บทที่ 2
หลักการและทฤษฎี

ในการทำวิจัยเรื่องการทดสอบคุณภาพของดินนั้น ได้ทำการทดสอบตามทฤษฎีทางด้านวิศวกรรมเพื่อให้ได้คุณสมบัติของดินที่ถูกต้องตามหลักการ ในกรณีของงานวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาเพื่อประโยชน์ด้านการสำรวจไปใช้ออกแบบฐานรากจึงต้องมีการทดสอบทั้งคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติด้านการรับกำลังของดินซึ่งมีวิธีและทฤษฎีที่ใช้ดังนี้

2.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

การทดสอบคุณสมบัติทางด้านกายภาพเป็นการทดสอบเพื่อจำแนกลักษณะของดินแต่ละชนิดที่ใช้พิจารณาเบื้องต้น เช่นการหา Moisture Content, Liquid Limit, Plastic Limit, Shrinkage-Limit, Grain Size Analysis ทั้งนี้เพื่อเป็นการจำแนกชนิดของดินในแต่ละชั้นที่เหมาะสมในการวางเสาเข็มซึ่งมีหลักการและทฤษฎีการทดสอบแต่ละชนิดดังต่อไปนี้

2.1.1 การทดสอบหาปริมาณความชื้นในดิน (Water Content)

ความชื้นในมวลดิน (Water Content, w) เป็นคุณสมบัติของดินที่มักใช้บ่อยที่สุดและมีประโยชน์มากเนื่องจากเมื่อปริมาณเปลี่ยนแปลงไป จะทำให้ดินเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพ และคุณสมบัติทางฟิสิกส์ไปซึ่งโดยทั่วไปจะกำหนดด้วย อัตราส่วนของน้ำหนักต่อน้ำหนักดินแห้ง ดินประเภท Sedimentation clay นั้น จะมีความชื้นในมวลดินที่แตกต่างกันในแต่ละชั้น ในการหาตัวอย่างตัวแทน (Representative Specimen) เพื่อนำมาหาความชื้นมวลดินนั้น จำเป็นต้องเลือกดินที่นำมาใช้หาความชื้นในมวลดินขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณที่มีอยู่ ซึ่งถ้ามีปริมาณดินมากยิ่งทำให้ค่าถูกต้องมากยิ่งขึ้นและถ้าจำเป็นต้องทำการชั่งวัดน้ำหนักดินอย่างรวดเร็ว เพื่อให้เกิดการสูญเสียน้ำน้อยที่สุด ภาชนะที่บรรจุที่ใช้ควรมีน้ำหนักที่เหมาะสมกับดิน อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง ควรอยู่ที่ 105 C หรือ 110 C โดนปกติมักอบตัวอย่างดินตลอดทั้งคืน ถึงแม้ว่าเวลาในการอบแห้งดินนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดจำนวน และรูปร่างของดิน เช่น ทราย 2-3 กรัมสามารถอบแห้งเป็นเวลา 1.00 ชั่วโมง การบอกความชื้นในมวลดินมักบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ดังสมการ

$$w = (W_1 - W_2) / (W_2 - W_0) \times 100$$

W_1 = น้ำหนักภาชนะบรรจุรวมกับน้ำหนักดินที่มีความชื้น

W_2 = น้ำหนักของภาชนะบรรจุรวมกับน้ำหนักดินอบแห้ง

W_0 = น้ำหนักของภาชนะบรรจุ

2.1.2 การทดสอบขีดจำกัดอัตเตอร์เบิร์ก (Atterberg 's Limit Test)

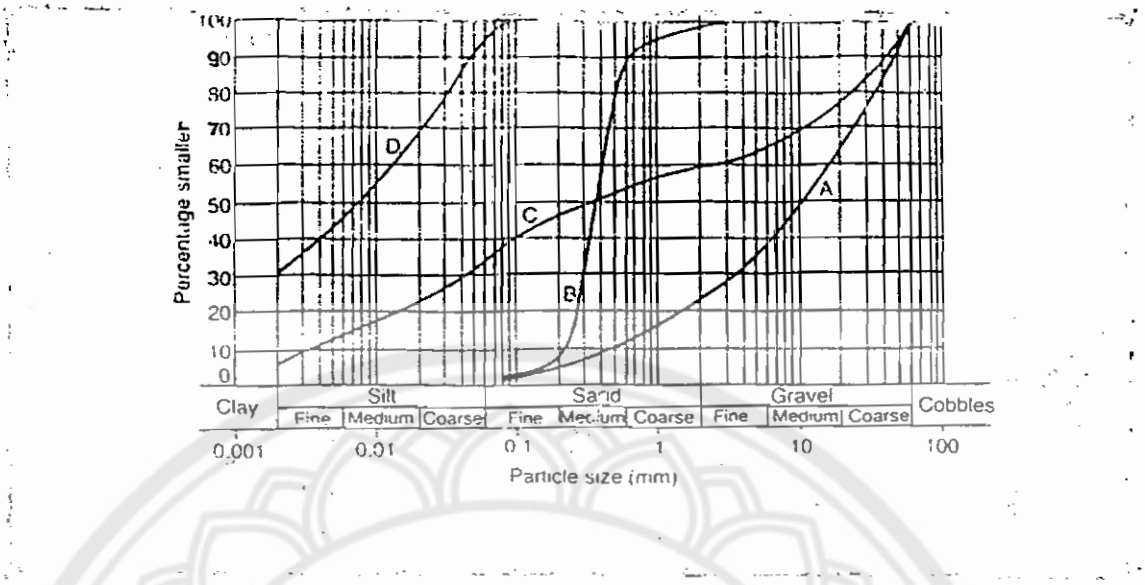
ปริมาณความชื้นในมวลดินมีผลในการเปลี่ยนแปลงของดินทางฟิสิกส์และทางสภาพของมวลดินโดยเฉพาะดินที่มีขนาดเม็ดเล็กเช่น ดินเหนียว (Cohesive Soil) เนื่องจากดินชนิดนี้ยึดเกาะกันอยู่ได้เพราะประจุไฟฟ้าบวกและลบที่มีอยู่ในดิน โดยมีน้ำเป็นแนวทางเชื่อมประสานระหว่างประจุทั้งสองนี้ สำหรับความชื้นในมวลดินที่จุดขณะเปลี่ยนสภาพจะเรียกว่า " ขีดจำกัด " (Limit) โดยมีอยู่หลายสภาวะและเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่ใช้จำแนกประเภทของดิน (Soil classification) การหรุดตัวของดิน ดินประเภทเม็ดละเอียด (Find-Grained soil) ปรากฏได้หลายสถานะ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่อยู่รอบ ๆ มวลดิน Atterberg กำหนดสภาวะต่าง ๆ ของมวลดินในรูปของ Limit เช่น

