ของหน่วยแรงรวม)

ตัวอย่างที่ 4 จากผลการทดสอบ Unconfined compression test จงคำนวณกำลังรับแรงเฉือนของดิน



จากสถานะของหน่วยแรง ณ.จุดวิบัตินำมาเขียนบนวงกลมของ Mohr





สถานนะของหน่วยแรงที่จุดที่ดินวิบัติ

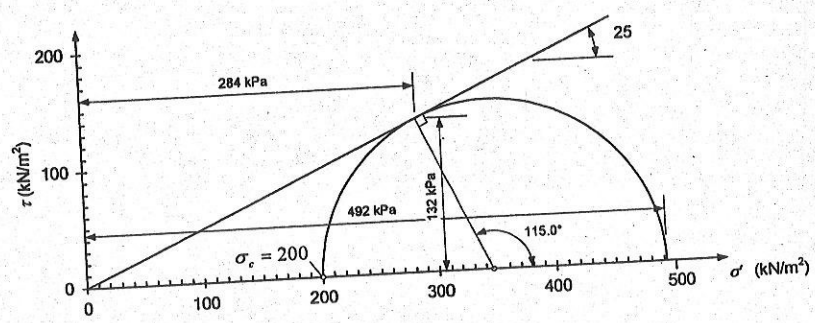
Problem ถ้าดิน Normally consolidated clay มีค่า Internal friction angle เป็น 25°

a) ถ้าทำการทดสอบ Consolidated Undrained triaxial test โดยใช้ cell pressure = 200 kN/m² จงหาว่าค่า Deviator stress ที่จุดวิบัติ $(\sigma_d)_f$ เป็นเท่าใด

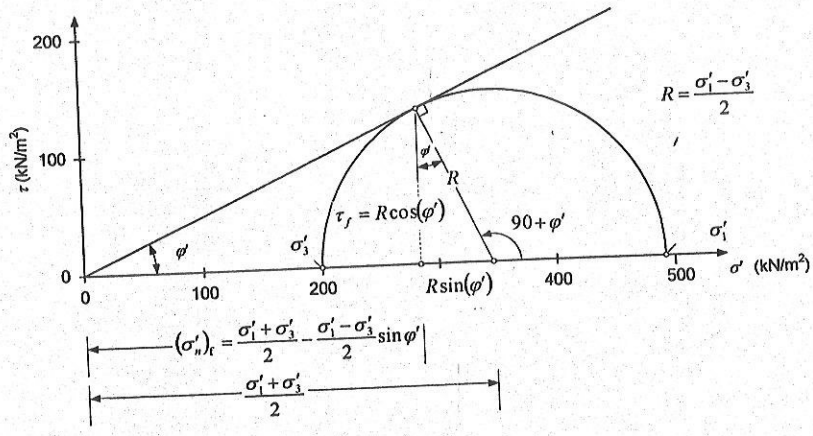
b) จากข้อ a) จงคำนวณหาค่าหน่วยแรงตั้งฉากและหน่วยแรงเฉือนที่ตัวอย่างเกิดการวิบัติ พร้อมทั้งแสดงระนาบที่ดินวิบัติด้วย

การคำนวณ ทำได้สองวิธีคือ

1. ใช้วิธีกราฟิก โดยการเขียนรูป Mohr's circle แล้ววัดระยะ
2. ใช้วิธีเรขาคณิตวิเคราะห์ โดยใช้ความรู้เรื่องคุณสมบัติของวงกลม และตรีโกณมิติ



ใช้วิธีกราฟิก โดยการเขียนรูป Mohr's circle แล้ววัดระยะ



ใช้วิธี Mohr's circle ประกอบกับเรขาคณิตวิเคราะห์

$$\frac{\frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2}}{\frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2}} = \sin\varphi'$$

$$\frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{\sigma_1' + \sigma_3'} = \sin\varphi'$$

