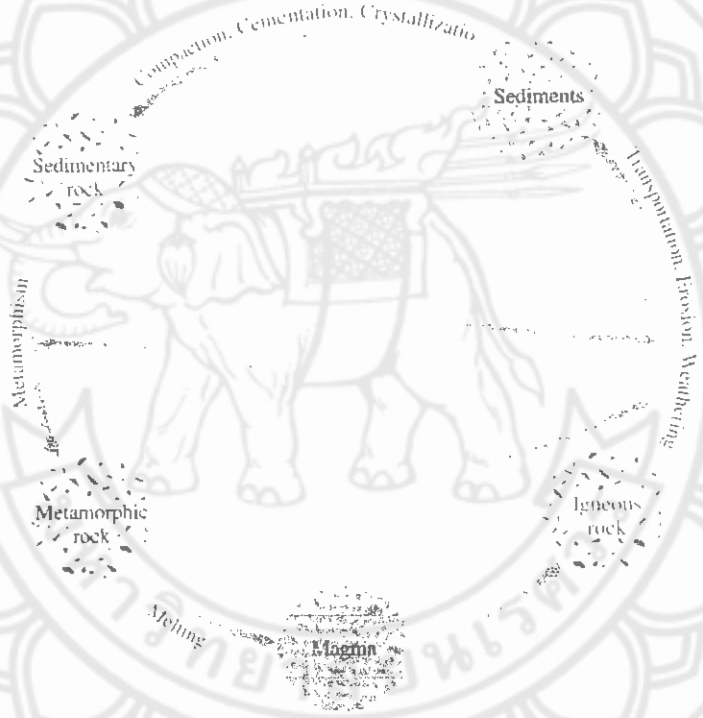
บทที่ 5
คุณสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของดิน
(Physical Properties of Soil)

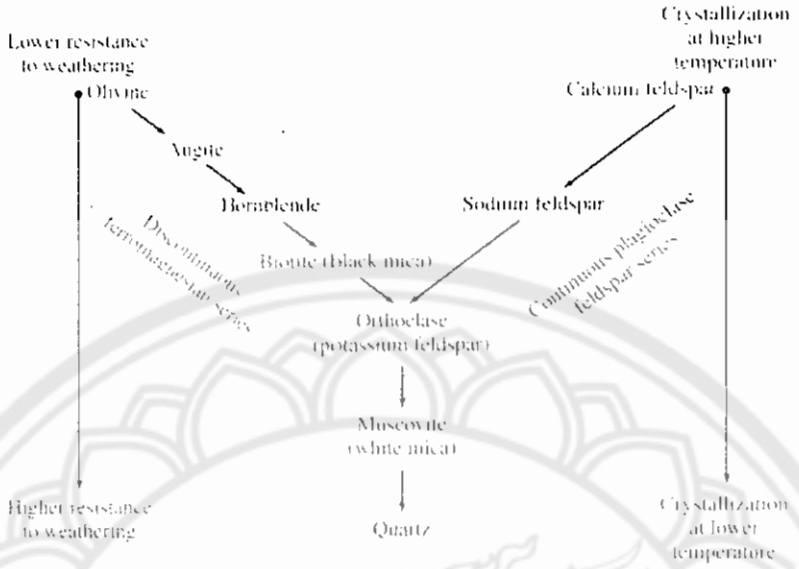
5.1 เนื้อหาโดยสรุป

5.1.1 ความหมายของดิน



รูปที่ 5.1 Rock cycle

จากรูปวัฏจักรของหิน (Rock Circle) นั้นจะเห็นได้ว่าหินเกิดจากการที่ภูเขาไฟระเบิด และพ่นหินละลายที่ร้อนแรงมากออกมาเราเรียกของเหลวนี้ว่า Magma เมื่อแมกม่าเย็นตัวและจับตัวเป็นก้อนกลายเป็นหินอัคนี (Igneous Rock) ซึ่งรูปร่างและลักษณะของเนื้อหินอัคนีจะแตกต่างกันออกไป ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวของแมกม่า เช่นส่วนที่ลึกลงไปจากผิวโลกมากๆ อัตราการเย็นตัวเป็นไปได้น้อยมากทำให้มีผลึกของแร่ธาตุต่างๆ เข้าไปรวมอยู่ด้วยจึงมีลักษณะเป็นเม็ดหยาบ ส่วนพวกที่เย็นตัวเร็วกว่าจะมีเนื้อละเอียดขึ้น จนถึงพวกที่ที่เย็นตัวอย่างรวดเร็วที่สุด จะมีเนื้อละเอียดมากจนมองดูคล้ายกระจกดังแสดงในรูปที่ 5.2 ซึ่งจะแบ่งให้เห็นว่าเมื่อเย็นตัวจากอุณหภูมิสูงๆ จนถึงอุณหภูมิต่ำๆ แร่ธาตุในหินอัคนีแต่ละอุณหภูมินั้นแตกต่างกันอย่างไร



จากรูปที่ 5.2 แสดงถึงลำดับการตกผลึกของแร่ตามทฤษฎีของ Bowen

ส่วนประกอบทางเคมีของธาตุแต่ละชนิดที่เย็นตัวต่างอุณหภูมิกันได้ตามตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ส่วนประกอบของแร่ที่แสดงในแผนภาพของ Bowen

Mineral	Composition
Olivine	$(Mg, Fe)_2SiO_4$
Augite	$Ca, Na(Mg, Fe, Al)(Al, Si_2O_6)$
Hornblende	Complex ferromagnesian silicate of Ca, Na, Mg, Ti, and Al
Biotite (black mica)	$K(Mg, Fe)_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$
Plagioclase — calcium feldspar	$Ca(Al_2Si_2O_8)$
Plagioclase — sodium feldspar	$Na(AlSi_3O_8)$
Orthoclase (potassium feldspar)	$K(AlSi_3O_8)$
Muscovite (white mica)	$KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$
Quartz	SiO_2

เมื่อหินอัคนีถูกอิทธิพลจากดินฟ้าอากาศ (Weathering) ก็จะเกิดการผุกร่อน (Erosion) และแตกกระจัดกระจาย (Transportation) ออกไปเป็นตะกอน (Sediments) โดยส่วนที่ละเอียดกว่าก็จะถูกนำพาไปได้ไกลกว่าส่วนที่ใหญ่และหนักกว่า ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่า บริเวณใกล้ภูเขามักจะเต็มไปด้วยก้อนหิน กรวด และทราย ส่วนในบริเวณห่างออกไปนั้นจะเป็นทรายเม็ดป่น (Silt) และดินเหนียว (clay) เมื่อนานไปเข้าตะกอนพวกนี้จะถูกบดอัด (Compaction) จนเกิดการประสาน (Cementation) จนเย็นตัวจนตกเป็นผลึก (Crystallization) กลายเป็นหินชั้น (Sedimentary Rock) อย่างไรก็ตามอิทธิพลจากดินฟ้าอากาศนี้ก็จะสามารถทำให้สิ่งที่ทับถมและหินชั้นกลับผุกร่อนขึ้นมาอีกก็ได้ การเปลี่ยนแปลงทางเคมี ความกดดันทางธรรมชาติ หรือความร้อนต่างๆ

(Metamorphism) ก็จะทำให้หินชั้นกลายเป็นหินแปร (Metamorphic Rock) และเมื่อหินแปรถูกความร้อนจนละลายก็จะมีสภาพกลับกลายมาเป็นแมกม่าได้

อนึ่งจากหินอัคนี (Igneous rock) เมื่อถูกความกดดันทางธรรมชาติและความร้อน (Metamorphism) ก็สามารถกลายเป็นหินแปรได้เลยโดยไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการบดอัด การประสาน และการตกผลึก และเมื่อถูกอิทธิพลของดินฟ้าอากาศก็จะเกิดการผุกร่อนขึ้นใหม่ได้ กลับไปกลับมาอีกได้ดังแสดงตาม Rock cycle ตามรูปที่ 5.1

เมื่อเราทราบถึงวัฏจักรของหินต้นกำเนิดของดิน เราก็ได้ทราบว่าดินเกิดจากการสลายตัวผุกร่อนของหินต่างๆ ดังกล่าวมาแล้ว โดยขบวนการธรรมชาติทั้งจากอิทธิพลของดินฟ้าอากาศ ความกดดันและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีแล้วถูกย้ายนำไปจากตะกอนทับถมกันในที่ต่างๆ พวกที่เป็นก้อนเป็นผลึกจะตกตะกอนสะสมอยู่เหนือหินแม่ (Residual soil) พวกที่มีขนาดเล็กกว่าจะถูกพัดพาโดยน้ำ ธารน้ำแข็ง และลมไปตกตะกอนจนสะสมในที่ต่างๆ เรียกว่า Transported soil เช่นในทะเลทราย มหาสมุทร แม่น้ำ รวมถึงบนบก ทำให้มีชื่อเรียกต่างๆ กันตามแบบการพัดหรือสถานที่เกิดการตกตะกอน เช่น ดินทะเลสาบ (Lacustrine) ดินสมุทร (Marine) ดินตะกอนแม่น้ำ (Alluvial) ดินชายเลน (Colluvial) ดินธารน้ำแข็ง (Glacial) และดินลม (Aeolian) แต่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางธรรมชาติเกิดขึ้นตลอดเวลา การสลายตัวผุกร่อนจึงไม่มีวันสิ้นสุด การตกตะกอนทับถมกันจึงเกิดขึ้นตลอดเวลา ทำให้คุณสมบัติของดินในแต่ละแห่งไม่ค่อยเหมือนกัน และชั้นดินแต่ละชั้นแตกต่างกันไปดินชั้นล่างๆ มักจะเป็นและมีความแน่นตัวกว่าดินชั้นบนถัดขึ้นมา

ดินบางชนิดอาจเกิดจากการสลายตัวของพืชและสัตว์ที่ล้มตายหรือทับถมกันเป็นเวลานานก็ได้ แต่ดินประเภทนี้จะมีสารอินทรีย์สูงและมีหน่วยน้ำหนักต่ำ (Unit Weight) ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้งานได้ด้านวิศวกรรม

จากที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า "ดินมีต้นกำเนิดมาจากหินโดยหินนั้นก่อนเกิดมาเป็นดินได้ผ่านกระบวนการต่างๆ โดยอาศัยธรรมชาติ ความร้อน และส่วนประกอบต่างๆจากนั้นเกิดการพัดพาไปตกตะกอนในที่ต่างๆ จึงเกิดมาเป็นดินขึ้น"

5.1.2 ขนาดอนุภาคของเม็ดดิน (Soil Particle Size)

โดยเม็ดดินที่เกิดจากหินมีหลายขนาด ตั้งแต่ขนาดหยาบ (Coarse grained) เช่นพวกหินกรวด และทราย จนถึงขนาดละเอียด (Fine grained) เช่น พวกตะกอนทราย ดินเหนียว และพวกแขวนลอย (Colloids) โดยขนาดของเม็ดดินเหล่านี้ แต่ละสถาบันจะกำหนด Code ขึ้นมาและใช้เป็นมาตรฐานซึ่งจะแตกต่างกันออกไป ดังแสดงตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.2 การแบ่งขนาดอนุภาคของเม็ดดิน (Particle-Size Classifications)

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

Note: Sieve openings of 4.75 mm are found on a U.S. No. 4 sieve; 2-mm openings on a U.S. No. 10 sieve; 0.075-mm openings on a U.S. No. 200 sieve. See Table 2.5.

จากตารางที่ 5.1 โดยทั่วไปดินเหนียวจะมีขนาดเล็กกว่า 0.002 mm. แต่ในช่วงที่ 0.002 - 0.005 mm. เท่านั้นที่ยังจะเรียกดินนี้ว่าดินเหนียวเพราะยังสามารถใช้หา Plasticity index ได้แต่ถ้าขนาดเล็กกว่า 0.005 mm. แล้วก็จะเรียกว่า Non-clay ซึ่งไม่สามารถหา Plasticity index ได้แต่ด้านขนาดเล็กกว่า 0.005 mm. แล้วก็จะเรียกว่า Non-clay ซึ่งไม่สามารถหา Plasticity index ได้

จากการจำแนกดินสามารถแบ่งดินออกได้เป็น 4 จำพวกคือ

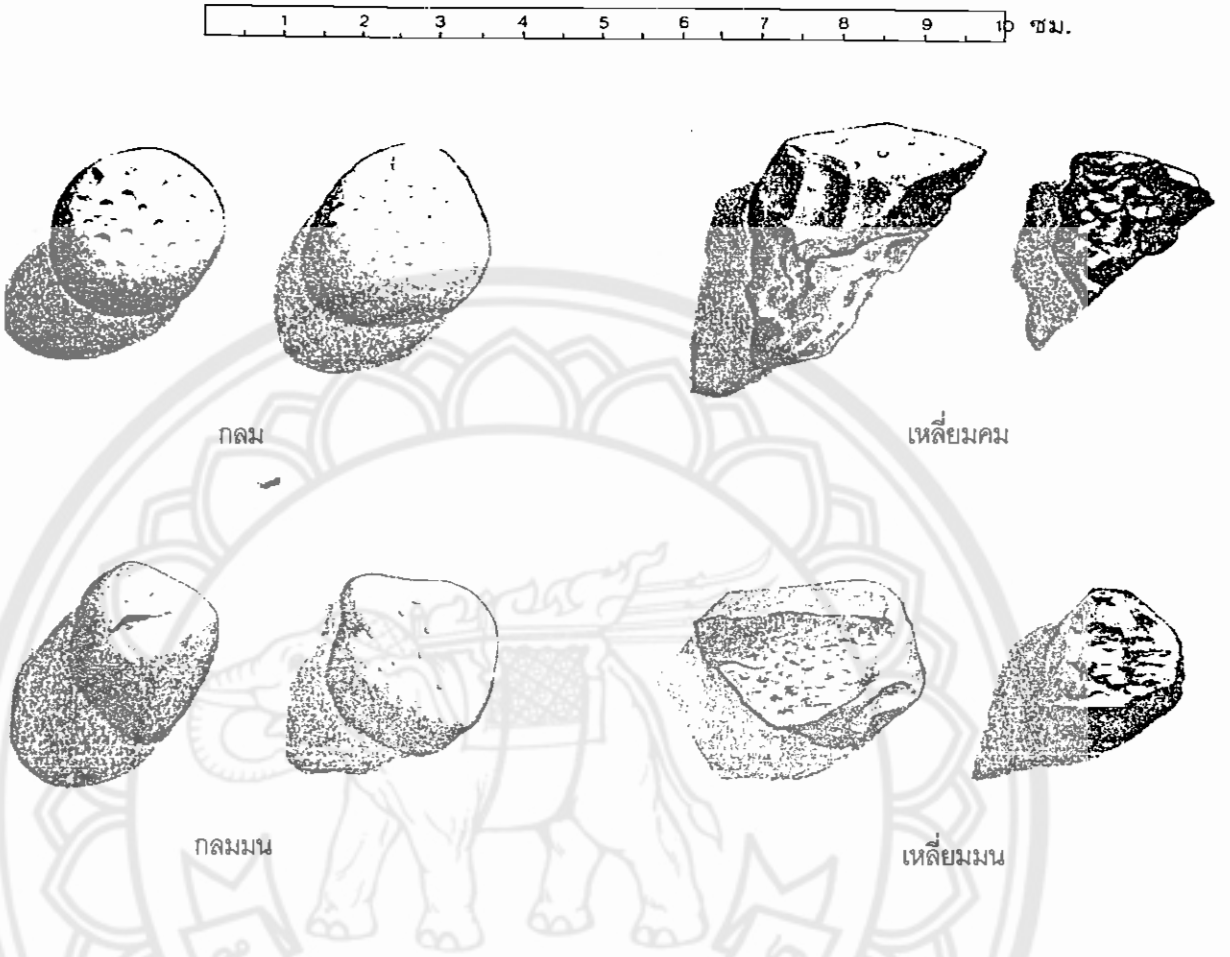
1. Gravel ประกอบไปด้วยแร่ธาตุ quartz, feldspar และ other minerals
2. Sand ประกอบไปด้วยแร่ธาตุ quartz, feldspar และ other minerals grains บางชนิด
3. Silts ประกอบไปด้วยแร่ธาตุ very-fine quartz, flake-shaped
4. Clays ประกอบไปด้วยแร่ธาตุ mostly flake-shaped, submicroscopic of Mica, clay minerals และ other minerals

5.1.3 รูปร่างของเม็ดดิน (Particle Shape)

รูปร่างของเม็ดดินนี้จะมีอิทธิพลทำให้คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของดินเปลี่ยนไป เช่นหน่วยน้ำหนัก (Unit weight) ความพรุน (Porosity) อัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio) โดยทั่วไปจะแบ่งดินออกเป็น 3 แบบดังต่อไปนี้

1. ดินเป็นเกล็ดหรือเมล็ด (Bulky หรือ Equidimonsion Particle)