Liquid limit เป็นขอบเขตที่อยู่ระหว่างสภาวะของเหลวและสภาวะ Plastic

Plastic Limit เป็นขอบเขตที่อยู่ระหว่างสภาวะ Plastic และสภาวะกึ่งของแข็ง

2.1.3 การทดสอบหาขนาดของเม็ดดิน (Grain Size Analysis)

การร่อนผ่านตระแกรง (Sieve Analysis) จะเป็นวิธีที่เหมาะสมเมื่อปริมาณเม็ดดินเกือบทั้งหมดนั้น ไม่สามารถผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ได้ และไม่สามารถบอกได้ว่าเม็ดดินมีลักษณะเหลี่ยมหรือกลม แต่บอกได้เพียงว่ามีขนาดเล็กหรือใหญ่กว่าตะแกรงเบอร์ที่เท่าไหร่เท่านั้น ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์หาขนาดเม็ดดิน นี้สามารถนำมาแสดงในรูปของเส้นกราฟเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบและพิจารณาการกระจายขนาดของเม็ดดิน โดยการนำขนาดของเม็ดดินและค่าของเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรง (Percent Passing หรือ Percent finer) ไปเขียนกราฟ Semi-log ก็จะได้เส้นโค้งของการกระจายขนาดของเม็ดดิน (Gradation Curve) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กราฟการกระจายตัวของดิน

จากกราฟสามารถนำไปหาค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Coefficient of Uniformity)ได้ดังนี้

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

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ของความโค้ง (Coefficient of Concavity) จะหาได้ดังนี้

$$Cc = (D_{30})^2 / (D_{10}.D_{60})$$

เมื่อ D_i = ขนาดของเม็ดดินที่ i เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

สำหรับดินที่มีขนาดคละกันดี (Well Graded) จะมีคุณสมบัติของค่าสัมประสิทธิ์ของความสม่ำเสมอ (Cu) และค่าสัมประสิทธิ์ของความโค้งดังรูปที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของค่าสัมประสิทธิ์ สำหรับดินที่มีขนาดคละกันดี

ชนิด	Cu	Cc
หิน	มากกว่า 4	1-3
ทราย	มากกว่า 6	1-3

สำหรับดินที่มีขนาดคละกันไม่ดี (Poorly Graded) โดยจะไม่เป็นไปตามตาราง ที่ 2.1 จะเป็นประเภทดินที่มีขนาดเม็ดเดียว (Uniform Graded) และดินที่มีลักษณะที่มีขนาดเม็ดขาดช่วง (Gab Graded) ซึ่งเส้นกราฟจะมีความชันมากและเป็นเส้นระนาบตามลำดับดังรูปที่ 2.1(เส้น B และ C) จากข้อมูลที่ได้ก็ทำการจำแนกดินตามระบบ Unified Soil Classification System ต่อไปได้

2.1.4 การจำแนกลักษณะดินทางวิศวกรรม (Soil Classification)

ดิน คือ วัตถุที่เกิดจากการสลายตัวของอินทรีย์สารและอนินทรีย์สาร ซึ่งได้แก่หิน ซากพืช ซากสัตว์ ที่ได้ผุพังเกิดเป็นตะกอนทับถมกันเป็นเวลานาน และการจัดหมู่ของดินทางวิศวกรรมนั้น จะใช้คุณสมบัติทางกายภาพของดินเป็นหลักเกณฑ์ในการพิจารณา เช่น ขนาดของเม็ดดิน และความอ่อนตัวของเนื้อดิน เป็นต้น จากการที่ดินแต่ละชนิดนั้น มีคุณสมบัติแตกต่างกันไป จึงมีหน่วยงานและผู้เกี่ยวข้องได้พยายามจำแนกดินออกเป็นกลุ่ม หรือประเภทของดินตามลักษณะหน่วยงานและวัตถุประสงค์ที่นำไปใช้ สำหรับงานทางด้านวิศวกรรมโยธามักจะใช้สัญลักษณ์ที่วิศวกรส่วนใหญ่ใช้เป็นมาตรฐานอยู่แล้ว ซึ่งสามารถจดจำได้ง่ายและสำหรับการจำแนกดินจะมีหลายวิธี เช่น ระบบการจำแนกดินของ American Association of State Highway and Transport Official System (AASHTO) , Unified Soil Classification System (USCS),American Standard Testing Material System (ASTM) , Federal Aviation Agency (FAA) นอกจากนี้ยังมีระบบอื่นที่ไม่เป็นที่นิยมนัก ในปัจจุบันวิธีการจำแนกดินที่ใช้กันอยู่นั้นมักจะขึ้นอยู่ลักษณะหรือประเภทงานที่นำไปใช้ เช่น ระบบ AASHTO จะใช้กับงานถนน ระบบ FAA จะใช้กับการสร้างสนามบิน และระบบ USC จะใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมทั่วไปและเป็นที่นิยมกว่าระบบอื่น

ในการวิจัยครั้งนี้ใช้การจำแนกดินตามระบบ USCS ซึ่งมีหลักในการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 2.2

