

การศึกษาความแม่นยำของการทำนายค่าพารามิเตอร์การบดอัดดินด้วยวิธีเชิงตัวเลข Accuracy Study for Predicting Compaction Parameters using Numerical Method

ชูศักดิ์ คีรีรัตน์*, ศุภชัย ไทยพุ่ม

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล
ประจวบคีรีขันธ์ 77110

*E-mail: chusak.k@rmutr.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความแม่นยำของการทำนายค่าพารามิเตอร์การบดอัดดิน โดยการอ่านค่าจากเส้นกราฟการบดอัดดินที่สร้างจากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ได้แก่ วิธีการประมาณค่าในช่วงเส้นโค้งกำลังสาม วิธีการถดถอยแบบพหุนามอันดับสาม และวิธีการถดถอยแบบพหุนามอันดับสี่ ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบการบดอัดดิน ได้แก่ ดินลูกรังในพื้นที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ชนิด ก และชนิด ข ตามมาตรฐานวัสดุผิวทางลูกรังของกรมทางหลวงชนบท การทดสอบการบดอัดดินใช้โมลขนาดเล็กและใช้ตัวอย่างดินร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 โดยใช้พลังงานบดอัดเทียบเท่าการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน ผลการศึกษาพบว่าค่าความแม่นยำของการทำนายค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่อ่านได้จากการสร้างเส้นกราฟการบดอัดดินด้วยวิธีการประมาณค่าในช่วงเส้นโค้งกำลังสามและวิธีการถดถอยแบบพหุนามอันดับสี่นั้น ให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดใกล้เคียงกันและสอดคล้องกับข้อมูลที่ใช้สำหรับตรวจสอบความแม่นยำของค่าความหนาแน่นแห้งที่ได้จากการทดสอบ

คำสำคัญ: พารามิเตอร์การบดอัดดิน, เส้นกราฟการบดอัดดิน, ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข, ดินลูกรัง

Abstract

The objective of this research was to study an accuracy of prediction of compaction parameters. These parameters could be read on compaction curves which constructed by numerical methods. The numerical methods used in this study were cubic spline interpolation, a third-order polynomial regression and a fourth-order polynomial regression. Lateritic soils in Prachuapkhirikhan province were provided as soil samples which divided according to materials standard for lateritic pavement of Department of Rural Roads into type A and type B. Soil grains passing a No. 4 sieve and small mold were prepared for compaction test which used compaction effort equivalent to modified compaction energy. As results, the compaction curves which constructed by cubic spline interpolation and the fourth-order polynomial regression yielded the maximum dry density close to the verified data of dry density from testing.

Keywords: Compaction parameters, Compaction curve, Numerical method, Lateritic soil

1. ที่มาและความสำคัญ

การบดอัดดินเป็นวิธีการหนึ่งในการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินให้ดีขึ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนัก ลดการทรุดตัว และเพิ่มความตึบแน่นของดิน ซึ่งถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการก่อสร้างที่เกี่ยวข้องกับงานด้านวิศวกรรมโยธา เช่น เขื่อนดิน ถนน สนามบิน เป็นต้น การบดอัดดินให้ได้ความหนาแน่นตามความต้องการหรือตามจุดประสงค์ของการใช้งานจะต้องอาศัยน้ำเป็นตัวเชื่อมประสานโดยหากน้ำมีอยู่มากเกินไป จะทำให้เม็ดดินแยกตัวห่างจากกันหรือหากมีน้ำอยู่น้อยเกินไป การเชื่อมประสานก็จะมีน้อยที่จะช่วยให้เม็ดดินเคลื่อนชิดกัน สำหรับพลังงานที่ใช้ในการบดอัดเปรียบได้กับจำนวนครั้งที่เครื่องจักรบดอัดวิ่งผ่าน ซึ่งถูกเปลี่ยนมาเป็นการกระทุ้ง โดยค่าพลังงานในการบดอัดดินนั้นจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของค้อนกระทุ้ง ความสูงของระยะปล่อยการบดอัดดิน จำนวนชั้นของการบดอัดดิน จำนวนครั้งที่กระทุ้งต่อชั้น และปริมาตรของโมล

การทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ มีจุดประสงค์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์การบดอัด 2 ค่าได้แก่ ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) และความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density, MDD) การดำเนินการที่ผ่านมากการหาค่าพารามิเตอร์การบดอัด ทำได้โดยการนำชุดข้อมูลการทดสอบการบดอัดดินที่ประกอบด้วยข้อมูล 4 หรือ 5 จุด มาเขียนเส้นกราฟการบดอัดดินและอ่านค่าจากเส้นกราฟการบดอัดดิน โดยการศึกษาที่ผ่านมาหรือจากข้อมูลที่ในอดีตมีข้อมูลที่แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของการหาค่าพารามิเตอร์การบดอัดดินที่อ่านได้จากเส้นกราฟที่เขียนขึ้นเปรียบเทียบกับค่าที่ทดสอบได้จริงน้อยมาก จึงทำให้มีความสนใจที่จะศึกษาความแม่นยำของค่าพารามิเตอร์การบดอัดดินที่อ่านได้จากเส้นกราฟการบดอัดดินที่สร้างโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

