การออกแบบอาคารต้านแผ่นดินไหวโดยระบบการแยกฐานราก

Building Design for resisting Earthquake by Base Isolation Method

ไพกานท์ รักษาสุทธิพันธ์

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยรังสิต มหาวิทยาลัยรังสิต 12000

E-mail: paiboon.r@rsu.ac.th

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ต้องการศึกษาถึงระบบโครงสร้างอาคารที่สามารถรับภัยแผ่นดินไหว เช่น ระบบแยกฐานราก (Base Isolation) เป็นต้น ทำการศึกษาโดยการจำลอง ต้นแบบโครงสร้าง ส่วนฐานราก ระบบแยกฐานราก(Base Isolation) และระบบฐานรากเดิม มาทำการเปรียบเทียบถึงสภาพของการสั่นไหวของโครงสร้าง จากสมมติฐานที่ว่า ถ้าโครงสร้างอาคารสามารถยืดหยุ่น เคลื่อนไหวได้ โดยเฉพาะส่วนฐานราก น่าจะทำให้สามารถลดผลกระทบที่เกิดขึ้นจากแรงสั่นสะเทือนจากการเกิดแผ่นดินไหวต่อตัวบ้านหรือตัวอาคาร ระบบฐานรากแยกมีหลักการคือการทำให้ตัวบ้านเป็นอิสระจากพื้นดินที่เกิดการสั่นไหว ซึ่งเป็นการลดแรงกระทำต่อตัวบ้านจากการสั่นของพื้นดินหรือแรงจากใต้ดิน จะได้ต้นแบบฐานรากอาคาร ที่สามารถนำไปใช้จริงในพื้นที่ ที่มีการเกิดแผ่นดินไหว

คำสำคัญ: แผ่นดินไหว, การออกแบบสถาปัตยกรรม, ฐานรากระบบแยก

Abstract

This research is to study the structure of buildings to resist an earthquake, such as the separate foundations (Base Isolation, etc.) Study by Modeling the Prototypes Structural of Foundations (Base Isolated foundations), and original foundations. To compare the condition of the shake of the structure. From the assumption that. If the building structure can be flexible, Movable, Especially the foundations It should be possible to reduce the impact of vibration from earthquakes on the house or building. The principle is to make the house free from shaking ground. This reduces the force on the house from the vibration of the ground or the force from the underground. We will get the prototype of the foundations. That can be applied in the area. With earthquakes

Key words: earthquake, Architectural design, separate foundation, Base Isolation

1. ที่มาและความสำคัญ

งานก่อสร้างถนนซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่มีความจำเป็นในระบบการคมนาคมภายในประเทศ เป็นสิ่งที่นับวันจะมีมากขึ้นเรื่อยๆตามการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ ซึ่งมีความจำเป็นต้องพิจารณาความเหมาะสมของวัสดุที่นำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างงานทาง เพื่อให้เกิดความมั่นใจต่อความคงทนแข็งแรงของโครสร้างถนน โดยจำเป็นต้องทราบ

คุณสมบัติทางวิศวกรรมได้แก่ ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) และความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density, MDD) จากการทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำคุณสมบัตินั้นไปใช้ในการบดอัดดินในงานสนามต่อไป

การแปรผลการทดสอบการบดอัดดินเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา เพื่อให้ได้มาซึ่งพารามิเตอร์การบดอัด (OMC และ MDD) ที่ถูกต้อง โดยปกติจะอาศัยการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยมักใช้วิธีการปรับเส้นโค้ง (Curve Fitting) ซึ่งเป็นความสามารถอย่างหนึ่งที่สามารถดำเนินการได้ในโปรแกรมไมโครซอฟเอ็กเซล สำหรับปัจจุบันมีโปรแกรกมประยุกต์ (Application) สำหรับใช้ในการแปรผลการทดสอบการบดอัดดินน้อยมาก หรือหากมีก็มักเป็นโปรแกรมเชิงพาณิชย์ของต่างประเทศ อีกทั้งในประเทศไทยก็ยังมีการพัฒนาโปรแกรมในลักษณะดังกล่าวน้อยมาก จึงเป็นแรงจูงใจในการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์เพื่อใช้แปรผลการทดสอบการบดอัดดิน และเพื่อให้เป็นการสอดคล้องกับการพัฒนาประเทศตามนโยบายไทยแลนด์ 4.0 อีกทางหนึ่งด้วย

2. วัตถุประสงค์

การศึกษาครั้งนี้เป็นการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ ซึ่งมีวัตถุประสงค์ ดังนี้

2.1 เพื่อพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ ร่วมกับการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและระบบฐานข้อมูล

2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับใช้ในการสร้างเส้นกราฟการบดอัดดิน โดยอาศัยข้อมูลจากการทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ

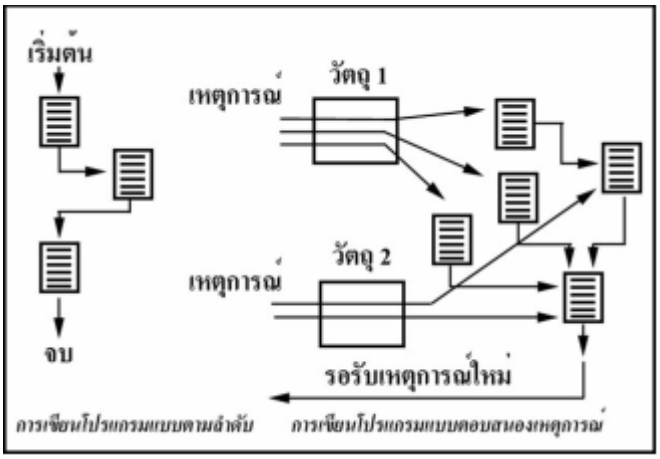
3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา Reddy (1993) ได้พัฒนาชุดโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการแปรผลการทดสอบได้แก่ การจำแนกประเภทของดิน การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง การทดสอบหาค่าซีบีอาร์ และการทดสอยการอัดตัวคายน้ำ Ozcep (2010) ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรมไมโครซอฟเอ็กเซลสำหรับการวิเคราะห์ทางธรณีเทคนิคและธรณีฟิสิกส์ El-Garhy (2013) ได้พัฒนาชุดคอมพิวเตอร์โปรแกรมสำหรับการสอนทางด้านวิศวกรรมเทคนิคธรณี นอกจากนี้ยังมีเวปไซด์ต่างประเทศ (เช่น geosystemsoftware.com, ggu-software.com เป็นต้น) เป็นตัวแทนจำหน่ายโปรแกรมสำหรับแปรผลการทดสอบทางด้านวิศวกรรมปฐพีเชิงพาณิชย์ ซึ่งทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาครั้งนี้ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การพัฒนาโปรแกรมแบบตอบสนองเหตุการณ์ (Event-Driven Programming)

การเขียนโปรแกรมแบบมีเหตุการณ์เป็นตัวขับ เป็นการเขียนโปรแกรมรูปแบบหนึ่งที่จะตอบสนองต่อผู้ใช้งานก็ต่อเมื่อมีเหตุการณ์ (Event) บางอย่างตามที่ได้กำหนดไว้เกิดขึ้น โดยการศึกษาครั้งนี้ใช้โปรแกรมภาษาวิชวลเบสิกซึ่งมีรูปแบบการเขียนโปรแกรมแบบตอบสนองเหตุการณ์ กล่าวคือ การเขียนโปรแกรมใช้หลักของวัตถุ (Object)

และการมองเห็น (Visualization) โดยเริ่มจากการออกแบบวินโดว์ย่อยหรือวิชวลเบสิก เรียกว่า ฟอร์ม (Form) ในฟอร์มประกอบด้วยสิ่งต่างๆที่จะทำงานด้วย หรือเรียกว่าเป็น วัตถุ เช่น ข้อความ (Label) ช่องรับข้อความ (TextBox) แถบเลื่อน (ScrollBar) ปุ่ม (Button) เป็นต้น เมื่อกำหนดสิ่งเหล่านี้ครบตามความต้องการแล้วจึงระบุว่าองค์ประกอบแต่ละอย่างจะทำงานอย่างไร โดยเขียนโปรแกรมย่อยปะเข้าไปกับวัตถุเหล่านี้และกำหนดให้การประมวลผลเกิดขึ้นตามเหตุการณ์ที่กำหนดให้กับวัตถุ ซึ่งเหตุการณ์ที่กำหนดนั้นมีได้หลายอย่าง เช่น ถ้าสิ่งที่สนใจเป็นกลุ่มควบคุมและต้องการให้การทำงานเกิดขึ้นเมื่อคลิกหรือดับเบิ้ลคลิกก็ระบุว่าหากมีการคลิกที่ปุ่มควบคุมนี้โปรแกรมจะต้องทำอย่างไร หรือถ้ามีการดับเบิ้ลคลิกจะต้องทำอย่างไร ส่วนเหตุการณ์ อื่นๆที่ไม่ได้ระบุไว้ก็จะไม่มีผลต่อตัวแปรนั้น เป็นต้น โดยเมื่อเปรียบเทียบลักษณะการทำงานระหว่างโปรแกรมแบบตอบสนองเหตุการณ์กับโปรแกรมโดยทั่วไป สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะการทำงานของโปรแกรม (สรกานต์ ศรีตองอ่อน, 2546)

3.2 การใช้ภาษาเอสคิวแอลจัดการฐานข้อมูล (Structure Query Language, SQL)

ภาษาเอสคิวแอลเป็นภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม เพื่อจัดการกับฐานข้อมูลโดยเฉพาะ เป็นภาษามาตรฐานบนระบบฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์และเป็นระบบเปิด (Open System) ซึ่งสามารถใช้คำสั่งภาษาเอสคิวแอลกับฐานข้อมูลชนิดใดก็ได้ และคำสั่งงานเดียวกันเมื่อสั่งงานผ่านระบบฐานข้อมูลที่แตกต่างกันจะได้ผลลัพธ์เหมือนกัน ทำให้สามารถเลือกใช้ฐานข้อมูลชนิดใดก็ได้โดยไม่ติดยึดกับฐานข้อมูลใดฐานข้อมูลหนึ่ง นอกจากนี้แล้วเอสคิวแอลยังเป็นชื่อโปรแกรมฐานข้อมูลด้วย ซึ่งโปรแกรมแอสคิวแอลเป็นโปรแกรมฐานข้อมูลที่มีโครงสร้างของภาษาที่เข้าใจง่าย ไม่ซับซ้อน มีประสิทธิภาพการทำงานสูง สามารถทำงานที่ซับซ้อนได้โดยใช้คำสั่งเพียงไม่กี่คำสั่ง ดังนั้นภาษาเอสคิวแอล จึงเหมาะที่จะใช้กับระบบฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์ ภาษาเอสคิวแอลสามารถใช้ประโยชน์ได้ 3 อย่าง ได้แก่ (1) สร้างฐานข้อมูลและตาราง (2) สนับสนุนการจัดการฐานข้อมูล ซึ่งประกอบด้วย การเพิ่ม การปรับปรุง และการลบข้อมูล และ (3) สนับสนุนการเรียกใช้ หรือค้นหาข้อมูล

3.3 การเขียนเส้นกราฟการบดอัดด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method)

