บทที่ 4
ผลการศึกษา

ผลการศึกษาตามหลักการและแนวทางการจัดทำโครงการ ดังที่อธิบายในบทที่ 2 และ 3 ได้ถูกนำเสนอโดยเรียงลำดับตามหัวข้อเรื่องดังนี้ :

1 หลักการในการบดอัดดิน (Principle of Compaction)
2 การทดสอบการบดอัดดิน (Compaction Test)
3 ข้อกำหนดของงานบดอัดดิน (Compaction Specification)
4 การนำความรู้ไปประยุกต์ใช้งาน (Practical Uses)

ทั้งนี้ รายละเอียดของผลการศึกษา ในแต่ละหัวข้อเรื่อง ประกอบไปด้วย

1. โจทย์ปัญหาที่จำลองมาจากสถานการณ์ที่มักจะเกิดขึ้นจริงในการทำงานในสนาม
2. แบบเฉลยโจทย์ปัญหา เพื่อเป็นแนวทางหรือทางเลือกในการประยุกต์พื้นฐานมาแก้ปัญหา

ผลที่ได้จากการศึกษา แสดงได้โดยละเอียดตามลำดับขั้น ดังนี้

4.1 หลักการในการบดอัดดิน (Principle of Compaction)

4.1.1 ในช่วงปิดเทอมภาคฤดูร้อน (summer) ประจำปีการศึกษา 2543 ประทิม อินทรีย์ นิสิตภาควิศวกรรมโยธา ชั้นปีที่ 3 มหาวิทยาลัยนเรศวร ได้ไปฝึกงานที่ลำปาง ร่วมกับบริษัทโยธินบูรณะการก่อสร้าง ซึ่งได้รับงานโครงการปรับปรุงถนนลาดยางเข้าหมู่บ้านพระเจ้าทันใจ ยาว 50 กิโลเมตร

คุณวีระศักดิ์ โอทาริก วิศวกรพี่เลี้ยงของประทิม ได้มอบหมายให้ประทิมลองศึกษางานด้านการบดอัดดิน โดยออกไปศึกษาจากการทำงานที่ Site งาน และให้ประทิมเขียนรายงานผลการศึกษางานส่งภายในเวลาหนึ่งสัปดาห์ ตามประเด็นที่พี่วีระศักดิ์ต้องการ ดังนี้ :

ก. การบดอัดดิน (soil compaction) คืออะไร และทำไปเพื่อวัตถุประสงค์ใด ?

ข. หลักการในการบดอัดดิน (principle of compaction) เป็นอย่างไร ? (กรุณาอธิบายอย่างสั้นๆมาพอเข้าใจ)

ค. การบดอัดดินเหมือนหรือแตกต่างกับ consolidation หรือไม่ อย่างไร ?

ง. ปัจจัยที่ส่งผลต่อการบดอัดดิน (factor affecting of compaction) มีอะไรบ้าง ? กรุณาอธิบายอย่างสั้นๆ และตรงประเด็น

จ. Zero air void line คืออะไร ? และมีความสำคัญอย่างไรต่อการบดอัดดิน ?

ฉ. การทำ compaction curve มีประโยชน์ต่อการทำงานในสนามหรือไม่ อย่างไร ?

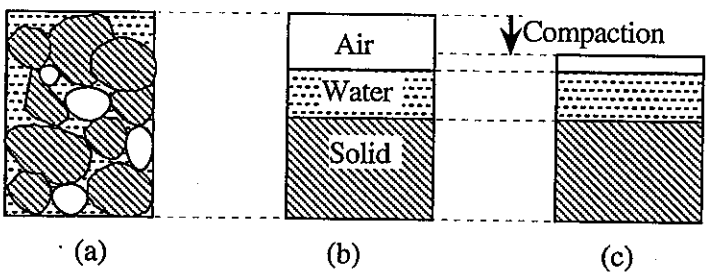
เฉลยโจทย์ปัญหา

ก. การบดอัดดิน (soil compaction) คือ การใช้น้ำหนักกระทำทันทีทันใดอย่างแรงหรือการใช้ dynamic forces ทำให้ดินที่อยู่ในสภาวะที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (unsaturated soil) มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น (increasing unit weight) โดยการลดปริมาตรของอากาศที่แทรกอยู่ในช่องว่าง (void) ระหว่าง solid phase ในมวลดิน

การบดอัดดินทำเพื่อวัตถุประสงค์ดังนี้ :

1. เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงเฉือน (shear strength) ของดิน ซึ่งก็จะส่งผลให้ bearing capacity และ lateral stability มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย
2. เพื่อลดค่าความสามารถในการยุบตัว (compressibility) ซึ่งเป็นสาเหตุของการทรุดตัว (settlement) และการเคลื่อนตัวด้านข้าง (lateral movement)
3. เพื่อลดค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ (permeability) ซึ่งจะช่วยสามารถกักเก็บน้ำในอ่างเก็บน้ำได้ดีขึ้น
4. เพื่อควบคุมการเปลี่ยนแปลงทางปริมาตร (shrinkage and swelling) ให้อยู่ในปริมาณที่ยอมรับได้ (ได้ออกแบบไว้) เพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นแก่โครงสร้าง
5. เพื่อลดการเกิด liquefaction potential จาก dynamic loads
6. เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมอื่นๆ (other engineering properties)

การบดอัดดิน สามารถอธิบายได้จากรูปที่ 4.1 ดังนี้ :



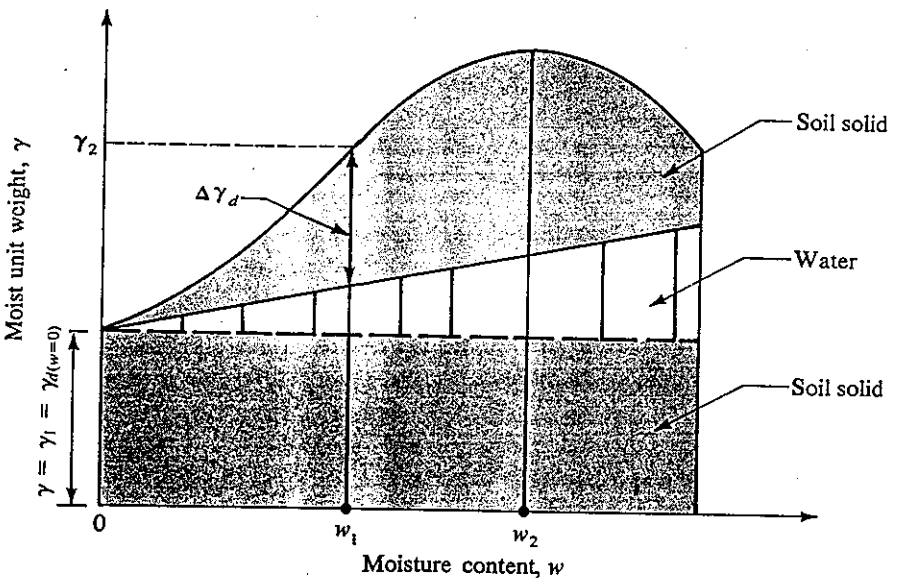
รูปที่ 4.1 Phase diagram of compaction

โดยที่ รูปที่ 4.1.a แสดงถึงในมวลดินจะประกอบไปด้วย 3 สถานะ ได้แก่ ของแข็ง (เม็ดดิน) , ของเหลว (น้ำ) และแก๊ส (อากาศ) กระจายอยู่โดยทั่ว

รูปที่ 4.1.b แสดงถึงอัตราส่วนของส่วนประกอบทั้ง 3 ก่อนทำการบดอัด

รูปที่ 4.1.c แสดงถึงสภาวะของมวลดินภายหลังทำการบดอัด ปริมาตรของอากาศจะลดลง ในขณะที่ปริมาตรและน้ำหนักของเม็ดดินและน้ำยังคงเท่าเดิม แต่มวลดินมีปริมาตรลดลง

ข. รูปที่ 4.2 แสดง compaction curve ซึ่งสามารถใช้อธิบายถึงหลักการบดอัดได้ดังนี้ คือ เมื่อมีการเพิ่มปริมาณน้ำเข้าไปในดินขณะทำการบดอัดในช่วงแรก (w_0- w_2) น้ำที่เพิ่มเข้าไปจะทำหน้าที่ช่วยหล่อลื่นเม็ดดินให้เคลื่อนเข้าสู่ตำแหน่งที่ชิดกันมากขึ้น ในช่วงนี้เมื่อ moisture content เพิ่มขึ้น หน่วยน้ำหนักแห้ง (dry unit weight) ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จนกระทั่งถึงตำแหน่ง moisture content เท่ากับ w_2 หลังจากนั้นการเพิ่มปริมาณน้ำเข้าไปอีกจะไม่ได้ช่วยหล่อลื่นเม็ดดิน แต่น้ำที่เพิ่มเข้าไปจะเริ่มเข้าไปแทรกใน air void แทนเม็ดดิน ซึ่งจะทำให้ dry unit weight มีค่าลดลง



รูปที่ 4.2 Principle of compaction

อนึ่งตำแหน่งของ moisture content บน compaction curve ที่ทำให้ ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งของดินมีค่าสูงสุด (**Maximum Dry Unit Weight**) เรียกว่า " **Optimum Moisture Content** " (OMC)

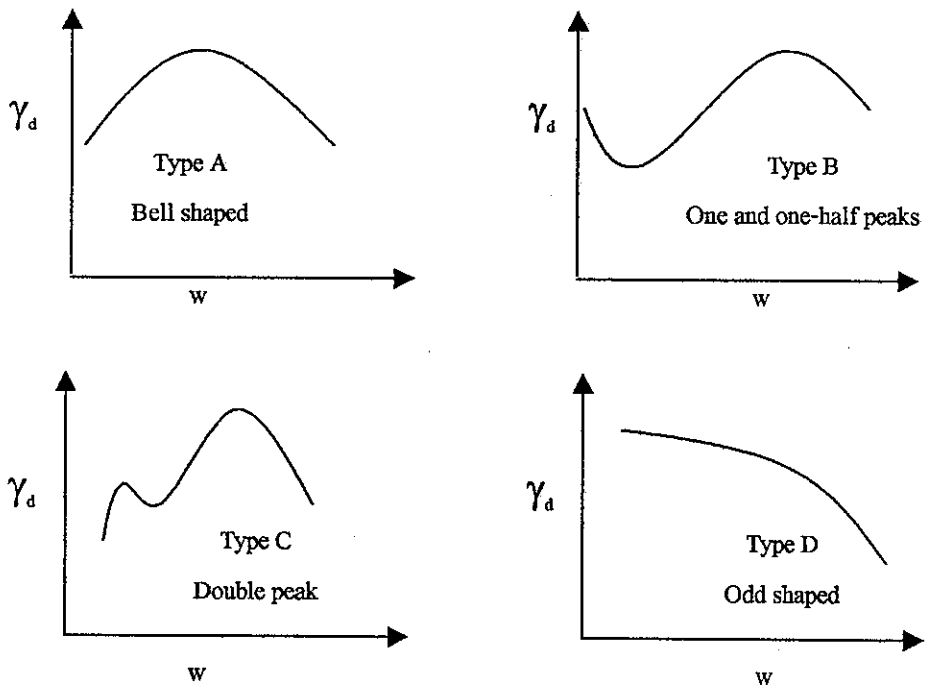
ค. Compaction และ consolidation แตกต่างกันเพราะ consolidation หมายถึง กระบวนการที่ปริมาตรของมวลดินถูกทำให้ลดลง เนื่องจากการไหลซึมออกของน้ำออกจากมวลดินอย่างช้าๆ ซึ่งกระทำได้โดยการใส่น้ำหนักแบบ static forces กระทำเป็นเวลานานต่อดินที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวยิ่งยวด (saturated soil) ต่างจาก compaction ตรงที่รูปแบบของน้ำหนักที่กระทำและระยะเวลาในการลดลงของปริมาตร

ง. ปัจจัยที่ส่งผลต่อการบดอัดดิน (factor affecting of compaction) ที่สำคัญมีอยู่ด้วยกัน 3 ประการ คือ

1. ปริมาณความชื้นในดิน (moisture content) ดังที่ได้อธิบายไปแล้วในข้อ ข.

2. ชนิดดิน (effect of soil type) ได้แก่ การกระจายขนาดของเม็ดดิน (grain - size distribution), รูปร่างของเม็ดดิน (shape of soil grain), ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (specific gravity of soil solid) รวมถึง ชนิดและปริมาณของแร่ดินเหนียว (clay mineral) ที่มีอยู่ในดิน

ดินแต่ละชนิดเมื่อนำไปบดอัดก็จะให้ compaction curve ที่แตกต่างกันออกไป จากการศึกษาของ Lee and Suelkamp (1972). พบว่าสามารถจำแนกรูปร่างของ compaction curve ออกได้เป็น 4 รูปแบบด้วยกัน ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 รูปแบบของ compaction curve

3. พลังงานในการบดอัด (compaction effort) คือ พลังงานที่ใช้ในการบดอัดต่อหน่วยปริมาตร ในการทดสอบการบดอัดสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$E = W_r H N_b N_l / V$$

เมื่อ W_r = Weight of rammer

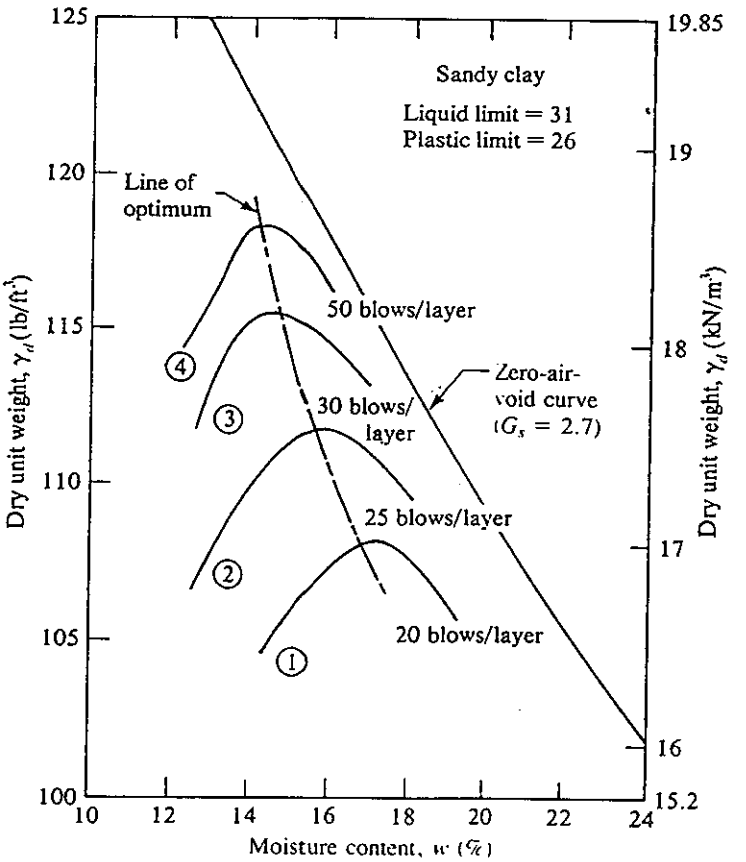
H = Hight of drop of rammer

N_b = Number of blow per layer

N_l = Number of layer

V = Volume of mold

ถ้าหากว่า compaction effort เปลี่ยนไป moisture–unit weight curve ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 Effect of compaction effort on sandy clay

จากรูปที่ 4.4 สามารถสรุปความสัมพันธ์ได้ดังนี้

- เมื่อ compaction effort มีค่าเพิ่มขึ้น maximum dry unit weight มีค่าเพิ่มขึ้น
- เมื่อ compaction effort มีค่าเพิ่มขึ้น optimum moisture content มีค่าลดลง line of optimum มีแนวโน้มเอียงไปทางซ้ายของ compaction curve

