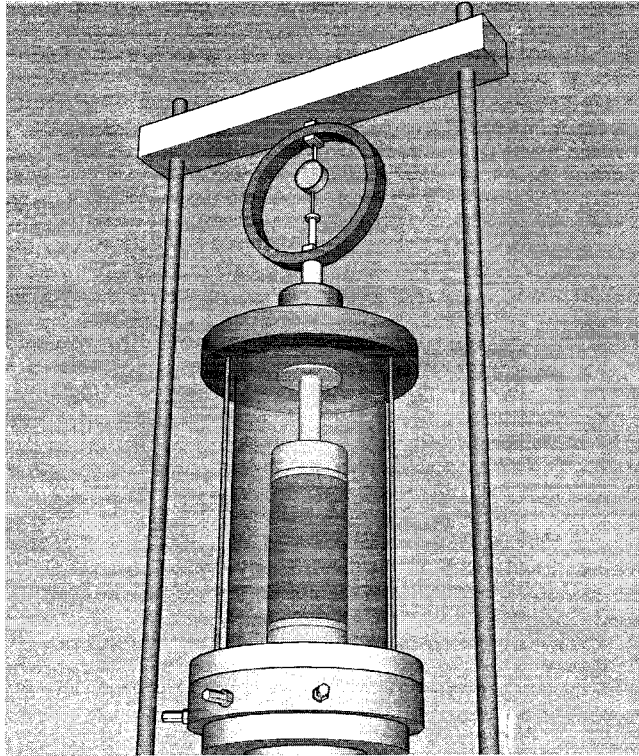


ปฐพีกลศาสตร์

SOIL MECHANICS



พรพจน์ ดันเส็ง

คำนำ

เอกสารการสอนฉบับนี้ ใช้สำหรับอ่านประกอบการบรรยายเนื้อหาวิชาปฐพีกลศาสตร์ ซึ่งเป็นการนำเอาความรู้ทางด้านกลศาสตร์ กลศาสตร์วัสดุ และกลศาสตร์ของไหล มาประยุกต์ใช้กับดินซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติ วิชาปฐพีกลศาสตร์นี้จะ เป็นพื้นฐานของการประยุกต์ใช้งานในสาขาวิศวกรรมปฐพีอื่นๆ ได้แก่ วิศวกรรมฐานราก วิศวกรรมการทาง และ วิชาโครงสร้างดิน ซึ่งประสบการณ์ที่ผู้เรียบเรียงพบในระหว่างสอนวิชาเหล่านี้พบว่า นักศึกษาทำความเข้าใจในเนื้อหาวิชานี้ได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นเจตนาของเอกสารประกอบการสอนนี้ต้องการให้เป็นเอกสารอ้างอิงระดับพื้นฐาน เพื่อที่ผู้ที่จะนำไปใช้งานสามารถทำความเข้าใจในเนื้อหาได้อย่างไม่ยากเย็นนัก โดยในเอกสารจะใช้รูปภาพที่แสดงแนวคิดอย่างง่ายและชัดเจน และยังมีตัวอย่างเสริมสร้างความเข้าใจในเนื้อหาวิชาได้ด้วยตนเอง และผู้เรียบเรียงยังได้แทรกส่วนที่เป็นการประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ในการแก้ปัญหา เพื่อที่ผู้อ่านจะได้มีทักษะในการนำความรู้ในทางปฐพีกลศาสตร์ไปใช้แก้ปัญหาในระดับสูงต่อไป

พรพจน์ ดันเต็ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2550



ปฐพีกลศาสตร์

Rule for Professional Attitude

by Kari Terzaghi

(considered by many to be the "Father" of modern soil mechanics)

1. Engineering is a noble sport which calls for good sportmanship. Occasional blundering is part of the game. let it be your ambition to be the first one to discover and announce your blunders. If somebody else gets ahead of you, take it with a smile and thank him for his interest. Once you begin to feel tempted to deny your blunders in the face of reasonable evidence you have ceased to be a good sport. You are already a crank or a grouch.

2. The worst habit you can possibly acquire is to become uncritical towards your own concepts and at the same time skeptical towards those of others. Once you arrive at that state you are in the grip of senility, regardless of your age.

3. When you commit one of your ideas to print, emphasize every controversial aspect of your thesis which you can perceive. Thus you win the respect of your readers and are kept aware of the possibilities for further improvement. A departure from this rule is the safest way to wreck your reputation and to paralyze your mental activities.

4. Very few people are either so dumb or so dishonest that you could not learn anything from them.

สารบัญ

คำนำ.....	I
สารบัญ.....	III
1 แนะนำวิชาปฐพีกลศาสตร์.....	1
1.1 SOIL MECHANICS คืออะไร.....	1
1.2 กรณีศึกษา.....	3
2 การกำเนิดของดิน.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 ROCK CYCLE.....	6
2.3 กำเนิดของดิน.....	7
2.4 SOIL FORMATION.....	8
2.5 แร่ดินเหนียว (CLAY MINERAL).....	10
2.6 แรงที่ผิวของเม็ดดินและ ADSORBED WATER.....	10
2.7 SOIL STRUCTURE.....	10
2.8 คำถามท้ายบท.....	10
3 คุณสมบัติทางกายภาพของดิน.....	10
3.1 วัตถุประสงค์.....	10
3.2 องค์ประกอบในดิน.....	10
3.3 การคำนวณความหนาแน่นแห้งจากความหนาแน่นเปียกและปริมาตรน้ำในดิน.....	10
3.4 คุณสมบัติทางกายภาพ และ INDEX PROPERTIES ของดินเม็ดละเอียด.....	10
3.5 ATTERBERG LIMITS (LIQUID LIMIT, PLASTIC LIMIT, PLASTICITY INDEX).....	10
3.6 การบดอัดดิน.....	10
3.7 คำถามท้ายบท.....	10
4 การจำแนกดิน.....	10
4.1 วัตถุประสงค์.....	10
4.2 ระบบการจำแนกดินทางด้านวิศวกรรม.....	10
4.3 การออกแบบชั้นกรองดิน (SOIL FILTERS).....	10
4.4 กรณีที่ดินมีดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียดปนกัน.....	10

4.5 การจำแนกดินด้วยระบบ UNIFIED SOIL CLASSIFICATION.....	10
4.6 การจำแนกดินระบบ AASHTO.....	10
4.7 คำถามท้ายบท.....	10
5 PERMEABILITY AND SEEPAGE.....	10
5.1 วัตถุประสงค์.....	10
5.2 ช่องว่างในดิน (SOIL VOID).....	10
5.3 PRESSURE AND HEAD.....	10
5.4 DARCY'S LAW.....	10
5.5 ค่าสัมประสิทธิ์ k ได้มาอย่างไร?.....	10
5.6 กรณีที่น้ำไหลผ่านดินหลายชั้น (FLOW THROUGH A LAYERED SOIL).....	10
5.7 ทฤษฎีการไหล (SEEPAGE THEORY).....	10
5.8 FLOW NET (เส้นช่วยการไหล).....	10
5.9 การคำนวณปริมาณการไหลซึมผ่าน (CALCULATION OF SEEPAGE QUANTITIES).....	10
5.10 การเขียน FLOW NET สำหรับดิน ANISOTROPIC โดยใช้วิธี TRANSFORMED SECTION.....	10
5.11 แรงดันน้ำในดินและแรงดันน้ำได้ฐานรากที่น้ำซึมผ่าน.....	10
5.12 SEEPAGE FORCE.....	10
5.13 การใช้ FINITE ELEMENT METHOD ในการคำนวณการไหลของน้ำ.....	10
5.14 คำถามท้ายบท.....	10
6 หน่วยแรงในมวลดิน.....	10
6.1 วัตถุประสงค์.....	10
6.2 หน่วยแรงประสิทธิผล (EFFECTIVE STRESS).....	10
6.3 หน่วยแรงเฉือนในดิน.....	10
6.4 ผลเนื่องจาก CAPILLARY.....	10
6.5 หน่วยแรงในดินเนื่องจากแรงกระทำจากภายนอก (APPLIED LOAD).....	10
6.6 หน่วยแรงในดินได้ฐานรากอ่อนตัวด้วยวิธีการฝึก.....	10
6.7 MOHR'S CIRCLE สำหรับปฐพีกลศาสตร์.....	10
6.8 การคำนวณสถานะของหน่วยแรง (STATE OF STRESS) โดยใช้ MOHR'S CIRCLE.....	10
6.9 การใช้วิธีเชิงตัวเลขในการคำนวณหาหน่วยแรง.....	10
6.10 คำถามท้ายบท.....	10
7 CONSOLIDATION.....	10
7.1 วัตถุประสงค์.....	10
7.2 STRESS-STRAIN RELATIONSHIP.....	10

7.3 CONSOLIDATION TEST (การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ).....	10
7.4 การคำนวณการทรุดตัวเนื่องจาก PRIMARY CONSOLIDATION.....	10
7.5 การทรุดตัวในมิติเดียวที่ขึ้นอยู่กับเวลา.....	10
7.6 ทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำ 1 มิติของ TERZAGHI.....	10
7.7 ตัวอย่างการคำนวณ.....	10
7.8 การเร่งการทรุดตัว (PRE-COMPRESSION, PRE-LOADING).....	10
7.9 การประยุกต์ใช้ PRE-LOADING ในงานก่อสร้างคันดิน.....	10
7.10 EFFECT OF SOIL TYPE AND FOUNDATION SIZE (AZIZI).....	10
7.11 EFFECT OF SAMPLE DISTURBANCE.....	10
7.12 คำถามท้ายบท.....	10
8 กำลังรับแรงเฉือนของดิน.....	10
8.1 บทนำ.....	10
8.2 พื้นฐานของกำลังรับแรงเฉือน.....	10
8.3 MOHR-COULOMB FAILURE CRITERIA.....	10
8.4 สมการเส้นการวิบัติ (FAILURE ENVELOPE) ของดินเหนียว OVERCONSOLIDATED CLAY.....	10
8.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง STRESS กับ STRAIN.....	10
8.6 TRIAXIAL TEST.....	10
8.7 ผลที่ได้จากการทดสอบ CONSOLIDATED DRAINED.....	10
8.8 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อดินรับแรงเฉือน.....	10
8.9 ผลที่ได้จากการทดสอบ CONSOLIDATED UNDRAINED.....	10
8.10 แรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นเมื่อมีรับแรงกระทำแบบ AXISYMMETRIC.....	10
8.11 UNCONFINED COMPRESSION (UC TEST).....	10
8.12 UNCONSOLIDATED UNDRAINED (UU TEST).....	10
8.13 กำลังรับแรงเฉือนของดินทราย.....	10
8.14 แบบฝึกหัด.....	10
9 การวิเคราะห์การทรุดตัวของฐานราก.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
บรรณานุกรม.....	10

1 แนะนำวิชาปฐพีกลศาสตร์

1.1 Soil mechanics คืออะไร?

Soil mechanics คือการนำหลักการและกฎ ในวิชา Mechanics และ Hydraulic มาประยุกต์ใช้กับปัญหาทางด้านวิศวกรรมที่ต้องเกี่ยวข้องกับดินดินมักจะถูกใช้เป็นวัสดุทางด้านวิศวกรรมหรือใช้เป็นฐานรากของโครงสร้าง ดังนั้นวิศวกรจะต้องศึกษาถึงคุณสมบัติต่างๆ และพฤติกรรมของดิน เช่น

ดินเกิดมาได้อย่างไร?

การกระจายของขนาดเม็ดดิน

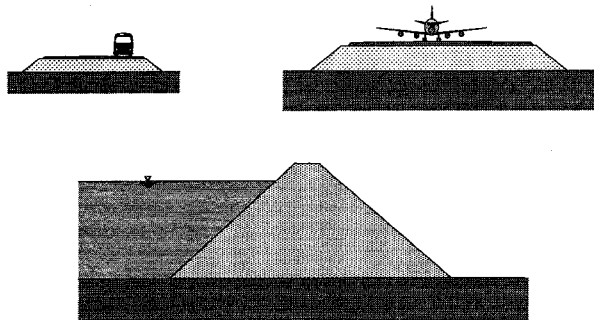
ความสามารถในการระบายน้ำของดิน

การยุบตัวเมื่อถูกแรงกระทำ

กำลังรับแรงเฉือนของดิน ฯลฯ

ซึ่งปัญหาด้านวิศวกรรมที่ต้องเกี่ยวข้องกับดินมีอยู่ 2 ประเภทคือ

- ก่อสร้างโดยใช้ดินเป็นวัสดุ (Made from earth) เช่น คันทาง (Embankment), เขื่อน (Dam)

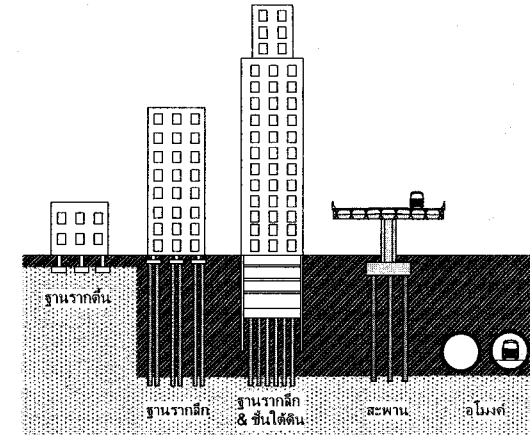


รูปที่ 1.1 ตัวอย่างโครงสร้างซึ่งสร้างขึ้นมาจากดิน

- ก่อสร้างลงไปในดิน (Made in earth) กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือใช้ดินเป็นฐานราก

Any unconsolidated materials that can be excavated and handled with pick and shovel.

ปฐพีกลศาสตร์



รูปที่ 1.2 โครงสร้างซึ่งสร้างลงที่ดิน

Definition of Soil Engineering

การศึกษาเกี่ยวกับดิน

ศึกษาพฤติกรรมของดิน

ศึกษาเกี่ยวกับการนำดินไปใช้เป็นวัสดุทางด้านวิศวกรรม

ในวิชาปฐพีกลศาสตร์เราจะศึกษาถึงคุณสมบัติและพฤติกรรมของดิน ได้แก่

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

จากวิชาปฐพีกลศาสตร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานอื่นๆ ได้ ตัวอย่างเช่น Highway engineering, Foundation Engineering, Earth structure

ในปัจจุบันการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านปฐพีกลศาสตร์มีความซับซ้อนมากขึ้น จึงได้มีการนำระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมาช่วยวิเคราะห์ปัญหา ซึ่งทำให้สามารถศึกษาพฤติกรรมของดินที่มีปฏิสัมพันธ์กับโครงสร้างได้ ผู้ทำ

การวิเคราะห์จะต้องมีความรู้พื้นฐานในวิชาปฐพีกลศาสตร์เป็นอย่างดีจึงจะสามารถทำการวิเคราะห์ได้อย่างเหมาะสม และสามารถนำผลลัพธ์มาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 กรณีศึกษา

ปฐพีกลศาสตร์นั้นเป็นสิ่งที่จำเป็นในการทำงานด้านวิศวกรรมโยธาเป็นอย่างมาก ดังจะเห็นได้จากในหลายกรณีศึกษาที่วิศวกรหรือผู้ที่เกี่ยวข้องขาดความเข้าใจในพื้นฐานวิชาปฐพีกลศาสตร์ทำให้เกิดการวิบัติ ซึ่งทำให้สูญเสียเงิน เวลา

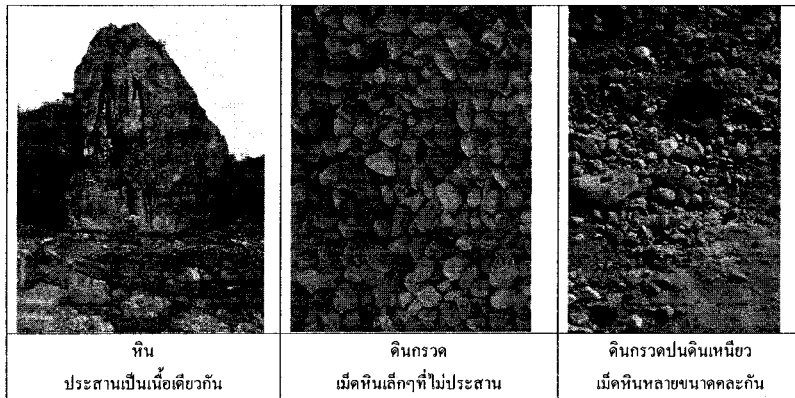


รูปที่ 1.3 ป้ายเตือน โคลนถูด ห้ามผ่าน อันตราย (CUR_Rport_162 1996)

2 การกำเนิดของดิน

2.1 บทนำ

ดินคือ มวลรวม (aggregate)¹ ที่ไม่มีการประสาน (cemented) เป็นเนื้อเดียวกัน ดินจะประกอบไปด้วยเม็ดดิน อินทรีย์วัตถุ และจะมี น้ำ หรือ อากาศแทรกอยู่ในระหว่างเม็ดดิน ดังรูปแสดงถึงหิน ดินกรวด ดินกรวดปนดินเหนียว



รูปที่ 2.1 ความแตกต่างของหิน และดิน

ในทางปฐพีทศศาสตร์ จะศึกษาถึงส่วนของเปลือกโลกส่วนเล็ก ๆ ไม่ใช่เปลือกโลกที่ประกอบกันเป็นชั้นใหญ่ ๆ ซึ่งคุณสมบัติของดินจะขึ้นกับลักษณะการกำเนิดดิน และลักษณะของดินที่ประกอบกันเป็นชั้นดิน

The way the soil deposits were formed

The nature of the soils found in the soil deposits

ถ้าเป็นโครงการใหญ่ๆอาจต้องอาศัยความรู้ลึกซึ้งจากนักธรณีวิทยา แต่ถ้านเป็นโครงการทั่วไปวิศวกรอาจต้องใช้ความรู้ด้านธรณีวิทยาและกระบวนการทางธรณีบ้าง

¹ 5.a cluster of soil granules not larger than a small crumb. 6.any of various loose, particulate materials, as sand, gravel, or pebbles, added to a cementing agent to make concrete, plaster, etc.aggregate. (n.d.). Dictionary.com Unabridged (v 1.1). Retrieved November 04, 2007, from Dictionary.com website: <http://dictionary.reference.com/browse/aggregate>

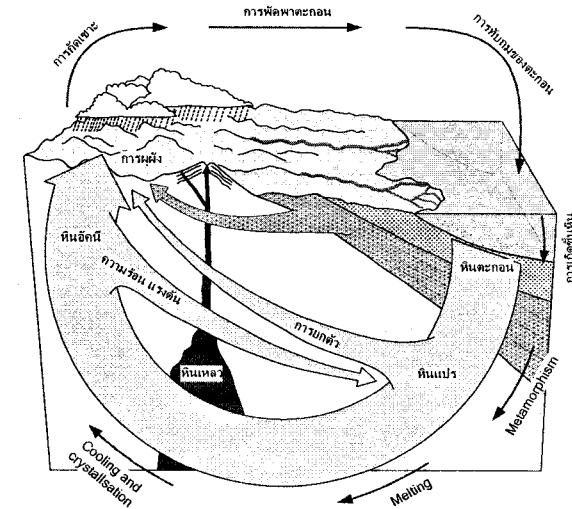
ปฐพีทศศาสตร์

2.2 Rock Cycle

หินแบ่งออกได้ตามลักษณะการกำเนิดคือ

- หินอัคนี (Igneous Rock)
- หินตะกอน (Sedimentary Rock)
- หินแปร (Metamorphic Rock)

Rock cycle ใช้ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหินแต่ละชนิดดังรูป



รูปที่ 2.2 วัฏจักรหิน

- หินอัคนี (Igneous Rock)

เกิดจากการแข็งตัวของหินหนืด (Magma) ได้เปลือกโลก ซึ่งอาจแข็งตัวอยู่ภายใต้เปลือกโลกหรือไหลผ่านเปลือกโลกก็ตาม

- หินตะกอน (Sedimentary Rock)

คือหินอัคนีที่เกิดการผุพังและแตกออกเป็นหินและเม็ดดินขนาดต่าง ๆ กัน และถูกพัดพาไปทับถม โดยตัวกลางทางธรรมชาติ เมื่อมีตัวประสานก็จะจับตัวแน่นกลายเป็นหินตะกอน

หินตะกอนเองก็อาจเกิดการผุพังและถูกพัดพาไปทับถมกลายเป็นหินตะกอนใหม่ได้อีก

- หินแปร (Metamorphic Rock)

เป็นหินที่แปรสภาพไปจากเดิม โดยอิทธิพลของความร้อน, ความกดดัน รวมทั้งปฏิกิริยาทางเคมีจนทำให้องค์ประกอบและเนื้อหินเปลี่ยนแปลงไป

2.3 กำเนิดของดิน

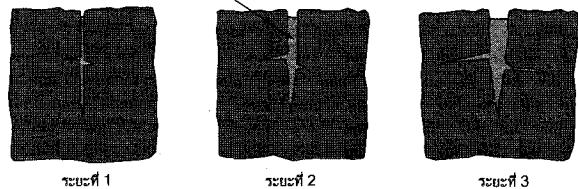
ในวิชาวิศวกรรมปฐพีนี้จะกล่าวถึงเฉพาะส่วนที่เป็นดินตามคำนิยาม ซึ่งได้แก่มวลรวมที่ไม่มีวัสดุยึดแน่นเป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นส่วนที่เกี่ยวข้องในวัฏจักรหินจะได้แก่ กระบวนการกัดเซาะ กระบวนการพัดพา และกระบวนการตกตะกอน โดยวัสดุต้นกำเนิดของดินจะมาจากกระบวนการ Weathering ของหิน ซึ่ง Weathering เป็นกระบวนการแตกสลาย (Disintegration) และผุพัง (Decomposition) ของหินซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการทางกลหรือกระบวนการทางเคมี

2.3.1 การผุพังทางกล (Mechanical Weathering)

คือการแตกออกของหินทำให้หินมีขนาดเล็กลงกระบวนการนี้จะทำให้เกิดดินที่ไม่มี cohesion (Cohesionless Soil)

- Temperature change - กลางวันร้อนกลางคืนเย็น

น้ำในรอยแตกแข็งตัวกลายเป็นน้ำแข็ง



รูปที่ 2.3 การแตกของหินเนื่องจากการขยายตัวของน้ำแข็ง

- Erosion - กระบวนการที่เกิดขึ้นโดยอาศัยตัวกลางเช่นน้ำและลม กัดกร่อนหินให้เป็นชิ้นเล็ก
- Abrasion - คือการครูดบนผิวหิน ซึ่งเกิดขึ้นจากการกระทำของเศษหิน กวดทราย ที่ลมและธารน้ำแข็ง พัดพาเคลื่อนที่ไป เศษหินจะเกิดการเสียดสี หรือครูดกับผิวหินด้านล่างทำให้เกิดการกร่อนของหินขึ้น

2.3.2 การผุพังทางเคมี (Chemical Weathering)

- Oxidation - Ion ของ Oxygen ทำปฏิกิริยากับแร่เหล็กในหินเป็นผลให้เกิดการผุพังของหินขึ้นคล้ายกับการเกิดสนิมในเหล็ก
- Carbonation - น้ำฝน + Carbon dioxide -> Carbonic Acid กรดคาร์บอนิก จะทำปฏิกิริยากับหินปูน ทำให้หินปูนเกิดการผุพัง
- Leaching - แร่ธาตุในชั้นดินหรือหินถูกชะออกไปกับน้ำในรูปของสารละลายหินตะกอนถูกชะล้างเอาสารเชื่อมประสานออกไปทำให้อนุภาคที่เคยยึดติดกันแยกออกจากกัน สารเชื่อมประสานที่ถูกชะออกไปอาจไหลซึมผ่านลงไปสู่ชั้นที่ลึกกว่าและอาจไปทำการเชื่อมประสานก่อให้เกิดหินตะกอนในชั้นที่ลึกกว่าได้

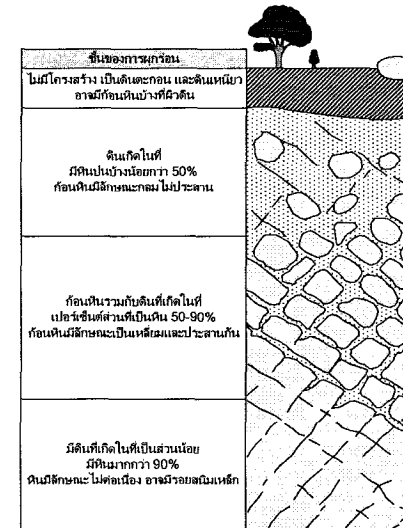
- Hydration - เป็นการเพิ่มน้ำเข้าไปในแร่ที่เป็นองค์ประกอบของหินโดยขบวนการที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีของหินทำให้เกิดแร่ใหม่ขึ้น

2.4 Soil Formation

การแยกชนิดของดินตามลักษณะการกำเนิด อาจแยกได้เป็น 2 ชนิดคือ

2.4.1 Residual Soil

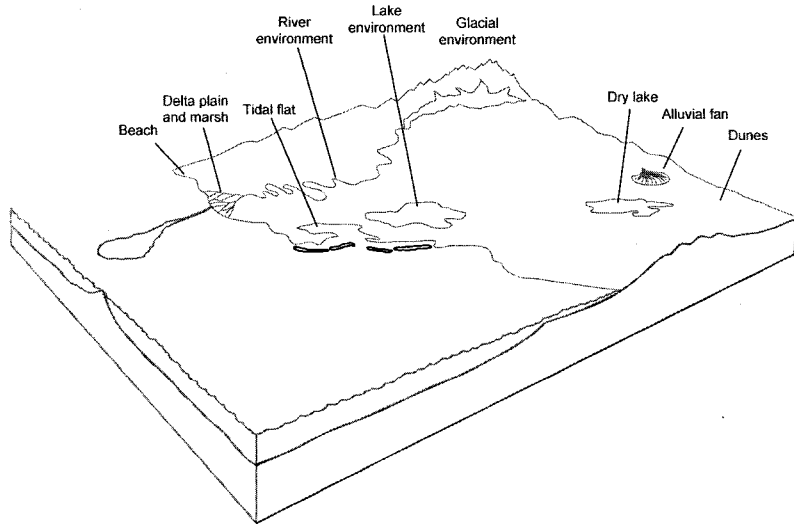
เป็นดินที่เกิดจากการผุพังของหินต้นกำเนิดอยู่โดยมีน้ำเป็นตัวทำละลายหลัก การผุพังจะเกิดที่ผิวดินมากกว่าระดับที่อยู่ลึกไป เช่นดินที่มีธาตุเหล็ก (Ferrous) ผสมจะมีสีน้ำตาลแดง เรียกว่าลูกรัง (Laterite)



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างรูปตัดหน้าดินที่เกิดในที่ (Residual Soil) ซึ่งเกิดจากหินแกรนิต (Ruxton et al., 1957)

2.4.2 Sediment Soils (Transported Soils)

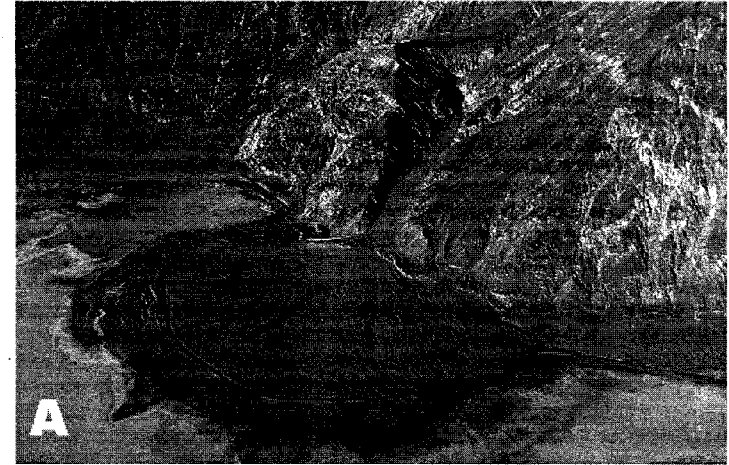
เป็นดินที่เกิดจากการถูกพัดพาจากแหล่งกำเนิด โดยตัวกลางและไปทับถมในอีกที่หนึ่ง ตัวกลางที่พัดพาอาจเป็นน้ำ ลม ธารน้ำแข็ง เมื่อเม็ดดินมาทับถมกันจะเกิดเป็นชั้นดินขึ้น ซึ่งจะมีชื่อเรียกตามลักษณะการถูกพัดพา เช่น



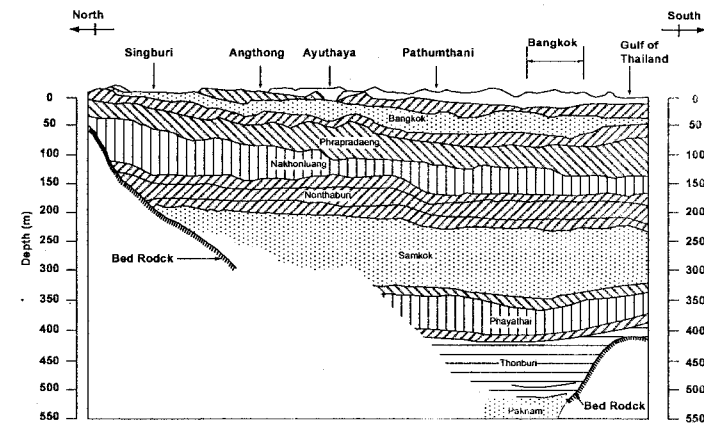
- Alluvium ดินที่เกิดจากการพัดพา และการตกตะกอนโดยแม่น้ำ ตัวอย่างดิน Alluvial คือที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งแม่น้ำเจ้าพระยาได้พัดพาตะกอนมากับน้ำและมาตกตะกอนเป็นที่ราบขั้น



- Alluvial ดินตะกอนรูปพัดบริเวณที่ราบเชิงเขา



- Marine ดินที่เกิดจากการพัดพาเม็ดดินขนาดเล็กไปตกตะกอนในทะเล ตัวอย่าง Marine Clay ได้แก่ที่ราบปากแม่น้ำเจ้าพระยาซึ่งเกิดจากการตกตะกอนของดินเม็ดละเอียดที่ปากแม่น้ำ ดิน Marine Clay มักมีสีเทา และมีกำลังต่ำและยุบตัวได้มาก ใช้เป็นฐานรากได้ไม่ดี



รูปที่ 2.5 รูปตัดแสดงชั้นดินตะกอนของกลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา (Balasubramaniam and Brenner 1981)

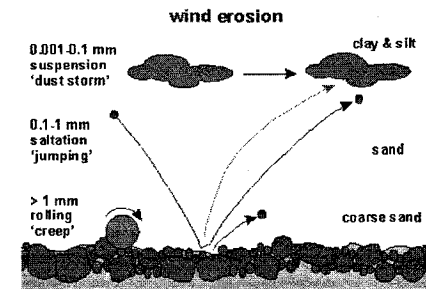
- Lacustrine คือดินที่ตะกอนถูกน้ำพัดพามาทับถม และตกตะกอนในทะเลสาบ



- Glacial Drift เกิดจากการبرد โม่และเคลื่อนที่ของธารน้ำแข็ง ส่วนใหญ่เป็นกรวดทรายปนดินตะกอน



- Aeolian เป็นดินที่ถูกพัดพาโดยลม และตกตะกอน ตัวอย่างดินเช่น Loess ซึ่งเป็นดินทรายแป้ง (Silt) หรือ Silty Clay ซึ่งมีขนาดประมาณ 0.06 มม. เมื่อแห้งจะมี Strength สูงแต่เมื่อมีความชื้น Strength จะลดลงและเกิดการทรุดตัวมาก



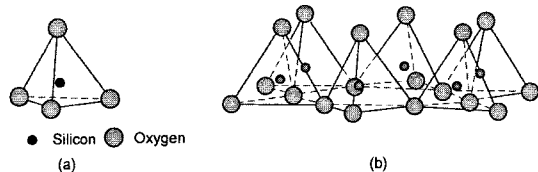
ดินในทางปฐพีกลศาสตร์จะแบ่งออกเป็นดินเม็ดละเอียด (fine grained soil) และดินเม็ดหยาบ (coarse grained soil) สำหรับดินเม็ดละเอียดถ้ามีองค์ประกอบหลักเป็นแร่ดินเหนียวจะทำให้ดินมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นในบทความนี้จะศึกษาถึงแร่ดินเหนียวที่เป็นองค์ประกอบของดินเม็ดละเอียด

2.5 แร่ดินเหนียว (Clay Mineral)

เป็นผลจากกระบวนการผุพังทางเคมี (Chemical Weathering) ซึ่งเม็ดดินจะเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก มีขนาดไม่เกิน 0.002 มิลลิเมตร หรืออาจเล็กกว่านี้มาก ส่วนใหญ่จะมีรูปร่างเป็นแผ่นบาง (Flat plates), เข็ม (Needles), ท่อ (tubes) หรือ แท่ง (rods) หรือในบางครั้งก็เป็นเพียงชิ้นส่วนที่มีความหนาไม่กี่โมเลกุล แร่ดินเหนียวส่วนใหญ่จะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างผลึก ซึ่งความหนาของผลึกอาจเล็กถึง 15 อังสตรอม และความกว้างอยู่ในระดับ ไมครอน ดังนั้นในการจำแนกจึงให้วิธี X-ray diffraction ในการจำแนกผลึกพื้นฐาน แร่ดินเหนียวนั้นเป็นองค์ประกอบ Aluminum silicates ซึ่งประกอบด้วยหน่วยย่อยพื้นฐานได้แก่ silica tetrahedron และ alumina tetrahedron

2.5.1 Silica Tetrahedron

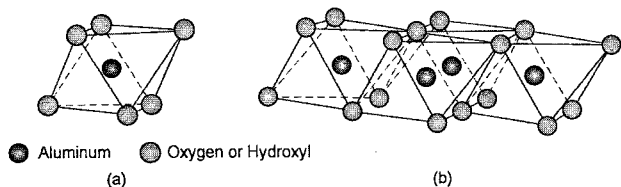
แต่ละหน่วยของ Tetrahedron จะประกอบด้วย oxygen 4 อะตอม อยู่รอบ ๆ Silicon 1 อะตอม ถ้า นำเอาแต่ละหน่วยมาประกอบกันจะเรียกว่า Silica Sheet



รูปที่ 2.6 การจัดเรียงตัวของ Silica tetrahedron (a) แบบหน่วยเดี่ยว (b) หลายๆหน่วยเกาะกลุ่มกันเป็นแผ่น Silica sheet (Das 1995)

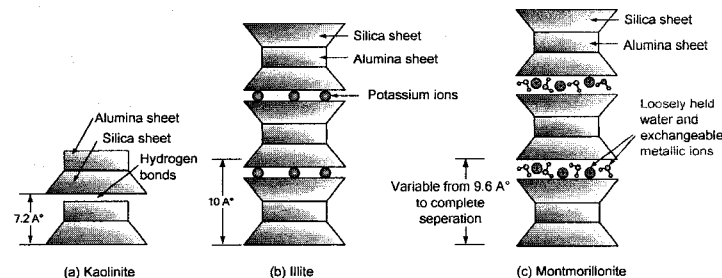
2.5.2 Alumina Octahedron

หน่วยของ Octahedron ประกอบด้วย hydroxyl 6 ตัวรอบ ๆ Aluminum 1 อะตอม ถ้ามี Aluminum hydroxyl หลาย ๆ หน่วยมารวมกันจะกลายเป็น octahedral sheets (อาจเรียกว่า Gibbsite sheet) ถ้าแทนอะตอมของ Aluminum ด้วยอะตอมของ Magnesium ใน Octahedron unit จะเรียกว่า Brucite sheet



รูปที่ 2.7 การจัดเรียงตัวของ Alumina Tetrahedron (a) แบบหน่วยเดี่ยว (b) หลายๆหน่วยเกาะกลุ่มกันเป็นแผ่น Alumina sheet (Das 1995)

แร่ดินเหนียวจะประกอบไปด้วย Basic sheet structure มาเรียงซ้อนกัน โดยมี bonding ต่างกันไปในแร่ดินเหนียวแต่ละชนิด แร่ดินเหนียวที่พบส่วนใหญ่คือ



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของ (a) เกาลีไนท์ (b) อิลไลต์ และ (c) มอนท์มอลลิไนท์

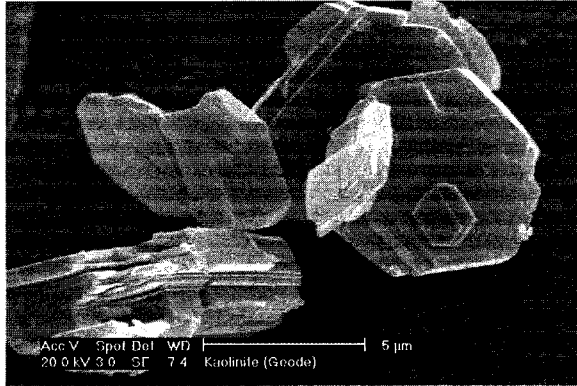
• เกาลีไนท์ (Kaolinite)

คำจำกัดความของ Kaolinite จากเอกสาร (EKA) Kaolinite คือแร่ที่อยู่ในกลุ่มของ Aluminosilicates ซึ่งรู้จักกันในชื่อของ “China Clay” เนื่องจากพบครั้งแรกที่เมือง Kao-Lin ในประเทศจีน โดย Kaolin เป็นดินเหนียวที่มีสีขาว ประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีลักษณะเป็นแผ่นขนาดเล็ก โดยเกิดจากการผุพังของหินที่แกรนิตที่มีแร่ Feldspar เป็นองค์ประกอบ หรือกระบวนการ Hydrothermal ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จะแปลงหินแกรนิตที่แข็งให้เป็นหน่วยย่อยที่อ่อน (soft matrix) ควอตซ์และไมกาที่อยู่ในหินแกรนิตจะไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ Feldspar จะเปลี่ยนไปเป็น Kaolinite ภาคอุตสาหกรรมได้นำเอา Kaolinite ไปใช้ประโยชน์ตัวอย่างเช่น การทำกระดาษ เซรามิก ส่วนประกอบของสี เป็นต้น

สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของ Kaolinite นั้นจะประกอบด้วย Silica tetrahedron 1 แผ่น และ Alumina Octahedron 1 แผ่น และยึดไว้ด้วย Hydrogen bonding ดังรูป แร่ Kaolinite มีความคงตัวมาก การเรียงตัวของมีการเรียงซ้อนกันมากกว่า 100 ชั้น

• อิลไลต์ (illite)

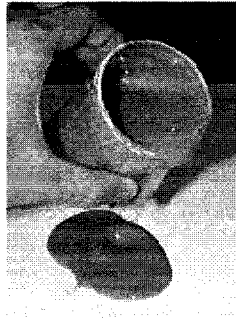
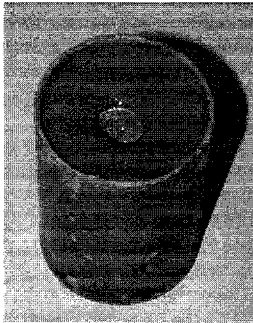
โครงสร้างพื้นฐานประกอบด้วย Alumina octahedral 1 แผ่นประกบด้วย Silica tetrahedron 2 แผ่น ดังรูปที่ 12 ใน Octahedral sheet อะตอมของ Magnesium และ เหล็ก จะมาแทนที่อะตอม Aluminum บางส่วน ส่วนใน Tetrahedron sheet อะตอมของ Aluminum จะแทนที่อะตอม Silicon บางส่วนเช่นกันระหว่างชุดของโครงสร้างพื้นฐานจะยึดไว้ด้วยกันด้วยแรงยึดเหนี่ยวที่ไม่แข็งแรงนักจากอะตอมของโปแตสเซียม (Non-exchangeable)



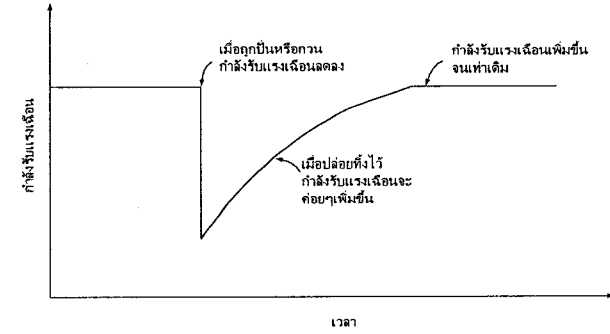
รูปที่ 2.9 เม็ดดิน Kaolinite ขนาดประมาณ 6 ไมครอน (เล็กกว่าเหรียญบาทประมาณ 3333 เท่า)

• มอนต์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite)

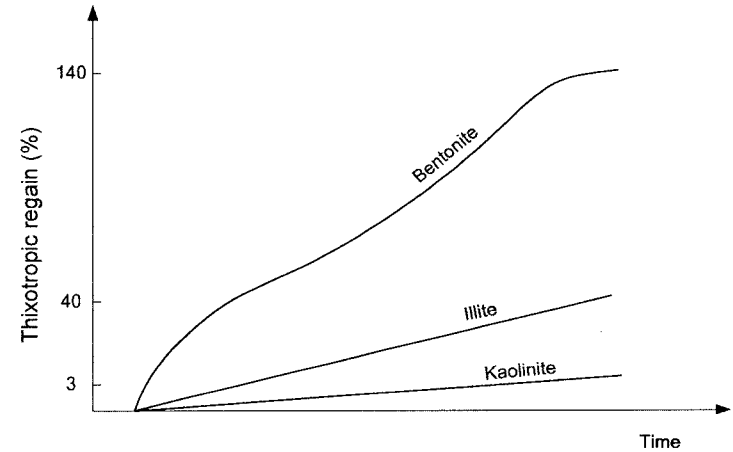
โครงสร้างพื้นฐานจะเหมือนกับ Illite แต่อะตอมของ Magnesium จะแทนที่อะตอมของ Aluminum บางส่วนของ Octahedral sheet ระหว่างโครงสร้างพื้นฐานจะมี โมเลกุลของน้ำและ Exchangeable Cation. ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นจะต่ำมากทำให้มีสภาพไม่เสถียร (Unstable) Montmorillonite สามารถดูดน้ำได้มากและทำให้เกิดมีการบวมตัวปริมาณสูง แร่ดินเหนียวชนิดนี้จะรู้จักกันดีในชื่อ Bentonite เมื่อนำไปผสมกับน้ำแล้วจะเป็นสารแขวนลอยที่มีความหนืด ลักษณะคล้ายน้ำโคลน มีความหนาแน่นสูง ซึ่งส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในงานก่อสร้างเสาเข็มเจาะ หลุมเจาะสำรวจ โดยจะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ผนังหลุมเจาะพังทลาย



รูปที่ 2.10 เมื่อบดด้วยไม้รบกวนจะมี Shear Strength เพิ่มขึ้นแต่เมื่อเขย่าหรือกวนกำลังจะลดลงจนกระทั่งไหลได้



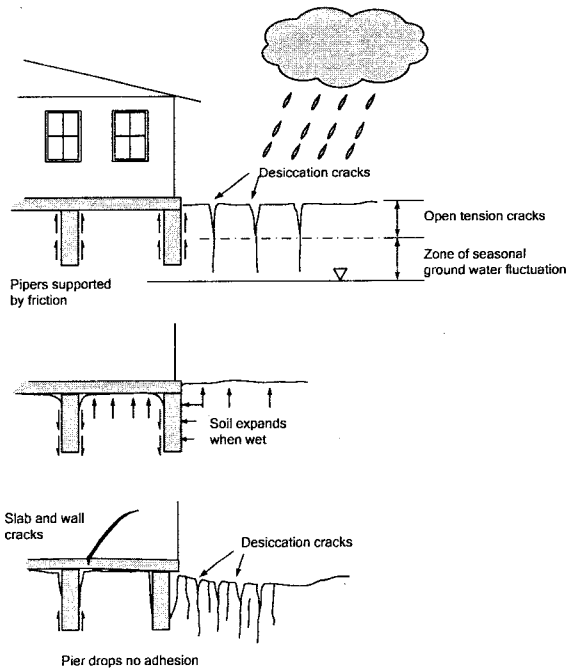
รูปที่ 2.11 กำลังของดินเมื่อถูกรบกวนจะลดลงและเมื่อปล่อยทิ้งไว้จะมีกำลังสูงขึ้นซึ่งเรียกว่า Thixotropy



รูปที่ 2.12 การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนของดินเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นของแร่ดินเหนียว 3 ชนิด



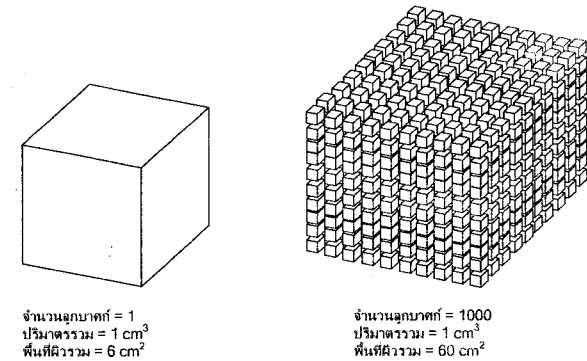
รูปที่ 2.13 เบนโทนไนท์ที่ใช้เพื่อป้องกันหลุมเจาะพังทลายในงานเสาเข็มเจาะ



รูปที่ 2.14 ปัญหาการทรุดตัวของอาคารที่เกิดจากดินเหนียวที่มีการบวมตัวและหดตัว

2.6 แรงที่ผิวของเม็ดดินและ adsorbed water

ในการอธิบายแรงที่ผิวของเม็ดดินเราพิจารณาจากพื้นที่ผิวของเม็ดดิน โดยเราสมมุติว่าดินเป็นรูปลูกบาศก์ขนาด $1\text{cm} \times 1\text{cm} \times 1\text{cm}$ (ที่สมมุติเป็นรูปลูกบาศก์เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณและการทำความเข้าใจ ในความเป็นจริงดินมีรูปร่างไม่แน่นอน) ลูกบาศก์ปริมาตร 1cm^3 นี้จะมีพื้นที่ผิวเป็น 6cm^2 ถ้าเราแบ่งลูกบาศก์นี้ออกเป็นลูกบาศก์เล็กๆขนาด $1\text{mm} \times 1\text{mm} \times 1\text{mm}$ ปริมาตรรวมของลูกบาศก์ทั้งหมดยังคงเท่าเดิม แต่พื้นที่ผิวรวมทั้งหมดของลูกบาศก์จะเท่ากับ 60cm^2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อลูกบาศก์มีขนาดเล็กลงพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้น ในกรณีของดินก็เช่นเดียวกัน ถ้าเป็นดินทรายพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักจะประมาณ $0.01\text{m}^2/\text{g}$ แต่ถ้าเป็นดินเหนียวที่ประกอบด้วยแร่ montmorillonite พื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักจะเป็น $1000\text{m}^2/\text{g}$ ดินที่ประกอบด้วยแร่กาโอลินจะมีพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักอยู่ในช่วง 10 ถึง $20\text{m}^2/\text{g}$ และสำหรับ อิลไลต์พื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักจะประมาณ 65 ถึง $100\text{m}^2/\text{g}$ จากพื้นที่ผิวที่ค่อนข้างมากมายนี้เองทำให้แรงที่ผิวมีผลต่อพฤติกรรมของดินมีผลละเอียดอย่างมากเมื่อเทียบกับดินเม็ดละเอียด



รูปที่ 2.15 เปรียบเทียบพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนัก (a) ลูกบาศก์ขนาด $1\text{cm} \times 1\text{cm} \times 1\text{cm}$ (b) ลูกบาศก์ขนาด $1\text{mm} \times 1\text{mm} \times 1\text{mm}$ จำนวน 1000 ลูก

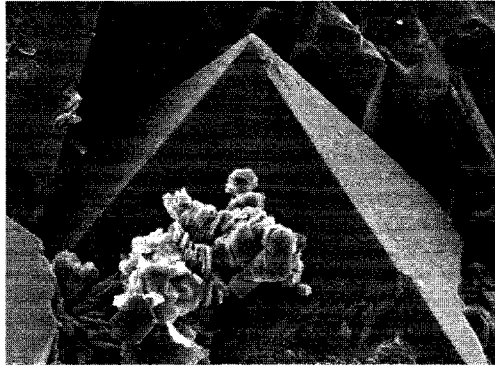
นั่นหมายความว่า ดินเม็ดละเอียดจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าดินเม็ดหยาบ ถ้ามึ้นน้ำหนักเท่ากัน เราเรียกพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักของดินว่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface)

ตารางที่ 2.1 พื้นที่ผิวจำเพาะของทรายและแร่ดินเหนียวบางชนิด

ชนิดของดิน	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตรต่อกรัม)
ทราย	0.01
Montmorillonite	1000
Illite	65 ถึง 100
Kaolinite	10 ถึง 20

จากตาราง จะเห็นได้ว่าทรายมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำกว่าแร่ดินเหนียว ซึ่งทำให้อิทธิพลที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูดที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวนั้นสูงกว่าทราย และเมื่อเปรียบเทียบเทียบระหว่างแร่ดินเหนียวด้วยกันแล้ว แร่ดินเหนียว Montmorillonite จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงที่สุด

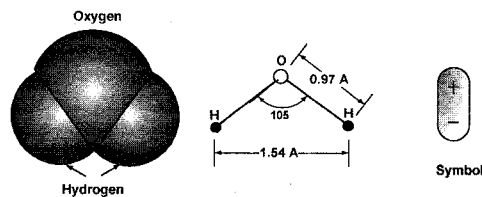
ซึ่งเมื่อดูผ่านกล้องจุลทรรศน์จะพบว่าขนาดของทรายมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของเม็ดดินเหนียวมาก



รูปที่ 2.16 Pyramidal diagenetic quartz overgrowth on a sand grain with associated Kaolinite platelets

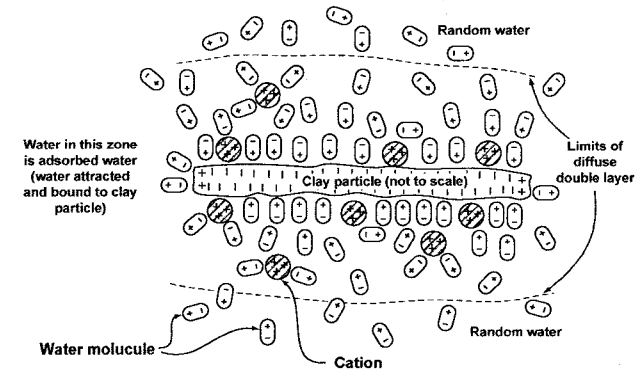
(www.geos.ed.ac.uk)

- ที่ผิวของแร่ดินเหนียวจะมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ เนื่องจากการจัดเรียงตัวของ ion ในแร่ดินเหนียว
- แร่ดินเหนียว (ดินเม็ดละเอียด) มักจะตกตะกอนในน้ำ ซึ่งน้ำจะมีผลต่อพฤติกรรมของดินเหนียว
- สำหรับดินเม็ดหยาบจะมีพื้นที่ผิวน้อยทำให้แรงที่เกิดจากประจุไฟฟ้าไม่มีผลต่อพฤติกรรมของดินเม็ดหยาบมากนัก
- เนื่องจากที่ผิวของแร่ดินเหนียวมีประจุไฟฟ้าเป็นลบดังนั้นจึงพยายามจะผลักกัน แต่ประจุไฟฟ้าลบก็จะดูดไอออนบวก (Cation) เช่น K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Al^{3+} ที่อยู่ในน้ำทำให้ประจุสมดุล ไอออนบวกพวกนี้เกิดจากกระบวนการย่อยสลายของหิน
- โมเลกุลของน้ำเป็น โมเลกุลที่มีขั้ว (Polar molecule) เนื่องจากการจัดเรียงตัวของอะตอมทำให้โมเลกุลของน้ำมีขั้วแบบอ่อน



รูปที่ 2.17 แบบจำลองโมเลกุลของน้ำซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว (Polar molecule)

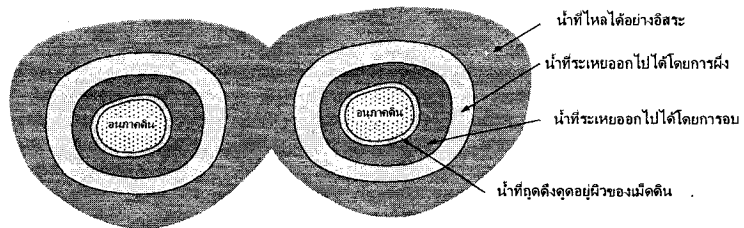
- ปลายที่มีประจุเป็นลบของโมเลกุลน้ำจะดึงดูดกับ ไอออนบวกที่ถูกผิวแร่ดินเหนียวดูดไว้ ทำให้โมเลกุลของน้ำยึดติดกับผิวดินเหนียว ส่วนปลายที่เป็นประจุบวกของโมเลกุลน้ำจะดึงดูดกับผิวของดินโดยตรง



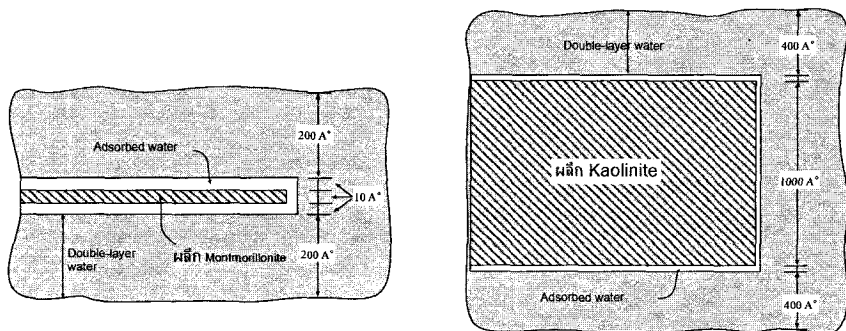
รูปที่ 2.18 Adsorbed water and cations in diffuse double layer surrounding clay particle.

