

พฤติกรรมทางกลของผนังดินซีเมนต์บดอัดภายใต้แรงกดอัดสำหรับบ้านดิน
Mechanical Behavior of Cement Stabilized Rammed Earth (CSRE) Wall
Under Axial load for earth building

สำเนียง อองสุพันธ์กุล^{1*}, วราธร แก้วแสง², สาโรจน์ ดำรงศิลป์¹

¹มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ พื้นที่ศาลายา 96 หมู่ 3 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170

²มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ 19/1 ถนนเพชรเกษม แขวงหนองค้างพลู เขตหนองแขม กรุงเทพมหานคร 10160

*E-mail Address: Sumnieng@rmutr.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมทางกลของผนังดินซีเมนต์บดอัดที่มีการเสริมเหล็กภายใต้แรงกดอัด โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบผนังดินซีเมนต์บดอัดที่แปรผันค่าความชะลูด โดยในการศึกษาใช้ดินลูกรังผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อัตราส่วนผสมซีเมนต์ต่อดินลูกรังที่ 1:7 โดยน้ำหนักดินแห้ง แล้วทำการทดสอบหาค่าการบดอัดดินแบบมาตรฐานในกรณีที่เหมาะสมและไม่ผสมปูนซีเมนต์ เพื่อหาค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) และค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) โดยการขึ้นรูปตัวอย่างการทดสอบ ตัวอย่างขนาด 400 x 400 x 200 มิลลิเมตร โดยบดอัดดินซีเมนต์ให้ได้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดไม่ต่ำกว่าร้อยละ 95 ของ MDD ตัดตัวอย่างด้วยเลื่อยให้มีขนาดเท่ากับ 200 x 200 x 400 มิลลิเมตร เพื่อนำตัวอย่างไปทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติกำลังรับแรงอัดแบบปริซึม (Compressive strength of CSRE Prisms) และขึ้นรูปผนังดินซีเมนต์บดอัดที่ผสมปูนซีเมนต์โดยกำหนดความหนาของผนังดินซีเมนต์บดอัดเท่ากับ 125 มิลลิเมตร และความกว้างเท่ากับ 1000 มิลลิเมตร โดยมีอัตราส่วนความชะลูดของผนัง (h/t) เท่ากับ 6, 8, 10 และ 14 ตามลำดับ และผนังมีการเสริมเหล็กเส้นกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร จำนวน 5 เส้น บดอัดดินซีเมนต์ให้ได้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดไม่ต่ำกว่าร้อยละ 95 ของ MDD เช่นเดียวกัน เมื่อครบอายุการบ่มที่ 28 วัน แล้วทำการทดสอบแรงกดอัด มีลักษณะเป็นแรงกระทำแบบจุด (One-point loading)

จากผลการศึกษา พบว่า การทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินลูกรังที่ผสมและไม่ผสมปูนซีเมนต์ให้ค่า OMC ที่ร้อยละ 9.16 และ 10.92 ที่ MDD เท่ากับ 1.984 และ 1.926 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบปริซึม ให้กำลังรับแรงอัดของดินลูกรังที่ผสมและไม่ผสมซีเมนต์ให้ค่าเท่ากับ 48.35 และ 12.74 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ค่าการรับแรงกดอัดของผนังดินซีเมนต์บดอัด พบว่า h/t ของผนังที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าแรงกดอัดในแนวแกนที่ผนังดินซีเมนต์บดอัดจะรับได้มีแนวโน้มลดลง โดยที่ h/t เท่ากับ 6, 8, 10 และ 14 ให้ค่าแรงกดอัดสูงสุดที่ 11,512.80, 40,599.49, 39,301.14 และ 35,406.09 กิโลกรัม ตามลำดับ

คำสำคัญ: พฤติกรรมทางกล, ดินซีเมนต์, ผนังดินซีเมนต์บดอัด, แรงกดอัด, บ้านดิน

Abstract

This paper aims to investigate the mechanical behavior under axial load of cement Stabilized Rammed Earth (CSRE) wall with steel reinforcement varied slenderness wall. Lateritic was used for the study by being mixed with Portland cement, type 1 at the ratio of cement to lateritic soil of 1:7 by weight of dried lateritic soil. Standard compaction test was carried out either with or without cement in order to find Optimum Moisture

Content (OMC) and Maximum Dry Density (MDD). Test specimens were the OMC to mix lateritic soil with and without cement with dimension of 400 x 400 x 200 mm compacted 95% of MDD. Compressive strength of CSRE Prisms was tested by cut specimens 400 x 400 x 200 mm. The flexural and compressive strength test was conducted by rammed earth mixed cement wall at 125 mm. thick and 1000 mm. wide, slenderness ratio (h/t) at 8, 10 and 12, respectively, which was steel reinforcement with 5-RB9 mm. Soil compaction was controlled for not less than 95% of MDD of standard compaction in both cases. After 28 days of incubation, the samples were tested with axial load by one-point loading.

The standard compaction test result shows that lateritic soil with and without cement have the OMC at 9.16 and 10.92 % and the MDD values of 1.984 and 1.926 g/cm³ respectively. The compressive strength of CSRE Prisms results of soil-cement rendered with and without cement were 48.35 and 12.74 kg/cm² respectively. The maximum axial load of soil-cement rendered wall was 11,512.80, 40,599.49, 39,301.14 and 35,406.09 kg at the h/t of 6, 8, 10 and 14 respectively with the axial load being inversely proportional to the h/t.