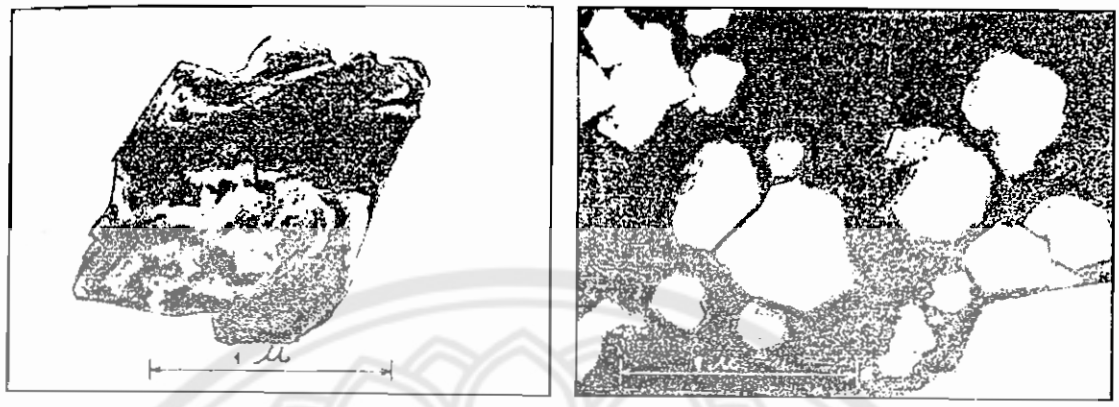
ดินมีลักษณะกลม (angular) กลมมน (Subangular) เหลี่ยมมน (Rounded) และเหลี่ยมคม (Subrounded) ได้แก่ดินพวกเม็ดหยาบเช่นกรวด ทราย ซึ่งประกอบด้วยแร่ธาตุพวก quartz และ feldspar ดินที่ประกอบด้วยรูปร่างของเม็ดดินชนิดนี้สามารถจะรับน้ำหนักได้มากและยุบตัวน้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้ารูปร่างเป็นแบบเหลี่ยมคม เพราะแรงสั่นสะเทือนและแรงกระแทกสามารถทำให้มันอัดตัวกันแน่นได้ง่ายดังแสดงดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 รูปร่างของเม็ดดินเป็นแบบก้อนหรือเป็นเมล็ด

2. เป็นแผ่นหรือเป็นเกล็ด (Flaky หรือ Plate-like particle)

มีลักษณะไม่เป็นทรงกลม (Very low sphericity) โดยจะมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ คล้ายใบไม้ได้แก่ดินพวกเม็ดละเอียด เช่น ตะกอนทราย ดินเหนียว ซึ่งประกอบด้วยแร่ธาตุพวก Mica และ Clay minerals บางชนิดเช่น Kadinite ดินที่ประกอบด้วยรูปร่างของเม็ดดินชนิดนี้จะถูกอัดและยุบตัวได้ง่ายภายใต้น้ำหนักคงที่ คล้ายใบไม้แห้งหรือกระดาษหลวมๆ ในตะกร้า แต่จะมั่นต่อแรงกระแทกหรือแรงสั่นสะเทือนมากกว่าดังแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 รูปร่างของเม็ดดินแบบเป็นแผ่นหรือเป็นเกล็ด

3. ดินที่มีรูปร่างเป็นเส้น (Needle-shaped particles)

ดินมีลักษณะยาวคล้ายเข็ม มีเนื้อละเอียด ได้แก่ดินเหนียว (Clay) ประกอบไปด้วยแร่ดินเหนียว (Clay minerals) พวกธาตุซิลิกอน และอลูมิเนียม เป็นส่วนใหญ่ อาจมีธาตุเหล็ก แคลเซียม โซเดียม โพแทสเซียม และแมกนีเซียมผสมอยู่บ้างเล็กน้อยรวมกันเป็นผลึก 3 กลุ่มใหญ่คือกลุ่ม Kaolinite กลุ่ม Montmorillonite และกลุ่ม Illite มีโครงสร้างเป็นแผ่น (Sheet structure)ประกอบขึ้นจากหน่วยพื้นฐานสองชนิดคือซิลิก้าเตตราฮีดรอนและอ๊อกตาฮัดรอลไฮด์ของ อลูมินั่ม (หรือของเหล็กหรือแมกนีเซียม) ดังแสดงดังรูปที่ 5.5

Halloysite

รูปที่ 5.5 รูปร่างของเม็ดดินแบบเป็นเส้น

5.1.4 **โครงสร้างของดิน** (Soil Structure)

โครงสร้างของดิน (Soil Structure) ก็คือการจัดเรียงตัวของเม็ดดิน นั่นคือนำดินที่มีรูปร่างแตกต่างกันในหัวข้อที่ผ่านมามาจัดเรียงตัวแล้วแบ่งแยกนั่นเอง โครงสร้างของดินตามธรรมชาติ จะเป็นผลมาจากแรงดึงดูดระหว่างการตกตะกอน แรงดึงดูดที่ผิวของเม็ดดิน และแรงดึงดูดของโลก ซึ่งจะขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเม็ดดิน รวมทั้งแร่ธาตุที่ประกอบกันเป็นเม็ดดิน ดังนั้นจึงมีผลต่อคุณสมบัติของดินเป็นอย่างมาก สามารถแบ่งได้ดังนี้

5.1.4.1 Structures in Cohesionless Soil (โครงสร้างในดินที่ไม่มีการยึดเหนี่ยว)

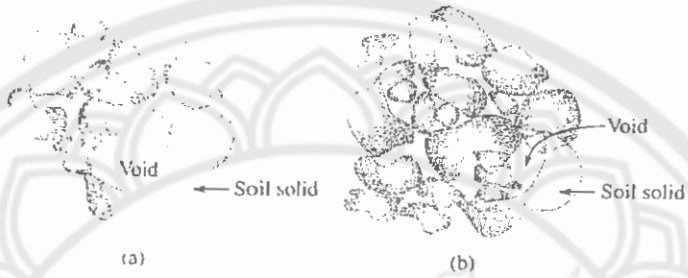
โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. **โครงสร้างแบบเม็ดเดี่ยว** (Single grained)

ส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างของทรายหรือตะกอนทรายที่มีอนุภาคใหญ่กว่า 0.05 mm. เม็ดดินพวกนี้เมื่อตกตะกอนทับถมกันจะเรียงต่อกันเป็นแบบเม็ดต่อเม็ดซ้อนกันอยู่ โดยปกติจะอยู่ใน

สภาพหลวมๆ เมื่อรับน้ำหนักหรือการสั่นสะเทือน เม็ดดินเหล่านี้จะขยับตัวอยู่ในสภาพแน่น ดังนั้น การทรุดตัวจะเกิดขึ้นทันทีที่ได้รับน้ำหนัก และการทรุดตัวต่อไปจะมีน้อยมากหลังจากรับน้ำหนัก

โครงสร้างแบบเม็ดเดี่ยวนี้สามารถแบ่งได้ดีกว่ามีการจัดเรียงตัวแบบหลวม (Loose) หรือแน่น (Dense) ดังแสดงตามรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 โครงสร้างเม็ดเดี่ยว (a) หลวม (b) แน่น

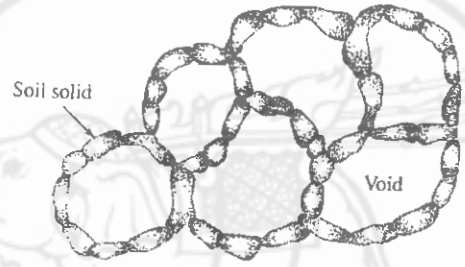
ซึ่งจากการเรียงตัวแบบแน่นหรือหลวมจะทำให้อัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio) ของโครงสร้างของดินชนิดนี้จะมีค่าต่างๆ กัน ขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดเรียงตัวกันของเม็ดดินว่าอยู่ในสภาพใด โดยถ้าการจัดเรียงตัวแบบหลวมค่า Void ratio จะมาก แต่ถ้าอยู่ในสภาพแน่นค่า Void ratio น้อย ดังแสดงในตาราง 5.3

ชนิดของดิน	อัตราส่วนช่องว่าง (e)	
	มากที่สุด	น้อยที่สุด
กรวด	0.60	0.30
ทรายหยาบ หรือทรายที่มีขนาดคละกันดี	0.75	0.35
ทรายละเอียด	0.85	0.40
ทรายที่มีเม็ดขนาดเดียวกัน	0.85	0.50
ทราย Ottawa มาตรฐาน	0.80	0.50
ทรายที่มีกรวดปน	0.70	0.20
ทรายที่มีตะกอนทรายปน	1.00	0.40
กรวดและทรายที่มีตะกอนทรายปน	0.85	0.15
กรวดที่มีทรายและตะกอนทรายปนซึ่งมีขนาดคละกันดี	0.65	0.25
ทรายและตะกอนทรายพวก Mica	1.25	0.80

ตารางที่ 5.3 ค่าอัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio) ของดินพวก กรวด-ทราย

2. โครงสร้างแบบรวงผึ้ง (Honeycombed grained)

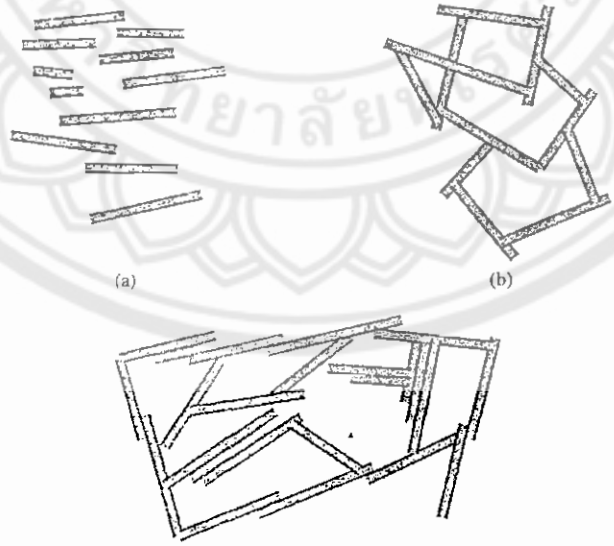
เป็นโครงสร้างของพวกตะกอนทรายที่มีขนาดเล็กกว่า 0.05 mm. เม็ดดินพวกนี้จะตกตะกอนและเกาะติดกันเป็นรูปโค้งและเกี่ยวกันเป็นวงติดต่อกันแบบรวงผึ้ง โครงสร้างแบบนี้จะมีอัตราส่วนช่องว่างสูงมาก และรับน้ำหนักได้จำกัด ถ้าน้ำหนักที่กระทำมากพอที่จะทำลายรูปร่างของเม็ดดินที่เกี่ยวกันนี้ได้ โครงสร้างของดินก็จะเปลี่ยนไปคล้ายกับเป็นโครงสร้างเม็ดเดี่ยว และอัตราส่วนช่องว่างก็จะลดลงอย่างมาก ดังนั้นอาคารที่ก่อสร้างบนโครงสร้างของดินชนิดนี้อาจจะพังทลายลงได้ เนื่องจากการลดลงของปริมาตรดินเมื่อโครงสร้างถูกทำลาย ทำให้เกิดการทรุด ตัวอย่างมากดังแสดงตามรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 โครงสร้างแบบรวงผึ้ง (Honeycombed structure)

5.1.4.2 Structure in Cohesive Soil (โครงสร้างในดินที่มีการยึดเหนี่ยว)

โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 โครงสร้างดินตะกอน (Sediment structure) (a) โครงสร้างแบบเป็นระเบียบ (b) โครงสร้างแบบระเกะระกะที่ไม่มีเกลือ (c) โครงสร้างเป็นแบบระเกะระกะที่มีเกลือ

1. **โครงสร้างแบบเป็นระเบียบ** (Dispersed structure)

เป็นโครงสร้างของดินพวกดินเหนียว ซึ่งเกิดจากการตกตะกอนในน้ำจืด แต่ผลลัพธ์จากประจุไฟฟ้าของดินทำให้เม็ดดินขณะตกตะกอนทับถมเกิดการจัดเรียงตัวเป็นแบบ Face-to-face **ได้เป็นโครงสร้างแบบเป็นระเบียบหรือเป็นโครงสร้างของดินเหนียวแบบระเกะระกะ** (Flocculation clay) ที่เมื่อถูกแรงหรือน้ำหนักกระทำก็จะเกิดการจัดเรียงใหม่เป็นโครงสร้างแบบเป็นระเบียบดัง**รูปที่** 5.8 (a)

2. โครงสร้างแบบระเกะระกะ (Flocculation Structure)

เป็นโครงสร้างของดินพวกดินเหนียว ซึ่งเกิดจากการตกตะกอนในน้ำเค็ม (น้ำทะเล) และผลลัพธ์จากประจุไฟฟ้าของเม็ดดินทำให้เมื่อเม็ดดินตกตะกอนและทับถมนั้นจัดเรียงตัวเป็นแบบ Edge-to-face เม็ดดินจะยึดตัวกันด้วยแรงดึงดูดระหว่างผิวที่จุดสัมผัสได้เป็นโครงสร้างแบบระเกะระกะดังรูปที่ 5.8 (b), (c) ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วโครงสร้างของดินชนิดนี้จะไม่ค่อยมั่นคง มีช่องว่างระหว่างเม็ดดินมาก เมื่อมีน้ำหนักมากระทำจุดสัมผัสอาจแตกหรือหลุด โครงสร้างบางส่วนจะถูกทำลายหรือเปลี่ยนไป ทำให้เกิดการยุบตัว ช่องว่างลดลงดินก็จะทรุดตัว

5.1.5 **ขนาดของเม็ดดิน** (Grain Size)

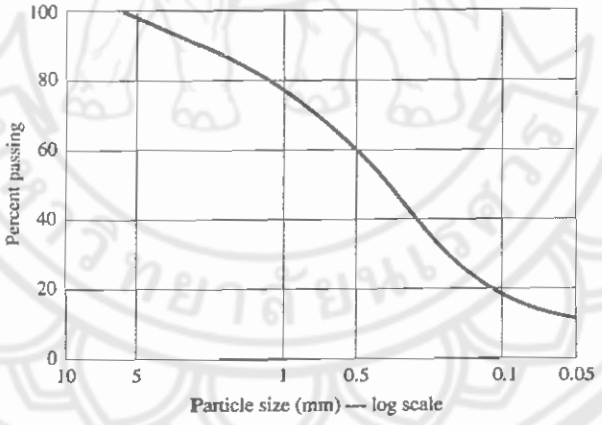
5.1.5.1 การหาขนาดของเม็ดดิน (Mechanical Analysis of soil)

1. วิธีร่อนด้วยตะแกรง (Sieve analysis)

วิธีนี้เหมาะสำหรับดินที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.075 mm. เช่น พวกกรวด ทราย เป็นต้น สามารถทำได้โดยการนำดินที่ต้องการหาขนาดใส่ลงไปในตะแกรงมาตรฐาน โดยตะแกรงร่อนมีหลายขนาดตามตารางที่ 5.4 โดยขนาดใหญ่ที่สุดจะมีเส้นผ่าศูนย์กลาง = 4.75 mm. (Sieve no. # 4) **และขนาดเล็กสุดจะมีเส้นผ่าศูนย์กลาง = 0.075 mm. (Sieve no. # 200) ซึ่งจะจัดให้ขนาดใหญ่ที่สุดอยู่ข้างบนและขนาดเล็กสุดอยู่ด้านล่าง (สามารถดูวิธีการทดลองในส่วนการทดลอง)**

Sieve no.	Opening (mm)
4	4.75
5	4.00
6	3.35
7	2.80
8	2.36
10	2.00
12	1.70
14	1.40
16	1.18
18	1.00
20	0.850
25	0.710
30	0.600
35	0.500
40	0.425
50	0.355
60	0.250
70	0.212
80	0.180
100	0.150
120	0.125
140	0.106
170	0.090
200	0.075
270	0.053

ตารางที่ 5.4 ขนาดของตะแกรงในอเมริกา (U.S. Standard Sieve Size)



กราฟแสดงการกระจายตัวของเม็ดดิน (Particle-size distribution curve)

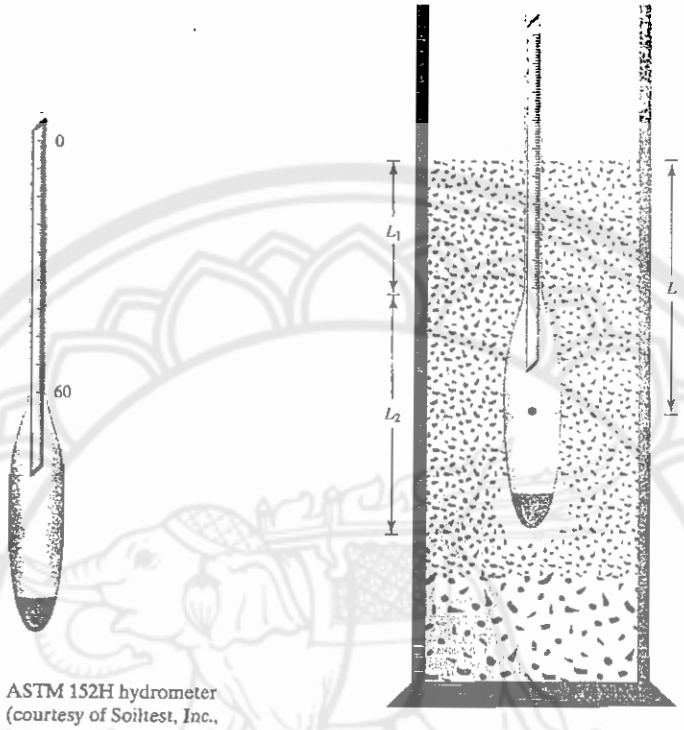
2. วิธีตกตะกอน (Hydrometer Analysis)

วิธีนี้เหมาะสำหรับพวกเม็ดละเอียด ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 0.075 mm. **ลงไป ทำได้โดยนำดินที่ต้องการหาขนาดมาละลายน้ำแล้วใส่ลงไปในหลอดแก้ว ให้เม็ดดิน** (ตะกอน) **กระจัดกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในน้ำแล้วใช้ไฮโดรมิเตอร์วัดอัตราการตกตะกอน หรือวัดความต่างจำเพาะของ**

