คุณสมบัติการบดอัดและค่า ซี บี อาร์ ของดินถมคันทาง

นายสถิต ชินอ่อน

โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2556

คุณสมบัติการบดอัดและค่า ซี บี อาร์ ของดินถมคันทาง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับโครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงงาน

(รศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)
ประธานกรรมการ

(ศ. ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน)

(ผศ. ดร.พรศิริ จงกล)
กรรมการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สถิตย์ ชินอ่อน : คุณสมบัติการบดอัดและค่าซีบีอาร์ของดินถมคันทาง (COMPACTION CHARACTERISTICS AND CBR OF SUBGRADE SOILS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติการบดอัดและค่าซีบีอาร์ของดินถมคันทางในห้องปฏิบัติการและในสนาม ดินตัวอย่างทดสอบมีกระจายขนาดคละตามมาตรฐานกรมทางหลวง การศึกษาคุณสมบัติการบดอัดและค่าซีบีอาร์ในห้องปฏิบัติการดำเนินการโดยการรวบรวมผลทดสอบจากศูนย์สร้างทางขอนแก่น กรมทางหลวง การทดสอบในสนามดำเนินการที่โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 2038 บ้านเมืองใหม่ อำเภอภูเวียง จังหวัดขอนแก่น ผลการศึกษาในห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นแห้งและซีบีอาร์สามารถประมาณได้จากคุณสมบัติพื้นฐาน อันได้แก่ ร้อยละของเม็ดดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 และขีดจำกัดเหลว ผลการบดอัดดินเม็ดละเอียดด้วยรถบดอัดในสนามที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมแสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นแห้งและซีบีอาร์ในสนามมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดตามจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและซีบีอาร์กับจำนวนเที่ยววิ่งสามารถประมาณได้ด้วยฟังก์ชันล็อกการิทึมจนถึงหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ผลการศึกษาทั้งหมดนำมาซึ่งวิธีการบดอัดและควบคุมการบดอัดในสนามที่มีประสิทธิภาพ

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ปีการศึกษา 2556 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

SATIT CHINON : COMPACTION CHARACTERISTICS AND CBR OF SUBGRADE SOILS. ADVISOR : PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D., P.E.

This research studies laboratory and field compaction characteristics and CBR values of subgrade soils. The gradation of the studied soils are in agreement with a stanadrd of the Deparatment of Highways. The laboratory studies of compaction characteristics and CBR values were performed by collecting test data from the Khon Kaen Road Construction Center, Department of Highways, Thailand. The field studies were perfomed at a construction project on highway route No. 2038, Ban Muangmai, Poohweng District, Khon Kaen. The laboratory studies show that the dry unit weight and CBR can be estimated from the basic properties, including the percentage of soil passing sieve No. 200 and the liquid limit. The field studies on compaction at optimum water content show that the dry unit weight and CBR increase significantly with increasing the number of roller passes. Relationships between field dry unit weight and field CBR versus number of rolloer passes are represented by logarithm functions until the field dry unit weight reaches laboratory maximum dry unit weight. An analysis of both laboratory and field studies leads to an effective field compaction method and construction control.

School of Civil Engineering Student's Signature_____

Academic Year 2013 Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานบัณฑิตนี้ สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องด้วยคณาจารย์และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือสนับสนุนเป็นอย่างดี ทั้งในด้านวิชาการ ด้านการดำเนินงานวิจัย และอนุเคราะห์ข้อมูลในการดำเนินงานวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข อย่างสุดซึ้งที่กรุณารับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา และให้ทั้งความรู้และคำแนะนำทางวิชาการด้านวิศวกรรมปฐพี จนโครงงานวิจัยนี้สำเร็จด้วยดี และขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ ประธานกรรมการสอบโครงงานมหาบัณฑิต และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล กรรมการสอบโครงงานมหาบัณฑิต ที่ช่วยให้คำแนะนำในการดำเนินงานวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์สร้างทางขอนแก่น กรมทางหลวง ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและช่วยเหลือในการทดสอบวัสดุในห้องปฏิบัติการและในสนาม

ท้ายที่สุด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ที่ได้อบรมสั่งสอน และสนับสนุนให้การศึกษาจนได้มาถึงวันนี้ และขอบคุณภรรยาและบุตร ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจมาโดยตลอด

สถิตย์ ชินอ่อน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข

กิตติกรรมประกาศ ..... ค

สารบัญ ..... ง

สารบัญตาราง ..... ซ

สารบัญรูปภาพ ..... ฌ

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ 2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

2 ปริทัศน์วรรณกรรม งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 บทนำ 4

2.2 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Proctor (1930) 7

2.3 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Hogentogler (1936) 8

2.4 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Buchanan (1942) 10

2.5 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Hilf (1956) 11

2.6 ทฤษฎีการบดอัดของ Lambe (1985) 12

2.7 เส้นโค้งการบดอัดดิน (compaction curve) 13

2.7.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการบดอัดดิน 15

2.7.2 ชนิดของดิน 15

2.8 พลังงานการบดอัด 18

2.9 การบดอัดและคุณสมบัติเชิงวิศวกรรม 20

2.10 ปรัชญาการบดอัดงานเขื่อนและงานถนน 23

2.11 การทำนายกราฟการบดอัด 24

2.12 มาตรฐานวัสดุถมคันทาง(embankment : Material) (ทล.ม.102/2532) 37

2.13 มาตรฐานวัสดุลูกรังรองพื้นทาง (Subbase) (ทล.ม.205/2532) 38
2.14 วิธีการทดสอบเพื่อหาขนาดเม็ดวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง
(ทล.ท,204/2516) (เทียบเท่า AASHO T27-70) 39
2.14.1 ขอบข่าย 39
2.14.2 วิธีทำ 40
2.14.3 การคำนวณ 41
2.14.4 การรายงาน 42
2.14.5 ข้อควรระวัง 42
2.15 วิธีการทดลองหาค่า Liquid Limit : L.L.) ของดิน (ทล.ท,102/2515)
(เทียบเท่า AASHTO T 89) 45
2.15.1 ขอบข่าย 45
2.15.2 วิธีทำ 45
2.15.3 การคำนวณ 49
2.15.4 การรายงาน 49
2.15.5 ข้อควรระวัง 49
2.16 วิธีการทดลองหาค่า Plastic Limit (PL) และ Plasticity Index (PI) ของดิน
(ทล.ท.103/2515) (เทียบเท่า AASHTO T 90) 53
2.16.1 ขอบข่าย 53
2.16.2 วิธีทำ 53
2.16.3 การคำนวณ 55
2.16.4 การรายงาน 55
2.16.5 ข้อควรระวัง 55
2.17 วิธีการทดลอง Compaction Test แบบมาตรฐาน(ทล.ท.107/2517)
(เทียบเท่า AASHTO T99) 55
2.17.1 ขอบข่าย 55
2.17.2 วิธีทำ 56
2.17.3 การคำนวณ 61
2.17.4 การรายงาน 62
2.17.5 ข้อควรระวัง 62
2.18 วิธีการทดลองหาค่าความแน่นของวัสดุในสนาม โดยใช้ทราย

(ทล.-ท. 603/2517) (เทียบเท่า AASHTO T191) 66
2.18.1 ขอบข่าย 66
2.18.2 วิธีทำ 66
2.18.3 การคำนวณ 73
2.18.4 การรายงาน 78
2.18.5 ข้อควรระวัง 79
2.19 วิธีการทดสอบเพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์. (C.B.R.) (ทล.ท.109/2517) 85
2.19.1 ขอบข่าย 85
2.19.2 วิธีทำ 85
2.19.3 การคำนวณ 96
2.19.4 การรายงาน 98
2.19.5 ข้อควรระวัง 98
2.20 วิธีการทดลองหาค่า CBR ในสนาม (Field CBR) (ทล.-ท. 602/2517)
(เทียบเท่าวิธีของ U.S. Corps of Engineers) 106
2.20.1 ขอบข่าย 106
2.20.2 วิธีทำ 106
2.20.3 การคำนวณ 111
2.20.4 การรายงาน 112
2.20.5 ข้อควรระวัง 112
2.20.6 หนังสืออ้างอิง 113
2.21 เครื่องจักรกลที่ใช้บดอัดดินในสนาม 116
3 วิธีดำเนินการทำโครงงาน 120
3.1 บทนำ 120
3.2 แผนงานดำเนินการ 120
3.3 ขั้นตอนการทดสอบในห้องปฏิบัติการ 120
3.4 การทดสอบหาค่าความแน่นของวัสดุงานทางในสนาม (field density test)
โดยวิธีการ Sand Cone Method 121
3.5 การทดสอบหน่วยแรงกดในสนาม 121
4 การวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผลการทดสอบ 124
4.1 บทนำ 124

4.2 วิธีดำเนินการวิจัย 125
4.3 ผลทดสอบที่ได้จากการรวบรวมและผลการวิเคราะห์ 126
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดค่าซีบีอาร์ในสภาวะไม่แช่น้ำและแช่น้ำ 134
4.5 การทดสอบในสนาม 139
4.6 ขั้นตอนการควบคุมงานบดอัดดินในสนาม 142
5 สรุปผลการศึกษา 144
เอกสารอ้างอิง 145
ประวัติผู้เขียน 147

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ขนาดคละของรองพื้นทางวัสดุมวลรวม 39

2.2 ขนาดคละของวัสดุ 40

4.1 ขอบเขตของขนาดเม็ดดินของดินคันทางที่รวบรวมจากโครงการก่อสร้าง ทั้ง 32 โครงการ 128

4.2 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติด้านการบดอัดของดินคันทาง 135

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	ลักษณะทั่วไปของเส้นการบดอัดดิน	7
2.2	ผลของแรงดึงผิวที่ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวปรากฏในดินเม็ดหยาบ	8
2.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้น นำเสนอโดย Hogentogler	9
2.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้น นำเสนอโดย Buchanan	11
2.5	กราฟแสดงผลของการบดอัดดินนำเสนอโดย Hilf	12
2.6	ผลกระทบของการบดอัดดินที่มีต่อโครงสร้างดิน	13
2.7	เส้นโค้งการบดอัดดิน (compaction curve)	14
2.8	เส้นโค้งการบดอัดดินของดินชนิดต่าง ๆ	16
2.9	กราฟการบดอัดของดินเหนียวชนิดต่าง ๆ ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Hopibulsuk et al., 2005)	16
2.10	อิทธิพลของชนิดดินต่อการบดอัดแบบมาตรฐาน (Johnson and Sallberg. 1960)	18
2.11	อิทธิพลของพลังงานบดอัดต่อกราฟการบดอัดของดนลูกรัง (Horpibulsuk et al., 2004)	19
2.12	การทดสอบความซึมผ่านได้และการบดอัดดิน Siburua (Lambe, 1962)	21
2.13	ลักษณะการอัดตัวของดินตะกอนปนดินเหนียวบดอัดที่ด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณ ความชื้นเหมาะสม (b) การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น (สุขสันติ์,2545)	21
2.14	ความสัมพันธ์ระหว่างความแค้น-ความเครียดของดินเหนียวปนดินตะกอนบดอัด (สุขสันติ์ 2545)	22
2.15	ความสัมพันธ์ระหว่างความแค้น-ความเครียดของดินลูกรังบดอัด	23
2.16	กราฟการบดอัด Ohio (ปรับปรุงจาก Joslin, 1959)	25
2.17	แบบจำลองโครงสร้างดินบดอัด (Nagaraj et al., 2006)	25
2.18	(a) กราฟการบดอัด	27
2.18	(b) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของดินเหนียวปนดินตะกอน (Horpibulsuk et al., 2008a)	27

2.19 (a) กราฟการบดอัด 28
2.19 (b) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของกรวด ที่ขนาด คละดี (Horpibulsuk et al., 2009a) 28
2.20 อิทธิพลของ A_d และ A_w ต่อกราฟการบดอัด (Horpibulsuk et al., 2008a) 29
2.21 อิทธิพลของ B_d และ B_w ต่อกราฟการบดอัด (Horpibulsuk et al., 2008a) 30
2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นเหมาะสม อัตราส่วนปริมาณความชื้นเหมาะสม และพลังงานการบดอัด (Horpibulsuk et al., 2009a) 31
2.23 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของดินเหนียว (ข้อมูลจาก Proctor, 1948) (Horpibulsuk et al., 2008a) 33
2.24 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของ Red earth (ข้อมูลจาก US Army Crops of Engineers, 1970) (Horpibulsuk et al., 2008a) 33
2.25 เส้นกราฟกรบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของดินเหนียวปนดินตะกอน (ข้อมูลจาก Turnbull and Foster, 1956) (Horpibulsuk et al., 2008a) 34
2.26 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของดินลูกรัง (ข้อมูลจาก Horpibulsuk et al., 2004c) (Horpibulsuk et al., 2009a) 34
2.27 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลการทดสอบและการทำนายของกรวดปนดินเหนียว (ข้อมูลจาก Ruenkrairergsa, 1982) (Horpibulsuk et al., 2009a) 35
2.28 กราฟ Ohio ปรับปรุงสำหรับพลังงานการบดอัดเท่ากับ 296.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร (Horpibulsuk et al., 2008a) 35
2.29 กราฟ Ohio ปรับปรุงสำหรับพลังงานการบดอัดเท่ากับ 1346.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร (Horpibulsuk et al., 2008a) 36
2.30 กราฟ Ohio ปรับปรุงสำหรับพลังงานการบดอัดเท่ากับ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร (Horpibulsuk et al., 2008a) 36
2.31 Machanical Liquid Limit Device 51
2.32 แสดงภาพตัดขวางการทดลองหาค่า (Liquid Limit) 51
2.33 Cylindrical Mold,101.6 mm. 63
2.34 Cylindrical Mold,152.5 mm. 63
2.35 เครื่องมือทดลองหาความแน่นในสนาม 82
2.36 Laboratory Loading Machine 101
2.37 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบหาค่า CBR ในห้องปฏิบัติการ 102

2.38 เครื่องมือทดลอง Field CBR (ขณะทำการทดลอง) 114
2.39 รถบดล้อยางทำงานด้วยระบบความดันลม (pneumatic-tired roller) 116
2.40 รถบดสั่นสะเทือน (vibrating roller) 117
2.41 a) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและจำนวนรอบของรถบดอัดที่วิ่งผ่าน (Johnson and Sallberg. 1960) 117
2.41 b) ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งกับจำนวนรอบที่รถบดอัดวิ่งผ่าน (D'Appolonia et al., 1969) 118
2.42 การประมาณความหนาของระดับชั้นของดินสำหรับความหนาแน่นสัมพันธ์ 75% กับจำนวนรอบของรถบดอัดที่วิ่งผ่านเท่ากับ 5 รอบ 119
3.1 แผนผังขั้นตอนการก่อสร้างดินคันทางหรือถนน 122
3.2 การทดสอบความแน่นในสนามด้วยวิธีกรวยทราย 123
3.3 การทดสอบหน่วยแรงกดในสนามในสนาม 123
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200 กับขีดจำกัดเหลวและดัชนี พลาสติก 129
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200 กับหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด 130
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งกับปริมาณน้ำเหมาะสม 130
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200 กับร้อยละการบวมตัว 131
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างซีบีอาร์ในสภาวะแช่น้ำกับความแน่นแห้งสูงสุดของดินคันทางบดอัด 133
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างซีบีอาร์ในสภาวะแช่น้ำกับร้อยละการบวมตัวของดินคันทางบดอัด 133
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างซีบีอาร์ในสภาวะแช่น้ำและขีดจำกัดเหลว 134
4.8 ผลการบดอัดแบบมาตรฐานและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับค่าซีบีอาร์ที่สภาวะต่างๆ ของดินคันทางในห้องปฏิบัติการที่พลังงานต่างกัน 136
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างซีบีอาร์ในสภาวะแช่น้ำและไม่แช่น้ำกับอัตราส่วนหน่วยแรงกดในสภาวะไม่แช่น้ำและปราศจากน้ำหนักกดทับ 137
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงกดและพลังงานการบดอัดของดินคันทางที่สภาวะต่างๆ 138
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงกดและหน่วยน้ำหนักแห้ง 139

4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและการบดอัดสัมพันธ์ในสนามกับจำนวนรอบการบดอัดด้วยรถบด 141
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างซีบีอาร์ในสภาวะแช่น้ำในสนามกับจำนวนเที่ยวรถบดอัด 142

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การบดอัดวัสดุ เป็นเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินทางกล ที่ใช้พลังงานบดอัดไล่อากาศออกจากมวลดิน และ ทำให้ช่องว่างระหว่างเม็ดดินลดลง มวลดินที่ได้รับการบดอัดจะมีหน่วยน้ำหนักแห้ง กำลังต้านทานแรงเฉือน และความต้านทานการเสียรูปสูงขึ้น และมีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำต่ำลง เทคนิคการบดอัดเป็นเทคนิคที่ง่ายและนิยมใช้ในงานก่อสร้าง อันได้แก่ ชั้นพื้นทาง ชั้นรองพื้นทาง และชั้นดินเดิม เพื่อป้องกันการทรุดตัวเป็นคลื่นร่องล้อ รอยแตก และหลุมบ่อ ถึงแม้ว่าจะมีการนำวัสดุนำวัสดุที่มีคุณภาพดีมาใช้เป็นวัสดุคันทางหรือโครงสร้างชั้นทาง แต่หากขบวนการบดอัดไม่ดีและเหมาะสม อายุการใช้งานของถนนก็จะไม่ได้ตามที่ออกแบบ การบดอัดชั้นดินคันทาง หรือดินเดิมที่ไม่เหมาะสมก่อความเสียหายอย่างมากต่อถนน

ในทางปฏิบัติ การบดอัดในสนามจะทำได้ก็ต่อเมื่อทราบผลทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการ ซึ่งได้แก่ ปริมาณน้ำเหมาะสม (Optimum moisture content,OMC) และความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry unit weight , $\gamma_{d,\max}$)การบดอัดในสนามนั้นทำโดยอาศัยรถบดอัด จนได้ความหนาแน่นแห้งที่ใกล้เคียงกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการ หน่วยงานหลักทางด้านงานทาง เช่น กรมทางหลวง กรมทางหลวงชนบท และกรมโยธาธิการและผังเมือง มีข้อกำหนดในการบดอัดดังนี้ ความหนาแน่นแห้งในสนามต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งในสนามสูงสุดที่ได้จากการทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการและปริมาณน้ำในดินต้องมีค่าอยู่ระหว่าง - 3 OMC และ + 3 OMC เครื่องจักรในสนามที่ใช้ในการบดอัดงานทางนั้น ได้แก่ รถบดล้อเหล็ก รถบดล้อยาง และ รถบดสั่นเทือน การบดอัดในสนามจะเป็นลักษณะแบบการนวด (Kneading) ด้วยรถบดอัดและให้พลังงานการบดอัดดินแก่ดินผ่านจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด จำนวนเที่ยววิ่งยิ่งมาก พลังงานการบดอัดที่ให้แก่ดินก็ยิ่งมากตาม แต่อย่างไรก็ตามการบดอัด และควบคุมงานบดอัดในสนาม ไม่มีมาตรฐานควบคุมจำนวนเที่ยววิ่งของรถบด การบดอัดในสนามส่วนใหญ่อาศัยประสบการณ์ของผู้ควบคุมงาน และพนักงานขับรถบดอัด โดยพยายามวิ่งให้ได้จำนวนเที่ยวมากที่สุดเพื่อให้ได้ความหนาแน่นแห้งที่กำหนด ผู้ควบคุมงานจะตรวจสอบความหนาแน่นในสนามหลังจากการบดอัดด้วยวิธีแทนที่ด้วยทราย (Sand Cone Method) หากความหนาแน่นแห้งและปริมาณน้ำในดินไม่ได้ตามข้อกำหนด ต้องทำการบดอัดใหม่ จำนวนเที่ยวของรถบดอัดจึงมีความสำคัญอย่างมากต่อการบดอัดและควบคุมการทำงาน หากจำนวนเที่ยวการบดอัดน้อยเกินไป ความหนาแน่นแห้งของดินบดอัดจะไม่ได้ตามข้อกำหนด แต่หากจำนวนเที่ยวการบด

อัดมากเกินไป ถึงแม้ความหนาแน่นแห้งในสนามจะได้ตามข้อกำหนด แต่ก็เป็นการสิ้นเปลืองในการปฏิบัติงาน ทั้งเวลา ทั้งแรงงาน น้ำมันเชื้อเพลิง และความเสื่อมสภาพของเครื่องจักร

นอกจากปริมาณน้ำและความแน่นแห้งของดินบดอัดแล้ว ตัวแปรทางวิศวกรรมที่ใช้ในการออกแบบดินบดอัดในสนามอีกตัวหนึ่งคือค่า California Bearing Ratio (CBR) ซึ่งบ่งบอกความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของดินบดอัด โดยที่ CBR คืออัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงต้านทานของตัวอย่างดินทดสอบบดอัด (Test Unit Load) ต่อหน่วยน้ำหนักมาตรฐานของวัสดุรองพื้นทางบดอัด (Standard Unit Load) ในระดับความลึกหรือระยะจมของแท่งกด (Penetration Piston) ที่เท่ากัน และแสดงในรูปของร้อยละ แบบก่อสร้างทางจะระบุค่า CBR ที่ต้องการสำหรับชั้นดินถมคันทาง (Subgrade) ชั้นรองพื้นทาง (Subbase) และชั้นพื้นทาง(Base) เมื่อบดอัดดินในสนามจนได้ความแน่นที่ออกแบบแล้ว วิศวกรสนามจะทำการตรวจวัดค่า CBR ของดินบดอัด จากนั้น นำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่า CBR.ของวัสดุเดียวกันที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แต่อย่างไรก็ตาม ด้วยข้อจำกัดทางด้านบุคลากร งบประมาณ และเครื่องมือทดสอบถนนบดอัดหลายเส้นขาดการตรวจวัดค่า CBR.ในสนาม ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR. และความหนาแน่นแห้งของดินบดอัดกับจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัดจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่สำคัญในการควบคุมการบดอัดในสนาม .

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง CBR และผลทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการ สำหรับดินถมคันทางที่มีขนาดคละตามมาตรฐานของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย และสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง/CBR.ในสนามและจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด ข้อมูลผลทดสอบการบดอัดและ CBR.ในห้องปฏิบัติการ รวบรวมจากฝ่ายตรวจสอบและวิคราะห์ทางวิศวกรรม ศูนย์สร้างทางขอนแก่น กรมทางหลวง สำหรับค่า CBR ในสนาม ผู้วิจัยจะทำการวัดโดยทางอ้อม (Indirect mesurment) ซึ่งจะใช้เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นเอง เครื่องมือนี้เป็นเครื่องกดที่ใช้กดหาหน่วยแรงกดในสนามโดยปราศจากน้ำหนักกดทับดินถม และแปลงหน่วยแรงกดเป็นค่า CBR โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดและค่า CBR ที่สร้างขึ้นจากผลทดสอบในห้องปฏิบัติการ การทดสอบในสนามจะดำเนินการในโครงการก่อสร้างทางในความรับผิดชอบของศูนย์สร้างทางขอนแก่น ผลงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ ต่อการควบคุมคุณภาพงานทางและช่วยลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการบดอัด

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อรวบรวมข้อมูลความแน่นแห้งสูงสุด (maximum dry density, $\gamma_{d,\max}$) และปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum water content, OWC) ในห้องปฏิบัติการของงานดินถม

1.2.2 เพื่อรวบรวมค่า CBRจากห้องปฏิบัติการ และค่า CBR ในสนามนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR และค่าความแน่นแห้งสูงสุด ($\gamma_{d,\max}$) ทั้งในห้องปฏิบัติการ และในสนาม

1.2.3 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ ระหว่างความแน่นแห้งและแรงกดในสนาม กับจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด

1.2.4 เพื่อนำเสนอวิธีการบดอัดในสนามที่มีประสิทธิภาพ (ได้ความแน่นตามข้อกำหนดและลดต้นทุนการบดอัด)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ประกอบด้วยสองส่วนหลัก: การเก็บรวบรวมผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการเก็บรวบรวมผลการทดสอบในสนาม วัสดุทดสอบประกอบด้วยวัสดุดินถมคันทาง ผลทดสอบในห้องปฏิบัติการรวบรวมจากฝ่ายตรวจสอบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ศูนย์สร้างทางขอนแก่น กรมทางหลวง ซึ่งประกอบด้วยผลทดสอบการกระจายขนาดของเม็ดดิน ขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit ,L.L.) ขีดจำกัดพลาสติค (Plastic Limit ,PL) และ ดัชนีสภาพพลาสติค (Plasticity Index ,PI) ของดินบดอัด วัสดุดินถมคันทางถูกบดอัดด้วยพลังงานตามมาตรฐาน (Standard Proctor) ผลทดสอบการบดอัดจะนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับ Ohio's compaction curve ผลทดสอบในสนามประกอบด้วยความหนาแน่นแห้งในสนาม ปริมาณความชื้นเหมาะสม ค่าหน่วยแรงกด และจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด ผลทดสอบในสนามจะนำมาซึ่ง ความเข้าใจถึงการพัฒนาความหนาแน่นแห้ง/ค่าหน่วยแรงกดและจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด ข้อมูลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และในสนามจะนำมาวิเคราะห์ ร่วมกันเพื่อนำเสนอขั้นตอนการบดอัดในสนามที่มีประสิทธิภาพ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบความเป็นไปได้ ในการประมาณค่า ความแน่นแห้ง และซีบีอาร์จากร้อยละของเม็ดดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์200และขีดจำกัดเหลว

1.4.2 ทราบความสัมพันธ์ระหว่าง CBR ในห้องปฏิบัติการ และCBR ในสนาม กับความหนา แน่นแห้งสูงสุด ($\gamma_{d,\max}$)ของงานดินคันทาง ที่มีคุณสมบัติตาม ข้อกำหนดของกรมทางหลวง

1.4.3 ทราบลักษณะการพัฒนาความหนาแน่นแห้งและหน่วยแรงกดในสนามตามจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในสมัยก่อนเมื่อการก่อสร้างยังไม่ได้พัฒนามาก การประดิษฐ์เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการบดอัดดินยังมีไม่มาก งานก่อสร้างที่เกี่ยวกับงานดิน เช่น ถนน ทางรถไฟ หลังจากการขุดถมแล้วก็ต้องปล่อยทิ้งไว้ 3 ถึง 5 ปี เพื่อรอให้มีการทรุดตัวแน่นก่อนที่จะมีการวางไม้หมอนรางรถไฟ หรือลงผิวจราจร การบดอัดดินเป็นกระบวนการที่ใช้แรง หรือน้ำหนักจากเครื่องมือกลกระทำให้เม็ดดินเบียดตัวชิดกัน เพิ่มความแน่นและความสามารถในการรับน้ำหนัก ลดการทรุดตัว ลดการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) ของดิน เครื่องมือกลที่ใช้ในการบดอัด เช่น รถบดล้อเหล็ก รถบดล้อยาง รถบดตีนแกะ (Sheep Foot Rollers) รถบดชนิดสั่นกระแทก (Vibrating Roller) เป็นต้น การจะเลือกใช้เครื่องมือชนิดใดขึ้นอยู่กับประเภทของดิน หรือวัสดุที่จะบดอัด

การบดอัดวัสดุในสนาม เป็นการเคลื่อนน้ำหนักไปบนดินที่ต้องการบดอัดเป็นจำนวนหลาย ๆ เที่ยว การบดอัดด้วยการเคลื่อนน้ำหนักไปบนดินจะทำให้ดินมีความแน่นเพิ่มขึ้นตามจำนวนเที่ยวที่รถบดผ่าน การคิดพลังงานในการบดอัดในภาคสนามจึงค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากจะต้องทราบแรงที่ทำให้น้ำหนักรถบดอัดเคลื่อนไป องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อผลที่ได้จากการบดอัดดินในสนามนอกเหนือจากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว มีดังนี้

2.1.1. อิทธิพลของวิธีการเตรียมวัสดุ

วิธีการกระทำต่อวัสดุก่อนบดอัดนั้น คือ การขุด ขนส่ง การปู หรือการตีแผ่ดินในหน้างาน การผสมดินกับน้ำ หรือทำให้ดินแห้งก่อนการบดอัดนั้น จะมีอิทธิพลต่อความแน่นในสนาม การผสมดินกับน้ำให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันเป็นสิ่งสำคัญและมักจะทำได้ไม่ดี ต้องเสียค่าใช้จ่ายและมักทำได้ยาก โดยเฉพาะในดินเหนียว การผสมน้ำในดินไม่ทั่วถึงจะทำให้ความแน่นแห้งลดลงได้

การคลุกเคล้าของดินกับน้ำนั้นควรเริ่มระหว่างการขุด ในกรณีที่ทราบว่าดินค่อนข้างแห้งเพื่อให้ดินสามารถดูดซึมน้ำก่อนที่จะนำไปตีแผ่บนถนน การทำ Stock Pile เป็นวิธีการเตรียมดินที่ดีเนื่องจากจะทำให้ดินที่ขุดเกิดการคลุกเคล้ากันได้ดียิ่งขึ้น และหากวัสดุที่จะนำมาใช้ยังไม่เข้ากันดีหรือต้องการผสมน้ำก่อนนำไปลงหน้างาน เราอาจทำการคลุกเคล้าดินในระหว่างการทำ Stock Pile หลาย ๆ ครั้ง ได้ อย่างไรก็ดีการตีแผ่และคลุกเคล้ากันที่หน้างาน เป็นสิ่งจำเป็นและจะต้องกระทำให้ดีที่สุด เพื่อให้เม็ดดินคลุกเคล้าเข้าเป็นเนื้อเดียวกันและเพื่อให้ได้ความแน่นสม่ำเสมอ

2.1.2. อิทธิพลของความสม่ำเสมอของการทำงาน

ขั้นตอนการทำงานที่ไม่สม่ำเสมอ มักจะเป็นสิ่งที่ทำให้ความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงจาก

แปลงหนึ่ง ไปอีกแปลงหนึ่งได้ ในธรรมชาติจะหาดินที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ได้ยากจึงมีความจำเป็นที่จะต้องให้มีขั้นตอนในการทำงานที่สม่ำเสมอเพื่อให้ดินทุกแปลงเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ในขณะตีแผ่และคลุกเคล้าในสนาม ความหนาที่ปูมักจะไม่สม่ำเสมออันจะทำให้ความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงไป รูปแบบของขบวนการบดอัดโดยรถบด จะเป็นสาเหตุที่ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของความแน่นของดินที่ถูกบดอัดได้

2.1.3. อิทธิพลของสิ่งแวดล้อม

สภาพแวดล้อมระหว่างการทำงาน เช่น การเปลี่ยนจากดินที่แห้งไปเปียก หรือจากเปียกไปแห้ง จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของดินที่ถูกบดอัด อันจะเป็นผลทำให้ความแน่นของดินนั้นไม่สม่ำเสมอในขณะบดอัดได้

2.1.4. อิทธิพลของชนิดของรถบดอัด

มีอยู่ด้วยกันหลายชนิดและบางครั้งอาจไม่สามารถจำแนกชนิดของรถบดที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันได้อย่างชัดเจน นั่นคือ รถบดนั้นอาจเป็นทั้งรถบดล้อเหล็ก หรือรถบดตีนแกะ พร้อมทั้งมีความสั่นสะเทือนอยู่ในตัวได้ เราอาจแบ่งชนิดของรถบดได้ดังนี้

- รถบดล้อเหล็ก (ล้อเรียบ)
- รถบดล้อยาง
- รถบดตีนแกะ
- รถบดประเภท Grid
- รถบดสั่นสะเทือน

หลักการบดอัดด้วยรถบดสั่นสะเทือนค่อนข้างยุ่งยาก และเข้าใจได้ยากกว่ารถบดชนิดอื่น อาจกล่าวกว้าง ๆ ได้ว่ารถบดสั่นสะเทือนใช้กับดินประเภทที่เป็นดินทราย การเขย่าทำให้ดินทรายขยับตัวได้ดี ทั้งนี้เพราะดินทรายไม่มีแรงเกาะยึดระหว่างเม็ดดิน ส่วนรถบดตีนแกะจะใช้ในดินเหนียว รถบดตีนแกะจะตีดินที่เกาะตัวกันเป็นก้อนให้แตกเป็นก้อนเล็กลง ทำให้ช่องว่างระหว่างก้อนดินลดลงเป็นลำดับ ทำให้ความแน่นเพิ่มขึ้น

ในปัจจุบันยังไม่มีรถบดชนิดใดที่มีความสามารถบดอัดดินทุกประเภทให้ดีเท่า ๆ กัน ดังนั้น จึงจำเป็นต้องใช้รถบดหลายชนิดในการก่อสร้างทาง ประสิทธิภาพและการประหยัดในการเลือกใช้รถบดจึงขึ้นอยู่กับดินที่ต้องการบดอัด

เราอาจเพิ่มประสิทธิภาพหรือเพิ่มพลังงานของแต่ละเที่ยวของรถบดได้ ในรถบดบางชนิด เช่น การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของรถบดล้อเหล็ก ความกว้างของล้อรถบด ความดันลมในล้อรถบดล้อยาง และความถี่ในการสั่นสะเทือนของรถบดสั่นสะเทือน เป็นต้น

พลังงานที่ใช้ต่อหน่วยปริมาตรของดินที่ถูกบดอัดนั้น จะขึ้นอยู่กับจำนวนเที่ยวที่บดทับ ในปัจจุบันการใช้รถบดที่เหมาะสมจะทำให้ความหนาแน่นแห้งของดินสูงเท่าที่เรากำหนด โดยทั่วไปใช้การบดประมาณ 8 – 16 เที่ยว ถ้าประสิทธิภาพของการบดอัดต่ำ ซึ่งทำให้ไม่สามารถทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงขึ้นได้ในการบดอัด 4 – 8 เที่ยวแล้ว ควรต้องพิจารณาเปลี่ยนรถบดหรือเปลี่ยนสภาพของดิน (เช่น ดินเปียกไป)

2.1.5. อิทธิพลของชั้นดินที่อยู่ใต้ชั้นที่ต้องการบดอัด

พื้นล่างของชั้นดินที่ต้องการบดอัดมีอิทธิพลต่อความแน่นของชั้นที่ต้องการบดอัด เช่นเดียวกับการบดอัดดินในห้องทดลอง ซึ่งต้องการพื้นหรือฐานที่มั่นคง ในกรณีที่ดินชั้นล่างแน่น การบดอัดดินชั้นบนที่หลวมจะทำให้ดินแน่นได้ เนื่องจากการถ่ายน้ำหนักของรถกระทำได้เต็มที่ อย่างไรก็ดี ในกรณีที่ชั้นดินบางมากเกินไป อาจทำให้ชั้นที่ต้องการบดอัดไม่ได้ความแน่นตามต้องการได้ เพราะแรงสั่นสะเทือนของรถบดทำให้ดินที่แน่นกลับหลวมตัวได้

2.1.6. อิทธิพลของความหนาของชั้นที่ต้องการบดอัด

โดยปกติความหนาแน่นแห้ง จะลดลงเมื่อเพิ่มความหนาของชั้นที่ต้องการบดอัดมากขึ้น ยกตัวอย่าง เช่น มีการทดลองในสนามพบว่า ความหนาแน่นแห้งลดลง 0.96-0.128 กรัม/มิลลิเมตร เมื่อความหนาเพิ่มจาก 150 มม. เป็น 300 มม. การเพิ่มความหนาของชั้นดินที่ต้องการบดอัดจะทำให้ความแน่นของชั้นดินตามความลึกมีความสม่ำเสมอน้อยลง นั่นคือ ดินที่อยู่ล่าง ๆ จะแน่นน้อยกว่าที่อยู่ใกล้ผิวหน้าเพราะการกระจายน้ำหนักของรถบดถูกทอนลงด้วยความแน่นและความหนาของดินที่อยู่ชั้นบน ในขณะที่ดินถูกปูและบดอัดชั้นดินที่อยู่ใต้ล่างจะถูกบดอัดด้วย การทดลองในสนามพบว่า ชั้นดินที่หนา 150 มม. ถึง 300 มม. การปูและบดอัดดินที่อยู่ด้านบน 2-6 ชั้น จะทำให้ความแน่นของชั้นแรกเพิ่มขึ้นได้ อย่างไรก็ดีเรามักจะไม่พิจารณาการเพิ่มของความแน่นในส่วนนี้ ในการควบคุมงาน เนื่องจากพลังงานที่ถ่ายลงในชั้นล่างเนื่องจากรถบดนั้นมีไม่มาก

2.1.7. อิทธิพลของอัตราความเร็วในการบดอัด

ดิน เป็นวัสดุที่อ่อนไหวต่ออัตราความเครียดที่กระทำ โดยเฉพาะในดินเหนียว อย่างไรก็ดี อัตราความเร็วในการบดอัดจะถูกควบคุมโดยความเร็วของรถบด ในรถบดสั่นสะเทือนการลดความเร็วของรถบดจะทำให้การบดอัดดีขึ้น ทั้งนี้เพราะจำนวนครั้งที่ตบ หรือกระแทกดินที่จุดเดิมจะเพิ่มขึ้น

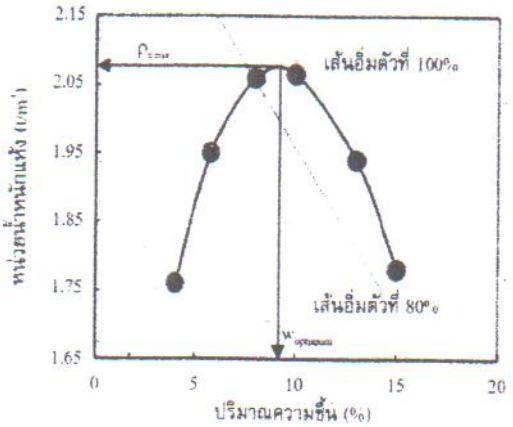
การบดอัดวัสดุ มีหลายองค์ประกอบที่เกี่ยวพันกัน ฉะนั้นในการกำหนดความหนาแน่นแห้งของดินในสนามเป็นร้อยละของความแน่นแห้งของการบดอัดในห้องทดลอง ซึ่งเป็นข้อกำหนดควบคุมเฉพาะผลเมื่อทำเสร็จแล้ว (End result Specification) เพียงอย่างเดียวแล้ว มิใช่จะได้คุณภาพ

ที่ดีเสมอไป จะต้องมีการกำหนดควบคุมวิธีการทำงาน (Methods Specification) ด้วย เพราะองค์ประกอบการบดอัดดินในสนามเกี่ยวพันถึงวิธีการทำงานด้วย

การบดอัดดินไม่ควรคำนึงถึง Percent Compaction เพียงอย่างเดียว บางทีการบดอัดมากเกินไป (Over compaction) จนเกิน 100 % จะทำให้รูปร่างของเม็ดดิน และโครงสร้างของเม็ดดินเปลี่ยนไป ทำให้คุณสมบัติด้านวิศวกรรมแปรเปลี่ยนไปได้เช่นกัน

2.2 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Proctor (1930)

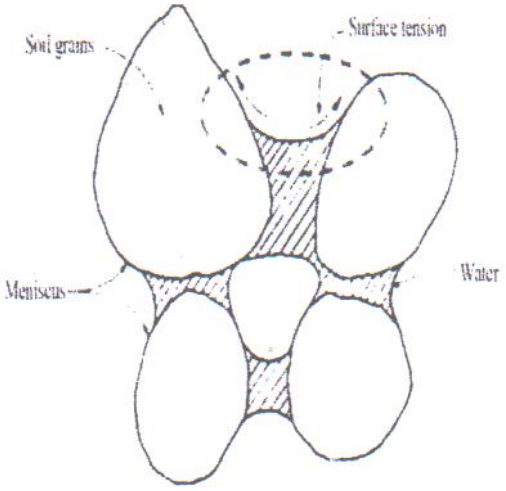
ทฤษฎีพื้นฐานการบดอัดดินสำหรับดินที่มีความเชื่อมแน่นได้ถูกสร้างความสัมพันธ์ขึ้นโดย R.R.Proctor (1930) โดยเริ่มต้นเมื่อมีการสร้างเขื่อนเพื่อกักเก็บน้ำใน Los Angeles และเขาได้พัฒนาหลักการบดอัดดินโดยตีพิมพ์ในหนังสือ Engineering New-Record (proctor, 1933) แล้วนำวิธีการทดสอบนี้ไปใช้ในห้องปฏิบัติการโดยเรียกวิธีการดังกล่าวว่า Proctor Test รูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะทั่วไปของเส้น การบดอัดดิน

Proctor ได้กล่าวถึงกลไกของการเกิดเส้นการบดอัดดังแสดงในรูปที่ 2.1 ไว้ว่าประสิทธิภาพของการบดอัดดินถูกกำหนดโดยแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดิน โดยแบ่งการบดอัดดินเป็น 2 ด้าน คือ ด้านแห้งและด้านเปียก สำหรับการบดอัดดินที่แห้งมากๆ ดินจะมีแรงเสียดทานที่สูงมาก เนื่องจากแรงดึงผิวที่เกิดจากความชื้นคาพิลลารี่ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เป็นผลให้การบดอัดดินทำได้ยาก แต่เมื่อเติมน้ำเข้าไปในดินที่แห้งมากๆ น้ำจะปลดแรงคาพิลลารี่ และเป็นผลให้แรงเสียดทานลดลงไปด้วย ถ้าเติมน้ำเข้าไปอีกเรื่อยๆ จนน้ำไปสลายแรงเสียดทานได้แล้ว น้ำก็จะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นทำให้เม็ดดินเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ จนถึงปริมาณน้ำที่เต็มช่องว่างในช่วงหนึ่งก็จะทำให้ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงสุด โดยเรียกจุดที่ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงสุดว่า maximum dry

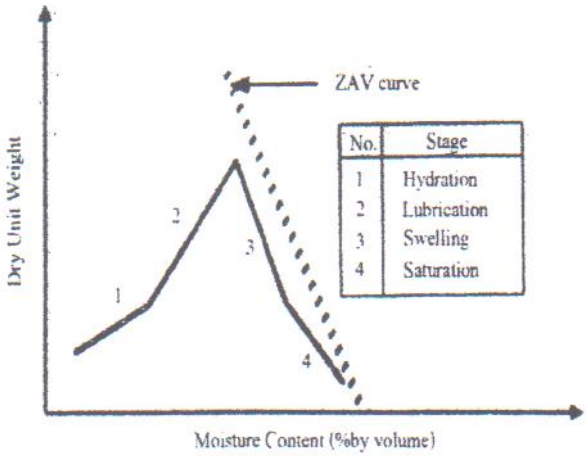
density และเรียกปริมาณความชื้นที่จุดนี้เรียกว่า optimum moisture content หลังจากจุดนี้ เมื่อเติมน้ำเข้าไปอีกจะทำให้ความหนาแน่นแห้งลดลง ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเข้าไปแทนที่เนื้อดิน ทำให้เนื้อดินที่มีในปริมาตรที่เท่ากันลดลง อีกทั้งเกิดจากความถ่วงจำเพาะของน้ำน้อยกว่าดิน ในขณะที่ความหนาแน่นเปียกมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อความชื้นในดินสูงมากๆ พบว่า ดินจะอยู่ในสภาพอ่อนตัว ซึ่งไม่อยู่ในสภาพที่สามารถรับน้ำหนักตัวได้อีกต่อไป



รูปที่ 2.2 ผลของแรงดึงผิวที่ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวปรากฏในดินเม็ดหยาบ

2.3 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Hogentogler (1936)

Hogentogler นำเสนอเส้นกราฟการบดอัดที่แตกต่างกันกับ Proctor กล่าวคือ เขาได้นำเสนอเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นในรูปของปริมาณน้ำต่อปริมาณรวม โดยลักษณะของเส้นกราฟแสดงด้วยเส้นตรง 4 เส้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งสาเหตุที่เขาได้นำเสนอการพล็อตเส้นกราฟแบบนี้เนื่องจากเขาพบว่าน้ำมีบทบาทอยู่ 4 ส่วน ได้แบ่งเป็น 4 ช่วง ซึ่งมีผลทำให้ดินเกิดความหนาแน่นแห้งสูงสุด และทำให้โครงสร้างของดินบดอัดมีความแตกต่างกันโดยมีรายละเอียดแต่ละช่วง



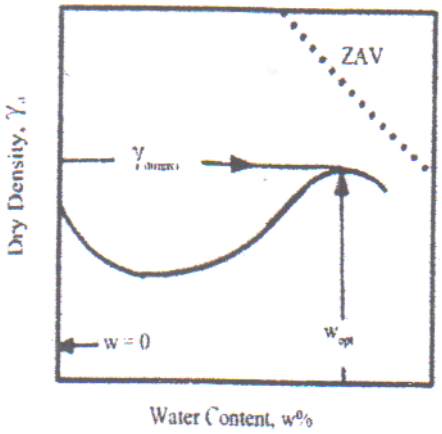
รูปที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นนำเสนอโดย Hogentogler

1. Hydration Stage เขากล่าวว่า ในช่วงนี้น้ำจะถูกดูดซึมโดยอนุภาคของดินในลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ ห่อหุ้มอนุภาคดิน ในลักษณะเดียวกับเมื่อพรมน้ำลงไปในดินแห้ง ในช่วงแรกอนุภาคดินจะดูดซึมน้ำทันที เพื่อไปหหุ้มอนุภาคดินก่อน โดยน้ำส่วนกลางที่จะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นนั้นยังไม่มี
2. Lubrication Stage ในช่วงนี้น้ำจะมีบทบาทเป็นสารหล่อลื่น เป็นผลให้ดินเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ในลักษณะที่มวลดินมีความแน่นขึ้น โดยยังคงมีอากาศอยู่ในมวลดินบางส่วน นั่นหมายถึง ความหนาแน่นแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเมื่อถึงจุดปริมาณน้ำที่เหมาะสม จะทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งมีค่าสูงสุด
3. Swelling Stage ในช่วงนี้เกิดจากการเติมน้ำที่เกินปริมาณน้ำที่เหมาะสม อากาศในส่วนที่มีอยู่จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากปริมาตรของมวลดินมีค่าน้อยอยู่แล้ว และอยู่ในสภาพที่แน่น ซึ่งจะไม่ให้อากาศที่มีอยู่ออกไป ดังนั้นเมื่อเติมน้ำเข้าไปอีก มวลดินจึงเกิดการบวมตัวในขณะที่ปริมาตรอากาศคงที่อากาศที่มีอยู่ออกไป ดังนั้นเมื่อเติมน้ำเข้าไปอีก มวลดินจึงเกิดการบวมตัวในขณะที่ปริมาตรอากาศคงที่
4. Saturation Stage ในช่วงนี้ เมื่อเติมน้ำเข้าไปอีก น้ำจะเข้าไปแทนที่อากาศในช่องว่างที่เหลืออยู่ในมวลดิน เป็นผลให้ระดับความอิ่มตัวเพิ่มมากขึ้น และมีแนวโน้มเข้าใกล้เส้นอากาศเป็นศูนย์

ดังที่ Hogentogler ได้อธิบายไว้ข้างต้น มักจะประยุกต์ใช้โดยตรงกับดินเหนียวเป็นส่วนใหญ่เช่นเดียวกับ Proctor

2.4 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Bachanan (1942)

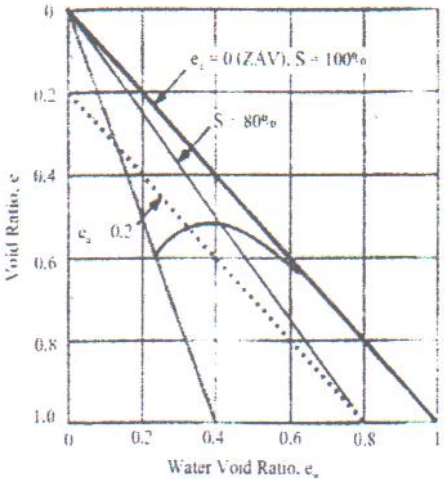
เขาได้อธิบายเส้นกราฟการบดอัดดินของดินเม็ดหยาบ โดยเขาพบว่า นอกจากจุดที่มีความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ปรากฏบนเส้นกราฟการบดอัดแล้ว ก่อนถึงด้านแห้งของการบดอัดจะมีจุดที่แสดงถึงค่าความหนาแน่นแห้งต่ำสุดดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งเขาได้อธิบายถึงช่วงที่ดินมีความหนาแน่นแห้งลดลงจนถึงจุดที่มีความหนาแน่นแห้งต่ำสุดว่า ถ้าหากเริ่มบดอัดดินเม็ดหยาบที่แห้งมากๆ หรือดินที่มีปริมาณความชื้นเท่ากับศูนย์ เมื่อเติมน้ำเข้าไปในช่วงแรกจะทำให้ความหนาแน่นแห้งลดลงจนถึงจุดความหนาแน่นแห้งต่ำสุด เมื่อเลยจุดนี้ไปก็จะเข้าสู่เส้นกราฟการบดอัดปกติ ซึ่งถ้าสังเกตจากเส้นกราฟพบว่า เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นแห้งที่จุดปริมาณความชื้นเท่ากับศูนย์กับจุดที่มีความหนาแน่นแห้งสูงสุด จะมีช่วงความแตกต่างกันค่อนข้างน้อย และเขาได้กล่าวในเชิงวิชาการไว้ว่า สำหรับกรณีของทรายที่มีความแห้งมากๆ เมื่อเติมน้ำในช่วงแรก อนุภาคดินจะจับตัวกันด้วยแผ่นฟิล์มบางๆ ของน้ำในลักษณะคล้ายกระจุกของก้อนดินหรือทรายรอบตัวเองที่เรียกว่า Arching Effect ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดช่องว่างในมวลดินมากขึ้น โดย Arching Effect จะพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดที่ความหนาแน่นแห้งต่ำสุด ดังนั้นปฏิกิริยาของน้ำที่เติมในช่วงแรกๆ จะแตกต่างกันจากกรณีของ Hogentrogler และ Proctor เนื่องจากดินทรายไม่มีประจุลบ ดังนั้นเมื่อเติมน้ำจะเกิดแรงตึงผิวทำให้เกิดแรงยึดแน่นปรากฏ และเมื่อเติมน้ำมากขึ้นแผ่นฟิล์มจะมีความหนาแน่นขึ้น มีผลทำให้ Arching Effect ลดน้อยลงไป เป็นผลทำให้แรงดึงดูดของแรงตึงผิวลดลงตามลำดับ แล้วอนุภาคดินก็เริ่มจัดเรียงตัวกันใหม่ และหลังจากนั้นก็จะเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไปแล้วแต่เขาได้ให้ความหมายของ OMC แตกต่างจากคนอื่น กล่าวคือ OMC คือ น้ำที่มีอยู่พอดีในมวลดินบดอัดที่ทำให้ดินอยู่บนสภาพที่ไปสลายแรงดึงผิวพอดี ที่เรียกว่า neutralizes surface tension และเมื่อมีพลังงานบดอัดมากระทำ จึงทำให้ทรายอัดเรียงตัวกันใหม่ ทำให้ทรายแน่นขึ้น จนสุดท้ายถึงจุดที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด เมื่อน้ำสูงขึ้นเกิน OMC ดินก็จะอ่อนตัวลง เป็นผลให้ความหนาแน่นแห้งลดลง โดยสรุปแล้ว ในการบดอัดดินทราย การที่จะให้ได้ความหนาแน่นแห้งค่อนข้างดี คือ ช่วงที่ทรายแห้งมากๆ และช่วงความชื้นที่ค่อนไปทางด้านเปียกไปแล้ว



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและ
ปริมาณความชื้นนำเสนอโดย Buchanan

2.5 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Hilf (1956)

