

พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีส่วนผสมของเศษยาง
จากยางรถยนต์รีไซเคิล

BEHAVIORS OF REINFORCED CONCRETE BEAMS CONTAINING
CRUMB RUBBER FROM RECYCLED TIRES

ปรัชญา กันบัว¹ ลาวลย์ ชันเกษร^{2*} อธิธิ พลิตศิริ³ และ ณัฐวุฒิ อินทบุตร⁴
^{1,2,3,4}อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี 450 ถนนสุพรรณบุรี-ชัยนาท,
ตำบลย่านยาว อำเภอสามชุก จังหวัดสุพรรณบุรี 72130,
¹prachya.k@rmutsb.ac.th, ^{2*}lawan.k@rmutsb.ac.th, ³itthi.w@rmutsb.ac.th,
⁴nuttawut.i@rmutsb.ac.th

Prachya Kanbua¹, Lawan Kankaset^{2*}, Itthi Plitsiri³ and Nuttawut Intaboot⁴
^{1,2,3,4}Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Suphanburi Center,
450 Moo 6 Suphanburi- Chainat rd., Yanyaw, Samchook, Suphanburi 72130, Thailand,
¹prachya.k@rmutsb.ac.th, ^{2*}lawan.k@rmutsb.ac.th, ³itthi.w@rmutsb.ac.th,
⁴nuttawut.i@rmutsb.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำจากคอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์ โดยทำการทดสอบคานจำนวน 15 ตัวอย่าง คานตัวอย่างกว้าง 15 เซนติเมตร ลึก 25 เซนติเมตร ยาว 2.4 เมตร จากสัดส่วนผสม 5 ส่วนผสม โดยใช้เศษยางรถยนต์บดแทนที่มวลรวมละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก จากการทดสอบคานมีพฤติกรรมเชิงเส้นสองช่วง (bi-linear) ก่อนเป็นไร้เชิงเส้น (non-linear) จนกระทั่งวิบัติ โดยเกิดรอยร้าวแรกที่ร้อยละ 23-27 ของแรงกระทำสูงสุดและเข้าสู่ช่วงที่สองจนถึงแรงสูงสุด หลังจากนั้นคานจะไม่สามารถรับแรงเพิ่มได้จนกระทั่งวิบัติ จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มปริมาณของเศษยางรถยนต์ไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมการวิบัติของคาน แต่ส่งผลในแง่ของกำลังรับโมเมนต์ดัด ดังนั้นสมการคำนวณโมเมนต์ดัดระบุตามทฤษฎียังสามารถใช้กับคานประเภทนี้ได้ แต่สมการคำนวณโมเมนต์แตกร้าวใช้ได้สำหรับคานที่ใช้เศษยางรถยนต์แทนที่มวลรวมละเอียดไม่เกินร้อยละ 5 เท่านั้น ในส่วนของคานที่มีปริมาณแทนที่ของเศษยางรถยนต์ตั้งแต่ร้อยละ 10 ถึง 20 ค่าโมเมนต์

แตกร้าวที่ทดสอบได้จะเหลือเพียงร้อยละ 80 ของค่าที่คำนวณได้จากสมการ ค่าการแอ่นตัวสูงสุด และการดูดซับพลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเศษยางรถยนต์ที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียด

คำสำคัญ: คอนกรีตผสมเศษยาง, โมเมนต์ดัดของคาน, คอนกรีตเสริมเหล็ก

ABSTRACT

The objective of this research were study on the flexural behaviors of reinforced concrete beams made of concrete mixed with crumb rubber by testing 15 samples of beams. The beams sample had 15 centimeters wide, 25 centimeters depth and length of 2.4 meters from mixture of 5 ingredients, using crumb rubber as fine aggregate replacement in ratio of 5, 10, 15 and 20 percent by weight. According to the test, the beams behaved in two linear phases (bilinear) before non-linear until failure, the first crack occurred at 23-27 percent of the maximum load and entered the second phase until reaching the maximum load. After that, the beams were unable to support additional weight until failure. The study also reserved that to Increase amount of crumb rubber did not affect failure behavior of the beams but affect in flexural strength. The equation for calculating the Nominal moment can also be used for this type of beams, but the equation for calculating the cracking moment can only be used for beams that use crumb rubber in place of fine aggregate not exceeding 5%. For the beams with crumb rubber replacements from 10% to 20%, the cracking moment tested were only 80% of the value calculated from the equation. The maximum deflection and energy absorption tend to increase with amount of crumb rubber used to replace fine aggregate.