- ถ้าโมเลกุลของน้ำอยู่ห่างจากผิวของแร่ดินเหนียวแรงดึงดูดเนื่องจากประจุไฟฟ้าลบก็จะลดลง ทำให้ไอออนบวกตกลงด้วย
- ระยะจากแร่ดินเหนียวไปยังจุดที่ไม่มีแรงดึงดูดระหว่างประจุ เรียกว่า Diffuse double layer และน้ำที่ถูกดูดอยู่ในช่วงนี้เรียกว่า Adsorbed water
- ที่ดินเหนียวยึดติดเป็นก้อนและสามารถปั้นได้ ก็เกิดจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าของแร่ดินเหนียวกับน้ำ (น้ำเป็นโมเลกุลที่มีขั้วอย่างอ่อน) แต่ถ้าตัวกลางเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว ดินจะไม่สามารถยึดติดเป็นก้อน และจะปั้นไม่ได้

ประเภทของน้ำที่ล้อมรอบดินเหนียวแสดงได้ง่ายๆดังรูป โดยน้ำที่อยู่ใกล้กับผิวของอนุภาคดินมากที่สุดจะถูกดึงดูดโดยแรงทางไฟฟ้า ซึ่งจะมีควมหนาแน่นมากซึ่งอาจหนาเพียง 0.005 ไมครอน การอบดินที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสไม่สามารถทำให้น้ำส่วนนี้หลุดจากดินได้ดังนั้นจึงคิดว่าน้ำในบริเวณนี้เป็นส่วนหนึ่งของอนุภาคดิน น้ำในชั้นถัดมาเป็นน้ำที่ไม่ถูกดึงดูดไว้แน่นนักซึ่งสามารถทำให้ระเหยออกจากเม็ดดินได้โดยการอบในตู้อบแต่จะไม่สามารถทำให้ระเหยได้โดยการผึ่งในอากาศ น้ำในบริเวณถัดมาจะเป็นน้ำที่ถูกดึงดูดด้วยแรงดึงดูดจากปรากฏการณ์ Capillary ซึ่งสามารถทำให้ระเหยออกไปได้โดยการผึ่งให้แห้งในอากาศ ส่วนน้ำที่เป็นอิสระและสามารถไหลผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดดินได้ น้ำในบริเวณนี้จะไม่ได้รับอิทธิพลแรงดึงดูดจากอนุภาคดิน



รูปที่ 2.19 การจำแนกลักษณะของน้ำที่ล้อมรอบอนุภาคดิน (Head 1980)



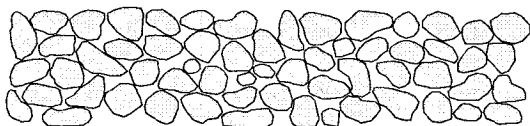
รูปที่ 2.20

2.7 Soil Structure

2.7.1 ดินไม่มีความเชื่อมแน่น (Cohesionless soil)

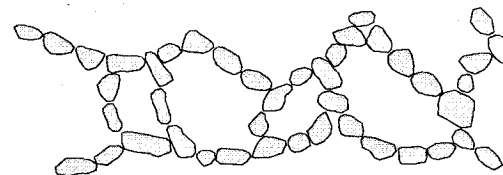
ได้แก่ดินเม็ดหยาบที่มีขนาดเม็ดดินใหญ่กว่า 0.074mm และดินทรายแป้งที่ไม่มีสภาพพลาสติก (Non plastic silt) โครงสร้างของดินชนิดนี้จะมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

โครงสร้างของดินแบบเม็ดเดี่ยว - เม็ดดินแต่ละเม็ดจะสัมผัสกับดินที่อยู่รอบ ๆ ขนาดและตำแหน่งของเม็ดดินจะมีผลต่อความแน่นของมวลดิน



รูปที่ 2.21 โครงสร้างดินแบบเม็ดเดี่ยว

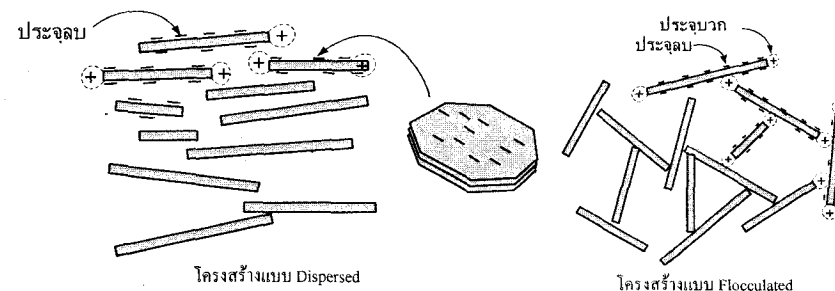
โครงสร้างแบบรังผึ้ง - จะเป็นโครงสร้างของทรายละเอียด และทรายแป้ง เม็ดดินจะจัดเรียงตัวในแบบลูกโซ่ ทำให้เป็นโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง (Honeycombed) การเรียงตัวแบบนี้ทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นมากแต่ถ้ารับน้ำหนักบรรทุกมากจะทำให้โครงสร้างดินพังปริมาตรของดินจะลดลงอย่างมากทำให้เกิดการทรุดตัว



รูปที่ 2.22 โครงสร้างดินแบบรังผึ้ง

2.7.2 ดินที่มีความเชื่อมแน่น (Cohesive soil)

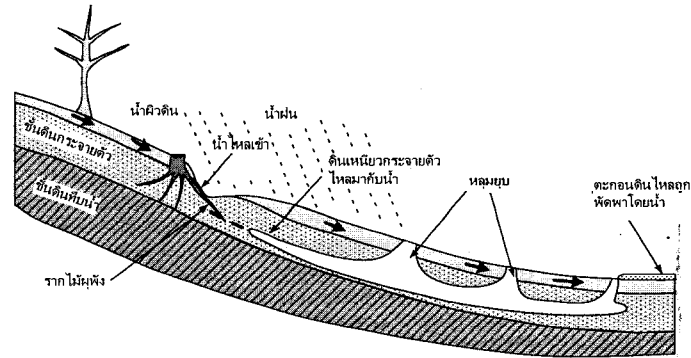
ได้แก่ดินที่มีขนาดเม็ดดินเล็กกว่า 0.074mm เช่นดินเหนียว (Clay) และดินทรายแป้งที่มีสภาพเป็นพลาสติก (Plastic silt) โครงสร้างของดินชนิดนี้จะมีอยู่ 2 ลักษณะคือ



รูปที่ 2.23 แนวคิดของโครงสร้างของดินแบบ Flocculated และแบบ Dispersed

โครงสร้างดินที่เป็นแบบ Dispersed นั้นเกิดจากการที่อนุภาคดินเหนียวแขวนลอยอยู่ในน้ำและมีไอออนบวกที่ล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำและมีขนาดใกล้เคียงกับอนุภาคดินเหนียว และเนื่องจากเม็ดดินยังมีประจุลบค้างอยู่เป็นจำนวนมากทำให้เกิดแรงผลักระหว่างเม็ดดินจนทำให้เม็ดดินไม่เกาะกันเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นและคกตะกอน ซึ่งการที่ดินไม่คกตะกอนนี้ก็จะเห็นได้จากการที่น้ำขุ่นเป็นระยะเวลานาน แต่ถ้าขนาดของไอออนบวกที่ล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำมีขนาดเล็กลงจะทำให้อนุภาคดินมีโอกาสมเกาะกันได้โดยชอบของเม็ดดินที่มีประจุบวกจะดึงดูดกับผิวของเม็ดดินที่มีประจุลบ และเมื่อคกตะกอนและทับถมจนเกิดเป็นดินแล้วจะได้ดินที่มีโครงสร้างแบบ Flocculated

โครงสร้างดินที่เป็นแบบ Dispersed นั้นมักจะก่อให้เกิดปัญหาทางวิศวกรรมกับโครงสร้างที่สร้างขึ้นมาจากดินชนิดนี้ ซึ่งดินเหนียวชนิดนี้จะมีคำเรียกเฉพาะว่า "ดินเหนียวกระจายตัว" ดินเหนียวชนิดนี้จะถูกกัดเซาะได้ง่ายถ้ามีน้ำสะอาดไหลผ่านดินดังกล่าว



รูปที่ 2.24 การเกิดการกัดเซาะของดินเหนียวกระจายตัว

ผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากดินเหนียวกระจายตัวอาจรุนแรงเกิดการวิบัติได้ ดังตัวอย่างการวิบัติของเขื่อนลำมูลบน ในอำเภอ ครบุรี จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งเป็นเขื่อนดินเนื้อเดียว (homogeneous) สูง 32 เมตร วิบัติในเดือนตุลาคม 2533 โดยเกิดรูรั่วทำให้น้ำไหลออกทางด้านตีนเขื่อน 2 แห่ง พัดพาเอาดินตะกอนออกมา 2 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที การแก้ไขใช้เวลา 10 วันจึงควบคุมปริมาณน้ำที่รั่วออกมาได้ ซึ่งการซ่อมแซมแก้ไขใช้งบประมาณกว่า 300 ล้านบาท เมื่อเทียบกับราคาค่าก่อสร้างครั้งแรกราว 150 ล้านบาท (วรารักษ์ -)

2.8 คำถามท้ายบท

1. ถ้าต้องการก่อสร้างฐานรากของอาคารในบริเวณ จังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งเป็นบริเวณที่แม่น้ำเจ้าพระยาไหลลงสู่อ่าวไทย อยากรทราบว่าดินในบริเวณนี้จะเป็นดินประเภทใด
2. ถ้าต้องการสร้างฐานรากในบริเวณเชิงเขา พบบนชั้นดินไม่หนาเมื่อขุดลงไปพบชั้นหินเป็นบริเวณกว้าง ดินในบริเวณนี้จะเป็นดินประเภทใด
3. จงเปรียบเทียบพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุที่มีขนาด $1 \times 1 \times 1$ เซนติเมตร กับวัสดุที่มีปริมาตรเท่ากันแต่มีขนาด $0.1 \times 0.1 \times 0.01$ เซนติเมตร

3 คุณสมบัติทางกายภาพของดิน

3.1 วัตถุประสงค์

หลังจากได้ศึกษาบทนี้แล้วนักศึกษาควรจะ

- อธิบายลักษณะของดิน และ จำแนกลักษณะของดิน
- สามารถบอกการกระจายตัวของขนาดของเม็ดดิน
- สามารถบอกอัตราส่วนขององค์ประกอบหลักของดิน
- สามารถบอก index properties ของดิน

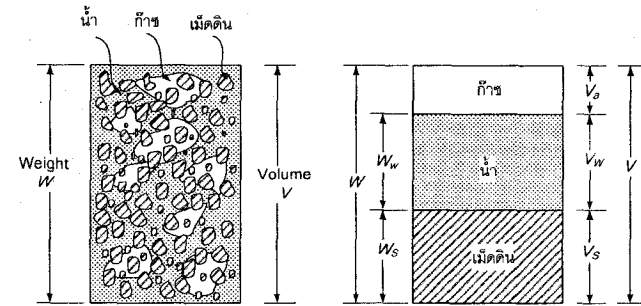
คำถามเพื่อช่วยในการอ่าน

- เราจะจำแนกดินได้อย่างไร
- เราจะใช้พารามิเตอร์อะไรในการจำแนกดิน
- ดินเม็ดละเอียดกับดินเม็ดหยาบแตกต่างกันอย่างไร
- การทดสอบพื้นฐานเพื่อใช้ในการจำแนกดินมีอะไรบ้าง
- Atterberg limit คืออะไร
- ทำไมจึงต้องจำแนกดิน

3.2 องค์ประกอบในดิน

ถ้าเราพิจารณาดินก้อนหนึ่งๆ (Soil Mass) ในดินจะประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนคือ เม็ดดินที่เป็นของแข็ง น้ำ และ ก๊าซ ซึ่งส่วนประกอบทั้งสามนี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและปริมาตรได้ดังรูปที่ 1

ปฐพีกลศาสตร์



รูปที่ 3.1 องค์ประกอบของดิน และแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและปริมาตร

จากรูปที่ 3.1 ปริมาตรทั้งหมดของดินก้อนนี้ V คือผลรวมของของแข็งและส่วนที่เป็นช่องว่าง (ซึ่งว่างประกอบไปด้วยน้ำและก๊าซ)

$$V = V_s + V_v = V_s + V_w + V_a$$

โดยที่

- V_s คือปริมาตรของดินส่วนที่เป็นของแข็ง
 - V_v คือปริมาตรของส่วนที่เป็นช่องว่างในเนื้อดิน (ของเหลว และ ก๊าซ)
 - V_w คือปริมาตรของส่วนที่เป็นของเหลวในก้อนดิน ซึ่งได้แก่น้ำ
 - V_a คือปริมาตรของส่วนที่เป็นก๊าซในก้อนดิน
- และจากรูปที่ 3.1 น้ำหนักของดินก้อนนี้คือ

$$W = W_s + W_w$$

โดยที่

- W_s คือน้ำหนักของดินส่วนที่เป็นของแข็ง
- W_w คือน้ำหนักของน้ำในก้อนดิน

3.2.1 ค่าจำกัดความ

อัตราส่วนช่องว่าง (void ratio; e) คืออัตราส่วนระหว่างปริมาตรของช่องว่างในก้อนดินต่อปริมาตรของดินส่วนที่เป็นของแข็ง

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (3.1)$$

ความพรุน (porosity, n) คืออัตราส่วนระหว่างปริมาตรของช่องว่างในก้อนดินต่อปริมาตรของก้อนดินทั้งหมด

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (3.2)$$

ระดับความอิ่มตัว (degree of saturation, S) คืออัตราส่วนระหว่างปริมาตรของน้ำในก้อนดินต่อปริมาตรของช่องว่างในก้อนดิน ซึ่งจะแสดงว่าช่องว่างในก้อนดินนี้มีปริมาณน้ำอยู่ที่เปอร์เซ็นต์ ถ้า $S = 100$ เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าช่องว่างมีน้ำบรรจุอยู่เต็ม และถ้า $S = 0$ เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าช่องว่างในก้อนดินไม่มีน้ำอยู่เลย ระดับความอิ่มตัวคำนวณได้จาก

$$S = \frac{V_w}{V_s} \quad (3.3)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง Void ratio และ Porosity หาได้จาก

$$V_v = eV_s$$

$$n = \frac{V_v}{V_v + V_s} = \frac{(V_v/V_s)}{(V_v/V_s) + (V_s/V_s)}$$

$$n = \frac{e}{1+e}$$

ความชื้นในดิน (Moisture content or water content, w) คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของน้ำต่อน้ำหนักของเนื้อดิน

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

หน่วยน้ำหนักรวม (Total unit weight, γ_t) คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของมวลดินต่อปริมาตรของก้อนดิน

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

สำหรับหน่วยน้ำหนักรวมจะสัมพันธ์กับน้ำหนักของเม็ดดิน (W_s), Moisture content (w) และ ปริมาตรของดิน (V) ดังสมการ

$$\gamma_t = \frac{W_s + W_w}{V}$$

$$= \frac{W_s(1 + W_w/W_s)}{V}$$

$$= \frac{W_s(1 + w)}{V}$$

หน่วยน้ำหนักแห้ง (Dry unit weight, γ_d) คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักเม็ดดินต่อปริมาตรของมวลดิน

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

$$= \frac{\gamma_t}{1 + \gamma_w}$$

ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific gravity, G_s)

คืออัตราส่วนระหว่างหน่วยน้ำหนักโดยเฉลี่ยของเม็ดดินต่อหน่วยน้ำหนักของน้ำที่อุณหภูมิ 4°C

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

$$= \frac{W_s}{V \cdot \gamma_w}$$

ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของดิน ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 2.6-2.9 โดยทรายซึ่งมีแร่ องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นควอตซ์ (quartz) เรามักจะสมมุติว่าดินนั้นมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.65 แต่ถ้าดินนั้นมีแร่องค์ประกอบอื่นอยู่ด้วยค่าความถ่วงจำเพาะก็จะเปลี่ยนไป ในกรณีของดินเหนียว แร่ องค์ประกอบส่วนใหญ่จะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าควอตซ์ซึ่งมีค่าทั่วๆ ไปโดยประมาณ 2.66-2.90 และในดินที่มีออกไซด์ของโลหะเป็นองค์ประกอบจะมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่าทรายและดินเหนียว ในทางตรงกันข้ามถ้าดินมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบจะมีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่า 2.65 ซึ่งในบางกรณีอาจจะต่ำกว่า 2.0 หรือในกรณีที่ดินมีรูพรุนจะทำให้มีค่าความถ่วงจำเพาะที่ได้จากการทดสอบต่ำกว่าค่าความถ่วงจำเพาะของเนื้อดินจริงๆ ตารางที่ 1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินสำหรับดินบางชนิด

ตารางที่ 3.1 ความถ่วงจำเพาะของแร่ต้นกำเนิดดิน

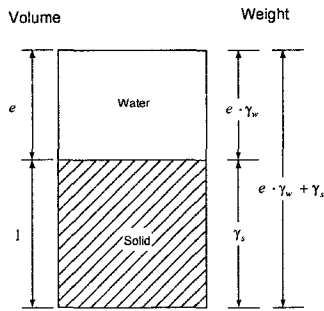
Mineral	G_s (g/cm ³)
Quartz	2.65
Kaolinite	2.60
Illite	2.80
Montmorillonite	2.65 - 2.80
Peat	1.0 - 1.2

ตารางที่ 3.2 ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินสำหรับดินบางชนิด

ชนิดของดิน	G_s
Quart Sand	2.64-2.66
Silt	2.65-2.73
Clay	2.66-2.90
Chalk	2.67-2.75
Loess	2.68-2.73
Peat	1.30-1.90

3.3 การคำนวณความหนาแน่นแห้งจากความหนาแน่นเปียกและปริมาณน้ำในดิน

สำหรับกรณีที่มีน้ำในดิน จะมีความยุ่งยากน้อยกว่ากรณีที่ดินไม่มีน้ำ เนื่องจากไม่ต้องคิดถึงปริมาณก๊าซในดิน ในที่นี้จะใช้แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับปริมาตรเพื่อช่วยในการคำนวณ



รูปที่ 3.2 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับปริมาตร กรณีที่ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (ไม่มีก๊าซในก้อนดิน)

จากแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับปริมาตร ความหนาแน่นเปียก γ_t ของดินคำนวณได้จาก

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

ส่วนความหนาแน่นแห้งของดิน γ_d คำนวณได้จาก

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+e} = \frac{G_s\gamma_w}{1+e}$$

อัตราส่วนความหนาแน่นเปียกต่อความหนาแน่นแห้งคือ

$$\frac{\gamma_t}{\gamma_d} = \frac{e+G_s}{G_s}$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_t G_s}{e+G_s}$$

และจากความสัมพันธ์ระหว่าง void ratio และ water content

$$w = \frac{e\gamma_w}{\gamma_s} = \frac{e}{G_s}$$

แทนค่าลงในสมการจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเปียกกับความหนาแน่นแห้งในเทอมของปริมาณน้ำในดินเป็น

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

ปฏิทฤษฎศาสตร์

ในการนำไปใช้งาน ส่วนใหญ่นำไปใช้ในการทดสอบการบดอัด (compaction test) โดยจะทำการทดสอบเพื่อให้ได้ความหนาแน่นของดินเปียก จากนั้นนำดินเปียกนี้ไปหาปริมาณน้ำในดิน นำผลที่ได้มาคำนวณหาความหนาแน่นของดินแห้ง ซึ่งจะใช้เป็นเป็นมาตรฐานในการควบคุมการก่อสร้างในสนาม ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวไว้ในบทที่ xx

ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density)

การระบุความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดินเม็ดหยาบ (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 0.075 มิลลิเมตร) คำนวณได้จากสมการ

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

e อัตราส่วนช่องว่างของดินเม็ดหยาบที่กำลังพิจารณา

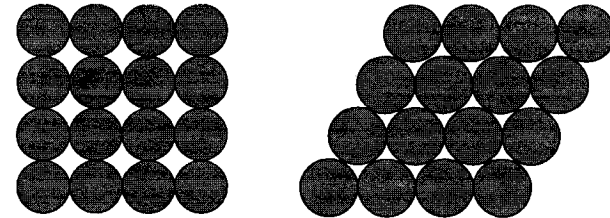
e_{max} อัตราส่วนช่องว่างของดินชนิดนี้ในสภาพหลวมที่สุด

e_{min} อัตราส่วนช่องว่างของดินชนิดนี้ในสภาพแน่นที่สุด

ดินที่มีสภาพแน่นที่สุด $D_r = 1$

ดินที่มีสภาพหลวมที่สุด $D_r = 0$

ถ้าเราทำการทดลองโดยใช้ลูกกลมที่มีขนาดเท่ากันมาวางเรียงกัน กลุ่มลูกกลมจะจัดเรียงอย่างหลวมที่สุดเมื่อจัดลูกวางกลมดังรูปที่ 3.12 (a) และจะถูกจัดเรียงอย่างแน่นที่สุดเมื่อจัดวางลูกกลมดังรูปที่ 3.12 (b) ในทางทฤษฎีสามารถคำนวณ Void ratio และ Porosity ของกลุ่มลูกกลมได้ดัง



การจัดเรียงตัวแบบหลวมที่สุด

การจัดเรียงตัวแบบแน่นที่สุด

รูปที่ 3.3 แผนภาพสมมุติแสดงการจัดเรียงตัวของลูกกลมที่มีขนาดเท่ากัน

	จัดเรียงตัวแบบหลวมที่สุด	จัดเรียงตัวแบบแน่นที่สุด
Void ratio, e	$e_{max} = 0.91$	$e_{min} = 0.35$
Porosity, n	$n_{max} = 26\%$	$n_{min} = 48\%$
Density, ρ	ρ_{min}	ρ_{max}

ตารางที่ 3.3 สภาพการอัดแน่นของดินกับความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดินเม็ดหยาบ

Relative density (%)	Description of soil deposit
0-15	Very Loose
15-50	Loose
50-70	Medium
70-85	Dense
85-100	Very Dense

ความหนาแน่นสัมพัทธ์สามารถคำนวณได้จากความหนาแน่นของดิน โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง void ratio กับความหนาแน่นของดิน ดังสมการ

$$e = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d} - 1$$

แทนค่าลงในสมการหาความหนาแน่นสัมพัทธ์จะได้

$$D_r = \frac{\left(\frac{1}{\gamma_{d(\min)}}\right) - \left(\frac{1}{\gamma_d}\right)}{\left(\frac{1}{\gamma_{d(\min)}}\right) - \left(\frac{1}{\gamma_{d(\max)}}\right)}$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$D_r = \left(\frac{\gamma_d - \gamma_{d(\min)}}{\gamma_{d(\max)} - \gamma_{d(\min)}}\right) \left(\frac{\gamma_{d(\max)}}{\gamma_d}\right) \quad (3.4)$$

$\gamma_{d(\min)}$ คือหน่วยน้ำหนักแห้งของดินเม็ดหยาบในสภาพหลวมที่สุด

$\gamma_{d(\max)}$ หน่วยน้ำหนักแห้งของดินเม็ดหยาบในสภาพแน่นที่สุด

γ_d หน่วยน้ำหนักแห้งของดินเม็ดหยาบที่พิจารณา

โดยหน่วยน้ำหนักแห้งของดินในสภาพหลวมที่สุด $\gamma_{d(\min)}$ จะหาได้โดยการเทดินทรายแห้งผ่านกรวยซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางของปากกรวย 0.5 นิ้ว โดยให้ระยะตกของดินทรายจากกรวยมีระยะ 1 นิ้ว ลงในแบบขนาด 1 ลูกบาศก์ฟุต หน่วยน้ำหนักแห้งคำนวณจาก (find the standard in SI unit)

$$\gamma_{d(\min)} = \frac{W_s}{V_m}$$

W_s คือน้ำหนักของดินทรายแห้งในแบบ

V_m ปริมาตรของแบบ (1 ลูกบาศก์ฟุต)

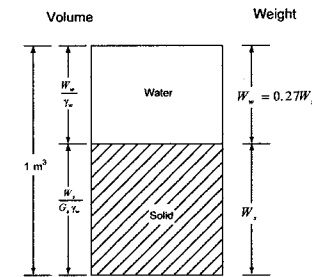
หน่วยน้ำหนักแห้งของดินในสภาพแน่น $\gamma_{d(\max)}$ ที่สุดหาได้โดยนำดินทรายที่อยู่ในแบบและมีหน่วยแรงกดทับเท่ากับ 2 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ไปสั่นด้วยเครื่องสั่นที่มีความถี่ 3600 รอบต่อนาที และมีขนาดของการสั่นเท่ากับ 0.025 นิ้ว หน่วยน้ำหนักในสภาพแน่นที่สุดหาได้จาก

$$\gamma_{d(\max)} = \frac{W_s}{V}$$

ตัวอย่างที่ 3.1 ดินซึ่งอิ่มตัวด้วยน้ำมี water content = 27% และมีหน่วยน้ำหนักรวม 1.97 t/m² จงคำนวณหา

หน่วยน้ำหนักแห้ง, b) void ratio, c) specific gravity

สมมุติให้ดินมีปริมาตร 1 m³



รูปที่ 3.4

$$W_w = 0.27W_s$$

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

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

$$W_s + 0.27W_s = 1.97$$

$$W_s = 1.55 \text{ t/m}^3$$

a) Dry density

$$\gamma_d = \frac{W_w}{V} = \frac{1.55}{1m^3} = 1.55 \text{ t/m}^3$$

b) Void ratio

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

$$V_s = V - V_v = 1.0 - 0.42 = 0.58 \text{ m}^3$$

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

R

c) Specific gravity

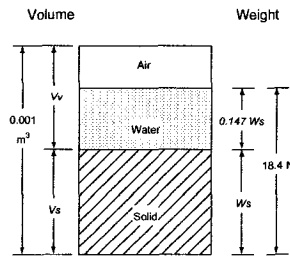
$$V_s = \frac{W_s}{G_s \gamma_w} = 0.58$$

$$G_s = \frac{1.55}{(0.58)(1.0)} = 2.67$$

R

ตัวอย่างที่ 3.2 ดินตัวอย่างมี Water content 14.7% และมีขนาด 0.1m x 0.1m x 0.1m มีน้ำหนัก 18.4 N จงคำนวณหา

Unit weight, b) Void ratio, c) Degree of saturation



รูปที่ 3.5

น้ำหนักของดินคือ

$$W_s + 0.147W_s = 18.4$$

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

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

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

R

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

$$V_s = \frac{W_s}{G_s \gamma_w} = \frac{16.04}{(2.72)(9.81)(100)} = 6.011 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$V_v = 0.001 - V_s = 0.001 - 6.011 \times 10^{-4} = 3.989 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{3.989 \times 10^{-4}}{6.011 \times 10^{-4}}$$

R

Degree of saturation

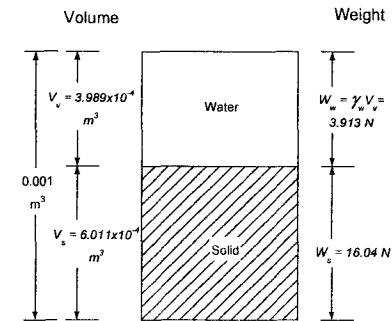
$$V_w = \frac{W_w}{\gamma_w} = \frac{2.36}{(9.81)(100)} = 2.406 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{2.406 \times 10^{-4}}{3.989 \times 10^{-4}} \times 100 = 60.3\%$$

R

ตัวอย่างที่ 3.3 จากข้อที่แล้ว ถ้าดินมี void ratio เท่าเดิมแต่มีตัวด้วยน้ำ (S=100%) จงคำนวณหา a) Unit weight,

b) Water content



รูปที่ 3.6

a) Unit weight

$$W_w = \gamma_w V_w = (9.81)(1000)(3.989 \times 10^{-4}) = 3.913 \text{ N}$$

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

R

Water content

$$w = \frac{W_w}{W_s} = \frac{3.913}{16.04} \times 100 = 24.4\%$$

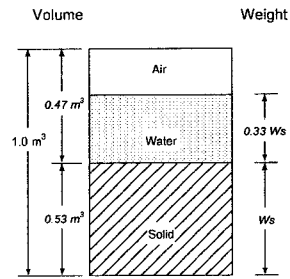
R

และจงคำนวณหา Unit weight เมื่อ water content = 0

$$\gamma = \frac{16.04}{0.001} = 16.04 \text{ kN/m}^3$$

R

ตัวอย่างที่ 3.4 ดินมีค่า porosity, $n=0.47$ มี water content = 0.33 และมี Specific gravity, $G_s = 2.68$ จงคำนวณหา
a) unit weight, b) dry unit weight, c) void ratio, d) degree of saturation



รูปที่ 3.7

$$V_v = (1.0)(0.47) = 0.47 \text{ m}^3$$

$$V_s = V - V_v = 1.0 - 0.47 = 0.53 \text{ m}^3$$

$$W_s = (G_s \gamma_w) V_s = (2.68)(9.81)(0.53) = 13.93 \text{ kN}$$

$$W_w = w \cdot W_s = (0.33)(13.93) = 4.6 \text{ kN}$$

Porosity

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

Unit weight

$$\gamma_t = \frac{(13.93 + 4.6)}{1.0 \text{ m}^3} = 18.53 \text{ kN/m}^3$$

Dry unit weight

$$\gamma_d = \frac{13.93}{1.0 \text{ m}^3} = 13.93 \text{ kN/m}^3$$

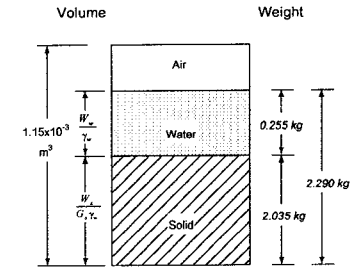
Void ratio

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

Degree of saturation

$$S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{0.47}{0.47} \times 100 = 100\%$$

ตัวอย่างที่ 3.5 ดินในสภาพธรรมชาติมีน้ำหนัก 2290 กรัมและมีปริมาตร $1.15 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ หลังจากนำไปอบให้แห้ง น้ำหนักของดินเหลือ 2035 กรัม และ $G_s = 2.68$ จงคำนวณหา, a) Unit weight, b) Water content, c) Void ratio, d) Porosity, e) Degree of saturation



รูปที่ 3.8

$$V_w = \frac{W_w}{\gamma_w} = \frac{0.255}{1000} = 2.55 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$V_s = \frac{W_s}{\gamma_w G_s} = \frac{2.035}{(1000)(2.68)} = 7.593 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$V_v = V - V_s = 1.15 \times 10^{-3} - 7.593 \times 10^{-4} = 3.927 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\gamma_t = \frac{2.29}{1.15 \times 10^{-3} \text{ m}^3} = 1.99 \text{ t/m}^3$$

$$w = \frac{W_w}{W_s} = \frac{0.255}{2.035} \times 100 = 12.5\%$$

Void ratio

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{3.927 \times 10^{-4}}{7.593 \times 10^{-4}} = 0.517$$

Porosity

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{3.927 \times 10^{-4}}{1.15 \times 10^{-3}} = 0.34$$

Degree of saturation

$$S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{2.55 \times 10^{-4}}{3.927 \times 10^{-4}} \times 100 = 64.9\%$$

ดินมีความหนาแน่นขึ้น 19.1 kN/m³ และมี Water content 9.5% จงคำนวณหา

ปริมาตรช่องว่างในดิน (Void ratio) Degree of saturation ในดิน

2. ถ้าดินยังมี void ratio เท่าเดิมแต่ถมตัวไปด้วยน้ำความหนาแน่น และ water content ของดินจะเป็นเท่าใด (กำหนดให้ $G_s = 2.70$)

3. ดินก้อนหนึ่งมีขนาด $38\text{mm} \times 76\text{mm}$ มีน้ำหนัก 168.0 กรัมถ้านำไปอบจนแห้งสนิทจะมีน้ำหนัก 130.5 กรัม Degree of saturation ของดินชนิดนี้เป็นเท่าไร

4. ทรายมี Maximum void ratio เท่ากับ 0.78 และ minimum void ratio เท่ากับ 0.43 จงคำนวณหาหน่วยน้ำหนักดินแห้งของทรายเมื่อ ความหนาแน่นสัมพัทธ์เท่ากับ 65% (กำหนดให้ $G_s = 2.67$)

Grain size distribution

เฉลยแบบฝึกหัด

1. ดินมีหน่วยน้ำหนักรวม 19.1 kN/m^3 และมี Water content 9.5% จงคำนวณ

a) ปริมาตรช่องว่างในดิน (Void ratio)

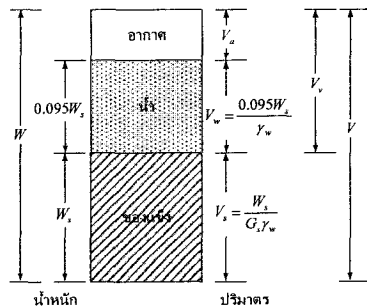
b) Degree of saturation ในดิน

c) ถ้าดินยังมี void ratio เท่าเดิมแต่ถมตัวไปด้วยน้ำ หน่วยน้ำหนัก และ water content ของดินจะเป็นเท่าใด (กำหนดให้ $G_s = 2.7$)

(a) $e=0.518$, (b) $S=49.47\%$ (c) $\gamma_i=20.79 \text{ kN/m}^3$, $w=19.2\%$

แนวคิด

เริ่มต้นจากการเขียนความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับปริมาตร



รูปที่ 3.9

ขั้นที่ 1 คำนวณปริมาตรของอากาศ เมื่อทราบหน่วยน้ำหนักรวม เราจะคิดค่าต่างๆไว้ในเทอมของ W_s

$$V = \frac{W}{\gamma_t}$$

$$V_a + \frac{0.095W_s}{\gamma_w} + \frac{W_s}{G_s \gamma_w} = \frac{W_s + 0.095W_s + W_a}{19.1}$$

$$V_a = \left(\frac{1 + 0.095}{19.1} \right) W_s - \left(\frac{0.095}{9.81} + \frac{1}{2.7 \times 9.81} \right) W_s$$

$$V_a = (9.891 \times 10^{-3}) W_s$$

ขั้นที่ 2 เมื่อเรารู้ปริมาตรของอากาศก็นำมาคำนวณค่าต่างๆที่โจทย์ถาม จะสังเกตได้ว่าค่าที่คิดในเทอมของ W_s จะตัดกันออกไปหมด

a) void ratio

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

$$V_v = V_a + V_w = (9.891 \times 10^{-3}) W_s + \frac{0.095 W_s}{9.81} = (1.957 \times 10^{-2}) W_s$$

$$e = \frac{1.957 \times 10^{-2} W_s}{\frac{W_s}{2.7 \times 9.81}} = 0.518$$

b) Degree of saturation

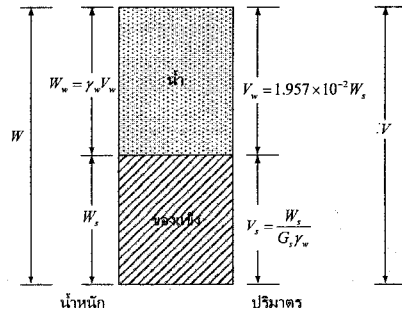
$$S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{\frac{0.095 W_s}{9.81}}{1.957 \times 10^{-2} W_s} \times 100 = 49.48\%$$

c) จากโจทย์บอกว่าดินอิ่มตัวด้วยน้ำดังนั้น $S=100\%$

$$\frac{V_w}{V_v} = 1$$

$$V_w = V_v$$

เขียนความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับปริมาตรใหม่ได้ดังรูป



รูปที่ 3.10

คำนวณหน่วยน้ำหนักหลังจากดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

$$\gamma_t = \frac{W}{V}$$

$$\gamma_t = \frac{\gamma_w V_w + W_s}{V_s + V_w} = \frac{(9.81 \times 1.957 \times 10^{-2} W_s) + W_s}{2.7 \times 9.81 + 1.957 \times 10^{-2} W_s}$$

$$\gamma_t = 20.79 \text{ kN/m}^3$$

คำนวณปริมาณความชื้นในดิน

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

$$w = \frac{(9.81)(1.957 \times 10^{-2} W_s)}{W_s} \times 100 = 19.2\%$$

ตัวอย่างที่ 3.6 ในการทดสอบตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (S=100%) ตัวอย่างหนึ่งได้ผลดังนี้

ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน $G_s = 2.7$

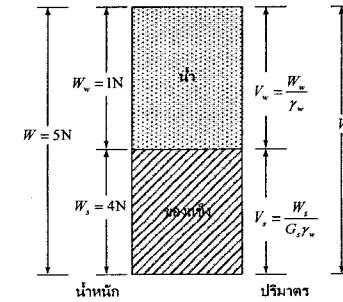
น้ำหนักของดินก่อนอบ = 5N

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) $\gamma_t=19.76 \text{ kN/m}^3$, (d) $\gamma_d=15.81 \text{ kN/m}^3$

เริ่มจากการเขียนความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับปริมาตร จากโจทย์ดินอิ่มตัวไปด้วยน้ำดังนั้นจึงไม่ต้องเขียนปริมาตรของอากาศลงในรูป



รูปที่ 3.11

จากนั้นคำนวณสิ่งที่โจทย์ถาม

(a) water content

$$w = \frac{W_w}{W_s} = \frac{1}{4} \times 100 = 25\%$$

(b) void ratio

$$e = \frac{V_w}{V_s} = \frac{1}{(2.7)(9.81)} = 0.675$$

(c) bulk unit weight

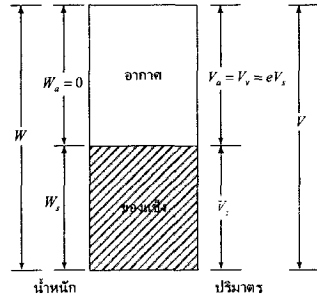
$$\gamma_t = \frac{W}{V} = \frac{5}{\frac{4}{(2.7)(9.81)} + \frac{1}{9.81}} = 19.76 \text{ kN/m}^3$$

(d) dry unit weight

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{4}{\frac{4}{(2.7)(9.81)} + \frac{1}{9.81}} = 15.81 \text{ kN/m}^3$$

ตัวอย่างที่ 3.7 เก็บตัวอย่างทรายธรรมชาติมาทำการทดสอบหาค่า maximum void ratio, $e_{\max} = 0.78$ และ minimum void ratio, $e_{\min} = 0.43$ จงคำนวณหาหน่วยน้ำหนักดินแห้งของทรายตัวอย่างนี้เมื่อความหนาแน่นสัมพัทธ์เท่ากับ 65% (กำหนดให้ $G_s = 2.67$) คำตอบ: $\gamma_d = 16.90 \text{ kN/m}^3$

เราลองเขียนความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับปริมาตร โดยโจทย์ต้องการหาหน่วยน้ำหนักดินแห้งดังนั้น $V_v = V_a$ จากรูปพบว่าข้อมูลที่จะต้องให้คือ void ratio ของดินตัวอย่าง



จากคำจำกัดความของความหนาแน่นสัมพัทธ์

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

จัดเทอมใหม่และแทนค่าในสมการ

$$e = e_{max} - D_r (e_{max} - e_{min})$$

$$e = 0.78 - \frac{65}{100} (0.78 - 0.43)$$

$$e = 0.55$$

คำนวณหน่วยน้ำหนักแห้ง

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

$$\gamma_d = \frac{2.67 \times 9.81 \times V_s}{V_s + 0.55V_s} = 16.90 \text{ kN/m}^3$$

3.4 คุณสมบัติทางกายภาพ และ Index properties ของดินเม็ดละเอียด

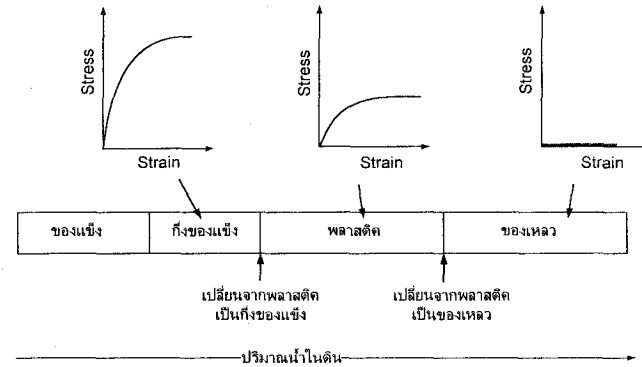
ลักษณะทางกายภาพของดินเหนียวที่ชัดเจนคือมีลักษณะเป็นเม็ดละเอียดเกาะกันเป็นก้อนและสามารถปั้นได้ เรียกว่า Plastic state

เราจะสังเกตได้ว่าคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อ ปริมาณน้ำที่ในดินเหนียวเปลี่ยนแปลงไป นั่นคือถ้าดินเหนียวแห้ง (ปริมาณน้ำในดินน้อย) ดินเหนียวจะมีสภาพเป็นของแข็งเกาะกันเป็นก้อน ซึ่งไม่สามารถปั้นได้ (มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงกระทำน้อย) แต่ถ้าค่อยๆเติมน้ำเข้าไปในดินแข็งดินจะนุ่มขึ้นเรื่อยๆตามปริมาณน้ำที่เพิ่มเข้าไป จนกระทั่งปริมาณน้ำถึงจุดหนึ่งดินเหนียวจะเริ่มอ่อนตัวจนสามารถปั้นได้ (เปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างมากเมื่อมีแรงกระทำ) และมีความเหนียว (ductile) จากจุดนี้ถ้าเพิ่มปริมาณน้ำลงไปในดินอีกเรื่อยๆ ดินจะอ่อนตัวลงตามปริมาณน้ำที่เพิ่มเข้าไป ถ้าเพิ่มปริมาณน้ำจนกระทั่งถึงจุดๆหนึ่ง ดินเหนียวจะอ่อน

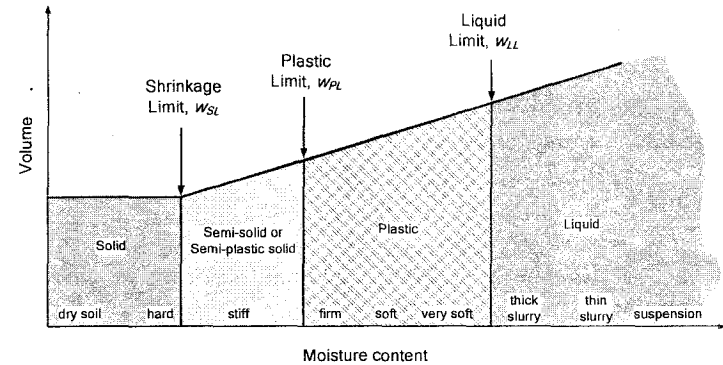
ตัวมากจนกระทั่งเป็นของไหล ซึ่งของไหลจะมีลักษณะสำคัญประการหนึ่งคือไม่สามารถรับแรงเฉือนได้เลย ถ้าเพิ่มปริมาณน้ำในดินเข้าไปอีกดินก็จะกลายเป็นสารแขวนลอยในน้ำ

แต่ถ้าเติมน้ำลงไปในดินเหนียว ดินเหนียวจะนุ่มขึ้นและจะอ่อนตัวจนกลายเป็นของเหลวและไม่สามารถปั้นได้อีก เรียกว่า Liquid state

แต่ถ้าปล่อยให้ปริมาณน้ำในดินเหนียวระเหยออกไป ดินเหนียวจะแข็งขึ้นจนกระทั่งกลายเป็นของแข็งและไม่สามารถปั้นได้อีก เรียกว่า Solid state



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับปริมาณน้ำในดิน



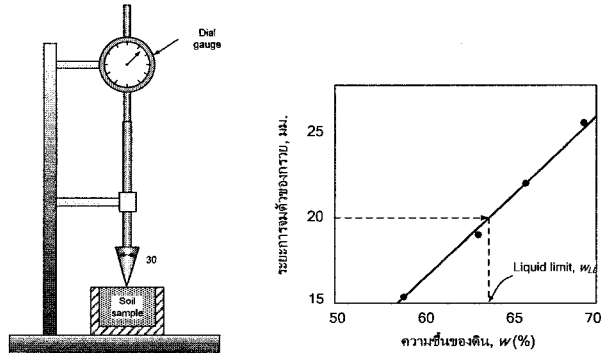
รูปที่ 3.13 Atterberg limit และ Stress-strain diagram ของดินที่สถานะต่าง ๆ

- ปริมาณความชื้น (Moisture content) ที่จุดแบ่งระหว่าง ของเหลวกับสถานะพลาสติกเรียกว่า พิกัดเหลว (Liquid limit) โดยค่านี้หมายถึงจุดซึ่งดินเริ่มที่จะมีกำลังรับแรงเฉือนประมาณ 1.7 kN/m^2
- ปริมาณความชื้นที่จุดแบ่งระหว่างสถานะพลาสติกกับกึ่งของแข็ง เรียกว่า พิกัดพลาสติก (Plastic limit)

- ปริมาณความชื้น ณ จุดที่ดินไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอีกต่อไปเรียกว่า พิกัดการหดตัว (Shrinkage limit)

3.5 Atterberg Limits (Liquid limit, Plastic limit, Plasticity index)

3.5.1.1 การทดสอบเพื่อหา Liquid limit ด้วยวิธี Cone penetration



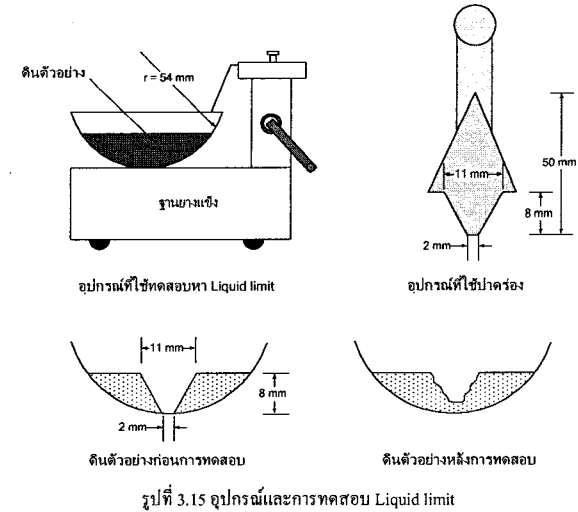
รูปที่ 3.14 การทดสอบหา Liquid limit โดยวิธี Cone penetration

นักวิทยาศาสตร์ชาวสวีเดนได้เสนอวิธีการทดสอบเพื่อหา Liquid limit และ Plastic limit โดยทดสอบกับดินที่มีขนาดเม็ดดินเล็กกว่า 0.425 มิลลิเมตร โดยใช้อุปกรณ์ตั้งรูปโดยจะปล่อยให้กรวยตกลงในดิน และบันทึกระยะที่กรวยจมลงในดิน และนำดินไปหาความชื้นของดินขณะนั้น จากนั้นนำไปเขียนกราฟเพื่อหาความชื้นของดินที่กรวยจมลงในดินเป็นระยะ 20 มิลลิเมตร

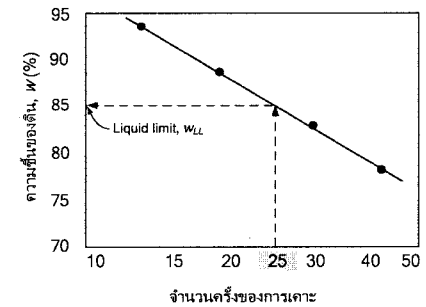
3.5.1.2 การทดสอบเพื่อหา Liquid limit ด้วยวิธี Casagrande method

ใช้อุปกรณ์ของ Casagrande (kah-sah grahn-dey)² ซึ่งทดสอบโดยการนำดินคลุกกับน้ำแล้วป้ายลงบนกระเบื้องทองเหลืองแล้วปาดร่องในดินให้ถึงก้นกระเบื้องด้วยเครื่องมือปาดร่องให้ดินแยกเป็น 2 ส่วน จากนั้นเคาะโดยการยกกระเบื้องให้สูงขึ้น 10 ซม. แล้วปล่อยให้ตกอย่างอิสระจนดินไหลมาชนกันเป็นระยะประมาณ 13 มิลลิเมตร

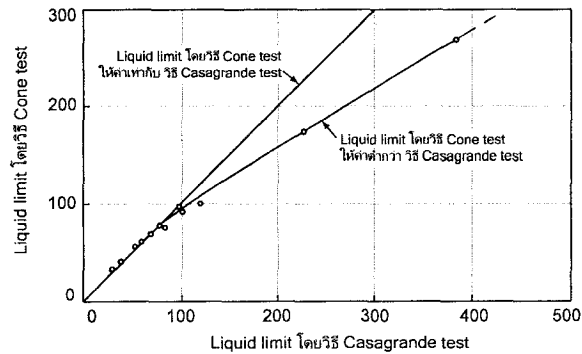
² casa grande. (n.d.). Dictionary.com Unabridged (v 1.1). Retrieved June 06, 2007, from Dictionary.com website: <http://dictionary.reference.com/browse/casa grande>



Liquid limit จะเป็นค่าความชื้นในดินที่จำนวนครั้งในการยกของกระเบื้องทองเหลืองเท่ากับ 25 ครั้งแล้วดินที่เซาะไว้ไหลมาชิดกัน 13 มิลลิเมตร



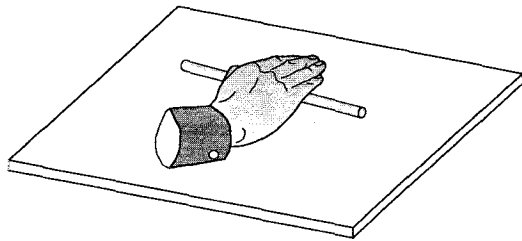
รูปที่ 3.16 การหาค่า Liquid limit



รูปที่ 3.17 เปรียบเทียบค่า Liquid limit ที่ได้จากการทดสอบด้วย Cone test กับ Casagrande test

3.5.1.3 Plastic limit

คือปริมาณความชื้นในดิน (Moisture contents) ณ จุดที่ปั้นดินให้เป็นเส้นยาวมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.2 มม. แล้วดินเริ่มร่วนและแตกออก



รูปที่ 3.18 การปั้นดินเพื่อทดสอบพิกัดพลาสติก

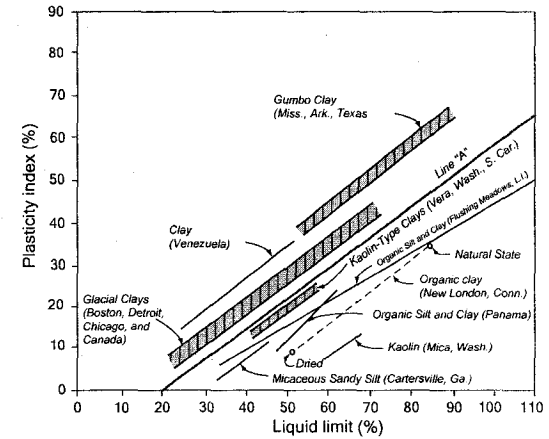
3.5.1.4 Plasticity index

จากค่า Liquid limit และ Plastic limit เราสามารถระบุช่วง water content ที่ทำให้ดินเหนียวปั้นได้และไม่ไหลออกจากมือว่า Plasticity index, I_p

$$I_p = w_{LL} - w_{PL}$$

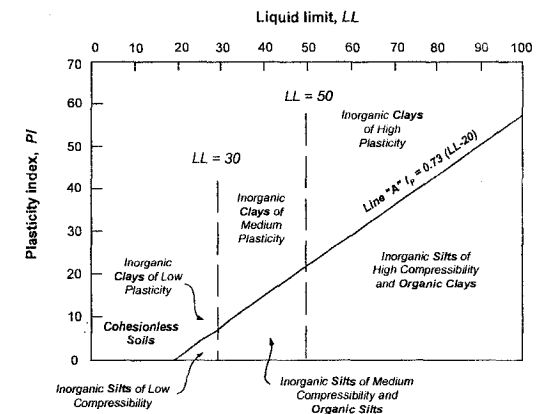
3.5.1.5 Plasticity chart

Casagrande ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Liquid limit กับ Plasticity index ของ Clay และ Silt จำนวนมากแล้วนำมาเขียนกราฟดังรูป



รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง Liquid limit กับ Plasticity index ของดินชนิดต่างๆ

- ดินชนิดเดียวกันจะมีความสัมพันธ์ระหว่าง Plasticity index กับ Liquid limit เป็นเส้นตรง
- จะมีการแบ่งช่องกันอยู่อย่างชัดเจนระหว่าง Silt กับ Clay ถ้าลากเส้นตรงจะได้เส้นตรงที่มีสมการเป็น $PI = 0.7(LL - 20)$ ซึ่งเรียกเส้นนี้ว่า A-Line
- ดินเหนียว (Clay) จะมีความสัมพันธ์ระหว่าง Liquid limit กับ Plasticity index อยู่เหนือเส้น A-Line
- ส่วนทรายแป้ง (Silt) และ Organic silt หรือ Organic clay จะมีความสัมพันธ์อยู่ใต้ A-Line
- ถ้า Liquid limit มากกว่า 50 จะเป็นดินที่มีความเป็นพลาสติกสูง (High plasticity) ส่วนดินที่มี Liquid limit น้อยกว่า 50 จะเป็นดินที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (Low plasticity)



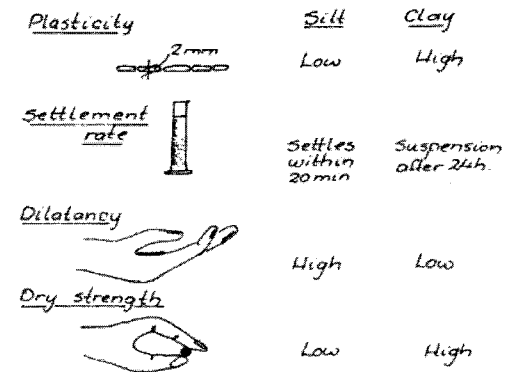
รูปที่ 3.20 Plasticity chart ที่เสนอโดย Casagrande

3.6 การจำแนกชนิดของดินเม็ดละเอียดในสนาม (Lambe and Whitman 1928)

Field identification for Fine Grained Soils or Fractions

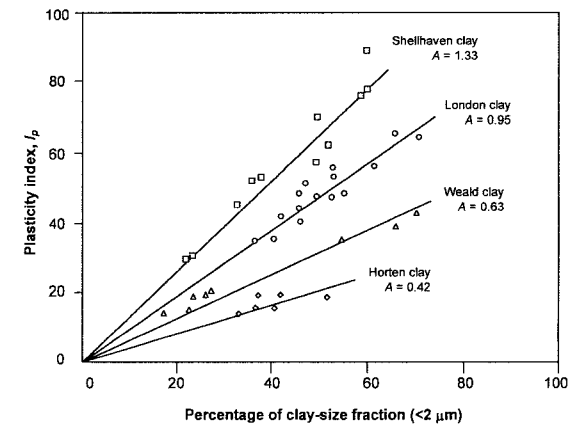
These procedures are to be performed on the minus 380 micron sieve size particle.

