



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

กำลังรับแรงเฉือนในคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

Shear strength in reinforced cellular lightweight concrete beam

กิตติธัช หมูทอง¹ เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย^{2*}

¹ ลูกจ้างโครงการทดสอบวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

Kittituss Moothong¹ Griengsak Kaewkulchai^{2*}

¹ Material testing employer, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University Ubon Ratchathani 34190

² Assistant professor, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University Ubon Ratchathani 34190

* Corresponding author.

E-mail: griengsak.k@ubu.ac.th; Telephone: 0 4535 3345

วันที่รับบทความ 8 กุมภาพันธ์ 2567; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 19 มีนาคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ 25 พฤษภาคม 2567

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอผลการศึกษากำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ ที่ความหนาแน่นเปียก 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีปริมาณเหล็กเสริมตามยาวในสัดส่วนร้อยละ 0.2 ถึง 1.8 ของพื้นที่หน้าตัด พิจารณาตัวอย่างที่เสริมเฉพาะเหล็กตามยาว และตัวอย่างที่เสริมเหล็กตามยาวและเหล็กปลอก ผลการศึกษาพบว่ากำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน ซึ่งเมื่อพิจารณาตัวคูณลดกำลัง (λ) พบว่าค่าของตัวคูณลดกำลังแปรผันตรงกับปริมาณเหล็กเสริมตามยาว และมีค่าน้อยกว่ามาตรฐาน ตัวอย่างที่เสริมเหล็กปลอกมีกำลังรับแรงเฉือนที่ต่ำกว่าตัวอย่างที่เสริมเฉพาะเหล็กตามยาว เนื่องจากการขาดกลไกในการต้านทานแรงเฉือนร่วมกัน ของคอนกรีตกับเหล็กปลอก ซึ่งกำลังเกิดจากเหล็กปลอกเป็นสำคัญ และกำลังจากคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศมีส่วนน้อย จึงเสนอให้ใช้วิธีการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนในคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่เสริมเหล็กโดยไม่คำนึงถึงกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต

คำสำคัญ

กำลังรับแรงเฉือน คอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ โฟมคอนกรีต คอนกรีตเสริมเหล็ก

Abstract

This paper presents the experimental results on the shear strength of reinforced cellular lightweight concrete beams with a wet density of 1,800 kg/m³ and longitudinal reinforcement ranging from 0.2% to 1.8%. The tested beams include those with only longitudinal reinforcement and other with both longitudinal and stirrup reinforcement. Results indicate that the shear strength of the specimens is lower than the value specified in the design code. The factor to reduced shear strength of concrete (λ) depended on percentage of longitudinal reinforcement, which is less than the required amount. Additionally, beams with stirrup reinforcement exhibit lower shear strength compared to beams with only longitudinal reinforcement, as the concrete and stirrups are not concerted to resistance shear force, and stirrups are the main contributor to resisting shear force, shear resistance from cellular lightweight concrete is very low. Therefore, a revised method of determining shear strength in reinforced cellular lightweight concrete beam, that excludes concrete shear resistance is recommended.

Keywords

shear strength; cellular lightweight concrete; foamed concrete; reinforced concrete

1. คำนำ

อุตสาหกรรมกรรมการก่อสร้างของไทยในปัจจุบันมีการขยายตัวอย่างมาก อีกทั้งนวัตกรรม และเทคนิคการก่อสร้างใหม่ ๆ ได้ถูกนำมาใช้มากขึ้น วัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้างถูกวิจัย และนำมาใช้งานเพื่อตอบสนองความต้องการอย่างหลากหลาย วัสดุชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้งานคือคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (Cellular Lightweight Concrete, CLC) ซึ่งนิยมใช้งานเป็นวัสดุไม่รับแรง เช่น วัสดุก่อ วัสดุลาดคันทาง วัสดุฉนวน และวัสดุอุด เป็นต้น วัสดุชนิดนี้มีน้ำหนักเบาเนื่องจากคอนกรีตชนิดนี้ไม่มีมวลรวมหยาบ (หิน) เป็นส่วนผสม และใช้ฟองอากาศผสมแทนมวลรวมหยาบ โดยที่ส่วนผสมจะมีเพียงมอร์ตาร์ (Mortar) ซึ่งประกอบด้วยปูนซีเมนต์ หยาบ และน้ำผสมกับฟองโฟมเหลวคงรูป ที่ได้จากกระบวนการอัดอากาศหรือตีให้เกิดฟอง จากสารผลิตฟองอากาศ (Foaming Agent) ที่สังเคราะห์ได้จากสารเคมี หรืออินทรีย์สาร กระบวนการผลิตคอนกรีตชนิดนี้ใช้วิธีการเติมฟองอากาศเข้าไปผสมกับมอร์ตาร์ (Pre – Formed Foam) และทำการบ่มแบบไม่อบไอน้ำ เมื่อคอนกรีตแข็งตัวฟองโฟมที่ผสมจะทำให้เกิดรูพรุนในเนื้อคอนกรีต ทำให้มีน้ำหนักเบา คุณสมบัติทั่วไปของคอนกรีตชนิดนี้คือ มีความสามารถในการทำงานได้ดี มีความเป็นฉนวนของความร้อน และเสียง โดยคุณสมบัติพื้นฐานจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่น และอัตราส่วนผสม [1] ความหนาแน่นที่ใช้งานจะอยู่ในช่วง 300 - 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร คุณสมบัติด้านต่าง ๆ นั้นได้มีการศึกษา และวิจัยมาบ้างแล้วทั้งด้านคุณสมบัติการใช้งาน และคุณสมบัติทางด้านกำลัง

จากการศึกษาคุณสมบัติการใช้งานพบว่าความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศจะแปรผกผันกับปริมาณฟองโฟมเหลว และแปรผันตรงกับอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ที่ผสม [2] เนื่องจากไม่มีมวลรวมหยาบผสม การหดตัวอาจสูงมากกว่า 10 เท่า ของการหดตัวเมื่อแห้งของคอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักปกติ ขึ้นอยู่กับความหนาแน่น และกรรมวิธีการบ่ม [3] ซึ่งมีอัตราการหดตัวแบบแห้งที่อายุ 28 วัน อยู่ในช่วงร้อยละ -0.218 ถึง -0.055 มีอัตราการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 8 - 50 ที่ความหนาแน่น 800 -

1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอยู่ระหว่าง 0.00157 ถึง 0.00566 วัตต์ต่อเซนติเมตร องศาเซลเซียส [4] มีการดูดซับเสียงได้ดี และส่งผ่านเสียงโดยเป็นตัวกลางได้ต่ำ เนื่องจากคุณสมบัติของรูพรุนในเนื้อคอนกรีต [5] ความคงทนของการเกิดคาร์บอนเนชั่น (Carbonation) พบว่าความลึกของการเกิดคาร์บอนเนชั่นสูงสุดในคอนกรีตชนิดนี้ที่อายุ 5 เดือนมีค่าเท่ากับ 18 มิลลิเมตร เมื่อบ่มในอากาศ [6] ความสามารถในการทนไฟ (Fired Resistance) ของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่ความหนาแน่น 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีความสามารถในการทนไฟในเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีความลึก 63.2 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส [7]

จากการศึกษาคุณสมบัติทางด้านกำลังพบว่าคอนกรีตชนิดนี้สามารถให้กำลังรับแรงอัดได้ตั้งแต่ 15 - 230 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ความหนาแน่น 300 - 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [8] ค่ากำลังรับแรงดึงโดยตรงอยู่ระหว่าง $0.09f'_c - 0.30f'_c$ ค่ากำลังรับแรงดึงแยกระหว่าง $0.86\sqrt{f'_c} - 1.32\sqrt{f'_c}$ และค่าโมดูลัสแตกร้าระหว่าง $0.27\sqrt{f'_c} - 1.32\sqrt{f'_c}$ ที่ความหนาแน่น 800 - 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [9,10] มีสมการแรงยึดเหนี่ยวสำหรับเหล็กเสริมเส้นกลมเท่ากับ $u_w = 0.624\sqrt{f'_c}/D$ และสำหรับเหล็กข้ออ้อยเท่ากับ $u_w = 2.39\sqrt{f'_c}/D$ ที่ความหนาแน่น 1,600 และ 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [11] และมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเป็น 0.71 - 1.03 เท่าของค่าคำนวณได้จากมาตรฐาน ACI [12]

จากการศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ทั้งในด้านกำลังและ ด้านการใช้งานที่ได้กล่าวมาแล้ว เห็นได้ว่าองค์ความรู้ต่าง ๆ นั้นค่อนข้างเพียงพอต่อการนำไปใช้งานโดยทั่วไป และเนื่องจากคุณสมบัติทางด้านกำลังนั้นสามารถนำมาใช้งานทางด้านโครงสร้างได้ จึงได้มีการศึกษาคุณสมบัติและ พฤติกรรมทางโครงสร้าง ตลอดจนความเป็นไปได้ที่จะนำคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศมาใช้งานทางด้านโครงสร้างรับกำลัง ซึ่งยังมีการศึกษาน้อยมาก จากการการศึกษาด้านกำลัง และ

พฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัด พบว่าการออกแบบโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเต็มพองอากาศที่เสริมเหล็กที่มีความหนาแน่น 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยมาตรฐาน ACI มีความปลอดภัย [13] และคานคอนกรีตมวลเบาแบบเต็มพองอากาศที่เสริมเหล็กที่มีความหนาแน่น 1,400 และ 1,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีพฤติกรรมการแอ่นตัวที่จุดวิบัติมากกว่าคอนกรีตปกติถึง 2.3 เท่า โดยมีลักษณะการกระจายตัวของรอยแตกกว้างที่มาก และยาวกว่า ซึ่งคุณสมบัติต่าง ๆ มีแนวโน้มที่จะใช้งานด้านโครงสร้างได้ แต่ต้องมีการพัฒนาคุณสมบัติในด้านกำลังให้ดีขึ้น [14] และยังไม่พบว่ามีการศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้างด้านอื่น ๆ รวมถึงกำลังรับแรงเฉือน ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางโครงสร้างที่สำคัญ

ในการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐานนั้น กำลังรับแรงเฉือนที่ใช้ออกแบบได้มาจากกำลังของวัสดุสองส่วนคือ เหล็กปลอก และคอนกรีตดังสมการที่ (1)

$$V_n = V_s + V_c \quad (1)$$

โดยที่ V_n คือค่ากำลังรับแรงเฉือนประลัยของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก V_s คือค่ากำลังรับแรงเฉือนของเหล็กปลอก และ V_c คือค่ากำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต

ตามมาตรฐาน ACI กำลังของวัสดุทั้งสองต้านทานแรงดึงแท่งในระนาบแรงเฉือนเป็นมุม 45 องศา ห่างจากจุดรองรับเป็นระยะเท่ากับความลึกประสิทธิภาพ (d) โดยที่ค่ากำลังรับแรงเฉือนของเหล็กปลอกได้จาก กำลังต้านทานแรงดึงของเหล็กปลอกที่อยู่บริเวณรอยแตก มีสมการการคำนวณดังสมการที่ (2)

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{s} \quad (2)$$

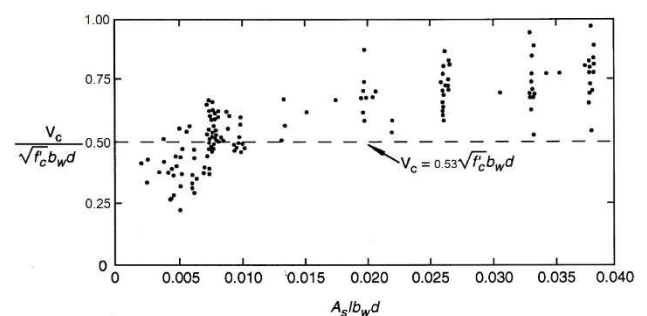
โดยที่ A_v คือพื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอก f_y คือกำลังครากของเหล็กปลอก และ s คือระยะเรียงของเหล็กปลอก

และกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตที่ได้จากกำลังต้านทานที่มีอิทธิพลมาจากปัจจัยสามส่วนที่ต้านทานแรงเฉือนร่วมกัน

ได้แก่ กลไกต้านทานแรงเฉือนเนื่องจากเหล็กเสริมตามยาว ซึ่งพยายามต้านทานการตัดเฉพาที่ (Dowel Action) กลไกการถ่ายแรงผ่านบริเวณรอยแตกโดยอาศัยการยึดเกาะของผิวมวลรวม (Aggregate Interlocking) และกลไกต้านทานแรงเฉือนจากส่วนของหน้าตัดที่อยู่ภายใต้หน่วยแรงอัด และยังไม่แตกร้าว (Uncracked Portion) ซึ่งกลไกทั้งสามนี้ยังไม่สามารถระบุชัดเจนได้ว่าส่วนใดสามารถต้านทานแรงเฉือนได้เท่าใด ทราบเพียงว่าสามารถต้านทานแรงเฉือนร่วมกัน ฉะนั้นสมการที่ใช้ในการคำนวณค่ากำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตตามมาตรฐานนั้นจึงได้จากการทดสอบ โดยจากการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยเสริมเฉพาะเหล็กตามยาวที่มีปริมาณเหล็กเสริมตามยาวต่างกันจำนวนมาก ดังรูปที่ 1 [15,16] โดยที่ปริมาณเหล็กเสริมตามยาว (ρ) คืออัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมตามยาว ต่อพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพของคานคอนกรีตเสริมเหล็กดังสมการที่ (3)

$$\rho = \frac{A_s}{b_w \cdot d} \quad (3)$$

โดยที่ A_s คือพื้นที่หน้าตัดของเหล็กตามยาว และ b_w คือความกว้างของหน้าตัดคาน



รูปที่ 1 อิทธิพลของปริมาณเหล็กเสริมตามยาวต่อกำลังรับแรงเฉือนขององค์อาคารที่ไม่เสริมเหล็กปลอก [15,16]

จากมาตรฐาน ACI ในการคำนวณค่ากำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตที่มีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่มีความหนาแน่นปกติ กำหนดให้มีตัวคูณลดกำลังรับแรงเฉือน (λ) กับสมการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต ดังสมการที่ (4) ในหน่วยเมตริก โดยที่ค่า f'_c มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc)

$$V_c = 0.53 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_c'} \cdot b_w \cdot d \quad (4)$$

โดยที่ λ มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อใช้คอนกรีตความหนาแน่นปกติ λ มีค่าเท่ากับ 0.85 เมื่อใช้คอนกรีตมวลรวมเบา (ใช้มวลรวมเบาแทนหิน) และ λ มีค่าเท่ากับ 0.75 เมื่อใช้คอนกรีตมวลเบาอื่น ๆ

ซึ่งสำหรับคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศตัวคุณลดกำลังมีค่าเท่ากับ 0.75 [17] นอกจากคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศแล้ว ยังมีคอนกรีตมวลเบาชนิดอื่น ๆ ที่ผลิตหรือใช้วัสดุผสมที่แตกต่างกัน (เช่น คอนกรีตมวลเบาแบบอบไอน้ำ, Autoclaved Aerated Concrete; AAC) โดยค่าที่ใช้ลดกำลังเป็นค่าที่ไม่เฉพาะเจาะจง ค่าที่คำนวณได้จากสมการนี้สำหรับคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศอาจให้ค่าจากการคำนวณไม่ถูกต้องได้ จึงมีความจำเป็นที่ต้องศึกษาเรื่องกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตชนิดนี้ จากการศึกษาที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่ความหนาแน่น 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีคุณสมบัติทางด้านกำลังที่สูง และมีการศึกษาคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องเนื่องกับการประยุกต์ใช้งานในด้านโครงสร้างพอสมควร เพื่อที่จะสามารถคำนวณ และ ออกแบบกำลังรับแรงเฉือนได้อย่างถูกต้อง บทความนี้จึงได้นำเสนอการศึกษาการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศเสริมเหล็ก ที่มีปริมาณเหล็กเสริมตามยาวร้อยละ 0.2 – 1.8 และการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศเสริมเหล็ก ที่เสริมเหล็กเสริมตามยาวและ เหล็กปลอก ที่ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศเท่ากับ 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

2. วิธีการศึกษา

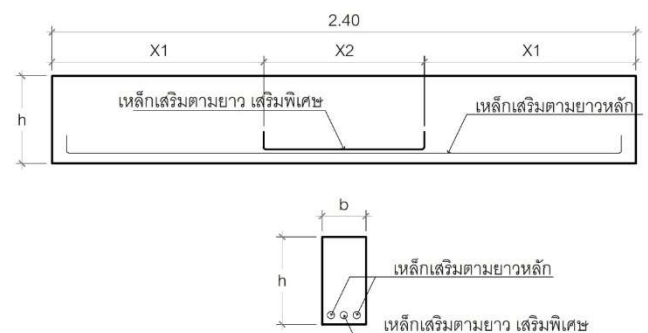
จากที่กล่าวมาแล้วในบทนำว่ากำลังของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดจากกำลังของเหล็กปลอก และคอนกรีต โดยที่กำลังของเหล็กปลอกสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2) แต่กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตนั้นจากสมการที่ (4) เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบ ฉะนั้นจึงอ้างอิงการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ ตามวิธีการหาค่ากำลัง

รับแรงเฉือนของคอนกรีตปกติ โดยได้ทำการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ 2 แบบ

ตารางที่ 1 ตัวอย่างการทดสอบคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่เสริมเฉพาะเหล็กตามยาว