KEYWORDS: crumb rubber concrete (CRC), flexural strength of beams, reinforced concrete

1. บทนำ

หลาย ๆ ประเทศมีปัญหาเรื่องมลพิษทางสิ่งแวดล้อม หนึ่งในนั้นเกิดจากการเผาทำลายขยะที่มาจากอุตสาหกรรมยานยนต์คือ “ยางรถยนต์” เนื่องจากยางรถยนต์ที่เสื่อมสภาพจากการใช้งานแล้วถือเป็นของเสียชนิดหนึ่งที่ยากต่อการกำจัดทิ้ง โดยยางรถยนต์เก่าเป็นวัสดุที่ไม่สามารถถูกย่อยสลายตามธรรมชาติได้ เนื่องจากความทนทานที่เกิดจากสมบัติทางเคมีที่ถูกปรุงแต่งในการผลิตและการผลิตยางรถยนต์ที่มีวิวัฒนาการอย่างต่อเนื่อง เช่น การใช้สารเคมีและสารพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ไปผสมกับยางธรรมชาติเพื่อปรับปรุงคุณภาพของยางให้มีความทนทานและความยืดหยุ่นมากขึ้น แต่สมบัติที่ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นนี้ทำให้การกำจัดยางรถยนต์ที่หมดอายุการใช้งานยากขึ้น ในต่างประเทศมีการศึกษาการแปรรูปยางเก่าให้ เป็นเม็ดเล็ก ๆ เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ เช่น ในงาน

ทำถนนแอสฟัลท์ [1] หรือทำวัสดุกันซึม โดยพบว่าวัสดุยางรถยนต์เก่าเหล่านั้นสามารถนำมาใช้ใหม่ได้ในอัตราส่วนที่ค่อนข้างสูง ยกตัวอย่างเช่น วัสดุยางสามารถย่อยเป็นชิ้นเล็ก ๆ และนำไปหลอมใหม่เพื่อใช้งานถนนลาดยางได้ โดยพบว่าเมื่อยางเก่าเมื่อผ่านการย่อยสลายเป็นเม็ดเล็ก ๆ และนำมาผสมกับวัสดุแอสฟัลท์ จะได้วัสดุทำผิวถนนที่เรียกว่า แอสฟัลท์ยาง (Asphalt-Rubber) [2] สามารถยึดตัวได้สูงก่อนวิบัติ ดูดซับพลังงานและแรงได้มาก เพิ่มความเหนียว ลดรอยร้าวและมีอายุการใช้งานนานกว่าปรกติ นอกจากนี้ยังมีความหนาที่ลดลงจากถนนแอสฟัลท์แบบเดิมช่วยประหยัดทั้งค่าวัสดุและแรงงาน หรือนำยางรถยนต์มาบดเป็นเม็ดเล็กๆ ผสมลงในคอนกรีตทำเป็นอิฐบล็อกคอนกรีต [3] และบล็อกปูถนน [4]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำยางรถยนต์เก่ามาบดเป็นเม็ดยางแทนที่ทราย เพื่อเป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตหล่อขึ้นรูปเป็นคานคอนกรีตที่มีสมมุติฐานว่าคานจะสามารถแอ่นตัวได้มากกว่าคานคอนกรีตทั่วไปก่อนวิบัติ [1, 5, 6] ดูดซับพลังงานได้มากขึ้น [7-10] และน้ำหนักเบาลง [11-12] และเนื่องจากความสามารถในการยึดตัวได้ดีอาจทำให้คานสามารถต้านทานการแตกร้าวได้ดีกว่าคอนกรีตปรกติทั่วไป [13] มีหลากหลายงานวิจัยที่บอกว่าการผสมเศษยางรถยนต์บดลงในคอนกรีตจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัด [14-17] และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตลดลง [18-20] แต่อย่างไรก็ตามสมบัติทางกลของคอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์บดก็ยังใกล้เคียงกับคอนกรีตปรกติทั่วไปที่กำลังอัดประลัยเท่ากัน [21] จึงทำให้การใส่เศษยางรถยนต์บดลงในคอนกรีตเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยลดการเผาทิ้งยางรถยนต์เก่าได้ซึ่งเป็นการรีไซเคิลยางรถยนต์เก่าได้อย่างยั่งยืน

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

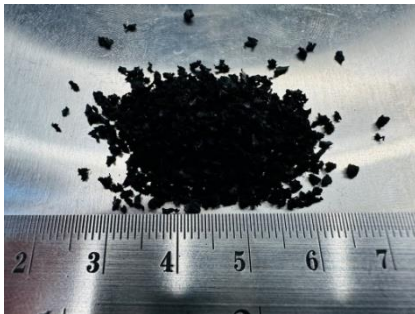
- 2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์
- 2.2 เพื่อเปรียบเทียบโมเมนต์ดัดที่ได้จากการทดสอบกับสมการทำนายโมเมนต์ดัดระบุ
- 2.3 เพื่อส่งเสริมให้นำวัสดุที่ยากต่อการกำจัดมารีไซเคิลเพื่อลดมลพิษจากการเผาทิ้งยางรถยนต์

