



รายงานการวิจัย

การบดอัดแบบพล็อกเตอร์โดยใช้แบบบดอัดขนาดเล็ก
(A Smaller Mold – Proctor Compaction Test)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

สำนักวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2551

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการเพียงผู้เดียว

กันยายน 2552

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถเสร็จสมบูรณ์ได้ จากความร่วมมือจากบุคคลและหน่วยงานต่างๆที่เกี่ยวข้อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งไปผู้อุดหนุนทุนวิจัยปีงบประมาณ 2551 ผู้เขียนขอขอบคุณ รศ.ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข สำหรับการแลกเปลี่ยนความคิดเห็นเชิงวิชาการซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการศึกษา นอกจากนี้ผู้เขียนขอขอบคุณ ดร.ณรงค์ อัครพัฒนานุกูล ผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และบุคลากรของศูนย์เครื่องมือฯ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง นายดิงศักดิ์ เหลืองเจริญทิพย์ ที่ให้ความสะดวกในการปฏิบัติงาน สุดท้ายนี้ผู้เขียนแสดงความขอบคุณ ไปยัง นายเอกชัย ม่าน โทกสูง และนายพัทยา หนอสีหา ผู้ช่วยวิจัยและนักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาที่ทำงานอย่างอุทิศตนมาตลอดระยะเวลาของโครงการ

อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์

หัวหน้าโครงการวิจัย

กันยายน 2552

บทคัดย่อ

การบดอัดดินเป็นวิธีพื้นฐานในการปรับปรุงคุณภาพดินสำหรับงานก่อสร้างโครงสร้างดิน ในทุก ๆ วันทั่วโลกมีการบดอัดดินเป็นจำนวนนับพันลูกบาศก์เมตร ซึ่งการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ (ASTMD 698-91) หรือสูงกว่ามาตรฐานพล็อกเตอร์ (ASTMD 1557-91) เป็นวิธีการทดสอบบดอัดที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อใช้ในการควบคุมการบดอัดดินในสนาม อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ จะต้องใช้เวลาและแรงงานคนในการทดสอบบดอัดมาก การใช้ชุดทดสอบที่มีขนาดเล็กลงจึงเป็นสิ่งที่น่าพิจารณา เพื่อให้การพัฒนาชุดทดสอบขนาดเล็กเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ วิทยานิพนธ์นี้จึงทำการศึกษาอิทธิพลของคุณลักษณะชุดทดสอบที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการลดลงของขนาดของชุดทดสอบต่อผลทดสอบการบดอัดดิน ชุดทดสอบการบดอัดดินขนาดเล็กที่เสนอมีคุณลักษณะของชุดทดสอบใกล้เคียงกับคุณลักษณะของชุดทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ จึงทำให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานจริงในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ผลทดสอบการบดอัดด้วยชุดทดสอบการบดอัดที่เสนอมีค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ อย่างไรก็ตามชุดทดสอบการบดอัดที่เสนอสามารถใช้ทดสอบการบดอัดได้เฉพาะกับดินที่ไม่มีกรวดปน และเพื่อให้ชุดทดสอบการบดอัดที่เสนอสามารถใช้ได้กับดินปนกรวด วิทยานิพนธ์นี้จึงได้ศึกษาอิทธิพลของกรวดต่อผลทดสอบการบดอัดดิน จากผลการศึกษาพบว่าปริมาณกรวดจะเป็นตัวควบคุมการถ่ายทอดพลังงานการบดอัดไปสู่ส่วนละเอียด (Fine fraction) รวมทั้งคุณลักษณะการบดอัดของส่วนละเอียด เมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรวดและพลังงานการบดอัดที่ถ่ายทอดไปสู่ส่วนละเอียด และนำไปใช้ในการประมาณค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสมของดินปนกรวด พบว่าคุณลักษณะการบดอัดของดินปนกรวดที่ได้จากการประมาณสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์

Abstract

Compaction is a classical ground improvement method for earth structures. Everyday thousands of cubic meter of soil are compacted throughout the world. Proctor test (e.g. ASTM D698-91 and ASTM D1557-91) is widely used to characterize soil compatibility for proper control over the field compaction. However, this procedure is time consuming and labor intensive. Thus, a smaller compaction apparatus is considered. For effectively introducing a new smaller apparatus, influence of changing equipment characteristics due to a reducing size of compaction apparatus must be investigated. The proposed apparatus is similar to the standard Proctor apparatus and is easy to introduce into any soil mechanics laboratory. The maximum dry density and the optimum water content yielded from the proposed compaction apparatus are in excellent agreement with those yielded from the standard Proctor procedure. However, the proposed apparatus is valid only for non-gravel soil. To extend the validity of the proposed apparatus, influence of gravels on standard Proctor test results are investigated. It is found that the gravel content play a major role in controlling the transmitted compaction energy and thus the compaction characteristic of the fine fraction. Relationship between the gravel content and the transmitted compaction energy is established. This relationship is employed to estimate the maximum dry density and the optimum water content of gravelly soil. Good agreement is found for comparison between the estimated values and the corresponding values from standard Proctor test.

สารบัญ

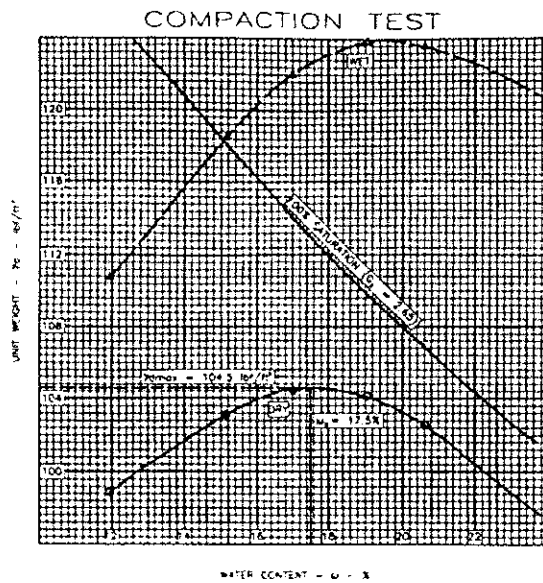
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
บทที่ 2 ปรัชญาแนวคิดการวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
บทที่ 3 การพัฒนาชุดทดสอบการบดอัดดินขนาดเล็ก	9
3.1 การศึกษาอิทธิพลการลดขนาดของแบบบดอัดดิน	9
3.2 ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก	13
บทที่ 4 อิทธิพลของกรวดต่อผลทดสอบการบดอัดดิน	18
4.1 ตัวอย่างดินและวิธีการศึกษา	18
4.2 ผลทดสอบและวิเคราะห์	19
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานบดอัดและปริมาณกรวด	27
4.4 การประมาณคุณลักษณะการบดอัดของดินปนกรวด ด้วยชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก	31
บทที่ 5 ผลทดสอบ	36
5.1 ผลทดสอบการบดอัดดินด้วยชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก	36
5.2 เปรียบเทียบผลการประมาณคุณลักษณะของดินปนกรวด	38
บทที่ 6 สรุป	41
เอกสารอ้างอิง	43

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การบดอัดดินเป็นวิธีพื้นฐานในการปรับปรุงคุณภาพดิน และถูกใช้อย่างแพร่หลายในงานก่อสร้างโครงสร้างดิน ฯลฯ โดยในการเลือกวัสดุที่จะนำมาบดอัดเป็นโครงสร้างดินจะต้องเลือกจากแหล่งดินหรือบ่อยืม (Borrow pit) ที่มีความเหมาะสม โดยนำดินมาทดสอบหาคุณลักษณะการบดอัด (Compaction characteristics) ในห้องปฏิบัติการ โดยร่างเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งของดินที่ได้รับการบดอัดกับความชื้นของดินบดอัด เรียกว่าเส้นโค้งการบดอัด (Compaction curve) ดังรูปที่ 1.1 จากรูปแกนตั้งเป็นแกนของความหนาแน่นแห้ง และแกนนอนเป็นแกนของความชื้นในดินบดอัด ค่าความหนาแน่นแห้งที่จุดสูงสุดของเส้นโค้งคือความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density: $\rho_{d\max}$) และความชื้นที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุดคือความชื้นที่เหมาะสม (Optimum water content: w_{opt}) หลังจากนั้นเมื่อนำดินไปทำการบดอัดจริงในสนาม คุณลักษณะการบดอัดที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะถูกนำมาใช้ในการกำหนดและควบคุมคุณภาพการบดอัดในสนาม



รูปที่ 1.1 เส้นโค้งการบดอัด

การทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติ โดยมักนิยมทำการทดสอบแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ (ASTM D698-91) หรือสูงกว่ามาตรฐานพล็อกเตอร์ (ASTM D1557-91) แต่แบบมาตรฐานที่กำหนดไว้ตามมาตรฐานการทดสอบยังมีขนาดใหญ่ทำให้ต้องใช้ปริมาณดินตัวอย่างในการทดสอบเป็นจำนวนมาก รวมทั้งการทดสอบยังใช้ระยะเวลาการทดสอบ และแรงงานมาก ดังนั้นหากสามารถลดขนาดของแบบที่ใช้ในการทดสอบบดอัดดินได้จะสามารถลดปริมาณดินตัวอย่าง

ระยะเวลาที่ใช้ทดสอบ และค่าใช้จ่ายในการจ้างแรงงานคนในการทดสอบ ซึ่งการลดขนาดของแบบลงจำเป็นต้องทำการศึกษาอิทธิพลของการลดขนาดของแบบเพื่อนำผลการศึกษาไปใช้ในการปรับปรุงชุดทดสอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามการลดขนาดของแบบลงมีผลทำให้แบบบดอัดใช้ได้กับดินเม็ดละเอียดเท่านั้น ดังเช่นผลการศึกษาของ Donaghe and Torrey ในปี ค.ศ. 1994 Garga and Madureira ในปี ค.ศ. 1985 Holtz and Lowitz ในปี ค.ศ. 1957 Donaghe and Townsend ในปี ค.ศ. 1976 และ Winter et al. ในปี ค.ศ. 1998 จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาอิทธิพลของกรวดที่ส่งผลกระทบต่อผลการทดสอบบดอัดดินด้วย อันจะนำไปสู่ข้อสรุปในการพัฒนาและปรับปรุงชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กให้ใช้ได้กับดินทุกประเภท

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อเสนอวิธีการใช้ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กในการทดสอบกับดินทุกประเภท

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาอิทธิพลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของชุดทดสอบการบดอัดดิน ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางก้อนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางแบบบดอัดดิน (Diameter ratio: DR) จำนวนของชั้นดินบดอัดในแบบ น้ำหนักก้อนบดอัดดิน และระยะตกของก้อนบดอัดดิน ต่อผลการทดสอบบดอัดดินตามมาตรฐานพล็อกเตอร์
2. เสนอชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กที่สามารถใช้แทนชุดทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์
3. ศึกษาอิทธิพลของกรวดต่อผลการทดสอบบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ โดยใช้กรวด 2 ขนาด คือกรวดที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 3/8 (9.5 มิลลิเมตร) และกรวดที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) ผสมในดิน 5 ประเภท ด้วยอัตราส่วนผสม 0, 10, 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

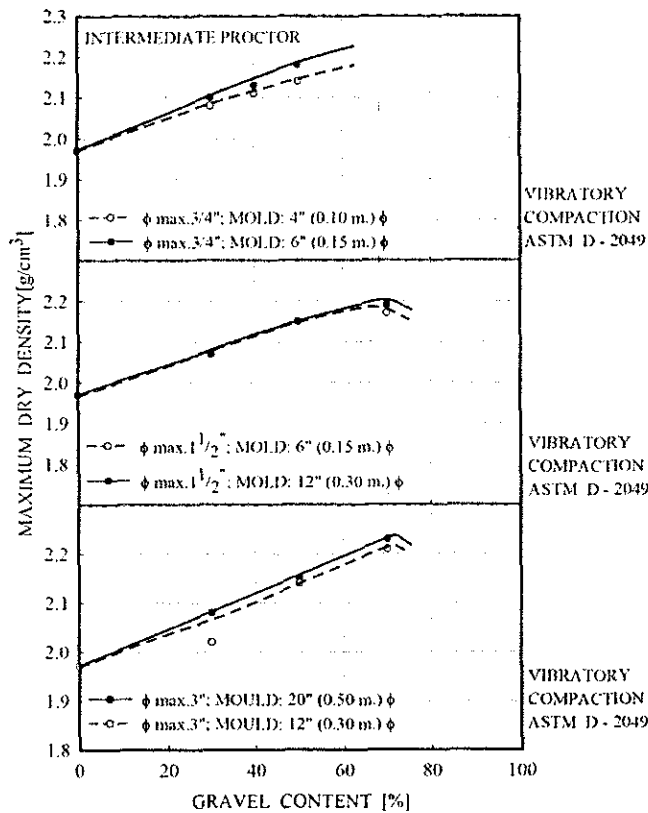
มาตรฐานการทดสอบบดอัดในห้องปฏิบัติการของสมาคมทดสอบและวัสดุแห่งอเมริกา เป็นวิธีการทดสอบการบดอัดดินที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยแบ่งเป็นการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ (ASTM D 698-91) และการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐานพล็อกเตอร์ (ASTM D 1557-91) การบดอัดทั้งสองประเภทจะทำการบดอัดดินลงในแบบทรงกระบอก (Mold) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร หรือแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 มิลลิเมตร โดยแบบทั้งสองมีความสูง 116.4 มิลลิเมตร การเลือกใช้แบบบดอัดในการทดสอบการบดอัดจะขึ้นอยู่กับปริมาณและขนาดของกรวดที่ผสมอยู่ในดินรายละเอียดแสดงในตารางที่ 2.1 โดยแบบบดอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร จะใช้ในการทดสอบการบดอัดดินตัวอย่างที่มีกรวดผสมอยู่ไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ หากดินตัวอย่างมีกรวดผสมอยู่มากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ จะใช้แบบบดอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 มิลลิเมตรในการทดสอบ

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดวิธีการทดสอบบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์

Samples	Method	Mold diameter [mm]	Ramer [weight]		No. of layer [No.]	No. of blow [No.]
			Weight [kg]	Drop height [mm]		
Soil with gravel 4.75-9.5 mm. dia. < 20%	A	101.6	2.5	304.8	3	25
Soil with gravel 4.75-9.5 mm. dia. > 20% and 9.5-19 mm. dia. ≤ 20%	B or C	101.6 or 152.4	2.5	304.8	3	25 or 56
Soil with gravel 9.5-19 mm. dia. > 20% and 9.5-19 mm. dia. ≤ 30%	C	152.4	2.5	304.8	3	56

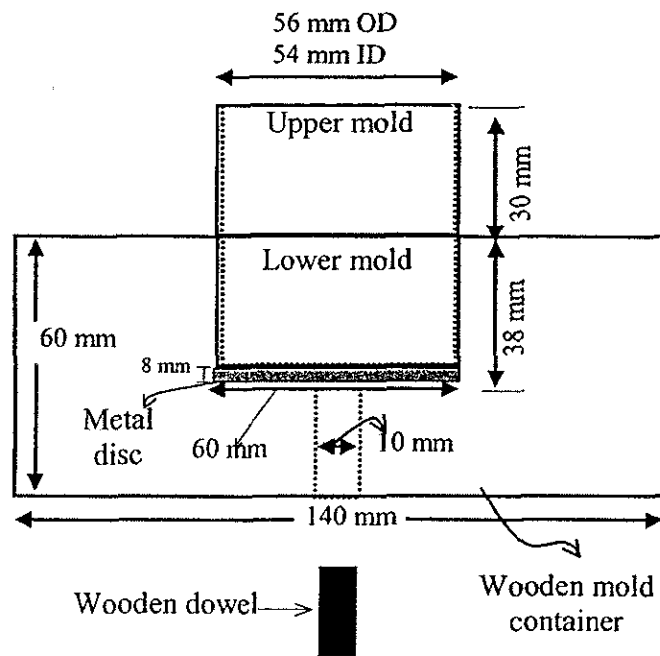
จากข้อกำหนดตามมาตรฐานการทดสอบบดอัดชี้ให้เห็นว่ากรวดมีผลต่อการทดสอบบดอัดดิน Donaghe and Torrey (1994) พบว่า อัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแบบบดอัดดินและขนาดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดดินที่เหมาะสมจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 5 ถึง 6 เท่า ขณะที่ Garga and Madureira (1985) ได้ทำการทดสอบบดอัดดินกรวดแม่น้ำพบว่า ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะมีค่ามากที่สุดเมื่ออัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแบบบดอัดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดดินเพิ่มขึ้นถึง 8 เท่า แสดงดังรูปที่ 2.1 นอกจากนี้ Garga and

Madureira (1985) ยังพบว่ากรวดจะเริ่มมีอิทธิพลต่อการทดสอบบดอัดดิน เมื่อดินตัวอย่างมีกรวดผสมในปริมาณ 20 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวได้สอดคล้องกับ Holtz and Lowitz (1957) และ Jones (1954) ขณะที่ผลการศึกษาของ Donaghe and Townsend (1976) พบว่ากรวดจะเริ่มซัดกันเมื่อดินมีปริมาณกรวดเพิ่มขึ้นถึง 40 เปอร์เซ็นต์ และ Winter et al. (1998) พบว่าถ้าดินตัวอย่างมีกรวดขนาดใหญ่กว่า 20 มิลลิเมตร ป่นอยู่ในปริมาณมากกว่า 45 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ กรวดจะเป็นตัวควบคุมพฤติกรรมกรรมการบดอัดของดิน ถึงแม้งานวิจัยหลายชิ้นได้แสดงให้เห็นว่ากรวดมีอิทธิพลต่อผลทดสอบการบดอัดดินป่นกรวดและส่งผลให้พลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดสู่ส่วนละเอียดมีค่าลดลง แต่ก็ไม่มีงานวิจัยชิ้นใดที่ทำการศึกษาการถ่ายทอดพลังงานการบดอัดไปสู่ส่วนละเอียดในการทดสอบบดอัดดินป่นกรวดอย่างจริงจัง

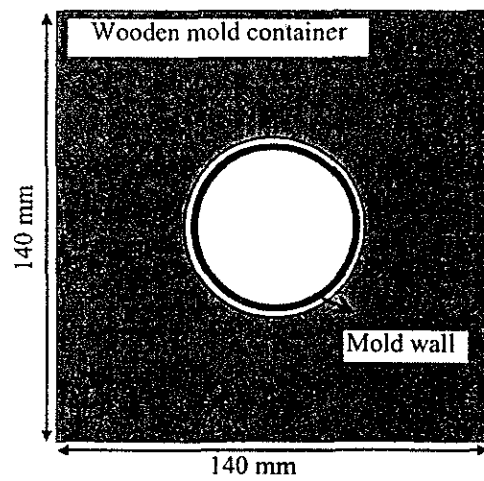


รูปที่ 2.1 ผลทดสอบการบดอัดดินของ Garga and Madureira (1985)

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการเสนอชุดทดสอบการบดอัดดินที่มีขนาดเล็กที่น่าสนใจ เช่น Diaz-Zorita et al. ในปี ค.ศ. 2001 หรือ Shidharan and Sivapullaiah ในปี ค.ศ. 2005 เป็นต้น อย่างไรก็ตามรูปแบบของชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กที่ถูกพัฒนาขึ้นจากทั้ง Diaz-Zorita et al. (2001) และ Shidharan and Sivapullaiah (2005) มีความแตกต่างจากรูปแบบชุดทดสอบแบบมาตรฐานหรือสูงกว่ามาตรฐานพลีออคเตอร์ค่อนข้างมากดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ

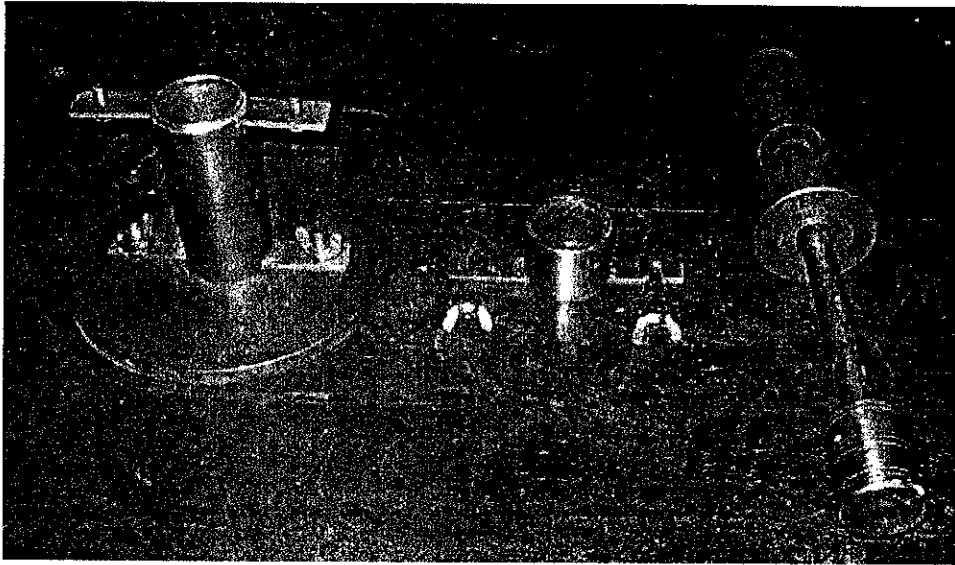


SIDE VIEW

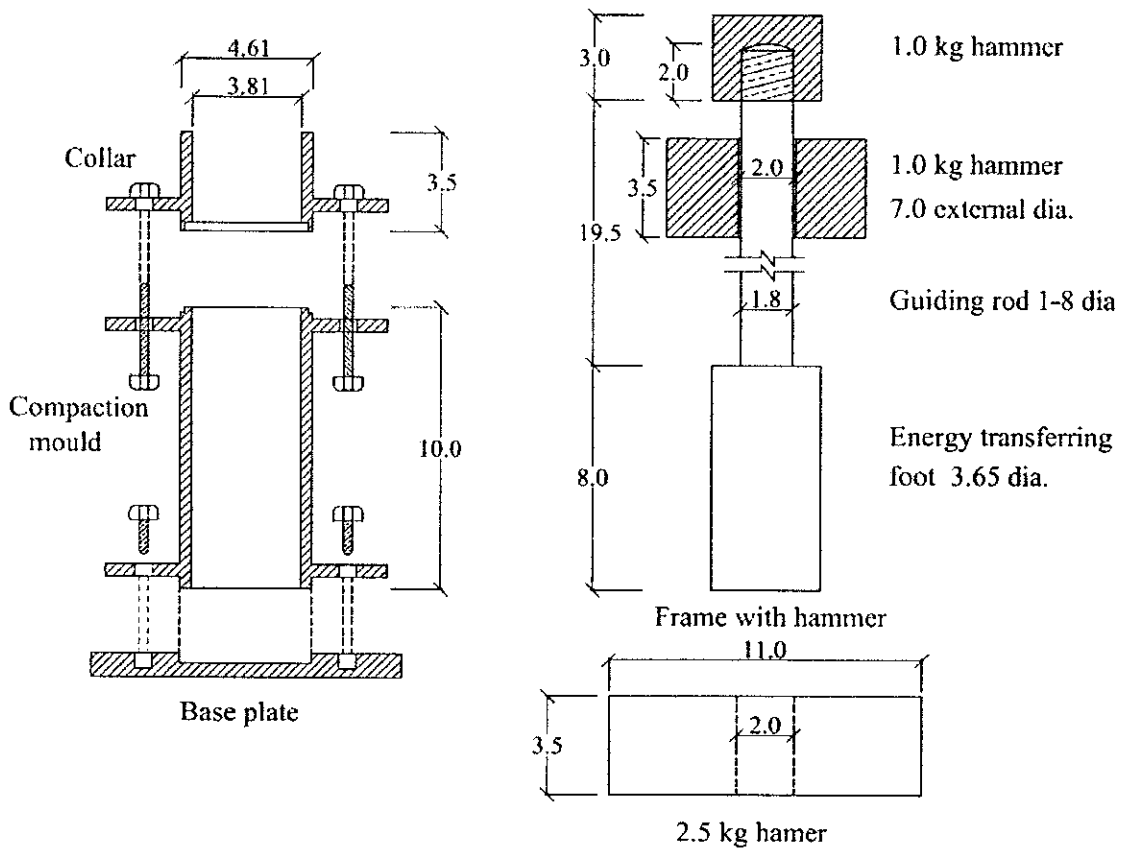


TOP VIEW

รูปที่ 2.2 ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กของ Diaz-Zorita et al. (2001)



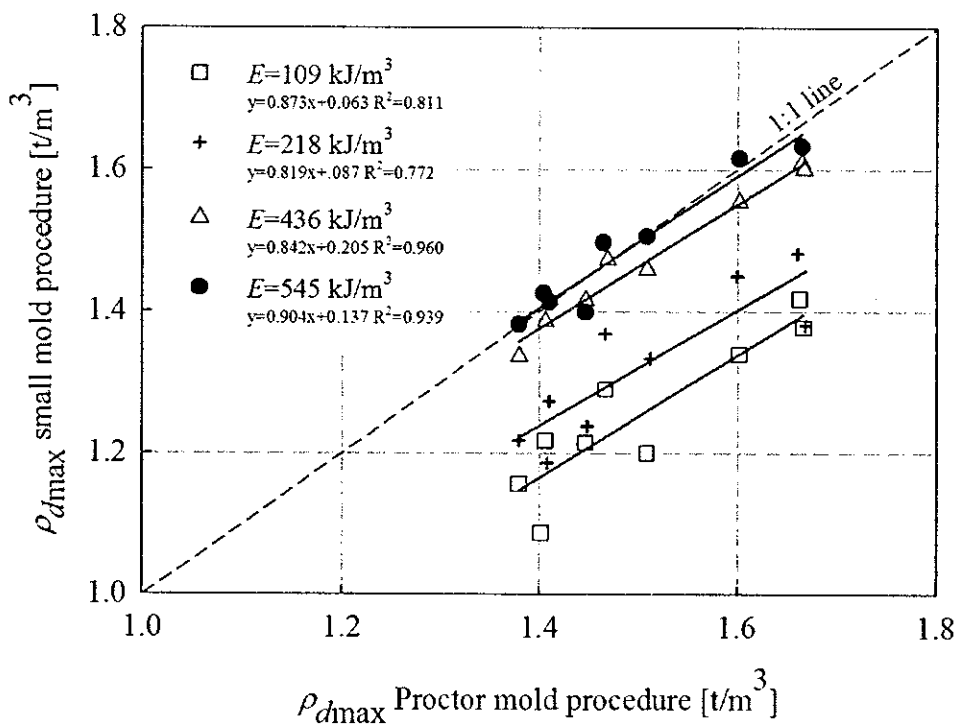
(ก) ภาพถ่ายชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก



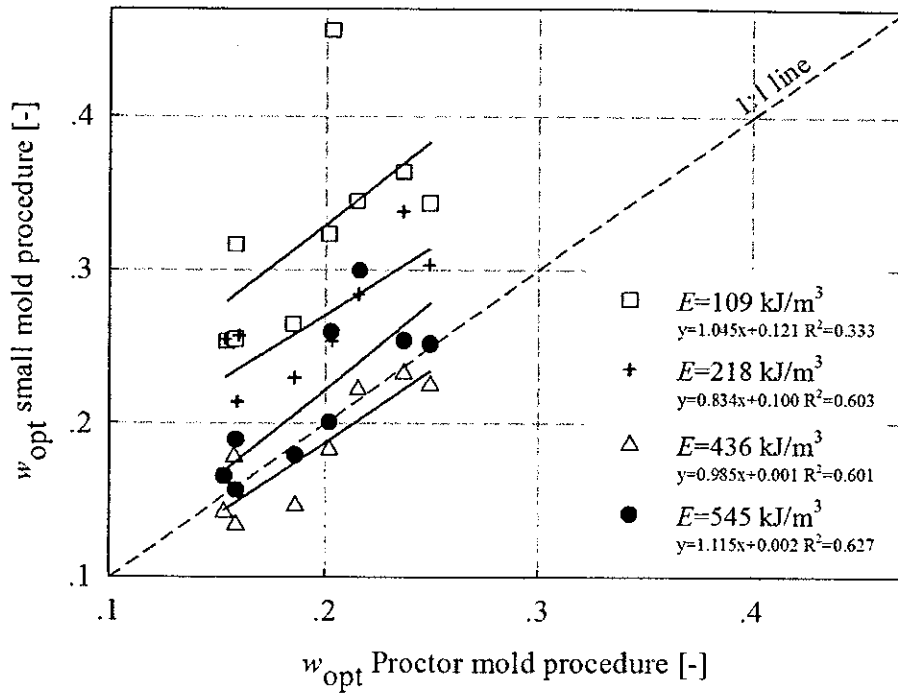
(ข) รายละเอียดชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก

รูปที่ 2.3 ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กของ Shidharan and Sivapullaiah (2005)

ชุดทดสอบการบดอัดดินทั้งสองยังมีการใช้ขนาดหน้าตัดค้อนเท่ากับขนาดหน้าตัดแบบบดอัด ซึ่งแตกต่างกับชุดทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานพลีอกเตอร์ซึ่งจะมีขนาดหน้าตัดค้อนเพียงครึ่งหนึ่งของขนาดหน้าตัดแบบบดอัดเท่านั้น นอกจากนี้ขั้นตอนนี้ขั้นตอนในการพัฒนาชุดทดสอบการบดอัดดินเองค่อนข้างยุ่งยากเนื่องจากการเป็นการลองผิดลองถูกที่สัดส่วนของชุดทดสอบหรือรวมทั้งลองผิดลองถูกที่กระบวนการทดสอบการบดอัดดินเพื่อให้ผลทดสอบการบดอัดดินตรงกับผลทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานพลีอกเตอร์ อีกทั้งยังมีข้อจำกัดในการใช้งาน เช่น ชุดทดสอบการบดอัดที่เสนอโดย Diaz-Zorita et al. (2001) จะใช้ได้กับการบดอัดดินที่ระดับพลังงานเท่ากับระดับพลังงานตามมาตรฐานพลีอกเตอร์ (592.5 kJ/m^3) เท่านั้น หากทำการบดอัดดินที่ระดับพลังงานต่างจากนี้จะให้ผลทดสอบไม่ตรงกับผลทดสอบการบดอัดดินด้วยชุดทดสอบการบดอัดดินแบบพลีอกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ทั้งนี้ปัญหาจากความยุ่งยากในการพัฒนาชุดทดสอบจากการลองผิดลองถูกและข้อจำกัดในการใช้งาน ทำให้ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กที่กล่าวถึงยังมีได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายเท่าที่ควร แต่หากมีการศึกษาอิทธิพลเนื่องจากคุณลักษณะของชุดทดสอบต่อผลทดสอบการบดอัดดิน จะทำให้สามารถพัฒนาแบบบดอัดได้อย่างมีประสิทธิภาพและหากสามารถคงคุณลักษณะของชุดทดสอบให้ได้ใกล้เคียงกับคุณลักษณะของชุดทดสอบแบบมาตรฐาน ก็จะทำให้สามารถพัฒนาชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กที่มีลักษณะใกล้เคียงกับชุดทดสอบการบดอัดแบบพลีอกเตอร์ อันจะทำให้ชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้นถูกนำไปใช้ได้ง่ายและแพร่หลายในที่สุด



(ก) ค่าความหนาแน่นแห้ง



(ข) ค่าความชื้นที่เหมาะสม

รูปที่ 2.4 ผลการทดสอบบดอัดของ Diaz-Zorita et al. (2001)

บทที่ 3

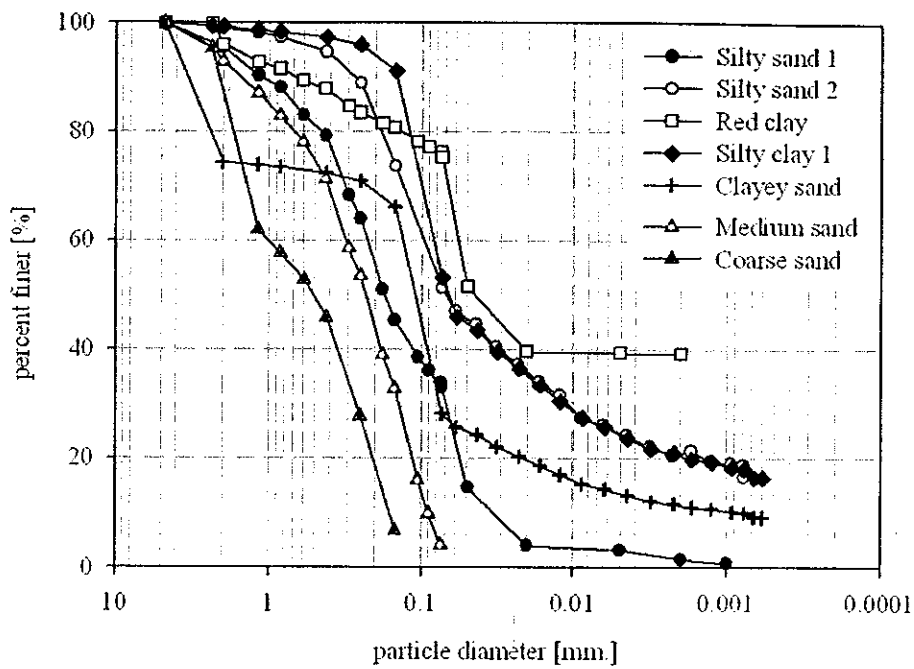
การพัฒนาชุดทดสอบการบดอัดดินขนาดเล็ก

3.1 การศึกษาอิทธิพลการลดขนาดของแบบบดอัดดิน

ในการพัฒนาชุดทดสอบการบดอัดดินให้มีขนาดเล็กลง จำต้องมีการลดขนาดของแบบบดอัดดินลง ทำให้คุณลักษณะของชุดทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงไป เพื่อให้สามารถพัฒนาชุดทดสอบการบดอัดดินขนาดเล็กเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ จึงได้ทำการศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของชุดทดสอบการบดอัดดิน โดยใช้ดินสองชนิดที่มีความแตกต่างกันอย่างมากคือ (1) Silty sand 1 และ (2) Red clay ซึ่งดินทั้งสองมีการกระจายขนาดของเม็ดดินแสดง ดังรูปที่ 3.1 และมีคุณสมบัติทางกายภาพและดัชนีแสดงดังตารางที่ 3.1 แล้วทำการทดสอบการบดอัดดินในแบบบดอัดดินที่มีความสูงเท่ากับ 116.4 มิลลิเมตร โดยควบคุมพลังงานต่อปริมาตรให้เท่ากับ 592.5 kJ/m^3 เพื่อศึกษาผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของชุดทดสอบการบดอัดดิน ได้แก่ (1) การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางก้อนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางแบบบดอัดดิน (Diameter ratio: DR) เพื่อศึกษาอิทธิพลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดหน้าตัดของก้อนและขนาดหน้าตัดของแบบบดอัดต่อผลทดสอบการบดอัด (2) จำนวนชั้นเพื่อศึกษาอิทธิพลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงจำนวนของชั้นดินที่บดอัดในแบบบดอัดต่อผลทดสอบการบดอัด (3) น้ำหนักก้อนเพื่อศึกษาอิทธิพลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักก้อนที่ใช้บดอัดต่อผลทดสอบการบดอัด และ (4) ระยะตกของก้อนเพื่อศึกษาอิทธิพลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระยะตกของก้อนต่อผลทดสอบการบดอัด รายการทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลเนื่องจากคุณลักษณะของชุดทดสอบการบดอัดต่อผลทดสอบการบดอัดดิน สรุปลงอยู่ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

Soil type	LL [%]	PL [%]	PI [%]	G_s	Group symbol
Silty sand 1	NP	NP	NP	2.67	SM
Silty sand 2	NP	NP	NP	2.69	SM
Red clay	75	24.6	50.4	2.70	CH
Silty clay 1	28.7	19.4	9.3	2.72	CL
Clayey sand	28.7	19.4	9.3	2.72	SC
Medium sand	NP	NP	NP	2.72	SP
Coarse sand	NP	NP	NP	2.72	SP



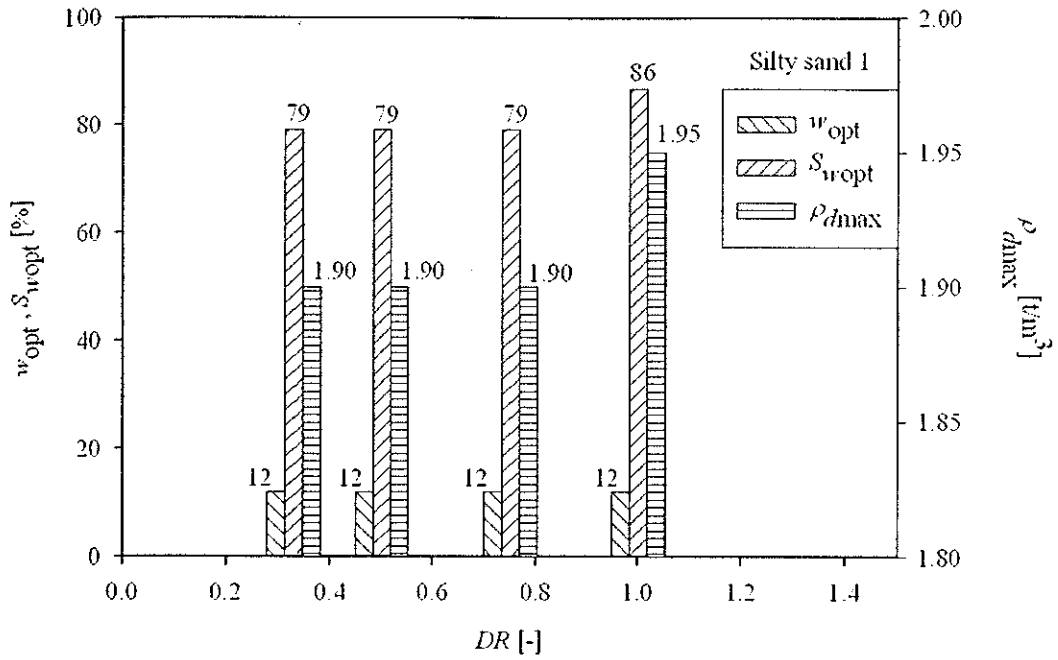
รูปที่ 3.1 การกระจายขนาดของดินที่ทำการศึกษา

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดการศึกษาผลกระทบเนื่องจากเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะ

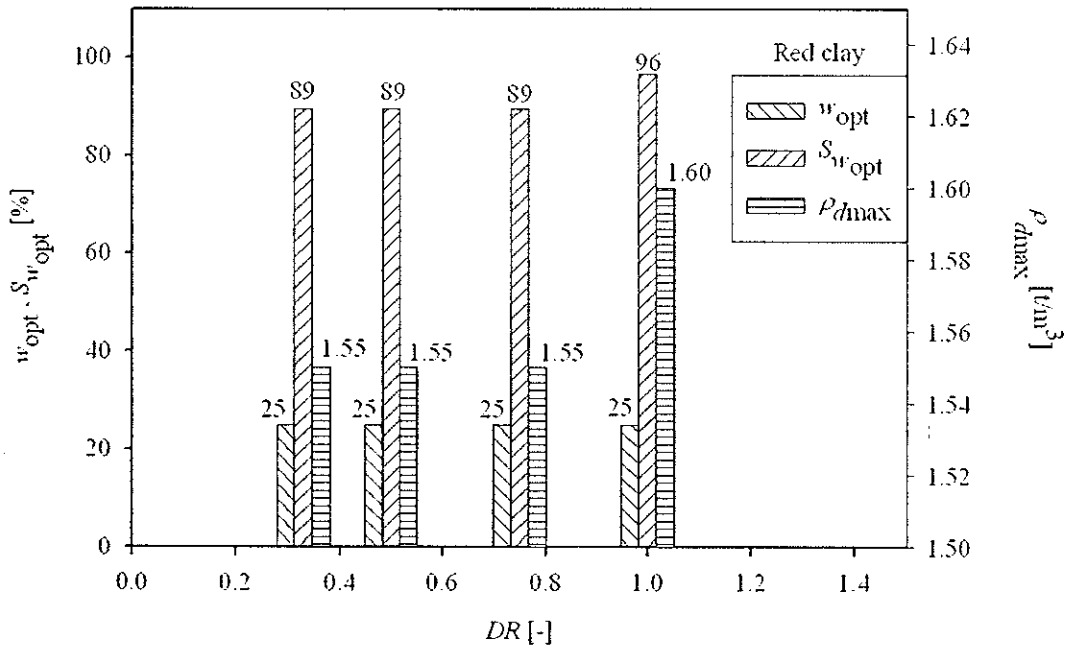
ของชุดทดสอบต่อผลทดสอบการบดอัดดิน

Tests no.	Mold diameter [mm]	Rammer diameter [mm]	Diameter ratio [-]	No. of layers [No.]	Rammer		No. of blow [No.]
					Weight [kg]	Drop height [mm]	
1.1	152.4	50.8	0.33	3	2.5	304.8	56
1.2	101.6	50.8	0.5	3	2.5	304.8	25
1.3	101.6	76.2	0.75	3	2.5	304.8	25
1.4	76.2	76.2	1	3	2.5	304.8	15
2.1	101.6	50.8	0.5	2	2.5	304.8	37
2.2	101.6	50.8	0.5	3	2.5	304.8	25
2.3	101.6	50.8	0.5	4	2.5	304.8	19
2.4	101.6	50.8	0.5	5	2.5	304.8	15
3.1	101.6	50.8	0.5	3	4.5	304.8	14
3.2	101.6	50.8	0.5	3	3.2	304.8	16
3.3	101.6	50.8	0.5	3	2.5	304.8	25
3.4	101.6	50.8	0.5	3	1	304.8	62
4.1	101.6	50.8	0.5	3	2.5	457.2	17
4.2	101.6	50.8	0.5	3	2.5	381	20
4.3	101.6	50.8	0.5	3	2.5	304.8	25
4.4	101.6	50.8	0.5	3	2.5	228.6	33

จากผลการทดสอบพบว่า การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของชุดทดสอบทุกตัวไม่ส่งผลกระทบต่อผลทดสอบการบดอัด ยกเว้นการทดสอบบดอัดดินที่ DR เท่ากับ 1 รูปที่ 3.2 แสดงผลทดสอบบดอัดดินที่ DR ต่าง ๆ ตามวิธีทดสอบที่ (1.1), (1.2), (1.3) และ (1.4) ในตารางที่ 3.2 โดยรูปที่ 3.2ก เป็นผลทดสอบการบดอัดดิน Silty sand 1 ส่วนรูปที่ 3.2ข เป็นผลทดสอบการบดอัดดิน Red clay เมื่อเทียบผลทดสอบการบดอัดดินที่ DR ต่าง ๆ กับผลทดสอบการบดอัดดินที่ DR เท่ากับ 0.50 ซึ่งเป็นการบดอัดตามมาตรฐานพ्ल็อกเตอร์ พบว่าการบดอัดโดยใช้ DR ทุกค่า ได้ค่าความชื้นที่เหมาะสม (Optimum water content: w_{opt}) ใกล้เคียงกันทั้งหมด แต่สำหรับความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density: ρ_{dmax}) การบดอัดโดยใช้ DR ต่าง ๆ จะให้ผลทดสอบใกล้เคียงกัน ยกเว้นการบดอัดที่ DR เท่ากับ 1 ซึ่งจะให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดสูงกว่าการทดสอบบดอัดดินที่ DR อื่น ทั้งนี้เนื่องมาจากการบดอัดดินที่ DR เท่ากับ 1 จะมีประสิทธิภาพการบดอัดที่ดีกว่าการบดอัดดินที่ DR อื่น ๆ ซึ่งเห็นได้จากค่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่ความชื้นเหมาะสม (Optimum degree of saturation: S_{wopt}) สำหรับการบดอัดดินที่ DR เท่ากับ 1 จะมี S_{wopt} สูงกว่าการบดอัดดินที่ DR ค่าอื่น ๆ ซึ่งในทางทฤษฎีการทดสอบการบดอัดดินโดยใช้ชุดทดสอบที่มี DR เท่ากับ 1 การบดอัดจะเกิดการสูญเสียพลังงานน้อยกว่าการทดสอบการบดอัดดินด้วย DR อื่น ๆ เพราะขณะทำการบดอัดดิน ตัวอย่างดินจะไม่ปูดบวมขึ้นมารอบ ๆ ค้อนบดอัด เนื่องจากไม่มีช่องว่างระหว่างหน้าตัดแบบบดอัดและหน้าตัดค้อน พลังงานบดอัดจากค้อนบดอัดจึงถูกใช้ไปในการบดอัดดินอย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า ดังนั้นในการพัฒนาชุดทดสอบการบดอัดดินขนาดเล็กโดยใช้ DR เท่ากับ 1 เพื่อให้ได้ผลทดสอบการบดอัดใกล้เคียงกับผลทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพ्ल็อกเตอร์ จะต้องทำการปรับเปลี่ยนชุดทดสอบการบดอัดให้มีประสิทธิภาพการบดอัดใกล้เคียงกับประสิทธิภาพการบดอัดของชุดทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพ्ल็อกเตอร์ เช่น Diaz-Zorita et al. (2001) ใช้แผ่นไม้เป็นแผ่นฐานรองรับแบบบดอัด เพื่อให้ผลทดสอบการบดอัดดินจากชุดทดสอบการบดอัดที่เสนอมีค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบการบดอัดจากชุดทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพ्ल็อกเตอร์ หรือ Shidharan and Sivapullaiah (2005) ที่ใช้ชุดทดสอบการบดอัดที่ DR เท่ากับ 1 และใช้ฐานเหล็กส่งถ่ายพลังงานบดอัดจากค้อนที่ตกกระทบไปสู่ดิน โดยทำการปรับเปลี่ยนจำนวนครั้งการบดอัดของค้อน เพื่อให้ได้ผลทดสอบการบดอัดใกล้เคียงกับผลทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพ्ल็อกเตอร์ จากงานวิจัยทั้งสองจะเห็นว่าชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กที่เสนอมีความซับซ้อนทั้งรูปร่างของชุดทดสอบ และขั้นตอนการทดสอบการบดอัด และเสียเวลาในการพัฒนาชุดทดสอบ เนื่องจากการพัฒนาชุดทดสอบในลักษณะลองผิดลองถูก และไม่เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในห้องปฏิบัติการทั่วไป เนื่องจากความยุ่งยากในการพัฒนาเครื่องมือ



(ก) ผลทดสอบการบดอัดดิน Silty sand 1

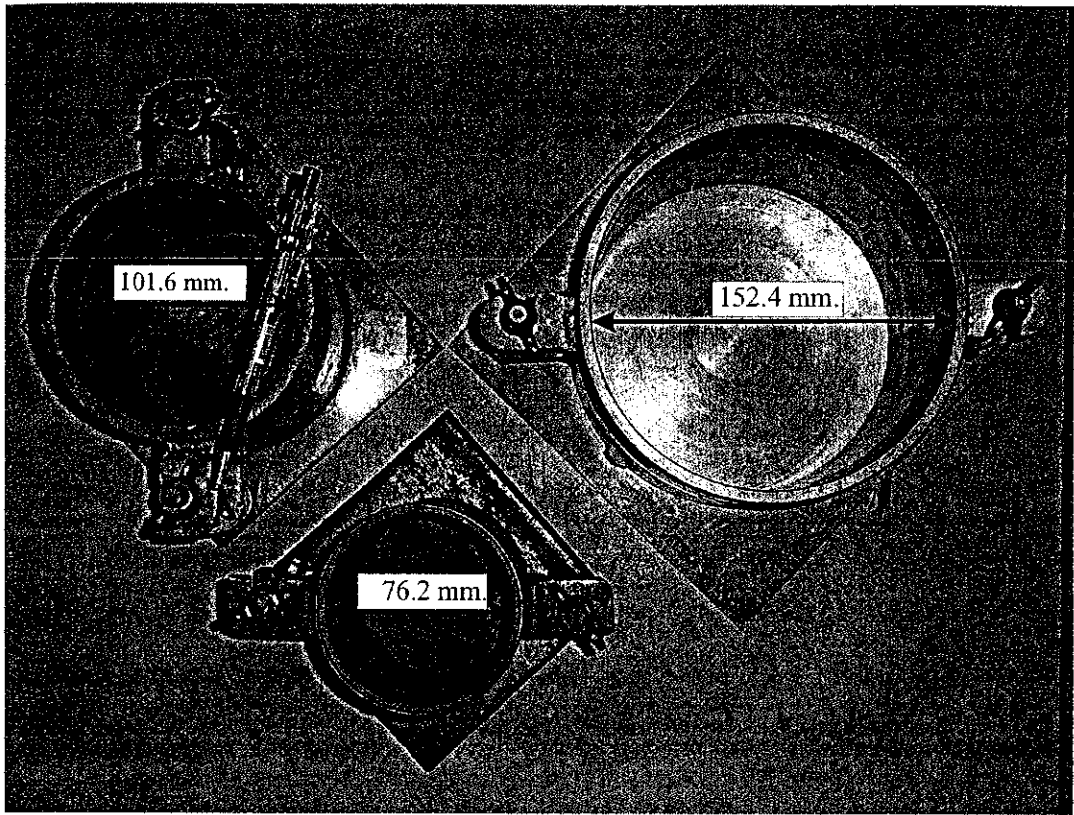


(ข) ผลทดสอบการบดอัดดิน Red clay

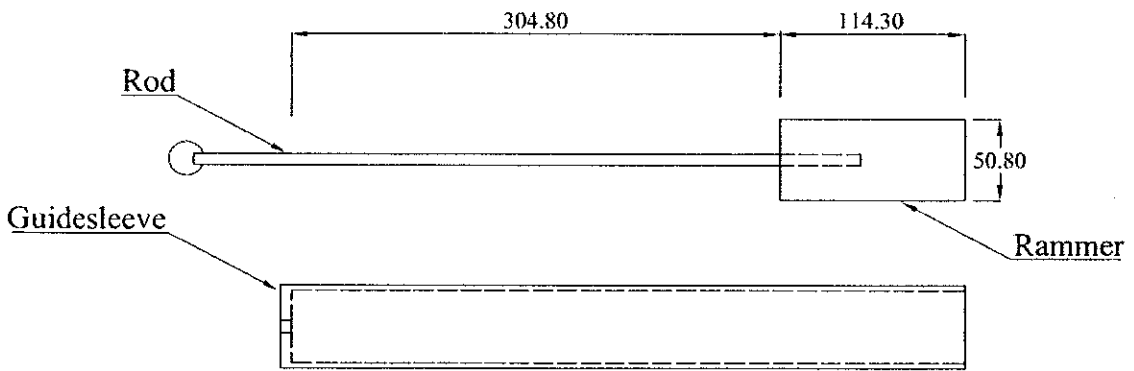
รูปที่ 3.2 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำตัดต่อผลทดสอบการบดอัดดิน

3.2 ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก

เพื่อให้ง่ายต่อการนำชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กไปใช้งานได้จริงและแพร่หลาย ชุดทดสอบที่เสนอจึงใช้เหล็กในการผลิตชุดทดสอบ โดยพยายามคงคุณลักษณะของชุดทดสอบให้ใกล้เคียงกับคุณลักษณะของชุดทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ให้ได้มากที่สุด และจะเป็นการง่ายหากสามารถใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่เดิมจากชุดทดสอบแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ ดังนั้นค้อนบดอัดของชุดทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ จึงถูกนำมาใช้ในชุดทดสอบการบดอัดที่เสนอ และเพื่อให้ DR ของชุดทดสอบการบดอัดที่เสนอมีค่าน้อยกว่า 1 จึงเลือกใช้แบบบดอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76.2 มิลลิเมตร (3 นิ้ว) ซึ่งทำให้ DR ของชุดทดสอบการบดอัดดินที่เสนอมีค่า DR เท่ากับ 0.67 โดยชุดทดสอบการบดอัดดินที่เสนอมีรายละเอียดดังนี้ แบบบดอัดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 76.2 มิลลิเมตร (3 นิ้ว) สูง 116.4 มิลลิเมตร (4.54 นิ้ว) และยังคงใช้ค้อนบดอัดซึ่งใช้ในชุดทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ นั่นคือเป็นค้อนบดอัดรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.80 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) และมีน้ำหนัก 2.5 กิโลกรัม โดยมีระยะตกอิสระของค้อนเท่ากับ 304.8 มิลลิเมตร (1.00 ฟุต) รูปที่ 3.3ก แสดงภาพถ่ายแบบบดอัดขนาดเล็กเทียบกับชุดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ 3.3ข แสดงรายละเอียดค้อนที่ใช้ในการทดสอบ 3.3ค แสดงรายละเอียดชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กเทียบกับชุดทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ ขนาดของแบบบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) ส่วนความสูงของแบบบดอัดขนาดเล็กและแบบบดอัดมาตรฐานจะมีขนาดเท่ากันคือ 116.4 มิลลิเมตร จะเห็นว่าชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กที่เสนอนี้ ยังคงคุณลักษณะของอุปกรณ์ทดสอบเหมือนกับชุดทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ โดยมีการเปลี่ยนแปลงเพียงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของแบบบดอัดเท่านั้น ซึ่งเป็นผลให้ปริมาตรของดินที่บดอัดลงในแบบลดลงถึง 1.8 เท่าเมื่อเทียบกับแบบมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 101.6 มิลลิเมตร และลดลงถึง 4 เท่าเมื่อเทียบกับแบบมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 116.4 มิลลิเมตร และการที่ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กใช้พลังงานต่อปริมาตรเท่าเดิม การที่มีปริมาตรลดลง จึงเป็นการลดพลังงานบดอัดลงตามจำนวนเท่าของปริมาตรดินบดอัด



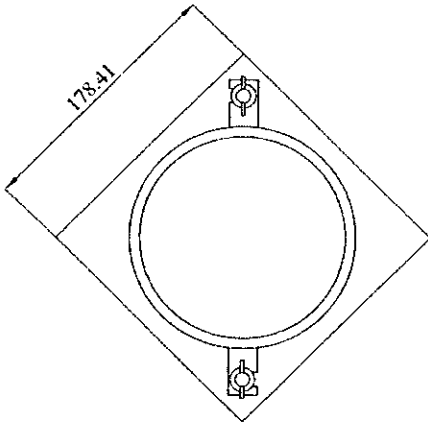
(ก) ภาพถ่ายแบบบดอัดขนาดเล็กเทียบกับแบบบดอัดมาตรฐานพลีออกเตอรื



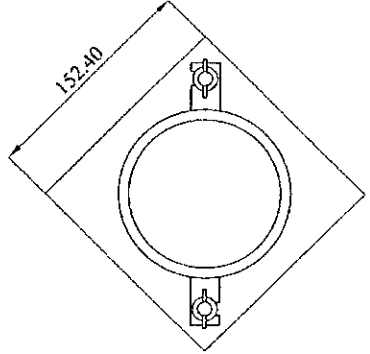
SECTION
Rammer

(ข) รายละเอียดค้่อบนบดอัดที่ใช้ในการทดสอบ

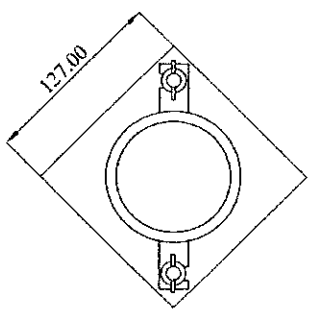
รูปที่ 3.3 ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กและชุดทดสอบมาตรฐานพลีออกเตอรื



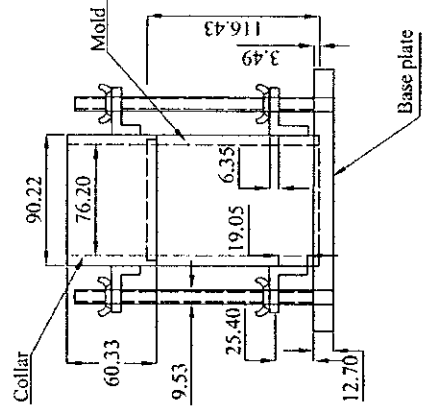
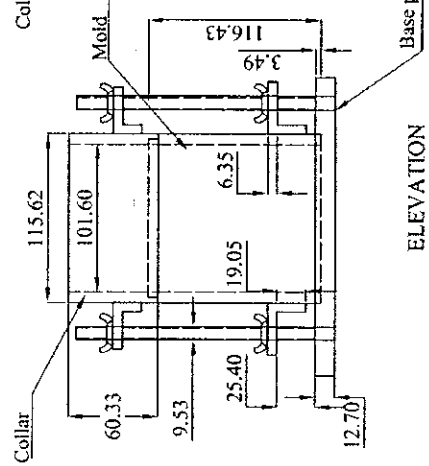
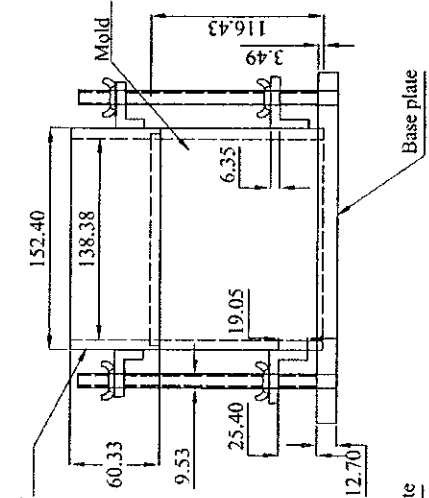
PLAN



PLAN



PLAN



ELEVATION
MOLD

(ค) รายละเอียดชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กและชุดทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน

รูปที่ 3.3 ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กและชุดทดสอบมาตรฐานพีล็กเตอร์ (ต่อ)