เขาได้นำเสนอแนวความคิดใหม่ โดยวางอยู่บนพื้นฐานของแรงดันน้ำในช่องว่าง และแรงดันอากาศในช่องว่าง ที่มีอยู่ในมวลดินที่บดอัด เขากล่าวไว้ว่า ดินแห้งที่บดอัดได้ยากเนื่องจากมวลดินมีแรงเสียดทานมาก ซึ่งเกิดจากแรงคาพิวลารี่ อย่างไรก็ตาม ในช่วงที่ดินมีความแห้งมากๆ มวลดินจะมีช่องว่างอยู่มาก การบดอัดจึงไปไล่อากาศให้ออกไปได้อย่างรวดเร็ว เมื่อเติมน้ำเพิ่มขึ้น แรงดึงผิวก็จะลดลง ทำให้แรงเสียดทานลดลงด้วย โดยความหนาแน่นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปจนกระทั่งถึงปริมาณน้ำที่เหมาะสม (OMC) ก็จะได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด เขากล่าวว่า ประสิทธิภาพที่น้อยลงไปจากการบดอัดเมื่อเติมน้ำเลยจุด OMC เนื่องจากอากาศถูกกักเอาไว้และเกิดการสะสมกันเป็นแรงดันอากาศในมวลดิน เขาได้เสนอเส้นกราฟการบดอัดโดยการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่าง (void ratio; e) และอัตราส่วนน้ำในช่องว่าง (water void ratio; e_w) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงผลของการบดอัดดินนำเสนอโดย Hilf

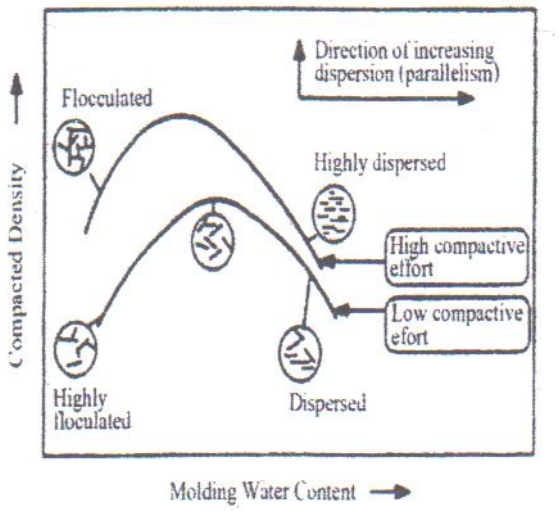
โดยพบว่าที่จุด OMC ค่าอัตราส่วนช่องว่างจะมีค่าน้อยที่สุด โดยจุดเริ่มต้นของเส้นกราฟเป็นจุดที่ค่าอัตราส่วนช่องว่างมาก และมีค่าระดับความอิ่มตัวน้อย เมื่อบดอัดไปก็จะได้ค่าอัตราส่วนช่องว่างที่น้อยที่สุด ซึ่งจุดนี้สามารถจะหาค่าสัดส่วนของอากาศได้ด้วย และพบว่าที่ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ค่าระดับความอิ่มจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 80 วิธีของ Hilf ทำให้ง่ายต่อการหาค่าระดับความอิ่มตัวที่จุดต่างๆ บนเส้นกราฟการบดอัด และสามารถหาปริมาณอากาศที่ความชื้นต่างๆ ได้ด้วย

2.6 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Lambe (1985)

เขาได้เริ่มนำผลจากการดูโครงสร้างภายในดินเปรียบเทียบกับความหนาแน่นแห้งของดินที่บดอัด โดยเขาสนใจว่าคุณสมบัติของดินที่บดอัดทางด้านเปียกและทางด้านแห้งมีความแตกต่างกันเกิดจากสาเหตุใด เขาสังเกตจากปัจจัยหลายๆ อย่างพบว่า ในความเป็นจริงแล้ว การบดอัดในสนามไม่สามารถบดอัดดินให้ได้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด ดังนั้นในการเติมน้ำจะมีช่วงหนึ่งที่เมื่อเติมน้ำเข้าไปในช่วงนี้แล้วคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมเป็นไปตามที่ต้องการ แต่เมื่อเติมน้ำเกินช่วงนี้ไปเป็นช่วงที่เขาไม่แนะนำ ซึ่งเขาให้เหตุผลจากการพิจารณาดูโครงสร้างภายในของดินเหนียวพบว่าในช่วงการบดอัดดินทางด้านแห้ง ลักษณะโครงสร้างของดินจับตัวกันเป็นกระจุก โดยเมื่อพิจารณาที่ความชื้นเดียวกัน การใช้พลังงานบดอัดต่ำ ความเป็นกระจุกของดินมีมาก และจะน้อยลงเมื่อใช้พลังงานการบดอัดที่สูง เป็นผลให้โครงสร้างของดินชิดกันมากขึ้นด้วย เมื่อเติมน้ำเข้าไปโดยที่พลังงานคงที่ สังเกตเห็นว่าโครงสร้างของดินแน่นขึ้น อัตราส่วนของช่องว่างลดลงจนกระทั่งเกินจุด OMC ลักษณะของการจัดเรียงตัวของโครงสร้างดินจะเป็นแบบขนานกันมากขึ้น เมื่อความชื้นยิ่ง

มากขึ้น ความเป็นระเบียบของโครงสร้างดินก็ยิ่งมากขึ้นตาม การที่โครงสร้างดินจัดเรียงตัวกันในแนวขนานถือว่าไม่ดี เพราะว่าเป็นระนาบที่อ่อนแอที่สุด โดยสรุปแล้วเขาพยายามตอบคำถามว่าทำไมจุดที่มีความหนาแน่นแห้งเท่ากันแต่มีปริมาณน้ำไม่เท่ากัน เมื่อเขาใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องดูพบว่า การบดอัดดินในด้านแห้งมีผลทำให้โครงสร้างดินเป็นแบบระเกะระกะ ในทางตรงกันข้ามเมื่อเติมน้ำเกินจุด OMC เป็นการบดอัดทางด้านเปียก มีผลทำให้โครงสร้างดินเป็นแบบขนาน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เมื่อพิจารณาที่ความหนาแน่นแห้งเท่ากัน โดยเปรียบเทียบดินบดอัดทางด้านแห้งกับดินบดอัดทางด้านเปียกพบว่า

- กำลังของดินสูงกว่า เนื่องจากความเครียดของดินต่ำ
- ค่าความซึมได้ของน้ำสูงกว่า เนื่องจากในมวลดินมีช่องว่างมากกว่า
- มีการหดตัวน้อยกว่า เนื่องจากปริมาณน้ำในมวลดินมีน้อยกว่า
- มีค่าการบวมตัวมากกว่า เนื่องจากมีช่องว่างที่น้ำสามารถสัมผัสกับพื้นผิวได้มากกว่า



รูปที่ 2.6 ผลกระทบของการบดอัดดินที่มีต่อโครงสร้างดิน

2.7 เส้นโค้งการบดอัดดิน (Compaction Curve)

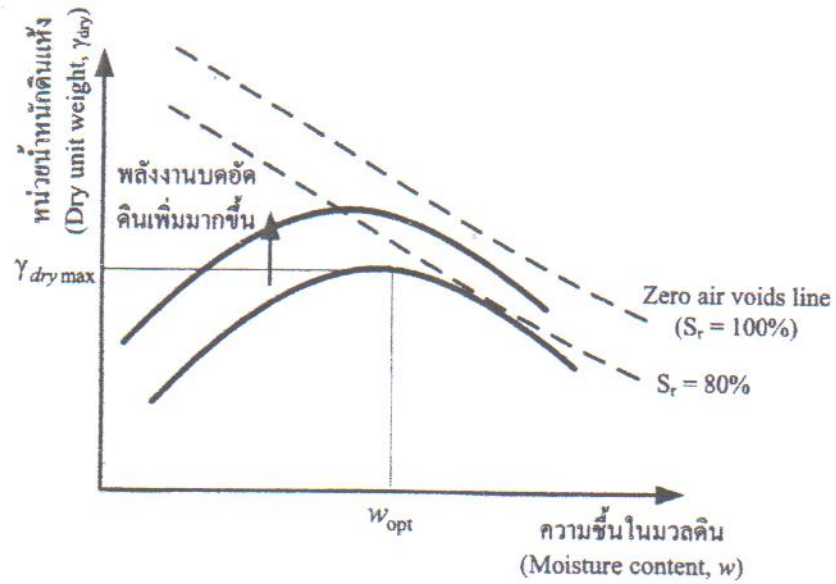
ทฤษฎีพื้นฐานที่นำมาใช้ในงานบดอัดดิน คือ สมการความสัมพันธ์ของหน่วยน้ำหนักดินแห้งกับระดับขั้นความอิ่มตัวด้วยน้ำ

$$\gamma_{dry} = \left(\frac{G_s}{1+e}\right)\gamma_w = \left(\frac{G_s}{1+wG_s/S_r}\right)\gamma_w \qquad \text{..... (2.1)}$$

การบดอัดดินให้แน่นที่สุดในทางทฤษฎีคือ การพยายามทำให้หน่วยน้ำหนักดินแห้งมากที่สุด ($\gamma_{dry\ max}$) ถ้าพิจารณาจากสมการที่ 2.1 การที่ดินจะมีหน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุดนั้น ดินจะต้องมีอัตราส่วนช่องว่างต่ำที่สุด (e_{min}) และจากความสัมพันธ์ที่ว่า $e = wG_s / S_r$ การจะควบคุมให้ e_{min} นั้นจะต้องให้ดินมีค่า $S_r = 1$ และ $w = w_{opt}$ (Optimum Water Content) กล่าวคือ

1. $S_r = 1$ หมายถึง ดินจะต้องอยู่ในสภาพิ่มตัวด้วยน้ำ
2. w_{opt} หมายถึง ปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ไม่แห้งจนเกินไป (เพราะถ้าแห้งไปดินจะไม่อยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ) และไม่มากจนเกินไป (เพราะจะทำให้อัตราส่วนช่องว่างมากขึ้น)

ถ้านำความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในมวลดิน (แกนนอน) มาเขียนกับหน่วยน้ำหนักดินแห้ง (แกนตั้ง) ของการบดอัดดิน ซึ่งเรียกว่า เส้นโค้งการบดอัดดิน (Compaction Curve) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เส้นโค้งการบดอัดดิน (Compaction Curve)

จากเส้นโค้งการบดอัดดิน (Compaction Curve) ดังรูปที่ 2.7 พบว่า หน่วยน้ำหนักดินแห้งในตอนแรกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำในมวลดินมากขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่ทำให้หน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุด (maximum dry unit weight, ($\gamma_{dry\ max}$) และเรียกปริมาณน้ำ ณ จุดนี้ว่า ปริมาณน้ำเหมาะสม (Optimum Water Content, w_{opt}) และเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นมากกว่าจุดนี้จะทำให้หน่วยน้ำหนักดินแห้งลดลง

ในทางปฏิบัติแล้ว การที่จะบดอัดดินให้อยู่ในสภาพทางทฤษฎีนั้นเป็นไปได้ยาก เพราะว่าการบดอัดดินนอกจากจะขึ้นกับปริมาณน้ำแล้ว ยังขึ้นกับระดับพลังงานกลที่กระทำกับดินที่บดอัดอีกด้วย โดยพลังงานที่ให้กับดินขณะทำการบดอัดจะต้องมีค่าสูงเพียงพอที่จะขับไล่ฟองอากาศให้ออกจากมวลดิน จนทำให้ดินอยู่เข้าใกล้ภาวะไร้ช่องว่าอากาศ จากรูปที่ 2.7 เมื่อเพิ่มพลังงานการบดอัดดิน จะพบว่าเส้นโค้งการบดอัดดินจะเคลื่อนตัวมาทิศทางบนซ้าย โดยหน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุด จะมีค่ามากขึ้น แต่ปริมาณน้ำที่เหมาะสม w_{opt} จะมีค่าลดลง แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นเส้นโค้งการบดอัดดินจะถูกควบคุมด้วยเส้นไร้ช่องว่างอากาศ เส้นโค้งการบดอัดดินจะไม่ตัดเส้นไร้ช่องว่างอากาศ (Zero air voids line) สมการเส้นไร้ช่องว่างอากาศจะหาได้จากสมการที่ 2.1 และแทนค่า $S_r = 1$ นั่นคือ

Zero air voids line : $$\gamma_{dry} = \left(\frac{G_s}{1+wG_s}\right)\gamma_w \quad \text{..... (2.2)}$$

2.7.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการบดอัดดิน

ดังได้อธิบายไว้แล้วข้างต้นว่า ปริมาณความชื้นในดินมีอิทธิพลอย่างมากต่อความหนาแน่นของดินบดอัดนอกเหนือจากปริมาณความชื้นแล้ว ยังมีปัจจัยอีกสองปัจจัย ซึ่งก็คือ ชนิดของดิน และพลังงานในการบดดิน

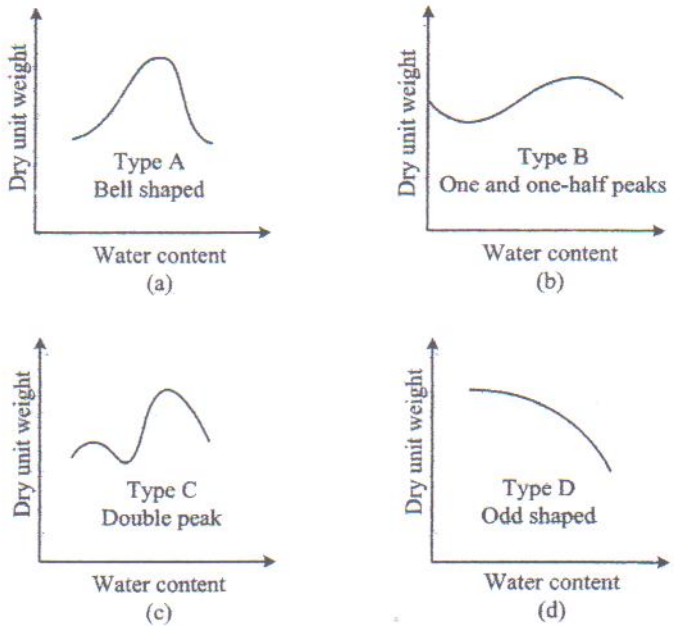
2.7.2 ชนิดของดิน

ชนิดของดินในที่นี้ครอบคลุมถึง การกระจายของเม็ดดิน รูปร่างของเม็ดดิน ความถ่วงจำเพาะของดินและปริมาณและชนิดของแร่ดินเหนียว

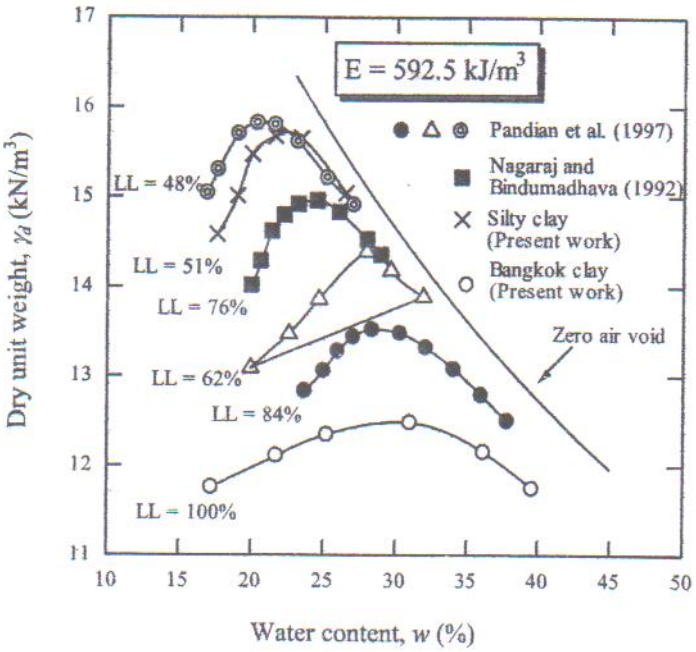
Lee and Suekamp (1972) ศึกษากราฟการบดอัดดินของดินที่แตกต่างกัน 35 ชนิด และพบว่า กราฟเหล่านั้นสามรถจำแนกออกได้เป็น 4 ชนิดหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ชนิด A เป็นกราฟที่มีจุดยอดเพียงจุดเดียว โดยทั่วไปมักพบในดินที่มีขีดจำกัดเหลวประมาณร้อยละ 30-70 ชนิด B คือกราฟที่มี 1 จุดยอด และครึ่งจุดยอด ชนิด C คือกราฟที่มีสองจุดยอด กราฟชนิด B และ C มักพบในดินที่มีขีดจำกัดเหลวน้อยกว่าร้อยละ 30 ชนิด D คือกราฟที่ไม่แสดงจุดยอดที่ชัดเจน ดินที่มีขีดจำกัดเหลวมากกว่าร้อยละ 70 อาจแสดงลักษณะกราฟเป็นแบบชนิด C หรือ D ซึ่งเป็นลักษณะกราฟที่ไม่ค่อยพบเห็น

สำหรับการบดอัดดินเหนียว Horpibulsuk (2005) แสดงให้เห็นว่า เส้นกราฟการบดอัดแปรผันอย่างมากกับขีดจำกัดเหลว ขีดจำกัดเหลวยิ่งมาก หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดยิ่งมีค่าน้อยลง ในขณะที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมยิ่งมีค่ามากขึ้น ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 2.9 ซึ่งแสดงผลทดสอบการบดอัดของดินชนิดต่างๆ ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (modified proctor test) การที่ขีดจำกัด

เหลวมีอิทธิพลต่อเส้นกราฟการอัดตัวคายน้ำ เนื่องจากขีดจำกัดเหลวเป็นพารามิเตอร์ที่สะท้อนผลของแร่ดินเหนียวและของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน



รูปที่ 2.8 เส้นโค้งการบดอัดดินของดินชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.9 กราฟการบดอัดดินของดินเหนียวชนิดต่างๆ ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Horpibulsuk et al., 2005)

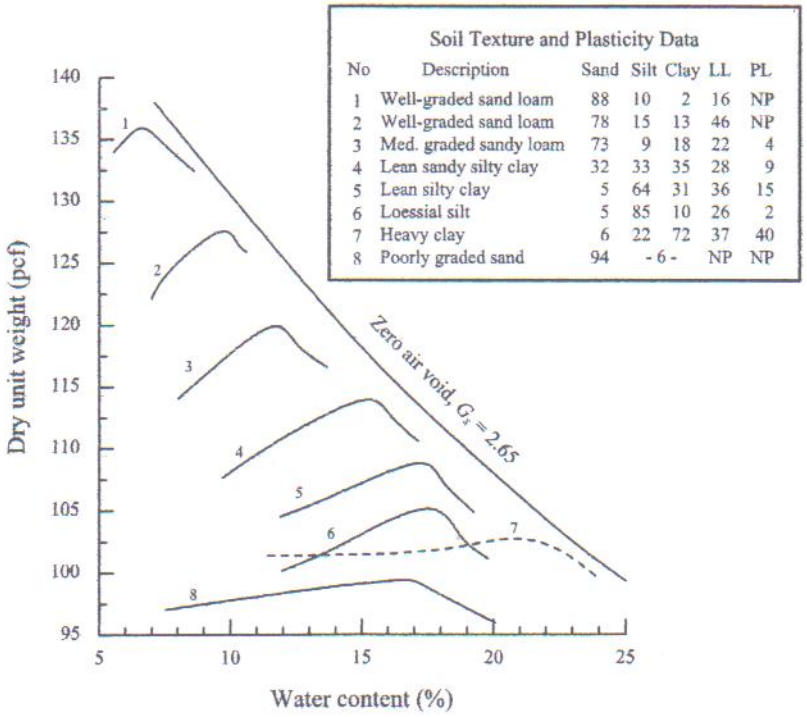
Gurtug and Sridharan (2002) แสดงให้เห็นว่า ปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินเม็ดละเอียด ที่บดอัดแบบวิธีมาตรฐาน มีความสัมพันธ์โดยตารางกับพิกัดพลาสติก ดังนี้

$$OMC = 0.92PL \qquad \text{……..…… (2.3)}$$

$$\gamma_{d\ max} = 0.98\gamma_{dPL} \qquad \text{……..…… (2.4)}$$

เมื่อ γ_{dPL} คือ หน่วยน้ำหนักแห้งที่พิกัดพลาสติก คำนวณโดยสมมติว่า พิกัดพลาสติกมีระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ เท่ากับร้อยละ 100 ความสัมพันธ์นี้ช่วยให้สามารถประมาณจุดเหมาะสมได้อย่างทันที เมื่อทราบค่าพิกัดอัตเตอร์เบิร์ก

รูปที่ 2.4 แสดงอิทธิพลของชนิดของดินต่อลักษณะการบดอัด กราฟการบดอัดมีลักษณะแบนสำหรับทรายที่มีขนาดสม่ำเสมอ ในทางตรงกันข้าม ทรายที่มีขนาดคละดี จะแสดงผลทดสอบที่มีจุดยอดอย่างเห็นได้ชัดสำหรับดินเม็ดละเอียด ดินที่มีขีดจำกัดเหลวสูง จะมีหน่วยน้ำหนักแห้งต่ำและปริมาณความชื้นเหมาะสมสูง ดินตะกอนจะแสดงกราฟที่เห็นจุดยอดได้ชัดเจน ขณะที่กราฟการบดอัดดินเหนียวจะมีลักษณะแบน ดินตะกอนเป็นดินที่ไวต่อปริมาณความชื้น กล่าวคือ สำหรับพลังการบดอัดค่าหนึ่ง ปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจะมีผลอย่างมากต่อหน่วยน้ำหนักแห้ง ส่วนดินเหนียวเป็นดินที่ไวต่อพลังงาน การเปลี่ยนแปลงพลังงานการบดอัดเพียงเล็กน้อยมีผลกระทบต่อหน่วยน้ำหนักแห้งอย่างมาก



รูปที่ 2.10 อิทธิพลของชนิดดินต่อการบดอัดแบบมาตรฐาน (Johnson and Sallberg. 1960)

2.8 พลังงานการบดอัด

พลังงานการบดอัดต่อปริมาตร 1 หน่วย (E) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$E = \frac{NB \times NL \times W \times H}{V_{(m)}} \qquad \text{..... (2.5)}$$

เมื่อ NB = จำนวนการตกกระทบของค้อนใน 1 ชั้น

NL = จำนวนชั้นของการบดอัด

W = น้ำหนักของค้อน

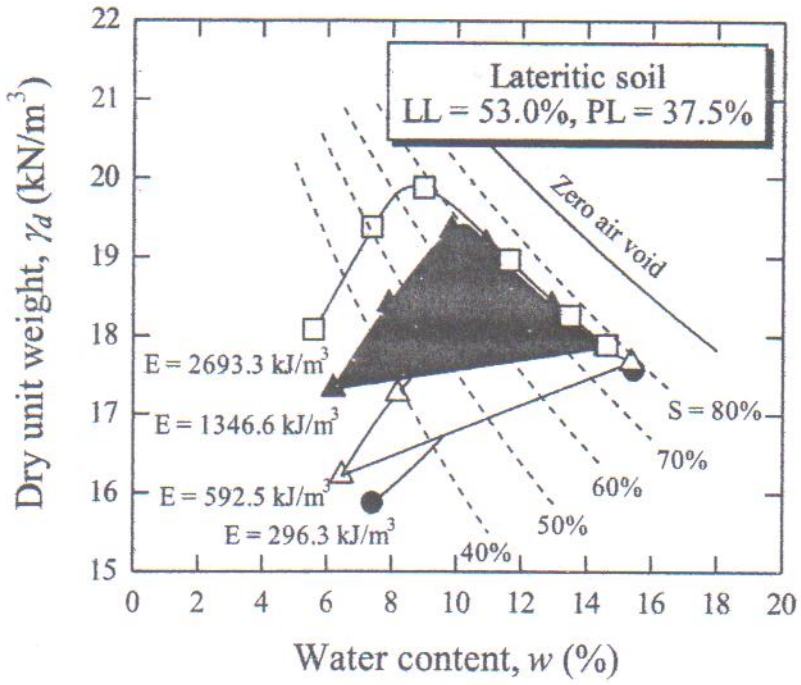
H = ระยะตกกระทบของค้อน

ดังนั้น พลังงานการบดอัดต่อปริมาตร 1 หน่วย ในแบบหล่อขนด 4 นิ้ว สำหรับการบดอัดแบบมาตรฐาน (E_{st}) และแบบสูงกว่ามาตรฐาน (E_{mod}) คือ

$E_{st} = \frac{(25)(3)(5.5)(1)}{1/30}$ = 12.375 ฟุต-ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต = 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

$E_{mod} = \frac{(25)(5)(10)(1.5)}{(1/30)}$ = 56,250 ฟุต-ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต

ถ้าแปลงพลังงานการบดอัดเปลี่ยนไป กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งจะเปลี่ยนแปลงด้วย รูปที่ 2.11 แสดงผลกทดสอบการบดอัดของดินลูกรัง จังหวัดเพชรบูรณ์ ทีพลังงานบดอัดต่างๆ ดินลูกรังประกอบด้วยกรวดเป็นมวลหลักในปริมาณร้อยละ 70 ส่วนที่เหลือเป็นทราย ดินตะกอน และดินเหนียว ดินนี้จัดอยู่ในกลุ่ม SC โดยการจำแนกตามระบบ Unified (USCS)



รูปที่ 2.11 อิทธิพลของพลังงานบดอัดต่อกราฟการบดอัดของดินลูกรัง (Horpibulsuk et al., 2004)

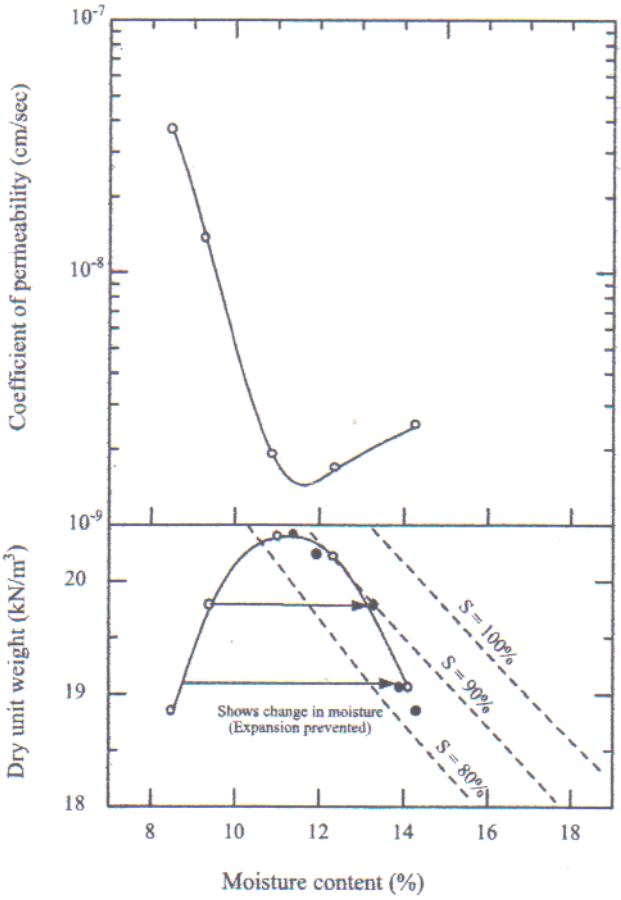
จากรูปที่ 2.11 เราสามารถสรุปได้ว่า

1. หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานการบดอัดที่เพิ่มขึ้น
2. ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าลดลงตามการเพิ่มของพลังงานการบดอัด

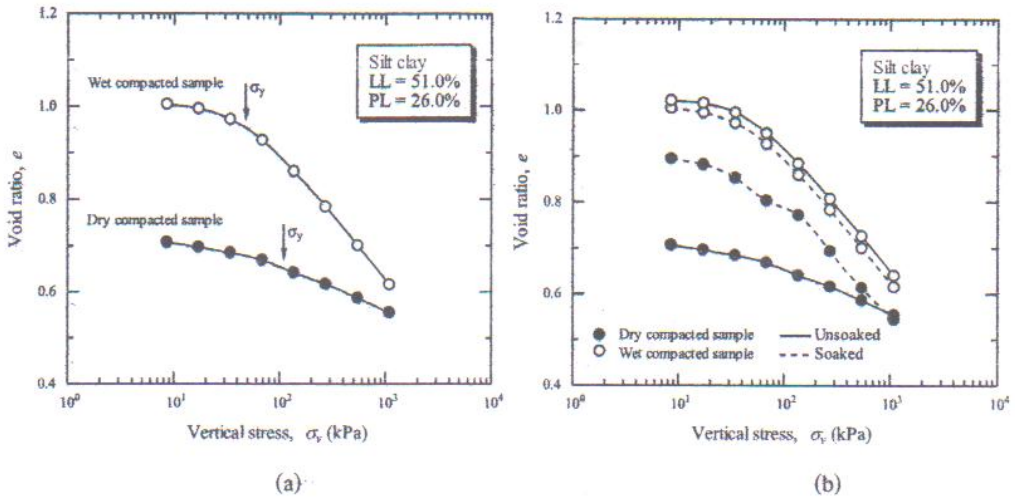
2.9 การบดอัดและคุณสมบัติเชิงวิศวกรรม

ในกรณีของดินเหนียว การเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นส่งผลให้ความสามารถในการไหลซึมลดลงในด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม (dry side of optimum moisture content) และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจะมีค่ามากขึ้นในด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 2.12 นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของพลังงานการบดอัดจะช่วยลดสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ เพราะเป็นการช่วยเพิ่มความหนาแน่นแห้งสูงสุด

เพื่อความเข้าใจถึงลักษณะการอัดตัวคายน้ำของดินบดอัด ผู้เขียนได้ทำการบดอัดดินเหนียวปนดินตะกอน ที่เก็บจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และนำเสนอผลทดสอบดังรูปที่ 2.13 ซึ่งแสดงอิทธิพลของปริมาณความชื้นที่ทำการบดอัดต่อการทรุดตัวของดินเหนียวปนดินตะกอนบดอัดสองตัวอย่างที่มีหน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากัน (ร้อยละ 95 ของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ดังตัวอย่างหนึ่งบดอัดที่ด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม อีกตัวอย่างบดอัดที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม จากผลการทดสอบพบว่า ดินที่บดอัดด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสมมีความสามารถด้านการทรุดตัวมากกว่า ดังจะเห็นได้จากความชันของกราฟมีค่าน้อยกว่า ดินที่บดอัดที่ด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสมยังมีค่าความเค้นคราก (σ_y) สูงกว่า แต่อย่างไรก็ตาม ดินบดอัดที่ด้านแห้งจะได้รับผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอย่างมาก เมื่อมีการเปลี่ยนปริมาณความชื้น และมีแนวโน้มที่จะขยายตัวเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น (Expansive due to wetting) ในขณะที่ ดินบดอัดด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม จะเกิดจากการอัดตัวเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น แต่อิทธิพลของการเพิ่มปริมาณความชื้นมีน้อยมาก เนื่องจากดินบดอัดด้านเปียกมีระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำใกล้เคียง ร้อยละ 100 ดังแสดงในรูปที่ 2.13b



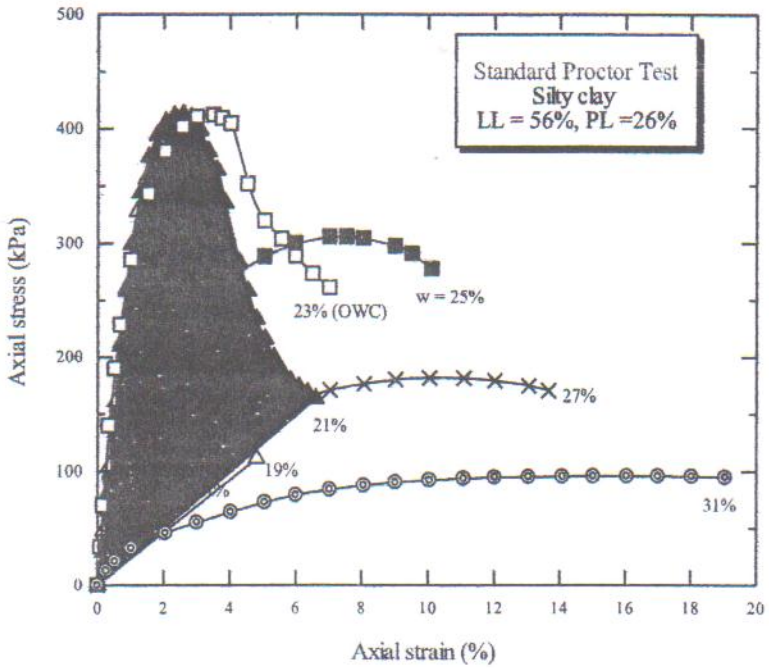
รูปที่ 2.12 การทดสอบความซึมผ่านได้และการบดอัดดิน Siburua (Lambe, 1962)



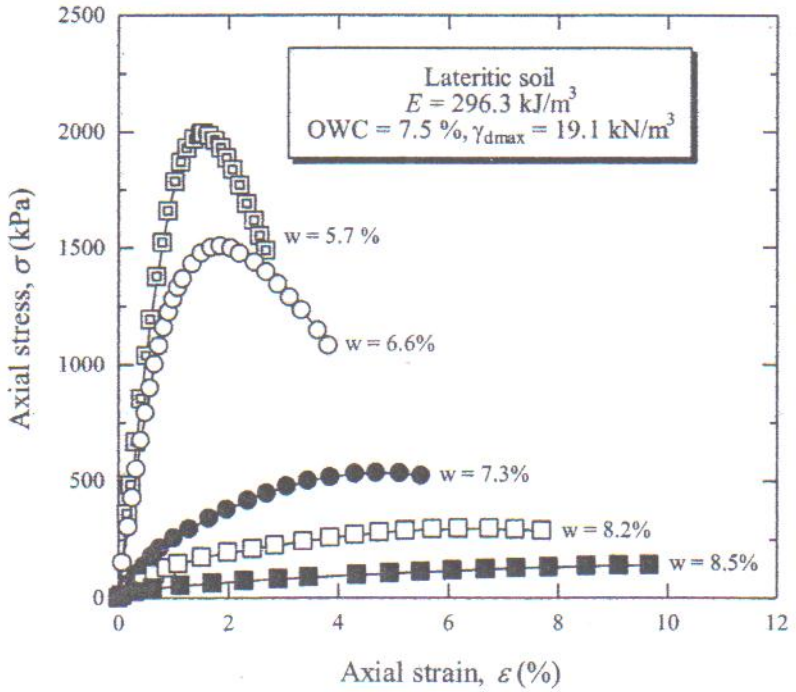
รูปที่ 2.13 ลักษณะการบดอัดตัวของดินตะกอนปนดินเหนียวบดอัดที่ด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม (b) การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น (สุขสันต์, 2545)

อิทธิพลของปริมาณความชื้น ต่อความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของดินบดอัดจะมีความแตกต่างกันตามแต่ชนิดของดิน (ดูรูปที่ 2.14 และ 2.15) สำหรับดินเม็ดละเอียด (รูปที่ 2.14) ดินตัวอย่างที่บดอัดที่ด้านแห้งจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม นอกจากนี้ดินบดอัดด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสมจะมีค่าความเครียดที่จุดวิบัติต่ำกว่าดินตัวอย่างที่บดอัดที่ด้านเปียก ดินตัวอย่างที่บดอัดที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม จะแสดงพฤติกรรมเป็นแบบเหนียว

สำหรับเม็ดหยาบ (รูปที่ 2.15) กำลังอัดแกนเดียวของดินบดอัดด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม มีแนวโน้มที่จะมีคุณสมบัติแบบแตกง่ายมากกว่าด้านเปียก เช่นเดียวกับเม็ดละเอียดแต่กำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบที่ด้านแห้งมีค่าลดลงตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นและมีค่ามากที่สุด ปริมาณความชื้นน้อยกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น – ความเครียดของดินเหนียวปนดินตะกอนบดอัด (สุขสันต์, 2545)



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น - ความเครียดของดินเหนียวปนดินลูกรังบดอัด

2.10 ปรัชญาการบดอัดงานเขื่อนและงานถนน

สำหรับดินฐานราก (ดินเดิม) ที่มีกำลังต้านทานแรงเฉือนสูง และมีการอัดตัวต่ำ ควรทำการบดอัดดินถมที่ด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม ในการบดอัดแบบนี้ นอกจากความดันน้ำส่วนเกินที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการบดอัดจะมีค่าต่ำแล้ว กำลังต้านทานแรงเฉือนรวมทั้งสติฟเนสของดินบดอัดจะมีค่าสูง

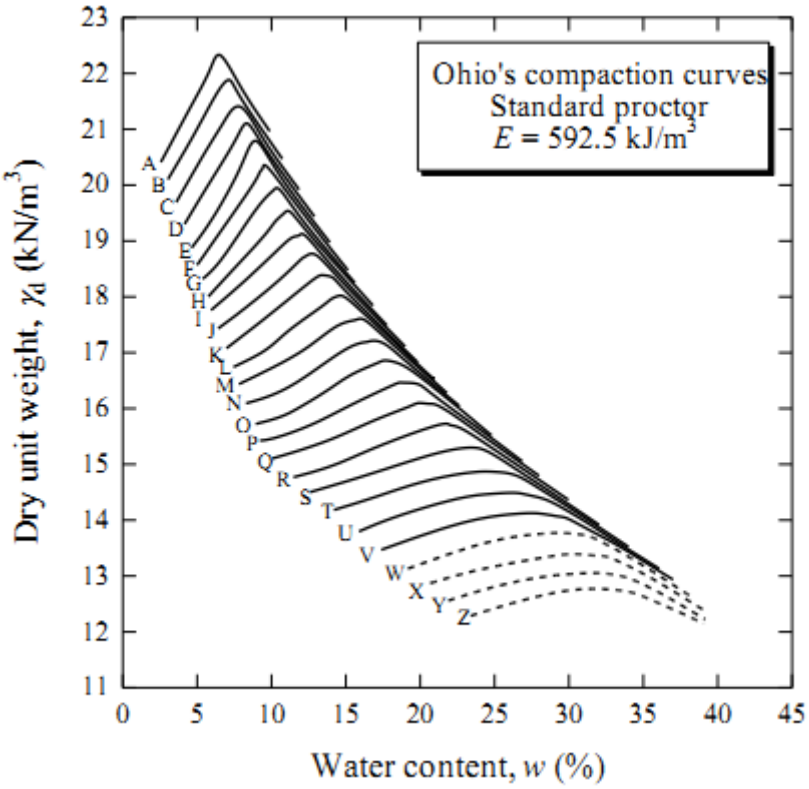
ในพื้นที่ที่ดินฐานรากเป็นดินอ่อนควรทำการบดอัดดินถมที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสมถึงแม้ว่าการบดอัดแบบนี้จะก่อให้เกิดความดันน้ำส่วนเกินที่มากและดินบดอัดมีกำลังต้านทานแรงเฉือนที่ค่อนข้างต่ำ แต่ดินบดอัดจะมีความยืดหยุ่นสูง และสามารถต้านทางการทรุดตัวที่แตกต่าง ซึ่งอาจเกิดเนื่องจากการทรุดตัวอย่างมากของดินฐานราก

สำหรับงานที่เกี่ยวข้องกับการกักเก็บน้ำ ควรบดอัดดินถมที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสมเนื่องจากดินบดอัดมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำ และมีค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนต่ำ ดังนั้นสามารถป้องกันการลดลงของกำลังต้านทานแรงเฉือนการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอันเนื่องมาจากดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

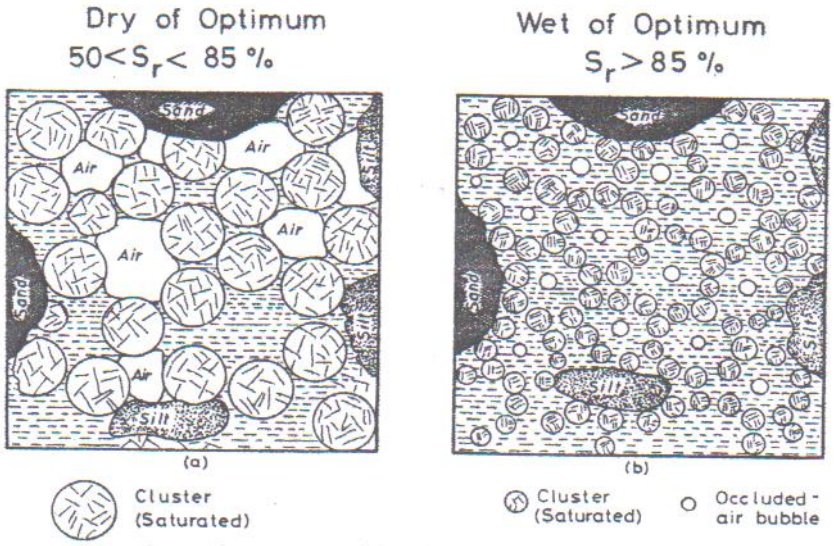
2.11 การทำนายกราฟการบดอัด

การทำนายกราฟการบดอัดเริ่มต้นครั้งแรกโดย Joslin (1959) ซึ่งเป็นผู้สร้างกราฟการบดอัดดินที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐานจำนวน 26 กราฟ และใช้ชื่อว่า กราฟ Ohio ดังแสดงในรูปที่ 2.16 กราฟเหล่านี้สร้างขึ้นจากการรวบรวมผลทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานของดินชนิดต่างๆ จำนวนมาก ในมลรัฐ Ohio กราฟ Ohio นี้มีประโยชน์ในการประมาณกราฟการบดอัดของดินชนิดต่างๆ ได้อย่างรวดเร็ว เมื่อทราบผลทดสอบของปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งค่าหนึ่ง แต่การประมาณนี้ทำได้เพียงแค่ที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน

Nagaraj et al. (2006) ได้นำเสนอแบบจำลองโพรงระหว่างอนุภาคดินอุดมคติสำหรับการทำนายกราฟการบดอัดดินเม็ดละเอียดภายใต้พลังงานการบดอัดต่างๆ (รูปที่ 2.17) โดยกล่าวว่าทางด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม สถานะของน้ำ และอากาศในมวลดินบดอัดจะมีความต่อเนื่อง จุดเชื่อมต่ำระหว่างอากาศและน้ำที่เกิดขึ้นเนื่องจากความโค้งผิวน้ำ จะเชื่อมต่อโพรงระหว่างกลุ่มอนุภาคดินเหนียว เมื่อระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำเพิ่มขึ้น ความต่อเนื่องของอากาศจะลดลงจนในที่สุดอากาศจะก่อตัวเป็นฟองอากาศ จากแบบทดลองดังกล่าว Nagaraj et al. (2006) ได้นำเสนอพารามิเตอร์สถานะสองตัว ($w/S^{0.5}$ และ w/S^2) สำหรับดินเม็ดละเอียดที่บดอัดทางด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม และกล่าวว่าที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง แม้ว่าปริมาณความชื้นจะเปลี่ยนแปลงตามระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ แต่พารามิเตอร์สถานะจะมีค่าคงที่



รูปที่ 2.16 กราฟการบดอัด Ohio (ปรับปรุงจาก Joslin, 1959)



รูปที่ 2.17 แบบจำลองโครงสร้างดินบดอัด (Nagaraj et al., 2006)

Horpibulsuk et al. (2008a และ 2009a) ได้ศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะของกราฟการบดอัดของดินเม็ดละเอียด 9 ชนิด ซึ่งครอบคลุมดินที่มีระดับการบวมตัวและสภาพความเป็นพลาสติกตั้งแต่ต่ำจนถึงสูงสุด (FSR = 0.2 ถึง 2.1, LL = 39.7 ถึง 256.3% และ PL = 6.1 ถึง 48.2%) และดิน

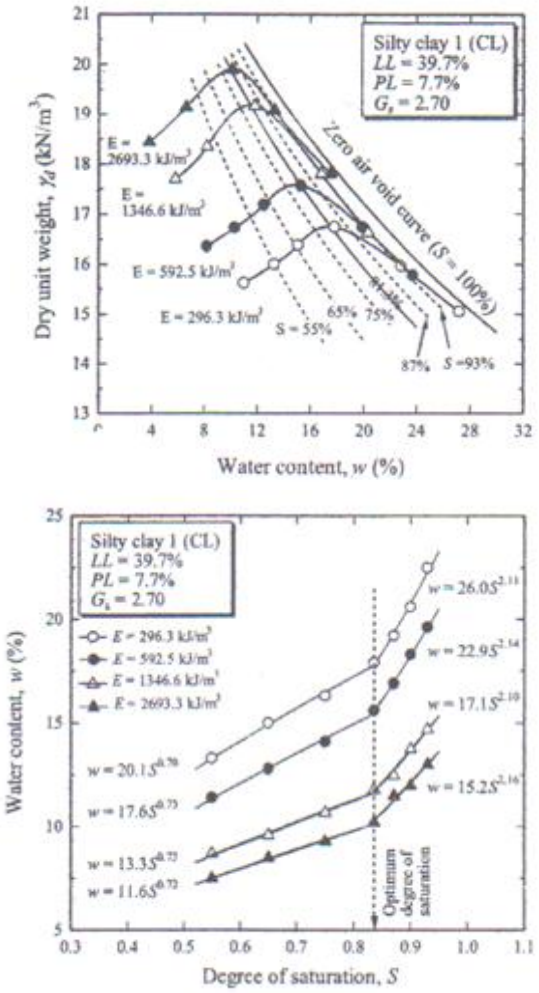
เม็ดหยาบ 16 ชนิด ซึ่งครอบคลุมดินทั้งหมดที่จำแนกด้วยระบบเอกภาพ พวกเขาพบว่าพารามิเตอร์สถานะที่เสนอโดย Nagaraj et al. (2006) ไม่สามารถใช้ได้กับดินทุกชนิด จึงได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่งในฟังก์ชั่นพาวเวอร์ ดังนี้

$w = A_d S^{Bd}$ สำหรับการบดอัดด้านแห้ง ..... (2.10)

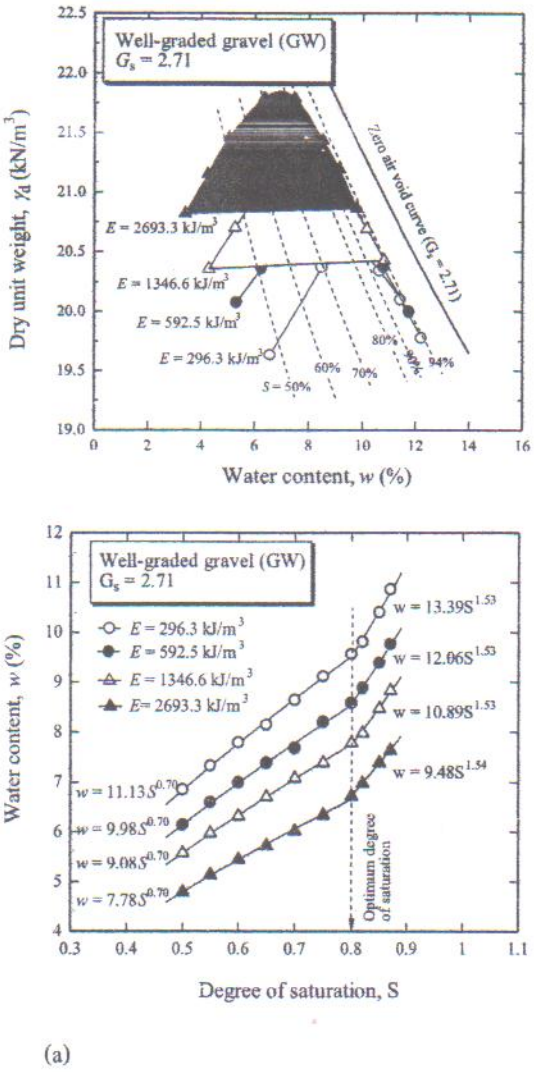
$w = A_d S^{Bw}$ สำหรับการบดอัดด้านเปียก ……..... (2.11)

เมื่อ A_d, B_d, A_w และ B_w คือ ค่าคงที่ ปริมาณความชื้นและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำมีหน่วยเป็นร้อยละและจุดทศนิยม ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นสามารถอธิบายผลทดสอบในห้องปฏิบัติการได้เป็นอย่างดี ดังแสดงในรูปที่ 2.16 สำหรับดินเหนียวปนดินตะกอน และรูปที่ 2.17 สำหรับกรวดที่มีความคละดี จากความสัมพันธ์นี้ Horpibulsuk et al. (2008a) ได้เสนอวิธีการประมาณระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่จุดเหมาะสมแบบใหม่ โดยนิยามว่าเป็นจุดตัดระหว่างสมการที่ (2.10) และ (2.11)



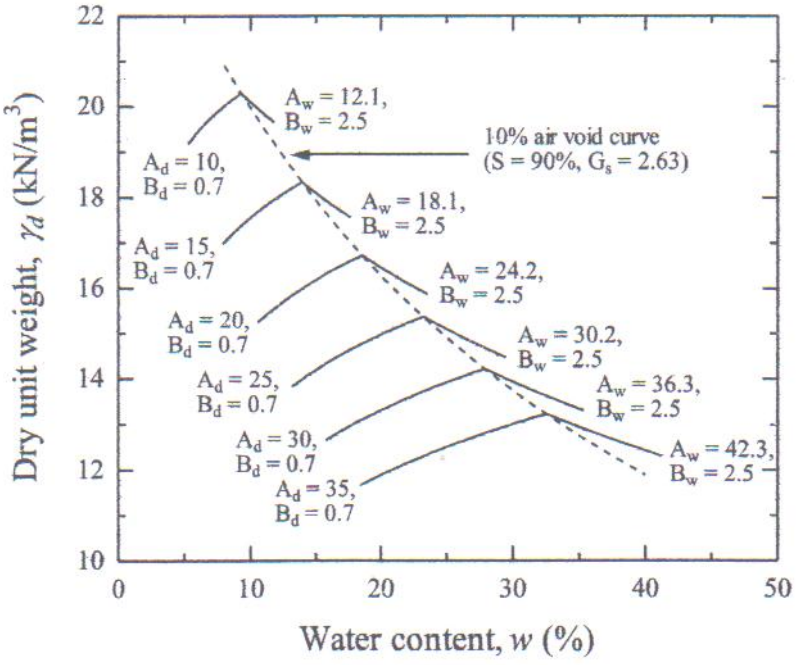
รูปที่ 2.18 (a) กราฟการบดอัด (b) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของดินเหนียวปนดินตะกอน (Horpibulsuk et al. 2008a)



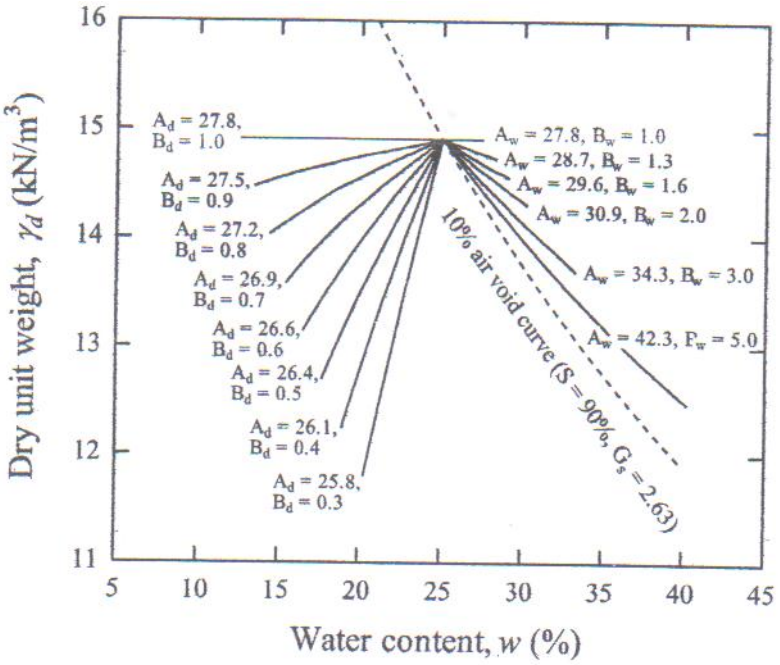
รูปที่ 2.19 (a) กราฟการบดอัด (b) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของกรวดที่ขนาดคละดี (Horpibulsuk et al. 2009a)

ถึงแม้ว่าลักษณะกราฟของการบดอัดแปรผันตามชนิดของดิน (ยกตัวอย่างเช่น ดินตะกอนมีความไวตัวต่อปริมาณความชื้น และดินเหนียวมีความไวตัวต่อพลังงานการบดอัด เป็นต้น) แต่พารามิเตอร์ A_d, B_d, A_w และ B_w สามารถอธิบายลักษณะกราฟการบดอัดของดินชนิดต่างๆ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 และ รูปที่ 2.19 สำหรับ B_d และ B_w ค่าหนึ่ง เมื่อ A_d และ A_w มีค่าลดลง หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้น (ปริมาณความชื้นเหมาะสมจะมีค่าลดลง) (รูปที่ 2.18) พารามิเตอร์ B_d และ B_w เป็นตัวควบคุมระดับความไวตัวต่อน้ำ (ความชันของกราฟการบดอัด) ทางด้านแห้งและด้านเปียกตามลำดับ ระดับความไวตัวต่อน้ำมีค่าสูงขึ้น เมื่อ B_d มีค่าลดลง และ B_w มีค่าสูงขึ้น (รูปที่ 2.19) ความชันของกราฟการบดอัดจะมีค่าเท่ากับศูนย์ (ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของหน่วยน้ำหนักแห้งกับปริมาณความชื้น) เมื่อ B_d และ B_w มีค่าเท่ากับ 1.0

จากผลการทดสอบการบดอัดดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียดหลายชนิด Horpibulsuk et al. (2008a และ 2009a) สรุปว่า สำหรับดินชนิดหนึ่ง A_d และ A_w มีค่าลดลงตามกรเพิ่มขึ้นของพลังงานการบดอัด ขณะที่ B_d และ B_w มีค่าประมาณคงที่สำหรับทุกพลังงานการบดอัด (ไม่แปรผันตามพลังงานการบดอัด) (ดังแสดงในรูปที่ 2.16 และ 2.17) B_d มีค่าประมาณ 0.70 ถึง 0.86 สำหรับดินเม็ดละเอียด และประมาณ 0.62 ถึง 0.74 สำหรับดินเม็ดหยาบ B_w มีค่าประมาณ 1.50 ถึง 2.72 สำหรับดินเม็ดละเอียด และประมาณ 1.53 ถึง 2.35 สำหรับดินเม็ดหยาบ ซึ่งแตกต่างจากผลงานวิจัยของ Nagaraj et al. (2006) (สมมติว่า $B_d = 2.5$ และ $B_w = 2.0$)



รูปที่ 2.20 อิทธิพลของ A_d และ A_w ต่อกราฟการบดอัด (Horpibulsuk et al. 2008a)

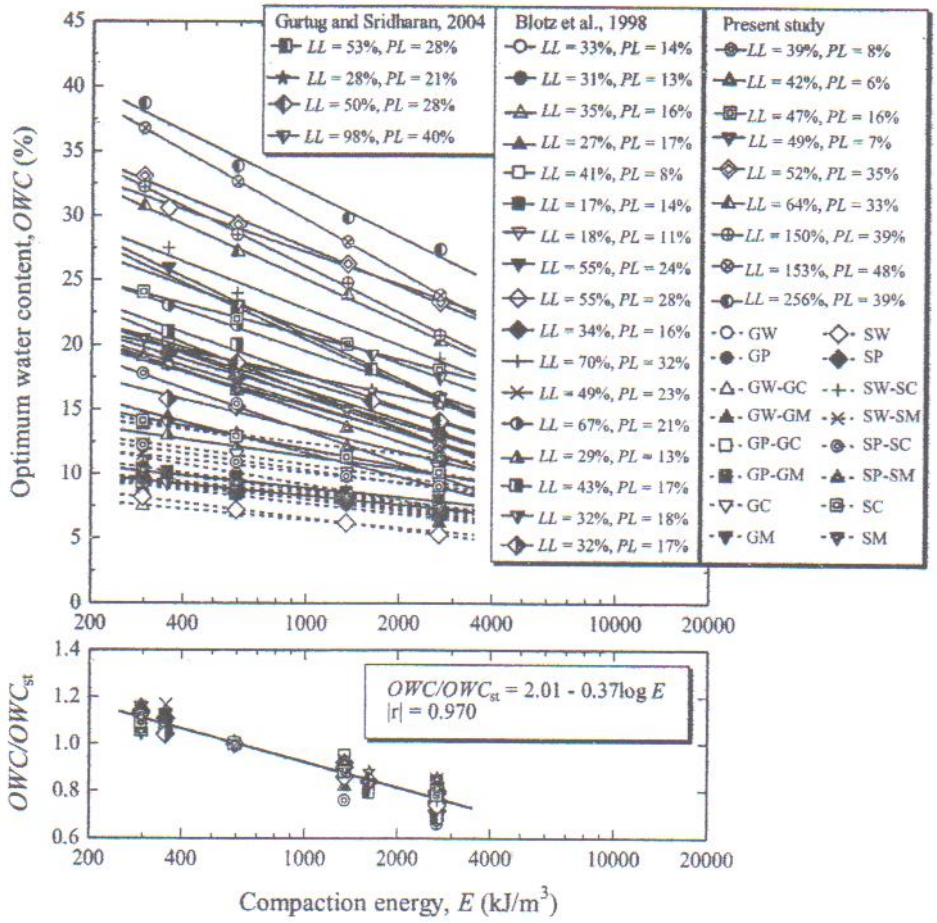


รูปที่ 2.21 อิทธิพลของ B_d และ B_w ต่อกราฟการบดอัด (Horpibulsuk et al. 2008a)

แม้ว่าพารามิเตอร์ A_d, B_d, A_w และ B_w จะมีความแตกต่างกันตามแต่ชนิดของดิน แต่อัตราส่วนระหว่าง A_d/A_{dst} และ A_w/A_{wst} ที่แต่ละพลังงานการบดอัด (เมื่อ A_{dst} และ A_{wst} คือ ค่าของ A_d และ A_w ที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน ตามลำดับ) มีค่าประมาณเกือบคงที่สำหรับทุกดิน และมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานการบดอัด (Horpibulsuk et al. 2009a) ดังนั้น เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.10) และ (2.10) จะพบว่าอัตราส่วนปริมาณความชื้นเหมะสม (OWC/OWC_{st}) จะมีค่าแปรผันตามพลังงานการบดอัด และเป็นค่าคงที่สำหรับดินบดอัด และเป็นค่าคงที่สำหรับดินบดอัดทุกชนิด เพราะ B_d และ B_w มีค่าประมาณคงที่สำหรับทุกพลังงานการบดอัด ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปริมาณความชื้นเหมาะสมและพลังงานการบดัดแสดงได้ดังรูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์เป็นเอกภาพสำหรับทั้งดินเม็ดละเอียดและดินเม็ดหยาบบดอัด และสามารถแสดงด้วยสมการ ดังนี้

$$\frac{owc}{owc_{st}} = 2.01 - 0.37 log E \qquad \text{..... (2.12)}$$

สมการนี้สามารถประมาณปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินชนิดต่างๆ ที่พลังงานการบดอัดใดๆ ได้ เพียงแค่ทราบปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินนั้นที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดสามารถประมาณได้โดยสมมติว่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่พลังงานการบดอัดต่างๆ มีค่าเท่ากัน



รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นเหมาะสม อัตราส่วนปริมาณความชื้นเหมาะสมและพลังงานการบดอัด (Horpibulsuk et al. 2009a)

โดยอาศัยสมการพาวเวอร์ของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระดับความอิ่มตัวด้วย (สมการที่ (2.10) และ (2.11)) และสมการอัตราส่วนปริมาณความชื้นเหมาะสม (สมการที่ (2.12)) การทำนายกราฟการบดอัดที่พลังงานการบดอัดใดๆ จากผลทดสอบการบดอัดที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่งสามารถสรุปได้เป็นขั้นตอนดังนี้

1. จากข้อมูลกราฟการบดอัด ที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง หาค่า A_d, B_d, A_w และ B_w และจุดเหมาะสม (γdmax ,OWC) และODS),
2. จากค่า OWC และ ODS ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 1) หาค่า OWC_{st} จากสมการ (2.12) และประมาณค่า $(\gamma dmax, OWC)_{st}$ โดยสมมติว่า ODS มีค่าคงที่สำหรับทุกพลังงานการบดอัด

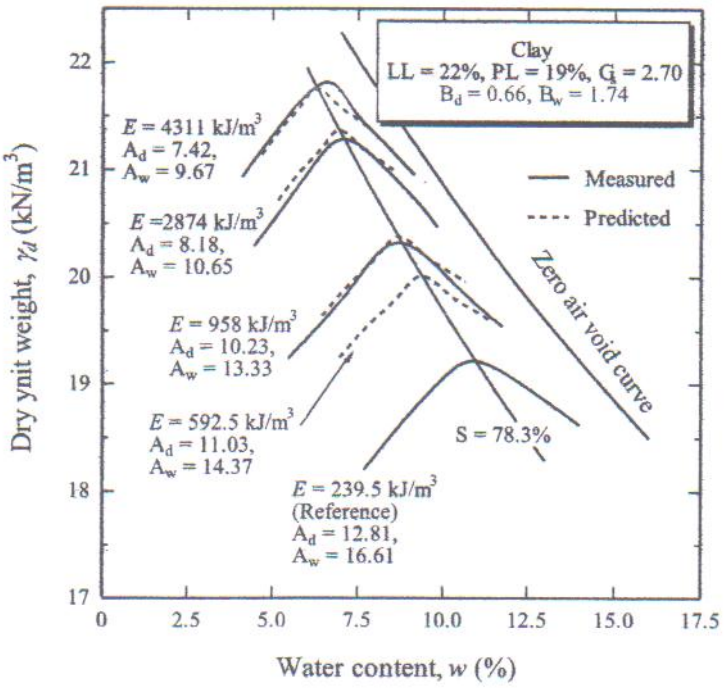
3. หาค่าจุดเหมาะสม (γ_{dmax} ,OWC) สำหรับพลังงานที่ต้องการ โดยการแทนค่า OWC_{st} ในสมการที่ (2.12)
4. หาค่า A_d และ A_w ที่พลังงานการบดอัดที่ต้องการ จากสมการที่ (2.13) และ (2.14)

$$A_d = \frac{OWC}{ODS^{B_d}} \qquad \text{..... (2.13)}$$

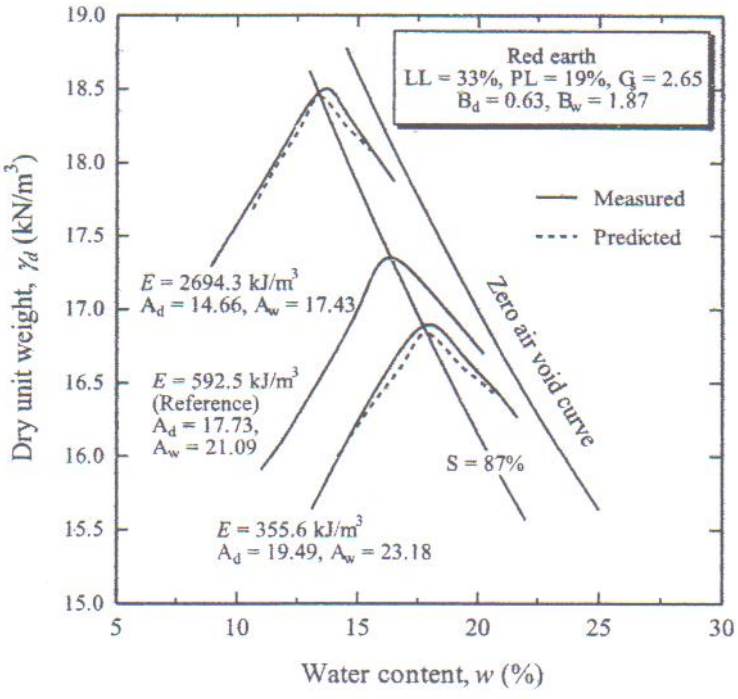
$$A_w = \frac{OWC}{ODS^{B_w}} \qquad \text{..... (2.14)}$$

5. หาค่าปริมาณความชื้น (w) ทางด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสมที่ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำค่าต่างๆ โดยอาศัยสมการที่ 2.10) และ (2.11) ตามลำดับ และหาค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง ($\square_d$)
6. วาดเส้นกราฟการบดอัดดินทางด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม โดยการต่อเส้นเชื่อมจุด ($\square_d$, w) ที่ได้จากขั้นตอนที่ 5

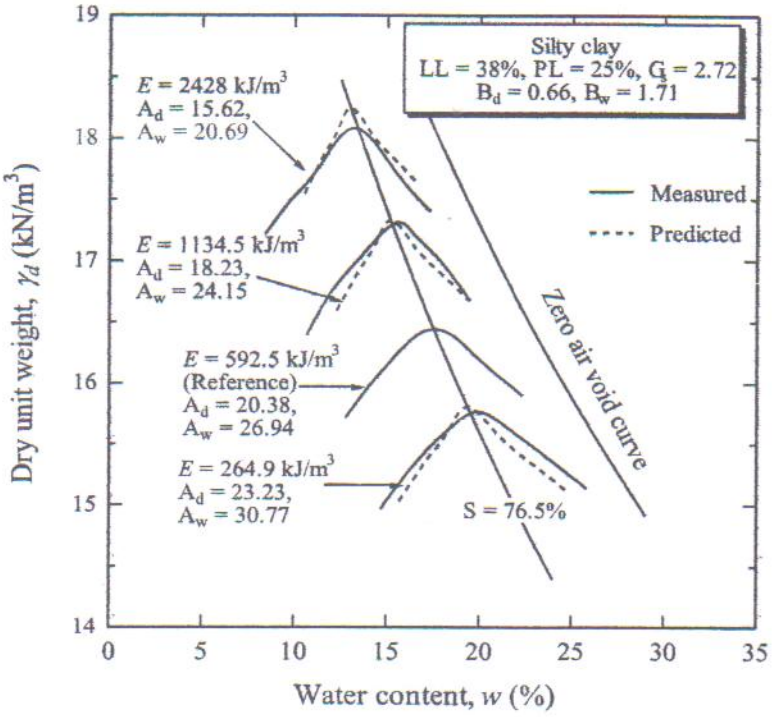
รูปที่ 2.21 ถึง 2.25 แสดงกราฟการบดอัดของเม็ดดินละเอียดและดินเม็ดหยาบที่รวบรวมจากผลงานวิจัยในอดีต จะเห็นได้ว่า กราฟการบดกอัดดินที่ได้จากการทำนายมีความสอดคล้องและใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริงมาก ซึ่งเป็นการแสดงความแม่นยำของวิธีการทำนายกราฟการบดอัดที่นำเสนอ เมื่อใช้กราฟการบดอัดของ Ohio เป็นกราฟอ้างอิงสำหรับเม็ดดินละเอียดและดินเม็ดหยาบที่บดอัดด้วยพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน (592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร) กราฟการบดอัดที่พลังงานใดๆ สามารถสร้างขึ้นได้ตามขั้นตอนที่นำเสนอข้างต้น กราฟที่สร้างขึ้นนี้เรียกว่า กราฟการบดอัดของ Ohio ปรับปรุง (Modified Ohio's compaction curves) รูปที่ 2.26 และ 2.28 แสดงกราฟการบดอัดของ Ohio ปรับปรุง สำหรับพลังงานการบดอัดเท่ากับ 296.3, 1346.6 และ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ กราฟเหล่านี้มีประโยชน์อย่างมากในการทำนายกราฟการบดอัดที่พลังงานที่ต้องำการ โดยอาศัยเพียงแค่หนึ่งผลการทดสอบของปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้ง



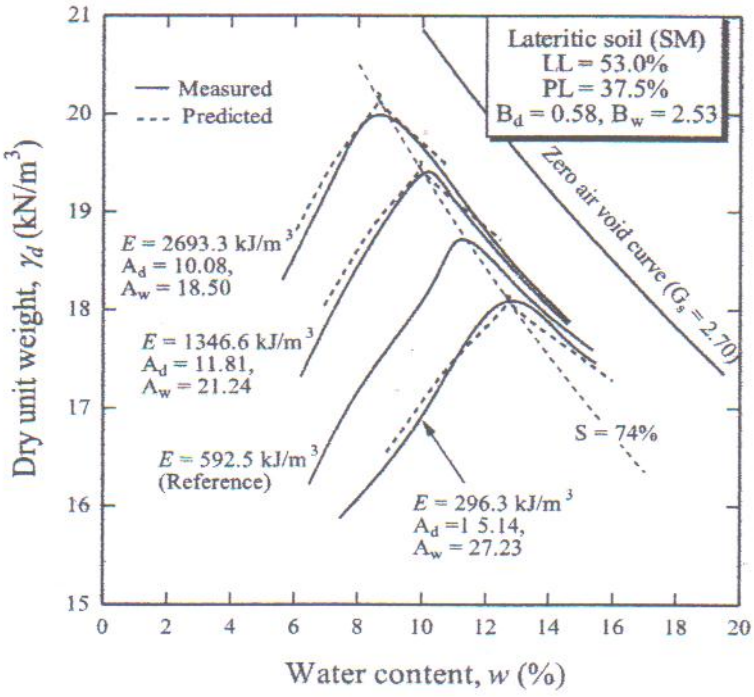
รูปที่ 2.23 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลการทดสอบและการทำนายของดินเหนียว (ข้อมูลจาก Proctor, 1948) (Horpibulsuk et al., 2008a)



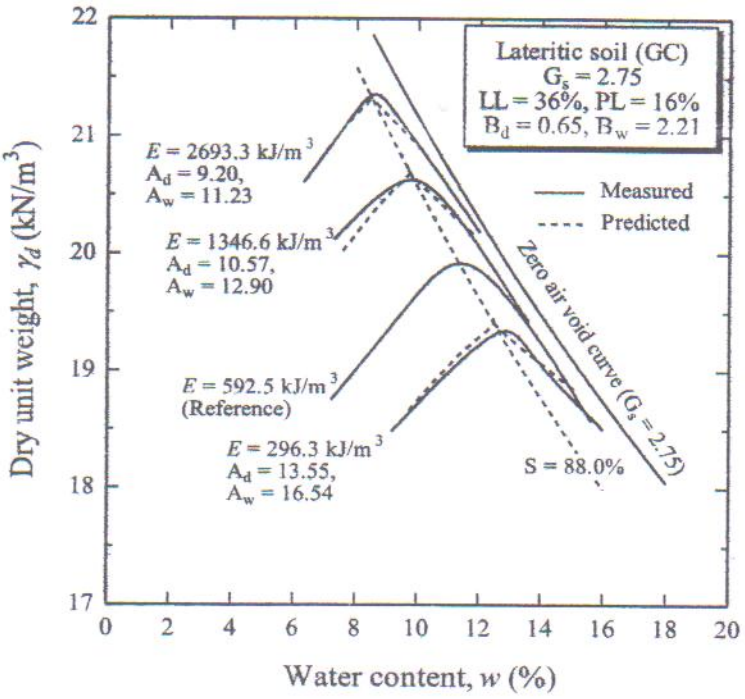
รูปที่ 2.24 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลการทดสอบและการทำนายของ Red earth (ข้อมูลจาก Us Army Crops of Engineers, 1970) (Horpibulsuk et al., 2008a)



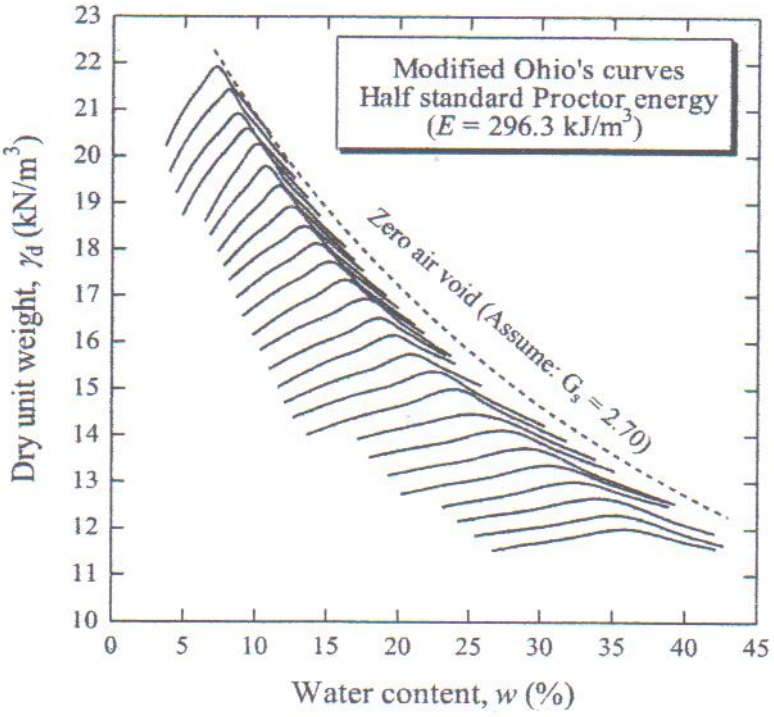
รูปที่ 2.25 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลการทดสอบและการทำนายของดินเหนียวปนดินตะกอน (ข้อมูลจาก Turnbull and Foster, 1956) (Horpibulsuk et al., 2008a)



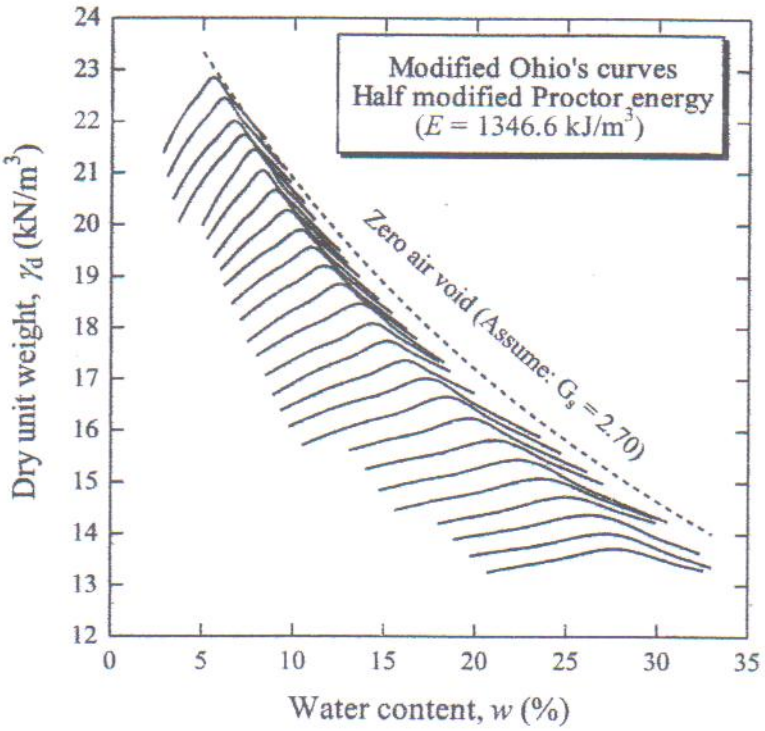
รูปที่ 2.26 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลการทดสอบและการทำนายของดินลูกรัง (ข้อมูลจาก Horpibulsuk et al., 2004c) (Horpibulsuk et al., 2009a)



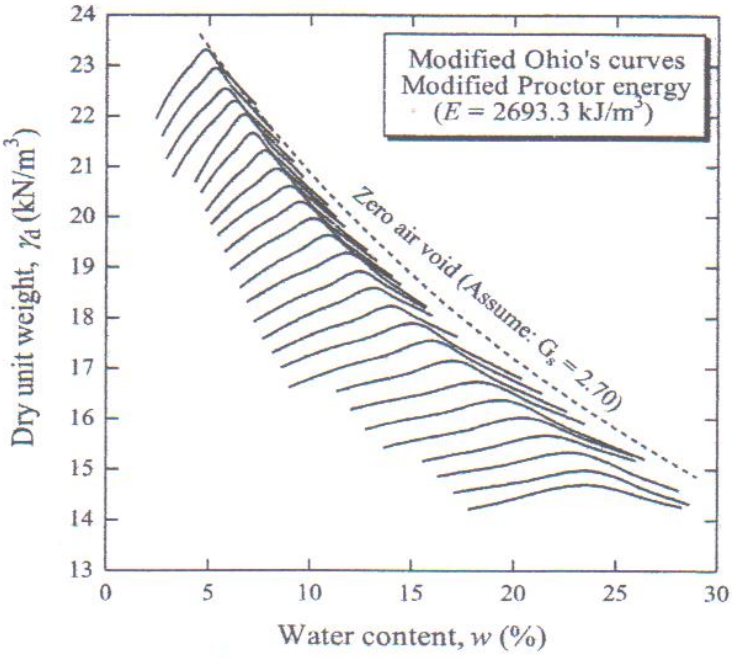
รูปที่ 2.27 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลการทดสอบและการทำนายของกรวดปนดินเหนียว (ข้อมูลจาก Ruendrairergsa, 1982) (Horpibulsuk et al., 2009a)



รูปที่ 2.28 กราฟ Ohio ปรับปรุงสำหรับพลังงานการบดอัดเท่ากับ 296.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร (Horpibulsuk et al., 2008a)



รูปที่ 2.29 กราฟ Ohio ปรับปรุงสำหรับพลังงานการบดอัดเท่ากับ 1346.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร (Horpibulsuk et al., 2008a)



รูปที่ 2.30 กราฟ Ohio ปรับปรุงสำหรับพลังงานการบดอัดเท่ากับ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร (Horpibulsuk et al., 2008a

วิธีบดอัดดินให้ได้ความแน่น (Density) สูงตามความต้องการหรือตามจุดประสงค์ของการใช้งาน จะต้องอาศัยน้ำเป็นตัวหล่อลื่น แต่ถ้าน้ำมีอยู่มากเกินไป น้ำจะไปหุ้มเคลือบรอบๆ มวลดิน ทำให้อณูของเม็ดดินแยกตัวห่างจากกัน หรือถ้าทีน้ำอยู่น้อยเกินไป การหล่อลื่นไม่ดีพอที่จะช่วยให้การบดอัดเม็ดดินเบียดชิดกันเท่าที่ควร ด้วยเหตุผลและข้อเท็จจริงดังกล่าว RR. Proctor (1933) ได้กำหนดวิธีทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับความแน่น (Density) ของดินที่ได้จากการบดอัดในห้องปฏิบัติการ ซึ่งต่อมาได้เป็นที่ยอมรับและนิยมใช้ทดสอบการบดอัดดินในงานก่อสร้างโดยทั่วไปว่าเป็นวิธีทดสอบมาตรฐาน (Standard Proctor Test) โดยเฉพาะการทดสอบเพื่อควบคุมงานก่อสร้างถนน สนามบิน (Runway) เขื่อนดิน พื้นโรงงาน ฯลฯ ในปัจจุบันยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งได้วิวัฒนาการมีขนาดใหญ่ขึ้น บรรทุกน้ำหนักได้มากขึ้นหลายเท่าตัว พลังงาน (Energy) ที่ใช้ในการบดอัดก็จำเป็นจะต้องเพิ่มขึ้นด้วย จึงได้มีการกำหนดวิธีทดสอบการบดอัดดินโดยการเพิ่มพลังงานให้สูงขึ้น เพื่อจะได้ฐานดินที่มีความแน่นสูง รับน้ำหนักได้มาก เรียกว่า วิธีทดสอบแบบโมดิฟายด์ (Modified Proctor Test)

2.12 มาตรฐานดินคันทาง (Embankment) (ทล.ม.102/2532)

คือ วัสดุชั้นที่อยู่ถัดลงไปจากโครงสร้างชั้นทาง (Pavement Structure) ทำหน้าที่รับ น้ำหนักล้อรถซึ่งถ่ายจากโครงสร้างชั้นทาง เป็นดินหรือวัสดุอื่นใด ที่ปราศจากหน้าดิน และวัชพืช จากแหล่งที่ได้รับความเห็นชอบจากนายช่างผู้ควบคุมงานแล้วมีคุณสมบัติตามที่กำหนดในแบบ ปราศจากส่วนที่จับตัวเป็นก้อนหรือยึดเกาะกันขนาดโตกว่า 50 มิลลิเมตร หรือทำให้แตกและผสมเข้าด้วยกันให้มีลักษณะสม่ำเสมอ

ดินเดิม (Subgrade) หรือลาดคันทางของถนนเดิม ซึ่งอยู่ต่ำกว่าระดับคันทางที่จะทำการก่อสร้างใหม่น้อยกว่า 1 เมตร ตามแบบ หลังจากกำจัดสิ่งซึ่งไม่พึงประสงค์ต่างๆ ออกหมดแล้วหรือหลังจากไถคราดผิวทางเดิมแล้ว จะต้องทำการบดอัดชั้น 150 มิลลิเมตร สุดท้ายวัดจากระดับดินเดิมหรือผิวถนนเดิมลงไปให้ได้ความแน่นแห้งของการบดอัดไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของความแน่นแห้งสูงสุด ที่ได้จากการทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 107/2515 "วิธีการทดลอง Compaction Test แบบมาตรฐาน"

ถ้ามิได้กำหนดไว้ในแบบเป็นอย่างอื่น ทางเดิมที่ยังไม่มีผิวถาวร และต้องการจะถมคันทางให้สูงขึ้นอีกไม่เกิน 300 มิลลิเมตร จะต้องไถคราดผิวทางเดิมไม่น้อยกว่า 150 มิลลิเมตร แล้วบดอัดรวมไปพร้อมกับชั้นใหม่ ของชั้นดินถมคันทางนั้น ความหนาของชั้นที่ไถคราดรวมกับวัสดุใหม่จะต้องไม่เกินความหนาแต่ละชั้นที่กำหนด

ในกรณีที่จะก่อสร้างคันทางตามลาดเชิงเขา หรือจะทำการก่อสร้างขยายคันทางใหม่บนคันทางเดิม ให้ตัดลาดเชิงเขาหรือลาดคันทางเดิมเป็นแบบขั้นบันได (Benching) จากปลายเชิงลาดจนถึงขอบไหล่ทาง ให้เกลี่ยแผ่วัสดุสม่ำเสมอในแนวราบ มีความกว้างพอที่เครื่องมือบดอัดที่เหมาะสมลงไปทำงานได้ โดยกำหนดให้ดำเนินการก่อสร้างเป็นชั้นๆ ให้มีความหนาแต่ละชั้นตามที่กำหนด

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นดินคันทางโดยทั่วไป

(1) มีค่า CBR ไม่น้อยกว่าที่กำหนดตามแบบ เมื่อทดลองตาม ทล.-ท. 109/2517 "วิธีการทดลองหาค่า CBR" ที่ความแน่นแห้งของการบดอัดร้อยละ 95 ของความแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดลองตาม ทล.-ท. 107/2515 "วิธีการทดลอง Compaction Test แบบมาตรฐาน"

(2) มีค่าการขยายตัว เมื่อทดลองตาม ทล.-ท.109/2517 "วิธีการทดลองหาค่า CBR" ไม่เกินร้อยละ 4 ที่ความแน่นแห้งของการบดอัดร้อยละ 95 ของความแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดลองตาม ทล.-ท.107/2515 "วิธีการทดลอง Compaction Test แบบมาตรฐาน"

2.13 มาตรฐานวัสดุลูกรังรองพื้นทาง (Subbase) (ทล.ม.205/2532)

วัสดุที่อยู่ใต้ชั้นพื้นทาง โดยมากใช้วัสดุมวลรวมที่มีเม็ดแข็ง ทนทานมีส่วนผสมของวัสดุเชื้อประสานที่ดีมีขนาดคละกันอย่างสม่ำเสมอจากขนาดใหญ่ไปขนาดเล็ก ปราศจากดินเหนียว วัชพืชอื่นๆ และส่วนที่จับตัวกันเป็นก้อนแข็ง ยึดเกาะกันมีขนาดโตเกินกว่า 50 มิลลิเมตร หรือทำให้แตกและผสมเข้าด้วยกันให้มีลักษณะสม่ำเสมอ

คุณสมบัติของวัสดุชั้นรองพื้นทาง โดยทั่วไป

(1) มีค่าความสึกหรอ เมื่อทดลองตาม ทล.-ท.202/2515 "วิธีการทดลองหาความสึกหรอของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion" ไม่เกินร้อยละ 60

(2) มีขนาดคละที่ดี เมื่อทดลองตาม ทล.-ท.205/2517 "วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง" ต้องมีขนาดใดขนาดหนึ่งตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ขนาดคละของรองพื้นทางวัสดุมวลรวม

ขนาดตะแกรงมาตรฐาน มิลลิเมตร		น้ำหนักที่ผ่านตะแกรงเป็นร้อยละ				
		A	B	C	D	E
50	(2")	100	100	-	-	-
25.0	(1")	-	75-95	100	100	100
9.5	(3/8")	30-65	40-75	50-85	60-100	-
2.00	(เบอร์ 10)	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100
0.425	(เบอร์ 40)	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50
0.075	(เบอร์ 200)	2-8	5-20	5-15	10-25	6-20

(3) มีค่า Liquid Limit เมื่อทดลองตาม ทล.-ท.102/2517 "วิธีการทดลองหาค่า Liquid Limit (LL) ของดิน" ไม่เกินร้อยละ 35

(4) มีค่า Plasticity Index เมื่อทดลองตาม ทล.-ท.103/2517 "วิธีการทดลองหาค่า Plasticity Limit (PL) และ Plasticity Index (PI)" ไม่เกินร้อยละ 11

(5) มีค่า CBR เมื่อทดลองตาม ทล.-ท.109/2517 "วิธีการทดลองหาค่า CBR" ไม่น้อยกว่าร้อยละ 25 มีความแน่นแห้งของการบดอัดร้อยละ 95 ของความแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดลองตาม ทล.-ท.108/2517 "วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน"

(6) กรณีใช้วัสดุมากกว่า 1 ชนิดผสมกัน วัสดุแต่ละชนิดจะต้องมีขนาดคละสม่ำเสมอและเมื่อผสมกันแล้วจะต้องมีลักษณะสม่ำเสมอ มีคุณภาพตามข้อกำหนด

(7) กรณีใช้วัสดุจำพวก Shale ต้องมีค่าเฉลี่ย Durability Index ของวัสดุทั้งชนิดเม็ดละเอียดและชนิดเม็ดหยาบ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 35 ทดลองตาม ทล.-ท.206/2517 "วิธีการทดลองหาค่า Durability ของวัสดุ"

2.14 วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง (ทล.ท,204/2516) (เทียบเท่า AASHO T 27-70)

2.14.1 ขอบข่าย

การทดลองนี้ได้ปรับปรุงจากAASHO T27-70 และT 37-70 เพื่อหาขนาดเม็ด

(Particle Size Distribution) ของ Aggregate ทั้งชนิดเม็ดละเอียดและหยาบ โดยให้ผ่านตะแกรงจากขนาดใหญ่ถึงขนาดใหญ่ถึงขนาดเล็ก มีขนาดช่องผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 มิลลิเมตร) และเปรียบเทียบมวลของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงขนาดต่างๆกับมวลทั้งหมดของตัวอย่าง

2.14.2 วิธีทำ

2.14.2.1 เครื่องมือ เครื่องมือทดลองประกอบด้วย

ก. ตะแกรงมีช่องผ่านเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดช่องผ่านต่างๆ ตามความต้องการพร้อมเครื่องมือเขย่าตะแกรง

ข. เครื่องชั่ง สามารถชั่งได้ละเอียด 0.2% ของตัวอย่างทั้งหมด

ค. เครื่องแบ่งตัวอย่าง (Sample Splitter)ขนาดต่างๆ

ง. แปรงลวดทองเหลือง แปรงพลาสติก แปรงขน สำหรับทำความสะอาดตะแกรง

จ. เตาอบสามารถควบคุมอุณภูมิให้คงที่ 110 + 5 องศาเซลเซียส

2.14.2.2 วัสดุที่ใช่ประกอบการทดลอง

2.14.2.3 แบบฟอร์ม ใช้แบบฟอร์มที่ ว.3-10 และ ที่ ว.2-12

2.14.2.4 การเตรียบตัวอย่าง

นำตัวอย่างมาคลุกให้เข้ากันและแยกด้วยวิธีแบ่งสี่ หรือใช้เครื่องมือแบ่งตัวอย่าง ในขณะที่ตัวอย่างมีความชื่นเพื่อลดการแยกตัว ถ้าตัวอย่างไม่มีส่วนละเอียดอาจจะแบ่งขณะที่ตัวอย่างแห้งอยู่ก็ได้ประมาณให้ได้ตัวอย่างเมื่อแห้งแล้วตาม ตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ขนาดคละของวัสดุ

ขนาดตะแกรง	**เปอร์เซนต์ผ่านตะแกรงมวลรวม**	**ตัวอย่างมีมวลไม่น้อยกว่า (กิโลกรัม)**
4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4)	90-100	0.5
9.5 มิลลิเมตร (3/4”)	90-100	1.0
12.5 มิลลิเมตร (1/2”)	90-100	2.0
19 มิลลิเมตร (3/4”)	90-100	5.0
25 มิลลิเมตร (1”)	90-100	10.0
37.5 มิลลิเมตร (1 ½”)	90-100	15.0
50 มิลลิเมตร (2”)	90-100	20.0

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

ขนาดตะแกรง	เปอร์เซนต์ผ่านตะแกรงมวลรวม	ตัวอย่างมีมวลไม่น้อยกว่า (กิโลกรัม)
63 มิลลิเมตร (2 ½")	90-100	25.0
75 มิลลิเมตร (3")	90-100	30.0
90 มิลลิเมตร (3 ½")	90-100	35.0

2.14.2.5 การทดลอง

2.14.2.5.1 ถ้ามีส่วนละเอียดจับก้อนใหญ่หรือมีส่วนละเอียดจับกันเองเป็นก้อน ต้องทำให้ส่วนระเอียดหลุดออกจากก้อนใหญ่หรือส่วนละเอียดที่จับกันเป็นก้อนแตกให้หมด ตากหรืออบตัวอย่างให้ผิวแห้ง (Surface Dry) ที่อุณหภูมิ 110+5

2.14.2.5.2 นำตัวอย่างไปเขย่าในตะแกรงขนาดต่างๆ ตามที่ต้องการ การเขย่านี้ต้องให้ตะแกรงเคลื่อนที่ทั้งแนวราบและแนวดิ่งรวมทั้งมรแรงกระแทกขณะเขย่าด้วย เขย่านานจนกระทั้งตัวอย่างผ่านตะแกรงแต่ละขนาดใน 1นาที ไม่เกิน 1% ของตัวอย่างในตะแกรงนั้น หรือใช้เวลานานทั้งหมดประมาณ 15นาที เมื่อเขย่าเสร็จตัวอย่างก้อนใหญ่กว่าตะแกรงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์4)ต้องไม่ซ้อนกันในตะแกรงและตัวอย่างที่มีเม็ดเล็กกว่าตะแกรงขนาด 4.75 มิลลิเมตร(เบอร์ 4)ต้องมีตัวอย่างค้างตะแกรงแต่ละขนาดไม่เกิน 6กรัมต่อ 1000 ตารางมิลลิเมตร หรือไม่เกิน 200 กรัม สำหรับตะแกรง เส้นผ่านศูนย์กลาง 203 มิลลิเมตร (ค.)ถ้าตัวอย่างค้างตะแกรงเกินกว่าที่กำหนดให้แบ่งตัวอย่างการทดลองสองครั้ง หรือเพิ่มตะแกรงขนาดใหญ่กว่าตะแกรงที่ค้างเกินไปขนาดหนึ่งนำตัวอย่างที่ค้างตะแกรงแต่ล่ะขนาดไปชั่ง

2.14.3 การคำนวณ

คำนวนหาขนาดเม็ดของวัสดุได้จากสูตร

$$\text{เปอร์เซนต์ผ่านตะแกรงต่อมวลรวม} = \frac{R}{T} \times 100$$

เมื่อ R = มวลของตะแกรงที่ใช้ทำการทดลอง

T =มวลของตัวอย่างทั้งหมด

2.14.4 รายงาน

ให้รายงานค่าเปอร์เซนต์ผ่านตะแกรงขนาดต่างๆต่อมวลรวมด้วยทศนิยม 1 ตำแหน่ง

2.14.5 ข้อควรระวัง

2.14.5.1 การแบ่งตัวอย่างด้วยเครื่องแบ่งตัวอย่างที่มีขนาดช่องกว้างประมาณ 1 ½ เท่าของก้อนที่โตที่สุด

2.14.5.2 ตรวจดูตะแกรงบ่อยๆถ้าชำรุดต้องซ่อมก่อนใช้

2.3-10

กองวิเคราะห์และวิจัย
กรมทางหลวง

อันดับทดลองที่ Gc-454

เจ้าของตัวอย่าง

หนังสือที่ วันที่รับหนังสือ

ทางสาย พระประแดง-บางขุนเทียน ตอน 3

เจ้าหน้าที่ทดลอง ชัยฤทธิ์ วันที่รับตัวอย่าง วันที่ทดลอง 21/5/43

SIEVE ANALYSIS OF AGGREGATE

Material หินผสมคอนกรีต ขนาด 3/4"-#4 Stockpile/Plant นครหลวง km. 9+900 LP.2.0 km.#303

Source โรงโม่หินเขาแก้ว จ.สุพรรณบุรี Sample No. of

Sieve	First Trial			Second Trial			Average
	Retained gm.	Passing gm.	Passing gm.	Retained gm.	Passing gm.	Passing gm.	% Passing
1"	-	13743	100.0				
3/4"	675	13068	95.1				
1/2"	6350	6718	48.9				
3/8"	2845	3873	28.2				
#4	3395	478	3.5				
#8	330	148	1.1				
Pan	148	-	-				

Remarks:

ค่าธรรมเนียมการทดลองเป็นเงิน.....บาท

ผลการทดลองนี้รับรองเฉพาะตัวอย่างที่กองวิเคราะห์และวิจัยได้รับเท่านั้น

Bureau of Materials Research & Development

Department of Highways

Project. : หน่วยที่ควบคุม-บ้านคุยแก้งกบ ตอน 3

No.	Source	Depth M.	Description of Sample	Estimate Quantity M3.	H R B Classification	Sieve Analysis % Passing								Plasticity		Comp. DH-T.205/2517		Lab. CBR.		Remark
						50.00 (2")	25.00 (1")	19.00 (3/4")	12.50 (1/2")	9.50 (3/8)	4.75 (#4)	2.36 (#8)		LL.	PI.	Opt. MC.%	pd gm/cc.	CBR.	Swell %	
QC-454	กิโลเมตรที่ 3/4" - #4						100.0	85.1	48.9	28.2	3.5	1.1		N	P	-	-	-	-	ทรายไม่ได้ใช้
	Stockpile/Plant หลักกิโล KM.ที่+500 Lt. 20 km. 4260																			
	เหมือน : โรงโม่หินกรวดแก้ว อ.คุยตาดุก																			

2.15 วิธีการทดลองหาค่า Liquid Limit (LL) ของดิน (ทล.ท,102/2515) (เทียบเท่า AASHTO T 89)

2.15.1. ขอบข่าย

Liquid Limit (LL) ของดิน คือ ปริมาณของน้ำที่มีอยู่พอดีในดิน ซึ่งทำให้ดินเปลี่ยนจากภาวะ Plastic มาเป็นภาวะ Liquid คือเทียบเป็นร้อยละของมวลดินอบแห้ง หาได้โดยนำดินที่ผ่านตระแกรงเบอร์ 40 (0.425 มิลลิเมตร) มาผสมกับน้ำ ค่า Liquid Limit (LL) คือ ปริมาณของน้ำคิดเป็นร้อยละที่ทำให้ดินในเครื่องมือทดลอง (Liquid Limit Device) ไหลมาชนกันยาว 12.7 มิลลิเมตร (1/2 นิ้ว) เมื่อเคาะเครื่องมือทดลองซึ่งมีจุดตกกระทบสูง 10 มิลลิเมตร จำนวน 25 ครั้ง

วิธีการทดลองนี้ได้ปรับปรุงจาก ASTM D 423-66, Test Method No. Calif. 204-13 อธิบายถึงวิธีการหาค่า Liquid Limit ของดินโดยวิธี Mechanical Method

2.15.2. วิธีทำ

2.15.2.1 เครื่องมือ

(1) เครื่องแบ่งตัวอย่างดิน

(2) ตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) และตะแกรงเบอร์ 40 (0.425 มิลลิเมตร)

(3) เครื่องมือทดลอง Liquid Limit 1 ชุด (ดูรูปที่ 1)

(4) เครื่องมือปาดร่องดิน (ดูรูปที่ 1)

(5) ถ้วยกระเบื้องเคลือบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 115 มิลลิเมตร (4 ½ นิ้ว) หรือแผ่นกระจกสำหรับผสมดินขนาด 150 มิลลิเมตร x 150 มิลลิเมตร

(6) Spatula ขนาดยาวประมาณ 75 มิลลิเมตร (3.0 นิ้ว) กว้าง 20 มิลลิเมตร (0.75 นิ้ว)

(7) Pipette หรือเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับใส่น้ำ

(8 กระป๋องอบดินขนาดเล็ก

(9) เครื่องชั่งชนิดอ่านได้ละเอียดถึง 0.01 กรัม

(10) เตาอบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่ 110±5 องศาเซลเซียส

2.15.2.2 วัสดุที่ใช้ประกอบการทดลอง

น้ำสะอาด

2.15.2.3 แบบฟอร์ม

ใช้แบบฟอร์มที่ ว.2-02

2.15.2.4 การเตรียมตัวอย่าง

(1) นำตัวอย่างตากแห้งหรืออบแห้งที่อุณหภูมิไม่เกิน 60 ซม. มาผสมกันให้ทั่วแล้วแบ่งด้วยเครื่องแบ่งตัวอย่างดิน หรือใช้วิธี Quartering โดยมากทำ พร้อมกับทำ Sieve Analysis ใช้ตัวอย่างซึ่งคาดว่าจะมีส่วนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 (0.425 มิลลิเมตร) มีมวลประมาณ 300 กรัม

(2) ถ้ามีตัวอย่างจับเกาะกันเป็นก้อน ให้ใช้เครื่องมือหรือค้อนยาง ค่อยๆ บด หรือทุบให้ก้อนดินแตกตัว แต่ต้องไม่ให้ส่วนที่เป็นเม็ดแข็งมาก

(3) นำดินมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 (0.425 มิลลิเมตร) ใช้ ตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) ซ้อนข้างบนอีกชั้นหนึ่ง เพื่อป้องกันก้อนโตค้างตะแกรงเบอร์ 40 (0.425 มิลลิเมตร) ใช้เวลาร่อนไม่น้อยกว่า 5 นาที

(4) นำดินที่ค้างตะแกรงเบอร์ 40 (0.425 มิลลิเมตร) ทิ้งไป เทดินที่ ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 (0.425 มิลลิเมตร) ใส่ขวดหรือภาชนะใดๆ เขียนป้ายบอกแหล่งและหมายเลขทดลองของวัสดุกำกับด้วยทุกครั้ง

2.15.2.5. การทดลอง

2.15.2.5.1 ให้ตรวจสอบเครื่องมือทดลอง Liquid Limit ดังนี้

(1) เครื่องมือทดลองต้องอยู่ในสภาพดีและมีขนาดถูกต้อง (ตามรูปที่ 2.31)

(2) สลักยึดถ้วยกระทะต้องไม่สึกหรอจนถ้วยกระทะเอียง

(3) สกรูยึดด้วยกระทะจนแน่น

(4) แนวปาดดินในถ้วยกระทะจะต้องไม่สึกเป็นร่อง

(5) ให้ตรวจสอบเครื่องมือปาดร่องดินบ่อยๆ เพื่อให้แน่ใจว่าความกว้างของเครื่องมือนี้ยังคงถูกต้องตามมาตรฐาน

(6) ให้ตรวจสอบความถูกสูงของถ้วยกระทะที่จะยกขึ้น โดยใช้ด้ามของเครื่องมือปาดร่องดิน ซึ่งมีลักษณะหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุตัสขนาด 10 มิลลิเมตร วัดระยะตกของถ้วยกระทะให้ได้ 10 มิลลิเมตรถ้าไม่ถูกต้องให้ปรับโดยคลายสกรูยึดถ้วยกระทะให้หลวมเสียก่อน ปล่อยให้ถ้วยกระทะขยับวางลงบนที่วัดแล้วจึงขันสกรูยึดให้แน่นดังเดิม หมุนที่หมุน

ด้วย กระทะเร็วๆ หลายๆ ครั้งถ้าได้ยินเสียง “แก๊ก” เบาๆ แสดงว่าการตั้งถูกต้องแล้ว แต่ถ้าถ้วยกระทบยังคงสูงขึ้นไปอีกหรือ

ไม่ได้ยินเสียง “แก๊ก” จะต้องปรับเครื่องใหม่

2.15.2.5.2 นำตัวอย่างทั้งหมดที่เตรียมไว้มาเทบนแผ่นกระจก ผสมกันให้ทั่วแล้วแต่งเป็นรูปกรวย ใช้ Spatula กดยอดทรงกรวย แล้วหมุน Sqatula จนครบรอบ เพื่อทำให้กองวัสดุตัวอย่างแบนราบลง ใช้ Spatula แบ่งตัวอย่างเป็น 4 ส่วนด้วยวิธี Quartering นำส่วนตรงกันข้ามรวมกันเพื่อทดลองส่วนที่เหลือเก็บไว้ทดลองเพิ่มเติม ถ้าต้องการภายหลัง

2.15.2.5.3 นำตัวอย่างที่แบ่งมานี้ผสมกับน้ำในถ้วยกระเบื้องเคลือบ หรือบนแผ่นกระจก เติมน้ำลงไปประมาณ 15-20 มิลลิเมตร ใช้ Spatula ผสมไปมา และบี้จนกระทั่งดินและน้ำผสมทั่วกันแล้วเพิ่มน้ำอีกครั้งละประมาณ 1-3 มิลลิเมตร ผสมให้เข้ากันจนทั่ว ใช้เวลาในการผสมทั้งหมด 5-10 นาที

2.15.2.5.4 เมื่อผสมน้ำและคลุกเคล้าจนทั่วแล้ว กะให้เคาะได้ประมาณ 40 ครั้ง นำตัวอย่างใส่ในถ้วยกระเบื้องเคลือบ ใช้แผ่นกระจกปิดข้างบน ตั้งทิ้งไว้ไม่น้อยกว่า 50 นาที และไม่เกิน 1 ชั่วโมง เพื่อให้ส่วนที่เป็นดินเหนียว (ถ้ามี) ดูดซึมน้ำจนทั่ว

2.15.2.5.5 นำตัวอย่างใส่ลงตรงกลางด้วยกระทะ ใช้ Spatula กดและปาดดินโดยพยายามปาดให้น้อยครั้งที่สุดและป้องกันไม่ให้มีฟองอากาศอยู่ข้างใน ให้ดินตรงกลางด้วยกระทะหนา 10 มิลลิเมตร และมีรูปร่างดังรูปที่ 2.32 แล้วนำตัวอย่างที่เหลือกลับมาเก็บในถ้วยกระเบื้องเคลือบอย่างเดิม

2.15.2.5.6 จับยึดถ้วยกระทะให้แน่นให้เครื่องมือปาดร่องดินปาดตัวอย่างให้เป็นร่องตรงกลางให้ได้ร่องที่สะอาดและเรียบร้อยในกรณีที่ตัวอย่างค่อนข้างแข็ง หรือมี Plasticity Index (PI) ต่ำ การกดเครื่องมือปาดร่องดินลงไปอาจจะทำให้ตัวอย่างทางด้านปลายฉีกหลุดหรือดินเคลื่อนออกจากกัน ดังนั้นให้ค่อยๆ ปาดจากหน้าไปหลังและหลังไปหน้า กลับไปกลับมาหลายๆ ครั้ง แต่

ต้องไม่เกิน 6 ครั้ง และค่อยๆ ปาดเป็นร่องลึกลงไปเรื่อยๆ จนครั้งสุดท้ายแตะก้นถ้วยพอดี และได้ร่องดินที่สะอาดเรียบร้อย

2.15.2.5.7 หมุนเคาะถ้วยกระทะด้วยอัตรา 2 ครั้งต่อวินาที จนกระทั่งเคลื่อนที่เข้ามาสัมผัสกันเป็นระยะเวลา 12.7 มิลลิเมตร (1/2 นิ้ว) ระยะเวลาที่ใช้ทดลองนับตั้งแต่ใส่ตัวอย่างลงในถ้วยกระทะจนกระทั่งเคาะเสร็จจะต้องไม่เกิน 3 นาที