Keywords: Mechanical Behavior, Cement Stabilized, Cement Stabilized Rammed Earth (CSRE) Wall, Axial load, Earth Building

1. ที่มาและความสำคัญ

บ้านดิน (Earth building) หมายถึง บ้านหรือสิ่งปลูกสร้างทั้งหลายที่สร้างขึ้นมาจากดินและวัสดุธรรมชาติที่ทำได้ตามชุมชน กำลังเป็นที่สนใจและเป็นกระแสทางเลือกที่เกิดขึ้นจากการสำนึกในธรรมชาติ และที่คิดจะอยู่ร่วมกับธรรมชาติ โดยเทคนิคการทำบ้านดินนั้น จะใช้วัสดุจากดินนำมาบดอัด (Rammed earth) ขึ้นรูปเป็นผนังรับแรง สำหรับในต่างประเทศได้มีการทำบ้านดินกันมานานแล้ว และพัฒนาจนมีมาตรฐานรองรับ มีแข็งแรงคงทนถาวร ส่วนในประเทศไทยยังจำกัดอยู่ในวงแคบของคนบางกลุ่มโดยเฉพาะในต่างจังหวัด ซึ่งอาศัยประสบการณ์และภูมิปัญญาท้องถิ่นที่ได้ถ่ายทอดกันมา วราธร และ จิรัฐดี (2551) ได้กล่าวไว้ว่า “การสร้างบ้านดินยังคงไม่สามารถขับเคลื่อนได้มากนัก ถ้าหากภาครัฐเองยังไม่ให้ความสำคัญของการสร้างบ้านดินเพื่อเป็นการลดทรัพยากรธรรมชาติและอีกประเด็นหนึ่งคือการใช้ดินเป็นวัสดุก็ยังไม่เห็นหน่วยงานไหนที่มากำกับดูแลเพื่อที่จะกำหนดออกมาเป็นมาตรฐานทางด้านวิศวกรรมเหมือนเช่นวัสดุอื่นๆ” สาเหตุสำคัญคือ ดิน ถือเป็นวัสดุสิ่งก่อสร้างที่ยังไม่เป็นที่ยอมรับจากกฎหมาย ยังไม่มีการตรวจสอบทางวิศวกรรมต่างๆอย่างเป็นทางการ จะเห็นได้ว่าส่วนประกอบของบ้านดินที่เรียกว่าผนังซึ่งสร้างจากวัสดุตามธรรมชาติยังไม่สามารถทำให้ผู้ใช้หรือหน่วยงานของรัฐที่เกี่ยวข้องยอมรับได้ ขาดการศึกษา การปรับปรุงในเรื่องของส่วนผสมของดินที่เหมาะสมกับประเทศไทย เพื่อให้ได้วัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งาน นอกจากการสร้างบ้านดินที่ขาดการควบคุมคุณภาพ ไม่มีมาตรฐานถูกต้องตามหลักวิศวกรรม จะมีความเสี่ยงต่อความเสียหาย โดยเฉพาะหากอาคารเหล่านี้ตั้งอยู่ในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหวจะมีความเสี่ยงต่อการวิบัติได้

ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงเป็นที่มาของคณะผู้วิจัยต้องทำการศึกษาพฤติกรรมของผนังบ้านดินบดอัดซึ่งเป็นวัสดุหลักที่ใช้ในการก่อสร้างบ้านดิน เพื่อใช้เป็นข้อมูลและเป็นแนวทางในการพัฒนางานการก่อสร้างบ้านดินให้มีมาตรฐานทางวิศวกรรมในอนาคต ในการวิจัยครั้งนี้จะทำการปรับปรุงดินลูกรังโดยใช้ปูนซีเมนต์และเสริมเหล็กเส้นกลมในแนวตั้งแล้วทำการบดอัดเป็นผนังดิน โดยจะทำการศึกษาพฤติกรรมทางกลภายใต้แรงกดอัดเพื่อสร้างความรู้ความเข้าใจ พฤติกรรมและลักษณะของการวิบัติ และนำไปสู่การวิเคราะห์และออกแบบผนังดินบดอัดเพื่อการก่อสร้างบ้านดินให้มีความมั่นคงแข็งแรงต่อไปในอนาคต

2.วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดอัดที่กระทำกับผนังดินซีเมนต์บดอัด และศึกษาเปรียบเทียบผลการทดสอบผนังดินซีเมนต์บดอัดที่แปรผันค่าความชื้นและมีการเสริมเหล็กภายใต้แรงกดอัด

3.ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1. คำจำกัดความของดินลูกรัง

