บทที่ 6
การบดอัดดิน
(Soil Compaction)

6.1 เนื้อหาโดยสรุป

ในการพัฒนางานด้านวิศวกรรม ดินในพื้นที่มักจะมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ไม่เหมาะสมสำหรับใช้ในงานก่อสร้าง และในบางกรณีวิศวกรสามารถเลือกทางเลือกอื่น เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาทางด้านวิศวกรรมของวัสดุก่อสร้างที่ต่ำกว่ามาตรฐาน โดยการเปลี่ยนที่ตั้ง เลี่ยงเส้นทาง หรืออีกวิธีหนึ่งที่นิยมในปัจจุบัน คือการทดแทนดินที่มีคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมที่ต่ำกว่ามาตรฐานด้วยดินที่มีคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมที่ดีกว่า เช่นการก่อสร้างปัจจุบัน จะใช้วิธีการปรับปรุงคุณสมบัติดิน หรือการบดอัดดิน (Compaction) ซึ่งเป็นวิธีที่สำคัญมากที่สุด เพราะงานก่อสร้างทุกชนิดไม่ว่าจะเป็นการถมถนน เขื่อนดิน (Earth dams) งานก่อสร้างอาคารพาณิชย์หรือที่พักอาศัย งานการทางงานสนามบิน ล้วนแล้วแต่จะต้องมีการถมดินและบดอัดดินทั้งสิ้น เพื่อให้ดินมีกำลังต้านทานแรงเฉือยเพิ่มขึ้นและทำให้น้ำไหลซึมผ่านได้น้อยลง ทั้งนี้เพื่อให้การทรุดตัว ในอนาคตลดน้อยลง

6.1.1 ทฤษฎีทั่วไปในการบดอัดดิน (General Principles)

การบดอัดดิน คือ การทำให้ดินแน่นขึ้นโดยใช้แรงคนหรือน้ำหนักจากเครื่องมือกล (Mechanical means) เพื่อไล่อากาศออกไปจากช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ทำให้เม็ดดินเรียงตัวกันแน่นขึ้น จนทำให้มีช่องว่างระหว่างเม็ดดินน้อยลง เมื่อดินมีความแน่นเพิ่มขึ้น ก็จะสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้น การทรุดตัวน้อยลง และยอมให้น้ำซึมผ่านได้น้อยลงด้วย

ซึ่งทฤษฎีโดยทั่วไปของการบดอัดดินจะเกี่ยวข้องกับหน่วยน้ำหนักดิน (unit weight) กับปริมาณความชื้น (moisture content) โดย Degree of compaction ของดินสามารถวัดได้จากหน่วยน้ำหนักแห้ง (dry unit weight) ของดิน ถ้าน้ำเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ขณะที่ดินถูกทำการบดอัดตัวอย่างดินนั้นก็จะมีหน่วยน้ำหนักดินเปียก (moist unit weight) เพิ่มขึ้นจนถึงจุดๆ หนึ่งค่าหน่วยน้ำหนักดินเปียกก็จะเริ่มมีค่าน้อยลง โดยดูได้จากรูปที่ 6.1

ซึ่งถ้าปริมาณความชื้น (W) = 0 หน่วยน้ำหนักดินเปียก (γ) = หน่วยน้ำหนักแห้งของดิน (γ_d) จะได้ = $\gamma_d (W = 0) = \gamma_1$

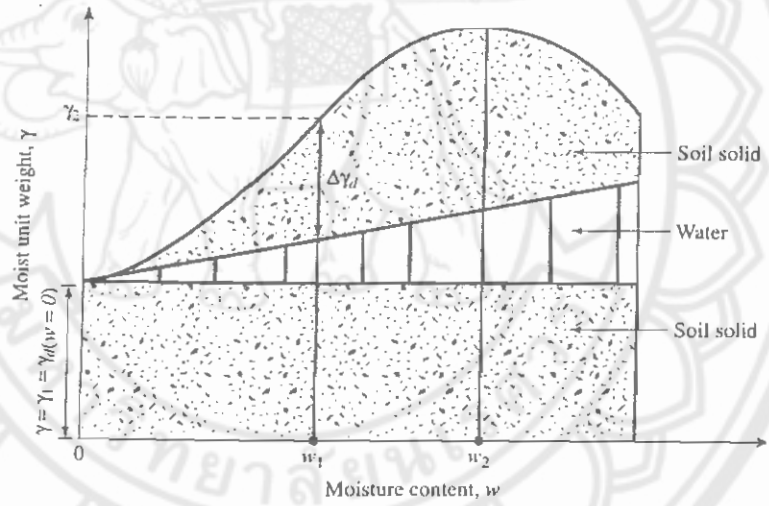
และถ้าปริมาณความชื้น (W) เพิ่มขึ้นทีละน้อยและกระทำการบดอัดดินไปเรื่อยๆ น้ำหนักของดินในส่วนที่เป็นของแข็งจะมีปริมาตรเพิ่มขึ้นที่ละเล็กละน้อยเหมือนกัน จากรูปที่ 6.1 จะได้เมื่อ $W = W_1$ แล้ว

$$\gamma \quad = \gamma_1$$

อย่างไรก็ตามหน่วยน้ำหนักแห้งของดิน (γ_d) ที่ปริมาณความชื้นที่ W_1 แล้ว

$$\gamma_d\,(W = W_1) \quad = \gamma_d\,(W = 0) + \Delta\gamma_d$$

ถัดออกไปเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นจนไปถึงจุด W_2 แล้วจะทำให้หน่วยน้ำหนักแห้ง (γ_d) ก็จะลดลงดังนั้นเราจะเรียกปริมาณความชื้น (W) ที่ทำให้เราได้หน่วยน้ำหนักของดิน (γ) ที่มากที่สุดขณะทำการบดอัดดินว่า "Optimum moisture content" ซึ่งก็คือปริมาณความชื้นที่ดีที่สุดในการบดอัดดินที่ทำให้ได้หน่วยน้ำหนักของดินมากที่สุด ซึ่ง Optimum moisture content สามารถหาได้จากการทดลอง



รูปที่ 6.1 ทฤษฎีในการบดอัดดิน (Principles of compaction)

6.1.2 การทดสอบการบดอัดดิน (Compaction Test)

6.1.2.1 การบดอัดในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Compaction) เพื่อเป็นการหาคุณสมบัติของแหล่งวัสดุก่อสร้างที่ต้องการ ไว้ใช้ในการออกแบบ และเป็นการควบคุมการบดอัดในสนาม เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ออกแบบ

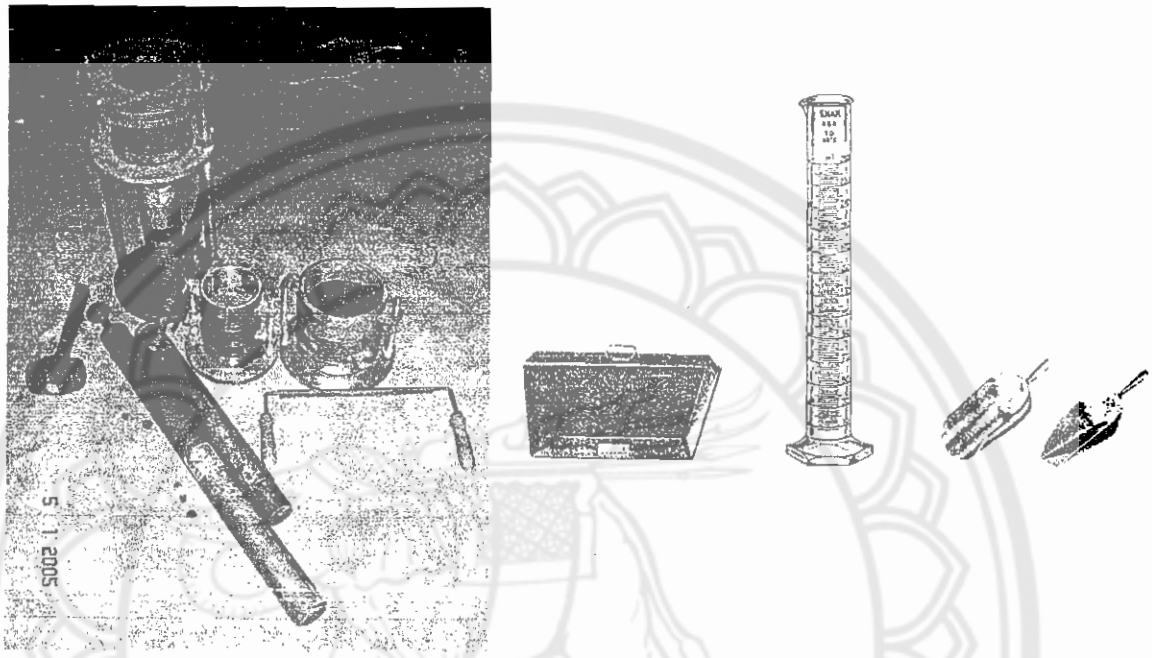
1) สำหรับดินที่มีความเชื่อมแน่น วิธีที่นิยมคือ

1.1)การทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน (Standard Proctor test)

1.2) การทดสอบการบดอัดดินแบบโมดิฟายด์ (Modified Proctor test)

2) สำหรับดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น ทำโดยวิธี

- การทดสอบแบบความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative Density Test)



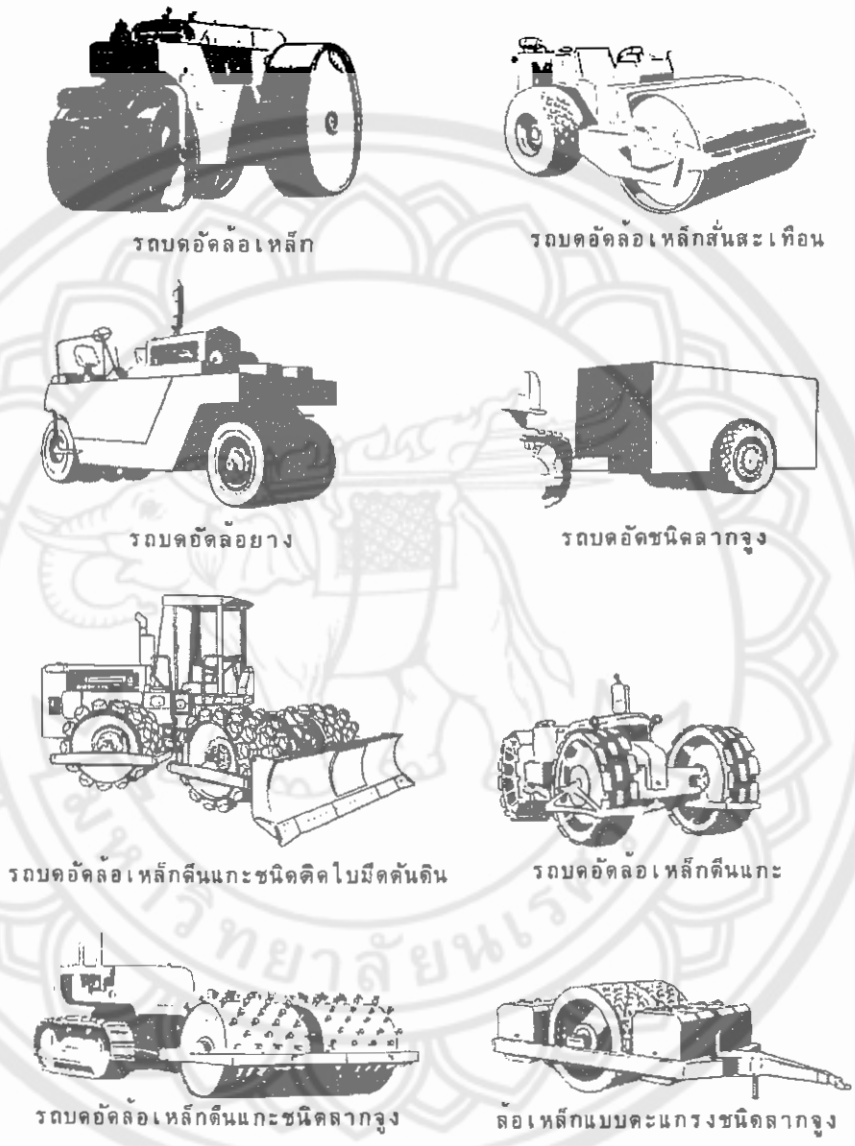
รูปที่ 6.2 แสดงเครื่องมือในการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ

6.1.2.2 การบดอัดดินในสนาม (Field Compaction) ด้วยเครื่องจักรที่เหมาะสม เพื่อปรับปรุงคุณภาพดินที่เป็นวัสดุก่อสร้างให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นตามต้องการ ทำได้ดังนี้

1) การบดไปมา (Rolling) จะเหมาะกับงานก่อสร้างที่มีบริเวณกว้างและยาว เช่น ถนน สนามบิน เขื่อนดิน ฯลฯ เพราะสามารถบดอัดได้เร็วและให้พลังงานการบดอัดสูง สามารถบดอัดดินได้ปริมาณมาก เครื่องจักรที่ใช้มีทั้งชนิดขับเคลื่อนได้ด้วยตนเองและจูงโดยรถแทรกเตอร์ ตัวอย่างเครื่องจักร รถบดล้อเหล็ก รถบดล้อยาง รถบดตีนแกะ เป็นต้น โดยทั่วไป

2) การกระทุ้ง (Ramming)จะเหมาะกับงานก่อสร้างที่เป็นบริเวณพื้นที่แคบๆ และจำกัดซึ่งเครื่องมืออื่นไม่สามารถทำงานได้ เช่นบริเวณรอบๆหรือชิดอาคารตัวอย่างเครื่องมือเช่น สามเกลอ หรือกบกระโดด (Frog-Rammer) มีทั้งแบบลมและแบบจุดระเบิดเผาไหม้ น้ำหนักอาจมากถึง 150 กิโลกรัม นอกจากนี้อาจเป็นแบบทิ้งตุ้มน้ำหนัก (Dropping Weight) เครื่องมือบดอัดแบบใช้แรงกระแทกนี้สามารถให้ความหนาแน่นสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัดดิน อยู่ระหว่างการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor test) และแบบโมดิฟายด์ (Modified Proctor test) ในห้องทดลอง ความหนาแน่นที่ได้จากการกระแทก 4 ครั้ง เป็นต้น

3) การสั่นหรือเขย่า (Vibration)จะเหมาะกับดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น เช่นกรวดทรายโดยใช้รถบดแบบสั่นสะเทือน เป็นต้น



รูปที่ 6.3 แสดงเครื่องมือในการบดอัดดินในสนาม

6.1.2.1 การทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน (Standard Proctor test)

ในวิธีการ Proctor แบบมาตรฐาน คือการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและความหนาแน่นของดินในห้องปฏิบัติการ โดยใช้อุปกรณ์คือ โมล (mold) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 101.6 mm (4 in.) สูง 116.4 mm (4,584 in.) ปริมาตรเท่ากับ 944 cm^3 ซึ่งยึดติดกับฐาน

(Base) จากนั้นจะมีปลอก (collar) ซึ่งจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 114.3 mm (4.5 in.) ดังแสดงดังรูปที่ 6.4 (a)

จากนั้นใช้ร่วมกับ Hammer หนัก 2.5 kg (5.5 lb) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหน้าตัด 50.8 mm (2 in.) ระยะตกกระแทกหรือระยะยก (Drop) 304.8 mm (12 in.) ดังแสดงในรูปที่ 6.4 (b)

ซึ่งการทดสอบสามารถกระทำได้โดยนำดินที่จะทำการทดสอบมาผึ่งให้แห้งหรือตากแดด ผสมน้ำลงไปในดินจำนวนหนึ่งแล้วกระทุ้งลงใน mold ด้วย Hammer โดยการแบ่งดินเป็น 3 ชั้น เท่าๆ กันโดยประมาณ และแต่ละชั้นกระทุ้งทั้งหมด 25 ครั้ง แล้วปาดผิวดินให้เรียบเสมอขอบ mold แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก โดยการกระแทกแต่ละครั้งยกให้สุดระยะยกคือ 304.8 mm (12 in.)