$$\sigma_1' - \sigma_1'\sin\varphi' = \sigma_3' - \sigma_3'\sin\varphi'$$

$$\sigma_1'(1 - \sin\varphi') = \sigma_3'(1 + \sin\varphi')$$

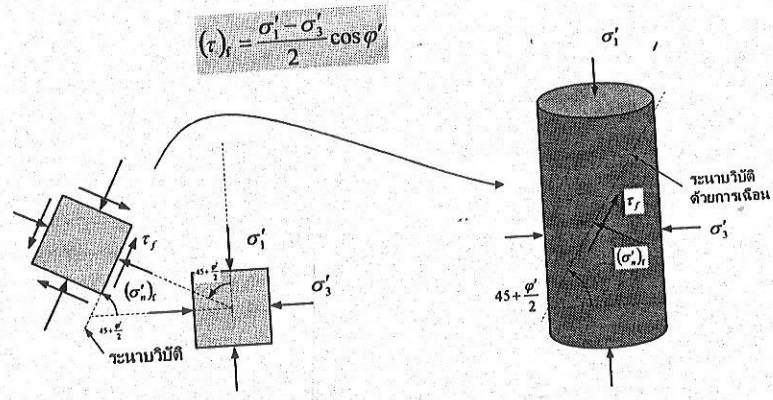
$$\sigma_1' = \sigma_3'\left(\frac{1 + \sin\varphi'}{1 - \sin\varphi'}\right)$$

ซึ่งถ้าเรารู้ค่ามุม Friction angle (φ') เราจะคำนวณ Major principle stress (σ'_1) ได้จาก Minor principle stress (σ'_3)

และคำนวณสถานะของหน่วยแรงบนระนาบที่เกิดการวิบัติ ได้โดยพิจารณาจาก Mohr's circle

$$(\sigma'_n)_f = \frac{\sigma'_1+\sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1-\sigma'_3}{2}\sin\varphi'$$

$$(\tau)_f = \frac{\sigma'_1-\sigma'_3}{2}\cos\varphi'$$



ซึ่งแทนค่าในสมการข้างต้นเมื่อใช้แก้ปัญหาโจทย์ที่กำหนดให้ cell pressure = 200 kPa และ friction angle = 25°

หน่วยแรงหลักมากที่สุด

$$\sigma'_1 = \sigma'_3\left(\frac{1+\sin\varphi'}{1-\sin\varphi'}\right)$$

$$= 200\left(\frac{1+\sin 25^\circ}{1-\sin 25^\circ}\right) = 492.78\text{kPa}$$

หน่วยแรงบนระนาบที่เกิดการวิบัติ

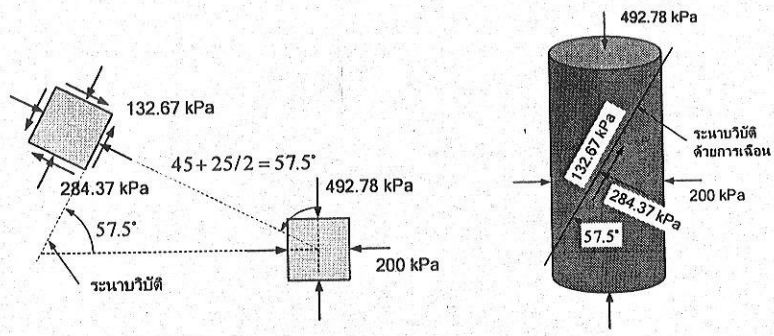
$$(\sigma'_n)_f = \frac{\sigma'_1+\sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1-\sigma'_3}{2}\sin\varphi'$$

$$(\sigma'_n)_f = \frac{492.78+200}{2} - \frac{492.78-200}{2}\sin 25^\circ = 284.37\text{kPa}$$ Ans.

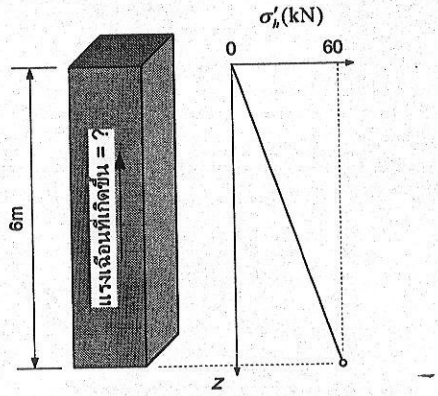
$$(\tau)_f = \frac{\sigma'_1-\sigma'_3}{2}\cos\varphi'$$

$$(\tau)_f = \frac{492.78-200}{2}\cos 25^\circ = 132.67\text{kPa}$$ Ans.

