

แบบจำลองกราฟการบดอัดและการประยุกต์ใช้ (COMPACTION CURVE MODEL AND ITS APPLICATION)

รุ่งลาวัลย์ ราชัน¹ สุขสันต์ หอพิบูลสุข² และวรรัชย์ เกษกัน³

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

51 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530

โทร 02-988-3655 ต่อ 281 กด 312 โทรสาร 02-988-3655 ต่อ 313

E-Mail: runglawa@civil.mut.ac.th

^{2,3}สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

โทร 044-22-4322 โทรสาร 044-22-4420 E-Mail: suksun@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองทำนายกราฟการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการของทั้งดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียด สำหรับดินชนิดหนึ่งซึ่งถูกบดอัดด้วยพลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง ที่ด้านหนึ่งของปริมาณความชื้นเหมาะสม ค่าตัวแปร $m/S^{0.5}$ จะเป็นค่าคงที่ (m คือปริมาณความชื้น และ S คือระดับความอิ่มตัวของน้ำ) แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นและความหนาแน่นแห้งก็ตาม ตัวแปร $(m/S^{0.5})/(m/S^{0.5})_s$ ถูกนำเสนอเพื่อพิจารณาอิทธิพลของชนิดดิน ที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม เส้นกราฟการบดอัดจะเป็นเส้นโค้งที่มีความลาดเอียงเดียวกันทุกพลังงานการบดอัด จากลักษณะดังกล่าว ผู้เขียนได้นำเสนอวิธีการสร้างเส้นกราฟการบดอัดอย่างง่าย ภายใต้พลังงานการบดอัดต่างๆ เพียงแค่ทำการทดสอบเดียว

Abstract

This paper presents a model for assessing laboratory compaction curves of both coarse and fine grained soils. For a given compacted soil, at dry side of optimum, the $m/S^{0.5}$ is constant for a particular compaction energy (where m is moisture content and S is degree of saturation), even with the change in moisture content and dry unit weight. The parameter, $(m/S^{0.5})/(m/S^{0.5})_s$, is introduced to take the effect of soil type into account. At the optimum moisture content and on the wet side of optimum, the compaction points of all compaction energies practically lie on the same line. These aspects lead to the simple method to assess the compaction curve wherein the compaction energy varies over a wide range by using a single laboratory trial.

1. บทนำ

ในงานก่อสร้างถนน เขื่อนดิน และโครงสร้างต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานทางด้านวิศวกรรม เราจำเป็นต้องทำการบดอัดดินเพื่อเพิ่มหน่วย

น้ำหนักของดิน การบดอัดจะเป็นการเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน และส่งผลให้กำลังรับแรงแบกทานของดินเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การบดอัดยังช่วยลดการทรุดตัวของชั้นดิน และเพิ่มเสถียรภาพความลาดให้กับดินถม

นักวิจัยหลายท่าน อาทิเช่น Davidson and Gardiner [1] และ Tumbull [2] ได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างจุดเหมาะสม (ปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด) และคุณสมบัติพื้นฐานของดิน เช่น ชนิดของดินและการจำแนกประเภทดิน (Soil Classification) ค่าพิกัดดัดเตอร์เบอร์เกอร์ (Atterberg's Limit) และการกระจายตัวของเม็ดดิน (Grain Size Distribution) Kofatis and Manikopolous [3] สร้างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและขนาดของดินเม็ดหยาบ Ramiah et al. [4] ได้สร้างสมการประมาณปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดในพจน์ของขีดจำกัดเหลว Jeng and Strohm [5] ได้สร้างสมการทำนายปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินบดอัดแบบวิธีมาตรฐานจากคุณสมบัติทางกายภาพของดิน Blotz et al. [6] ทำการทดสอบดินเม็ดละเอียด 22 ชนิด และเสนอสมการคำนวณปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดในพจน์ของขีดจำกัดเหลวและพลังงานการบดอัด Gurtug and Sridharan [7] ได้สร้างสมการทำนายปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินเม็ดละเอียดบดอัดแบบมาตรฐานจากค่าพิกัดพลาสติก

จนถึงปัจจุบัน มีงานวิจัยเพียงไม่กี่ชิ้นที่ทำการศึกษาและสร้างแบบจำลองทำนายเส้นกราฟการบดอัด เส้นกราฟการบดอัดเป็นสิ่งสำคัญยิ่ง เนื่องจากมันสามารถบ่งบอกพฤติกรรมที่ปริมาณความชื้นต่างๆ ลักษณะของกราฟจะเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการควบคุมปริมาณความชื้นสำหรับการบดอัดในสนาม แบบจำลองกราฟการบดอัดได้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Joslin [8] จากการทดสอบการบดอัดดิน 26 ชนิด ด้วยการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor Test) แบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้เรียกว่า กราฟการบดอัดโอไฮโอ (Ohio Curves) กราฟดังกล่าวสามารถประมาณค่าเส้นกราฟการบดอัดได้อย่างรวดเร็วเพียงแค่ใช้ข้อมูลปริมาณ

ความชื้นและหน่วยน้ำหนักรวมเพียงจุดเดียวจากการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน ต่อมา Nagaraj and Bindumadhava [9] และ Pandian et al. [10] ได้เสนอแบบจำลองจากการสังเกต (Phenomenological Model) สำหรับสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและปริมาณความชื้นของดินเมื่อละเอียดทางด้านแห้งและทางด้านเปียกของความชื้นเหมาะสมจากค่าขีดจำกัดเหลวและความถ่วงจำเพาะ แต่อย่างไรก็ตาม แบบจำลองนี้ใช้ได้เฉพาะกับการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานเท่านั้น จุดสูงสุดของเส้นกราฟเกิดจากจุดตัดของเส้นกราฟทางด้านแห้งและทางด้านเปียกทำให้กราฟมีลักษณะเป็นรูปตัววีกลับหัว (Inverted V Shape)