จากการทดสอบ หน่วยน้ำหนักของดิน (Moist Unit Weight) ของการบดอัดดินสามารถหาได้โดย

$$\gamma = \frac{W}{V_{mold}} \qquad \text{(สมการที่ 6.1)}$$

โดยที่ W = น้ำหนักของดินหลังจากบดอัดดินเสร็จแล้ว

V = ปริมาตรของโมล = 944 cm^3 $\left(\frac{1}{30} ft^3\right)$

เมื่อนำดินที่ชั่งน้ำหนักแล้วเรานำดินส่วนหนึ่งไปหาปริมาณความชื้น (moisture content) ก็จะสามารถหาหน่วยน้ำหนักของดินที่บดอัดแล้ว (dry unit weight) ได้จากสมการ

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+\frac{\omega(\%)}{100}} \qquad \text{(สมการที่ 6.2)}$$

โดยที่ ω = ปริมาณความชื้นเป็นเปอร์เซ็นต์ (Moisture content)

แต่ถ้าให้ moisture content (ω) และ degree of saturation (S) ดังนั้นหน่วยน้ำหนักแห้งของการบดอัดสามารถหาได้จากสมการที่ 6.2.1

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} \qquad \text{(สมการที่ 6.2.1)}$$

โดยที่ G_s = ความถ่วงจำเพาะของดิน (Specific Gravity of Soil)

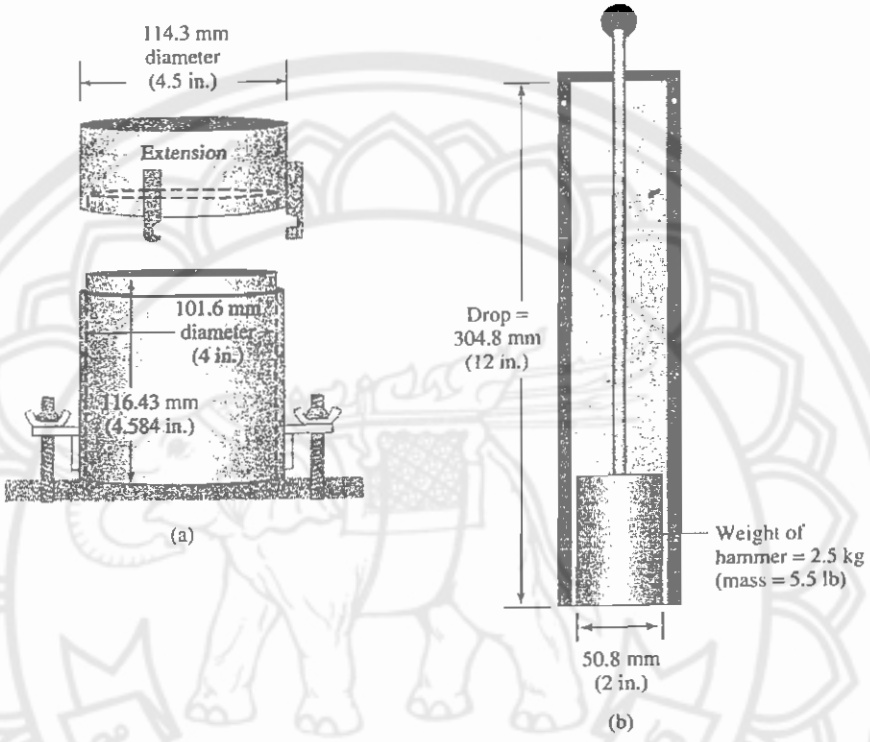
γ_w = หน่วยน้ำหนักของน้ำ (Unit Weight of Water)

e = อัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio) = $\frac{G_s \gamma_w}{S}$

ดังนั้น

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1 + \frac{G_s \omega}{S}} \qquad \text{(สมการที่ 6.2.2)}$$

โดยที่ S = ดีกรีความอิ่มตัว (Degree of Saturation)



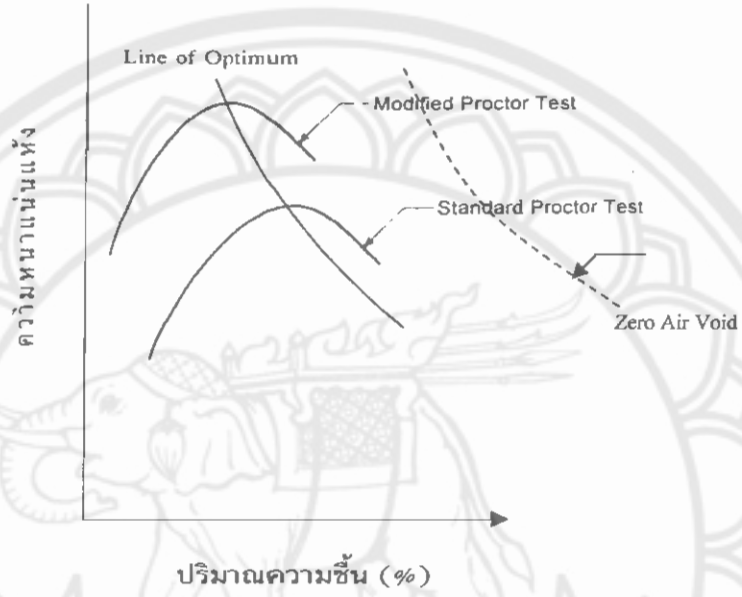
รูปที่ 6.4 เครื่องมือที่ใช้ทดลอง Standard Proctor Test (a) โมล (Mold) (b) ค้อน (Hammer)

6.1.2.2 การทดสอบการบดอัดดินแบบโมดิฟายด์ (Modified Proctor test)

ในวิธี Proctor แบบโมดิฟายด์ ก็คือการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและความหนาแน่นของดินในห้องปฏิบัติการ เช่นเดียวกับแบบมาตรฐานเพียงแต่ต้องได้ความหนาแน่นของดินมากกว่า เหมาะสำหรับงานที่ต้องการรับน้ำหนักบรรทุกมากๆ เช่นงานก่อสร้างสนามบิน เป็นต้น โดยความแตกต่างของแบบโมดิฟายด์คือจะใช้ hammer ขนาดน้ำหนัก 4.5 kg (10 lb.) และมีระยะยก (drop) 457 mm (18 in.) ซึ่งจะแบ่งดินออกเป็น 5 ชั้น แต่ละชั้นกระทุ้งทั้งหมด 25 ครั้ง จากนั้นก็คำนวณหา γ และ γ_d โดยใช้วิธีการและสมการชุดเดิมคือสมการที่ 6.1 และสมการที่ 6.2

จากวิธีการทั้ง 2 วิธีคือแบบมาตรฐานและแบบโมดิฟายด์ ให้ทำแต่ละวิธีอย่างน้อย 4-5 ครั้ง โดยแต่ละครั้งให้เพิ่มจำนวนน้ำขึ้นครั้งละประมาณ 2% จากนั้นเราก็นำไปหา γ และ γ_d จาก

สมการที่ 6.1 และสมการที่ 6.2 ซึ่งก็จะได้ปริมาณความชื้น (ω) และหน่วยน้ำหนักดินแห้ง (γ_d) มาอย่างละ 1 ชุดต่อ 1 วิธี จากนั้นนำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น (moisture content) กับหน่วยน้ำหนักแห้งของดิน (dry unit weight) จะได้กราฟดังแสดงตามรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในมวลดิน
กับความหนาแน่นของมวลดิน (Compaction Curve)

ซึ่งกราฟที่ได้จะเรียกว่า "Compaction curve" โดยที่จุดยอดของกราฟเรียกว่า หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (max dry unit weight) และจุดความชื้นที่ให้หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดเราจะเรียกว่า "ความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัดดิน (optimum moisture content)"

โดยจากรูปที่ 6.5 จะเห็นว่าความหนาแน่นของดิน (ชนิดเดียวกัน) ที่ได้จากการทดสอบแบบโมดิฟายด์จะสูงกว่าแบบมาตรฐาน เนื่องจากการทดสอบแบบโมดิฟายด์จะใช้ค่าพลังงานในการบดอัดดินมากกว่าแบบมาตรฐาน ดังนั้นจะทำให้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (optimum moisture content) จะมีค่าน้อยกว่าแบบมาตรฐาน

เราควรจะทำความรู้จักเส้นโค้งอันหนึ่งซึ่งมีชื่อเรียกว่า "Zero air void" เป็นเส้นแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักของดินบดอัดในกรณีที่ดินอิ่มตัว (S = 100%) ซึ่งก็คือเส้นที่มีปริมาณอากาศเท่ากับ 0 นั่นเอง โดยค่าที่ได้จะนำลงไป plot กราฟในรูปที่ 6.5 ด้วย นั่นคือค่าหน่วยน้ำหนัก (γ_{zav}) สามารถหาได้จากสมการ

$$\gamma_{zav} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + \omega G_s} = \frac{\gamma_w}{\omega + 1/G_s} \qquad \text{(สมการที่ 6.3)}$$

โดยที่ γ_{zav} = หน่วยน้ำหนักของดินที่ไม่มีอากาศแทรกอยู่ (Zero-air-void unit weight)

แต่ถ้าระดับความอิ่มตัวของดิน (s) ไม่เท่ากับ 100% เพราะใน Lab หรือในสนามไม่สามารถทำได้เนื่องจากจะมีอากาศหลงเหลืออยู่บ้าง จึงจะมีอากาศเหลืออยู่ประมาณ 5% เป็นต้น ดังนั้นระดับความอิ่มตัวของดินจะเท่ากับ 95% เมื่อนำไปหา γ_{zav} จะเรียกกราฟที่พล็อตได้จะเรียกว่า "5% air void" นั่นเอง

อย่างไรก็ตามวิธีการที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดก็สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามมาตรฐาน ASTM D-698 และ ASTM D-1557 ซึ่งวิธีที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดเราเรียกว่า "Method A" และเราสามารถทดสอบตามมาตรฐานได้อีก 2 วิธีตามที่แสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ข้อสรุปเกี่ยวกับ Standard และ Modified Proctor Compaction Test

	Description	Method A	Method B	Method C
Physical Data for the Tests	Material	Passing No. 4 sieve	Passing 9.5 mm ($\frac{3}{8}$ in.) sieve	Passing 19 mm ($\frac{3}{4}$ in.) sieve
	Use	Used if 20% or less by weight of material is retained on No. 4 (4.75 mm) sieve	Used if more than 20% by weight of material is retained on No. 4 (4.75 mm) sieve and 20% or less by weight of material is retained on 9.5 mm ($\frac{3}{8}$ in.) sieve	Used if more than 20% by weight of material is retained on 9.5 mm ($\frac{3}{8}$ in.) sieve and less than 30% by weight of material is retained on 19 mm ($\frac{3}{4}$ in.) sieve
	Mold volume	944 cm^3 ($\frac{1}{30}$ ft^3)	944 cm^3 ($\frac{1}{30}$ ft^3)	944 cm^3 ($\frac{1}{30}$ ft^3)
	Mold diameter	101.6 mm (4 in.)	101.6 mm (4 in.)	101.6 mm (4 in.)
	Mold height	116.4 mm (4.584 in.)	116.4 mm (4.584 in.)	116.4 mm (4.584 in.)
Standard Proctor Test	Weight of hammer	24.4 N (5.5 lb)	24.4 N (5.5 lb)	24.4 N (5.5 lb)
	Height of drop	305 mm (12 in.)	305 mm (12 in.)	305 mm (12 in.)
	Number of soil layers	3	3	3
	Number of blows/layer	25	25	56
Modified Proctor Test	Weight of hammer	44.5 N (10 lb)	44.5 N (10 lb)	44.5 N (10 lb)
	Height of drop	457 mm (18 in.)	457 mm (18 in.)	457 mm (18 in.)
	Number of soil layers	5	5	5
	Number of blows/layer	25	25	56

ตารางที่ 6.2 แสดงการเปรียบเทียบอุปกรณ์และพลังงานที่ใช้ทดสอบ(Standard Proctorและ Modified Proctor)

Test	Mold size	Wt. Of hammer (lb.)	No. of layer	Height of drop (in)	No. of blow per layer	Energy/vol. Ft – lb/ft^3
Standard Proctor	ϕ4.0"x4.6"	5.5	3	12	25	12400
	ϕ6.0"x5.0"	5.5	3	12	56	12400
Modified Proctor	ϕ6.0"x5.0"	10	5	18	56	56000
	ϕ4.0"x4.6"	10	5	18	25	56300