No	b (m)	h (m)	X2 (m)	เหล็ก เสริม ตามยาว	เหล็ก เสริม พิเศษ	d (cm)	ρ (%)
B1	0.15	0.30	1.25	1-DB12	2-DB12	26.9	0.28
B2	0.15	0.30	0.55	2-DB12	1-DB12	26.9	0.56
B3	0.15	0.30	-	3-DB12	-	26.9	0.84
B4	0.15	0.30	-	4-DB12	-	25.1	1.2
B5	0.15	0.30	-	2-DB16	-	26.7	1
B6	0.15	0.30	-	3-DB16	-	26.7	1.51
B7	0.20	0.40	0.45	1-DB20	1-DB12	36.5	0.43
B8	0.20	0.40	-	4-DB12	-	35.1	0.64
B9	0.20	0.40	-	4-DB16	-	34.7	1.16
B10	0.20	0.40	-	5-DB16	-	35.1	1.43
B11	0.20	0.40	-	3-DB20	-	36.5	1.29
B12	0.20	0.40	-	4-DB20	-	34.3	1.83

$$X1 = 0.5 \cdot (2.40 - X2)$$



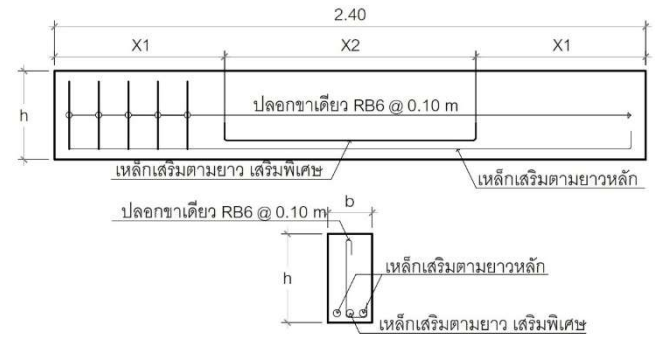
รูปที่ 2 รายละเอียดและมิติของตัวอย่างการทดสอบคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศเสริมเหล็ก เสริมเฉพาะเหล็กตามยาว

แบบแรกคือการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ ที่เสริมเฉพาะเหล็กตามยาว ดังตารางที่ 1 และรูปที่ 2 ซึ่งไม่รวมเหล็กที่เสริมจริงบริเวณกลางคาน ในระยะ X_2 ที่เสริมเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการวิบัติด้วยโมเมนต์ดัด และแบบที่สองการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่เสริมเหล็กตามยาว และเหล็กปลอก ดังตารางที่ 2 และรูปที่ 3 เพื่อพิจารณาหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ และความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศกับเหล็กปลอก โดยตัวอย่างที่ทดสอบถูกควบคุมให้วิบัติด้วยรูปแบบของแรงเฉือนเท่านั้น เช่นเดียวกับการทดสอบแบบแรก โดยการเพิ่มเหล็กเสริมตามยาวเข้าไปในบริเวณกลางคาน เป็นระยะ X_2 ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวอย่างการทดสอบคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่เสริมเหล็กตามยาวและ เหล็กปลอก

No	b (m)	h (m)	X2 (m)	เหล็ก เสริม ตามยาว	เหล็ก เสริม พิเศษ	d (cm)	P (%)
BS 1	0.1 5	0.3 0	1.5 0	1-DB12	2-DB16	26.3	0.29
BS 2	0.1 5	0.3 0	1.1 5	1-DB16	2-DB16	26.1	0.51
BS 3	0.1 5	0.3 0	0.6 5	3-DB12	2-DB16	26.3	0.86
BS 4	0.1 5	0.3 0	0.4 5	2-DB16	2-DB16	26.1	1.03
BS 5	0.1 5	0.3 0	0.3 0	4-DB12	2-DB16	24.5	1.23
BS 6	0.1 5	0.3 0	-	3-DB16	2-DB16	26.1	1.54
BS 7	0.1 5	0.3 0	-	2-DB20	-	25.9	1.62

$$X1 = 0.5 \cdot (2.40 - X2)$$

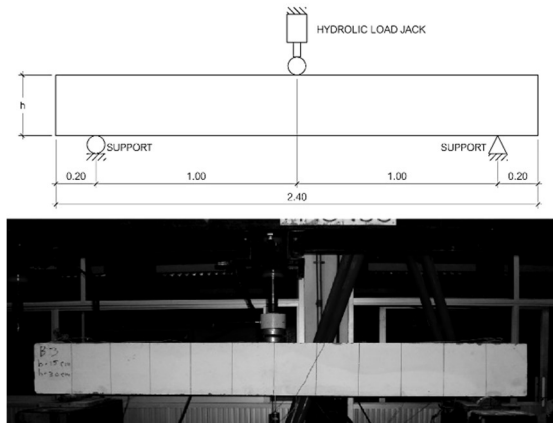


รูปที่ 3 รายละเอียดและมิติของตัวอย่างการทดสอบคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่เสริมเหล็กตามยาว และเหล็กปลอก

โดยที่การทดสอบแบบที่สอง ขนาดหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบถูกปรับลดลงเหลือเพียงขนาดกว้าง 15 เซนติเมตร ลึก 30 เซนติเมตร และเสริมเหล็กปลอกขนาดเล็กขนาด R6 ที่ระยะเรียง 0.10 เมตร ตลอดความยาวคาน และการที่ต้องลดขนาดหน้าตัดคานตัวอย่างลง เนื่องจากเมื่อหน้าตัดคานมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นค่ากำลังรับแรงเฉือนจะเพิ่มตาม และเมื่อพิจารณา กำลังรับแรงเฉือนตามทฤษฎีจากสมการที่ (1) จะทำให้กำลังรับแรงเฉือนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่อการป้องกันคานตัวอย่างทดสอบไม่ให้เกิดการวิบัติด้วยโมเมนต์ดัด ก่อนเกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือน จากทฤษฎีการคำนวณกำลังต้านทานแรงดึงของเหล็กปลอกที่อยู่บริเวณรอยแตก ดังสมการที่ (2) หากใช้หน้าตัดคานตัวอย่างทดสอบตามขนาด กว้าง 15 เซนติเมตร ลึก 30 เซนติเมตร เมื่อทำการเสริมเหล็กปลอกที่ระยะห่างทุก 10 เซนติเมตร จะมีเหล็กปลอกต้านทานแรงเฉือนอย่างน้อย 2 ปลอกในบริเวณรอยแตกนั้น

การทดสอบ ทำโดยการหล่อตัวอย่างคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่ความหนาแน่นเปียก 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามขนาดและรายละเอียดดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2 และรูปที่ 3 ซึ่งใช้เหล็กเสริมตามยาวชั้นคุณภาพ SD30 (กำลังคราก = 3,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) และเหล็กปลอกชั้นคุณภาพ SR24 (กำลังคราก = 2,400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) บ่มตัวอย่างในอากาศเป็นเวลา 28 วัน แล้วทำการทดสอบให้น้ำหนักกระทำแบบจุดเดียวที่กึ่งกลางคานตัวอย่าง ซึ่งมีความยาวช่วง 2 เมตร ดังรูปที่ 4 ใช้การทดสอบคานด้วยวิธีทดสอบแบบแรงกระทำสามจุด (Three Pointed Loading) โดยการควบคุมตัวอย่างทดสอบ

ให้เกิดการวิบัติในรูปแบบการวิบัติด้วยแรงเฉือน (Shear Failure Mode) โดยการเสริมเหล็กตามยาวเสริมพิเศษในช่วงกลางคานเพื่อป้องกันการวิบัติด้วยโมเมนต์ดัด ซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณเหล็กเสริมตามยาวที่บริเวณระยะ d จากจุดรองรับเปลี่ยนแปลง (ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือนตามทฤษฎี) ทำการทดสอบให้น้ำหนัก โดยการให้น้ำหนักกระทำจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบวิบัติ แล้วบันทึกผล



รูปที่ 4 รูปแบบการทดสอบคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

3. ผลการศึกษา

จากการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ จากตัวอย่างทั้งสองแบบคือ ผลการทดสอบคานตัวอย่างที่เสริมเฉพาะเหล็กเสริมตามยาว และตัวอย่างที่เสริมเหล็กตามยาว และเหล็กปลอก แสดงตามหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

3.1 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่เสริมเฉพาะเหล็กตามยาว

จากตารางที่ 3 เป็นผลการทดสอบคานตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ ที่มีปริมาณเหล็กเสริมตามยาวร้อยละ 0.2 – 1.8 ซึ่งไม่เสริมเหล็กปลอก แรงเฉือนสูงสุด (V_n) ได้จากแรงกระทำสูงสุด (P_n) ซึ่งมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของแรงกระทำสูงสุดรวมกับผลของน้ำหนักของคานโดยพิจารณาจากแผนภาพแรงเฉือน (Shear Diagram) และแสดงกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (f'_c) ที่ใช้หล่อตัวอย่าง จากตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกที่มีอายุเท่ากับคานที่ทำการทดสอบ