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วย อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 [22] ต่อทรายและหิน เป็น 1:2:4 โดยน้ำหนัก มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักเท่ากับ 0.55 และปริมาณของเศษยางรถยนต์บดร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ดังรูปที่ 1 ใส่แทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15, 20 ของน้ำหนักทราย และมีสัญลักษณ์ที่ใช้เรียกคือ XXCon55 โดย XX คือปริมาณร้อยละของเศษยางรถยนต์บดละเอียด โดยมี Con55 เป็นคอนกรีตควบคุม

ดัดงารางที่ 1 และสมบัตัพื้นฐานของหิน ทราย และเสะยางรถยนต์บดละเอียด ได้แก ่ ความหนาแน่น ความถ่วงจำเพาะ การดูดซ้มน้ำ และโมดูลัสความละเอียด มีค่าดัดงารางที่ 2 และสมบัตัทางกลดัดงารางที่ 3 [23]



(ก) เสะยางรถยนต์บด



(ข) การกระจายตัวของเสะยางในคอนกรีต

รูปที่ 1 เสะยางรถยนต์บดและการกระจายตัวของเสะยางรถยนต์ในคอนกรีต

ดาร์างที่ 1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตผสมเสะยางรถยนต์ [23]

Symbol	Cement (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Gravel (kg/m ³)	Crumb rubber tires (kg/m ³)	Water (kg/m ³)
Con55	282	676	1288	0	155
5Con55	282	642	1288	34	155
10Con55	282	608	1288	68	155
15Con55	282	574	1288	101	155
20Con55	282	540	1288	135	155

ดาร์างที่ 2 สมบัตัพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย [23]

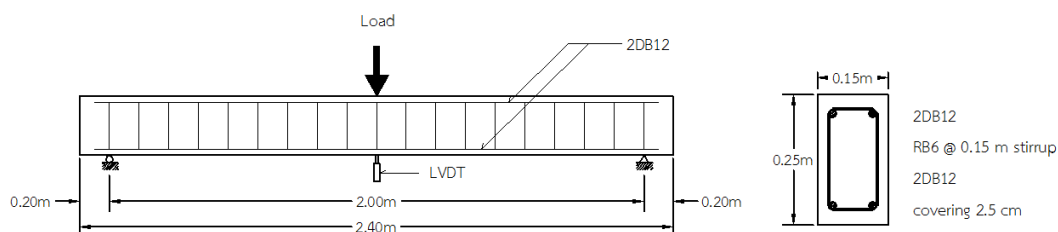
Aggregate	Bulk density (kg/m ³)	Relative density	Water absorption (%)	Fineness modulus
Sand	1678.85	2.65	1.85	3.00
Stone	1600.20	2.60	1.00	6.03
Crumb rubber	589.80	0.89	1.70	2.62

ตารางที่ 3 สมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย [23]

Symbol	Compressive Strength (ksc)	Splitting Tensile Strength (ksc)	Modulus of Elasticity (ksc)	Modulus of Rupture (ksc)	Density (kg/m ³)
Con55	220	35	207100	39.10	2375
5Con55	175	24	88500	32.79	2316
10Con55	142	18	55000	29.75	2256
15Con55	124	16	51300	28.67	2197
20Con55	101	13	47800	28.18	2115

3.2 วิธีการทดสอบ

คานคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบมีความกว้าง 0.15 เมตร ลึก 0.25 เมตร ยาว 2.40 เมตร เสริมเหล็กเกรด SD40 มีความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก 4000 ksc จำนวน 4 เส้น (เหล็กบน 2 เส้นและเหล็กล่าง 2 เส้น) เสริมเหล็กดัด (Stirrup) RB6 ที่ระยะเรียง (Spacing) 0.15 เมตร เพื่อรับแรงเฉือน และทดสอบที่อายุการบ่มคอนกรีต 28 วัน ตัวอย่างทดสอบคานจะทดสอบโดยใช้แรงกระทำแบบสามจุด (Three Point Loading) มีระยะห่างระหว่างจุดรองรับ 2.00 เมตร อัตราส่วนความยาวต่อความลึก (L/d) เท่ากับ 8 จัดอยู่ในคานประเภทยาวปานกลางทำให้ผลกระทบของแรงเฉือนน้อยกว่าผลของแรงดัด และมีการออกแบบเหล็กดัดเพื่อใช้ในการรับแรงเฉือนตลอดช่วงคานเพื่อป้องกันการวิบัติด้วยแรงเฉือน ดังนั้นคานจะวิบัติโดยแรงดัด (Flexural Failure) [24] ทำการวัดการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางของความยาวด้วย LVDT (Linear Variable Displacement Transducer) ดังรูปที่ 2 จำนวนตัวอย่างทดสอบ 3 ตัวอย่างต่อ 1 สัดส่วนผสม รวมทั้งสิ้น 15 ตัวอย่างทดสอบ ระหว่างการทดสอบแรงกระทำและการแอ่นตัวจะถูกบันทึกโดย Data logger และสังเกตพฤติกรรมการแตกร้าวภายใต้แรงกระทำตลอดการทดสอบ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 รายละเอียดของหน้าตัดและการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3 การทดสอบตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเศษยางรถยนต์

