

การศึกษากำลังต้านทานแรงดึงของเหล็กเสริมกำลังแบกทานในคอนกรีตมวลเบา สำหรับการออกแบบโครงสร้างเสริมกำลังทางดิน Study of pullout resistance of bearing reinforcement embedded in lightweight Cellular Concrete (LCC) for Designing Reinforced Earth Structure

กัมปนาท สุขมาก^{1,*} ศิวกร คอนกำลัง¹ ศรายุทธ รักรวงศ์¹ อันชรี ศรีเมือง¹
อิรพาน มะกะ¹ เสมอเทพ ลังซ์เพชร¹ ชีตีพาตีหะหมะห์ อาแว¹ และ กฤษกร หนูเจริญ¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ จ.นครศรีธรรมราช
*Corresponding author; E-mail address: gampanart.su@wu.ac.th; k.sukmak_ce@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ ศึกษาหลักการต้านทานแรงดึงของเหล็กเสริมกำลังแบกทาน (Bearing reinforcement) ฝังในคอนกรีตมวลเบา (Light weight cellular concrete; LCC) เหล็กเสริมกำลังแบกทานถูกใช้เป็นวัสดุเสริมกำลังทางดิน ประกอบด้วยเหล็กเสริมกำลังตามยาว (Longitudinal member) คือ เหล็กข้ออ้อย (Deformed bar) และเหล็กเสริมกำลังตามขวาง (transverse members) คือ เหล็กฉาก (Equal angle steel) ปัจจุบัน การประยุกต์ใช้ LCC เป็นวัสดุทดแทนวัสดุถม (Backfill) สำหรับโครงสร้างเสริมกำลังทางดิน เนื่องจาก น้ำหนักเบาและกำลังรับแรงอัดสูง เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุดินถม การทดสอบกำลังรับแรงดึงของวัสดุเสริมกำลังแบกทาน ประกอบด้วยเหล็กเสริม 3 ลักษณะ คือ เหล็กเสริมกำลังตามยาวไม่มีเหล็กเสริมตามขวาง (เหล็กข้ออ้อยขนาด 16 มิลลิเมตร ความยาวฝัง 1,100 มิลลิเมตร) และเหล็กเสริมกำลังแบกทานที่มีเหล็กเสริมกำลังตามยาวที่มีเหล็กเสริมตามขวางจำนวน 1 และ 2 ชั้น (เหล็กฉากขนาด 25.40 มิลลิเมตร ความยาวเหล็กฉาก 150 มิลลิเมตร) การทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมกำลังแบกทานใน LCC ที่มีค่าหน่วยน้ำหนักอยู่ในช่วงระหว่าง 600-1,650 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร กำลังต้านทานแรงดึงรวม (Total pullout resistance) เป็นผลรวมระหว่าง แรงเสียดทานและแรงแบกทานของเหล็กตามยาวและเหล็กตามขวาง ตามลำดับ ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดประลัยกับหน่วยน้ำหนักของ LCC แสดงในฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล รูปแบบการวิบัติของเหล็กเสริมกำลังแบกทานภายใต้การดึงขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและค่ากำลังของคอนกรีตมวลเบา

คำสำคัญ: เหล็กเสริมกำลังแบกทาน, คอนกรีตมวลเบา, กำลังต้านทานแรงดึง, เหล็กเสริมกำลังตามยาว, เหล็กเสริมกำลังตามขวาง, กำลังรับแรงอัดแบบไม่โอบรัด

Abstract

This paper aims to study the pullout resistance mechanism of bearing reinforcement embedded in Lightweight Cellular Concrete (LCC). The bearing reinforcement is composed of a longitudinal member and transverse (bearing) members. The longitudinal member is a steel deformed bar and transverse members are a set of equal steel angle. LCC has been used as backfill material for retaining walls due to its low self-weight and high compressive strength as compared with soils. The pullout

tests on the reinforcement were conducted on three types of bearing reinforcement. The longitudinal member without transverse member (with a diameter of 16 mm and length of 1.1m). The bearing reinforcement with a 1.10 m longitudinal member and with number of transverse members, n (n= 1 and 2). The laboratory pullout tests on the bearing reinforcement embedded in different unit weights of LCC ranged from 600-1,650 kN/m³. The total pullout resistance (P_t) is the sum of the pullout friction (obtained between the LCC and the longitudinal member) and bearing resistances. The relationships between ultimate compressive strength (f'_c) versus unit weight are represented by an exponential function for all curing periods. The failure mode of bearing reinforcement under pullout test depends on the unit weight and f'_c .

Keywords: Bearing reinforcement, Lightweight Cellular Concrete, Pullout resistance, Longitudinal member, Transverse member. Unconfined compressive strength

1. คำนำ

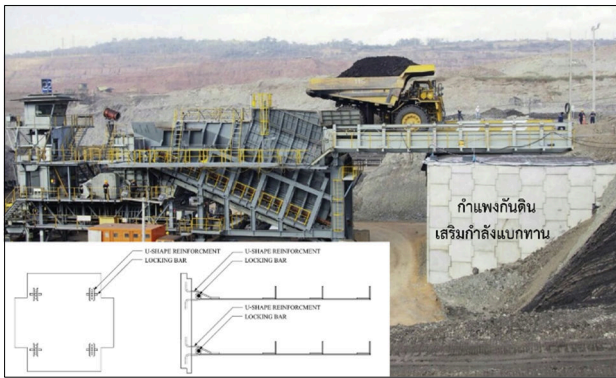
การออกแบบกำแพงกันดินเสริมกำลัง ต้องตรวจสอบเสถียรภาพภายนอกและภายใน โดยทั่วไปกำแพงกันดินถูกสมมุติว่าเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid body) การตรวจสอบเสถียรภาพภายนอก คือ การตรวจสอบรูปแบบการวิบัติแบบเลื่อนไถล การพลิกคว่ำ และการวิบัติแบกทาน การตรวจสอบเสถียรภาพภายใน คือ การตรวจสอบกำลังต้านทานการดึงออกและการฉีกขาด (Pullout and rupture resistance) ของวัสดุเสริมกำลัง เสถียรภาพภายในต้านทานการฉีกขาดขึ้นอยู่กับ พื้นที่และกำลังของวัสดุเสริมกำลัง