จ. Zero air void line คือ เส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง moisture content และ unit weight ที่แสดงค่าหน่วยน้ำหนักสูงสุดที่สามารถบดอัดได้ตามทฤษฎี ที่ค่า moisture content ใดๆ โดยที่ช่องว่างในมวลดินถูกเติมเต็มด้วยน้ำอย่างสมบูรณ์ นั่นคือ degree of saturation , S =1

ทั้งนี้ zero air void line สามารถ plot ค่าได้ตามสมการดังนี้ :

$$\gamma_{zav} = \gamma_w / (w + 1 / G_s)$$

เมื่อ γ_{zav} = zero air void unit weight

γ_w = unit weight of water

w = moisture content

G_s = specific gravity of soil solid

zero air void line สามารถนำไปใช้สำหรับตรวจสอบค่าที่ได้จากการทดสอบการบดอัดดิน เนื่องจากในการบดอัดดินจริงๆนั้น จะไม่สามารถบดอัดจนกระทั่งถึงค่าการบดอัดสูงสุดตามทฤษฎีได้ (S = 1) ดังนั้นค่าที่ได้จากการทดสอบการบดอัดจะต้องไม่เกินค่าที่อยู่บน zero air void line หากค่าที่ได้จากการทดสอบอยู่เหนือ zero air void line แสดงว่าค่าที่ได้มีความผิดพลาดเกิดขึ้น เป็นค่าที่ไม่ถูกต้อง

ฉ. การทำ compaction curve มีประโยชน์ต่อการทำงานบดอัดดินอย่างมาก เพราะในการบดอัดดินจะต้องทำการบดอัดให้ได้ความหนาแน่นเท่าที่สามารถทำได้ เพื่อให้ได้งานแข็งแรงปลอดภัย

ทั้งนี้ compaction curve จะนำไปใช้หาค่า maximum dry unit weight ($\gamma_{d\text{-}max}$) และค่า optimum moisture content (w_{opt}) ซึ่งจะทำให้รู้ว่าควรจะทำการบดอัดดินชนิดนี้ในสนามที่ปริมาณความชื้นเท่าใด จึงจะให้ค่า dry unit weight ได้ตามที่กำหนดไว้ และตรงตามข้อกำหนดการบดอัด (specification) ที่มี

4.1.2. ประทิมนิสิตฝึกงานได้รับมอบหมาย ให้เขียนรายงานเพิ่มเติมตามประเด็น ดังนี้ (กรุณาอธิบายอย่างสั้นๆ มาพอเข้าใจ)

ก. เพราะเหตุใดจึงต้องแบ่งดินที่ทำการบดอัด เป็นชั้นๆ (lifts) ? จะเป็นการประหยัดกว่าหรือเหมาะสมกว่าหรือไม่ ? ถ้าหากจะทำการบดอัดให้เสร็จโดยบดอัดเพียงชั้นเดียวเลย

ข. ทางโครงการก่อสร้าง พบว่าสามารถหาแหล่งดินก่อสร้างได้จากบ่อยืมดิน 2 แห่ง ซึ่งมีคุณสมบัติของดิน ดังนี้

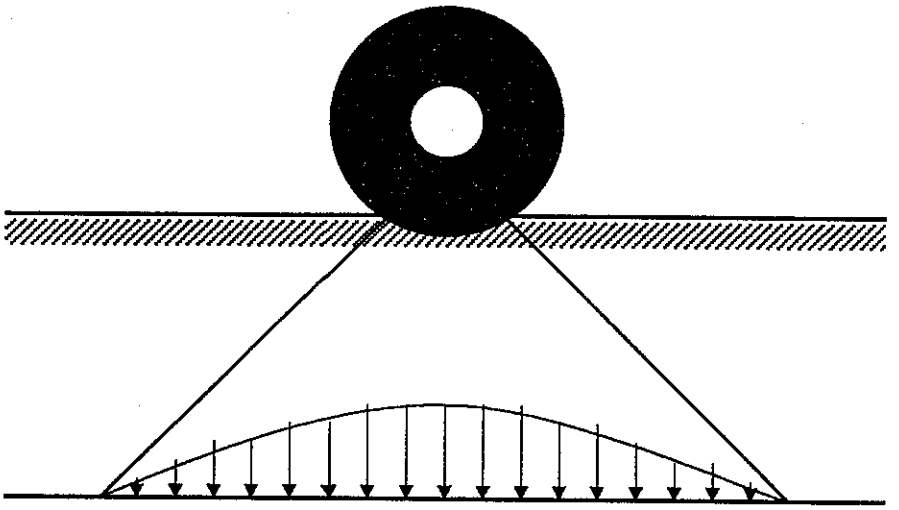
บ่อยืมดินที่ 1 $\gamma_T = 105\ lb/ft^3$ $w_n = 15\%$ LL = 24 PL = 40

บ่อยืมดินที่ 2 $\gamma_T = 100\ lb/ft^3$ $w_n = 8\%$ LL = 30 PL = 37

หากการประมาณราคา (cost estimation) พบว่า ค่าใช้จ่ายในการขุด , ซื้อ และขนดิน มายัง site งานก่อสร้างมีต้นทุนเท่ากัน กรุณาให้คำแนะนำว่าควรจะเลือกใช้ดินจากบ่อยืมดินบ่อใด ? เพราะเหตุใด ?

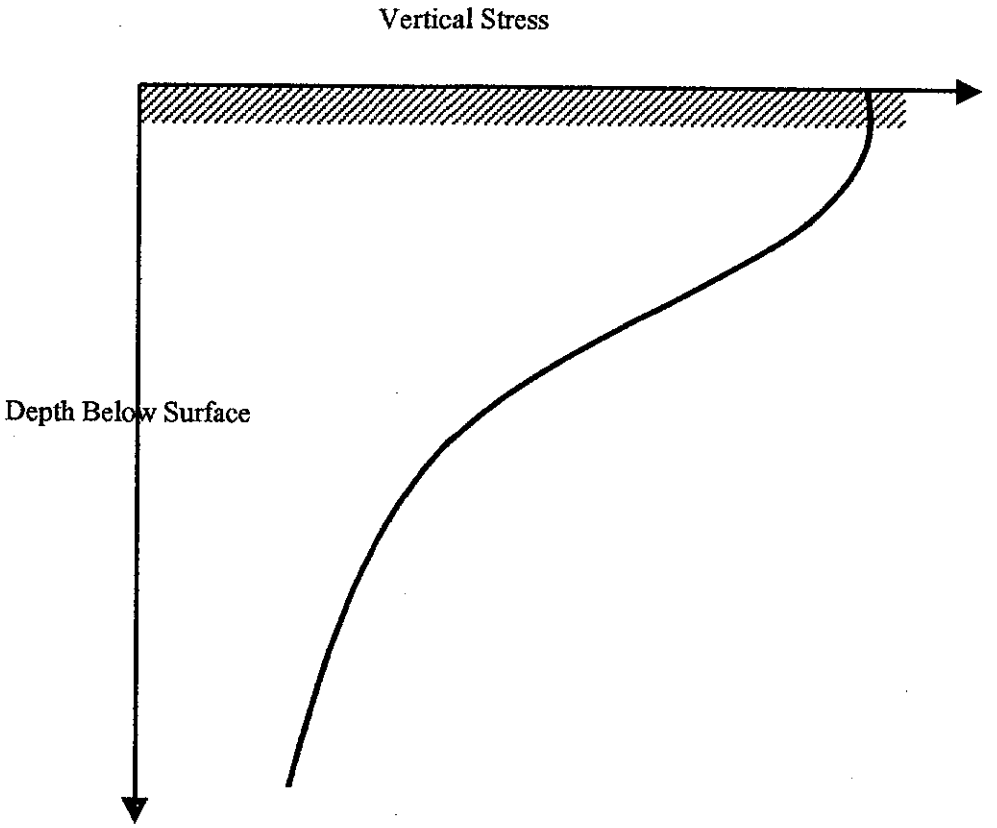
เฉลยโจทย์ปัญหา

ก. ในการทำงานบดอัดดิน (soil compaction) จะต้องกำหนดให้แบ่งการบดอัดดินเป็นชั้นๆ (lifts) เพราะดินจะถูกบดอัดด้วยแรงกระทำจากด้านบน ส่งผลให้การกระจายของแรงกระทำมีค่าลดลงตามความลึกดังรูปที่ 4.5 นั่นคือ แรงที่กดลงไปสู่เนื้อดินจะมีการกระจายตัวออกไปเป็นวงกว้างเสมือนกับว่า ทำให้พื้นที่รับแรงมีขนาดใหญ่เมื่อความลึกมากขึ้น (ในขณะที่แรงกระทำที่ผิวดินมีค่าคงที่) ส่งผลให้ค่าแรงอัดต่อหน่วยพื้นที่ (stress) มีค่าลดลงตามความลึก ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 การกระจายของแรงลงสู่พื้นดิน

ดังนั้น compaction effort มีค่าลดลงเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น และส่งผลให้การบดอัดดินโดยใช้การบดอัดเพียงชั้นเดียว มีแรงบดอัดไม่เพียงพอที่จะทำให้ได้ความหนาแน่นตามข้อกำหนด โดยเฉพาะที่ระดับความลึกล่างๆ ดังนั้น จึงต้องแบ่งทำการบดอัดเป็นชั้น (lifts) ที่ไม่หนามาก เพื่อให้การบดอัดดินทำได้อย่างทั่วถึง



รูปที่ 4.6 การกระจายความเค้นในชั้นดินที่บดอัด

ข. การคำนวณขั้นต้น

สำหรับบ่อยืมดินที่ 1

$$\gamma_T = 105\ lb/ft^3,\ w_n = 15\%,\ LL = 24\%,\ PL = 40\%$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_T}{1 + w_n/100}$$

$$= \frac{105\ lb/ft^3}{1 + 15/100} = 91.3\ lb/ft^3$$

$$PI = LL - PL$$

$$= 40 - 24$$

$$= 16$$

สำหรับบ่อยืมดินที่ 2

$$\gamma_T = 100\ lb/ft^3,\ w_n = 8\%,\ LL = 30\%,\ PL = 37\%$$

$$\gamma_d = \frac{100\ lb/ft^3}{1 + 8/100}$$

$$= 92.6\ lb/ft^3$$

$$PI = 37 - 30$$

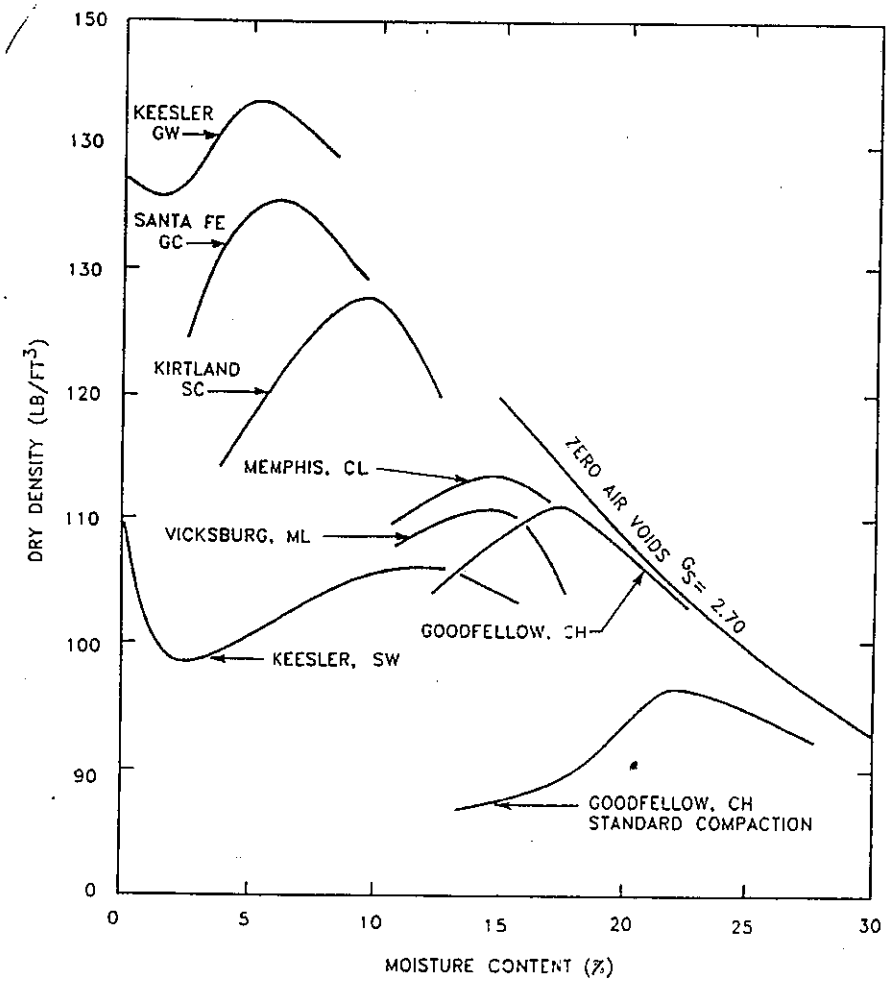
$$= 7$$

จากการพิจารณาคุณสมบัติของดินจากบ่อยืมดินทั้ง 2 แห่ง เราควรจะเลือกใช้ดินจากบ่อยืมดินที่ 2 เพราะ

1. ค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง (γ_d) ของดินจากบ่อยืมดินที่ 2 มีค่ามากกว่าค่าหน่วยน้ำหนักแห้งของดินจากบ่อยืมดินที่ 1 ซึ่งจะทำให้มีเนื้อดิน (solid phase) มากกว่า และจะส่งผลให้ต้นทุนถูกกว่า ในการนำไปใช้บดอัดในสนาม

2. ค่า PI จากบ่อยืมดินที่ 2 มีค่าน้อยกว่าค่า PI จากบ่อยืมดินที่ 1 บ่งชี้ว่ามีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการบดอัดดินดีกว่า เพราะค่า PI จะส่งผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์การบดอัดของดิน (relative compaction) นั่นคือที่ compaction effort เท่ากัน ดินที่มีค่า PI สูง (high plastic soil) จะบดอัดได้ค่า relative compaction ที่ต่ำกว่าดินที่มีค่า PI ต่ำๆ (low plastic soil)

4.1.3. หากการบดอัดดิน 8 ชนิดให้ผลทดสอบดังแสดงโดย compaction curve ดังรูปที่ 4.7 กรุณาให้ข้อคิดเห็นว่าสำหรับการบดอัดดินในสนาม ดินชนิดใดที่จะต้องถูกควบคุมปริมาณความชื้นในดิน (water content) อย่างเข้มงวดกว่าดินชนิดอื่นๆ ? เพราะเหตุใด ?