ป
TA
710
ว2560
2547

สำนักหอสมุด
พ.ย. 2548
4840086

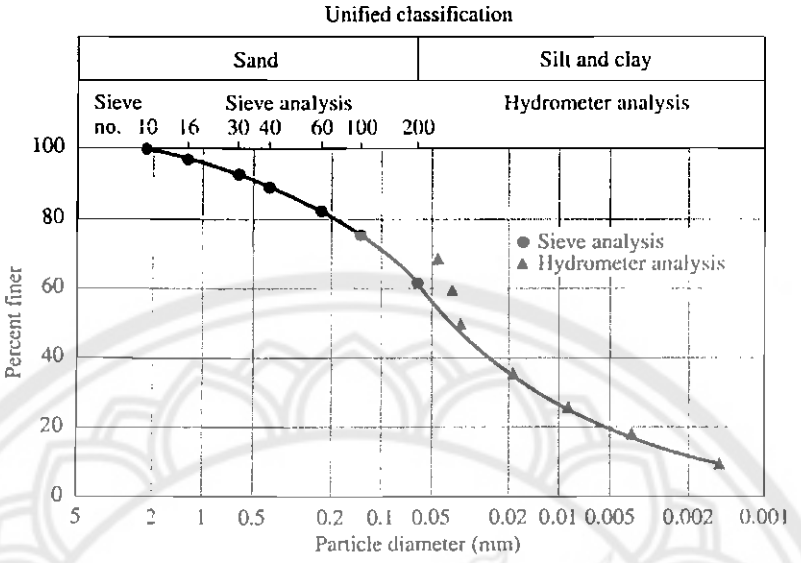
เม็ดดินที่ละลายแขวนลอยอยู่ในน้ำที่ความลึก (L) ในช่วงเวลา (t) ต่างๆ ดังรูปที่ 5.9 โดยใช้หลัก Stakes' law



ASTM 152H hydrometer
(courtesy of Soiltest, Inc.,
Lake Bluff, Illinois)

รูปที่ 5.9 แสดง Hydrometer ที่ใช้ในการทดลอง

เมื่อเสร็จสิ้นจาก Hydrometer Analysis แล้วก็นำค่าของขนาดเม็ดดิน ที่หาได้มา Plot ลงในกราฟ semi-log ลงต่อจากการหาขนาดของเม็ดดินด้วยใช้ Sieve Analysis ซึ่งจะเรียกว่า "Particle-size distribution curve-sieve analysis and hydrometer analysis" ตามรูปแสดงดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 กราฟการกระจายตัวของเม็ดดินซึ่งแสดงผลจากวิธีร่อนด้วยตะแกรงกับวิธีการตกตะกอน

5.1.5.2 การกระจายตัวของเม็ดดิน (Particle-size Distribution)

จาก Particle-size distribution curve สามารถหาตัวแปร 4 ตัวแปรจากดินได้ดังต่อไปนี้

1. Effective size (D_{10})

หาได้จากขนาดของเม็ดดินที่ 10% finer ซึ่งจะเรียกว่า "ขนาดประสิทธิผล" ซึ่งขนาดที่หาได้นี้จะสามารถนำไปประมาณหาค่า Hydraulic conductivity และ Drainage ซึ่งจะกล่าวต่อไป

2. Uniformity coefficient (C_u)

สามารถหาได้จากสมการ

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \qquad \text{(สมการที่ 5.8)}$$

โดยที่ D_{60}= หาได้จากขนาดของเม็ดดินที่ 60 % finer

3. Coefficient of gradation (C_z)

สามารถหาได้จากสมการ

$$C_z = \frac{D_{30}^2}{D_{10}D_{60}} \qquad \text{(สมการที่ 5.9)}$$

โดยที่ D_{30}= หาได้จากขนาดของเม็ดดินที่ 30 % finer

4. Sorthing coefficient (S_o)

สามารถหาได้จากสมการ

$$S_0 = \sqrt{\frac{D_{75}}{D_{25}}} \qquad \text{(สมการที่ 5.10)}$$

โดยที่ D_{75}= หาได้จากขนาดของเม็ดดินที่ 75 % finer

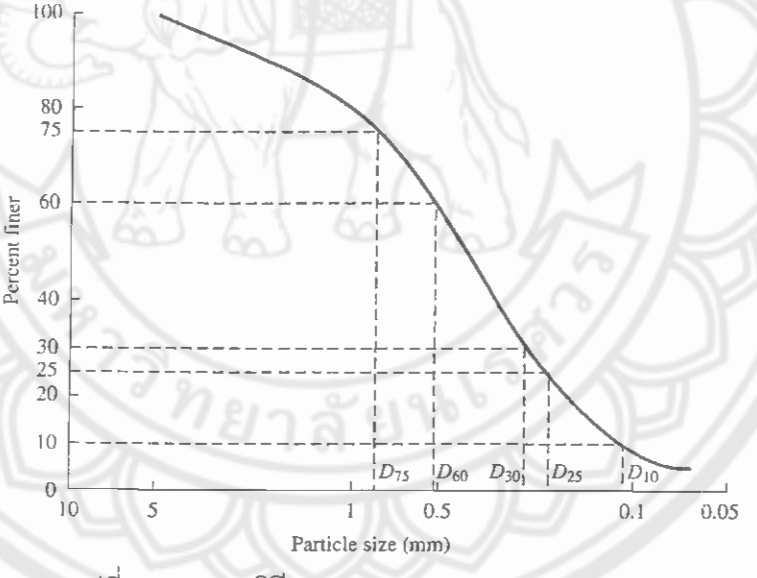
D_{25}= หาได้จากขนาดของเม็ดดินที่ 25 % finer

จากพารามิเตอร์ทั้ง 4 สามารถสรุปถึงลักษณะของดินที่มีขนาดคละกันดีได้ตามตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ของดินที่หาได้จากกราฟการกระจายตัวของเม็ดดิน

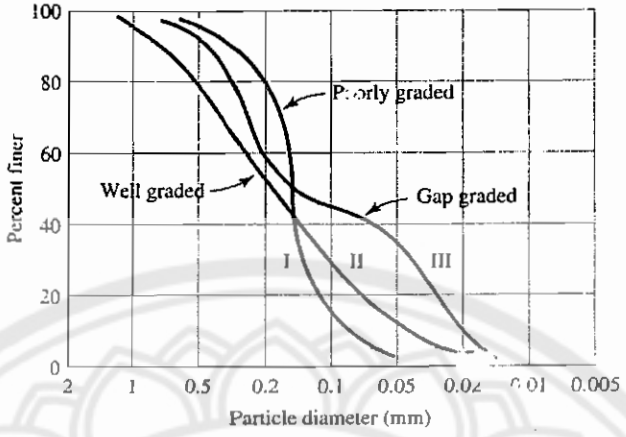
ชนิดของดิน	C_u	C_z
Gravel	> 4.00	1 – 3
Sand	> 6.00	1 – 3

ซึ่งพารามิเตอร์ทั้ง 4 สามารถแสดงการหา D ที่จุดต่างๆ ได้ตามรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 แสดงวิธีการหา D_{75},D_{60},D_{30},D_{25} และ D_{10}

และจาก particle-size distribution curve สามารถจะทำนายการกระจายตัวของดินอย่างคร่าวๆ ได้ ตามรูปที่ 5.12 ซึ่งสามารถบอกการกระจายตัวของดินอย่างคร่าวๆ ได้



รูปที่ 5.12 ความแตกต่างของกราฟการกระจายตัวของเม็ดดิน

(Different types of partical-size distribution curves)

5.1.6 ความถ่วงจำเพาะของดิน (Specific gravity of Soil)

ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) สามารถให้คำจำกัดความได้คือ "หน่วยน้ำหนักของวัสดุชนิดใดชนิดหนึ่งเทียบกับหน่วยน้ำหนักของน้ำ" ซึ่งความถ่วงจำเพาะนี้ใช้มากในการคำนวณด้านปฐพีกลศาสตร์ ซึ่งสามารถหาได้ถูกต้องแม่นยำที่สุดจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยตารางที่ 5.6 แสดงถึงค่าความถ่วงจำเพาะในวัสดุหรือแร่ทั่วๆ ไปเช่น ควอทซ์ เป็นต้น

ตารางที่ 5.6 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะของแร่พื้นฐาน (Specific Gravity of Common Minerals)

Mineral	Specific gravity, G_s
Quartz	2.65
Kaolinite	2.6
Illite	2.8
Montmorillonite	2.65–2.80
Halloysite	2.0–2.55
Potassium feldspar	2.57
Sodium and calcium feldspar	2.62–2.76
Chlorite	2.6–2.9
Biotite	2.8–3.2
Muscovite	2.76–3.1
Hornblende	3.0–3.47
Limonite	3.6–4.0
Olivine	3.27–3.7

จากตารางค่าที่มากที่สุดจะอยู่ในช่วงประมาณ 2.6-2.9 และค่าความถ่วงจำเพาะของพวกทรายที่มีส่วนประกอบของ Quartz จะประมาณได้คือประมาณ 2.65 นั่นเอง และค่าความถ่วงจำเพาะสำหรับดินเหนียว (clay) จะอยู่ประมาณ 2.6-2.9 นั่นเอง

5.1.6.1 ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific gravity of solid particles)

ค่านี้จากห้องปฏิบัติการเราจะสามารถหาได้แค่ค่า unit weight ของดินหรือน้ำเท่านั้นดังนั้นจึงต้องมีสมการในการหาค่าความถ่วงจำเพาะดังต่อไปนี้

$$G_s = \frac{\text{น้ำหนักหรือมวลของเม็ดดิน}}{\text{น้ำหนักหรือมวลของน้ำที่มีปริมาตรเท่าเม็ดดิน}} = \frac{\text{หน่วยน้ำหนักของดิน}}{\text{หน่วยน้ำหนักของน้ำ}}$$

$$= \frac{W_s \text{ or } M_s}{V_s(\gamma_w \text{ or } \rho_w)} = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

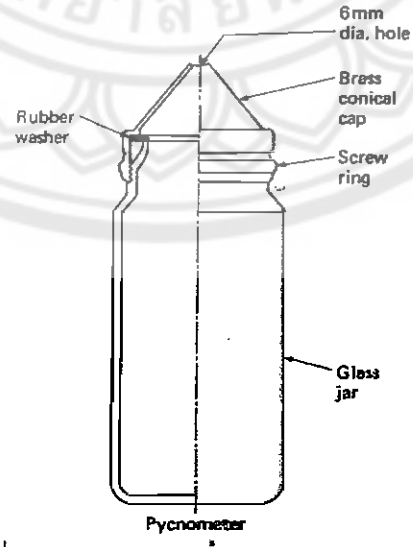
โดยที่ ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำ $= \frac{M_w}{V_w} = 1000 \text{ kg/m}^3$

γ_w = หน่วยน้ำหนักของน้ำ $= \frac{W_w}{V_w} = 9.81 \text{ kn/m}^3$

Summary

$$G_s = \frac{\gamma_s\left(kn/m^3\right)}{9.81} \qquad \text{(สมการที่ 5.11)}$$

ในห้องปฏิบัติการสามารถหาค่าความถ่วงจำเพาะได้จาก Pycnometer ซึ่งประกอบไปด้วยเหยือกขนาด 1 ลิตร และประกอบไปด้วยเครื่องมือเกี่ยวกับการเขย่า ดังแสดงในรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 แสดงถึงเครื่องมือ Pycnometer

โดยปากขวดที่เล็กนั้นเพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศในการทดลองหาค่าน้ำหนักน้ำที่มาปริมาตรเท่ากับเนื้อดินซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะของดินที่หาได้นี้จะสามารถนำไปคำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆ ได้คือ 1. ปริมาตรช่องว่างของดิน (Void volume), 2. ความอิ่มตัว (Degree of saturation), 3. ความพรุน (Porosity) และอื่นๆ ได้อีกทั้งยังสามารถคาดการณ์ได้ว่าดินชนิดนี้มีธาตุใดเป็นส่วนประกอบโดยดูจากตารางที่ 5.6

5.1.7 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักและปริมาตรในส่วนประกอบของดิน (Weight-Volume Relationships)

ในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องรู้สัดส่วนโดยมวลหรือปริมาตรของส่วนประกอบต่างๆของดิน ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ จึงมีการจำลองส่วนประกอบของดิน 3 ส่วน (Three-phase diagram) เพื่อที่สามารถใช้นำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างมวล (Mass) และปริมาตร (Volume) ของส่วนที่เป็นของแข็ง (Solid), น้ำ (Water) และอากาศ (air) ที่ประกอบกันขึ้นเป็นเนื้อดินนั่นเอง

จากรูปที่ 5.17 แสดงให้เห็นถึงส่วนประกอบของดินในรูปของปริมาตร (V) และมวล (W) ซึ่งสามารถจำลองแผนภาพได้ออกมาเป็น 3 ส่วน (Three-phase Diagram) นั่นก็คือของแข็ง, น้ำ และอากาศ จากแผนภาพนี้สามารถหามวลและปริมาตรได้ดังนี้

1. ปริมาตรรวม (Total Volume)

$$V = V_s + V_v = V_s + V_w + V_a \qquad \text{(สมการที่ 5.12)}$$

โดยที่ V_s = Volume of soil solids

V_v = Volume of voids

V_w = Volume of water in the voids

V_a = Volume of air in the voids

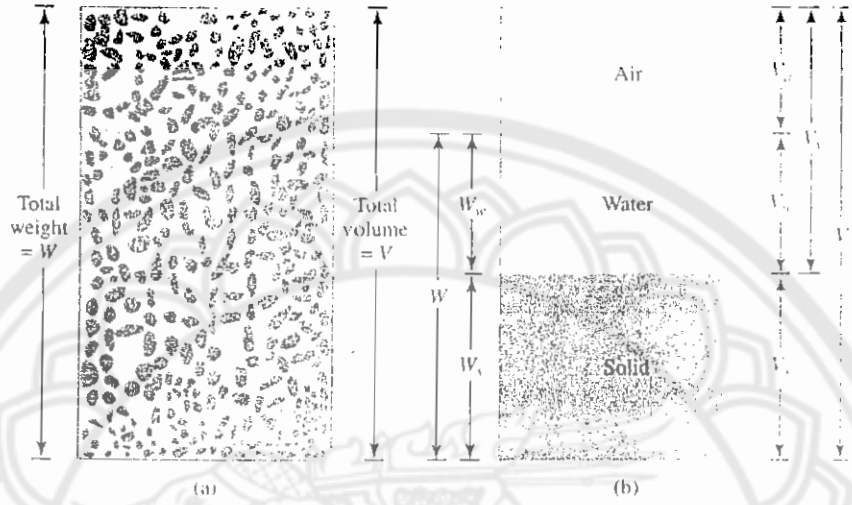
2. น้ำหนักรวม (Total Weight)

$$W = W_s + W_w \qquad \text{(สมการที่ 5.13)}$$

โดยที่ W_s = weight of soil solids

W_w = weight of water

จะเห็นได้ว่าเราจะไม่นำน้ำหนักของอากาศมาคิดเพราะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับน้ำหนักของของแข็งและน้ำหนักของของเหลวแต่ในส่วนของปริมาตรนั้นอากาศก็มีปริมาตรของตัวมันเอง



รูปที่ 5.14 (a) ส่วนประกอบของดินตามธรรมชาติ (Soil element in natural state)
(b) Three phases ของส่วนประกอบของดิน

5.1.7.1 ความสัมพันธ์ของปริมาณ (Volume relationships)

จากแผนภาพจำลอง (Three-phases diagrams) ของดินในธรรมชาติดังกล่าวมาแล้วข้างต้นสามารถหาพารามิเตอร์ในการคำนวณได้ 3 ตัว มีดังต่อไปนี้

1. อัตราส่วนช่องว่าง [Void ratio : e]

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_w + V_a}{V_s} \qquad \text{(สมการที่ 5.14)}$$

โดยทั่วไปแล้วอัตราส่วนช่องว่างในดินที่มีเนื้อดินแบบเป็นก้อนขนาดใหญ่ (bulky-shaped) จะมีค่าต่ำกว่าอัตราส่วนช่องว่างในดินที่มีเนื้อดินแบบแผ่นหรือเกล็ดเล็กๆ (flaky-shaped)

2. **ความพรุน** (Porosity : η)

$$\eta = \frac{V_v}{V} \qquad \text{(สมการที่ 5.15)}$$

$$= \frac{V_v}{V_s + V_v} = \frac{\left(\frac{V_v}{V_s}\right)}{1+\left(\frac{V_v}{V_s}\right)} = \frac{e}{1+e}$$

$$= \frac{e}{1+e} \qquad \text{(สมการที่ 5.16)}$$

ดังนั้นจากความสัมพันธ์ลักษณะเดียวกันจะทำให้

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_v}{V - V_v} = \frac{\left(\frac{V_v}{V}\right)}{1-\left(\frac{V_v}{V}\right)} = \frac{\eta}{1-\eta} \qquad \text{(สมการที่ 5.17)}$$

จากความสัมพันธ์ที่กล่าวมาเมื่อแบ่งแยกดินตามชนิดแล้วแสดงได้ตามตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 แสดงถึงค่าอัตราส่วนช่องว่างและค่าความพรุนของดินชนิดต่างๆ

ชนิดของดิน	Void ratio, e	$\eta = \frac{e}{1+e}$
Loose uniform sand	0.08	0.44
Dense uniform sand	0.45	0.31
Loose angular-grained Silty sand	0.65	0.39
Dense angular- grained Silty sand	0.40	0.39
Stiff clay	0.60	0.38
Soft clay	0.9-1.4	0.47-0.58
Loess clay	0.90	0.47
Soft organic clay	2.5-3.2	0.71-0.76
Glacial till	0.30	0.23

3. ระดับความอิ่มตัว [Degree of Saturation : S]

$$S = \frac{V_w}{V_v} \qquad \text{(สมการที่ 5.18)}$$

แต่ในการนำไปใช้งานจริงมักจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ (Percentage) นั่นก็คือนำไปคูณกับ 100 ก่อนที่จะนำมาใช้ และมีค่า

S = 0 % เมื่อดินที่พิจารณาเป็นดินอบแห้ง (Over-dry soil)

S = 100 % เมื่อดินที่พิจารณาเป็นดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated soil) ในกรณีงานจริง นั้นก็คือดินที่ถูกน้ำท่วมหรือน้ำขังตลอดปี

5.1.7.2 ความสัมพันธ์ของน้ำหนัก (Weight relationships)

สามารถหาพารามิเตอร์ไปใช้ในการคำนวณได้ 3 ตัว มีดังต่อไปนี้

1. ปริมาณน้ำในดิน (Moisture or Water Content)

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \qquad \text{(สมการที่ 5.18)}$$

