

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาพลังงานกอนกรีตสมรรถนะสูงแบบหลายชั้น
ในการต้านทานแรงกระแทกจากกระสุนโดยตรง
จากคอนกรีตผสมเม็ดยางและคอนกรีตผสมเส้นใยไฟเบอร์

รองศาสตราจารย์ ดร. ปิติ สุคนธ์สุขกุล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สนับสนุนโดย สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยโดยทุนพัฒนานักวิจัยที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในโครงการนี้และ ขอขอบคุณโครงการทุนปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) ที่ให้ทุนการศึกษาระดับปริญญาเอกแก่ นายสิทธิศักดิ์ แจ่มนาม ซึ่งเป็นผู้ช่วยวิจัยในโครงการ รวมถึงขอขอบคุณ บริษัท เอส อาร์ ไฟเบอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุไฟเบอร์หลักที่ใช้ในการทดลอง และ นักศึกษาในระดับปริญญาตรีทุกท่านที่มีความเกี่ยวข้องกับโครงการนี้

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถของคอนกรีตผสมเม็ดยางในการปรับปรุงความสามารถในการต้านทานแรงกระแทกอันเนื่องมาจากอาวุธปืนของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก โดยคอนกรีตผสมเม็ดยางที่ใช้ได้จากการนำยางรถยนต์เก่าที่ผ่านการย่อยจนมีขนาดเล็กมาแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยสัดส่วนผสม 50%, 75% และ 100% โดยปริมาตร และ มาหล่อที่ผิวหน้าของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กโดยการแทนที่ความหนาบางส่วน ขนาดของแผ่นทดสอบกำหนดไว้ที่ 400x400x30 มม โดยทำการทดสอบทั้งภายใต้แรงกระทำคงที่ (Static Test) และแรงกระแทก (Impact Test) ด้วยกระสุน 2 ขนาดคือ 9 มม และ 11 มม (0.45 แมกนัม) ที่ระยะยิง 10 เมตร แผ่นคอนกรีตชั้นเดียวที่นำมาทดสอบประกอบไปด้วย แผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กล้วน และ แผ่นคอนกรีตผสมเม็ดยางล้วน สำหรับแผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้น ชั้นคอนกรีตผสมเม็ดยางจะถูกนำไปแทนที่ความหนาของชั้นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กที่ความหนา 5 10 และ 15 มม ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าชั้นของคอนกรีตผสมเม็ดยางมีความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ของกระสุนได้อย่างที่คาดหวังไว้ โดยสังเกตได้จากรูปแบบความเสียหาย การลดลงของค่าอัตราเร่ง การลดลงของค่าการโก่งตัว และ การลดลงของค่า Inertial Force

คำสำคัญ: ผงกั้นกระสุน อาวุธปืน คอนกรีตผสมเม็ดยาง คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก แผ่นคอนกรีตแบบสองชั้น

Abstract

In this study, the ability of rubberized concrete to improve the impact performance of steel fiber reinforced concrete (SFRC) bulletproof panel subjected to direct fire arm is investigated. The rubberized concrete layer (RC) made by replacing fine aggregate at 50%, 75% and 100% by volume fractions is used to replace parts of the thickness of the SFRC panel. The dimension of the panels is set at 400x400x30 mm. Two types of test are carried out static test and impact test (using two types of bullets (9 mm. and 11 mm) with the striking distance of 10 m). For single layer panels, two types of panels are tested: steel fiber reinforced concrete (SFRC) and rubberized concrete (RC). For double layer panels, the RC layer is placed at the front surface by partially replacing part of the SFRC layer at 5, 10 and 15 mm. It is expected that the flexibility and softness of the RC layers will allow the RC layer to act as a cushion layer to absorb impact energies from the bullet and cause less damage, reduce the acceleration, displacement and inertial force occurring to the panel.

Key Words: Bulletproof Panel, Direct Fire Weapon, Rubberized Concrete, Fiber Reinforced Concrete, Double Layer Concrete Plate.

บทสรุปย่อผู้บริหาร

1. ชื่อโครงการ การพัฒนาผนังคอนกรีตสมรรถนะสูงแบบหลายชั้นในการต้านทานแรงกระแทกจากกระสุนโดยตรงจากคอนกรีตผสมเม็ดยางและคอนกรีตผสมเส้นใยไฟเบอร์
- Development of High Performance Multi-Layer Concrete Panel made of Rubberized and Fiber Reinforced Concrete to Resist Impact Force from Direct Fire Weapon
- คำสำคัญ คอนกรีตผสมเม็ดยาง คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก ผนังคอนกรีตแบบหลายชั้น กระสุนปืน แรงกระแทก
- Keywords Rubberized Cement, Fiber Reinforced Concrete, Multilayer Concrete Panel, Direct Fire Weapon, Impact Force

2. รายละเอียดของหัวหน้าโครงการ

ชื่อ นายปิติ สุขนรสุขกุล

คุณวุฒิ ปริญญาเอก

ตำแหน่งวิชาการ รองศาสตราจารย์ 9

สถานที่ทำงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

1518 ถ. ประชาราษฎร์ 1 วงศ์สว่าง บางซื่อ กทม 10800

โทรศัพท์ 02-555-20 00ต่อ8621 - 25 โทรสาร 02-587-4337

อีเมล piti@kmutnb.ac.th, piti_sk@hotmail.com

3. ปัญหาที่ท้าวใจและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปัญหาการก่อการร้ายได้ทวีความรุนแรงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินของทางราชการและภาคเอกชน การพัฒนาอาคารหรือชิ้นส่วนของอาคารให้มีความสามารถในการต้านทานแรงระเบิดหรือกระสุนถือเป็นความจำเป็น

สำหรับอาคารส่วนใหญ่ในประเทศไทยนั้น เป็นอาคารที่ก่อสร้างด้วยคอนกรีตหรือผนังก่ออิฐ (อิฐมอญ อิฐบล็อก หรือ บล็อกมวลเบา) ภายใต้อาคารนั้นมีการติดตั้งโครงเหล็กด้วยกระสุนหรือระเบิดนั้น โดยทั่วไป ผลของกระสุนที่ยิงเข้ามาในอาคารนั้นส่งผลกระทบต่อบุคคลที่อยู่ด้านหลังของผนังอาคารได้ 3 ประการ 1) ผลกระทบโดยตรง (Direct Effect) โดยเป็นลักษณะของกระสุนที่ทะลุผ่านผนังเข้ามาถูกบุคคลได้รับบาดเจ็บหรือเสียชีวิต 2) ชิ้นส่วนวัสดุอันตรายกระเด็น (Flying Hazardous Debris) โดยเป็นลักษณะของกระสุนกระทบถูกผนังทำให้ชิ้นส่วนขององค์อาคารกระเทาะ (Spalling) และกระเด็นออกมาโดนบุคคลที่อยู่ภายในได้รับบาดเจ็บ และ 3) ผลกระทบทางอ้อม (Indirect Effect) เป็นลักษณะของการที่คนภายในอาคารวิ่งหลบกระสุนเสียหลักและอาจจะกระแทกกับสิ่งของที่อยู่ในอาคาร ทำให้ได้รับบาดเจ็บได้

ในส่วนการทหาร โครงสร้างชั่วคราวที่ใช้ในงานทหาร ยกตัวอย่างเช่น ป้อมยาม หรือ บังเกอร์ มักจะเป็นโครงสร้างขนาดเล็กที่ล้อมรอบด้วยกระสอบทราย จุดเด่นของกระสอบทรายคือสามารถหยุดกระสุนที่ยิงเข้ามาได้อย่างดี แต่มีข้อเสียเปรียบคือมีน้ำหนักมากเคลื่อนย้ายช้า ต้องมีการวางซ้อนกันมากกว่า 2 ชั้น เพื่อปิดช่องว่างระหว่างกระสอบทราย กรอบหรือรั้วเสียหายระหว่างเคลื่อนย้ายได้ง่าย ในกรณีที่ต้องการเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นที่ที่มีเหตุการณ์ก่อการร้ายให้ทันทั่วทั้งพื้นที่นั้น กระสอบทรายจะเป็นอุปสรรคทำให้การจัดตั้งอาคารชั่วคราวเป็นไปได้อย่างล่าช้า

ในการศึกษานี้เสนอการใช้ผนังแบบแผ่นบางสองชั้นหนาไม่เกิน 5 ซม. ผลผลิตจากวัสดุคอนกรีตต่างชนิดที่มีประสิทธิภาพสูง มีน้ำหนักเบาเคลื่อนย้ายง่าย มีประสิทธิภาพสูงในการต้านทานแรงยิงของกระสุนโดยตรงระดับ 3A ได้ (ตามมาตรฐานของกระทรวงกลาโหมว่าด้วยเกราะกันกระสุน กมย.กท. 1/2547)

สำหรับคอนกรีตนั้น คุณสมบัติโดยทั่วไปเป็นวัสดุที่มีกำลังอัดสูง แต่เปราะ หน่วงน้ำหนักประมาณ 2500 กก/ลบ.ม ภายใต้อาคารนั้นมีการกระทำแบบกระแทก (Impact Loading) อย่างกระสุนปืนนั้น คอนกรีตมักจะแตกอย่างรุนแรง ทำให้กระสุนหรือชิ้นส่วนของคอนกรีตสามารถทะลุเข้าไปในอาคาร เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติด้านความเปราะของคอนกรีต จึงได้มีการพัฒนานำเส้นใยไฟเบอร์เล็กขนาดเล็กละเอียดมาผสมในคอนกรีตได้เป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพสูงในการต้านทานแรงกระแทกหรือแรงระเบิด แต่อย่างไรก็ตาม วัสดุเส้นใยที่นำมาผสมต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศและมีราคาแพงกว่าผนังคอนกรีตธรรมดาหลายเท่า

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ทางผู้วิจัยจึงมีความคิดที่จะพัฒนานำวัสดุซีเมนต์ผสมยางมาประยุกต์ใช้โดยหล่อเป็นชั้นนอกของผนังคอนกรีตเสริมเส้นใย โดยเม็ดยางที่ใช้เป็นชั้นเกรดอุตสาหกรรมที่ได้จากการย่อยเศษยางรถยนต์เก่า (ผลิตในประเทศไทยโดย บริษัท ยูเนียนพัฒนกิจ จำกัด) เมื่อนำมาผสมในซีเมนต์มอร์ตาร์จะได้วัสดุซีเมนต์ยางที่มีหน่วยน้ำหนักเบา แต่ความยืดหยุ่นตัวสูง โดยชั้นของซีเมนต์ผสมเม็ดยางจะทำหน้าที่เป็นชั้นดูดซับพลังงานจลน์และช่วยลดความเร็วของกระสุนก่อนที่จะวิ่งเข้าไปถึงชั้นของคอนกรีตผสมเส้นใย (ลดค่าพลังงานจลน์ของกระสุนปืนที่จะกระทำต่อผนังมีค่าลดลง) รวมถึงการเพิ่มผนังชั้นนอกเป็นคอนกรีตผสมเม็ดยาง ทำให้สามารถลดความหนาของชั้นคอนกรีตผสมเส้นใยชั้นในลงได้ (ลดต้นทุนด้านวัสดุของผนังลง) นอกจากนี้ การแทนที่ความหนาบางส่วนด้วยชั้นของคอนกรีตผสมเม็ดยางที่มีหน่วยน้ำหนักเบากว่าจะเป็นลดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตลง ทำให้ผนังมีน้ำหนักเบาขึ้นและ สามารถนำมาประกอบขึ้นเป็นโครงสร้างชั่วคราวเพื่อใช้ในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงหรืออันตรายได้อย่างรวดเร็ว รวมถึงเคลื่อนย้ายเข้าออกได้ด้วยความเร็วเช่นกัน

4. วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาความสามารถในการต้านทานกระสุนของผนังคอนกรีตที่ผลิตจากคอนกรีตผสมเม็ดยางและคอนกรีตผสมเส้นใยหลักในหลายสัดส่วนผสม
- เพื่อศึกษาความสามารถในการต้านทานกระสุนระบบผนังแบบสองชั้นที่ประกอบขึ้นด้วยชั้นด้วยคอนกรีตผสมเม็ดยางและชั้นของคอนกรีตผสมเส้นใยหลัก
- พัฒนาระบบผนัง 2 ชั้น ที่มีประสิทธิภาพในการต้านทานกระสุนใกล้เคียงกับผนังคอนกรีตเสริมเส้นใยหลักปริมาณสูง แต่มีน้ำหนักเบากว่า

5. ระเบียบวิธีวิจัย (โดยย่อ)

งานวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน

1. การทดลอง ประกอบไปด้วย 1) การทดสอบด้วยแรงกระทำคงที่ (Static Test) และ 2) การทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงกระแทกจากกระสุนปืน (Impact Test from Direct Fire Weapon)
 - a. การทดสอบภายใต้แรงกระทำคงที่เป็นทดสอบแผ่นคอนกรีตภายใต้แรงคดที่กระทำอย่างช้าๆ โดยทำการทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine โดยทำการวัดค่าแรงกระทำต่อแผ่นทดสอบ และการโก่งตัวของแผ่นทดสอบภายใต้แรงกระทำ
 - b. การทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงกระแทกจากกระสุนปืน ทำการทดสอบในสนามทดสอบด้วยกระสุนปืนขนาด 9 และ 11 มม. ที่ระยะยิง 10 เมตร โดยทำการวัดค่าอัตราเร่งที่เกิดขึ้นในแผ่นทดสอบภายใต้แรงกระแทกของกระสุนปืน 2 ตำแหน่ง
2. การวิเคราะห์ ประมวล และ สรุปผลการทดลอง
ผลการทดลองที่ได้จะถูกนำไปประมวลผล โดยค่าอัตราเร่งที่วัดได้จะถูกนำไปแปลงเป็นค่าอัตราเร็วและการเคลื่อนที่ (โก่งตัว) ของแผ่นทดสอบ ที่ตำแหน่งที่กระสุนกระทำ นอกจากนี้ยังถูกนำไป

คำนวณเป็นค่าแรงเฉื่อย (Inertial Load) ที่กระทำต่อแผ่นคอนกรีต โดยใช้สมการ Shape function ที่เหมาะสมในการคำนวณ

6. ประโยชน์ที่ได้รับ

- ทราบถึงประสิทธิภาพของแผ่นคอนกรีตกันกระสุนแบบสองชั้น
- ทราบถึงประสิทธิภาพของคอนกรีตผสมเม็ดยางในการทำหน้าที่เป็นชั้นดูดซับพลังงานจลน์ของกระสุนที่เข้ามาดกกระทบ
- ได้ระบบผนังกันกระสุนแบบสองชั้นที่ประกอบไปด้วยคอนกรีตผสมเม็ดยางและคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กที่มีความหนาไม่เกิน 3 ซม.

7. ผลลัพธ์ที่ได้

บทความวิจัย 4 บทความ แบ่งออกเป็น

1. วารสารวิชาการนานาชาติที่มี Impact Factor
 - a. Sukontasukkul, P., Jamnam, S., Rodsin, K., and Banthia, N., ‘Use of Rubberized Concrete as a Cushion Layer in Bulletproof Fiber Reinforced Concrete Panels’, Journal of Construction and Building Materials, Vol. 41, 2013, pp.801-811.
(ISSN: 0950-0618, Impact Factor: 1.834 (JCR 2011))
 - b. Sukontasukkul, P., Jamnam, S., Sappakittipakorn, M., Banthia, N., “Preliminary Study on Bullet Resistance of Double-Layer Concrete Panel made of Rubberized and Steel Fiber Reinforced Concrete”, Materials and Structures, DOI 10.1617/s11527-013-0049-x
(ISSN 1359-5997, Impact Factor: 1.278 (JCR 2011))
2. งานประชุมวิชาการนานาชาติ
 - a. Sukontasukkul, P., Jamnam, S., Preemanoch, P., Suppakittipakorn, M., and Banthia, N., Use of High Content Crumb Rubber From Wasted Tire in Bulletproof Concrete Panels, 1st International Conference in Concrete Sustainability, Tokyo, Japan, May 27-27, 2013.
 - b. **Keynote Paper**-Sukontasukkul, P, Suppakittipakorn, M., and Banthia, N., Bullet Resistance of Double-Layer Concrete Panels Made of Rubberized and Steel Fibre Reinforced Concrete, 8th International Conference: Concrete in the Low Carbon Era, Dundee, United Kingdom, 9-11 July 2012

สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ.....	b
บทคัดย่อ.....	c
Abstract	d
บทสรุปย่อผู้บริหาร	e
สารบัญ	i
สารบัญรูปภาพ	k
สารบัญตาราง	n
บทที่ 1	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
บทที่ 2	4
2.1 วิธีการทดสอบแรงกระแทก	4
2.1.1 การทดสอบแรงกระแทกด้วยค้อนเหวี่ยงแบบเพนดูลัม [1](Pendulums Impact Test)	4
2.1.2 การทดสอบแรงกระแทกด้วยการปล่อยน้ำหนักกระทบ (Drop Weight Impact Test)[2]	6
2.1.3 The split Hopkinson pressure bar (SHPB)[2]	7
2.2 คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตภายใต้แรงกระทำแบบคงที่.....	9
2.3 คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตภายใต้แรงกระทำแบบกระแทก.....	14
2.3.1 ความเสียหายที่เกิดจากแรงกระแทก	14
2.3.2 ผลของอัตราความเครียดและอัตราความเค้น	15
2.3.4 คุณสมบัติทางด้านการรับแรงดัดและแรงดึง.....	17
2.4 คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก.....	18
2.4.1 คุณสมบัติภายใต้แรงกระทำแบบคงที่	19
2.4.2 คุณสมบัติภายใต้การรับแรงกระแทก.....	24
2.5 คอนกรีตผสมเม็ดยาง	27
2.5.1 การจำแนกประเภทของมวลรวมยาง.....	28
2.5.2 การผสม, การเตรียมมวลรวม และ ความสามารถในการเทคอนกรีต	29
2.5.3 พฤติกรรมและคุณสมบัติเชิงกล	30

2.5.4 การต้านทานแรงกระแทกและความเหนียว.....	32
2.6 กระสุนปืนพก	36
2.6.1 กระสุนปืน 9 x 19 มม. Parabellum [54]	36
2.6.2 กระสุน .45 ACP [55]	39
2.7 มาตรฐานการกันกระสุน	41
บทที่ 3	44
3.1 วัสดุส่วนผสมคอนกรีต	44
3.2 การเตรียมตัวอย่างและจำนวนตัวอย่าง	45
3.3 การทดสอบ	47
3.3.1 การทดสอบแรงกระทำแบบคงที่ (Static Test).....	47
3.3.2 การทดสอบแรงกระแทกด้วยกระสุนปืน	48
บทที่ 4	52
4.1 ผลการทดสอบแรงกระแทกด้วยกระสุนปืน (Impact Loading-Bullet Test).....	52
4.1.1 รูปแบบการวิบัติ.....	52
4.1.2 อัตราเร่ง (Acceleration)	60
4.1.3 แรงเฉื่อย (Inertial Load)	66
4.1.4 การโก่งตัวของแผ่นคอนกรีต	74
4.2 ผลการทดสอบแรงกระทำแบบคงที่ (Static Test)	76
4.2.1 ผลการทดสอบตัวอย่างแบบชั้นเดียว.....	76
4.2.2 แผ่นคอนกรีตแบบสองชั้น	79
บทที่ 5	85
เอกสารอ้างอิง	86
ผลงานตีพิมพ์ที่ได้จากโครงการ	90
1. วารสารวิชาการนานาชาติ.....	90
2. งานประชุมวิชาการนานาชาติ.....	90

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 เครื่องมือทดสอบแรงกระแทกแบบลูกตุ้มเพนดูลัม (a) แบบชาร์ปี (b) แบบไอซอด [2]	5
รูปที่ 2.2 ชิ้นทดสอบ (a) แบบชาร์ปี (b) แบบไอซอด [2].....	6
รูปที่ 2.3 เครื่องมือทดสอบแรงกระแทกด้วยการปล่อยกระแทบ (Drop Weight Impact Test)[3]	7
รูปที่ 2.4 Split Hopkinson Pressure Bar [2]	8
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและหน่วยความเครียดของคอนกรีต[7].....	10
รูปที่ 2.6 การทดสอบแบบแรงดึงโดยตรง (ซ้าย) และ การทดสอบแบบผ่าซีก (ขวา).....	10
รูปที่ 2.7 การทดสอบแรงดัดแบบสามจุด.....	11
รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของ มวลรวม, คอนกรีต และ ซีเมนต์เพสต์ [6]	12
รูปที่ 2.9 แสดงความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่แรงกดต่างๆ [6].....	13
รูปที่ 2.10 โมดูลัสของคอนกรีตภายใต้แรงกระทำแบบคงที่ [6]	14
รูปที่ 2.11 เปรียบเทียบรอยแตกร้าวของการทดสอบแบบ Static และ Impact [16]	15
รูปที่ 2.12 ผลของอัตราความเครียดต่อกำลังของคอนกรีตแห้ง [14]	16
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง DIF และอัตราความเครียดของคอนกรีต[19].....	18
รูปที่ 2.14 เส้นใยชนิดต่างๆ	19
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตผสมเส้นใยภายใต้แรงอัด.....	20
รูปที่ 2.16 ผลของปริมาณเส้นใยต่อความเค้นและความเครียดของคอนกรีตผสมเส้นใย[23].....	20
รูปที่ 2.17 ผลของ l/d ต่อความเค้นและความเครียดของคอนกรีตผสมเส้นใย [23]	20
รูปที่ 2.18 ความเค้นและความเครียดของมอร์ต้าผสมเส้นใย[22].....	21
รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะเคลื่อนตัวของมอร์ต้าผสมเส้นใยในการรับแรงดึง[26]	22
รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและระยะเคลื่อนตัวของมอร์ต้าผสมเส้นใยในการรับแรงดึง[26].....	23
รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงและการ โกงตัว (ASTM C 1018).....	24
รูปที่ 2.22 แรงและการ โกงตัวของคอนกรีตผสมเส้นใย[28]	24
รูปที่ 2.23 ความเค้นและความเครียดของคอนกรีตผสมเส้นใย 0.5% (HE) [28]	26
รูปที่ 2.24 แรงและการ โกงตัวของคอนกรีตผสมเส้นใย 1% (HE) [28].....	26
รูปที่ 2.25 ผลของอัตราความเครียด และปริมาณไฟเบอร์ ต่อ กำลังดัด [27]	27
รูปที่ 2.26 การจำแนกชนิดของมวลรวมยาง[32].....	29

รูปที่ 2.27 ผลของปริมาณเม็ดยางต่อค่าการยุบตัว([36][37][38])	29
รูปที่ 2.28 ผลของเม็ดยางต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเม็ดยาง	31
รูปที่ 2.29 ผลของอัตราความเครียดต่อกำลังรับแรงอัดกระแทก และ Dynamics-increasing Factor (DIF).....	32
รูปที่ 2.30 ผลของปริมาณเม็ดยางต่อกำลังรับแรงอัดกระแทก และ DIF ที่อัตราความเค้นต่างๆ	33
รูปที่ 2.31 ผลของปริมาณเม็ดยางต่อโมดูลัสยืดหยุ่น.....	34
รูปที่ 2.32 ผลของจำนวนรอบการสั่นต่อ Damping Ratio.....	34
รูปที่ 2.33 ผลปริมาณเม็ดยางต่อกำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ภายใต้การทดสอบแบบ Static	34
รูปที่ 2.34 (a) แรงกระแทกต่อช่วงเวลา (b) พลังงานที่ถูกดูดซับต่อเวลา.....	35
รูปที่ 2.35 ผลของปริมาณการแทนที่เม็ดยาง, ชนิดของยางและการบ่มต่อค่า BI [29].....	36
รูปที่ 2.36 ขนาดกระสุนมาตรฐาน 9x19 มม. Parabellum.....	37
รูปที่ 2.37 ขนาดกระสุนมาตรฐาน .45 ACP	40
รูปที่ 3.1 การทดสอบภายใต้แรงกระทำที่ด้วยเครื่อง UTM.....	47
รูปที่ 3.2 พื้นที่ใต้กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัด Load (kN).....	48
รูปที่ 3.3 Data Acquisition System	48
รูปที่ 3.4 ฐานรองรับที่ใช้ในการทดสอบ	49
รูปที่ 3.5 ภาพแสดงการติดตั้งแผ่นคอนกรีตก่อนทำการทดสอบ	51
รูปที่ 4.1 การวัดของแผ่นคอนกรีตล้วนแบบชั้นเดียว	53
รูปที่ 4.2 การวัดของแผ่นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กแบบชั้นเดียว.....	53
รูปที่ 4.3 การวัดของแผ่นคอนกรีตผสมเม็ดยางแบบชั้นเดียว	54
รูปที่ 4.4 การวัดของแผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้น โดยทั่วไป.....	54
รูปที่ 4.5 การวัดของแผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้น กระสุนทะลุเข้าที่ผิวหน้าแต่ไม่ผ่านออก	55
รูปที่ 4.6 การวัดแบบกระแทก+ทะลุผ่านของแผ่นคอนกรีต 2 ชั้นที่มีชั้นคอนกรีตผสมเม็ดยางหนา.....	55
รูปที่ 4.7 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกระสุนที่ผิวด้านหน้าของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแบบชั้นเดียว.....	56
รูปที่ 4.8 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกระสุนที่ผิวด้านหน้าของแผ่นคอนกรีตผสมเม็ดยางแบบชั้นเดียว	56
รูปที่ 4.9 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกระสุนที่ผิวด้านหน้าของแผ่นคอนกรีตแบบสองชั้น (75R/3S, 1:2) .	57
รูปที่ 4.10 อัตราเร่ง vs. เวลา ของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก 2% แบบชั้นเดียว (9 มม.).....	61
รูปที่ 4.11 อัตราเร่ง vs. เวลา ของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก 3% แบบชั้นเดียว (9 มม.).....	61
รูปที่ 4.12 อัตราเร่ง vs. เวลา ของแผ่นคอนกรีตแบบสองชั้น (50R4S) (9 มม.).....	62

รูปที่ 4.13 อัตราเร่ง vs. เวลา ของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก 4% แบบชั้นเดียว (11 มม.).....	62
รูปที่ 4.14 อัตราเร่ง vs. เวลา ของแผ่นคอนกรีตแบบสองชั้น (50R4S) (11 มม.).....	63
รูปที่ 4.15 อัตราเร่งของแผ่นคอนกรีตภายใต้แรงกระทำของกระสุนขนาด 9 มม.....	64
รูปที่ 4.16 อัตราเร่งของแผ่นคอนกรีตภายใต้แรงกระทำของกระสุนขนาด 11 มม.....	64
รูปที่ 4.17 รูปแบบของก๊าซ.....	66
รูปที่ 4.18 ลักษณะการกระจายตัวของอัตราเร่งบนแผ่นคอนกรีตแบบชั้นเดียวที่ตำแหน่งต่างๆ	69
รูปที่ 4.19 แรงเฉื่อยของแผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้น (5/25)	73
รูปที่ 4.20 แรงเฉื่อยของแผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้น	74
รูปที่ 4.21 พฤติกรรมการรับแรงและรูปแบบการวิบัติของแผ่นคอนกรีตล้วนแบบชั้นเดียว.....	77
รูปที่ 4.22 พฤติกรรมการรับแรงและรูปแบบการวิบัติของแผ่นคอนกรีตผสมเม็ดยางแบบชั้นเดียว.....	78
รูปที่ 4.23 พฤติกรรมการรับแรงและรูปแบบการวิบัติของแผ่นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กแบบชั้นเดียว	79
รูปที่ 4.24 ผลกระทบของปริมาณเส้นใยต่อกำลังรับแรงดัดของแผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้น (a) ชั้นฐานเป็น SFRC 2% (b) ชั้นฐานเป็น SFRC 3% และ (c) ชั้นฐานเป็น SFRC 4%.....	81
รูปที่ 4.25 ผลกระทบของความหนาชั้นคอนกรีตผสมเม็ดยางต่อพฤติกรรมการรับแรงดัด.....	82
รูปที่ 4.26 พลังงานแตกหักของแผ่นคอนกรีตสองชั้นที่ระยะ 15 มิลลิเมตร ที่ปริมาณเม็ดยางต่างๆ	83
รูปที่ 4.27 พลังงานแตกหักของแผ่นคอนกรีตสองชั้นที่ระยะ 15 มิลลิเมตร ที่ความหนาของชั้นเม็ดยางต่างๆ.....	84

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 อัตราความเครียดและชนิดของแรงกระทำ[4]	9
ตารางที่ 2.2 ประสิทธิภาพของกระสุนปืน 9x19 มม. Parabellum.....	38
ตารางที่ 2.3 ประสิทธิภาพของกระสุนปืน .45 ACP	41
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเม็ดยางขนาดเบอร์ 6	44
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของไฟเบอร์เหล็ก.....	45
ตารางที่ 3.3 จำนวนตัวอย่างคอนกรีตแบบชั้นเดียว.....	46
ตารางที่ 3.4 จำนวนตัวอย่างแผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้น	46
ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของอุปกรณ์วัดอัตราเร่ง	49
ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติของกระสุนขนาด 9 มม.....	50
ตารางที่ 3.7 คุณสมบัติของกระสุนขนาด 11 มม.....	50
ตารางที่ 4.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยปะทะของแผ่นทดสอบ.....	58
ตารางที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการวิบัติกับมาตรฐานของกระทรวงกลาโหม	59
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบน้ำหนักแผ่นคอนกรีตที่นำมาทดสอบ	65
ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ a ของแผ่นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กแบบชั้นเดียว	68
ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่ a แบบเฉลี่ยของแผ่นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กแบบชั้นเดียว	69
ตารางที่ 4.6 ค่าคงที่ a แบบเฉลี่ยของแผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้น (ชั้นเม็ดยางหนา 5 มิลลิเมตร)	70
ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่ a แบบเฉลี่ยของแผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้น (ชั้นเม็ดยางหนา 10 และ 15 มิลลิเมตร)	71
ตารางที่ 4.8 ค่าการโก่งตัวที่กึ่งกลางของแผ่นคอนกรีตทดสอบด้วยกระสุนขนาด 9 มม.....	75
ตารางที่ 4.9 ผลกระทบของสัดส่วนผสมเม็ดยางต่อค่ากำลังรับแรงดัด	81
ตารางที่ 4.10 ผลกระทบของชั้นความหนาของคอนกรีตผสมเม็ดยางต่อค่ากำลังรับแรงดัด	82

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปัจจุบันปัญหาการก่อการร้ายได้ทวีความรุนแรงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินของทางราชการและภาคเอกชน การพัฒนาอาคารหรือชิ้นส่วนของอาคารให้มีความสามารถในการต้านทานแรงระเบิดหรือกระสุนถือเป็นความจำเป็น

สำหรับอาคารส่วนใหญ่ประเทศไทยนั้น เป็นอาคารที่ก่อสร้างด้วยคอนกรีตหรือผนังก่ออิฐ (อิฐมอญ อิฐบล็อก หรือ บล็อกมวลเบา) ภายใต้สถานการณ์การถูกโจมตีด้วยกระสุนหรือระเบิดนั้น โดยทั่วไป ผลของกระสุนที่ยิงเข้ามาในอาคารนั้นส่งผลกระทบต่อบุคคลที่อยู่ด้านหลังของผนังอาคารได้ 3 ประการ 1) ผลกระทบโดยตรง (Direct Effect) โดยเป็นลักษณะของกระสุนที่ทะลุผ่านผนังเข้ามาถูกบุคคลได้รับบาดเจ็บหรือเสียชีวิต 2) ชิ้นส่วนวัสดุอันตรายกระเด็น (Flying Hazardous Debris) โดยเป็นลักษณะของกระสุนกระทบถูกผนังทำให้ชิ้นส่วนขององค์อาคารกระเทาะ (Spalling) และกระเด็นออกมาโดนบุคคลที่อยู่ภายในได้รับบาดเจ็บ และ 3) ผลกระทบทางอ้อม (Indirect Effect) เป็นลักษณะของการที่คนภายในอาคารวิ่งหลบกระสุนเสียหลักและอาจจะกระแทกกับสิ่งของที่อยู่ในอาคาร ทำให้ได้รับบาดเจ็บได้

ในส่วนการทหาร โครงสร้างชั่วคราวที่ใช้ในงานทหาร ยกตัวอย่างเช่น ป้อมยาม หรือ บังเกอร์ มักจะเป็นโครงสร้างขนาดเล็กที่ล้อมรอบด้วยกระสอบทราย จุดเด่นของกระสอบทรายคือสามารถหยุดกระสุนที่ยิงเข้ามาได้อย่างดี แต่มีข้อเสียเปรียบคือน้ำหนักมากเคลื่อนย้ายช้า ต้องมีการวางซ้อนกันมากกว่า 2 ชั้น เพื่อปิดช่องว่างระหว่างกระสอบทราย กรอบหรือรั้วเสียหายระหว่างเคลื่อนย้ายได้ง่าย ในกรณีที่ต้องการเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นที่ที่มีเหตุการณ์ก่อการร้ายให้ทันทั่วทั้งพื้นที่นั้น กระสอบทรายจะเป็นอุปสรรคทำให้การจัดตั้งอาคารชั่วคราวเป็นไปได้อย่างล่าช้า

ในการศึกษานี้เสนอการใช้ผนังแบบแผ่นบางสองชั้นหนาไม่เกิน 5 ซม. ผลผลิตจากวัสดุคอนกรีตต่างชนิดที่มีประสิทธิภาพสูง มีน้ำหนักเบาเคลื่อนย้ายง่าย มีประสิทธิภาพสูงในการต้านทานแรงยิงของกระสุนโดยตรงระดับ 3A ได้ (ตามมาตรฐานของกระทรวงกลาโหมว่าด้วยเกราะกันกระสุน กมย.กท. 1/2547)

สำหรับคอนกรีตนั้น คุณสมบัติโดยทั่วไปเป็นวัสดุที่เปราะ ภายใต้แรงกระทำแบบกระแทก (Impact Loading) อย่างกระสุนปืนนั้น คอนกรีตมักจะแตกอย่างรุนแรง ทำให้กระสุนหรือชิ้นส่วนของคอนกรีตสามารถทะลุเข้าไปในอาคาร ดังนั้น เพื่อความปลอดภัยของทรัพย์สินและบุคลากรที่อยู่ในอาคาร ผนังควรจะต้องมีความสามารถในการป้องกันไม่ให้กระสุนทะลุเข้ามาโดนผู้ที่อยู่ในอาคารหรือก่อให้เกิดชิ้นส่วนกระเด็นมาโดนผู้ที่อยู่ภายในอาคารที่อาจจะทำให้เกิดอาการบาดเจ็บได้

เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติด้านความเปราะของคอนกรีต จึงได้มีการพัฒนานำเส้นใยไฟเบอร์เหล็กขนาดเล็กมาผสมในคอนกรีตได้เป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพสูงในการต้านทานแรงกระแทกหรือแรงระเบิด แต่อย่างไรก็ตามวัสดุเส้นใยที่นำมาผสมต้องนำเข้าจากต่างประเทศทำให้ผนังคอนกรีตเสริมเส้นใยมักจะมีราคาแพงกว่าผนังคอนกรีตธรรมดาหลายเท่า

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ทางผู้วิจัยจึงมีความคิดที่จะพัฒนานำวัสดุซีเมนต์ผสมยางมาประยุกต์ใช้โดยหล่อเป็นชั้นนอกของผนังคอนกรีตเสริมเส้นใย โดยเม็ดยางที่ใช้เป็นชั้นเกรดอุตสาหกรรมที่ได้จากการย่อยเศษยางรถยนต์เก่า (ผลิตในประเทศโดย บริษัท ยูเนี่ยนพัฒนกิจ จำกัด) เมื่อนำมาผสมในซีเมนต์มอร์ตาร์จะได้วัสดุซีเมนต์ยางที่มีหนว้น้ำหนักเบา แต่ความยืดหยุ่นตัวสูง โดยชั้นของซีเมนต์ผสมเม็ดยางจะทำหน้าที่เป็นชั้นดูดซับพลังงานจลน์และช่วยลดความเร็วของกระสุนก่อนที่กระสุนจะวิ่งเข้าไปถึงชั้นของคอนกรีตผสมเส้นใย (ลดค่าพลังงานจลน์ของกระสุนปืนที่จะกระทำต่อผนังมีค่าลดลง) รวมถึงการเพิ่มผนังชั้นนอกเป็นคอนกรีตผสมเม็ดยาง ทำให้สามารถลดความหนาของชั้นคอนกรีตผสมเส้นใยชั้นในลงได้ (ลดต้นทุนด้านวัสดุของผนังลง) นอกจากนี้ การแทนที่ความหนาบางส่วนด้วยชั้นของคอนกรีตผสมเม็ดยางที่มีหนว้น้ำหนักเบากว่าจะเป็นลดหนว้น้ำหนักของคอนกรีตลง ทำให้ผนังมีน้ำหนักเบาขึ้น และสามารถนำมาประกอบขึ้นเป็นโครงสร้างชั่วคราวเพื่อใช้ในพื้นที่มีความเสี่ยงหรืออันตรายได้อย่างรวดเร็ว รวมถึงเคลื่อนย้ายเข้าออกได้ด้วย ความรวดเร็วเช่นกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1 เพื่อศึกษาความสามารถในการต้านทานกระสุนของผนังคอนกรีตที่ผลิตจากคอนกรีตผสมเม็ดยางและคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กในหลายสัดส่วนผสม
- 2 เพื่อศึกษาความสามารถในการต้านทานกระสุนระบบผนังแบบสองชั้นที่ประกอบขึ้นด้วยชั้นด้วยคอนกรีตผสมเม็ดยางและชั้นของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก
- 3 พัฒนาระบบผนัง 2 ชั้น ที่มีประสิทธิภาพในการต้านทานกระสุนใกล้เคียงกับผนังคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูง แต่มีน้ำหนักเบากว่า

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยครอบคลุมการทดสอบผนังคอนกรีตแบบชั้นเดียวที่หล่อจากคอนกรีตผสมเม็ดยางและคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก และ ผนังคอนกรีตแบบสองชั้น โดยชั้นแรกทำจากวัสดุคอนกรีตเม็ดยาง (Rubberized Cement) ส่วนชั้นที่สองทำจากคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก (Steel Fiber Reinforced Concrete) ในสัดส่วนผสมแตกต่างกัน โดย ทดสอบภายใต้แรงกระทำด้วยกระสุนปืนขนาด 9 และ 11 มม. ในสนามยิงปืน และ ทำการทดสอบภายใต้แรงกระทำคงที่ด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วิธีการทดสอบแรงกระแทก

เทคนิคและวิธีการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุภายใต้แรงกระแทก ได้ถูกคิดค้นและพัฒนาอย่างต่อเนื่องทั้งการพัฒนาารูปแบบของตัวอย่างและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ เพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะของแรงกระแทกที่อาจเกิดขึ้นได้หลายลักษณะ ได้แก่ แรงกระแทกที่เกิดจากแรงดึง (Tensile Impact), แรงกด (Compression Impact), แรงดัด (Flexural Impact) และแรงบิด (Torsion Impact) โดยรูปแบบการทดสอบก็เช่น การทดสอบแรงกระแทกด้วยค้อนเหวี่ยงแบบเพนดูลัม (Pendulums Impact Test) การทดสอบแรงกระแทกแบบเจาะทะลุ (Puncher Impact Test) การทดสอบแรงกระแทกแบบปล่อยน้ำหนักกระทบ (Drop Weight Impact Test) และแบบ Split Hopkinson Pressure Bar เป็นต้น

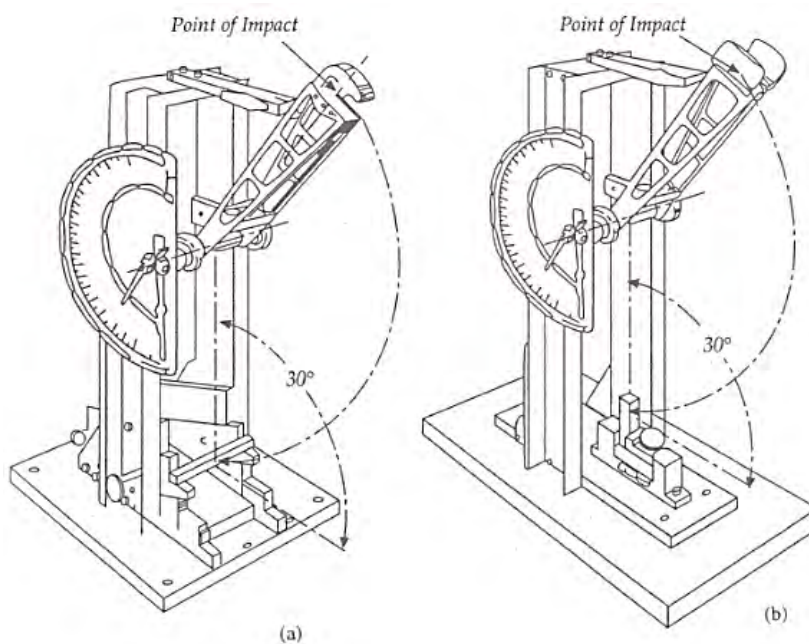
2.1.1 การทดสอบแรงกระแทกด้วยค้อนเหวี่ยงแบบเพนดูลัม [1](Pendulums Impact Test)

การทดสอบแบบเพนดูลัมเป็นการปล่อยตุ้มน้ำหนักสวิงเข้ากระแทกกับชิ้นทดสอบมาตรฐาน เพื่อหาค่าพลังงานที่ถูกดูดซับโดยชิ้นทดสอบ, การผลกระทบของรอยบาก และ พฤติกรรมการวิบัติของวัสดุ โดยมีรูปแบบที่นิยมใช้อยู่ 2 วิธี นั่นก็คือ การทดสอบกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy Impact Testing) และการทดสอบการกระแทกแบบไอซอด (Izod Impact Testing) ดังรูปที่ 2.1 วิธีการทดสอบเริ่มด้วยการ ยกตุ้มเหวี่ยงให้สูงถึงจุดหนึ่ง จากนั้นปล่อยให้น้ำหนักเคลื่อนที่ลงมากระแทกกับชิ้นทดสอบ และทำการวัดพลังงานที่ชิ้นตัวอย่างสามารถดูดซับได้ เทียบกับพลังงานศักย์ของตุ้มเหวี่ยงก่อนที่จะถูกปล่อยออกมา ในการทดสอบ ชิ้นตัวอย่างจะถูกกระแทกให้เสียหายจากการกระแทกเพียงครั้งเดียว ซึ่งวัสดุที่มีความเหนียวมากจะดูดซับพลังงานได้ที่สูงกว่าวัสดุที่มีความเหนียวน้อยกว่า ในการกระแทกชิ้นงานพลังงานของการกระแทกจะขึ้นอยู่กับมวลของตุ้มเหวี่ยงและระดับความสูงที่ตุ้มเหวี่ยงยกตัว จุดที่กระแทกชิ้นงานจะเป็นจุดต่ำสุดในการเหวี่ยงกระแทก โดยความเร็วของตุ้มเหวี่ยงก่อนที่จะถึงชิ้นทดสอบจะมีความเร็วสูงสุดและมีโมเมนตัมสูง เมื่อตุ้มเหวี่ยงกระทบกับชิ้นทดสอบแล้ว ตุ้มเหวี่ยงจะสูญเสียพลังงานไปส่วนหนึ่งเพื่อให้ชิ้นทดสอบนั้นหักพัง ค่าพลังงานที่สูญเสียไปนี้ก็คือ พลังงานการกระแทก (Impact energy) มีหน่วยเป็นฟุต-ปอนด์ (ft-lb) หรือ จูล (Joule: J) การทดสอบประเภทนี้จะมีอัตราแรงกระทำระหว่าง 0.005 -1000 mm/s

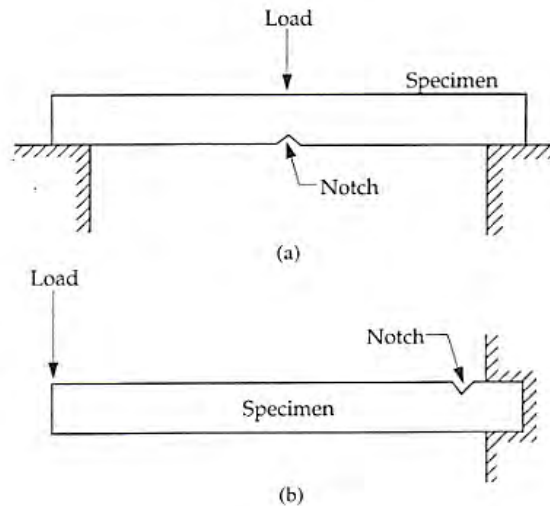
การทดสอบแบบชาร์ปี (Charpy Impact Test) ชิ้นทดสอบมาตรฐานเป็นคานที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและมีการบากตรงกลางชิ้นทดสอบ รูปแบบรอยบากได้แก่ รอยบากตัววี (V-notch), รอยบากตัวยู (U-notch), รอยบากรูปกุญแจ (Key-hole notch) รวมถึงชิ้นทดสอบที่ไม่มีรอยบาก ชิ้นทดสอบจะถูกวางไว้ระหว่างฐานรองรับ โดยวางให้ฝั่งตรงข้ามรอยบากไปในทางที่จะทำการ

กระแทก ลูกตุ้มจะกระแทกเข้ากับด้านหลังร่องบากของชิ้นงานที่บริเวณกึ่งกลางระหว่างฐานรองรับชิ้นงาน ดังรูปที่ 2.2a การทดสอบแบบไอซอด (Izod Impact Test) คล้ายกับแบบชาร์ปี จะยึดชิ้นงานในรูปของกานยื่นและตีกระแทกที่ปลายอีกข้างหนึ่งด้านหลังร่องบากดังรูป 2.2b

ในการทดสอบทั้ง 2 แบบ ผลต่างของพลังงานเริ่มต้นและพลังงานที่เหลืออยู่ของตุ้มน้ำหนัก คือ ค่าพลังงานที่ใช้ในการแตกหักของชิ้นทดสอบ การสูญเสียพลังงานของตุ้มน้ำหนัก เกิดจากพลังงานหลายส่วนร่วมกัน แต่หลักๆ จะประกอบไปด้วย 3 ส่วนได้แก่ 1) พลังงานที่ใช้เพื่อที่จะทำให้เกิดการแตกร้าวของวัสดุ, 2) พลังงานที่ใช้ในการทำให้รอยร้าวเคลื่อนที่ และ 3) พลังงานที่ใช้ในการดันชิ้นทดสอบที่แตกหัก นอกจากนี้ยังมีพลังงานที่สูญเสียไปกับการโก่งตัวของชิ้นทดสอบ, การสั่นของลูกตุ้มน้ำหนักที่เคลื่อนที่ และแรงเสียดทานของตุ้มน้ำหนัก เป็นต้น สำหรับการทดสอบของวัสดุแบบเปราะ พลังงานที่ดูดซับโดยชิ้นทดสอบ ใช้เพียงพลังงาน 3 ส่วนหลักข้างต้นในการอธิบายพลังงานที่สูญเสียได้ ในกรณีของวัสดุประกอบ ซึ่งจะมีความเปราะซ่อนอยู่ภายใน กระบวนการแตกหักซับซ้อนซึ่งเกี่ยวข้องการดูดซับพลังงานอื่นๆ รวมด้วย ในกรณีของวัสดุแบบแข็งและเหนียว ปัจจัยสำคัญที่สุดคือพลังงานที่ต้องการในการทำให้รอยร้าวเคลื่อนที่ผ่านชิ้นทดสอบ



รูปที่ 2.1 เครื่องมือทดสอบแรงกระแทกแบบลูกตุ้มเพนดูลัม (a) แบบชาร์ปี (b) แบบไอซอด [2]

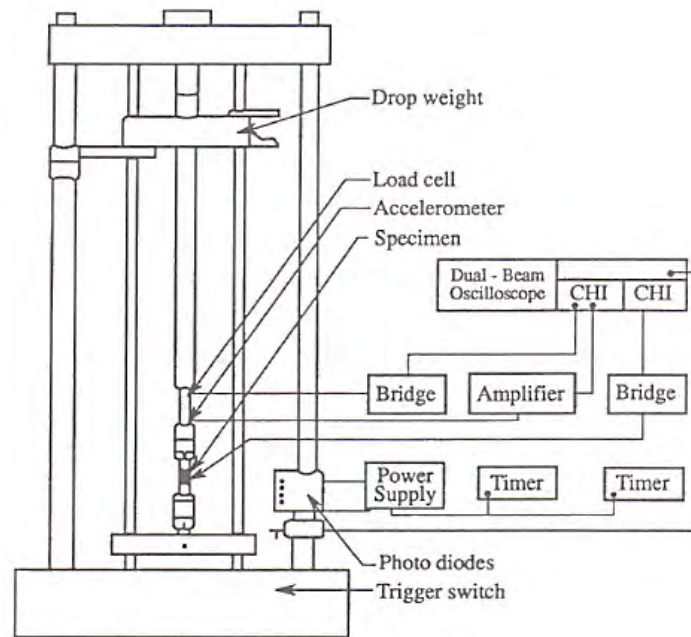


รูปที่ 2.2 ชื่นทดสอบ (a) แบบชาร์ปี (b) แบบไอซอด [2]

2.1.2 การทดสอบแรงกระแทกด้วยการปล่อยน้ำหนักกระทบ (Drop Weight Impact Test)[2]

การทดสอบวิธีนี้ถูกคิดค้นขึ้นมาเพื่อใช้ในการทดสอบแรงกระแทกในตัวอย่างทดสอบที่มีรูปแบบหลากหลายมากกว่าแบบ Charpy/Izod และให้ได้ข้อมูลคุณสมบัติทางด้านพลวัต เช่น การดูดซับพลังงาน, ความเหนียวแตกหัก, กลไกการวิบัติ, การลดลงของกำลังและการตอบสนองของรอยบาก รูปแบบเครื่องมือชนิดนี้มีอัตราของแรงกระทำระหว่าง 1-10 m/s อุปกรณ์ประกอบไปด้วยโครงเฟรมที่ใช้ในการปล่อยน้ำหนักที่มีแรงเสียดทานที่น้อย โดยปล่อยน้ำหนักตกลงในแนวตั้งกระแทกบริเวณจุดกึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบ โดยสามารถติดตั้งหัวทดสอบ (Tups) แบบต่างๆ บนก้อนน้ำหนักและสามารถที่จะเปลี่ยนขนาดของก้อนน้ำหนักได้ ในการทดสอบการกระแทกแบบแรงตัด สามารถกำหนดตำแหน่งฐานรองรับรวมถึงปรับระยะห่างของฐานรองรับได้ตามต้องการ นอกจากนี้ ยังสามารถติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น เกจวัดความเครียด, ตัววัดความเร่ง และกล้องดิจิทัลความเร็วสูง เข้าไประหว่างการทดสอบจะให้ผลการทดสอบที่เป็นประโยชน์ ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบขึ้นกับการติดตั้งอุปกรณ์วัดเพิ่มเติมเข้าไปตามลักษณะของการทดสอบนั้นๆ อย่างไรก็ตามข้อเสียเปรียบของการทดสอบแบบนี้ คือ ค่าพลังงานที่วัดได้จะขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของหัวกระแทกและความฝืดหรือแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างหัวกระแทกและพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบ นอกจากนี้ พลังงานของการกระแทกที่ใช้อยู่ยังขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของตัวอย่างนั้นๆ

การทดสอบแบบปล่อยน้ำหนักตกสามารถที่จะวัดคุณสมบัติทางด้านแรงดึงและแรงอัดของวัสดุประกอบได้ ในรูปของกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นและความเครียด และคุณสมบัติทางกลของวัสดุนั้นได้



รูปที่ 2.3 เครื่องมือทดสอบแรงกระแทกด้วยการปล่อยกระทบ (Drop Weight Impact Test)[3]