จากการติดตั้งตัวอย่างทดสอบข้างต้นสามารถคำนวณโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานที่เกิดขึ้นได้จากสมการที่ 1 [25] ดังนี้

$$M_{\max} = \frac{P_{\max} L}{4} \quad (1)$$

เมื่อ $M_{\max}$ คือ โมเมนต์ดัดสูงสุด

$P_{\max}$ คือ แรงกระทำสูงสุด

L คือ ความยาวของคาน (วัดจากระยะห่างของจุดรองรับ)

จากหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบคานดังรูปที่ 2 จะสามารถคำนวณโมเมนต์ดัดระบุของหน้าตัดตามมาตรฐาน ACI 318-19 ซึ่งเป็นค่าตามทฤษฎีได้จากสมการที่ 2 [25]

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2)$$

เมื่อ M_n คือ โมเมนต์ดัดระบุ

A_s คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงดึง

f_y คือ กำลังครากของเหล็กเสริมรับแรงดึง

d คือ ความลึกประสิทธิภาพ

a คือ ความลึกของกล่องความเค้นอัด (Stress Box)

การคำนวณโมเมนต์แตกร้าว (Cracking Moment) ของหน้าตัดสามารถคำนวณได้ตามมาตรฐานของ ACI 318-19 [26]

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} \quad (3)$$

เมื่อ M_{cr} คือ โมเมนต์แตกร้าวของหน้าตัด

f_r คือ โมดูลัสแตกหักของคอนกรีต

I_g คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดของคอนกรีตล้วนรอบแกนสะเทิน

y_t คือ ระยะจากแกนสะเทินของหน้าตัดรวมไปยังผิวด้านรับแรงดึง

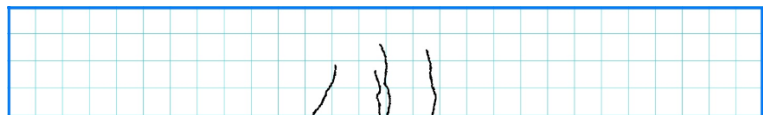
4. ผลและอภิปรายผลการวิจัย

4.1 รอยร้าวและการวิบัติของคาน

เมื่อคานถูกแรงกระทำคานจะเกิดโมเมนต์ดัดและเริ่มมีรอยร้าวที่กึ่งกลางคานเมื่อโมเมนต์ดัดถึงค่าโมเมนต์แตกร้าว โดยรอยร้าวจะเริ่มจากด้านล่างของคาน ซึ่งเป็นส่วนที่คอนกรีตมีหน่วยแรงดึงสูงที่สุดของหน้าตัด เมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นรอยร้าวจะกว้างขึ้นและแผ่ขยายยาวขึ้นไปซึ่งเห็นได้จากผิวด้านข้างของคาน หลังจากนั้นเหล็กเสริมจะเกิดการครากและรอยร้าวจะขยายไปจนเกือบสุดด้านบนของคาน จนกระทั่งคานเกิดการวิบัติ โดยสามารถลากแนวการวิบัติได้ดังรูปที่ 4-8



(4a)

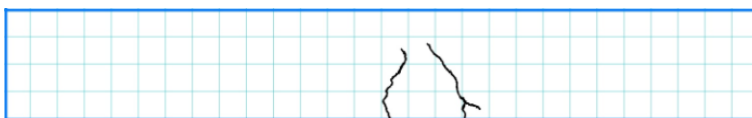


(4b)

รูปที่ 4 ตัวอย่างรอยแตกร้าวของคาน Con55



(5a)



(5b)

รูปที่ 5 ตัวอย่างรอยแตกร้าวของคาน 5Con55



(6a)

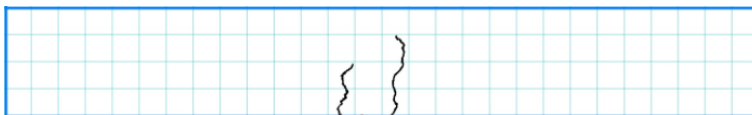


(6b)

รูปที่ 6 ตัวอย่างรอยแตกร้าวของคาน 10Con55



(7a)



(7b)

รูปที่ 7 ตัวอย่างรอยแตกร้าวของคาน 15Con55



(8a)



(8b)

รูปที่ 8 ตัวอย่างรอยแตกร้าวของคาน 20Con55

จากรูปที่ 4-8 จะเห็นรอยร้าวเริ่มจากบริเวณกึ่งกลางของคานมีลักษณะเป็นแนวตั้ง ซึ่งเป็นรอยร้าวที่เกิดจากหน่วยแรงดัด (Flexural Crack) [25] ที่ทำให้เกิดหน่วยแรงดึงสูงสุดที่ผิวล่างของคาน และไม่มีรอยร้าวทแยงที่เกิดจากหน่วยแรงเฉือน แสดงว่าเศษยางรถยนต์ที่เพิ่มเข้าไปเป็นส่วนผสมในคานคอนกรีตไม่ได้ส่งผลต่อพฤติกรรมการวิบัติของคาน

