

บทที่ 1

ดิน

ดิน (Soil) หมายถึง วัตถุทางธรรมชาติที่เกิดจากการแปรสภาพหรือสลายตัวของหินและแร่ธาตุ ซึ่งทับถมกันในสภาพที่ไม่แน่นอน โดยอาจจะมีอินทรีย์วัตถุเป็นส่วนประกอบด้วยหรือไม่ก็ได้ แต่ความหมายของดินในทางวิศวกรรม “ดิน” หมายถึง กรวด (Gravel) ทราย (Sand) ทรายแป้ง (Silt) และดินเหนียว (Clay)

1.1 การกำเนิดของดิน

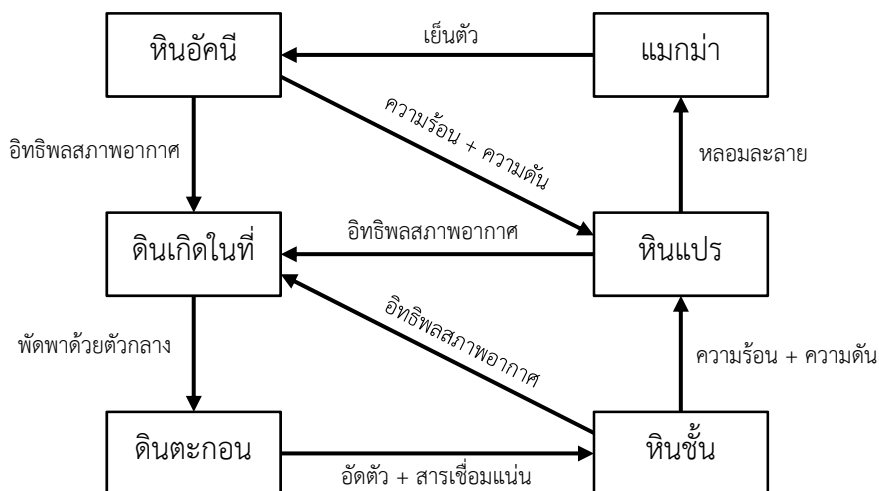
ดินที่ปกคลุมโลกส่วนใหญ่เกิดจากการผุ (Weathering) สลายตัวจากหินประเภทต่างๆ โดยการกัดกร่อนถูกแบ่งออกเป็น 2 แบบได้แก่ การผุทางกายภาพและการผุทางเคมี

การผุทางกายภาพ (Physical Weathering) คือกระบวนการที่หินหลักถูกทำให้แตกเป็นชิ้นเล็กๆ เนื่องจากแรงทางกายภาพ โดยหินหรือดินที่แตกตัวออกมา ยังคงมีส่วนประกอบทางเคมีเหมือนเดิม ตัวอย่างของการกัดกร่อนทางกลได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิซึ่งจะทำให้เกิดการขยายตัวและหดตัวของหินเนื่องจากการได้รับหรือสูญเสียความร้อน นำไปสู่การเกิดรอยแตกร้าวของหิน การจับตัวเป็นน้ำแข็งของน้ำคืออีกตัวอย่างหนึ่งของการกัดกร่อนทางกล เมื่อน้ำไหลเข้าสู่ช่องว่างของหินเมื่ออุณหภูมิลดลงจนกระทั่งน้ำเกิดจับตัวเป็นน้ำแข็ง ซึ่งทำให้ปริมาตรของน้ำเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดแรงดันจากภายในช่องว่างของหินและทำให้หินเกิดการแตกตัว นอกจากนี้การกัดกร่อนทางกลยังเกิดจาก แรงจากการไหลของน้ำ แรงลม แรงคลื่น แรงจากการเคลื่อนที่ของน้ำแข็ง ฯลฯ

การผุทางเคมี (Chemical Weathering) คือกระบวนการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบทางเคมีของหินหลัก ซึ่งทำให้แร่ธาตุเดิมของหินหลักเปลี่ยนไปเป็นแร่ธาตุใหม่ที่แตกต่างไปจากเดิม ตัวอย่างเช่นการกัดกร่อนทางเคมีของแร่เฟลสปาร์ (Feldspar) สามารถทำให้เกิดแร่ดินเหนียวได้ (Clay Minerals) ฯลฯ

1.2 วัฏจักรทางธรณีวิทยา

การกำเนิดของดินอาจแสดงในรูปของวัฏจักรทางธรณีวิทยาได้ดังรูปที่ 1.1 เมื่อภูเขาไฟระเบิดและพ่นหินละลาย หรือแมกมา (Magma) ออกมา แมกมาเย็นลงและจับตัวกันเป็นก้อนแข็งกลายเป็นหินอัคนี (Igneous Rock) จากนั้นหินอัคนีอาจเกิดการกัดกร่อนย่อยสลายกลายเป็นดิน เนื่องจากอิทธิพลของสภาพอากาศ (Weathering) กลายเป็นดินที่เกิดในที่ (Residual Soil) หรือหินอัคนีอาจเปลี่ยนแปลงกลายเป็นหินแปร (Metamorphic Rock) เนื่องจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงโดยความร้อนและความดัน (Metamorphism) ดินที่เกิดอยู่กับที่บางส่วนจะถูกพัดพาด้วยตัวกลาง เช่น ลม น้ำ เป็นต้น ไปตกตะกอนทับถมในสถานที่ใหม่กลายเป็นดินตะกอน (Sedimentary Soil) หรืออาจ



รูปที่ 1.1 วัฏจักรทางธรณีวิทยา

เรียกว่า ดินที่เกิดโดยการพัดพา (Transported Soil) เมื่อดินตะกอนมีการทับถมเป็นเวลานานก็จะเกิดการจับตัวแน่น (Lithification) กลายเป็นหินชั้น (Sedimentary Rock) หินชั้นเมื่อได้รับความร้อนและความดันที่เพียงพอก็จะกลายเป็นหินแปร ในอีกทางหนึ่งหินชั้นอาจได้รับอิทธิพลจากสภาพอากาศจนเกิดการกัดกร่อนและสลายตัวกลายเป็นดินที่เกิดในที่ เช่นเดียวกันหินแปรอาจเกิดการกัดกร่อนย่อยสลายกลายเป็นดินที่เกิดในที่เหมือนกับหินชั้น หรือหินแปรอาจได้รับความร้อนจนกระทั่งละลายกลายเป็นແມ່ງມ່ และเมื่อແມ່ງມ່เย็นตัวก็จะกลายเป็นหินอัคนีวนเป็นวัฏจักรทางธรณีวิทยา

1.3 การแบ่งประเภทของดินตามลักษณะการเกิด

ดินที่สลายตัวจากหินหลักสามารถตกตะกอนทับถมได้ 2 แบบ ได้แก่การตกตะกอนทับถมในบริเวณเดียวกันกับหินหลักซึ่งเรียกว่าดินที่เกิดอยู่กับที่ หรือการตกตะกอนในบริเวณที่อยู่ห่างไกลจากหินหลักเนื่องจากถูกพัดพาด้วยตัวกลางแบบต่างๆ ซึ่งเรียกว่าดินที่เกิดโดยการพัดพา

1.3.1 ดินที่เกิดอยู่กับที่

ดินที่เกิดอยู่กับที่ (Residual Soil) หมายถึง ดินที่มีการกัดกร่อน และแตกตัวออกจากหินหลัก หรือหินแม่แล้วตกตะกอนทับถมอยู่กับที่ ไม่มีการเคลื่อนย้ายไปที่อื่น หรือในกรณีที่อัตราการกัดกร่อนของหินหลักเกิดขึ้นมากกว่าอัตราการถูกพัดพาโดยตัวกลาง โดยปกติแล้วอัตราการกัดกร่อนในพื้นที่อบอุ่นและชื้นจะสูงกว่าพื้นที่แห้งและหนาวเย็น

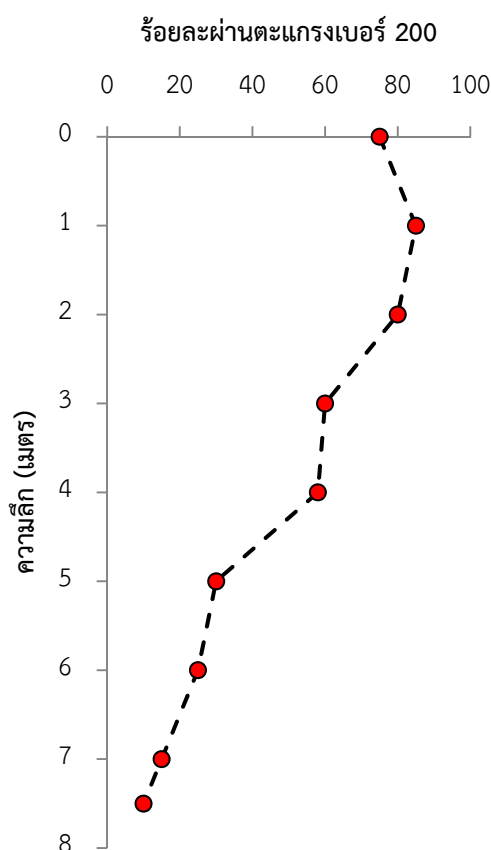
โดยทั่วไปแล้วลักษณะทางธรรมชาติของดินที่เกิดอยู่กับที่จะขึ้นอยู่กับหินหลัก ตัวอย่างเช่น เมื่อหินแกรนิตถูกกัดกร่อน แร่ธาตุส่วนใหญ่จะตกตะกอนทับถมอยู่กับที่ ลักษณะของดินประเภทนี้ดินชั้นบนจะเป็นดินเหนียวหรือดินเหนียว (Clay) ปนดินทรายแป้ง (Silty Clay) ดินชั้นถัดไปจะเป็นดิน

ทรายแป้ง (Silt) หรือดินทราย (Sand) ซึ่งวางอยู่บนชั้นหินหลักที่ถูกกัดกร่อนบางส่วนและหินหลักตามลำดับ โดยลักษณะสำคัญของดินประเภทนี้คือเม็ดดินที่อยู่ด้านบนจะมีขนาดเม็ดที่เล็กกว่าเม็ดดินที่ด้านล่างและขนาดของเม็ดดินจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ ตามความลึกของดิน รูปที่ 1.2 แสดง boring log ของดินที่เกิดอยู่กับที่เนื่องจากการสลายตัวของหินแกรนิต

ในทางตรงกันข้ามหากดินที่เกิดอยู่กับที่เกิดจากการสลายตัวของหินปูนซึ่งเกิดจากการจับตัวของแร่แคลไซต์ (CaCO_3) ซึ่งเป็นแร่ธาตุที่สามารถละลายน้ำได้ ทำให้แร่ธาตุบางส่วนละลายไปกับน้ำใต้ดินและคงเหลือไว้เพียงแร่ธาตุที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งจะทำให้ลักษณะการกระจายขนาดของเม็ดดินไม่เป็นไปตาม Boring Log ในรูปที่ 1.2

1.3.2 ดินที่เกิดโดยการพัดพา

ดินที่เกิดโดยการพัดพา (Transported Soil) หมายถึง ดินที่เมื่อกัดกร่อนสลายตัวออกจากหินหลักแล้วถูกพัดพาไปยังที่อื่นโดยตัวกลางชนิดต่างๆ เช่น น้ำ ลม แร่งโน้มถ่วง เป็นต้น การที่ตัวกลางพัดพาเม็ดดินไปยังที่อื่นๆ จะส่งผลกระทบต่อรูปร่าง ผิวสัมผัสและการจัดเรียงขนาดของเม็ดดิน ดินที่เกิดโดยการพัดพาสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 กลุ่มใหญ่ๆ ตามชนิดของตัวกลางที่พัดพา



รูปที่ 1.2 Boring Log ของดินที่เกิดอยู่กับที่จากการสลายตัวของหินแกรนิต

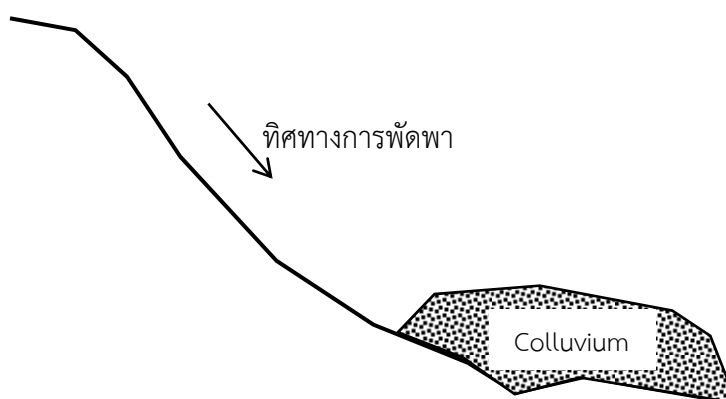
1) ดินที่เกิดโดยพัดพาของแรงโน้มถ่วง (Gravity Transported Soil) ดินที่เกิดอยู่กับที่บริเวณที่เป็นที่ลาดตามธรรมชาติสามารถที่จะถูกแรงโน้มถ่วงทำให้ไหลลงมาบริเวณด้านล่างได้ การพัดพาแบบนี้จะทำให้ดินเกิดการเคลื่อนที่จากที่สูงลงสู่ที่ต่ำ โดยหากดินค่อยๆ ไหลลงมาเราจะเรียกว่า การคืบ (Creep) แต่หากดินไหลลงมาด้วยความเร็วเราจะเรียกว่าการถล่ม (Land-Slide) โดยเรามีชื่อเรียกเฉพาะสำหรับดินประเภทนี้ว่า Colluvium ดังแสดงในรูปที่ 1.3

2) ดินที่เกิดโดยการพัดพาของน้ำและตกตะกอนในแม่น้ำ (Alluvial Deposits) ดินประเภทนี้จะมีน้ำเป็นตัวกลางในการพัดพา โดยการเคลื่อนที่ของไหลจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำเช่นเดียวกับการพัดพาของแรงโน้มถ่วง เมื่อธารน้ำสูญเสียความเร็วก็จะเกิดการตกตะกอนทับถมซึ่งเรียกว่า ดินตะกอนน้ำพา (Alluvial Soil) การตกตะกอนทับถมของดินที่เกิดโดยการพัดพาของน้ำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ ได้แก่ แบบธารประสานสาย (Braided-Stream) และแบบทางน้ำโค้งตัว (Meander Stream)

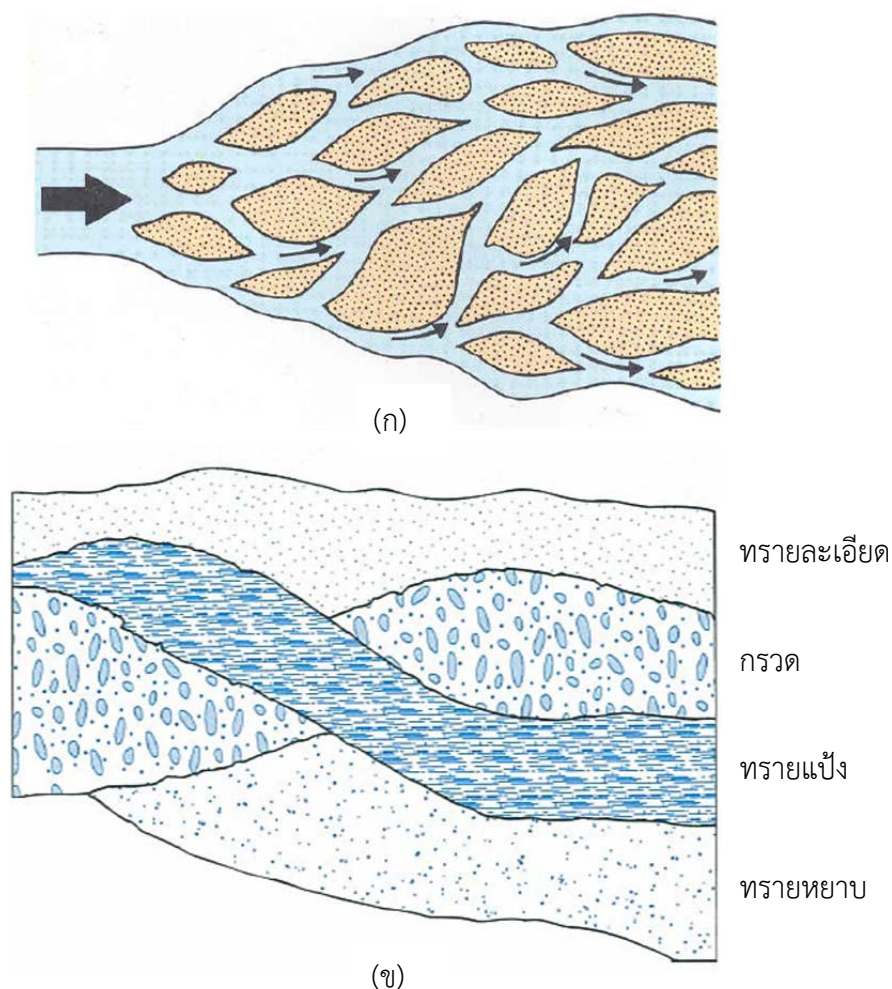
(1) การตกตะกอนทับถมของลำน้ำแบบธารประสานสาย Braided-Stream ธารประสานสายเป็นธารน้ำที่มีความลาดชันทำให้น้ำไหลเร็วและแรงส่งผลให้มีการกัดเซาะสูง ตะกอนจำนวนมากถูกพัดพาไปตามกระแสน้ำ เมื่อธารน้ำเกิดการสูญเสียความเร็วจะทำให้เกิดการตกตะกอนทับถม จากกระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดธารน้ำหลายสายที่ไหลทั้งแยกและรวมกัน โดยมีสันดอนทรายเป็นตัวกำหนดทิศทางการไหลของน้ำดังแสดงในรูปที่ 1.4 (ก)

รูปแบบการทับถมของธารน้ำแบบธารประสานสายจะมีลักษณะการแบ่งชั้นที่ไม่เป็นระเบียบและมีขนาดของเม็ดดินจะมีการกระจายตัวค่อนข้างกว้าง ดังรูปที่ 1.4 (ข) คุณลักษณะของการทับถมของธารประสานสายมีดังนี้

- ขนาดของเม็ดดินจะเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่างทรายแป้งถึงกรวด (จะไม่พบการตกตะกอนของดินเหนียวในธารประสานสาย)
- แม้ว่าขนาดของเม็ดดินจะมีการกระจายตัวค่อนข้างกว้างในธารประสานสาย แต่



รูปที่ 1.3 ลักษณะการทับถมของดินที่เกิดโดยการพัดพาของแรงโน้มถ่วง



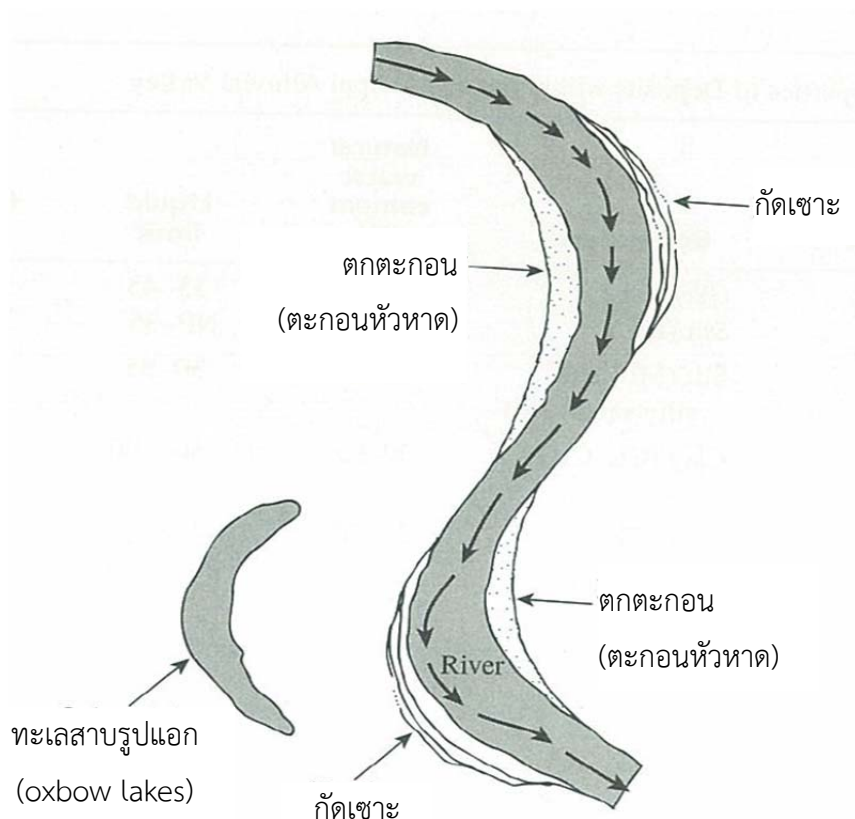
รูปที่ 1.4 (ก) ลักษณะธารน้ำประสานสาย (ข) รูปตัดขวางธารประสานสาย

ที่มา: Physical Geology by Charles C., Plummer and David McGeary (1991)

ขนาดของเม็ดดิน ณ จุดเดียวกันจะมีขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอ

■ ณ ความลึกเดียวกัน อัตราส่วนช่องว่างและหน่วยน้ำหนักของดินอาจมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมากแม้ว่าระยะทางจะห่างกันเพียงไม่กี่เมตร ในทำนองเดียวกัน ค่าความต้านทานทะลุทะลวงมาตรฐาน (Standard Penetration Test) ที่ได้จากหลุมเจาะต่างๆ ณ ความลึกเดียวกันก็อาจจะมีค่าไม่สม่ำเสมอ

(2) การตกตะกอนทับถมของธารน้ำแบบโค้งตัว (Meander Stream) ธารน้ำส่วนมากจะไม่เป็นแนวตรง แต่จะมีการคดไปคดมา โดยความโค้งจะค่อยๆ ขยายกว้างขึ้นเนื่องจากการกัดเซาะของน้ำที่เกิดด้านนอกโค้ง ในขณะที่ด้านในโค้งจะเกิดการตกตะกอนทับถม ดังแสดงในรูปที่ 1.5 ซึ่งเรียกว่า ตะกอนหัวหาด (Point bars)



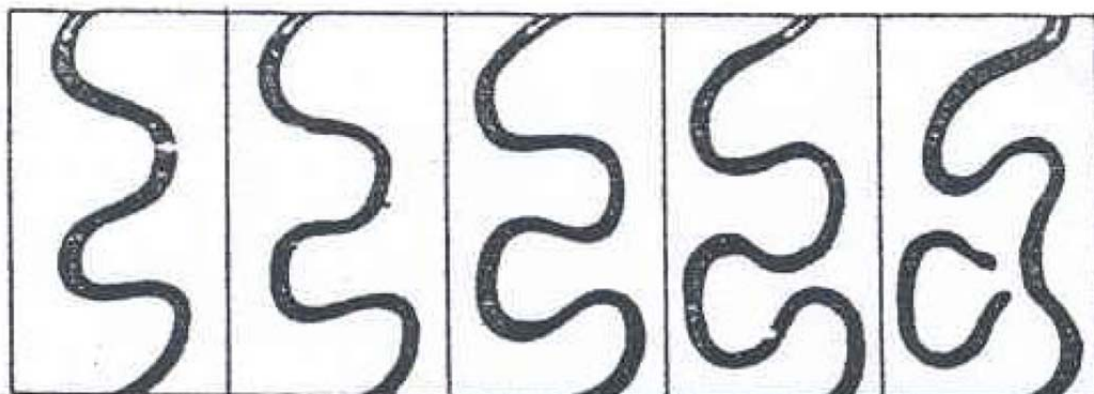
รูปที่ 1.5 ลักษณะการกัดเซาะและทับถมของธารน้ำแบบโค้งตัว

ที่มา: Physical Geology by Charles C., Plummer and David McGeary (1991)

เมื่อเวลาผ่านไปธารน้ำจะมีการกัดเซาะและตกตะกอนทับถมจนกระทั่งความโค้งของธารน้ำแคบลงจนเกิดเป็นคอคอด ธารน้ำในบริเวณนี้จะมีลักษณะคล้ายกับห่วงเชือก ในบางครั้งกระแสน้ำอาจกัดเซาะแผ่นดินตรงคอคอดจนทำให้ธารน้ำช่วงที่มีลักษณะเป็นห่วงถูกตัดขาดไปจากธารน้ำหลัก เมื่อมีการตกตะกอนทับถมตรงบริเวณรอยต่อกับธารน้ำหลักจะทำให้เกิดเป็นทะเลสาบรูปแอก (Oxbow Lake) กระบวนการเกิดทะเลสาบรูปแอกสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.6

3) ดินที่เกิดโดยการพัดพาของน้ำไปตกตะกอนในทะเลสาบ (Lacustrine Deposits) ดินประเภทนี้เกิดจากการทับถมอย่างต่อเนื่องโดยกระแสน้ำจากแม่น้ำลงสู่ทะเลสาบ การตกตะกอนเกิดขึ้นอย่างเป็นลำดับ โดยน้ำจะพัดพาเม็ดดินจากที่สูงไปสู่ที่ต่ำซึ่งดินที่มีเม็ดดินขนาดใหญ่ เช่น กรวด หินทราย ซึ่งมีน้ำหนักมากจะเริ่มตกตะกอนทับถมก่อน ในขณะที่ดินที่มีขนาดเล็กกว่าจะถูกพัดพาไปได้ไกลกว่าและตกตะกอนทับถมในทะเลสาบดังแสดงในรูปที่ 1.7

4) ดินที่เกิดโดยการพัดพาของธารน้ำแข็ง (Glacial Deposits) ในช่วงยุคน้ำแข็งไพลิสโตซีน (Pleistocene Ice Age) พื้นที่ขนาดใหญ่ของโลกได้ถูกปกคลุมไปด้วยธารน้ำแข็ง ในระหว่างที่ธาร

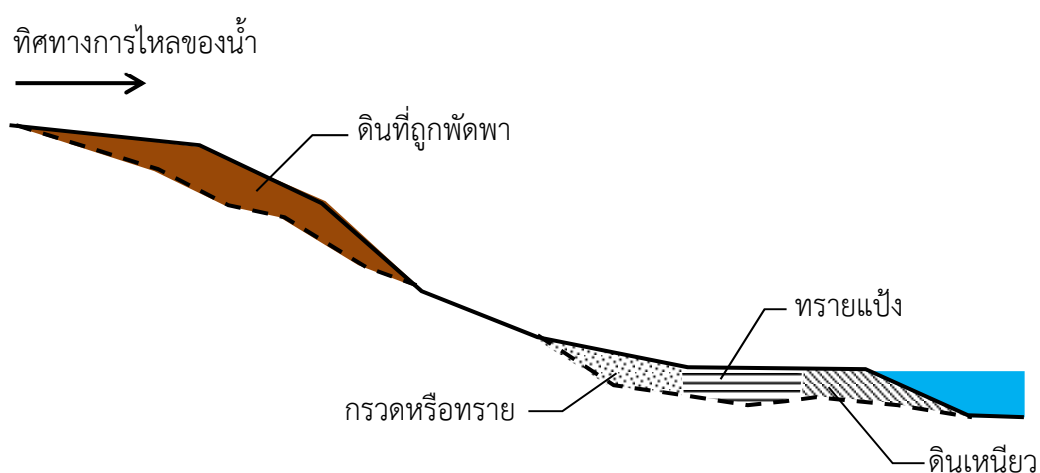


รูปที่ 1.6 การเกิดทะเลสาบรูปแอก

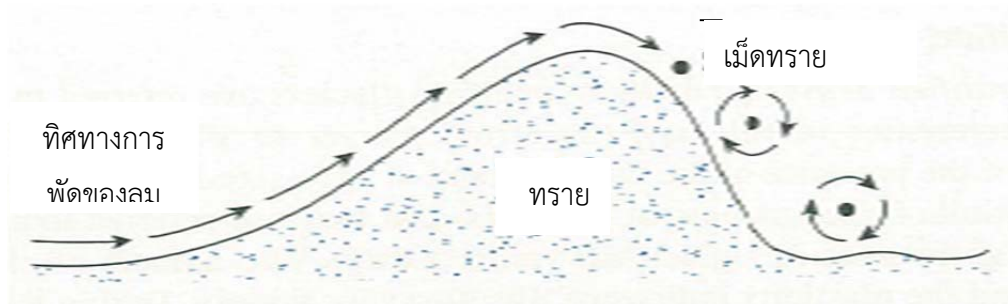
ที่มา: Holmes Principles of Geology by A. Holmes and D.L. Holmes (1978)

น้ำแข็งสะสมตัวเพิ่มขึ้น ทราย ทรายแป้ง ดินเหนียว กรวด และเศษหินแตก ได้ถูกดูดกลืนรวมเข้าไป ด้วยกับธารน้ำแข็ง เมื่อธารน้ำแข็งเคลื่อนตัวไปก็จะพัดพาดินเหล่านี้ติดไปด้วย และเมื่อน้ำแข็งละลาย ดินเหล่านี้ก็จะเกิดการตกตะกอนทับถมกันบริเวณนั้น ซึ่งถูกเรียกว่าเศษหินธารน้ำแข็ง (Moraines)

5) ดินที่เกิดโดยการพัดพาของลม (Aeolian Soil Deposits) ดินประเภทนี้จะมีลักษณะเป็น เม็ดละเอียดแห้ง เนื่องจากลมมีพลังงานในการพัดพาไม่มากจึงสามารถพัดพาได้เฉพาะดินที่มีขนาด เม็ดเล็ก ลมเป็นตัวกลางที่สำคัญโดยเฉพาะบริเวณทะเลทราย ซึ่งเม็ดทรายจะทับถมสะสมตัวกัน ออกมาในรูปของเนินทราย (Dunes) ดังแสดงในรูปที่ 1.8 เมื่อเนินทรายก่อตัวขึ้นเม็ดทรายจะถูกลม พัดขึ้นไปตามเนินทรายจนกระทั่งข้ามสันทรายเม็ดทรายจะกลิ้งตามความลาดหลังเนินทราย กระบวนการดังกล่าวจะทำให้เกิดการอัดตัวของเม็ดทรายบริเวณด้านหน้าเนินทรายและเกิดทราย



รูปที่ 1.7 ลักษณะการทับถมของดินทะเลสาบ



รูปที่ 1.8 ลักษณะการพัดพาเม็ดทรายผ่านเนินทราย

ที่มา: Holmes Principles of Geology by A. Holmes and D.L. Holmes (1978)

หลวมบริเวณด้านหลังเนินทราย คุณลักษณะสำคัญของเนินทรายสามารถสรุปได้ดังนี้

- ขนาดของเม็ดทรายจะมีขนาดสม่ำเสมอ
- ขนาดของเม็ดทรายจะลดลงเมื่อระยะทางจากแหล่งกำเนิดเพิ่มขึ้น เนื่องจากลมสามารถพัดพาเม็ดทรายขนาดเล็กไปได้ไกลกว่าเม็ดทรายขนาดใหญ่
- ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของทรายที่ฝั่งด้านหน้าเนินทรายอาจมีค่าสูงถึง 50 – 65% ในขณะที่ฝั่งด้านหลังเนินทรายอาจมีค่าต่ำเพียง 0 – 15%

1.4 ดินอินทรีย์ (Organic Soil)

โดยปกติจะพบดินอินทรีย์ในบริเวณพื้นที่ต่ำที่ระดับน้ำอยู่ใกล้หรือเหนือผิวดิน ซึ่งน้ำจะช่วยในการเจริญเติบโตของพืชบางชนิด และเมื่อพืชเกิดการย่อยสลายก็จะทำให้เกิดเป็นดินอินทรีย์ขึ้น ดินอินทรีย์มีคุณสมบัติทั่วไปดังนี้

- ปริมาณความชื้นจะมีค่าอยู่ในช่วง 200 – 300%
- สามารถเกิดการอัดตัวได้สูง
- จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่าจะเกิดการทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำขั้นที่สองมากที่สุด

1.5 การสำรวจดิน

การสำรวจดินมีวัตถุประสงค์หลักๆ เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลของลักษณะชั้นดิน คุณสมบัติต่างๆ ของดิน และระดับน้ำใต้ดิน ณ สถานที่นั้นๆ โดยข้อมูลดินที่ได้จากการสำรวจจะถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบ และเลือกวิธีการก่อสร้างที่เหมาะสม

การเจาะสำรวจ (Subsurface Exploration) เป็นการสำรวจใต้ผิวดินเพื่อหาขอบเขตของชั้นดิน ชั้นหินต่างๆ ที่อยู่ลึกลงไปจากระดับผิวดิน และเก็บตัวอย่างดินขึ้นมาเพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติ

ต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Test) หรืออาจจะทำการทดสอบหาคุณสมบัติของดินที่ระดับความลึกที่ต้องการ (In-situ Test) นอกจากนี้การเจาะสำรวจดินจะทำให้ทราบถึงระดับน้ำใต้ดิน (Ground Water Table) อีกด้วย การเจาะสำรวจแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1) การเจาะสำรวจขั้นต้น (Primary Exploration) เป็นการเก็บข้อมูลลักษณะการเปลี่ยนแปลงของชั้นดิน (Soil Profile) ระดับน้ำใต้ดิน และกำลังรับแรงของดินอย่างคร่าวๆ เพื่อใช้กำหนดจำนวนและระยะห่างของหลุมเจาะสำรวจ ตลอดจนความลึกของหลุมเจาะที่จะใช้ในการเจาะสำรวจแบบละเอียดต่อไป

2) การเจาะสำรวจแบบละเอียด (Detailed Exploration) การเจาะสำรวจแบบนี้จะมีการทำการทดสอบในที่และเก็บตัวอย่างดินตามระดับความลึกที่กำหนด เพื่อนำตัวอย่างดินมาวิเคราะห์หาคุณสมบัติต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ เช่น การกระจายตัวของเม็ดดิน ปริมาณน้ำ กำลังต้านทานแรงเฉือน การยุบอัดตัว เป็นต้น

1.6 วิธีการเจาะหลุมสำรวจ

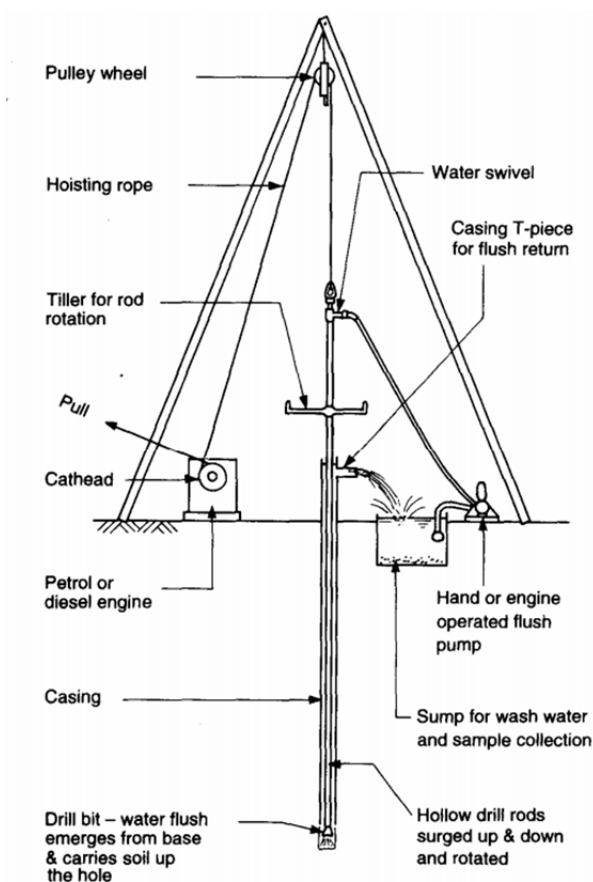
การเจาะสำรวจดินเพื่อเก็บตัวอย่างมีหลายวิธีด้วยกัน โดยวิธีที่มีความสะดวกและมีค่าใช้จ่ายในการเจาะสำรวจไม่สูงมากนักได้แก่วิธี การเจาะล้าง การเจาะปั่น การเจาะสว่าน และการเปิดบ่อทดสอบ ซึ่งมีรายละเอียดในการเจาะดังนี้

1.6.1 การเจาะล้าง (Wash Boring)

วิธีการเจาะล้างเป็นวิธีการเจาะสำรวจที่ได้รับความนิยมค่อนข้างมาก เนื่องจากเป็นวิธีการเจาะที่ทำได้ง่าย ไม่จำเป็นต้องใช้ช่างเจาะที่มีความชำนาญในการควบคุมเครื่องเจาะ รวมทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการเจาะไม่ซับซ้อน น้ำหนักเบาและสามารถถอดประกอบได้ ทำให้สะดวกต่อการขนย้าย อย่างไรก็ตามการเจาะล้างไม่สามารถเจาะผ่านชั้นกรวดใหญ่ ลูกรังแข็ง หินผุหรือดินดานได้

รูปที่ 1.9 แสดงเครื่องมือการเจาะสำรวจแบบการเจาะล้าง ซึ่งประกอบไปด้วยท่อกรู (Casing) ทำหน้าที่กรุผนังของหลุมเจาะไม่ให้พังทลาย โดยทั่วไปท่อกรูจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 75 – 100 มม. และยาวท่อนละ 1.0 – 1.5 ม. ตั้มน้ำหนักสำหรับตอกท่อกรู สามขาสำหรับยกก้านเจาะ ท่อกรู และตั้มน้ำหนัก ก้านเจาะซึ่งมีรูกลวงตรงกลางสำหรับให้น้ำไหลผ่าน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 50 มม. และยาวท่อนละ 1.5 – 3.0 ม. หัวน้ำและเครื่องปั้มน้ำ หัวเจาะหรือหัวกระแทก (Chopping Bit)

การเจาะล้างเกิดใช้พลังงานจากแรงกระแทกและแรงดันน้ำในการทำหลุมเจาะ ดินภายในหลุมเจาะจะถูกกระแทกด้วยหัวเจาะซึ่งถูกยกกระแทกขึ้นลงโดยช่างเจาะ (บางกรณีช่างเจาะอาจจะใช้มือช่วยบดหมุนก้านเจาะด้วย) ทำให้แตกเป็นชิ้นเล็กๆ ในขณะที่เดียวกันน้ำจะถูกฉีดดันลงไปตามรูกลวง



รูปที่ 1.9 เครื่องมือการเจาะสำรวจแบบการเจาะล้าง (Wash Boring)

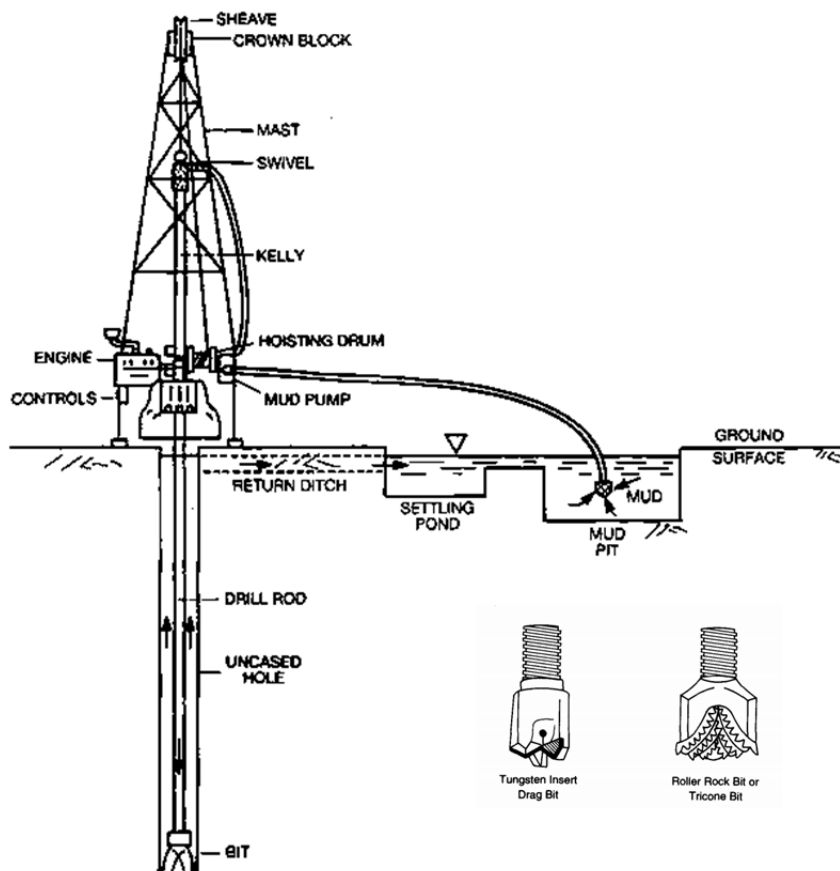
ที่มา: Site Investigation, Clayton et al. (อ้างถึง Hvorslev 1949)