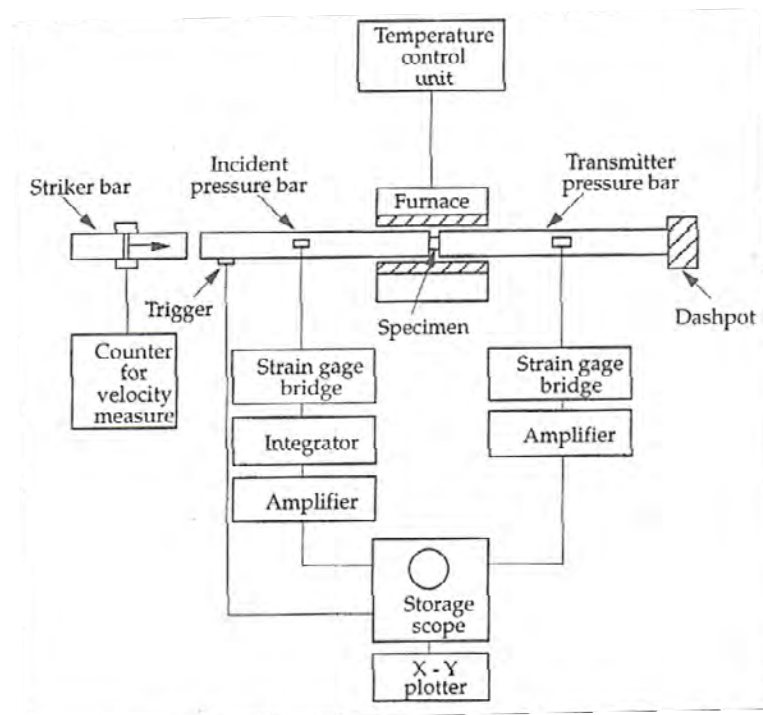
อย่างไรก็ตาม ถึงแม้เครื่องมือทดสอบการกระแทกแบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์วัด (Instrumented Impact Machine) สามารถจะให้ข้อมูลจำนวนมาก แต่ก็มีข้อจำกัดบางอย่าง เช่น ปริมาณเสียงรบกวน (Noise) ที่เกิดขึ้นรวมถึงการสั่นของหัวกระแทกที่อาจจะเป็นปัญหาได้ ดังนั้นจำเป็นต้องมีการกำจัด noise ออกจากข้อมูลหรือทำการกรองข้อมูลที่ได้ ซึ่งการกรองข้อมูลนั้นสามารถใช้ซอฟต์แวร์หรือฮาร์ดแวร์ แต่ถ้าทำไม่ถูกต้อง ข้อมูลที่ได้จะผิดจากความเป็นจริง เครื่องมือการทดสอบการกระแทกเป็นการทดสอบที่ควบคุมโดยพลังงาน (Energy-Controlled Test) ไม่ใช่เครื่องมือที่ควบคุมโดยอัตราความเค้น ดังนั้นอัตราความเค้นจึงเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าระหว่างการทดสอบ ซึ่งต้องการกระบวนการ Trial and Error (บนระยะความสูง, น้ำหนักที่ปล่อยลงรูปร่างของชิ้นทดสอบ) เพื่อที่จะได้อัตราความเค้นที่ต้องการ

2.1.3 The split Hopkinson pressure bar (SHPB)[2]

วิธีการทดสอบนี้ได้ถูกคิดค้นโดย Hopkinson มานานกว่า 80 ปี ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและใช้กันอย่างกว้างขวาง วัตถุประสงค์เป็นไปเพื่อใช้ในการทดสอบวัสดุที่ค่าอัตราความเครียดสูงในระดับที่เครื่องทดสอบแบบปล่อยน้ำหนักทำไม่ได้ เครื่องมือชนิดนี้สามารถให้ข้อมูลระหว่างเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ, ความเค้นสูงสุดในระหว่างการกระแทก, การตอบสนองของอัตราความเครียด, การขยายตัวของความเสียหายและกลไกการวิบัติ เครื่องมือประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ Striker Bar, Incident Bar และ Transmitted Bar โดย Bar ทั้งสามทำจากวัสดุเดียวกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน ในกระบวนการทดสอบ ชิ้นทดสอบถูกวางระหว่าง Incident Bar และ Transmitted Bar ส่วน Striker Bar จะถูกเร่งโดยวิธีให้แรงกระทำซึ่งอาจจะมาจากกลไกของสปริงหรือใช้ปืนแก๊ส Striker Bar ถูกยิงไปกระแทกกับ Incident Bar ที่อัตราความเร็วต่างๆ เมื่อ Bar ทั้งสอง

กระแทกกันทำให้เกิด Strain Wave แปรไปตลอดความยาวของ Incident Bar และเกิดการส่งผ่านและสะท้อนกลับของ Strain Wave ที่รอยต่อของแต่ละช่วง โดย Strain Gauge ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของ Incident Bar ใช้บันทึก Incident Wave และ Reflected Wave ขณะที่ใช้ Strain Gauge ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของ Transmitted Bar เพื่อบันทึก Transmitted wave จากนั้นนำสัญญาณที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูลต่อไป

ถึงแม้ว่า SHPB สามารถทดสอบวัสดุที่อัตราความเครียดในระดับสูงและให้ข้อมูลจำนวนมาก แต่เครื่องมือชนิดนี้ก็มีข้อจำกัดบางอย่าง เช่น ความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นทดสอบต้องเล็กเท่าที่เป็นไปได้เพื่อให้การกระจายตัวของความเค้นเท่ากันทั้งหน้าตัด, ผลของแรงเสียดทานระหว่างปลายชิ้นทดสอบและ Incident Bar ก่อนข้างสูง นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้ SHPB เพื่อทดสอบวัสดุภายใต้แรงแบบต่างๆ เช่น แรงอัด, แรงดัด, แรงดึงและแรงเฉือนอีกด้วย



รูปที่ 2.4 Split Hopkinson Pressure Bar [2]

2.2 คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตภายใต้แรงกระทำแบบคงที่

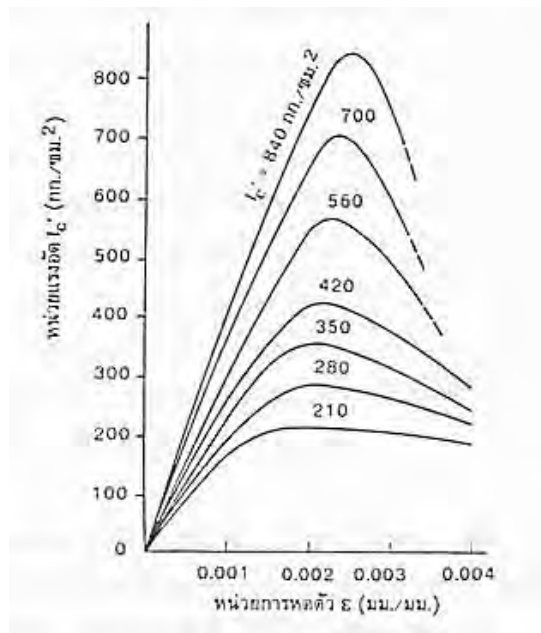
แรงกระทำแบบคงที่ในที่นี้หมายถึงแรงกระทำที่มีอัตราการเครียดไม่เกิน 10^{-7} ต่อวินาที ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 อัตราความเครียดและชนิดของแรงกระทำ[4]

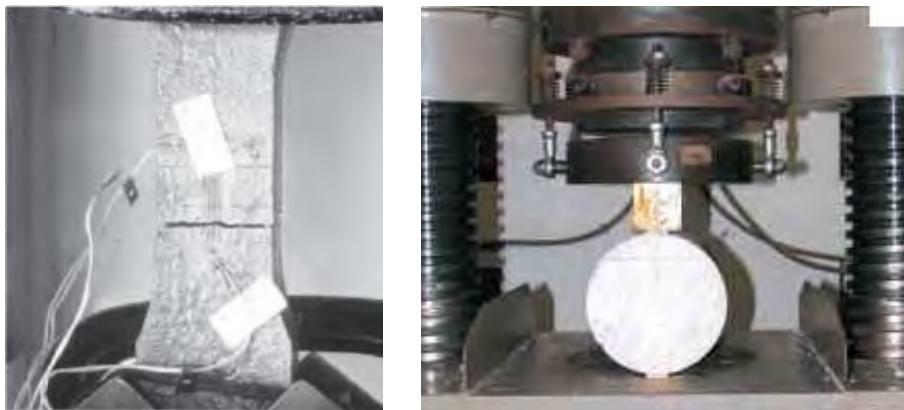
Type of Loading	Strain Rate (1/s)	Test and Machines
Static Loading : Creep, etc	10^{-7}	Static Test
Traffic	10^{-6} - 10^{-4}	Quasi-Static Test
Gas Explosions	5×10^{-5} - 5×10^{-4}	Seismic Effect Test
Earthquake	5×10^{-3} - 5×10^{-1}	Shake Table Test
Pile Driving; Airplane Impact Vehicle Hitting Bridge Pier Hard impact	10^{-2} - 10^1	Special Hydraulic Machine with High-Capacity Servo-Valves Impact Test; Drop Weight Machine Split-Hopkinson Pressure Bar
Hypervelocity Impact	10^2 - 10^6	Explosion or Bombing Adjacent to Building

-**กำลังต้านทานแรงอัด** [[5]- [7]] ของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติที่โดดเด่นของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เมื่อเทียบกับคุณสมบัติในการต้านทานต่อแรงกระทำแบบอื่น เช่น กำลังต้านทานแรงดึง กำลังต้านทานแรงดัด กำลังต้านทานแรงเฉือน เป็นต้น รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของแท่งคอนกรีตมาตรฐานที่มีกำลังต้านทานแรงอัดต่างกัน เมื่อรับแรงกดอัดตามแนวแกนอย่างเดียว (Uniaxial Stress) จนกระทั่งแท่งคอนกรีตตัวอย่างวิบัติ จะเห็นว่าจากจุดเริ่มต้นที่รับแรงกดจนถึงระดับของหน่วยแรงประมาณ 40% ถึง 50% ของกำลังต้านทานสูงสุด ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเป็นเส้นเส้นตรง เมื่อหน่วยแรงอัดเพิ่มสูงขึ้น ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเป็นเส้นโค้งเหมือนเส้นโค้งพาราโบลา ซึ่งพบว่าที่หน่วยแรงอัดสูงสุด คอนกรีตจะมีหน่วยการหดตัวประมาณ 0.002 - 0.003 สังเกตว่า คอนกรีตที่มีกำลังต้านทานแรงอัดสูง หน่วยแรงอัดจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อผ่านจุดที่หน่วยแรงอัดสูงสุดแล้ว แต่คอนกรีตที่มีกำลังต้านทานแรงอัดต่ำกว่า หน่วยแรงอัดจะลดลงช้ากว่า และมีค่าหน่วยการหดตัวสูงสุดมากกว่า แสดงว่า คอนกรีตที่มีกำลังต่ำกว่าจะมีความเหนียว (Ductility) มากกว่าคอนกรีตที่มีกำลังสูงกว่า

-**กำลังต้านทานแรงดึง** [[5]- [7]] จากการทดสอบโดยวิธีการทดสอบแรงดึงโดยตรง (Direct Tensile Test) คอนกรีตสามารถรับแรงดึงได้ประมาณ 8% ถึง 12% ของกำลังต้านทานแรงอัด เนื่องจากการทดสอบแบบแรกมีปัญหาในเรื่องการจับยึดเพื่อดึงแท่งตัวอย่างทดสอบจึงมีการทดสอบโดยทางอ้อมเรียกว่า Cylinder Splitting Test เป็นการกดแท่งคอนกรีตทรงกระบอกมาตรฐานวางในแนวนอนจนกระทั่งแท่งคอนกรีตแยกตัวในแนวตั้ง ค่าที่ได้เรียกว่า กำลังดึงแยกผ่าซีกของคอนกรีต จากการทดสอบของ Hanson [8] พบว่า กำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีตประมาณ 8% ถึง 14% ของกำลังต้านทานแรงอัด รูปที่ 2.6 การทดสอบแรงดึงทั้ง 2 แบบ



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและหน่วยความเครียดของคอนกรีต[7]



รูปที่ 2.6 การทดสอบแบบแรงดึงโดยตรง (ซ้าย) และ การทดสอบแบบผ่าซีก (ขวา)

-กำลังต้านทานแรงดัด [[5]- [7]] ทดสอบโดยใช้ตัวอย่างคานคอนกรีตมาตรฐาน ขนาดหน้าตัด 15 x 15 ซม. ยาว 75 ซม. และให้แรงกระทำที่จุดแบ่งสามช่วงคานยาว 60 ซม. ดังรูปที่ 2.7 ค่าที่ได้เรียกว่าโมดูลัสของการแตกร้าว (Modulus of Rupture) เป็นค่าหน่วยแรงดึงสูงสุดตรงจุดที่คอนกรีตเกิดรอยแตกร้าว จากการทดสอบของ Wood [9] พบว่า กำลังต้านทานแรงดัดมีค่าประมาณ 0.7 – 0.8 เท่าของ รากที่สองของกำลังต้านทานแรงอัด



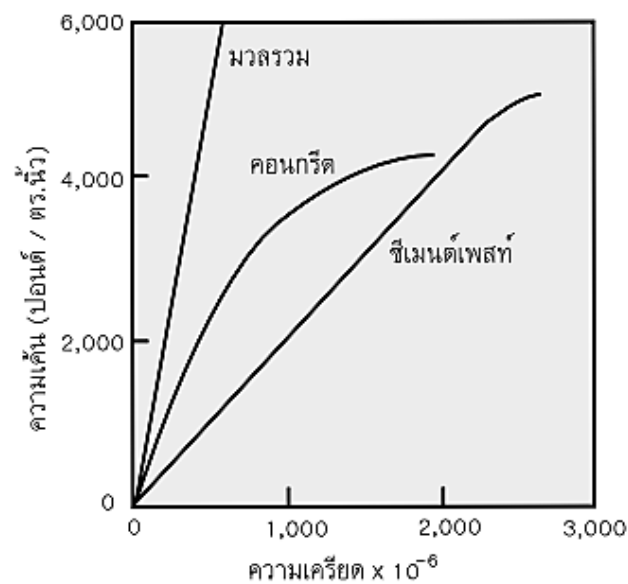
รูปที่ 2.7 การทดสอบแรงดัดแบบสามจุด

-กำลังต้านทานแรงเฉือน (Shear Strength) ([5]- [7]) การเฉือนเป็นการกระทำของแรงสองแรง ซึ่งมีขนาดเท่ากันและขนานกันโดยกระทำตรงข้ามบนระนาบซึ่งมีระยะห่างกันเล็กน้อย แรงเฉือนมักจะเกิดขึ้นพร้อมกับแรงดึงและแรงดัดเสมอ การทดสอบความต้านทานแรงเฉือนในคอนกรีตโดยตรงนี้ไม่สะดวก เช่นเดียวกับการทดสอบหาความต้านทานแรงดึง ทั้งนี้เพราะค่าแรงดัด แรงกด และแรงดึงในแนวทแยง จะมีส่วนเกี่ยวข้องทำให้ผลการทดสอบไม่ถูกต้อง ปกติการทดสอบหาความต้านทานแรงเฉือน กระทำได้โดยการบิดแท่งตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอก พบว่า กำลังต้านทานแรงเฉือนมีค่าประมาณร้อยละ 15 ถึง ร้อยละ 25 ของกำลังอัดประลัย ค่าความต้านทานแรงเฉือนนี้ขึ้นอยู่กับส่วนผสมเช่นเดียวกับค่ากำลังอัดประลัย

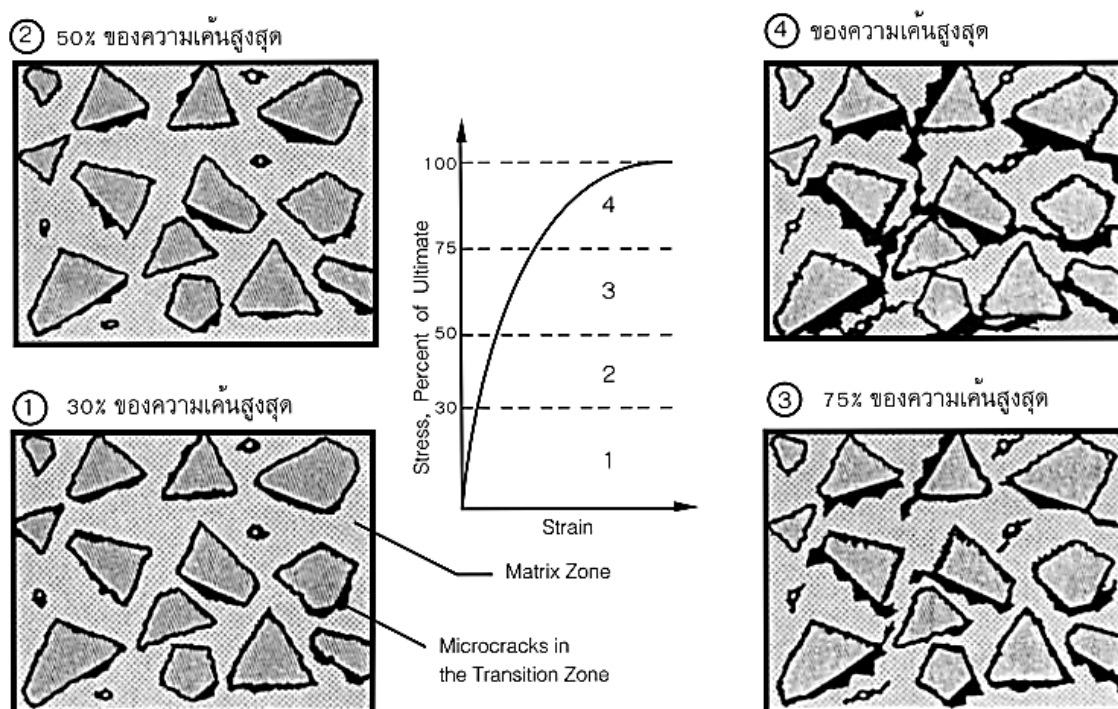
-โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต [6]เมื่อใส่แรงกระทำกับคอนกรีตจะเกิดการหดตัว ซึ่งพบว่าคอนกรีตไม่ได้แสดงพฤติกรรมเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นอย่างแท้จริงเหมือนกับมวลรวมหรือซีเมนต์เพสต์ ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการแพร่กระจายของรอยร้าวในคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นภายใต้น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้ดังนี้ โดยปกติในเนื้อคอนกรีตจะมีรอยร้าวเล็กๆ (Micro Cracks) อยู่ภายในเป็นจำนวนมาก โดยจำนวนและขนาดของรอยร้าวขึ้นอยู่กับลักษณะการเยิ้ม การบ่ม ความแข็งแรงของบริเวณรอยต่อ (Transition Zone) ระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวมหยาบ

- ในช่วงคอนกรีตรับแรงเค้นไม่เกิน 30% ของความเค้นสูงสุด รอยร้าวดังกล่าวจะยังไม่เกิดการขยายตัวหรือเพิ่มขนาด จึงทำให้กราฟในช่วงต้นนี้มีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 2.9 เมื่อคอนกรีตได้รับความเค้นเกิน 30% ของความเค้นสูงสุด จำนวนความกว้าง และความยาวของรอยแตกร้าวบริเวณรอยต่อจะเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราส่วนความเค้นต่อความเครียดเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้กราฟเริ่มเบี่ยงเบนไม่เป็นเส้นตรง

- ที่ระดับความเค้น 50% ของความเค้นสูงสุด รอยร้าวบริเวณรอยต่อจะเริ่มคงที่และเมื่อความเค้นอยู่ในช่วง 50%-60% ของความเค้นสูงสุด รอยร้าวจะเริ่มเกิดขึ้นบริเวณซีเมนต์เพสต์
- ที่ระดับความเค้นประมาณ 75% ของความเค้นสูงสุด รอยร้าวบริเวณซีเมนต์เพสต์จะแพร่กระจายมากขึ้น อีกทั้งรอยร้าวบริเวณรอยต่อเริ่มเพิ่มขึ้นในช่วงนี้ทำให้กราฟเริ่มโค้งสู่แนวนอนมากขึ้น
- ที่ระดับความเค้นมากกว่า 75% ของความเค้นสูงสุด รอยร้าวทั้งในบริเวณซีเมนต์เพสต์และบริเวณรอยต่อเกิดมากขึ้นและเริ่มมีความต่อเนื่องกัน ทำให้การเพิ่มความเค้นเพียงเล็กน้อยจะทำให้ความเครียดเปลี่ยนแปลงไปมาก



รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของ มวลรวม, คอนกรีต และ ซีเมนต์เพสต์ [6]



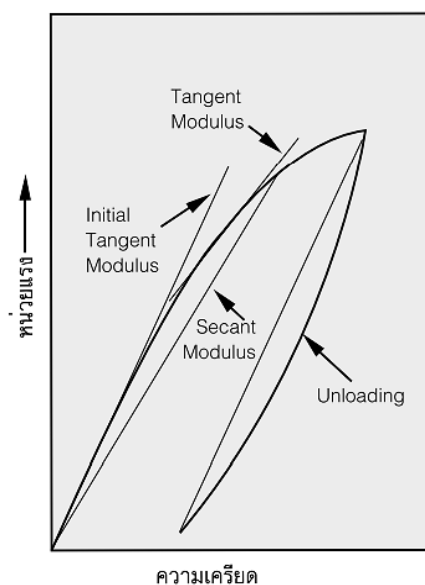
รูปที่ 2.9 แสดงความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่แรงกดต่างๆ [6]

โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าแปรผันตามกำลังของคอนกรีต หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ตลอดจนขนาดและระยะเวลาที่รับน้ำหนักบรรทุก เมื่อคอนกรีตรับน้ำหนักบรรทุกอยู่ในช่วงใช้งานและกระทำในช่วงเวลาสั้นๆ อาจจะสมมุติว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยการหดตัวเป็นสัดส่วนโดยตรงกับหน่วยแรงอัดที่กระทำ แต่เมื่อคอนกรีตรับน้ำหนักบรรทุกค้างเป็นเวลานานหรือรับแรงกระทำซ้ำๆ เป็นวัฏจักร ต้องพิจารณารวมหน่วยการหดตัวแบบพลาสติกหรือความล้าของคอนกรีตด้วย ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นคงที่ สามารถคำนวณหาได้หลายวิธีดังนี้ [6]

- Initial Tangent Modulus คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นสัมผัส ณ จุดเริ่มต้น ค่าที่ได้นี้เป็นการสมมุติว่าคอนกรีตเป็นวัสดุยืดหยุ่น ไม่คิดผลของการหดตัวแบบพลาสติกหรือการล้าของคอนกรีต
- Secant Modulus คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นที่ลากจากจุดเริ่มต้นไปถึงจุดใดๆ ที่ต้องการหา (โดยทั่วไปจะเป็นจุดที่มีหน่วยแรงอัด 40%-50% ของหน่วยแรงอัดสูงสุด) บนเส้นความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัว มาตรฐาน ACI ถือว่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่แท้จริงของคอนกรีตในสถานะใช้งานเพราะเป็นค่าที่ได้รวมถึงการหดตัวแบบพลาสติกหรือการล้าของคอนกรีต
- Tangent Modulus คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นสัมผัสกับจุดใดๆ บนเส้นความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของคอนกรีต ค่าโมดูลัสที่หาได้เป็นค่าที่แท้จริงของคอนกรีตในทุกตำแหน่งของหน่วยแรง ค่าโมดูลัสทั้ง 3 แบบ แสดงดังรูปที่ 2.10

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นไม่คงที่ สามารถหาได้จากการทดสอบด้วยเสียง (Sonic Test) โดยปกติมีค่ามากกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแบบคงที่ 20% - 40% เป็นค่าที่มีประโยชน์ในการวิเคราะห์ความเค้นสำหรับโครงสร้างที่ต้องรับแรงกระแทก

-ค่าอัตราส่วนปัวซอง [6]เป็นค่าอัตราส่วนของหน่วยการหดตัวด้านข้างต่อหน่วยการหดตัวในแนวแกนที่รับแรงกระทำ ซึ่งคอนกรีตปกติจะมีค่าประมาณ 0.15-0.20 จากการวิจัยที่ผ่านมายังไม่พบความสัมพันธ์ที่แน่ชัดระหว่างค่าอัตราส่วนปัวซองกับคุณสมบัติของคอนกรีต เช่น อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ การบ่ม หรือขนาดผลของมวลรวม แต่อย่างไรก็ตามพบว่า อัตราส่วนปัวซองจะมีค่าลดลงในคอนกรีตกำลังสูง คอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำและคอนกรีตที่ได้หน่วยแรงไม่คงที่ (Dynamic Load)



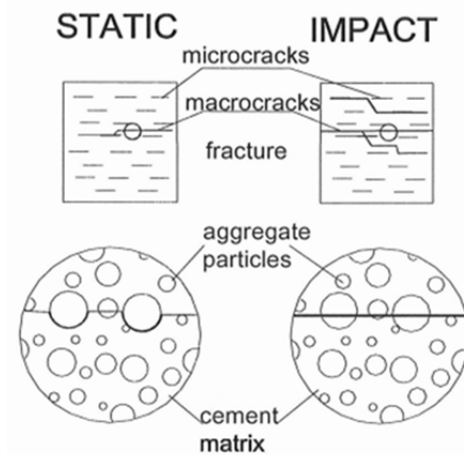
รูปที่ 2.10 โมดูลัสของคอนกรีตภายใต้แรงกระทำแบบคงที่ [6]

2.3 คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตภายใต้แรงกระทำแบบกระแทก

แรงกระทำแบบกระแทกคือแรงกระทำที่มีอัตราความเครียดสูงประมาณ 10^{-2} ขึ้นไป ระดับของอัตราความเครียดของแรงกระทำแต่ละประเภทก็มีค่าไม่เท่ากันดังแสดงในตารางที่ 2.1 ก่อนหน้า

2.3.1 ความเสียหายที่เกิดจากแรงกระแทก

ปกติในเนื้อคอนกรีตมีรอยร้าวเล็กๆ (Micro Cracks) อยู่ภายใน โดยจำนวนและขนาดของรอยร้าวขึ้นอยู่กับลักษณะการเอี่ยม การบ่ม ความแข็งแรงของบริเวณรอยต่อ ระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวมหยาบ สำหรับคอนกรีตทั่วไป รอบต่อระหว่างมวลรวมหยาบกับซีเมนต์จะเป็นจุดที่อ่อนแอของคอนกรีต ดังนั้นการแตกร้าวจะเริ่มขึ้นที่จุดนี้ และจะมีทิศทางตั้งฉากกับแนวของแรงที่กระทำ แสดงดังรูปที่ 2.11



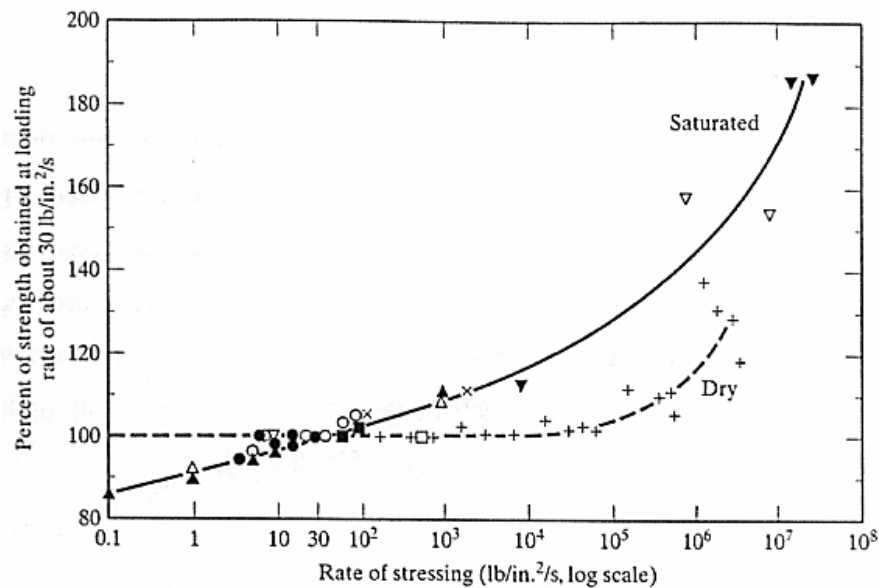
รูปที่ 2.11 เปรียบเทียบรอยแตกร้าวของการทดสอบแบบ Static และ Impact [16]

จากรูปที่ 2.11 ที่อัตราแรงกระทำที่ช้าๆ เช่น Quasi-Static Test รอยร้าวภายในจะเริ่มขยายตัวและเคลื่อนที่อย่างช้าๆ เนื่องจากอัตราใส่แรงกระทำที่ค่อนข้างช้า ทำให้รอยร้าวไม่ได้ถูกเร่งให้ต้องเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็ว การเคลื่อนที่ของร้าวก็จะผ่านไปยังบริเวณหรือเส้นทางที่มีกำลังต่ำที่สุด ซึ่งในกรณีของคอนกรีตก็จะเป็นการเคลื่อนที่ไปตามพื้นที่สัมผัสระหว่างมวลรวมหยาบกับซีเมนต์เพสต์ ผ่านเนื้อซีเมนต์เพสต์ จนกลายเป็นรอยร้าวขนาดใหญ่ที่ต่อเนื่อง โดยทั่วไปจำนวนรอยร้าวที่พบจะมีจำนวนน้อยและมีขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตาม ภายใต้อัตราการใส่แรงกระทำที่สูง เช่น ภายใต้แรงกระแทกซึ่งจะใช้เวลากระทำน้อยกว่าแบบคงที่มาก รอยร้าวที่มีอยู่ภายในหลายรอยจะถูกเร่งให้ขยายตัวและเคลื่อนที่ออกไปในช่วงเวลาสั้นๆ พร้อมกัน ด้วยการที่ถูกนี้เอง ทำให้รอยร้าวต่างๆ เหล่านี้ต้องขยายตัวและถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปในเส้นทางที่สั้นที่สุดโดยไม่มีระยะเวลาในการเลือกเส้นทางที่มีกำลังต่ำสุด ด้วยความเร็วของปลายรอยร้าวที่สูงทำให้เกิดการขยายตัวตัดผ่านเนื้อของมวลรวมหยาบที่มีความแข็งแรงสูง ด้วยจำนวนรอยร้าวหลายรอยที่เกิดขึ้นพร้อมๆ กันประกอบกับการที่ต้องเคลื่อนที่ตัดผ่านมวลรวมหยาบซึ่งมีความแข็งแรงที่มาก จึงจำเป็นต้องใช้แรงกระทำที่สูงมากเพื่อที่จะทำให้คอนกรีตเกิดการวิบัติ ซึ่งก็จะส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตด้านต่างๆ มีค่าสูงขึ้นตามอัตราเร็วของแรงกระทำที่เพิ่มขึ้น

2.3.2 ผลของอัตราความเครียดและอัตราความเค้น

การตอบสนองต่ออัตราความเครียดของคอนกรีตขึ้นกับปัจจัยหลายประการ เช่น คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ผสมคอนกรีต, อัตราเร็วของแรงกระทำ, ปริมาณความชื้นและอุณหภูมิ เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้ทำให้ผลการทดสอบของนักวิจัยหลายๆ คน มีความแตกต่างกัน Hughes และ Gregory [10] ได้ทำการทดสอบแรงอัดภายใต้แรงกระทำที่มีอัตราความเครียดเท่ากับ 30 /sec พบค่าอัตราส่วนกำลัง Dynamic/Static อยู่ที่ 1.9 ในส่วนของวัสดุผสมคอนกรีตพบว่า ลักษณะของมวลรวมหยาบมีบทบาทสำคัญต่อคุณสมบัติของคอนกรีตภายใต้อัตราการเครียดสูง โดยมวลรวมที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม หยาบ จะให้การตอบสนองต่ออัตราความเครียดได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีมวลรวมกลม

เรียบและมีความแข็งแรงที่สูง [11] นอกจากนี้ Banthia [12] ได้พบว่าอัตราการเครียดมีผลต่อกำลังของคอนกรีต โดยคอนกรีตจะมีค่ากำลังเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการเครียดเพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.12) แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นดังกล่าวจะลดต่ำลงตามกำลังของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น แต่เพิ่มขึ้นตามระดับของความชื้นภายในที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.12 ผลของอัตราการเครียดต่อกำลังของคอนกรีตแห้ง [14]

อัตราการเค้นหรืออัตราของแรงกระทำจะถูกใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของวัสดุภายใต้การกระทำในกรณีที่มีการทดสอบด้วยการควบคุมค่าอัตราการเครียดโดยตรงทำได้ยาก โดยทั่วไปความสัมพันธ์อัตราการเค้นและอัตราการเครียดจะเป็นไปตามสมการ $\dot{\sigma} = E \dot{\epsilon}$ โดยสมการนี้จะเป็นจริงในกรณีที่แรงกระทำต่อคอนกรีตอยู่ในช่วงยืดหยุ่นและมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นคงที่ ในกรณีของการทดสอบด้วยแรงกระทำแบบคงที่ตามมาตรฐาน ASTM C39 [13] กำหนดให้ใช้ค่าอัตราการเค้นในการทดสอบแรงอัดแบบ Quasi-Static ควรอยู่ระหว่าง 0.14 – 0.34 MPa/s สำหรับคอนกรีตทั่วไปค่าโมดูลัสยืดหยุ่นอยู่ระหว่าง 20 – 40 GPa เมื่อทำการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของอัตราการเครียดจะอยู่ในช่วง $3 \times 10^{-6} - 17 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ สำหรับแรงกระทำกรณีของแรงกระทำค่าอัตราการเครียดอาจมีค่าสูงถึง 10^6

2.3.3 คุณสมบัติทางด้านการรับแรงอัด

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตภายใต้แรงกระทำเพิ่มขึ้นกับ อัตราการเครียด และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น โดยทั่วไป กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ค่าความเครียดที่ตำแหน่งแรงกระทำสูงสุด และ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นก็จะมีค่าแปรผันตามอัตราการเครียดที่เพิ่มขึ้น (จะสูงขึ้นตามการเพิ่มของอัตราการเครียด) Yon [15] พบว่า ค่าโมดูลัสสัมผัสตั้งต้น (Initial Tangent Modulus) มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการเพิ่มของแรงกระทำ แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสภายใต้แรงอัดจะมีต่ำกว่าการเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสภายใต้แรงดึง การเปลี่ยนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นถูกกำหนดให้เป็นไปตามความสัมพันธ์ดังสมการ 2-1 [4]

$$\frac{E_d}{E_s} = \left(\frac{\dot{\sigma}_d}{\dot{\sigma}_s}\right)^{0.025} \quad \text{หรือ} \quad \frac{E_d}{E_s} = \left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s}\right)^{0.026}$$

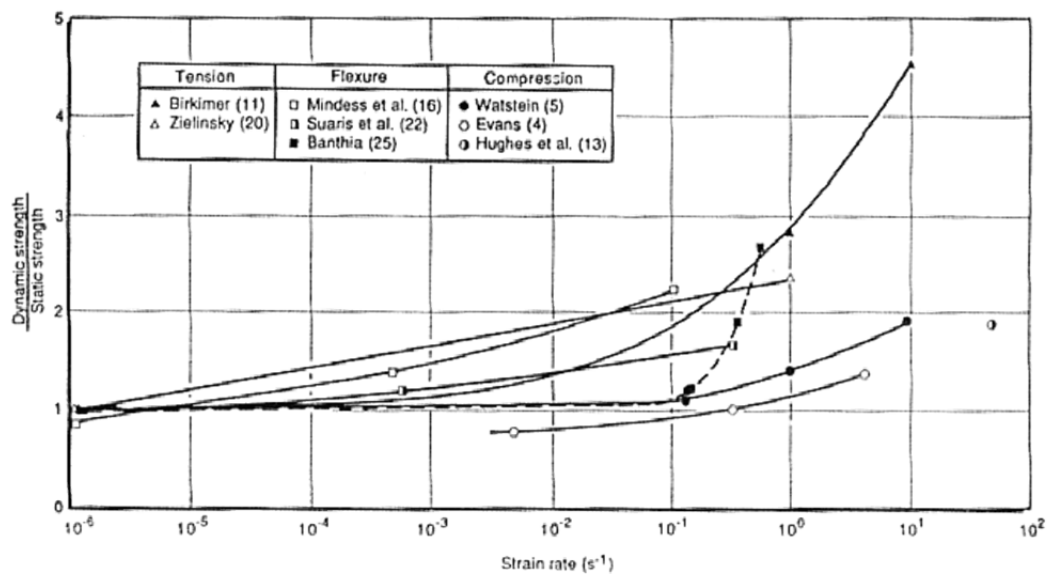
$$\text{โดยที่ } \dot{\sigma}_s = 1 \text{ MPa s}^{-1} \text{ และ } \dot{\epsilon}_s = 30 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$$

การเปลี่ยนรูปหรือหน่วยการหดตัว ณ ตำแหน่งแรงกระทำสูงสุดของคอนกรีตภายใต้แรงอัด พบว่า หลายงานวิจัยได้สรุปผลที่แตกต่างกันทั้งลดลงและเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตภายใต้แรงอัดแบบคงที่ โดยช่วงของความแตกต่างอยู่ระหว่างลดลงไปประมาณ 30% จนถึงเพิ่มขึ้นไปประมาณ 40% จากผลข้างต้นเนื่องมาจากความแตกต่างทางด้านวิธีการทดสอบหรือความบกพร่องทางการวัดค่า เหล่านี้นำมาสู่ความแตกต่างของรูปแบบการวิบัติ Bischoff, P. H. และ Perry, S. H [16] ให้ข้อสังเกตว่า การที่ค่าความเครียดมีทั้งลดลงและเพิ่มขึ้นเนื่องจากการทดสอบตัวอย่างโดยใช้เครื่องทดสอบแบบไฮดรอลิก แต่ค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้นเพียงอย่างเดียวเป็นการทดสอบแรงกระทำจริง นั่นคือการใช้ Drop Weight Test ซึ่งมีอัตราความเครียดสูงกว่า

2.3.4 คุณสมบัติทางด้านการรับแรงคัดและแรงดึง

ในการทดสอบแรงกระทำทางด้านการคัด พบว่า ความเครียดแตกร้าว (Fracture Strain) และการแอ่นตัว (Deflection) จะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอัตราการกระทำของแรง โดยที่การเพิ่มขึ้นนี้ จะพบอย่างชัดเจนในคอนกรีตที่มีเส้นใยเป็นส่วนผสมเนื่องจากเส้นใยจะทำหน้าที่ดูดซับพลังงานในขณะที่กำลังถูกดึงออกเนื่องจากการทดสอบกำลังคัด Zielinski, A.J. [17] พบว่า ความเครียดประลัยในมอร์ต้าและคอนกรีตปกติภายใต้แรงกระทำจะมีค่าสูงกว่าค่าความเครียดประลัยภายใต้แรงกระทำแบบคงที่ เนื่องมาจากพฤติกรรมของอนุภาคมวลรวมและการเพิ่มขึ้นของความเครียดแตกหัก โดยสังเกตได้จากการที่มีรอยร้าวจำนวนมากปรากฏในคอนกรีต

Gopalaratnam and Shah [18] รายงานผลการทดสอบการรับแรงคัด พบว่าแรงคัดสูงสุดจะมีค่าเพิ่มจาก 2.47 kN ไปเป็น 4.27 kN เมื่อเพิ่มอัตราความเครียดจาก 1×10^{-6} ไปเป็น 0.3 ต่อวินาที จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของความเครียดและกำลังรับแรงดึง การตอบสนองต่ออัตราความเครียดของคอนกรีตภายใต้การดึง, การอัดและการคัด สามารถแสดงได้ในรูปของ DIF (Dynamic Improvement Factor) ซึ่งคืออัตราส่วนของค่ากำลังรับแรงภายใต้แรงแบบพลศาสตร์ (Dynamic) ต่อค่ากำลังรับแรงภายใต้แรงกระทำแบบคงที่ (Static) ดังแสดงรูป 2.13

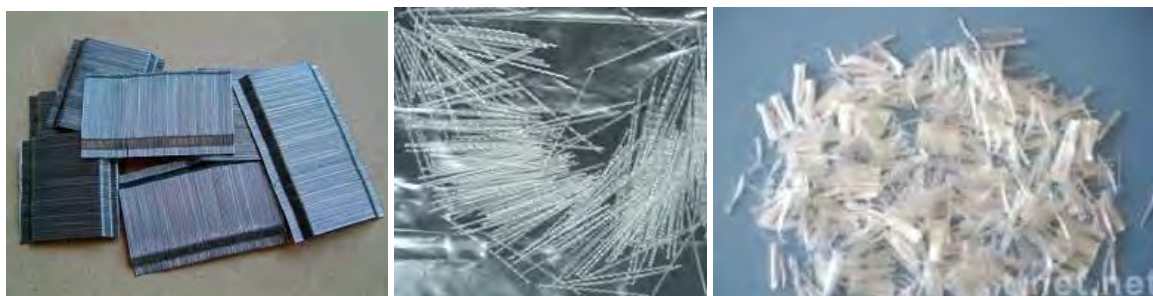


รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง DIF และอัตราความเครียดของคอนกรีต[19]

จากรูปที่ 2.13 จะพบว่า กำลังของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราของแรงกระทำ คอนกรีตมีการตอบสนองอัตราความเครียดภายใต้แรงดึงและแรงดัดมากกว่าภายใต้แรงอัด ความแตกต่างในด้านกำลังแรงดึงแรงดัดและแรงอัดตามอัตราแรงกระทำที่เพิ่มขึ้นและผลของการแพร่ขยายของรอยแตกกว้างที่เป็นสาเหตุของการพังทลาย สามารถส่งผลให้รูปแบบการพังทลายเปลี่ยนรูปแบบจากการดัดเป็นการเฉือนตามอัตราแรงกระทำ[20]

2.4 คอนกรีตผสมเส้นใยหลัก

คอนกรีตมีกำลังการรับแรงอัดที่ดี แต่ด้วยความที่เป็นวัสดุที่มีความเปราะ (Brittle Material) ทำให้มีคุณสมบัติการรับแรงดึงที่ต่ำ การปรับปรุงคุณสมบัติให้คอนกรีตมีความเหนียวเพิ่มขึ้นจำเป็นต้องมีการใส่วัสดุเสริมกำลังเข้าไปในเนื้อคอนกรีต เส้นใยถือว่าเป็นวัสดุที่นิยมนำมาผสมในคอนกรีตเพื่อเสริมคุณสมบัติดังกล่าว รู้จักกันในชื่อ คอนกรีตผสมเส้นใย (Fiber Reinforced Concrete : FRC) โดยการเติมเส้นใยที่มีลักษณะการกระจายตัวออกจากกันแบบไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Discrete Fiber) เข้าไประหว่างการผสม ชนิดของเส้นใยมีหลายแบบ เส้นใยจากธรรมชาติ เช่น ใยหิน ฟางข้าว ป่าน ปอ เป็นต้น เส้นใยที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น เส้นใยเหล็ก เส้นใยโพลีพรอพิลีน เส้นใยโพลีเอทิลีน เส้นใยคาร์บอน เป็นต้น ตัวอย่างเส้นใย แสดงดังรูปที่ 2.14



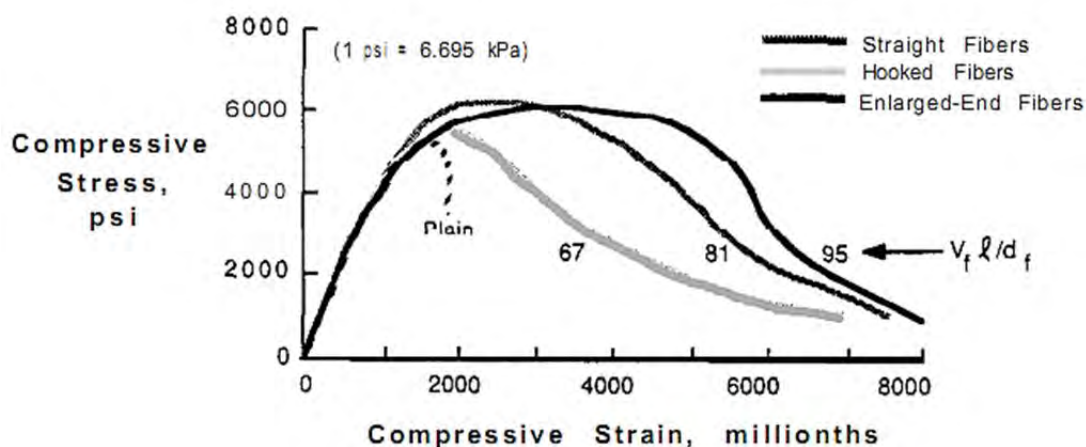
รูปที่ 2.14 เส้นใยชนิดต่างๆ

โครงสร้างของคอนกรีตผสมเส้นใย ประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ 1) มอร์ต้า (Matrix) 2) เส้นใย (Reinforcement) จัดเป็นวัสดุผสมเส้นใยชนิดไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Fibrous Composite Material) คือ เส้นใยมีการเรียงตัวไปในทิศทางที่ไม่แน่นอนและกระจายตัวไปทั่วเนื้อคอนกรีต

2.4.1 คุณสมบัติภายใต้แรงกระทำแบบคงที่

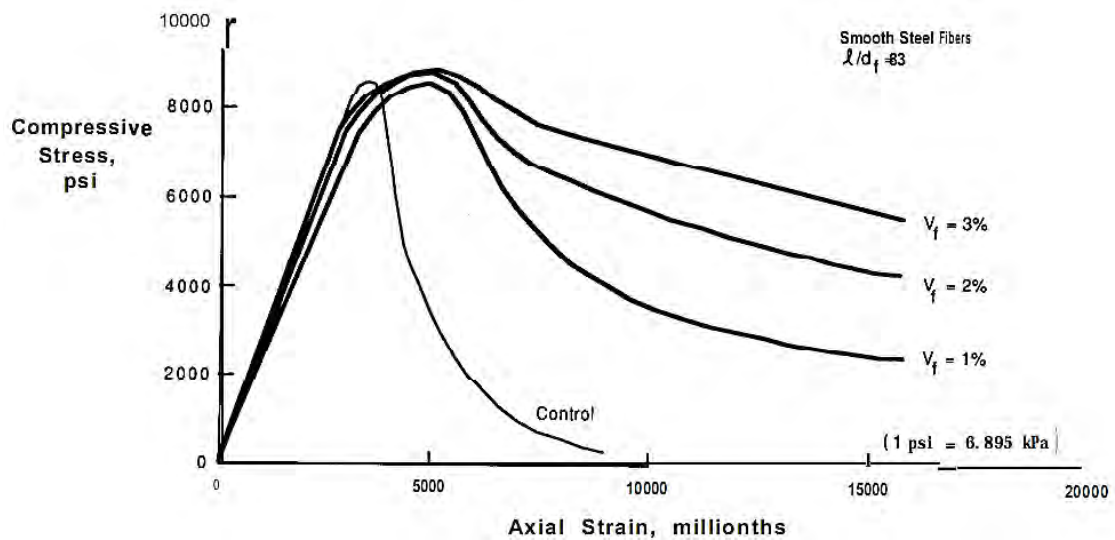
การผสมเส้นใยเข้าไปในคอนกรีต มีวัตถุประสงค์เพื่อความเหนียวให้กับคอนกรีตและทำให้คอนกรีตมีความเปราะน้อยลง ซึ่งหน้าที่ของเส้นใยหลักที่กระจายอยู่ในเนื้อของคอนกรีต จะทำหน้าที่ยึดรั้งรอยแตกไว้ไม่ให้ขยายตัวออกได้โดยง่าย ซึ่งในบางครั้งอาจทำให้รอยร้าวนั้นหยุดลง นำไปสู่การเกิดรอยร้าวใหม่

- กำลังต้านทานแรงอัด จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น เส้นใยหลักที่ผสมเข้าไปในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านความเหนียว แต่อย่างไรก็ตาม การใส่เส้นใยหลักลงไปในคอนกรีตมีผลต่อกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตเช่นกัน จากการทดสอบของ Williamson [21] พบว่า กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยหลัก 2% ($l/d = 100$) โดยปริมาตร เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง น้อยมากจนถึง 23% เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้า ซึ่งต่อมา Shah และคณะ[22] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง หน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวภายใต้การรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยแบบต่างๆ ดังรูปที่ 2.15

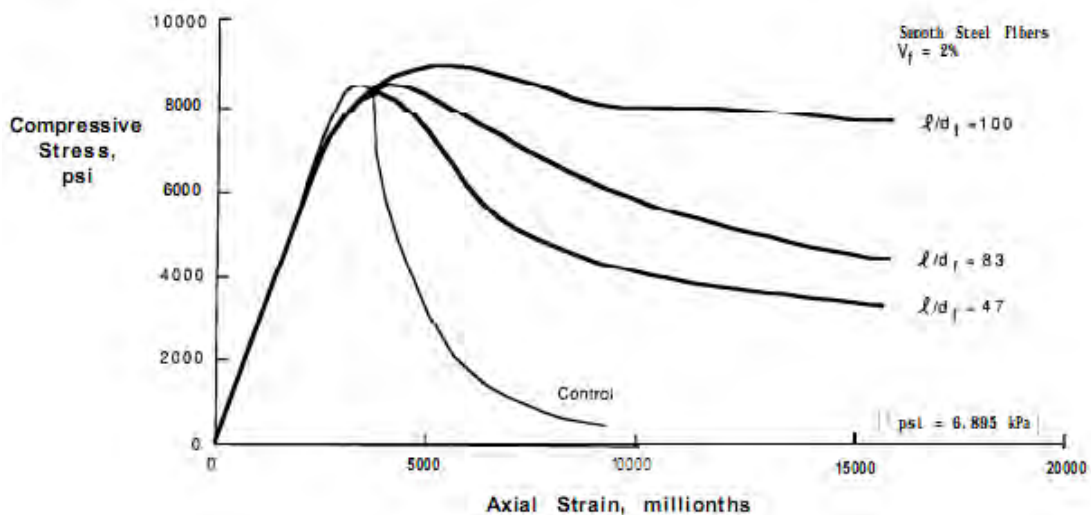


รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตผสมเส้นใยภายใต้แรงอัด

จากรูปที่ 2.15 พบว่า กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยนั้นเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่สิ่งที่เห็นได้อย่างชัดเจนคือ ณ ตำแหน่งหน่วยแรงอัดสูงสุด หน่วยการหดตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กล็กมีมากกว่าคอนกรีตธรรมดา และพฤติกรรมหลังจากหน่วยแรงอัดสูงสุดกระทำ ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยมีค่าความชันน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา แสดงให้เห็นถึงความเหนียวที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ Fanella and Naaman [23] ได้ศึกษาผลของปริมาณเส้นใยและอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (l/d , Aspect Ratio) ต่อกำลังต้านทานแรงอัดของมอร์ต้า



รูปที่ 2.16 ผลของปริมาณเส้นใยต่อความเค้นและความเครียดของคอนกรีตผสมเส้นใย [23]

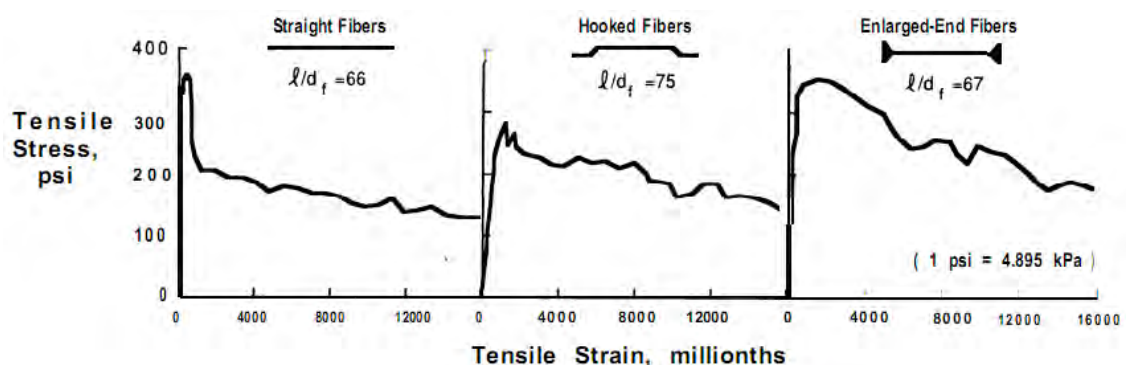


รูปที่ 2.17 ผลของ l/d ต่อความเค้นและความเครียดของคอนกรีตผสมเส้นใย [23]

จากรูปที่ 2.16 - 2.17 พบว่า ผลของปริมาณเส้นใยและผลของอัตราส่วน l/d มีผลให้กำลังต้านทานแรงอัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้า และพฤติกรรมหลังจากหน่วยแรงอัดสูงสุดกระทำ ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของมอร์ต้าผสมเส้นใยมีค่าความชันน้อยกว่ามอร์ต้า สอดคล้องกับการทดสอบของ P.N. Balagura [24] ที่พบว่า เมื่อปริมาณเส้นใยมีผลทำให้กำลังต้านทานแรงอัดเพิ่มขึ้นและค่าความเหนียวเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น Y. Mohammadi และคณะ[25] ได้แสดงว่าผลของกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่ปริมาณต่างกัน และมีความยาวแตกต่างกัน พบว่า กำลังต้านทานแรงอัดเพิ่มขึ้น 3% -26% ตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น

