

CE 372 ENGINEERING SOIL TESTS

การทดสอบเรื่องที่ 4

การทดสอบเพื่อประเมินขนาดและปริมาณของเม็ดดินในมวลดินเม็ดละเอียด
โดยวิธีไฮโดรมิเตอร์

PARTICLE SIZE ANALYSIS OF FINE GRAINED SOILS

HYDROMETER METHOD

1. บทนำ

การประเมินขนาดและปริมาณของเม็ดดินในมวลดินละเอียดโดยวิธีกลจะไม่สามารถทำได้ เนื่องจากเม็ดดินประเภท silt และ clay มีขนาดเล็กมากและเม็ดดินมีแรงยึดเหนี่ยวดึงดูดซึ่งกันและกัน หรือ cohesion ทำให้เม็ดดินเกาะติดกันเป็นก้อนดินที่มีความมั่นคงสูง การทุบมวลดินละเอียดด้วยค้อนอย่าง ไม่สามารถทำให้เม็ดดินแยกตัวออกจากกันเป็นเม็ดดินอิสระจนหมดสิ้นได้ เมื่อนำมวลดินละเอียดนั้นไปร่อนผ่านตะแกรง โดยวิธีกล จึงทำให้เม็ดดินค้างอยู่บนตะแกรงที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่กว่าขนาดที่แท้จริงของเม็ดดินแต่ละเม็ด นอกจากนั้น เม็ดดินที่มีขนาดเล็กมาก มีค่า specific surface สูง สามารถดึงดูดติดอยู่กับเส้นลวดแผ่นตะแกรง ทำให้เกิดการอุดตันของแผ่นตะแกรงได้ง่าย ด้วยเหตุผลเหล่านี้ ทำให้ผลทดสอบแสดงปริมาณเม็ดดินค้างอยู่บน ตะแกรงที่มีช่องเปิดขนาดเล็ก มีปริมาณมากกว่าความเป็นจริง อีกทั้ง การผลิตแผ่นตะแกรงที่มีช่องเปิดขนาดเล็ก (ขนาดเล็กกว่า 0.038 มม หรือ 38 microns) ย่อมไม่ได้ผลดี ยากแก่การควบคุมขนาดช่องเปิดของตะแกรง ให้คงที่ได้มาตรฐาน และยากต่อการดูแลรักษา แผ่นตะแกรงมักจะเกิดอุดตันระหว่างการทดสอบและเกิดการชำรุดเสียหายได้ง่าย ดังนั้น การประเมินขนาดและปริมาณของเม็ดดินในมวลดินละเอียด จึงต้องเปลี่ยนไปใช้วิธีการทางเคมี โดยใช้สารเคมีที่มีคุณสมบัติทำลายแรงดึงดูดระหว่างเม็ดดินผสมเข้ากับมวลดินละเอียดเพื่อช่วยให้เม็ดดินขนาดเล็ก แยกตัวออกจากกันเป็นเม็ดดินอิสระ หรือ ทำให้เม็ดดินอยู่ในสภาพ deflocculation และอาศัยกฎ การตกตะกอนของอนุภาครูปทรงกลมในของเหลว หรือ Stokes' Law ช่วยในการประเมินขนาดและปริมาณของ เม็ดดินในมวลดินละเอียดนั้น วิธีการทดสอบนี้เรียกว่า Hydrometer Analysis หรือ Hydrometer Method ซึ่งตาม มาตรฐาน AASHTO และ ASTM ระบุว่าใช้ทดสอบกับมวลดินละเอียดส่วนที่เม็ดดินมีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม. หรือ มวลดินส่วนที่ร่อนผ่านตะแกรง ASTM No.200 โดยที่ข้อกำหนดตามกฎหมายของ Stokes สามารถนำไปใช้ได้กับ อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 0.0002 มม. ถึง 0.2 มม. (BOWLES, 1992)

2. วัตถุประสงค์ของการทดสอบ

เพื่อให้นักศึกษาได้ทำความเข้าใจในทฤษฎี และเรียนรู้วิธีการที่ใช้ประเมินขนาดและปริมาณ ของเม็ดดินในมวลดินละเอียด โดยวิธี Hydrometer Analysis ภายใต้หลักการของ Stokes' Law รวมถึง

การคำนวณ การวิเคราะห์ผล และการรายงานผลการทดสอบในรูปของ particle size distribution curve หรือ grading curve ให้สัมพันธ์กับผลการทดสอบโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรงที่ได้ดำเนินการทดสอบไปแล้วกับตัวอย่างดินส่วนที่เป็นมวลละเอียดของตัวอย่างมวลดินละเอียดเดียวกันนี้

3. เอกสารอ้างอิง

- 3.1 มาตรฐาน ASTM D 422
Standard Method for Particle-Size Analysis of Soils
- 3.2 มาตรฐาน AASHTO DESIGNATION T 88
Standard Method of Particle Size Analysis of Soils
- 3.3 มาตรฐานอังกฤษ (BRITISH STANDARD) BS 1377 : 1975 TEST 7 (D)
Determination of the Particle Size Distribution : Subsidiary Method for Fine Grained Soils (Hydrometer Method)
- 3.4 BOWLES, J.E. (1992)
“Engineering Properties of Soils and Their Measurement”
Mcgraw-Hill Book Co.; Fourth Edition 1992; Experiment No.6
- 3.5 HEAD, K.H. (2006)
“Manual of Soil Laboratory Testing”
Volume 1 : Soil Classification and Compaction Tests
CRC Press, Taylor & Francis Group; Third Edition 2006
- 3.6 DAS, B.M. (2002)
“Soil Mechanics Laboratory Manual”
Oxford University Press; Sixth Edition 2002

4. ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

การทดสอบเพื่อประเมินขนาดและปริมาณของเม็ดดินในมวลดินละเอียดที่ประกอบไปด้วยดินเม็ดละเอียดโดยวิธีการตกตะกอนนี้ อาศัยหลักการของ Stokes' Law ซึ่งระบุว่า การตกตะกอนของอนุภาครูปทรงกลมในของเหลวชนิดเดียวกันใดๆ อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่ จะตกตะกอนได้เร็วกว่าอนุภาคชนิดเดียวกันที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า และความเร็วของการตกตะกอนของอนุภาค จะมีความสัมพันธ์แปรผกผันกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคนั้น ดังนั้น ในการทดสอบเพื่อประเมินขนาดและปริมาณของเม็ดดินในมวลดินละเอียดโดยวิธีนี้ จึงมีวิธีการโดยสรุป คือ นำมวลดินละเอียดละเอียดอบแห้งมาละลายลงในน้ำที่ผสมสารเคมี dispersing agent ไว้ เพื่อให้เกิดการแตกตัวของเม็ดดินเป็นเม็ดดินอิสระในกระบอกตวงหรือ measuring cylinder สารเคมีที่นิยมใช้ เป็น dispersing agent คือ สารละลาย sodium hexametaphosphate (NaPO_3) เมื่อเตรียมดินผสมสารเคมีแล้ว เขย่าผสมให้เม็ดดินขนาดต่างๆ กระจายไปอย่างสม่ำเสมอตลอดความลึกของกระบอกตวงแล้วตั้งกระบอกตวงทิ้งไว้เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของเม็ดดิน ความเข้มข้นของน้ำดินในส่วนบนของกระบอกตวงจะค่อยๆ ลดลง เนื่องจากเม็ดดินในส่วนบนของกระบอกตวงเคลื่อนที่ตกตะกอนไปสู่ส่วนล่างของกระบอกตวงมากขึ้นตลอดเวลา โดยเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่จะตกตะกอนไปก่อน และเม็ดดินขนาดเล็ก