ของก้านเจาะและไหลออกตรงปลายของหัวเจาะ น้ำจะทำหน้าที่ละลายดินให้กลายเป็นโคลนและดินเศษดินให้ไหลย้อนกลับขึ้นมาด้านบนหลุมเจาะและไหลไปยังถังตกตะกอน

โดยทั่วไปแล้วน้ำในถังตกตะกอนจะทำการหมุนเวียนน้ำผ่านปั้มน้ำ จึงจำเป็นจะต้องเตรียมน้ำให้เพียงพอต่อการปั้มน้ำกลับลงไปในหลุมเจาะ และเพื่อช่วยป้องกันการพังทลายของหลุมเจาะไม่ให้พังลงมาก่อนที่จะเก็บตัวอย่างดินที่ก้นหลุมน้ำที่ใช้ในการเจาะควรจะผสมสารละลายเบนโทไนท์ด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเจาะผ่านชั้นทราย

1.6.2 การเจาะปั่น (Rotary Drilling)

วิธีการเจาะปั่นและเครื่องมือของการเจาะปั่นจะมีความคล้ายคลึงกับการเจาะล้าง โดยจะแตกต่างกันที่การเจาะปั่นจะใช้เครื่องยนต์ในการหมุนก้านเจาะด้วยความเร็วคงที่และใช้ไฮดรอลิกในการกดหัวเจาะให้จมลงไป ดังแสดงในรูปที่ 1.10 นอกจากนี้รูที่ให้น้ำไหลออกบริเวณหัวเจาะจะถูกออกแบบให้ฉีดน้ำออกทางด้านข้างเพื่อหลีกเลี่ยงการฉีดน้ำโดยตรงไปที่ก้นหลุมเจาะ ทำให้การเจาะ



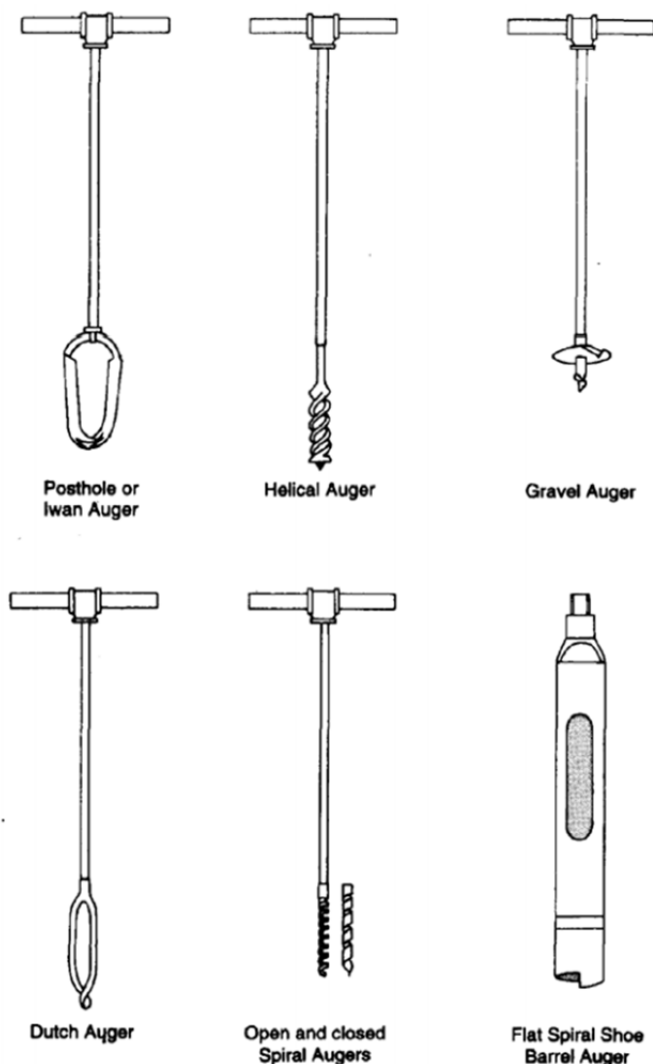
รูปที่ 1.10 เครื่องมือการเจาะสำรวจแบบการเจาะปั่น (Rotary Drilling)

ปั่นเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับว่าเป็นการเจาะที่ทำให้ชั้นดินเปลี่ยนสภาพไปจากเดิมน้อยที่สุดวิธีหนึ่ง นั่นคือเหมาะกับการเก็บตัวอย่างแบบคงสภาพ

การเจาะปั่นสามารถเจาะสำรวจได้ทั้งชั้นดินและชั้นหิน เนื่องจากเครื่องมือเจาะสำรวจถูก ออกแบบมาให้สามารถเปลี่ยนหัวเจาะให้เหมาะสมกับสภาพดินและหินได้ เช่น การเปลี่ยนมาใช้หัว เจาะเพชร หรือทังสเทนในการเจาะชั้นหินเป็นต้น

1.6.3 การเจาะสว่าน (Auger Boring)

การเจาะสว่าน อาจเรียกว่าวิธีการเจาะแห้ง เนื่องจากเป็นวิธีการเจาะที่ไม่ต้องใช้น้ำในการล้าง เศษดินเหมือนกับการเจาะล้างและการเจาะปั่น การเจาะสว่านจะใช้ดอกเจาะที่มีลักษณะเหมือนดอก สว่านในการคว้านดินออก ดังแสดงในรูปที่ 1.11 โดยจะหมุนลงไปในชั้นดินเป็นช่วงสั้นๆ จากนั้นต้อง ดึงดอกสว่านขึ้นจากหลุมเพื่อชักดินที่ติดกับใบสว่านออก แล้วจึงหย่อนสว่านที่ไม่มีดินติดลงไปในหลุม ใหม่ ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกว่าจะถึงระดับที่ต้องการหรือไม่สามารถดำเนินการเจาะต่อไปได้ เช่น เมื่อเจาะลงไปเจอหน้าไต้ดินหรือชั้นทราย ซึ่งจะทำให้เนื้อดินไม่สามารถยึดเกาะใบสว่านจนกระทั่งขึ้น มาถึงปากหลุมได้



รูปที่ 1.11 อุปกรณ์เจาะส่วน (Auger Boring)

ที่มา: Site Investigation, Clayton et al.

1.6.4 การเปิดบ่อทดสอบ (Test Pit)

การเปิดบ่อทดสอบจะสามารถทำได้ในความลึกประมาณ 2 – 3 เมตร เนื่องจากอาจเกิดการพังทลายของผนังบ่อหรือเจอกับน้ำใต้ดิน กระทำโดยการใช้แรงงานคนหรือเครื่องจักรในการขุดเปิดเป็นบ่อบริเวณที่ต้องการสำรวจ ทำให้สามารถตรวจสอบชนิดดินได้ทันที โดยการมองด้วยตาเปล่า สัมผัส และถ่ายภาพลักษณะชั้นดิน รวมทั้งยังสามารถเก็บตัวอย่างดิน หรืออาจทำการทดสอบในที่ได้เลย โดยตัวอย่างดินที่ได้จะเป็นตัวอย่างที่ได้รับการกระทบกระเทือนน้อยกว่าวิธีการอื่นๆ

การเจาะสำรวจดินแต่ละวิธีจะมีข้อดี ข้อด้อยต่างกัน ตารางที่ 1.1 แสดงการเปรียบเทียบวิธีการเจาะสำรวจแบบต่างๆ

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบการเจาะสำรวจด้วยวิธีการต่างๆ (ที่มา แนวทางการตรวจสอบชั้นดินเพื่องานฐานราก, วสท.)

วิธีเจาะสำรวจ	หลักการ	การสังเกตการเปลี่ยนชั้นดินขณะเจาะ	การขนย้าย	ค่าใช้จ่าย	คุณภาพของหลุมเจาะ	ข้อจำกัด
การเจาะล้าง	ใช้น้ำฉีดล้างขณะยกหัวเจาะกระแทกขึ้น-ลง พร้อมกับบดหมุนก้านเจาะ	สังเกตสีของน้ำล้นที่ขึ้นมาปากหลุม และการสัมผัสก้านเจาะ รวมทั้งอัตราเร็วในการเจาะ	สะดวกปานกลาง (อุปกรณ์ไม่ซับซ้อนมาก)	ไม่สูงมาก	พอใช้ (เนื่องจากดินบางส่วนถูกรบกวน)	ไม่สามารถเจาะผ่านชั้นกรวดใหญ่ ลูกรังแข็ง หินผุหรือดินดานได้
การเจาะปั่น	ใช้เครื่องยนต์หมุนปั่นก้านเจาะ ขณะที่กดหัวเจาะลง พร้อมกับการฉีดน้ำออกจากรูด้านข้างหัวเจาะ	สังเกตสีของน้ำที่ล้นขึ้นมาปากหลุม และแรงที่ใช้ในการกดหัวเจาะ รวมทั้งอัตราเร็วในการเจาะ	ยุ่งยาก (อุปกรณ์มีน้ำหนักมาก และซับซ้อน)	สูง	ดีมาก (หลุมเจาะสะอาด และดินถูกรบกวนน้อย)	ไม่มี
การเจาะสว่าน	ใช้การหมุนใบสว่านเพื่อนำดินขึ้นมา	สัมผัสจำแนกได้โดยตรงจากดินที่ติดขึ้นมากับใบสว่าน	สะดวก (อุปกรณ์มีน้ำหนักไม่มาก)	ไม่สูง	ดี (เมื่อเป็นหลุมเจาะแห้งที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน)	เกิดอุปสรรคในการเจาะผ่านชั้นทราย กรวด หรือเมื่อระดับเจาะอยู่ต่ำกว่าน้ำใต้ดิน
การเปิดบ่อทดสอบ	ขุดเปิดบ่อด้วยแรงคนหรือเครื่องจักร	ตรวจสอบสัมผัสได้โดยตรง และบันทึกหรือถ่ายภาพการเรียงตัวของชั้นดินได้อย่างชัดเจน	สะดวก	ปานกลาง	ดีมาก	ความลึกมักไม่เกิน 2 – 3 เมตร

1.7 การเก็บตัวอย่างดิน

การเก็บตัวอย่างดินจากหลุมเจาะสามารถกระทำได้ 2 ลักษณะ คือ ตัวอย่างดินแบบไม่คงสภาพและตัวอย่างดินแบบคงสภาพขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ที่จะนำตัวอย่างไปใช้งานต่อ

ตัวอย่างดินแบบไม่คงสภาพ (Disturbed Samples) เป็นตัวอย่างดินที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านโครงสร้างของดินเนื่องจากตัวอย่างดินได้รับการกระทบกระเทือนในระหว่างการเจาะ หรือการเก็บตัวอย่างดิน อย่างไรก็ตามส่วนประกอบของดินยังคงเหมือนเดิม ตัวอย่างดินลักษณะนี้จึงเหมาะที่จะนำไปทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานของดิน เช่น ลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดิน ปริมาณน้ำในมวลดิน ชีตจำกัดอัตรเพอร์เบิร์ก (Atterberg's Limits) เป็นต้น

ตัวอย่างดินคงสภาพ (Undisturbed Samples) เป็นตัวอย่างดินที่ได้รับการกระทบกระเทือนน้อยมากในระหว่างการเจาะ หรือเก็บตัวอย่างดิน ซึ่งถือว่าตัวอย่างดินที่เก็บมามีสภาพเหมือนกับตอนที่อยู่ในหลุมเจาะ (ยกเว้นแรงดันรอบด้านที่หายไป) ดังนั้นตัวอย่างลักษณะนี้จึงเหมาะกับการทดสอบหาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดิน เช่น กำลังรับแรงเฉือน การทรุดตัวของดิน เป็นต้น

1.7.1 กระบอกเก็บตัวอย่างดิน (Soil Samplers)

กระบอกเก็บตัวอย่างดินมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ โดยสามารถแยกออกเป็น 2 แบบหลักๆ ได้แก่

1) กระบอกผ่า (Split Barrel Sampler) จะใช้สำหรับเก็บตัวอย่างดินแบบไม่คงสภาพ เนื่องจากในการเก็บตัวอย่างจะใช้วิธีการตอกกระบอกผ่าลงไปในเนื้อดินซึ่งจะทำให้ตัวอย่างดินถูกรบกวน นอกจากจะใช้เก็บตัวอย่างดินแล้วกระบอกผ่ายังเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับทดสอบความแข็งแรงของดินจากการทะลุทะลวงแบบมาตรฐาน (Standard Penetration Test – SPT) อีกด้วย

กระบอกผ่ามีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 50.8 มม. (2 นิ้ว) และยาว 864 มม. (34 นิ้ว) ดังแสดงในรูปที่ 1.12 (ก) โดยกระบอกจะถูกแบ่งครึ่งเป็น 2 ซีกตามความยาวของกระบอก (จึงถูกเรียกว่ากระบอกผ่า) ในระหว่างการเก็บตัวอย่างตัวกระบอกจะถูกประกบเข้าลิ้นกันและชันปิดหัวท้ายด้วยท่อหุ้มที่ไม่ได้ผ่า โดยท่อหุ้มท่อนบนจะใช้ต่อกับก้านเจาะ ในขณะที่ท่อหุ้มท่อนล่างจะมีลักษณะปลายคม ทำหน้าที่ตัดเฉือนเนื้อดินเข้าเก็บในกระบอกเก็บตัวอย่าง

เมื่อนำตัวอย่างขึ้นมาจากหลุมแล้วสามารถนำตัวอย่างออกจากกระบอกผ่าได้โดยการคลายเกลียวท่อหุ้มท่อนบนและล่างแล้วเปิดกระบอกผ่าออกเป็น 2 ซีก ซึ่งจะทำให้สามารถหยิบเก็บตัวอย่างได้อย่างสะดวก

2) กระบอกผนังบาง (Thin wall Shelby Tube Sampler) เป็นกระบอกเก็บตัวอย่างดินที่ใช้สำหรับเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ โดยการเก็บตัวอย่างดินจะใช้วิธีการกดกระบอกลงไปในเนื้อ

ดินด้วยอัตราการกัดที่เร็วและต่อเนื่องกันตลอด และไม่ควรใช้การตอกในการเก็บตัวอย่างดินด้วยกระบอกผนังบาง ดังนั้นกระบอกผนังบางจึงเหมาะสำหรับเก็บตัวอย่างดินประเภทดินเหนียวอ่อน

เมื่อกดปลายกระบอกผนังบางถึงความลึกที่ต้องการแล้วให้หมุนก้านเจาะเพื่อให้ตัวอย่างดินที่ปลายกระบอกถูกตัดเฉือนขาดจากชั้นดินเดิม แล้วจึงยกกระบอกผนังบางขึ้นมาและนำออกจากหลุม จากนั้นให้คว้านตัวอย่างดินบริเวณปลายทั้งสองด้านของกระบอกผนังบางออกเล็กน้อย แล้วเทซีเมนต์ปิดผิวหน้าดินให้ทั่ว โดยหนาประมาณ 5 มม. เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำในตัวอย่างดินระเหยออก

จากการศึกษาของ M.G. Hvorslev พบว่าการอัตราการถูกรบกวนของตัวอย่างดินที่เก็บขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของพื้นที่เนื้อดินที่ถูกแทนที่ต่อพื้นที่ของตัวอย่างดิน โดย Hvorslev เรียกอัตราส่วนนี้ว่า อัตราส่วนพื้นที่ (Area Ratio - C_a) และสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$C_a = (D_w^2 - D_e^2) / D_e^2$$

เมื่อ D_w = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของกระบอกเก็บตัวอย่าง

D_e = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของส่วนปลายที่จุ่มเข้า

ค่า C_a ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.10 – 0.15 สำหรับการเก็บตัวอย่างดินคงสภาพทั่วไป แต่ในกรณีที่ต้องเก็บตัวอย่างดินอ่อนหรือดินที่มีความไวต่อการสูญเสียกำลังสูง ค่า C_a ควรมีค่าประมาณ 0.10 เพื่อรักษาสภาพตัวอย่างดินให้คงเดิมที่สุด (วสท. 2548)

กระบอกเก็บตัวอย่างดินที่มีปลายกระบอกจุ่มเข้าเล็กน้อยจะช่วยให้แรงเสียดทานระหว่างผิวตัวอย่างดินกับผนังด้านในกระบอกเก็บตัวอย่างลดลง Hvorslev ได้แนะนำให้ใช้อัตราส่วนระหว่างค่าความแตกต่างระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางภายในและเส้นผ่าศูนย์กลางของส่วนปลายจุ่มต่อค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของปลายจุ่มซึ่งเรียกว่า Inside Clearance Ratio (C_i) ควรมีค่าระหว่าง 1 – 3 % และไม่ควรเกิน 15 % โดยสามารถคำนวณค่า C_i ได้จากสมการ

$$C_i = (D_s - D_e) / D_e$$

เมื่อ D_s = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในกระบอกเก็บตัวอย่างดิน

กระบอกผนังบางที่ใช้ทั่วไปจะต้องเป็นกระบอกบางที่รีดสำเร็จรูป ไม่มีรอยตะเข็บต่อเชื่อมที่เกิดจากการเอาแผ่นเหล็กม้วนเป็นกระบอกทรงกลม กระบอกผนังบางมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกอยู่ระหว่าง 50 – 63.5 มม. โดยมีความหนาของกระบอกระหว่าง 1.5 – 2.0 มม. ทำให้มีอัตราส่วนพื้นที่ประมาณ 0.13 สำหรับความยาวของกระบอกผนังบางจะยาวประมาณ 500 – 600 มม. รูปที่ 1.12 (ข) แสดงตัวอย่างกระบอกผนังบาง



(ก)



(ข)

รูปที่ 1.12 (ก) กระบอกผ่า (ข) กระบอกผนังบาง

บทที่ 2

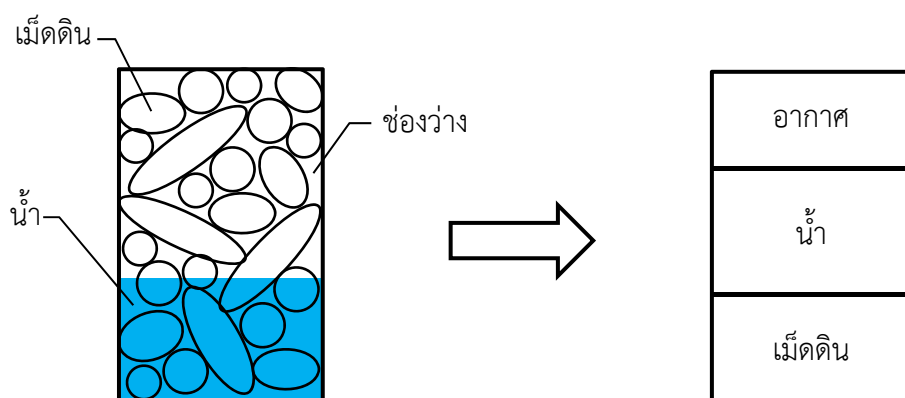
องค์ประกอบและคุณสมบัติของดิน

2.1 ส่วนประกอบของดิน

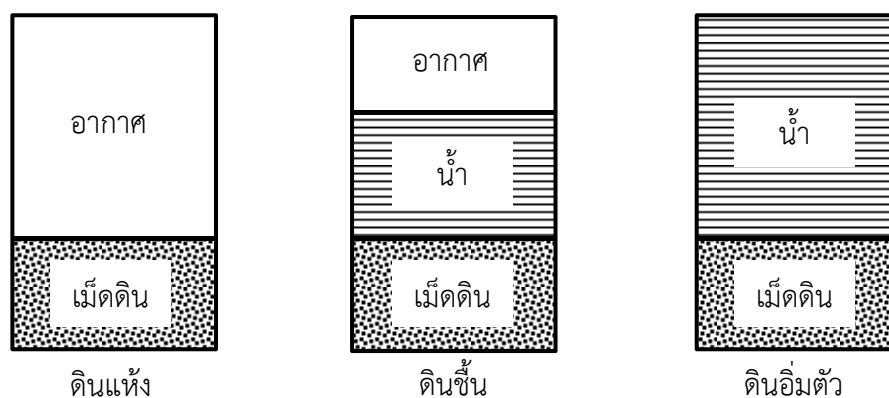
หากเราพิจารณามวลดินหนึ่งก้อนจะพบว่าดินประกอบไปด้วย 2 ส่วนได้แก่ เม็ดดินหรือส่วนที่เป็นของแข็ง (Solid Phase) และส่วนที่เป็นโพรงหรือช่องว่าง (Void Phase) โดยดินทั่วไปที่อยู่ในสภาพธรรมชาติมักจะมีอากาศและน้ำบรรจุอยู่ในช่องว่างของมวลดิน ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าดินในธรรมชาติประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่ เม็ดดิน น้ำและอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.1

เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำในมวลดินจะพบว่าเราสามารถแบ่งสถานะของมวลดินออกได้เป็น 3 สถานะดังแสดงในรูปที่ 2.2 ตามปริมาณของน้ำที่อยู่ภายในช่องว่างของมวลดินได้แก่ ดินแห้ง ดินชื้น และดินอิ่มตัว

- 1) ดินแห้ง (Dry Soil) หมายถึง ดินที่ภายในโพรงหรือช่องว่างไม่มีของเหลว (โดยทั่วไปคือน้ำ) บรรจุอยู่เลย
- 2) ดินชื้นหรือดินเปียก (Wet Soil) หมายถึง ดินที่ภายในโพรงหรือช่องว่างมีของเหลวหรือน้ำบรรจุอยู่บางส่วนไม่เต็มช่องว่างทั้งหมด
- 3) ดินอิ่มตัว (Saturated Soil) หมายถึง ดินที่ภายในโพรงหรือช่องว่างมีของเหลวหรือน้ำบรรจุอยู่เต็มช่องว่างทั้งหมด



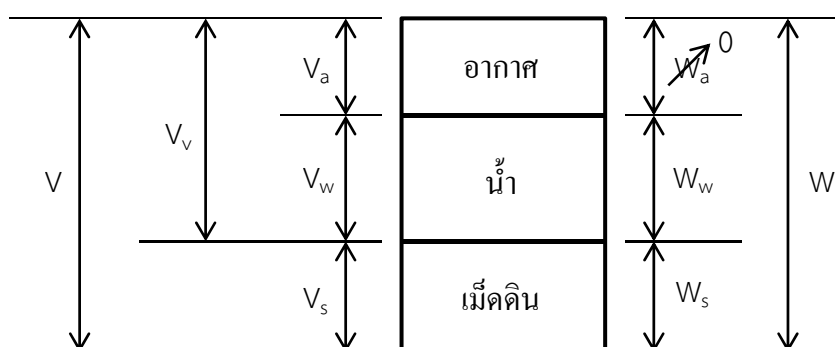
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบหลักของมวลดิน



รูปที่ 2.2 สถานะของมวลดิน

2.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของดิน

คุณสมบัติทางฟิสิกส์หรือคุณสมบัติพื้นฐานของดินเกิดขึ้นจากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและปริมาตรของส่วนต่างๆ ที่ประกอบขึ้นเป็นมวลดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 น้ำหนักและปริมาตรต่างๆ ในมวลดิน

โดยที่	V	คือ ปริมาตรทั้งหมดของมวลดิน
	V_v	คือ ปริมาตรของช่องว่างในมวลดิน
	V_s	คือ ปริมาตรของเม็ดดิน
	V_w	คือ ปริมาตรของน้ำ
	V_a	คือ ปริมาตรของอากาศ
	W	คือ น้ำหนักของมวลดิน
	W_s	คือ น้ำหนักของเม็ดดิน

W_w คือ น้ำหนักของน้ำ

W_a คือ น้ำหนักของอากาศ ซึ่งถูกกำหนดให้เท่ากับศูนย์ เนื่องจากน้ำหนักของอากาศมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับน้ำหนักของเม็ดดินและน้ำ

เมื่อพิจารณารูปที่ 2.3 จะพบว่า

$$V = V_s + V_v$$

$$V_v = V_w + V_a$$

ดังนั้น

$$V = V_s + V_w + V_a \quad (2.1)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$W = W_s + W_w + W_a$$

แต่ $W_a = 0$ จะได้

$$W = W_s + W_w \quad (2.2)$$

2.2.1 ความสัมพันธ์ทางด้านปริมาตร

1) อัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio, e)

$$e = V_v / V_s \quad (2.3)$$

2) ความพรุน (Porosity, n)

$$n = (V_v / V) \times 100 \quad (2.4)$$

3) ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of Saturation, S)

$$S = (V_w / V_v) \times 100 \quad (2.5)$$

2.2.2 ความสัมพันธ์ทางด้านน้ำหนัก

ปริมาณความชื้น (Moisture Content, m)

$$m = (W_w / W_s) \times 100 \quad (2.6)$$

ตัวอย่างที่ 2.1 ในการทดสอบหาปริมาณความชื้นในดิน กระทบเก็บตัวอย่างเปล่าๆ น้ำหนัก 16.5 กรัม เมื่อนำดินตัวอย่างที่เก็บมาใส่ในกระป๋องแล้วชั่งหนัก 138.9 กรัม จากนั้นนำดินตัวอย่างเข้าตู้อบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งหนัก 118.3 กรัม จงหาปริมาณความชื้นของดินตัวอย่าง

วิธีทำ

$$\begin{aligned}
 \text{น้ำหนักน้ำ } (W_w) &= \text{น้ำหนัก}_{\text{ดิน + ทราย}} (\text{ก่อนอบ}) - \text{น้ำหนัก}_{\text{ดิน + ทราย}} (\text{หลังอบ}) \\
 &= 138.9 - 118.3 \\
 &= 20.6 \text{ กรัม}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{น้ำหนักดินแห้ง } (W_s) &= \text{น้ำหนัก}_{\text{ดิน + ทราย}} (\text{หลังอบ}) - \text{น้ำหนัก}_{\text{ทราย}} \\
 &= 118.3 - 16.5 \\
 &= 101.8 \text{ กรัม}
 \end{aligned}$$

จากสมการที่ 2.6 จะได้

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาณความชื้น} &= (W_w / W_s) \times 100 \\
 &= 20.6 / 101.8 \times 100 \\
 &= 20.2 \%
 \end{aligned}$$

ตอบ

2.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและน้ำหนัก

1) หน่วยน้ำหนัก (Unit Weight, γ)

$$\gamma = W / V \quad (2.7)$$

2) หน่วยน้ำหนักแห้ง (Dry Unit Weight, γ_d)

$$\gamma_d = W_s / V \quad (2.8)$$

3) หน่วยน้ำหนักของเม็ดดิน (Unit Weight of Solid Particle, γ_s)

$$\gamma_s = W_s / V_s \quad (2.9)$$

4) ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity, G_s)

$$G_s = \gamma_s / \gamma_w \quad (2.10)$$

โดยที่ γ_w คือ หน่วยน้ำหนักของน้ำ

ค่าความถ่วงจำเพาะของดินโดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 2.6 ถึง 2.8 ทำให้เมื่อไม่ทราบค่าความถ่วงจำเพาะของดินในการคำนวณมักจะกำหนดให้ดินมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.7 (ค่าเฉลี่ยของ 2.6 และ 2.8) ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะของดินชนิดต่างๆ

5) หน่วยน้ำหนักของดินใต้น้ำ (Submerged Unit Weight, γ_{sub})

$$\gamma_{\text{sub}} = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w \quad (2.11)$$

โดยที่ γ_{sat} คือหน่วยน้ำหนักของดินอิ่มตัว

ตารางที่ 2.1 ความถ่วงจำเพาะของดิน

ชนิดดิน	ค่าความถ่วงจำเพาะ
ทราย	2.60 – 2.67
ทรายแป้ง	2.67 – 2.70
ดินเหนียว	2.70 – 2.80
ดินอินทรีย์สาร	ไม่แน่นอน

ที่มา: ชินวัฒน์ (2545)

6) ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative Density, D_r)

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

หรือ

$$D_r = [(\gamma_{d, \max} / \gamma_d) \times (\gamma_d - \gamma_{d, \min}) / (\gamma_{d, \max} - \gamma_{d, \min})] \times 100 \quad (2.12)$$

ความหนาแน่นสัมพัทธ์จะถูกใช้กับดินเม็ดหยาบ โดยแต่ละช่วงของความหนาแน่นสัมพัทธ์จะมีชื่อเรียกแตกต่างกันดังรายละเอียดในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความหนาแน่นสัมพัทธ์

ความหนาแน่นสัมพัทธ์ %	ชื่อเรียก
0 – 15	หลวมมาก (Very Loose)
15 – 35	หลวม (Loose)
35 – 65	ปานกลาง (Medium)
65 – 85	แน่น (Dense)
85 – 100	แน่นมาก (Very Dense)

ที่มา: ชินวัฒน์ (2545)

7) ความสัมพันธ์อื่นๆ

$$n = e / (1 + e) \quad (2.13)$$

$$e = n / (1 - n) \quad (2.14)$$

$$Se = mG_s \quad (2.15)$$

$$\gamma = G_s \times \gamma_w \times (1 + m) / (1 + e) \quad (2.16)$$

$$\gamma_d = \gamma / (1 + m) \quad (2.17)$$

ตัวอย่างที่ 2.2 จากตัวอย่างที่ 2.1 ถ้าตัวอย่างดินที่เก็บมาอยู่ในสภาพอิ่มตัว (Saturated Condition) และมีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.7 จงหาค่าอัตราส่วนช่องว่าง ความพรุน หน่วยน้ำหนักและหน่วยน้ำหนักแห้งของดินตัวอย่าง

วิธีทำ

เนื่องจากตัวอย่างดินอยู่ในสภาพอิ่มตัวแสดงว่ามีน้ำอยู่เต็มช่องว่างของมวลดิน ($V_w = V_v$) ทำให้ $S = 1.0$ จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.15 จะทำให้สามารถหาอัตราส่วนช่องว่างได้

$$Se = mGs$$

$$e = mGs / S$$

$$= (20.2\%) \times 2.7 / 1.0$$

$$= 0.545$$

ตอบ

จากสมการ 2.13 จะสามารถหาค่าความพรุนได้คือ

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

$$= 0.545 / (1 + 0.545)$$

$$= 0.353$$

ตอบ

ค่าหน่วยน้ำหนักของดินตัวอย่างสามารถหาได้จากสมการที่ 2.17 ดังนี้

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

$$= 2.7 \times (1.0) \times (1 + 20.2\%) / (1 + 0.545)$$

$$= 2.10 \text{ ตัน / ลบ.ม.}$$

ตอบ

หน่วยน้ำหนักแห้งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.17 คือ

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

$$= 2.10 / (1 + 20.2\%)$$

$$= 1.75 \text{ ตัน / ลบ.ม.}$$

ตอบ

ตัวอย่างที่ 2.3 จากการทดสอบหาความหนาแน่นดินในสนามพบว่าดินมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.95 ตัน / ลบ.ม. เมื่อเก็บตัวอย่างดินมาทดสอบพบว่าปริมาณความชื้นของดินเท่ากับ 25% และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.67 จงหาค่าอัตราส่วนช่องว่างและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของดิน

วิธีทำ

เนื่องจากเราทราบความหนาแน่นของดิน แต่ไม่ทราบน้ำหนักหรือปริมาตรทั้งหมดของดิน เพื่อความสะดวกในการคำนวณเราจะกำหนดให้ดินมีปริมาตรเท่ากับ 1 ลบ.ม. ดังนั้น ดินจะมีน้ำหนักเท่ากับ 1.95 ตัน สำหรับตัวอย่างนี้) จะได้

$$1.95 = W_s + W_w \quad (1)$$

ปริมาณความชื้นในดินเท่ากับ 25% สามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

$$\begin{aligned} 25 &= (W_w / W_s) \times 100 \\ W_w &= 0.25W_s \end{aligned} \quad (2)$$

แทนค่าสมการที่ (2) ใน (1) จะได้

$$\begin{aligned} 1.95 &= W_s + 0.25W_s \\ W_s &= 1.95 / (1 + 0.25) \\ &= 1.56 \text{ ตัน} \end{aligned}$$

แทนค่า W_s ในสมการที่ (1) จะได้

$$\begin{aligned} 1.95 &= 1.56 + W_w \\ W_w &= 0.39 \text{ ตัน} \end{aligned}$$

จาก $V_s = W_s / \gamma_s$ จะได้

$$\begin{aligned} V_s &= W_s / (G_s \times \gamma_w) \\ &= 1.56 / (2.67 \times 1.0) \\ &= 0.584 \text{ ลบ.ม.} \end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกัน

$$\begin{aligned} V_w &= W_w / \gamma_w \\ &= 0.39 / 1.0 \\ &= 0.39 \text{ ลบ.ม.} \end{aligned}$$

จากสมการที่ 2.1 จะสามารถหาปริมาตรอากาศได้ดังนี้

$$\begin{aligned} V &= V_s + V_w + V_a \\ 1.0 &= 0.584 + 0.39 + V_a \\ V_a &= 0.026 \text{ ลบ.ม.} \end{aligned}$$

ค่าอัตราส่วนช่องว่างสามารถหาได้จากสมการที่ 2.3 ดังนี้

$$\begin{aligned} e &= V_v / V_s \\ &= (0.39 + 0.026) / 0.584 \\ &= 0.712 \end{aligned}$$

ตอบ

หาระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำจากสมการที่ 2.5 จะได้

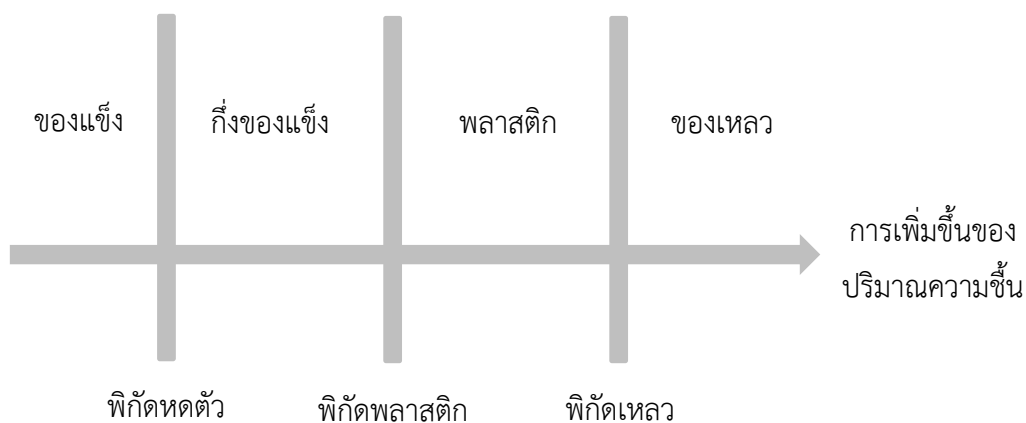
$$\begin{aligned} S &= (V_w / V_v) \times 100 \\ &= (0.39 / 0.584) \times 100 \\ &= 66.8 \% \end{aligned}$$

ตอบ

2.3 สถานะของดินเหนียว

สำหรับดินที่มีแร่ดินเหนียวเป็นส่วนประกอบจะสามารถจับตัวกันได้เมื่อมีปริมาณความชื้นจำนวนหนึ่ง การจับตัวกันของเม็ดดินนี้เกิดจากผลของน้ำแอฟสอพ (Absorbed water) ซึ่งเป็นน้ำที่อยู่รอบๆ อนุภาคดินเหนียว โดยสถานะของดินที่มีแร่ดินเหนียวจะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณน้ำในมวลดิน หากดินมีปริมาณน้ำน้อยจะแสดงสถานะเป็นของแข็งที่มีความเปราะ ในทางกลับกันหากดินมีปริมาณน้ำมากจะแสดงสถานะเหมือนกับของเหลวที่สามารถไหลได้

ในช่วงต้นของศตวรรษที่ 20 นักวิทยาศาสตร์ชาวสวีเดนชื่อ Albert Mauritz Atterberg ได้พัฒนาวิธีการสำหรับการอธิบายสถานะของดินที่มีแร่ดินเหนียวซึ่งเปลี่ยนแปลงตามปริมาณความชื้นของมวลดิน โดยเขาได้แบ่งสถานะของดินที่มีแร่ดินเหนียวออกเป็น 4 สถานะได้แก่ ของเหลว พลาสติก กึ่งของแข็ง และของแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยปริมาณความชื้นที่เป็นจุดเปลี่ยนระหว่าง



รูปที่ 2.4 สถานะต่างๆ ของดินที่มีแร่ดินเหนียว

สถานะของแข็งไปเป็นกึ่งของแข็งถูกเรียกว่า “พิกัดหดตัว” ในขณะที่ปริมาณความชื้นที่เป็นจุดเปลี่ยนระหว่างสถานะกึ่งของแข็งไปเป็นสถานะพลาสติกจะเรียกว่า “พิกัดพลาสติก” และปริมาณความชื้นที่เป็นจุดเปลี่ยนระหว่างสถานะพลาสติกไปเป็นของเหลวถูกเรียกว่า “พิกัดเหลว” โดยจะเรียกพิกัดเหลวนี้นี้ว่า “พิกัดออตเทอร์เบิร์ก” (Atterberg Limits)

2.3.1 พิกัดเหลว (Liquid Limit, LL)

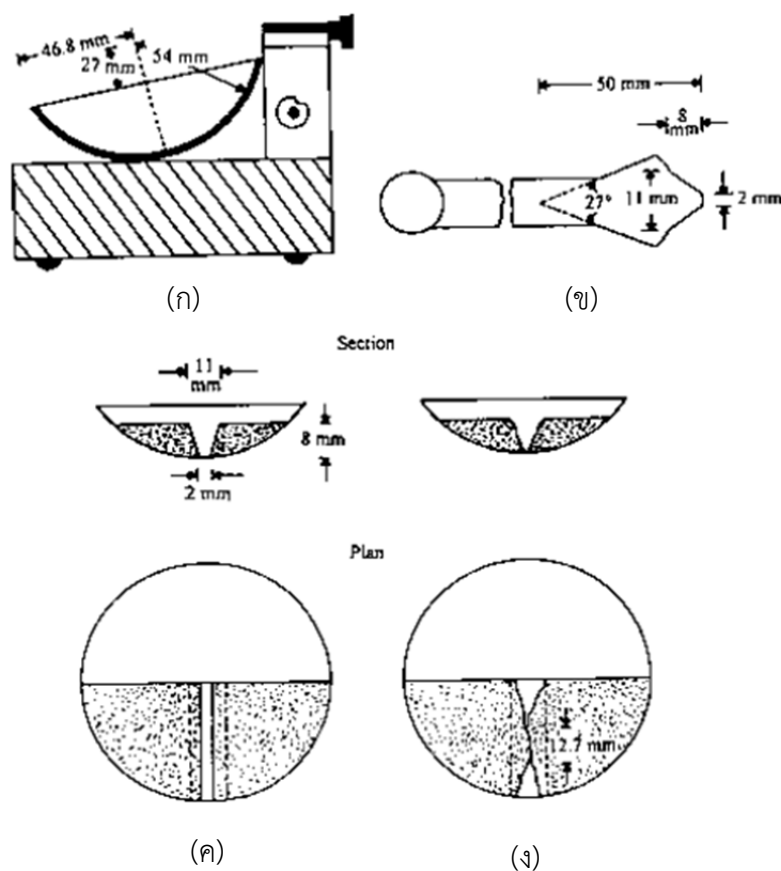
พิกัดเหลวคือปริมาณน้ำในมวลดินที่น้อยที่สุดที่ยังทำให้ดินมีสถานะเหลว (ดินสามารถไหลได้) โดยดินที่มีปริมาณความชื้นเท่ากับ LL จะมีกำลังรับแรงเฉือนประมาณ 2 kPa ตามมาตรฐาน ASTM D-4318 รูปที่ 2.5 แสดงเครื่องมือหาค่าพิกัดเหลวที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Arthur Casagrande ซึ่งประกอบด้วยถ้วยทองเหลืองสำหรับใส่ดิน และอุปกรณ์กรีดร่อง (Grooving Tool) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ก) และ รูปที่ 2.5 (ข) ตามลำดับ

