



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การลดความเสียหายจากแรงกระแทกของคานเหล็กกล่องกรอกคอนกรีต

The reduction of Impact loading damage of rectangular concrete-filled steel tubular beams

ปาวริศ ประดงจงเนตร¹ ปิยะพงษ์ วงศ์เมธา^{1*} พุทธิรักษ์ จรัสพันธุ์กุล¹ รัฐพล เกติยศ²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

² สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย 57120

Pawarit Pradongchongnet¹ Piyaopong Wongmatar^{1*} Bhuddarak Charatpangoon¹ Rattapon Ketiyot²

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chaingmai University, Chaing Mai 50200

² Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Rai 57120

* Corresponding author.

E-mail: piyaopong.wongmatar@cmu.ac.th; Telephone: 082-3856636

วันที่รับบทความ 8 มิถุนายน 2565; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 9 สิงหาคม 2565; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 21 สิงหาคม 2565

วันที่ตอบรับบทความ 7 กันยายน 2565

บทคัดย่อ

การออกแบบโครงสร้างรับแรงกระแทกโดยทั่วไปนิยมใช้ตัวแปรเพิ่มกำลังของหน้าตัดจากผลของแรงกระแทกซึ่งอาจไม่ถูกต้องมากนักเนื่องจากแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจากการรับแรงกระแทกประกอบด้วย แรงกระแทก แรงปฏิกิริยา และโดยเฉพาแรงเฉื่อยซึ่งไม่ปรากฏในการพิจารณาปัญหาแบบสถิตศาสตร์ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกระแทกของคานอย่างง่ายประกอบด้วยคานคอนกรีตเสริมเหล็กและคานเหล็กกล่องกรอกคอนกรีตที่ออกแบบให้มีกำลังรับแรงเท่ากัน และคานเหล็กกล่องกลวงทั้งหมด 9 ตัวอย่างโดยการปล่อยตุ้มเหล็กหนัก 160 กิโลกรัมจากความสูง 700 มิลลิเมตรตกกระแทกที่กลางคาน จากการศึกษาพบว่าแรงกระแทกที่เกิดขึ้นในช่วงแรกทั้งหมดถูกรองรับโดยแรงเฉื่อยของโครงสร้าง สำหรับคานเหล็กกล่องกรอกคอนกรีตซึ่งมีค่าความแข็งแรงต่อการแอ่นตัวน้อยกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างมากเมื่อรับแรงแบบสถิตศาสตร์แต่กลับส่งผลดีเมื่อใช้ด้านทานแรงกระแทกเนื่องจากช่วยลดแรงกระแทกที่เกิดขึ้นได้มากกว่า 7 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่กำลังของหน้าตัดที่เท่ากัน และยังสามารถลดแรงปฏิกิริยาจากการกระแทกได้ สำหรับความเสียหายของโครงสร้างจากการกระแทกในคานคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นการเกิดการวิบัติแบบเปราะ และคานเหล็กกล่องกลวงเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่บริเวณที่เกิดการกระแทก แต่สำหรับคานเหล็กกล่องกรอกคอนกรีตนั้นไม่พบความเสียหายจากการกระแทก ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่เหมาะสมในการรองรับแรงกระแทกของคานเหล็กกล่องกรอกคอนกรีต

คำสำคัญ

แรงกระแทก แรงเฉื่อย คานเหล็กกล่องกรอกคอนกรีต การวิบัติแบบเปราะ

Abstract

The structural design against impact loading is generally used impact factor to increase capacity of structural member, which may not be very accurate. This is because the impact force, reaction force, and especially inertia force are occurred in structural member under impact load, which are not considered in static problem. In this research, the impact behavior of 9 simple beams, including reinforced concrete beams (RC) and rectangular concrete-filled steel tube beams (CFST) designed to have same load capacities and hollow steel beams (HS), under dropped steel hammer 160 kg from 700 mm height were observed. The results revealed that the most of impact force in early stage was absorbed by inertia force. The CFST beams which have elastic stiffness less than RC beams significantly showed the well impact loading

performance. They can reduce the impact forced more than 7 times compared to RC beams with same load capacities and also reduced the reaction force from colliding events. The RC beams reached the brittle failure and HS beams occurred the local buckling at the impact point. Nevertheless, CFST beams did not demonstrate any damage. These results illustrate that CFST beams are appropriate to resist impact load.

Keywords

impact loading; inertia force; rectangular concrete-filled steel tubular beams; brittle failure

1. บทนำ

ในช่วงชีวิตของอายุการใช้งานของโครงสร้างอาจต้องพบเจอกับรูปแบบแรงกระทำนอกเหนือจากการออกแบบให้รองรับไว้ เช่น แรงกระแทก ดังนั้นเพื่อให้มั่นใจว่าโครงสร้างจะยังคงมีความปลอดภัยภายใต้แรงกระทำที่เกิดขึ้น ในขั้นตอนการออกแบบจึงได้มีการพิจารณาตัวแปรของแรงกระทำร่วมอยู่ในการคำนวณกำลังของโครงสร้างซึ่งอ้างอิงวิธีการแบบสถิติศาสตร์ [1,2] การพิจารณาในรูปแบบดังกล่าวอาจไม่ถูกต้องมากนักเนื่องจากแรงที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างจากการรับแรงกระทำประกอบด้วย แรงกระแทก แรงปฏิกิริยา และแรงเฉื่อยซึ่งไม่ปรากฏในการพิจารณาแบบสถิติศาสตร์ [3] ในโครงสร้างคอนกรีตที่ได้รับการออกแบบให้วิบัติแบบเหนียวภายใต้วิธีแบบสถิติศาสตร์ถูกพบว่าสามารถเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติเป็นรูปแบบเปราะได้เมื่อรับแรงกระทำ [4-6] ชิ้นส่วนโครงสร้างท่อเหล็กกรอกคอนกรีต (concrete-filled steel tubular, CFST) พบว่ามีคุณสมบัติในด้านความเหนียวที่ดีเนื่องจากการทำงานประสานกันระหว่างเหล็กและคอนกรีต [7,8] เนื่องจากความเค้นที่เกิดขึ้นในคอนกรีตอยู่ในสถานะแรงกระทำสามทิศทางจากผลการโอบรัดของท่อเหล็กภายนอกซึ่งช่วยเพิ่มกำลังและคุณสมบัติความเหนียวของคอนกรีต นอกจากนี้การโก่งเดาะของท่อเหล็กถูกป้องกันด้วยคอนกรีตภายใน [9] ส่งผลให้มีการเลือกใช้โครงสร้าง CFST สำหรับเป็นโครงสร้างสะพาน อาคารสูง รวมถึงมีการพัฒนาคุณสมบัติในการรับแรงให้ดีขึ้นอย่างต่อเนื่อง [10,11] Zhu และคณะ [12], Cai และคณะ [13] ได้ศึกษาพฤติกรรมของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตทั้งหน้าตัดสี่เหลี่ยมและวงกลมภายใต้แรงแผ่นดินไหวพบว่าท่อเหล็กภายนอกที่ห่อหุ้มคอนกรีตไว้ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงของเสาและยังป้องกันการเกิดรอยร้าวเฉือนในแกนคอนกรีตภายในได้ ในส่วนพฤติกรรมการรับแรงกระทำนั้น Yousuf และคณะ [14,15] เปรียบเทียบคุณสมบัติการต้านทาน

แรงกระแทกของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตระหว่างท่อเหล็กคอร์บอนดำและท่อสแตนเลส โดยผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าเสาท่อสแตนเลสกรอกคอนกรีตมีความสามารถในการสลายพลังงานจากการกระแทกได้ดีกว่า โดยตัวแปรหลักที่เป็นตัวควบคุมพฤติกรรมการตอบสนองต่อแรงกระทำของโครงสร้าง CFST ประกอบด้วย อัตราส่วนระหว่างขนาดหน้าตัดต่อความหนาของผนังท่อ อัตราส่วนความขรุขระ และความเร็วของการกระแทก [16] จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าโครงสร้าง CFST มีจุดเด่นในส่วนของพฤติกรรมแบบเหนียวรวมถึงประสิทธิภาพการรับแรงที่ดีขึ้นจากการทำงานประสานกันระหว่างท่อเหล็กภายนอกและคอนกรีตภายใน

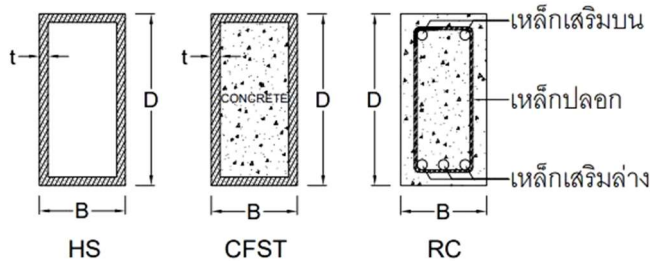
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก คานเหล็กกล่องกรอกคอนกรีต และคานเหล็กกล่องกลวงภายใต้แรงกระทำจากการปล่อยตุ้มน้ำหนักที่ความสูงเท่ากันในทุกตัวอย่าง โดยได้ทำการออกแบบกำลังรับแรงดัดและแรงเฉือนของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กและเหล็กกล่องกรอกคอนกรีตให้มีกำลังเท่ากันในแต่ละกลุ่มตัวอย่าง ผลทดสอบแรงกระทำ แรงปฏิกิริยา ความเร่ง และความเสียหายที่เกิดจากการกระทำได้ถูกแสดงและสรุปเป็นรูปแบบโครงสร้างที่เหมาะสมต่อการรับแรงกระทำ

2. การดำเนินงานวิจัย

2.1 ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างคานทดสอบในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 3 กลุ่มตัวอย่างคือ คานคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC) คานเหล็กกล่องกรอกคอนกรีต (CFST) และคานเหล็กกล่องกลวง (HS) สำหรับคอนกรีตที่ใช้เทคานคอนกรีตเสริมเหล็กและคานเหล็กกล่องกรอกคอนกรีตเป็นคอนกรีตจากการผสมครั้งเดียวกันและมีกำลังอัดประลัยเท่ากัน โดยขนาดมิติของหน้าตัดและรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 1 และตารางที่ 1 โดยคานทุก

ตัวอย่างมีความยาวทั้งหมดเท่ากับ 1,300 มม. มีความยาวช่วงพาดเท่ากับ 1200 มม. และมีปลายยื่นด้านละ 50 มม. สำหรับคุณสมบัติกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต กำลังรับแรงดึงที่จุดครากและที่จุดสูงสุดของเหล็กรูปพรรณกลองสี่เหลี่ยม และเหล็กเส้นกลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 2



รูปที่ 1 รายละเอียดหน้าตัดของตัวอย่างคานทดสอบ

2.2 การออกแบบตัวอย่าง

ตัวอย่างคานทดสอบในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ตัวอย่างคือ คานคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC) คานเหล็กกล่อกกรอกคอนกรีต (CFST) และคานเหล็กกล่อกกลวง (HS) ดังแสดงในหัวข้อตัวอย่างทดสอบ สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กและคานเหล็กกล่อกกรอกคอนกรีตแต่ละหน้าตัดถูกออกแบบให้มีค่ากำลังต้านทานแรงดัดและกำลังต้านทานแรงเฉือนเท่ากัน เช่น หน้าตัด CFST-1 และ RC-1 มีค่ากำลังเท่ากัน และสำหรับคานเหล็กกล่อกกรอกคอนกรีตและคานเหล็กกล่อกกลวงจะมีขนาดหน้าตัดของเหล็กกล่อกเท่ากัน เช่น CFST-1 และ HS-1 ใช้เหล็กกล่อกขนาด 75x38x2.3 มม. โดยการคำนวณกำลังต้านทานแรงของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงมาตรฐาน ACI 318 [17] การคำนวณกำลังหน้าตัดเหล็กกล่อกกลวงและหน้าตัดเหล็กกล่อกกรอกคอนกรีตอ้างอิงมาตรฐาน AISC 360-16 [18] และคำนวณตามหลักของ Lai และคณะ [19] โดยแสดงดังตารางที่ 3 ในการคำนวณกำลังรับแรงดัดของหน้าตัดเหล็กกล่อกกรอกคอนกรีต เนื่องจากเหล็กกล่อกที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ล้วนเป็นหน้าตัดอัดแน่น (compact section) ดังนั้นการคำนวณกำลังรับแรงดัดระบุ (Nominal flexural strength, M_n) ของหน้าตัด CFST แสดงดังสมการที่ 1-2