จะเคลื่อนที่ตกตะกอนตามลงไปด้วยอัตราความเร็วที่ช้ากว่า เม็ดดินที่ค้างอยู่ในน้ำส่วนบนของกระบอกตวงจะเป็นเม็ดดินที่มีขนาดเล็ก และปริมาณน้อยลง ตลอดเวลาที่ผ่านไปหลังจากเริ่มต้นการทดสอบ ปริมาณเม็ดดินที่มีอยู่ในน้ำส่วนบนของกระบอกตวง ณ เวลาใดๆ สามารถวัดได้โดยใช้ hydrometer Model ASTM 152H ที่จัดทำขึ้นโดยเฉพาะ อ่านค่าปริมาณมวลสารที่มีเจือปนอยู่ในน้ำปริมาตร 1000 ลบ.ซม. หรือ 1 ลิตร จากข้อมูลดังกล่าว จะนำไปคำนวณได้ว่า ณ เวลาที่ผ่านไปใดๆ ยังมีเม็ดดินเหลือลอยอยู่ในน้ำส่วนบนของกระบอกตวง เป็นร้อยละเท่าใด โดยน้ำหนักของเม็ดดินทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบ และใช้ Stokes' Law คำนวณได้ว่า ณ เวลาที่ผ่านไปนั้นๆ เม็ดดินที่ตกตะกอนไปแล้วจากน้ำส่วนบนของกระบอกตวง มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง หรือ particle size (particle diameter, grain size, หรือ grain diameter) เล็กที่สุดเท่าใด ทำให้ประเมินได้ว่า มวลดินละเอียดที่ใช้ในการทดสอบมีเม็ดดินขนาดเล็กกว่า particle size ใด อยู่เป็นร้อยละเท่าใดโดยน้ำหนัก ของมวลดินละเอียดทั้งหมด หรือ ค่า percentage finer นั้นเอง เมื่ออ่านค่าเก็บข้อมูลการทดสอบ ณ เวลาต่างๆ หลายค่า ก็จะได้ค่า percentage finer สำหรับค่า particle size ต่างๆหลายขนาด สามารถนำไป plot เป็น particle size distribution curve ได้

กฎของ Stokes แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการตกตะกอนของอนุภาครูปทรงกลมในของเหลวใดๆ กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาครูปทรงกลมนั้นดังต่อไปนี้

$$v = \frac{2}{9} \left(\frac{\gamma_s - \gamma_f}{\eta} \right) \left(\frac{D}{2} \right)^2 \dots\dots\dots (4.1)$$

- เมื่อ v เป็นความเร็วของการเคลื่อนที่ตกตะกอนของอนุภาครูปทรงกลม มีหน่วยเป็น cm/s
- D เป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาครูปทรงกลม มีหน่วยเป็น cm
- η เป็นค่า absolute viscosity หรือ dynamic viscosity ของของเหลวตัวกลางของการตกตะกอน มีหน่วยเป็น dyne.s/cm² หรือ g/(cm.s) หรือ poise
- γ_s เป็นหน่วยน้ำหนัก (unit weight) ของอนุภาคที่ตกตะกอน โดยที่ $\gamma_s = g\rho_w$ และในหน่วย SI สามารถเขียนได้เป็น $\gamma_s = 980.7 G_s$ เมื่อ G_s เป็นค่า specific gravity ของอนุภาคที่ตกตะกอน
- γ_f เป็นหน่วยน้ำหนักของของเหลวตัวกลางการตกตะกอน แต่ในการทดสอบนี้ ใช้น้ำกลั่นเป็นของเหลวตัวกลางการตกตะกอน ดังนั้น γ_f จึงเขียนแทนด้วย γ_w โดยที่ $\gamma_w = g\rho_w$ และในหน่วย SI สามารถเขียนได้เป็น $\gamma_w = 980.7 G_w$ เมื่อ G_w เป็นค่า specific gravity ของน้ำ และมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ (ตารางที่ 4.1)

สมการที่ 4.1 สามารถเขียนในรูปแบบที่เรียบเรียงใหม่ เพื่อใช้ประเมินค่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคที่ตกตะกอนได้ ดังนี้ คือ

$$D = \sqrt{\frac{18 \eta v}{980.7 (G_s - G_w)}} \dots\dots\dots (4.2)$$

ผลการวิเคราะห์โดยสมการที่ 4.2 นี้ เป็นที่ยอมรับได้เมื่ออนุภาคที่ตกตะกอน มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 0.0002 มม. ถึง 0.2 มม. และจะใช้ประเมินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคได้ จะต้องมีข้อมูลประกอบไปด้วย ค่า η และ ค่า G_w ของน้ำ ณ อุณหภูมิที่ทำการทดสอบ ซึ่งสามารถอ่านค่าทั้งสองได้จากตารางที่ 4.1 ส่วนค่า G_s เป็นค่า specific gravity ของเม็ดดินซึ่งประเมินได้จากการทดสอบที่ผ่านมาแล้ว และค่า v เป็นความเร็วของการตกตะกอนของอนุภาคหรือเม็ดดินในน้ำ

Hydrometer ที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็น hydrometer มาตรฐาน ASTM MODEL No.152H ที่ทำขึ้นโดยเฉพาะ มี scale สำหรับอ่านค่าเป็นปริมาณมวลสารที่เจือปนอยู่ในน้ำ ในหน่วย g/litre คือ กรัมของมวลสารหรือมวลดินที่เจือปนอยู่ในน้ำปริมาตร 1 ลิตร hydrometer นี้มี scale ที่ใช้อ่านค่าได้จาก 0 ถึง 60 g/l ดังนั้นจึงต้องระมัดระวังในการใช้งานหากมีปริมาณมวลสารเจือปนอยู่ในน้ำเกินกว่า 60g/l จะไม่สามารถใช้ hydrometer นี้อ่านค่าได้ ในการนำ hydrometer นี้ไปใช้งาน เมื่อจุ่ม hydrometer ลงไปในน้ำดิน hydrometer จะต้องลอยตัวอยู่ได้โดยอิสระ แล้วทำการอ่านค่าบนก้าน hydrometer ณ จุดที่ก้าน hydrometer ตัดกับระดับราบของผิวหน้า ค่าที่อ่านได้จะเป็นค่าปริมาณความเข้มข้นของเม็ดดินในน้ำ ณ ระดับจุดศูนย์ถ่วงของกระเปาะ hydrometer ในหน่วยกรัมของเม็ดดิน/ลิตรของน้ำดิน ดังนั้น เมื่อระยะเวลาที่ทำการทดสอบผ่านไปนานขึ้น ปริมาณเม็ดดินที่ลอยอยู่ในน้ำส่วนบนของกระบอกตวงลดลง hydrometer ก็จะจมลึกลงไปในน้ำดินได้มากขึ้น พร้อมทั้งค่าที่อ่านได้จะลดลงไปเรื่อยๆ ทำให้จุดศูนย์ถ่วงของกระเปาะ hydrometer จมลึกลงไปจากระดับผิวของน้ำดินทุกขณะ ระยะ L ซึ่งเป็นระยะจากระดับราบของผิวหน้าดินถึงระดับจุดศูนย์ถ่วงของกระเปาะ hydrometer ณ เวลาที่ผ่านมาใดๆ มีความสำคัญที่จะต้องนำมาใช้ในการคำนวณความเร็วของการตกตะกอนของเม็ดดินในน้ำดินนั้น โดยที่ Stokes' Law ถือว่า อนุภาคที่ผิวหน้า เคลื่อนที่ตกตะกอนลงมาถึงระดับจุดศูนย์ถ่วงของกระเปาะ hydrometer เป็นระยะทาง L (cm) ในเวลา t (s) ที่ผ่านไปหลังจากเริ่มการทดสอบ ดังนั้น อนุภาคจะเคลื่อนที่ตกตะกอนด้วยความเร็ว v โดยที่

$$v = \frac{L}{t} \quad \text{ในหน่วย cm/s} \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

และเมื่อแทนค่า v นี้ลงในสมการที่ 4.2 พร้อมทั้งเปลี่ยนหน่วยของเวลา (t) เป็น นาที และเปลี่ยนหน่วยของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค หรือ particle size (D) เป็น มม. จะเขียนสมการที่ 4.2 ได้ใหม่ เป็น

$$D = \sqrt{\frac{30 \eta}{980.7 (G_s - G_w)}} \sqrt{\frac{L}{t}} \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

หรือ $D = K \sqrt{\frac{L}{t}} \quad \dots\dots\dots (4.5)$

- เมื่อ K เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการทดสอบ ซึ่งเป็น function ของค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (G_s) และคุณสมบัติของน้ำ (G_w และ η) ณ อุณหภูมิที่ใช้ทำการทดสอบ (ตารางที่ 4.3)
- D เป็นขนาดของเม็ดดินที่เล็กที่สุดที่ตกตะกอนผ่านจุดศูนย์ถ่วงของกระเปาะ hydrometer ลงไปแล้ว หลังจากการทดสอบผ่านไปเป็นเวลา t ใดๆ มีหน่วยเป็น มม.
- t เป็นระยะเวลาที่ผ่านมาไป จากจุดเริ่มอ่านค่าการทดสอบ มีหน่วยเป็น นาที