2.15.2.5.8 ถ้าไม่แน่ใจว่าการทดลองในข้อ 2.5.7 ถูกต้อง ให้ทำการตรวจสอบ โดยรีบนำตัวอย่างมาผสมกันใหม่โดยเร็ว แล้วนำกลับไปทดลองใหม่ ถ้าการเคาะในครั้งนี้นับจำนวนครั้งได้เท่าเดิมหรือต่างกันหนึ่งครั้ง ถือว่าการทดลองถูกต้อง แต่ถ้าผิดกันมากกว่านั้น จะต้องนำเอาตัวอย่างมาผสมกันใหม่ เพื่อให้น้ำได้ผสมกับตัวอย่างจนทั่ว แล้วนำมาทดลองอีกครั้งหนึ่ง การตรวจสอบนี้จะมีความสำคัญมากในช่วงที่ใส่น้ำลงไปมากๆ และตัวอย่างมี PI สูงเพราะตัวอย่างดูดซึมน้ำยังไม่เต็มที่ขณะทำการทดลองและยังคงดูดซึมน้ำอยู่ตลอดเวลา จึงทำให้การทดลองมีค่าแตกต่างกัน

2.15.2.5.9 ทันทีที่เคาะจนตัวอย่างเคลื่อนที่มาสัมผัสกันยาว 12.7 มิลลิเมตร(1/2 นิ้ว) ให้ใช้ช้อนตักตัวอย่างผ่านตรงที่ตัวอย่างเคลื่อนที่มาสัมผัสกันตลอดแนวความกว้างของตัวอย่างที่ตั้งฉากกับร่องตัวอย่างเอาตัวอย่างใส่กระป๋องปิดฝาให้แน่น แล้วนำไปชั่งหามวล จดจำนวนครั้งที่เคาะไว้ด้วย

2.15.2.5.10 รวมตัวอย่างจากถ้วยกระทะมาใส่ในถ้วยกระเบื้องเคลือบตามเดิม (หรือบนแผ่นกระจกแล้วแต่กรณี) เติมน้ำลงไปแล้วผสมให้เข้ากัน แล้วดำเนินการทดลองตามข้อ 2.5.5 ถึง ข้อ 2.5.9

2.15.2.5.11 ทำการทดลอง 4 จุด แต่ละจุดให้การเคาะต่างกันประมาณ 5-7 ครั้ง และจุดต่างๆ ควรอยู่ระหว่างช่วงดังต่อไปนี้

จุดที่ 1 ช่วงการเคาะ 35 -40 ครั้ง

จุดที่ 2 ช่วงการเคาะ 25-35 ครั้ง

จุดที่ 3 ช่วงการเคาะ 20-30 ครั้ง

จุดที่ 4 ช่วงการเคาะ 15-25 ครั้ง

การทดลองที่เคาะนอกช่วง 15-40 ใช้ไม่ได้

2.15.2.5.12 ถ้าหากตัวอย่างเปียกเพราะเติมน้ำมากเกินไป แล้วต้องการให้ตัวอย่างแห้งขึ้นให้เกลี่ยตัวอย่างบางๆ บนแผ่นกระจกหรือในถ้วยกระเบื้องเคลือบ ผึ่งลมไว้ชั่วครู่ แล้วทำการคลุกผสมกันใหม่ ทำเช่นนี้หลายๆ ครั้ง จนกว่าตัวอย่างจะแห้งตามที่ต้องการ แต่อย่าผึ่งตัวอย่างทิ้งไว้จนผิวหน้า แข็งเป็นคราบขึ้นที่ผิวหน้า ห้ามใช้วิธีเอาตัวอย่างใหม่ ผสมเพิ่มลงไปเพื่อให้ตัวอย่างแห้งขึ้น

2.15.2.5.13 ตัวอย่างที่ใส่กระป๋อง หลังจากชั่งหามวลแล้ว (ให้ชั่งละเอียดถึง 0.01 กรัม) นำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 105-115 ^{0}ซ. อบจนแห้งและมีน้ำหนักคงที่แล้วนำออกจากเตาอบทิ้งไว้จนเย็น แล้วชั่งหามวลแห้ง คำนวณหาปริมาณน้ำในดินของตัวอย่างแต่ละจุด

2.15.3. การคำนวณ

คำนวณหาปริมาณน้ำในดินได้จากสูตร

$$W = \frac{\text{มวลของน้ำในดิน (กรัม)} \times 100}{\text{มวลของดินอบแห้ง (กรัม)}}$$

เมื่อ W = ปริมาณน้ำในดิน มีหน่วยเป็นร้อยละ

2.15.4. การรายงาน

2.15.4.1 เขียน Flow Curve ลงใน Semi logarithmic Graph ซึ่งอยู่ใน แบบฟอร์มที่ ว.2-02 จากปริมาณน้ำในดินและจำนวนครั้งที่ เคาะเป็นเส้นตรงให้ผ่านหรือใกล้เคียงอย่างน้อย 3 จุด

2.15.4.2 Liquid Limit คือ ปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละที่ได้จากการลากเส้นตรงจากจำนวนที่เคาะ 25 ครั้งตัดกับ Flow Curve ให้รายงานค่า LL ในแบบฟอร์มที่ ว.2-02 โดยใช้ทศนิยม 1 ตำแหน่ง

2.15.5. ข้อควรระวัง

2.15.5.1 ดินตัวอย่างที่มีค่า PI ต่ำ เช่น Silty Clay หรือ Sandy Clay ขณะที่ปริมาณน้ำในดินน้อยๆ การเคลื่อนที่ของตัวอย่างเข้าติดกันในร่อง อาจจะไม่ใช่การเคลื่อนที่ เข้าสัมผัสกันอย่างแท้จริง แต่เกิดจากปริมาณน้ำในดินน้อยเกินไปตัวอย่างจึงไม่ยึดเกาะพื้นด้วยกระทะ ที่ปรากฏให้เห็นเคลื่อนที่เข้า

ติดกันนั้น อาจเป็นเพราะตัวอย่างเคลื่อนไถลมาชนกัน ให้ตรวจสอบโดยใช้ Spatula ถ่วงดูตรงที่ตัวอย่างชนกัน ถ้าปรากฏว่าตัวอย่าง “ชนกัน” เฉยๆ ไม่ “ติดเป็นเนื้อเดียว” แสดงว่าเกิดการ Slip ขึ้นให้เพิ่มน้ำแล้วทดลองใหม่

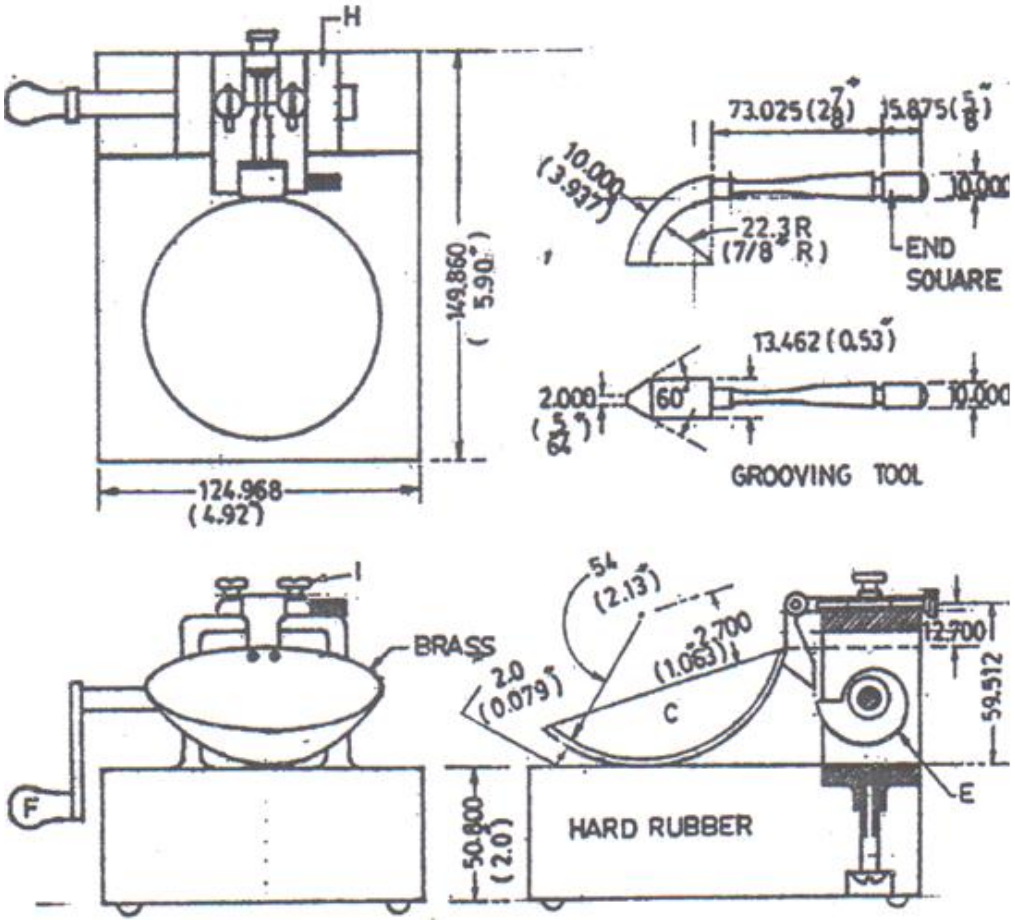
2.15.5.2 ในการเตรียมตัวอย่างทดลอง จะต้องแน่ใจว่า Sand Grains และ Clay Lamps ต่างๆ แยกออกจากกันจนสามารถผ่านตะแกรงเบอร์ 40 (0.425 มิลลิเมตร) ได้ อย่าอบตัวอย่างที่อุณหภูมิเกิน 60^{0} ซ. เพราะจะทำให้ค่า PI และ LL ของวัสดุบางชนิดลดลง และ Organic Matters อาจจะถูกเผาไหม้

2.15.5.3 ให้เก็บตัวอย่างทันทีเมื่อตัวอย่างเคลื่อนที่เข้ามาติดกันยาว 12.7 มิลลิเมตร (1/2 นิ้ว) แล้วรีบชั่งหามวล เนื่องจากปริมาณน้ำในดินมีจำนวนน้อยอยู่แล้ว การเก็บรอไว้จะทำให้น้ำระเหยออกไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งห้องทำงานหรือท้องถิ่นที่มีอากาศร้อนการระเหยของน้ำจะมีมากขึ้น

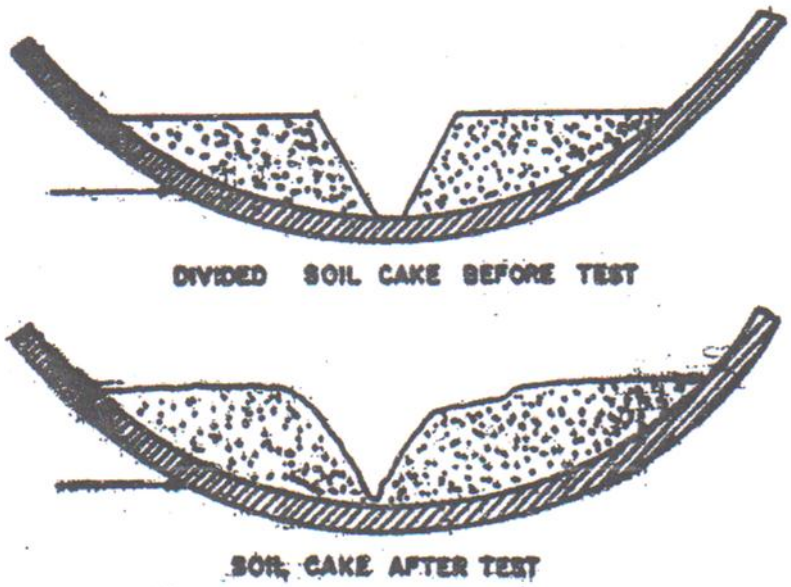
2.15.5.4 ห้ามผสมตัวอย่างกับน้ำในถ้วยกระทะของเครื่องมือทดลอง แต่ให้ผสมตัวอย่างในถ้วยกระเบื้องเคลือบหรือบนแผ่นกระจก

2.15.5.5 ให้วางเครื่องมือทดลองกับพื้นราบทุกครั้งในขณะหมุนเครื่อง ห้ามใช้มืออุ้มเครื่องขึ้น เพื่อหมุนทดลอง

2.15.5.6 น้ำที่ใช้ทดลองจะต้องเป็นน้ำสะอาด เช่น น้ำกลั่น น้ำฝนหรือน้ำประปา



รูปที่ 2.31 MACHANICAL LIQUID LIMIT DEVICE



รูปที่ 2.32 แสดงภาพตัดขวางการทดลองหาค่า LIQUID LIMIT

(อ้างอิง : AASHO T 89-68, 10 THE DITION 1971. FIG.6)

สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง

อันดับทดลองที่ C-443 วันที่รับตัวอย่าง..... วันที่ทดลอง 26/4/43

เจ้าของตัวอย่าง..... หนังสือที่……

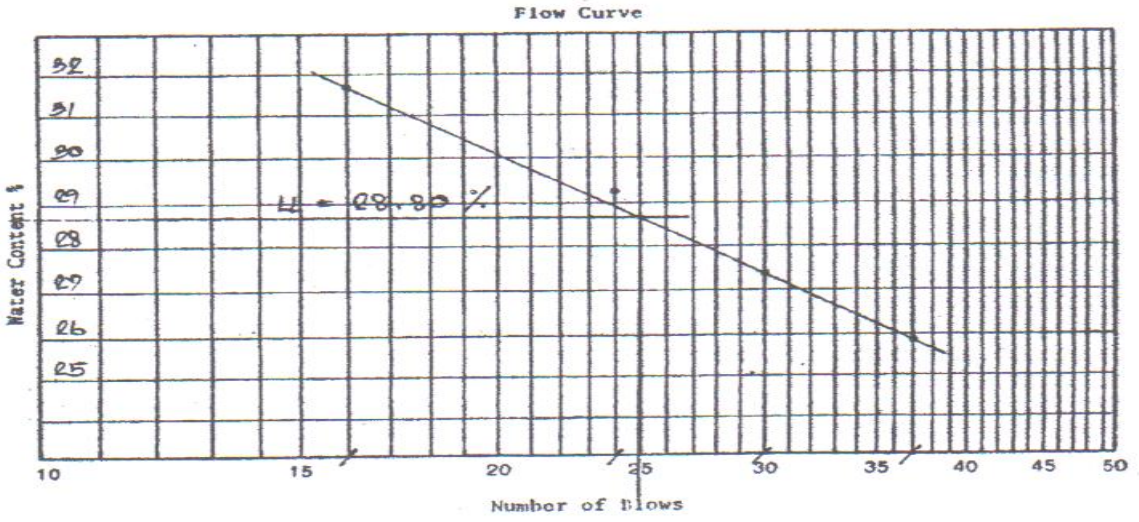
ทางสาย พระประแดง-บางขุนเทียน ตอน 3 เจ้าหน้าที่ทดลอง ชัยฤทธิ์

ATTERBERG LIMITS

Sample : Weathering Rock No…….. Of ……..

Soruce : km. 43+150-43+295 Frontage Rd., Rt

Test	LIQUID LIMIT				PLASTIC LIMIT	
Trial	1	2	3	4	1	2
Can No.	10	5	13	22	16	19
No. of Blows	16	24	30	37	-	-
Wet. Soil+can gm.	37.90	38.11	37.37	35.05	31.40	31.27
Dry. Soil+can gm.	33.82	34.17	33.66	31.70	29.47	29.26
Wt. of water gm.	4.08	3.94	3.71	3.35	1.93	2.01
Wt. of can gm.	20.96	20.70	20.11	18.79	19.93	19.53
Wt. of dry soil gm.	12.86	13.47	13.55	12.91	9.54	9.73
Water content %	31.72	29.23	27.37	25.97	20.28	20.66
	L.L. = 28.80				P.L. = 20.47%	
	P.I. = L.L-P.L. = 28.80-20.47 = 8.33 %					



2.16 วิธีการทดลองหาค่า Plastic Limit (PL) และ Plasticity Index (PI) ของดิน (ทล.ท. 103/2515) (เทียบเท่า AASHTO T 90)

2.16.1 ขอบข่าย

วิธีการทดลองนี้ได้ปรับปรุงจาก AASHTO T 90 อธิบายถึงการหาค่าจำนวนน้ำต่ำสุดในดินเมื่อดินนั้นยังคงอยู่ในสภาพ Plastic โดยการนำดินมาคลึงเป็นเส้นให้แตกตัวที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตร (1/8 นิ้ว)

2.16.2 วิธีทำ

2.16.2.1 เครื่องมือ

เครื่องมือทดลองประกอบด้วย

(1) ใช้เครื่องมือชุดเดียวกับที่ทดลองหา Liquid Limit ตามการทดลองที่ ทล.-ท. 102/2515

(2) แผ่นกระจกขนาดประมาณ 150 มิลลิเมตร x 150 มิลลิเมตร x 10 มิลลิเมตร

2.16.2.2 วัสดุที่ใช้ประกอบการทดลอง

-

2.16.2.3 แบบฟอร์ม

ใช้แบบฟอร์มที่ ว.2-02

2.16.2.4 การเตรียมตัวอย่าง

ดำเนินการตามวิธีการเตรียมตัวอย่างของวิธีการทดลองหาค่า Liquid Limit ของดิน ตามการทดลองที่ ทล.-ท. 102/2515

2.16.2.5 การทดลอง

(1) นำตัวอย่างประมาณ 8 กรัม มาคลุกขยี้ขยำให้เข้ากันจนทั่ว แล้วทำเป็นรูปยาวรี (Ellipsoidal Shape)

(2) ใช้นิ้วมือคลึงตัวอย่างออกเป็นเส้น โดยใช้น้ำหนักกดลงแต่เพียงพอดีในอัตราการคลึง 80 ถึง 90 เที่ยวต่อนาที (คลึงไปและกลับนับเป็น 1 เที่ยว) ให้เส้นผ่าน ศูนย์กลางของเส้นตัวอย่างโตสม่ำเสมอกันโดยตลอด เส้นตัวอย่างจะค่อยๆ ยาวออกและเส้นผ่านศูนย์กลางจะค่อยๆ เล็กลง

(3) เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นตัวอย่างเล็กลงจนเท่ากับ 3.2 มิลลิเมตร (1/8 นิ้ว) และเส้นตัวอย่างแตกพอดี ให้ดำเนินการตามข้อ2.15.2.5.11

(4) ถ้าเส้นตัวอย่างยังไม่แตก เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นตัวอย่างเล็กลงไปถึง 3.2 มิลลิเมตร (1/8 นิ้ว) ให้หักเส้นตัวอย่างออกเป็นหกหรือแปดชิ้น ใช้นิ้วขยี้และขยำทั้งสองมือจนเข้ากันดี แต่งเป็นรูปยาวรีแล้วคลึงใหม่เช่นเดียวกับข้อ (2)

(5) ถ้าดำเนินการตามข้อ (4)แล้วเส้นตัวอย่างยังคงไม่แตก ให้ดำเนินการตามวิธี (4) ซ้ำใหม่ จนกระทั่งเส้นตัวอย่างแตก ไม่สามารถคลึงต่อไปได้

(6) ถ้าการแตกของเส้นตัวอย่างตามข้อ (5) เกิดขึ้นเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดโตกว่า 3.2 มิลลิเมตร (1/8 นิ้ว) และเส้นตัวอย่างนั้นเคยคลึงได้ขนาด 3.2 มิลลิเมตร มาก่อนแล้วให้ดำเนินการตามข้อ2.15.2.5.11 ได้

(7) การแตกของเส้นตัวอย่าง จะแสดงลักษณะผิดแผกกันไปสุดแล้วแต่ชนิดของ ดินบางชนิดจะแตกออกเป็นก้อนเล็กๆ มากมาย บางชนิดแตกออกเป็นลักษณะทรงกระบอก โดยเริ่มต้นแตกปริออกจากปลายทั้งสองข้างก่อน แล้วจึงแตก ติดต่อกันไปตรงกลาง จนในที่สุดเส้นตัวอย่างจะแตกออกเป็นชิ้นบางๆ เล็กๆ หรืออาจจะแตกในลักษณะอื่นๆ ก็ได้

(8) การปฏิบัติตามข้อ 2.5.4 สำหรับดินที่เหนียวมากในการคลึงให้เป็นเส้นแต่ละครั้ง การคลึงครั้งหลังๆ จำเป็นต้องเพิ่มน้ำหนักมากขึ้น ตัวอย่างดินชนิดนี้เมื่อแตกจะแตกออกเป็นปล้องๆ มีขนาดยาว 6.0 ถึง 10.00 มิลลิเมตร (1/4 - 3/8 นิ้ว)

(9) ในการคลึงแต่ละครั้งตามข้อ 2.5.4 ห้ามเปลี่ยนอัตราเร็ว หรือเปลี่ยนน้ำหนักการคลึง หรือเปลี่ยนทั้งสองอย่าง เพื่อต้องการให้เส้นตัวอย่างแตกที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตร

(10)สำหรับตัวอย่างที่มี Plasticity น้อยๆ ในครั้งแรกควรทำดินตัวอย่างให้มีรูปร่างยาวรีและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโตกว่า 3.2 มิลลิเมตรเล็กน้อย

(11)รวบรวมตัวอย่างที่แตกทั้งหมดใส่ลงในกระป๋องปิดฝารีบนำไปชั่งแล้ว บันทึกมวลไว้และเอาไปอบจนแห้งที่อุณหภูมิ 110±5 0 ซ. นำไปชั่ง บันทึกมวลดินแห้ง หามวลที่หายไป และถือว่าเป็นมวลของน้ำ

(12) ให้ทำการทดลองตัวอย่างละอย่างน้อย 2 ครั้ง แต่ผลต่างของค่า Plastic Limit (PL) จะต้องไม่เกิน 2%

2.16.3 การคำนวณ

คำนวณหาค่า Plastic Limit (PL) และค่า Plasticity Index (PI) ได้จากสูตร

$$\text{Plastic Limit (PL)} = \frac{\text{มวลของน้ำ (กรัม)} \times 100\%}{\text{มวลของดินแห้ง (กรัม)}}$$

$$\text{Plasticity Index (PI)} = \text{LL - PL}$$

2.16.4 การรายงาน

ให้รายงานผลการทดลองโดยใช้ทศนิยม 1 ตำแหน่ง ยกเว้นกรณีดังต่อไปนี้

2.16.4.1 ในกรณีที่ไม่สามารถหาค่า Plastic Limit (PL) และค่า Plasticity Index (PI) ได้ ให้รายงานค่า PI ไว้ว่า “NP (Non-Plastic)”

2.16.4.2 ในกรณีที่ค่า Plastic Limit มากว่าหรือเท่ากับ Liquid Limit ให้รายงานค่า PI ว่า “NP”

2.16.5 ข้อควรระวัง

2.16.5.1 ในการทดลองแต่ละครั้ง ให้แต่ดินตัวอย่างที่ใช้ทดลองเป็นแท่งยาวรีก่อนคลึง น้ำหนักนิ้วมือและอัตราความเร็วที่ใช้คลึงจะต้องเหมือนกัน

2.16.5.2 ทุกครั้งที่เก็บตัวอย่างที่ใช้ชั่งหามวลทันที มิฉะนั้นน้ำจะระเหยหายไป

2.16.5.3 ตัวอย่างดินพวก Lilt หรือพวก PI ต่ำๆ จะทำลำบากมาก ก่อนคลึงให้แต่งดินเป็นแท่งยาว น้ำหนักนิ้วที่ใช้กดคลึงต้องเบา มิฉะนั้นแท่งตัวอย่างจะแตกทันที และระหว่างคลึงอาจจะต้องคอยซับน้ำที่ออกจากตัวอย่างมาติดแผ่นกระจก

2.16.5.4 ในกรณีที่ตัวอย่างมีทรายปนมาก ให้หาค่า Plastic Limit ก่อนค่า Liquid Limit ถ้าเป็น Non-Plastic จะได้ไม่ต้องทดลองหาค่า Liquid Limit

2.17 วิธีการทดลอง Compaction Test แบบมาตรฐาน(ทล.ท.107/2517) (เทียบเท่า AASHTO T 99)

2.17.1 ขอบข่าย

การทดลอง Compaction วิธีนี้เป็นการทดลองโดยวิธี Dynamic Compaction เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นของดินกับปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดทับ เมื่อทำการบดทับดินใน

แบบตามขนาดข้างล่างนี้ ด้วยค้อนหนัก 2.494 กิโลกรัม (5.5 ปอนด์) ระยะปล่อยค้อนตก 304.8 มิลลิเมตร (12 นิ้ว)

วิธี ก. แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) ดินผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว)

วิธี ข. แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) ดินผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว)

วิธี ค. แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) ดินผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4)

วิธี ง. แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) ดินผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4)

2.17.2 วิธีทำ

2.17.2.1 เครื่องมือ

เครื่องมือทดลองประกอบด้วย

2.17.2.1.1 แบบ (Mold) ทำด้วยโลหะแข็งและเหนียว ลักษณะทรงกระบอกกลวงมี 2 ขนาด คือ

(1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) สูง 116.4 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว) และจะต้องมีปลอกขนาดเดียวกันสูงประมาณ 50.8 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) มีฐานทึบตามรูปที่ 1

(2) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 152.4 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) สูง 177.8 มิลลิเมตร (7 นิ้ว) และจะต้องมีปลอกขนาดเดียวกันสูงประมาณ 50.8 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) มีฐานทึบหรือเจาะรูพรุนในการทดลองต้องใช้แท่งโลหะรองตามข้อ 2.1.2 รองด้านใต้ เพื่อให้ได้ตัวอย่างสูง 116.4 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว) หรืออาจใช้แบบขนาดสูง 116.4 มิลลิเมตร (4.564 นิ้ว) ตามรูปที่ 2 โดยไม่ต้องใช้แท่งโลหะรอง แต่ต้องมีฐานทึบหรือแบบขนาดสูงอื่นใด ซึ่งเมื่อใช้แท่งโลหะรองแล้ว ได้ความสูงของตัวอย่างในแบบเท่ากับ 116.4 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว)

2.17.2.1.2 แท่งโลหะรองเป็นโลหะรูปทรงกระบอก เพื่อใช้กับแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 150.8 มิลลิเมตร (5 15/16 นิ้ว) และสูงขนาดต่างๆ ซึ่งเมื่อใช้กับแบบตามข้อ 2.17.2.1.1 -(2) แล้ว จะเหลือเป็นตัวอย่างสูงเท่ากับ 116.4 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว) นั่นเอง

2.17.2.1.3 ค้อน ทำด้วยโลหะมีลักษณะดังนี้ เป็นรูปทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) มีมวลรวมทั้งด้ามถือ 2.494 กิโลกรัม (5.5 ปอนด์) ต้องมีปลอกที่ทำให้ไว้อย่างเหมาะสม เป็นตังบังคับระยะตกเท่ากับ 304.8 มิลลิเมตร (12 นิ้ว) เหนือระดับดินที่ต้องการบดทับ จะต้องมีรูระบายอากาศอย่างน้อย 4 รู แต่ละรูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 9.5 มิลลิเมตร เจาะห่างจากปลายของปลอกทั้ง 2 ข้างประมาณ 19 มิลลิเมตร

2.17.2.1.4 เครื่องดันตัวอย่าง เป็นเครื่องดันดินออกจากแบบหลังจากทดลองเสร็จแล้ว จะมีหรือไม่มีก็ได้ ประกอบด้วย Jack ทำหน้าที่เป็นตัวดันและโครงเหล็กทำหน้าที่เป็นตัวจับแบบ ในกรณีที่ไม่มีใช้ ให้ใช้สิ่วหรือเครื่องมืออย่างอื่นแคะตัวอย่างออกจากแบบ

2.17.2.1.5 ตาชั่งแบบ Balance มีขีดความสามารถชั่งได้ไม่น้อยกว่า 16 กิโลกรัม และชั่งได้ละเอียดถึง 0.001 กิโลกรัม สำหรับชั่งตัวอย่างทดลอง

2.17.2.1.6 ตาชั่งแบบ Scale หรือแบบ Balance มีขีดความสามารถชั่งได้ 1,000 กรัม และชั่งได้ละเอียดถึง 0.1 กิโลกรัม สำหรับหาปริมาณน้ำในดิน

2.17.2.1.7 เตาอบ ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่ 110±5 องศาเซลเซียส สำหรับอบดินตัวอย่าง

2.17.2.1.8 เหล็กปาด เป็นเหล็กคล้ายไม้บรรทัด หนาและแข็งเพียงพอในการตัดแต่งตัวอย่างที่ส่วนบนของาแบบ มีความยาวไม่น้อยกว่า 300 มิลลิเมตร และไม่ยาวเกินไปจะเกะกะ หนาประมาณ 3.0 มิลลิเมตร

2.17.2.1.9 ตะแกรงร่อนดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 203 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) สูงประมาณ 51 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) มีขนาดดังนี้

(1) ขนาด 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว)

(2) ขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4)

2.17.2.1.10 เครื่องผสม เป็นเครื่องมือจำเป็นต่างๆ ที่ใช้ผสมตัวอย่าง ได้แก่ ถาด, ช้อน, พลั่ว, เกรียง, ค้อนยาง, ถ้วยตวงวัดปริมาณน้ำ หรือจะใช้เครื่องผสมแบบ Mechanical Mixer ก็ได้

2.17.2.1.11 กระป๋องอบดิน สำหรับใช้ใส่ตัวอย่างดินเพื่ออบหาปริมาณน้ำในดิน

2.17.2.2 วัสดุที่ใช้ประกอบการทดลอง

น้ำสะอาด

2.17.2.3 แบบฟอร์ม

ใช้แบบฟอร์มที่ ว.2-02 สำหรับทำ Compaction Test และที่ ว.2-15 สำหรับ Plot Curve ผลการทำ Compaction Test

2.17.2.4 การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างได้แก่ ดินหรือหินคลุก หรือ Soil-Aggregate หรือวัสดุอื่นใดที่ต้องการทดลองให้ดำเนินการดังนี้

2.17.2.4.1 ถ้าขนาดของตัวอย่างก้อนที่ใหญ่ที่สุด มีขนาดโตกว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ให้เตรียมตัวอย่างดังต่อไปนี้

(1) นำตัวอย่างมาทำให้แห้ง โดยวิธีตากแห้งผึ่งอากาศให้แห้ง และทำ Quartering หรือใช้เครื่องมือแบ่งตัวอย่าง เมื่อเห็นแห้งพอเหมาะสมแล้ว (มีน้ำประมาณ 2-3%) แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงเป็น 3 ขนาด คือ

- ขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว)
- ขนาดระหว่าง 19.00 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ถึง ขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4)
- ขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4)

(2) ทำการชั่งหามวลของวัสดุแต่ละขนาดที่เตรียมได้จากข้อ 2.17.2.4.1 (1) ก็จะทราบว่ามวลของตัวอย่างแต่ละขนาดมีจำนวนอยู่ขนาดละเท่าใด

(3) ตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ให้ทิ้งไป

(4) แทนที่มวลรวมของตัวอย่างในข้อ 2.4.1 (3) ด้วยตัวอย่างที่มีขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) ด้วยมวลที่เท่ากัน ตัวอย่างเช่น มีขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร อยู่ 2,650 กรัม ก็ให้ใช้ตัวอย่างขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร เพิ่มเข้าไปอีก 2,650 กรัมที่เหลือจะเป็นขนาดที่เล็กกว่า 19.0 มิลลิเมตร ตามที่มีจริงดังนี้

ตัวอย่างทั้งหมดมีมวล 9,000 กรัม

มีขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร 2,650 กรัม

มีขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร 4,850 กรัม

จากวิธีการเตรียมตัวอย่างตามที่กล่าวมาแล้วจะได้มวลของตัวอย่างที่เตรียมไว้คือ

มีขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร เป็นจำนวน 2,650+4,850 = 7,500 กรัม และมีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร เท่ากับ 1,500 กรัม

(5) คลุกตัวอย่างที่ได้จากข้อ 2.17.2.4.1 (4) ให้เข้ากัน

2.17.2.4.2 ถ้าขนาดของตัวอย่างก้อนที่ใหญ่ที่สุดมีขนาดเล็กกว่า .0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ให้นำตัวอย่างมาทำให้แห้งโดยวิธีตากแห้งผึ่งอากาศให้แห้ง (มีน้ำประมาณ 2-3%) และทำ Quartering หรือใช้เครื่องแบ่งตัวอย่างและคลุกตัวอย่างให้เข้ากัน

2.17.2.4.3 ถ้าต้องการทดลองตามวิธี ค. หรือ ง. ดังกล่าวในขอบข่าย ให้นำตัวอย่างมาทำให้แห้งโดยวิธีตากแห้งผึ่งอากาศ แล้วใช้ค้อน

ทุบให้ก้อนหลุดออกจากกันและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) คลุกตัวอย่างให้เข้ากัน

2.17.2.4.4 ชั่งตัวอย่างที่เตรียมได้จากข้อ 2.17.2.4.1 หรือ 2.17.2.4.2 หรือ

2.17.2.4.5 แล้วแต่กรณีให้ได้มวลประมาณดังต่อไปนี้

(1) ถ้าใช้แบบขนาดเล็กตามข้อ 2.17.2.1.1 (1) ให้ใช้มวลประมาณ 3,000 กรัม สำหรับการทดลอง 1 ครั้ง

(2) ถ้าใช้แบบขนาดใหญ่ตามข้อ 2.17.2.1.1 (2) ให้ใช้มวลประมาณ 6,000 กรัม สำหรับการทดลอง 1 ครั้ง

2.17.2.4.6 ปริมาณตัวอย่างตามข้อ 2.4.4 ให้เตรียมตัวอย่างเพื่อทดลองได้ไม่น้อยกว่า 4 ครั้ง

2.17.2.5 การทดลอง

การทดลอง Compaction Test จะใช้แบบขนาดใดก็ได้ แล้วแต่ความต้องการตามวิธีต่างๆ ดังกล่าว ในขอบข่ายแล้วให้ดำเนินการทดลอง ดังนี้

2.17.2.5.1 นำตัวอย่างที่ได้เตรียมไว้แล้วมาคลุกเคล้าจนเข้ากันดี

2.17.2.5.2 เติมน้ำจำนวนหนึ่ง โดยปกติมักเริ่มต้นที่ประมาณ 4% ต่ำกว่าปริมาณน้ำในดินที่ให้ความแน่นสูงสุด

2.17.2.5.3 คลุกเคล้าตัวอย่างที่เติมน้ำแล้วด้วยมือ หรือนำเข้าเครื่องผสมจนเข้ากันดี

2.17.2.5.4 แบ่งตัวอย่างใส่ลงในแบบซึ่งมีปลอกสวมเรียบร้อย โดยให้ดินแต่ละชั้นเมื่อบดทับแล้วมีความสูงประมาณ 1/3 ของ 127 มิลลิเมตร (5 นิ้ว)

2.17.2.5.5 ทำการบดทับโดยค้อน ดังนี้

- ตามวิธี ก. และ ค. จำนวน 25 ครั้ง
- ตามวิธี ข. และ ง. จำนวน 56 ครั้ง

2.17.2.5.6 ดำเนินการบดทับจนได้ตัวอย่างที่ทำการบดทับแล้วเป็นชั้นๆ จำนวน 3 ชั้น มีความสูงประมาณ 127 มิลลิเมตร (5 นิ้ว) (สูงกว่าแบบประมาณ 10 มิลลิเมตร)

2.17.2.5.7 ถอดปลอกออก ใช้เหล็กปาดแต่งหน้าให้เรียบเท่าระดับของตอนบนของแบบ (เหลือความสูงเท่ากับ 116.4 มิลลิเมตร) กรณีมีหลุมบนหน้า ให้เติมดินตัวอย่างและใช้ค้อนทุบให้แน่น

พอควรแล้วนำไปชั่ง จะได้มวลของดินตัวอย่าง และมวลของแบบ หักมวลของแบบออกก็จะได้มวลของดินตัวอย่างเปียก

2.17.2.5.8 ในขณะเดียวกับทีทำการบดทับตัวอย่างในแบบ ให้นำดินใส่กระป๋องอบดิน เพื่อนำไปทดลองหาปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละ มวลของดินที่นำไปหาปริมาณน้ำในดิน ให้ใช้ดังนี้

- ขนาดก้อนใหญ่สุด 19.0 มิลลิเมตร ใช้ประมาณ 300 กรัม
- ขนาดก้อนใหญ่สุด 4.75 มิลลิเมตร ใช้ประมาณ 100 กรัม

2.17.2.5.9 คำนวณหาค่าความแน่นเปียก, ρ_t และความแน่นแห้ง, ρ_d เมื่อทราบปริมาณน้ำในดิน, w

2.17.2.5.10 ดำเนินตามข้อ 2.17.2.5.1 ถึงข้อ 2.17.2.5.9 โดยเพิ่มปริมาณน้ำในดินขึ้นอีกครั้งละ 2% จนกว่าจะได้ความแน่นลดลงจึงหยุดการทดลองหรืออาจลดน้ำที่ผสม ในกรณีที่เมื่อเพิ่มน้ำแล้วได้ความแน่นลดลง เพื่อให้เขียน Curve ได้

2.17.2.5.11 เขียน Curve ระหว่างความแน่นแห้ง (ρ_d) และปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละ (w) ก็จะทราบค่าความแน่นแห้งสูงสุด Max. ρ_d (Maximum Dry Density) และปริมาณน้ำในดินที่ให้ความแน่นแห้งสูงสุด, OMC. (Optimum Moisture Content)

2.17.3 การคำนวณ

2.17.3.1 คำนวณหาค่าปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละ

$$W = ([(M)]_1\text{-}M_2)\ 100)/M_2$$

เมื่อ w = ปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละคิดเทียบกับมวลของดินอบแห้ง

M_1 = มวลของดินเปียก มีหน่วยเป็นกรัม

M_2 = มวลของดินอบแห้ง มีหน่วยเป็นกรัม

2.17.3.2 คำนวณหาค่าความแน่นเปียก

$$P_t = A/V$$

เมื่อ ρ_t = ความแน่นเปียก มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิลิตร

A = มวลของดินเปียกที่บดทับในแบบ มีหน่วยเป็นกรัม

V = ปริมาตรของแบบ หรือปริมาตรของดินเปียกที่บดทับในแบบ มีหน่วยเป็นมิลลิลิตร

2.17.3.3 คำนวณหาค่าความแน่นแห้ง

$$\rho_d = \rho_t/(1+W/100)$$

เมื่อ ρ_d = ความแน่นแห้ง มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิลิตร

ρ_t = ความแน่นเปียก มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิลิตร

w = ปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละ

2.17.4 การรายงาน

ในการทำ Compaction Test แบบมาตรฐานให้รายงาน ดังนี้

2.17.4.1 ความแน่นแห้งสูง มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิลิตร (แบบมาตรฐาน)

2.17.4.2 ค่าปริมาณน้ำในดินที่ให้ความแน่นแห้งสูงสุด เป็นร้อยละ

ตัวอย่าง ความแน่นแห้งสูงสุด (แบบมาตรฐาน) 2.010 กรัมต่อมิลลิลิตร (ใช้ทศนิยม 3 ตำแหน่ง)

ค่าปริมาณน้ำในดินที่ให้ความแน่นแห้งสูงสุด 20.8 % (ใช้ทศนิยม 1 ตำแหน่ง)

2.17.5. ข้อควรระวัง

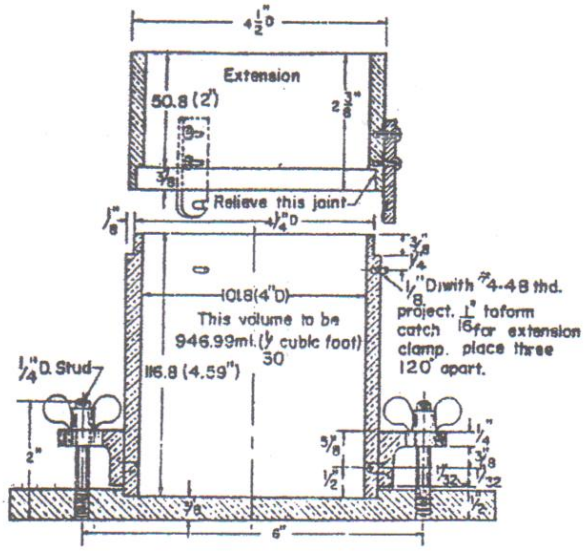
2.17.5.1 การกะปริมาณน้ำที่ใช้ผสมสำหรับดินเหนียว ควรใช้ปริมาณต่ำกว่าและสูงกว่าปริมาณน้ำที่ให้ความแน่นสูงสุดที่ประมาณไว้ สำหรับดินทรายควรเริ่มจากดินตากแห้ง แล้วค่อยๆ เพิ่มปริมาณน้ำขึ้นทีละน้อย เพื่อให้ได้จำนวนจุดที่จะนำไปเขียน Curve มากที่สุด

2.17.5.2 ในการใช้ค้อนทำการบดทับให้วางแบบบนพื้นที่มั่นคง แข็งแรง ราบเรียบ เช่น คอนกรีต เพื่อไมให้แบบกระตอนขึ้นขณะทำการตอก

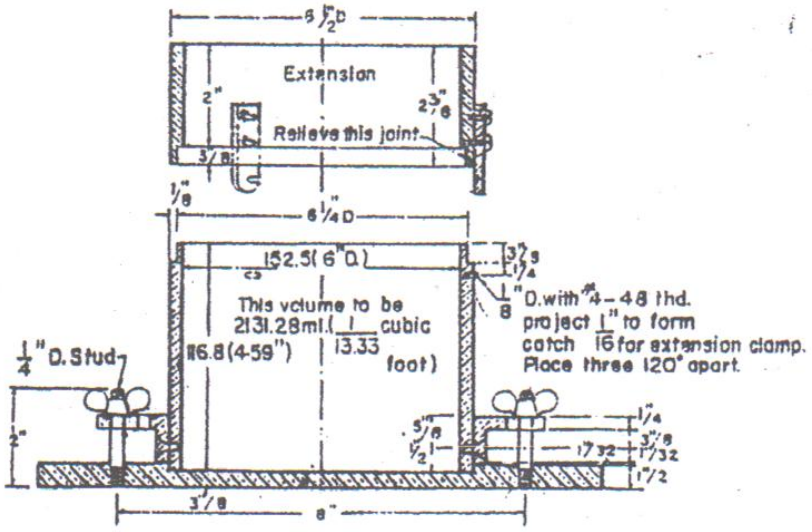
2.17.5.3 ให้ใช้จำนวนตัวอย่างให้เพียงพอ โดยให้มีตัวอย่างทดลองทางด้านแห้งกว่าจำนวนน้ำที่ให้ความแน่นสูงสุดประมาณไม่น้อยกว่า 2 ตัวอย่าง และให้มีจุดทดลองทางด้านเปียกกว่าจำนวนน้ำให้ความแน่นสูงสุดประมาณ 1 ตัวอย่าง

2.17.5.4 สำหรับดินที่เหนียวมากหลังจากตากแห้งแล้ว ให้ทุบด้วยค้อนยาง หรือนำเข้าเครื่องบดจนได้ตัวอย่างผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) ให้มากที่สุดเท่าที่จะมากได้

2.17.5.5 ปริมาตรแบบ ให้ทำการวัดและคำนวณ เพื่อให้ได้ปริมาตรที่แท้จริงของแต่ละแบบ ห้ามใช้ปริมาตรที่แสดงไว้โดยประมาณในรูป



รูปที่ 2.33 Cylindrical Mold, 101.6 mm. (4.0 in) for soil Tests.



รูปที่ 2.34 Cylindrical Mold, 152.5 mm. (6.0 in) for soil Tests.

เจ้าของตัวอย่าง.....

หนังสือที่……วันที่รับหนังสือ.....

ทางสาย พระประแดง-บางขุนเทียน ตอน 3

เจ้าหน้าที่ทดลอง ชัยฤทธิ์ วันที่รับตัวอย่าง.....วันที่ทดลอง 1/5/43

COMPACTION TEST

Soil Sample : Sand Bedding - Backfill Layer MW AØ 1,000 mm.

Location : ……..Boring No. : ……Depth : ……..……

Type Test : ……..Mold Wt. : 3.528 kgs. Volume : 936.6 ml.……

DENSITY

Trial (Water added) %	10	12	14	16			
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.265	5.380	5.437	5.416			
Wt. Mold (Kg.)	3.528	3.528	3.528	3.528			
Wt. Soil (Kg.)	1.737	1.852	1.909	1.888			
Wt. Density (gm./ml.)	1.855	1.977	2.038	2.016			
Dry Density (gm./ml.)	1.679	1.760	1.780	1.725			
Void Ratio e							
Porosity n							

WATER CONTENT

Can No.	27	12	19	23			
Wt. Can + Wet Soil (gm.)	380.7	346.8	362.3	373.8			
Wt. Can + Dry Soil (gm.)	348.5	313.4	321.6	325.8			
Wt. Water (gm.)	32.2	33.4	40.7	48.0			
Wt. Can (gm.)	41.5	42.0	40.9	42.0			
Wt. Dry Soil (gm.)	307.0	271.4	280.7	283.8			
Water Content (%)	10.5	12.3	14.5	16.9			

Remarks Avg = 0.5 %

สำนักงานวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง

กรมทางหลวง

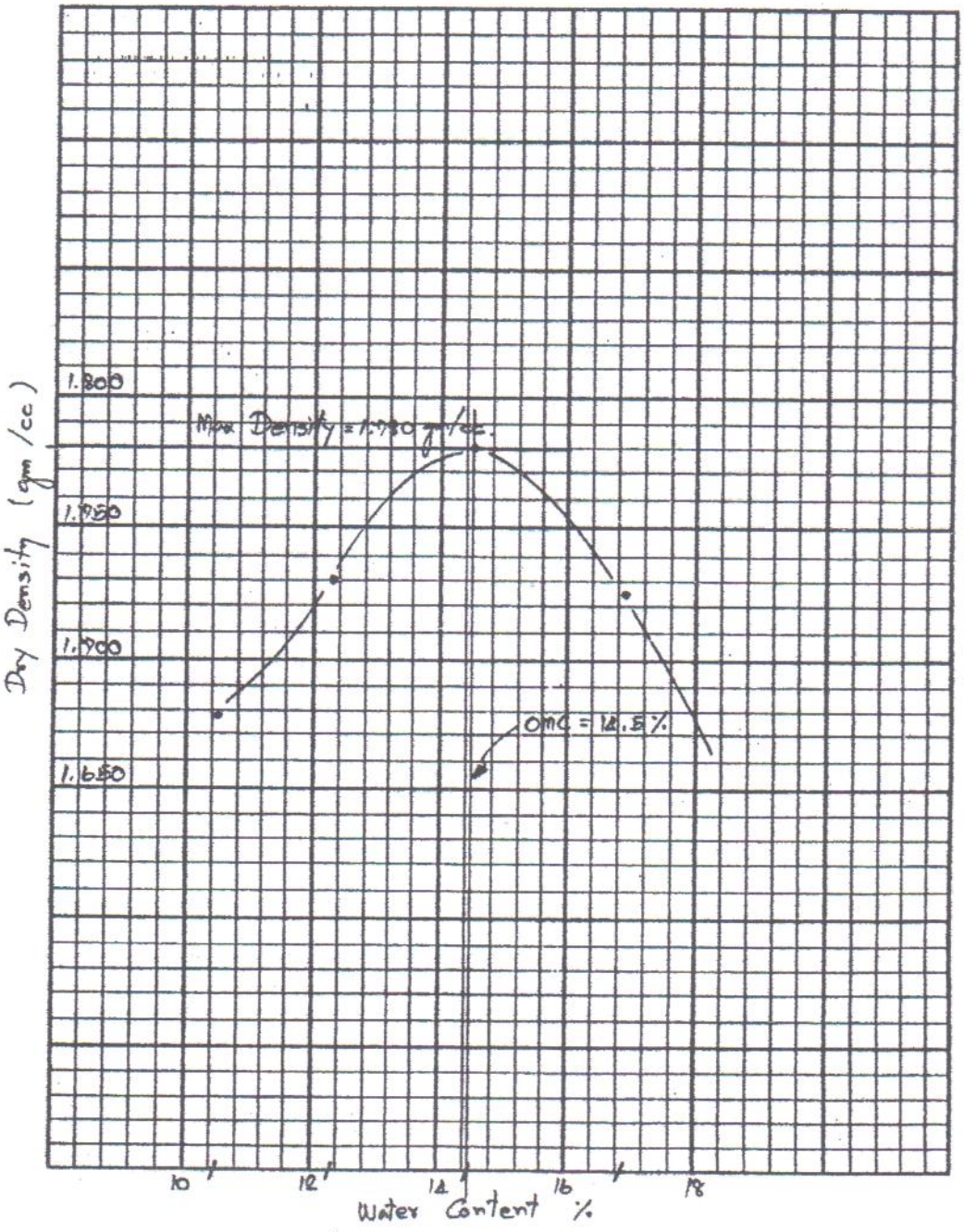
Test No. P-3

Type of Test Compaction Test แบบมาตรฐาน วิธี ก.

Datec 2/5/43

Source Sand Bedding-Backfill Layer AW AØ 1,000 mm.

Plotted by ชัยฤทธิ์



2.18 วิธีการทดลองหาค่าความแน่นของวัสดุในสนาม โดยใช้ทราย (ทล.-ท. 603/2517)

(เทียบเท่า AASHTO T 191)

2.18.1 ขอบข่าย

วิธีการทดลองนี้เป็นการใช้ทรายแทนที่ (Sand Replacement หรือ Sand Cone Method) เพื่อหาความแน่นในสนาม (In-Place Density) ของวัสดุที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 50.8 มิลลิเมตร (2 นิ้ว)

2.18.2 วิธีทำ

2.18.2.1 เครื่องมือ

เครื่องทดลองหาค่าความแน่น (แสดงในรายละเอียดในรูปที่ 2.38) ประกอบด้วย

2.18.2.1.1 ขวด (Jar) ลักษณะทรงกระบอก เป็นแก้วหรือพลาสติกที่โปร่งแสง และมีขนาดโดยประมาณดังนี้คือ ปริมาตร 3,780 มิลลิลิตร (1 แกลลอน) ตรงกลางขวดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 160 มิลลิเมตร ปากขวดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร และมีเกลียวสำหรับต่อกับกรวย

2.18.2.1.2 กรวย (Metal Funnel) เป็นโลหะสูงประมาณ 210 มิลลิเมตร ตรงกลางมีลิ้น (Value) สำหรับปิดหรือเปิดรูทรงกระบอก (Orifice) เส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร (1/2 นิ้ว) ยาว 28.6 มิลลิเมตร (1 1/8 นิ้ว) ปากกรวยบานออกมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 165.1 มิลลิเมตร (6 1/2 นิ้ว) เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 171.5 มิลลิเมตร (6 3/4 นิ้ว) สูง 136.5 มิลลิเมตร (5 3/8 นิ้ว) ปลายอีกข้างหนึ่งมีเกลียวสำหรับต่อกับขวดขณะทำการทดลอง รอยต่อระหว่างขวดและกรวยต้องปิดสนิท ในกรณีที่มีช่องว่างหรือเคลื่อนตัวได้ต้องใส่แหวนยางหรือ Gasket

2.18.2.1.3 แผ่นฐาน (Base Plate) เป็นโลหะขนาด 304.8 มิลลิเมตร x 304.8 มิลลิเมตร (12 นิ้ว x 12 นิ้ว) ตรงกลางมีรูกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 165.1 มิลลิเมตร (เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของปากกรวย) มีร่องกว้างประมาณ 3.2 มิลลิเมตร (1/8 นิ้ว) สำหรับวางปากกรวยให้สนิทขอบของ

แผ่นฐานยกสูงขึ้นเพื่อความสะดวกในการเก็บดินตัวอย่าง มีรูสำหรับตอกตะปูยึดแผ่นฐานไว้ทั้ง 4 มุม

หมายเหตุ เครื่องทดลองความแน่นนี้ใช้กับตัวอย่างประมาณ 2,800 มิลลิลิตร (0.10 ลูกบาศก์ฟุต) อาจดัดแปลงเครื่องมือให้เล็กลงหรือใหญ่ขึ้นได้ แล้วแต่ความเหมาะสมในการใช้งานแต่ละชนิด

2.18.2.1.4 ทราย เป็นทรายออตตาวา (Ottawa Sand) หรือทรายธรรมดาที่มีในธรรมชาติหรือที่ทำขึ้น หรือวัสดุอื่นใดที่ต้องมีความสะอาด แห้ง ไหลได้โดยอิสระ (Free Flowing) ไม่มีเชื้อประสาน แข็ง กลม ไม่มีรอยแตก ไม่มีเหลี่ยมมุม ขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 20 (0.85 มิลลิเมตร) ค้างตะแกรงเบอร์ 40 (0.425 มิลลิเมตร) และมีความหนาแน่น (Bulk Density) ที่เปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์

2.18.2.1.5 เครื่องชั่งสนาม มีขีดความสามารถชั่งได้ไม่น้อยกว่า 16 กิโลกรัม อ่านได้ละเอียด 1.0 กรัม

2.18.2.1.6 เครื่องชั่งขนาด 1,000 กรัม อ่านได้ละเอียด 0.1 กรัม

2.18.2.1.7 เครื่องอบ (Drying Equipment) เป็นเตาอบไฟฟ้าหรือเตาเผาซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ประมาณ 110±5 องศาเซลเซียส หรือเครื่องมืออื่นใดที่สามารถทำให้ตัวอย่างแห้งเพื่อหาปริมาณน้ำในดิน

2.18.2.1.8 เครื่องมือประกอบอื่นๆ มีช้อนตักดิน กระป๋องเก็บตัวอย่าง ภาชนะใส่ดิน เกรียง สิ่ง ค้อน อีเตอร์ จอบ พลั่ว แปรงขน แปรงลวด เหล็กปาก ตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ตะแกรงเบอร์ 20 (0.85 มิลลิเมตร) ตะแกรงเบอร์ 40 (0.425 มิลลิเมตร) น้ำกลั่น และเทอร์โมมิเตอร์

2.18.2.2 วัสดุประกอบการทดลอง

-

2.18.2.3 แบบฟอร์ม

2.18.2.3.1 ใช้แบบฟอร์มที่ ว. 6-03 ก.

