

ชุดทดสอบการทะลุทะลวงแบบพกพา สำหรับการควบคุมคุณภาพงานบัดดัด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2557

**A PORTABLE CONE PENETROMETER FOR
COMPACTION WORK CONTROL**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2014**

ชุดทดสอบการทะเลาะวิวาทแบบพกพา สำหรับการควบคุมคุณภาพงานบัดอัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.พรพจน์ ตันเส็ง)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ถาวร ชีรเมธาพิรัตน์ : ชุดทดสอบการทะลุทะลวงแบบพกพา สำหรับการควบคุมคุณภาพงานบดอัด (A PORTABLE CONE PENETROMETER FOR COMPACTION WORK CONTROL) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์, 99 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาชุดทดสอบที่สามารถใช้ในการควบคุมคุณภาพของงานบดอัดดินได้อย่างคล่องตัว เสียค่าใช้จ่ายน้อย โดยไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพงาน อุปกรณ์นี้จะอ่านค่าความแน่นแห้ง (Dry density, γ_d) รวมทั้งค่าซีบีอาร์ (California Bearing Ratio, CBR) ในสนามได้ทันทีขณะทำการทดสอบ ชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้นมาใหม่นี้ มีขนาดเล็กสามารถพกพาได้ง่ายและในการใช้งานต้องการผู้ทดสอบเพียงคนเดียว ปลายด้านหนึ่งของอุปกรณ์เป็นกรวยแหลมทำมุม 60 องศา จึงตั้งชื่ออุปกรณ์ชุดนี้ว่า Portable Cone Penetrometer หรือ PCP

นอกจากนี้การศึกษานี้ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดที่กดให้กรวยจมลงเป็นระยะ 20 มิลลิเมตร (PCPF) กับค่าซีบีอาร์แบบแห้ง (Unsoked CBR) ค่าซีบีอาร์แบบเปียก (Soaked CBR) ความหนาแน่นแห้ง (Dry density, γ_d) และความชื้นในดินบดอัด (Water content, W) โดยแบ่งความสัมพันธ์ออกเป็นสามส่วน ได้แก่ ความสัมพันธ์ของดินที่บดอัดที่ความชื้นด้านแห้ง ความสัมพันธ์ของดินที่บดอัดที่ความชื้นที่เหมาะสม และความสัมพันธ์ของดินที่บดอัดที่ความชื้นด้านเปียก เพื่อนำไปใช้ร่วมกับชุดทดสอบ PCP ในการควบคุมคุณภาพงาน บดอัดดินค้นพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของผลทำนายอยู่ในช่วงค่าที่ยอมรับได้ในงานวิศวกรรม

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

TAWORN TIRAMETATIPARAT : A PORTABLE CONE

PENETROMETER FOR COMPACTION WORK CONTROL. THESIS

ADVISOR : ASSOC. PROF. AVIRUT CHINKULKIJNIWAT, Ph.D., 99 PP.

SUBGRADE SOIL/COMPACTION/CBR/DRY DENSITY/OWC

The objective of this research is to develop a light and simple device to assist the field compaction control work by providing field density and field CBR. As one tip of the device is 60 degree cone shape, the device is called Portable Cone Penetrometer (PCP). The PCP is light, portable and operable by only 1 person.

Relationships among the magnitude of force to reach 20 mm cone penetration depth (PCPF), soaked- and unsoaked-CBRs, dry density, and water content were introduced. The relationships were developed for three zones based on compacted water contents; dry side, wet side, and at the optimum water content. Verification provided very good agreement between read and predicted results.

School of Civil Engineering

Academic Year 2014

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดีเนื่องด้วยคณาจารย์และกลุ่มบุคคลต่างๆที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการ ช่วยเหลือสนับสนุนอนุเคราะห์ข้อมูลเครื่องมือและอุปกรณ์ที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัยเป็นอย่างดี ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูงดังนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุชิต อุชายภิชชาติ ที่ให้คำแนะนำ ตลอดจนข้อมูลทางวิชาการด้านปฐพีกลศาสตร์ คอยกระตุ้นเตือนจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยดี

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข และคุณสฤติ ชินอ่อนที่อนุเคราะห์ข้อมูลของศูนย์สร้างทางขอนแก่น กรมทางหลวงในการนำมาวิเคราะห์และกำหนดขอบเขตงานวิจัย

ท้ายที่สุดขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและกรมทางหลวงชนบท กระทรวงคมนาคมที่สนับสนุนทุนวิจัยมาโดยตลอด

ถาวร ชีรเมธาธิพรัตน์



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
2 ปรีทรรสน์ วรรณกรรม งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 บทนำ	4
2.2 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Proctor (1930)	4
2.3 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Hogentogler (1936)	6
2.4 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Buchanan (1942)	7
2.5 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Hilf (1956)	8
2.6 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Lambe (1985)	9
2.7 เส้นโค้งการบดอัดดิน (compaction curve)	11
2.8 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการบดอัดดิน	12
2.8.1 ปริมาณความชื้นในดิน	12
2.8.2 ชนิดของดิน	12
2.8.3 พลังงานการบดอัด	15

สารบัญ (ต่อ)

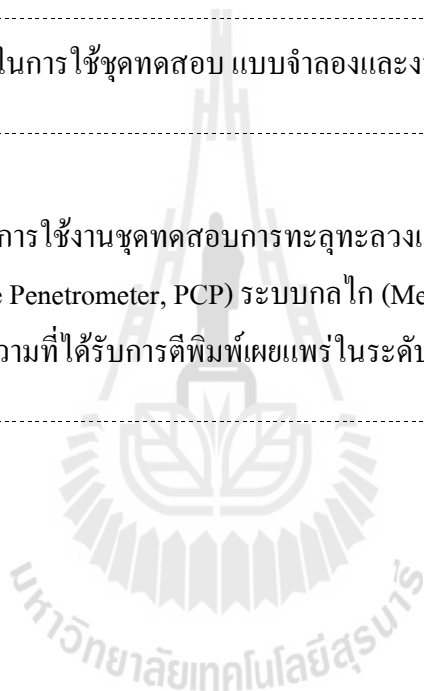
หน้า

2.9	การบดอัดและคุณสมบัติเชิงวิศวกรรม	17
2.10	ปรัชญาการบดอัดงานเขื่อนและงานถนน	20
2.11	การทำนายกราฟการบดอัด	20
2.12	ทฤษฎีค่าซีบีอาร์	32
2.13	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์ ค่าความแน่นแห้งสูงสุดและอัตราส่วน หน่วยแรงกด	34
2.14	ความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นการบดอัดกับจำนวนรอบ ของรถบดอัดในสนาม	42
3	วิธีดำเนินการทำโครงการ	47
3.1	แผนงานดำเนินการ	47
3.2	ขั้นตอนการดำเนินการ	47
3.2.1	การพัฒนาชุดอุปกรณ์ทดสอบกำลังดินบดอัด	47
3.2.2	การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การบดอัด	53
3.3	การเตรียมวัสดุที่ใช้ทดสอบ	56
4	ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล	60
4.1	บทนำ	60
4.2	กราฟการบดอัด	62
4.3	ผลทดสอบค่าซีบีอาร์ (CBR) และความสัมพันธ์กับค่าแรงกดด้วย ชุดทดสอบ	65
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณน้ำ (w) ค่าแรงกด (PCPF) และค่าดัชนีพลาสติก (Plasticity Index,	67
4.5	การทำนายค่าความแน่นแห้ง (Dry density) และค่าซีบีอาร์ (CBR) เพื่อการควบคุม คุณภาพงานบดอัดดินคันทาง (Compacted subgrade soil)	70
4.5.1	กรณีบดอัดดินที่ปริมาณน้ำเหมาะสม (Optimum Water Content, OWC)	70
4.5.2	กรณีบดอัดดินด้านเปียกของปริมาณน้ำเหมาะสม (Wet side of Optimum Water)	73

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5.3	กรณีบดอัดดินด้านแห้งของปริมาณน้ำเหมาะสม (Dry side of Optimum Water).....	75
4.6	การตรวจสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายผล	79
5	บทสรุป	83
5.1	สรุป.....	83
5.2	ข้อเสนอแนะในการใช้ชุดทดสอบ แบบจำลองและงานวิจัยต่อไป.....	85
	รายการอ้างอิง.....	86
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. คู่มือการใช้งานชุดทดสอบการทะลุทะลวงแบบพกพา (Portable Cone Penetrometer, PCP) ระบบกลไก (Mechanics).....	88
	ภาคผนวก ข. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับนานาชาติ.....	93
	ประวัติผู้เขียน.....	99



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ค่า standard unit load ที่ความลึก.....32
2.2	ความสัมพันธ์ของ %CBR และการใช้งาน.....33
3.1	ชนิดและคุณสมบัติทางกายภาพของดินที่นำมาศึกษา.....56
4.1	ผลการทดสอบ PCP test กับดินชั้นทางผสมส่วนละเอียดบดอัดแน่นชุดที่.....60
4.2	ผลการทดสอบ PCP test กับดินชั้นทางผสมส่วนละเอียดบดอัดแน่นชุดที่..... 61
4.3	ผลการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณเพื่อทำนายค่าปริมาณน้ำ (Water content,) ในดินชั้นทางบดอัด (Compacted subgrade soil).....69
4.4	ผลการตรวจสอบแบบจำลองในงานควบคุมการบดอัดดินชั้นทาง.....80
4.5	ผลการตรวจสอบแบบจำลองของดินบดอัดที่ปริมาณน้ำเหมาะสม เมื่อใช้ค่าตัวแปรเป็น ปริมาณน้ำด้านแห้งที่ <i>OWC</i> -2% และด้านเปียกที่ <i>OWC</i> +2%.....82

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ลักษณะทั่วไปของเส้นการบดอัดดิน (typical compaction curve) 5
2.2	ผลของแรงตึงผิวที่ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวปรากฏ (Apparent Cohesion) ในดินเม็ดหยาบ 6
2.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้น เสนอโดย Hogentogler 6
2.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นนำเสนอโดย 8
2.5	กราฟแสดงผลของการบดอัดดินนำเสนอโดย 9
2.6	ผลกระทบของการบดอัดดินที่มีต่อโครงสร้างดิน 10
2.7	เส้นโค้งการบดอัดดิน (compaction curve) 11
2.8	เส้นโค้งการบดอัดดินของดินชนิดต่างๆ 13
2.9	กราฟการบดอัดของดินเหนียวชนิดต่างๆ ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่า มาตรฐาน 14
2.10	อิทธิพลของชนิดดินต่อการบดอัดแบบมาตรฐาน 15
2.11	อิทธิพลของพลังงานบดอัดต่อกราฟการบดอัดของดินลูกรัง 16
2.12	การทดสอบความซึมผ่านได้และการบดอัดดิน Siburua 17
2.13	(a) ลักษณะการอัดตัวของดินตะกอนปนดินเหนียวบดอัดทางด้านแห้งและ ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม (b) การเปลี่ยนแปลงปริมาตร เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น 18
2.14	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของดินเหนียวปนดินตะกอน บดอัด 19
2.15	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของดินลูกรังบดอัด 19

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.16 กราฟการบดอัด Ohio	21
2.17 แบบจำลองโครงสร้างดินบดอัด	22
2.18 (a) กราฟการบดอัดดิน (b) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระดับ ความอิ่มตัวด้วยน้ำของดินเหนียวปนดินตะกอน	23
2.19 (a) กราฟการบดอัดดิน (b) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระดับ ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของกรวดที่ขนาดละเอียด	23
2.20 อิทธิพลของ A_d และ A_w ต่อกราฟการบดอัด	25
2.21 อิทธิพลของ B_d และ B_d ต่อกราฟการบดอัด	25
2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นเหมาะสม อัตราส่วนปริมาณความชื้น เหมาะสมและพลังงานการบดอัด	26
2.23 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของดินเหนียว	28
2.24 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของ Red earth	28
2.25 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของดินเหนียวปนดิน ตะกอน	29
2.26 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของดินลูกรัง	29
2.27 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของกรวดปนดินเหนียว	30
2.28 กราฟ Ohio ปรับปรุงสำหรับพลังงานการบดอัดเท่ากับ 296.3 กิโลจูลต่อ ลูกบาศก์เมตร	30
2.29 กราฟ Ohio ปรับปรุงสำหรับพลังงานการบดอัดเท่ากับ 1346.6 กิโลจูลต่อ ลูกบาศก์เมตร	31
2.30 กราฟ Ohio ปรับปรุงสำหรับพลังงานการบดอัดเท่ากับ 2693.3 กิโลจูลต่อ ลูกบาศก์เมตร	31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง <i>CBR</i> , <i>K</i> , <i>R</i> และ Bearing.....	31
2.32 ความสัมพันธ์ระหว่างขีดจำกัดเหลว (<i>LL</i>) ดัชนีพลาสติก (<i>PI</i>) กับร้อยละของดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (ขนาดเล็กกว่า 0.075).....	35
2.33 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดกับร้อยละของดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (ขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร).....	35
2.34 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่เหมาะสมกับหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด.....	36
2.35 ความสัมพันธ์ระหว่างการบวมตัวกับร้อยละของดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (ขนาดเล็กกว่า 0.075).....	37
2.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์ในสถานะแช่้ำกับหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด.....	39
2.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์ในสถานะแช่้ำกับการบวมตัว.....	39
2.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์ในสถานะแช่้ำกับขีดจำกัดเหลวของดินที่มาจากแหล่งกำเนิดต่างกัน.....	40
2.39 เส้นโค้งบดอัดแบบมาตรฐานและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของดินกับหน่วยแรงกดและค่าซีบีอาร์ในสถานะแช่้ำและไม่แช่้ำ.....	41
2.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์ในสถานะแช่้ำและไม่แช่้ำกับอัตราส่วนหน่วยแรงกดในสถานะไม่แช่้ำและปราศจากแรงกดทับ.....	41
2.41 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงกดและพลังงานการบดอัดของดินคันทางในสถานะแช่้ำและไม่แช่้ำ.....	42
2.42 a) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและจำนวนรอบของรถที่วิ่งผ่าน.....	43
2.42 b) ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกับหน่วยน้ำหนักแห้งตามจำนวนวิ่งผ่าน.....	43
3.1 ลักษณะของชุดทดสอบ Portable Cone Penetrometer, PCP.....	49
3.2 รายละเอียดส่วนประกอบของชุดทดสอบ Portable Cone Penetrometer, PCP.....	51
3.3 ตำแหน่งการทำ PCP test ในโมลดินบดอัด.....	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.4	แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานพัฒนาชุดทดสอบกำลังดินบดอัด.....	53
3.5	แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายผล ค่าซีบีอาร์และค่าความแน่นแห้งของดินบดอัด.....	55
3.6	ผังรายละเอียดส่วนผสมของดินตัวอย่างชุดที่ 1 ที่นำมาบดอัด.....	58
3.7	ผังรายละเอียดส่วนผสมของดินตัวอย่างชุดที่ 2 ที่นำมาบดอัด.....	59
4.1	กราฟการบดอัดดินทรายปนดินตะกอน (Silty sand) ที่ผสมส่วนละเอียด (Fine content) โดยน้ำหนักร้อยละ 15, 30, 45 และ 60 ตามลำดับ.....	63
4.2	กราฟการบดอัดดินทรายปนดินเหนียว (Clayed sand) ที่ผสมส่วนละเอียด (Fine content) โดยน้ำหนักร้อยละ 15, 30, 45 และ 60 ตามลำดับ.....	64
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์แบบไม่แช่น้ำ ([CBR] _ (unsoaked)) กับค่าแรงกด ด้วยชุดทดสอบ PCP (PCPF) ของดินทรายปนดินตะกอน (Silty sand) บดอัดที่ผสมส่วน ละเอียด (Fine content) โดยน้ำหนักร้อยละ 15, 30, 45 และ 60.....	65
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์แบบไม่แช่น้ำ ([CBR] _ (unsoaked)) กับค่าแรงกดด้วย ชุดทดสอบ PCP (PCPF) ของดินทรายปนดินเหนียว (Clayed sand) บดอัดที่ผสมส่วน ละเอียด (Fine content) โดยน้ำหนักร้อยละ 31, 40, 50 และ 60.....	66
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์แบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked CBR) กับ ค่าแรงกด (PCPF) ของดินชั้นทางบดอัด (Compacted subgrade soil).....	67
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ (Water content, w) ในดินชั้นทางบดอัด (Compacted subgrade soil) กับค่าแรงกด.....	68
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ (Water content, w) ในดินชั้นทางบดอัด (Compacted subgrade soil) กับค่าแรงกด PCPF และค่าดัชนีพลาสติก.....	69
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์ทั้งแบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked CBR) และแช่น้ำ (Soaked CBR) กับค่าแรงกด PCPF ของดินชั้นทางบดอัดที่ OWC.....	71
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์แบบแช่น้ำ (Soaked CBR) กับค่าซีบีอาร์ แบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked CBR) ของดินชั้นทางบดอัดที่ OWC.....	71

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์แบบแช่น้ำ (Soaked CBR) กับค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, $\gamma_{d, max}$) ของดินชั้นทางบดอัดที่ <i>OWC</i>	72
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, $\gamma_{d, max}$) ของดินชั้นทางบดอัดกับปริมาณน้ำเหมาะสม.....	73
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์แบบแช่น้ำ (Soaked CBR) กับค่าซีบีอาร์ (แบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked CBR) ของดินชั้นทางบดอัดด้านเปียก.....	74
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแน่นแห้ง (Dry density, γ_d) ของดินชั้นทางบดอัดกับปริมาณน้ำด้านเปียก.....	75
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์แบบแช่น้ำ (Soaked CBR) กับค่าซีบีอาร์ (Unsoaked CBR) ของดินชั้นทางบดอัดด้านแห้ง (Dry side).....	76
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์แบบแช่น้ำ (Soaked CBR) กับค่าความแน่นแห้ง (Dry density, γ_d) ของดินชั้นทางบดอัดด้านแห้ง (Dry side).....	76
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแน่นแห้ง (Dry density, γ_d) ของดินชั้นทางบดอัดกับปริมาณน้ำด้านแห้ง (Dry side).....	77
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่าความแน่นแห้งต่อความแน่นแห้งสูงสุด ($\gamma_d / \gamma_{d, max}$) ของดินชั้นทางบดอัด กับอัตราส่วนค่าปริมาณน้ำด้านแห้งต่อปริมาณน้ำเหมาะสม (w_{dry} / OWC).....	78
ก.1 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอน (Flow Chart) การควบคุมคุณภาพงานบดอัดดินชั้นทางด้วยชุดทดสอบการทะลุทะลวง แบบพกพา (Portable Cone Penetrometer, PCP).....	92

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากการพัฒนาการคมนาคมและตำแหน่งที่ตั้งของประเทศไทย ทำให้การจะเข้าสู่ประชาคมอาเซียนในปีพุทธศักราช 2558 ของประเทศไทยจะมีความได้เปรียบอย่างมากในเรื่องการคมนาคมขนส่งในภูมิภาคนี้เมื่อเทียบอัตราส่วนระหว่างความยาวเส้นทางจราจรต่อพื้นที่แล้ว พบว่าประเทศไทยยังมีเส้นทางจราจรน้อยกว่าประเทศที่มีระบบขนส่งดีอยู่มากทางรัฐบาลไทยมีการวางแผนสร้างและขยายโครงข่ายถนนเพิ่ม เพื่อยกมาตรฐานระบบคมนาคมทางบกของประเทศไทย ทำให้ในอนาคตจะมีการก่อสร้างเส้นทางอีกจำนวนมาก ในการสร้างเส้นทางจราจรนั้น คุณภาพและความคงทนของเส้นทางไม่ได้ขึ้นกับคุณภาพของผิวทางเท่านั้น ยังขึ้นกับคุณภาพของชั้นพื้นทางด้วย ซึ่งในการก่อสร้างจะต้องมีการออกแบบความความหนาของชั้นพื้นทาง โดยใช้ค่า California bearing ratio (CBR) เป็นเกณฑ์มาตรฐานในการออกแบบ

ดินชนิดหนึ่งๆ เมื่อบดอัดที่ระดับพลังงานค่าหนึ่งจะมีค่าความแน่นแห้งและค่าซีบีอาร์ (CBR) ค่าหนึ่งในทางปฏิบัตินั้นการบดอัดดินในสนามจะกระทำผ่านการใช้รถบดอัดวิ่งบดอัดดินเข้าไปมา โดยพลังงานบดอัดดินจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัดจนได้ความแน่นแห้งตามที่ต้องการ ซึ่งมาตรฐานของกรมทางหลวงกำหนดให้การบดอัดต้องให้ได้ค่าความแน่นแห้งในสนามไม่น้อยกว่า ร้อยละ 95 ของความแน่นแห้งในสนามสูงสุดที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและปริมาณน้ำ ในดินต้องมีค่าอยู่ระหว่าง $OWC-3$ และ $OWC+3$ แต่การบดอัดดินในสนามไม่มีมาตรฐานควบคุมจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัดการประมาณการค่าใช้จ่ายในงานบดอัดดินมักกระทำผ่านประสบการณ์ของวิศวกรที่เกี่ยวข้อง อาจเกิดความผิดพลาดในการประมาณราคาทั้งในแง่ของการประมาณค่าใช้จ่าย ต่ำกว่าหรือสูงกว่าความเป็นจริง ความผิดพลาดดังกล่าวอาจส่งผลให้มูลค่าของโครงการ สูงกว่าที่ควร จะเป็น หรือทำให้คุณภาพของงานไม่เป็นไปตามที่ควรจะเป็น

อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะมีวิธีการประมาณจำนวนรอบรถบดอัดที่ให้ค่าความแน่นแห้งในสนามอย่างแม่นยำแล้ว การตรวจสอบคุณภาพการบดอัดดินในสนามก็ยังคงมีความสำคัญ และมีความจำเป็นอย่างมาก ในการควบคุมคุณภาพการบดอัดนั้นจะทำการทดสอบหาความแน่นแห้งใน

สนามตามกำหนดระยะเวลาควบคุมทุกๆช่วงเวลาที่กำหนดหนึ่ง ในการก่อสร้างเส้นทางใหม่ หรือขยายเส้นทางเดิมที่มีเส้นจราจรยาวๆ จะมีค่าใช้จ่ายในการควบคุมคุณภาพสูงมาก ซึ่งส่งผลต่อราคาค่าก่อสร้างของงานนั้นๆ และในการทดสอบแต่ละครั้งจะกินเวลานานประมาณ 1 วัน ทำให้เกิดความยุ่งยากในการควบคุมงาน ดังนั้น หากพัฒนาชุดอุปกรณ์ทดสอบกำลังดินขึ้นมาใหม่ ให้มีวิธีการทดสอบที่ไม่ยุ่งยาก ใช้เวลาและค่าใช้จ่ายน้อยลงและสามารถทำนายค่าความแน่นแห้งในสนามได้อย่างแม่นยำ แล้วนำมาบูรณาการกับวิธีการทดสอบหาความแน่นแห้งในสนามแบบเดิมจะได้แนวทางใหม่สำหรับใช้ควบคุมคุณภาพของการบดอัดดินในสนามแบบบูรณาการที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตอบคำถามวิจัยสองประเด็นคือ 1) จะทำอย่างไรจึงจะสามารถควบคุมคุณภาพของงานได้คล่องตัวขึ้น และมีค่าใช้จ่ายลดลง โดยไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพของงาน และ 2) จะทำอย่างไรจึงจะสามารถทำนายค่าความแน่นแห้งและค่าซีบีอาร์ด้วย ชุดทดสอบอย่างง่ายที่ประดิษฐ์ขึ้นมาใหม่ อันส่งผลต่อการประมาณจำนวนรอบวิ่งของรถบดอัดในสนาม ที่แม่นยำซึ่งจะมีประโยชน์ต่อการประมาณค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 พัฒนาแนวทางในการควบคุมคุณภาพการบดอัด ให้ใช้เวลาและค่าใช้จ่ายในการควบคุมคุณภาพน้อยลง แต่คงประสิทธิภาพไม่ด้อยกว่าวิธีมาตรฐานเดิม

1.2.2 ประดิษฐ์ชุดทดสอบแบบพกพาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถทำนาย ค่าความแน่นแห้งและค่าซีบีอาร์ของดินคันทางที่สะดวก รวดเร็วและแม่นยำ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ขอบเขตเชิงปริมาณ ศึกษาเฉพาะตัวอย่างดินคันทางที่มีคุณสมบัติ ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง และกรมทางหลวงชนบทเท่านั้น

1.3.2 ขอบเขตเชิงทฤษฎี การวิเคราะห์ข้อมูลและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เป็นการวิเคราะห์ผลทดสอบที่ได้จากชุดเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ในห้องปฏิบัติการ โดยจะเน้นศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามต่างๆ ที่ทำได้ง่ายในงานภาคสนามเท่านั้น

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

14.1 พัฒนาและเสนอแนวทางในการควบคุมคุณภาพของงานบดอัดแบบบูรณาการที่มี

ประสิทธิภาพโดยมีความคล่องตัวสูงและมีค่าใช้จ่ายลดลง

14.2 มีชุดเครื่องมือใหม่ที่สะดวกต่อการใช้งาน โดยใช้ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่า *CBR* และค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, $X_{d, max}$) ได้โดยตรงและรวดเร็ว ด้วยตัวแปรต่างๆ ที่หาได้ง่ายจากการทดสอบดินคันทางในภาคสนาม ส่งผลให้สามารถประมาณจำนวนรอบวิ่งของรถบดอัดได้รวดเร็วและแม่นยำมากขึ้น

14.3 การประมาณค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง ในส่วนของการบดอัดดินคันทาง ได้อย่างถูกต้องตามความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น



บทที่ 2

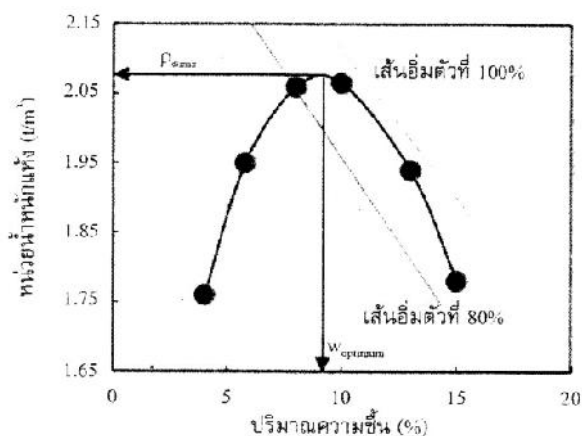
ปรัทัศนัวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานบดอัดดินเป็นการเพิ่มเสถียรภาพของโครงสร้างดิน จึงเป็นงานก่อสร้างที่สำคัญอีกงานหนึ่งในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิค ได้แก่ การก่อสร้างคันดิน (raised embankment) งานถมดินหลังกำแพงกันดิน (backfill behind retaining wall) บดอัดกลบดิน (Backfilled trench) และงานเขื่อนดิน (earth dam) เป็นต้น การบดอัดดินในสนามเป็นการเคลื่อนน้ำหนักจรด บดอัดไปบนดินที่ต้องการบดอัดเป็นจำนวนหลายๆ เทียวยทำให้ดินแน่นขึ้นตามจำนวนเทียวยิ่ง โดยมีองค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อการบดอัดดินในสนามที่สำคัญ ได้แก่ วัสดุดินคันทางการผสมคลุกเคล้า ความชื้นจากสภาพสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง การเลือกใช้ชนิดของรถบดอัดให้เหมาะสมกับชนิดของดิน ความหนาของชั้นดินแต่ละชั้นและความเร็วในการบดอัด ตลอดจนพื้นที่ล่างของชั้นดินที่ทำการบดอัดซึ่งอาจแตกต่างจากฐานรองโม่ลบบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องศึกษาทั้งในด้านทฤษฎีการบดอัดดิน การทดสอบในห้องปฏิบัติการและในสนาม เพื่อประกอบการออกแบบโครงสร้างดังกล่าว

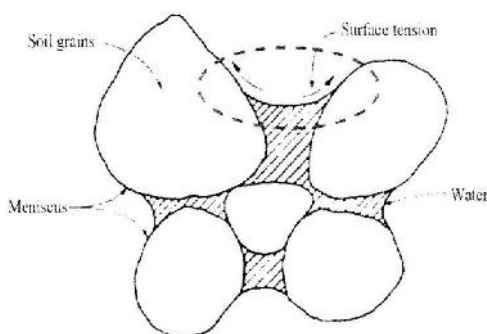
2.2 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Proctor (1930)

ทฤษฎีพื้นฐานการบดอัดดินสำหรับดินที่มีความเชื่อมแน่น ได้ถูกสร้างควมสัมพันธ์ขึ้นโดย R.R. Proctor (1930) โดยเริ่มต้นเมื่อมีการสร้างเขื่อนเพื่อกักเก็บน้ำใน Los Angeles และเขาได้พัฒนาหลักการบดอัดดินโดยตีพิมพ์ในหนังสือ Engineering New-Record (proctor, 1933) แล้วนำวิธีการทดสอบนี้ไปใช้ในห้องปฏิบัติการ โดยเรียกวิธีการดังกล่าวว่า Proctor Test ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะทั่วไปของเส้นการบดอัดดิน (typical compaction curve)

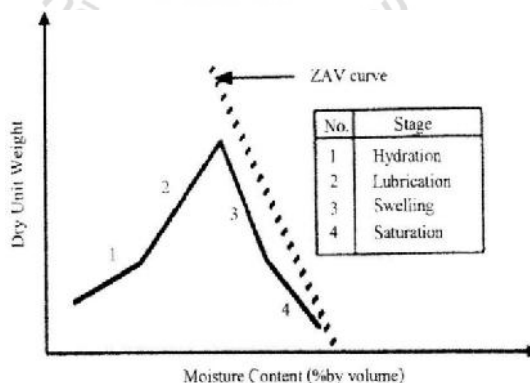
Proctor ได้กล่าวถึงกลไกของการเกิดเส้นการบดอัดดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ไว้ว่า ประสิทธิภาพของการบดอัดดินถูกกำหนดโดยแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดิน โดยแบ่งการบดอัดดินเป็น 2 ด้านคือ ด้านแห้งและด้านเปียก สำหรับการบดอัดดินที่แห้งมาก ๆ ดินจะมีแรงเสียดทานที่สูงมากเนื่องจากแรงดึงดูดที่เกิดจากความชื้นคาพิลลารี (Capillary Moisture) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เป็นผลให้การบดอัดดินทำได้ยาก แต่เมื่อเติมน้ำเข้าไปในดินที่แห้งมาก ๆ น้ำจะไปลดแรงคาพิลลารี และเป็นผลให้แรงเสียดทานลดลงไปด้วยถ้าเติมน้ำเข้าไปอีกเรื่อยๆ จนน้ำไปสลายแรงเสียดทานได้แล้ว น้ำก็จะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นทำให้เม็ดดินเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่จนถึงปริมาณน้ำที่เต็มช่องว่างในช่วงหนึ่งก็จะทำให้ดินมีความแน่นแห้งสูงสุด โดยเรียกจุดที่ดินมีความแน่นแห้งสูงสุดว่า maximum dry density และเรียกปริมาณน้ำที่จุดนี้ว่า Optimum Water Content, **OWC** หลังจากจุดนี้เมื่อเติมน้ำเข้าไปอีกจะทำให้ความแน่นแห้งลดลง เนื่องจากน้ำเข้าไปแทนที่เนื้อดินทำให้เนื้อดินที่มีในปริมาตรที่เท่ากันลดลง อีกทั้งเกิดจากความถ่วงจำเพาะของน้ำน้อยกว่าดิน ในขณะที่ความแน่นเปียกมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณน้ำในดินสูงมาก ๆ ดินจะอยู่ในสภาพอ่อนตัวซึ่งไม่อยู่ในสภาพที่สามารถรับน้ำหนักได้อีกต่อไป



รูปที่ 2.2 ผลของแรงตึงผิวที่ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวปรากฏ (Apparent Cohesion) ในดินเม็ดหยาบ

2.3 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Hogentogler (1936)

Hogentogler นำเสนอเส้นกราฟการบดอัดที่แตกต่างกับ Proctor กล่าวคือ เขาได้นำเสนอเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง (dry density) กับปริมาณความชื้น (moisture content) ในรูปของปริมาณน้ำต่อปริมาตรรวม (molding moisture content : V_w/V) โดยลักษณะของเส้นกราฟแสดงด้วยเส้นตรง 4 เส้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งสาเหตุที่เขาได้นำเสนอการพล็อตเส้นกราฟแบบนี้เนื่องจากเขาพบว่าน้ำมีบทบาทอยู่ 4 ช่วงที่มีผลทำให้ดินเกิดความหนาแน่นแห้งสูงสุดและทำให้โครงสร้างของดินบดอัดมีความแตกต่างกัน โดยมีรายละเอียดแต่ละช่วงดังนี้



รูปที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้น
นำเสนอโดย Hogentogler

เส้นกราฟช่วงที่ 1 เรียกว่า Hydration Stage เขากล่าวว่าในช่วงนี้น้ำจะถูกดูดซึมโดยอนุภาค

ของดินในลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ ห่อหุ้มอนุภาคดินในลักษณะเดียวกับเมื่อพรมน้ำลงไป ในดินแห้งในช่วงแรกอนุภาคดินจะดูดซึมน้ำทันทีเพื่อไปห่อหุ้มอนุภาคดินก่อน โดยน้ำส่วนกลางที่จะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นนั้นยังไม่มี

เส้นกราฟช่วงที่ 2 เรียกว่า Lubrication Stage ในช่วงนี้น้ำจะมีบทบาทเป็นสารหล่อลื่นเป็นผลทำให้ดินเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ในลักษณะที่มวลดินมีความแน่นขึ้น โดยยังคงมีอากาศอยู่ในมวลดินบางส่วนนั้นหมายถึงความหนาแน่นแห้งจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเมื่อถึงจุดปริมาณน้ำที่เหมาะสม (optimum moisture content ; **OMC**) จะทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งมีค่าสูงสุด (maximum dry density)

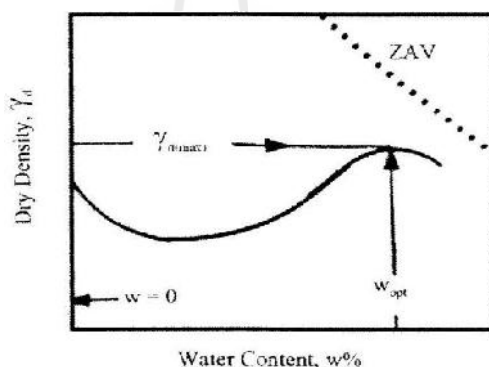
เส้นกราฟช่วงที่ 3 เรียกว่า Swelling Stage ในช่วงนี้เกิดจากการเติมน้ำที่เกินปริมาณน้ำที่เหมาะสม อากาศในส่วนที่มีอยู่จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากปริมาตรของมวลดินมีค่าน้อยอยู่แล้วและอยู่ในสภาพที่แน่นซึ่งจะกักไม่ให้อากาศที่มีอยู่ออกไป ดังนั้นเมื่อเติมน้ำเข้าไปอีก มวลดินจึงเกิดการบวมตัวในขณะที่ปริมาตรอากาศคงที่

เส้นกราฟช่วงที่ 4 เรียกว่า Saturation Stage ในช่วงนี้เมื่อเติมน้ำเข้าไปอีกน้ำจะเข้าไปแทนที่อากาศในช่องว่างที่เหลืออยู่ในมวลดินเป็นผลให้ระดับความอิ่มตัว (degree of saturation) เพิ่มมากขึ้นและมีแนวโน้มเข้าใกล้เส้นอากาศเป็นศูนย์ (Zero Air Void ; **ZAV**) ดังที่ Hogentogler ได้อธิบายไว้ข้างต้น เส้นกราฟการบดอัดนี้ มักจะประยุกต์ใช้โดยตรงกับดินเหนียวเป็นส่วนใหญ่ เช่นเดียวกับ Proctor

2.4 ทฤษฎีการบดอัดดินของBuchanan (1942)

เขาได้อธิบายเส้นกราฟการบดอัดของดินเม็ดหยาบ โดยเขาได้พบว่า นอกจากจุดที่มีความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ปรากฏบนเส้นกราฟการบดอัดแล้ว ก่อนถึงด้านแห้งของการบดอัดจะมีจุดที่แสดงถึงค่าความหนาแน่นแห้งต่ำสุด ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งเขาอธิบายได้ว่า ถ้าหากเริ่มบดอัดดิน เม็ดหยาบที่แห้งมากๆ หรือดินที่มีปริมาณความชื้นเท่ากับศูนย์ เมื่อเติมน้ำเข้าไปในช่วงแรกจะทำให้ความหนาแน่นแห้งลดลงจนถึงจุดความหนาแน่นแห้งต่ำสุด เมื่อเลยจุดนี้ไป ก็จะเข้าสู่เส้นกราฟ การบดอัดปกติ เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นแห้งที่จุดปริมาณความชื้นเท่ากับศูนย์กับจุดที่ ความหนาแน่นแห้งสูงสุด จะมีช่วงความแตกต่างกันค่อนข้างน้อย และเขาได้กล่าวในเชิงวิชาการไว้ว่า สำหรับกรณีของทรายที่มีความแห้งมากๆ เมื่อเติมน้ำในช่วงแรก อนุภาคดินจะจับตัวกันด้วยแผ่นฟิล์มบางๆ ของน้ำในลักษณะคล้ายกระจกของก้อนดิน หรือทรายรอบตัวเองที่เรียกว่า Arching Effect ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดช่องว่างในมวลดินมากขึ้น โดย Arching Effect จะพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดที่ความหนาแน่นแห้งต่ำสุด ดังนั้น ปฏิกริยาของน้ำที่เติมในช่วงแรกๆ จะแตกต่าง