Dilatancy (Reaction to shaking)	Dry strength (Crushing characteristics)	Toughness (Consistency near plastic limit)
<p>After removing particles larger than 380 micron sieve size, prepare a pat of moist soil with a volume of about 8000 cu.mm. Add enough water if necessary to make the soil soft but not sticky.</p> <p>Place the pat in the open palm of one hand and shake horizontally, striking vigorously against the other hand several times. A positive reaction consists of the appearance of water on the surface the pat which changes to a livery consistency and becomes glossy. When the sample squeezed between the fingers, the water and gloss disappear from the surface, the pat stiffens and finally it cracks or crumbles. The rapidly of appearance of water during shaking and of its disappearance during squeezing assist in identifying the character of the fines in a soil</p> <p>Very fine clean sands give the quickest and most distinct reaction whereas a plastic clay has no reaction. Inorganic silts, such as a typical rock flour, show a moderately quick reaction</p>	<p>After removing particles larger than 380 micron sieve size, mould a pat of soil to the consistency of putty, adding water if necessary. Allow the pat to dry completely by oven, sun or air drying, and then test its strength by breaking and crumbling between the fingers. This strength is a measure of the character and quantity of the colloidal fraction contained in the soil. The dry strength increases with increasing plasticity.</p> <p>High dry strength is characteristic for clays of the CH groups. A typical inorganic silt possesses only very slight dry strength. Silty fine sands and silts have about the same slight dry strength, but can be distinguished by the feel when powdering the dried specimen. Fine sand feels gritty whereas a typical silt has the smooth feel of flour.</p>	<p>After removing particles larger than 380 micron sieve size., a specimen of soil about 12 mm cube in size, is molded to the consistency of putty. If too dry, water must be added and if sticky, the specimen should be spread out in a thin layer and allowed to lose some moisture by evaporation. Then the specimen is rolled out by hand on a smooth surface or between the palms into a thread about 3mm in diameter. The thread is then folded and re-rolled repeatedly. During this manipulation the moisture content is gradually reduced and the specimen stiffens, finally loses its plasticity, and crumbles when the plastic limit is reached.</p> <p>After the thread crumbles, the pieces should be lumped together and an slight kneading action continued until the lump crumbles.</p> <p>The tougher the thread near the plastic limit and the stiffer the lump when it finally crumbles, the more potent is the colloidal clay fraction in the soil. Weakness of the thread at the plastic limit and quick loss of coherence of the lump below the plastic limit indicate either inorganic clay of low plasticity, or materials such as kaolin-type clays and organic clays which occur below the A-line</p> <p>Highly organic clays have a very weak and spongy fell at the plastic limit.</p>



รูปที่ 3.21 รูปจาก Broms

3.6.1.1 Activity



รูปที่ 3.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง Plasticity index กับปริมาณอนุภาคที่เล็กกว่า 2 ไมครอน

สำหรับดินเหนียวแต่ละชนิด Plasticity index จะสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับปริมาณเม็ดดินที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 2 ไมครอน ดังรูป

จากความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรง Skempton ได้นิยามค่า Activity ไว้ดังสมการ

$$\text{Activity} = \frac{\text{Plasticity index}}{\text{Percent of clay size particle (less than } 0.002\mu\text{)}} \quad (3.5)$$

ตารางที่ 3.4 ค่า Activity ของดินเหนียวชนิดต่าง ๆ

Group		Typical value	
Description	Activity	Soil/mineral	Activity
Inactive	< 0.75	Kaolinite	0.4
		Lias Clay	0.4-0.6
		Glacial Clays	0.5-0.7
		Illite	0.9
Normal	0.75 – 1.25	Weald Clay	0.6-0.8
		Oxford, London Clay	0.8-1.0
		Gault Clay	0.8-1.25
Active	1.25 – 2.0	Calcium Montmorillonite	1.5
		Organic Alluvial Clay	1.2-1.7
Highly active	> 2.0	Sodium Montmorillonite (Bentonite)	7

Activity ใช้เป็นตัวบอกว่า ดินเหนียวนี้จะมีโอกาสเกิดการบวมตัวมากเพียงไร ถ้า Activity มากการบวมตัวก็จะมากด้วย ข้อมูลการบวมตัวของดินจะใช้กำหนดความลึกของระดับฐานรากต้นตงแสดงดังตาราง

ตารางที่ 3.5 โอกาสที่จะเกิดการหดตัวของดิน BRE Digest 240, 1980 (คัดลอกจาก (Barnes 2000))

Plasticity index (%)	Clay fraction (%)	โอกาสที่ดินจะหดตัว
> 35	>95	สูงมาก
22-48	60-95	สูง
12-32	30-60	ปานกลาง
<18	<30	ต่ำ

ตารางที่ 3.6 ระยะฝังของฐานรากในดินเหนียวที่น่าจะมีการหดตัว NHBC 1992 (คัดลอกจาก (Barnes 2000))

โอกาสที่ดินจะหดตัว	Plasticity index (%)	ความลึกของฐานราก (m)
สูง	>40	1.0
ปานกลาง	20-40	0.9
ต่ำ	10-20	0.75

3.7 การบดอัดดิน

สำหรับโครงสร้างที่สร้างขึ้นมาจากดินนั้น เราจะต้องขนย้ายวัสดุจากบริเวณอื่นเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง จากกระบวนการขุดดินเพื่อขนย้ายวัสดุจะทำให้ดินหลวม ดังนั้นเราจึงต้องทำการบดอัดเพื่อให้ดินแน่นขึ้น ซึ่งเมื่อดินแน่นขึ้นแล้วจะมีความหนาแน่นสูงขึ้น นอกจากนี้แล้วยังจะทำให้กำลังและความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างของดินสูงขึ้นด้วย

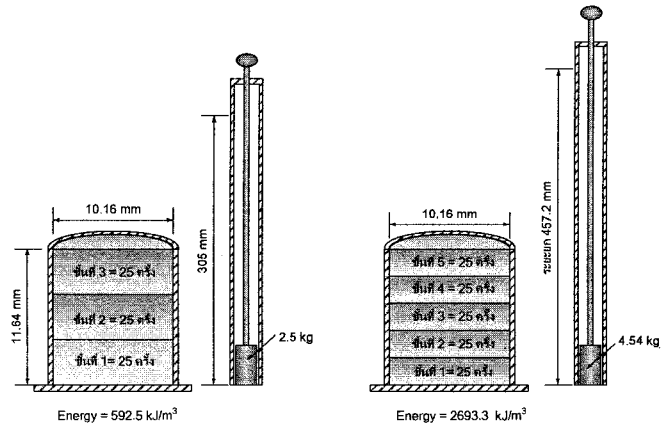
3.7.1 ขั้นตอนการบดอัด

- นำดินจากแหล่งที่จะใช้มาทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการเพื่อหาความหนาแน่นแห้งสูงสุด และ ปริมาณน้ำที่เหมาะสม
- นำดินจากแหล่งที่จะใช้ไปบดอัดในพื้นที่ที่ต้องการ
- ตรวจสอบว่าดินที่บดอัดในสนามมีความหนาแน่นแห้งใกล้เคียงกับความหนาแน่นแห้งในห้องปฏิบัติการแล้วหรือยัง ถ้ายังต้องมีการแก้ไข โดยบดอัดเพิ่มขึ้น หรือรื้อชั้นมาบดอัดใหม่

3.7.1.1 การบดอัดในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 3.7 มาตรฐานการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ

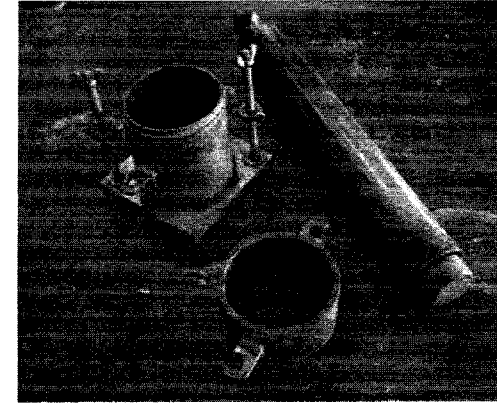
	Standard Proctor test	Modified Proctor test
แบบที่ใช้ในการบดอัด	เส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6mm ความสูง 116.4 mm	เส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6mm ความสูง 116.4 mm
ลูกตุ้มที่ใช้ในการบดอัด	น้ำหนัก 2.5kg ระยะยก 305mm	น้ำหนัก 4.54kg ระยะยก 457.2mm
จำนวนครั้งของการบดอัด	แบ่งการบดอัดเป็น 3 ชั้น กระแทกลูกตุ้ม 25 ครั้งต่อ 1 ชั้น	แบ่งการบดอัดเป็น 5 ชั้น กระแทกลูกตุ้ม 25 ครั้งต่อ 1 ชั้น
พลังงานที่ใช้ในการบดอัด	พลังงานที่ใช้ = 592.5kJ/m ³	พลังงานที่ใช้ = 2693.3kJ/m ³



รูปที่ 3.23 เปรียบเทียบอุปกรณ์ที่ใช้ในการบดอัดดินแบบ Standard และ Modified

การทดสอบมีอุปกรณ์ดังรูป และมีขั้นตอนในการทดสอบโดยสังเขปดังนี้

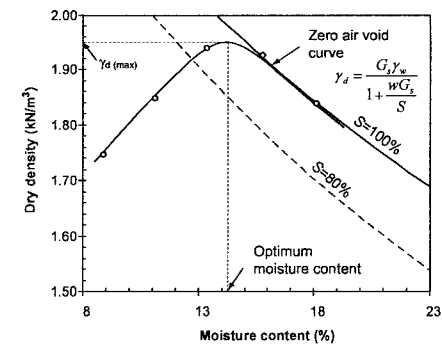
- นำดินที่ต้องการจะทดสอบไปบดอัดในแบบ ตามมาตรฐาน Standard Proctor หรือ Modified Proctor
- จากนั้นนำดินไปชั่งน้ำหนักหน้าน้ำหนักดินในแบบหล่อและคำนวณปริมาตรของแบบหล่อ แล้วคำนวณความหนาแน่นเปียก
- จากนั้นแบ่งดินจำนวนหนึ่ง ไปอบเพื่อหา moisture content คำนวณความหนาแน่นแห้ง
- ในการทดสอบจะใช้ความชื้นที่แตกต่างกัน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



รูปที่ 3.24 อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการทดสอบการบดอัด



รูปที่ 3.25 ขั้นตอนการบดอัดในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 3.26 ผลการทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการ

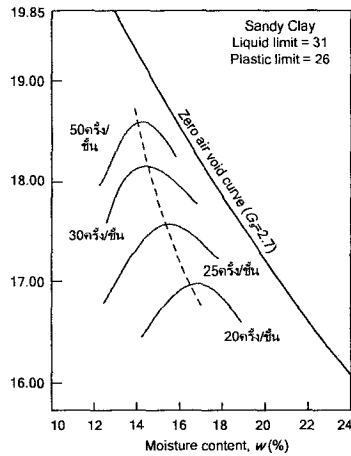
ลักษณะของกราฟการบดอัด

Zero air void curve เป็นเส้นที่แสดงถึงดินที่ไม่มีโพรงอากาศอยู่ในเนื้อดินเลย ซึ่งเป็นจุดที่ดินแน่นที่สุดที่จะเป็นไปได้ที่ปริมาณน้ำที่กำหนดให้ เนื่องจากที่จุดนี้เป็นจุดที่มีเฉพาะเนื้อดินและน้ำเท่านั้น ตัวอย่างจากรูปที่ 3.26 ถ้าปริมาณน้ำเท่ากับ 18 เปอร์เซ็นต์ ความหนาแน่นแห้งในกรณีที่ไม่มีโพรงอากาศเหลืออยู่เลย (มีเฉพาะเนื้อดินกับน้ำเท่านั้น) จะเท่ากับ ($G_s = 2.7$ และ ถ้าไม่มีโพรงอากาศ $S = 1.0$)

$$\gamma_d = \frac{(2.7)(1.0)}{1 + (0.18)(2.7)/1} = 1.82 \text{ t/m}^3$$

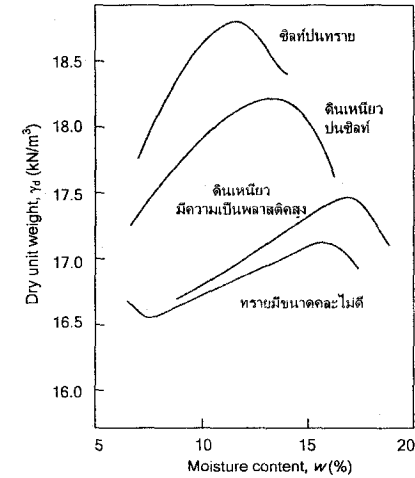
ซึ่งหมายความว่า ดินชนิดนี้เมื่อมีปริมาณน้ำในดิน 18 เปอร์เซ็นต์ และบดอัดด้วยวิธีมาตรฐาน จะให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (ไม่มีโพรงอากาศเหลืออยู่เลยหลังจากบดอัดเสร็จและน้ำยังไม่ระเหยออกจากตัวอย่าง) เท่ากับ 1.82 ตันต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งความหนาแน่นแห้งจากการทดสอบด้วยวิธีเดียวกันที่ปริมาณน้ำเท่ากันจะต้องไม่เกินกว่าค่านี้

ถ้าเพิ่มพลังงานในการบดอัด เช่นเพิ่มจำนวนครั้งของการตอกลูกค้อนจะทำให้ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงขึ้นและมีความชื้นเหมาะสมลดลง



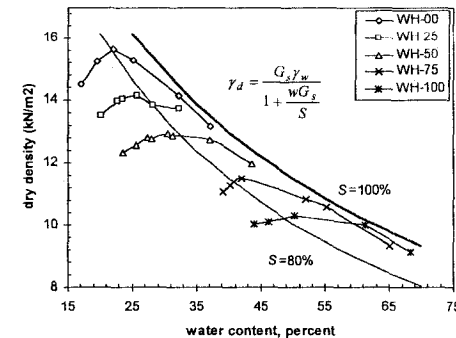
รูปที่ 3.27 กราฟการบดอัดเมื่อใช้พลังงานในการบดอัดแตกต่างกัน

ชนิดและคุณสมบัติของดินก็มีผลต่อการบดอัด โดยการบดอัดจะทำให้ดินเหนียวมีความหนาแน่นได้สูงขึ้นมากกว่าดินทราย



รูปที่ 3.28 กราฟการบดอัดของดินต่างชนิดกัน

และจากการศึกษาโดย (พรพจน์ 2550) พบว่า เมื่อดินมีปริมาณดินเหนียวรวมตัวผสมอยู่ในเนื้อดินจะทำให้ความเป็นพลาสติกของดินลดลงและหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลง โดยปริมาณน้ำเหมาะสมจะเพิ่มขึ้นดังรูป



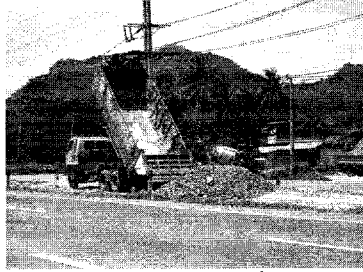
รูปที่ 3.29 กราฟการบดอัดของดินที่มีสัดส่วนดินเหนียวรวมตัวต่างกัน (พรพจน์ 2550)

3.7.1.2 การบดอัดในสนามและการควบคุมคุณภาพ

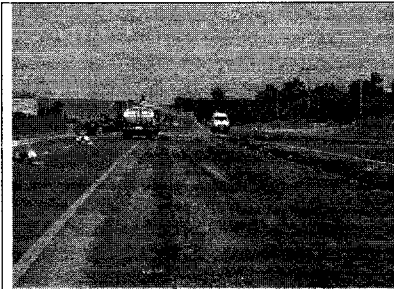
เป็นกรรมวิธีที่เหมือนกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แต่มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีอุปกรณ์ที่แตกต่างไปจากอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งในการบดอัดในสนามนั้นจะมีปัจจัยจากสิ่งแวดล้อมเพิ่มเข้ามาด้วย เช่น การระเหยของน้ำเนื่องจากแดดเผา การคลุกดินกับน้ำ เครื่องมือที่ใช้บดอัดใช้วิธีที่แตกต่างจากการใช้ลูกค้อนคกกระทะเทกดินเป็นต้น



ดินจากแหล่งดินที่จะนำไปใช้



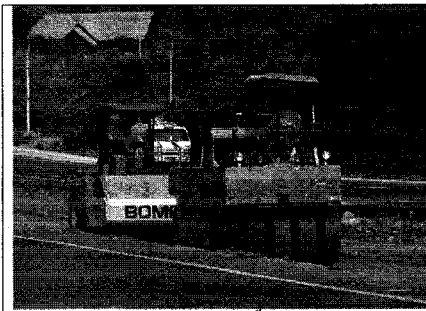
ขนย้ายดินจากแหล่งดินมาที่โครงการ



ฉีดน้ำตามปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากห้องปฏิบัติการ



คลุกดินกับน้ำให้เข้ากัน

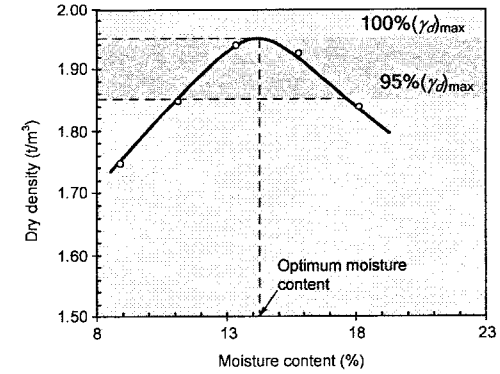


บดอัดดินที่คลุกกับน้ำให้แน่น



รูปที่ 3.30 รูปแสดงขั้นตอนการบดอัดดินในสนาม

ดังนั้นจะต้องมีการควบคุมคุณภาพของดินบดอัดในสนาม โดยเกณฑ์ปกติที่ใช้กันคือ ความหนาแน่นในสนามที่ทดสอบโดยวิธีกรวยทรายจะต้องไม่น้อยกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ของความหนาแน่นในห้องปฏิบัติการ เป็นต้น



รูปที่ 3.31

3.8 คำถามท้ายบท

- ชั้นดินเหนียวหนักมี $e = 0.75$ และมี $G_s = 2.7$ และมีระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ 2 เมตรจากระดับพื้นดิน
 (a) จงคำนวณปริมาณน้ำในดินที่อยู่ที่ระดับน้ำใต้ดิน (ดินจมน้ำจะอิ่มตัว $S = 100\%$)
 (b) จงคำนวณหน่วยน้ำหนักกรรมของดิน Ans: (a) $w = 28\%$, (b) $\gamma_t = 18.9 \text{ kN/m}^3$
- จงคำนวณอัตราส่วนระหว่างหน่วยน้ำหนักดินอิ่มตัวต่อหน่วยน้ำหนักกรรมของดิน γ_{sat} / γ_t ถ้าดินมี $e = 1.0$, $w = 25\%$ และ $G_s = 2.7$ Ans: $\gamma_{sat} / \gamma_t = 1.1$
- ตัวอย่างดินแห่งทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร และมีความสูง 100 มิลลิเมตร เก็บมาจากชั้นดินเหนียวแข็ง ตัวอย่างมีน้ำหนัก 1320 กรัม และหลังจากอบแล้วตัวอย่างมีน้ำหนัก 1075 กรัม ถ้า $G_s = 2.7$ จงคำนวณ (a) water content, (b) Void ratio, (c) degree of saturation, (d) total unit weight, (e) dry unit weight
 Ans: (a) $w = 22.8\%$, (b) $e = 0.97$, (c) $S = 63.3\%$, (d) $\gamma_t = 16.8 \text{ kN/m}^3$, (e) $\gamma_d = 13.7 \text{ kN/m}^3$

4. การทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการกับตัวอย่างดินเม็ดละเอียดได้ผลดังตาราง

ปริมาณน้ำในดิน (%)	11	13	16	21
หน่วยน้ำหนักกรรม (kN/m ³)	17.75	18.92	19.84	19.48

- จงเขียนกราฟระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณน้ำในดิน จากนั้นให้ระบุหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณน้ำที่จุดเหมาะสม
- ถ้าใช้ดินชนิดนี้บดอัดเพื่อก่อสร้างคันดิน จากนั้นทดสอบการบดอัดในสนามพบว่ามีเปอร์เซ็นต์การบดอัดเท่ากับ 95 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ปริมาณน้ำที่จุดเหมาะสม จงคำนวณหน่วยน้ำหนักกรรมของดิน, ดักรความอิ่มตัว และความพรุน Ans: (a) $\gamma_{dmax} = 17.1 \text{ kN/m}^3$, $w_{opt} = 16\%$ (b) $\gamma_t = 18.8 \text{ kN/m}^3$, $S = 65.2\%$, $n = 0.4$

4 การจำแนกดิน

4.1 วัตถุประสงค์

หลังจากได้ศึกษาบทแล้วนักศึกษาคงจะ

- อธิบายลักษณะของดิน และ จำแนกลักษณะของดิน
- สามารถบอกการกระจายตัวของขนาดของเม็ดดิน
- สามารถบอกอัตราส่วนขององค์ประกอบหลักของดิน
- สามารถบอก index properties ของดิน

ในวิชาปฐพีกลศาสตร์ เรสนใจในคุณสมบัติของดินทางวิศวกรรม ซึ่งคุณสมบัติสำคัญที่ต้องพิจารณาคือ

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

ในการทดสอบหาค่าดังกล่าวค่อนข้างยาก ใช้เวลานาน และค่าใช้จ่ายมาก ดังนั้นถ้าต้องการทราบคุณสมบัติของดินนั้นอย่างคร่าวๆ จำเป็นที่จะต้องจัดดินให้เป็นกลุ่มๆ โดยที่แต่ละกลุ่มจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน เพื่อใช้บ่งบอกถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินนั้นอย่างคร่าวๆ เพื่อเป็นแนวทางก่อนที่จะทำการทดสอบหาคุณสมบัติของดินเหล่านั้นอย่างละเอียดในภายหลัง ประโยชน์อีกประการหนึ่งก็คือเพื่อเอาไว้ใช้ตรวจสอบผลการทดลองในห้องปฏิบัติการว่าเป็นไปได้หรือไม่ ตัวอย่างเช่นถ้าผลการจำแนกดินปรากฏว่าดินเป็นดินเหนียว เราก็คาดเดาได้ว่าดินชนิดนี้น่าจะเป็นดินเหนียวที่น้ำซึมผ่านได้ยาก และมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างมากเมื่อรับแรง และมีกำลังต่ำ เป็นต้น

4.2 ระบบการจำแนกดินทางด้านวิศวกรรม

USCS (Unified Soil Classification System) และระบบ AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) โดยในแต่ละระบบมีรายละเอียดที่แตกต่างกัน ดังนี้

- USCS เป็นระบบซึ่งได้รับการพัฒนาขึ้นโดยกองทัพสหรัฐในระหว่างสงครามโลกครั้งที่สองเพื่อใช้ในการก่อสร้างสนามบิน ซึ่งต่อมาได้รับการพัฒนาขึ้นอีกหลายครั้งในปัจจุบันนิยมใช้ระบบนี้ในการจำแนกดินในงานวิศวกรรมปฐพี

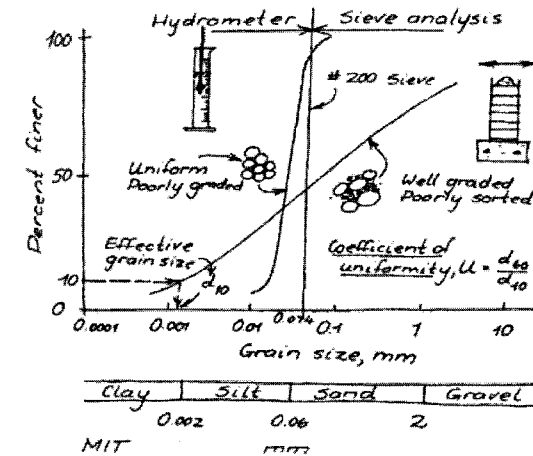
ปฐพีกลศาสตร์

- AASHTO เป็นระบบที่มีพื้นฐานจากการศึกษาสมรรถนะของดินได้พิจารณา ซึ่งวิธีนี้จะนิยมใช้ในงานวิศวกรรมทาง

ในการจำแนกชนิดของดินจะต้องใช้ข้อมูลที่สำคัญ 2 อย่างคือ

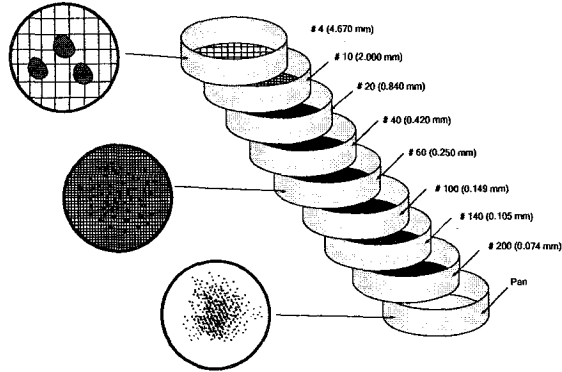
- การกระจายขนาดของเม็ดดิน (Grain size distribution)
- ความชื้นเหลวของดิน (Liquid limit, Plastic limit และ Plasticity index)

ในการหาการกระจายขนาดของเม็ดดินถ้าเป็นดินที่มีขนาดเม็ดดินใหญ่กว่า 0.075 มิลลิเมตร จะใช้วิธีร่อนผ่านตะแกรงหลายๆขนาด การกระจายของเม็ดดินจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของเม็ดดินที่ค้างอยู่บนตะแกรงแต่ละขนาด แต่ถ้าดินมีขนาดเม็ดดินเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร จะไม่สามารถใช้วิธีร่อนผ่านตะแกรงได้เนื่องจากขนาดของเม็ดดินเล็กเกินไป จึงต้องใช้วิธีอื่นมาวิเคราะห์ วิธีที่ใช้วิเคราะห์ที่เป็นมาตรฐานก็คือการนำดินมาผสมน้ำให้เป็นสารแขวนลอย แล้วปล่อยให้ตกตะกอน ซึ่งเรียกวิธีนี้ว่าวิธีวิเคราะห์ด้วยไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer analysis)



รูปที่ 4.1

1. ใช้ตะแกรงร่อน (Sieve analysis) ใช้กับดินที่มีขนาดเม็ดดินใหญ่กว่า 0.075 มม.



รูปที่ 4.2 ตะแกรงร่อน

วิธีการคำนวณหาการกระจายของเม็ดดิน

1. หาน้ำหนักของเม็ดดินที่ค้างบนตะแกรงแต่ละเบอร์
2. คำนวณหาน้ำหนักของเม็ดดินทั้งหมด (เป็นเปอร์เซ็นต์) ที่ค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์นั้น
3. คำนวณหาน้ำหนักของเม็ดดิน (เป็นเปอร์เซ็นต์) ที่ลอดผ่านตะแกรงเบอร์นั้น ผลที่ได้จะเรียกว่า Percent Finer
4. จากนั้นนำขนาดร่อนเปิดของตะแกรงแต่ละเบอร์ และ เปอร์เซ็นต์ของดินที่ลอดผ่านตะแกรงเบอร์นั้น (Percent finer) มาพล็อต ในกระดาษกราฟ Semi-Log จะได้เส้นโค้งที่เรียกว่าเส้นโค้งการกระจายขนาดของเม็ดดิน (Grain size distribution curve)

เปอร์เซ็นต์ดินที่ค้างบนตะแกรงใดๆ

$$\% \text{ Retained on } i^{th} \text{ sieve} = \frac{W_i}{W} \times 100 \quad (4.1)$$

จากเปอร์เซ็นต์ที่ค้างอยู่ นำมาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ลอดผ่านตะแกรงเบอร์ใดๆ

$$\% \text{ Finer than } i^{th} \text{ sieve} = 100 - \sum_{i=1}^i (\% \text{ Retained on } i^{th} \text{ sieve}) \quad (4.2)$$

จากผลที่ได้นำมาเขียนกราฟระหว่างเปอร์เซ็นต์ของเม็ดดินที่ลอดผ่าน (ไม่ใช่เปอร์เซ็นต์ของดินที่ค้าง) ตะแกรงเบอร์นั้นๆ กับขนาดของเม็ดดิน

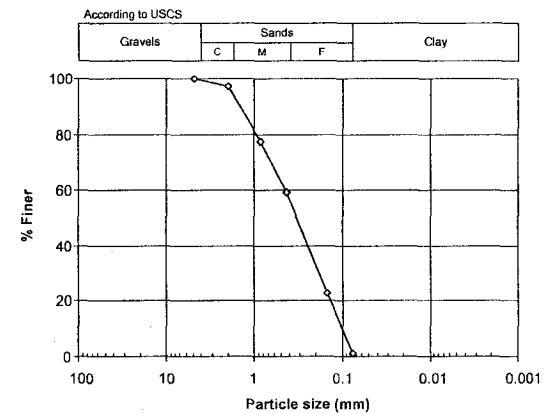
ตัวอย่าง การทดสอบเพื่อหาการกระจายขนาดของเม็ดดินโดยใช้ดิน 500g ได้ผลดังตาราง จงเขียนเส้นโค้งการกระจายขนาดเม็ดดิน (grain size distribution curve)

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

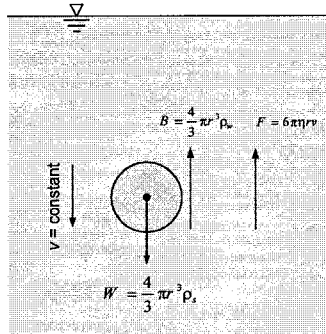
เบอร์ตะแกรง	น้ำหนักดินที่ค้างอยู่ (g)	%ดินค้าง	Σ (%ดินค้าง)	%ลอดผ่าน
4	0	0	0	100 - 0 = 100
10	14.8	3.0	3.0	100 - 3.0 = 97.0
20	98	19.6	22.6	100 - 22.6 = 77.4
40	90.1	18.0	40.6	100 - 40.6 = 59.4
100	181.9	36.4	77.0	100 - 77 = 23.0
200	108.8	21.8	98.8	100 - 98.8 = 1.2
ถาดรองรับ	6.1	1.2	100.0	

จากนั้นเขียนกราฟระหว่างขนาดช่องเปิดและเปอร์เซ็นต์ลอดผ่านบนกระดาษ semi-logarithmic



รูปที่ 4.3

2. ถ้าเม็ดดินมีขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร จะใช้ตะแกรงร่อนไม่ได้จึงต้องใช้วิธีทำให้ตกตะกอนในน้ำ (Hydrometer analysis) การวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดินโดยใช้ Hydrometer จะใช้กฎของ Stoke (Stoke's law) ที่ว่า "ความเร็วในการเคลื่อนที่ในของเหลวของวัตถุทรงกลม จะขึ้นกับขนาดของวัตถุทรงกลมนั้น และความหนืดของของไหล" โดยจะต้องสมมุติว่าเม็ดดินเป็นทรงกลมและมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ D มีความหนาแน่นเท่ากับ ρ_s ซึ่งเราเขียน free body diagram ได้ดังรูป



รูปที่ 4.4 Free body diagram ของการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมในของไหลเมื่อมีความเร็วคงที่

เมื่อเม็ดดินเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ผลรวมของแรงลัพธ์ในแนวตั้งเท่ากับศูนย์ $\sum F_y = 0$ น้ำหนักของเม็ดดินจะเท่ากับผลรวมของแรงลอยตัว B และแรงเนื่องจากความหนืดของของไหล F

$$W = B + F$$

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

เมื่อจัดรูปสมการจะให้ความเร็วของเม็ดดินที่เคลื่อนที่ในน้ำกับขนาดของเม็ดดินดังสมการ

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

โดยที่

- v คือความเร็วของเม็ดดินที่เคลื่อนตัวในแนวตั้ง
- ρ_w ความหนาแน่นของน้ำ ณ อุณหภูมิที่กำลังทดสอบซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ตั้งตาราง
- η ความหนืดของน้ำ ณ อุณหภูมิที่กำลังทดสอบซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ตั้งตารางที่

ตารางที่ 4.1 ความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ

deg.	Millipoises									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	17.94	17.32	16.74	16.19	15.68	15.19	14.73	14.29	13.87	13.48
10	13.10	12.74	12.39	12.06	11.75	11.45	11.16	10.88	10.60	10.34
20	10.09	9.84	9.61	9.38	9.16	8.95	8.75	8.55	8.36	8.18
30	8.00	7.83	7.67	7.51	7.36	7.21	7.06	6.92	6.79	6.66
40	6.54	6.42	6.30	6.18	6.08	5.97	5.87	5.77	5.68	5.58
50	5.49	5.40	5.32	5.24	5.15	5.07	4.99	4.92	4.84	4.77
60	4.70	4.63	4.56	4.50	4.43	4.37	4.31	4.24	4.19	4.13
70	4.07	4.02	3.96	3.91	3.86	3.81	3.76	3.71	3.66	3.62
80	3.57	3.53	3.48	3.44	3.40	3.36	3.32	3.28	3.24	3.20
90	3.17	3.13	3.10	3.06	3.03	2.99	2.96	2.93	2.90	2.87
100	2.84	2.82	2.79	2.76	2.73	2.70	2.67	2.64	2.62	2.59

1 dyne sec per sq cm = 1 poise
 1 gram sec per sq cm = 980.7 poises
 1 poise = 1000 millipoises

ตารางที่ 4.2 ความหนาแน่นหรือความถ่วงจำเพาะของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ

deg.	Specific gravity of water or density of water (g/cc)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0.9999	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9999	0.9999	0.9998
10	0.9997	0.9996	0.9995	0.9994	0.9993	0.9991	0.9990	0.9988	0.9986	0.9984
20	0.9982	0.9980	0.9978	0.9976	0.9973	0.9971	0.9968	0.9965	0.9963	0.9960
30	0.9957	0.9954	0.9951	0.9947	0.9944	0.9941	0.9937	0.9934	0.9930	0.9926
40	0.9922	0.9919	0.9915	0.9911	0.9907	0.9902	0.9898	0.9894	0.9890	0.9885
50	0.9881	0.9876	0.9872	0.9867	0.9862	0.9857	0.9852	0.9848	0.9842	0.9838
60	0.9832	0.9827	0.9822	0.9817	0.9811	0.9806	0.9800	0.9795	0.9789	0.9784
70	0.9778	0.9772	0.9767	0.9761	0.9755	0.9749	0.9743	0.9737	0.9731	0.9724
80	0.9718	0.9712	0.9706	0.9699	0.9693	0.9686	0.9680	0.9673	0.9667	0.9660
90	0.9653	0.9647	0.9640	0.9633	0.9626	0.9619	0.9612	0.9605	0.9598	0.9591

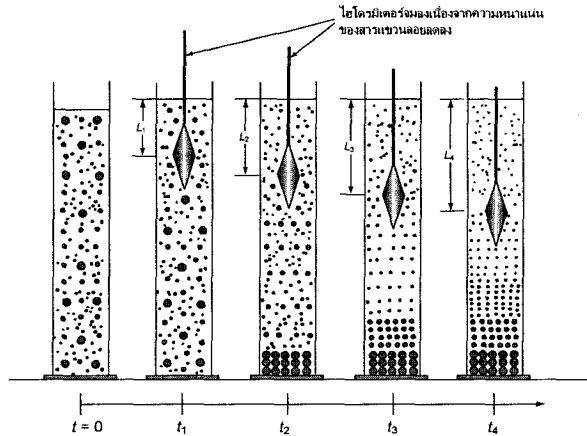
จากสมการจะเห็นว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวตั้งแปรผันตามขนาดของเม็ดดินยกกำลังสอง นั้นแสดงให้เห็นว่าเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีความเร็วในการเคลื่อนที่ในของไหลเร็วกว่าด้วย ในการนำสมการนี้ไปคำนวณหาการกระจายของเม็ดดินจะต้องใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว ระยะทาง และเวลา ดังสมการ

$$v = \frac{L}{t}$$

เมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้ดังสมการ

$$D = \sqrt{\frac{18\eta}{\rho_s - \rho_w}} \sqrt{\frac{L}{t}}$$

สมการนี้จะใช้ในการคำนวณหาปริมาณของเม็ดดินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า D โดยในการทดลองจะนำดินมาผสมกับน้ำให้เป็นสารแขวนลอย จากนั้นปล่อยให้ตกตะกอนในขณะที่ตกตะกอนก็บันทึกความหนาแน่นของสารแขวนลอย ณ. เวลาใดๆเอาไว้ดังรูปที่



รูปที่ 4.5 การทดสอบเพื่อหาการกระจายของเม็ดดินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตรโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์

จากรูปจะเห็นได้ว่าที่เวลา $t = 0$ จะมีเม็ดดินทุกขนาดลอยกระจายอยู่ทั่วกระบอกตวง แต่ ณ. เวลา t ใดๆ เม็ดดินที่มีขนาด D ได้ตกตะกอนผ่านระยะ L ลงมาหมดแล้ว หรืออีกนัยหนึ่งก็คือสารแขวนลอยที่อยู่ระหว่างผิวน้ำกับระยะ L จากผิวน้ำมีเม็ดดินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า D เท่านั้น ดังนั้นเราจึงคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของเม็ดดินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า D (percent finer) ได้จาก

$$\text{ปริมาณดินที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า } D (\%) = \frac{\text{ความหนาแน่นของสารแขวนลอยที่จุด } L \text{ ณ. เวลา } t}{\text{ความหนาแน่นของสารแขวนลอยที่เวลา } t = 0}$$

เมื่อ

L = ระยะจากผิวน้ำถึง c.g. ของกะเปาะ Hydrometer

t = ระยะเวลาจากเริ่มตกตะกอนถึงเวลาที่อ่านค่าความหนาแน่นจาก Hydrometer

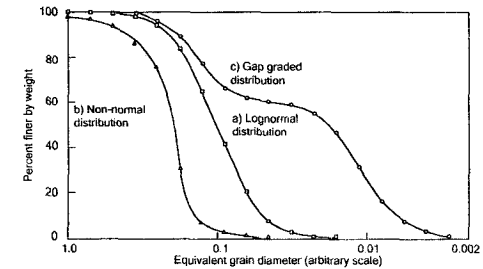
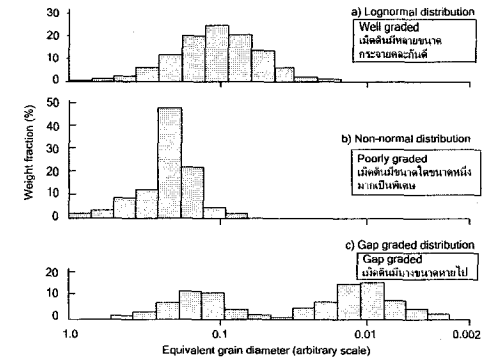
เรานำผลการทดสอบไฮโดรมิเตอร์ไปเขียน Particle size distribution curve เช่นเดียวกับการทดสอบการร่อนผ่านตะแกรง เราจะได้การกระจายขนาดของเม็ดดินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร

4.2.1 การตีความ Particle size distribution curve

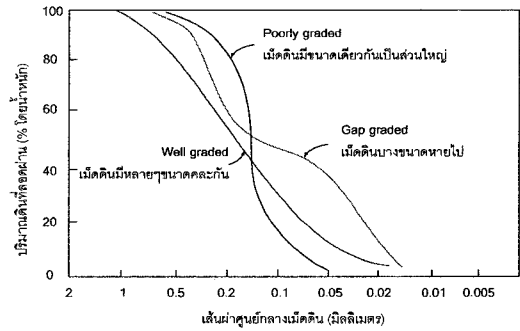
Grain size distribution curve สามารถบอกถึงการกระจายขนาดของเม็ดดิน เมื่อนำปริมาณดินที่ค้ำบนตะแกรงแต่ละขนาดมาเขียนเป็นแผนภูมิแท่งจะแสดงให้เห็นถึงการกระจายของขนาดของเม็ดดิน ซึ่งแผนภูมิแท่งจะแสดง

สัดส่วนปริมาณของเม็ดดินในแต่ละขนาด กราฟชนิดนี้จะเป็นกราฟที่ไม่ต่อเนื่อง ในการนำผลการทดสอบไปใช้งานเราจะแสดงผลเป็นกราฟที่ต่อเนื่องโดยใช้ frequency distribution curve

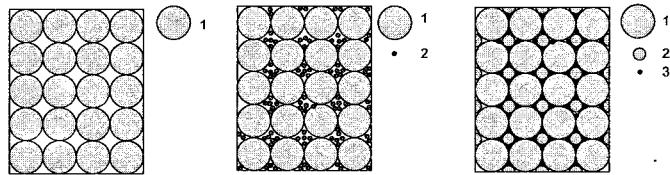
เส้นโค้งการกระจายขนาดของเม็ดดินอาจจะนำมาใช้ประเมินการกำเนิดของดินชนิดนั้นๆ ได้อย่างคร่าวๆ ตัวอย่างเช่น



รูปที่ 4.6 Gradation curves



รูปที่ 4.7 อธิบายขนาดคละของเม็ดดิน



รูปที่ 4.8 Schematic แสดงขนาดคละของเม็ดดิน

4.2.2 คุณสมบัติของกราฟการกระจายขนาดของเม็ดดิน

- Effective size, D_{10}

คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดดินที่มีเปอร์เซ็นต์ของดินที่มีขนาดเล็กกว่าอยู่ 10%

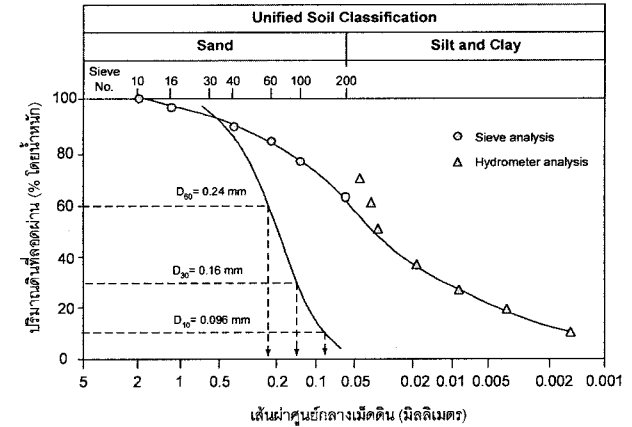
- Uniformity coefficient, C_u

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

- Coefficient of curvature, C_c

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

ตัวอย่างการคำนวณหา C_u และ C_c จากกราฟการกระจายเม็ดดินตามรูป



รูปที่ 4.9

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0.24}{0.096} = 2.5$$

$$D_{10} = 0.096 \text{ mm}$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} = \frac{(0.16)^2}{0.24 \times 0.096} = 1.11$$

ตัวอย่างที่ 4.1 จงหาปริมาณของ Gravel, Sand, Silt และ Clay จากข้อมูลดังนี้

ดินที่มีขนาดเม็ดเล็กกว่า 76.2 มิลลิเมตร มีปริมาณ 100%

ดินที่มีขนาดเม็ดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร มีปริมาณ 100%

ดินที่มีขนาดเม็ดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร มีปริมาณ 62%

จากข้อมูลข้างต้นเรานำมาใช้คำนวณปริมาณ กรวด ทราย และดินเหนียวได้

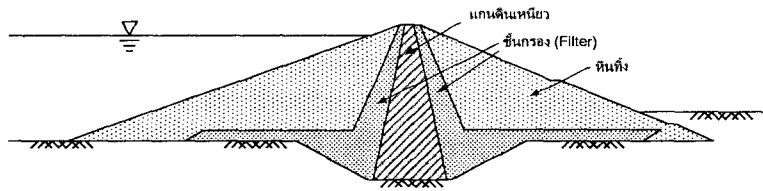
ปริมาณ กรวด (Gravel) 100-100 = 0%

ปริมาณ ทราย (Sand) 100-62 = 38%

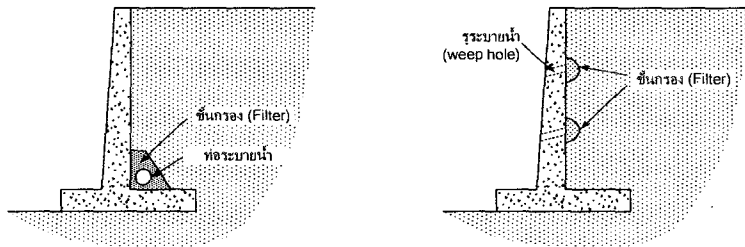
ปริมาณ ดินเหนียวและทรายแป้ง (Clay and Silt) 62-0 = 62%

4.3 การออกแบบชั้นกรองดิน (Soil filters)

ชั้นกรองดินใช้สำหรับระบายน้ำออกจากผิวรอยต่อของดิน โดยน้ำที่ออกจากผิวรอยต่อของดินนี้จะถูกบังคับให้ไหลไปในทิศทางที่จะป้องกันการถูกกัดเซาะของดิน ตัวอย่างของชั้นกรองดินที่ใช้ในงานวิศวกรรมได้แก่ ชั้นกรองดินที่อยู่ในเขื่อนดิน ชั้นกรองดินหลังกำแพงกันดิน หรือชั้นกรองดินที่อยู่รอบบ่ออาคาร เป็นต้น ในการที่จะป้องกันไม่ให้ดินเม็ดละเอียดไหลออกมาที่นั่นนั้น ตัววัสดุ Filter จะต้องมียุขขนาดใหญ่พอที่น้ำจะไหลได้อย่างสะดวก และจะต้องมีส่วนการกระจายของดินขนาดเล็กเพียงพอที่จะป้องกันไม่ให้ดินเม็ดเล็กไหลลอดผ่านออกไปได้



รูปที่ 4.10

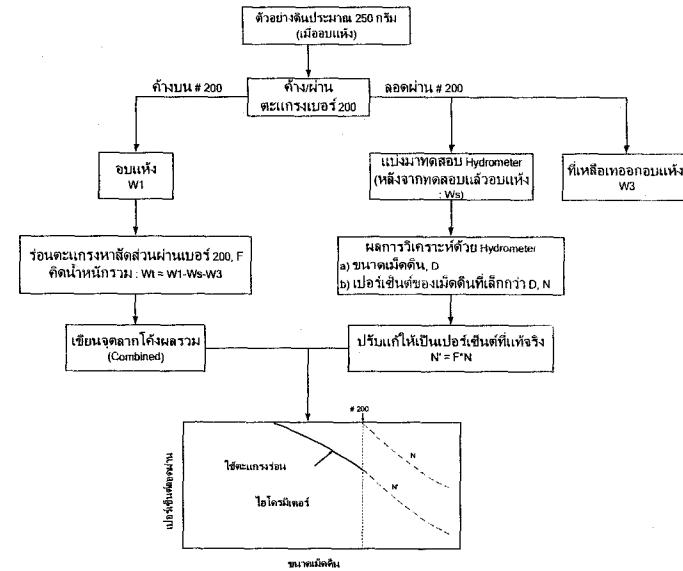


รูปที่ 4.11

4.4 กรณีที่ดินมีดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียดปนกัน

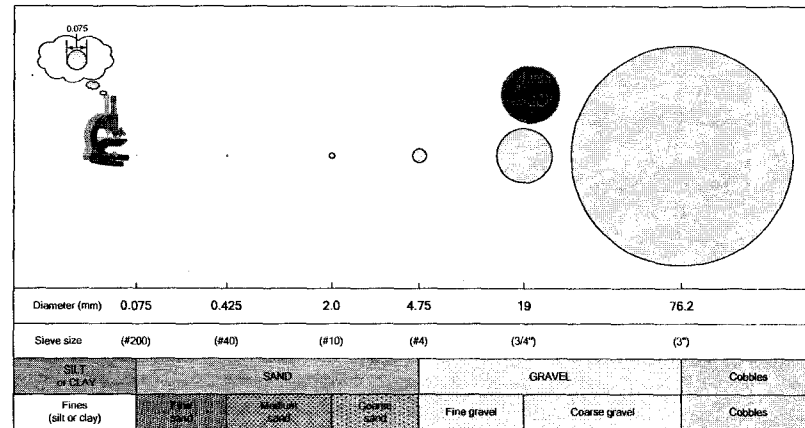
ในกรณีนี้ต้องทำการวิเคราะห์ทั้งส่วนที่เป็นดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียดโดย ร่อนดินโดยใช้ตะแกรงร่อนจะได้ดิน 2 ส่วนคือ

1. ดินส่วนที่อยู่เหนือตะแกรงเบอร์ #200 (0.075 มม.)
2. ดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ #200 และค้างอยู่บนถาด ซึ่งมีขั้นตอนการทำการวิเคราะห์ดังรูป



รูปที่ 4.12

4.5 การจำแนกดินด้วยระบบ Unified Soil Classification

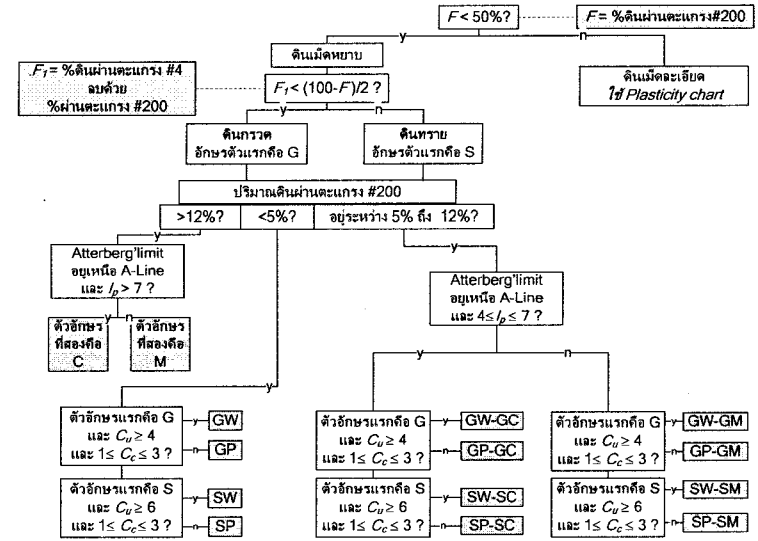


รูปที่ 4.13

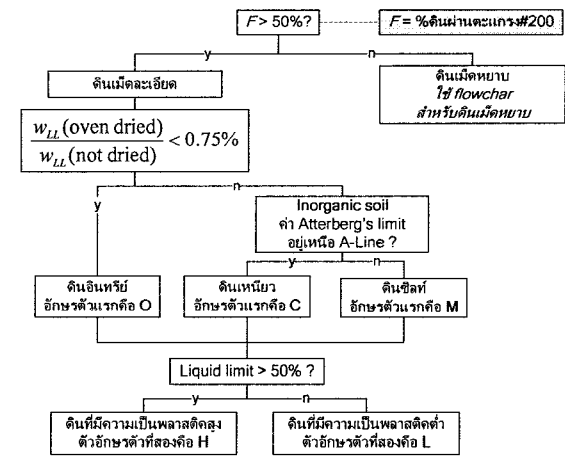
Major division	Group symbol	Typical name
Gravels (more than half of coarse fraction is larger than 4 mm sieve size)	GW	Well graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines
	GP	Poorly graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines
	GM	Silty gravels, poorly graded gravel-sand-silt mixtures
	GC	Clayey gravels, poorly graded gravel-sand-clay mixtures
Sands (more than half of coarse fraction is smaller than 4 mm sieve size)	SW	Well graded sands, gravelly sands, little or no fines
	SP	Poorly graded sands, gravelly sands, little or no fines
Silt and clays (more than half of material is smaller than No. 200 sieve size)	SM	Silty sands, poorly graded sand-silt mixtures
	SC	Clayey sands, poorly graded sand-clay mixtures
Fine-grained soils (more than half of material is smaller than No. 200 sieve size)	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
	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
	Pt	Peat and other highly organic soils

Laboratory classification criteria
$C_u = D_{60} / D_{10}$ $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} D_{60})$
Greater than 4 Between 1 and 3
Not meeting all gradation requirements for GW
Atterberg's limits below 'A' line, or P_I less than 4
Above 'A' line with P_I between 4 and 7 are borderline cases requiring use of dual symbol
Atterberg's limits above 'A' line with P_I greater than 7
$C_u = D_{60} / D_{10}$ $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} D_{60})$
Greater than 6 Between 1 and 3
Not meeting all gradation requirements for SW
Atterberg's limits below 'A' line, or P_I less than 5
Above 'A' line with P_I between 4 and 7 are borderline cases requiring use of dual symbol
Atterberg's limits above 'A' line with P_I greater than 7

รูปที่ 4.14 การจำแนกดินด้วยวิธี Unified Soil Classification System



รูปที่ 4.15 Flowchart สำหรับจำแนกดินเม็ดหยาบ



รูปที่ 4.16 Flowchart สำหรับจำแนกดินเม็ดละเอียด

ระบบการจำแนกดินวิธีนี้ได้นำมาใช้ในการก่อสร้างสนามบินโดย Casagrande ในปี 1942 หลังจากนั้นได้นำมาใช้อย่างกว้างขวางในวงการวิศวกรรม

การจำแนกจะใช้สัญลักษณ์เป็นตัวอักษรในการระบุชนิดของดินเช่น GW, SP, ML หรือ CH เป็นต้น โดยจะแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ 2 กลุ่มคือ

1. ดินเม็ดหยาบ (Coarse-grained soils) ซึ่งมีปริมาณของดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ #200 น้อยกว่า 50% จะมีตัวอักษรนำหน้าคือ

G = Gravelly soils

S = Sandy Soils

2. ดินเม็ดละเอียด (Fine-grained soils) ซึ่งมีปริมาณของดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ #200 มากกว่า 50%

M = Inorganic silts

C = Inorganic clays

O = Organic silts and clays

Pt = Peat

ซึ่งจากกลุ่มใหญ่ ๆ ข้างต้นจะมีคำอธิบายชนิดของดินต่อท้าย ตัวอย่างเช่น

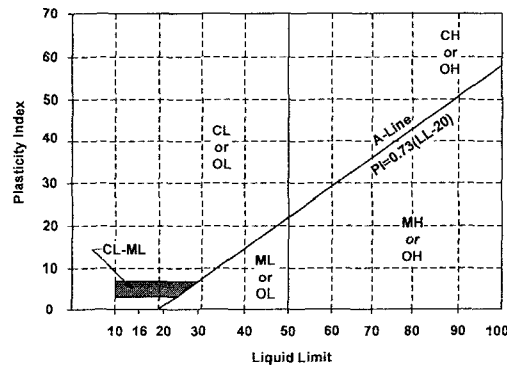
W = Well graded

P = Poorly graded

L = Low plasticity

H = High plasticity

4.5.1 Flowchart แสดงขั้นตอนวิธีการจำแนกดิน



รูปที่ 4.17

4.6 การจำแนกดินระบบ AASHTO

การจำแนกดินด้วยวิธีนี้แบ่งดินเป็น 7 กลุ่มหลักใหญ่ ๆ คือ

- กลุ่ม A-1, A-2 และ A-3 เป็น Granular materials ซึ่งมีปริมาณดินที่ลอดผ่านตะแกรงเบอร์ 200 น้อยกว่า 35%

- กลุ่ม A-4, A-5, A-6 และ A-7 จะเป็น Clay-type materials ซึ่งปริมาณดินที่ลอดผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่า 35%

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)			
	A-1		A-3	A-2			A-4	A-5	A-6	A-7
Group classification	A-1a	A-1b		A-2.4	A-2.5	A-2.6	A-2.7			A-7.5a A-7.6a
Sieve analysis Percent passing: No. 10 No. 40 No. 200	≤ 50 ≤ 30 ≤ 15	≤ 50 ≤ 25	> 51 ≤ 10	≤ 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	≤ 40 ≤ 10	> 41 > 11	≤ 40 > 11
Group index	0		0	0			≤ 4	≤ 8	≤ 12	≤ 16
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			

รูปที่ 4.18 ตารางที่ใช้ในการจำแนกดินโดยใช้ระบบ AASHTO

โดยเกณฑ์ที่ใช้ในการจำแนกจะมีดังนี้คือ

พิจารณาจาก Grain size

Boulder	$\phi \geq 75$ mm
Gravel	$2 \text{ mm} \leq \phi < 75$ mm
Coarse sand	$0.425 \text{ mm} \leq \phi < 2$ mm
Fine sand	$0.075 \text{ mm} \leq \phi < 0.425$ mm
Silt	$0.002 \text{ mm} \leq \phi < 0.075$ mm
Clay	$\phi < 0.002$ mm

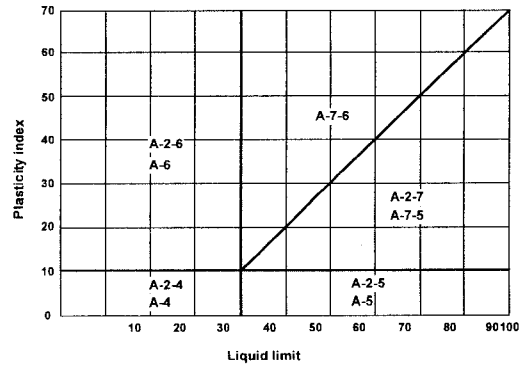
พิจารณาจากความเป็นพลาสติกของดิน (Plasticity)

พิจารณาส่วนที่เป็นดินเม็ดละเอียด:

Plasticity index น้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 จะเรียกว่า Silty

Plasticity index มากกว่าหรือเท่ากับ 11 จะเรียกว่า Clayey

ถ้าดินอยู่ในกลุ่ม A-2, A-4, A-5, A-6 และ A-7 จะให้กราฟ Liquid limit และ Plasticity index ในการจำแนกก็ได้



รูปที่ 4.19

ช่วงของ Liquid limit และ Plasticity index สำหรับดินที่อยู่ในกลุ่ม A-2, A-4, A-5, A-6 และ A-7

วิธีการจำแนกโดยใช้ตาราง

นำเอาผล Grain size distribution และ Atterberg limits มาพิจารณาโดยเริ่มจากซ้ายไปขวาไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งอยู่ในกลุ่มที่เหมาะสม

Group index

Group index (GI) จะเป็นตัวประเมินคุณภาพของดินที่ใช้เป็นวัสดุพื้นทางโดยจะเขียนไว้ในวงเล็บท้ายกลุ่มที่ได้จำแนกไว้แล้ว โดยมีสมการคือ

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

โดยที่

F เป็นเปอร์เซ็นต์ของดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200

LL Liquid limit

PI Plasticity index

ถ้าผลการคำนวณ ได้ค่า GI ติดลบให้ GI = 0

ให้ขีดทศนิยมให้เป็นเลขจำนวนเต็ม (เช่น 3.4 ปัดเป็น 3 หรือ 3.5 ปัดเป็น 4)

Group index ไม่มีค่าสูงสุด

Group index ของดินในกลุ่ม A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5 และ A-3 จะเป็นศูนย์เสมอ

Group index ของดินกลุ่ม A-2-6 และ A-2-7 จะใช้สมการ

$$GI = 0.01(F - 15)(PI - 10)$$

คุณภาพของดินเมื่อจะนำมาใช้เป็นชั้นรองพื้นทางเมื่อพิจารณาจาก Group index ดังตาราง

Excellent	A-1-a (0)
Good	(0-1)
Fair	(2-4)
Poor	(5-9)
Very poor	(10-20)

ตัวอย่างที่ 4.2 จงจำแนกดินที่กำหนดให้โดยใช้ระบบ AASHTO

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

วิธีทำ - ดินชนิดที่ 1

- พบว่าดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ #200=38% ซึ่งมากกว่า 35% จึงเลื่อนไปพิจารณาดารางส่วนที่เป็น silt-clay materials
- Liquid limit > 41 และ plasticity index >11 ซึ่งตรงกับช่องสุดท้าย
- Plasticity index > Liquid limit - 30 ดังนั้นจัดอยู่ใน A-7-6

วิธีทำ - ดินชนิดที่ 2

- พิจารณาปริมาณดินที่ผ่านตะแกรง #10, #40 และ #200 แล้วพบว่าตรงกับช่อง A-1-a
- พบว่าดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ #200=8% ซึ่งน้อยกว่า 35% จึงพิจารณาดารางส่วนที่เป็น granular materials
 - ผ่านตะแกรง #10 = 48 < 50%
 - ผ่านตะแกรง #40 = 29 < 30%
 - ผ่านตะแกรง #200 = 15 < 35%
 - Plasticity index = 2 < 6%

วิธีทำ - ดินชนิดที่ 3

- พบว่าดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ #200=64% ซึ่งมากกว่า 35% จึงพิจารณาดารางส่วนที่เป็น silt-clay materials
- Liquid limit > 41 และ plasticity index >11 ซึ่งตรงกับช่องสุดท้าย
- Plasticity index > Liquid limit - 30 ดังนั้นจัดอยู่ใน A-7-6

วิธีทำ - ดินชนิดที่ 4

- พบว่าดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ #200=34% ซึ่งน้อยกว่า 35% จึงพิจารณาตารางส่วนที่เป็น granular materials
- พิจารณาปริมาณดินที่ผ่านตะแกรง #10, #40 และ #200 แล้วพบว่าตรงกับช่อง A-2-7
 - ผ่านตะแกรง #10 = 90 > 50%
 - ผ่านตะแกรง #40 = 76 > 50%
 - ผ่านตะแกรง #200 = 15 < 35%
- พิจารณา Atterberg's limit ซึ่งตรงกับช่อง A-2-6
 - Liquid limit = 37 < 40%
 - Plasticity index = 12 > 11%

ตัวอย่างที่ 4.3 ผลการทดสอบ Sieve analysis ของตัวอย่างดินตัวอย่างที่ 1 มีผลดังนี้

ส่วนที่ค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 4	30%
ส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 แต่ค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 200	40%
ส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200	30%
Liquid Limit	33
Plasticity Index	12

จากผลการทดสอบมีส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 = 30% < 50% ดังนั้นดินนี้เป็นดินเม็ดหยาบ (G, S)

ส่วนที่เป็นดินเม็ดหยาบ = 100-30 = 70%

ส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 200 = 40%

$F1 = 40\% > (100-30)/2 = 35\%$ ดังนั้นดินชนิดนี้เป็นดินทราย ใช้ Group symbol เป็น S

จากนั้นพิจารณาค่า Liquid limit และ Plasticity index

ดินเม็ดละเอียดที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 = 30% > 12% และเมื่อพิจารณาจาก Plasticity chart จะพบว่าค่าที่ได้อยู่

เหนือ A-Line

ดังนั้นดินชนิดนี้จะมี Group symbol เป็น SC

ดินชนิดที่ 2 มีผลการทดสอบ Sieve analysis ดังนี้

ส่วนที่ค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 4	10%
ส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 แต่ค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 200	82%
ส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200	8%
Liquid limit	39
Plasticity index	8
Cu	3.9
Cc	2.1

ส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 = 8% < 50% ดังนั้นดินชนิดนี้เป็นดินเม็ดหยาบ (G, S)

ส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 แต่ค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 200 = 82% > (100-8)/2 = 46% ดินชนิดนี้เป็นดินทราย
พิจารณาส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 = 8% ซึ่งอยู่ระหว่าง 5% ถึง 12%

ค่า Cu < 6 และ ค่า Cc อยู่ระหว่าง 1 กับ 3 ซึ่งไม่เป็นไปตามเกณฑ์ของ SW ดังนั้น เป็น SP

พิจารณาค่า Liquid limit และค่า Plasticity index เมื่อนำไป Plot ใน Plasticity chart จะพบว่าไม่มี group symbol เป็น SM

สรุป ดินชนิดนี้มี Group symbol เป็น SP-SM

ดินชนิดที่ 3 มีผลการทดสอบ

ส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4	100%
ส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200	86%
Liquid limit	55
Plasticity index	28

พิจารณาว่ามีส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 > 50% ดังนั้นดินชนิดนี้เป็นดินเม็ดละเอียด (M, C)

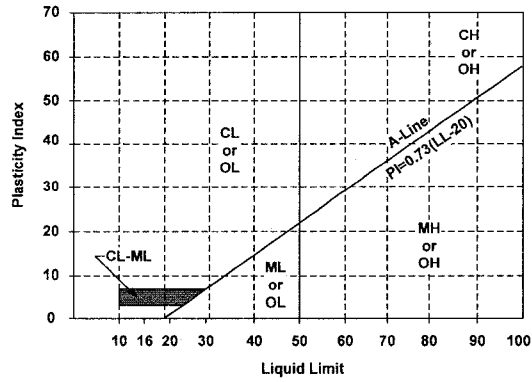
พิจารณาค่า Liquid limit และ plasticity index เมื่อนำไป Plot ใน Plasticity chart แล้วจะอยู่เหนือ A-Line ดังนั้น ดินชนิดนี้มี group symbol คือ CH

ตัวอย่างที่ 4.4 – จากหนังสือ Braja M Das

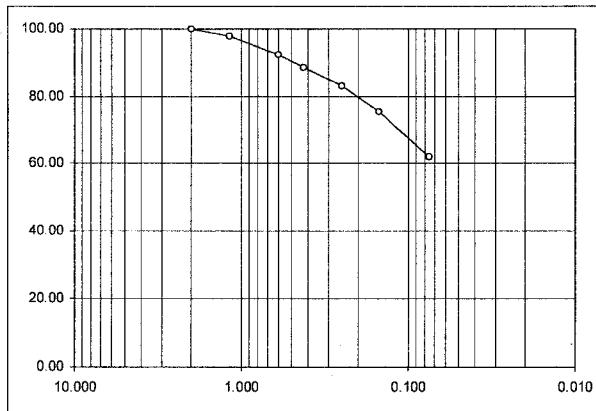
From Braja M. Das

Mass of dry soil sample = 450 g

Sieve no.	Diameter (mm)	Mass of soil retained on each sieve (g)	Percent of soil retained on each sieve (g)	Percent passing (%)
10	2.000	0.00	0.00	100.00
16	1.180	9.90	2.20	97.80
30	0.600	24.66	5.48	92.32
40	0.425	17.60	3.91	88.41
60	0.250	23.90	5.31	83.10
100	0.150	35.10	7.80	75.30
200	0.075	59.85	13.30	62.00
pan		278.99	62.00	0.00