2.18.2.3.2 สำหรับในกรณีที่วัสดุค้างตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร มากกว่า 10% ให้ใช้แบบฟอร์มที่ ว. 6-03 ก. และ ว. 6-03 ข.

2.18.2.3.2 ใช้แบบฟอร์มที่ ว. 6-07 สำหรับรายงานผล

2.18.2.4 การเตรียมตัวอย่าง

-

2.18.2.5 การทดลอง

2.18.2.5.1 การตรวจสอบความแน่นของทราย (Bulk Density of Sand) ให้ดำเนินการดังนี้

(1) หามวลของทรายเต็มขวด (M_1)

(1.1) หงายขวดเปล่าที่ประกอบเข้ากับทราย ซึ่งได้ทำความสะอาดและชั่งเรียบร้อยแล้วลงบนพื้นที่มั่นคงได้ระดับ ปิดลิ้นแล้วเททรายใส่ในกรวยจนเต็ม

(1.2) เปิดลิ้นให้ทรายไหลลงในขวด และคอยเติมทรายให้เต็มกรวยอยู่ตลอดเวลา ต้องระวังไม่ให้ขวดทรายกระเทือน เนื่องจากแรงสั่นสะเทือนจะทำให้ค่าความแน่นของทรายผิดได้ เมื่อทรายล้นขวดแล้วจึงปิดลิ้น แล้วเททรายที่ล้นออกให้หมด

(1.3) ชั่งขวดทรายแล้วหามวลของทรายเต็มขวดโดยเอามวลของขวดเปล่าพร้อมกรวยไปหักออกจากมวลของขวดทราย

(1.4) ให้ทดลองอย่างน้อย 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยมวลของทรายเต็มขวดเป็น M_1

(2) หาปริมาตรของขวด (L)

(2.1) ตั้งขวดเปล่าพร้อมกรวยบนพื้นที่มั่นคงได้ระดับ แล้วเปิดลิ้นไว้

(2.2) เติมน้ำกลั่นลงในขวด จนกระทั่งระดับน้ำขึ้นท่วมกรวยแล้วจึงปิดลิ้น และเทน้ำที่ล้นข้างบนออกให้หมด

(2.3) ถ้าเกลียวของขวดและกรวยปิดไม่สนิทจะมีน้ำซึมออกมาในขณะที่เติมน้ำ ให้ใช้พาราฟิน หรือเทปหรือขี้ผึ้ง ฉาบป้องกันน้ำซึม

(2.4) เช็ดน้ำที่ติดกรวยให้แห้ง แล้วนำขวดน้ำไปชั่ง หามวลของน้ำเต็มขวด โดยเอามวลของขวดเปล่าไปหักออกจากมวลของขวดน้ำ ให้หักมวลของวัสดุป้องกันน้ำรั่วออกด้วย

(2.5) วัดอุณหภูมิของน้ำในขวด

(2.6) ให้ทดลองอย่างน้อย 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยมวลของน้ำเต็มขวดเป็น M_2 และอุณหภูมิของน้ำ เพื่อนำไปหาค่าปริมาตรของน้ำต่อหนึ่งหน่วยมวลเป็น T ตามตารางที่ 1

(2.7) คำนวณหาปริมาตรของขวดเป็น L

หมายเหตุ

1. ต้องทำเครื่องหมายไว้ว่าเกลียวของขวดและกรวยเคลื่อนตัวหรือไม่ เกลียวต้องไม่ขยับเขยื้อน เพื่อให้ปริมาตรของขวดมีค่าคงที่ตลอดเวลาที่ทดลอง
2. เมื่อได้ปริมาตรของขวดเรียบร้อยแล้ว ให้บันทึกปริมาตรที่ถูกต้องของขวดนั้นไว้เพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป

2.18.2.5.2 การทดลองหาค่าความหนาแน่นของดินที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร

(1) ตั้งเครื่องชั่งให้อยู่ในแนวระดับและปรับให้ได้ศูนย์

(1.1) ชั่งหามวลของกระป๋องเก็บตัวอย่างเป็น X_4

(1.2) ชั่งหามวลของภาชนะใส่ดินเป็น P2

(1.3) เติมทรายลงในขวดซึ่งประกอบเข้ากับกรวยเรียบร้อยแล้วให้มีปริมาณเพียงพอสำหรับการใช้งาน ปิดลิ้นไว้ แล้วนำขวดทรายไปชั่ง ได้มวลครั้งที่หนึ่งเป็น M_1

(2) ปรับพื้นผิวทดลองให้เรียบและได้ระดับ วางแผ่นฐานให้สนิทกับพื้นแล้วตอกตะปูยึดให้แน่น ใช้แปรงขนปัดฝุ่นผิวหน้าดินและบนแผ่นฐานออกให้หมด

(3) คว่ำขวดทรายให้ปากกรวยตรงกับร่องของแผ่นฐาน เปิดลิ้นให้ทรายไหลลงจนล้นขึ้นมาเต็มกรวยโดยไม่ให้ขวดทรายกระเทือน เมื่อทรายหยุดไหลแล้วจึงปิดลิ้นนำขวด

ทรายที่เหลือไปชั่ง ได้มวลครั้งที่สองเป็น M_2 มวลที่หายไป $M_1 - M_2$ คือมวลของทราย ในกรวยเป็น M_5

หมายเหตุ การทดลองหาค่าความหนาแน่นของตัวอย่างที่มีเม็ดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) ที่ต้องการความรวดเร็ว และค่าละเอียดไม่มากนัก ให้ใช้ค่าปริมาตรของกรวยเป็นค่าคงที่ ซึ่งหาค่าเฉลี่ยได้จากการทดลองอย่างน้อย 3 ครั้ง

(4) เก็บทรายบนแผ่นฐานและพื้นทดลองออกให้หมด ให้ผิวหน้าคงสภาพเดิมเหมือนก่อนเททราย สำหรับทรายที่สกปรกหรือชื้น ให้นำไปทำความสะอาด เพิ่มเติมทรายที่สะอาดลงในขวดมีปริมาณเพียงพอกับการใช้งาน ปิดลิ้นไว้ แล้วนำขวดทรายไปชั่งหาหมวดครั้งที่ 3 เป็น W_3

(5) เจาะดินตรงกลางแผ่นฐานเป็นรูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ารูตรงกลางของแผ่นฐาน โดยขุดเป็นแนวตั้งฉากตลอดชั้นวัสดุที่ทดลอง หรือลึกประมาณ 100-150 มิลลิเมตร แล้วแต่ชนิดของงาน และขนาดของวัสดุตามตารางที่ 6 แต่งหลุมให้เรียบเพื่อให้ทรายแทนที่ได้สะดวก

(5.1) รวบรวมตัวอย่างที่ขุดทั้งหมดใส่ภาชนะแล้วนำไปชั่ง ได้มวลรวมของตัวอย่างชื้นและภาชนะใส่ตัวอย่างเป็น P_1

(5.2) นำมวลของภาชนะใส่ตัวอย่าง ไปหักออกจากมวลรวมของตัวอย่างชื้นและภาชนะใส่ตัวอย่าง มวลที่คงเหลือ $P_1 - P_2$ คือมวลของดินชื้นในหลุมเป็น P_3

(6) คลุกดินที่เก็บจากหลุมให้ทั่ว แล้วเก็บใส่กระป๋องเก็บตัวอย่าง อย่างน้อย 100 กรัม หรือแล้วแต่ขนาดของวัสดุตามตารางที่ 6

(6.1) ปิดฝากระป๋องกันดินหล่นออก แล้วนำไปชั่งหามวลทันที ได้มวลรวมของดินชื้นและกระป๋องเก็บตัวอย่างเป็น X_1

(6.2) นำดินใส่กระป๋องที่เปิดฝาไปอบในเครื่องอบที่อุณหภูมิ $100\pm5^{\circ}$ ซ. จนตัวอย่างแห้ง แล้วนำไปชั่งหามวลได้มวลรวมของดินแห้งและกระป๋องเก็บตัวอย่างเป็น X_2

(6.3) นำมวลรวมของดินแห้งและกระป๋องเก็บตัวอย่างไปหักออกจากมวลรวมดินชื้นและกระป๋องเก็บตัวอย่าง $X_1 - X_2$ ได้มวลของน้ำที่มีอยู่ในดินเป็น X_3

(6.4) นำมวลของกระป๋องเก็บตัวอย่างไปหักออกจากมวลรวมของดินแห้งและกระป๋องเก็บตัวอย่าง ได้มวลของดินแห้งเป็น X_5

(6.5) หาปริมาณน้ำในดิน w โดยคิดเทียบมวลของน้ำที่มีอยู่ในดินเป็นร้อยละของมวลของดินแห้งในหน่วยมวลเดียวกัน

(7) คว่ำขวดทรายให้ปากกรวยตรงกับร่องของแผ่นฐาน (การทดลองที่ต้องการความละเอียดและถูกต้องให้ทำเครื่องหมายไว้ที่ปากกรวยด้านนอก และที่ขอบรูกลางแผ่นฐานด้านบน ในขณะที่คว่ำขวดทรายลงบนแผ่นฐานต้องเลื่อนให้เครื่องหมายตรงกันทุกครั้ง) เปิดลิ้นให้ทรายไหลลงจนเต็มหลุม ต้องไม่ให้ขวดทรายกระเทือนเมื่อทรายหยุดไหลแล้วจึงปิดลิ้น นำขวดทรายที่เหลือไปชั่งหามวลครั้งที่สี่เป็น W_4 เก็บทรายสะอาดเพื่อใช้งานต่อไป ส่วนทรายที่ชื้นหรือสกปรกให้นำไปทำความสะอาด ความแตกต่างของมวลในการทดลองครั้งหลัง $W_3 - W_4$ คือมวลของทรายที่แทนที่ในหลุมและกรวยเป็น W_6

(8) นำมวลของทรายในกรวยไปหักออกจากมวลของทรายในหลุมและกรวย $W_6 - W_5$ คือมวลของทรายในหลุมเป็น W_7

(9) หาปริมาตรของหลุมเป็น V_1 โดยเอาความแน่นของทราย ρ_s ไปหารมวลของทรายในหลุม

2.18.2.5.3 การทดลองหาค่าความแน่นของดินที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 50.8 มิลลิเมตร และมีส่วนที่เม็ดค้างตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร น้อยกว่า 10% ของมวลรวม

(1) ปฏิบัติการทดลองตามข้อ 2.5.2 (1) ถึง (5)

(2) ใช้ตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร แบ่งแยกดินที่เก็บจากหลุม ชั่งหามวลของดินที่มีเม็ดผ่านตะแกรงเป็น P_4

(3) ให้นำส่วนที่เม็ดค้างตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร ใส่ลงในหลุมทดลอง

(4) ปฏิบัติการทดลองตามข้อ 2.5.2 (6) ถึง (8)

(5) หาปริมาตรของดินที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร เป็น V2 โดยเอาความแน่นของทรายไปหารมวลของทรายในหลุม

2.18.2.5.4 การทดลองหาค่าความแน่นของวัสดุที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 50.8 มิลลิเมตร และมีส่วนที่เม็ดค้างตระแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร มากกว่าหรือเท่ากับ 10% ของมวลรวม หรือวัสดุพวก Grade A หรือ Grade B (มาตรฐานกรมทางหลวง)

(1) ปฏิบัติการทดลองตามข้อ 2.5.2 (1) ถึง (5)

(2) ใช้ตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร แบ่งแยกสินค้าที่เก็บจากหลุม

(2.1) ชั่งหามวลของดินที่มีเม็ดผ่านตะแกรงเป็น P_5

(2.2) ชั่งหามวลของส่วนที่เม็ดค้างตะแกรงเป็น P_5

(3) ส่วนที่เม็ดค้างตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร หรือวัสดุพวก Grade A หรือ Grade B ไม่ต้องใส่ลงในหลุมทดลอง ให้คำนวณหาปริมาตรของส่วนที่เม็ดค้างตะแกรงเป็น V_3 จากความถ่วงจำเพาะ G แบบ Bulk Saturated-Surface Dry Specific Gravity ตามวิธีทดลอง

ที่ ทล.-ท. 207/2517 ที่ได้หาไว้แล้ว ถ้าหินมีลักษณะชิ้น หรือแบบ Bulk Specific Gravity ถ้าหินมีลักษณะแห้ง

(4) ปฏิบัติการทดลองตามข้อ 2.5.2 (6) ถึง (8)

(5) หาปริมาตรของหลุมเป็น V_4 โดยเอาความแน่นของทรายไปหารมวลของทรายในหลุม และผลต่างของปริมาตรของทรายในหลุมกับปริมาตรของส่วนที่เม็ดค้างตะแกรง คือปริมาตรของดินที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร เป็น V_5

2.18.3 การคำนวณ

2.18.3.1 ความแน่นของทราย

2.18.3.1.1 ปริมาตรของขวด

$$L = M_2 T$$

เมื่อ L = ปริมาตรของขวด มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

M_2 = มวลของน้ำเต็มขวด มีหน่วยเป็นกรัม

T = ปริมาตรของน้ำ 1 กรัม ที่อุณหภูมิทดลองตามตารางที่ 5 มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อกรัม

2.18.3.1.2 ความแน่นของทราย

$$\rho_s = \frac{M_1}{L}$$

เมื่อ ρ_s = ความแน่นของทราย มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิเมตร

M_1 = มวลของทรายเต็มขวด มีหน่วยเป็นกรัม

L = ปริมาตรของขวด มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

2.18.3.2 ปริมาณน้ำในดิน

2.18.3.2.1 มวลของน้ำที่มีอยู่ในดิน

$$X_3 = X_1 - X_2$$

เมื่อ X_3 = มวลของน้ำที่มีอยู่ในดิน มีหน่วยเป็นกรัม

X_1 = มวลของดินชื้นและกระป๋องเก็บตัวอย่าง มีหน่วยเป็นกรัม

X_2 = มวลของดินแห้งและกระป๋องเก็บตัวอย่าง มีหน่วยเป็นกรัม

2.18.3.2.2 มวลของดินแห้ง

$$X_5 = X_2 - X_4$$

เมื่อ X_5 = มวลของดินแห้ง มีหน่วยเป็นกรัม

X_2 = มวลของดินแห้งและกระป๋องเก็บตัวอย่าง มีหน่วยเป็นกรัม

X_4 = มวลของกระป๋องเก็บตัวอย่าง มีหน่วยเป็นกรัม

2.18.3.2.3 ปริมาณน้ำในดิน

$$w = \frac{X_3}{X_5} \times 100$$

เมื่อ w = ปริมาณน้ำในดิน มีหน่วยเป็นร้อยละ

X_3 = มวลของน้ำที่มีอยู่ในดิน มีหน่วยเป็นกรัม

X_5 = มวลของดินแห้ง มีหน่วยเป็นกรัม

2.18.3.3 มวลของทรายในหลุม

2.18.3.3.1 มวลของทรายในกรวย

$$M_5 = M_1 - M_2$$

M_5 = มวลของทรายในกรวย มีหน่วยเป็นกรัม

M_1 = มวลครั้งที่หนึ่งของขวด กรวยและทราย มีหน่วยเป็นกรัม

M_2 = มวลครั้งที่สองของขวด กรวยและทราย มีหน่วยเป็นกรัม

2.18.3.3.2 มวลของทรายในหลุมและทราย

$$M_6 = M_3 - M_4$$

M_6 = มวลของทรายในหลุมและกรวย มีหน่วยเป็นกรัม

M_3 = มวลครั้งที่สามของขวด กรวยและทราย มีหน่วยเป็นกรัม

M_4 = มวลครั้งที่สี่ของขวด กรวยและทราย มีหน่วยเป็นกรัม

2.18.3.3.3 มวลของทรายในหลุม

$$M_7 = M_6 - M_5$$

M_7 = มวลของทรายในหลุม มีหน่วยเป็นกรัม

M_6 = มวลของทรายในหลุมและกรวย มีหน่วยเป็นกรัม

M_5 = มวลของทรายในกรวย มีหน่วยเป็นกรัม

2.18.3.4 ความแน่นของดินที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร

2.18.3.4.1 ปริมาตรของหลุม * เช็คใหม่

$$V_1 = \frac{M_7}{\rho_5}$$

เมื่อ V_1 = ปริมาตรของหลุม มีหน่วยเป็นมิลลิลิตร

M_7 = มวลของทรายในหลุม มีหน่วยเป็นกรัม

ρ_s = ความแน่นของทราย มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิลิตร

2.18.3.4.2 มวลของดินชื้นจากหลุม

$$P_3 = P_1 - P_2$$

เมื่อ P_3 = มวลของดินชื้นจากหลุม มีหน่วยเป็นกรัม

P_1 = มวลของดินชื้นและภาชนะใส่ดิน มีหน่วยเป็นกรัม

P_2 = มวลของภาชนะใส่ดิน มีหน่วยเป็นกรัม

2.18.3.4.3 ความหนาแน่นของดินชื้น

$$\rho_w = \frac{P_3}{V_1}$$

เมื่อ ρ_w = ความแน่นของดินชื้น มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิลิตร

P_3 = มวลของดินชื้นจากหลุม มีหน่วยเป็นกรัม

V_1 = ปริมาตรของหลุม มีหน่วยเป็นมิลลิลิตร

2.18.3.4.4 ความหนาแน่นของดินชื้น

$$\rho_d = \frac{\rho_w}{1+\frac{W}{100}}$$

เมื่อ ρ_d = ความแน่นของดินแห้ง มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิลิตร

ρ_w = ความแน่นของดินชื้น มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิลิตร

W = ปริมาณน้ำในดิน มีหน่วยเป็นร้อยละ

2.18.3.5 ความหนาแน่นของดินที่มีส่วนที่เม็ดค้างตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร น้อยกว่า 10% ของมวลรวม

2.18.3.5.1 ปริมาตรที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร

$$V_2 = \frac{W_7}{\rho_S}$$

เมื่อ V_2 = ปริมาตรของดินที่มีเม็ดผ่านตระแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตรมีหน่วยเป็นมิลลิลิตร

M_7 = มวลของทรายในหลุม มีหน่วยเป็นกรม

ρ_S = ความแน่นของทราย มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิลิตร

2.18.3.5.2 ความแน่นของดินชื้น

$$\rho_2 = \frac{P_4}{V_2}$$

เมื่อ ρ_2 = ความแน่นของดินชื้น มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิลิตร

P_4 = มวลของดินชื้นที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตรมีหน่วยเป็นกรัม

V_2 = ปริมาตรของดินที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตรมีหน่วยเป็นมิลลิลิตร

2.18.3.5.3 ความแน่นของดินแห้ง

$$\rho_d = \frac{\rho_2}{1+\frac{W}{100}}$$

เมื่อ ρ_d = ความแน่นของดินแห้ง มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิลิตร

ρ_2 = ความแน่นของดินชื้น มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิลิตร

W = ปริมาณน้ำในดิน มีหน่วยเป็นร้อยละ

2.18.3.6 ความแน่นของดินที่มีส่วนที่เม็ดค้างตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร มากกว่า 10% ของมวลรวม หรือวัสดุ Grade A หรือ Grade B

2.18.3.6.1 ปริมาตรของดินที่เม็ดค้างตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร

$$V_3 = \frac{P_6}{G \cdot \rho_W}$$

เมื่อ V_3 = ปริมาตรของส่วนที่เม็ดค้างตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตรมีหน่วยเป็นมิลลิลิตร

P_6 = มวลของดินชื้นที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตรมีหน่วยเป็นกรัม

G = ความถ่วงจำเพาะของส่วนที่เม็ดค้างตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร

ρ_W = ความหนาแน่นของน้ำใช้ 1 กรัมต่อมิลลิลิตร

2.18.3.6.2 ปริมาตรของดินที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร

$$V_5 = V_4 - V_3$$

เมื่อ V_5 = ปริมาตรของดินที่เม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตรมีหน่วยเป็นมิลลิลิตร

V_4 = ปริมาตรของหลุม มีหน่วยเป็นมิลลิลิตร

V_3 = ปริมาตรของดินที่มีเม็ดค้างตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตรมีหน่วยเป็นมิลลิลิตร

2.18.3.6.3 ความแน่นของดินชื้น

$$\rho_3 = \frac{P_5}{V_5}$$

เมื่อ ρ_3 = ความแน่นของดินชื้น มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิลิตร

P_5 = มวลของดินชิ้นที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตรมีหน่วยเป็นกรัม

V_5 = ปริมาตรของดินที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร มีหน่วยเป็นมิลลิลิตร

2.18.3.6.4 ความแน่นของดินแห้ง

$$\rho_d = \frac{\rho_3}{1+\frac{W}{100}}$$

เมื่อ ρ_d = ความแน่นของดินแห้ง มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิลิตร

ρ_3 = ความแน่นของดินชื้น มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิลิตร

W = ปริมาณน้ำในดิน มีหน่วยเป็นร้อยละ

2.18.3.7 เปอร์เซ็นต์การบดทับ

$$P_c = \frac{\rho_d}{\rho_m} \times 100$$

เมื่อ P_c = เปอร์เซ็นต์การบดทับ

ρ_d = ความแน่นของดินแห้ง มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิลิตร

ρ_m = ความแน่นสูงสุดของดินแห้ง ตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 107/2517 หรือ 108/2517 มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิลิตร

2.18.4 การรายงาน

ให้รายงานรายละเอียดต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.18.4.1 รายงานชื่อโครงการ สายทาง ชั้นของวัสดุ ชนิดของวัสดุ เจ้าหน้าที่ทดลอง วัน เวลาที่ทดลอง ความแน่นของทรายที่หาได้ ตำแหน่งที่ทดลอง ความหนาของชั้นต่างๆ ตามสัญญาและความหนาจริงในการก่อสร้าง และรายละเอียดอื่นๆ

2.18.4.2 รายงานค่าต่างๆ ตามแบบฟอร์ม สำหรับค่าความแน่นของดินให้ใช้ทศนิยม 3 ตำแหน่ง และเปอร์เซ็นต์การบดทับให้ใช้ทศนิยม 1 ตำแหน่ง

2.18.5 ข้อควรระวัง

2.18.5.1 แผ่นฐานที่วางบนพื้นทดลองต้องไม่ให้เคลื่อนตัวได้

2.18.5.2 ต้องเก็บทรายที่เทครั้งแรกออกจากผิวหน้าทดลองให้หมด

2.18.5.3 ขณะทดลองต้องไม่ให้ขวดทรายกระเทือน

2.18.5.4 ต้องหาค่าความแน่นของทรายอย่างน้อยสัปดาห์ละ 1 ครั้ง

2.18.5.5 ทรายที่ใช้ทดลองต้องสะอาดและแห้ง

2.18.5.6 ต้องปิดลิ้นก่อนคว่ำขวดทรายทุกครั้ง

2.18.5.7 ในขณะที่เคลื่อนย้ายเครื่องมือ ให้อุ้มตัวขวดโดยตรงหรือทำที่หิ้วขวด เพราะกรวยมักจะขาดตรงบริเวณลิ้นถ้าจับหิ้วที่กรวย

2.18.5.8 ให้หาความถ่วงจำเพาะของหินที่ค้างตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร ใหม่ทุกครั้งที่ชนิดของวัสดุเปลี่ยนแปลง ตามวิธีทดลองในข้อ 2.20.2.5.4 (3)

DH-T 603 ทล.-ท. 603/2517

ว. 6-03 ก.

สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง

FIELD DENSITY TEST

SAND REPLACEMENT METHOD

โครงการฯ สาย สุไหงโกลก-พรมแดน

วัสดุชั้น Base Course ชนิดของวัสดุ Lime Stone

เจ้าหน้าที่ทดลอง วินัย วันที่ทดลอง 25 ต.ค. 16

Density of sand (ρ_S) 1,500 gm./ml.

Station	Km.		1+325	1+416	1+502	1+629	1+716
	Off set	m.	1.5 Lt.	2.4 Rt.	1.8 Rt.	2.6 Lt.	2.0 Rt.
VOLUME DETERMINATION							
Mass of Sand in funnel							
initiaMass(M)		gm.	7,350	7,849	8,054	7,965	8,031
finalMass (M)		gm.	5,603	5,953	6,352	6,307	6,307
Mass of Sand used M = ($M_1 - M_2$)		gm.	1,747	1,896	1,702	1,678	1,724
Mass of Sand in hole and funnel		gm.					
initialMass(M_3)			8,008	8,167	7,840	7,940	7,971
finalMass(M_2)		gm.	2,926	3,267	3,221	3,312	3,448
Mass of Sand used M_6=($M_3 - M_2$)		gm.	5,082	4,900	4,619	4,628	4,523
Mass of Sand in hole M_7=(M_6-M_5)		gm.	2,335	3,004	2,917	2,950	2,799
Volume of hole V_1 = (M_6+ ρ_S) or = V_2		ml.	2,214.5	1,994.7	1,936.9	1,958.8	1,858.6
V_5 from ว. 6-03 ข.		ml.	1,937.1	1,725.8	1,684.78	1,704.3	1,614.9
WATER CONTENT DETERMINATION							
Can No.		gm.	20	F-80	F-2	75	81
Wet soil + can. (X_1)		gm.	254.3	274.0	285.2	292.6	254.6
Dry soik + can. (X_2)		gm.	245.3	268.2	276.0	283.0	245.2
Mass of water X_3 = (X_1- X_2)		gm.	9.0	5.8	9.2	9.6	9.4
Mass of can (X_4)		gm.	45.7	43.2	41.0	43.0	45.2
Mass of Dry soil X_5 = (X_2- X_4)		gm.	199.6	225.0	235.0	240.0	200.0
Water content [(X_3- X_5) 100] = ω		%	4.5	2.6	3.9	4.0	4.7
Mass OF DENSITY SAMPLE							
Wet soil + container (P_1)		gm.	4,809	4,142	4,152	4,333	4,083
Mass of container (P_2)		gm.	317	317	317	317	317
Mass of wet soil P_3 = (P_1-P_2) or = P_4 = or = P_5		gm.	4,492	3,825	3,835	4,016	3,766
Wet density ρ_U= (P_3+V) or = ($P_4 \div V_2$) or=($P_5 \div V_5$)		gm./ml.	2.319	2.216	2.276	2.308	2.332
Dry density $[\rho_\omega \div \left(1+\frac{w^1}{100}\right)] = \rho d$		gm./ml.	2.219	2.150	2.191	2.219	2.227
ERCENT COMPACTION DETERMINATION							
Max. density ρ_m		gm./ml.	2.254	2.254	2.254	2.254	2.254
% Compaction P_c =($\left\|\rho_d \div \rho_m)100\right\|$)			98.4	95.8	97.2	98.4	98.8
DEPTH OF COMPACTED MATERIAL							
Designed depth		cm.	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
Actual depth in field		cm.	38.0	35.0	40.0	37.0	40.0

(Soil-Aggregate ที่มี Gradation เข้า Specs. Grade A และ B ให้ใช้ Data ว. 6-03 ข. ทดลองด้วย)

FIELD DENSITY TEST

ใช้คู่กับ ว. 6-03 ก. ในกรณีที่วัสดุค้างตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร มากกว่า 10%

ในการทดลอง field density หินที่โตกว่า 19.0 มิลลิเมตร จะต้องเอากลับลงไปในหลุม ในขณะที่ทดลองหาปริมาตรของหลุม ถ้าหากมีหินขนาดนี้มากกว่า 10% ขึ้นไป จะทำให้กรวยไม่สามารถไหลถึงก้นหลุมได้ จะทำให้เกิด error ในการทดลองหา field density

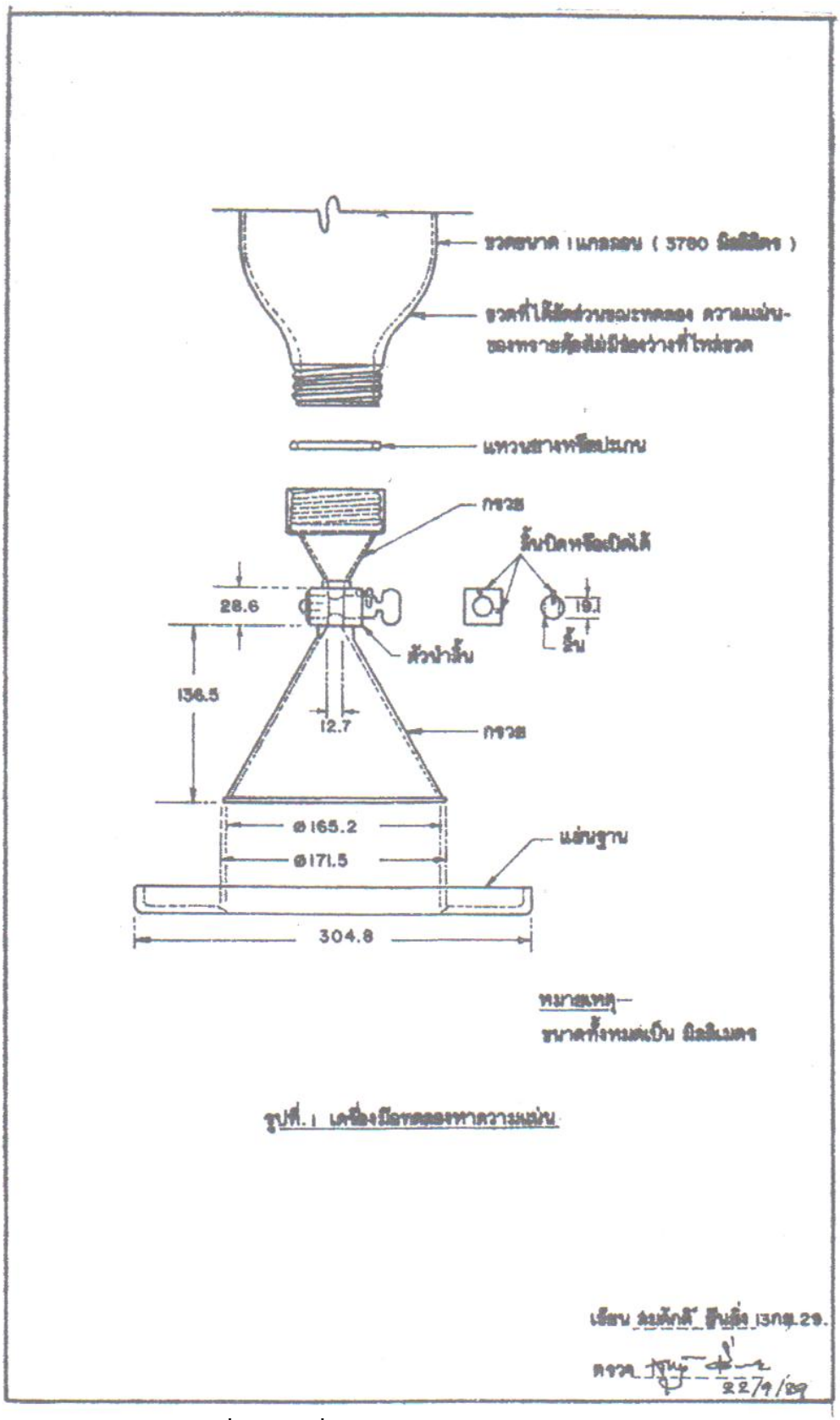
ในกรณีมีวัสดุโตกว่า 19.0 มิลลิเมตร มากกว่า 10% ไม่ต้องเอาวัสดุเหล่านี้ลงในหลุมและให้ดำเนินการทดลองดังนี้ โดยใช้ Data ควบกับ ว. 6-03 ก.

Bulk saturated-surface-dry specific gravity (G) = 2.70

(ของวัสดุที่ขนาดโตกว่า 19.0 มิลลิเมตร)

Station	Km.		1+325	1+416	1+502	1+629	1+716
	Off. Set. m.	m.	1.5 Lt.	2.4 Rt.	1.8 Rt.	2.6 Lt.	2.0 Rt.
Volume of 19.0 mm. retained-aggregate							
Wt. of + 19.0 mm. aggregate (p_6)		gm.	749	726	681	590	658
Volume of + 19.0 mm. aggregate $V_3 = (p_6 \div G)$		cc.	277.4	268.9	252.2	218.5	243.7
Total Volume of hole V_1 from ว. 6-03 ก. = (V_4)		cc.	2,214.5	1,994.7	1,936.9	1,958.8	1,858.6
Volume of 19.0 mm. passing-aggregate (V_5) or							
Volume of hole = ($V_4 - V_3$)		cc.					
(ใช้ Volume of hole ค่านี้ไปหา wet density ใน ว. 6-03 ก. ต่อไป)			1,937.1	1,725.8	1,684.7	1,740.3	1,614.9

หมายเหตุ Soil-Aggregate ที่มี Gradation เข้า Specs. Grade A และ B ให้ใช้วิธีการทดลองนี้ทุกครั้ง



รูปที่ 2.35 เครื่องมือทดลองหาความแน่นในสนาม

สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง

Field Density Test Report

Project : สุไงโกลก-พรมแดน

Section : - **Date** 18 ต.ค. 16 **Tested by** วินัย

No.	Station	Depth cm.	Material to be used as	Laboratory Test		In-Place Test		Percent Compaction	Minimum Compaction Required	Acceptance	Remarks
				Opt. Moist. %	Density gm/ml.	Moisture %	Density gm/ml.				
1	1+325 1.5 Lt.	23.8	Subbase	6.8	2.254	4.5	2.219	98.4	95.0	ใช้ได้	
2	1+416 2.4 Rt.	23.5	Subbase	6.8	2.254	2.6	2.160	95.8	95.0	ใช้ได้	
3	1+502 1.8 Rt.	24.0	Subbase	6.8	2.254	3.9	2.191	97.2	95.0	ใช้ได้	
4	1+629 2.6 Lt.	23.7	Subbase	6.8	2.254	4.0	2.219	98.4	95.0	ใช้ได้	
5	1+716 2.0 Rt.	24.0	Subbase	6.8	2.254	4.7	2.227	98.8	95.0	ใช้ได้	

วินัย **Material Engineer.**

ตารางที่ 5

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาตรของน้ำต่อหนึ่งหน่วยมวล

อุณหภูมิ		ปริมาตรของน้ำต่อหนึ่งหน่วยมวล
องศาเซลเซียส	องศาฟาเรนไฮต์	มิลลิลิตรต่อกรัม (T)
12	53.6	1.000 48
14	57.2	1.000 73
16	60.8	1.001 03
18	64.4	1.001 38
20	68.8	1.001 77
22	71.6	1.002 21
24	75.2	1.002 68
26	78.8	1.003 20
28	82.4	1.003 75
30	86.0	1.004 35
32	89.6	1.004 97

ตารางที่ 6

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดวัสดุ ปริมาตรหลุมและมวลที่ใช้หาความชื้น

ขนาดใหญ่สุดของวัสดุ		ปริมาตรต่ำสุดของหลุม (มิลลิลิตร)	มวลต่ำสุดของวัสดุที่ใช้หาความชื้น (กรัม)
มิลลิเมตร	ขนาดตะแกรง		
5.75	เบอร์ 4	700	100
12.5	1/2 นิ้ว	1,400	250
25.0	1 นิ้ว	2,100	500

2.19 วิธีการทดลองเพื่อหาค่า CBR (ทล.ท.109/2517) **(เทียบเท่า AASHTO T 193)**

2.19.1 ขอบข่าย

วิธีการทดลอง CBR วิธีนี้ เป็นวิธีการทดลองที่กำหนดขึ้น เพื่อหาค่าเปรียบเทียบ Bearing Value ของวัสดุตัวอย่างกับวัสดุหินมาตรฐาน เมื่อทำการบดทับตัวอย่างนั้น โดยใช้ค้อนบดทับในแบบ (Mold) ที่ Optimum Moisture Content หรือปริมาณน้ำในดินใดๆ เพื่อนำมาใช้ออกแบบโครงสร้างของถนนและใช้ควบคุมงาน ในการบดทับให้ได้ความแน่นและความชื้นตามต้องการ

การทดลอง CBR อาจทำได้ 2 วิธี คือ

วิธี ก. การทดลองแบบแช่น้ำ (Soaked)

วิธี ข. การทดลองแบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked)

ถ้าไม่ระบุวิธีใด ให้ใช้ “วิธี ก.”

2.19.2. วิธีทำ

2.19.2.1 เครื่องมือ

เครื่องมือทดลองประกอบด้วย

2.19.2.1.1 เครื่องกด (Loading Machine) เป็นเครื่องมือทดลองเพื่อหาค่า CBR ต้องมีขีดความสามารถรับแรงกดไม่น้อยกว่า 5,000 กิโลกรัม (ประมาณ 10,000 ปอนด์, 50 กิโลนิวตัน) เครื่องกดนี้อาจจะเป็นเครื่องแบบใช้มือหมุน (กรณีใช้เฟือง) หรือใช้ปั๊ม (กรณีใช้ Hydraulic) หรือแบบฉุดด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าก็ได้ ในกรณีฉุดด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า อัตราเร็วของมอเตอร์ที่หมุนฉุดต้องทำให้ฐานหรือท่อนกด (Piston) เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 1.27 มิลลิเมตร (0.05 นิ้ว) ต่อนาที เครื่องกดนี้ประกอบด้วย Jack ซึ่งดันหรือหมุนให้ฐานเลื่อนขึ้นหรือเลื่อนลง โดยมีเครื่องวัดการเลื่อนขึ้นหรือลงด้วย Dial Gauge มีอัตราเร็ว 1.27 มิลลิเมตร (0.05 นิ้ว) ต่อนาที เพื่อใช้ดันให้ท่อนกดจมลงในตัวอย่างที่เตรียมไว้แล้วในแบบ เครื่องกดนี้จะต้องมี Proving Ring อ่านแรงกด (กรณีใช้เฟืองเป็นตัวดันขึ้นหรือดันลง) หรือหน้าปัดอ่านแรงกด (กรณีใช้ Hydraulic เป็นตัวดันขึ้นหรือดันลง) ได้ละเอียดถึง 2 กิโลกรัม (20 นิวตัน) หรือน้อยกว่านั้น (ดังรูป)

2.19.2.1.2 แบบ (Mold) ทำด้วยโลหะแข็งและเหนียว ลักษณะทรงกระบอกกลวงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 152.4 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) สูง 177.8 มิลลิเมตร (7 นิ้ว) และจะต้องมีปลอก (Collar) ขนาดเดียวกันสูง 50.8 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) มีฐานเจาะรูพรุน ในการทดลองต้องใช้แท่งโลหะรอง (Spacer Disc) ตามข้อ 2.13 รองด้านล่าง เพื่อให้ได้ตัวอย่างสูง 116.4 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว) หรืออาจใช้แบบขนาดสูงเท่าใดก็ได้ เมื่อใช้แท่งโลหะรองแล้ว ได้ความสูงของตัวอย่างในแบบเท่ากับ 116.4 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว) ดังรูป

2.19.2.1.3 แท่งโลหะรอง (Spacer Disc) เป็นโลหะรูปทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 150.8 มิลลิเมตร (5 15/16 นิ้ว) มีความสูงขนาดต่างๆ ซึ่งเมื่อใช้กับแบบตามข้อ 2.1.2 แล้วจะเหลือตัวอย่างสูงเท่ากับ 116.4 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว) ดังรูป

2.19.2.1.4 ค้อน (Rammer) ทำด้วยโลหะมี 2 แบบ ดังนี้

(1) เป็นรูปทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) มวลรวมทั้งด้ามถือ 4,537 กรัม (10 ปอนด์) ต้องมีปลอกทำไว้อย่างเหมาะสมเป็นตัวบังคับให้ระยะตกเท่ากับ 457.2 มิลลิเมตร (18 นิ้ว) เหนือระดับดินที่ต้องการบดทับจะต้องมีรูระบายอากาศอย่างน้อย 4 รู แต่ละรูมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 9.5 มิลลิเมตร เจาะห่างจากปลายของปลอกทั้งสองข้างประมาณ 19.0 มิลลิเมตร ใช้สำหรับการหาค่า CBR ที่ความแน่น “สูงกว่ามาตรฐาน” ตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.108/2517

(2) เป็นรูปทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) มีมวลรวมทั้งด้ามถือ 2,495 กรัม (5.5 ปอนด์) ต้องมีปลอกทำไว้อย่างเหมาะสม เป็นตัวบังคับให้ระยะตกเท่ากับ 304.8 มิลลิเมตร (12 นิ้ว) เหนือระดับดินที่ต้องการบดทับ จะต้องมีรูระบายอากาศ

อย่างน้อย 4 รู แต่ละรูมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 9.5 มิลลิเมตร เจาะห่างจากปลายของปลอกทั้งสองข้างประมาณ 19.0 มิลลิเมตร ใช้สำหรับการหาค่า CBR ที่ความแน่น “มาตรฐาน” ตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 107/2517

2.19.2.1.5 เครื่องวัดการขยายตัว (Expansion Measuring Apparatus) ประกอบด้วย

(1) แผ่นวัดการขยายตัว (Swell Plate) ทำด้วยโลหะมีก้านที่สามารถจะจัดให้สูงหรือต่ำได้ และมีรูพรุน (ดังรูป)

(2) สามขา (Tripod) สำหรับวัดการขยายตัว มีลักษณะเป็นรูปสามขา ติดด้วย Dial Gauge วัดได้ละเอียด 0.01 มิลลิเมตร วัดได้ 25 มิลลิเมตร (หรือจะใช้ Dial Gauge วัดได้ละเอียด 0.001 นิ้ว วัดได้ 1 นิ้ว แทนก็ได้) เพื่อหาการขยายตัว (ดังรูป)

2.19.2.1.6 แผ่นถ่วงน้ำหนัก (Surcharge Weight) เป็นเหล็กทรงกระบอกแบน เส้นผ่านศูนย์กลาง 149.2 มิลลิเมตร (5 7/8 นิ้ว) มีรูกลวงเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 54.0 มิลลิเมตร (2 1/8 นิ้ว) เพื่อให้ท่อนกดสอดผ่านไปได้ โดยมีมวลเท่ากับ 2,268 กรัม (5 ปอนด์) ดังรูป แผ่นถ่วงน้ำหนักนี้อาจเป็นแบบผ่าครึ่งเป็นสองซีก หรือผ่าเป็นร่องก็ได้

2.19.2.1.7 ท่อนกด (Penetration Piston) ทำด้วยโลหะทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 49.5 มิลลิเมตร (1.95 นิ้ว) มีพื้นที่หน้าตัด 1,935.5 ตารางมิลลิเมตร (3 ตารางนิ้ว) ยาวไม่น้อยกว่า 101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) ดังรูป

2.19.2.1.8 เครื่องดันตัวอย่าง (Sample Extruder) เป็นเครื่องดันดินออกจากแบบภายหลังเมื่อทดลองเสร็จแล้ว จะมีหรือไม่มีก็ได้ ประกอบด้วยตัว Jack ทำหน้าที่เป็นตัวดันและโครงเหล็กทำหน้าที่เป็นตัวจับแบบ ในกรณีที่ไม่มีใช้ ให้ใช้สิ่วหรือเครื่องมืออย่างอื่นและตัวอย่างออกจาแบบ

2.19.2.1.9 ตาชั่งแบบ Balance มีขีดความสามารถชั่งได้ไม่น้อยกว่า 16 กิโลกรัม ชั่งได้ละเอียดถึง 0.001 กิโลกรัม สำหรับชั่งตัวอย่างทดลอง

2.19.2.1.10 ตาชั่งแบบ Scale หรือแบบ Balance มีขีดความสามารถชั่งได้ 1,000 กรัม ชั่งได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม สำหรับหาปริมาณน้ำในดิน

2.19.2.1.11 เตาอบ ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่ $110 \pm 5^{\circ}$ ซ. สำหรับอบดินตัวอย่าง

2.19.2.1.12 เหล็กปาด (Straight Edge) เป็นเหล็กคล้ายไม้บรรทัด หนาและแข็งเพียงพอในการตัดแต่งตัวอย่างที่ส่วนบนของแบบ มีความยาวไม่น้อยกว่า 300 มิลลิเมตร แต่ไม่ยาวเกินไปจนเกะกะและหนาประมาณ 3.0 มิลลิเมตร

2.19.2.1.13 เครื่องแบ่งตัวอย่าง (Sample Splitter)

2.19.2.1.14 ตะแกรงร่อนดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 203.2 มิลลิเมตร (8 นิ้ว) สูง 50.8 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) มีขนาดดังนี้

(1) ขนาด 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว)

(2) ขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4)

2.19.2.1.15 เครื่องผสม เป็นอุปกรณ์จำเป็นต่างๆ ที่ใช้ผสมตัวอย่างกับน้ำได้แก่ ถาด ช้อน พลั่ว เกรียง ค้อนยาง ถ้วยตวงวัดปริมาตรน้ำ หรือจะใช้เครื่องผสมแบบ Mechanical Mixer ก็ได้

2.19.2.1.16 กระป๋องอบดินสำหรับใส่ตัวอย่างดิน เพื่ออบหาปริมาณน้ำในดิน

2.19.2.1.17 นาฬิกาจับเวลา

2.19.2.2 วัสดุที่ใช้ประกอบการทดลอง

2.19.2.2.1 กระดาษกรองอย่างหยาบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 มิลลิเมตร (6 นิ้ว)

2.19.2.2.2 น้ำสะอาด

2.19.2.3 แบบฟอร์ม

ใช้แบบฟอร์ม ที่ ว. 2-11 สำหรับการทดลองหาค่า CBR

ที่ ว. 2-15 สำหรับ Plot Curve CBR

ที่ ว. 2-15 ก. สำหรับการ Plot Curve หาค่า CBR

2.19.2.4 การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่าง ได้แก่ ดิน หินคลุก หรือ Soil Aggregate หรือวัสดุอื่นใดที่ต้องการทดลองให้ดำเนินการดังนี้

2.19.2.4.1 ถ้าขนาดของตัวอย่างก้อนที่ใหญ่ที่สุด มีขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ให้เตรียมตัวอย่างดังต่อไปนี้

(1) นำตัวอย่างมาทำให้แห้งโดยวิธีตากแห้ง และทำ Quartering หรือใช้เครื่องแบ่งตัวอย่าง เมื่อแห้งพอเหมาะแล้ว (มีปริมาณน้ำในดินประมาณ 2-3%) นำมาร่อนผ่านตะแกรงแบ่งเป็น 3 ขนาด คือ

- ขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว)
- ขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4)
- ขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4)

(2) ทำการชั่งหามวลของแต่ละขนาด ที่เตรียมได้จากข้อ 2.4.1 (1) ก็จะทราบว่ามวลของตัวอย่างแต่ละขนาดมีอยู่ขนาดละเท่าใด

(3) ตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร ให้ทิ้งไป

(4) แทนที่ตัวอย่างในข้อ 2.21.2.4.1 (3) ด้วยตัวอย่างที่มีขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร ด้วยมวลที่เท่ากัน ตัวอย่างเช่น มีขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร อยู่ 2,650 กรัม ก็ให้ใช้ตัวอย่างขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร เพิ่มเข้าไปอีก 2,650 กรัม ที่เหลือจะเป็นขนาดที่เล็กกว่า 19.0 มิลลิเมตร ตามที่มีจริงดังนี้

สมมติ ตัวอย่างทั้งหมดมีมวล 9,000 กรัม

มีขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร เท่ากับ 2,650 กรัม

มีขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร เท่ากับ 4,850 กรัม

มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร เท่ากับ 1,500 กรัม จากวิธีการเตรียมตัวอย่างตามที่กล่าวมาแล้ว จะได้มวลของตัวอย่างที่เตรียมไว้ คือ

- มีขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร เท่ากับ 2,650 + 4,850 = 7,500 กรัม
- มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร เท่ากับ 1,500 กรัม

(5) คลุกตัวอย่างที่ได้จากข้อ 2.21.2.4.1 (4) ให้เข้ากัน

2.19.2.4.2 ถ้าขนาดของตัวอย่างก้อนที่ใหญ่ที่สุด มีขนาดเล็กกว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ให้นำตัวอย่างมาทำให้แห้งโดยวิธีตากแห้ง (มีปริมาณน้ำในดินประมาณ 2-3%) และทำ Quartering หรือใช้เครื่องแบ่งตัวอย่างแล้วคลุกตัวอย่างให้เข้ากัน

2.19.2.4.3 ถ้าต้องการทดลอง โดยใช้ตัวอย่างผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) ให้นำตัวอย่างมาทำให้แห้งโดยวิธีตากแห้งแล้วใช้ค้อนยางทุบให้ก้อนหลุดจากกันและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) คลักตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงให้เข้ากัน

2.19.2.4.4 ชั่งตัวอย่างที่เตรียมได้จากข้อ 2.21.2.4.1 หรือ 2.21.2.4.2 หรือ 2.21.2.4.3 แล้วแต่กรณีให้มีมวลประมาณ 6,000 กรัม สำหรับการทดลอง 1 ตัวอย่าง

2.19.2.4.5 ปริมาณตัวอย่างตามข้อ 2.21.2.4.4 ให้เตรียมไว้ 3 ตัวอย่าง ในการทดลองแต่ละครั้ง

2.19.2.5 การทดลอง

2.19.2.5.1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อการทดลอง

(1) นำตัวอย่างที่เตรียมไว้แล้วจากข้อ 2.19.2.4 มาคลุกเคล้าจนเข้ากันดี

(2) โดยวิธีการทดลอง Compaction Test ตามการทดลองที่ ทล.-ท. 107/2517 หรือ ทล.-ท. 108/2517 จะทราบปริมาณน้ำในดินที่ความแน่นสูงสุด (Optimum Moisture Content) ให้ใช้ปริมาณน้ำในดินดังนี้

- ดูแบบฟอร์มที่ ว. 2-05 ในการทดลองที่ ทล.-ท. 107/2517 หรือ ทล.-ท. 108/2517 เปรียบเทียบปริมาณน้ำในดินของตัวอย่างกับปริมาณน้ำในดินที่คำนวณได้จากการอบตัวอย่าง จะทราบปริมาณน้ำในดินที่มีอยู่ในตัวอย่างที่ได้เตรียมไว้ ให้ใช้ค่าเฉลี่ยของผลการทดลองดังกล่าว เป็นค่าปริมาณน้ำในดินที่มีอยู่ในตัวอย่าง เพิ่มน้ำเข้าไปในตัวอย่างที่เตรียมไว้ จนได้ปริมาณน้ำในดินที่ความแน่นสูงสุด
- กรณีที่คาดว่าปริมาณน้ำในดินของตัวอย่างที่เตรียมไว้เพื่อทำการทดลอง CBR อาจจะไม่เท่ากับที่ทำ Compaction Test ให้หาปริมาณน้ำในดินที่มีอยู่จริง โดยการอบหรือคั่วให้แห้งก็จะทราบปริมาณน้ำในดินที่มีอยู่ในตัวอย่าง ให้เพิ่มน้ำจนได้ปริมาณน้ำในดินที่ความแน่นสูงสุด

(3) เติมน้ำตามที่คำนวณได้จากข้อ 2.21.2.5.1 (2)