ASTM D1157 (2012) กล่าวไว้ว่าการเขียนเส้นกราฟการบดอัดควรให้เส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นราบเรียบต่อเนื่องกันและต้องผ่านทุกจุดข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งการเขียนเส้นกราฟการบดอัดจึงสามารถกระทำได้ 2 แนวทาง โดยอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ได้แก่ การปรับเส้นโค้ง (Curve Fitting) และการประมาณค่าในช่วง (Interpolation) ซึ่งหลักการของทั้งสองวิธีสามารถอธิบายในภาพรวมได้ ดังนี้

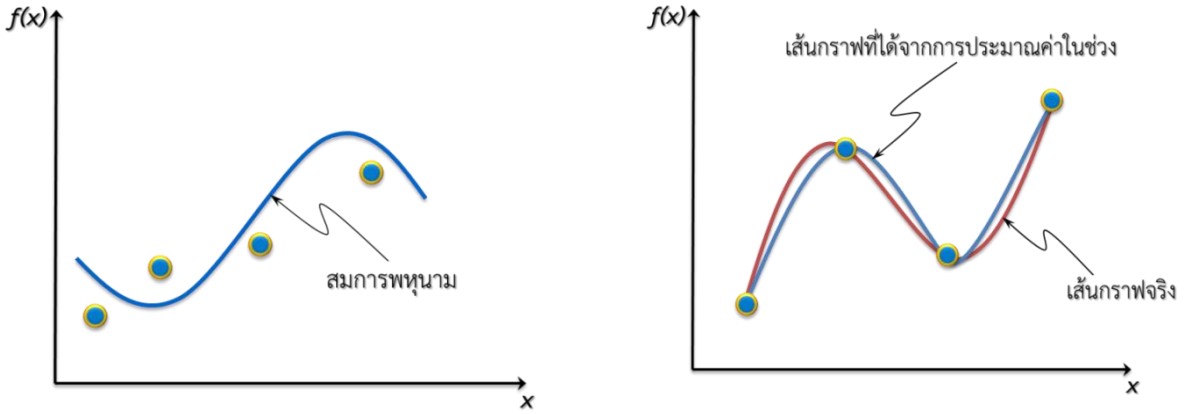
3.3.1 การปรับเส้นโค้ง

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

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \ldots + a_m x^m \quad (1)$$

3.3.2 การประมาณค่าในช่วง

การประมาณค่าในช่วงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ใช้ระเบียบวิธีการประมาณค่าในช่วงเส้นโค้งกำลังสาม (Cubic Spline Interpolation) ซึ่งอาศัยการใช้วิธีประมาณค่าเป็นช่วงโดยอาศัยจุดข้อมูล 4 จุด ดังรูปที่ 2(ข) ระเบียบวิธีนี้สามารถแก้ข้อจำกัดของการประมาณค่าโดยอาศัยสมการโพลิโนเมียลอันดับสูงสมการเดียวเพื่อให้ได้ค่าประมาณที่เที่ยงตรงได้ เนื่องจากเมื่อใช้สมการโพลิโนเมียลอันดับสูงสมการเดียวแล้วอาจทำให้เกิดพฤติกรรมการแกว่งตัวของเส้นกราฟ (Oscillatory Behavior) โดยการประมาณค่าในช่วงเส้นโค้งกำลังสามจะให้ค่าประมาณที่มีลักษณะเรียบและมีความต่อเนื่องที่แต่ละจุดของข้อมูลด้วย

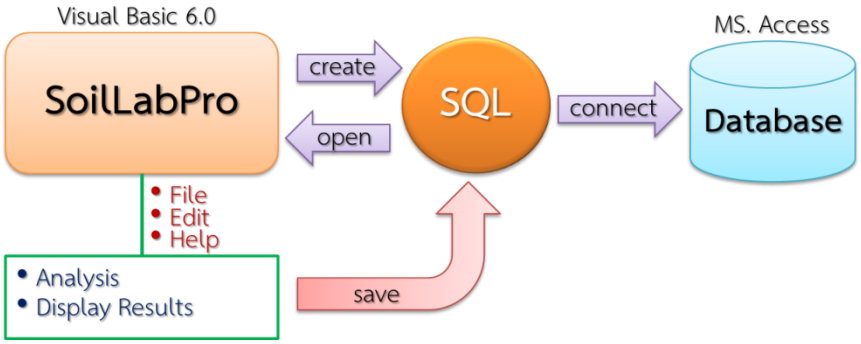


(ก) ระเบียบวิธีการถดถอยแบบพหุนาม (ข) ระเบียบวิธีเส้นโค้งกำลังสาม

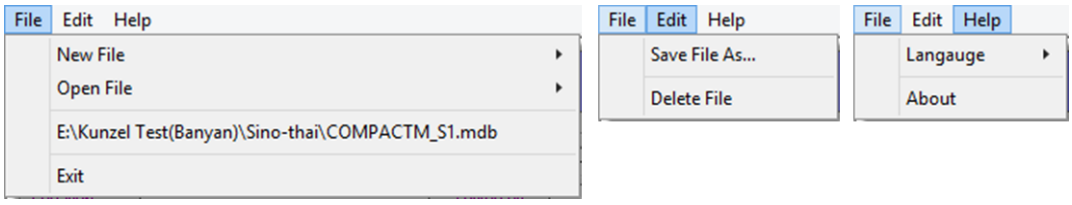
รูปที่ 2 การเขียนเส้นกราฟด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (ชูศักดิ์, 2559)