จากกรณีของ Hogentrogler และ Proctor เนื่องจากในดินทรายไม่มีประจุลบ ดังนั้น เมื่อเติมน้ำจะเกิดแรงดึงผิว ทำให้เกิดแรงยึดแน่นปรากฏ (apparent cohesion) และเมื่อเติมน้ำมากขึ้น แผ่นฟิล์มจะหนาขึ้นทำให้ Arching Effect ลดน้อยลง แรงดึงผิวของแรงดึงผิวก็ลดลง ตามลำดับ แล้วอนุภาคดินก็เริ่มจัดเรียงตัวกันใหม่และหลังจากนั้นก็จะเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไปแล้ว แต่เขาได้ให้ความหมายของ **OMC** ต่างจากคนอื่น กล่าวคือ **OMC** คือ น้ำที่มีอยู่พอดีในมวลดินบดอัดที่ทำให้ดินอยู่ในสภาพ ที่ไปสลายแรงดึงผิวพอดี ที่เรียกว่า neutralizes surface tension และเมื่อมีพลังงานบดอัดมากจะทำทราย ทำให้ทรายแน่นขึ้น จนสุดท้ายถึงจุดที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด เมื่อน้ำสูงขึ้นเกิน **OMC** ดินก็จะอ่อนตัวลง เป็นผลให้ความหนาแน่นแห้งลดลง สรุปแล้วในการบดอัดดินทรายนั่น การที่จะให้ได้ความหนาแน่นแห้งก่อนข้างคือ ช่วงที่ทรายแห้งมากๆ และช่วงความชื้นที่ค่อนข้างน้อยไปทางด้านเปียก ไปแล้ว

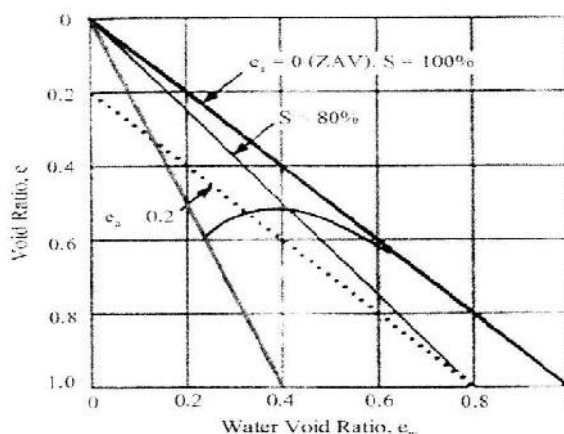


รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้น
นำเสนอ โดย Buchanan

2.5 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Hilf (1956)

เขาได้นำเสนอแนวความคิดใหม่โดยวางอยู่บนพื้นฐานของแรงดันน้ำในช่องว่าง (porewater pressure) และแรงดันอากาศในช่องว่าง (pore air pressure) ที่มีอยู่ในมวลดินที่ บดอัด เขากล่าวไว้ว่า ดินแห้งเป็นดินที่บดอัดได้ยาก เนื่องจากภายในมวลดินมีแรงเสียดทานมาก ซึ่งเกิดจากแรงคาพิลลารี อย่างไรก็ตามในช่วงที่ดินมีความแห้งมากๆ มวลดินจะมีช่องว่างอยู่มาก การบดอัดจึงไปไล่อากาศให้ออกไปได้อย่างรวดเร็ว เมื่อเติมน้ำเพิ่มขึ้นแรงดึงผิวก็จะลดลง ทำให้แรงเสียดทานลดลงด้วย โดยความแน่นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปจนกระทั่งถึงปริมาณน้ำที่เหมาะสม (**OMC**) ก็จะได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (maximum dry density) เขากล่าวว่า ประสิทธิภาพที่น้อยลงไปจากการบดอัดเมื่อเติมน้ำเลขจุด **OMC** เนื่องจากอากาศถูกกัก

เอาไว้และเกิดการสะสมกันเป็นแรงดันอากาศในมวลดิน เขาได้เสนอกราฟการบดอัดโดยการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่าง (voidratio ; e) และอัตราส่วนน้ำในช่องว่าง (water voidratio ; e_w) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงผลของการบดอัดดินนำเสนอ โดย Hilf

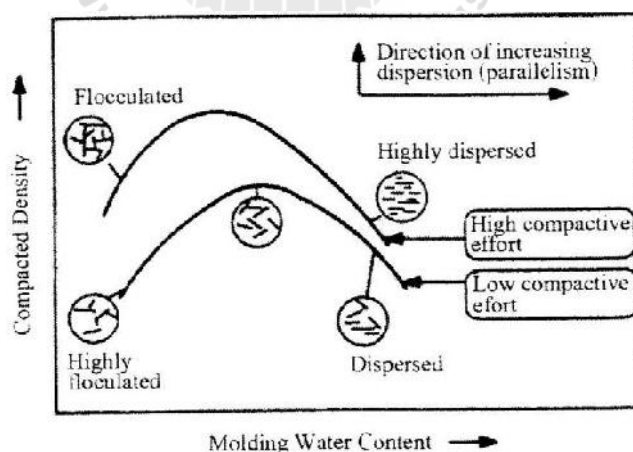
โดยพบว่าที่จุด **OMC** ค่าอัตราส่วนช่องว่างจะมีค่าน้อยที่สุด โดยจุดเริ่มต้นของเส้นกราฟเป็นจุดที่ค่าอัตราส่วนช่องว่างมากและมีค่าระดับความอิ่มตัวน้อย เมื่อบดอัดไปก็จะได้ค่าอัตราส่วนช่องว่างที่น้อยที่สุดซึ่งจุดนี้สามารถหาค่าสัดส่วนของอากาศได้ด้วยและพบว่าที่ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดนี้ ค่าระดับความอิ่มตัวจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 80 วิธีของ Hilf ทำให้ง่ายต่อ การหาค่าระดับความอิ่มตัวที่จุดต่างๆ บนเส้นกราฟการบดอัด และสามารถหาปริมาณอากาศ ที่ความชื้นต่างๆ ได้ด้วย

2.6 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Lambe (1985)

เขาได้เริ่มนำผลจากการดูโครงสร้างภายในดินเปรียบเทียบกับความหนาแน่นแห้งของดินที่บดอัด โดยเขาสนใจว่าคุณสมบัติของดินที่บดอัดทางด้านเปียกและทางด้านแห้งมีความแตกต่างกันนั้นเกิดจากสาเหตุใด เขาสังเกตจากปัจจัยหลายๆ อย่าง เขาพบว่าในความเป็นจริงนั้น การบดอัดในสนามนั้นไม่สามารถบดอัดดินให้ได้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด ดังนั้น ในการเติมน้ำจะมีช่วงหนึ่ง ที่เมื่อเติมน้ำเข้าไปในช่วงนี้แล้วคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมเป็นไปตามที่ต้องการ แต่เมื่อเติมน้ำเกินช่วงนี้ไปเป็นช่วงที่เขาไม่แนะนำซึ่งเขาให้เหตุผลจากการพิจารณาโครงสร้าง

ภายในของดินเหนียวพบว่าในช่วงการบดอัดดินทางด้านข้างนั้น ลักษณะโครงสร้างของดินจับตัวกันเป็นกระจุก โดยเมื่อพิจารณาที่ความชื้นเดียวกัน การใช้พลังงานบดอัดต่ำความเป็นกระจุกของดินมีมากและจะน้อยลงเมื่อใช้พลังงานการบดอัดสูง เป็นผลให้โครงสร้างของดินชิดกันมากขึ้นด้วย เมื่อเติมน้ำ เข้าไปโดยที่พลังงานคงที่ สังเกตเห็นว่าโครงสร้างของดินแน่นขึ้น อัตราส่วนช่องว่างลดลงจนกระทั่งเกินจุด OMC ลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างดินจะเป็นแบบขนานกันมากขึ้นเมื่อความชื้นยิ่งมาก โครงสร้างดินก็ยังเป็นระเบียบจัดเรียงตัวกันในแนวขนานมากขึ้นซึ่งถือว่าไม่ดีเพราะว่าเป็นระนาบที่อ่อนแอที่สุด โดยสรุปแล้วเขาพยายามตอบคำถามว่าทำไมจุดที่มีความหนาแน่นแห้งเท่ากันแต่ปริมาณน้ำไม่เท่ากัน เมื่อเขาใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องดู พบว่าการบดอัดดินในด้านข้างมีผลทำให้โครงสร้างดินเป็นแบบระเกะระกะ (flocculated structure) ในทางตรงกันข้าม เมื่อเติมน้ำเกินจุด **OMC** เป็นการบดอัดทางด้านเปียก มีผลทำให้โครงสร้างดินเป็นแบบขนาน (dispersed structure) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เมื่อพิจารณาที่ความหนาแน่นแห้งเท่ากัน โดยเปรียบเทียบดินบดอัดทางด้านข้างกับดินบดอัดทางด้านเปียก พบว่า

- กำลังของดินสูงกว่า เนื่องจากความเครียด (strain) ของดินต่ำกว่า
- ค่าความซึมได้ของน้ำสูงกว่า เนื่องจากในมวลดินมีช่องว่างมากกว่า
- มีการหดตัวน้อยกว่า เนื่องจากปริมาณน้ำในมวลดินมีน้อยกว่า
- มีค่าการบวมตัวมากกว่า เนื่องจากมีช่องว่างที่น้ำสามารถสัมผัสกับพื้นผิวได้มากกว่า



รูปที่ 2.6 ผลกระทบของการบดอัดดินที่มีต่อ โครงสร้างดิน

2.7 เส้นโค้งการบดอัดดิน (compaction curve)

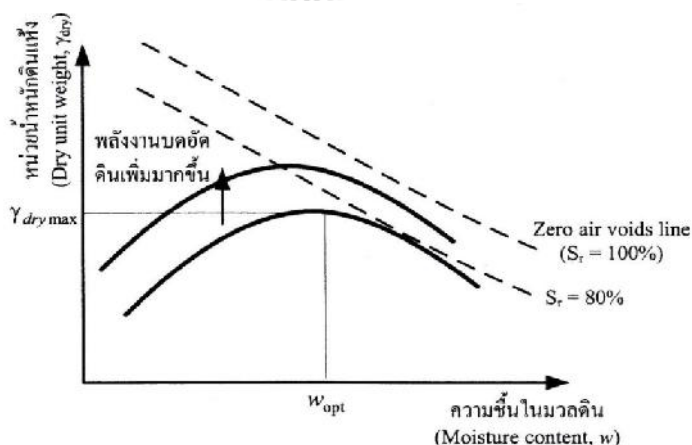
ทฤษฎีพื้นฐานที่นำมาใช้ในงานบดอัดดินคือ สมการความสัมพันธ์ของหน่วยน้ำหนักดินแห้งกับระดับชั้นความอืดด้วยน้ำ ดังสมการที่ 2.1

$$Y_{dry} = \left(\frac{G_s}{1+e} \right) Y_w = \left(\frac{G_s}{1+wG_s/S_r} \right) Y_w \quad (2.1)$$

การบดอัดดินให้แน่นที่สุดในทางทฤษฎีคือ การพยายามทำให้หน่วยน้ำหนักดินแห้งมากที่สุด ($Y_{dry, max}$) ถ้าพิจารณาจากสมการที่ 2.1 การที่ดินจะมีหน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุดนั้นดินจะต้องมีค่าอัตราส่วนช่องว่างต่ำที่สุด (e_{min}) และจากความสัมพันธ์ที่ว่า $e = wG_s/S_r$ การจะควบคุมให้ได้ e_{min} นั้น จะต้องทำให้ดินมีค่า $S_r=1$ และ $w = w_{opt}$ (optimum water content) กล่าวคือ

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

ถ้านำความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในมวลดิน (แกนนอน) มาพล็อตกราฟกับหน่วยน้ำหนักดินแห้ง (แกนตั้ง) ของการบดอัดดิน ซึ่งเรียกว่าเส้นโค้งการบดอัดดิน (Compaction curve) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เส้นโค้งการบดอัดดิน (compaction curve)

จากเส้นโค้งการบดอัดดินในรูปที่ 2.7 พบว่าหน่วยน้ำหนักดินแห้งในตอนแรกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำในมวลดินมากขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่ทำให้หน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุด (maximum dry unit weight, $\gamma_{dry, max}$) และเรียกปริมาณน้ำ ณ จุดนี้ว่าปริมาณน้ำเหมาะสม (Optimum water content, w_{opt}) และเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นมากกว่าจุดนี้จะทำให้หน่วยน้ำหนักดินแห้งลดลง ในทางปฏิบัติแล้วการที่จะบดอัดดินให้อยู่ในสภาพทางทฤษฎีนั้นเป็นไปได้ยาก เพราะว่าการบดอัดดินนอกจากจะขึ้นกับปริมาณน้ำแล้ว ยังขึ้นกับระดับพลังงานกล (Mechanical energy) ที่กระทำกับดินที่บดอัดอีกด้วย โดยพลังงานที่ให้กับดินขณะทำการบดอัดจะต้องมีค่าสูงเพียงพอที่จะขับไล่ฟองอากาศให้ออกจากมวลดิน จนทำให้ดินอยู่ในสภาวะที่เข้าใกล้สภาวะไร้ช่องว่างอากาศ (Zeroair voids) จากรูปที่ 2.7 เมื่อเพิ่มพลังงานการบดอัดดิน จะพบว่าเส้นโค้งการบดอัดดินจะเคลื่อนตัวมาทิศทางบนซ้าย โดยหน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุดจะมีค่ามากขึ้น แต่ปริมาณน้ำเหมาะสม (w_{opt}) จะมีค่าลดลง แต่ทั้งนี้ทั้งนั้น เส้นโค้งการบดอัดดินจะถูกควบคุมด้วยเส้นไร้ช่องว่างอากาศ (Zeroair voids line) เส้นโค้งการบดอัดดินจะไม่ตัดเส้นไร้ช่องว่างอากาศ ซึ่งสมการเส้นไร้ช่องว่างอากาศจะหาได้จากสมการที่ 2.1 และแทนค่า $S_r=1$ นั่นคือ

$$\text{Zeroair voidline : } \gamma_{dry} = \left(\frac{G_s}{1+wG_s} \right) K_w \quad (2.2)$$

2.8 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการบดอัดดิน

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการบดอัดดิน ได้แก่ ปริมาณความชื้นในมวลดิน ชนิดของดินและพลังงานในการบดอัด

2.8.1 ปริมาณความชื้นในมวลดิน

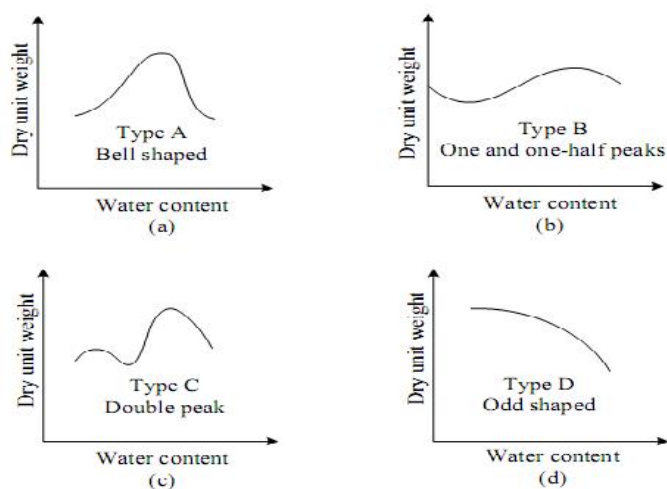
ดังที่ได้อธิบายไปแล้วข้างต้น ในหัวข้อเรื่องเส้นโค้งการบดอัดดิน ซึ่งจะเห็นได้ว่า ปริมาณความชื้นในดินมีอิทธิพลอย่างมากต่อความหนาแน่นของดินบดอัด

2.8.2 ชนิดของดิน

ชนิดของดินในที่นี้ ครอบคลุมถึงการกระจายของเม็ดดิน รูปร่างของเม็ดดิน ความถ่วงจำเพาะของดินและปริมาณและชนิดของแร่ดินเหนียวด้วย

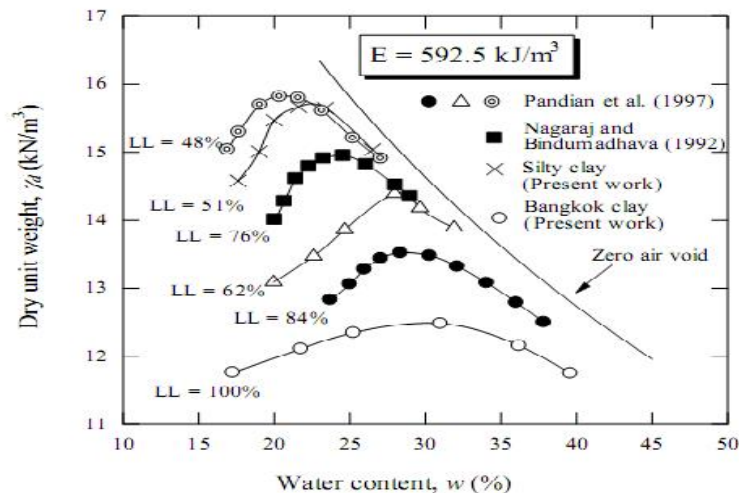
Leeand Suedkamp (1972) ศึกษากราฟการบดอัดดินของดินที่แตกต่างกัน 35 ชนิด พบว่า กราฟเหล่านั้นสามารถจำแนกออกได้เป็น 4 ชนิดหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ชนิด A คือ กราฟที่มีจุดยอดเพียงจุดเดียว โดยทั่วไปมักพบในดินที่มีขีดจำกัดเหลวประมาณร้อยละ 30-70 ชนิด B คือ กราฟที่มี 1 จุดยอดและครึ่งจุดยอด ชนิด C คือ กราฟที่มี 2 จุดยอด กราฟชนิด B และ C มัก

พบในดินที่มีขีดจำกัดเหลวน้อยกว่าร้อยละ 30 ชนิด D คือ กราฟที่ไม่แสดงจุดยอดที่ชัดเจนดิน ที่มีขีดจำกัดเหลวมากกว่าร้อยละ 70 อาจแสดงลักษณะกราฟเป็นแบบชนิด C หรือ D ซึ่งเป็นลักษณะกราฟที่ไม่ค่อยพบเห็น



รูปที่ 2.8 เส้นโค้งการบดอัดดินของดินชนิดต่างๆ

สำหรับการบดอัดดินเหนียว Horpibulsuk (2005) แสดงให้เห็นว่า เส้นกราฟการบดอัดแปรผันอย่างมากกับขีดจำกัดเหลว เมื่อค่าขีดจำกัดเหลวยิ่งมากหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดยังมีค่าน้อยลง ในขณะที่เดียวกันปริมาณความชื้นเหมาะสมก็ยังมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 2.9 แสดงผลทดสอบการบดอัดของดินชนิดต่างๆ ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (modified proctor test) การที่ขีดจำกัดเหลวมีอิทธิพลต่อเส้นกราฟการบดอัดดินนั้น เนื่องจากขีดจำกัดเหลวเป็นพารามิเตอร์ที่สะท้อนผลของแร่ดินเหนียวและของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (pore fluid)



รูปที่ 2.9 กราฟการบดอัดของดินเหนียวชนิดต่างๆที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Horpibulsuketal., 2005)

Gurtugand Sridharan (2002) แสดงให้เห็นว่า ปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินเม็ดละเอียด (fine-grained soil) ที่ถูกบดอัดแบบวิธีมาตรฐาน (standard Proctor test) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพิกัดพลาสติก ดังนี้

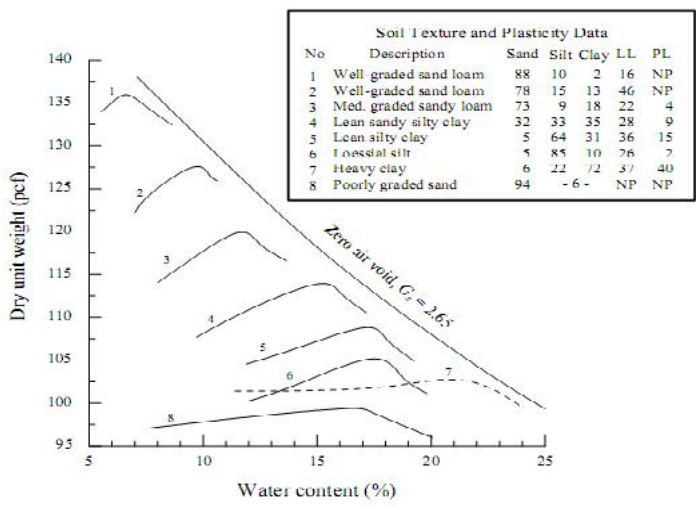
$$OMC = 0.92PL \tag{2.3}$$

$$X_{d \max} = 0.98X_{dPL} \tag{2.4}$$

เมื่อ X_{dPL} คือ หน่วยน้ำหนักแห้งที่พิกัดพลาสติก คำนวณโดยการสมมติว่าพิกัดพลาสติกมีระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ เท่ากับร้อยละ 100 ความสัมพันธ์นี้ช่วยให้สามารถประมาณจุดเหมาะสม (Optimum point) ได้อย่างทันที เมื่อทราบค่าพิกัดอัตราเตอร์เบอร์ก

รูปที่ 2.10 แสดงอิทธิพลของชนิดดินต่อลักษณะการบดอัด กราฟการบดอัดมีลักษณะแบน สำหรับทรายที่มีขนาดสม่ำเสมอ (Uniformly graded sand) ตรงกันข้ามกับทรายที่มีขนาดละเอียด (Well-graded sand) จะแสดงผลทดสอบที่มีจุดยอดอย่างเห็นได้ชัด ส่วนในดินเม็ดละเอียดที่มีขีดจำกัดเหลวสูงๆ จะมีหน่วยน้ำหนักแห้งต่ำและมีปริมาณความชื้นเหมาะสมสูง ส่วนในดินตะกอนจะแสดงกราฟที่เห็นจุดยอดได้ชัดเจน ในขณะที่กราฟการบดอัดของดินเหนียวจะมีลักษณะแบน โดยดินตะกอนเป็นดินที่ไวต่อปริมาณความชื้นกล่าวคือ สำหรับพลังงานการบด

อัด ค่าหนึ่ง เมื่อมีปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยก็จะมีผลกระทบอย่างมากต่อหน่วยน้ำหนักแห้งของดินตะกอน ส่วนดินเหนียวเป็นดินที่ไวต่อพลังงานการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ แม้พลังงานการบดอัดที่เปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยก็จะมีผลกระทบต่อหน่วยน้ำหนักแห้งอย่างมาก



รูปที่ 2.10 อิทธิพลของชนิดดินต่อการบดอัดแบบมาตรฐาน (Johnson and Sallberg, 1960)

2.8.3 พลังงานการบดอัด

พลังงานการบดอัดต่อปริมาตร 1 หน่วย (E) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$E = \frac{NB \times NL \times W \times H}{V(m^3)} \tag{2.5}$$

เมื่อ NB = จำนวนการตกระทบของค้อนใน 1 ชั้น (number of blows per layer)

NL = จำนวนชั้นของการบดอัด (number of layers)

W = น้ำหนักของค้อน (weight of hammer)

H = ระยะตกระทบของค้อน (height of drop of hammer)

ดังนั้น พลังงานการบดอัดต่อปริมาตร 1 หน่วย ในแบบหล่อขนาด 4 นิ้ว สำหรับการบดอัดแบบมาตรฐาน (E_{sc}) และแบบสูงกว่ามาตรฐาน ($E_{modified}$) คือ

$$E_{sc} = \frac{(25)(3)(3.5)(1)}{(1/30)} = 12,375 \text{ ฟุต-ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต}$$

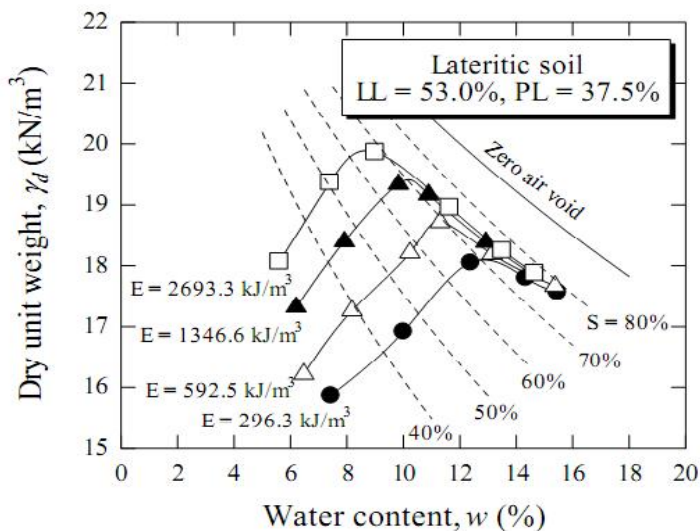
$$= 592.5 \text{ กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร}$$

$$E_{mod} = \frac{(25)(3)(10)(1.5)}{(1/30)} = 56,250 \text{ ฟุต-ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต}$$

$$= 2,693.3 \text{ กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร}$$

ถ้าพลังงานการบดอัดเปลี่ยนแปลงไป กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งจะเปลี่ยนแปลงด้วย ในรูปที่ 2.11 แสดงผลทดสอบการบดอัดของตัวอย่างดินลูกรัง ในจังหวัดเพชรบูรณ์ที่พลังงานบดอัดต่างๆ โดยตัวอย่างดินลูกรังที่นำมาทดสอบประกอบด้วยกรวดเป็นมวลหลักในปริมาณร้อยละ 70 ส่วนที่เหลือเป็นทรายดินตะกอน และ ดินเหนียวดินนี้จัดอยู่ในกลุ่ม SC โดยการจำแนกตามระบบเอกภาพ (Unified Soil Classification System, USCS) เราสามารถสรุปได้ว่า

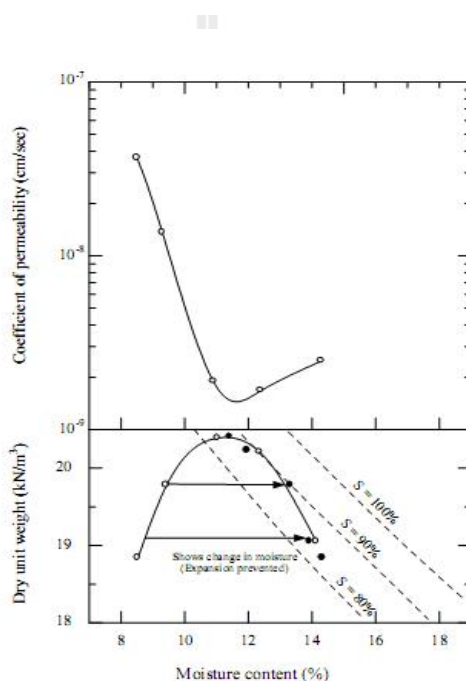
1. หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานการบดอัดที่เพิ่มขึ้น
2. ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าลดลงตามการเพิ่มของพลังงานการบดอัด



รูปที่ 2.11 อิทธิพลของพลังงานบดอัดต่อกราฟการบดอัดของดินลูกรัง (Horpibulsuket al.,2004)

2.9 การบดอัดและคุณสมบัติเชิงวิศวกรรม

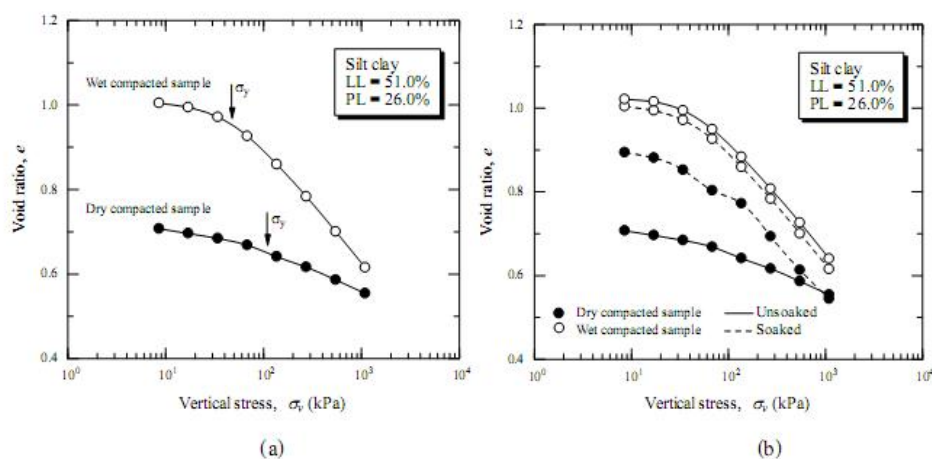
ในกรณีของดินเหนียวการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้น จะส่งผลให้ความสามารถในการไหลซึมลดลงในด้านหนึ่งของปริมาณความชื้นเหมาะสม (dry side of optimum moisture content) และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจะมีค่ามากขึ้นในด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 2.12 นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของพลังงานการบดอัดจะช่วยลดสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำเพราะเป็นการช่วยเพิ่มความหนาแน่นแห่งสูงสุด



รูปที่ 2.12 การทดสอบความซึมผ่านได้และการบดอัดดิน Siburua (Lambe, 1962)

เพื่อความเข้าใจถึงลักษณะของการอัดตัวคายน้ำของดินบดอัด สุขสันต์ หอพิบูลสุข (2545) ได้ทำการบดอัดดินเหนียวปนดินตะกอนที่เก็บตัวอย่างจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และนำเสนอผลทดสอบดังแสดงรูปที่ 2.13 (a) ซึ่งแสดงอิทธิพลของปริมาณความชื้นที่ทำให้การบดอัดต่อการทรุดตัวของดินเหนียวปนดินตะกอนบดอัดมาเปรียบเทียบกับจำนวนสองตัวอย่างที่มีหน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากัน (ร้อยละ 95 ของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด) โดยตัวอย่างหนึ่งบดอัดทางด้านหนึ่งของปริมาณความชื้นเหมาะสมอีกตัวอย่างบดอัดทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม ผลทดสอบพบว่า ดินที่ทำการบดอัดทางด้านหนึ่งของปริมาณความชื้นเหมาะสมมี

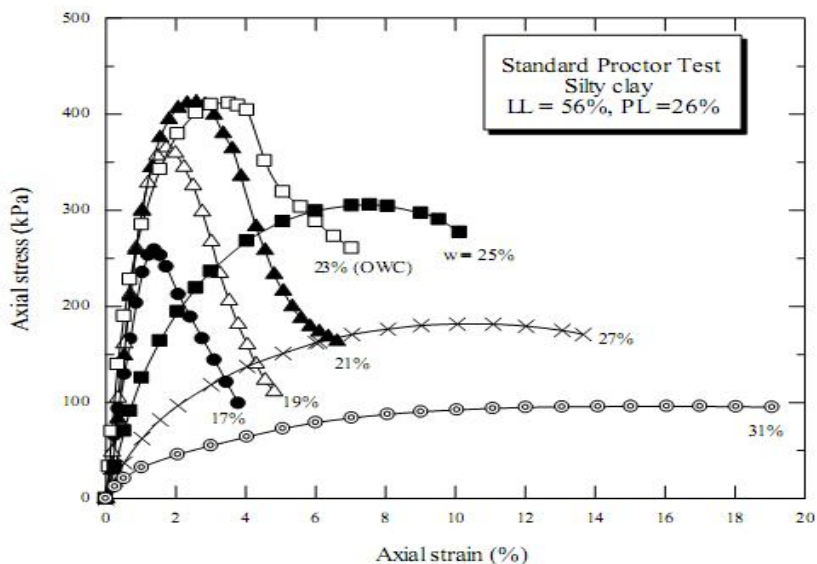
ความสามารถด้านการทรุดตัวมากกว่าดินที่ทำการบดอัดทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม ดังจะเห็นได้จากความชันของเส้นกราฟมีค่าน้อยกว่าอย่างชัดเจน นอกจากนี้ดินที่บดอัดทางด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสมยังมีค่าความเค้นคราก (σ_y) สูงกว่าด้วย แต่อย่างไรก็ตาม ดินตัวอย่างที่ทำการ บดอัดทางด้านแห้งจะได้รับผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณอย่างมาก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น โดยมีแนวโน้มที่จะขยายตัวเมื่อมีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น (Expansive due to wetting) ในขณะที่ดินตัวอย่างที่ทำการบดอัดทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสมจะเกิดการอัดตัวเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น แต่อิทธิพลของการเพิ่มปริมาณความชื้นมีน้อยมากเนื่องจากว่า ดินตัวอย่างที่บดอัดทางด้านเปียกจะมีระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำใกล้เคียงร้อยละ 100 ดังแสดงในรูปที่ 2.13 (b)



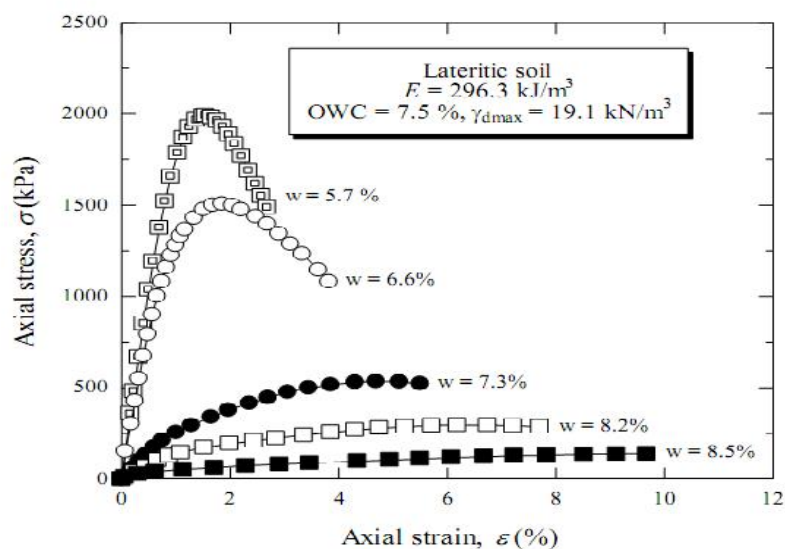
รูปที่ 2.13 (a) ลักษณะการอัดตัวของดินตะกอนปนดินเหนียวบดอัดทางด้านแห้ง และด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม (b) การเปลี่ยนแปลงปริมาตร เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น (สุขสันต์, 2548)

อิทธิพลของปริมาณความชื้นต่อความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของดินบดอัด จะมีความแตกต่างกันตามแต่ชนิดของดิน (ดูรูปที่ 2.14 และ 2.15) สำหรับดินเม็ดละเอียด (รูปที่ 2.14) ดินตัวอย่างที่บดอัดทางด้านแห้งจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้น ตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม นอกจากนี้ดินที่บดอัดด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสมจะมีค่าความเครียดที่จุดวิบัติต่ำกว่าดินตัวอย่างที่บดอัดทางด้านเปียก ดินตัวอย่างที่บดอัดทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสมจะแสดงพฤติกรรมเป็นแบบเหนียว (Ductile) สำหรับดินเม็ดหยาบ (รูปที่ 2.15) กำลังอัดแกนเดียวของดินที่บดอัดทางด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสมมีแนวโน้มที่จะมีคุณสมบัติแบบแตกง่าย (Brittle) มากกว่าดินที่บดอัดทางด้าน

เปือก เช่นเดียวกับดินเม็ดละเอียด แต่กำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบที่บดอัดทางด้านหนึ่งจะมีค่าลดลงตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นและมีค่ามากที่สุดที่ปริมาณความชื้นน้อยกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของดินเหนียวปนดินตะกอนบดอัด (สุขสันต์, 2548)



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของดินลูกรังบดอัด (Horpibulsuk et al., 2006)

2.10 ปัจจัยการบดอัดงานเขื่อนและงานถนน

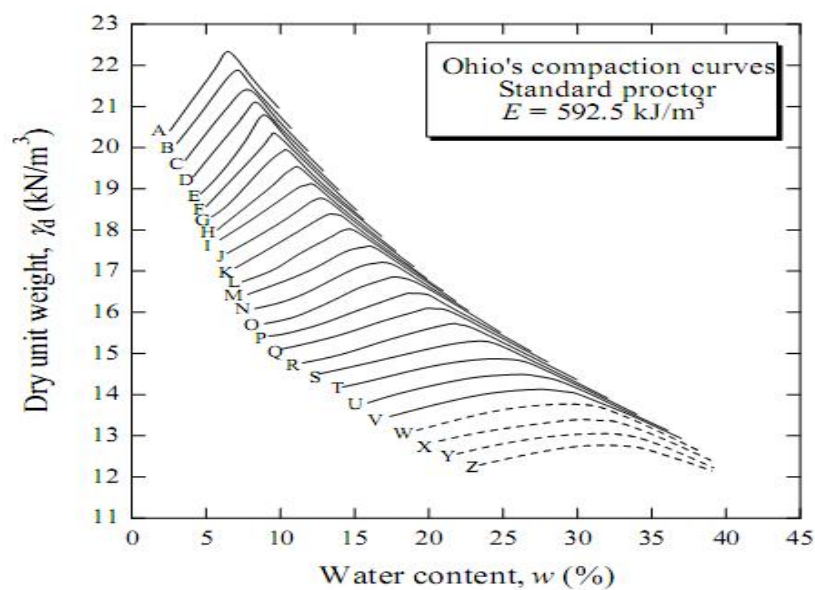
สำหรับดินฐานราก (ดินเดิม) ที่มีกำลังต้านทานแรงเฉือนสูงและมีการอัดตัวต่ำ ควรทำการบดอัดดินถมทางด้านข้างของปริมาณความชื้นเหมาะสมในการบดอัดแบบนี้ นอกจากความดันน้ำส่วนเกินที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการบดอัดจะมีค่าต่ำแล้ว กำลังต้านทานแรงเฉือนรวมทั้งสติฟเนส (Stiffness) ของดินบดอัดจะมีค่าสูงขึ้น ในพื้นที่ที่ดินฐานรากเป็นดินอ่อนควรทำการบดอัดดินถมทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม ถึงแม้ว่าการบดอัดแบบนี้จะก่อให้เกิดความดันน้ำส่วนเกินที่มากและดินบดอัดมีกำลังต้านทานแรงเฉือนที่ค่อนข้างต่ำ แต่ดินบดอัดจะมีความยืดหยุ่นสูงและสามารถต้านทานการทรุดตัวที่แตกต่าง (Differential settlement) ซึ่งอาจเกิดเนื่องจากการทรุดตัวอย่างมากของดินฐานราก สำหรับงานที่เกี่ยวข้องกับการเก็บกักน้ำควรบดอัดดินถมทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม เนื่องจากดินบดอัดมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำและมีค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนต่ำ ดังนั้น จึงสามารถป้องกันการลดลงของกำลังต้านทานแรงเฉือนและการเปลี่ยนแปลงปริมาตร อันเนื่องมาจากดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Strength reduction and volume change due to wetting)