รูปที่ 4.20

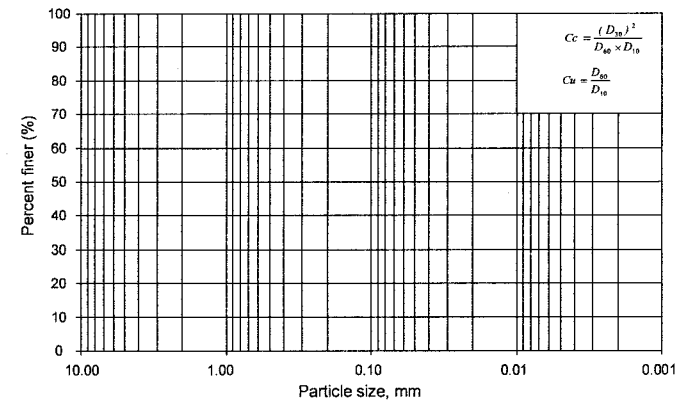


รูปที่ 4.21

4.7 คำถามท้ายบท

1. จงจำแนกดินตัวอย่างในตารางด้วยวิธี Unified Soil Classification จากการจำแนกดินถ้าต้องการนำดินไปทำเป็น แกนเซ็อนซึ่งจะต้องเป็น โครงสร้างที่บ้น้ำ (น้ำซึมผ่านได้ยาก) ควรจะใช้ดิน A หรือ B จงอธิบายเหตุผล

Sieve no	Opening size (mm)	Percent finer (%)	
		ดิน A	ดิน B
4	4.750	98	100
10	2.000	86	100
20	0.850	50	98
40	0.425	28	93
60	0.250	18	88
100	0.150	14	83
200	0.075	10	77
Liquid limit		-	53
Plastic limit		-	28



รูปที่ 4.22

2. โครงการสร้างผนังทับน้ำด้วยดิน (น้ำซึมผ่านได้ยาก) มีแหล่งวัสดุให้เลือกอยู่ 3 แหล่งโดยมีผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการดังตาราง

- จงจำแนกดินทั้ง 3 ชนิดนี้ด้วยระบบ Unified Soil Classification
- นักศึกษาจะเลือกวัสดุจากแหล่งใดเพื่อใช้เป็นแกนเซ็อน โปรดยกเหตุผลประกอบ

4 การจำแนกดิน

	ดินจากแหล่ง A	ดินจากแหล่ง B	ดินจากแหล่ง C
% ดินผ่านตะแกรงเบอร์ 4	98.0	100.0	90.0
% ดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200	10.0	77.0	4.0
Coefficient of uniformity, Cu	11	-	4.5
Coefficient of curvature, Cc	2.3	-	1.2
Plastic limit (%)	20	28	-
Liquid limit (%)	44	54	-

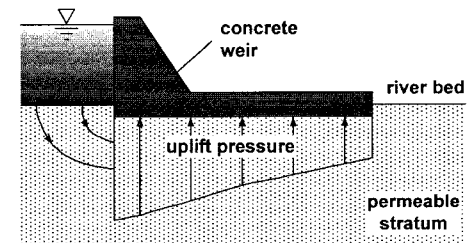
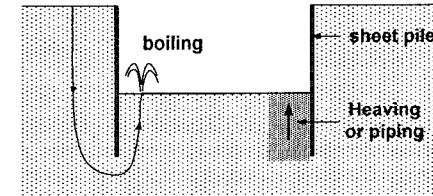
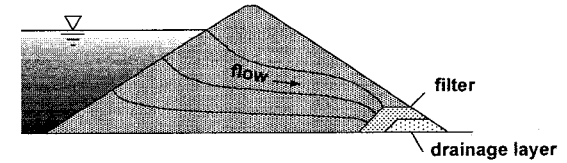
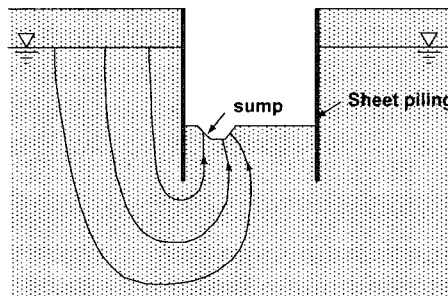
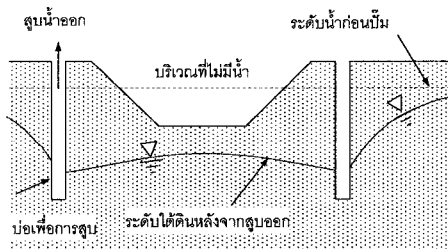
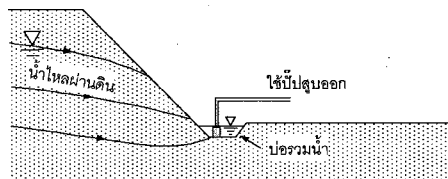
3. จากตารางข้อมูล Atterberg's limit ของดินเหนียว 3 ชนิดจงบรรยายว่าสถานะของดินทั้ง 3 ชนิดนี้เป็นอย่างไร
จงบอกเหตุผลประกอบ

	ดิน A	ดิน B	ดิน C
Water content	22	40	60
Liquid limit	50	50	50
Plastic limit	25	25	25

5 Permeability and Seepage

5.1 วัตถุประสงค์

ในทางปฐพีกลศาสตร์ ดินประกอบไปด้วยเม็ดดิน น้ำ และก๊าซ ในงานวิศวกรรมน้ำที่ไหลผ่านดินมีผลกระทบอย่างมาก ดังตัวอย่างในรูปที่ ดังนั้นจึงต้องศึกษาถึงความสามารถในการไหลของน้ำผ่านดิน



5.2 ช่องว่างในดิน (Soil Void)

การไหลของน้ำผ่านดินจะไม่ขึ้นกับปริมาณช่องว่างระหว่างเม็ดดิน แต่จะขึ้นอยู่กับขนาดช่องว่างระหว่างเม็ดดินตาราง ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของดินและ Permeability

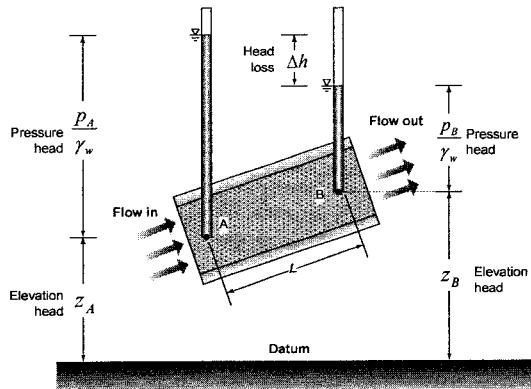
ชนิดของดิน	Porosity	Typical permeability (m/s)
Clay	0.3 - 0.5	10^{-9}
Sand	0.2 - 0.4	10^{-3}

Degree of permeability	Coefficient of permeability (cm/s)
High	More than 10^{-1}
Medium	10^{-1} to 10^{-3}
Low	10^{-3} to 10^{-5}
Very Low	10^{-5} to 10^{-7}
Practically impermeable	Less than 10^{-7}

		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						
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					
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											

After Casagrande and Fadum (1940)

5.3 Pressure and Head



รูปที่ 5.1 การไหลผ่านท่อ

จากสมการของ Bernoulli ความเร็วในการไหลของน้ำน้อยมากดังนั้น Total head จึงเขียนได้เป็น

$$(Total\ head)_{at\ B} = Elevation\ head + Pressure\ head$$

Total head at A

$$z_A + \frac{p_A}{\gamma_w}$$

Total head at B

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

Head loss ระหว่างจุด A และ B

$$Head\ loss, \Delta h = (Total\ head)_A - (Total\ head)_B$$

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

และ

Head Loss เขียนได้ในรูปแบบ Dimensionless ได้ดังสมการ

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

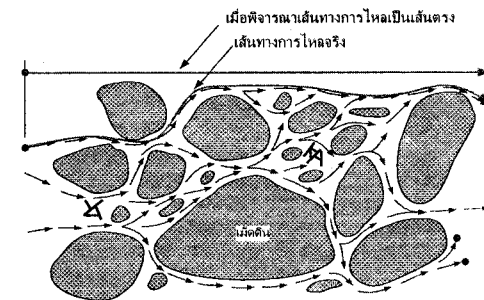
i = hydraulic gradient

L = ระยะระหว่างจุด A และ B (ระยะในการไหลที่ทำให้เกิด Head loss)

ถ้า Total head ที่ A และ B เท่ากันจะไม่มีกรไหลของน้ำระหว่าง 2 จุด

แต่ถ้า Total head ที่ A สูงกว่า B ก็จะมีการไหลของน้ำจาก A ไปยัง B โดยที่ Head ที่แตกต่างกันระหว่างจุดทั้งสองเรียกว่า Head loss

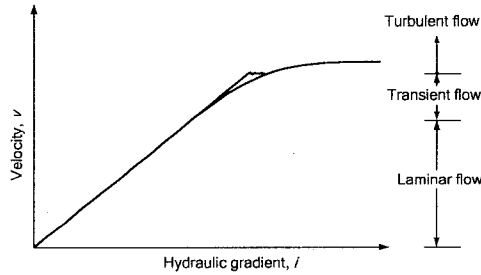
5.4 Darcy's Law



รูปที่ 5.2 การไหลของน้ำในดินขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่างระหว่างเม็ดดิน

- ดินเหนียวมีช่องว่างระหว่างเม็ดดินเล็ก จะหน่วงการไหลของน้ำทำให้ไหลได้ช้า
- ดินทรายช่องว่างระหว่างเม็ดดินใหญ่กว่าดินเหนียว การไหลของน้ำในช่องว่างสะดวกขึ้น น้ำไหลเร็วขึ้น

ในปี 1856 Darcy ได้เสนอว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการไหลของน้ำในดินแปรผันตรงกับ hydraulic gradient



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับ hydraulic gradient

สำหรับดินส่วนใหญ่ เราจะคิดว่า การไหลของน้ำผ่านช่องว่างในดินเป็นแบบ laminar flow นั่นคือความเร็วของการไหลแปรผันตรงกับ hydraulic gradient

$$v \propto i$$

ซึ่งเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$v = ki$$

โดยที่

k = Coefficient of permeability (สัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของน้ำ) มีหน่วยเป็นระยะทางต่อเวลา

i = Hydraulic gradient ($\Delta h / L$)

อัตราการไหลของน้ำคือผลคูณของความเร็วในการไหลกับพื้นที่หน้าตัดที่เกิดการไหล

$$q = vA = Aki$$

หน่วยของอัตราการไหลคือ m^3/s หรือ cm^3/s โดยกฎของการอนุรักษ์การไหลของน้ำ (conservation of flow) อัตราไหลเข้าของน้ำจะเท่ากับอัตราการไหลออกของน้ำ โดยไม่มีการสูญเสียของปริมาณน้ำ

สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของดิน ขนาดคละของเม็ดดิน การจัดเรียงตัวของโครงสร้างดิน และความสม่ำเสมอของเนื้อดิน ค่าโดยทั่วไปของสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านแสดงไว้ในตารางข้างล่าง

ตารางที่ 5.1 สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของดินบางชนิด

ชนิดของดิน	k (cm/s)
กรวดที่ไม่มีสิ่งเจือปน	> 1.0
ทรายที่ไม่มีสิ่งเจือปน หรือ ทรายปนกรวดที่ไม่มีสิ่งเจือปน	1.0 ถึง 10^3
ทรายละเอียด ซิลต์ ดินที่มีส่วนผสมของ ทราย ซิลต์ และดินเหนียว	10^3 ถึง 10^7
ดินเหนียวที่ไม่มีชั้นดินเม็ดหยาบแทรก	< 10^7

ในทางปฏิบัติแล้วเราจะถือว่าดินเหนียวที่เป็นเนื้อเดียวกัน (ไม่มีชั้นทรายแทรกอยู่) จะที่บ้น้ำ จากคุณสมบัตินี้ ดินเหนียวจึงเป็นวัสดุที่นิยมนำไปใช้ในการก่อสร้างแกนเขื่อนเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำไหลซึมผ่านตัวเขื่อน หรือนำดินเหนียวไปใช้เป็นตัวรองพื้นของขยะเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำจากขยะไหลลงไปกับเนื้อดินรอบๆ ขอบ

เราอาจจะหาสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านได้จากความสัมพันธ์ที่สร้างจากผลการทดลอง (empirical relationship) ได้มีผู้นำเสนอความสัมพันธ์ไว้มากมาย แต่ในที่นี้จะเสนอความสัมพันธ์ที่นำเสนอโดย Hazen ในปี 1930 ดังนี้

$$k = C \cdot (D_{10})^2$$

k = Coefficient of permeability, (m/s)

D_{10} = Effective size, (mm) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดดินที่ % finer เป็น 10%

C = ค่าคงที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0.01 ถึง 0.015

สมการนี้ใช้ได้กับ Clean and Uniform Sand ซึ่งอยู่ในสภาพหลวมที่สุดเท่านั้น

อัตราเร็วในการไหลของน้ำ (Discharge velocity, v) สัมพันธ์กับอัตราเร็วที่น้ำไหลผ่านเม็ดดิน (Seepage velocity, v_s) ดังนี้

$$v_s = \frac{v}{n}$$

โดยที่

n = ความพรุนของดิน (Porosity)

Darcy's Law ใช้ได้เฉพาะกรณีของ Laminar Flow ซึ่งความเร็วในการไหลไม่สูง

ในความเป็นจริงน้ำจะไหลผ่านดินด้วยความเร็วไม่สูงทำให้สามารถใช้ Darcy's Law

ถ้าเป็นดินเม็ดหยาบความเร็วในการไหลอาจอยู่ในช่วง Turbulent ทำให้ไม่สามารถใช้ Darcy's Law

5.5 ค่าสัมประสิทธิ์ k ได้มาอย่างไร?

5.5.1 ใช้ค่าประมาณจากสมการเชิงประจักษ์ (Empirical formula)

ในการดินเม็ดหยาบ (กรวด และ ทราย) ค่า K จะขึ้นอยู่กับปัจจัยเหล่านี้

Effective size, D_{10} ถ้าขนาดของเม็ดดินใหญ่ขนาดช่องว่างระหว่างเม็ดดินจะใหญ่ด้วย

การกระจายขนาดของเม็ดดิน, C_u เม็ดดินจะมีการเรียงตัวเต็มพื้นที่หรือมีช่องว่างขึ้นอยู่กับค่า C_u

อัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio, e) ค่า k จะมีความสัมพันธ์กับปัจจัยข้างต้นเป็นสมการ empirical ดังนี้คือ

$$k = C \cdot (D_{10})^a (C_u)^b (e)^c$$

โดยที่ C, a, b และ c เป็นค่าคงที่

แต่สมการ Empirical นี้จะไม่น่าเชื่อถือนักเนื่องจากดินเม็ดหยาบจะเปลี่ยนแปลงสภาพ ไปจากเดิมมากเมื่อนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ ทำให้ค่า permeability ที่ได้จากสมการนี้ไม่ค่อยถูกต้องนัก

สมการ Empirical ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางคือสมการที่เสนอโดย Hazen

$$k = C \cdot (D_{10})^2$$

k = Coefficient of permeability, (m/s)

D_{10} = Effective size, (mm) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดดินที่ % finer เป็น 10%

C = ค่าคงที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0.01 ถึง 0.015

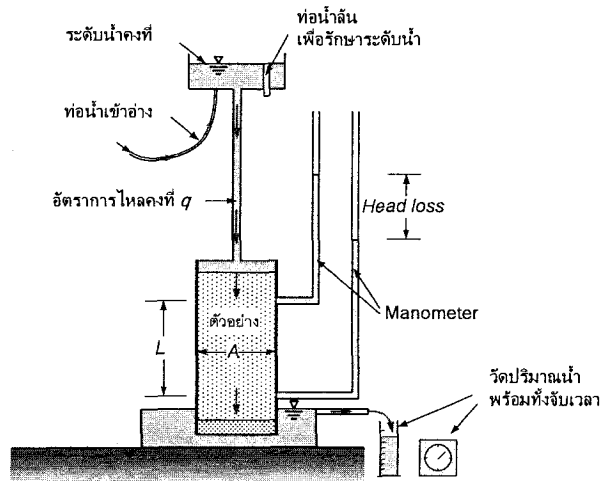
สมการนี้ใช้ได้กับ Clean and Uniform Sand ซึ่งอยู่ในสภาพหลวมที่สุดเท่านั้น

5.5.2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบเพื่อหาสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านในห้องปฏิบัติการมีอยู่ 2 วิธีได้แก่

5.5.2.1 ใช้ระดับน้ำคงที่ (Constant head)

วิธีทดสอบแบบนี้เหมาะกับทรายที่ไม่มีดินเม็ดละเอียดเจือปน (Clean sand) จนถึงกรวดหรือทรายซึ่งมีดินเม็ดละเอียดปนอยู่น้อยกว่า 10% รูปที่ 1 คือเครื่องมือที่ใช้ทดสอบแบบ constant head ในการทดสอบจะปล่อยให้ น้ำไหลผ่านกระบอกบรรจุดินตัวอย่างโดยที่น้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างจะบรรจุอยู่ในอ่างซึ่งควบคุมระดับน้ำให้คงที่ ณ ตัวอย่างจะมีการวัดระดับน้ำด้วย Manometer ซึ่งจะนำมาใช้คำนวณ head loss อัตราการไหลของน้ำทำได้โดยการวัดปริมาณน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่าง Q โดยใช้กระบอกตวงพร้อมทั้งจับเวลา t สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านคำนวณได้จาก



รูปที่ 5.4 การทดสอบแบบระดับน้ำคงที่

$$Q = Avt$$

$$= A(ki)t$$

และจาก $i = \frac{h}{L}$ โดยที่ L เป็นระยะระหว่าง Manometer จะได้สมการที่ใช้คำนวณสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

คือ

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

โดยที่

Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่าง (วัดโดยกระบอกตวง)

A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ

h = ความแตกต่างของระดับน้ำใน manometer

t = ช่วงเวลาที่น้ำไหลผ่านตัวอย่าง

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

จากนั้นปรับแก้ผลเนื่องจากอุณหภูมิโดยใช้สมการ

$$k_{20} = k_T \frac{\eta_T}{\eta_{20}}$$

และทำการหา Dry density หรือ Void ratio ของตัวอย่าง

จากนั้นทดสอบซ้ำโดยเปลี่ยนค่า Dry density หรือ Void ratio ของตัวอย่าง

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Dry density หรือ Void ratio กับค่า k_{20}

การทดสอบนี้ไม่นิยมใช้เพื่อหาค่า k ของดินคงสภาพเนื่องจาก

- ตัวอย่างดินมีขนาดเล็ก ทำให้ไม่ครอบคลุมถึงรอยแยกหรือช่องว่างขนาดใหญ่ภายในดิน (Fissure, lamination, root hole)
- การเตรียมตัวอย่างดินใน Permeameter ทำได้ยาก
- น้ำจะไหลตามรอบ ๆ Permeameter ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่ทดสอบมีค่ามากกว่าความเป็นจริง การทดสอบนี้เหมาะกับ
- ดินที่จะต้องถูกแปรสภาพ ไปจากเดิมเช่นดินที่จะนำมาให้ทำเป็น filter
- ขนาดที่ใหญ่ที่สุดของเม็ดดินจะต้องไม่มากกว่า 1/20 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Permeameter

Coefficient of permeability นอกจากขึ้นอยู่กับลักษณะของช่องว่างระหว่างเม็ดดินแล้วยังขึ้นกับ คุณสมบัติของน้ำด้วยดังสมการ

$$k = K \frac{\gamma_w}{\eta}$$

โดยที่

k = Coefficient of permeability

K = ค่าคงที่ขึ้นกับลักษณะของช่องว่างระหว่างเม็ดดิน

γ_w = หน่วยน้ำหนักของ ของไหล

η = ความหนืดของน้ำ

จากสมการข้างต้นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปสิ่งที่เปลี่ยนแปลงคือ

Unit weight ของน้ำ

Viscosity ของน้ำ

ซึ่งจะทำให้ค่า k เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นการระบุค่า k มักจะระบุที่ 20 °C

อุณหภูมิจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลง Unit weight ไม่มากนัก แต่จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลง Viscosity ของน้ำอย่างมาก ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างค่า Permeability ของดินที่อุณหภูมิต่าง ๆ กับที่อุณหภูมิ 20 °C คือ

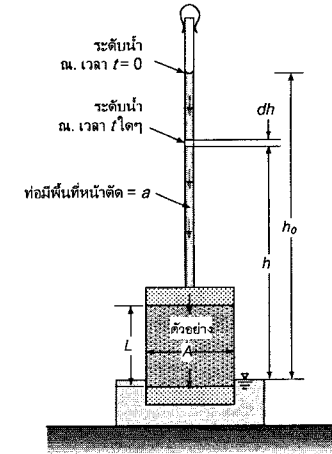
$$k_{20} = k_T \frac{\eta_T}{\eta_{20}}$$

ตารางค่าปรับแก้เนื่องจากอุณหภูมิ

Temp °C	$\frac{\eta_T}{\eta_{20}}$	Temp °C	$\frac{\eta_T}{\eta_{20}}$
0	1.779	25	0.906
4	1.555	30	0.808
10	1.299	40	0.670
15	1.133	50	0.550
20	1.000	60	0.468

5.5.2.2 ระดับน้ำเปลี่ยนแปลง (Variable head)

การทดสอบนี้เหมาะกับดินที่มี สัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ปานกลางถึงต่ำ เช่นดินเหนียว การทดสอบทำโดยการปล่อยน้ำให้ไหลผ่านตัวอย่าง โดยน้ำจะบรรจุอยู่ในท่อ



รูปที่ 5.5 การทดสอบแบบระดับน้ำเปลี่ยนแปลง

การคำนวณหาค่า k ทำได้โดยพิจารณาอัตราการไหลของน้ำผ่านตัวอย่างผ่าน Stand pipe โดยวัดความสูงที่น้ำลดลงพร้อมทั้งจับเวลา t จากนั้นคำนวณหาค่า Coefficient of permeability โดยใช้สมการ

$$q = k \frac{h}{L} A$$

$$= -a \frac{dh}{dt}$$

q = อัตราการไหล

a = พื้นที่หน้าตัดของ Stand pipe

A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง

จัดรูปสมการได้เป็น

$$dt = \frac{aL}{Ak} \left(-\frac{dh}{h} \right)$$

อินทิเกรตสมการข้างต้นจะได้

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

จะได้

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

ซึ่งเป็นสมการที่ใช้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านโดยใช้วิธีการทดสอบแบบ Variable head

5.5.3 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านในสนาม

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่า Coefficient of permeability ในสนาม ซึ่งทดสอบโดยการเจาะหลุมเพื่อสูบน้ำ (pumping well) และสูบน้ำออกจากนั้นเจาะหลุมเจาะ (Observation well) ไว้เพื่อตรวจสอบระดับน้ำใต้ดินที่ลดลง ไปเมื่อสูบน้ำขึ้นมาเป็นเวลานานพอจะสามารถตรวจสอบระดับน้ำใต้ดินได้ว่าลดลงไปอย่างไร

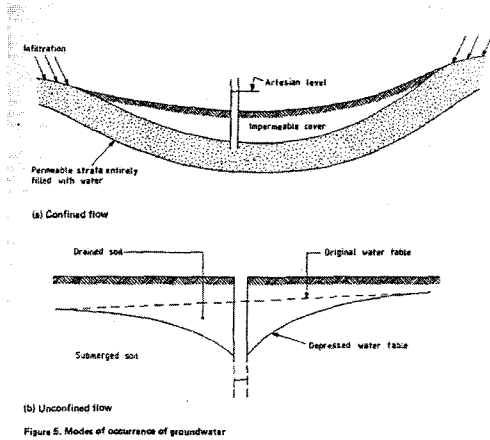
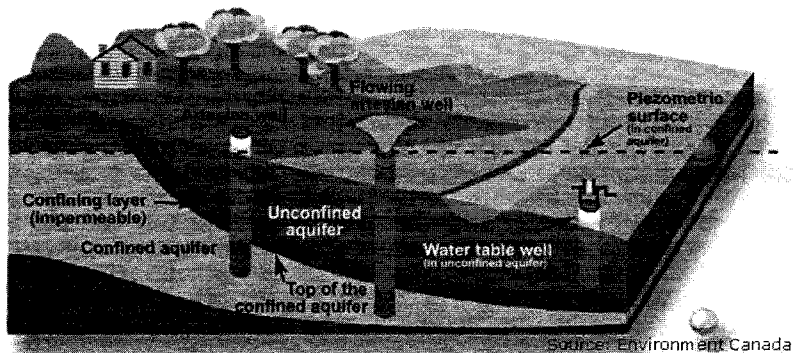
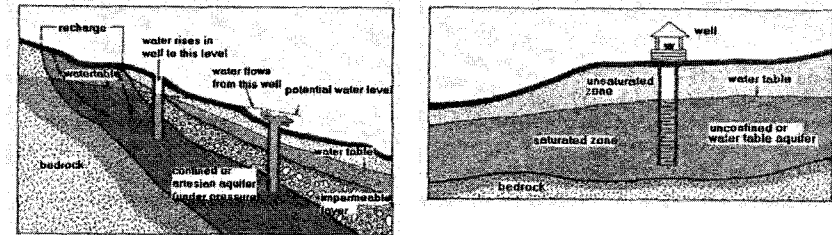


Figure 5.6. Modes of occurrence of groundwater

รูปที่ 5.6 ลักษณะของชั้นน้ำแบบ confined และ unconfined

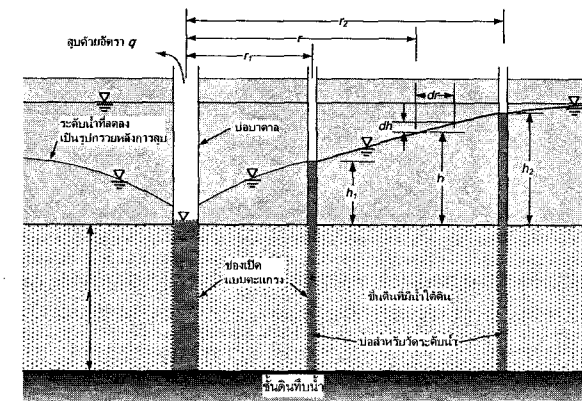


รูปที่ 5.7 Aquifers and wells



รูปที่ 5.8 Aquifers and wells

5.5.3.1 ชั้นน้ำถูกจำกัด



รูปที่ 5.9 การทดสอบเพื่อหาค่า k กรณีชั้นน้ำถูกจำกัด

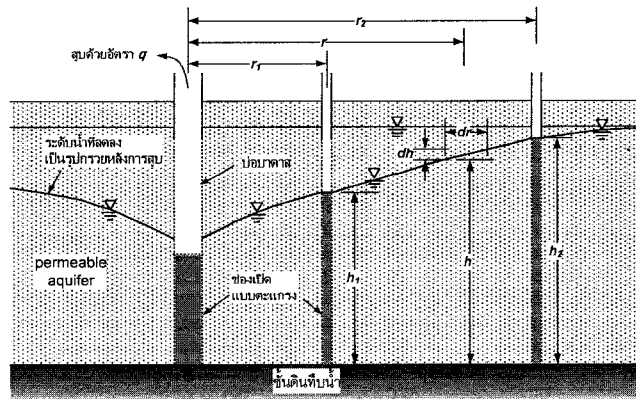
$$q = kiA$$

$$q = k \left(\frac{dh}{dr} \right) (2\pi r l)$$

$$\int_1^2 \frac{dr}{r} = (2\pi k l) \int_{h_1}^{h_2} dh$$

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

5.5.3.2 ชั้นน้ำไม่ถูกจำกัด



รูปที่ 5.10 การทดสอบเพื่อหาค่า k กรณีชั้นน้ำไม่ถูกจำกัด

$$q = kiA$$

$$q = k \left(\frac{dh}{dr} \right) (2\pi r h)$$

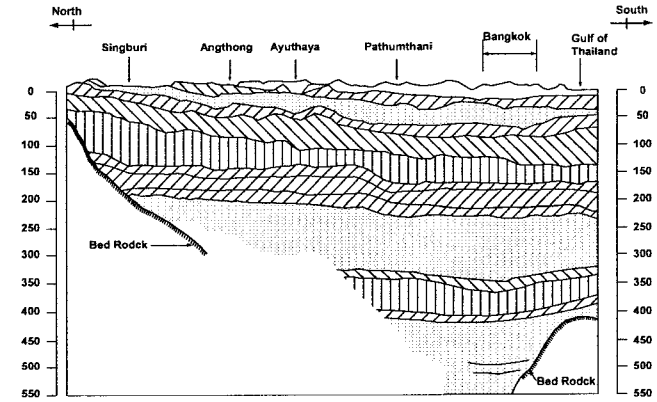
$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \frac{2\pi k}{q} \int_{h_1}^{h_2} h \cdot dh$$

สมการสำหรับคำนวณสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านในสนามในกรณีชั้นน้ำไม่ถูกจำกัดคือ

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

5.6 กรณีที่น้ำไหลผ่านดินหลายชั้น (Flow through a layered soil)

ที่ผ่านมาระดับหนึ่งได้พูดถึงการไหลของน้ำผ่านดินสม่ำเสมอไปแล้ว แต่ในความเป็นจริงดินที่เกิดจากการพัดพาของน้ำและมาตกตะกอนจะมีลักษณะเป็นชั้นๆ ดังรูป ซึ่งชั้นดินนี้มักจะประกอบไปด้วยดินหลายชนิด ในการพิจารณาอัตราการไหลซึมผ่านจะนำสัมประสิทธิ์การไหลของดินแต่ละชนิดมาใช้ในการคำนวณ ซึ่งจะพิจารณาการไหลสองแบบคือการไหลตั้งฉากกับชั้นดิน และการไหลขนานไปกับชั้นดิน

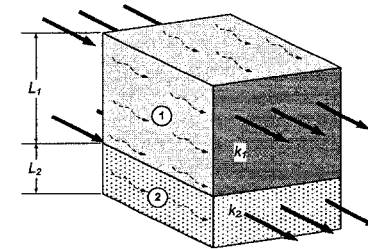


รูปที่ 5.11 ตัวอย่างดินตะกอนที่ทับถมกันเป็นชั้น

ดินที่เกิดจากการพัดพาของน้ำและมาตกตะกอนจะมีลักษณะเป็นชั้น ๆ ค่า Permeability ของดินจะแตกต่างกันไปตามลักษณะของการทับถมเช่น

ถ้ามีชั้นดินเหนียวบาง ๆ แทรกอยู่ในชั้นทรายจะทำให้ Permeability ในแนวตั้งของดินลดลงอย่างมาก แต่ถ้ามีชั้นทรายบาง ๆ แทรกอยู่ในชั้นดินเหนียวจะทำให้ Permeability ในแนวราบของดินเพิ่มขึ้นอย่างมาก กรณีที่ 1 การไหลขนานไปกับชั้นดิน

ถ้าการไหลขนาดไปกับชั้นดิน ความลาดของการไหล (hydraulic gradient) จะเท่ากันทุกจุด อัตราการไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดรวมจะเท่ากับผลรวมของอัตราการไหลผ่านดินแต่ละชั้นย่อย



รูปที่ 5.12 การไหลผ่านในแนวขนานกับชั้นดิน

การไหลของน้ำในแนวราบในดินชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 จะมี Head Loss เท่ากันดังนั้นจะมี Hydraulic gradient

(i) เท่ากัน $i_1 = i_2 = i$

ดังนั้นอัตราไหลของน้ำผ่านหน้าตัดดินที่มีความกว้าง 1 หน่วยคือ

$$q_v = Av$$

$$= (1.0)L_1 k_1 i + (1.0)L_2 k_2 i + \dots + (1.0)L_n k_n i$$

โดยที่ L_t คือความหนารวมของชั้นดิน

K_H = Coefficient of permeability in horizontal direction

ถ้าสมการข้างต้นจะได้สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านในกรณีนี้คือ

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

ซึ่งเป็นสมการที่ใช้คำนวณหา Coefficient of permeability in horizontal direction ในกรณีที่มีดินหลายชั้น และน้ำไหลในแนวราบ

กรณีที่ 2 การไหลตั้งฉากกับแนวชั้นดิน

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

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

และอัตราการไหลผ่านดินแต่ละชั้นจะเท่ากัน $q_1 = q_2 = q_v$ ซึ่งจากกฎของคาร์ซีเราจะได้

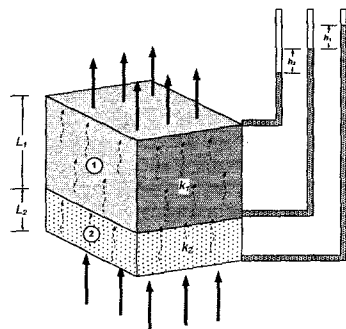
$$k_v \frac{\Delta H}{L_t} = k_1 \frac{\Delta h_1}{L_1} = k_2 \frac{\Delta h_2}{L_2} = \dots = k_n \frac{\Delta h_n}{L_n}$$

เมื่อนำไปแทนค่าลงในสมการ head loss รวมจะได้

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

จัดรูปสมการใหม่จะได้

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



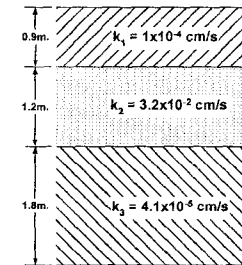
รูปที่ 5.13 การไหลผ่านในตั้งฉากกับชั้นดิน

k_v = Coefficient of permeability in horizontal direction

i_v = Hydraulic gradient ของน้ำที่ไหลผ่านดินซึ่งประกอบไปด้วยดินชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2

head loss ของดินแต่ละชั้นคือ $h_1 = i_1 L_1$ และ $h_2 = i_2 L_2$

ตัวอย่างที่ 5.1 จากชั้นดินและข้อมูลดังรูป จงคำนวณหา $(k_v)_{eq}$ และ $(k_H)_{eq}$ และ $(k_H)_{eq} / (k_v)_{eq}$



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

$$(k_H)_{eq} = \frac{(0.9)(1 \times 10^{-4}) + (1.2)(3.2 \times 10^{-2}) + (1.8)(4.1 \times 10^{-5})}{0.9 + 1.2 + 1.8} = 9.888 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$$

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

$$(k_v)_{eq} = \frac{0.9 + 1.2 + 1.8}{\left(\frac{0.9}{1 \times 10^{-4}} + \frac{1.2}{3.2 \times 10^{-2}} + \frac{1.8}{4.1 \times 10^{-5}} \right)} = 7.367 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$$

$$\frac{(k_H)_{eq}}{(k_v)_{eq}} = \frac{9.888 \times 10^{-3}}{7.367 \times 10^{-5}} = 134.2$$

จากตัวอย่างจะเห็นว่าน้ำไหลขนานกับชั้นดินได้ดีกว่าไหลตั้งฉากกับชั้นดิน เพราะการไหลเป็นอิสระต่อกัน เปรียบเสมือนมีท่อมีการไหล จากข้อมูลนี้เรามักจะนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างกำแพงกันน้ำ เนื่องจากเราทราบว่าถ้ามีชั้นดินที่น้ำแทรกตัวอยู่จะทำให้สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านต่ำลง

ตัวอย่างที่ 5.2 ในการทดสอบหาสัมประสิทธิ์การซึมผ่านโดยใช้วิธี Constant-head มีข้อมูลดังนี้

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

จงคำนวณหา coeff. of permeability, k

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

$$= \frac{(541 \times 10^3)(150)}{(76)(0.25\pi 100^2)(2)(60)}$$

$$= 1.13 \text{ mm/s}$$

ปรับแก้เนื่องจากอุณหภูมิโดยใช้ตารางที่ ปรุ (17°C) $\frac{\eta_r}{\eta_{20}} = 1.09$

$$k_{20} = 1.13 \times 1.09 = 1.23 \text{ mm/s}$$

ตัวอย่างที่ 5.3 จากข้อมูลการทดสอบสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านโดยใช้วิธี Variable-head จงคำนวณสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของดินตัวอย่างนี้

เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของตัวอย่าง = 100 mm

ความยาวของตัวอย่าง = 150 mm

เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของ 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

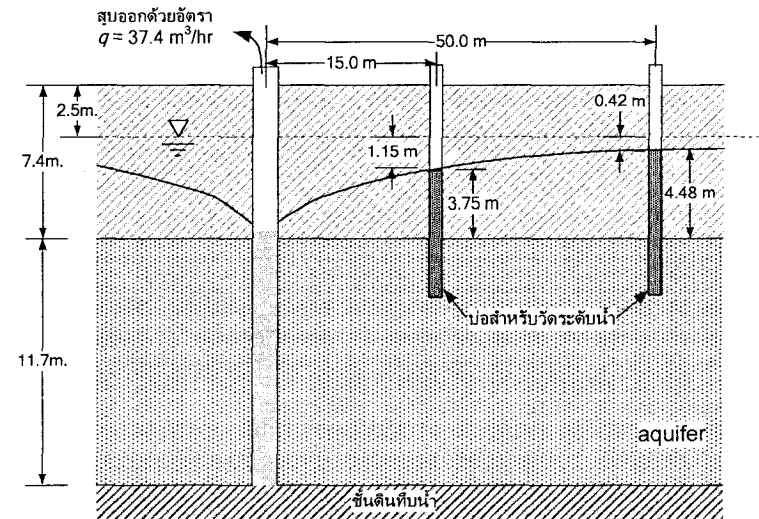
แทนค่าในสมการ

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

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

$$= 1.975 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$

ตัวอย่างที่ 5.4 ในการทดสอบหาค่า coeff. of permeability โดยใช้วิธี Pumping test ของชั้นทรายแน่นที่อุณหภูมิลำดับน้ำใต้ดินโดยมีอัตราการไหล 37.4 m³/hr Pumping well และ Observation well มีตำแหน่งดังรูป จงคำนวณหาค่า k



ระยะห่างของบ่อวัดระดับน้ำและระดับน้ำในบ่อทั้งสอง

$$r_1 = 15 \text{ m}$$

$$h_1 = 7.4 - (2.5 + 1.15) = 3.75 \text{ m}$$

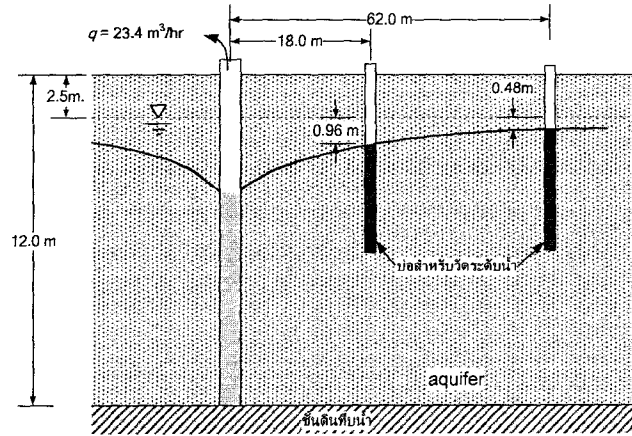
$$r_2 = 50 \text{ m}$$

$$h_2 = 7.4 - (2.5 + 0.42) = 4.48 \text{ m}$$

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

$$k = \frac{(37.4)}{(3600)(2\pi \times 11.7)(4.48 - 3.75)} \ln \left(\frac{50}{15} \right) = 2.33 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

ตัวอย่างที่ 5.5 การทดสอบหาค่า coeff. of permeability โดยใช้วิธี Pumping test ของชั้นดินทรายโดยทำการเจาะ Pumping well และ Observation well ดังรูปถ้าอัตราการไหลเป็น 23.4 m³/hr จงคำนวณสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่าน



$$r_1 = 18 \text{ m}$$

$$h_1 = 12 - (2.5 + 0.48) = 9.02 \text{ m}$$

$$r_2 = 62 \text{ m}$$

$$h_2 = 12 - (2.5 + 0.96) = 8.54 \text{ m}$$

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

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

5.7 ทฤษฎีการไหล (Seepage theory)

ในส่วนนี้จะอธิบายการไหลของน้ำในระนาบซึ่งมี 2 มิติคือแกนตั้งและแกนราบ โดยจะสมมุติว่าแกนที่ตั้งฉากกับแกนทั้งสองนี้ไม่มีการไหลผ่าน การไหลของน้ำใน 2 มิตินี้อธิบายได้โดยใช้สมการของลาปลาซ (Laplace's equation)

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

โดยที่ H คือ Total head

k_x และ k_z คือสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านในทิศทาง x และ z

สมการของลาปลาซอธิบายการไหลของน้ำว่า ถ้ามีการเปลี่ยนแปลง Hydraulic gradient ในทิศทางใด จะมีการระบบปรับเข้าสู่สมดุล โดย hydraulic gradient ในทิศทางอื่นจะมีการเปลี่ยนแปลง สมการของลาปลาซตั้งอยู่บนสมมุติฐานดังนี้

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

ถ้าดินเป็นเนื้อเดียวกันค่า k_x จะเท่ากับ k_z ดังนั้นสมการของลาปลาซจะเขียนใหม่ได้เป็น

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

ในการแก้สมการนี้จะต้องรู้ขอบเขตของปัญหาซึ่งค่อนข้างจะซับซ้อนและยุ่งยากในกรณีที่ขอบเขตที่ไม่สามารถอธิบายด้วยคณิตศาสตร์ จึงได้มีการเสนอวิธีเพื่อใช้ในการแก้สมการนี้ วิธีหนึ่งที่นิยมใช้กันคือวิธีประมาณด้วยการเขียน flow net (เส้นข่ายการไหล)

สมการของลาปลาซอธิบายการไหลของน้ำว่า ถ้ามีการเปลี่ยนแปลง hydraulic gradient ในทิศทางใด hydraulic gradient ในทิศทางอื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อปรับระบบให้เข้าสู่สมดุล

สมการของลาปลาซตั้งอยู่บนสมมุติฐานคือ

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

5.8 Flow net (เส้นข่ายการไหล)

วิธีเขียนเส้นข่ายการไหลเป็นวิธีที่ง่ายและทำให้เรามองเห็นภาพได้ชัดเจน ก่อนที่จะเข้าไปในรายละเอียดเราควรจะต้องเข้าใจการไหลในสองมิติก่อน จากสมการของลาปลาซค่าของสมการจะขึ้นอยู่กับ total head ในบริเวณสนามการไหลในระนาบ XZ เท่านั้น ถ้าเราตั้งตัวแปร ξ แทน velocity potential ซึ่งตัวแปรนี้จะแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของ total head ในมวลดิน

$$\xi = kH$$

เมื่อ k เป็นสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านใดๆ ความเร็วของการไหลในแนวแกน X และ Z คือ

$$v_x = k_x \frac{\partial H}{\partial x} = \frac{\partial \xi}{\partial x}$$

$$v_z = k_z \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{\partial \xi}{\partial z}$$

ซึ่งจากสมการแสดงความเร็วของการไหลจะตั้งฉากกับเส้นที่มี total head ค่าเดียวกัน ซึ่งเรามักเรียกเส้นนี้ว่า equipotential line (มีระดับน้ำใน piezometer เท่ากันดังรูปที่ xx) ความเร็วจะชี้ไปในทิศที่มีค่า total head ลดลง ความแตกต่างระหว่าง head ของเส้น equipotential สองเส้นจะเป็นค่า head loss ดังอธิบายในรูปที่ xx

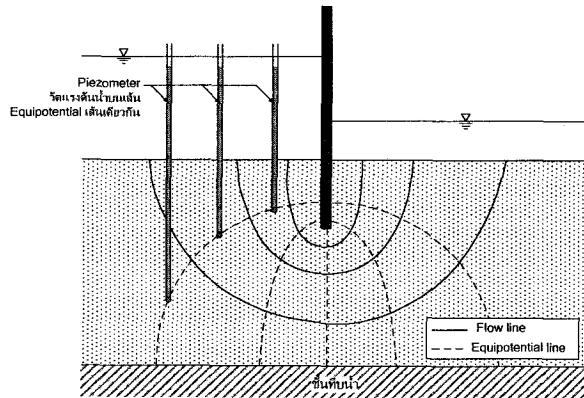
ในกรณีที่มี $k_x = k_z$ สมการลาปลาซจะเขียนได้ใหม่เป็น

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

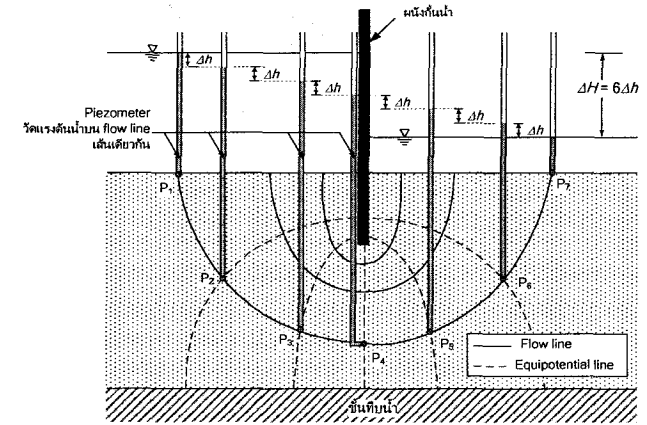
ต้องการจะทราบ Total head ณ จุดใดๆ $H = f(x, z)$

การแก้สมการนี้จะต้องรู้ขอบเขตของปัญหา ซึ่งในกรณีที่ขอบเขตของปัญหาไม่สามารถอธิบายด้วยคณิตศาสตร์ง่าย ๆ ได้ จึงมักจะนิยมใช้วิธีอื่นแทนการแก้สมการตรงๆ ซึ่งวิธีเหล่านั้น ได้แก่

- วิธีการฟิสิก เป็นการเขียน flow net
- วิธีเชิงตัวเลข เช่น Finite element หรือ Finite difference



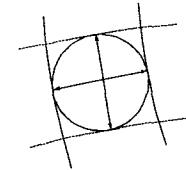
รูปที่ 5.14 เส้น equipotential เป็นเส้นซึ่งแสดงว่ามี Total head เท่ากัน ถ้าเรานำ piezometer ไปวางไว้บนเส้น equipotential เส้นเดียวกันระดับน้ำใน piezometer จะเท่ากัน



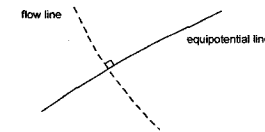
รูปที่ 5.15 เส้นการไหล (flow line) เป็นเส้นแสดงถึงทิศทางการไหลของน้ำ และจะตั้งฉากกับเส้น equipotential

ชุดของเส้น Equipotential line กับ Flow line จะเรียกว่า Flow net ซึ่งจะใช้ในการคำนวณหาการไหลของน้ำ และแรงดันน้ำที่จุดใดๆ ในขอบเขตของ Flow net ซึ่งในการเขียนจะมีกฎในการเขียนดังนี้

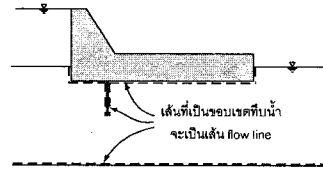
1. พื้นที่ซึ่งล้อมรอบด้วย flow line และ equipotential line จะต้องมืทุกด้านเท่ากัน ซึ่งเราสามารถที่จะเขียนวงกลมลงไปได้โดยวงกลมจะสัมผัสกับเส้นพอดี



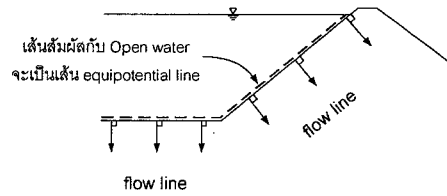
2. เส้น Equipotential line และเส้น Flow line จะต้องตัดกันเป็นมุมฉาก



3. เนื่องจากขอบเขตที่ตึบน้ำจะไม่มีการไหลของน้ำผ่าน ดังนั้นเส้นขอบเขตที่ตึบน้ำจะเป็นเส้นการไหล 1 เส้น

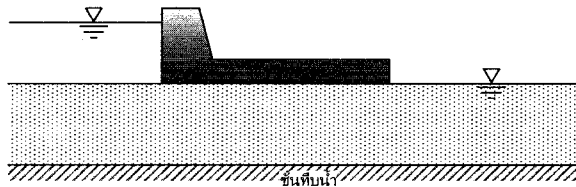


4. กรณีที่ขอบเขตของชั้นดินที่น้ำซึมผ่าน ได้สัมผัสกับ open water จะเป็นเส้น Equipotential line

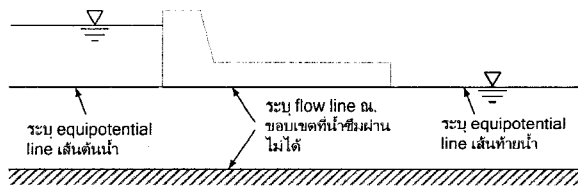


จากกฎเกณฑ์ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น นำมาเขียน Flow net โดยมีขั้นตอนดังนี้

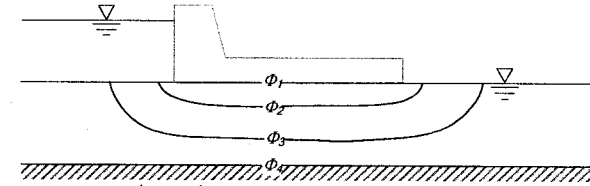
1. เขียนรูปตัดของปัญหาโดยใช้สเกลที่เหมาะสม ซึ่งจะต้องระบุขอบเขตของชั้นดินและโครงสร้างต่างๆ ลงในรูปด้วย



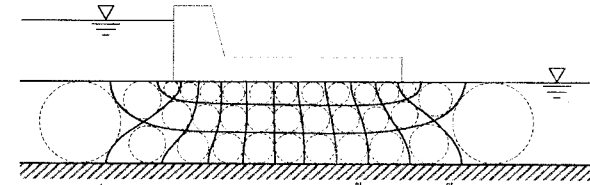
2. ระบุเส้นขอบเขตที่น้ำ โดยขอบเขตที่น้ำจะเป็น flow line 1 เส้น เนื่องจากน้ำจะไม่สามารถไหลผ่านเส้นขอบเขตที่น้ำนี้ได้ จากนั้นระบุ Equipotential line ซึ่งเป็นเส้นที่เราทราบว่า Total head เท่ากัน นั่นคือเส้นที่ชั้นดินสัมผัสกับน้ำนั่นเอง



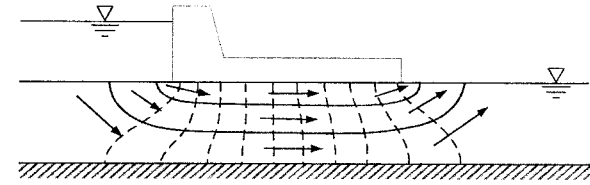
3. เสกตัดเส้น flow line



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

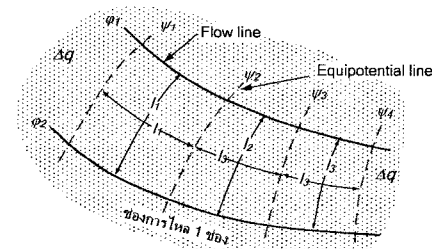


5. จากนั้นปรับแก้จนกระทั่งทุกๆ เส้นตัดกันเป็นตารางจตุรัสทั้งหมด จากนั้นลบเส้นที่ไม่ต้องการทิ้งไป

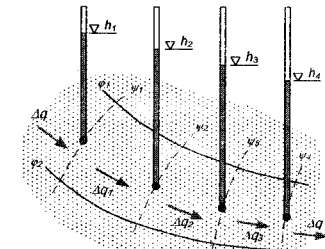


5.9 การคำนวณปริมาณการไหลซึมผ่าน (Calculation of seepage quantities)

อัตราการไหลของน้ำในดินสามารถวิเคราะห์ได้โดยการสร้าง Flow net และใช้ Darcy's law ในการหาอัตราไหลของน้ำในดิน โดยพิจารณาจาก Flow channel 1 ช่อง



ช่องการไหล 1 ช่อง ความลึกตั้งฉากกับระนาบ = 1 หน่วย



Total head ณ จุดกึ่งกลางของช่องการไหล

รูปที่ 5.16

อัตราการไหลของน้ำผ่าน Flow channel 1 ช่องคือ

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

จาก Darcy's law อัตราการไหลของน้ำคือ kiA จะได้

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

จากสมการแสดงว่า การลดระดับของ Piezometric level ที่เห็น equipotential line ที่ติดกันจะเท่ากัน ซึ่งเราเรียกว่า potential drop

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

การไหลของน้ำผ่านดินต่อ 1 ช่องการไหล (flow channel) คือ

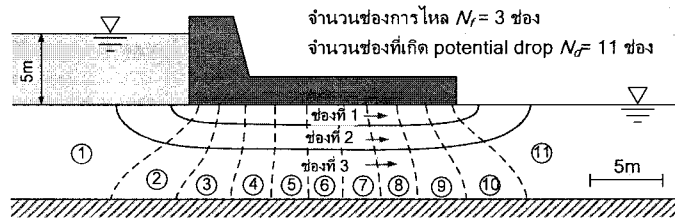
$$\begin{aligned} \Delta q &= (1.0) \left(k \frac{H}{N_d} \right) \\ &= (1.0) \left(k \frac{H}{N_d} \right) \end{aligned}$$

H = ความแตกต่างระหว่าง head ของดินน้ำกับท้ายน้ำ หรือ head loss รวม

N_d = Number of potential drops

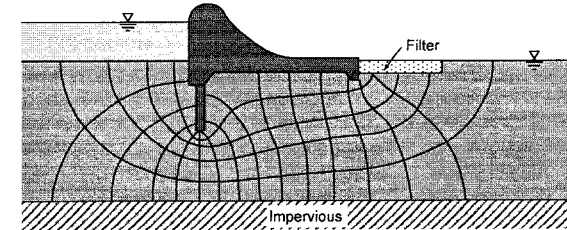
ดังนั้นการไหลของน้ำรวมทั้งหมด ในกรณีที่มี Flow channel เป็นจำนวน N_f ช่องคือ

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

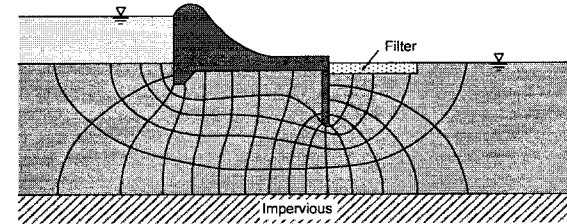


รูปที่ 5.17

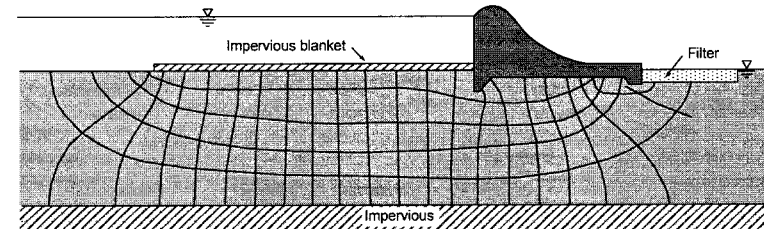
ความรู้เกี่ยวกับการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการไหลผ่านดินสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการลดแรงดันน้ำใต้ดินได้ เขียนได้ ดังตัวอย่างในรูปที่



a) เขื่อนคอนกรีตที่ใช้ Sheet pile อยู่ด้านต้นน้ำ



b) เขื่อนคอนกรีตที่ใช้ Sheet pile อยู่ด้านใต้



c) เขื่อนคอนกรีตที่ใช้ แผ่นทับน้ำ (Impervious blanket) ปูไว้ที่ด้านต้นน้ำ

5.10 การเขียน Flow net สำหรับดิน anisotropic โดยใช้วิธี Transformed section

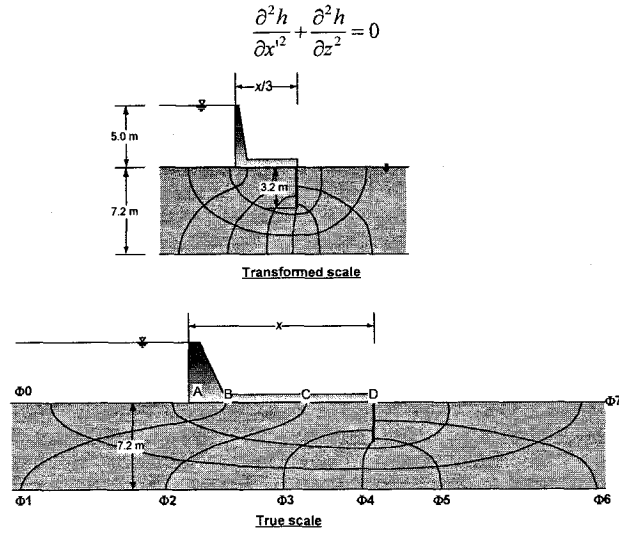
สมการ differential equation of continuity for a two dimensional flow is

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

ถ้าเป็นดิน anisotropic ค่า $k_H \neq k_V$ ทำให้ Equipotential line และ Flow line ไม่ตัดกันเป็นมุมฉาก แต่เราสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{\partial^2 h}{(k_H / k_V) \partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

แทนค่า $x' = \sqrt{\frac{k_H}{k_V}} x$ จะได้



รูปที่ 5.18

จะเห็นว่าสมการที่ได้จะแทน x ด้วย x' ซึ่งเป็น Coordinate ใหม่ดังนั้นถ้าเป็น anisotropic soil ($k_H \neq k_V$) จะมีขั้นตอนการสร้าง Flow net ดังนี้

Flow net ในกรณีนี้ $k_H = 9k_V$

$$\begin{aligned} \text{ระยะ } x \text{ ใน Transformed scale} &= \text{ระยะจริง} \sqrt{\frac{k_V}{k_H}} \\ &= \text{ระยะจริง} \left(\frac{1}{3}\right) \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 5.6

ต้องการสร้างเขื่อนคอนกรีตบนชั้นดินที่มี permeability $k_x = 16 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ และ $k_y = 1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ ในการควบคุมแรงดันน้ำใต้ฐานเขื่อนได้ใช้ cutoff sheet pile ด้านเหนือน้ำเป็นระยะ 4.6 เมตร จงคำนวณ From: Azizi

- (a) แรงดันน้ำใต้ฐานเขื่อนที่จะยกตัวเขื่อนขึ้น
- (b) Factor of safety against piping