ซึ่งนำมาเขียนเป็นสถานะของหน่วยแรงบนระนาบที่เกิดการวิบัติได้ดังรูป



ถ้าผลการทดสอบทรายชนิดหนึ่งมีค่า Friction angle, φ'= 30° จงคำนวณแรงเสียดทานที่จะเกิดขึ้นที่ผิวของเสาเข็มขนาด 0.4เมตร×0.4เมตร ในรูปถ้าเสาเข็มเคลื่อนตัวจนดินเกิดการวิบัติ



กำลังรับแรงเฉือนของดินทราย

•ดินทรายมีค่า Permeability สูงเมื่อรับแรงกระทำ Excess pore pressure ที่เกิดขึ้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว

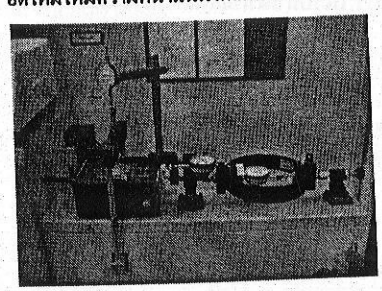
•การวิเคราะห์กำลังรับแรงเฉือนของดินจึงใช้การวิเคราะห์แบบ Effective stress analysis

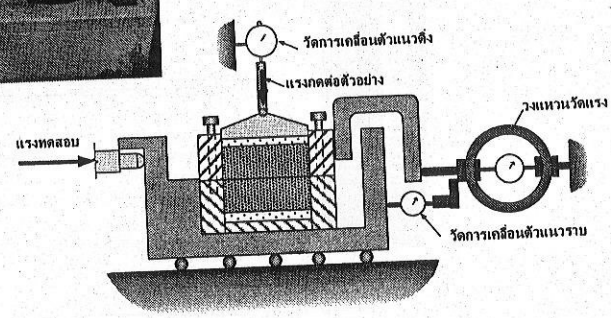
•ผลการทดสอบจะได้ Shear strength parameter ที่อยู่ในรูปของ Effective stress คือ

c' = cohesion
φ' = Angle of shearing resistance

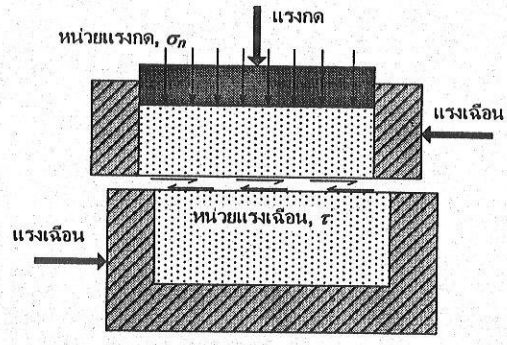
การเก็บตัวอย่างดินทรายที่คงสภาพเดิมเหมือนอยู่ในสนามทำได้ยาก ไม่เหมือนกับดินเหนียว ทำให้ต้องทดสอบดินทรายในสนาม (In-situ test)

วิธีการทดสอบตัวอย่างดินทรายที่ไม่คงสภาพเดิมคือ Direct shear test ซึ่งจะนำตัวอย่างทรายมาบดอัดใหม่ให้มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับสภาพในสนามมากที่สุดจากนั้นทดสอบโดยให้แรงเฉือนกระทำ



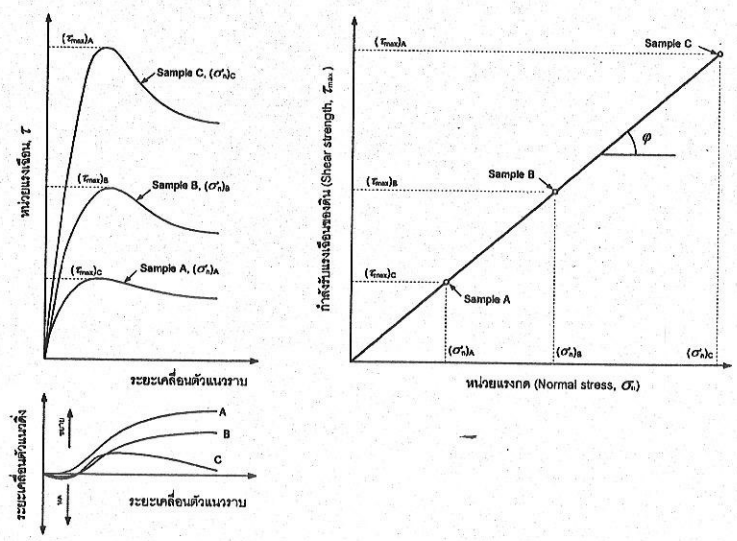


อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ Direct shear

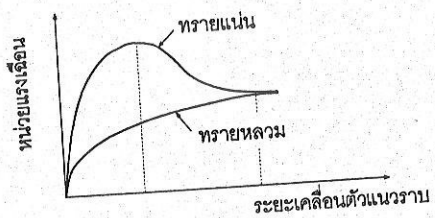


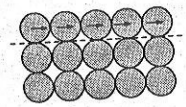
แผนภาพแสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในขณะทำการทดสอบ

เมื่อทำการทดสอบจะวัดการเคลื่อนตัวในแนวนอนและการเคลื่อนตัวในแนวตั้งที่แรงเฉือนต่าง ๆ แล้ว นำมาเขียนกราฟจะได้กราฟดังรูป

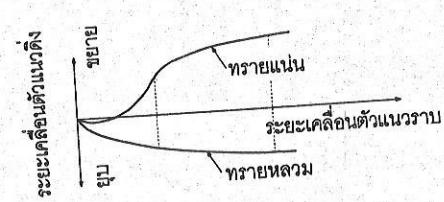


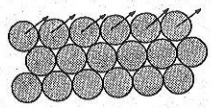
ในการทดสอบดินทรายจะมีพฤติขณะที่มีแรงเฉือนกระทำที่น่าสนใจคือ





แบบจำลองทรายหลวม





แบบจำลองทรายแน่น

ดินทรายแน่น

- ดินทรายแน่นจะมีปริมาตรลดลงในช่วงแรกของการเฉือนจากนั้นปริมาตรจะเพิ่มขึ้น
- ส่วนหน่วยแรงเฉือนจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดแล้วจะลดลง

ดินทรายหลวม

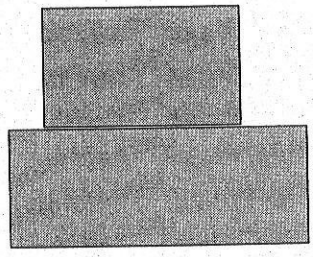
- ดินทรายหลวมจะมีปริมาตรลดลงตลอดการเฉือนตัวอย่าง
- หน่วยแรงเฉือนจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุดสูงสุดโดยไม่มีการลดลงของหน่วยแรงเฉือน

จบเรื่องกำลังรับแรงเฉือนของดิน

การเลือกใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ

ในกรณีดินเหนียว

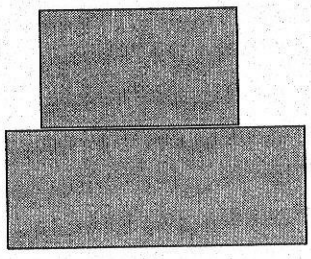
ในกรณีที่น้ำยังระบายออกจากดินไม่หมด



ในกรณีที่น้ำระบายออกจากดินหมดแล้ว

ในกรณีดินทราย

ในกรณีที่น้ำยังระบายออกจากดินไม่หมด



ในกรณีที่น้ำระบายออกจากดินหมดแล้ว

Short term

- Clay

  Total stress

  Effective stress

- Sand

  Effective stress

Long term

- Clay

  Effective stress

- Sand

  Effective stress

Stress path

Stress path

วิธีที่เป็นระบบในการศึกษาเรื่อง เสถียรภาพ (Stability) และ การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation) ของดินได้มีผู้เสนอวิธีในการเขียน Stress path ไว้หลายวิธีด้วยกันแต่จะกล่าวถึงแต่เพียง 2 วิธีเท่านั้น

1. Plot ระหว่าง s' กับ t' (วิธีของ MIT)

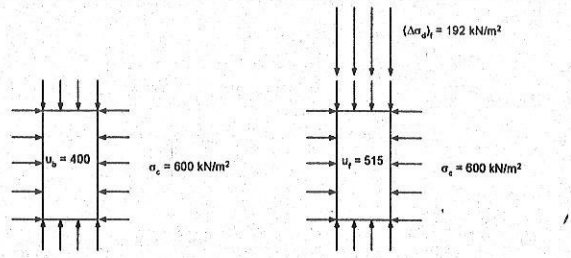
เป็นวิธีที่พัฒนาจาก MIT โดย Prof. Lambe (1964) โดยจุดของ Stress จะแสดงถึงหน่วยแรงเฉือนมากที่สุด

$$s = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \qquad t = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

$$s' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \qquad t = t' = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

ตัวอย่าง จากผลการทดสอบ consolidated undrained triaxial test จงเขียน stress path แบบ s, t และ แบบ p, q
Cell pressure = 600 kN/m2 ตลอดการทดสอบ
แรงดันน้ำในตัวอย่างก่อนทดสอบ = 400 kN/m2