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 ออกแบบแนวคิดการดำเนินการพัฒนาโปรแกรม ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยกำหนดให้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นชื่อ SoilLabPro ซึ่งสร้างด้วยโปรแกรมภาษาวิชวลเบสิก 6.0 สำหรับไฟล์ฐานข้อมูลไมโครซอฟเอ็กเซสที่ถูกสร้างขึ้นด้วยการใช้ภาษาเอสคิวแอลจะถูกนำมาใช้เป็นไฟล์สำหรับเก็บข้อมูล การทำงานของโปรแกรมสามารถเลือกใช้งานจาก 3 เมนูหลัก ได้แก่ เมนูไฟล์ (File) เมนูปรับเปลี่ยนข้อมูล (Edit) และเมนูตัวช่วย (Help) โดยเมนูย่อยในแต่ละเมนูหลักดังแสดงในรูปที่ 4 สำหรับการประมวลผลและการแสดงผลลัพธ์สามารถดำเนินการผ่านปุ่มที่อยู่ในหน้าจอโปรแกรม

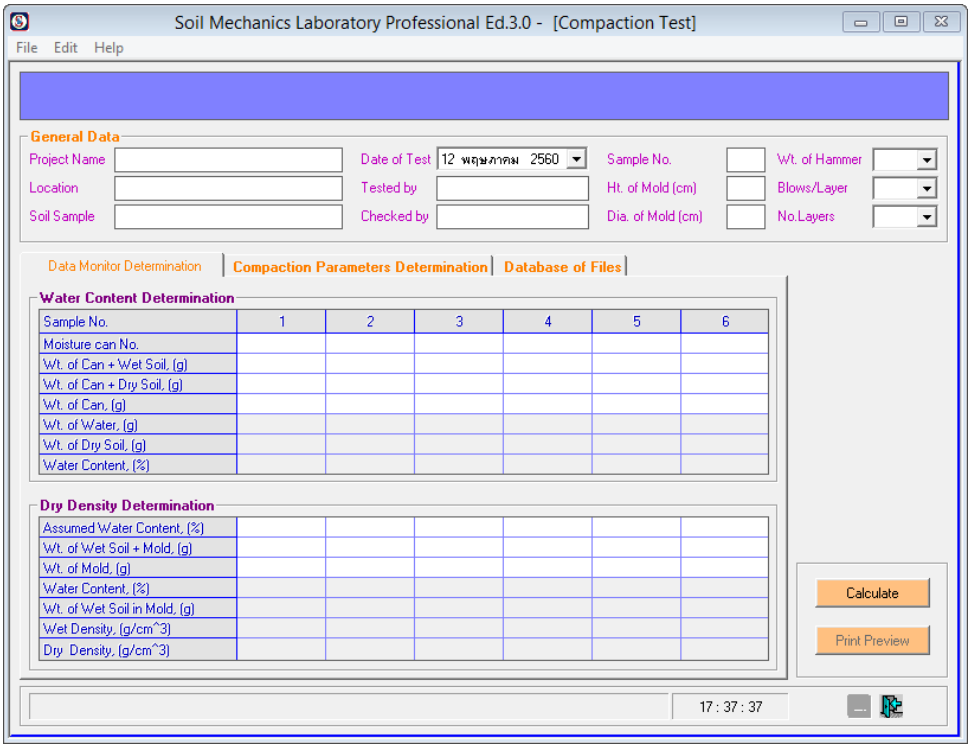


รูปที่ 3 แผนผังการทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น



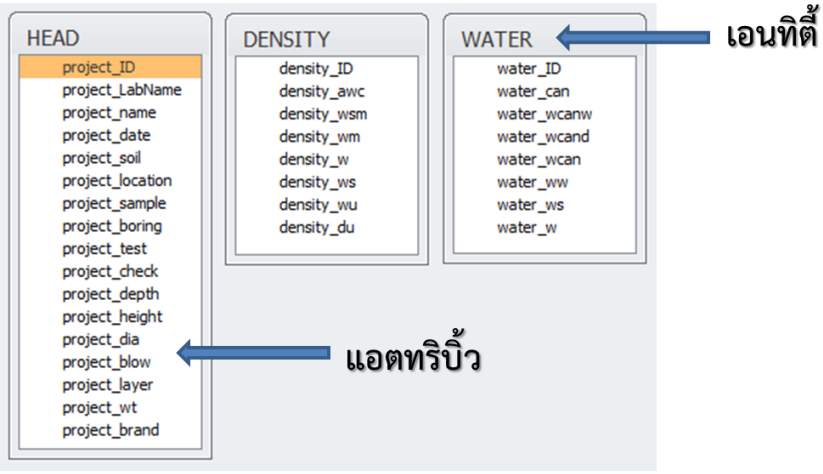
รูปที่ 4 รายละเอียดเมนูย่อยในแต่ละเมนูหลัก

4.2 ออกแบบหน้าจอโปรแกรมซึ่งประกอบไปด้วย 3 ส่วนได้แก่ (1) ส่วนรับข้อมูล (2) ส่วนของการวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูล และ (3) ส่วนของการรายงานผลซึ่งสามารถรายงานผลได้ทั้งทางจอภาพและทางเครื่องพิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 หน้าจอโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