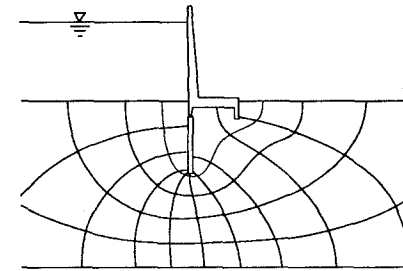
อุณหภูมิของปัญหาด้วยอัตราส่วน

$$\sqrt{\frac{k_V}{k_H}} = \frac{1}{4}$$

จะได้ transformed section ซึ่ง permeability จะเป็น

$$k_t = \sqrt{k_H k_V}$$

จากนั้นเขียน flow net โดยใช้กฎเกณฑ์ที่กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 5.19 Transformed section

คำนวณอัตราการไหลต่อหน่วยความยาว

$$\begin{aligned} Q &= k_t H \frac{N_f}{N_d} \\ &= (4 \times 10^{-8})(5) \left(\frac{5}{10}\right) \\ &= 1 \times 10^{-7} \text{ m}^3 / \text{s} / \text{1m} \end{aligned}$$

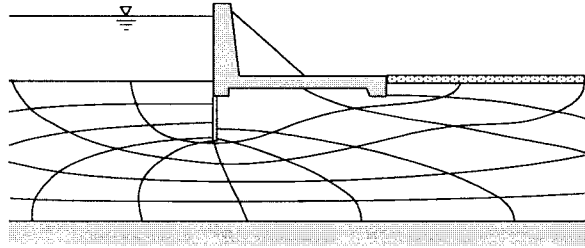
คำนวณ factor of safety against piping

Exit hydraulic gradient, i_{exit} ประมาณจาก

$$\begin{aligned} i_{exit} &= \frac{H / N_d}{L_{exit}} \\ &= \frac{5 / 10}{1.1} = 0.45 \end{aligned}$$

Factor of safety

$$\begin{aligned} FS &= \frac{i_{cr}}{i_{exit}} \\ &= \frac{1}{0.45} = 2.22 \end{aligned}$$



รูปที่ 5.20 Natural section

5.11 แรงดันน้ำในดินและแรงดันน้ำใต้ฐานรากที่น้ำซึมผ่าน

เราสามารถใช่ flow net ในการคำนวณหา uplift pressure ได้โครงสร้างที่น้ำไหลผ่านได้ โดยการคำนวณ Pressure distribution ซึ่งจะคำนวณได้จากระดับ Piezometric level ที่จุดนั้น ๆ

Total head = Elevation head + Pressure head

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

แต่ Total head บนเส้น equipotential line ใด ๆ Φ_i คำนวณได้จาก

$$(Total\ head)\ \Phi_i = (Total\ head)\ \Phi_0 - (H/N_d) * i$$

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

โดยที่ i = number of potential drop from Φ_0 to Φ_i

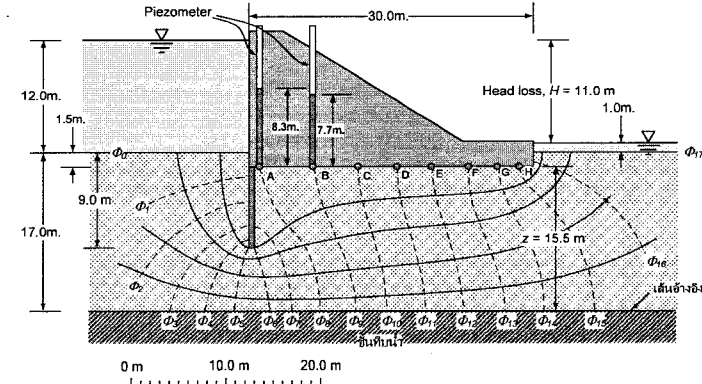
ดังนั้น Pore water pressure, u คำนวณได้จาก

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

ตัวอย่างที่ 5.7 จากโครงสร้างฝายดังรูปจงคำนวณ

- a) อัตราการไหลของน้ำผ่านดินได้ฝาย
- b) แรงดันของน้ำที่กระทำต่อได้ฝาย

กำหนดให้: Coefficient of permeability, $k = 5.2 \times 10^{-5}$ m/s



รูปที่ 5.21

$$N_f = 4.4 \text{ ช่อง}$$

$$N_d = 17 \text{ ช่อง}$$

$$q = kH \frac{N_f}{N_d} = (5.2 \times 10^{-5}) (11.0) \left(\frac{4.4}{17} \right) = 1.48 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

Pressure ที่จุด A (Φ_8)

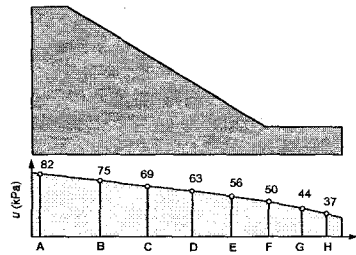
$$(Total\ head)\ \Phi_8 = (Total\ head)\ \Phi_0 - (H/N_d) * n$$

$$z_A = 17 - 1.5 = 15.5 \text{ m}$$

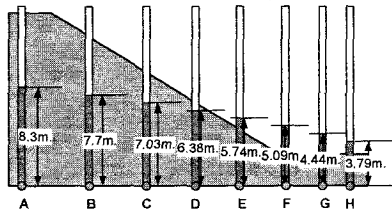
$$p_A = (23.82 - 15.5)(9.81) = 82 \text{ kPa}$$

ตารางที่แสดงแรงผลการคำนวณแรงดันน้ำ ณ. จุด A ถึงจุด H ได้เขียน

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

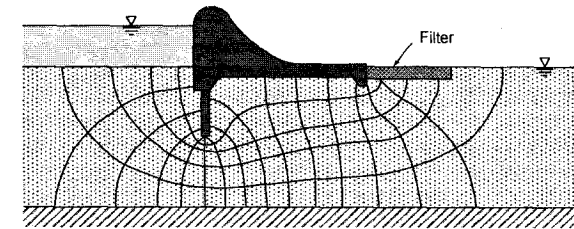
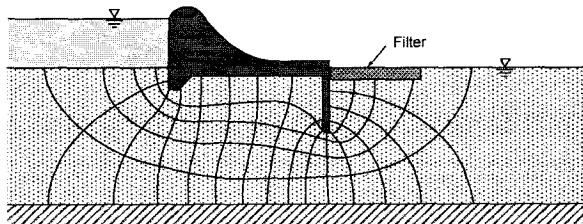


รูปที่ 5.22 ซึ่งเมื่อนำมาพล็อตเป็นแรงดันที่กระทำต่อฐานรากของฝาย ได้ดังรูป



รูปที่ 5.23 ถ่าน piezometer ใว้าง ณ จุดที่เส้น equipotential ขนกับฐานฝายจะได้ดังรูป

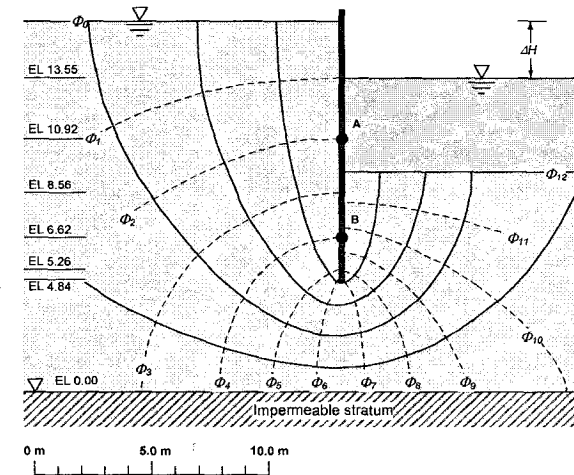
จากการคำนวณทำให้เราทราบว่าเมื่อน้ำไหลผ่านช่องทางเดินยาวๆ จะสูญเสียพลังงานไปในการไหล จากความรู้ที่เรานำไปประยุกต์ในงานฝาย โดยการเพิ่มระยะทางเดินของน้ำ



ถ้าวาง cut off wall ไว้ด้านเหนือน้ำจะทำให้ระยะทางที่น้ำเดินทางไกลขึ้น และแรงดันน้ำที่กระทำต่อได้ฝายลดลงด้วย

ตัวอย่างที่ 5.8 Sheet pile ใช้เป็นโครงสร้างกันดินมีระดับน้ำดังแสดงจงคำนวณหาอัตราการไหลของน้ำผ่าน Sheet pile และแรงดันของน้ำที่จุด A และ B

กำหนดให้: Coefficient of permeability, $k = 5.2 \times 10^{-5}$ m/s



รูปที่ 5.24

Total head loss = 2.5 m

$N_f = 5$ ช่อง

$$q = kH \frac{N_f}{N_d} = (5.2 \times 10^{-5}) (2.5) \left(\frac{5}{12} \right) = 5.729 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

$N_d = 12$ ช่อง

Pressure ที่จุด A (Φ_2)

(Total head) $\Phi_2 = (\text{Total head}) \Phi_0 - (H/Nd) \cdot n$

$$= (16.0) - \left(\frac{2.5}{12}\right)(2) = 15.58 \text{ m}$$

คำนวณแรงดันน้ำจาก Head $u = (H_i - z)\gamma_w$

$$z_A = 10.92 \text{ m}$$

$$u_A = (15.58 - 10.92) \cdot 9.81 = 45.74 \text{ kPa}$$

Pressure ที่จุด A (Φ_4)

(Total head) $\Phi_4 = (\text{Total head}) \Phi_0 - (H/Nd) \cdot n$

$$= (16.0) - \left(\frac{2.5}{12}\right)(4) = 15.16 \text{ m}$$

คำนวณแรงดันน้ำจาก Head $u = (H_i - z)\gamma_w$

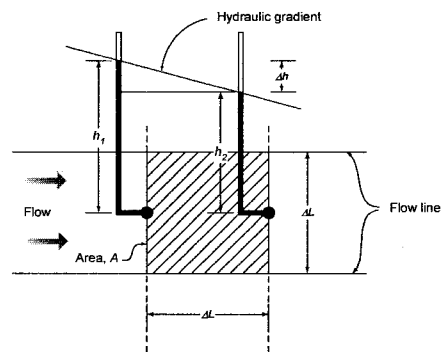
$$z_B = 6.62 \text{ m}$$

$$u_B = (15.16 - 6.62) \cdot 9.81 = 83.7 \text{ kPa}$$

5.12 Seepage force

เมื่อน้ำไหลผ่านดินจะเกิดแรงเนื่องจากการไหลของน้ำกระทำต่อดิน (Seepage force) ขึ้น ซึ่ง Seepage force อาจทำให้สมดุลของดินเสียไปและอาจทำให้เกิดการวิบัติขึ้นตามมา

พิจารณา Block ของดินซึ่งเป็นส่วนที่ equipotential line และ flow line ตัดกัน



รูปที่ 5.25

แรงดันน้ำที่ด้านซ้ายมือ $= \gamma_w h_1 A$

แรงดันน้ำที่ด้านขวามือ $= \gamma_w h_2 A$

พื้นที่หน้าตัดต่อความกว้าง 1 หน่วย $= (\Delta l)(1.0)$

ปริมาตรส่วนที่แรงเฉือนซึ่งได้รับผลจาก Seepage force $= (\Delta l)^2(1.0)$

Hydraulic gradient, $i = \frac{\Delta h}{\Delta l}$

แรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของน้ำ (Seepage force) เท่ากับ

$$= \gamma_w h_1 (\Delta l \cdot 1.0) - \gamma_w h_2 (\Delta l \cdot 1.0)$$

$$= \gamma_w \cdot \Delta h \cdot \Delta l \cdot (1.0)$$

$$= \gamma_w \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \cdot (\Delta l)^2 \cdot (1.0)$$

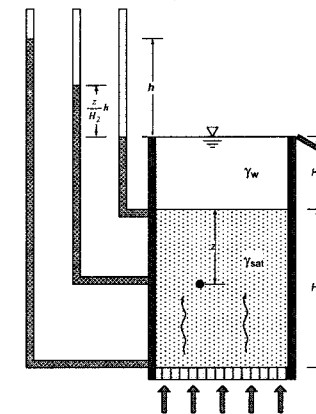
$$J = \gamma_w \cdot i \cdot V$$

ดังนั้น Seepage force per unit volume

$$\frac{J}{V} = \gamma_w \cdot i$$

5.12.1 กรณีการไหลในแนวตั้งไหลขึ้น (Vertical seepage)

กรณีที่น้ำไหลขึ้น



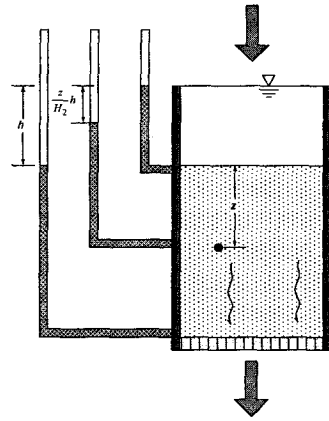
รูปที่ 5.26 กรณีน้ำไหลที่สวางตรงข้ามกับแรงโน้มถ่วง

เราคำนวณ Critical hydraulic gradient (กรณีที่ $\sigma' = 0$) ได้จากสมการ

$$\sigma' = (\gamma_{sat} - \gamma_w)(z) + iz\gamma_w$$

$$i_c = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{\gamma_w} = \frac{\gamma'}{\gamma_w}$$

กรณีที่น้ำไหลลง

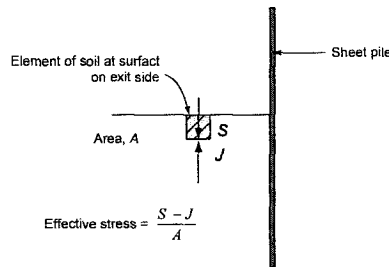


รูปที่ 5.27 กรณีที่น้ำไหลในทิศทางเดียวกับแรงโน้มถ่วง

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

5.12.2 ทรายเดือด (Boiling or Quick Sand)

Boiling คือสถานะที่ Effective stress ในดินเป็นศูนย์ทำให้ดินไม่สามารถรับแรงกระทำจากภายนอกได้เลย การไหลของน้ำผ่าน Sheet pile



รูปที่ 5.28

- ด้านขวน้ำไหลลงมี Effective stress เพิ่มขึ้น Shear strength เพิ่มขึ้น
- ด้านเข้าน้ำไหลขึ้นมี Effective stress ลดลง Shear strength ลดลง
- J = upward seepage force
- S = downward gravity force

$$S = (\gamma_t - \gamma_w) \cdot V$$

ถ้า Effective stress เป็นศูนย์ ($S = J$) เมื่อดินจะไม่มีการแตกกันทำให้ดินมีคุณสมบัติเหมือนของเหลว ทำให้เห็นน้ำพุ่งขึ้นมาเหมือนน้ำเดือด

Hydraulic gradient ที่สภาวะนี้เรียกว่า critical gradient (i_c) คำนวณได้จาก

$$S = J$$

$$(\gamma_t - \gamma_w) \cdot V = \gamma_w i_c V$$

$$i_c = \frac{\gamma_t - \gamma_w}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e}$$

ถ้า Hydraulic gradient มีค่ามากกว่า i_c จะทำให้เกิด Boiling ขึ้นค่า i_c จะขึ้นอยู่กับ ความหนาแน่นของเม็ดดิน และการเรียงตัวของดิน

ถ้าเม็ดดินที่มีความหนาแน่นต่ำและหยาบ i_c ประมาณ 0.6

ถ้าเม็ดดินที่มีความหนาแน่นสูงและแน่น i_c ประมาณ 1.0

การหา Factor of safety against boiling หาได้จากการศึกษา Block สุดท้ายของ Flow net ในด้านที่น้ำไหลออกโดย

Head loss = Δh

ความยาวของ Block = Δl

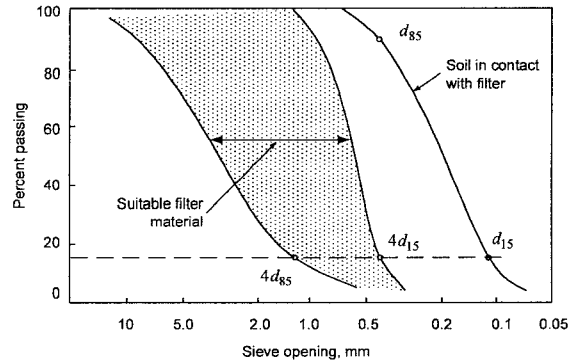
ดังนั้น hydraulic gradient ด้านที่น้ำไหลออกคือ

$$i_{ex} = \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

$$F_{boiling} = \frac{i_c}{i_{ex}}$$

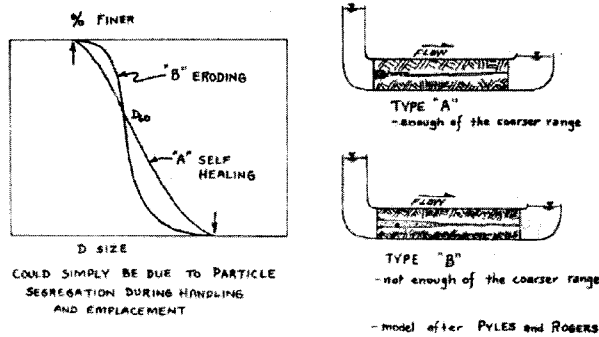
5.12.3 Piping adjacent to sheet piles

Terzaghi (1929) กล่าวว่าถ้าเมื่อใดที่แรงดันน้ำเนื่องจากการไหลมีค่าเท่ากับแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกกระทำต่อดิน น้ำที่ไหลผ่านดินจะมีความเร็วสูงขึ้นเนื่องจากเม็ดดินถูกแรงดันให้ลอยขึ้นและแยกจากกัน (จาก "Background on failure of Teton Dam, โดย Roger D.) เกณฑ์ในการเลือกวัสดุกรอง (Filtration Criteria) ได้ค้นพบโดย Terzaghi ในปี ค.ศ. 1922 และได้มีการทดลองเพิ่มเติมโดย Bureaus of reclamation, ซึ่งได้เผยแพร่ในปี 1947 หน้าที่ของ Filter คือการป้องกันการสูญเสียเม็ดดินไปกับการไหลของน้ำที่เกิดจากความแตกต่างของ Hydraulic head (การสูญเสียเม็ดดินไปกับน้ำนี้เรียกว่า Hydraulic piping)



รูปที่ 5.29

Terzaghi นิยาม Critical hydraulic gradient ว่าเป็นค่าแรงดันน้ำที่เท่ากับอัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงประสิทธิผลกับแรงดันน้ำในดิน เมื่ออัตราส่วนเท่ากับ 1.0 หน่วยแรงประสิทธิผลจะเป็นศูนย์เนื่องจากแรงดันเนื่องจากการไหลมีค่าเท่ากับน้ำหนักของดินที่จมน้ำ ดังนั้นเม็ดดินจะลอยขึ้นและกลายเป็นสารแขวนลอยและถูกพัดพาไปกับน้ำ กระบวนการนี้เรียกว่า Hydraulic piping



Lang term seepage questions
 - Types of adsorbed ions in pore water of core.
 - chemistry of reservoir water
 osmotic gradients \Rightarrow increased erosion & dispersion

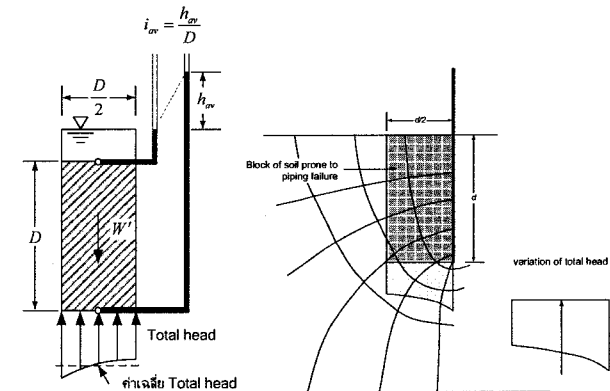
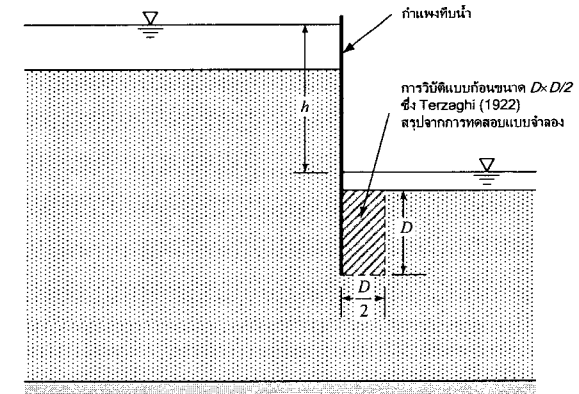
รูปที่ 5.30 จงอธิบายต่อ - ใช้ในการอธิบายการถูกกัดเซาะของดินเนื่องจาก Hydraulic failure ได้

การวิบัติเนื่องจาก piping เกิดเนื่องจากสาเหตุที่เป็นลำดับดังนี้

- Soil grain moving apart

- Increase permeability
- Increase flow
- Quick condition
- Loss of strength
- Catastrophic collapse

พิจารณาส่วนของ Flow net ด้านที่น้ำไหลออก ซึ่ง Terzaghi ได้ทดสอบแบบจำลองหลายๆ แบบแล้วสรุปว่า Piping จะเกิดในบริเวณที่มีความกว้าง $D/2$ และ ลึก D ดังรูป



รูปที่ 5.31

น้ำหนักของดินใน Block ที่อยู่เหนือปลาย Sheet pile, W คือ

$$W = \gamma_{sub}(d)\left(\frac{d}{2}\right)$$

$$= \frac{1}{2}\gamma_{sub}(d)^2$$

แรงดันน้ำที่กระทำต่อ Block

$$F_{water} = \gamma_w \cdot d \cdot \frac{d}{2} + \gamma_w i \cdot d \cdot \frac{d}{2}$$

Piping จะเกิดเมื่อ Resultant force = 0

$$\frac{1}{2}\gamma_{sub}(d)^2 = \gamma_w \cdot d \cdot \frac{d}{2} + \gamma_w i \cdot d \cdot \frac{d}{2}$$

จะได้

$$i = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{\gamma_w} = \frac{G_x - 1}{1 + e} = i_c$$

ดังนั้น Factor of safety against piping คือ

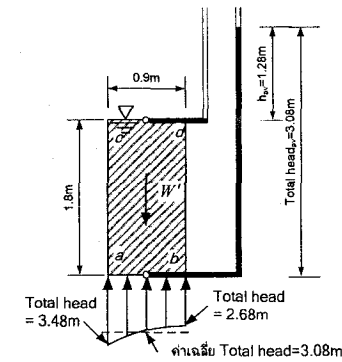
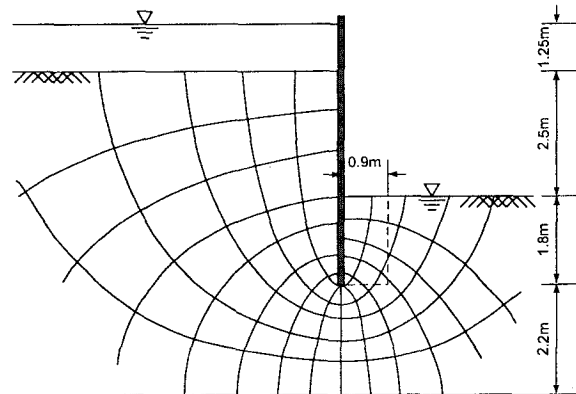
$$FS_{piping} = \frac{i_c}{i_m}$$

เมื่อ

$$i_m = \text{Mean hydraulic gradient } i_m = \frac{h_m}{d}$$

h_m = Total head เฉลี่ยที่ความลึก d (ดังรูป)

ตัวอย่าง จงคำนวณ Factor of safety against piping ของ sheet pile ดังรูป

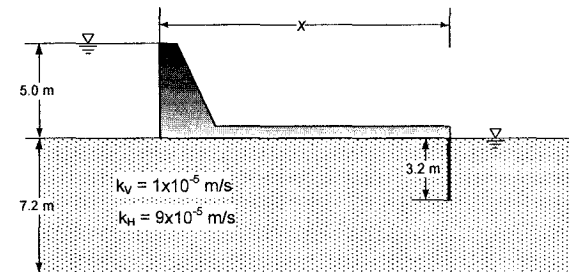


$$i_{av} = \frac{h_{av}}{D}$$

ตัวอย่าง ฝ่ายคอนกรีตก่อสร้างไว้บนชั้นทรายดังรูป

- a) จงคำนวณหาปริมาณการไหลของน้ำผ่านดินได้ฝ่ายนี้
- b) จงคำนวณหาแรงยกตัว (Uplift force) ที่กระทำต่อฝ่ายตัวนี้

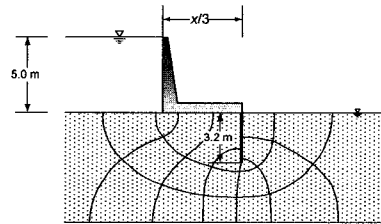
กำหนดให้: Coefficient of permeability ของทราย $k_H = 9 \times 10^{-5}$ m/s, $k_V = 1 \times 10^{-5}$ m/s



รูปที่ 5.32

เนื่องจากดินมีค่า k ไม่เท่ากันจึงต้องแปลง scale ในแนวอนด้วยสมการ

$$x_T = \sqrt{\left(\frac{k_V}{k_H}\right)}(x) = \frac{1}{3}(x)$$

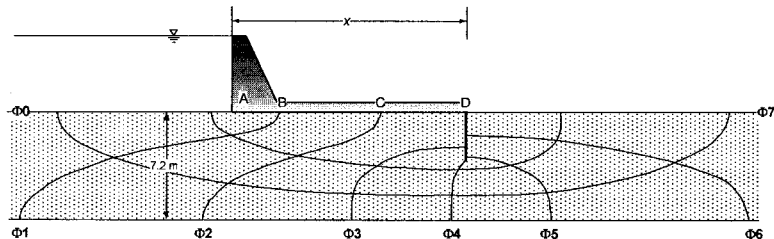


Transformed scale

รูปที่ 5.33

ส่วน Scale ในแนวตั้งไม่ต้องเปลี่ยนแปลงจะได้รูปโครงสร้างดังรูป จากนั้นเขียน Flow net ลงใน Transformed section โดยใช้วิธีปกติ

จากนั้นแปลง Flow net ที่ได้กลับมาเป็น True scale โดยขยาย Scale ในแนวราบให้เป็น 3 เท่า



True scale

รูปที่ 5.34

ค่า Permeability รวมคือ

$$k_{overall} = \sqrt{(k_v)(k_H)} = \sqrt{(1 \times 10^{-5})(9 \times 10^{-5})} = 3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

จะเห็นว่าในกรณีที่เป็น Anisotropic soil เส้น equipotential line จะตัดกับเส้น Flow line เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

Number of equipotential drops, $N_d = 7$

Number of flow channel, $N_f = 3$

$$q = (k_{overall}) \left(h \right) \left(\frac{N_f}{N_d} \right)$$

$$q = (3 \times 10^{-5}) \left(5 \right) \left(\frac{3}{7} \right) = 6.43 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s}$$

อัตราการไหลของน้ำผ่านได้ฝาย = 3.9 ลิตรต่อวินาที

Pressure ที่จุด A (Φ_0)

$$\text{(Total head)} \Phi_0 = \text{(Total head)} \Phi_0 - (H/N_d) * n$$

$$= (12.2) - \left(\frac{5.0}{7} \right) (0) = 12.2 \text{ m}$$

จาก

$$z_A = 7.2 \text{ m}$$

$$u_A = (12.2 - 7.2) * 9.81 = 49 \text{ kPa}$$

Pressure ที่จุด B (Φ_1)

$$\text{(Total head)} \Phi_1 = \text{(Total head)} \Phi_0 - (H/N_d) * n$$

$$= (12.2) - \left(\frac{5.0}{7} \right) (1) = 11.48 \text{ m}$$

$$z_B = 7.2 \text{ m}$$

$$u_B = (11.48 - 7.2) * 9.81 = 42 \text{ kPa}$$

Pressure ที่จุด C (Φ_2)

$$\text{(Total head)} \Phi_2 = \text{(Total head)} \Phi_0 - (H/N_d) * n$$

$$= (12.2) - \left(\frac{5.0}{7} \right) (2) = 10.77 \text{ m}$$

$$z_C = 7.2 \text{ m}$$

$$u_C = (10.77 - 7.2) * 9.81 = 35 \text{ kPa}$$

Pressure ที่จุด D ($\Phi_2 - \Phi_3$)

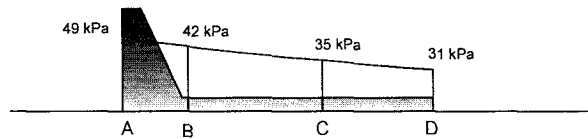
$$\text{(Total head) ระหว่าง } \Phi_2 \text{ ถึง } \Phi_3 = \text{(Total head)} \Phi_0 - (H/N_d) * n$$

$$= (12.2) - \left(\frac{5.0}{7} \right) (2.5) = 10.41 \text{ m}$$

$$z_D = 7.2 \text{ m}$$

$$u_D = (10.41 - 7.2) * 9.81 = 31 \text{ kPa}$$

นำมาเขียนเป็นแรงดันได้ฝายได้ดังรูป

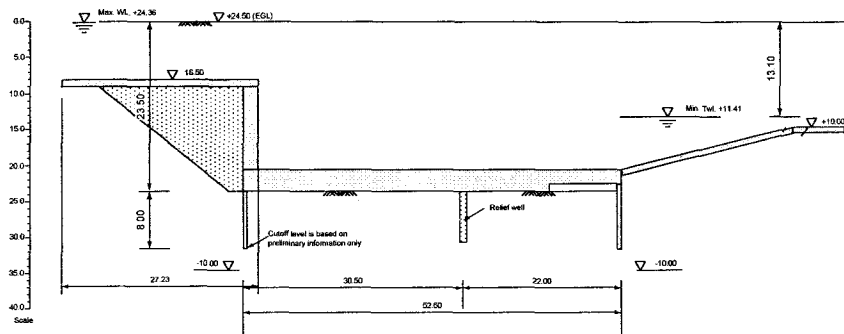


รูปที่ 5.35

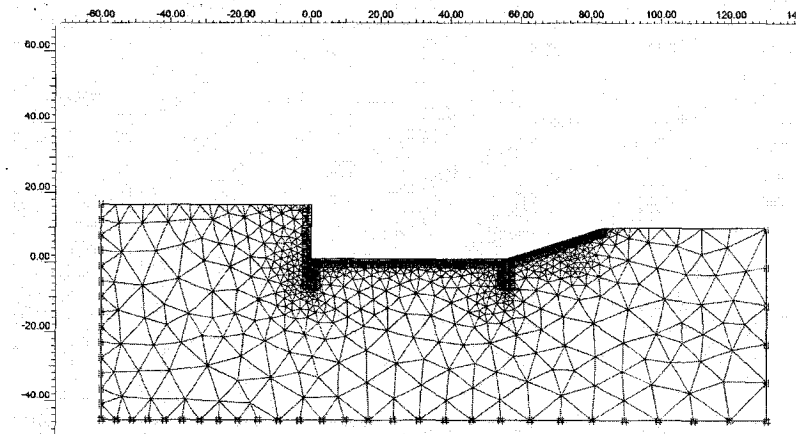
จากรูปจะเห็นได้ว่าแรงดันได้ฐานแปรผกผันกับระยะทางที่น้ำไหลผ่าน ดังนั้นถ้าต้องการที่จะลดแรงดันได้ ฝ่ายให้มีประสิทธิภาพจึงควรจะทำให้ช่องทางไหลยาวขึ้น

5.13 การใช้ Finite Element Method ในการคำนวณการไหลของน้ำ

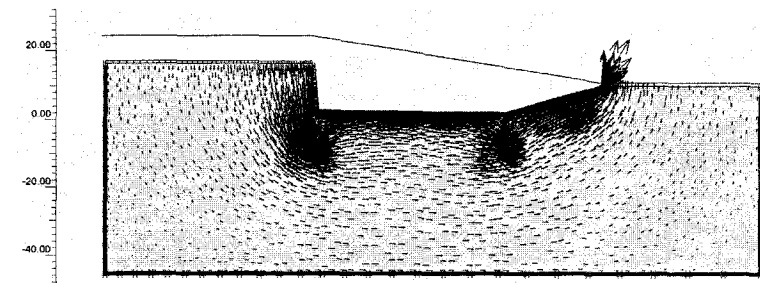
เราสามารถใช่วิธี Finite Element ในการคำนวณการไหลของน้ำได้ ดังตัวอย่าง



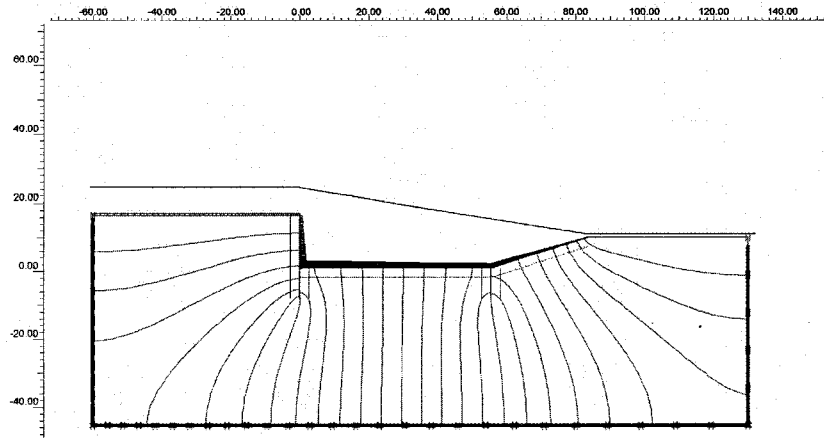
รูปที่ 5.36 โจทย์ปัญหาที่ต้องการการคำนวณ



รูปที่ 5.37 โครงข่ายที่ใช้สำหรับการคำนวณ



รูปที่ 5.38 ทิศทางการไหลที่ได้จากการคำนวณ



รูปที่ 5.39 เส้นแรงดันน้ำเท่ากัน

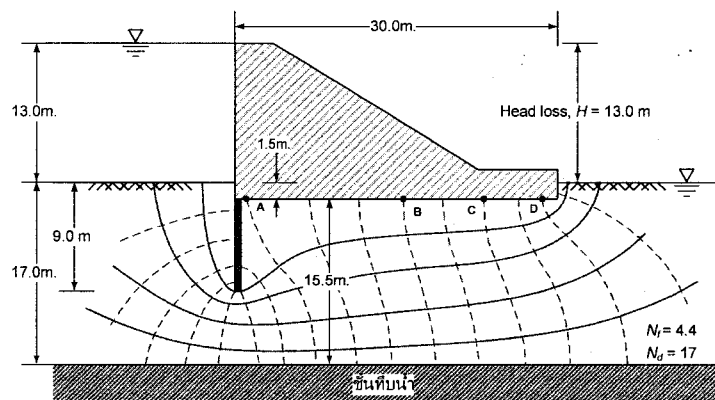
5.14 คำถามท้ายบท

1. จากโครงสร้างฝายซึ่งมีข่ายการไหล (flow net) ดังรูป จงคำนวณ

- a) อัตราการไหลของน้ำผ่านดินได้ฝายต่อความกว้างหนึ่งหน่วย
- b) แรงดันน้ำที่จุด A, B, C และ D

กำหนดให้: สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่าน $k = 5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ และ $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$

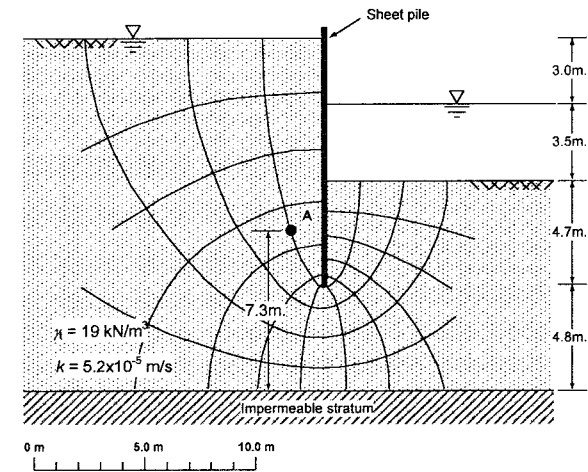
Midterm Exam 2-2548



รูปที่ 5.40

4. จากโครงสร้าง Sheet pile สำหรับงานขุดในทรายตามรูป จงคำนวณหา

- a) อัตราการไหลของน้ำต่อความกว้าง 1 หน่วย
- b) แรงดันน้ำที่จุด A
- c) Critical hydraulic gradient, i_c
- d) Factor of safety against boiling



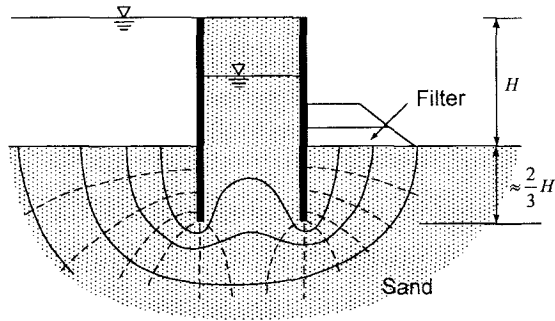
รูปที่ 5.41

1. จากโครงสร้างฝายซึ่งมีข่ายการไหล (flow net) ดังรูป จงคำนวณ

- a) อัตราการไหลของน้ำผ่านดินได้ฝายต่อความกว้างหนึ่งหน่วย
- b) แรงดันน้ำที่จุด (โปรดเติม)
- c) ระดับน้ำในทรายลมระหว่าง sheet pile

กำหนดให้: สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่าน $k = 5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ และ $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$

Midterm Exam 2-2548

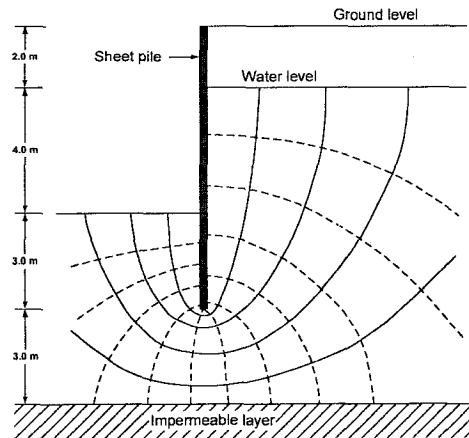


รูปที่ 5.42

จากรูป Flow net แสดงการไหลของน้ำรอบ ๆ Sheet pile

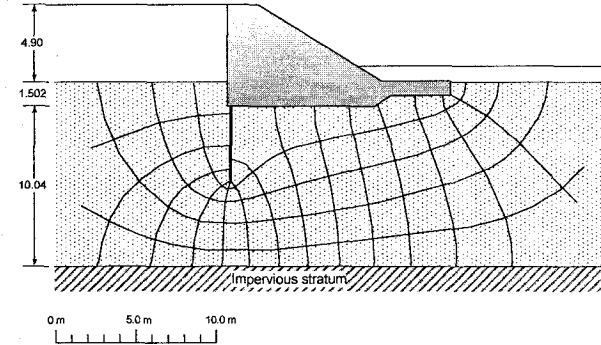
- a) จงคำนวณหาปริมาณการไหลของน้ำผ่าน Sheet pile นี้ต่อเมตร
- b) การกระจายของแรงดันน้ำต่อ sheet pile
- c) Factor of safety against boiling และ heaving

กำหนดให้: Coefficient of permeability ของทราย $k = 3 \times 10^{-5}$ m/s, $G_s = 2.65$, $e = 0.6$



รูปที่ 5.43

จงคำนวณแรงดันน้ำใต้ผิวดังรูป พร้อมทั้งคำนวณอัตราการไหลของน้ำผ่านผาย $k = 5 \times 10^{-5}$ m/s และ $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$



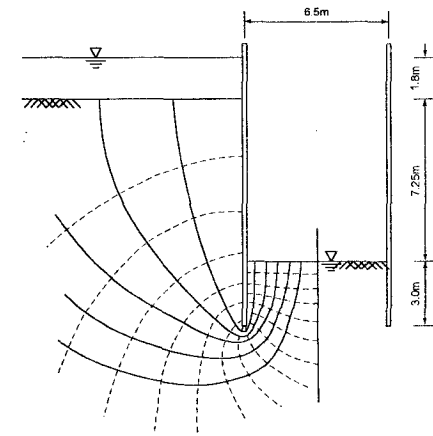
รูปที่ 5.44

Fig. shows the cross-section of a long cofferdam into which the flow can be considered two-dimensional. Sketch the flow net (to the right of the center line only) for this situation. The base of the soil stratum is at a considerable depth. Determine the seepage into the cofferdam (per meter run) if the water level inside is maintained at excavated ground level. The coefficient of permeability of the soil is 0.015 m/s in every direction.

Using the flow net, determine the distribution of water pressure (expressed as meters head of water) both on the outside and inside of the sheet piling and indicate the values on the left hand part of the drawing.

Comment on the stability of the proposed structure. (ICE)

B.H.C. Sutton, Solving Problem in Soil Mechanics,



รูปที่ 5.45

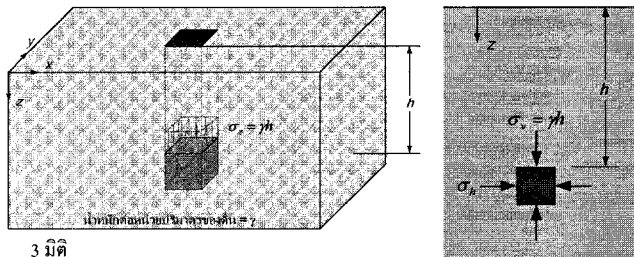
6 หน่วยแรงในมวลดิน

6.1 วัตถุประสงค์

ดินเป็นวัสดุที่แตกต่างจากวัสดุก่อสร้างอื่นๆ เช่น คอนกรีตหรือเหล็ก เนื่องจากดินเป็นวัสดุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ อีกทั้งดินประกอบไปด้วยเม็ดดิน ก๊าซ และน้ำ ...เขียนต่อภายหลัง

หน่วยแรงในดินแบ่งได้เป็นสองประเภทคือ

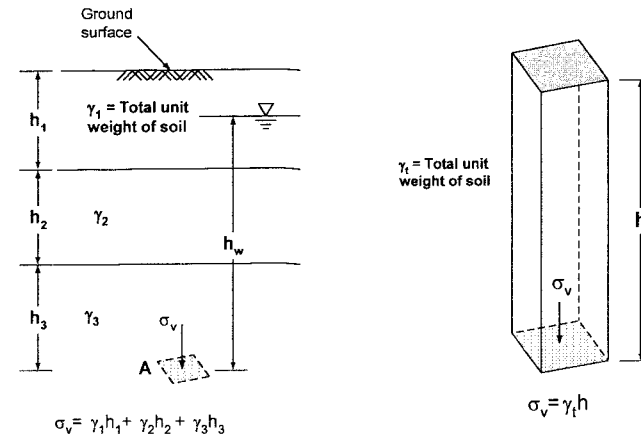
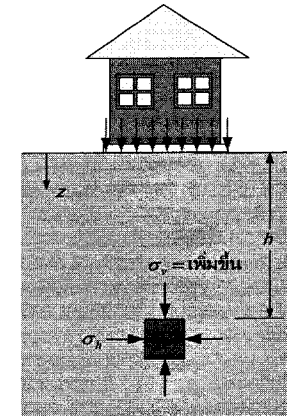
- หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักกดทับของดิน (overburden pressure)



3 มิติ

รูปที่ 6.1

- หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก (applied load)



รูปที่ 6.2 การคำนวณหาหน่วยแรงในดินเนื่องจากน้ำหนักกดทับ (Overburden pressure)

หน่วยแรงตั้งฉากในแนวตั้ง ณ. จุด A คำนวณได้จากสมการ

$$\sigma_v = \gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \gamma_3 h_3 \quad (6.1)$$

สมการทั่วไปของ Vertical total stress

$$\sigma_v = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \quad (6.2)$$

γ_i : หน่วยน้ำหนักรวมของดิน ณ. ชั้นที่ i

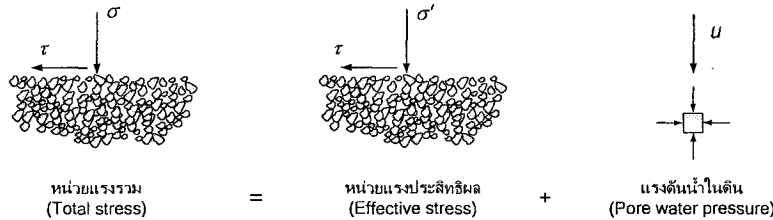
h_i ความหนาของดิน ณ. ชั้นที่ i
 n จำนวนชั้นดินเหนือจุดที่พิจารณา
 แรงดันน้ำในช่องว่างเม็ดดิน (Pore water pressure, u) จะเท่ากับความดัน Hydrostatic

$$u = \gamma_w h_w \quad (6.3)$$

γ_w หน่วยน้ำหนักของน้ำ
 h_w ระยะจากผิวน้ำใต้ดินถึงจุดที่พิจารณา

6.2 หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress)

หลักการของหน่วยแรงประสิทธิผลมีความสำคัญในวิชาปฐพีกลศาสตร์อย่างมาก เนื่องจากการเปลี่ยนรูปของดินจะขึ้นอยู่กับหน่วยแรงประสิทธิผลเท่านั้น หน่วยแรงประสิทธิผลจะใช้กับหน่วยแรงตั้งฉากเท่านั้นซึ่งจะไม่ได้ใช้กับหน่วยแรงเฉือน



รูปที่ 6.3 หลักการหน่วยแรงประสิทธิผล

หน่วยแรงในแนวตั้ง (Vertical stress)

σ_v หน่วยแรงรวม (Vertical total stress)

σ'_v หน่วยแรงประสิทธิผล (Vertical effective stress)

u ความดันน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (Pore water pressure)

ดังนั้น Effective stress เนื่องจากน้ำหนักกดทับของดินคำนวณได้จาก

$$\sigma'_v = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i - \gamma_w h_w \quad (6.4)$$

6.3 หน่วยแรงเฉือนในดิน

เนื่องจากน้ำไม่สามารถรับแรงเฉือนได้ ดังนั้น Total shear stress จึงเท่ากับ Effective shear stress

$$\tau = \tau' \quad (6.5)$$

τ หน่วยแรงเฉือนรวม (Total stress)

τ' หน่วยแรงเฉือนประสิทธิผล (Effective stress)

Effective horizontal stress σ'_h เนื่องจากน้ำหนักกดทับของดินจะคำนวณได้จากสมการ

K_0 Coefficient of lateral earth pressure at rest

Total horizontal stress σ_h คำนวณได้จากสมการ

สำหรับหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งคำนวณได้จาก

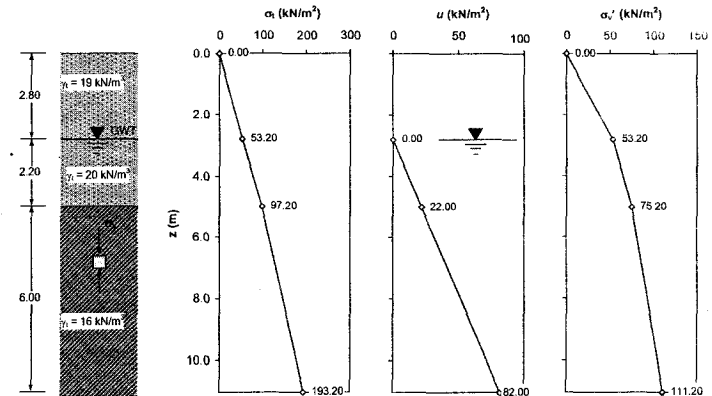
และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบคำนวณได้โดยการคูณหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งกับค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงด้านข้างในสภาพที่ดินไม่เคลื่อนที่ (Coefficient of lateral earth pressure at rest) ดังสมการที่

$$\sigma'_h = K_0 \sigma'_v \quad (6.6)$$

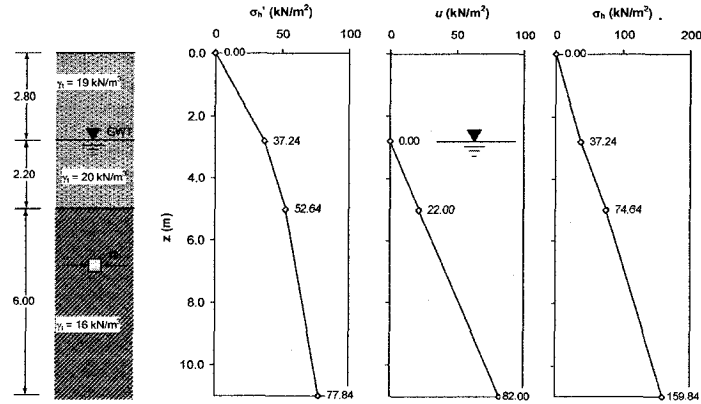
ตัวอย่างที่ 6.1 จากรูปชั้นดินจากการสำรวจเพื่อทำฐานรากของโครงการหนึ่งประกอบไปด้วยชั้นทรายหนา 5 เมตรถัดลงไปเป็นชั้นดินเหนียวหนา 13 เมตร ถ้าระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ระดับ 4.8 เมตรจากผิวดินจงเขียนแนวแสดงหน่วยแรงดังต่อไปนี้

- a) หน่วยแรงรวมในแนวตั้ง
- b) หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง
- c) หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ
- d) หน่วยแรงรวมในแนวราบ
- e) แรงดันน้ำในดิน

กำหนดให้ $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$ และ $K_0 = 0.7$



รูปที่ 6.4 เส้นแนวของหน่วยแรงรวมและหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง



รูปที่ 6.5 เส้นแนวของหน่วยแรงรวมและหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวนอน

6.4 ผลเนื่องจาก capillary

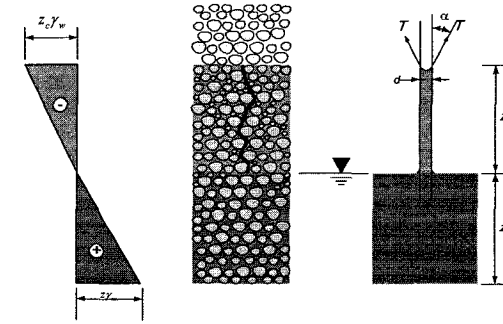
เราได้ทราบมาแล้วว่าดินประกอบไปด้วยเม็ดดินซึ่งไม่ประสานเป็นเนื้อเดียวกันดังนั้นจึงมีช่องว่างระหว่างเม็ดดินซึ่งช่องว่างระหว่างเม็ดดินนี้อาจจะมีน้ำบรรจุอยู่ในกรณีที่ดินอยู่ที่ระดับน้ำใต้ดิน สำหรับดินที่อยู่ในบริเวณผิวของระดับน้ำใต้ดินดินยังคงมีน้ำบรรจุอยู่ในช่องว่าง ปรากฏการณ์นี้อธิบายได้โดยใช้หลักการทางฟิสิกส์เกี่ยวกับปรากฏการณ์แคปิลารี นั่นคือเมื่อมีหลอดขนาดเล็กจุ่มลงในน้ำ แรงตึงผิวของน้ำจะดูดน้ำในท่อให้มีระดับน้ำสูงกว่าระดับน้ำที่หลอดจุ่มลงไป ซึ่งเราสามารถอธิบายพฤติกรรมนี้ในดินได้โดยคิดถึงสมดุลของแรงตึงผิวของน้ำ T กับน้ำหนักของน้ำที่ถูกยกระดับขึ้นไปเป็นระยะ z_c ดังสมการที่

$$Z_c = \frac{4T \cos \alpha}{\gamma_w d} \tag{6.7}$$

ถ้าเราสมมุติให้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อมีขนาดเท่ากับขนาดช่องว่างในเม็ดดินจะได้สมการที่

$$Z_c \propto \frac{1}{d} \tag{6.8}$$

จากสมการที่จะเห็นได้ว่าถ้าช่องว่างในดินมีขนาดเล็กจะทำให้ช่องว่างในดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินมีน้ำบรรจุอยู่เต็ม (ดินอิมตัวด้วยน้ำ) ดังนั้นดินทรายละเอียดซึ่งมีขนาดช่องว่างเล็กกว่าดินทรายหยาบจะมีระดับ Capillary zone สูงกว่า



รูปที่ 6.6 รูปจำลองการเกิด Capillary ในดิน

และการเกิด Capillary จะทำให้แรงดันน้ำในดินเป็นลบเนื่องจากน้ำจะถูกแรงตึงผิวดึง ดังนั้นหน่วยแรงประสิทธิผลใน capillary zone จะคำนวณได้จาก

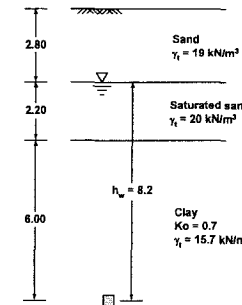
$$\sigma' = \sigma - (-\gamma_w z)$$

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

ตัวอย่างที่ 6.2 ชั้นดินของโครงการหนึ่งประกอบไปด้วยชั้นทรายหนา 5.0 เมตรถัดลงไปเป็นชั้นดินเหนียวหนา 13.0 เมตร และระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ระดับ 2.8 เมตรจากผิวดิน จงคำนวณหา

- a) หน่วยแรงรวมในแนวตั้ง (vertical total stress)
- b) หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (vertical effective stress)
- c) หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวนอน (horizontal effective stress)
- d) หน่วยแรงรวมในแนวนอน (horizontal total stress)

ที่ความลึก 11.0 เมตรจากผิวดิน



a) Vertical total stress

$$\sigma_v = \sum \gamma_i h_i$$

$$\sigma_v = (19)(2.8) + (20)(2.2) + (15.7)(6) = 191.4 \text{ kPa}$$

b) Vertical effective stress

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

$$\sigma'_v = 191.4 - 80.4 = 111 \text{ kPa}$$

Pore water pressure

$$\begin{aligned} u &= \gamma_w h_w \\ &= (9.8)(8.2) \\ &= 80.4 \text{ kPa} \end{aligned}$$

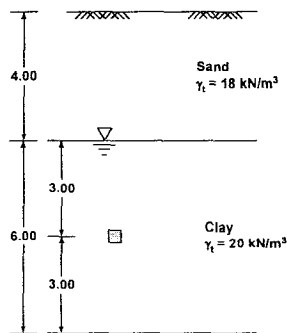
c) Horizontal effective stress

$$\begin{aligned} \sigma'_h &= K_o \sigma'_v \\ &= 0.7(111) \\ &= 77.7 \text{ kPa} \end{aligned}$$

d) Horizontal total stress

$$\begin{aligned} \sigma_h &= \sigma'_h + u \\ &= 77.7 + 80.4 \\ &= 158.1 \text{ kPa} \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 6.3 ชั้นดิน ๗. โครงการหนึ่งประกอบด้วยชั้นดินทรายหนา 4 เมตรถัดลงไปเป็นชั้นดินเหนียวหนา 6 เมตร มีระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ระดับ 4.0 เมตรจากผิวดินและมีหน่วยน้ำหนักดังรูปจงคำนวณหา a) หน่วยแรงรวมในแนวตั้ง (Vertical total stress) และ b) หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Vertical effective stress) ที่จุดกึ่งกลางความหนาของชั้นดินเหนียว



a) Vertical total stress

$$\sigma_v = \sum \gamma_i h_i$$

$$\begin{aligned} \sigma_v &= 18(4) + 20(3) \\ &= 132 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Pore water pressure

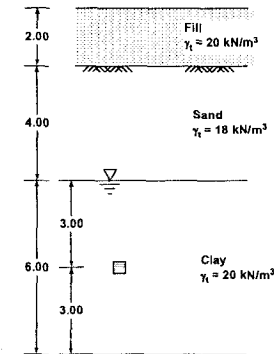
$$\begin{aligned} u &= \gamma_w h_w \\ &= 9.8(3.0) \\ &= 29.4 \text{ kPa} \end{aligned}$$

b) Vertical effective stress

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

$$\sigma'_v = 132 - 29.4 = 102.6 \text{ kPa}$$

ตัวอย่างที่ 6.4 จากตัวอย่าง Ex. 2 ถ้าน้ำทราย ($\gamma_t = 20 \text{ kN/m}^3$) มาถมเป็นพื้นที่กว้างหนา 2.0 เมตร จงคำนวณหา a) หน่วยแรงรวมในแนวตั้ง (Vertical total stress) และ b) หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Vertical effective stress) ที่จุดกึ่งกลางความหนาของชั้นดินเหนียว ณ. เวลาผ่านไปนานมากจนความดันน้ำอยู่ในสภาพ Hydrostatic และยังอยู่ที่ระดับเดิม



ระดับน้ำอยู่ในสภาพ Hydrostatic หมายความว่าไม่มีแรงดันน้ำส่วนเกินเกิดขึ้นในดินเหนียว ดังนั้นจึงคำนวณโดยใช้สมการที่ใช้คำนวณหา Effective stress ได้ตามปกติ เนื่องจากถมดินเป็นบริเวณกว้างหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นจึงเท่ากับ $h(\gamma_t)_{fill}$

a) Vertical total stress

$$\sigma_v = \sum \gamma_i h_i$$

$$\sigma_v = (20)(2) + (18)(4) + (20)(3) = 172 \text{ kPa}$$

Pore water pressure

$$u = \gamma_w h_w$$

$$u = (9.8)(3.0) = 29.4 kPa$$

b) Vertical effective stress

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

$$\sigma'_v = 172 - 29.4 = 142.6 kPa$$

6.5 หน่วยแรงในดินเนื่องจากแรงกระทำจากภายนอก (Applied load)

การคำนวณในปัจจุบันจะแบ่งเป็นสองประเภทใหญ่ได้แก่

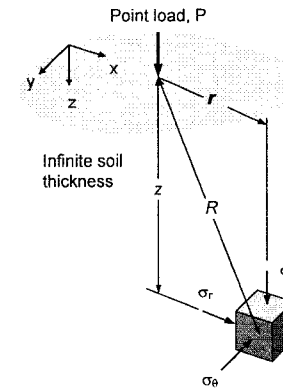
- คำนวณโดยใช้วิธี Analytical - คำนวณจาก close form solution ใช้ได้กับปัญหาที่ไม่มีความซับซ้อนใช้คำนวณหน่วยแรงถูกต้องได้ทุกจุด
- คำนวณโดยใช้วิธี Numerical - คำนวณโดยแบ่งดินเป็นอิเลเมนต์ย่อยๆ วิธีนี้สามารถคำนวณปัญหาในรูปแบบซับซ้อนได้ หน่วยแรงที่คำนวณได้เป็นการประมาณ