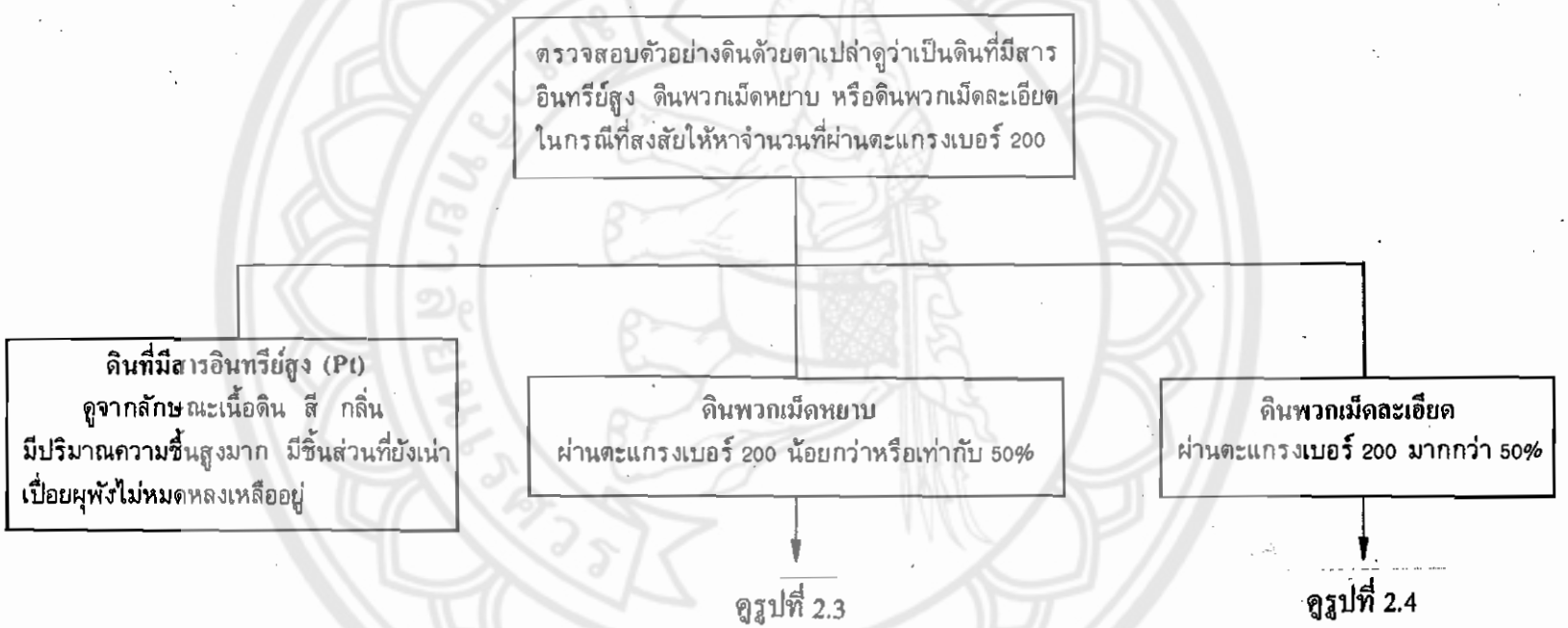
ระบบการจำแนกดินแบบ USCS นี้ถูกกำหนดโดย A.Casagrande ในปี ค.ศ 1942 ต่อมาหน่วยทหารช่างของสหรัฐอเมริกาได้นำไปปรับปรุงเพื่อนำไปใช้การก่อสร้างสนามบินและมีการปรับปรุงในหน่วยงานอื่น ๆ อีกและตั้งเป็นระบบที่มีความเหมาะสมกับประเภทของประเทศนั้น ๆ สำหรับการจำแนกดินด้วยระบบนี้จะพิจารณาจาก

- ขนาดเม็ดดินเป็นดินหยาบ (Coarse – Grained Soil) หมายถึงดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 น้อยกว่า 50% เช่น กรวด (Gravel) ทราย (Sand) และสำหรับดินเม็ดละเอียด (Fine – Grained Soil) หมายถึงดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากว่า 50% เช่น ทรายแป้ง (Silt) ดินเหนียว (Clay) เป็นต้น
- สำหรับดินเม็ดหยาบจะพิจารณาแยกย่อยโดยพิจารณาการกระจายขนาดของเม็ดดินเช่น ลักษณะการคละกันดี (Well Grade) ไม่คละกันดี (Poorly Grade)
- สำหรับดินเม็ดละเอียดจะพิจารณาแยกย่อยโดยขีดจำกัดอัตเตอร์เบิร์ก (Atterberg 's Limit) ค่า Liquid Limit และค่า Plastic Index

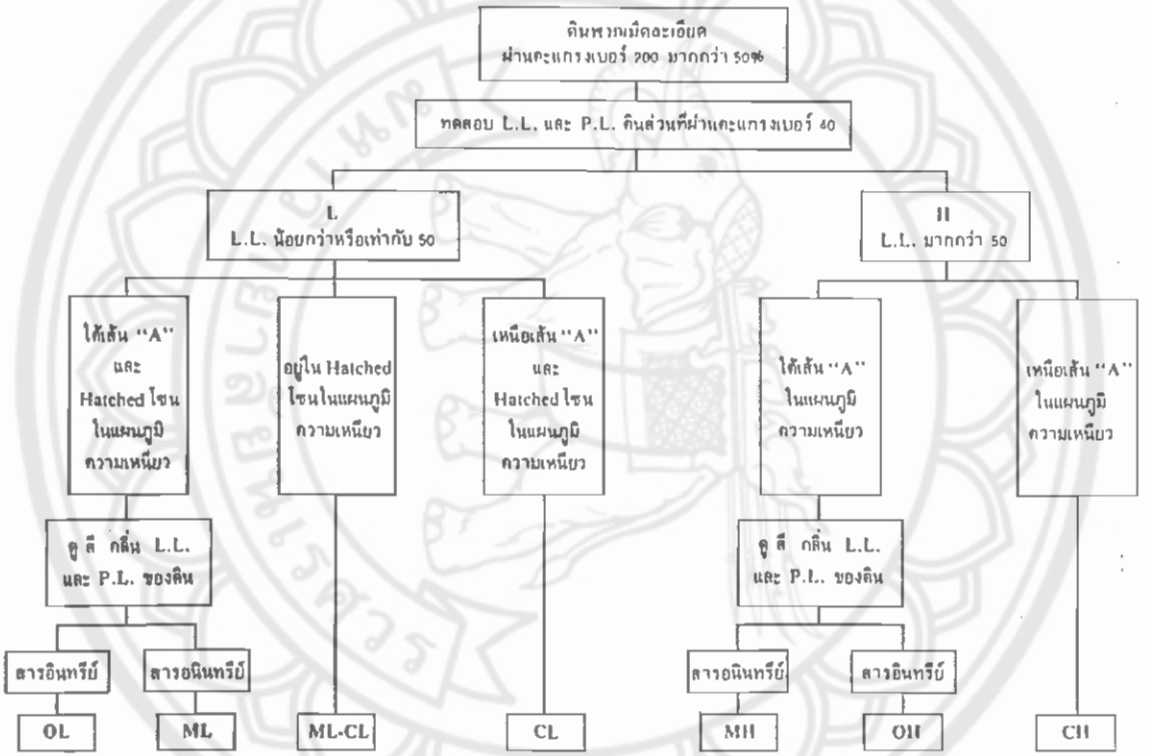
สำหรับการจำแนกดินด้วยระบบนี้มักจะบอกเป็นอักษรย่อ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 แสดงสัญลักษณ์ของชนิดดินตามระบบ USCS