แม้ว่าจะมีแบบจำลองที่ใช้ในการสร้างกราฟการบดอัดแล้วก็ตาม แต่แบบจำลองเหล่านั้นใช้ได้กับเฉพาะการบดอัดแบบมาตรฐาน ในทางปฏิบัติ การสุ่มทดสอบ (Trail Test) เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งก่อนที่จะเริ่มต้นทำการบดอัดในสนาม ดังนั้น งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะนำเสนอแบบจำลองกราฟการบดอัดดิน ซึ่งสามารถประมาณกราฟการบดอัดที่พลังงานการบดอัดต่างๆ โดยอาศัยเพียงผลทดสอบการบดอัดพลังงานเดียว

2. ดินตัวอย่าง

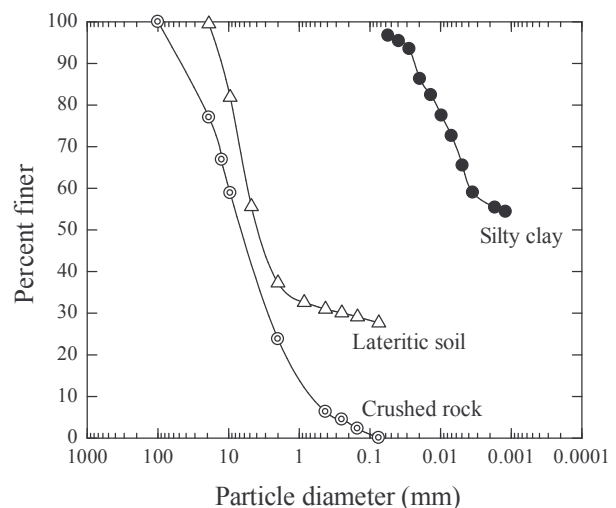
การศึกษานี้ทำการทดสอบดินสามชนิด ซึ่งครอบคลุมขนาดของเม็ดดินตั้งแต่ละเอียดและหยาบ ได้แก่ ดินเหนียวปนดินตะกอน ดินลูกรัง และหินคลุก ดินเหนียวปนดินตะกอนถูกเก็บที่ความลึก 3 เมตร จากระดับผิวดิน ภายในบริเวณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีปริมาณดินเหนียว 53 เปอร์เซ็นต์ ดินตะกอน 44 เปอร์เซ็นต์ และดินทรายเพียง 3 เปอร์เซ็นต์ ดินเหนียวมีค่าความเป็นพลาสติกปานกลาง และมีปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ 18.5 เปอร์เซ็นต์ ขีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับ 51 และ 26 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ กำลังต้านทานแรงเฉือนในสภาพไม่ระบายน้ำมีค่าเท่ากับ 100 กิโลปาสกาล

ดินลูกรังและหินคลุกเก็บจากจังหวัดเพชรบูรณ์ ดินลูกรังประกอบด้วยดินเม็ดหยาบ 70 เปอร์เซ็นต์ ค่าขีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกเท่ากับ 53 และ 37 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จัดเป็นดินทรายที่มีดินเหนียวปน (SC) ตามระบบเอกภาพ (unified Soil Classification, USCS) หินคลุกจำแนกตามระบบ USCS ได้เป็นกรวดที่มีขนาดละเอียด (GW) การกระจายตัวของดินตัวอย่างทั้งสามแสดงดังรูปที่ 1

3. วิธีการทดสอบ

ตัวอย่างดินทั้งสามชนิดถูกนำมาร่อนผ่านตะแกรงขนาดช่องเปิด 19 มิลลิเมตร เพื่อจัดส่วนผสมที่มีขนาดใหญ่ อันจะก่อให้เกิดความไม่เหมาะสมทางด้านขนาดของวัสดุทดสอบ (Size Effect) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D698 และ AASHTO T99 ขนาดของเม็ดดินดินตัวอย่างที่ผ่านการร่อนจะถูกนำมาผึ่งแห้งในอากาศอย่างน้อย 3 วัน

จากนั้นหาปริมาณความชื้น และเตรียมทำการบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่างๆ กันจำนวน 5 ถึง 6 จุดปริมาณความชื้น โดยในแต่ละจุดปริมาณความชื้น ทำการเติมน้ำใส่ตัวอย่างและห่อเก็บไว้ในถุงพลาสติก เป็นเวลาประมาณ 12 ชั่วโมง เพื่อให้ดินตัวอย่างมีปริมาณความชื้นทั่วถึงกัน จากนั้นวัดปริมาณความชื้นก่อนทำการบดอัด ดินตัวอย่างจะถูกทำการบดอัดในแบบหล่อมาตรฐาน (Mold) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ด้วยพลังงานการบดอัดเท่ากับ 296.3, 592.5, 1346.6 และ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร เทียบเท่ากับครึ่งหนึ่งของพลังงานการบดอัดมาตรฐาน พลังงานการบดอัดมาตรฐาน ครึ่งหนึ่งของพลังงานการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน และพลังงานการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน ตามลำดับ รูปแบบการบดอัดและพลังงานที่ใช้ในการบดอัด (น้ำหนักค้อน จำนวนชั้นบดอัด จำนวนการบดอัดต่อชั้น และระยะยกค้อน) แสดงดังตารางที่ 1 ในแต่ละจุดปริมาณความชื้น ใช้จำนวนตัวอย่างอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง เพื่อตรวจสอบความสอดคล้อง (Consistency) ของผลทดสอบ



รูปที่ 1 การกระจายตัวของดินตัวอย่างทดสอบ

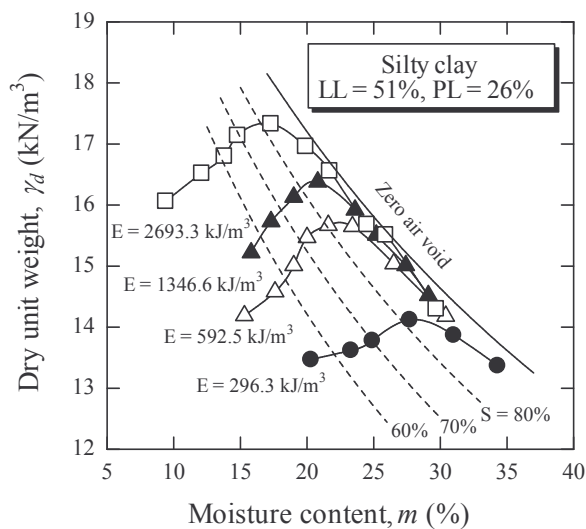
ตารางที่ 1 รูปแบบการบดอัดและพลังงานที่ใช้ในการบดอัดดิน