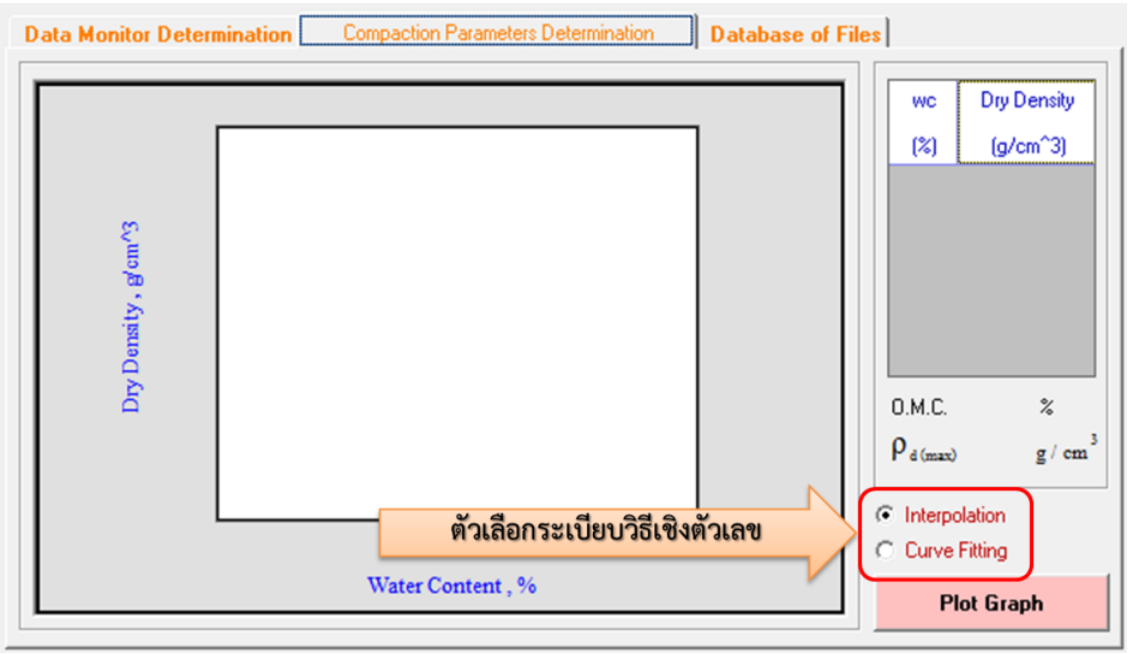
4.3 ออกแบบเอนทิตี้ (Entity) และแอตทริบิ้ว (Attribute) ของไฟล์ฐานข้อมูล ซึ่งจะกำหนดให้มี 3 เอนทิตี้ ได้แก่ HEAD DENSITY และ WATER และมีแอตทริบิ้วภายใต้แต่ละเอนทิตี้ ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 เอนทิตี้และแอตทริบิ้ว ของฐานข้อมูล

4.4 เขียนรหัสคำสั่ง (Coding) ในรูปแบบตอบสนองเหตุการณ์ ทั้งในส่วนของการจัดการไฟล์ฐานข้อมูล และส่วนของการประมวลและแสดงผลลัพธ์ โดยส่วนการประมวลผลสำหรับนำไปเขียนเส้นกราฟการบดอัดนั้น จะใช้

ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข 3 วิธี ได้แก่ วิธีประมาณค่าในช่วงเส้นโค้งกำลังสาม วิธีปรับเส้นโค้งด้วยสมการโพลิโนเมียลอันดับสาม และวิธีปรับเส้นโค้งด้วยสมการโพลิโนเมียลอันดับสี่ โดยวิธีปรับเส้นโค้งด้วยสมการโพลิโนเมียลอันดับสามจะใช้กับชุดข้อมูลการทดสอบ 4 จุด ส่วนวิธีปรับเส้นโค้งด้วยสมการโพลิโนเมียลอันดับสี่จะใช้กับข้อมูลการทดสอบที่มากกว่า 4 จุด และวิธีประมาณค่าในช่วงเส้นโค้งกำลังสามจะใช้กับชุดข้อมูลการทดสอบเท่ากับและมากกว่า 4 จุด โดยกำหนดให้ผู้ใช้งานสามารถเลือกได้ว่าจะใช้ระเบียบวิธีการประมาณค่าในช่วงหรือการปรับเส้นโค้ง ดังหน้าจอในรูปที่ 7



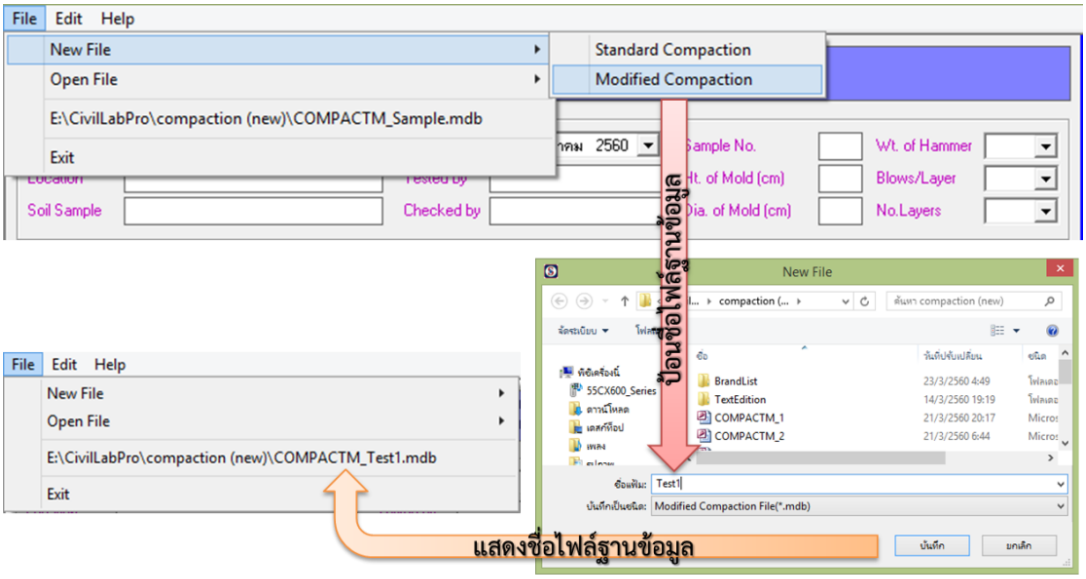
รูปที่ 7 หน้าจอสำหรับเขียนเส้นกราฟการบดอัด