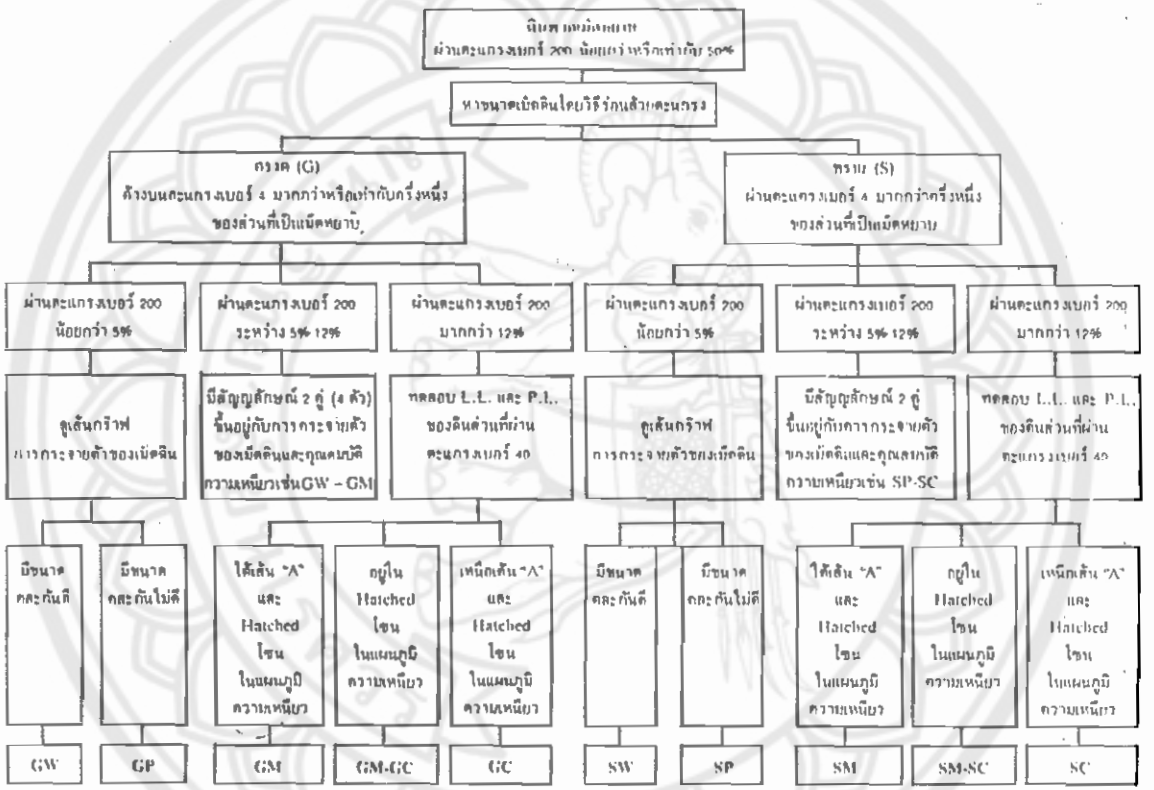
สัญลักษณ์	ลักษณะดิน	ย่อมาจาก
G	พวกกรวด	Gravel
S	พวกทราย	Sand
M	พวกตะกอนทราย	Mo = Silt
C	พวกดินเหนียว	Clay
O	พวกสารอินทรีย์	Organic
Pt	มีสารอินทรีย์สูง	Peat
W	มีขนาดคละกันดี	Well graded
P	มีขนาดคละกันไม่ดี	Poorly graded
L	L.L น้อยกว่า 50%	Low liquid limit
H	L.L มากกว่า 50%	High liquid limit



รูปที่ 2.2 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการจำแนกประเภทของดินโดยระบบ USCS ขั้นที่ 1



รูปที่ 2.3 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการจำแนกประเภทของดินโดยระบบ USCS ขั้นที่ 2



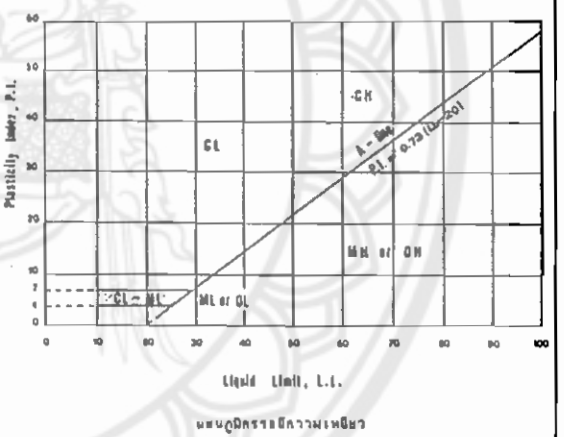
รูปที่ 2.4 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการจำแนกประเภทของดินโดยระบบ USCS ขั้นที่ 3

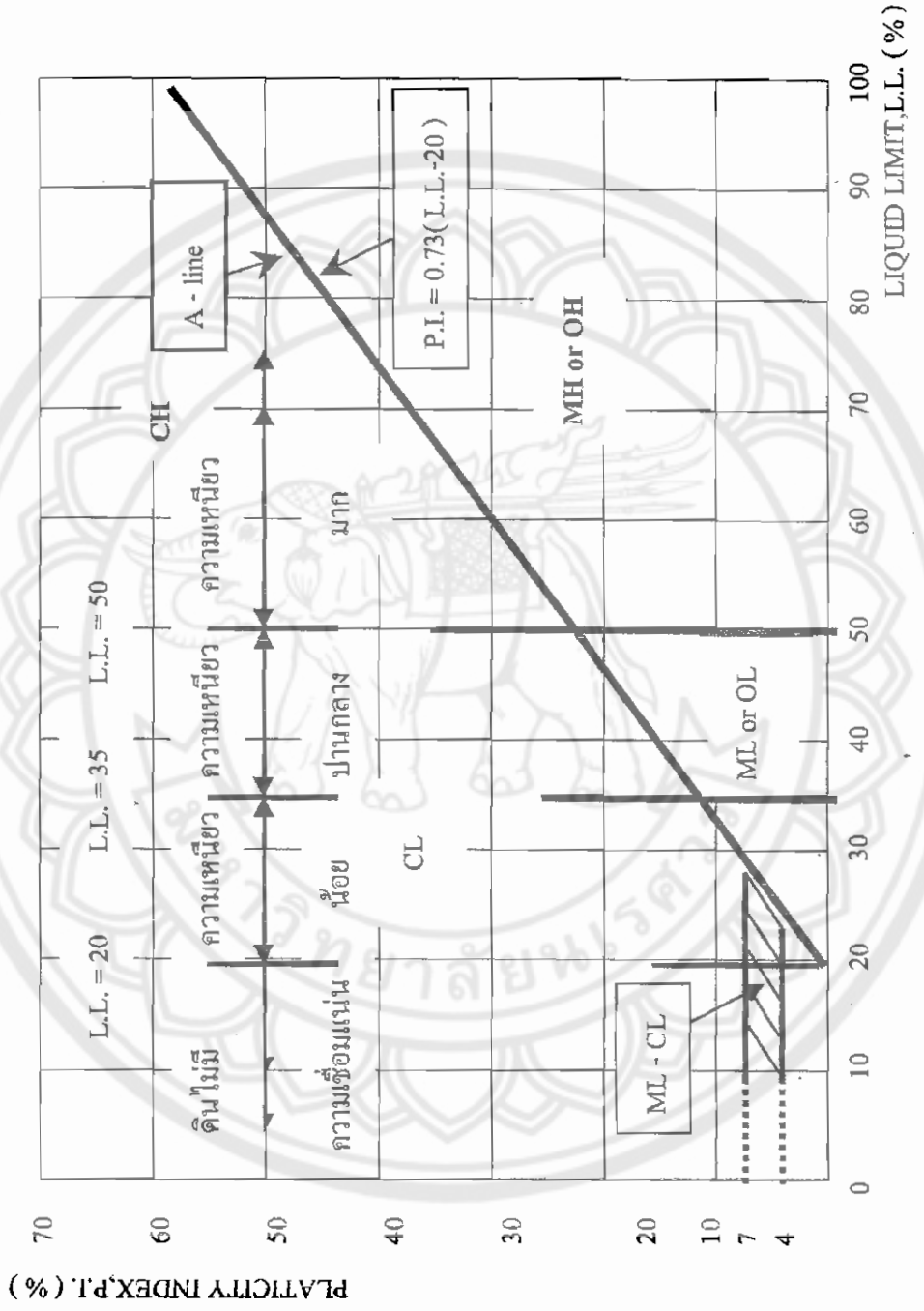
ตารางที่ 2.3 รายละเอียดการจำแนกประเภทของดินโดยระบบ USCS