เหล็กเสริมกำลังแบกทาน (Bearing reinforcement) ถูกพัฒนาโดย Horpibulsuk and Niramitkronburee (2010) เป็นวัสดุเสริมกำลังชนิดยืดไม่ได้ (Inextensible reinforcement) ที่ประกอบด้วย เหล็กเสริมกำลังตามยาว (Longitudinal member) และเหล็กเสริมกำลังตามขวาง (Transverse members) ถูกผลิตขึ้นจากการเชื่อมระหว่าง เหล็กข้ออ้อย (Deformed bar) และกลุ่มของเหล็กฉาก (Equal angle steel) โดยเหล็กเสริมกำลังแบกทานได้ผสมสานข้อดีของ เหล็กแถบ (Strip) และวัสดุเสริมกำลังชนิดตาข่าย (Grid reinforcements) เข้าด้วยกัน นั่นคือ เหล็กเสริมกำลังแบกทานสามารถพัฒนากำลังต้านทานการดึงออก ด้วยแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวสัมผัสของเหล็กเสริมกำลังตามยาวและวัสดุดินถม การ

พัฒนาการกำลังต้านทานแรงอัดแบกทาน จะเกิดขึ้นด้านหน้าของเหล็กฉาก เมื่อเหล็กเสริมถูกดึงออก ในอดีต มีการศึกษาลักษณะการวิบัติของเหล็กเสริมกำลังแบกทานในวัสดุดินถมหลายชนิด ถูกทดสอบในห้องปฏิบัติการภาคสนาม และการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ [1-5]

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากลไกการพัฒนาการกำลังต้านทานการดึงออก (Pullout resistant mechanism) ในดินถมชนิดต่าง ๆ เช่น ดินอนุภาคหยาบ (ดินทรายและกรวดที่มีขนาดความละเอียดต่าง ๆ) ดินอนุภาคละเอียด (ดินทรายแป้งและดินเหนียว) พร้อมกับการศึกษาอิทธิพล จำนวนของเหล็กเสริมกำลังตามขวาง (number of transverse member; n) ระยะการจัดวางตำแหน่งของเหล็กเสริมกำลังตามขวาง (Spacing; S) ซึ่งพบว่า เหล็กเสริมกำลังแบกทานจะวิบัติแบบ Individual failure เมื่ออัตราส่วนของระยะห่าง (S) ต่อขนาด (B) ของเหล็กเสริมกำลังตามขวาง (spacing ratio; S/B) มีค่าไม่น้อยกว่า 15

การศึกษาแปลงทดสอบภาคสนามของกำแพงกันดินเสริมกำลังแบกทานด้วยวัสดุดินถมชนิดทราย (แปลงทดสอบในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี) [5] และดินเหนียวแม่เมาะ (แปลงทดสอบในเมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง) [4] เพื่อศึกษาการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน (Wall Facing) การทรุดตัวของกำแพงกันดิน และการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงดันดินด้านข้าง เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อกำแพงกันดิน รูปที่ 1 แสดงการติดตั้งเหล็กเสริมกำลังแบกทานและตัวอย่างกำแพงกันดินเสริมกำลังแบกทาน



รูปที่ 1 การติดตั้งเหล็กเสริมกำลังแบกทาน และตัวอย่างกำแพงกันดินเสริมกำลังแบกทาน (ที่มา: [4])

ในปัจจุบัน Lightweight Cellular Concrete (LCC) ได้รับความนิยมสำหรับการนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนดินถม ในการก่อสร้างโครงสร้างทางดิน (Earth structure) เช่น กำแพงกันดินและวัสดุรองพื้นทางสำหรับงานถนน เนื่องจาก วัสดุ LCC มีหน่วยน้ำหนักเบา จึงสามารถลดการทรุดตัวของชั้นดินได้ และมีกำลังรับแรงอัดสูง [6] เมื่อเทียบกับวัสดุถมตามธรรมชาติ วัสดุ LCC เป็นวัสดุที่ผสมระหว่าง ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทราย น้ำ และสารเพิ่มฟองโฟม (Foaming agent) วัสดุ LCC สามารถก่อสร้างได้โดยปราศจากการบดอัด (compaction) จึงลดขั้นตอนและระยะเวลาการก่อสร้างได้ จากการศึกษาของ Engineered Fill (2001) พบว่า หน่วยน้ำหนักของ LCC ที่ใช้ในการก่อสร้างในงานปฐพี (Geotechnical application) อยู่ระหว่าง $385-800 \text{ kg/m}^3$

Ye et.al. (2022) [7] ได้ศึกษา วัสดุ LCC ใช้งานร่วมกับวัสดุเสริมกำลังชนิดเหล็กแถบและตาข่ายเสริมกำลัง เพื่อหาความสัมพันธ์ของผิวสัมผัส (Interface) ระหว่างวัสดุเสริมกำลังและวัสดุ LCC แต่อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการศึกษา กลไกการพัฒนาการกำลังต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมกำลังแบกทานในวัสดุ LCC

