

## พฤติกรรมทางกลของผนังดินซีเมนต์บดอัดภายใต้แรงดัด

### Mechanical Behaviour of Cement Stabilized Rammed Earth (CSRE) under Flexural Load

วราธร แก้วแสง<sup>1</sup> คณะวิศวกรรมศาสตร์

Warathorn Kaewsang<sup>1</sup> Faculty of Engineering

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของการรับแรงดัดที่กระทำกับผนังดินซีเมนต์บดอัดที่ไม่มีเหล็กเสริมภายใต้แรงดัดและเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงดัดที่แปรผันตามความชะลูดของตัวผนัง โดยในการศึกษาใช้ดินลูกรังจากบ่อดินลูกรังฟ้าบ้านดาด ตำบลหนองกบ อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี มาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อัตราส่วนผสมซีเมนต์ต่อดินลูกรังที่ 1:7 โดยนำน้ำหนักดินแห้ง แล้วทำการทดสอบหาค่าการบดอัดดินแบบมาตรฐานในกรณีที่เหมาะสมและไม่ผสมปูนซีเมนต์ เพื่อหาค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) และค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) โดยการขึ้นรูปตัวอย่างการทดสอบแบ่งเป็นสองขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรก นำค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมาผสมกับดินลูกรังในกรณีที่เหมาะสมและไม่ผสมปูนซีเมนต์ เพื่อขึ้นรูปตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร เพื่อนำตัวอย่างไปทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวที่บ่มด้วยอากาศในอุณหภูมิปกติที่อายุ 28 วัน ขั้นตอนที่สอง ขึ้นรูปผนังดินซีเมนต์บดอัดที่ผสมปูนซีเมนต์โดยกำหนดความหนาของผนังดินซีเมนต์บดอัดเท่ากับ 15 เซนติเมตร และความกว้างเท่ากับ 100 เซนติเมตร มีอัตราส่วนความชะลูดของผนัง (h/t) เท่ากับ 8, 10 และ 12 ตามลำดับ โดยในการบดอัดดินทำการบดอัดดินทีละชั้น ๆ ละประมาณ 10 เซนติเมตร เมื่อบดอัดดินได้ความสูงตามต้องการแล้วนำแผ่นพลาสติกมาห่อหุ้มผนังตัวอย่างให้มิดชิดแล้วทำการบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน เช่นกัน แล้วเมื่อครบอายุการบ่มทำการทดสอบแรงดัดโดยให้แรงกระทำแบบให้แรงสองจุดโดยให้ตำแหน่งของจุดทั้งสองเป็นตำแหน่งที่แบ่งผนังออกเป็น 3 ส่วนเท่าๆ กัน (Third- point loading) โดยทั้งสองกรณีควบคุมการบดอัดดินให้ได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดของการบดอัดแบบมาตรฐาน

จากผลการศึกษาพบว่า การทดสอบหาค่าการบดอัดดินซีเมนต์แบบมาตรฐานให้ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 9.4 และค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 2.072 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวของก้อนตัวอย่างพบว่ากำลังรับรับแรงอัดทิศทางเดียวของก้อนดินลูกรังที่ผสมและไม่ผสมปูนซีเมนต์มีค่าเท่ากับ 80.38 และ 32.88 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ และจากการทดสอบแรงดัดพบว่าเมื่ออัตราส่วนความชะลูดสูงขึ้นจะทำให้ผนังดินซีเมนต์บดอัดรับแรงดัดที่กระทำที่จุดวิบัติและค่าโมดูลัสการแตกหักลดลง เช่นกัน โดยมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงและให้ค่าสมการความสัมพันธ์ดังนี้  $Moment = -206.89(h/t) + 3061.8$  และ  $Modulus\ of\ rupture = -5.5175(h/t) + 81.392$  ตามลำดับ