2. วัตถุประสงค์

การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบผลที่ได้การทดสอบและผลที่ได้จากการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งมีวัตถุประสงค์ ดังนี้

2.1 เพื่อศึกษาความแม่นยำของการทำนายค่าพารามิเตอร์การบดอัดดินที่อ่านได้จากเส้นกราฟการบดอัดดินสำหรับดินลูกรัง

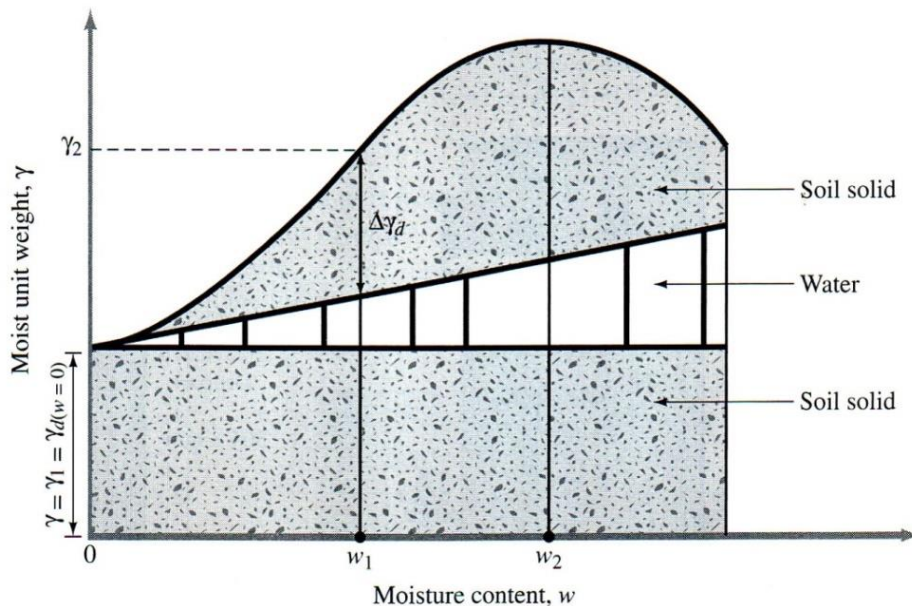
2.2 เพื่อศึกษาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการสร้างเส้นกราฟการบดอัดดิน

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความแม่นยำของการทำนายค่าพารามิเตอร์การบดอัดดินด้วยวิธีเชิงตัวเลข โดยศึกษาจากการนำผลการทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ มาใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบกับการทำนายค่าพารามิเตอร์การบดอัดด้วยวิธีเชิงตัวเลขเพื่อให้มีความมั่นใจต่อการนำค่าพารามิเตอร์การบดอัดที่ได้จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการไปใช้ในการบดอัดในสนาม จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 การบดอัดดิน

การบดอัดดินคือ การปรับปรุงคุณภาพดินโดยการประยุกต์ใช้พลังงานเชิงกล เพื่อให้ดินแน่นขึ้นโดยการไล่อากาศออกไปจากดิน ซึ่งเป็นการปรับปรุงปริมาณความชื้นในมวลดินให้มีความเหมาะสมที่สุดและวัดปริมาณความแน่นของดินในรูปของความหนาแน่นแห้งหรือหน่วยน้ำหนักแห้ง ซึ่งจุดประสงค์ของการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการเพื่อหาค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุด โดย Proctor (1930) ได้กล่าวไว้ว่าเมื่อน้ำถูกเพิ่มเข้าไปในมวลดินระหว่างการบดอัด น้ำจะทำหน้าที่เหมือนสารหล่อลื่นซึ่งทำให้เม็ดดินเคลื่อนติดกันมากขึ้น เป็นผลให้ดินมีความแน่นมากขึ้นจนถึงจุดที่ดินมีความแน่นสูงสุดและเมื่อน้ำที่เติมเข้าไปถูกเพิ่มมากขึ้นอีก ดินก็จะมีความแน่นลดลง เนื่องจากน้ำจะเข้าไปแทนที่เม็ดดิน ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 เส้นกราฟการบดอัด (Das, 2008)

3.2 การใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการเขียนเส้นกราฟการบดอัด

ASTM D1157 (2012) กล่าวว่าวิธีการเขียนเส้นกราฟการบดอัดควรให้เส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นราบเรียบต่อเนื่องกันและต้องผ่านทุกจุดข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ โดยนักวิจัยที่ผ่านมามากมายท่านได้ใช้ระเบียบวิธีการถดถอยแบบพหุนามในการสร้างเส้นกราฟการบดอัด (Joslin, 1959; Rethati, 1988; Hilf, 1991; Howell et al.,1997; Daita et al.,2005; Apampa et al.,2015) ซึ่งการเขียนเส้นกราฟการบดอัดสามารถดำเนินการได้ 2 แนวทาง โดยอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ได้แก่ การปรับเส้นโค้ง (Curve Fitting) และการประมาณค่าในช่วง (Interpolation) ซึ่งหลักการของทั้งสองวิธีอธิบายในภาพรวมได้ ดังนี้