ซึ่งปกติในการนำไปใช้มักจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ (Percentage) เช่นเดียวกับระดับความอิ่มตัว โดยทั่วไปจะมีค่าปริมาณความชื้นอยู่ในช่วง 0-900 % ซึ่งถ้า

ω = 0 % แสดงว่าดินเป็นดินอบแห้ง (Oven-dry soil) นั่นเอง

ดินในธรรมชาติทั่วไปสามารถสรุปค่าอัตราส่วนช่องว่างเปรียบเทียบกับปริมาณความชื้นได้ตามตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 แสดงค่าอัตราส่วนช่องว่างเปรียบเทียบกับปริมาณความชื้นของดินทั่วไปในธรรมชาติ

Type of soil	Void ratio, e	Natural moisture content in a saturated state (%)	Dry unit weight, γ_d lb/ft^3	Dry unit weight, γ_d kN/m^3
Loose uniform sand	0.8	30	92	14.5
Dense uniform sand	0.45	16	115	18
Loose angular-grained silty sand	0.65	25	102	16
Dense angular-grained silty sand	0.4	15	121	19
Stiff clay	0.6	21	108	17
Soft clay	0.9–1.4	30–50	73–93	11.5–14.5
Loess	0.9	25	86	13.5
Soft organic clay	2.5–3.2	90–120	38–51	6–8
Glacial till	0.3	10	134	21

2. หน่วยน้ำหนัก [unit weight : γ]

$$\gamma = \frac{W}{V} \qquad \text{(สมการที่ 5.20)}$$

โดยจากแผนภาพจำลองเราสามารถหาหน่วยน้ำหนัก (unit weight) จากตัวแปรของแผนภาพได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{W_s\left[1 + \frac{W_w}{W_s}\right]}{V} = \frac{W_s[1+\omega]}{V} \qquad \text{(สมการที่ 5.21)}$$

และจากสมการที่ 5.21 ถ้าดินเป็นแบบดินอบแห้ง (Oven-dry soil) ซึ่งจะแสดงว่าปริมาณน้ำในดิน [Water content : ω] = 0 จะได้

$$\gamma_d = \frac{W_s[1+0]}{V} = \frac{W_s}{V} \qquad \text{(สมการที่ 5.22)}$$

3. ความหนาแน่น [Density : ρ]

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{M_w + M_s}{V_a + V_w + V_s} \qquad \text{(สมการที่ 5.23)}$$

โดยที่ M = total mass of soil sample

M_w = mass of water in the voids

M_S = mass of soil solids

ในกรณีที่ดินอบแห้ง (Oven-dry soil) จะไม่มีมวลของน้ำมาเข้าเกี่ยวข้องจึงสามารถบอกได้ว่า

$$\rho = \frac{M_s}{V} \qquad \text{(สมการที่ 5.24)}$$

จากความสัมพันธ์ที่กล่าวมาทั้งหมดทั้งความสัมพันธ์ของปริมาตรและความสัมพันธ์ของน้ำหนักสามารถใช้แก้ปัญหาทางปฐพีกลศาสตร์ (Soil Mechanics) รวมกับแผนภาพจำลองดิน (Three-phase diagram) มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของน้ำหนักและปริมาตรตามความสัมพันธ์ที่กล่าวมาข้างต้น

โดยความสัมพันธ์นี้สามารถหาได้โดย 2 วิธีดังนี้คือ

1. กำหนดปริมาตรเนื้อดินเท่ากับ 1 (V_S = 1)
2. กำหนดปริมาตรเนื้อดินทั้งหมดเท่ากับ 1 (V = 1)

5.1.7.3 **แบบจำลองปริมาตรเนื้อดินเท่ากับหนึ่ง** ($V_S = 1$)

สามารถบอกถึงดินได้ 2 ลักษณะ คือ

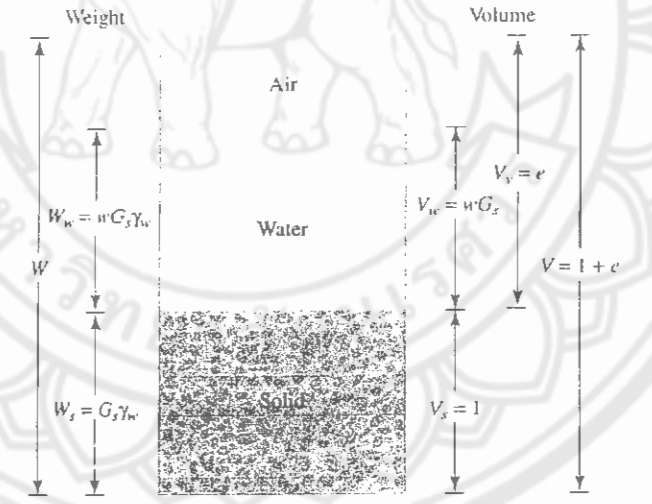
- **ดินธรรมดาทั่วไป** (Soil) $\Longrightarrow$ $S < 1$
- ดินอิ่มตัว (Saturated soil) $\Longrightarrow$ $S = 1$

1. สำหรับดินธรรมดาทั่วไป [$S < 1$]

ที่เรากำหนด $V_S = 1$ เพื่อที่จะทำให้ปริมาตรของช่องว่าง (Void Volume) เท่ากับอัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio)

นั่นคือ

ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ต่างๆ ได้ง่ายดังแสดงตามรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.15 Three Phases **ของส่วนประกอบดินถ้ากำหนดให้ปริมาตรของ** Soil solids **เท่ากับ** 1

จากรูปสามารถหาความสัมพันธ์ต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

1. $\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{G_s\gamma_w + \omega G_s\gamma_w}{1+e} = \frac{(1+\omega)G_s\gamma_w}{1+e}$ (สมการที่ 5.25)

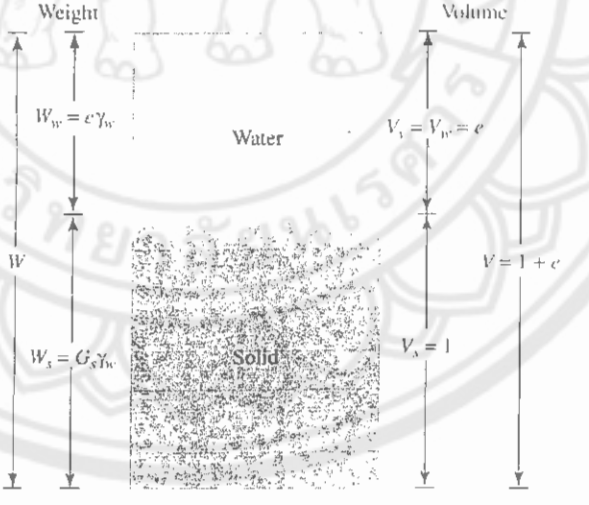
2. $\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{G_s\gamma_w}{1+e}$ (สมการที่ 5.26)

3. $e = \frac{G_s\gamma_w}{\gamma_d} - 1$ (สมการที่ 5.27)

4. $S = \frac{\omega G_s}{e}$ (สมการที่ 5.28)

ซึ่งเราก็จะสามารถหาพารามิเตอร์เหล่านี้ไปใช้ในการคำนวณด้านปฐพีกลศาสตร์ต่อไป

2. สำหรับดินอิ่มตัว [S = 1]



รูปที่ 5.16 ดินเหนียวอิ่มตัวที่กำหนดให้ปริมาตรของ Soil solids เท่ากับ 1

จากรูปที่ 5.16 สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังต่อไปนี้

1. $\gamma_{sat} = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{G_s\gamma_w + e\gamma_w}{1+e} = \frac{(G_s + e)\gamma_w}{1+e}$ (สมการที่ 5.29)

2. $e = \omega G_s$ (สมการที่ 5.30)

3. $S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{\omega G_s}{e} = 1$ (สมการที่ 5.31)

จากการกำหนด V_s = 1 ด้านบนทั้ง 2 กรณีที่ต้องการความสัมพันธ์ของมวลเราก็สามารถเปลี่ยนหน่วยน้ำหนัก (unit weight) เป็นความหนาแน่น (Density) ในสมการในการคำนวณได้เลยก็จะทำให้พจน์ของน้ำหนัก (weight) กลายเป็นพจน์ของมวล (Mass) ทันที

5.1.7.4 แบบจำลองปริมาตรเนื้อดินทั้งหมดเท่ากับหนึ่ง (V = 1)

ที่เราสมมติให้ V = 1 เพราะจะทำให้พจน์ของปริมาตรของช่องว่าง (Void Volume) เท่ากับความพรุน (Porosity)

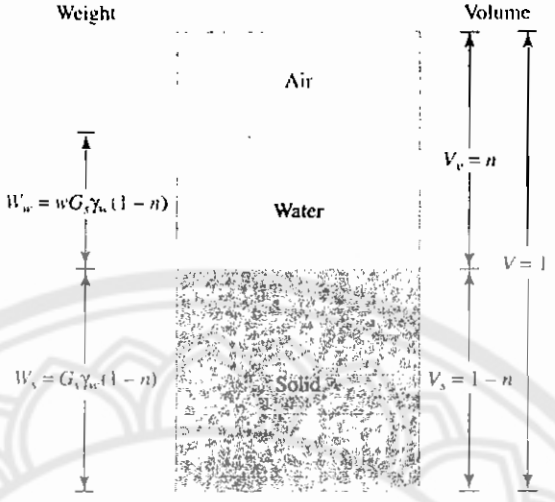
นั่นคือ

จึงทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ต่างๆ ได้ง่ายขึ้นกรณีที่บอกค่าความพรุนมาได้ง่ายขึ้น โดยกำหนดกับดิน 2 กรณีคือ

- ดินธรรมดาทั่วไป (Soil) $\Longrightarrow$ S < 1
- ดินอิ่มตัว (Saturated soil) $\Longrightarrow$ S = 1

1. สำหรับดินธรรมดาทั่วไป (S < 1)

สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 ส่วนประกอบของดินที่ปริมาตรทั้งหมดเท่ากับ 1

จากความสัมพันธ์จากแบบจำลองตามรูปที่ 5.17 สามารถนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติของดินได้ดังนี้

1. $$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} = \omega G_s\gamma_w(1-\eta) + G_s\gamma_w(1-\eta)$$ (สมการที่ 5.32)
$$= G_s\gamma_w(1-\eta)(1+\omega)$$

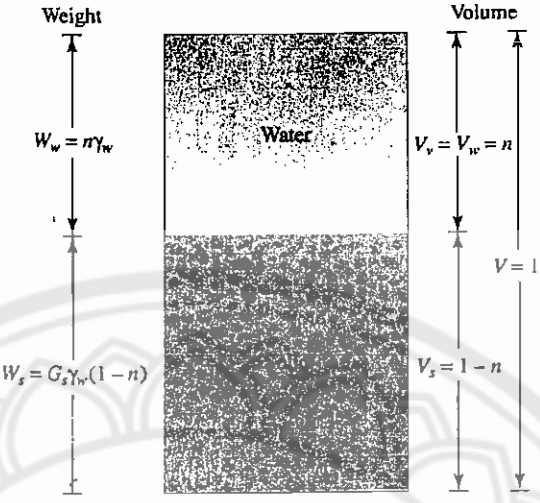
2. $$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = G_s\gamma_w(1-\eta)$$ (สมการที่ 5.33)

3. $$\eta = \frac{1-G_s\gamma_w}{\gamma_d}$$ (สมการที่ 5.34)

4. $$S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{\omega G_s(1-\eta)}{\eta}$$ (สมการที่ 5.35)

2. สำหรับดินอิ่มตัว (S = 1)

สามารถแสดงตามรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.19 ดินอิ่มตัวโดยกำหนดให้ปริมาตรทั้งหมดเท่ากับ 1

จากความสัมพันธ์จากแบบจำลองรูปที่ 5.19 สามารถนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติของดินได้ดังนี้

1. $\gamma_{sat} = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} = G_s\gamma_w(1-\eta) + \eta\gamma_w = \left[(1-\eta)G_s + \eta\right]\gamma_w$ (สมการที่ 5.36)

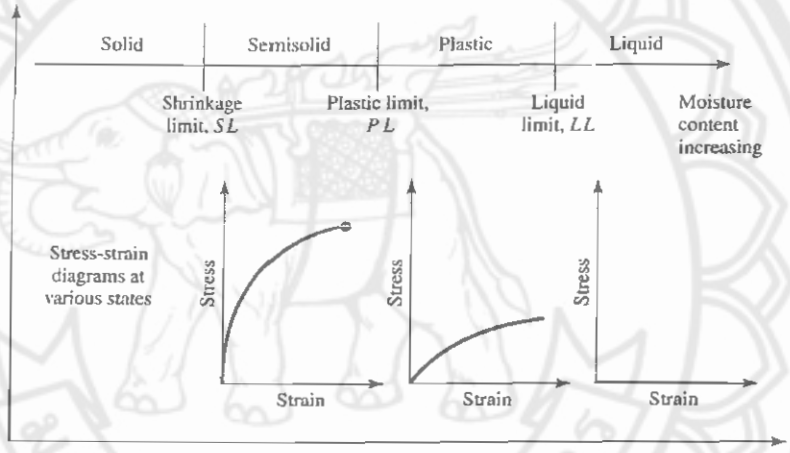
2. $\omega = \frac{W_w}{W_s} = \frac{\eta\gamma_w}{G_s\gamma_w(1-\eta)} = \frac{\eta}{(1-\eta)G_s}$ (สมการที่ 5.37)

3. $S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{\eta}{\eta} = 1$ (สมการที่ 5.38)

5.1.8 คุณสมบัติความข้นเหลวของดิน (Consistency of soil)

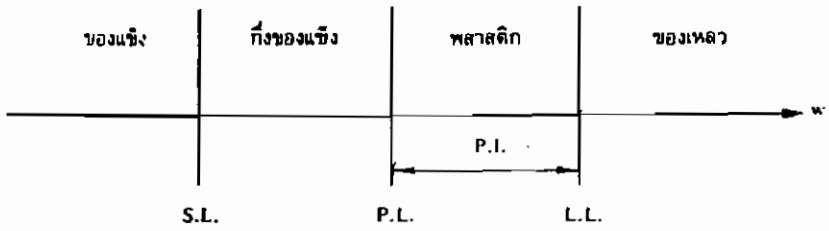
สำหรับดินพวกเม็ดละเอียด เช่น ตะกอนทราย (Silt) และดินเหนียว (clay) เนื่องจากเม็ดดินมีขนาดเล็กมากและมีคุณสมบัติเปลี่ยนไปตามจำนวนน้ำหรือปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในดิน ดังนั้นก่อนที่จะแบ่งแยกชนิดของดินตามระบบต่างๆ จึงต้องหาคุณสมบัติความข้นเหลวของดิน (Consistency of soil) เสียก่อน

ซึ่งความข้นเหลวของดิน (Consistency of soil) มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า "Atterberg Limits" ซึ่งการแบ่งดินพวกเม็ดละเอียดพวกนี้โดยใช้ Atterberg Limits แบ่งแยกดินได้ตามรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.20 Atterberg Limits

จากรูปที่ 5.21 ดินถูกแบ่งออกเป็นช่วงๆ สามารถแบ่งออกได้เป็นช่วง Solid, Semisolid, Plastic, Liquid ดังแสดงตามรูป ซึ่งแต่ละช่วงนั่นสามารถแบ่งจากปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ นั่นเอง โดยมีจุดแบ่งสถานภาพของดิน ได้แก่ Liquid Limit, Plastic Limit, Shrinkage Limit ดังแสดงในรูป



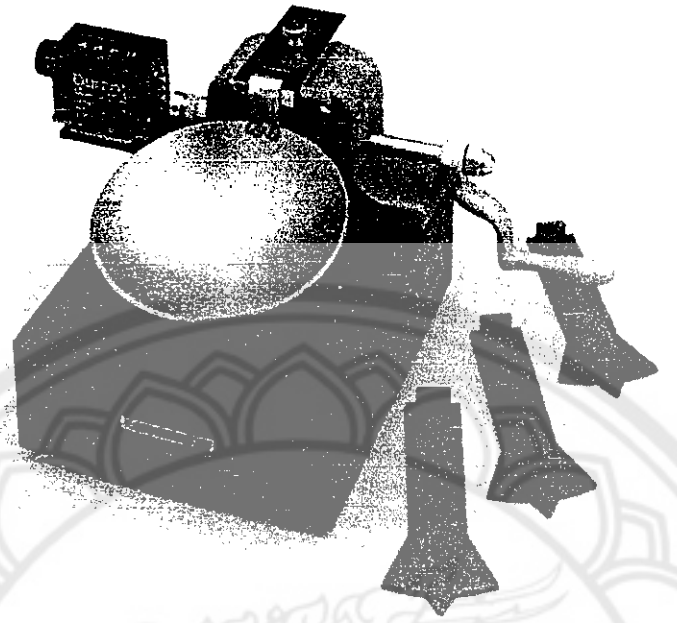
รูปที่ 5.21 สถานภาพของดิน

1. Shrinkage Limit คือจุดแบ่งระหว่างของแข็ง (Solid) กับพวกกึ่งของแข็ง (Semisolid)
2. Plastic Limit คือจุดแบ่งระหว่างพวกกึ่งของแข็ง (Semisolid) กับพวกพลาสติก (Plastic)
3. Liquid Limit คือจุดแบ่งระหว่างพวกพลาสติก (Plastic) กับพวกของเหลว (Liquid)