วิธีบดอัดดินให้ได้ความแน่น (Density) สูงตามความต้องการ หรือตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน จะต้องอาศัยน้ำเป็นตัวหล่อลื่น แต่ถ้ามีน้ำมากเกินไปน้ำจะไปหุ้มเคลือบรอบๆ มวลดิน ทำให้อณูของเม็ดดินแยกตัวห่างจากกัน หรือถ้ามีน้ำมีอยู่น้อยเกินไป การหล่อลื่นไม่ดีพอที่จะช่วยให้การบดอัดเม็ดดินเบียดชิดกันเท่าที่ควร ด้วยเหตุผลและข้อเท็จจริงดังกล่าว R.R. Proctor (1933) ได้กำหนดวิธีทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับความแน่น (Density) ของดินที่ได้จากการบดอัดในห้องปฏิบัติการ ซึ่งต่อมาได้เป็นที่ยอมรับและนิยมใช้ทดสอบการบดอัดดินในงานก่อสร้าง โดยทั่วไปว่าเป็นวิธีทดสอบมาตรฐาน (Standard Proctor Test) โดยเฉพาะการทดสอบเพื่อควบคุมงานก่อสร้างถนน สนามบิน (Run way) เขื่อนดิน พื้นโรงงาน ฯลฯ ในปัจจุบันยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งได้วิวัฒนาการมีขนาดใหญ่ขึ้น บรรทุกน้ำหนักได้มากขึ้นหลายเท่าตัว พลังงาน (Energy) ที่ใช้ในการบดอัดก็จำเป็นจะต้องเพิ่มขึ้นด้วย จึงได้มีการกำหนดวิธีทดสอบการบดอัดดินโดยการเพิ่มพลังงานให้สูงขึ้น เพื่อจะได้ฐานดินที่มีความแน่นสูง รับน้ำหนักได้มาก เรียกว่า วิธีทดสอบแบบโมดิไฟด์ (Modified Proctor Test)

2.11 การทำนaylorาฟการบดอัด

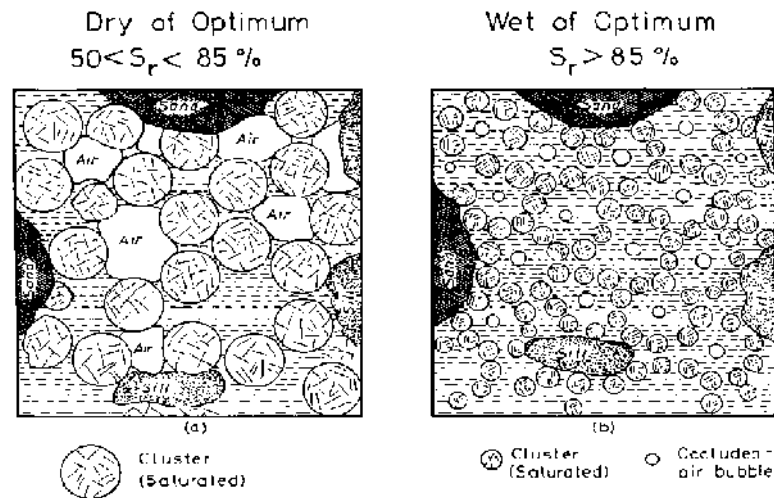
การทำนaylorาฟการบดอัด เริ่มต้นครั้งแรก โดย Joslin (1959) ซึ่งเป็นผู้สร้างกราฟ การบดอัดดินที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน จำนวน 26 กราฟและให้ชื่อว่ากราฟ Ohio (Ohio curves) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 กราฟเหล่านี้สร้างขึ้น โดยการรวบรวมผลทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน

ของดินชนิดต่างๆ จำนวนมากในมลรัฐ Ohio กราฟ Ohio นี้ มีประโยชน์มากในการประมาณกราฟการบดอัดของดินชนิดต่างๆ ได้อย่างรวดเร็ว เมื่อทราบผลทดสอบของปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งค่าหนึ่ง แต่การประมาณนี้มีข้อจำกัดคือ ทำได้เพียงแค่ที่พลังงาน การบดอัดแบบมาตรฐานเท่านั้น



รูปที่ 2.16 กราฟการบดอัด Ohio (ปรับปรุงจาก Joslin, 1959)

Nagaraj et al. (2006) ได้นำเสนอแบบจำลองโพรงระหว่างอนุภาคดินในอุดมคติสำหรับการทำนายกราฟการบดอัดดินเม็ดละเอียด ภายใต้พลังงานการบดอัดต่างๆ (รูปที่ 2.17) โดยกล่าวว่าทางด้านหนึ่งของปริมาณความชื้นเหมาะสมสถานะของน้ำ (Water phase) และอากาศ (Air phase) ในมวลดินบดอัดจะมีความต่อเนื่อง จุดเชื่อมต่อระหว่างอากาศและน้ำที่เกิดขึ้นเนื่องจากความโค้งผิวน้ำ (Meniscus) จะเชื่อมต่อโพรงระหว่างกลุ่มอนุภาคของดินเหนียว เมื่อระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำเพิ่มมากขึ้น ความต่อเนื่องของอากาศ (Air phase) จะลดลง จนในที่สุดอากาศจะก่อตัวเป็นฟองอากาศ (Air bubble) จากแบบจำลองดังกล่าว พวกเขาได้เสนอพารามิเตอร์สถานะสองตัวคือ $w/S^{0.5}$ และ w/S^2 สำหรับดินเม็ดละเอียดที่บดอัดทางด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสมตามลำดับและได้กล่าวว่าที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง แม้ว่าปริมาณความชื้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำแต่พารามิเตอร์สถานะจะมีค่าคงที่



รูปที่ 2.17 แบบจำลองโครงสร้างดินบดอัด (Nagaraj et al., 2006)

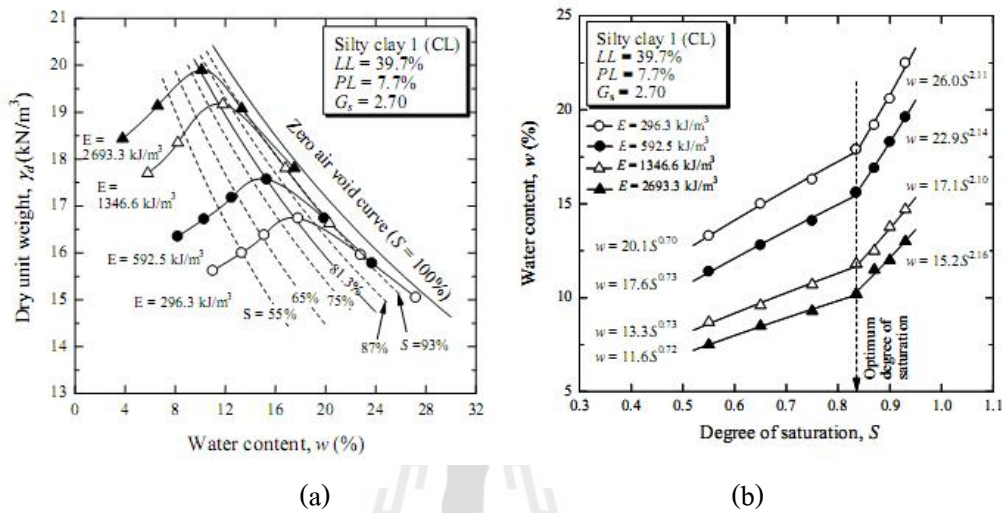
Horpibulsuk et al. (2008a และ 2009a) ได้ศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะกราฟการบดอัดของดินเม็ดละเอียดจำนวน 9 ชนิดซึ่งครอบคลุมดินที่มีระดับการบวมตัวและสภาพความเป็นพลาสติกตั้งแต่ต่ำจนถึงสูง ($FSR = 0.2$ ถึง 2.1 , $LL = 39.7$ ถึง 256.3% และ $PL = 6.1$ ถึง 48.2%) และ ดินเม็ดหยาบอีก 16 ชนิดซึ่งครอบคลุมดินทั้งหมดที่จำแนกด้วยระบบเอกภาพ (Unified Soil Classification System, USCS) พวกเขาพบว่า พารามิเตอร์สถานะที่เสนอโดย Nagaraj et al. (2006) ไม่สามารถใช้ได้กับดินทุกชนิด จึงได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระดับความอึดตัวด้วยน้ำที่ระดับพลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง ในฟังก์ชันพาวเวอร์ ดังนี้

$$w = A_d S^{B_d} \quad \text{สำหรับการบดอัดทางด้านแห้ง} \quad (2.6)$$

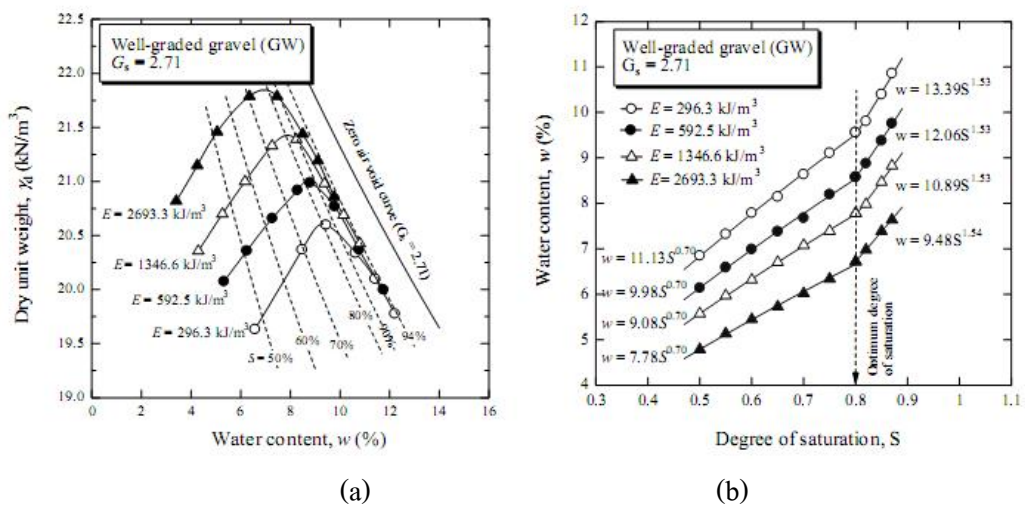
$$w = A_w S^{B_w} \quad \text{สำหรับการบดอัดทางด้านเปียก} \quad (2.7)$$

เมื่อ A_d , A_w , B_d และ B_w คือ ค่าคงที่ w และ S คือ ปริมาณความชื้นและระดับความอึดตัวด้วยน้ำมีหน่วยเป็นร้อยละและจุดทศนิยมตามลำดับ ความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นสามารถอธิบายผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้เป็นอย่างดี ดังแสดงในรูปที่ 2.18 สำหรับดินเหนียวปนดินตะกอน (Silty clay) และรูปที่ 2.19 สำหรับกรวดที่มีความละเอียดดี (Well-graded gravel) จากความสัมพันธ์นี้ Horpibulsuk et al. (2008a) ได้เสนอวิธีการประมาณระดับความอึดตัว

ด้วยน้ำที่จุดเหมาะสม (Optimum degree of saturation, **ODS**) แบบใหม่ โดยนิยามว่าเป็นจุดตัดระหว่างสมการที่ (2.6) และ (2.7)



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



รูปที่ 2.19 (a) กราฟการบดอัดดิน (b) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของกรวดที่ขนาดละเอียด (Horpibulsuk et al., 2009a)

ถึงแม้ว่าลักษณะกราฟการบดอัดจะแปรผันตามชนิดของดิน (ตัวอย่างเช่น ดินตะกอน มีความไวตัวต่อปริมาณความชื้นและดินเหนียวมีความไวตัวต่อพลังงานการบดอัด เป็นต้น) แต่พารามิเตอร์ A_{cs} , A_{ws} , B_{cs} และ B_{ws} สามารถอธิบายลักษณะกราฟการบดอัดของดินชนิดต่างๆ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 และ 2.19 สำหรับ B_{cs} และ B_{ws} ค่าหนึ่ง เมื่อ A_{cs} และ A_{ws} มีค่าลดลง หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้น (ปริมาณความชื้นเหมาะสมจะมีค่าลดลง) (รูปที่ 2.18) พารามิเตอร์ B_{cs} และ B_{ws} เป็นตัวควบคุมระดับความไวตัวต่อน้ำ (ความชันของกราฟการบดอัด) ทางด้านแห้งและด้านเปียกตามลำดับ ระดับความไวตัวต่อน้ำมีค่าสูงขึ้น เมื่อ B_{cs} มีค่าลดลง และ B_{ws} มีค่าสูงขึ้น (รูปที่ 2.19) ความชันของกราฟการบดอัดจะมีค่าเท่ากับศูนย์ (ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของหน่วยน้ำหนักแห้งกับปริมาณความชื้น) เมื่อ B_{cs} และ B_{ws} มีค่าเท่ากับ 1.0

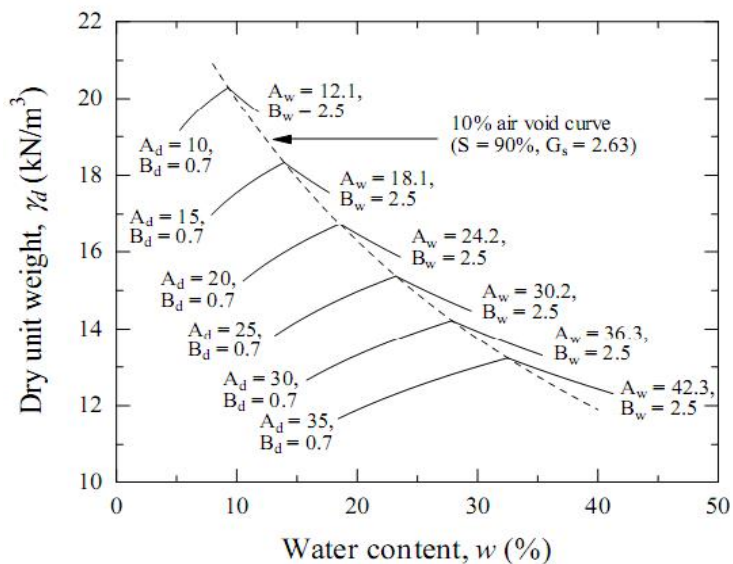
จากผลทดสอบการบดอัดดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียดหลายชนิด Horpibulsuk et al. (2008a และ 2009a) สรุปว่า สำหรับดินชนิดหนึ่ง A_{cs} และ A_{ws} มีค่าลดลง ตามการเพิ่มขึ้นของพลังงานการบดอัด ขณะที่ B_{cs} และ B_{ws} มีค่าประมาณคงที่ สำหรับทุกพลังงานการบดอัด (ไม่แปรผันตามพลังงานการบดอัด) (ดังแสดงในรูปที่ 2.16 และ 2.17) B_{cs} มีค่าประมาณ 0.70 ถึง 0.86 สำหรับดินเม็ดละเอียดและประมาณ 0.62 ถึง 0.74 สำหรับดินเม็ดหยาบ B_{ws} มีค่าประมาณ 1.50 ถึง 2.72 สำหรับดินเม็ดละเอียด และประมาณ 1.53 ถึง 2.35 สำหรับดินเม็ดหยาบซึ่งแตกต่างจากผลงานวิจัยของ Nagaraj et al. (2006) ที่สมมติว่า $B_{cs} = 0.5$ และ $B_{ws} = 2.0$

แม้ว่าพารามิเตอร์ A_{cs} , A_{ws} , B_{cs} และ B_{ws} จะมีความแตกต่างกันตามแต่ละชนิดของดิน แต่อัตราส่วนระหว่าง A_{cs}/A_{csst} และ A_{ws}/A_{wst} ในแต่ละพลังงานการบดอัด (เมื่อ A_{csst} และ A_{wst} คือ ค่าของ A_{cs} และ A_{ws} ที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐานตามลำดับ) มีค่าประมาณเกือบคงที่ สำหรับทุกดินและมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานการบดอัด (Horpibulsuk et al., 2009a) ดังนั้น เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.6) และ (2.7) จะพบว่า อัตราส่วนปริมาณความชื้นเหมาะสม (OWC/OWC_{st}) จะมีค่าแปรผันตามพลังงานการบดอัดและเป็นค่าคงที่สำหรับดินบดอัดทุกชนิด เพราะ B_{cs} และ B_{ws} มีค่าประมาณคงที่สำหรับทุกพลังงานการบดอัด ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปริมาณความชื้นเหมาะสมและพลังงานการบดอัดแสดงได้ ดังรูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์นี้เป็นเอกภาพสำหรับทั้งดินเม็ดละเอียดและดินเม็ดหยาบบดอัด ตามสมการดังนี้

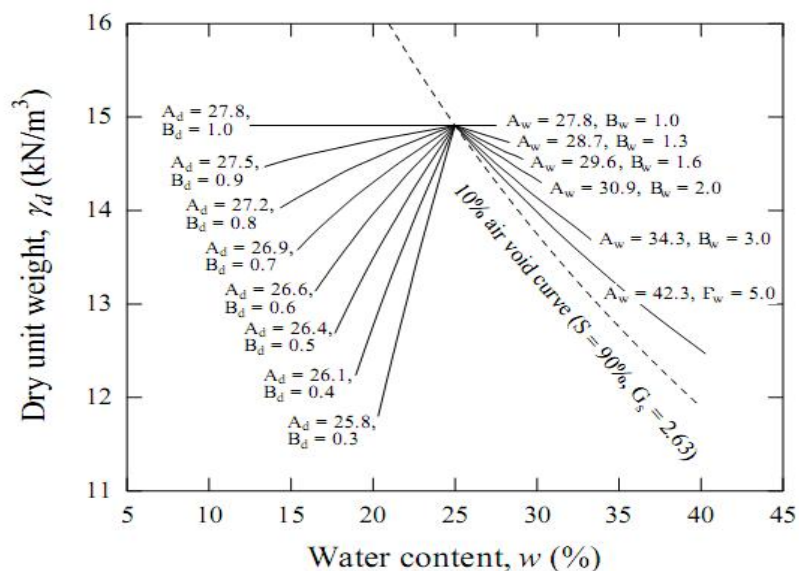
$$\frac{OWC}{OWC_{st}} = 2.01 - 0.37 \log E \quad (2.8)$$

สมการนี้สามารถประมาณปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินชนิดต่างๆ ที่พลังงานการบดอัดใดๆ ได้ เพียงแค่ทราบปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินนั้นที่พลังงานการบดอัด

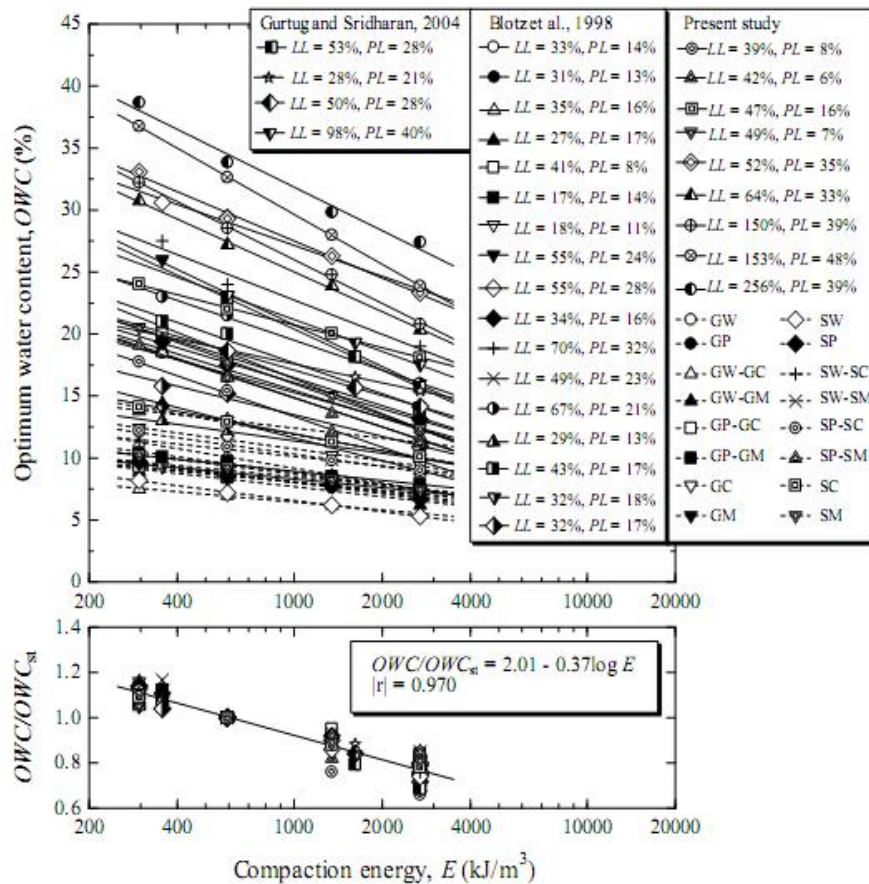
แบบมาตรฐาน หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดสามารถประมาณได้ โดยสมมติว่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ ที่พลังงานการบดอัดต่างๆ มีค่าเท่ากัน



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)



รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นเหมาะสมอัตราส่วนปริมาณความชื้นเหมาะสมและพลังงานการบดอัด (Horpibulsuk et al., 2009a)

อาศัยสมการพาวเวอร์ของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (สมการที่ (2.6) และ (2.7)) และสมการอัตราส่วนปริมาณความชื้นเหมาะสม (สมการที่ (2.8)) การทำนaylorกราฟบดอัดที่พลังงานการบดอัดใดๆ จากผลทดสอบการบดอัดที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่งสามารถสรุปได้เป็นขั้นตอนดังนี้

1. จากข้อมูลกราฟการบดอัดที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง หาค่า A_d , A_w , B_d และ B_w และจุดเหมาะสม ($y_{d, max}$, OWC และ ODS)
2. จากค่า OWC และ ODS ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 1) หาค่า OWC_{st} จากสมการ (2.8) และประมาณค่า ($y_{d, max}$)_{st} โดยสมมติว่า ODS มีค่าคงที่สำหรับทุกพลังงานการบดอัด

3. หาค่าจุดเหมาะสม ($\gamma_{d,max}$, OWC) สำหรับพลังงานที่ต้องการโดยการแทนค่า OWC_{\pm} ในสมการที่ (2.8)

4. หาค่า A_d และ A_w ที่พลังงานการบดอัดที่ต้องการ จากสมการที่ (2.9) และ (2.10)

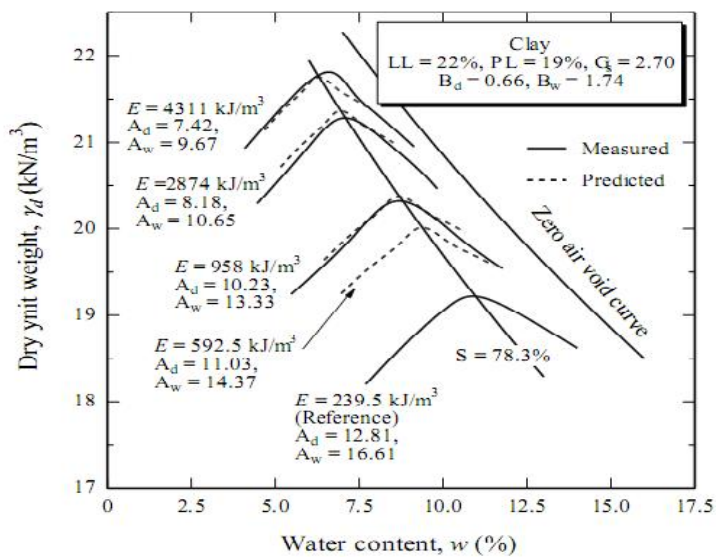
$$A_d = \frac{OWC}{ODS^2 E_d} \quad (2.9)$$

$$A_w = \frac{OWC}{ODS^2 E_w} \quad (2.10)$$

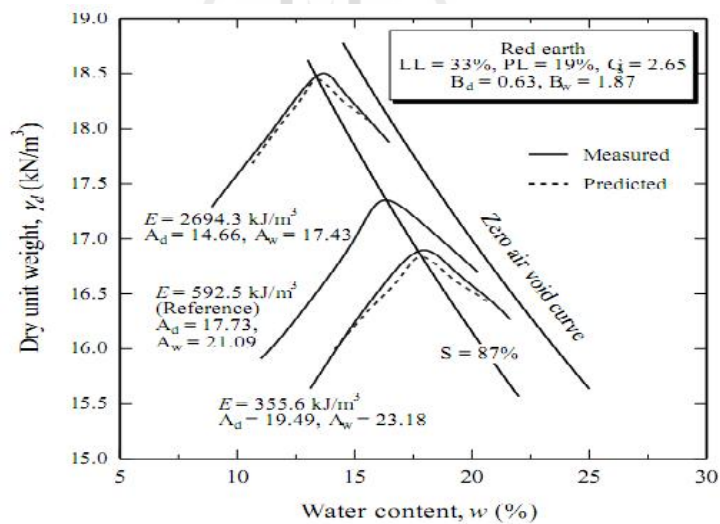
5. หาค่าปริมาณความชื้น (w) ทางด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสมที่ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำค่าต่างๆ โดยอาศัยสมการที่ (2.6) และ (2.7) ตามลำดับและหาค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง (γ_d)

6. วาดเส้นกราฟการบดอัดดินทางด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม โดยการต่อเส้นเชื่อมจุด (γ_d , w) ที่ได้จากขั้นตอนที่ 5

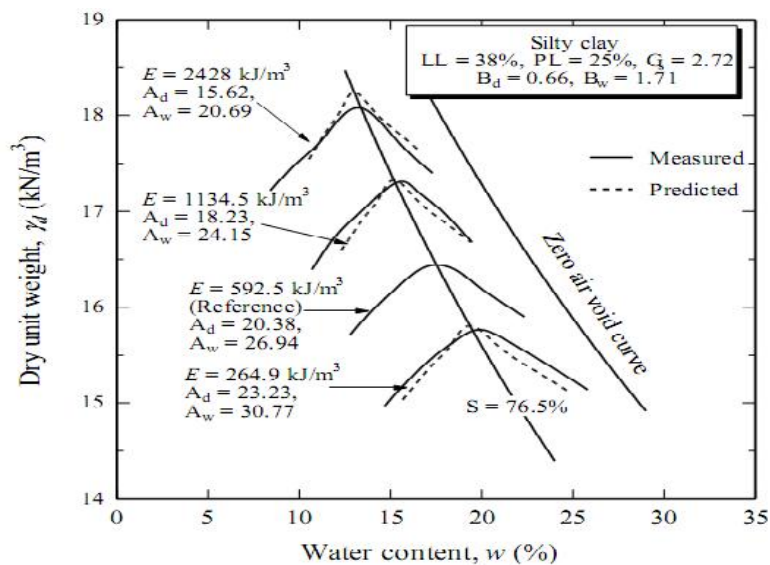
รูปที่ 2.23 ถึง 2.27 แสดงกราฟการบดอัดของดินเม็ดละเอียดและดินเม็ดหยาบที่รวบรวมจากผลงานวิจัยในอดีต จะเห็นได้ว่ากราฟการบดอัดดินที่ได้จากการทำนายมีความสอดคล้องและใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริงมาก ซึ่งเป็นการแสดงความแม่นยำของวิธีการทำนายกราฟการบดอัด ที่นำเสนอ เมื่อใช้กราฟการบดอัดของ Ohio เป็นกราฟอ้างอิง สำหรับดินเม็ดละเอียดและดินเม็ดหยาบ ที่บดอัดด้วยพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน (592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร) กราฟการบดอัด ที่พลังงานใดๆ สามารถสร้างขึ้นได้ตามขั้นตอนที่นำเสนอข้างต้น กราฟที่สร้างขึ้นนี้ เรียกว่า กราฟ การบดอัดของ Ohio ปรับปรุง (Modified Ohio's compaction curves) รูปที่ 2.28 ถึง 2.30 แสดงกราฟการบดอัดของ Ohio ปรับปรุง สำหรับพลังงานการบดอัดเท่ากับ 296.3, 1,346.6 และ 2,693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ กราฟเหล่านี้ มีประโยชน์อย่างมากในการทำนายกราฟการบดอัดที่พลังงานการบดอัดที่ต้องการ โดยอาศัยเพียงแค่นี้ผลทดสอบของปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้ง



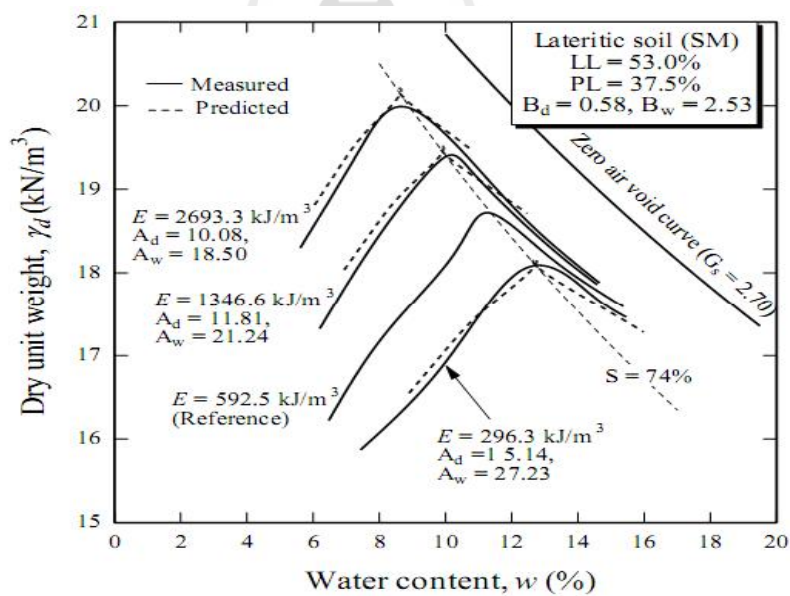
รูปที่ 2.23 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของดินเหนียว (ข้อมูลจาก Proctor, 1948) (Horpibuksuk et al., 2008a)



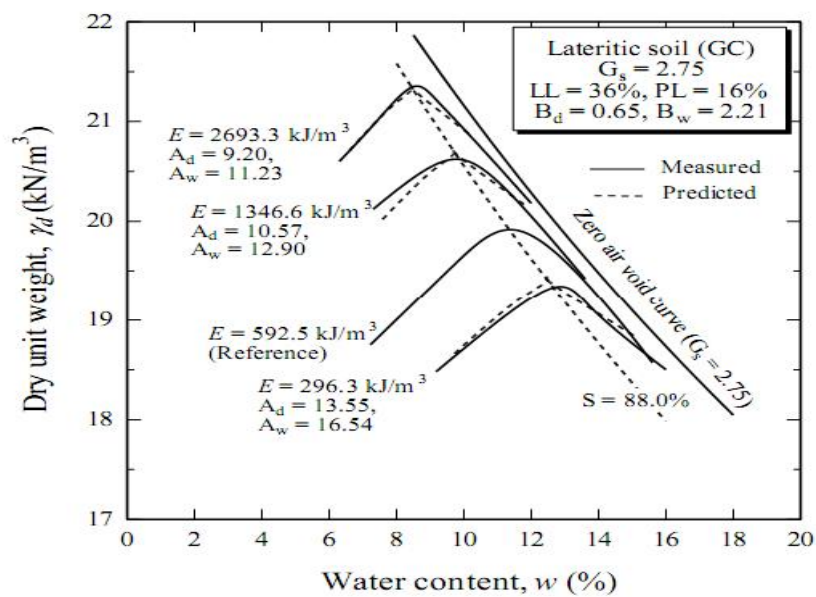
รูปที่ 2.24 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของ Red earth (ข้อมูลจาก US Army Corps of Engineers, 1970) (Horpibusluk et al., 2008a)



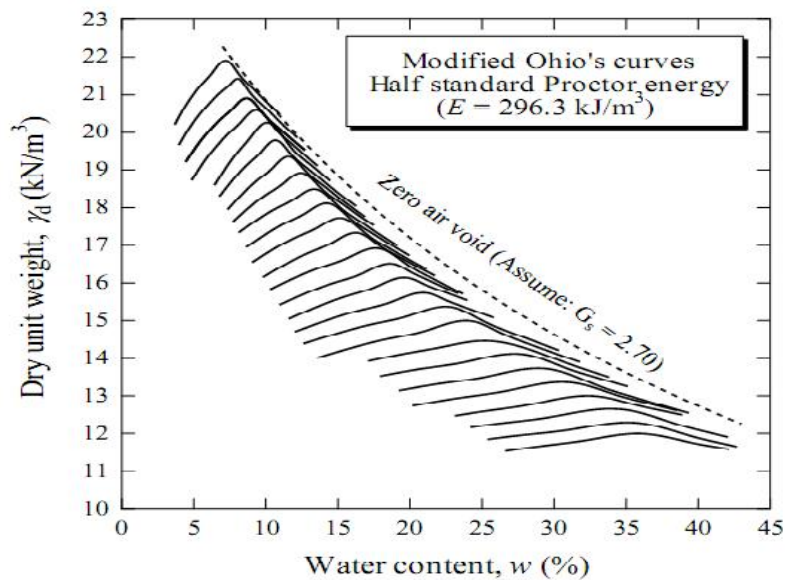
รูปที่ 2.25 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของดินเหนียวปนดินตะกอน (ข้อมูลจาก Turnbull and Foster, 1956) (Horpibulsuk et al., 2008a)



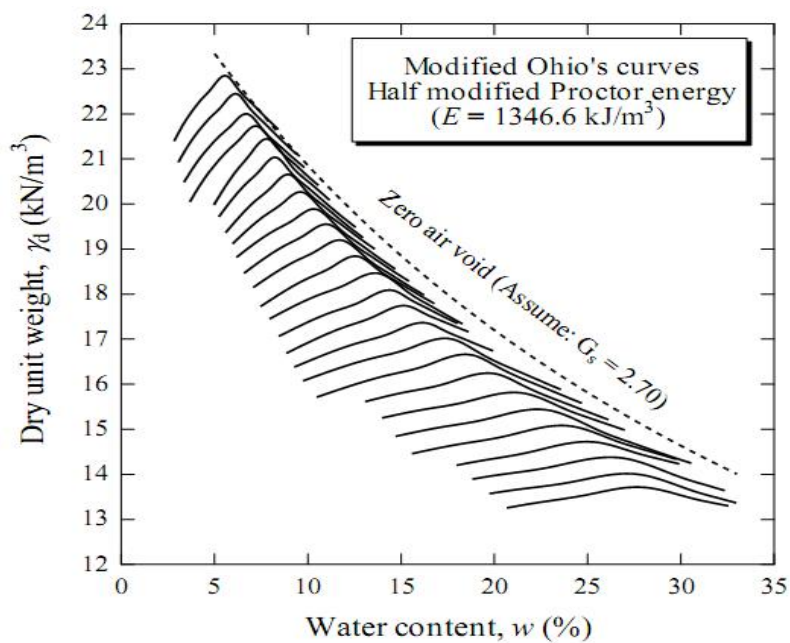
รูปที่ 2.26 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของดินลูกรัง (ข้อมูลจาก Horpibulsuk et al., 2004c) (Horpibulsuk et al., 2009a)



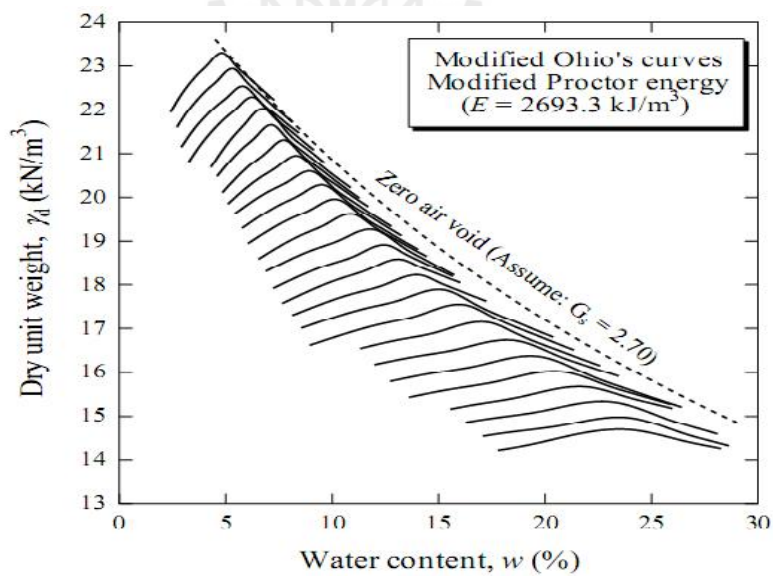
รูปที่ 2.27 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของกรวดปนดินเหนียว (ข้อมูลจาก Ruenkraitersa, 1982) (Horpibulsuk et al., 2009a)



รูปที่ 2.28 กราฟ Ohio ปรับปรุง สำหรับพลังงานการบดอัดเท่ากับ 296.3 กิโลจูล ต่อลูกบาศก์เมตร (Horpibulsuk et al., 2008a)