ตารางที่ 1 ขนาดหน้าตัดและรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ

ชื่อ	ขนาดหน้าตัด		ความหนาผนังเหล็กกล่อก (t) (มม.)		
	ลึก (D) (มม.)	กว้าง (B) (มม.)			
CFST-1	75	38	2.3		
CFST-2	75	45			
CFST-3	100	50			
HS-1	75	38			
HS-2	75	45			
HS-3	100	50			
	ลึก (D) (มม.)	กว้าง (B) (มม.)	เหล็กเสริม		เหล็กปลอก
			บน	ล่าง	
RC-1	250	130	2RB6	2RB6	RB6@10cm
RC-2	200	140	2RB6	3RB6	RB6@6cm
RC-3	280	200	2RB6	4RB6	RB6@8cm

ตารางที่ 2 คุณสมบัติวัสดุ

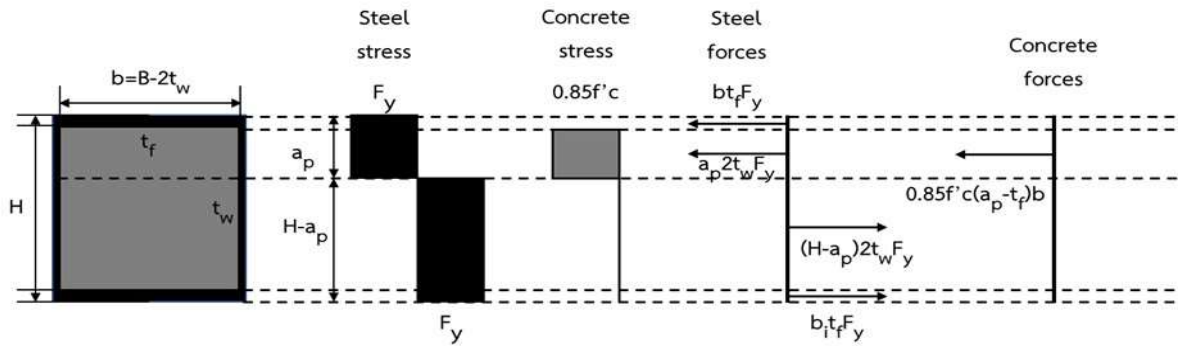
คอนกรีต	
กำลังอัดประลัย (f'_c), MPa	21.09
เหล็กเส้นกลม 6 มม.	
กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (f_y), MPa	341.78
กำลังรับแรงดึงที่จุดสูงสุด (f_u), MPa	482.25
เหล็กรูปพรรณ	
กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (f_y), MPa	331.57
กำลังรับแรงดึงที่จุดสูงสุด (f_u), MPa	396.32

2.3 วิธีการทดสอบ

คานทดสอบทุกตัวอย่างถูกสร้างขึ้น 2 ชุดเพื่อแยกทดสอบแรงกระแทกและทดสอบการให้แรงกดแบบสถิตศาสตร์ โดยวิธีการทดสอบแสดงดังนี้

2.3.1 การทดสอบแรงกระแทก

แรงกระแทกที่กระทำต่อตัวอย่างคานทดสอบทุกตัวอย่างในงานวิจัยนี้เกิดจากการปล่อยตุ้มน้ำหนัก 160 กก. จากความสูง 700 มม. จากผิวบนของคานตกลงอิสระ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางความยาวช่วงพาดของคานซึ่งยาว 1200 มม. สำหรับการยัดรี้งคานทดสอบเป็นรูปแบบคานอย่างง่าย (simple beam) โดยจุดรองรับแต่ละด้านเป็นแบบ hinge และ roller



รูปที่ 2 Stress block ของหน้าตัดอัดแน่น

$$M_n = M_p = F_y b t_f \left(a_p - \frac{t_f}{2} \right) + F_y b t_f \left(H - a_p - \frac{t_f}{2} \right) + F_y a_p 2t_w \left(\frac{a_p}{2} \right) + F_y (H - a_p) 2t_w \left(\frac{H - a_p}{2} \right) + 0.85f'_c (a_p - t_f) b \left(\frac{a_p - t_f}{2} \right) \quad (1)$$

$$\text{เมื่อ} \quad a_p = \frac{2F_y H t_w + 0.85f'_c b t_f}{4F_y t_w + 0.85f'_c b} \quad (2)$$

โดยที่ F_y คือกำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (MPa) f'_c คือกำลังอัดประลัยของคอนกรีต (MPa) H และ b คือความลึกและความกว้างของหน้าตัดตามลำดับ (mm) t_w และ t_f คือความหนาเอวและความหนาปีกของเหล็กกล่อง ตามลำดับ (mm)

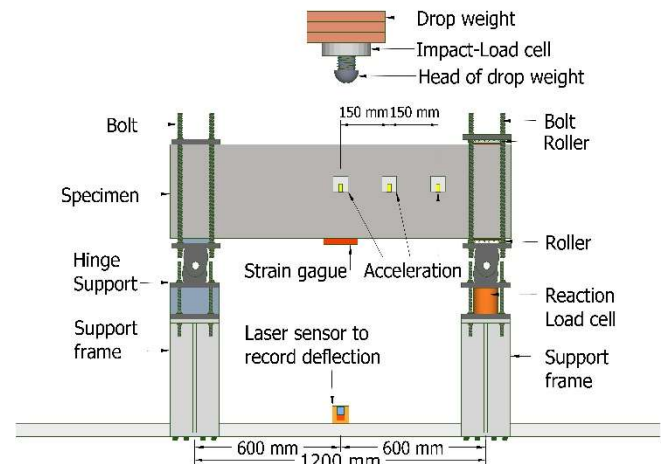
การวัดค่าประกอบด้วยค่าแรงกระแทกจาก load cell ที่ติดตั้งในตุ้มกระแทก ค่าแรงปฏิกิริยาที่จุดรองรับ ระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานวัดด้วย laser displacement sensor และค่าความเร่งของคาน 3 ตำแหน่ง แต่ละตำแหน่งห่างกัน 150 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยค่าความถี่ของเครื่องมืออยู่ที่ 1000 (Hz)

2.3.2 การทดสอบแรงกดแบบสถิตศาสตร์

การทดสอบการให้แรงกดแบบสถิตศาสตร์จะมีวิธีการเช่นเดียวกับการทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุด (three-pointed bending test) โดยการเตรียมตัวอย่างจะมีระยะช่วงพาดและเงื่อนไขจุดรองรับเช่นเดียวกับการทดสอบแรงกระแทกดังแสดงในรูปที่ 3 และให้แรงกดกระทำที่จุดกึ่งกลางช่วงพาดจนคานเกิดการวิบัติ