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่เสริมเฉพาะเหล็กตามยาว

No.	ρ (%)	f'_c (ksc)	P_n (kg)	V_n (kg)
B1	0.28	225	2,237	1,197
B2	0.56	214	3,971	2,067
B3	0.84	209	4,000	2,081
B4	1.20	218	5,091	2,626
B5	1.00	222	5,531	2,848
B6	1.51	209	4,724	2,444
B7	0.43	189	3,410	1,849
B8	0.64	184	6,817	3,553
B9	1.16	175	7,991	4,140
B10	1.43	191	6,229	3,259
B11	1.29	197	6,642	3,466
B12	1.83	193	6,450	3,371

จากผลทดสอบพบว่าลักษณะของกำลังรับแรงเฉือนที่ได้ในแต่ละกลุ่มทดสอบที่ขนาดหน้าตัดตัวอย่างขนาดต่างกัน ในกลุ่มแรกตัวอย่างคาน B1 ถึง B6 ตัวอย่างที่มีกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดคือตัวอย่าง B5 ซึ่งมีปริมาณเหล็กเสริมตามยาวร้อยละ 1.00 และตัวอย่างที่มีกำลังรับแรงเฉือนต่ำสุด คือตัวอย่าง B1 ซึ่งมีปริมาณเหล็กเสริมตามยาวร้อยละ 0.28 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีปริมาณเหล็กเสริมตามยาวต่ำสุด กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้หล่อตัวอย่างทดสอบอยู่ในช่วง 209 - 225 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



ก. จุดเริ่มแตกหัก



ข. จุดเริ่มคราก

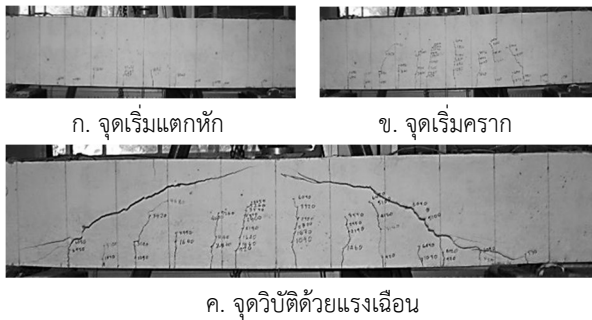


ค. จุดวิบัติด้วยแรงเฉือน

รูปที่ 5 ลักษณะการแตกร้าว ของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่เสริมเฉพาะเหล็กตามยาว ตัวอย่างทดสอบ B1

จากรูปที่ 5 รูปตัวอย่างแสดงลักษณะการแตกร้าว ของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่เสริมเฉพาะเหล็กตามยาว ของตัวอย่างทดสอบ B1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าลักษณะการ

วิบัติสุดท้ายที่เกิดขึ้นอยู่ในรูปแบบการวิบัติด้วยแรงเฉือนตามที่ออกแบบการทดสอบไว้ และในกลุ่มที่สองตัวอย่างคาน B7 ถึง B12 ตัวอย่างที่มีกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดคือตัวอย่าง B9 ซึ่งมีปริมาณเหล็กเสริมตามยาวร้อยละ 1.16 และตัวอย่างที่มีกำลังรับแรงเฉือนต่ำสุด คือตัวอย่าง B7 ซึ่งมีปริมาณเหล็กเสริมตามยาวร้อยละ 0.43 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีปริมาณเหล็กเสริมตามยาวต่ำสุดในกลุ่มนี้ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้หล่อตัวอย่างทดสอบอยู่ในช่วง 175 - 197 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 6 ลักษณะการแตกร้าว ของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเต็มฟองอากาศที่เสริมเฉพาะเหล็กตามยาว ตัวอย่างทดสอบ B9

และจากรูปที่ 6 รูปตัวอย่างแสดงลักษณะการแตกร้าวของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเต็มฟองอากาศที่เสริมเฉพาะเหล็กตามยาว ของตัวอย่างทดสอบ B9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าลักษณะการวิบัติสุดท้ายที่เกิดขึ้นอยู่ในรูปแบบการวิบัติด้วยแรงเฉือนตามที่ออกแบบการทดสอบเช่นเดียวกับกลุ่มตัวอย่างทดสอบแรก

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5 และรูปที่ 6 แสดงลักษณะการแตกร้าว ของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเต็มฟองอากาศที่เสริมเฉพาะเหล็กตามยาว ตัวอย่างทดสอบ B1 และ B9 จากการทดสอบเมื่อให้น้ำหนักกระทำแก่คานตัวอย่างในช่วงแรก ส่วนใหญ่ตัวอย่างเกิดการแตกร้าวเริ่มต้นอยู่ในช่วงบริเวณกลางคาน และการแตกร้าวเริ่มกระจายจากบริเวณกลางคานออกมาด้านข้างทั้งสอง เมื่อแรงกระทำมีค่าเพิ่มขึ้นไปประมาณร้อยละ 80 ของแรงกระทำสูงสุด การแตกร้าวของหน้าตัดเริ่มคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อให้น้ำหนักกระทำจนถึงแรงกระทำสูงสุด หน้าตัดเกิดการแตกร้าวในแนวทแยงขึ้น ในลักษณะฉับพลันลักษณะของรอยแตกร้าวเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางหน้าตัด ที่ระยะ

ระหว่างจุดกดให้แรงกระทำกับจุดรองรับ แล้วแตกร้าวไปยังบริเวณจุดกดให้น้ำหนัก และแตกร้าวไปยังเหล็กเสริมตามยาวที่ห่างจากจุดรองรับเป็นระยะประมาณ 20 - 40 เซนติเมตร ลามไปตามแนวของเหล็กเสริมตามยาวจนคานตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ

ลักษณะรอยแตกร้าว ณ จุดวิบัติของตัวอย่างทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนร่วมกับโมเมนต์ดัด โดยที่รอยแตกร้าวในแนวเอียงเริ่มแตกก่อนและลามไปยังเหล็กเสริมตามยาว เมื่อยอยแตกทั้งสองมีความกว้างมากขึ้นจนเหล็กเสริมตามยาวสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตไปจะทำให้ตัวอย่างวิบัติ ซึ่งเป็นการวิบัติในรูปแบบแรงเฉือนร่วมแรงดึง (Shear-tension failure) [18]

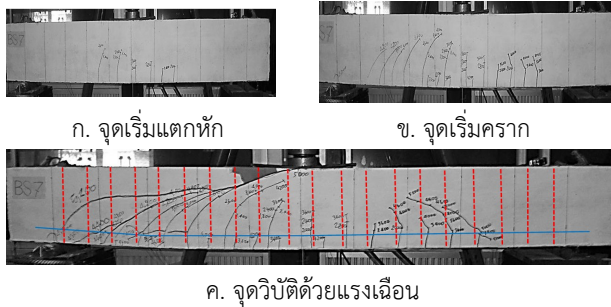
ตารางที่ 4 ผลการทดสอบคานคอนกรีตมวลเบาแบบเต็มฟองอากาศเสริมเหล็กตามยาว และเหล็กปลอก

No.	ρ (%)	f_c' (ksc)	P_n (kg)	V_n (kg)
BS1	0.29	181	4,661	2,412
BS2	0.51	253	4,477	2,321
BS3	0.86	240	6,027	3,095
BS4	1.03	199	5,448	2,805
BS5	1.23	240	4,844	2,503
BS6	1.54	212	5,555	2,858
BS7	1.62	170	5,241	2,701

3.2 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเต็มฟองอากาศเสริมเหล็กตามยาวและ เหล็กปลอก

จากตารางที่ 4 เป็นผลการทดสอบคานตัวอย่างคานคอนกรีตมวลเบาแบบเต็มฟองอากาศ ที่มีปริมาณเหล็กเสริมตามยาวร้อยละ 0.2 - 1.6 ซึ่งเสริมเหล็กปลอกเป็นเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร (RB6) ซึ่งมีกำลังครากเฉื่อยจริงจากการทดสอบเท่ากับ 3,078 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แสดงค่าแรงเฉือนสูงสุดที่ได้จาก แรงกระทำสูงสุด และแสดงกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้หล่อตัวอย่างจากตัวอย่างทรงกระบอกที่มีอายุเท่ากับคานที่ทำการทดสอบ ตัวอย่างที่มีกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดคือตัวอย่าง BS3 ซึ่งมี

ปริมาณเหล็กเสริมตามยาวร้อยละ 0.86 และตัวอย่างที่มีกำลังรับแรงเฉือนต่ำสุด คือตัวอย่าง BS2 ซึ่งมีปริมาณเหล็กเสริมตามยาวร้อยละ 0.51 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้หล่อตัวอย่างทดสอบอยู่ในช่วง 170 – 253 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 7 ลักษณะการแตกร้าว ของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศเสริมเหล็กตามยาว และเหล็กปลอก ตัวอย่างทดสอบ BS7