4.2 โมเมนต์ดัดสูงสุดและโมเมนต์แตกร้าว

จากการทดสอบได้ค่าแรงกระทำสูงสุดและแรงกระทำเมื่อคานแตกร้าวเฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่าง นำมาคำนวณโมเมนต์ดัดสูงสุดและโมเมนต์แตกร้าวจากสมการที่ 1 ได้ดังตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าค่าโมเมนต์แตกร้าวของคานสัดส่วนผสม 5con55 เท่ากับโมเมนต์แตกร้าวของคอนกรีตควบคุมซึ่งเท่ากับ 0.70 แต่เมื่อผสมเศษยางรถยนต์แทนที่มวลรวมละเอียดเพิ่มขึ้นร้อยละ 10, 15 และ 20 (10con55, 15con55 และ 20con55 ตามลำดับ) จะทำให้ค่าโมเมนต์แตกร้าวมีค่าลดลงเหลือเพียง 0.55 ส่วนค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานจะมีค่าลดลงตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเศษยางรถยนต์ โดยสาเหตุที่ทำให้โมเมนต์ดัดสูงสุดของคานลดลงเกิดจากการก้ำกึ่งอัดประลัยและค่าโมดูลัสแตกหักของคอนกรีตที่ลดลงเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเศษยางรถยนต์ [14-17]

ตารางที่ 4 แรงกระทำสูงสุดและกำลังรับโมเมนต์ดัดของคานที่ได้จากการทดสอบ

Symbol	Experimental Cracking Load P_{cre} (ton)	Maximum Load P_{max} (ton)	Experimental Cracking Moment M_{cre} (ton-m)	Maximum Moment M_{max} (ton-m)
Con55	1.40	5.70	0.70	2.85
5Con55	1.39	5.19	0.70	2.59
10Con55	1.10	4.80	0.55	2.40
15Con55	1.10	4.49	0.55	2.25
20Con55	1.09	4.18	0.55	2.05

4.3 เปรียบเทียบโมเมนต์ดัดของคาน

โมเมนต์ดัดสูงสุดของตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเศษยางรถยนต์ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับโมเมนต์ดัดระบุของหน้าตัดที่ได้จากทฤษฎีในสมการที่ 2 ค่าที่ทดสอบได้มีสัดส่วนความแตกต่างกับทฤษฎีอยู่ระหว่าง 1.23 – 1.55 โดยคำนวณจากกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสม

เศษยางรถยนต์ในตารางที่ 3 และไม่คิดสัดส่วนความปลอดภัย (Safety Factor) เนื่องจากโมเมนต์ดัดสูงสุดจากการทดสอบมีค่าสูงกว่าโมเมนต์ดัดระบุ แสดงให้เห็นว่าสมการที่ใช้คำนวณโมเมนต์ดัดระบุของหน้าตัดยังสามารถใช้ออกแบบคานคอนกรีตประเภทนี้ได้โดยไม่วิบัติ ส่วนของค่าโมเมนต์แตกร้าวที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎีในสมการที่ 3 มีสัดส่วนความแตกต่างกับทฤษฎีอยู่ระหว่าง 0.79 – 1.03 ดังตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่าค่าโมเมนต์แตกร้าวที่คำนวณได้จากทฤษฎีไม่สามารถใช้ทำนายโมเมนต์แตกร้าวของคานคอนกรีตที่ผสมเศษยางรถยนต์แทนที่มวลรวมละเอียดในอัตราส่วนเกินร้อยละ 5 ได้ เนื่องจากโมเมนต์แตกร้าวจากการทดสอบได้ค่าประมาณร้อยละ 80 ของโมเมนต์แตกร้าวตามทฤษฎี (น้อยกว่าทฤษฎีอยู่ประมาณร้อยละ 20) จึงไม่แนะนำให้ใช้สมการโมเมนต์แตกร้าวจากทฤษฎีมาคำนวณคานคอนกรีตที่ผสมเศษยางรถยนต์แทนที่มวลรวมละเอียดในอัตราส่วนเกินร้อยละ 5 เพราะคานจะเกิดรอยร้าวก่อนถึงค่าที่คำนวณออกแบบไว้