ตารางที่ 3 กำลังออกแบบของหน้าตัด

ตัวอย่าง	M_n (kN-m)	V_n (kN)	โหมดการวิบัติ
CFST-1	5.10	48.47	การดัด
CFST-2	5.62	48.84	การดัด
CFST-3	9.36	77.51	การดัด
RC-1	5.80	47.91	การดัด
RC-2	6.36	44.30	การดัด
RC-3	9.38	77.22	การดัด
HS-1	3.43	46.70	การดัด
HS-2	3.85	46.70	การดัด
HS-3	6.3	63.28	การดัด



รูปที่ 3 การทดสอบการให้แรงกระแทก

3. ผลการทดสอบ

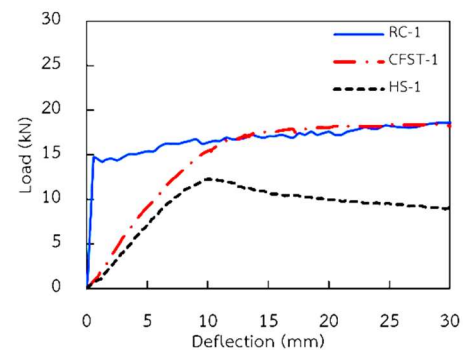
3.1 แรงกดและการแอ่นตัวของคานจากการทดสอบแบบสถิตศาสตร์

จากการทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุดโดยการให้แรงแบบสถิตศาสตร์ ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานแสดงดังรูปที่ 4 โดยกราฟแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มตามเลขท้ายของชื่อตัวอย่าง จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าทุกตัวอย่างมีรูปแบบการวิบัติแบบเหนียว และค่าแรงกดสูงสุด ($P_{s,max}$) แสดงดังตารางที่ 4 โดยจะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกับข้อมูลการออกแบบดังแสดงในรูปแบบอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ดัดสูงสุดจากการทดสอบและออกแบบ ($M_{s,max}/M_n$) ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 1.0 เนื่องจากรูปแบบการวิบัติเป็นแบบดัดยกเว้นตัวอย่างเหล็กกล่องกลวงที่กำลังต่ำกว่าที่ออกแบบเล็กน้อยเนื่องจากเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ (Local buckling) บริเวณรับแรงกดและเกิดการสูญเสียกำลังเมื่อผ่านจุดสูงสุด ซึ่งค่าความแข็งแรงต่อการแอ่นตัวของคานในช่วงยืดหยุ่น (elastic stiffness) แสดงดังตารางที่ 4 ซึ่งค่าความแข็งแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสูงกว่าคานเหล็กกล่องกรอกคอนกรีตและเหล็กกล่องกลวงอย่างชัดเจน ขณะที่การกรอกคอนกรีตในเหล็กกล่องช่วยเพิ่มค่าความแข็งแรงได้เล็กน้อย

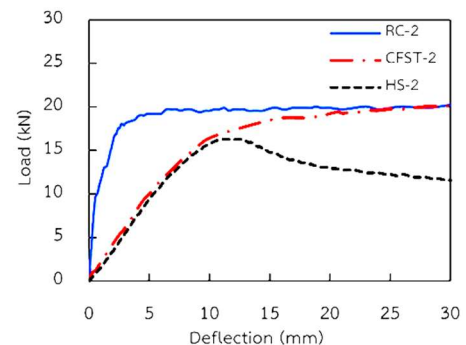
3.2 แรงกระแทกและแรงปฏิกิริยาจากการกระแทก

จากการปล่อยตุ้มน้ำหนักตกกระแทกคานทดสอบ ข้อมูลแรงกระแทกและแรงปฏิกิริยาที่จู่รองรับแสดงดังรูปที่ 5 และค่าแรงกระแทกสูงสุด ($P_{i,max}$) และค่าแรงปฏิกิริยารวมจากจู่รองรับทั้งสองด้านสูงสุด ($R_{i,max}$) สรุปดังตารางที่ 4 จากผลแสดงให้เห็นว่าแรงกระแทก (Impact force) ที่เกิดขึ้นทันทีหลังเกิดกระแทกมีค่าสูงขณะที่แรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกันของทุกตัวอย่างมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และในเวลาต่อมาค่าแรงปฏิกิริยาจึงมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าใกล้เคียงกับค่าแรงกระแทกที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามแรงกระแทกที่เกิดขึ้นช่วงแรกในคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่าสูงกว่าคานชนิดอื่นอย่างชัดเจนที่ตำแหน่งตกกระแทกโดยรอยร้าวไม่มีการกระจายตัวออกซึ่งรูปแบบความเสียหายดังกล่าวจะส่งผลให้ค่าความเครียดในเหล็กเสริมเกิดอย่างกระจุกตัวรวมถึงการสูญเสียพื้นที่รับแรงอัดในคอนกรีตจึงอาจนำไปสู่การวิบัติแบบเปราะจากการอัดแตก

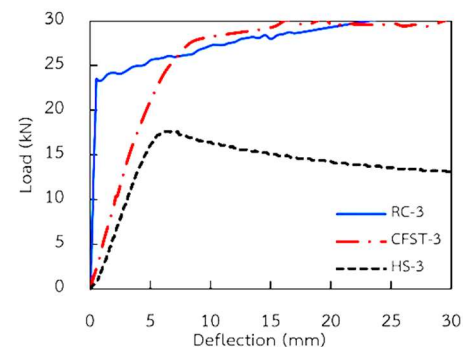
ของคอนกรีต (concrete crushing) และจากรูปแบบความเสียหายนี้ส่งผลให้ค่าระยะแอ่นตัวมีค่ามากเมื่อเทียบกับโครงสร้างอื่นดังแสดงในรูปที่ 6 สำหรับคานเหล็กกล่องกลวงพบการโก่งเดาะเฉพาะที่บริเวณตกกระแทกซึ่งเป็นรูปแบบความเสียหายที่ควรหลีกเลี่ยงในโครงสร้างเหล็กเนื่องจากทำให้สูญเสียกำลังการต้านทานแรงของโครงสร้าง และสำหรับคานเหล็กกล่องกรอกคอนกรีตนั้นไม่พบความเสียหายจากการกระแทกรวมถึง