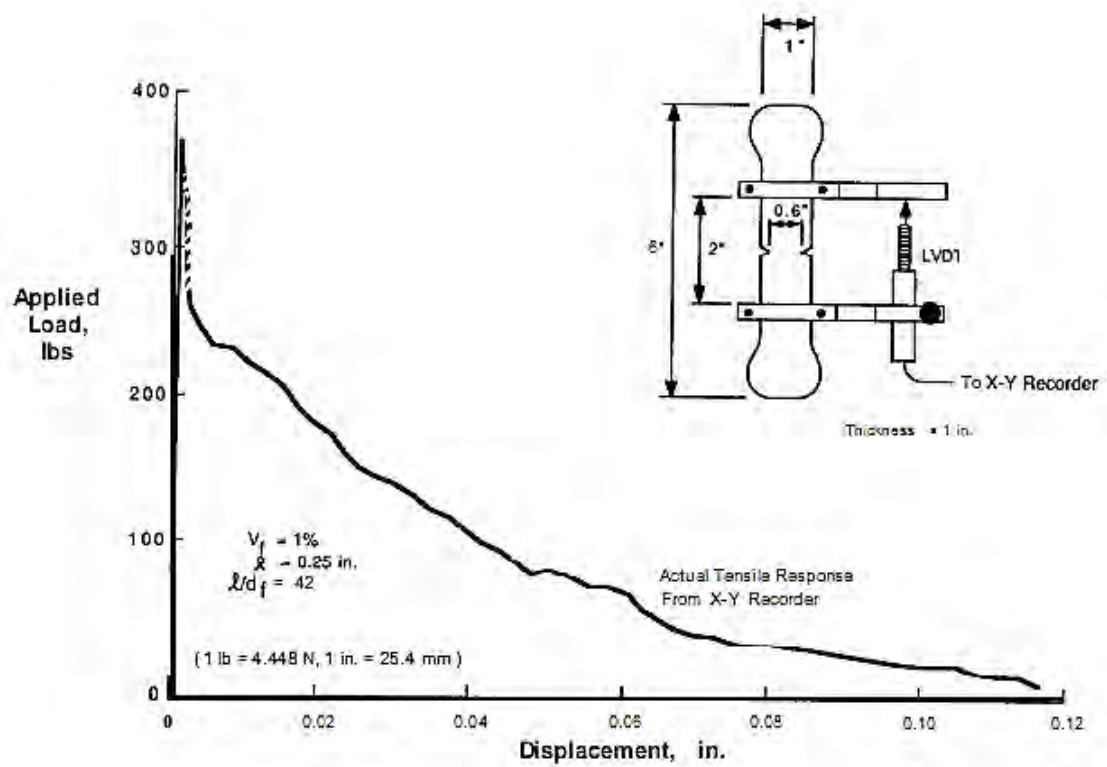
กล่าวโดยสรุปคือ การผสมเส้นใยเหล็กนั้นทำให้กำลังต้านทานแรงอัดเพิ่มขึ้นบางส่วน ผลที่โดดเด่นของการผสมเส้นใยเหล็กคือ ค่าความเหนียว (Toughness) ที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ค่าความเหนียวเป็นการวัดความสามารถในการดูดซับพลังงานระหว่างการเสียรูปของตัวอย่างทดสอบ กล่าวคือเส้นใยเหล็กช่วยในการป้องกันการพังทลายแบบทันทีทันใดภายใต้แรงกระทำแบบคงที่ (Statics Loading) และสามารถดูดซับพลังงานภายใต้แรงกระทำแบบพลศาสตร์ (Dynamics Loading)

- กำลังต้านทานแรงดึง จากการศึกษากของ Shah และคณะ [22] โดยวิธีการทดสอบแรงดึงโดยตรงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและหน่วยการยืดตัวของมอร์ต้าผสมเส้นใยเหล็ก พบว่าในช่วงแรกที่มีความสัมพันธ์เพิ่มขึ้นจนถึงค่าหน่วยแรงดึงสูงสุดมอร์ต้าธรรมดาและมอร์ต้าผสมเส้นใยเหล็กให้ผลที่เหมือนกัน แต่ในช่วงหลังจากหน่วยแรงดึงสูงสุดความสัมพันธ์จะขึ้นกับลักษณะรูปทรง, ปริมาณ และค่า Aspect Ratio (l/d) ของเส้นใย ตามรูปที่ 2.18

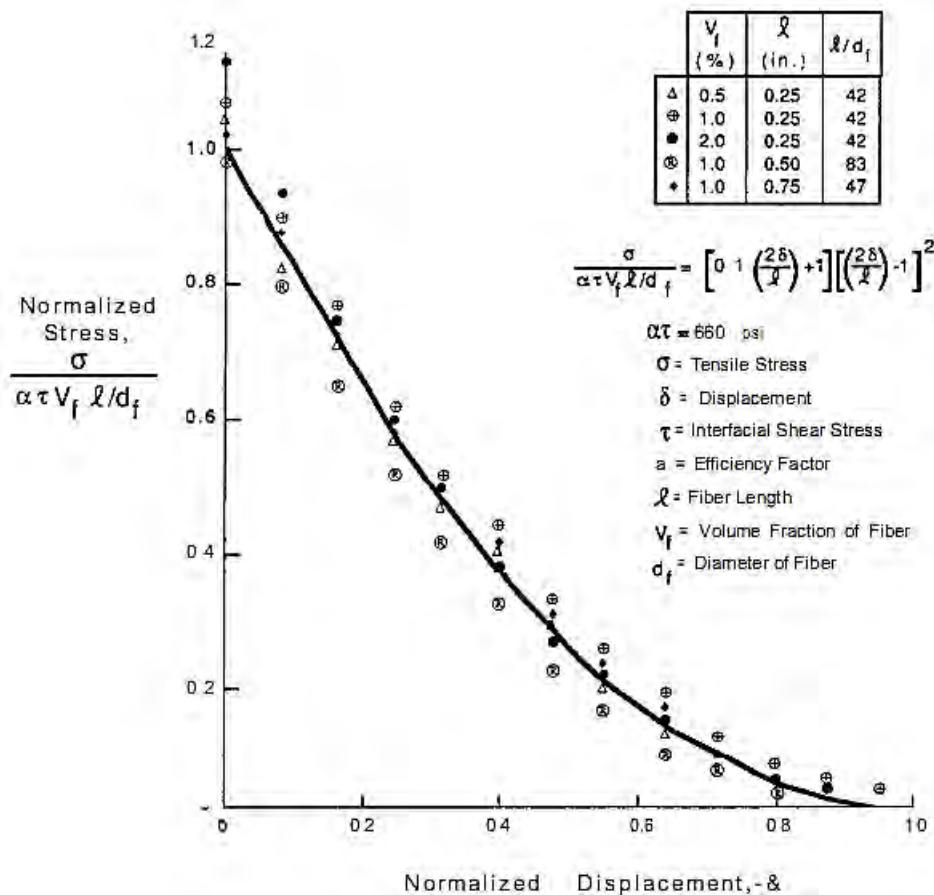


รูปที่ 2.18 ความเค้นและความเครียดของมอร์ต้าผสมเส้นใย[22]

ต่อมา Visalvanich and Naaman [26] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและหน่วยการยืดตัวหลังจากหน่วยแรงดึงสูงสุด พบว่า เมื่อรูปแบบการแตกร้าวมีเพียงแบบเดียวดังการทดสอบในรูปที่ 2.19 การเสียรูปจะพิจารณาไปที่ตำแหน่งรอยร้าวนั้นและสามารถคำนวณหาหน่วยการยืดตัวได้จาก Gage Length เมื่อนำข้อมูลการทดสอบหลายข้อมูลมาวิเคราะห์สามารถเสนอสมการทำนายผลของหน่วยแรงดึงได้ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะเคลื่อนตัวของมอร์ต้าผสมเส้นใยในการรับแรงดึง[26]

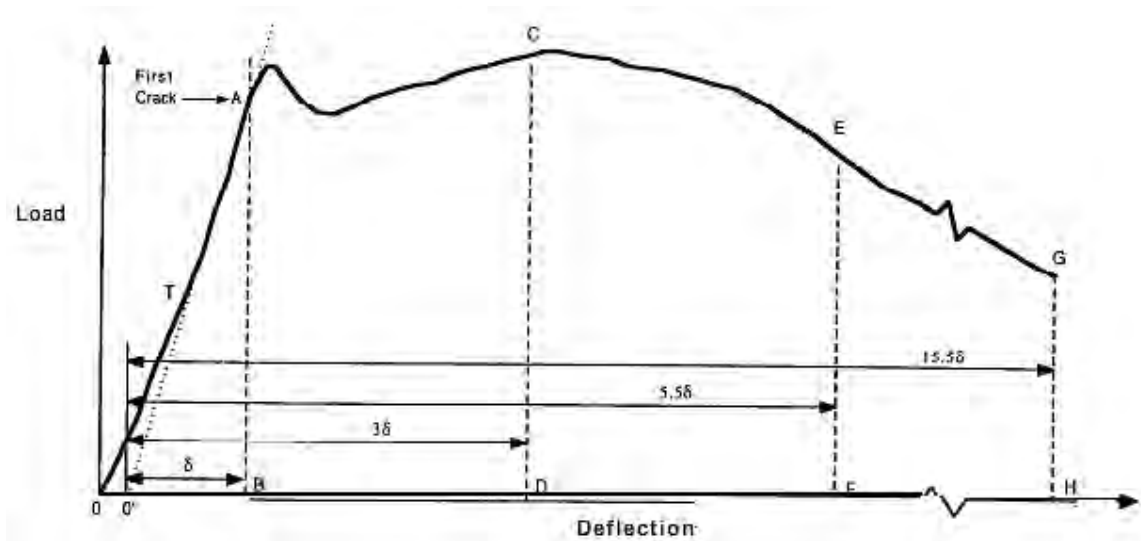


รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและระยะเคลื่อนตัวของมอร์ต้าผสมเส้นใยในการรับแรงดึง[26]

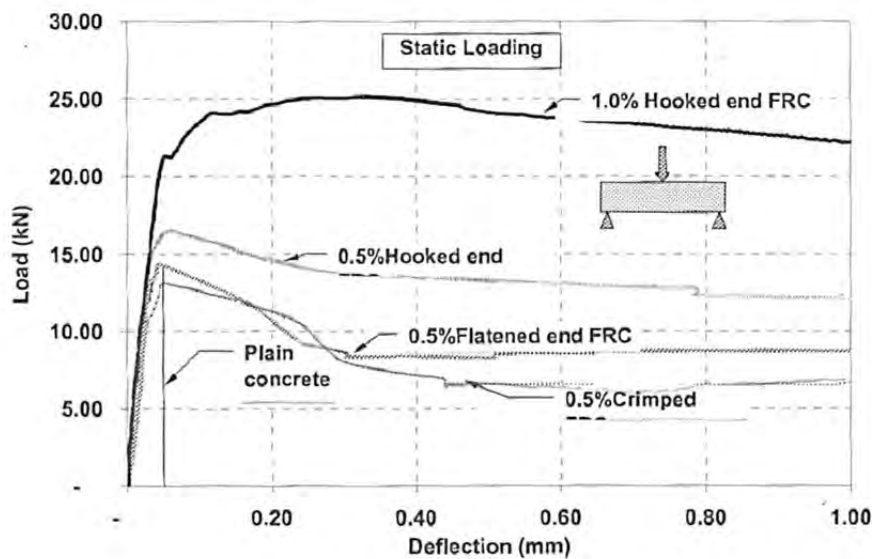
โดยทั่วไปกำลังต้านทานแรงดึงโดยตรงของคอนกรีตผสมเส้นใยสัดส่วนผสมต่างๆ นั้น จะสามารถรับกำลังต้านทานได้ใกล้เคียงกับคอนกรีตธรรมดาประมาณ 2-4 MPa. อย่างไรก็ตาม ค่าความเหนียวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กมีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวเส้นใยและแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในขณะที่เส้นใยเหล็กกำลังถูกดึงออก ณ ตำแหน่งที่เกิดการแตกร้าว ([22][23][27])

- กำลังต้านทานแรงดัด ผลของเส้นใยเหล็กต่อกำลังต้านทานแรงดัดจะมีมากกว่ากำลังต้านทานแรงอัดและและกำลังต้านทานแรงดึง จาก ASTM C 1018 พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและการโก่งตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยดังรูปที่ 2.21 จะพบว่ากำลังรับแรงดัดมีสองค่า ค่าแรกเป็นกำลังรับแรงดัดที่ตำแหน่งเกิดการแตกร้าวครั้งแรก (จุด A) ซึ่งแรงกระทำเพิ่มขึ้นจากเริ่มต้นจนถึงจุด A อย่างเป็นเส้นตรง ณ จุดนี้เป็นตำแหน่งที่คอนกรีตแตกร้าวเส้นใยที่ผสมเริ่มจะทำหน้าที่รับแรงกระทำ และค่าที่สองเป็นกำลังรับแรงดัดประลัย (จุด C) หรือ โมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of Rupture) เป็นตำแหน่งที่เส้นใยรับแรงกระทำอย่างเต็มที่ จากการทดสอบของ Sukontasukkul[28]พบว่า การผสมเส้นใยในคอนกรีตทำให้พฤติกรรมหลังจากแรงกระทำสูงสุดที่ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา (ความเหนียวเพิ่มมากขึ้น) และกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.22 ค่ากำลัง

รับแรงสูงสุดของ FRC จะมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตธรรมดาในสัดส่วนผสมต่างๆ แต่จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อสัดส่วนผสมเส้นใยสูงขึ้น (มากกว่า 1%)



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงและการโก่งตัว (ASTM C 1018)



รูปที่ 2.22 แรงและการโก่งตัวของคอนกรีตผสมเส้นใย[28]

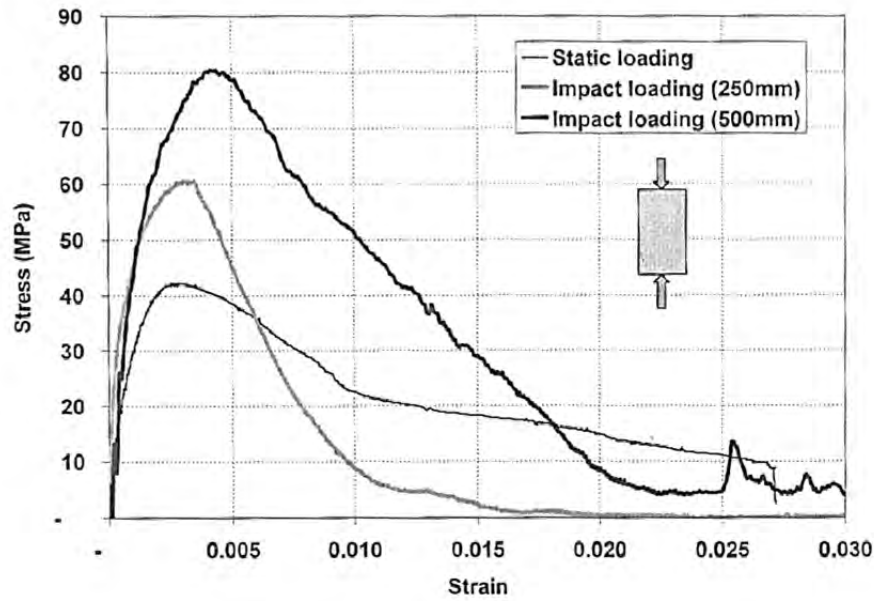
- ค่าความเหนียวการดัด ค่าความเหนียวเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก สามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟ แรงกระทำ-ระยะโก่งตัว ตั้งแต่เริ่มรับแรงกระทำไปจนถึงจุดที่แรงกระทำเป็นศูนย์ ซึ่งก็คือค่าพลังงานทั้งหมดที่ตัวอย่างสามารถดูดซับได้จนถึงตำแหน่งวิบัติ (ACI 544.1R)

2.4.2 คุณสมบัติภายใต้การรับแรงกระแทก

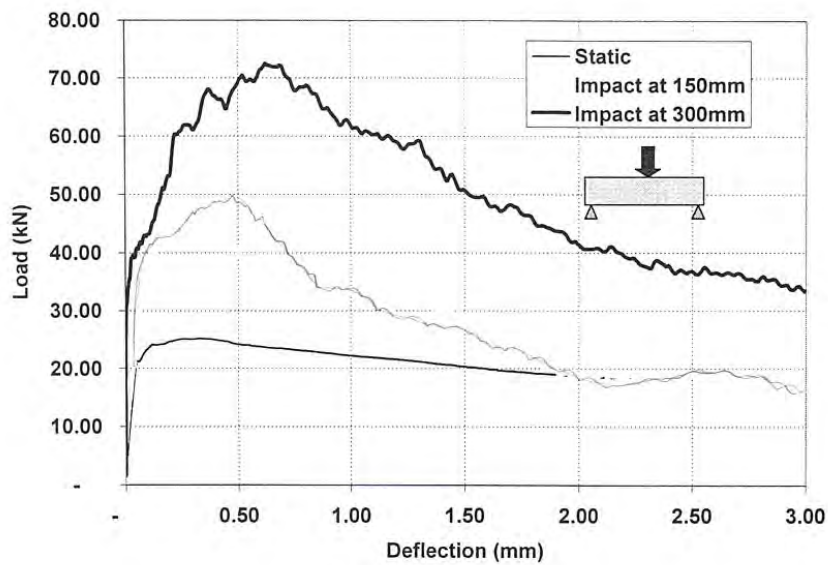
ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น เส้นใยสามารถปรับปรุงความสามารถในการรับแรงช่วงหลังของคอนกรีต (เช่น การดูดซับพลังงาน) เมื่อเกิดรอยร้าว เส้นใยจะทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่างรอยร้าวเพื่อทำหน้าที่ส่งผ่านแรงกระทำ และการวิบัติแบบทันทีทันใดจะไม่เกิดขึ้น คอนกรีตผสมเส้นใยสามารถต้านทานการกระแทกได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา อย่างไรก็ตาม การตอบสนองอัตราความเครียดของ FRC แตกต่างจากคอนกรีตทั่วไป เนื่องจากไม่ได้ขึ้นกับพารามิเตอร์ที่ส่งผลการตอบสนองความเครียดของคอนกรีตเท่านั้นยังขึ้นกับ การตอบสนองอัตราของเส้นใยที่ใส่เข้าไปในคอนกรีต และการยึดเหนี่ยวระหว่าง Matrix และเส้นใยด้วย

คุณสมบัติทางการรับแรงอัด Sukontasukkul [28] พบว่าการใส่เส้นใยในคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความเหนียวเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.23 การคำนวณค่าความเหนียวแรงอัดภายใต้แรงกระทำแบบไม่คงที่ (Dynamic Compressive Toughness) เป็นการบ่งบอกถึงผลของเส้นใยในการรับแรงกระแทก ที่ผ่านมาการคำนวณค่าความเหนียวของแรงอัดภายใต้แรงกระทำของ FRC มีค่อนข้างน้อย ปัญหาหลักเป็นเรื่องของการวัดการเสียรูปของตัวอย่างในช่วงเวลาของแรงกระทำซึ่งช่วงเวลาของการกระแทกน้อยกว่า 5×10^{-3} วินาที ปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานสำหรับตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกและ ตัวอย่าง FRC ทรงกระบอกภายใต้แรงกระทำแบบอัด อย่างไรก็ตาม มีผู้วิจัยบางส่วนได้ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดแบบกระแทกของคอนกรีตธรรมดาและ FRC โดยใช้เครื่องมือ Drop Weight Impact Machines [28-32] พบว่า ภายใต้แรงกระทำแบบอัด กำลังรับแรงอัดตามแนวแกนของคอนกรีตธรรมดาเพิ่มขึ้น 85%-100% ในส่วนของ SFRC ได้มีผู้วิจัย[16] ใช้เครื่องมือ Hopkinson Pressure Bar พบว่าความเหนียวหลังแรงกระทำสูงสุดไม่ปรากฏเมื่ออัตราความเครียดสูง สูงกว่า 50 s^{-1} เพราะวาทิศทางของเส้นใยหลักกับทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นในตัวอย่างมีทิศทางไม่สอดคล้องกัน ทำให้ประสิทธิภาพของเส้นใยภายใต้แรงอัดไม่ได้ถูกใช้อย่างเต็มที่

คุณสมบัติทางการรับแรงดัด จากการคุณสมบัติของเส้นใยที่กล่าวข้างต้น ผลการทดสอบของ Sukontasukkul[28] ด้วยการทดสอบคานคอนกรีตผสมเส้นใยต่างชนิดและปริมาณด้วยเครื่องมือทดสอบแบบปล่อยน้ำหนักตก พบว่า ค่า Stiffness ของคานคอนกรีตผสมเส้นใยจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับคานคอนกรีตธรรมดา และภายใต้แรงกระทำแบบกระแทก กำลังรับแรงดัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราของแรงกระทำ การโก่งตัวของคานที่ตำแหน่งแรงกระทำสูงสุดเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.24 ทำให้ค่าความเหนียวการดัดเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

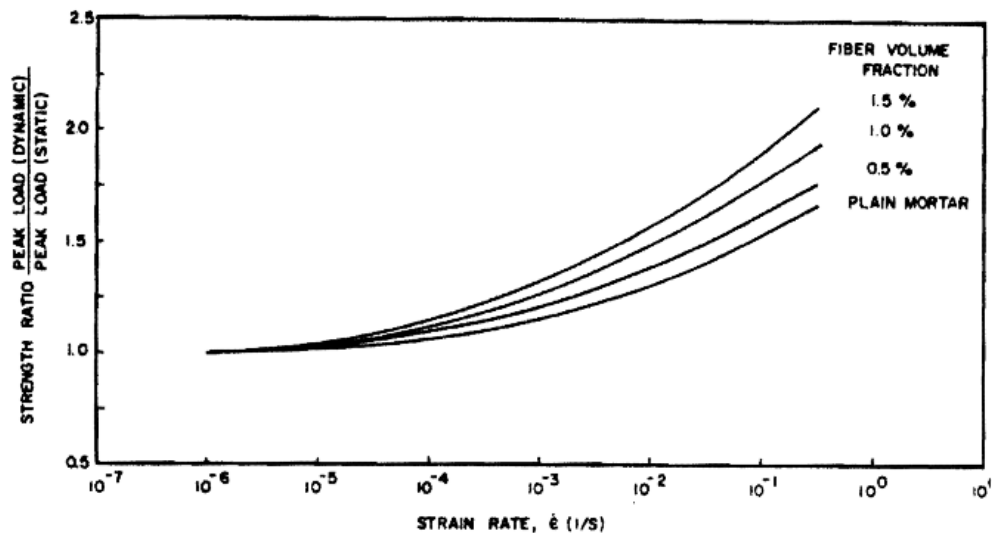


รูปที่ 2.23 ความเค้นและความเครียดของคอนกรีตผสมเส้นใย 0.5% (HE) [28]



รูปที่ 2.24 แรงและการโก่งตัวของคอนกรีตผสมเส้นใย 1% (HE) [28]

จากงานวิจัยของ Gopalaratnam et al [18] และ Banthia et al [19] ได้สรุปข้อมูลจากการทดสอบกำลังรับแรงดัดว่า ข้อมูลจากการกระแทกที่ได้จากการทดสอบจะตอบสนองต่ออัตราความเครียด กล่าวคือ ที่อัตราความเค้นแตกต่างกันจะส่งผลต่อค่าของกำลังของการกระแทก (Impact Strength) พิจารณาได้จากรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 ผลของอัตราความเครียด และปริมาณไฟเบอร์ ต่อ กำลังคัด [27]

จากรูปที่ 2.25 พบว่าอัตราส่วนกำลัง Impact/Static จะเพิ่มความตามอัตราความเครียดที่เพิ่มขึ้น ทั้งคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใย โดยคอนกรีตที่ผสมเส้นใยในปริมาณที่สูงจะมี อัตราส่วนกำลัง Impact/Static ที่สูงขึ้นเช่นกัน

2.5 คอนกรีตผสมเม็ดยาง

ยางเป็นวัสดุที่ย่อยสลายตามธรรมชาติได้ยากหรืออาจไม่ย่อยสลาย ดังนั้นขยะที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ยางเก่าจึงสามารถก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมได้ หากไม่ได้รับการดูแลอย่างถูกวิธี ปัญหาที่เกิดจากขยะยางก็จะมีมากขึ้นตามปริมาณการใช้ยางที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว นอกจากขยะที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ยางเก่าแล้ว เศษยาง (scrap) ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต ก็ถือเป็นปัญหาหลักอีกอย่างหนึ่ง เพราะการกำจัดขยะจากเศษยางทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นอันจะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้การพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ ที่สามารถนำขยะยางกลับมาใช้ใหม่จึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญและได้รับความสนใจจากทั้งผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมยางและจากนักอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมทั่วโลก (ทีมา)

ในงานวิจัยต่างๆที่ผ่านมาได้มีความพยายามที่นำเศษยางเก่ามาผสมแทนที่มวลรวมในคอนกรีตเพื่อประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ Fattuhi และ Clark [29] ได้นำคอนกรีตผสมเศษยางไปใช้เป็นฐานรองเครื่องจักรที่มีการสั่นตลอดเวลา เพื่อทำหน้าที่ต้านทานต่อแรงกระแทก Topçu และ Avcular [30] เสนอว่า คอนกรีตผสมยางอาจจะนำไปใช้ในการสร้างผนังกันเสียงบนถนนและนำไปเป็นวัสดุดูดซับพลังงานจากแผ่นดินไหวภายในอาคารได้ Hernandez-

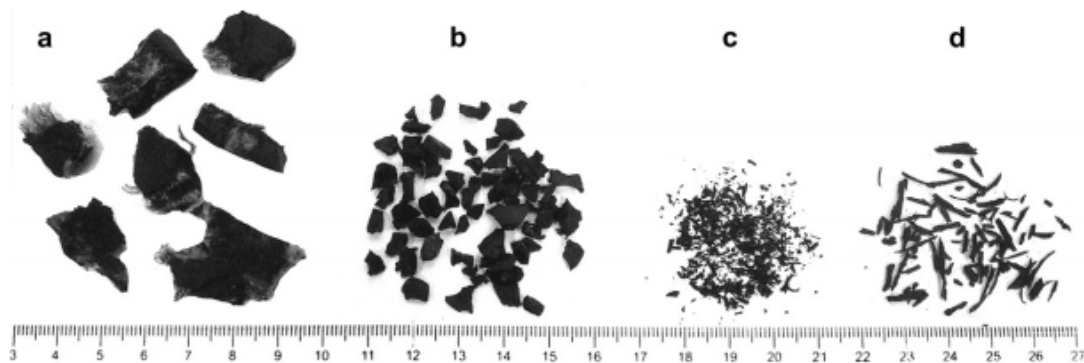
Olivares และ Barluenga [31] ได้นำยางผสมกับคอนกรีตกำลังสูงเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทนไฟ พบว่า การผสมยางเข้าไปในคอนกรีตกำลังสูงสามารถลดระยะ Cover ของคอนกรีตลงได้และเพิ่มประสิทธิภาพในการทนไฟ

2.5.1 การจำแนกประเภทของมวลรวมยาง

มวลรวมยางหรือยางผง เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำขยะยาง (เช่น ยางล้อเก่า เศษยางที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต) ไปผ่านกระบวนการบด หั่น โดยใช้เครื่องมือเชิงกลต่างๆ เช่น เครื่องแกรนูลเลเตอร์ (granulator) เครื่องฟัลเวอร์ไรเซอร์ (pulverizer) เครื่องบดกระแทก (hammer mill) เครื่องบดแบบ 2 ลูกกลิ้ง (two-roll mill) ทั้งนี้การบดสามารถทำได้ทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำ โดยทั่วไปการบดที่อุณหภูมิห้องจะเหมาะกับการผลิตยางผงที่มีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่ ยางผงที่ได้จะมีรูปร่างที่ไม่เป็นระเบียบและมีพื้นผิวขรุขระ หากต้องการยางผงที่มีขนาดอนุภาคเล็กลง จำเป็นต้องนำขยะยางไปผ่านเครื่องบดซ้ำหลายๆ รอบ ซึ่งจะส่งผลทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น ส่วนการบดที่อุณหภูมิต่ำนั้นเป็นวิธีการบดที่มีต้นทุนสูงเพราะต้องใช้ในโตรเจนเหลวปริมาณมาก วิธีนี้จึงเหมาะสำหรับการใช้ผลิตยางผงที่มีอนุภาคขนาดเล็กเท่านั้น ยางผงที่ได้จากการบดด้วยวิธีนี้ส่วนใหญ่จะมีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบ ปัจจุบันได้มีการนำยางผงที่ได้จากการรีไซเคิลไปประยุกต์ใช้งานในหลากหลายรูปแบบ เช่น การนำไปใช้เป็นสารเติมเต็มในอุตสาหกรรมยาง นำไปใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงในพลาสติก นำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตยางรีเคลมและยางเทอร์โมพลาสติก รวมถึงการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมโยธา

เพื่อเป็นการส่งเสริมอุตสาหกรรมก่อสร้างใช้ยางผงเป็นทางเลือกในการนำมาเป็นวัสดุมวลรวม ได้มีการจำแนกชนิดของยางผงได้ดังนี้[32]

- 1) Shredded Rubber มีขนาดเทียบเท่ากับมวลรวมหยาบ สามารถใช้แทนที่ หิน กรวด ได้เพียงบางส่วน
- 2) Crumb Rubber มีขนาดทั่วไป ระหว่าง 0.425 – 4.74 mm หลากๆ งานวิจัยนำไปใช้แทนที่ทรายบางส่วน
- 3) Ground Tyre Rubber มีขนาดที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 (0.425 mm) มีงานวิจัยบางส่วนนำไปใช้ผสมในคอนกรีตที่ไหลเข้าแบบได้ง่าย (Self-Compacting Rubberized Concrete) ส่วนมากนำไปใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์มากกว่า
- 4) Fibre Rubber ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของเส้นใยที่มีขนาดเส้น ความยาวระหว่าง 8.5-21.5 mm

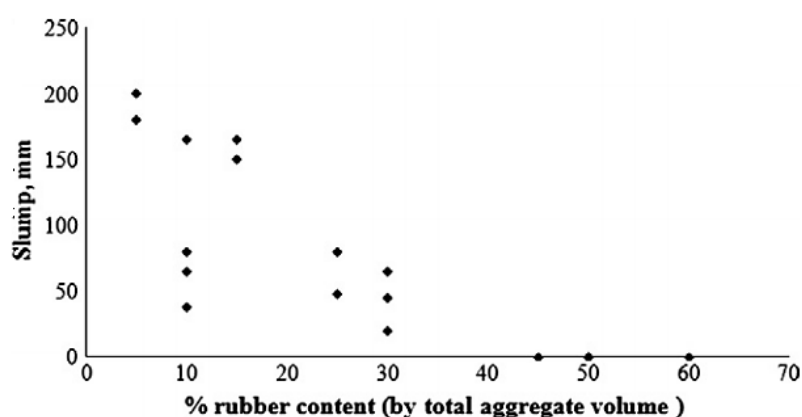


รูปที่ 2.26 การจำแนกชนิดของมวลรวมยาง[32]

2.5.2 การผสม, การเตรียมมวลรวม และ ความสามารถในการเทคอนกรีต

ปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานวิธีการผสมคอนกรีตผสมเม็ดยาง วิธีการที่ดีที่สุดคือการพิจารณางานวิจัยที่ผ่าน ซึ่งปัญหาหลักๆ ที่พบคือเรื่องของการแยกตัวและการเยิ้มที่เพิ่มขึ้นมากกว่าการผสมคอนกรีตปกติ นักวิจัยหลายท่านเห็นตรงกันว่าในการตอนการผสมแห้งของวัสดุควรผสมในช่วงเวลา 1 นาที ถึง 5 นาที ([33][34]) ก่อนที่จะมีการเติมน้ำอย่างสม่ำเสมอและสารลดน้ำ จากนั้นทำการผสมต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 3 ถึง 5 นาที หรือจนเป็นเนื้อเดียวกัน บางงานวิจัยเสนอว่า ในการผสมแห้งระหว่างซีเมนต์กับมวลรวมหยาบ ควรตามด้วย ยาง,ทรายและที่มีสารลดน้ำ 75 % ส่วนที่เหลือ 25% ให้ผสมในช่วง 3 นาทีสุดท้ายของกระบวนการผสม [35]ได้แนะนำว่า ผสมมวลรวมหยาบ, มวลรวมละเอียด และยางปริมาณครึ่งหนึ่ง ด้วยน้ำหนึ่งในสี่ จากนั้นใส่ซีเมนต์และน้ำอีกครั้งหนึ่งของที่เหลือ ผสมกันจากนั้นเติมน้ำส่วนที่เหลือผสมกันเป็นเวลา 3-5 นาที

ในหลายๆ งานวิจัยได้ประเมินความสามารถในการเทของคอนกรีตผสมเม็ดยางโดยการทดสอบค่าความยุบตัว (Slump) ซึ่งค่าการยุบตัวขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดยางและ % การแทนที่ รูปที่ 2.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวกับ % การแทนที่ของเม็ดยาง ([36][37][38])



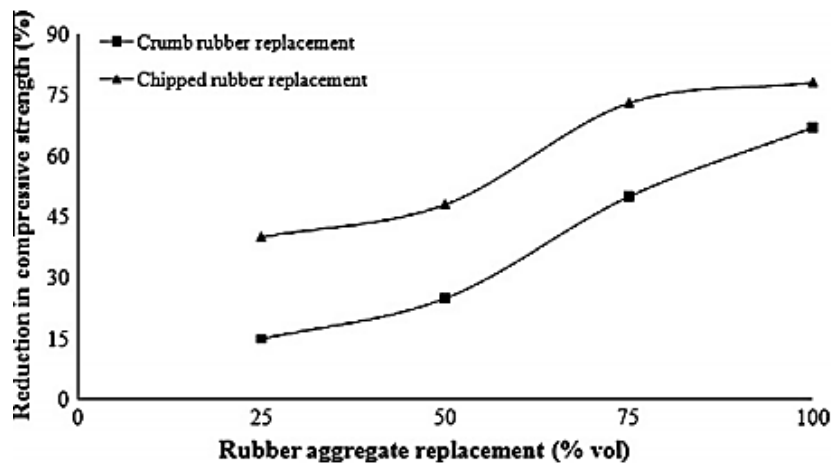
รูปที่ 2.27 ผลของปริมาณเม็ดยางต่อค่าการยุบตัว([36][37][38])

งานวิจัยที่ผ่านมา Khaloo AR และคณะ[39]พบว่า การแทนที่เม็ดยางจน 15% โดยน้ำหนักของมวลรวมหยาบ มีผลกระทบต่อค่าการยุบตัวเล็กน้อยเมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติโดยไม่คำนึงขนาดและรูปร่างของเม็ดยาง การศึกษาอื่นพบว่า การแทนที่เม็ดยาง 40-50% โดยปริมาตรของมวลรวม ทำให้ค่าการยุบตัวไม่มี เมื่อเทียบการค่าการยุบตัวปกติของคอนกรีต (80-180 mm) ขึ้นกับการผสม แต่งานวิจัยของ Khaloo AR ให้ผลที่ตรงข้าม กล่าวคือ การแทนที่เม็ดยางชนิด Crumb Rubber ที่ 15% โดยปริมาตร ซึ่งสอดคล้องกับ Yilmaz A และ Degirmenci N [40] พบว่าการเพิ่มเม็ดยางชนิด Crumb Rubber สูงถึง 40% โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด ยังคงมีความสามารถในการเทได้เมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ และจากงานวิจัยอื่นๆ เมื่อคอนกรีตที่ผสมด้วยเม็ดยางชนิด Crumb Rubber เพียงอย่างเดียว มีความสามารถในการเทสูงกว่าการผสมด้วยเม็ดยางประเภทอื่นๆ ในการแทนที่เม็ดยางในปริมาณสูง ค่าการยุบตัวจะลง เช่น การแทนที่มวลรวมละเอียด 45% โดยปริมาตรด้วยเม็ดยางชนิด Crumb Rubber และการแทนที่มวลรวมหยาบ 43% และ 57% โดยปริมาตรด้วยเม็ดยางชนิด Chipped Rubber [41]

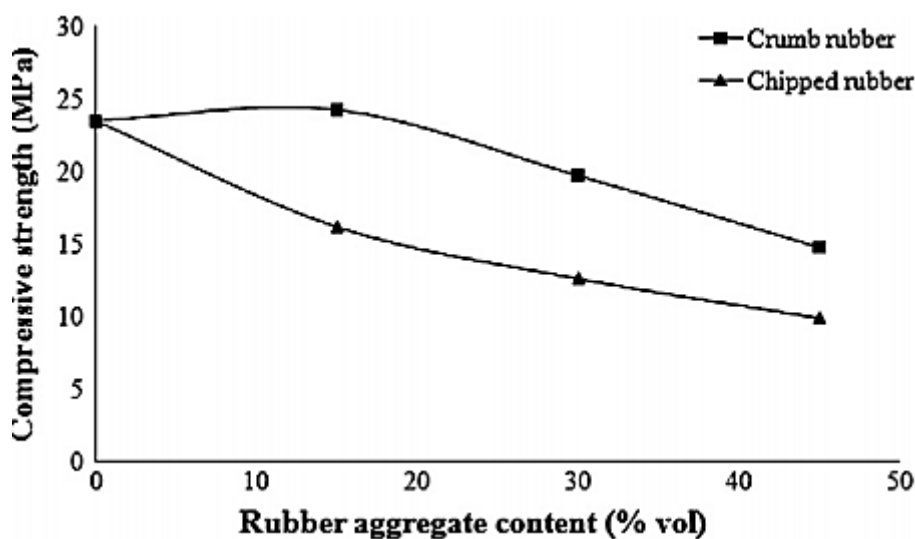
Turatsinze A และ Garros M [42] รายงานผลการศึกษา ปริมาณของสารลดน้ำพิเศษที่ต้องการให้ค่าการยุบตัวอยู่ระหว่าง 630 ± 30 mm ด้วยการเพิ่มปริมาณจาก 3.5 kg/m^3 สำหรับคอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายแบบ (Self-Compacting Concrete) เป็น 9.32 kg/m^3 สำหรับคอนกรีตไหลผสมเม็ดยางไหลเข้าแบบง่ายที่มีเม็ดยาง (4-10 mm) 25% โดยปริมาตร การแทนที่มวลรวม Topcu และ Bilr ระบุว่าชนิดของสารเคมีผสมเพิ่มเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อความสามารถในการเทได้ของ SCRC โดยการไหลที่เพิ่มขึ้นก็มีความเสี่ยงในการแยกตัวที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน

2.5.3 พฤติกรรมและคุณสมบัติเชิงกล

ผลของการใช้เม็ดยางรถยนต์เก่าแทนที่มวลรวมบางส่วนต่อกำลังแรงอัด, แรงดึงและแรงดัด ในหลายๆงานวิจัยที่ผ่านมาให้ผลไปทางเดียวกันคือ กำลังรับแรงอัด, แรงดึง และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น Static ของคอนกรีตผสมเม็ดยางลดลงตามปริมาณการแทนที่ของเม็ดยางที่เพิ่มขึ้น เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงคุณสมบัติเชิงกลที่ต่ำลง นักวิจัยหลายคนแนะนำให้ปริมาณเม็ดยางไม่ควรเกินค่าระหว่าง 20%, 25% และสูงสุด 30% โดยปริมาตรของมวลรวมทั้งหมด และการใช้เม็ดยางชนิด Chips จะส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลลดลงต่ำกว่าแบบใช้เม็ดยางชนิด Crump ดังรูปที่แสดงผลของการแทนที่ของเม็ดยางต่อการลดลงของกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัดที่ 28 วันของคอนกรีตผสมเม็ดยางชนิด Crump และ Chips พิจารณาดังรูปที่ 2.28 จะสังเกตเห็นว่า คอนกรีตที่ผสมด้วยเม็ดยางชนิด Crump กำลังจะลดลงหลังจากผสมเม็ดยางเกิน 15% โดยน้ำหนัก สำหรับคอนกรีตที่ผสมเม็ดยางชนิด Chips ค่ากำลังจะลดลงตั้งแต่ผสมเม็ดยางเกิน 0% โดยน้ำหนัก



(a) % การแทนที่ของเม็ดยางต่อ % การลดกำลังรับแรงอัด [43]



(b) % การแทนที่ของเม็ดยางต่อกำลังรับแรงอัด [29]

รูปที่ 2.28 ผลของเม็ดยางต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเม็ดยาง

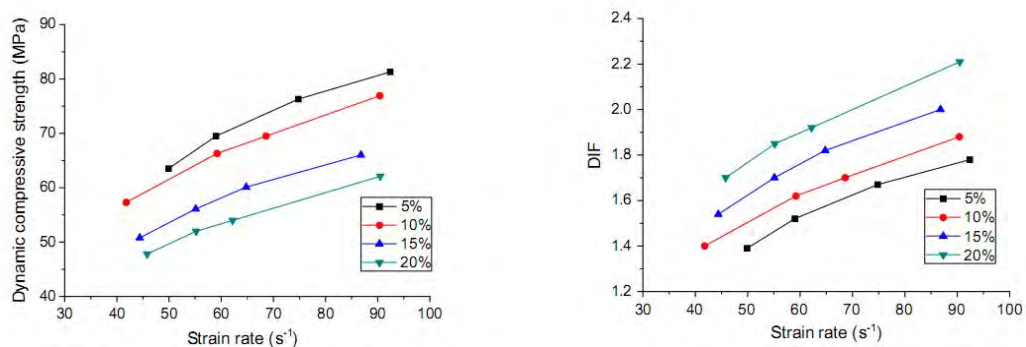
สมยศ และ ปิติ [44] ศึกษาถึงคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาปานกลาง ที่ได้จากการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเม็ดยาง ที่ย่อยจากเศษยางรถยนต์เก่า โดยขนาดของเม็ดยางที่นำมาใช้ มี 2 ขนาด คือ เบอร์ 6 และ เบอร์ 20 ที่สัดส่วนผสมไม่เกินร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเม็ดยาง พบว่าคอนกรีตที่ผสมเม็ดยางในทุกสัดส่วนมีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา เหตุที่ทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงทั้งนี้ขึ้นกับปัจจัยที่สำคัญ คือ อนุภาคของเม็ดยางทั้ง 2 ขนาด ที่มีลักษณะเหนียวและยืดหยุ่นเมื่อนำไปแทนที่อนุภาคของเม็ดทรายซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่าทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงตามปริมาณเม็ดยางที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาถึงความแน่นของคอนกรีตก็สอดคล้องกันกับค่ากำลังอัดที่ลดลงเช่นกัน ค่ากำลังดัดของคอนกรีตในรูปค่าโมดูลัสแตกร้าว (Modulus of Rupture) พบว่า กำลังดัดซึ่งอยู่ในรูปค่าโมดูลัสแตกร้าวโดยทำการเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตธรรมดากับคอนกรีตผสมเม็ดยางพบว่าคอนกรีตผสมเม็ดยางให้ค่ากำลังรับแรงดัดต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา เช่นเดียวกับกำลังรับแรงอัด พบว่า ค่าโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตผสมเม็ดยางมีแนวโน้ม

ลดลงตามปริมาณสัดส่วนการแทนที่ของเม็ดยางที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับพฤติกรรมการรับแรงอัดและค่าความหนาแน่นของคอนกรีต

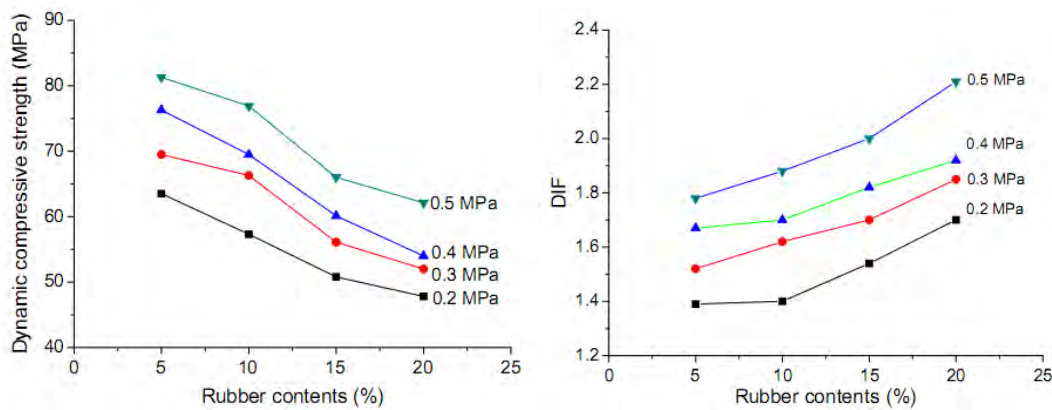
2.5.4 การต้านทานแรงกระแทกและความเหนียว

ถึงแม้ว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตผสมเม็ดยางลดลงตามปริมาณการเพิ่มของเม็ดยาง[36] แต่อัตราความเครียดนั้นเพิ่มขึ้นอย่างมากตามปริมาณเม็ดยาง(ชนิด Crumb และ Chips) ค่าความแกร่งของคอนกรีตผสมเม็ดยางเพิ่มอย่างต่อเนื่องตามปริมาณการแทนที่ของเม็ดยางที่ใส่เข้าไป จนถึง 25% ของการแทนที่ โดยที่ค่ากำลังจะลดลง [39]Teha MMR[43] สังเกตผลจากการทดสอบว่า ค่าFracture Toughness ของคอนกรีตผสมเม็ดยางเพิ่มขึ้นตามปริมาณเม็ดยาง การแทนที่ด้วยเม็ดยาง 75%-โดยปริมาตร ค่าความเหนียวแตกหักเพิ่มขึ้น 350% เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา (เพิ่มขึ้น 132% เมื่อเปรียบเทียบกับ ตัวอย่างที่แทนที่ด้วยเม็ดยาง 25%) การผสมเม็ดยาง Chips สามารถเพิ่มการต้านทานแรงกระแทกได้ แต่ความกว้างของรอยร้าวและการขยายตัวจะมีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไป [29] พฤติกรรมนี้เกิดเนื่องจากอัตราความเครียดที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มค่าการดูดซับพลังงานด้วย การแทนที่ 100% ของเม็ดยางชนิด Shred การดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้น 187% [45] โดยทั่วไปค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นวัดโดยใช้เครื่องมือ Ultrasonic Pulse Meter ลดลงตามการเพิ่มปริมาณการแทนที่ของเม็ดยางและไม่คำนึงถึงรูปทรงของมวลรวม ([46]-[48]) Guoquiang และ คณะ[49]พบว่า การแทนที่มวลรวมหยาบด้วยเม็ดยางชนิด Fiber 15% โดยปริมาตร ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดและค่าความแข็งแรง (Stiffness) ลดลงไป 11.2% และ 7.4% ตามลำดับเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา

จากการศึกษาของ Feng Liu และคณะ[50]ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมทางการรับแรงกระแทก โดยทำการทดสอบคอนกรีตผสมเม็ดเม็ดยางที่อัตราส่วน 5%, 10%,15% และ 20% โดยการแทนที่ทราย โดยขนาดของเม็ดยางมีขนาด 0.178 mm, 1.11mm,และ 2 mm. ด้วยการทดสอบโดยเครื่อง Split-Hopkinson Pressure Bar (SHPB) โดยผลการทดสอบ สามารถสรุปได้ดังนี้ จากรูปที่ 2.29 ที่ปริมาณเม็ดยางคงที่ กำลังรับแรงอัดกระแทก และ Dynamics-increasing Factor (DIF) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราความเครียดที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.29 ผลของอัตราความเครียดต่อกำลังรับแรงอัดกระแทก และ Dynamics-increasing Factor (DIF)

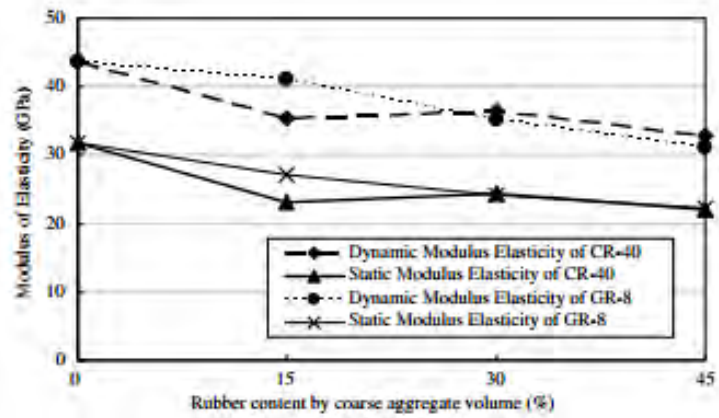


รูปที่ 2.30 ผลของปริมาณเม็ดยางต่อกำลังรับแรงอัดกระแทก และ DIF ที่อัตราความเค้นต่างๆ

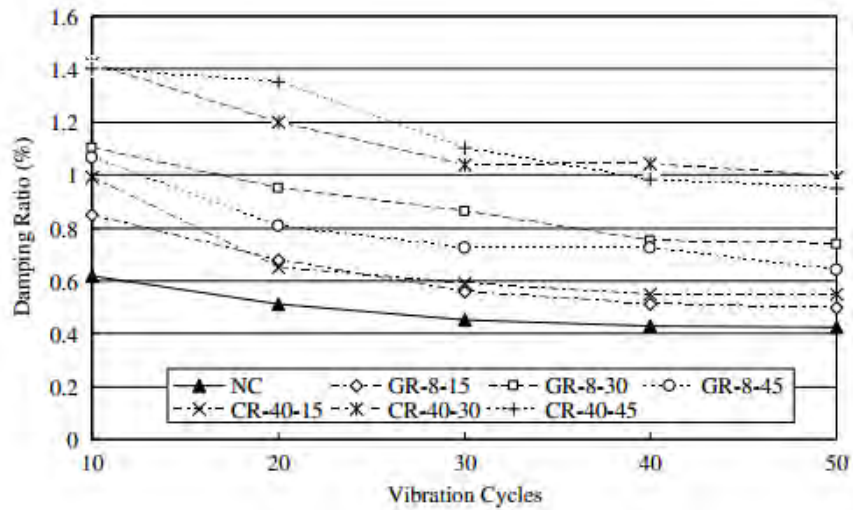
จากรูปที่ 2.30 พบว่า ปริมาณเม็ดยางที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดกระแทกแนวโน้มลดลง และแต่ DIF มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากการศึกษาของ Topcu [29] ได้ทำการทดสอบการปล่อยน้ำหนักตกกระแทกกับคอนกรีตผสมเม็ดยาง เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำคอนกรีตผสมเม็ดยางมาใช้ในการทำเป็น Barriers ของทางหลวง พบว่า การเพิ่มเม็ดยางเข้าไปในคอนกรีตปกติทำให้การต้านทานการกระแทกเพิ่มขึ้น เนื่องจากความสามารถในดูดซับพลังงานของเม็ดยางที่ใส่เข้าไป นอกจากนี้ยังมีการศึกษาถึงขนาดของเม็ดยางที่มีผลต่อกำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเม็ดยาง Feng Liu [50], Topcu [29] และ Zheng [41] พบว่า กำลังรับแรงกระแทกเพิ่มขึ้นตามขนาดของเม็ดยางที่เพิ่มขึ้น

งานวิจัยของ Zheng และคณะ [41] ได้ศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตผสมเม็ดยางภายใต้แรงสั่นสะเทือนเพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติของทางด้านการลดการสั่น โดยคำนวณหา Damping Ratio ของคานคอนกรีตผสมเม็ดยางที่ปริมาณแตกต่างกันพบว่า ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น Dynamic ของคอนกรีตผสมเม็ดยางจะมีค่าสูงกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่น Static และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น Dynamic จะลดลงตามปริมาณเม็ดยางที่เพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.31 และผลจากการศึกษา Damping Ratio จะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบการสั่น และ โดยค่า Damping Ratio จะลดลงจนเริ่มคงที่ที่รอบการสั่นมากกว่า 30 โดยค่า Damping Ratio ของคอนกรีตผสมเม็ดยางจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเม็ดยางที่เพิ่ม และมีค่ามากกว่า คอนกรีตปกติ แสดงดังรูปที่ 2.32