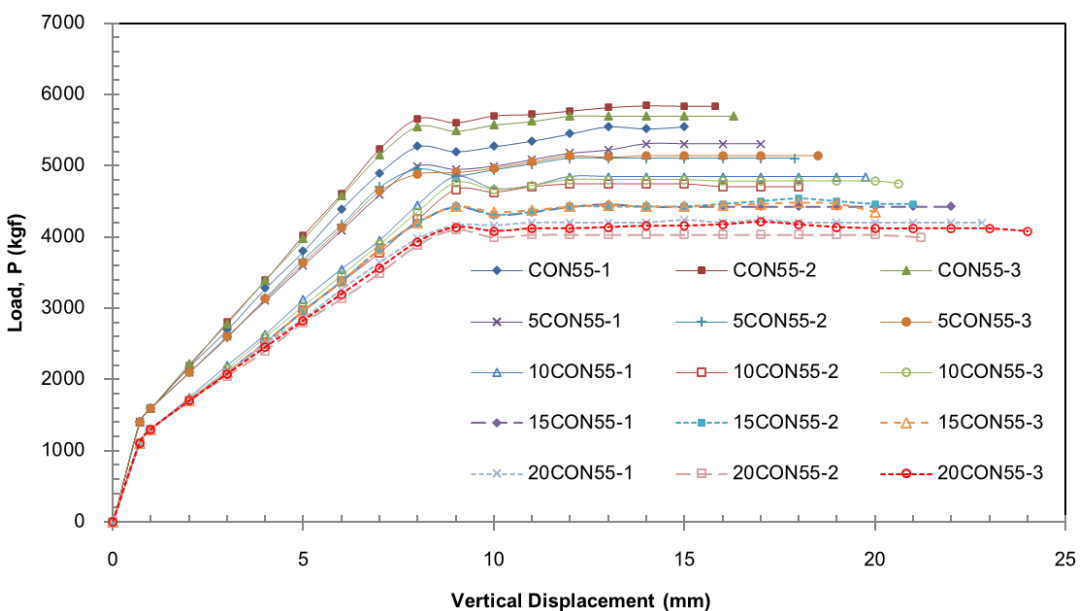
ตารางที่ 5 เปรียบเทียบกำลังรับโมเมนต์ดัดของคาน

Symbol	Exp. Cracking Moment M_{cre} (ton-m)	Theoretical Cracking Moment M_{cr} (ton-m)	M_{cre}/M_{cr}	Maximum Moment M_{max} (ton-m)	Nominal Moment M_n (ton-m)	M_{max}/M_n
Con55	0.70	0.70	1.00	2.85	1.84	1.55
5Con55	0.70	0.68	1.03	2.59	1.80	1.44
10Con55	0.55	0.70	0.79	2.40	1.76	1.36
15Con55	0.55	0.69	0.80	2.25	1.72	1.31
20Con55	0.55	0.69	0.80	2.05	1.66	1.23

4.4 แรงกระทำและการแอ่นตัวของคาน

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัวสูงสุดที่กึ่งกลางของคาน ดังรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าคานมีพฤติกรรมเชิงเส้นสองช่วง โดยที่ช่วงแรกเป็นช่วงที่คานเริ่มรับแรงกระทำและยังไม่มีแตกร้าว คานจะมีพฤติกรรมเป็นเส้นตรงจนกระทั่งคานเกิดรอยร้าวแรก (First Crack) ที่ร้อยละ 23-27 ของแรงกระทำสูงสุด ที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานด้านล่างซึ่งเป็นตำแหน่งที่คอนกรีตเกิดหน่วยแรงดึง (ด้านล่างของแกนสะเทิน) ความชันของกราฟจะลดลงและเข้าสู่พฤติกรรมที่เป็น

เส้นตรงช่วงที่สอง โดยช่วงที่สองนี้คานจะเกิดการแตกร้าวในส่วนของคอนกรีตที่รับแรงดึงเพิ่มขึ้น รอยแตกร้าวจะขยายตัวและมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งเหล็กเสริมเกิดการคราก จากนั้น ความชันของกราฟจะลดลงอย่างรวดเร็วและกราฟจะถึงจุดที่คานรับกำลังได้สูงสุด หลังจากนั้น คานจะไม่สามารถรับกำลังเพิ่มขึ้นได้อีกแต่การแอ่นตัวจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงจุดวิบัติ โดย ค่าการแอ่นตัวสูงสุดของตัวอย่างคานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเศษยางรถยนต์ สังเกตได้จากกราฟมีเส้นในแนวนอนที่ยาวขึ้นโดยคอนกรีตควบคุมจะมีค่าการแอ่นตัวสูงสุดเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 15 มิลลิเมตร และค่าการแอ่นตัวสูงสุดเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 17, 19, 21 และ 23 มิลลิเมตร ของคานตัวอย่าง 5con55, 10con55, 15con55 และ 20con55 ตามลำดับ



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคาน

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคานในรูปที่ 9 สามารถหาค่าการดูดซับพลังงาน (Energy Absorption) ได้จากพื้นที่ใต้กราฟ โดยคำนวณจาก จุดเริ่มต้นของกราฟที่แรงกระทำและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคานเป็นศูนย์จนกระทั่งตัวอย่าง ทดสอบคานวิบัติ (จุดสิ้นสุดของเส้นกราฟ) [27] ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณเศษยางรถยนต์ ส่งผลให้คานมีแนวโน้มของการดูดซับพลังงานที่มากขึ้น ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ความสามารถในการดูดซับพลังงานของคาน