Energy per Volume (kJ/m ³)	Weight of Hammer (N)	Number of Layer	Number of Blows/Layer	Height of Hammer drop (m)
296.3	24.46	3	13	0.3048
592.5	24.46	3	25	0.3048
1346.6	44.48	5	13	0.4572
2693.3	44.48	5	25	0.4572

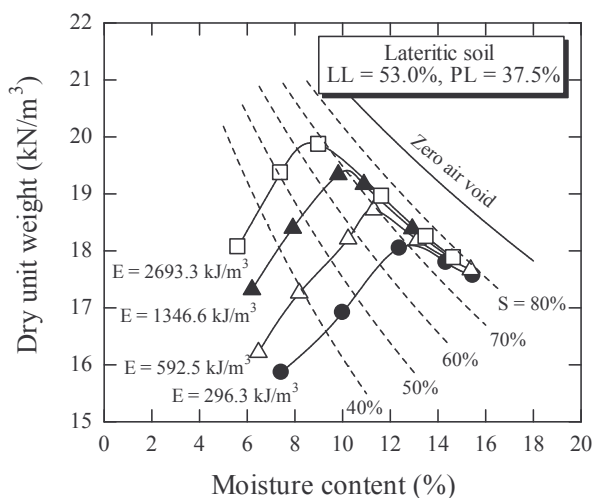
นอกจากการทดสอบดังอธิบายข้างต้นแล้ว ผลทดสอบดินลูกรัง [11] และดินเหนียวปนดินตะกอน [12] ถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบความแม่นยำของการทำนายกราฟการบดอัด

4. ผลการทดสอบ

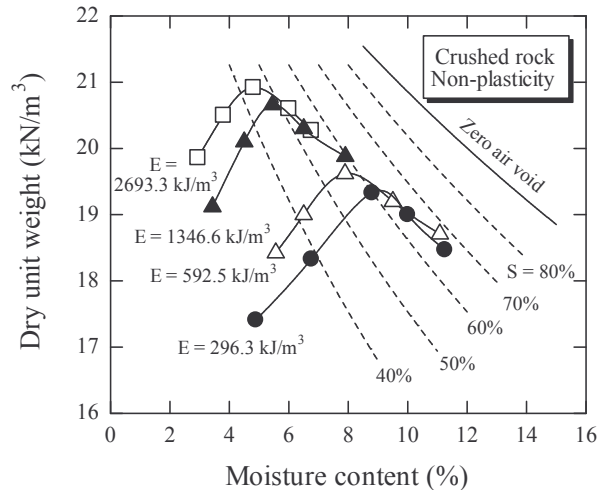
รูปที่ 2 ถึง 4 แสดงผลทดสอบการบดอัดของดินเหนียวปนดินตะกอน ดินลูกรัง และหินคลุก ที่พลังงานการบดอัดต่างๆ กัน ตามลำดับ จะเห็นว่าที่พลังงานการบดอัดเดียวกัน ดินเหนียวปนดินตะกอนจะให้ค่าปริมาณความชื้นเหมาะสม (OMC) สูงที่สุด และหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (γ_{dmax}) ต่ำที่สุด ในขณะที่ หินคลุกจะให้ค่าปริมาณความชื้นเหมาะสม (OMC) ต่ำที่สุด และหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (γ_{dmax}) สูงที่สุด สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าปริมาณของดินเม็ดละเอียดในมวลดินเป็นปัจจัยที่ควบคุมลักษณะทางวิศวกรรมของดินบดอัด ดินที่มีปริมาณดินเม็ดละเอียดมากจะให้ค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมสูงกว่าและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดต่ำกว่า



รูปที่ 2 ผลทดสอบการบดอัดของดินเหนียวปนดินตะกอนที่พลังงานการบดอัดต่างๆ

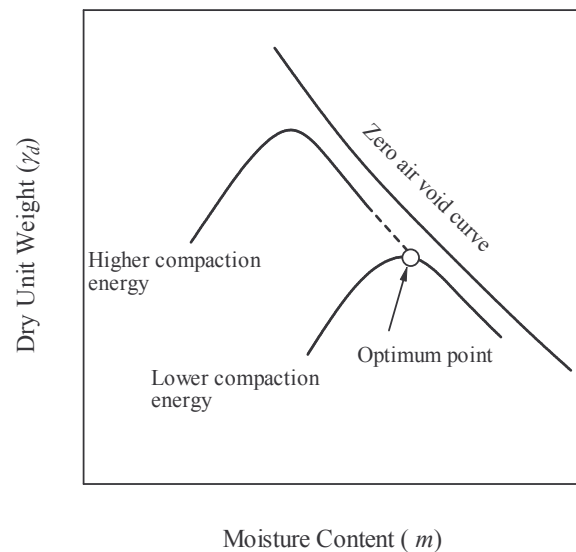


รูปที่ 3 ผลทดสอบการบดอัดของดินลูกรังที่พลังงานการบดอัดต่างๆ



รูปที่ 4 ผลทดสอบการบดอัดของหินคลุกที่พลังงานการบดอัดต่างๆ

ผลทดสอบในรูปที่ 2 ถึง 4 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้ง ที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม มีลักษณะเป็นเส้นโค้งเดียวกันสำหรับทุกพลังงานการบดอัด ซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบของนักวิจัยในอดีต [12 ถึง 15] ดังนั้น ผู้เขียนขอเสนอแบบจำลองทำนายเส้นกราฟการบดอัดดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 รูปแบบจำลองเส้นกราฟการบดอัดรูปตัววีกลับหัว