(4) คลุกเคล้าตัวอย่างที่เติมน้ำแล้ว หรือนำเข้าเครื่องผสมจนเข้ากันดี

(5) นำแท่งโลหะรองใส่ลงในแบบ ซึ่งสวมปลอกเรียบร้อยแล้วและใส่กระดาษกรองลงบนแท่งโลหะรอง

(6) แบ่งตัวอย่างใส่ลงในแบบ โดยประมาณให้ตัวอย่างแต่ละชั้นเมื่อบดทับแล้วมีความสูงประมาณ 1 ใน 5 ของ 127.0 มิลลิเมตร (5 นิ้ว)

(7) ทำการบดทับโดยใช้ค้อน ตามข้อ 2.21.2.1.4 (1) หรือ 2.21.2.1.4 (2) แล้วแต่กรณี จำนวน 12 ครั้ง โดยเฉลี่ยการบดทักให้สม่ำเสมอเต็มหน้าที่บดทับ

(8) ดำเนินการบดทับจนได้ตัวอย่างที่ทำการบดทับแล้วเป็นชั้นๆ จำนวน 5 ชั้น มีความสูงประมาณ 127.0 มิลลิเมตร (5 นิ้ว) หรือสูงกว่าแบบประมาณ 10.0 มิลลิเมตร

(9) ถอดปลอก (Collar) ออก ให้เหล็กปาดแต่งหน้าให้เรียบเท่าระดับตอนบนของแบบ (เหลือความสูงเท่ากับ 116.4 มิลลิเมตร) กรณีมีหลุมบนหน้าให้เติมตัวอย่างใช้เหล็กปาดรางทับแล้วใช้ค้อนยางทุบจนกระทั่งเหล็กปาดยุบลงถึงขอบแบบ

(10)คลายสกรูที่ยึดระหว่างแผ่นฐาน (Base Plate) และแบบยกแบบพร้อม ตัวอย่างที่บดทับแล้วออก นำแท่งโลหะรองออกจากแผ่นฐาน วางกระดาษกรองแผ่นใหม่ลงบนแผ่นฐานพลิกแบบโดยให้ด้านล่างของแบบอยู่ด้านบน นำเข้าประกอบกับแผ่นฐานขันสกรูและใส่ปลอกเข้าที่ก็จะได้ตัวอย่างที่เตรียมไว้ สำหรับทำการทดลองเพื่อหาค่า CBR ต่อไป (กรณีต้องการทดลองตาม “วิธี ข.” ดังกล่าวในขอบข่าย ไม่ต้องใส่กระดาษกรองรองใต้แบบ)

(11) ทำการเตรียมตัวอย่างอีก 2 ตัวอย่าง โดยทำการบดทับแต่ละชั้นด้วยค้น จำนวน 25 ครั้ง และ 56 ครั้ง ตามวิธีข้างต้นในข้อ 2.5.1 ก็จะได้ตัวอย่างทั้งสิ้น 3 ตัวอย่าง โดยมีค่าการบดทับเท่ากับ 12 ครั้ง, 25 ครั้ง และ 56 ครั้ง ต่อชั้น

2.19.2.5.2 การหาความแน่นในการบดทับและปริมาณน้ำในดิน

(1) นำตัวอย่างพร้อมแบบที่เตรียมไว้จากข้อ 2.19.2.5.1 (11) ไปชั่งจะได้มวลของตัวอย่างและมวลของแบบ หักมวลของแบบออกก็จะได้มวลของตัวอย่างเปียก (A)

(2) ในขณะเดียวกับที่ทำการบดทับตัวอย่างในแบบ ตามข้อ 2.19.2.5.1 ให้นำตัวอย่างใส่กระป๋องอบตัวอย่าง เพื่อนำไปทดลองหาปริมาณน้ำในดินด้วย มวลของตัวอย่างที่นำไปหาปริมาณน้ำในดินใช้ดังนี้

- ขนาดก้อนใหญ่สุด 19.0 มิลลิเมตร ใช้ประมาณ 300 กรัม

- ขนาดก้อนใหญ่สุด 4.75 มิลลิเมตร ใช้ประมาณ 100 กรัม

(3) คำนวณหาค่าความแน่นเปียก ρ_t (Wet Density) และค่าความแน่นแห้ง ρ_t (Dry Density) เมื่อทราบปริมาณน้ำในดิน w (Moisture Content) โดยใช้สูตรตามข้อ 2.21.3.1 2.19.3.2 และ 2.19.3.3

2.19.2.5.2 การหาค่าการขยายตัว (Swell)

(1) นำแผ่นวัดการขยายตัว (Swell Plate) พร้อมแผ่นถ่วงน้ำหนักจำนวน 2 อัน สำหรับวัสดุพื้นทาง (Base) วัสดุรองพื้นทาง (Subbase) และวัสดุคัดเลือก (Selected Materials) และ 3 อัน สำหรับวัสดุ Subgrade วางลงบนตัวอย่างที่เตรียมไว้แล้วตามข้อ 2.21.2.5.1 (10) ให้แนบสนิทกับตัวอย่าง โดยขยับไปมา แล้วนำลงแช่ในน้ำให้ท่วมตัวอย่างให้หมด วางก้านสามขา (Tripod) ลงบนปลอกของแบบจัดให้ก้านของ Dial Gauge อยู่กึ่งกลางบนก้านของแผ่นวัดการขยายตัว จด Initial Reading ที่อ่านได้จาก Dial Gauge แช่น้ำทิ้งไว้ บันทึกวันและเวลาที่อ่าน Reading บน Dial Gauge และอ่าน Reading บน Dial Gauge ทุกๆ วัน เพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การขยายตัว (Swell) ในการอ่าน Reading บน Dial Gauge แต่ละครั้ง ถ้าจำเป็นต้องตั้งสามขาใหม่ ให้พยายามตั้งให้ขาของสามขาและแกนของ Dial Gauge อยู่ที่เดิมเช่นเดียวกับการอ่าน Initial Reading โดยทำเครื่องหมายไว้บนปลอก

(2) เมื่อครบกำหนด 4 วัน ถึงแม้ว่าการขยายตัวยังเพิ่มอยู่เรื่อยๆ เช่น ดินเหนียวหรืออาจจะเร็วกว่า 4 วัน เมื่อปรากฏว่าไม่มีการขยายตัว เช่น ทราย (เมื่ออ่านค่าการขยายตัวแต่ละวันแล้ว) ให้นำตัวอย่างขึ้นจากน้ำ ยกแผ่นวัดการขยายตัวพร้อมแผ่นถ่วงน้ำหนักออกตะแคงแบบให้น้ำไหลออกประมาณ 15 นาที ระหวังอย่าให้

ผิวหน้าของตัวอย่างเสียหาย โดยเฉพาะวัสดุจำพวก Granular Material เสร็จแล้วทำการชั่งหามวล เมื่อหักมวลของแบบออกก็จะทราบมวลของตัวอย่างภายหลังแช่น้ำแล้ว นำตัวอย่างเตรียมไว้เพื่อทดลอง Penetration Test ต่อไปโดยทันที

2.19.2.5.3 การทดลอง Penetration Test เพื่อหาค่า CBR

(1) ถ้าต้องการทดลองโดย “วิธี ข.” วิธีไม่แช่น้ำ (Unsoaked) ไม่ต้องดำเนินการหาค่าการขยายตัว (Swell) ตามข้อ 2.19.2.5.3 ให้นำตัวอย่างภายหลังจากการชั่งหามวลตามข้อ 2.19.2.5.2 มาทดลอง Penetration Test ได้ทันที

(2) นำตัวอย่างตามข้อ 2.19.2.5.3 (2) หรือ 2.19.2.5.4 (1) แล้วแต่กรณีมาใส่แผ่นถ่วงน้ำหนักจำนวน 2 อัน สำหรับวัสดุพื้นทาง (Base) วัสดุรองพื้นทาง (Subbase) และวัสดุคัดเลือก(Selected Material) และ 3 อัน สำหรับวัสดุ Subgrade ลงบนตัวอย่าง

(3) นำตัวอย่างขึ้นตั้งบนที่ตั้งของเครื่องกด ตั้งให้ท่อนกดอยู่ตรงพอดีกับกึ่งกลางรูของแผ่นถ่วงน้ำหนัก

(4) หมุนเครื่องหรือเดินเครื่องหรือปั๊ม แล้วแต่ลักษณะของเครื่องกดให้แผ่นฐานเคลื่อนขึ้นหรือท่อนกดเคลื่อนลงจนท่อนกดสัมผัสกับผิวหน้าของตัวอย่าง มีแรงกดปริมาณ 4 กิโลกรัม (40 นิวตัน) ตั้งหน้าปัดของ Proving Ring หรือหน้าปัดของเครื่องวัดแรงให้เป็นศูนย์ พร้อมทั้งตั้งหน้าปัดของ Dial Gauge ที่วัด Penetration ให้เป็นศูนย์ด้วย การที่ให้มีแรงกดประมาณ 4 กิโลกรัม (40 นิวตัน) เพื่อให้แน่ใจว่าท่อนกดได้สัมผัสผิวของตัวอย่าง และไม่นำมาคิดในการหา Stress vs. Penetration

(5) เพิ่มแรงลงบนท่อนกด ตามวิธีการของเครื่องกดนั้นๆ ด้วยอัตราเร็วที่สม่ำเสมอเท่ากับ 1.27 มิลลิเมตร(0.05

นิ้ว) ต่อนาที โดยการอ่าน Penetration Dial Gauge เทียบกับนาฬิกาจับเวลา

(6) ทำการบันทึกแรงกด เมื่อ Penetration อ่านได้ที่

- 0.63 มิลลิเมตร (0.025 นิ้ว)
- 1.27 มิลลิเมตร (0.050 นิ้ว)
- 1.90 มิลลิเมตร (0.075 นิ้ว)
- 2.54 มิลลิเมตร (0.100 นิ้ว)
- 3.17 มิลลิเมตร (0.125 นิ้ว)
- 3.81 มิลลิเมตร (0.150 นิ้ว)
- 4.44 มิลลิเมตร (0.175 นิ้ว)
- 5.08 มิลลิเมตร (0.200 นิ้ว)
- 6.35 มิลลิเมตร (0.250 นิ้ว)
- 7.62 มิลลิเมตร (0.300 นิ้ว)
- 8.89 มิลลิเมตร (0.350 นิ้ว)
- 10.16 มิลลิเมตร (0.400 นิ้ว)
- 11.43 มิลลิเมตร (0.450 นิ้ว)
- 12.70 มิลลิเมตร (0.500 นิ้ว)

เสร็จแล้วคลายแรงที่กดออก นำตัวอย่างพร้อมแบบออกจากแท่นของเครื่องกด ยกแผ่นถ่วงน้ำหนักออก

(7) นำตัวอย่างบริเวณที่ถูกท่อนกดๆ ลงไปเป็นรูไปหาปริมาณน้ำในดิน ปริมาณตัวอย่างให้ใช้ตามข้อ 2.19.2.5.2 (2)

(8) ดำเนินการทดลอง Penetration Test ของตัวอย่างที่เตรียมไว้อีก 2 ตัวอย่าง โดยวิธีเดียวกับที่กล่าวมาแล้ว

(9) เขียน Curve ระหว่างแรงกด และระยะที่ท่อนกดจมลงในตัวอย่าง (Stress vs. Penetration) เพื่อหาค่า CBR ต่อไป

(10) เมื่อได้ค่า CBR ของแต่ละตัวอย่างแล้ว เขียน Curve1 ระหว่างค่า CBR กับค่าความแน่นแห้ง (Dry Density)

เพื่อหาค่า CBR ที่เปอร์เซ็นต์ของการบดทับที่ต้องการต่อไป

หมายเหตุ

ในการเขียน Curve ของ Stress vs. Penetration เพื่อหาค่า CBR จำเป็นจะต้องทำการแก้ Curve โดยเลื่อนจุดศูนย์กลาง Penetration ในกรณีที่ Curve หงายเพื่อให้ได้ค่า CBR ที่แท้จริง

2.19.3 การคำนวณ

2.19.3.1 คำนวณหาปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละ

$$w = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$$

เมื่อ w = ปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละคิดเทียบกับมวลของดินอบแห้ง

M_1 = มวลของดินเปียก มีหน่วยเป็นกรัม

M_2 = มวลของดินอบแห้ง มีหน่วยเป็นกรัม

2.19.3.2 คำนวณหาค่าความแน่นเปียก (Wet Density)

$$\rho_t = \frac{A}{V}$$

เมื่อ ρ_t = ความแน่นเปียก มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิลิตร

A = มวลของดินเปียกที่บดทับในแบบ มีหน่วยเป็นกรัม

V = ปริมาตรของดินเปียกที่บดทับในแบบ หรือปริมาตรของแบบ มีหน่วยเป็นมิลลิลิตร

2.19.3.3 คำนวณหาค่าความแน่นแห้ง (Dry Density)

$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + \frac{w}{100}}$$

เมื่อ ρ_d = ความแน่นแห้ง มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิลิตร

ρt = ความแน่นเปียก มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิเมตร

w = ปริมาณน้ำในดิน มีหน่วยเป็นร้อยละ

2.19.3.4 คำนวณหาค่าการขยายตัว (Swell)

$$\text{Swell} = \frac{S}{H} \times 100$$

เมื่อ S = ผลต่างระหว่างการอ่าน Reading ครั้งแรกและครั้งสุดท้าย ของ Dial Gauge ที่วัด Swell มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

H = ความสูงเริ่มต้น (Initial Height) ของตัวอย่างก่อนแช่น้ำ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

2.19.3.5 คำนวณหาค่า CBR

ในการคำนวณหาค่า CBR ให้ถือแรงมาตรฐาน (Standard Load) ดังนี้

Penetration (mm.)	**Standard Load (kg.)**	**Standard Unit Load (Y) (kg./cm^2.)**
2.54 (0.1″)	1,360.8 (3,000 lb)	70.3 (1,000 lb/in^2)
5.08 (0.2″)	2,041.2 (4,500 lb)	105.46 (1,500 lb/in^2)
7.62 (0.3″)	2,585.5 (5,700 lb)	133.59 (1,900 lb/in^2)
10.16 (0.4″)	3,129.8 (6,900 lb)	161.71 (2,300 lb/in^2)
12.70 (0.5″)	3,538.0 (7,800 lb)	182.81 (2,600 lb/in^2)

หมายเหตุ 1. ถ้าต้องการแปลงหน่วยเป็นระบบ SI ให้ดูภาพผนวก

2. พื้นที่หน้าตัดของท่อนกด = 1,935.5 ตารางมิลลิเมตร (3 ตารางนิ้ว) คำนวณค่า CBR เป็นร้อยละจากสูตร

$$\text{CBR} = \frac{X}{Y} \times 100$$

เมื่อ X = ค่าแรงกดที่อ่านได้ต่อหน่วยพื้นที่ของท่อนกด (สำหรับ Penetration ที่ 2.54 มิลลิเมตร หรือ 0.1 นิ้ว และที่เพิ่มขึ้นอีกทุกๆ 2.54 มิลลิเมตร)

Y = ค่าหน่วยแรงมาตรฐาน (Standard Unit Load) กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (จากตารางข้างบนนี้)

2.19.4 การรายงาน

ในการทำการทดลอง CBR ให้รายงานดังนี้

2.19.4.1 ค่า CBR ที่ความแน่น X% ของความแน่นแห้งสูงสุด (แบบสูงกว่ามาตรฐานหรือแบบมาตรฐาน) ใช้ทศนิยม 1 ตำแหน่ง

2.19.4.2 ค่าความแน่นแห้งที่ให้ค่า CBR ตามข้อ 2.21.4.1 ใช้ทศนิยม 3 ตำแหน่ง

2.19.4.3 ค่าการขยายตัว (Swell) ใช้ทศนิยม 1 ตำแหน่ง

2.19.4.4 และค่าอื่นๆ ตามแบบฟอร์มที่ ว. 2-15 ก.

2.19.5 ข้อควรระวัง

2.19.5.1 สำหรับดินจำพวกดินเหนียวมาก (Heavy Clay) หลังจากตากแห้งแล้ว ให้ทุบด้วยค้อนยางหรือนำเข้าเครื่องบด จนได้ตัวอย่างผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) ให้มากที่สุดเท่าที่มากได้

2.19.5.2 ในการใช้ค้อนทำการบดทับให้วางแบบบนพื้นที่มั่นคง แข็งแรง ราบเรียบ เช่นพื้นคอนกรีต เพื่อไม่ให้แบบกระดกหรือกระดอนขึ้นขณะทำการบดทับ

2.19.5.3 ปริมาตรของแบบ (V) หลังจากหักปริมาตรของโลหะรองออกแล้ว ให้ทำการวัดและคำนวณเพื่อให้ได้ปริมาตรที่แท้จริงของแต่ละแบบไป ห้ามใช้ปริมาตรโดยประมาณ หรือจากที่แสดงไว้ในข้อ 2.19.2.1.2

2.19.5.4 ปริมาณของน้ำที่ใช้ผสม เพื่อเตรียมตัวอย่างทำ CBR ถ้าต้องการใช้ค่าต่างๆ นอกเหนือจากที่ระบุไว้ในวิธีการทดลอง วิธีนี้ย่อมทำได้สำหรับงานวิจัยหรืองานอื่นใด แต่ถ้าไม่แสดงไว้ว่าต้องการใช้ปริมาณน้ำเท่าใดแล้ว ให้ใช้ปริมาณน้ำตามข้อ 2.5.1 (2) เสมอไป

2.19.5.5 ในการทดลอง Penetration Test โดยใช้ Proving Ring เป็นตัวอ่านแรง และใช้ Penetration Dial Gauge คิดที่ Frame ของเครื่องกดต้องทำการแก้ค่า Penetration เนื่องจากการหดตัวของ Proving Ring โดยหักค่าการหดตัวของ Proving Ring ออกจากค่า Penetration ตามตัวอย่างที่แสดงไว้ในแบบฟอร์มที่ ว. 2-11 กรณีที่ติด Penetration Dial Gauge ที่ท่อนกด ไม่ต้องปฏิบัติตามความในข้อนี้

2.19.5.6 เมื่อทำการทดลอง Penetration เสร็จเรียบร้อยแล้ว ในการ Plot Curve ระหว่าง Unit Load และค่า Penetration จำเป็นจะต้องแก้จุดศูนย์สำหรับ Curve ที่หงายขึ้น เนื่องจากความไม่ราบเรียบ หรือเกิดจากการอ่อนยุ่ยที่ผิวหน้าของตัวอย่าง เนื่องจากการแช่น้ำ ให้ทำการแก้โดยลากเส้นตรงให้สัมผัสกับเส้นที่ชันที่สุดของ Curve ไปตัดกับแกนตามแนวราบ คือ เส้นที่ลากผ่าน Unit Load เท่ากับศูนย์ ต่อจากนั้นให้เลื่อนค่าศูนย์ของ Penetration ไปที่จุดตัด แล้วจึงดำเนินการหาค่า CBR ต่อไปเรียกว่า Corrected CBR Value

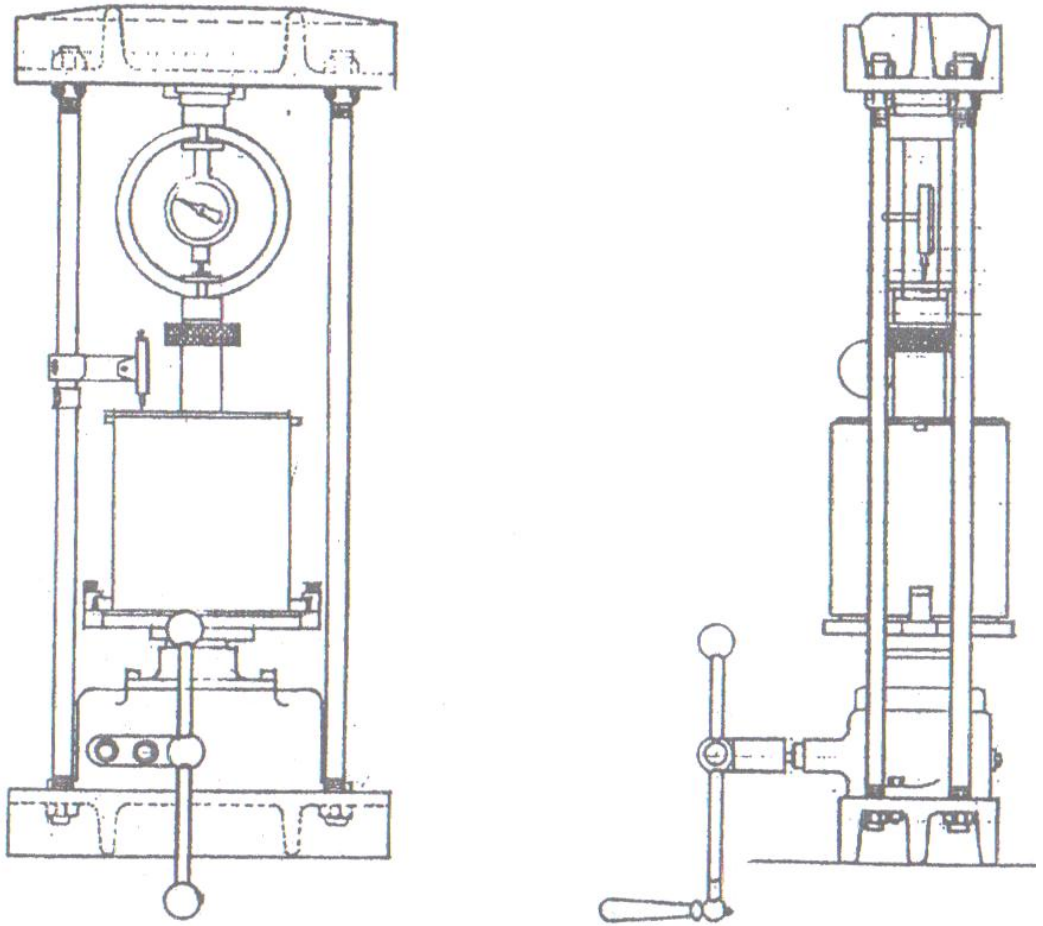
2.19.5.7 ค่า CBR ที่ได้จาก Corrected Load Value หรือจาก True Load Value (Curve ถูกต้องไม่ต้องแก้ Curve) คำนวณจาก Penetration 2.54 มิลลิเมตร (0.1 นิ้ว) และที่ Penetration 5.08 มิลลิเมตร (0.2 นิ้ว) เป็นค่า CBR ที่ใช้รายงาน

โดยปกติค่า CBR ที่ Penetration 2.54 มิลลิเมตร จะต้องมีค่าสูงกว่าค่า CBR ที่ Penetration 5.08 มิลลิเมตร ถ้าหากไม่เป็นดังนั้น คือค่า CBR ที่ 5.08 มิลลิเมตร สูงกว่าที่ 2.54 มิลลิเมตร ให้ทำการเตรียมตัวอย่างทดลองใหม่ทั้งหมด แต่ถ้ายังสูงกว่าอยู่อีกให้ใช้ค่า CBR ที่ 5.08 มิลลิเมตร

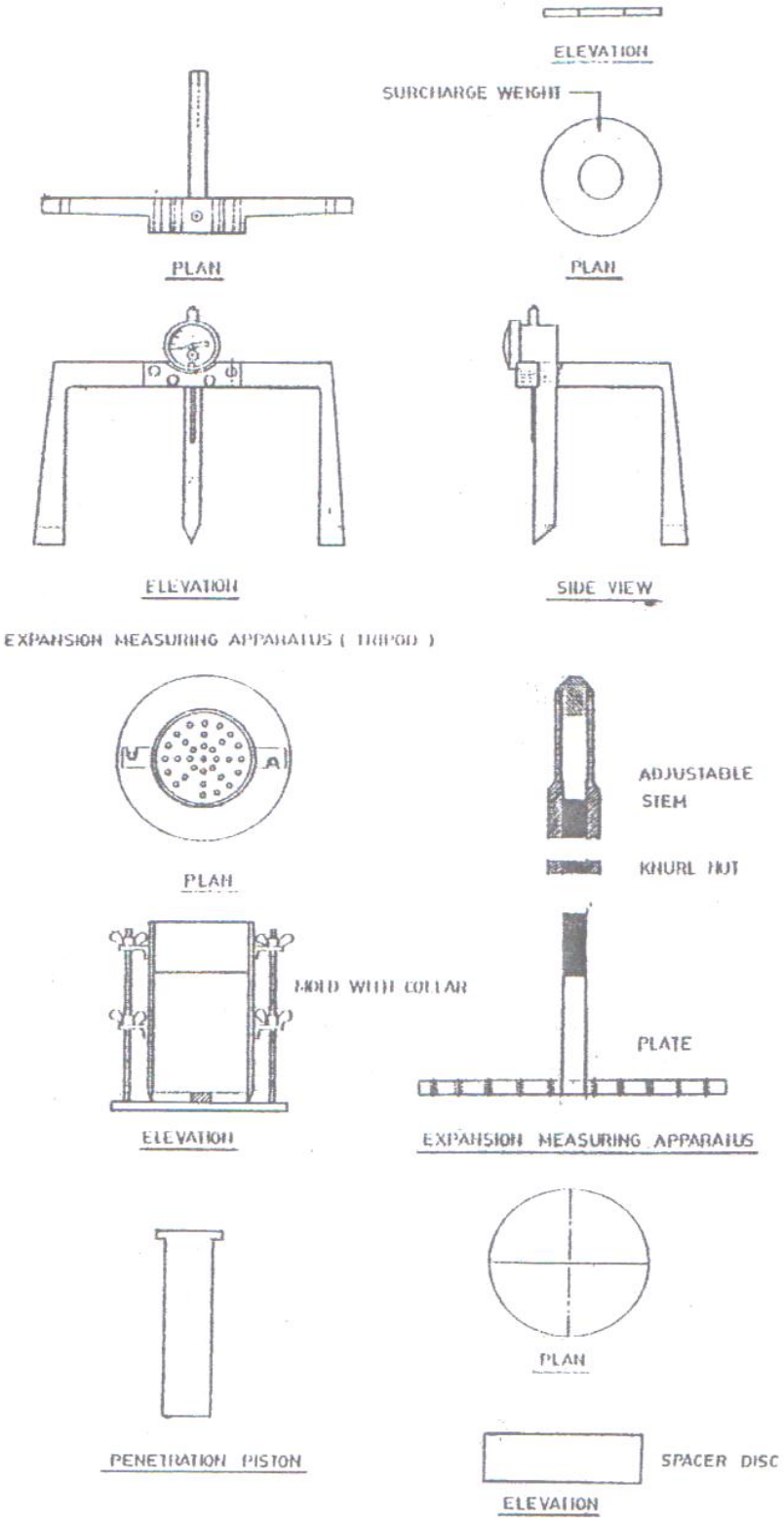
2.19.5.8 ในการทำตัวอย่างเพื่อทดลอง ในกรณีที่ต้องการบดทับมากกว่าหรือน้อยกว่า ที่ต้องการตามวิธีทดลองนี้ อาจจะเพิ่มการบดทับเป็นชั้นละ 75 ครั้ง หรือลดการบดทับเป็นชั้นละ 8 ครั้ง เพื่อให้ได้ตัวอย่างมากขึ้นในการนำมาเขียน Curve ตามข้อ 2.5.4 (10) ก็ได้ (ในแบบฟอร์มที่ ว. 2-15 ก. ก็ได้ เตรียมช่องเพื่อลงรายการไว้ด้วยแล้ว)

2.19.5.9* ค้อนที่ใช้ทำการบดทับเพื่อเตรียมตัวอย่างเพื่อหาค่า CBR มี 2 ขนาด คือ ตามข้อ 2.19.2.1.4 (1) และข้อ 2.1.4 (2) ในการเตรียมตัวอย่าง

CBR ตามวิธีการทดลอง Compaction Test ที่ ทล.-ท. 107/2517 ให้ใช้ค้อนขนาดเล็ก (ข้อ 2.1.4 (1)) ส่วนการเตรียมตัวอย่าง CBR ตามวิธีการทดลอง Compaction Test ที่ ทล.-ท. 108/2517 ให้ใช้ค้อนขนาดใหญ่ (ข้อ 2.19.2.1.4 (2))



รูปที่ 2.36 LABORATORY LOADING MACHINE



รูปที่ 2.37 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบหาค่า CBR.ในห้องปฏิบัติการ

สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง

อันดับทดลองที่ C-443

เจ้าของตัวอย่าง

หนังสือที่ วันที่รับหนังสือ

ทางสาย พระประแดง-บางขนเทียน ตอน 3

เจ้าหน้าที่ทดลอง ชัยฤทธิ์ วันที่รับตัวอย่าง วันที่ทดลอง

CALIFORNIA BEARING RATIO TEST

Sample Subbase Layer km. 43+150-43+295 Frontage Rd. Rt

Mold No. 4 Weight 0.200 Kg. Volume 2127 cc. Factor 8.3195 lb/Div-23 lb

DENSITY

No.blows 12

No.Layers 5

Wt.Hammer 4.537 Kg.

Drop 45.72 cm.

Wt Mold+Soil Kg.			
Wt Mold Kg.			
Wt Soil Kg.			
Wet Density gm./cc.			
Dry Density gm./cc.			

WATER CONTENT

		25	46	33	9
Wt. Can+ Wt Soil	gm.	300.5	312.0	312.0	315.0
Wt.Can+Dry Soil	gm.	282.7	294.3	293.7	289.5
Wt. Water	gm.	17.8	17.7	18.3	25.5
Wt.Can	gm.	41.6	42.1	42.0	41.7
Wt. Dry Soil	gm.	241.1	252.2	251.7	247.8
Water content	%	7.4	7.0	7.3	10.3
Average Water content	%	-	7.2	-	-

PENETRATION TEST : Surcharge 2 pcs. = 4.536 Kg. Proving Ring No. 200382

Piston area = 19.355 $cm.^2$ (3 $in.^2$) at 1.27 mm/min (0.05 in/min)

Date	Time	Reading mm.	Swell mm.	Swell %	Days	Pene (mm.) (1)	Dial Reading	Cor. Pme. (mm.) (3)=(1)-(2)	Load (Kg.) Rdg.from (2)	Bearing Value $Kg./cm.^2$	Bearing Ratio (From Curve)
28/4/43	10.30	1.00	-	-	0	0.63 (0.025*)	7				
29	10.30	1.17	0.17	0.14	1	1.27 (0.050*)	16				
30	10.30	1.19	0.19	0.16	2	1.90 (0.075*)	25				
1/5/43	10.30	1.20	0.20	0.17	3	2.54 (0.100*)	36				
2	10.30	1.20	0.20	0.17	4	3.13 (0.125*)	45				
(1) Optimum Moist.					7.5%	3.81 (0.150*)	55				
(2) Original Moist.					0.7 %	4.44 (0.175*)	62				
(3) Water to be added (1) – (2)					6.9%	5.08 (0.200*)	70				
(4) Use soil passing # 4					2.460 gm.	0.35 (0.200)					
(5) Use soil retained # 4					3540 gm.	7.02 (0.300*)					
(6) Total dry soil (4)+(5)					6000 gm.	0.09 (0.350*)					
(7) Total dry soil (6)+ $\frac{100+(2)}{100}$					5961 gm.	0.008 (0.400*)					
(8) Total water to be added $\frac{408}{(7)\times(3)}$					gm.	11.44 (0.450*)					
						12.70 0.200*)					

ว. 2-15

สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง

กรมทางหลวง

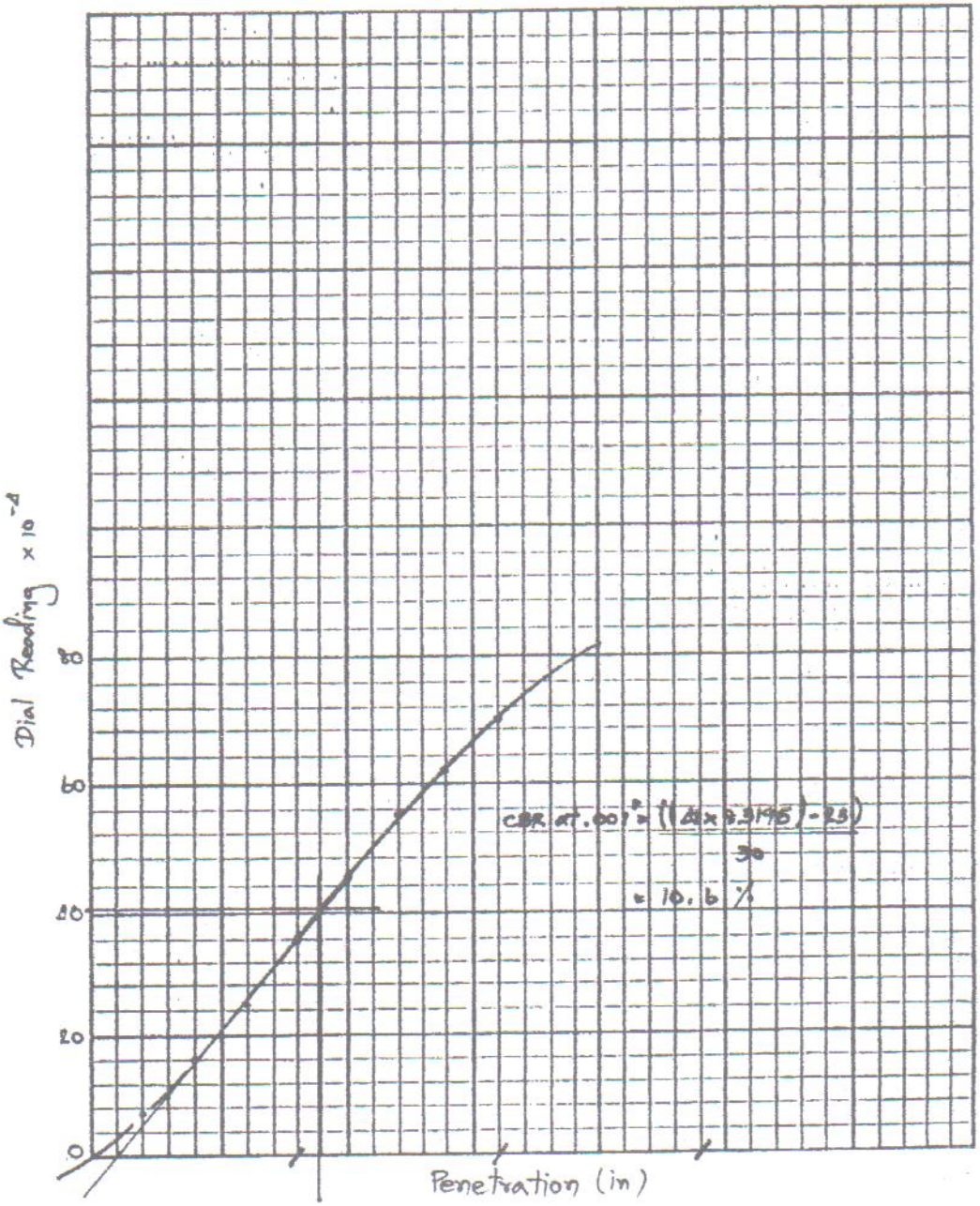
Test No. C-443

Type of test CBR. At 12 Blows

Date 2/5/43

Source Subbase Layer km. 43+150-43+295 Frontage Rd. RT.

Plotted by ชัยฤทธิ์



ว. 2-15 ก.

SUMMARY OF RESULTS

Type and No. of test C-443 (G-22)

Type of material Weathering Rock To be used for Subbase Layer

Source บ่อสุรวิทย์ อ.พุแค จ.สระบุรี Stock pile No.

Location of sampling km. 43+150-43+295 Frontage Rd., RT.

Tested by อวยพร, ชัยฤทธิ์ Dated 3/5/43

Materials	Passing							L.L.	P.L.
	50.0	25.0	19.0	9.5	# 10	# 40	# 200		
A A-2-4	100.0	91.5	86.7	60.9	30.0	20.8	16.9	28.8	8.3
B Grade "B"			# 4 =	41.0					
Mixed A : B =									

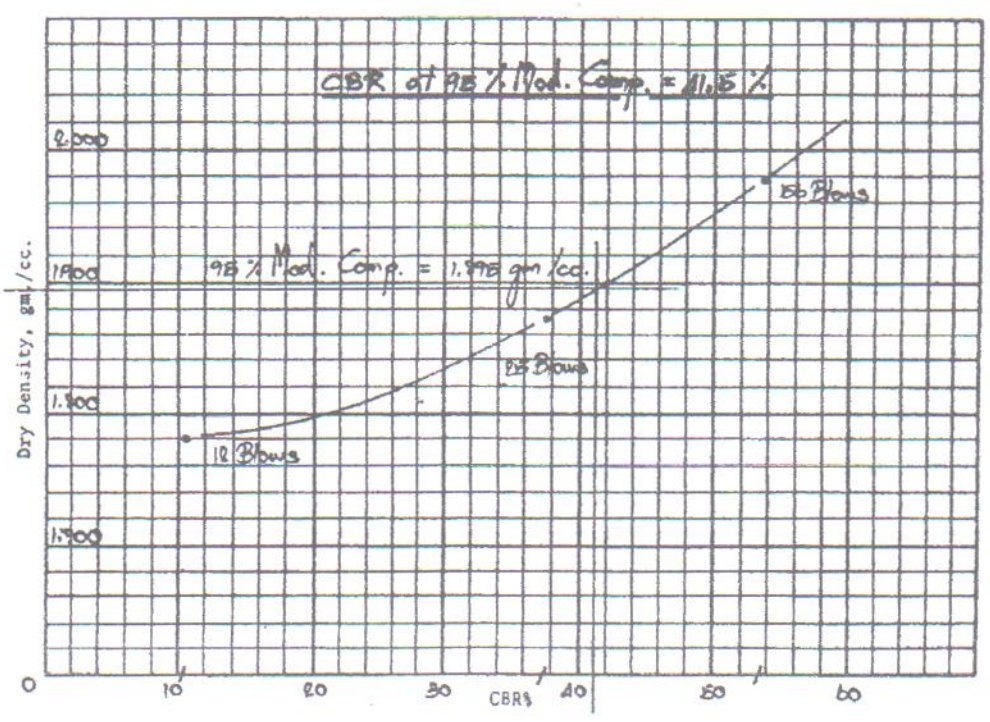
Blow	Density gm./cc.	CBR%	Swell%
8	-	-	-
12	1.780	10.6	0.17
25	1.874	37.5	0.14
56	1.979	53.6	0.10
75	-	-	-

100% Mod Comp. (ทล.-ท. 108/2517) = 1.995 gm./cc.

95% Mod Comp. (ทล.-ท. 108/2517) = 1.895 gm./cc.

O.M.C. = 7.5 % water content of (molding) CBR = 7.2 %

Required CBR ≥ 25.0 % Raise percent compaction - %



2.20 วิธีการทดลองหาค่า CBR ในสนาม (Field CBR) (ทล.-ท. 602/2517**) (เทียบเท่าวิธีของ U.S. Corps of Engineers)**

2.20.1 ขอบข่าย

การทดลองนี้ใช้หาค่าความแข็งแรงของชั้นต่างๆ ของทางที่ประกอบด้วยวัสดุที่มีขนาดเล็กกว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) พื้นที่ทดลองอาจอยู่ในสภาพธรรมชาติได้รับการบดอัดแล้ว หรือได้รับการเพิ่มความชื้น ซึ่งขึ้นอยู่กับความต้องการของงาน การทดลองนี้ได้ดัดแปลงจากวิธีของ U.S. Corps of Engineers

2.20.2 วิธีทำ

2.20.2.1 เครื่องมือ

เครื่องมือทดลองดังแสดงไว้ในรูปที่ 1 และรูปที่ 2 ประกอบด้วย

2.20.2.1.1 น้ำหนักกด เป็นน้ำหนักที่เคลื่อนย้ายได้สะดวก ปกติใช้เครื่องจักรหรือรถบรรทุกที่หนักพอไม่ลอยตัวเมื่อขณะทำการทดลอง

2.20.2.1.2 เครื่องกด (Screw Jack) มีความสามารถรับแรงกดได้ไม่น้อยกว่า 5,000 กิโลกรัม (50 กิโลนิวตัน) ซึ่งสามารถควบคุมความเร็วของการกดให้คงที่ได้ด้วยอัตราเร็ว 1.27 มิลลิเมตร (0.05 นิ้ว) ต่อนาที

2.20.2.1.3 ท่อนกด (Penetration Piston) เป็นท่อนทรงกระบอกตัน มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 49.5 มิลลิเมตร (1.95 นิ้ว) มีพื้นที่หน้าตัด 1,935.4 ตารางมิลลิเมตร (3 ตารางนิ้ว) และมีความยาวไม่น้อยกว่า 142.4 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) มีเกลียวภายในสำหรับต่อกับท่อนต่อ (Piston Rod) หรือใช้ต่อกับ Proving Ring ได้

2.20.2.1.4 เครื่องวัดการเลื่อนขึ้นหรือเลื่อนลงพร้อมที่จับเป็นแม่เหล็ก (Dial Gauge With Magnetic Holder) ชนิดวัดได้ 25 มิลลิเมตร และอ่านได้ละเอียดถึง 0.01 มิลลิเมตร (หรือจะใช้ขนาดวัดได้ 1 นิ้ว และอ่านได้ละเอียดถึง 0.001 นิ้ว แทนก็ได้)

2.20.2.1.5 แผ่นเหล็กถ่วงน้ำหนัก (Steel Plate) มี 3 ชนิด

(1) แผ่นเหล็ก แผ่นคอนกรีต กลมมีหูจับ 2 ด้าน มีมวล 4,537 กรัม (10 ปอนด์) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 304.8 มิลลิเมตร (12 นิ้ว)

(2) แผ่นเหล็กกลมมีมวล 4,537 กรัม (10 ปอนด์) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 254 มิลลิเมตร (10 นิ้ว) ตรงกลางมีรูเส้นผ่านศูนย์กลาง 51.6 มิลลิเมตร (2 1/32 นิ้ว)

(3) แผ่นเหล็กกลมมีมวล 2,258 กรัม (5 ปอนด์) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 254 มิลลิเมตร (10 นิ้ว) มีช่องเพื่อให้สวมท่อนกดได้หรือจะใช้น้ำหนักอย่างอื่น (Slotted Surcharge หรือ Split Surcharge) แทนก็ได้

2.20.2.1.6 Proving Ring ขนาด 1,000 กิโลกรัม (2,000 ปอนด์, 10 กิโลนิวตัน) และ 3,000 กิโลกรัม (6,000 ปอนด์, 30 กิโลนิวตัน) พร้อมทั้ง Curve แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและค่าที่อ่านได้บนหน้าปัดของ Proving Ring

2.20.2.1.7 โครงเหล็กพร้อมส่วนประกอบ เพื่อประกอบเป็นแขนติดเครื่องวัดการเลื่อนขึ้นลง (Dial Gauge) เพื่อใช้วัดระยะที่ท่อนกดจมลง

2.20.2.1.8 ท่อนต่อ (piston Rod) เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเดียวกับท่อนกด ใช้เพิ่มความยาวของท่อนกด

2.20.2.1.9 อุปกรณ์อื่นๆ ได้แก่ นาฬิกาจับเวลา ภาชนะเก็บตัวอย่างสำหรับหาปริมาณน้ำในดิน สิ่ว ค้อน อีเตอร์ จอบ พลั่ว เครื่องวัดระดับ ป้ายกั้นจราจร ถังบรรจุน้ำ พร้อมที่ตัก เตาอบ และเครื่องชั่ง

2.20.2.2 วัสดุใช้ประกอบการทดลอง

2.20.2.2.1 ทรายละเอียด

2.20.2.2.2 ปูนปลาสเตอร์

2.20.2.2.3 น้ำสะอาด

2.20.2.3 แบบฟอร์ม

ใช้แบบฟอร์มที่ ว. 6-01 และ ว. 6-02

2.20.2.4 การเตรียมตัวอย่าง

-

2.20.2.5 การทดลอง

2.20.2.5.1 ขุดผิวหน้าวัสดุออกจนถึงชั้นที่จะทำการทดลอง มีขนาดหลุมประมาณ 500 มิลลิเมตร x 500 มิลลิเมตร (ถ้าต้องการทดลองหาค่าความแน่นตาม "วิธีการทดลองหาค่าความแน่นของวัสดุในสนามโดยใช้ทราย การทดลองที่ ทล.-ท. 603/2517" จุดทดลองความแน่นต้องห่างจากจุดทดลอง CBR ในสนามไม่น้อยกว่า 300 มิลลิเมตร)

2.20.2.5.2 เลือกจุดทดลอง CBR ในสนามที่ไม่มีวัสดุก้อนโตกว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ปรับผิวหน้าในเรียบและได้ระดับโดยใช้เครื่องวัดระดับช่วย ในกรณีที่ต้องการแช่น้ำ (Soak) ต้องวางแผ่นเหล็ก ดังนี้

(1) แผ่นเหล็กถ่วงน้ำหนักตามข้อ 2.20.2.1.5 (1) จำนวน 1 อัน มีมวล 4,537 กรัม (10 ปอนด์) สำหรับวัสดุพื้นทาง วัสดุรองพื้นทางและวัสดุคัดเลือก หรือน้ำหนักอื่นใดตามที่กำหนดแต่มีมวลไม่เกิน 13,011 กรัม (30 ปอนด์) บนจุดที่จะทดลอง

(2) แผ่นเหล็กถ่วงน้ำหนักตามข้อ 2.1.5 (1) จำนวน 1 อัน และแผ่นเหล็กถ่วงน้ำหนักตามข้อ 2.20.2.1.5 (3) จำนวน 1 อัน มีมวลรวม 6,084 กรัม (15 ปอนด์) สำหรับวัสดุ Subgrade หรือน้ำหนักอื่นใดที่กำหนดแต่ต้องไม่เกิน 13,611 กรัม (30 ปอนด์) บนจุดที่จะทดลอง

เทน้ำลงในหลุม แช่ทิ้งไว้จนประมาณว่าวัสดุมีปริมาณความอิ่มตัว (Degree of Saturation) ไม่ต่ำกว่า 80% (วัสดุที่มีดินจำพวกดินเหนียวปน ต้องแช่น้ำไว้ไม่ต่ำกว่า 24 ชั่วโมง) เมื่อแช่น้ำได้ตามที่ต้องการแล้ว ให้ตักน้ำออกให้หมด แล้วยกน้ำหนักที่วางไว้ออก ปาดส่วนที่เหลวออก และแต่งผิวหน้าให้เรียบได้ระดับ ถ้าไม่สามารถแต่งผิวหน้าให้เรียบได้ ให้ใช้ทรายละเอียดแต่งเฉพาะส่วนที่อยู่ใต้แผ่นเหล็ก สำหรับส่วนที่อยู่ใต้

ท่อนกด ห้ามปรับระดับด้วยทราย หากจำเป็นต้องแต่งระดับให้ใช้ปูนปลาสเตอร์แต่งบางๆ ให้เรียบ มีขนาดพื้นที่โตไม่เกินหน้าตัดของท่อนกด ก่อนการทดลองต้องปล่อยให้น้ำซึมออกจากจุดทดลองประมาณ 15 นาที นับจากที่ได้ตักน้ำออกหมด

2.20.2.5.3 ให้นำน้ำหนักกดที่ติดเครื่องกดเข้าบริเวณหลุม ติด Proving Ring พร้อมด้วยท่อนกดเข้ากับเครื่องกด แล้วเลื่อนให้ท่อนกดตรงกับจุดทดลอง ปรับให้ท่อนกดตั้งฉากกับพื้นที่ทดลอง วางแผ่นเหล็กดังนี้

(1) แผ่นเหล็กถ่วงน้ำหนักตามข้อ 2.20.2.1.5 (2) จำนวน 1 อัน มีมวล 4,537 กรัม (10 ปอนด์) สำหรับวัสดุพื้นทาง วัสดุรองพื้นทางและวัสดุคัดเลือก หรือน้ำหนักอื่นใดที่กำหนด แต่มวลต้องไม่เกิน 13,611 กรัม (30 ปอนด์)

(2) แผ่นเหล็กถ่วงน้ำหนักตามข้อ 2.20.2.1.5 (2) จำนวน 1 อัน และแผ่นเหล็กถ่วงน้ำหนักตามข้อ 2.20.2.1.5 (3) จำนวน 1 อัน มีมวลรวม 6,805 กรัม (15 ปอนด์) สำหรับวัสดุ Subgrade หรือน้ำหนักอื่นใดที่กำหนดแต่ต้องไม่เกิน 13,611 กรัม (30 ปอนด์)

2.20.2.5.4 ติดเครื่องวัดการเลื่อนขึ้นลง (Dial Gauge) เข้ากับท่อนกด โดยให้แม่เหล็กติดกับท่อนกด และปลายของ Dial Guage วางอยู่บนแผ่นที่ยื่นออกมาจากโครงเหล็ก (ตามข้อ 2.20.2.1.7) ให้อยู่ในลักษณะที่อ่านค่าระยะจมลงของท่อนกดได้

2.20.2.5.5 หมุนเครื่องกดให้ปลายท่อนกด กดบนผิวหน้าของพื้นที่ทดลอง ด้วยแรงกดประมาณ 4,000 กรัม (40 นิวตัน) ตั้งหน้าปัดของ Proving Ring ให้เป็นศูนย์ พร้อมทั้งตั้งหน้าปัดของ Dial Gauge ที่อ่านค่าระยะจมลงของท่อนกดให้เป็นศูนย์ด้วย การที่ให้มีน้ำหนักกดประมาณ 4,000 กรัม (40 นิวตัน) เพื่อให้แน่ใจว่าท่อนกดได้สัมผัสผิวของพื้นที่ทดลองและไม่นำมาคิด ในการหา Stress vs. Penetration

2.20.2.5.6 หมุนเครื่องกดให้ปลายของท่อนกดจมลงด้วยอัตราเร็วที่สม่ำเสมอเท่ากับ 1.27 มิลลิเมตร (0.05 นิ้ว) ต่อนาที

2.20.2.5.7 ทำการบันทึกแรงกดจากหน้าปัดของ Proving Ring เมื่อท่อนกดจมลงอ่านได้ที่

- 0.63 มิลลิเมตร (0.025 นิ้ว)
- 1.27 มิลลิเมตร (0.050 นิ้ว)
- 1.90 มิลลิเมตร (0.075 นิ้ว)
- 2.54 มิลลิเมตร (0.100 นิ้ว)
- 3.17 มิลลิเมตร (0.125 นิ้ว)
- 3.81 มิลลิเมตร (0.150 นิ้ว)
- 4.44 มิลลิเมตร (0.175 นิ้ว)
- 5.08 มิลลิเมตร (0.200 นิ้ว)
- 6.35 มิลลิเมตร (0.250 นิ้ว)
- 7.62 มิลลิเมตร (0.300 นิ้ว)
- 8.89 มิลลิเมตร (0.350 นิ้ว)
- 10.16 มิลลิเมตร (0.400 นิ้ว)
- 11.43 มิลลิเมตร (0.450 นิ้ว)
- 12.70 มิลลิเมตร (0.500 นิ้ว)

เสร็จแล้วคลายแรงกดออก ยกท่อนกดและแผ่นเหล็กถ่วงน้ำหนักออก

2.20.2.5.8 นำตัวอย่างบริเวณที่ถูกท่อนกดไดหาปริมาณน้ำในดิน ปริมาณตัวอย่างให้ใช้ดังนี้

(1) ขนาดก้อนใหญ่สุด 19.0 มิลลิเมตร ใช้ประมาณ 300 กรัม

(2) ขนาดก้อนใหญ่สุด 4.75 มิลลิเมตร ใช้ประมาณ 100 กรัม

2.20.2.5.9 เขียน Curve ระหว่างค่าที่อ่านได้จาก Proving Ring กับระยะที่ท่อนกดจมลง (Dial Reading vs. Penetration) เพื่อหาค่า CBR ต่อไป

หมายเหตุ ในการเขียน Curve ของ Dial Reading vs. Penetration เพื่อหาค่า CBR จำเป็นจะต้องทำการแก้ Curve โดยเลื่อนจุดศูนย์ของ Penetration ในกรณีที่ Curve หงาย เพื่อให้ได้ค่า CBR ที่แท้จริง

2.20.3 การคำนวณ

2.20.3.1 คำนวณค่าปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละ

$$\omega = \frac{M_1-M_2}{M_2} \times 100$$

เมื่อ ω = ปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละคิดเทียบกับมวลของดินอบแห้ง