Symbol	Energy Absorption (kg-m)	Symbol	Energy Absorption (kg-m)
Con55-1	63.38	15Con55-1	81.67
Con55-2	71.74	15Con55-2	77.54
Con55-3	73.45	15Con55-3	72.96
5Con55-1	70.85	20Con55-1	81.48
5Con55-2	74.56	20Con55-2	72.08
5Con55-3	77.80	20Con55-3	85.20
10Con55-1	77.26		
10Con55-2	66.83		
10Con55-3	80.53		

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบโดยการนำเศษยางรถยนต์มาเป็นส่วนผสมในการผลิตคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถสรุปได้ดังนี้ การใส่เศษยางรถยนต์แทนที่มวลรวมละเอียดในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักไม่ส่งผลต่อลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กแต่ส่งผลในแง่ของโมเมนต์ดัดสูงสุด โดยค่าโมเมนต์แตกร้าวและโมเมนต์ดัดสูงสุดจะมีค่าลดลงตามปริมาณเศษยางรถยนต์ที่เพิ่มขึ้น และค่าโมเมนต์ดัดระบุสามารถใช้สมการคำนวณตามทฤษฎีการออกแบบด้วยวิธีกำลังได้ เพราะโมเมนต์ดัดระบุที่ตามทฤษฎีจะให้ค่าที่น้อยกว่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่คานสามารถรับได้จึงไม่ทำให้เกิดการวิบัติ แต่หากต้องการคำนวณค่าโมเมนต์แตกร้าวของคานคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเศษยางรถยนต์แทนที่มวลรวมละเอียดเกินร้อยละ 5 ควรลดกำลังที่ได้จากการคำนวณลงประมาณร้อยละ 80 และการใส่เศษยางรถยนต์ช่วยเพิ่มความสามารถในการแอ่นตัวสูงสุดก่อนเกิดการวิบัติ และเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานของคานได้ ดังนั้นเพื่อให้พฤติกรรมการวิบัติของคานเปลี่ยนและยังคงใช้สมการคำนวณโมเมนต์แตกร้าวและโมเมนต์ดัดระบุตามทฤษฎีได้ ผู้แต่งจึงเห็นว่าไม่ควรใส่เศษยางรถยนต์แทนที่มวลรวมละเอียดในอัตราส่วนที่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนักที่ใช้เป็นส่วนผสมของคานคอนกรีต ทั้งนี้การใส่เศษยางรถยนต์เข้าไปในคอนกรีตเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถช่วยลดการเผาทิ้งยางรถยนต์เก่าได้ ในงานวิจัยครั้งต่อไปอาจใช้ยางเป็นสารเติมแต่ง (additive) ผสมเพิ่มซึ่งอาจมีผลดีต่อการไหลหรือบดละเอียดขึ้นเพื่อช่วยเรื่องเติมเต็มช่องว่างของมวลรวมได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่เป็นผู้ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้ รหัสโครงการ R65205035 ชื่อเรื่อง นวัตกรรมคานคอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์รีไซเคิล งบกองทุนส่งเสริมงานวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2565 ทำให้งานวิจัยมีงบประมาณในการทดสอบจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

References

- [1] Shu X, Huang B. Recycling of waste tire rubber in asphalt and Portland cement concrete: an overview. *Construction and Building Materials* 2013;67:217-24.
- [2] Moreno-Navarro F, Sol-Sánchez M, Rubio-Gámez MC, Segarra-Martínez M. The use of additives for the improvement of the mechanical behavior of high modulus asphalt mixes. *Construction and Building Materials* 2014;70:65-70.
- [3] Intaboot N, Kanbua P. Investigation of concrete blocks mixed with recycled crumb rubber: A case study in Thailand. *Engineering and Applied Science Research* 2021;49(3):413-24.
- [4] Vudjung C, Thiakthum S. Paving blocks for the elderly: a study of the preparation of concrete mixed with crumb rubber and bonded rubber. *Kasem Bundit Engineering Journal* 2021;11(3):90-109. (In Thai)
- [5] Khaloo AR, Dehestani M, Rahmatabadi P. Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles. *Waste Manage* 2008;28(12):2472-82.
- [6] Pacheco-Torgal F, Ding Y, Jalali S. Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): an overview. *Construction and Building Materials* 2012;30:714-24.
- [7] Al-Tayeb MM, Bakar BHA, Ismail H, Akil HM. Impact resistance of concrete with partial replacements of sand and cement by waste rubber. *Polymer-Plastics Technology and Engineering* 2012;51(12):1230-36.
- [8] Liu F, Chen G, Li L, Guo Y. Study of impact performance of rubber reinforced concrete. *Construction and Building Materials* 2012;36:604-16.
- [9] Grinys A, Sivilevicius H, Pupekis D, Ivanauskas E. Fracture of concrete containing crumb rubber. *Journal of Civil Engineering and Management* 2013;19(3):447-55.