จากรูปที่ 7 รูปตัวอย่างแสดงลักษณะการแตกร้าว ของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศเสริมเหล็กตามยาว และเหล็กปลอก ของตัวอย่างทดสอบ BS7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าลักษณะการวิบัติสุดท้ายที่เกิดขึ้นอยู่ในรูปแบบการวิบัติด้วยแรงเฉือนตามที่ออกแบบการทดสอบไว้ เช่นเดียวกับกลุ่มตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่เสริมเฉพาะเหล็กตามยาว ลักษณะการแตกร้าวของตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศเสริมเหล็กตามยาว และเหล็กปลอก จากการทดสอบเมื่อให้น้ำหนักกระทำแก่คานตัวอย่างในตอนแรก ตัวอย่างทดสอบคานส่วนใหญ่เกิดการแตกร้าวเริ่มต้นอยู่ในช่วงบริเวณกลางคาน และการแตกร้าวเริ่มกระจายจากบริเวณกลางคานออกมาด้านข้างทั้งสองในช่วงประมาณ 20 ถึง 60 เซนติเมตรจากกึ่งกลางคาน การแตกร้าวเกิดขึ้นเอียงห่างออกมาจากตำแหน่งของเหล็กปลอกเล็กน้อย โดยแนวของการแตกร้าวนานกับเหล็กปลอก

เมื่อให้น้ำหนักกระทำต่อไปเรื่อย ๆ แนวของรอยแตกร้าวเปลี่ยนทิศทางเข้าหาจุดกดให้น้ำหนักจนแรงกระทำมีค่าเพิ่มขึ้นไปประมาณร้อยละ 70 ของแรงกระทำสูงสุด การแตกร้าวของหน้าตัดเริ่มคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อให้น้ำหนักกระทำต่อไปเรื่อย ๆ การแตกร้าวมีความยาวมากขึ้นเมื่อเทียบกับอัตราแรงที่กระทำ เมื่อให้น้ำหนักกระทำจนใกล้ถึงแรงกระทำสูงสุดรอย

แตกร้าวเข้าใกล้ผิวบนของคาน แล้วเกิดรอยแตกร้าวไปตามแนวของเหล็กเสริมตามยาวที่ระยะห่างจากจุดรองรับ 20 ถึง 40 เซนติเมตร เมื่อให้น้ำหนักกระทำจนถึงแรงกระทำสูงสุดหน้าตัดเกิดการแตกร้าวในแนวทแยงขึ้นโดยที่รอยแตกร้าวบรรจบ ผิวบนของคาน รอยแตกร้าวที่เกิดตามแนวเหล็กเสริมตามยาวเข้าสู่จุดรองรับแล้วบรรจบที่ท้องคาน ทำให้คานตัวอย่างวิบัติ

ลักษณะรอยแตกร้าว ณ จุดวิบัติของตัวอย่างทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนร่วมกับโมเมนต์ดัด ซึ่งเป็นการวิบัติในรูปแบบแรงเฉือนร่วมแรงดัด (Shear-tension failure) เช่นเดียวกันกับตัวอย่างทดสอบที่เสริมเฉพาะเหล็กตามยาว

4. การอภิปรายผล

จากผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ ทั้งสองแบบคือ ผลการทดสอบคานตัวอย่างที่เสริมเฉพาะเหล็กเสริมตามยาว และตัวอย่างที่เสริมเหล็กตามยาว และเหล็กปลอก จากหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 สามารถวิเคราะห์ผลการทดสอบได้ดังต่อไปนี้

4.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่เสริมเฉพาะเหล็กตามยาว

จากผลการทดสอบในตารางที่ 3 เนื่องจากคานตัวอย่างไม่เสริมเหล็กปลอก ฉะนั้นกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดคือกำลังรับแรงเฉือนที่เกิดจากการต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีต ในที่นี้คือกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (V_{CLC}) ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณตามมาตรฐานกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต จากสมการที่ (4) ซึ่งคูณด้วยลดกำลังที่มีค่าเท่ากับ 0.75 แล้ว โดยใช้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตามที่ทดสอบของแต่ละตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 5 เมื่อ V_{CLC} คือกำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบ และ $0.75 \cdot V_{c(RC)}$ คือกำลังรับแรงเฉือนที่คำนวณตามมาตรฐาน

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือน ของตัวอย่างทดสอบที่เสริมเฉพาะเหล็กตามยาว กับค่าที่คำนวณตามมาตรฐาน

No.	ρ (%)	f_c' (ksc)	V_{CLC} (kg)	$0.75 \cdot V_{C(RC)}$ (kg)	Differ -ent* (%)	$\frac{V_{CLC}}{b_w d \sqrt{f_c'}}$
B1	0.28	225	1,197	2,406	-50.2	0.198
B2	0.56	214	2,067	2,346	-11.9	0.350
B3	0.84	209	2,081	2,319	-10.3	0.357
B4	1.20	218	2,626	2,205	19.1	0.474
B5	1.00	222	2,848	2,372	20.1	0.478
B6	1.51	209	2,444	2,302	6.2	0.422
B7	0.43	189	1,849	3,989	-53.7	0.184
B8	0.64	184	3,553	3,780	-6.0	0.374
B9	1.16	175	4,140	3,644	13.6	0.452
B10	1.43	191	3,259	3,852	-15.4	0.336
B11	1.29	197	3,466	4,073	-14.9	0.338
B12	1.83	193	3,371	3,783	-10.9	0.354

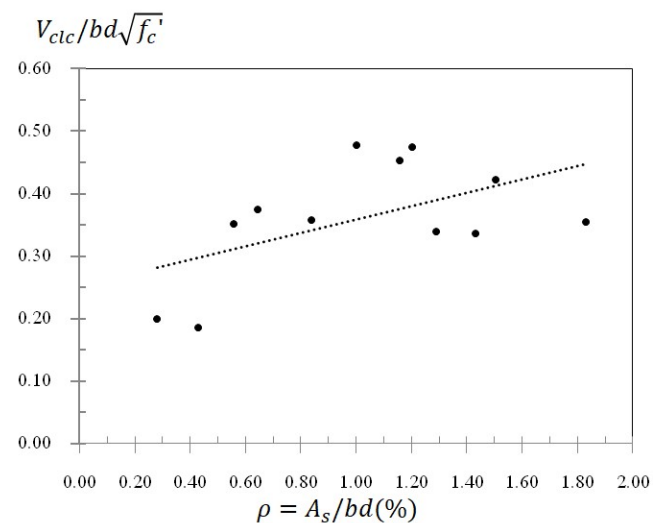
*เป็นลบเมื่อค่าจากการทดสอบน้อยกว่าค่ามาตรฐาน

จากตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่าถึงแม้ในการคำนวณตามมาตรฐานจะมีการใช้ตัวคูณลดกำลังของคอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักที่เบาว่าคอนกรีตปกติแล้ว แต่จากการทดสอบพบว่าการคำนวณตามสมการนั้น ยังให้ค่าที่ไม่ถูกต้องและ ปลอดภัยสำหรับคานตัวอย่างบางตัวที่มีปริมาณเหล็กเสริมตามยาวแตกต่างกันไป ซึ่งสมการนี้อาจสามารถใช้งานได้แต่ไม่ครอบคลุมในทุกตัวอย่างการทดสอบ โดยมีค่าที่ต่ำกว่ามาตรฐานมากที่สุดถึงร้อยละ 53.7 เมื่อพิจารณากำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศของคานตัวอย่างแต่ละตัวมาแทนลงในสมการที่ (4) แล้วจัดให้อยู่ในรูปแบบเดียวกัน (Normalize) โดยพิจารณากำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ ที่ขึ้นกับกำลังรับแรงอัด และพื้นที่หน้าตัดรับแรง ดังสมการที่ (5)

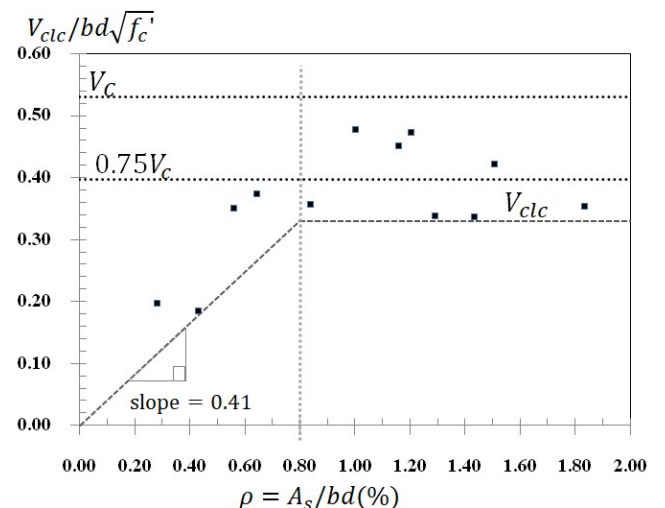
$$\frac{V_{CLC}}{b_w d \sqrt{f_c'}} \quad (5)$$

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง อิทธิพลของเหล็กเสริมตามยาว ต่อกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ ในคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่เสริมเฉพาะเหล็กตามยาว ดังรูปที่ 8 เห็นได้ว่าความสามารถใน

การรับแรงเฉือนของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศมีแนวโน้มมากขึ้น เมื่อปริมาณเหล็กเสริมตามยาวมีค่ามากขึ้น ในลักษณะที่การกระจายตัวไม่ได้เป็นลักษณะเชิงเส้น อันเป็นผลมาจากพื้นที่หน้าตัดรับแรงเฉือน และกำลังของคอนกรีตที่แตกต่างกัน อีกประการ สังเกตเห็นได้ว่าจากตัวอย่างที่มีการกระจายตัวของเหล็กเสริมตามยาวจำนวนมากมีแนวโน้มที่จะให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่มากตามไปด้วย ฉะนั้นการประเมินกำลังรับแรงเฉือนจากรูปที่ 8 นั้นไม่สามารถให้ค่าที่ถูกต้อง และเที่ยงตรงได้ ซึ่งเมื่อพิจารณาขอบเขตต่ำสุดของกำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบดังรูปที่ 9



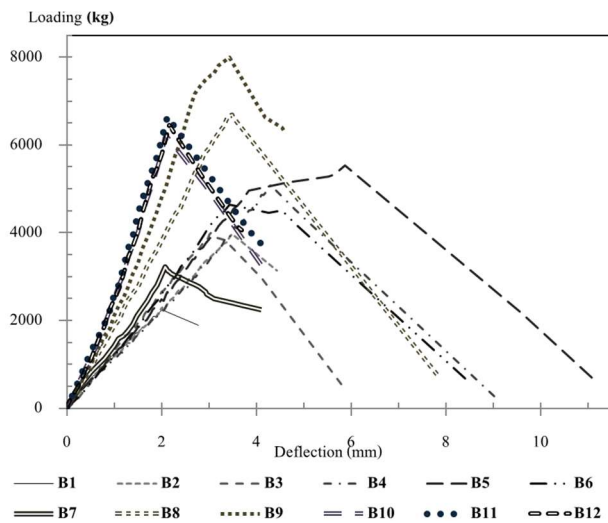
รูปที่ 8 อิทธิพลของเหล็กเสริมตามยาว ต่อกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่เสริมเฉพาะเหล็กตามยาว



รูปที่ 9 กำลังรับแรงเฉือนปลอดภัยของตัวอย่างที่เสริมเฉพาะเหล็กตามยาว กับค่าที่คำนวณตามมาตรฐาน

จากรูปที่ 9 เห็นได้ว่ากำลังรับแรงเฉือนที่ปลอดภัยของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ มีค่าต่ำกว่ากำลังรับแรงเฉือนที่คำนวณตามมาตรฐาน และสามารถพิจารณาตัวคูณลดกำลังได้ตั้งสมการที่ (6) ซึ่งแปรผันตรงกับปริมาณเหล็กเสริมตามยาวในช่วงที่มีปริมาณเหล็กเสริมตามยาวไม่เกินร้อยละ 0.8 และจะคงที่เมื่อปริมาณเหล็กเสริมตามยาวเกินร้อยละ 0.8 ขึ้นไป

$$\lambda = \begin{cases} 0.78 \rho & ; 0 < \rho \leq 0.8 \\ 0.62 & ; \rho > 0.8 \end{cases} \quad (6)$$



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับระยะการแอ่นตัวของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่เสริมเฉพาะเหล็กตามยาว

จากรูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับระยะการแอ่นตัวของตัวอย่างทดสอบตั้งแต่เริ่มให้น้ำหนักกระทำจนกระทั่งวิบัติ โดยส่วนใหญ่ของตัวอย่างทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำและ ระยะการแอ่นตัวของคาน ในช่วงแรกของการให้น้ำหนักกระทำแก่ตัวอย่างทดสอบมีลักษณะเชิงเส้น แปรผันตรงต่อกัน และเมื่อให้แรงกระทำต่อเนื่องเพิ่มขึ้น ระยะการแอ่นตัวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วพร้อมกับกำลังรับน้ำหนักที่ลดลง ซึ่งเป็นจุดวิบัติของคานตัวอย่าง จะเห็นได้ว่าคานตัวอย่างดังกล่าววิบัติแบบฉับพลันเมื่อแรงกระทำเกินกว่ากำลังที่ตัวอย่างสามารถต้านทานได้

และจากรูปที่ 5 และรูปที่ 6 ในหัวข้อที่ 3.1 ลักษณะการแตกร้าว ของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่เสริม

เฉพาะเหล็กตามยาว ตัวอย่างทดสอบ B1 และ B9 จากที่กล่าวมาแล้วว่า ลักษณะของรอยแตกร้าวเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางหน้าตัด ที่ระยะระหว่างจุดกดให้แรงกระทำกับจุดรองรับ แล้วแตกร้าวไปยังบริเวณจุดกดให้น้ำหนัก และเหล็กเสริมตามยาว ซึ่งเมื่อการแตกร้าวยาวไปถึงเหล็กเสริมตามยาว ลักษณะของรอยแตกจะเกิดขึ้นต่อเนื่องไปตามแนวของเหล็กเสริมตามยาว เข้าสู่จุดรองรับ เป็นผลทำให้เกิดการรูดของเหล็กเสริมกับคอนกรีต ทำให้เหล็กเสริมตามยาวไม่สามารถช่วยต้านทานแรงเฉือนได้ เนื่องจากอาจขาดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมตามยาวและคอนกรีต ซึ่งเห็นได้ว่าโดยส่วนใหญ่ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ เป็นการวิบัติโดยฉับพลัน คือเมื่อแรงกระทำถึงจุดสูงสุดที่หน้าตัดรับได้โครงสร้างจะวิบัติโดยทันที อาจเนื่องจากไม่มีมวลรวมหยาบช่วยในการขัดกันเพื่อส่งถ่ายแรง

4.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศเสริมเหล็กตามยาว และเหล็กปลอก

จากผลการทดสอบในตารางที่ 4 ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดเป็นค่าที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็นกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต และกำลังรับแรงเฉือนของเหล็กปลอก เมื่อตัวอย่างถูกกำหนดขนาดและ ระยะเรียงของเหล็กปลอกไว้แล้ว

ตารางที่ 6 กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศของตัวอย่างทดสอบที่เสริมเหล็กตามยาว และเหล็กปลอก

No.	ρ (%)	f_c' (ksc)	V_n (kg)	$\frac{d}{s}$	V_s (kg)	V_{CLC} (kg)
BS1	0.29	181	2,412	2.63	2,291	121
BS2	0.51	253	2,321	2.61	2,274	47
BS3	0.86	240	3,095	2.63	2,291	804
BS4	1.03	199	2,805	2.61	2,274	532
BS5	1.23	240	2,503	2.45	2,130	374
BS6	1.54	212	2,858	2.61	2,274	585
BS7	1.62	170	2,701	2.59	2,256	445

จากตารางที่ 6 สามารถหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของเหล็กปลอก (V_s) โดยการแทนค่าอัตราส่วนความลึกประสิทธิผลต่อระยะเรียงของเหล็กปลอก ($\frac{d}{s}$) ขนาด RB6 ที่ระยะเรียง 0.10 เมตร และพื้นที่หน้าตัดเหล็กปลอกขาเดียว (A_v) เท่ากับ 0.283 ตารางเซนติเมตร ลงในสมการที่ (2) และการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (V_{CLC}) หาได้จากสมการที่ (1) โดยที่ $V_{CLC} = V_n - V_s$ ซึ่ง V_n ได้การทดสอบ

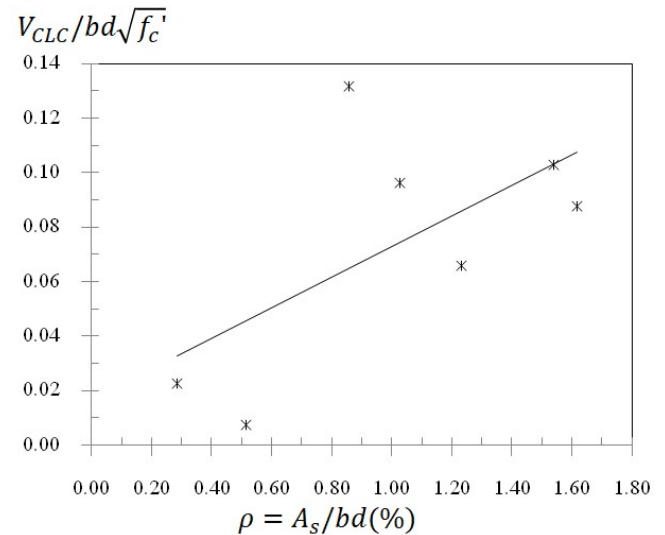
ตารางที่ 7 เปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือน ของตัวอย่างทดสอบที่เสริมเหล็กตามยาว และเหล็กปลอก กับค่าที่คำนวณตามมาตรฐาน

No.	ρ (%)	f_c' (ksc)	V_{CLC} (kg)	$0.75 \cdot V_{C(RC)}$ (kg)	Different* (%)	$\frac{V_{CLC}}{b_w d \sqrt{f_c'}}$
BS1	0.29	181	121	2,109	-94.3	0.02
BS2	0.51	253	47	2,474	-98.1	0.01
BS3	0.86	240	804	2,428	-66.9	0.13
BS4	1.03	199	532	2,193	-75.7	0.10
BS5	1.23	240	374	2,259	-83.5	0.07
BS6	1.54	212	585	2,265	-74.2	0.10
BS7	1.62	170	445	2,015	-77.9	0.09