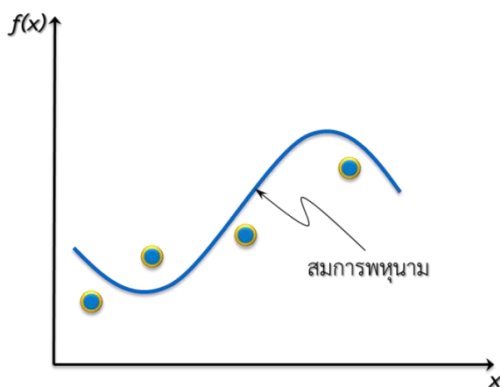
3.2.1 การปรับเส้นโค้ง

การปรับเส้นโค้ง เป็นการดำเนินการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งถูกใช้เป็นสมการตัวแทนอธิบายความสัมพันธ์ต่างๆ สำหรับชุดข้อมูลใดๆ ดังรูปที่ 2(ก) สำหรับวิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ระเบียบวิธีการถดถอยแบบพหุนาม (Polynomial Least-Squares Regression) อันดับสาม และอันดับสี่ โดยอาศัยสมการพหุนาม หรือสมการโพลิโนเมียลหลายอันดับ เป็นการปรับสมการสำหรับชุดข้อมูลที่มีความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง โดยจัดสมการให้อยู่ในรูปแบบของสมการพหุนาม ดังนี้

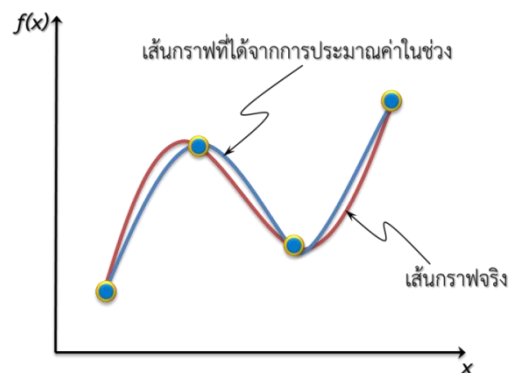
$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m \quad (1)$$

3.2.2 การประมาณค่าในช่วง

การประมาณค่าในช่วงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือระเบียบวิธีการประมาณค่าในช่วงเส้นโค้งกำลังสาม (Cubic Spline Interpolation) ซึ่งอาศัยการใช้วิธีประมาณค่าเป็นช่วงโดยอาศัยจุดข้อมูล 4 จุด ดังแสดงในรูปที่ 2(ข) ระเบียบวิธีนี้สามารถแก้ข้อจำกัดของการประมาณค่าโดยอาศัยสมการโพลิโนเมียลอันดับสูงสมการเดียวเพื่อให้ได้ค่าประมาณที่เที่ยงตรงได้ เนื่องจากเมื่อใช้สมการโพลิโนเมียลอันดับสูงสมการเดียวแล้วอาจทำให้เกิดพฤติกรรมการแกว่งตัวของเส้นกราฟ (Oscillatory Behavior) โดยการประมาณค่าในช่วงเส้นโค้งกำลังสามจะให้ค่าประมาณที่มีลักษณะเรียบและมีความต่อเนื่องที่แต่ละจุดของข้อมูล



(ก) ระเบียบวิธีการถดถอยแบบพหุนาม



(ข) ระเบียบวิธีเส้นโค้งกำลังสาม

รูปที่ 2 การเขียนเส้นกราฟด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (ชูศักดิ์, 2559)

Al-Badran และ Schanz (2014) กล่าวว่าการศึกษาลักษณะของเส้นกราฟการบดอัดของนักวิจัยที่ผ่านมาสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ (1) การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและค่าความ

หนาแน่นแข็งสูงสุดกับคุณสมบัติอื่น ๆ ของดิน (2) การศึกษาลักษณะของเส้นกราฟการบดอัดจากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้จะเข้าเกณฑ์การศึกษาตามข้อที่ 2

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 การเตรียมวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ ดินลูกรังนำมาจากแหล่งดินในจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ โดยนำตัวอย่างดินมาทำให้แห้งโดยผึ่งแดด ถ้าดินจับตัวเป็นก้อนจะใช้ค้อนยางทุบให้แตก แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 1 นิ้ว 3/8 นิ้ว เบอร์ 4 เบอร์ 10 เบอร์ 40 และเบอร์ 200 โดยนำดินที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาดใส่แยกไว้ในภาชนะ หลังจากนั้นนำดินที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาดมาคลุกเคล้าให้เข้ากันเป็นชนิดของดินตัวอย่างสำหรับการทดสอบ โดยอ้างอิงตามขนาดคละของวัสดุผิวทางลูกรังชนิด ก และ ชนิด ข ของกรมทางหลวงชนบท (มทข. 206-2545) โดยแบ่งดินออกเป็น 6 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ชนิดของตัวอย่างดินลูกรังที่ใช้ในการทดสอบ