รูปที่ 4.7 Sample compaction curve for different soils

เฉลยโจทย์ปัญหา

compaction curve ในรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าจำเป็นที่จะต้องควบคุมปริมาณความชื้นในดิน (moisture content) GW, GC และ SC อย่างเข้มงวดกว่าดิน 5 ชนิดที่เหลือ เพราะ compaction curve ของ GW, GC และ SC มีความชันมากกว่าของดินอีก 5 ชนิด ซึ่งแสดงว่าขณะทำการบดอัดดิน 3 ชนิดนี้ การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น (moisture content) เท่ากับการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของดินอีก 5ชนิด จะส่งผลให้หน่วยน้ำหนักของดินเปลี่ยนแปลงได้มากกว่า

4.1.4. นายช่างโกดิน วิศวกรโยธาของบริษัท สยามซิตี้คอร์โปเรชั่น จำกัด ได้รับมอบหมายให้ประมาณค่าใช้จ่ายในโครงการก่อสร้าง เพื่อปรับปรุงและขยายทางหลวงแผ่นดิน หมายเลข 203 (ช่วงแยก อ. หล่มเก่า จ.เพชรบูรณ์ ถึง อ. เมือง จ. เลย) ที่มีข้อกำหนดประกอบแบบก่อสร้าง (specification) ดังนี้

- การถมและการบดอัดดิน ต้องกระทำด้วยเครื่องจักรกล
- ต้องตรวจสอบความชื้นของดินที่บ่อยืมดิน (borrow pits) ก่อนที่จะนำมาใช้งาน และถ้าความชื้นเกินเกณฑ์ที่กำหนด (มากกว่าความชื้นที่จุด optimum 2 %) ห้ามนำดินนั้นมาใช้งาน
- ดินถมแต่ละชั้นต้องเกลี่ยให้กระจายสม่ำเสมอ ถ้าดินเป็นก้อนต้องทำให้แตกกระจายและแผ่ออกโดยตลอด
- ดินแต่ละชั้นต้องมีความชื้นเท่ากันโดยตลอด และต้องไม่น้อยกว่าหรือมากกว่า 2 % จากความชื้นที่จุด optimum moisture content
- ต้องทำการบดอัดดินให้ได้ความหนาแน่นแห้ง (dry unit weight) ไม่น้อยกว่าที่ 95 % ของ maximum dry unit weight ที่ได้จากการทดสอบ standard compaction test

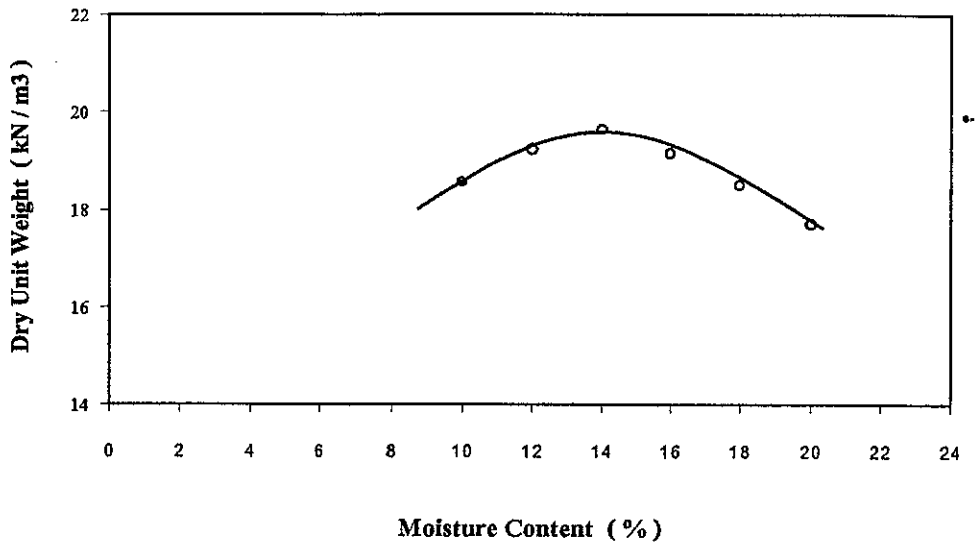
ก. หากทางบริษัทต้องเลือกใช้ดินจากบ่อยืมดิน (borrow pits) จาก site งานข้างเคียง 2 แห่ง และได้ส่งไปทดสอบ standard compaction test ที่บริษัท Phitsanuloke Soil Testing Limited พบว่า

Site 1 $G_s = 2.69$ $\gamma_T = 17.5\ kN/m^3$ $w_n = 13\ \%$

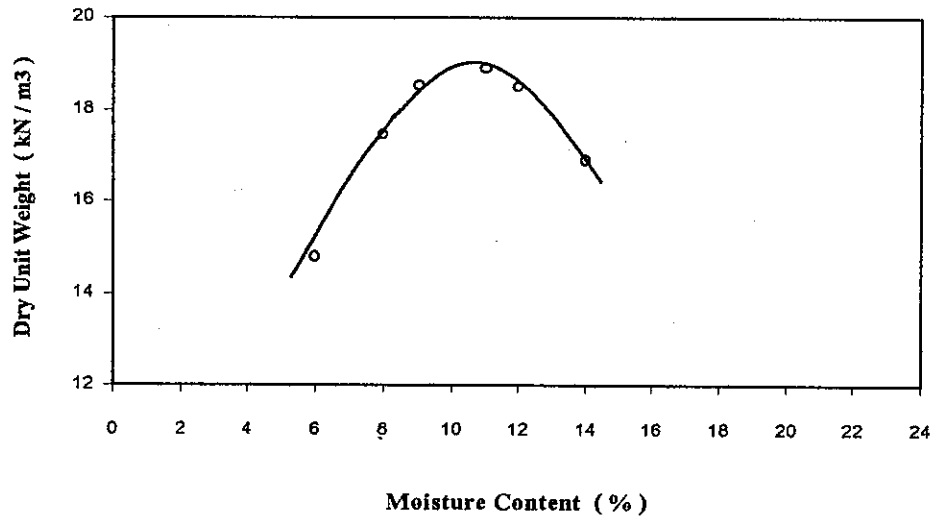
Site 2 $G_s = 2.72$ $\gamma_T = 16.0\ kN/m^3$ $w_n = 7\ \%$

ในฐานะนายช่างโกดินกรุณาให้คำแนะนำกับทางบริษัทว่าควรจะเลือกใช้ดินจาก site ใดจึงจะเหมาะสมกับการบดอัดดินให้ได้ตามข้อกำหนดประกอบแบบก่อสร้าง (specification)

ข. จากแหล่งดินที่ท่านได้แนะนำให้ทางบริษัทเลือกใช้ กรุณาคำนวณหาปริมาตรของดินที่จะต้องใช้ในการบดอัด แล้วคำนวณค่าใช้จ่ายให้กับทางบริษัท โดยจัดทำเป็นรายการคำนวณแนบส่งให้ทางบริษัท เมื่อปริมาณเนื้องานทั้งหมดหลังการบดอัดเรียบร้อยตาม เท่ากับ specification คิดเป็นปริมาตรเนื้อดิน 10,000 m^3



รูปที่ 4.8 Compaction curve of soil sample from site 1



รูปที่ 4.9 Compaction curve of soil sample from site 2

ป
TA
710
.A2
@177@
2543

สำนักหอสมุด

- 3 ก.ค. 2544
4440195

เฉลยโจทย์ปัญหา

1. จาก compaction curve รูปที่ 4.8 และ รูปที่ 4.9

site ที่ 1 optimum moisture content (OMC) = 14 %

maximum dry unit weight ($\gamma_{d\text{-}max}$) = 19.63 kN/ m^3

site ที่ 2 optimum moisture content (OMC) = 10.5 %

maximum dry unit weight ($\gamma_{d\text{-}max}$) = 19.20 kN/ m^3

พิจารณาที่ข้อกำหนดการบดอัดดินข้อที่ 2 พบว่า

* ค่า natural moisture content ของ site ที่ 1 มีค่าน้อยกว่า OMC อยู่ = 14 - 13 = 1 %
* ค่า natural moisture content ของ site ที่ 2 มีค่าน้อยกว่า OMC อยู่ = 10.5 - 7 = 3.5 %

ดังนั้น ดินจาก site ทั้ง 2 มีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนด นายช่างโกดินก็ควรจะตัดสินใจเลือกใช้ดินจาก site ที่ 1 เพื่อใช้ในงานบดอัดดิน เนื่องจากค่า $\gamma_{d\text{-}max}$ ของ site 1 มีค่ามากกว่า $\gamma_{d\text{-}max}$ ของ site ที่ 2 ซึ่งจะให้กำลัง (strength) ที่ดีกว่า และประหยัดกว่าเนื่องจากมีเนื้อดินมากกว่า

ข. เมื่อนายช่างโกดินตัดสินใจเลือกแหล่งดินได้แล้ว สามารถคำนวณปริมาตรดินได้ดังนี้ :

ปริมาณงานดินที่ต้องการ (V) = 10,000 m^3

ต้องทำการบดอัดดินที่ relative compaction (RC) = 95 %

ดังนั้นจะต้องบดอัดให้ได้ dry unit weight = 0.95 X 19.63 kN/ m^3

= 18.65 kN/ m^3

dry unit weight ของดินใน site = $\dfrac{1.75 \text{ kN/ } m^3}{1 + 13 / 100}$

= 15.49 kN/ m^3

shrinkage factor = $\dfrac{18.65 \text{ kN/ } m^3}{15.49 \text{ kN/ } m^3}$ = 1.204

ดังนั้นจะต้องเพิ่มปริมาณดินในการสั่งซื้ออีกประมาณ 20.4 %

ต้องสั่งซื้อดินทั้งหมด = 1.204 X 10,000 m^3

= 12,040 m^3

4.2 การทดสอบการบดอัด (Compaction Test)

4.2.1. ในที่ประชุมโครงการก่อสร้างขยายท่าอากาศยานภายในประเทศ สวรรคโลก สุโขทัย ซึ่งประกอบด้วยผู้เข้าร่วมประชุมจาก NAGABISHI ENGINEERING EVALUATION COMPANY บริษัทผู้ทำหน้าที่ประเมินผลการใช้เงินงบประมาณเงินกู้ของประเทศญี่ปุ่น, บริษัท สมเดชการก่อสร้าง จำกัด ผู้รับเหมาโครงการ และบริษัท Best Builder Consultant Ltd. บริษัทที่ปรึกษาของเจ้าของโครงการ ขณะที่ร่วมกันประชุมเพื่อตกลงแผนงาน และชี้แจงรายละเอียดเกี่ยวกับงานก่อสร้าง นายช่างโยอิชิ วิศวกรโยธาของบริษัท NAGABISHI ENGINEERING EVALUATION COMPANY ได้ขอให้นายช่างภูมิศาสตร์ site engineer ของบริษัท สมเดชการก่อสร้าง จำกัด นำเสนอในเกี่ยวกับเรื่องการบดอัดดิน (compaction test) อย่างสั้นๆ พร้อมทั้งแสดงเหตุผล ภาพประกอบ และ รายการคำนวณ หากสามารถทำให้เข้าใจได้ง่ายยิ่งขึ้น ตามประเด็น ดังนี้ :

ก. Compaction test คืออะไร ? และมีประโยชน์อย่างไรสำหรับการใช้งานจริง (practical work)

ข. ในการทดสอบ compaction test จำนวนครั้งของการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณความชื้นในเนื้อดินตัวอย่างทดสอบ (mold moisture content) ที่จำเป็นสำหรับการสร้าง compaction curve เป็นเท่าใด ? เพราะเหตุใด ?

ค. ผู้ทำการทดสอบควรจะเลือกค่า mold moisture content สำหรับการทดสอบ 6 ครั้งอย่างไร ?

ง. ควรจะทำการ "ตำดิน (compact)" ลักษณะใด จึงช่วยให้ได้ค่าการบดอัดที่ถูกต้อง ?

จ. เพราะเหตุใดจึงจำเป็นที่จะต้องบดอัดดินชั้นสุดท้ายให้สูงเลย extension collar ?

ฉ. ค่า optimum moisture content (w_{opt}) และ maximun dry unit weight ($\gamma_{d\text{-}max}$) ที่ได้จากการทดสอบ standard compaction test และ modified compaction test ควรจะมีค่าเท่ากันหรือไม่ ? เพราะเหตุใด ?

ช. Zero air void line มีความสำคัญต่อ compaction test หรือไม่ ? อย่างไร ?

เฉลยโจทย์ปัญหา

ก. Compaction test คือ กระบวนการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ทำให้เนื้อดิน (solid phase) เข้ามาอยู่ชิดกันมากขึ้น โดยใช้การใส่พลังงานจลน์เข้าไปบดอัด (compaction) เนื้อดิน ควบคู่ไปกับการใช้ปริมาณน้ำที่แตกต่างกันผสมลงไปในดิน เพื่อช่วยหล่อลื่นให้เนื้อดินเข้ามาชิดกันมากน้อยต่างกัน

การทำ compaction test จะทำให้ได้ข้อมูลความหนาแน่นของดินที่ถูกบดอัดใน compaction mold เมื่อดินใน mold มีปริมาณความชื้นต่างๆกัน ซึ่งสามารถนำไป plot compaction curve ซึ่งสามารถใช้หาค่า optimum moisture content (w_{opt}) และ maximum dry unit weight ($\gamma_{d\text{-}max}$) ของดินตัวอย่างทดสอบที่นำมาบดอัด ทำให้สามารถนำค่า w_{opt} และ $\gamma_{d\text{-}max}$ ที่ได้ไปใช้ในงานออกแบบ และจัดทำข้อกำหนด (specification) สำหรับงานบดอัดดินในสนามว่า ควรจะทำการบดอัดดินที่ค่า moisture content เท่าใด และงานที่บดอัดจะต้องได้ dry unit weight เป็นร้อยละเท่าใดของ $\gamma_{d\text{-}max}$ เป็นต้น

ข. ในการทดสอบการ compaction test อย่างน้อยควรทำการทดสอบโดยเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณความชื้นในเนื้อดินตัวอย่างทดสอบ (mold moisture content) ประมาณ 5 ครั้ง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการสร้าง compaction curve ให้ครอบคลุมทั้งในด้านแห้ง (dry side) และด้านเปียก (wet side) ของ optimum moisture content

ค. ในการเลือกค่า moisture content สำหรับทดสอบการบดอัด ควรจะให้ความแตกต่างของ moisture content ในแต่ละครั้งไม่เกิน 2 % – 3 % และควรมีปริมาณความชื้น (moisture content) อย่างน้อย 2 ค่าทางด้าน wet side และ dry side ของ optimum moisture content

ง. หากผู้ทำการทดสอบต้องการ " ตำดิน (compact) " ให้ถูกต้อง ควรทำการตำในลักษณะที่ช่วยบดอัดดินที่ช่วยบดอัดดินให้ทั่วถึงกันสม่ำเสมอตลอดทั้ง mold โดยดินที่ถูกบดอัดควรได้รับ compaction effort ที่ใกล้เคียงกัน เพื่อให้ดินที่ถูกบดอัดมีความหนาแน่นที่ค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วทั้ง mold ซึ่งสามารถปฏิบัติได้ดังนี้ :

- ปล่อยลูกตุ้มให้ตกด้วยแรงโน้มถ่วงอย่างอิสระ (free fall) และด้วยความสูง (drop height) ที่เท่าๆกันทุกครั้ง ดังรูป 4.10 ก.
- ให้ผิวหน้าของท่อ rammer สัมผัสกับผิวหน้าของดินเท่านั้น ไม่กดลงบนผิวหน้าของดิน

- ไม่ควรให้มีเศษดินติดอยู่ในท่อ rammer เพราะจะทำให้เกิด friction loss ทำให้ compaction effort มีค่าลดลง
- "ตำดิน" อย่างทั่วถึงกันตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ข.

จ. การบดอัดดินให้ดินชั้นสุดท้าย สูงเลยขึ้นมาถึง extension collar ก็เพื่อป้องกันความผิดพลาดในการทดสอบ เพราะในการบดอัดดินชั้นสุดท้ายเราไม่สามารถควบคุมให้บดอัดได้ราบเรียบเสมอกับขอบ mold ได้ และหากทำการบดอัดดินชั้นสุดท้ายต่ำกว่าขอบ mold ก็ไม่สามารถคำนวณหาค่าหน่วยน้ำหนักของดินโดยใช้ปริมาตรของ mold ได้ จะต้องทำการทดลองใหม่ ดังนั้น จึงต้องทำการบดอัดดินชั้นสุดท้ายให้ถึง extension collar แล้วค่อยปาดดินที่เกินออกทีหลัง ทั้งนี้ ASTM แนะนำว่า ผิวบนสุดของดินควรสูงจากขอบ mold ประมาณ 0.5 cm.