คำสำคัญ : ผนังดินซีเมนต์บดอัด, แรงดัด, ค่าโมดูลัสการแตกหัก, ดินลูกรัง

#### Abstract

This paper aims to investigate behaviours against flexural load applied to Cement Stabilized

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ หนองแขม กรุงเทพฯ 10160

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, South-East Asia University, Nongkhaem, Bangkok 10160

Rammed Earth (CSRE) without steel reinforcement and compare flexure test results varied based on wall slenderness. Lateritic soil from Fah Bandan source in Nong Kob Sub-district, Ban Pong District, Ratchaburi was used for the study by being mixed with Portland cement, type 1 at the ratio of cement : lateritic soil, 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 sample models were made into 2 steps. Firstly, using the OMC to mix lateritic soil with and without cement and set the sample model with diameter of 15 cm and a height of 30 cm high and then using such sample model to test for unconfined compression after being cured under normal temperature for 28 days. The second step was carried out by setting rammed wall with cement at 15 cm thick and 100 cm wide, slenderness ratio (h/t) at 8, 10 and 12, respectively. Soil was compacted layer by layer to get 10-cm thickness each. Upon the desired height had been reached, such wall was tightly covered by film to cure it at room temperature for 28 days. After the completion of curing period, flexure test by third point – loading was performed. Soil compaction was controlled for not less than 95% of MDD of standard compaction in both cases. Findings from the study showed that standard compaction test for soil-cement rendered OMC at 9.4 % and MDD at 2.072 g/cm<sup>3</sup>. When unconfined compression test was done for sample model, it indicated that unconfined compressive strength of lateritic soil specimen with and without cement was equal to 80.38 and 32.88 kg/cm<sup>2</sup>, respectively. It was further found from the flexure test that at higher slenderness ratio, rammed wall's flexural strength at failure and modulus of rupture decreased in linear trend and equation as follows: Moment = -206.89(h/t) + 3061.8 and Modulus of rupture = -5.5175(h/t) + 81.392, respectively.

**Keywords** : Cement Stabilized Rammed Earth (CSRE), Flexural Load, Modulus of rupture, Lateritic soil

**E-mail address** : Warathornk@sau.ac.th

## คำนำ

ในปัจจุบันการสร้างบ้านที่ทำจากดินมีมากขึ้นโดยเฉพาะการก่อสร้างบ้านแบบอิฐดินดิบ(Adobe bricks) โดยวิธีดังกล่าวนำดินเหนียวมาผสมกับน้ำและเส้นใยธรรมชาติ เช่น แกลบ หรือฟางข้าว แล้วปั้นเป็นอิฐดินดิบ นำอิฐดินดิบมาก่อเป็นผนังบ้านโดยใช้โคลนเป็นตัวประสาน โดยการก่อสร้างดังกล่าว มีข้อดีคือสามารถที่จะลดปัญหา ด้านสิ่งแวดล้อม การประหยัดพลังงาน ตลอดจนการใช้วัสดุธรรมชาติมาทดแทนวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้น แต่ก็มีข้อเสีย คือ บ้านไม่มีความคงทนถาวร เหมือนเช่นวัสดุสังเคราะห์ในปัจจุบัน ซึ่งวัสดุสังเคราะห์ได้ผ่านกระบวนการทดสอบวิเคราะห์ วิจัย เป็นวัสดุที่ยอมรับและออกเป็นมาตรฐานทางด้านวิศวกรรมอย่างชัดเจน แต่การก่อสร้างบ้านดินยังคงต้องมีการพัฒนาในส่วนของการวิจัยและพัฒนาอีกมากเพื่อให้เกิดมาตรฐานเป็นที่ยอมรับ ด้วยศักยภาพของวัสดุในประเทศไทย ผู้วิจัยเล็งเห็นว่าควรจะต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของดินที่มีอยู่ให้มีคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมให้ดีขึ้นโดยการเพิ่มวัสดุเชื่อมประสาน (Cementing material) ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) และเพิ่มความหนาแน่นให้กับดินโดยการบดอัด ซึ่งหลักการดังกล่าวเรียกว่า การปรับปรุงคุณภาพดิน (Soil