5. การวิเคราะห์ผลทดสอบการบดอัด

Nagaraj and Srinivasa Murthy [16] และ Nagaraj and Tiwari [17] ได้อธิบายว่ากราฟการบดอัดที่พลังงานหนึ่งๆ จะถูกควบคุมโดยคุณสมบัติพื้นฐาน กล่าวคือ ปริมาณความชื้นและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของดิน โดยการใช้ตัวแปรทั้งสองเป็นตัวแปรหลัก Pandian et al. [10] ได้นำเสนอแบบจำลองที่ได้จากสังเกต (Phenomenological model) เพื่อ

ทำนายเส้นกราฟการบดอัด ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐานเท่านั้น งานวิจัยนี้จะขยายแนวคิดดังกล่าวเพื่อนำเสนอแบบจำลองกราฟการบดอัดของดินชนิดต่างๆ ที่พลังงานการบดอัดต่างๆ

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและพลังงานการบดอัดบนสเกลล็อกการิทึม พบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นเส้นตรงซึ่งแปรผันตามค่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงนี้แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณความชื้นเดียวกัน ปริมาณอากาศในดินบดอัดจะถูกไล่ออกได้ง่าย เมื่อให้พลังงานการบดอัดที่สูงขึ้นและมีผลให้ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของดินสูงตามไปด้วย ลักษณะการเปลี่ยนแปลงเช่นนี้จะไม่ปรากฏกับดินบดอัดที่มีปริมาณความชื้นมากกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม (ด้านเปียก) ทั้งนี้เพราะมวลดินมีสภาพใกล้เคียงกับสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ

จากการ Normalization ปริมาณความชื้นด้วยระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ พบว่า $m/S^{0.5}$ มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับพลังงานการบดอัดบนสเกลล็อกการิทึม ดังสมการที่ 1

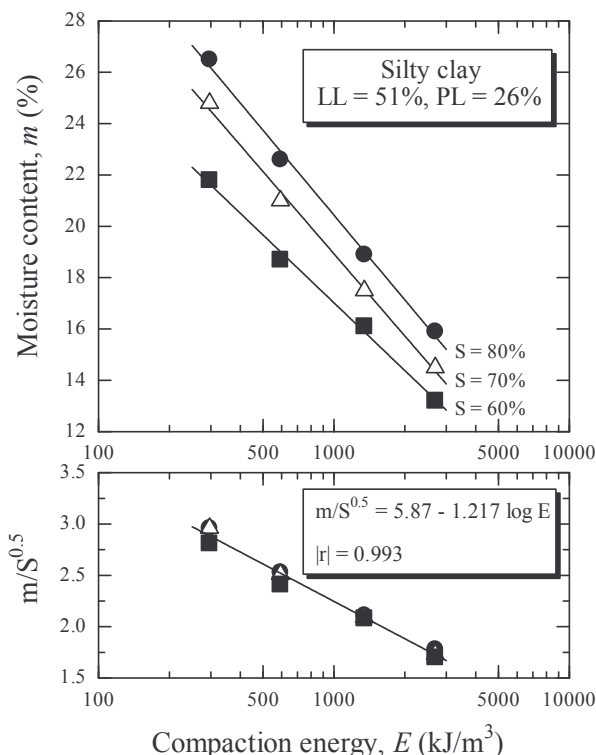
$$\frac{m}{S^{0.5}} = a - b \log E \quad (1)$$

เมื่อ m คือปริมาณความชื้น S คือระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ a และ b คือค่าคงที่ ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของดินแต่ละชนิด

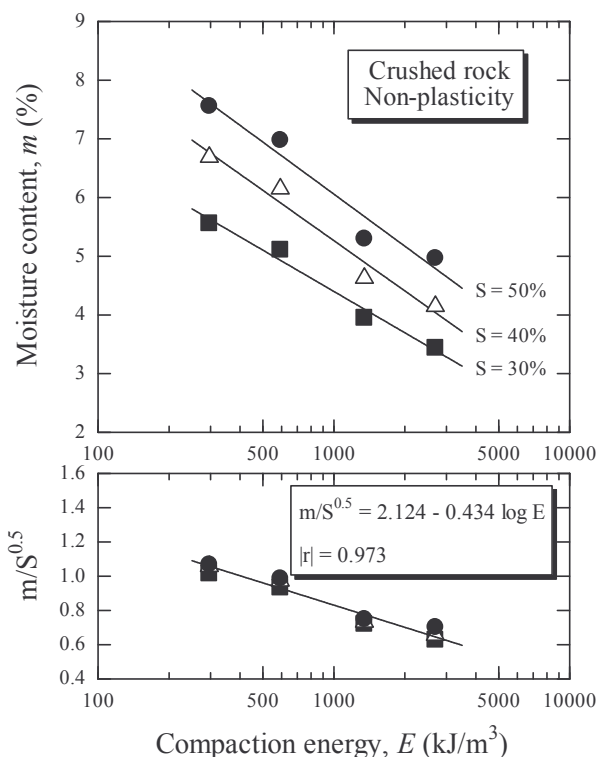
สมการข้างต้นนี้แสดงให้เห็นว่า ที่ปริมาณความชื้นน้อยกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม (ด้านแห้ง) $m/S^{0.5}$ เป็นค่าเฉพาะสำหรับพลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง ไม่แปรผันตามระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ ปริมาณความชื้น และหน่วยน้ำหนักแห้ง จากรูปที่ 6 พบว่า a และ b มีค่าเท่ากับ 5.87 และ 1.217 ตามลำดับ สำหรับดินเหนียวปนดินตะกอนในทำนองเดียวกัน a และ b สำหรับหินคลุก (รูปที่ 7) มีค่าเท่ากับ 2.125 และ 0.434 ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างจากค่าของดินเหนียวปนดินตะกอน รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $m/S^{0.5}$ และ $\log E$ ของดินทั้งสามชนิด จะเห็นได้ว่าเส้นความสัมพันธ์ของดินที่มีปริมาณดินเหนียวมากที่สุด จะมีความชันสูงที่สุด สิ่งที่น่าสนใจที่สังเกตได้จากความสัมพันธ์ดังกล่าวคือ ถึงแม้ว่าการเปลี่ยนแปลงของ $m/S^{0.5}$ ภายใต้การเพิ่มขึ้นของพลังงานการบดอัดจะมีความแตกต่างกันตามแต่ละชนิดของดิน แต่อัตราส่วนของ $m/S^{0.5}$ มีค่าคงที่ หรือกล่าวมีนัยหนึ่งว่า

$$\left[\frac{(m/S^{0.5})_1}{(m/S^{0.5})_2} \right]_{\text{Silty clay}} = \left[\frac{(m/S^{0.5})_1}{(m/S^{0.5})_2} \right]_{\text{lateritic soil}} = \left[\frac{(m/S^{0.5})_1}{(m/S^{0.5})_2} \right]_{\text{Crushed rock}}$$