รูปที่ 2.29 กราฟ Ohio ปรับปรุง สำหรับพลังงานการบดอัดเท่ากับ 1,346.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร (Horpibulsuk et al., 2008a)



รูปที่ 2.30 กราฟ Ohio ปรับปรุง สำหรับพลังงานการบดอัดเท่ากับ 2,693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร (Horpibulsuk et al., 2008a)

2.12 ทฤษฎีค่าซีบีอาร์

การทดสอบหาค่าซีบีอาร์ (California Bearing Ratio , CBR) นั้น ผู้พัฒนาเริ่มแรกในปี ค.ศ. 1920 หรือในช่วงก่อนสงครามโลกครั้งที่ 2 โดย O.J. Porter ในการออกแบบถนนของกรมการขนส่งมลรัฐแคลิฟอร์เนีย สหรัฐอเมริกา (California Department of Transportation) ในปัจจุบันได้กำหนดเป็นมาตรฐานในการทดสอบวัสดุ ได้แก่ ASTMD1883-05 สำหรับวัสดุในห้องปฏิบัติการ และ ASTMD4429 สำหรับวัสดุในสนาม รวมทั้งมาตรฐาน AASHTO T193 ด้วย

CBR test เป็นวิธีการทดสอบวัดแรงเฉือน (Shearing resistance) ของดินที่บดอัดจนแน่น ดีแล้ว (ส่วนมากจะทดสอบที่ Optimum moisture content) โดยการใช้ท่อนเหล็กกลมตัน (Piston) ขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว กดลงบนดินตัวอย่างที่เตรียมไว้ด้วยอัตรา 0.05 นิ้วต่อนาที แล้วนำไปหาอัตราส่วนเปรียบเทียบกับค่า Unit load มาตรฐานที่ได้จากการทดลองกด piston ขนาดเดียวกันนี้บนหินที่ compact แน่นที่ความลึกของ penetration เท่ากัน ค่าที่ได้นี้เรียกว่า “เปอร์เซ็นต์ CBR” เทียบอัตราส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์ของ Standard Unit load เขียนเป็นสมการของอัตราส่วนได้ดังนี้

$$CBR = \frac{\text{Test Unit Load}}{\text{Standard Unit Load}} \times 100 \quad (2.11)$$

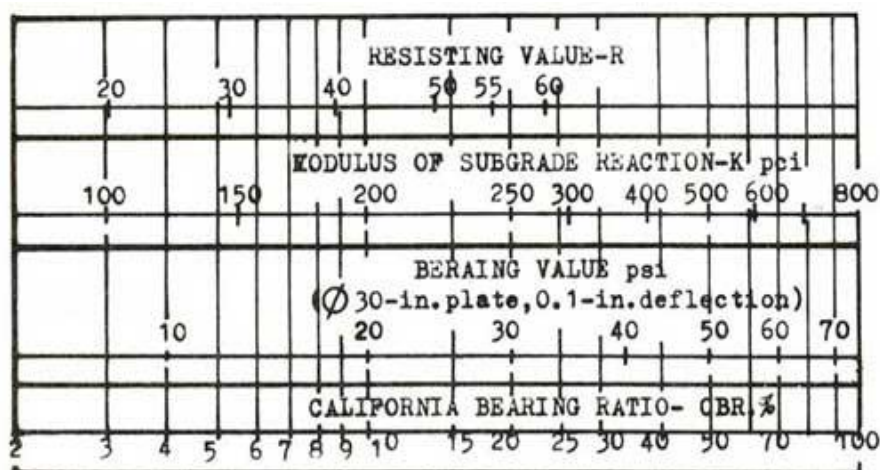
ค่า standard unit load ซึ่งได้จากการทดลองกดท่อนเหล็กกลมตัน (Piston) มีพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว บนหินคลุกมาตรฐานบดอัดแน่นขนาดต่างๆ กันหลายขนาดมีค่ามาตรฐานดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่า standard unit load ที่ความลึกต่างๆ

Penetration (in)	Unit load (Psi)
0.1	1000
0.2	1500
0.3	1900
0.4	2300
0.5	2600

ค่าซีบีอาร์โดยทั่วไปแล้ว จะใช้ค่าอัตราส่วนของแรงกดที่ความลึก 0.1 นิ้ว แต่ถ้าผลปรากฏออกมาว่าซีบีอาร์ ของแรงกดที่ความลึก 0.2 นิ้ว สูงกว่าที่ความลึก 0.1 นิ้ว การทดลองจะต้องกระทำซ้ำอีกครั้ง ซึ่งถ้าค่าซีบีอาร์ที่ได้มายังเป็นไปในรูปเดิม ก็ให้ใช้ค่าซีบีอาร์ที่การยุบตัว 0.2 นิ้ว

ค่าซีบีอาร์ นำมาใช้ประโยชน์ในการออกแบบความหนาของถนนลาดยาง (flexible pavement) โดยการกำหนดความหนาจาก design charts หรืออาจใช้ช่วยในการกำหนดค่า Subgrade Modulus (K) ของดินจากตารางเปรียบเทียบ เพื่อช่วยในการออกแบบถนนคอนกรีตได้อีกด้วย



รูปที่ 2.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CBR, K , R และ Bearing Value

จากค่าซีบีอาร์ของดินแต่ละชนิด ยังสามารถกำหนดคุณสมบัติของดินอย่างคร่าว ๆ ว่าเหมาะที่จะใช้กับงานก่อสร้างถนนในชั้นดินถม (subgrade) ชั้นรองพื้นทาง (subbase) หรือชั้นพื้นทาง (base) ดังตารางที่ 2.2 ข้างล่างนี้

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของซีบีอาร์และการใช้งาน

ซีบีอาร์ (%)	คุณสมบัติเหมาะสมทางวิศวกรรม	การใช้งาน
0 – 3	very poor	subgrade
3 – 7	poor to fair	subgrade
7 – 20	fair	subbase
20 – 50	good	subbase, base
50 – 80	very	good base
> 80	excellent	base

การทดสอบซีบีอาร์ทำได้ทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนาม จากตัวอย่างดินที่บดอัดแน่นตามวิธีการของ Standard หรือ Modified Proctor ดินตัวอย่างที่เตรียมสำหรับทดลองในห้องปฏิบัติการจะต้องเตรียมขึ้น 2 ชุด ชุดหนึ่งใช้กดทดลองหาค่า Penetration ทันทีหลังจากเตรียม

ตัวอย่างเสร็จ อีกชุดหนึ่งจะต้องแช่น้ำไว้ 96 ชั่วโมง เพื่อให้ดินอนน้ำจนอิ่มตัว และเพื่อจุดประสงค์ จะวัดหาอัตรา การบวมตัวของดินด้วย ในระหว่างที่ทำการแช่น้ำอยู่จะต้องมีน้ำหนักวางกดทับบน ดินตัวอย่าง (Surcharge) ไม่น้อยกว่า 10 ปอนด์ หรือเท่ากับน้ำหนักของพื้นทางและผิวจราจร เหตุผล ที่ทำเช่นนี้ ก็เพื่อจะหาค่าซีบีอาร์ที่ควรเกิดขึ้นจริง ๆ ในสนาม กล่าวคือ ในช่วงหน้าฝนระดับน้ำ ใต้ดินจะสูง จนทำให้ดินที่รองรับถนนอยู่อิ่มตัว และอัตราการบวมตัวของดินที่จะมาใช้ในการ ก่อสร้างจะเป็น ค่าหนึ่งซึ่งสามารถบ่งบอกถึงคุณสมบัติ และความเหมาะสมในการใช้งานของวัสดุ นั้น ๆ

2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์ ค่าความแน่นแห้งสูงสุดและอัตราส่วนหน่วย

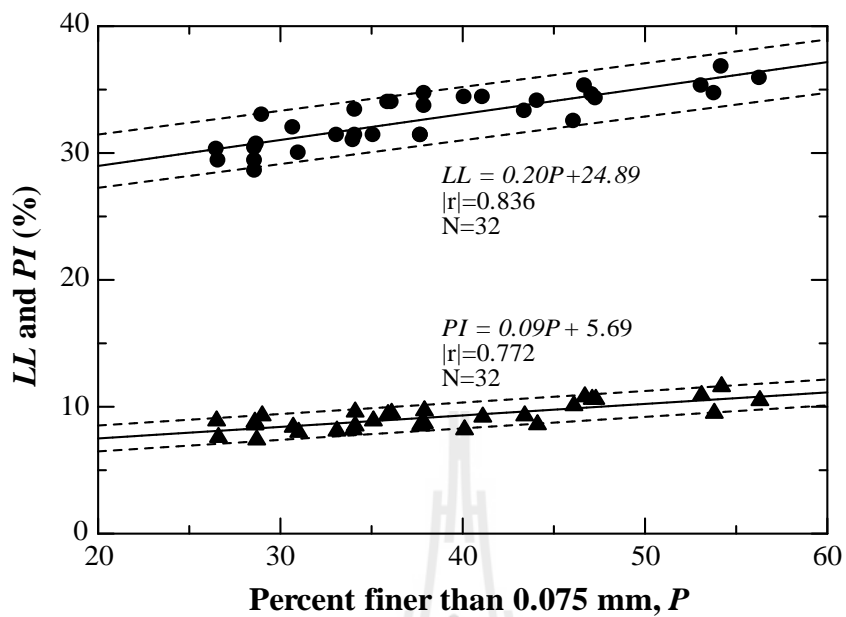
แรงกด

Black (1962) แสดงให้เห็นว่าค่าซีบีอาร์ (*CBR*) มีความสัมพันธ์กับกำลังต้านแรงเฉือนแบบ ไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength, S_u) ตามทฤษฎีกำลังรับแรงแบกทานของดิน (Bearing capacity theory)

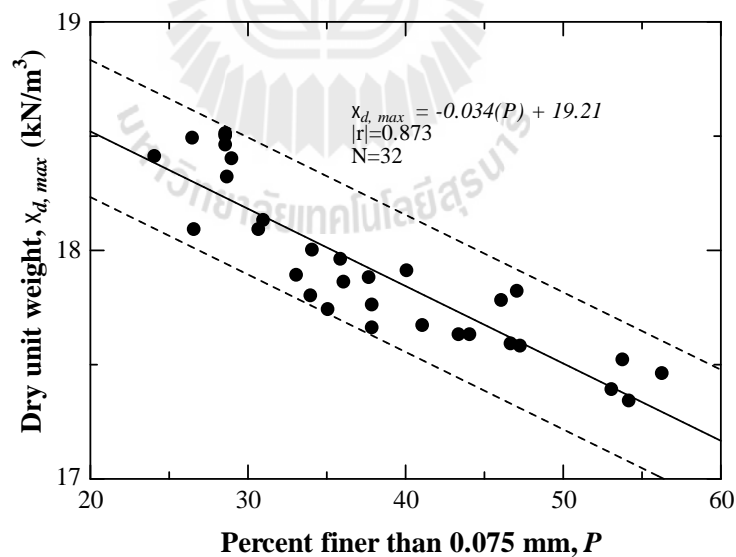
Horpibulsuk et al. (2013) แสดงให้เห็นว่า ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของดินผ่าน ตะแกรงเบอร์ 200 (ขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร) กับขีดจำกัดเหลว (*LL*) ดัชนีพลาสติก (*PI*) ดังแสดงในรูปที่ 2.32 จะมีลักษณะแปรผันตรงมีค่า Degree of correlation สูงถึง 0.806 ซึ่งสามารถ ใช้ขีดเป็นตัวแทนได้ สอดคล้องกับ Ramiah et al. (1970), Pandial et al. (1997) และ Nagaraj et al. (2006) ที่แสดงให้เห็นว่าหน่วยน้ำหนักแห้งของดินเหนียวแปรผันตามขีดจำกัดเหลว ดังนั้น เขาจึง สร้างความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับปริมาณดินเม็ดละเอียด ดังแสดงในรูปที่ 2.33 โดยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงดังนี้

$$Y_{d,max} = -0.0339P + 19.211 \quad (2.12)$$

เมื่อ P คือ ร้อยละของดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200



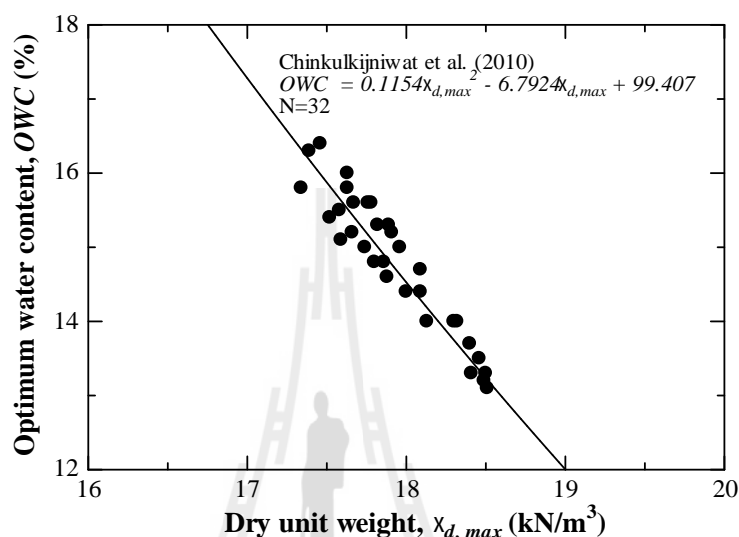
รูปที่ 2.32 ความสัมพันธ์ระหว่างขีดจำกัดเหลว (LL) ดัชนีพลาสติก (PI) กับร้อยละของดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (ขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร)



รูปที่ 2.33 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดกับร้อยละของดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (ขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร)

เมื่อนำสมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับปริมาณดินเม็ดละเอียด

($\gamma_{d,max} = -0.0339P + 19.211$) มาเทียบกับความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด และปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียดบดอัดของ Chinkulkijniwat et al. (2010) พบว่า สามารถใช้ในการทำนายปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินที่รวบรวมได้เป็นอย่างดี ดังแสดงในรูปที่ 2.34

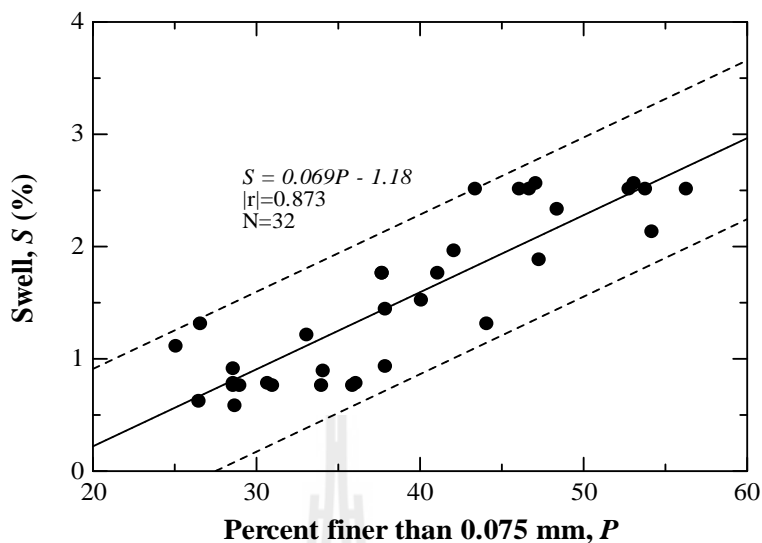


รูปที่ 2.34 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นเหมาะสมกับหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด

สำหรับคุณสมบัติด้านการบวมตัวซึ่งมีความสำคัญในการออกแบบดินคันทางก็สามารถหาความสัมพันธ์กับปริมาณดินเม็ดละเอียด Horpibulsuk et al. (2013) ได้แสดงให้เห็นว่าการบวมตัวของดินเพิ่มขึ้นตามปริมาณร้อยละของดินเม็ดละเอียดที่เพิ่มขึ้น โดยโมเลกุลของน้ำจะเข้าไปแทนที่อออนที่เชื่อมต่อกันระหว่างชั้นซิลิกาและกิบไซต์ในดินเหนียวซึ่งจะไปลดการดันน้ำหนักกดทับในแนวตั้งและด้านแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค (Attractive forces) ทำให้เกิดการบวมตัวในดินเหนียวที่ปนอยู่ในดินคันทางซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการบวมตัว (Swell, S) กับปริมาณดินเม็ดละเอียดในลักษณะของการแปรผันตรง กล่าวคือ เมื่อปริมาณดินเม็ดละเอียดเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ดินมีการบวมตัวเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.35 โดยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงดังสมการที่ 2.13

$$S = 0.0687P + 1.175 \quad (2.13)$$

เมื่อ P คือ ร้อยละของดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200



รูปที่ 2.35 ความสัมพันธ์ระหว่างการบวมตัวกับร้อยละของดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (ขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร)

Siswosoebrotho et al. (2005) ได้แสดงให้เห็นว่าปริมาณส่วนละเอียดที่เพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 4 ขึ้นไป จะทำให้ค่าดัชนีพลาสติก (Plasticity Index, PI) ของดินเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงในทางที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อทำให้ค่าความแน่นแห้งสูงสุด ($Y_{d,max}$) ของดินบดอัดให้ลดลง

เช่นเดียวกับ Patel และ Desai (2010) ได้แสดงให้เห็นว่า ค่าซีบีอาร์ CBR) ซึ่งจะแปรผันตามชนิดของดินนั้น สำหรับกรณีดินเม็ดละเอียด (Fine grained soil) นั้น คุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆ ของดิน เช่น ค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit, LL) และค่าพิกัดพลาสติก (Plastic Limit, PL) มีอิทธิพลน้อยต่อค่า CBR โดยตัวทำนายค่า CBR ที่ดีคือ ค่าดัชนีพลาสติก (Plasticity Index, PI) ซึ่งเขาพบว่า ค่า CBR จะแปรผกผันกับค่า PI

Horpibulsuk et al. (2013) ได้แสดงให้เห็นว่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด สามารถใช้เป็นตัวแปรหลักในการประมาณค่าซีบีอาร์ (CBR) ของดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียดบดอัด โดยค่าซีบีอาร์ในสถานะแช่น้ำ (CBR_{soaked}) จะเพิ่มขึ้นตามหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ($Y_{d,max}$) ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.36 โดยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ดังสมการที่ 2.14

$$CBR_{soaked} = 0.891Y_{d,max} - 11.194 \quad (2.14)$$

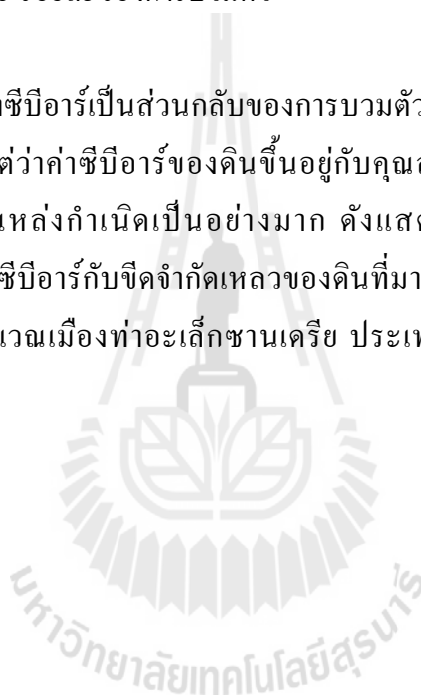
เมื่อ $Y_{d,max}$ คือ หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด

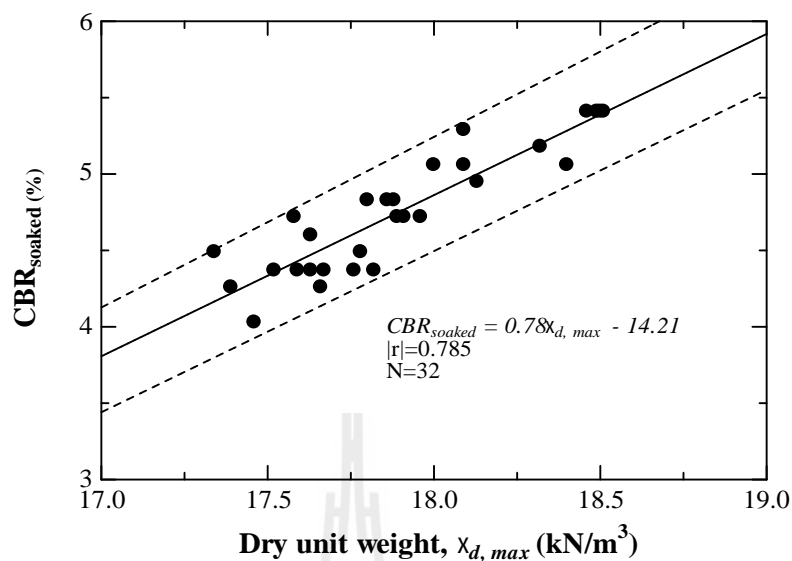
และเนื่องจากค่าซีบีอาร์ในสภาวะแช่น้ำ (CBR_{soaked}) ของดินชนิดหนึ่งๆ มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับกำลังต้านทานแรงเฉือนและมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการด้านการบวมตัวของดินในลักษณะแปรผกผันกัน กล่าวคือ เมื่อดินมีการบวมตัวเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่าซีบีอาร์แบบแช่ น้ำ (CBR_{soaked}) ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.37 โดยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ดังสมการที่ 2.15

$$CBR_{soaked} = -0.3958S + 5.335 \quad (2.15)$$

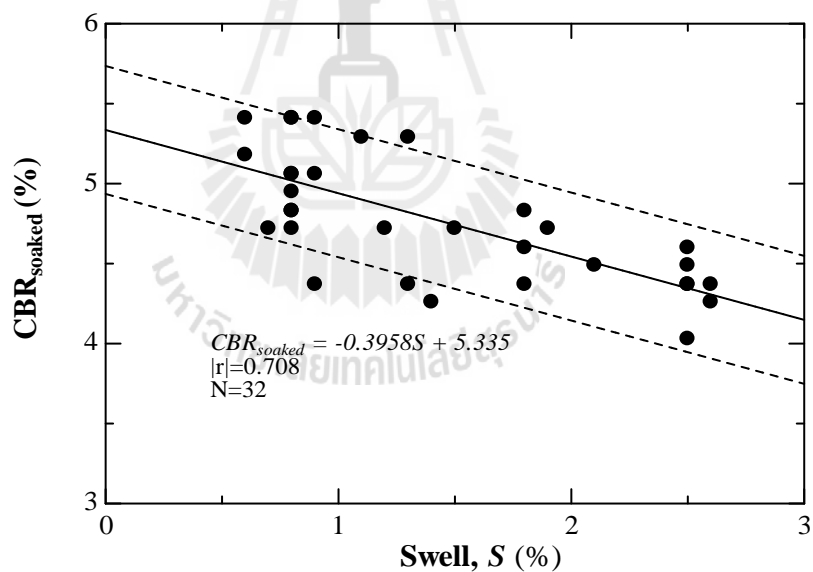
เมื่อ S คือ ร้อยละของการบวมตัว

หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าค่าซีบีอาร์เป็นส่วนกลับของการบวมตัว ถึงแม้ว่าค่าซีบีอาร์จะแปรผันตามขีดจำกัดเหลวของดิน แต่ค่าซีบีอาร์ของดินขึ้นอยู่กับคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินตามแหล่งกำเนิดเป็นอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.38 ซึ่งจะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์กับขีดจำกัดเหลวของดินที่มาจากภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยกับดินที่บริเวณเมืองท่าอะเล็กซานเดรีย ประเทศอียิปต์มีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง

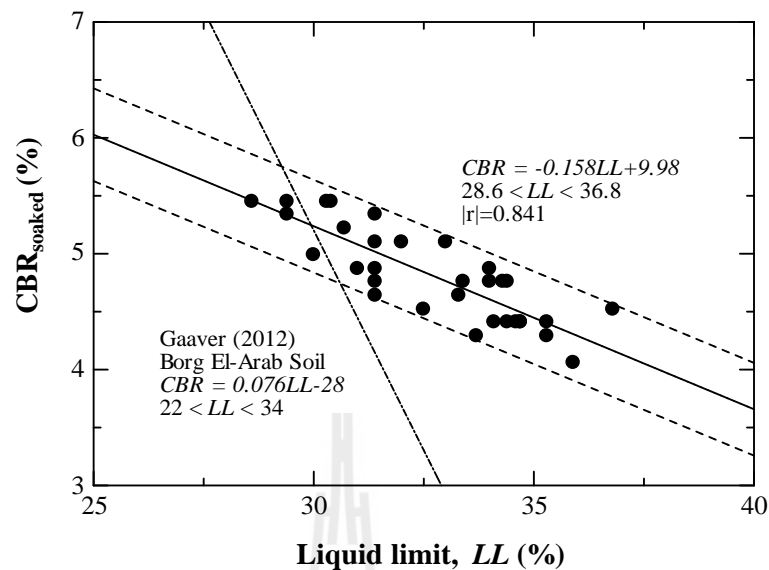




รูปที่ 2.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์ในสถานะแช่น้ำกับหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด



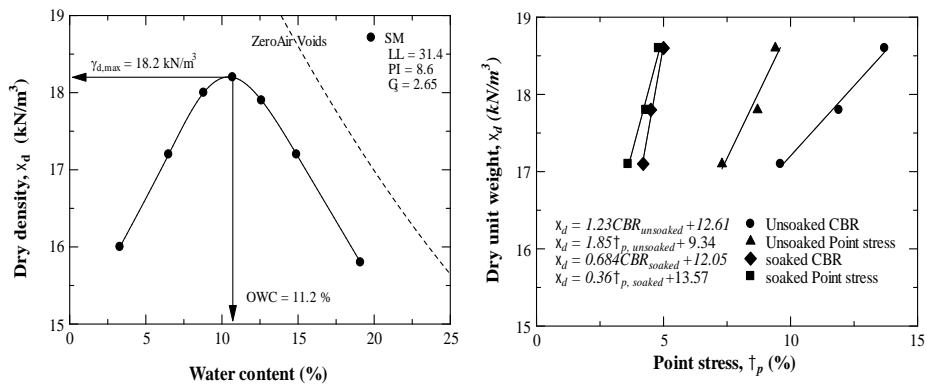
รูปที่ 2.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์ในสถานะแช่น้ำกับการบวมตัว



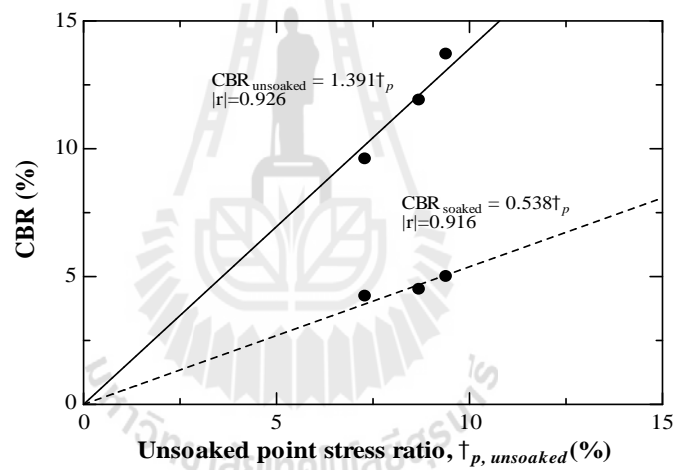
รูปที่ 2.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์ในสถานะแช่น้ำกับขีดจำกัดเหลวของดิน
ที่มาจากแหล่งกำเนิดต่างกัน

Horpibulsuk et al. (2013) ได้แสดงให้เห็นว่า อัตราหน่วยหน่วยแรงกดและค่าซีบีอาร์มีความสัมพันธ์กับหน่วยน้ำหนักแห้งของดิน สามารถประมาณได้ด้วยความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 2.39 โดยความชันของกราฟการเปลี่ยนแปลงหน่วยน้ำหนักแห้งกับอัตราส่วนหน่วยแรงกดและค่าซีบีอาร์ของดินในสถานะไม่แช่น้ำ (Unsoaked Point stress and Unsoaked CBR) มีความชันน้อยกว่าดินที่อยู่ในสถานะแช่น้ำ (Soaked Point stress and Soaked CBR) อย่างชัดเจน โดยรูปที่ 2.40 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าค่า $CBR_{unsoaked}$ มีค่าประมาณ 2.6 เท่า (1.39/0.539) ของค่า CBR_{soaked} สำหรับทุกหน่วยน้ำหนักที่เท่ากัน และในรูปที่ 2.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนหน่วยแรงกดและพลังงานการบดอัดในฟังก์ชันล็อกการิทึม ซึ่งความสัมพันธ์ทั้งหมด ที่กล่าวมานี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการประมาณค่าหน่วยน้ำหนักแห้งและค่าซีบีอาร์ในสนาม

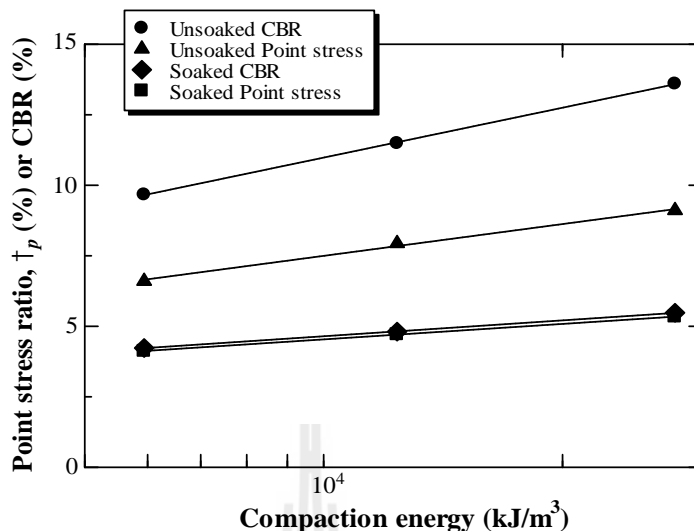
Patel และ Desai (2010) ได้แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนค่าซีบีอาร์แบบแช่น้ำต่อซีบีอาร์แบบไม่แช่น้ำ ($CBR_{soaked} / CBR_{unsoaked}$) ของดินเม็ดละเอียดมีค่าเท่ากับ 0.50 โดยประมาณ หรือประมาณ 2.0 เท่า



รูปที่ 2.39 เส้นโค้งบดอัดแบบมาตรฐานและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งของดินกับหน่วยแรงกดและค่าซีบีอาร์ในสถานะแช่น้ำและไม่แช่น้ำ



รูปที่ 2.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์ในสถานะแช่น้ำและไม่แช่น้ำกับอัตราส่วนหน่วยแรงกดในสถานะไม่แช่น้ำและปราศจากแรงกดทับ



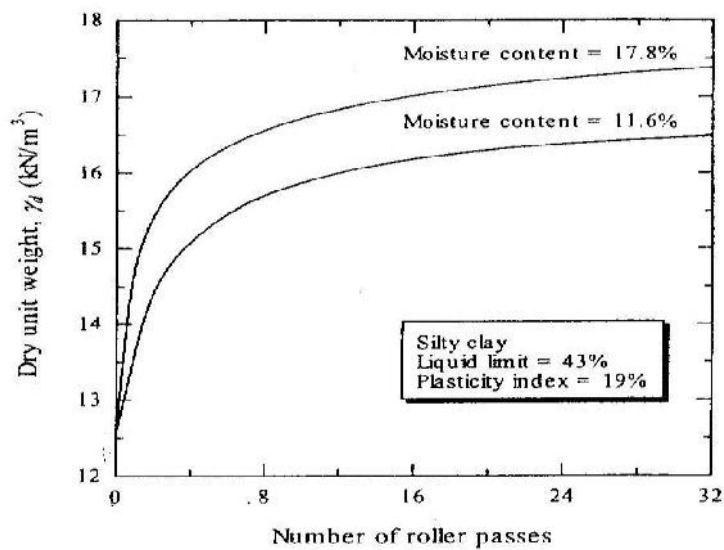
รูปที่ 2.41 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงกดและพลังงานการบดอัดของดินคันทาง ในสภาวะแช่น้ำและไม่แช่น้ำ

2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นการบดอัดกับจำนวนรอบของรถบดอัดในสนาม

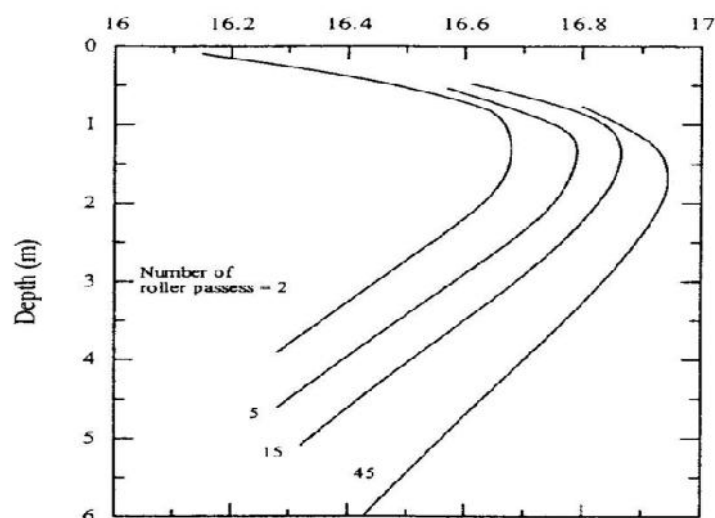
ในการบดอัดดินในสนาม นอกจากชนิดของดินและปริมาณความชื้นแล้วยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการบดอัดในสนามอีก ได้แก่ ความหนาของชั้นดินที่ทำการบดอัด (lift) ความเข้มข้นของความดันจากเครื่องบดอัดและพื้นที่สัมผัสระหว่างล้อกับดิน เนื่องจากความดันล้อรถบดอัดที่กระทำที่ผิวดินจะลดลงตามความลึก ส่งผลให้เกิดการลดลงของระดับการบดอัด (degree of compaction) นอกจากนี้ ความหนาแน่นแห้งของดินยังแปรผันกับจำนวนรอบที่รถบดอัดวิ่งผ่าน รูปที่ 2.42a แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับจำนวนรอบที่รถบดอัดวิ่งผ่านของดินเหนียวปนดินตะกอนที่ปริมาณความชื้นค่าหนึ่งความหนาแน่นแห้งจะเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนรอบที่รถบดอัดวิ่งผ่าน จนถึงค่าหนึ่งแล้วจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ถึงแม้ว่าจำนวนรอบที่บดอัดจะเพิ่มขึ้นโดยทั่วไป จำนวนรอบที่เท่ากับ 10 ถึง 15 รอบจะให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด

รูปที่ 2.42b แสดงการเปลี่ยนแปลงของหน่วยน้ำหนักแห้งกับความลึกสำหรับทรายที่มีขนาดละเอียด การบดอัดกระทำโดยใช้รถบดอัดดินแกละแบบสันสะเทือน น้ำหนักของรถบดอัดเท่ากับ 55.6 กิโลนิวตันและเส้นผ่านศูนย์กลางของดินแกละเท่ากับ 1.19 เมตร ความหนาของชั้นบดอัดเท่ากับ 2.44 เมตร ตระหนักว่าที่ความลึกใดๆ ความหนาแน่นแห้งของการบดอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบของการวิ่งผ่านของรถบดอัด แต่อย่างไรก็ตาม อัตราการเพิ่มขึ้นจะมีค่าลดลงหลังจากจำนวนรอบที่ 15 ความจริงอีกประการหนึ่งที่ค้นพบจากรูปที่ 2.42b คือ ความหนาแน่น

แห้งมี ค่ามากที่สุดที่ความลึกประมาณ 0.5 เมตรและค่อยๆ มีค่าน้อยลงตามความลึก เนื่องจาก การลดลงของความเค้นตามความลึกทันทีที่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกับความหนาแน่นสัมพัทธ์(หรือความหนาแน่นแห้ง) สำหรับดินชนิดหนึ่งๆที่จำนวนรอบที่รถอัดวิ่งผ่านค่าหนึ่งเราสามารถประมาณความหนาของการบดอัดแต่ละชั้นได้ วิธีการนี้แสดงในรูปที่ 2.43 (D'Appolonia et al., 1969)

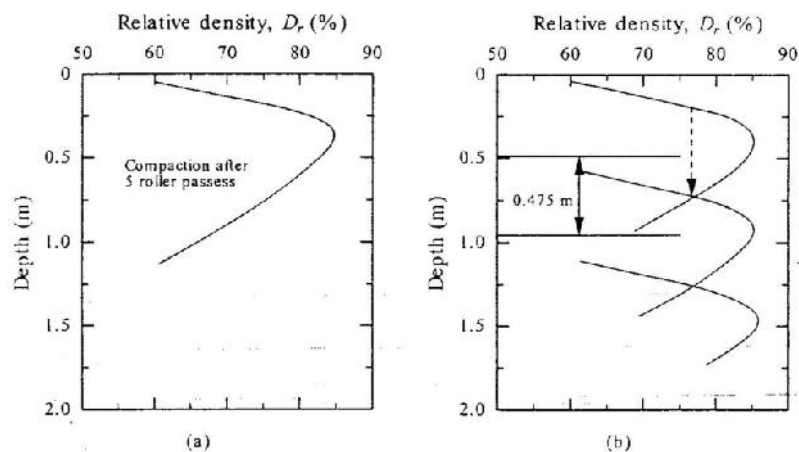


รูปที่ 2.42a) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและจำนวนรอบของรถอัดที่วิ่งผ่าน (Johnson and Sallberg, 1960)



รูปที่ 2.42b) ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกับหน่วยน้ำหนักแห้งตามจำนวนรอบ

ที่รตบดอัดวีงผ่าน (D'Appolonia et al., 1969)



รูปที่ 2.43 การประมาณความหนาของระดับชั้นของดินสำหรับความหนาแน่นสัมพัทธ์ 75%
กับจำนวนรอบของรถบดอัดที่วิ่งผ่านเท่ากับ 5 รอบ