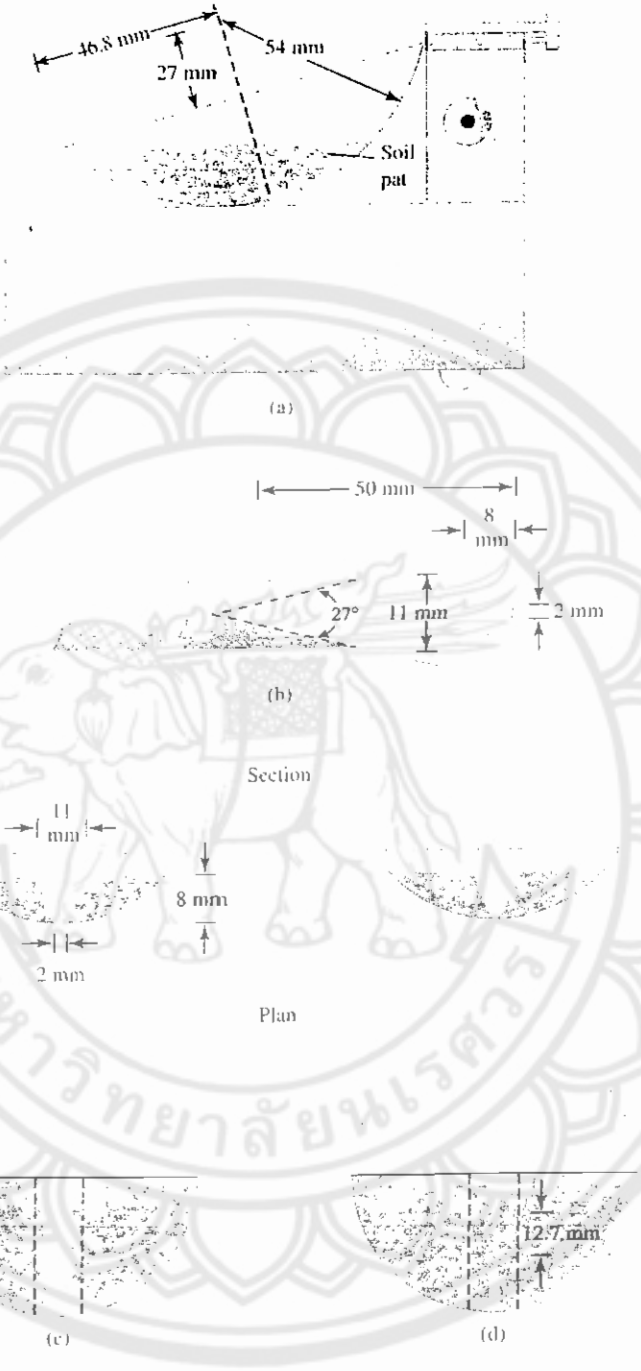
โดยค่าทั้ง 3 นี้สามารถหาได้ตามรายละเอียดที่จะกล่าวต่อไป

5.1.8.1 Liquid Limit (พิกัดความเหลว ; LL)

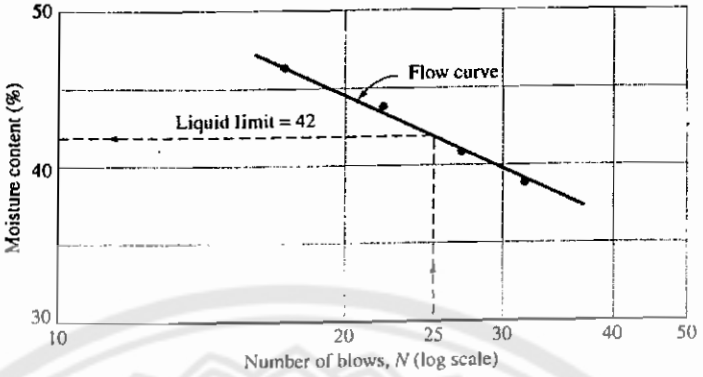
พิกัดความเหลวคือปริมาณน้ำที่น้อยที่สุดในมวลดินที่ทำให้ดินเหลวและไหลได้ โดยสามารถหาค่านี้ได้จากเครื่องมือที่แสดงตามรูปที่ 5.24 โดยสามารถหาได้โดย นำดินเปียกมาใส่ในถ้วยทองเหลือง ปาดผิวดินให้เรียบแล้วแบ่งดินออกเป็นสองส่วนโดยใช้ grooving tool ดังแสดงตามรูปที่ 3 (b) จากนั้นหมุนให้ถ้วยยกกระแทกกับฐานเครื่องมือด้วยความเร็ว 2 ครั้ง / s ระยะที่ตกกระแทกเท่ากับ 10 mm จนกระทั่งดินที่แบ่งไว้ 2 ส่วนเคลื่อนที่เข้ามาติดกันเป็นระยะทาง 12.7 mm บันทึกจำนวนครั้งที่ตกกระแทกและนำดินนั้นไปหาปริมาณความชื้น ทำซ้ำเช่นนี้ 4-5 ครั้ง โดยให้ดินมีปริมาณความชื้นต่างๆ กันจากนั้นนำผลไปเขียนเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งกับปริมาณความชื้นในกระดาษ Semi-log จะได้ความสัมพันธ์ออกมาดังแสดงในรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.22 เครื่องมือทดสอบ Liquid Limit



รูปที่ 5.23 การทดลอง Liquid Limit (a) liquid limit Device (b) grooving tool (c)soil pat before (d) soil pat after test

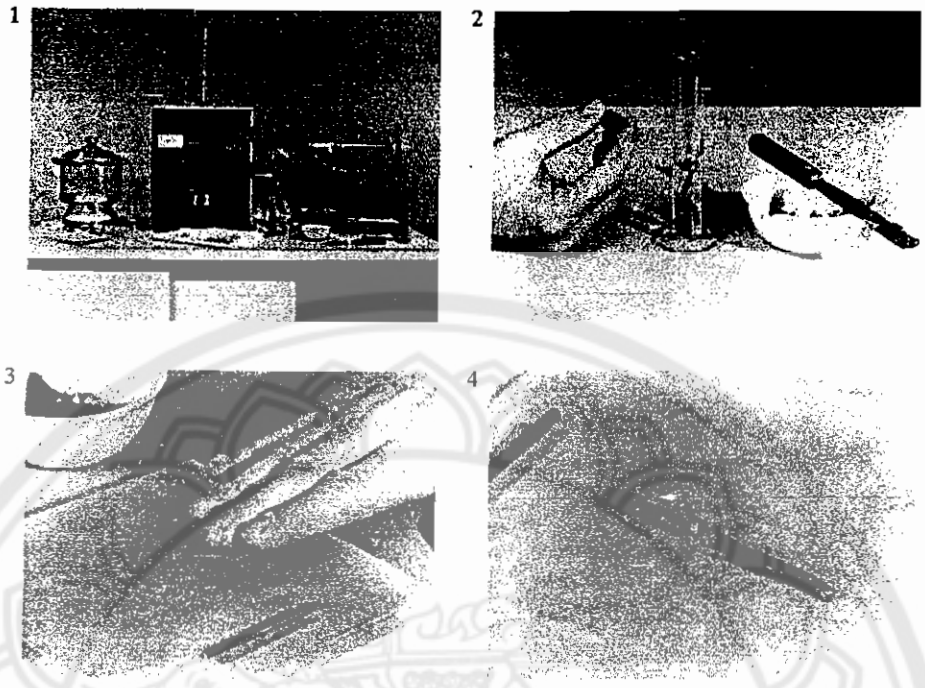


รูปที่ 5.24 กราฟสำหรับการหา Liquid Limit ของ Clayey silt

จากรูปที่ 5.24 เมื่อเขียนกราฟเสร็จแล้วปริมาณความชื้นที่ 25 ครั้งคือว่า Liquid Limit (LL) ของดินชนิดนั้นนั่นเองโดยดูจากรูปที่ 5.24 เป็นตัวอย่าง

5.1.8.2 พิกัดความเหนียวหนืด (Plastic Limit ; PL) (ASTM Test Designation D-4318)

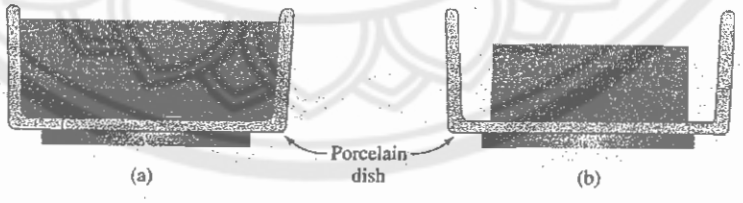
พิกัดความเหนียวหนืดเป็นปริมาณน้ำที่น้อยที่สุดในมวลดินที่ดินยังมีความเหนียวหนืดสามารถปั้นเป็นรูปร่างได้โดยไม่เกิดรอยแตกที่ผิว ซึ่งก็คือความชื้นในมวลดินขณะที่เปลี่ยนสถานภาพจากพลาสติกเป็นกึ่งของแข็ง หาได้โดยนำดินขึ้นมาคลึงด้วยฝ่ามือบนกระจก จนเป็นเส้นด้ายขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 1 หุน (3.2 mm หรือ 1/8 in.) แล้วเริ่มแตกร้าวพอดี ปริมาณความชื้นที่จุดนั้นเรียกว่า Plastic Limit (PL) โดยสามารถแสดงถึงอุปกรณ์และวิธีการหาได้ตามรูปที่ 5.25



รูปที่ 5.25 แสดงถึงวิธีการทดลองหาค่า Plastic Limit

5.1.8.3 พิกัดหดตัว (Shrinkage Limit ; SL) (ASTM Test Designation D-4318)

พิกัดหดตัวคือปริมาณน้ำที่มากที่สุด ซึ่งถึงแม้ว่าจะมีการสูญเสียความชื้นอีกต่อไปก็ไม่ทำให้ดินหดตัวหรือลดปริมาณลงอีกสามารถหาได้โดย นำดินมาผสมน้ำจนอยู่ในสภาพเป็นพลาสติก แล้วทำเป็นก้อนกรงกลมแบนแล้วชั่งน้ำหนักของมวลได้ M_1 จากนั้นนำไปวัดปริมาณในปรอดได้ V_1 จากนั้นจึงนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 ° C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักได้ M_2 และวัดปริมาตรในปรอทได้ V_f ดังแสดงตามรูปที่ 6.26

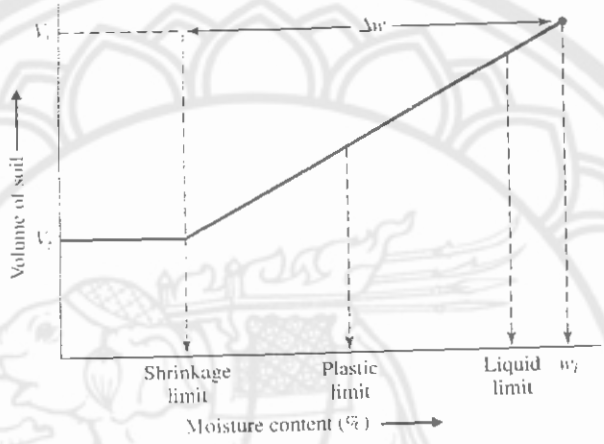


รูปที่ 5.26 แสดงการทดลองหาค่า Shrinkage limit (a) soil pat before drying (b) soil pat after drying

โดยจะได้การหาพิกัดหดตัว (SL) ได้ตามสมการ

$$SL = \left(\frac{M_1 - M_2}{M_2}\right)(100) - \left(\frac{V_i - V_f}{M_2}\right)(\rho_w)(100) \qquad \text{(สมการที่ 5.44)}$$

จะเห็นได้ว่าดินเปลี่ยนจากสภาพพลาสติกเป็นสภาพแห้งนั้น จะต้องผ่านสภาพที่ SL ก่อน โดยจะมีการสูญเสียความชื้นต่อไปหลังจาก SL แล้วปริมาณดินก็คงยังไม่ลดลงจากความสัมพันธ์นี้เองสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับมวลของดินที่สถานภาพความเหลวต่างกันไปตามรูปที่ 5.27



รูปที่ 5.27 อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Shrinkage Limit, Plastic Limit และ Liquid Limit

จากรูปที่ 5.27 ช่วงปริมาณน้ำในมวลดิน ซึ่งดินอยู่ในสถานภาพความเหนียวหนืด (Plastic) เรียกว่า "ดัชนีความเหนียวหนืด" (Plasticity Index ; PI) ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างพิกัดความเหลวกับพิกัดความเหนียวหนืดโดยหาได้จากสมการ 2 ซึ่งค่า PI นี้สามารถบ่งชี้สถานภาพของดินทรายในสนาม

$$PI = LL - PL \qquad \text{(สมการที่ 5.45)}$$

ซึ่งสรุปก็คือถ้าหากดินชนิดใดชนิดหนึ่งมีค่า PI = 40% แสดงว่าดินนั้นถ้าจะเปลี่ยนไปเป็นสถานภาพของเหลว (Liquid) จะดูดน้ำเพิ่มขึ้น 40% นั้นเอง โดยสามารถบ่งบอกถึงชนิดของดินได้จาก PI ตามตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 แบ่งชนิดของดินตามค่า PI

PI	Description
0	Nonplastic
1–5	Slightly plastic
5–10	Low plasticity
10–20	Medium plasticity
20–40	High plasticity
>40	Very high plasticity

สำหรับดินปนทรายที่ไม่สามารถหาค่าพิกัดความเหนียวหนืดได้ จะรายงานค่าดัชนีความเหนียวหนืดว่า NP ซึ่งหมายความว่าไม่มีความเหนียวหนืด (Non-plastic) ถ้าค่า PL มีค่า $\geq$ LL แล้วจะรายงานค่าดัชนีความเหนียวหนืดว่าเป็นศูนย์

สำหรับดินที่มีความเชื่อมแน่น (Cohesive soil) สามารถบ่งชี้สถานภาพของดินเหนียวในสนามได้จากค่าดัชนีความเหลว (Liquidity Index) และดัชนีความข้นเหลว (Consistency Index)

- ดัชนีความเหลว (Liquidity Index ; LI)

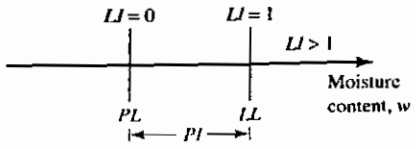
$$LI = \frac{\omega - PL}{LL - PL} \qquad \text{(สมการที่ 5.46)}$$

โดยที่ W = ปริมาณความชื้นของดิน in-situ

- ดัชนีความข้นเหลว (Liquidity Index ; CI)

$$CI = \frac{LL - \omega}{PI} \qquad \text{(สมการที่ 5.47)}$$

โดยค่าดัชนีความข้นเหลว (Liquidity Index) เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกสภาพของดินในธรรมชาติ ซึ่งถ้ามีค่าเท่ากับหนึ่ง แสดงว่าดินมีปริมาณน้ำในมวลดินอยู่ที่พิกัดความเหนียวหนืด (Liquid Limit) พอดีทำนองเดียวกันถ้ามีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าดินมีปริมาณน้ำในมวลดินอยู่ที่พิกัดความเหลว (Plastic Limit) พอดีถ้าดัชนีความเหลวมีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าดินค่อนข้างเหลวมากเพราะมีปริมาณน้ำในมวลดินมากกว่าที่พิกัดความเหลว ถ้าดัชนีความเหลวมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าดินค่อนข้างแห้งและแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 5.28



รูปที่ 5.28 **แสดงถึงค่า** Liquidity Index

สรุปได้ว่าการหาตัวแปรทั้งหมดที่กล่าวมาจะนำไปใช้ในการจำแนกประเภทของดินดังจะกล่าวในบทต่อๆ ไป อีกทั้งยังสามารถบ่งบอกถึงสถานะของดินได้อีกด้วย

5.1.9 **แผนภูมิความเหนียว** (Plasticity Chart)

ในการจำแนกประเภทของดินจะต้องหาค่าดัชนีความเหนียว (Plasticity Index ; PI) และพิกัดความเหลว (Liquid Limit ; LI) ของดินจากนั้นนำไป ลงจุดในแผนภูมิความเหนียว (Plasticity Chart) จึงจะทราบชนิดของดินได้ ดังนั้นเราจะต้องสร้างแผนภูมิความเหนียวให้ได้ก่อน

การสร้างแผนภูมิความเหนียวนี้ (Plasticity Chart) สามารถกระทำได้โดยเขียนกราฟเส้นตรง

$$PI = 0.73\,(LL - 20) \qquad \text{(สมการที่ 5.48)}$$

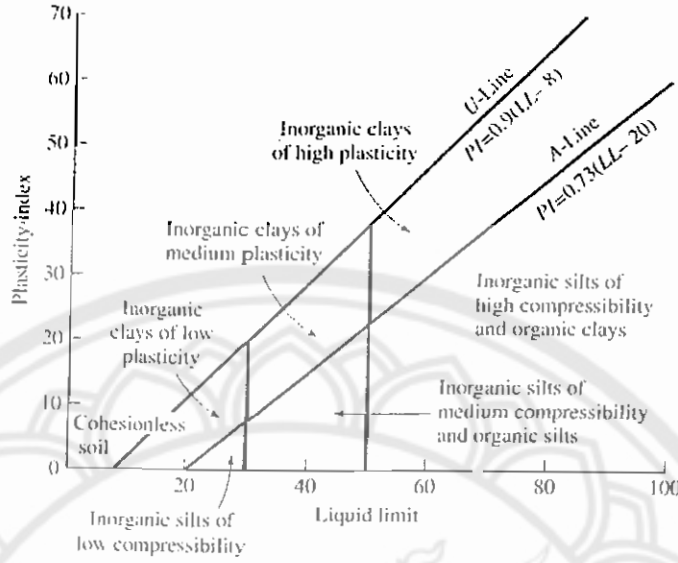
จากนั้นจะได้กราฟเส้นตรงที่เรียกว่าเส้น A-line ตามแสดงดังรูปที่ 5.31 ซึ่งเส้น A-line นี้เป็นจุดแบ่งระหว่าง Silt กับ clay นั่นเองโดยดินเหนียวจะอยู่เหนือเส้น A-line ส่วนตะกอนทราย (Silt) จะอยู่ต่ำกว่าเส้น A-line โดยที่สถานะความเหลวสามารถแบ่งได้ดังนี้