เมื่อ $(m/S^{0.5})_1$ คือค่าของ $m/S^{0.5}$ ที่พลังงานการบดอัดค่าใดๆ และ $(m/S^{0.5})_2$ คือค่าของ $m/S^{0.5}$ ที่พลังงานการบดอัดค่าใดค่าหนึ่ง



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและพลังงานการบดอัดของดินเหนียวปนดินตะกอนและเส้น Normalization



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและพลังงานการบดอัดของหินคลุกและเส้น Normalization

ในที่นี้ ถ้าเลือกใช้ค่า $(m/S^{0.5})_2$ เท่ากับ $(m/S^{0.5})$ ที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน (592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร) และเขียนเป็น $(m/S^{0.5})_{st}$ ความสัมพันธ์ที่เป็นเอกภาพ (Unique Relationship) ระหว่าง $(m/S^{0.5})/(m/S^{0.5})_{st}$ ซึ่งรวมอิทธิพลของชนิดดินสามารถนำเสนอด้วยรูปที่ 8 และดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{(m/S^{0.5})}{(m/S^{0.5})_{st}} = 2.153 - 0.417 \log E \quad (2)$$

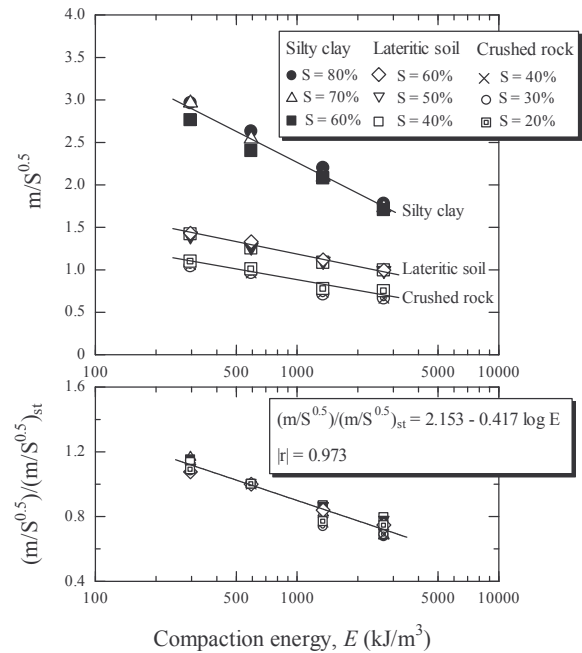
เมื่อ $(m/S^{0.5}) = (m/S^{0.5})_{st}$ และ $E = 592.5$ กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร พจน์ทางซ้ายมือจะกลายเป็นหนึ่ง ขณะที่พจน์ทางขวามือจะเป็น 0.997 สิ่งนี้ยืนยันความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้สมการนี้ในการประมาณ $(m/S^{0.5})$ ที่พลังงานการบดอัดค่าอื่นๆ สมการที่ได้นี้มีประโยชน์อย่างมากในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งที่ด้านหนึ่งของปริมาณความชื้นเหมาะสม ภายใต้พลังงานการบดอัดใดๆ เมื่อทราบค่าตัวแปร $m/S^{0.5}$ ที่พลังงานการบดอัดค่าใดค่าหนึ่ง

ต่อไปนี้จะกล่าวถึงการสร้างเส้นโค้งการบดอัดที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม จากรูปที่ 5 ในทางปฏิบัติ เราสามารถสมมติว่าเส้นโค้งของหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้นที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสมเป็นเส้นโค้งเดียวกันสำหรับทุกพลังงานการบดอัด ดังนั้น เราสามารถสร้างเส้นโค้งการบดอัดได้ทันที เมื่อทราบค่า OMC และ γ_{dmax} ที่พลังงานการบดอัดต่างๆ รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง OMC และพลังงานการบดอัดของดินบดอัดทั้งสามชนิดร่วมกับดินบดอัดอีกสองชนิดที่ได้จากผลทดสอบของ Daniel and Benson [18] และ Blotz et al. [6] จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นสมการเชิงเส้นตรง ซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบของ Boutwell [19]

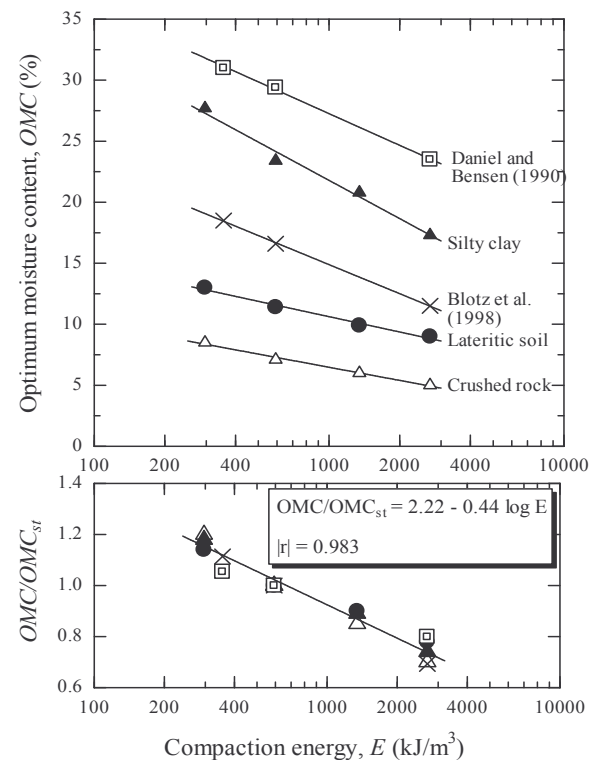
ในปี 1998 Blotz et al. [6] ได้แสดงให้เห็นว่า OMC/OMC_k มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ E/E_k เมื่อ E_k คือพลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง และ OMC_k คือปริมาณความชื้นเหมาะสมที่ได้จากการบดอัดด้วยพลังงาน E_k ดังนั้น ผู้เขียนจึงได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized OMC และพลังงานการบดอัด โดยเลือก OMC ที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐานเป็นตัวอ้างอิง และได้ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized OMC และพลังงานการบดอัดดังนี้