ขั้นตอนการทดสอบการบดอัดดินจะเหมือนกับการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน พลาสติกเตอร์ ดินที่จะใช้เป็นดินที่มีขนาดเม็ดดินใหญ่สุดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 4.75 มิลลิเมตร จำนวน 2.5 กิโลกรัม จะถูกนำมาผสมน้ำให้มีความชื้นตามที่ต้องการแล้วคลุมพลาสติกไว้ระยะเวลาหนึ่งขึ้นกับประเภทของดินเพื่อให้ความชื้นในตัวอย่างดินมีความสม่ำเสมอ หลังจากนั้นจะแยกดินออกมาเป็นสามกองเพื่อบดอัดลงในแบบขนาดเล็กเป็นจำนวนสามชั้น ในแต่ละชั้นจะทำการบดอัดด้วยค้อนบดอัด 14 ครั้ง ตารางที่ 3.3 รายละเอียดการบดอัดดินด้วยชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก เทียบกับการบดอัดดินด้วยชุดทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพลาสติกเตอร์ พลังงานต่อปริมาตรของชุดทดสอบการบดอัดดินขนาดเล็กจะมีค่าน้อยกว่าพลังงานต่อปริมาตรของชุดทดสอบมาตรฐานเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดการทดสอบการบดอัดดินด้วยชุดทดสอบมาตรฐานพลาสติกเตอร์

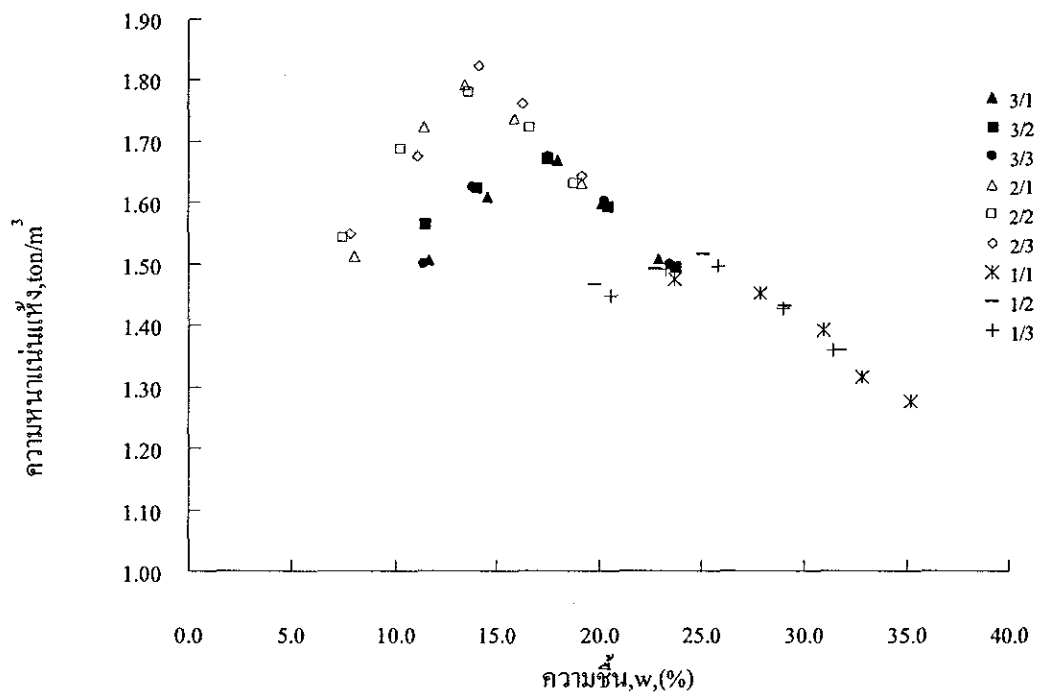
และชุดทดสอบการบดอัดดินขนาดเล็ก

Mould Dia. [mm.]	DR. [-]	Drop [Blow]	Lay. [-]	Rammer		Compaction Effort [kJ/m ³]
				Weight [kg]	Drop [mm]	
76.2	0.67	14	3	2.5	300	581.4
101.6	0.5	25	3	2.5	300	592.6

เพื่อยืนยันการนำไปใช้ได้จริงของแบบบดอัดที่เสนอ จึงได้ทำการทดสอบการบดอัดตัวอย่างดินซึ่งมีขนาดเม็ดดินใหญ่ไม่เกิน 4.75 มิลลิเมตร จำนวนสามชนิดตัวอย่าง โดยความเป็นพลาสติกของดินทั้งสามชนิดแสดงในตารางที่ 3.4 การทดสอบการบดอัดดินทั้งสามชนิด ทำโดยแบ่งการทดสอบในแต่ละชนิดตัวอย่างดินออกเป็น 3 ชุดทดสอบ ชุดทดสอบที่ 1 จะบดอัดดินในแบบมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร ชุดทดสอบที่ 2 และ 3 จะบดอัดดินในแบบขนาดเล็กที่เสนอ การที่ทำการทดสอบบดอัดดินในแบบขนาดเล็กที่เสนอซ้ำจำนวน 2 การทดสอบ เพื่อตรวจสอบความแปรปรวนของผลการบดอัดดินในแบบขนาดเล็ก จากผลทดสอบการบดอัดดิน ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.4 แสดงให้เห็นได้เป็นอย่างดีว่าแบบบดอัดที่ขนาดเล็กที่เสนอให้ผลทดสอบการบดอัดดินไม่ต่างจากผลทดสอบการบดอัดดินที่ได้จากแบบบดอัดมาตรฐาน

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่างที่ใช้ในการตรวจสอบแบบขนาดเล็กที่เสนอ

Soil type	LL [%]	PL [%]	PI [%]
Soil 1	56	27	29
Soil 2	34	16	18
Soil 3	34	14	20



รูปที่ 3.4 ผลทดสอบการบดอัดดินสามตัวอย่างเพื่อตรวจสอบแบบขนาดเล็กที่เสนอ

บทที่ 4

อิทธิพลของกรวดต่อผลทดสอบการบดอัดดิน

4.1 ตัวอย่างดินและวิธีการศึกษา

ตัวอย่างดินจากแหล่งดินตามธรรมชาติ บริเวณรอบ ๆ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทั้งหมด 5 ตัวอย่างดิน ถูกนำมาใช้ในการศึกษาอิทธิพลของกรวดที่มีต่อผลการทดสอบบดอัด ดินทั้ง 5 ประกอบด้วย (1) Silty sand 1 (2) Red clay (3) Silty sand 3 (4) Silty clay 2 และ (5) Silty clay 3 ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของดินที่นำมาศึกษา ส่วนการกระจายขนาดของเม็ดดินที่นำมาศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.1 จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 จะพบว่าดินที่นำมาศึกษามีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งเพียงพอที่จะนำมาศึกษาอิทธิพลของกรวดต่อการบดอัดที่เป็นตัวแทนของดินทุกประเภท

สำหรับกรวดที่นำมาศึกษาเป็นกรวดที่คัดออกมาจากดินลูกรัง โดยคัดกรวดที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 4 แล้วนำไปทำความสะอาดโดยการล้างน้ำ จากนั้นนำกรวดที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4 ตะแกรงเบอร์ 3/8 และตะแกรงเบอร์ 4 เพื่อคัดกรวดที่เตรียมไว้ออกเป็นสองขนาดเพื่อศึกษาอิทธิพลเนื่องจากขนาดและปริมาณของกรวดต่อผลทดสอบการบดอัด กรวดทั้งสองขนาดคือ

(ก) กรวดที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 4 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 4.75 มิลลิเมตรถึง 9.5 มิลลิเมตร ซึ่งต่อไปจะเรียกว่ากรวดขนาดเล็ก และ

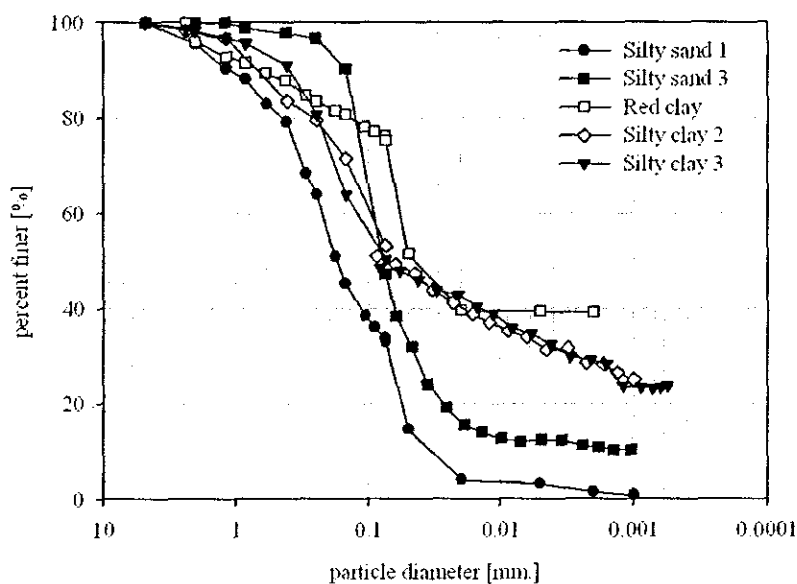
(ข) กรวดที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 3/8 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 9.5 มิลลิเมตรถึง 19 มิลลิเมตร ซึ่งต่อไปจะเรียกว่ากรวดขนาดใหญ่

ส่วนกรวดที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 3/4 จะไม่นำมาศึกษาและถูกคัดทิ้งไป ทั้งนี้เนื่องจากตามมาตรฐานการทดสอบการบดอัดแบบพล็อกเตอร์ หากดินที่นำมาทดสอบการบดอัดมีกรวดที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 3/4 กรวดเหล่านี้จะถูกคัดออกแล้วแทนที่กรวดที่คัดออกด้วยกรวดที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 3/8 ด้วยปริมาณเท่ากับปริมาณกรวดที่คัดออก เมื่อคัดกรวดออกเป็น 2 ขนาดแล้ว กรวดทั้งสองขนาดจะถูกนำไปแช่น้ำและก่อนนำมาทดสอบจะถูกทำให้ผิวแห้งเพื่อให้กรวดอยู่ในสภาพอิมตัวผิวแห้งก่อนทดสอบ

กรวดทั้งสองขนาดจะถูกนำไปแยกผสมกับตัวอย่างดินทั้ง 5 ประเภทด้วยปริมาณ 0, 10, 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์ ก่อนจะนำไปทดสอบการบดอัดดินตามมาตรฐานพล็อกเตอร์ (ASTM D698-91) รูปที่ 4.2 แสดงแผนภาพตัวอย่างดินทั้งหมดที่ถูกนำไปทดสอบการบดอัดดิน จากรูปดินที่ทำการศึกษามี 5 ประเภท นำไปผสมกรวด 2 ขนาด คือกรวดขนาดเล็กและกรวดขนาดใหญ่ ด้วยปริมาณที่แตกต่างกัน 5 ปริมาณ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมีการทดสอบการบดอัดดินทั้งสิ้นจำนวน 45 การทดสอบ

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

Soil type	LL [%]	PL [%]	PI [%]	G_s	Group symbol
Silty sand 1	NP	NP	NP	2.67	SM
Red clay	75	24.6	50.4	2.7	CH
Silty clay 2	37.5	15.7	21.8	2.67	CL
Silty sand 3	NP	NP	NP	2.68	SM
Silty clay 3	29.4	17.9	11.5	2.73	CL

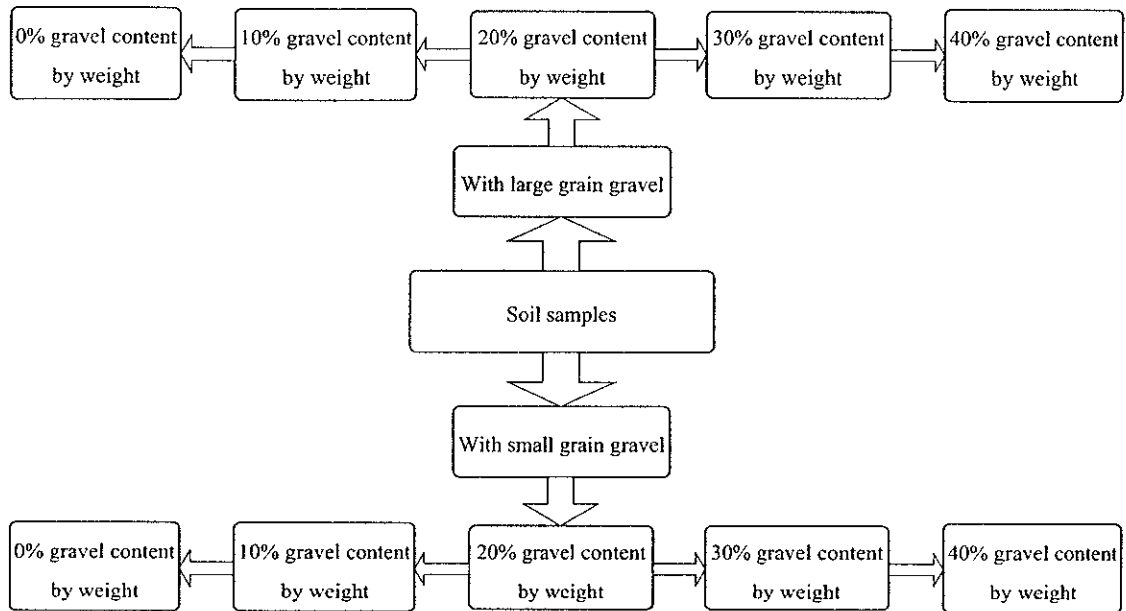


รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดของดินที่ทำการศึกษา

4.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์

รูปที่ 4.3 แสดงเส้นโค้งการบดอัดจาก 45 การทดสอบการบดอัดตามมาตรฐานพล็อกเตอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกรวด ความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความชื้นที่เหมาะสมจะลดลงสำหรับทุกประเภทดิน ผลทดสอบการบดอัดดินทั้งหมด 45 การทดสอบ จากรูปที่ 4.3 จะพบว่าสำหรับดินที่มีความเชื่อมแน่นรูปร่างของเส้นโค้งการบดอัดดินสำหรับดินที่มีปริมาณกรวดไม่เกินหรือเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ กับรูปร่างของเส้นโค้งการบดอัดดินสำหรับดินที่มีปริมาณกรวดสูงกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ จะมีรูปร่างต่างกันเล็กน้อย โดยเฉพาะทางด้านแห้ง (Dry side of optimum) ซึ่งทางด้านแห้งของเส้นโค้งการบดอัดดินสำหรับดินที่มีปริมาณกรวดมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ จะมีความชันมากกว่าทางด้านแห้งของเส้นโค้งการบดอัดดินสำหรับดินที่มีปริมาณกรวดน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากตามมาตรฐานการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์จะต้องเปลี่ยนแบบสำหรับบดอัดดินจากแบบบดอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) ไปเป็นแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) เมื่อมีปริมาณกรวดผสมในดิน

เกินกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการเพิ่มขนาดของแบบบดอัดเป็นการลดการซัดของกรวดที่ผสมอยู่ในดิน จึงทำให้สามารถบดอัดดินได้ดีขึ้นและแสดงออกมาที่ความชื้นของเส้นโค้งการบดอัดทางด้านหนึ่ง



รูปที่ 4.2 แผนการทดสอบของดินแต่ละประเภท

เมื่อนำค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัดที่ได้จากการทดสอบไปทำการคำนวณความหนาแน่นแห้งสูงสุดเฉพาะส่วนละเอียดซึ่งเป็นดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (Minus no.4 sieve) และต่อไปจะเรียกว่าดินบดอัดคัดกรวด โดยใช้สมการที่ 4.1 และความชื้นเหมาะสมในดินบดอัดคัดกรวด โดยใช้สมการที่ 4.2 โดยทั้งสองสมการพิสูจน์มาจากการวิเคราะห์สถานะของส่วนประกอบในดินจากปริมาณกรวดที่ผสมอยู่ในดินและความหนาแน่นของกรวด

$$\rho'_{d\max} = \frac{\rho_{d\max}}{\left[1 + P_g - \frac{P_g \rho_{d\max}}{\rho_g}\right]} \quad (4.1)$$

$$w'_{\text{opt}} = w_{\text{opt}} (1 + P_g) \quad (4.2)$$

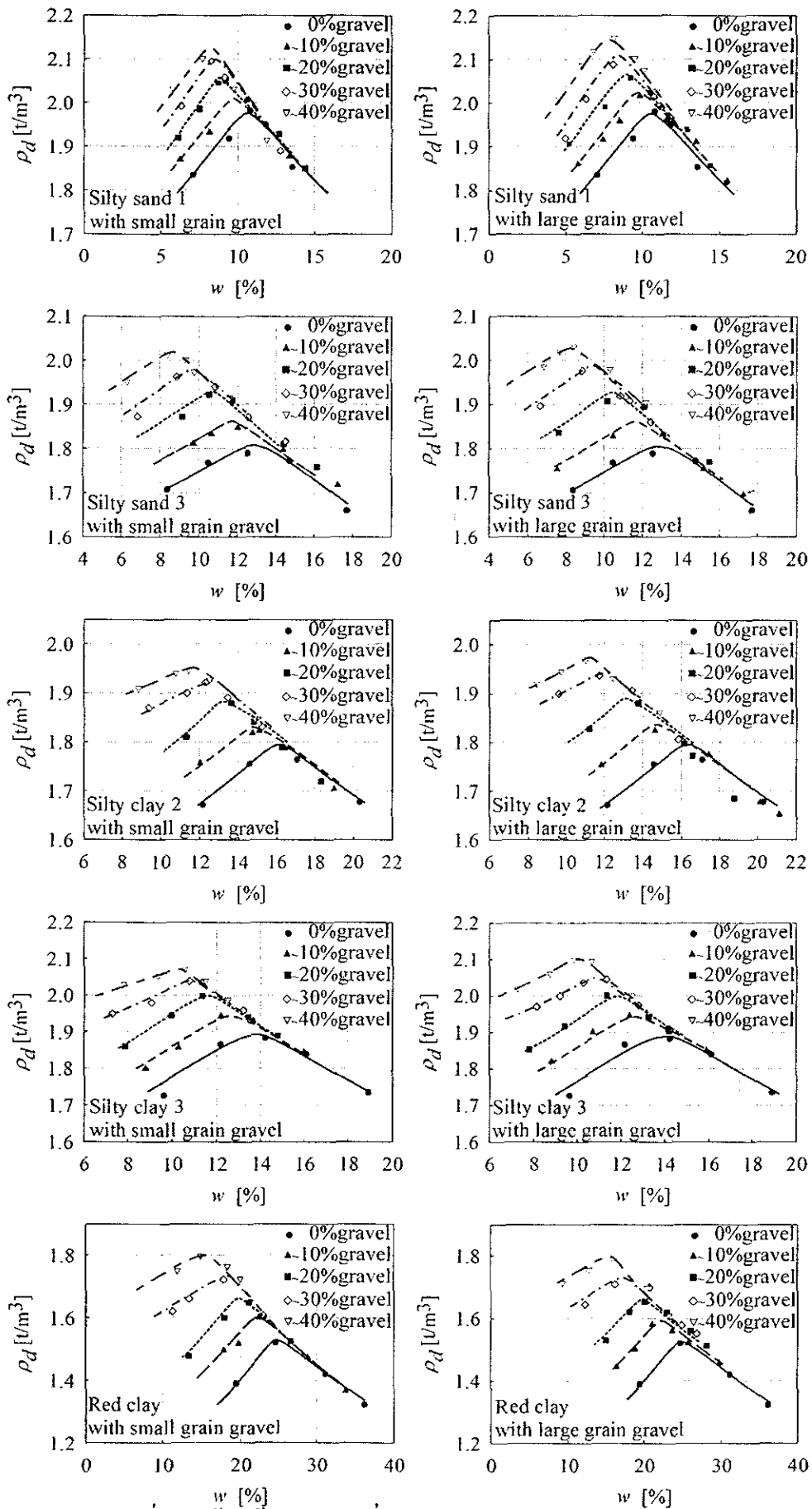
โดยที่	$\rho_{d\max}$	คือ ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัด
	w_{opt}	คือ ความชื้นที่เหมาะสมของดินบดอัด
	$\rho'_{d\max}$	คือ ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัดคัดกรวด
	w'_{opt}	คือ ความชื้นที่เหมาะสมของดินบดอัดคัดกรวด
	ρ_g	คือ ความหนาแน่นของกรวด
	P_g	คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของกรวดต่อน้ำหนักดินทั้งหมด

คำนวณความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัดในจินตภาพ (Idealized maximum dry density, $\rho_{d\max I}$) จากสมการที่ 4.3 ซึ่งเสนอโดย Shockley (1948) สำหรับคำนวณความหนาแน่นแห้งของดินปนกรวดที่ปริมาณกรวดต่าง ๆ โดยสมมติให้ช่องว่างระหว่างกรวดจะถูกเติมเต็มด้วยเม็ดดินที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการบดอัดเม็ดดินตามมาตรฐานพล็อกเตอร์ โดยเมื่อมีปริมาณกรวดในดินเพิ่มมากขึ้น สัดส่วนของกรวดจะมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่สัดส่วนของดินที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการบดอัดเม็ดดินตามมาตรฐานพล็อกเตอร์จะมีค่าลดลง ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัดตามทฤษฎี จึงเปลี่ยนแปลงตามสัดส่วนของดินและกรวด

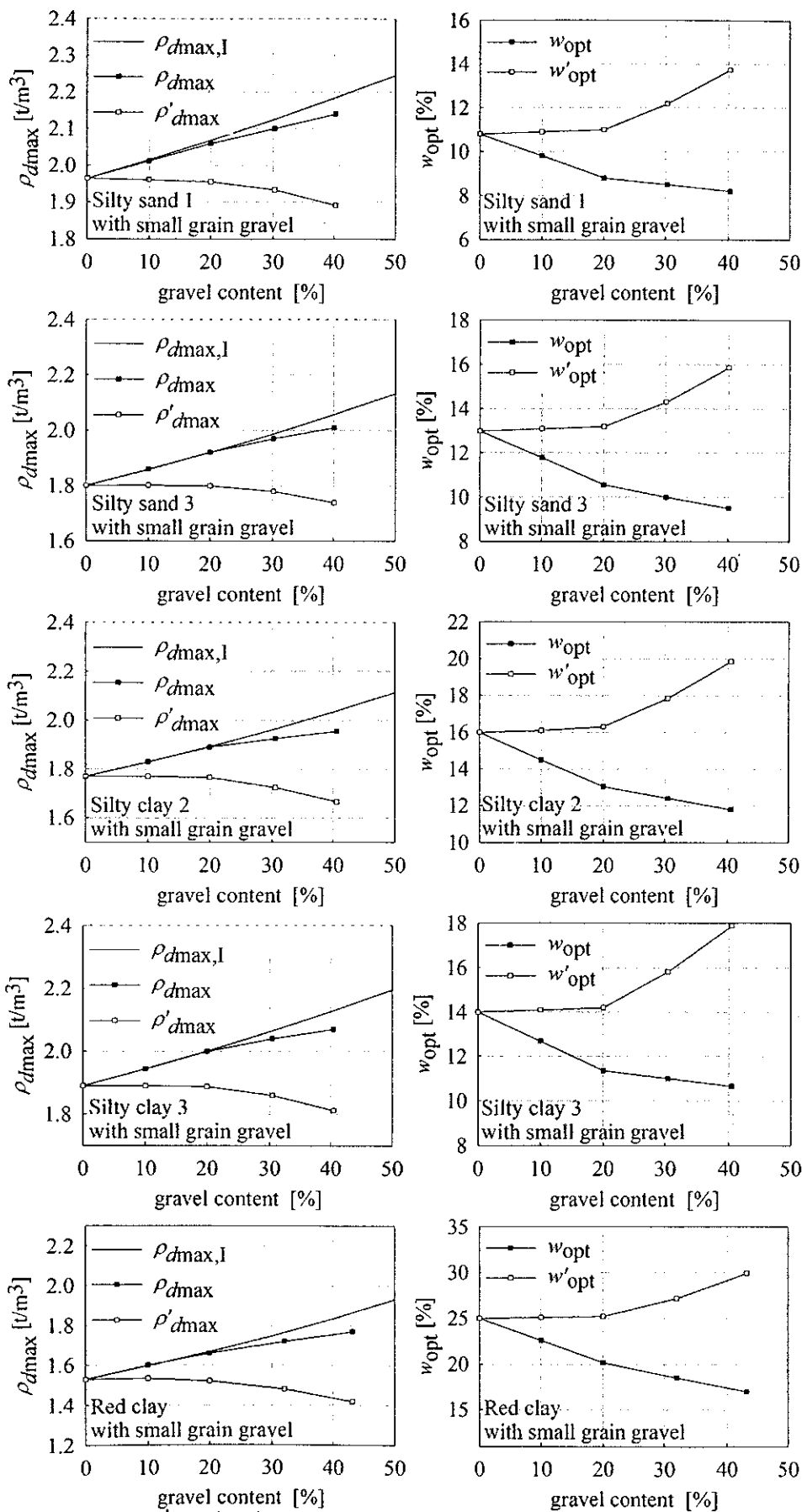
$$\rho_{d\max I} = \frac{1}{\left(\frac{P_f}{\rho_{d\max f}}\right) + \left(\frac{P_g}{\rho_g}\right)} \quad (4.3)$$

โดยที่	$\rho_{d\max I}$	คือ ความหนาแน่นแห้งสูงสุดในจินตภาพ (Idealized maximum dry density)
	P_f	คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของส่วนละเอียดต่อน้ำหนักดินทั้งหมด
	P_g	คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของกรวดต่อน้ำหนักดินทั้งหมด
	$\rho_{d\max f}$	คือ ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของเม็ดดินที่ถูกบดอัดตามมาตรฐานพล็อกเตอร์

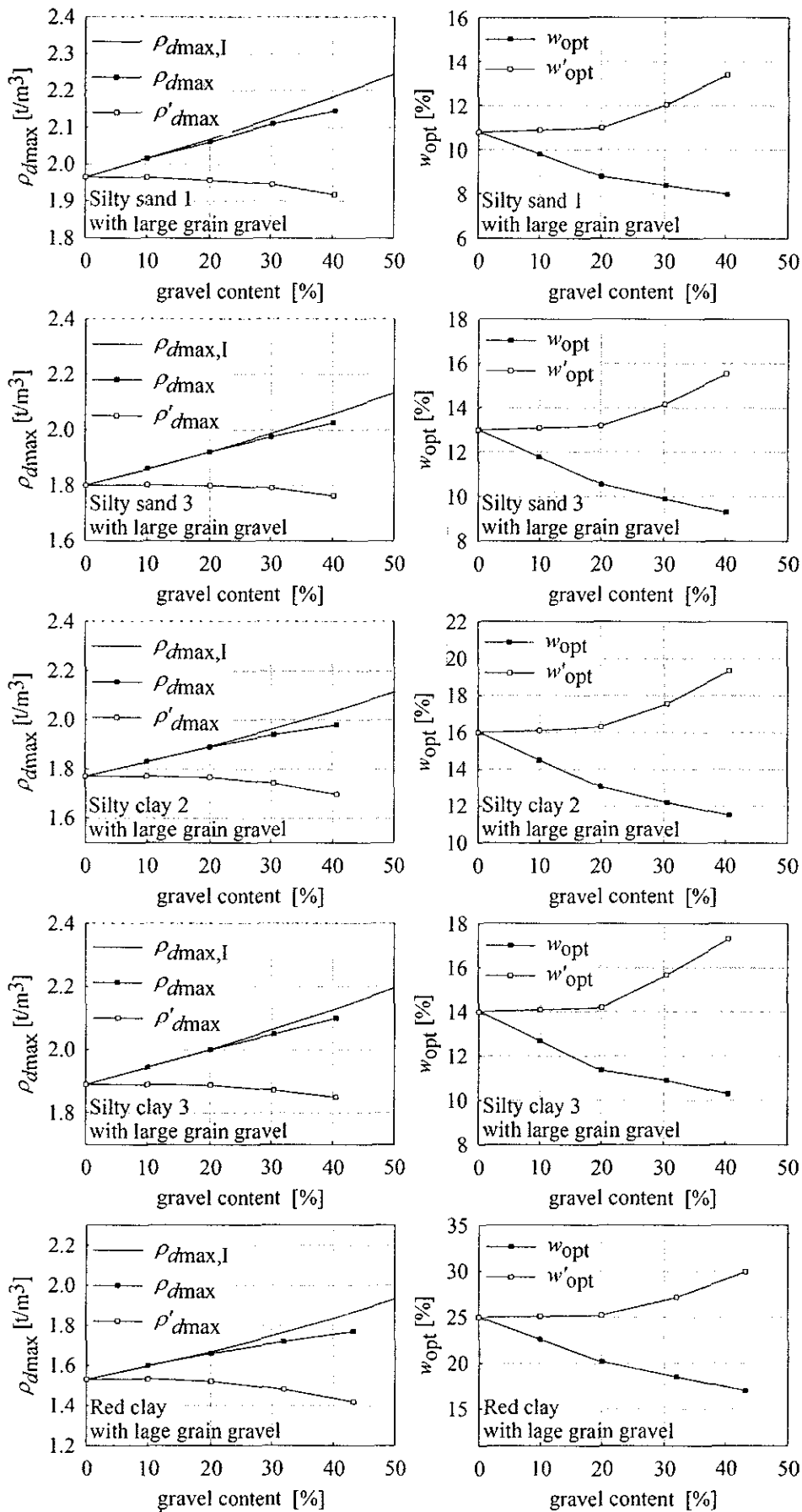
รูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดทั้งที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณ โดยใช้สมการที่ 4.1 และสมการที่ 4.3 พบว่าเมื่อปริมาณกรวดมีค่าไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัดและความหนาแน่นแห้งสูงสุดทางทฤษฎีมีค่าเท่ากัน และเมื่อเพิ่มปริมาณกรวดถึง 20 เปอร์เซ็นต์ จะเริ่มสังเกตเห็นความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับความหนาแน่นแห้งสูงสุดทางทฤษฎี อย่างไรก็ตามความแตกต่างดังกล่าวจะมีค่าน้อยมาก แต่เมื่อเพิ่มปริมาณกรวดจนมีปริมาณมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไปความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับความหนาแน่นแห้งสูงสุดทางทฤษฎีจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 4.3 เส้นโค้งบดอัดดินที่ปริมาณกรวดและขนาดกรวดต่างๆ



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรวดกับ ρ_{dmax} และ w_{opt} สำหรับดินผสมกรวดขนาดเล็ก



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรวดกับ ρ_{dmax} และ w_{opt} สำหรับดินผสมกรวดขนาดใหญ่

การที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัดและความหนาแน่นแห้งสูงสุดทางทฤษฎีมีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกันในช่วงที่มีกรวดผสมอยู่ไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่ากรวดไม่ได้ไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของเม็ดดินในระหว่างที่เม็ดดินถูกบดอัด แต่กรวดจะไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของดินเม็ดละเอียดเมื่อปริมาณกรวดมีมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ดังจะเห็นได้จากการที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุดทางทฤษฎีมีค่าสูงกว่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัดอย่างชัดเจน ซึ่งเมื่อพิจารณาความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัดคัดกรวดที่ปริมาณผสมกรวดใด ๆ ก็จะได้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัดคัดกรวดมีค่าลดลงเมื่อกรวดมีปริมาณสูงกว่า 20 เปอร์เซ็นต์

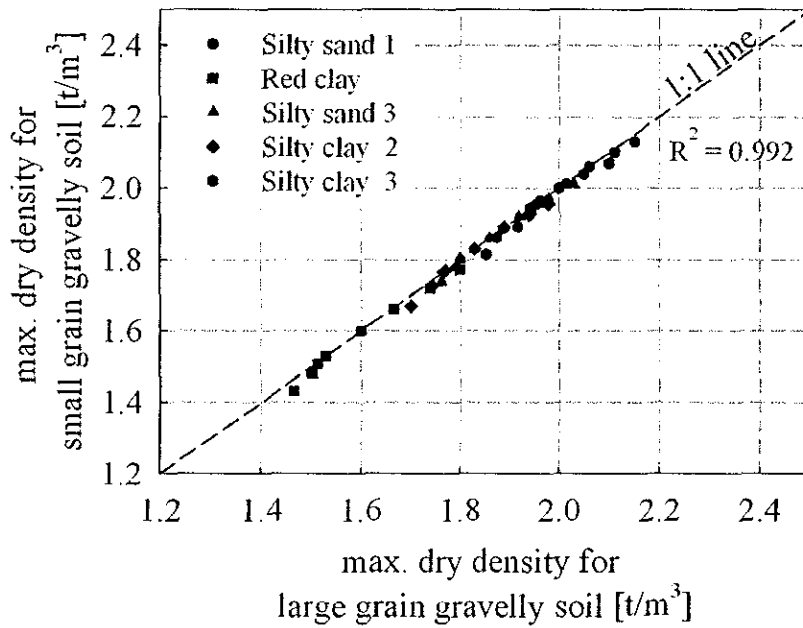
นอกจากนี้ในรูปที่ 4.4 และ รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรวดกับความชื้นที่เหมาะสมของดินบดอัด และความชื้นที่เหมาะสมของดินบดอัดคัดกรวดซึ่งคำนวณโดยใช้สมการที่ 4.2 จะพบว่าความชื้นของดินบดอัดคัดกรวดมีค่าเกือบคงที่ในช่วงที่มีปริมาณกรวดไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ และจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มปริมาณกรวดมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์

งานวิจัยหลายชิ้นได้บ่งชี้ให้เห็นว่าความชื้นที่เหมาะสมมีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ใช้ในการบดอัดดิน โดยความชื้นที่เหมาะสมจะมีค่าลดลงตามพลังงานบดอัดที่เพิ่มขึ้น เช่น Boutwell (1961) Blotz et al. (1998) และ Horpibulsuk et al. (2009) เป็นต้น ดังนั้นการที่ความชื้นที่เหมาะสมของดินบดอัดคัดกรวดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณกรวด เป็นการบ่งชี้ว่าพลังงานการบดอัดที่ถ่ายทอดไปสู่เม็ดดินลดลงตามปริมาณกรวดที่เพิ่มขึ้นเกินกว่า 20 เปอร์เซ็นต์

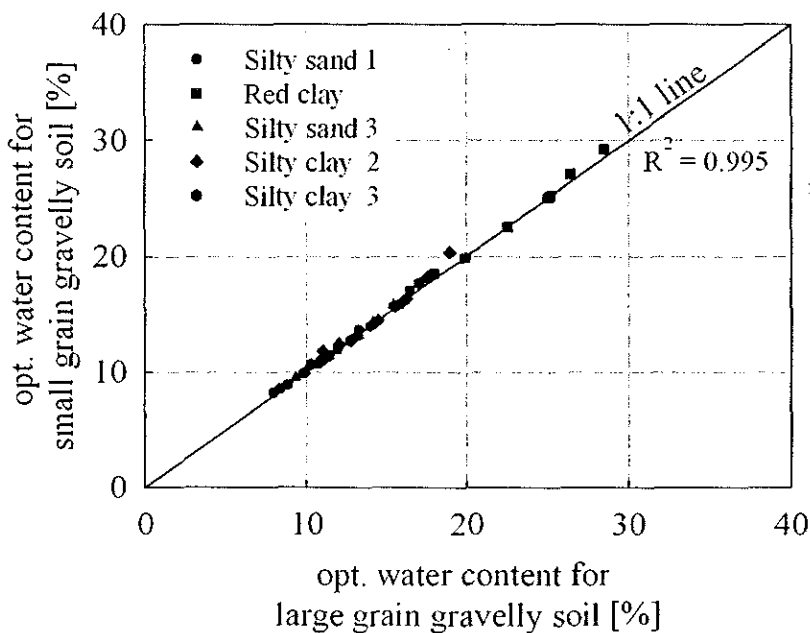
จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง $\rho_{d\max}$ และ $\rho'_{d\max}$ ของดินบดอัดที่ผสมกรวดขนาดเล็กและดินบดอัดที่ผสมกรวดขนาดใหญ่ ที่ปริมาณกรวดเท่ากันดังแสดงในรูปที่ 4.6 และความสัมพัทธ์ระหว่าง w_{opt} และ w'_{opt} ของดินบดอัดที่ผสมกรวดขนาดเล็กและดินบดอัดที่ผสมกรวดขนาดใหญ่ที่ปริมาณกรวดเท่ากันดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าพิกัดของความหนาแน่นแห้งสูงสุดอยู่ตรงหรือต่ำกว่าเส้น 1:1 เล็กน้อย ในขณะที่พิกัดของความชื้นที่เหมาะสมอยู่ตรงหรือสูงกว่าเส้น 1:1 เล็กน้อย นั่นคือ ดินที่ผสมกรวดขนาดใหญ่จะมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดสูงกว่าดินที่ผสมกรวดขนาดเล็ก และความชื้นที่เหมาะสมของดินที่ผสมกรวดขนาดใหญ่จะมีค่าต่ำกว่าดินที่ผสมกรวดขนาดเล็ก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณกรวดเท่ากัน กรวดที่มีขนาดเม็ดเล็กซึ่งมีจำนวนเม็ดมากกว่าจะขัดกันมากกว่า จึงไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของเม็ดดินได้มากกว่า นอกจากนี้กรวดขนาดใหญ่มีการคละก้นดีกว่ากรวดขนาดเล็ก เนื่องจากช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกรวดขนาดใหญ่มีช่วงที่กว้างกว่า กล่าวคือระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 9.5 มิลลิเมตรถึง 19 มิลลิเมตร ในขณะที่กรวดขนาดเล็กมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 4.75 มิลลิเมตรถึง 9.5 มิลลิเมตร จึงทำให้การบดอัดดินผสมกรวดขนาดใหญ่สามารถบดอัดได้ดีกว่าดินผสมกรวดขนาดเล็ก แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.6 และ 4.7 ซึ่งพบว่าพิกัดของข้อมูลเบี่ยงเบนจากเส้น

1:1 น้อยมาก (R^2 มากกว่า 0.99) ซึ่งทำให้สามารถสรุปได้ว่า ขนาดของกรวดรวมทั้งการลดขนาดของกรวดมีอิทธิพลต่อผลทดสอบการบดอัดดินน้อยมาก

จากผลทดสอบและบทวิเคราะห์ข้างต้นทำให้สามารถสรุปได้ว่ากรวดจะมีอิทธิพลต่อผลทดสอบการบดอัดดินเมื่อปริมาณกรวดมีมากเกินไปกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ และปัจจัยหลักต่อผลทดสอบการบดอัดดินคือปริมาณกรวดที่ผสมในดินบดอัด โดยเมื่อกรวดมีปริมาณเกินกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ จะขัดขวางการจัดเรียงตัวของเม็ดดินในระหว่างการบดอัดทำให้เม็ดดินได้รับพลังงานในการบดอัดลดลง