ลักษณะทั่วไปของดินลูกรังเป็นดินที่เกิดในแถบที่มีความร้อนชื้น เช่น ทางตอนใต้ของประเทศอินเดีย หมู่เกาะอินเดีย ตะวันออก ตอนกลางของแอฟริกา และตอนเหนือของอเมริกาใต้ เนื่องจากภูมิอากาศแถบร้อนและกึ่งร้อนชื้นมีผลทำให้เกิดกระบวนการกำเนิดดินลูกรัง ที่เรียกว่า การเกิดกระบวนการ Laterization อันเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดดินลูกรังสภาพอากาศเช่นนี้ ทำให้เกิดการสลายตัวทางเคมีเพิ่มขึ้นอันเป็นผลให้หินแตกตัว โดยกระบวนการกัดเซาะทางเคมีนี้จะเกิดการชะล้างและพัดพาเอาซิลิกา (Silica) ออกจากดินเดิม และในขณะเดียวกันก็มีการสะสมของเซสควิวออกไซด์ (Sesquioxide, Fe_2O_3 and Al_2O_3) ในดินเดิมทำให้เกิดเป็นก้อนแข็ง ซึ่งผลของกระบวนการดังกล่าวจะทำให้เกิดดินที่มีปริมาณเหล็กออกไซด์ และอลูมิเนียมออกไซด์สูงกว่าปกติ

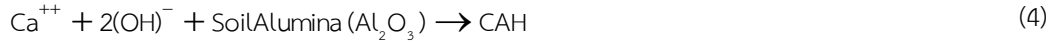
Buchanan (1807) ได้ให้คำจำกัดความตามคุณสมบัติการแข็งตัว และเป็นผู้ริเริ่มใช้คำว่า laterite เรียกดินที่พบในมาลาบาร์ ประเทศอินเดีย ซึ่งหมายถึง ดินที่มีสีเหลืองอ่อนเนื่องจากมีเหล็กผสมอยู่ในปริมาณสูง มีความพรุน ไม่แบ่งชั้น มีความอ่อนตัวพอที่จะตัดเป็นแผ่นขนาดเท่าอิฐได้ และเมื่อขุดพบจะแข็งตัวอย่างรวดเร็วเมื่อตั้งทิ้งไว้ในอากาศ ดังนั้นจึงนิยมมาทำเป็นอิฐ เพื่อใช้ในงานก่อสร้าง ส่วน Mallet (1883) ได้ให้คำจำกัดความทางเคมี โดยเป็นผู้ริเริ่มให้ความหมายดินลูกรัง (Lateritic Soils) หมายถึง ดินที่ตามธรรมชาติจะมีสีแดงเนื่องจากมีออกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียมเป็นส่วนผสม และ Lacroix (1913) ได้จำแนกชนิดของลูกรังตามปริมาณของออกไซด์ที่เป็นส่วนประกอบ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 : จำแนกชนิดของลูกรังตามปริมาณของออกไซด์

ชนิดของลูกรัง	ปริมาณออกไซด์ของเหล็ก (ร้อยละ)
True laterite	90
Silicate laterite	50-90
Laterite Clay	10-50

3.2. กลไกปฏิกิริยาเคมีระหว่างดินและปูนซีเมนต์

Moh (1965) ได้อธิบายกลไกปฏิกิริยาเคมีระหว่างดินและปูนซีเมนต์ โดยเกิดปฏิกิริยา Cement Hydration เป็นหลัก ซึ่งปฏิกิริยา Cement Hydration ที่เกิดขึ้นใน Soil-Cement ก็คล้ายๆ กับปฏิกิริยา Cement Hydration ในคอนกรีต กล่าวคือ เมื่ออนุภาคปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำ ซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำเรียกว่า Cement Hydration ผลของปฏิกิริยาดังกล่าวจะก่อให้เกิดสารที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน (Reaction Products) คือ Calcium Silicate Hydrate (CSH), Calcium Aluminate Hydrate (CAH) และ Lime (Calcium Hydroxide, $Ca(OH)_2$) สาร CSH และ CAH จะมีคุณสมบัติเป็นตัวเกาะยึด โดยสามารถเกาะยึดมวลเม็ดดินเข้าด้วยกันทำให้รวมตัวกันเป็นมวลดินขนาดใหญ่ที่มีความแข็งแรงสูง $Ca(OH)_2$ ที่เกิดจะทำปฏิกิริยากับ Soil Silica และ Soil Alumina ในดินต่อไปอีก ทำให้เกิดสาร CSH และ CAH เพิ่มเติมจากปฏิกิริยาที่เกิดจากปูนซีเมนต์โดยตรง ปฏิกิริยา Cement Hydration สามารถจะเขียนออกมาในรูปของสมการได้ดังต่อไปนี้



โดยที่สมการที่ (1) เป็นสมการที่แสดงว่า CSH และ CAH เกิดจาก Cement Hydration โดยตรง ดังนั้น CSH และ CAH ที่เกิดจาก Cement Hydration โดยตรงนี้จะเรียกว่า Primary Reaction

ส่วนสมการที่ (2) และ (3) เป็นสมการที่แสดงว่า CSH และ CAH เกิดจากปฏิกิริยาต่อเนื่องระหว่าง Ca(OH)_2 ที่เหลือจากสมการที่ (1) มีปริมาณร้อยละ 25 กับ Silica และ Alumina ในดิน ดังนั้นจึงเรียกปฏิกิริยาดังกล่าวว่า Secondary Reaction

3.3. ผนังดินซีเมนต์บดอัด (Cement Stabilized Rammed Earth (CSRE) wall)