Horpibulsuk et al. (2013) แสดงให้เห็นว่า ความแน่นแข็งของดินบดอัดในสนามมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในจำนวนเที่ยววิ่ง (จำนวนรอบที่วิ่งผ่าน) ที่ 6 ถึง 11 หลังจากนั้น ความแน่นแข็งในสนามจะเริ่มคงที่ ถึงแม้จะมีการเพิ่มจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัดก็ตาม แสดงในรูปที่ 2.44a และรูปที่ 2.44b แสดงให้เห็นว่า ความแน่นแข็งที่วัดได้ในสนามที่จำนวนรอบที่ 11 ขึ้นไป มีค่าใกล้เคียงกับความแน่นแข็งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ สาเหตุที่หน่วยน้ำหนักแห้งไม่เพิ่มขึ้นอีก ถึงแม้จะเพิ่มพลังงานการบดอัดมากขึ้น (เพิ่มจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด) เนื่องจากระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่สภาวะนี้ใกล้เคียงกับหน่วยน้ำหนักแห้งในสภาวะไม่มีอากาศในโพรงดิน (Zero air void) สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างการบดอัดสัมพัทธ์ (Relative compaction, $\gamma_{df}/\gamma_{d, max}$) กับจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด ด้วยฟังก์ชันเชิงลอการิทึม ดังนี้

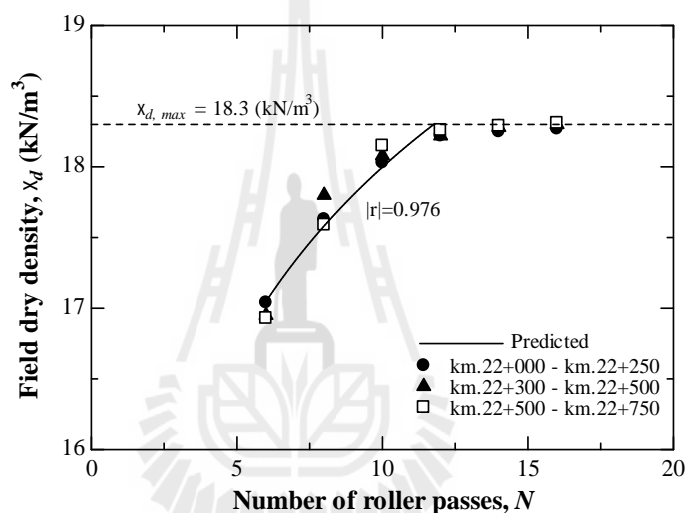
$$\frac{\gamma_{df}}{\gamma_{d, max}} = a + b \ln N \quad (2.16)$$

เมื่อ γ_{df} คือ หน่วยน้ำหนักแห้งของดินบดอัดในสนาม a และ b เป็นค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 74.85 และ 10.81 ตามลำดับซึ่งใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ Horpibulsuk et al. (2013) ที่ได้ค่า a และ b มีค่าเท่ากับ 75.92 และ 9.61 ตามลำดับ และ N คือ จำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัดซึ่งจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัดที่เหมาะสม สามารถประมาณได้จากการแทนค่าให้ $\gamma_{df}/\gamma_{d, max}$

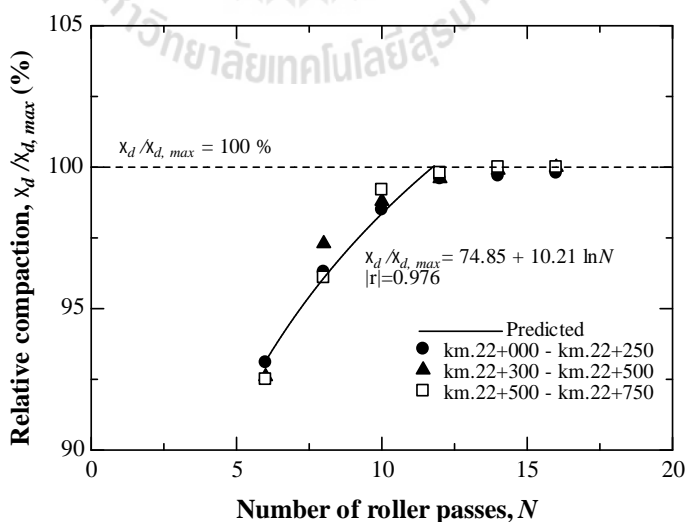
เท่ากับ 100 และรูปที่ 2.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์ในสถานะไม่แช่น้ำกับจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด ซึ่งค่าซีบีอาร์จะเริ่มคงที่ที่จำนวนเที่ยววิ่งที่ 11 โดยจะไม่เพิ่มขึ้นตามจำนวนเที่ยววิ่งอีกเช่นเดียวกัน ประมาณได้จากสมการ ดังนี้

$$CBR_{soaked} = 0.538\sigma_p \tag{2.17}$$

เมื่อ CBR_{soaked} คือ ค่าซีบีอาร์ในสถานะแช่น้ำ และ σ_p คือ อัตราส่วนหน่วยแรงกด



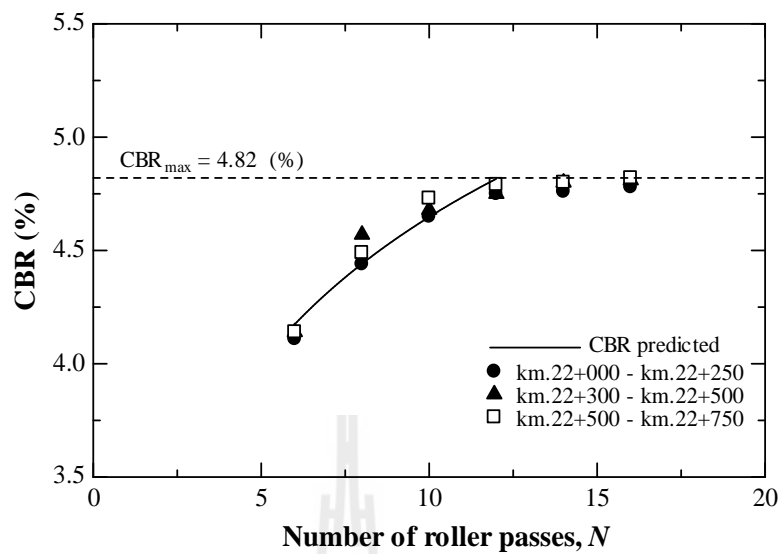
(a)



(b)

รูปที่ 2.44 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นแห้งในสนามกับจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างการบดอัดสัมพัทธ์กับจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด



รูปที่ 2.45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์ในสถานะแช่น้ำในสนามกับจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด

บทที่ 3

วิธีดำเนินการทำโครงการ

3.1 แผนงานดำเนินการ

งานวิจัยนี้แยกออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งเป็นการหาแนวทางในการบูรณาการการควบคุมคุณภาพการบดอัดแบบเดิม ร่วมกับแนวทางใหม่ที่เสนอขึ้น เพื่อให้เกิดความสะดวก รวดเร็ว และประหยัดงบประมาณในการควบคุมคุณภาพงาน โดยจะทำการรวบรวมเอกสารงานวิจัย ที่เกี่ยวข้อง เลือกวิธีทดสอบที่สามารถเชื่อมโยงค่าที่อ่านได้กับค่าความหนาแน่นแห้งในสนาม เมื่อได้ข้อสรุปแล้ว จึงจะทำการออกแบบชุดทดสอบดังกล่าว แล้วทำการสอบเทียบชุดทดสอบดังกล่าว หลังจากนั้น จะทำการตรวจสอบความถูกต้องของค่าที่อ่านได้จากชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้น เทียบกับค่าที่อ่านได้โดยวิธีมาตรฐาน เมื่อผลการตรวจสอบเป็นที่ยอมรับได้ ก็จะนำเสนอผ่านการประชาสัมพันธ์เพื่อให้เกิดการใช้งานจริงในภาคสนาม

งานส่วนที่สองจะเป็นการทำนายค่าซีบีอาร์และค่าความหนาแน่นแห้งตามที่ต้องการ โดยจะทำการศึกษาผ่านวรรณกรรมวิจารณ์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากนั้นจะทำการเก็บรวบรวมข้อมูลภาคสนาม พร้อมกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำมาวิเคราะห์ และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เชื่อมโยงสู่การประมาณจำนวนรอบวิ่งของรถบดอัดได้อย่างแม่นยำ แล้วทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

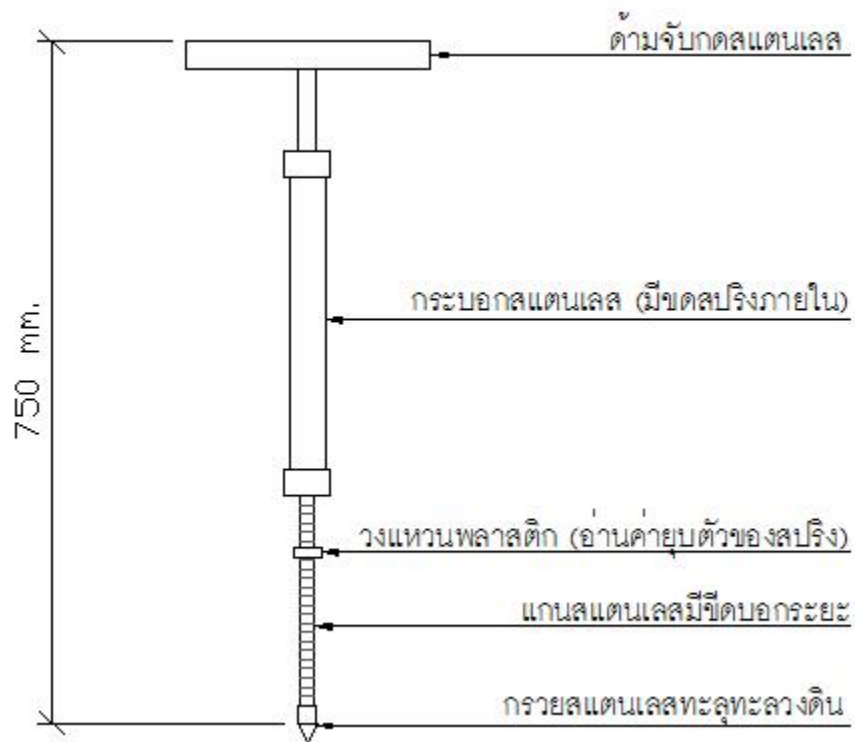
การหาแนวทางในการบูรณาการการควบคุมคุณภาพของการบดอัดดินแบบเดิมกับการควบคุมคุณภาพการบดอัดดินที่จะเสนอขึ้นมาในงานวิจัยนี้ มีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

3.2.1 การพัฒนาชุดทดสอบกำลังดินบดอัด

1) รวบรวมเอกสารงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อพัฒนาชุดทดสอบขึ้นมาใหม่สำหรับทดสอบหากำลังดินบดอัดที่สามารถเชื่อมโยงค่าที่อ่านได้กับค่าความหนาแน่นแห้งในสนาม

2) พัฒนาชุดทดสอบขึ้นมาใหม่ในการทดสอบค่ากำลังดินบดอัด เป็นการวัดค่าหน่วยแรงกดคือ ค่าระหว่างแรงกดที่ระยะจม 20 มิลลิเมตร กับค่าซีบีอาร์มาตรฐาน

ชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้นมาใหม่นี้ เรียกว่า ทดสอบการทะลุทะลวงดินแบบพกพา





วันที่

เรื่อง

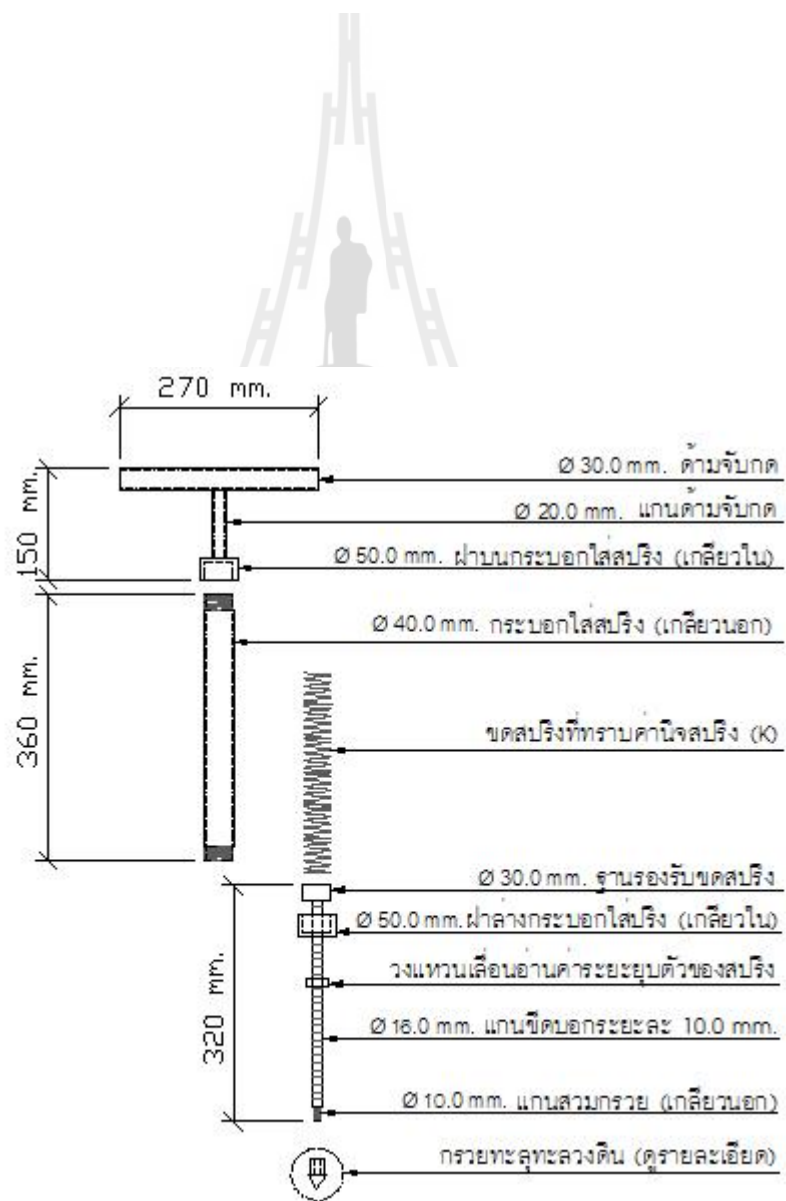
K) 1

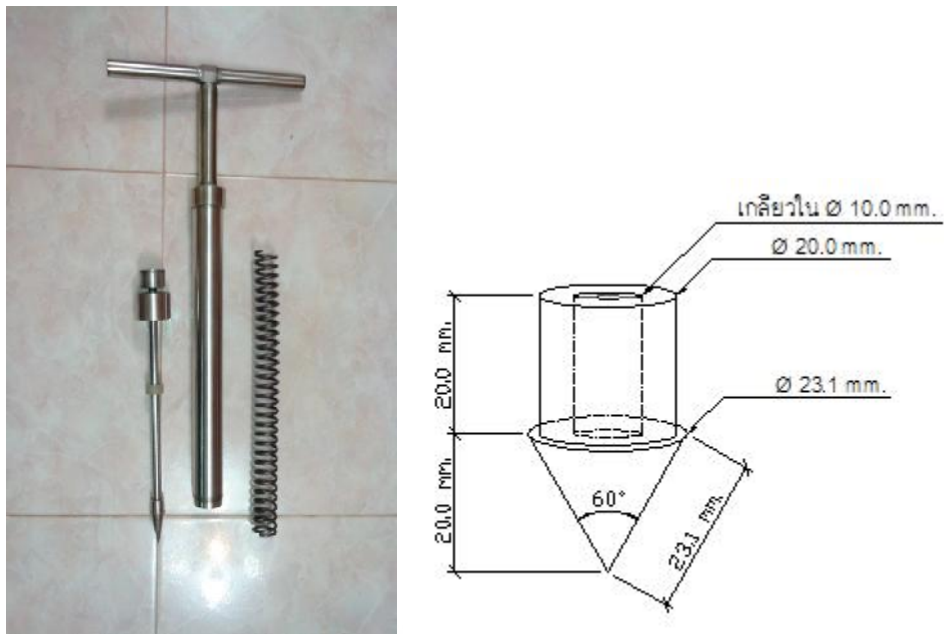
.

1111

ทศ

K)





รูปที่ 3.2 รายละเอียดส่วนประกอบของชุดทดสอบ Portable Cone Penetrometer, PCP

3) นำชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้นนี้ ไปทดสอบหาค่ากำลังดินบดอัดของตัวอย่างดินคันทางในห้องปฏิบัติการที่เรียกว่า PCP test ซึ่งเป็นการวัดระยะการหดตัวของสปริง (หน่วยเป็นเซนติเมตร) ที่ระยะกรวยจมลงดินเท่ากับ 2.0 เซนติเมตร หรือ 20 มิลลิเมตร โดยทำการทดสอบจำนวน 3 จุดต่อตัวอย่าง และจะใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบทั้งสามจุดไปใช้งานต่อไป



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งการทำ PCP test ใน โมลดินบดอัด

วิธีการใช้งานชุดทดสอบ

1. ก่อนทำการทดสอบด้วย Portable Cone Penetrometer หรือ PCP ให้เลื่อนวงแหวนพลาสติกสำหรับอ่านค่าระยะยุบตัวของสปริงมาให้ติดกับปลายกระบอกกลวง เป็นการตั้งค่าระยะศูนย์ (Set 0)

2. นำชุดทดสอบไปทดสอบดินชั้นทางบดอัด (Compacted Sub-grade Soil) โดยใช้มือทั้งสองข้างจับที่ด้ามจับของชุดทดสอบ PCP วางปลายแหลมของกรวยทะลุทะลวงดิน (PCP Cone) ตรงตำแหน่งที่ต้องการทดสอบ แล้วค่อยๆ ออกแรงกดด้ามชุดทดสอบ PCP ด้วยความเร็วสม่ำเสมอ แรงมือกดจะไปดันสปริงในกระบอกกลวงให้ยุบตัวลงซึ่งจะถ่ายแรงกดไปที่ PCP Cone ให้ทะลุทะลวงจมลงไปในดินบดอัด เมื่อได้ระยะจมที่ 20 มิลลิเมตร (จม PCP Cone พอดี) ให้หยุดกด แล้วดึงชุดทดสอบออกจากดินที่ทำกรทดสอบ

3. อ่านค่าระยะยุบตัวของสปริง (ค่า PCP) หน่วยเป็นเซนติเมตร (cm) คือ ระยะที่วงแหวนพลาสติกเลื่อนไปจากตำแหน่งเดิมที่ตั้งไว้ (set 0) แล้วจดบันทึกไว้

4. ทำการทดสอบซ้ำตามข้อ 1 ถึง ข้อ 4 ประมาณ 3-5 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่าง โดยตำแหน่งที่ทดสอบควรห่างจากจุดเดิมอย่างน้อย 5 เซนติเมตร หรือให้มากกว่า 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางส่วนที่โตที่สุดของ PCP Cone (Dia. PCP Cone = 23.1 มิลลิเมตร) แล้วหาค่าเฉลี่ยของค่า PCP เพื่อนำไปใช้คำนวณต่อไป

5. ทำการแปลงค่าระยะยุบตัวของสปริงหรือค่า PCP ที่คำนวณได้จากข้อ 4 เป็นค่าแรงกด (PCPF) มีหน่วยเป็นนิวตัน (N) โดยการคูณด้วยค่านิจสปริง (K) ของสปริงในชุดทดสอบด้วยสมการดังนี้

$$PCPF = K \cdot (PCP) \quad (3.1)$$

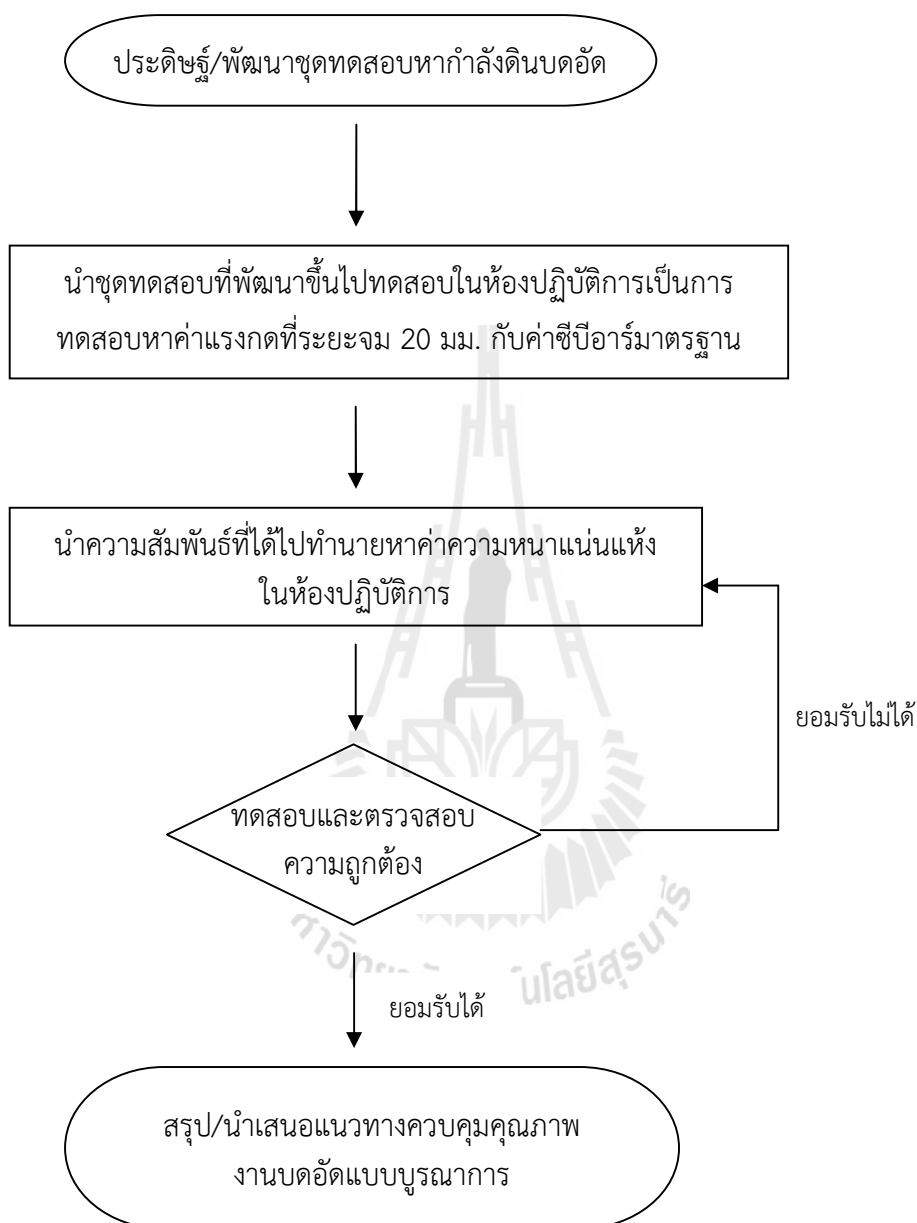
เมื่อ PCPF คือ ค่าแรงกดบนด้ามจับของชุดทดสอบ PCP มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)

K คือ ค่านิจสปริงในชุดทดสอบ PCP มีหน่วยเป็นนิวตัน/เซนติเมตร (N/cm) โดยการศึกษาครั้งนี้ค่า $K = 27.72 \text{ N/cm}$

PCP คือ ค่าเฉลี่ยของระยะยุบตัวของสปริงที่อ่านได้จากวงแหวนพลาสติกที่เลื่อนไปจากระยะเดิมของชุดทดสอบ PCP มีหน่วยเป็นเซนติเมตร (cm)

4) หาความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบด้วยชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ (ค่า PCP test) กับค่า Unsoaked CBR มาตรฐานของดินชั้นทางบดอัดในห้องปฏิบัติการ และค่าตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติพื้นฐานของดินบดอัด

5) สรุปผลการประดิษฐ์และพัฒนาชุดทดสอบกำลังดินที่พัฒนาขึ้นมาใหม่



รูปที่ 3.4 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานพัฒนาชุดทดสอบกำลังดินบดอัด

3.2.2 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การบดอัดดิน

1) ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องและรวบรวมข้อมูลปฐมภูมิย้อนหลังจากแหล่งต่างๆของศูนย์สร้างทางขอนแก่น กรมทางหลวง จำนวน 32 โครงการซึ่งข้อมูลดินตัวอย่างที่รวบรวมมา

คุณสมบัติพื้นฐานแตกต่างกันดังนี้

- ชนิดของดินเป็น SM จำนวน 13 ตัวอย่าง, SC จำนวน 15 ตัวอย่าง และ ML จำนวน 4 ตัวอย่าง

- ค่าร้อยละของดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ระหว่างร้อยละ 28.7 ถึง 53.1

- ค่าขีดจำกัดเหลว ระหว่างร้อยละ 30.7 ถึง 35.3

- ค่าดัชนีพลาสติก ระหว่างร้อยละ 7.4 ถึง 10.9

- ค่าปริมาณน้ำเหมาะสม ระหว่างร้อยละ 13.1 ถึง 16.0

- ค่าความแน่นแห้งสูงสุด ระหว่าง 1.79 ถึง 1.89 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

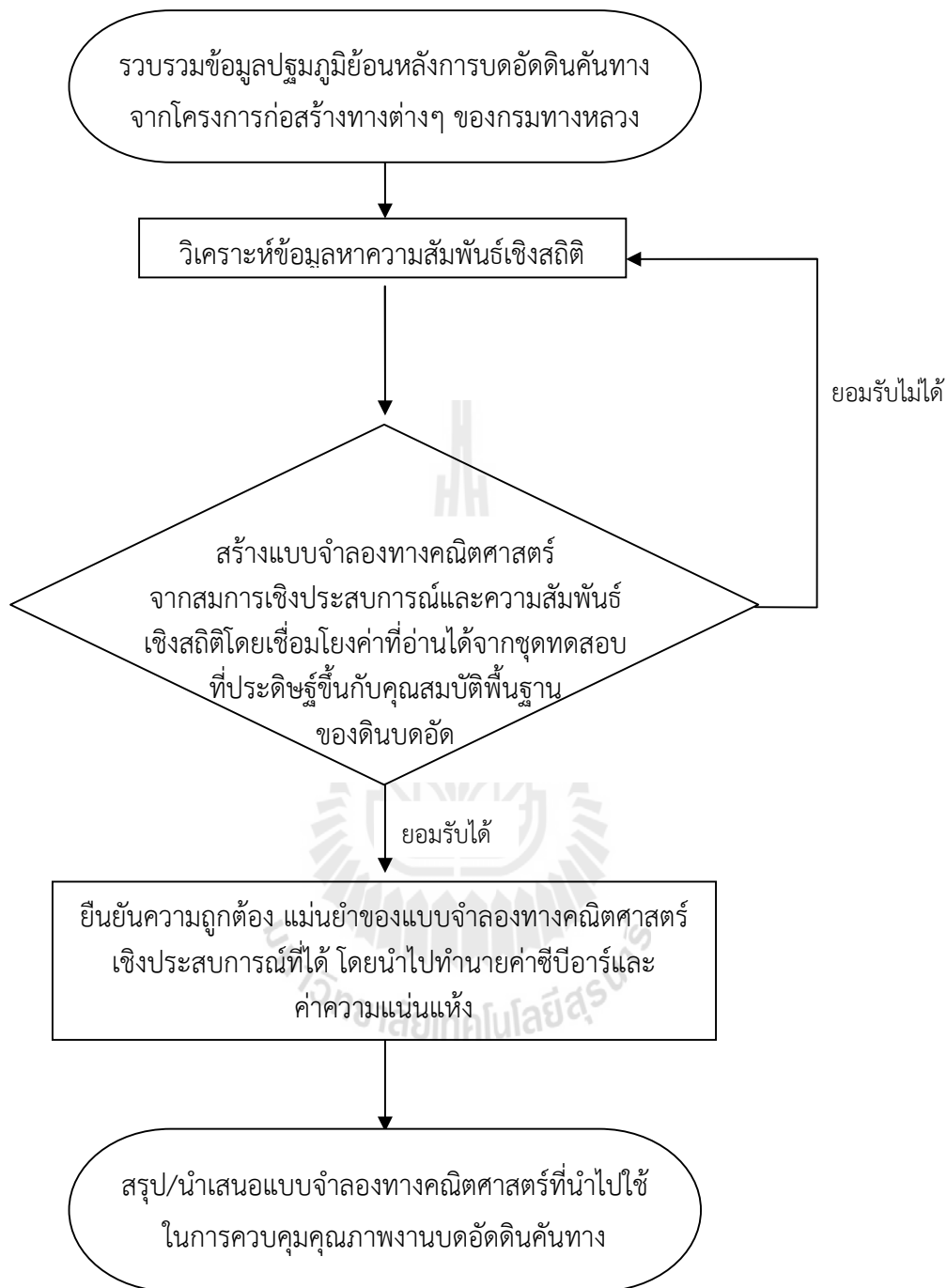
(g/cm³)

- ค่าซีบีอาร์แบบแช่น้ำ (CBR_{soaked}) ระหว่างร้อยละ 4.37 ถึง 5.41

2) วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของข้อมูลที่รวบรวมได้ด้วยสถิติวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ได้สมการความสัมพันธ์เชิงประสพการณ์ สำหรับการทำนายค่าซีบีอาร์และค่าความแน่นแห้งของดินในสนาม

3) ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น โดยนำค่าที่ทำนายได้ไปเทียบกับผลการทดสอบความแน่นแห้งและค่าซีบีอาร์ ในลักษณะเดียวกัน

4) สรุปผลการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การบดอัดดินในสนาม



รูปที่ 3.5 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายผล
ค่าซีบีอาร์และค่าความแน่นแห้งของดินบดอัด

3.3 การเตรียมวัสดุที่ใช้ทดสอบ

ดินตัวอย่างที่นำมาใช้ทดสอบประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ดินชั้นทาง (Subgrade soil) ซึ่งเป็นดินตัวอย่างหลักกับส่วนละเอียดที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (Fine content) ซึ่งเป็นส่วนจะที่ใช้ผสมเพิ่มเข้าไปในสัดส่วนที่กำหนด เพื่อให้ได้ชนิดของดินชั้นทางที่แตกต่างกัน โดยคุณสมบัติทางกายภาพของดินตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ชนิดและคุณสมบัติทางกายภาพของดินที่นำมาศึกษา

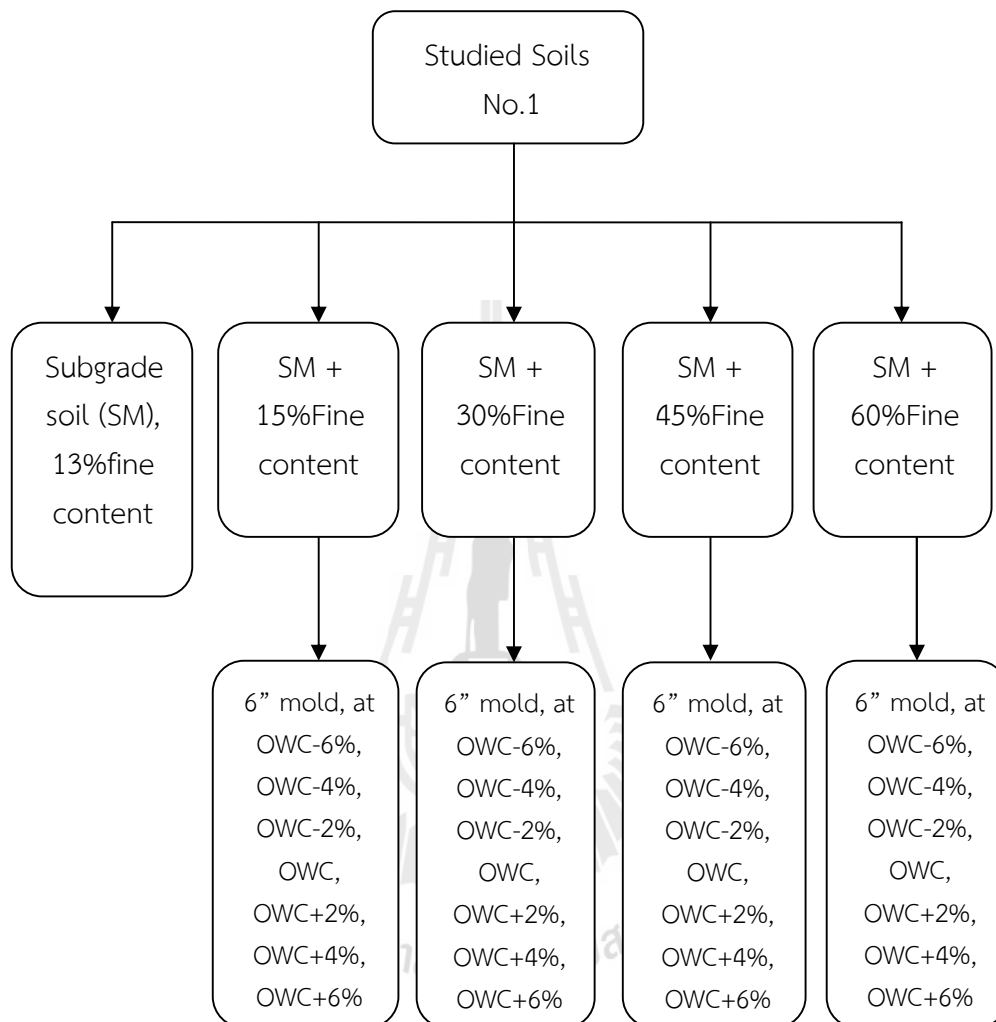
คุณสมบัติของดิน	ดินชั้นทาง	ส่วนละเอียด
ดินตัวอย่างชุดที่ 1		
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity, G_s)	2.67	2.72
ขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit, LL)	9.2	52.3
ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit, PL)	3.3	32.5
จำแนกชนิดดินด้วยวิธี USCS.	SM	CH
Sieve analysis (%Passing)		
1/2 นิ้ว	100.0	-
3/8 นิ้ว	89.5	-
#4	86.7	-
#10	79.7	-
#40	67.2	-
#100	20.2	-
#200	13.1	100.0
Standard Compaction Test (mold 6 นิ้ว)		
ความแน่นแห้งสูงสุด (γ_d, max), (g/cm ³)	1.95	-
ปริมาณความชื้นเหมาะสม (OWC , %)	11.07	-
CBR test		
Soaked CBR (%)	6.9	-
Unsoaked CBR (%)	16.8	-
Swell (%)	0.1	-

ตารางที่ 3.1 ชนิดและคุณสมบัติทางกายภาพของดินที่นำมาศึกษา (ต่อ)

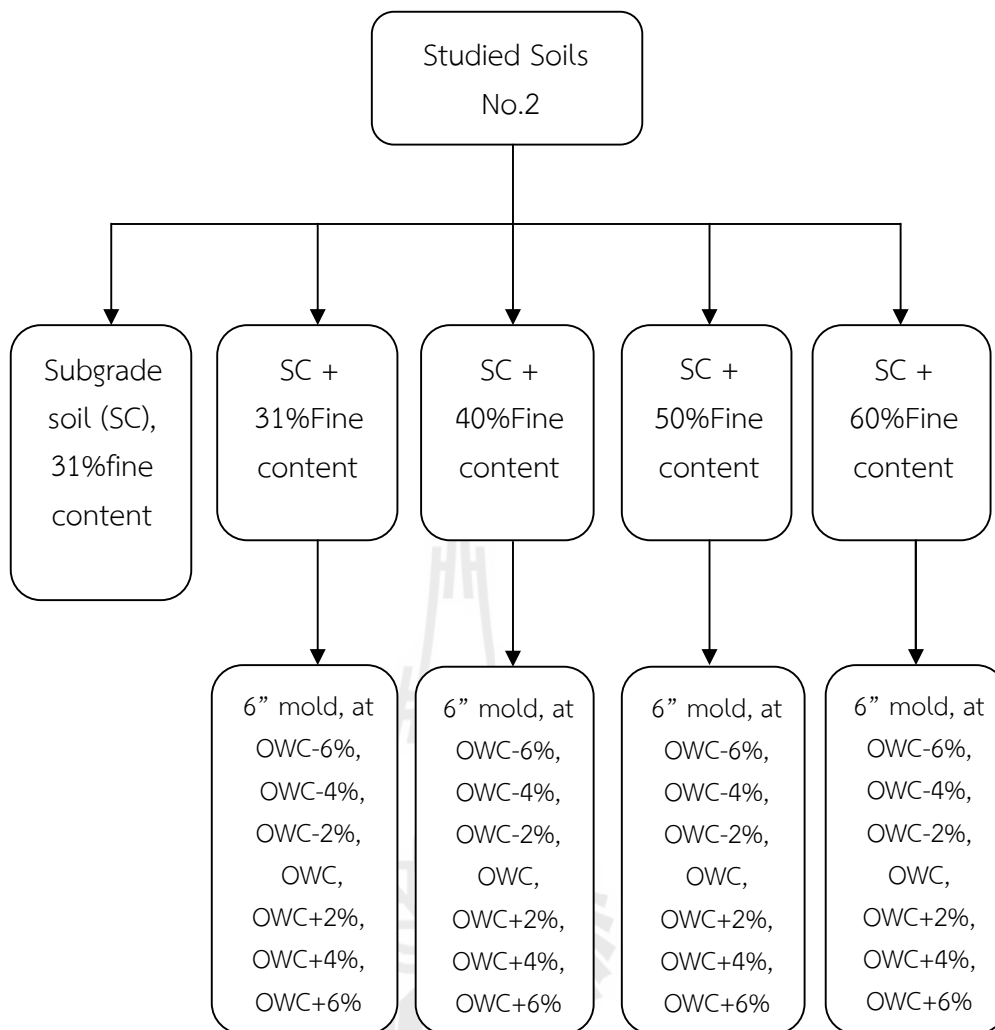
คุณสมบัติของดิน	ดินคันทาง	ส่วนละเอียด
<u>ดินตัวอย่างชุดที่ 2</u>		
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity, G_s)	2.68	2.71
ขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit, LL)	16.3	51.7
ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit, PL)	9.8	27.4
จำแนกชนิดดินด้วยวิธี USCS.	SC	CH
Sieve analysis (%Passing)		
1/2 นิ้ว	100.0	-
3/8 นิ้ว	98.8	-
#4	95.9	-
#10	90.3	-
#40	68.7	-
#100	32.3	-
#200	25.9	100.0
Standard Compaction Test (mold 6 นิ้ว)		
ความแน่นแห้งสูงสุด (γ_d, max), (g/cm^3)	1.88	-
ปริมาณความชื้นเหมาะสม (OWC , %)	14.09	-
CBR test		
Soaked CBR (%)	6.3	-
Unsoaked CBR (%)	15.5	-
Swell (%)	0.2	-