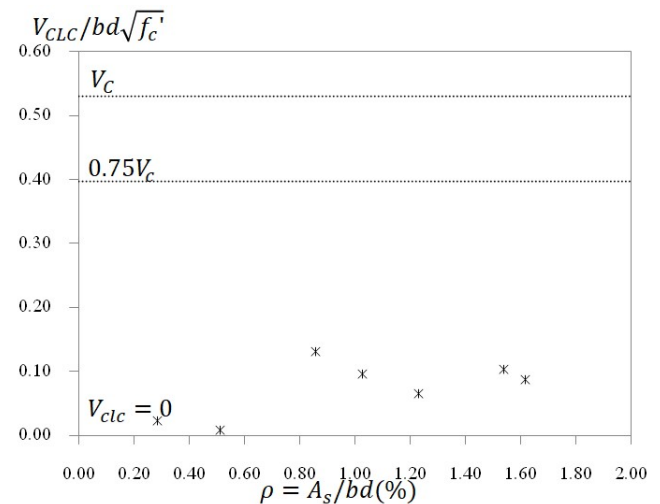
*เป็นลบเมื่อค่าจากการทดสอบน้อยกว่าค่ามาตรฐาน

จากตารางที่ 7 พิจารณาเฉพาะกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ โดยเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ กับค่ากำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตที่คำนวณตามมาตรฐานโดยคูณตัวลดกำลัง 0.75 จากสมการที่ (4) พบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนมีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณตามมาตรฐานมาก ซึ่งมากที่สุดถึงร้อยละ 98.1 แสดงถึงค่ากำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศมีค่าน้อยมากหรือต้านทานแรงเฉือนไม่ได้เลย ในตัวอย่างทดสอบดังกล่าว อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาสัดส่วนกำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบจากสมการที่ (5) และหาความสัมพันธ์กับปริมาณเหล็กเสริมตามยาวดังรูปที่ 11 พบว่า

กำลังรับแรงเฉือนมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณเหล็กเสริมตามยาวมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 11 อิทธิพลของเหล็กเสริมตามยาว ต่อกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ ตัวอย่างที่เสริมเหล็กตามยาว และเหล็กปลอก

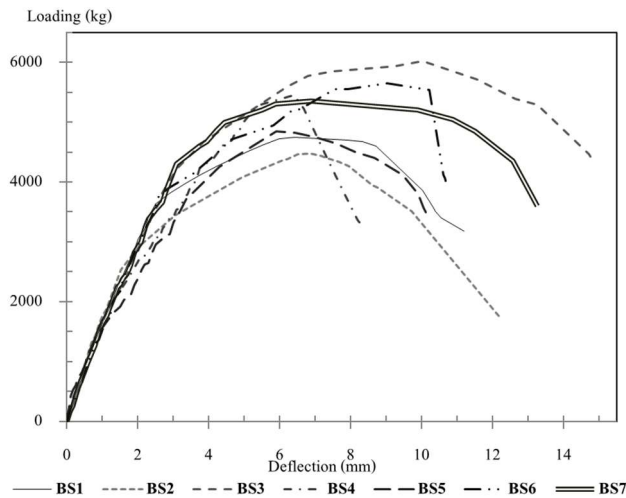


รูปที่ 12 กำลังรับแรงเฉือนปลอดภัยของตัวอย่างที่เสริมเหล็กตามยาว และเหล็กปลอกกับค่าที่คำนวณตามมาตรฐาน

เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบกับค่าที่คำนวณตามมาตรฐาน ดังรูปที่ 12 เนื่องจากค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบมีค่าน้อยมาก จนไม่สามารถประเมินได้ จึงกำหนดให้ตัวคูณลดกำลังเป็นศูนย์ ดังสมการที่ (7) ซึ่งเสมือนว่าคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศไม่

สามารถต้านทานแรงเฉือนได้ กำลังรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเกิดจากกลไกต้านทานแรงเฉือนของเหล็กปลอก

$$\lambda = 0 \quad (7)$$



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับระยะการแอ่นตัวของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศเสริมเหล็กตามยาว และเหล็กปลอก

จากรูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับระยะการแอ่นตัวของตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศเสริมเหล็กตามยาว และเหล็กปลอก เห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำ และระยะการแอ่นตัวของคานมีลักษณะเชิงเส้นในช่วงแรก และเมื่อให้แรงกระทำต่อเนื่องเพิ่มขึ้นระยะการแอ่นตัวของคานมีอัตราที่เพิ่มขึ้นมากเทียบกับแรงที่กระทำ จนถึงแรงกระทำสูงสุดความสามารถในการรับแรงกระทำจะลดลง และเกิดระยะการแอ่นตัวที่มากขึ้นในลักษณะโค้งคว่ำ จนกระทั่งหน้าตัดเกิดการวิบัติ

ในการทดสอบนี้ได้ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดความเครียด (Strain Gauge) ในเหล็กปลอกที่ตำแหน่งที่อยู่ห่างจากจุดรองรับ 0.25 เมตร (อยู่ในช่วง □ ของตัวอย่าง) ทั้งสองข้างของคานตัวอย่าง ผลของความเครียดของเหล็กปลอกที่วัดได้แสดงดังตารางที่ 8 จะเห็นได้ว่าเหล็กปลอกสามารถพัฒนากำลังได้ถึงจุดครากในขณะเกิดแรงกระทำสูงสุดในตัวอย่าง BS1 BS3 BS6 และ BS7 ซึ่งจากตารางจะเห็นได้ว่ามีจุดที่ตรวจวัดความเครียดของคานบางตัวอย่าง พัฒนากำลังได้ไม่ถึงจุดครากหรือไม่สามารถวัดได้ในขณะที่เกิดแรงกระทำสูงสุด เนื่องจาก

รอยแตกร้าวของการวิบัติเข้าสู่แนวของเหล็กเสริมตามยาวแล้ว วิบัตีก่อน ตัวอย่างทดสอบส่วนใหญ่เหล็กปลอกเกิดการครากจริงซึ่งแสดงให้เห็นว่า เหล็กปลอกมีส่วนในการรับแรงเฉือนในตัวอย่างทดสอบจริง และแสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมการรับแรงเฉือนร่วมกันระหว่างคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศกับเหล็กปลอกนั้นมีพฤติกรรมรับแรงเฉือนร่วมกันได้น้อย

ตารางที่ 8 กำลังรับน้ำหนักสูงสุด กับหน่วยแรงของเหล็กปลอก ของตัวอย่างที่เสริมเหล็กตามยาว และเหล็กปลอก

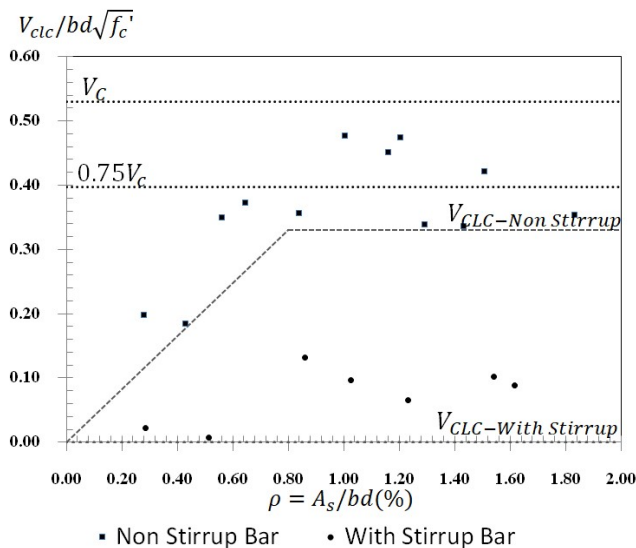
No.	ρ (%)	P_n (kg)	Left Support		Right Support	
			Strain ($\mu\text{m/m}$)	f_s (ksc)	Strain ($\mu\text{m/m}$)	f_s (ksc)
BS1	0.29	4,661	4,967	3,078*	**	**
BS2	0.51	4,477	310	632	183	373
BS3	0.86	6,027	301	614	9,986	3,078*
BS4	1.03	5,448	**	**	**	**
BS5	1.23	4,844	**	**	861	1,756
BS6	1.54	5,555	9,986	3,078*	580	1,183
BS7	1.62	5,241	4,967	3,078*	**	**

*เหล็กปลอกคราก, **รอยแตกไม่ผ่านจุดที่ทำการวัดความเครียดเหล็กปลอก

4.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบของตัวอย่างที่เสริมเฉพาะเหล็กตามยาว กับตัวอย่างที่เสริมเหล็กตามยาว และเหล็กปลอก