ความเหนียวน้อย (low compressibility) มีค่า LL < 30

ความเหนียวปานกลาง (medium compressibility) มีค่า 30 < LL < 50

ความเหนียวมาก (high compressibility) มีค่า LL > 50

สามารถแสดง ""Plasticity chart" แสดงได้ตามรูปที่ 5.31



รูปที่ 5.29 แผนภูมิความเหลว (Plasticity Chart)

จากรูปจะเห็นเส้นอีกเส้นหนึ่งชื่อว่าเส้น U-line ซึ่งเขียนขึ้นจากสมการ

$$PI = 0.9\,(LL - 8) \qquad \text{(สมการที่ 5.49)}$$

ซึ่งเส้นนี้แสดงถึงความสัมพันธ์ที่สูงที่สุดของค่าดัชนีความเหนียว (Plasticity Index ; PI) กับพิกัดความเหลว (Liquid limit ; LL) โดยถ้าพล็อตจุดแล้วความสัมพันธ์ของดินทุกชนิดในโลกจะไม่มีทางอยู่เหนือเส้น U-line นั่นเอง

จาก Plasticity Chart ข้างต้นเราจะนำไปใช้ในการจำแนกดินในระบบ Unified ในจะกล่าวถึงต่อๆ ไปได้อีกเพื่อให้ทราบถึงชนิดของดินเพื่อนำไปใช้ในงานคำนวณต่อๆ ไป

ในบทนี้ทำให้เราทราบถึงต้นกำเนิดและคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของดิน เพื่อที่จะให้เราได้นำไปใช้ในบทต่อๆ ไป เช่น ในเรื่องของการจำแนกประเภทของดินก็จะใช้เรื่อง Atterberg Limit ในการจำแนก รวมถึงจะต้องใช้แผนภูมิความเหลวอีกด้วย ส่วนในเรื่องการบดอัดดิน การประมาณค่าการยุบตัวของดินก็ต้องใช้เรื่องความสัมพันธ์น้ำหนักและปริมาตร ในการหาคำนวณหาค่าอีกด้วย จะเห็นได้ว่าบทนี้เป็นพื้นฐานในการเรียนรู้เรื่องต่อๆไป จึงจำเป็นที่ผู้เรียนควรได้ศึกษาเพื่อประโยชน์ในการคิดวิเคราะห์ปัญหาต่อไป

5.2 โจทย์ทบทวนเนื้อหา ความรู้ และความเข้าใจ (Example)

5.2.1 จากผลการทดลอง Sieve analysis ได้ผลตารางดังต่อไปนี้

ตะแกรงเบอร์	น้ำหนักของดินที่ค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ (g)
4	0
10	18.5
20	53.2
40	90.5
60	81.8
100	92.2
200	58.5
Pan	26.5

ดังนั้นจงหา

5.2.2.1 หาร้อยละของดินที่ผ่านตะแกรง (Percent Finer) ของแต่ละตะแกรงพร้อมทั้งเขียนกราฟการกระจายตัวของเม็ดดิน (grain-size distribution curve)

5.2.2.2 หาค่า D_{60}, D_{30} และ D_{10}จากกราฟการกระจายตัวของเม็ดดิน (grain-size distribution curve)

5.2.2.3 คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Uniformity Coefficient ; C_u)

5.2.2.4 คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ขนาดคละ (Coefficient of gradation ; C_z)

<u>วิธีทำ</u>

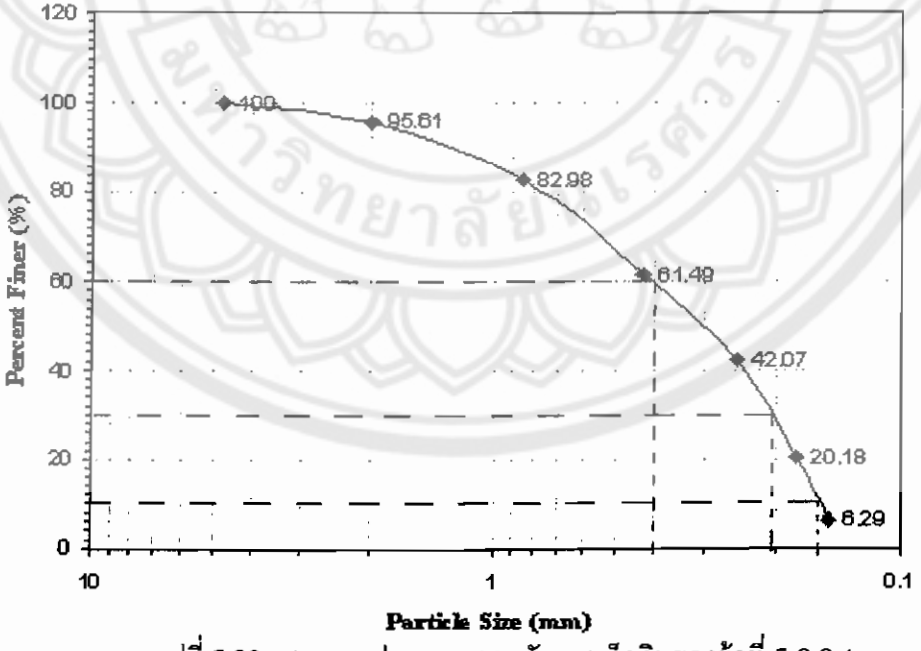
5.2.2.1 สามารถหาค่าร้อยละของดินที่ผ่านตะแกรง (Percent Finer) ดังตารางที่ 5.11 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.10 ผลการคำนวณหา Percent Finer

ตะแกรงเบอร์	ช่องเปิด (mm)	น้ำหนักของดินที่ค้างอยู่บนตะแกรงแต่ละเบอร์ (g)	น้ำหนักของดินสะสมที่ค้างอยู่บนตะแกรงแต่ละเบอร์ (g)	ร้อยละของดินที่ผ่านตะแกรง (Percent Finer)[1] (%)
4	4.75	0	0	100
10	2.00	18.5	0+18.5=18.5	95.61
20	0.850	53.2	18.5+53.2=71.7	82.98
40	0.425	90.5	71.7+90.5=162.2	61.49
60	0.250	81.8	162.2+81.8=244.0	42.07
100	0.180	92.2	244.0+92.2=336.2	20.18
200	0.150	58.5	336.2+58.5=394.7	6.29
Pan	-	26.5	394.7+26.5=421.2=ΣM	0

[1] $\frac{\Sigma M - Column4}{\Sigma M} x100 = \frac{421.2 - Col.4}{421.2} \quad x100$

ดังนั้นสามารถเขียนกราฟแสดงการกระจายตัวของเม็ดดินได้ดังต่อไปนี้คือ



รูปที่ 5.30 แสดงกราฟการกระจายตัวของเม็ดดินของข้อที่ 5.2.2.1

5.2.2.2 จากกราฟการกระจายตัวของเม็ดดินจะได้

D_{10} = 0.18 mm.

D_{30} = 0.21 mm.

D_{60} = 0.40 mm.

5.2.2.3 ดังนั้นจะได้สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Uniformity Coefficient ; C_u)

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

$$= 2.22$$

5.2.2.4 ดังนั้นจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ขนาดคละ (Coefficient of gradation ; C_z)

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

$$= 0.6125$$

5.2.2 สำหรับดินที่มี D_{60} = 0.42 mm, D_{30} = 0.21 mm, และ D_{10} = 0.16 mm จงหาสัมประสิทธิ์ของความสม่ำเสมอ (Uniformity corfficient) และสัมประสิทธิ์ของขนาดคละ (Coefficient of gradation)

<u>วิธีทำ</u>

จากโจทย์

1. สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Uniformity Coefficient ; C_u)

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

ดังนั้น $C_u = \frac{0.42mm}{0.16mm} = 2.625$

2. สัมประสิทธิ์ขนาดคละ (Coefficient of gradation ; C_z)

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

ดังนั้น $C_z = \frac{(0.21mm)^2}{(0.42mm)(0.16mm)} = 0.656$

5.2.3 จงหาดีกรีของความอิ่มตัวของดินตัวอย่างซึ่งมี

γ = 2.1 g/cm^3

ω = 15%

G_s = 2.65

ซึ่งกำหนดให้ γ_w = 1 g/cm^3

วิธีทำ จากสมการที่ว่า $\omega = \frac{W_w}{W_s}$

จะได้ $W_w = \omega W_s$

$W_w = \omega G \gamma_w$; $\gamma_w = \frac{W_w}{V_w}$

ดังนั้นจะได้ $V_w = \omega G$

จากสมการ $S = \frac{W_w}{V_w}$ ถ้าสมมุติให้ V_s = 1 แล้ว

จะได้ $S \cdot e = \omega G$

$= 0.15\ (2.65)$

$S \cdot e = 0.3975$

จากสมการ $\gamma = \frac{(G + S \cdot e)\gamma_w}{1+e}$

$2.1 = \frac{(2.65 + 0.3975)(1)}{1+e}$

$2.1 + 2.1e = 3.0475$

$e = 0.451$

แทนค่า c ลงไปในสมการ $S \cdot e = 0.3975$ แล้วจะได้

$S = \frac{0.3975}{0.451}$

$S = 0.882$

$S = 88.2\ \%$

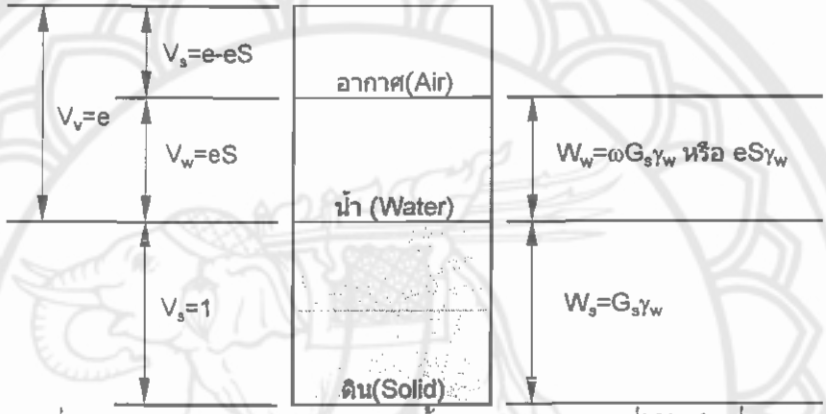
5.2.4 **ตัวอย่างดินมีปริมาตรน้ำ** (water content) **เท่ากับ 10% และหน่วยน้ำหนักเปียกเท่ากับ** 20 kN/m^3 **ถ้าเม็ดดินมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ** 2.70

จงหา 5.2.4.1 หน่วยน้ำหนักแห้ง (Dry unit weight)

5.2.4.2 อัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio)

5.2.4.3 **ดีกรีความอิ่มตัว** (Degree of saturation)

<u>วิธีทำ</u> ใช้แบบจำลองที่ $V_s = 1$ จะได้



รูปที่ 5.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักต่อปริมาตรที่ใช้ในข้อที่ 5.2.4

5.2.4.2 จากสมการ $\gamma_t = \frac{W}{V} = \frac{(1+w)G_s\gamma_w}{1+e}$

$20 = \frac{(1+0.10)(2.7)(10)}{1+e}$ (เมื่อ γ_w = 10 kN/m^3)

ดังนั้นจะได้ $e = 0.485$

5.2.4.1 ดังนั้นจะได้ $\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{G_s\gamma_w}{1+e}$

$= \frac{(2.7)(10)}{(1+0.485)} = 18.18$ kN/m^3

5.2.4.3 ดังนั้นจะได้ $wG_s = eS \rightarrow S = \frac{wG_s}{e} = \frac{(0.10)(2.70)}{0.485}$

$= 0.557$ (55.7%)

5.2.5 **ดินตัวอย่างหนึ่งมีปริมาตร** 100 m^3 **มีความพรุน** 40% **มีความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินเท่ากับ** 2.72 **และปริมาณน้ำ** (Water Content) 12% **จงหาปริมาณน้ำเพื่อใช้เติมลงในดินแล้วทำให้ดินอิ่มน้ำ** (S=1)

วิธีทำ จากโจทย์ $V = 100\ m^3$

$n = 0.40$

$G_s = 2.72$ และ $\omega = 0.12$

จาก $n = \frac{V_v}{V} \rightarrow V_v = 0.40 \times 100 = 40\ m^3$

$\therefore V_s = V - V_v = 100 - 40 = 60\ m^3$

และ $W_s = G_s \gamma_w V_s = 2.72 \times 1 \times 60 = 163.2t$ (เมื่อ $\gamma_w = 1\ t/m^3$)

จาก $\omega = \frac{W_w}{W_s} \rightarrow W_w = 0.12 \times 163.2 = 19.584\ t$

$\therefore V_w = W_w \gamma_w = 19.584 \times 1 = 19.584\ m^3$

$\therefore V_a = V_v - V_w = 40 - 19.584 = 20.416\ m^3$

ดังนั้น ต้องการปริมาณน้ำอีก $= 20.416 \times 1 = 20.416\ t$

5.2.6 **ดินตัวอย่างอิ่มน้ำ** (Fully Saturation) **มีปริมาณน้ำ** (Water Content) 25% **หน่วยน้ำหนักเปียก** 20 kN/m^3

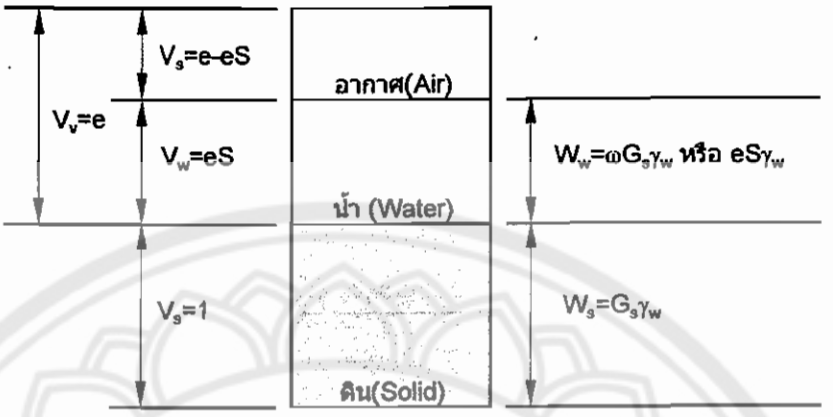
จงหา 5.2.6.1 **หน่วยน้ำหนักดินแห้ง** (Dry unit Weight)

5.2.6.2 อัตราส่วนช่องว่าง (void ratio)

5.2.6.3 ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน

5.2.6.4 หน่วยน้ำหนักเปียกของดินเมื่อดินมีดีกรีความอิ่มตัวเท่ากับ 80% โดย**ที่อัตราส่วนช่องว่างยังคงเท่าเดิม**

<u>วิธีทำ</u> ใช้แบบจำลอง $V_s = 1$ จะได้



รูปที่ 5.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักต่อปริมาตรที่ใช้ในข้อที่ 5.2.6

5.2.6.3 ดังนั้นจาก $\gamma_{sat} = \dfrac{(1+w)G_s\gamma_w}{1+WG_s}$

$$20 = \frac{G_s x\, 10x\,(1+0.25)}{(1+0.25G)}$$

$\therefore$ จะได้ $G_s = 2.67$

5.2.6.2 สำหรับ S = 100%

จะได้ $e = wG_s = 0.25 \times 2.67 = 0.67$

5.2.6.1 จาก $\gamma_d = \dfrac{G_s\gamma_w}{1+e} = \dfrac{2.67x\,10}{(1+0.67)}$

$= 15.99\ kN/m^3$

5.2.6.4 เมื่อ S = 80%

และ e = 0.67

จะได้ $\gamma_t = \dfrac{(eS+G_s)\gamma_w}{1+e}$

$$= \frac{[0.67x\,0.80+2.67]x\,10}{(1+0.67)}$$

$= 19.20\ kN/m^3$

5.2.7 **ดินเหนียวตัวอย่างซึ่งเก็บมาจากสนามถูกเคลือบด้วยพาราฟิน มีน้ำหนัก** 695 g **และปริมาตร** 355 cm^3 **เมื่อเอาพาราฟินออกไป พบว่าตัวอย่างมีน้ำหนัก** 685 g **และดินมีปริมาณน้ำ** 18% **ถ้าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินเท่ากับ** 2.70 **และความถ่วงจำเพาะของพาราฟินเท่ากับ** 0.90

จงหา 5.2.7.1 หน่วยน้ำหนักของดินตัวอย่าง (Total unit weight)

5.2.7.2 หน่วยน้ำหนักแห้งของดินตัวอย่าง (Dry unit weight)

5.2.7.3 อัตราส่วนช่องว่าง (Void Ration)

และ 5.2.7.4 ดีกรีความอิ่มตัว (Degree of saturation)

<u>วิธีทำ</u> น้ำหนักของพาราฟิน = 695 – 685 = 10 g

ปริมาตรของส่วนที่เป็นพาราฟิน $= \frac{10}{0.9x1} = 11.11\ cm^3$

$\therefore$ ปริมาตรของส่วนที่เป็นดิน = 355 - 11.11 = 343.89 cm^3

5.2.7.1 จะได้ $\gamma_t = \frac{685}{343.89} = 1.99\ g/cm^3$

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

$\therefore \quad \gamma_d = \frac{1.99}{1+0.18} = 1.69\ g/cm^3$

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

$1 + e = \frac{2.70x1}{1.69}$

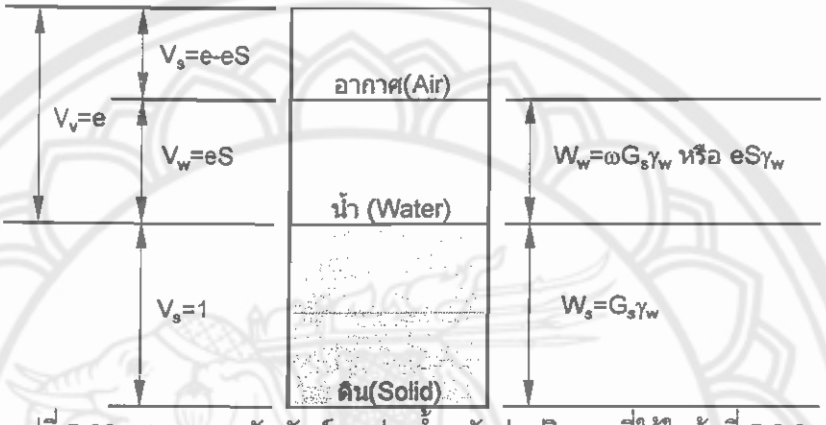
$e = 0.60$

5.2.7.4 จาก $e \cdot S = \omega \cdot G_s$

$S = \frac{0.18x2.70}{0.60} = 0.81\ (81\%)$

5.2.8 ตัวอย่างดินอิ่มน้ำที่มีปริมาณความชื้น 29% และความหนาแน่นรวม 1,930 kg/m^3 จงหาความหนาแน่นแห้งอัตราส่วนช่องว่าง และความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน ถ้าดินนี้ถูกบดอัดและได้อัตราส่วนช่องว่างคงเดิม แต่ดีกรีความอิ่มตัวลดลงหรือเป็น 90% จงหาความหนาแน่นรวม