stabilization) ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับบ้านดินในส่วนของผนังได้ ในงานวิจัยนี้จึงเรียกว่า “ผนังดินซีเมนต์บดอัด” (Cement Stabilized Rammed Earth ,CSRE) ซึ่งสอดคล้องกับ Pignal (2005) ได้กล่าวว่ดินบดอัดเป็นเทคนิคการก่อสร้างที่ทำได้ง่ายมาก โดยขึ้นอยู่กับแบบหล่อและการบดอัดดิน เพื่อให้ดินเป็นเนื้อเดียวกัน และในปัจจุบันดินบดอัดยังเป็นที่ยอมรับในประเทศออสเตรเลีย สหรัฐอเมริกา และส่วนอื่นของโลก เพราะดินบดอัดได้รับการยอมรับเป็นวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืนอีกด้วย ส่วน Easton (2007) ได้กล่าวเช่นกันว่าทวีปยุโรปเองมีการใช้ดินบดอัดอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศฝรั่งเศส

การประยุกต์ใช้งานของดินบดอัดสามารถใช้เป็นผนังที่รับน้ำหนักและไม่รับน้ำหนักก็ได้ โดยผนังดินบดอัดมีส่วนประกอบจำพวก ดิน ทราย หรือกรวด ซึ่งสามารถที่จะปรับปรุงคุณภาพหรือไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยวัสดุเชื่อมประสานก็ได้ แล้วทำการบดอัดให้มีความแน่นในแบบหล่อที่เตรียมไว้ ถ้าหากมีการปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้วัสดุเชื่อมประสานเช่น ปูนซีเมนต์ ก็จะทำให้ดินมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น โดยคุณสมบัติทางกลของดินบดอัดยังขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ปริมาณปูนซีเมนต์ พลังงานของการบดอัด ความหนาแน่น และปริมาณความชื้นที่ผสม Venkatarama และ Prasanna (2009)

ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงเป็นสาเหตุให้ผู้วิจัยต้องทำการศึกษาวิจัย โดยศึกษาพฤติกรรมทางกลของผนังบ้านดินบดอัดซึ่งเป็นวัสดุหลักที่ใช้ในการก่อสร้างบ้านดิน เพื่อใช้เป็นข้อมูลและเป็นแนวทางในการพัฒนางานการก่อสร้างบ้านดินให้มีมาตรฐานทางวิศวกรรมในอนาคต โดยในการวิจัยนี้จะศึกษาถึงพฤติกรรมของการรับแรงดัดที่กระทำกับผนังดินซีเมนต์บดอัดที่ไม่มีเหล็กเสริม และเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงดัดที่แปรผันตามความชะลูดของตัวผนัง เพื่อสร้างความรู้ความเข้าใจ พฤติกรรมและลักษณะของการวิบัติ และนำไปสู่การวิเคราะห์และออกแบบผนังดินบดอัดเพื่อการก่อสร้างบ้านดินให้มีความมั่นคงแข็งแรงต่อไปในอนาคต

## อุปกรณ์และวิธีการ

### วิธีการเตรียมวัสดุอุปกรณ์

1. ดินลูกรัง ใช้ตัวอย่างดินจาก ตำบลหนองกบ อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี โดยนำมาตากแห้ง (Sun dried) แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงที่มีช่องเปิด 4 มิลลิเมตร ตัวอย่างที่ได้นำมาบรรจุใส่ถุงพลาสติกเพื่อรักษาความชื้นคงที่ไม่เกินร้อยละ 5
2. ปูนซีเมนต์ (Cement) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป
3. น้ำ ใช้ในการทดลองเป็นน้ำประปาที่มีความสะอาด
4. การเตรียมแบบหล่อไม้สำหรับผนังดินซีเมนต์บดอัด โดยกำหนดอัตราส่วนความชะลูดของผนัง (h/t) เท่ากับ 8, 10 และ 12 จะต้องเตรียมแบบหล่อผนังที่มีความสูงเท่ากับ 1.20, 1.50 และ 1.80 เมตร ตามลำดับ ที่ความหนา 15 เซนติเมตร และความกว้างเท่ากับ 100 เซนติเมตร เท่ากันทุกอัตราส่วนความชะลูด (See figure 1 and 2)