ขนาดตะแกรง	ร้อยละผ่านตะแกรง					
	ชนิด ก-1	ชนิด ก-2	ชนิด ก-3	ชนิด ข-1	ชนิด ข-2	ชนิด ข-3
1 นิ้ว	100	100.0	100	100	100.0	100
3/8 นิ้ว	50	67.5	85	60	80.0	100
เบอร์ 4	25	45.0	65	50	54.0	58
เบอร์ 10	25	37.5	50	40	49.0	58
เบอร์ 40	15	22.5	30	25	35.0	45
เบอร์ 200	8	11.5	15	8	16.5	25

4.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

ก่อนดำเนินการทดสอบการบดอัดดิน ตัวอย่างดินถูกนำมาทดสอบหาคูณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน และค่าขีดจำกัดสถานะภาพของดิน เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการจำแนกประเภทของดินด้วยระบบเอกภาพ (Unified Soil Classification System, USCS)

4.3 การทดสอบการบดอัดดิน

การทดสอบการบดอัดใช้การบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

4.3.1 การทดสอบการบดอัดดินในการศึกษาครั้งนี้ ใช้โมลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.76 เซนติเมตร สูง 7.55 เซนติเมตร น้ำหนักค้อน 1.43 กิโลกรัม ระยะยกของค้อน 34.7 เซนติเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าโมลมาตรฐานตาม

วิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ดังนั้นจึงต้องคำนวณย้อนกลับโดยใช้พลังงานการบดอัดเทียบเท่า เพื่อหาจำนวนครั้งของการบดอัดพบว่า จำนวนครั้งในการบดอัดโดยใช้โมลขนาดเล็กเท่ากับ 9.5 จึงใช้จำนวนครั้งในการบดอัดเท่ากับ 10 ครั้ง ซึ่งให้ค่าพลังงานการบดอัดมากกว่าค่าพลังงานการบดอัดตามมาตรฐานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ดังนั้นเพื่อให้เกิดความแน่ใจว่าสามารถใช้การบดอัดด้วยโมลขนาดเล็กได้ จึงได้ทำการศึกษาอิทธิพลของขนาดโมลโดยการเปรียบเทียบผลการทดสอบการบดอัดดินชนิด ก-2 และ ข-2 โดยใช้โมลขนาดมาตรฐานและโมลขนาดเล็ก ซึ่งการทดสอบโดยใช้โมลขนาดเล็กจะใช้ขนาดเม็ดดินใหญ่สุด 4.75 มิลลิเมตร (ตะแกรงเบอร์ 4) ตามคำแนะนำของ อวีรุที (2551) โดยกำหนดให้ร้อยละผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เท่ากับ 100 และเทียบเป็นสัดส่วนสำหรับร้อยละผ่านตะแกรงขนาดที่เล็กลงไป

4.3.2 ดำเนินการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐานด้วยโมลขนาดเล็ก และแปลผลการทดสอบ โดยการเขียนเส้นการบดอัดด้วยวิธีการประมาณค่าในช่วงเส้นโค้งกำลังสาม เพื่อหาค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุด

4.3.3 นำค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่หาได้ไปผสมกับดินแห้ง แล้วดำเนินการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน นำข้อมูลไปแปลผลหาค่าความหนาแน่นแห้ง

4.4 ตรวจสอบความแม่นยำของการทำนายค่าความหนาแน่นแห้ง

ดำเนินการตรวจสอบความแม่นยำของการทำนายค่าพารามิเตอร์การบดอัดดินด้วยวิธีเชิงตัวเลข โดยมีขั้นตอนดังนี้

4.4.1 นำข้อมูลผลการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐานของตัวอย่างดินทั้ง 6 ชนิด มาเขียนเส้นกราฟการบดอัดดินโดยใช้วิธีการประมาณค่าในช่วงเส้นโค้งกำลังสาม การถดถอยแบบพหุนามอันดับสามและอันดับสี่ ตามลำดับ

4.4.2 นำค่าปริมาณความชื้นจากข้อ 4.3.3 ไปแทนลงในสมการการถดถอยแบบพหุนามอันดับสามและอันดับสี่ เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้ง