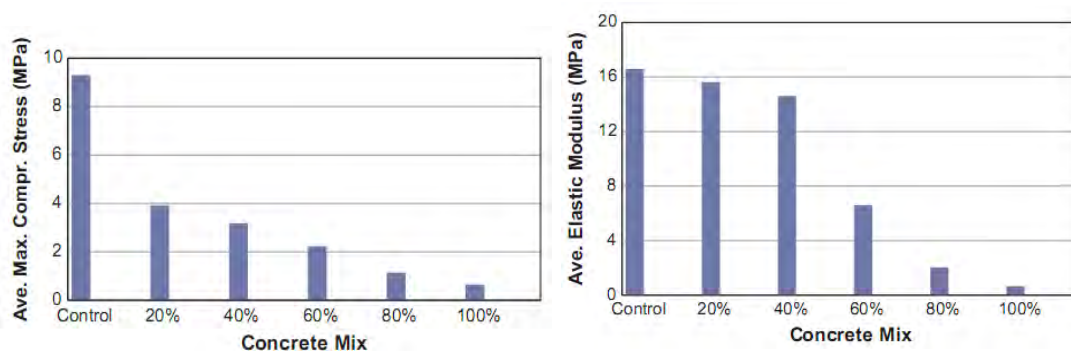
งานวิจัยของ Atahan[45] ได้ศึกษาคุณสมบัติทางด้าน Static และ Dynamic ของคอนกรีตผสมเม็ดยางภายใต้การทดสอบแบบแรงกด และแบบปล่อยน้ำหนักตกกระแทก สามารถสรุปผลได้ดังนี้ สำหรับผลทางด้าน Static นั้น กำลังรับแรงกดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะลดลงตามปริมาณเม็ดยางที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.31 ผลของปริมาณเม็ดยางต่อโมดูลัสยืดหยุ่น

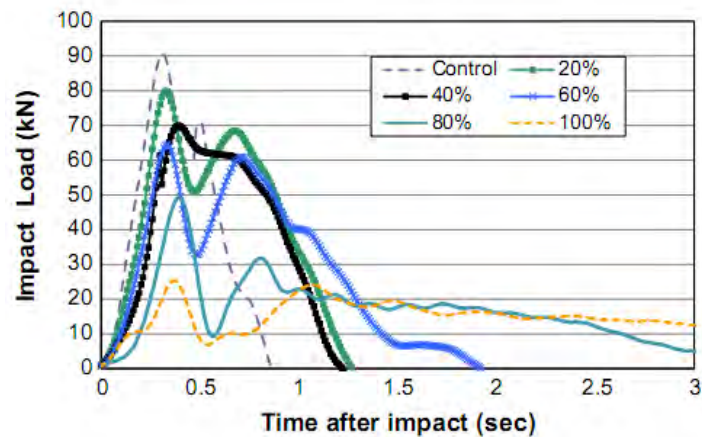


รูปที่ 2.32 ผลของจำนวนรอบการสั่นต่อ Damping Ratio

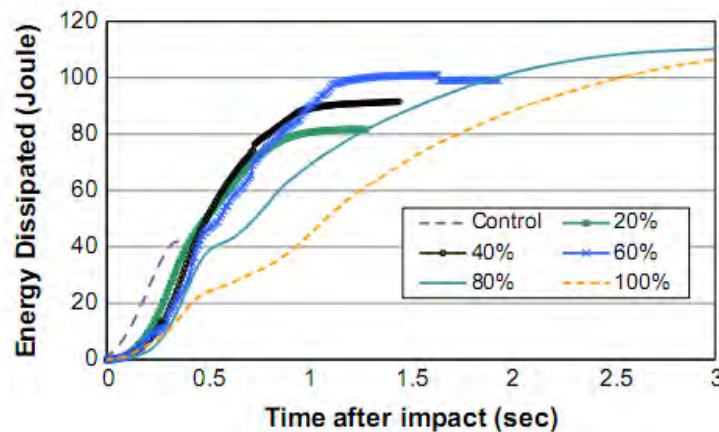


รูปที่ 2.33 ผลปริมาณเม็ดยางต่อกำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ภายใต้การทดสอบแบบ Static

ผลการทดสอบทางด้าน Dynamic โดยการปล่อยน้ำหนักกระแทกกับคอนกรีตตัวอย่าง พบว่า กำลังรับแรงอัดสูงสุดจะลดลงตามปริมาณเม็ดยางที่เพิ่มขึ้น ในระหว่างการกระแทก เวลาที่ใช้จะมีระยะเวลาเพิ่มขึ้นตามปริมาณเม็ดยางที่เพิ่มขึ้น สิ่งนี้ออกได้ถึงการดูดซับพลังงานที่เพิ่มมากขึ้นของคอนกรีตผสมเม็ดยางที่ปริมาณสูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.34 จากผลการทดสอบที่ได้สอดคล้องกับการทดสอบของ Topcu et al. (1997) ที่ว่าคอนกรีตผสมเม็ดยางสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็น Barriers ของถนนทางหลวงได้



(a)

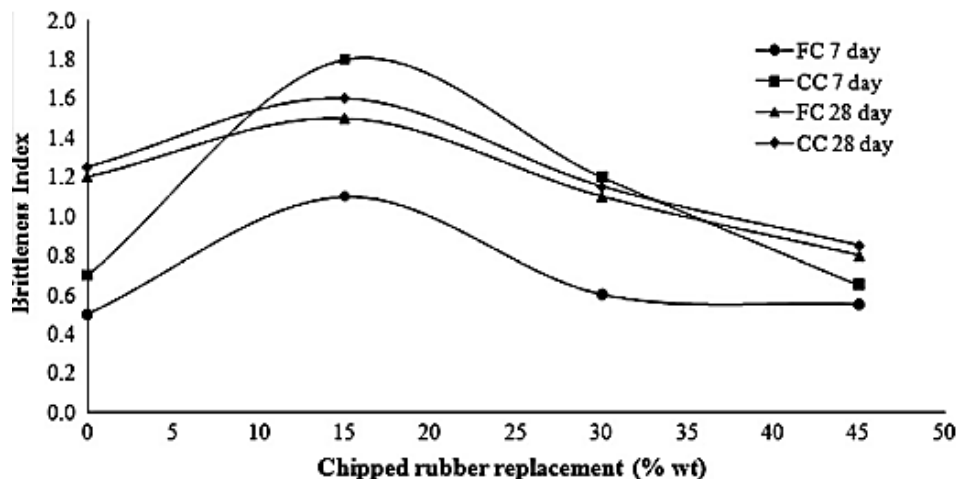


(b)

รูปที่ 2.34 (a) แรงกระแทกต่อช่วงเวลา (b) พลังงานที่ถูกดูดซับต่อเวลา

คอนกรีตผสมเม็ดยางมีค่าความเหนียว (Ductility) มากกว่าคอนกรีตธรรมดา เนื่องจากอัตราความเครียดที่สูงกว่ายอมให้เกิดการเสียรูปพลาสติกที่มากกว่าก่อนที่จะถึงจุดคราก จากการศึกษาของ Zheng และคณะ[51] พบว่าเนื่องจากประสิทธิภาพความเหนียวของคอนกรีตผสมเม็ดยางที่สูงกว่าคอนกรีตธรรมดา ทำให้ค่า Brittleness Index (BI) ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาเช่นกัน และค่า BI ลดลงตาม % ของเม็ดยางที่ผสมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตซึ่งเม็ดยางชนิด Chips จะลดลงมากกว่าชนิด Crumb รูปที่ 2.35 แสดงผลของ % การแทนที่มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบของเม็ดยาง(โดยน้ำหนักของมวลรวม) พบว่า ที่ 15% การแทนที่จะให้ค่า BI สูงที่สุด

ในการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเม็ดยางทางด้าน Static และ Dynamic โดยใช้เม็ดยางชนิด Fiber แบบสั้น (0.85 – 2.15 cm) ที่ 5% โดยปริมาตรการแทนที่ของมวลรวมทั้งหมด พบว่า กำลังรับแรงอัดและค่า Stiffness ลดลงตามปริมาณเม็ดยางที่เพิ่มขึ้น แต่การดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้น (ระหว่าง 23% - 30% เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไป) และการขยายตัวของรอยร้าวลดลง [52] โดยการผลการศึกษาข้างต้นได้ถูกยืนยันด้วยการศึกษาของ Tung-ChaiL [53]



รูปที่ 2.35 ผลของปริมาณการแทนที่เม็ดยาง, ชนิดของยางและการบ่มต่อค่า BI [29]

2.6 กระสุนปืนพก

ชนิดของกระสุนปืนอาจแบ่งได้มากมายหลายแบบ ไม่ว่าจะเป็นตามขนาด ความเร็วหรือลักษณะการใช้งานของกระสุน ในที่นี้จะขอกล่าวถึงกระสุนปืนที่ใช้ในการทดสอบ คือ กระสุนขนาด 9 มม. และขนาด 0.45 ACP (11 มม.)

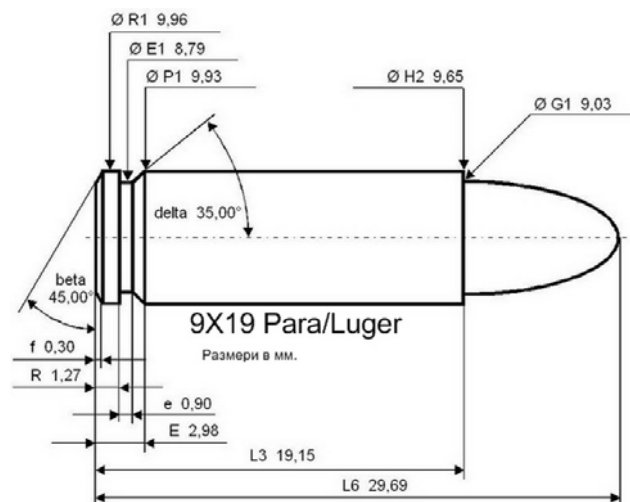
2.6.1 กระสุนปืน 9 x 19 มม. Parabellum [54]

กระสุน 9x19 มม. ถูกออกแบบครั้งแรกโดย จอร์จ ลูเกอร์ (Georg Luger) ผู้ออกแบบปืนพกชนิด Luger P08 ที่มีแบบมาจากปืนพกบอร์ชาร์ด และนำเสนอปืนชนิดนี้แก่กองทัพอเมริกา แต่ไม่ได้รับการพิจารณา เนื่องจากการผลิตยุ่งยาก ซ้ำ เพราะต้องใช้ในการขัดแต่งชิ้นส่วนต่างๆด้วยมือ จากนั้น ปี 1908 Luger จึงนำไปเสนอแก่กองทัพเยอรมันและถูกซื้อไป เพื่อผลิตเข้าประจำการ โดยในตอนต้นผลิตกระสุนในขนาด 7.65 × 21 mm ต่อมากองทัพเยอรมันได้ให้ จอร์จ ลูเกอร์ ออกแบบกระสุนชนิดใหม่เพื่อให้สามารถใช้กับปืนกลมือรุ่นใหม่และสามารถใช้ร่วมกับปืนพกได้ในขนาดเดียวกัน ซึ่งกระสุนที่ Luger ออกแบบขึ้นใหม่ มีขนาดหน้าตัด 9 มม.(.355 นิ้ว) มีความยาวปลอกกระสุน 19 มม. เป็นกระสุนขนาด 9 มม. เข้าประจำการกองทัพเยอรมัน โดยปรับ ปืน P 08 จากขนาด

กระสุน 7.65 Luger เป็น 9 มม. ซึ่งใช้ร่วมกับปืนกลมือ MP 40 ซึ่งเป็นกลมือหลักในกองทัพเยอรมัน และกระสุนขนาด 9 มม. ใหม่นี้ ได้ถูกเรียกชื่อว่า 9 มม. พาราเบลลัม (Parabellum) เพราะใช้กับปืน P 08 และผลิตที่โรงงานนี้ และมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า 9 มม. ลูเกอร์ เพื่อเป็นเกียรติแก่ G.Luger

กระสุน 9 มม. Parabellum ได้ถูกใช้ในสงครามโลกครั้งที่สอง โดยกองทัพเยอรมันใช้กับปืนพก Parabellum P08 และ Walther P38 และในปืนกลมือ Schmeisser MP40 และเป็นกระสุนขนาดเดียวกับที่ฝ่ายตรงข้ามใช้ในการรบเช่นกันคือ อังกฤษก็ใช้กระสุน 9x19 มม. ในปืนกลมือ Sten ต่อมาหลังสงครามโลกครั้งที่สอง กระสุนปืนขนาดนี้ได้รับความนิยมมากขึ้นเรื่อยๆ ในยุโรป จนกระทั่งเข้าสู่สหรัฐอเมริกา ซึ่งกระสุนยอดนิยมขณะนั้นคือ 0.45 ACP ในท้ายที่สุดปืนพกสมัยใหม่ที่ผลิตขึ้นเพื่อรองรับกระสุนขนาด 9x19 มม. มากขึ้นเรื่อยๆ หลายประเทศก็ใช้กระสุนขนาดนี้ในปืนพกประจำการกองทัพ จนกระทั่งในที่สุดกองทัพสหรัฐฯ ก็รับเข้าประจำการ ชาติพันธมิตรนาโต้ ตามสนธิสัญญาป้องกันแอตแลนติกเหนือ ทุกชาติใช้กระสุนชนิดนี้ประจำการในปืนพกทหาร ดังนั้นกระสุน 9x19 มม. จึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า 9 mm. NATO

กระสุน 9x19 มม. Parabellum มีความจุขนาด 0.86 มิลลิกรัม (13.3 grains) มีขนาดของกระสุนดังรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 ขนาดกระสุนมาตรฐาน 9x19 มม. Parabellum

ตามที่หน่วยงาน Commission Internationale Permanente Pour L'Epreuve Des Armes A Feu Portatives (C.I.P.) ได้กำหนดมาตรฐานของสำหรับกระสุน 9x19 มม. Parabellum ได้กำหนดค่าความดันไว้มากที่สุดไม่เกิน 235 MPa (34,100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ในประเทศที่มีการควบคุม C.I.P. จะมีการทดสอบการยิงที่ 130% ของค่าที่กำหนดไว้เพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้ นอกจากนี้ องค์การควบคุมมาตรฐานปืนกับกระสุน (SAAMI Sporting Arms and Ammunition Mnf. Institute : SAAMI) กำหนดขีดจำกัดความดันของกระสุน 9x19 มม. Parabellum ไว้ที่ 241.32 MPa (35,001 psi) และกระสุน 9x19 มม. Parabellum +P ไว้ 265.45 MPa (38,500 psi)

9x19mm Parabelum / 9mm. Luger เป็นกระสุนที่ถูกออกแบบเพื่อให้มีอำนาจทะลุทะลวงสูง วิธีกระสุนสามารถยิงได้ไกล กระสุนทางทหารคือ 9x19 mm +P+ เป็นกระสุนระดับ Super Sonic คือ ความเร็วเหนือเสียง แต่หากใช้หัวกระสุนแบบ FMJ (Full Metal Jacket) ก็ยังไม่สามารถยิงทะลุเสื้อเกาะอ่อนได้ ต้องเปลี่ยนหัวกระสุนเป็นแบบ Steel Teflon Jacket คือ กระสุนหัวเหล็กเคลือบสาร Teflon ทำให้สามารถพองเจาะเกาะอ่อนได้ ตารางที่ 2.2 แสดงถึงประสิทธิภาพของกระสุนปืน 9x19 มม. Parabellum แบบต่างๆ ไป ที่มีน้ำหนักหัวกระสุน ตั้งแต่ 115-147 เกรน (7.5-9.5 กรัม)

ตารางที่ 2.2 ประสิทธิภาพของกระสุนปืน 9x19 มม. Parabellum

Manufacturer	Load	Mass	Velocity	Energy	Expansion	Penetration	PC	TSC
Cor-Bon	JHP	7.5 g (115 gr)	410 m/s	630 J	14 mm	360 mm)	56 mL	631 mL
Speer	Gold Dot JHP	8.0 g (124 gr)	400 m/s	640 J	18 mm	337 mm	84 mL	616 mL
Federal	HydraShok JHP +P+	8.0 g (124 gr)	370 m/s	560 J	17 mm	340 mm	77 mL	734 mL
Remington	Golden Saber JHP	9.5 g (147 gr)	300 m/s	430 J	16 mm	370 mm	72 mL	544
Winchester	Silvertip	7.5 g (115 gr)	373 m/s	519 J	18 mm	200 mm	54 mL	274 mL
Winchester	WWB JHP	9.5 g (147 gr)	300 m/s	430 J	15 mm	400 mm	69 mL	321
Winchester	FMJ	7.5 g (115 gr)	352 m/s	462 J	9.1 mm (0.36 in)	620 mm	41 mL	174 mL
Doubletap	JFN+P trail defense	9.5 g (147 gr)	346 m/s	570 J	9.1 mm (0.36 in)	1,000 mm	NA	NA

Expansion: ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ขยายตัว (จากการทดสอบยิงวัสดุจำลองเนื้อเยื่อ : Ballistic Gelatin).

Penetration: ระยะจม (Ballistic Gelatin).

PC: ปริมาตรโพรงถาวร (Ballistic Gelatin, FBI Method).

TSC: ปริมาตรโพรงไม่ถาวร(Ballistic Gelatin).

นอกจากข้อกำหนดมาตรฐานของ C.I.P หรือ SAAMI ของกระสุน 9x19 มม. Parabellum แล้ว ยังมีความแตกต่างที่เกิดจากการพัฒนาเพื่อให้มีประสิทธิภาพที่เหมาะสมกับการใช้อีกเช่น กระสุน 9×19 mm +P ในช่วงปี 1990 มีความพยายามให้การปรับปรุงความดันของกระสุนขนาด 9 มม. ให้มีความดันที่สูงขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ โดยจะใช้สัญลักษณ์ต่อท้าย เช่น +P หรือในกรณีที่มีความดันสูงมากๆ จะใช้สัญลักษณ์ +P+

กระสุน 9×19 mm นาโต ได้ถูกผลิตและใช้กันอย่างแพร่หลายมากกว่า 70 ประเทศทั่วโลกและกลายเป็นมาตรฐานเส้นผ่านศูนย์กลางสำหรับ นาโต และทหารอื่นทั่วโลก ผู้ใช้ของนาโตจะเรียกกระสุนชนิดนี้อย่างเป็นทางการว่า "9 mm NATO" โดยมีมาตรฐานที่นาโตได้กำหนดขึ้น ความดันสภาวะสูงสุดใช้งานของ 9 มม.นาโต อยู่ที่ 252

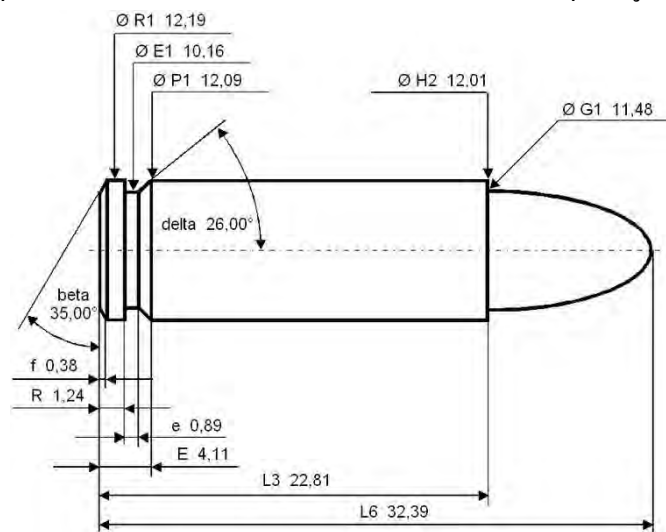
MPa. (36,500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) สำหรับมาตรฐานของ CIP ความดันสถานะสูงสุดใช้งานของ 9 มม.ลูเกอร์ จะอยู่ที่ 235 MPa. (34,100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)

2.6.2 กระสุน .45 ACP [55]

กระสุน 0.45 (11.43×23mm) หรือที่เรียกอย่างเป็นทางการว่า .45 ออโต้ โดย C.I.P. ถูกออกแบบโดย จอร์น บราว นิง (John Browning) ในปี 1904 กระสุนนี้นำไปใช้ปืนพกต้นแบบ .45 กึ่งอัตโนมัติ และได้ถูกนำมาใช้กับปืน M1911 ในกองทัพสหรัฐฯ ในปี 1911

ในสมัยก่อนกองทัพสหรัฐรบกับชนเผ่าโมโร ซึ่งทหารอเมริกันที่เป็นเจ้าอาณานิคมฟิลิปปินส์ ปืนลูกโม .38 ลอน โคลท์ ของทหารอเมริกัน ไม่สามารถทำให้กลุ่มกบฏโมโร หยุดการเข้าซาร์จ บุกรุกเข้ามาพันคอทหารอเมริกัน ได้ทั้งที่กลุ่มกบฏยิงด้วย .38 เข้าตามตัว จากนั้นกองทัพสหรัฐจึงได้มีการสั่งให้จัดหาปืนพกแบบใหม่ขึ้น กองทัพสหรัฐจึงได้ตัดสินใจใช้กระสุน .45 ACP ที่จอร์น บราว นิง ได้ออกแบบไว้ โดยทางกองทัพสหรัฐ ได้ทำ การทดสอบกระสุนชนิดนี้ด้วยการยิงสัตว์ที่มีชีวิตและศพมนุษย์ ผลการทดสอบเป็นที่น่าพอใจ จากนั้นในปี 1906 ทางกองทัพสหรัฐ จึงประกาศหาผู้ผลิตปืนพก กึ่งอัตโนมัติ เพื่อนำมาใช้ในงานกองทัพ มีบริษัทหลายบริษัทได้ ออกแบบปืนมาเพื่อใช้กับกระสุนชนิดนี้ ท้ายที่สุดแล้วมีเพียง 3 บริษัท คือ 1) Colt 2) Deutsche Waffen und Munitionsfabriken (DWM) 3) Savage Arms Company หลังจากการทดสอบครั้งที่หนึ่ง บริษัท DWM ได้ถอนตัว เหลือเพียง 2 บริษัทคือ Colt กับ Savage ช่วงการทดสอบภาคสนาม ยังดำเนินการต่อไปจาก 1907 ถึง 1911 ปืน ของ Savage และ Colt ยังคงผ่านการทดสอบในแบบปืนของตัวเองทั้งคู่ในรายการแรก ตลอดไปจนถึงสุดท้าย ก่อนให้การยอมรับ สุดท้ายแล้วช่วงก่อนสิ้นปี 1910 สนามตัดสินความสำเร็จตกเป็นของบริษัท โคลท์ ในการ ทดสอบการยิงทรหด 6 พันนัด ในช่วงเวลา 2 วัน ปืนโคลท์ยังผ่านไปได้ตลอดทั้งการทดสอบ ไม่มีติดขัดเลยแม้ นัดเดียว แต่มีการเปลี่ยนชิ้นส่วนเช่น คันค้ำสไลด์ เซฟนิว โดงเตง. ส่วนปืนซาเวจ มีอาการติดขัดในระหว่างการ ยิง ดังนั้นปืนของบริษัท Colt จึงมีความน่าเชื่อถือมากที่สุด ปี 1911 บริษัท Colt ได้รับการเชิ้อนุมัติจากรัฐบาล. ปืนรุ่น M1911 ถูกใช้งานตลอดทั้งก่อน ระหว่าง และ หลังสงครามโลกครั้งที่ 1 ต่อเนื่องจนถึงการปรับเปลี่ยนครั้งที่ 2 ในปี 1924 จนมาสงครามโลกครั้งที่ 2

กระสุน .45 ACP มีความจุขนาด 1.62 มิลลิกรัม (25 grains) มีขนาดของกระสุนดังรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.37 ขนาดกระสุนมาตรฐาน .45 ACP

ตามที่หน่วยงาน C.I.P ได้กำหนดมาตรฐานของสำหรับกระสุน .45 ACP ได้กำหนดค่าความดันไว้มากที่สุดไม่เกิน 130 MPa (19,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ในประเทศที่มีการควบคุม C.I.P จะมีการทดสอบการยิงที่ 130% ของค่าที่กำหนดไว้เพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้ นอกจากนี้ องค์การควบคุมมาตรฐานปืนกับกระสุน (SAAMI) กำหนดขีดจำกัดความดันของกระสุน .45 ACP ไว้ที่ 140 MPa (21,000 psi) และกระสุน .45 ACP +P ไว้ 160 MPa (23,000 psi)

กระสุนขนาด .45 ACP ซึ่งมีแรงดันในปลอกกระสุนน้อย (เมื่อเปรียบเทียบกับแรงดันของกระสุนปืนขนาด 9 mm. Parabellum) ทำให้การยิงปืนด้วยกระสุนขนาดนี้มีแรงถีบ (Recoil) ไม่รุนแรงมากนักและสามารถควบคุมปืนได้อย่างไม่ยาก กระสุน .45ACP ถูกออกแบบเพื่อให้เป็นกระสุนแบบ DUM-DUM คือกระสุนที่มีอำนาจหยุดยั้งสูง กล่าวคือ เมื่อกระสุนถูกยิงออกไปคนโดนต้องหยุดเพราะมีแรงปะทะสูง เพื่อให้เป้าหมายหมดสภาพเมื่อโดนเพียงแก่นัดเดียว กระสุนชนิดนี้มีความเร็วต่ำกว่าเสียงทุกแบบ จึงไม่เหมาะที่จะนำมาทำเป็นกระสุนเจาะเกราะ และที่สำคัญหน้าตัดกระสุนใหญ่เกินไป เมื่อเทียบกับแรงดันของดินขับแล้วไม่สามารถนำมาทำเป็นกระสุนเจาะเกราะได้ ตารางที่ 2.3 แสดงถึงประสิทธิภาพของกระสุนปืน .45 ACP แบบต่างๆไป

ตารางที่ 2.3 ประสิทธิภาพของกระสุนปืน .45 ACP

Manufacturer	Load	Mass	Velocity	Energy	Expansion	Penetration	PC	TSC
Federal	HydraShok JHP	15 g (230 gr)	260 m/s	500 J	20 mm	300 mm	93.9 mL	465 mL
Remington	Golden Saber JHP	15 g (230 gr)	267 m/s	530 J	19 mm	360 mm	103.6 mL	416 mL
Cor-Bon	JHP	12 g (185 gr)	350 m/s	738 J	18	290 mm	71.3 mL	469 mL
Winchester	Silvertip JHP	12 g (185 gr)	300 m/s	557 J	20	300 mm	96.4 mL	495 mL
Winchester	Ranger SXT	15 g (230 gr)	270 m/s	561 J	20 mm	330 mm	101.8 mL	416 mL
Remington	FMJ	15 g (230 gr)	255 m/s	483 J	11 mm	690 mm	70.3 mL	150 mL

Expansion: ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ขยายตัว (จากการทดสอบยิงวัสดุจำลองเนื้อเยื่อ : Ballistic Gelatin).

Penetration: ระยะซึม (Ballistic Gelatin).

PC: ปริมาตรโพรงถาวร (Ballistic Gelatin, FBI Method).

TSC: ปริมาตรโพรงไม่ถาวร(Ballistic Gelatin).

2.7 มาตรฐานการกันกระสุน

เนื่องจากความหลากหลายของกระสุนที่ได้ผลิตออกมาใช้งานการราชการและงานด้านความปลอดภัย ระดับความรุนแรงของกระสุนแต่ละประเภทมีอำนาจทำลายล้างแตกต่างกัน ดังนั้นหน่วยงานที่กำหนดมาตรฐานการป้องกันกระสุนมีหลายหน่วยงาน เช่น มาตรฐานของ NIJ (U.S. National Institute of Justice), มาตรฐาน U.S. PPAA เป็นต้น แต่ที่นิยมใช้กัน มาตรฐานของ NIJ เป็นมาตรฐานที่ใช้กันอย่างกว้างขวางที่สุด ทั้งในสหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย เอเชีย ตะวันออกกลาง และประเทศในยุโรปบางประเทศ เช่น ฟินแลนด์ และอังกฤษ เป็นต้น NIJ กำหนดระดับของ Bulletproof vest ไว้ 6 ระดับ ได้แก่

ระดับ 1

Type 1 (ชนิด 1) คือ เสื้อที่สามารถป้องกันกระสุนในขนาด .22 LR ที่มีหัวกระสุนหนัก 40 เกรนและมีความเร็วไม่เกิน 329 m/s (1080 ft/s $\pm$ 30 ft/s) และกระสุนขนาด .380ACP ที่มีหัวกระสุนหนัก 95 เกรน และมีความเร็วไม่เกิน 322 m/s (1055 ft/s $\pm$ 30 ft/s) หรือกระสุนในขนาด .38 RNL ที่มีหัวกระสุนหนัก 158 เกรนและความเร็วไม่เกิน 850 ft/s

ระดับ 2

Type 2A (ชนิด 2A) คือ เสื้อที่สามารถป้องกันกระสุนในขนาด 9 มม. พาราเบลลัม แบบ FMJ ที่มีหัวกระสุนหนัก 124 เกรนและมีความเร็วไม่เกิน 1,090 ft/s และกระสุนขนาด .40 S&W แบบ FMJ ที่มีหัวกระสุนหนัก 180เกรนและมีความเร็วไม่เกิน 1,025 ft/s รวมไปถึงป้องกันกระสุนในระดับ 1

ระดับ 3

Type 2 (ชนิด 2) คือ เสื้อที่สามารถป้องกันกระสุนในขนาด 9 มม. พาราฯ แบบ FMJ ที่มีหัวกระสุนหนัก 124 เกรนและมีความเร็วไม่เกิน 1,175 ft/s และกระสุนในขนาด .357 แม็กนัม แบบ Jacketed Soft Point

(JSP) ที่มีหัวกระสุนหนัก 158 เกรนและมีความเร็วไม่เกิน 1,400 ft/s รวมไปถึงป้องกันกระสุนในระดับ 1 และ 2

ระดับ 4

Type 3A (ชนิด 3A) คือ เสื้อที่สามารถป้องกันกระสุนขนาด 9 มม. พาราฯ แบบ FMJ ที่มีหัวกระสุนหนัก 124 เกรนและมีความเร็วไม่เกิน 1,400 ft/s และกระสุนขนาด .44 แม็กนั่ม แบบ SJHP ที่มีหัวกระสุนหนัก 240 เกรนและมีความเร็วไม่เกิน 1,400 ft/s รวมไปถึงป้องกันกระสุนในระดับ 1, 2 และ 3

ระดับ 5

Type 3 (ชนิด 3) คือ เสื้อที่สามารถป้องกันกระสุนจากปืนเล็กยาวในขนาด 7.62 มม. แบบ FMJ หรือแบบ M 80 ของกองทัพอเมริกาที่มีหัวกระสุนหนัก 148 เกรนและมีความเร็วไม่เกิน 2,750 ft/s รวมไปถึงป้องกันกระสุนในระดับ 1, 2, 3 และ 4

ระดับ 6

Type 4 (ชนิด 4) คือ เสื้อที่สามารถป้องกันกระสุนแบบเจาะเกราะขนาด 30-06 แบบ M 2 AP ของกองทัพอเมริกาที่มีหัวกระสุนหนัก 166 เกรนและมีความเร็วไม่เกิน 2,850 ft/s รวมไปถึงป้องกันกระสุนในระดับ 1, 2, 3, 4 และ 5

สำหรับประเทศไทยมีร่างมาตรฐานยุทธโศปกรณ์ที่จัดทำโดยคณะกรรมการกำหนดมาตรฐานยุทธโศปกรณ์ กระทรวงกลาโหม (กมย.กท.) ว่าด้วยเกราะกันกระสุน ซึ่งได้แปล วิเคราะห์ ประยุกต์ และเรียบเรียง ให้เหมาะสมกับประเทศไทย โดยอิงมาตรฐาน U.S. NIJ.0101.04 ตามความจำเป็นและเหมาะสมเพื่อมุ่งส่งเสริมและสนับสนุนกิจการอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของ ไทยเป็นหลัก ในคราวประชุมครั้งที่ 4/47 เมื่อ 25 ส.ค. 47 และครั้งที่ 5/47 เมื่อ 1 ก.ย. 47 ได้พิจารณาแล้ว มีมติเห็นชอบให้การรับรองมาตรฐานยุทธโศปกรณ์ฉบับนี้ เป็นมาตรฐานยุทธโศปกรณ์กระทรวงกลาโหม และยกเลิกมาตรฐานเสื้อเกราะกันกระสุน กท. ที่กำหนดตาม U.S. NIJ.0101.03 โดยสามารถจำแนกตามระดับความสามารถในการกันกระสุน ปืนได้เป็น 6 ระดับ

- ระดับที่ 1 เป็นระดับที่สามารถกันกระสุนที่เป็นภัยคุกคามที่มีหัวกระสุนขนาด .22LR และ .380ACP ได้
- ระดับที่ 2A สามารถป้องกันกระสุนในขนาด 9 มม. พาราฯ และกระสุนขนาด .40 S&W และระดับ 1 ได้
- ระดับที่ 2 เสื้อเกราะแบบมาตรฐานใช้กันอย่างกว้างขวางทั่วโลก เป็นเสื้อเกราะมาตรฐานของเจ้าหน้าที่ตำรวจสหรัฐ กันกระสุนได้เกือบทุกชนิด ยกเว้นกระสุนปืนพกที่มีอำนาจการทะลุทะลวงสูง

- ระดับที่ 3A เป็นระดับที่สามารถกันกระสุนปืนพกโดยทั่วไปได้ เป็นเสื้อเกราะที่ออกแบบโดยการรวมคุณสมบัติการป้องกันกระสุน และป้องกันการเสียบแทงด้วยวัตถุมีคมเข้าด้วยกัน สามารถป้องกันวัตถุมีคมได้ทุกชนิดที่มีแรง ไม่เกิน 81.2 ฟุต/ปอนด์
- ระดับที่ 3 เสื้อเกราะชนิดพิเศษถูกออกแบบมาเพื่อป้องกันกระสุนปืน 44 แมกนัม รีวอลเวอร์ ซึ่งโดยปกติ กระสุนชนิดนี้ สามารถทะลุทะลวงผ่านเสื้อเกราะคุณภาพต่ำได้ นอกจากนี้ยังสามารถกันกระสุนความเร็วสูงจำพวกกระสุนปืนพกและปืนกลเบาขนาด 9 มิลลิเมตรได้ดี
- ระดับที่ 4 เสื้อเกราะชนิดนี้ถูกออกแบบมาสามารถกันกระสุนปืนเล็กยาวชนิดเจาะเกราะขนาด 30-40 และที่รุนแรงน้อยกว่าทั้งหมด

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

การทดสอบแผ่นคอนกรีตตัวอย่างในสนามเป็นการทดสอบในแผ่นคอนกรีตแบบชั้นเดียวและสองชั้น ที่หล่อจากชั้นของคอนกรีตผสมเส้นใยไฟเบอร์และคอนกรีตผสมเม็ดยาง โดยในบทนี้จะเป็นรายละเอียดของอุปกรณ์ สัดส่วนผสม รูปแบบและจำนวนแผ่นทดสอบ วิธีการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล ดังจะได้อธิบายต่อไป

3.1 วัสดุส่วนผสมคอนกรีต

วัสดุที่ใช้ในการผสมแผ่นคอนกรีตเพื่อใช้ทดสอบ ประกอบไปด้วย

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- ทราย โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.3-3.2 (ผ่านตะแกรง #16 และ ค้างตะแกรง #50)
- เม็ดยางจากการย่อยเศษยางรถยนต์เก่า ขนาดเบอร์ 6 คุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3.1
- เส้นใยไฟเบอร์เหล็กชนิดงอปลาย คุณสมบัติดังแสดงตารางที่ 3.2
- สารเคมีผสมเพิ่ม Superplasticizer Type FF
- น้ำสะอาด

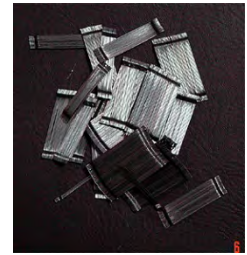
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเม็ดยางขนาดเบอร์ 6

Properties	
Average Bulk Specific Gravity	0.87
Average Bulk Specific Gravity (SSD)	0.89
Average Apparent Specific Gravity	0.89
Average Absorption (%)	1.70
Tensile Strength (MPa)	15.64
%Elongation	324.90



ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของไฟเบอร์เหล็ก

Materials	Specific Gravity	Shape	Length (mm)	Section (mm)	Aspect Ratio (l/d)	Tensile Strength (N/mm ²)
Steel	7.8	Hooked End	35	Circle dia. -0.55	64	1000



สำหรับสัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบประกอบไปด้วยปูนซีเมนต์ ทราย น้ำ และสารลดน้ำ โดยกำหนดให้ค่า w/c เท่ากับ 0.3 ทุกสัดส่วนผสม สำหรับคอนกรีตผสมเม็ดยางนั้นจะนำเม็ดยางมาแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณ 50%, 75% และ 100% ส่วนคอนกรีตผสมเส้นใยไฟเบอร์จะใช้สัดส่วนผสมเส้นใยเหล็ก 2%, 3% และ 4% โดยปริมาตรเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีความสามารถในการต้านทานแรงกระแทก

3.2 การเตรียมตัวอย่างและจำนวนตัวอย่าง

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการผสมคอนกรีตได้แก่ เครื่องโม่คอนกรีต, แบบหล่อแท่งตัวอย่างมาตรฐานแผ่นผนัง ขนาด 40x40x3 cm., ถาด, ช้อนตัก และ เกรียงเหล็ก เป็นต้น

ขั้นตอนการผสมเริ่มต้นด้วยการเทคอนกรีตชั้นแรก ทำการการชั่งปูนซีเมนต์ ทราย น้ำ เม็ดยาง ตามอัตราส่วนที่ได้ออกแบบส่วนผสมไว้ เตรียมแบบหล่อตัวอย่าง โดยทาน้ำมันเคลือบภายในแบบหล่อให้ทั่วเพื่อความสะดวกในการถอดแบบ ทำการผสมคอนกรีตจากวัสดุที่เตรียมไว้ การผสมคอนกรีตทำโดยการใส่ซีเมนต์และทรายลงในเครื่องโม่และผสมแห้งเป็นเวลาประมาณ 5 นาที จากนั้นผสมน้ำเข้าเครื่องโม่จนเห็นเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วค่อยๆ โรยเม็ดยางให้ทั่วเพื่อป้องกันการจับตัวเป็นก้อนของเม็ดยาง และคอนกรีตที่ผสมเสร็จจะต้องมีการกระจายตัวของเม็ดยางอย่างสม่ำเสมอไม่กระจุกตัวเป็นก้อน จากนั้นตักคอนกรีตใส่แบบตามความหนาในชั้นแรกตามที่ต้องการ และทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้คอนกรีตแข็งตัว

หลังจากคอนกรีตชั้นแรกแข็งตัวจึงเริ่มทำการเทคอนกรีตชั้นที่ 2 โดยชั่งปูนซีเมนต์ ทราย น้ำ เส้นใยเหล็ก ตามอัตราส่วนที่ได้ออกแบบปฏิภาณส่วนผสมเอาไว้ ตามขั้นตอนที่กล่าวมาในตอนต้น โดยทำการโรยเส้นใยเหล็กให้ทั่วในช่วงของการผสมเปียกเพื่อป้องกันการจับตัวเป็นก้อนเส้นใยเหล็ก จากนั้นตักคอนกรีตใส่แบบตามความหนาในชั้นที่ 2 ตามที่กำหนดไว้ ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้วจึงถอดแบบออก เขียนรายละเอียดต่าง ๆ บนหน้าก้อนปูน เช่น วันที่ทำตัวอย่าง หมายเลขตัวอย่าง เป็นต้น จากนั้นนำก้อนตัวอย่างไปบ่มโดยการแช่น้ำจนถึงเวลาที่จะทำการทดสอบ โดยทั่วไปจะทดสอบที่อายุคอนกรีต 28 วัน เมื่อถึงกำหนดเวลาทดสอบ นำก้อนตัวอย่างขึ้นจากบ่อบ่มทิ้ง

ไว้ให้ผิวแห้ง ชั่งน้ำหนัก วัดขนาด จดบันทึกไว้ และนำไปทดสอบ รูปแบบของตัวอย่างและจำนวนตัวอย่างทดสอบเป็นไปตามแสดงในตารางที่ 3.3 และ 3.4

ตารางที่ 3.3 จำนวนตัวอย่างคอนกรีตแบบชั้นเดียว

No.	Designation	Description	Material	Volume Fraction	Thickness (cm)	No of Specimen
1	Plain	Single Layer	Plain Concrete		3.0	6
2	SFRC 2%	Single Layer	SFRC	2%	3.0	6
3	SFRC 3%	Single Layer	SFRC	3%	3.0	6
4	SFRC 4%	Single Layer	SFRC	4%	3.0	6
5	RBC50%	Single Layer	Rubberized	50% of FA	3.0	6
6	RBC75%	Single Layer	Rubberized	75% of FA	3.0	6
7	RBC100%	Single Layer	Rubberized	100% of FA	3.0	6
		Total				42

ตารางที่ 3.4 จำนวนตัวอย่างแผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้น

No.	Designation	1 st Layer (T1)			2 nd Layer (T2)			No. of Specimen
		Mat.	% VF	Thick. (cm)	Mat.	% VF	Thick. (cm)	
1	50R/2s	Rub.	50	0.5	SFRC	2%	2.5	6
2	75R/2s	Rub.	75	0.5	SFRC	2%	2.5	6
3	100R/2s	Rub.	100	0.5	SFRC	2%	2.5	6
4	A-75R/2s	Rub.	50	1.0	SFRC	2%	2.0	6
5	B-75R/2s	Rub.	75	1.5	SFRC	2%	1.5	6
6	50R/3s	Rub.	50	0.5	SFRC	3%	2.5	6
7	75R/3s	Rub.	75	0.5	SFRC	3%	2.5	6
8	100R/3s	Rub.	100	0.5	SFRC	3%	2.5	6
9	A-75R/3s	Rub.	50	1.0	SFRC	3%	2.0	6
10	B-75R/3s	Rub.	75	1.5	SFRC	3%	1.5	6
11	50R/4s	Rub.	50	0.5	SFRC	4%	2.5	6
12	75R/4s	Rub.	75	0.5	SFRC	4%	2.5	6
13	100R/4s	Rub.	100	0.5	SFRC	4%	2.5	6
			Total					78

The diagram shows a cross-section of a two-layer concrete specimen. The top layer is hatched and labeled 'Rubberized Concrete' with a vertical dimension line indicating its thickness as 'T1'. The bottom layer is plain and labeled 'Steel Fiber Reinforced Concrete' with a vertical dimension line indicating its thickness as 'T2'.

3.3 การทดสอบ

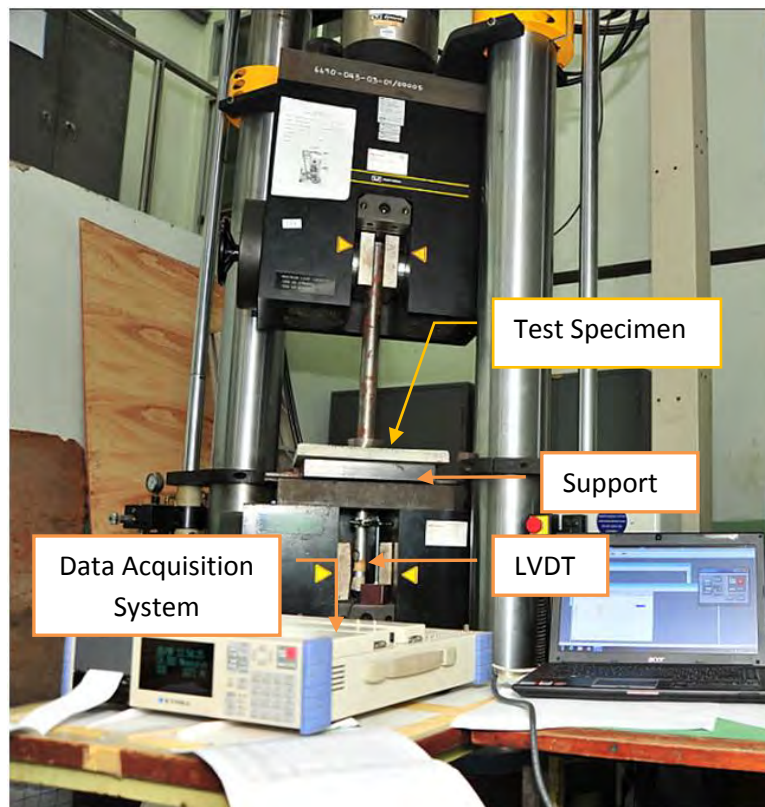
3.3.1 การทดสอบแรงกระทำแบบคงที่ (Static Test)

3.3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบไปด้วย

- เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine พร้อมระบบเก็บข้อมูล
- ฐานรองรับขนาด 35 x 35 ซม
- อุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ของตัวอย่าง (LVDT)
- หัวกดทดสอบรูปครึ่งวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm

3.3.1.2 วิธีการทดสอบ

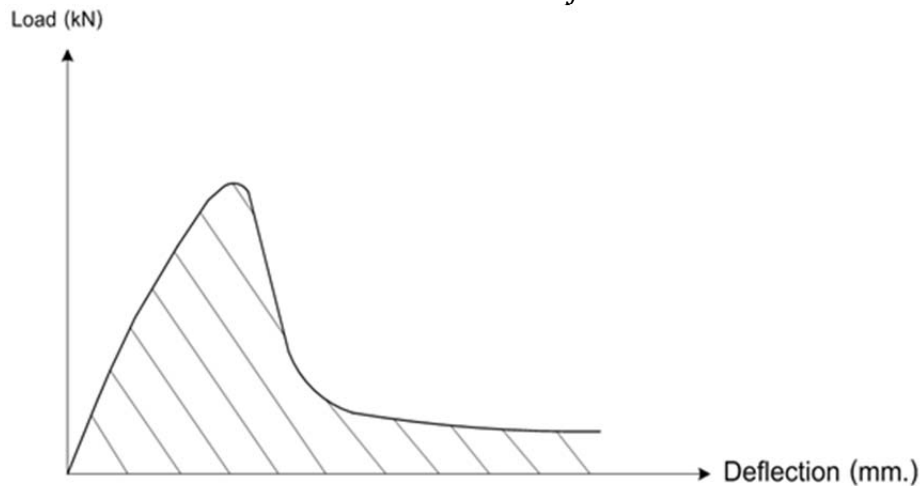
ก่อนการทดสอบ ฐานรองรับและหัวกดทดสอบแบบครึ่งวงกลมจะถูกนำไปติดตั้งเข้ากับเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างไปวางบนฐานรองรับให้มีส่วนที่ยื่นออกมาด้านละประมาณ 5 ซม นำ LVDT ไปติดตั้งที่ตำแหน่งด้านล่างกึ่งกลางของแผ่นคอนกรีต ระหว่างการทดสอบข้อมูลจะถูกบันทึกด้วย Data Acquisition ลงสู่คอมพิวเตอร์ แสดงดังรูปที่ 17



รูปที่ 3.1 การทดสอบภายใต้แรงกระทำคงที่ด้วยเครื่อง UTM

ผลการทดสอบที่ได้จะอยู่ในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว (Load–Deflection) ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่าพลังงานแตกหัก (Fracture Energy) จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างกำลังรับแรงตัดและการโก่งตัวของคานได้ดังสมการด้านล่าง (รูปที่ 3.2)

$$Fracture\ Energy = \int Fd\delta$$



รูปที่ 3.2 พื้นที่ใต้กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงตัด Load (kN)

3.3.2 การทดสอบแรงกระแทกด้วยกระสุนปืน

3.3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

(a) เครื่องมือจัดเก็บข้อมูล (Data Acquisition System) ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นของ National Instrument รุ่น NI USB-6225 โดยมีรายละเอียดของเครื่องมือดังนี้

- Up to 80 analog inputs at 16 bits, 250 kS/s
- Up to 4 analog outputs at 16 bits, 833 kS/s
- Up to 48 TTL/CMOS digital I/O lines (up to 32 hardware-timed at up to 1 MHz)
- Two 32-bit, 80 MHz counter/timers



รูปที่ 3.3 Data Acquisition System

- (b) เครื่องมือวัดอัตราเร่ง (Accelerometer) คือ เครื่องตรวจวัดอัตราเร่งที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นแบบเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Accelerometer) ยี่ห้อ PBC รุ่น -350A14 วัดความเร่งได้สูงสุด $\pm 5000g$ น้ำหนัก 17.9 กรัม โดยมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของอุปกรณ์วัดอัตราเร่ง

PERFORMANCE	ENGLISH	SI	
Sensitivity($\pm 15\%$)	1.0 mV/g	0.102 mV/(m/s ²)	
Measurement Range	$\pm 5000\text{ g pk}$	$\pm 49,000\text{ m/s}^2\text{ pk}$	
Frequency Range($\pm 10\%$)	0.4 to 7500 Hz	0.4 to 7500 Hz	
Electrical Filter Cutoff Frequency(-10 %)	$\geq 7.5\text{ kHz}$	$\geq 7.5\text{ kHz}$ [2]	
Resonant Frequency	$\geq 50\text{ kHz}$	$\geq 50\text{ kHz}$	
Broadband Resolution(1 to 10,000 Hz)	0.02 g rms	0.20 m/s ² rms [1]	
Non-Linearity	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	
Transverse Sensitivity	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$ [3]	

- (c) ฐานรองรับ เป็นโครงเหล็กประกอบขึ้นด้วยตัวแท่นวางตัวอย่าง โครงยึดจับตัวอย่างด้านนอก และ ฐานรองรับ นำมาประกอบเข้าด้วยกันดังรูปที่ 3.4

(d)



รูปที่ 3.4 ฐานรองรับที่ใช้ในการทดสอบ

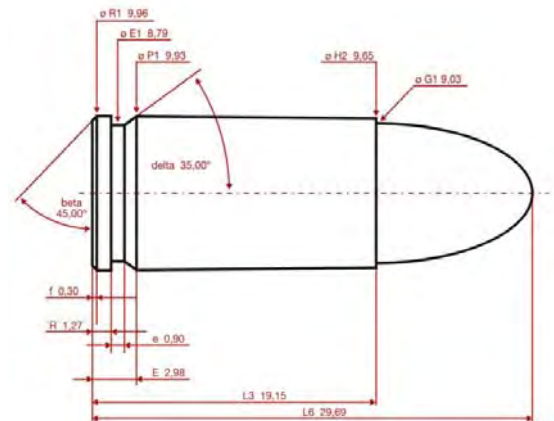
- (e) กระสุนปืน กระสุนปืนที่ใช้มี 2 ขนาด คือ ขนาด 9 มม. Luger FMJ ของ Winchester น้ำหนักหัวกระสุน 7.45 กรัม (115 Grains) ความเร็วต้นประมาณ 362 m/s (ตารางที่ 3.6) และกระสุนปืนขนาด 11 มม. (0.45 ACP ของ Remington) น้ำหนักหัวกระสุน 14.9 กรัม (230 Grains) ความเร็วต้นประมาณ 254 m/s (ตารางที่ 3.7)

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติของกระสุนขนาด 9 มม.

Technical Information		
Manufacturer	Winchester	
Caliber	9mm Lugar	
Bullet Weight	115 grains (7.45 grams)	
Bullet Style	Full Metal Jacket	
Case Type	Brass	
Ballistics Information		
Muzzle Velocity	1190 fps	362 m/s
Muzzle Energy	362 ft.lbs.	492 N.m

Technical drawing of a Winchester 9mm Lugar bullet. The drawing shows the bullet's profile with various dimensions and angles labeled. The dimensions are as follows:

- $\phi R1$ 9.96
- $\phi E1$ 8.79
- $\phi P1$ 9.93
- $\phi H2$ 9.65
- $\phi G1$ 9.63
- δ 35.00°
- β 45.00°
- f 0.30
- H 1.27
- ϕ 0.90
- E 2.98
- $L3$ 19.15
- $L6$ 29.62

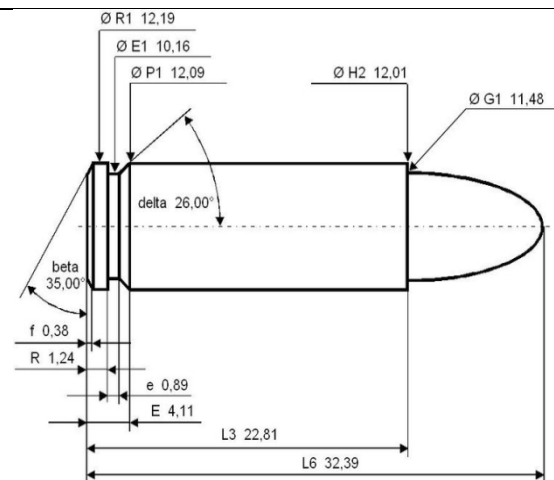


Note: 1grian = 0.064798911g

ตารางที่ 3.7 คุณสมบัติของกระสุนขนาด 11 มม.