ผนังดินซีเมนต์บดอัด หมายความว่า การนำดินลูกรังมาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป โดยผสมน้ำที่ปริมาณน้ำที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดสอบความหนาแน่นของดินแบบมาตรฐานหรือสูงกว่ามาตรฐาน แล้วนำส่วนผสมดังกล่าวมาบดอัดลงในแบบหล่อผนังที่ได้เตรียมไว้ โดยการควบคุมความหนาแน่นของดินในแต่ละชั้นที่บดอัดไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของค่าความหนาแน่นสูงสุดที่ได้จากการทดสอบความหนาแน่นของดินแบบมาตรฐานหรือสูงกว่ามาตรฐาน เพื่อเป็นการตรวจสอบความหนาแน่นของผนังดินซีเมนต์บดอัดให้มีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน Pignal (2005) กล่าวว่าดินบดอัดเป็นเทคนิคการก่อสร้างที่ทำได้ง่ายมากโดยจะขึ้นอยู่กับแบบหล่อและการบดอัดดินเพื่อให้ดินเป็นเนื้อเดียวกัน ในปัจจุบันเป็นที่นิยมในประเทศออสเตรเลีย ประเทศสหรัฐอเมริกาและส่วนอื่นๆ ของโลก เพราะดินบดอัดได้รับการยอมรับเป็นวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืน Easton (2007) ส่วนแถบยุโรปมีการใช้ดินบดอัดอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศฝรั่งเศส Venkatarama et.al.(2009) ดินบดอัดสามารถประยุกต์ใช้งานเป็นผนังที่รับน้ำหนักและไม่รับน้ำหนักก็ได้ โดยผนังดังกล่าวมีส่วนประกอบด้วย ดิน หยาบ หรือกรวด ทั้งที่ปรับปรุงคุณภาพหรือไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ก็ได้ แล้วบดอัดให้มีความแน่นในแบบหล่อที่เตรียมไว้ ซึ่งการปรับปรุงคุณภาพดินใช้สารผสมเพิ่มเช่น ปูนซีเมนต์ เพื่อทำให้ดินมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น และคุณสมบัติทางกลของดินบดอัดขึ้นอยู่กับปัจจัยของปริมาณปูนซีเมนต์ การบดอัด ความหนาแน่น และปริมาณความชื้นที่บดอัด ตามลำดับ

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1. วิธีการเตรียมวัสดุอุปกรณ์

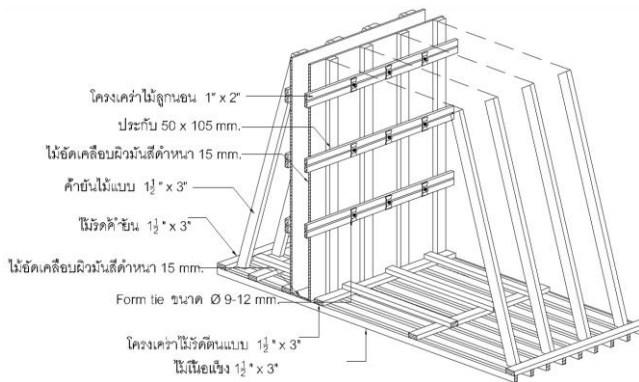
4.1.1. ดินลูกรัง ใช้ตัวอย่างดินลูกรังจากจังหวัดราชบุรี โดยทำตัวอย่างให้แห้งด้วยการนำมาตากแห้ง (Sun dried) แล้วร่อนผ่านตะแกรงที่มีช่องเปิดขนาด 4 มิลลิเมตร ตัวอย่างที่ได้นำมาบรรจุใส่ถุงพลาสติกเพื่อรักษาปริมาณความชื้นให้คงที่ไม่เกินร้อยละ 5

4.1.2. ปูนซีเมนต์ (Cement) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป

4.1.3. น้ำ ใช้ในการทดลองเป็นน้ำประปาที่มีความสะอาด

4.1.4. เหล็กเสริม ใช้เหล็กเสริมเส้นกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 9 มิลลิเมตร โดยมีชั้นคุณภาพ SR24

4.1.5. การเตรียมแบบหล่อไม้ สำหรับผนังดินซีเมนต์บดอัด โดยกำหนดอัตราส่วนความขรุขระของผนัง (h/t) เท่ากับ 6, 8, 10 และ 14 จะต้องเตรียมแบบหล่อผนังที่มีความสูงเท่ากับ 75, 100, 125 และ 175 เซนติเมตร ตามลำดับ ที่ความหนา 125 มิลลิเมตร และความกว้างเท่ากับ 1000 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 : การเตรียมแบบหล่อไม้สำหรับผนังดินซีเมนต์บดอัด

4.2. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดินลูกรัง

4.2.1. การหาขนาดคละของดิน (Particle-size analysis of soils) ระบุตามมาตรฐาน ASTM D2487 และ ASTM D422

4.2.2. การหาขีดจำกัดแอดเตอร์เบอร์ก (Atterberg' Limit) ได้แก่ ขีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit, LL) ขีดจำกัดความเหนียว (Plastic Limit, PL) และดัชนีความเหนียว (Plasticity Index, PI) ระบุตามมาตรฐาน ASTM D 4318