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\rho_{d\max}$ ของดินบดอัดที่ผสมกรวดขนาดเล็กและกรวดขนาดใหญ่



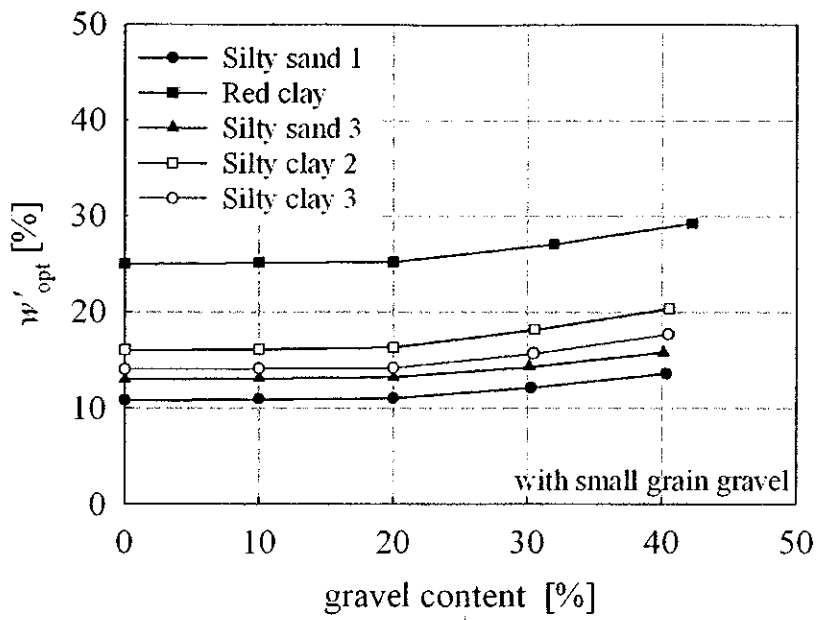
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง w_{opt} ของดินบดอัดที่ผสมกรวดขนาดเล็กและกรวดขนาดใหญ่

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานบดอัดและปริมาณกรวด

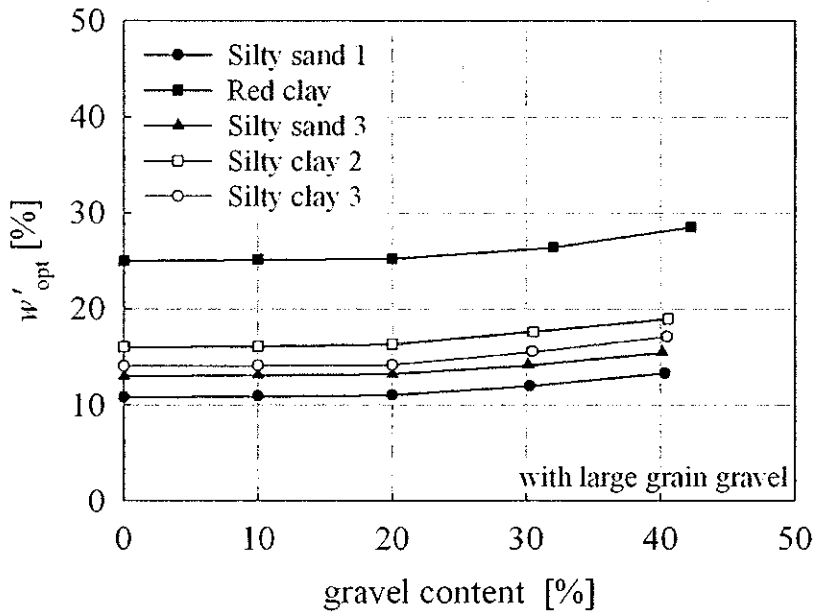
จากผลทดสอบในหัวข้อที่ 4.2 พบว่าสำหรับดินชนิดหนึ่ง เมื่อปริมาณกรวดที่ผสมในดินมีค่าเพิ่มขึ้นเกินกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ กรวดจะขัดกัน และคุณสมบัติพลังงานบดอัดดินบางส่วนไว้ ทำให้พลังงานบดอัดที่จะถ่ายทอดไปสู่ส่วนละเอียดมีค่าลดลง ดังจะเห็นได้จากความชื้นที่เหมาะสมของดินบดอัดคัดกรวดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณกรวดที่เพิ่มขึ้นมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.8

รูปที่ 4.9 แสดงเส้นโค้งบดอัดของดินทั้ง 5 ประเภท ที่ถูกบดอัดด้วยพลังงานบดอัด 148.1 kJ/m³ 197.5 kJ/m³ 296.2 kJ/m³ และ 592.5 kJ/m³ และรูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นที่เหมาะสมกับพลังงานที่ใช้ในการบดอัดดิน จากความสัมพันธ์ที่กล่าวมาข้างต้น สามารถแปลงอิทธิพลของกรวดให้เป็นพลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดสู่ส่วนละเอียดได้ รูปที่ 4.11 แสดงแผนภาพการแปลงอิทธิพลของกรวดเป็นพลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดสู่ส่วนละเอียด จากรูปเป็นการแสดงขั้นตอนการแปลงอิทธิพลของกรวดเป็นพลังงานที่ถ่ายทอดสู่ส่วนละเอียดสำหรับดิน Silty clay 2 ที่มีกรวดผสมอยู่ 30 เปอร์เซ็นต์ เมื่อแปลงปริมาณกรวด 30 เปอร์เซ็นต์เป็นค่า 1/ gravel content ได้เท่ากับ 3.33 นำไปอ่านความชื้นเหมาะสมของดินบดอัดคัดกรวดในรูปที่ 4.8 จะได้ความชื้นเหมาะสมของดินบดอัดคัดกรวดเท่ากับ 18 เปอร์เซ็นต์ นำความชื้นเหมาะสมของดินบดอัดคัดกรวดที่อ่านได้จากรูปที่ 4.8 ไปอ่านค่าพลังงานบดอัดจากรูปที่ 4.10 ได้ค่าเท่ากับ 278 kJ/m³ จากนั้นนำค่า 1/ gravel content กับพลังงานที่อ่านได้จากรูปที่ 4.10 มาพล็อตกราฟโดยกำหนดให้ค่า 1/ gravel content เป็นแกนตั้ง ให้ค่าพลังงานเป็นแกนนอน เมื่อทำเช่นนี้ที่ปริมาณกรวดอื่นๆ กับดินทั้งหมดที่นำมาทดสอบ จะได้พลังงานที่ถ่ายทอดสู่ส่วนละเอียดเนื่องจากอิทธิพลของกรวด ดังรูปที่ 4.12

จากรูปที่ 4.12 พบว่าที่ปริมาณกรวดไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ พลังงานบดอัดทั้งหมดจะถ่ายทอดไปสู่ส่วนละเอียด นั่นคือมีพลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดสู่ส่วนละเอียดเท่ากับพลังงานบดอัดตามมาตรฐานพล็อกเตอร์ เท่ากับ 592.5 kJ/m³ แต่เมื่อปริมาณกรวดเพิ่มขึ้นมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ พลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดสู่ส่วนละเอียดจะลดลง และที่ปริมาณกรวดหนึ่งๆ พลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดสู่ส่วนละเอียดจะมีค่ากระจายอยู่ในช่วงแคบ ๆ ซึ่งทำให้สามารถสรุปได้ว่าปริมาณกรวดที่ผสมอยู่ในดินเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อพลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดสู่ส่วนละเอียด โดยไม่ขึ้นกับประเภทของดิน รวมทั้งขนาดและการกระจายขนาดของกรวด

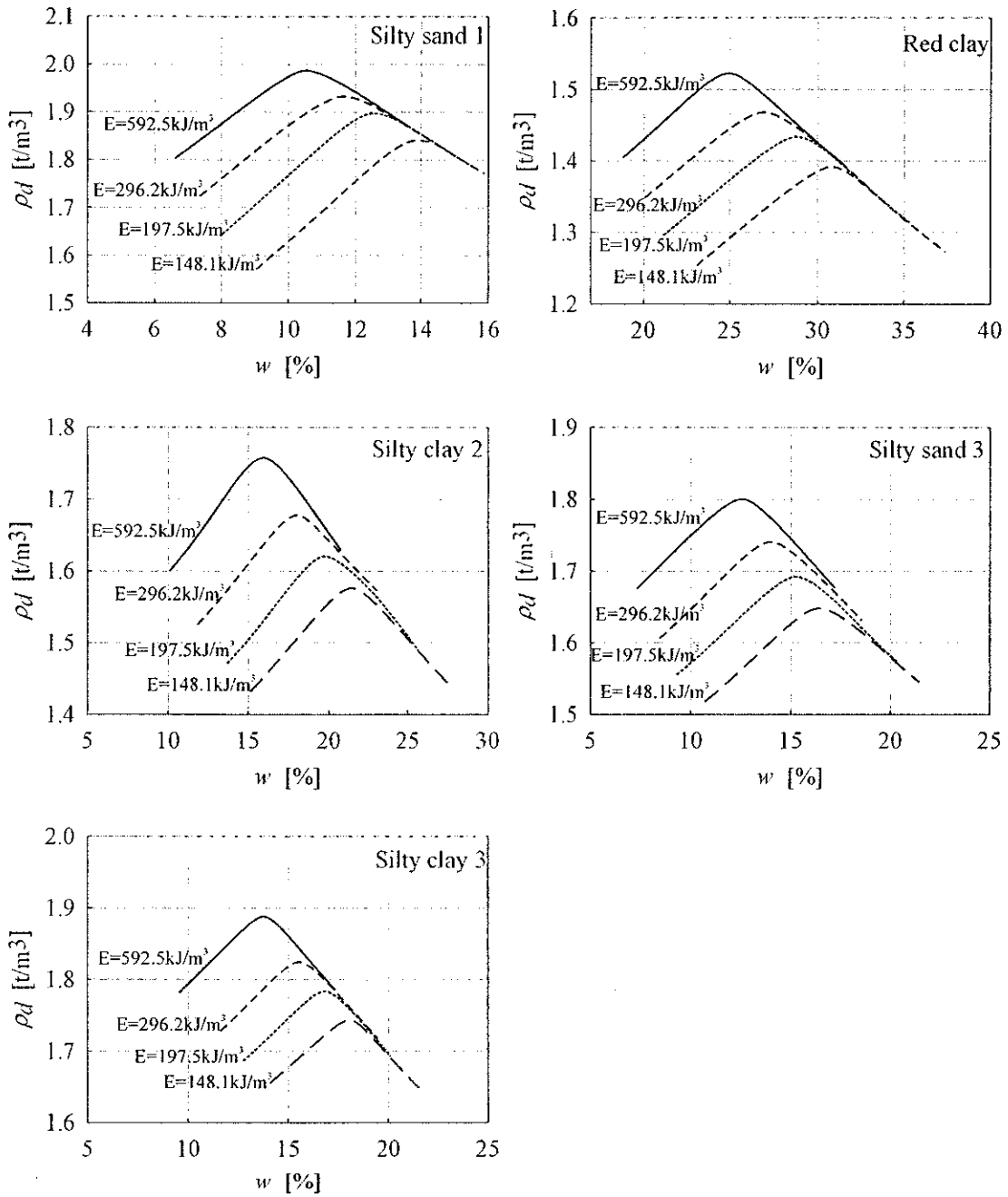


(ก) ดินผสมกรวดขนาดเล็ก



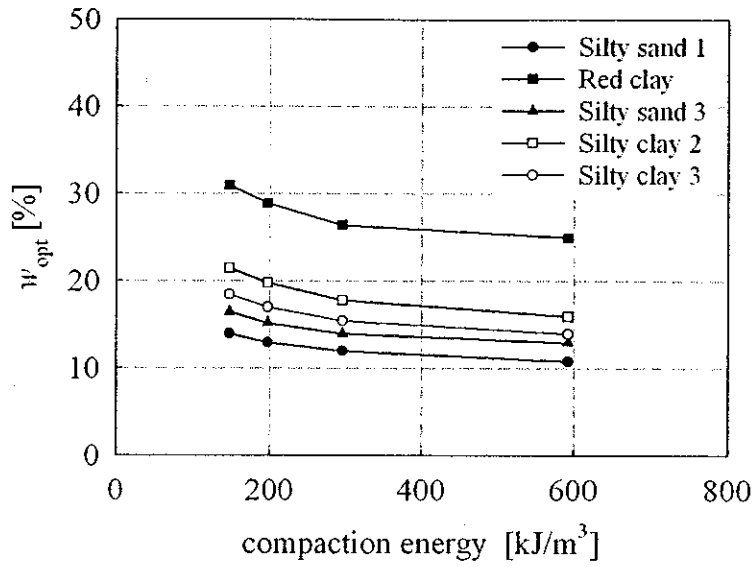
(ข) ดินผสมกรวดขนาดใหญ่

รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรวดและ w'_{opt} ของดินผสมกรวดขนาดเล็ก และกรวดขนาดใหญ่

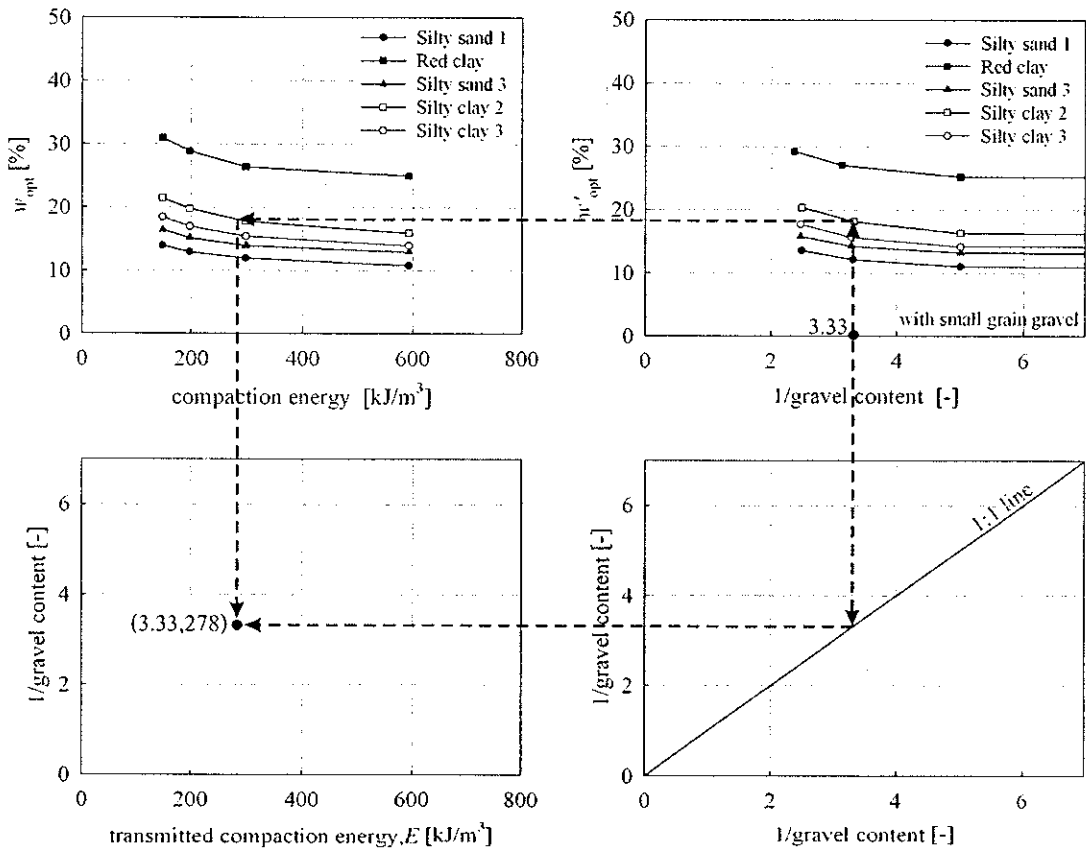


รูปที่ 4.9 เส้นโค้งบดอัดของดินทั้ง 5 ประเภทที่ถูกบดอัดด้วยพลังงานบดอัด

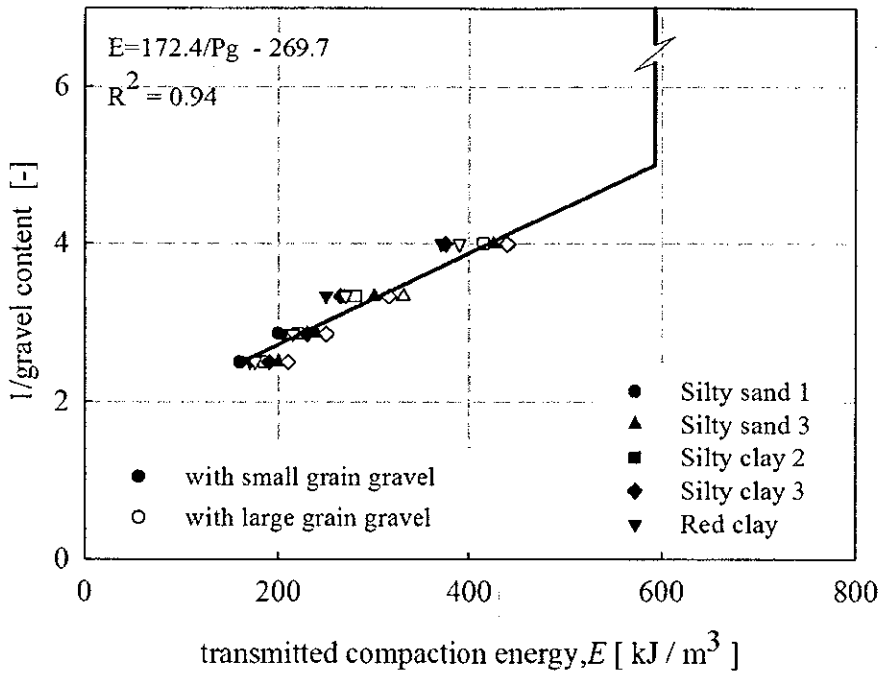
148.1 kJ/m^3 197.5 kJ/m^3 296.2 kJ/m^3 และ 592.5 kJ/m^3



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง w_{opt} กับพลังงานที่ใช้ในการบดอัดดิน



รูปที่ 4.11 แผนภาพการแปลงอิทธิพลของกรวดเป็นพลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดสู่ส่วนละเอียด



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดสู่ส่วนละเอียดและปริมาณกรวด

4.4 การประมาณคุณลักษณะการบดอัดของดินปนกรวดด้วยชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก

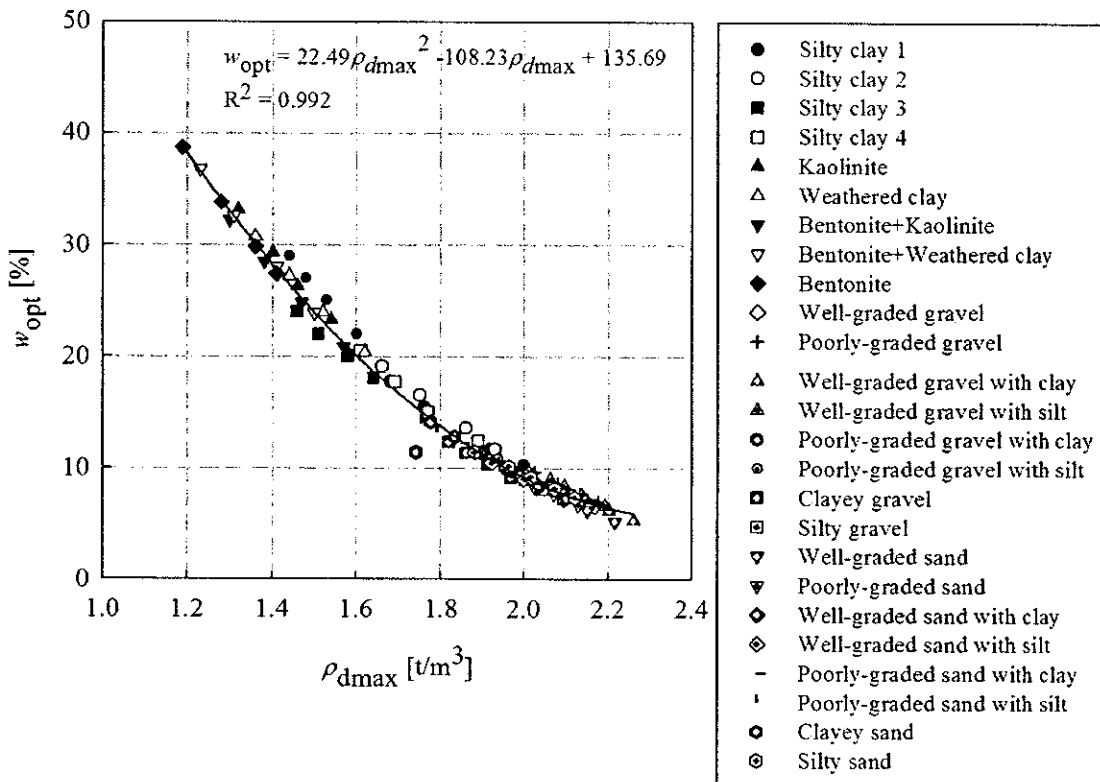
ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กที่เสนอไปในบทที่ 3 สามารถใช้หาความหนาแน่นแห้งสูงสุด และความชื้นที่เหมาะสมของดินที่มีขนาดเม็ดดินใหญ่สุดไม่เกิน 4.75 มิลลิเมตรที่พลังงานบดอัดตามมาตรฐานพล็อกเตอร์ได้เป็นอย่างดี แต่มีข้อจำกัดที่ไม่สามารถนำไปใช้ทดสอบการบดอัดกับดินปนกรวดได้ อย่างไรก็ตามจากผลทดสอบและวิเคราะห์ในหัวข้อที่ผ่านมา ทำให้ทราบว่าพลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดสู่ส่วนละเอียดขึ้นกับปริมาณกรวดที่ผสมอยู่ในดิน และได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดสู่ส่วนละเอียดกับปริมาณกรวดที่ผสมอยู่ในดิน เมื่อทำการบดอัดดินปนกรวดตามมาตรฐานพล็อกเตอร์ เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า สำหรับดินชนิดหนึ่ง ๆ คุณลักษณะการบดอัดของดินจะขึ้นกับพลังงานบดอัด และมีงานวิจัยที่ผ่านมาได้นำเสนอสมการในการประมาณความชื้นที่เหมาะสมที่พลังงานบดอัดต่าง ๆ เช่น Boutwell (1961); Blozt et al. (1998) และ Horpibulsuk et al. (2009) ดังนั้นการหาความหนาแน่นแห้งสูงสุด และความชื้นที่เหมาะสมของส่วนละเอียดในดินปนกรวดที่บดอัดตามมาตรฐานพล็อกเตอร์จึงสามารถทำได้ และเมื่อทราบความหนาแน่นแห้งสูงสุด และความชื้นที่เหมาะสมของส่วนละเอียดแล้วจะสามารถคำนวณความหนาแน่นแห้งสูงสุด และความชื้นที่เหมาะสมของดินปนกรวดที่บดอัดตามมาตรฐานพล็อกเตอร์ได้จากสมการที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

$$\rho_{dmax} = \frac{1}{\frac{P_f}{\rho'_{dmax}} + \frac{P_g}{2.65}} \quad (4.4)$$

$$w_{opt} = \frac{w'_{opt}}{\left(1 + \frac{P_g}{P_f}\right)} \quad (4.5)$$

- โดยที่ ρ_{dmax} คือ ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัด
- w_{opt} คือ ความชื้นที่เหมาะสมของดินบดอัด
- ρ'_{dmax} คือ ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัดกักรวด
- w'_{opt} คือ ความชื้นที่เหมาะสมของดินบดอัดกักรวด
- P_g คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของกรวดต่อน้ำหนักดินทั้งหมด
- P_f คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของส่วนละเอียดต่อน้ำหนักดินทั้งหมด
- 2.65 คือ ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของกรวด

และจากการรวบรวมผลทดสอบการบดอัดดินจากบทความวิจัยของ Horpibulsuk et al. (2009) พบว่าสามารถสร้างสมการการถดถอยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสมได้ที่มีค่า R^2 สูงถึง 0.992 ดังแสดงในรูปที่ 4.13



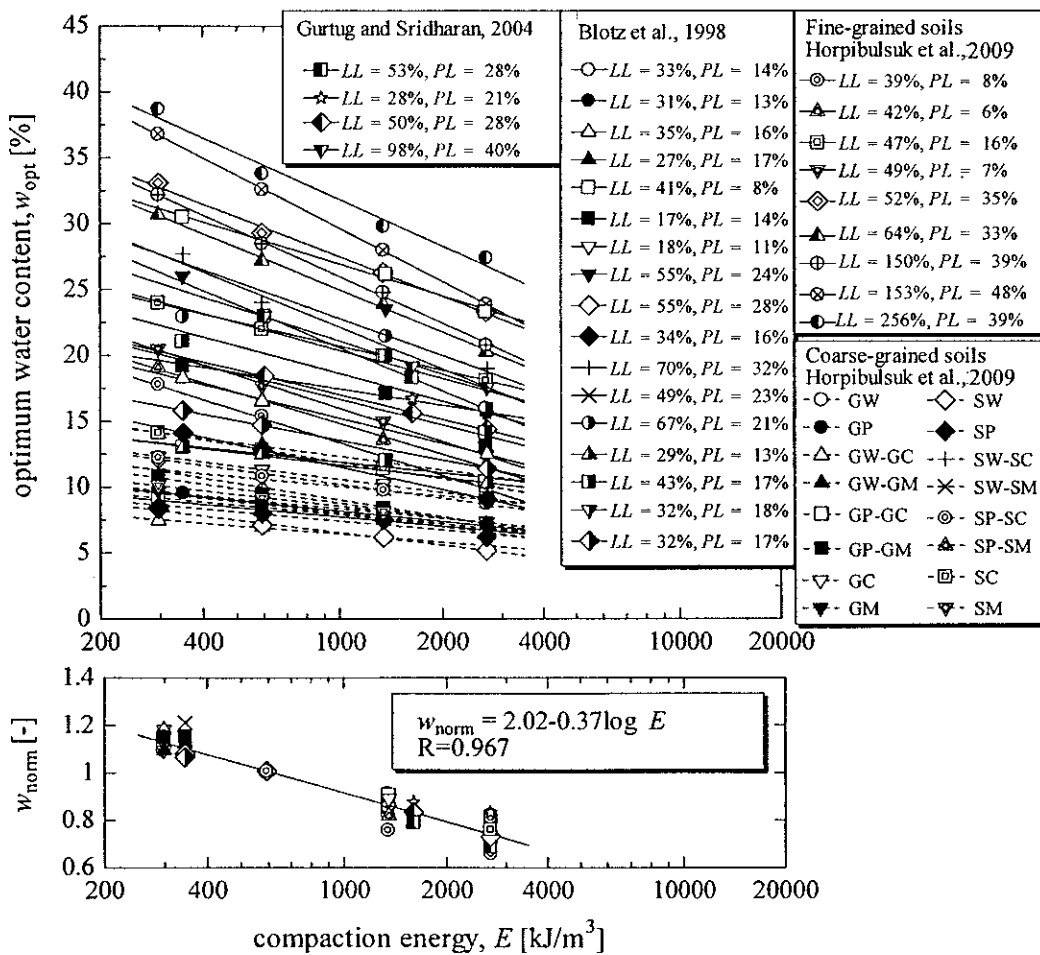
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง ρ_{dmax} กับ w_{opt}

นอกจากนี้ Horpibulsuk et al. (2009) ได้รวบรวมผลทดสอบการบดอัดดิน 25 ประเภท สำหรับความชื้นที่เหมาะสม ในช่วงระดับพลังงานเท่ากับ 296.3 kJ/m³ ถึง 2693.3 kJ/m³ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และทำการวิเคราะห์ความถดถอยได้ดังสมการที่ 4.6

$$w_{opt, norm} = \frac{w_{opt}}{w_{opt, st}} = 2.02 - 0.37 \log E \quad (4.6)$$

- โดยที่ $w'_{opt, norm}$ คือ ความชื้นที่เหมาะสมปกติ (Normalized optimum water content)
 w'_{opt} คือ ความชื้นที่เหมาะสมที่ระดับพลังงานใด ๆ
 $w'_{opt, st}$ คือ เป็นความชื้นที่เหมาะสมที่ระดับพลังงาน 592.5 kJ/m³

จากรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 จะพบว่าหากทราบพลังงานที่เม็ดดินได้รับในการบดอัดดิน และความชื้นที่เหมาะสมที่ระดับพลังงาน 592.5 kJ/m³ จะสามารถประมาณคุณลักษณะการบดอัดของเม็ดดินที่ระดับพลังงานนั้นๆได้



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานการบดอัดกับ w_{opt} (Horpibulsuk et al., 2009)

รูปที่ 4.15 แสดงแผนภาพการประมาณความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของเม็ดดินในดินปนกรวดที่ได้รับการบดอัดแบบมาตรฐานพลีอกเตอร์ ซึ่งสามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

(ก) แยกกรวดออกจากดินปนกรวด พร้อมทั้งหาสัดส่วนกรวดที่ผสมในดิน

(ข) นำดินที่กักกรวดไปหาทดสอบการบดอัดโดยใช้ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กเพื่อสร้างเส้นโค้งการบดอัดแบบมาตรฐานพลีอกเตอร์

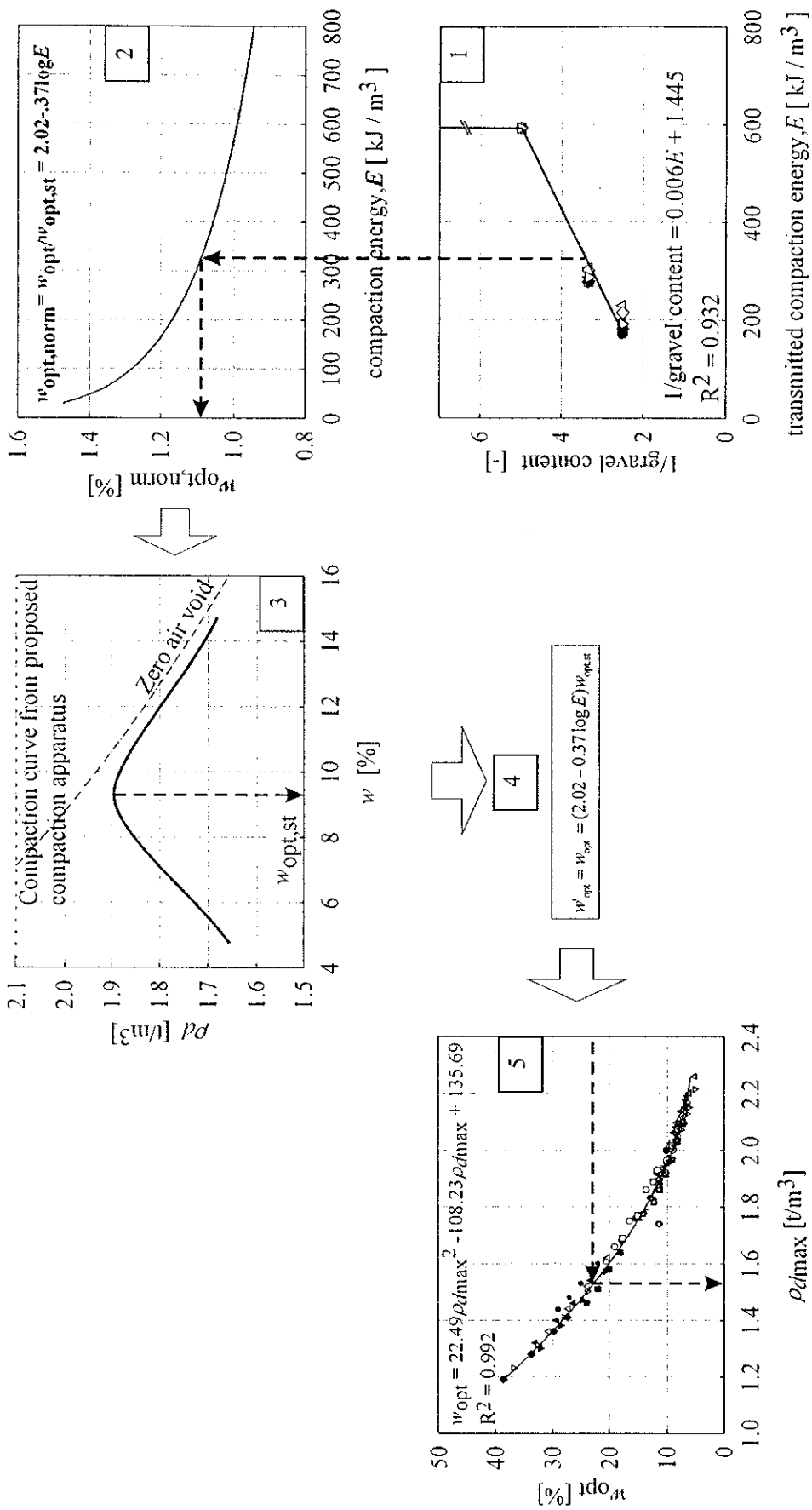
(ค) จากปริมาณกรวดที่ผสมในดินปนกรวด อ่านค่าพลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดสู่ส่วนละเอียดจากรูปที่ 4.12

(ง) จากพลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดสู่ส่วนละเอียดที่อ่านได้ นำไปคำนวณความชื้นที่เหมาะสมปกติจากรูปที่ 4.14

(จ) คำนวณความชื้นที่เหมาะสมของส่วนละเอียด จากความชื้นที่เหมาะสมปกติที่คำนวณได้จากสมการ 4.6 ในข้อ (ง) และความชื้นที่เหมาะสมที่อ่านได้จากเส้นโค้งการบดอัดแบบมาตรฐานพลีอกเตอร์ ที่ได้จาก (ข)

(ฉ) จากความชื้นที่เหมาะสมที่คำนวณได้จากข้อ (จ) นำไปอ่านความหนาแน่นแห้งสูงสุดของส่วนละเอียดจากรูปที่ 4.13

เมื่อได้ความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของส่วนละเอียดแล้ว จะสามารถคำนวณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินปนกรวดที่ได้รับการบดอัดแบบมาตรฐานพลีอกเตอร์ได้จากสมการที่ 4.4 และสมการที่ 4.5 ตามลำดับ



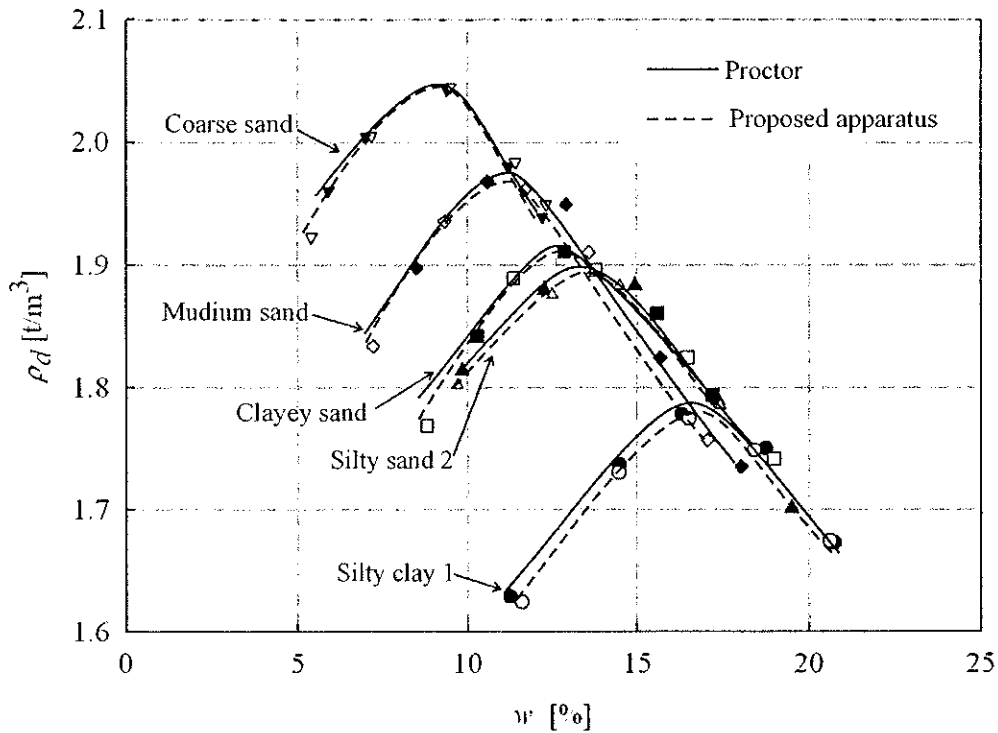
รูปที่ 4.15 แผนภาพการประมาณความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุด
ของส่วนละเอียดในดินปนกรวด

บทที่ 5

ผลทดสอบ

3.2 ผลทดสอบการบดอัดดินด้วยชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก

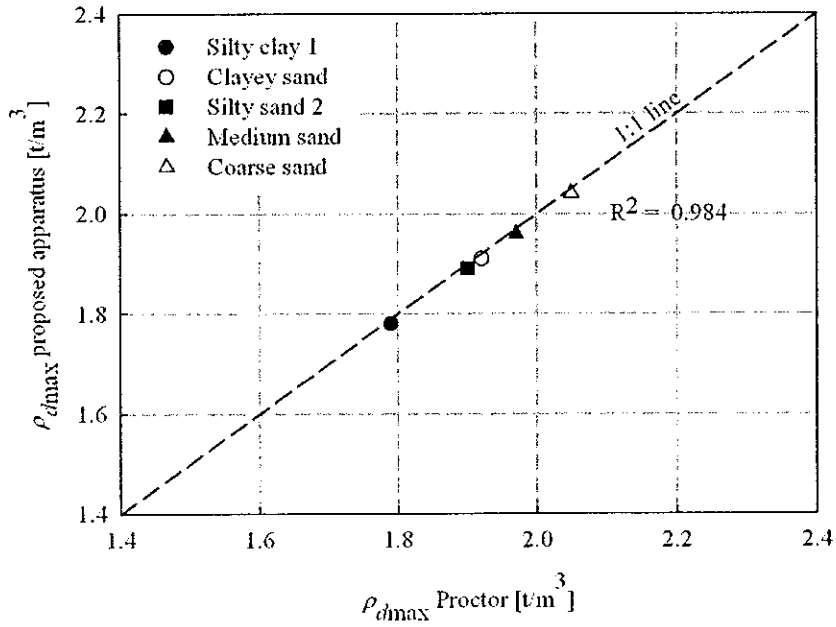
ทำการตรวจสอบการใช้ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กในการบดอัดดินเทียบกับชุดทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ โดยใช้ตัวอย่างดิน 5 ชนิด ได้แก่ (1) Silty sand 2 (2) Silty clay 1 (3) Clayey sand (4) Medium sand และ (5) Coarse sand ซึ่งมีการกระจายขนาดของเม็ดดินดังรูปที่ 3.1 และมีคุณสมบัติทางกายภาพและดัชนีแสดงดังตารางที่ 3.1 ซึ่งดินทั้ง 5 ชนิดล้วนเป็นดินที่มีขนาดเม็ดดินใหญ่สุดไม่เกิน 4.75 มิลลิเมตร