จากการทดสอบตัวอย่างทั้งสองแบบสามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบทั้งหมด กับค่าที่คำนวณตามมาตรฐานแสดงดังรูปที่ 14 เห็นได้ว่ากำลังรับแรงเฉือนส่วนของคอนกรีต V_{clc} ของตัวอย่างทดสอบที่เสริมเหล็กตามยาวและเหล็กปลอกให้ค่าที่น้อยกว่าตัวอย่างทดสอบที่เสริมเฉพาะเหล็กตามยาว ตามทฤษฎีแล้วกำลังต้านทานแรงเฉือนของคานที่เสริมเหล็กปลอกจะต้องมีกำลังรับแรงเฉือนที่มากกว่าตัวอย่างที่เสริมเฉพาะเหล็กตามยาว แต่กำลังรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นโดยส่วนมากเกิดจากกำลังของเหล็กปลอกเพียงอย่างเดียว โดยที่เหล็กปลอกมีพฤติกรรมรับแรงเฉือนร่วมกันกับคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศได้น้อยมาก แตกต่างจากตัวอย่างคานคอนกรีตมวล

แบบเติมฟองอากาศเสริมเฉพาะเหล็กตามยาวที่กำลังต้านทานแรงเฉือนเกิดจากพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพของคอนกรีตโดยตรง ร่วมกับอิทธิพลของเหล็กเสริมตามยาว



รูปที่ 14 เปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนปลอดภัยของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ ของตัวอย่างคานทั้งสองแบบ

4.4 ข้อเสนอเบื้องต้นสำหรับการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนในคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

จากการทดสอบตัวอย่างทั้งสองแบบ เห็นได้ว่าตัวคูณลดกำลังที่ได้จากการทดสอบมีค่าที่แตกต่างกันมาก ซึ่งในตัวอย่างคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศเสริมเหล็กตามยาวและเหล็กปลอกมีค่าตัวคูณลดกำลังที่ได้จากการทดสอบเท่ากับศูนย์ดังสมการที่ (7) ฉะนั้นในการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตในสมการที่ (4) จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่ใช้ออกแบบควรจะมาจากการคำนวณของเหล็กปลอกที่คำนวณจากสมการที่ (2) เท่านั้น เพื่อการออกแบบให้เกิดความปลอดภัย

หรือเลือกใช้วิธีการคำนวณ ออกแบบที่ไม่คิดผลของการต้านทานแรงเฉือนเนื่องจากคอนกรีต โดยพิจารณากำลังของเหล็กปลอกในการต้านทานแรงเฉือนเท่านั้น ซึ่งจะทำให้ได้กำลังรับแรงเฉือนที่ปลอดภัยในการคำนวณออกแบบเช่น วิธีแบบจำลองโครงข้อแข็ง (Truss Analogy) วิธีแบบจำลองค้ำยันและ ยึดโยง (Strut and Tie Model) หรือวิธี Modified Compression on Field Theory ตามมาตรฐานแคนาดา เป็นต้น

5. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาสามารถสรุปเกี่ยวกับกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศได้ดังนี้

5.1 กำลังรับแรงเฉือน

กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศมีค่าที่น้อยกว่าค่า ที่คำนวณได้ตามมาตรฐานที่คูณตัวลดกำลังแล้ว

5.2 ตัวคูณลดกำลังรับแรงเฉือน

ตัวคูณลดกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างที่เสริมเฉพาะเหล็กตามยาว แปรผันตรงกับปริมาณเหล็กเสริมตามยาว ซึ่งมีค่าที่ต่ำกว่าตัวคูณลดกำลังตามมาตรฐานดังสมการที่ (6) และสำหรับตัวอย่างที่เสริมเหล็กตามยาวและเหล็กปลอกในการศึกษา กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตมีค่าน้อยมากจึงกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์

5.3 กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศเกิดจากการกำลังรับแรงเฉือนของเหล็กปลอกเป็นสำคัญ เนื่องจากกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศมีค่าน้อยมาก และมีพฤติกรรมต้านทานแรงเฉือนร่วมกับเหล็กปลอกได้ต่ำ

5.4 การคำนวณกำลังรับแรงเฉือนในคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

การคำนวณกำลังรับแรงเฉือนในคานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ ให้เลือกใช้วิธีการคำนวณ ออกแบบที่ไม่คิดผลของการต้านทานแรงเฉือนเนื่องจากคอนกรีต โดยพิจารณากำลังของเหล็กปลอกในการต้านทานแรงเฉือนเท่านั้น

ข้อเสนอแนะ

การศึกษารั้งนี้ ทดสอบตัวอย่างคานจำนวนจำกัด จึงควรที่จะต้องมีทดสอบตัวอย่างที่มีขนาดหน้าตัด และปริมาณเหล็กเสริมตามยาวที่หลากหลายมากขึ้น เพื่อให้ทราบถึงปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือน รวมถึงการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของเหล็กปลอกที่เกิดขึ้นจริงในตำแหน่งอื่น ๆ เพิ่ม เพื่อให้ทราบถึงกำลัง และพฤติกรรมที่ถูกต้อง ของการ

ต้านทานแรงเฉือนระหว่างเหล็กปลอก และคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ในการอนุเคราะห์เครื่องมือ และสถานที่ทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Nambiar KEK, Ramamurthy K. Influence of filler type on the properties of foam concrete. *Cement & Concrete Composites*. 2006;28(5): 475–480.
- [2] ชัยนต์ เจริญพร, สุเชษฐ์ เอี่ยมเขย. การศึกษาคุณสมบัติของ Cellular Concrete เพื่อใช้เป็นวัสดุมวลเบา (รายงานวิจัยฉบับที่ วพ.172.). กรุงเทพมหานคร: ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม; 2542.
- [3] Ramamurthy K, Nambiar EKK, Ranjani IG. A classification of studies on properties of foam concrete. *Cement & Concrete Composites*. 2009;31(6): 388–396.
- [4] อิทธิเชษฐ์ อุตะธีรวิชัย, ธนกร ทวีวุฒิ. คุณสมบัติการใช้งานคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส. ใน: *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15*. อุบลราชธานี: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี; 2553.
- [5] Laukaitis A, Fiks B. Acoustical properties of aerated autoclaved concrete. *Applied Acoustics*. 2006;67(3): 284–296.
- [6] วิวัฒน์ พัทธศานนท์, ธนกร ทวีวุฒิ, เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย, สถาพร โภคา. อิทธิพลของส่วนผสม วิธีการบ่มและระยะเวลาบ่ม ต่อความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสในสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ. ใน: *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16*. ชลบุรี: มหาวิทยาลัยมหิดล; 2554.
- [7] Othuman MA, Wang YC. Elevated-temperature thermal properties of lightweight foamed concrete. *Construction and Building Materials*. 2011;25(2): 705–716.
- [8] นัฐวุฒิ ทิพย์โยธา, เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย, สถาพร โภคา, อิทธิพงษ์ พันธนิกุล. กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส. ใน: *การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 4*. อุบลราชธานี: สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย; 2551.
- [9] แก้วตา ดิยัง, นัฐวุฒิ ทิพย์โยธา, เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย, ธนกร ทวีวุฒิ. การศึกษากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส. ใน: *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14*. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2552. หน้า 1667-1772.
- [10] ธนกร ทวีวุฒิ, เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย, วิวัฒน์ พัทธศานนท์, สถาพร โภคา. กำลังรับแรงดึงแยก และโมดูลัสการแตกร้าวของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส. ใน: *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14*. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2552. หน้า 1673-1778.
- [11] นัฐวุฒิ ทิพย์โยธา, เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย, สถาพร โภคา, วิวัฒน์ พัทธศานนท์. แรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส. ใน: *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14*. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2552. หน้า 1685-1690.
- [12] นัฐวุฒิ ทิพย์โยธา, อิทธิพล รัตนมงคลทิพย์, เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย. การทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส. ใน: *การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6*. เพชรบุรี: สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย; 2553.
- [13] นัฐวุฒิ ทิพย์โยธา, เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย, สถาพร โภคา, วิวัฒน์ พัทธศานนท์. การทดสอบกำลังรับโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเสริมเหล็ก. ใน: *การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5*. นครราชสีมา: สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย; 2552.
- [14] Jones MR, McCarthy A. Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material. *Magazine of Concrete Research*. 2005;57(1): 21–31.
- [15] ASCE–ACI Committee 445 on Shear and Torsion. Recent Approaches to Shear and Torsion of Structural Concrete. *Journal of Structural Engineering*. 1998;124(12): 1375–1417.

- [16] MacGregor JG. *Reinforced Concrete Mechanics and Design*. Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall; 1992.
- [17] ACI Committee 318. *Building Code Requirement for Structural Concrete (ACI 318– 08) and Commentary*. Farmington Hills, MI.: American Concrete Institute; 2008
- [18] ASCE–ACI Committee 426 on shear and diagonal tension of the committee on masonry and reinforced concrete of the structural division. *Journal of Structural Division*. 1973;99(6): 1091–1187.