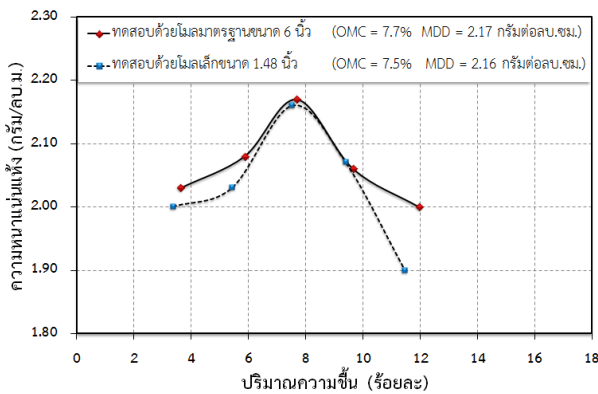
4.4.3 นำค่าความหนาแน่นแห้งที่หาได้จากเส้นกราฟการบดอัดที่สร้างด้วยวิธีการประมาณค่าในช่วงเส้นโค้งกำลังสาม การถดถอยแบบพหุนามอันดับสามและอันดับสี่ มาเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นแห้งที่ได้จากการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐานและสรุปร้อยละความแตกต่างของค่าความหนาแน่นแห้ง

5. ผลและวิจารณ์

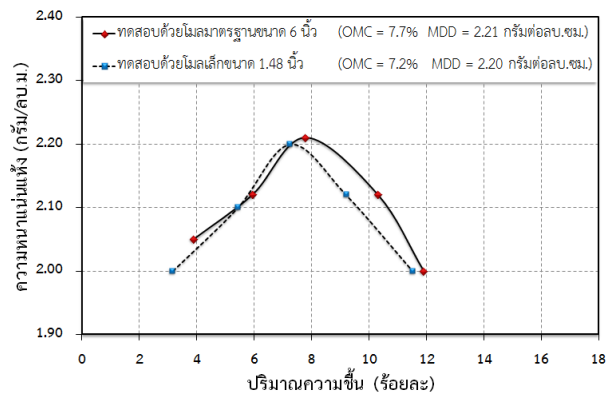
5.1 ผลการเปรียบเทียบอิทธิพลของขนาดโมลต่อเส้นกราฟการบดอัดดิน

เส้นกราฟการบดอัดดินที่สร้างจากชุดข้อมูลผลการทดสอบการบดอัดดินสำหรับดินชนิด ก-2 และ ข-2 โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบการบดอัดดินระหว่างการใช้โมลขนาดมาตรฐานและโมลขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 3(

ก) และรูปที่ 3(ข) ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของผลการทดสอบแล้วพบว่า ผลการทดสอบของดินทั้งสองชนิดมีลักษณะที่สอดคล้องกัน กล่าวคือความค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเมื่อทดสอบด้วยโมลขนาดเล็กให้ค่าน้อยกว่าการทดสอบด้วยโมลขนาดมาตรฐานในปริมาณที่เท่ากันทั้งดินชนิด ก-2 และชนิด ข-2 ซึ่งเป็นค่าที่น้อยมาก สำหรับค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเมื่อทดสอบด้วยโมลขนาดเล็กให้ค่าน้อยกว่าการทดสอบด้วยโมลขนาดมาตรฐานทั้งดินชนิด ก-2 และชนิด ข-2 ในปริมาณไม่เกินร้อยละ 0.5 เมื่อเปรียบเทียบกับการนำไปใช้งานจริงในสนามซึ่งมักจะกำหนดให้ใช้ปริมาณน้ำที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ± 2 ดังนั้นค่าความแตกต่างอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้



(ก) ดินชนิด ก-2



(ข) ดินชนิด ข-2

รูปที่ 3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบการบดอัดดินระหว่างการใช้โมลขนาดมาตรฐานและโมลขนาดเล็ก

5.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดิน

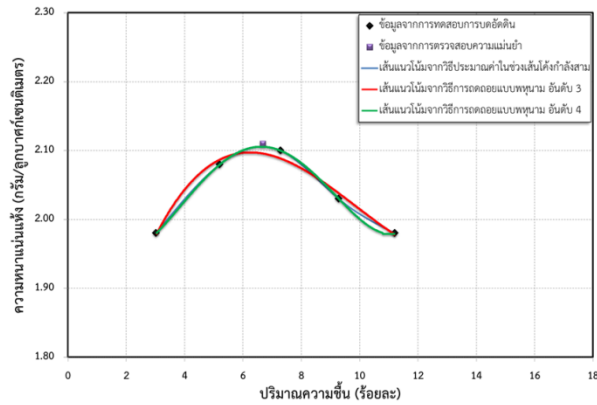
ข้อมูลที่แปรผลจากเส้นกราฟการกระจายตัวและขีดจำกัดสถานะภาพของตัวอย่างดินชนิด ก-1 ดินชนิด ก-2 ดินชนิด ก-3 ดินชนิด ข-1 ดินชนิด ข-2 และดินชนิด ข-3 ดังแสดงในตารางที่ 2 เมื่อนำข้อมูลมาจำแนกประเภทของดินด้วยระบบ USC พบว่าตัวอย่างดินทุกชนิดสามารถจำแนกได้เป็นชนิดดินทรายปนดินเหนียว (SC) สำหรับผลการหาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน พบว่ามีค่าเท่ากับ 2.84 ซึ่งอยู่ในช่วงของค่าทั่วไปของดินลูกรัง