M_1 = มวลของดินเปียก มีหน่วยเป็นกรัม

M_2 = มวลของดินอบแห้ง มีหน่วยเป็นกรัม

2.20.3.2 คำนวณค่า CBR

การคำนวณหาค่า CBR ให้ถือแรงมาตรฐานดังนี้

Penetration (mm.)	**Standard Load (kg.)**	**Standard Unit Load (Y) ($kg./cm^2$.)**
2.54 (0.1″)	1,360.8 (3,000 lb)	70.3 (1,000 lb/in^2)
5.08 (0.2″)	2,041.2 (4,500 lb)	105.46 (1,500 lb/in^2)

หมายเหตุ 1. ถ้าต้องการแปลงหน่วยเป็นระบบ SI ให้ดูภาคผนวก

2. ท่อนกดมีพื้นที่หน้าตัด 1,935.5 ตารางมิลลิเมตร (3 ตารางนิ้ว)

คำนวณค่า CBR เป็นร้อยละ จากสูตร

$$\text{CBR (\%)} = \frac{X}{Y} \times 100$$

เมื่อ X = ค่าแรงกดที่อ่านได้ต่อหน่วยพื้นที่ของท่อนกด มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (สำหรับ Penetration ที่ 2.54 มิลลิเมตรหรือ 0.1 นิ้ว และที่ 5.08 มิลลิเมตร หรือ 0.2 นิ้ว)

Y = ค่าหน่วยแรงมาตรฐาน (Standard Unit Load) มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากตารางข้างบนนี้

2.20.4 การรายงาน

ให้รายงาน

2.20.4.1 ค่า CBR ที่ได้เป็นเปอร์เซ็นต์ใช้ทศนิยม 1 ตำแหน่ง

2.20.4.2 ค่าปริมาณน้ำในดินเป็นเปอร์เซ็นต์ใช้ทศนิยม 2 ตำแหน่ง

2.20.4.3 สภาพภูมิประเทศ พื้นถนน การระบายน้ำ รูปตัดของถนนตรงจุดที่ทดลองและอื่นๆ ตามแบบฟอร์มที่ ว. 6-01 และที่ ว. 6-02

2.20.5 ข้อควรระวัง

2.20.5.1 ขาของโครงเหล็กต้องตั้งให้ห่างจากจุดกดไม่น้อยกว่า 400 มิลลิเมตร เพื่อให้อยู่นอกอิทธิพลของการเคลื่อนตัวของวัสดุเนื่องจากแรงกด

2.20.5.2 ก่อนการทดลอง ถ้าปรากฏว่าน้ำที่ Soak ไว้แห้ง ให้เติมน้ำแช่ไว้ประมาณ 2 เซนติเมตร จึงตักน้ำออกแล้วดำเนินการทดลอง หลังจากเติมน้ำ

2.20.5.3 ต้องมีป้ายกั้นหรือเครื่องหมายจราจรในบริเวณทดลอง เพื่อป้องกันอุบัติเหตุในกรณีที่จำเป็นจะต้องทดลองบริเวณที่มีระยะมองเห็นปลอดภัยสั้น เช่น ที่บริเวณทางโค้งหรือขึ้นเนิน เป็นต้น ให้เพิ่มป้ายกั้นหรือเครื่องหมายจราจร เพื่อให้เห็นได้ในระยะไกล

2.20.5.4 ในขณะหมุนเครื่องกดเพื่อให้ท่อนกดจมลงนั้น รถบรรทุกหรือเครื่องจักรที่ใช้เป็นตัวน้ำหนักต้องจอดนิ่งจริงๆ ถ้าเบรกมือไม่ดีพอต้องหมุนล้อเสีย โดยเฉพาะสำหรับจดทดลองบนทางลาด

2.20.5.5 ในการกดท่อนตามข้อ 2.5.6 และอ่านแรงกดตามข้อ 2.5.7 ห้ามกดต่อไป เมื่ออ่านแรงกดได้ถึง 90% ของค่าความสามารถอ่านได้ค่าสูงสุด (Capacity) ของ Proving Ring ถ้าใช้ Proving Ring ชนิด 1,000 กิโลกรัม (10 กิโลนิวตัน) ให้เปลี่ยน Proving Ring เป็นชนิด 3,000 กิโลกรัม (30 กิโลนิวตัน) และทดลองที่จุดใหม่ถ้าใช้ Proving Ring 3,000 กิโลกรัม (30 นิวตัน) ให้หยุดทดลองและหมายเหตุไว้

2.20.5.6 เมื่อทดลอง Penetration เสร็จเรียบร้อยแล้ว ในการ Plot Curve ระหว่าง Load (หรือ Proving Ring Reading) กับค่า Penetration จำเป็นจะต้องแก้จุดศูนย์สำหรับ Curve ที่หงายขึ้น เนื่องจากผิวหน้าของตัวอย่างไม่ราบเรียบหรืออ่อนยุ่ยเพราะถูกแช่น้ำ ให้ทำการแก้ไขโดยลากเส้นตรงให้สัมผัสกับเส้นที่ชันที่สุดของ Curve ไปตัดกับแกนตาม

แนวราบ คือ เส้นที่ลากผ่าน Unit Load เท่ากับศูนย์ต่อจากนั้น ให้เลื่อนค่าศูนย์ของ Penetration ไปที่จุดที่ตัดแล้วจึงดำเนินการหากค่า CBR ต่อไป เรียกค่า CBR ที่ได้ว่า Corrected CBR Value

2.20.5.7 ค่า CBR ที่คำนวณได้จาก Penetration 2.54 มิลลิเมตร (0.1 นิ้ว) และที่ Penetration 5.08 มิลลิเมตร (0.2 นิ้ว) เป็นค่า CBR ที่ใช้รายงาน

โดยปกติค่า CBR ที่ Penetration 2.54 มิลลิเมตร จะต้องมีค่าสูงกว่าค่า CBR ที่ Penetration 5.08 มิลลิเมตร ถ้าไม่เป็นดังนั้นคือ ค่า CBR ที่ 5.08 มิลลิเมตร สูงกว่าที่ 2.54 มิลลิเมตร ก็ให้ใช้ค่า CBR ที่ 5.08 มิลลิเมตร เป็นค่าที่ทดลองได้

2.20.6 หนังสืออ้างอิง

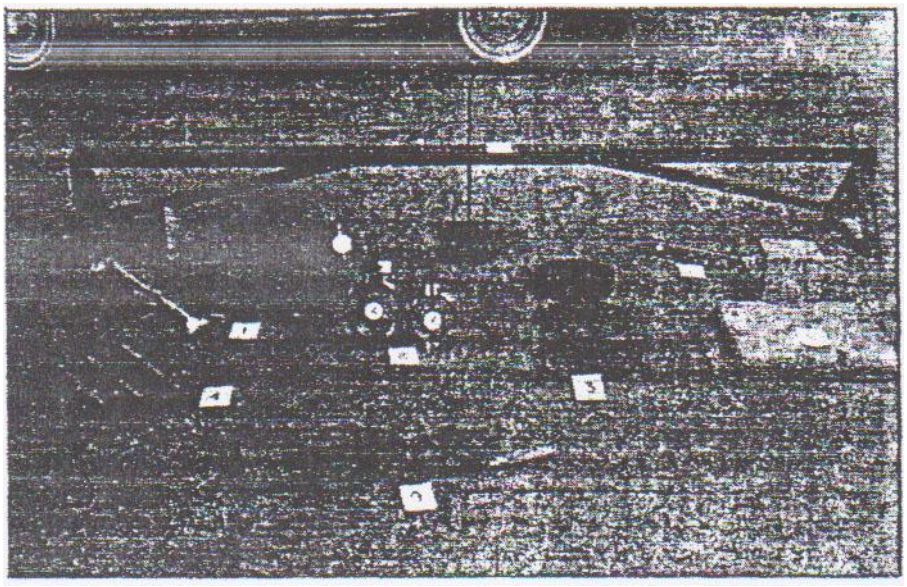
2.20.6.1 The Asphalt Institute (1963). Soil Manual for Tesing of Asphalt Pavement Structure.

2.20.6.2 Road Research Laboratory, Department of Scientific and Industrial Research, U.K. Soil Mechanics for Road Engineers.

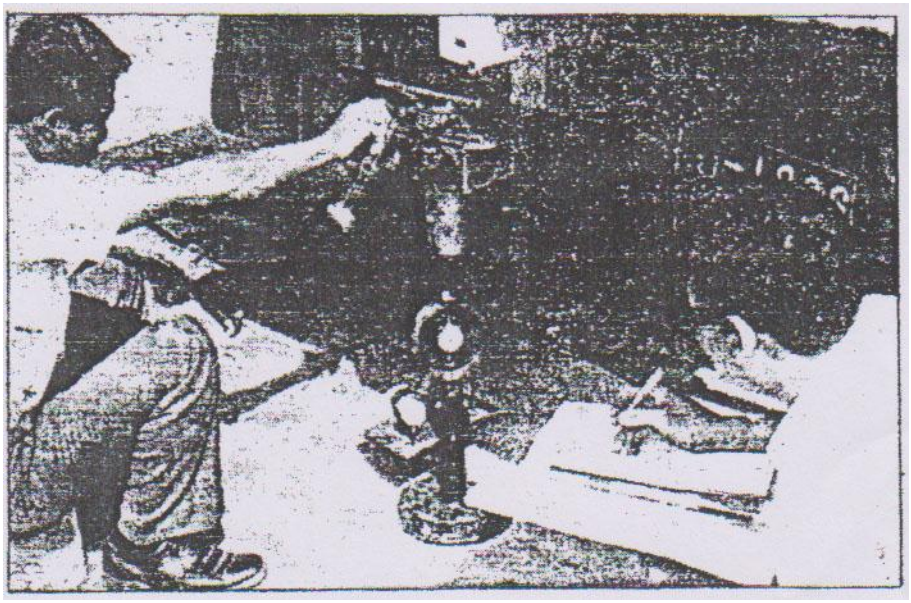
2.20.6.3 กองวิเคราะห์และวิจัย กรมทางหลวง การทดลอง ที่ ทล.-ท. 109/2517 “วิธีการทดลองเพื่อหาค่า CBR”

การทดลองที่ ทล.-ท. 602/2517

Test Number DH-T 602/2517



รูปที่ 2.38 เครื่องมือทดลอง Field CBR



รูปที่ 2.38 เครื่องมือทดลอง Field CBR (ขณะทำการทดลอง)

ว. 6-01 ก.

สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง

ทางสาย เลย-ท่าลี่-ปากห้วย กม. 1-500 L.T.

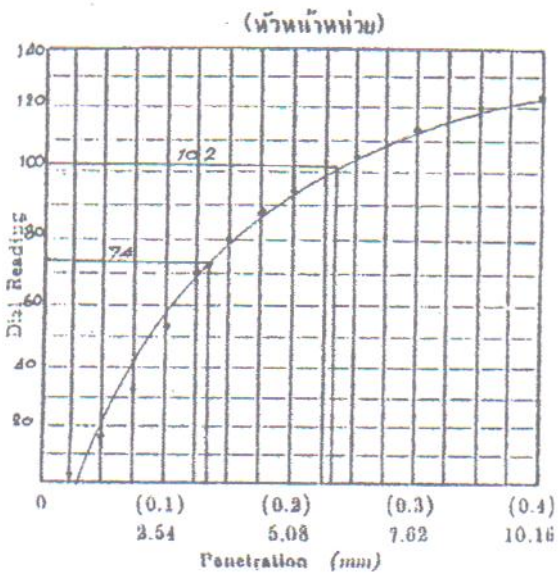
ชนิดพื้นถนนที่ทำ C.B.R. Subgrade ตำแหน่ง 1600 จาก 4

ลึกจากผิว Soil Agg. 80 mm. ความลึกของหลุม 120 mm.

Proving Ring No. AG.66 วันที่ทดลอง 26 มี.ค. 37

Factor of Proving Ring 3.108 Kg./Division ผู้ทดลอง วิทยา

Pene.	Dial	Pene.	Dial	Pene.	Dial
0.63 (0.025*)	1	4.44 (0.450*)	89		126
1.27 (0.050*)	16	5.08 (0.200*)	94	13.70 (0.500*)	128
1.90 (0.075*)	32	6.35 (0.250*)	104		
2.51 (0.100*)	53	7.62 (0.300*)	113		
3.17 (0.125*)	70	8.09 (0.350*)	120		
3.81 (0.150*)	80	10.15 (1.400*)	124		



CBR at (0.1") 2.54 mm. CBR at (0.2") 5.08 mm.

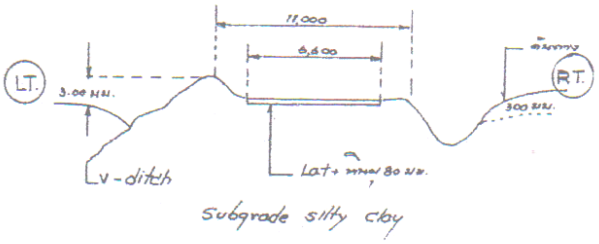
Corrected Dial : 74 Corrected Dial : 102

Load : $\frac{74 \times 3.108 \times 100}{19.355 \times 70.3}$ Load : $\frac{102 \times 3.108 \times 100}{19.355 \times 100.46}$

CBR : 16.90 % CBR : 15.53 %

Area of Piston 19.355 $cm.^2$

	Water Content CBR.
Can No.	135
Wet Soil+Can	88.35
Dry Soil+ Can	78.40
Wt. of water	8.95
Wt. of can	11.00
Wt. of wet soil	
Wt. of dry soil	67.40
Water Content	14.76



Subgrade silty clay

สภาพภูมิประเทศ

ทั่ว ๆ ไป: ที่ราบ ราบ ลาดเอียง; เนินขึ้นลง ราบสูง✓ สันเนิน ลาดปานกลาง✓; เนินเขา ราบสูง สันเนิน ลาดชัน

ตรงจุดทดลอง: ราบต่ำ ลงเนิน; ราบต่ำ ลงเนิน✓; ลาดปานกลาง หุบเขา

สภาพผิวจราจร: ลาดยาง ดี เสียมาก; ลงหิน เป็นลูกคลื่น เสียหมด; ลงลูกรัง เป็นหลุม

สภาพการระบายน้ำ

ทั่ว ๆ ไป✓ดี/ปานกลาง/เลว

ใกล้จุดทดลอง✓ดี/ปานกลาง/เลว

น้ำข้างทาง มี/ไม่มี✓

หนองน้ำข้าง ๆ มี/ไม่มี✓

เคยมีน้ำท่วม มี/ไม่มี✓

ระบบการระบายน้ำที่มีอยู่ U ditch

สภาพพื้นถนน

สภาพชำรุดของผิวลาดยาง

แตกหรือทรุดตามแนว { ยาว / ขวาง

เป็นหลุมหน้าข้าวตัง เป็นหลุมเดียวโดด ๆ

มีรอยร่องล้อตามยาว

ไหล่ชำรุด

ปะซ่อมยางที่ไหล่

ปะซ่อมธรรมดาทั่ว ๆ ไป

ปะซ่อมหนักทั่ว ๆ ไป

ทรุด

2.21 เครื่องจักรกลที่ใช้บดอัดดินในสนาม

อุปกรณ์และเครื่องจักรกลที่ใช้ในการทำงานมีหลายชนิด แต่ละชนิดมีความหมาะสมเฉพาะงาน ดังนั้นการรู้จักใช้อุปกรณ์และเครื่องจักรกลให้เหมาะสมกับขนาดและประเภทของงานเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง การบดอัดดินในสนามพอที่จะจำแนกระบบบนพื้นฐานการทำงานของเครื่องจักรกลได้ดังนี้

2.21.1 รถบดล้อยาง (รูปที่ 2.42) เป็นรถบดที่มีประสิทธิภาพสูงกว่ารถบดล้อเรียบในหลาย ๆ ด้าน รถบดประเภทนี้เป็นรถบดที่มีน้ำหนักมาก และประกอบด้วยล้อประมาณ 4 ถึง 6 ล้อในหนึ่งแถว แต่ละล้อมีระยะห่างใกล้กัน ความดันที่จุดสัมผัสระหว่างล้อกับดินประมาณ 85 ถึง 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (585 ถึง 690 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร) รถบดแบบนี้หมาะสำหรับดินทรายและดินเหนียว การบดอัดเป็นการผสมผสานระหว่างการบดอัดด้วยความดันและการนวด

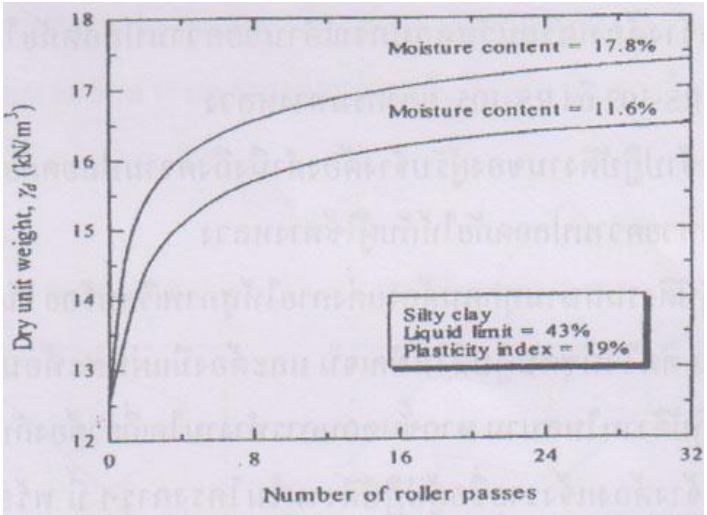
รูปที่ 2.39 รถบดล้อยางทำงานด้วยระบบความดันลม (pneumatic-tired roller)

2.21.2 รถบดอัดแบบสั่นสะเทือนเป็นรถบดอัดที่มีประสิทธิภาพอย่างมากสำหรับกรวดและทราย เครื่องสั่นสะเทือนสามารถติดตั้งกับรถบดอัดได้ทุกประเภท รูปที่ 2.43 แสดงหลักการของรถบดอัดประเภทนี้การสั่นสะเทือนเกิดจากเครื่องที่ติดตั้งไว้นอกจุดศูนย์ กลางของล้อ (off-center rotation weight) เครื่องสั่นนี้จะเคลื่อนที่ขึ้นลงระหว่างการบดอัดด้วยความถี่ 20 ถึง 30 รอบต่อวินาที

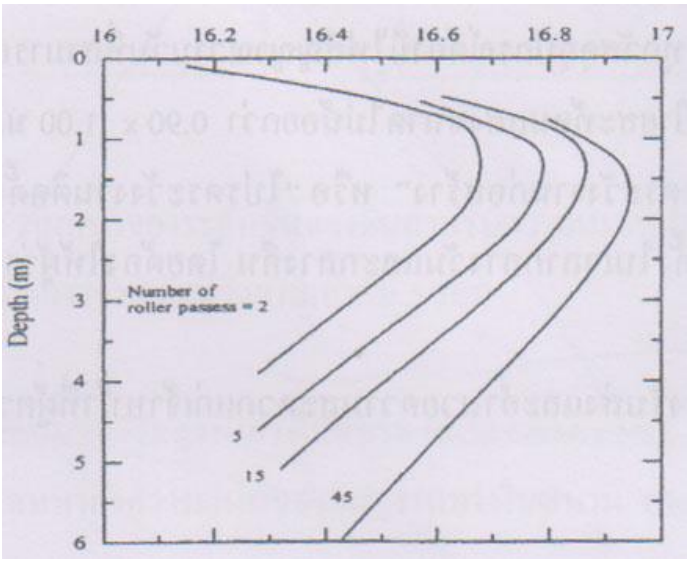
นอกจากชนิดของดินและปริมาณความชื้นแล้ว ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการบดอัดในสนามอีก ปัจจัยเหล่านี้ ได้แก่ ความหนาของชั้นดินที่ทำการบดอัด (lift) ความเข้มข้นของความดันจากเครื่องบดอัด และพื้นที่สัมผัสระหว่างล้อกับดิน เนื่องจากความดันล้อที่กระทำที่ผิวจะ

ลดลงตามความลึก ส่งผลให้เกิดการลดลงของระดับการบดอัด (drgree of compaction) นอกจากนี้ความหนาแน่นแห้งของดินยังแปรผันกับจำนวนที่รถบดอัดวิ่งผ่าน (รูปที่ 2.41a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับ จำนวนรอบที่รถบดอัดวิ่งผ่านของดินเหนียวปนดินตะกอนที่ปริมาณความชื้นค่าหนึ่ง ความหนาแน่นแห้งจะเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนที่รถบดอัดวิ่งผ่านจนถึงค่าหนึ่ง และความหนาแน่นแห้งจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ถึงแม้ว่าจำนวนรอบที่บดอัดจะเพิ่มขึ้น โดยทั่ว ๆ ไป จำนวนรอบที่เท่ากับ 10 ถึง 15 รอบ ให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด

รูปที่ 2.40 รถบดสั่นสะเทือน (vibrating roller)

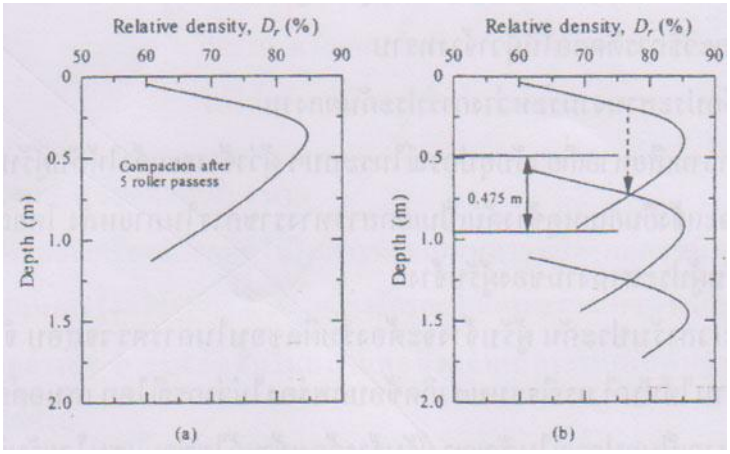


รูปที่ 2.41a ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและจำนวนรอบของรถบดอัดที่วิ่งผ่าน (Johnoso and Sallberg. 1960)



รูปที่ 2.41 b ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งกับจำนวนรอบทีรถบดอัดวิ่งผ่าน (D'Appolonia et al, 1969)

รูปที่ 2.41 b แสดงการเปลี่ยนแปลงของหน่วยน้ำหนักแห้งกับความลึกสำหรับทรายที่มีขนาดคละไม่ดี การบดอัดกระทำโดยใช้รถบดอัดตีนแกะแบบสั่นสะเทือน น้ำหนักของรถบดอัดเท่ากับ 55.6 กิโลนิวตัน และเส้นผ่านศูนย์กลางของตีนแกะเท่ากับ 1.19 เมตร ความหนาของชั้นบดอัดเท่ากับ 2.44 เมตร ตระหนักว่า ที่ความลึกใด ๆ ความหนาแน่นแห้งของการบดอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับจำนวนรอบของการวิ่งผ่านของรถบดอัด แต่อย่างไรก็ตาม อัตราการเพิ่มขึ้นจะมีค่าลดลงหลังจากจำนวนรอบที่ 15 ความจริงอีกประการหนึ่งที่ค้นพบจากรูปที่ 2.44b คือความหนาแน่นแห้งมีค่ามากที่สุดที่ความลึกประมาณ 0.5 เมตรและค่อย ๆ มีค่าน้อยลงตามความลึก เนื่องจากการลดลงของความเค้นตามความลึก ทันทีที่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกับความหนาแน่นสัมพันธ์ (หรือความหนาแน่นแห้ง) สำหรับดินชนิดหนึ่ง ๆ ที่จำนวนรอบที่รถบดอัดวิ่งผ่านค่าหนึ่งเราสามารถประมาณความหนาของการบดอัดแต่ละชั้นได้ วิธีการนี้แสดงในรูปที่ 2.36 (D'Appolonia et al., 1969)



รูปที่ 2.42 การประมาณความหนาของระดับชั้นของดินสำหรับความหนาแน่นสัมพันธ์ 75% กับจำนวนรอบของรถบดอัดที่วิ่งผ่านเท่ากับ 5 รอบ

บทที่ 3
วิธีดำเนินการทำโครงงาน

3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้จะเก็บรวบรวมข้อมูลผลการทดสอบบดอัดและการทดสอบ CBR. ในห้องปฏิบัติการของดินถมคันทาง จากฝ่ายตรวจสอบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ศูนย์สร้างทางขอนแก่น กรมทางหลวง ดินตัวอย่างทั้งหมดเป็นดินที่มีคุณสมบัติตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง ผลทดสอบทั้งหมดจะนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR. และค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density) นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลความแน่นและค่าหน่วยแรงกดของดินบดอัดในสนามและจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นแห้งและค่าหน่วยแรงกดในสนามของดินถมคันทางตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนเที่ยว

3.2 แผนงานดำเนินการ

งานวิจัยนี้ประกอบด้วยสองส่วนหลัก: ส่วนแรกเป็นการเก็บรวบรวมผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ผลทดสอบในห้องปฏิบัติการของดินถมคันทาง รวบรวมจากฝ่ายตรวจสอบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ศูนย์สร้างทางขอนแก่น กรมทางหลวง ผลการทดสอบประกอบด้วยการกระจายขนาดของเม็ดดิน พิกัด Atterberg ของดิน การบดอัดดิน และ CBR ข้อมูลผลการศึกษาส่วนที่สองเป็นการรวบรวมผลการทดสอบในสนาม ผลการทดสอบในสนามได้จากการเก็บข้อมูลการบดอัดของโครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 2038 ตอนแยกทางหลวงหมายเลข 12(กุดฉิม)-อ.ภูเวียง-บ.เมืองใหม่ จังหวัดขอนแก่น การบดอัดนี้เป็นการบดอัดดินถมคันทาง

3.3 ขั้นตอนการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ผลการทดสอบของดินตัวอย่างที่รวบรวมเป็นของวัสดุที่จะผ่านมาตรฐานของกรมทางหลวง โดยดินตัวอย่างจากสายทางต่างๆจะนำมาตากแห้ง และแบ่งตัวอย่างให้ได้ปริมาณเพียงพอต่อความต้องการทดสอบด้วยเครื่องแบ่งตัวอย่างตาม มาตรฐานการทดสอบของกรมทางหลวงเป็นดังนี้

- การทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้างตามมาตรฐานวิธีการทดลอง ทล.-ท.204/2516
- การทดสอบเพื่อหาค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit :LL) ตามมาตรฐานวิธีทดลอง ทล.-ท 102/25/5

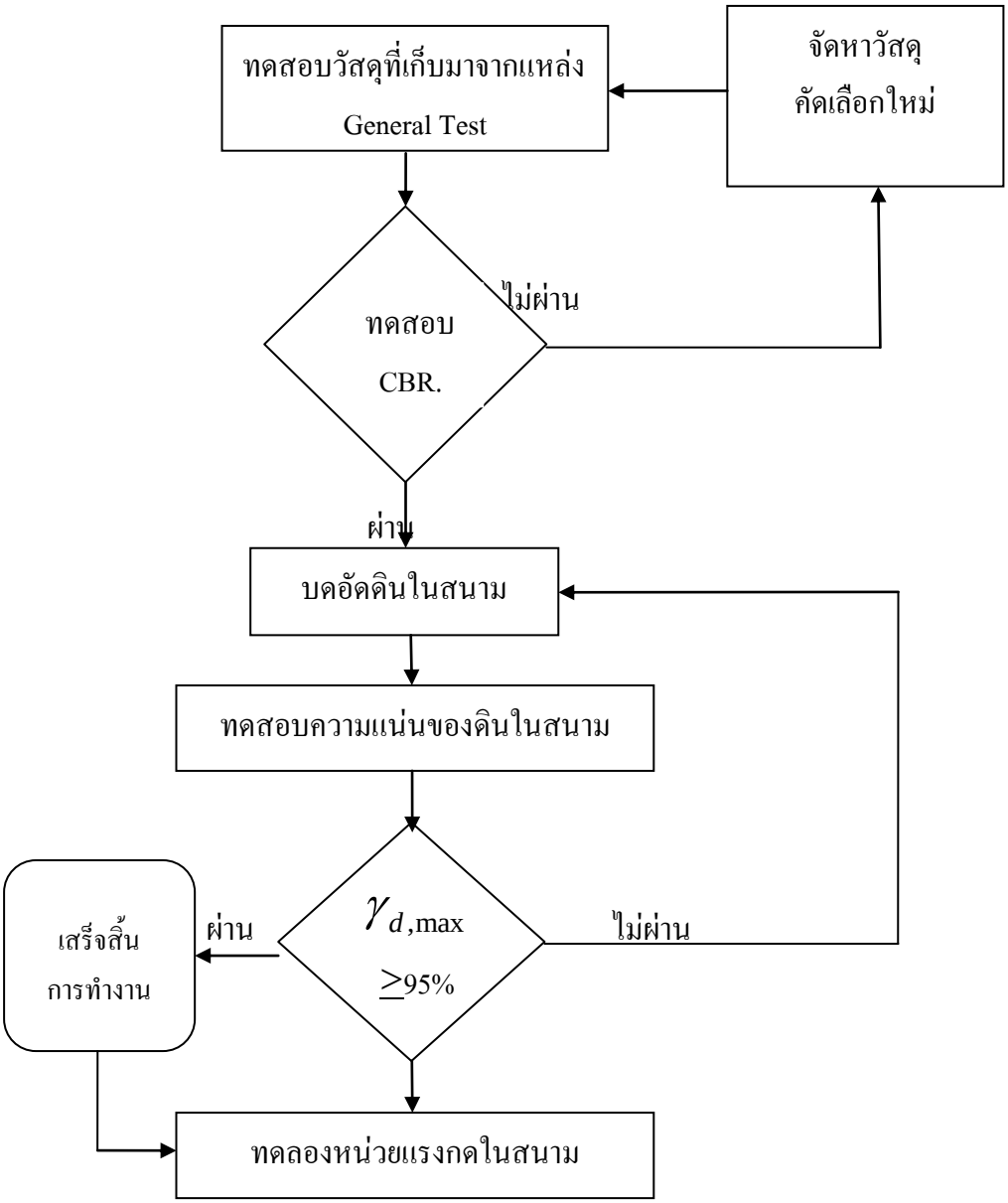
- การทดสอบเพื่อหาค่าขีดจำกัดพลาสติก(Plastic Limit: PL) ตามวิธีทดลอง ทล .ท 103/2515
- การทดสอบความแน่นแบบมาตรฐาน(Standrad compaction) ตามวิธีการทดสอบ ทล.-ท 107/2517
- การทดสอบเพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์ (CBR.) ตามมาตรฐานวีธีทดสอบ แบบแช่น้ำ ตามมาตรฐานวิธีทดลอง ทล.-ท 109/2517

3.4 การทดสอบหาค่าความแน่นของวัสดุในสนาม (Field density test)โดยวิธีกรวยทราย (Sand Cone Test)

ขั้นตอนในการทำงานในสนาม สามารถเขียนเป็นแผนผังได้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งเริ่มต้นจากการเก็บตัวอย่างวัสดุจากแหล่งดินแล้วนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการตามหัวข้อ 3.3 วัสดุที่นำมาใช้ในการบดอัดจะเก็บบนถนน ทุกช่วง(ประมาณ 500 เมตร)ความหนาแน่นแห้งในสนามตรวจวัดด้วยวิธีกรวยทรายจนได้ ความแน่นในสนามไม่น้อยกว่าร้อยละ95 ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ รูปที่ 3.2 แสดงการทดสอบความแน่นแห้งในสนาม ด้วยวิธีกรวยทราย

3.5 การทดสอบหน่วยแรงกดในสนาม

ชุดทดสอบ แรงกดในสนามพัฒนาขึ้นจากการปรับปรุงเครื่องมือทดลอง CBR. ในห้องปฏิบัติการ โดยการเปลี่ยนพฤติกรรมของเครื่องมือในห้องปฏิบัติการ (แม่แรงจะยกโมลดินเข้าหาแท่งกดตัวอย่างแล้วอ่านค่าการจมของแท่งกดกับพลังงานที่ใช้กด) การทดสอบในสนามจะใช้แม่แรงจะกดแท่งกดลงไปในถนนดินบดอัดที่ได้ทดสอบความแน่น ในการทดสอบนี้ จะไม่มีการวางน้ำหนักบรรทุกกดทับบนดินบดอัด ค่าหน่วยแรงกดคืออัตราส่วนระหว่างแรงกดที่ระยะจม 0.1” กับค่ามาตรฐาน รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะการทดสอบแรงกดของดินบดอัด ผลการทดสอบจะนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดและจำนวนเที่ยววิ่งรถบดอัด



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการก่อสร้างดินถมคันทางหรือถนน

รูปที่ 3.2 การทดสอบความแน่นแห้งในสนาม ด้วยวิธีกรวยทราย

รูปที่ 3.3 การทดสอบหน่วยแรงกดในสนาม (Fied Compression test.)

บทที่ 4
การวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผลการทดสอบ

4.1 บทนำ

ดินคันทางมีอิทธิพลอย่างมากต่อความแข็งแรงและคงทนของผิวทาง คุณสมบัติของดินคันทางขึ้นอยู่กับขบวนการกำเนิดดิน อันได้แก่ คุณสมบัติของหินต้นกำเนิด ประวัติความเค้น (Stress history) และสภาพแวดล้อมดิน คันทางที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมสูงช่วยให้ผิวทางมีความแข็งแรงและมีอายุการใช้งานหลายปี ในทางกลับกัน ดินคันทางมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่ำส่งผลให้ถนนได้รับความเสียหายในเวลาอันสั้น และจำเป็นต้องมีการซ่อมบำรุงผิวทางอยู่เป็นประจำ ดินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ส่วนใหญ่เป็นดินซึ่งเกิดจากการพัดพาโดยลม เรียกว่า ดินลมหอบ ดินประเภทนี้มีพฤติกรรมเสียรูปอย่างมากเมื่อสัมผัสกับน้ำ (Collapse due to wetting) ดินลมหอบส่วนใหญ่จะมีสีแดง ซึ่งจะพบมากในตอนบนของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เช่น จังหวัดขอนแก่น ดินประเภทนี้จะประกอบด้วยทรายละเอียดปนทรายแป้ง ดินชนิดนี้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินหลวมและมีกำลังต้านทานแรงเฉือนสูงมากในสภาพแห้ง เนื่องจากมีออกไซด์ของเหล็กเป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างเม็ดดิน แต่จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มสูงขึ้น(Phien-wej et al., 1992) ดังนั้น ดินประเภทนี้จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อให้ดินมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีขึ้นและสามารถใช้เป็นดินคันทาง

การบดอัดเป็นการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีทางกลที่ทำได้ง่ายและประหยัด ซึ่งจะทำให้กำลังต้านทานแรงเฉือนสูงขึ้น การหดตัวและการทรุดตัวลดลง และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำต่ำลง ความหนาแน่นแห้งของดินบดอัดแปรผันตามปริมาณความชื้นในดินและพลังงานที่ใช้ในการบดอัด สำหรับพลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง ความหนาแน่นแห้งของดินจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณความชื้นเหมาะสม และหากปริมาณความชื้นในดินมีมากเกินไป (เกินปริมาณความชื้นเหมาะสม) น้ำส่วนเกินจะเข้าไปแทนที่เม็ดดินและโพรงทำให้ความหนาแน่นแห้งของดินบดอัดลดลง

ซีบีอาร์ เป็นพารามิเตอร์ที่นิยมใช้ในการออกแบบถนน ซึ่งคิดค้นโดย California Division of Highway (1929) การทดสอบซีบีอาร์มักจะทำควบคู่ไปกับการทดสอบการบดอัด และเพื่อให้แน่ใจว่าดินบดอัดในสนามมีความแน่นแห้งและความแข็งแรงตามที่ออกแบบ วิศวกรผู้ควบคุมงานต้องตรวจสอบความแน่นและค่าซีบีอาร์ของดินบดอัดในสนาม การดำเนินงานโดยทั่วไปจะเริ่มต้นจากการคำนวณหาความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นเหมาะสมสำหรับดินบดอัดในสนาม โดยนำดินในสนามมาทำการบดอัดในห้องปฏิบัติการ การบดอัดในสนามทำด้วยรถบดอัดจน

ได้ความหนาแน่นแห้งในสนามไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ และปริมาณความชื้นในสนามอยู่ระหว่างร้อยละ –3 ถึง +3 ของ

ปริมาณความชื้นเหมาะสมในห้องปฏิบัติการ แม้ว่าพลังงานการบดอัดที่ให้แก่ดินจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนเที่ยวของรถบดอัด แต่ความหนาแน่นแห้งสูงสุดสำหรับปริมาณความชื้นในสนามค่าหนึ่งจะมีค่าได้ไม่เกินความหนาแน่นแห้งที่ปริมาณอากาศในดินเป็นศูนย์ (ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ) (Horpibulsuk et al., 2013) จำนวนเที่ยวของรถบดอัดมีความสำคัญอย่างมากต่อความแน่นของดินบดอัดและค่าใช้จ่ายในการบดอัด ถ้าหากจำนวนเที่ยวการบดอัดน้อยเกินไป ความหนาแน่นแห้งจะไม่ได้ตามข้อกำหนด แต่หากจำนวนเที่ยวการบดอัดมากเกินไป ถึงแม้ความหนาแน่นแห้งในสนามจะได้ตามข้อกำหนด แต่ก็เป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักสองประการ กล่าวคือ 1) การศึกษาอิทธิพลของคุณสมบัติพื้นฐานต่อความหนาแน่นและค่าซีบีอาร์ของดินบดอัดในห้องปฏิบัติการ โดยอาศัยผลการทดสอบดินคันทางที่รวบรวมจากโครงการก่อสร้างและปรับปรุงถนนทั้งสิ้น 32 โครงการของศูนย์สร้างทางขอนแก่น กรมทางหลวง และ 2) การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นแห้งและซีบีอาร์ของดินคันทางในสนามกับจำนวนเที่ยววิ่งของรถบด งานวิจัยนี้เป็นประโยชน์ต่อการประมาณความหนาแน่นแห้งสูงสุดและซีบีอาร์ของดินคันทางจากคุณสมบัติพื้นฐาน และต่อการควบคุมคุณภาพงานบดอัดที่มีประสิทธิภาพในเชิงวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์

4.2 วิธีดำเนินการทำวิจัย

งานวิจัยนี้ประกอบด้วยงานหลักสามส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1: การรวบรวมข้อมูลผลทดสอบในห้องปฏิบัติการและการวิเคราะห์อิทธิพลของคุณสมบัติพื้นฐานต่อความหนาแน่นและซีบีอาร์ของดินบดอัด ส่วนที่ 2: การทดสอบอัตราส่วนหน่วยแรงกด (Point stress ratio, σ_p) ในห้องปฏิบัติการภายใต้น้ำหนักกดทับและสภาวะการแช่น้ำต่างๆ เพื่อสร้างสมการสอบเทียบค่าอัตราส่วนหน่วยแรงกดและซีบีอาร์ ค่าอัตราส่วนหน่วยแรงกดมีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงกดที่ระยะจม 0.1 นิ้ว ต่อค่าแรงกดมาตรฐาน (6894.76 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร) ซึ่งเป็นนิยามเดียวกับค่าของซีบีอาร์ จะแตกต่างตรงที่การทดสอบซีบีอาร์ต้องมีน้ำหนักกดทับหนักไม่น้อยกว่า 44.5 นิวตัน บนตัวอย่างดินบดอัด และส่วนที่ 3: การวิเคราะห์การพัฒนาความหนาแน่นและซีบีอาร์ของดินบดอัดในสนามตามจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด ค่าซีบีอาร์ในสนามจะประมาณจากค่าอัตราส่วนหน่วยแรงกดในสภาวะไม่แช่น้ำและไม่มีน้ำหนักกดทับ เพื่อความสะดวกในการทดสอบในสนาม

ผลทดสอบในห้องปฏิบัติการรวบรวมจากฝ่ายตรวจสอบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ศูนย์สร้างทางขอนแก่น กรมทางหลวง ประกอบด้วยการกระจายขนาดของเม็ดดิน ขีดจำกัด Atterberg การทดสอบบดอัด และการทดสอบซีบีอาร์ การทดสอบหาขนาดคละเม็ดดิน ทำตามมาตรฐาน ทล.-

ท.204/2516 การทดสอบขีดจำกัดเหลวทำตามมาตรฐานทล.-ท 102/2515 การทดสอบขีดจำกัดพลาสติกทำตามวิธีทดลอง ทล .ท103/2515 การทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard compaction) ทำตามมาตรฐาน ทล.-ท 107/2517 และการทดสอบซีบีอาร์ แบบแช่น้ำทำตามมาตรฐาน ทล.-ท 109/2517 ผลทดสอบทั้งหมดนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่า ซีบีอาร์และค่าความแน่นแห้งสูงสุด งานวิจัยส่วนที่ 2 จะเป็นการทดสอบซีบีอาร์ของดินคันทางในสภาวะต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างซีบีอาร์และอัตราส่วนหน่วยแรงกดในสภาวะไม่แช่น้ำและปราศจากน้ำหนักกดทับ งานวิจัยส่วนที่ 3 จะเป็นการเก็บข้อมูลความหนาแน่นแห้งและอัตราส่วนหน่วยแรงกดในสนามตามจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด การทดสอบความหนาแน่นในสนามใช้วิธีการแทนที่ด้วยทราย การวัดอัตราส่วนหน่วยแรงกดทำด้วยเครื่องมือที่ประดิษฐ์ขึ้นเอง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประมาณค่าซีบีอาร์โดยวิธีทางอ้อม อุปกรณ์ทดสอบประกอบด้วยหัวกดซีบีอาร์ขนาด 5 นิ้ว ชุดไฮดอรลิกสำหรับให้แรงกด รถบรรทุกที่บรรทุกน้ำเต็มถัง ซึ่งมีน้ำหนักโดยรวมประมาณ 5 ถึง 10 ตัน วงแหวนวัดแรง (สำหรับอ่านหน่วยแรงกด) และมาตรหน้าปัดวัดการเคลื่อนตัว (สำหรับอ่านค่าการทรุดตัวในแนวดิ่ง) การทดสอบนี้มีความคล้ายกับการทดสอบซีบีอาร์ในสนาม เพียงแต่ไม่มีการให้น้ำหนักกดทับในแนวดิ่งด้วยแผ่นเหล็ก และการทดสอบดำเนินการในสภาวะแห้ง (Unsoaked condition) การทดสอบในสนามดำเนินการที่โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 2038 ตอนแยกทางหลวงหมายเลข 12 (กุดฉิม) บ้านเมืองใหม่ อำเภอภูเวียง จังหวัดขอนแก่น ท้ายสุด ผู้วิจัยจะนำเสนอแนวทางการควบคุมการบดอัดในสนามที่มีประสิทธิภาพ

4.3 ผลทดสอบดินที่ได้จากการรวบรวมและผลการวิเคราะห์

ดินคันทางที่รวบรวมได้ในงานวิจัยนี้ส่วนใหญ่เป็นดินทรายปนดินเม็ดละเอียด ที่มีร้อยละผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ในช่วงร้อยละ 25.1 ถึง 56.3 ดินที่รวบรวมได้เป็นดินที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ มีค่าดัชนีพลาสติกเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 10.95 $\pm$4.62 มีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดในช่วง 17.3 ถึง 18.5 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าซีบีอาร์ในสภาวะแช่น้ำเฉลี่ยเท่ากับ 4.1 $\pm$0.35 คุณสมบัติของดินคันทางทั้ง 32 ชนิด แสดงดังตารางที่ 4.1

Kumpala and Horpibulsuk (2013) แสดงให้เห็นว่าดินในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งเป็นดินชนิดหนึ่งในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เป็นดินบวมตัวต่ำ ดังนั้น ขีดจำกัดเหลวของดินที่เก็บรวบรวมจึงมีค่าที่ไม่สูงมากนัก ถึงแม้ว่าดินจะมีปริมาณดินเม็ดละเอียดมากขึ้นก็ตาม โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 29.4 ถึง 36.8 ความสัมพันธ์ระหว่างขีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกของดินที่รวบรวมแปรผันตรงกับปริมาณดินเม็ดละเอียด (ขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร) ความสัมพันธ์

ระหว่างขีดจำกัดเหลวและปริมาณดินเม็ดละเอียดแสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่มีค่า Degree of correlation สูงถึง 0.806 ลักษณะของกราฟการบดอัดของดินคันทางที่รวบรวมทั้งหมดมีลักษณะเป็นระฆังคว่ำ ที่มีจุดยอดเพียงจุดเดียว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lee and Suedkamp (1972) พวกเขาศึกษากราฟการบดอัดของดินที่ต่างกัน 35 ชนิด และสรุปว่าดินที่มีขีดจำกัดเหลวประมาณร้อยละ 30 ถึง 70 จะมีลักษณะเป็นระฆังคว่ำ

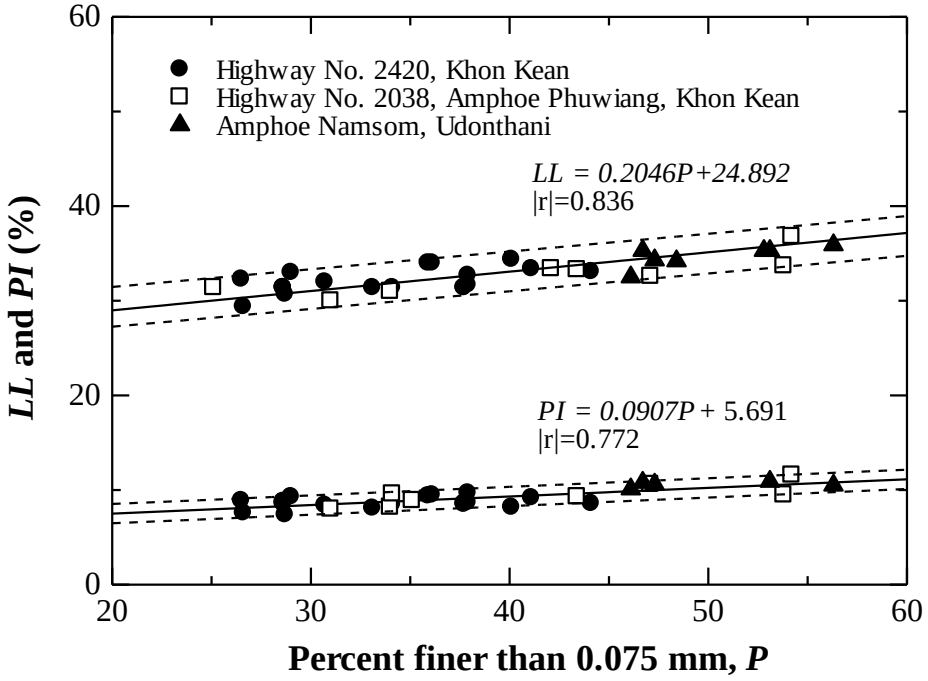
ตารางที่ 4.1 ขอบเขตของขนาดเม็ดดินของดินคันทางที่รวบรวมจากโครงการก่อสร้างทั้ง 32 โครงการ

No.	% Passing								LL	PI	OWC	Dry unit weight (KN/m^3)	CBR (%)	Swell (%)	USCS
	2"	1"	3/4"	3/8"	#4	#10	#40	#200							
1	-	-	-	-	100	87.5	82.8	28.7	30.7	7.4	14.0	18.32	5.18	0.6	SM
2	-	-	-	-	100	86.0	80.2	30.7	32.0	8.4	14.4	18.09	5.06	0.8	SM
3	-	-	-	-	100	84.9	79.3	28.6	31.4	8.8	13.1	18.51	5.41	0.9	SC
4	-	-	-	-	100	82.6	75.8	35.9	34.0	9.4	15.0	17.96	4.72	0.8	SM
5	-	-	-	-	100	87.5	82.8	36.1	34.0	9.5	14.8	17.86	4.83	0.8	SM
6	-	-	-	-	100	86.0	80.2	26.5	32.3	8.9	13.2	18.49	5.41	0.6	SM
7	-	-	100	95.6	82.2	74.2	69.8	28.6	31.4	8.6	13.3	18.50	5.41	0.8	SC
8	-	-	-	-	100	84.9	79.3	34.1	31.4	8.5	14.4	18.00	5.06	0.9	SC
9	-	-	-	-	100	86.0	80.2	40.1	34.4	8.2	15.2	17.91	4.72	1.5	SM
10	-	-	-	-	100	95.0	91.7	44.1	33.1	8.6	15.8	17.63	4.37	1.3	SM
11	-	-	-	-	100	95.0	91.7	37.7	31.4	8.6	14.6	17.88	4.83	1.8	SC
12	-	-	-	-	100	95.0	91.7	41.1	33.4	9.2	15.6	17.67	4.37	1.8	SM
13	-	-	-	-	100	93.0	88.2	37.9	31.7	8.7	15.6	17.76	4.37	0.9	SC
14	-	-	-	-	100	95.0	91.7	28.6	31.4	8.6	13.5	18.46	5.41	0.8	SC
15	-	-	-	-	100	97.2	95.6	29.0	33.0	9.3	13.7	18.40	5.06	0.8	SM
16	-	-	-	-	100	86.0	80.2	37.9	32.7	9.7	15.2	17.66	4.26	1.4	SC
17	-	-	-	-	100	97.2	95.6	26.6	29.4	7.6	14.7	18.09	5.29	1.3	SC
18	-	-	-	-	100	86.0	80.2	33.1	31.4	8.1	15.3	17.89	4.72	1.2	SM
19	-	-	-	-	100	95.0	91.7	37.7	31.4	8.5	14.0	18.30	4.6	1.8	SC
20	-	-	-	-	100	95.0	91.7	31.0	30.0	8.0	14.0	18.13	4.95	0.8	SC
21	-	-	-	-	100	93.0	88.2	34.0	31.0	8.2	14.8	17.80	4.83	0.8	SC
22	-	-	-	-	100	95.0	91.7	34.1	33.4	9.6	13.3	18.41	4.72	2.0	SM
23	-	-	-	-	100	95.0	91.7	35.1	31.4	8.9	15.0	17.74	5.29	1.1	SC
24	-	-	-	-	100	85.2	73.5	47.1	32.6	10.6	15.3	17.82	4.37	2.6	SC
25	-	-	-	-	100	86.8	78.5	43.4	33.3	9.3	16.0	17.63	4.6	2.5	SM
26	-	-	-	-	100	86.5	57.5	53.8	33.7	9.5	15.4	17.52	4.37	2.5	ML
27	-	-	-	-	100	86.9	78.7	54.2	36.8	11.6	15.8	17.34	4.49	2.1	ML
28	-	-	-	100	95.8	82.4	68.3	56.3	35.9	10.5	16.4	17.46	4.03	2.5	ML
29	10	99.	98	89.3	68.8	63.7	53.8	46.7	35.3	10.8	15.1	17.59	4.37	2.5	SM
30	10	99.	99.2	89.1	67.1	61.8	52.1	46.1	32.5	10.1	15.6	17.78	4.49	2.5	SC
31	10	99.	98.4	90.2	72.8	69.8	56.4	47.3	34.3	10.6	15.5	17.58	4.72	1.9	SC
32	-	-	-	100	96.6	83.0	65.3	53.1	35.3	10.9	16.3	17.39	4.26	2.6	ML