4.2.3. การหาค่าความถ่วงจำเพาะของดิน (Specific gravity of soil) ระบุตามมาตรฐาน ASTM D 584

4.2.4. ทดสอบการความหนาแน่นของดินแบบมาตรฐาน (Standard compaction test) ระบุตามมาตรฐาน ASTM D 698-07

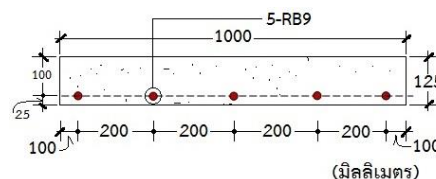
4.3. การทดสอบดินลูกรังที่ผสมปูนซีเมนต์ โดยทำการทดสอบความหนาแน่นแบบมาตรฐาน (Standard compaction test) ระบุตามมาตรฐาน ASTM D 698-07 เพื่อหาความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, MDD) และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) ที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:7 โดยน้ำหนักดินแห้ง

4.4. การทดสอบหาค่ารับแรงอัดแบบปริซึม (Compressive strength of CSRE Prisms) เป็นการทดสอบคุณสมบัติของก้อนตัวอย่างดินซีเมนต์บดอัด โดยนำผลปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) มาผสมกับดินลูกรังและปูนซีเมนต์ เพื่อขึ้นรูปตัวอย่างทดสอบเป็นแบบหล่อขนาดเท่ากับ 400 x 400 x 200 มิลลิเมตร โดยบดอัดดินซีเมนต์ให้ได้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดไม่ต่ำกว่าร้อยละ 95 ของ MDD เป็นชั้นจำนวน 4 ชั้นเท่าๆ กัน แล้วตัดตัวอย่างด้วยเลื่อยให้มีขนาดเท่ากับ 200 x 200 x 400 มิลลิเมตร

4.5. การทดสอบภายใต้แรงกดอัดของผนังดินซีเมนต์บดอัด ที่แปรผันค่าความชะลูดและมีการเสริมเหล็ก

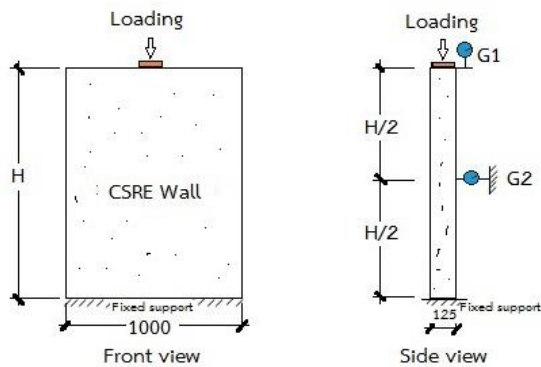
4.5.1. เตรียมตัวอย่างเป็นผนัง โดยบดอัดดินซีเมนต์เป็นชั้นๆ ละ 100 มิลลิเมตร ให้ได้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดไม่ต่ำกว่าร้อยละ 95 ของ MDD ซึ่งกำหนดให้ผนังมีความหนาเท่ากับ 125 มิลลิเมตร ความสูงที่ 75, 100, 125 และ 175 เซนติเมตร เพื่อให้ได้อัตราส่วนความชะลูดของผนังเท่ากับ 6, 8, 10, และ 14 ตามลำดับ พิจารณาความกว้างของผนังเท่ากับ 1000 มิลลิเมตร

4.5.2. การเสริมเหล็กในผนัง โดยกำหนดให้ใช้เหล็กเสริมเส้นกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร (ที่มีชั้นคุณภาพ SR24) จำนวน 5 เส้น เสริมในแนวตั้งโดยระบุให้มีระยะห่างและตำแหน่งการวาง ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 : รูปแบบการเสริมเหล็กในผนังดินซีเมนต์บดอัด

4.5.3. การกำหนดการทดสอบแรงกดอัด มีลักษณะเป็นแรงกระทำแบบจุด (One-point loading) โดยทดสอบกับตัวอย่างผนังที่บ่มด้วยความชื้นในอุณหภูมิปกติ หลังจากที่ย้าย 28 วัน กำหนดให้มีจุดรองรับด้านล่างของผนัง (Restraint bottom) ตลอดความยาว 100 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3



G1 วัสดุการหัดตัวในแนวตั้ง
G2 วัสดุการโคงตัวทางด้านข้าง



รูปที่ 3 : รูปแบบการทดสอบแรงกดอัดของผนัง

5. ผลและวิจารณ์

5.1. ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดินลูกรัง (กรณีก่อนการคัดขนาดผ่านตะแกรง)

จากตารางที่ 2 แสดงผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดินลูกรัง พบว่า ตัวอย่างดินลูกรังให้ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.72 และมีส่วนประกอบหลักเป็นทรายถึงร้อยละ 45.82 ค่าขีดจำกัดความเหลวร้อยละ 20.75 ขีดจำกัดความเหนียวร้อยละ 8.78 และค่าดัชนีความเหนียวร้อยละ 11.97 ซึ่งสามารถจำแนกชนิดของดินตามระบบเอกภาพ (Unified soil classification) พบว่าเป็นกลุ่ม SP-SC ชื่อ Poorly graded SAND with clay and gravel