บทความนี้ ศึกษาหลักการพัฒนากำลังต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมกำลังแบกทานในวัสดุคอนกรีตมวลเบาชนิด LCC เพื่อศึกษาพฤติกรรมการพัฒนาการกำลังต้านทานแรงดึงของเหล็กเสริมกำลังแบกทานในวัสดุ LCC ที่มีความหนาแน่นต่าง ๆ เพื่อใช้สำหรับการออกแบบโครงสร้างเสริมกำลังทางดิน

2. วัสดุ อัตราส่วนการผสม และวิธีการทดสอบ

2.1 วัสดุเชื่อมประสาน

ปูนซีเมนต์ ชนิดปูนงานโครงสร้าง เอสซีจี สูตรโฮบริด ผลิตโดย บริษัทปูนซีเมนต์ไทย (ทุ่งสง) จำกัด มีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 3.15

2.2 มวลรวมละเอียด

ทรายแม่น้ำละเอียด มีร้อยละผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (ขนาดช่องเปิด 4.75 มิลลิเมตร) และร้อยละค้างสะสมตะแกรงเบอร์ 100 เท่ากับร้อยละ 90 ค่าโมดูลัสความละเอียด เท่ากับ 1.94 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.52 ร้อยละการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.25 ทรายถูกอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.2 น้ำ

น้ำประปา มีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) เท่ากับ 8

2.3 สารผสมเพิ่ม

น้ำยาสีสร้างฟองโฟม SUT-CLC Foaming ผลิตและจำหน่ายโดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สัดส่วนการผสมน้ำยาสีสร้างฟองโฟม 1 ส่วนต่อน้ำ 40 ส่วน

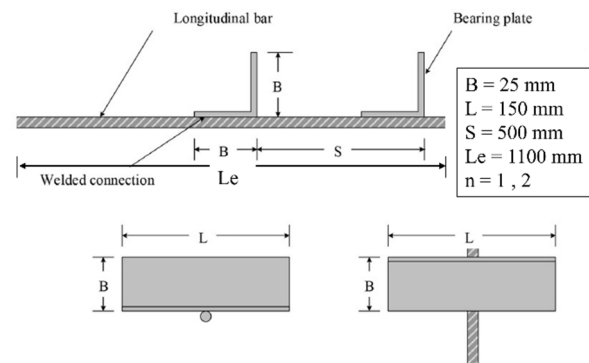
2.4 เหล็กเสริมกำลังแบกทาน

เหล็กเสริมกำลังตามยาว

เหล็กข้ออ้อย (DB16 SD40T) ผลิตโดย บริษัทไทยสตีลโปรไฟล์ จำกัด (มหาชน) มีค่ากำลังคราก (yield strength) เท่ากับ 109.91 กิโลนิวตัน และค่ากำลังรับแรงสูงสุด (Ultimate strength) 129.69 กิโลนิวตัน น้ำหนัก 1.56 กิโลกรัมต่อเมตร

เหล็กเสริมกำลังตามขวาง

เหล็กฉากขนาด 25x25 มิลลิเมตร (B) ความยาว 150 มิลลิเมตร (L) ความหนา 5 มิลลิเมตร Sukmak et. al., (2015) [2] เสนอว่า ค่ากำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมกำลังแบกทาน แปรผันตามพื้นที่รับแรงแบกทานของเหล็กเสริมกำลังตามขวาง (ผลคูณความกว้างและความยาว) และจำนวนของเหล็กเสริมกำลังตามขวาง (number of transverse member, n) รูปที่ 2 แสดงลักษณะและการกำหนดตัวแปรของเหล็กเสริมแบกทาน

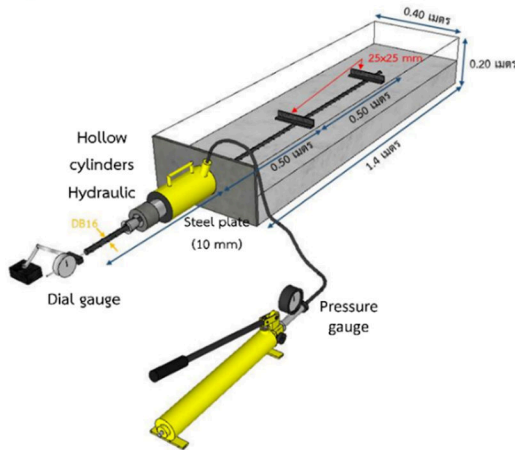


รูปที่ 2 ลักษณะและการกำหนดตัวแปรของเหล็กเสริมแบกทาน

จากการศึกษาเบื้องต้นของบทความนี้ได้กำหนดความยาวของเหล็กเสริมกำลังตามขวาง L เท่ากับ 50 100 150 และ 200 มิลลิเมตร ขนาดของเหล็กฉาก B เท่ากับ 25 มิลลิเมตร จำนวน 1 ชั้น ($n=1$) เชื่อมติดกับเหล็ก

เสริมกำลังตามยาว ที่มีระยะห่างเท่ากับ 1,100 มิลลิเมตร ในคอนกรีตมวลเบา LCC ความหนาแน่น เท่ากับ 900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่ระยะการบ่ม 28 วัน เมื่อทดสอบการฉุดออกของเหล็กเสริมกำลังแบบทวน ได้พบว่า ในช่วงความยาวเหล็กเสริมกำลังตามขวาง $L = 50-150$ มิลลิเมตร ค่ากำลังรับแรงอัดรวมสูงสุด มีค่าเท่ากับ 24.52 28.37 และ 33.51 กิโลนิวตัน ซึ่งเพิ่มขึ้นเชิงเส้นตรงตามความยาวของเหล็กเสริมกำลังตามขวาง แต่ที่ความยาวเหล็กเสริมกำลังตามขวาง $L=200$ มิลลิเมตร ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด มีค่าเท่ากับ 34.20 กิโลนิวตัน ซึ่งเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับ $L=150$ มิลลิเมตร เนื่องจาก เหล็กเสริมกำลังตามขวาง ($L=200$ มิลลิเมตร) เกิดการตัดให้โค้งงอ เมื่อเหล็กเสริมกำลังแบบทวนถูกฉุดออก