การทดสอบหาค่าพิกัดเหลวตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D-4318 ทำโดยการนำดินที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 มาผสมน้ำตามปริมาณที่กำหนด แล้วนำดินเปียกใส่ถ้วยทองเหลือง ปาดผิวหน้าดินให้เรียบ แล้วแบ่งดินเป็นสองส่วนซ้าย-ขวาด้วยอุปกรณ์กรีดร่อง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ค) ซึ่งจะเรียกร่องนี้ว่าร่องมาตรฐาน (Standard Groove) ซึ่งจะมีความลึก 8 มิลลิเมตร ความกว้างที่ก้นถ้วยและผิวดิน 2 มิลลิเมตรและ 11 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากนั้นเริ่มเคาะถ้วยทองเหลืองโดยยกถ้วยสูงขึ้นประมาณ 1 เซนติเมตรและปล่อยตกกระแทกฐานซึ่งทำจากแผ่นยางแข็งในอัตราเร็ว 2 ครั้งต่อวินาที ค่า LL คือค่าปริมาณความชื้นในดินที่เคาะถ้วยทองเหลืองจำนวน 25 ครั้งแล้วทำให้อ่างมาตรฐานเคลื่อนมาบรรจบกันเป็นระยะทาง 12.7 มิลลิเมตร (1/2 นิ้ว) ดังรูปที่ 2.5 (ง)

2.3.2 พิกัดพลาสติก (Plastic Limit, PL)

พิกัดพลาสติกคือปริมาณน้ำในมวลดินที่น้อยที่สุดที่ดินยังสามารถปั้นเป็นรูปร่างได้และไม่เกิดรอยแตกร้าวที่ผิว

การทดสอบหาค่าพิกัดพลาสติกตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D-4318 ทำโดยการนำดินที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 มาผสมน้ำ แล้วคลึงดินให้เป็นเส้นยาวจนกระทั่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3.2 มิลลิเมตร (1/8 นิ้ว) ปริมาณความชื้นที่ทำให้เส้นดินเริ่มมีรอยแตกร้าวพอดีคือค่า PL



รูปที่ 2.5 Casagrande Cup สำหรับทดสอบพิกัดเหลว

ที่มา: Das (2005)

2.3.3 พิกัดหดตัว (Shrinkage Limit, SL)

พิกัดหดตัวคือปริมาณน้ำที่มากที่สุดที่เมื่อดินมีการสูญเสียความชื้นแล้วไม่ทำให้ดินเกิดการหดตัวหรือสูญเสียปริมาตรลงอีก การทดสอบหาค่าพิกัดหดตัวทำได้โดยการนำดินที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 มาผสมน้ำให้มีปริมาณชื้นมากกว่า LL จากนั้นบรรจุตัวอย่างดินลงในภาชนะทดสอบรูปทรงเป็นตลับวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 44.4 มิลลิเมตร และสูง 12.7 มิลลิเมตร จากนั้นผึ่งตัวอย่างดินให้แห้งในอากาศ แล้วจึงนำเข้าตู้อบจนแห้ง จึงหาปริมาตรของดินด้วยการแทนที่ปรอท สามารถคำนวณหาค่า SL ได้จากสมการ คือ

$$SL = [(m_1 - m_2) / m_2 - \gamma_w \times (V_1 - V_2) / m_2] \times 100 \quad (2.18)$$

โดยที่ m_1 = น้ำหนักของดินเปียกเต็มภาชนะทดสอบ

m_2 = น้ำหนักของดินแห้งหลังจากการอบ

V_1 = ปริมาตรของดินเปียกเต็มภาชนะทดสอบ

V_2 = ปริมาตรของดินแห้งหลังจากการอบ

2.4 ค่าดัชนีของดิน

โดยปกติแล้วนอกจากค่าพิกัดอัตราเพอร์กินที่ทดสอบได้แล้วยังมีค่าดัชนีต่างๆ ที่ถูกคำนวณจากค่าพิกัดอัตราเพอร์กินเพื่อใช้ในการบอกคุณสมบัติของดินที่ทดสอบ ค่าดัชนีที่สำคัญมีรายละเอียดตามที่จะได้อธิบายดังนี้

2.4.1 ดัชนีสภาพพลาสติก (Plasticity Index, PI)

การบอกค่าความเหนียวของดินจะบอกในรูปของดัชนีสภาพพลาสติก โดยค่าดัชนีสภาพพลาสติกสามารถหาได้จากค่าความแตกต่างระหว่างค่า PL และ LL สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$PI = LL - PL \quad (2.19)$$

เมื่อ LL = พิกัดเหลว

PL = พิกัดพลาสติก

หาก PI มีค่ามากแสดงว่าดินมีความเหนียวมากในทางกลับกันหาก PI มีค่าน้อยแสดงว่าดินมีความเหนียวน้อย สำหรับดินที่ไม่มีความเหนียว เช่น ทราย จะแสดงค่า PI ด้วย NP (Non-Plastic) ซึ่งหมายความว่าดินไม่มีความเหนียว

2.4.2 ค่าดัชนีสภาพความเหลว (Liquidity Index, LI)

ค่าดัชนีสภาพการไหลเป็นค่าที่บ่งบอกความสามารถของการไหลของดิน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ คือ

$$LI = (m - PL) / PI \quad (2.20)$$

เมื่อ m = ปริมาณความชื้นในดิน

PL = พิกัดพลาสติก

PI = ดัชนีสภาพพลาสติก

จากสมการ 2.20 จะเห็นว่า ค่าดัชนีสภาพความเหลวของดินน่าจะมีค่าต่ำกว่า 1.0 เนื่องจากดินในธรรมชาติจะมีลักษณะเป็นก้อนไม่มีการไหล ($m < LL$) และดินจะเริ่มไหลเมื่อปริมาณความชื้นเท่ากับพิกัดเหลว นั่นคือหากค่า LI มีค่าสูงมากกว่า 1.0 เท่าใด ดินก็จะสามารถไหลได้ง่ายขึ้นเท่านั้น

2.4.3 ค่าแอกติวิตี้ (Activity, A)

Skempton (1953) ได้ค้นพบว่าค่า PI จะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตรงตามร้อยละของอนุภาคดินเหนียว (ร้อยละโดยน้ำหนักของเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่า 2 ไมครอน) โดย Skempton เรียกปริมาณนี้ว่า แอกติวิตี้ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$A = PI / (\% \text{ finer than } 2 \mu\text{m, by weight})$$

ค่า A จะถูกใช้เพื่อบ่งบอกว่าดินมีจะเกิดการบวมตัวได้มากน้อยเพียงใด ถ้าค่า A มีค่ามาก แสดงว่าดินมีโอกาสบวมตัวมาก การเรียกชื่อดินเหนียวและค่าทั่วไปของ A สำหรับแร่ดินเหนียวแต่ละชนิดสามารถแสดงได้ในตารางที่ 2.3 และตารางที่ 2.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.3 การเรียกชื่อดินเหนียว

ค่าแอกติวิตี้ (A)	การเรียกชื่อ
น้อยกว่า 0.7	Inactive Clay
0.7 – 1.2	Normal Clay
มากกว่า 1.2	Active Clay

ที่มา: ชินวัฒน์ (2545)

ตารางที่ 2.4 ค่าแอกติวิตี้ของแร่ดินเหนียว

แร่ดินเหนียว	ค่าแอกติวิตี้ (A)
Smectites	1.0 – 7.0
Illite	0.5 – 1.0
Kaolinite	0.5
Halloysite (2H ₂ O)	0.5
Holloysite (4H ₂ O)	0.1
Attapulgite	0.5 – 1.2
Allophane	0.5 – 1.2

ที่มา: Das (2000)

2.5 การแบ่งประเภทของดิน

นอกจากการแบ่งประเภทของดินตามลักษณะการเกิดแล้ว ดินยังสามารถแบ่งตามเกณฑ์อื่นๆ ได้อีก เช่น แบ่งตามขนาดของเม็ดดิน แบ่งตามความเชื่อมโยงแน่นระหว่างเม็ดดิน เป็นต้น

2.5.1 ประเภทของดินตามขนาดของเม็ดดิน

การแบ่งประเภทของดินตามขนาดของเม็ดดินสามารถแยกดินออกได้เป็น 4 ประเภทได้แก่ กรวด ทราย ดินตะกอน และดินเหนียว โดยกรวดและทรายจัดอยู่ในกลุ่มของดินเม็ดหยาบ ในขณะที่ดินตะกอนและดินเหนียวจัดอยู่ในกลุ่มของดินเม็ดละเอียด

(1) กรวด (Gravel) มีลักษณะเหมือนเศษก้อนหิน สามารถมองเห็นและแยกออกเป็นเม็ดเดี่ยวๆ ได้ด้วยตาเปล่า โดยทั่วไปกรวดมีขนาดตั้งแต่ 2 มิลลิเมตรจนถึง 150 มิลลิเมตร

(2) ทราย (Sand) มีขนาดเล็กกว่ากรวด สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ลักษณะเม็ดทรายจะค่อนข้างกลมและมักจะมีแร่เฟลสปาร์เป็นส่วนประกอบ ขนาดของเม็ดทรายจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.075 มิลลิเมตรถึง 2 มิลลิเมตร

(3) ดินตะกอน (Silt) มีขนาดเล็กมากประมาณ 0.002 มิลลิเมตรถึง 0.075 มิลลิเมตร ดินประเภทนี้ไม่สามารถแยกเม็ดได้ด้วยตาเปล่า ลักษณะรูปร่างจะเป็นแผ่นบางๆ และมักจะมีแร่ไมกาเป็นส่วนประกอบ

(4) ดินเหนียว (Clay) ขนาดเม็ดดินของดินเหนียวจะมีขนาดเล็กมาก (เล็กกว่า 0.002 มิลลิเมตร) จึงไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เม็ดดินมีรูปร่างเป็นแผ่นบางๆ ตามลักษณะของแร่ดินเหนียว ลักษณะพิเศษอีกอย่างหนึ่งของดินเหนียวคือสามารถแสดงสภาพพลาสติกได้

2.5.2 ประเภทของดินตามความเชื่อมโยงแน่น

การแบ่งประเภทของดินตามความเชื่อมโยงแน่นระหว่างเม็ดดินสามารถแยกดินออกได้เป็น 2 ประเภทได้แก่ ดินที่ไม่มีความเชื่อมโยงแน่นและดินที่มีความเชื่อมโยงแน่น

(1) ดินที่ไม่มีความเชื่อมโยงแน่น (Cohesionless Soil) ดินประเภทนี้จะมีแรงเนื่องจากน้ำหนักของดินมากเมื่อเปรียบเทียบกับแรงดึงดูดระหว่างผิวของเม็ดดิน ทำให้เม็ดดินไม่สามารถอยู่ในสภาพพลาสติกได้ ดินประเภทนี้ได้แก่ กรวด ทราย และดินตะกอน

(2) ดินที่มีความเชื่อมโยงแน่น (Cohesive Soil) ดินประเภทนี้ได้แก่ดินเหนียว เนื่องจากเม็ดดินเหนียวมีขนาดเม็ดดินเล็กกว่า 0.002 มิลลิเมตร รวมทั้งมีลักษณะแบนจึงทำให้แรงดึงดูดระหว่างผิวของเม็ดดินมีค่ามากกว่าแรงเนื่องจากน้ำหนักของเม็ดดิน ส่งผลทำให้ดินสามารถอยู่ในสภาพพลาสติกได้ โดยคุณสมบัติของดินประเภทนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของแร่ดินเหนียว

2.6 ขนาดของเม็ดดิน

ดินแต่ละชนิดจะมีขนาดของเม็ดดินแตกต่างกัน การแบ่งชนิดของดินเบื้องต้นจึงอาจใช้ขนาดของเม็ดดินเป็นตัวกำหนด ดังแสดงในตารางที่ 2.5 อย่างไรก็ตามการแบ่งชนิดของดินตามขนาดเม็ดดินยังขึ้นอยู่กับมาตรฐานที่ใช้ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 ชนิดของดินเม็ดหยาบแยกตามขนาดของเม็ดดิน

ชนิดของดิน	ขนาดของเม็ดดิน (ม.ม.)
หิน (Boulders)	> 300
กรวดหยาบ (Cobbles)	76 – 300
กรวด (Gravel)	4.75 – 76
ทรายหยาบ (Coarse Sand)	2.00 – 4.75
ทรายหยาบปานกลาง (Medium Sand)	0.425 – 2.00
ทรายละเอียด (Fine Sand)	0.074 – 0.425
ดินตะกอน (Silt)	0.002 – 0.074
ดินเหนียว (Clay)	< 0.002

ที่มา: สุรฉัตร (2549)

ตารางที่ 2.6 ขนาดของเม็ดดินแยกตามมาตรฐานต่างๆ (สุรฉัตร 2549)

	ขนาดของเม็ดดิน (ม.ม.)			
	MIT	AASHTO	FAA	Unified
กรวด (Gravel)	2.00 – 100	2.00 – 100	2.00 – 100	4.76 – 100
ทราย (Sand)	0.06 – 2.00	0.074 – 2.00	0.074 – 2.00	0.074 – 4.76
ดินตะกอน (Silt)	0.002 – 0.06	0.002 – 0.074	0.005 – 0.074	0.002 – 0.074
ดินเหนียว (Clay)	< 0.002	< 0.002	< 0.005	< 0.002

2.7 การวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดิน

เพื่อให้ทราบว่าดินที่จะนำมาใช้ในงานก่อสร้างมีดินชนิดต่างๆ ประกอบอยู่มากน้อยเพียงใดวิศวกรจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดิน ซึ่งการวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินสามารถกระทำได้ 2 วิธี ได้แก่ การวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินโดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรง และการวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์

2.7.1 การวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินโดยการร่อนผ่านตะแกรง (Sieve Analysis)

การวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินด้วยวิธีการนี้เหมาะสำหรับดินเม็ดหยาบ (ขนาดเม็ดดินใหญ่กว่า 0.075 มิลลิเมตร) ซึ่งได้แก่ กรวดและทราย โดยตะแกรงที่ใช้ในการร่อนจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 20.32 เซนติเมตร มีช่องเปิดของตะแกรงร่อน (Sieve Opening) เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งมีหลายขนาดดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ขนาดของตะแกรงมาตรฐาน

ตะแกรง	ขนาดช่องเปิด		ตะแกรง	ขนาดช่องเปิด	
	ม.ม.	นิ้ว		ม.ม.	นิ้ว
3"	76.20	3.0000	เบอร์ 25	0.710	0.0280
2"	50.80	2.0000	เบอร์ 30	0.600	0.0236
1 ½"	38.10	1.5000	เบอร์ 35	0.500	0.0197
¾"	19.05	0.7500	เบอร์ 40	0.425	0.0167
½"	12.70	0.5000	เบอร์ 45	0.335	0.0132
⅜"	9.52	0.3750	เบอร์ 50	0.300	0.0118
¼"	6.35	0.2500	เบอร์ 60	0.250	0.0098
เบอร์ 4	4.75	0.1870	เบอร์ 70	0.212	0.0083
เบอร์ 5	4.00	0.1575	เบอร์ 80	0.180	0.0071
เบอร์ 6	3.35	0.1319	เบอร์ 100	0.150	0.0059
เบอร์ 7	2.80	0.1102	เบอร์ 120	0.125	0.0049
เบอร์ 8	2.36	0.0929	เบอร์ 140	0.106	0.0042

เบอร์ 10	2.00	0.0787	เบอร์ 170	0.090	0.0035
เบอร์ 12	1.70	0.0669	เบอร์ 200	0.075	0.0030
เบอร์ 14	1.40	0.0510	เบอร์ 230	0.063	0.0025
เบอร์ 16	1.18	0.0464	เบอร์ 270	0.053	0.0021
เบอร์ 18	1.00	0.0394	เบอร์ 325	0.045	0.0018
เบอร์ 20	0.85	0.0335	เบอร์ 400	0.038	0.0015

ที่มา: ชินะวัฒน์ (2545)

ชุดตะแกรงมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินจะใช้ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 10 20 40 60 140 และ 200 โดยการเรียงตะแกรงจะเรียงตะแกรงที่มีขนาดช่องเปิดใหญ่กว่าไว้ด้านบน ซึ่งตะแกรงที่มีความสำคัญในงานด้านปฐพีกลศาสตร์ได้แก่ ตะแกรงเบอร์ 4 10 40 และ 200 สำหรับรายละเอียดในการทดสอบสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากมาตรฐานการทดสอบวัสดุ ASTM D-422

2.7.2 การวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer Analysis)

ดินที่มีขนาดเม็ดดินเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตรจะวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินด้วยวิธีการนี้ หลักการของการวิเคราะห์ด้วยวิธีการนี้จะอาศัยกฎของสโตรค (Stroke's Law) ที่กล่าวว่า “ความเร็วของวัตถุทรงกลมที่จมลงในของเหลว มีความสัมพันธ์กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของวัตถุนั้นยกกำลังสอง” หรือเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V = (\gamma_s - \gamma_w) \times D^2 / (18 \times \eta)$$

หรือ

$$D = [(v \times 18 \times \eta) / (\gamma_s - \gamma_w)]^{0.5}$$

$$= [(v \times 18 \times \eta) / (G_s - 1) \times \gamma_w]^{0.5}$$

โดยที่ V คือ ความเร็วในการตกตะกอนของเม็ดดิน

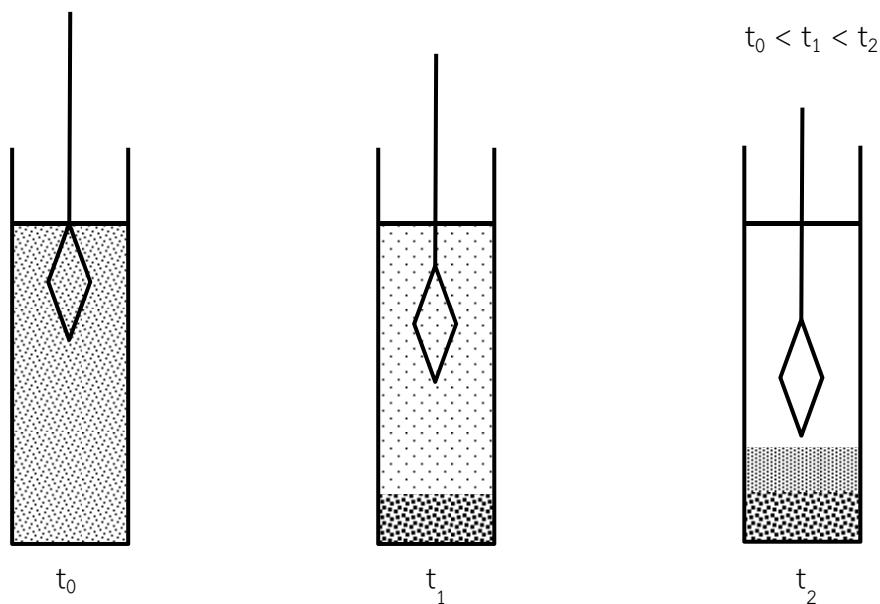
G_s คือ ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน

γ_w คือ หน่วยน้ำหนักของน้ำ

η คือ ความหนืด (Viscosity) ของน้ำ

D คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดดิน

จะเห็นว่าสมการขนาดของเม็ดดินจะขึ้นอยู่กับค่าความถ่วงจำเพาะและค่าความหนืดของน้ำ การวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินด้วยการใช้ไฮโดรมิเตอร์จะอาศัยหลักการที่ว่า “ถ้าของเหลวมีความถ่วงจำเพาะมากไฮโดรมิเตอร์จะจมลงไปใต้อ่างเหลวน้อย และถ้าของเหลวมีความถ่วงจำเพาะน้อยไฮโดรมิเตอร์จะจมลงไปใต้อ่างเหลวมาก” นั่นคือ ในช่วงเริ่มต้นของการทดสอบเม็ดดินทุกขนาดยังคงลอยตัวอยู่ในน้ำทำให้ความถ่วงจำเพาะของน้ำในตอนเริ่มต้นมีค่าสูงไฮโดรมิเตอร์จะจมลงน้อย เมื่อเวลาผ่านไปดินที่มีขนาดเม็ดใหญ่จะเริ่มตกตะกอนก่อนทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำลดลงส่งผลให้ไฮโดรมิเตอร์จมลงมากขึ้น จนกระทั่งการตกตะกอนของเม็ดดินสิ้นสุดค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำในขณะนั้นจะมีค่าน้อยที่สุดส่งผลให้ไฮโดรมิเตอร์จมลงมากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 2.6 และระยะเวลาในการตกตะกอนของดินแต่ละชนิดสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.8



รูปที่ 2.6 การวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์

ตารางที่ 2.8 ชนิดของดินเม็ดละเอียดแยกตามเวลาที่ใช้ในการตกตะกอน

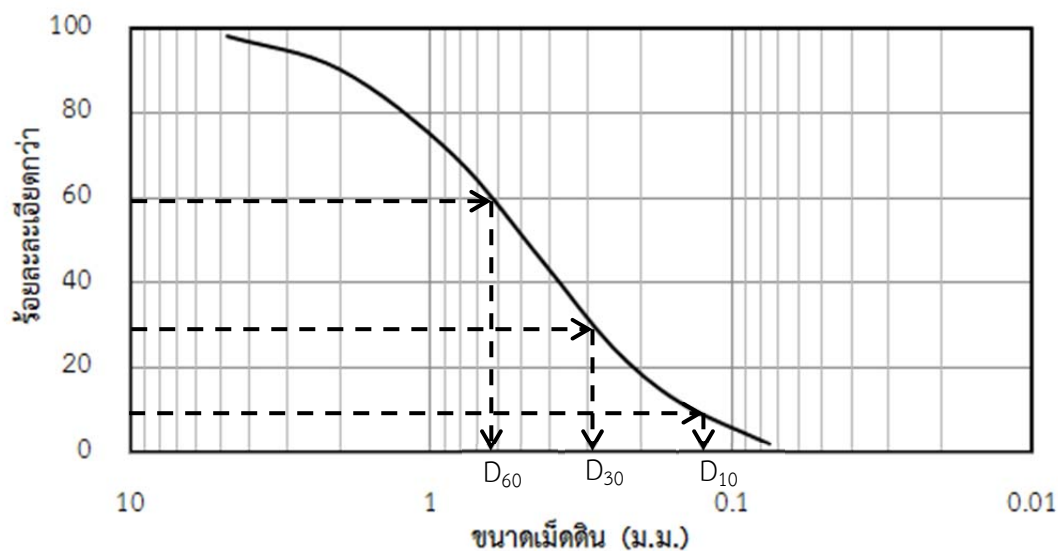
ชนิดของดิน	เวลาที่ใช้ในการตกตะกอน
ดินตะกอนปนทราย (Sandy Silt)	30 วินาที – 60 นาที
ดินตะกอน (Silt)	15 นาที – 60 นาที
ดินตะกอนปนดินเหนียว (Clayey Silt)	15 นาที – หลายชั่วโมง
ดินเหนียวปนทราย (Sandy Clay)	30 วินาที – หลายชั่วโมง

ดินเหนียวปนดินตะกอน (Silty Clay)	15 นาที – หลายชั่วโมง
ดินเหนียว (Clay)	หลายชั่วโมง – หลายวัน
ดินตะกอนอินทรีย์ (Organic Silt)	15 นาที – หลายชั่วโมง
ดินเหนียวอินทรีย์ (Organic Clay)	หลายชั่วโมง – หลายวัน

ที่มา: สุรฉัตร (2549)

2.8 การกระจายขนาดของเม็ดดิน

เมื่อทำการวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินด้วยวิธีการดังกล่าวข้างต้นแล้ว ค่าร้อยละของเม็ดดินที่มีขนาดละเอียดกว่าจะถูกนำมาพล็อตเทียบกับขนาดของเม็ดดินดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยแกนตั้งเป็นค่าร้อยละของเม็ดดินที่มีขนาดละเอียดกว่าและแกนนอนเป็นค่าขนาดของเม็ดดิน ซึ่งแกนนอนจะมีมาตราส่วนเป็นแบบมาตราส่วนลอการิทึม (Logarithm)



รูปที่ 2.7 กราฟการกระจายขนาดของเม็ดดิน

จากรูปที่ 2.7 สามารถหาค่าที่จำเป็นในการวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดินได้เพิ่มเติมดังนี้

(1) ค่าขนาดประสิทธิภาพ (Effective Size, D_{10}) หมายถึง ขนาดของเม็ดดินที่ดินร้อยละ 10 ของน้ำหนักดินทั้งหมดมีขนาดเม็ดดินเล็กกว่า

(2) สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Coefficient of Uniformity, C_u) เป็นค่าตัวเลขที่บ่งบอกถึงความสม่ำเสมอของเม็ดดิน โดยถ้าค่า C_u มีค่าน้อยกว่า 4 แสดงว่าดินมีขนาดเม็ดดินสม่ำเสมอ (Uniform Soil) แต่

หากค่า C_u มีค่ามากกว่า 4 แสดงว่าดินมีขนาดเม็ดดินคละกัันดี (Well-graded Soil) ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$C_u = D_{60} / D_{10} \quad (2.21)$$

โดยที่ D_{60} หมายถึง ขนาดของเม็ดดินที่ดินร้อยละ 60 ของน้ำหนักดินทั้งหมดมีขนาดเม็ดดินเล็กกว่า

(3) สัมประสิทธิ์ความโค้ง (Coefficient of Curvature, C_c) เป็นค่าตัวเลขอีกค่าหนึ่งที่ใช้บ่งบอกลักษณะของเม็ดดิน โดยถ้าค่า C_c อยู่ระหว่าง 1 ถึง 3 แสดงว่าดินมีขนาดเม็ดดินคละกัันดี ค่าสัมประสิทธิ์ความโค้งสามารถหาได้จากสมการ

$$C_c = D_{30}^2 / (D_{10} \times D_{60}) \quad (2.22)$$

โดยที่ D_{30} หมายถึง ขนาดของเม็ดดินที่ดินร้อยละ 30 ของน้ำหนักดินทั้งหมดมีขนาดเม็ดดินเล็กกว่า

ตัวอย่างที่ 2.4 การวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินโดยการร่อนผ่านตะแกรง

# ตะแกรง	ขนาดช่อง เปิด (มม.) (1)	น้ำหนัก (กรัม)			ร้อยละ		
		ตะแกรง (2)	ตะแกรง+ดิน (3)	ดินค้าง (4)	ดินค้าง (5)	สะสม (6)	ผ่าน (7)
# 4	4.75	500	515.4	15.4	3.4	3.4	96.6
# 10	2.00	498.3	517.7	19.4	4.3	7.7	92.3
# 20	0.84	512.1	559.4	47.3	10.5	18.2	81.8
# 40	0.42	515.8	616.2	100.4	22.3	40.5	59.5
# 60	0.25	503.3	590.2	86.9	19.3	59.8	40.2
# 100	0.149	507.6	601	93.4	20.8	80.6	19.4
# 200	0.075	495.2	553.4	58.2	12.9	93.5	6.5
ถาดรอง		511.7	540.7	29	6.4	99.9	0.1

วิธีทำ

เนื่องจากค่าในช่องที่ (1) (2) และ (3) จะได้จากการทดลองดังนั้นจะเริ่มคำนวณจากช่องที่ (4) – (7) โดยมีรายละเอียดในการคำนวณดังนี้

ค่าในช่องที่ (4) = (3) – (2)

ค่าในช่องที่ (5) = ค่าในช่องที่ (4) / ผลรวมของค่าในช่องที่ (4) ทั้งหมด

ค่าในช่องที่ (6) = ค่าในช่องที่ (5) + ค่าในช่องที่ (6) ที่อยู่เหนือขึ้นไป 1 บรรทัด

ค่าในช่องที่ (7) = 100 – ค่าในช่องที่ (6)

การคำนวณตะแกรงเบอร์ 20 ในบรรทัดที่ 3 สามารถคำนวณได้ดังนี้

น้ำหนักดินค้าง = ค่าในช่องที่ (4)

$$= 559.4 - 512.1$$

$$= 47.3 \text{ กรัม}$$

ตอบ

ร้อยละดินค้ำ = ค่าในช่องที่ (5)

$$= 47.3 / (15.4 + 19.4 + 47.3 + 100.4 + 86.9 + 93.4 + 58.2 + 29)$$

$$= 10.5 \%$$

ตอบ

ร้อยละสะสม = ค่าในช่องที่ (6)

$$= 10.5 + 7.7$$

$$= 18.2 \%$$

ตอบ

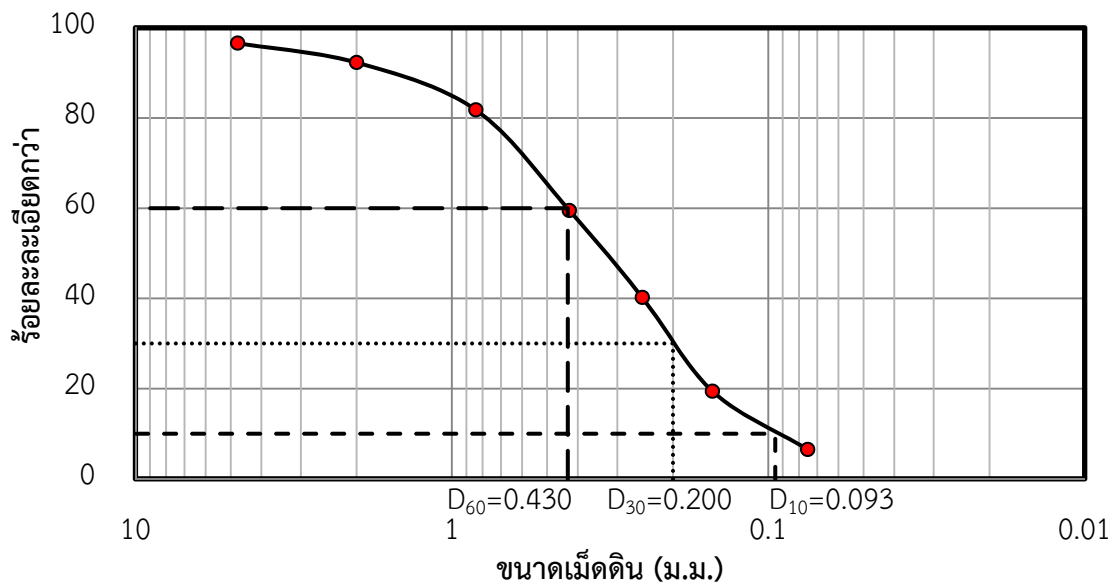
ร้อยละผ่าน = ค่าในช่องที่ (7)

$$= 100 - 18.2$$

$$= 81.8 \%$$

ตอบ

นำค่าในช่อง (1) และ (7) ไปพล็อตกราฟ semi-log โดยแกน x คือค่าในช่องที่ (1) และแกน y คือค่าในช่องที่ (7) จะได้กราฟดังรูปด้านล่าง



จากกราฟจะได้

$$D_{10} = 0.093 \text{ มม.}$$

$$D_{30} = 0.200 \text{ มม.}$$

$$D_{60} = 0.430 \text{ มม.}$$

ดังนั้น ขนาดประสิทธิภาพ = 0.093 มม.

$$\begin{aligned}\text{สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ } C_u &= D_{60} / D_{10} \\ &= 0.430 / 0.093 \\ &= 4.6\end{aligned}$$

เนื่องจาก $C_u = 4.6$ มีค่ามากกว่า 4 แสดงว่าดินมีขนาดคละกัันดี

$$\begin{aligned}\text{สัมประสิทธิ์ความโค้ง } C_c &= D_{30}^2 / (D_{60} \times D_{10}) \\ &= 0.200^2 / (0.430 \times 0.093) \\ &= 1.000\end{aligned}$$

เนื่องจาก $C_c = 1.000$ ซึ่งอยู่ระหว่าง 1 และ 3 แสดงว่าดินมีขนาดคละกัันดี

2.5 การแบ่งประเภทของดิน

นอกจากการแบ่งประเภทของดินตามลักษณะการเกิดแล้ว ดินยังสามารถแบ่งตามเกณฑ์อื่นๆ ได้อีก เช่น แบ่งตามขนาดของเม็ดดิน แบ่งตามความเชื่อมโยงแน่นระหว่างเม็ดดิน เป็นต้น

2.5.1 ประเภทของดินตามขนาดของเม็ดดิน

การแบ่งประเภทของดินตามขนาดของเม็ดดินสามารถแยกดินออกได้เป็น 4 ประเภทได้แก่ กรวด ทราย ดินตะกอน และดินเหนียว โดยกรวดและทรายจัดอยู่ในกลุ่มของดินเม็ดหยาบ ในขณะที่ดินตะกอนและดินเหนียวจัดอยู่ในกลุ่มของดินเม็ดละเอียด

(1) กรวด (Gravel) มีลักษณะเหมือนเศษก้อนหิน สามารถมองเห็นและแยกออกเป็นเม็ดเดี่ยวๆ ได้ด้วยตาเปล่า โดยทั่วไปกรวดมีขนาดตั้งแต่ 2 มิลลิเมตรจนถึง 150 มิลลิเมตร

(2) ทราย (Sand) มีขนาดเล็กกว่ากรวด สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ลักษณะเม็ดทรายจะค่อนข้างกลมและมักจะมีแร่เฟลสปาร์เป็นส่วนประกอบ ขนาดของเม็ดทรายจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.075 มิลลิเมตรถึง 2 มิลลิเมตร

(3) ดินทรายแป้ง (Silt) มีขนาดเล็กมากประมาณ 0.002 มิลลิเมตรถึง 0.075 มิลลิเมตร ดินประเภทนี้ไม่สามารถแยกเม็ดได้ด้วยตาเปล่า ลักษณะรูปร่างจะเป็นแผ่นบางๆ และมักจะมีแร่ไมกาเป็นส่วนประกอบ

(4) ดินเหนียว (Clay) ขนาดเม็ดดินของดินเหนียวจะมีขนาดเล็กมาก (เล็กกว่า 0.002 มิลลิเมตร) จึงไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เม็ดดินมีรูปร่างเป็นแผ่นบางๆ ตามลักษณะของแร่ดินเหนียว ลักษณะพิเศษอีกอย่างหนึ่งของดินเหนียวคือสามารถแสดงสภาพพลาสติกได้

2.5.2 ประเภทของดินตามความเชื่อมโยงแน่น

การแบ่งประเภทของดินตามความเชื่อมโยงแน่นระหว่างเม็ดดินสามารถแยกดินออกได้เป็น 2 ประเภทได้แก่ ดินที่ไม่มีความเชื่อมโยงแน่นและดินที่มีความเชื่อมโยงแน่น

(1) ดินที่ไม่มีความเชื่อมโยงแน่น (Cohesionless Soil) ดินประเภทนี้จะมีแรงเนื่องจากน้ำหนักของดินมากเมื่อเปรียบเทียบกับแรงดึงดูดระหว่างผิวของเม็ดดิน ทำให้เม็ดดินไม่สามารถอยู่ในสภาพพลาสติกได้ ดินประเภทนี้ได้แก่ กรวด ทราย และดินตะกอน

(2) ดินที่มีความเชื่อมโยงแน่น (Cohesive Soil) ดินประเภทนี้ได้แก่ดินเหนียว เนื่องจากเม็ดดินเหนียวมีขนาดเม็ดดินเล็กกว่า 0.002 มิลลิเมตร รวมทั้งมีลักษณะแบนจึงทำให้แรงดึงดูดระหว่างผิวของเม็ดดินมีค่ามากกว่าแรงเนื่องจากน้ำหนักของเม็ดดิน ส่งผลทำให้ดินสามารถอยู่ในสภาพพลาสติกได้ โดยคุณสมบัติของดินประเภทนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของแร่ดินเหนียว

2.6 ขนาดของเม็ดดิน

ดินแต่ละชนิดจะมีขนาดของเม็ดดินแตกต่างกัน การแบ่งชนิดของดินเบื้องต้นจึงอาจใช้ขนาดของเม็ดดินเป็นตัวกำหนด ดังแสดงในตารางที่ 2.5 อย่างไรก็ตามการแบ่งชนิดของดินตามขนาดเม็ดดินยังขึ้นอยู่กับมาตรฐานที่ใช้ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 ชนิดของดินเม็ดหยาบแยกตามขนาดของเม็ดดิน

ชนิดของดิน	ขนาดของเม็ดดิน (ม.ม.)
หิน (Boulders)	> 300
กรวดหยาบ (Cobbles)	76 – 300
กรวด (Gravel)	4.75 – 76
ทรายหยาบ (Coarse Sand)	2.00 – 4.75
ทรายหยาบปานกลาง (Medium Sand)	0.425 – 2.00
ทรายละเอียด (Fine Sand)	0.074 – 0.425
ดินทรายแป้ง (Silt)	0.002 – 0.074
ดินเหนียว (Clay)	< 0.002

ที่มา: สุรฉัตร (2549)

ตารางที่ 2.6 ขนาดของเม็ดดินแยกตามมาตรฐานต่างๆ (สุรฉัตร 2549)

	ขนาดของเม็ดดิน (ม.ม.)			
	MIT	AASHTO	FAA	Unified
กรวด (Gravel)	2.00 – 100	2.00 – 100	2.00 – 100	4.76 – 100
ทราย (Sand)	0.06 – 2.00	0.074 – 2.00	0.074 – 2.00	0.074 – 4.76
ดินทรายแป้ง (Silt)	0.002 – 0.06	0.002 – 0.074	0.005 – 0.074	0.002 – 0.074
ดินเหนียว (Clay)	< 0.002	< 0.002	< 0.005	< 0.002

2.7 การวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดิน

เพื่อให้ทราบว่าดินที่จะนำมาใช้ในงานก่อสร้างมีดินชนิดต่างๆ ประกอบอยู่มากน้อยเพียงใดวิศวกรจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดิน ซึ่งการวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินสามารถกระทำได้ 2 วิธี ได้แก่ การวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินโดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรง และการวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์

2.7.1 การวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินโดยการร่อนผ่านตะแกรง (Sieve Analysis)

การวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินด้วยวิธีการนี้เหมาะสำหรับดินเม็ดหยาบ (ขนาดเม็ดดินใหญ่กว่า 0.075 มิลลิเมตร) ซึ่งได้แก่ กรวดและทราย โดยตะแกรงที่ใช้ในการร่อนจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 20.32 เซนติเมตร มีช่องเปิดของตะแกรงร่อน (Sieve Opening) เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งมีหลายขนาดดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ขนาดของตะแกรงมาตรฐาน

ตะแกรง	ขนาดช่องเปิด		ตะแกรง	ขนาดช่องเปิด	
	ม.ม.	นิ้ว		ม.ม.	นิ้ว
3"	76.20	3.0000	เบอร์ 25	0.710	0.0280
2"	50.80	2.0000	เบอร์ 30	0.600	0.0236
1 ½"	38.10	1.5000	เบอร์ 35	0.500	0.0197
¾"	19.05	0.7500	เบอร์ 40	0.425	0.0167
½"	12.70	0.5000	เบอร์ 45	0.335	0.0132
⅜"	9.52	0.3750	เบอร์ 50	0.300	0.0118
¼"	6.35	0.2500	เบอร์ 60	0.250	0.0098
เบอร์ 4	4.75	0.1870	เบอร์ 70	0.212	0.0083
เบอร์ 5	4.00	0.1575	เบอร์ 80	0.180	0.0071
เบอร์ 6	3.35	0.1319	เบอร์ 100	0.150	0.0059
เบอร์ 7	2.80	0.1102	เบอร์ 120	0.125	0.0049
เบอร์ 8	2.36	0.0929	เบอร์ 140	0.106	0.0042