5.2. ผลการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังที่ผสมและไม่ผสมปูนซีเมนต์

5.2.1. ผลการทดสอบความหนาแน่นของดินลูกรังแบบมาตรฐาน พบว่า ดินลูกรังที่ไม่ผสมปูนซีเมนต์ให้ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) ที่ร้อยละ 10.92 ที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) เท่ากับ 1.926 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนดินลูกรังที่ผสมปูนซีเมนต์ พบว่า ให้ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) ที่ร้อยละ 9.16 ที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) เท่ากับ 1.984 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

5.2.2. ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบปริซึม (Compressive strength of CSRE Prisms) พบว่า กำลังรับแรงอัดของดินลูกรังที่ผสมและไม่ผสมซีเมนต์มีค่าเท่ากับ 48.35 และ 12.74 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งพบว่า การที่ดินลูกรังผสมซีเมนต์สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดสูงกว่าดินลูกรังที่ไม่ได้ผสมซีเมนต์ถึงประมาณ 3.79 เท่า อันเนื่องมาจาก Calcium Hydroxide, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่เกิดจากปฏิกิริยาจะมีคุณสมบัติเป็นตัวเกาะยึดเม็ดดินเข้าด้วยกันทำให้รวมตัวกันเป็นมวลดินขนาดใหญ่ที่มีความแข็งแรงสูง และหลังจากนั้นจะทำปฏิกิริยากับ Soil Silica และ Soil Alumina ในดินอีก ทำให้เกิดสาร CSH และ CAH เพิ่มเติมจากปฏิกิริยาที่เกิดจากปูนซีเมนต์โดยตรง ตามการศึกษาของ Moh (1965)



ตารางที่ 2 : ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดินลูกรัง

คุณสมบัติทั่วไป	ผลการทดสอบ
Texture Composition:	
Gravel; > 4.75 mm. (%)	42.33
Coarse Sand; 4.75-0.425 mm. (%)	34.24
Fine Sand; 0.425-0.075 mm. (%)	11.58
Silt and Clay; ≤ 0.075 mm. (%)	11.85
Physical Properties:	
Liquid Limit (%)	20.75
Plastic Limit (%)	8.78
Plasticity Index (%)	11.97
Specific Gravity	2.72
คุณสมบัติทั่วไป	ผลการทดสอบ
Classification System:	
Unified Soil Classification	SP-SC (Poorly graded SAND with clay and gravel)

5.3. ผลการทดสอบพฤติกรรมทางกลของผนังดินซีเมนต์บดอัดภายใต้แรงกดอัด

5.3.1. อิทธิพลของอัตราส่วนความละเอียดของผนัง (h/t) ที่มีผลต่อค่าการรับแรงกดอัดของผนังดินซีเมนต์บดอัด

จากการทดสอบการรับแรงกดอัดของผนังดินซีเมนต์บดอัดที่อัตราส่วนความละเอียดของผนังเท่ากับ 6, 8, 10, และ 14 ตามลำดับ สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความละเอียดของผนังกับแรงกดอัดของผนังดินซีเมนต์บดอัด (ดังแสดงในรูปที่ 4) และ พบว่า อัตราส่วนความละเอียดของผนังที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าแรงกดอัดในแนวแกนที่ผนังดินซีเมนต์บดอัดจะรับได้มีแนวโน้มลดลง โดยที่อัตราส่วนความละเอียดของผนัง 6, 8, 10 และ 14 ให้ค่าแรงกดอัดสูงสุดที่ 11,512.80, 40,599.49, 39,301.14 และ 35,406.09 กิโลกรัม ตามลำดับ ยกเว้นในกรณีของอัตราส่วนความละเอียดเท่ากับ 6 ที่ให้ค่าแรงกดอัดต่ำกว่าอัตราส่วนความละเอียดอื่น เนื่องมาจากในขณะที่ทำการทดสอบพบว่าที่ด้านล่างของผนังดินซีเมนต์บดอัดเกิดเป็นโพรง และเนื้อดินที่ผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งเกิดจากกระบวนการบดอัดตั้งแต่ต้น เมื่อผนังรับแรงกดอัดจึงทำให้เกิดรอยร้าวที่ตำแหน่งดังกล่าว (ดังแสดงในรูปที่ 5) ดังนั้น จากรูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความละเอียดของผนังที่ 8, 10 และ 14 เท่านั้น กับแรงกดอัดของผนังดินซีเมนต์บดอัด ซึ่งใช้วิธีสมการเส้นถดถอยแบบเส้นตรง (Linear regression analysis) มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ดังกล่าว จะได้ผลดังสมการที่ (5)

$$\text{Load} = - 3873.6(h/t) + 58708$$

$$R^2 = 0.9748 > 0.80 \text{ แสดงว่า มีความสัมพันธ์กันดีมาก (Draper and Smith, 1966)}$$