การทดสอบหาลำรับแรงอัดของวัสดุเสริมกำลังแบบทวน ประกอบด้วย 3 ลักษณะ คือ เหล็กเสริมกำลังตามยาวไม่มีเหล็กเสริมตามขวาง (เหล็กข้ออ้อยขนาด 16 มิลลิเมตร ความยาวฝัง 1,100 มิลลิเมตร) และเหล็กเสริมกำลังแบบทวนที่มีเหล็กเสริมกำลังตามขวางจำนวน 1 และ 2 ชั้น (number of transverse member, $n = 1-2$) เหล็กเสริมกำลังตามขวาง ถูกเชื่อมติดอย่างแน่นหนาเข้ากับเหล็กเสริมกำลังแบบทวนตามยาว (ขนาดความยาว 1.10 เมตร) ด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า ขนาด 3.2 มิลลิเมตร (KOBELB52) ทนแรงดึงสูงสุด 490 เมกะปาสคาล ตำแหน่งการเชื่อมเหล็กเสริมกำลังตามขวางถูกเชื่อมติดที่ตำแหน่งการฝัง 0.50 และ 1.00 เมตร แบบจำลองเหล็กเสริมกำลังแบบทวนในคอนกรีตมวลเบา LCC แสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ลักษณะของเหล็กเสริมกำลังแบบทวน ขนาดตัวอย่างทดสอบการฉุดและการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแรงอัดและการเคลื่อนตัว

2.5 อัตราส่วนผสมตัวอย่าง ขนาดแบบหล่อตัวอย่าง และระยะการบ่ม

น้ำยาสร้างฟองโฟมผสมกับน้ำในสัดส่วน 1 ต่อ 40 โฟมถูกฉีดผ่านกระบอกฉีดที่รักษาความดันคงที่ เท่ากับ 8 บาร์ โดยมีความสัมพันธ์น้ำหนักโฟมต่อเวลาการฉีด (น้ำหนักน้ำรวมกับน้ำหนักน้ำยาสร้างฟองโฟม) เท่ากับ 65.40 กรัมต่อวินาที ความหนาแน่นของฟองโฟมเท่ากับ 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ตัวอย่างถูกผสมที่ปริมาณอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (water to cement ratio; w/c) คงที่ เท่ากับ 0.55 อัตราส่วนผสม สัดส่วนการผสมปูนซีเมนต์ : ทราย : น้ำ เป็น 1:1:0.55 แสดงดังตารางที่ 1

สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดประลัย (Ultimate compressive strength) ของตัวอย่าง แบบหล่อทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร มีความสูง 30 เซนติเมตร เมื่อบ่มครบเวลาบ่ม 24 ชั่วโมง ถอด

แบบหล่อ ตัวอย่างถูกห่อด้วยฟิล์มใส และเก็บในอุณหภูมิห้อง บ่มเป็นระยะเวลา 7 14 และ 28 วัน

สำหรับการเตรียมตัวอย่างทดสอบหาลำรับแรงอัดของวัสดุเสริมกำลังแบบทวน (Pullout test) มีขนาดความยาว 1,400 เซนติเมตร กว้าง 40 เซนติเมตร และความลึก 20 เซนติเมตร เมื่อบ่มครบเวลาบ่ม 24 ชั่วโมง ถอดแบบหล่อ ตัวอย่างถูกห่อด้วยฟิล์มใส และเก็บในอุณหภูมิห้องตัวอย่างถูกทดสอบที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน (เตรียม 3 ตัวอย่างต่ออัตราส่วนผสม)

ตารางที่ 1 อัตราส่วนการผสม

ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ปูนซีเมนต์ (กิโลกรัม)	ทราย (กิโลกรัม)	น้ำ (กิโลกรัม)	น้ำยาฟองโฟม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาการฉีดฟองโฟม (วินาที)
600	37.50	37.50	14.74	5.89	90
900	37.50	37.50	16.05	4.58	70
1250	37.50	37.50	18.01	2.62	40
1650	37.50	37.50	19.32	1.31	20

2.6 ขั้นตอนการผสมตัวอย่าง

1. ชั่งน้ำหนักซีเมนต์ ทรายและน้ำ นำใส่เครื่องผสม ปั่นผสมเป็นเวลา 5 นาที
2. ฉีดฟองโฟม ระยะเวลาตามตารางที่ 1 ปั่นผสมเป็นเวลา 5 นาที
3. เปิดวาล์วเครื่องผสม เพื่อให้ตัวอย่างผสมไหลลงแบบหล่อทดสอบกำลังรับแรงอัดและแบบหล่อการทดสอบกำลังรับแรงอัด เหล็กเสริมกำลังแบบทวนถูกติดตั้งกึ่งกลางความกว้าง (20 เซนติเมตร) และความสูง (10 เซนติเมตร) ของแบบหล่อการทดสอบกำลังรับแรงอัด

2.7 วิธีการทดสอบ

การทดสอบกำลังรับแรงอัดประลัย (Compressive strength) ทดสอบด้วยเครื่อง Compression machine ขนาด 3,000 กิโลนิวตัน ทดสอบด้วยอัตรา 5 กิโลนิวตันต่อวินาที