Technical Information		
Manufacturer	Remington	
Load	FMJ	
Caliber	0.45 ACP	
Bullet Weight	230 grains (15 grams)	
Bullet Style	Full Metal Jacket	
Case Type	Rimless, straight	
Ballistic Information		
Velocity	255 m/s	835 ft/s
Energy	483 J	356 ft·lb

Technical drawing of a Remington 0.45 ACP FMJ bullet. The drawing shows the bullet's profile with various dimensions and angles. Key dimensions include:
 - $\varnothing R1$ 12,19 (Rim diameter)
 - $\varnothing E1$ 10,16 (Engraving diameter)
 - $\varnothing P1$ 12,09 (Primer diameter)
 - $\varnothing H2$ 12,01 (Case diameter)
 - $\varnothing G1$ 11,48 (Groove diameter)
 - β 35,00° (Beta angle)
 - δ 26,00° (Delta angle)
 - f 0,38 (Fillet radius)
 - R 1,24 (Radius)
 - e 0,89 (Engraving depth)
 - E 4,11 (Engraving length)
 - $L3$ 22,81 (Case length)
 - $L6$ 32,39 (Total length)
 The drawing also shows the bullet's profile, including the rim, case, and ogive.



3.3.2.2 การทดสอบแผ่นคอนกรีต

แผ่นคอนกรีตตัวอย่างจะถูกติดตั้งด้วยอุปกรณ์วัดความเร่ง (Accelerometer-capacity 5000g) จำนวน 2 ตัว ที่ตำแหน่งกึ่งกลาง และ ตำแหน่ง 1/4 ของความยาวด้านกว้าง จากนั้นนำไปติดตั้งบนอุปกรณ์รองรับ ก่อนจะทำกรยิงด้วยกระสุนปืนขนาด 9 มม. เข้าที่ตำแหน่งกึ่งกลางจำนวน 1 นัดต่อแผ่น ที่ระยะยิง 10 ม. (รูปที่ 3.5) พฤติกรรมของแผ่นคอนกรีตภายใต้แรงกระทำจะถูกบันทึกด้วยกล้องความเร็วสูง (1000 เฟรม/วินาที) อัตราเร่งของแผ่น

คอนกรีตจะถูกเก็บโดยคอมพิวเตอร์ และนำมาวิเคราะห์พฤติกรรมและหาความสามารถในการต้านทานแรง
กระสุนของแผ่นคอนกรีตแต่ละชนิด



รูปที่ 3.5 ภาพแสดงการติดตั้งแผ่นคอนกรีตก่อนทำการทดสอบ

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดสอบแรงกระแทกด้วยกระสุนปืน (Impact Loading-Bullet Test)

4.1.1 รูปแบบการวิบัติ

4.1.1.1 คอนกรีตธรรมดาแบบชั้นเดียว

รูปแบบการวิบัติของแผ่นคอนกรีตล้วนจะมีลักษณะการวิบัติที่ค่อนข้างเป็นวงกว้าง (Globalized Failure) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยพบว่าที่ผิวด้านหน้าเกิดการกะเทาะออก (Scabbing) กระสุนไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นคอนกรีตได้ แต่ก่อให้เกิดการกะเทาะของผิวที่อยู่ตรงข้ามเป็นวงกว้าง (Spalling) ขึ้นส่วนที่กะเทาะออกหลุดออกจากผิวคอนกรีตทั้งหมด และเนื่องจากความเปราะของคอนกรีต แรงปะทะของกระสุนจึงทำให้เกิดรอยแตกร้าวขนาดใหญ่ที่ทำให้แผ่นคอนกรีตแตกออกจากกัน (Flexural Failure)

(a) คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กแบบชั้นเดียว

รูปแบบการวิบัติของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กแบบชั้นเดียวเป็นไปดังแสดงในรูปที่ 4.2 ลักษณะการวิบัติที่พบคือ ผิวหน้าของแผ่นคอนกรีตจะถูกกะเทาะออก (Scabbing) เนื่องจากถูกแรงกระแทกจากกระสุนปืน ในลักษณะเป็นวงกลมความลึกของรอยที่ถูกกะเทาะออกจะลึกประมาณ 3.0-4.5 มม. และ มีการหลุดลอกของเส้นใยเหล็กในบางตัวอย่าง ส่วนด้านหลังแผ่นคอนกรีตเกิดการกะเทาะออก (Spalling) แต่ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางไม่กว้างเท่ากับในกรณีของคอนกรีตล้วน ขึ้นส่วนของคอนกรีตที่กะเทาะออกมาบางส่วนไม่หลุดออกจากผิวคอนกรีตเนื่องจากถูกยึดจับด้วยเส้นใยเหล็ก พื้นผิวโดยรอบไม่มีรอยแตกร้าวที่เห็นได้ด้วยตาเปล่า

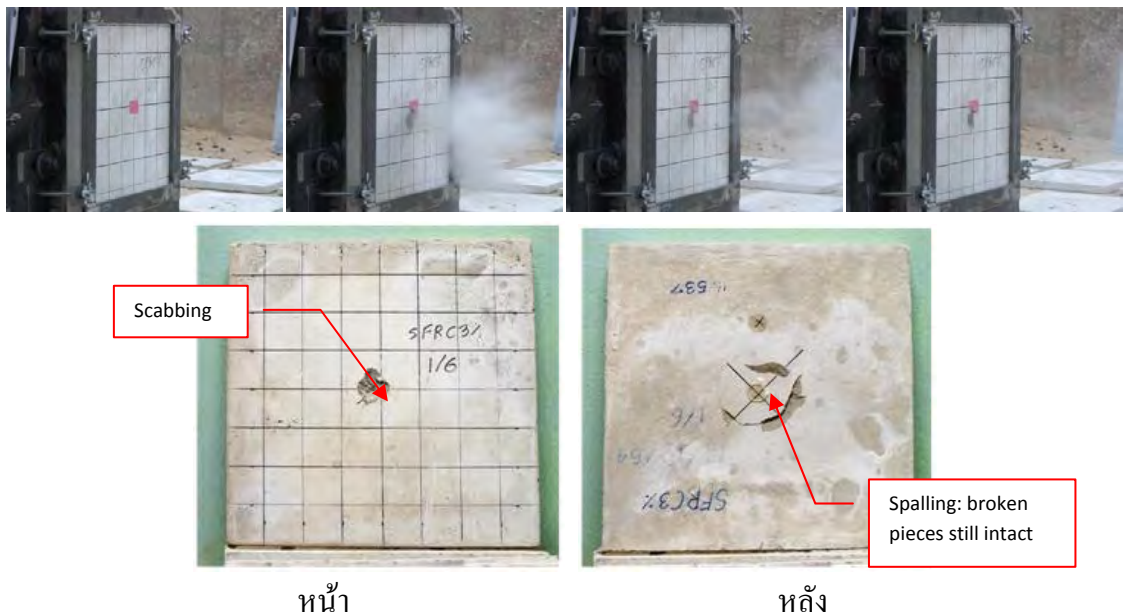




หน้า

หลัง

รูปที่ 4.1 การวิบัติของแผ่นคอนกรีตล้วนแบบชั้นเดียว



หน้า

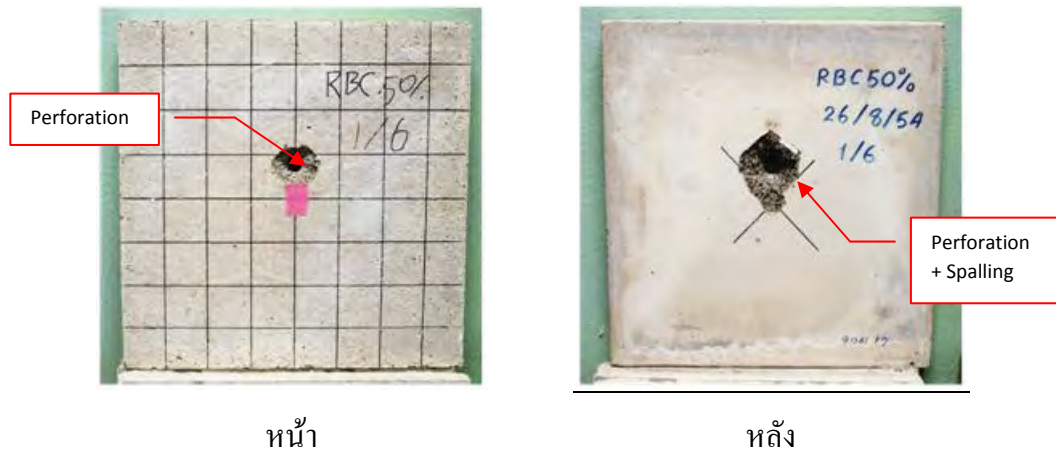
หลัง

รูปที่ 4.2 การวิบัติของแผ่นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กแบบชั้นเดียว

(b) แผ่นคอนกรีตผสมเม็ดยางแบบชั้นเดียว

ในกรณีของคอนกรีตผสมเม็ดยางล้วนรูปแบบการวิบัติจะมีลักษณะที่เกิดขึ้นค่อนข้างเฉพาะที่ (Localized Failure) (รูปที่ 4.3) ในรูปแบบของการทะลุผ่าน (Perforation) โดยกระสุนจะทะลุผ่านแผ่นคอนกรีตทั้งแผ่นและไม่ก่อให้เกิดการแตกร้าวโดยรอบ ด้านหลังจะมีลักษณะของการกะเทาะออกควบคู่ไปด้วยในบางกรณีเนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอกมีขนาดใหญ่กว่าด้านใน

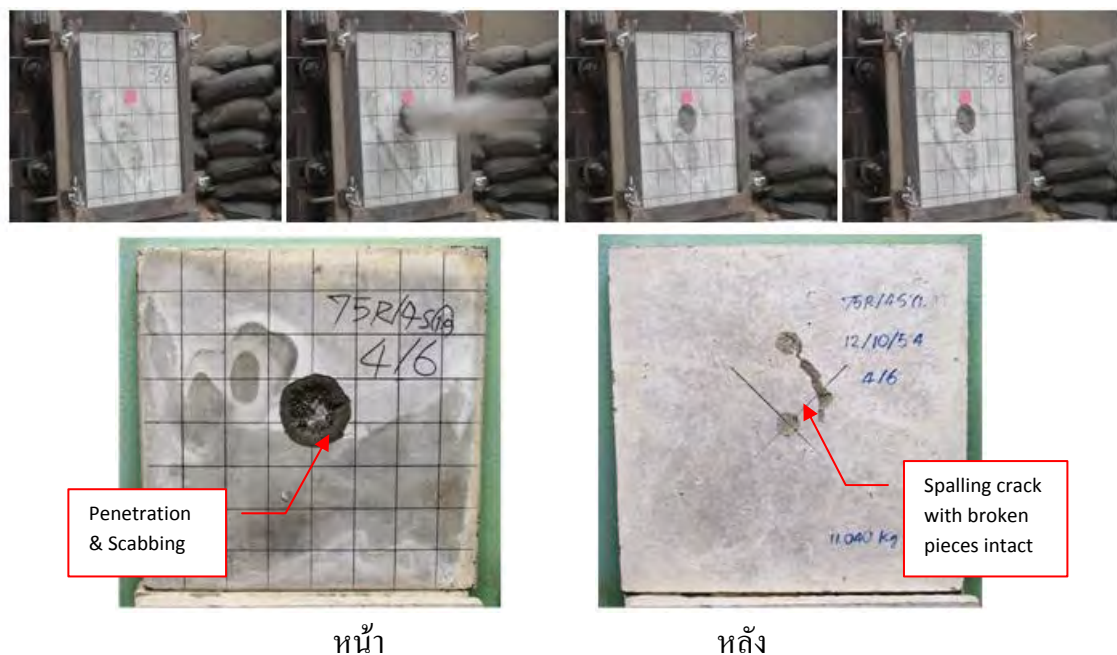




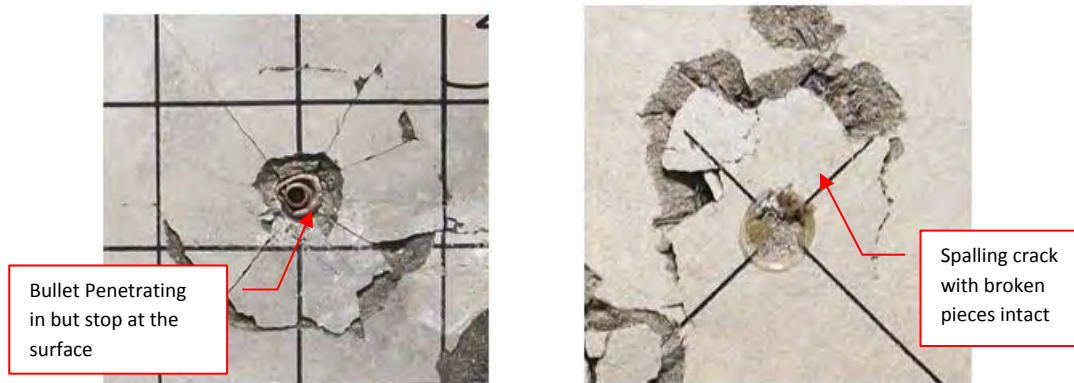
รูปที่ 4.3 การวิบัติของแผ่นคอนกรีตผสมเม็ดยางแบบชั้นเดียว

4.1.1.2 แผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้น

รูปแบบการวิบัติของแผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้นเป็นไปดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 โดยส่วนมากพบว่าที่ด้านหน้าของแผ่นคอนกรีตพบการวิบัติแบบผสมระหว่างการทะลุกับการกะเทาะออก (Penetration and Scabbing) ส่วนด้านหลังพบการกะเทาะออกโดยที่ชั้นส่วนที่แตกไม่มีการหลุดลอกออกจากผิวเดิม ในบางกรณีพบว่ากระสุนมีการทะลุเข้าไปในผิวหน้าคอนกรีตบางส่วนแต่ไม่ทะลุออกด้านหลัง โดยที่กระสุนได้ติดคาอยู่บนผิวหน้าไม่ได้สะท้อนออกมา ส่วนด้านหลังก็ไม่มีการหลุดล่อนของแผ่นคอนกรีตที่แตกออก (รูปที่ 4.4)



รูปที่ 4.4 การวิบัติของแผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้น โดยทั่วไป



หน้า หลัง
รูปที่ 4.5 การวิบัติของแผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้น กระสุนทะลุเข้าที่ผิวหน้าแต่ไม่ผ่านออก

นอกจากนี้ยังพบรูปแบบการวิบัติที่เป็นลักษณะของการกะเทาะบวกกับทะลุผ่านเช่นกัน (รูปที่ 4.6) ซึ่งรูปแบบดังกล่าวจะเกิดในกรณีของแผ่นทดสอบที่มีชั้นความหนาของคอนกรีตผสมเม็ดขนาดมากกว่า 5 มม (10 และ 15 มม) โดยพบว่าในกรณีที่ความหนาของชั้นคอนกรีตผสมเม็ดขนาดมีค่าเพิ่มขึ้น ความหนาของชั้นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กก็มีความบางลง ซึ่งไม่เพียงพอต่อการต้านทานแรงกระแทกของกระสุนปืนได้ทำให้กระสุนทะลุผ่านออกไปด้านหลัง ซึ่งในกรณีนี้จะถือว่าไม่ผ่านมาตรฐานของกระทรวงกลาโหมว่าด้วยเกราะกันกระสุน

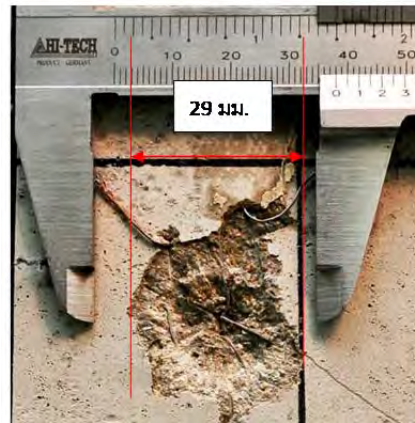


รูปที่ 4.6 การวิบัติแบบกระเทาะออก+ทะลุผ่านของแผ่นคอนกรีต 2 ชั้นที่มีชั้นคอนกรีตผสมเม็ดขนาดหนา

4.1.1.3 เปรียบเทียบรูปแบบการวิบัติระหว่างกระสุน 9 มม.และ 11 มม.

กรณีของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กแบบชั้นเดียว ลักษณะการเคลื่อนที่ของกระสุนจะสะท้อนกลับออกมาหลังการปะทะอันเป็นผลเนื่องมาจากความแข็งของแผ่นทดสอบ อย่างไรก็ตามพบความแตกต่างเล็กน้อยในส่วนของรอยปะทะด้านหน้าของกระสุนทั้ง 2 ขนาด โดยแผ่นทดสอบที่ถูกยิงด้วยกระสุนขนาด 9 มม.จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กกว่า แต่มีความลึกของรอยปะทะที่มากกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับแผ่นทดสอบที่ถูกยิงด้วย

กระสุนขนาด 11 มม. (รูปที่ 4.7) ทั้งนี้ น่าเป็นสาเหตุมาจากการลักษณะของกระสุนขนาด 11 มม. ที่ป้านและใหญ่ ทำให้ไม่สามารถทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ดี ช่วงเวลาของการปะทะสั้น กระสุนสะท้อนกลับออกมาด้วยความรวดเร็ว ทำให้เกิดรอยปะทะที่เล็กและตื้นกว่า ส่วนกระสุนขนาด 9 มม. จะมีลักษณะที่ปลายแหลม ทำให้มีอำนาจการทะลุทะลวงได้ดีกว่าแต่สร้างความเสียหายในวงกว้างได้น้อยกว่า



(a) 9 มม.



(b) 11 มม.

รูปที่ 4.7 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกระสุนที่ผิวด้านหน้าของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแบบชั้นเดียว

ในกรณีของแผ่นคอนกรีตผสมเม็ดยางแบบชั้นเดียว พบว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของแผ่นคอนกรีตที่ทดสอบด้วยกระสุนขนาด 11 มม. จะมีขนาดใหญ่กว่าแผ่นคอนกรีตที่ทดสอบด้วยกระสุนขนาด 9 มม. เนื่องารรูปแบบของการวิบัติเป็นการทะลุผ่านทั้งหมด ทำให้ขนาดของกระสุนมีผลโดยตรงต่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยปะทะค่อนข้างมาก



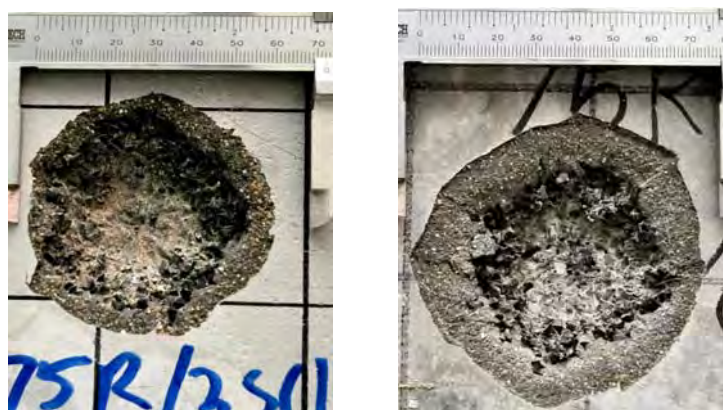
(a) 9 มม.



(b) 11 มม.

รูปที่ 4.8 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกระสุนที่ผิวด้านหน้าของแผ่นคอนกรีตผสมเม็ดยางแบบชั้นเดียว

ในกรณีของแผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้นพบว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นทดสอบที่ถูกยิงด้วยกระสุนขนาด 11 มม จะมีขนาดใหญ่กว่าแผ่นที่ถูกยิงด้วยกระสุนขนาด 9 มม (รูปที่ 4.9) ซึ่งจะต่างจากแผ่นในกรณีของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแบบชั้นเดียว ทั้งนี้สาเหตุน่าจะมาจากความอ่อนของชั้นคอนกรีตผสมเม็ดยางด้านนอก ประกอบกับขนาดของกระสุน 11 มม ที่มีขนาดใหญ่กว่า ในการทดสอบแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กชั้นเดียว กระสุนขนาด 11 มม ไม่สามารถทะลุทะลวงได้ดีเนื่องจากมีขนาดของกระสุนที่ป้านกว่า แต่ในกรณีของแผ่นคอนกรีตแบบสองชั้นที่มีชั้นคอนกรีตผสมยางอยู่ด้านนอก ด้วยความอ่อนของชั้นคอนกรีตผสมเม็ดยาง ทำให้กระสุนขนาด 11 มม สามารถทะลุทะลวงได้และก่อให้เกิดความเสียหายในวงกว้างกว่าเนื่องจากมีขนาดของหัวกระสุนที่ป้านและใหญ่กว่า โดยค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นทดสอบทุกแผ่นเป็นไปดังแสดงในตารางที่ 4.1



(a) 9 มม.

(b) 11 มม.

รูปที่ 4.9 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกระสุนที่ผิวด้านหน้าของแผ่นคอนกรีตแบบสองชั้น (75R/3S, 1:2)

ตารางที่ 4.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยปะทะของแผ่นทดสอบ

Type	9 mm				11 mm			
	เส้นผ่านศูนย์กลางด้านหน้า (mm)				เส้นผ่านศูนย์กลางด้านหน้า (mm)			
	แผ่นที่ 1/6	แผ่นที่ 2/6	แผ่นที่ 3/6	avg. (mm)	แผ่นที่ 4/6	แผ่นที่ 5/6	แผ่นที่ 6/6	avg. (mm)
Plain								
SFRC2%	44	33	44	40.33	36	40	39	38.33
SFRC3%	43	48	37	42.67	40	37	37	38.00
SFRC4%	39	30	33	34.00	37	32	34	34.33
RBC50%	56	45	41	47.33	48	52	45	48.33
RBC75%	42	40	41	41.00	42	43	51	45.33
RBC100%	31	44	44	39.67	44	47	30	40.33
50R2S	87	58	60	68.33	69	74	77	73.33
50R3S	74	48	58	60.00	68	54	63	61.67
50R4S	54	48	46	49.33	51	62	46	53.00
75R2S	49	53	55	52.33	54	53	55	54.00
75R3S	54	41	54	49.67	60	54	47	53.67
75R4S	48	52	50	50.00	52	53	54	53.00
100R2S	51	47	64	54.00	46	44	46	45.33
100R3S	52	47	45	48.00	46	47	55	49.33
100R4S	44	43	48	45.00	46	44	47	45.67
A-75R2S	48	50	50	49.33	50	48	53	50.33
B-75R2S	95	100	87	94.00	95	98	99	97.33
A-75R3S	61	63	77	67.00	86	75	77	79.33
B-75R3S	88	63	82	77.67	98	22	100	73.33

4.1.1.4 สรุปรูปแบบการวิบัติเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน

จากมาตรฐานของกระทรวงกลาโหม กำหนดจำนวนตัวอย่างทดสอบสำหรับแผ่นกันกระสุนแต่ละชุดหรือแต่ละแบบเป็นจำนวนไม่ต่ำกว่า 3 แผ่นต่อชุด หากมีแผ่นใดแผ่นหนึ่งในชุดนั้นที่กระสุนสามารถทะลุผ่านได้ ก็ถือว่าชุดนั้นไม่ผ่านการทดสอบ ซึ่งผลการสำรวจรูปแบบความเสียหายรวมถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านหน้าของแผ่นทดสอบทั้งหมดที่ยิงด้วยกระสุนขนาด 9 มม และ 11 มม สามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2

โดยผลการทดลองพบว่าแผ่นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กทั้งแบบชั้นเดียวและสองชั้นที่มีความหนาของชั้นคอนกรีตผสมเม็ดยางไม่เกิน 5 มม. ก็ผ่านมาตรฐานว่าด้วยเกราะกันกระสุนของกระทรวงกลาโหม โดยการวิบัติที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปของการกระแทกออกที่ด้านหน้าและอาจจะมีการกระแทกออกที่ด้านหลัง (แต่ชั้นส่วนที่กระแทกออกมาไม่หลุดออกจากแผ่นทดสอบ) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น

ส่วนในกรณีของแผ่นคอนกรีตผสมเม็ดยางแบบ 2 ชั้นที่มีความหนาของชั้นคอนกรีตผสมเม็ดยางที่ 10 และ 15 มม. มีรูปแบบการวิบัติแบบผสมผสานระหว่างการทะลุผ่านและแบบไม่ทะลุผ่าน ในกรณีที่ไม่มีกระแทกผ่าน อาจจะมีลักษณะของการที่กระสุนไม่สะท้อนกลับเช่นกัน (ติดอยู่ที่ผิวหน้า) แต่เนื่องจากมีบางแผ่นที่เกิดการทะลุออก ทำให้ผลการเปรียบเทียบในชุดเหล่านี้ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

ตารางที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการวิบัติกับมาตรฐานของกระทรวงกลาโหม

Type	9 mm		11 mm	
	Failure Type	Classification	Failure Type	Classification
R25	Perforation	not pass	Perforation	not pass
R50	Perforation	not pass	Perforation	not pass
R75	Perforation	not pass	Perforation	not pass
S2	Scabbing	pass	Scabbing	pass
S3	Scabbing	pass	Scabbing	pass
S4	Scabbing	pass	Scabbing	pass
R50/S2	Scabbing	pass	Scabbing	pass
R75/S2	Scabbing + Spalling	pass	Scabbing + Spalling	pass
R100/S2	Scabbing + Spalling	pass	Scabbing + Spalling	pass
R50/S3	Scabbing	pass	Scabbing	pass
R75/S3	Scabbing	pass	Scabbing	pass
R100/S3	Scabbing + Spalling	pass	Scabbing	pass
R50/S4	Scabbing + Spalling	pass	Scabbing	pass
R75/S4	Scabbing	pass	Scabbing	pass
R100/S4	Scabbing	pass	Scabbing	pass
A-R75/S2	Scabbing + Spalling	pass	Scabbing + Perforation	not pass
B-R75/S2	Scabbing + Spalling	pass	Scabbing + Perforation	not pass
A-R75/S3	Scabbing + Perforation	not pass	Scabbing + Perforation	not pass
B-R75/S3	Scabbing + Perforation	not pass	Scabbing + Perforation	not pass

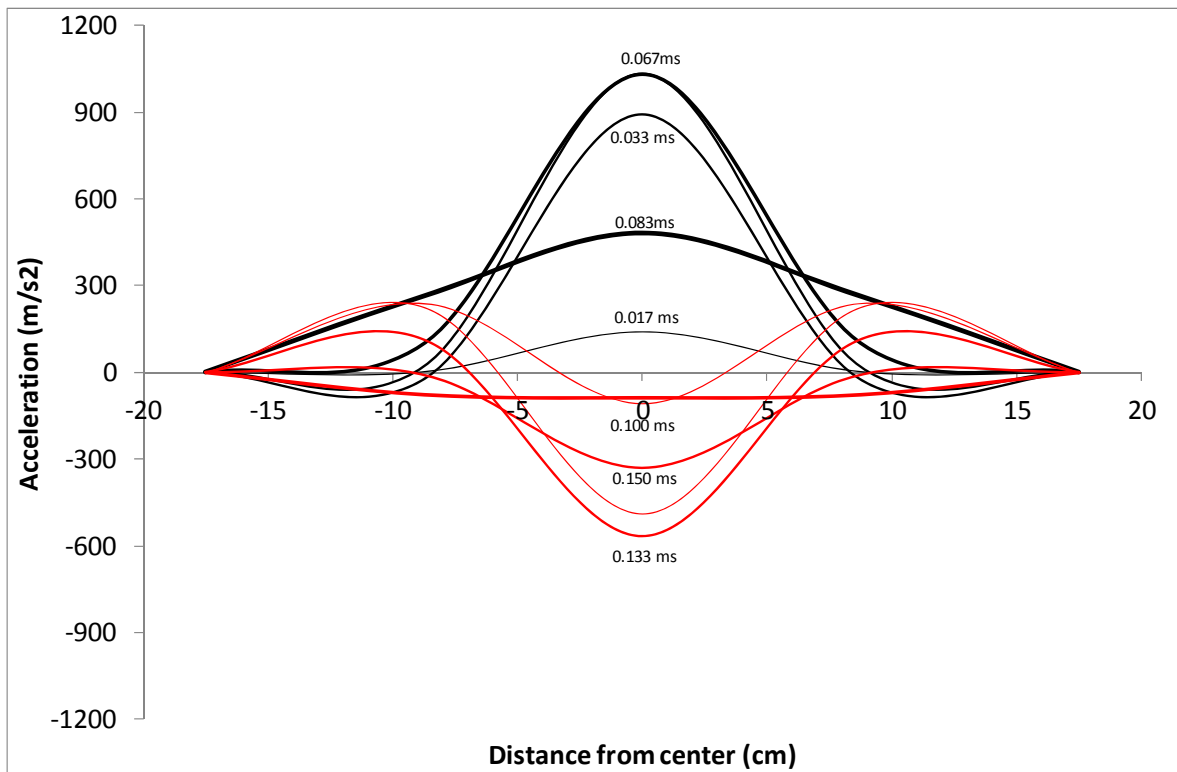
4.1.2 อัตราเร่ง (Acceleration)

4.1.2.1 พฤติกรรมทั่วไป (Typical Responses)

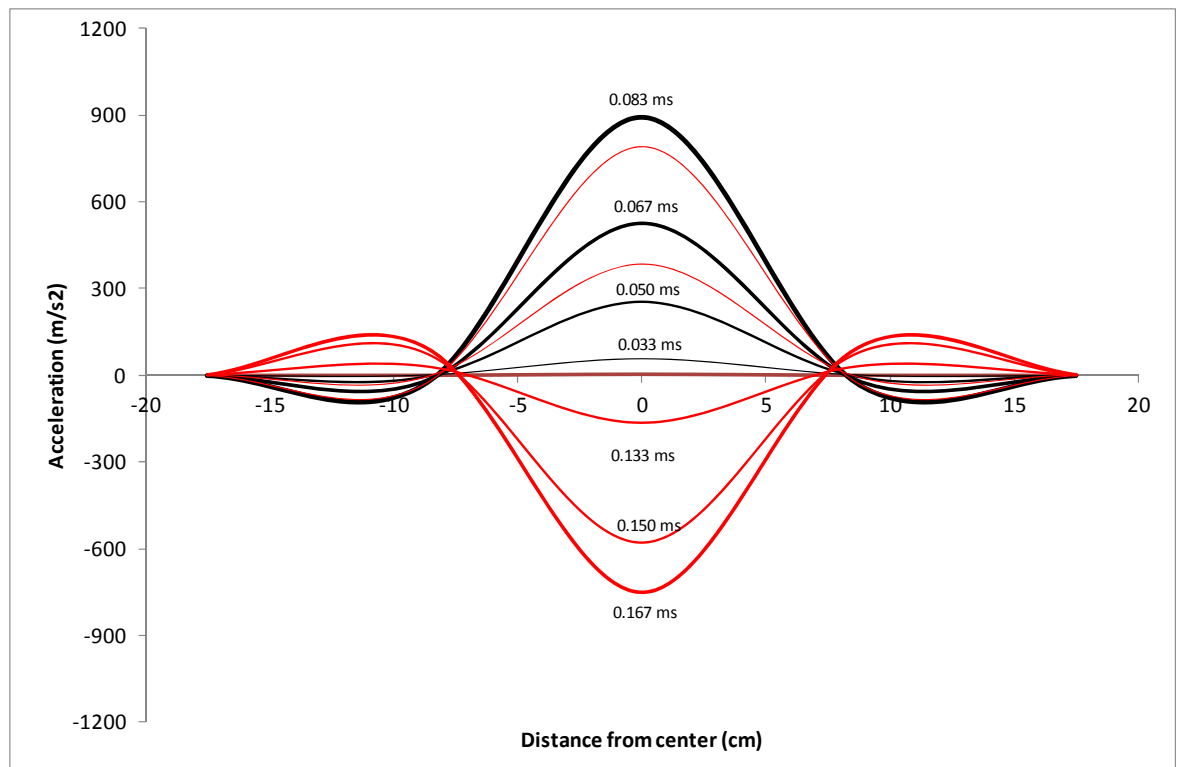
พฤติกรรมโดยทั่วไปของแผ่นคอนกรีตภายใต้การยิงด้วยกระสุนปืนขนาด 9 มม. ถูกแสดงด้วยกราฟอัตราเร่งกับเวลาเป็นไปดังแสดงในรูปที่ 4.10-4.12 โดยในช่วงแรกของการปะทะ อัตราเร่งที่กึ่งกลางของแผ่นคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในทิศทางเดียวกับที่กระสุนกระทำ ในขณะที่รอบด้านก็มีการเร่งเกิดขึ้นเช่นกันแต่จะค่อนข้างช้า มีค่าไม่สูงมาก (ในบางกรณีอาจจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางที่กระสุนกระทำ) อัตราเร่งที่กึ่งกลางแผ่นจะมีค่าสูงสุดที่เวลาประมาณ 0.067- 0.083 ms. ก่อนที่มีค่าลดลงและเพิ่มขึ้นอีกครั้งแต่เป็นในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับครั้งแรก ส่วนอัตราเร่งของพื้นที่บริเวณรอบๆเริ่มเห็นได้ชัดขึ้นและมีทิศทางไปในทิศทางเดียวกับที่กระสุนกระทำ

โดยสาเหตุที่ทำให้พฤติกรรมการเร่งของแผ่นคอนกรีตเกิดขึ้นในลักษณะนี้ ส่วนหนึ่งน่าจะมาจากลักษณะจำเพาะของกระสุนปืนเป็นหลัก โดยกระสุนขนาด 9 มม. จะมีปลายกระสุนที่แหลม มีความสามารถในการทะลุทะลวงได้ดี มีอัตราเร็วตั้งต้นอยู่ที่ประมาณ 340 ม/วินาที การมีปลายกระสุนที่แหลมก็ทำให้การปะทะที่เกิดขึ้นจำกัดอยู่ในพื้นที่ที่รอบๆตำแหน่งที่กระสุนเข้าปะทะ ทำให้อัตราเร่งที่บริเวณกึ่งกลางในทิศทางเดียวกับที่กระสุนกระทำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ส่วนรอบข้างอาจจะยังไม่ได้รับกระทบของแรงปะทะของกระสุนที่เข้ากระทำในทันทีทันใด เมื่อเวลาผ่านไปเมื่อคลื่นของแรงกระแทกเคลื่อนที่ออกไปรอบๆ พื้นที่รอบข้างเริ่มรับรู้แรงปะทะของกระสุนก็จะเกิดการเพิ่มของอัตราเร่งในทิศทางเดียวกับที่กระสุนกระทำเช่นกัน

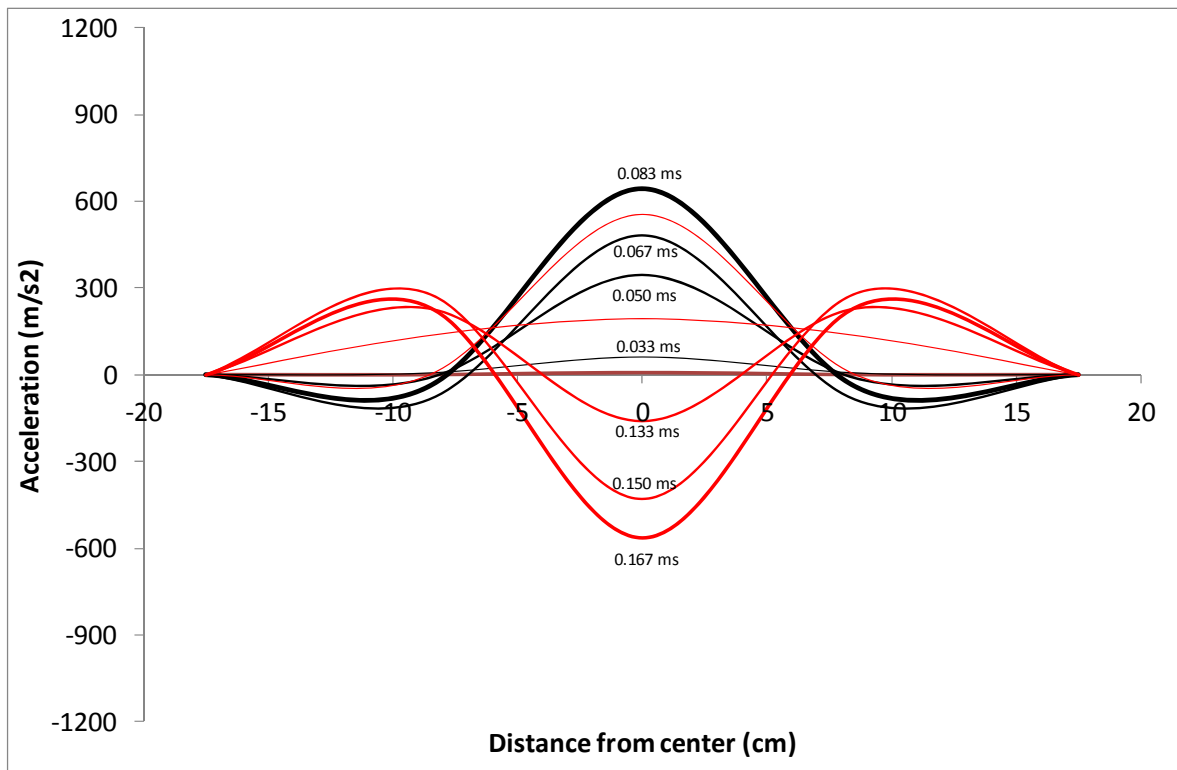
ในกรณีของกระสุนขนาด 11 มม. พบว่ารูปแบบการเกิดอัตราเร่งทั่วแผ่นเป็นไปดังแสดงในรูปที่ 4.13 ถึง 4.14 โดยพบว่ารูปแบบการเกิดอัตราเร่งของแผ่นคอนกรีตที่ถูกยิงด้วยกระสุนขนาด 11 มม. ทั้งแผ่นเป็นไปในทิศทางเดียวกันตั้งแต่เริ่มต้น โดยอัตราเร่งที่วัดได้จากตำแหน่งกึ่งกลางและตำแหน่งด้านข้างการเพิ่มขึ้นตลอดทั้งแผ่นตั้งแต่เริ่มต้นไปจนถึงช่วงเวลาอัตราเร่งเพิ่มขึ้นสูงสุด ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการที่ขนาดของหัวกระสุนที่ใหญ่กว่าและรูปร่างปลายหัวกระสุนที่ป้านกว่า ทำให้เมื่อปะทะกับแผ่นคอนกรีต แรงที่กระทำบนแผ่นคอนกรีตครอบคลุมพื้นที่กว้าง ไม่จำกัดอยู่ในวงแคบๆเหมือนกับในกรณีของกระสุน 9 มม. แผ่นคอนกรีตรับรู้แรงกระทำของกระสุนปืนและเกิดการอัตราเร่งไปในทิศทางเดียวกันทั่วทั้งแผ่น



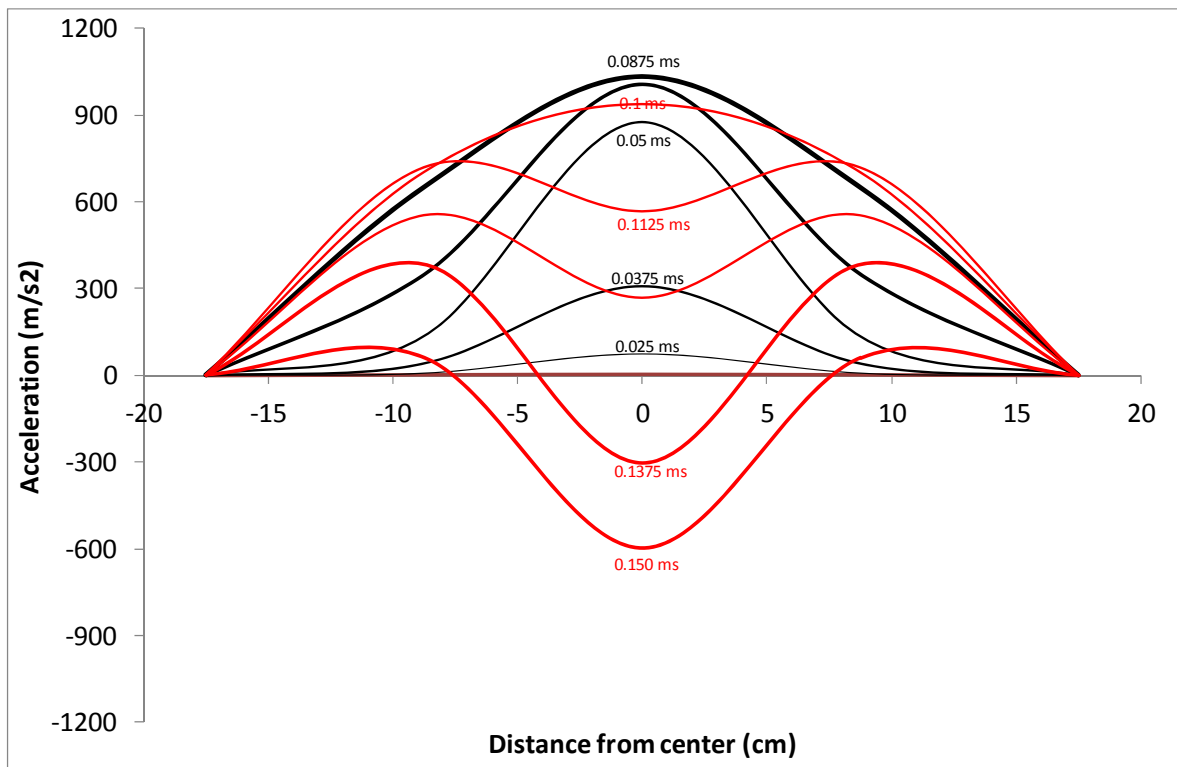
รูปที่ 4.10 อัตราเร่ง vs. เวลา ของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก 2% แบบชั้นเดียว (9 มม.)



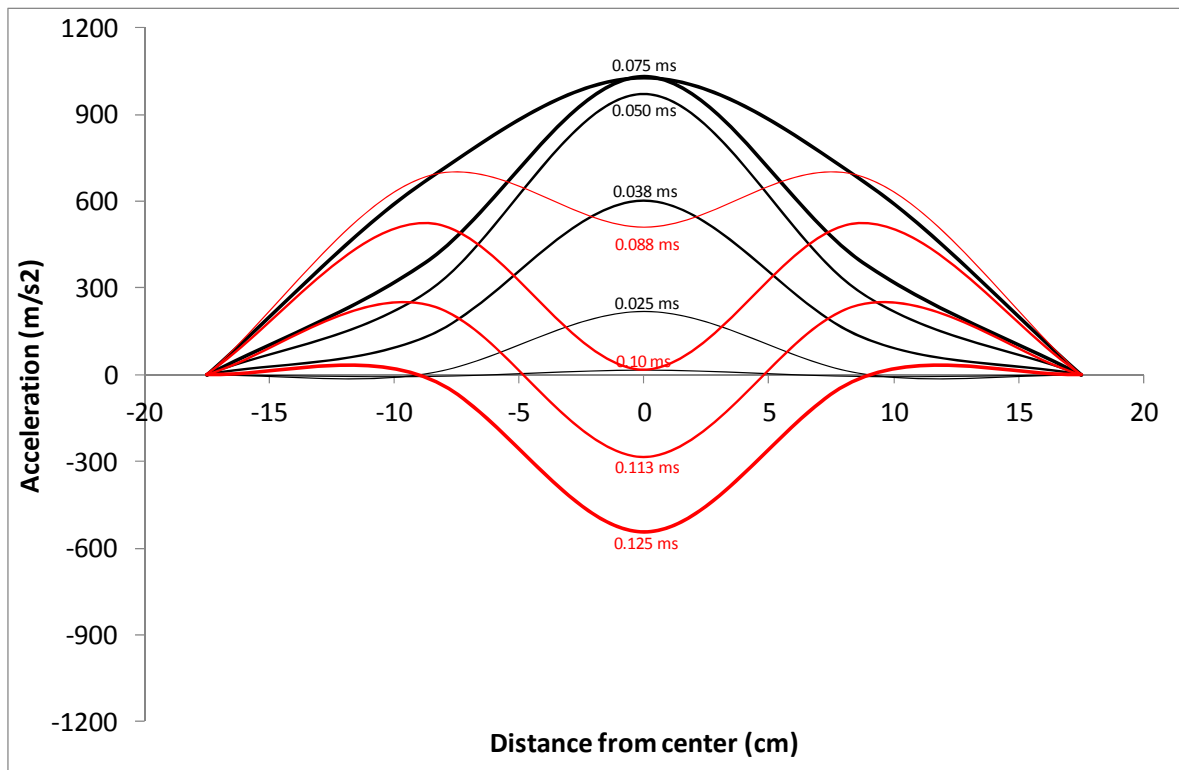
รูปที่ 4.11 อัตราเร่ง vs. เวลา ของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก 3% แบบชั้นเดียว (9 มม.)



รูปที่ 4.12 อัตราเร่ง vs. เวลา ของแผ่นคอนกรีตแบบสองชั้น (50R4S) (9 มม.)



รูปที่ 4.13 อัตราเร่ง vs. เวลา ของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก 4% แบบชั้นเดียว (11 มม.)



รูปที่ 4.14 อัตราเร่ง vs. เวลา ของแผ่นคอนกรีตแบบสองชั้น (50R4S) (11 มม.)

4.1.2.2 ค่าอัตราเร่ง

ค่าอัตราเร่งที่ได้จากการทดสอบด้วยกระสุนขนาด 9 มม. และ 11 มม. เป็นไปดังแสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16 โดยค่าอัตราเร่งที่นำมาวิเคราะห์ในส่วนนี้เป็นอัตราเร่งวัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางแผ่นและเกิดจากการปะทะครั้งแรก โดยผลการทดลองในแผ่นคอนกรีตแบบชั้นเดียวพบว่าภายใต้แรงกระทำของกระสุนขนาด 9 มม. ค่าอัตราเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าอยู่ระหว่าง 579 – 1000 เมตร/วินาที² ส่วนกระสุนขนาด 11 มม. จะให้ค่าอัตราเร่งสูงสุดต่ำกว่าของ 9 มม. เล็กน้อย โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 608 – 906 เมตร/วินาที² นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราเร่งมีค่าลดลงตามปริมาณเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการดูดซับพลังงานบางส่วน of แผ่นคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้น ในกรณีของแผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้น สามารถแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน คือ

ผลกระทบของเปอร์เซ็นต์ยาง สำหรับสัดส่วนผสมเม็ดยางที่ใช้ในการทดลองนี้มี 3 ค่า คือ 50% 75% และ 100% โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด โดยคอนกรีตผสมเม็ดยางซึ่งทำหน้าที่ลดหรือดูดซับพลังงานจากการปะทะของกระสุนปืนจะอยู่เป็นชั้นนอกของแผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้น โดยทำการปรับลดความหนาของชั้นคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็ก 0.5 1.0 และ 1.5 ซม. แล้วแทนที่ด้วยชั้นของคอนกรีตผสมเม็ดยาง ผลการทดสอบพบว่าชั้น

คอนกรีตผสมเม็ดยางมีความสามารถในการดูดซับพลังงานจากการกระแทกของกระสุนได้ ดังจะเห็นได้จากการลดลงของค่าอัตราเร่งที่เกิดขึ้นในแผ่นคอนกรีตมีค่าต่ำกว่าแผ่นคอนกรีตที่ไม่มีชั้นของคอนกรีตผสมเม็ดยางที่ด้านนอก โดยการลดลงของค่าอัตราเร่งจะแปรผันไปตามสัดส่วนผสมเม็ดยางที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานที่เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนผสมของเม็ดยางที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน

ผลกระทบของปริมาณเส้นใย ผลการทดลองพบว่าที่ความหนาเท่ากันและสัดส่วนผสมเม็ดยางที่เท่ากัน อัตราเร่งที่กึ่งกลางแผ่นมีค่าลดลงตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นในชั้นของคอนกรีตเสริมเส้นใย ซึ่งสอดคล้องกับในกรณีของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กแบบชั้นเดียว โดยปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานกระแทกจากกระสุนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.15 อัตราเร่งของแผ่นคอนกรีตภายใต้แรงกระแทกของกระสุนขนาด 9 มม.



รูปที่ 4.16 อัตราเร่งของแผ่นคอนกรีตภายใต้แรงกระแทกของกระสุนขนาด 11 มม.