สำหรับการบดอัดดินตัวอย่าง เพื่อนำไปทดสอบหาค่าแรงกดด้วยชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้นมาใหม่และทดสอบเทียบกับหาค่าซีปี่อาร์มาตรฐาน (ASTM Standards D1883-05) นั้น จะเตรียมตัวอย่างดินคันทาง แล้วใส่ดินส่วนละเอียดผสมเพิ่มเข้าไปและบดอัดด้วยวิธีมาตรฐาน (Standard proctor test) ในโมลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ที่ปริมาณความชื้นระหว่าง $OWC \pm 6\%$ (เพื่อให้

ครอบคลุมมาตรฐานของกรมทางหลวงที่กำหนดไว้คือ ระหว่าง $OWC \pm 3\%$) รายละเอียดการเตรียม ดินตัวอย่างสำหรับการบดอัด ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และ 3.3



รูปที่ 3.6 ผังรายละเอียดส่วนผสมของดินตัวอย่างชุดที่ 1 ที่นำมาบดอัด



รูปที่ 3.7 แผนผังรายละเอียดส่วนผสมของดินตัวอย่างชุดที่ 2 ที่นำมาบดอัด

บทที่ 4

ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

บทนี้วิเคราะห์ผลการทดสอบกำลังของดินชั้นทาง (Subgrade Soil) บดอัดแน่นแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) ด้วยชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ที่เรียกว่า Portable Cone Penetrometer test หรือ PCP test กับค่า California Bearing Ratio หรือ CBR มาตรฐานแบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked) และแบบแช่น้ำ (soaked) ในห้องปฏิบัติการ โดยตัวอย่างดินชั้นทาง (Silty Sand, SM) ได้เพิ่มส่วนผสมที่เป็นดินส่วนละเอียดร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (Fine content) ในปริมาณต่างๆ กัน สูงสุดไม่ให้เกินร้อยละ 60 และกำหนดปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum Water Content, OWC) ที่ OWC-6%, OWC-4%, OWC-2%, OWC, OWC+2%, OWC+4%, OWC+6% จำนวน 2 ชุดตัวอย่าง ผลการทดสอบด้วย PCP test ของดินทั้งสองชุดตัวอย่างจะนำมาสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์กับค่า CBR และค่าความแน่นแห้ง (Dry density, γ_d) ผลทำนายที่ได้ข้อมูลที่ได้จะนำไปสู่การควบคุมคุณภาพการบดอัดดินชั้นทาง

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบ PCP test กับดินชั้นทางผสมส่วนละเอียดบดอัดแน่นชุดที่ 1

No.	Fine content (%)	บ PCP test ที่ดิน		กั บ คี	Dry Density (g/cm^3)	Soaked CBR (%)	Unsoaked CBR (%)	PCP test (cm)
		PI (%)	w (%)					
1	15.0	5.9	4.45		1.80	5.2	20.1	16.91
2	15.0	5.9	6.73		1.86	5.8	19.4	15.28
3	15.0	5.9	9.10		1.93	6.7	18.4	13.36
4	15.0	5.9	11.40*		1.97	7.1	17.2	11.36
5	15.0	5.9	13.01		1.94	6.5	15.9	9.64
6	15.0	5.9	15.10		1.87	5.6	14.6	7.66
7	15.0	5.9	17.40		1.79	4.8	12.7	5.15
8	30.0	6.3	7.88		1.77	4.8	18.4	13.95
9	30.0	6.3	10.13		1.83	5.4	17.2	11.98
10	30.0	6.3	11.71		1.87	6.0	16.6	10.77
11	30.0	6.3	13.91*		1.89	6.6	15.6	8.96

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบ PCP test กับดินชั้นทางผสมส่วนละเอียดบดอัดแน่นชุดที่ 1 (ต่อ)

No.	Fine content (%)	by PCP test กับดิน		st. กับดิน w (%)	Dry Density (g/cm ³)	Soaked		PCP test (cm)
		PI (%)	w (%)			CBR (%)	Unsoaked CBR (%)	
12	30.0	6.3	16.01	1.83	5.5	14.1	6.84	
13	30.0	6.3	17.90	1.77	4.6	12.4	4.68	
14	30.0	6.3	19.93	1.71	3.7	10.5	2.34	
15	45.0	8.5	9.50	1.71	3.6	16.6	11.91	
16	45.0	8.5	11.48	1.75	4.2	15.8	10.34	
17	45.0	8.5	13.41	1.79	4.9	14.5	8.38	
18	45.0	8.5	15.43*	1.82	5.1	13.2	6.51	
19	45.0	8.5	17.53	1.77	4.4	14.1	3.58	
20	45.0	8.5	19.10	1.72	3.3	12.4	1.34	
21	45.0	8.5	21.43	1.65	2.2	10.5	0.00	
22	60.0	11.3	10.02	1.68	10.31	14.7	10.31	
23	60.0	11.3	11.97	1.72	8.04	12.9	8.04	
24	60.0	11.3	13.81	1.76	6.06	11.5	6.06	
25	60.0	11.3	15.94*	1.78	3.69	9.5	3.69	
26	60.0	11.3	17.88	1.75	1.17	7.1	1.17	
27	60.0	11.3	20.02	1.69	0.00	4.1	0.00	
28	60.0	11.3	21.98	1.63	0.00	1.2	0.00	

* Water content at OWC

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบ PCP test กับดินชั้นทางผสมส่วนละเอียดบดอัดแน่นชุดที่ 2

No.	Fine content (%)	PCP test กับดิน		st. กับดิน w (%)	Dry Density (g/cm ³)	Soaked CBR (%)	Unsoaked CBR (%)	PCP test (cm)
		PI (%)	w (%)					
1	31.1	6.5	8.11	1.74	4.1	18.4	15.00	
2	31.1	6.5	10.21	1.79	4.5	17.4	12.53	
3	31.1	6.5	12.18	1.84	5.4	16.7	10.81	
4	31.1	6.5	14.09*	1.88	6.3	15.5	8.84	
5	31.1	6.5	16.08	1.83	5.1	14.2	6.29	
6	31.1	6.5	18.04	1.77	3.9	11.0	2.67	

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบ PCP test กับดินคันทางผสมส่วนละเอียดบดอัดแน่นชุดที่ 2 (ต่อ)

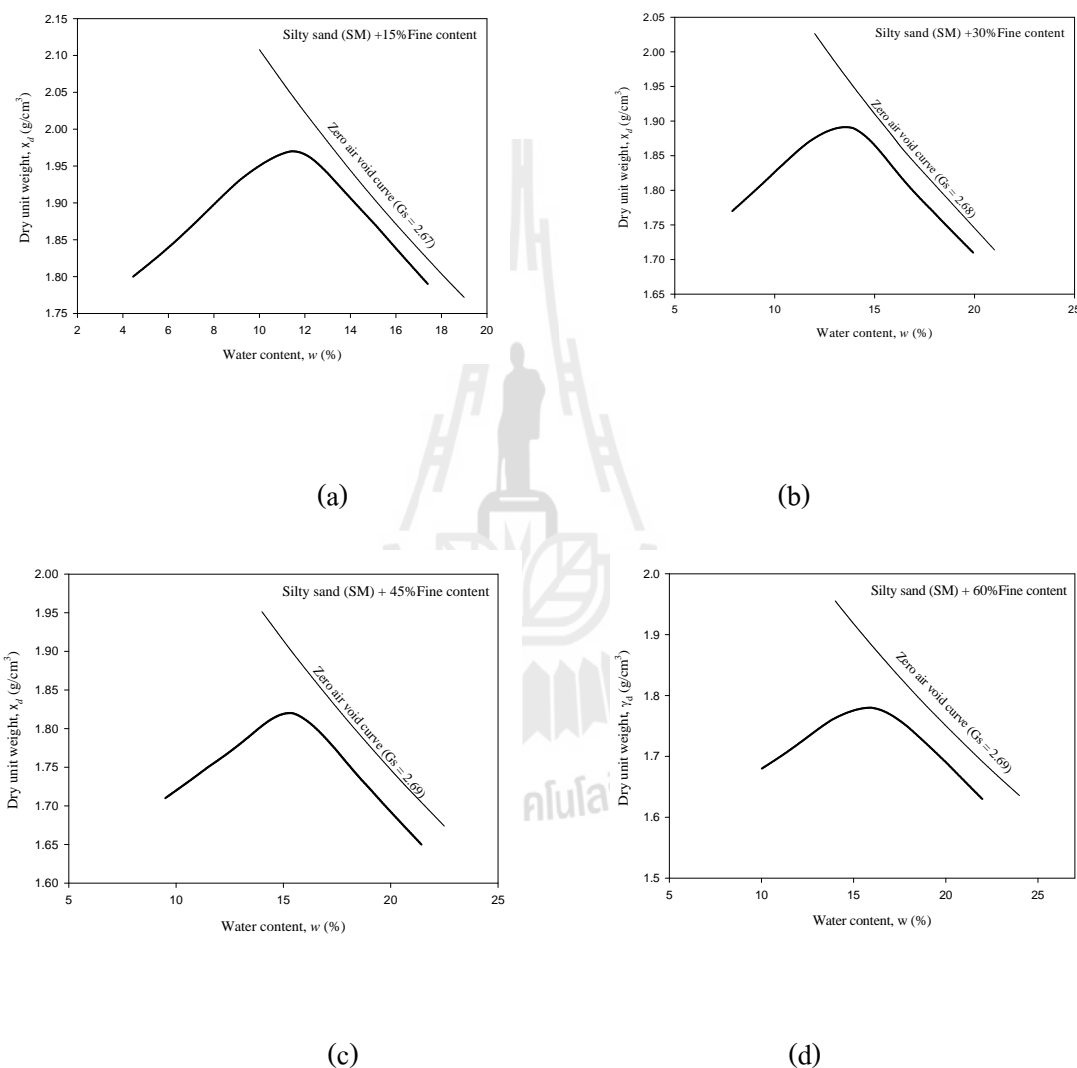
No.	Fine content (%)	PCP test ดินคัน		Dry Density (g/cm ³)	Soaked CBR (%)	Unsoaked CBR (%)	PCP test (cm)
		PI (%)	w (%)				
7	31.1	6.5	20.10	1.71	3.5	8.5	1.10
8	40.0	8.3	9.12	1.7	3.3	17.2	13.06
9	40.0	8.3	10.98	1.73	3.7	16.6	11.67
10	40.0	8.3	13.03	1.79	4.4	15.9	10.27
11	40.0	8.3	15.11*	1.83	5.3	14.6	7.37
12	40.0	8.3	17.08	1.78	4.4	13.1	5.63
13	40.0	8.3	19.12	1.72	3.6	11.3	3.56
14	40.0	8.3	21.14	1.66	3.2	7.7	1.02
15	50.0	9.4	9.85	1.69	3.0	15.7	10.23
16	50.0	9.4	11.78	1.73	3.3	15.0	8.81
17	50.0	9.4	13.81	1.78	3.8	13.9	7.01
18	50.0	9.4	15.80*	1.81	4.5	11.8	4.73
19	50.0	9.4	17.86	1.76	3.9	10.4	3.21
20	50.0	9.4	19.75	1.70	3.2	7.1	0.94
21	50.0	9.4	21.84	1.64	2.8	5.7	0.51
22	60.0	10.1	10.04	1.66	2.3	14.7	9.33
23	60.0	10.1	12.06	1.71	3.0	12.8	6.71
24	60.0	10.1	13.93	1.76	3.3	12.0	5.32
25	60.0	10.1	16.02*	1.79	4.0	8.5	2.10
26	60.0	10.1	17.94	1.74	2.6	5.4	0.72
27	60.0	10.1	19.96	1.68	0.9	1.2	0.00
28	60.0	10.1	21.93	1.63	0.0	0.0	0.00

* Water content at OWC

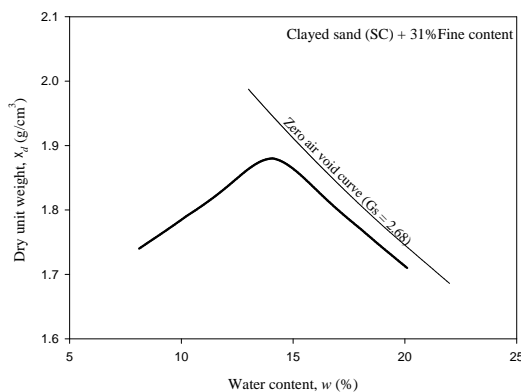
4.2 กราฟการบดอัด

จากการบดอัดดินคันทางซึ่งเป็นดินเม็ดละเอียด จำนวนทั้งหมด 2 ชุดคือ ดินทรายปนดินตะกอน (Silty Sand) หรือ SM และดินทรายปนดินเหนียว (Clayed Sand) หรือ SC โดยการผสมปริมาณส่วนละเอียด (Fine content) ในปริมาณต่างๆ ให้ได้จำนวนตัวอย่างดิน 2 กลุ่ม ตัวอย่างละ 4 ชนิด รวมได้ดินตัวอย่างเป็น 8 ชนิด พบว่า กราฟการบดอัดของดินคันทางทุก

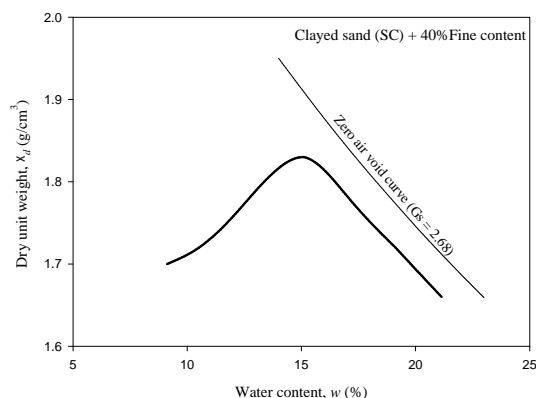
ตัวอย่างมีลักษณะเป็นระฆังคว่ำ มีจุดยอดเดียว โดยค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, $\gamma_{d, max}$) มีค่าแปรผันในช่วง 1.57 ถึง 1.96 และ 1.61 ถึง 1.96 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับ ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณน้ำเหมาะสม (Optimum Water Content, OWC) และปริมาณส่วนละเอียด (Fine content) โดยปริมาณน้ำเหมาะสมและปริมาณส่วนละเอียดที่มาก จะทำให้ได้ความแน่นแห้งของดินบดอัดที่ต่ำ แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2



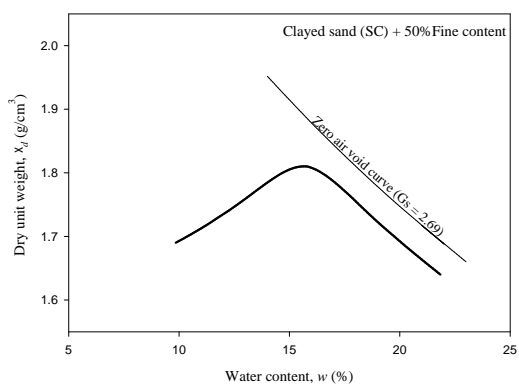
รูปที่ 4.1 กราฟการบดอัดดินทรายปนดินตะกอน (Silty sand) ที่ผสมส่วนละเอียด (Fine content) โดยน้ำหนักร้อยละ 15, 30, 45 และ 60 ตามลำดับ



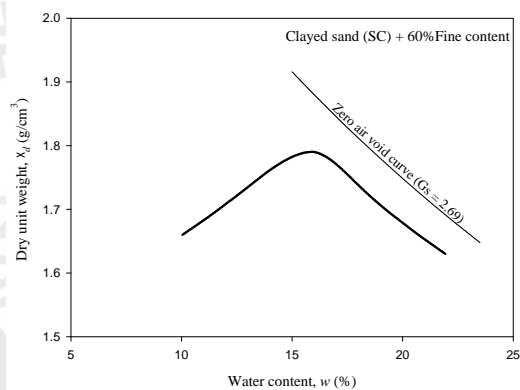
(a)



(b)



(c)



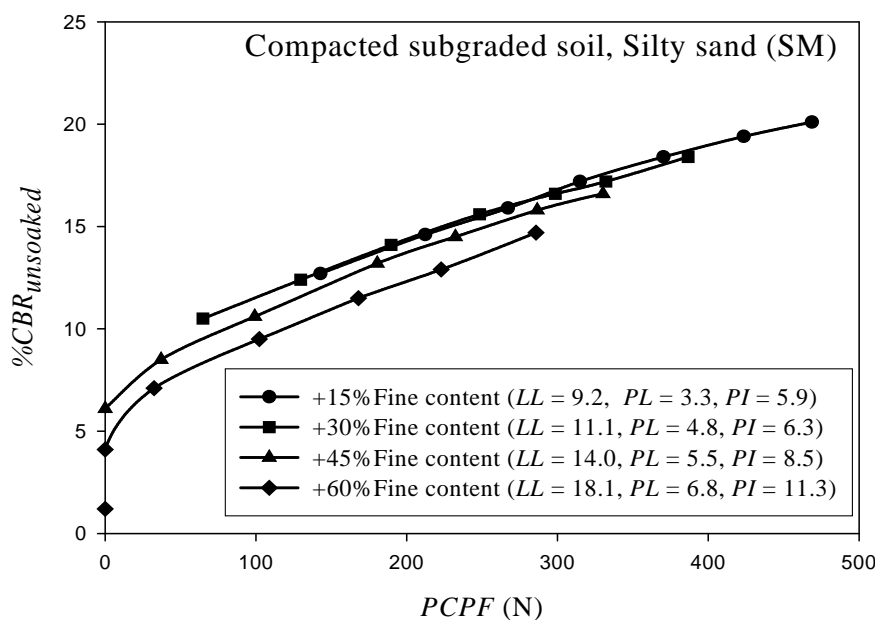
(d)

รูปที่ 4.2 กราฟการบดอัดดินทรายปนดินเหนียว (Clayed sand) ที่ผสมส่วนละเอียด (Fine content) โดยน้ำหนักร้อยละ 15, 30, 45 และ 60 ตามลำดับ

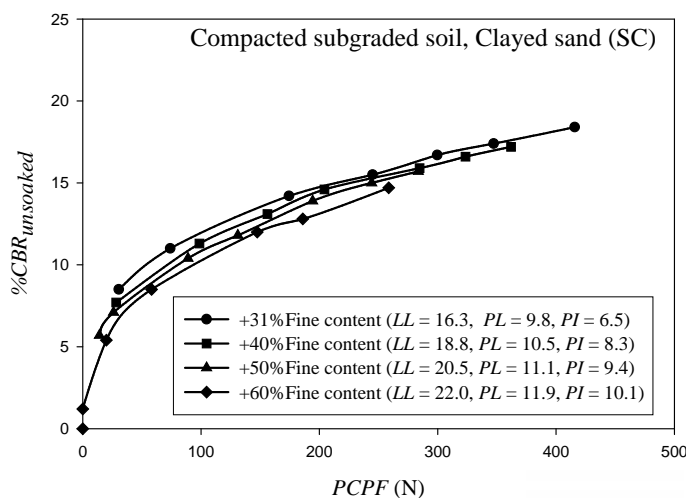
ค่าความแน่นแห้งสูงสุด ($\gamma_{d,max}$) ของดินบดอัดที่ลดลง เป็นผลมาจากค่าดัชนีพลาสติก (Plasticity Index, PI) ในดินตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น ตามปริมาณส่วนละเอียด (Fine content) ที่ผสมเพิ่มเข้าไป เช่นเดียวกับการศึกษาของ Siswosoebrotho et al. (2005) ที่พบว่าปริมาณส่วนละเอียด ที่เพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 4 ขึ้นไป จะทำให้ค่า PI ของดินเพิ่มมากขึ้นจนส่งผลกระทบต่อค่าความแน่นแห้งสูงสุด ($\gamma_{d,max}$) ของดินบดอัดให้ลดลงได้

4.3 ผลทดสอบค่าซีบีอาร์ (CBR) และความสัมพันธ์กับค่าแรงกดด้วยชุดทดสอบ PCP

เมื่อทำการทดสอบหาค่าแรงกดด้วยชุดทดสอบ PCP test (*PCPF*) ในโมลดินบดอัดในสถานะแบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked) แล้วนำไปทดสอบหาค่าซีบีอาร์แบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked CBR) จะได้ความสัมพันธ์แปรผันตามกันทางบวกระหว่างค่า $CBR_{unsoaked}$ กับค่าแรงกด *PCPF* โดยดินตัวอย่างที่มีปริมาณส่วนละเอียด (Fine content) ในปริมาณมาก หรือมีค่าดัชนีพลาสติก (Plasticity Index, *PI*) มากกว่า มีแนวโน้มให้ค่า $CBR_{unsoaked}$ และค่า *PCPF* ที่ต่ำกว่า แสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์แบบไม่แช่น้ำ ($CBR_{unsoaked}$) กับค่าแรงกดด้วยชุดทดสอบ PCP (*PCPF*) ของดินทรายปนดินตะกอน (Silty sand) บดอัดที่ผสมส่วนละเอียด (Fine content) โดยน้ำหนักร้อยละ 15, 30, 45 และ 60

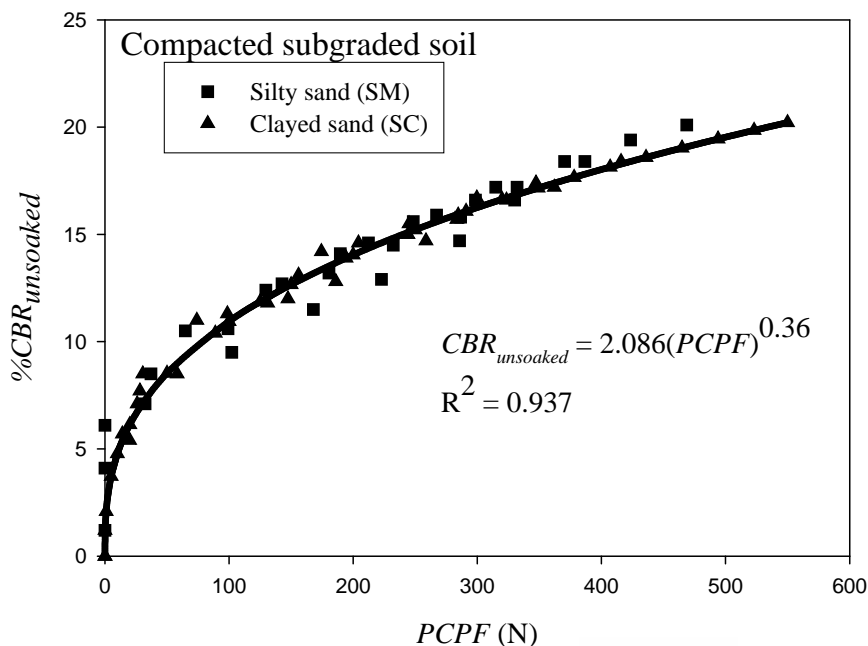


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์แบบไม่แช่น้ำ ($CBR_{unsoaked}$) กับค่าแรงกดด้วยชุดทดสอบ PCP ($PCPF$) ของดินทรายปนดินเหนียว (Clayed sand) บดอัดที่ผสมส่วนละเอียด (Fine content) โดยน้ำหนักร้อยละ 31, 40, 50 และ 60

ถึงแม้ว่าค่าซีบีอาร์จะแปรผันตามชนิดของดิน แต่สำหรับดินเม็ดละเอียด (Fine grained soil) คุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆ ของดิน เช่น ค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit, LL) และค่าพิกัดพลาสติก (Plastic Limit, PL) มีอิทธิพลน้อยต่อค่าซีบีอาร์ แต่พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อค่าซีบีอาร์มากที่สุดคือ ค่าดัชนีพลาสติก (Plasticity Index, PI) กล่าวคือ ค่า CBR ของดินเม็ดละเอียดจะแปรผกผันกับ ค่า PI (Patel & Desai, 2010) ดังนั้น จึงสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า $CBR_{unsoaked}$ กับค่าแรงกดด้วยชุดทดสอบ PCP ($PCPF$) ของตัวอย่างดินทั้งสองกลุ่มตัวอย่าง (รวม 8 ชนิดย่อย) นำมารวมกันเพื่อหาความสัมพันธ์รวมของดินชั้นทางบดอัด (Compacted subgrade soil) ได้ ดังแสดงในรูป 4.5 เป็นสมการยกกำลัง ดังนี้

$$CBR_{unsoaked} = 2.086(PCPF)^{0.36} \quad (4.1)$$

เมื่อ $CBR_{unsoaked}$ คือ ร้อยละของค่าซีบีอาร์แบบไม่แช่น้ำ
 $PCPF$ คือ ค่าแรงกดด้วย PCP test มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)



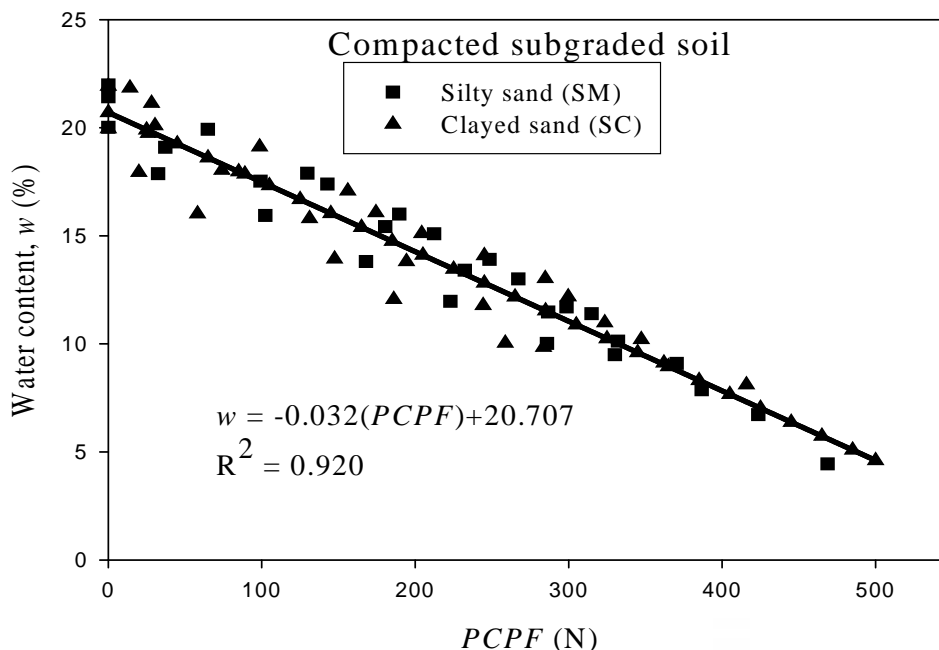
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์แบบไม่แช่น้ำ ($CBR_{unsoaked}$) กับค่าแรงกด ($PCPF$) ของดินคั่นทางบดอัด (Compacted subgrade soil)

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณน้ำ ค่าแรงกดและค่าดัชนีพลาสติก

ปริมาณน้ำในดินบดอัดมีอิทธิพลอย่างมากในการบดอัดดินให้ได้ความแน่นสูงสุดตามที่กำหนด ดังนั้นจึงต้องหาความสัมพันธ์ของตัวแปรจากข้อมูลผลการทดสอบ PCP test มาสร้างแบบจำลองทำนายปริมาณความชื้น (w) ในดินคั่นทางบดอัด เพื่อตรวจสอบว่าเป็นการบดอัดดินที่ใช้ปริมาณน้ำเหมาะสม (Optimum Water Content, OWC) หรือเป็นการบดอัดดินทางด้านเปียก (Wet side of OWC) หรือทางด้านแห้ง (Dry side of OWC) ซึ่งแบบจำลองนี้อยู่ในรูปแบบฟังก์ชันเส้นตรง (Linear function) ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และสมการที่ 4.2

$$w = 20.707 - 0.032 (PCPF) \quad (4.2)$$

เมื่อ w คือ ร้อยละของปริมาณน้ำในดินบดอัด ในขณะที่ $PCPF$ คือ ค่าแรงกดด้วยชุดทดสอบ PCP มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ (Water content, w) ในดินชั้นทางบดอัด (Compacted subgrade soil) กับค่าแรงกด $PCPF$

เพื่อให้การทำนายค่าปริมาณน้ำ (Water content, w) ในดินชั้นทางบดอัด (Compacted subgrade soil) แม่นยำขึ้น จึงได้สร้างสัมพันธ์ของตัวแปรที่สำคัญ 3 ตัวแปรคือ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณน้ำ (w) ค่าแรงกด ($PCPF$) และค่าดัชนีพลาสติก (Plasticity Index, PI) ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และสร้างแบบจำลอง ด้วยถดถอยพหุคูณ (Multiple Linear Regression) ดังตารางที่ 4.1 พบว่าตัวแปรค่าแรงกด ($PCPF$) และค่าดัชนีพลาสติก (PI) ของดินบดอัด สามารถอธิบายความแปรปรวนของค่าปริมาณน้ำในดินบดอัด ได้ร้อยละ 95.1 ($R^2 = 0.951$) และเป็นตัวทำนายค่าปริมาณน้ำในดิน บดอัด (w) ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 มีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการกะประมาณ (Standard Error of the Estimate, SEE) ห่างจากเส้นถดถอย โดยรอบเท่ากับร้อยละ 0.979 ผลการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณเขียนเป็นสมการพยากรณ์ที่ 4.3 ดังนี้

$$w = 25.712 - 0.036 (PCPF) - 0.526(PI) \quad (4.3)$$

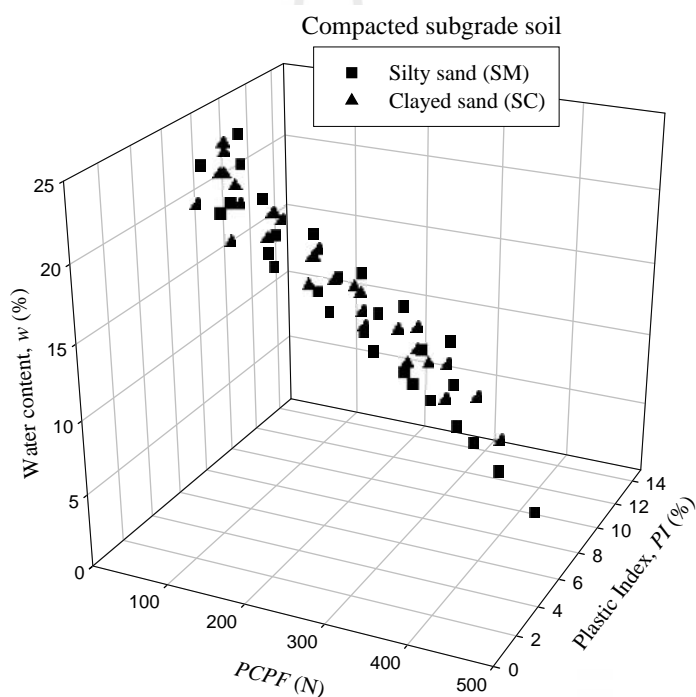
เมื่อ w คือ ร้อยละของปริมาณความชื้นในดินบดอัด ในขณะที่ $PCPF$ คือ ค่าแรงกดด้วยเครื่องมือ PCP มีหน่วยเป็นนิวตัน (N) และ PI คือ ค่าร้อยละของดัชนีพลาสติกของดินบดอัด

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณเพื่อทำนายค่าปริมาณน้ำในดินชั้นทางบดอัด

ตัวแปร	ค่าสัมประสิทธิ์ถดถอย	ค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยมาตรฐาน	ค่า t	ระดับนัยสำคัญ
ค่าแรงกด ($PCPF$)	-0.036	0.001	-30.616**	0.000
ค่าดัชนีพลาสติก (PI)	-0.526	0.082	-6.375**	0.000
ค่าคงที่	25.712	-	31.227	0.000

$R^2 = 0.951$, $SEE = 0.979$, $F = 517.074$, $p\text{-value} = 0.000$, $R = 0.975$

** ระดับนัยสำคัญ 0.01



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ (Water content, w) ในดินชั้นทางบดอัด (Compacted subgrade soil) กับค่าแรงกด $PCPF$ และค่าดัชนีพลาสติก (Plastic Index, PI)

4.5 การทำนายค่าความแน่นแห้ง (Dry density) และค่าซีบีอาร์ (CBR) เพื่อการควบคุมคุณภาพงานบดอัดดินชั้นทาง (Compacted subgrade soil)

ในการควบคุมคุณภาพงานบดอัดดินชั้นทางนั้น วิศวกรผู้ออกแบบจะกำหนดมาตรฐานวัสดุที่นำมาบดอัดด้วยค่าซีบีอาร์แบบแช่น้ำ (Soaked CBR) ตามมาตรฐานแต่ละชั้นทางที่กำหนดไว้ และควบคุมคุณภาพการบดอัดดินในงานสนาม (Field density) ด้วยค่าความแน่นแห้ง (Dry density) หรือหน่วยน้ำหนักแห้ง (Dry unit weight, γ_d) สามารถแบ่งการทำนายค่าดังกล่าวได้เป็น 3 กรณีดังต่อไปนี้

4.5.1 กรณีบดอัดดินที่ปริมาณน้ำเหมาะสม (Optimum Water Content, *OWC*)

ในการบดอัดดินชั้นทางด้วยปริมาณน้ำเหมาะสม (*OWC*) สามารถสร้างแบบจำลองทำนายค่าซีบีอาร์ได้ทั้งแบบไม่แช่น้ำ ($CBR_{unsoaked}$) และแบบแช่น้ำ (CBR_{soaked}) ด้วยค่าแรงกด *PCPF* ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ในรูปในรูปแบบฟังก์ชันเส้นตรง (Linear function) ดังสมการที่ 4.4 และ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์แบบแช่น้ำ (CBR_{soaked}) กับค่าซีบีอาร์แบบไม่แช่น้ำ ($CBR_{unsoaked}$) นอกจากนี้แล้วค่าซีบีอาร์แบบแช่น้ำ (CBR_{soaked}) ยังสัมพันธ์กับค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, $\gamma_{d,max}$) ในรูปแบบฟังก์ชัน โพลีโนเมียล (Polynomial function) แสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 ดังสมการที่ 4.6 และ 4.7

$$CBR_{unsoaked} = 6.598 + 0.0360(PCPF) \quad (4.4)$$

$$CBR_{soaked} = 2.958 + 0.013(PCPF) \quad (4.5)$$

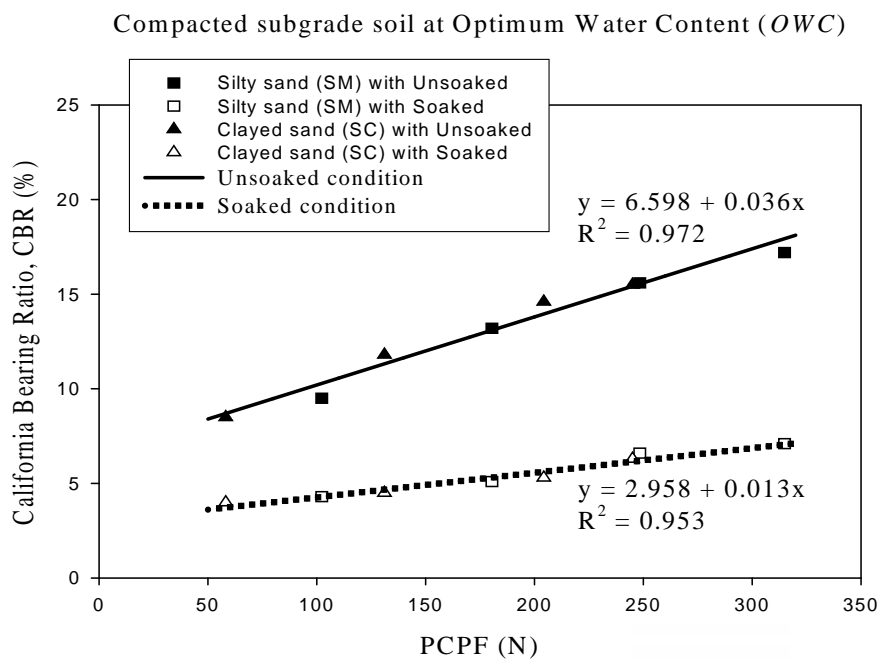
$$CBR_{soaked} = 6.634 - 0.629(CBR_{unsoaked}) + 0.039(CBR_{unsoaked})^2 \quad (4.6)$$

$$CBR_{soaked} = -281.73 + 290.22(\gamma_{d,max}) - 72.882(\gamma_{d,max})^2 \quad (4.7)$$