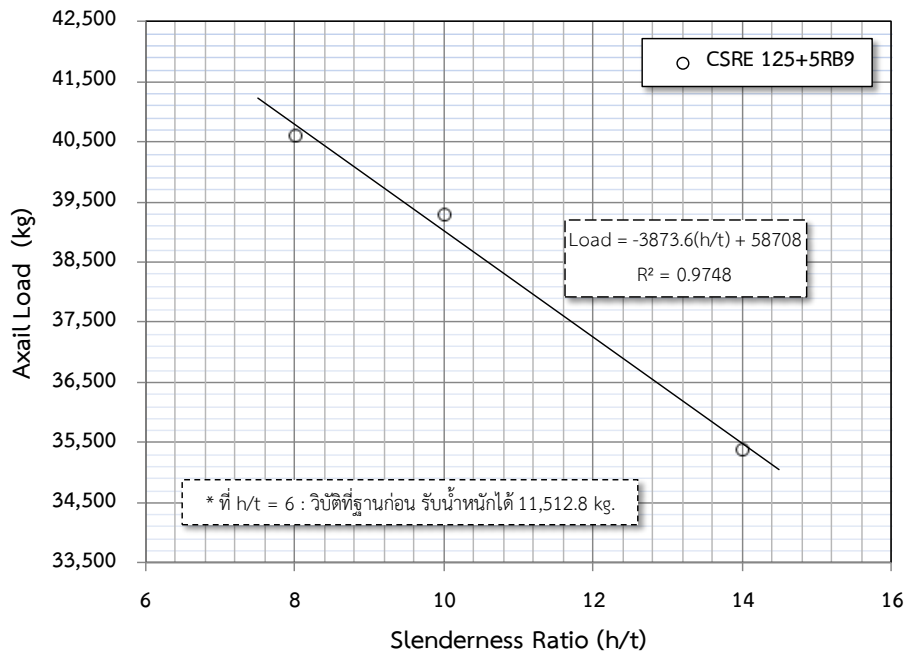
โดยที่ Load คือ แรงกดอัดในแนวแกน (มีหน่วยเป็น กิโลกรัม)

h คือ ความสูงของผนังดินซีเมนต์บดอัด (มีหน่วยเป็น เซนติเมตร)

t คือ ความหนาของผนังดินซีเมนต์บดอัด (มีหน่วยเป็น เซนติเมตร)

และพิจารณา h/t ที่ช่วงอยู่ระหว่าง 8-14 เท่านั้น

(5)



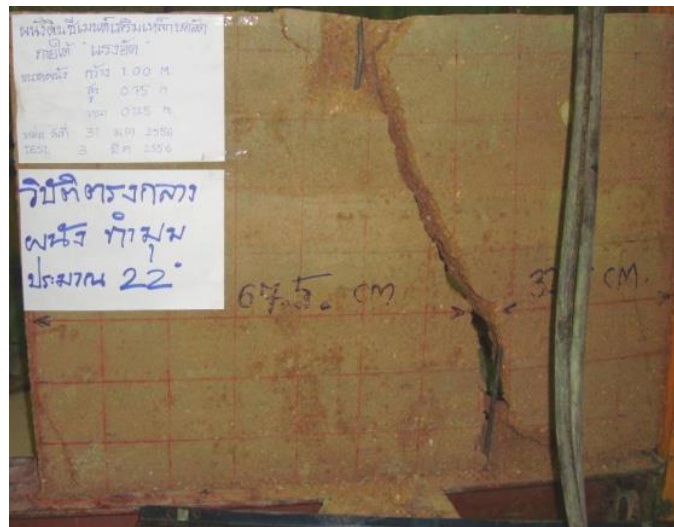
รูปที่ 4 : ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความชะลูดของผนังกับแรงกดอัด



รูปที่ 5 : ด้านล่างของผนังดินซีเมนต์บดอัดเกิดเป็นโพรง

5.3.2. รูปแบบการวิบัติของผนังดินซีเมนต์บดอัดภายใต้แรงกดอัด

จากรูปที่ 6 แสดงตัวอย่างลักษณะรูปแบบของการวิบัติของผนังดินซีเมนต์บดอัดที่รับแรงภายใต้แรงกดอัดพบว่า ลักษณะรูปแบบของการวิบัติแบบกำลังรับแรงเฉือน (Shear strength) เป็นแนวเฉียง ทำมุมกับแนวดิ่งประมาณ 22 องศา และแนววิบัติจะเกิดตั้งแต่จุดที่รับน้ำหนักกระทำจนถึงขอบล่างของผนัง ซึ่งลักษณะของการวิบัติดังกล่าวเป็นการวิบัติของวัสดุที่แข็งแรงเปราะ เช่น คอนกรีต ดินซีเมนต์ เป็นต้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ ปรีดา และ อนุสรณ์ (2544) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของปูนรอกต่อพฤติกรรมของการรับน้ำหนักบรรทุกทุกเป็นจุดของกำแพงคอนกรีตบล็อกไม่เสริมเหล็ก ได้กล่าวว่าพื้นที่ที่เกิดจากการกระจายน้ำหนักกระทำเป็นจุดผ่านแผ่นเหล็กถ่ายแรงเป็นมุมประมาณ 20-30 องศา เทียบกับแนวดิ่ง



รูปที่ 6 : ลักษณะรูปแบบของการวิบัติของผนังดินซีเมนต์บดอัดด้านหน้า ตัวอย่างขนาด 12.5x75x100 เซนติเมตร