4.1.2.3 สัดส่วนอัตราเร่งต่อน้ำหนักแผ่นคอนกรีต

เป้าหมายสำคัญอันหนึ่งในงานวิจัยนี้คือการลดน้ำหนักของแผ่นคอนกรีตด้วยการแทนที่ความหนาบางส่วนของชั้นคอนกรีตผสมเส้นใยด้วยชั้นของคอนกรีตผสมเม็ดยางที่มีหน่วยน้ำหนักต่ำกว่า เนื่องจากต้องการทำให้แผ่นคอนกรีตมีน้ำหนักเบาและยกติดตั้งได้ง่าย ซึ่งผลของการแทนที่ดังกล่าวทำให้น้ำหนักของแผ่นคอนกรีตลดลงตั้งแต่โดยประมาณตั้งแต่ 3% ไปจนถึง 15% (ตาราง 4.3)

ตารางที่ 4.8 นอกจากจะแสดงน้ำหนักเปรียบเทียบของแผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้นเทียบกับแบบชั้นเดียวแล้ว ยังทำการเปรียบเทียบหาสัดส่วนของอัตราเร่งที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักของแผ่นทดสอบ (a/W) โดยผลการคำนวณพบว่าค่า a/W ของแผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้นจะมีค่าต่ำกว่าของแผ่นคอนกรีตแบบชั้นเดียว เมื่อเปรียบเทียบในสัดส่วนผสมเส้นใยหลักที่เท่ากัน โดย a/W ratio ที่ลดลงน่ามีสาเหตุมาจากการลดลงของค่าอัตราเร่งควบคู่ไปกับการลดลงของค่าหน่วยน้ำหนัก

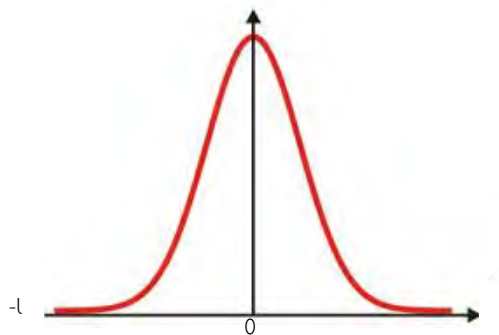
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบน้ำหนักแผ่นคอนกรีตที่นำมาทดสอบ

Type	Weight (kg)	Density (kg/m ³)	%Weight Reduction	Acceleration (m/s ²)		Acceleration per Weight Ratio	
				9 mm	11 mm	9 mm	11 mm
S2	11.52	2,399.06	0	1068.39	1013.64	92.78	88.02
S3	11.68	2,434.36	0	1037.84	1000.25	88.82	85.60
S4	11.57	2,410.56	0	964.53	944.40	83.36	81.62
R50/S2	11.18	2,328.80	2.93	894.01	741.84	79.98	66.36
R75/S2	11.14	2,320.75	3.26	864.41	738.45	77.60	66.29
R100/S2	11.15	2,322.51	3.19	822.99	723.05	73.82	64.86
R50/S3	11.30	2,354.62	3.28	850.06	711.53	75.21	62.96
R75/S3	11.16	2,324.77	4.50	802.91	678.74	71.95	60.82
R100/S3	11.02	2,294.92	5.73	763.51	633.45	69.31	57.50
R50/S4	11.16	2,325.09	3.55	712.943	671.66	63.88	60.18
R75/S4	10.95	2,281.23	5.36	684.019	634.75	62.47	57.97
R100/S4	10.74	2,237.37	7.18	671.90	587.73	62.56	54.73

4.1.3 แรงเฉื่อย (Inertial Load)

4.1.3.1 สมการที่ใช้ในการคำนวณ

ในส่วนนี้จะเป็นการเสนอสมการเพื่อคำนวณแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้นบนแผ่นคอนกรีต จากลักษณะการกระจายของอัตราเร่งบนแผ่นคอนกรีต พบว่า ณ ตำแหน่งที่อัตราเร่งที่กึ่งกลางมีค่ามากที่สุด และมีลักษณะการกระจายตัวเป็นรูประฆังคว่ำ ดังนั้นรูปแบบที่ที่มีความสอดคล้อง คือ รูปแบบของเกาส์ (Gaussian Distribution Function) แสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 รูปแบบของเกาส์

สมมติฟังก์ชันการกระจัด และความเร่ง ดังสมการ

$$u(x,t) = u_o^P e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^2} \quad (1)$$

$$\delta u(x,t) = \delta u_o^P e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^2} \quad (2)$$

$$\ddot{u}(x,t) = \ddot{u}_o^P e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^2} \quad (3)$$

ค่าความเร่งที่ได้จากการวัดสัมพันธ์กับแรงที่เกิดขึ้นบนแผ่นคอนกรีต (แรงเฉื่อย, P_i) แรงเฉื่อย หมายถึงแรงที่ใช้ในการเร่งแผ่นคอนกรีตจากสภาวะหยุดนิ่งจนมีการเคลื่อนที่ที่สามารถคำนวณได้จากสมการ (4)

$$dI(x,t) = \rho(2\pi h)x.\ddot{u}(x,t)dx \quad (4)$$

จากหลักการงานเสมือน

$$P_i(t)\partial u_o^p = \int_0^l \rho(2\pi h)x.\ddot{u}(x,t)\partial u(x,t)dx \quad (5)$$

แทนค่าสมการที่ (2) และ (3) ลงใน (5)

$$P_i(t)\partial u_o^p = \int_0^l \rho(2\pi h)x.\ddot{u}_o^p e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^2} \partial u_o^p e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^2} dx$$

$$P_i(t)\partial u_o^p = 2\pi h\rho\ddot{u}_o^p \int_0^l x.e^{-\left[\frac{2x^2}{a^2}\right]} dx$$

ดังนั้นสมการแรงเฉื่อยสามารถคำนวณได้จาก

$$P_i(t) = \pi\rho h\ddot{u}_o^p \left[\frac{a^2}{2} \right] \left[1 - e^{-\left[\frac{(2)l^2}{a^2}\right]} \right] \quad (6)$$

โดยที่

- ρ คือ ความหนาแน่นของแผ่นคอนกรีต
- h คือ ความหนาของแผ่นคอนกรีต
- $\ddot{u}_o^p$ คือ ค่าความเร่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นคอนกรีต
- l คือ ระยะครึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างฐานรองรับ
- a คือ ค่าคงที่ (เมตร)

จากสมการที่ (6) ค่าคงที่ a เป็นพารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับความกว้างของฟังก์ชัน หาได้จากการนำค่าอัตราเร่งแรงเฉื่อย ตำแหน่งกึ่งกลางและด้านข้าง แทนค่าในสมการที่ (3)

4.1.3.2 การคำนวณหาค่าคงที่ a

(a) แผ่นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กแบบชั้นเดียว (SFRC) หนา 25 มิลลิเมตร

จากการทดสอบ ณ เวลาที่อัตราเร่งถึงกลางสูงสุด นำอัตราส่วนระหว่างอัตราเร่งที่จุดถึงกลางและด้านข้าง
คำนวณหาค่าคงที่ a ได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ a ของแผ่นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กแบบชั้นเดียว

	กรณีกระสุน 9 มม.			
	อัตราเร่งถึงกลาง	อัตราเร่งด้านข้าง	อัตราเร่งถึงกลาง/ อัตราเร่งด้านข้าง	ค่าคงที่ a
SFRC2%	1068.39	58.35	18.309	0.0513
SFRC3%	1037.84	61.74	16.809	0.0521
SFRC4%	964.53	52.85	18.249	0.0514
	กรณีกระสุน 11 มม.			
	อัตราเร่งถึงกลาง	อัตราเร่งด้านข้าง	อัตราเร่งถึงกลาง/ อัตราเร่งด้านข้าง	ค่าคงที่ a
SFRC2%	1013.64	82.86	12.233	0.0553
SFRC3%	1000.25	70.01	14.287	0.0537
SFRC4%	944.40	68.25	13.837	0.0540

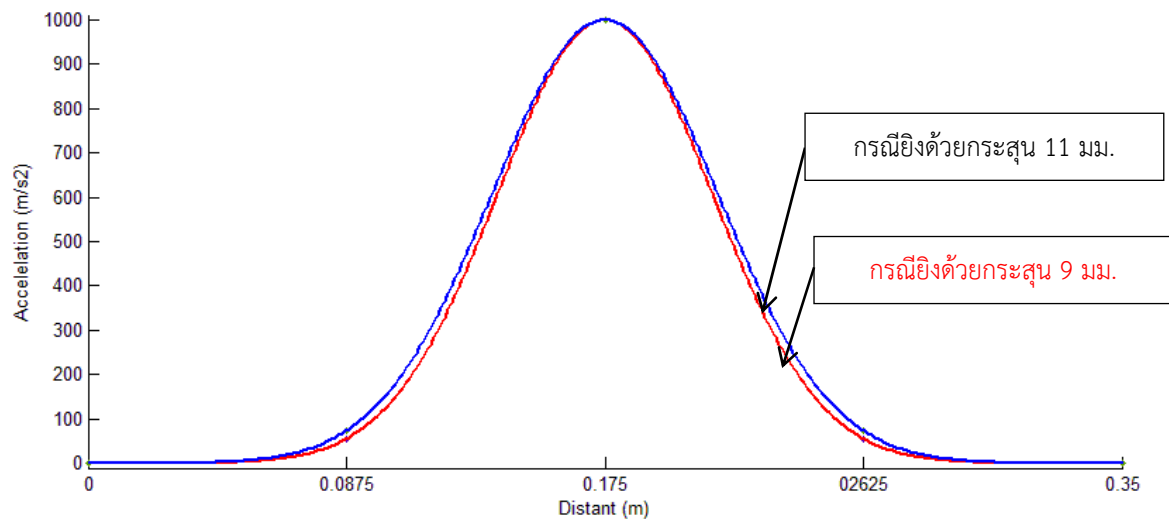
จากตารางที่ 4.4 พบว่า ค่าคงที่ a ที่ได้จากการคำนวณนั้นขึ้นกับค่าอัตราส่วนของอัตราเร่งที่จุดถึงกลางและด้านข้าง ซึ่งค่าอัตราส่วนอัตราเร่งที่เกิดจากแผ่นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กปริมาณ 2% , 3% และ 4% นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งในกรณีแผ่นคอนกรีตที่ยังด้วยกระสุน 9 มม. และ 11 มม. แสดงให้เห็นว่า แผ่นคอนกรีตที่ความหนาเท่ากันถูกยิงด้วยกระสุนชนิดเดียวกัน ผลของปริมาณเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อค่าอัตราส่วนของอัตราเร่งที่จุดถึงกลางและด้านข้าง ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก จึงทำให้ค่าคงที่ a มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นในการคำนวณหาค่าคงที่ a จะใช้ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนของอัตราเร่งของแผ่นคอนกรีตที่ปริมาณเส้นใยเหล็ก 2% , 3% และ 4% นำมาคำนวณหาค่าคงที่ a เพื่อใช้เป็นตัวแทนแผ่นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กแบบชั้นเดียว ดังตารางที่ 4.5

เมื่อนำค่าคงที่ a ที่ได้จากตารางที่ 4.5 มาสร้างความสัมพันธ์ของการกระจายของอัตราเร่งบนแผ่นคอนกรีตที่ระยะต่างๆ ที่เกิดจากกระสุนขนาด 9 มม. และ 11 มม. ดังรูปที่ 4.18 โดยสมมติให้อัตราเร่งที่ถึงกลาง เท่ากับ $1,000 \text{ m/s}^2$ จะพบว่า ลักษณะการกระจายของอัตราเร่งที่เกิดจากกระสุน 9 มม. จะมีลักษณะฐานที่แคบกว่าอัตราเร่งที่เกิดจากกระสุน 11 มม. เนื่องมาจากเป็นผลมาจากรูปทรงของกระสุน 9 มม. ที่มีรูปทรงแหลมและเร็ว ทำให้ขณะกระทบ

แผ่นคอนกรีต กระสุนจะส่งผลต่ออัตราเร่งที่กึ่งกลางของแผ่นคอนกรีตบริเวณมากกว่าด้านข้างของแผ่นคอนกรีต ในกรณีแผ่นคอนกรีตที่ถูกยิงด้วยกระสุน 11 มม. เนื่องจากรูปทรงของกระสุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่และ หัวกระสุนป้าน ทำให้ขณะกระทบแผ่นคอนกรีต กระสุนจะส่งผลต่ออัตราเร่งกระจายได้ทั่วทั้งแผ่นคอนกรีต

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่ a แบบเฉลี่ยของแผ่นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กแบบชั้นเดียว

	กรณีกระสุน 9 มม.				
	อัตราเร่งกึ่งกลาง	อัตราเร่งด้านข้าง	อัตราเร่งกึ่งกลาง/ อัตราเร่งด้านข้าง	อัตราส่วนเฉลี่ย	ค่าคงที่ a
SFRC2%	1068.39	58.35	18.309	17.789	0.0516
SFRC3%	1037.84	61.74	16.809		
SFRC4%	964.53	52.85	18.249		
	กรณีกระสุน 11 มม.				
	อัตราเร่งกึ่งกลาง	อัตราเร่งด้านข้าง	อัตราเร่งกึ่งกลาง/ อัตราเร่งด้านข้าง	อัตราส่วนเฉลี่ย	ค่าคงที่ a
SFRC2%	1013.64	82.86	12.233	13.452	0.0543
SFRC3%	1000.25	70.01	14.287		
SFRC4%	944.40	68.25	13.837		



รูปที่ 4.18 ลักษณะการกระจายตัวของอัตราเร่งบนแผ่นคอนกรีตแบบชั้นเดียวที่ตำแหน่งต่างๆ

(b) แผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้น ความหนา 30 มิลลิเมตร (ชั้นเม็ดยาง 5 มม. ชั้นเส้นใยเหล็ก 25 ,,))

จากผลการทดสอบที่ได้กล่าวมา การเพิ่มความหนาของชั้นเม็ดยางที่ด้านหน้าของการปะทะของกระสุน ทำให้ค่าอัตราเร่งที่เกิดขึ้นบนแผ่นคอนกรีตนั้นลดลง ดังนั้นแนวทางการคำนวณหาค่าคงที่ a จะพิจารณาว่า การเพิ่มความหนาของชั้นคอนกรีตผสมเม็ดยางที่ปริมาณคงที่ที่ด้านหน้าของชั้นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก 2% , 3% และ 4% ส่งผลต่อค่าอัตราส่วนของของอัตราเร่งที่จุดกึ่งกลางและด้านข้างมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน เช่นเดียวกับการคำนวณหาค่าคงที่ กรณีแผ่นคอนกรีตแบบชั้นเดียว ดังนั้นสามารถคำนวณค่าคงที่ a ได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าคงที่ a แบบเฉลี่ยของแผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้น (ชั้นเม็ดยางหนา 5 มิลลิเมตร)

	กรณีกระสุน 9 มม.				
	อัตราเร่งกึ่งกลาง	อัตราเร่งด้านข้าง	อัตราเร่งกึ่งกลาง/ อัตราเร่งด้านข้าง	อัตราส่วนเฉลี่ย	ค่าคงที่ a
50R2S	894.01	36.31	24.62	18.58	0.0512
50R3S	850.06	158.91	5.35		
50R4S	712.94	27.67	25.77		
75R2S	864.41	138.85	6.23	17.25	0.0518
75R3S	802.91	29.35	27.35		
75R4S	684.02	37.67	18.16		
100R2S	822.99	265.82	3.09	18.51	0.0512
100R3S	763.51	38.47	19.85		
100R4S	671.90	20.62	32.58		
50R2S	741.85	148.42	4.99	9.79	0.0580
50R3S	711.54	54.98	12.94		
50R4S	671.66	58.65	11.45		
75R2S	738.45	69.61	10.61	9.13	0.0588
75R3S	678.75	49.87	13.61		
75R4S	634.75	200.36	3.17		
100R2S	723.05	119.89	6.03	9.25	0.0586
100R3S	633.45	42.62	14.86		
100R4S	587.74	85.58	6.87		

จากตารางที่ 4.6 พบว่า ค่าคงที่ a ที่เกิดจากแผ่นคอนกรีตที่ยิงด้วยกระสุน 9 มม. นั้นมีค่าที่น้อยกว่า ค่าที่ได้จากแผ่นคอนกรีตที่ยิงด้วยกระสุน 11 มม. เนื่องมาจากเป็นผลมาจากรูปทรงของกระสุน 9 มม. ที่มีรูปทรงแหลมและ

เร็ว กระสุนจะส่งผลต่ออัตราเร่งที่กึ่งกลางของแผ่นคอนกรีตบริเวณมากกว่าด้านข้างของแผ่นคอนกรีต กรณี กระสุน 11 มม.รูปทรงของกระสุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่และหัวกระสุนป้าน ทำให้ขณะกระทบแผ่นคอนกรีต กระสุนจะส่งผลต่ออัตราเร่งกระจายได้ทั่วทั้งแผ่นคอนกรีต ซึ่งผลที่ได้เหมือนกับกรณีแผ่นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กแบบชั้นเดียวเช่นกัน

(c) กรณีแผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้น ความหนารวม 30 มิลลิเมตร

โดยทำการเปรียบเทียบความหนาชั้นเม็ดทราย ต่อ ชั้นเส้นใยเหล็ก ดังนี้ 10 : 20 และ 15 : 15 (หน่วย มิลลิเมตร) หลักการคำนวณค่าคงที่ a ใช้หลักการเช่นเดียวกับกรณีแผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้น ที่กล่าวมาในช่วงต้น โดยทำการคำนวณแยกตามความหนาดังตารางที่ 4.7

จากตารางที่ 4.7 พบว่า การเพิ่มความหนาของชั้นเม็ดทรายและลดความหนาของชั้นเส้นใยเหล็ก ทำให้ค่าคงที่ a มีแนวโน้มลดลง ทั้งในกรณีแผ่นคอนกรีตที่ยิงด้วยกระสุน 9 มม. และ 11 มม. ทั้งนี้เนื่องมาจากความหนาของชั้นเส้นใยเหล็กเป็นส่วนสำคัญที่ต้านทานแรงกระทำจากกระสุนป้าน ดังนั้นความหนาของชั้นเส้นใยเหล็กที่ลดลง จึงทำให้กระสุนมีความสามารถในการทะลุแผ่นคอนกรีตได้มากขึ้น ส่งผลให้แรงปะทะที่เกิดจากกระสุนป้านมีผลต่อตำแหน่งตรงกลางของแผ่นคอนกรีตมากกว่าตำแหน่งด้านข้าง

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่ a แบบเฉลี่ยของแผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้น (ชั้นเม็ดทรายหนา 10 และ 15 มิลลิเมตร)

	กรณีกระสุน 9 มม.				
	อัตราเร่งกึ่งกลาง	อัตราเร่งด้านข้าง	อัตราเร่งกึ่งกลาง/ อัตราเร่งด้านข้าง	อัตราส่วนเฉลี่ย	ค่าคงที่ a
75R2S(1)	904.84	32.06	28.226	20.790	0.0502
75R3S(1)	811.80	70.47	11.519		
75R4S(1)	798.99	35.32	22.624		
75R2S(1.5)	981.49	45.33	21.652	29.009	0.0476
75R3S(1.5)	955.11	39.05	24.458		
75R4S(1.5)	858.55	20.98	40.917		
	กรณีกระสุน 11 มม.				
	อัตราเร่งกึ่งกลาง	อัตราเร่งด้านข้าง	อัตราเร่งกึ่งกลาง/ อัตราเร่งด้านข้าง	อัตราส่วนเฉลี่ย	ค่าคงที่ a
75R2S(1)	815.67	44.62	18.279	16.977	0.0520
75R3S(1)	806.73	75.26	10.720		
75R4S(1)	802.74	36.59	21.933		
75R2S(1.5)	973.52	42.15	23.094	23.207	0.0493
75R3S(1.5)	931.93	52.03	17.911		
75R4S(1.5)	876.09	30.61	28.618		

4.1.3.3 ค่าแรงเฉื่อย

จากสมการที่ (6) เมื่อนำค่าคงที่ a และค่าความหนาแน่นของแผ่นคอนกรีตแทนค่าลงไป จะสามารถคำนวณค่าแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้นกับแผ่นคอนกรีตได้ดังนี้

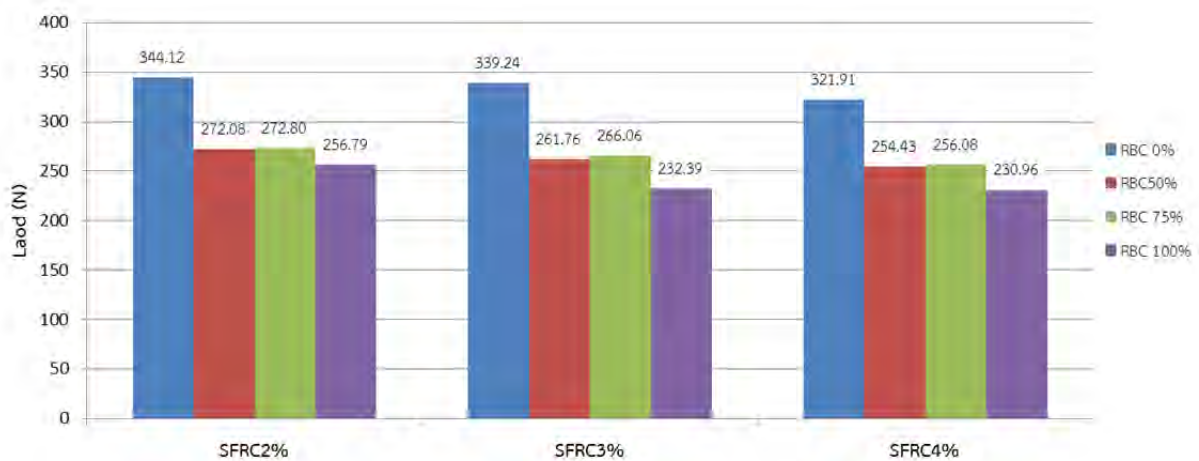
(a) เปรียบเทียบแผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้นกับแผ่นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กชั้นเดียว

จากรูปที่ 4.19 พบว่า แรงเฉื่อยที่เกิดขึ้นลดลงสัดส่วนของเม็ดยางที่เพิ่มขึ้นและปริมาณเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้น โดยที่แรงเฉื่อยของแผ่นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กแบบชั้นเดียว มีค่าแรงเฉื่อยที่สูงกว่าแผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้น เนื่องจากชั้นคอนกรีตผสมเม็ดยางดูดซับพลังงานจนทำให้บางส่วนจึงทำให้แรงเฉื่อยมีแนวโน้มลดลง

เมื่อเปรียบเทียบแรงเฉื่อยที่เกิดจากแผ่นคอนกรีตที่ถูกยิงด้วยกระสุน 9 มม. และ 11 มม. พบว่า ค่าแรงเฉื่อยที่เกิดจากกระสุน 11 มม. มีแนวโน้มค่าแรงเฉื่อยที่สูงกว่าแผ่นที่ถูกยิงด้วยกระสุน 9 มม. ทั้งนี้เนื่องมาจากโมเมนต์ของกระสุนปืนที่เข้าปะทะของกระสุน 11 มม. มีค่ามากกว่า กระสุน 9 มม. (โมเมนต์ของกระสุน 11 มม. = $0.0149 \times 254 = 3.784 \text{ N.s}$, โมเมนต์ของกระสุน 9 มม. = $0.00745 \times 362 = 2.696 \text{ N.s}$) ทำให้แรงที่เกิดขึ้นบนแผ่นคอนกรีตที่ถูกยิงด้วยกระสุน 11 มม. มีค่าแรงเฉื่อยมากกว่าแผ่นคอนกรีตที่ถูกยิงด้วยกระสุน 9 มม.



a) กระสุน 9 มม.



บ) กระสุน 11 มม.

รูปที่ 4.19 แรงเฉื่อยของแผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้น (5/25)
(ชั้นเม็ดยางหนา 5 มิลลิเมตร และชั้นเส้นใยเหล็กหนา 25 มิลลิเมตร)

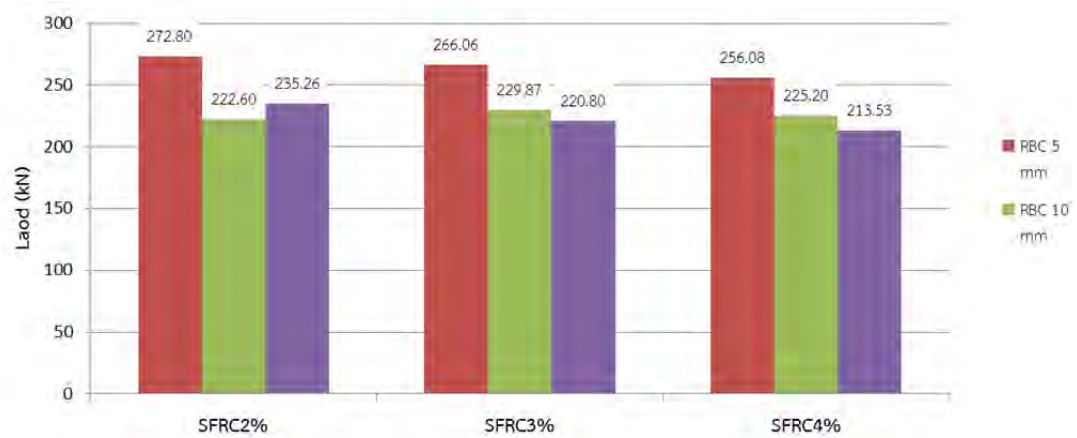
(บ) เปรียบเทียบระหว่างแผ่นคอนกรีต 2 ชั้นที่มีความหนาของชั้นคอนกรีตผสมยาง (5/25, 10/20 และ 15/15)

จากรูปที่ 4.20 พบว่า แรงเฉื่อยที่เกิดขึ้นบนแผ่นคอนกรีต มีแนวโน้มลดลงตามความหนาของชั้นเม็ดยางที่เพิ่มขึ้น (ลดสัดส่วนความหนาของชั้นเส้นใยเหล็ก) ทั้งในกรณีแผ่นคอนกรีตที่ถูกยิงด้วยกระสุน 9 มม. และ 11 มม. เมื่อเปรียบเทียบแรงเฉื่อยที่เกิดจากแผ่นคอนกรีตที่ถูกยิงด้วยกระสุน 9 มม. และ 11 มม. พบว่า ค่าแรงเฉื่อยที่เกิดจากกระสุน 11 มม. มีแนวโน้มค่าแรงเฉื่อยที่สูงกว่าแผ่นที่ถูกยิงด้วยกระสุน 9 มม.

อย่างไรก็ตาม การที่แรงเฉื่อยมีค่าลดลงตามความหนาของชั้นเม็ดยางที่เพิ่มขึ้นนั้น (ลดสัดส่วนความหนาของชั้นเส้นใยเหล็ก) เกิดมาจากการที่เนื่องมาจากความหนาของชั้นเส้นใยเหล็กเป็นสำคัญที่ต้านทานแรงกระทำจากกระสุนปืน ดังนั้นความหนาของชั้นเส้นใยเหล็กที่ลดลง จึงทำให้กระสุนมีความสามารถในการทะลุแผ่นคอนกรีตได้มากขึ้น ส่งผลให้แรงปะทะที่เกิดจากกระสุนปืนมีผลต่อตำแหน่งตรงกลางของแผ่นคอนกรีตมากกว่าตำแหน่งด้านข้างซึ่งสอดคล้องกับค่าคงที่ a ที่ได้จากการคำนวณในหัวข้อ 4.1.3.2(c)



a) กรณีกระสุน 9 มม.



b) กรณีกระสุน 11 มม.

รูปที่ 4.20 แรงเฉื่อยของแผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้น

(ความหนาชั้นเม็ดยาง ต่อ ชั้นเส้นใยเหล็ก 5 : 25 , 10 : 20 และ 15 : 15 (หน่วย มิลลิเมตร))

4.1.4 การโค้งตัวของแผ่นคอนกรีต

การ โค้งตัวของแผ่นคอนกรีตได้จากการนำข้อมูลของอัตราเร่งมาทำการอินทิเกรตเทียบกับเวลาเป็นจำนวน 2 ครั้ง ดังสมการด้านล่าง

$$u(t) = \iint_0^t \ddot{u}(t) dt$$

โดยที่ $\ddot{u}(t)$ is the acceleration at any time t

$u(t)$ is the displacement at any time t

ผลการคำนวณการโก่งตัวที่กึ่งกลางแผ่นทดสอบจากข้อมูลการทดสอบด้วยกระสุนขนาด 9 มม. เป็นดังแสดงในตารางที่ 4.8 โดยพบว่าค่าการโก่งตัวที่ของแผ่นทดสอบมีค่าลดลงตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นในกรณีของแผ่นคอนกรีตแบบชั้นเดียว ส่วนในกรณีของแผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้น พบว่าค่าการโก่งตัวมีค่าลดลงตามสัดส่วนผสมของเม็ดยางที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชั้นของคอนกรีตผสมเม็ดยางมีความสามารถในการดูดซับพลังงานจลย์บางส่วนของกระสุนก่อนที่จะกระทำต่อแผ่นทดสอบอันมีผลทำให้อัตราเร่งและการโก่งตัวลดต่ำลง

ตารางที่ 4.8 ค่าการโก่งตัวที่กึ่งกลางของแผ่นคอนกรีตทดสอบด้วยกระสุนขนาด 9 มม.

Type	Avg. Center Displacement (mm)	% Difference	D/W ratio Disp. per weight (mm/kg)
S2	0.46	-	0.040
S3	0.44	-	0.038
S4	0.42	-	0.036
R50/S2	0.35	23.91	0.031
R75/S2	0.28	39.13	0.025
R100/S2	0.25	45.65	0.022
R50/S3	0.39	11.29	0.035
R75/S3	0.37	17.38	0.033
R100/S3	0.32	28.44	0.029
R50/S4	0.37	10.84	0.033
R75/S4	0.33	20.48	0.030
R100/S4	0.28	33.49	0.026

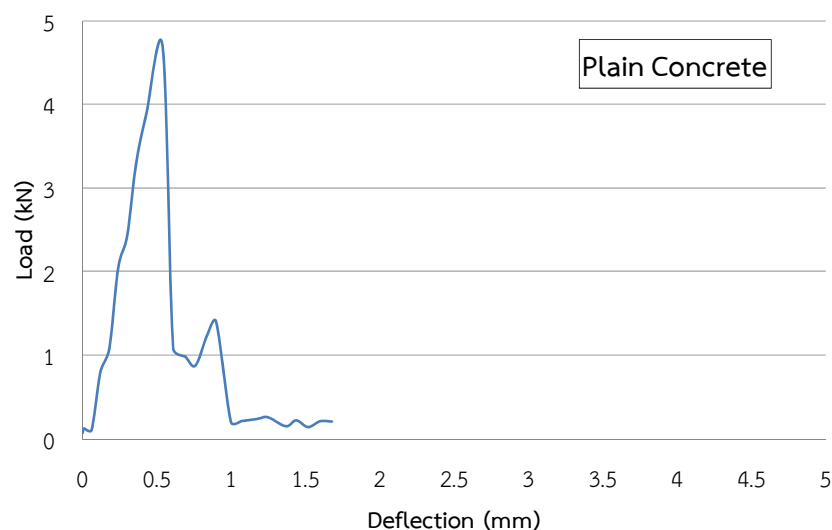
4.2 ผลการทดสอบแรงกระทำแบบคงที่ (Static Test)

4.2.1 ผลการทดสอบตัวอย่างแบบชั้นเดียว

4.2.1.1 แผ่นคอนกรีตล้วน

ในกรณีของแผ่นคอนกรีตล้วน พฤติกรรมการรับแรงจะพบว่าแผ่นทดสอบมีพฤติกรรมการรับแรงแบบเปราะ ซึ่งเป็นคุณลักษณะเด่นของคอนกรีตล้วน โดยการโค้งตัวของแผ่นทดสอบมีค่าแปรผันโดยตรงกับขนาดของแรงกระทำที่เพิ่มขึ้น โดยปกติก่อนจะถึงตำแหน่งการรับแรงสูงสุดนั้น พฤติกรรมการรับแรงของวัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลงจาก แบบเชิงเส้นตรง (Linear) ไปเป็น แบบไม่เชิงเส้นตรง (Non-Linear) อันเป็นผลมาจากการขยายตัวและการเคลื่อนที่ของรอยร้าวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานความเครียดที่สะสมอยู่ภายในวัสดุ แต่เนื่องจากการทดสอบนี้เป็นการทดสอบแรงคดและกระทำในวัสดุเปราะ ดังนั้นช่วงเวลาของการแสดงพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นจึงจะมีไม่มากนัก ซึ่งทันทีที่แรงกระทำหรือขนาดของพลังงานสะสมเพียงพอที่จะทำให้รอยร้าวเริ่มเกิดการขยายตัว มันจะเคลื่อนที่ออกจากกันอย่างรวดเร็วและนำไปสู่การวิบัติแบบทันทีทันใด (สังเกตได้จากการตกลงของแรงกระทำอย่างรวดเร็ว)

ในส่วนของรูปแบบการวิบัติที่พบจะมีลักษณะการวิบัติแบบคดและเปราะ (Flexural and Brittle Failure) โดยรอยร้าวที่พบมีจำนวนไม่มาก แต่จะมีขนาดใหญ่และทิศทางค่อนข้างเป็นเส้นตรง แผ่นคอนกรีตแตกและแยกออกจากกันอย่างเห็นได้ชัด ช่วงเวลาของการวิบัติเกิดขึ้นในระยะเวลาที่รวดเร็ว เกือบจะทันทีที่แรงกระทำเพิ่มขึ้นถึงค่าสูงสุดแผ่นทดสอบก็จะแตกออกจากกัน พร้อมกับค่ากำลังรับแรงที่ตกลงอย่างรวดเร็ว ลักษณะของรอยร้าวที่เป็นเส้นตรงแสดงให้เห็นว่าไม่มีการชะลอตัวหรือการหยุดของรอยร้าว อันเป็นลักษณะสำคัญของการวิบัติในวัสดุเปราะ (รูปที่ 4.21)





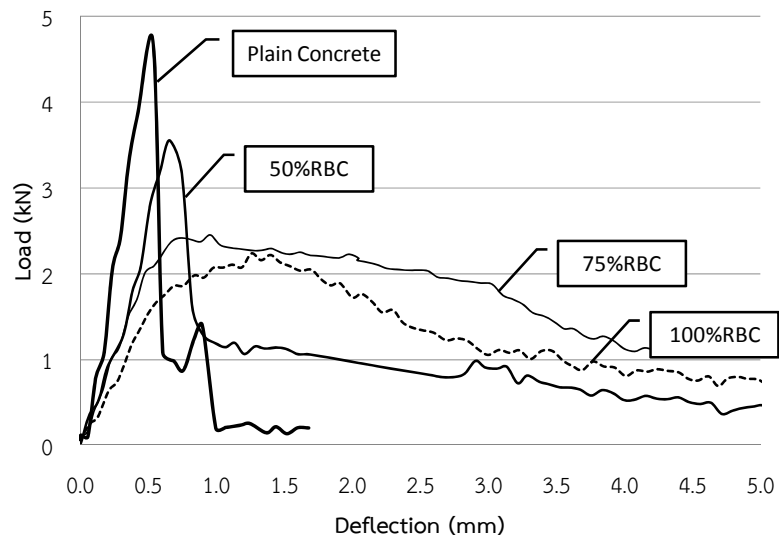
รูปที่ 4.21 พฤติกรรมการรับแรงและรูปแบบการวิบัติของแผ่นคอนกรีตล้วนแบบชั้นเดียว

4.2.1.2 แผ่นคอนกรีตผสมเม็ดยาง

พฤติกรรมภายใต้แรงกระทำและรูปแบบการวิบัติของแผ่นคอนกรีตผสมเม็ดยางแบบชั้นเดียวเป็นไปดังแสดงในรูปที่ 4.22 ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของปริมาณเม็ดยางต่อพฤติกรรมการรับแรงดัดอย่างค่อนข้างชัด โดยในคอนกรีตผสมเม็ดยางในสัดส่วน 50% โดยปริมาตรนั้น พบว่าพฤติกรรมการรับแรงดัดจะค่อนข้างคล้ายกับแผ่นคอนกรีตล้วน (เนื่องจากมีปริมาณเม็ดยางที่น้อย) คือจะมีลักษณะที่ค่อนข้างเปราะและมีการลดลงของค่ากำลังรับแรงอย่างรวดเร็วหลังจากที่แรงกระทำขึ้นถึงจุดสูงสุด แต่ก็จะมีอิทธิพลของเม็ดยางในด้านความยืดหยุ่นเข้ามาเกี่ยวข้องพอสมควร โดยสังเกตได้จากการคงความสามารถในการรับแรงไว้ได้ในระดับหนึ่งหลังจากการแตกร้าวครั้งแรก

เมื่อปริมาณเม็ดยางเพิ่มสูงขึ้น (ที่ 75% และ 100%) จะพบว่ารูปแบบพฤติกรรมการรับแรงแบบเปราะจะเริ่มลดลง โดยคอนกรีตผสมเม็ดยางเริ่มแสดงพฤติกรรมที่มีความยืดหยุ่นตัวมากขึ้น ซึ่งหมายถึงการคงความสามารถในการรับแรงกระทำที่ระยะการโก่งตัวมากๆ ได้และไม่มีการตกลงของค่ากำลังรับแรงอย่างรวดเร็วเหมือนกับในคอนกรีตธรรมดาหรือคอนกรีตผสมเม็ดยางที่ 50% อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่นตัวก็มีผลลดต่อความสามารถในการรับแรง โดยพบว่าแผ่นคอนกรีตผสมเม็ดยางในทุกสัดส่วนผสมจะมีค่ากำลังรับแรงดัดที่ต่ำกว่าแผ่นคอนกรีตล้วน

สำหรับรูปทรงการวิบัติ พบว่าคอนกรีตผสมเม็ดยางในสัดส่วน 50% โดยปริมาตรจะมีรูปแบบการวิบัติที่คล้ายกับคอนกรีตธรรมดาคือมีรอยร้าวมีขนาดใหญ่และขึ้นตัวอย่างขาดออกจากกันอย่างเด็ดขาดหลังการทดสอบสิ้นสุด อย่างไรก็ตามสำหรับตัวอย่างที่มีสัดส่วนผสมของเม็ดยางเพิ่มสูงขึ้น เช่น 75%RBC และ 100%RBC พบว่ารูปแบบการวิบัติจะแตกต่างกับตัวอย่าง 50%RBC ตรงที่ตัวอย่างจะมีความยืดหยุ่นตัวสูงกว่า และยังคงสภาพเป็นแผ่นได้โดยไม่มีเกิดการขาดออกจากกันของชิ้นตัวอย่างหลังการทดสอบสิ้นสุด (รูปที่ 4.2)



50%RBC

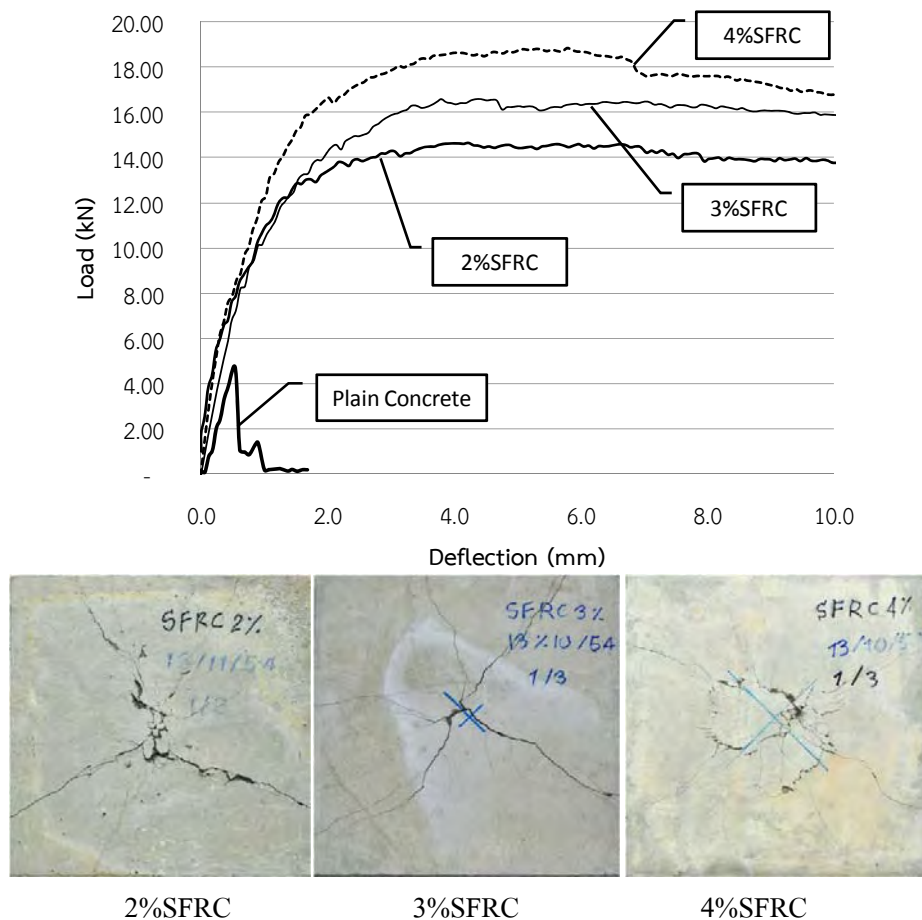
75%RBC

100%RBC

รูปที่ 4.22 พฤติกรรมการรับแรงและรูปแบบการวิบัติของแผ่นคอนกรีตผสมเม็ดยางแบบชั้นเดียว

4.2.1.3 คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก

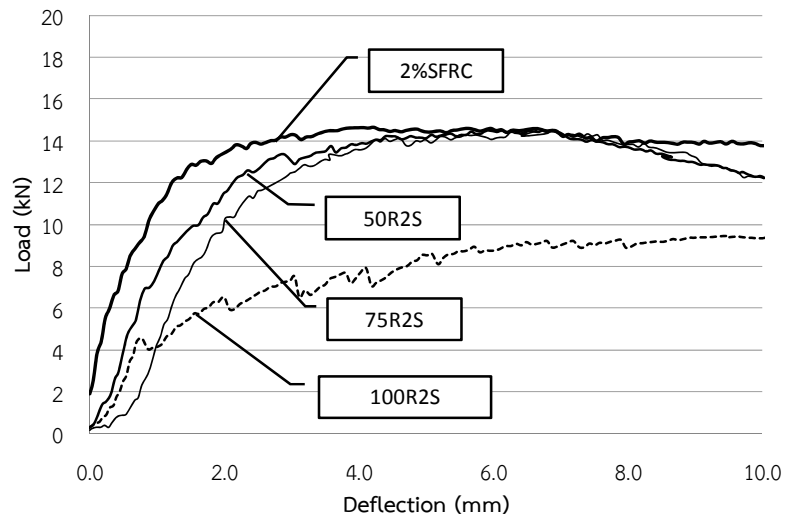
ในส่วนของการผสมเส้นใยเหล็กพบว่า การผสมเส้นใยเหล็กในสัดส่วนที่สูงมีผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดรวมถึงความเหนียวของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นสูงมากอย่างเห็นได้ชัด โดยคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่ 2%, 3% และ 4% มีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าคอนกรีตล้วนประมาณ 3.5, 4.0 และ 4.75 เท่า ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงอัดและความเหนียวเป็นผลมาจากประสิทธิภาพของเส้นใยเหล็กในการยึดรั้งและชะลอการขยายตัวของรอยร้าว ทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงทั้งก่อนและหลังการแตกร้าวครั้งแรกเพิ่มขึ้น โดยจะสังเกตได้จากรูปการวิบัติของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่จะมีจำนวนรอยร้าวขนาดเล็กๆ ที่มากกว่าแผ่นคอนกรีตล้วนและแผ่นคอนกรีตผสมเม็ดยาง รวมถึงการไม่พบรอยร้าวขนาดใหญ่ที่นำไปสู่การหลุดออกจากกันของชิ้นส่วนที่เกิดการแตกร้าว (รูปที่ 4.23)



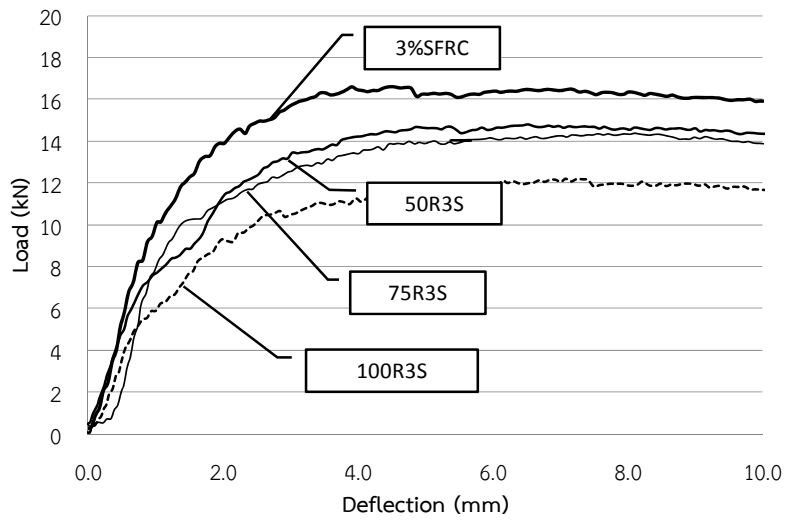
รูปที่ 4.23 พฤติกรรมการรับแรงและรูปแบบการวิบัติของแผ่นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กแบบชั้นเดียว

4.2.2 แผ่นคอนกรีตแบบสองชั้น

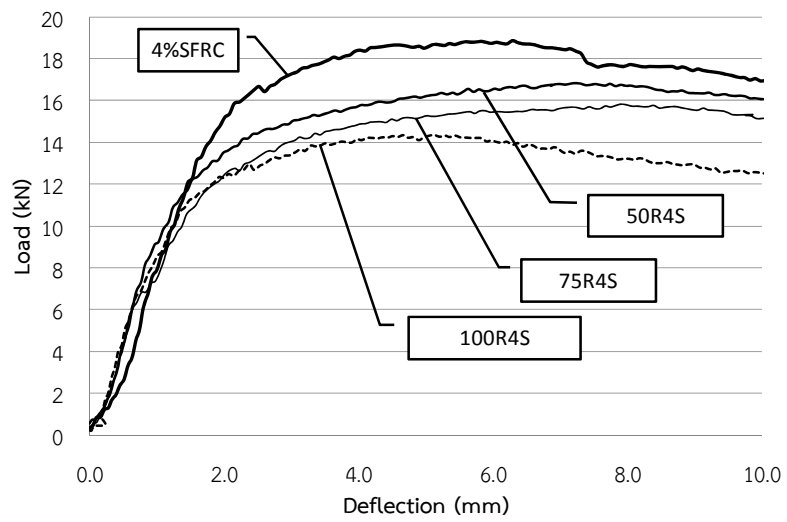
ในกรณีของตัวอย่างทดสอบแบบ 2 ชั้น พบว่าค่ากำลังรับแรงคดของแผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้นจะมีค่าต่ำกว่าแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กชั้นเดียวในทุกสัดส่วนผสม (รูปที่ 4.24) ทั้งนี้เนื่องจากลดลงของชั้นความหนาของคอนกรีตเสริมเส้นใย ถึงแม้ว่าจะถูกแทนที่ด้วยชั้นของคอนกรีตผสมเม็ดทราย แต่เนื่องจากคอนกรีตผสมเม็ดทรายเป็นวัสดุที่มีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำมาก การนำมาใช้แทนที่ก็ไม่ส่งผลมากพอที่จะทดแทนค่ากำลังรับแรงคดที่หายไป โดยคอนกรีตเสริมเส้นใยที่แทนที่ผิวบนด้วยชั้นของคอนกรีตผสมเม็ดทรายที่มีความหนา 0.5 มม. จะมีค่ากำลังรับแรงลดลงคิดเป็น ตั้งแต่ 1% ไปจนถึง 35% (ตารางที่ 4.9)



(a)



(b)



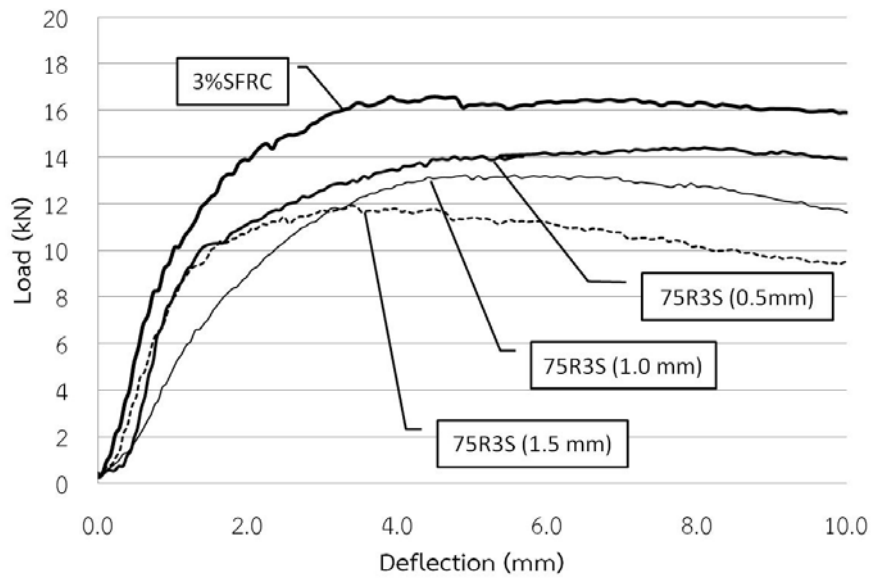
(c)

รูปที่ 4.24 ผลกระทบของปริมาณเส้นใยต่อกำลังรับแรงดัดของแผ่นคอนกรีตแบบ 2 ชั้น (a) ชั้นฐานเป็น SFRC 2% (b) ชั้นฐานเป็น SFRC 3% และ (c) ชั้นฐานเป็น SFRC 4%

ตารางที่ 4.9 ผลกระทบของสัดส่วนผสมเม็ดยางต่อค่ากำลังรับแรงดัด

Sample Type	Maximum Bending Load (kN)	Percentage Difference (%)
SFRC2%	14.63	100%
50R/S2%	14.51	99%
75R/S2%	14.57	99%
100R/S2%	9.44	64%
SFRC3%	16.58	100%
50R/S3%	14.81	89%
75R/S3%	14.39	87%
100R/S3%	12.21	74%
SFRC4%	18.84	100%
50R/S4%	16.84	89%
75R/S4%	15.83	84%
100R/S4%	14.35	76%

นอกจากผลกระทบของสัดส่วนผสมเม็ดยางแล้ว ความหนาของชั้นคอนกรีตผสมเม็ดยางก็มีผลทำให้ค่ากำลังรับแรงดัดของแผ่นทดสอบมีค่าลดลงเช่นกัน ผลการทดลองเป็นดังแสดงในรูปที่ 4.25 และตารางที่ 4.10 โดยค่ากำลังดัดที่ลดอันเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของชั้นความหนาของคอนกรีตผสมเม็ดยางที่สัดส่วนผสม 75% โดยปริมาตรมีค่าตั้งแต่ 1% ไปจนถึง 37%



รูปที่ 4.25 ผลกระทบของความหนาชั้นคอนกรีตผสมเม็ดยางต่อพฤติกรรมการรับแรงดัด

ตารางที่ 4.10 ผลกระทบของชั้นความหนาของคอนกรีตผสมเม็ดยางต่อค่ากำลังรับแรงดัด

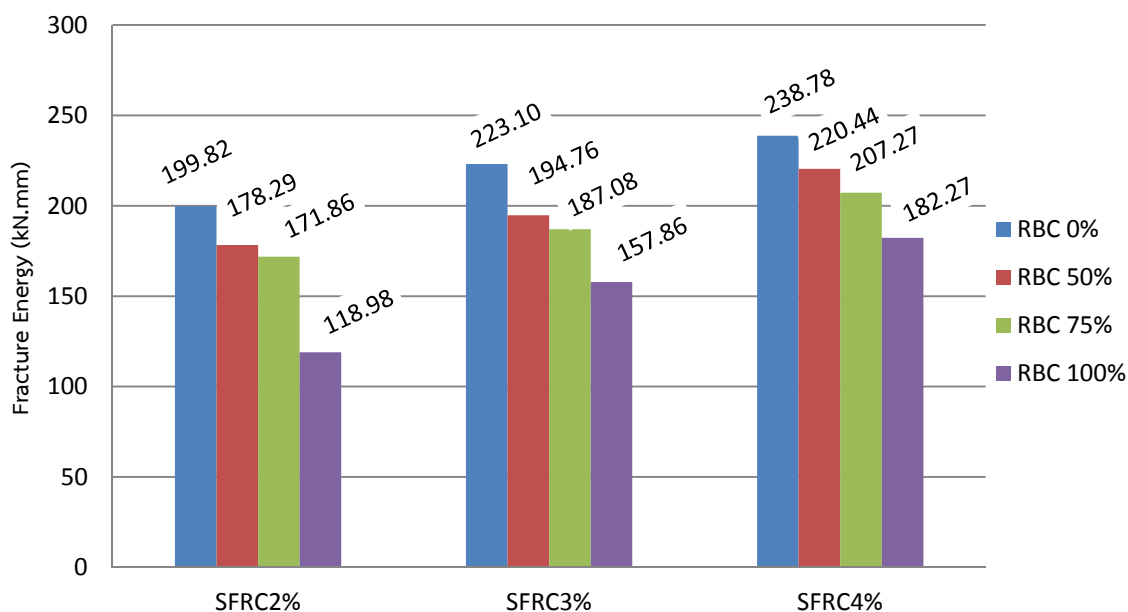
Sample Type	Maximum Bending Load (kN)	Percentage Difference(%)
SFRC2%	14.63	100.0%
75R/S2% (0.5)	14.57	99.5%
75R/S2% (1.0)	12.48	85.3%
75R/S2% (1.5)	11.31	77.3%
SFRC3%	16.58	100.0%
75R/S3% (0.5)	14.39	86.8%
75R/S3% (1.0)	13.21	79.7%
75R/S3% (1.5)	11.91	71.8%
SFRC4%	18.84	100.0%
75R/S4% (0.5)	15.83	84.0%
75R/S4% (1.0)	13.57	72.0%
75R/S4% (1.5)	11.91	63.2%

4.2.3 ค่าพลังงานแตกหัก (Fracture Energy)

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัว ของแผ่นคอนกรีตชั้นสองชั้นข้างต้น สามารถนำมาคำนวณหาค่าพลังงานแตกหักของแผ่นคอนกรีตที่ระยะการโก่งตัวที่ 15 มิลลิเมตร โดยสรุปได้ดังนี้

4.2.3.1 ผลของปริมาณเม็ดยาง

ผลการคำนวณค่าพลังงานแตกหักที่ระยะการโก่งตัว 15 มิลลิเมตร พบว่า ที่ปริมาณเส้นใยเหล็กคงที่ ค่าพลังงานแตกหักจะลดลงตามปริมาณเม็ดยางที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณเม็ดยางที่เพิ่มขึ้นทำให้แผ่นคอนกรีตเกิดความอ่อนตัวของชั้นเม็ดยางมากขึ้น เมื่อพิจารณาที่ปริมาณเม็ดยางคงที่ ค่าพลังงานแตกหักจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้นจะทำหน้าที่ยึดรั้งรอยแตกที่เกิดจากแรงกระทำไว้ทำให้แผ่นคอนกรีตมีความเหนียวมากขึ้น แสดงดังภาพที่ 4.26

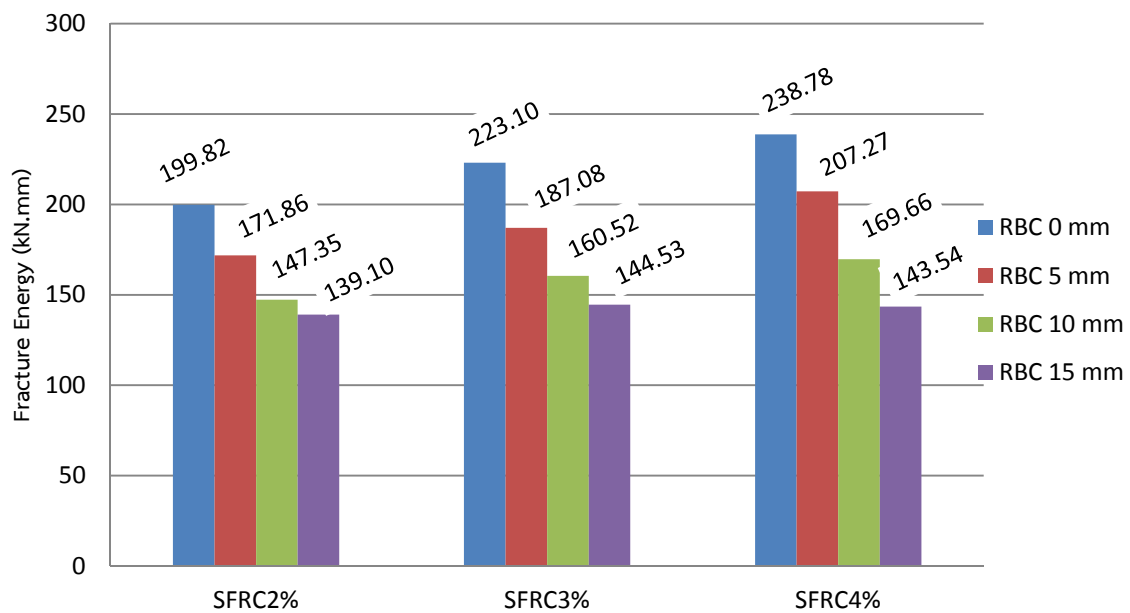


รูปที่ 4.26 พลังงานแตกหักของแผ่นคอนกรีตสองชั้นที่ระยะ 15 มิลลิเมตร ที่ปริมาณเม็ดยางต่างๆ

4.2.3.2 ผลของความหนาชั้นเม็ดยาง

ในส่วนของผลกระทบของความหนาของชั้นเม็ดยางพบว่า ค่าพลังงานแตกหักมีแนวโน้มลดลงตามความหนาของชั้นเม็ดยางที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ทั้งนี้เนื่องจากความหนาของชั้นเม็ดยางที่เพิ่มขึ้นทำให้ชั้นคอนกรีตผสมเม็ดยางนั้นมีความอ่อนตัวมากขึ้นและความหนาของชั้นของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กลดลงทำให้

ความแข็งแรงลดลงจากเดิมภายใต้แรงกระทำ ส่งผลให้ค่าพลังงานแตกหักลดลง นอกจากนี้ค่าพลังงานแตกหักเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้นด้วย (ที่ความหนาของชั้นเมือเดียวกัน)



รูปที่ 4.27 พลังงานแตกหักของแผ่นคอนกรีตสองชั้นที่ระยะ 15 มิลลิเมตร ที่ความหนาของชั้นเมือต่างๆ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยสามารถสรุปได้ว่า ในด้านของความสามารถในการรับแรงกระแทกจากกระสุนปืนของแผ่นคอนกรีตแบบสองชั้นขนาดความหนาไม่เกิน 3 ซม. ที่มีการแทนที่ชั้นของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กด้วยชั้นของคอนกรีตมวลเบาผสมเม็ดยางไม่เกิน 0.5 ซม. มีประสิทธิภาพในการป้องกันการทะลุผ่านของกระสุนปืนเล็กขนาด 9 และ 11 มม. ตามที่กำหนดในมาตรฐานของกระทรวงกลาโหม โดยแผ่นคอนกรีตแบบสองชั้นมีน้ำหนักต่อแผ่นที่เบากว่าแผ่นคอนกรีตแบบชั้นเดียว อันเนื่องมาจากการแทนที่ความหนาของชั้นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กด้วยคอนกรีตผสมเม็ดยางที่มีหน่วยน้ำหนักเบากว่า

โดยรูปแบบการวิบัติของคอนกรีตแบบสองชั้นที่มีชั้นความหนาของคอนกรีตผสมเม็ดยางไม่เกิน 5 มม. จะเป็นการกระแทกออกที่ผิวหน้าและอาจจะมีการกระแทกออกของผิวด้านหลัง แต่ไม่เกิดการกระเด็นออกมา เนื่องจากเส้นใยไฟเบอร์มีส่วนในการยึดรั้งไม่ให้หลุดออก อย่างไรก็ตาม เมื่อความหนาของชั้นคอนกรีตผสมเม็ดยางเพิ่มขึ้น (ซึ่งทำให้ความหนาของชั้นคอนกรีตเสริมเส้นใยลดลง) ส่งผลให้รูปแบบการวิบัติเปลี่ยนไป โดยเกิดการทะลุผ่านในบางกรณี ซึ่งทำให้ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

ในส่วนของอัตราเร่งและค่าแรงเฉื่อยของแผ่นคอนกรีตภายใต้แรงกระแทกของกระสุน พบว่ามีค่าลดลงในกรณีของแผ่นคอนกรีตแบบสองชั้น โดยการลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสัดส่วนของปริมาณเม็ดยางที่เพิ่มขึ้นในชั้นของคอนกรีตผสมเม็ดยาง ซึ่งการลดลงของค่าอัตราเร่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถของชั้นคอนกรีตผสมเม็ดยางในการสลายหรือดูดซับพลังงานจลน์บางส่วนของกระสุนได้ และการลดลงของอัตราเร่งนี้เองก็ทำให้การโก่งตัวของแผ่นทดสอบแบบสองชั้นภายใต้แรงกระแทกลดลงเช่นกัน

ในส่วน of ความสามารถในการรับแรงกระทำแบบคงที่ พบว่าแทนที่ชั้นความหนาของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กบางส่วนด้วยคอนกรีตผสมเม็ดยาง มีผลทำให้ประสิทธิภาพในการรับแรงกระทำดัดแบบคงลดลง โดยสังเกตได้จากค่ากำลังรับแรงดัดและค่าพลังงานแตกหักที่ลดลง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Leonardo D'Acquisto and Roberto Montanini "DESIGN AND SET-UP OF A BI-PENDULUM IMPACT TESTING MACHINE" 18th Conference on Force, Mass and Torque, Celle, Germany, 2002
- [2] R.L.Sierakowski and S.K. Chaturvedi "Dynamic loading and characterization of fiber reinforced composites" J. Wiley & Sons, NY, 1997
- [3] Broutman, L.J. and Rotem, A. "Impact Strength and Toughness of Fiber Composite Materials" ASTM STP 568, pp. 114-133, 1975
- [4] Comite Euro-International du Beton (CEB), "Concrete structures under impact and impulsive loading", Bulletin no. 187 1988.
- [5] ปิติ สุขนรสุขกุล, "คอนกรีตขั้นพื้นฐาน" โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [6] ชัชวาลย์ เสริมบุตร, "คอนกรีตเทคโนโลยี (Concrete Technology)", คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค, บริษัทผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด.
- [7] วินิต ช่อวิเชียร, "คอนกรีตเทคโนโลยี" พิมพ์ครั้งที่ 6, 2538
- [8] Hanson, J. A., "Effects of Curing and Drying Environments on Splitting Tensile Strength of Concrete", Development Department Bulletin DX141, Portland Cement Association, pp. 11., 1968
- [9] Wood, Sharon L., Evaluation of the Long-Term Properties of Concrete, Research and Development Bulletin RD102, Portland Cement Association, 1992, 99 pages.
- [10] Hughes, B.P. and Gregory, R.; "Concrete Subjected to High Rates of Loading in Compression". Magazine of Concrete Research, 24 (78), pp. 25-36, 1972.
- [11] Mindess, S, Young, J , Darwin, D., Concrete 2nd Edition, Prentice Hall, 2002
- [12] Banthia, N., "Impact Resistance of Concrete" PhD Dissertation, UBC, 1987
- [13] ASTM C39, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, American Society for Testing and Materials, West Conshohochen, Pennsylvania. 1999 Annual Book of ASTM Standards, Edition, pp. 18-22.
- [14] S. Mindess, J.F. Young, D. Darwin, Concrete 2nd Edition, Prentice Hall, 2002
- [15] Yon, J. H., Hawkins, N. M., Kobayshi, A. S., 1992a, "Strain-Rate Sensitivity of Concrete Mechanical Properties," ACI Materials Journal, V. 89, No. 2, Mar.-Apr., pp. 146-153.
- [16] Bischoff, P. H., Perry, S. H., "Compressive Behavior of Concrete at High Strain Rates". Materials and Structures. V. 24, 1991, pp.425-450.