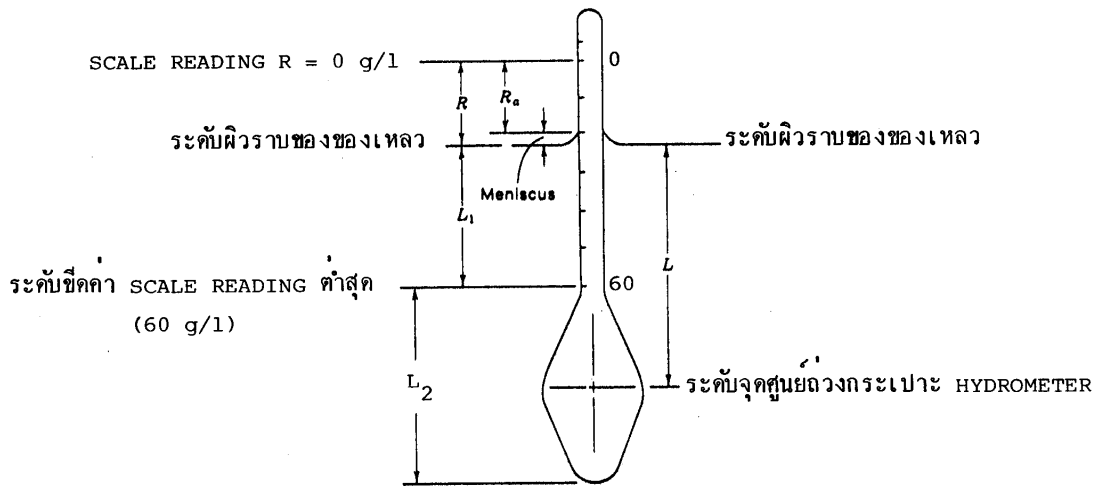
L เป็นระยะความลึก จากระดับราบของผิวน้ำดินในกระบอกตวง ถึงระดับจุดศูนย์ถ่วงของ กระเปาะ hydrometer ณ เวลา t ที่ผ่านไปนั้นๆ มีหน่วยเป็น ซม.

หากกำหนดให้ L เป็นระยะทางจากระดับราบของผิวของเหลวลงไปถึงระดับจุดศูนย์ถ่วงของ กระเปาะ hydrometer ในของเหลวนั้นดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าทุกครั้งที่ค่าที่อ่านได้บนก้าน hydrometer (hydrometer reading, R) เปลี่ยนไป ระยะ L ก็เปลี่ยนไปด้วย แต่ความสัมพันธ์ระหว่างค่า L และค่า R บนก้าน ของ hydrometer แต่ละอันเป็นความสัมพันธ์ที่คงที่ สามารถประเมินได้โดยการ calibrate hydrometer ที่จะใช้ไว้ล่วงหน้าก่อนทำการทดสอบ โดยอาศัยสมการ

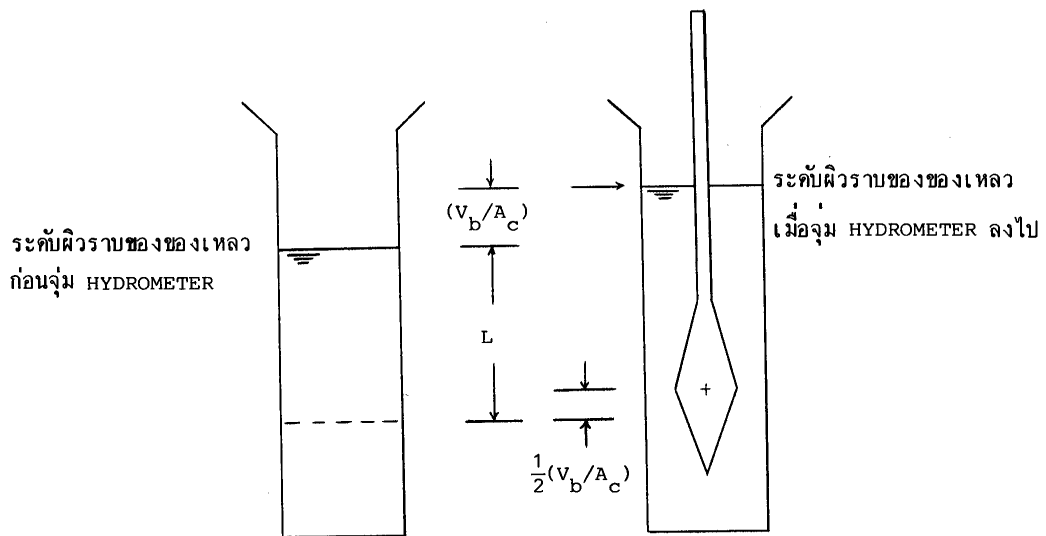
$$L = L_1 + \frac{1}{2} \left(L_2 - \frac{V_b}{A_c} \right) \dots\dots\dots (4.6)$$

- เมื่อ L เป็นระยะทางจากจุด scale reading ใดๆ (ค่า R หน่วย g/l) บนก้าน hydrometer ถึงระดับจุดศูนย์ถ่วงของกระเปาะ hydrometer เมื่อ hydrometer นั้นลอยตัวอยู่ใน น้ำดิน มีหน่วยเป็น cm
- L₁ เป็นระยะทางจากจุด scale reading ใดๆ (ค่า R หน่วย g/l) บนก้าน hydrometer ถึงระดับ scale reading ที่อยู่ต่ำสุดบนก้าน hydrometer นั้น (ปกติจะเป็น scale reading ที่ R = 60 g/l) มีหน่วยเป็น cm
- L₂ เป็นระยะทางจากจุด scale reading ที่อยู่ต่ำสุดบนก้าน hydrometer (ปกติจะเป็นค่า R = 60 g/l) ถึงจุดปลายสุดของกระเปาะ hydrometer มีหน่วยเป็น cm
- V_b เป็นปริมาตรของกระเปาะ hydrometer มีหน่วยเป็น cc
- A_c เป็นพื้นที่หน้าตัดภายในของกระบอกตวงความจุ 1000 cc ที่ใช้ทดสอบการตกตะกอนของ เม็ดดิน มีหน่วยเป็น cm²

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า ระยะจาก scale reading ที่เป็นค่า R ใดๆ ลงไปถึง จุดศูนย์ถ่วงของกระเปาะ hydrometer จะมีค่า $L = \left(L_1 + \frac{1}{2} L_2 \right)$ แต่จากรูปที่ 4.2 การนำ hydrometer ไปจุ่มลงในของเหลวในกระบอกตวง ปริมาตรของกระเปาะ hydrometer (V_b) จะไปแทนที่ของเหลวในกระบอกตวง เป็น ผลให้ระดับผิวของเหลวในกระบอกตวงสูงขึ้นจากระดับเดิม เป็นระยะ $= \left(\frac{V_b}{A_c} \right)$ (ระดับเดิมในที่นี้ คือ ระดับขีด แสดงปริมาตร 1000 cc ของกระบอกตวง) ทำให้จุดศูนย์ถ่วงของกระเปาะ hydrometer เคลื่อนที่สูงขึ้นมาใน กระบอกตวงเป็นระยะทาง $= \frac{1}{2} \left(\frac{V_b}{A_c} \right)$ เมื่อเปรียบเทียบกับระดับที่จุดศูนย์ถ่วงของกระเปาะ hydrometer ควรจะ วางตัวอยู่ใน ของเหลว หากระดับผิวของของเหลวทรงตัวอยู่ที่ระดับเดิม (ที่ขีดแสดงปริมาตร 1000 cc) ในการ ประเมินความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะ L และค่า hydrometer reading, R โดยสมการที่ 4.6 นี้ จะถือว่า ก้าน hydrometer ส่วนที่จุ่มลงไปแทนที่ของเหลวในกระบอกตวง มีปริมาตรน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาตรของ



รูปที่ 4.1 ระยะต่างๆบน HYDROMETER



รูปที่ 4.2 ระยะ L เมื่อ HYDROMETER ลอยอยู่ในของเหลว

กระเปาะ hydrometer (V_b) ดังนั้น จึงสมมุติให้การเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของเหลวส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยก้าน hydrometer มีค่าเป็นศูนย์ ผลของการทำ hydrometer calibration จะเป็นเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า L และค่า hydrometer scale reading, R ซึ่งจะบอกให้ทราบได้ว่า เมื่อ hydrometer ดังกล่าวลอยตัวอยู่ในของเหลว ที่มีอุณหภูมิหรือเมื่อดินเจือปน และอ่านค่า ณ จุดที่ก้าน hydrometer ตัดกับระดับราบของผิวของเหลว ได้เป็นค่า R ใดๆ จุดศูนย์ถ่วงของกระเปาะ hydrometer ในขณะนั้น จะอยู่ลึกจากระดับราบของผิวของเหลวเป็นระยะทาง L เท่าใด เส้นกราฟความสัมพันธ์นี้จะมีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรง

การอ่านค่า scale บนก้าน hydrometer ที่ถูกต้อง จะต้องเป็นค่าที่ระดับราบของผิวของเหลว ตัดกับก้าน hydrometer เสมอ แต่โดยทั่วไปในระหว่างการทดสอบ การอ่านค่าจะเป็นการอ่านที่ระดับ top of meniscus ทั้งนี้เนื่องจากแรงตึงผิวระหว่างของเหลวกับก้านของ hydrometer ทำให้จุดตัดของผิวของเหลวกับก้าน hydrometer สูงขึ้นไปจากระดับราบของระดับผิวของเหลวที่แท้จริง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.1 และการที่ของเหลวมีความขุ่นข้น ทำให้ไม่สามารถมองผ่านของเหลวเข้าไปอ่านค่าบนก้าน hydrometer ณ ระดับราบของผิวของเหลว ในกระบอกตวงได้ จึงจำเป็นต้องอ่านค่าบนก้าน hydrometer จากระดับ top of meniscus (R_a) แทนแล้วนำค่า R_a ที่อ่านได้นี้มาทำการปรับแก้ โดยใช้ค่า meniscus correction ซึ่งประเมินได้โดยการนำ hydrometer ดังกล่าว ไปจุ่มลอยตัวในน้ำใส ทำให้สามารถอ่านค่าบนก้าน hydrometer ทั้งที่ top of meniscus และที่ระดับราบของผิวน้ำ ได้อย่างถูกต้อง ความแตกต่างของค่าที่อ่านได้ทั้งสองค่า จะนำมาใช้เป็นค่า meniscus correction สำหรับใช้การปรับแก้ค่า R_a ที่อ่านได้ในน้ำดิน ให้เป็นค่า R ที่ถูกต้อง เพื่อนำไปประเมินค่า L จาก calibration chart ต่อไป

หลังจากที่ประเมินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง หรือ particle size (D) ของเม็ดดินที่ตกตะกอนในระยะเวลา t ใดๆที่ผ่านไปได้แล้ว จะสามารถประเมินปริมาณของเม็ดดินในมวลดินละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่า D ซึ่งยังคงแขวนลอยอยู่ในน้ำเหนือระดับจุดศูนย์ถ่วงของ hydrometer หลังจากระยะเวลา t ที่ผ่านไปดังกล่าวเป็นปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของมวลดินละเอียดที่ใช้ในการทดสอบ หรือ percentage finer than particle size D ได้จากสมการ

$$N = 100 \left(\frac{a R_c}{W_s} \right) \quad \text{มีหน่วยเป็น \%} \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

เมื่อ N เป็นค่า percentage finer than particle size D ณ เวลา t ใดๆ
 W_s เป็นน้ำหนักของมวลดินแห้งในกระบอกตวงที่ใช้ทำการทดสอบในครั้งนี้ มีหน่วยเป็น กรัม
 a เป็น factor ที่ขึ้นอยู่กับค่า specific gravity ของเม็ดดิน ประเมินได้จากสมการ

$$a = \frac{1.65 G_s}{2.65 (G_s - 1)} \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

โดยที่ G_s เป็นค่า specific gravity ของเม็ดดิน และ $a = 1.00$ เมื่อ $G_s = 2.65$
 ค่า factor a นี้ จะอ่านโดยตรงจากตารางที่ 4.4 ก็ได้

R_c เป็นค่า hydrometer reading ที่ถูกต้อง หลังจากปรับแก้ความคลาดเคลื่อนต่างๆแล้ว

ความคลาดเคลื่อนของค่า hydrometer reading (R_a) ที่ต้องปรับแก้ให้เป็นค่าที่ถูกต้อง (R_c) ในที่นี้ เป็นผลมาจากมาจากอนุภาคของสารเคมี dispersing agent ที่แตกตัวแขวนลอยอยู่ในน้ำ อนุภาคเหล่านี้ไม่ใช่อนุภาคของมวลดินละเอียดที่ทำการทดสอบ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเป็นผลให้ ค่า hydrometer reading ที่อ่านได้จากการทดลอง (R_a) แสดงปริมาณเม็ดดินที่ลอยตัวอยู่ในน้ำมากเกินความเป็นจริง ค่าปรับแก้ความคลาดเคลื่อนดังกล่าว เรียกว่าค่า zero correction หรือ C_z (BOWLES, 1992) ประเมินได้โดยการเตรียมกระบอกตวงบรรจุน้ำผสม dispersing agent ในปริมาณเดียวกันและที่อุณหภูมิเดียวกันกับที่ใช้ทำการทดสอบกับมวลดิน

คละ แล้วจุ่ม hydrometer ลงไปลอยอยู่ในส่วนผสมดังกล่าว อ่านค่าบนก้าน hydrometer ที่ระดับ top of meniscus จะได้ค่า C_z หากค่าที่อ่านได้อยู่ระหว่างช่วง scale 0 ถึง 60 g/l C_z จะมีค่าเป็นบวก (+) แต่ถ้าอ่านค่าได้น้อยกว่า 0 g/l C_z จะมีค่าเป็นลบ (-) ความคลาดเคลื่อนของค่า hydrometer reading อีกส่วนหนึ่งเป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิของน้ำดินในขณะทำการอ่านค่า ซึ่ง hydrometer ที่ใช้ทำการทดสอบนี้ จะอ่านค่าได้ถูกต้องถ้าของเหลวที่ใช้ทำการทดสอบมีอุณหภูมิ 20°C หากอุณหภูมิที่ใช้ทำการทดสอบผิดไปจากอุณหภูมิมาตรฐาน 20°C ค่า hydrometer reading (R_a) ที่อ่านได้จะผิดไปจากความเป็นจริง ค่าปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากผลของอุณหภูมินี้ เรียกว่า temperature correction หรือ C_T เป็นค่าคำนวณสำเร็จดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ทำการทดสอบต่ำกว่า 20°C C_T จะมีค่าเป็นลบ (-) ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 20°C C_T จะมีค่าเป็นบวก (+) โดยทั่วไปแล้ว การทดสอบจะดำเนินการไปภายใต้การควบคุมอุณหภูมิที่คงที่โดยวางกระบอกตวงน้ำดินและกระบอกตวงที่ใส่ dispersing agent ไว้ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิจึงที่ (thermal bath) ตลอดการทดลอง แต่อย่างไรก็ตาม ในการทดสอบที่ต่อเนื่องเป็นระยะเวลาานาน ควรจะทำการวัดอุณหภูมิของน้ำดินและน้ำผสม dispersing agent ในกระบอกตวงทุกครั้งที่ย่านค่า hydrometer (R_a) หลังจากเริ่มทำการทดสอบไปแล้ว นานเกินกว่าสองชั่วโมง ค่าปรับแก้ความคลาดเคลื่อนทั้งสองนี้ นำมาใช้ปรับแก้ค่า hydrometer reading (R_a) ให้เป็นค่าที่ถูกต้อง หรือ corrected hydrometer reading (R_c) (BOWLES, 1992) ได้โดยใช้สมการ

$$R_c = R_a - C_z + C_T \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

โดยทำการ บวก และ ลบ ตามเครื่องหมาย และจะเห็นได้ว่าการปรับแก้ครั้งนี้ ไม่มีการปรับแก้ค่า meniscus error แต่อย่างใด ทั้งนี้เนื่องจากค่า hydrometer reading (R_a) และค่าปรับแก้ C_z เป็นค่าที่อ่านจากระดับ top of meniscus ด้วยกันทั้งคู่ meniscus error ที่เกิดขึ้น จึงหมดไปโดยอัตโนมัติ

การประเมินขนาดและปริมาณของเม็ดดิน ในมวลดินคละเม็ดละเอียดโดยวิธี hydrometer analysis ตามที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น สามารถสรุปเพื่อความเข้าใจเกี่ยวกับการใช้ค่า hydrometer reading, (R_a) ที่อ่านได้จากการทดสอบดังต่อไปนี้ คือ เมื่อการทดสอบผ่านไปเป็นระยะเวลา t (นาที) ใดๆ อ่านค่า R_a บนก้าน hydrometer ที่ลอยตัวอยู่ในน้ำดินที่ระดับ top of meniscus ค่า R_a นี้ นำไปปรับแก้ meniscus error ให้เป็นค่า R นำไปประเมินค่า L จากกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการทำ hydrometer calibration เพื่อนำไปคำนวณหาค่า particle size, D จากสมการที่ 4.5 หลังจากนั้น นำค่า hydrometer reading, (R_a) ไปปรับแก้ความคลาดเคลื่อน C_z และ C_T ตามสมการที่ 4.9 จะได้ค่า corrected hydrometer reading, (R_c) นำไปใช้ในสมการที่ 4.7 คำนวณหาค่า percentage finer หรือ ร้อยละโดยน้ำหนักของมวลดินคละที่เม็ดดินมีขนาดเล็กกว่า particle size, D ที่ได้คำนวณไว้แล้วนั้น