ฉ. เมื่อใช้ตัวอย่างดินทดสอบที่เหมือนกันค่า optimum moisture content (w_{opt}) และ maximum dry unit weight ($\gamma_{d\text{-}max}$) ที่ได้จากการทดสอบ standard compaction test จะมีค่าต่ำกว่า w_{opt} และ $\gamma_{d\text{-}max}$ ที่ได้จาก modified compaction test เพราะ standard compaction test ทำการทดสอบโดยใช้ weight of rammer , rammer drop height และ number of blows per layer ต่ำกว่า นั่นคือทดสอบโดยใช้ค่า compaction effort ต่ำกว่าที่ใช้ในการทดสอบ modified compaction test ทำให้บดอัดดินได้แน่นน้อยกว่า

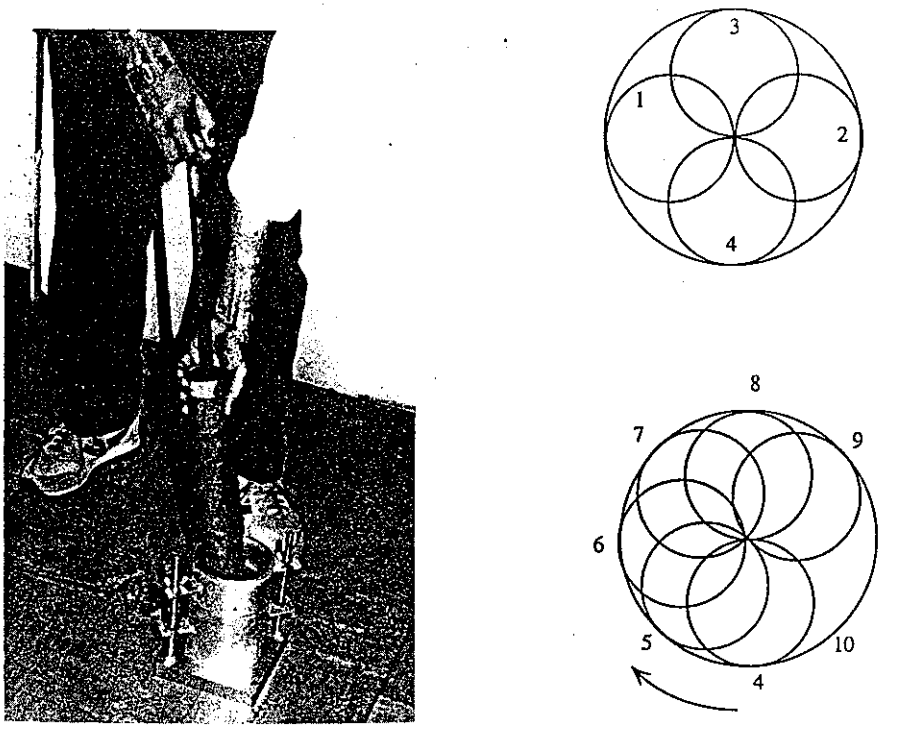
ทั้งนี้ ค่า optimum moisture content และ maximum dry unit weight จากการทดสอบทั้ง 2 เป็นดังรูปที่ 4.11 คือ

optimum moisture content : Modified Proctor Test < Standard Proctor Test

maximum dry unit weight : Modified Proctor Test > Standard Proctor Test

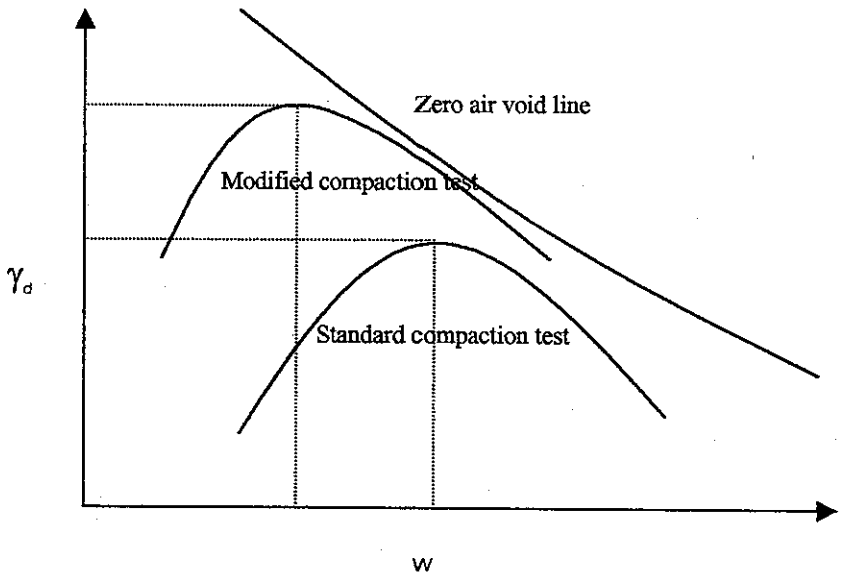
ช. Zero air void line คือกราฟแสดงความสัมพันธ์ของ moisture content กับ maximum dry unit weight

Zero air void line มีความสำคัญกับ compaction test มาก ในลักษณะที่ว่าสามารถใช้ตรวจสอบความน่าเชื่อถือของผลที่ได้จากการทดสอบ ว่ามีข้อผิดพลาดหรือไม่ ทั้งนี้เพราะ หาก compaction curve ที่ได้จากการทดสอบอยู่เหนือ zero air void line สามารถบ่งชี้ได้ว่าผลการทดสอบมีข้อผิดพลาดเพราะ zero air void line จะเป็นค่าหน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงที่สุดที่ moisture content ใดๆ ที่จะสามารถทำการบดอัดได้ตามทฤษฎี



(ก). (ข).

ที่ 4.10 วิธีการตำดิน (ก). การยกลูกตุ้มกระทบขอบกระบอกด้านบนเพื่อให้ระยะตก (drop height) เท่าๆกันทุกครั้งของลูกตุ้ม (ข).ลำดับการปล่อยลูกตุ้ม ตกกระทบดิน



รูปที่ 4.11 Compaction effort comparison between Standard compaction test and Modified compaction test

4.2.2. มานพ เป็น material engineer ประจำบริษัท โยธินการโยธา จำกัด ได้รับมอบหมายให้ควบคุมการทดสอบ standard compaction test และทำรายงานการทดสอบส่งต่อทางบริษัท โดยให้รายงานประกอบด้วย

ก. วิธีการทดสอบ (Compaction Test Procedure)

ข. รายการคำนวณ (Calculation Sheet)

ค. Compaction Curve และการวิเคราะห์หา w_{opt} และ $\gamma_{d\text{-}max}$

ง. ความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นในการทดสอบ

ทั้งนี้ ข้อมูลการทดสอบประกอบด้วย

$\varnothing$ of mold = 105 mm. Height of mold (H_m) = 115 mm.

Weight of mold (W_m) = 4.26 Kg Gs = 2.72

Weight of soil and mold (gm)	Weight of can and wet soil (gm)	Weight of can and dried soil (gm)	Weight of can (gm)
6070	98.03	94.65	46.67
	95.13	91.56	45.67
	105.80	101.67	45.61
6274	88.29	84.76	46.69
	72.27	70.07	45.67
	79.00	76.08	45.61
6268	73.22	70.29	46.69
	77.32	73.73	45.67
	84.36	77.84	45.61
6248	62.62	60.46	45.69
	75.95	71.64	46.67
	6268	60.33	45.61
6232	90.35	83.68	45.69
	82.73	77.09	45.67
	86.33	80.34	45.61

เฉลยโจทย์ปัญหา

ก. วิธีการทดสอบ (Compaction Test Procedure)

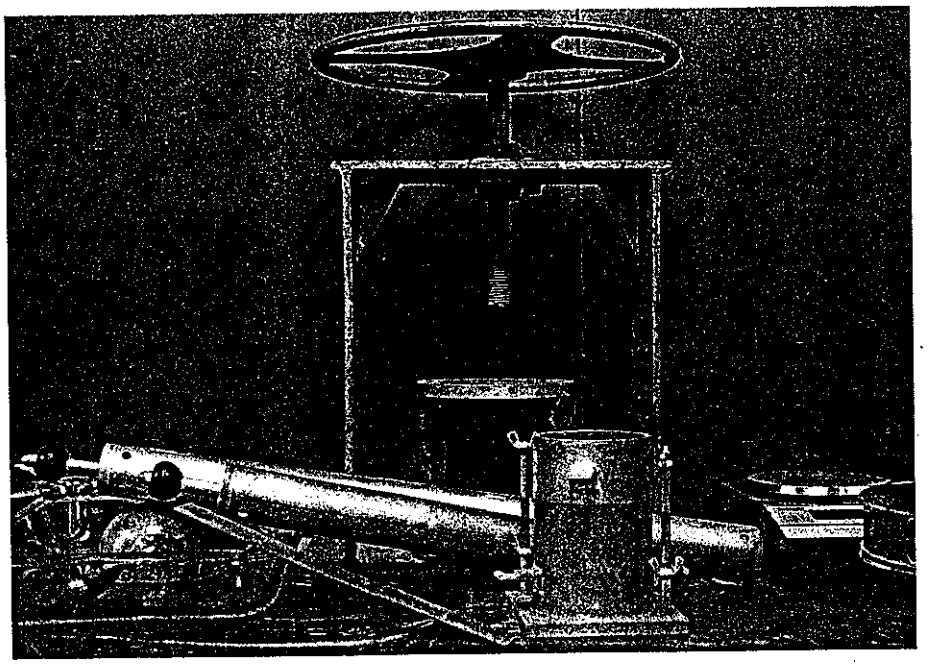
1. Standard Compaction Test

R.R. Proctor (1933) ได้กำหนดวิธีการบดอัดแบบมาตรฐาน (standard compaction test) โดยมีขั้นตอนโดยสังเขป ดังนี้

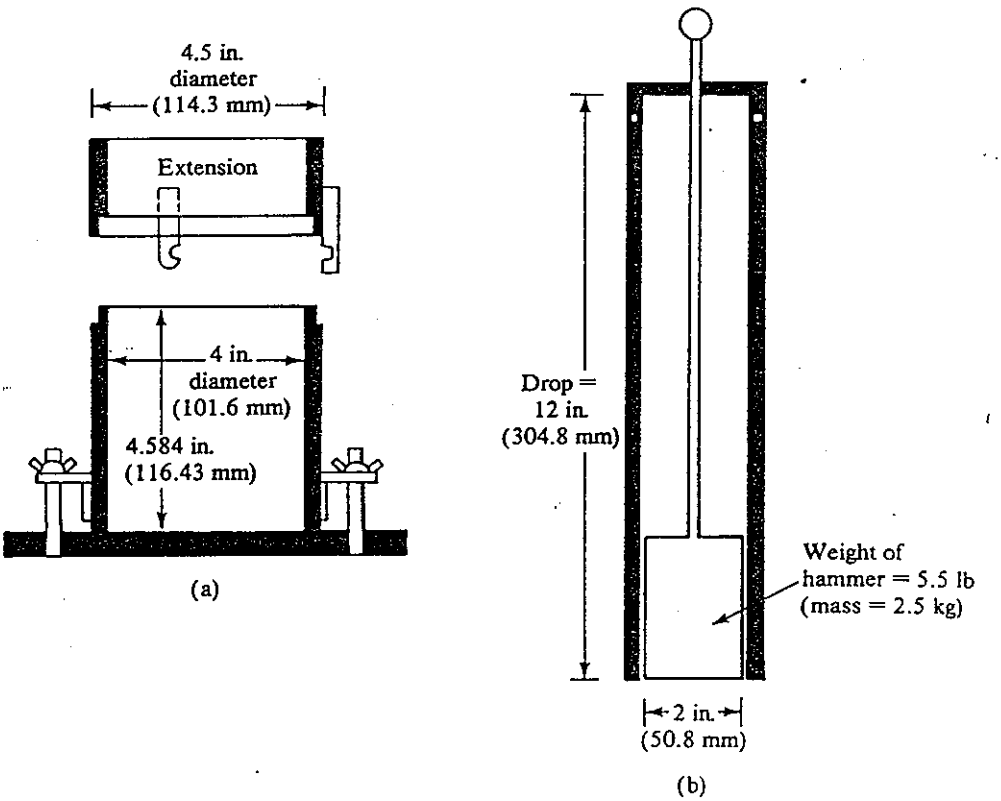
- เตรียมตัวอย่างทดสอบ (soil test specimen) โดยการร่อนตัวอย่างดิน (soil sample) ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (Sieve No. 4) ให้ได้น้ำหนักดินประมาณ 5 กิโลกรัม
- คลุกเคล้าตัวอย่างดินทดสอบกับน้ำ โดยเลือกใช้ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมกับดิน เพื่อให้ค่า moisture content เปลี่ยนแปลงไปเท่าๆกัน สำหรับการทดลองประมาณ 5 ครั้ง
- นำดินที่คลุกเคล้ากับน้ำดีทั่วถึงดีแล้วบดอัดใน standard compaction mold ขนาด $\varnothing$ 4 นิ้ว ปริมาตร 1 / 30 ลูกบาศก์ฟุต โดยแบ่งดินออกเป็น 3 ส่วนเท่าๆกันเพื่อให้บดอัดได้เป็น 3 ชั้นๆละ 25 ครั้ง ด้วยลูกตุ้ม (weight) 5.5 ปอนด์ ระยะตกกระแทก (drop height) สูง 1 ฟุต
- หลังจากบดอัดเสร็จแล้ว แบ่งตัวอย่างดินบดอัดที่บริเวณกลาง mold เพื่อนำไปหาค่า moisture content
- วาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง dry unit weight (γ_d) และ moisture content (w) ที่ได้จากการทดสอบแต่ละ mold
- เขียน zero air void line เพื่อตรวจสอบผลการทดลอง

2. Modified Proctor Test

เพื่อรองรับการพัฒนาของงานก่อสร้างที่ต้องการออกแบบโครงสร้างเพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุกที่สูงขึ้นตามขนาดของสิ่งก่อสร้างและยานพาหนะ เช่น การออกแบบและก่อสร้างสนามบินให้รองรับการขึ้น-ลง ของเครื่องบินขนาดใหญ่ ที่มีน้ำหนักเครื่องและน้ำหนักบรรทุกสูงมากขึ้น จึงได้มีการปรับปรุงการทดสอบ compaction test ด้วยการใช้พลังงานบดอัดที่สูงขึ้นจากที่เคยใช้อยู่ในวิธีการบดอัดแบบ standard compaction test อย่างไรก็ตาม วิธีการทดสอบ modified compaction test ก็คล้ายคลึงกับการบดอัดแบบ standard compaction test โดยการใช้ ทรงกระบอกกลวงขนาด 1 / 30 ลูกบาศก์ฟุต บดอัดจำนวน 5 ชั้นๆ ละ 25 ครั้ง ด้วยน้ำหนัก (weight) 10 ปอนด์ ระยะสูง 1.5 ฟุต



รูปที่ 4.12 compaction test equipment . cylindrical mold , scoop , steel straightedge , 10 kg capacity scale , and extractor.