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

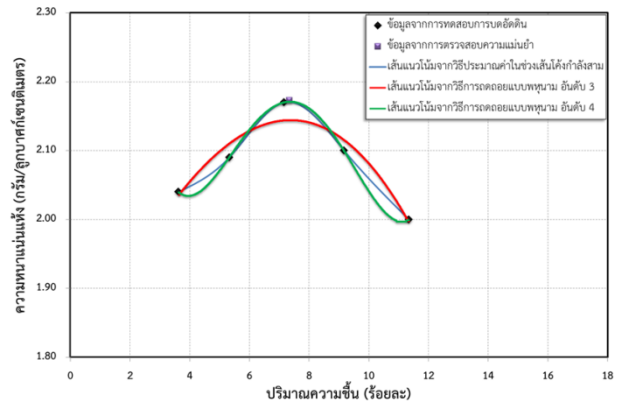
คุณสมบัติ	ชนิดของดิน					
	ก-1	ก-2	ก-3	ข-1	ข-2	ข-3
ร้อยละผ่านตะแกรงเบอร์ 200	23.08	25.56	32.00	16.00	30.56	43.10
ส.ป.ส.ความสม่ำเสมอ (C_u)	65.21	132.05	91.26	81.98	146.2	248.85
ส.ป.ส.ความโค้ง (C_c)	6.28	3.09	1.12	0.81	0.46	0.27
ค่าขีดจำกัดเหลว (LL)	34.23	39.04	37.98	31.29	28.44	38.74
ค่าขีดจำกัดพลาสติก (PL)	14.99	21.14	18.76	18.51	20.47	24.44
ค่าดัชนีความเหนียว (PI)	19.24	17.90	19.22	12.78	17.97	24.15

5.3 ผลการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน

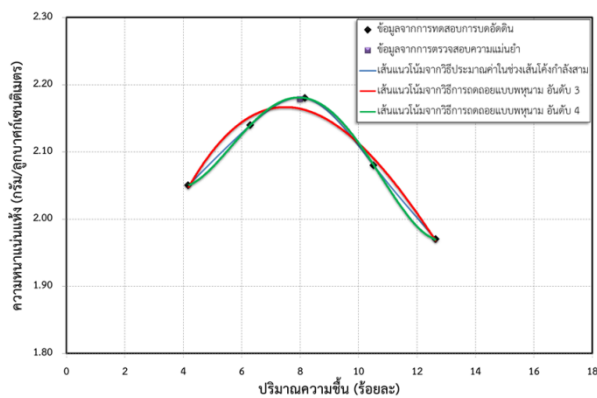
ผลจากการทดสอบการบดอัดดิน สามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบความแม่นยำของความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการเขียนเส้นกราฟการบดอัดดิน ดำเนินการโดยการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นแห้งที่ได้จากการทดสอบการบดอัดดินโดยใช้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมกับค่าที่อ่านได้จากเส้นกราฟการบดอัดดินที่สร้างด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (การประมาณค่าในช่วงเส้นโค้งกำลังสาม การถดถอยแบบพหุนามอันดับสาม และการถดถอยแบบพหุนามอันดับสี่) เมื่อพิจารณาที่ปริมาณความชื้นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4