เบอร์ 10	2.00	0.0787	เบอร์ 170	0.090	0.0035
เบอร์ 12	1.70	0.0669	เบอร์ 200	0.075	0.0030
เบอร์ 14	1.40	0.0510	เบอร์ 230	0.063	0.0025
เบอร์ 16	1.18	0.0464	เบอร์ 270	0.053	0.0021
เบอร์ 18	1.00	0.0394	เบอร์ 325	0.045	0.0018
เบอร์ 20	0.85	0.0335	เบอร์ 400	0.038	0.0015

ที่มา: ชินะวัฒน์ (2545)

ชุดตะแกรงมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินจะใช้ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 10 20 40 60 140 และ 200 โดยการเรียงตะแกรงจะเรียงตะแกรงที่มีขนาดช่องเปิดใหญ่กว่าไว้ด้านบน ซึ่งตะแกรงที่มีความสำคัญในงานด้านปฐพีกลศาสตร์ได้แก่ ตะแกรงเบอร์ 4 10 40 และ 200 สำหรับรายละเอียดในการทดสอบสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากมาตรฐานการทดสอบวัสดุ ASTM D-422

2.7.2 การวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer Analysis)

ดินที่มีขนาดเม็ดดินเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตรจะวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินด้วยวิธีการนี้ หลักการของการวิเคราะห์ด้วยวิธีการนี้จะอาศัยกฎของสโตรค (Stroke's Law) ที่กล่าวว่า “ความเร็วของวัตถุทรงกลมที่จมลงในของเหลว มีความสัมพันธ์กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของวัตถุนั้นยกกำลังสอง” หรือเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V = (\gamma_s - \gamma_w) \times D^2 / (18 \times \eta)$$

หรือ

$$D = [(v \times 18 \times \eta) / (\gamma_s - \gamma_w)]^{0.5}$$

$$= [(v \times 18 \times \eta) / (G_s - 1) \times \gamma_w]^{0.5}$$

โดยที่ V คือ ความเร็วในการตกตะกอนของเม็ดดิน

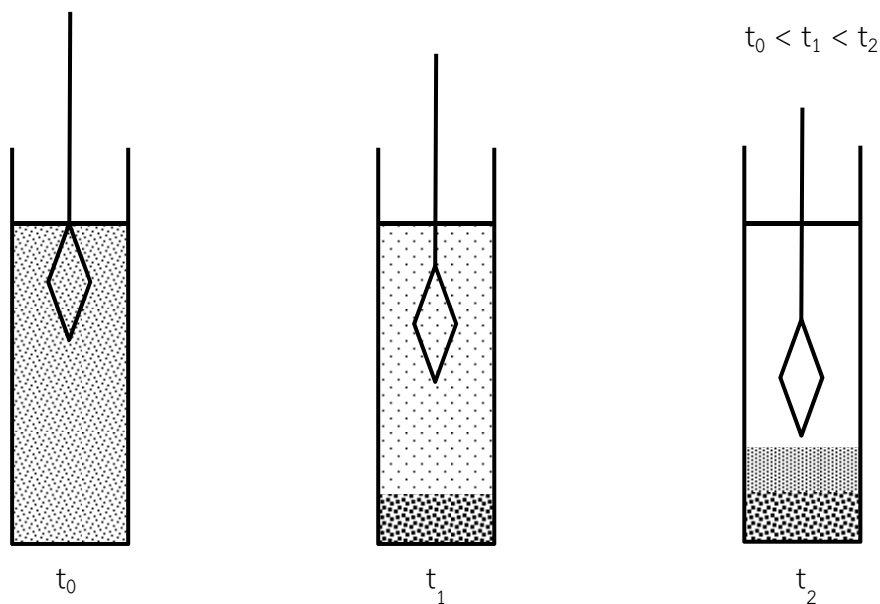
G_s คือ ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน

γ_w คือ หน่วยน้ำหนักของน้ำ

η คือ ความหนืด (Viscosity) ของน้ำ

D คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดดิน

จะเห็นว่าสมการขนาดของเม็ดดินจะขึ้นอยู่กับค่าความถ่วงจำเพาะและค่าความหนืดของน้ำ การวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินด้วยการใช้ไฮโดรมิเตอร์จะอาศัยหลักการที่ว่า “ถ้าของเหลวมีความถ่วงจำเพาะมากไฮโดรมิเตอร์จะจมลงไปใต้อ่างเหลวน้อย และถ้าของเหลวมีความถ่วงจำเพาะน้อยไฮโดรมิเตอร์จะจมลงไปใต้อ่างเหลวมาก” นั่นคือ ในช่วงเริ่มต้นของการทดสอบเม็ดดินทุกขนาดยังคงลอยตัวอยู่ในน้ำทำให้ความถ่วงจำเพาะของน้ำในตอนเริ่มต้นมีค่าสูงไฮโดรมิเตอร์จะจมลงน้อย เมื่อเวลาผ่านไปดินที่มีขนาดเม็ดใหญ่จะเริ่มตกตะกอนก่อนทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำลดลงส่งผลให้ไฮโดรมิเตอร์จมลงมากขึ้น จนกระทั่งการตกตะกอนของเม็ดดินสิ้นสุดค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำในขณะนั้นจะมีค่าน้อยที่สุดส่งผลให้ไฮโดรมิเตอร์จมลงมากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 2.6 และระยะเวลาในการตกตะกอนของดินแต่ละชนิดสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.8



รูปที่ 2.6 การวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์

ตารางที่ 2.8 ชนิดของดินเม็ดละเอียดแยกตามเวลาที่ใช้ในการตกตะกอน

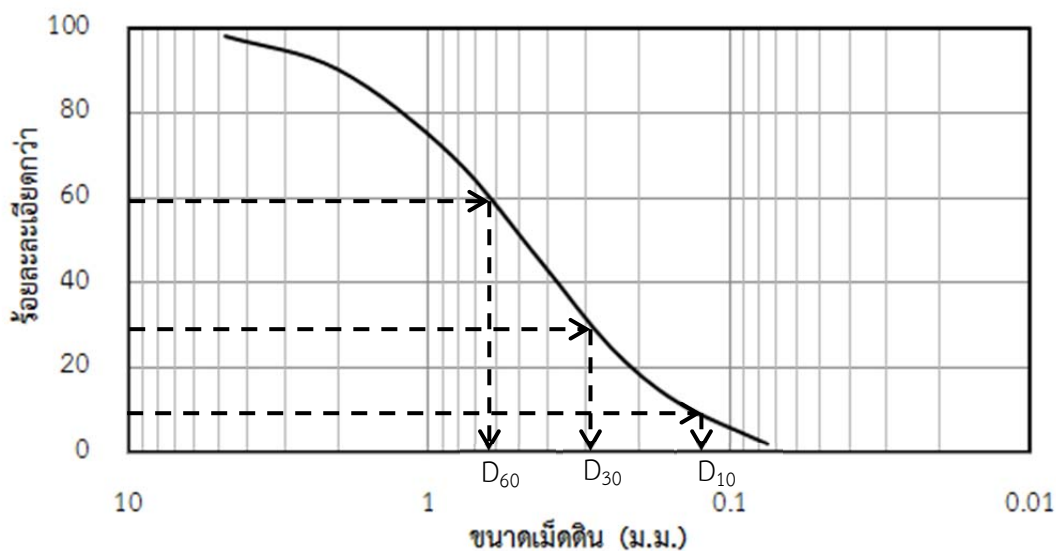
ชนิดของดิน	เวลาที่ใช้ในการตกตะกอน
ดินทรายแป้งปนทราย (Sandy Silt)	30 วินาที – 60 นาที
ดินทรายแป้ง (Silt)	15 นาที – 60 นาที
ดินทรายแป้งปนดินเหนียว (Clayey Silt)	15 นาที – หลายชั่วโมง
ดินเหนียวปนทราย (Sandy Clay)	30 วินาที – หลายชั่วโมง

ดินเหนียวปนดินทรายแป้ง (Silty Clay)	15 นาที – หลายชั่วโมง
ดินเหนียว (Clay)	หลายชั่วโมง – หลายวัน
ดินทรายแป้งอินทรีย์ (Organic Silt)	15 นาที – หลายชั่วโมง
ดินเหนียวอินทรีย์ (Organic Clay)	หลายชั่วโมง – หลายวัน

ที่มา: สุรฉัตร (2549)

2.8 การกระจายขนาดของเม็ดดิน

เมื่อทำการวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินด้วยวิธีการดังกล่าวข้างต้นแล้ว ค่าร้อยละของเม็ดดินที่มีขนาดละเอียดกว่าจะถูกนำมาพล็อตเทียบกับขนาดของเม็ดดินดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยแกนตั้งเป็นค่าร้อยละของเม็ดดินที่มีขนาดละเอียดกว่าและแกนนอนเป็นค่าขนาดของเม็ดดิน ซึ่งแกนนอนจะมีมาตราส่วนเป็นแบบมาตราส่วนลอการิทึม (Logarithm)



รูปที่ 2.7 กราฟการกระจายขนาดของเม็ดดิน

จากรูปที่ 2.7 สามารถหาค่าที่จำเป็นในการวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดินได้เพิ่มเติมดังนี้

(1) ค่าขนาดประสิทธิภาพ (Effective Size, D_{10}) หมายถึง ขนาดของเม็ดดินที่ดินร้อยละ 10 ของน้ำหนักดินทั้งหมดมีขนาดเม็ดดินเล็กกว่า

(2) สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Coefficient of Uniformity, C_u) เป็นค่าตัวเลขที่บ่งบอกถึงความสม่ำเสมอของเม็ดดิน โดยถ้าค่า C_u มีค่าน้อยกว่า 4 แสดงว่าดินมีขนาดเม็ดดินสม่ำเสมอ (Uniform Soil) แต่

หากค่า C_u มีค่ามากกว่า 4 แสดงว่าดินมีขนาดไม่สม่ำเสมอ ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$C_u = D_{60} / D_{10} \quad (2.21)$$

โดยที่ D_{60} หมายถึง ขนาดของเม็ดดินที่ดินร้อยละ 60 ของน้ำหนักดินทั้งหมดมีขนาดเม็ดดินเล็กกว่า

(3) สัมประสิทธิ์ความโค้ง (Coefficient of Curvature, C_c) เป็นค่าตัวเลขอีกค่าหนึ่งที่ใช้บ่งบอกลักษณะของเม็ดดิน โดยถ้าค่า C_c อยู่ระหว่าง 1 ถึง 3 แสดงว่าดินมีขนาดเม็ดดินคละกัันดี ค่าสัมประสิทธิ์ความโค้งสามารถหาได้จากสมการ

$$C_c = D_{30}^2 / (D_{10} \times D_{60}) \quad (2.22)$$

โดยที่ D_{30} หมายถึง ขนาดของเม็ดดินที่ดินร้อยละ 30 ของน้ำหนักดินทั้งหมดมีขนาดเม็ดดินเล็กกว่า

ตัวอย่างที่ 2.4 การวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินโดยการร่อนผ่านตะแกรง

# ตะแกรง	ขนาดช่อง เปิด (มม.) (1)	น้ำหนัก (กรัม)			ร้อยละ		
		ตะแกรง (2)	ตะแกรง+ดิน (3)	ดินค้าง (4)	ดินค้าง (5)	สะสม (6)	ผ่าน (7)
# 4	4.75	500	515.4	15.4	3.4	3.4	96.6
# 10	2.00	498.3	517.7	19.4	4.3	7.7	92.3
# 20	0.84	512.1	559.4	47.3	10.5	18.2	81.8
# 40	0.42	515.8	616.2	100.4	22.3	40.5	59.5
# 60	0.25	503.3	590.2	86.9	19.3	59.8	40.2
# 100	0.149	507.6	601	93.4	20.8	80.6	19.4
# 200	0.075	495.2	553.4	58.2	12.9	93.5	6.5
ถาดรอง		511.7	540.7	29	6.4	99.9	0.1

วิธีทำ

เนื่องจากค่าในช่องที่ (1) (2) และ (3) จะได้จากการทดลองดังนั้นจะเริ่มคำนวณจากช่องที่ (4) – (7) โดยมีรายละเอียดในการคำนวณดังนี้

ค่าในช่องที่ (4) = (3) – (2)

ค่าในช่องที่ (5) = ค่าในช่องที่ (4) $\times$ 100 / ผลรวมของค่าในช่องที่ (4) ทั้งหมด

ค่าในช่องที่ (6) = ค่าในช่องที่ (5) + ค่าในช่องที่ (6) ที่อยู่เหนือขึ้นไป 1 บรรทัด

ค่าในช่องที่ (7) = 100 – ค่าในช่องที่ (6)

การคำนวณตะแกรงเบอร์ 20 ในบรรทัดที่ 3 สามารถคำนวณได้ดังนี้

น้ำหนักดินค้าง = ค่าในช่องที่ (4)

$$= 559.4 - 512.1$$

$$= 47.3 \text{ กรัม}$$

ตอบ

ร้อยละดินค้ำ = ค่าในช่องที่ (5)

$$= 47.3 \times 100 / (15.4 + 19.4 + 47.3 + 100.4 + 86.9 + 93.4 + 58.2 + 29)$$

$$= 10.5 \%$$

ตอบ

ร้อยละสะสม = ค่าในช่องที่ (6)

$$= 10.5 + 7.7$$

$$= 18.2 \%$$

ตอบ

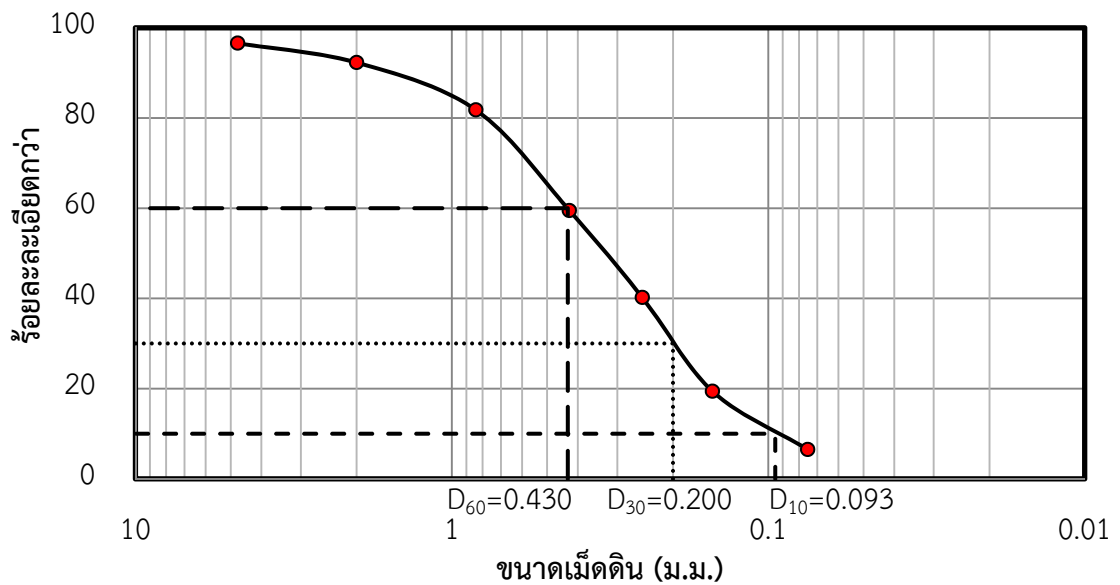
ร้อยละผ่าน = ค่าในช่องที่ (7)

$$= 100 - 18.2$$

$$= 81.8 \%$$

ตอบ

นำค่าในช่อง (1) และ (7) ไปพล็อตกราฟ semi-log โดยแกน x คือค่าในช่องที่ (1) และแกน y คือค่าในช่องที่ (7) จะได้กราฟดังรูปด้านล่าง



จากกราฟจะได้

$$D_{10} = 0.093 \text{ มม.}$$

$$D_{30} = 0.200 \text{ มม.}$$

$$D_{60} = 0.430 \text{ มม.}$$

ดังนั้น ขนาดประสิทธิภาพ = 0.093 มม.

$$\begin{aligned}\text{สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ } C_u &= D_{60} / D_{10} \\ &= 0.430 / 0.093 \\ &= 4.6\end{aligned}$$

เนื่องจาก $C_u = 4.6$ มีค่ามากกว่า 4 แสดงว่าดินมีขนาดไม่สม่ำเสมอ

$$\begin{aligned}\text{สัมประสิทธิ์ความโค้ง } C_c &= D_{30}^2 / (D_{60} \times D_{10}) \\ &= 0.200^2 / (0.430 \times 0.093) \\ &= 1.000\end{aligned}$$

เนื่องจาก $C_c = 1.000$ ซึ่งอยู่ระหว่าง 1 และ 3 แสดงว่าดินมีขนาดค่อนข้างดี

2.9 การจำแนกดิน (Soil Classification)

การจำแนกดินเป็นการจัดกลุ่มดินที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกันไว้ด้วยกัน โดยสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่และกลุ่มย่อยแยกตามพฤติกรรมทางด้านวิศวกรรม ในช่วงเริ่มต้นการจำแนกดินจะใช้เฉพาะขนาดของเม็ดดินในการพิจารณาจัดกลุ่ม แต่เมื่อมีการศึกษาเพิ่มเติมพบว่าการใช้เฉพาะขนาดของเม็ดดินไม่สามารถบอกถึงคุณลักษณะเบื้องต้นอื่นๆ ของดินได้ ในช่วงหลังจึงได้มีการพัฒนาการจำแนกดินโดยนำค่าพิคัตต์เตอร์เบอร์กของดินมาพิจารณาร่วมด้วย (ชินะวัฒน์ 2545)

ในปัจจุบันการจำแนกดินที่นิยมใช้มีอยู่ด้วยกัน 2 ระบบได้แก่ การจำแนกดินตามระบบ AASHTO และระบบ Unified โดยระบบ AASHTO นิยมใช้จำแนกดินสำหรับงานก่อสร้างถนน ในขณะที่การจำแนกดินตามระบบ Unified จะถูกใช้มากในงานด้านธรณีเทคนิค

2.9.1 การจำแนกดินตามระบบ AASHTO (AASHTO Soil Classification System)

การจำแนกดินระบบนี้ถูกพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1929 โดย Bureau of Public Roads และถูกนำมาใช้โดย American Association of State Highway and Transportation Official หรือ AASHTO

ดินที่ถูกจำแนกด้วยระบบนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 7 กลุ่มหลักๆ (A-1 ถึง A-7) โดยดินที่ถูกจำแนกอยู่ในกลุ่ม A-1 A-2 และ A-3 จะเป็นดินเม็ดหยาบ ในขณะที่ดินเม็ดละเอียดจะถูกจัดให้อยู่ในกลุ่ม A-4 A-5 A-6 และ A-7 นอกจากนี้ยังมีค่าดัชนีกลุ่ม (Group Index) สำหรับประเมินคุณภาพของดินว่ามีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุถมคันทางหรือไม่ โดยถ้าค่าดัชนีกลุ่มมีค่ามากจะไม่เหมาะกับการนำมาใช้เป็นวัสดุถมคันทาง

ดินที่ถูกจำแนกด้วยระบบนี้จะถูกเขียนแสดงในรูปของกลุ่มของดินและตัวเลขดัชนี ซึ่งตัวเลขดัชนีกลุ่มจะถูกเขียนไว้ในวงเล็บและนำไปวางต่อท้ายชื่อของกลุ่มดิน โดยการจำแนกดินตามระบบนี้จะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดดังต่อไปนี้

การจำแนกดินตามระบบนี้จะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดดังต่อไปนี้

1) ขนาดของเม็ดดิน

- กรวด (Gravel) คือเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่า 75 มม. และค้ำบนตะแกรงเบอร์ 10 (ใหญ่กว่าหรือเท่ากับ 2 มม.)
- ทราย (Sand) คือเม็ดดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 10 และค้ำตะแกรงเบอร์ 200 (ใหญ่กว่าหรือเท่ากับ 0.075 มม.)
- ดินตะกอน (Silt) และดินเหนียว (Clay) คือเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม.

2) สภาพพลาสติกของดิน

- ดินที่มีค่าดัชนีสภาพพลาสติก (Plasticity Index) น้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 เราจะถือว่าดินมีส่วนผสมของตะกอน (Silty)
 - ดินที่มีค่าดัชนีสภาพพลาสติกมากกว่าหรือเท่ากับ 11 เราจะถือว่าดินมีส่วนผสมของดินเหนียว (Clayey)
- 3) เม็ดดินที่มีขนาดใหญ่กว่า 75 มม. จะไม่ถูกนำมาใช้ในการจำแนกดินด้วยระบบ AASHTO อย่างไรก็ตาม จะต้องบันทึกค่าร้อยละของเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่กว่า 75 มม. นั้นไว้

ขั้นตอนการจำแนกดินตามระบบ AASHTO

ขั้นตอนที่ 1 พิจารณาร้อยละของเม็ดดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 หากมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 35 ให้ใช้ **ตารางที่ 2.9** ในการจำแนกดิน แต่หากมีค่ามากกว่าร้อยละ 35 ให้ใช้ **ตารางที่ 2.10** ในการจำแนกดิน โดยวิธีการพิจารณาจะเริ่มจากคอลัมน์ทางซ้ายมือก่อนแล้วพิจารณาค่าไล่จากบนลงล่าง หากค่าที่พิจารณาสอดคล้องทั้งหมดจะได้ชื่อกลุ่มตามชื่อคอลัมน์ หากพิจารณาแล้วค่าไม่สอดคล้องทั้งหมดให้ขยับไปพิจารณาคอลัมน์ทางขวาต่อไปที่ละคอลัมน์

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่าดัชนีกลุ่ม (Group Index, GI) โดยมีหลักเกณฑ์ในการคำนวณดังนี้

- หากดินอยู่ในกลุ่ม A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5 และ A-3 $GI = 0$
 - หากดินอยู่ในกลุ่ม A-2-6 และ A-2-7 ให้คำนวณ GI จากสมการ
- $$GI = 0.01 \cdot (F - 15) \cdot (PI - 10)$$

ตารางที่ 2.9 ตารางจำแนกดินเม็ดหยาบของระบบ AASHTO

การจำแนก		ดินตะกอนและดินเหนียว (Silt and Clay Materials)					
กลุ่ม	A-1		A-3	A-2			
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
% ผ่านตะแกรง							
#10	≤ 50						
#40	≤ 30	≤ 50	≥ 51				
#200	≤ 15	≤ 25	≤ 10	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35
LL				≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41
PI	≤ 6		ไม่แสดง	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11

ตารางที่ 2.10 ตารางจำแนกดินเม็ดละเอียดของระบบ AASHTO

การจำแนก	กรวดและดินทราย (Gravel and Sand Materials)			
กลุ่ม	A-7			
	A-4	A-5	A-6	A-7-5 ¹
				A-7-6 ²
% ผ่านตะแกรง				
#10				
#40				
#200	≥ 36	≥ 36	≥ 36	≥ 36
LL	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41
PI	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11

หมายเหตุ: A-7-5 เมื่อ $PI \leq LL-30$
A-7-6 เมื่อ $PI > LL-30$

- นอกนั้นให้คำนวณ GI จากสมการ

$$GI = (F-35) \cdot [0.2 + 0.005 \cdot (LL-40)] + 0.01 \cdot (F-15) \cdot (PI-10) \quad (2.23)$$

โดยที่ F = ร้อยละผ่านตะแกรงเบอร์ 200

LL = ชีดจำกัดเหลว

PI = ดัชนีสภาพพลาสติก

หมายเหตุ: GI ต้องเป็นจำนวนเต็ม

$GI = 0$ เมื่อคำนวณได้ค่าลบ

ขั้นตอนที่ 3 เขียนผลการจำแนกดินในรูปแบบ กลุ่ม (ดัชนีกลุ่ม) เช่น A-1-a(0), A-4(16) เป็นต้น

2.9.2 การจำแนกดินตามระบบ Unified (Unified Soil Classification System)

การจำแนกดินด้วยระบบนี้ถูกคิดค้นโดย Casagrande ในปี ค.ศ. 1942 สำหรับงานก่อสร้างทางวิ่งของสนามบินภายใต้การดูแลของ Army Corps of Engineers ต่อมาในปี ค.ศ. 1952 การจำแนกดินระบบนี้ได้ถูกพัฒนาใหม่โดย U.S. Bureau of Reclamation

การจำแนกดินด้วยระบบ Unified จะจำแนกดินออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือดินเม็ดหยาบ (Coarse-grained) และดินเม็ดละเอียด (Fine-grained) โดยดินที่มีค่าร้อยละการผ่านตะแกรงเบอร์ 200 น้อยกว่าร้อยละ

ละ 50 จะถือว่าเป็นดินเม็ดหยาบ ซึ่งได้แก่ กรวดและดินทราย โดยจะใช้สัญลักษณ์ G และ S แทนตามลำดับ ในทางตรงกันข้าม หากดินมีค่าร้อยละการผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 50 จะถือว่าเป็นดินเม็ดละเอียด ซึ่งได้แก่ดินตะกอนและดินเหนียว โดยจะถูกแทนที่ด้วยสัญลักษณ์ M และ C ตามลำดับ

นอกจากนี้ในการจำแนกดินด้วยระบบนี้ยังจำเป็นต้องใช้สัญลักษณ์อื่นๆ เพิ่มเติมอีกดังนี้

- W มีการคละขนาดของดินเม็ดดินดี
- P มีการคละขนาดของเม็ดดินไม่ดี
- L แสดงสภาพความเป็นพลาสติกต่ำ
- H แสดงสภาพความเป็นพลาสติกสูง

ขั้นตอนการจำแนกดินตามระบบ Unified

ขั้นตอนที่ 1 พิจารณาร้อยละของเม็ดดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (F) หากมีค่ามากกว่าร้อยละ 50 แสดงว่าดินเป็นดินเม็ดละเอียดให้ข้ามไปทำขั้นตอนที่ 6 (ไม่ต้องทำขั้นตอนที่ 2-5)

ขั้นตอนที่ 2 พิจารณาร้อยละของเม็ดดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และค่าตะแกรงเบอร์ 200 (F₁) หาก $F_1 < (100-F)/2$ ให้ใช้ตารางที่ 2.11 ในการหาสัญลักษณ์กลุ่ม แต่หาก $F_1 \geq (100-F)/2$ ให้ข้ามไปทำขั้นตอนที่ 4

ตารางที่ 2.11 สัญลักษณ์กลุ่มของดินเม็ดหยาบตามระบบ Unified กรณีที่มีกรวดมากกว่าทราย

สัญลักษณ์กลุ่ม	เงื่อนไข
GW	1. $F < 5\%$ 2. $C_u \geq 4$ 3. $1 \leq C_c \leq 3$
GP	1. $F < 5\%$ 2. $C_u < 4$ หรือ $C_c < 1$ หรือ $C_c > 3$
GM	1. $F > 12\%$ 2. $PI < 4$ หรือ จุดอยู่ต่ำกว่าเส้น A-Line เมื่อพล็อตกราฟในรูปที่ 2.8
GC	1. $F > 12\%$ 2. จุดอยู่สูงกว่าเส้น A-Line เมื่อพล็อตกราฟในรูปที่ 2.8 3. $PI > 7$
GC-GM	1. $F > 12\%$ 2. จุดอยู่ในพื้นที่แรเงา CL-ML เมื่อพล็อตกราฟในรูปที่ 2.8

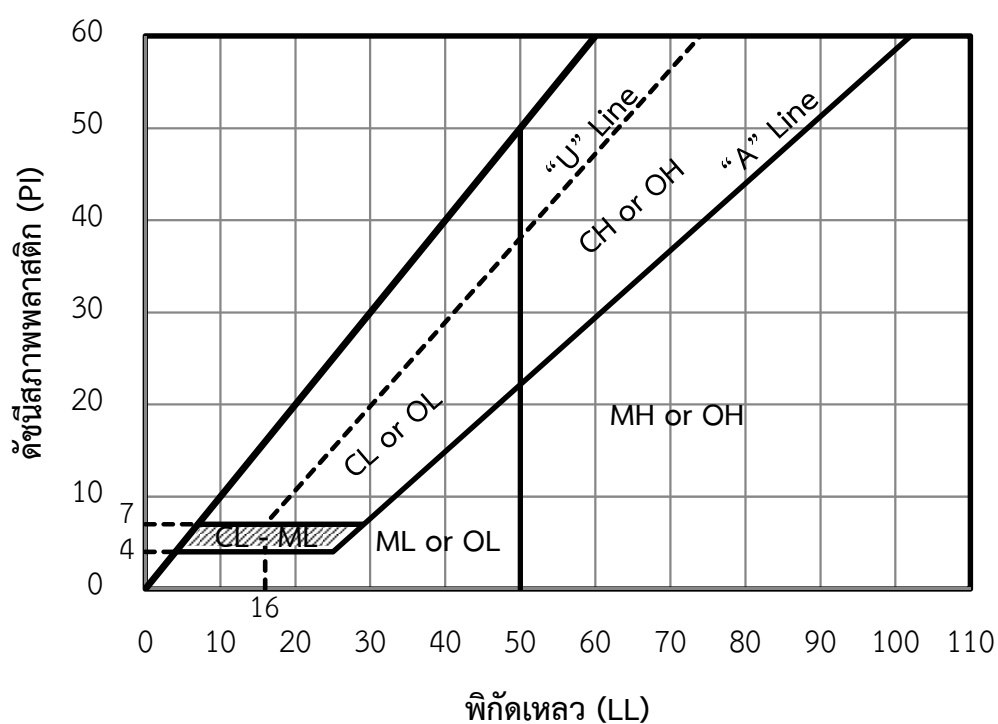
สัญลักษณ์กลุ่ม	เงื่อนไข
GW-GM	1. $5 \leq F \leq 12$ 2. $C_u \geq 4$ 3. $1 \leq C_c \leq 3$ 4. $PI < 4$ หรือ จุดอยู่ต่ำกว่าเส้น A-Line เมื่อพล็อตกราฟในรูปที่ 2.8
GW-GC	1. $5 \leq F \leq 12$ 2. $C_u \geq 4$ 3. $1 \leq C_c \leq 3$ 4. จุดอยู่สูงกว่าเส้น A-Line เมื่อพล็อตกราฟในรูปที่ 2.8 5. $PI > 7$
GP-GM	1. $5 \leq F \leq 12$ 2. $C_u < 4$ หรือ $C_c < 1$ หรือ $C_c > 3$ 3. $PI < 4$ หรือ จุดอยู่ต่ำกว่าเส้น A-Line เมื่อพล็อตกราฟในรูปที่ 2.8
GP-GC	1. $5 \leq F \leq 12$ 2. $C_u < 4$ หรือ $C_c < 1$ หรือ $C_c > 3$ 3. จุดอยู่สูงกว่าเส้น A-Line เมื่อพล็อตกราฟในรูปที่ 2.8 4. $PI > 7$

ขั้นตอนที่ 3 พิจารณาหาชื่อกลุ่มตามตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 ชื่อกลุ่มของดินเม็ดหยาบกรณีที่มีกรวดมากกว่าทราย

สัญลักษณ์กลุ่ม	เงื่อนไข	ชื่อกลุ่ม
GW	ทราย < 15%	Well-graded gravel
	ทราย $\geq$ 15%	Well-graded gravel with sand
GP	ทราย < 15%	Poorly graded gravel
	ทราย $\geq$ 15%	Poorly graded gravel with sand
GW-GM	ทราย < 15%	Well-graded gravel with silt
	ทราย $\geq$ 15%	Well-graded gravel with silt and sand
GW-GC	ทราย < 15%	Well-graded gravel with clay (or silty clay)
	ทราย $\geq$ 15%	Well-graded gravel with clay (or silty clay) and sand

สัญลักษณ์กลุ่ม	เงื่อนไข	ชื่อกลุ่ม
GP-GM	ทราย < 15%	Poorly graded gravel with silt
	ทราย ≥ 15%	Poorly graded gravel with silt and sand
GP-GC	ทราย < 15%	Poorly graded gravel with clay (or silty clay)
	ทราย ≥ 15%	Poorly graded gravel with clay (or silty clay) and sand
GM	ทราย < 15%	Silty gravel
	ทราย ≥ 15%	Silty gravel with sand
GC	ทราย < 15%	Clayey gravel
	ทราย ≥ 15%	Clayey gravel with sand
GC-GM	ทราย < 15%	Silty clayey gravel
	ทราย ≥ 15%	Silty clayey gravel with sand



รูปที่ 2.8 กราฟสภาพพลาสติก

ขั้นตอนที่ 4 จำแนกดินตามตารางที่ 2.13

ตารางที่ 2.13 สัญลักษณ์กลุ่มของดินเม็ดหยาบตามระบบ Unified กรณีที่มีทรายมากกว่ากรวด

สัญลักษณ์กลุ่ม	เงื่อนไข
SW	1. $F < 5\%$ 2. $C_u \geq 4$ 3. $1 \leq C_c \leq 3$
SP	1. $F < 5\%$ 2. $C_u < 4$ หรือ $C_c < 1$ หรือ $C_c > 3$
SM	1. $F > 12\%$ 2. $PI < 4$ หรือ จุดอยู่ต่ำกว่าเส้น A-Line เมื่อพล็อตกราฟในรูปที่ 2.8
SC	1. $F > 12\%$ 2. จุดอยู่สูงกว่าเส้น A-Line เมื่อพล็อตกราฟในรูปที่ 2.8 3. $PI > 7$
SC-SM	1. $F > 12\%$ 2. จุดอยู่ในพื้นที่แรง CL-ML เมื่อพล็อตกราฟในรูปที่ 2.8
SW-SM SW-SM	1. $5 \leq F \leq 12$ 2. $C_u \geq 4$ 3. $1 \leq C_c \leq 3$ 4. $PI < 4$ หรือ จุดอยู่ต่ำกว่าเส้น A-Line เมื่อพล็อตกราฟในรูปที่ 2.8
SW-SC	1. $5 \leq F \leq 12$ 2. $C_u \geq 4$ 3. $1 \leq C_c \leq 3$ 4. จุดอยู่สูงกว่าเส้น A-Line เมื่อพล็อตกราฟในรูปที่ 2.8 5. $PI > 7$
SP-SM	1. $5 \leq F \leq 12$ 2. $C_u < 4$ หรือ $C_c < 1$ หรือ $C_c > 3$ 3. $PI < 4$ หรือ จุดอยู่ต่ำกว่าเส้น A-Line เมื่อพล็อตกราฟในรูปที่ 2.8
SP-SC	1. $5 \leq F \leq 12$ 2. $C_u < 4$ หรือ $C_c < 1$ หรือ $C_c > 3$ 3. จุดอยู่สูงกว่าเส้น A-Line เมื่อพล็อตกราฟในรูปที่ 2.8

สัญลักษณ์กลุ่ม	เงื่อนไข
	4. $PI > 7$

ขั้นตอนที่ 5 พิจารณาชื่อกลุ่มตามตารางที่ 2.14

ตารางที่ 2.14 ชื่อกลุ่มของดินเม็ดหยาบกรณีที่มีทรายมากกว่ากรวด

สัญลักษณ์กลุ่ม	เงื่อนไข	ชื่อกลุ่ม
SW	กรวด < 15%	Well-graded sand
	กรวด $\geq$ 15%	Well-graded sand with gravel
SP	กรวด < 15%	Poorly graded sand
	กรวด $\geq$ 15%	Poorly graded sand with gravel
SW-SM	กรวด < 15%	Well-graded sand with silt
	กรวด $\geq$ 15%	Well-graded sand with silt and gravel
SW-SC	กรวด < 15%	Well-graded sand with clay (or silty clay)
	กรวด $\geq$ 15%	Well-graded sand with clay (or silty clay) and gravel
SP-SM	กรวด < 15%	Poorly graded sand with silt
	กรวด $\geq$ 15%	Poorly graded sand with silt and gravel
SP-SC	กรวด < 15%	Poorly graded sand with clay (or silty clay)
	กรวด $\geq$ 15%	Poorly graded sand with clay (or silty clay) and gravel
SM	กรวด < 15%	Silty sand
	กรวด $\geq$ 15%	Silty sand and gravel
SC	กรวด < 15%	Clayey sand
	กรวด $\geq$ 15%	Clayey sand and gravel
SC-SM	กรวด < 15%	Silty clayey sand
	กรวด $\geq$ 15%	Silty clayey sand with gravel

ขั้นตอนที่ 6 พิจารณาสัญลักษณ์กลุ่มของดินจากตารางที่ 2.15

ตารางที่ 2.15 สัญลักษณ์กลุ่มของดินเม็ดละเอียดตามระบบ Unified

สัญลักษณ์กลุ่ม	เงื่อนไข
----------------	----------

สัญลักษณ์กลุ่ม	เงื่อนไข
CL	1. ดินอินทรีย์ 2. $LL < 50$ 3. $PI > 7$ 4. จุดอยู่บนหรือสูงกว่าเส้น A-Line เมื่อพล็อตกราฟในรูปที่ 2.8
ML	1. ดินอินทรีย์ 2. $LL < 50$ 3. $PI < 4$ หรือจุดอยู่ต่ำกว่าเส้น A-Line เมื่อพล็อตกราฟในรูปที่ 2.8
CH	1. ดินอินทรีย์ 2. $LL \geq 50$ 3. จุดอยู่บนหรือสูงกว่าเส้น A-Line เมื่อพล็อตกราฟในรูปที่ 2.8
MH	1. ดินอินทรีย์ 2. $LL \geq 50$ 3. จุดอยู่ต่ำกว่าเส้น A-Line เมื่อพล็อตกราฟในรูปที่ 2.8
CL-ML	1. ดินอินทรีย์ 2. จุดอยู่ในพื้นที่แรง CL-ML เมื่อพล็อตกราฟในรูปที่ 2.8
OL	1. ดินอินทรีย์ 2. $(LL_{\text{ดินอบแห้ง}} / LL) < 0.75$ 3. $LL < 50$
OH	1. ดินอินทรีย์ 2. $(LL_{\text{ดินอบแห้ง}} / LL) < 0.75$ 3. $LL \geq 50$
Pt	ไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขข้างบน (ดินที่มีซากพืช (Peat) หรือเกิดจากการสลายตัวของซากพืช (Muck) และดินอื่นๆ ที่มีสารอินทรีย์สูงๆ)

หมายเหตุ: การแยกระหว่างดินอินทรีย์และดินอนินทรีย์จะพิจารณาจากสีและกลิ่น

ขั้นตอนที่ 7 หากได้สัญลักษณ์กลุ่มเป็น OL หรือ OH (ดินอินทรีย์) ให้พิจารณาชื่อกลุ่มจากตารางที่ 2.17 แต่หากเป็นสัญลักษณ์กลุ่มอื่นๆ (ดินอนินทรีย์) ให้พิจารณาชื่อกลุ่มจากตารางที่ 2.16 (ยกเว้น Pt ไม่มีชื่อกลุ่ม)