อนึ่ง หากผลการทดสอบโดยวิธี hydrometer analysis นี้ เป็นส่วนหนึ่งของการทดสอบเพื่อประเมินปริมาณของเม็ดดินขนาดต่างๆในตัวอย่างมวลดินคละ ที่มีทั้งดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียดปนกันอยู่ ผลการทดสอบโดยวิธี hydrometer analysis นี้ ต้องสามารถนำไปวิเคราะห์สัมพันธ์กับผลการทดสอบกับส่วนของมวลคละที่เป็นดินเม็ดหยาบ ซึ่งได้ทำการทดสอบโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรงไว้ก่อนหน้านี้อแล้วได้ ค่า N หรือ percentage finer than D ณ เวลา t ใดๆที่คำนวณได้โดยสมการที่ 4.7 ในที่นี้ เป็นค่าร้อยละโดยน้ำหนัก เมื่อ

เปรียบเทียบกับน้ำหนักดินแห้งเฉพาะที่ใช้ในการทดสอบ hydrometer analysis ซึ่งเป็นดินเม็ดละเอียดส่วนที่ร่อนจากมวลคละทั้งหมดผ่านตะแกรง ASTM No.200 มิใช่เปรียบเทียบกับน้ำหนักดินแห้งของมวลคละทั้งตัวอย่าง ดังนั้น หากจะนำผลการทดสอบ hydrometer analysis นี้ไป plot เป็น particle size distribution curve ร่วมกับผลการทดสอบมวลคละโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรงที่ได้ทดสอบไปก่อนหน้านี้แล้ว จำเป็นต้องคำนวณหาค่า percentage finer เป็นร้อยละโดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักมวลคละทั้งตัวอย่าง ซึ่งจะคำนวณได้จากสมการ

$$N' = \left(\frac{N}{100} \right) \times N_{200} \quad \text{มีหน่วยเป็น \%} \quad \dots\dots\dots (4.10)$$

เมื่อ N' เป็นค่า percentage finer than particle size D เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของมวลคละทั้งตัวอย่าง
 N เป็นค่า percentage finer than particle size D เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักดินแห้งเฉพาะที่ใช้ทำการทดสอบ hydrometer analysis ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 4.7
 N_{200} เป็นค่าร้อยละโดยน้ำหนักของมวลคละทั้งตัวอย่างที่ร่อนผ่านตะแกรง ASTM No.200 ซึ่งประเมินได้จากการทดสอบโดยวิธีร่อน (หรือล้าง) ผ่านตะแกรง

5. วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 5.1 ตัวอย่างดินแห้งร่อนผ่านตะแกรง ASTM No.200 ประมาณไม่น้อยกว่า 50 กรัม แต่ไม่เกิน 60 กรัม
- 5.2 กระจกตวง (measuring cylinder) ขนาดความจุ 1000 cc จำนวน 2 ใบ และ 500 cc จำนวน 1 ใบ
- 5.3 hydrometer model ASTM No. 152H 1 อัน
- 5.4 เวอร์เนีย ขนาดวัดระยะได้ไม่ต่ำกว่า 15 ซม. 1 อัน
- 5.5 เทอร์โมมิเตอร์ มีช่วงวัดอุณหภูมิ 0 ถึง 50 °C อ่านค่าได้ละเอียดถึง 1 °C
- 5.6 สารเคมีที่ใช้เป็น dispersing agent ในปริมาณที่ต้องการ
- 5.7 เครื่องปั่น (mixer) และอุปกรณ์กวนผสมน้ำดิน 1 ชุด
- 5.8 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิคงที่ได้ (thermal bath)
- 5.9 นาฬิกาจับเวลา 1 เรือน
- 5.10 ถาดอะลูมิเนียมเข้าเตาอบได้ มีความจุไม่ต่ำกว่า 1500 cc 1 ใบ
- 5.11 เครื่องชั่งไฟฟ้า ชั่งได้ละเอียดถึง 0.01 กรัม

6. วิธีการทดสอบ

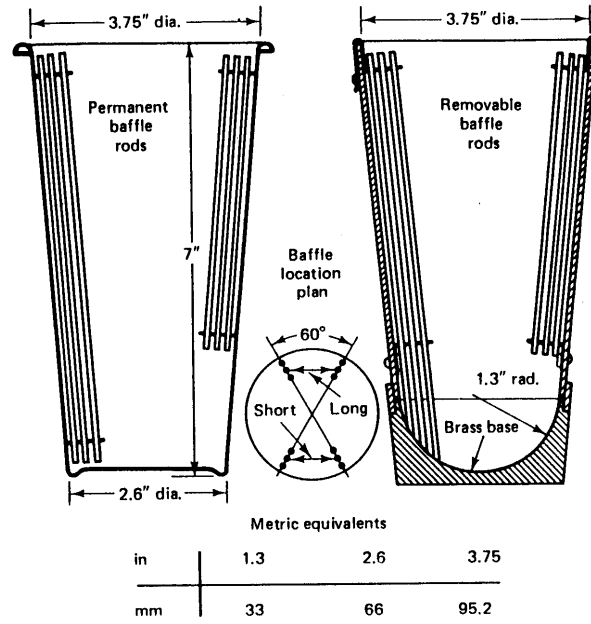
การทดสอบเรื่องนี้แบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการประเมินความสัมพันธ์ระหว่างค่า hydrometer reading, R ที่ปรับแก้ meniscus error แล้ว กับ ระยะความลึกจากระดับผิวราบของของเหลวถึงระดับจุดศูนย์ถ่วงของกระเปาะ hydrometer ที่ลอยอยู่ในของเหลว (L) ซึ่งเรียกโดยทั่วไปว่า การทดสอบ hydrometer calibration หลังจากนั้น จึงทดสอบการตกตะกอนของเม็ดดิน โดยใช้ hydrometer และกระจกตวง 1000 cc ที่ได้ทำการ calibrate ร่วมกันไว้แล้ว

6.1 HYDROMETER CALIBRATION

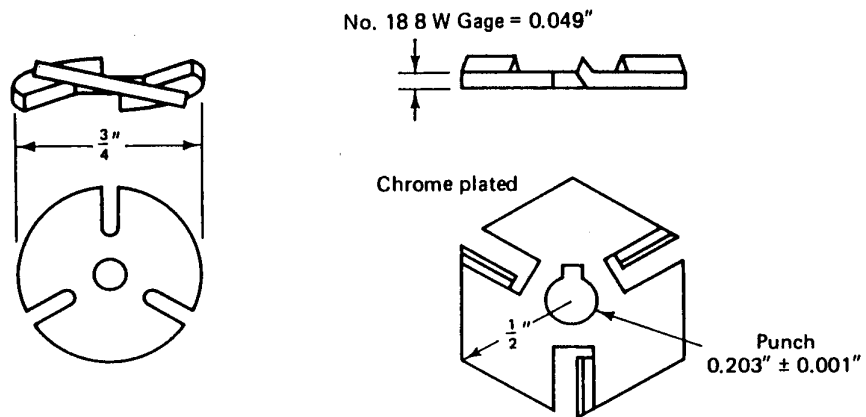
- 6.1.1 ประเมินพื้นที่หน้าตัดของกระบอกตวง 1000 cc (ค่า A_C) ที่จะใช้ทดสอบการตกตะกอนของเม็ดดิน โดยใช้เวอร์เนีย วัดระยะระหว่างขีดบอกปริมาตร 500 cc และ 1000 cc บนกระบอกตวง ให้ได้ค่ามีความละเอียดถึง 0.01 ซม. ซึ่งปริมาตรภายในของกระบอกตวงในช่วงระยะดังกล่าว เท่ากับ 500 cc นำค่าระยะที่วัดได้ไปหารปริมาตร 500 ลบ.ซม. จะได้ค่าพื้นที่หน้าตัดภายในของกระบอกตวง (A_C)
- 6.1.2 นำกระบอกตวงความจุ 500 cc ไปใส่น้ำให้มีปริมาตรประมาณ 400 cc อ่านค่าระดับผิวน้ำในกระบอกตวง เป็น cc แล้วเอา hydrometer ที่จะทำการ calibrate จุ่มลงไปจน scale reading ขีดต่ำสุดบนก้าน hydrometer (ขีด scale 60 g/l) อยู่ที่ระดับผิวน้ำพอดี ใช้มือจับ hydrometer ไว้ให้อยู่นิ่ง แล้วอ่านค่าระดับผิวน้ำจาก scale ข้างกระบอกตวงปริมาตรน้ำในกระบอกตวงที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการแทนที่ของกระเปาะ hydrometer จะเป็นค่าปริมาตรของกระเปาะ hydrometer (V_b)
- 6.1.3 ใช้เวอร์เนีย วัดระยะ L_2 จากขีดตำแหน่งค่า scale reading ต่ำสุดบนก้าน hydrometer (ขีด scale 60 g/l) ลงไปถึงจุดปลายสุดของกระเปาะ hydrometer
- 6.1.4 เลือก scale reading บนก้าน hydrometer ที่ $R = 0$ g/l เป็นค่าแรก ใช้เวอร์เนียวัดระยะ L_1 จากขีดตำแหน่งค่า scale reading 0 g/l ลงไปถึงขีด scale reading ที่อยู่ต่ำสุดบนก้าน hydrometer (ขีด scale 60 g/l)
- 6.1.5 วัดระยะ L_1 อีก ตามวิธีในข้อ 6.1.4 โดยเลือกขีดค่าบนก้าน hydrometer ที่ค่า scale reading $R = 10, 20, 30, 40,$ และ 50 g/l ตามลำดับ
- 6.1.6 บันทึกผลการวัดระยะ พื้นที่ และ ปริมาตรทั้งหมดในหน่วย cm, cm^2 , และ cc ตามลำดับ
- 6.1.7 นำข้อมูลที่ได้มาทั้งหมดไปคำนวณ โดยสมการที่ 4.6 จะได้ค่า L เมื่อ R มีค่าต่างๆ นำค่า L และ R แต่ละคู่ ไป plot เป็น hydrometer calibration curve