และจากการแบ่งแยกดินแบบ Unified system เราก็สามารถสรุปชนิดของดินแล้วใช้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการบดอัดดินนั้นไปตามตารางที่ 6.3 ซึ่งแสดงถึงกลุ่มดินและปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการบดอัดดินชนิดนั้น รวมถึงลักษณะการบดอัดโดยใช้เครื่องมืออีกด้วย

ตารางที่ 6.3 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่สุดในดินแต่ละชนิด

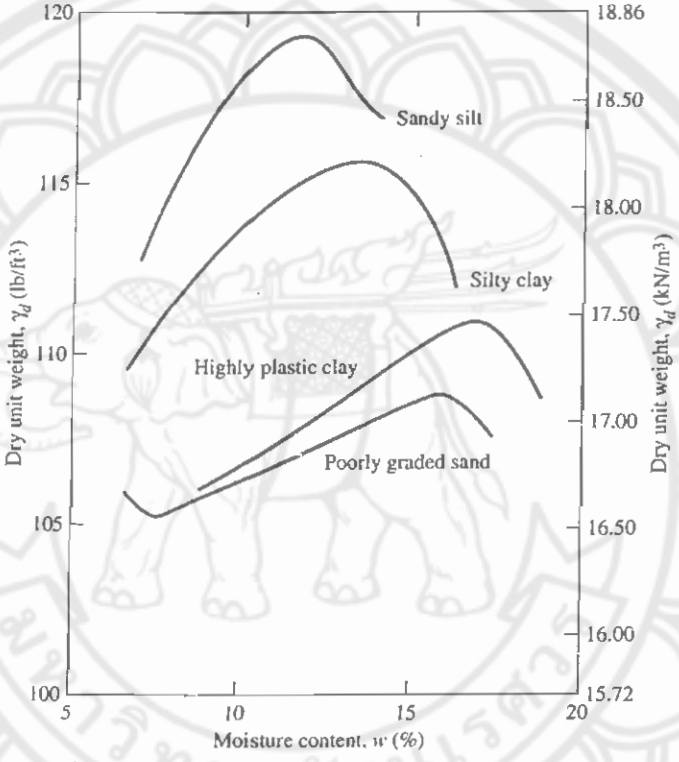
การจำแนกประเภททั่วไป		กลุ่มดิน	คำอธิบาย	ลักษณะการบดอัดและการใช้เครื่องมือบดอัด	ความหนาแน่นแห้ง (ตัน/ลบม.)	ปริมาณน้ำที่เหมาะที่สุด (%)	ค่า CBR ในสนาม
ดินเม็ดหยาบ	กรวดและดินปนกรวด	GW	กรวดหรือกรวดผสมทราย มีหลายขนาดคละกัน มีเม็ดละเอียดปนบ้างหรือไม่มีเลย	ดี, ใช้รถแทรกเตอร์, รถล้อยาง, รถบดล้อเหล็ก	2.00-2.16	11-8	60-80
		GP	กรวดหรือกรวดผสมทราย ขนาดเดียวกัน มีเม็ดละเอียดปนบ้างหรือไม่มีเลย	ดี, ใช้รถแทรกเตอร์ รถล้อยาง, รถบดล้อเหล็ก	1.84-2.00	14-11	25-60
		GM	กรวดปนตะกอนทราย กรวดปนทรายและตะกอนทรายมีเม็ดขนาดเดียวกัน	ดี, ต้องคุมงานอย่างเข้มงวด รถล้อยาง, รถบดตีนแกะ	1.92-2.16	12-8	20-60
		GC	กรวดปนดินเหนียว, กรวด ทราย และดินเหนียว ปนคละกัน มีเม็ดขนาดเดียว	ดี, รถล้อยาง, รถบดตีนแกะ	1.84-2.08	14-9	20-40
	ทราย และดินปนทราย	SW	ทรายหลายขนาดคละกัน, ทรายปนกรวด มีเม็ดละเอียดปนบ้างหรือไม่มีเลย	ดี, ใช้รถแทรกเตอร์	1.76-2.08	16-9	20-40
		SP	ทรายเม็ดขนาดเดียวกัน, ทรายปนกรวด มีเม็ดละเอียดปนบ้างหรือไม่มีเลย	ดี, ใช้รถแทรกเตอร์	1.60-1.92	21-12	10-25
		SM	ทรายปนตะกอนทราย ทรายปนตะกอนทรายมีเม็ดขนาดเดียวกัน	ดี, ต้องคุมงานอย่างเข้มงวด รถล้อยาง รถบดตีนแกะ	1.76-2.00	16-11	10-40
		SC	ทรายปนดินเหนียว, ของผสมของทรายกับดินเหนียวมีขนาดเดียวกัน	ดี, ใช้รถบดตีนแกะ รถบดล้อยาง	1.68-2.00	19-11	10-20
ดินเม็ดละเอียด	ตะกอนทรายและดินเหนียว LL > 50	ML	ตะกอนทรายอนินทรีย์, ทรายละเอียดมาก, หินฝุ่น, ทรายละเอียดปนตะกอนทราย หรือดินเหนียวมีสภาพพลาสติกเล็กน้อย	ดีหรือเลว, การคุมงานเป็นสิ่งที่สำคัญมาก, รถบดล้อยาง รถบดตีนแกะ	1.52-1.92	24-12	5-15
		CL	ดินเหนียวอนินทรีย์ มีสภาพพลาสติกต่ำกว่าปกติ ดินเหนียวปนกรวดหรือปนทรายหรือปนตะกอนทราย, ดินเหนียวมีความหนืดเล็กน้อย	ดีหรือไม่ดีนัก รถบดตีนแกะ รถบดล้อยาง	1.52-1.92	24-12	5-15
		OL	ตะกอนทรายอินทรีย์ มีสภาพพลาสติกเล็กน้อยและดินเหนียวปนตะกอนทราย	ดีหรือไม่ดีนัก รถบดตีนแกะ	1.28-1.60	33-21	4-8
	ตะกอนทรายและดินเหนียว LL > 50	MH	ตะกอนทรายอนินทรีย์, ดินเหนียวปนทรายหรือตะกอนทราย มีไมกาหรือดินเบาผสม	เลวหรือไม่เหมาะ รถบดตีนแกะ	1.12-1.52	40-24	4-8
		CH	ดินเหนียวอนินทรีย์ มีสภาพพลาสติกมาก ดินหนียวมีความหนืดสูง	ดีหรือไม่ดีนัก รถบดตีนแกะ	1.20-1.68	36-19	3-5
		OH	ดินเหนียวอินทรีย์มีสภาพพลาสติกสูงกว่าปกติ, ตะกอนทราย อินทรีย์	เลวหรือไม่เหมาะ รถบดตีนแกะ	1.04-1.60	45-21	3-5
ดินอินทรีย์สูงมาก		Pt	พีตและดินอินทรีย์สูงอื่น ๆ	ไม่เหมาะที่จะใช้หลังการบดอัด			

6.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการบดอัดดิน (Factor affecting Compaction)

ปัจจัยที่มีผลมีอยู่ด้วยกันทั้งหมด 2 ประการคือ

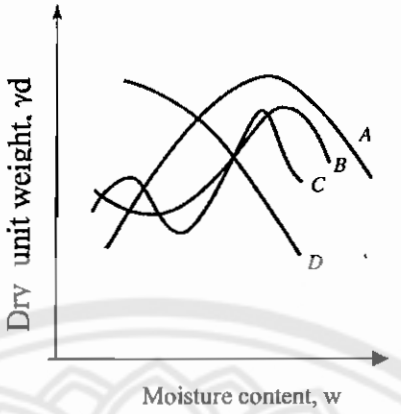
6.1.3.1 ผลกระทบจากชนิดของดิน (Soil Type)

ก็คือจากตารางที่ 6.3 เราก็จะเห็นได้ว่าถ้าชนิดของดินต่างกัน เราจะใช้ปริมาณน้ำในการบดอัดดินต่างๆ กันดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 6.6 อีกด้วย



รูปที่ 6.6 ชนิดของ Compaction Curve ของดิน 4 ชนิด

จากรูปที่ 6.6 จะเห็นได้ว่าดินต่างชนิดกันใช้ปริมาณน้ำในการบดอัดดินไม่เท่ากันจึงทำให้ในการทำงานจริงถ้าดินถม เรามีหลายชนิดปนกันอาจจะทำให้เราบดอัดดินไม่ได้ตามมาตรฐานหรือตามที่เราต้องการให้รับน้ำหนักได้และจากการศึกษาตัวอย่างดิน 35 ชนิดของ Lee และ Suedkamp (1972) จะสามารถแบ่งแยกชนิดของ Compaction curve ได้ตามรูปที่ 6.7



รูปที่ 6.7 ชนิดของ Compaction Curve

ซึ่งจากรูปที่ 6.7

จะได้

ชนิด A → คือชนิดปกติโดยทั่วไปซึ่งจะมีค่า Liquid Limit (LL) ประมาณ 30-70

ชนิด B → คือจุดสูงสุดของกราฟจะอยู่ที่ครึ่งใดครึ่งหนึ่งของกราฟโดยมีค่า LL น้อยกว่า 30

ชนิด C → คือจุดสูงสุดของกราฟจะมี 2 ค่าซึ่งค่า LL จะน้อยกว่า 30

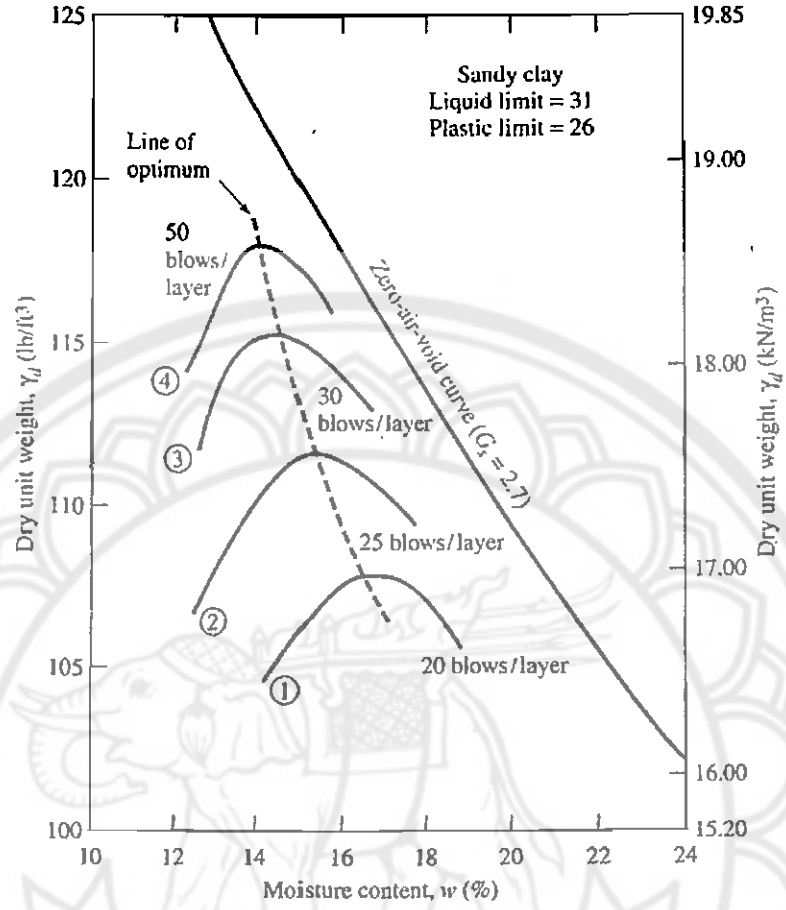
ชนิด D → คือไม่สามารถหาจุดสูงสุดของกราฟได้

6.1.3.2 ผลกระทบจาก Compaction effort

พลังงานที่ใช้บดอัดดินที่บอกเป็นค่าพลังงานต่อหน่วยปริมาตรของดินโดยคำนวณได้จาก

$$W = \frac{\text{จำนวนที่กระทุ้ง} \times \text{จำนวนชั้นของดิน} \times \text{น้ำหนักของ hammer} \times \text{ความสูงของการยก hammer}}{\text{ปริมาตรของ mold}}$$ (สมการที่ 6.4)

ซึ่งจากการคำนวณพลังงานที่ใช้บดอัดดินมีผลต่อหน่วยน้ำหนักของดินและปริมาณน้ำในมวลดิน คือถ้าใช้พลังงานมากขึ้น หรือบดอัดมากขึ้น ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งของดินก็จะมากขึ้น และค่าปริมาณน้ำที่พอเหมาะ (optimum moisture content) จะลดลง ซึ่งเป็นเรื่องดีเพราะใช้น้ำลดลง ดังแสดงในรูปที่ 6.8



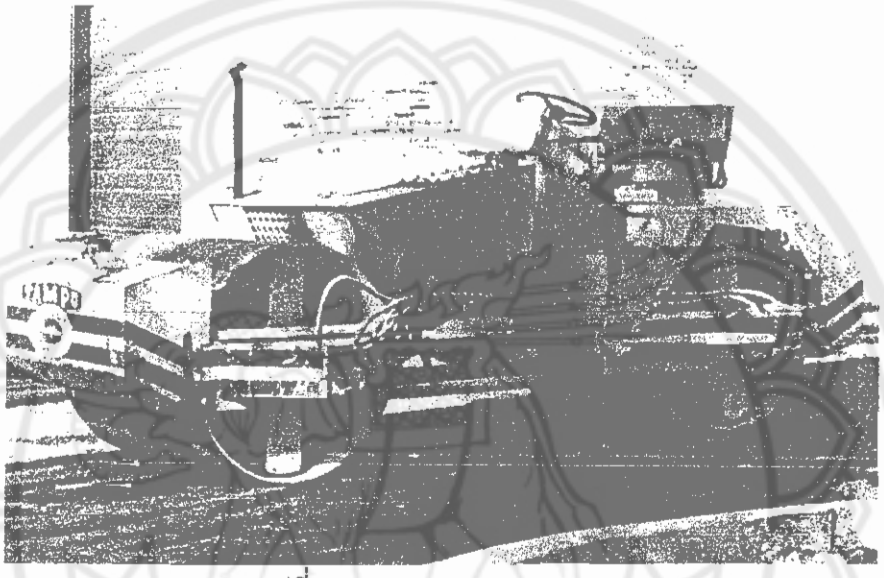
รูปที่ 6.8 ผลกระทบจากพลังงานในการบดอัดในการบดอัดดิน Sandy Clay