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของเหล็กเสริมกำลังแบบทวน (Pullout test) ด้วยแม่แรงไฮดรอลิกทรงกระบอกแบบมีรูทะลุแกนกลาง (Hollow plunger cylinders) ยี่ห้อ Hi-power รุ่น RCH-123 และ RCH-304 ความสามารถในการดึงสูงสุด (Maximum capacity) 12 และ 30 ตัน และมีระยะการยก 76 และ 102 มิลลิเมตร ตามลำดับ วัดแรงอัดด้วยเกจวัดความดัน (Pressure gauge) และวัดระยะการฉุดเหล็กเสริมกำลังตามยาวด้วยไดอัลเกจ (Dial gauge) อัตราการฉุด 1 มิลลิเมตรต่อวินาที การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบแสดงดังรูปที่ 4

3. ผลการทดสอบ

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา

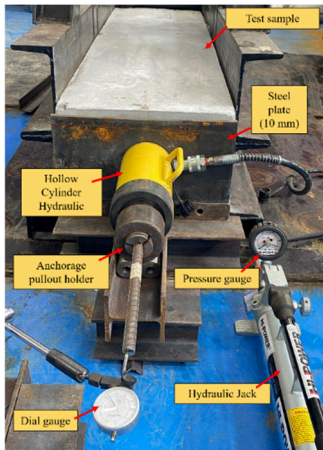
รูปที่ 5 และตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา ที่หน่วยน้ำหนักและระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ พบว่า ค่ากำลังของรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ตามการเพิ่มขึ้นของหน่วยน้ำหนักของตัวอย่าง และค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม การพัฒนา กำลังรับแรงอัดตามระยะบ่ม ของตัวอย่างที่ความหนาแน่น 600 และ 900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีการพัฒนากำลังของกำลังอัดต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังอัดของตัวอย่างที่ความหนาแน่น 1,250

และ 1,650 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เนื่องจากมีร้อยละของซีเมนต์ต่ำกว่าเมื่อเทียบปริมาตรเดียวกัน

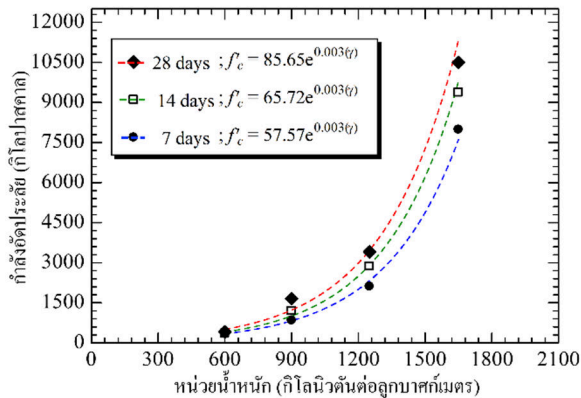
จากผลการทดสอบ (รูปที่ 5) สามารถสร้างสมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและค่าหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาในฟังก์ชันของเอกซิโพเนนเชียล ตามสมการที่ 1

$$f'_c = Ae^{b(\gamma)} \quad (1)$$

เมื่อ A และ b คือ ค่าคงที่ โดยที่ค่า A แปรผันตามระยะเวลาการบ่มมีค่าเท่ากับ 57.57 65.72 และ 85.65 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วัน ในขณะที่ค่า b มีค่าเท่ากับ 0.003 สำหรับทุก ๆ ระยะเวลาการบ่ม



รูปที่ 4 อุปกรณ์การทดสอบและการติดตั้ง



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและหน่วยน้ำหนักที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วัน

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 14 และ 28 วัน

หน่วยน้ำหนัก (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	กำลังอัดประลัย (กิโลปาสคาล) ของตัวอย่างที่เวลาการบ่ม (วัน)		
	7 วัน	14 วัน	28 วัน
600	345	359	411
900	849	1,250	1,658
1,250	2,120	2,870	3,407
1,650	7,989	9,377	10,504

3.2 พฤติกรรมการพัฒนากำลังรับแรงอัดและระยะการเคลื่อนตัวของเหล็กเสริมกำลังแบททาน

3.2.1 การพัฒนาแรงต้านทานการดึงออก (Pullout force development) ของเหล็กเสริมกำลังแบททาน (ไม่มีเหล็กเสริมกำลังตามขวาง $n=0$)

สำหรับตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่น 900 และ 1,250 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร แสดงในรูปที่ 5 a และ b ค่ากำลังการต้านทานแรงดึงจะเพิ่มขึ้นตามค่ากำลังอัดประลัยของตัวอย่าง จากการศึกษาของ Edoardo Cosenze et al., [8] สามารถจำแนกการพัฒนาแรงต้านทานการดึงออกตามระยะการดึงออก เป็น 3 ช่วง คือ 0-3 3-6 และมากกว่า 6 มิลลิเมตร ตามระยะการดึงออก

ช่วงที่ 1 ที่ระยะการดึงออก 0-3 มิลลิเมตร แรงต้านทานการดึงเกิดจากแรงต้านยึดเหนี่ยวเชิงเคมี (Chemical adhesion resistance) ที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของเหล็กข้ออ้อยและคอนกรีต แรงต้านทานการดึงเพิ่มขึ้นเชิงเส้นตรงตามระยะการดึงออก

ช่วงที่ 2 ระยะการดึง 3-6 มิลลิเมตร เมื่อเหล็กเสริมกำลังเคลื่อนตัวมากกว่า 3 มิลลิเมตร แรงต้านทานการดึงออกมีค่าคงที่ ซึ่งเกิดจากแรงต้านทานการดึงออกของบั้งของเหล็กข้ออ้อย (Ribs)