6.2 การทดสอบการตกตะกอนของเม็ดดิน

- 6.2.1 เตรียมสารละลาย dispersing agent โดยใช้สารเคมี sodium hexametaphosphate หนัก 40 กรัม ละลายลงในน้ำกลั่น 1000 cc
- 6.2.2 นำตัวอย่างดินแห้งร่อนผ่านตะแกรง ASTM No.200 ประมาณ 50 กรัม ใส่ลงในกระป๋องอะลูมิเนียมที่ใช้กับเครื่องปั่น (mixer) ดังในรูปที่ 4.3 ก. เติมน้ำกลั่นให้ท่วมตัวอย่างดิน แล้วใช้สารละลาย dispersing agent ที่เตรียมไว้ในข้อ 6.2.1 ปริมาตร 125 cc เติมลงในกระป๋อง ใช้เครื่องปั่น (mixer) กวนผสมให้เข้ากันเป็นน้ำดิน เทน้ำดินที่กวนผสมแล้วลงในกระบอกตวง 1000 cc ที่ใช้ calibrate hydrometer ในข้อ 6.1 ใช้ น้ำกลั่นล้างเม็ดดินจากกระป๋องเครื่องปั่นลงไปในกระบอกตวงให้หมด แล้วปล่อยให้ $dispersing$ agent ทำปฏิกิริยากับเม็ดดินเป็นเวลาประมาณ 16 ชั่วโมง เพื่อให้เม็ดดินแตกตัวออกจากกัน
- 6.2.3 หลังจากเม็ดดินแตกตัวดีแล้ว เติมน้ำกลั่นลงในกระบอกตวงให้ได้ปริมาตรน้ำดิน 1000 cc แล้วใช้อุปกรณ์กวนผสมน้ำดินในกระบอกตวง ดังในรูปที่ 4.3 ข. กวนผสมให้เม็ดดินกระจายตัวในกระบอกตวงอย่างทั่วถึง
- 6.2.4 ใช้กระบอกตวงความจุ 1000 cc ใบที่ 2 เตรียมสารเคมีในปริมาณเท่ากับที่ใช้ผสมน้ำดิน คือใช้สารละลายที่เตรียมขึ้นในขั้นตอนที่ 6.2.1 ปริมาตร 125 cc แล้วเติมน้ำกลั่นเพิ่มให้ได้



ก. กระจับป่องสำหรับกวนผสมน้ำดินด้วยเครื่องปั่น



ข. ใบพัดสำหรับกวนผสมน้ำดินในกระบอบกวดวง

รูปที่ 4.3 อุปกรณ์ประกอบเครื่องปั่น (MIXER) และอุปกรณ์กวนผสมน้ำดิน

- ปริมาตร 1000 cc พอดี แล้วนำกระบอกตวงไปแช่ไว้ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ (thermal bath) เพื่อใช้เป็น control cylinder
- 6.2.5 จุ่ม hydrometer ที่ได้ calibrate ไว้แล้ว ลงในน้ำผสมสารเคมีใน control cylinder อ่านค่าที่ระดับ top of meniscus จะได้ค่า zero correction, C_2 แล้วมองผ่านของเหลวเข้าไปอ่านค่าบนก้าน hydrometer ณ ระดับผิวราบของของเหลว ความแตกต่างระหว่างค่าที่อ่านได้นี้กับค่าที่อ่านได้ที่ระดับ top of meniscus จะเป็นค่า meniscus correction
- 6.2.6 วางกระบอกตวงที่บรรจุน้ำดิน ลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิ กวนผสมน้ำดินต่อไปจนกว่าจะพร้อมลงมือทำการทดสอบ ใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิของน้ำดินในกระบอกตวงและในน้ำผสมสารเคมีใน control cylinder จนอุณหภูมิในกระบอกตวงทั้งสองมีค่าเท่ากันและคงที่บันทึกค่าอุณหภูมิ (T °C) ไว้
- 6.2.7 เมื่อพร้อมที่จะทำการทดสอบ ถอนอุปกรณ์กวนผสมออกจากกระบอกน้ำดิน แล้วหย่อน hydrometer ลงไปแทนพร้อมกับเริ่มจับเวลา บันทึกวันที่และเวลา (time of day) ที่เริ่มการทดสอบ อ่านค่าบนก้าน hydrometer ที่ระดับ top of meniscus ซึ่งเป็นค่า R_a เมื่อเวลาผ่านไป 0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2, 3, และ 4 นาที ตามลำดับ
- 6.2.8 ถอน hydrometer ออกจากกระบอกน้ำดิน แล้วกวนผสมน้ำดินในกระบอกตวงให้ทั่วถึงเมื่อพร้อมแล้ว เริ่มทดสอบตามขั้นตอนที่ 6.2.6 อีกครั้งหนึ่ง
- 6.2.9 เปรียบเทียบชุดค่า R_a ที่อ่านได้ในขั้นตอนที่ 6.2.8 นี้ กับชุดค่าที่อ่านได้ในขั้นตอนที่ 6.2.7 ที่ผ่านมา ถ้าค่าแตกต่างกันมาก ให้กวนผสมน้ำดินเสียใหม่ให้ทั่วถึง แล้วเริ่มทดสอบตามขั้นตอนที่ 6.2.7 อีกครั้ง จนกว่าชุดค่า R_a ในระยะเวลา 4 นาทีแรก ในการทดสอบ 2 ครั้งต่อเนื่องกัน จะมีค่าใกล้เคียงกัน
- 6.2.10 เมื่อชุดค่า R_a เป็นที่ยอมรับได้แล้วให้อ่านค่า R_a ที่เวลา t ต่างๆต่อเนื่องกันไป เช่น ที่เวลา 6, 8, 10, 15, 30, 60.....นาที ตามลำดับ จนกว่าค่า R_a จะลดลงเหลือประมาณ 20 g/l หรือเมื่อได้ค่า R_a มากพอที่จะนำไปคำนวณเพื่อ plot grading curve ได้โดยเหมาะสม
- 6.2.11 หลังจากการทดสอบผ่านไปนานเกินกว่า 2 ชั่วโมงแล้ว ควรจะอ่านค่าอุณหภูมิของน้ำดินในกระบอกตวง ควบคู่ไปกับการอ่านค่า R_a ทุกครั้ง
- 6.2.12 ไม่ควรแช่ hydrometer ไว้ในน้ำดินนานเกินไป เพราะกระเปาะ hydrometer จะเป็นอุปสรรคในการตกตะกอนของเม็ดดิน และมีเม็ดดินมาเกาะติดกับกระเปาะ hydrometer ทำให้ hydrometer มีน้ำหนักเพิ่มขึ้น และจมลงไปในน้ำดินได้มากขึ้น ค่าที่อ่านได้ก็จะผิดไปจากความเป็นจริง ดังนั้น หลังจากอ่านค่าที่เวลา $t = 4$ นาทีแล้ว ให้ถอน hydrometer ออกจากกระบอกน้ำดินหลังจากอ่านค่าแล้วทุกครั้ง นำไปแช่ไว้ใน control cylinder จนกว่าพร้อมที่จะอ่านค่าครั้งต่อไป จึงนำ hydrometer กลับไปแช่ลงในกระบอกน้ำดินอีกครั้ง
- 6.2.13 เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบแล้ว เทน้ำดินจากกระบอกตวงใส่ภาชนะที่ชั่งน้ำหนักและจดหมายเลขไว้แล้ว ใช้น้ำกลั่นล้างเม็ดดินจากกระบอกตวงลงไปในภาชนะให้หมด แล้วนำภาชนะน้ำดินไปเข้าเตาอบจนแห้ง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักดินแห้งที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ (W_s)
- 6.2.14 บันทึกข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดลองนี้ลงใน data sheet ให้ครบถ้วน