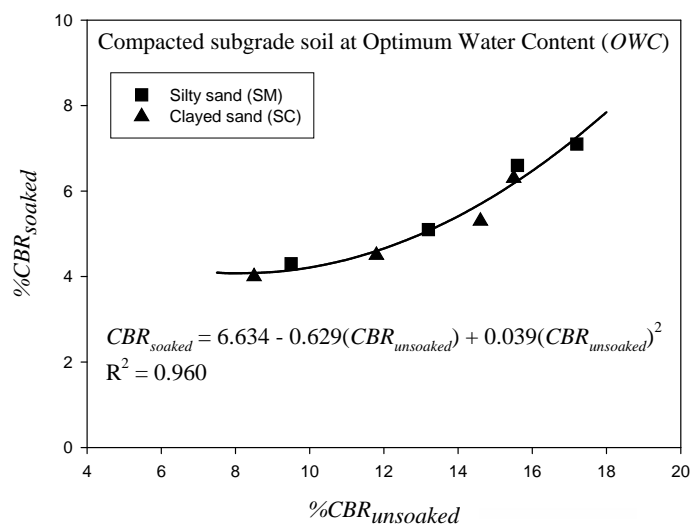
เมื่อ CBR_{soaked} และ $CBR_{unsoaked}$ คือ ร้อยละของค่าซีบีอาร์ของดินชั้นทางบดอัดในสถานะแช่น้ำและไม่แช่น้ำ ตามลำดับ

PCPF คือ ค่าแรงกดด้วยชุดทดสอบ PCP มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)

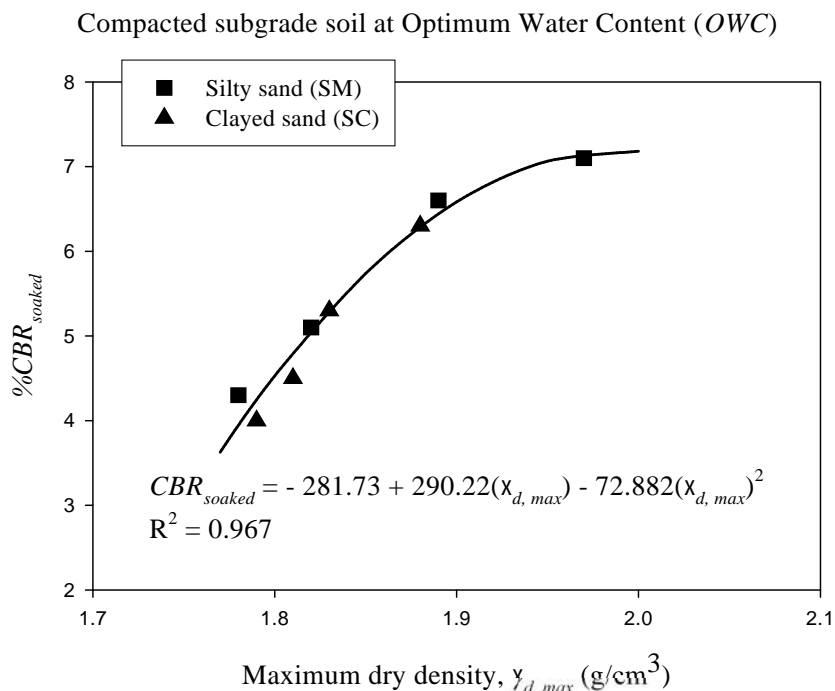
$\gamma_{d,max}$ คือ ค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density) ของดินชั้นทางบดอัดที่ปริมาณน้ำเหมาะสม (*OWC*) มีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3)



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์ทั้งแบบไม่แช่น้ำ ($CBR_{unsoaked}$) และแช่น้ำ (CBR_{soaked}) กับค่าแรงกด PCPF ของดินคันทางบดอัดที่ OWC



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์แบบแช่น้ำ (CBR_{soaked}) กับค่าซีบีอาร์แบบไม่แช่น้ำ ($CBR_{unsoaked}$) ของดินคันทางบดอัดที่ OWC

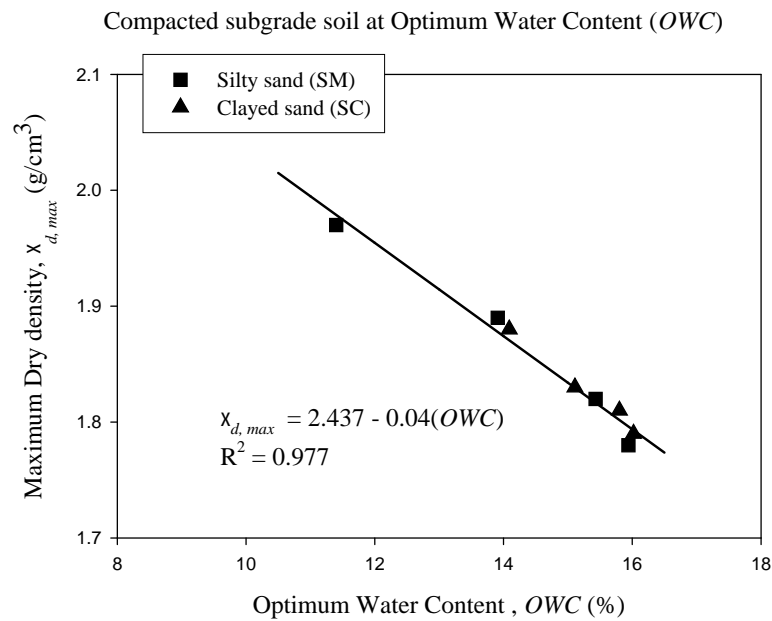


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์แบบแช่น้ำ (CBR_{soaked}) กับค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, $\gamma_{d,max}$) ของดินคันทางบดอัดที่ *OWC*

สำหรับแบบจำลองทำนายค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, $\gamma_{d,max}$) ของดินคันทางบดอัดก็มีความสัมพันธ์กับค่าแรงกดด้วยเครื่องมือ PCP (*PCPF*) เช่นกัน หากแต่ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรเป็นเลขสิบยกกำลังด้วยลบหก (10^{-6}) ทำให้ไม่สะดวกในการนำมาใช้คำนวณดังนั้น ผู้ศึกษาจึงได้เสนอแบบจำลองทำนายค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, $\gamma_{d,max}$) ของดินคันทางบดอัดด้วยค่าปริมาณน้ำเหมาะสม (Optimum Water Content) โดยใช้หลักการทำนายกราฟการบดอัดของ Joslin (1959) ที่รู้จักกันดีคือ กราฟ Ohio (Ohio curves) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, $\gamma_{d,max}$) ของดินคันทางบดอัดกับค่าปริมาณน้ำเหมาะสม แสดงในรูปที่ 4.11 อยู่ในรูปแบบฟังก์ชันเส้นตรง (Linear function) ดังสมการที่ 4.8

$$\gamma_{d,max} = 2.437 - 0.04 (OWC) \quad (4.8)$$

เมื่อ $x_{d, max}$ คือ ค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density) ของดินบดอัด มีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) ในขณะที่ OWC คือ ร้อยละของปริมาณน้ำเหมาะสมในดินคันทางบดอัด



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, $x_{d, max}$) ของดินคันทางบดอัดกับปริมาณน้ำเหมาะสม (OWC)

4.5.2 กรณีบดอัดดินด้านเปียกของปริมาณน้ำเหมาะสม (Wet side of Optimum Water Content)

ในการบดอัดดินคันทางด้วยปริมาณน้ำด้านเปียกของปริมาณน้ำเหมาะสม (Wet side of OWC) สามารถสร้างแบบจำลองทำนายค่าซีบีอาร์แบบแช่น้ำ (CBR_{soaked}) ด้วยค่าซีบีอาร์แบบไม่แช่น้ำ ($CBR_{unsoaked}$) ที่หาได้จากสมการที่ 4.1 ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์แบบแช่น้ำ (CBR_{soaked}) กับค่าซีบีอาร์แบบไม่แช่น้ำ ($CBR_{unsoaked}$) แสดงดังรูปที่ 4.12 โดยเป็นรูปแบบฟังก์ชันเส้นตรง (Linear function) ดังสมการที่ 4.9 สำหรับแบบจำลองทำนายค่าความแน่นแห้ง (Dry density, x_d) จะใช้ค่าปริมาณน้ำด้านเปียกของปริมาณน้ำเหมาะสม (w_{wet}) เป็นตัวทำนาย แสดงดังรูปที่ 4.13 โดยเป็นรูปแบบฟังก์ชันเส้นตรง (Linear function) เช่นเดียวกัน ดังสมการที่ 4.10

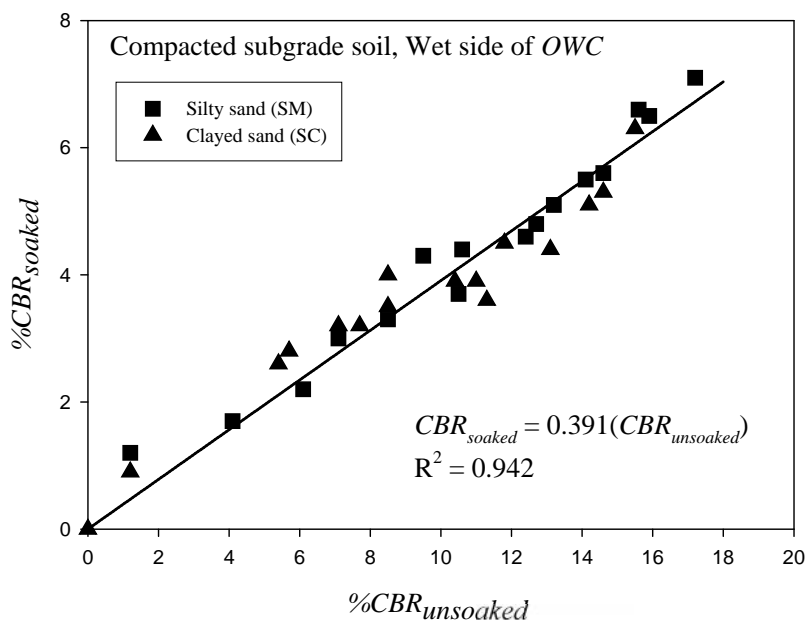
$$CBR_{soaked} = 0.391(CBR_{unsoaked}) \quad (4.9)$$

$$\gamma_d = 2.322 - 0.032 (w_{wet}) \quad (4.10)$$

เมื่อ CBR_{soaked} และ $CBR_{unsoaked}$ คือ ร้อยละของค่าซีบีอาร์ของดินชั้นทางบดอัดในสถานะแช่น้ำและไม่แช่น้ำ ตามลำดับ

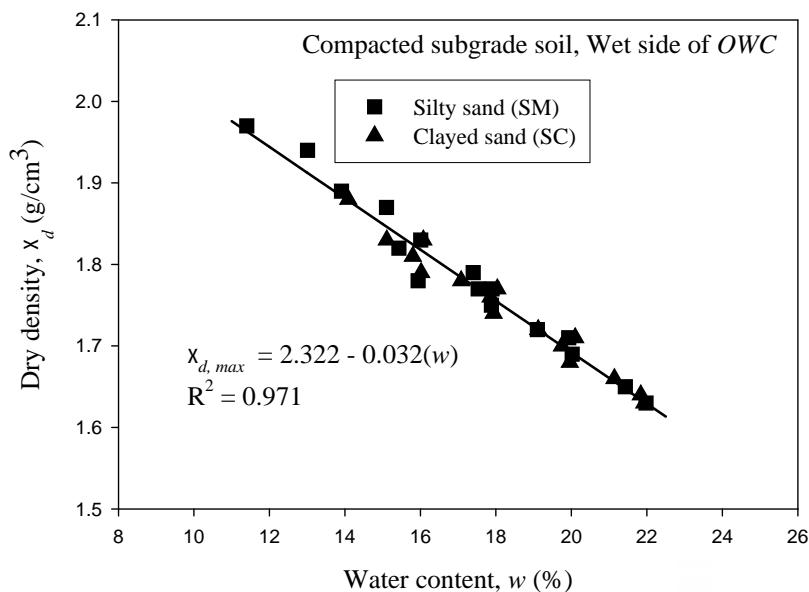
γ_d คือ ค่าความแน่นแห้ง (Dry density) ของดินชั้นทางบดอัด มีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3)

w_{wet} คือ ร้อยละของปริมาณน้ำในดินบดอัดทางด้านเปียกของปริมาณน้ำเหมาะสม (Dry side of *OWC*)



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์แบบแช่น้ำ (CBR_{soaked}) กับค่าซีบีอาร์แบบไม่แช่น้ำ ($CBR_{unsoaked}$) ของดินชั้นทางบดอัดด้านเปียก (Wet side)

จากรูปที่ 4.12 พบว่าอัตราส่วนค่าซีบีอาร์แบบแช่น้ำต่อซีบีอาร์แบบไม่แช่น้ำ ($CBR_{soaked}/CBR_{unsoaked}$) มีค่าเท่ากับ 0.39 ใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ Patel & Desai (2010) ที่พบว่าอัตราส่วนค่าซีบีอาร์แบบแช่น้ำต่อซีบีอาร์แบบไม่แช่น้ำ ($CBR_{soaked}/CBR_{unsoaked}$) ของดินเม็ดละเอียดมีค่าเท่ากับ 0.50 โดยประมาณ



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแน่นแห้ง (Dry density, γ_d) ของดินชั้นทางบดอัด กับปริมาณน้ำด้านเปียก (Wet side)

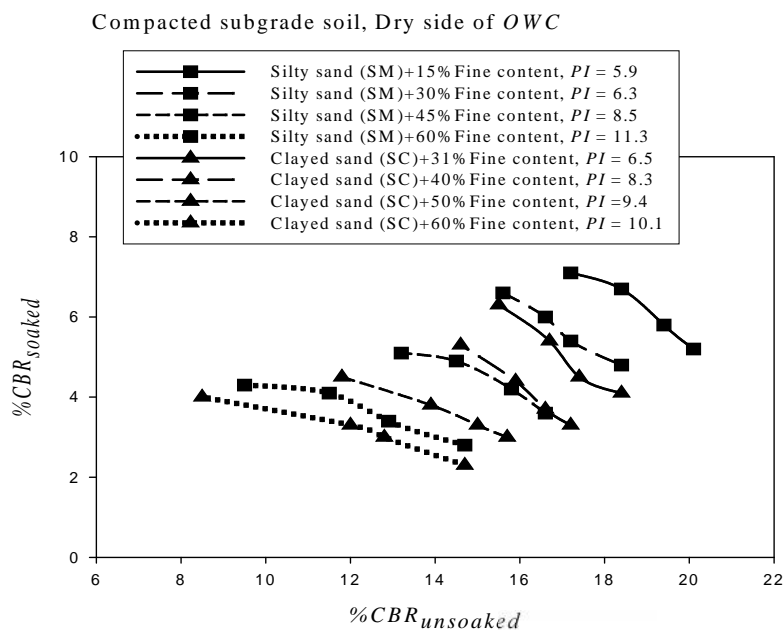
4.5.3 กรณีบดอัดดินด้านแห้งของปริมาณน้ำเหมาะสม (Dry side of Optimum Water Content)

ในการบดอัดดินชั้นทางด้วยปริมาณน้ำด้านแห้งของปริมาณน้ำเหมาะสม (Dry side of OWC) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์แบบแช่น้ำ (CBR_{soaked}) กับค่าซีบีอาร์แบบไม่แช่น้ำ ($CBR_{unsoaked}$) ยังไม่เป็นเอกภาพ โดยขึ้นกับชนิดของดิน แสดงดังรูปที่ 4.14 ดังนั้นในการหาค่า CBR_{soaked} จากค่าความแน่นแห้ง (x_d) แสดงดังรูปที่ 4.15 ในรูปแบบฟังก์ชันเส้นตรง (Linear function) ดังสมการที่ 4.11

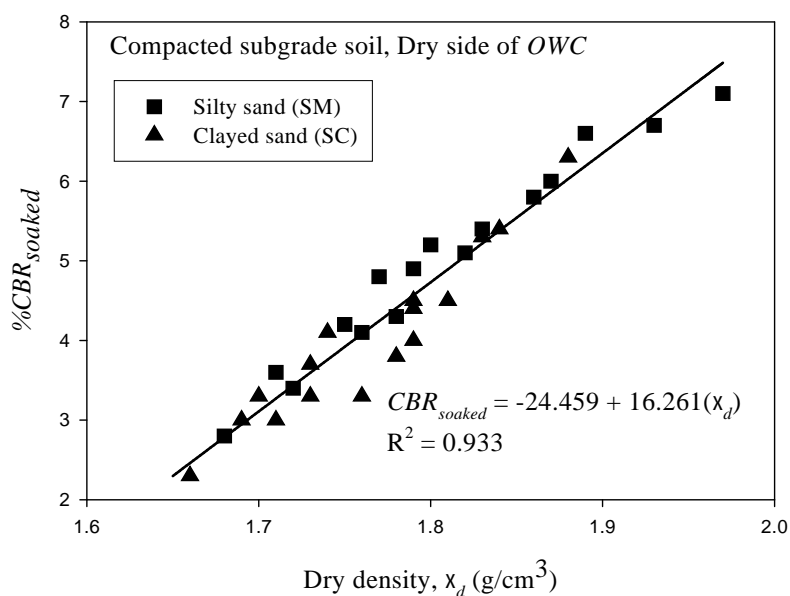
$$\text{For Dry side, } CBR_{soaked} = -24.459 + 16.261 (\gamma_d) \quad (4.11)$$

เมื่อ CBR_{soaked} คือ ร้อยละของค่าซีบีอาร์ของดินชั้นทางบดอัดในสถานะแช่น้ำ

x_d คือ ค่าความแน่นแห้ง (Dry density) ของดินชั้นทางบดอัดที่ปริมาณน้ำด้านแห้ง (Dry side) มีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm³)



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์แบบแช่น้ำ (CBR_{soaked}) กับค่าซีบีอาร์แบบไม่แช่น้ำ ($CBR_{unsoaked}$) ของดินคั่นทางบดอัดด้านแห้ง (Dry side)



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์แบบแช่น้ำ (CBR_{soaked}) กับค่าความแน่นแห้ง (Dry density, x_d) ของดินคั่นทางบดอัดด้านแห้ง (Dry side)

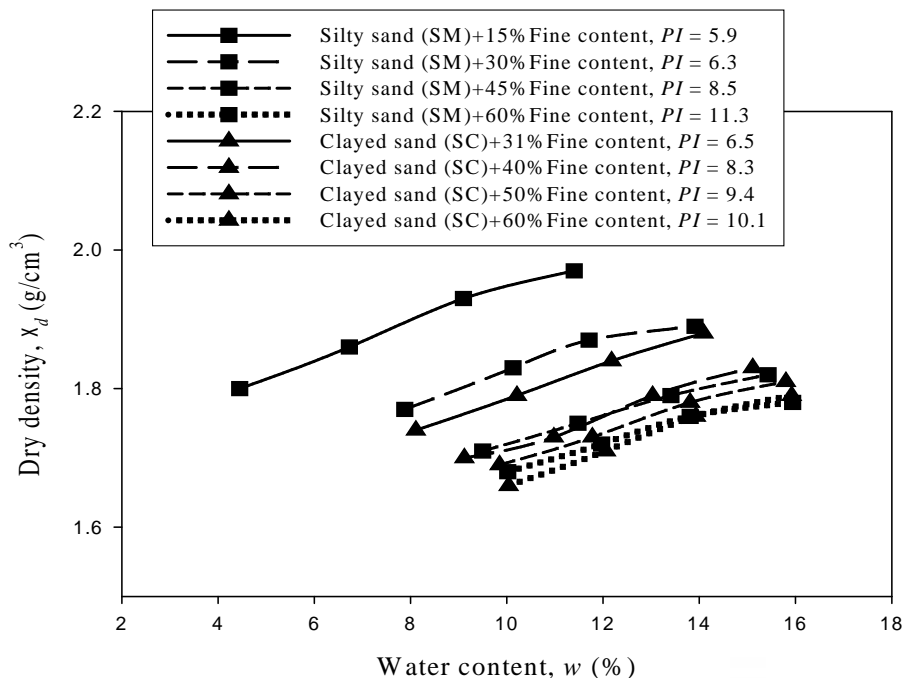
สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแน่นแห้ง (Dry density, γ_d) ของดินชั้นทางบดอัดกับปริมาณน้ำด้านแห้งของปริมาณน้ำเหมาะสม (Dry side of *OWC*) ยังไม่เป็นเอกภาพ โดยขึ้นกับชนิดของดิน แสดงดังรูปที่ 4.16 จำเป็นต้องทำการ normalize ค่าความแน่นแห้ง (x_d) ของดินบดอัดโดยการหารด้วยค่าความแน่นแห้งสูงสุด ($x_{d,max}$) และทำการ normalize ค่าปริมาณน้ำในดินบดอัด ด้านแห้ง (w_{dry}) โดยการหารด้วยค่าปริมาณน้ำเหมาะสม (*OWC*) แสดงดังรูปที่ 4.17 ได้เป็นรูปแบบฟังก์ชันเส้นตรง (Linear function) ดังสมการที่ 4.12

$$\left(\frac{\gamma_d}{\gamma_{d, max}}\right) = 0.841 + 0.16 \left(\frac{w_{dry}}{OWC}\right) \quad (4.12)$$

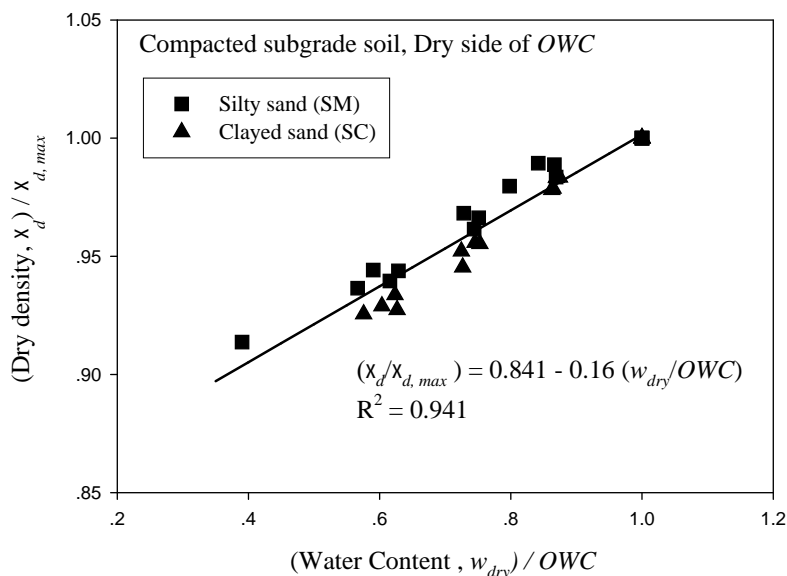
เมื่อ γ_d และ $\gamma_{d, max}$ คือ ค่าความแน่นแห้งและความแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัด ตามลำดับ มีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3)

w_{dry} และ *OWC* คือ ร้อยละของปริมาณความชื้นในดินบดอัดด้านแห้ง (Dry side) และที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมตามลำดับ

Compacted subgrade soil, Dry side of *OWC*



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแน่นแห้ง (Dry density, γ_d) ของดินชั้นทางบดอัดกับปริมาณน้ำด้านแห้ง (Dry side)



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่าความแน่นแห้งต่อความแน่นแห้งสูงสุด ($\gamma_d/\gamma_{d,max}$) ของดินคันทางบดอัดกับอัตราส่วนค่าปริมาณน้ำด้านแห้งต่อปริมาณน้ำเหมาะสม (w_{dry}/OWC)

การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากผลทดสอบด้วยชุดทดสอบ Portable Cone Penetrometer (PCP) และสร้างแบบจำลองทำนายค่าต่างๆ ที่จำเป็นในการออกแบบและควบคุมคุณภาพงานบดอัดดินคันทางที่กล่าวมานั้น ข้อมูลทดสอบ PCP test เป็นการวัดค่าแรงกด *PCPF* จากระยะหดยุบตัวของชุดสปริงที่เกิดจากแรงต้านทานแรงเฉือนของดินคันทางบดอัดที่ปลายกรวยทะลุลงดิน (PCP Cone) ที่ระยะจมลงในดิน 20 มิลลิเมตรในสถานะไม่แช่น้ำ สอดคล้องกับ Black (1962) ที่พบว่าค่าซีบีอาร์ (CBR) มีความสัมพันธ์กับกำลังต้านแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength, s_u) ตามทฤษฎีกำลังรับแรงแบกทานของดิน (Bearing capacity theory) โดยผู้ศึกษาได้สร้างแบบจำลองทำนายค่าซีบีอาร์แบบไม่แช่น้ำและปริมาณน้ำในดินคันทางบดอัดด้วยฟังก์ชันของค่าแรงกด *PCPF* และตัวบ่งชี้คุณสมบัติของดิน (Index properties) คือ ค่า Plasticity Index, *PI* ซึ่งค่าปริมาณน้ำ (water content, w) ในดินบดอัดที่หาได้จากฟังก์ชันของค่าแรงกด *PCPF* นี้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าปริมาณน้ำเหมาะสม (Optimum Water Content, *OWC*) ก็จะทำให้ทราบทันทีว่างานบดอัดดินคันทางที่ทดสอบนั้นเป็นการบดอัดที่ *OWC* หรือ ด้านเปียก (Wet side) หรือ ด้านแห้ง (Dry side) จากนั้นจึงเลือกใช้ฟังก์ชันความสัมพันธ์ต่างๆ ตามปริมาณน้ำที่ใส่บดอัดดินคันทาง แล้วแต่กรณี ท้ายสุดเพื่อให้ได้ค่าซีบีอาร์แบบแช่น้ำ (Soaked CBR) และค่าความแน่นแห้ง

(Dry density, γ_d) สำหรับเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพงานบดอัดดินคันทาง ซึ่งแบบจำลองที่ได้สร้างขึ้นทั้งหมดนี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Ramasubbarao & Siva sankar (2013) พบว่า สมการถดถอยอย่างง่าย (Simple Linear Regression Analysis, SLRA) ของตัวแปรที่ใช้ทำนายค่าซีบีอาร์แบบแช่น้ำ (CBR_{soaked}) ของดินเม็ดละเอียดได้ดีคือ ค่าปริมาณน้ำเหมาะสม (OWC) และตัวแปรที่ทำนายค่าซีบีอาร์แบบแช่น้ำ (CBR_{soaked}) ได้ดีกว่าคือ ค่าความแน่นแห้ง (Dry density, γ_d) และหากพัฒนาแบบจำลองโดยใช้สมการถดถอยพหุคูณ (Multiple Linear Regression Analysis, MLRA) โดยใช้ตัวแปรทำนายที่บ่งชี้คุณสมบัติของดิน (Index properties) ตั้งแต่สองตัวแปรขึ้นไปจนได้ค่าอาร์ยกกำลังสอง (R^2 -value) ตั้งแต่ 0.92 ขึ้นไป จะช่วยลดความคลาดเคลื่อน (Error) ได้เป็นอย่างมาก ทำให้ได้ผลทำนายแม่นยำขึ้น สรุปความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้สร้างแบบจำลองทำนายผล เพื่อใช้ในงานควบคุมคุณภาพการบดอัดดิน ดังนี้

$$CBR_{unsoaked} = f(PCPF)$$

$$w = f(PCPF) \text{ หรือ } w = f(PCPF, PI)$$

$$CBR_{soaked} = f(CBR_{unsoaked})$$

$$\gamma_{d, max} = f(OWC)$$

4.6 การตรวจสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายผล

การพัฒนาชุดทดสอบ Portable Cone Penetrometer (PCP) และสร้างแบบจำลองทำนายผลจากผลทดสอบ PCP test นี้ มุ่งเน้นให้เกิดความสะดวก ใช้งานง่าย ช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการควบคุมคุณภาพงานบดอัดดินคันทางในสนาม (Field density) ผลการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองในการทำนายผลหาค่าปริมาณน้ำในดินบดอัด (w) ในขั้นตอนแรกและนำค่าปริมาณน้ำในดินบดอัด (w) ที่หาได้ในขั้นตอนแรกนี้ไปใช้ทำนายผลค่าความแน่นแห้ง (Dry density, γ_d) ของดินบดอัดต่อเป็นขั้นตอนที่สอง ซึ่งในการทำนายผลค่าความแน่นแห้ง (Dry density, γ_d) ที่มีสองขั้นตอนนี้มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดรวมกันเป็นร้อยละ 2.54 ขณะที่ในการทำนายผลค่า $CBR_{unsoaked}$ ซึ่งเป็นขั้นตอนแรกและนำค่า $CBR_{unsoaked}$ ที่หาได้ในขั้นตอนแรกนี้ไปใช้ทำนายผลค่า CBR_{soaked} ของดินบดอัดต่อเป็นขั้นตอนที่สอง ซึ่งในการทำนายผลค่า CBR_{soaked} ที่มีสองขั้นตอนนี้มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดรวมกันเป็นร้อยละ 4.36 ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนรวมสูงสุดในการใช้ตัวแปรค่าแรงกด $PCPF$ ไปทำนายผลผ่านแบบจำลองตามขั้นตอนต่างๆ เพื่อให้ได้ค่าความแน่นแห้ง (Dry density, γ_d) และค่า

CBR_{soaked} ที่ใช้ในการควบคุมคุณภาพการบดอัดดินนั้น พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนรวมสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นในงานวิศวกรรมถือว่าผลทำนายอยู่ในช่วงค่าที่ยอมรับได้

ตารางที่ 4.4 ผลการตรวจสอบแบบจำลองในงานควบคุมการบดอัดดินกันทาง

where PI = 8.2	At <small>อบแบบจำลอง</small> OWC			Wet side of <small>บดอัดดินกัน</small> OWC			Dry side of OWC		
	Lab. values	Predicted values	%Error	Lab. values	Predicted values	%Error	Lab. values	Predicted values	%Error
$PCPF (N)$	198.43			92.23			316.42		
Water content, $\frac{W}{D} (\%)$	13.98	14.26	2.00	17.97	18.08	0.61	9.97	10.01	0.40
$\frac{CBR_{unsoaked}}{CBR_{soaked}} (\%)$	14.1	14	0.71	10.4	10.6	1.92	16.7	16.6	0.60
$\frac{CBR_{unsoaked}}{CBR_{soaked}} (\%)$	5.3	5.4	1.89	4.1	4.2	2.44	4.1	4.2	2.44
Dry density, $\gamma_d (g/cm^3)$	1.85	1.86	0.54	1.74	1.75	0.73	1.75	1.77	0.57
Total Absolute Predicted Error, For Dry density, γ_d			2.54			1.34			0.97
Total Absolute Predicted Error, For CBR_{soaked}			2.60			4.36			3.04

ในการควบคุมคุณภาพงานบดอัดในสนาม จะพยายามควบคุมปริมาณน้ำในดินบดอัดให้ได้ค่าปริมาณที่เหมาะสม (OWC) ดังนั้น แบบจำลองที่จะนำไปใช้ในการควบคุมคุณภาพงานบดอัดคือแบบจำลองกรณีการบดอัดที่ปริมาณน้ำเหมาะสม (OWC) เท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติงานในสนามจริงจะไม่สามารถควบคุมปริมาณน้ำในดินบดอัดให้ได้ค่าปริมาณน้ำเหมาะสมได้ถูกต้องแน่นอน เหมือนกับการควบคุมปริมาณน้ำเหมาะสมในดินบดอัดในห้องปฏิบัติการได้ ผู้ศึกษาจึงได้ทำการตรวจสอบ ค่าความคลาดเคลื่อน (%Error) เมื่อใช้ค่าปริมาณน้ำในดินบดอัดที่ $OWC-2\%$ และ $OWC+2\%$ แทนค่าในแบบจำลองทำนายผล กรณีการบดอัดที่ปริมาณน้ำเหมาะสม (OWC) ตามสมการต่อไปนี้

$$CBR_{unsoaked} = 2.086(PCPF)^{0.36} \quad (4.1)$$

$$w = 20.707 - 0.032 (PCPF) \quad (4.2)$$

$$CBR_{soaked} = 6.634 - 0.629(CBR_{unsoaked}) + 0.039(CBR_{unsoaked})^2 \quad (4.6)$$

$$\gamma_{d, max} = 2.437 - 0.04 (OWC) \quad (4.8)$$

ผลการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองในการทำนายผลหาค่าปริมาณน้ำในดินบดอัด (w) ในขั้นตอนแรกซึ่งจะใกล้เคียงกับค่าปริมาณน้ำเหมาะสม (OWC) และนำค่าปริมาณน้ำในดินบดอัด (w) ที่ทำได้ในขั้นตอนแรกนี้ไปใช้ทำนายผลค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, $\gamma_{d,max}$) ของดินบดอัดต่อเป็นขั้นตอนที่สอง รวมทั้งสองขั้นตอนนี้มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดรวมกันเป็นร้อยละ 8.98 ขณะที่ในการทำนายผลค่า $CBR_{unsoaked}$ ในขั้นตอนแรกและนำค่า $CBR_{unsoaked}$ ที่ทำได้ในขั้นตอนแรกนี้ไปใช้ทำนายผลค่า CBR_{soaked} ของดินบดอัดต่อเป็นขั้นตอนที่สองนั้น รวมทั้งสองขั้นตอนแล้วมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดรวมกันเป็นร้อยละ 7.68 ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งพบว่า ถึงแม้จะใช้ค่าปริมาณน้ำในดินบดอัดที่ $OWC-2\%$ และ $OWC+2\%$ แทนค่าในแบบจำลองทำนายผล กรณีการบดอัดที่ปริมาณน้ำเหมาะสม (OWC) ความคลาดเคลื่อนรวมสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นในงานวิศวกรรมถือว่าผลทำนายอยู่ในช่วงค่าที่ยอมรับได้เช่นกัน โดยสรุปเป็นแผนภาพแสดงลำดับขั้นตอน (Flow Chart) การควบคุมคุณภาพงานบดอัด ดินคันทาง ด้วยชุดทดสอบการทะลุทะลวง แบบพกพา (Portable Cone Penetrometer, PCP) ดังแสดงในรูปที่ 4.18

ตารางที่ 4.5 ผลการตรวจสอบแบบจำลองของดินบดอัดที่ปริมาณน้ำเหมาะสม เมื่อใช้ค่าตัวแปรเป็น ปริมาณน้ำด้านแห้งที่ $OWC-2\%$ และด้านเปียกที่ $OWC+2\%$

where	At $\frac{OWC-2\%}{OWC}$			At $\frac{OWC+2\%}{OWC}$			At $\frac{OWC-2\%}{OWC}$		
	Lab. values	Predicted values	%Error	Lab. values	Predicted values	%Error	Lab. values	Predicted values	%Error
PCPF (N)	254.19			308.80			184.06		
Water content, $\frac{W}{D}$ (%)	12.83	12.57	2.03	10.83			14.82		
$\frac{CBR_{unsoaked}}{CBR_{soaked}}$ (%)	15.2	15.3	0.66	16.3	16.1	1.23	13.5	13.6	0.74
$\frac{CBR_{unsoaked}}{CBR_{soaked}}$ (%)	6.3	6.1	3.17	6.2	6.6	6.45	5.5	5.3	3.64
Dry density, (g/cm ³)	1.91	1.93	1.05	1.87	2.00	6.95	1.86	1.84	1.08
Total Absolute Predicted Error, For Maximum dry density, ,			3.08			8.98			3.11
Total Absolute Predicted Error, For			3.83			7.68			4.38

บทที่ 5

สรุปผล

5.1 สรุปผลงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้ประดิษฐ์และศึกษาชุดทดสอบการทะลุทะลวงแบบพกพา (Portable Cone Penetrometer, PCP) สำหรับการควบคุมคุณภาพงานบดอัดดินชั้นทาง (Subgrade soil) พร้อมเสนอสมการทำนายค่าอัตราส่วนกำลังรับแรงแบกทาน (California Bearing Ratio, CBR) ทั้งแบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked) และแบบแช่น้ำ (Soaked) และทำนายค่าความแน่นแห้ง (Dry Density, γ_d) ของดินชั้นทางบดอัด โดยแปรผันปริมาณความชื้น (water content, w) และค่าดัชนีพลาสติก (Plasticity Index, PI) ซึ่งได้จากการแปรผันปริมาณส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 200 (Finer content) สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 ชุดทดสอบการทะลุทะลวงแบบพกพา สำหรับการควบคุมคุณภาพงานบดอัด

ชุดทดสอบนี้เป็นนวัตกรรมสิ่งประดิษฐ์ที่มีชื่อว่า ชุดทดสอบการทะลุทะลวงแบบพกพา (Portable Cone Penetrometer, PCP) มีขนาดกะทัดรัด มีน้ำหนักเบา (น้ำหนักประมาณ 2.60 กิโลกรัม) สะดวกในการพกพาไปในสถานที่ก่อสร้างที่ห่างไกลห้องปฏิบัติการ มีวิธีการใช้เครื่องมือทดสอบที่ทำได้ง่าย ไม่มีเทคนิคที่ยุ่งยากซับซ้อนที่ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญเฉพาะ และยังสามารถใช้งานชุดทดสอบนี้ ทำการทดสอบ (PCP test) ได้ด้วยตัวคนเดียวอย่างรวดเร็ว ช่วยให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายเป็นอย่างมาก หลักการทำงานของชุดทดสอบนี้เป็นระบบกลไก (Mechanics) ทำการทดสอบบดอัดดินบดอัดโดยใช้แรงคนกดที่ด้ามจับ แรงกดนี้จะถูกถ่ายแรงไปยังสปริงเพื่อดันให้กรวยทะลุทะลวงดินให้จมลงไปในดินที่ต้องการทดสอบเพียง 20 มิลลิเมตร แล้วอ่านค่าระยะยุบตัวของสปริงจากวงแหวนพลาสติกที่ถูกกระบอกกลวงที่บรรจุสปริงภายในดันให้เลื่อนไปจากตำแหน่งเดิมบนแกนสเกลที่ขีดเป็นช่วงๆละ 10 มิลลิเมตร แล้วนำระยะยุบหดตัวของสปริงที่อ่านได้ ไปแปลงเป็นค่าแรงกด โดยการคูณด้วยค่านิจของสปริง (K) ที่บรรจุอยู่ในกระบอกกลวงของชุดทดสอบนี้ แล้วนำไปคำนวณหาค่า CBR และค่าความแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัด ($\gamma_{d, \max}$) ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะกล่าวต่อไป

5.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าความแน่นแห้งและค่าซีบีอาร์