รูปที่ 4.13 part and dimension of standard compaction mold and rammer

ข. รายการคำนวณ (Calculation Sheet)

Moisture Content (%)	Weight of Moist Soil (gm)	Moist Unit Weight (kg/m^3)	Dry Unit Weight (kg/m^3)	Zero Air Void Unit Weight (kg/m^3)
7.4	1810	1818	1692	2264
9.3	2014	2022	1850	2171
12.6	2008	2016	1790	2026
16	1988	1996	1721	1895
17.6	1972	1980	1684	1840

ตัวอย่างการคำนวณ

$V_m \Rightarrow$ Volume of mold $= (\pi (0.105\ m)^2 / 4) \times 0.115\ m = 9.958 \times 10^{-4}\ m^3$

$W_{sm} \Rightarrow$ Weight of soil and mold $= 6070$ gm

$W_{cws} \Rightarrow$ Weight of can and wet soil $= 98.03$ gm

$W_{cds} \Rightarrow$ Weight of can and dry soil $= 94.65$ gm

$W_c \Rightarrow$ Weight of can $= 46.67$ gm

$W_m \Rightarrow$ Weight of mold $= 4260$ gm

หาค่า moist unit weight, γ_T

$$\gamma_T = W_{sm} - W_m / V_m$$
$$= (6070\ gm - 4260\ gm) / 9.958 \times 10^{-4}\ m^3$$
$$= 1818\ kg/m^3$$

หาค่า mold moisture content, w

$$w_1 = (W_{cws} - W_{cds}) \times 100 / (W_{cds} - W_c)$$
$$= (98.03\ gm - 94.65\ gm) \times 100 / (94.65\ gm - 46.67\ gm)$$
$$= 7\ \%$$

w_2 = (95.13 gm - 91.56 gm) X 100 / (91.56 gm - 45.67 gm)

= 7.8 %

w_3 = (105.8 gm - 101.67 gm) X 100 / (101.67 gm - 45.61 gm)

= 7.4 %

ทำการเฉลี่ยค่า moisture content ที่ได้จากการทดลองหาค่า moisture content ทั้ง 3 ครั้ง

w = (7 + 7.8 + 7.4) / 3

= 7.4 %

หาค่า dry unit weight , γ_d

$$\gamma_d = \gamma_T / (1 + w/100)$$

$$= 1818 \text{ kg/m}^3 / (1 + 0.074)$$

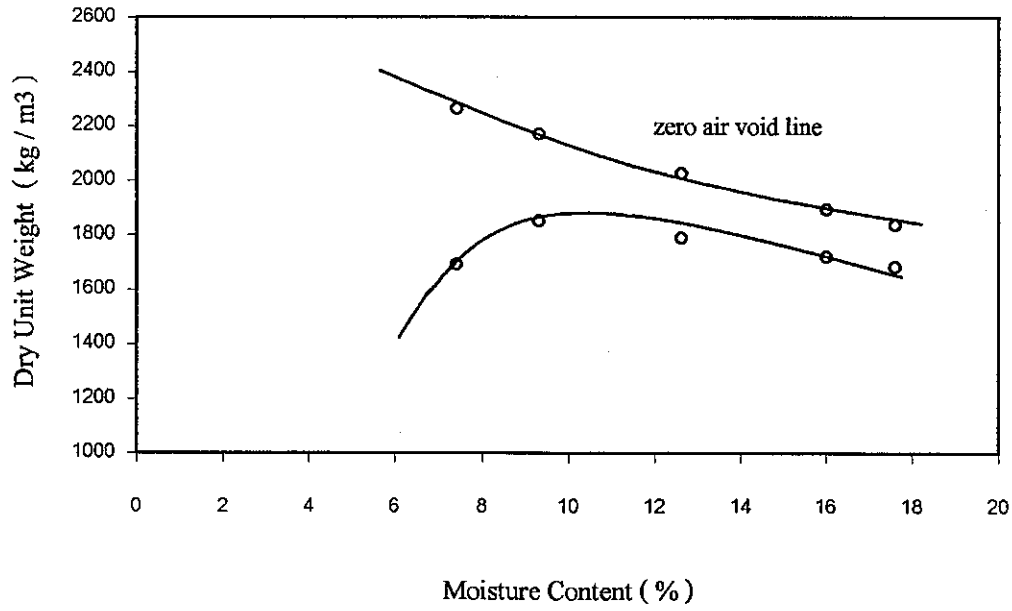
$$= 1692 \text{ kg/m}^3$$

ตรวจสอบค่าที่ได้จากการทดลอง โดยการสร้างคำนวณ zero air void unit weight ที่ w = 7.4 %

$$\gamma_{ZAV} = \gamma_w / (w + 1 / G_s)$$

$$= 1000 \text{ kg/m}^3 / (0.074 + 1/2.72)$$

$$= 2264 \text{ kg/m}^3$$



รูปที่ 4.14 Compaction curve for soil sample

ค. เขียน compaction curve และวิเคราะห์หา w_{opt} และ $\gamma_{d\text{-}max}$

จาก compaction curve (รูปที่ 4.16) พบว่า

Maximum Dry Unit Weight, γ_{d-max} = 1850 kg / m^3

Optimum Moisture Content, w_{opt} = 9.5 %

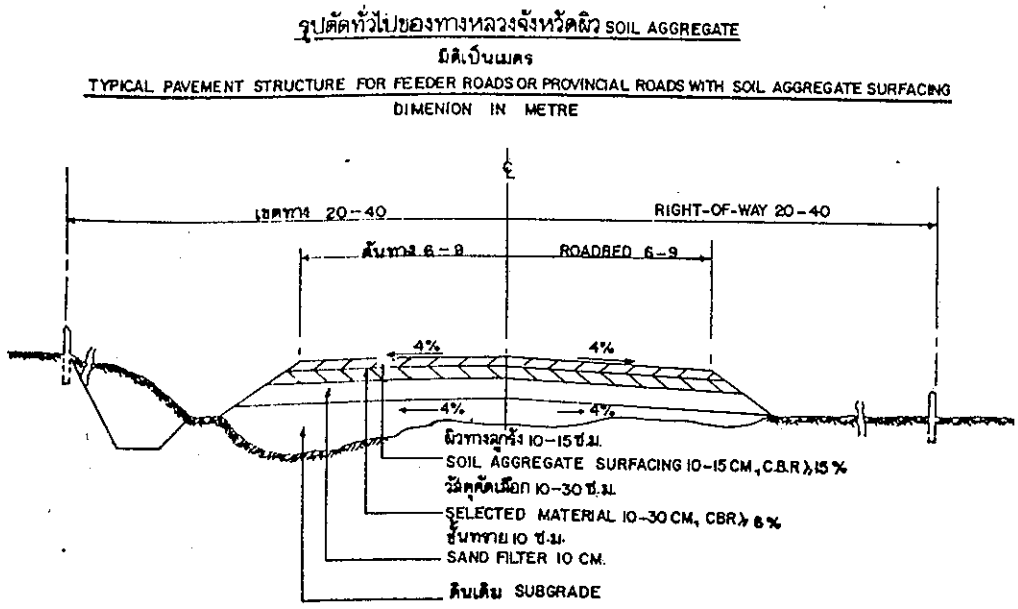
ง. ข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้น ในการทดสอบ compaction test

1. ดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ยังเป็นดินแห้งที่ยังติดกันเป็นก้อนอยู่
2. การผสมน้ำคลุกเคล้าดินเป็นไปอย่างไม่ทั่วถึง
3. ดินตัวอย่างถูกใช้ทดลองซ้ำหลายๆครั้ง อาจทำให้ maximum dry unit weight มีค่าเพิ่มขึ้น และ optimum moisture content มีค่าลดลง เนื่องจากการถูกบดอัดซ้ำหลายๆครั้งจำทำให้ช่องว่างในดินตามธรรมชาติลดลงและมี compaction effort สะสมอยู่มากขึ้น ดังนั้นจึงแนะนำให้ใช้ดินตัวอย่างใหม่ ในการทดสอบแต่ละครั้ง
4. จำนวนครั้งการทดลองไม่เพียงพอในการสร้าง compaction curve คือผลการทดลองไม่ครอบคลุมทั้ง 2 ด้านของ optimum moisture content และ maximum dry unit weight
5. พื้นที่วาง mold ไม่แข็งแรง และถูกต้องเหมาะสม
6. อุปกรณ์ไม่ได้ calibrated ให้ถูกต้อง
7. ใช้อุปกรณ์ในการทดสอบไม่ถูกต้องกับวิธีการทดสอบ
8. ความผิดพลาดของตัวบุคคลในการทำการทดลอง เช่น ผู้ทดสอบกดปากกระบอกลูกตุ้มลงไปบนผิวหน้าของตัวอย่างดินทดสอบ ทำให้ drop height ต่ำกว่าที่ควรเป็น ผู้ทดสอบยกลูกตุ้มไม่สูงพอ (ไม่กระทบด้านบนของกระบอก) ทำให้ drop height และ compaction effort ต่ำลง หรือการที่ผู้ทดสอบยกกระบอกลูกตุ้มลอยสูงเหนือผิวหน้าของตัวอย่างดินทดสอบทำให้ drop height และ compaction effort มีค่าสูงขึ้น
9. การเลือก samples เพื่อทำการหาค่า moisture content ไม่ถูกต้อง

4.3 ข้อกำหนดการก่อสร้าง (Compaction Specification)

4.3.1. บริษัท นวกิจรุ่งเรือง จำกัด ชนะการประมูลงาน โครงการปรับปรุงทางหลวงจังหวัด (ผิวทางลูกรัง) ซึ่งมีรายละเอียดของรูปตัด (cross section) ดังรูปที่ 4.15 สาย สวรรคโลก – ทุ่งเสลี่ยม ระยะทางยาว 30 กิโลเมตร มูลค่า 52.74 ล้านบาท และได้สอบสัมภาษณ์รับนายสุรศักดิ์ วิศวกรจบใหม่จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร เข้ามาเป็นวิศวกรโยธา ช่วยผู้ดูแลและควบคุมงานก่อสร้าง

ในฐานะนายช่างสุรศักดิ์ กรุณาช่วยทางบริษัท จัดทำรายการ แสดงราย ละเอียดของเครื่องจักรกลที่ใช้ในงานบดอัดดิน (compaction equipment) เพื่อให้ทาง บริษัทใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจเลือกใช้เครื่องจักรกลที่ใช้ในงานบดอัดดิน (ให้อธิบายพอสังเขป)



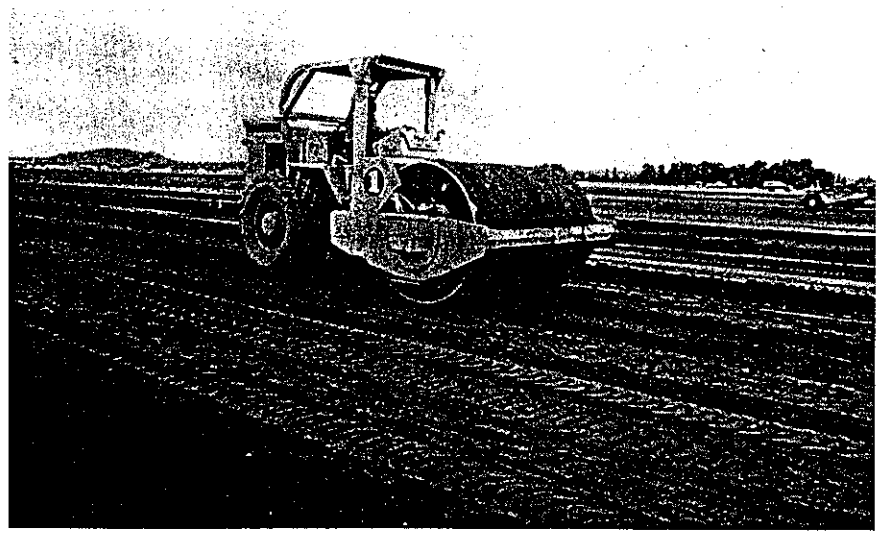
รูปที่ 4.15 รูปตัดทั่วไปของทางหลวงจังหวัดผิวทาง soil aggregate

เฉลยโจทย์ปัญหา

เครื่องจักรกลที่ใช้ในงานบดอัดสามารถแยกชนิด ตามความเหมาะสมกับใช้งาน ดังนี้

1. Rollers หรือ เป็นรถบดอัดดินที่ใช้น้ำหนักกลิ้งทับดิน โดยใช้ลูกกลิ้งที่ติดกับรถบดทำการกลิ้งบดทับ มีหลายชนิดดังนี้

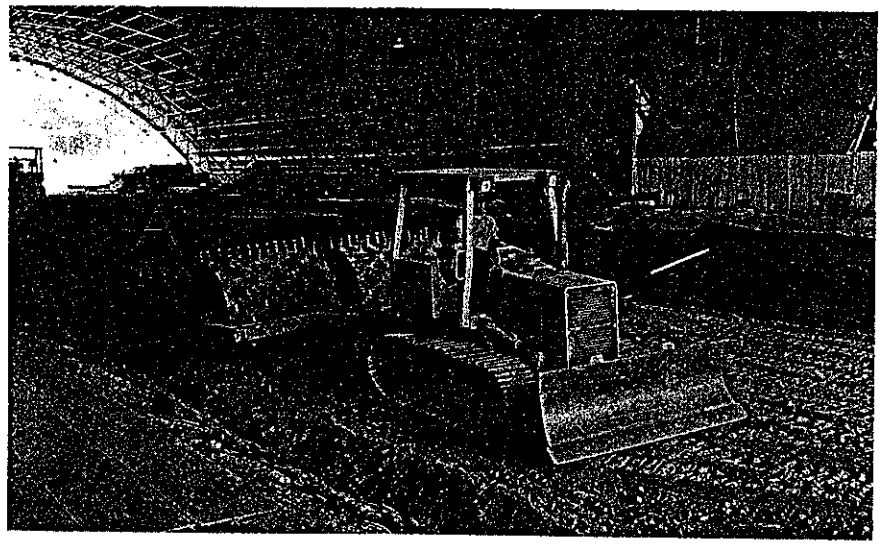
1.1. Steel – wheel rollers หรือ **Smooth – wheel rollers** (รูปที่ 4.16) เหมาะสมสำหรับใช้กับการบดอัด subgrade และงานตกแต่งผิวงานที่ถมด้วยดินทรายและดินเหนียว ไม่เหมาะสมสำหรับการบดอัดที่ต้องให้ได้หน่วยน้ำหนักดินสูงๆ เมื่อทำการบดอัดเป็นชั้นหนาๆ



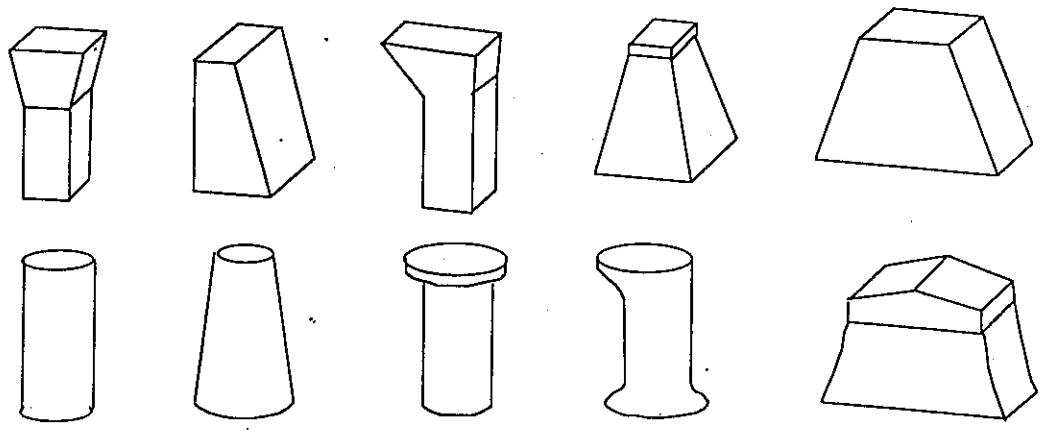
รูปที่ 4.16 Smooth – wheel roller (courtesy of David A Caroll , Austin , Texus)

1.2. Sheepsfoot rollers คือ รถบดอัดที่ล้อซึ่งใช้กลิ้งทับดิน (drum) มีตุ่มยื่นออกมาจาก drum ลักษณะคล้ายกับเท้าของสัตว์ที่ย่ำลงบนดิน foot (ดังรูปที่ 4.17) ที่มีรูปร่างค่อนข้างแหลมยื่นออกมาจากล้อ (drum) foot ของ Sheepsfoot มีหลายรูปร่างและขนาด (รูปที่ 4.18) เพื่อให้เลือกใช้ได้ตรงกับจุดประสงค์ของงาน

ทั้งนี้ Sheepsfoot rollers เหมาะสมที่จะใช้ในการบดอัดดินจำพวก clayey soil (รูปที่ 4.18) ซึ่งต้องการทั้งการบดอัดควบคู่กับการนวด (kneeding) ให้เนื้อดินคลุกเคล้ากันอย่างสม่ำเสมอและทั่วถึง