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในดินเนื่องจากแรงภายนอก (Stress from applied load) Boussinesq's equation

ในปี 1885 Boussinesq ได้เสนอสมการสำหรับหาหน่วยแรงในมวลดินที่เกิดจากแรงภายนอกกระทำที่ผิวดิน โดยมีสมมุติฐานดังนี้

- ดินเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous)
- มีพฤติกรรมเหมือนกันทุกทิศทาง (Isotropic) ตัวอย่างเช่น ไม่ว่าจะออกแรงกระทำในทิศทางใดจะแสดงผลเหมือนกันเสมอ
- ดินมีพฤติกรรมแบบ Linear elastic
- ดินมีความกว้างจำกัดแต่ความลึกไม่จำกัด (Semi-infinite)

6.5.1 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในดินเนื่องจากแรงกระทำเป็นจุด (Vertical stress at any point under point load)



รูปที่ 6.7

$$\sigma_v = \frac{3Pz^3}{2\pi R^5} = \frac{3P}{2\pi z^2 \left[1 + \left(\frac{r}{z} \right)^2 \right]^{5/2}} \quad (6.9)$$

ตัวอย่าง ให้แรง 1500 kN มากระทำเป็นจุดอยู่ที่ผิวดินเชิงรูปจวงคำนวณหาหน่วยแรงในแนวตั้งเนื่องจากแรงกระทำนี้ที่ความลึก 5.0 เมตรใต้จุดที่แรงกระทำ

วิธีทำ

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

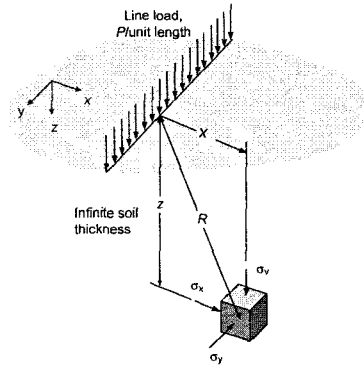
$$z = 5m$$

$$R = \sqrt{r^2 + z^2} = \sqrt{0^2 + 5^2} = 5m$$

แทนค่าในสมการ

$$\sigma_v = \frac{(3)(1500)(5^3)}{2\pi(5^5)} = 28.6 kPa$$

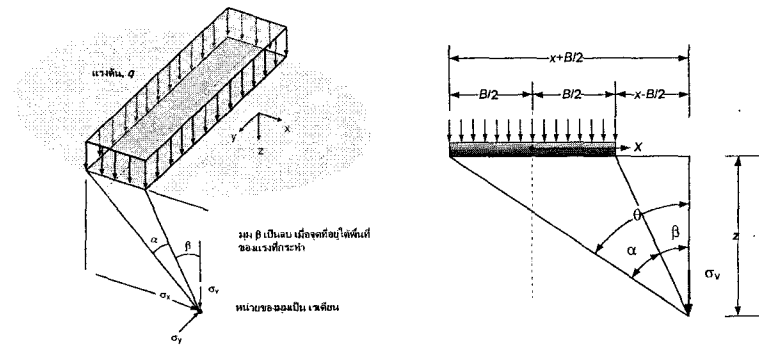
6.5.2 หน่วยแรงในแนวตั้งภายใต้หน้าคบรรทุกทุกแนว line load



รูปที่ 6.8

$$\sigma_v = \frac{2Pz^3}{\pi R^4} \quad (6.10)$$

6.5.3 หน่วยแรงในมวลดินเมื่อมีแรงกระทำแบบ Uniform strip pressure กระทำที่ผิวดิน



รูปที่ 6.9

$$\sigma_v = \frac{q}{\pi} [\alpha + \sin \alpha \cos(\alpha + 2\beta)] \quad (6.11)$$

$$\sigma_x = \frac{q}{\pi} [\alpha - \sin \alpha \cos(\alpha + 2\beta)] \quad (6.12)$$

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

โดยที่

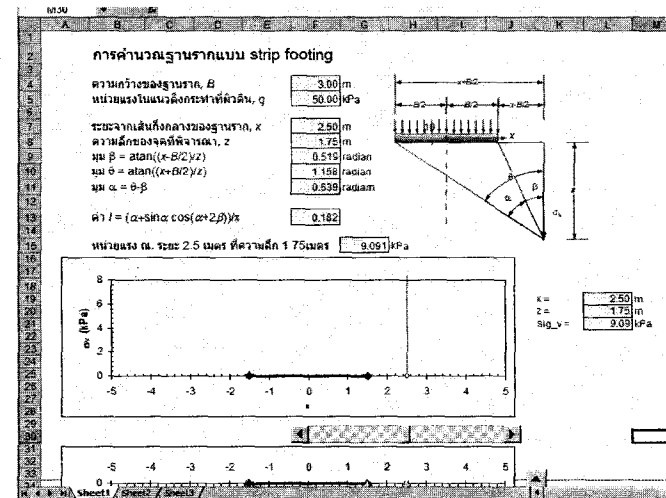
$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{x - B/2}{z} \right)$$

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

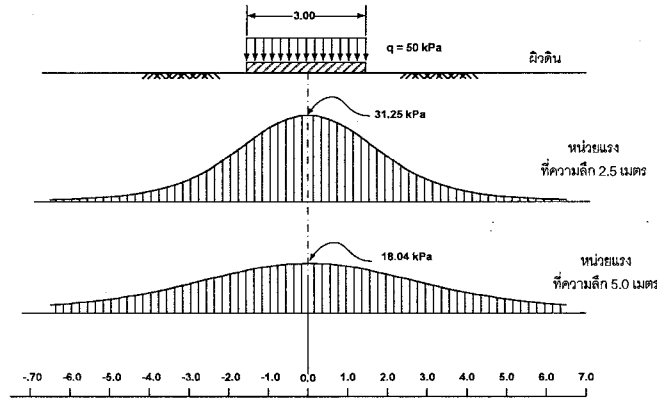
$$\beta = \theta - \alpha$$

ตัวอย่าง ฐานราก Strip footing กว้าง 3.0 เมตรทำให้มีแรงดัน 50 kPa กระทำที่ผิวดิน จงคำนวณหาการกระจายของหน่วยแรงในแนวตั้งเนื่องจากแรงกระทำที่ความลึก 2.5 และ 5.0 เมตร

เป็นวิธีการแทนค่าสมการอย่างตรงไปตรงมาไม่ยาก ซึ่งสามารถใช้โปรแกรมสเปรดชีทเช่น Excel ในการคำนวณได้ดังรูป



รูปที่ 6.10



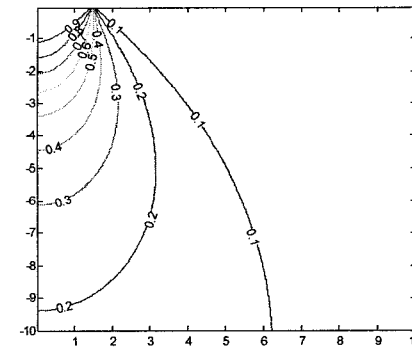
รูปที่ 6.11

หรือถ้าจะศึกษาถึงอิทธิพลของแรงดันที่ผิวดินทั้งหมดอาจจะเขียนเส้น contour โดยใช้โปรแกรมช่วยเช่น โปรแกรม MATLAB เป็นต้น

```
%plot principle stress contour under a strip footing
% by Pornpot Tanseng, Suranaree university of technology
clear
%Input
B = 3;
q = 1;
% calculation
for runx = 1:200
for runz = 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);
```

รูปที่ 6.12



รูปที่ 6.13 ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงจะมีค่าแตกต่างจากหน่วยแรงที่ได้จากสมการของ Boussinesq อยู่บ้างเนื่องจากสภาพดินจริงจะต่างจากสมมุติฐานคือ

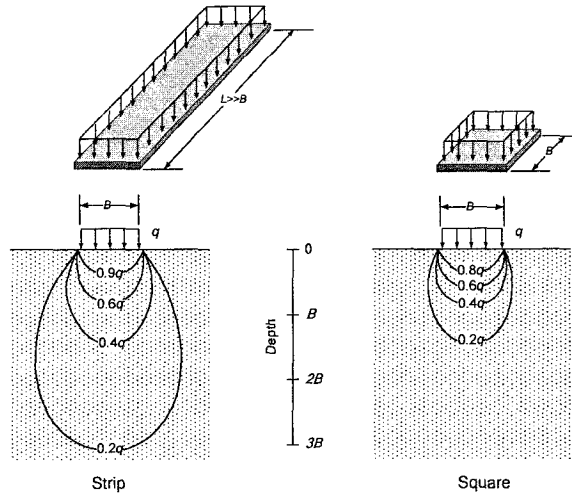
- มีชั้นดินแข็งอยู่ใต้ชั้นดิน
- ดินไม่ Homogeneous ดินส่วนใหญ่จะมี Stiffness เพิ่มขึ้นตามความลึก
- ดินไม่มีคุณสมบัติ Isotropic เพราะดิน Over consolidated clay จะมี Stiffness ในแนวราบมากกว่าในแนวตั้ง
- ดินบางชนิดไม่มีคุณสมบัติ Linear Elastic

สมการของ Boussinesq น้ำหนักจะกระทำที่ผิวดินแต่ฐานรากทั่วไปจะวางอยู่ใต้ผิวดิน ถ้าจะใช้สมการของ Boussinesq หาหน่วยแรงในมวลดินก็สามารถสมมุติให้ระดับดินอยู่ตรงระดับฐานราก และน้ำหนักกระจายจะเป็น Net applied pressure, qnet โดยที่

$$Q_{net} = \text{Gross applied pressure} - \text{pressure of soil}$$

6.5.4 หน่วยแรงในดินในรูปของกะเปาะแรงดัน (Bulb of pressure)

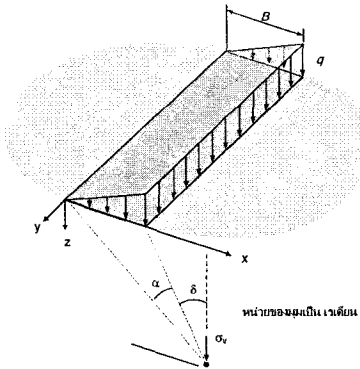
ใช้สมการของ Boussinesq คำนวณหาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในมวลดิน ณ จุดต่างๆ แล้วเขียน Contour line จะได้เส้นดังรูป ซึ่งเรียกว่า Bulb of pressure



รูปที่ 6.14

6.5.5 หน่วยแรงในมวลดินใต้หน่วยแรงกระทำแบบสามเหลี่ยม (Linearly increased load)

เมื่อมีแรงดันกระทำที่ผิวดินเป็นรูปสามเหลี่ยมโดยแรงกระทำมีความยาวไม่จำกัด ในการคำนวณหน่วยแรงในมวลดินเนื่องจากแรงกระทำนี้คำนวณได้โดยคิดให้เป็น Strip load เสียก่อนแล้วจึงรวมผลของ Strip load เข้าด้วยกันโดยการ Integrate ตลอดความกว้าง B



รูปที่ 6.15

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจาก Strip load

$$d\sigma_v = \frac{2\left(\frac{q}{B}rdr\right)z^3}{\pi((x-r)^2 + z^2)^2}$$

เมื่อรวมผลของแถบย่อยเข้าด้วยกันด้วยการ Integrate ตลอดความกว้าง B

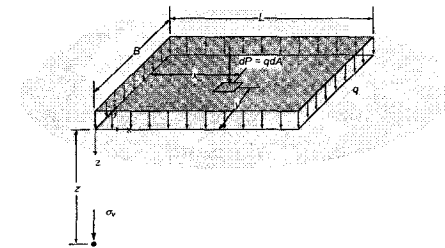
$$\sigma_v = \int_{r=0}^{r=B} d\sigma_v$$

$$\sigma_v = \int_0^B \frac{2\left(\frac{q}{B}rdr\right)z^3}{\pi((x-r)^2 + z^2)^2}$$

$$\sigma_v = \frac{q}{\pi} \left(\frac{x}{B} \alpha - \frac{\sin 2\delta}{2} \right)$$

6.5.6 หน่วยแรงในดินใต้ฐานรากอ่อนตัวรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Stress beneath a flexible rectangle)

สมการได้มาจากการคิดว่าหน่วยแรงที่เป็นจุดกระทำอยู่ทุกจุดบนกรอบสี่เหลี่ยมผืนผ้า B ยาว L และหน่วยแรงที่คำนวณได้จะอยู่ที่มุมใดมุมหนึ่งในสี่มุมของฐานรากเท่านั้น ดังนั้นวิธีนี้จะคำนวณได้เฉพาะหน่วยแรงที่มุมของฐานรากเท่านั้น ถ้าจะคำนวณหน่วยแรงที่จุดอื่นจะต้องให้วิธีช่วยซึ่งจะกล่าวต่อไป



รูปที่ 6.16

$$dP = qdA = q(dx dy)$$

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

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

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

สำหรับการอินทิเกรตสมการที่ นั้นมีความยุ่งยากแต่ก็มีผู้ทำการอินทิเกรตโดยคิดไว้ ในเทอมของ B และ L

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

โดยถ้า $m^2 + n^2 \geq m^2 n^2$

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

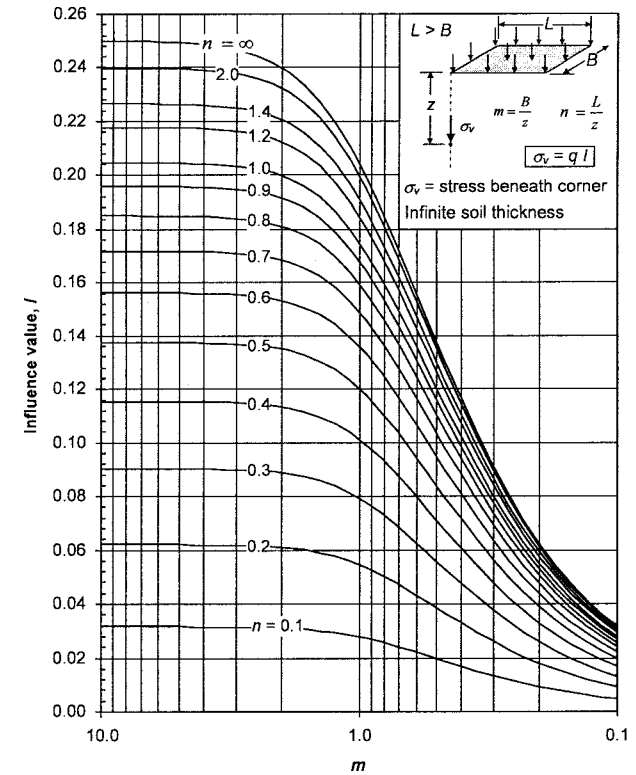
และถ้า $m^2 + n^2 < m^2 n^2$

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

ในการใช้สมการนี้ต้องระวังว่า ถ้า $m^2 + n^2 + 1 < m^2 n^2$ จะต้องบวกเทอม (\tan^{-1}) ด้วยค่า π และพึงสังเกตว่าค่ามุม \tan^{-1} มีหน่วยเป็นเรเดียน

ในอดีตกการคำนวณสมการที่ เป็นความยุ่งยากมากเนื่องจากสมการมีความยาวมาก จึงให้มีผู้คำนวณค่าและนำเสนอไว้ในรูปของกราฟ ซึ่งเราพบเห็นได้โดยทั่วไปในหนังสือวิชาปฐพีกลศาสตร์

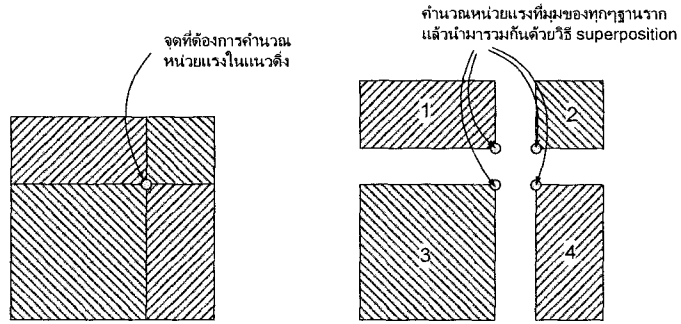
เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้ ค่า influence factor จะเขียนอยู่ในรูปของกราฟ โดยกราฟจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง influence factor กับ m และ n



รูปที่ 6.17

สำหรับในปัจจุบันเราสามารถเขียนโปรแกรมเพื่อสำหรับคำนวณค่า Influence factor ได้ซึ่งอาจจะเขียนลงเครื่องคิดเลขหรือลงในคอมพิวเตอร์ก็ได้ ซึ่งจะทำให้ได้ค่า I ที่ถูกต้องและสะดวกกว่าการเปิดจากกราฟ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการเปิดกราฟก็ยังเป็นวิธีที่ค่อนข้างสะดวกเมื่อเทียบกับการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ต้องย้ำเตือนกันอีกครั้งว่าหน่วยแรงที่คำนวณได้นั้นเป็นจุดที่อยู่ใต้มุมใดมุมหนึ่งของพื้นที่สี่เหลี่ยมเท่านั้น แต่ถ้าจุดที่ต้องการคำนวณไม่อยู่ใต้มุมของฐานรากจะต้องทำการแบ่งรูปฐานรากให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่อยๆซึ่งมีจุดมุมอยู่ที่ฐานราก ดังรูป จากนั้นนำมารวมกันโดยใช้หลักการของ Superposition



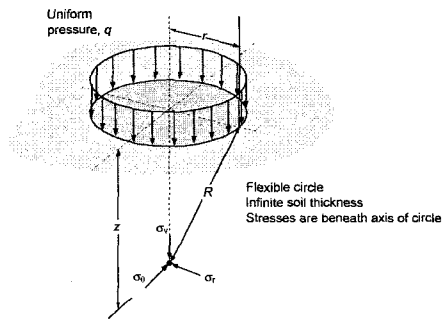
รูปที่ 6.18

ตัวอย่าง ต้องการก่อสร้างฐานรากค้ำรูปลงบนดินผิวดิน โดยฐานรากจะก่อให้เกิดแรงกดที่ผิวดินเป็น 40 kPa ถ้าได้ดินมีท่อฝังอยู่ที่ความลึก 4 เมตรจงคำนวณหาหน่วยแรงกดที่เกิดจากฐานรากบนผิวบนของท่อ สำหรับตัวอย่างนี้จะใช้ 2 วิธีในการคำนวณคือวิธี Newmark's chart และวิธีแบ่งเป็นรูปย่อยๆ

$$\sigma_v = qI_1 + qI_2 + qI_3 + qI_4 \quad (6.13)$$

6.5.7 หน่วยแรงในมวลดินใต้ฐานรากรูปวงกลม

วัตถุประสงค์ของฐานรากคือการกระจาย Load ให้กระจายตัวบนผิวดินถ้าเป็นกรณีของฐานรากวงกลมเราสามารถ ใช้ Boussinesq equation ในการคำนวณหาหน่วยแรงที่เกิดเนื่องจากฐานรากรูปวงกลมได้ สำหรับแรงกดในกรณีนี้ได้แก่หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนัก



รูปที่ 6.19

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

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

อินทิเกรตสมการข้างบนจะได้

$$\sigma_v = q \left[1 - \left\{ \frac{1}{1 + \left(\frac{r}{z} \right)^2} \right\}^{3/2} \right] \quad (6.14)$$

ถ้าจัดสมการใหม่ให้เป็น

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

$$I = \frac{\sigma_v}{q}$$

Example ฐานรากวงกลมแบบ Flexible มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เมตรมีแรงกระทำซึ่งทำให้เกิดแรงกดที่ผิวดินเป็น 150kPa จงคำนวณหาหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้น ณ. ความลึก 10 เมตรใต้ศูนย์กลางของฐานราก

$$\sigma_v = q \left[1 - \left\{ \frac{1}{1 + \left(\frac{r}{z} \right)^2} \right\}^{3/2} \right] \quad (6.15)$$

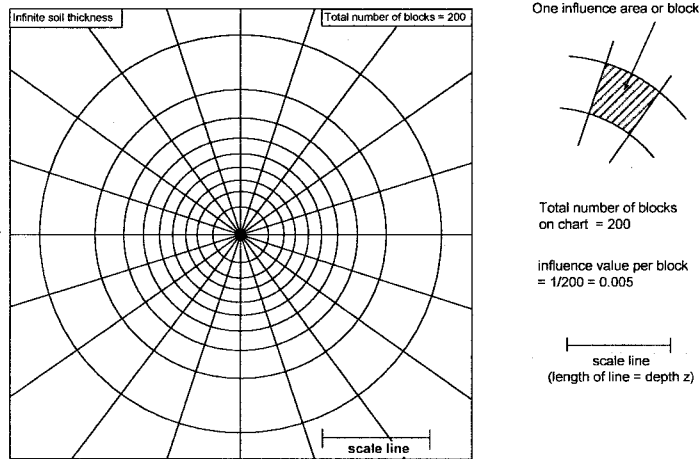
ด้วยการแทนค่าลงในสมการจะได้

$$\sigma_v = 150 \left[1 - \left\{ \frac{1}{1 + \left(\frac{5.0}{10.0} \right)^2} \right\}^{3/2} \right]$$

$$= 42.7 \text{ kPa} \quad (6.16)$$

6.6 หน่วยแรงในดินใต้ฐานรากอ่อนตัวด้วยวิธีการฟิก

Newmark (1942) ได้เสนอวิธีการหาหน่วยแรง ณ จุดใดๆ ของฐานรากรูปร่างใดก็ได้ใต้ฐานรากรูปใดๆ โดยที่ chart จะเป็นรูปวงกลมหลายๆวงที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน วงกลมเหล่านี้จะถูกแบ่งเป็นตารางด้วยเส้นรัศมี จากรูปจะเห็นว่าจำนวนวงกลมทั้งหมด 9 วง ส่วนวงที่ 10 จะไกลออกไปไม่มีที่สิ้นสุด สัดส่วนของ



รูปที่ 6.20 Newmark's chart

วิธี Graphical ในการหา Integration จากสมการข้างต้น การหาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ความลึก z ใต้ฐานรากแบบ Flexible ที่มีรูปร่างใด ๆ เนื่องจากแรงกระทำ q สามารถหาได้โดยใช้ Newmark's chart

วิธีการคำนวณโดยใช้ Newmark's chart มีขั้นตอนดังนี้

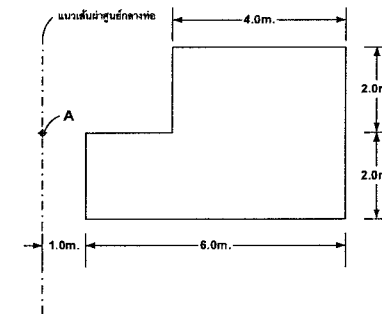
1. กำหนดสเกล โดยให้ระยะตามแนวตั้งจากใต้ฐานรากถึงจุดที่ต้องการหาหน่วยแรงเป็นระยะ z ให้เท่ากับความยาวของเส้น Scale line
2. วาดรูปฐานรากลงบน Newmark's chart โดยให้จุดที่ต้องการหาหน่วยแรงอยู่ที่จุดศูนย์กลางของ Newmark's chart
3. นับจำนวนช่องที่รูปฐานรากทับอยู่ (ส่วนที่ไม่เต็มช่องให้รวมกันโดยประมาณ)
4. หน่วยแรงในแนวตั้งที่เกิดขึ้นคำนวณได้จาก

$$\sigma_v = 0.005 \cdot N \cdot q$$

N = จำนวนช่องที่อยู่ภายใต้ขอบเขตของฐานราก

q = หน่วยแรงกระทำที่ผิวดิน

ตัวอย่าง ท่อฝังอยู่ที่ความลึก 4 เมตรถ้าต้องการสร้างฐานรากตั้งรูปโดยฐานรากจะมีแรงกดลงที่ผิวดินเป็น 40 kPa จงคำนวณหาหน่วยแรงกดในแนวตั้งบนท่อที่จุด A



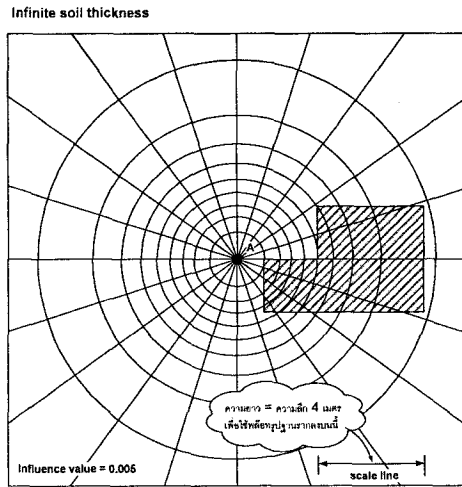
รูปที่ 6.21

ในการแก้ปัญหานี้สามารถทำได้หลายวิธีแต่ในที่นี้จะใช้วิธีการฟิก วิธี 'Newmark' chart และวิธีคำนวณโดยใช้สมการโดยตรง เพื่อเปรียบเทียบกัน

a) ขั้นตอนการทำโดยใช้ Newmark's chart

- ให้ความยาวของเส้น Scale line = ความลึกของจุดที่พิจารณา = 4.0 m
- เขียนรูปฐานรากลงบน Newmark's chart โดยใช้ Scale เป็นความยาวของเส้น Scale line ที่ได้เทียบไว้ จุดที่ต้องการคำนวณหา Vertical stress จะต้องอยู่บนจุดศูนย์กลางของวงกลมใน Chart
- นับจำนวนช่องที่รูปฐานรากทับอยู่โดยรวมช่องย่อย ๆ เข้าด้วยกันโดยประมาณ
- จากโจทย์จำนวนของ Influence area ที่โดนทับด้วยฐานรากคือ 21.5 ช่อง
- ดังนั้น Vertical stress คำนวณได้จาก

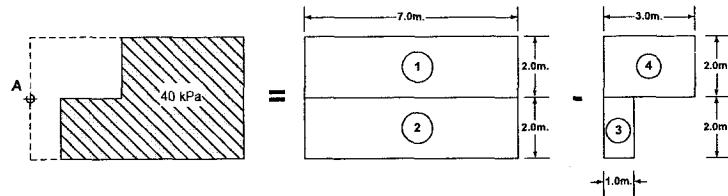
$$\begin{aligned} \sigma_v &= 0.005 Nq \\ &= 0.005(21.5)(40) \\ &= 4.3 \text{ kPa} \end{aligned}$$



รูปที่ 6.22

b) ขั้นตอนการทำโดยใช้ Influence factor

เนื่องจากวิธี Influence factor จะใช้ได้เฉพาะการคำนวณหา Vertical stress ที่มุมของฐานรากสี่เหลี่ยมมุมฉากเท่านั้น แต่โจทย์ต้องการให้คำนวณหา Vertical stress ที่จุด A ซึ่งไม่อยู่ที่มุมของฐานรากดังนั้นจึงต้องใช้ Method of superposition มาช่วยในการคำนวณดังรูป



รูปที่ 6.23

	B (m)	L (m)	Z/B	L/B	I
1	2.0	7.0	4.0/2.0=2	7.0/2.0=3.5	0.134
2	2.0	7.0	4.0/2.0=2	7.0/2.0=3.5	0.134
3	1.0	2.0	4.0/1.0=4	2.0/1.0=2	0.048
4	2.0	3.0	4.0/2.0=2	3.0/2.0=1.5	0.107

ด้วยวิธี superposition

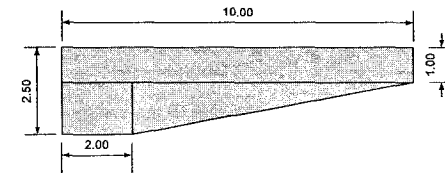
$$\begin{aligned} \Delta\sigma_v &= q(I_1 + I_2 - I_3 - I_4) \\ &= (40)(0.133 + 0.133 - 0.048 - 0.107) \\ &= 4.44 \text{ kPa} \end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่าคำตอบที่ได้จากวิธีใช้ Newmark's chart มีค่าใกล้เคียงกับวิธี superposition สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือการใช้ Newmark's chart เป็นการ integrate โดยใช้แผนภาพจึงมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการเสกกรุปลงบน Newmark's chart และความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการประมาณจำนวนช่อง ดังนั้นถ้าฐานรากมีรูปร่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก การคำนวณด้วยวิธี superposition จะเป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วกว่าวิธีใช้ Newmark's chart

ข้อแนะนำ เนื่องจากในปัจจุบันคอมพิวเตอร์ได้เข้ามามีบทบาทในการช่วยในการคำนวณทางวิศวกรรมเป็นอย่างมากดังนั้นในการคำนวณหาค่า influence factor จากสมการโดยตรงจึงทำได้ง่ายกว่า ซึ่งการคำนวณอาจทำได้โดยใช้โปรแกรมสเปรดชีท เช่น Excel เป็นต้นซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเหมือนกับวิธีกราฟิก และวิธี Newmark's chart

ตัวอย่างที่ 6.5 ตัวอย่างการคำนวณโดยใช้ Newmark's chart

ฐานรากรองรับอาคารมีขนาดดังรูป จงคำนวณหน่วยแรงในแนวตั้งที่ความลึก 4 เมตร ณ จุดศูนย์กลางของฐานราก โดยที่ฐานรากนี้ก่อให้เกิดหน่วยแรงบนดินเท่ากับ 200 kPa

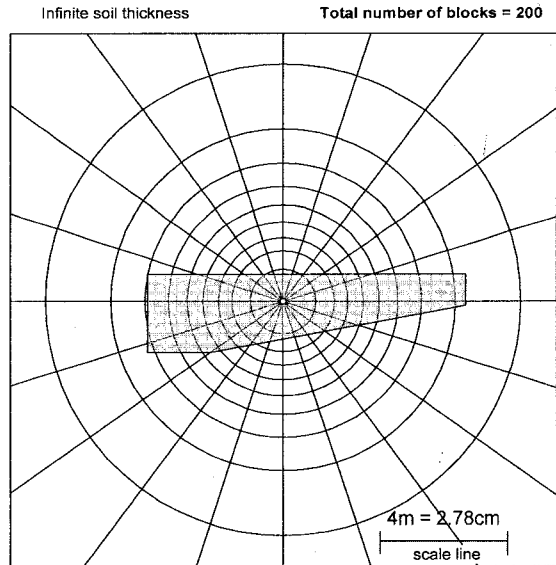


รูปที่ 6.24

แนวทางในการแก้ปัญหา เนื่องจากบางส่วนของฐานรากเป็นรูปที่ไม่เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังนั้นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วกว่าคือวิธีใช้ Newmark's chart ขั้นแรกต้องคำนวณจุดศูนย์กลางของฐานรากก่อน จากนั้นเสกกรุปลงบน chart โดยใช้ตาราง

ตารางที่ 6.1 ตารางแสดงการคำนวณเสกเพื่อใช้เขียนรูปลงบน chart

ด้าน	ความยาวจริง	ระยะที่เสกลงใน Newmark's chart
A	4.0 m	2.78cm
B	10.0 m	(10/4)(2.78)=6.95cm
C	1.0m	(1/4)(2.78)=0.70cm
D	2.0m	(2/4)(2.78)=1.39cm
E	2.5m	(2.5/4)(2.78)=1.74cm



รูปที่ 6.25

จากตารางเสกซ์ข้างต้นเรานำมาใช้เขียนรูปลงบน chart โดยให้จุดศูนย์กลางของรูปซึ่งเป็นจุดที่เราต้องการหาหน่วยแรงอยู่ตรงจุดศูนย์กลางของวงกลม จากนั้นก็นับจำนวนช่องที่ถูกคลุมไว้ด้วยรูปฐานราก ซึ่งจะนับได้ 61 ช่อง เราคำนวณค่า Influence ต่อหนึ่งช่องตารางได้เท่ากับ $(1/\text{จำนวนช่องทั้งหมดใน chart}) = 1/200 = 0.005$ สุดท้ายนำค่าที่หาได้แทนค่าในสมการจะได้

$$\begin{aligned} \sigma_v &= NI_N q \\ &= (61)(0.005)(200) \\ &= 61 \text{ kPa} \end{aligned}$$

6.7 Mohr's Circle สำหรับปรุพิกลศาสตร์

เมื่อดินรับหน่วยแรงกระทำจนถึงจุดหนึ่งดินจะเกิดการวิบัติเช่นเดียวกับวัสดุทางวิศวกรรมอื่นๆ ทั่วไป ในการวิบัติของดินเราสามารถตรวจสอบได้โดยตรวจสอบหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในดินว่าเกินกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้หรือไม่

ในวิชา Mechanics of materials เราจะพบกับวัสดุที่เป็น เหล็ก, ไม้, พลาสติก ซึ่งจะรับแรงดึงได้ดีและส่วนใหญ่จะรับแรงดึง แต่ในทางปรุพิกลศาสตร์ ดินรับแรงดึงได้น้อยมากในทางปฏิบัติเราจึงถือว่าดินรับแรงดึงไม่ได้

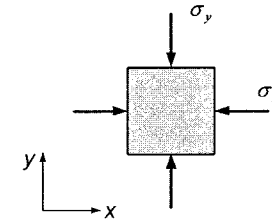
การใช้ Mohr circle คำนวณหา State of Stress ในวิชา Soil Mechanics มีหลายวิธี เช่นวิธี pole ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายและวิธีกราฟิกผสมผสานกับการคำนวณ ในที่นี้จะเสนอให้ใช้วิธีการที่ผสมผสานกับการคำนวณเพียงวิธีเดียว ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกในการนำไปใช้และไม่ยากในการทำความเข้าใจ

โดยปกติแล้วสิ่งที่สำคัญที่จะต้องทำการคำนวณหาคือ

- Major Principle Stress (หน่วยแรงหลักที่มากที่สุด)
- Minor Principle Stress (หน่วยแรงหลักที่น้อยที่สุด)
- Stress in Arbitrary Plane (สถานะของหน่วยแรงที่ระนาบใดๆ)

6.7.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องหมายและทิศทาง

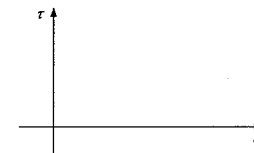
ดินเป็นวัสดุที่รับหน่วยแรงดึงได้น้อย ในทางปฏิบัติเราถือว่าดินรับแรงดึงไม่ได้เลยดังนั้นหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในดินจะเป็นหน่วยแรงอัด ในการคำนวณหน่วยแรงสูงสุดต่ำสุดหรือหน่วยแรงในระนาบใดๆที่จะกล่าวถึงในบทนี้จะใช้วิธี Mohr's circle ซึ่งผู้ที่สนใจที่จะศึกษาวิธีนี้โดยละเอียดสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากหนังสือกลศาสตร์วัสดุต่างๆ ทั่วไป ในที่นี้จะกลศาสตร์ของวัสดุจะกำหนดให้แรงดึงมีค่าเป็นบวกดังนั้นหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นในดินจะมีค่าเป็นลบ



รูปที่ 6.26 หน่วยแรงอัดมีค่าเป็นลบ

6.8 การคำนวณสถานะของหน่วยแรง (State of stress) โดยใช้ Mohr's circle

- ในเนื้อหาระดับนี้จะใช้วิธี Mohr's circle ในการคำนวณสถานะของหน่วยแรงในระนาบใดๆ หรือคำนวณสถานะของหน่วยแรงสูงสุด-ต่ำสุด



รูปที่ 6.27

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

6.8.1 Sign convention

หน่วยแรงอัด มีค่าเป็นบวก	หน่วยแรงเฉือนทวนเข็มนาฬิกา เป็นบวก	หน่วยแรงเฉือนตามเข็มนาฬิกา เป็นลบ

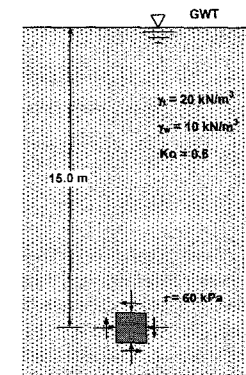
รูปที่ 6.28 Sign convention

สิ่งที่ต้องการหาโดยใช้ Mohr's circle

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

ตัวอย่าง จากชั้นดินครึ่งรูปไข่มีหน่วยแรงเฉือนเกิดขึ้นในดินเท่ากับ 60 kPa ดังรูปจงคำนวณ

- a) Principle stress b) State of stress ที่ระนาบทำมุม 45° กับแกน x (ทวนเข็มนาฬิกา)



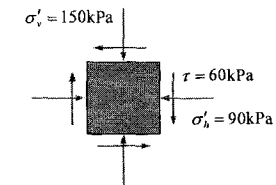
รูปที่ 6.29

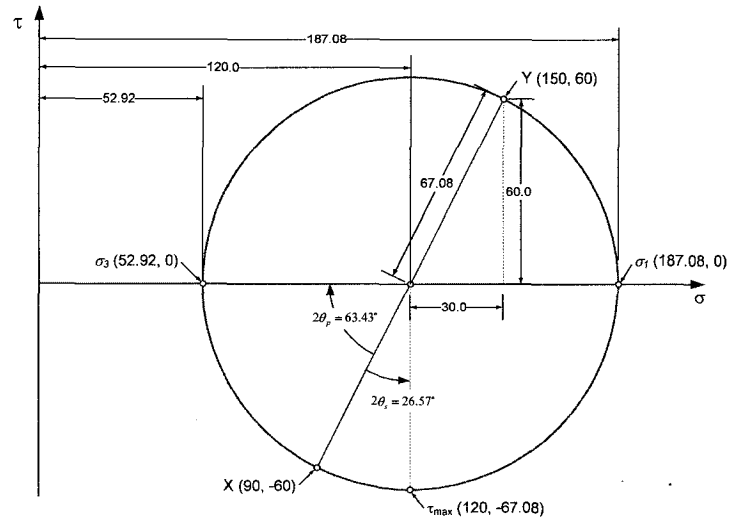
คำนวณ vertical effective stress

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

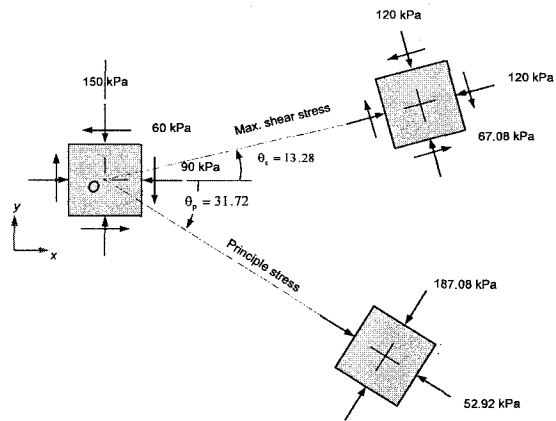
คำนวณ horizontal effective stress

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

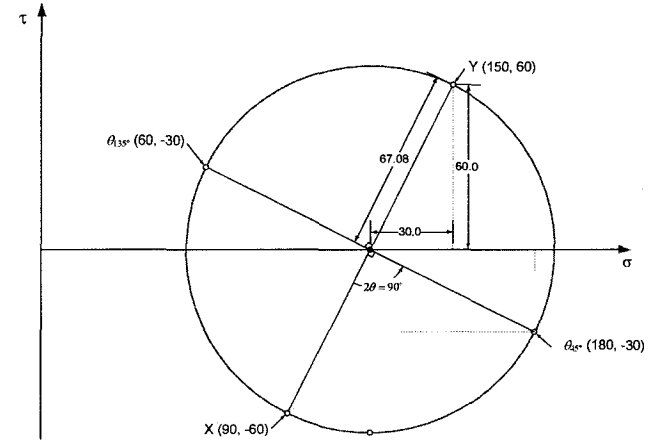
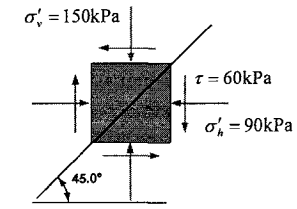




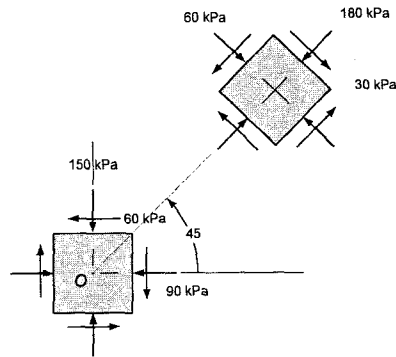
รูปที่ 6.30 a) Principle stress



รูปที่ 6.31 b) State of stress ที่ระนาบที่มุม 45° กับแกน x ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

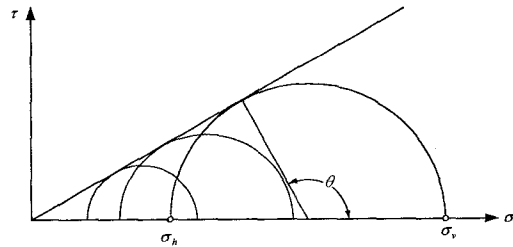


รูปที่ 6.32 State of stress ที่ระนาบที่มุม 45° กับแกน x ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

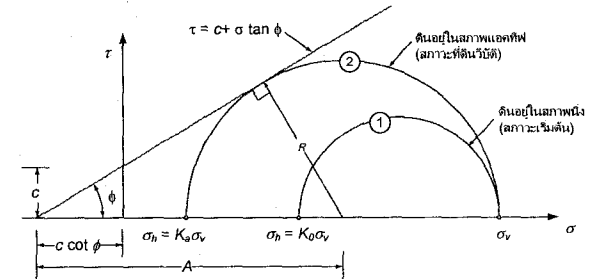
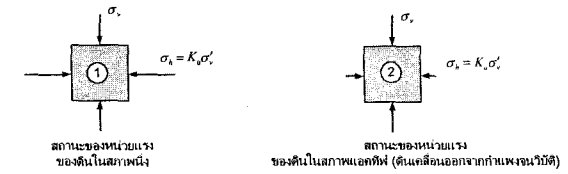


6.8.2 ตัวอย่างการนำความรู้เรื่อง Mohr's circle ไปประยุกต์ใช้

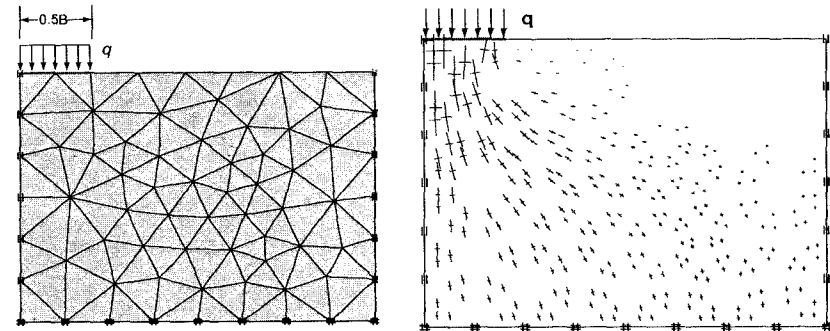
Mohr's circle จะใช้ในเรื่องกำลังรับแรงเฉือนของดิน



ใช้ในการพัฒนาสมการสำหรับแรงดันดินที่กระทำต่อกำแพงโดยทฤษฎีของ Rankine



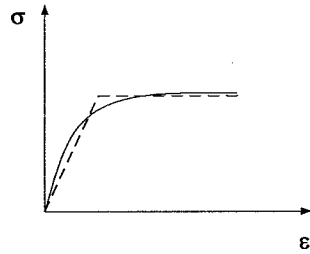
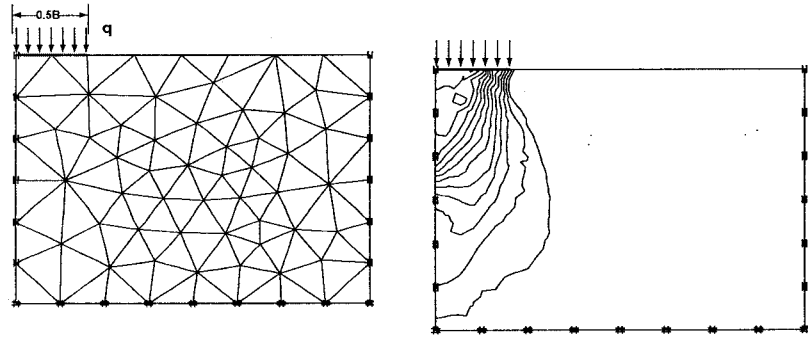
ใช้เขียนหน่วยแรงหลักซึ่งเกิดขึ้นในมวลดินเมื่อคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลข



6.9 การใช้วิธีเชิงตัวเลขในการคำนวณหาหน่วยแรง

ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีราคาถูกลงในขณะที่ประสิทธิภาพสูงขึ้นด้วย วิศวกรจึงมักจะนำวิธีเชิงตัวเลขมาใช้ในการคำนวณหาหน่วยแรงในมวลดิน วิธีที่นิยมใช้กันคือ Finite Element และ Finite Difference โดยแต่ละวิธีก็มีคุณสมบัติและข้อจำกัดแตกต่างกัน

การคำนวณหาหน่วยแรงได้ฐานรากในปัจจุบัน วิศวกรนิยมใช้ระบบวิธีเชิงตัวเลขกันมากขึ้น ในปัญหาที่ค่อนข้างซับซ้อน เนื่องจากสมการที่ใช้หาหน่วยแรงได้ฐานรากมีข้อสมมุติฐานหลายประการ ซึ่งอาจจะไม่ตรงกับสภาพความเป็นจริง ตัวอย่างเช่น สมมุติฐานที่ว่าดินมีคุณสมบัติยืดหยุ่น โดยไม่มีสภาพพลาสติก ซึ่งเป็นสมมุติฐานที่ตรงกันข้ามกับความเป็นจริงอย่างมากถ้าฐานรากรับแรงจนใกล้จะถึงจุดวิบัติ

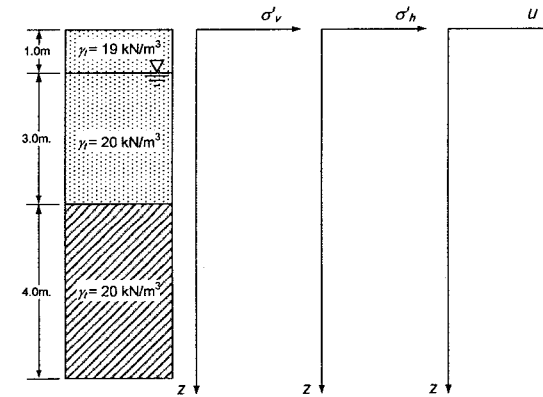


รูปที่ 6.33

จากรูปเป็นการคำนวณหน่วยแรงได้ฐานรากแบบยึดหยุ่น โดยใช้วิธี finite element และใช้แบบจำลอง Mohr-Coulomb ในการจำลองพฤติกรรมพลาสติกของดิน

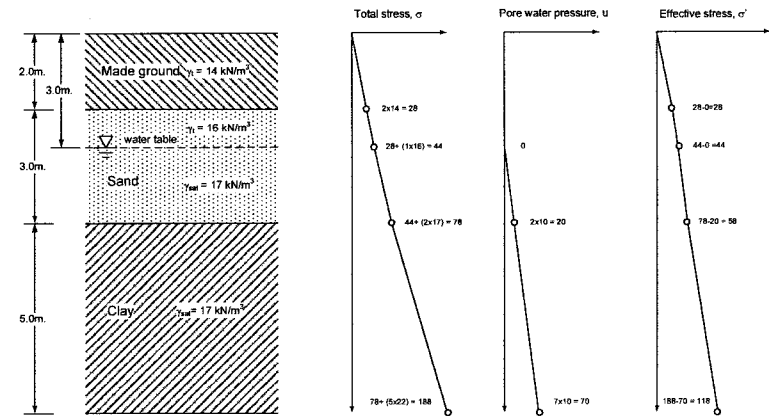
6.10 คำถามท้ายบท

1. จากข้อมูลชั้นดินดังรูปจงเขียนเส้นแสดงแนวของหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง แนวของหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ และแนวของแรงดันน้ำในดิน ในแกนที่กำหนดให้ (หน่วยน้ำหนักของน้ำ, $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$ และ $K_0 = 0.7$)



รูปที่ 6.34

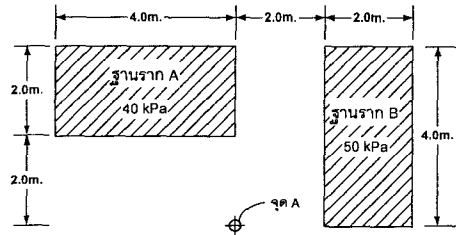
2. จงเขียนแรงประสิทธิผลที่สัมพันธ์กับความลึกของชั้นดินตามรูป ($\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$)



รูปที่ 6.35

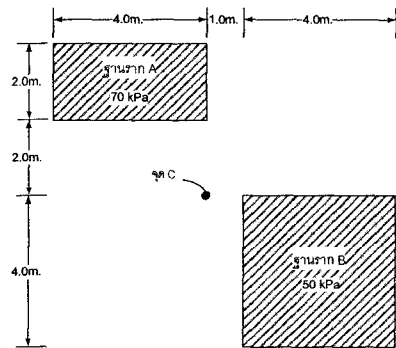
3. จากสถานะของหน่วยแรงดังรูปข้างล่าง จงคำนวณ a) หน่วยแรงหลัก b) หน่วยแรงตั้งฉากและหน่วยแรงเฉือนบนระนาบ AB

2. ฐานราก A ทำให้เกิดแรงดันกระทำที่ผิวดิน 40 kPa ส่วนฐานราก B ทำให้เกิดแรงดันที่ผิวดิน 50 kPa ดังรูป จงคำนวณหาหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นในแนวตั้งที่จุด A ที่ความลึก 4.0 เมตร (กำหนดให้ ฐานรากเป็นแบบ Flexible foundation) – Midterm Exam 2548



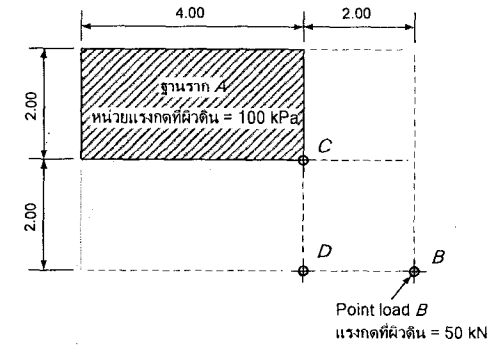
รูปที่ 6.36

3. ฐานรากแบบอ่อนตัว A ก่อให้เกิดแรงดันกระทำที่ผิวดิน 70 kN/m² และฐานรากแบบอ่อนตัว B ก่อให้เกิดแรงดันที่ผิวดิน 50 kN/m² ดังรูป จงคำนวณหาหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นในแนวตั้งที่จุด C ที่ความลึก 4.0 เมตร – Midterm Exam 2-2548



รูปที่ 6.37

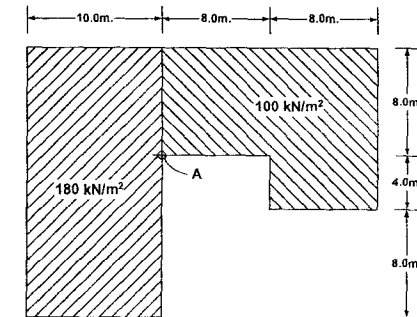
4. ฐานราก A มีขนาด กว้าง 2 เมตร ยาว 4 เมตร ก่อให้เกิดหน่วยแรงกดที่ผิวดินเท่ากับ 100 kPa และที่จุด B มีแรงกระทำที่ผิวดินแบบ Point load เท่ากับ 50 kN จงคำนวณหาหน่วยแรงในแนวตั้งที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากหน่วยแรงกดจากฐานราก A และแรงกด Point load B ที่จุด C และจุด D ที่ระดับความลึกจากผิวดิน 2 เมตร – Midterm Exam 1-2550



รูปที่ 6.38

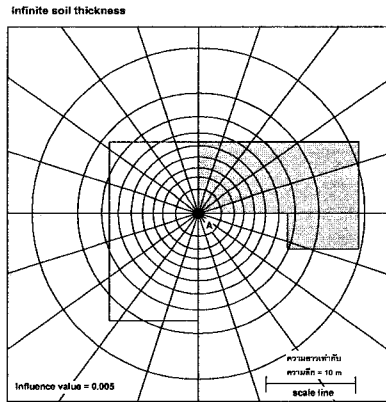
5. จงคำนวณหา Vertical stress ที่เกิดขึ้นที่ความลึก 10 เมตร เนื่องจากฐานรากดังรูปโดยใช้

- a) Newmark's chart
- b) Influence factor



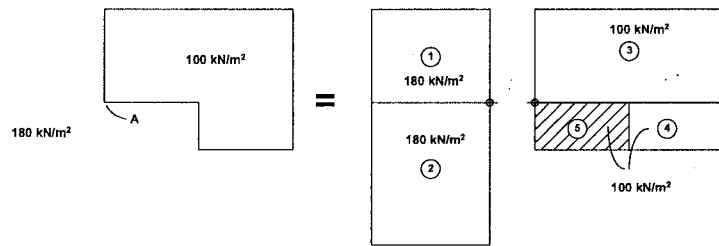
รูปที่ 6.39

แนวทางในการแก้ปัญหา
ใช้วิธี Newmark's chart



รูปที่ 6.40

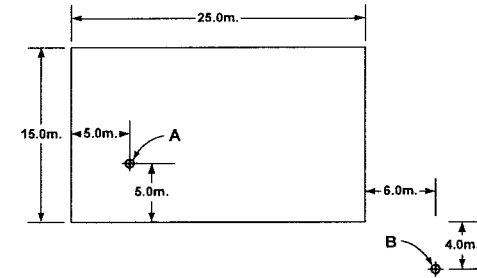
ใช้วิธีคำนวณหา influence factor



รูปที่ 6.41 ตรวจสอบด้วย

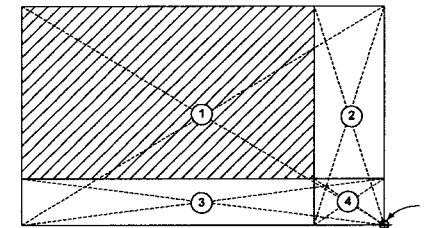
6. พังของฐานรากรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งถ่ายหน่วยแรงกดลงบนผิวดินเท่ากับ 120 kPa จงคำนวณหาหน่วยแรงในแนวตั้งที่เกิดขึ้นที่

- a) ความลึก 10 เมตร ได้จุด A
- b) ความลึก 5 เมตร ได้จุด B



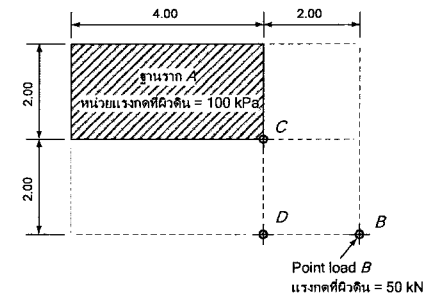
รูปที่ 6.42

แนวทางในการคิด: จะใช้ Newmark's chart หรือ Influence factor ก็ได้ ถ้าใช้ Influence factor จะต้องแบ่งฐานรากออกเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่อยๆ และคำนวณหาหน่วยแรงได้มุมของรูปย่อยๆ นั้นแล้วนำมารวมกันโดยใช้ Principle of superposition ดังรูป



$$\sigma_v = q \cdot I = q(I_1 - I_2 - I_3 + I_4)$$

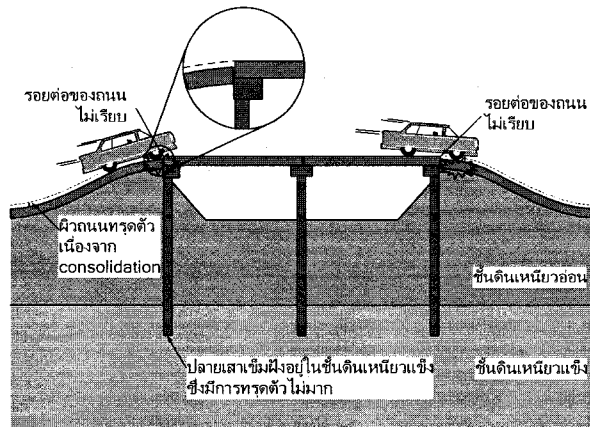
7. ฐานราก A มีขนาด กว้าง 2 เมตร ยาว 4 เมตร ก่อให้เกิดหน่วยแรงกดที่ผิวดินเท่ากับ 100 kPa และที่จุด B มีแรงกระทำที่ผิวดินแบบ Point load เท่ากับ 50 kN จงคำนวณหาหน่วยแรงในแนวตั้งที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากหน่วยแรงกดจากฐานราก A และแรงกด Point load B ที่จุด C และจุด D ที่ระดับความลึกจากผิวดิน 2 เมตร



7 Consolidation

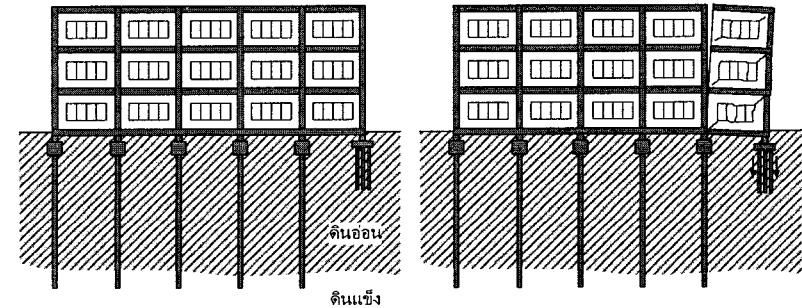
7.1 วัตถุประสงค์

ตัวอย่างปัญหาที่เกิดจากการทรุดตัว



รูปที่ 7.1 การทรุดตัวของดินที่คอสะพาน ทำให้ผิวถนนไม่เรียบ

สาเหตุเกิดเนื่องจากเสาเข็มมีปลายวางอยู่บนชั้นดินแข็งจึงมีการทรุดตัวน้อยในขณะที่ดินซึ่งไม่มีเสาเข็มรองรับเกิดการทรุดตัวมาก ดังนั้นคอสะพานจึงมีระดับต่างกันเมื่อรถวิ่งผ่านซึ่งทำให้เกิดการสะเทือนเมื่อรถผ่านรอยต่อ