จากผลการทดสอบดินคันทางบดอัดด้วยชุดทดสอบ PCP ผู้วิจัยขอเสนอแบบจำลองค่าซีบีอาร์ ในสถานะไม่แช่น้ำ ($CBR_{unsoaked}$) ในรูปแบบของฟังก์ชันกำลัง (Power function) ดังสมการที่ 4.1

$$CBR_{unsoaked} = 2.086(PCPF)^{0.36} \quad (4.1)$$

เมื่อ $CBR_{unsoaked}$ คือ ร้อยละของค่าซีบีอาร์ของดินบดอัดในสถานะไม่แช่น้ำ ขณะที่ $PCPF$ คือ ค่าแรงกดบนด้วยเครื่องมือ PCP มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)

แบบจำลองทำนายปริมาณความชื้น (w) ในดินบดอัด เพื่อตรวจสอบว่าเป็นการบดอัดดินที่ใช้ปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum Water Content, OWC) หรือเป็นการบดอัดดินทางด้านเปียก (Wet side) หรือทางด้านแห้ง (Dry side) ในรูปแบบฟังก์ชันเส้นตรง (Linear function) ดังสมการที่ 4.2

$$w = 20.707 - 0.032 (PCPF) \quad (4.2)$$

หรือ กรณีที่ทราบค่าดัชนีพลาสติก (Plasticity Index, PI) ของดินบดอัดที่ทำการทดสอบ ให้ใช้สมการความสัมพันธ์ที่สามารถทำนายค่าปริมาณความชื้นในดินบดอัดได้ดียิ่งขึ้น ดังสมการที่ 4.3

$$w = 25.712 - 0.036 (PCPF) - 0.526(PI) \quad (4.3)$$

เมื่อ w คือ ร้อยละของปริมาณความชื้นในดินบดอัด ในขณะที่ $PCPF$ คือ ค่าแรงกดด้วยเครื่องมือ PCP มีหน่วยเป็นนิวตัน (N) และ PI คือ ค่าร้อยละของดัชนีพลาสติกของดินบดอัด

กรณีบดอัดดินที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม (OWC) หรืออยู่ในช่วง $OWC \pm 2\%$ สามารถใช้แบบจำลองทำนายค่าซีบีอาร์ในสถานะแช่น้ำ (CBR_{soaked}) ในรูปแบบฟังก์ชันพหุนาม (Polynomial function) ดังสมการที่ 4.6 และแบบจำลองความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry Density, $\gamma_{d, max}$) ของดินบดอัด ในรูปแบบฟังก์ชันเส้นตรง (Linear function) ดังสมการที่ 4.8

$$CBR_{soaked} = 6.634 - 0.629(CBR_{unsoaked}) + 0.039(CBR_{unsoaked})^2 \quad (4.6)$$

$$\gamma_{d, \max} = 2.437 - 0.04 (OWC) \quad (4.8)$$

เมื่อ CBR_{soaked} และ $CBR_{unsoaked}$ คือ ร้อยละของค่าซีบีอาร์ของดินบดอัดในสถานะแช่น้ำและไม่แช่น้ำ ตามลำดับ

$\gamma_{d, \max}$ คือ ค่าความแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัด มีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3)

OWC คือ ร้อยละของปริมาณน้ำเหมาะสมในดินบดอัด หรือ ค่าปริมาณน้ำในดินบดอัดอยู่ในช่วง $OWC \pm 2\%$

5.2 ข้อเสนอแนะในการใช้ชุดทดสอบ แบบจำลองและงานวิจัยต่อไป

5.2.1 ควรหมั่นหยอดน้ำมันหล่อลื่นในกระบอกกลางและวงแหวนอ่านค่าของชุดทดสอบ PCP เพื่อลดแรงเสียดทานรวมทั้งตรวจสอบความล้าของสปริงอยู่เสมอ เพื่อที่จะได้ค่าแรงกดที่ถูกต้อง เป็นจริงมากที่สุด

5.2.2 แบบจำลองทำนายค่าปริมาณความชื้น ค่าความแน่นแห้งสูงสุดและค่าซีบีอาร์นี้ ให้ใช้กับการควบคุมคุณภาพการบดอัดดินเม็ดละเอียดเท่านั้นและใช้ได้ดีที่สุดกับดินคันทางตามมาตรฐานของกรมทางหลวงซึ่งมีค่า Soaked CBR อยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 3.5 ถึง 8.5

5.2.3 ควรทำการวิจัยเพิ่มกับดินคันทางหลายๆ ชนิดในโครงการก่อสร้างจริง เพื่อให้ได้ผลทำนายที่แม่นยำมากขึ้นด้วย จนสามารถบูรณาการใช้ร่วมกับวิธีมาตรฐานที่มีอยู่เดิม หรืออาจกำหนดเป็นวิธีมาตรฐานในการควบคุมคุณภาพงานบดอัดได้อีกวิธีหนึ่ง

5.2.4 ควรพัฒนาชุดทดสอบให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นเช่น วัดแรงกดด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ รวมทั้งคำนวณค่าที่ต้องการออกทางหน้าจอแสดงผลทันที เป็นต้น

รายการอ้างอิง

- สุขสันต์ หอพิบูลสุข (2548). การเพิ่มกำลังของดินเหนียวและดินตะกอน โดยการผสมซีเมนต์ สำหรับงานฐานราก. รายงานการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 50 หน้า
- สุขสันต์ หอพิบูลสุข และ รุ่งลาวัลย์ ราชัน. (2554). บทที่ 7 การบดอัด (Soil compaction). **ปฐพีกลศาสตร์ (Soil Mechanics 2nd edition)**. หน้า 283-319
- สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ. **มาตรฐานและข้อกำหนดวัสดุ**. กรมทางหลวง.
- Black, W.P.M. (1962). "A Method of Estimating the CBR of Cohesive Soil from Plasticity Data", *Geotechnique*. Vol. 12, pp. 271-272.
- Chinkulkijniwat A., Man-koksung, E., Uchaipichart, 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, pp.1-15.
- Gurtug, Y and Sridharan, A. (2002), "Prediction of compaction characteristics of fine-grained soils", **Geotechnique**, vol.52, No.10, pp.761-763
- Hilf. (1956). ทฤษฎีบดอัดดิน. **ปฐพีกลศาสตร์**. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชูศักดิ์ กิริรัตน์. หน้า 741 - 742
- Hogentogler. (1936). ทฤษฎีบดอัดดิน. **ปฐพีกลศาสตร์**. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชูศักดิ์ กิริรัตน์. หน้า 739 - 740
- Horpibulsuk, S., Katkan, W., Sirilerdwattana, W., and Rachan, R. (2006), "Strength development in cement stabilized low plasticity and coarse grained soils : Laboratory and field study", **Soils and Foundations**, Vol.46, No.3, pp.351 - 366.
- Horpibulsuk, S., Katkan, W., and Apichatvullop, A. (2008a), "An approach for assessment of compaction curves of fine-grained soils at various energies using a one point test", **Soils and Foundations**, Vol.48, No.2, pp.115-126.
- Horpibulsuk, S., Katkan, W. and Naramitkornburee, A. (2009a), "Modified Ohio's curves: A rapid estimation of compaction curves for coarse - and fine-grained soils", **Geotechnical Testing Journal, ASTM**, Vol.32, No.1.
- Horpibulsuk, s., Miura, N, Nagaraj, T.S. (2005). Clay-Water Cement ratio identify of cement and mixed soft clay. **Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering, ASCE**,

vol.131, No.2 (in press)

Johnson, A.W. and Sallberg, J.R. (1960). Factors that influence field compaction of soil, **Bulletin No.272**, High survey research board, 206 p.

Joseph, D. and Vipulanandan, C. (2011), “Characterization of Field Compacted Soils (Unsoaked) Using the California Bearing Ratio (CBR) Test”. *Geo-Frontiers2011: Advance in Geotechnical Engineering, Vol. 211 of Geotechnical Special Publication*, American Society of Civil Engineers, ASCE, March 13-16, 2011, pp. 2719-2728.

Joslin, J.C. (1959), “Ohio’s typical water-density curves, American Society for testing and materials”, **Special Technical Publication STP 239**, pp.111-118.

Lambe. (1985). ทฤษฎีบดอัดดิน. **ปฐพีกลศาสตร์**. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชูศักดิ์ ศิริรัตน์. หน้า 742-743

Lambe, T.W. (1962). Soil stabilization, Chapter 4 of **Foundation Engineering**, G.A. Leonard (ed.), McGraw Hill, New York.

Lee, P.Y. and Suedkamp, R.J. (1972), Characteristics of irregularly shaped compaction curves of soils. **Highway research record No.381**, National academic of sciences, Washington D.C., pp.1 - 9.

Nagaraj, T.S., Lutenegeger, A.J., Pandian N.S. and Manoj, M. (2006), “Rapid estimation of compaction parameters for field control.”, **Geotechnical Testing Journal, ASTM**, Vol.29, No.6, pp.1-10.

Patel S. and Desai, M.D. (2010), “CBR Predicted by Index Properties for Alluvial Soils of South Gujarat”, **Indian Geotechnical Conference-2010, GEOTrendz**, December 16-18, 2010, IGS Mumbai Chapter & IIT Bombay.

Proctor. (1930). ทฤษฎีบดอัดดิน. **ปฐพีกลศาสตร์**. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชูศักดิ์ ศิริรัตน์. หน้า 738-739

Ramasubbarao, G.V. and Siva Sankari, G. (2013), “Predicting Soaked CBR Value of Fine Grained Soil Using Index and Compaction Characteristics”, **Jordan Journal of Civil Engineering**, Vol.7, No.3, 2013, pp.354 - 360.

Sathawara Jigar, K., and Patel, A.K. (2013), “Comparison between soaked and unsoaked CBR”, **International Journal of Advanced Engineerig Research and Studies, IJAERS**, Vol.11, Issue 3 April-June, 2013, pp.132-135.



ภาคผนวก ก

คู่มือการใช้งานชุดทดสอบการทะลุทะลวงแบบพกพา
(Portable Cone Penetrometer, PCP) ระบบกลไก (Mechanics)

คู่มือการใช้งานชุดทดสอบการทะลุทะลวงแบบพกพา (Portable Cone Penetrometer, PCP) ระบบกลไก (Mechanics)

วิธีการใช้งานชุดทดสอบ (PCP Test)

1. ก่อนทำการทดสอบด้วย Portable Cone Penetrometer หรือ PCP ให้เลื่อนวงแหวนพลาสติกสำหรับอ่านค่าระยะยุบตัวของสปริงมาให้ติดกับปลายกระบอกกลวง เป็นการตั้งค่าระยะศูนย์ (Set 0)

2. นำชุดทดสอบไปทดสอบดินคั่นทางบดอัด (Compacted Sub-grade Soil) โดยใช้มือทั้งสองข้างจับที่ด้ามจับของชุดทดสอบ PCP วางปลายแหลมของกรวยทะลุทะลวงดิน (PCP Cone) ตรงตำแหน่งที่ต้องการทดสอบ แล้วค่อยๆ ออกแรงกดด้ามชุดทดสอบ PCP ด้วยความเร็วสม่ำเสมอ แรงมือกดจะไปดันสปริงในกระบอกกลวงให้ยุบตัวลงซึ่งจะถ่ายแรงกดไปที่ PCP Cone ให้ทะลุทะลวงจมลงไปในดินบดอัด เมื่อได้ระยะจมที่ 20 มิลลิเมตร (จม PCP Cone พอดี) ให้หยุดกด แล้วดึงชุดทดสอบออกจากดินที่ทำการทดสอบ

3. อ่านค่าระยะยุบตัวของสปริง (ค่า *PCP*) หน่วยเป็นเซนติเมตร (cm) คือ ระยะที่วงแหวนพลาสติกเลื่อนไปจากตำแหน่งเดิมที่ตั้งไว้ (set 0) แล้วจดบันทึกไว้

4. ทำการทดสอบซ้ำตามข้อ 1 ถึง ข้อ 4 ประมาณ 3-5 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่าง โดยตำแหน่งที่ทดสอบควรห่างจากจุดเดิมอย่างน้อย 5 เซนติเมตร หรือให้มากกว่า 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางส่วนที่โตที่สุดของ PCP Cone (Dia. PCP Cone = 23.1 มิลลิเมตร) แล้วหาค่าเฉลี่ยของค่า *PCP* เพื่อนำไปใช้คำนวณต่อไป

5. ทำการแปลงค่าระยะยุบตัวของสปริง หรือค่า *PCP* ที่คำนวณได้เป็นค่าเฉลี่ยที่อ่านได้จากข้อ 4 ให้เป็นค่าแรงกด (*PCPF*) มีหน่วยเป็นนิวตัน (N) โดยการคูณด้วยค่านิจสปริง (*K*) ของสปริงในชุดทดสอบด้วยสมการที่ 1

$$PCPF = K \cdot (PCP) \quad (1)$$

เมื่อ *PCPF* คือ ค่าแรงกดบนด้ามจับของชุดทดสอบ PCP มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)

K คือ ค่านิจสปริงในชุดทดสอบ PCP มีหน่วยเป็นนิวตัน/เซนติเมตร (N/cm) โดยการศึกษารูปร่างค่า $K = 27.72 \text{ N/cm}$

PCP คือ ค่าเฉลี่ยของระยะยุบตัวของสปริงที่อ่านได้จากวงแหวนพลาสติกที่เลื่อนไปจากระยะเดิมของชุดทดสอบ PCP มีหน่วยเป็นเซนติเมตร (cm)

6. คำนวณหาค่าปริมาณน้ำในดินบดอัด (w) เพื่อตรวจสอบให้แน่ใจว่าได้ทำการบดอัดดินคั่นทางด้วยค่าปริมาณน้ำเหมาะสม (OWC) ทั้งนี้ เพื่อจะทำให้ได้ค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, $\gamma_{d, max}$) โดยใช้สมการที่ 2

$$w = 20.707 - 0.032 (PCPF) \quad (2)$$

เมื่อ $PCPF$ คือ ค่าแรงกดบนด้ามจับของชุดทดสอบ PCP มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)

หากพบว่าค่าปริมาณน้ำในดินบดอัด (w) ที่คำนวณได้ มีค่าอยู่ระหว่าง $OWC \pm 2\%$ ก็ให้ถือว่าเป็นการบดอัดดินด้วยค่าปริมาณน้ำเหมาะสม (OWC) เช่นกัน แต่ถ้าหากค่าปริมาณน้ำในดินบดอัด (w) ที่คำนวณได้ไม่อยู่ในช่วง $OWC \pm 2\%$ ก็ให้ทำการเพิ่มหรือน้ำที่ใช้ผสมในดินคั่นทางบดอัดใหม่แล้วทดสอบซ้ำ จนกระทั่งคำนวณได้ค่าปริมาณน้ำในดินบดอัดอยู่ในช่วง $OWC + 2\%$

7. คำนวณหาค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, $\gamma_{d, max}$) ของดินบดอัดโดยใช้สมการที่ 3

$$\gamma_{d, max} = 2.437 - 0.04 (OWC) \quad (3)$$

เมื่อ $\gamma_{d, max}$ คือ ค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density) ของดินบดอัดมีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) ในขณะที่ OWC คือ ร้อยละของปริมาณน้ำเหมาะสมในดินคั่นทางบดอัด (อนุโลมให้ใช้ค่าปริมาณน้ำในดินบดอัด (w) ที่คำนวณได้ในช่วง $OWC \pm 2\%$ ถือเป็นค่า OWC ในสมการที่ 3 นี้ด้วย)

8. คำนวณหาค่า $CBR_{unsoaked}$ ตามสมการที่ 4 และคำนวณหาค่า CBR_{soaked} ตามสมการที่ 5 ตามลำดับ

$$CBR_{unsoaked} = 2.086(PCPF)^{0.36} \quad (4)$$

$$CBR_{soaked} = 6.634 - 0.629(CBR_{unsoaked}) + 0.039(CBR_{unsoaked})^2 \quad (5)$$

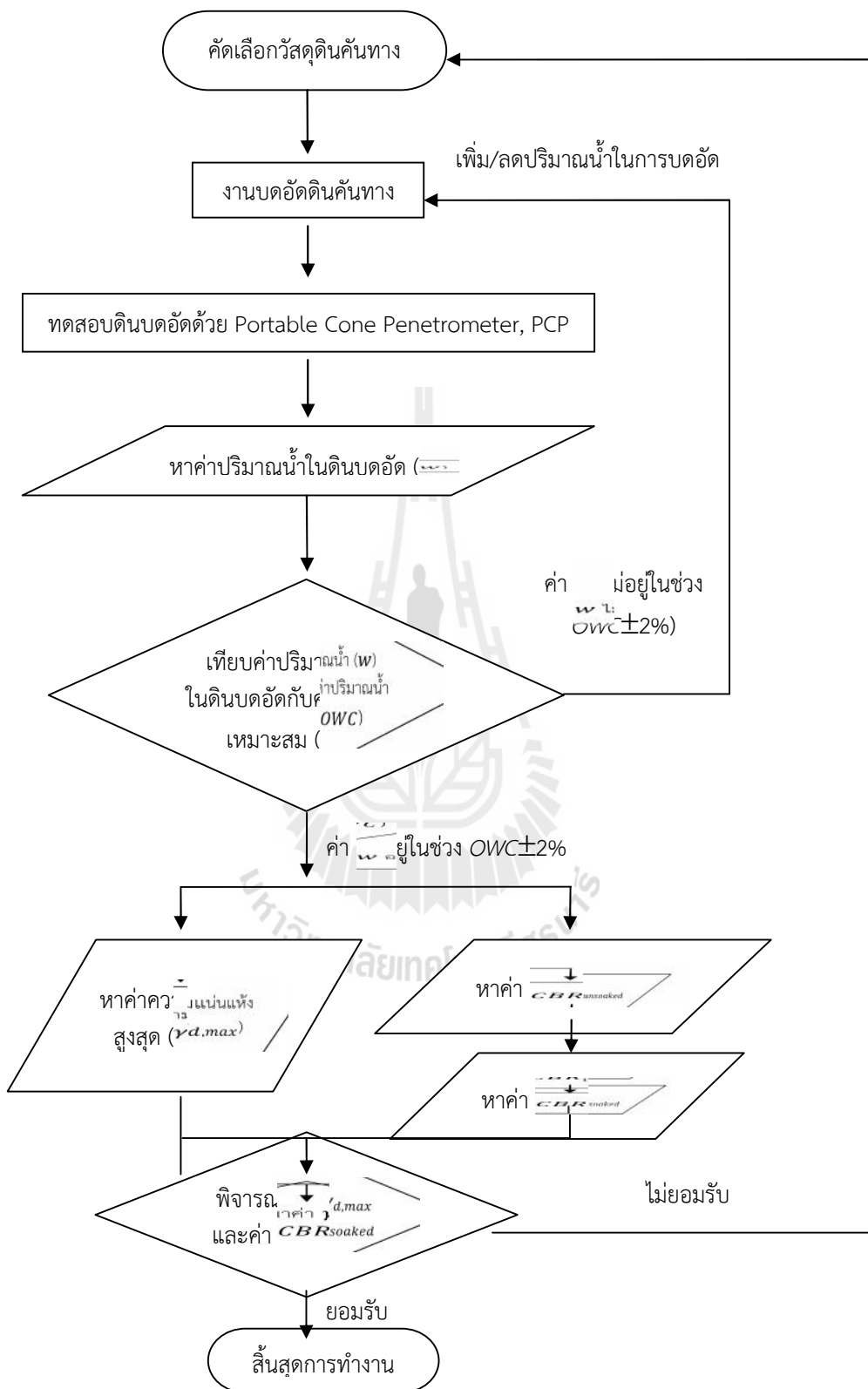
9. พิจารณาค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, $\gamma_{d, max}$) และค่า CBR_{soaked} ที่คำนวณได้ตามข้อที่ 7 และข้อที่ 8 ว่าเป็นไปตามมาตรฐานมาตรฐานที่กำหนด

หรือไม่ หากพบว่าค่าที่คำนวณได้อยู่ในช่วงค่าตามมาตรฐานกำหนด ก็สิ้นสุดขั้นตอนการควบคุมคุณภาพงานบดอัด แต่ถ้าหากค่าที่คำนวณได้ไม่อยู่ในช่วงค่ามาตรฐานที่กำหนด ควรพิจารณาคัดเลือกวัสดุใหม่และเริ่มต้นขั้นตอนการบดอัดใหม่

ลำดับขั้นตอนในการควบคุมคุณภาพงานบดอัดดินคันทาง

ลำดับขั้นตอน (Flow Chart) ในการควบคุมคุณภาพงานบดอัดดินคันทาง ด้วยชุดทดสอบการทะลุทะลวง แบบพกพา (Portable Cone Penetrometer, PCP) แสดงดังรูปที่ ผ-1





รูปที่ ก.1 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอน (Flow Chart) การควบคุมคุณภาพงานบดอัดดินชั้นทาง ด้วยชุดทดสอบการทะลุทะลวง แบบพกพา (Portable Cone Penetrometer, PCP)

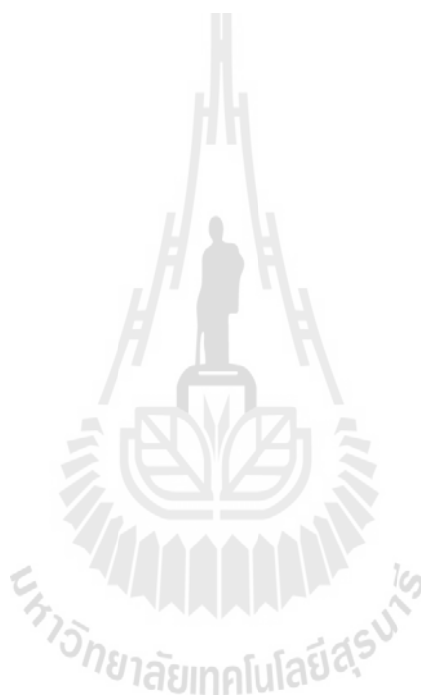
ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

- T. Tirametatiparat and A. Chinkulkijniwat. (2014). “**A Portable Cone Penetrometer for Compaction Work Control**”, International Conference on Advances in Civil Engineering for Sustainable Development (ACESD 2014). August 27–29, 2014. Suranaree University of Technology Nachon Ratchasima, Thailand. Invited Lectures, Vol. 2, pp. 185-188.



A Portable Cone Penetrometer for Compaction Work Control

T. Tirametatiparat & A. Chinkulkijniwat

Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

ABSTRACT: A Portable Cone Penetrometer (PCP) device was developed in this paper. The objective of the PCP is for quick estimation of field CBR. The test results showed a linear correlation between the unsoaked CBR values and penetrations read from the PCP at various fine contents. Comparisons between the CBR tests and measurement of PCP test from standard compaction characteristics with optimum water content -4% to $+4\%$ ($\pm 4\%$ OWC) are in very agreement.

1 INTRODUCTION

The California bearing ratio (CBR) is a test to evaluate the mechanical strength of road subgrades and basecourses. It was developed by the California Department of Transportation before World War II. The test is performed by measuring the pressure required to penetrate a soil sample with a plunger of standard area. The measured pressure is then divided by the pressure required to achieve an equal penetration on a standard crushed rock material. The CBR test is described in ASTM Standards D1883-05 (for laboratory-prepared samples) and D4429 (for soils in place in field), and AASHTO T193. The CBR rating was developed for measuring the load-bearing capacity of soils used for building roads.

The Dynamic Cone Penetrometer (DCP, TM6951-3(2003)) is an instrument designed for the rapid in-situ measurement of the structural properties of existing road pavements constructed of unbound materials.

The CBR value is used for road pavements constructed design. But compaction work control of road subgrades are checked with field dry density. Because CBR tests is time consuming and labor expense. As such, a Portable Cone Penetrometer (PCP) was developed to assist compaction work control. The instrument provides a very simple method of obtaining CBR values which would not require the digging of test pits. It means that the PCP is quick and easy to use, portable and suitable for use in loca-

tions where access may be difficult. Relationship between CBR values and read values from the device is important component in developing the PCP device. The paper considers several subgrade soils at sieve distribution particle material were decided based on Department of Highways, Thailand's standard. A series of PCP tests were conducted with a 6 inches diameter compaction mold. Based on analysis of this testing, the relationships between the PCP results and the subgrade parameters such as unsoaked CBR and dry density are obtained.

2 MATERIALS AND EXPERIMENTS

A cohesionless soil was examined in this study. It was taken from an existing borrow pit (which has been used for road subgrades) located just about 5 km apart from Suranaree University of Technology, Nakhon-Ratchasima, Thailand. Based on the unified soil classification system (USCS) by ASTM D2487-69, this cohesionless soil can be classified as a silty sand (SM). Other physical properties of the studied soil are expressed in Table 1.

Prior to the test, the studied soil was air dried for a week. The particle size distribution was conducted by sieve analysis according to ASTM D422-63 (2007). A series of standard compaction test has been performed based on ASTM D 698-70 to determine the maximum dry unit weight ($\gamma_{d,max}$) and optimum water content (OWC). The specimens those compacted in the 6 inches diameter with 4.584 inch-

es height mold were compacted with a standard rammer of 5.5 lb weight having drop height of 12 inches. Number of drop was 25 blows for each layer and the specimens were compacted in three layers.

Table 1. Physical Properties of studies soils.

Soil Properties	Samples	
	Silty sand	Fine materials
Physical Properties:		
Specific Gravity	2.71	2.57
Liquid Limit,%	NP	55.1
Plastic Limit,%	NP	38.7
USCS.	SM	CH

Fine content of 15%, 30%, 45% and 60% by weight were added into the studied soil. Properties of fine content are given in Table 1. Based on the unified soil classification where system (USCS), this clay soil can be classified as a high liquid limit clay (CH). While, the silty sand is categorized as the minus sieve No.4 material. Prior to the compaction test, the silty sand was manually mixed with various amount of fine content and water sprayed to desired water content of about OWC-4%, OWC-2%, OWC, OWC+2% and OWC+4%. Then the admixed soils were covered with plastic for 24 hours to achieve a uniform water content. The compaction program is organized as shown in Figure 1.

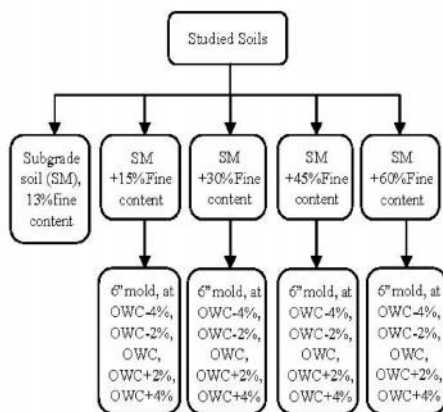


Figure 1. Detail of compaction tests organized in this study .

The unsoaked CBR tests were carried out according to ASTM D1883 (2007) on the compacted samples with various water contents form OWC-4%, to OWC+4% .

The Portable Cone Penetrometer (PCP) is an instrument designed for rapid measurement of in-situ CBR values. The PCP consists of a rod of 16 mm diameter and a tempered steel cone of 20 mm base diameter and a 60 degree point angle, which is attached to rod. The PCP is driven into the soil by a

human force applied through a spring. The magnitude of compression is measured at 20.0 mm depth of cone penetration.

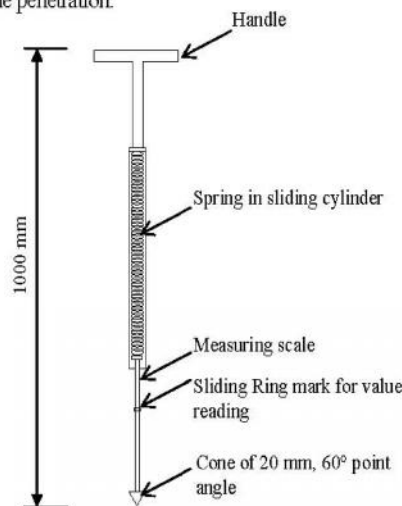


Figure 2. The Portable Cone Penetrometer (PCP).

The relationships between the spring retraction distance (obtained from the PCP test) and CBR (without surcharge) under unsoaked conditions were developed based on the CBR and PCP tested results on the identical samples. The developed relationships will be used for approximation of the CBR and dry density values at construction site.

3 RESULTS AND DISCUSSIONS

The basic properties and compaction properties of compacted subgrade soil are written in Table 2. The laboratory compaction curves of the admixed soils in 6 inches diameter mold are plotted in Figure 3 to 6. The maximum dry densities admixed soils decreases with increasing fine content (the plasticity of soil). The compaction characteristics of admixed soils are written in Table 3.

Table 2. Basic properties and compaction properties of compacted subgrade soil.

Compacted subgrade soil properties	Values
Seive analysis (%Passing):	
#4	100.0
#10	91.9
#40	65.2
#200	13.1
Liquid Limit,%	NP
Plastic Limit,%	NP
OWC,%	9.23
Maximun dry density, g/cm ³	1.89
Soaked CBR,%	2.1
Unsoaked CBR,%	7.1
Swell,%	0.2

Table 3. Compaction characteristics of admixed soils and result of PCP test.

Fine content	PI	Compacted admixed soil properties			
		w (%)	γ_d (g/cm ³)	CBR _{unsoaked} (%)	PCP test (cm)
+15%	11.4	6.19	1.84	13.1	13.07
		8.10	1.90	10.3	11.33
		9.41*	1.96	6.9	10.17
		11.92	1.89	3.2	3.47
		13.81	1.84	1.2	0.73
+30%	12.7	8.13	1.81	12.1	14.70
		10.01	1.89	9.7	12.77
		11.92*	1.90	5.2	7.60
		14.36	1.81	1.6	2.87
		16.53	1.75	1.0	0.73
+45%	13.3	11.88	1.77	8.6	9.77
		14.01	1.80	4.3	4.93
		15.80*	1.81	2.3	2.50
		17.73	1.71	0.9	0.43
		19.10	1.61	0.6	0.00
+60%	16.3	13.69	1.70	6.9	8.07
		15.52	1.70	4.1	5.47
		17.27*	1.75	1.8	2.43
		19.16	1.64	0.6	0.60
		21.92	1.57	0.3	0.20

* Water content at OWC

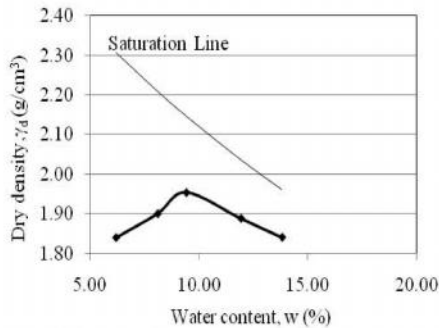


Figure 3. Compaction curve with 15% fine content.

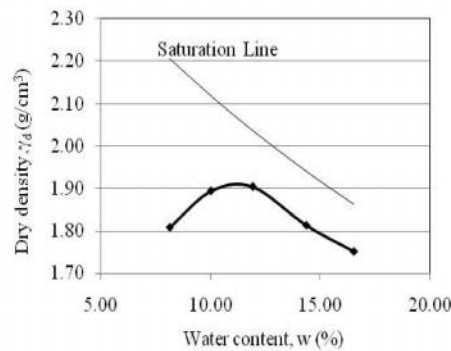


Figure 4. Compaction curve with 30% fine content.

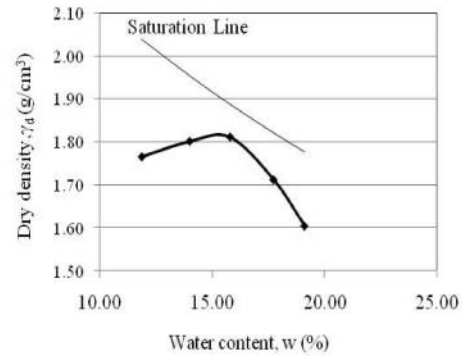


Figure 5. Compaction curve with 45% fine content.

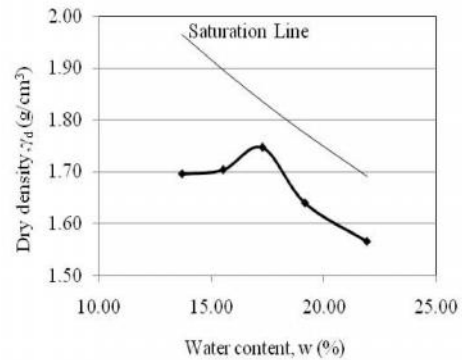


Figure 6. Compaction curve with 60% fine content.

The compaction curves of all specimens compacted are bell shaped with one peak point. Generally, the fine particles control engineering properties of compacted soils. The soil containing the higher fine contents exhibits the higher optimum water content due to high water holding capacity (Ramiah et al., 1970; Pandian et al., 1997; Nagaraj et al., 2006; and Horpibulsuk et al., 2008 and 2009). The high optimum water content is associated with low maximum dry unit weight. While, the unsoaked CBR and PCP values of the specimens compacted are depend on water content, (w) and fine content . To relate the unsoaked CBR and PCP values with w as presented in Fig. 7 and 8. The related curve are reverse S-shaped. Generally, the fine content control engineering properties of compacted soils. The unsoaked CBR tested of all specimens with water content at +4%OWC are similar to CBR with soaked condition.

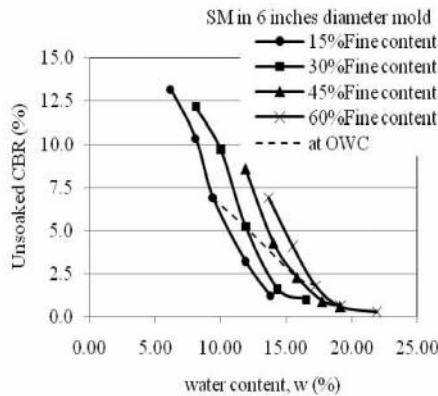


Figure 7. Relationship between Unsoaked CBR and water content at $\pm 4\%$ OWC versus percent fine content.

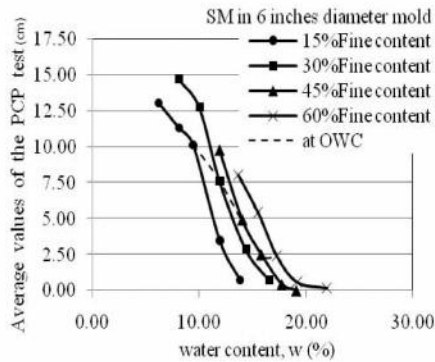


Figure 8. Relationship between the PCP values and water content at $\pm 4\%$ OWC versus percent fine content.

Figure 8 shows the relationship between unsoaked CBR and the PCP values versus fine content with water content at $\pm 4\%$ OWC. It was taken for developing a relationship in linear function:

$$CBR_{\text{unsoaked}} = 0.8312 (\text{PCP}) + 0.1381 \quad (1)$$

The unsoaked CBR tested of all specimens with water content at $\pm 4\%$ OWC are similar to CBR with soaked condition. However, unsoaked CBR can be approximated from the PCP test using linear function are in very agreement.

The PCP test has the advantage of economic, timesaver and by oneself testing. While, CBR values results from the PCP test equate with CBR values results from CBR-standard method.

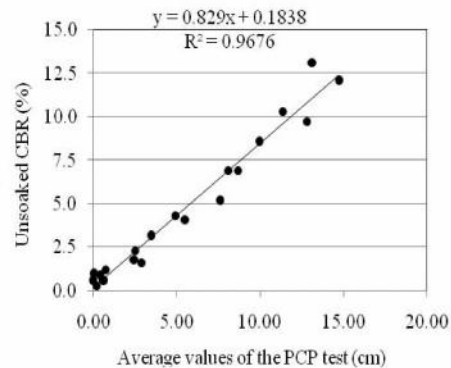


Figure 9. Relationship between Unsoaked CBR and the PCP values.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors acknowledge the financial support from the Thailand Research Fund (TRF).

REFERENCES

- Chinkulkijniwat, A., Man-koksung, E., Uchaipichart, A. and Horpibulsuk, S. 2010. Compaction characteristics of non-gravel and gravelly soils using a small compaction apparatus, *Journal of ASTM International*, 7(7): 1-15.
- Gill, K.S., Jha, J.N. and Choudhary, A.K., 2010. CBR Value Estimation Using Dynamic Cone, Penetrometer Indian Geotechnical Conference, GEOTrendz, 16-18 December.
- Gurtug, Y., Sridharan, A., 2002. Prediction of compaction characteristics of fine-grained soils. *Geotechnique*, 52(10): 761-763.
- Gurtug, Y. and Sridharan, A., 2004. Compaction behavior and prediction of its characteristics of fine grained soils with particular reference to compaction energy, *Soils and Foundations*, 44(5): 27-36.
- Horpibulsuk, S., Katkan, W. and pichatvullop, A. 2008a. An approach for assessment of compaction curves of fine-grained soils at various energies using a one point test, *Soils and Foundations*, 48(2): 115-126.
- Horpibulsuk, S., Katkan, W., and Naramitornburee, A. 2009. Modified Ohio's curves : A rapid estimation of compaction curves for coarse-grained soils and fine-grained soils, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 32(1): 64-75.
- Nagaraj, T.S., Lutenegeger, A.J., Pandian N.S. and Manoj, M. 2006. Rapid estimation of compaction parameters for field control, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 29(6): 1-10.
- Pandian, N.S., Nagaraj, T.S. and Manoj, M. 1997. Re-examination of compaction characteristics of fine-grained soils, *Geotechnique*, 47(2): 363-366.
- Ramiah, B.K., Viswanath, V. and Krihanmurthy, H.V. 1970. Interrelationship of compaction and index properties, *Proceedings of 2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering: 577-587: Singapore.*

ประวัติผู้เขียน

นายถาวร ชีรเมธาภิพรัตน์ เกิดเมื่อวันที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2513 ที่บ้านปรางค์น้อย หมู่ที่ 9 ตำบลพลับพลา อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนโชคชัยสามัคคี อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี (เกียรตินิยมอันดับ 1) สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล และได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปัจจุบันประกอบอาชีพวิศวกรโยธาอิสระ มีผลงานทางวิชาการดังปรากฏรายละเอียดในภาคผนวก ข.