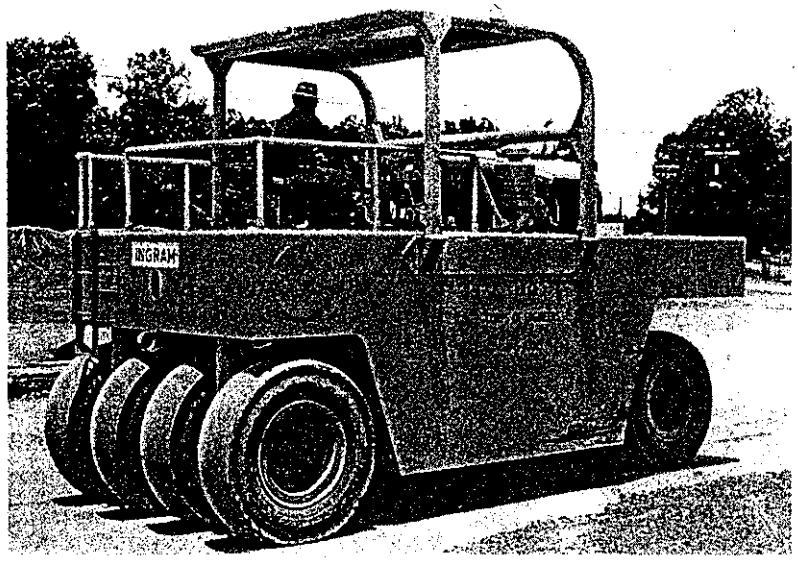


รูปที่ 4.17 Sheepsfoot roller (courtesy of David A Caroll , Austin , Texus)



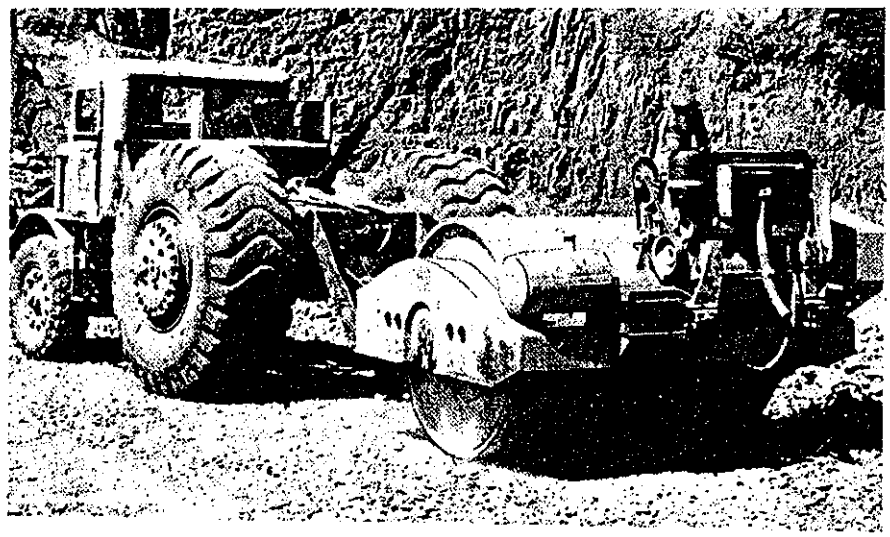
รูปที่ 4.18 Sheepsfoot and padfoot shape (After Poesch and Ikes (1975).)

1.3. Rubber – tired rollers เป็นรถบดอัดที่ล้อซึ่งใช้กลิ้งทับดินทำจากล้อยาง โดยมักจะประกอบด้วยล้อยางหลายล้อมาเรียงเป็นแถว โดยมากในแต่ละ 1 แถวจะมีล้อยาง 4–6 ล้อ เพื่อให้ใช้งานบดอัดดินพวก sandy และ clayey soil ได้ดีกว่า Smooth–wheel rollers



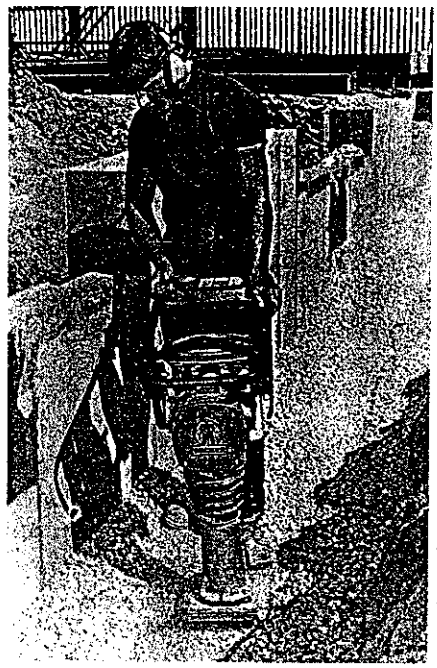
รูปที่ 4.19 Rubber – tired roller (courtesy of David A Caroll , Austin , Texus)

1.4.) **Vibratory rollers** เป็นรถบดอัดดินที่ล้อซึ่งใช้กลิ้งทับดิน ถูกออกแบบให้สามารถสั่นสะเทือนได้ โดยการติดตั้งระบบสั่นสะเทือนเข้ากับ Smooth–wheel rollers หรือ Rubber–tired rollers หรือ Sheepsfoot rollers ได้ Vibratory rollers เหมาะสำหรับการบดอัดดิน granular soil



รูปที่ 4.20 Vibratory roller

2. Impact Machine คือ เครื่องจักรที่ทำการบดอัดดินด้วยการปล่อยน้ำหนักจากที่สูงกว่าในแนวดิ่งตกลงมากระแทกเพื่ออัดดิน (dropping weight type) ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 Impact machine

3. Vibratory Machine คือ เครื่องจักรที่ทำการบดอัดดินด้วยการใช้แรงสั่นสะเทือน ดังเช่น Hand–held vibrating machine เป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับบดอัดดินพวก granular soil ในพื้นที่แคบๆ (รูปที่ 4.22)

รูปที่ 4.22 Vibratory plate compactor

4.3.2. บริษัท นวกิจรุ่งเรือง จำกัด ได้ส่งนายช่างสุรศักดิ์ (project engineer) ไปควบคุมงานก่อสร้างโครงการปรับปรุงทางหลวงจังหวัด (ผิวทางลูกรัง) สาย สวรรคโลก – ทุ่งเสลี่ยม ระยะทางยาว 30 กิโลเมตร โดยมีรูปตัด (cross section) ของถนนดังรูปที่ 4.15

ก. ผลการสำรวจแหล่งทรายเพื่อใช้ในการก่อสร้าง sand filter (10 cm. thick) พบว่ามี 3 แหล่ง ที่ต้นทุนอยู่ในช่วงที่พอจะยอมรับได้ โดยมีคุณสมบัติดังนี้:

แหล่งที่ 1 $\gamma_{d(min-lab)} = 1300\ kg/m^3$, $\gamma_{d(max-lab)} = 1830\ kg/m^3$

$e_{max} = 1.07$, $e_{min} = 0.42$, $C_u = 6.6$, $C_c = 2.4$

แหล่งที่ 2 $\gamma_{d(min-lab)} = 1460\ kg/m^3$, $\gamma_{d(max-lab)} = 1780\ kg/m^3$

$e_{max} = 0.77$, $e_{min} = 0.46$, $C_u = 2.4$, $C_c = 0.92$

แหล่งที่ 3 $\gamma_{d(min-lab)} = 1350\ kg/m^3$, $\gamma_{d(max-lab)} = 1750\ kg/m^3$

$e_{max} = 1.02$, $e_{min} = 0.54$, $C_u = 6.5$, $C_c = 1.40$

กรุณาให้คำแนะนำกับทางบริษัทว่า

ก.1 ควรจะเลือกทรายจากแหล่งทรายใดจึงจะเหมาะสมกับการก่อสร้างที่สุด พร้อมให้เหตุผลประกอบการตัดสินใจ

ก.2 ควรเลือกใช้รถบดอัดแบบใด จึงจะเหมาะสมกับการทำงานที่สุด

ข. ถ้าหากข้อกำหนดประกอบแบบก่อสร้าง (specification) กำหนดว่า relative compaction (R) ที่ได้จากการบดอัดชั้นทรายในสนาม (sand filter) อย่างน้อยต้องเท่ากับ 97 % โดยที่ทรายที่นำมาถม มีคุณสมบัติที่ได้จากการทดลอง ดังนี้

$\gamma_{d(max-lab)} = 1830\ kg/m^3$ $\gamma_{d(min\ lab)} = 1300\ kg/m^3$

กรุณาให้คำแนะนำกับทางบริษัทว่า จะต้องทำการบดอัดให้ได้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง (dry unit weight) ในสนามให้ได้เท่ากับเท่าใด

เฉลยโจทย์ปัญหา

ก.1 ขั้นตอนที่ 1

คำนวณหาค่าความสามารถในการบดอัดได้ของดิน (compatibility) จากสมการ

$$F\,(\text{compatibility}) = \frac{e_{max} - e_{min}}{e_{min}}$$

ทั้งนี้ ค่า compatibility นี้จะบอกถึงคุณสมบัติด้านการบดอัดดังนี้ F ที่มีค่ามาก หมายความว่า ดินถูกบดอัดได้ง่าย, F ที่มีค่าน้อย หมายความว่า ดินถูกบดอัดได้ยาก

ดินจากแหล่งที่ 1 $F = (1.07 - 0.42) / 0.42$

$= 1.547$

ดินจากแหล่งที่ 2 $F = (0.77 - 0.46) / 0.46$

$= 0.674$

ดินจากแหล่งที่ 3 $F = (1.02 - 0.54) / 0.54$

$= 0.889$

นั่นคือค่า F บ่งชี้ว่าดินจากแหล่งที่ 1 จะถูกบดอัดได้ง่ายที่สุด

ขั้นตอนที่ 2 พิจารณาค่า C_u และ C_c

ดินจากแหล่งที่ 1 $C_u = 6.6 > 6$

$C_c = 2.4$, $1 < C_c < 3$ ดังนั้นเป็น well-graded

ดินจากแหล่งที่ 2 $C_u = 2.4 < 6$

$C_c = 0.92 < 1$ ดังนั้นเป็น poorly-graded

ดินจากแหล่งที่ 3 $C_u = 6.5 > 6$

$C_c = 1.4$, $1 < C_c < 3$ ดังนั้นเป็น well-graded

ขั้นตอนที่ 3 สรุปผลการคำนวณ ค่า compatibility (F) และ การจำแนกการคละขนาด

แหล่งดิน	F	Grain – size distribution
1	1.547	Well – graded
2	0.674	Poorly – graded
3	0.889	Well - graded

ขั้นตอนที่ 4 เลือกแหล่งดิน

จากการพิจารณาค่า compatibility และ grain – size distribution พบว่า ควรเลือกใช้ดินจากแหล่งดินที่ 1 เพราะมีค่า F (compatibility) สูงสุด จะทำให้บดอัดได้ง่าย และมีการกระจายตัวของเม็ดดิน (grain–size distribution) เป็นแบบ well–graded ทำให้สามารถบดอัดดินได้แน่น เพราะเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่าจะแทรกเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดินขนาดใหญ่กว่า ได้ดี

ก.2 เนื่องจากดินที่ทำการบดอัดเป็นดินทราย (sand) รถบดอัดดินที่เหมาะสมจึงเป็นรถบดอัดดินที่ใช้กับการบดอัดดินจำพวก granular soil ได้แก่ vibratory roller , rubber–tired roller หรือ smooth–wheel roller

ข. จากข้อกำหนดประกอบการก่อสร้าง (specification) ต้องบดอัดชั้นทรายให้ได้ relative compaction เท่ากับ 97 %

$$R\,(\%) = \frac{\gamma_{d(\text{field})}}{\gamma_{d(\text{max lab})}} \times 100$$

$$\gamma_{d(\text{field})} = 0.97\,(1830\ \text{kg/m}^3)$$

$$= 1775\ \text{kg/m}^3$$

ดังนั้น จะต้องทำการบดอัดดินในสนามให้ได้ dry unit weight = 1775 kg/m^3

4.3.3. บริษัท ประเสริฐ รับเหมาก่อสร้าง ได้เป็นผู้รับเหมาก่อสร้างโครงการซ่อมแซมและปรับปรุงทางหลวงแผ่นดิน หมายเลข 11 (ช่วงลำปาง ถึง เชียงใหม่) ได้ส่งตัวอย่างดิน จากบ่อยืมดินที่มีคุณภาพดี และจะนำดินนี้ใช้บดอัดคันทาง (embankment) มาทำการทดสอบที่ ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ของภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร ซึ่งผลการทดสอบการบดอัดดินออกมาเป็นดังนี้ :

Moisture Content %	Dry Unit Weight (kN/m^3)
6	14.80
8	17.45
9	18.52
11	18.9
12	18.5
14	16.9

ก. ผู้รับเหมาจะต้องทำการบดอัดให้ได้ค่า dry unit weight เท่าใด ? และใช้ค่า moisture content ที่เท่าใด ? ถ้าจะต้องบดอัดให้ได้ relative compaction เท่ากับ 95 % และ moisture content $\pm$ 2 % ที่ optimum moisture content

ข. เมื่อทำการบดอัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว ก็ได้ทำการทดสอบดินบดอัดด้วยวิธี sand cone method ซึ่งให้ผลดังนี้

Calibrated dry density of Ottawa sand = 1570 kg/m^3

Calibrated mass of Ottawa sand to fill the cone = 0.545 kg

Mass of jar + cone + sand (before use) = 7.59 kg

Mass of jar + cone + sand (after use) = 4.78 kg

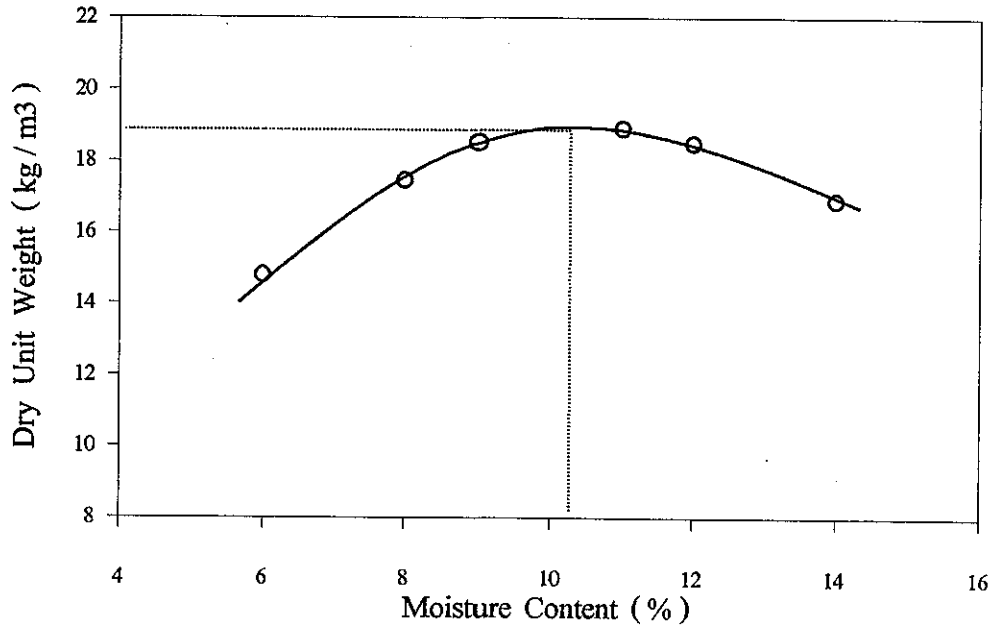
Mass of moist soil form hole = 3.007 kg

Moisture content of moist soil = 10.2 %

จากผลการทดสอบ งานบดอัดดินนี้ผ่านข้อกำหนดในการก่อสร้างหรือไม่ ? ถ้าหากว่ากำหนดให้ ค่า relative compaction เท่ากับ 95 %