- [17] Zielinski, A.J., "Fracture of Concrete under Impact Loading," Structural Impact and Crashworthiness, Vol. 2, 1984, pp. 665-654
- [18] Gopalaratnam, V.S., and Shah, S.P., Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete Subjected to Impact Loading, ACI Journal, Vol. 38, 1986, pp117-126
- [19] Banthia N., M. Pigeon., "Dynamic Behavior of Concrete and its Fiber Reinforced Composites: A Review and Future Research Needs". P.S. Bulson Ed. Structures under shock and impact, Proceedings of the 1st International Conference, Cambridge, Massachusetts. USA. July 1989.
- [20] ACI Committee 446, Report on Dynamic Fracture of Concrete, ACI 446.4R-04. 2004.
- [21] Williamson, Gilbert R., 1974, "The Effect of Steel Fibers on the Compressive Strength of Concrete,"Fiber Reinforced Concrete, SP-44, American Concrete Institute, Detroit, pp. 195-207.
- [22] Shah, S. P., and Batson, G. B., Editors, 1987, Fiber Reinforced Concrete-Properties and Applications, SP-105, American Concrete Institute, Detroit, 597 pp.
- [23] Fanella, David A., and Naaman, Antoine E., July-Aug. 1985, "Stress-Strain Properties of Fiber Reinforced Concrete in Compression," ACI Journal, Proceedings V. 82, No. 4, pp . 475-483.
- [24] Balagura. P.N. and Shah, S.P. "Fiber-Reinforced Cement Composites", McGraw-Hill, New York 1992.
- [25] Mohammadi Y, Singh SP, Kaushik SK.Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state, Construction and Building Materials,22(2008) 956-75.
- [26] Visalvanich, Kitisak, and Naaman, Antoine E., Mar.-Apr. 1983,"Fracture Model for Fiber Reinforced Concrete," ACI JOURNAL,Proceedings V. 80, No. 2, pp. 128-138.
- [27] Gopalaratnam, V. S., and Shah, S. P., May 1987b, "Tensile Failure of Steel Fiber Reinforced Mortar," Journal of Engineering Mechanics, ASCE, V. 113, No. 5, May 1987, pp. 635-652.
- [28] Sukontasukkul, P., "Impact Behavior of Concrete under Multiaxial Loading", PhD Thesis, University of British Columbia, Canada, 2001.
- [29] Fattuhi NI, Clark LA., Cement-based materials containing shredded scrap truck Tyre rubber. Constr Build Mater1996; 10(4):229–36.
- [30] Topçu,I.B.,1997.Assessment of the brittleness index of rubberized concretes. Cement and Concrete Research 27,177-183.
- [31] Hernández-Olivares F, Barluenga G, Bollati M, Witoszek B. Static and dynamic behavior of recycled tyre rubber-filled concrete. Cement Concrete Res 2002; 32(10):1587–96.

- [32] K. B. Najim and M. R. Hall, “A review of the fresh/hardened properties and applications for plain- (PRC) and self-compacting rubberised concrete (SCRC),” *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 11, pp. 2043–2051, 2010
- [33] Turgut P, Yesilata B. Physico-mechanical and thermal performances of newly developed rubber added bricks. *Energy Build* 2008; 40(5):679–88.
- [34] Sukontasukkul P. Use of crumb rubber to improve thermal and sound Properties of pre-cast concrete panel. *Constr Build Mater* 2009; 23(2):1084–92.
- [35] Ganjian E, Khorami M, Maghsoudi A A. “Scrap-tyre-rubber replacement for Aggregate and filler in concrete”. *Construction and Building Materials*, 2009; pp 1828–1836.
- [36] Güneyisi E, Gesoglu M, Özturan T. Properties of rubberized concretes containing silicafume. *Cement Concrete Res* 2004; 34(12):2309–17.
- [37] Mehmet G, Guneyisi E. Strength development and chloride penetration in rubberized concretes with and without silicafume. *MaterStruct* 2007; 40:953–64.
- [38] Khatib Z K, Bayomy F M. Rubberized Portland cement concrete. *J MaterCivilEng* 1999;1 1(3):7.
- [39] Khaloo A R, Dehestani M, Rahmatabadi P. Mechanical properties of concrete Containing a high volume of tire-rubber particles. *WasteManage* 2008; 28(12):2472–82.
- [40] Yilmaz A, Degirmenci N. Possibility of using waste tire rubber and flyash with Portland cement as construction materials. *WasteManage* 2009; 29(5):1541–6.
- [41] Zheng L, Sharon H X, Yuan Y. Experimental investigation on dynamic properties of rubberized concrete. *ConstrBuildMater* 2008; 22(5):939–47.
- [42] Turatsinze A, Garros M. On the modulus of elasticity and strain capacity of self-compacting concrete incorporating rubber aggregates. *ResourConservRecycl* 2008; 52(10):1209–15.
- [43] Taha MMR, Asce M, El-Dieb AS, Abd El-Wahab MA, Abdel-Hameed ME. Mechanical, fracture, and micro structural investigations of rubber concrete. *J Mater Civil Eng* 2008; 20(10):640–9.
- [44] สมยศ วิวัฒน์พัฒพงศ์ และ ปิติ สุคนธ์สุขกุล, คอนกรีตมวลเบาปานกลางผสมเม็ดยาง (วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [45] Atahan A O, Sevim UK. Testing and comparison of concrete barriers containing Shredded waste tire chips. *Mater Lett* 2008; 62(21–22):3754–7.
- [46] Hernandez-Olivares F, Barluenga G. Fibre performance of recycled rubber-filled high-strength concrete. *Cement Concrete Res* 2004; 34(1):109–17.
- [47] Wang JY. Young’s modulus of porous materials. *J Mater Sci* 1984; 19:809–14.

- [48] Garrick GM. Analysis and testing of waste tire fibre modified concrete. Agricultural and Mechanical College, Louisiana State University, Louisiana; 2005.
- [49] Guoqiang L, Gregory G, John E, Christopher A, Michael AS, Su-Seng P. Waste Tire fiber modified concrete. Composite Part B: Eng 2004; 35(4):305–12
- [50] Feng Liu 刘凤, “Study of impact performance of rubber reinforced concrete”, Construction and Building Materials, 36(2012), pp.604–616
- [51] Zheng L, Sharon HX, Yuan Y. Strength, modulus of elasticity, and brittleness Index of rubberized concrete. Journal Materials in Civil Engineering 2008; pp. 692–9.
- [52] Baoshan H, Guoqiang L, Su-Seng P, John E. Investigation into waste tire rubber-Filled concrete. J Mater Civil Eng 2004; 16(3):187–94.
- [53] Tung-Chai L, Hasanan MN, Mohd. RH, Abdul Aziz C. Laboratory performance of Crumb rubber concrete block pavement. Int J Pavement Eng 2009; 10(5).
- [54] 9×19mm Parabellum. Available online at: http://en.wikipedia.org/wiki/9_mm_Luger_Parabellum.
- [55] .45 ACP. Available online at: http://en.wikipedia.org/wiki/.45_ACP.

ผลงานตีพิมพ์ที่ได้จากโครงการ

1. วารสารวิชาการนานาชาติ

- a. Sukontasukkul, P., Jamnam, S., Rodsin, K., and Banthia, N., 'Use of Rubberized Concrete as a Cushion Layer in Bulletproof Fiber Reinforced Concrete Panels', Journal of Construction and Building Materials, Vol. 41, 2013, pp.801-811.

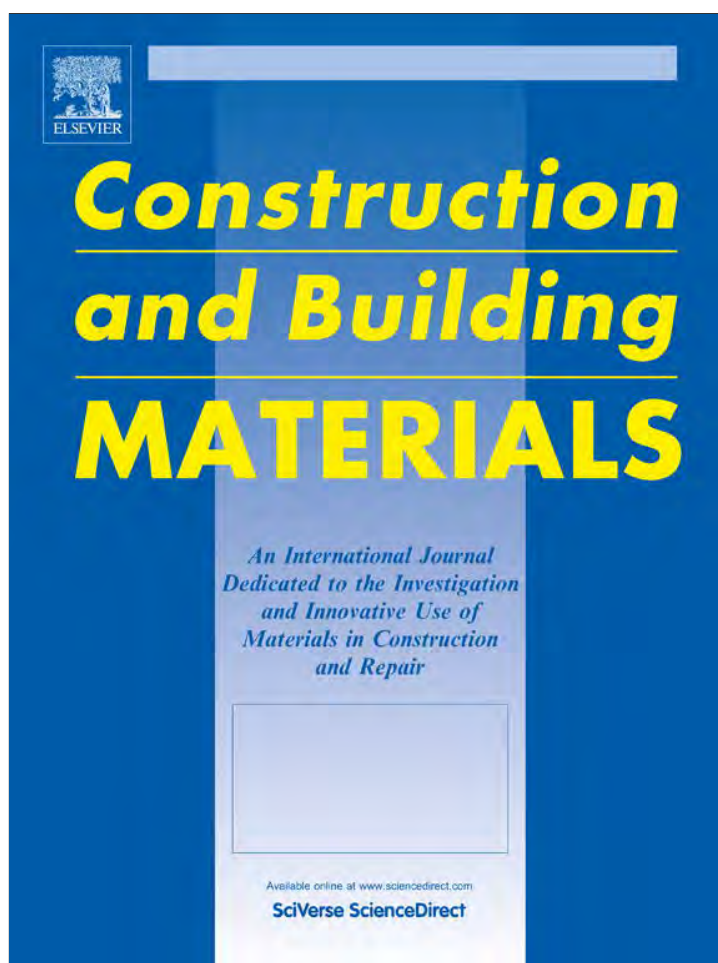
(ISSN: 0950-0618, Impact Factor: 1.834 (JCR 2011))

- b. Sukontasukkul, P., Jamnam, S., Sappakittipakorn, M., Banthia, N., "Preliminary Study on Bullet Resistance of Double-Layer Concrete Panel made of Rubberized and Steel Fiber Reinforced Concrete", Materials and Structures, DOI 10.1617/s11527-013-0049-x

(ISSN 1359-5997, Impact Factor: 1.278 (JCR 2011))

2. งานประชุมวิชาการนานาชาติ

- a. Sukontasukkul, P., Jamnam, S., Preemano, P., Suppakittipakorn, M., and Banthia, N., Use of High Content Crumb Rubber From Wasted Tire in Bulletproof Concrete Panels, 1st International Conference in Concrete Sustainability, Tokyo, Japan, May 27-27, 2013.
- b. **Keynote Paper**-Sukontasukkul, P., Suppakittipakorn, M., and Banthia, N., Bullet Resistance of Double-Layer Concrete Panels Made of Rubberized and Steel Fibre Reinforced Concrete, 8th International Conference: Concrete in the Low Carbon Era, Dundee, United Kingdom, 9-11 July 2012



(This is a sample cover image for this issue. The actual cover is not yet available at this time.)

This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

<http://www.elsevier.com/copyright>



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Construction and Building Materials

journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat

Use of rubberized concrete as a cushion layer in bulletproof fiber reinforced concrete panels

Piti Sukontasukkul^{a,*}, Sittisak Jamnam^a, Kittipoom Rodsin^a, Nemkumar Banthia^b^a King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 1518, Pracharath I Road, Bangsue, Bangkok 10800, Thailand^b University of British Columbia, Canada

HIGHLIGHTS

- ▶ This study proposes the use of double layer bulletproof concrete panel consisting of layers of soft and hard material.
- ▶ The soft layer is intended for absorbing impact energy, reducing acceleration and displacement occurred to the plate.
- ▶ The soft layer is made of rubberized concrete produced by mixing crumb rubber particle from wasted tires.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 21 August 2012

Received in revised form 27 December 2012

Accepted 28 December 2012

Keywords:

Bulletproof panel

Direct fire weapon

Rubberized concrete

Fiber reinforced concrete

Double layer concrete plate

ABSTRACT

In this study, the ability of rubberized concrete to improve the impact performance of steel fiber reinforced concrete (SFRC) bulletproof panel subjected to direct fire arm is investigated. The rubberized concrete layer (RC) made by replacing fine aggregate at 50%, 75% and 100% by volume fractions is used to replace parts of the thickness of the SFRC panel. The dimensions of the panels are 400 × 400 × 30 mm, the bullet type is 9 mm, and the striking distance is 10 m. For single layer panels, two types of panels are tested: steel fiber reinforced concrete (SFRC) and rubberized concrete (RC). For double layer panels, the RC layer is placed at the front surface by partially replacing part of the SFRC layer at 5, 10 and 15 mm. It is expected that the flexibility and softness of the RC layers will allow the RC layer to act as a cushion layer to absorb the impact energy from the bullet and cause less damage, delay the responding time and reduce the acceleration occurring to the panel.

© 2013 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Terrorist attack has become a serious threat worldwide. In Thailand, terrorist attacks occur more frequently especially in the southern parts of the country. When a certain area is under attacked, a perimeter control is usually established and enforced. Such perimeter controls include providing access control, diverting traffic movement, or establishing guard posts. Typical guard posts in Thailand are often nonpermanent structures (Fig. 1). Some are constructed of timber or wooden panels and some are constructed of sand bags. In term of bullet resistance, the timber or bamboo structures provide none or little protection to the personnel inside the structure. The sand bag structures, on the other hand, if properly constructed, offer high protection. However, there are some disadvantages on the use of sand bags such as, heavy weight (slow installation), easy to disintegrate (sensitive to moisture and UV), and need a replacement once it has been punctured. In the situa-

tion where military units are required to move into the area and quickly construct a bunker or guard post, the weight of the sand bags could become a factor to slowing them down.

In this study, a bullet proof concrete panel with the thickness of about 30 mm made from layers of steel fiber reinforced concrete and rubberized concrete is proposed. The panel is expected to replace wooden structure and constructed with or without sand bags surrounding them. It must also be able to sustain Class 3A fire weapon (handguns) according to the Thailand Department of Defense standard for bullet proof panel or shield [1].

In general, plain concrete is a quasi-brittle material, when subjected to an impact loading (or high rate of loading), it usually fractures catastrophically [2–4]. This causes pieces of broken concrete to take off in all directions. In order to improve concrete brittleness and impact resistance, small fibers are mixed uniformly into concrete mixture (fiber reinforced concrete, FRC). With the ability of fibers to bridge across the cracks, the impact resistance of FRC is much more superior to that of plain concrete [4–7].

Although FRC offers excellent impact resisting property to the bullet proof panel, there are some properties that can be improved, for example, reducing weight and decreasing bullet ricocheting.

* Corresponding author. Tel.: +66 89 794 9241; fax: +66 2 587 4337.

E-mail addresses: piti.kmutnb@gmail.com, piti_sk@hotmail.com, piti@kmutn-b.ac.th (P. Sukontasukkul).



Fig. 1. Examples of temporary military guard post or bunker (<http://www.bloggang.com/mainblog.php?id=jbunny&month=09-01-2008&group=21&gblog=9>).

This study proposes on the use of rubberized concrete layer to partially replace parts of the SFRC thickness. The rubberized concrete is known for producing lightweight concrete, increasing energy absorption under static [8–12], dissipating impact energy [13–14], and reducing catastrophic failure. It is expected, by replacing part of the SFRC thickness with lighter and highly elastic material such as rubberized concrete, that the weight of the panel can be reduced and the rubberized concrete layer will also act as a cushion layer to dissipate impact energy from the bullet, allowing less energy to act on the panel, and causing less damage (acceleration and deformation) to the panels.

2. Experimental procedure

2.1. Materials

- Type I Portland cement.
- River sand.
- Hooked end steel fiber (Table 1).
- Crumb rubber passing sieve No. 6 (Table 2).

2.2. Specimen preparation

For all specimens, the concrete is mixed in a pan mixer, poured into the mold and vibrated on a vibrating table. After 24 h, the specimens are demolded and cured in water for 28 days. Three types of specimen with dimensions of 400 × 400 × 30 mm are prepared (Table 3):

- *Single layer SFRC plate*: for this specimen, hooked end fibers are mixed with concrete at 2%, 3% and 4% by volume fractions.
- *Single layer CRC plate*: for this specimen, fine aggregate is replaced partially with crumb rubber at 50%, 75% and 100% by volume fractions.
- *Double layer SFRC + CRC plate*: for this specimen, the thickness divided into two layers. The top layer is made of CRC with the thickness varied from 5 to 15 mm. The bottom layer is made of SFRC with the thickness varied from 15 to 25 mm (Table 3).

Table 1
Fiber properties.

Mat.	SG	Shape	L (mm)	Section (mm)	Aspect ratio (l/d)	Tensile strength (N/mm ²)
Steel	7.8	Hooked end	35	Circle dia.	64	1000
				–0.55		

Table 2
Properties of crumb rubber and fine aggregate.

Categories	Crumb rubber	Fine aggregate
Average bulk specific gravity	0.96	2.43
Average bulk specific gravity (SSD)	0.97	2.47
Average apparent specific gravity	0.97	2.55
Average absorption (%)	0.92	2.04
Finess modulus	4.93	2.90

2.3. Testing

The specimen is placed on the support anvil with four sides secured by a steel frame to provide simple support along the edges as shown in Fig. 2. Two accelerometers are attached at the quarter and at the center location of the back surface to measure the accelerations during the impact. Each specimen is shot by a 9 mm bullet at a distance of 10 m (bullet dimensions and specification given in Table 4). The acceleration is measured and recorded using a computer based data acquisition system.

As a requirement for the class 3 bullet proof shield, in order for the shield to pass the requirement, it must be able to sustain two types of handgun bullets: 9 mm and 11 mm. The term ‘sustain’ means that the bullet must not penetrate through the thickness of the shield (no perforation failure). In all cases, three samples from each panel type are tested, if just one of the three samples does not pass the requirement, the panel is considered “not pass”. It must be noted here also that due to some technical issues, the results from the 11 mm bullet test cannot be reported in this manuscript.

2.4. Data analysis

Using the obtained acceleration data, the velocity and the displacement at any time and at the location of the accelerometer can be calculated using the following equations [5,6]:

$$u(t) = \int_0^t \ddot{u}(t) dt \quad (1)$$

$$u(t) = \int_0^t \int_0^t \ddot{u}(t) dt \quad (2)$$

where $\ddot{u}(t)$ is the acceleration at any time t ; $\dot{u}(t)$ is the velocity at any time t ; and $u(t)$ is the displacement at any time t .

Table 3
Casting details.

Type	Thickness (mm)		Material		No. of spec.
	t1	t2	t1	t2	
R25	–	30	50%RC	–	3
R50	–	30	75%RC	–	3
R75	–	30	100%RC	–	3
S2	–	30	2%SFRC	–	3
S3	–	30	3%SFRC	–	3
S4	–	30	4%SFRC	–	3
R50/S2	5	25	50%RC	2%SFRC	3
R75/S2	5	25	75%RC	2%SFRC	3
R100/S2	5	25	100%RC	2%SFRC	3
R50/S3	5	25	50%RC	3%SFRC	3
R75/S3	5	25	75%RC	3%SFRC	3
R100/S3	5	25	100%RC	3%SFRC	3
R50/S4	5	25	50%RC	4%SFRC	3
R75/S4	5	25	75%RC	4%SFRC	3
R100/S4	5	25	100%RC	4%SFRC	3
R75/S2A	10	20	75%RC	3%SFRC	3
R75/S2B	15	15	75%RC	3%SFRC	3
R75/S3A	10	20	75%RC	3%SFRC	3
R75/S3B	15	15	75%RC	3%SFRC	3

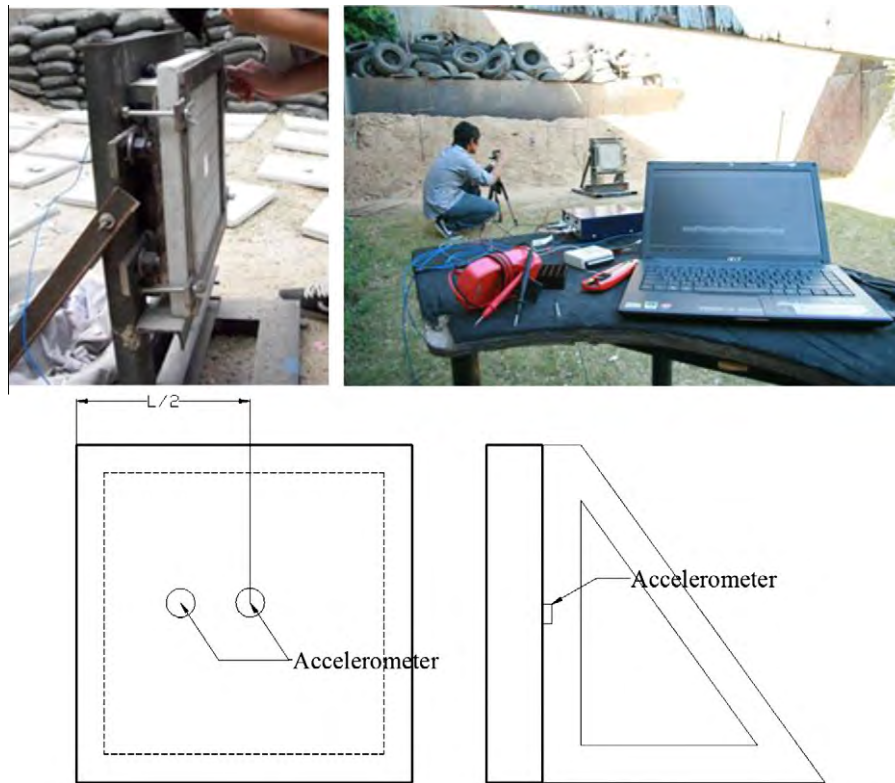


Fig. 2. Specimen setup.

Table 4
Bullet specification.

<i>Technical information:</i>		
Caliber	9 mm lugar	
Bullet weight	115 grains (7.45 g)	
Bullet style	Full metal jacket	
Case type	Brass	
<i>Ballistics information:</i>		
Muzzle velocity	1190 fps	362 m/s
Muzzle energy	362 ft.lbs.	492 N m

A technical diagram of a bullet. The bullet is shown in profile, facing right. It has a curved, rounded nose. Dimension lines with arrows indicate the following measurements: the total length of the bullet is 29.25; the diameter of the base (the widest part at the rear) is 9.65; the diameter of the nose (the widest part at the front) is 9.00; and the height from the base to the top of the nose curve is 19.31.

Note: 1 grain = 0.064798911 g.

3. Results and discussion

3.1. Panel weight

As one of the objective of this study, part of the SFRC thickness is replaced by the rubberized concrete layer in order to reduce the weight of the panel. The average weight and density of each panel type are shown in Table 5.

The SFRC has average density of about 2400 kg/m³ and each plate weights around 11.5–11.6 kg. For the rubberized concrete plate, depending on the rubber content, the density starts from 1634 to 1948 kg/m³ and each plate weights around 7.85–9.35 kg. As for the double layer panel, the average weight is slightly lower than the SFRC plates' weight due to the replacing of top layer with

rubberized concrete (about 3–14% lower, Table 5). Each plate weights from 10 to 11.3 kg. The percentage of reduction varies according to the percentage of crumb rubber in the rubberized concrete layer.

3.2. Failure patterns and contact zones

Failure patterns found in this study are strongly influenced by the type of specimen. Typically, five failure patterns are found: flexural cracking, scabbing, spalling, penetrating, and perforation. Mixed mode failure is also found in some cases. Summary is given in Table 6.

For single layer plain concrete panels, the typical failure mode at the front surface is scabbing and at the back surface is spalling, and flexural cracks are also found all over the place. It is these flexural cracks that lead to a complete fracture of the specimen (Fig. 3). The existing of the flexural cracks indicates the brittleness of plain concrete and its unsuitability to be used for a bullet shield.

For SFRC single layer panels, the typical failure modes are scabbing at the front surface and spalling at the back surface (Fig. 4a). There is no sign of flexural cracks, and in all cases, the bullet does not penetrate through the panel. Although the spalling is found at the back surface, it is not a complete spalling as the broken piece remains partially intact and clinging on by steel fibers. These phenomena indicate the ability of fibers to bridge across the cracks and to enhance the impact resistance of concrete. The diameters of the scabbing at the impact point are found to be around 34–48 mm (Fig. 4b).

For the rubberized concrete panels, because of its low strength, the bullets are able to penetrate through panel's thickness and create the perforation failure type (Fig. 5). There are evidences of spalling together in the perforation at the back surface. The impact points have a diameter around 27–56 mm. They appear to decrease with the increasing rubber content. Because of the perforation, the

Table 5
Average weight and density.

Type	Weight (kg)	Density (kg/m ³)	%Weight reduction
R25	9.35	1948.44	–
R50	8.53	1776.84	–
R75	7.85	1634.62	–
S2	11.52	2399.06	–
S3	11.68	2434.36	–
S4	11.57	2410.56	–
R50/S2	11.18	2328.80	2.93
R75/S2	11.14	2320.75	3.26
R100/S2	11.15	2322.51	3.19
R50/S3	11.30	2354.62	3.28
R75/S3	11.16	2324.77	4.50
R100/S3	11.02	2294.92	5.73
R50/S4	11.16	2325.09	3.55
R75/S4	10.95	2281.23	5.36
R100/S4	10.74	2237.37	7.18
R75/S2A	10.50	2187.87	8.80
R75/S2B	10.02	2087.95	12.97
R75/S3A	10.63	2215.19	9.00
R75/S3B	10.03	2089.88	14.15

rubberized concrete does not pass the requirement for the bullet proof shield.

For the double layer concrete panels, three different failure patterns are observed.

- Type I: scabbing at the front surface and spalling at the back surface. This pattern is similar to the single layer SFRC plates as described before. There is no flexural crack and the spalling is also not a complete spalling. The bullet does not penetrate through the thickness of the plate (Fig. 6a). All plates with the thickness of rubberized concrete layer of 5 mm fail in this manner. The impact point look like a crater with the bursting out of the rubberized concrete layer forms outer radius while the SFRC surface is exposed inside the circle (Fig. 6b). Similar those single layer RC panels, the diameter of the contact zone decrease with the increasing rubber content due to the elastic properties of the rubberized concrete.
- Type II: the bullet stops at the front surface. For this type, the bullet is found the stop completely at the front surface of the panel, there is no perforation and ricocheting. This type of failure is an ideal for the bullet proof panel. It is found mostly in the panels with rubberized concrete layer thickness of 10 and 15 mm. With thicker rubberized concrete layer, the impact

energy of the bullet is dissipated entirely and causes the bullet to stop there (Fig. 6c). However, not all of these panels fail in this manner, this is because the layer of the SFRC is quite thin for this type of specimen and in some cases, cause the specimens fail in type III which is the undesirable one.

- Type III: perforation. This type is found mostly in the panels with rubberized concrete thickness of 10 and 15 mm. As mentioned before that the increasing thickness of rubberized concrete increases the possibility of a bullet to stop at the front surface. However, the increasing thickness of rubberized concrete also means the decreasing thickness of SFRC as well. As the SFRC thickness decreases, the efficiency of the whole panel also decreases and the bullet is able to penetrate through the thickness (Fig. 6d). This type of failure is also found in the double layer plates with 3%SFRC base more than those with 2%SFRC base. The reason could be the difficulty to obtain uniform distribution of fiber when casting in such a thin layer with high volume of fiber content.

3.3. Plate's acceleration

Acceleration is one of the important data in impact testing because it can be used for calculating velocities and displacements (as shown in Eqs. (1) and (2)).

A typical acceleration response (acceleration vs. time) along the span of a single layer concrete plate subjected is shown in Fig. 7. It could be seen that the response is much more localized and confined in the middle of the plate. As the bullet comes into contact with the plate, the center-acceleration increases rapidly while the side-acceleration remains unresponsive. After the center-acceleration reaches its peak and begins to decelerate, then the side-acceleration begins to increase. This is because the size of the bullet which is quite small as compared to the plate dimension.

For the double layer plates, the typical acceleration vs. time response is as shown in Fig. 8. Similar to the cases of single layer plates, the response of the plate is found to confine the center of the plate where the contact occurs. However, there are a few indicators that show the ability of rubberized concrete layer to dissipate the impact energy from the bullet, such as the differences in the responding time and the acceleration values at the peak.

- For the responding time, the acceleration data from the beginning of the impact event (0.017 μ s) are plotted and compared in Fig. 9. It could be seen that at the same period of time, the

Table 6
Failure modes summary.

Type	Failure type	Diameter (mm)	Classification	Remarks
R25	Perforation	56.00	Not pass	
R50	Perforation	45.00	Not pass	
R75	Perforation	27.00	Not pass	
S2	Scabbing and spalling	42.67	Pass	
S3	Scabbing and spalling	48.33	Pass	
S4	Scabbing and spalling	34.00	Pass	
R50/S2	Scabbing and spalling	68.33	Pass	
R75/S2	Scabbing and spalling	60.00	Pass	
R100/S2	Scabbing and spalling	49.33	Pass	
R50/S3	Scabbing and spalling	52.33	Pass	
R75/S3	Scabbing and spalling	49.67	Pass	
R100/S3	Scabbing and spalling	50.00	Pass	
R50/S4	Scabbing and spalling	54.00	Pass	
R75/S4	Scabbing and spalling	48.00	Pass	
R100/S4	Scabbing and spalling	45.00	Pass	
R75/S2A	Mixed type	49.33	Pass	Mixed between scabbing and bullet stop
R75/S2B	Mixed type	94.00	Pass	
R75/S3A	Perforation	67.00	Not pass	Mixed between scabbing and perforation
R75/S3B	Perforation	77.67	Not pass	

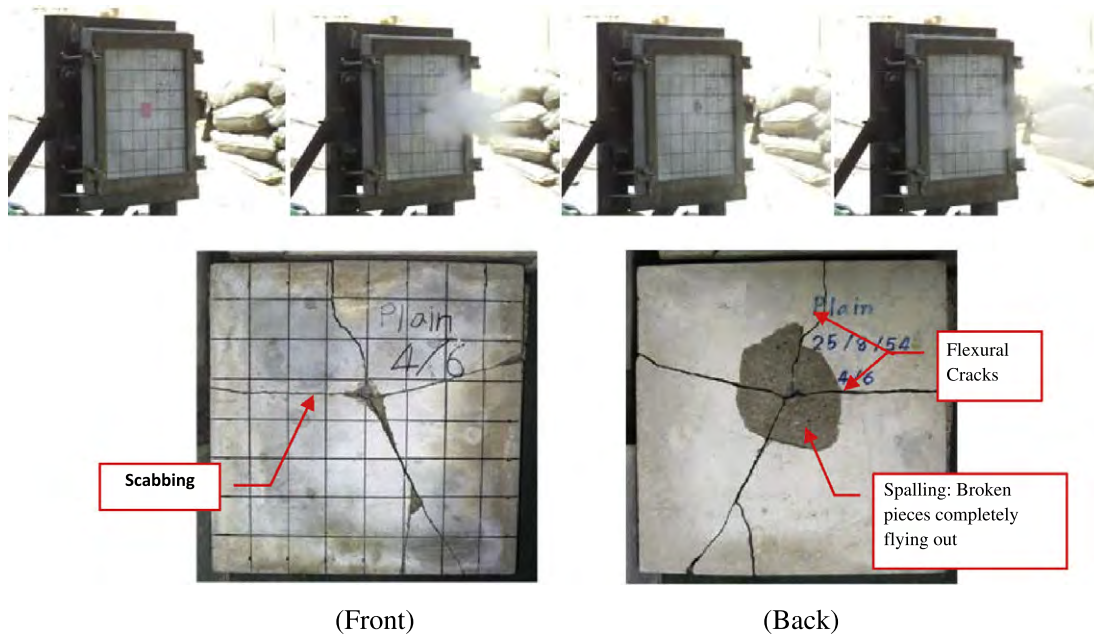


Fig. 3. Failure patterns of single layer plain concrete panel.

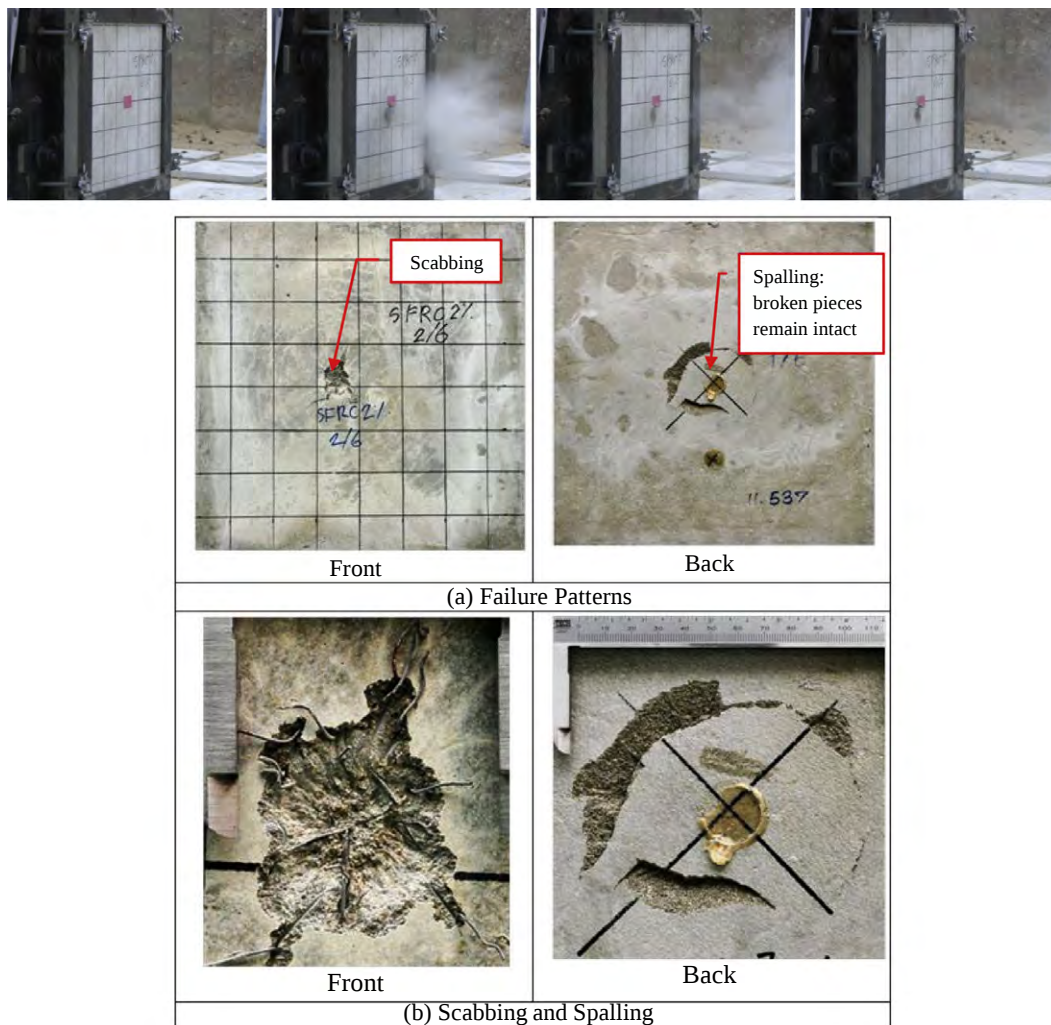


Fig. 4. Failure patterns and impact point of single layer SFRC concrete panel. (a) Failure patterns. (b) Scabbing and spalling.

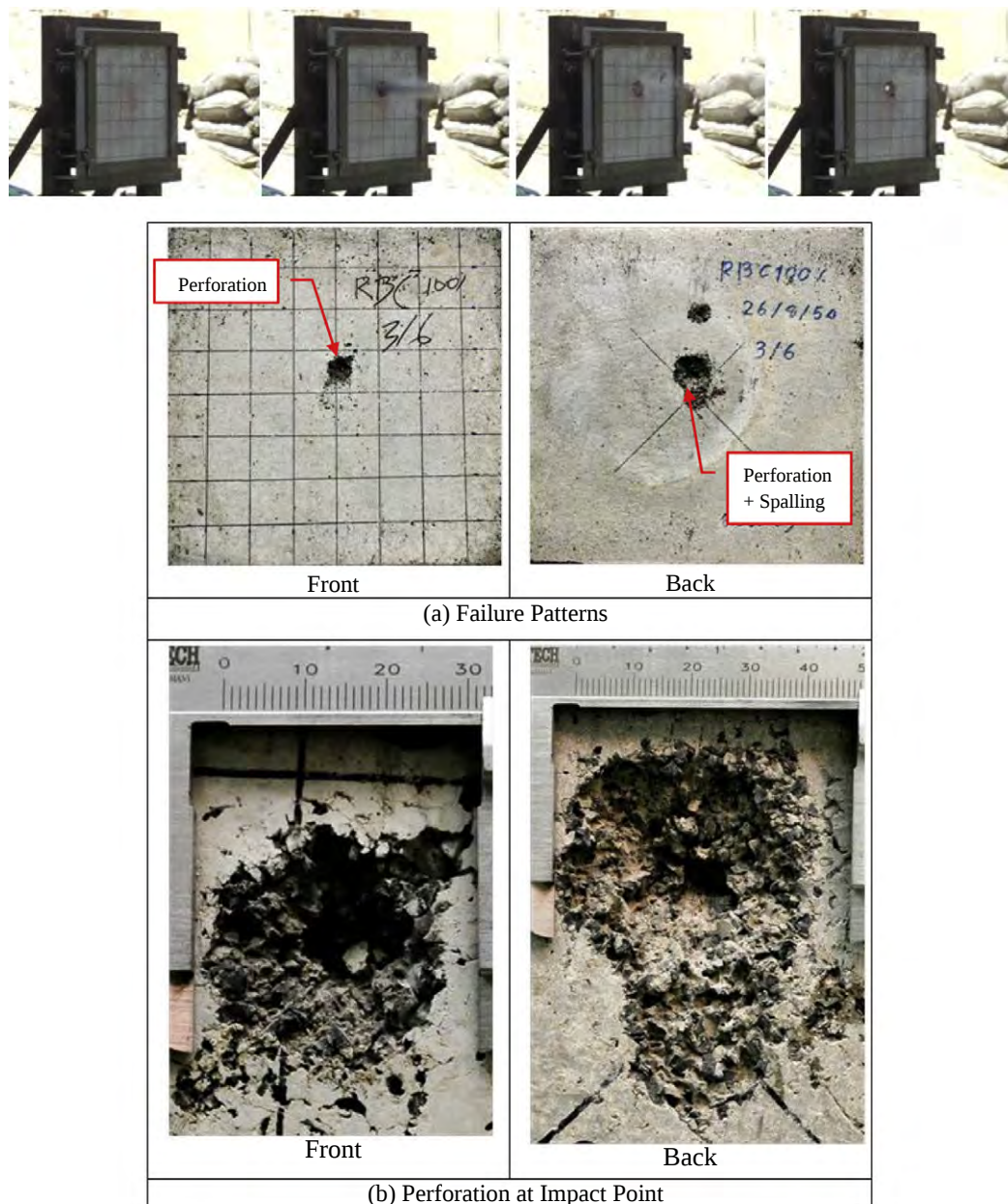


Fig. 5. Failure patterns and impact points of single layer rubberized concrete panel. (a) Failure patterns. (b) Perforation at impact point.

acceleration of the double layer plate is much smaller than that of the single layer plate. This indicates that the double layer plate is responding to the impact load at slower rate. The delaying also exhibits the ability of rubberized concrete layer to dissipate impact energy and slow down the responding time.

- In the case of peak acceleration, all of the double layer plates exhibit smaller values of peak acceleration than those of the single layer plates with the same fiber content (Figs. 9 and 10). The decreasing peak acceleration shows the effectiveness of rubberized concrete in dissipating impact energy and reducing the acceleration of the plate.
- As for the effect to fiber content (on the SFRC layer), the acceleration is found to decrease with the increasing fiber content similar to those of single layer SFRC. The acceleration is decreased due to the increasing stiffness of the plate with increasing fiber content.

3.4. Displacement

Using Eq. (2), the center displacement of the plates at the peak acceleration can be determined as shown in Table 7. The comparisons between each type of plate are also given in Fig. 11. Overall, the displacements at the peak acceleration of all the panels are smaller than 0.50 mm. For the SFRC single layer plates, the displacements are in the range of 0.415–0.460 mm. The displacement is found to confine in the center of the plate and to decrease with the increasing fiber content (Fig. 11a).

In the case of double layer plates, the comparisons are made with the single layer plate with the same fiber content and the results are demonstrated in Fig. 11b–d. In all cases, the displacements of double layer plates are smaller than those of single layer plates. Smaller displacement indicates the ability of rubberized concrete layer to absorb impact energy and allow less force

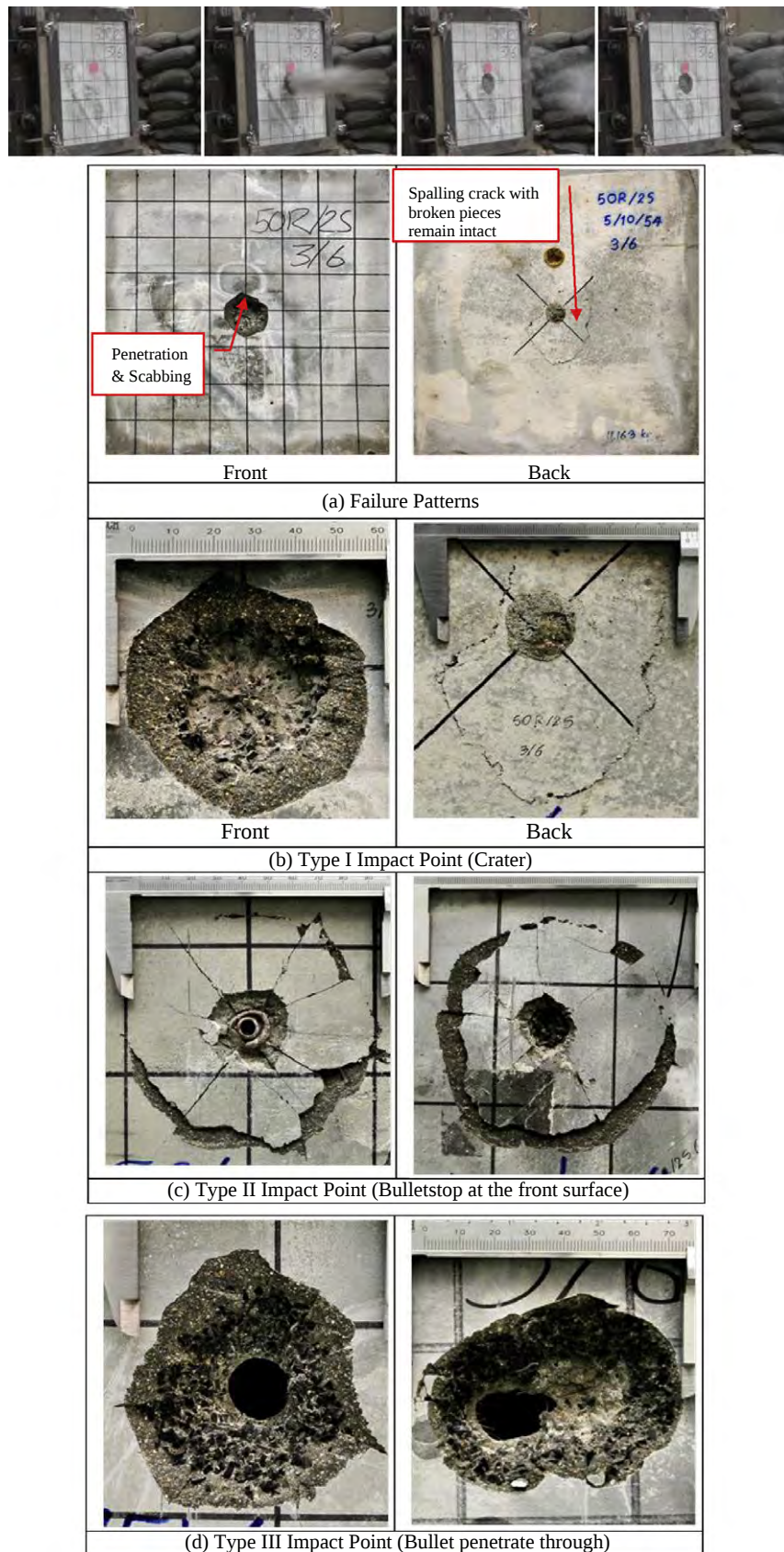


Fig. 6. Failure patterns and impact points of double layer rubberized/SFRC panels. (a) Failure patterns. (b) Type I impact point (crater). (c) Type II impact point (bullet stop at the front surface). (d) Type III impact point (bullet penetrate through).