ตารางที่ 2.16 ชื่อกลุ่มของดินเม็ดละเอียดกรณีเป็นดินอนินทรีย์

สัญลักษณ์กลุ่ม	เงื่อนไขที่ 1	เงื่อนไขที่ 2	เงื่อนไขที่ 3	ชื่อกลุ่ม
CL	%ดินค้ำตะแกรงเบอร์ 200 < 15%	-	-	Lean clay
	15% ≤ %ดินค้ำตะแกรงเบอร์ 200 < 30%	%ทราย ≥ % กรวด	-	Lean clay with sand
		%ทราย < % กรวด	-	Lean clay with gravel
	%ดินค้ำตะแกรงเบอร์ 200 ≥ 30%	%ทราย ≥ % กรวด	%กรวด < 15%	Sandy lean clay
			%กรวด ≥ 15%	Sandy lean clay with gravel
		%ทราย < % กรวด	%ทราย < 15%	Gravelly lean clay
			%ทราย ≥ 15%	Gravelly lean clay with sand
CL-ML	%ดินค้ำตะแกรงเบอร์ 200 < 15%	-	-	Silty clay
	15% ≤ %ดินค้ำตะแกรงเบอร์ 200 < 30%	%ทราย ≥ % กรวด	-	Silty clay with sand
		%ทราย < % กรวด	-	Silty clay with gravel
	%ดินค้ำตะแกรงเบอร์ 200 ≥ 30%	%ทราย ≥ % กรวด	%กรวด < 15%	Sandy silty clay
			%กรวด ≥ 15%	Sandy silty clay with gravel
		%ทราย < % กรวด	%ทราย < 15%	Gravelly silty clay
			%ทราย ≥ 15%	Gravelly silty clay with sand
ML	%ดินค้ำตะแกรงเบอร์ 200 < 15%	-	-	Silt
	15% ≤ %ดินค้ำตะแกรงเบอร์ 200 < 30%	%ทราย ≥ % กรวด	-	Silt with sand
		%ทราย < % กรวด	-	Silt with gravel
	%ดินค้ำตะแกรงเบอร์ 200 ≥ 30%	%ทราย ≥ % กรวด	%กรวด < 15%	Sandy silt
			%กรวด ≥ 15%	Sandy silt with gravel
		%ทราย < % กรวด	%ทราย < 15%	Gravelly silt
			%ทราย ≥ 15%	Gravelly silt with sand

ตารางที่ 2.16 (ต่อ) ชื่อกลุ่มของดินเม็ดละเอียดกรณีเป็นดินอนินทรีย์

สัญลักษณ์กลุ่ม	เงื่อนไขที่ 1	เงื่อนไขที่ 2	เงื่อนไขที่ 3	ชื่อกลุ่ม
CH	%ดินค้ำตะแกรงเบอร์ 200 < 15%	-	-	Fat clay
	15% ≤ %ดินค้ำตะแกรงเบอร์ 200 < 30%	%ทราย ≥ % กรวด	-	Fat clay with sand
		%ทราย < % กรวด	-	Fat clay with gravel
	%ดินค้ำตะแกรงเบอร์ 200 ≥ 30%	%ทราย ≥ % กรวด	%กรวด < 15%	Sandy fat clay
			%กรวด ≥ 15%	Sandy fat clay with gravel
		%ทราย < % กรวด	%ทราย < 15%	Gravelly fat clay
			%ทราย ≥ 15%	Gravelly fat clay with sand
MH	%ดินค้ำตะแกรงเบอร์ 200 < 15%	-	-	Elastic silt
	15% ≤ %ดินค้ำตะแกรงเบอร์ 200 < 30%	%ทราย ≥ % กรวด	-	Elastic silt with sand
		%ทราย < % กรวด	-	Elastic silt with gravel
	%ดินค้ำตะแกรงเบอร์ 200 ≥ 30%	%ทราย ≥ % กรวด	%กรวด < 15%	Sandy elastic silt
			%กรวด ≥ 15%	Sandy elastic silt with gravel
		%ทราย < % กรวด	%ทราย < 15%	Gravelly elastic silt
			%ทราย ≥ 15%	Gravelly elastic silt with sand

ตารางที่ 2.17 ชื่อกลุ่มของดินเม็ดละเอียดกรณีเป็นดินอินทรีย์

สัญลักษณ์กลุ่ม	เงื่อนไขที่ 1	เงื่อนไขที่ 2	เงื่อนไขที่ 3	ชื่อกลุ่ม
OH (จุดอยู่บนหรือสูงกว่าเส้น A-Line เมื่อพล็อตกราฟในรูปที่ 2.8)	%ดินค้ำตะแกรงเบอร์ 200 < 15%	-	-	Organic clay
	15% ≤ %ดินค้ำตะแกรงเบอร์ 200 < 30%	%ทราย ≥ % กรวด	-	Organic clay with sand
		%ทราย < % กรวด	-	Organic clay with gravel
	%ดินค้ำตะแกรงเบอร์ 200 ≥ 30%	%ทราย ≥ % กรวด	%กรวด < 15%	Sandy organic clay
			%กรวด ≥ 15%	Sandy organic clay with gravel
		%ทราย < % กรวด	%ทราย < 15%	Gravelly organic clay
			%ทราย ≥ 15%	Gravelly organic clay with sand
OH (จุดอยู่ต่ำกว่าเส้น A-Line เมื่อพล็อตกราฟในรูปที่ 2.8)	%ดินค้ำตะแกรงเบอร์ 200 < 15%	-	-	Organic silt
	15% ≤ %ดินค้ำตะแกรงเบอร์ 200 < 30%	%ทราย ≥ % กรวด	-	Organic silt with sand
		%ทราย < % กรวด	-	Organic silt with gravel
	%ดินค้ำตะแกรงเบอร์ 200 ≥ 30%	%ทราย ≥ % กรวด	%กรวด < 15%	Sandy organic silt
			%กรวด ≥ 15%	Sandy organic silt with gravel
		%ทราย < % กรวด	%ทราย < 15%	Gravelly organic silt
			%ทราย ≥ 15%	Gravelly organic silt with sand
OL (PI ≥ 4 และ จุดอยู่บนหรือสูงกว่าเส้น A-Line เมื่อพล็อตกราฟในรูปที่ 2.8)	%ดินค้ำตะแกรงเบอร์ 200 < 15%	-	-	Organic clay
	15% ≤ %ดินค้ำตะแกรงเบอร์ 200 < 30%	%ทราย ≥ % กรวด	-	Organic clay with sand
		%ทราย < % กรวด	-	Organic clay with gravel
	%ดินค้ำตะแกรงเบอร์ 200 ≥ 30%	%ทราย ≥ % กรวด	%กรวด < 15%	Sandy organic clay
			%กรวด ≥ 15%	Sandy organic clay with gravel
		%ทราย < % กรวด	%ทราย < 15%	Gravelly organic clay
			%ทราย ≥ 15%	Gravelly organic clay with sand

ตารางที่ 2.17 (ต่อ) ชื่อกลุ่มของดินเม็ดละเอียดกรณีเป็นดินอินทรีย์

สัญลักษณ์กลุ่ม	เงื่อนไขที่ 1	เงื่อนไขที่ 2	เงื่อนไขที่ 3	ชื่อกลุ่ม
OL (PI < 4 หรือ จุดอยู่ ต่ำกว่าเส้น A-Line เมื่อพล็อตกราฟใน รูปที่ 2.8)	%ดินค้ำตะแกรงเบอร์ 200 < 15%	-	-	Organic silt
	15% ≤ %ดินค้ำตะแกรงเบอร์ 200 < 30%	%ทราย ≥ % กรวด	-	Organic silt with sand
		%ทราย < % กรวด	-	Organic silt with clay
	%ดินค้ำตะแกรงเบอร์ 200 ≥ 30%	%ทราย ≥ % กรวด	%กรวด < 15%	Sandy organic silt
			%กรวด ≥ 15%	Sandy organic silt with gravel
		%ทราย < % กรวด	%ทราย < 15%	Gravelly organic silt
			%ทราย ≥ 15%	Gravelly organic silt with sand

บทที่ 3

การไหลของน้ำในดิน

การวิเคราะห์ปริมาณการไหลของน้ำในดินมีความสำคัญมากโดยเฉพาะงานก่อสร้างที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน งานก่อสร้างที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดินจะต้องสูบน้ำออกจนกระทั่งน้ำอยู่ในระดับที่สามารถทำการก่อสร้างได้โดยวิศวกรจะต้องเป็นผู้เลือกขนาดเครื่องสูบน้ำให้มีขนาดที่เหมาะสมไม่เล็กหรือใหญ่เกินไป ซึ่งการพิจารณาเลือกขนาดเครื่องสูบน้ำจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำในดิน

3.1 ลักษณะการไหลของน้ำในดิน

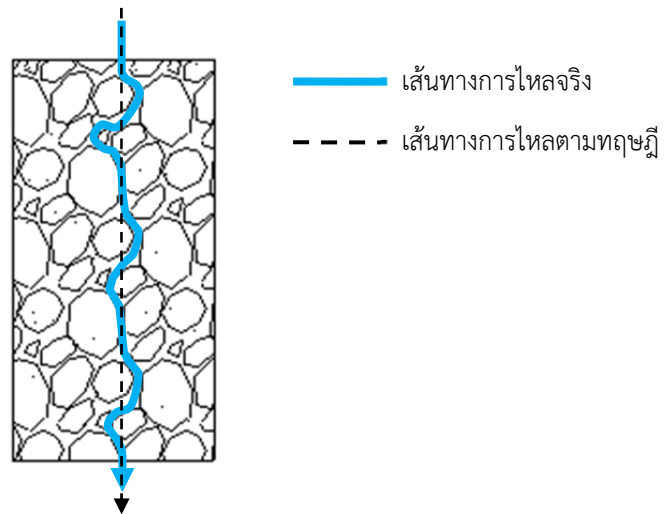
น้ำในดินจะไหลผ่านช่องว่างภายในมวลดิน ซึ่งโดยปกติแล้วช่องว่างในมวลดินก่อนหนึ่งๆ จะต่อเนื่องกัน สำหรับดินเม็ดหยาบซึ่งได้แก่กรวดและทรายจะมีช่องว่างขนาดใหญ่ส่งผลให้น้ำสามารถไหลซึมผ่านดินประเภทนี้ได้ง่าย ในขณะที่ดินเม็ดละเอียดได้แก่ทรายแป้งและดินเหนียวจะมีช่องว่างขนาดเล็กทำให้น้ำไหลซึมผ่านได้ยากกว่าดินเม็ดหยาบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินเหนียวซึ่งอาจจะมีช่องว่างบางส่วนในมวลดินที่ไม่เชื่อมต่อกับช่องว่างของมวลดินที่อยู่ติดกันอีกทั้งผลของประจุไฟฟ้าในแร่ดินเหนียวจึงทำให้น้ำไหลซึมผ่านดินประเภทนี้ได้ยาก

ลักษณะการไหลของน้ำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะตามการแปรผันของพลังงานที่สูญเสียกับความเร็วในการไหล คือ

(1) การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) คือ การไหลของน้ำที่การสูญเสียพลังงานแปรผันเป็นแบบเชิงเส้นตรงกับความเร็วในการไหล ทำให้อนุภาคของน้ำเคลื่อนที่ต่อเนื่องกันไปแบบราบเรียบ ลักษณะการไหลแบบนี้จะเกิดกับน้ำที่ไหลด้วยความเร็วต่ำ

(2) การไหลแบบสับสน (Turbulent Flow) คือ การไหลของน้ำที่การสูญเสียพลังงานแปรผันแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรงกับความเร็วในการไหล การไหลลักษณะนี้จะเกิดกับน้ำที่ไหลด้วยความเร็วสูงและอนุภาคของน้ำจะเคลื่อนที่ในทิศทางที่สับสน

การไหลของน้ำในดินสามารถแสดงดังในรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าในความเป็นจริงน้ำจะไม่สามารถไหลเป็นแนวเส้นตรงได้แต่จะต้องไหลในทิศทางคดเคี้ยวตามช่องว่างที่ต่อเนื่องกัน อย่างไรก็ตามในทางทฤษฎีจะถือว่าน้ำไหลในแนวเส้นตรงด้วยความเร็วประสิทธิผล (Effective Velocity) และเนื่องจากอัตราการไหลของน้ำผ่านดินเป็นไปอย่างช้ามากจึงถือได้ว่าการไหลของน้ำผ่านดินเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) นั่นคือพลังงานที่สูญเสียไปจะเป็นสัดส่วนแบบเชิงเส้นตรงกับ



รูปที่ 3.1 ลักษณะการไหลของน้ำในดิน

ความเร็วในการไหล กฎการไหลของน้ำผ่านดินที่สำคัญ กฎพลังงานของการไหล กฎของดาร์ซี และกฎการต่อเนื่องของการไหลหรือสมการของลาปลาซ (Laplace's Equation) (สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์)

3.2 กฎพลังงานของการไหล

พลังงานที่ส่งผลต่อการไหลของน้ำในดินประกอบด้วยพลังงาน 3 ส่วน ได้แก่ พลังงานศักย์ พลังงานความดันและพลังงานจลน์ โดยเบอร์นูลลี (Bernoulli) ได้เสนอให้ใช้เฮด (Head) ซึ่งมีหน่วยความยาวเป็นเมตรแทนพลังงานเหล่านี้ นั่นคือ เฮดเนื่องจากระดับความสูงแทนพลังงานศักย์ เฮดเนื่องจากความดันน้ำแทนพลังงานความดันและเฮดเนื่องจากความเร็วแทนพลังงานจลน์ ซึ่งผลรวมของเฮดทั้งสามเรียกว่าเฮดทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยน้ำจะไหลจากจุดที่มีเฮดทั้งหมดสูงไปยังจุดที่มีเฮดทั้งหมดต่ำนั่นคือน้ำจะไหลจากจุด A ไปจุด B สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังสมการที่ 3.1

$$h = h_e + h_p + h_v \quad (3.1)$$

โดยที่ h = เฮดทั้งหมด

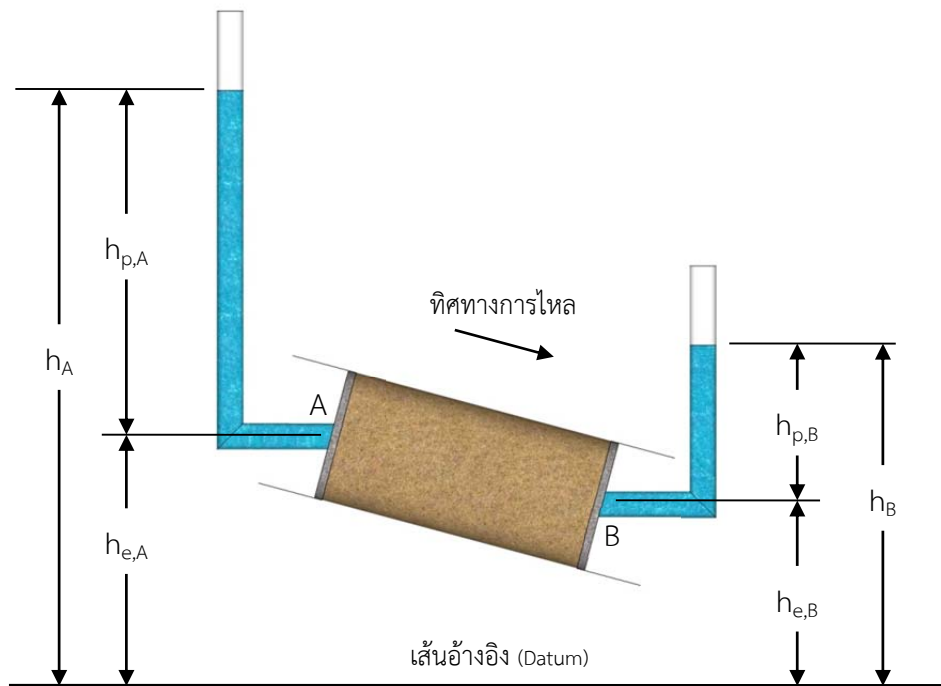
h_e = เฮดเนื่องจากระดับความสูง

h_p = เฮดเนื่องจากความดัน

h_v = เฮดเนื่องจากความเร็ว

แต่เนื่องจากความเร็วในการไหลของน้ำผ่านดินมีค่าน้อยมากนั่นคือ $h_v = 0$ สมการที่ 3.1

จึงสามารถเขียนใหม่ได้ว่า

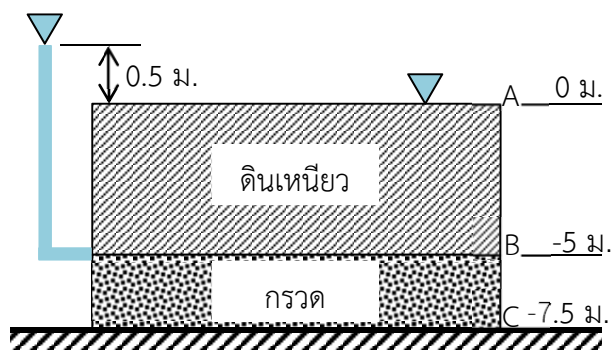


รูปที่ 3.2 เหน้ดความดัน เหน้ดระดับ และเหน้ดทั้งหมดของน้ำที่ไหลผ่านดิน

$$h = h_e + h_p$$

(3.2)

ตัวอย่างที่ 3.1 จากรูปข้างล่าง จงหาค่าเหน้ดทั้งหมด เหน้ดระดับ และเหน้ดความดัน พร้อมทั้งพล็อตกราฟ



วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 เลือกเส้นอ้างอิง ในกรณีนี้เลือกเส้นฐาน (ระดับ 7.5 ม.) เป็นเส้นอ้างอิง

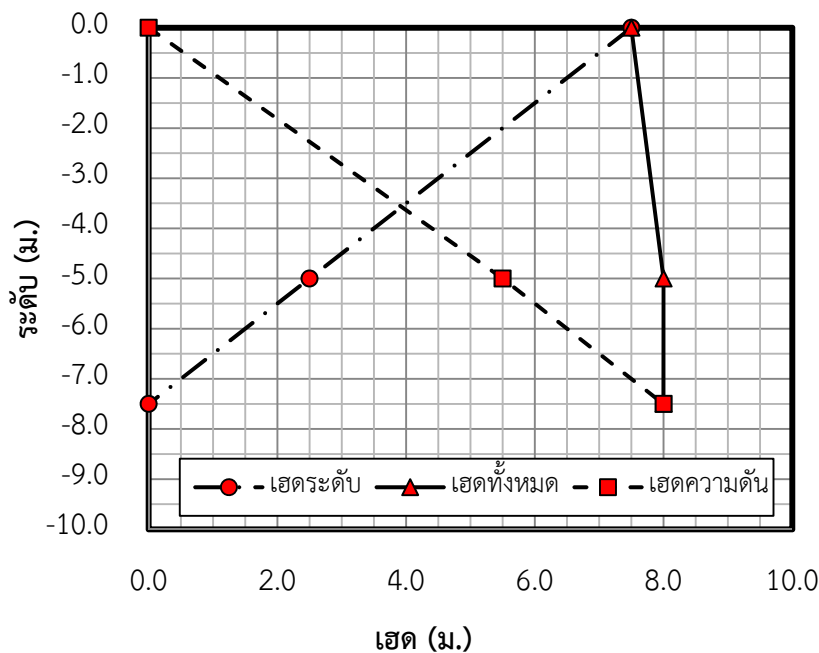
ขั้นตอนที่ 2 หาค่าเหน้ดระดับ โดยพิจารณาความสูงจากเส้นอ้างอิงถึงจุดที่พิจารณา จุด A สูงจากเส้นฐานเท่ากับ 7.5 ม. ดังนั้นเหน้ดระดับของจุด A จะเท่ากับ 7.5 ม. ในทำนองเดียวกันเหน้ดระดับของจุด B และ C จะมีค่าเท่ากับ 2.5 ม. และ 0 ม. ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 3 หาค่าเฮดทั้งหมด โดยพิจารณาความสูงจากเส้นอ้างอิงถึงระดับน้ำในหลอดวัดความดัน ณ จุดที่พิจารณา เช่น ที่จุด A ระดับน้ำจะอยู่สูงจากเส้นฐานเท่ากับ 7.5 ม. ดังนั้นเฮดทั้งหมดของจุด A เท่ากับ 7.5 ม. สำหรับเฮดทั้งหมดของจุด B และ C จะมีค่าเท่ากับ 8.0 ม. ทั้งสองจุด (ถือว่า การไหลภายในชั้นกรวดไม่มีการสูญเสียพลังงาน)

ขั้นตอนที่ 4 หาค่าเฮดความดันได้จากผลต่างระหว่างเฮดทั้งหมดและเฮดระดับ โดยผลการวิเคราะห์เฮด ณ จุดต่างๆ สามารถสรุปได้ดังตารางข้างล่าง

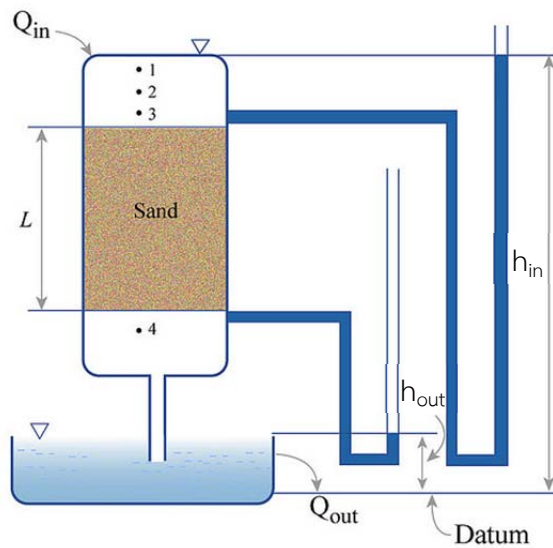
ตำแหน่ง	เฮดระดับ (ม.)	เฮดทั้งหมด (ม.)	เฮดความดัน (ม.)
A	7.5	7.5	0.0 (= 7.5 - 7.5)
B	2.5	8.0 (= 7.5 + 0.5)	5.5 (= 8.0 - 2.5)
C	0.0	8.0 (= 7.5 + 0.5)	8.0 (= 8.0 - 0.0)

จากค่าในตารางสามารถนำค่ามาพล็อตกราฟได้ดังกราฟด้านล่าง



3.3 กฎของดาร์ซี (Darcy's Law)

ในปี 1856 H. Darcy ได้ทำการศึกษาการไหลของน้ำผ่านทราย ลักษณะของอุปกรณ์ทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 ในการทดลองครั้งนี้ตัวอย่างขนาดความยาวต่างๆ ได้ถูกศึกษารวมกับการเปลี่ยนความดันของน้ำที่ด้านบนและด้านล่างของดินตัวอย่าง โดยน้ำไหลผ่านตัวอย่างดินด้วยความเร็วที่ช้ามาก ลักษณะการไหลเป็นแบบราบเรียบ (Laminar Flow) และสภาพการไหลอยู่ในลักษณะคงตัว (Steady State) จากการศึกษาพบว่าอัตราการไหลแปรผันตรงกับความแตกต่าง



ที่มา: <http://www.flickr.com>

รูปที่ 3.3 ลักษณะอุปกรณ์ทดลองของดาร์ซี

ระหว่างเขตทั้งหมดที่ด้านบนและด้านล่างของดินตัวอย่างและแปรผกผันกับความยาวของตัวอย่างดิน ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 3.3

$$q = k \frac{(h_{in} - h_{out})}{L} A$$

หรือ

$$q = kAi \quad (3.3)$$

โดยที่ q = อัตราการไหลของน้ำผ่านดิน
 k = สัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดิน
 h_{in} = เขตทั้งหมดด้านที่น้ำไหลเข้าตัวอย่างดิน
 h_{out} = เขตทั้งหมดด้านที่น้ำไหลออกจากตัวอย่างดิน
 L = ความยาวของตัวอย่างดิน
 A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดิน
 i = ความชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic Gradient)

สมการที่ 3.3 สามารถเขียนใหม่ในรูปของความเร็วในการไหลของน้ำได้ดังสมการที่ 3.4

$$v = ki \quad (3.4)$$

โดยที่ v = ความเร็วของน้ำในดิน

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินเป็นคุณสมบัติทางกายภาพของดินแต่ละชนิด โดยค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินจะอยู่ระหว่าง $1 - 10^{-9}$ ซม./วินาที ตารางที่ 3.1 แสดงค่าพิสัยสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินตามชนิดของดิน

ตารางที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดิน (สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์)

ชนิดของดิน	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดิน (k) ซม./วินาที
กรวด	$1-10^2$
ทรายหยาบและกรวดเม็ดละเอียด	$10^{-3}-1$
ทรายแป้งไม่อัดแน่นและทรายละเอียด	$10^{-5}-10^{-3}$
ทรายแป้งปนดินเหนียวและทรายแป้งอัดแน่น	$10^{-6}-10^{-5}$
ดินเหนียวปนทรายแป้งและดินเหนียว	$10^{-9}-10^{-6}$

กฎการไหลของดาร์ซีเป็นการไหลในลักษณะ 1 มิติ (ความเร็วของน้ำ ทิศทางของความชันทางชลศาสตร์จะอยู่ในทิศทางเดียวกันและอยู่ในแกนใดแกนหนึ่งของพิกัดคาร์ทีเซียน) ถูกใช้เป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์การไหลของน้ำทั้งแบบ 2 มิติและ 3 มิติ

พิจารณาดินสองชั้นที่ซ้อนทับกันดังแสดงในรูปที่ 3.4 ดินชั้นที่ 1 มีความหนา L_1 และมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินเท่ากับ k_1 ในขณะที่ดินชั้นที่ 2 มีความหนา L_2 และมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินเท่ากับ k_2 โดยที่การสูญเสียเฮดทั้งหมดเมื่อน้ำไหลผ่านดินชั้นที่ 1 เท่ากับ Δh_1 และการสูญเสียเฮดทั้งหมดเมื่อน้ำไหลผ่านดินชั้นที่ 2 เท่ากับ Δh_2

กำหนดให้การสูญเสียเฮดทั้งหมดเมื่อน้ำไหลซึมผ่านดินทั้งสองชั้นมีค่าเท่ากับ ΔH จะได้

$$\Delta H = \Delta h_1 + \Delta h_2 \quad (3.5)$$

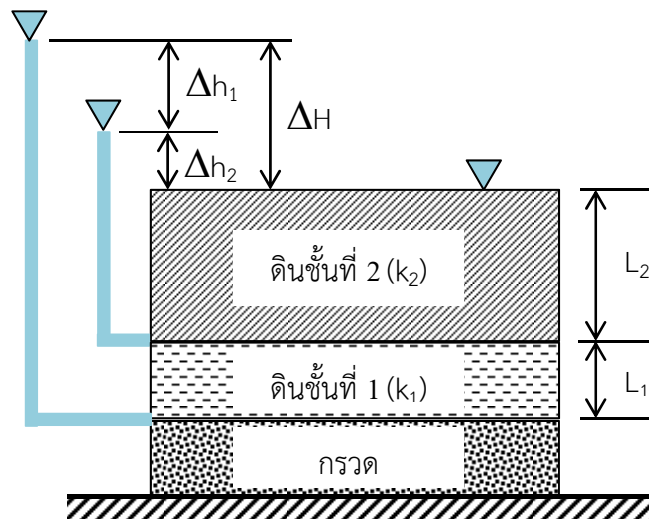
กำหนดให้น้ำที่ไหลผ่านดินชั้นที่ 1 และดินชั้นที่ 2 มีค่าเท่ากับ q_1 และ q_2 ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินชั้นที่ 1 และดินชั้นที่ 2 มีปริมาณเท่ากันดังนั้น $q_1 = q_2$ และจากสมการ 3.3 จะได้

$$k_1 A_1 i_1 = k_2 A_2 i_2 \quad (3.6)$$

และเนื่องจากเนื่องจากดินทั้งสองชั้นมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน ดังนั้นสมการ 3.6 จะเปลี่ยนเป็น

$$k_1 i_1 = k_2 i_2$$

$$k_1 \Delta h_1 / L_1 = k_2 \Delta h_2 / L_2$$



รูปที่ 3.4 ลักษณะชั้นดินสำหรับวิเคราะห์การสูญเสียเฮดในชั้นดินที่ติดกัน

หรือ

$$\Delta h_1 = \Delta h_2 (k_2 / L_2) (L_1 / k_1) \quad (3.7)$$

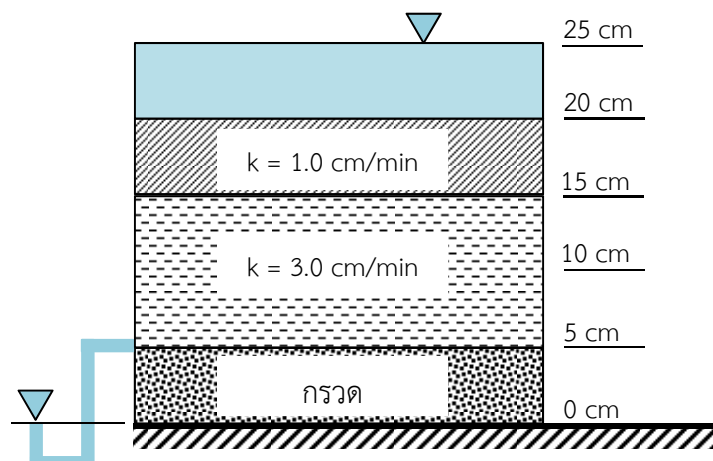
แทนค่าสมการ 3.7 ลงในสมการที่ 3.5 และจัดรูปจะได้

$$\Delta h_2 = \Delta H / (1 + \alpha) \quad (3.8)$$

$$\Delta h_1 = \alpha \Delta H / (1 + \alpha) \quad (3.9)$$

เมื่อ $\alpha = (k_2/L_2) / (k_1/L_1)$

ตัวอย่างที่ 3.2 จากรูปข้างล่าง จงหาค่าเฮดทั้งหมด เฮดระดับ และเฮดความดัน พร้อมทั้งพล็อตกราฟ



วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดตำแหน่งเส้นอ้างอิง ในที่นี้เลือกที่ระดับ 0 cm

ขั้นตอนที่ 2 หาการสูญเสียเฮดทั้งหมดเมื่อน้ำไหลผ่านดินทั้งสองชั้น

เฮดทั้งหมดที่ตำแหน่ง 20 cm มีค่าเท่ากับ 25.0 cm. ในขณะที่เฮดทั้งหมดที่ตำแหน่ง 5 cm มีค่าเท่ากับ 0.0 cm จะได้

$$\Delta H = 25.0 - 0.0 = 25.0 \text{ cm}$$

ขั้นตอนที่ 3 หาค่า α จากสมการ

$$\alpha = (k_2/L_2) / (k_1/L_1)$$

$$\text{โดยที่ } k_1 = 1.0 \text{ cm/min} \quad L_1 = 5 \text{ cm}$$

$$k_2 = 3.0 \text{ cm/min} \quad L_2 = 10 \text{ cm}$$

ดังนั้น

$$\alpha = (3.0 / 10) / (1.0 / 5)$$

$$= 1.5$$

หาค่า Δh_1 และ Δh_2 จากสมการ 3.9 และ 3.8 ตามลำดับ จะได้

$$\Delta h_1 = \alpha \Delta H / (1 + \alpha)$$

$$= (1.5) (25.0) / (1 + 1.5)$$

$$\Delta h_1 = 15 \text{ cm}$$

$$\Delta h_2 = \Delta H / (1 + \alpha)$$

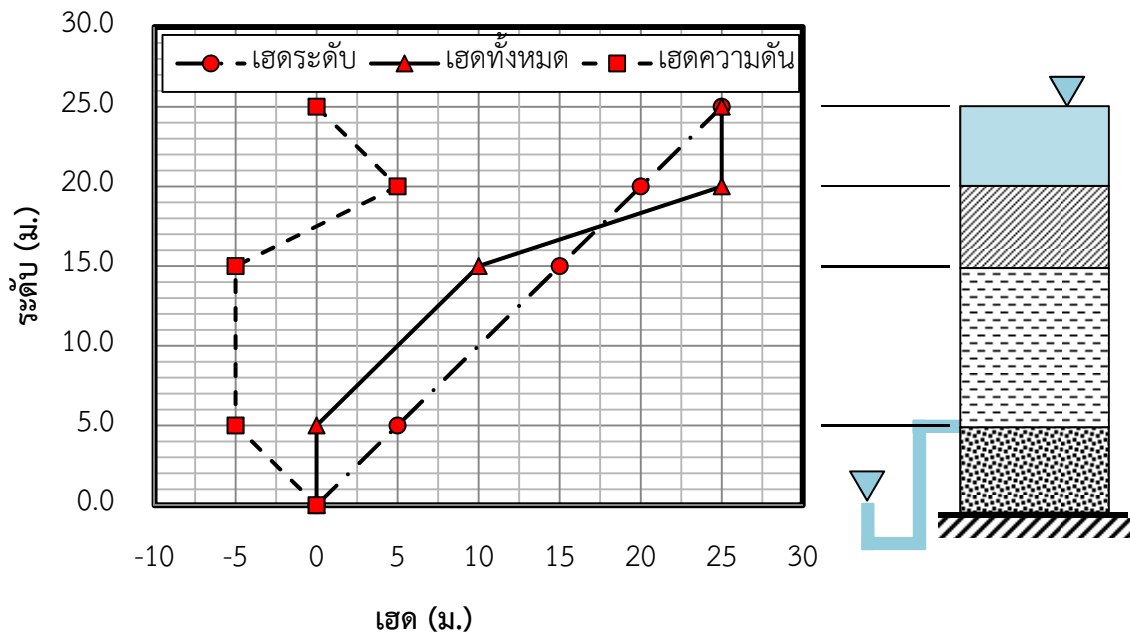
$$= (25.0) / (1 + 1.5)$$

$$\Delta h_2 = 10 \text{ cm}$$

ขั้นตอนที่ 4 หาค่าเฮดระดับ เฮดทั้งหมด และเฮดความดันตามขั้นตอนในตัวอย่างที่ 1 จะได้

ตำแหน่ง	เฮดระดับ (ม.)	เฮดทั้งหมด (ม.)	เฮดความดัน (ม.)
25	25.0	25.0	0.0
20	20.0	25.0	5.0
15	15.0	10.0	-5.0
5	5.0	0.0	-5.0
0	0.0	0.0	0.0

จากค่าในตารางสามารถนำค่ามาพล็อตกราฟได้ดังกราฟด้านล่าง



3.4 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินในห้องปฏิบัติการ

ในการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินในห้องปฏิบัติการสามารถทดสอบได้ 2 วิธีได้แก่ การทดสอบแบบระดับน้ำคงที่และแบบระดับน้ำลดลง สำหรับการทดสอบแบบระดับน้ำคงที่จะใช้กับดินเม็ดหยาบซึ่งมีอัตราการไหลของน้ำผ่านดินค่อนข้างเร็ว ในขณะที่การทดสอบแบบระดับน้ำลดลงจะใช้กับดินที่มีอัตราการไหลของน้ำผ่านดินค่อนข้างช้า

3.4.1 การทดสอบแบบระดับน้ำคงที่ (Constant Head Test)

ลักษณะทั่วไปของการทดสอบแบบระดับน้ำคงที่สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.5 ระดับน้ำทางด้านเฮดทั้งหมดสูงจะถูกปรับระดับจนกระทั่งได้ความแตกต่างของเฮดทั้งหมดตามที่ต้องการตลอดระยะเวลาที่ทำการทดสอบ อัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านดินตัวอย่างจะถูกวัดโดยการวัดปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินตัวอย่าง (เก็บปริมาณน้ำในกระบอกตวง) ในช่วงเวลาที่กำหนดและคำนวณหาอัตราการไหล

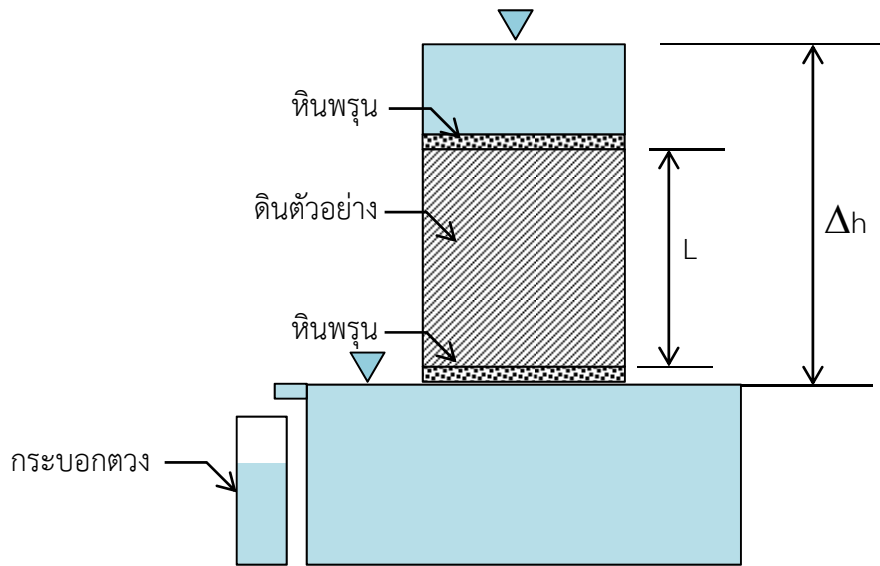
ปริมาณน้ำที่เก็บได้ในกระบอกตวงสามารถแสดงในรูปของสมการได้คือ

$$Q = A v t$$

หรือ

$$Q = A (k_i) t$$

(3.10)



รูปที่ 3.5 ลักษณะการทดสอบแบบระดับน้ำคงที่ (Constant Head Test)

โดยที่ A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดิน

t = ระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บปริมาณน้ำ

แทนค่า $i = \Delta h / L$ ในสมการที่ 3.10 โดยที่ L คือ ความยาวของตัวอย่างที่นำมาทดสอบ
จะได้

$$Q = A (k \Delta h / L) t$$

หรือ

$$k = QL / (A \Delta h t) \quad (3.11)$$

3.4.2 การทดสอบแบบระดับน้ำลดลง (Falling Head Test)

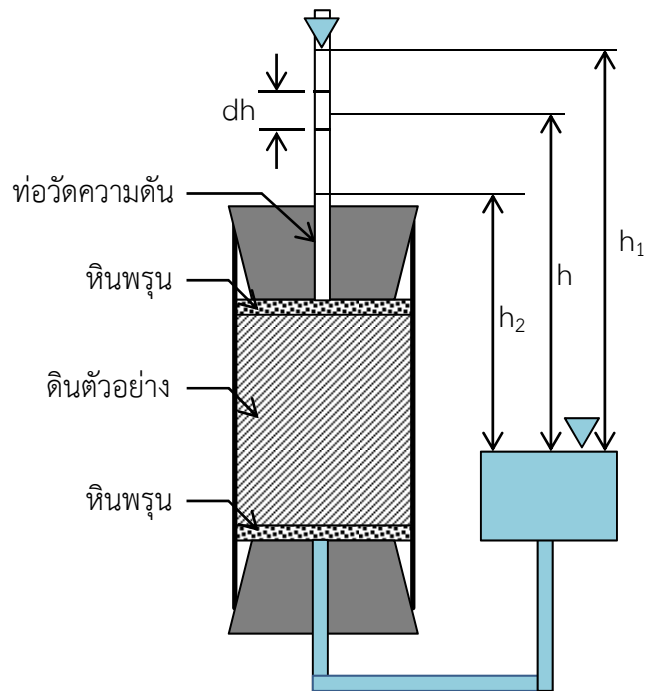
ลักษณะทั่วไปของการทดสอบแบบระดับน้ำลดลงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.6 ระดับน้ำเริ่มต้นในด้านที่เฮดทั้งหมดสูงมีระดับ h_1 ณ เวลา $t = 0$ จะถูกจดบันทึกไว้ น้ำจะไหลผ่านดินไปเรื่อยๆ จนกระทั่งระดับน้ำในด้านเฮดทั้งหมดสูงมีระดับ h_2 ณ เวลา $t = t_2$

อัตราการไหลซึมของน้ำผ่านดิน ณ เวลาใดๆ สามารถหาได้จากสมการ

$$q = A (k \Delta h / L) = -a dh / dt \quad (3.12)$$

โดยที่ a = พื้นที่หน้าตัดของหลอดความดัน

A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดิน



รูปที่ 3.6 ลักษณะการทดสอบแบบระดับน้ำลดลง (Falling Head Test)

จัดรูปสมการที่ 3.12 ใหม่จะได้

$$dt = aL / (Ak) (-dh / h) \quad (3.13)$$

อินทิเกรตสมการที่ 3.13 โดยมีขอบเขตของเวลาจาก 0 ถึง t และขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงเฮดจาก h_1 ถึง h_2 จะได้

$$t = aL / Ak \ln (h_1 / h_2)$$

หรือ

$$k = 2.303 aL / At \log (h_1 / h_2) \quad (3.14)$$

ตัวอย่างที่ 3.3 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินแบบระดับน้ำคงที่ มีค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบดังนี้

- ความยาวของตัวอย่างดิน = 254 มม.
- ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างดิน = 63.5 มม.
- ความแตกต่างของเฮดทั้งหมด = 457 มม.
- ปริมาณน้ำที่วัดในเวลา 2 นาที = 0.51 ลบ.ซม.