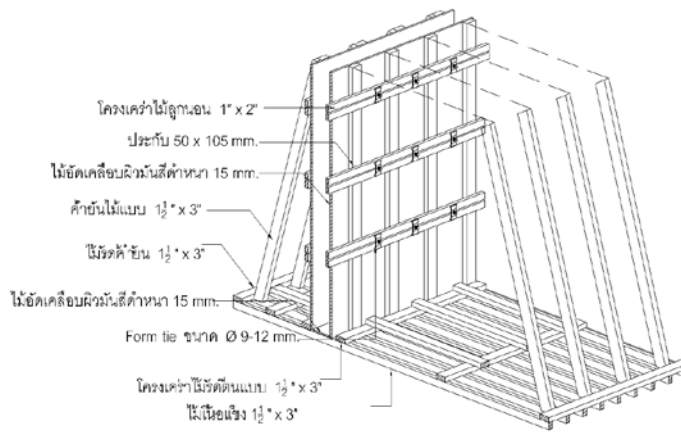


Figure 1 Wall formwork components.



Figure 2 Wall formwork

### ระเบียบวิธีการทดสอบ

#### 1. การหาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของดินลูกรัง

- การหาความถ่วงจำเพาะเม็ดดิน ระบุตามมาตรฐาน ASTM D 854-10
- การหาขนาดคละของเม็ดดิน ระบุตามมาตรฐาน ASTM D 422-07 และ ASTM D 2487-69
- การบดอัดดินแบบมาตรฐาน ระบุตามมาตรฐาน ASTM D 698-07

#### 2. การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม และการขึ้นรูปตัวอย่างผนังดินซีเมนต์บดอัด

ทำการทดสอบบดอัดดินแบบมาตรฐาน ระบุตามมาตรฐาน ASTM D 698-07 ของดินลูกรังที่ผสมปูนซีเมนต์ ที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:7 โดยน้ำหนัก เพื่อหาความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, MDD) และ ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) โดยนำผลของค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองมาผสมขึ้นรูปตัวอย่างโดยแบ่งเป็นสองขั้นตอน ขั้นตอนแรก ผสมขึ้นรูปตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง เพื่อนำตัวอย่างไปทดสอบกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียว (Unconfined compression test) ระบุตามมาตรฐาน ASTM D 2166-06 ที่บ่มด้วยความชื้นในอุณหภูมิปกติ ที่อายุ 28 วัน ขั้นตอนที่สอง ขึ้นรูปผนังดินซีเมนต์บดอัดที่ผสมปูนซีเมนต์โดยกำหนดความหนาของผนังดินซีเมนต์บดอัดเท่ากับ 15 เซนติเมตร และความกว้างเท่ากับ 100 เซนติเมตร ที่อัตราส่วนความชะลูดของผนัง (h/t) เท่ากับ 8, 10 และ 12 ตามลำดับ โดยในการบดอัดดินทำการบดอัดดินทีละชั้น ๆ ละประมาณ 10 เซนติเมตร โดยทั้งสองกรณีควบคุมการบดอัดดินให้ได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดของการบดอัดแบบมาตรฐาน

#### 2. การทดสอบการรับแรงดัด (Flexural strength) ของผนังดินซีเมนต์บดอัด

แรงดัดที่ใช้ในการทดสอบเกิดจากการให้แรงกระทำแบบให้แรงสองจุดโดยให้ตำแหน่งของจุดทั้งสองเป็นตำแหน่งที่แบ่งผนังออกเป็น 3 ส่วนเท่า ๆ กัน (Third-point loading) กำหนดให้มีจุดรองรับด้านบนและด้านล่างของผนัง (Restraint top and bottom) ตลอดความยาว 100 เซนติเมตร โดยแรงดัดที่กระทำกับผนังในงานวิจัยใช้ เครื่องอัดไฮดรอลิค ขนาด 50 ตัน ทดสอบกับตัวอย่างผนังดินซีเมนต์บดอัดที่บ่มด้วยความชื้นในอุณหภูมิปกติ ที่อายุ 28 วัน (See figure 3 and 4)

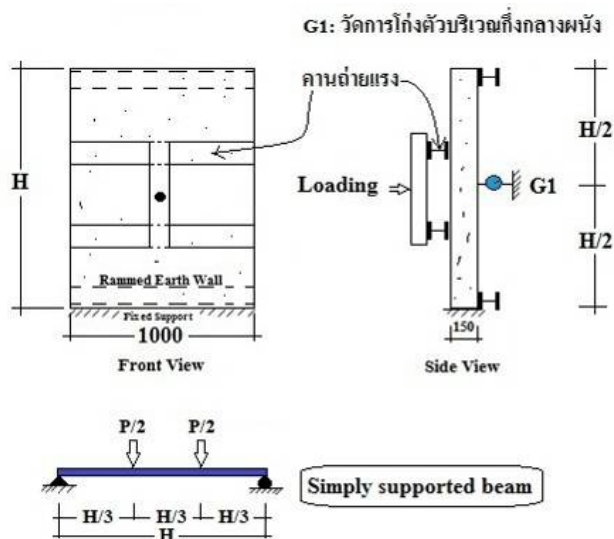


Figure 3 Third-point loading method



Figure 4 Installation of loading frame

### ผลการทดสอบและวิจารณ์

#### คุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของดินลูกรัง

ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของดินลูกรัง พบว่าดินลูกรังมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.82 และมีส่วนประกอบหลักเป็นทรายเม็ดหยาบถึงร้อยละ 58.47 ซึ่งสามารถจำแนกชนิดตามระบบเอกภาพ (Unified soil classification) พบว่าเป็นกลุ่ม SW (See table 1)

Table 1 Basic engineering properties of lateritic soil.

Properties	Test results.
<u>Texture composition:</u>	
Gravel; >4.75 mm. (%)	15.06
Coarse sand; 4.75-0.425 mm. (%)	58.47
Fine sand; 0.425-0.075 mm. (%)	23.87
Silt and clay; ≤0.075 mm. (%)	2.60
<u>Physical properties:</u>	
Specific gravity of soil	2.82
Unified soil classification	SW (Well-graded SAND with gravel)

#### คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังที่ผสมและไม่ผสมปูนซีเมนต์

ผลการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินลูกรัง พบว่าดินลูกรังให้ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) ที่ร้อยละ 10 ที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) เท่ากับ 1.98 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนดินลูกรังที่ผสมปูนซีเมนต์ พบว่าให้ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) ที่ร้อยละ 9.4 ที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) เท่ากับ 2.072 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวของก้อนตัวอย่าง พบว่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวของดินลูกรังที่ผสมและไม่ผสมปูนซีเมนต์มีค่าเท่ากับ 80.38 และ 32.88 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

**ผลการทดสอบพฤติกรรมทางกลของผนังดินซีเมนต์บดอัดภายใต้แรงดัด**

1. อิทธิพลของอัตราส่วนความชะลูดของผนัง (h/t) ที่มีผลต่อค่าการรับแรงดัดของผนังดินซีเมนต์บดอัด