อย่างไรก็ดีหน่วยน้ำหนักแห้งที่เพิ่มขึ้นนี้ไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานที่ใช้ สิ่งที่ควรจะระวังคือการใช้พลังงานบดอัดดินมากเกินไปอาจจะไม่ได้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งมากที่สุดก็ได้เช่น จากรูปที่ 6.8 เมื่อบดอัด 25 ครั้งได้หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดค่าหนึ่ง แต่ในค่าที่ได้นี้ถึงใช้การบดอัด 30 ครั้งก็ไม่สามารถเป็นค่าสูงสุดได้ เพราะกราฟจะตกลงเรื่อยๆ การใช้น้ำก็เยอะขึ้นในหน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากัน ดังนั้นจึงต้องเลือกให้เหมาะสมในการบดอัดจากสิ่งที่เราต้องการ เช่นตัวเราต้องการ γ_d = 115 16 / ft^3 เราควรใช้การบดอัดที่ 30 ครั้งเพราะใช้น้ำน้อยกว่า 50 ครั้งและประหยัดกว่าด้วย เป็นต้น

6.1.4 การบดอัดดินในสนาม (Field compaction)

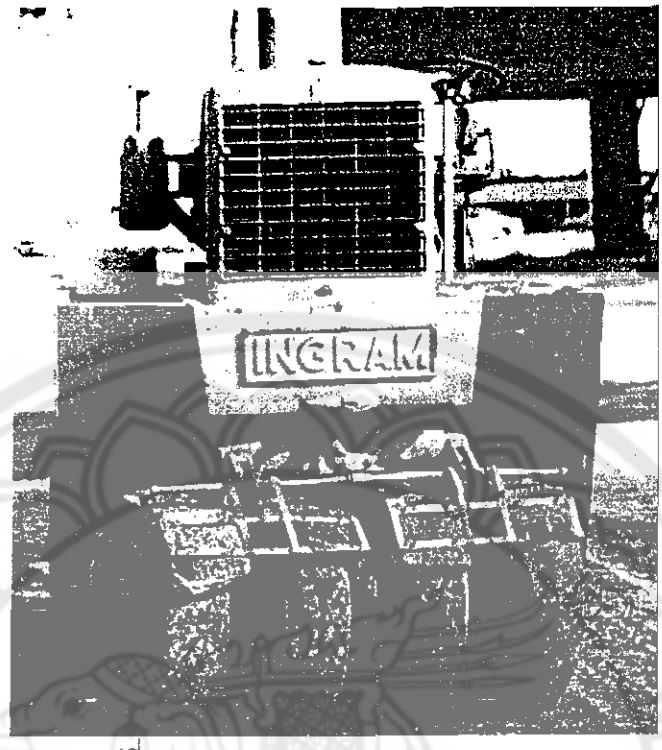
การบดอัดดินในสนามโดยใช้รถนั่นมีรถอยู่ 4 แบบดังต่อไปนี้

6.1.4.1 การบดอัดดินโดยรถบดถนนล้อเหล็ก (Smooth-wheel rollers) โดยแสดงตามรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 Smooth-wheel roller

6.1.4.2 การบดอัดดินโดยรถบดถนนล้อยาง(Pneumetic rubber-tired rollers) โดยแสดงตามรูปที่ 6.10

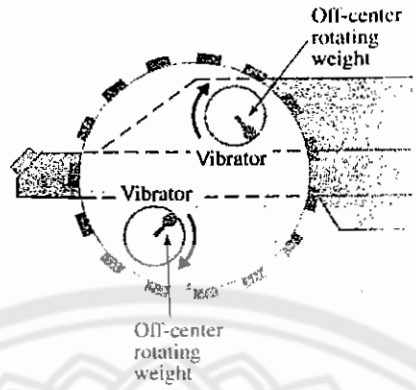


รูปที่ 6.10 Pneumatic rubber-tired roller

6.1.4.3 การบดอัดดินโดยใช้รถตีนแกะ (sheepsfoot rollers) โดยแสดงตามรูปที่ 6.11

รูปที่ 6.11 Sheepsfoot roller

6.1.4.4 การบดอัดดินโดยใช้รถแบบสั่น (Vibratory rollers) โดยแสดงตามรูปที่ 6.12



รูปที่ 6.12 ทฤษฎีของ Vibratory rollers

การบดอัดดินในสนามให้ได้ผลตามข้อกำหนดที่ต้องการนั้น ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ โดยประการที่สำคัญอันหนึ่งคือ เครื่องมือที่ใช้ในการบดอัดดินจะต้องเหมาะสมกับชนิดของดินที่ทำการบดอัด การเลือกเครื่องสำหรับการบดอัดดินนั้นจะพิจารณาจากชนิดของดิน ลักษณะพื้นที่บริเวณที่จะทำการบดอัดและค่าความหนาแน่นที่ต้องการ โดยการเลือกนั้น รถบดตีนแกะจะเหมาะกับดินพวกเม็ดละเอียด (Fines) ที่มีความเชื่อมแน่น เช่นดินเหนียวปนดินตะกอน (Silty Soil) และดินเหนียว (Clayey Soil) รถบดล้อยางเหมาะกับดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่นทั้งดินพวกกรวด-ทราย (Granular Material) ที่มีพวกเม็ดละเอียดปนอยู่บ้างเล็กน้อย และพวกดินเหนียว ดินเหนียวปนดินตะกอน รถบดล้อเหล็กเหมาะกับงานพื้นที่และงานปรับพื้นผิวให้เรียบ กับดินประเภทหินย่อย กรวดและทรายหรืออาจใช้ได้กับดินทีมีความเชื่อมแน่นปานกลาง (moderately cohesive soils) รถบดแบบสั่นสะเทือนกับดินที่มีเม็ดหยาบและไม่มีความเชื่อมแน่น

ซึ่งการเลือกชนิดของรถบดนี้ตามชนิดของดินสามารถจำแนกได้ตามตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 การพิจารณาเลือกใช้เครื่องจักรในการบดอัดดิน

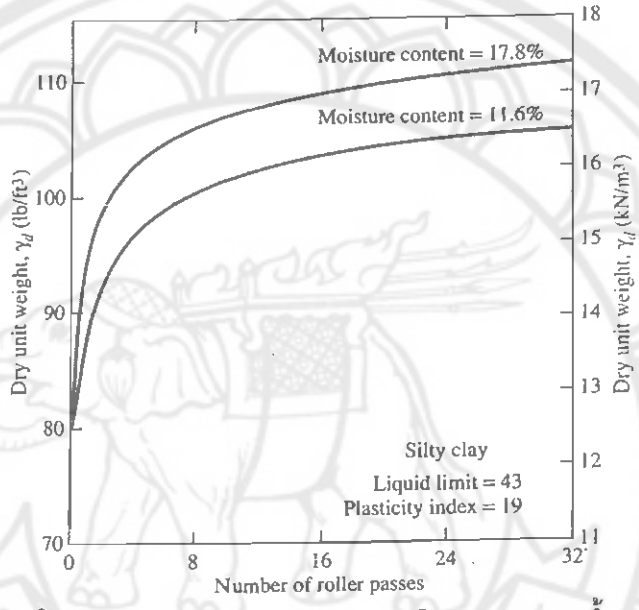
ประเภทของดิน	กลุ่มของดิน	ระดับขั้นของความแน่น	การถมดินและการบดอัดดิน ๆ						คุณพารามิเตอร์หรือหมาย	
			เครื่องจักรที่ใช้ในการบดอัด	จำนวนที่ต้อง	ความหนาแต่ละชั้น, มม.	จำนวนน้ำที่ผสม, %	γ dry กน./ม.³	การควบคุมในสนาม	วิธีการบดอัด	การควบคุมในสนาม
หินหลุมหินที่ไม่ยึดเกาะกันหรือดินเม็ดหยาบ	GW GP SW SP	95 ถึง 105 เปอร์เซนต์ของการทดสอบความแน่นแบบมาตรฐาน หรือ 70 ถึง 85 เปอร์เซนต์ของความหนาแน่นสัมพัทธ์ (D_r)	รถบดล้อเหล็กหรือเครื่องจักรแบบสั่นสะเทือน	ตามต้องการ	ตามต้องการ	อิ่มตัวโดยให้น้ำท่วม	17-21	ทดสอบความหนาแน่นในสนาม ณ จุดต่าง ๆ โดยวิธีสุ่ม (Random)	ไม่สามารถทำได้ยกเว้นชั้นที่อยู่ใกล้ผิวดิน	· ตัวอย่างคงสภาพจากหลุมเจาะหรือบ่อทดลอง (Test pits) · SPT ก่อน และหลังการบดอัด
			รถบดล้อยาง	2-5	300					
			รถแทร็คเตอร์ดันตะขาบ	2-5	200					
			เครื่องกระทุ้งด้วยมือ (หนัก > 45 กก.)	ตามต้องการ	< 150					
		90 ถึง 95 เปอร์เซนต์ของการทดสอบความแน่นแบบมาตรฐาน หรือ 60 ถึง 70 เปอร์เซนต์ของความหนาแน่นสัมพัทธ์ (D_r)	รถบดล้อยาง	2-5	350	อิ่มตัวโดยให้น้ำท่วม	16-20	ทดสอบความหนาแน่นในสนาม ณ จุดต่าง ๆ โดยวิธีสุ่ม	- Vibroflotation - Compaction piles - Sand piles - Explosives - และวิธีผิวดิน	
			รถแทร็คเตอร์ดันตะขาบ	1-2	250					
			เครื่องกระทุ้งด้วยมือ	ตามต้องการ	<200					
หินหลุมหินที่ไม่ยึดเกาะกันหรือดินเม็ดหยาบ	GM GC SM SC	95 ถึง 105 เปอร์เซนต์ของการทดสอบความแน่นแบบมาตรฐาน	รถบดล้อยาง	2-5	200	ณ จุดความชื้นที่เหมาะสม ซึ่งให้จากการทดสอบความแน่นในห้องปฏิบัติการ	16-20	ทดสอบความหนาแน่นในสนาม ณ จุดต่างๆ โดยวิธีสุ่ม	- ถมทำ Preload - ลดระดับน้ำใต้ดิน - โดยทำไปใช้ทฤษฎีของการบุบอัดตัวของดินมาประยุกต์	
			รถบดดินเหนียว	4-8	150					
			เครื่องกระทุ้งด้วยมือ	ตามต้องการ	< 100					
	ML CL OL MH CH OH	90 ถึง 95 เปอร์เซนต์ของการทดสอบความแน่นแบบมาตรฐาน	รถบดล้อยาง	2-4	250		14-19			
			รถบดดินเหนียว	4-8	200					
			รถแทร็คเตอร์ดันตะขาบ	2-4	150					
			เครื่องกระทุ้งด้วยมือ	ตามต้องการ	< 150					

หมายเหตุ 1. รถบดล้อยางความดันลมยาง (Tire pressures) ประมาณ 550-700 กน./ม.²

2. รถบดดินเหนียวความดันหนาม (Foot pressures) อยู่ในเกณฑ์ 1,700–3,500 กน./ม.²

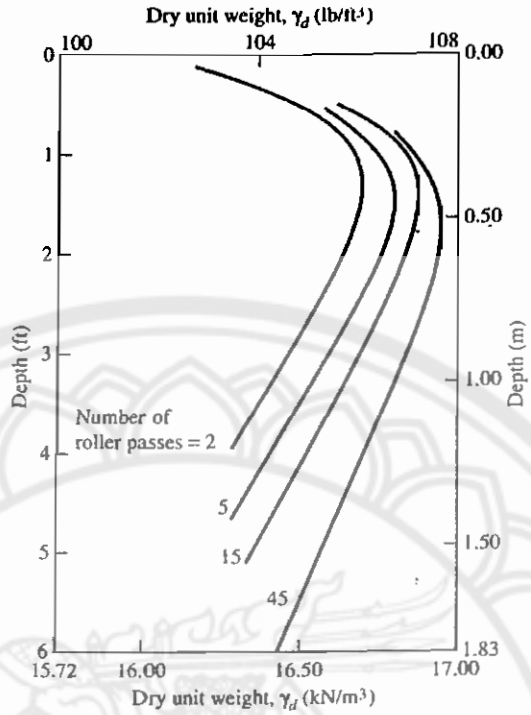
3. รถแทร็คเตอร์ดันตะขาบน้ำหนักจะต้องสูงกว่า 85 กน. และความดันลายพาน (Track pressures) จะต้อ

จากตารางข้างต้นคือตารางที่ 6.4 มีปัจจัยอีกอย่างหนึ่งที่มีผลต่อการบดอัดดินในสนามก็คือจำนวนรอบหรือจำนวนเที่ยวในการบดอัดดิน (Passes or coverage) ซึ่งจะตารางกำหนดไว้ก็จริงแต่ในการทำงานจริงเมื่อเราต้องการค่าของหน่วยน้ำหนักแห้งของดิน (Dry unit weight ; γ_d) ที่เราต้องการและไม่ตรวจตามตารางกำหนดเราก็สามารถหาจำนวนรอบหรือจำนวนเที่ยวได้จากกราฟ ซึ่งแสดงให้เห็นตามรูปที่ 6.13



รูปที่ 6.13 กราฟสำหรับ Silty Clay – ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งกับจำนวนรอบของ 85kN (19 kip) three-wheel roller โดยบดอัดในดินตัวอย่างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 229 mm (9 in) ในสภาวะหลวม ที่ Moisture Content ที่แตกต่างกัน

และถ้าเกิดเราใช้รถแบบสั่นสะเทือนเราอาจจะต้องการความลึกของดินที่ต้องการในหน่วยน้ำหนักแห้งของดินค่าใดค่าหนึ่งโดยจากการทำงานจริงของการทำงาน จะต้องกำหนดหน่วยน้ำหนักแห้งไว้ก่อนจากนั้นเราก็เลือกจำนวนรอบเพื่อนำไปพล็อตลงในกราฟที่แสดงในรูปที่ 6.14 เราก็จะได้ความหนาของชั้นดินที่ต้องการ



(a)

รูปที่ 6.14 (a) การบดอัดดินแบบสั่นของทราย – ที่ความต่างของจำนวนรอบกับหน่วยน้ำหนักแห้งที่ความหนาของชั้นดิน = 2.45 m (8 ft)