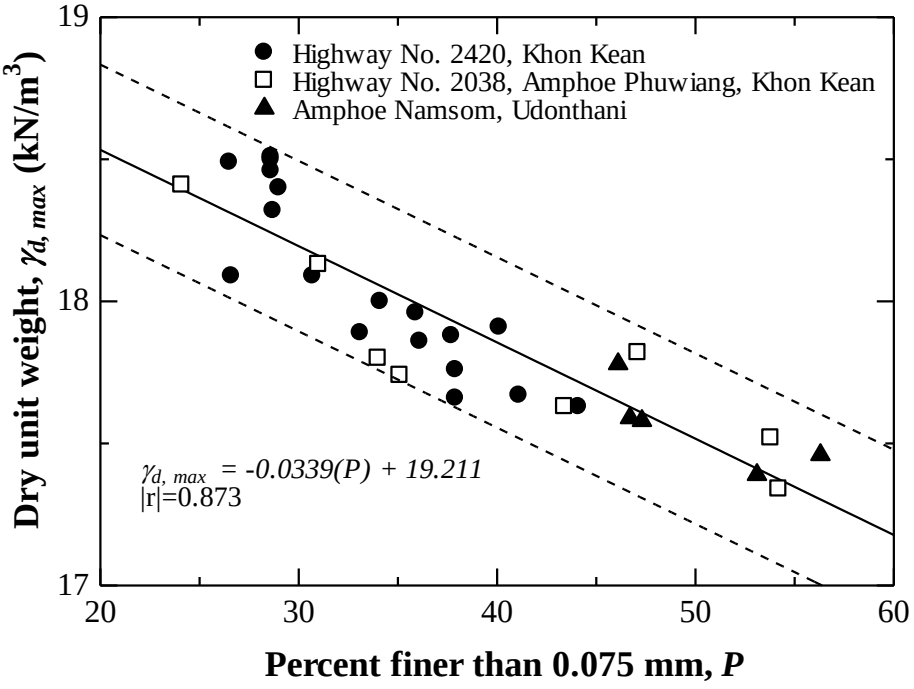
คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวแปรผันตามแร่ดินเหนียวและของเหลวระหว่างอนุภาคของเม็ดดิน (Sridharan, 1991 และ Sridharan and Rao, 1975) ซึ่งสามารถใช้ขีดจำกัดเหลวเป็นตัวแทนได้ในทางปฏิบัติ Ramiah et al. (1970), Pandian et al. (1997) และ Nagaraj et al. (2006) ได้แสดงให้เห็นว่าหน่วยน้ำหนักแห้งของดินเหนียวแปรผันตามขีดจำกัดเหลว เนื่องจากขีดจำกัดเหลวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณดินเม็ดละเอียด (รูปที่ 4.1) จึงเป็นไปได้ที่จะสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณดินเม็ดละเอียดดังแสดงในรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณดินเม็ดละเอียดเพิ่มขึ้น หน่วยน้ำหนักแห้งของดินบดอัดจะมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นเหมาะสม ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและร้อยละของดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 แสดงได้ด้วยความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ดังนี้

$$\gamma_{d,\max} = -0.0339P + 19.211 \quad \text{..... (4.1)}$$

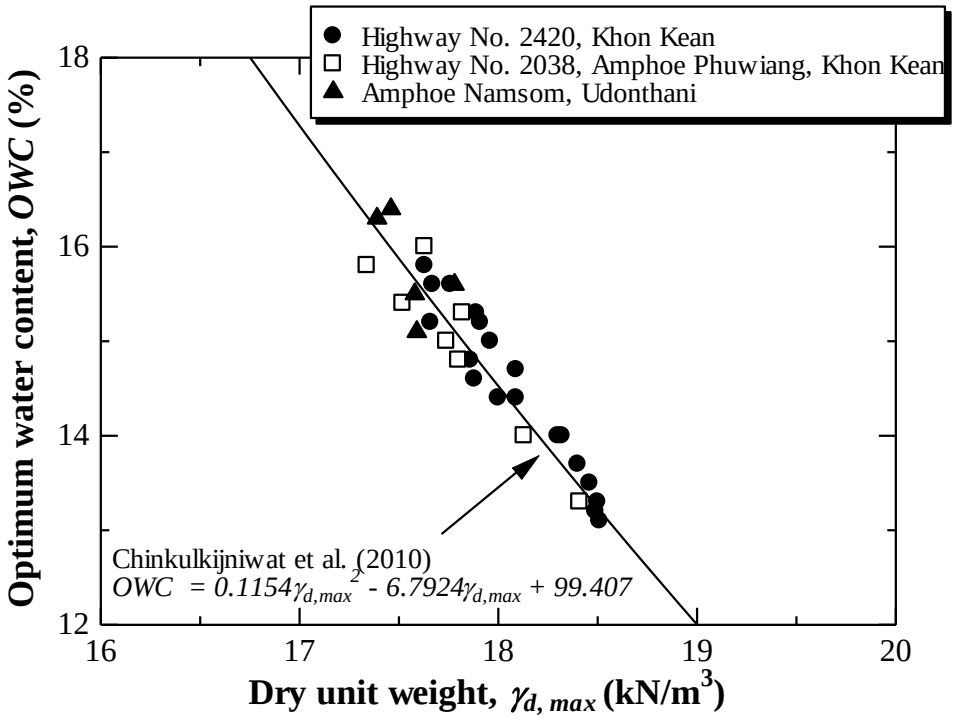
เมื่อ P คือร้อยละของเม็ดดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200 กับขีดจำกัดเหลวและดัชนีพลาสติก

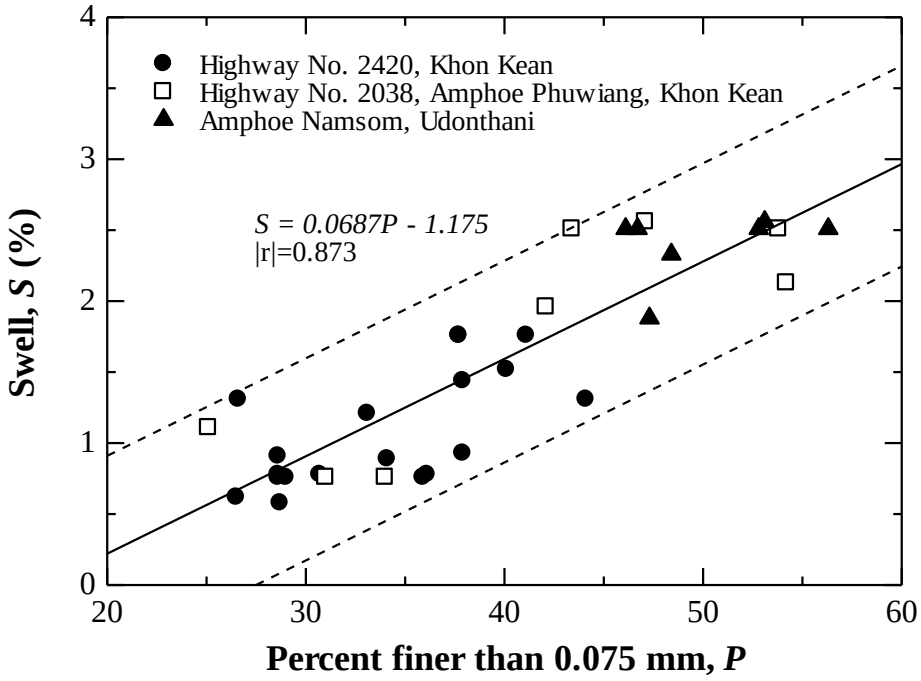


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200 กับหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งกับปริมาณน้ำเหมาะสม

หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นเหมาะสมเป็นคุณสมบัติเฉพาะของดินชนิดหนึ่งๆ Chinkulkijniwat et al. (2010) ได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียดบดอัด และพบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถประมาณได้ด้วยฟังก์ชั่นกำลังสอง เมื่อนำสมการที่นำเสนอนี้มาเปรียบเทียบกับผลทดสอบการบดอัดของดินบดอัด 32 ชนิดที่รวบรวม พบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถใช้ในการทำนายปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินที่รวบรวมได้เป็นอย่างดี ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200 กับร้อยละการบวมตัว

นอกจากคุณสมบัติด้านความหนาแน่นของดินบดอัดแล้ว คุณสมบัติด้านการบวมตัวในสภาวะแช่น้ำและซีบีอาร์ในสภาวะแช่น้ำของดินคันทางเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับการออกแบบผิวทางในสภาวะที่รุนแรง (ปริมาณความชื้นสูง) ปัจจัยที่อาจส่งผลให้ดินบดอัดมีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน และปริมาณระดับน้ำใต้ดินที่สูงขึ้น เป็นต้น ปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นนอกจากจะก่อให้เกิดการบวมตัว และส่งผลให้ผิวทางเกิดการแตกร้าวแล้ว ยังทำให้ความต้านทานแรงเฉือน (ค่าซีบีอาร์) ของดินลดลงด้วย ซึ่งอาจทำให้ผิวทางเกิดการวิบัติเมื่อรับแรงกระทำ คุณสมบัติด้านการบวมตัวและซีบีอาร์จะแปรผันอย่างมากกับขีดจำกัดเหลว รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการบวมตัวและปริมาณดินเม็ดละเอียด การบวมตัวของดินเพิ่มขึ้นตาม

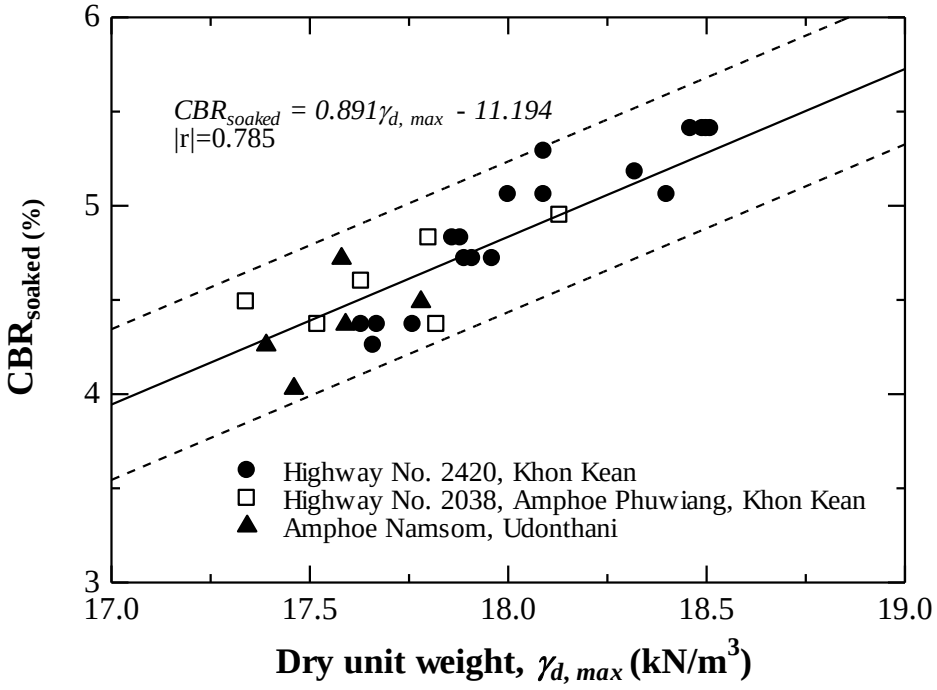
ปริมาณร้อยละของดินเม็ดละเอียดที่ค่าเพิ่มขึ้น โมเลกุลของน้ำจะเข้าไปแทนที่อิออนที่เชื่อมต่อระหว่างชั้นซิลิกาและกิบบ์ไซต์ในดินเหนียว ทำให้เกิดการบวมตัวในดินเหนียว และส่งผลให้เกิดการบวมตัวของดินคันทางต้านน้ำหนักกดทับในแนวดิ่งและต้านแรงดูดระหว่างอนุภาค (Attractive forces) ความสัมพันธ์ระหว่างการบวมตัว (Swell, *S*) และร้อยละของเม็ดดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 แสดงได้ดังนี้

$$S = 0.0687P + 1.175 \qquad \text{.....(4.2)}$$

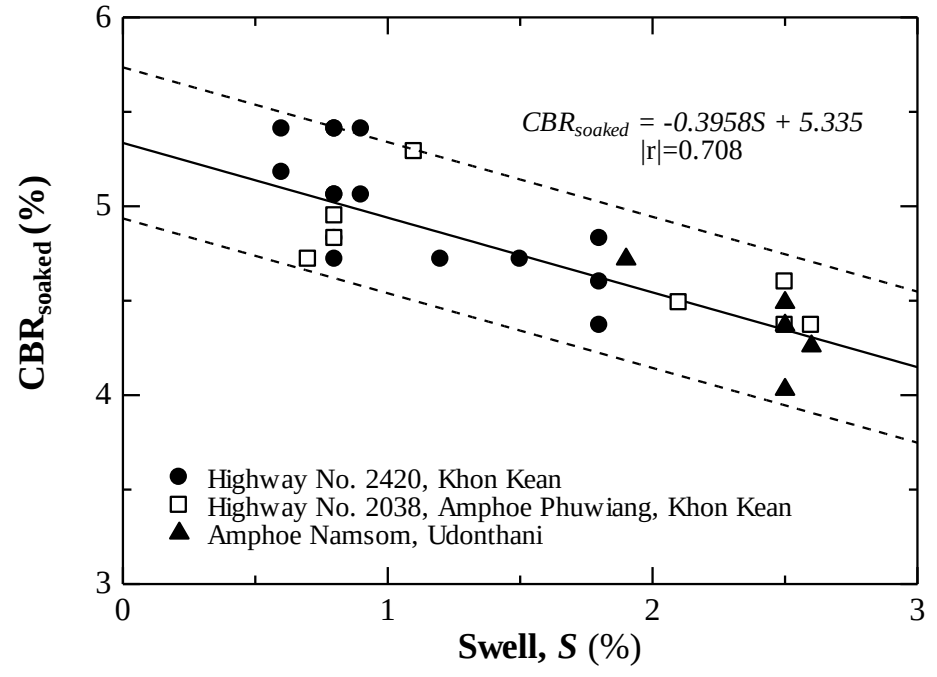
Horpibulsuk et al. (2013) ได้แสดงให้เห็นว่าหน่วยน้ำหนักแห้งสามารถใช้เป็นตัวแปรหลักในการประมาณค่าซีบีอาร์ของดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียดบดอัด ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์และหน่วยน้ำหนักแห้งจะมีค่าต่างกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน เช่น กำลังต้านทานแรงเฉือน ขนาดความคละ และความต้านทานการสึกหรอ เป็นต้น ตัวอย่างเช่น ดินเม็ดละเอียดจะมีค่าซีบีอาร์ที่ต่ำ ในขณะที่ หินคลุกจะมีค่าซีบีอาร์ที่สูง รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างซีบีอาร์กับหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ซีบีอาร์ในสภาวแช่น้ำ (CBR_{soaked}) มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดในฟังก์ชั่นเชิงเส้นตรง ดังแสดงด้วยสมการต่อไปนี้

$$CBR_{soaked} = 0.891\gamma_{d,\max} - 11.194 \qquad \text{.....(4.3)}$$

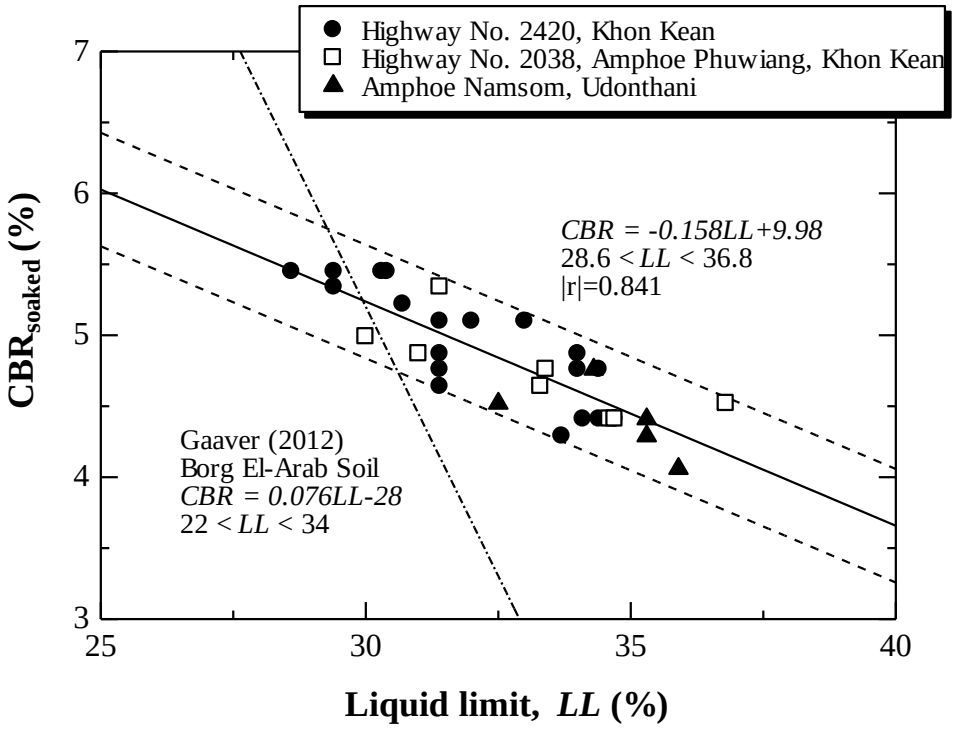
เนื่องจากค่าซีบีอาร์ในสภาวะแช่น้ำของดินชนิดหนึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกำลังต้านทานแรงเฉือนและความสามารถในการบวมตัวของดิน ดินที่มีค่าซีบีอาร์สูงเป็นดินมีกำลังต้านทานแรงเฉือนสูงและความต้านทานการบวมตัวสูง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ค่าซีบีอาร์เป็นส่วนกลับของค่าการบวมตัว (ดังแสดงในรูปที่ 4.6) ดังได้กล่าวแล้วข้างต้นว่าค่าซีบีอาร์แปรผันตามคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน ซึ่งแปรผันอย่างมากกับแหล่งกำเนิดดิน ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์กับคุณสมบัติพื้นฐานจึงแปรผันตามแหล่งกำเนิดดิน ดังแสดงในรูปที่ 4.7 แม้ว่าค่าซีบีอาร์จะแปรผันตามขีดจำกัดเหลวสำหรับดินที่มาจากแหล่งกำเนิดที่ต่างกัน (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยและบริเวณเมืองท่าอะเล็กซานเดรีย ประเทศอียิปต์) แต่ความสัมพันธ์ทั้งสองต่างกันโดยสิ้นเชิง การพัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์และคุณสมบัติพื้นฐานของดินจากแหล่งกำเนิดหนึ่งมีความเป็นไปได้ ดังแสดงให้เห็นด้วยรูปที่ 4.1 ถึง 4.6 และเป็นประโยชน์อย่างมากในงานวิศวกรรม



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างซีบีอาร์ในสภาวะแช่น้ำกับความแน่นแห้งสูงสุดของดินคันทางบดอัด



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างซีบีอาร์ในสภาวะแช่น้ำกับร้อยละการบวมตัวของดินคันทางบดอัด



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างซีบีอาร์ในสภาวะแช่น้ำและขีดจำกัดเหลว

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดค่าซีบีอาร์ในสภาวะไม่แช่น้ำและแช่น้ำ

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงอิทธิพลของน้ำหนักกดทับ (ขนาด 44.5 นิวตัน) ต่อค่าอัตราส่วนหน่วยแรงกด ทั้งในสภาวะที่ดินบดอัดอิ่มตัวด้วยน้ำ (แช่น้ำ) และที่สภาวะที่ดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (ไม่แช่น้ำ) ผลการศึกษาจะนำมาวิเคราะห์เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงกด (ปราศจากน้ำหนักกดทับและไม่แช่น้ำ) และค่าซีบีอาร์ (น้ำหนักกดทับเท่ากับ 44.5 นิวตัน) ในสภาวะไม่แช่น้ำและแช่น้ำ สำหรับประมาณค่าซีบีอาร์ในสนาม

ดินตัวอย่างถูกเก็บจากโครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 2038 ตอนแยกทางหลวงหมายเลข 12 (กุดฉิม) จังหวัดขอนแก่น ซึ่งจำแนกด้วยระบบเอกภพ (Unified Soil Classification, USCS) ได้เป็นดินชนิด SM ดังแสดงในตารางที่ 4.2 รูปที่ 4.1 และ 4.3 และสมการที่ 4.1 และ 4.3 สามารถใช้ในการทำนายขีดจำกัดเหลว พิกัดพลาสติก ปริมาณความชื้นเหมาะสม และหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ของดินบดอัดได้ โดยอาศัยเพียงค่าร้อยละของดินที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าผลการทำนายมีค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบมาก

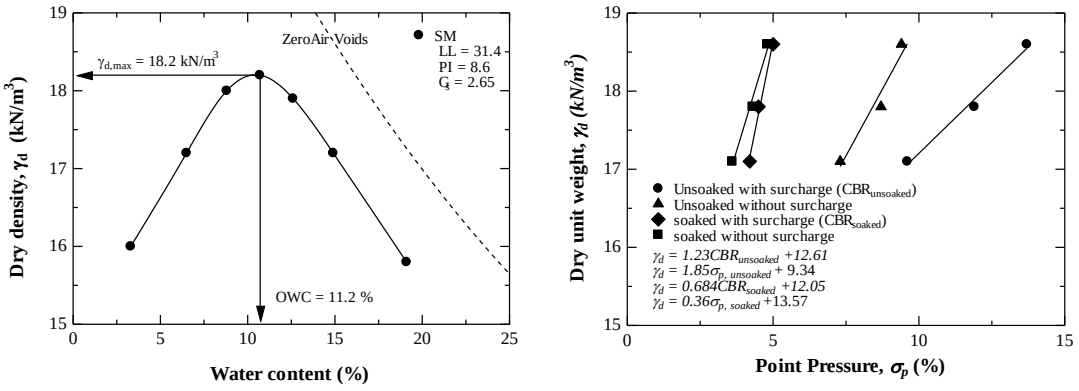
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติด้านการบดอัดของดินคันทาง

Material	%Passing				LL	LL	PI	PI	OWC	OWC	$\gamma_{d,max}$	$\gamma_{d,max}$
	#4	#10	#40	#200	(M)	(P)	(M)	(P)	(M)	(P)	(M)	(P)
SM	100	98	93	29.4	31.4	30.5	8.6	8.4	13.5	13.8	18.3	18.2

* M คือค่าที่ได้จากการตรวจวัด P คือค่าที่ได้จากการประมาณ

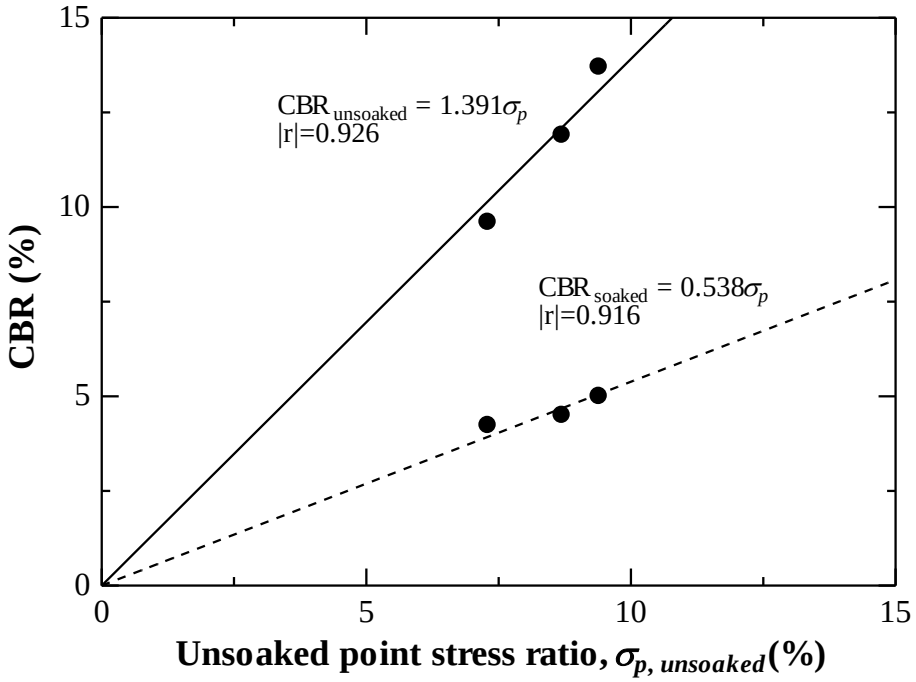
รูปที่ 4.8a แสดงผลการทดสอบการบดอัดของดินคันทาง ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินมีค่าเท่ากับ 18.2 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร และปริมาณความชื้นเหมาะสมเท่ากับร้อยละ 11.2 ความสัมพันธ์ของหน่วยน้ำหนักแห้งกับค่าอัตราส่วนหน่วยแรงกด ที่ปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 11.2 ภายใต้พลังงานการบดอัดสามค่าที่แตกต่างกัน เท่ากับ 5940, 12375 และ 27720 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร แสดงในรูปที่ 4.8b อัตราส่วนหน่วยแรงกดที่หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าเท่ากับร้อยละ 4.57, 4.89, 8.94 และ 12.66 สำหรับดินบดอัดในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้น้ำหนักกดทับ ในสภาวะที่ดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำปราศจากน้ำหนักกดทับ ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำปราศจากน้ำหนัก และในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้น้ำหนักกดทับ ตามลำดับ

ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนหน่วยแรงกดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับหน่วยน้ำหนักแห้ง และสามารถประมาณได้ด้วยความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ความชันของกราฟแสดงความไวตัวของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนหน่วยแรงกดต่อการเปลี่ยนแปลงหน่วยน้ำหนักแห้ง ดินที่อยู่ในสภาวะไม่แช่น้ำมีความชันที่น้อยกว่าดินที่อยู่ในสภาวะแช่น้ำอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของหน่วยน้ำหนักแห้งมีผลอย่างมากต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนหน่วยแรงกด น้ำหนักกดทับมีอิทธิพลอย่างมากต่อดินที่อยู่ในสภาวะไม่แช่น้ำ ดังจะเห็นได้จากอัตราส่วนหน่วยแรงกดของดินในสภาวะไม่แช่น้ำและปราศจากน้ำหนักกดทับมีค่ามากกว่าอัตราส่วนหน่วยแรงกดของดินในสภาวะไม่แช่น้ำแต่ถูกกดทับด้วยน้ำหนัก ค่าอัตราส่วนหน่วยแรงกดของดินในสภาวะแช่น้ำมีค่าต่ำกว่าค่าอัตราส่วนหน่วยแรงกดของดินในสภาวะแช่น้ำอย่างมาก ค่าอัตราส่วนหน่วยแรงกดของดินในสภาวะแช่น้ำแปรผันตามน้ำหนักกดทับ แต่อิทธิพลของน้ำหนักกดทับต่อค่าอัตราส่วนหน่วยแรงกดมีน้อยกว่าในกรณีของดินไม่แช่น้ำ ทั้งนี้อาจเนื่องจากดินคันทางเป็นดินที่มีกำลังต้านทานแรงเฉือนต่ำมาก เมื่ออยู่ในสภาวะแช่น้ำ ดังนั้น เมื่อให้น้ำหนักกดในแนวดิ่ง การวิบัติของดินจึงมีแนวโน้มเป็นแบบเฉือนทะลุ (Punching shear) ซึ่งน้ำหนักกดทับในแนวดิ่งมีส่วนช่วยพัฒนากำลังรับแรงแบกทานไม่มากนัก

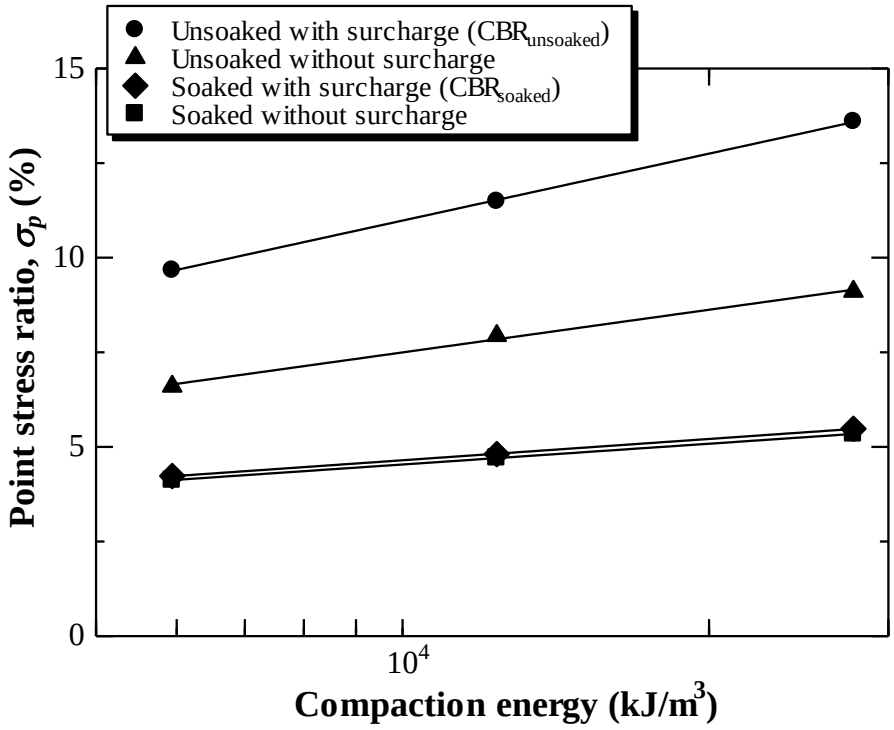


รูปที่ 4.8 ผลการบดอัดแบบมาตรฐานและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับค่าซีบีอาร์ที่สภาวะต่างๆ ของดินคันทางในห้องปฏิบัติการที่พลังงานต่างกัน

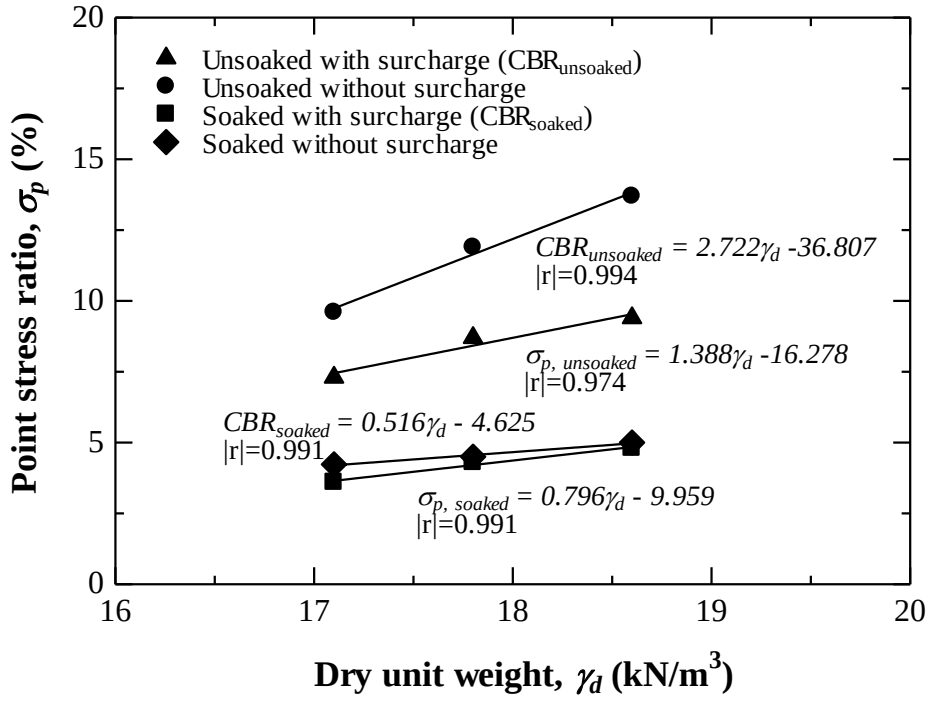
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงกดและซีบีอาร์ในสภาวะไม่แช่น้ำและแช่น้ำแสดงดังรูปที่ 4.9 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง โดยที่ $CBR_{unsoaked}$ มีค่าประมาณ 2.6 (= 1.39/0.539) เท่าของ CBR_{soaked} สำหรับทุกหน่วยน้ำหนักที่เท่ากัน รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนหน่วยแรงกดและพลังงานการบดอัด อัตราส่วนหน่วยแรงกดมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานการบดอัดในฟังก์ชั่นล็อกการิทึม ซึ่งเป็นลักษณะเช่นเดียวกันกับความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและพลังงานการบดอัด (Horpibulsuk et al. 2009 and 2013) ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ที่จะสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงกดและหน่วยน้ำหนักแห้งที่สภาวะการแช่น้ำและการให้น้ำหนักกดทับต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ทั้งสามนี้มีประโยชน์อย่างมากในการประมาณค่าอัตราส่วนหน่วยแรงกดและค่าซีบีอาร์ในสนาม เมื่อทราบหน่วยน้ำหนักแห้งในสนาม ซึ่งจะแสดงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างซีบีอาร์ในสภาวะแช่น้ำและไม่แช่น้ำกับอัตราส่วนหน่วยแรงกดในสภาวะไม่แช่น้ำและปราศจากน้ำหนักกดทับ



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงกดและพลังงานการบดอัดของดินคันทางที่สภาวะต่างๆ



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงกดและหน่วยน้ำหนักแห้ง

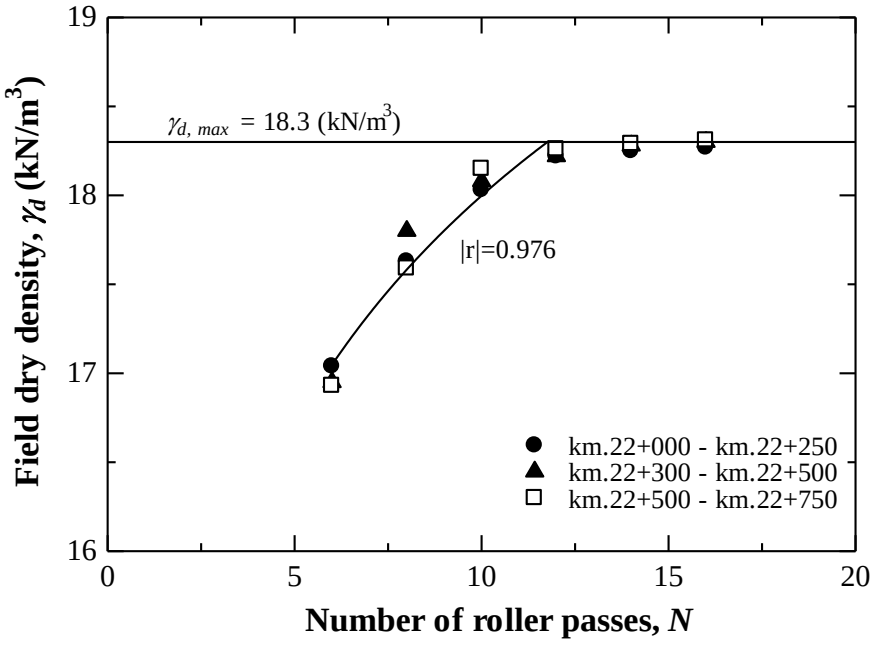
4.5 การทดสอบในสนาม

การทดสอบในสนามดำเนินการที่โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 2038 ตอนแยกทางหลวงหมายเลข 12 (กุดฉิม) บ.เมืองใหม่ อ.ภูเวียง จังหวัดขอนแก่น การบดอัดดินคันทางในสนามทำโดยการถมดินที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม (ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ) การบดอัดเริ่มต้นจากการถมดินจนได้ความหนาชั้นละประมาณ 30 ถึง 40 มิลลิเมตร และบดอัดด้วยรถบดอัด 1 เที่ยว เมื่อได้ความหนาสุดท้ายประมาณ 200มิลลิเมตร (เที่ยววิ่งที่ 6) รถบดอัดจะเริ่มต้นบดอัดอย่างต่อเนื่องโดยปราศจากการถมดินเพิ่มจนได้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ รถบดอัดที่ใช้เป็นรถบดตีนแกะแบบสั่นสะเทือนน้ำหนักล้อรถบดหนักประมาณ 12 ตันต่อตารางเมตร ความถี่ของการสั่นสะเทือนประมาณ 20 ถึง 30 รอบต่อวินาที การเก็บข้อมูลความหนาแน่นแห้งในสนามทำโดยใช้ด้วยวิธีกรวยทราย ซึ่งจะเริ่มที่จำนวนรอบที่ 6 เป็นต้นไป รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นแห้งในสนามและอัตราส่วนหน่วยน้ำหนักแห้งในสนามกับจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด จะเห็นได้ว่าหน่วยน้ำหนักแห้งในสนามมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงจำนวนเที่ยวที่ 6 ถึง 11 หลังจากนั้นความหนาแน่นแห้งในสนามเริ่มคงที่เมื่อมีการเพิ่มจำนวนเที่ยวของรถบด เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นแห้งที่

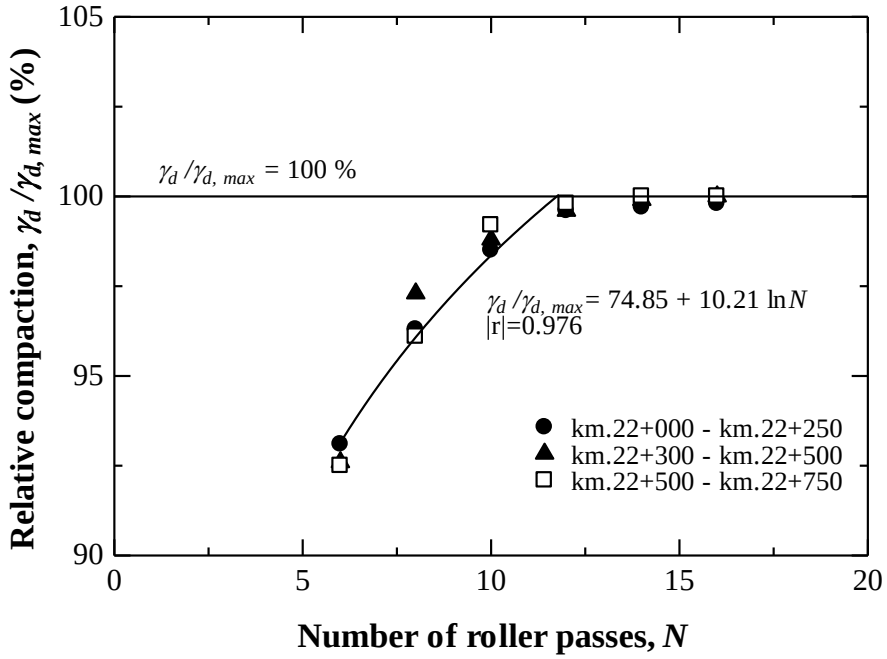
วัดได้ในสนามกับความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ (รูปที่ 4.12b) จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นแห้งที่จำนวนรอบที่ 11 ขึ้นไปมีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ แม้ว่าจะทำการเพิ่มพลังงานการบดอัดให้มากขึ้น (เพิ่มจำนวนเที่ยวของการบดอัด) แต่หน่วยน้ำหนักแห้งก็จะไม่สามารถเพิ่มขึ้นต่อไปได้อีก เนื่องจากระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่สภาวะนี้มีค่าใกล้เคียงกับหน่วยน้ำหนักแห้งในสภาวะไม่มีอากาศในโพรงดิน (Zero air void) ดังนั้นจำนวนเที่ยววิ่งที่มากเกินไปจึงไม่เกิดประโยชน์อันใดในทางปฏิบัติ ความสัมพันธ์ระหว่างการบดอัดสัมพันธ์ (Relative compaction, $\gamma_{df}/\gamma_{d,\max}$) และจำนวนเที่ยววิ่งรถบดอัดแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์เชิงล็อกการิทึม (Horpibulsuk et al., 2013) ดังนี้

$$\frac{\gamma_{df}}{\gamma_{d,\max}} = a + b\ln N \qquad \text{.....(4.4)}$$

เมื่อ γ_{df} คือหน่วยน้ำหนักแห้งของดินบดอัดในสนาม a และ b เป็นค่าคงที่ และ N คือจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า a และ b มีค่าเท่ากับ 74.85 และ 10.81 ตามลำดับ ค่าที่ได้ทั้งสองนี้มีความใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ Horpibulsuk et al. (2013) ซึ่ง a และ b มีค่าเท่ากับ 75.92 และ 9.61 ตามลำดับ จำนวนเที่ยววิ่งที่เหมาะสมสามารถประมาณได้จากการแทนค่า N เท่ากับ 100



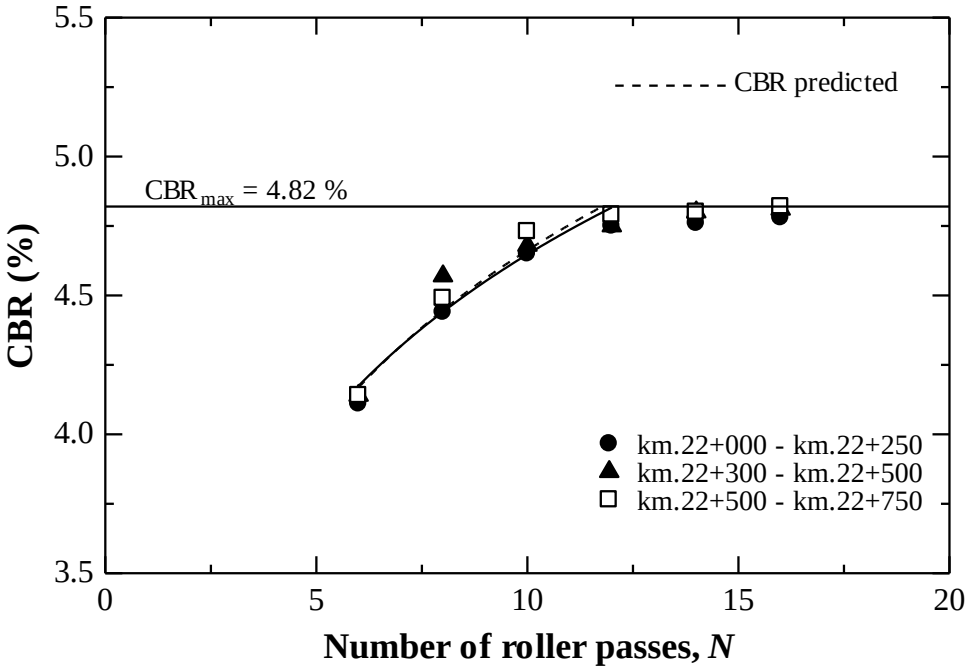
(a)



(b)

รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและการบดอัดสัมพันธ์ในสนามกับจำนวนรอบการบดอัดด้วยรถบด

รูปที่ 4.13 แสดงค่าซีบีอาร์ในสภาวะไม่แช่น้ำกับจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด ที่จำนวนเที่ยววิ่ง 11 ถึง 12 ค่าซีบีอาร์เริ่มที่จะคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของหน่วยน้ำหนักแห้ง ค่าซีบีอาร์ที่แสดงในรูปที่ 4.13ประมาณได้จากสมการ $CBR_{soaked} = 0.538\sigma_p$ เมื่อมีการเพิ่มพลังงานการบดอัดจนเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำที่ความชื้นค่าหนึ่งค่า ซีบีอาร์จะมีค่าสูงสุดค่าหนึ่งและจะไม่เพิ่มขึ้นอีกแม้จะมีการเพิ่มพลังงานการบดอัดมากขึ้นเนื่องจากความหนาแน่นแห้งเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างซีบีอาร์ในสภาวะแช่น้ำในสนามกับจำนวนเที่ยวรถบดอัด

4.6 ขั้นตอนการควบคุมงานบดอัดในสนาม

จากผลการศึกษาทั้งหมด ผู้วิจัยนำเสนอแนวทางการตรวจสอบความแน่นและซีบีอาร์ในสนาม โดยมีขั้นตอนดังนี้

<u>การเตรียมข้อมูลในห้องปฏิบัติการ</u>

1. ทำการทดสอบการบดอัดของดินคันทางเพื่อหาหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นเหมาะสม
2. จากปริมาณความชื้นเหมาะสมที่ทราบค่า ทำการบดอัดดินที่พลังงานการบดอัดต่างๆ เพื่อทำการทดสอบหาความหนาแน่นแห้งและซีบีอาร์
3. สร้างความสัมพันธ์ระหว่างซีบีอาร์และความหนาแน่นแห้ง

<u>การควบคุมงานบดอัดในสนาม</u>

1. ทำการบดอัดดินในสนาม โดยกำหนดปริมาณความชื้นของดินบดอัดให้อยู่ในช่วงร้อยละ 2 ของปริมาณความชื้นเหมาะสมที่หาได้จากห้องปฏิบัติการ
2. วัดค่าหน่วยน้ำหนักแห้งและจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด เพื่อหาค่า a และ b และประมาณจำนวนเที่ยววิ่งเหมาะสม โดยการแทนค่าความหนาแน่นสัมพันธ์ (อัตราส่วนความหนาแน่น) เท่ากับ 100

3. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและจำนวนเที่ยววิ่งจากพารามิเตอร์ *a* และ *b* ที่ทราบค่า
4. สร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์และจำนวนเที่ยววิ่งจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์และหน่วยน้ำแห้ง ที่หาได้จากขั้นตอนที่ 3
5. เมื่อจำนวนเที่ยววิ่งเท่ากับจำนวนเที่ยววิ่งเหมาะสม ทำการตรวจสอบความหนาแน่นแห้งในสนาม ความหนาแน่นแห้งสัมพันธ์ต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 และค่าซีบีอาร์ในสนามต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของค่าที่หาได้จากห้องปฏิบัติการ

บทที่ 5
สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการรวบรวมผลการบดอัดในห้องปฏิบัติการและในสนามเพื่อนำเสนอขั้นตอนการทำงานบดอัดที่ประสิทธิภาพ บทสรุปที่สำคัญแสดงได้ดังนี้

1. ดินคันทางที่รวบรวมในงานวิจัยนี้เป็นดินในเขตพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ความหนาแน่นแห้งและซีบีอาร์สามารถประมาณได้จากคุณสมบัติพื้นฐาน อันได้แก่ ร้อยละของเม็ดดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 และขีดจำกัดเหลว
2. ค่าซีบีอาร์ทั้งในสภาวะแช่น้ำและไม่แช่น้ำมีความสัมพันธ์กับพลังงานการบดอัดในฟังก์ชั่นล็อกการิทึม เช่นเดียวกับความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและพลังงานการบดอัด ดังนั้น ซีบีอาร์จึงมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับหน่วยน้ำหนักแห้ง ซีบีอาร์ของดินคันทางบดอัดในสภาวะไม่แช่น้ำมีค่าประมาณ 2.6 เท่าของซีบีอาร์ของดินคันทางบดอัดในสภาวะแช่น้ำ
3. ความหนาแน่นแห้งและซีบีอาร์ในสนามมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดตามจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด จนกระทั่งถึงหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด จำนวนเที่ยววิ่งที่เพิ่มขึ้นหลังจากนี้ไม่สามารถเพิ่มหน่วยน้ำหนักแห้งและซีบีอาร์ได้อีกต่อไป เนื่องจากระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าเข้าใกล้ 1.0
4. จากผลการศึกษาทั้งหมด ผู้วิจัยได้นำเสนอขั้นตอนการบดอัดในสนามให้ได้ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง โดยเริ่มต้นตั้งแต่การทดสอบดินในห้องปฏิบัติการ จนถึงการบดอัดในสนาม ขั้นตอนที่นำเสนอนี้สามารถช่วยลดแรงงานและจำนวนเที่ยววิ่งรถบดอัดที่ไม่จำเป็น

เอกสารอ้างอิง

สุขสันติ์ หอพิบูลสุข. (2545). **ลักษณะการการอัดตัวของดินตะกอนปนดินตะกอน ปนดินเหนียวบดอัดที่ ด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม และการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น**. ปฐพีกลศาสตร์. หน้า 240

สุขสันติ์ หอพิบูลสุข. (2545). **ความสัมพันธ์ระหว่างความแค้น-ความเครียดของดินเหนียวปนดินตะกอน บดอัด.** ปฐพีกลศาสตร์. หน้า 241

รุ้งลาวัลย์ ราชัน และ สุขสันติ์ หอพิบูลสุข. **ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและพลังงานการบดอัดของดินเหนียวปนดินตะกอนและหินคลุกและเส้น Normalization**. ปฐพีกลศาสตร์. หน้า 243

รุ้งลาวัลย์ ราชัน และ สุขสันติ์ หอพิบูลสุข. (2548). **เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลการทดสอบและการทำนายของดินเหนียวปนดินตะกอน.** ปฐพีกลศาสตร์. หน้า 248

Proctor. (1930). **ทฤษฎีการบดอัดดิน.** ปฐพีกลศาสตร์. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชูศักดิ์ คีรีรัตน์.หน้า 738-739

Hogentogler. (1936). **ทฤษฎีบดอัดดิน.** ปฐพีกลศาสตร์. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชูศักดิ์ คีรีรัตน์.หน้า 739-740

Buchanan. (1942). **ทฤษฎีบดอัดดิน.** ปฐพีกลศาสตร์. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชูศักดิ์ คีรีรัตน์.หน้า 740-741

Hilf. (1956). **ทฤษฎีบดอัดดิน.** ปฐพีกลศาสตร์. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชูศักดิ์ คีรีรัตน์. หน้า 741-742

Lambe. (1985). **ทฤษฎีบดอัดดิน.** ปฐพีกลศาสตร์. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชูศกดิ์ คีรีรัตน์. หน้า 742-743

สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา. **มาตรฐานวัสดุดินถมคันทาง (Embankment)** (ทล.ม.102/2532) กรมทางหลวง

สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา. **มาตรฐานวัสดุลูกรังรองพื้นทาง (Subbase)** (ทล.ม.205/2532) กรมทางหลวง

สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา. **มาตรฐานวิธีการทดลองหาขนาดเม็ดวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง** (ทล.ท,204/2516) กรมทางหลวง

สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา. **มาตรฐานวิธีการทดลองหาค่า Liquid Limit (LL) ของดิน** (ทล. ท, 102/2515) กรมทางหลวง

สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา. **มาตรฐานวิธีการทดลองหาค่า Plastic Limit (PL) และ Plasticity Index (PI)** ของดิน(ทล.ท.103/2515) กรมทางหลวง

สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา. **มาตรฐานวิธีการทดลองวิธีการทดลอง Compaction Test แบบมาตรฐาน**(ทล.ท.107/2517) กรมทางหลวง

สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา. **มาตรฐานวิธีการทดลองหาค่าความแน่นของวัสดุในสนามโดยใช้ทราย** (ทล.-ท. 603/2517) กรมทางหลวง

สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา. **มาตรฐานวิธีการทดลองเพื่อหาค่า CBR** (ทล.ท.109/2517) กรมทางหลวง

สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา. **มาตรฐานวิธีการทดลองหาค่า CBR ในสนาม (Field CBR)** (ทล.-ท. 602/2517) กรมทางหลวง

Horpibulsuk, S., Suddeepong, A., Chamket, P. and Chinkulkijniwat, A. (2013), **"Compaction behavior of fine-grained soils, lateritic soils and crushed rocks",** *Soils and Foundations*, Vol.53, No.1, pp.166-172.

Horpibulsuk, S., Katkan, W., and Naramitkornburee, A. (2009), **"Modified Ohio's curves: A rapid estimation of compaction curves for coarse- and fine-grained soils",** *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol.32, No.1, pp.64-75.

Sridharan, A., 1991. **Engineering behavior of fine grained soils – A fundamental approach**. Indian Geotechnical Journal 21 (1), 1-136.

Sridharan, A. and Rao, G.V., 1975. **Mechanism controlling the liquid limit of clays**. Proceedings of Istanbul Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. vol. 1, pp. 65-74.

Kumpala, A. and Horpibulsuk, S. (2013), **"Engineering properties of calcium carbide residue stabilized silty clay",** *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol.25, No.5, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000618.

Chinkulkijniwat, A., Man-koksung, E, Uchaipichat, A., and Horpibulsuk, **S.** (2010), **"Compaction characteristics of non-gravel and gravelly soils using a small compaction apparatus",** *Journal of ASTM International*.Vol.7, No.7, Paper ID JAI102945.

ประวัติผู้เขียน

นายสถิตย์ ชินอ่อน เกิดวันที่ 28 มีนาคม 2511 บ้านโคกกลาง ต.วังชัย อ.น้ำพอง จ.ขอนแก่น จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นที่ โรงเรียนน้ำพองศึกษา อ.น้ำพอง จ.ขอนแก่น และระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) ที่วิทยาลัยเทคโนโลยีและอาชีวศึกษา วิทยาเขตขอนแก่น และระดับประกาศนียบัตรชั้นสูง (ปวส.) แผนกช่างก่อสร้าง ที่เดียวกัน และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ปี พ.ศ. 2544 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยขอนแก่น ได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และปัจจุบันรับราชการตำแหน่งวิศวกรโยธา ชำนาญการ ฝ่ายแผนงาน สังกัดศูนย์สร้างทางขอนแก่น กรมทางหลวง