6. สรุปผล

6.1. ผลการทดสอบพฤติกรรมทางกลของผนังดินซีเมนต์บดอัดภายใต้แรงกดอัด

6.1.1. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดอัดกับระยะการหดตัวในแนวแกน พบว่า ผนังดินซีเมนต์บดอัดให้ค่าแรงกดอัดสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนความละเอียดของผนัง (h/t) ที่ลดลง โดยเกิดระยะการหดตัวในแนวแกนที่จุดวิบัติมีค่าตั้งแต่ 14.61 ถึง 28.57 มิลลิเมตร

6.1.2. อิทธิพลของอัตราส่วนความละเอียดของผนัง (h/t) ที่มีผลต่อค่าการรับแรงกดอัดของผนังดินซีเมนต์บดอัด พบว่า อัตราส่วนความละเอียดของผนังที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าแรงกดอัดในแนวแกนที่ผนังดินซีเมนต์บดอัดจะรับได้มีแนวโน้มลดลง โดยที่อัตราส่วนความละเอียดของผนัง 6, 8, 10 และ 14 ให้ค่าแรงกดอัดสูงสุดที่ 11,512.80, 40,599.49, 39,301.14 และ 35,406.09 กิโลกรัม ตามลำดับ ยกเว้นในกรณีของอัตราส่วนความละเอียดเท่ากับ 6 ที่ให้ค่าแรงกดอัดต่ำกว่าอัตราส่วนความละเอียดอื่น โดยได้ความสัมพันธ์ดังสมการ $Load = -3873.6(h/t) + 58708$; (h/t = 8, 10, 14)

6.2 รูปแบบการวิบัติของผนังดินซีเมนต์บดอัดภายใต้แรงกดอัด

ลักษณะรูปแบบของการวิบัติแบบกำลังรับแรงเฉือน (Shear strength) เป็นแนวเฉียง ทำมุมกับแนวตั้งประมาณ 22 องศา และแนววิบัติจะเกิดตั้งแต่จุดที่รับน้ำหนักกระทำจนถึงขอบล่างของผนังส่วนการวิบัติได้แผ่นเหล็กที่รองรับน้ำหนักที่กระทำเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 10 เซนติเมตร ส่วนเหล็กเสริมในผนัง ไม่พบว่ามีส่วนช่วยในทางตรงที่จะรับน้ำหนักแต่มีส่วนช่วยให้อ่อนดินซีเมนต์ที่วิบัติแล้วไม่หลุดร่วงออกจากผนังทำให้ปลอดภัยมากขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ได้ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัยประจำปีงบประมาณ 2557 และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ พื้นที่ศาลายา และมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ที่สนับสนุนพื้นที่สำหรับงานวิจัย นายกิตติพงศ์ ไชยมุณี นายคณนาท บัวบาน นายธรรมรัตน์ แก้วสีม่วง นางสาวปิยนุช สองพั่ง และนายอาคม ตานวล นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ที่ช่วยทดสอบและรวบรวมข้อมูลงานวิจัยในครั้งนี้ ดร.บุญชัย เชิญเกียรติประดับและบริษัท พี เอ็น เอ็น ดีไซน์แอนด์คอนซัลแตนท์ จำกัด ที่กรุณาให้

เครื่องอัดไฮดรอลิก มาใช้งาน รวมทั้งเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ที่ให้ความร่วมมือในการทำวิจัยสำเร็จลุล่วง

บรรณานุกรม

- [1] ปรีดา ไชยมหาวัน และอนุสรณ์ อินทร์ซี่, 2544, “ผลของปูนกรอกต่อพฤติกรรมของกำแพงคอนกรีตบดลือกรับน้ำหนักบรรทุกกระทำเป็นจุด,” วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 9, 11-23.
- [2] วราธร แก้วแสง และจิรัฐดี บรรจงศิริ, 2551, “บ้านดิน : อยู่อย่างพอเพียง,” วิศวกรรมสารเอเชียอาคเนย์, มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์, กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์.
- [3] Buchanan, F., 1807, “A journey from Madras thorough the countries of Mysore,” Canara and Malabor, 2d ed., East Indian Company, London.
- [4] Draper, N.R. and Smith, H., 1966, Applied Regression Analysis, New York: John Wiley & Sons. 407p.
- [5] Easton, D., 2007, The rammed earth house (revised ed.), Vermont Totnes, England: Chelsea Green Publishing Company White River Junction.
- [6] Mallet, F.R., 1883, “Laterite and other manganese are occurring at Gosolpur,” Jabalpur district, Rec. Geol. Surv. 16, 103-118.
- [7] Moh, Z.C., 1965, “Reactions of Soil Minerals with Cement and Chemicals,” Highway Research Record 86, Washington, 39-61.
- [8] Lacroix, A., 1913, Les Laterites de la guinea et les products d’ alte’ration qui leur sontassocie’s, In MD Gidigas, Laterite soil engineering, Elsevier Sci. Pub. Co., New York, 255-356.
- [9] Pignal, B., 2005, Terre crue: Technique de construction et de restauration, Editions Eyrolles.
- [10] Venkatarama, B. V., R. and Prasanna P., 2009, “Role of clay content and moisture on characteristics of cement stabilized rammed earth,” (NOCMAT2009) Proceedings of the 11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies, 6-9 September, Bath, UK.