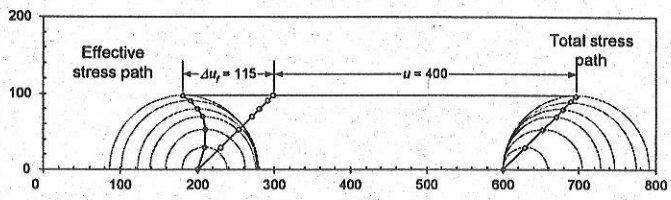
Deviator stress $\sigma_1 - \sigma_3$	Pore pressure u	σ_1	σ_3	$s = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$	$t = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$	σ'_1	σ'_3	$s' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}$	$t = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$
0	400	600	600	600	0.0	200	200	200	0
58	419	658	600	629	29.0	239	181	210	29
104	441	704	600	652	52.0	263	159	211	52
140	463	740	600	670	70.0	277	137	207	70
158	479	758	600	679	79.0	279	121	200	79
180	499	780	600	690	90.0	281	101	191	90
192	515	792	600	696	96.0	277	85	181	96



End of consolidation

At failure after shear

$$t = t' = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (\text{kN/m}^2)$$



$$s = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad \text{or} \quad s' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \quad (\text{kN/m}^2)$$

2. Plot ระหว่าง p และ q (วิธีของ Cambridge)

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

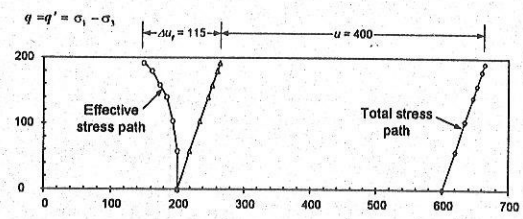
$$p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} \qquad q = \sigma_1 - \sigma_3$$

Effective stress

$$p' = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3} \qquad q = \sigma'_1 - \sigma'_3 = \sigma_1 - \sigma_3$$

Deviator stress $\sigma_1 - \sigma_3$	Pore pressure u	σ_1	σ_3	p	q	σ'_1	σ'_3	p'	q'
0	400	600	600	600	0	200	200	200	0
58	419	658	600	619	58	239	181	200	58
104	441	704	600	635	104	263	159	194	104
140	463	740	600	647	140	277	137	184	140
158	479	758	600	653	158	279	121	174	158
180	499	780	600	660	180	281	101	161	180
192	515	792	600	664	192	277	85	149	192

(kN/m²)

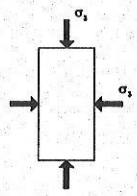
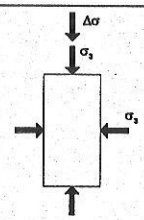


$$p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} \quad \text{or} \quad p' = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3} \quad (\text{kN/m}^2)$$

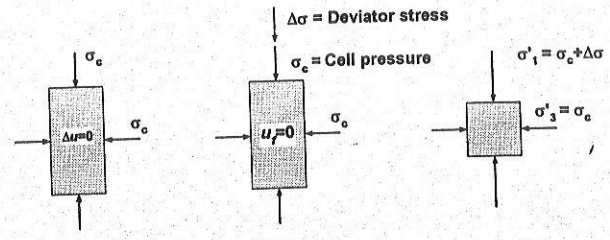
จบเรื่อง Shear strength of soil

Old slides

การทดสอบ Triaxial มีวิธีการทดสอบ 3 วิธีขึ้นอยู่กับการระบายน้ำในตัวอย่างดิน

ชนิดของการทดสอบ		
Consolidated Drained	เพิ่มแรงดันใน cell, σ_3 จากนั้นปล่อยให้ consolidate (<u>ปล่อย</u>ให้น้ำไหลออกจากตัวอย่าง)	เพิ่มหน่วยแรงกดในแนวดิ่ง $\Delta\sigma$ อย่างช้า ๆ และ<u>ปล่อยให้ตัวอย่าง Consolidate</u>
Consolidated Undrained	เพิ่มแรงดันใน cell, σ_3 จากนั้นปล่อยให้ consolidate (<u>ปล่อย</u>ให้น้ำไหลออกจากตัวอย่าง)	เพิ่มหน่วยแรงกดในแนวดิ่ง $\Delta\sigma$ แต่<u>ไม่ปล่อยให้ตัวอย่าง Consolidate</u> (ไม่ปล่อยให้น้ำไหลออกจากตัวอย่าง)
Unconsolidated Undrained	เพิ่มแรงดันใน cell, σ_3 แต่ไม่เกิดการ consolidate (<u>ไม่ปล่อย</u>ให้น้ำไหลออกจากตัวอย่าง)	เพิ่มหน่วยแรงกดในแนวดิ่ง $\Delta\sigma$ แต่<u>ไม่ปล่อยให้ตัวอย่าง Consolidate</u> (ไม่ปล่อยให้น้ำไหลออกจากตัวอย่าง)