เฉลยโจทย์ปัญหา

ก. สร้าง compaction curve จากชุดข้อมูลการทดสอบ



รูปที่ 4.23 compaction curve for soil sample

จาก compaction curve

- Maximum dry unit weight = 19 kN / m^3
- Optimum moisture content = 10.3 %

relative compaction = 95 %

ดังนั้นจะต้องทำการบดอัดให้ได้ค่า dry unit weight ในสนามให้ได้ :

field dry unit weight = 0.95 X 19 kN / m^3

= 18.05 kN / m^3

และจะต้องทำการบดอัดให้ moisture content อยู่ในช่วง 8.3 % - 12.3 %

ข. ทำการคำนวณหาค่า dry unit weight ของดินบดอัดในสนาม

กำหนดให้

CS $\Rightarrow$ Calibrated dry density of Ottawa sand = 1570 kg / m^3

CC $\Rightarrow$ Calibrated mass of Ottawa sand to fill the cone = 0.545 kg

MB $\Rightarrow$ Mass of jar + cone + sand (before use) = 7.59 kg

MA $\Rightarrow$ Mass of jar + cone + sand (after use) = 4.78 kg

MS $\Rightarrow$ Mass of moist soil form hole = 3.007 kg

w $\Rightarrow$ Moisture content of moist soil = 10.2 %

ปริมาณของทรายที่ใช้ทั้งหมด = MB - MA

= 7.59 kg - 4.78 kg = 2.81 kg

ปริมาณของทรายที่ใช้ถมหลุม = ปริมาณของทรายที่ใช้ทั้งหมด - CC

= 2.81 kg - 0.545 kg = 2.265 kg

ปริมาตรของหลุม = ปริมาณของทรายที่ใช้ถมหลุม / CS

= 2.265 kg / 1570 kg / m^3

= 0.0014426 m^3

moist unit weight, γ_T = MS / ปริมาตรของหลุม

= 3.007 kg / 0.0014426 m^3

= 2084.4 kg / m^3

dry unit weight, γ_d = γ_d / (1 + w / 100)

= 2084.4 kg / m^3 / (1 + 0.102)

= 1891.5 kg / m^3

= 1891.5 kg / m^3 X 9.81 = 18.56 kN / m^3

จากข้อกำหนดจะต้องทำการบดอัดให้ได้ dry unit weight เท่ากับ 18.05 kN / m^3 และ moisture content $\pm$ 2 % ของ optimum moisture content

18.56 kN / m^3 > 18.05 kN / m^3

8.3 % < 10.2 % < 10.3 %

ดังนั้นงานบดอัดนี้ผ่านข้อกำหนดการก่อสร้าง สามารถใช้งานได้

4.3.4. นายช่างกีรติ วิศวกรโยธาของบริษัท บูรณะการก่อสร้าง ได้รับมอบหมายให้ดูแลงานก่อสร้างลานตากมันสำปะหลังแห่งหนึ่งที่หมู่บ้านโคกเดื่อ จังหวัดนครสวรรค์ โดยที่ข้อกำหนดประกอบแบบก่อสร้าง (specification) ระบุให้ทำการบดอัดดินในสนาม (field compaction) ทางด้าน dry side of moisture content และต้องให้ได้ relative compaction เท่ากับ 95 %

นายช่างกีรติได้ส่งตัวอย่างดินที่จะใช้ในการบดอัด ไปทำการทดสอบ compaction test และได้ผลการทดสอบเป็นดังนี้

ผลจากการทดสอบ Standard Proctor Test

Volume of mold (ft^3)	Weight of wet Soil in mold (lb)	Moisture content (%)
1 / 30	3.70	9.9
1 / 30	3.77	10.6
1 / 30	3.91	12.1
1 / 30	4.03	13.8
1 / 30	4.11	15.1
1 / 30	4.14	17.4
1 / 30	4.21	19.4
1 / 30	4.07	21.2

ก. จากผลการทดสอบ จงหาค่า maximum dry unit weight และ optimum moisture content ของดินตัวอย่างนี้

ข. เมื่อนำดินชนิดนี้ไปทำการบดอัดในสนาม และทำการทดสอบได้ผลดังนี้

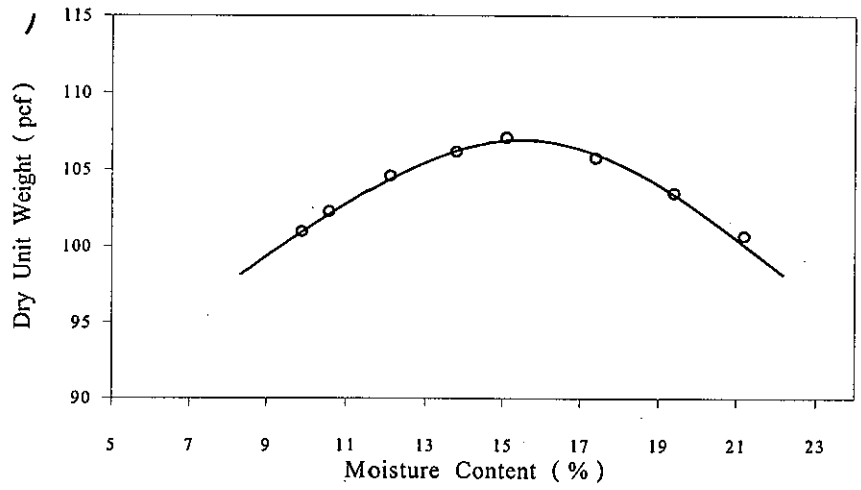
$$w = 10.2\ \%\qquad \gamma_T = 106\ lb/ft^3$$

จากข้อกำหนดจะต้องบดอัดให้ได้ relative compaction เท่ากับ 95 % นั้น จากผลการทดสอบดินบดอัดนี้ได้ตาม ข้อกำหนดหรือไม่ ?

เฉลยโจทย์ปัญหา

ก. ตารางการคำนวณ

Moisture content (%)	Weight of wet soil in mold (lb)	Moist unit weight (lb/ft^3)	Dry unit weight (lb/ft^3)
9.9	3.70	111	101
10.6	3.77	113.1	102.3
12.1	3.91	117.3	104.6
13.8	4.03	120.9	106.2
15.1	4.11	123.3	107.1
17.4	4.14	124.2	105.8
19.4	4.12	123.6	103.5
21.2	4.07	122.1	100.7



รูปที่ 4.24 compaction curve for soil sample

- Maximum Dry Unit Weight = 107.2 pcf
- Optimum Moisture Content = 15.2 %

ข. จากการทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักเปียกในสนามได้ผลดังนี้

$$w = 10.2\ \%\qquad \gamma_T = 106\ pcf$$

คำนวณหาค่าหน่วยน้ำหนักแห้งในสนาม

$$\gamma_d = 106\ pcf\ /\ (1+0.102)$$

$$= 96.2\ pcf$$

$$\text{Relative Compaction} = 96.2\ pcf\ /\ 107.2\ pcf$$

$$= 0.898 = 89.8\ \% < 95\ \%$$ (จากข้อกำหนดการบดอัด)

เนื่องจาก relative compaction ในสนาม มีค่าน้อยกว่าข้อกำหนดการบดอัด ดังนั้นงานบดอัดนี้จึงไม่ผ่านข้อกำหนด จึงต้องมีการบดอัดซ้ำอีกครั้งเพื่อให้หน่วยน้ำหนักแห้งในสนามมีค่าเพิ่มมากขึ้น

4.4 การนำไปใช้ (Practical Uses)

4.4.1. บริษัท เกษมนวกิจการก่อสร้าง ได้รับประมูลงานโครงการงานขุดลอกบึงราชนก อำเภอวังทอง จังหวัดพิษณุโลก ของสำนักชลประทานที่ 3 จึงได้มอบหมายงานให้กับนายช่างณรงค์ วิศวกรโยธาของบริษัท เป็นผู้ควบคุมงาน โดยที่นายช่างณรงค์ ได้เลือกใช้ดินจากแหล่งดินที่มีค่า natural moisture content (w_n) เท่ากับ 12 % ค่า moist unit weight (γ_T) เท่ากับ 1650 kg / m^3 และค่า specific gravity (G_s) ของเม็ดดิน เท่ากับ 2.75 โดยจะต้องขุดดินจากแหล่งดินไปยังสถานที่ก่อสร้างเพื่อทำการบดอัด ถ้าตามข้อกำหนดการก่อสร้างจะต้องทำการบดอัดเพื่อให้ได้ค่า dry unit weight (γ_d) เท่ากับ 1600 kg / m^3 ที่ค่า moisture content (w) เท่ากับ 12 % จะต้องใช้ปริมาณดินเท่าใดเพื่อที่จะทำการบดอัดงานปริมาณ 170,000 m^3 และจะต้องใช้รถขนดินขนาด 20 ton ขนดินเป็นจำนวนกี่เที่ยวจึงจะเสร็จ

เฉลยโจทย์ปัญหา

จากข้อมูลของดินจากแหล่งดินที่ให้มา

$w_n = 12\%$, $\gamma_T = 1650\ kg/m^3$, $G_s = 2.75$

$$\gamma_d = 1600\ kg/m^3 / (1+0.12) = 1473.21\ kg/m^3$$

จะต้องทำการบดอัดดินในสนามให้ได้ $\gamma_d = 1600\ kg/m^3$

shrinkage factor = 1600 / 1473.21 = 1.086

นั่นคือจะต้องใช้ปริมาณดินจากแหล่งดินเพิ่มขึ้นอีก 8.6 %

ปริมาณงานดินที่ต้องทำการบดอัด = 170,000 m^3

ดังนั้น จะต้องใช้ปริมาตรดินในการบดอัดทั้งหมด = 170,000 m^3 x 1.086

= 184620 m^3

และจะต้องทำการขนย้ายดินทั้งหมดเป็นจำนวน $= \dfrac{184620\ m^3 \times 1650\ kg/m^3 \times 1\ ton}{20\ ton \times 907.18\ kg}$

= 16790 เที่ยว

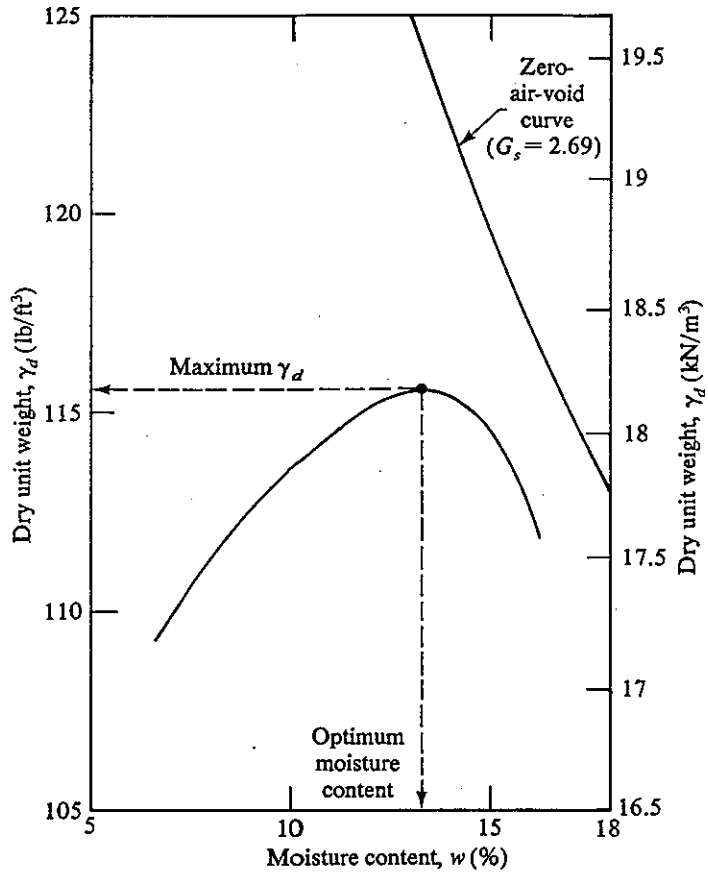
4.4.2. นายช่างสุรชัย วิศวกรโครงการของบริษัท ศักดิ์สิทธิ์การโยธา เป็นผู้ควบคุมงานการก่อสร้าง โครงข่ายถนนรอบมหาวิทยาลัยนเรศวร วิทยาเขตพะเยา โดยที่จะต้องทำงานดินถมคันทาง ซึ่งมีปริมาณงานทั้งหมด 10,000 m^3 ข้อกำหนดของงานถมคันทางกำหนดให้มีค่า void ratio เท่ากับ 0.7

ในบริเวณใกล้เคียงมีบ่อยืมดินทั้งหมด 4 แห่ง ซึ่งได้บอกค่า void ratio และราคาต่อหน่วยเอาไว้ให้ดังนี้

Borrow Pit	Void Ratio e	Cost (bath / m^3)
A	0.85	360
B	1.20	240
C	0.95	280
D	0.75	400

ก. จงทำการคำนวณเพื่อที่จะเลือกว่าควรจะใช้ดินจากบ่อยืมดินใด จึงจะซื้อดินได้ในราคาต่ำที่สุด สมมติว่าดินแต่ละแห่งมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากัน $G_s = 2.75$

ข. เมื่อเลือกดินที่จะใช้ได้แล้ว นายช่างสุรชัย ก็ได้ส่งดินตัวอย่างไปทำการทดสอบ ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.26 หลังจากที่ทำการบดอัดเป็นที่เรียบร้อยแล้วนายช่างสุรชัยก็ได้ทำการทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของดินบดอัดในสนามพบว่า dry unit weight มีค่าเท่ากับ 17.91 kN / m^3. ค่า moisture content เท่ากับ 14 % จากผลการทดสอบอยากทราบว่าผลของการบดอัดดินในสนามเป็นอย่างไร และเพราะเหตุใด เมื่อจะต้องทำการบดอัดที่ $\pm$ 2 % ของ optimum moisture content และ relative compaction เท่ากับ 95 %



รูปที่ 4.25 Standard compaction test results for a soil sample

เฉลยโจทย์ปัญหา

ก. ทำการคำนวณหาค่า dry unit weight (γ_d) ของดินตามข้อกำหนดการบดอัด

$$\gamma_d = \gamma_w G_s / (1+e)$$

$$\gamma_{d\text{-field}} = 1000 \text{ kg/m}^3 \text{ X } 2.72 / (1+0.7)$$
$$= 1600 \text{ kg/m}^3$$

คำนวณหาปริมาณดินที่จะต้องใช้และราคาดินของแต่ละบ่อยืมดิน

บ่อยืมดิน A

$$\gamma_d = 1000 \text{ kg/m}^3 \text{ X } 2.72 / (1+0.85)$$
$$= 1472.27 \text{ kg/m}^3$$

ค่าการบดอัดของดิน $= 1600 \text{ kg/m}^3 / 1472.27 \text{ kg/m}^3$

$= 1.087$

ปริมาตรของดินที่ต้องขุดจากบ่อยืมดิน $= 1.087 \text{ X } 10000 \text{ m}^3$

$= 10870 \text{ m}^3$

บ่อยืมดิน B

$$\gamma_d = 1000 \text{ kg/m}^3 \text{ X } 2.72 / (1+1.20)$$
$$= 1236.36 \text{ kg/m}^3$$

ค่าการยุบตัวของดิน $= 1600 \text{ kg/m}^3 / 1236.36 \text{ kg/m}^3$

$= 1.294$

ปริมาตรของดินที่ต้องขุดจากบ่อยืมดิน $= 1.294 \text{ X } 10000 \text{ m}^3$

$= 12940 \text{ m}^3$

บ่อยืมดิน C

$$\gamma_d = 1000 \text{ kg/m}^3 \text{ X } 2.72 / (1+0.95)$$
$$= 1394.87 \text{ kg/m}^3$$

ค่าการยุบตัวของดิน $= 1600 \text{ kg/m}^3 / 1394.87 \text{ kg/m}^3)$

$= 1.147$

ปริมาตรของดินที่ต้องขุดจากบ่อยืมดิน $= 1.147 \text{ X } 10000 \text{ m}^3$

$= 11470 \text{ m}^3$

บ่อยืมดิน D

$$\gamma_d = 1000\ kg/m^3 \times 2.72 / (1+0.75)$$

$$= 1554.28\ kg/m^3$$

ค่าการยุบตัวของดิน $= 1600\ kg/m^3 / 1554.28\ kg/m^3)$

$$= 1.029$$

ปริมาตรของดินที่ต้องขุดจากบ่อยืมดิน $= 1.029 \times 10000\ m^3$

$$= 10290\ m^3$$

บ่อยืมดิน	ปริมาตรที่ต้องใช้ m^3	ราคาต่อหน่วย บาท	ราคารวม บาท
A	10870	360	3913200
B	12273	300	3882000
C	11282	320	3670400
D	10286	380	3910200