จาก Figure 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความชะลูดของผนังกับแรงดัดของผนังดินซีเมนต์บดอัด พบว่าอัตราส่วนความชะลูดของผนังที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าแรงดัดที่ผนังดินซีเมนต์บดอัดจะรับได้มีแนวโน้มลดลง ซึ่งใช้วิธีสมการเส้นถดถอยแบบเส้นตรง (Linear regression analysis) มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ดังกล่าว ได้ผลดังสมการที่ 1

$$\text{Moment} = -206.89(h/t) + 3061.8 \tag{1}$$

$R^2 = 0.9921 > 0.80$  แสดงว่า มีความสัมพันธ์กันดีมาก (Draper and Smith, 1966)

โดยที่ Moment คือ ค่าการรับแรงดัด (มีหน่วยเป็น กิโลกรัม - เมตร)

h คือ ความสูงของผนังดินซีเมนต์บดอัด

t คือ ความหนาของผนังดินซีเมนต์บดอัด

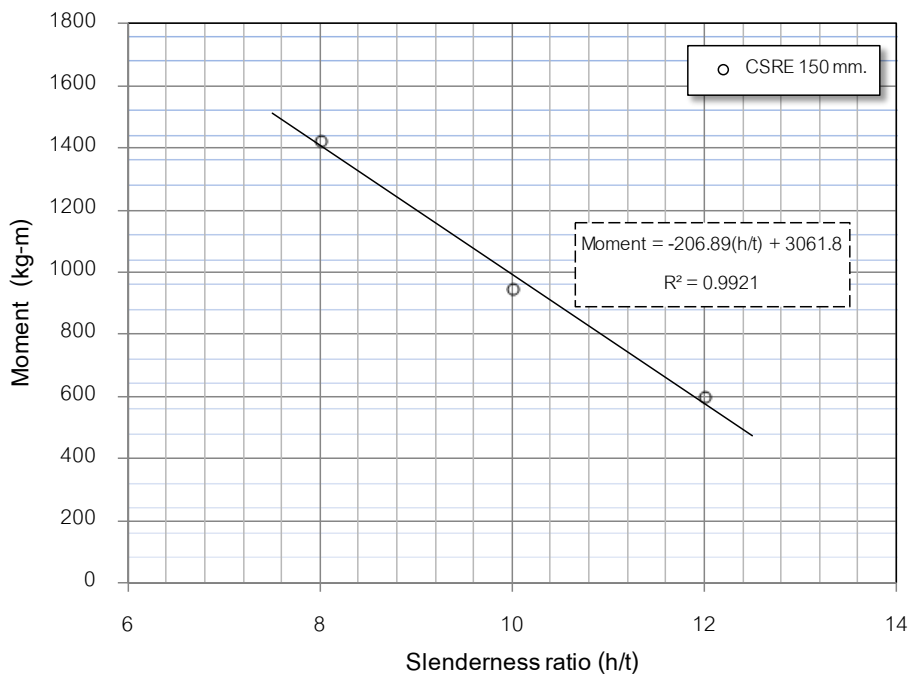


Figure 5 Relationship between the slenderness ratio and moment under CSRE 150 mm.

2. อิทธิพลของอัตราส่วนความชะลูดของผนัง (h/t) ที่มีผลต่อค่าโมดูลัสการแตกร้าวของผนังดินซีเมนต์บดอัด

จาก Figure 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความชะลูดของผนังกับโมดูลัสการแตกร้าวของผนังดินซีเมนต์บดอัด พบว่าอัตราส่วนความชะลูดของผนังที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าโมดูลัสการแตกร้าวของผนังดินซีเมนต์บดอัดมีแนวโน้มลดลง โดยที่ค่าโมดูลัสการแตกร้าวระบุตามมาตรฐาน ASTM C78/C78M-10 ซึ่งใช้วิธีสมการเส้นถดถอยแบบเส้นตรง (Linear regression analysis) มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ดังกล่าว ได้ผลดังสมการที่ 2

$$\text{Modulus of rupture} = -5.5175(h/t) + 81.392 \quad (2)$$

$R^2 = 0.9834 > 0.80$  แสดงว่า มีความสัมพันธ์กันดีมาก (Draper and Smith, 1966)