จงคำนวณหาค่าต่อไปนี้

- (1) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดิน
- (2) ความเร็วในการไหล (Discharge Velocity)

วิธีทำ

(1) จากสมการที่ 3.11 จะได้

$$\begin{aligned}
 k &= QL / (A \Delta h t) \\
 &= (0.51 \times 10^3) (254) / [(\pi / 4 \times 63.5^2) (457) (2)] \\
 &= 4.48 \times 10^{-2} \text{ มม./นาทีก} \\
 k &= 7.46 \times 10^{-5} \text{ ซม./วินาที}
 \end{aligned}$$

ตอบ

(2) จากสมการที่ 3.4 จะได้

$$\begin{aligned}
 v &= ki \\
 &= (7.46 \times 10^{-5}) (457 / 254) \\
 v &= 13.42 \times 10^{-5} \text{ ซม./วินาที}
 \end{aligned}$$

ตอบ

ตัวอย่างที่ 3.4 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินแบบระดับน้ำลดลง มีค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบดังนี้

- ความยาวของตัวอย่างดิน = 380 มม.
- พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดิน = 19.4 ตร.ซม.
- ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดิน $k = 2.92 \times 10^{-3}$ ซม./วินาที

จงคำนวณหาค่าพื้นที่หน้าตัดของหลอดวัดความดันที่ต้องการหากต้องการให้ระดับน้ำเริ่มต้นเท่ากับ 640 มม. ลดลงเหลือ 320 มม. ในเวลา 8 นาที

วิธีทำ

จากสมการที่ 3.14 จะได้

$$\begin{aligned}
 k &= 2.303 aL / At \log (h_1 / h_2) \\
 2.92 \times 10^{-3} &= 2.303 a (380/10) / [19.4 \times (8 \times 60)] \log [(640/10) / (320/10)] \\
 a &= 1.03 \text{ cm}^2
 \end{aligned}$$

ตอบ

3.5 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินในสนาม

การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินในสนามที่นิยมทดสอบจะทำโดยการเจาะบ่อเพื่อสูบน้ำออก (Pumping well) จำนวน 1 บ่อ และเจาะบ่อสังเกตการณ์ (Observation well)

จำนวน 2 บ่อเพื่อวัดระดับน้ำที่ลดลงจากการสูบ การทดสอบทำโดยการสูบน้ำออกจากบ่อด้วยอัตราคงที่ จากนั้นจะทำการวัดระดับน้ำในบ่อสังเกตการณ์จนกระทั่งระดับน้ำในบ่อสังเกตการณ์มีระดับคงที่ (ซึ่งอาจใช้เวลาหลายวัน) ลักษณะการไหลของน้ำลักษณะนี้จะเป็นการไหลแบบรัศมี (Radial Flow) โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินจะขึ้นอยู่กับลักษณะของชั้นดินซึ่งจะมีอยู่ 2 ลักษณะ ดังนี้

3.5.1 ลักษณะชั้นดินแบบไม่มีขอบเขตจำกัด (Unconfined flow) ลักษณะชั้นดินแบบไม่มีขอบเขตจำกัดจะมีชั้นดินที่ไม่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้เฉพาะด้านล่าง ในขณะที่ชั้นดินด้านบนน้ำสามารถไหลซึมผ่านได้จนกระทั่งถึงผิวดินดังแสดงในรูปที่ 3.7 (ก) และสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินได้จากสมการ

$$k = q \ln (r_2 / r_1) / [\pi (h_2^2 - h_1^2)] \quad (3.15)$$

เมื่อ q = ปริมาณน้ำที่สูบออกมา

h_1 = ระดับน้ำวัดจากชั้นที่ไม่มีการซึมผ่านโดยมีระยะห่างจากบ่อสูบน้ำเท่ากับ r_1

h_2 = ระดับน้ำวัดจากชั้นที่ไม่มีการซึมผ่านโดยมีระยะห่างจากบ่อสูบน้ำเท่ากับ r_2

3.5.1 ลักษณะชั้นดินแบบมีขอบเขตจำกัด (Confined flow) ลักษณะชั้นดินแบบมีขอบเขตจำกัดจะมีชั้นดินที่ไม่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้ทั้งด้านบนและด้านล่างของชั้นดินที่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (ข) และสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินได้จากสมการ

$$k = q \ln (r_2 / r_1) / [2\pi D (h_2 - h_1)] \quad (3.16)$$

เมื่อ D = ความหนาของชั้นดินที่ต้องการหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดิน

ตัวอย่างที่ 3.5 พิจารณาการหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินในสนามของชั้นดินแบบไม่มีขอบเขตจำกัด โดยมีข้อมูลดังนี้

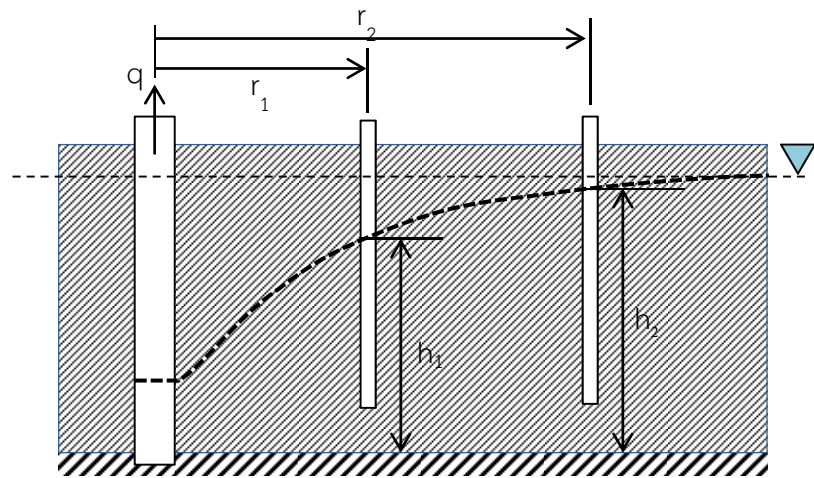
- $q = 0.74$ ลบ.ม. / นาที
- $h_1 = 4.8$ ม. และ $r_1 = 30$ ม.
- $h_2 = 5.5$ ม. และ $r_2 = 60$ ม.

จงคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินในหน่วย ซม. / วินาที

วิธีทำ

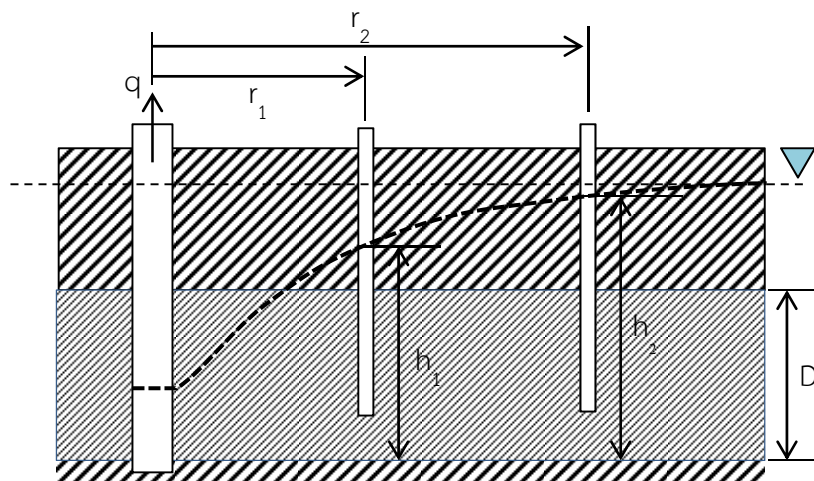
จากสมการที่ 3.15 จะได้

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



ชั้นที่บน้ำ

(ก)



ชั้นที่บน้ำ

(ข)

รูปที่ 3.7 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินในสนาม (ก) ลักษณะชั้นดินแบบไม่มีขอบเขตจำกัด (ข) ลักษณะชั้นดินแบบมีขอบเขตจำกัด

$$k = (0.74) \ln (60/30) / [\pi (5.5^2 - 4.8^2)]$$

$$= 2.26 \times 10^{-2} \text{ ม./นาที่}$$

$$k = 3.77 \times 10^{-2} \text{ ซม. / วินาที}$$

ตอบ

3.6 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินของดินหลายชั้น

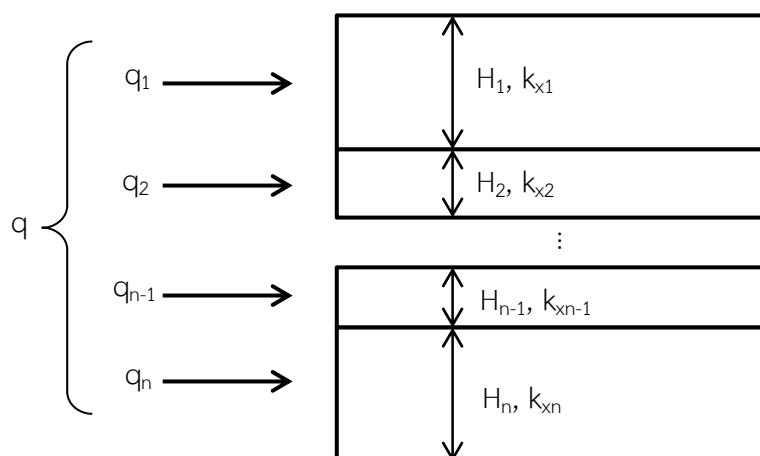
ในธรรมชาติดินเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติไม่สม่ำเสมอ (Nonhomogeneous Material) เนื่องจากการกำเนิดของดินเกิดจากการตกตะกอนทับถมเป็นชั้นๆ ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดิน (k) มีหลายค่าตามคุณลักษณะของดินที่ซ้อนทับกันอยู่ ดังนั้นจึงต้องหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินเฉลี่ย เพื่อใช้เป็นพารามิเตอร์ในการหาปริมาณน้ำที่ไหลซึมผ่านชั้นดินเหล่านี้

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินจะไม่เท่ากันทุกทิศทางขึ้นอยู่กับทิศทางการไหล การหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินเฉลี่ยจึงแยกพิจารณาเป็น 2 ทิศทาง ดังนี้

3.6.1 การไหลแนวนอน (Horizontal Flow)

พิจารณารูปที่ 3.8 มีดินซ้อนทับกันอยู่ทั้งหมด n ชั้น ดินชั้นที่ 1 หนาเท่ากับ H_1 มีปริมาณน้ำไหลผ่านเท่ากับ q_1 และมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินเท่ากับ k_{x1} ดินชั้นที่ 2 หนาเท่ากับ H_2 มีปริมาณน้ำไหลผ่านเท่ากับ q_2 และมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินเท่ากับ k_{x2} ในทำนองเดียวกัน ดินชั้นที่ n หนาเท่ากับ H_n มีปริมาณน้ำไหลผ่านเท่ากับ q_n และมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินเท่ากับ k_{xn} ดังนั้นปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินทั้งหมดสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$q = q_1 + q_2 + \dots + q_{n-1} + q_n$$



รูปที่ 3.8 การไหลแนวนอนผ่านดินหลายชั้น

จากสมการที่ 3.3 ($q = kAi$) และกำหนดให้ดินแต่ละชั้นมีความกว้างเท่ากับ 1 หน่วยจะได้

$$(k_{xav})(\sum_{j=1}^n H_j) = (k_{x1})(i)(H_1) + (k_{x2})(i)(H_2) + \dots + (k_{xn-1})(i)(H_{n-1}) + (k_{xn})(i)(H_n)$$

หรือ

$$k_{xav} = \frac{\sum_{j=1}^n (k_{xj} \cdot H_j)}{\sum_{j=1}^n H_j} \quad (3.17)$$

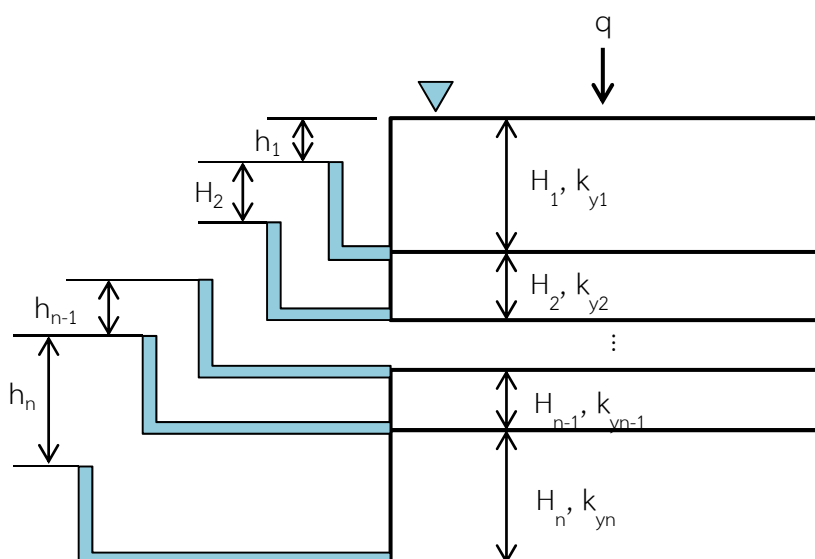
โดยที่ k_{xav} = สัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินในแนวนอนเฉลี่ย

k_{xj} = สัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินในแนวนอนของดินชั้นที่ j

H_j = ความหนาของดินชั้นที่ j

3.6.1 การไหลแนวตั้ง (Vertical Flow)

พิจารณารูปที่ 3.9 มีดินซ้อนทับกันอยู่ทั้งหมด n ชั้น ดินชั้นที่ 1 หนาเท่ากับ H_1 และมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินเท่ากับ k_{y1} ดินชั้นที่ 2 หนาเท่ากับ H_2 และมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินเท่ากับ k_{y2} ในทำนองเดียวกัน ดินชั้นที่ n หนาเท่ากับ H_n และมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินเท่ากับ k_{yn} เนื่องจากปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินแต่ละชั้นมีปริมาณเท่ากันซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ



รูปที่ 3.9 การไหลแนวตั้งผ่านดินหลายชั้น

$$q = q_1 = q_2 = \dots = q_{n-1} = q_n$$

และเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดที่น้ำไหลผ่านมีค่าเท่ากัน นั่นคือ

$$A = A_1 = A_2 = \dots = A_{n-1} = A_n$$

จัดรูปสมการที่ 3.3 ใหม่ดังนี้

$$k = q / (A i) \quad (3.18)$$

ดังนั้น

$$k_{yav} = (q / A) (H_1 + H_2 + \dots + H_{n-1} + H_n) / (h_1 + h_2 + \dots + h_{n-1} + h_n)$$

เนื่องจาก $i = h / H$ หรือ $h = (i \cdot H)$ จะได้

$$k_{yav} = (q / A) (H_1 + H_2 + \dots + H_{n-1} + H_n) / (i_1 H_1 + i_2 H_2 + \dots + i_{n-1} H_{n-1} + i_n H_n)$$

$$k_{yav} = (q / A) (H_1 + H_2 + \dots + H_{n-1} + H_n) / [q_1 H_1 / (A_1 k_1) + q_2 H_2 / (A_2 k_2) + \dots + q_{n-1} H_{n-1} / (A_{n-1} k_{n-1}) + q_n H_n / (A_n k_n)]$$

$$k_{yav} = (H_1 + H_2 + \dots + H_{n-1} + H_n) / (H_1 / k_1 + H_2 / k_2 + \dots + H_{n-1} / k_{n-1} + H_n / k_n)$$

หรือ

$$k_{yav} = \frac{\sum_{j=1}^n H_j}{\sum_{j=1}^n (H_j / k_j)} \quad (3.19)$$

โดยที่ k_{yav} = สัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินในแนวดิ่งเฉลี่ย

k_{yj} = สัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินในแนวดิ่งของดินชั้นที่ j

H_j = ความหนาของดินชั้นที่ j

ตัวอย่างที่ 3.6 จากผลการเจาะสำรวจดินพบว่ามีชั้นดินซ้อนทับกันอยู่ 3 ชั้น เมื่อนำตัวอย่างดินแต่ละชั้นไปทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินได้ข้อมูลดังต่อไปนี้

ดินชั้นที่	ความหนา (m)	k_x (cm/sec)	k_y (cm/sec)
1	3.2	1.5×10^{-5}	1.5×10^{-6}
2	2.5	2.0×10^{-6}	3.0×10^{-6}

ดินชั้นที่	ความหนา (m)	k_x (cm/sec)	k_y (cm/sec)
3	5.0	1.0×10^{-4}	1.5×10^{-5}

จงคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินเฉลี่ยในแต่ละทิศทาง

วิธีทำ

- (1) คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินในแนวนอนจากสมการที่ 3.17

$$k_{xav} = \frac{\sum_{j=1}^n (k_{xj} \cdot H_j)}{\sum_{j=1}^n H_j}$$

$$= (1.5 \times 10^{-5})(3.2) + (2.0 \times 10^{-6})(2.5) + (1.0 \times 10^{-4})(5.0) / (3.2 + 2.5 + 5.0)$$

$$= 5.17 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$$

ตอบ

- (2) คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินในแนวดิ่งจากสมการที่ 3.19

$$k_{yav} = \frac{\sum_{j=1}^n H_j}{\sum_{j=1}^n (H_j / k_j)}$$

$$= (3.2 + 2.5 + 5.0) / [3.2 / (1.5 \times 10^{-6}) + 2.5 / (3.0 \times 10^{-6}) + 5.0 / (1.5 \times 10^{-5})]$$

$$= 3.24 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$$

ตอบ

3.7 กฎการไหลต่อเนื่อง

กฎการไหลต่อเนื่องนี้พิจารณาถึงการไม่สูญหายของน้ำในมวลดิน พิจารณามวลดิน ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งมีคุณสมบัติด้านการซึมผ่านเท่ากันทุกทิศทาง จากกฎการไหลต่อเนื่องจะได้ว่า ปริมาณน้ำทั้งหมดที่ไหลเข้าและไหลออกจากมวลดินจะต้องมีปริมาณเท่ากัน นั่นคือ

$$q_x + q_y + q_z = (q_x + dq_x) + (q_y + dq_y) + (q_z + dq_z)$$

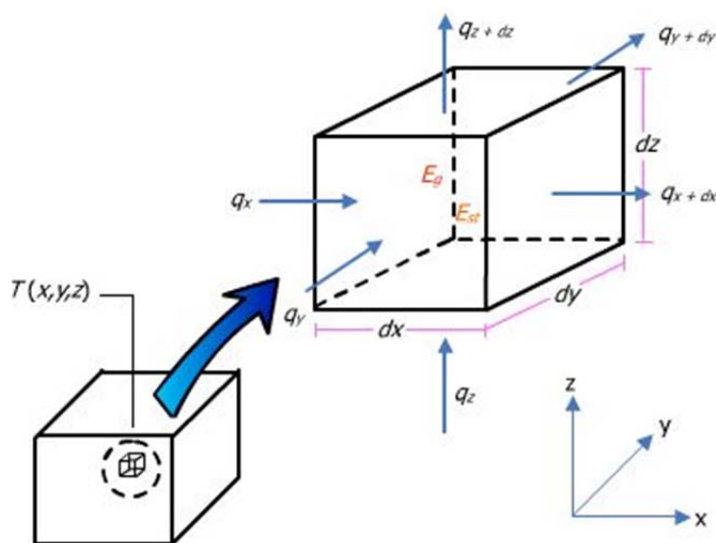
หรือ

$$dq_x + dq_y + dq_z = 0 \quad (3.20)$$

เนื่องจาก $dq_x = k_x \cdot di_x \cdot d_y d_z$

$$dq_y = k_y \cdot di_y \cdot d_x d_z$$

$$dq_z = k_z \cdot di_z \cdot d_x d_y$$



ที่มา: <http://pirun.ku.ac.th>

รูปที่ 3.10 การไหลต่อเนื่องที่ไม่มีการสูญหายของน้ำในมวลดิน

โดยที่ $i_x = \frac{\partial h}{\partial x}$; $i_y = \frac{\partial h}{\partial y}$; $i_z = \frac{\partial h}{\partial z}$

จะได้ $di_x = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}$; $di_y = \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}$; $di_z = \frac{\partial^2 h}{\partial z^2}$

แทนค่ากลับในสมการที่ 3.20 จะได้

$$k_x \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \cdot dy \cdot dz + k_y \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \cdot dx \cdot dz + k_z \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \cdot dx \cdot dy = 0$$

หรือ

$$k_x \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

ในกรณีที่ดินมีคุณสมบัติการซึมผ่านเท่ากันทุกทิศทาง $k_x = k_y = k_z$ จะได้

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (3.21)$$

สมการ 3.21 เป็นสมการที่ใช้วิเคราะห์การไหลซึมของน้ำผ่านดิน และเรียกว่าสมการลาปลาซ (Laplace's Equation) การแก้สมการลาปลาซเพื่อวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำผ่านดินนี้

สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ตาข่ายการไหล (Flow Net) การใช้วิธีการเชิงตัวเลข (Numerical Method) การใช้แบบจำลองทางชลศาสตร์ (Hydraulic Model) เป็นต้น

3.8 ตาข่ายการไหล

ตาข่ายการไหล (Flow Nets) เป็นวิธีการประมาณค่าปริมาณการไหลของน้ำในดินโดยวิธีการวาดภาพ การวิเคราะห์ปริมาณการไหลของน้ำด้วยวิธีการวาดตาข่ายการไหลมีสมมุติฐานดังต่อไปนี้

- (1) ดินอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ
- (2) ปริมาณน้ำภายในช่องว่างของมวลดินมีค่าคงที่ตลอดการไหลซึมผ่าน
- (3) ดินมีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง (ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินมีค่าเท่ากันทุกทิศทาง)

ตาข่ายการไหลประกอบขึ้นจากการวาดเส้นสองประเภท คือ เส้นการไหลและเส้นสมศักย์ เส้นการไหล (Flow Lines) เป็นเส้นที่แสดงทิศทางการไหลของน้ำซึ่งจะไหลจากด้านที่มีเฮดทั้งหมดสูงไปยังด้านที่มีเฮดทั้งหมดต่ำ เส้นสมศักย์ (Equipotential Lines) เป็นเส้นที่ลากผ่านจุดที่มีค่าเฮดทั้งหมดเท่ากัน

ปริมาณการไหลของน้ำที่ได้จากการวาดตาข่ายการไหลจะขึ้นอยู่กับรูปตาข่ายการไหลที่วาด หากวาดรูปไม่ถูกต้องตามหลักการก็จะทำให้ค่าปริมาณน้ำที่ได้มีค่าไม่ถูกต้องตามไปด้วย การวาดตาข่ายการไหลมีหลักการและขั้นตอนดังนี้

- (1) วาดรูปหน้าตัดของโครงสร้าง และชั้นดินให้ถูกต้องตามมาตราส่วนที่กำหนด
- (2) กำหนดให้เส้นของระดับผิวดินเป็นเส้นสมศักย์ ผิวดินด้านที่มีเฮดทั้งหมดสูงจะเป็นเส้นสมศักย์เส้นแรก และผิวดินด้านที่มีเฮดทั้งหมดต่ำจะเป็นเส้นสมศักย์เส้นสุดท้าย
- (3) กำหนดให้โครงสร้างที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ที่วางอยู่บนดินหรือฝังลงในดินเป็นเส้นการไหลเส้นแรก
- (4) กำหนดให้เส้นระดับของชั้นดินที่น้ำซึมผ่านไม่ได้เป็นเส้นการไหลเส้นสุดท้าย
- (5) วาดเส้นการไหลที่เหลือให้อยู่ระหว่างเส้นการไหลเส้นแรกและเส้นการไหลเส้นสุดท้าย โดยต้องไม่ให้เส้นการไหลที่วาดตัดกัน
- (6) วาดเส้นสมศักย์ที่เหลือให้อยู่ระหว่างเส้นสมศักย์เส้นแรกและเส้นสุดท้าย โดยพยายามวาดให้เส้นสมศักย์ตัดกับเส้นการไหลเป็นมุมฉากและเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

พิจารณารูปที่ 3.11 ถ้ากำหนดให้ N_f คือจำนวนช่องการไหลทั้งหมด (ช่องการไหลหมายถึง ช่องว่างที่อยู่ระหว่างเส้นการไหลสองเส้นที่ติดกัน) ปริมาณการไหลของน้ำในแต่ละช่องการไหลมีค่าเท่ากับ Δq และ N_d คือจำนวนช่องของเส้นสมศักย์ทั้งหมด การสูญเสียเฮดระหว่างเส้นสมศักย์ที่อยู่ติดกันมีค่าเท่ากับ Δh ดังนั้นถ้ากำหนดให้ q คือปริมาณการไหลทั้งหมดจะได้

$$\Delta q = q / N_f$$

ในทำนองเดียวกันถ้ากำหนดให้ ΔH คือการสูญเสียเฮดระหว่างเส้นสมศักย์เส้นแรกและเส้นสุดท้าย จะได้

$$\Delta h = \Delta H / N_d$$

เนื่องจาก

$$i = \Delta h / b$$

จะได้

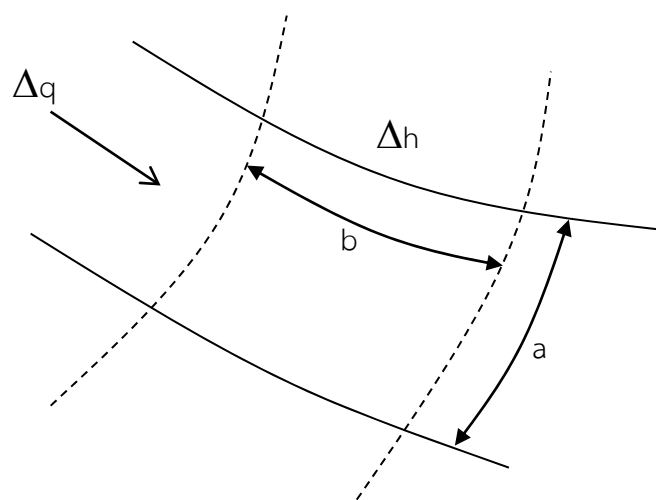
$$i = \Delta H / (b \cdot N_d)$$

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

$$\Delta q = k[\Delta H / (b \cdot N_d)] \cdot a$$

หรือ

$$q = k \cdot \Delta H (a/b)(N_f / N_d) \quad (3.22)$$



รูปที่ 3.11 ช่องการไหลของตาข่ายการไหล

ในกรณีที่วาดตาข่ายการไหลเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ($a = b$) ดังนั้นสมการที่ 3.22 จะเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$q = k \cdot \Delta H (N_f / N_d) \quad (3.23)$$

เมื่อ q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินต่อ 1 หน่วยความยาว

k = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดิน

ΔH = การสูญเสียเฮดที่เกิดขึ้นทั้งหมด

N_f = จำนวนช่องการไหลทั้งหมด

N_d = จำนวนช่องของเส้นสมศักย์ทั้งหมด

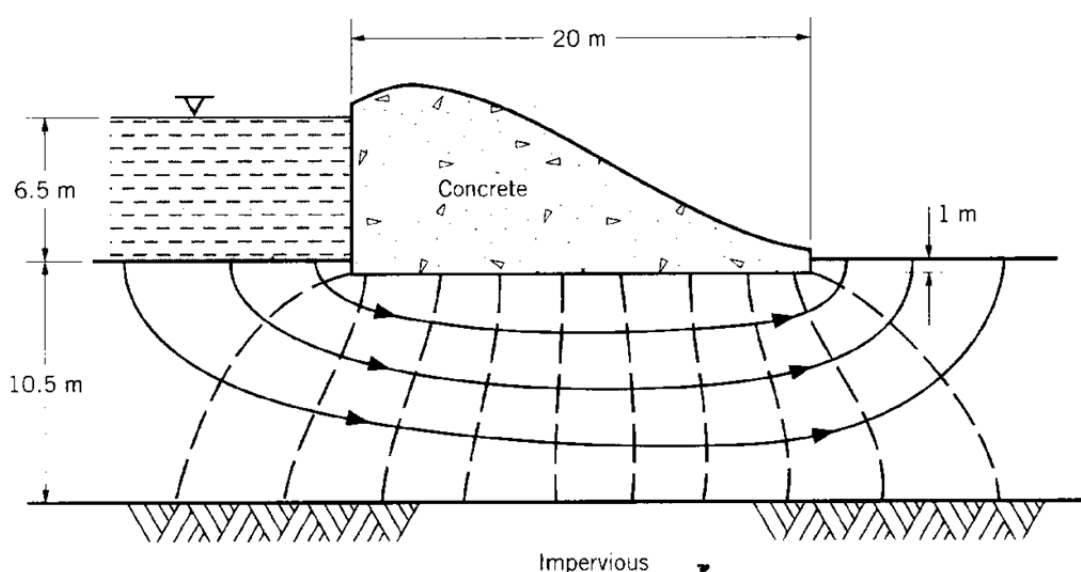
การวาดตาข่ายการไหลในกรณีที่ดินมีคุณสมบัติไม่เหมือนกันทุกทิศทางสามารถทำได้โดยการแปลงค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินจาก k เป็น k_e และระยะในแนวนอนจาก x เป็น x' โดยมีสมการการแปลงดังนี้

$$k_e = (k_x \cdot k_y)^{1/2} \quad (3.24)$$

และ

$$x' = (k_y / k_x)^{1/2} \cdot x \quad (3.25)$$

ตัวอย่างที่ 3.7 เขื่อนคอนกรีตตั้งอยู่บนชั้นดินเหนียวหนา 10.5 m ดังแสดงในรูปด้านล่าง กำหนดให้ค่า $k_x = k_y = 30 \times 10^{-4}$ cm/s จงหาค่าปริมาณอัตราการไหล q ต่อหน่วยความยาวเขื่อน



วิธีทำ

จากรูป จะได้

$n_f = 4$ (จำนวนช่องการไหลที่นับได้ในแนวดิ่ง)

$n_d = 11$ (จำนวนช่องการไหลที่นับได้ในแนวขวาง)

แทนค่าในสมการที่ 3.23 ($q = \frac{n_f}{n_d} \times kh$) จะได้

$$q = \frac{4}{11} \left(30 \times 10^{-4} \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right) (6.5 \text{ m}) \left(100 \frac{\text{cm}}{\text{m}} \right) \left(100 \frac{\text{cm}}{\text{m}} \right)$$

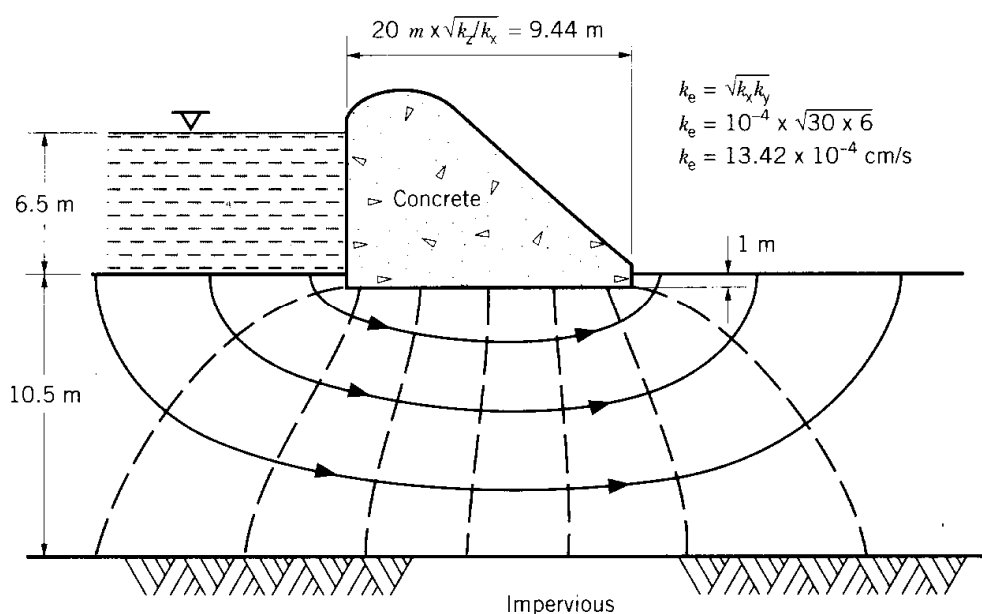
$$= 70.91 \text{ cm}^3/\text{s}/\text{m}$$

ตอบ

ตัวอย่างที่ 3.8 จากตัวอย่างที่ 3.7 ถ้าค่า $k_x = 30 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ และ $k_y = 6.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ จงหาค่าปริมาณอัตราการไหล q ต่อหน่วยความยาวเขื่อน

วิธีทำ

เนื่องจากโจทย์ข้อนี้มีค่า $k_x \neq k_y$ ดังนั้นจะต้องทำการแปลงหน้าตัดเขื่อนโดยใช้สมการที่ 3.25 และเขียนตาข่ายการไหลใหม่ ดังแสดงในรูปด้านล่าง



จากนั้นแปลงค่า k ตามสมการที่ 3.24 $k_e = \sqrt{k_x k_y}$ นับจำนวนช่องการไหลจะได้ค่า $n_f = 4$ และ $n_d = 11$ ดังนั้น

$$\begin{aligned} q &= \frac{n_f}{n_d} \times k_e h \\ &= \frac{4}{8} \left(\sqrt{30 \times 6} \times 10^{-4} \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right) (6.5 \text{ m}) \left(100 \frac{\text{cm}}{\text{m}} \right) \left(100 \frac{\text{cm}}{\text{m}} \right) \\ &= 43.60 \text{ cm}^3/\text{s/m} \end{aligned}$$

ตอบ

บทที่ 4

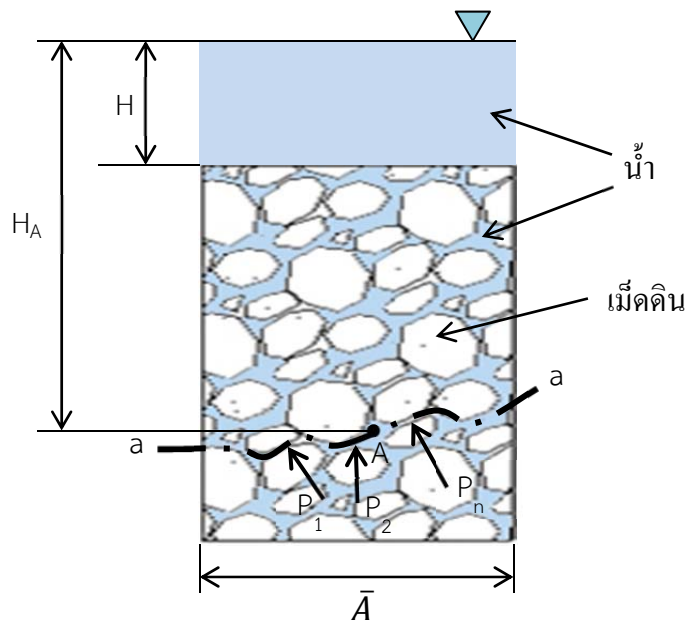
หน่วยแรงในมวลดิน

โดยธรรมชาติแล้วมวลดินประกอบไปด้วย 3 ส่วนได้แก่ อากาศ น้ำ และเม็ดดิน เมื่อมีแรงมากระทำต่อมวลดินไม่ว่าจะเป็นแรงภายนอกหรือแรงที่เกิดจากน้ำหนักของมวลดินเองก็ตาม แรงเหล่านี้จะทำให้เกิดหน่วยแรงภายในมวลดิน หน่วยแรงภายในที่เกิดขึ้นนี้ ส่วนหนึ่งจะถูกต้านทานโดยน้ำที่อยู่ภายในช่องว่างของมวลดิน ในขณะที่หน่วยแรงอีกส่วนหนึ่งที่เหลือจะถูกต้านทานโดยกำลังของเม็ดดิน หลักการดังกล่าวนี้เป็นหลักการของหน่วยแรงประสิทธิผล

4.1 หน่วยแรงภายในมวลดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำและไม่มีการไหลซึมของน้ำ

ลักษณะภายในมวลดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำและไม่มีการไหลซึมของน้ำในทุกทิศทางสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 หากพิจารณารอยตัดตามแนว $a - a$ เราสามารถคำนวณหาหน่วยแรงรวมที่เกิดขึ้นได้จากหน่วยน้ำหนักของน้ำและหน่วยน้ำหนักของดินที่อยู่บนรอยตัด $a - a$ ได้ดังนี้

$$\sigma = H \cdot \gamma_w + (H_A - H) \cdot \gamma_{sat} \quad (4.1)$$



รูปที่ 4.1 หลักการของหน่วยแรงประสิทธิผล

โดยที่ γ_w = หน่วยน้ำหนักของน้ำ

γ_{sat} = หน่วยน้ำหนักของดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

H = ระดับความสูงของน้ำวัดจากผิวดิน

H_A = ระดับความสูงของน้ำวัดจากจุด A

หน่วยแรงทั้งหมดที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.1 จะถูกต้านทานโดยหน่วยแรงภายในที่เกิดขึ้นจากส่วนประกอบของดินดังนี้

1) หน่วยแรงส่วนแรกจะถูกต้านทานโดยน้ำที่อยู่ภายในช่องว่างของมวลดิน การส่งถ่ายแรงจะกระทำผ่านน้ำที่อยู่ในช่องว่างที่อยู่ติดกันอย่างต่อเนื่อง โดยหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเท่ากันในทุกทิศทาง

2) หน่วยแรงที่เหลือจากหน่วยแรงส่วนแรกจะถูกต้านทานโดยเม็ดดิน การส่งผ่านแรงจะกระทำผ่านจุดสัมผัสระหว่างเม็ดดินที่อยู่ติดกันในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัส ผลรวมของแรงประกอบในแนวตั้งหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของมวลดิน จะเรียกว่าหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\sigma' = \frac{P_1(v) + P_2(v) + \dots + P_n(v)}{\bar{A}} \quad (4.2)$$

โดยที่ $P_1(v)$, $P_2(v)$, ..., $P_n(v)$ คือแรงประกอบในแนวตั้งของแรง P_1 , P_2 , ..., P_n ตามลำดับและ $\bar{A}$ คือพื้นที่หน้าตัดของมวลดินที่พิจารณา

กำหนดให้ $a_s = a_1 + a_2 + \dots + a_n$ เมื่อ a_1 , a_2 , ..., a_n เป็นพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเม็ดดินที่แรง P_1 , P_2 , ..., P_n กระทำ จะได้พื้นที่ผิวสัมผัสของน้ำที่เหลืออยู่เท่ากับ $\bar{A} - a_s$ ดังนั้นจะได้

$$\sigma = \sigma' + \frac{u(\bar{A} - a_s)}{\bar{A}} = \sigma' + u\left(1 - \frac{a_s}{\bar{A}}\right) \quad (4.3)$$

เนื่องจากค่าของ a_s มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ $\bar{A}$ ดังนั้นอัตราส่วน $\frac{a_s}{\bar{A}}$ จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ สมการที่ 4.3 สามารถลดรูปได้ดังนี้

$$\sigma = \sigma' + u$$

หรือ

$$\sigma' = \sigma - u \quad (4.4)$$

โดยที่ $u = H_A \cdot \gamma_w =$ แรงดันน้ำในโพรง (Pore Water Pressure)