หลังจากก่อสร้างเสร็จ

หลังจากก่อสร้างเสร็จเป็นระยะเวลานาน

รูปที่ 7.2 การทรุดตัวที่ไม่เท่ากันของอาคาร ทำให้เกิดการบิดของอาคาร

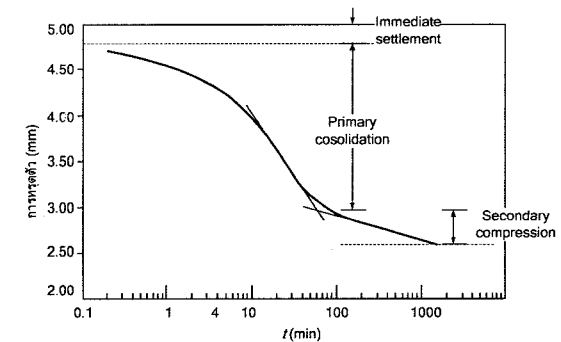
สาเหตุเกิดเนื่องจากการที่ใช้เสาเข็มมีความยาวไม่เท่ากัน โดยอาคารสูงใช้เสาเข็มยาววางอยู่บนชั้นดินแข็งจะทรุดตัวน้อย ส่วนอาคารต่ำใช้เสาเข็มสั้นวางอยู่บนชั้นดินอ่อนจะทรุดตัวมาก เมื่อการทรุดตัว

จากเรื่องหน่วยแรงในมวลดิน ดินมีหน่วยแรงเพิ่มขึ้นอาจเนื่องจากฐานรากหรือ จากแรงกระทำใด ๆ จะทำให้ดินมีการเปลี่ยนรูปร่างเกิดขึ้น แต่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของดินจะเกิดเนื่องจาก 3 สาเหตุคือ

- การเปลี่ยนรูปของเม็ดดิน
- การที่เม็ดดินจัดเรียงตัวกันใหม่
- น้ำในดินถูกบีบออกจากช่องว่างในดิน

การทรุดตัวของดินแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ

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



รูปที่ 7.3

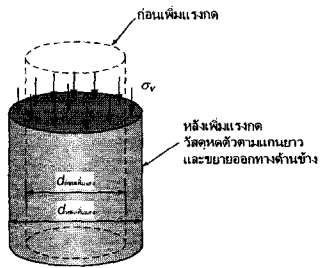
เนื่องจากดินทรายมีค่า permeability สูงเมื่อมีแรงดันน้ำเกิดขึ้น น้ำจะระบายออกจากดินอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการทรุดตัวส่วนใหญ่จะเป็น Immediate settlement

เนื้อหาจะแบ่งเป็นสองส่วนคือ

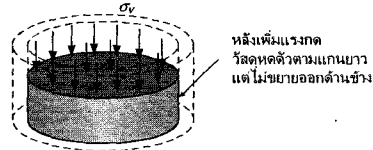
- การทรุดตัวเนื่องจาก consolidation (การอัดตัวคายน้ำ) ซึ่งจะพิจารณาในกรณีที่ดินสด Primary consolidation (การอัดตัวคายน้ำปฐมภูมิ)
- การทรุดตัวเนื่องจาก consolidation (การอัดตัวคายน้ำ) ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลา

7.2 Stress-strain relationship

ชนิดของการทดสอบ



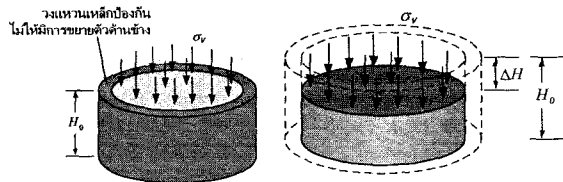
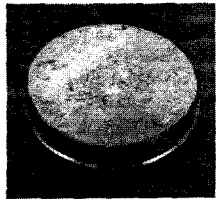
(a) unconfined compression



(b) confined compression

รูปที่ 7.4

ในบทนี้เราจะกล่าวถึงเรื่อง Confined compression หรือการขูดตัวในทิศทางเดียวเท่านั้น Confined compression คือการทดสอบตัวอย่างโดยใช้แรงกระทำในแนวตั้ง และจะไม่ยอมให้ตัวอย่างขยายตัวออกทางด้านข้าง ดังนั้นจะมีเพียงการขูดตัวในแนวตั้ง



ก่อนเพิ่มแรงกด

หลังเพิ่มแรงกด

รูปที่ 7.5

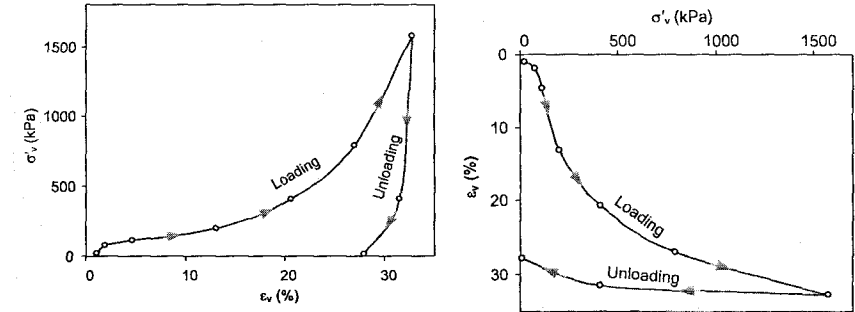
Normal strain คำนวณได้จาก

$$\epsilon_v = \frac{\Delta H}{H_0} \quad (7.1)$$

Normal stress คำนวณได้จาก

$$\sigma'_v = \frac{P}{A} \quad (7.2)$$

ซึ่งเมื่อเปลี่ยนแปลงกระทำต่อตัวอย่างหลายๆค่า จะได้ผลการทดสอบซึ่งนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stress กับ strain ได้ดังรูป

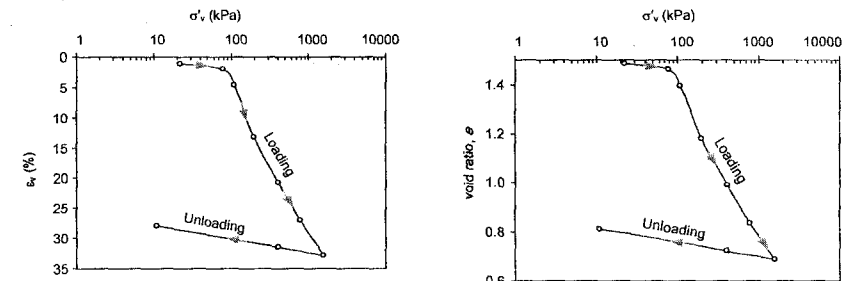


เมื่อให้แกนนอนเป็น σ'_v และแกนตั้งเป็น ϵ_v

เมื่อหมุนรูปกราฟ 90° ตามเข็มนาฬิกา

รูปที่ 7.6

จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟเป็นเส้นโค้งจึงได้ใช้แกนของ stress เป็น logarithmic scale เพื่อให้กราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงดังหน้าถัดไป



เมื่อปรับแกนของ stress ให้เป็น logarithmic scale แล้ว

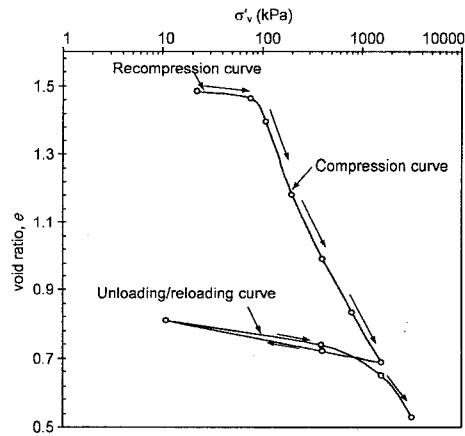
เปลี่ยนแกนจาก strain ให้เป็น void ratio, e

รูปที่ 7.7

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

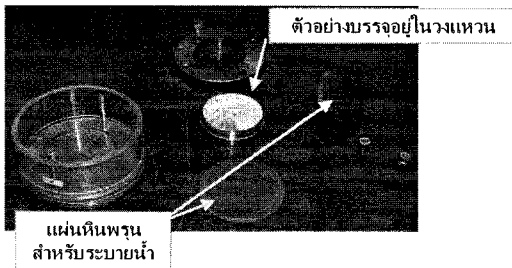
$$\epsilon_v = \frac{e_0 - e}{1 + e_0}$$

$$e = e_0 - \epsilon_v (1 + e_0) \quad (7.3)$$



รูปที่ 7.8 ลักษณะของ consolidation curve

7.3 Consolidation test (การทดสอบการอัดตัวของดิน)



รูปที่ 7.9 อุปกรณ์ทดสอบการอัดตัวของดิน



รูปที่ 7.10



รูปที่ 7.11

7.3.1 ขั้นตอนการทดสอบและคำนวณผล

- บรรจุตัวอย่างดินลงใน Rigid ring ทำให้เกิดการทรุดตัวในแนวตั้งเท่านั้น
- ตัวอย่างถูกประกบไว้ด้วยแผ่นวัสดุที่มีความพรุน (porous disc) เพื่อระบายน้ำออกจากดิน
- การทดสอบต้องเติมน้ำลงในดินเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความชื้นตามธรรมชาติในขณะทำการทดสอบ และให้ดินดูดน้ำในกรณีที่เกิดการบวมตัว (Swelling)
- เพิ่มน้ำหนักกดลงบนตัวอย่างแล้วปล่อยให้จนกระทั่งการทรุดตัวสิ้นสุด ซึ่งดูได้จากค่ายุบตัวของตัวอย่าง
- เพิ่มน้ำหนักกดจนถึงน้ำหนักกดสูงสุดที่ต้องการ แล้วลดน้ำหนักกดลงจนเป็นศูนย์
- เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง หน่วยแรงกดประสิทธิผล และ อัตราส่วนโพรง
- จากผลการทดสอบจะได้ค่า compression index, recompression index, cv, OCR

ตัวอย่าง จากการทดสอบ Consolidation test ได้ข้อมูลดังตารางข้างล่าง จงเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stress กับ void ratio

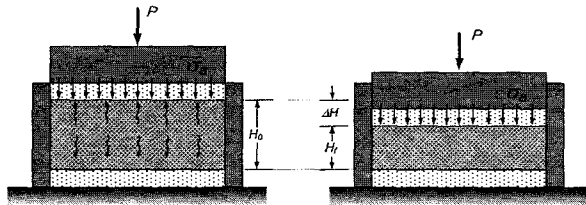
น้ำหนักดินตัวอย่างอบแห้งหลังทดสอบเสร็จ, $W_s = 66.6 \text{ g}$

พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง, $A = 31.67 \text{ cm}^2$

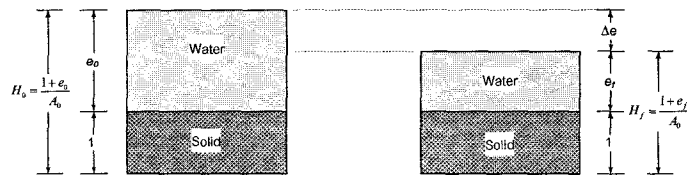
ความถ่วงจำเพาะ, $G_s = 2.71$

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



รูปที่ 7.12

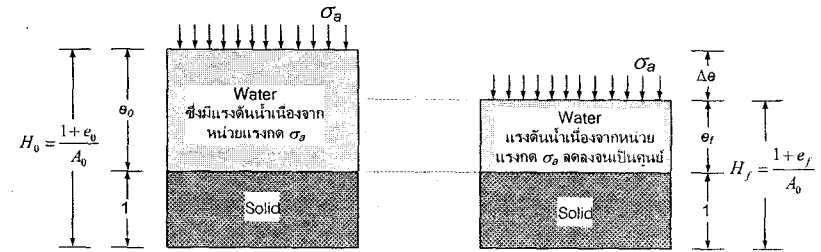


รูปที่ 7.13

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

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

เรายังสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง Effective stress กับ Void ratio ได้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาตรของตัวอย่างกับความสูงของตัวอย่าง



รูปที่ 7.14

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

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

คำนวณ Void ratio จากความสูงของตัวอย่าง

$$H_v = H_f - H_s$$

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

ปริมาณดินแห้งเมื่อคิดเป็นความสูง

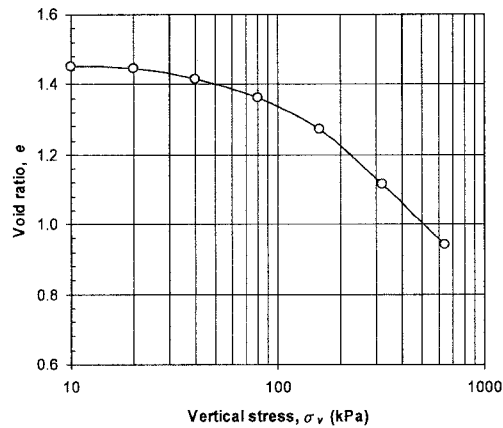
$$H_s = \frac{V_s}{A} = \frac{W_s}{\gamma_w G_s A}$$

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

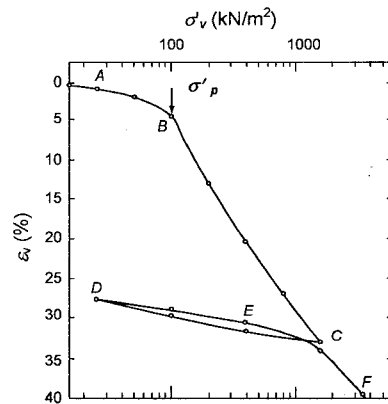
แรงกด (N)	หน่วยแรงกด (kPa)	ความสูงของตัวอย่าง หลังจากตัวอย่างคายน้ำ ออกหมดแล้ว, H (cm)	ปริมาตรโพรง $H_v = H - H_s$ (cm)	อัตราส่วนโพรง $e = H_v/H_s$
0	0	1.900	$1.900 - 0.776 = 1.124$	$1.124/0.776 = 1.448$
31.7	10	1.900	$1.900 - 0.776 = 1.124$	$1.124/0.776 = 1.448$
63.3	20	1.899	$1.899 - 0.776 = 1.123$	$1.123/0.776 = 1.447$
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



รูปที่ 7.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง vertical stress กับอัตราส่วนโพรง (void ratio)

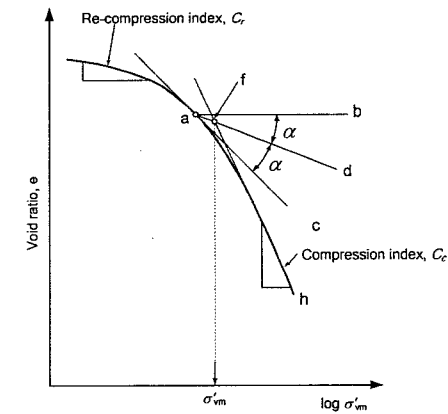


รูปที่ 7.16

ดินเป็นวัสดุที่มีความเป็นพลาสติก ดังนั้นจึงมีพฤติกรรมพลาสติก ซึ่งได้แก่

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

Maximum past pressure คือหน่วยแรงประสิทธิผลที่ดินเคยผ่านมาสูงที่สุด ซึ่งเป็นจุดที่แบ่งระหว่าง Compression curve กับ Recompression curve ซึ่งมีความชันต่างกัน

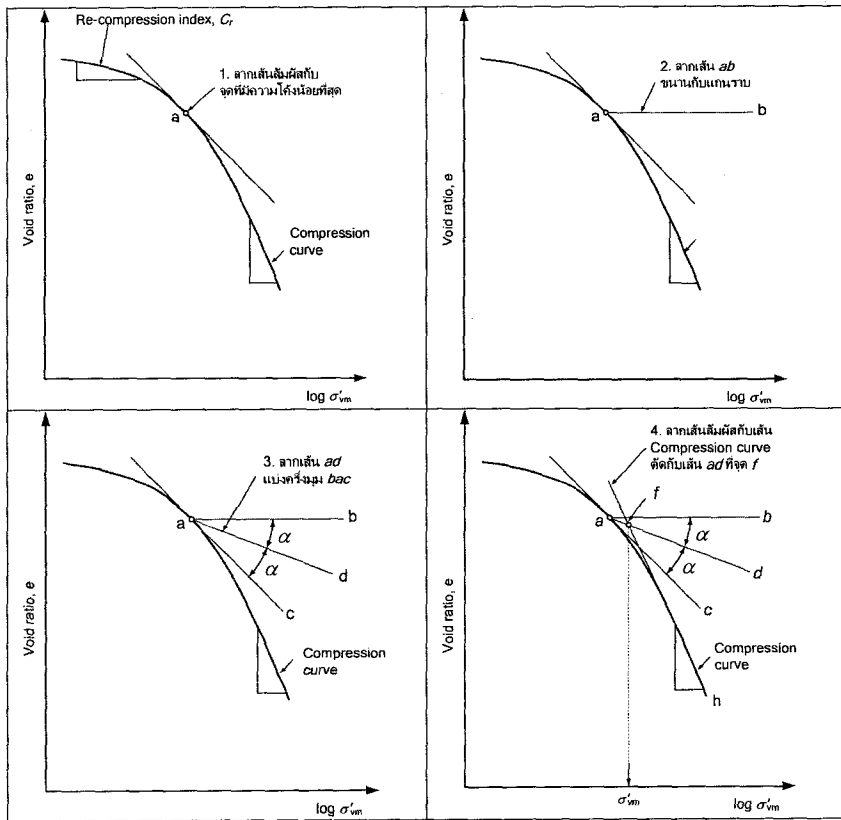


รูปที่ 7.17 วิธีหา Maximum past pressure, σ'_{vm} ซึ่งเสนอโดย Casagrande มีขั้นตอนดังนี้

- หาจุดที่มีความโค้งมากที่สุดภายในกราฟ (จุด a) แล้วลากเส้นสัมผัสกับเส้นโค้ง ณ จุดนี้ เส้น ac
- จากจุดสัมผัสลากเส้นตรง ab ขนานกับแกน x จะได้มุม bac
- ลากเส้น ad แบ่งครึ่งมุม bac

ลากเส้นสัมผัสกับ Compression curve ไปตัดกับเส้นแบ่งครึ่งมุม ad จะได้จุดตัดคือจุด f จากจุดตัดลากเส้นตั้งลงมาตัดกับแกนนอนจะได้ค่า Maximum past pressure, σ'_{vm}

สรุปขั้นตอนในการหา Maximum past pressure



7.3.2 Overconsolidation ratio

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

$$OCR = \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{v0}} \quad (7.4)$$

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

Ex. เก็บดินตัวอย่างมาจากความลึก 10 เมตร ซึ่งระดับได้ดินอยู่ที่ระดับผิวดิน

ผลการทดสอบหาหน่วยน้ำหนักรวมได้ 18 kPa และ Maximum past pressure, $\sigma'_{vm} = 100$ kPa จงคำนวณค่า OCR ของดินชนิดนี้ ($\gamma_w = 10$ 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

- Normally Consolidates Clay (NC Clay) คือดินเหนียวที่มีหน่วยแรงกดทับสูงสุดเท่ากับหน่วยแรงกดทับปัจจุบัน (OCR = 1)

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

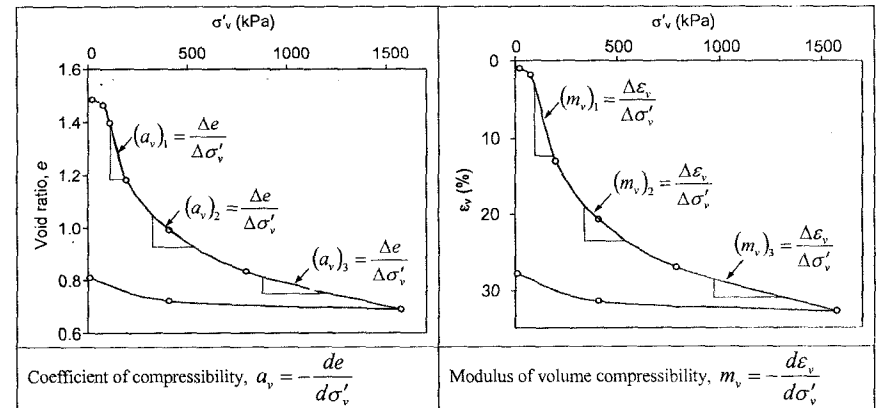
- Over Consolidated Clay (OC Clay) คือดินเหนียวที่มีหน่วยแรงกดทับในอดีตมากกว่าในปัจจุบัน (OCR > 1)

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

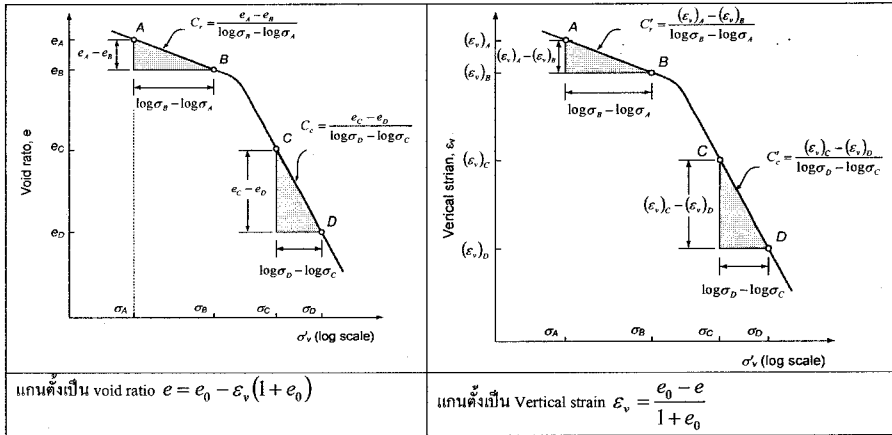
- Heavily Over Consolidated Clay (HOC Clay) คือดินเหนียวที่มีหน่วยแรงกดทับในอดีตสูงมาก (OCR > 4)

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

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Effective stress กับ Void ratio จะได้ว่า พาราเมเตอร์ซึ่งเกี่ยวกับ Consolidation ดังนี้



รูปที่ 7.18



รูปที่ 7.19

7.4 การคำนวณการทรุดตัวเนื่องจาก Primary consolidation

เราคำนวณ vertical strain ของ 1-D consolidation ได้จาก

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

ดังนั้นเราคำนวณการยุบตัวของดินได้จาก

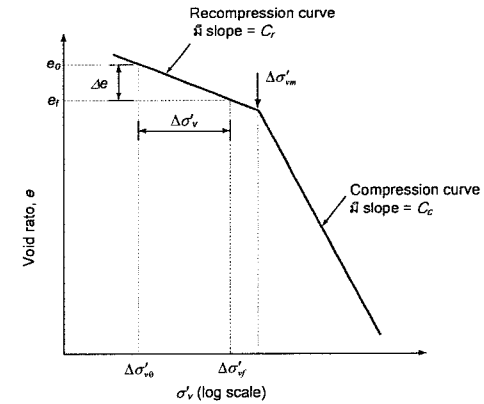
$$\rho = \Delta H$$

$$\rho = (\epsilon_v)(H)$$

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

สิ่งที่เราต้องการเพื่อมาแทนค่าในสมการข้างต้นคือ Δe ซึ่งได้มาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง e กับ $\log \sigma'_v$

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



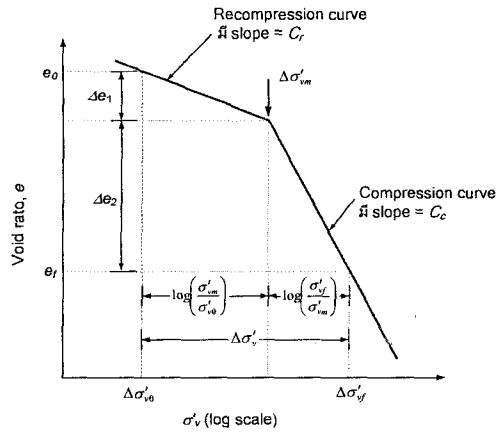
รูปที่ 7.20

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

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

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

7.4.2 กรณีที่ 2 หน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นเกิน Maximum past pressure $(\sigma'_v)_f = \sigma'_{v0} + \Delta\sigma_v > \sigma'_{vm}$

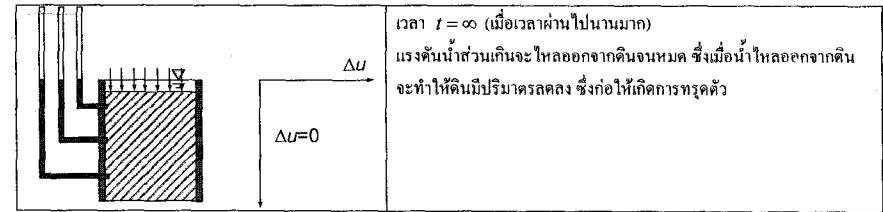
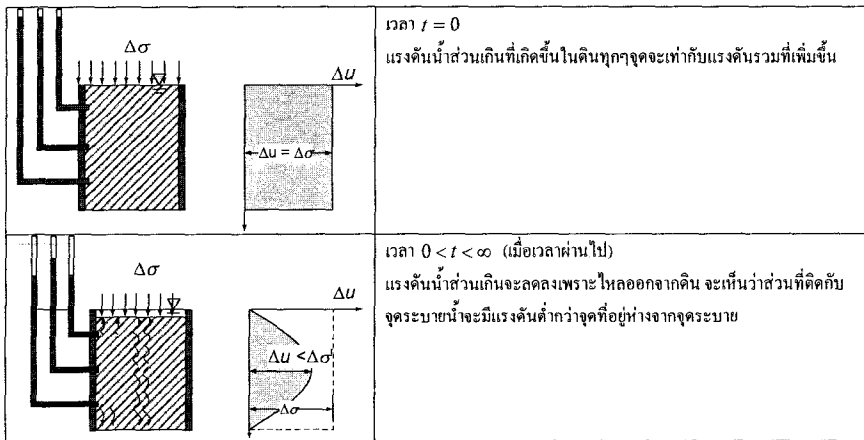


รูปที่ 7.21

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

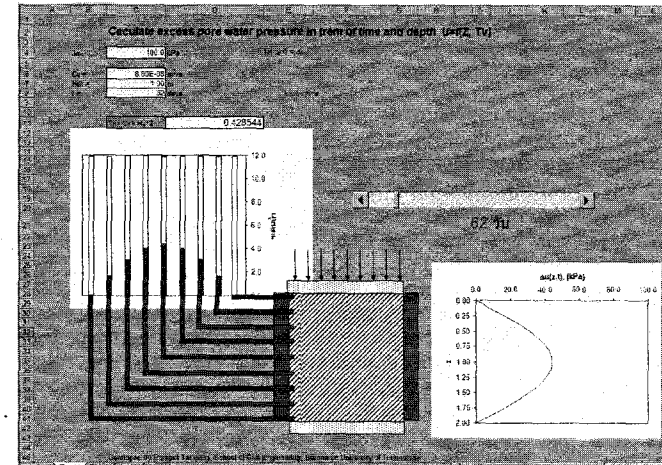
$$\rho = \left[\left(\frac{H}{1 + e_0} \right) C_r \log \left(\frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{v0}} \right) \right] + \left[\left(\frac{H}{1 + e_0} \right) C_c \log \left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vm}} \right) \right] \quad (7.5)$$

7.5 การทรุดตัวในมิติเดียวที่ขึ้นอยู่กับเวลา



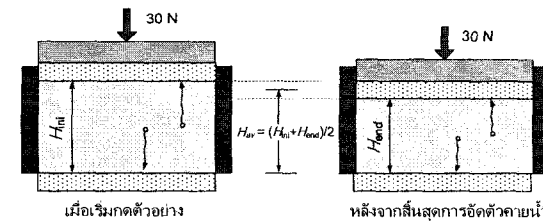
รูปที่ 7.22

ตัวอย่าง โปรแกรม Excel ที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงแรงดันของน้ำในมวลดินที่มีหน่วยแรงรวมกระทำ ณ. เวลาใดๆ



รูปที่ 7.23

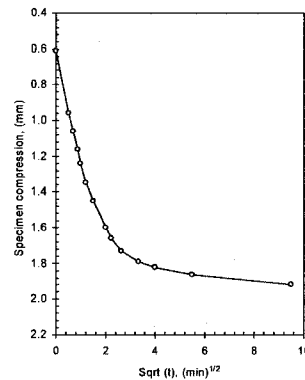
ในการเพิ่มน้ำหนักจะบันทึกปริมาณการยุบตัวที่เวลาต่างๆ ไปด้วย เนื่องจากการยุบตัวจะไม่ใช่เป็นการยุบตัวทันที แต่จะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา การทรุดตัวที่คงที่ที่จะถือว่าเป็นการทรุดตัวที่น้ำส่วนเกินไหลออกไปจากดินหมดแล้ว



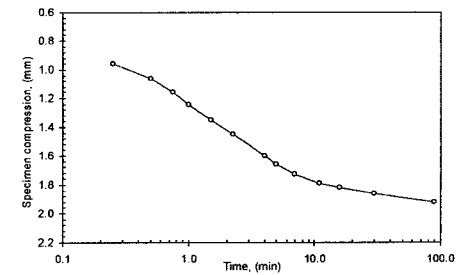
รูปที่ 7.24

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



รูปที่ 7.25



รูปที่ 7.26

ซึ่งจากกราฟทั้งสองนี้เราจะใช้สำหรับการหาค่า Coefficient of consolidation ซึ่งจะได้อ่านในหัวข้อต่อไป

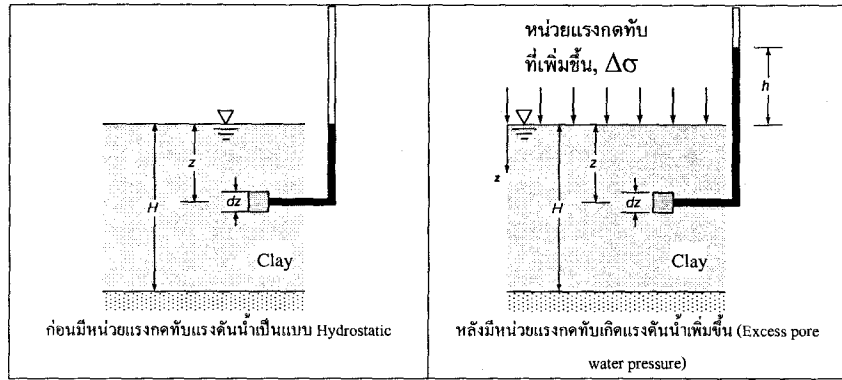
7.6 ทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำ 1 มิติของ Terzaghi

7.6.1 สมมุติฐาน

- การอัดตัวของดินและการไหลของน้ำในดินเกิดขึ้นใน 1 มิติโดยจะไม่มีกรขยายตัวของดินทางด้านข้าง ($\epsilon_{lateral} = 0$) ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง Vertical strain, ϵ_v , กับ Void ratio, e เป็น

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

- การไหลของน้ำเป็นไปตามกฎของ Darcy's
- ค่า Coefficient of permeability, k และ Modulus of volume compressibility, m_v , คงที่ระหว่าง Consolidation
- ไม่มี Creep เกิดขึ้น (Secondary compression)
- น้ำหนักกดทับดินทันทีและพื้นที่ของการกดทับจะเป็นบริเวณกว้างมาก
- พิจารณา Element A ซึ่งมีขนาด (dx, dy, dz) ในมวลดินเหนียวที่มีพื้นที่ไม่จำกัด



รูปที่ 7.27

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

$$\frac{\partial h}{\partial z} = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z}$$

$$-\partial u = \gamma_w \partial h$$

จากกฎของ Darcy ความเร็วในการไหลของน้ำ v ในเมื่อพิจารณาการไหลในแนวตั้งเท่านั้นคือ

$$v = ki = -k \frac{\partial h}{\partial z} = -\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z}$$

Velocity gradient, $\partial v / \partial z$ ในแนวตั้งคือ

$$\frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

เมื่อน้ำไหลออกจากดินทำให้ปริมาตรรวมของดินลดลงซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินต่อเวลา dV / dt คือ

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial v}{\partial z} (\partial x \partial y \partial z)$$

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

การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินเกิดจากการที่น้ำถูกบีบออกจากช่องว่างในเม็ดดิน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่อปริมาตรเริ่มต้นคือ

$$\frac{dV}{\partial x \partial y \partial z} = \frac{\partial e}{1 + e_0}$$

อัตราเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินต่อเวลา

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

จากสมมติฐานข้อที่ 1 จะเกิดการยุบตัวในแนวตั้งเท่านั้น โดยไม่มีการขยายตัวออกด้านข้าง

$$m_v = \frac{\partial \epsilon_v}{\partial \sigma'_v} = -\frac{\partial e}{\partial \sigma'_v} \frac{1}{1 + e_0}$$

จากสมมติฐานข้อที่ 5 น้ำหนักกดทับเกิดขึ้นทันที ดังนั้นแรงดันน้ำจะเพิ่มขึ้นเท่ากับหน่วยแรงกด

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

อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินต่อเวลา แทนในสมการ (g) และ (h) ใน (c) จะได้

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

และ

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

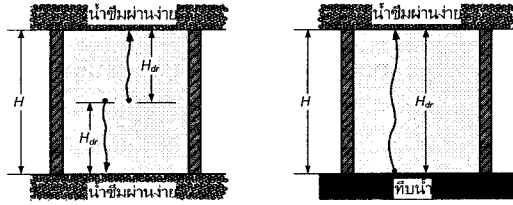
$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{m_v \gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

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

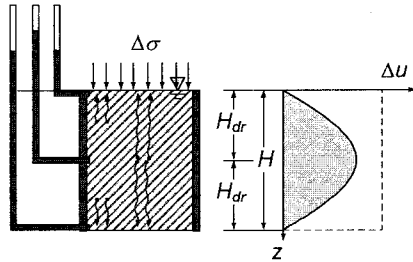
$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \tag{7.6}$$

สมการนี้เป็นสมการ Differential สำหรับการอัดตัวของน้ำในมิติเดียว ซึ่งอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำส่วนเกิน Excess pore pressure, Δu ในตัวอย่างเทียบกับเวลาและระยะทาง ซึ่งเราสามารถแก้สมการที่ 7.6 ได้โดยใช้อนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier Series) โดยจะต้องมีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) ดังนี้

- เมื่อเวลาเริ่มต้น $t = 0$ แรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้น Δu เท่ากับหน่วยแรงกระทำที่เพิ่มขึ้น $\Delta \sigma_v$,
- ในการแก้ปัญหาสมมติให้มีการระบายน้ำได้ ทั้งด้านบนและด้านล่างของดิน
- ที่ด้านบนของดินซึ่งมีระยะ $z = 0$ มีแรงดันน้ำส่วนเกินเป็นศูนย์, $\Delta u = 0$
- ที่ด้านล่างของดินซึ่งมีระยะ $z = 2H_{dr}$ มีแรงดันน้ำส่วนเกินเป็นศูนย์, $\Delta u = 0$



รูปที่ 7.28 อธิบาย Drainage path, H_{dr}

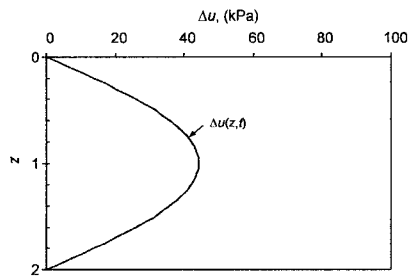


รูปที่ 7.29

จะได้แรงดันน้ำส่วนเกินที่ความลึก z ใดๆ ที่เวลา t ใดๆ

$$\Delta u_z(z, t) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2\Delta u_0}{M} \sin\left(\frac{Mz}{H_{dr}}\right) e^{-M^2 T_v} \quad (7.7)$$

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

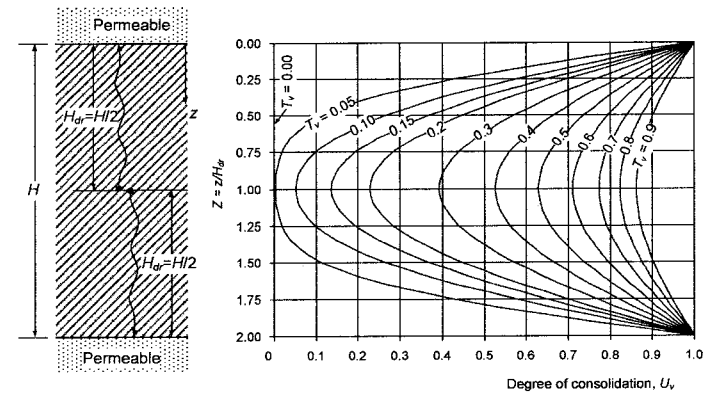


รูปที่ 7.30 Excess pore pressure ในตัวอย่างดินที่ตำแหน่ง z ใดๆ และเวลา t ใดๆ

และเราสามารถ Degree of consolidation ที่ระยะ z ใดๆ ได้จาก

$$U_z = \frac{\Delta u_0 - \Delta u_z}{\Delta u_0} = 1 - \frac{\Delta u_z}{\Delta u_0} \quad (7.8)$$

จากสมการที่ xx สามารถนำมาเขียนเป็นกราฟของ Degree of consolidation ของตัวอย่างดินที่ตำแหน่ง z และเวลา $t (t = T_v H_{dr}^2 / c_v)$ ได้ดังรูปที่ 7.31



รูปที่ 7.31 Degree of consolidation, U_z ที่ตำแหน่ง z และเวลา t ใดๆ

ในการระบุ Degree of consolidation, U_z ที่ตำแหน่ง z และเวลา t ใดๆ จะเป็นการไม่สะดวกในการพิจารณา ดังนั้นจึงได้คิดเป็นค่าเฉลี่ยของ Degree of consolidation โดยการ Integrate พื้นที่กราฟของแรงดันน้ำส่วนเกินทั้งหมดที่เวลา t หาด้วยความหนาของตัวอย่าง $\left(\int_0^{2H_{dr}} \Delta u_z dz\right) / (2H_{dr})$ แล้วเทียบกับพื้นที่กราฟของแรงดันน้ำเริ่มต้น Δu_0 ดังสมการ

$$U = 1 - \frac{\left(\frac{1}{2H_{dr}}\right) \int_0^{2H_{dr}} \Delta u_z dz}{\Delta u_0} \quad (7.9)$$

จะได้ค่าเฉลี่ย Degree of consolidation, U ในรูปของอนุกรม

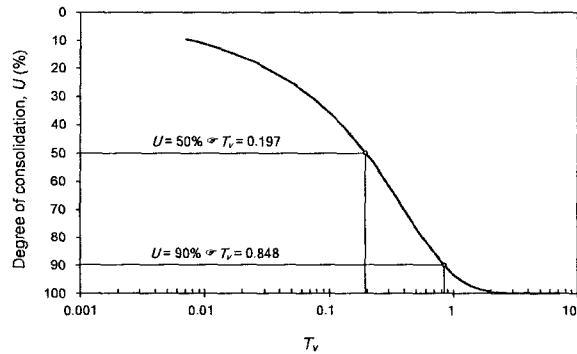
$$U = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v} \quad (7.10)$$

สมการที่ 7.10 เป็นสมการที่ใช้คำนวณความสัมพันธ์ระหว่าง Average degree of consolidation กับเวลาซึ่งอยู่ในรูปของ Time factor ซึ่งเราสามารถคำนวณโดยใช้โปรแกรม Spreadsheet เช่น Excel ในการคำนวณ โดยผลที่ได้สรุปไว้ดังตารางที่ 7.1 และเขียนเป็นความสัมพันธ์ด้วยกราฟดังรูปที่ 7.32

ตารางที่ 7.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Average degree of consolidation กับ Time Factor

Average Degree of consolidation, U (%)	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	∞



รูปที่ 7.32 ความสัมพันธ์ระหว่าง Average degree of consolidation กับ Time factor

ในการคำนวณ Average degree of consolidation เมื่อทราบค่า T_v โดยใช้สมการที่ 7.10 นั้น ค่อนข้างยุ่งยากจึงได้มีผู้ทำการ Fit curve ในรูปที่ 7.32 ดังสมการต่อไปนี้

สำหรับ $U = 0\%$ ถึง 60%

$$T_v = \frac{\pi (U\%)^2}{4 (100)^2} \quad (7.11)$$

สำหรับ U มากกว่า 60%

$$T_v = 1.781 - 0.933 \log(100 - U\%) \quad (7.12)$$

การเคลื่อนที่ของน้ำออกจากดินในแนวแกนเมื่อมีหน่วยแรงกดทับ

หา T_v จาก

จาก T_v สามารถนำไปหา U_{av}

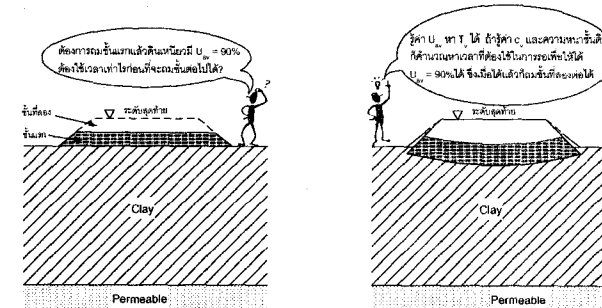
จาก U_{av} นำไปคำนวณหา

Excess pore pressure, Δu

Consolidation Settlement, ρ_c

Effective stress, σ'_v

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



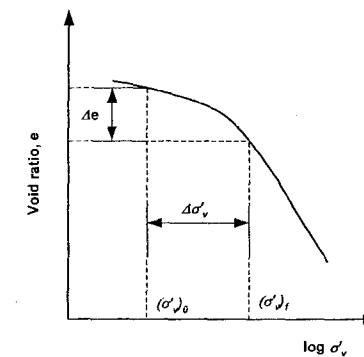
รูปที่ 7.33

สร้าง Embankment บนดินเหนียวอ่อน (กำลังต่ำ) ถ้าถมสูงทีเดียวอาจเกิดการวิบัติได้

การ Consolidation ทำให้ Void ratio ลดลงดินมีกำลังสูงขึ้น

ดังนั้นค่อยๆ เพิ่มความสูงโดยปล่อยให้ดิน Consolidate จนกระทั่งมีกำลัง (Effective stress) เพียงพอ ซึ่งดูจาก

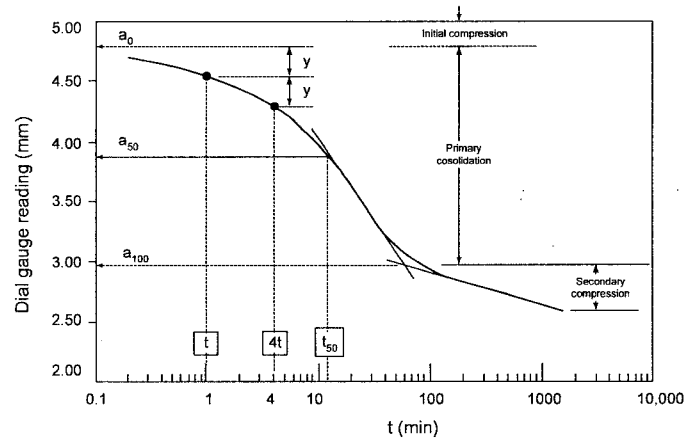
Degree of consolidation



รูปที่ 7.34

การหาค่า Coefficient of permeability, c_v

ค่า Coefficient of consolidation โดยปกติจะลดลงเมื่อ liquid limit ของดินเพิ่มขึ้น ในการหาค่า c_v จะใช้วิธี Graphic คือ



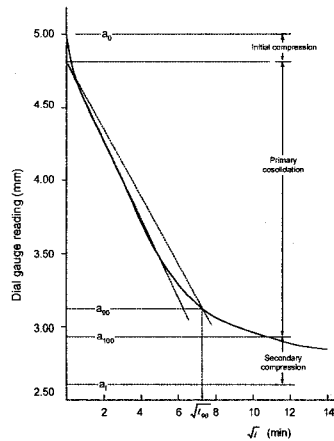
รูปที่ 7.35

1. วิธี Logarithm-of-time ซึ่งเสนอโดย Casagrande และ Taylor ในปี 1942

ถ้า d_{50} คือการทรุดตัวที่ degree of consolidation = 50% ดังนั้นค่า T_v จึงเท่ากับ 0.197 ค่า C_v ได้จากสมการ

$$c_v = \frac{0.197d^2}{t_{50}}$$

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



รูปที่ 7.36

ในกรณีนี้ d_{90} คือการทรุดตัวที่ degree of consolidation = 90% ดังนั้นค่า T_v จึงเท่ากับ 0.848 ค่า C_v ได้จากสมการ

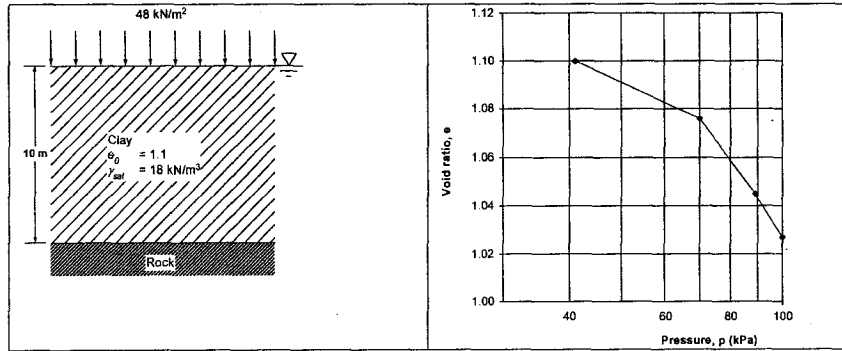
$$c_v = \frac{0.848d^2}{t_{90}} \quad (7.13)$$

7.7 ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่าง ผลการทดสอบ Consolidation ของตัวอย่างดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำตัวอย่างหนึ่งแสดงในตาราง ถ้าความหนาของตัวอย่างก่อนทดสอบคือ 19 มม. จงคำนวณหาค่า c_v

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

ตัวอย่าง ชั้นดินเหนียวหนา 10 เมตรและมีผลการทดสอบ Consolidation ดังรูปถ้าถมคันดินทำให้มีหน่วยแรงกดที่ผิวดินเป็น 48 kPa จงคำนวณหาการทรุดตัวเนื่องจาก Primary consolidation



ตัวอย่างที่ 7.1 Normally Consolidated clay หนา 8 เมตร ถามี net uniform pressure 60 kN/m² กระทำที่ผิวดิน จงหาปริมาณการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคาน้ำให้ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ระดับผิวดิน

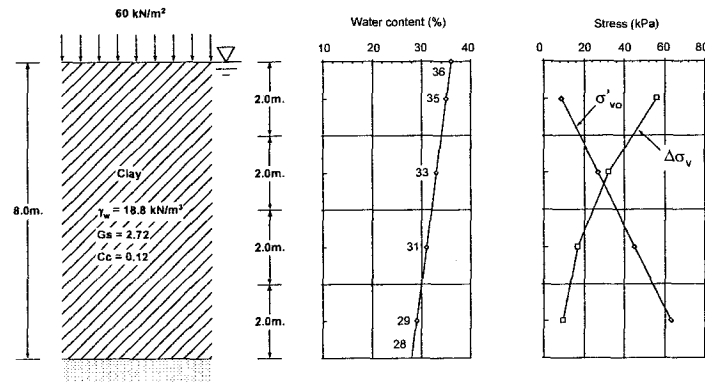
คุณสมบัติของดินเหนียว

Bulk unit weight = 18.8 kN/m²

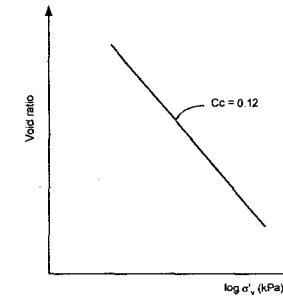
Specific gravity = 2.72

Compression index (Cc) = 0.12

ความชื้นในดินลดลงเชิงเส้นจาก 36% ที่ระดับผิวดินถึง 28% ที่ความลึก 8 m



รูปที่ 7.37



รูปที่ 7.38

Layer	Layer thickness (m)	Depth @ mid layer (m)	σ'_{v0} (kPa)	$\Delta\sigma_v$ (kPa)	$P = \log \left(\frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma}{\sigma'_{v0}} \right)$	$\Delta e = C_c \cdot P$	w_0 (%)	$e_0 = w \cdot G_s$	$\Delta H = \left[\frac{C_c}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma}{\sigma'_{v0}} \right) \right] (H)$
1	2.0	1.0	9.00	56.4	0.851	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 =									0.176 m

7.8 การเร่งการทรุดตัว (Pre-compression, Pre-loading)

ถ้าต้องการสร้างโครงสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีการทรุดตัวสูง จะใช้วิธีเร่งการทรุดตัว (Pre-loading) เพื่อลดการทรุดตัวที่อาจจะเกิดขึ้นหลังจากที่ก่อสร้างโครงสร้างไปแล้ว

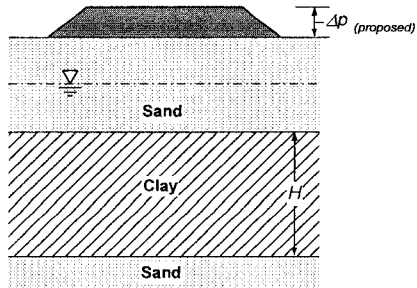
ถ้าต้องการสร้างโครงสร้างที่มีหน่วยแรงกด = $\Delta p_{proposed}$

บนชั้นดินที่มีความหนา = H_c

การทรุดตัวมากที่สุดเนื่องจาก Consolidation = $s_{(proposed)}$ คือ

$$s_{(proposed)} = \frac{C_c \cdot H_c}{1 + e_0} \log \left(\frac{P_0 + \Delta p_{(proposed)}}{P_0} \right)$$

การทรุดตัวจนหมดจะต้องใช้เวลา t_1

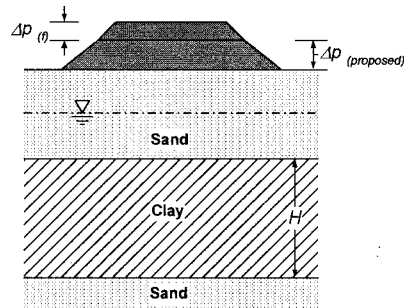


รูปที่ 7.39

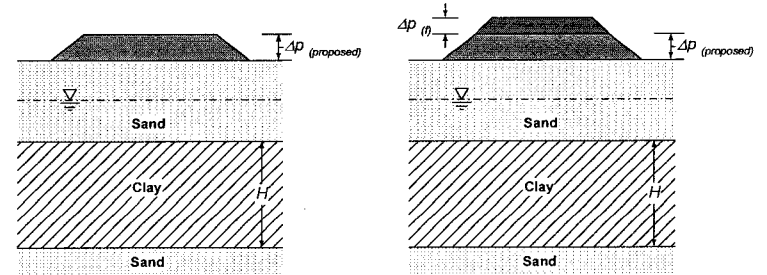
แต่ถ้าต้องการเร่งการทรุดตัวให้เร็วขึ้นจึงเพิ่มหน่วยแรงกด = $\sigma_{(proposed)} + \sigma_{p(f)}$
 การทรุดตัวเนื่องจาก Consolidation = $s_{(proposed+f)}$ คือ

$$s_{(proposed+f)} = \frac{C_c \cdot Hc}{1 + e_0} \log \left(\frac{p_0 + [\Delta p_{(proposed)} + \Delta p_{(f)}]}{p_0} \right) \quad (7.14)$$

การทรุดตัวจนหมดใช้เวลา t_2 หลังจากนั้นเอา $\Delta p_{(f)}$ ออกก็จะไม่เกิดการทรุดตัวเพิ่มขึ้นอีก



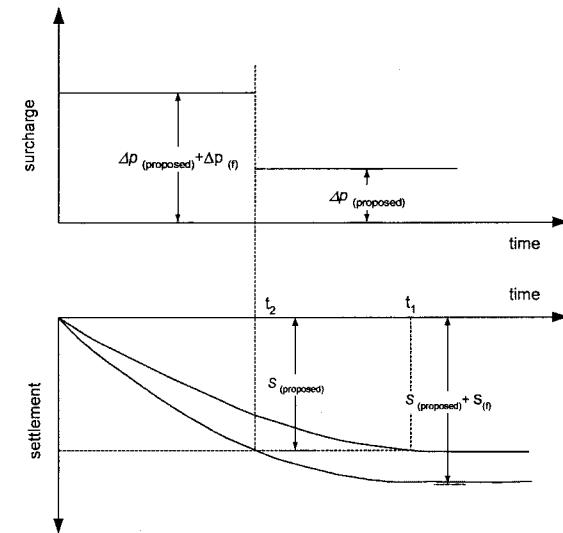
รูปที่ 7.40



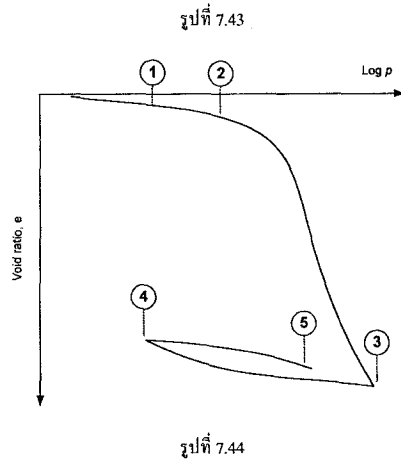
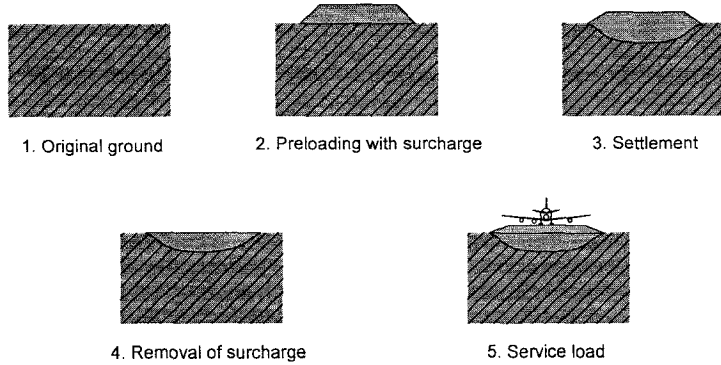
Without precompression

With precompression

รูปที่ 7.41



รูปที่ 7.42



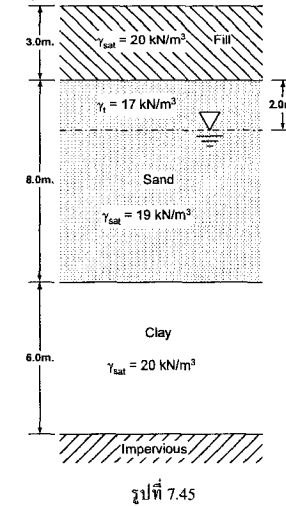
7.9 การประยุกต์ใช้ Pre-loading ในงานก่อสร้างคันดิน

ตัวอย่างในการทดสอบ Consolidation test ของตัวอย่าง ST -5 ในห้องปฏิบัติการได้ผลการทดสอบดังนี้

Pressure, p (kN/m ²)	Void ratio at end of consolidation, e
140	0.92
212	0.86

ตัวอย่างมีความหนาเริ่มต้น 25.4 mm และมีกระบวนน้ำ 2 ทาง เวลาที่ใช้ในการ Consolidate ตัวอย่างให้มี Average degree of consolidation = 50% คือ 4.5 นาที จึงคำนวณหา

- a) การทรุดตัวที่คาดว่าจะเกิดขึ้นมากที่สุดถ้าชั้นดินมีความหนา 2.8 เมตร และกึ่งกลางชั้นดินมี $\sigma'_{v0} = 140$ kPa และ $\Delta\sigma = 72$ kPa
 - b) ระยะเวลาที่จะเกิดการทรุดตัว = 40 mm. นับตั้งแต่เริ่ม Apply stress
- ตัวอย่าง จากชั้นดินตั้งรูปถ้าต้องการถมดินสูง 3 เมตร ($\gamma_f = 20$ kN/m³) เป็นบริเวณกว้างมาก คุณสมบัติของดินเหนียว



$\sigma'_{v0} = 100$ 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

ตัวอย่าง ในการสร้างคันดินถมบนชั้นดินอ่อน ซึ่งคาดว่าในอนาคตจะมีหน่วยแรงกดเพิ่มขึ้นในชั้นดินเหนียว $\Delta\sigma = 115$ kN/m² ถ้า In-situ effective stress ($\sigma'_{v0} = 210$ kN/m²) ก่อนทำการก่อสร้างได้มีการเก็บตัวอย่างมาทดสอบในห้องปฏิบัติการได้ผลดังนี้

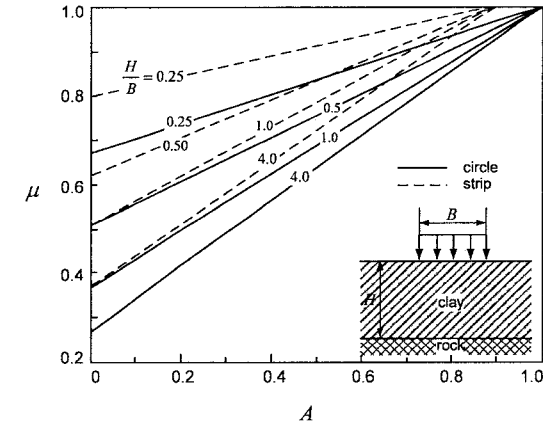
- $c_c = 0.28$, $e_0 = 0.9$, $c_v = 0.36$ m²/month (ถ้าดินเป็นดินแบบ Normally consolidated clay) จงคำนวณหา
- a) การทรุดตัวเนื่องจาก Primary consolidation ที่จะเกิดขึ้น ในกรณีที่ไม่มี pre-compression
- b) Surcharge ที่จะต้องใช้เพื่อเร่งให้เกิด primary consolidation หมดภายใน 9 เดือน

7.10 Effect of soil type and foundation size (Azizi)

การคำนวณการทรุดตัวเนื่องจาก consolidation จากสมการ $\rho = \Delta \varepsilon H$ นั้นจะตรงกับสภาพความเป็นจริงก็ต่อเมื่อพื้นที่รับแรงกระทำนั้นกว้างมากเมื่อเทียบกับความลึก ซึ่งในการคำนวณการทรุดตัวเนื่องจากฐานรากนั้น จะพบว่าขนาดของฐานรากเล็กมากเมื่อเทียบกับความหนาของชั้นดิน