โดยที่ Modulus of rupture คือ โมดูลัสการแตกร้าว (มีหน่วยเป็น กิโลกรัม – ตารางเซนติเมตร)  
 h คือ ความสูงของผนังดินซีเมนต์บดอัด  
 t คือ ความหนาของผนังดินซีเมนต์บดอัด

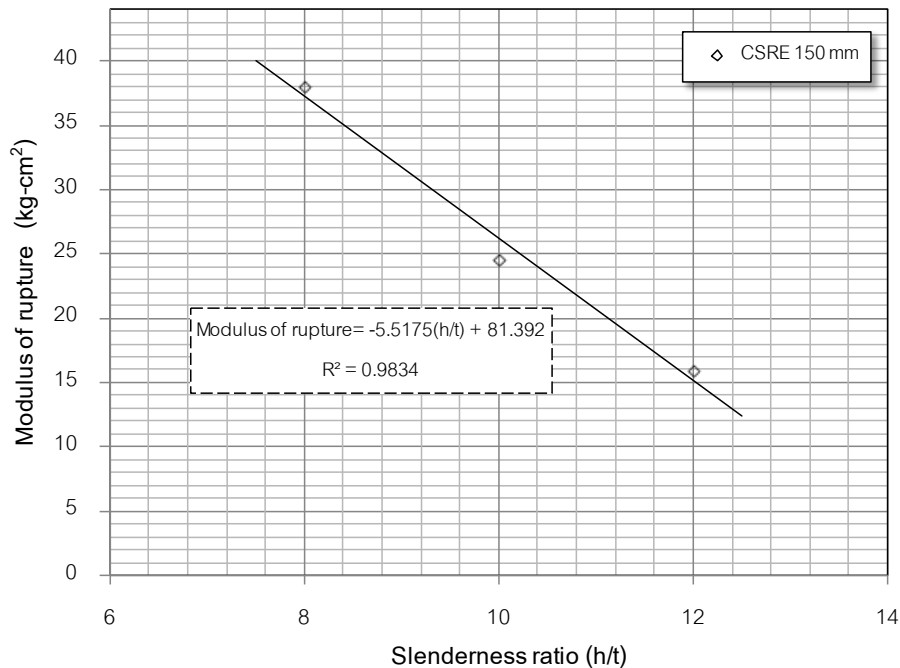


Figure 6 Relationship between slenderness ratio and the modulus of rupture under CSRE 150 mm.

### 3. ลักษณะของการวิบัติของผนังดินซีเมนต์บดอัด

จาก Figure 8 แสดงลักษณะตัวอย่างของการวิบัติของผนังดินซีเมนต์บดอัดจากการทดสอบแรงดัดพบว่า เกิดรอยร้าวเป็นลักษณะเป็นแนวยาวตั้งฉากกับความสูงของผนังในทุกอัตราส่วนความชะลูด จากการตรวจสอบรอยร้าวพบว่าส่วนใหญ่เกิดที่ตำแหน่งของรอยต่อของชั้นดินแต่ละชั้นที่บดอัด ซึ่งในอนาคต งานวิจัยที่คาดว่าจะดำเนินการศึกษาต่อไปจำเป็นต้องมีการเสริมเหล็กในแนวตั้งเพื่อช่วยในการรับแรงดัดที่เกิดขึ้น