5. ผลและวิจารณ์

ผลจากการพัฒนาโปรแกรมการบดอัดดิน โดยตรวจสอบจากการใช้ชุดข้อมูลการทดสอบการบดอัดดินจำนวน 3 ชุดข้อมูล มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 การสร้างไฟล์ฐานข้อมูลบันทึกผลการทดสอบ

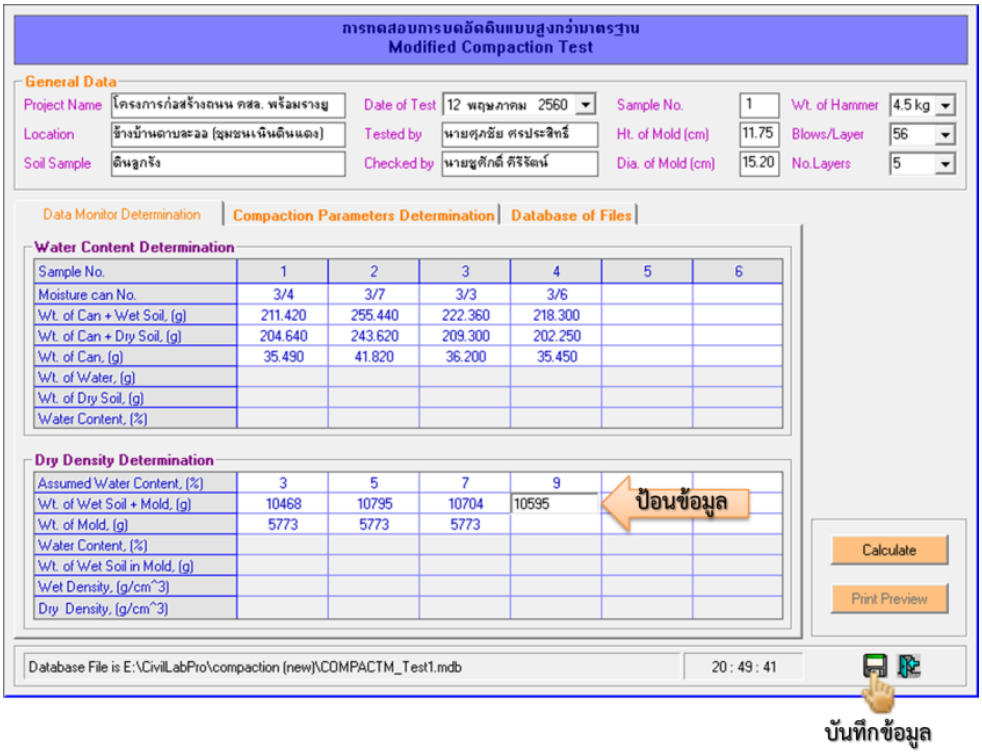
เมื่อเริ่มเข้าใช้งานโปรแกรมผู้ใช้งานสามารถเลือกได้ว่าจะสร้างไฟล์ฐานข้อมูลใหม่หรือจะเปิดข้อมูลที่มีอยู่แล้ว และสามารถเลือกว่าจะใช้การทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานหรือแบบสูงกว่ามาตรฐาน หากต้องการสร้างไฟล์ฐานข้อมูลใหม่สามารถดำเนินการได้ โดยเมื่อการสร้างไฟล์ฐานเสร็จสิ้นจะปรากฏชื่อของไฟล์ฐานข้อมูลนั้น ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 การสร้างไฟล์ฐานข้อมูลใหม่

5.2 การป้อนและบันทึกข้อมูลการทดสอบ

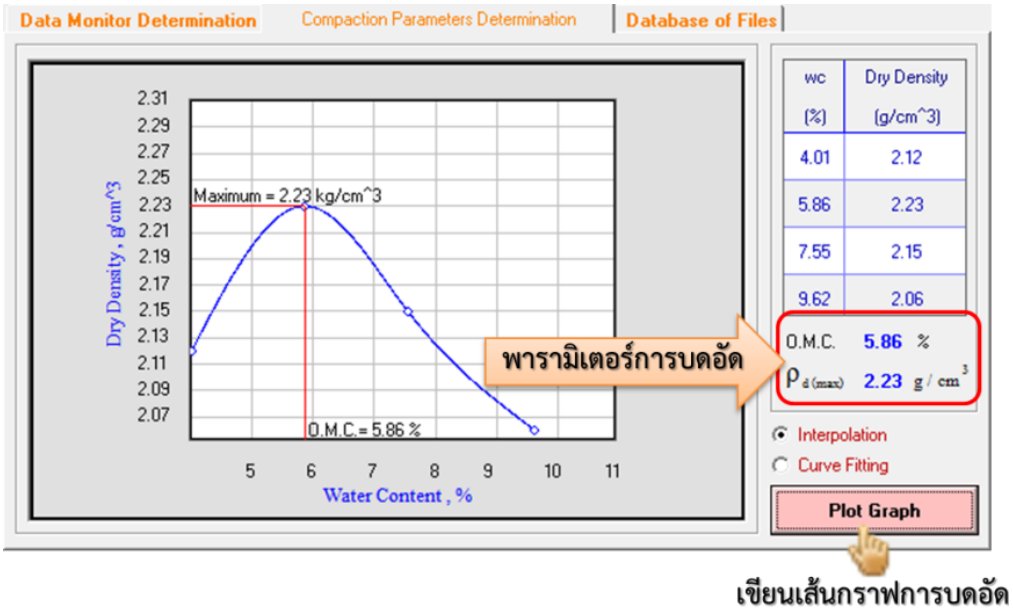
การป้อนข้อมูลการทดสอบสามารถดำเนินการได้ในลักษณะเดียวกับการใช้โปรแกรมไมโครซอฟเอ็กเซล โดยใช้เมาส์คลิกในช่องที่ต้องการป้อนข้อมูล แล้วกดปุ่ม Enter เพื่อรับค่า เมื่อป้อนข้อมูลเสร็จก็สามารถบันทึกข้อมูลผ่านแถบปุ่มรูปแผ่นดิส ดังแสดงในรูปที่ 9 หากต้องการเปลี่ยนค่าที่ป้อนไปแล้วก็ทำในลักษณะดียวกัน