- [10] Cheng Z, Shi Z. Vibration attenuation properties of periodic rubber concrete panels. *Construction and Building Materials* 2014;50:257-65.
- [11] Aiello MA, Leuzzi F. Waste tyre rubberized concrete: properties at fresh and hardened state. *Waste Manage* 2010;30(8-9):1696-704.
- [12] Wang HY, Chen BT, Wu YW. A study of the fresh properties of controlled low-strength rubber lightweight aggregate concrete (CLSRLC). *Construction and Building Materials* 2013;41:526-31.
- [13] Guo HM, Zhu H. Study on the structural properties of steel reinforced CRC beam-cracking resistance. *Advanced Materials Research* 2011;374-377:775-80.
- [14] Ghaly AM, Cahill JD Iv, Correlation of strength, rubber content, and water to cement ratio in rubberized concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering* 2011;32(6):1075-81.
- [15] Mohammed BS. Structural behavior and m-k value of composite slab utilizing concrete containing crumb rubber. *Construction and Building Materials* 2010;24(7):1214-21.
- [16] Issa CA, Salem G. Utilization of recycled crumb rubber as fine aggregates in concrete mix design. *Construction and Building Materials* 2013;42:48-52.
- [17] Al-Tayeb MM, Bakar BHA, Akil HM, Ismail H. Experimental and numerical investigations of the influence of reducing cement by adding waste powder rubber on the impact behaviour of concrete. *Computers and Concrete* 2013;11(1):63-73.
- [18] Sukontasukkul P, Tiamlom K. Expansion under water and drying shrinkage of rubberized concrete mixed with crumb rubber with different size. *Construction and Building Materials* 2012;29:520-26.
- [19] Onuaguluchi O, Panesar DK. Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume. *Journal of Cleaner Production* 2014;82:125-31.
- [20] Holmes N, Dunne K, O'Donnell J. Longitudinal shear resistance of composite slabs containing crumb rubber in concrete toppings. *Construction and Building Materials* 2014;55:365-78.
- [21] Mendis ASM, Al-Deen S, Ashraf M. Behavior of similar strength Crumbed Rubber Concrete (CRC) mixes with different mix proportions. *Construction and Building Materials* 2017;137:354-66.
- [22] American society for testing and materials. ASTM C150 Specification for portland cement. Annual book of ASTM standard Vol. 4.01. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International; 2005.

- [23] Phohirun S, Kanbua P, Intaboot N. Properties of concrete mixed with recycled crumb rubber-tires. RMUTI Journal Science and Technology 2023;16(1):28-37. (in Thai)
- [24] Seo S, Choi K, Kwon Y, Lee K. Flexural strength of RC beam strengthened by partially de-bonded near surface-mounted FRP strip. International Journal of Concrete Structures and Materials 2016;10(2):149-61.
- [25] Jiravacharadet M. Reinforced concrete design (strength design method). Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology; 2014.
- [26] ACI Committee 318. ACI 318-19: Building code requirements for structural concrete. Farmington Hills, Michigan, USA: American Concrete Institute; 2019.
- [27] Sukontasukkul P, Chaikaew C. Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber. Construction and Building Materials 2006;20(7):450-57.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ปรัชญา ก้านบัว ตำแหน่งอาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี เลขที่ 450 ถ.สุพรรณบุรี - ชัยนาท ต.ย่านยาว อ.สามชุก จ.สุพรรณบุรี 72130 โทรศัพท์ 086-8774155 E-mail: prachya.k@rmutsb.ac.th



ลาวัลย์ ขันเกษม ตำแหน่งอาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี เลขที่ 450 ถ.สุพรรณบุรี - ชัยนาท ต.ย่านยาว อ.สามชุก จ.สุพรรณบุรี 72130 โทรศัพท์ 063-3626515 E-mail: lawan.k@rmutsb.ac.th



ดร.อิทธิ พลิตศิริ ตำแหน่งอาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี เลขที่ 450 ถ.สุพรรณบุรี - ชัยนาท ต.ย่านยาว อ.สามชุก จ.สุพรรณบุรี 72130 โทรศัพท์ 080-9992491 E-mail: itthi.w@rmutsb.ac.th



รศ.ดร.ณัฐวุฒิ อินทบุตร ตำแหน่งอาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรม
ศาสตรบัณฑิตและมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ศูนย์สุพรรณบุรี เลขที่ 450 ถ.สุพรรณบุรี - ชัยนาท ต.ย่านยาว อ.สามชุก
จ.สุพรรณบุรี 72130 โทรศัพท์ 089-9109781 E-mail: nuttawut.i@mutsb.ac.th

Article History:

Received: September 5, 2023

Revised: March 5, 2024

Accepted: March 7, 2024