$$\frac{OMC}{OMC_{st}} = 2.22 - 0.44 \log E \quad (3)$$

เมื่อ OMC_{st} คือปริมาณความชื้นเหมาะสมที่พลังงานการบดอัดมาตรฐาน (592.5 kJ/m^3) และ E คือพลังงานการบดอัดใดๆ ค่า Degree of Correlation มีค่าสูงถึง 0.983



รูปที่ 8 ตัวแปร $m/S^{0.5}$ และพลังงานของดินทั้งสามชนิดและอัตราส่วนของ $(m/S^{0.5})/(m/S^{0.5})_{st}$ ที่พลังงานต่าง ๆ



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง OMC และพลังงานการบดอัด ร่วมกับ Normalization

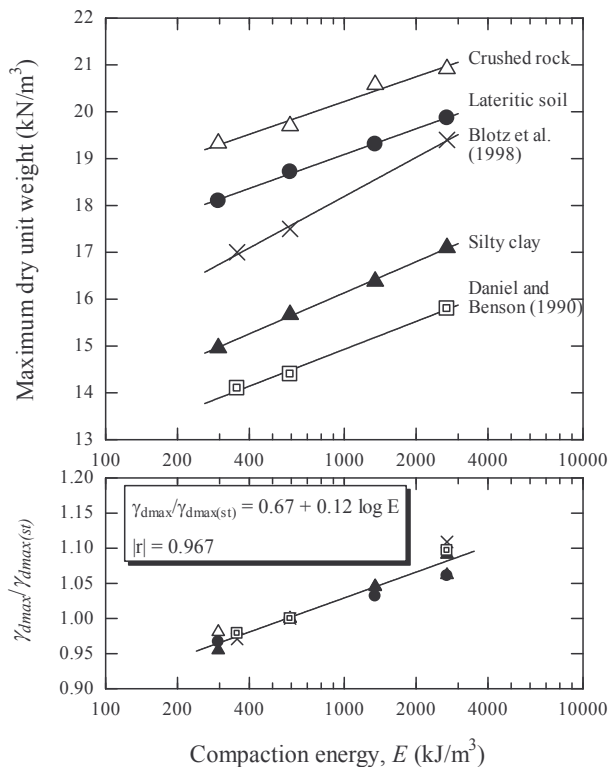
เนื่องจาก γ_{dmax} มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ OMC [6, 7 และ 19] ดังนั้น γ_{dmax} จึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพลังงานการบดอัดด้วย

เช่นกัน ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized γ_{dmax} และพลังงานการบดอัด แสดงในรูปที่ 10 และสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{\gamma_{dmax}}{(\gamma_{dmax})_{st}} = 0.67 + 0.12 \log E \quad (4)$$

เมื่อ $(\gamma_{dmax})_{st}$ คือหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่พลังงานการบดอัดมาตรฐาน เมื่อทำการรวมสมการที่ (3) และ (4) เข้าด้วยกัน จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง γ_d และ m ทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสมดังนี้

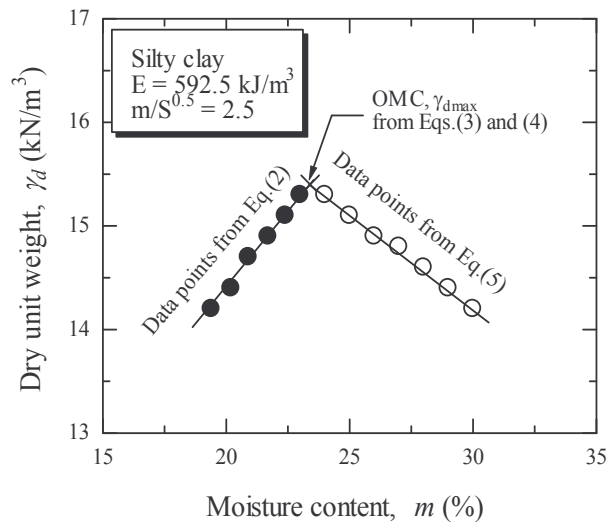
$$\gamma_d = \left[1.27 - 0.27 \left(\frac{m}{OMC_{st}} \right) \right] (\gamma_{dmax})_{st} \quad (5)$$



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง γ_{dmax} และพลังงานการบดอัด ร่วมกับ Normalization

จากสมการที่ (2) ถึง (5) เราสามารถวาดกราฟการบดอัดที่พลังงานการบดอัดค่าใดค่าหนึ่งได้ ดังแสดงในรูปที่ 11 แสดงพิกัด (m, γ_d) ทั้งทางด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม ตัวอย่างที่แสดงนี้เป็นผลการคำนวณของดินเหนียวปนดินตะกอนที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน เส้นกราฟการบดอัดสามารถสร้างขึ้นโดยการลากเส้น

เชื่อมระหว่างจุดทั้งหมด ดังนั้น ถ้าต้องการได้กราฟที่มีความโค้งสวยงาม ควรสร้างจุดทางด้านแห้งและด้านเปียกให้มากพอ



รูปที่ 11 การประมาณกราฟการบดอัดของดินเหนียวปนดินตะกอนที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน

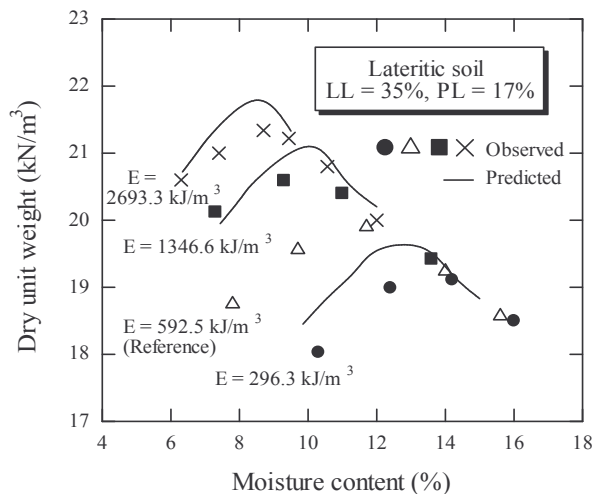
6. การทำนายเส้นกราฟการบดอัด

จากหัวข้อที่แล้ว ลักษณะของกราฟการบดอัดของดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียดได้ถูกวิเคราะห์ เส้นโค้งการบดอัดทางด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสมสามารถลากโดยอาศัยสมการที่ (2) ส่วนเส้นโค้งการบดอัดทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสมสามารถวาดโดยอาศัยสมการที่ (3) ถึง (5) ดังนั้น เราสามารถทำนายเส้นกราฟการบดอัด ภายใต้พลังงานการบดอัดค่าต่างๆ จากข้อมูลกราฟการบดอัดของดินชนิดหนึ่ง ภายใต้พลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง ได้ดังวิธีต่อไปนี้

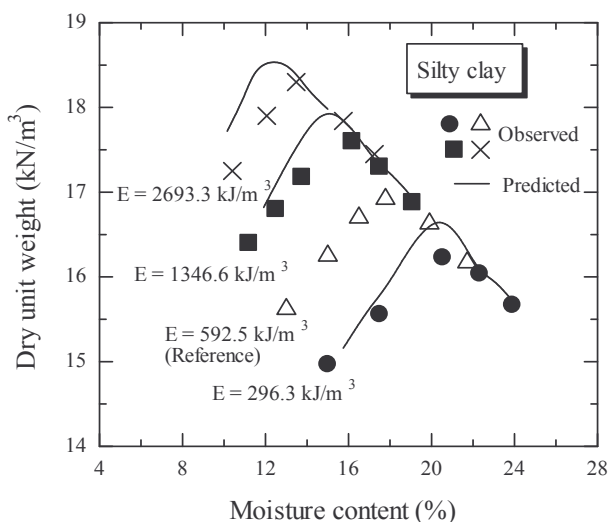
1. จากข้อมูลกราฟการบดอัด ภายใต้พลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง หาค่าเฉลี่ยของ $m/S^{0.5}$ ที่ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำต่างๆ ทางด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม หลังจากนั้น หาค่า $(m/S^{0.5})_{st}$ จากสมการที่ (2)
2. จากค่า OMC และ γ_{dmax} ที่ทราบ หาค่า $(OMC)_{st}$ และ $(\gamma_{dmax})_{st}$ จากสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ
3. คำนวณหา $m/S^{0.5}$ ของพลังงานการบดอัดที่ต้องการทราบโดยแทนค่า $(m/S^{0.5})_{st}$ ลงในสมการที่ (2)
4. คำนวณหาจุดเหมาะสมของเส้นกราฟการบดอัด (Optimum Point, OMC และ γ_{dmax}) ที่พลังงานที่ต้องการทราบ โดยอาศัยสมการที่ (3) และ (4)
5. กำหนดค่า m ในช่วงที่ $m < OMC$ และคำนวณหา γ_d เพื่อให้ได้กราฟที่สมบูรณ์ ควรกำหนดค่า m ให้มีค่าใกล้เคียง OMC ให้มากที่สุด
6. ลากเส้นเชื่อมต่อด้าน (m, γ_d) ที่ได้จากขั้นตอนที่ 5 จนถึง OMC เส้นนี้คือเส้นกราฟการบดอัดทางด้านแห้ง

7. ลากเส้นกราฟการบดอัดทางด้านเปียก ($m > OMC$) โดยอาศัยสมการที่ (5)

จากวิธีการทำนายตามขั้นตอนที่นำเสนอ ผู้เขียนได้แสดงผลการทำนายกราฟการบดอัด ดังแสดงในรูปที่ 12 และ 13 ซึ่งเป็นผลการทดสอบดินลูกรัง [11] และดินเหนียวปนดินตะกอน [12] ตามลำดับ ในการทำนาย ผู้เขียนใช้ข้อมูลกราฟการบดอัดที่พลังงานการบดอัดมาตรฐานเป็นกราฟอ้างอิง



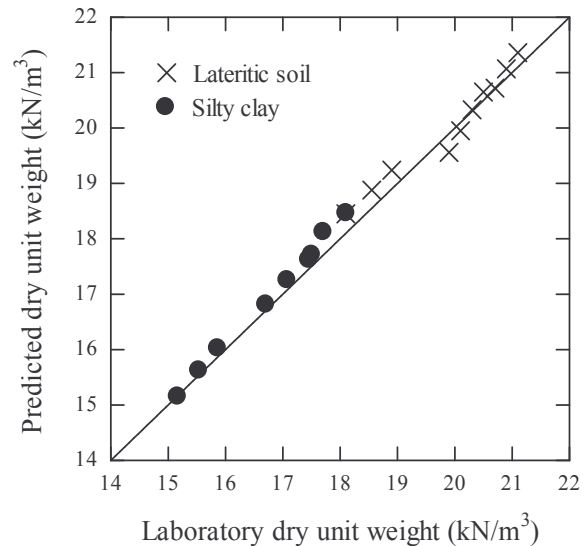
รูปที่ 12 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของดินลูกรัง (ข้อมูลจากธีรชาติและสมบัติกระแสน [11])



รูปที่ 13 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของดินเหนียวปนดินตะกอน (ข้อมูลจาก Tumbull [12])

รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งที่ได้จากการทำนายและจากผลทดสอบในห้องปฏิบัติการของดินทั้งสองชนิด ที่ระดับความอึดด้วยน้ำค่าต่างๆ ทางด้านแห้ง จะเห็นได้ว่าความ

ผิดพลาดของผลการทำนายมีค่าน้อยมาก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า กราฟการบดอัดดินที่ได้จากการทำนายมีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริงมาก



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งที่ได้จากการทำนายและจากผลทดสอบในห้องปฏิบัติการ

7. บทสรุป

งานวิจัยนี้กล่าวถึงลักษณะสำคัญของกราฟการบดอัดของดินเม็ดละเอียดและดินเม็ดหยาบ และการสร้างแบบจำลองทำนายเส้นกราฟการบดอัด ที่พลังงานการบดอัดดินต่างๆ ประเด็นสำคัญของงานวิจัยนี้สามารถสรุปเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

1. เส้นกราฟการบดอัดทางด้านแห้งของดินบดอัดชนิดหนึ่งๆ ถูกควบคุมโดยตัวแปร $m/S^{0.5}$ ที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง ถึงแม้ว่าดินบดอัดจะมีปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งต่างกัน แต่ตัวแปร $m/S^{0.5}$ จะมีค่าคงที่ ตัวแปรนี้มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับลอการิทึมของพลังงานการบดอัด ตัวแปร $(m/S^{0.5})/(m/S^{0.5})_{st}$ ถูกสร้างขึ้นเพื่อจัดอิทธิพลของชนิดของดิน

2. ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและปริมาณความชื้นทางด้านเปียก เส้นกราฟการบดอัดจะเป็นเส้นลาดในแนวเดียวกันของทุกๆ พลังงานการบดอัด

3. แบบจำลองที่เสนอในบทความนี้นอกจากจะสามารถใช้สร้างกราฟการบดอัดได้กับพลังงานการบดอัดในช่วง 296.3 ถึง 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร แล้ว ยังสามารถประมาณค่าพลังงานการบดอัดที่ต้องใช้เพื่อให้ได้ค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่ต้องการ อีกทั้งยังสามารถใช้ตรวจสอบความถูกต้องของผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้อีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] D.T. Davidson and W.F. Gardiner, "Calculation of Standard Proctor Density and Optimum Moisture Content from Mechanical, Analysis, Shrinkage and Factors and Plasticity Index", Highway Research Board, Proceedings of the Annual Meeting, Vol.29, 1949, pp.447-481.
- [2] W.J. Turnbull, "Computation of the Optimum Moisture Content in the Moisture-Density Relationship of Soils", Proceedings of the 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam, Vol.4, 1948, pp.256-262.
- [3] G.P. Korfiatis and C.N. Manikopoulos, "Correlation of Maximum Dry Density and Grain Size", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.108, No.GT9, 1982, pp.1171-1176.
- [4] B.K. Ramiah, V. Viswanath, and H.V. Krihnamurthy, "Interrelationship of Compaction and Index Properties", Proceedings of the 2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering, Singapore, 1970, pp.577-587.
- [5] Y.S. Jeng, and W.E. Strokm, Prediction of the Shear Strength and Compaction Characteristics of Compacted Fine-Grained Cohesive Soils, United States Waterways Experiment Station, Soil and Pavement Laboratory, Vicksburg, Miss., 1976.
- [6] L.R. Blotz, C.H. Benson, and G.P. Boutwell, "Estimating Optimum Water Content and Maximum Dry Unit Weight for Compacted Clays", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.124, 1998, pp.907-912.
- [7] Y. Gurtug and A. Sridharan, "Prediction of Compaction Characteristics of Fine-Grained Soils", Geotechnique, Vol.52, No.10, 2002, pp.761-763.
- [8] J.C. Joslin, "Ohio's Typical Moisture-Density Curves", American Society for testing and materials, Special Technical Publication, STP 239, 1959, pp.111-118.
- [9] T.S. Nagaraj, and Bindumadhava, "Analysis of Compaction Characteristics of Fine Grained Soils", Proceedings of Indian Geotechnical Engineering Conference, Calcutta, Vol.1, 1992, pp.441-444.
- [10] N.S. Pandian, T.S. Nagaraj, and M. Manoj, "Re-Examination of Compaction Characteristics of Fine-Grained Soils", Geotechnique, Vol.47, No.2, 1997, pp.363-366.
- [11] ชีรชาติ รื่นไกรฤกษ์ และสมบัติกระแสด จรัสกร "กำลังรับแรงอัดของดินที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน" รายงานวิจัยฉบับที่ วพ. 188, 2544 ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง. กรมทางหลวง.
- [12] W.J. Turnbull, "Compaction and Strength Tests on Soil", Annual Meeting ASCE (January), 1950.
- [13] J.K. Mitchell, D.R. Hooper, and R.G. Campanella, "Permeability of Compacted Clay", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.91, No.4, 1965, pp.41-65.
- [14] T.S. Nagaraj, B.R. Srinivasa Murthy, and A. Vatasala, Analysis and Prediction of Soil Behavior, Wiley Eastern Limited, 1994 294p.
- [15] F. Santucci De Magistris and F. Tatsuoka, "Effects of Moulding Water Content on the Stress-Strain Behavior of a Compacted Silty Sand", Soils and Foundations, Vol.44, No.2, 2004, pp.85-101.
- [16] T.S. Nagaraj, and B.R. Srinivasa Murthy, "Compressibility of Partly Saturated Soils", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.111, No.7, 1985, pp.937-942.
- [17] T.S. Nagaraj, and S.S. Tiwari, "Prediction of Strength of Partly Saturated Soils", Proceedings of 1st International Conference on Geomechanics in Tropical Laterite and Saprolitic Soils, Sao Paulo, Brazil, 1985, pp.359-370.
- [18] D. Daniel and C. Benson, "Water Content-Density Criteria for Compacted Soil Liners", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.116, No.12, 1990, pp.1181-1130.
- [19] G. Boutwell, "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., 1996.