(ก) กลุ่มที่ 1



(ข) กลุ่มที่ 2

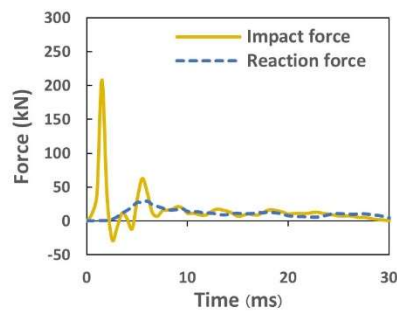


(ค) กลุ่มที่ 3

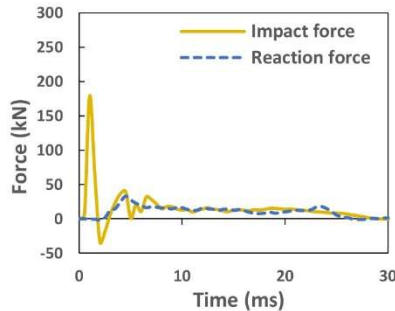
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบ

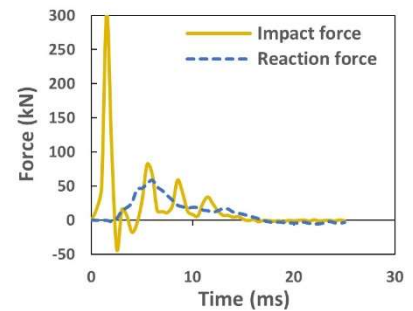
ตัวอย่าง	Static				Impact			
	$P_{s,max}$	$M_{s,max}$	$M_{s,max} / M_n$	Stiffness	$P_{i,max}$	$R_{i,max}$	Δ_{max}	Δ_{res}
	(kN)	(kN-m)		(kN/mm)	(kN)	(kN)	(mm)	(mm)
RC-1	18.89	5.67	0.98	31.9	208.16	29.60	298.2	31.1
RC-2	20.23	6.07	0.95	21.2	178.69	32.79	417.7	21.4
RC-3	30.41	9.12	0.97	50.0	304.31	59.10	292.7	14.1
CFST-1	18.39	5.52	1.08	1.8	29.28	24.73	45.6	40.5
CFST-2	20.40	6.12	1.09	2.1	28.92	29.34	41.1	35.8
CFST-3	30.25	9.08	0.97	4.7	49.80	35.89	31.0	22.3
HS-1	9.59	2.88	0.84	1.5	19.51	16.57	94.5	85.4
HS-2	12.42	3.73	0.97	2.0	19.41	18.07	61.5	58.0
HS-3	17.56	5.27	0.84	3.9	16.93	20.04	46.7	43.2



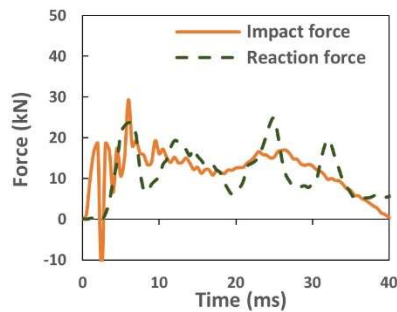
(ก) RC-1



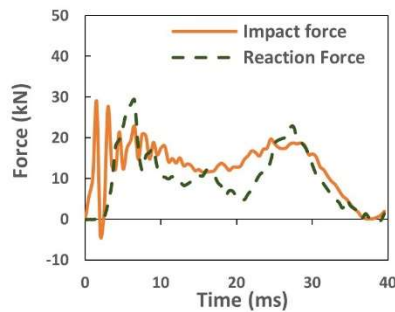
(ข) RC-2



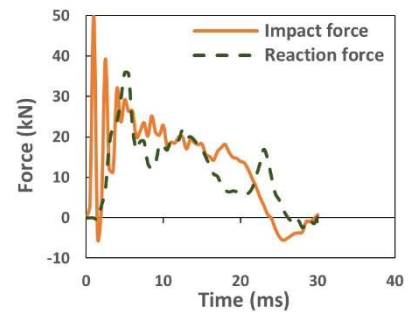
(ค) RC-3



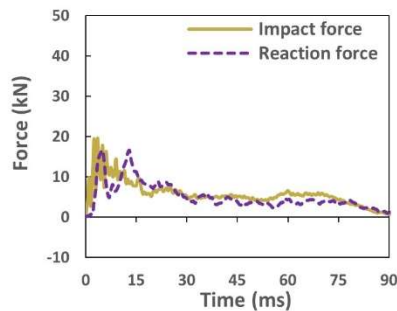
(ง) CFST-1



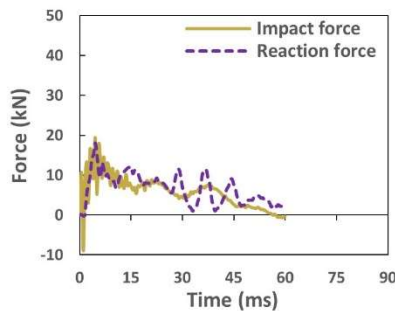
(จ) CFST-2



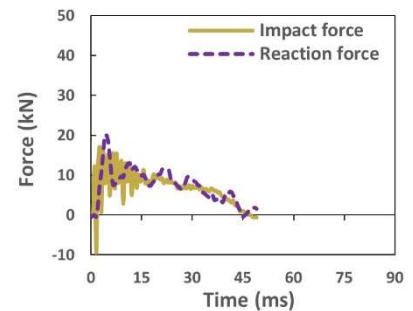
(ฉ) CFST-3



(ช) HS-1



(ซ) HS-2



(ฌ) HS-3

รูปที่ 5 แรงกระแทกและแรงปฏิกิริยาที่จุดรองรับ

3.3 การแอ่นตัวจากการกระแทก

ค่าการแอ่นตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานจากการกระแทกแสดงดังรูปที่ 6 โดยค่าระยะแอ่นตัวสูงสุดที่เกิดขึ้น (Δ_{max}) และค่าระยะแอ่นตัวคงค้างหลังการกระแทก (Δ_{res}) แสดงดังตารางที่ 4

3.4 รูปแบบความเสียหาย

ความเสียหายของคานทดสอบจากการกระแทกด้วยตุ้มน้ำหนักแสดงดังรูปที่ 7 โดยความเสียหายของคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งหมดเกิดรอยร้าวแตก (flexural crack) ขนาดใหญ่ ค่าระยะแอ่นตัวที่เกิดขึ้นยังมีความน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับคานชนิดอื่นแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการต้านทานแรงกระแทกที่เหมาะสม