ช่วงที่ 3 ระยะการดึงมากกว่า 6 มิลลิเมตร เมื่อเหล็กเสริมกำลังเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้น จะเริ่มเกิดรอยร้าวทั้งในแนวตั้งฉาก (perpendicular) และแนวขนาน (parallel) ของเหล็กเสริมกำลัง แนวรอยร้าวจะเพิ่มขยายขึ้นตามระยะการดึงของเหล็กเสริมกำลัง ส่งผลให้แรงต้านทานการดึงออกมีค่าลดลง และเกิดการวิบัติด้วยการดึงออก (Pullout failure)

สำหรับกรณี ตัวอย่างความหนาแน่น 1,650 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร การพัฒนาแรงต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมกำลังแบททาน ($n=0$) แสดงในรูป 3c จากผลการทดสอบ พบว่า เกิดการวิบัติจากการฉีกขาดของเหล็กเสริมกำลัง (Rupture failure) สาเหตุจาก ตัวอย่างมีค่ากำลังอัดประลัยสูง (10,504 กิโลปาสคาล) ส่งผลให้ การพัฒนากำลังต้านทานแรงดึงระหว่างเหล็กเสริมกำลังและคอนกรีตมีค่าสูง และมีค่าเท่ากับค่ากำลังของเหล็กข้ออ้อย ที่มีค่ากำลังคราก (yield strength) เท่ากับ 109.91 กิโลนิวตัน และค่ากำลังรับแรงสูงสุด (Ultimate strength) 129.69 กิโลนิวตัน เมื่อสิ้นสุดการทดสอบ ไม่ปรากฏการแตกร้าวที่ผิวภายนอกของตัวอย่าง

3.2.2 การพัฒนาแรงต้านทานการดึงออก (Pullout force development) ของเหล็กเสริมกำลังแบททาน (เหล็กเสริมกำลังตามขวาง จำนวน 1 และ 2 ขึ้น $n=1-2$)

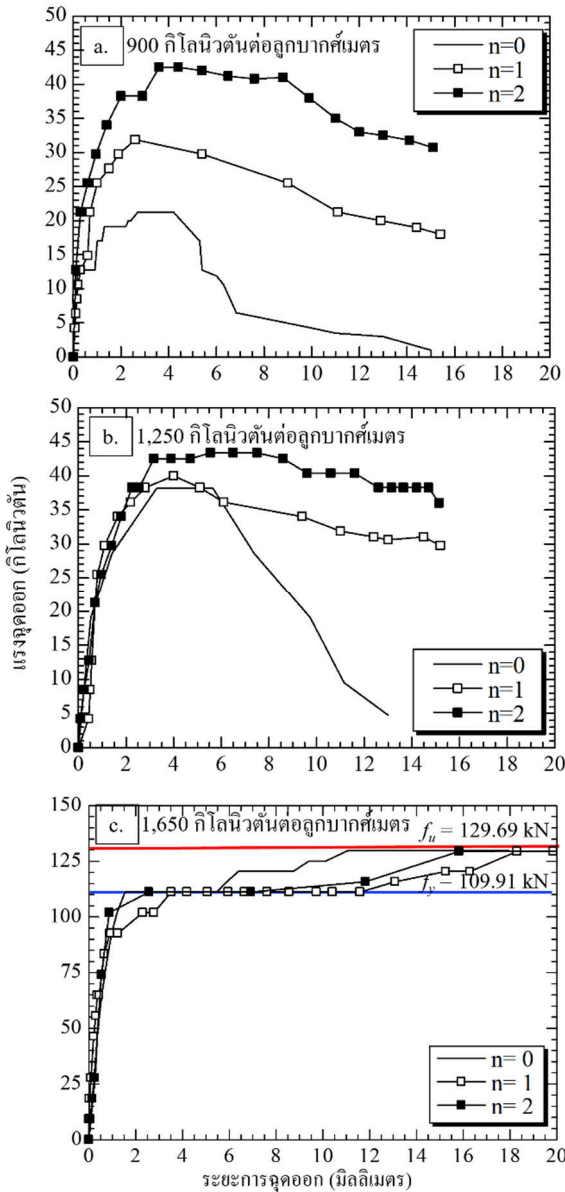
จากรูปที่ 5 สามารถจำแนกลักษณะการพัฒนากำลังต้านทานการดึงได้เป็น 2 ช่วง คือ

ช่วงที่ 1 ที่ระยะการดึง 0-3 มิลลิเมตร แรงต้านทานการดึงเกิดจากแรงต้านยึดเหนี่ยวเชิงเคมี (Chemical adhesion resistance) ที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของเหล็กข้ออ้อยและคอนกรีต แรงต้านทานการดึงเพิ่มขึ้นเชิงเส้นตรงตามระยะการดึงออก

ช่วงที่ 2 ที่ระยะการดึงมากกว่า 3 มิลลิเมตร แรงต้านทานการดึงออกเกิดจากผลรวมของแรงต้านทานการดึงออก (bearing) ของบั้งของเหล็กข้ออ้อย (Ribs) และเหล็กเสริมกำลังตามขวาง (Transvers members)

สำหรับตัวอย่างความหนาแน่น 600 และ 900 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร มีค่ากำลังอัดประลัยเท่ากับ 411 และ 1,658 กิโลปาสคาล (ตามลำดับ) การพัฒนาแรงต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมกำลังแบททานเพิ่มขึ้นตามจำนวนของเหล็กเสริมกำลังตามขวาง ดังแสดงในรูปที่ 5a แต่เนื่องจากคอนกรีตมวลเบา มีความพรุนของช่องว่างอากาศมาก เมื่อเหล็กเสริมกำลังแบททานถูกดึง จะเกิดการยุบตัวของมวลคอนกรีตมวลเบา ด้านหน้าของเหล็กเสริมกำลังตามขวาง จึงไม่เกิดการพัฒนากำลังรับแรง