6.1.5 **การควบคุมคุณภาพของการบดอัดดินในสนาม** (Specifications for Field Compaction)

การบดอัดดินตามสภาพจริงในสนาม ไม่สามารถทำให้ดินแน่นได้ตามหน่วยน้ำหนักของดินในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นการดูว่าดินได้ตามมาตรฐานหรือไม่จะดูจากค่า "Relative Compaction" หรือ "% Compaction" ซึ่งใช้กับดินประเภทที่มีความเชื่อมแน่น (cohesive soil) สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$R(\%) = \frac{\gamma_{d(field)}}{\gamma_{d(\max-lab)}} \times 100 \qquad \text{(สมการที่ 6.5)}$$

โดยที่ $\gamma_{d\ (field)}$ = หน่วยน้ำหนักแห้งที่ได้จากการบดอัดในสนามจากการสุ่มตรวจ

$\gamma_{d\ (max\text{-}lab)}$ = หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

โดยที่ในกรณีดินไม่มีความเชื่อมแน่นเช่นทราย จะกำหนดเป็นค่า "Relative Density" แทนซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 6.6

$$D_r(\%) = \left[\frac{\gamma_{d(\text{field})} - \gamma_{d(\text{min})}}{\gamma_{d(\text{max})} - \gamma_{d(\text{min})}}\right]\left[\frac{\gamma_{d(\text{max})}}{\gamma_{d(\text{field})}}\right] \times 100 \qquad \text{(สมการที่ 6.6)}$$

โดยจากสมการที่ 6.5 และสมการที่ 6.6 สามารถหา "Relative Density" ของทรายหรือดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่นจากสมการที่ 6.7

$$R(\%) = \frac{R_0}{1 - D_r(1 - R_0)} \times 100 \qquad \text{(สมการที่ 6.7)}$$

โดยที่ $R_0 = \dfrac{\gamma_{d(\text{min})}}{\gamma_{d(\text{max})}}$

ซึ่ง γ_d (min) = หน่วยน้ำหนักแห้งต่ำสุดที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

γ_d (max) = หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

γ_d (min), γ_d (max) = สามารถทดสอบได้ในการทดสอบวิธีที่กล่าวมาแล้ว

แต่จากการทดสอบดินที่เป็นเมล็ด (granular soil) 47 ตัวอย่างโดย Lee และ Singh (1971) สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง R และ D_r ได้ตามสมการที่ 6.8

$$R = 80 + 0.2D_r \qquad \text{(สมการที่ 6.8)}$$

โดยทั่วไปในงานทางการต้องการ % Compaction ของการบดอัดดินประมาณ 90-100% ของความหนาแน่นที่ได้จากการทดลองตามวิธี Standard Proctor test ส่วนในงานก่อสร้างเขื่อนดินต้องการ % Compaction ของการบดอัดดินประมาณ 85-100% ของความหนาแน่นที่ได้จากการทดลองตามวิธี Modified Proctor test

จากการที่กล่าวมาแล้ว ทำให้เราทราบถึงชนิดของรถบดอัดดิน ปัจจัยที่มีผลต่อการบดอัดดิน และการควบคุมคุณภาพของการบดอัดดิน ดังนั้นเมื่อเราต้องการ % Compaction ของการบดอัดดิน 95-100% สำหรับงานการทางแล้ว เราสามารถเลือกใช้รถชนิดต่างๆ ให้เหมาะกับสภาพหรือชนิดของดินได้จากการที่ได้ศึกษามาแล้ว

6.1.6 การหาค่าหน่วยน้ำหนักดินในสนามที่บดอัดดิน (Determine of Field unit weight of compaction)

ในงานก่อสร้างเกี่ยวกับงานดิน เมื่อได้ทำการบดอัดดินที่ใช้ในการก่อสร้างเสร็จแล้ว จะต้องทำการทดสอบผลการบดอัดดินได้ตาม % Compaction หรือ Relative Compaction ที่ต้องการหรือไม่นั่นก็คือประมาณ 90-100% สำหรับดินโดยทั่วไป ซึ่งสามารถหาได้ทั้งหมด 3 วิธีดังต่อไปนี้

1. วิธี Sand cone
2. วิธี Rubber balloon
3. วิธี Nuclear

ซึ่งวิธีที่นิยมมากที่สุดคงจะเป็นวิธีการแทนที่ด้วยทราย (Sand cone method)

6.1.6.1 Sand cone Method (ASTM Designation D-1556)

วิธีนี้คือวิธีทรายช่วยในการหาปริมาตรของหลุม ทรายที่ใช้อาจวิธี Ottawa sand หรืออาจจะใ ช้ทรายที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 แต่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 30 หรืออาจจะใช้ทราบที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 30 แล้วค้างตะแกรงเบอร์ 40 ก็ได้ โดยเริ่มต้นคือการซึ่งทรายที่จะใส่ลงไปในเยือก (jar) รวมทั้งกราฟเป็น W_1 จากนั้นขุดดินจากหลุมขึ้นมาแล้วชั่งน้ำหนักของดินที่ขึ้นมาเป็น W_2 จากนั้นนำดินส่วนหนึ่งไปหาปริมาณความชื้นแล้วนำมาแทนค่าลงในสมการที่ 8.9

$$W_3 = \frac{W_2}{1+\frac{\omega(\%)}{100}} \qquad \text{(สมการที่ 6.9)}$$

โดยที่ W_3 = น้ำหนักแห้งของดินที่ขุดขึ้นมาก

ω = ปริมาณความชื้น (moisture content)

จากนั้นเมื่อแทนที่ดินด้วยทรายในหลุมเสร็จเรียบร้อยแล้วก็นำทรายที่เหลือทั้งกรวยมาชั่งเป็น W_4 แล้วก็นำไปหาน้ำหนักของทรายในหลุมจากสมการที่ 6.10

$$W_5 = W_1 - W_4 \qquad \text{(สมการที่ 6.10)}$$

โดยที่ W_5 = น้ำหนักของทรายในหลุมรวมทั้งกรวย

ดังนั้นปริมาตรของหลุมจะเท่ากับ

$$V = \frac{W_s - W_c}{\gamma_{d(sand)}} \qquad \text{(สมการที่ 6.11)}$$

โดยที่ V = ปริมาตรของหลุม

W_c = น้ำหนักของกรวยเปล่าๆ

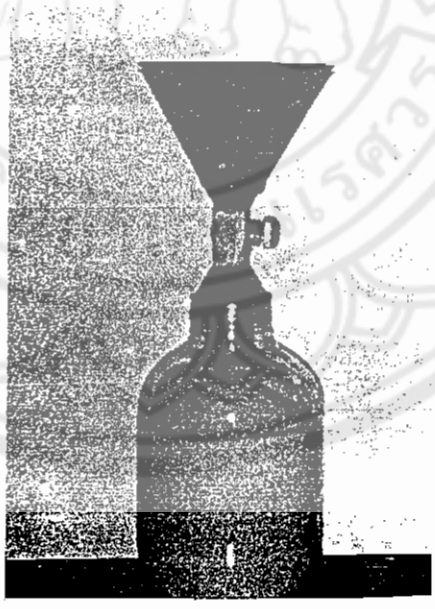
γ_d (sand) = หน่วยน้ำหนักแห้งของทรายที่ใช้ในเหยือก (jar)

ซึ่ง W_c และ γ_d (sand) สามารถหาได้จากการปรับแก้ในห้องปฏิบัติการ

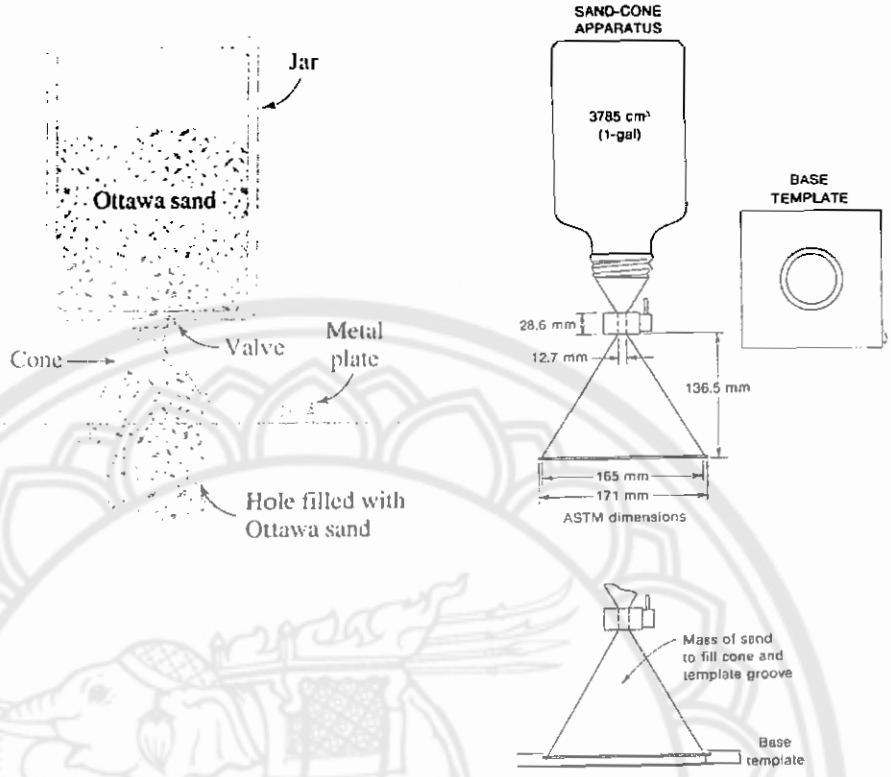
จากนั้นเมื่อได้ปริมาตรของหลุมแล้วเราก็สามารถหาหน่วยน้ำหนักแห้งของดินได้จาก

$$\gamma_d = \frac{W_3}{V} \qquad \text{(สมการที่ 6.12)}$$

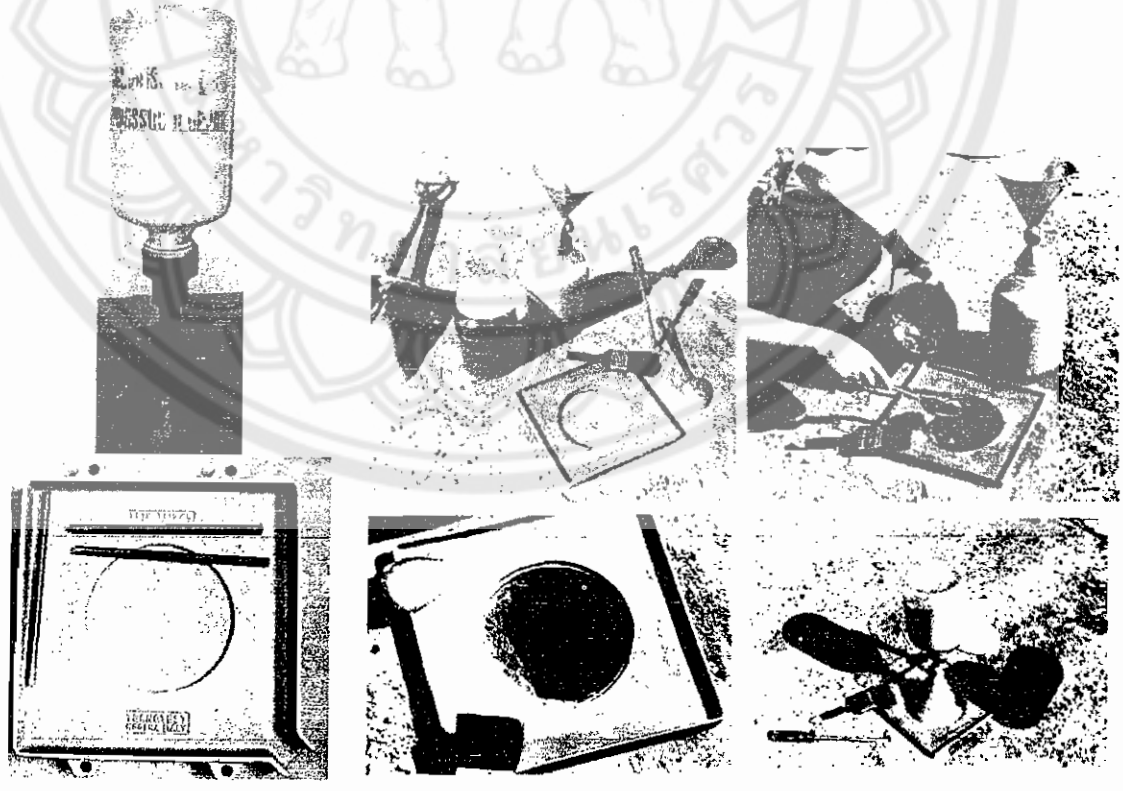
ซึ่งค่านี้คือค่า $\gamma_{d\ (field)}$ ในสมการที่ 6.5 จากนั้นนำไปหา Relative Compaction หรือ % Compaction โดยสามารถแสดงรูปเครื่องมือและรูปในการทดลองได้ตามรูปที่ 6.13 และรูปที่ 6.14 ตามลำดับ