การจำแนกประเภทหลัก		ชื่อกลุ่มดิน	เกณฑ์การจำแนกประเภท
ดินหยาบ มีขนาดเม็ดดินที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 น้อยกว่าร้อยละ 50			
กรวด มีขนาดเม็ดดินที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 น้อยกว่าร้อยละ 50	กรวดสะอาด (มีเม็ดดินขนาดอื่นปนอยู่น้อยกว่าร้อยละ 5)	GW	กรวดผสมทราย มีปริมาณเม็ดดินขนาดเล็กกว่าเบอร์ 200 น้อยกว่าร้อยละ 5	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ มากกว่า 4 $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ อยู่ระหว่าง 1-3
		GP	กรวดเรียงขนาดสม่ำเสมอ กรวดผสมทราย มีปริมาณเม็ดดินขนาดเล็กกว่าเบอร์ 200 น้อยกว่าร้อยละ 5	ไม่เข้าเกณฑ์ที่กำหนด GW
	กรวดมีเม็ดดินขนาดอื่นปนอยู่มาก (มีเม็ดดินขนาดอื่นปนอยู่มากกว่าร้อยละ 12)	GM	กรวดปนตะกอนทราย กรวด-ทราย-ตะกอนทรายแป้งผสมกัน	Atterberg limits อยู่ต่ำเส้น "A" หรือ P.I. น้อยกว่า 4	Atterberg limits อยู่ในบริเวณที่แรเงา Hatched ใช้สัญลักษณ์ 2 ตัว
		GC	กรวดปนดินเหนียว กรวด-ทราย-ดินเหนียวผสมกัน	Atterberg limits อยู่สูงเส้น "A" และ P.I. มากกว่า 7	ถือว่าเกณฑ์ทั้งสองกรณีใช้สัญลักษณ์ 2 ตัว
	ทรายมีเม็ดดินขนาดอื่นปนอยู่น้อย (มีเม็ดดินขนาดอื่นปนอยู่น้อยกว่าร้อยละ 5)	SW	ทรายสะอาด มีปริมาณเม็ดดินขนาดเล็กกว่าเบอร์ 200 น้อยกว่าร้อยละ 5	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ มากกว่า 6 $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ อยู่ระหว่าง 1-3
		SP	ทรายเรียงขนาดสม่ำเสมอ ทราย มีปริมาณเม็ดดินขนาดเล็กกว่าเบอร์ 200 น้อยกว่าร้อยละ 5	ไม่เข้าเกณฑ์ที่กำหนด SW
	ทรายมีเม็ดดินขนาดอื่นปนอยู่มาก (มีเม็ดดินขนาดอื่นปนอยู่มากกว่าร้อยละ 12)	SM	ทรายปนตะกอนทราย ทราย-ตะกอนทรายแป้งผสมกัน	Atterberg limits อยู่ต่ำเส้น "A" หรือ P.I. น้อยกว่า 4	Atterberg limits อยู่ในบริเวณที่แรเงา Hatched ใช้สัญลักษณ์ 2 ตัว
		SC	ทรายปนดินเหนียว ทราย-ดินเหนียวผสมกัน	Atterberg limits อยู่สูงเส้น "A" และ P.I. มากกว่า 7	ถือว่าเกณฑ์ทั้งสองกรณีใช้สัญลักษณ์ 2 ตัว
ดินละเอียด มีขนาดเม็ดดินที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่าร้อยละ 50			
ดินตะกอน และดินเหนียว มีค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit) น้อยกว่าร้อยละ 50		ML	ตะกอนทราย ตะกอนทรายแป้ง ตะกอนดินเหนียว ที่มีความเหนียวน้อย	ไม่เข้าเกณฑ์ที่กำหนด
		CL	ดินเหนียวอินทรีย์ ดินเหนียวปนทราย ดินเหนียวปนตะกอน ที่มีความเหนียวต่ำถึงปานกลาง	Atterberg limits อยู่ต่ำเส้น "A" หรือ P.I. น้อยกว่า 4	Atterberg limits อยู่ในบริเวณที่แรเงา Hatched ใช้สัญลักษณ์ 2 ตัว
		OL	ดินตะกอนอินทรีย์ ดินเหนียวตะกอนอินทรีย์ ที่มีความเหนียวต่ำ	Atterberg limits อยู่ต่ำเส้น "A" หรือ P.I. น้อยกว่า 4	ถือว่าเกณฑ์ทั้งสองกรณีใช้สัญลักษณ์ 2 ตัว
ดินตะกอน และดินเหนียว มีค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit) มากกว่าร้อยละ 50		MH	ตะกอนทรายอินทรีย์ ตะกอนทรายแป้งอินทรีย์ ที่มีความเหนียวปานกลาง	ไม่เข้าเกณฑ์ที่กำหนด
		CH	ดินเหนียวอินทรีย์ ที่มีความเหนียวสูง	Atterberg limits อยู่ต่ำเส้น "A" หรือ P.I. น้อยกว่า 4	Atterberg limits อยู่ในบริเวณที่แรเงา Hatched ใช้สัญลักษณ์ 2 ตัว
		OH	ดินตะกอนอินทรีย์ ที่มีความเหนียวปานกลาง	Atterberg limits อยู่ต่ำเส้น "A" หรือ P.I. น้อยกว่า 4	ถือว่าเกณฑ์ทั้งสองกรณีใช้สัญลักษณ์ 2 ตัว
ดินอินทรีย์สูง		Pt	พีท ดินอินทรีย์สูง	ไม่เข้าเกณฑ์ที่กำหนด