3.5 ความเร่งสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานจากการกระแทก

ค่าความเร่งสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานจากการกระแทกแสดงดังรูปที่ 8 โดยข้อมูลความเร่งแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มตามค่ากำลังรับแรงของหน้าตัดตั้งอธิบายในหัวข้อที่ 2.2 และแสดงหมายเลขกลุ่มของตัวอย่างไว้ท้ายชื่อตัวอย่างทดสอบ

4. อภิปรายผลการทดสอบ

4.1 พฤติกรรมการรับแรงกระแทกของคาน

พฤติกรรมการตอบสนองของคานรับแรงกระแทกในช่วงแรกของการกระแทกนั้นคานจะมีการตอบสนองแบบพลศาสตร์ (dynamic response) ดังแสดงตัวอย่างการตอบสนองของคาน RC-1 ดังรูปที่ 9 โดยจะเห็นว่าค่าความเร่ง (acceleration) ที่วัดจากตำแหน่งกึ่งกลางคานนั้นมีค่าสูงมาก ขณะที่ค่าแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาเดียวกันนั้นมีค่าน้อยมากต่างกับค่าแรงกระแทกที่มีค่าสูงดังที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อ 3.2 สาเหตุเนื่องจากแรงกระแทกที่เกิดขึ้นถูกต้านทานโดยแรงเฉื่อย (inertia force) ซึ่งมีค่าเท่ากับมวลคูณความเร่งของคาน และในเวลาต่อมาเมื่อค่าความเร่งมีค่าลดลงพฤติกรรมการตอบสนองของคานจะเปลี่ยนเป็นการตอบสนองแบบสถิตศาสตร์ (static response) ดังแสดงในรูปที่ 9 โดยค่าแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับแรงกระแทกที่เกิดขึ้น จากรูปแบบการตอบสนองนี้ส่งผลให้พฤติกรรมการรับแรงกระแทกของคานมีความซับซ้อน

4.2 ผลของรูปแบบโครงสร้างต่อพฤติกรรมการกระแทก

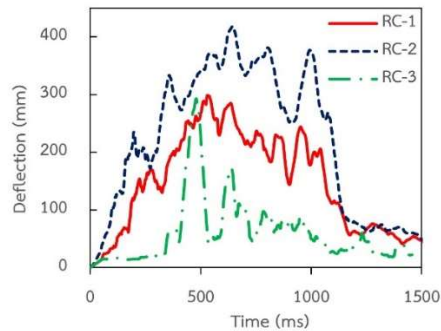
การวิเคราะห์ผลของรูปแบบโครงสร้างต่อพฤติกรรมการรับแรงกระแทกในหัวข้อนี้จะเน้นการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC) และคานเหล็กกล่องกรอกคอนกรีต (CFST) เนื่องจากในแต่ละกลุ่มตัวอย่างได้ถูกออกแบบให้มีกำลังเท่ากัน เมื่อดูจากค่าความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานดังแสดงในรูปที่ 8 จะเห็นว่าค่าความเร่งของคานเหล็กกล่องกรอกคอนกรีตมีค่ามากกว่าชัดเจนเนื่องจากหน่วยน้ำหนักคงที่ (dead load) ของคานเหล็กกล่องกรอกคอนกรีตน้อยกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กอยู่ที่ประมาณ 8 เท่าและค่าความแข็งเกร็งมีค่าน้อยกว่าดังแสดงในตารางที่ 4 แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าแรงกระแทกสูงสุดที่เกิดขึ้นในช่วงการตอบสนองแบบพลศาสตร์ของคานดังแสดงในรูปที่ 10 นั้นกลับพบว่าแรงกระแทกที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่าสูงกว่าคานเหล็กกล่องกรอกคอนกรีตอยู่มาก เมื่อเทียบสัดส่วน (RC/CFST) พบว่าสูงถึง 6.1-7.1 เท่า โดย Pham และ Hao [20], Saatci และ Vecchio [21], ปิยะพงษ์และชยานนท์ [22] ได้อธิบายว่าแรงกระแทกที่เกิดขึ้นในช่วงพฤติกรรมแบบพลศาสตร์นั้นจะแปรเปลี่ยนเป็นแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้นในคานดังแสดงในแผนภาพการกระจายของแรงในรูปที่ 11 จากข้อมูลแสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งเกร็งต่อการแอ่นตัวของคานเหล็กกล่องกรอกคอนกรีตที่น้อยกว่ากลับส่งผลต่อพฤติกรรมการรับแรงกระแทก โดยสามารถลดแรงกระแทกที่เกิดขึ้นได้มากถึง 7.1 เท่าเมื่อเทียบกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กส่งผลให้แรงเฉื่อยในคานที่เกิดขึ้นจากการกระแทกลดลงด้วยเช่นกัน

4.3 แรงปฏิกิริยาจากการกระแทก

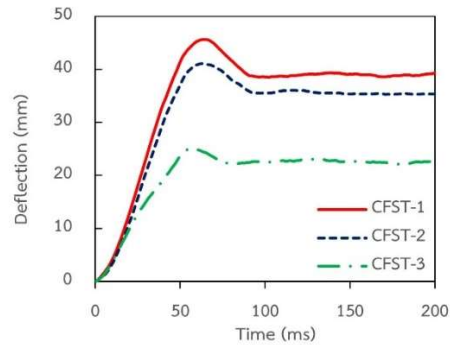
จากข้อมูลแรงปฏิกิริยาสูงสุดที่จู่ตรงรับจากการทดสอบการให้แรงกดแบบแบบสถิตศาสตร์และการให้แรงกระแทกต่อคานตัวอย่างดังสรุปในตารางที่ 4 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าแรงปฏิกิริยาสูงสุดระหว่างการทดสอบกระแทกและการกดแบบสถิตศาสตร์พบว่าแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการทดสอบการกระแทกมีค่าสูงกว่าในทุกตัวอย่าง และเมื่อเปรียบเทียบเป็นสัดส่วนค่าแรงปฏิกิริยาระหว่างการทดสอบทั้ง 2 รูปแบบ ($R_{i,max}/P_{s,max}$) ดังแสดงในกราฟรูปที่ 12 แสดงให้เห็นว่าในคานคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นค่าแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการกระแทกมีค่าสูงกว่าการกดแบบสถิตศาสตร์ (ซึ่งสอดคล้องกับ