<u>วิธีทำ</u> ใช้แบบจำลอง $V_s = 1$ จะได้



รูปที่ 5.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักต่อปริมาตรที่ใช้ในข้อที่ 5.2.8

<u>วิธีทำ</u> จากแบบจำลอง จะได้ $\gamma_t = \dfrac{(1+w)\gamma_w G_s}{1+e}$

$\gamma_d = \dfrac{\gamma_w G_s}{1+e}$

$$\therefore \gamma_d = \frac{\gamma_t}{1+w} = \frac{1,930}{1+0.29} = 1,496 \text{ kg/m}^3$$

$\therefore e \cdot S = \omega \cdot G_s$

จะได้ $e = \omega G_s$ (S = 100%)

$\gamma_d = 1,496 = \dfrac{1,000\,x G_s}{1+0.29G_s}$

ซึ่งจะได้ $G_s = 2.64$

$\therefore \quad e = \omega G_s = 0.29 \times 2.64 = 0.767$

แต่ถ้า S = 90% จะได้

$$\omega = \frac{eS}{G_s} = \frac{2.64\,x\,0.90}{2.64} = 0.26 \quad (26\%)$$

$$\gamma_t = \frac{2.64x\ 1{,}000x\ (1+0.26)}{1+0.767} = 1{,}884\ \text{kg/m}^3$$

5.2.9 **ตัวอย่างดินเหนียวมีพิกัดความเหลว** (Liquid Limit) 60% **และพิกัดหดตัว** (Shrinkage Limit) 25% **ถ้าตัวอย่างดินมีปริมาตรเป็น** 10.5 cm^3 **ณ พิกัดความข้นเหลว และเป็น** 7.0 cm^3 **ที่พิกัดหดตัว** จงหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน

วิธีทำ ที่พิกัดความข้นเหลว $W_w = 0.60\ W_s$

ที่พิกัดหดตัว $W_w = 0.25\ W_s$

ดังนั้น ปริมาณน้ำช่วง LL กับ SL $= 0.60\ W_s - 0.25\ W_s = 0.35\ W_s$

$\therefore$ ดินมีปริมาตรลดลง $= \frac{0.35W_s}{1.0}\ cm^3$

ซึ่งจะเท่ากับ $10.5 - 7.0 = 3.5\ cm^3$

$\therefore$ $0.35\ W_s = 3.5$ ซึ่งจะได้ $W_s = 10\ g$

$\therefore$ ที่พิกัดหดตัว จะได้ $W_w = 0.25 \times 10 = 2.5\ g$

$V_w = 2.5 / 1.0 = 2.5\ cm^3 = V_v$ (ที่พิกัดหดตัว)

$\therefore$ $V_s = V - V_w$

$= 7.0 - 2.5 = 4.5\ cm^3$

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

$= \frac{10}{1.0x\ 4.5} = 2.22$

หมายเหตุ น้ำมีค่าความถ่วงจำเพาะ ≈ 1

5.3 โจทย์ทดสอบความสามารถในการคิดวิเคราะห์(Critical thinking problem)

5.3.1 ในช่วงฤดูแล้งที่จะถึง แขวงการทางพิษณุโลกกำลังเตรียมเปิดประมูลงานปรับปรุงเส้นทางหลวงหมายเลข 12 ช่วง จ.พิษณุโลก ถึงแยก อ.วังทอง ซึ่งมีความยาวประมาณ 30 กม. แต่เนื่องจากภาวะฝนขาดช่วงในบริเวณพื้นที่ท้ายเขื่อน วิศวกรโครงการต้องการประมาณการเพื่อหาปริมาณน้ำที่จะต้องเตรียมสำรองไว้ใช้สำหรับผสมกับดินที่ใช้บดอัดคันทาง (embankment) หากท่านได้รับมอบหมายให้ทำหน้าที่ดังกล่าว ให้ท่านประมาณการ

1.1 ปริมาณน้ำ (m^3) ที่จะต้องใช้ผสมกับดินที่บดอัด $1m^3$ เพื่อให้ได้ 90% degree of saturation เมื่อใช้ดินจากแหล่งวัสดุ

ก. บ้านเขาสมอแคลง และ

ข. บ้านโนนมะคึก

(คุณสมบัติของดินจากแหล่งวัสดุทั้งสองสรุปได้ดังตารางที่)

1.2 หากเจ้าของงานมีนโยบายดึงน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติ เพื่อใช้สำหรับการบดอัดดินให้น้อยที่สุด

1. จากการสำรวจชั้นทรายที่อยู่เหนือชั้นหินแข็ง ได้นำตัวอย่างดินทรายที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินหนัก 2,205 g ปริมาตร 1,125 cm^3 หลังจากนำไปอบแห้งแล้วปรากฏว่าเหลือตัวอย่างดินหนัก 1,970 g และตัวอย่างดินนี้มีค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน 2.65

1.1 สำหรับดินทรายชั้นที่อยู่เหนือหระดับน้ำใต้ดิน จงหา

1.1.1 ความหนาแน่นทั้งหมด

1.1.2 ปริมาณความชื้น

1.1.3 อัตราส่วนช่องว่าง

1.1.4 ระดับความอิ่มตัว

1.1.5 ปริมาณอากาศ

1.2 สำหรับดินทรายชั้นที่อยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดิน จงหา

1.2.1 ปริมาณความชื้น

1.2.2 ความหนาแน่นอิ่มตัว

1.3 หลังจากที่อบแห้งแล้ว นำดินทราบ 1,000 g เทลงในทรงกระบอกจุ 2 ลิตร ต่อมาพบว่าดินทรายนี้มีปริมาตร 641.5 cm^3 เมื่อนำดินทราบที่อบแห้งนี้ไปบดอัดในแบบเหล็ก (mold) รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm สูง 120 mm

โดยบดอัด 3 **ชั้นโดยใช้** hammer **ได้มวลทรายที่อยู่เต็มในแบบเหล็กเท่ากับ** 1,746.6 g **จงหาความหนาแน่นสัมพันธ์** (D_r)

<u>วิธีทำ</u> 1.1 จากโจทย์ได้ $M = 2205$ g

$V = 1125\ cm^3$

$M_s = 1970$ g

ดังนั้นน้ำหนักน้ำ $M_w = M - M_s = 2205 - 1970 = 235$ g

ปริมาตรน้ำ $V_w = 235\ cm^3$

จากสมการ $G_s = \dfrac{M_s}{V_s \rho_w}$

$V_s = \dfrac{M_s}{V_s \rho_w} = \dfrac{1970}{(2.65)(1)} = 743.4\ cm^3$

ปริมาตรช่องว่าง $V_v = V - V_s = 1125 - 743.4 = 381.6\ cm^3$

ปริมาตรอากาศ $V_a = V_s - V_w = 381.6 - 235 = 146.6\ cm^3$

ดังนั้นจากค่าต่างๆ ด้านบนจะได้

1.1.1 ความหนาแน่นทั้งหมด $(\rho) = \dfrac{M}{V} = \dfrac{2205}{1125} = 1.96\ g/cm^3$

1.1.2 ปริมาณความชื้น $(w) = \dfrac{M_w}{M_s} = \dfrac{235}{1970} = 0.119 = 11.9\%$

1.1.3 อัตราส่วนช่องว่าง $(e) = \dfrac{V_v}{V_s} = \dfrac{381.6}{743.4} = 0.616 = 61.6\%$

1.1.4 ระดับความอิ่มตัว $(S_r) = \dfrac{V_w}{V_v} = \dfrac{235}{381.6} = 0.616 = 61.6\%$

1.1.5 ปริมาณอากาศ $(A_r) = \dfrac{V_a}{V} = \dfrac{146.6}{1125} = 0.130 = 13\%$

1.2 น้ำหนักของน้ำทั้งหมด $M_w = 235 - 146.6 = 381.6$ g

มวลรวมทั้งหมด $M = M_s + M = 1970 + 381.6 = 2351.6$ g

1.2.1 **ปริมาณความชื้น** $(w) = \dfrac{M_w}{M_s} = \dfrac{381.6}{1970} = 0.194 = 19.4\%$

1.2.2 ความหนาแน่นอิ่มตัว $(\rho_s) = \dfrac{M}{V} = \dfrac{2351.6}{1125} = 2.09\ g/cm^3$

1.3 **สำหรับอัตราส่วนช่องว่างสูงสุด จะได้มวลดินในทรงกระบอก** (M) = 100 g

ปริมาตรดินในทรงกระบอก(V) = 641.5 cm^3

เนื่องจากเป็นดินทรายอบแห้ง ดังนั้น M_s = 1000 g

ปริมาตรเม็ดดินในทรงกระบอก (V_s) $= \frac{M_s}{G_s \rho_w} = \frac{1000}{(2.65)(1)} = 377.4\ cm^3$

ปริมาตรช่องว่างในทรงกระบอก $V_v = V - V_s = 641.5 - 377.4 = 264.1\ cm^3$

อัตราส่วนช่องว่างสูงสุด $e_{max} = \frac{V_v}{V_s} = \frac{264.1}{377.4} = 0.70$

สำหรับอัตราส่วนช่องว่างต่ำสุด จะได้ มวลดินใน mold M = 1746.6 g

ปริมาตรในดิน mold V $= \pi(5^2)(12)$

$= 942.5\ m^3$

เนื่องจากเป็นดินทรายอบแห้ง ดังนั้น M_s = 1746.6 g

ปริมาตรเม็ดดินใน mold $V_s = \frac{M_s}{G_s \rho_w} = \frac{1746.6}{(2.65)(1)} = 659.1\ cm^3$

ปริมาตรช่องว่างใน mold $V_v = V - V_s = 942.5 - 659.1 = 283.4\ cm^3$

อัตราส่วนช่องว่างต่ำสุด $e_{min} = \frac{V_v}{V_s} = \frac{283.4}{659.1} = 0.43$

ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (D_r) $= \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} = \frac{0.70 - 0.51}{0.70 - 0.43} = 0.70 = 70\%$

5.3.2 ในการหาความหนาแน่นของดินในสนามโดยวิธีใช้ทรายแทนที่ ดินที่ขุดออกมาจากหลุมหนัก 4.56 kg ทรายแห้งที่เติมเต็มหลุมหนัก 3.54 kg

5.3.2.1 ถ้าทรายเติมเต็มภาชนะที่มีปริมาตร 0.0042 m^3 จะหนัก 6.57 kg จงหาความหนาแน่นของดินในสนาม

5.3.2.2 ในการหาปริมาตรความชื้นในดิน ดินชื้นซึ่งหนัก 24 g ภายหลังอบให้แห้งแล้วชั่งน้ำหนักดินแห้งได้ 20 g กำหนดความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินเท่ากับ 2.68 จงหาปริมาณความชื้นในดิน ความหนาแน่นของดินแห้ง และระดับความอิ่มตัวของดิน

<u>วิธีทำ</u> 5.3.2.1 **ความหนาแน่นของทรายที่ใช้**

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{6.57}{0.0042} = 1{,}564\ kg/m^3$$

ปริมาตรของหลุม = **ปริมาตรของทรายที่เติมเต็มหลุม** $= \frac{3.54}{1{,}564} =$

$0.00226\ m^3$

$\therefore$ ความหนาแน่นของดิน $\rho = \frac{M}{V}$

$= \frac{4.56}{0.00226} = 2{,}108 \text{ kg/m}^3$

5.3.2.2 $M_w = M - M_s = 24 - 20 = 4$ g

จากสมการ $\rho = \frac{M}{V}$

ปริมาตรของดิน $V = \frac{24 x\, 1{,}000^3}{2{,}018 x\, 1{,}000} = 11{,}893 \text{ mm}^3$

จากสมการ $G_s = \frac{M_s}{V_s \rho_w}$

ปริมาตรของเม็ดดิน $V_s = \frac{20 x\, 1{,}000^3}{2.68 x\, 1{,}000 x\, 1{,}000} = 7{,}463 \text{ m}^3$

หาปริมาตรของช่องว่าง $V_v = V - V_s$

$= 11{,}893 - 7{,}463 = 4{,}430 \text{ m}^3$

จากสมการ $\rho_w = \frac{M_w}{V_w}$

ปริมาตรของน้ำ $V_w = \frac{4 x\, 1{,}000^3}{1{,}000 x\, 1{,}000} = 4{,}000 \text{ m}^3$

ปริมาณความชื้นในดิน $\omega = \frac{M_w}{M_s} \times 100\% = \frac{4}{20} \times 100 = 20\%$

ความหนาแน่นของดินแห้ง $\rho_d = \frac{\rho}{1+w} = \frac{2{,}018}{1+0.20} = 1{,}682 \text{ kg/m}^3$

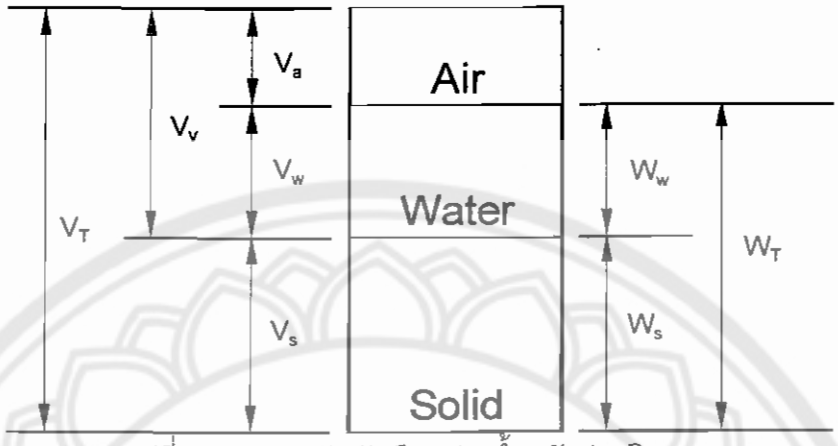
ระดับความอิ่มตัว $S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% = \frac{4{,}000}{4{,}430} \times 100 = 90\%$

5.3.3 นิสิตที่เรียนวิชาปฐพีกลศาสตร์ (soil mechanics) กลุ่มหนึ่ง ได้นำตัวอย่างดินจากบริเวณที่จะทำการก่อสร้างอาคารพลังงานในมหาวิทยาลัยนเรศวรมาทำการทดสอบ พบว่า bulk unit weight (γ_T) เท่ากับ 96 lb/ft^3, water content (w) เท่ากับ 17% และ degree of saturation (S) เท่ากับ 60% จากข้อมูลดังกล่าว กรุณาคำนวณหา

5.3.3.1 void ratio (e)

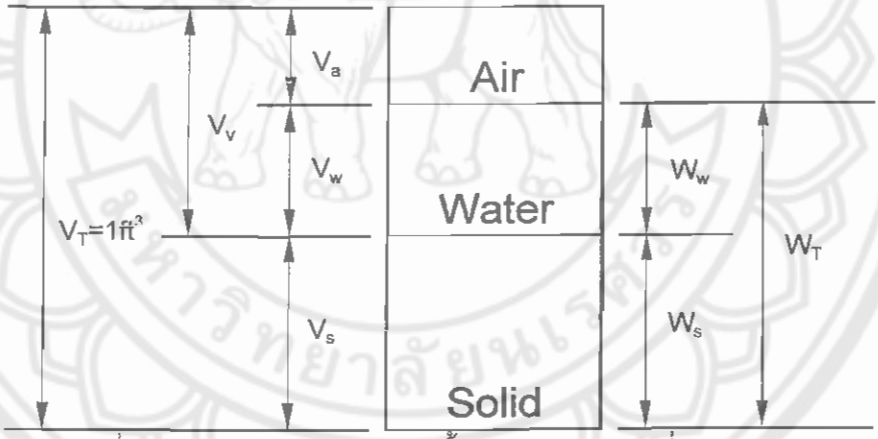
5.3.3.2 specific gravity of soil (G_s)

<u>วิธีทำ</u> สร้าง phase diagram ของ wet soil



รูปที่ 5.34 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักต่อปริมาตร

ใช้แบบจำลอง V_T = 1 ft^3 และแสดงส่วนที่ทราบค่าแล้วลงใน phase diagram



รูปที่ 5.35 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักต่อปริมาตรที่ $V_T = 1 ft^3$

จาก physical properties ของตัวอย่างดิน ที่ได้จากการทดสอบ นำมาวิเคราะห์หาค่าใน phase diagram

จาก $\gamma_T = \frac{W_T}{V_T}$

$96\ lb/ft^3 = \frac{w_T}{1 ft^3}$

$W_T = 96\ lb$

จาก $w = 17\% = 0.17 = \frac{W_w}{W_s}$

$W_w = 0.17\ W_s$ (สมการที่ 5.50)