รูปที่ 6.15 เหยือกแก้วที่มีทราย Ottawa อยู่ด้านใน กับกรวย



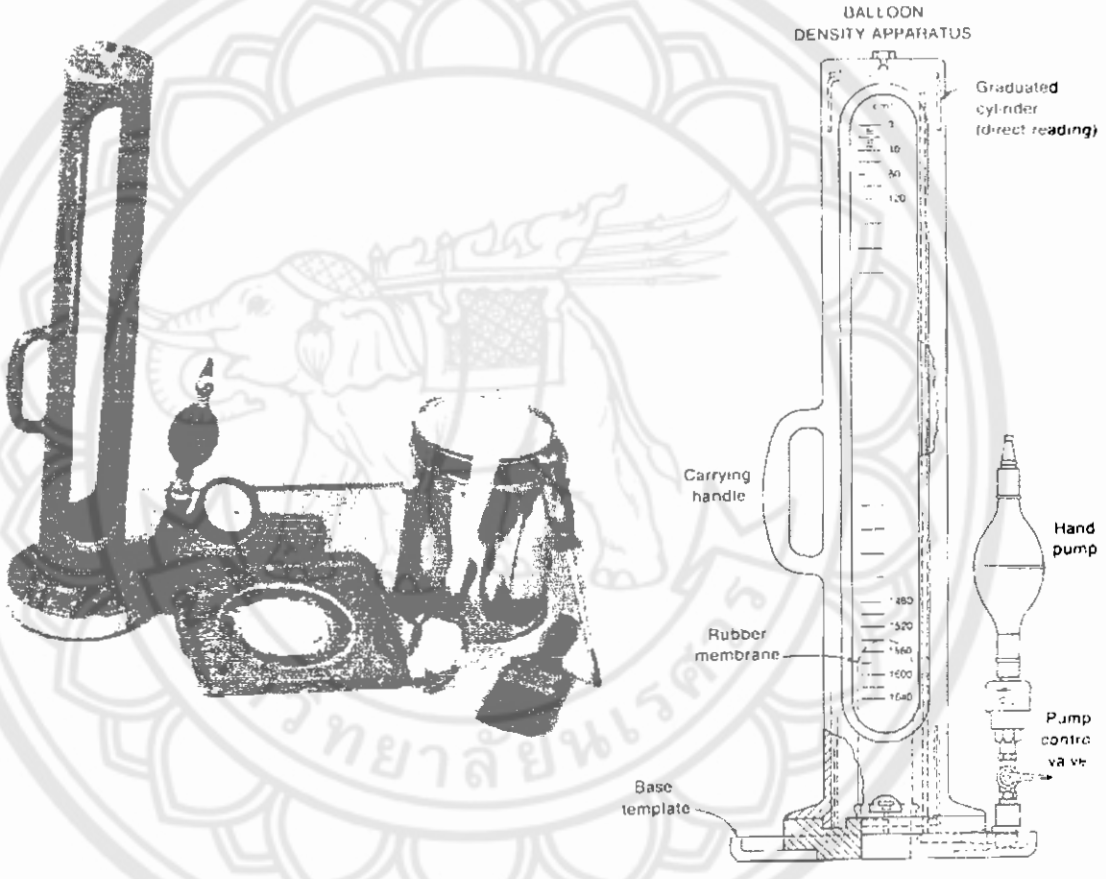
รูปที่6.16การหาหน่วยน้ำหนักในสนามโดยวิธีSand Cone methodโดยจากรูปแสดงรูปตัดของชั้นดิน



รูปที่ 6.17 แสดง Sand Density Cone Field Density Plates และขั้นตอนการทำ Sand Cone

6.1.6.2 Rubber Balloon Method (ASTM Designation D-2167)

วิธีนี้ช่วยในการหาปริมาตรของหลุมซึ่งสะดวกและรวดเร็วกว่าวิธีใช้ทราย ในการทดลองอาศัยใช้ลมจากลูกยางบีบอัดลมไปตรงส่วนบนของผิวน้ำในหลอดแก้วของเครื่องมือทำให้น้ำในหลอดแก้วถูกอัดดันลงไปในลูกโป่งยางและไหลลงไปในหลุมทดลองที่ขุดไว้ใต้พื้นดิน ลมที่อัดลงไปนี้มีส่วนช่วยให้น้ำในลูกโป่งยางอัดแนบสนิทกับหลุม ทำให้ได้ค่าปริมาตรของหลุมที่ถูกต้องและแม่นยำยิ่งขึ้นดังแสดงในรูปที่ 6.17



รูปที่ 6.18 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง Rubber Balloon

โดยปริมาตรของหลุมสามารถหาได้จากสมการที่ 6.13

V = ระดับน้ำที่อ่านครั้งแรก – ระดับน้ำที่อ่านครั้งหลัง (สมการที่ 6.13)

จากนั้นนำไปหาหน่วยน้ำหนักแห้งของดินได้ตามสมการที่ 6.14

$$\gamma_d = \frac{W}{V} \qquad \text{(สมการที่ 6.14)}$$

โดยที่ W = **น้ำหนักของดินที่ขุดขึ้นจากหลุมอบแห้ง**

V = ปริมาตรของหลุม

ซึ่งค่า γ_d ที่ได้นี้คือค่า $\gamma_{d\ (field)}$ ในสมการที่ 6.5 จากนั้นก็นำไปหา Relative Compaction เพื่อกำหนดคุณภาพของดินธรรมชาติ

จากที่เราได้ศึกษามาทั้งหมดนี้ ทำให้ได้ทราบถึงผลกระทบของปริมาณน้ำในมวลดิน**ต่อ**หน่วยน้ำหนักแห้งของดินที่ได้จากการบดอัดเพื่อที่จะนำไปเป็นข้อกำหนดในการก่อสร้างต่างๆ **เช่น** จำนวนรอบของการบดอัดดินคันทาง จำนวนความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัดดินฐานราก เป็น**ต้น** ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการทำงานจริงในอนาคต อีกทั้งยังทราบถึงวิธีการตรวจสอบผลงานที่ได้ว่า**ผ่าน**ตามเกณฑ์ที่กำหนดหรือไม่ โดยแสดงในรูปของ Relative Compaction นั่นเอง

6.2 โจทย์ทบทวนเนื้อหา ความรู้ และความเข้าใจ (Example)

6.2.1 ให้ดินมีความถ่วงจำเพาะ (G_s) = 2.72 จงหาหน่วยน้ำหนักของดินที่ zero-air-void (γ_{zav}) ในหน่วย lb/ft^3 ที่ ω = 5%, 8%, 10%, 12% และ 15%

<u>วิธีทำ</u> จากสมการที่ 6.3 จะได้ $\gamma_{zav} = \dfrac{\gamma_w}{w + \dfrac{1}{G_s}}$

หลังจากการคำนวณสามารถสรุปเป็นตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 6.5 ค่าที่ได้จากการคำนวณ ณ ปริมาณความชื้นต่างๆ

Water Content (%)	γ_{zav} (lb/ft^3)
5	149.408
8	139.396
10	133.434
12	127.961
15	120.545

6.2.2 **จงหาการแปรผันของหน่วยน้ำหนักแห้ง (γ_d) ของดินในหน่วย kN/m^3 โดยที่ G_s = 2.65 ที่ปริมาณความชื้น (ω) = 10% และ 20% สำหรับดีกรีความอิ่มตัว (S) = 80%, 90% และ 100% ตามลำดับ**

วิธีทำ จากสมการที่ 6.26 จะได้ $\gamma_d = \dfrac{G_s \gamma_w}{1 + \dfrac{G_s w}{s}}$

หลังจากการคำนวณสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 6.6 ค่าที่ได้จากการคำนวณตามสมการข้างต้น

Moisture Content (ω)	Degree of Saturation (s)	γ_d (kN/m^3)
10%	80%	19.528
	90%	20.083
	100%	20.551
20%	80%	15.637
	90%	16.361
	100%	16.991

6.2.3 จากผลการทดลอง Standard Proctor Test สามารถแสดงได้ในตารางข้างล่าง **จงหาหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของการบดอัด** ($\gamma_{d(max)}$) และปริมาณความชื้นที่มากที่สุด (Optimum moisture Content ; ω_{max})

ตารางที่ 6.7 ผลการทดลองที่ได้ในข้อที่ 6.2.3

Volume of Proctor mold (ft^3)	Weight of Wet soil in the mold (%)	Moisture content (%)
1/30	3.26	8.4
1/30	1.45	10.2
1/30	4.67	12.3
1/30	4.02	14.6
1/30	3.63	16.8

และถ้า G_s = 2.72 จงหาอัตราส่วนช่องว่าง (e) และดีกรีความอิ่มตัว (S) ที่ปริมาณความชื้นที่มากที่สุด (optimum moisture content)

<u>วิธีทำ</u> จากตารางข้างต้นสามารถสรุปเป็นตารางที่ 6.8 ได้ดังนี้

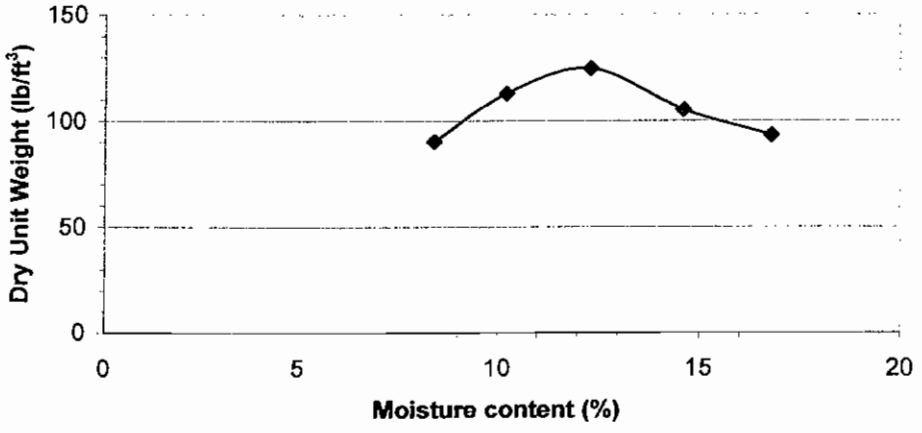
ตารางที่ 6.8 ค่าที่ได้จากการคำนวณ

Volume of mold, V (ft^3)	Weight of soil, W (lb)	Moist unit weight, γ (lb/ ft^3)[a]	Moisture content, ω (%)	Dry unit weight, γ_d (lb/ ft^3)[b]
1/30	3.26	97.8	8.4	90.221
1/30	4.15	124.5	10.2	112.976
1/30	4.67	140.1	12.3	124.755
1/30	4.02	120.6	14.6	105.236
1/30	3.63	108.9	16.8	93.236

[a] $\gamma = W / V$

[b] $\gamma_d = \gamma/[1+(\omega/100)]$

นำไปเขียนกราฟ Compaction Curve จะได้



รูปที่ 6.19 กราฟ Compaction Curve ของข้อที่ 6.2.3

ดังนั้น จากกราฟสามารถหา

$\gamma_{d(max)}$ = 125 lb/ ft^3

$$\omega_{optimum} = 12.5\%$$

จากค่าข้างต้นนำไปหาค่า S จากสมการที่ 6.26 จะได้

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1 + \frac{G_s w}{S}}$$

$$125 = \frac{2.72(62.4)}{1 + \frac{2.72(0.125)}{S}}$$

$$125(1 + \frac{0.34}{S}) = 169.728$$

$$S = 0.95$$

$$S = 95\%$$

และจากสมการที่ว่า

$$e = \frac{G_s w}{S}$$

$$= \frac{(2.72)(12.5/100)}{(95/100)}$$

$$e = 0.358$$

$\therefore$ ดังนั้นจะได้ว่าอัตราส่วนช่องว่าง (e) = 0.358 และดีกรีความอิ่มตัว (S) = 95% ที่ปริมาณความชื้นที่มากที่สุด

6.2.4 การทดสอบความหนาแน่นของดินเหนียวปนทราย (Sand Clay) ที่บดอัดในสนามได้ผลดังนี้

- น้ำหนักของดินจากหลุมที่ขุด 1,037 g
- น้ำหนักของดินเมื่ออบแห้ง 915 g
- ปริมาตรของหลุมที่ขุด 0.019 ft^3

จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการของการบดอัดแบบมาตรฐาน ได้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด 120 lb/ ft^3 ที่ปริมาตรความชื้นที่เหมาะสม 11%

จงหาการบดอัดสัมพัทธ์ (Relative Compaction) และการบดอัดในสนามเป็นการบดอันด้านใดของเส้นกราฟการบดอัด

วิธีทำ

$W = 1{,}037$ g

$W_s = 915$ g

$\therefore\ W_w = W - W_s = 122$ g

$\therefore\ \omega = W_w / W_s = 122 / 915 = 0.133\ (13.3\%)$

$$\gamma_t = \frac{W}{V} = \frac{1{,}037}{0.0169} \times \frac{1}{453.4} = 135.3 \text{ lb/ ft}^3$$

$$\gamma_{d(field)} = \frac{135.3}{1+0.133} = 119.4 \text{ lb/ ft}^3$$

$\therefore$ การบดอัดสัมพัทธ์ $= R = \frac{119.4}{120} \times 100 = 99.5\%$

เนื่องจาก $\omega_{(field)} = 13.3\%$ ซึ่งมากกว่า $\omega_{(lab)} = 11\%$ จึงเป็นการบดอัดด้านเปียก (Wet Side of Compaction)

6.2.5 ดินทรายมีการบดอันบดในสนามพบว่ามีอัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio)= 0.45 จากการทดสอบพบว่าอัตราส่วนโพรงในสภาพหลวมที่สุด (e_{max}) เท่ากับ 0.68 และในสภาพแน่นที่สุด (e_{min}) เท่ากับ 0.30 จงหาความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative Density) กำหนดให้ G = 2.65

วิธีทำ จากสมการความหนาแน่นสัมพัทธ์

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100 = \frac{0.68 - 0.45}{0.68 - 0.30} \times 100 = 60.53\%$$

จากค่า D_r ที่ได้จะได้ว่าเป็นดินทรายสภาพแน่นปานกลาง

$$\gamma_{d\,max} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e_{min}} = \frac{2.65x1}{1+0.3} = 2.04 \text{ t/m}^3$$

$$\gamma_{d\,min} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e_{max}} = \frac{2.65x1}{1+0.68} = 1.58 \text{ t/m}^3$$

ในสนาม

$$\gamma_d = \frac{2.65x1}{1+0.45} = 1.83 \text{ t/m}^3$$

$$\therefore\ R = \frac{1.83}{2.04} \times 100 = 89.7\%$$

หรือหาได้จาก

$$R = \frac{R_o}{1 - D_r(a - R_o)} = \frac{0.775}{1 - 0.60053\,(1 - 0.775)} = 0.897 \quad (89.7\%)$$

โดยที่

$$R_o = \frac{\gamma_{d\,min}}{\gamma_{d\,max}} = \frac{1.58}{2.04} = 0.775$$

6.2.6 ดินจากแหล่งยืม (Borrow Pit) มีอัตราส่วนช่องว่าง 0.95 เมื่อนำไปบดอัดในภาคสนาม พบว่าอัตราส่วนช่องว่างลดลงเหลือ 0.64 จงหาว่าดินมีเปอร์เซ็นต์การลดลงของปริมาตรเท่าไร