กำลังออกแบบของหน้าตัด) มากขึ้น 1.94 เท่า ในขณะที่
สัดส่วนดั่งกล่าวที่เกิดขึ้นในคานเหล็กกล่องกรอกคอนกรีตมี
ค่าสูงสุดเพียง 1.44 เท่า ข้อมูลนี้แสดงให้เห็นว่าการออกแบบ
กำลังของจตุรกรรับในกรณีของคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะต้อง

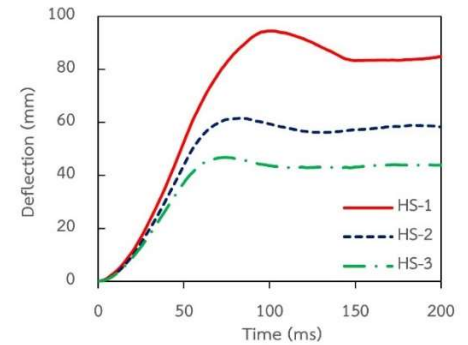
มีการคูณตัวแปรจากแรงกระทำที่สูงกว่าเมื่ออ้างอิงข้อมูล
กำลังของหน้าตัดในการออกแบบ



(ก) ตัวอย่าง RC



(ข) ตัวอย่าง CFST



(ค) ตัวอย่าง HS

รูปที่ 6 ระยะแอนตัวที่กึ่งกลางคานจากการกระแทก



(ก) RC-1



(ข) RC-2



(ค) RC-3



(ง) CFST-1



(จ) CFST-2



(ฉ) CFST-3



(ช) HS-1

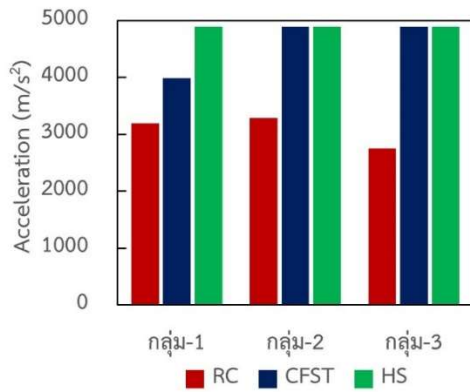


(ซ) HS-2

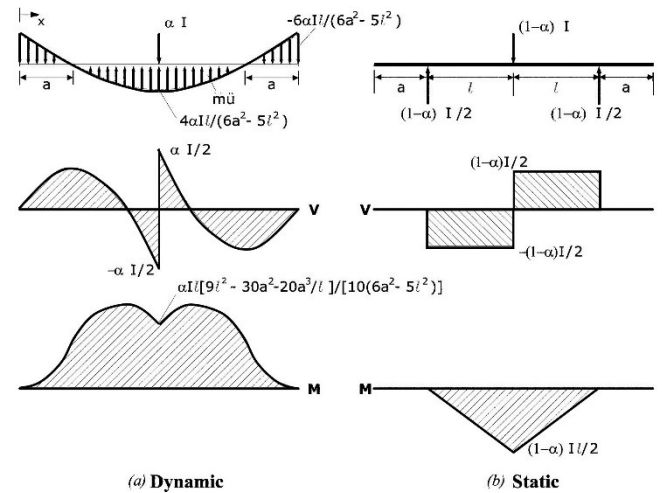


(ฅ) HS-3

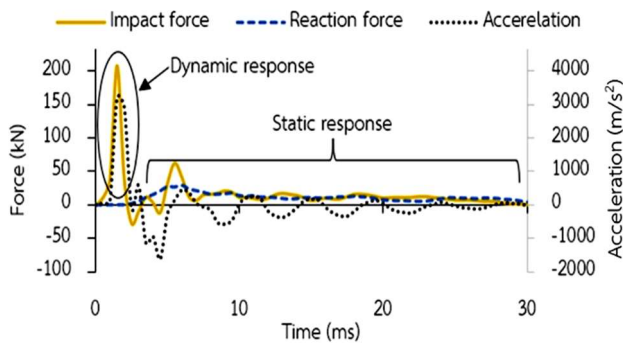
รูปที่ 7 ตัวอย่างความเสียหายจากการกระแทก



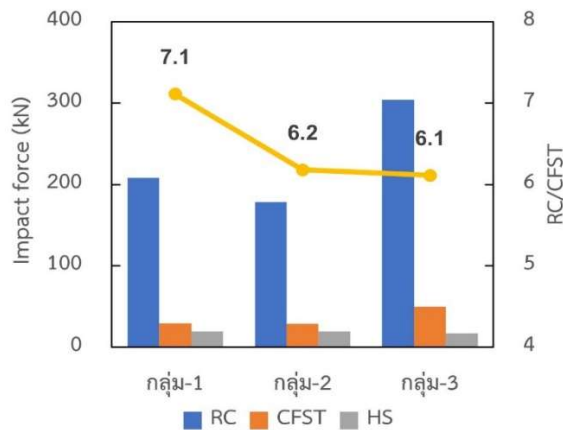
รูปที่ 8 ค่าความเร่งสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางคาน



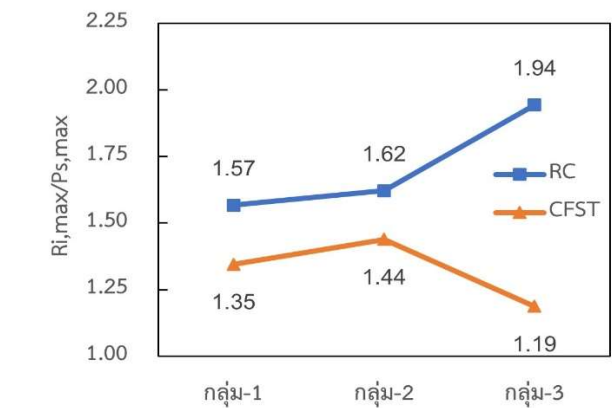
รูปที่ 11 แผนภาพการกระจายของแรงจากการกระแทก [21]



รูปที่ 9 ค่าแรงกระแทกและความเร่งของคาน RC-1



รูปที่ 10 เปรียบเทียบค่าแรงกระแทกสูงสุด



รูปที่ 12 อัตราส่วนแรงปฏิกิริยาสูงสุดระหว่างทดสอบการกระแทกต่อการทดสอบแบบสถิตศาสตร์