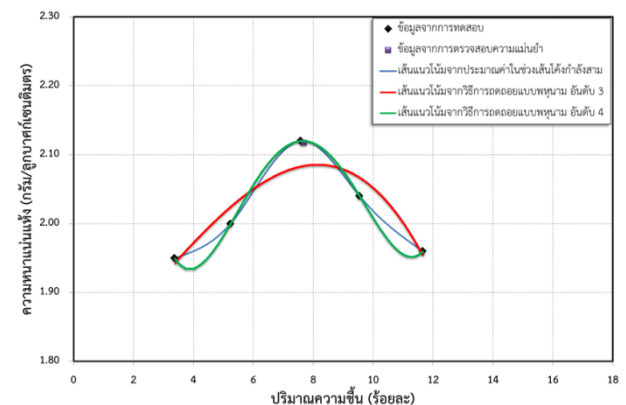
(ก) ชนิด ก-1



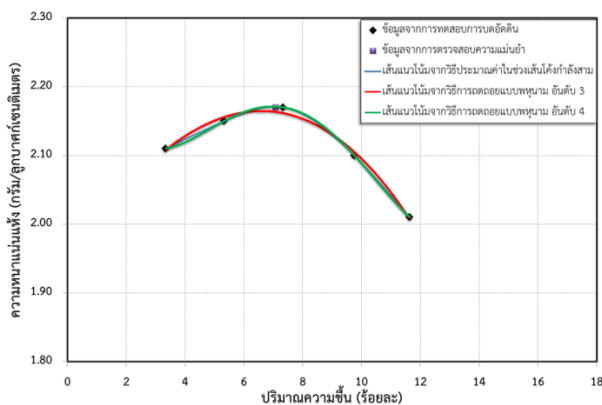
(ง) ชนิด ข-1



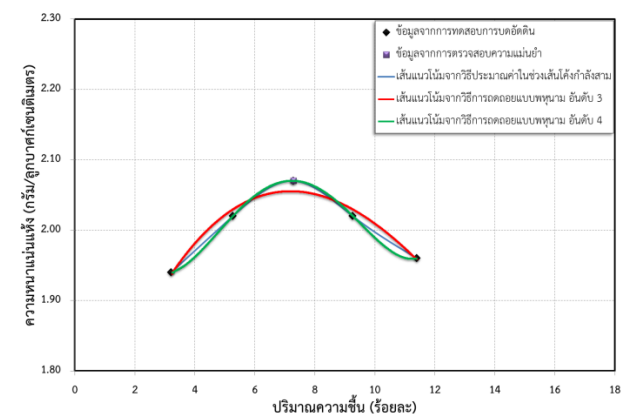
(ข) ชนิด ก-2



(จ) ชนิด ข-2



(ค) ชนิด ก-3



(ฉ) ชนิด ข-3

รูปที่ 4 เส้นกราฟการบดอัดดินที่สร้างด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

การศึกษาความแม่นยำของการทำนายค่าความหนาแน่นแห้งของดินกลุ่ม ก และดินกลุ่ม ข จากการอ่านค่าเส้นกราฟการบดอัดดินที่สร้างจากการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข 3 วิธี ได้แก่ วิธีประมาณค่าในช่วงเส้นโค้งกำลังสาม วิธีการถดถอยแบบพหุนามอันดับสาม และวิธีการถดถอยแบบพหุนามอันดับสี่ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าร้อยละความแตกต่างเฉลี่ยของการศึกษาความแม่นยำของการทำนายค่าความหนาแน่นแห้ง สำหรับวิธีการประมาณค่าในช่วงเส้นโค้งกำลังสาม วิธีการถดถอยแบบพหุนามอันดับสี่ และวิธีการถดถอยแบบพหุนามอันดับสาม เท่ากับ 0.09672, 0.11509 และ 0.89848 ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าวิธีการประมาณค่าในช่วงเส้นโค้งกำลังสาม และวิธีการถดถอยแบบพหุนามอันดับสี่ ให้ค่าที่ใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับข้อมูลการตรวจสอบความแม่นยำ อีกทั้งเส้นกราฟที่เขียนจากวิธีทั้งสองลากผ่านข้อมูลการทดสอบทุกจุด ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของ ASTM D1557 (2012) ในขณะที่การใช้วิธีการถดถอยแบบพหุนามกำลังสาม เส้นกราฟจะไม่ผ่านข้อมูลการทดสอบทุกจุด แต่เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการแกว่งตัวของเส้นกราฟแล้วพบว่า วิธีการประมาณค่าในช่วงเส้นโค้งกำลังสามไม่ทำให้เส้นกราฟเกิดพฤติกรรมการแกว่งตัวของเส้นกราฟ ซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่สามารถใช้ในการสร้างเส้นกราฟการบดอัดดินที่ดีที่สุด

ตารางที่ 3 สรุปผลการศึกษาความแม่นยำของการทำนายค่าความหนาแน่นแห้งของดินกลุ่ม ก และดินกลุ่ม ข

ข้อมูลจากการตรวจสอบความแม่นยำ	ก-1	ก-2	ก-3	ข-1	ข-2	ข-3
ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (ร้อยละ)	6.676	7.983	7.075	7.329	7.63	7.289
ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (กรัม/ลบ.ซม.)	2.11027	2.17874	2.17037	2.17334	2.11788	2.07042
วิธีประมาณค่าในช่วงเส้นโค้งกำลังสาม						
ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (ร้อยละ)	6.676	7.983	7.075	7.329	7.673	7.289
ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (กรัม/ลบ.ซม.)	2.10541	2.18042	2.17037	2.17040	2.11905	2.07212
ร้อยละความแตกต่าง	0.23083	0.07722	0.00000	0.13524	0.05498	0.08204
วิธีการถดถอยแบบพหุนามอันดับสี่						
ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (ร้อยละ)	6.676	7.983	7.075	7.329	7.673	7.289
ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (กรัม/ลบ.ซม.)	2.10570	2.18084	2.17111	2.17038	2.12009	2.06998
ร้อยละความแตกต่าง	0.21725	0.09626	0.03408	0.10871	0.10424	0.02126
วิธีการถดถอยแบบพหุนามอันดับสาม						
ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (ร้อยละ)	6.676	7.983	7.075	7.329	7.673	7.289
ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (กรัม/ลบ.ซม.)	2.09584	2.16467	2.16366	2.14412	2.08361	2.05532
ร้อยละความแตกต่าง	0.68858	0.64998	0.31012	1.36280	1.64474	0.73468