<u>วิธีทำ</u> $e_i = 0.95 = V_{vi} / V_s$

$e_f = 0.64 = V_{vf} / V_s$ (เม็ดดินไม่มีการยุบตัว)

$$\therefore \quad \frac{V_{vi}}{0.95} = \frac{V_{vf}}{0.64} = V_s$$

$$\therefore \quad V_i = V_{vi} + V_s = 0.95\,V_s + V_s = 1.95\,V_s$$

$$V_f = V_{vf} + V_s = 0.64\,V_s + V_s = 1.64\,V_s$$

$$\therefore \quad \Delta V = \frac{(1.95V_s - 1.64V_s)}{1.95V_s} \times 100 = 15.9\%$$

6.3 โจทย์ทดสอบความสามารถในการคิดวิเคราะห์ (Critical thinking problem)

6.3.1 ในการก่อสร้างทางเส้นพิจิตร – นครสวรรค์ จะต้องใช้ดินถมคันทาง (Embankment fill) จำนวน 5000 m^3 ในการบดอัด และอัตราส่วนช่องว่าง (void ratio) ของการบดอัดให้ได้ = 0.7 ดังนั้นการสำรวจแหล่งดินใกล้เคียง 4 แห่งสามารถสรุปเป็นตารางดังนี้

ตารางที่ 6.9 ผลสำรวจดินที่ใช้ในข้อที่ 6.3.1

แหล่งดิน	อัตราส่วนช่องว่าง	ราคา(บาท/ m^3)
สามง่าม	0.85	387
ปลวกสูง	1.2	258
โพธิ์ประทับช้าง	0.95	301
คลองคะเชนทร์	0.75	430

ในฐานะวิศวกรที่ปรึกษาของโครงการกรุณาให้คำแนะนำในการเลือกแหล่งดินที่ประหยัดที่สุด ถ้ากำหนดให้ G_s ของดินแต่ละแหล่งมีค่าใกล้เคียงกันมาก

วิธีทำ ถ้ากำหนด $G_s = 2.70$

จะได้จากสมการที่ 6.26 จะได้

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

ดังนั้นจะได้น้ำหนักของดินที่ใช้ $(W_s) = \frac{(2.70)(9.81)}{1+0.7} = \frac{W_s}{500}$

$$W_s = 77902.94 \text{ kN}$$

1. ดินแหล่งสามง่าม

ถ้าต้องใช้ดิน = 77902.94 kN ดังนั้นจะต้องใช้ดินที่มีปริมาตรเท่ากับ

$$\frac{V}{77902.94} = \frac{1+0.85}{(2.70)(9.81)}$$

$$V = 5441.18 \text{ m}^3$$

$\therefore$ ใช้เงินในการก่อสร้างเท่ากับ 5441.18 x 387 = 2,105,736.66 บาท

2. ดินแหล่งปลวกสูง

ถ้าต้องใช้ดิน = 77902.94 kN ดังนั้นจะต้องใช้ดินที่มีปริมาตรเท่ากับ

$$\frac{V}{77902.94} = \frac{1+0.85}{(2.70)(9.81)}$$

$$V = 6470.59 \text{ m}^3$$

$\therefore$ ใช้เงินในการก่อสร้างเท่ากับ 6470.59 x 258 = 1,669,412.22 บาท

3. ดินแหล่งโพธิ์ประทับช้าง

ถ้าต้องใช้ดิน = 77902.94 kN ดังนั้นจะต้องใช้ดินที่มีปริมาตรเท่ากับ

$$\frac{V}{77902.94} = \frac{1+0.85}{(2.70)(9.81)}$$

$$V = 5735.29\ m^3$$

∴ ใช้เงินในการก่อสร้างเท่ากับ 5735.29 x 301 = 1,726,322.29 บาท

4. ดินแหล่งคลองคะเชนทร์

ถ้าต้องใช้ดิน = 77902.94 kN ดังนั้นจะต้องใช้ดินที่มีปริมาตรเท่ากับ

$$\frac{V}{77902.94} = \frac{1+0.85}{(2.70)(9.81)}$$

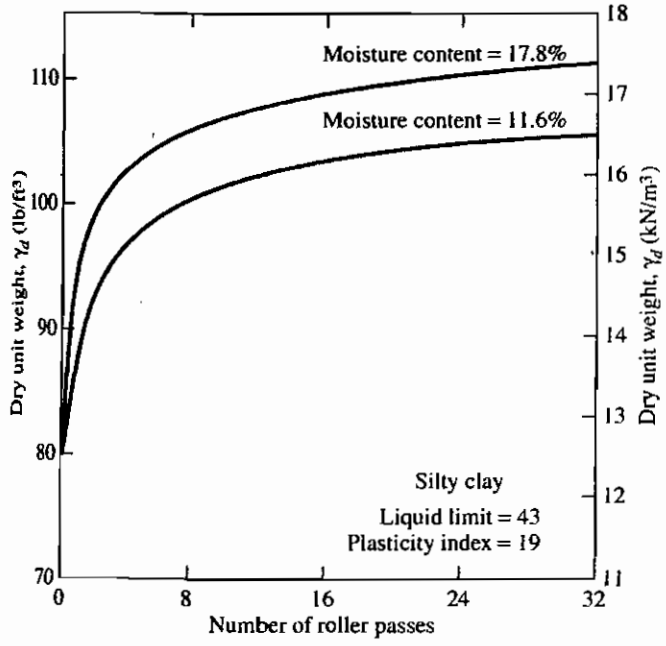
$$V = 5147.06\ m^3$$

∴ ใช้เงินในการก่อสร้างเท่ากับ 5147.06 x 430 = 2,213,235.80 บาท

สรุปได้ว่าแหล่งดิน B ประหยัดที่สุดจึงเลือกใช้แหล่งดิน B เป็นแหล่งวัสดุในการก่อสร้าง

6.3.2 นายช่างวินัย วิศวกรสนามของผู้รับเหมางานก่อสร้างโครงการขยายถนนสาย 117 ช่วง พิษณุโลก-นครสวรรค์ กม.71+250 ถึง 81+500 พบจากผลการทดสอบ field density ของ trial section ว่า หากบดอัดดินโดยใช้จำนวนเที่ยว และ water content = 11.6% และ 17.8% แล้ว dry unit weight จะเป็นดังแสดงในรูปด้านล่าง

หากท่านเป็นนายช่างวินัยน้อย กรุณาแนะนำว่าควรจะทำการบดอัดดินในสนาม ด้วยรถบดรุ่นเดียวกันนี้อย่างไร? จึงจะสามารถส่งงาน ตามที่ระบุให้บดอัดให้ถึง Relative Compaction = 95% (dry-max LAB = 107.5 lb/ft^3)



รูปที่ 6.20 กราฟที่ได้จากผลการทดสอบในข้อที่ 6.3.2

<u>วิธีทำ</u> จากสมการของ Relative Compaction $= \dfrac{\gamma_d\,(fueld\,)}{\gamma_d\,(nax\;-lab\,)} \times 100$

$$95\% = \frac{\gamma_d\,(fueld\,)}{107.516 lb\,/\,ft^{\,3}} \times 100$$

$$\gamma_{d(field)} = 102.125\ \text{lb/ft}^3$$

ดังนั้นจะต้องบดอัดดินในสนามให้ได้หน่วยน้ำหนักแห้งให้ได้เท่ากับ 102.125 lb/ft^3

∴ จากรูปจะได้ว่าถ้าใช้รถบดชนิดนี้ในปริมาตรความชื้น (water content) = 17.8% จะใช้จำนวนรอบที่ใช้ในการบดอัด = 4 รอบ แต่ในขณะที่ปริมาณความชื้น (water content) = 11.6% จะใช้ในจำนวนรอบที่ใช้ในการบดอัด = 14 รอบ อย่างไรก็ตามในระยะทางจาก กม. 71+250 ถึง 81+500 ซึ่งก็คือ 10.250 km นั้นควรจะใช้วิธีการเพิ่มปริมาณน้ำเป็น 17.8% ดีกว่างจะเพิ่มจำนวนรอบ เพราะถ้าวิ่งเพิ่มจำนวนรอบจะเพิ่มระยะทางถึง 102.5 km เลยทีเดียว

สรุปว่าใช้ปริมาณความชื้นที่ 17.8% จำนวนแรงรอบของการบดอัด 4 เที่ยว

6.3.3 มหาวิทยาลัยนเรศวร กำลังดำเนินการออกแบบก่อสร้าง ถนนสายหลักสำหรับวิทยาเขตพะเยา บริษัทวิศวกรที่ปรึกษาได้ใช้ผลการศึกษาจาก โครงงานวิศวกรรมโยธาของนิสิตมหาวิทยาลัยนเรศวร ดังแสดงในภาพที่ 6.21 และได้แนะนำให้มหาวิทยาลัยออกข้อกำหนดการก่อสร้าง เพื่อการบดอัดถนนใช้ได้ dry unit weight = 105 pcf ดังนี้

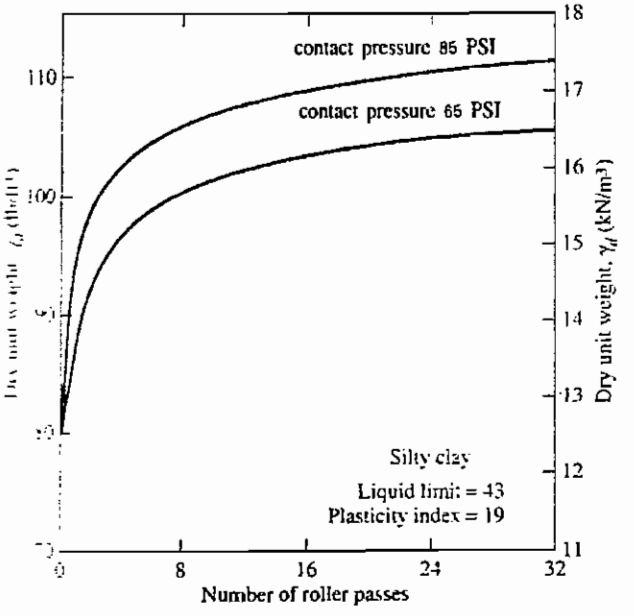
ก. ให้ใช้ swooth-wheel roller compactor ที่มี contact pressure > 60 PSI

ข. ให้วิ่งบดอัดเป็นจำนวน ไม่น้อยกว่า 10 รอบ

ในฐานะ วิศวกรโยธาของมหาวิทยาลัยนเรศวร ให้ท่านแนะนำโดยสรุปดังนี้

6.3.3.1 เห็นด้วยกับข้อกำหนดของวิศวกรที่ปรึกษา ในข้อ ก. หรือไม่อย่างไร

6.3.3.2 เห็นด้วยกับข้อกำหนดของวิศวกรที่ปรึกษา ในข้อ ข. หรือไม่อย่างไร



รูปที่ 6.21 กราฟที่ใช้ในข้อที่ 6.3.3

<u>ตอบ</u>

6.3.3.1 จะเห็นได้ว่าจากรูปใช้ contact pressure 65 PSI ถ้าต้องการจะให้การบดอัดถนนให้ได้ γ_d = 105 pcf แล้วจะใช้จำนวนเที่ยวถึง 32 เที่ยว ซึ่งมากที่สุดในรูป ดังนั้นจึงเหมาะสมแล้วที่จะทำให้กำหนดว่าควรใช้ contact pressure > 60 PSI แต่ถ้าจะให้ดีที่สุดควรจะกำหนดให้มากกว่า 65

PSI (contact pressure > 65 PSI) เพราะจะทำให้จำนวนรอบของการบดอัดลง จึงสรุปว่าเห็นด้วยกับข้อกำหนด ก.

6.3.3.2 การวิ่งบดอัดมากกว่า 10 รอบนั่นจากรูปถ้าใช้ contact pressure 60 PSI จะใช้จำนวนรอบ 32 รอบ ซึ่งถ้าระยะทางยาวมากๆ จะทำให้ไม่คุ้มเนื่องจากเปลืองค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง ดังนั้นจงไม่ควรกำหนดจำนวนรอบเพราะถ้าใช้ contact pressure 85 PSI จะใช้จำนวนรอบเพียงแค่ 7 รอบเท่านั้น ซึ่งจะประหยัดกว่า 32 รอบมาก จึงสรุปว่าไม่เห็นด้วยกับข้อ ข.

6.3.4 นางช่างก้องเกียรติ Project Engineer ซึ่งรับผิดชอบการตรวจรับงานก่อสร้างโครงการขยายถนนสาย 11 ช่วง พิษณุโลก-อุตรดิตถ์ กม.12+050 ถึง 12+800 ที่ระบุให้บดอัดให้ถึง Relative Compaction = 95% ได้รับรายงานข้อมูลการทดสอบจากนายช่างฉัตรชัย วิศวกรของบริษัทผู้รับเหมาก่อสร้าง ดังแสดงในตารางที่ 8.9

6.3.4.1 ในฐานะนายช่างก้องเกียรติ ท่านจะพิจารณารับงานก่อสร้าง หรือไม่? เพราะเหตุใด?

6.3.4.2 หากท่านเป็นเจ้าของบริษัทผู้รับเหมา ท่านจะพิจารณาความดีความชอบในช่วงปีใหม่นี้ ให้กับนายช่างสิริอย่างไร? เพราะเหตุใด?