แทนค่าสมการ 4.1 ในสมการ 4.4 จะได้

$$\begin{aligned} \sigma' &= H \cdot \gamma_w + (H_A - H) \cdot \gamma_{sat} - H_A \cdot \gamma_w \\ &= (H_A - H) \cdot (\gamma_{sat} - \gamma_w) \end{aligned}$$

$$\sigma' = H' \cdot \gamma_{sub} \quad (4.5)$$

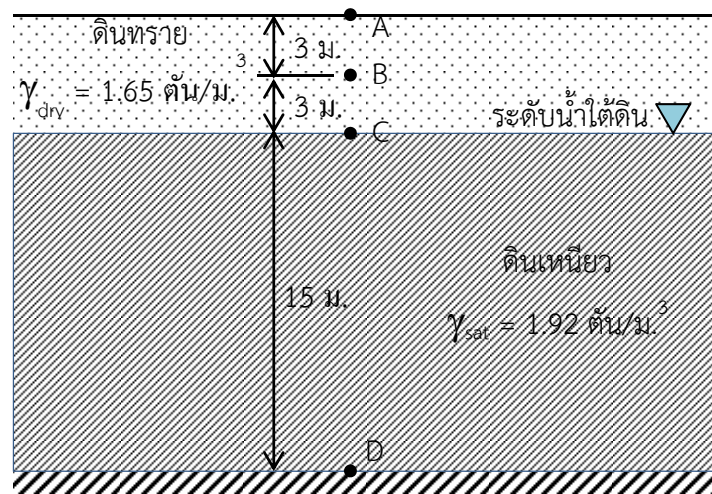
โดยที่ H' คือ ความหนาของชั้นดินถึงจุดที่พิจารณา

จากสมการที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าหน่วยแรงประสิทธิผลไม่ขึ้นกับความลึกของระดับน้ำที่อยู่เหนือผิวดิน

ตัวอย่างที่ 4.1 จงคำนวณค่าหน่วยแรงรวม ความดันน้ำในโพรง และหน่วยแรงประสิทธิผล ที่จุด A, B, C และ D จากรูปด้านล่าง

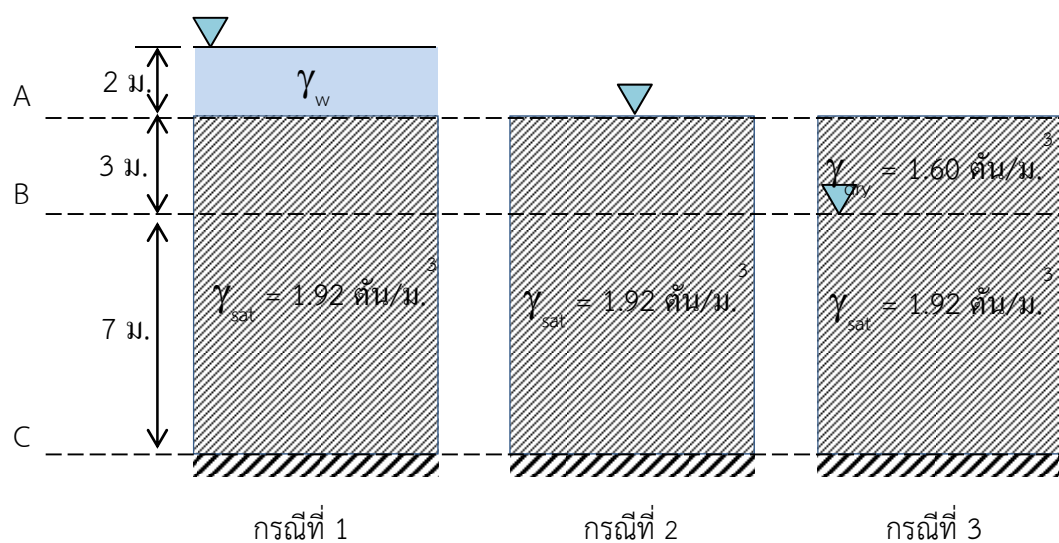
วิธีทำ

ในการวิเคราะห์หาหน่วยแรงภายในมวลดินเนื่องจากน้ำหนักของมวลดินเองเริ่มต้นจากการหาค่าหน่วยแรงทั้งหมดก่อน จากนั้นจึงหาค่าแรงดันน้ำในโพรง แล้วจึงคำนวณค่าหน่วยแรงประสิทธิผลที่เมื่อดินรับ



จุดที่ พิจารณา	หน่วยแรงทั้งหมด (σ , ตัน/ม. ²)	แรงดันน้ำในโพรง (u , ตัน/ม. ²)	หน่วยแรงประสิทธิผล ($\sigma' = \sigma - u$, ตัน/ม. ²)
A	0	0	0
B	$3 \times 1.65 = 4.95$	0	$4.95 - 0 = 4.95$
C	$6 \times 1.65 = 9.9$	0	$9.9 - 0 = 9.9$
D	$(6 \times 1.65) + (15 \times 1.92) = 38.7$	$15 \times 1.0 = 15.0$	$38.7 - 15.0 = 23.7$

ตัวอย่างที่ 4.2 จงคำนวณค่าหน่วยแรงรวม ความดันน้ำในโพรง และหน่วยแรงประสิทธิผล ที่ระดับ A, B และ C ของมวลดินที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใน 3 กรณีดังแสดงในรูปด้านล่าง



วิธีทำ

กรณีที่ 1 : ระดับน้ำอยู่เหนือผิวดิน 2 เมตร

จุดที่ พิจารณา	หน่วยแรงทั้งหมด (σ , ตัน/ม. ²)	แรงดันน้ำในโพรง (u , ตัน/ม. ²)	หน่วยแรงประสิทธิผล ($\sigma' = \sigma - u$, ตัน/ม. ²)
A	$2 \times 1.0 = 2.0$	$2 \times 1.0 = 2.0$	$2.0 - 2.0 = 0.0$
B	$2.0 + 3 \times 1.92 = 7.76$	$(2 + 3) \times 1.0 = 5.0$	$7.76 - 5.0 = 2.76$
C	$7.76 + (7 \times 1.92) = 21.2$	$(2 + 10) \times 1.0 = 12.0$	$21.2 - 12.0 = 9.2$

กรณีที่ 2 : ระดับน้ำอยู่ที่ผิวดินพอดี

จุดที่ พิจารณา	หน่วยแรงทั้งหมด (σ , ตัน/ม. ²)	แรงดันน้ำในโพรง (u , ตัน/ม. ²)	หน่วยแรงประสิทธิผล ($\sigma' = \sigma - u$, ตัน/ม. ²)
A	0	0	$0 - 0 = 0$
B	$3 \times 1.92 = 5.76$	$3 \times 1.0 = 3.0$	$5.76 - 3.0 = 2.76$
C	$5.76 + (7 \times 1.92) = 19.2$	$10 \times 1.0 = 10.0$	$19.2 - 10.0 = 9.2$

กรณีที่ 3 : ระดับน้ำต่ำกว่าระดับผิวดิน 3 เมตร

จุดที่ พิจารณา	หน่วยแรงทั้งหมด (σ , ตัน/ม. ²)	แรงดันน้ำในโพรง (u , ตัน/ม. ²)	หน่วยแรงประสิทธิผล ($\sigma' = \sigma - u$, ตัน/ม. ²)
A	0	0	$0 - 0 = 0$
B	$3 \times 1.6 = 4.8$	0	$4.8 - 0 = 4.8$
C	$4.8 + (7 \times 1.92) = 18.24$	$7 \times 1.0 = 7.0$	$18.24 - 7.0 = 11.24$

4.2 หน่วยแรงภายในมวลดินที่อ้อมตัวด้วยน้ำและการไหลซึมของน้ำ

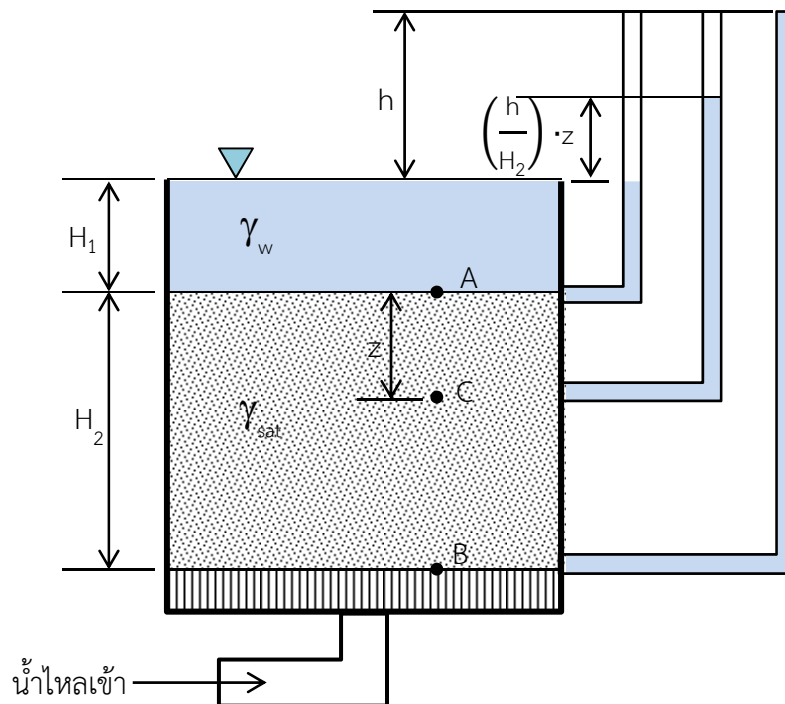
การไหลซึมของน้ำภายในมวลดินส่งผลต่อหน่วยแรงประสิทธิผลที่เกิดขึ้นภายในมวลดิน หน่วยแรงประสิทธิผลจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลซึมของน้ำ ซึ่งสามารถแยกพิจารณาได้เป็น 2 กรณีคือการไหลซึมของน้ำในทิศทางขึ้นข้างบนและการไหลซึมของน้ำในทิศทางลงข้างล่าง ซึ่งมีรายละเอียดในการวิเคราะห์ดังนี้

4.2.1 การไหลซึมของน้ำในทิศทางขึ้นข้างบน

การวิเคราะห์หน่วยแรงประสิทธิผลของมวลดินในกรณีที่น้ำไหลซึมขึ้นข้างบนสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.2 จากรูปจะเห็นว่าน้ำจะไหลจากท่อส่งน้ำด้านล่างขึ้นสู่ผิวดิน เนื่องจากเฮดทั้งหมดที่ผิวดินด้านล่างมีค่ามากกว่าเฮดทั้งหมดที่ผิวดินด้านบน (พิจารณาจากความสูงของน้ำในหลอดวัดความดัน) การสูญเสียเฮดที่เกิดขึ้นระหว่างจุด A และจุด B มีค่าเท่ากับ h หน่วยแรงที่จุด A และจุด B สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

พิจารณาจุด A :

- หน่วยแรงทั้งหมด $\sigma_A = H_1 \cdot \gamma_w$
- แรงดันน้ำในโพรง $u_A = H_1 \cdot \gamma_w$
- หน่วยแรงประสิทธิผล $\sigma'_A = \sigma_A - u_A = 0$



รูปที่ 4.2 ลักษณะชั้นดินกรณีน้ำไหลซึมขึ้นข้างบน

พิจารณาจุด B :

- หน่วยแรงทั้งหมด $\sigma_B = H_1 \cdot \gamma_w + H_2 \cdot \gamma_{sat}$
- แรงดันน้ำในโพรง $u_B = (H_1 + H_2 + h) \cdot \gamma_w$
- หน่วยแรงประสิทธิภาพ $\sigma_B' = \sigma_B - u_B$

$$= (H_1 \cdot \gamma_w + H_2 \cdot \gamma_{sat}) - (H_1 + H_2 + h) \cdot \gamma_w$$

$$= H_2(\gamma_{sat} - \gamma_w) - h \cdot \gamma_w$$

$$\sigma_B' = H_2 \cdot \gamma_{sub} - h \cdot \gamma_w$$

พิจารณาจุด C :

- หน่วยแรงทั้งหมด $\sigma_C = H_1 \cdot \gamma_w + z \cdot \gamma_{sat}$
- แรงดันน้ำในโพรง $u_C = (H_1 + z + \left(\frac{h}{H_2}\right) \cdot z) \cdot \gamma_w$
- หน่วยแรงประสิทธิภาพ $\sigma_C' = \sigma_C - u_C$

$$= (H_1 \cdot \gamma_w + z \cdot \gamma_{sat}) - (H_1 + z + \left(\frac{h}{H_2}\right) \cdot z) \cdot \gamma_w$$

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

$$\sigma_C' = z \cdot \gamma_{sub} - \left(\frac{h}{H_2}\right) \cdot z \cdot \gamma_w \quad (4.6)$$

โดยที่ h/H_2 คือ ความลาดชลศาสตร์ (i) ที่เกิดจากการไหลของน้ำ ดังนั้นสามารถเขียนสมการที่ 4.6 ได้ดังนี้

$$\sigma_C' = z \cdot \gamma_{sub} - i \cdot z \cdot \gamma_w \quad (4.7)$$

พิจารณาสมการที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าสำหรับมวลดินใดๆ ค่าหน่วยแรงประสิทธิภาพของดินจะขึ้นอยู่กับค่าความลาดชลศาสตร์ (เนื่องจากค่า z และค่าหน่วยน้ำหนักของดินและน้ำมีค่าคงที่สำหรับดินใดๆ) หากค่าความลาดทางชลศาสตร์เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงค่าๆ หนึ่งจะพบว่าหน่วยแรงประสิทธิภาพมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งจะทำให้มวลดินอยู่ในสถานะไม่มีเสถียรภาพ ค่าความลาดชลศาสตร์สูงสุดนี้เรียกว่าค่าความลาดชลศาสตร์วิกฤต (Critical Hydraulic Gradient) สามารถหาได้จากสมการ

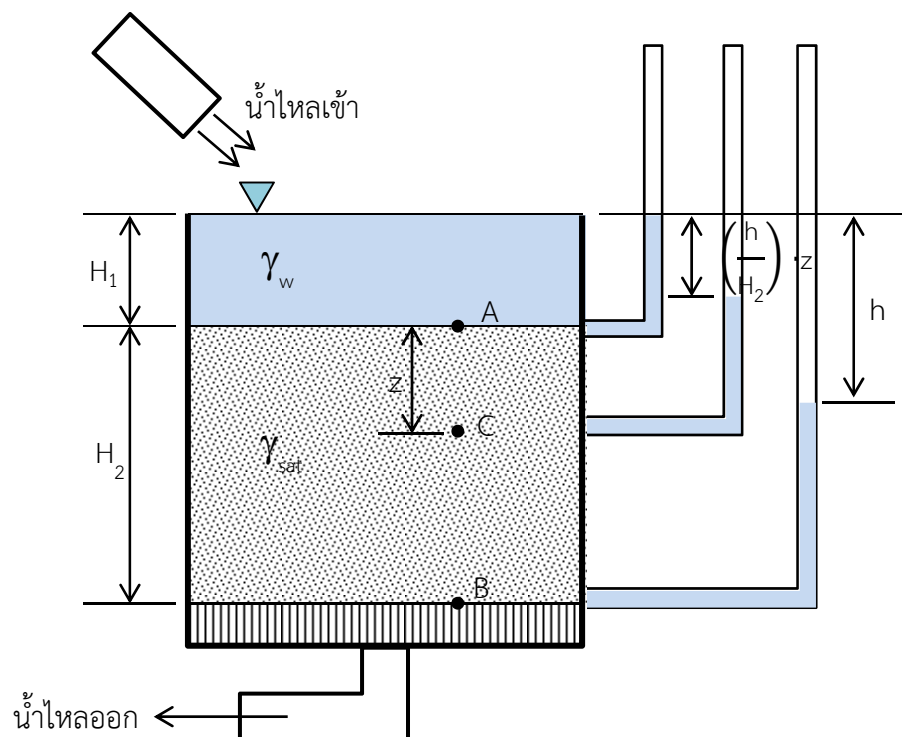
$$i_{cr} = \gamma_{sub} / \gamma_w \quad (4.8)$$

4.2.2 การไหลซึมของน้ำในทิศทางลงข้างล่าง

การวิเคราะห์หน่วยแรงประสิทธิผลของมวลดินในกรณีที่น้ำไหลซึมลงข้างล่างสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.3 จากรูปจะเห็นว่าน้ำจะไหลจากผิวดินด้านบนลงด้านล่าง เนื่องจากเฮดทั้งหมดที่ผิวดินด้านบนมีค่ามากกว่าเฮดทั้งหมดที่ผิวดินด้านล่าง (พิจารณาจากความสูงของน้ำในหลอดวัดความดัน) การสูญเสียเฮดที่เกิดขึ้นระหว่างจุด A และจุด B มีค่าเท่ากับ h หน่วยแรงที่จุด C สามารถวิเคราะห์ได้ในทำนองเดียวกันกับการไหลซึมของน้ำในทิศทางขึ้นข้างบน นั่นคือ

พิจารณาจุด C :

- หน่วยแรงทั้งหมด $\sigma_c = H_1 \cdot \gamma_w + z \cdot \gamma_{sat}$
- แรงดันน้ำในโพรง $u_c = (H_1 + z - \left(\frac{h}{H_2}\right) \cdot z) \cdot \gamma_w$
- หน่วยแรงประสิทธิผล $\sigma_c' = \sigma_c - u_c$



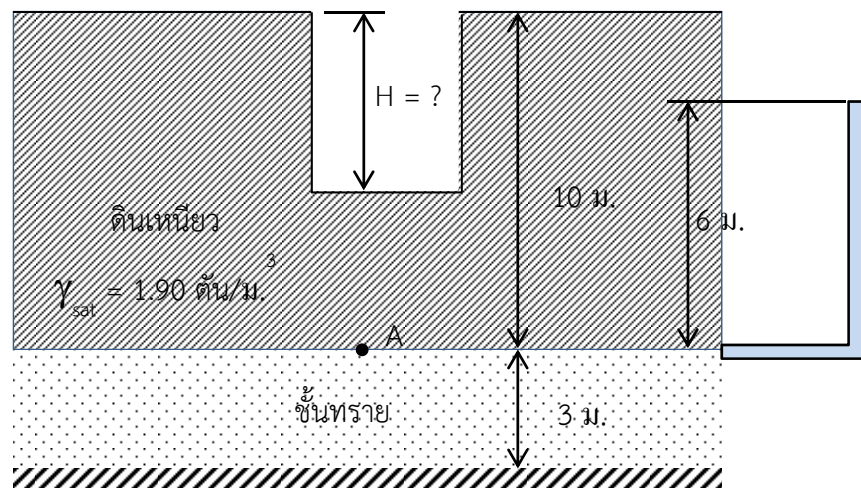
รูปที่ 4.3 ลักษณะชั้นดินกรณีน้ำไหลซึมลงข้างล่าง

$$\begin{aligned}
&= (H_1 \cdot \gamma_w + z \cdot \gamma_{\text{sat}}) - (H_1 + z - \left(\frac{h}{H_2}\right) \cdot z) \cdot \gamma_w \\
&= z(\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w) + \left(\frac{h}{H_2}\right) \cdot z \cdot \gamma_w \\
&= z \cdot \gamma_{\text{sub}} + \left(\frac{h}{H_2}\right) \cdot z \cdot \gamma_w
\end{aligned}$$

$$\sigma_c' = z \cdot \gamma_{\text{sub}} + i \cdot z \cdot \gamma_w \quad (4.9)$$

พิจารณาสมการที่ 4.9 พบว่าในกรณีที่น้ำไหลซึมลงข้างล่างมวลดินจะไม่เกิดสภาวะไม่มีเสถียรภาพ (หน่วยแรงประสิทธิผลมีค่าเท่ากับศูนย์) เหมือนกับกรณีที่น้ำไหลซึมขึ้นข้างบน ดังนั้นความลาดชันศาสตร์วิกฤตจะไม่มีสำหรับการไหลซึมลงข้างล่าง

ตัวอย่างที่ 4.3 ชั้นดินเหนียวหนา 10 ม. วางตัวอยู่บนชั้นทรายหนา 3 ม. ดังแสดงในรูปด้านล่าง หากหาความดันน้ำในชั้นทรายอยู่สูงจากระดับชั้นทรายเท่ากับ 6 ม. จงหาความลึกในการขุดชั้นดินเหนียวที่มากที่สุดที่สามารถขุดได้ก่อนที่ชั้นดินเหนียวจะไม่มีเสถียรภาพ



วิธีทำ

พิจารณาหน่วยแรงที่จุด A เมื่อมีการขุดดินลึกเท่ากับ H เมตรจะสามารถวิเคราะห์หน่วยแรงประสิทธิผลที่จุด A ได้จากสมการ

$$\sigma_A' = \sigma_A - u_A$$

$$= (10 - H) \times 1.90 - (6 \times 1.0)$$

$$\sigma_A' = 13 - 1.9H$$

มวลดินจะอยู่ในสภาพไม่มีเสถียรภาพเมื่อหน่วยแรงประสิทธิผลมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$0 = 13 - 1.9H$$

$$H = 13 / 1.9$$

$$= 6.84 \text{ เมตร}$$

ตอบ

4.3 หน่วยแรงภายในมวลดินเนื่องจากแรงกระทำภายนอก

$$= (10 - H) \times 1.90 - (6 \times 1.0)$$

$$\sigma_A' = 13 - 1.9H$$

มวลดินจะอยู่ในสภาพไม่มีเสถียรภาพเมื่อหน่วยแรงประสิทธิผลมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$0 = 13 - 1.9H$$

$$H = 13 / 1.9$$

$$= 6.84 \text{ เมตร}$$

ตอบ

4.3 หน่วยแรงภายในมวลดินเนื่องจากน้ำหนักกระทำที่ผิวดิน

เมื่อมีการก่อสร้างสิ่งก่อสร้างต่างๆ เช่น อาคาร ถนน เป็นต้น น้ำหนักของสิ่งก่อสร้างเหล่านี้จะทำให้เกิดหน่วยแรงเพิ่มขึ้นภายในมวลดิน หน่วยแรงเพิ่มขึ้นที่เกิดขึ้นจะกระทำในทุกทิศทาง หากพิจารณาในกรณี 2 มิติ หน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นจะถูกแยกพิจารณาออกเป็น 2 แกน ได้แก่ แกนแนวดิ่ง (แกน z) และแกนแนวนอน (แกน x)

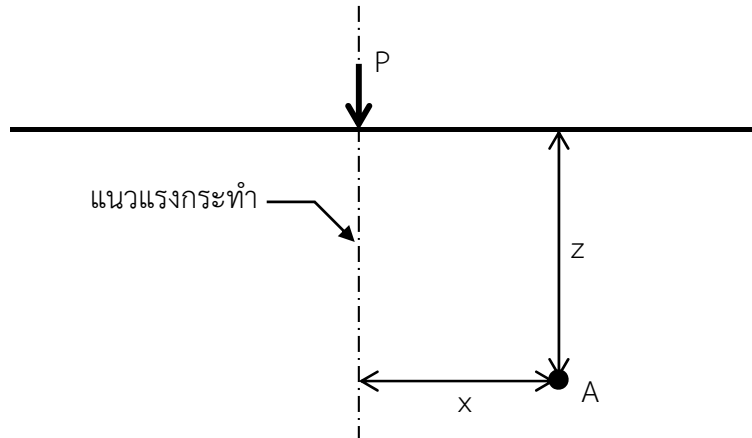
การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำหนักกระทำที่ผิวดินจะแบ่งการวิเคราะห์ออกตามรูปร่างของน้ำหนักที่กระทำที่ผิวดิน โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.3.1 น้ำหนักกระทำเป็นจุด (Point Load)

ในปี ค.ศ. 1883 Boussinesq ได้เสนอสมการสำหรับคำนวณหน่วยแรงเพิ่มขึ้นที่เกิดจากน้ำหนักกระทำที่มีรูปร่างเป็นจุดภายในมวลดินที่มีเนื้อดินสม่ำเสมอ (Homogeneous) มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง (Isotropic) และมีลักษณะยืดหยุ่น (Elastic) ดังแสดงในรูปที่ 4.4

$$\Delta\sigma_z = \frac{3P}{2\pi} \cdot \frac{z^3}{(x^2 + z^2)^{5/2}} \quad (4.10)$$

ตัวอย่างที่ 4.4 พิจารณาน้ำหนักกระทำเป็นจุดขนาด 5 ตัน จงพล็อตกราฟแสดงการกระจายของหน่วยแรงทุกๆ ความลึก 0.5 เมตร จากผิวดินถึงความลึก 5 เมตร ที่ระยะห่างจากแนวแรงกระทำเท่ากับ 2 เมตร



รูปที่ 4.4 น้ำหนักกระทำแบบเป็นจุด

วิธีทำ

สามารถคำนวณค่าหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นตามแนวตั้ง ($\Delta\sigma_z$) ได้ตามสมการที่ 4.10 ดังนี้
 ที่ความลึก 1 ม. :

$$\Delta\sigma_z = [(3 \times 5) / (2\pi)] \times [1^3 / (2^2 + 1^2)^{5/2}] = 0.043 \text{ ตัน / ม.}^2$$

ที่ความลึก 2 ม. :

$$\Delta\sigma_z = [(3 \times 5) / (2\pi)] \times [2^3 / (2^2 + 2^2)^{5/2}] = 0.106 \text{ ตัน / ม.}^2$$

ที่ความลึก 3 ม. :

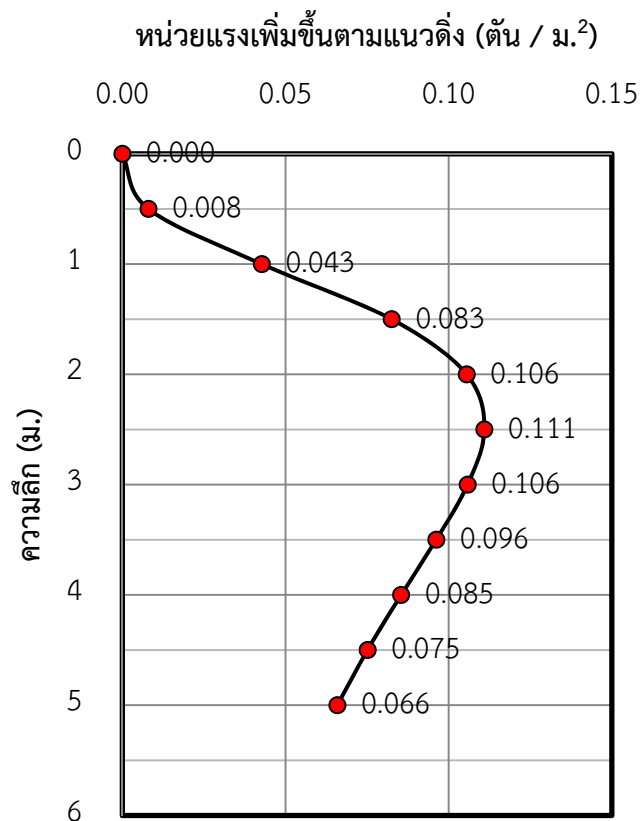
$$\Delta\sigma_z = [(3 \times 5) / (2\pi)] \times [3^3 / (2^2 + 3^2)^{5/2}] = 0.106 \text{ ตัน / ม.}^2$$

ที่ความลึก 4 ม. :

$$\Delta\sigma_z = [(3 \times 5) / (2\pi)] \times [4^3 / (2^2 + 4^2)^{5/2}] = 0.085 \text{ ตัน / ม.}^2$$

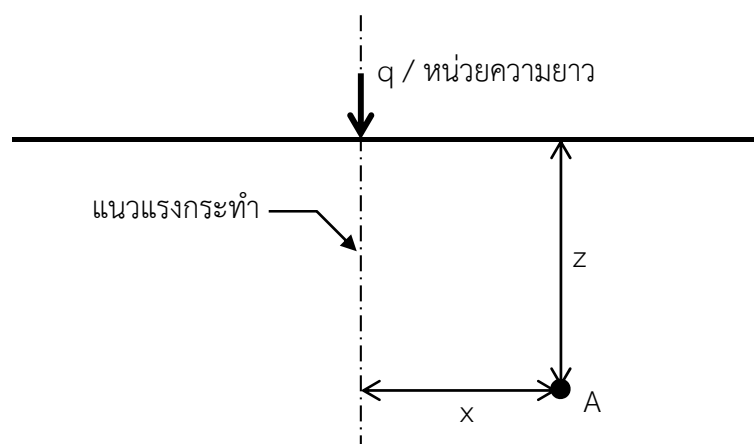
ที่ความลึก 5 ม. :

$$\Delta\sigma_z = [(3 \times 5) / (2\pi)] \times [5^3 / (2^2 + 5^2)^{5/2}] = 0.066 \text{ ตัน / ม.}^2$$



4.3.2 น้ำหนักกระทำเป็นเส้นยาว (Line Load)

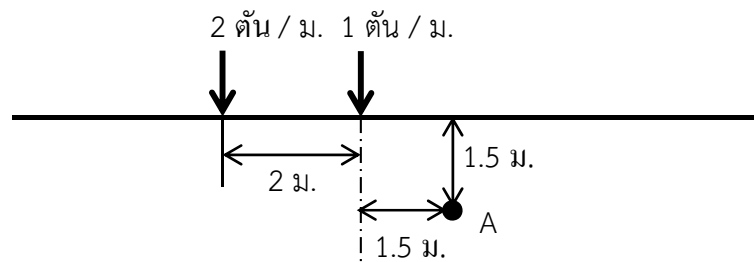
น้ำหนักกระทำที่มีรูปร่างเป็นเส้นยาว เช่น น้ำหนักจากท่อ หรือแนวรั้ว เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 4.5 สามารถคำนวณหาหน่วยแรงในแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้นที่จุด A ได้จากสมการด้านล่าง



รูปที่ 4.5 น้ำหนักกระทำแบบเป็นเส้นยาว

$$\Delta\sigma_z = \frac{2qz^3}{\pi(x^2 + z^2)^2} \quad (4.11)$$

ตัวอย่างที่ 4.5 จงคำนวณหาหน่วยแรงแนวตั้งที่เพิ่มขึ้นที่จุด A เนื่องจากน้ำหนักกระทำของท่อส่งน้ำมัน 2 เส้น ดังแสดงในรูปด้านล่าง



วิธีทำ

ขั้นตอนในการคำนวณหาหน่วยแรงแนวตั้งที่เพิ่มขึ้นจะทำทีละแรงแล้วจึงนำผลลัพธ์ที่ได้มารวมกัน

พิจารณาแรง $q_1 = 1$ ตัน / ม. :

$$\Delta\sigma_{z1} = (2 \times 1 \times 1.5^3) / [\pi(1.5^2 + 1.5^2)^2] = 0.106 \text{ ตัน / ม.}^2$$

พิจารณาแรง $q_2 = 2$ ตัน / ม. :

$$\Delta\sigma_{z2} = (2 \times 2 \times 1.5^3) / [\pi(3.5^2 + 1.5^2)^2] = 0.204 \text{ ตัน / ม.}^2$$

ดังนั้นหน่วยแรงแนวตั้งที่เพิ่มขึ้นทั้งหมดที่จุด A คือ

$$\Delta\sigma_z = \Delta\sigma_{z1} + \Delta\sigma_{z2}$$

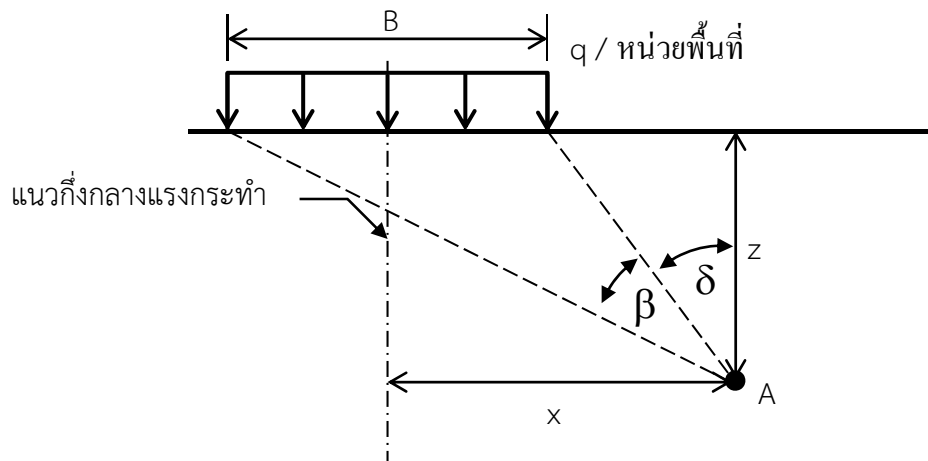
$$= 0.106 + 0.204$$

$$\Delta\sigma_z = 0.310 \text{ ตัน / ม.}^2$$

ตอบ

4.3.3 น้ำหนักกระทำเป็นแผ่นยาว (Strip Load)

ในงานก่อสร้างถนนจะทำให้เกิดน้ำหนักกระทำที่มีรูปร่างแบบแผ่นยาว ดังแสดงในรูปที่ 4.6 การคำนวณหาหน่วยแรงเพิ่มขึ้นในแนวดิ่งที่จุด A สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้



รูปที่ 4.6 น้ำหนักกระทำแบบเป็นแผ่นยาว

$$\Delta\sigma_z = \frac{q}{\pi} \cdot [\beta + \sin\beta \cos(\beta + 2\delta)] \quad (4.12)$$

โดยที่ $\delta = \tan^{-1} [(x - B/2) / z]$

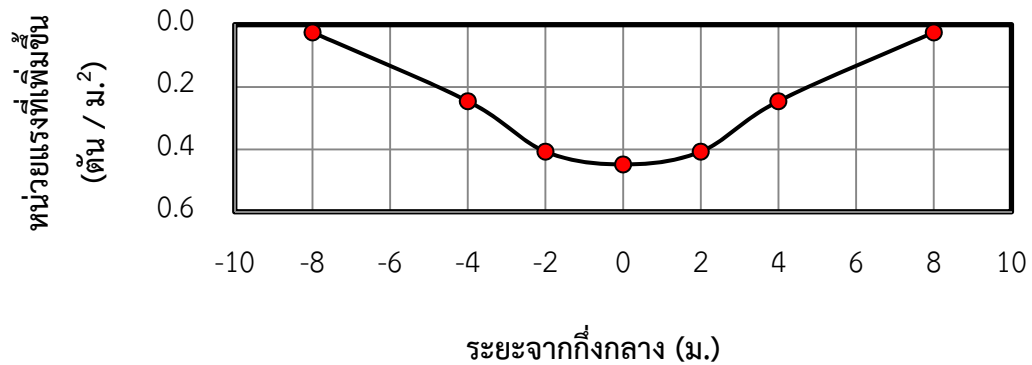
$$\beta = \tan^{-1} [(x + B/2) / z] - \delta$$

ตัวอย่างที่ 4.6 จากรูปที่ 4.6 หากกำหนดให้ $B = 8$ ม. และ $q = 0.5$ ตัน / ม.² จงพล็อตการกระจายของหน่วยแรงแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้นของความลึก 3 เมตร ภายใต้แรงกระทำที่ระยะกึ่งกลาง ± 2 ม. ± 4 ม. และ ± 8 ม. จากกึ่งกลาง

วิธีทำ

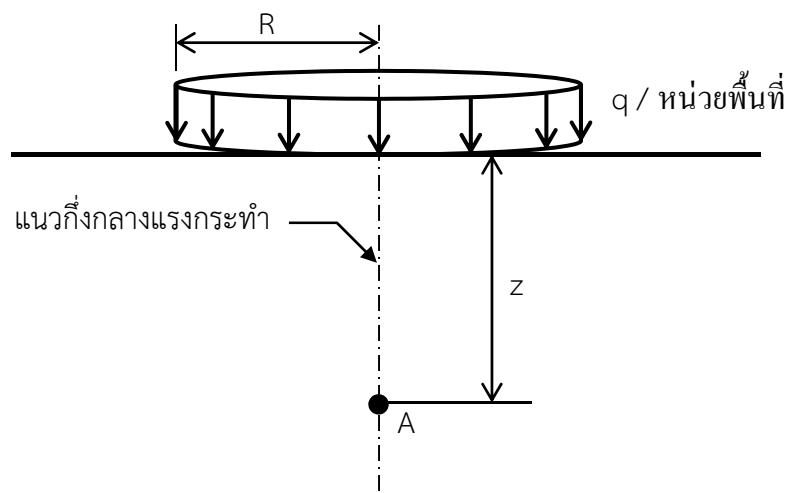
ระยะจากกึ่งกลาง	δ	β	$\Delta\sigma_z$
0	-53.1	106.3	0.45
± 2	-33.7	97.1	0.41

ระยะจากกึ่งกลาง	δ	β	$\Delta\sigma_z$
± 4	0.0	69.4	0.25
± 8	53.1	22.8	0.02



4.3.4 น้ำหนักกระทำเป็นแบบสม่ำเสมอรูปวงกลม (Uniformly Loaded Circular Area)

สำหรับการก่อสร้างถังเก็บน้ำ หรือน้ำมันที่มีฐานเป็นรูปวงกลม จะทำให้เกิดน้ำหนักกระทำแบบสม่ำเสมอรูปวงกลม ดังแสดงในรูปที่ 4.7 หน่วยแรงในแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้นที่จุด A สามารถคำนวณได้จากสมการ



รูปที่ 4.7 น้ำหนักกระทำแบบสม่ำเสมอรูปวงกลม

$$\Delta\sigma_z = q \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{[(R/z)^2 + 1]^{3/2}} \right\} \quad (4.13)$$

ตัวอย่างที่ 4.7 จงคำนวณหาค่าหน่วยแรงในแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้นภายใต้ถังเก็บน้ำมันขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 ม. ที่ระดับความลึก 5 ม. หากน้ำหนักที่ผิวดินมีค่าเท่ากับ 15 ตัน / ม.²

วิธีทำ

จากสมการที่ 4.13 แทนค่า $R = 10$ ม. $z = 5$ ม. และ $q = 15$ ตัน / ม.² จะได้

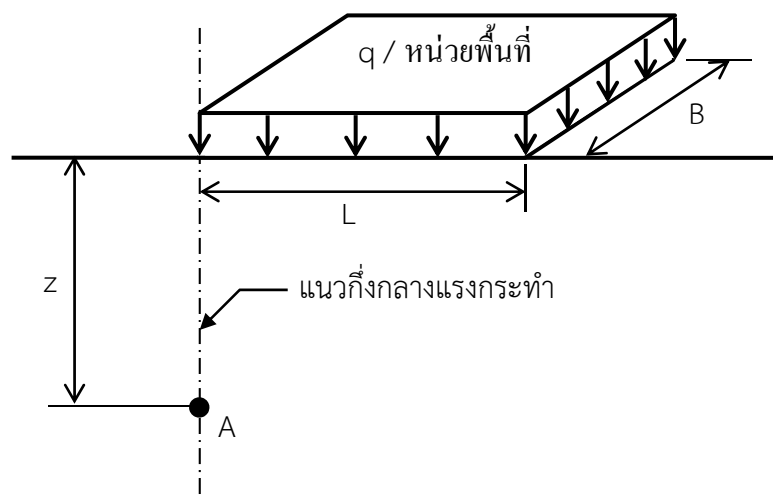
$$\Delta\sigma_z = 15 \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{[(10/5)^2 + 1]^{3/2}} \right\}$$

$$\Delta\sigma_z = 13.66 \text{ ตัน / ม.}^2$$

ตอบ

4.3.5 น้ำหนักกระทำเป็นแบบสม่ำเสมอรูปสี่เหลี่ยม (Uniformly Loaded Rectangular Area)

สำหรับการก่อสร้างฐานรากเดี่ยวที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจะทำให้เกิดน้ำหนักกระทำแบบสม่ำเสมอรูปสี่เหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 4.8 หน่วยแรงในแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้นที่จุด A สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้