เมื่อหน่วยแรงกระทำมีพื้นที่กว้างมาก	เมื่อหน่วยแรงกระทำมีพื้นที่ไม่กว้างมาก
$\Delta u = \Delta \sigma$	$\Delta u = \Delta \sigma_3 + A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)$ $= \Delta \sigma_1 \left(A + \frac{\Delta \sigma_3}{\Delta \sigma_1} (1 - A) \right)$ โดยที่ $\Delta \sigma_1 \equiv \Delta \sigma_v$
$\rho_c = m_v \Delta u dz$	
$\rho_{c(ocdo)} = \int_0^H m_v \Delta \sigma_1 dz$	$\rho_c = \int_0^H m_v \Delta \sigma_1 \left(A + \frac{\Delta \sigma_3}{\Delta \sigma_1} (1 - A) \right) dz$
$\rho_c = \frac{\int_0^H m_v \Delta \sigma_1 \left(A + \frac{\Delta \sigma_3}{\Delta \sigma_1} (1 - A) \right) dz}{\int_0^H m_v \Delta \sigma_1 dz}$ $= A + (1 - A) \frac{\int_0^H \Delta \sigma_3 dz}{\int_0^H \Delta \sigma_1 dz}$	

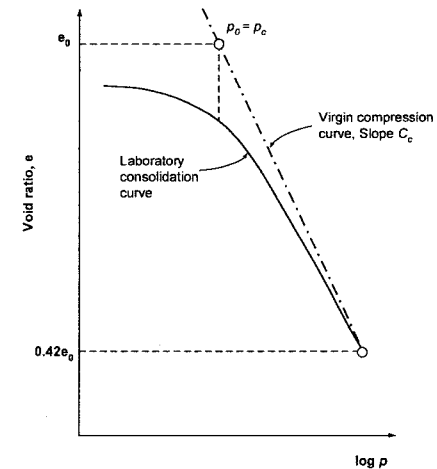
จากสมการจะเห็นได้ว่าถ้าพื้นที่ที่มีแรงกระทำนั้นมีคิติน้อยกว่าความหนาของชั้นดิน หรือในกรณีที่ดินเป็นชนิด overconsolidated clay (ค่า A มีค่าน้อย) จะทำให้เมื่อคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จาก Oedometer test แล้วจะให้ผลที่คลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นจึงต้องทำการปรับแก้เนื่องจากขนาดของฐานรากโดยพารามิเตอร์ μ ซึ่งขึ้นกับ pore pressure parameter, A และอัตราส่วน H/B ซึ่งสามารถหาได้จากกราฟข้างล่าง



รูปที่ 7.46 Correction factor for foundation size (Skempton and Bjerrum 1957)

7.11 Effect of sample disturbance

เนื่องจากดินเหนียวที่มีการทรุดตัวสูงจะมี Strength ต่ำในการเก็บตัวอย่างขึ้นมาทดสอบ Consolidation และการเตรียมตัวอย่างอาจมีผลกระทบต่อโครงสร้างของดิน ซึ่งเราเรียกว่า "Sample disturbance"

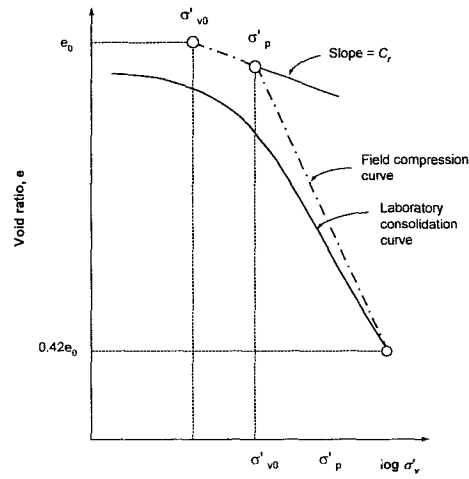


รูปที่ 7.47

สำหรับดิน Normally consolidated clay (OCR =1)

ถ้าไม่มีผลเนื่องจาก Sample disturb จะได้เส้น Virgin compression curve

เส้น Lab consolidation curve ตัดกับเส้น Virgin compression curve ที่ Void ratio = $0.42e_0$
 การสร้าง Field compression curve
 Schmertmann, 1953 ได้เสนอวิธีหาเส้นโค้ง (Field compression curve) ให้โดยมีวิธีการดังนี้

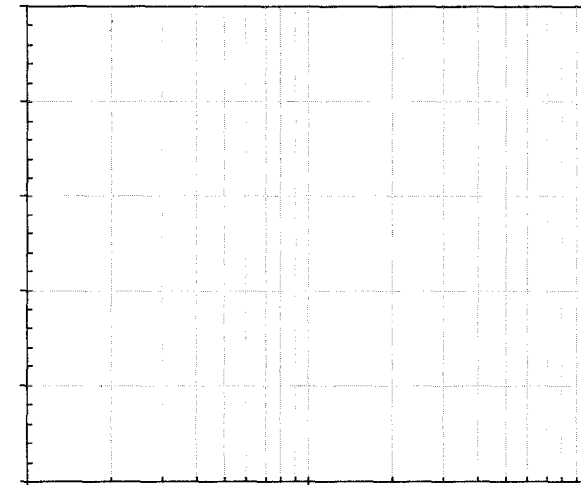


รูปที่ 7.48

7.12 คำถามท้ายบท

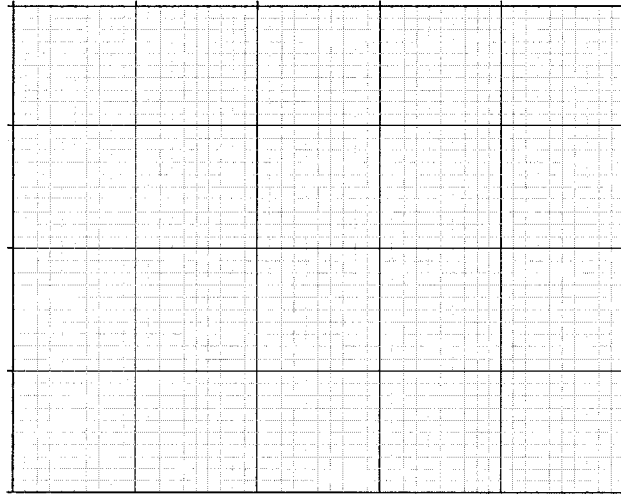
1. ฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 5 เมตรซึ่งก่อให้เกิดแรงดันที่ผิวดินเท่ากับ 120 kPa กระทำอยู่บนชั้นดินดังรูป
 - 1.1) จงคำนวณการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำปฐมภูมิ (primary consolidation)
 ใช้ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำในห้องปฏิบัติการในตารางที่ 1
 ตารางที่ 1 ผลการทดสอบ Consolidation

σ'_v (kPa)	Void ratio, e
15	1.66
30	1.66
60	1.64
120	1.52
240	1.38
480	1.25



รูปที่ 7.49

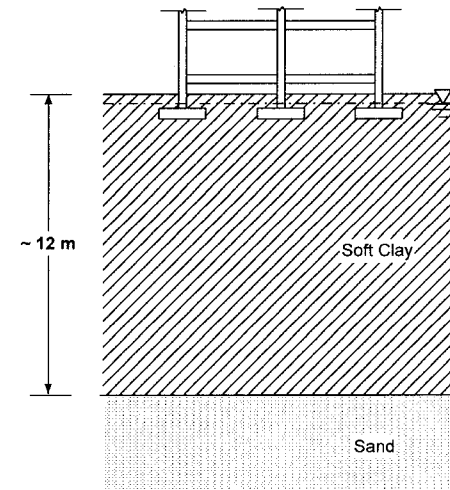
- 1.2) จงเขียนกราฟความสัมพันธ์ของการทรุดตัวกับเวลาโดยให้แกนอนเป็นเวลาและแกนตั้งเป็นค่าการทรุดตัว กำหนดให้ค่า $c_v = 60 \text{ mm}^2/\text{min}$



รูปที่ 7.50

5. ถ้าต้องการสร้างโครงสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อนซึ่งมีกำลังรับแรงเฉือนต่ำดังรูปจงอธิบายถึงปัญหาที่
อาจจะเกิดขึ้น ในประเด็นของกำลังรับแรงของดินและการทรุดตัว

- a) ในช่วงแรกของการก่อสร้าง
 - b) หลังจากก่อสร้างเสร็จและใช้งานเป็นเวลานาน
- จงเสนอวิธีการแก้ไขปัญหามาในข้อ a) และ ข้อ b)

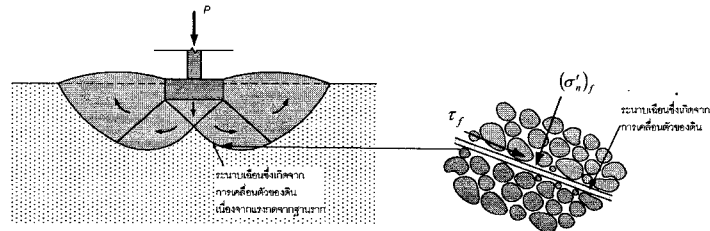


รูปที่ 7.51

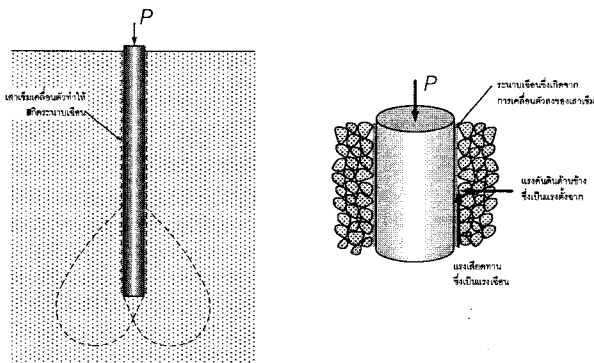
8 กำลังรับแรงเฉือนของดิน

8.1 บทนำ

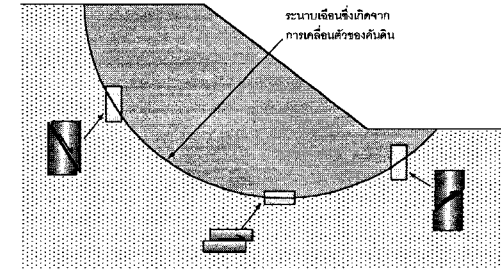
เมื่อมีแรงภายนอกกระทำต่อดินจะเกิดหน่วยแรงขึ้นในเนื้อดิน ถ้าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นไม่เกินกำลังรับแรงเฉือนของดินก็จะไม่เกิดการวิบัติขึ้น แต่ถ้าเกินกว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแล้ว การวิบัติก็จะเกิดขึ้น เราต้องศึกษาเรื่องกำลังต้านแรงเฉือนของดินเพื่อที่จะนำไปใช้วิเคราะห์ ปัญหาทางด้าน Soil Engineering เช่น



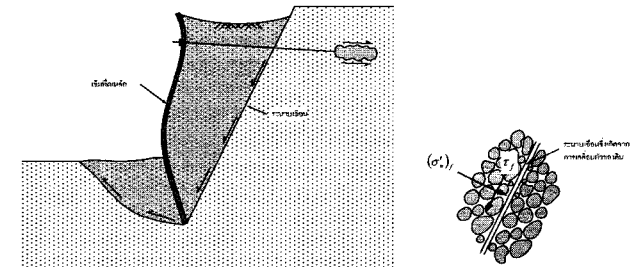
รูปที่ 8.1 กำลังรับน้ำหนักของฐานรากดินซึ่งเกิดจากแรงต้านทานการเฉือนของดิน



รูปที่ 8.2 กำลังของเสาเข็มส่วนหนึ่งเกิดจากกำลังต้านทานการเฉือนของดิน



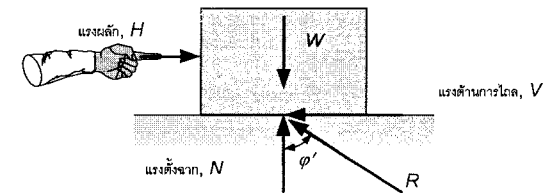
รูปที่ 8.3 การเฉือนของดินที่เกิดขึ้นภายในดินดิน



รูปที่ 8.4 แนวการวิบัติเนื่องจากการเฉือนของดินหลังกำแพงกันดิน

8.2 พื้นฐานของกำลังรับแรงเฉือน

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



รูปที่ 8.5 กล่องไม่เคลื่อนที่จนกว่าแรงดันมากกว่าแรงต้านการไถล

$$V = \mu N \quad (8.1)$$

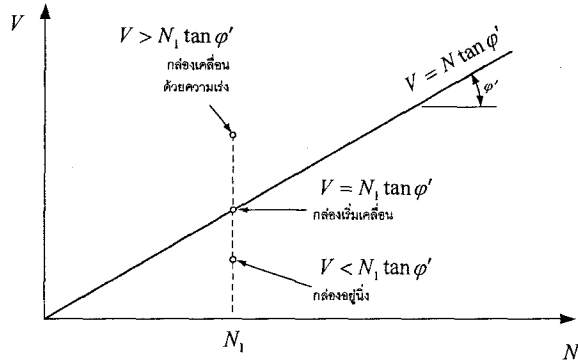
เมื่อ μ คือสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างพื้นกับกล่องซึ่งเท่ากับ

$$\mu = \tan \phi' \quad (8.2)$$

ดังนั้น

$$V = N \tan \phi' \quad (8.3)$$

เมื่อ ϕ' คือ มุมเสียดทาน (Angle of friction)
 ซึ่งเมื่อเขียนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านการไถลกับแรงด้านทานในแนวตั้งจะได้ดังรูป



รูปที่ 8.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านการไถลกับแรงด้านทานในแนวตั้ง

จากสมการของแรงด้านการเคลื่อนที่ในรูปแบบการเลื่อนระหว่างกล่องกับพื้น ถ้านำมาใช้พิจารณาหน่วยแรงเฉือนในดินจะได้

$$\tau_f = (\sigma'_n)_f \tan \phi' \quad (8.4)$$

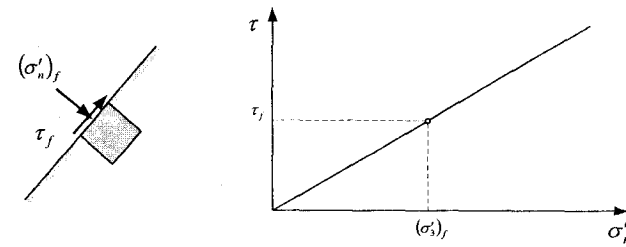
τ_f คือหน่วยแรงเฉือนในขณะที่ดินเริ่มถูกเฉือนให้เคลื่อนจากกัน
 $(\sigma'_n)_f$ คือหน่วยแรงตั้งฉากบนระนาบที่เกิดการเฉือน

8.3 Mohr-Coulomb Failure Criteria

Otto Mohr (1900) ได้เสนอทฤษฎีว่า วัสดุจะวิบัติเนื่องจากทั้ง Normal stress และ Shearing stress ซึ่งไม่ได้เกิดจาก Maximum normal หรือ Maximum shear เท่านั้น ดังสมการ

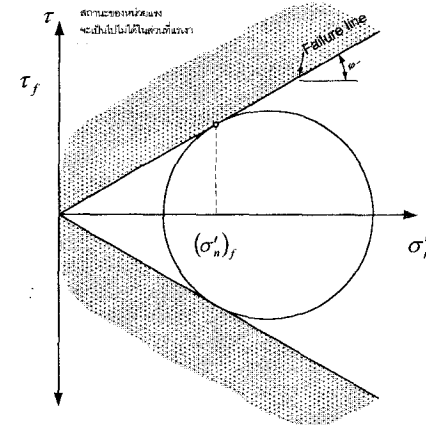
$$\tau_f = f(\sigma) \quad (8.5)$$

ในระนาบที่เกิดการเฉือนในดินนั้นจะมีทั้งหน่วยแรงตั้งฉากและหน่วยแรงเฉือน ซึ่งเมื่อเรานำมาเขียนจุดในแกน $\sigma - \tau$ จะได้จุดดังรูป

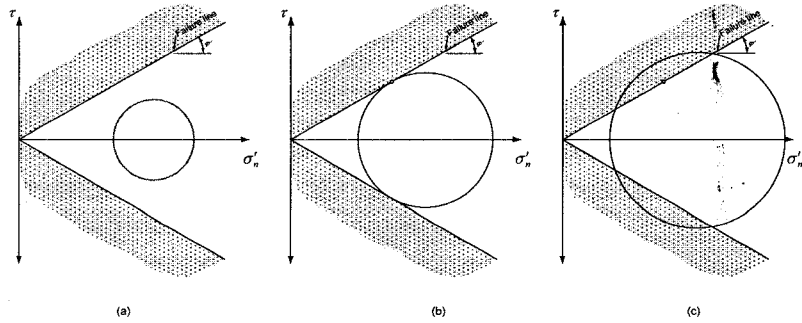


รูปที่ 8.7

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



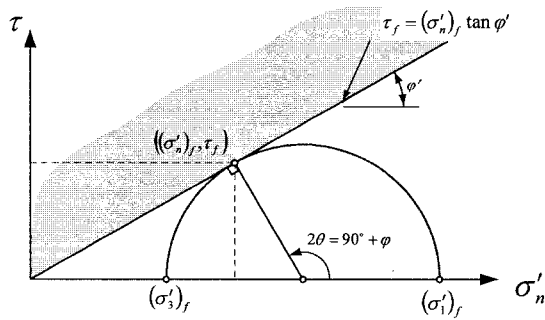
รูปที่ 8.8 Mohr's circle ในกรณีของดินที่มี OCR = 1 ถึง 2 (Normally consolidated soil)



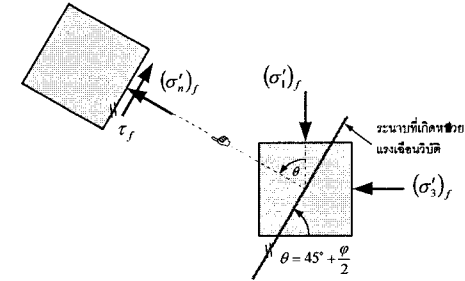
รูปที่ 8.9 (1) เป็นไปได้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นไม่ทำให้ดินวิบัติ, (2) เป็นไปได้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นทำให้ดินวิบัติ, (3) เป็นไปไม่ได้ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเกินกว่าขอบเขตวิบัติ

เราจะพิจารณาเฉพาะส่วนที่อยู่เหนือแกนราบขึ้นมาเท่านั้น เนื่องจากความสมมาตร ถ้าเราทราบหน่วยแรงหลัก (Major principle stress และ Minor principle stress) เราจะหาสิ่งต่อไปนี้ได้

- ระบายที่เกิดการวิบัติ
- หน่วยแรงตั้งฉากและหน่วยแรงเฉือนบนระนาบที่เกิดการวิบัตินี้



รูปที่ 8.10 Mohr's circle



รูปที่ 8.11 State of stress แสดงแนวและสถานะของหน่วยแรงของระนาบวิบัติ

8.4 สมการเส้นการวิบัติ (Failure envelope) ของดินเหนียว Overconsolidated clay

ถ้าที่ดินเหนียวอยู่ใน Overconsolidated สมการเส้นการวิบัติจะเป็น

$$\tau_f = c + \sigma' \tan \phi'$$

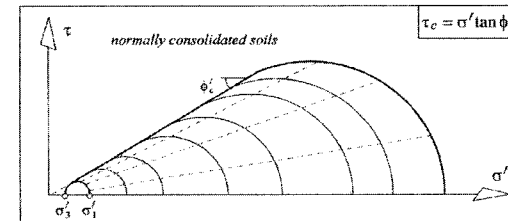


Figure 5.24: Behaviour of a normally consolidated clay.

ถ้าที่ดินเหนียวอยู่ใน Normally consolidated สมการเส้นการวิบัติจะเป็น

$$\tau_f = \sigma' \tan \phi'$$

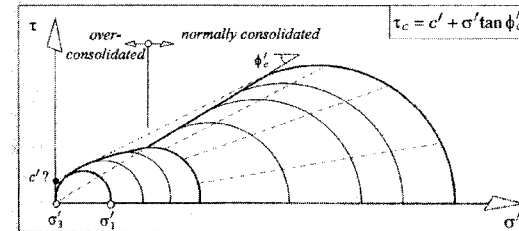


Figure 5.25: Typical behaviour of an overconsolidated clay.

8.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain

ในหัวข้อคุณสมบัติของวัสดุในวิชา กลศาสตร์วัสดุ หรือวิชากำลังของวัสดุ เราได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ของหน่วยแรงภายในเนื้อวัสดุและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อมีแรงภายนอกกระทำ สำหรับในวิชาปฐพีกลศาสตร์เราก็สนใจความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ต่อแรงกระทำเหมือนกัน

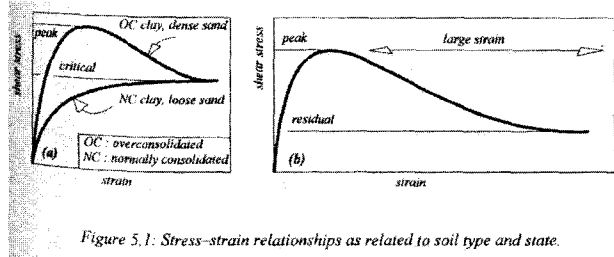


Figure 5.1: Stress-strain relationships as related to soil type and state.

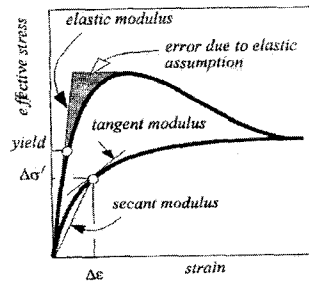
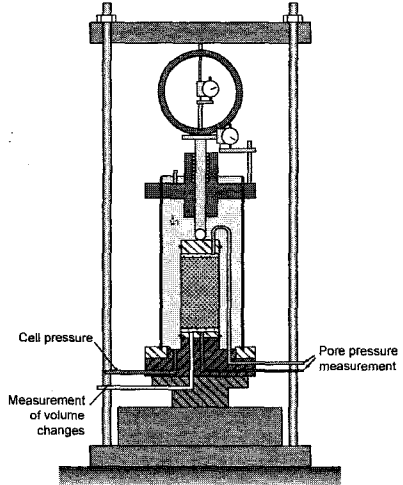


Figure 5.2: Selection of appropriate stiffness parameters.

ในการทดสอบจะใช้เครื่องมือทดสอบซึ่งจะจำลองให้เหมือนกับสภาพธรรมชาติมากที่สุด โดยเครื่องมือที่ใช้ทดสอบเรียกว่า Triaxial apparatus

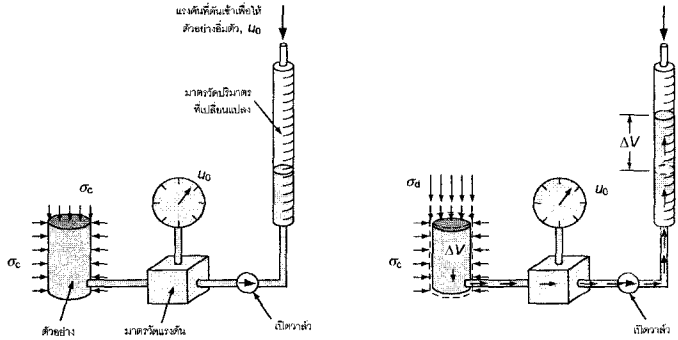


รูปที่ 8.12 เครื่องมือทดสอบ Triaxial

8.6 Triaxial test

เป็นวิธีการทดสอบหา Shear strength parameter ของดินโดยจำลองสภาพของตัวอย่างดินที่เก็บขึ้นมาให้เหมือนกับสภาพเดิมมากที่สุด

8.6.1 การทดสอบตัวอย่างแบบระบายน้ำ (Drained compression)



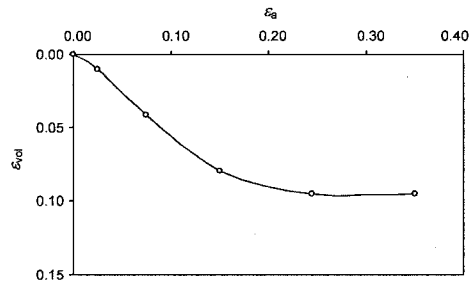
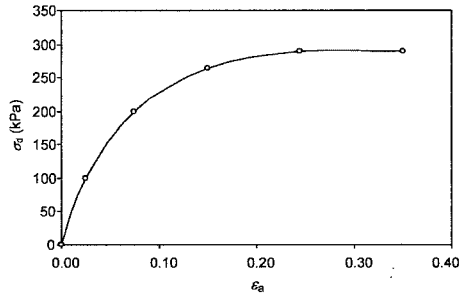
รูปที่ 8.13 การทดสอบแบบระบายน้ำ (Drained compression test) เป็นตัวอย่างระบายน้ำ

ตัวอย่าง การคำนวณผลการทดสอบ Drained Triaxial จากตารางข้อมูลการทดสอบ Drained triaxial จงเขียนกราฟ $\sigma_d - \epsilon_a$ และ $\epsilon_v - \epsilon_a$

$$A = \frac{V}{H} = \frac{V_0 - \Delta V}{H_0 - \Delta H} = \frac{V_0 \left(1 - \frac{\Delta V}{V_0}\right)}{H_0 \left(1 - \frac{\Delta H}{H_0}\right)} = A_0 \left(\frac{1 - \epsilon_{\text{volume}}}{1 - \epsilon_{\text{axial}}}\right) \quad (8.6)$$

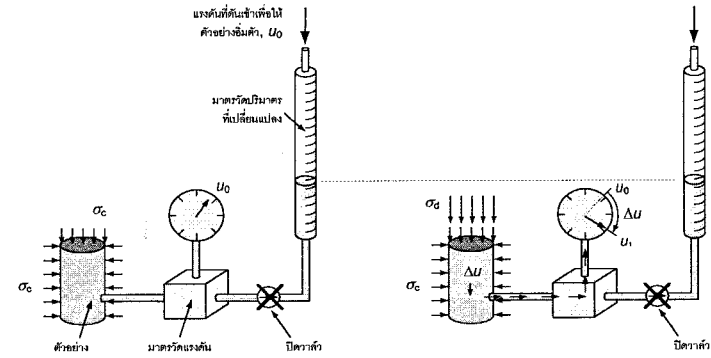
ตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง xx มิลลิเมตร ยาว xx มิลลิเมตร

แรงกด (kN)	ความยาวที่เปลี่ยน (mm)	ปริมาตรที่เปลี่ยน (mm ³ × 10 ³)	Volumetric strain, ϵ_v	Axial strain, ϵ_a	พื้นที่หน้าตัด A (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



รูปที่ 8.14

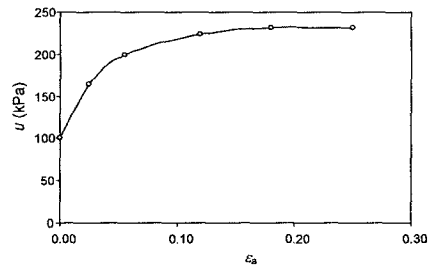
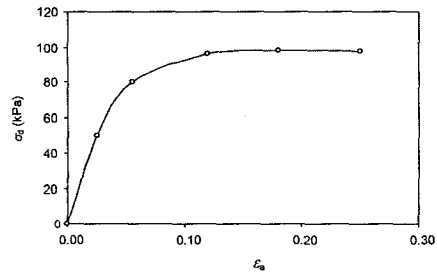
8.6.2 การทดสอบตัวอย่างแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained compression)



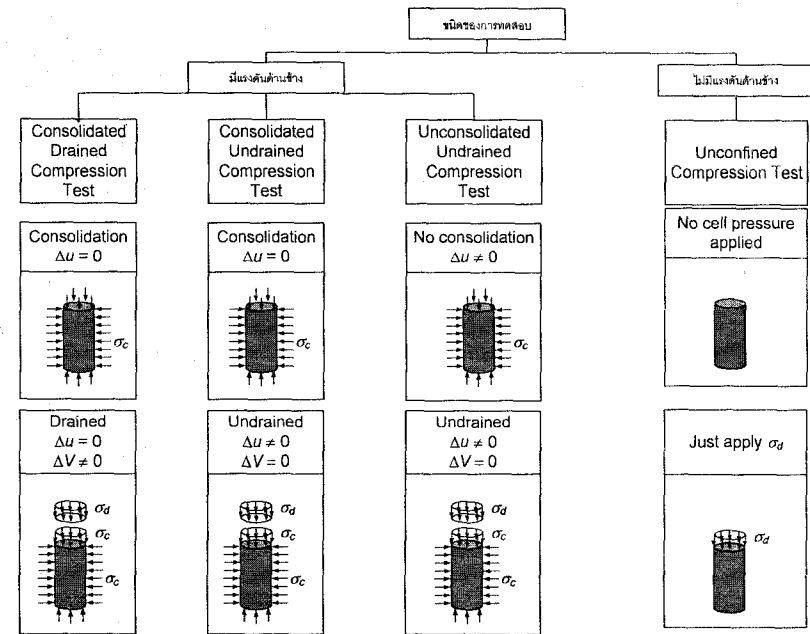
รูปที่ 8.15 การทดสอบแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Compression test) ปิตวาล์วระบายน้ำ

ตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง xx มิลลิเมตร ยาว xx มิลลิเมตร

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



รูปที่ 8.16

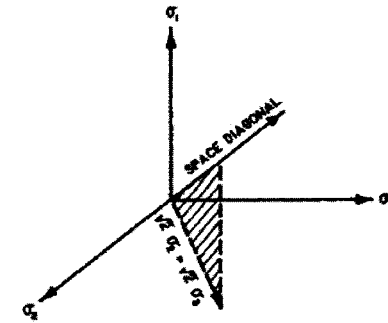


รูปที่ 8.17

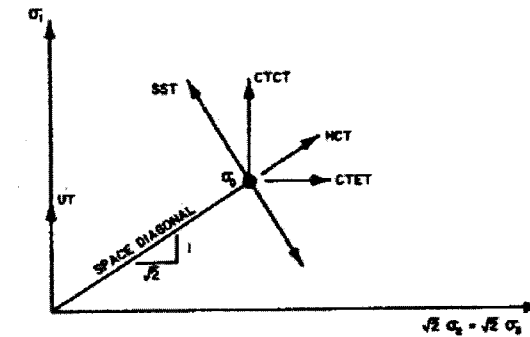
8.7 ชนิดของการทดสอบและพารามิเตอร์ของดิน (USACE 1990)

Table D-1
Laboratory Tests for Evaluation of Elastic Parameters
(Refer to Figure D-1)

TYPE OF TEST	DESCRIPTION	DIAGRAM
UNIAxIAL STRESS (UT)	LOADING σ_1 ON A SINGLE VERTICAL AXIS. $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$. YOUNG'S MODULUS E IS DETERMINED.	
HYDROSTATIC COMPRESSION (HCT)	LOADING OCCURS ALONG THE SPACE DIAGONAL IN EQUAL INCREMENTS $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ AND $\epsilon_{vol} = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3$. BULK MODULUS K IS DETERMINED.	
SIMPLE SHEAR (SST)	AFTER HYDROSTATIC LOADING TO $\sigma_0 = \sigma_{int}$ ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) KEPT CONSTANT, BUT TWO OF THREE STRESS AXES VARIED, I.E. $\Delta \sigma_1 = -\Delta \sigma_2$, $\Delta \sigma_3 = 0$. SHEAR MODULUS G IS DETERMINED.	
CONFINED COMPRESSION (CCT)	LOADING σ_1 WHEN $\epsilon_2 = \epsilon_3 = 0$ (CONSOLIDATION TEST) CONSTRAINED MODULUS E_c IS DETERMINED.	
CONVENTIONAL TRIAXIAL COMPRESSION (CTCT)	AFTER HYDROSTATIC LOADING TO σ_0 , σ_1 INCREASED WHILE $\sigma_2 = \sigma_3$ KEPT CONSTANT AT σ_0 . TANGENT MODULUS E_t IN COMPRESSION DETERMINED.	
CONVENTIONAL TRIAXIAL EXTENSION (CTET)	AFTER HYDROSTATIC LOADING TO σ_0 , $\sigma_2 = \sigma_3$ INCREASED WHILE σ_1 KEPT CONSTANT AT σ_0 . TANGENT MODULUS E_t IN EXTENSION DETERMINED.	



a. THE TRIAXIAL PLANE



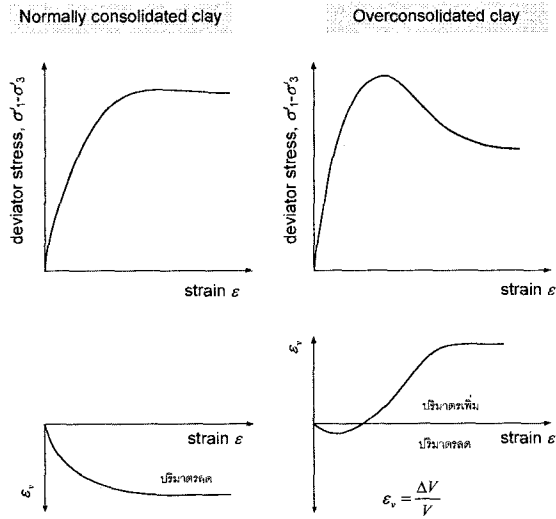
b. STRESS PATHS

Figure D-1. Examples of stress paths for different tests (Refer to Table D-1 for descriptions of tests)

8.8 การทดสอบ Consolidated Drained Triaxial

Deviator stress และ Strain

การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่าง ในการทดสอบชนิดนี้จะปล่อยให้ น้ำไหลออกจากตัวอย่างตลอดการทดสอบ ทำให้ไม่มีแรงดันน้ำส่วนเกินค้างอยู่ในดิน และเมื่อน้ำไหลออกจากดินจะทำให้ปริมาตรเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 8.18

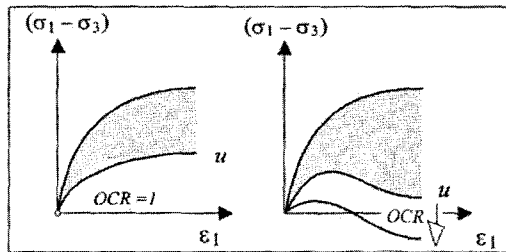


Figure 5.22: Effects of the state of a clay on the porewater pressure at failure.

8.9 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อดินรับแรงเฉือน

เมื่อดินรับแรงเฉือนอนุภาคของเม็ดดินจะมีการจัดเรียงตัวกันใหม่ให้เหมาะสมเพื่อต้านแรงเฉือน แต่เม็ดดินก่อนถูกเฉือนเรียงตัวกันอย่างหลวม ๆ เม็ดดินจะเรียงตัวกันให้แน่นขึ้น (Void ratio ลดลง) เมื่อรับแรงเฉือน ถ้าเม็ดดินก่อนถูกเฉือนเรียงตัวอย่างแน่น เม็ดดินจะขยายตัวให้หลวมมากขึ้น (Void ratio เพิ่มขึ้น) เมื่อรับแรงเฉือนซึ่งถ้าหน่วยแรงหลักประสิทธิภาพ (Principle effective stress) มาเขียนวงกลมของ Mohr และลากเส้นสัมผัสวงกลมจะได้เส้นการวิบัติ (โปรดเรียบเรียงใหม่)

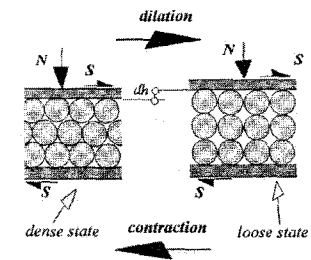


Figure 5.12: Loose and dense states for sands.

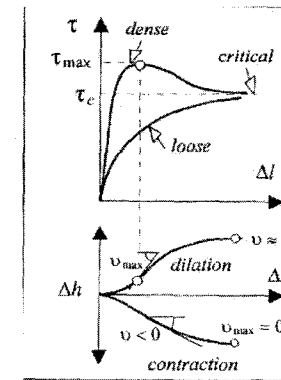


Figure 5.13: Contraction and dilation of sands.

8.10 ผลของ OCR ต่อ Peak strength ของดิน

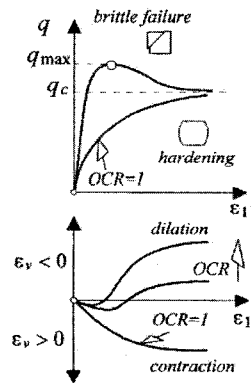


Figure 5.28: Effect of the OCR on the peak strength of a clay.

8.11 การทดสอบ Consolidated Undrained Triaxial

Deviator stress และ Strain

แรงดันน้ำซึ่งเกิดจากแรงภายนอกกระทำ จะเห็นได้ว่าการทดสอบนี้จะไม่ได้ผลการเปลี่ยนแปลงปริมาตร เนื่องจากเราปิดวาล์วน้ำเอาไว้ เมื่อมีแรงกระทำแรงดันน้ำจึงเปลี่ยนแปลง

สำหรับการทดสอบแบบ Undrained จะเกิดแรงดันน้ำขึ้นเนื่องจากแรงกระทำจากภายนอก (หน่วยแรงรวม) ซึ่งเรากำหนดหน่วยแรงประสิทธิผลได้จาก

$$\sigma' = \sigma - \Delta u \tag{8.7}$$

ดังนั้นในกรณีของการทดสอบแบบ CU จะเขียน Mohr's circle ได้ทั้งแบบหน่วยแรงรวมและหน่วยแรงประสิทธิผล

8.12 แรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นเมื่อมีรับแรงกระทำแบบ Axisymmetric

แรงดันน้ำในตัวอย่างทดสอบจะเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงกระทำภายนอก ซึ่ง Skempton (1954) เสนอสมการเพื่อให้คำนวณแรงดันน้ำในกรณีสมมาตรรอบแกนหมุน (Axisymmetry)

$$\Delta u = B(\Delta \sigma_3 + A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)) \tag{8.8}$$

$\Delta \sigma_3$ 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)

ถ้าเราจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} = B \left(1 + A \left(\frac{\Delta \sigma_1}{\Delta \sigma_3} - 1 \right) \right) \tag{8.9}$$

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

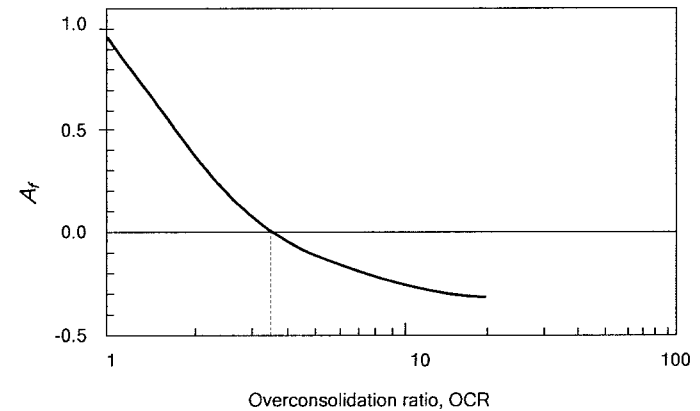
$$\frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} = B$$

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

ซึ่งหมายความว่าถ้าเราเพิ่มแรงดันดินด้านข้าง σ_3 จะทำให้แรงดันน้ำในตัวอย่างเพิ่มขึ้นเท่ากับ σ_3 และที่จุดวิกฤติ

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

Δu_d แรงดันน้ำเปลี่ยนแปลงซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจาก Deviatoric stress



รูปที่ 8.19 การเปลี่ยนแปลงของค่า A_f ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า OCR

ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า A_f จะแปรเปลี่ยนตามค่า OCR

OCR < 2 แรงดันน้ำส่วนเกินจะเป็นบวก (เกิดหน่วยแรงดัน)

OCR > 2 แรงดันน้ำส่วนเกินจะเป็นลบ (เกิดหน่วยแรงดูด) ดังรูป

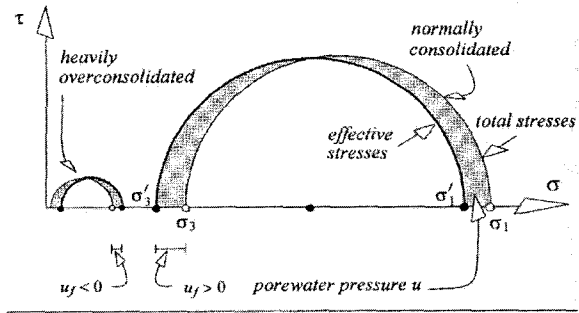


Figure 5.21: Effect of the state of a clay on its strength.

8.13 Unconfined compression (UC test)

เป็นการทดสอบที่ง่ายที่สุด ไม่มีแรงดันด้านข้าง ดังนั้นจึงทดสอบได้เฉพาะตัวอย่างดินเหนียวซึ่งเกาะกันเป็นก้อนเท่านั้น

clay consistency	c_u (kN/m ²)
very soft	< 20
soft	20-40
firm to medium	40-75
stiff	75-150
very stiff	> 50

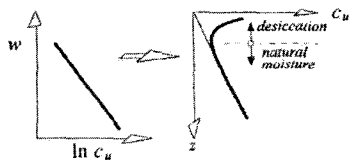


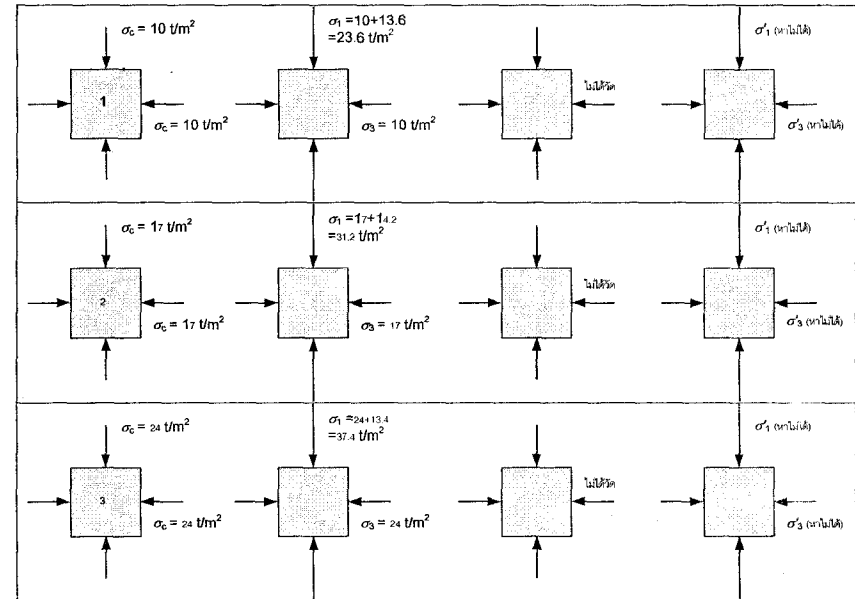
Figure 5.20: Variation of c_u with depth for a normally consolidated clay.

8.14 Unconsolidated Undrained (UU test)

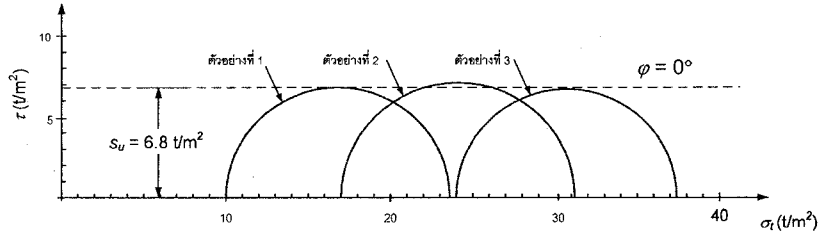
จะเห็นว่า failure envelop เป็นเส้นราบ ($\phi = 0$) และ $\sigma_f = s_u$

ตัวอย่างที่ 8.1 จงคำนวณหา Shear strength พารามิเตอร์ จากผลการทดสอบ Unconsolidated Undrained triaxial test

การทดสอบชนิดนี้ไม่มีการวัดแรงดันน้ำในดิน ดังนั้นจึงต้องวิเคราะห์ด้วยวิธีหน่วยแรงรวม เพราะถ้ามีแรงดันน้ำ จึงจะคำนวณหน่วยแรงประสิทธิผลได้



รูปที่ 8.20 สถานะของหน่วยแรงของตัวอย่างที่ 1 ณ จุดที่ดินวิบัติ

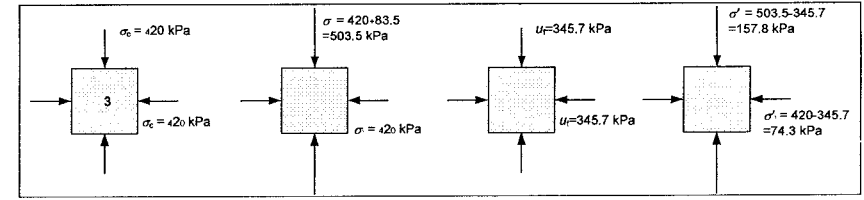
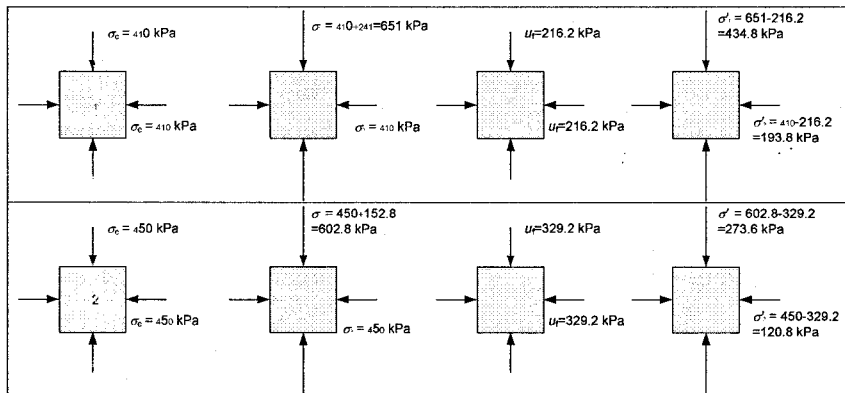


รูปที่ 8.21

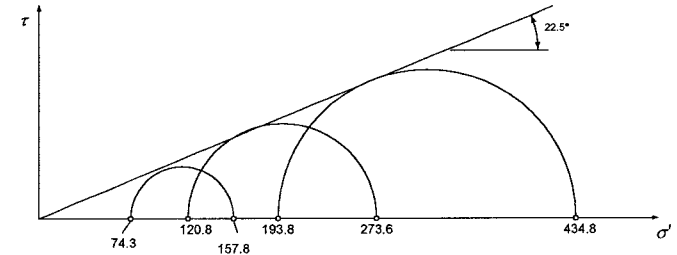
ตัวอย่างที่ 8.2 จงคำนวณ Shear strength พารามิเตอร์ จากผลการทดสอบ Consolidated Drained triaxial test

Sample no.	Cell pressure, σ_c (t/m ²)	Deviator stress at failure, $\sigma_d = (\sigma_1 - \sigma_3)$, (t/m ²)	Pore pressure = Backpressure (u) (t/m ²)
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



รูปที่ 8.22



รูปที่ 8.23

รูปที่ 8.24 จากสถานะของหน่วยแรงรวม (Total stress) และหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress) จากผลการทดสอบ 3 ตัวอย่างนำไปเขียนลงใน Mohr's circle จะได้

ตัวอย่างที่ 8.3 จงคำนวณ Shear strength พารามิเตอร์ จากผลการทดสอบ Consolidated Undrained triaxial test

หาใจข้มมาได้ด้วย

ตัวอย่างที่ 8.4 จากผลการทดสอบ Unconfined compression test จงคำนวณกำลังรับแรงเฉือนของดิน

หาใจข้มมาได้ด้วย

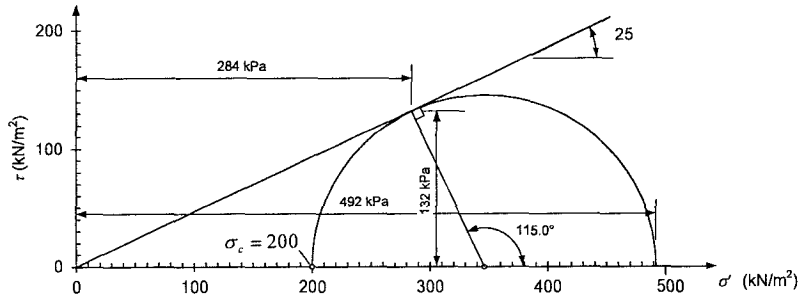
Problem ถ้าดิน Normally consolidated clay มีค่า Internal friction angle เป็น 25°

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

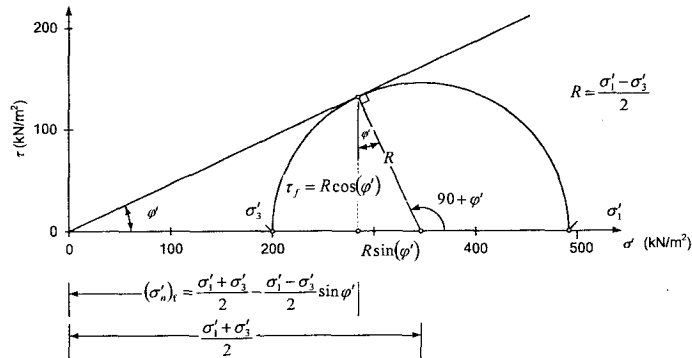
b) จากข้อ a) จงคำนวณหาค่าหน่วยแรงตั้งฉากและหน่วยแรงเฉือนที่ตัวอย่างเกิดการวิบัติ พร้อมทั้งแสดงระนาบที่ดินวิบัติด้วย

การคำนวณ ทำได้สองวิธีคือ

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



รูปที่ 8.25 ใช้วิธีการพิก โดยการเขียนรูป Mohr's circle แล้ววัดระยะ



รูปที่ 8.26 ใช้วิธี Mohr's circle ประกอบกับเรขาคณิตวิเคราะห์

$$\frac{\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}}{\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}} = \sin \phi'$$

$$\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} = \sin \phi'$$

$$\sigma'_1 - \sigma'_1 \sin \phi' = \sigma'_3 - \sigma'_3 \sin \phi'$$

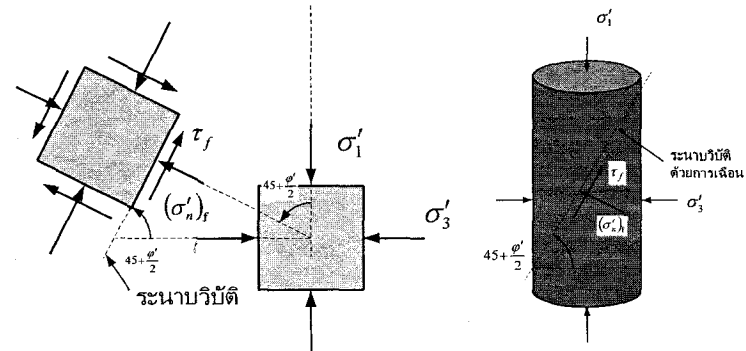
$$\sigma'_1 (1 - \sin \phi') = \sigma'_3 (1 + \sin \phi')$$

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

ซึ่งถ้าเรารู้ค่ามุม Friction angle (ϕ') เราจะคำนวณ Major principle stress (σ'_1) ได้จาก Minor principle stress (σ'_3) และคำนวณสถานะของหน่วยแรงบนระนาบที่เกิดการวิบัติ ได้โดยพิจารณาจาก Mohr's circle

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

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



รูปที่ 8.27

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

หน่วยแรงหลักมากที่สุด

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

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

หน่วยแรงบนระนาบที่เกิดการวิบัติ

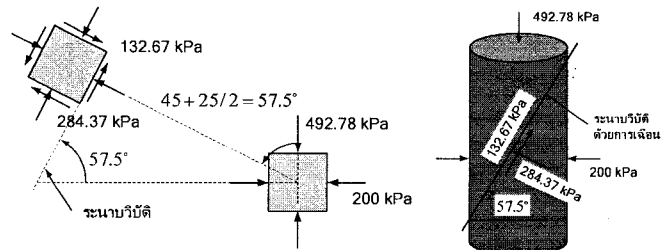
$$(\sigma'_n)_f = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \sin \phi'$$

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

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

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

ซึ่งนำมาเขียนเป็นสถานะของหน่วยแรงบนระนาบที่เกิดการวิบัติได้ดังรูป

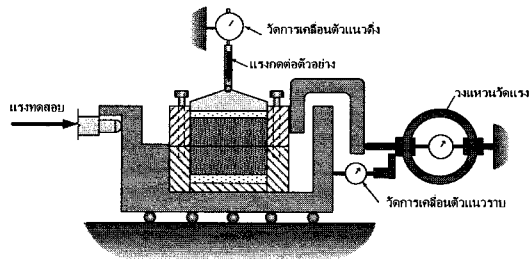


รูปที่ 8.28

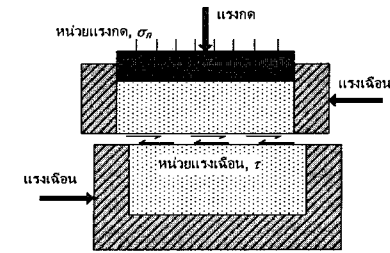
8.15 กำลังรับแรงเฉือนของดินทราย

- ดินทรายมีค่า Permeability สูงเมื่อรับแรงกระทำ Excess pore pressure ที่เกิดขึ้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว
- การวิเคราะห์กำลังรับแรงเฉือนของดินจึงใช้การวิเคราะห์แบบ Effective stress analysis
- ผลการทดสอบจะได้ Shear strength parameter ที่อยู่ในรูปของ Effective stress คือ

การเก็บตัวอย่างดินทรายที่คงสภาพเดิมเหมือนอยู่ในสนามทำได้ยาก ไม่เหมือนกับดินเหนียว ทำให้ต้องทดสอบดินทรายในสนาม (In-situ test) วิธีการทดสอบตัวอย่างดินทรายที่ไม่คงสภาพเดิมคือ Direct shear test ซึ่งจะนำตัวอย่างทรายมาบดอัดใหม่ให้มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับสภาพในสนามมากที่สุดจากนั้นทดสอบโดยให้แรงเฉือนกระทำ

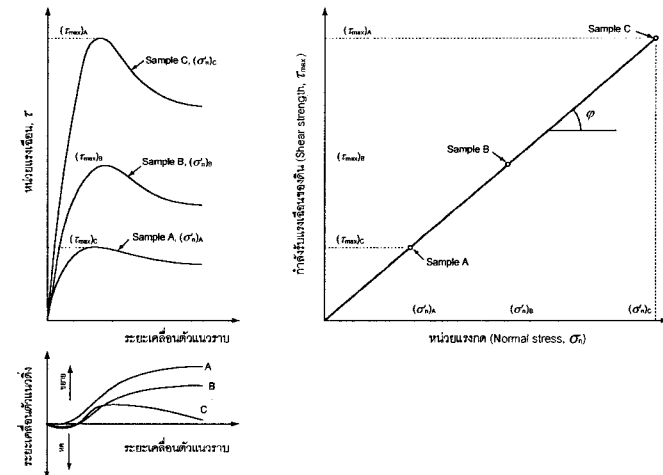


รูปที่ 8.29 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ Direct shear



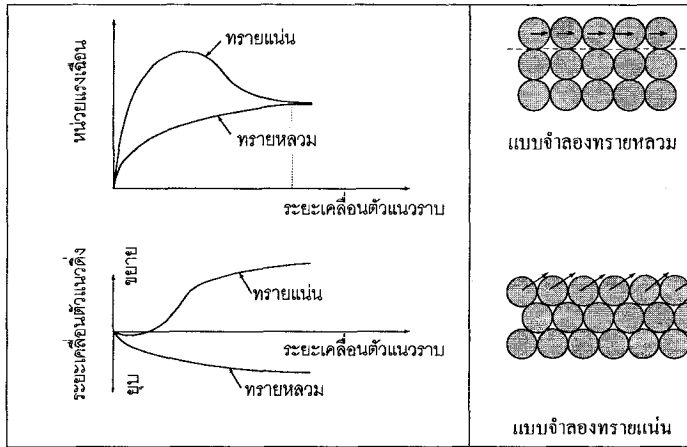
รูปที่ 8.30 แผนภาพแสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการทดสอบ

เมื่อทำการทดสอบจะวัดการเคลื่อนตัวในแนวอนและการเคลื่อนตัวในแนวตั้งที่แรงเฉือนต่างๆ แล้วนำมาเขียนกราฟจะได้กราฟดังรูป



รูปที่ 8.31

ในการทดสอบดินทรายจะมีพหุคูณที่มีแรงเฉือนกระทำที่น่าสนใจคือ



รูปที่ 8.32

- ดินทรายแน่น

ดินทรายแน่นจะมีปริมาตรลดลงในช่วงแรกของการเฉือนจากนั้นปริมาตรจะเพิ่มขึ้น ส่วนหน่วยแรงเฉือนจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดแล้วจะลดลง

- ดินทรายหลวม

ดินทรายหลวมจะมีปริมาตรลดลงตลอดการเฉือนด้วยซ้ำ หน่วยแรงเฉือนจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุดสูงสุดโดยไม่มีการลดลงของหน่วยแรงเฉือน

8.16 แบบฝักหัด

บรรณานุกรม

- Balasubramaniam, A. S. and R. P. Brenner (1981). "Consolidation and settlement of soft clay in soft clay engineering." *Development in Geotechnical Engineering*, Elsevier.
- Barnes, G. (2000). *Soil Mechanics: Principles and Practice: 2nd edition*, Macmillan Press Ltd.
- CUR_Rport_162 (1996). *Building on soft soils: Design and construction of earth structures both and into highly compressible subsoils of low bearing capacity*, A. A. Balkema.
- Das, B. M. (1995). *Principles of Foundation Engineering - 3rd edition*, PWS Publishing.
- EKA The European Kaolin Association.
- Head, K. H. (1980). *Manual of soil laboratory testing*. London, Pentech Press.
- Lambe, W. and R. Whitman (1928). *Soil Mechanics, SI Version*, John Wiley & Sons.
- USACE (1990). *Engineering manual EM 1110-1-1904*, Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers.
- พรพจน์, ด. (2550). ผลของการพองตัวและหดตัวของดินเหนียวรวมตัวบดอัดต่อฐานรากดิน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, โรงแรมอริรินทร์สถาน จ.พิษณุโลก 2-4 พฤษภาคม
- วรการ (-). เอกสารประกอบการบรรยาย "วิศวกรรมเขื่อนดิน", ภาควิชาวิศวกรรมโยธา และ โครงการซ่อมแซมและปรับปรุงเขื่อนมูลบน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.