แบกทาน และส่งผลให้เกิดการวิบัติแบบเฉือนทะลุ (Punching shear) ที่ด้านหน้าเหล็กเสริมกำลังแบกทานตามขวางภายในตัวอย่าง เมื่อสิ้นสุดการทดสอบ ไม่พบรอยแตกร้าวที่ผิวด้านนอกของคิวดตัวอย่าง



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดและระยะการเคลื่อนตัว ที่ความหนาแน่นต่าง ๆ สำหรับ $n = 0, 1$ และ 2 ระยะการบ่ม 28 วัน

สำหรับตัวอย่างความหนาแน่น 1,250 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร มีค่ากำลังอัดประลัยเท่ากับ 3,407 กิโลปาสกาล การพัฒนาแรงต้านทานการดุดออกสูงสุด มีค่าเท่ากับ 41.15 และ 43.5 กิโลนิวตัน ตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนเหล็กเสริมกำลัง $n=1$ และ $n=2$ ตามลำดับ การพัฒนากำลังของเหล็กเสริมกำลังแบกทานเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจาก เมื่อเหล็กเสริมกำลังแบกทานถูกดุดออกที่ระยะการดุดมากกว่า 3 มิลลิเมตร จะเกิดการพัฒนาระบบแบกทานที่บริเวณด้านหน้าเหล็กเสริมกำลังตามขวาง ซึ่งส่งผลให้เกิดหน่วยแรงดึงและเกิดการพัฒนารอยร้าว (Cracking) ภายในคอนกรีต ที่ช่วงระยะการดุดออก 3-14 มิลลิเมตรขนาดของรอยร้าวจะเพิ่มขึ้นตามระยะการดุดออก ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดุดลดลง และที่ระยะการดุดออกเท่ากับ 15 มิลลิเมตร เกิดแยกตัวอย่างสิ้นเชิงของตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างที่ความหนาแน่น 1,250 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับเหล็กเสริมกำลังแบกทาน $n = 1$

สำหรับกรณี ตัวอย่างที่ความหนาแน่น 1,650 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร จากผลการทดสอบ พบว่า การพัฒนาแรงต้านทานการดุดออกของเหล็กเสริมกำลังแบกทาน ที่ $n=1$ และ $n=2$ มี พฤติกรรมการพัฒนาแรงต้านทานการดุดออกของเหล็กเสริมกำลังแบกทานคล้ายคลึงกับ $n=0$ เนื่องจากการวิบัติจากการฉีกขาดของเหล็กข้ออ้อย เมื่อสิ้นสุดการทดสอบ ไม่ปรากฏการแตกร้าวที่ผิวด้านนอกของตัวอย่าง ตารางที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ของหน่วยน้ำหนักกำลังอัดประลัยและกำลังต้านทานแรงดุดสูงสุดและรูปแบบการวิบัติ ของตัวอย่างที่ระยะการบ่ม 28 วัน

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ของหน่วยน้ำหนัก กำลังอัดประลัย และกำลังต้านทานแรงดุดสูงสุดและรูปแบบการวิบัติ ที่ระยะการบ่ม 28 วัน

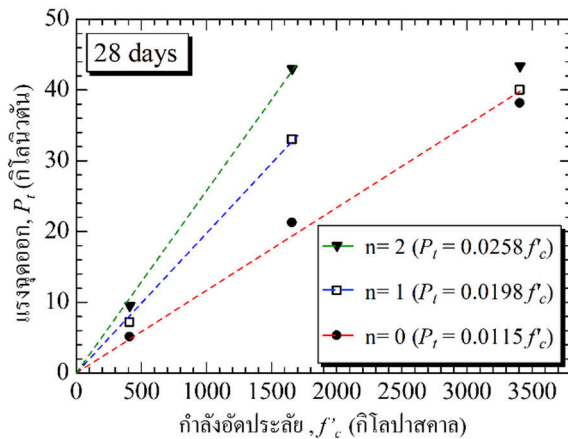
หน่วยน้ำหนัก (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	กำลังอัดประลัย (กิโลปาสกาล) บ่ม 28 วัน	ค่ากำลังต้านทานแรงดุดสูงสุด		
		$n = 0$	$n = 1$	$n = 2$
600	411.20	5.12	7.15	9.50
900	1658.21	21.26	33.00	43.00
1250	3407.49	38.15	40.20*	43.36*
1650	10503.51	42.51**	43.36**	129.69**

* วิบัติจากการแตกร้าวของคอนกรีตมวลเบา LCC

** วิบัติจากการฉีกขาดของเหล็กเสริมกำลังตามยาว

3.3 สมการทำนายกำลังต้านทานแรงดุดของเหล็กเสริมกำลังแบกทาน ($n=0, 1$ และ 2)

รูปที่ 7 แสดงสมการทำนายกำลังต้านทานแรงดุดของเหล็กเสริมกำลังแบกทาน ที่ไม่มีเหล็กเสริมกำลังตามขวาง ($n=0$) และมีเหล็กเสริมกำลังตามขวางจำนวน 1 และ 2 ชั้น ($n=1-2$) ที่หน่วยน้ำหนัก 600 900 และ 1,250 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร (ไม่วิเคราะห์ข้อมูลที่หน่วยน้ำหนัก 1,650 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร เนื่องจากเหล็กเสริมกำลังตามยาวเกิดการฉีกขาด)