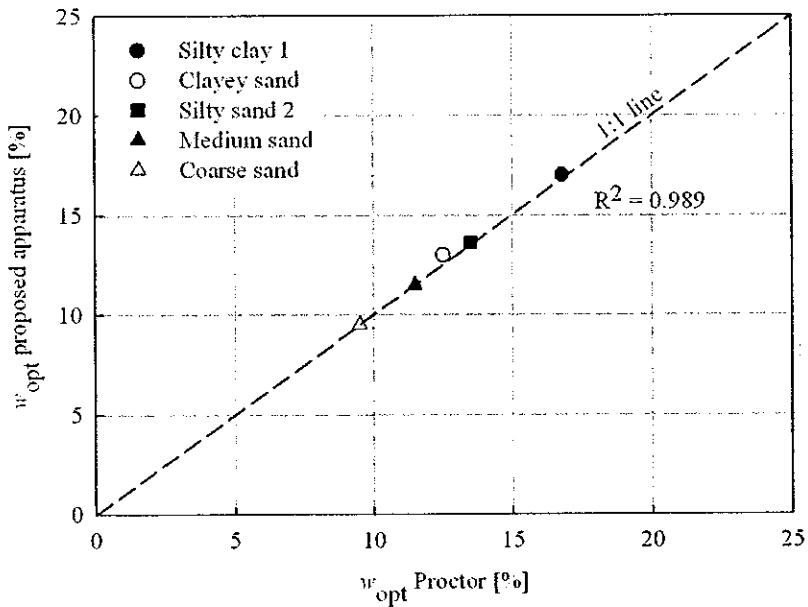
รูปที่ 5.1 เส้นโค้งการบดอัดจากชุดทดสอบมาตรฐานและชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก

รูปที่ 5.1 แสดงเส้นโค้งการบดอัดของดินทั้ง 5 ชนิดที่บดอัดโดยใช้ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก เทียบกับผลทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ จากรูปพบว่าผลการทดสอบบดอัดโดยชุดทดสอบบดอัดขนาดเล็กและชุดทดสอบบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ให้ผลการทดสอบไม่ต่างกัน รูปที่ 5.2ก แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่า $\rho_{d\max}$ ที่ได้จากการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ กับค่า $\rho_{d\max}$ ที่ได้จากการทดสอบการบดอัดโดยใช้ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก ส่วนรูปที่ 5.2ข แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่า w_{opt} ที่ได้จากการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ กับค่า w_{opt} ที่ได้จากการทดสอบการบดอัดโดยใช้ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก พบว่าผลทดสอบการบดอัดโดยใช้ชุดทดสอบขนาดเล็กให้ผลเป็นที่น่าพอใจ เมื่อทำ

การวิเคราะห์ความถดถอยโดยใช้สมการ y เท่ากับ x พบว่าค่า R^2 มีค่าสูงกว่า 0.98 อย่างไรก็ตามจากรูปจะพบว่า ความสัมพันธ์ของ ρ_{dmax} จะอยู่ใต้เส้น 1:1 เล็กน้อย ในขณะที่ความสัมพันธ์ของ w_{opt} ที่อยู่เหนือเส้น 1:1 เล็กน้อยเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากพลังงานต่อปริมาตรที่ใช้ในชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กมีค่าน้อยกว่าพลังงานต่อปริมาตรที่ใช้ในแบบบดอัดมาตรฐานพล็อกเตอร์



(ก) เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด



(ข) เปรียบเทียบค่าความชื้นที่เหมาะสม

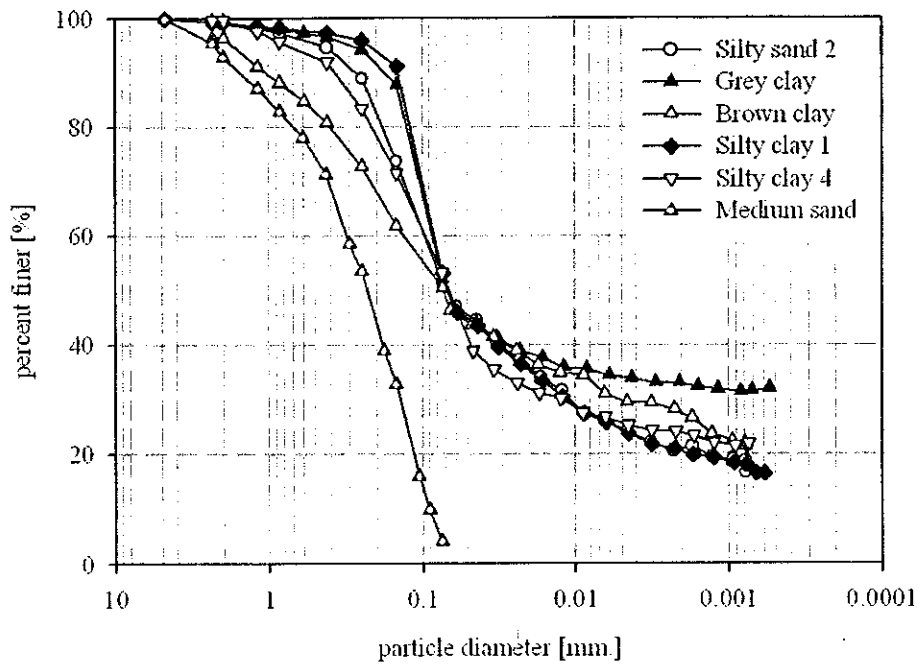
รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบผลทดสอบการบดอัดที่ได้จากชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก และชุดทดสอบมาตรฐานพล็อกเตอร์

5.2 เปรียบเทียบผลการประมาณคุณลักษณะของดินปนกรวด

เพื่อยืนยันการนำแผนภาพในรูปที่ 4.15 ไปใช้ในการประมาณคุณลักษณะการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ของดินปนกรวด จึงทำการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ กับดินทั้งสิ้น 6 ประเภทได้แก่ (1) Silty clay 1 (2) Silty sand 2 (3) Medium sand (4) Grey clay (5) Brown clay และ (6) Silty clay 4 ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพ และดัชนีดังตารางที่ 5.1 และมีการกระจายขนาดของเม็ดดินแสดงดังรูปที่ 5.3 ซึ่งดินแต่ละประเภทจะนำมาผสมกรวดให้มีปริมาณกรวดระหว่าง 30 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ โดยกรวดที่ใช้ผสมจะทำการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนระหว่างกรวดขนาดเล็กและกรวดขนาดใหญ่ดังแสดงในตารางที่ 4.4 แล้วทำการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ ผลการประมาณคุณลักษณะการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ที่เสนอ ให้ผลเป็นที่น่าพอใจในระดับหนึ่ง เมื่อเทียบกับผลทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ โดยค่า $\rho_{d\max}$ และค่า w_{opt} ที่ได้จากการประมาณจะมีค่าสูงกว่าค่า w_{opt} ที่ได้จากการทดสอบบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 5.4

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

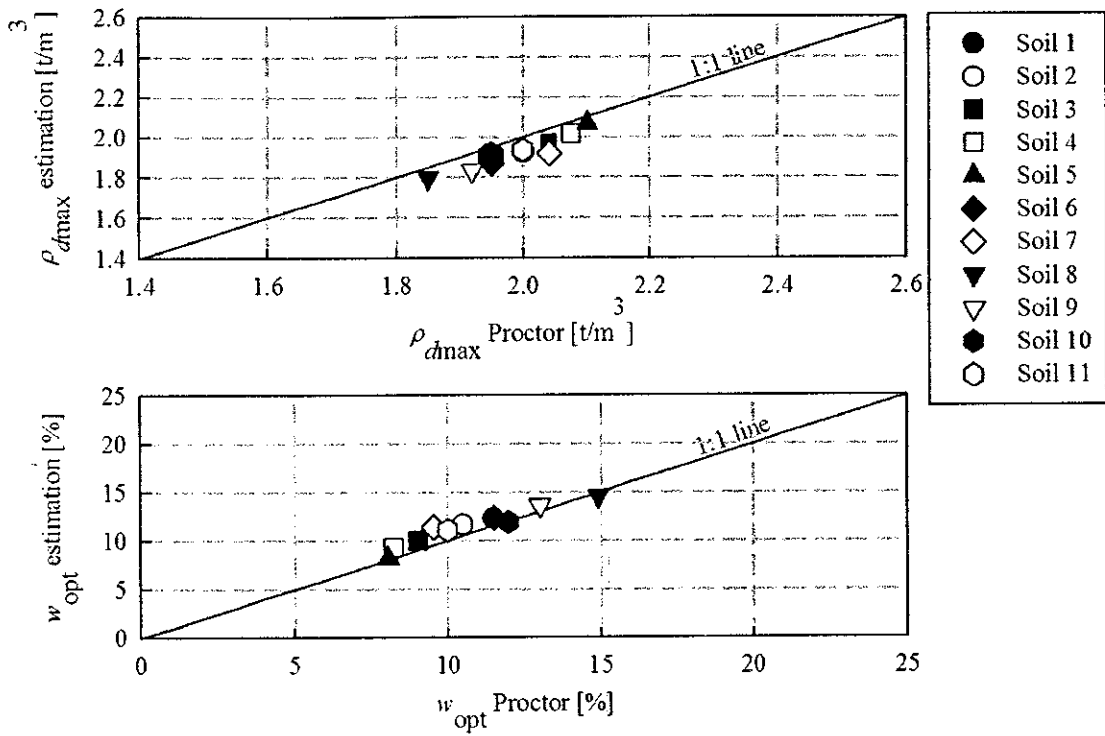
Soil type	LL [%]	PL [%]	PI [%]	G_s	Group symbol
Silty clay 1	28.7	19.4	9.3	2.72	CL
Silty sand 2	NP	NP	NP	2.69	SM
Medium sand	NP	NP	NP	2.72	SP
Grey clay	68.8	19.4	49.4	2.72	CH
Brown clay	61.6	18.7	42.9	2.74	CH
Silty clay 4	41.4	20	21.4	2.64	CL



รูปที่ 5.3 การกระจายขนาดของดินที่ทำการศึกษา

ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างดินและกรวดที่ใช้ทดสอบบดอัดแบบมาตรฐานพลีเอกเตอร์เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการประมาณ

Sample	Raw soil	Gravel mix.		Gravel content [%]
		Small [%]	Large [%]	
Soil 1	Silty clay 1	-	30	30
Soil 2	Silty clay 1	-	30	40
Soil 3	Silty sand 2	-	30	30
Soil 4	Silty sand 2	-	30	40
Soil 5	Medium sand	-	35	35
Soil 6	Grey clay	9	21	30
Soil 7	Grey clay	12	28	40
Soil 8	Brown clay	15	15	30
Soil 9	Brown clay	20	20	40
Soil 10	Silty clay 4	12	18	30
Soil 11	Silty clay 4	16	24	40



รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบคุณลักษณะการบดอัดจากการประมาณและผลการทดสอบบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์

บทที่ 6

สรุป

จากการศึกษาอิทธิพลเนื่องจากขนาดของแบบบดอัด และนำไปใช้ในการพัฒนาชุดทดสอบบดอัดขนาดเล็ก และการศึกษาอิทธิพลของกรวดต่อผลการทดสอบบดอัด เพื่อใช้ในการเสนอวิธีการประมาณคุณลักษณะการบดอัดของดินปนกรวดโดยชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

6.1 การศึกษาอิทธิพลเนื่องจากขนาดของแบบบดอัดและการพัฒนาชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก

การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของชุดทดสอบการบดอัดดินเช่น จำนวนของชั้นบดอัด น้ำหนักค้อน ระยะตกของค้อน และ Diameter ratio; DR ไม่มีผลต่อผลการทดสอบบดอัด ยกเว้นการบดอัดดินโดยใช้ชุดทดสอบการบดอัดดินที่ DR เท่ากับ 1 จะทำให้ประสิทธิภาพการบดอัดสูงขึ้น และจากการศึกษาอิทธิพลเนื่องจากขนาดของแบบบดอัด สามารถเสนอชุดทดสอบการบดอัดดินขนาดเล็ก ซึ่งให้ผลทดสอบการบดอัดดินใกล้เคียงกับผลทดสอบการบดอัดดินตามมาตรฐานพล็อกเตอร์ โดยการทดสอบบดอัดดินด้วยชุดทดสอบการบดอัดดินขนาดเล็กที่เสนอสามารถลดปริมาณดินตัวอย่างที่ใช้ทดสอบและจำนวนครั้งในการบดอัดได้ โดยใช้ปริมาณดินตัวอย่างเท่ากับ 2.5 กิโลกรัม และจำนวนครั้งในการบดอัดเท่ากับ 14 ครั้งต่อชั้น ซึ่งลดลงจากการทดสอบบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ที่ใช้ปริมาณดินตัวอย่างเท่ากับ 4 กิโลกรัม และใช้จำนวนครั้งในการบดอัดเท่ากับ 25 ครั้งต่อชั้น สำหรับการทดสอบบดอัดดินในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) อย่างไรก็ตามชุดทดสอบการบดอัดดินขนาดเล็กที่เสนอสามารถใช้ทดสอบบดอัดได้ดีกับดินที่มีขนาดเม็ดดินใหญ่สุดไม่เกิน 4.75 มิลลิเมตร

6.2 การศึกษาอิทธิพลของกรวดต่อผลการทดสอบบดอัด และการถ่ายทอดพลังงานบด

อัดไปสู่ดินเม็ดละเอียดในการทดสอบบดอัดดินปนกรวด

การบดอัดดินเมื่อมีปริมาณกรวดเพิ่มขึ้น ค่า ρ_{dmax} จะเพิ่มขึ้นและค่า w_{opt} จะลดลง ในการบดอัดดินที่มีปริมาณกรวดไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ สามารถบดอัดได้ดีโดยไม่มีผลกระทบจากปริมาณกรวด เมื่อปริมาณกรวดเพิ่มขึ้นมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ กรวดจะขัดขวางการบดอัด ซึ่งจากการศึกษาอิทธิพลของกรวดต่อผลการทดสอบบดอัด พลังงานบดอัดสามารถถ่ายทอดไปสู่ส่วนละเอียดได้ดีในการบดอัดดินที่มีปริมาณกรวดผสมอยู่ไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อปริมาณกรวดเพิ่มขึ้นมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ถ่ายทอดไปสู่ส่วนละเอียดจะมีค่าลดลงตามปริมาณกรวดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการบดอัดดินที่มีปริมาณกรวดผสมมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ เม็ดกรวดจะขัดกันทำให้ขัดขวางการเรียงตัวของเม็ดดินและกรวดยังดูดซับพลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดไปสู่ส่วนละเอียด ทำ

ให้ความหนาแน่นแห้งของดินบดอัดกักรวดมีค่าลดลงและความชื้นของดินบดอัดกักรวดมีค่าเพิ่มขึ้น

6.3 การประมาณคุณลักษณะการบดอัดของดินปนกรวด

ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดไปสู่ส่วนละเอียดกับปริมาณกรวดที่ผสมอยู่ในดินที่เสนอในวิทยานิพนธ์นี้ สามารถนำไปประมาณค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสมของดินปนกรวดได้ และพบว่าค่าที่ได้จากการประมาณมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบเล็กน้อย

เอกสารอ้างอิง

- ASTM D 698-91,1995: **Test method for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort [12,400 ft-lb/ft³(600kN-m/m³)]**. Annual Books of ASTM Standards, ASTM international, West Conshohcken, PA,Sec. 4, Vol. 04.08, pp. 69-76.
- ASTM D 1557-91,1995: **Test method for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort [56,400 ft-lb/ft³(2,700kN-m/m³)]**. Annual Books of ASTM Standards, ASTM international, West Conshohcken, PA,Sec. 4, Vol. 04.08, pp. 118-125.
- Blotz, L. R., Benson, C. and Boutwell, G. (1998). **Estimating optimum water content and maximum dry unit weight for compacted clays**. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 124, No. 9, pp. 907-912.
- Boutwell, G. (1961). **Effects of variation of fill construction on the material properties and the subsequent fill performance**. Independent Study Rep. School of Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA.
- Diaz-Zorita, M., Grove, J.H. and Perfect, E. (2001). **Laboratory compaction of soils using a small mold procedure**. Soil Science Society of American Journal, Vol. 65, No.6, pp. 1593-1598.
- Donaghe, R. T. and Townsend, F. C. (1976). **Scalping and replacement effect on the compaction characteristics of earth-rock mixtures**. Special Technical Publication No. 599, American Society for Testing and Materials, pp. 248-277.
- Donaghe, R.T. and Torrey, V.H. (1994). **A compaction test method for soil-rock mixtures in which equipment size effects are minimized**. Geotechnical Testing Journal, Vol. 17, No. 3, pp. 363-370.
- Garga, V. K. and Madureira, C. J.(1985). **Compaction characteristics of river terrace gravel**. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 111, No. 8, pp. 987-1007.
- Hilf, J.W. (1956). **An Investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils**. Technical Memorandum 654, U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- Holz, W. G. and Lowitz, C. W. (1957). **Compaction characteristics of gravelly soils**. STP no. 232. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pennsylvania, pp. 70-83.

- Horpibulsuk, S., Katkan, W. and Naramitkornburee, A. (2009). **Modified Ohio's Curves: A rapid estimation of compaction curves for coarse- and fine-grained soils.** Geotechnical Testing Journal, Vol. 32, No. 1, pp. 1-12.
- Jones, C.W. (1954). **The Permeability and settlement of laboratory specimens of sand gravel mixtures.** Special Technical Publication No.163, American Society for Testing and materials, pp. 68-78.
- Shockley, W. G. (1948). **Correction of unit weight and moisture content for soils containing gravel sizes.** Technical Data Sheet No. 2, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.
- Sridharan, A. and Sivapullaiah, P. V. (2004). **Mini compaction test apparatus for fine grained soils.** Geotechnical Testing Journal, Vol. 28, No.3, pp. 240-246.
- Winter, M. G., Holmgeirsdttir, Th. and Suhardi. (1998). **The effect of large particles on acceptability for earthworks compaction.** Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 31, pp. 247-268.

ประวัตินักวิจัย

ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ เกิดเมื่อวันที่ 25 ตุลาคม 2516 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต(เกียรตินิยม) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปี 2539 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมปฐพี จากสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ในปี 2541 และวิศวกรรมดุฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ออस्टเรีย ในปี 2548

ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ ได้เริ่มปฏิบัติงานในตำแหน่งอาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในปี 2541 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ผลงานวิจัยที่ผ่านมาคือแบบจำลองการไหลและการเสียวรูปในดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยการหาคุณลักษณะการอุ้มน้ำในดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยใช้แบบจำลองย้อนกลับ ปัจจุบันมีผลงานวิจัยตีพิมพ์ในระดับนานาชาติกว่า 10 เรื่อง และมีส่วนร่วมในโครงการก่อสร้างและโครงการที่ปรึกษาหลายโครงการ