รูปที่ 9 การป้อนและบันทึกข้อมูลการทดสอบ

5.3 การแปรผลการทดสอบการบดอัดดิน

เมื่อป้อนข้อมูลการทดสอบเรียบร้อย สามารถสั่งให้โปรแกรมคำนวณได้โดยกดปุ่ม Calculate แล้วจึงสามารถเขียนเส้นกราฟการบดอัดโดยเลือกว่าจะใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบประมาณค่าในช่วงหรือปรับเส้นโค้งพร้อมทั้งหาค่าพารามิเตอร์การบดอัด (OMC และ MDD) และจะปรากฏดังแสดงผลทางจอภาพ ในรูปที่ 10



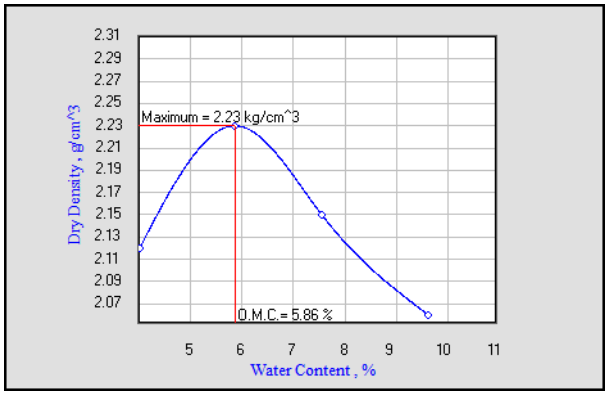
รูปที่ 10 การแปรผลการทดสอบการบดอัดดิน

5.4 การเปรียบเทียบการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเขียนเส้นกราฟการบดอัด

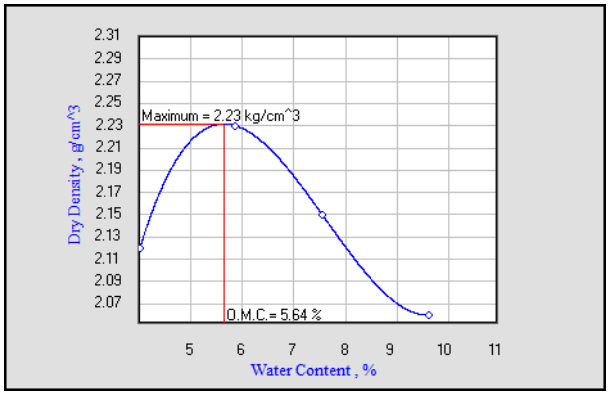
จากการใช้ชุดข้อมูลจากการทดสอบการบดอัดดิน 3 ชุดข้อมูล ที่มีค่าจำนวนข้อมูล 4 จุด 5 จุด และ 6 จุด ตามลำดับ โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถเขียนเส้นกราฟการบดอัดได้ดังแสดงในรูปที่ 11 และค่าพารามิเตอร์การบดอัดที่อ่านได้จากเส้นกราฟการบดอัด ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าทั้งการใช้วิธีประมาณค่าใช้ช่วงกำลังสามและการปรับเส้นโค้งด้วยสมการโพลิโนเมียล ให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) เท่ากัน แต่ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยซึ่งไม่ส่งผลต่อการนำไปใช้งานในการบดอัดดินในภาคสนาม

ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์การบดอัดจากการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

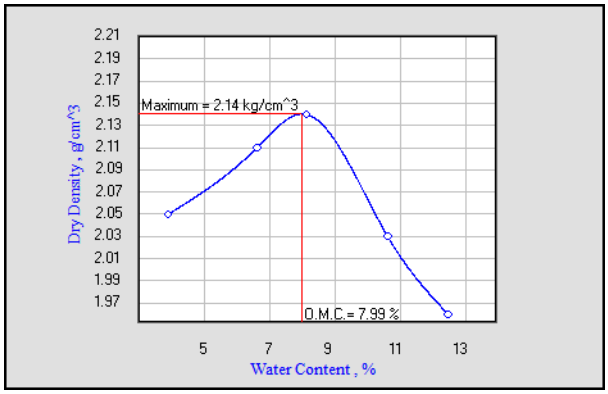
ชุดข้อมูล	วิธีประมาณค่าในช่วงเส้นโค้งกำลังสาม		วิธีปรับเส้นโค้งด้วยสมการโพลิโนเมียล	
	OMC (%)	MDD (g/cm^3)	OMC (%)	MDD (g/cm^3)
จำนวนข้อมูล 4 จุด	5.86	2.23	5.64	2.23
จำนวนข้อมูล 5 จุด	7.99	2.14	7.96	2.14
จำนวนข้อมูล 6 จุด	5.24	2.17	5.27	2.17