หมายเหตุ : ดินที่มีขนาดเม็ดดินที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ระหว่าง 5-12 % : GW, GP, SW, SP
ดินที่มีขนาดเม็ดดินที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่า 12 % : GM, GC, SM, SC
ดินที่มีขนาดเม็ดดินที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ระหว่าง 5-12 % : มีสัญลักษณ์ 2 ตัว (ตามหน้า)

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)รายละเอียดการจำแนกประเภทของดินโดยระบบ USCS

การจำแนกประเภทหลักใหญ่		สัญลักษณ์กลุ่ม	ชื่อกลุ่มดิน	เกณฑ์การจำแนกประเภท
ดินหยาบ มีขนาดเม็ดใหญ่กว่าเบอร์ 200 มากกว่า 50 %	กรวดหรือกรวดปนทราย มีขนาดเม็ดเล็กกว่าเบอร์ 4 มากกว่า 50 %	GW	กรวดหรือกรวดปนทรายที่มีการคละขนาดดี มีเม็ดละเอียดปนอยู่น้อย	
		GP	กรวดหรือกรวดปนทรายที่มีการคละขนาดไม่ดี มีเม็ดละเอียดปนอยู่น้อย	
		GM	กรวดหรือกรวดปนทรายที่มีเม็ดละเอียดปนอยู่มาก ดินเหนียวปนทรายปนกรวด	
		GC	กรวดหรือกรวดปนทรายที่มีเม็ดละเอียดปนอยู่มาก ดินเหนียวปนทรายปนกรวด	
	ทรายหรือทรายปนกรวด มีขนาดเม็ดเล็กกว่าเบอร์ 4 มากกว่า 50 %	SW	ทรายหรือทรายปนกรวดที่มีการคละขนาดดี มีเม็ดละเอียดปนอยู่น้อย	
		SP	ทรายหรือทรายปนกรวดที่มีการคละขนาดไม่ดี มีเม็ดละเอียดปนอยู่น้อย	
		SM	ทรายหรือทรายปนกรวดที่มีเม็ดละเอียดปนอยู่มาก ดินเหนียวปนทรายปนกรวด	
		SC	ทรายหรือทรายปนกรวดที่มีเม็ดละเอียดปนอยู่มาก ดินเหนียวปนทรายปนกรวด	
ดินหยาบ มีขนาดเม็ดใหญ่กว่าเบอร์ 200 มากกว่า 50 %	ดินตะกอนทรายอินทรีย์และทรายละเอียดมาก ดินตะกอนทราย ทรายแป้ง ทรายละเอียดปนดินตะกอนทราย หรือดินเหนียวมีความเหนียวเล็กน้อย L.L. น้อยกว่าหรือเท่ากับ 50	ML	ดินตะกอนทรายอินทรีย์และทรายละเอียดมาก ดินตะกอนทราย ทรายแป้ง ทรายละเอียดปนดินตะกอนทราย หรือดินเหนียวมีความเหนียวเล็กน้อย	
		CL	ดินเหนียวอินทรีย์มีความเหนียวต่ำถึงปานกลาง ดินเหนียวปนกรวด ดินเหนียวปนทราย ดินเหนียวปนตะกอนทราย ดินเหนียวล้วน	
		OL	ตะกอนทรายอินทรีย์และดินเหนียวปนตะกอนทรายอินทรีย์ มีความเหนียวต่ำ	
	ดินตะกอนทรายอินทรีย์และดินเหนียว L.L. มากกว่า 50	MH	ตะกอนทรายอินทรีย์ ทรายละเอียดหรือตะกอนทรายปนทรายหรือดินเหนียวตะกอนทรายที่มีกรหนุน	
		CH	ดินเหนียวอินทรีย์มีความเหนียวสูง ดินเหนียวมีความหนืดสูง	
		OH	ดินเหนียวอินทรีย์ มีความเหนียวปานกลางถึงสูง ตะกอนทรายอินทรีย์	
ดินหากหาอินทรีย์สูง		PT	ดิน รากหญ้า และดินอินทรีย์ผสมอื่นๆ	แยกวิจารณ์ ดิ กดิน การสังเกตและลักษณะเนื้อ



รูปที่ 2.5 แผนภูมิความเหนียว สำหรับการจำแนกประเภทของดินจำพวกดินเม็ดละเอียด

2.2 การทดสอบความแน่นของดินที่เปลี่ยนไปตามเปอร์เซ็นต์ความชื้น

2.2.1 การบดอัดดิน (Compaction Test)

วิธีบดอัดดินให้ได้ความแน่น (Density) สูงตามความต้องการหรือตามจุดประสงค์ของการใช้งานจะต้องอาศัยน้ำเป็นตัวหล่อลื่น แต่ถ้าน้ำมีอยู่มากเกินไปน้ำจะไปหุ้มเคลือบรอบ ๆ มวลดิน ทำให้อนุของเม็ดดินแยกตัวห่างออกจากกัน หรือถ้ามีน้ำอยู่น้อยเกินไป การหล่อลื่นก็ไม่ดีพอที่จะช่วยให้การบดอัดเม็ดดินเบียดชิดกันเท่าที่ควร ด้วยเหตุผลและข้อเท็จจริงดังกล่าว RR. Proctor (1933) ได้กำหนดวิธีทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับความแน่น (Density) ของดินที่ได้จากการบดอัดในห้องปฏิบัติการ ซึ่งต่อมาได้เป็นที่ยอมรับและนิยมใช้ทดสอบการบดอัดดินในงานก่อสร้างโดยทั่วไป ว่าเป็นวิธีทดสอบมาตรฐาน (Standard Proctor Test) โดยเฉพาะการทดสอบเพื่อควบคุมงานก่อสร้างถนน สนามบิน (Runway) เขื่อนดิน พื้นโรงงาน ฯลฯ ในปัจจุบัน ยานพาหนะที่ใช้ขนส่งมีขนาดใหญ่ขึ้น บรรทุกน้ำหนักได้มากขึ้นหลายเท่าตัว พลังงาน (Energy) ที่ใช้ในการบดอัดก็จำเป็นต้องเพิ่มขึ้นด้วย จึงได้มีการกำหนดวิธีทดสอบการบดอัดดินโดยการเพิ่มพลังงานให้สูงขึ้น เพื่อจะได้ฐานดินที่มีความแน่นสูงรับน้ำหนักได้มาก เรียกว่า วิธีทดสอบแบบโมดิฟายด์ (Modified Proctor Test)

2.3 การทดสอบความสามารถทางด้านกำลังของดิน

2.3.1 การทดสอบแรงอัดไม่จำกัด (Unconfined Compression Test)