รูปที่ 7 กำลังต้านทานแรงดุดของเหล็กเสริมกำลังแบกทาน ($n=0-2$) ที่หน่วยน้ำหนัก 600 900 และ 1250 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร

จากรูปที่ 7 สำหรับ $n=0$ ที่ความหนาแน่น 600 900 และ 1250 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ค่ากำลังต้านทานแรงดุดเพิ่มขึ้นเชิงเส้นตรงกับการเพิ่มขึ้นของหน่วยน้ำหนักประลัย ขณะที่ $n = 1$ และ 2 ค่ากำลังต้านทานแรงดุด เพิ่มขึ้นเชิงเส้นตรง ในช่วงหน่วยน้ำหนัก 600 และ 900 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร แต่ที่ 1250 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตรตัวอย่างคอนกรีตเกิดการแตกร้าว

4. สรุป

การศึกษาการพัฒนากำลังต้านทานการดุดออกของเหล็กเสริมกำลังแบกทานในวัสดุคอนกรีตมวลเบาชนิด lightweight Cellular Concrete (LCC) เพื่อความเข้าใจในพฤติกรรมกำลังต้านทานแรงดุดของเหล็กเสริมกำลังแบกทานในวัสดุ LCC ที่มีความหนาแน่นต่าง ๆ เพื่อใช้สำหรับการออกแบบกำแพงกันดิน โดยวัสดุคอนกรีตมวลเบาที่มีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 600 900 1,250 และ 1,650 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และเหล็กเสริมกำลังแบกทานที่มีเหล็กเสริมกำลังตามยาวที่มีเหล็กเสริมตามขวางจำนวน 1 และ 2 ชั้น (เหล็กฉากขนาด 25.40 มิลลิเมตร ความยาวเหล็กฉาก 150 มิลลิเมตร) จากการทดสอบพบว่า

1. ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและค่าหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา ในฟังก์ชันของเอกซิโพเนนเชียล โดยที่ ค่า A แปรผันตามระยะเวลาการบ่ม มีค่าเท่ากับ 57.57 65.72 และ 85.65 ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 14 และ 28 วัน ในขณะที่ ค่า b มีค่าเท่ากับ 0.003 สำหรับทุก ๆ ระยะเวลาการบ่ม

2. รูปแบบการวิบัติของเหล็กเสริมกำลังแบกทานภายในการดุดออก (Pullout failure) ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและค่ากำลังของคอนกรีตมวลเบา

3. ที่ระยะการดุดต่ำกว่า 3 มิลลิเมตร ค่าแรงต้านทานการดุดออกขึ้นอยู่กับแรงยึดเกาะ (Adhesive) และแรงเสียดทานเป็นหลัก และเมื่อเหล็กเสริมกำลัง ถูกดุดออกมากกว่า 3 มิลลิเมตร ค่าแรงต้านทานการดุดออก คือผลรวมของแรงต้านทานการดุดออก (bearing) ของบั้งของเหล็กข้ออ้อย (Ribs) และเหล็กเสริมกำลังตามขวาง (Transvers members) เมื่อตัวอย่างถูกดุดออก ค่าแรงต้านทานการดุดออกลดลง เนื่องจากเกิดรอยร้าวภายในตัวอย่าง และพัฒนาจนตัวอย่างเกิดการวิบัติอย่างสมบูรณ์ ที่ระยะการดุด 15 มิลลิเมตร ในทุก ๆ กรณีการทดสอบ

4. การเพิ่มจำนวนของเหล็กเสริมกำลังแบกทานตามขวาง มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานแรงดุดอย่างชัดเจน เมื่อตัวเหล็กเสริมกำลังแบกทาน ถูกฝังในตัวอย่างที่หน่วยน้ำหนัก 600 และ 900 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร แต่ที่ความหนาแน่น 1,250 และ 1,650 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร การเพิ่มจำนวนของเหล็กเสริมกำลังตามขวาง มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานแรงดุดอย่างไม่มีนัยสำคัญ เนื่องจากการแตกร้าวของคอนกรีตและการฉีกขาดของเหล็กเสริมกำลังตามยาว

เอกสารอ้างอิง

1. Sukmak, K., et al., *Pullout resistance of bearing reinforcement embedded in marginal lateritic soil at molding water contents*. Geotextiles and Geomembranes, 2016. **44**(3): p. 475-483.
2. Sukmak, K., et al., *Effect of fine content on the pullout resistance mechanism of bearing reinforcement embedded in cohesive-frictional soils*. Geotextiles and Geomembranes, 2015. **43**(2): p. 107-117.

3. Suksiripattanapong, C., et al., *Pullout resistance of bearing reinforcement embedded in coarse-grained soils*. Geotextiles and Geomembranes, 2013. **36**: p. 44-54.
4. Udomchai, A., et al., *Performance of the bearing reinforcement earth wall as a retaining structure in the Mae Moh mine, Thailand*. Geotextiles and Geomembranes, 2017. **45**(4): p. 350-360.
5. Suksiripattanapong, C., et al., *Numerical analysis of bearing reinforcement earth (BRE) wall*. Geotextiles and Geomembranes, 2012. **32**: p. 28-37.
6. Tiwari, B., et al., *Mechanical Properties of Lightweight Cellular Concrete for Geotechnical Applications*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017. **29**(7): p. 06017007.
7. Ye, Y., et al., *Pullout resistance of geogrid and steel reinforcement embedded in lightweight cellular concrete backfill*. Geotextiles and Geomembranes, 2022. **50**(3): p. 432-443.
8. Cosenza, E., G. Manfredi, and R. Realfonzo, *Behavior and Modeling of Bond of FRP Rebars to Concrete*. Journal of Composites for Construction, 1997. **1**(2): p. 40-51.