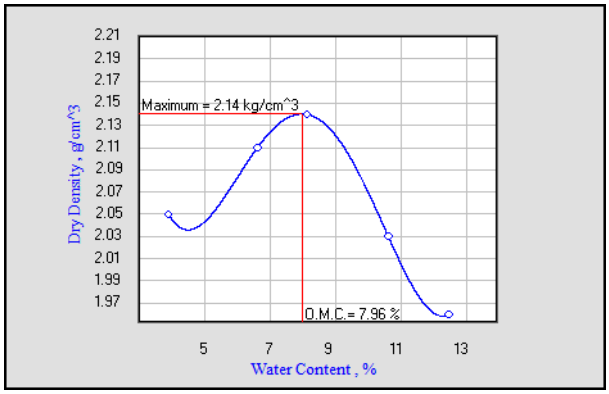
(ก) วิธีประมาณค่าในช่วงเส้นโค้งกำลังสาม (4 จุด)



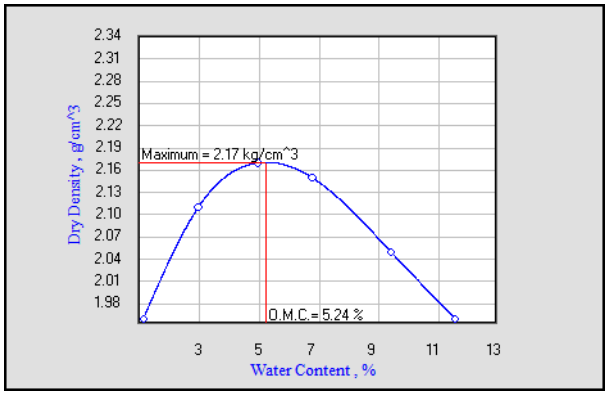
(ข) วิธีปรับเส้นโค้งด้วยสมการโพลิโนเมียล (4 จุด)



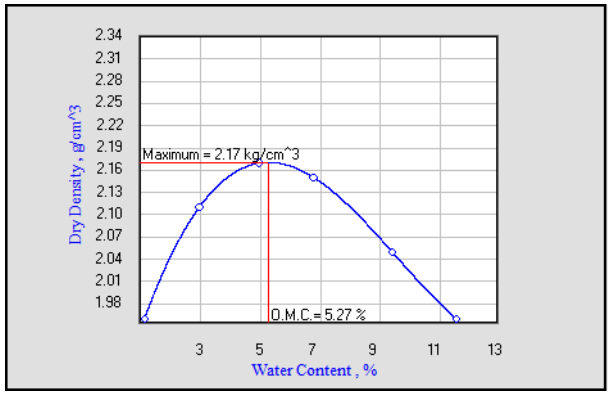
(ค) วิธีประมาณค่าในช่วงเส้นโค้งกำลังสาม (5 จุด)



(ง) วิธีปรับเส้นโค้งด้วยสมการโพลิโนเมียล (5 จุด)



(จ) วิธีประมาณค่าในช่วงเส้นโค้งกำลังสาม (6 จุด)



(ฉ) วิธีปรับเส้นโค้งด้วยสมการโพลิโนเมียล (6 จุด)

รูปที่ 11 การเขียนเส้นกราฟการบดอัดดิน

6. สรุปผล

6.1 โปรแกรม SoilLabPro ที่พัฒนาขึ้นสามารถแปรผลและรายงานผลการทดสอบการบดอัดดินได้ถูกต้องและรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับการแปรผลการทดสอบด้วยมือและการใช้โปรแกรมไมโครซอฟเอ็กเซล ซึ่งสามารถลดความผิดพลาดเนื่องจากคน (Human Error) ได้เป็นอย่างดี อีกทั้งสามารถใช้เป็นโปรแกรมต้นแบบสำหรับการพัฒนาขีดความสามารถได้ในอนาคต และสอดคล้องกับการขับเคลื่อนนโยบายไทยแลนด์ 4.0

6.2 การแปรผลการทดสอบโดยใช้ชุดข้อมูลที่มีจำนวนข้อมูล 4 จุด 5 จุด และ 6 จุด แสดงให้เห็นว่าการใช้ระเบียบวิธีประมาณค่าในช่วงเส้นโค้งกำลังสาม การปรับเส้นโค้งด้วยสมการโพลิโนเมียลอันดับสามและอันดับสี่สามารถใช้ในการเขียนเส้นกราฟการบดอัดได้ดี และให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเท่ากันทั้งสองระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยระเบียบวิธีประมาณค่าในช่วงเส้นโค้งกำลังสามเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากการใช้ปรับเส้นโค้งด้วยสมการโพลิโนเมียลสำหรับบางชุดข้อมูลทำให้เกิดพฤติกรรมการแกว่งตัวของเส้นกราฟ ดังเช่นชุดข้อมูลที่มีจำนวน 5 จุด ดังรูปที่ 11(ง)

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยงบประมาณเงินรายได้ ประจำปี 2559 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชรัตนโกสินทร์ ผู้วิจัยขอขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

8. บรรณานุกรม

[1] ชูศักดิ์ คีรีรัตน์, 2559, เอกสารคำสอนวิชาวิธีทางคอมพิวเตอร์สำหรับวิศวกรโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราช-มงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล.

[2] สรกานต์ ศรีตองอ่อน, 2546, วิชวลเบสิกในงานวิศวกรรมโยธา, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

[3] ASTM D1157, 2012, “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft^3 (2,700 kN-m/m^3)),” Annual Books of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, Sec. 4, Vol 04.08.

[4] El-Garhy, B., Ragab, T., Asal, F., 2013, “A Computer Aided Learning Package for Teaching Geotechnical Engineering,” Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 18, 1437-1448.

[5] Ozcep, F., 2010, “Soil Engineering: A Microsoft Excels spreadsheet& program for geotechnical and geophysical analysis of soils,” Computers & Geosciences, 36, 1355-1361.

[6] Reddy, E.S.B., 1993, A Computer Package for a Geotechnical Engineering Laboratory, Computers in Industry, 21(3), 285-293.

[7] www.geosystemsoftware.com

[8] www.ggu-software.com