เป็นการทดสอบหาค่าแรงเฉือนของดินชนิด Cohesive Soil และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการประมาณเสภาพการรับน้ำหนักของดินได้ การทดสอบแรงอัดแบบแกนเดียวนี้นิยมใช้แพร่หลายในการใช้กับดินประเภท Cohesive Soil เนื่องจากสามารถทำได้อย่างรวดเร็วและมีค่าความปลอดภัยสูงกว่าวิธีอื่น ๆ แต่อย่างไรก็ตามการหาค่าแรงเฉือนด้วยวิธีนี้เป็นค่าโดยประมาณเท่านั้น เพราะเป็นผลมาจากวิธีการทดสอบดังต่อไปนี้

(1) ไม่มีแรงดันด้านข้างของตัวอย่างดินก่อให้เกิดความแตกต่างจากสภาพจริงในธรรมชาติ

(2) สภาพภายในของดิน เช่น ค่าระดับของความอิ่มตัว ค่าแรงดันของน้ำในดินขณะรับน้ำหนักไม่สามารถควบคุมได้

สำหรับค่าการรับน้ำหนักของดินนั้นสามารถหาค่าแรงเฉือนของดินโดยประมาณได้อย่างรวดเร็วจาก Mohr ' s Diagram และจะเป็นไปตาม Coulomb ' s Law ส่วนค่ากำลังรับน้ำหนักของ

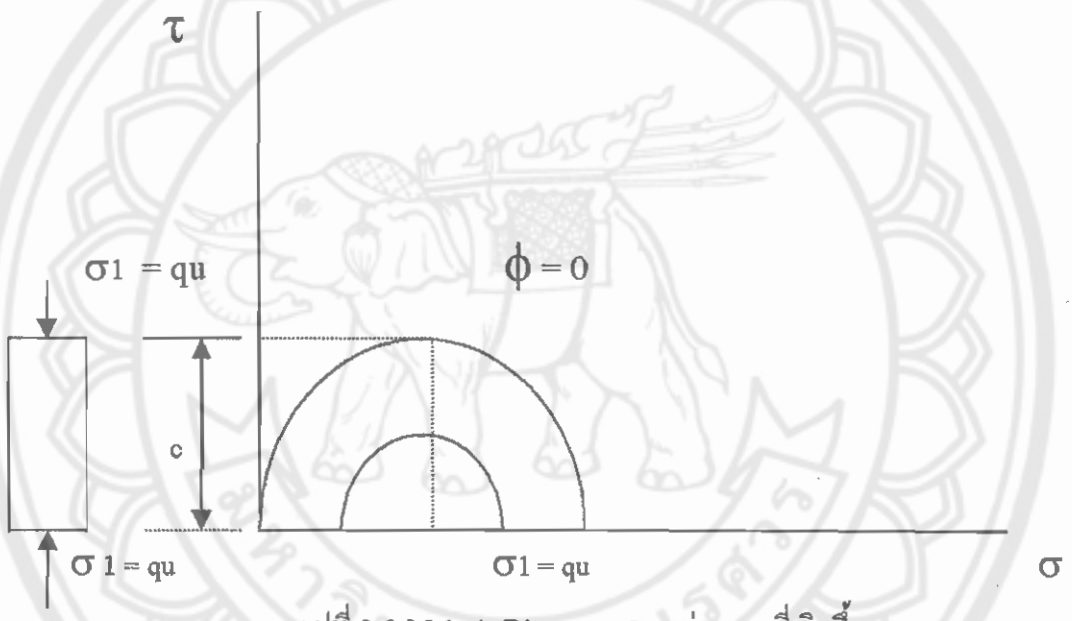
ดินเหนียวขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน ในขณะที่ดินเม็ดหยาบค่ากำลังรับน้ำหนักขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดิน

จากสมการของ Mohr-Coulomb ดังสมการที่ 2.1

$$\tau = C + \sigma\tan\phi \qquad (2.1)$$

จะพบว่าสำหรับดินเหนียวอ่อนแล้วจะไม่มีแรงเสียดทานภายในเม็ดดินนั่นคือ $\tan\phi = 0$ ดังนั้น

$$\tau = C \qquad (2.2)$$



รูปที่ 2.6 Mohr 's Diagram และหน่วยแรงที่เกิดขึ้น

ขณะที่ทำการทดสอบ บันทึกค่าแรงกดที่เพิ่มขึ้น (Fv) และการหดตัวของตัวอย่างดิน (ΔV) จนกระทั่งตัวอย่างดินเกิดการวิบัติ จะได้ค่า Fv max คำนวณหาค่ากำลังอัดของดิน (Compression Strength, σ1) จากรูปที่ 2.6 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Cohesion และ Unconfined Compressive Strength

$$C = qu / 2 \qquad (2.3)$$

ค่า Undrained shear strength ของดินเหนียวแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 กำลังเฉือน (Shear strength) ของดินเหนียว

Consistency Description	Undrained shear strength (t/m^2)
Very soft	< 2.0
Soft	2.0-4.0
Soft to firm	4.0-5.0
Firm	5.0-7.5
Firm to stiff	7.5-10.0
Stiff	10.0-15.0
Very stiff to hard	> 15.0

2.4 การทดสอบการเปลี่ยนรูปของดิน

2.4.1 การทดสอบการอัดคายตัวของน้ำ (Consolidation Test)

ดินเมื่อได้รับแรงกดก็พยายามที่จะจัดตัวให้แน่น โดยการทำให้น้ำในช่องว่างของมวลดินออกไปทำให้ปริมาตรลดลง เกิดการทรุดตัวซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในด้านปฐพีกลศาสตร์ ในทางด้านวิศวกรรมปฐพีนั้นแบ่งการทรุดตัวของดินออกเป็น 3 ชนิดคือ

(1) Elastic Deformation เกิดจากคุณสมบัติยืดหยุ่นของดิน ปกติมักจะเกิดขึ้นทันทีที่มีน้ำหนักกดทับและมีปริมาณไม่มากนัก

(2) Primary Consolidation เกิดจากปริมาณน้ำหรืออากาศที่ถูกบีบออกจากมวลดินทำให้ปริมาตรรวมของดินลดลง

(3) Secondary Consolidation กล่าวกันว่ามีสาเหตุจาก Plastic Deformation และการจัดเรียงตัวของเม็ดดินที่เกิดขึ้นหลังจาก Primary Consolidation

การอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) คือ กระบวนการรีดน้ำออกจากมวลดิน โดยที่เนื้อของดินส่วนที่เป็นส่วนของแข็งยังคงมีปริมาณคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด มีเพียงปริมาณของน้ำหนักเท่านั้นที่ลดลง ดินเมื่อผ่านกระบวนการการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) หรือถูกรีดน้ำกระบวนการนี้อาจเป็นเพราะแรงกระทำจากภายนอกหรือความร้อนที่เผาให้น้ำระเหยออกไป เช่น ความร้อนจากแสงอาทิตย์หรือการดูดน้ำออกจากดิน เช่นการสูบน้ำบาดาล เป็นต้น กระบวนการการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) คือ มวลดินที่อุ้มน้ำอยู่เต็มเมื่อได้รับปัจจัยที่ทำให้เกิดการอัดตัวกาย

น้ำเพิ่มสูงขึ้นในปริมาณหนึ่ง เมื่อปล่อยน้ำทิ้งไว้จะเริ่มไหลหนีออกจากมวลดินนั้น ในขณะที่น้ำไหลหนีออกไปนี้ก็จะถ่ายแรงให้กับเม็ดดินความดันในน้ำก็จะลดลงในขณะที่ความเค้นประสิทธิผลในเม็ดดินก็จะเพิ่มขึ้น จนกระทั่งน้ำได้ถ่ายแรงดันในส่วนที่เพิ่มสูงขึ้นนั้นให้แก่เม็ดดินจนหมดสิ้น ก็ถือได้ว่าเป็นการสิ้นสุดขบวนการการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) เนื่องจากแรงกระทำเท่านั้น

ถ้าสมมุติให้ชั้นดินเหนียวสปริงที่บรรจุน้ำอยู่ในสภาพสมดุล ปิดวาล์วเมื่อเราเริ่มใช้แรงกด P จะพบว่าน้ำจะรับแรง P นี้ไว้ แต่น้ำไม่สามารถขุบอัดตัวได้จะเกิดแรงดันน้ำ Δu_o (Initial Excess pore pressure) เมื่อเราปิดวาล์วจะระบายออก ในขณะเดียวกันแรง P ก็จะถ่ายแรงให้กับสปริง สปริงจะหดตัว ซึ่งเปรียบเสมือนกับเม็ดดินที่จะรับแรงแทนน้ำจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลอีกครั้งคือแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore Pressure) เป็นศูนย์ ซึ่งในชั้นดินจริงเวลาที่ต้องใช้นานมากขึ้นอยู่กับชนิดของดิน สำหรับชั้นดินที่อยู่ในสภาพชุ่มน้ำ เมื่อน้ำระบายออกก็เกิดการทรุดตัว ปริมาณการทรุดตัวสูงสุด (Total Settlement) จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ " ดัชนีการทรุดตัว " (Compressibility Index , Cc) ซึ่งเป็นสิ่งที่เราต้องการทราบ

นอกจากนี้อัตราความเร็วในการทรุดตัว (Rate of Settlement) เป็นคุณสมบัติสำคัญที่จะทราบค่าอัตราความเร็วในการทรุดตัวนั้นขึ้นอยู่กับอิทธิพลของสิ่งเหล่านี้

- มวลดินมีความชุ่มน้ำมากน้อยเพียงใด (Degree of Settlement)
- ความสามารถของดินที่ให้น้ำซึมผ่านได้ดีเพียงใด (Coefficient of Permeability)
- ระยะทางที่น้ำต้องซึมผ่าน (Drainage Path) ไปสู่จุดสมดุล

คุณสมบัติการทรุดตัวที่ต้องการหามีอยู่ 2 ค่า คือ

1. ปริมาตรการทรุดตัวสูงสุด (Total Settlement)

$$Sc = (Cc / (1+eo)) . H \log ((Po+\Delta P) / Po))$$

เมื่อ Cc = ดัชนีการทรุดตัว

e_o = Initial Void Ratio

Po = Effective Overburden pressure

ΔP = External Pressure

H = ความหนาของชั้นดิน

2. อัตราความเร็วในการทรุดตัว

จาก Terzaghi 's Consolidation Theory ซึ่งทำการวิเคราะห์ทางเชิงคณิตศาสตร์ออกมาแล้ว จะได้ดัชนีค่าหนึ่งซึ่งบ่งถึงคุณสมบัติเกี่ยวกับการทรุดตัว เราเรียกว่า"Coefficient of Consolidation"

$$Cv = Th_d^2 / t$$

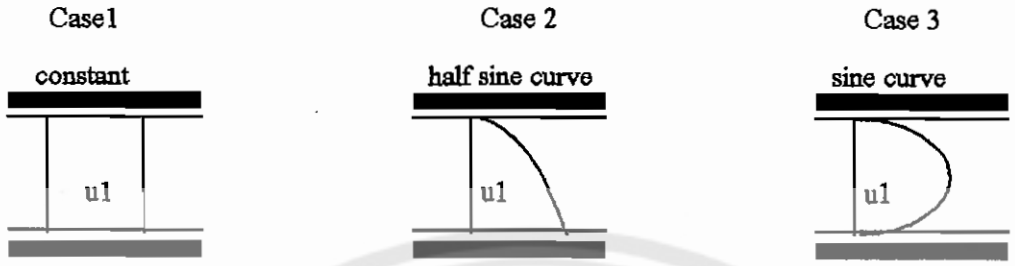
เมื่อ T = Time Factor เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ของการอัดตัวคายน้ำ (Percentage of Consolidation) และลักษณะของ Initial Excess Pore Pressure ดังแสดงในตารางที่ 2.5 และรูปที่ 2.7

t = เวลาในการเกิดเปอร์เซ็นต์ของการอัดตัวคายน้ำ (Percentage of Consolidation)

h_d = ระยะทางที่ไกลที่สุดที่น้ำในมวลดินจะต้องบไหลออกจากจุดสมดุล ค่า Cc, e_0 และ Cv สามารถหาได้จากการทดสอบนี้

ตารางที่ 2.5 ค่า Time Factor

Percentage of Consolidation	Time Factor Case 1	Time factor Case 2	Time factor Case 3
0	0	0	0
5	0.0020	0.0030	0.0208
10	0.0078	0.0111	0.0427
15	0.0177	0.0238	0.0659
20	0.0314	0.0405	0.0904
25	0.0491	0.0608	0.128
30	0.0707	0.0847	0.145
35	0.0962	0.112	0.187
40	0.126	0.143	0.207
45	0.159	0.177	0.242
50	0.197	0.215	0281
55	0.239	0.257	0.324
60	0.286	0.305	0.371
65	0.342	0.359	0.435
70	0.403	0.422	0.488
75	0.477	0.495	0.562
80	0.567	0.586	0.652
85	0.674	0.402	0.769
90	0.848	0.867	0.933
95	1.129	1.14	1.214
100	α	α	α



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของ Initial Pore Pressure สำหรับกรณี 1,2 และ 3