ดังนั้นจะสามารถซื้อดินที่มีราคาต่ำสุดได้จากบ่อยืมดิน C ในราคา 3,670,400 บาท

ข. จาก compaction curve ของดินตัวอย่างที่ถูกนำไปทดสอบ

Maximum dry unit weight ($\gamma_{d\text{-}max}$) $= 18.16\ kN/m^3$

Optimum moisture content (OMC) $= 13.3\ \%$

จากข้อกำหนดการบดอัดดินในสนามจะต้องบดอัด ซึ่ง moisture content จะต้องอยู่ในช่วง $\pm 2\ \%$ ของ optimum moisture content และ relative compaction เท่ากับ 95 %

ดังนั้นจะต้องทำการบดอัดให้ได้ moisture content ในสนามอยู่ระหว่าง 11.3 % - 15.3 %

และ $\gamma_{d\text{-field}} = 0.95 \times 18.16 = 17.25\ kN/m^3$

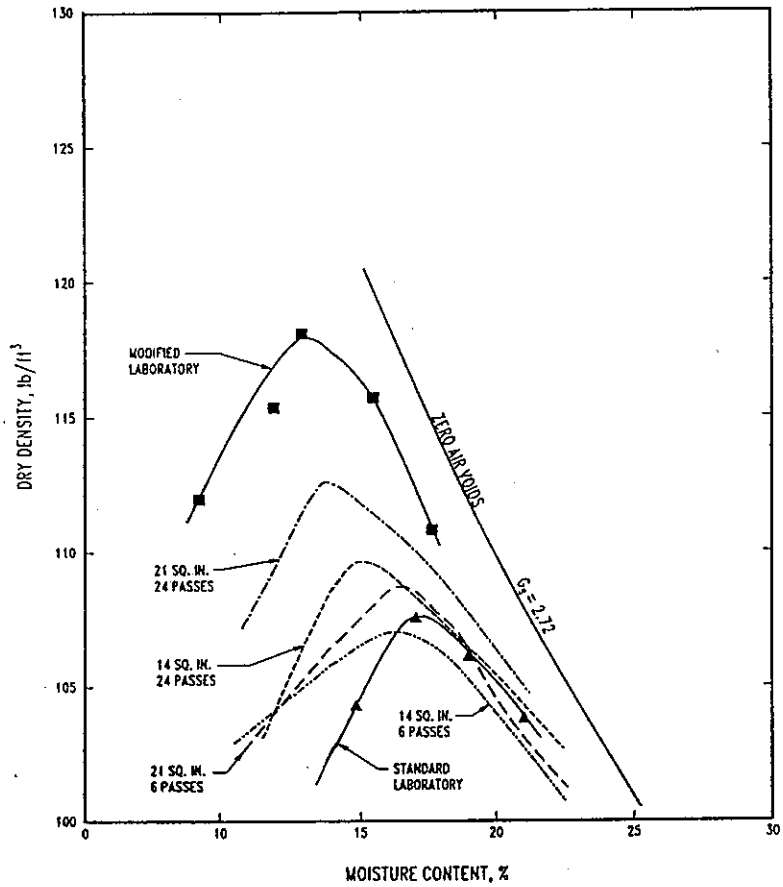
จากการทดลองหาหน่วยน้ำหนักของดินบดอัดในสนาม พบว่า

$$\gamma_d = 17.91\ kN/m^3 > 17.25\ kN/m^3$$

$$w = 14\ \%\ ,\ 11.3 < w < 15.3$$

ดังนั้นงานบดอัดนี้ผ่านตามข้อกำหนดงานบดอัดที่กำหนด สามารถใช้งานได้ตามที่ออกแบบไว้

4.4.3. นายช่างโชคชัย วิศวกรโยธาของบริษัท SIAM CITY COPORATION Ltd. เป็นผู้ควบคุมงานก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 1 ช่วงจังหวัดตาก ถึง จังหวัดสุโขทัย ได้ทำการทดสอบดินโดยการใช้รถบดอัดที่ทางบริษัทมีประจำการอยู่ ซึ่งให้ผลดังนี้



รูปที่ 4.26 compaction curve ของการทดสอบด้วยรถบดอัด

ถ้าทำการบดอัดที่ moisture content เท่ากับ 10 % เพื่อให้ได้ dry unit weight เท่ากับ 112 lb/f^3 ควรจะเลือกใช้รถบดอัดขนาดเท่าใด และบดอัดเป็นจำนวนกี่รอบ

เฉลยโจทย์ปัญหา

จากผลการบดอัดดินตัวอย่างด้วย Sheepsfoot ขนาด 250 psi (contact pressure per foot) เมื่อพิจารณาดูแล้วพบว่าควรจะทำการบดอัดโดยใช้ foot ขนาด 21 SQ.IN. ทำการบดอัดดินเป็นจำนวน 6 รอบ จะประหยัดค่าใช้จ่ายที่สุด แต่ถ้าหากว่าเพิ่มจำนวนรอบการบดอัดดินจะทำให้ได้ relative compaction ที่มากกว่าข้อกำหนดการบดอัด แต่ว่าไม่มีความจำเป็นที่จะต้องบดอัดดินให้ได้ถึงระดับนั้น ทั้งยังจะเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายอีกด้วย

4.4.4. Moisture content–Unit weight Criteria for clay liner construction และ Acceptable zone คือ อะไร และเรามีวิธีการสร้าง acceptable zone ได้อย่างไร จงอธิบายมาพอสังเขป และจงสร้าง acceptable zone จากข้อมูลการทดลองดินเพื่อการก่อสร้าง solid west disposal site โดยที่ข้อกำหนดในการบดอัดดินกำหนดให้มีค่าการซึมผ่านของน้ำ (k) $\leq 10^{-7}$ m / s

Compaction Test

Modified Proctor Test

Moisture content (%)	Dry unit weight (pcf)
21.5	99
24	100
26	97
28	95
31	91

Standard Proctor Test

Moisture content (%)	Dry unit weight (pcf)
24	87
26	88.5
28	90
30	91.5
32	88
34.5	84.5

Reduced Proctor Test

Moisture content (%)	Dry unit weight (pcf)
26.5	82.5
28.5	85
30	88
32.5	86
34.5	85
37	81.5

Permeability Test

Modified Proctor Test

Moisture content (%)	K (m/s)
21.5	3×10^{-8}
24	5×10^{-9}
26	7×10^{-9}
28	2×10^{-8}
31	3×10^{-8}

Standard Proctor Test

Moisture content (%)	K (m/s)
24	5×10^{-6}
26	7×10^{-6}
28	3×10^{-7}
30	6×10^{-8}
32	8×10^{-8}
34.5	5×10^{-7}

Reduced Proctor Test

Moisture content (%)	K (m/s)
26.5	6×10^{-5}
28.5	2×10^{-5}
30	7×10^{-8}
32.5	9×10^{-7}
34.5	2×10^{-7}
37	3×10^{-6}

เฉลยโจทย์ปัญหา

งานบดอัดดินในงานก่อสร้างจำพวกเขื่อนดินหรือ solid–waste disposal ที่ต้องการให้มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำของดินบดอัดมีค่าน้อยๆ (low permeability) จึงมีความจำเป็นที่จะต้องสร้างข้อกำหนดของการบดอัด moisture content–unit weight criteria for clay liner ว่าจะต้องทำการบดอัดดินที่ moisture content และ dry unit weight เป็นเท่าใด จึงจะทำให้ดินที่บดอัดมีคุณสมบัติตามที่ต้องการ

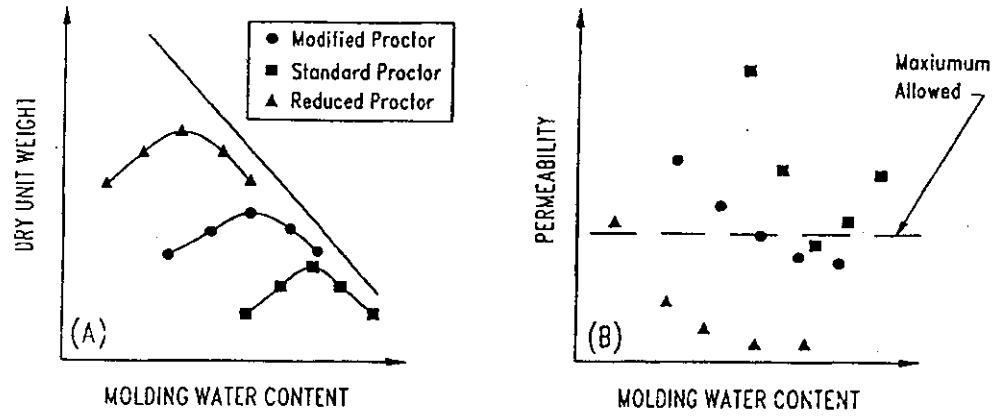
ในการทำการบดอัดดินเพื่อทำโครงสร้างให้มีการซึมผ่านของน้ำต่ำ (low permeability) จะต้องทำการบดอัดดินที่ moisture content ทางด้าน wet side ของ optimum moisture content เนื่องจากการบดอัดดินทางด้าน dry side ของ optimum moisture content โครงสร้างของดินจะเป็นแบบ flocculent ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบระเกะระกะ เกิด void ขนาดต่างๆกระจายอยู่ทั่วมวลดิน ซึ่งการบดอัดดินทางด้าน dry side จะทำให้ดินมีความแข็งแรงสูง (high strength) มีลักษณะเป็น brittle material และน้ำสามารถซึมผ่านได้ง่าย (high permeability) แต่การบดอัดดินทางด้าน wet side จะทำให้โครงสร้างของดินเป็นแบบ dispersed โครงสร้างมีการเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ void ในมวลดินจะมีค่าลดลงและมีขนาดเล็กลง การบดอัดดินทางด้าน wet side จะทำให้ดินมีความแข็งแรงต่ำ (low strength) มีลักษณะเป็น elastic material และน้ำซึมผ่านได้ยากขึ้น (low permeability)

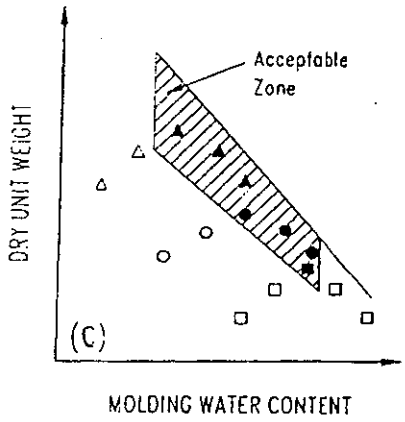
การสร้าง acceptable zone สำหรับ moisture content–unit weight criteria for clay liner construction สามารถทำได้ดังนี้ :

1. นำดินตัวอย่างไปทำการทดสอบ modified compaction test , standard compaction test และ reduced compaction test (วิธีการทดสอบคล้ายกับ standard compaction test แต่ว่าบดอัดชั้นละ 15 ครั้ง) เพื่อสร้าง compaction curve ที่ค่า compaction effort ต่างๆ ดังรูปที่ 4.27 a

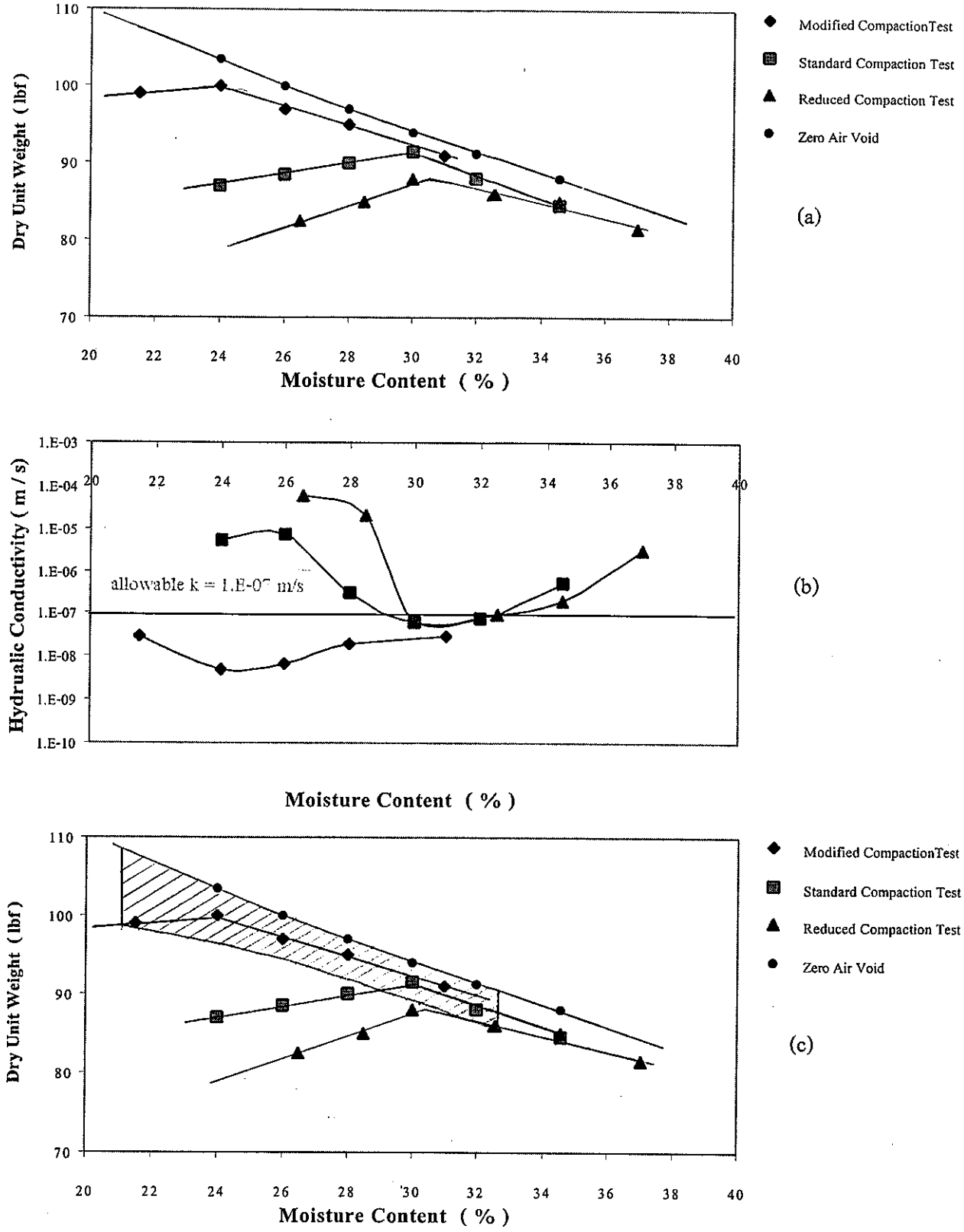
2. นำดินตัวอย่างที่ทำการบดอัดแล้วจากข้อที่ 1 มาทำการทดสอบ permeability test แล้วนำมาสร้าง hydraulic conductivity–moisture curve ดังรูปที่ 4.27 b แล้วสร้างเส้น maximum allowable value of k (k = hydraulic conductivity)

3. ทำการสร้าง acceptable zone บน compaction curve จากข้อมูลที่มีค่า k < maximum allowable value of k ดังรูปที่ 4.27 c





รูปที่ 4.27 (a). compaction curve. (b). variator of hydraulic conductivity (c). determination of acceptable zone



รูปที่ 4.28 Soil sample from borrow pit (a). compaction curve. (b) variator of hydraulic conductivity (c) determination of acceptable zone