6. สรุปผล

การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาความแม่นยำของการทำนายค่าพารามิเตอร์การบดอัดดินด้วยวิธีเชิงตัวเลข จากผลที่ได้จากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐานด้วยโมลเล็กสามารถทดแทนการใช้โมลขนาดมาตรฐานได้ ซึ่งผลการทดสอบการบดอัดดินให้ค่าความหนาแน่นแห้งใกล้เคียงกับการโมลมาตรฐาน สำหรับการศึกษาครั้งนี้พบว่ามีความแตกต่างกันไม่เกิน 0.01 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ทำให้สามารถลดปริมาณดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบและจำนวนครั้งในการบดอัดได้มาก แต่ขนาดเม็ดดินใหญ่สุดที่ใช้ในการบดอัดไม่ควรเกินขนาดตะแกรงเบอร์ 4

2. จากเส้นกราฟการบดอัดดินที่สร้างด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (การประมาณค่าในช่วงเส้นโค้งกำลังสาม การถดถอยแบบพหุนามอันดับสาม และการถดถอยแบบพหุนามอันดับสี่) เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นแห้ง ที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเดียวกันกับข้อมูลที่ใช้สำหรับตรวจสอบความแม่นยำ พบว่าค่าความหนาแน่นแห้งที่อ่านได้จากเส้นกราฟการบดอัดดินที่สร้างด้วยวิธีประมาณค่าในช่วงเส้นโค้งกำลังสาม และวิธีการถดถอยแบบพหุนามอันดับสี่ ให้ค่าความหนาแน่นแห้งใกล้เคียงและสอดคล้องกับข้อมูลที่ใช้สำหรับตรวจสอบความแม่นยำของค่าความหนาแน่นแห้ง ซึ่งเส้นกราฟการบดอัดดินที่สร้างจากทั้งสองวิธีเป็นเส้นเรียบและผ่านจุดข้อมูลทดสอบทุกจุดเป็นไปตามข้อกำหนดของ ASTM D1157 (2012) โดยจากผลการศึกษาเมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นแห้งตามค่าเลขนัยสำคัญ 3 ตำแหน่ง (ASTM D6026, 2006) จะให้ค่าที่เท่ากัน สำหรับการเขียนเส้นกราฟการบดอัดดินและการหาค่าพารามิเตอร์การบดอัดดิน (ความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม) นั้น เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการแกว่งตัวของเส้นกราฟ จะพบว่าการใช้วิธีประมาณค่าในช่วงเส้นโค้งกำลังสามเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด การเขียนเส้นกราฟการบดอัดดินด้วยวิธีเชิงตัวเลขและการแปรผลการทดสอบการบดอัดดินสามารถนำไปสร้างเป็นโปรแกรมแอปพลิเคชันได้

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยงบประมาณเงินรายได้ ประจำปี 2559 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

บรรณานุกรม

- [1] ชูศักดิ์ ศิริรัตน์, 2559, เอกสารคำสอนวิชาวิธีทางคอมพิวเตอร์สำหรับวิศวกรโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล.
- [2] อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์, 2552, การบดอัดดินแบบพล็อกเตอร์โดยใช้แบบบดอัดขนาดเล็ก, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, สำนักวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

- [3] Al-Badran, Y., Schanz, T., 2014, “Modelling the Compaction Curve of Fine-Grained Soil,” *Soils and Foundations*, 54(3), 426-438.
- [4] ASTM D1157, 2012, “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)),” *Annual Books of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, PA, Sec. 4, Vol 04.08.
- [5] ASTM D6026, 2006, “Standard Practice for Using Significant Digits in Geotechnical Data,” *Annual Book of ASTM Standards Volume Information*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [6] Apampa, O.A., Jimoh, Y.A., Olonade, K.A., 2015, “Modeling of Compaction Curves for Corn Cob Ash-Cement Stabilized Lateritic Soils,” *International Journal of Civil, Environmental, Construction and Architectural Engineering*, 9(6), 763-766.
- [7] Daita, K.R., Drnevich, V.P., Kim, D., 2005, *Family of Compaction Curves for Chemically Modified Soil*, FHWA/IN/JTRP 2005/07, Joint Transportation Research Program, INDOT and Purdue University, West Lafayette, Indiana, US.
- [8] Das, B.M., 2008, *Fundamentals of Geotechnical Engineering*. 3rd ed., Thomson, Ontario.
- [9] Joslin, J.C., 1959, “Oiho’s Typical Moisture-Density Curves,” 239, *American Society for Testing and Materials*, Special Technical Publication STP, 111-118.
- [10] Hilf, J.W., 1991, “Compacted Fill,” *Foundation Engineering Handbook*, Chapman and Hall Ltd., London, UK, 249-316.
- [11] Howell, J.L., Shackelford, C.D., Amer, N.H., Stern, R.T., 1997, *Compaction of Sand-Processed Dry Soil Mixtures*, *Geotechnical Test Journal*, 20(4), 443-458.
- [12] Proctor, R.R., 1933, “Design and Construction of Rolled Earth Dams,” *Engineering News Record*, Vol. 3, 245–248, 286 –289, 348–351, 372–376.
- [13] Rethati, L., 1988, *Probabilistic Solution in Geotechnics*, Elsevier, New York.