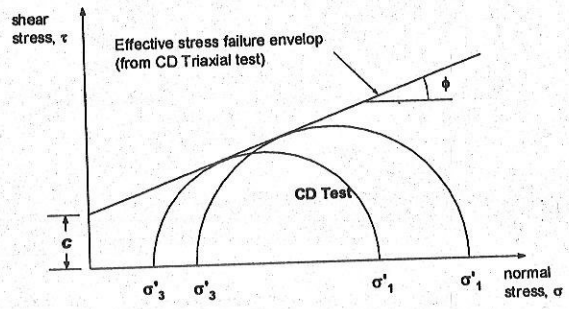
1. Consolidated Drained (CD test)



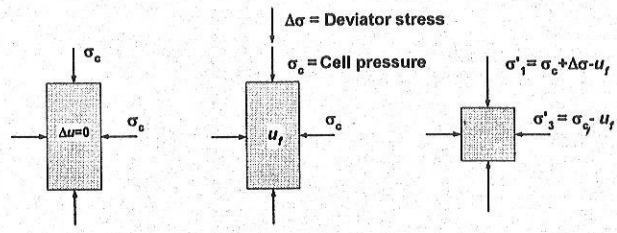
Apply cell pressure and let sample consolidate

Shear with drain
(Let water escape during shear)

State of stress



2. Consolidated Undrained (CU test)



Apply cell pressure and let sample consolidate

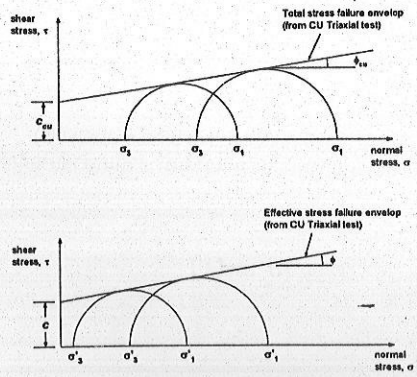
Shear without drain (Measure pore pressure)

State of stress

เมื่อเพิ่ม cell pressure และปล่อยให้ตัวอย่าง Consolidate จะทำให้กำลังของดินเพิ่มขึ้น

ดังนั้นเมื่อทดสอบตัวอย่างโดยใช้ cell pressure สูงขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงเฉือนของดินสูงขึ้นตามไปด้วยเมื่อนำมาเขียน Mohr's circle จะได้วงกลมที่มีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย

เขียนวงกลม Mohr ได้ 2 แบบคือแบบ Total stress และ แบบ Effective stress



กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว
กำลังต้านแรงเฉือนของดินเหนียวจะเกิดจาก
•แรงต้านที่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดิน
•แรงต้านที่เกิดจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน

เมื่อดินเหนียวรับแรงเฉือนจะเกิดแรงดันน้ำในดินเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากดินเหนียวมีค่า Permeability ต่ำทำให้น้ำในดินที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงเฉือนระบายออกไปได้ช้า

ดังนั้นถ้าจะคำนวณหากำลังรับแรงเฉือนของดิน ณ.เวลา t ใด ๆ

$$s = c' + \sigma' \tan(\phi')$$

จะต้องคำนวณหาแรงดันของน้ำ ที่เวลาใด ๆ ซึ่งเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยุ่งยากดังนั้นจึงแบ่งการวิเคราะห์กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวเป็น 2 แบบคือ

การวิเคราะห์ในรูปของหน่วยแรงรวม (Total stress analysis)
Short term condition พิจารณาในสภาพที่ดินยังมีแรงดันน้ำส่วนเกินอยู่เต็ม (t = 0) ซึ่งจะใช้สมการ

$$s = c + \sigma \tan(\phi)$$

โดยที่

σ	Total stress
c	Apparent cohesion
φ	Apparent angle of shearing resistance

การวิเคราะห์ในรูปของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress analysis)
Long term condition พิจารณาในสภาพที่ดินยังมีแรงดันน้ำส่วนเกินระบายออกไปหมดแล้วซึ่งจะใช้สมการ

$$s = c' + \sigma' \tan(\phi')$$