5. สรุปผลการทดสอบ

จากการศึกษาพฤติกรรมระหว่างโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เหล็กกล่องกรอกคอนกรีต และเหล็กกล่องกลวงจากการตกกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานด้วยตุ้มน้ำหนัก 160 กิโลกรัมปล่อยจากความสูง 700 มิลลิเมตรแสดงให้เห็นว่า

1) แรงกระแทกที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับคานเหล็กกล่องกรอกคอนกรีตโดยมีสัดส่วนมากที่สุดถึง 7.1 เท่าเมื่อเปรียบเทียบที่กำลังรับแรงของหน้าตัดที่เท่ากัน

2) การออกแบบกำลังของจตุรกรรับคานต้านทานแรงกระแทกเมื่อพิจารณาจากกำลังออกแบบของหน้าตัด สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กจำเป็นที่จะต้องคูณเพิ่มตัวแปรจากแรง

กระแทกที่มากกว่ากรณีของคานเหล็กกล่องกรอกคอนกรีต เมื่ออ้างอิงจากผลการทดสอบพบว่าค่าของตัวแปรสูงถึง 1.94 สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ขณะที่คานเหล็กกล่องกรอกคอนกรีตใช้เพียง 1.44

3) รูปแบบความเสียหายจากแรงกระแทกของคานคอนกรีตเสริมเหล็กทำให้เกิดรอยร้าวตัดขนาดใหญ่ที่อาจนำไปสู่การวิบัติแบบเปราะได้ ขณะที่คานเหล็กกล่องกลวงเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่บริเวณรับแรงกระแทกซึ่งเป็นรูปแบบความเสียหายที่ควรหลีกเลี่ยงในโครงสร้างเหล็ก สำหรับคานเหล็กกล่องกรอกคอนกรีตนั้นไม่พบความเสียหายจากข้อมูลพฤติกรรมการรับแรงกระแทกของโครงสร้างทั้ง 3 ชนิดแสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมของโครงสร้างเหล็กกล่องกรอกคอนกรีตต่อการรับแรงกระแทกที่ช่วยลดค่าแรงกระแทกและช่วยลดความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยภายใต้ “ทุนพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่” รหัสโครงการ JRCMU2564_057

เอกสารอ้างอิง

- [1] BSI U. National annex to eurocode 1: *Actions on structures-part 2: Traffic loads on bridges*, NA to BS EN 1991-2: 2003: British Standards Institution; 2008.
- [2] AASHTO. *Bridge design specifications*. Washington DC: American association of state highway transportation officials; 2012.
- [3] CEB. *Concrete structures under impact and impulsive loading*. Lausanne: Bulletin information; 1988.
- [4] Micallef K, Sagaseta J, Ruiz MF, Muttoni A. Assessing punching shear failure in reinforced concrete flat slabs subjected to localised impact loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2014;71:17-33.
- [5] Pham TM, Hao H. Behavior of fiber-reinforced polymer- strengthened reinforced concrete beams under static and impact loads. *International Journal of Protective Structures*. 2017;8(1):3-24.
- [6] Qin F, Pingan W. Main factors affecting failure modes of blast loaded RC beams. *Chinese Journal of Computational Mechanics*. 2003;20(1):39-42.
- [7] Han LH, Li W, Bjorhovde R. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: Members. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014;100: 211-228.
- [8] Han L-H, Yao G-H, Tao Z. Performance of concrete-filled thin-walled steel tubes under pure torsion. *Thin-Walled Structures*. 2007;45(1):24-36.
- [9] Ekmekyapar T, Alwan OH, Hasan HG, Shehab BA, Al-Eliwi BJ. Comparison of classical, double skin and double section CFST stub columns: Experiments and design formulations. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019; 155: 192-204.
- [10] Espinos A, Romero ML, Lam D. Fire performance of innovative steel-concrete composite columns using high strength steels. *Thin - Walled Structures*. 2016;106:113-128.
- [11] Wang Y-H, Wang Y-Y, Hou C, Zhou X-H, Deng R, Lan Y-S, et al. Combined compression-bending-torsion behaviour of CFST columns confined by CFRP for marine structures. *Composite Structures*. 2020;242:112-131.
- [12] Zhu M, Liu J, Wang Q, Feng X. Experimental research on square steel tubular columns filled with steel-reinforced self-consolidating high-strength concrete under axial load. *Engineering Structures*. 2010;32(8):2278-2286.

- [13] Cai J, Pan J, Wu Y. Mechanical behavior of steel-reinforced concrete-filled steel tubular (SRCFST) columns under uniaxial compressive loading. *Thin-Walled Structures*. 2015;97:1-10.
- [14] Yousuf M, Uy B, Tao Z, Remennikov A, Liew JR. Transverse impact resistance of hollow and concrete filled stainless steel columns. *Journal of Constructional Steel Research*. 2013;82:177-189.
- [15] Yousuf M, Uy B, Tao Z, Remennikov A, Liew JR. Impact behaviour of pre-compressed hollow and concrete filled mild and stainless steel columns. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014;96:54-68.
- [16] Al - Rifaie A, Jones S, Wang Q, Guan Z. Experimental and numerical study on lateral impact response of concrete filled steel tube columns with end plate connections. *International Journal of Impact Engineering*. 2018;121:20-34.
- [17] ACI Committee. *Building code requirements for structural concrete (ACI 318 - 08) and commentary*. Farmington Hills: ACI; 2008.
- [18] ANSI/ AISC 360- 16. *Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago: AISC; 2016.
- [19] Lai Z, Varma AH, Zhang K. Noncompact and slender rectangular CFT members: Experimental database, analysis, and design. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014;101:455-468.
- [20] Pham TM, Hao H. Impact behavior of FRP-strengthened RC beams without stirrups. *Journal of Composites for Construction*. 2016;20(4):11-24.
- [21] Saatci S, Vecchio FJ. Effects of shear mechanisms on impact behavior of reinforced concrete beams. *ACI structural Journal*. 2009;106(1):78-86.
- [22] ปิยะพงษ์ วงศ์เมธา, ชยานนท์ ทรราชปัญญา. การวิเคราะห์การรับแรงกระแทกของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีอัตราส่วนของระยะช่วงเฉือนต่อความลึกต่างกัน. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*. 2018;25(3):211-223.