Figure 7 Cement stabilized rammed earth wall

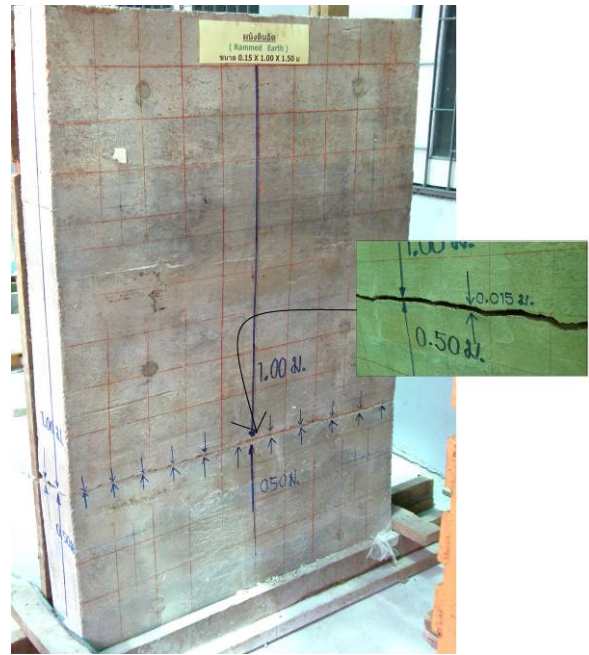


Figure 8 The failure of the CSRE wall

### สรุปผลการศึกษา

1. ดินลูกรังที่นำมาเป็นวัสดุมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.82 และมีส่วนประกอบหลักเป็นทรายเม็ดหยาบถึงร้อยละ 58.47 ซึ่งจำแนกชนิดตามระบบเอกภาพ เป็นกลุ่ม SW, Well-graded SAND with gravel
2. การทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน พบว่าดินลูกรังให้ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) ที่ร้อยละ 10 ที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) เท่ากับ 1.98 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดินลูกรังที่ผสมปูนซีเมนต์ พบว่าให้ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) ที่ร้อยละ 9.4 ที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) เท่ากับ 2.072 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวของดินลูกรังที่ผสมและไม่ผสมปูนซีเมนต์มีค่าเท่ากับ 80.38 และ 32.88 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ
3. อิทธิพลของอัตราส่วนความชะลูดของผนัง (h/t) ที่มีผลต่อค่าการรับแรงดัดของผนังดินซีเมนต์บดอัด ให้สมการความสัมพันธ์ คือ  $Moment = -206.89(h/t) + 3061.8$
4. อิทธิพลของอัตราส่วนความชะลูดของผนัง (h/t) ที่มีผลต่อค่าโมดูลัสการแตกร้าวของผนังดินซีเมนต์บดอัดให้สมการความสัมพันธ์ คือ  $Moment = -206.89(h/t) + 3061.8$

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ที่สนับสนุนงานวิจัย นายชโลทัย ทรงโฉม นายชัชชพรราช แสงพิทักษ์ และนายสนั่น งามขำ นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ที่ช่วยทดสอบและรวบรวมข้อมูลงานวิจัยในครั้งนี้ อาจารย์บุญชัย เทัญเกียรติประดับและบริษัท บี เอ็น เอ็น ดีไซน์แอนด์คอนซัลแตนท์ จำกัด ที่กรุณาให้ยืมเครื่องอัดไฮดรอลิค เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ที่ให้ความร่วมมือในการทำวิจัย



## เอกสารอ้างอิง

- American Society for Testing and Materials. 2012. **ASTM Standards**. Volume 04.08 and 04.09. Soil and Rock. Philadelphia.
- Draper, N.R. and Smith, H. 1966. **Applied Regression Analysis**. New York: John Wiley & Sons. 407p.
- Easton, D. 2007. **The Rammed Earth House** (revised edition). Chelsea Green Publishing Company. White River Junction. Vermont.
- Pignal, B. 2005. **Terre crue: Technique de construction et de restauration**. Editions Eyrolles.
- Venkatarama, B. V., R. and Prasanna P. 2009. Role of Clay Content and Moisture on Characteristics of Cement Stabilized Rammed Earth. *In Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Non-conventional Materials and Technologies (NOCMAT2009)*. 6-9 September 2009. Bath. UK.