จาก $W_T = W_w + W_s$

$96\ lb = 0.17\ W_s + W_s$

$W_s = 82\ lb$

แทนค่าในสมการที่ 6.50 จะได้

$W_w = 0.17\ (82\ lb)$

$= 14\ lb$

จาก $\gamma_w = \frac{W_w}{V_w}$

$62.4 lb/ft^3 = \frac{14 lb}{V_w}$

$V_w = 0.224\ ft^3$

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

$60 = \frac{0.221 ft^3 x V_v}{100}$

$V_v = 0.373\ ft^3$

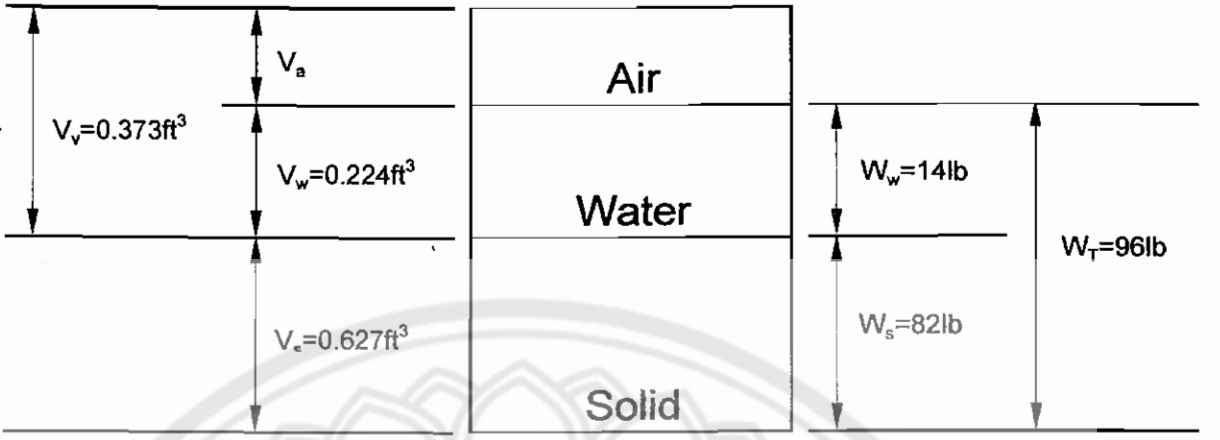
จากแบบจำลอง

$V_T = V_s + V_v$

$1\ ft^3 = 0.373\ ft^3 + V_s$

$V_s = 0.627\ ft^3$

แสดงค่าน้ำหนัก (weight) และปริมาตร (volume) ที่คำนวณได้เพิ่มลงไปใน phase diagram



รูปที่ 5.36 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักต่อปริมาตรที่ $V_T = 1 ft^3$ ที่คำนวณค่าแล้ว

ใช้ phase diagram ที่ทราบค่าน้ำหนัก (weight) และปริมาตร (volume) แล้วคำนวณคุณสมบัติตามที่ต้องการ

5.3.3.1 คำนวณหาค่า void ratio (e)

จาก $e = \frac{V_v}{V_s}$

$= \frac{0.373 ft^3}{0.627 ft^3}$

= 0.59

5.3.3.2 คำนวณหาค่า specific gravity of soil (G_s)

จาก $G_s = \frac{W_s}{V_s \gamma_w}$

$= \frac{82 lb}{(0.627 ft^3)(62.4 lb/ft^3)}$

= 2.09

5.3.4 โครงการก่อสร้างถนนภายในมหาวิทยาลัยนเรศวร บริเวณรอบกลุ่มอาคารพลังงานแสงอาทิตย์ก่อนที่จะทำการก่อสร้างถนนดังกล่าว วิศวกรผู้ควบคุมโครงการก่อสร้างได้นำดินจากบริเวณที่จะทำการก่อสร้างถนน 2 ตัวอย่างมาทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่า

ตารางที่ 5.11 ผลการทดสอบดิน 2 ตัวอย่างในข้อที่ 5.3.4

Soil no.	γ_T (kN/m^3)	γ_{dry} (kN/m^3)	G_s	e	η	S (%)	ω
1	16.0			0.60			0
2	17.7		2.71		0.45		

โดยที่ γ_T = bulk unit weight

γ_{dry} = dry unit weight

G_s = specific gravity

e = void ratio

η = porosity

S = degree of saturation

ω = water content

ในฐานะวิศวกรผู้ควบคุมโครงการ กรุณาคำนวณค่า physical properties ที่ยังไม่ทราบค่าของดินแต่ละตัวอย่างดิน

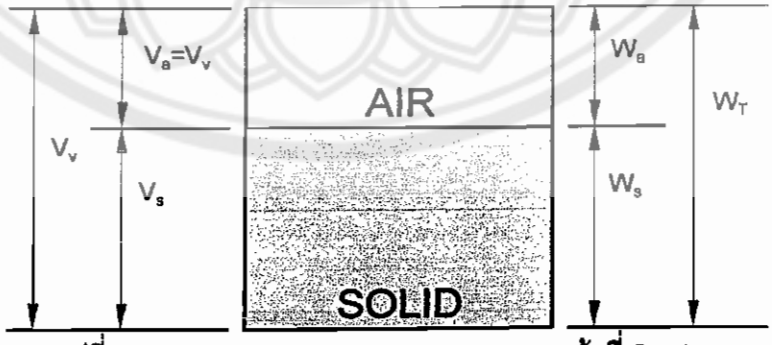
<u>วิธีทำ</u> Soil no. 1 γ_T = 16 kN/m^3

e = 0.6

w = 0

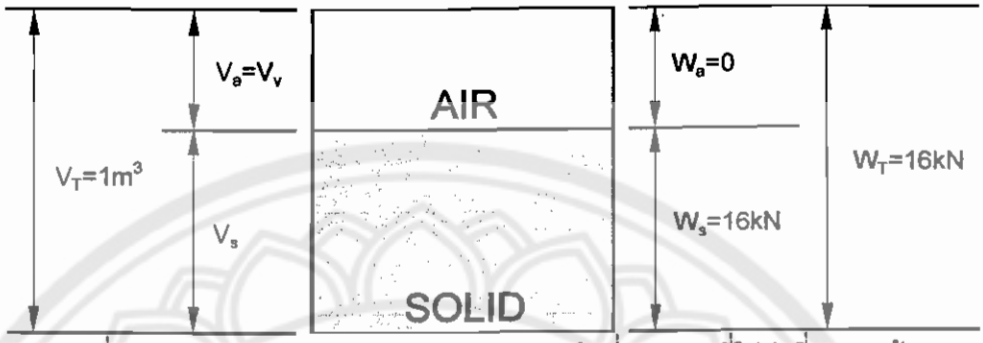
ต้องคำนวณค่า γ_{dry}, G_s, η, และ S

สร้าง phase diagram ของ dried soil โดย $V_A = V_v$



รูปที่ 5.37 Phase diagram ของ Dried soil ของข้อที่ 5.3.4.1

ใช้แบบจำลอง $V_T = 1\ m^3$ และแสดงค่าส่วนที่ทราบค่าแล้วใน phase diagram



รูปที่ 5.38 Phase diagram ของ Dried soil ของข้อที่ 5.3.4.1 ที่ใส่ค่าที่ทราบแล้ว

จากข้อมูล Soil no.1

$\gamma_T = \frac{W_T}{V_T} = 16.0\ kN/m^3$

$W_T = 16\ kN$

จาก phase diagram $W_T = W_s + W_A$

เนื่องจาก $W_A = 0$

ดังนั้น $W_T = W_s$

ดังนั้นจาก physical properties ของ soil no.1 พบว่า ถ้านำมาวิเคราะห์หาค่าใน phase diagram แล้วจะได้

จาก void ratio (e) เท่ากับ 0.6

$e = \frac{V_v}{V_s} = 0.6$

$V_v = 0.6\ V_s$

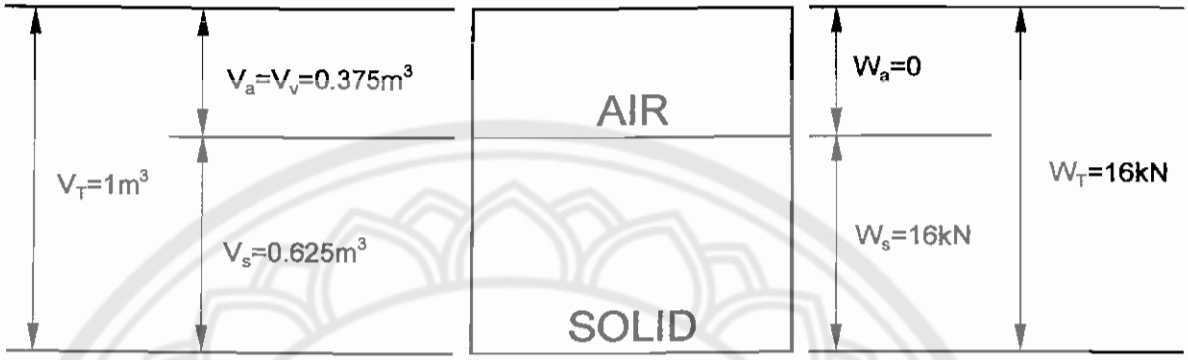
จากปริมาตรดินทั้งหมด, $V_T = V_s + V_A$

$1\ m^3 = 0.6\ V_s + V_s$

$V_s = 0.625\ m^3$

จะได้ $V_v = 0.375\ m^3$

แสดงค่าน้ำหนัก (weight) และปริมาตร (volume) ที่คำนวณได้ในขั้นที่ 2 เพิ่มลงในphase diagram



รูปที่ 5.39 Phase diagram ของ Dried soil ของข้อที่ 5.3.4.1 ที่คำนวณค่าทั้งหมดแล้ว

ใช้ phase diagram ที่ทราบค่าน้ำหนัก (weight) และปริมาตร (volume) แล้วคำนวณคุณสมบัติตามที่ต้องการ

5.3.4.1.1 specific gravity (G_s) จาก

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

$$= \frac{16kN}{(0.625m^3)(9.84kN/m^3)}$$

$$= 2.61$$

5.3.4.1.2 คำนวณค่า porosity (η) จาก

$$\eta = \frac{V_v}{V_T}$$

$$= \frac{0.375m^3}{1m^3}$$

$$= 0.375$$

5.3.4.1.3 degree of saturation (S) จาก

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

$$= \frac{0m^3}{0.375m^3}$$

= 0%

5.3.4.1.4 dry unit weight (γ_{dry}) จาก

$$\gamma_{dry} = \frac{W_s}{V_T}$$

$$= \frac{15kN}{1m^3}$$

= 16 kN/m^3

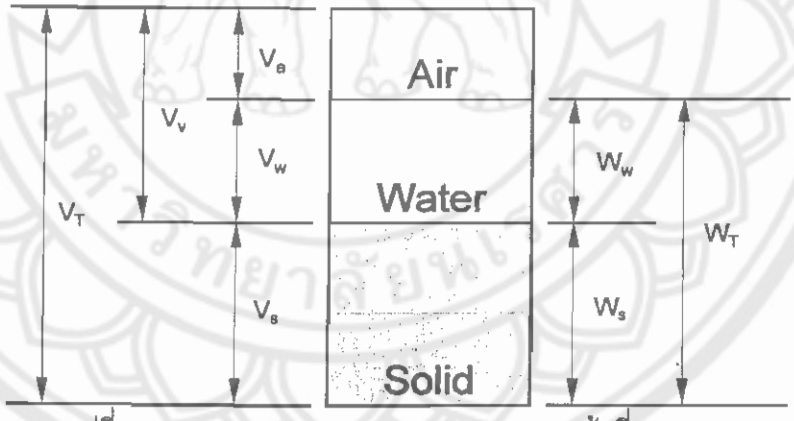
Soil no.2 γ_T = 17.1 kN/m^3

G_s = 2.71

η = 0.45

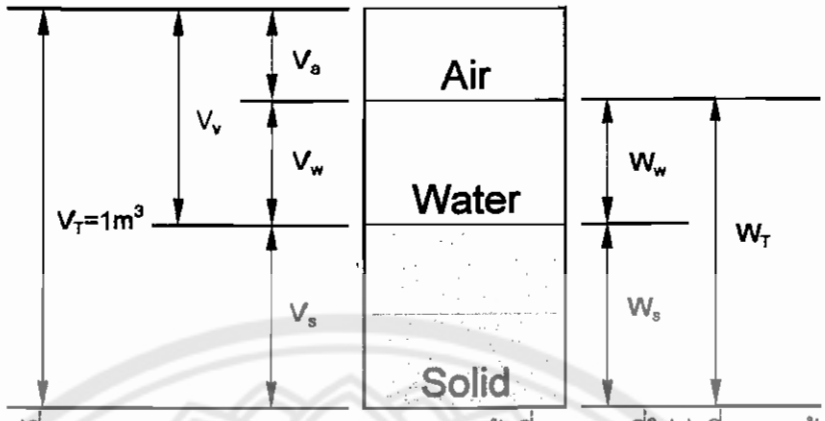
ต้องคำนวณค่า γ_{dry}, e, S, และ ω

สร้าง phase diagram ของ wet soil



รูปที่ 5.40 Phase diagram ของ Dried soil ของข้อที่ 5.3.4.2

ใช้แบบจำลอง V_T = 1 m^3 **และแสดงส่วนที่ทราบค่าแล้วลงใน** phase diagram



รูปที่ 5.41 Phase diagram ของ Wet soil ของข้อที่ 5.3.4.2 ที่ใส่ค่าที่ทราบแล้ว

จาก physical properties ของตัวอย่างดินที่ได้จากการทดสอบ นำมาวิเคราะห์หาค่าใน phase diagram

จาก bulk unit weight (γ_T) เท่ากับ 17.7 kN/m^3

$$\gamma_T = \frac{W_T}{V_T}$$

$$17.7\ kN/m^3 = \frac{w_T}{1m^3}$$

$$W_T = 17.7\ kN$$

จาก porosity (η) เท่ากับ 0.45

$$\eta = \frac{V_v}{V_T}$$

$$0.45 = \frac{V_v}{1m^3}$$

$$V_v = 0.45\ m^3$$

จาก ปริมาตรของดินทั้งหมด (V_T) เท่ากับ 1 m^3

$$V_T = V_s + V_v$$

$$1\ m^3 = V_s + 0.45\ m^3$$

$$V_s = 0.55\ m^3$$

จาก specific gravity (G_s) เท่ากับ 2.71

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

$$2.71 = \frac{W_s}{(0.55m^3)(9.81kN/m^3)}$$

W_s = 14.62 kN

จาก bulk unit weight (γ_T) เท่ากับ 17.7 kN/m^3

$$\gamma_T = \frac{W_T}{V_T}$$

$$\gamma_T = \frac{W_s + W_w + W_A}{V_T}$$

$$17.7\ kN/m^3 = \frac{(14.62 + W_w + o)m^3}{1m^3}$$

W_w = 3.08 kN

จาก water unit weight (γ_w) เท่ากับ 9.81 kN/m^3

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w}$$

$$9.81\ kN/m^3 = \frac{3.08kN}{V_w}$$

V_w = 0.314 m^3

จาก ปริมาตรของดินทั้งหมด (V_T) เท่ากับ 1 m^3

$V_T = V_s + V_w + V_A$

$V_A = V_T - V_s - V_w$

= (1-0.55-0.314) m^3

= 0.136 m^3

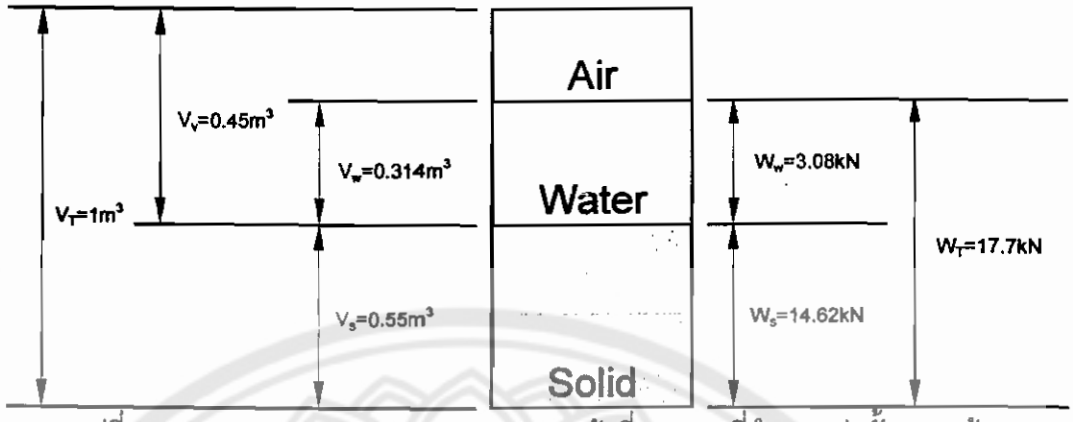
คำนวณ ปริมาตรของช่องว่าง (V_v)

$V_v = V_w + V_A$

= (0.314+0.136) m^3

= 0.45 m^3

แสดงค่าน้ำหนัก (weight) และปริมาตร (volume) ที่คำนวณได้เพิ่มลงใน phase diagram



รูปที่ 5.42 Phase diagram ของ Dried soil ของข้อที่ 5.3.4.2 ที่คำนวณค่าทั้งหมดแล้ว

ใช้ phase diagram ที่ทราบค่าน้ำหนัก (weight) และปริมาตร (volume) แล้วคำนวณหาคุณสมบัติตามที่ต้องการ

5.3.4.2.1 void ratio (e) จาก

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{0.45m^3}{0.55m^3} = 0.82$$

5.3.4.2.2 dry unit weight (γ_{dry}) จาก

$$\gamma_{dry} = \frac{W_s}{V_T} = \frac{14.62kN}{1m^3} = 14.62\ kN/m^3$$

5.3.4.2.3 degree of saturation (S) จาก

$$S = \frac{V_w}{V_v} x100\%$$

$$= \frac{0.314m^3}{0.45m^3} x100\%$$

$$= 70\%$$

5.3.4.2.4 water content (w) จาก

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

$$= \frac{3.08kN}{14.62kN}$$

$$= 0.21$$