ตารางที่ 4.1 ค่า SPECIFIC GRAVITY และ
VISCOSITY ของน้ำ

อุณหภูมิ °C	G _w	VISCOSITY ของน้ำ (POISES)
4	1.00000	0.01567
16	0.99897	0.01111
17	0.99880	0.01083
18	0.99862	0.01056
19	0.99844	0.01030
20	0.99823	0.01005
21	0.99802	0.00981
22	0.99780	0.00985
23	0.99757	0.00936
24	0.99733	0.00914
25	0.99708	0.00894
26	0.99682	0.00874
27	0.99655	0.00855
28	0.99627	0.00836
29	0.99598	0.00818
30	0.99568	0.00801

ตารางที่ 4.2 ค่าปรับแก้ความคลาดเคลื่อน
เนื่องจากอุณหภูมิ, C_T

อุณหภูมิ °C	CORRECTION FACTOR, C _T
15	- 1.10
16	- 0.90
17	- 0.70
18	- 0.50
19	- 0.30
20	0.00
21	+ 0.20
22	+ 0.40
23	+ 0.70
24	+ 1.00
25	+ 1.30
26	+ 1.65
27	+ 2.00
28	+ 2.50
29	+ 3.05
30	+ 3.80

ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์ K สำหรับใช้ในสมการที่ 4.5

อุณหภูมิ °C	SPECIFIC GRAVITY ของเม็ดดิน							
	2.50	2.55	2.60	2.65	2.70	2.75	2.80	2.85
16	0.0151	0.0148	0.0146	0.0144	0.0141	0.0139	0.0137	0.0136
17	0.0149	0.0146	0.0144	0.0142	0.0140	0.0138	0.0136	0.0134
18	0.0148	0.0144	0.0142	0.0140	0.0138	0.0136	0.0134	0.0132
19	0.0145	0.0143	0.0140	0.0138	0.0136	0.0134	0.0132	0.0131
20	0.0143	0.0141	0.0139	0.0137	0.0134	0.0133	0.0131	0.0129
21	0.0141	0.0139	0.0137	0.0135	0.0133	0.0131	0.0129	0.0127
22	0.140	0.0137	0.0135	0.0133	0.0131	0.0129	0.0128	0.0126
23	0.0138	0.0136	0.0134	0.0132	0.0130	0.0128	0.0126	0.0124
24	0.0137	0.0134	0.0132	0.0130	0.0128	0.0126	0.0125	0.0123
25	0.0135	0.0133	0.0131	0.0129	0.0127	0.0125	0.0123	0.0122
26	0.0133	0.0131	0.0129	0.0127	0.0125	0.0124	0.0122	0.0120
27	0.0132	0.0130	0.0128	0.0126	0.0124	0.0122	0.0120	0.0119
28	0.0130	0.0126	0.0126	0.0124	0.0123	0.0121	0.0119	0.0117
29	0.0129	0.0127	0.0125	0.0123	0.0121	0.0120	0.0118	0.0116
30	0.0128	0.0126	0.0124	0.0122	0.0120	0.0118	0.0117	0.0115

ตารางที่ 4.4 ค่า FACTOR a เมื่อเม็ดดินมีค่า SPECIFIC GRAVITY ต่าง ๆ

G_s	2.85	2.80	2.75	2.70	2.65	2.60	2.55	2.50
a	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00	1.01	1.02	1.04

ตารางที่ 4.5 ค่า EFFECTIVE DEPTH, L สำหรับ HYDROMETER มาตรฐาน 152H และกระบอกตวง มาตรฐานขนาด 1000 cc (จาก มาตรฐาน ASTM D 422)

Actual Reading R (g/l)	Effective Depth L (cm)	Actual Reading R (g/l)	Effective Depth L (cm)	Actual Reading R (g/l)	Effective Depth L (cm)	Actual Reading R (g/l)	Effective Depth L (cm)
1	16.1	16	13.7	31	11.2	46	8.8
2	16.0	17	13.5	32	11.1	47	8.6
3	15.8	18	13.3	33	10.9	48	8.4
4	15.6	19	13.2	34	10.7	49	8.3
5	15.5	20	13.0	35	10.6	50	8.1
6	15.3	21	12.9	36	10.4	51	7.9
7	15.2	22	12.7	37	10.2	52	7.8
8	15.0	23	12.5	38	10.1	53	7.6
9	14.8	24	12.4	39	9.9	54	7.4
10	14.7	25	12.2	40	9.7	55	7.3
11	14.5	26	12.0	41	9.6	56	7.1
12	14.3	27	11.9	42	9.4	57	7.0
13	14.2	28	11.7	43	9.2	58	6.8
14	14.0	29	11.5	44	9.1	59	6.6
15	13.8	30	11.4	45	8.9	60	6.5

หมายเหตุ : $L_1 = 10.5$ cm. เมื่อ $R = 0$ g/litre และ $L_1 = 2.3$ cm. เมื่อ $R = 50$ g/litre

7. การคำนวณผลการทดสอบ

- 7.1 นำข้อมูลจากการทดสอบ hydrometer calibration มาคำนวณหาค่า L สำหรับ R แต่ละค่า โดยใช้ สมการที่ 4.6 แล้วนำผลที่ได้ไป plot กราฟความสัมพันธ์ ตามที่กำหนดไว้ใน data sheet
- 7.2 จากการทดสอบการตกตะกอนของเม็ดดิน ณ เวลาที่ผ่านไป t นาทีใดๆ
 - 7.2.1 นำค่า hydrometer reading, R_a แต่ละค่า ไปปรับแก้ meniscus error เป็นค่า R แล้วอ่านค่า L จาก calibration chart
 - 7.2.2 อ่านค่า C_T จากตารางที่ 4.2 เมื่อทราบอุณหภูมิ (T °C) ขณะที่อ่านค่า R_a นั้นๆ
 - 7.2.3 นำค่าอุณหภูมิ (T °C) และ specific gravity ของเม็ดดิน ไปอ่านค่า K จากตารางที่ 4.3 แล้วคำนวณค่า particle size (D) จากสมการที่ 4.5

- 7.2.4 ใช้สมการที่ 4.9 ปรับแก้ค่า hydrometer reading, R_a ให้เป็นค่า R_c แล้วคำนวณหาค่า percentage finer (N) โดยใช้สมการที่ 4.7
- 7.2.5 หากตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบนี้ เป็นมวลคละส่วนที่ร่อนผ่านตะแกรง ASTM No. 200 ของตัวอย่างมวลคละที่ประกอบไปด้วยดินทั้งเม็ดหยาบและเม็ดละเอียดให้คำนวณหาค่า percent finer than particle size, D เป็นร้อยละโดยน้ำหนักของมวลดินคละทั้งตัวอย่าง (N') โดยใช้สมการที่ 4.10 (ใช้ค่า N_{200} จากการทดสอบเรื่องที่ 3)
- 7.3 คำนวณและ plot ตามขั้นตอนที่ 7.2 เมื่อเวลาผ่านไปเป็นค่า t ต่างๆ จนครบตามที่ได้บันทึกข้อมูลไว้
- 7.4 นำค่า particle size, D และ percent finer, N' ที่คำนวณได้ทั้งหมดไป plot ต่อเนื่องจาก particle size distribution curve ที่ plot ไว้จากการร่อนส่วนที่เป็นมวลหยาบของมวลคละเดียวกันนี้ผ่านตะแกรง (จากการทดสอบเรื่องที่ 3)

8. บทวิเคราะห์วิจารณ์

ให้เปรียบเทียบผลการทดสอบ hydrometer calibration กับตารางที่ 4.5 หลังจากนั้นให้พิจารณาผลการทดสอบและผลการคำนวณขนาดคละของเม็ดดิน แล้วสรุปลักษณะของมวลดินคละที่ใช้ทำการทดสอบ และทำการบ่งชี้ชนิดของมวลดินคละนี้ในระบบต่างๆมาเท่าที่จะสามารถทำได้ พร้อมกับอธิบายให้เหตุผลประกอบการบ่งชี้ดังกล่าว หลังจากนั้น ให้พิจารณาวีการทดสอบว่า การทดสอบปฏิบัติขั้นตอนใดบ้างที่ต้องเอาใจใส่ระมัดระวัง เพื่อมิให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูล

9. ข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับการทดสอบนี้

- 9.1 สารเคมีที่ใช้เป็น dispersing agent มีอยู่หลายชนิดแต่ที่นิยมใช้กันมาก เป็นสารเคมีที่มีชื่อผลิตภัณฑ์ว่า CALGON หรือ sodium hexametaphosphate (NaPO_3) ความเข้มข้น 4% ซึ่งเตรียมขึ้นตามที่กล่าวไว้ในข้อ 6.2.1 สารเคมีอีกชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ คือ sodium silicate หรือเรียกทั่วไปว่า water glass (Na_2SiO_3) ซึ่งเตรียมขึ้นโดยใช้สารละลาย (Na_2SiO_3) เข้มข้น ประมาณ 0.5-1.0 ml ละลายในน้ำ 125 ml สำหรับใช้ทำการทดสอบดิน 1 ตัวอย่าง ปริมาณสาร dispersing agent ตามที่ระบุไว้นี้ อาจเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับชนิดของดินที่นำมาทดสอบ
- 9.2 การจุ่ม hydrometer ลงในน้ำดิน ต้องทำอย่างระมัดระวัง โดยจับก้าน hydrometer ให้อยู่ในแนวตั้ง หย่อนลงไปใต้น้ำดินเบาๆ การกระทบกระเทือนจะรบกวนการตกตะกอนของเม็ดดิน และในขณะที่ทดสอบต้องระวังมิให้กระบอกตวงใส่น้ำดินได้รับความกระทบกระเทือนใดๆ ซึ่งจะเป็นผลกระทบต่อการเคลื่อนที่ตกตะกอนของเม็ดดินในกระบอกตวงนั้น

@@@@@@@@@@@@@@

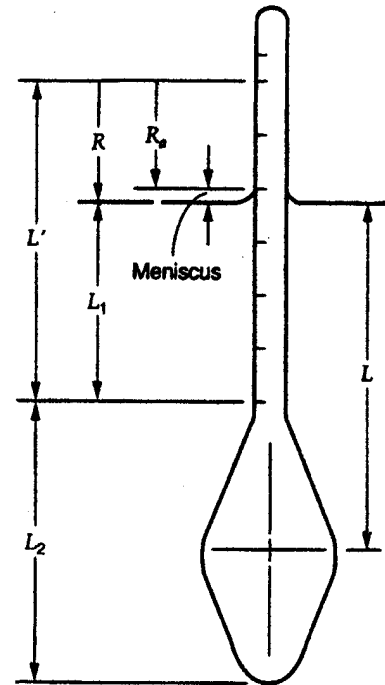
CE 372 ENGINEERING SOIL TESTS

EXPERIMENT No. 4.1

HYDROMETER CALIBRATION

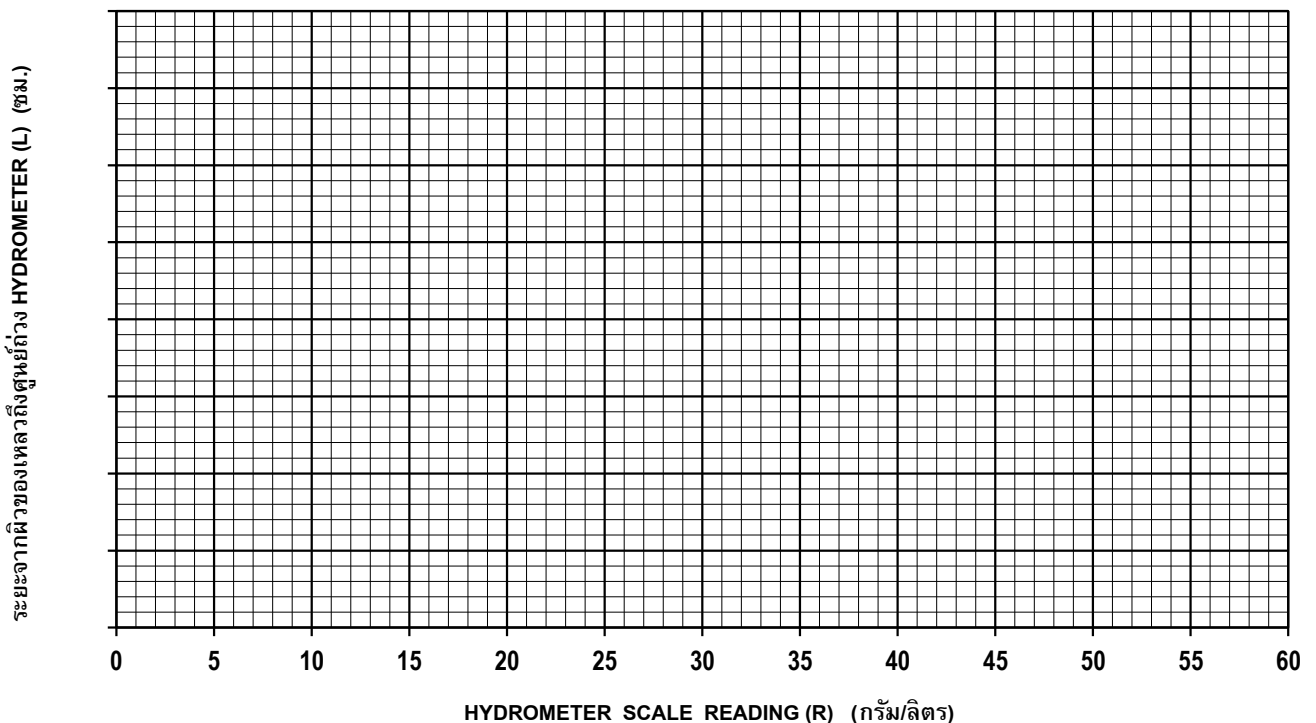
ชื่อ-สกุล รหัส ตอนที่ กลุ่มที่ วันทดสอบ

Hydrometer ที่ใช้ทดสอบ No.	
กระบอกตวง 1000 cc ที่ใช้ทดสอบ No.	
พื้นที่หน้าตัดภายในกระบอกตวง (Ac) (ตร.ซม.)	
ปริมาตร hydrometer bulb (Vb) (ลบ.ซม.)	
ระยะจากขีด scale ต่ำสุดถึงปลาย hydrometer (L2) (ซม.)	



TEST No.	Scale Reading R (กรัม/ลิตร)	L ₁ (ซม.)	L (ซม.)
1	0		
2	10		
3	20		
4	30		
5	40		
6	50		

HYDROMETER CALIBRATION CHART



CE 372 ENGINEERING SOIL TESTS

EXPERIMENT No. 4.2

HYDROMETER ANALYSIS

ชื่อ-สกุล รหัส ตอนที่ กลุ่มที่ วันที่ทดสอบ

กระบอกตวง No.	
Hydrometer No.	
Dispersing agent ที่ใช้ทดสอบ	
ปริมาตรสารละลาย dispersing agent ที่ใช้ (cc)	
น้ำหนักดินแห้งที่ใช้ทดสอบ (Ws) (กรัม)	

ร้อยละผ่านตะแกรง No.200 (N200) (%)	
ถ.พ.ตัวอย่างดิน (Gs)	
ค่า a จากตารางที่ 4.4	
zero correction (Cz) (กรัม/ลิตร)	
memiscus correction (กรัม/ลิตร)	

วัน-เวลา อ่านค่า		เวลา ผ่านไป (นาที)	อุณหภูมิ T (องศา C)	ค่า ปรับแก้ CT	ค่าที่ อ่านได้ Ra (กรัม/ลิตร)	ปรับแก้ เป็นค่า R (กรัม/ลิตร)	effective depth L (ซม.)	ค่า K จากตาราง ที่ 4.3	Grain Size D (มม.)	ปรับแก้ Ra เป็น Rc (กรัม/ลิตร)	Percent Finer	
											ตัวอย่าง N (%)	มวลรวม N' (%)
วัน	เวลา	0.00										
เดือน	เวลา	0.25										
ปี	เวลา	0.50										
		0.75										
		1.00										
		1.50										
		2.00										
		3.00										
		4.00										
		6.00										
		8.00										
		10.00										
		15.00										
		20.00										
		30.00										
		45.00										
		60.00										

$$D = K \sqrt{\frac{L}{t}}$$

$$R_c = R_a - C_z + C_T$$

$$N(\%) = 100 R_c \left(\frac{a}{W_s} \right)$$

$$N' = \left(\frac{N(\%)}{100} \right) N_{200}$$