ตารางที่ 6.10 ผลการทดสอบดินที่ใช้ในข้อที่ 6.3.3

Volume of Mold (cc)	Mass of Wet Soil and Mold (kg)	Mass of Mold (kg)	Moisture Content (%)
943	2.21	0.5	10.6
943	2.27	0.5	12.1
943	2.33	0.5	13.8
943	2.36	0.5	15.1
943	2.58	0.5	17.4
943	2.57	0.5	19.4

Field Density Test Results

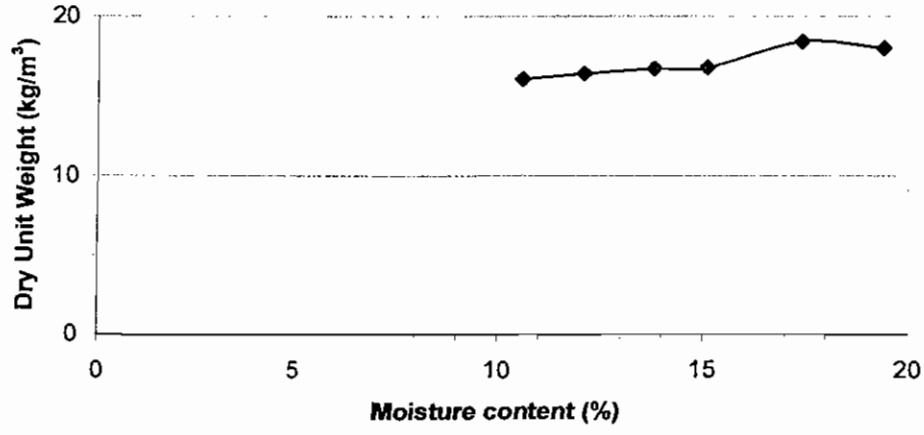
- Moist Unit Weight = 18.7 kN/m^3
- Moisture Content = 10.2%
- Dry Unit Weight = 16.7 kN/m^3

<u>วิธีทำ</u> จากตารางที่ 6.10 สามารถสรุปเป็นตารางที่ 6.11 ได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 6.11 ผลที่ได้จากการคำนวณจากตารางข้างต้น

Volume of mold, V (m^3)	Weight of soil, W (kg)	Moist unit weight, γ (kN/m^3)	Moisture content, ω (%)	Dry unit weight, γ_d (kg/m^3)
0.943	1.71	17.80	10.6	16.08
0.943	1.77	18.41	12.1	16.42
0.943	1.83	19.04	13.8	16.73
0.943	1.86	19.35	15.1	16.81
0.943	2.08	21.64	17.4	18.43
0.943	2.07	21.53	19.4	18.04

จากตารางที่ 6.11 ข้างต้นสามารถเขียน Compaction curve ได้ดังนี้



รูปที่ 6.22 แสดง Compaction Curve

จากกราฟจะได้ $\gamma_{d(max)} = 18.5\ kN/m^3$

และ $\gamma_{d(field)} = 16.7\ kN/m^3$

ดังนั้นจะได้ Relative Compaction (%R) $= \frac{\gamma_d\,(field)}{\gamma_d\,(lab)} \times 100$

$= \frac{16.7}{18.5} \times 100$

%R = 90.27%

จึงสามารถตอบคำถามได้ดังต่อไปนี้

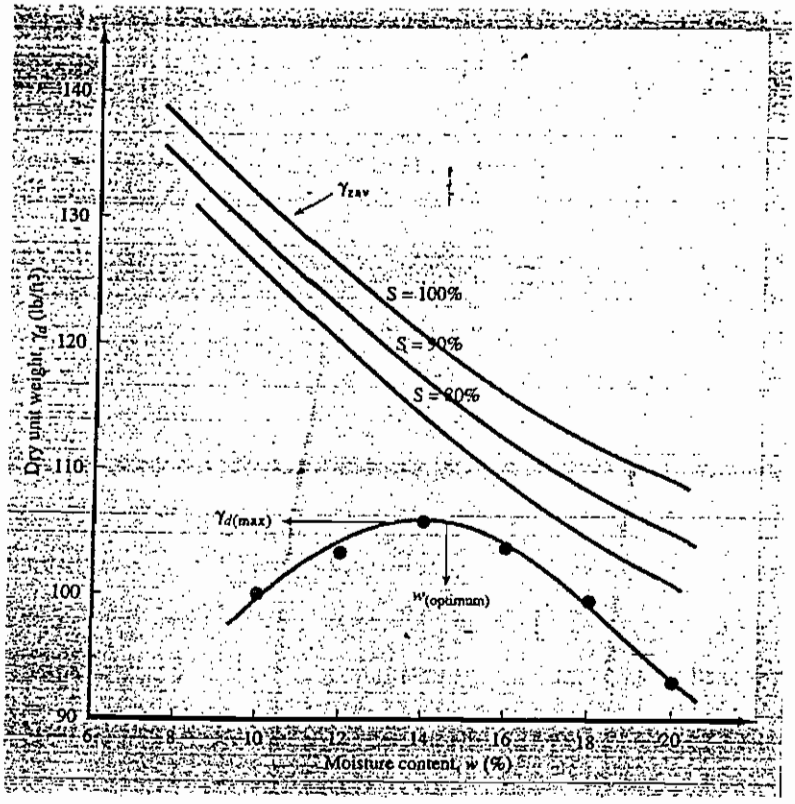
6.3.4.1 พิจารณาไม่รับงานก่อสร้างเพราะบดอัดดินไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดคือ 95% โดยบดอัดได้เพียงแค่ 90.27% เท่านั้น

6.3.4.2 พิจารณาไม่ให้ Bonus แก่นายช่างฉัตรชัยเพราะทำงานได้ไม่ผ่นการตรวจจริงทำให้บริษัทเสียค่าใช้จ่ายในการบดอัดใหม่อีกครั้ง

6.3.5 เพื่อเตรียมจัดทำ Specifications for Field Compaction สำหรับงานบดอัด sub-grade ของคันทาง (Embankment) ถนนสาย 117 บริษัทเกียรติศักดิ์วิศวกรที่ปรึกษาได้นำดินที่จะใช้ก่อสร้าง ไปทำการทดสอบ Standard Compaction Test และพบว่า $\gamma_{dry\text{-}max} \cong 105$ pcf ที่ $w_{opt} = 14.5\%$ ดังแสดงในรูปที่ 6.23 ในฐานะวิศวกรของบริษัทที่ปรึกษา กรุณาตอบคำถามต่อไปนี้

6.3.5.1 คำนวณหาค่า $\gamma_{d(field)}$ ที่ทำให้ end-product specification ได้ $R \geq 90\%$

6.3.5.2 ให้คำแนะนำประกอบ Specification ในข้อ 6.3.5.1 ว่าผู้รับเหมาควรใช้ water content เท่าใด ในการบดอัดดินให้ได้ตามข้อ 6.3.5.1



รูปที่ 6.23 รูปประกอบข้อ 6.3.5

<u>วิธีทำ</u> 6.3.5.1 จากโจทย์ต้องการให้ %R $\geq$ 90%

จากสมการ %R $\geq \frac{\gamma_d\,(field)}{\gamma_d\,(lab)} \times 100$

$0.9 \geq \frac{\gamma_d\,(field)}{105}$

$\gamma_{d(field)} \geq 94.5$ pcf

ดังนั้นจะต้องใช้ $\gamma_{d(field)}$ มากกว่าหรือเท่ากับ 94.5 pcf จึงจะทำให้ %R $\geq$ 90%

6.3.5.2 จากรูปจะต้องให้ water content (ω) อยู่ในช่วง 9.4 $\leq$ 18.4% จึงจะทำให้ได้ $\gamma_{d(field)}$ มากกว่าหรือเท่ากับ 94.5 pcf โดยจะทำให้ %R $\geq$ 90%

6.3.6 ในการก่อสร้างอาคารแห่งหนึ่งต้องมีการถมดินโดยมีดินให้เลือกจาก 2 แหล่ง ซึ่งแต่ละแห่งมีคุณสมบัติในสนามไม่เหมือนกันดังแสดงในตารางที่ 6.12

ตารางที่ 6.12 ผลการทดสอบตัวอย่างดินที่ใช้ในข้อที่ 6.3.6

คุณสมบัติ	แหล่ง A	แหล่ง B
อัตราส่วนช่องว่าง	0.79	0.65
ปริมาณความชื้น (%)	18	15

ถ้าการก่อสร้างต้องถมดินให้สูงขึ้นจากระดับเดิม 2 m บนพื้นที่ 20,000 m^2 ดินถมจะต้องบดอัดให้ได้ความหนาแน่นรวม 2 t/m^3 และปริมาณความชื้น 21%

การขนส่งดินจากแหล่งทั้งสองอาศัยรถบรรทุกซึ่งบรรทุกได้ครั้งละ 10 m^3 และพบว่าเมื่อขุดดินจากแหล่งและบรรทุกขนส่ง ดินจะมีการสูญหายประมาณ 10% โดยมีค่าใช้จ่ายในการขุด ขนส่ง และบดอัดดินจากทั้งสองแหล่งเป็น

แหล่ง A : 200 บาท / คัน / เที่ยว

แหล่ง B : 250 บาท / คัน / เที่ยว

ค่าใช้จ่ายในการบรรทุกน้ำเป็น 100 บาท / คัน / เที่ยว จงหาว่าจะใช้ดินจากแหล่งใดจะประหยัดกว่า

<u>วิธีทำ</u> ดินถมเมื่อสิ้นสุดการก่อสร้าง จะได้

น้ำหนัก $= \gamma_t \times V = 2 \times 20{,}000 = 80{,}000$ tons

น้ำหนักดินแห้ง $= \dfrac{2}{1+0.21} \times 2 \times 20{,}000 = 66{,}115$ tons

$\therefore$ ปริมาตรน้ำ $= 80{,}000 - 66{,}115 = 13{,}885$ tons

1. แหล่ง A จากสมการจะได้

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

$$\therefore \quad V = \frac{W_s}{G_s \gamma_w}(1+e)$$

$$= \frac{66{,}115}{2.65x1} \times (1+0.79)$$

$$= 44{,}658.8 \ m^3$$

$\therefore$ จำนวนครั้งในการขนดิน $= \frac{44,658}{10} \times 1.1 = 4,913$ ครั้ง

โดยปริมาณความชื้นในดินเป็น $0.18 \times 66,115 = 11,900.7$ tons

$\therefore$ ต้องการปริมาณน้ำอีก $13,885 - 11,900.7 = 1,984.3$ tons

$\therefore$ จำนวนครั้งในการบรรทุกน้ำ $1,984.3 / 10 = 199$ ครั้ง

$\therefore$ ดังนั้น ค่าใช้จ่ายจากแหล่ง A เป็น $4,913 \times 200 + 199 \times 100 = 1,002,500$ บาท

2. แหล่ง B จากสมการจะได้

$V = \frac{66,115}{2.65x1} \times (1 + 0.+65) = 41,165.9\ m^3$

$\therefore$ จำนวนครั้งในการขนดิน $= \frac{41,115}{10} \times 1.1 = 4,529$ ครั้ง

โดยปริมาณความชื้นในดินเป็น $0.15 \times 66,115 = 9,917.25$ t

$\therefore$ ต้องการปริมาณน้ำอีก $13,885 - 9,917.25 = 3,967.75$ t

$\therefore$ จำนวนครั้งในการบรรทุกน้ำ $3,967.75/ 10 = 397$ ครั้ง

$\therefore$ ดังนั้น ค่าใช้จ่ายจากแหล่ง B เป็น $4,529 \times 250 + 397 \times 100 = 1,171,950$ บาท

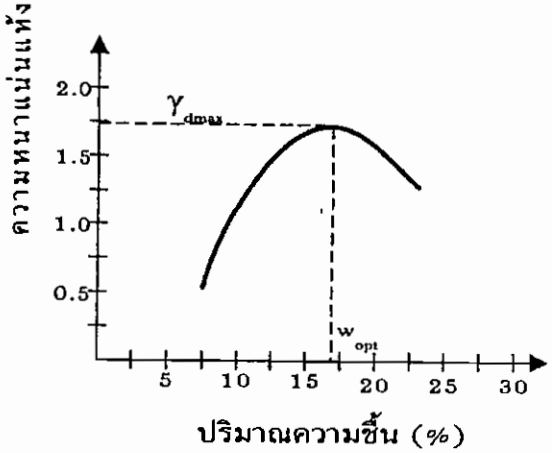
$\therefore$ จึงสามารถสรุปได้ว่าต้องใช้ดินจากแหล่ง A จึงจะประหยัดกว่าแหล่ง B

6.3.7 ในการบดอัดดินในภาคสนามต้องการการการบดอัดสัมพัทธ์ (Relative Compaction) 97% จากการหาความหนาแน่นของดินในสนามได้ผลดังนี้

น้ำหนักของดินจากหลุมทดสอบ : 1,815 g

ปริมาตรของหลุมทดสอบ : 945 cm^3

ปริมาตรความชื้นของดิน : 15 %



รูปที่ 6.24 แสดงผลการทดสอบดินตัวอย่างที่ใช้ในข้อที่ 6.3.7

ดังนั้นจากผลการทดสอบ ความหนาแน่นของดินในสนามสามารถจะสามารถยอมรับได้หรือไม่

วิธีทำ

ในสนาม : γ_t = 1,815 / 945 = 1.92 t/m^3

γ_d = 1.92 / (1+0.15) = 1.67 t/m^3

ในห้องปฏิบัติการ : γ_{dmax} = 1.715 t/m^3

W_{opt} = 16%

$\therefore$ การบดอัดสัมพัทธ์ = $R = \frac{1.67}{1.715} \times 100$ 97.4% > 97%

สามารถสรุปได้ว่าความหนาแน่นของดินในสนามยอมรับได้

6.3.8 ดินจากแหล่งยืมมีความหนาแน่นแห้ง 17 kN/ m^3 และปริมาณความชื้น 10% ต้องการนำดินนี้มาก่อสร้างดินคันทาง โดยการบดอัดให้ได้ความหนาแน่นแห้ง 18 kN/ m^3 ที่ปริมาณความชื้น 15% ถ้าต้องการดินคันทางที่มีปริมาตร 100 m^3 จะต้องใช้ดินจากแหล่งยืมเป็นปริมาตรเท่าใด และต้องใช้น้ำเติมลงไปเป็นปริมาตรเท่าไร ถ้า

ปริมาตรของดินคันทาง = 100 m^3

ความหนาแน่นของดินคันทาง = 18 kN/ m^3

<u>วิธีทำ</u> ∴ น้ำหนักแห้งของดินคันทาง = 1,800 kN = น้ำหนักแห้งของดินจากแหล่งยืม จาก

$$\gamma_t = \gamma_d (1+w)$$

∴ น้ำหนักของดินจากแหล่งยืม = 1,8000 x (1+0.10) = 1,980 kN

โดยที่ $\gamma_t = \gamma_d (1+w) = 17 \times (1+0.10) = 18.7$ kN/ m^3

∴ ปริมาตรดินที่ขุดจากแหล่งยืม = 1,980 / 18.7 = 105.9 m^3

จากสมการ $\omega = W_w / W_s$

ดินจากแหล่งยืม : W_w = 0.10 x 1,800 = 180 kN

ดินคันทาง : W_w = 0.15 x 1,800 = 270 kN

∴ ต้องการน้ำอีกเป็นปริมาณ 270 – 180 = 90 kN = 90 / 9.81 = 9.17 m^3 ถึงจะพอใช้ในการบดอัด