รูปที่ 4.8 น้ำหนักกระทำแบบสม่ำเสมอรูปสี่เหลี่ยม

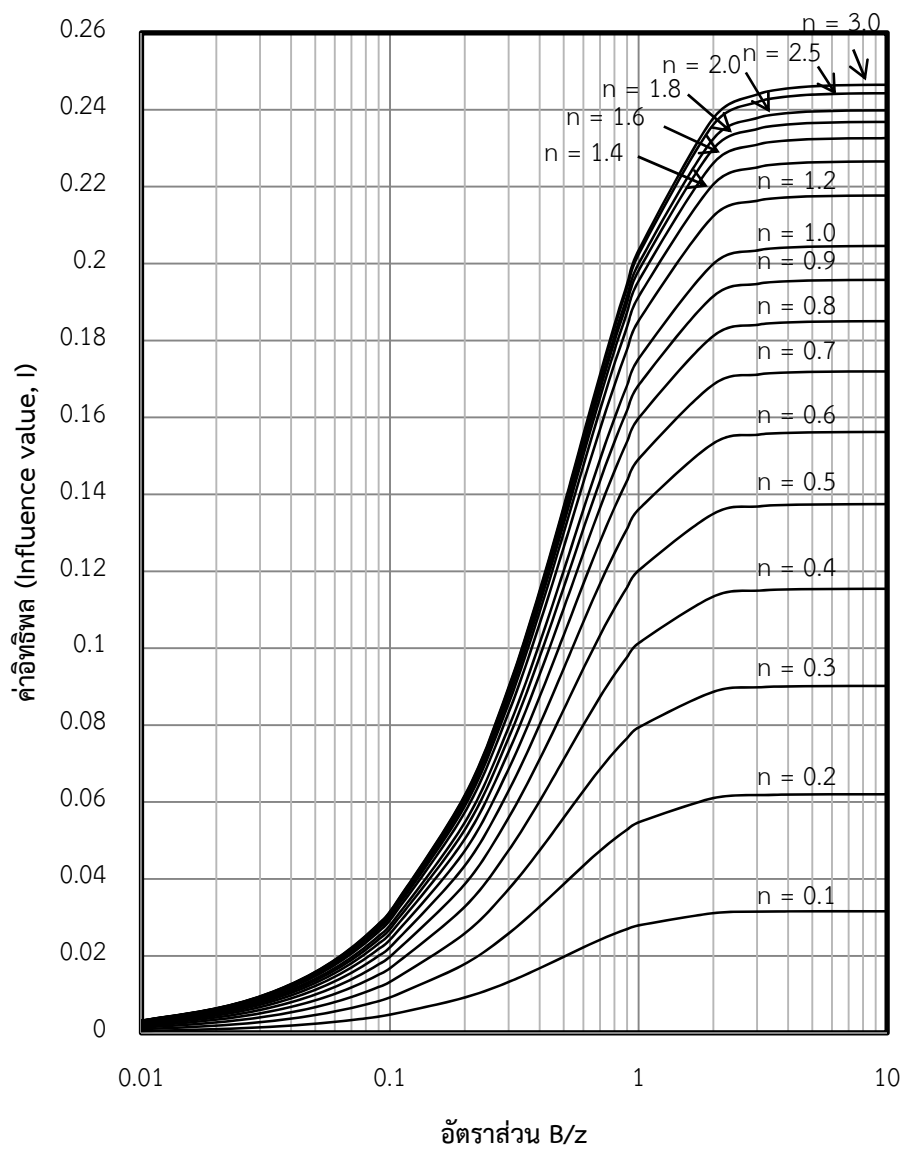
$$\Delta\sigma_z = q \cdot I \quad (4.14)$$

โดยที่

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

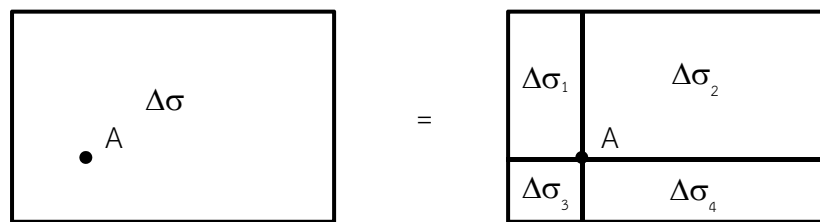
เมื่อ $m = B / z$ และ $n = L / z$

หรืออาจใช้กราฟในรูปที่ 4.9 สำหรับหาค่า I แทนได้

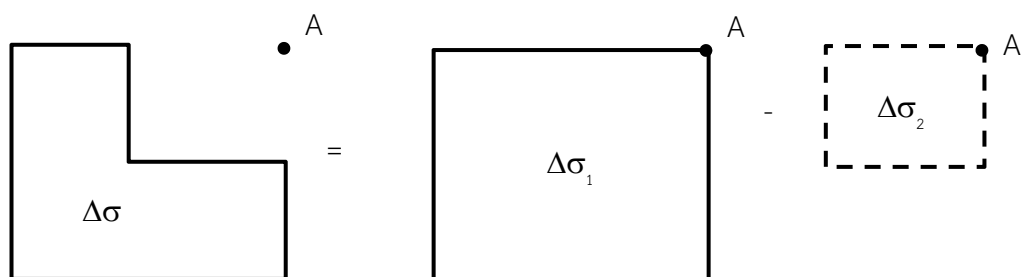


รูปที่ 4.9 แผนภูมิค่าอิทธิพลสำหรับหาค่าหน่วยแรงแนวตั้งที่เพิ่มขึ้น
สำหรับน้ำหนักกระทำรูปสี่เหลี่ยม

พิจารณาสมการที่ 4.14 จะพบว่าสมการดังกล่าวใช้สำหรับคำนวณหาหน่วยแรงในแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้นบริเวณมุมของน้ำหนักระทำแบบสม่ำเสมอรูปสี่เหลี่ยม ในกรณีที่ต้องการหาหน่วยแรงในแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้น ณ จุดอื่นๆ สามารถกระทำได้โดยการแบ่งน้ำหนักระทำรูปสี่เหลี่ยมออกเป็นหลายๆ รูป แล้วทำการบวกหรือลบ (กรณีที่ไม่มีน้ำหนักระทำอยู่จริง) หน่วยแรงเพิ่มขึ้นที่คำนวณได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.10



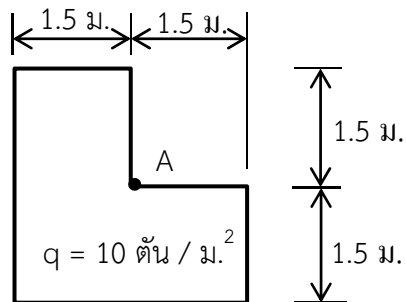
$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3 + \Delta\sigma_4$$



$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2$$

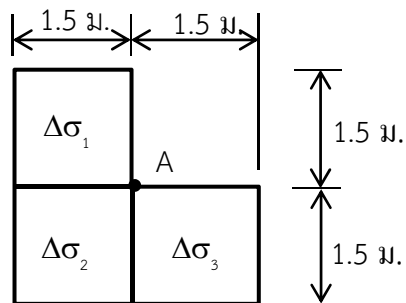
รูปที่ 4.10 การรวมกันของน้ำหนักระทำแบบสม่ำเสมอรูปสี่เหลี่ยม

ตัวอย่างที่ 4.8 จงคำนวณหาค่าหน่วยแรงในแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง A ของดินที่อยู่ลึกลงไป 3 ม. ของฐานรากที่มีรูปร่างแบบตัว L ดังแสดงในรูปด้านล่าง



วิธีทำ

จากรูปจะต้องทำแบ่งรูปสี่เหลี่ยมออกเป็น 3 รูปย่อยๆ ดังแสดงดังรูปด้านล่าง



จากรูปพบว่าสี่เหลี่ยมทั้งสามรูปมีขนาดเท่ากัน ดังนั้นจะได้

$$\Delta\sigma_1 = \Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_3$$

และ

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3$$

ดังนั้น

$$\Delta\sigma = 3\Delta\sigma_1$$

หา $m = 1.5 / 3 = 0.5$ และ $n = 1.5 / 3 = 0.5$ จากกราฟในรูปที่ 4.9 จะได้ค่า $I = 0.175$ ดังนั้น

$$\Delta\sigma_1 = 10 \times 0.175 = 1.75 \text{ ตัน / ม.}^2$$

นั่นคือ

$$\Delta\sigma = 3 \times 1.75$$

$$= 5.25 \text{ ตัน / ม.}^2$$

ตอบ

4.4 แผนภูมิอิทธิพล

ในปี ค.ศ. 1942 Newmark ได้พัฒนาแผนภูมิอิทธิพลเพื่อใช้ในการหาค่าหน่วยแรงในแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้นสำหรับน้ำหนักกระทำแบบสม่ำเสมอที่มีรูปร่างแบบใดก็ได้ แผนภูมิอิทธิพลมีพื้นฐานมาจากสมการที่ 4.13 โดยจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{\Delta\sigma_z}{q} = 1 - \frac{1}{[(R/z)^2 + 1]^{3/2}} \quad (4.15)$$

รูปที่ 4.11 แสดงแผนภูมิอิทธิพลของ Newmark ซึ่งได้จากการวาดรูปวงกลมจำนวน 9 วงที่มีจุดศูนย์กลางซ้อนทับกัน โดยวงกลมแต่ละวงจะมีรัศมีเท่ากับค่า R/z ซึ่งได้จากการแทนค่า $\Delta\sigma/q = 0.1 \ 0.2 \ 0.3 \ \dots \ 1.0$ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

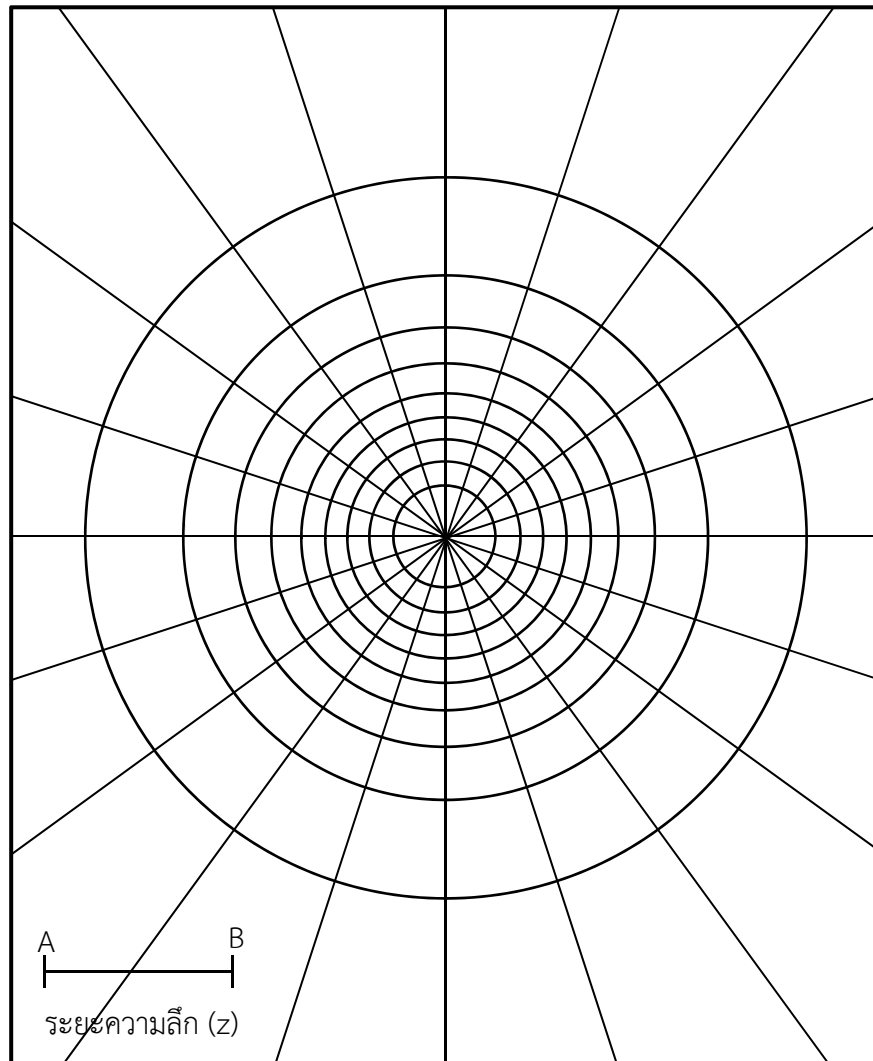
ตารางที่ 4.1 ค่ารัศมีของวงกลมสำหรับสร้างแผนภูมิอิทธิพล

$\Delta\sigma/q$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
R/z	0.00	0.27	0.40	0.52	0.64	0.77	0.92	1.11	1.39	1.91	∞

ค่าอิทธิพล (Influence Value) สามารถคำนวณได้จากค่า $1/N$ เมื่อ N คือจำนวนช่องในตาราง สำหรับแผนภูมิอิทธิพลในรูปที่ 4.11 มีจำนวนช่องทั้งหมดเท่ากับ 200 ช่อง ดังนั้นค่าอิทธิพลจะมีค่าเท่ากับ $1/200 = 0.005$

ขั้นตอนการใช้งานแผนภูมิอิทธิพลเพื่อหาค่าหน่วยแรงในแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้นสำหรับน้ำหนักแบบสม่ำเสมอที่มีรูปร่างใดๆ สามารถทำได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. กำหนดให้ความลึกของจุดที่ต้องการหาค่าหน่วยแรงในแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้นมีความยาวเท่ากับ ความยาว AB ที่กำหนดในแผนภูมิอิทธิพล



รูปที่ 4.11 แผนภูมิอิทธิพล (ค่าอิทธิพลเท่ากับ 0.005)

2. วาดรูปน้ำหนักระทำโดยใช้มาตราส่วน AB เท่ากับความลึก z และวาดให้จุดที่ต้องการหาหน่วยแรงในแนวตั้งที่เพิ่มขึ้นทับที่จุดศูนย์กลางของวงกลม
3. นับจำนวนช่องของแผนภูมิอิทธิพลที่อยู่ภายในรูปร่างของน้ำหนักระทำ (M) จากนั้นคำนวณหาค่าหน่วยแรงในแนวตั้งที่เพิ่มขึ้นจากสมการ

$$\Delta\sigma = (IV) \cdot q \cdot M \quad (4.16)$$

โดยที่ IV = ค่าอิทธิพล

q = น้ำหนักกระทำต่อหน่วยพื้นที่

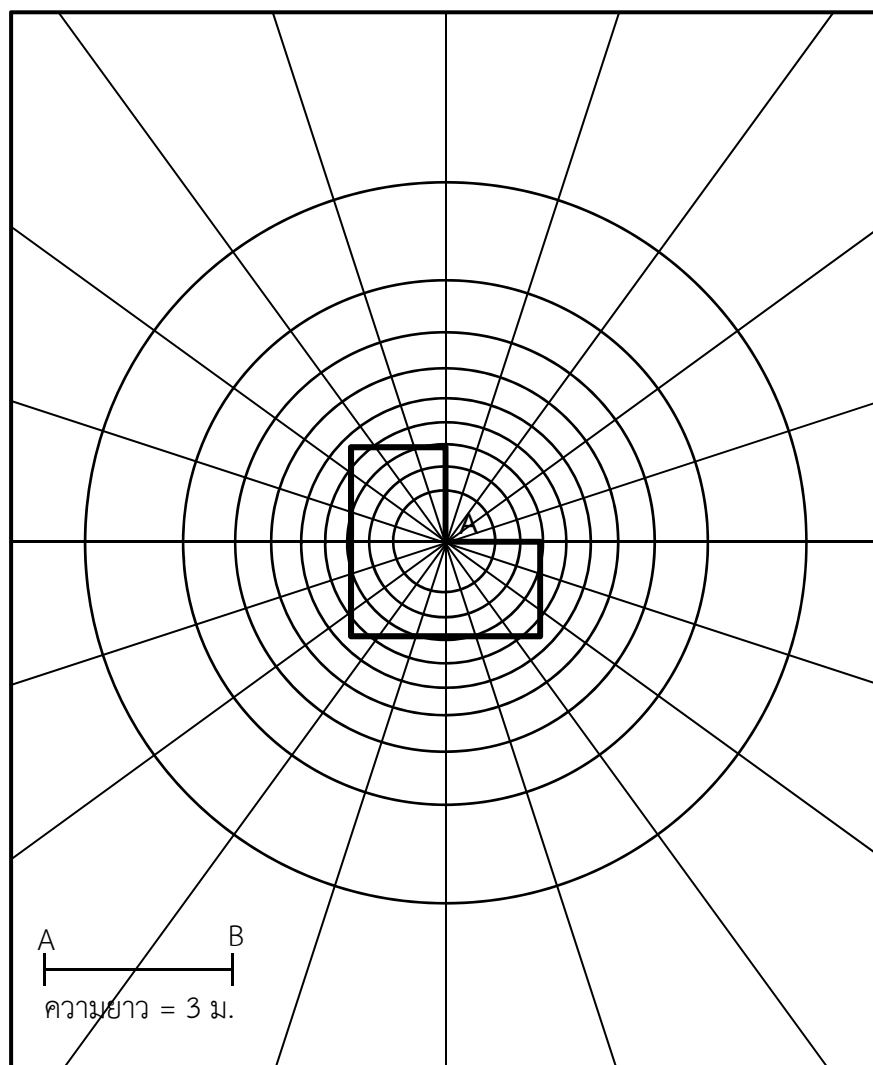
N = จำนวนช่องที่อยู่ภายในรูปร่างของน้ำหนักกระทำ

ตัวอย่างที่ 4.9 จากตัวอย่างที่ 4.8 จงใช้แผนภูมิอิทธิพลในการหาค่าหน่วยแรงในแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้น

วิธีทำ

1. กำหนดให้ความยาว AB มีค่าเท่ากับความลึกที่ต้องการหาค่าหน่วยแรงในแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้น
ในที่นี้ ความยาว $AB = 3$ ม.

2. วาดรูปน้ำหนักกระทำตามมาตราส่วนในข้อ 1 จะได้รูปร่างดังข้างล่าง



3. นับจำนวนช่องของแผนภูมิที่อยู่ภายในรูปร่างน้ำหนัที่วาดในขั้นตอนที่ 2 ซึ่งจะได้ $M = 51$ ช่อง ดังนั้นหน่วยแรงในแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ

$$\Delta\sigma = (0.005) \cdot (10) \cdot (51)$$

$$= 2.55 \text{ ตัน / ม.}^2$$

ตอบ

บทที่ 5

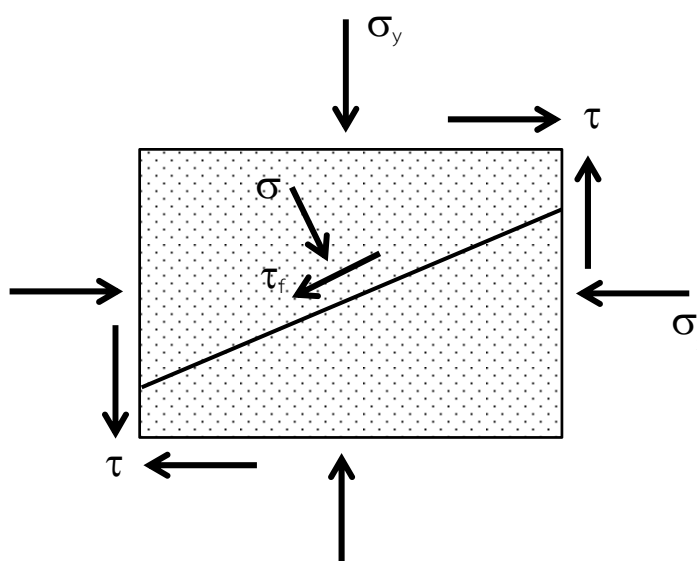
กำลังรับแรงเฉือนของดิน

ความสามารถในการต้านทานการพังทลายของดินถูกกำหนดในรูปของค่ากำลังรับแรงเฉือนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ กำลังรับแรงเฉือนของดินเป็นค่าพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพของมวลดิน เช่น ความสามารถในการรับแรงแบกทาน (Bearing Capacity) เสถียรภาพของความลาด (Slope Stability) แรงดันดินด้านข้าง (Lateral Earth Pressure) เป็นต้น

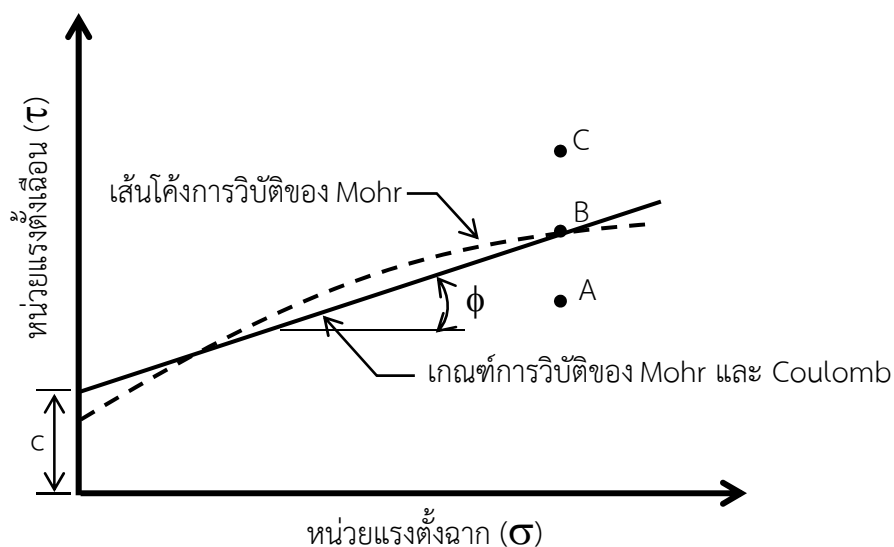
5.1 เกณฑ์การวิบัติของ Mohr และ Coulomb

ทฤษฎีการวิบัติของวัสดุที่นำเสนอโดย Mohr กล่าวว่า วัสดุต่างๆ วิบัติเนื่องจากการกระทำร่วมกันระหว่างหน่วยแรงตั้งฉาก (Normal Stress, σ) และหน่วยแรงเฉือน (Shear Stress, τ) ดังแสดงในรูปที่ 5.1

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงตั้งฉากและหน่วยแรงเฉือนบนระนาบวิบัติสามารถแสดงได้ดังเส้นโค้งในรูปที่ 5.2 ในการประมาณค่าหน่วยแรงเฉือนบนระนาบวิบัติสามารถใช้ฟังก์ชันเชิงเส้นตรงของหน่วยแรงหลักในการหาค่าแทนได้ (Coulomb, 1776) ดังแสดงในสมการที่ 5.1 ซึ่งเรียกว่า เกณฑ์การวิบัติของ Mohr และ Coulomb (Mohr – Coulomb Failure Criteria)



รูปที่ 5.1 หน่วยแรงตั้งฉากและหน่วยแรงเฉือนบนระนาบวิบัติ



รูปที่ 5.2 เกณฑ์การวิบัติของ Mohr และ Coulomb

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (5.1)$$

โดยที่ τ_f = หน่วยแรงเฉือนบนระนาบวิบัติ

σ = หน่วยแรงตึงฉากบนระนาบวิบัติ

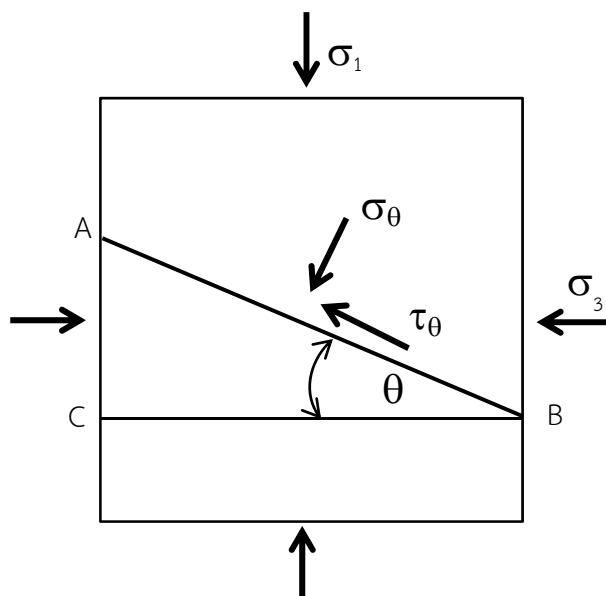
c = ค่าความเชื่อมั่นแน่นของดิน

ϕ = ค่ามุมเสียดทานภายในของดิน

พิจารณารูปที่ 5.2 เมื่อพล็อตค่าหน่วยแรงตึงฉากและหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนระนาบใดๆ แล้วจุดอยู่ใต้เส้นโค้งการวิบัติ (จุด A) แสดงว่าหน่วยแรงเฉือนวิบัติจะไม่เกิดขึ้นบนระนาบนั้นๆ กรณีที่จุดอยู่บนเส้นโค้งการวิบัติ (จุด B) แสดงว่าระนาบนั้นคือระนาบที่เกิดหน่วยแรงเฉือนวิบัติ สำหรับกรณีของจุด C ซึ่งอยู่เหนือเส้นโค้งการวิบัติจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากดินได้เกิดการวิบัติไปก่อนแล้วที่จุด B

5.2 หน่วยแรงตึงฉากและหน่วยแรงเฉือนบนระนาบเอียง

รูปที่ 5.3 แสดงมวลดินในระนาบ 2 มิติ โดยกำหนดให้หน่วยแรงตึงฉากในแนวดิ่ง (σ_1) มีค่ามากกว่าหน่วยแรงตึงฉากในแนวนอน (σ_3) ระนาบ AB คือระนาบที่เอียงทำมุม θ กับระนาบที่หน่วย



รูปที่ 5.3 หน่วยแรงตั้งฉากและหน่วยแรงเฉือนบนระนาบเอียง
กรณีมีเฉพาะหน่วยแรงตั้งฉากกระทำ

แรง σ_1 กระทำ โดยบนระนาบ AB จะมีหน่วยแรงตั้งฉาก σ_θ และหน่วยแรงเฉือน τ_θ กระทำร่วมกัน อยู่ หากกำหนดให้มวลดินมีความยาวด้านละ 1 หน่วยจะได้

$$AB = 1 / \cos \theta$$

$$AC = 1 \cdot \tan \theta$$

กำหนดให้ F_n คือ แรงที่กระทำตั้งฉากบนระนาบ AB ซึ่งมีค่า

$$F_n = (\sigma_1 \times 1 \times 1) \cdot \cos \theta + (\sigma_3 \times 1 \times 1 \cdot \tan \theta) \cdot \sin \theta$$

$$= \sigma_1 \cdot \cos \theta + \sigma_3 \cdot \tan \theta \cdot \sin \theta$$

ในทำนองเดียวกันสามารถหาค่า F_s ซึ่งคือแรงกระทำเฉือนบนระนาบ AB ได้จาก

$$F_s = (\sigma_1 \times 1 \times 1) \cdot \sin \theta - (\sigma_3 \times 1 \times 1 \cdot \tan \theta) \cdot \cos \theta$$

$$= \sigma_1 \cdot \sin \theta - \sigma_3 \cdot \tan \theta \cdot \cos \theta$$

ดังนั้น หน่วยแรงตั้งฉากบนระนาบ AB จะสามารถหาได้จากสมการ

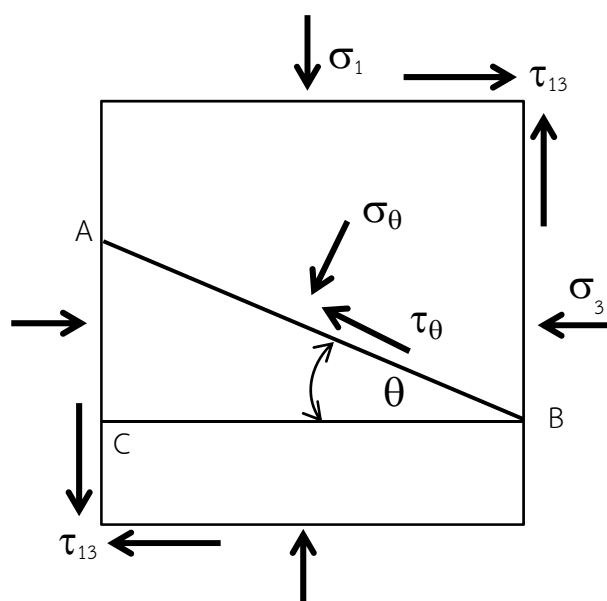
$$\begin{aligned}
 \sigma_{\theta} &= F_n / AB \\
 &= (\sigma_1 \cdot \cos \theta + \sigma_3 \cdot \tan \theta \cdot \sin \theta) \cdot \cos \theta \\
 &= \sigma_1 \cdot \cos^2 \theta + \sigma_3 \cdot \sin^2 \theta \\
 &= \sigma_1 \cdot \cos^2 \theta + \sigma_3 \cdot (1 - \cos^2 \theta) \\
 &= \sigma_1 \cdot \cos^2 \theta - \sigma_3 \cdot \cos^2 \theta + \sigma_3 \\
 &= (\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \cos^2 \theta + \sigma_3 \\
 &= (\sigma_1 - \sigma_3) \cdot [(\cos 2\theta + 1) / 2] + \sigma_3 \\
 \sigma_{\theta} &= (\sigma_1 + \sigma_3) / 2 + [(\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \cos 2\theta] / 2
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

ในทำนองเดียวกันหน่วยแรงเฉือนบนระนาบ AB สามารถหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned}
 \tau_{\theta} &= F_s / AB \\
 &= (\sigma_1 \cdot \sin \theta - \sigma_3 \cdot \tan \theta \cdot \cos \theta) \cdot \cos \theta \\
 &= \sigma_1 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta - \sigma_3 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \\
 &= (\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \\
 \tau_{\theta} &= [(\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \sin 2\theta] / 2
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ 5.2 และ 5.3 สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ค่าหน่วยแรงตั้งฉากมากที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อ $\cos 2\theta$ มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งเท่ากับ $\cos 0^\circ$ ดังนั้นมุม θ มีค่าเท่ากับ 0°



รูปที่ 5.4 หน่วยแรงตั้งฉากและหน่วยแรงเฉือนบนระนาบเอียง
กรณีมีทั้งหน่วยแรงตั้งฉากและหน่วยแรงเฉือนกระทำ

2. ค่าหน่วยแรงเฉือนที่มากที่สุดจะเกิดขึ้นได้เมื่อ $\sin 2\theta$ มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งเท่ากับ $\sin 90^\circ$ ดังนั้นมุม 2θ มีค่าเท่ากับ 90° หรือ θ มีค่า 45° นั่นเอง

ในกรณีที่มวลดินมีหน่วยแรงเฉือนมากกระทำร่วมด้วยดังแสดงในรูปที่ 5.4 ค่าหน่วยแรงตั้งฉากและหน่วยแรงเฉือนบนระนาบที่เอียง θ จากระนาบที่หน่วยแรง σ_1 กระทำสามารถหาได้จากสมการ

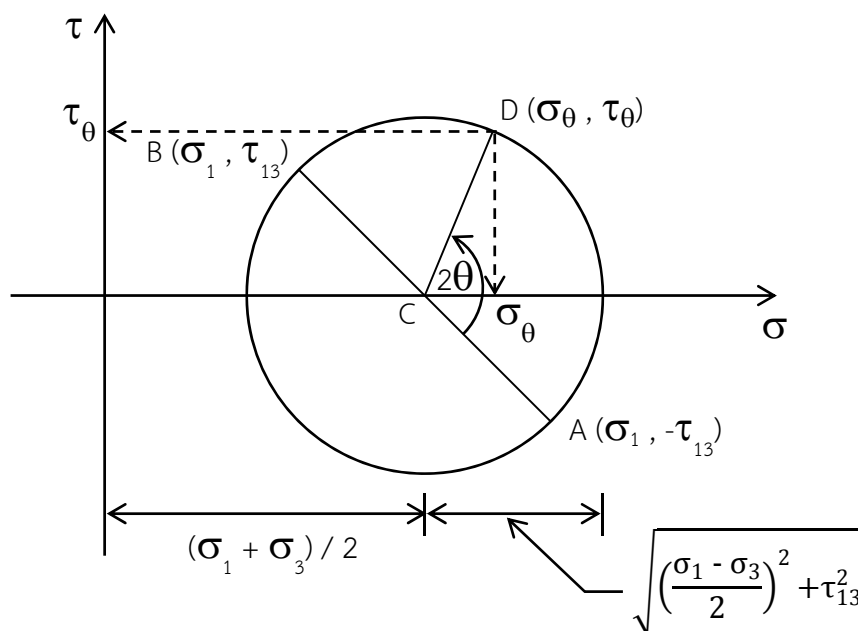
$$\sigma_\theta = (\sigma_1 + \sigma_3) / 2 + [(\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \cos 2\theta] / 2 - \tau_{13} \cdot \sin 2\theta \quad (5.2)$$

และ

$$\tau_\theta = [(\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \sin 2\theta] / 2 - \tau_{13} \cdot \cos 2\theta \quad (5.3)$$

5.3 วงกลม Mohr (Mohr's Circle)

วงกลม Mohr เป็นวิธีการหาค่าหน่วยแรงตั้งฉากและหน่วยแรงเฉือนบนระนาบต่างๆ โดยวิธีการวาดรูป โดยกำหนดให้แกนในแนวนอน (แกน x) เป็นค่าหน่วยแรงตั้งฉากและแกนตั้ง (แกน y) เป็นค่าหน่วยแรงเฉือน ดังแสดงในรูปที่ 5.5 ดังนั้นจุดต่างๆ บนเส้นวงกลมจะเป็นค่าหน่วยแรงตั้งฉากและหน่วยแรงเฉือนบนระนาบต่างๆ



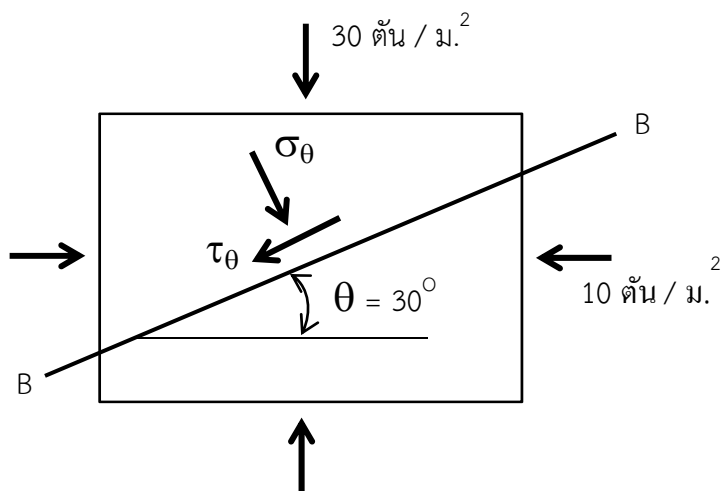
รูปที่ 5.5 วงกลม Mohr

การกำหนดเครื่องหมายบวกลบสำหรับการวาดวงกลม Mohr จะกำหนดให้หน่วยแรงตั้งฉากที่เป็นหน่วยแรงอัดมีค่าเป็นบวกและหน่วยแรงเฉือนที่ทำให้วัตถุหมุนทวนเข็มนาฬิกามีค่าเป็นบวก สำหรับการวัดมุม θ จะมีค่าเป็นบวกในกรณีที่วัตถุหมุนทวนเข็มนาฬิกา

ขั้นตอนการวาดรูปวงกลม Mohr สามารถทำได้ดังนี้

1. กำหนดจุดหน่วยแรงตั้งฉากและหน่วยแรงเฉือนบนระนาบ 2 ระนาบ ในกรณีนี้กำหนดจุด A มีค่าพิกัด $(\sigma_1, -\tau_{13})$ และจุด B มีค่าพิกัด (σ_3, τ_{13})
2. ลากเส้นตรงเชื่อมต่อระหว่างจุด A และจุด B จะได้จุดตัดแกนนอนที่จุด C จากนั้นใช้จุด C เป็นจุดศูนย์กลางของวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับ CA หรือ CB แล้ววาดวงกลม Mohr
3. หากต้องการทราบค่าหน่วยแรงที่ระนาบเอียงทำมุม θ ใดๆ กับระนาบ A ให้วัดมุมเป็นจากแนว CA เท่ากับ 2θ จะได้จุด D ซึ่งสามารถอ่านค่าหน่วยแรงตั้งฉากจากแกนนอนและหน่วยแรงเฉือนจากแกนตั้ง

ตัวอย่างที่ 5.1 มวลดินมีหน่วยแรงกระทำดังแสดงในรูปข้างล่าง จงหาค่าหน่วยแรงตั้งฉากและหน่วยแรงเฉือนบนระนาบ A – A โดยวาดวงกลม Mohr



วิธีทำ

1. กำหนดจุดหน่วยแรงตั้งฉากและหน่วยแรงเฉือนบนระนาบ 2 ระนาบ ในกรณีนี้กำหนดจุด A มีค่าพิกัด (30 , 0) และจุด B มีค่าพิกัด (10 , 0)

2. ลากเส้นตรงเชื่อมต่อระหว่างจุด A และจุด B จะได้จุดตัดแกนอนที่จุด C จากนั้นใช้จุด C เป็นจุดศูนย์กลางของวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับ $\sqrt{\left(\frac{30-10}{2}\right)^2 + 0^2} = 10$ แล้ววาดวงกลม Mohr จะได้ดังรูป

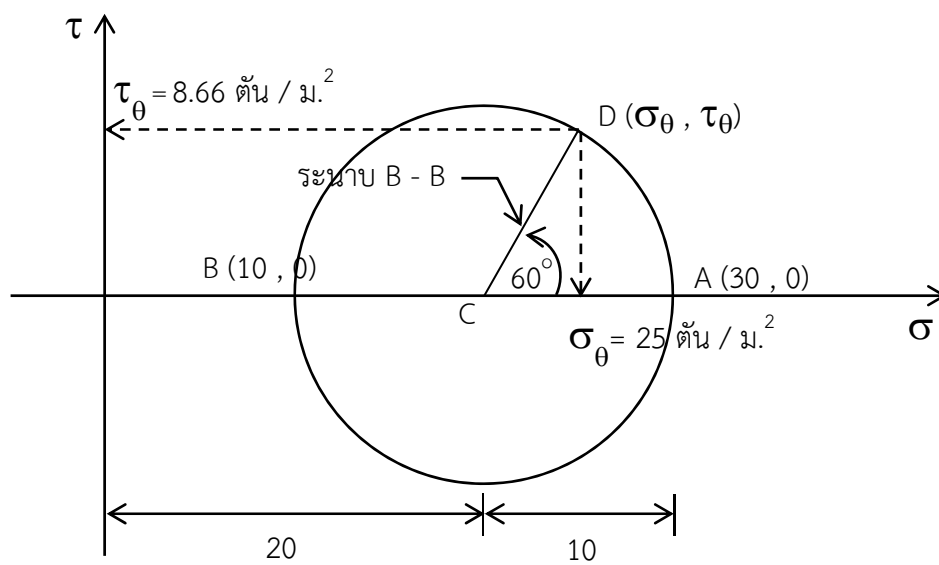
3. วาดระนาบ B – B โดยวัดมุมจากระนาบที่หน่วยแรง 30 ตัน / ม.² กระทำไปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาเป็นมุม 60° ($2 \times 30^\circ$) แล้วอ่านหรือคำนวณค่าหน่วยแรงตั้งฉากและหน่วยแรงเฉือนจะได้

$$\sigma_\theta = 20 + 10 \cdot \cos 60^\circ$$

$$= 20 + (10) \cdot (0.5)$$

$$\sigma_\theta = 25 \text{ ตัน / ม.}^2$$

ตอบ



$$\tau_\theta = 10 \cdot \sin 60^\circ$$

$$= (10) \cdot (0.866)$$

$$\tau_\theta = 8.66 \text{ ตัน / ม.}^2$$

ตอบ