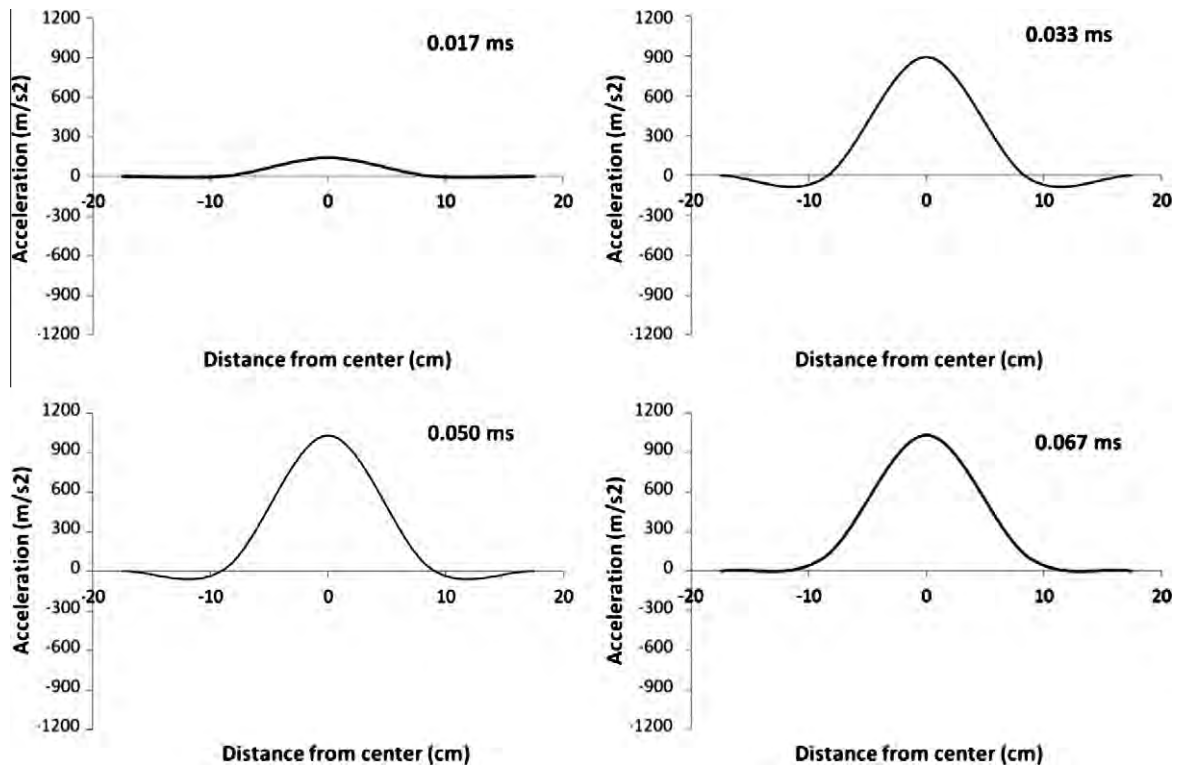


Fig. 7. Acceleration vs. time response of single layer 2%SFRC plate subjected to 9 mm bullet.

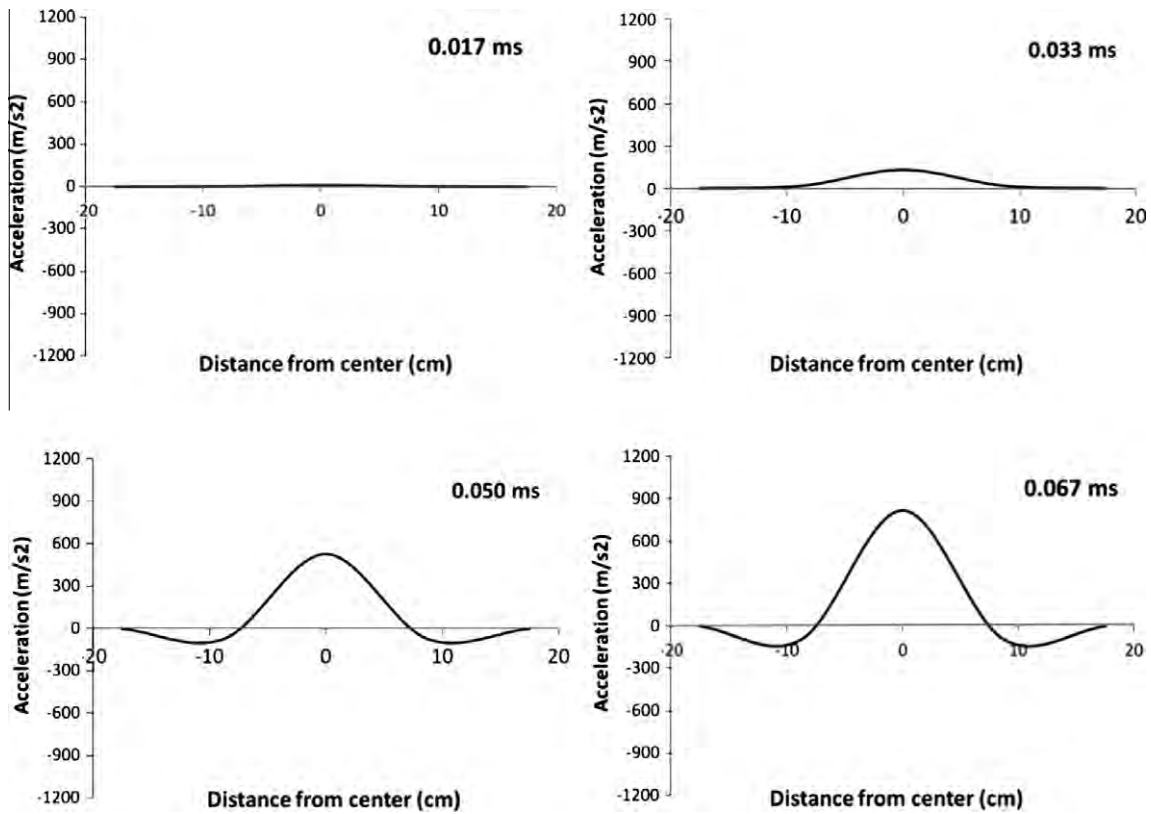


Fig. 8. Acceleration vs. time response of double layer plate subjected to 9 mm bullet.

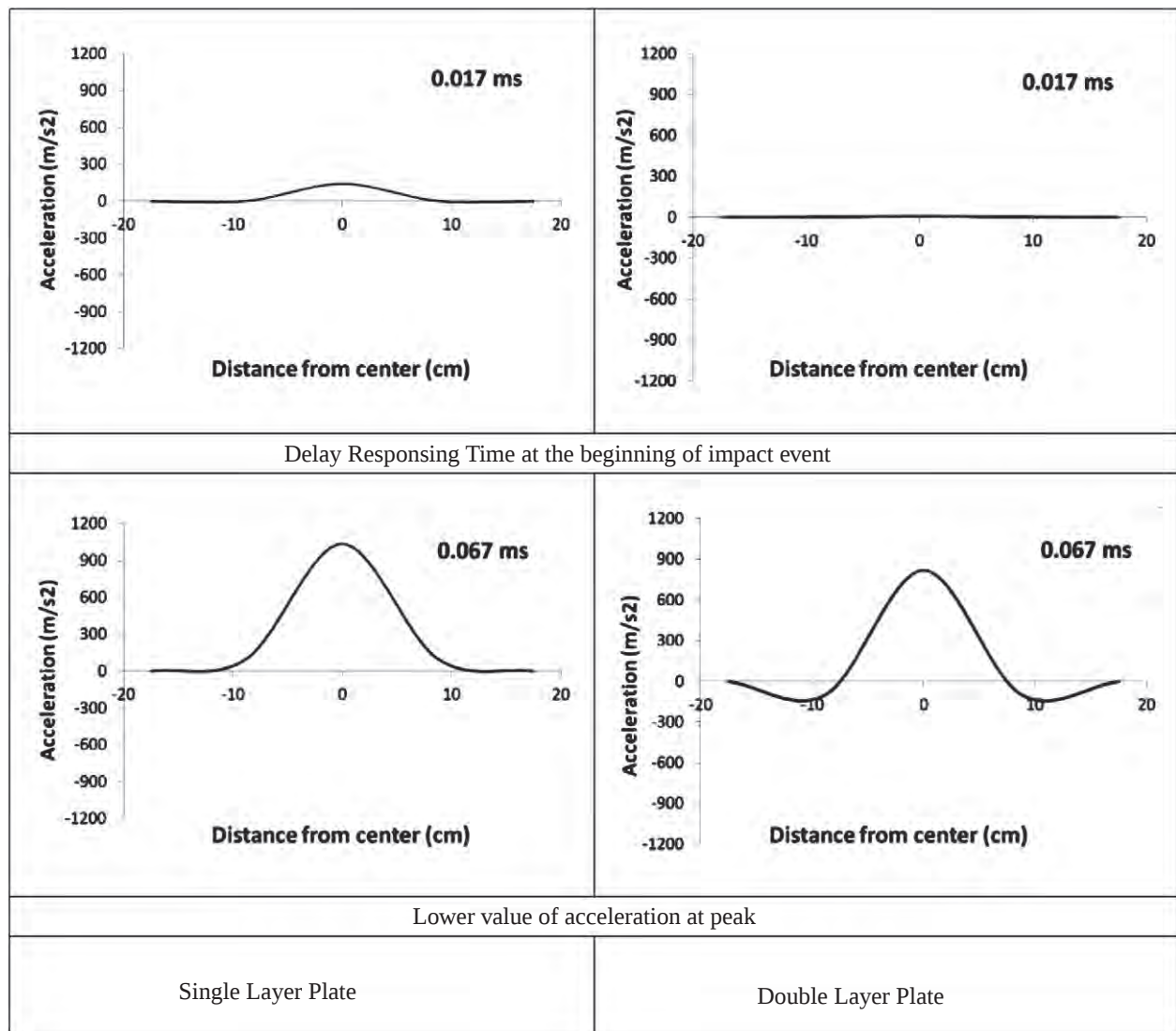


Fig. 9. Comparison between single and double layer plate (9 mm).

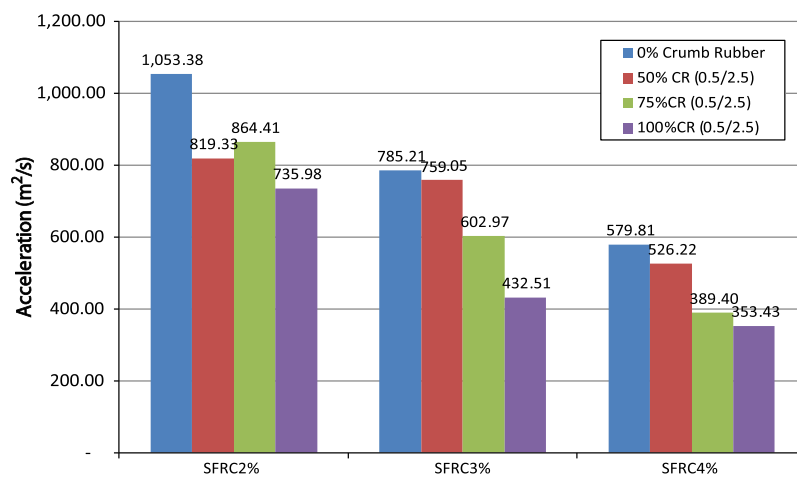


Fig. 10. Average peak acceleration (9 mm bullet).

Table 7
Center displacement at peak acceleration.

Type	Avg. center displacement (mm)	% Difference	D/W Ratio disp. per weight (mm/kg)
R25	–	–	–
R50	–	–	–
R75	–	–	–
S2	0.46	–	0.040
S3	0.44	–	0.038
S4	0.42	–	0.036
R50/S2	0.35	23.91	0.031
R75/S2	0.28	39.13	0.025
R100/S2	0.25	45.65	0.022
R50/S3	0.39	11.29	0.035
R75/S3	0.37	17.38	0.033
R100/S3	0.32	28.44	0.029
R50/S4	0.37	10.84	0.033
R75/S4	0.33	20.48	0.030
R100/S4	0.28	33.49	0.026

to act on the plate which leads to the reduction of displacement. The percentages of reduction are ranged from 11% to 45%. The displacement is also found to decrease with the increasing rubber content in the rubberized concrete layer. In term of displacement allowable per weight (D/W ratio), all double layer plates exhibit less D/W ratio than that of SFRC plates. The R100/S2 offers the best ratio at 0.022 mm/kg (Table 7).

The content of the fiber in the SFRC layer also influences the displacement of the plate during the impact. It is observed that the displacement decreases with the increasing fiber content in the SFRC layer similar to those single layer SFRC plate. The lower

displacement is due to the decreasing acceleration and increasing stiffness of the plate with higher SFRC content.

4. Conclusion

This manuscript describes parts of results of the experimental series on impact resistance of multilayer plate subjected to direct fire weapons (9 mm bullet type). It is shown here that a combination of soft and hard material can be used to sustain impact force. The role of the soft layer (rubberized concrete) is to act as a cushion layer to absorb parts of the energy and allow less impact force to reach the hard layer (SFRC). This results in the delay the responding time at the beginning of impact event, the decrease in peak acceleration and the lower center displacement.

Acknowledgements

The authors would like to thank Thailand Research Fund (TRF Research Career Development Grant), TRF Golden Jubilee PhD Grant and Faculty of Engineering-Industry Related Research Grant (KMUTNB) for financially support the experiment. Thanks also to SR. Fiber Co., Ltd. for providing steel fibers.

References

- [1] Standard for bullet proof shield. Kingdom of Thailand: Department of Defense; 2006.
- [2] Banthia N, Mindess S, Yan C. Fracture toughness of concrete under impact loading. *Cem Concr Res* 1987;17(2):321–41.
- [3] Sukontasukkul P, Nimityongskul P, Mindess S. Effect of loading rate on damage of concrete. *J Cem Concr Res (JCCR)* 2004;34(11):2127–34.

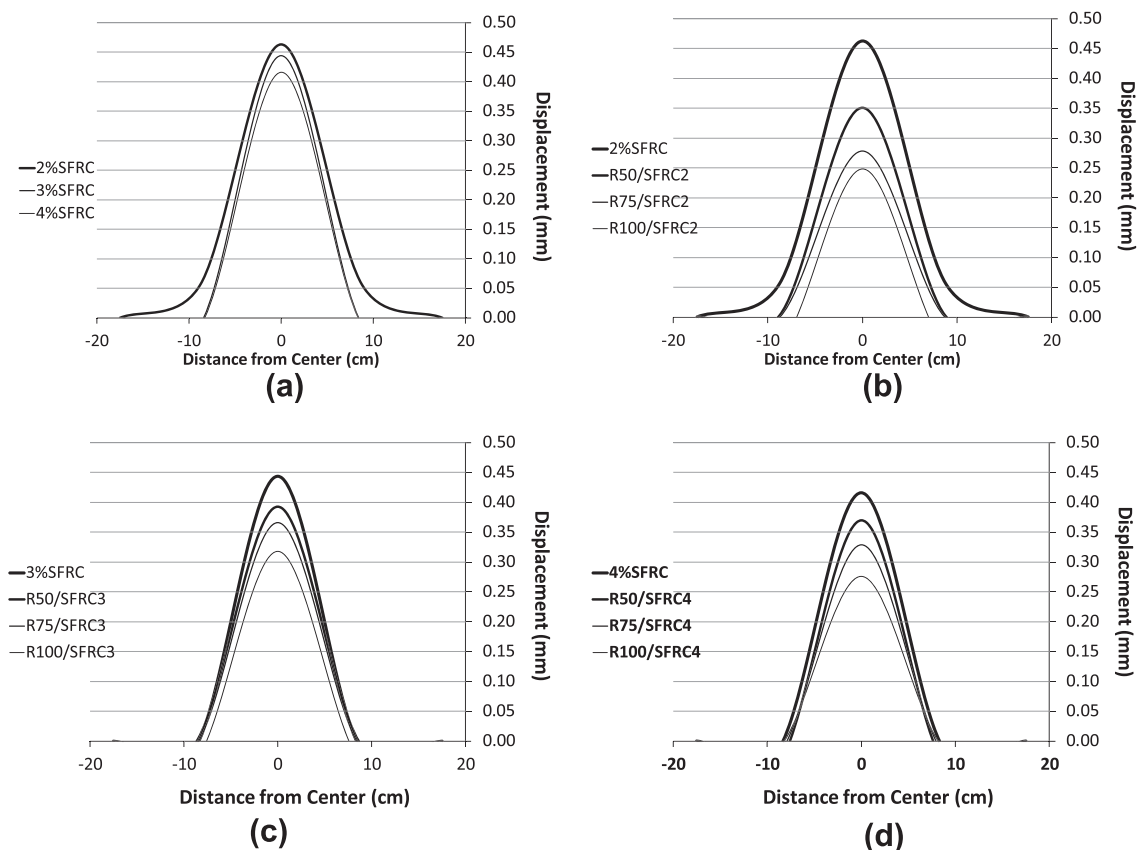


Fig. 11. Displacement of the panel.

- [4] Mindess S, Yan C. Perforation of plain and fibre reinforced concretes subjected to low-velocity impact loading. *Cem Concr Res* 1993;23:83–92.
- [5] Banthia N. Impact resistance of concrete. PhD Thesis. Canada: University of British Columbia; 1987.
- [6] Sukontasukkul P. Impact behavior of concrete under multiaxial loading. PhD Thesis. Canada: University of British Columbia; 2001.
- [7] Sukontasukkul P, Mindess S, Banthia N. Penetration resistance of hybrid fibre reinforced concrete under low velocity impact loading. In: Annual conference of the Canadian society for civil engineering. Canada: Montreal, Quebec; June 2002.
- [8] Eldin N, Senouci A. Rubber-tire particles as concrete aggregate. *ASCE: J Mater Civ Eng* 1993;5(4):478–96.
- [9] Fattuhi N, Clark L. Cement based materials containing shredded scrap truck tire rubber. *Constr Build Mater* 1996;10(4):229–36.
- [10] Khatib ZK, Bayomy FM. Rubber Portland cement concrete. *ASCE: J Mater Civ Eng* 1990;11(3):6–13.
- [11] Sukontasukkul P, Chaikaew C. Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber. *Constr Build Mater (JCBM)* 2006;20(7):450–7.
- [12] Sukontasukkul P. Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of concrete panel. *Constr Build Mater (JCBM)* 2009;23(2):1084–92.
- [13] Liu Feng, Chen Guixuan, Li Lijuan, Guo Yongchan. Study of impact performance of rubber reinforced concrete. *Constr Build Mater* 2012;36:604–16.
- [14] Ali O, Atahan, Yücel Ayhan Öner. Crumb rubber in concrete: static and dynamic evaluation. *Constr Build Mater* 2012;36:617–22.

*Preliminary study on bullet resistance
of double-layer concrete panel made
of rubberized and steel fiber reinforced
concrete*

**Piti Sukontasukkul, Sitisak Jamnam,
Manote Sappakittipakorn & Nemkumar
Banthia**

Materials and Structures

ISSN 1359-5997

Mater Struct

DOI 10.1617/s11527-013-0049-x



Your article is protected by copyright and all rights are held exclusively by RILEM. This e-offprint is for personal use only and shall not be self-archived in electronic repositories. If you wish to self-archive your article, please use the accepted manuscript version for posting on your own website. You may further deposit the accepted manuscript version in any repository, provided it is only made publicly available 12 months after official publication or later and provided acknowledgement is given to the original source of publication and a link is inserted to the published article on Springer's website. The link must be accompanied by the following text: "The final publication is available at link.springer.com".

Preliminary study on bullet resistance of double-layer concrete panel made of rubberized and steel fiber reinforced concrete

Piti Sukontasukkul · Sitisak Jamnam ·
Manote Sappakittipakorn · Nemkumar Banthia

Received: 22 August 2012 / Accepted: 9 March 2013
© RILEM 2013

Abstract In this study, the impact resistance of double-layer concrete panels made of rubberized and steel fiber reinforced concrete subjected to direct fire weapon (11 mm or 0.45 magnum bullet size) is investigated. Concrete panels with dimensions of $400 \times 400 \times 50$ mm are subjected to impact forces from 11 mm-diameter bullets at a distance of 10 m. Three types of concrete panels are tested: single-layer steel fiber reinforced concrete (SFRC), single-layer crumb rubber concrete (CRC), and double-layer CRC/SFRC. For a double-layer CRC/SFRC, the CRC layer of 12.5 mm is added to the front surface by partially replacing part of the SFRC panel. The CRC layer is expected to act as a cushion layer to absorb impact energy from the bullet and to reduce damage to the concrete panel.

Keywords Double layer concrete panel · Bullet resistance · Rubberized concrete · Fiber reinforced concrete · 0.45 Magnum

1 Introduction

Terrorism is currently the biggest and number one security threat worldwide. In Thailand, terrorist attacks occur more frequently in the southern part of the country. Most threats are in the form of fire weapon attacking or bombing. It becomes essential to develop structures or structural elements that can resist those threats and provide safety for people or personnel inside the buildings.

In Thailand, most buildings are constructed using timber, masonry bricks, or reinforced concrete. Under impact loading from gunfire, timber is the least effective among them. Concrete is able to provide better impact resistance than timber, but since concrete is a quasi-brittle material it usually fractures catastrophically into small pieces. These broken pieces are often turned into flying hazardous debris which travels at high velocity and in random directions. The flying debris can cause casualties or property damage.

In order to make people inside the buildings feel safe and prevent the secondary damage to occur (flying hazardous debris or bullet ricocheting), the bullet proof concrete panels must not only prevent a bullet from penetrating through, it must also maintain its integrity to keep the flying hazardous debris to minimum. One method to improve concrete brittleness and increase impact resistance is to add small fibers into concrete mixture fiber reinforced concrete (FRC). Fibers can be found in various kinds of materials such

P. Sukontasukkul (✉) · S. Jamnam ·
M. Sappakittipakorn
King Mongkut's University of Technology North
Bangkok, 1518 Pracharat I Road, Bangsue,
Bangkok 10800, Thailand
e-mail: piti_sk@hotmail.com; piti.kmutnb@gmail.com

N. Banthia
University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada

Table 1 Fiber properties

Mat.	SG	Shape	<i>L</i> (mm)	Section (mm)	Aspect ratio (<i>l/d</i>)	Tensile strength (N/mm ²)
Steel	7.8	Hooked end	35	Circle dia. –0.55	64	1,000

Table 2 Properties of crumb rubber and fine aggregate

Categories	Crumb rubber	Fine aggregate
Average bulk specific gravity	0.96	2.43
Average bulk specific gravity (SSD)	0.97	2.47
Average apparent specific gravity	0.97	2.55
Average absorption (%)	0.92	2.04
Fineness modulus	4.93	2.9
Average size	2.8 mm	0.6–1.2 mm

as steel, carbon, polypropylene, etc. With the ability of fibers to bridge across the cracks, the impact resistance of FRC has been proved to be much superior to that of plain concrete [1–5].

However, despite its superior impact resistance, FRC plates seem to have a problem with the ricocheting of the bullet when subjected to gunfire due to its hard surface. Therefore, in this study, instead of using single layer steel fiber reinforced concrete (SFRC), a double layer panel system made from layers of SFRC and rubberized concrete is proposed. The double layer bulletproof concrete panel is constructed by replacing front part of the SFRC panel with a layer of rubberized concrete (CRC).

Briefly, the rubberized concrete is a particulate composite material consisting of cement paste as a matrix and rubber particle as a reinforcement. It is produced by replacing normal fine aggregate with crumb rubber particles in concrete mixtures at different proportions. The crumb rubber used in this study is a recycling product from grinding abandoned or wasted tires. In general, because of its poor mechanical properties, the rubberized concrete is used mainly in non-structural lightweight or insulated concrete applications. Despite its poor mechanical properties, the rubberized concrete has shown some promising properties in term of increasing ductility and improving energy absorption under static [6–10] and impact loadings [11, 12]. The decrease in elasticity and brittleness index with the increasing rubber content is

Table 3 Casting details

Type	Thickness (mm)		Material		No. of specimen
	<i>t</i> 1	<i>t</i> 2	<i>t</i> 1	<i>t</i> 2	
R25	50	–	25 %CRC		3
R50	50	–	50 %CRC		3
S2	50	–	2 %SFRC		3
S3	50	–	3 %SFRC		3
S4	50	–	4 %SFRC		3
R25/S2	12.5	37.5	25 %CRC	2 %SFRC	3
R50/S2	12.5	37.5	50 %CRC	2 %SFRC	3
R25/S3	12.5	37.5	25 %CRC	3 %SFRC	3
R50/S3	12.5	37.5	50 %CRC	3 %SFRC	3
R25/S4	12.5	37.5	25 %CRC	4 %SFRC	3
R25/S4	12.5	37.5	50 %CRC	4 %SFRC	3

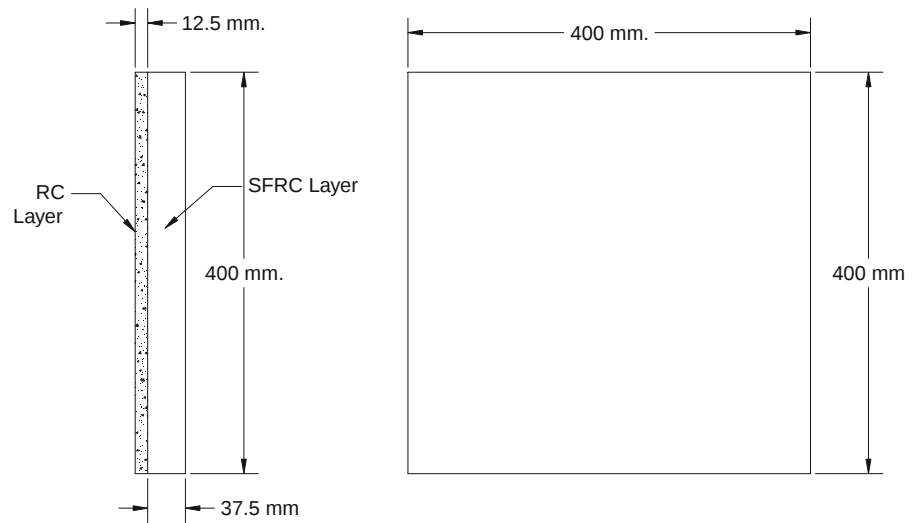
an indicator to the ductility improvement of rubberized concrete [13]. In the case of toughness, it is found to increase with the rubber content up to about 25 % replacement ratio [14, 15]. Beyond 25 %, the toughness is found to decrease due to the decrease in strength. Rubberized concrete also exhibits the ability to dissipate impact energy and prevent catastrophic failure [16–18].

By replacing portion of the SFRC thickness with rubberized concrete, the weight of the panel is expected to reduce up to about 15 % which could become useful when quick installation is required. The rubberized concrete which is placed at the front surface of the panel is also expected to act as an energy absorption layer to absorb or dissipate the kinetic energy of the bullet and allow less impact force to act on the panel.

2 Experimental procedure

2.1 Materials

- Type I Portland cement
- River sand

Fig. 1 Specimen configuration**Table 4** Data acquisition system and accelerometer specifications

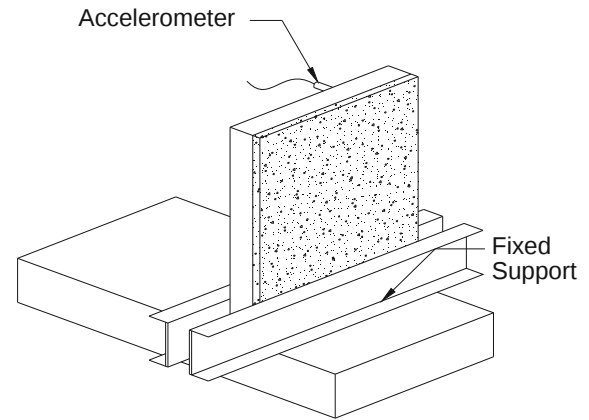
Data acquisition system

Type

General specification	Up to 80 analog inputs at 16 bits, 250 kS/s
	Up to 4 analog outputs at 16 bits, 833 kS/s
	Up to 48 TTL/CMOS digital I/O lines (up to 32 hardware-timed at up to 1 MHz)
	Two 32-bit, 80 MHz counter/timers

Accelerometer

Sensitivity ($\pm 15\%$)	0.102 mV/(m/s ²)
Measurement range	$\pm 49,000$ m/s ² pk
Frequency range ($\pm 10\%$)	0.4–7,500 Hz
Electrical filter cutoff frequency (-10%)	≥ 7.5 kHz
Resonant frequency	≥ 50 kHz
Broadband resolution (1–10,000 Hz)	0.20 m/s ² rms
Non-linearity	$\leq 1\%$
Transverse sensitivity	$\leq 5\%$
Sensing element	Quartz
Size (hex $\times$ height)	12.7 mm $\times$ 36.8 mm
Weight	17.9 g
Electrical connector	10–32 coaxial jack

**Fig. 2** Specimen setup

- Hooked end steel fiber (Table 1)
- Crumb rubber (Table 2)

2.2 Specimen preparation

For all specimens, the concrete is mixed in a pan mixer, carefully poured into the mold and vibrated on a vibrating table. After 24 h, the specimens are demolded and cured in water for 28 days. Three types of specimen with dimensions of $400 \times 400 \times 50$ mm are prepared (Table 3):

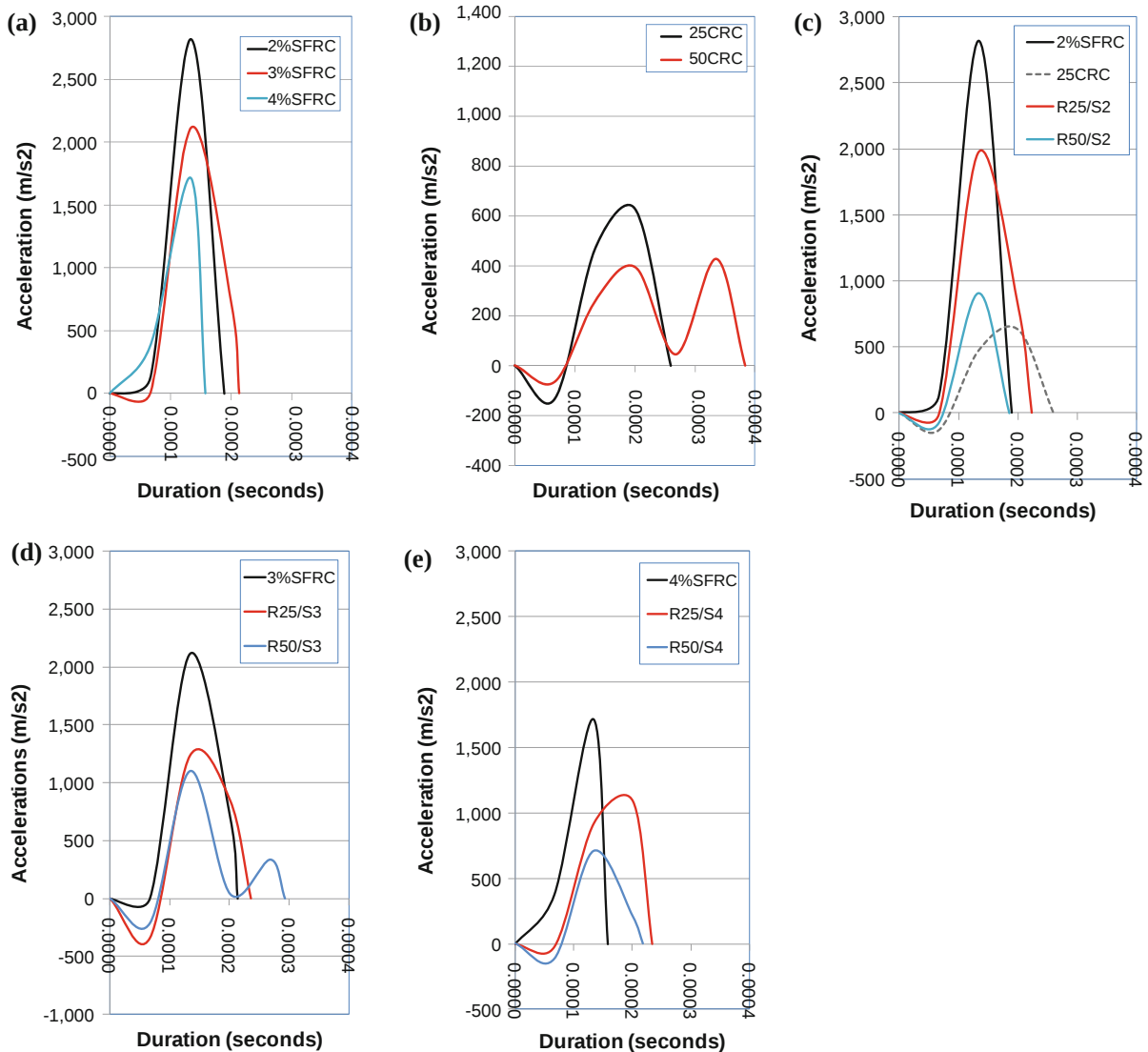
- Single layer SFRC plate. For this specimen, hooked end fibers are mixed with concrete at 2, 3 and 4 % by volume fractions.

Table 5 Bullet specification

Technical information		
Caliber	0.45 ACP	
Bullet weight	230 grains or 15 g	
Bullet style	Full metal jacket	
Case type	Brass	
Ballistics information		
Muzzle velocity	900 ft/s	270 m/s
Muzzle energy	414 ft lb	561 J

- Single layer CRC plate. For this type of specimen, the fine aggregate is partially replaced by the crumb rubber at 25 and 50 % by volume fractions.
- Double layer SFRC + CRC concrete plate. The specimen's thickness is divided into two layers: the top layer of 12.5 mm is made of CRC and the bottom layer of 37.5 mm is made of SFRC (Fig. 1).

The data acquisition system used in this study is an USB based system and the accelerometer is a piezo-electric type with the specifications as shown in

**Fig. 3** Acceleration of SFRC (a), CRC (b) and double layer plates (c–e)

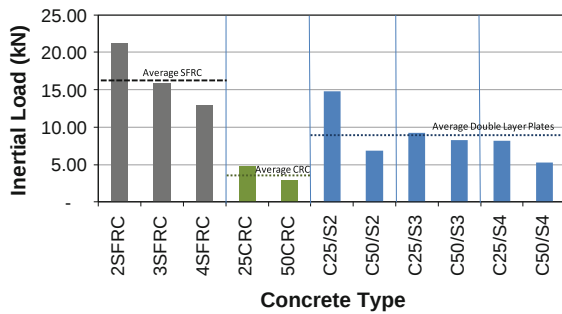


Fig. 4 Inertia loads

Table 6 Inertial force per weight

Type	Inertial force (kN)	Weight (Kg)	I/W ratio
2SFRC	21.11	19.19	1.10
3SFRC	15.85	19.47	0.81
4SFRC	12.87	19.28	0.67
25CRC	4.73	15.59	0.30
50CRC	2.90	14.21	0.20
C25/S2	14.83	18.29	0.81
C50/S2	6.82	17.95	0.38
C25/S3	9.24	18.50	0.50
C50/S3	8.28	18.16	0.46
C25/S4	8.16	18.36	0.44
C50/S4	5.30	18.36	0.29

Table 4. The accelerometer is connected to the data acquisition system using low-noise cable and connected to the notebook computer for recording data.

2.3 Testing

The specimen is placed on the support as shown in Fig. 2. Prior to the shooting, an accelerometer is attached to the back and at the top of the specimen to measure the acceleration of the plate during impact. One shot is attempted per specimen using 11 mm size bullets (0.45 magnum) from 15 meters distance. The specification of the bullet is given in Table 5. The acceleration is measured and recorded using a computer based data acquisition system.

2.4 Data analysis

Using the obtained acceleration data located at the top of the panel, the velocity and the displacement at any time at the location of the accelerometer can be calculated using Eqs. 1 and 2 [3].

$$\dot{u}(t) = \int_0^t \ddot{u}(t) dt \quad (1)$$

$$u(t) = \int_0^t \dot{u}(t) dt \quad (2)$$

where $\ddot{u}(t)$ is the acceleration at any time t , $\dot{u}(t)$ is the velocity at any time t , $u(t)$ is the displacement at any time t .

By assuming linear distribution of the acceleration from top to support of the specimen, the approximate virtual acceleration and displacement at any point of the panel can be obtained using Eqs. 3 and 4 [3].

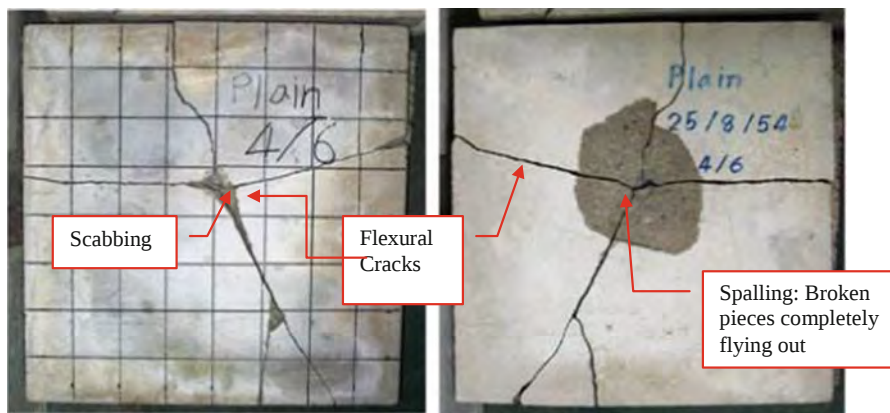


Fig. 5 Failure patterns of single layer plain concrete panel

$$u(x, t) = \frac{u(t)}{l}x \quad (3)$$

$$\ddot{u}(x, t) = \frac{\ddot{u}(t)}{l}x \quad (4)$$

$$\delta u(x, t) = \frac{\delta u(t)}{l}x \quad (5)$$

where $u(x, t)$ is the deflection at any point, x , on the panel at a given time t , $u(t)$ is the deflection at the top of the panel at any time t , $\ddot{u}(x, t)$ is the acceleration at any point, x , at any time t , $\ddot{u}(t)$ is the measured acceleration at the top of the panel at any time t , $\delta u(x, t)$ is the virtual deflection at any point x at time t , $\delta u(t)$ is the virtual deflection of the top of the panel at any time t .

The inertial force (dI) at any segment of the panel dx , with an acceleration of $\ddot{u}(x, t)$ can be determined using Eq. 6. By applying the principle of Virtual Work, the inertial load, $P_I(t)$, acting on the panel can be calculated using Eq. 7 [3].

$$dI = \rho A \ddot{u}(x, t) dx \quad (6)$$

$$P_I(t) \delta u = \int \rho A \ddot{u}(x, t) \delta u(x, t) dx, \quad (7)$$

where ρ is the concrete density, A is the thickness of the specimen.

3 Results and discussion

3.1 Acceleration

The acceleration is one of the key performances to demonstrate the movement or the response of materials under impact loading. By using the relationship between acceleration and time, velocity and displacement can be obtained using Eqs. 1 and 2. Results from tests are shown in Fig. 3. The discussion is focused on two points: impact duration and value of acceleration.

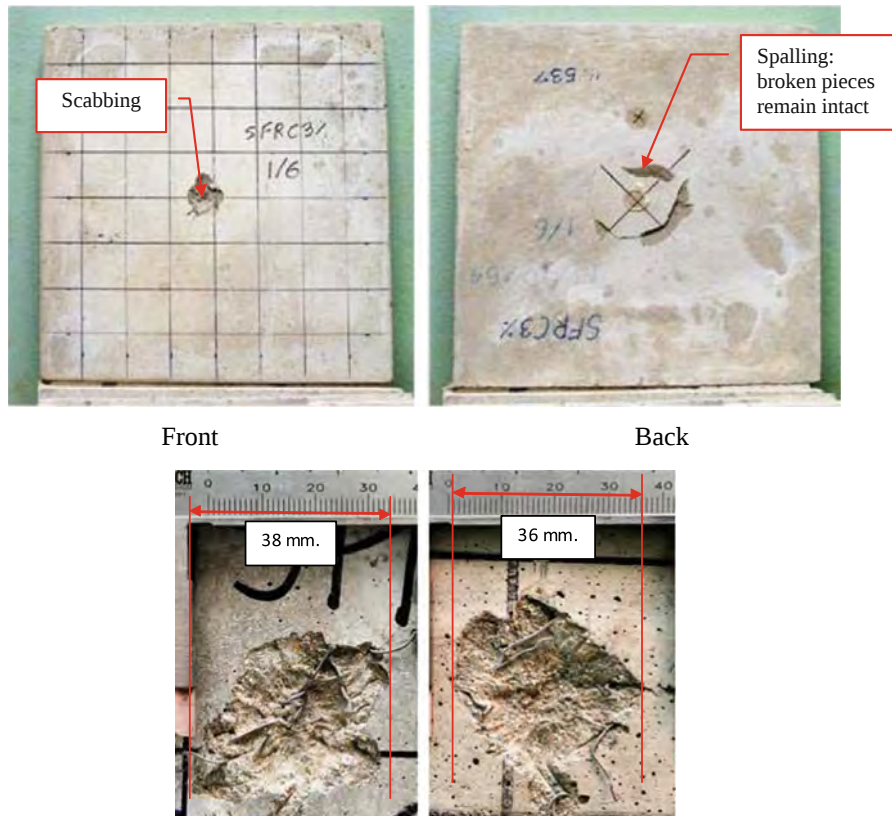


Fig. 6 Failure patterns of single layer SFRC concrete panel

For the impact duration, the impact events are found to vary from about 0.0002 s to about 0.0004 s depending on the type of specimen. The impact duration of the SFRC plates (about 0.0002 s) are shorter than those of the CRC plates (about 0.0004 s). Shorter impact duration of the SFRC plates indicates that the bullet is reflecting out of the plate surface immediately right after the contact. However, in the case of CRC plate, because of its highly flexible and soft surface, the bullet is allowed to penetrate deep into the surface before bouncing back and causes the impact event to extend slightly further.

In the case of acceleration, among the single layer plates, the CRC plates ($400\text{--}650\text{ m/s}^2$) exhibit much lower acceleration as compared to the SFRC plates ($1,700\text{--}2,700\text{ m/s}^2$) (Fig. 3a, b). Lower acceleration indicates that the CRC plate is being accelerated less than the SFRC plates, which in some way implies that the CRC is better in absorbing kinetic energy than the SFRC. In addition, for both types of materials the accelerations are also found to decrease with the increasing fiber and crumb rubber content.

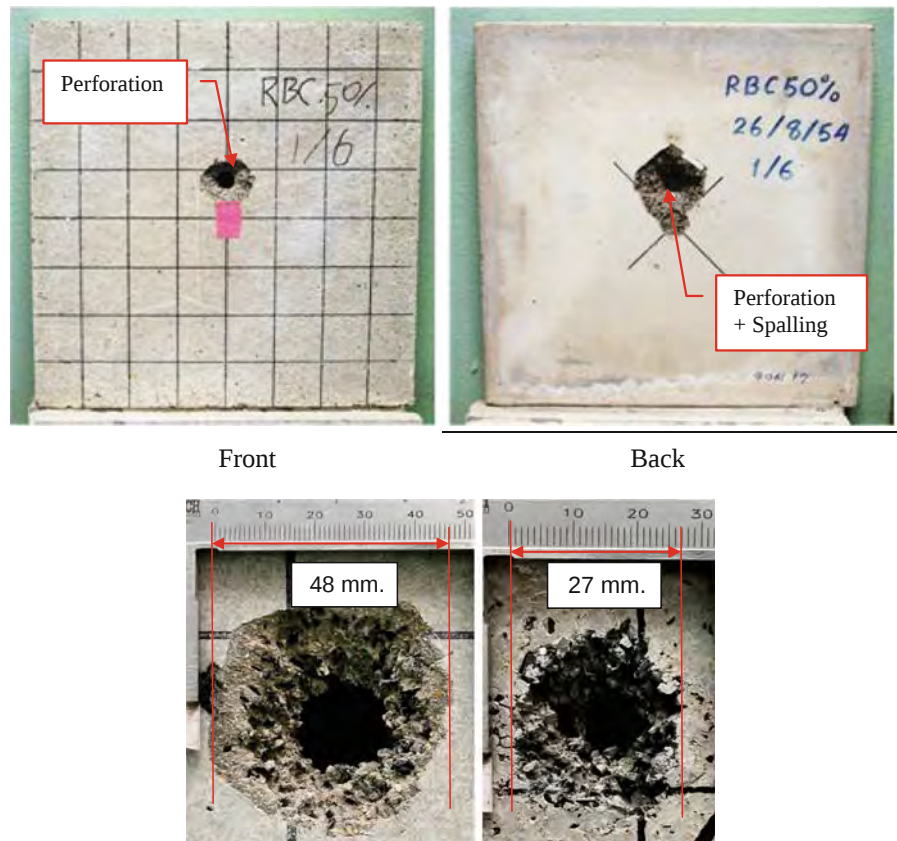
For the double layer plates, all of them exhibit less acceleration as compared to the single layer plates (Fig. 6c–e). This indicates that a layer of CRC material is able to provide a cushion effect for the plate which causes a reduction in the plate acceleration. The acceleration also decreases with the increasing rubber content of the CRC layer.

3.2 Inertial forces

Inertial force is the force used in accelerating a subject from its rest position. It can be calculated using Eq. 7 and by assuming a linear distribution of the acceleration from the support to the top of the specimen (0 at the support) the calculated results obtained are shown in Fig. 4.

From Fig. 4, it could be seen that the average values of the inertial loads acting on the specimens are highest on the single layer SFRC plates, followed by the double layer plates and the CRC plates. The results indicate that specimens with harder surfaces are more resistant to impact force than those with softer surfaces and as a result, cause higher inertial force. The CRC

Fig. 7 Failure patterns of single layer rubberized concrete panel



plates offer little resistance and allow the bullet to go through them very fast because of its low strength. This causes the inertial load acting the CRC plate to be very small.

For the double layer plates, the values which fall in between the SFRC and CRC plates indicate the combined effect of soft and hard materials in dissipating and resisting impact force. The softness of rubberized concrete absorbs or dissipates parts of the energy while the SFRC engages on the surplus energy and cause the inertial force to decrease.

For comparison, the inertial force per weight (I/W) ratios are provided in Table 6. The ratio indicates the inertial force allowed to occur per weight of the panel. The SFRC panels have I/W ratio ranged from 0.67 to 1.1 kN/kg. The ratio is found to decrease significantly in the CRC panels due to the lower value of inertial force. The decrease is also found in the double layer plates which have the values ranged from 0.29 to 0.81 kN/kg. The lower ratios indicate the

ability of the double layer plates to dissipate the impact energy and allow less inertial force to occur.

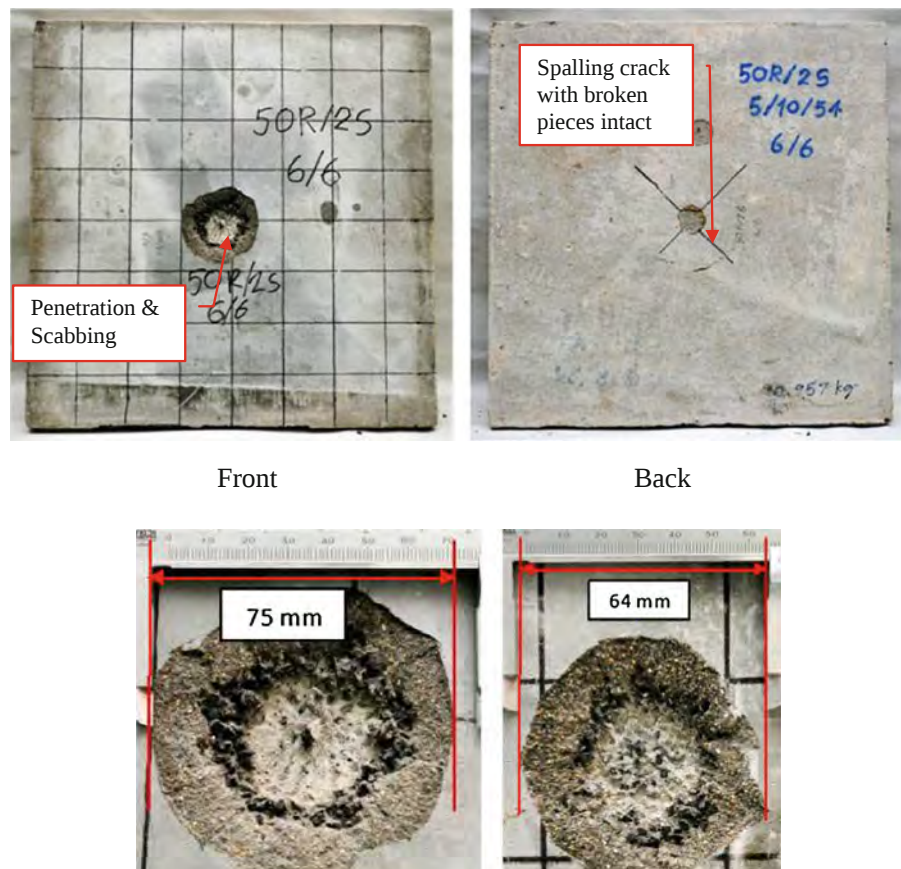
3.3 Failure patterns

Failure patterns found in this study are strongly influenced by the type of specimen. Typically, five failure patterns are found: flexural cracking, scabbing, spalling, penetrating, and perforation. Mixed mode failure is also found in some cases.

For single layer plain concrete panels, the typical failure mode is scabbing at the front surface and spalling at the back surface. Flexural cracks are also found all over the place. It is the flexural cracks that lead the specimen to a complete fracture (Fig. 5). The existence of the flexural cracks indicates the brittleness of plain concrete.

For SFRC single layer panels, the typical failure modes are scabbing at the front surface and spalling at

Fig. 8 Failure patterns of double layer rubberized/SFRC panel



the back surface (Fig. 6). There are no signs of flexural cracks, and the bullet does not penetrate through the panel. Although spalling is found at the back surface, it is not a complete spalling as the broken piece remains partially intact and clings on by steel fibers. These phenomena indicate the ability of fibers to bridge across the cracks and to enhance the impact resistance of concrete. The diameters of the scabbing are found to be around 36–38 mm.

For the rubberized concrete panels the bullets are able to penetrate through panel's thickness and create the perforation failure type because of its low strength (Fig. 7). There are evidences of spalling together with the perforation at the back surface. The typical contact zones have a diameter around 27–48 mm. The perforating diameter is found to decrease with the increasing rubber content.

For the double layer concrete panels, the typical patterns are scabbing at the front surface and spalling at the back surface. There were no flexural cracks found and the spalling is also not a complete spalling. The bullet does not penetrate through the thickness of the plate (Fig. 8). However, when looking closely at the contact zones, their appearances look more like a crater. The bursting out of the rubberized concrete layer creates the outer circle while the inner circle shows the surface of the SFRC layer. Similar to the single layer CRC panels, the outer diameter of the double layer panels decrease with the increasing rubber content (Fig. 8).

4 Conclusion

This manuscript is a preliminary result of the experimental series on impact resistance of multi-layer plates subjected to direct fire weapons (11 mm or 0.45 magnum). The 0.45 magnum are different from other bullets because it provides more impact force but less penetration. This study has proved that a combination of soft and hard material can be used to sustain impact force from this fire arm. The soft layer is acting as a cushion layer to absorb or dissipate the impact energy and allowing less impact force to act on the SFRC plate. Additional studies will be carried out on different kinds of fire arm, support layouts, and different combinations of material thicknesses.

Acknowledgments The authors would like to thank Thailand Research Fund (TRF), Golden Jubilee Ph.D. Research Grant and Faculty of Engineering of KMUTNB for financially supporting the experiment. Thank also to SR. Fiber Co., Ltd. for providing steel fibers.

References

1. Banthia N, Mindess S, Yan C (1987) Fracture toughness of concrete under impact loading. *Cem Concr Res* 17(2):321–341
2. Mindess S, Yan C (1993) Perforation of plain and fibre reinforced concretes subjected to low-velocity impact loading. *Cem Concr Res* 23:83–92
3. Banthia NP, Mindess S, Bentur A (1987) Impact behavior of concrete beams. *Mater Struct* 20:293–302
4. Sukontasukkul P (2001) Impact behavior of concrete under multiaxial loading, PhD Thesis, University of British Columbia, Canada
5. Sukontasukkul P, Mindess S, Banthia N (2002) Penetration resistance of hybrid fibre reinforced concrete under low velocity impact loading, Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Quebec, Canada
6. Eldin N, Senouci A (1993) Rubber-tire particles as concrete aggregate. *ASCE J Mater Civ Eng* 5(4):478–496
7. Fattuhi N, Clark L (1996) Cement based materials containing shredded scrap truck tyre rubber. *Constr Build Mater* 10(4):229–236
8. Khatib ZK, Bayomy FM (1990) Rubber portland cement concrete. *ASCE J Mater Civ Eng* 11(3):6–13
9. Sukontasukkul P, Chaikaew C (2006) Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber. *Constr Build Mater (JCBM)* 20(7):450–457
10. Sukontasukkul P (2009) Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of concrete panel. *Constr Build Mater (JCBM)* 23(2):1084–1092
11. Zheng L, Huo XS, Yuan Y (2008) Experimental investigation on dynamic properties of rubberized concrete. *Constr Build Mater* 22(5):939–947
12. Sallam HEM, Sherbini AS, Seleem MH, Balaha MM (2008) Impact resistance of rubberized concrete. *Eng Res J* 31: 265–271
13. Zheng L, Huo XS, Yuan Y (2008) Strength, modulus of elasticity, and brittleness index of rubberized concrete. *J Mater Civ Eng* 20(11):692–699
14. Taha MMR, Asce M, El-Dieb AS, Abd El-484 Wahab MA, Abdel-Hameed ME (2008) Mechanical, fracture, and microstructural investigations of rubber concrete. *J Mater Civ Eng* 20(10):640–649
15. Khaloo AR, Dehestani M, Rahmatabadi P (2008) Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles. *Waste Manag* 28(12):2472–2482
16. Hernández-Olivares F, Barluenga G, Bollati M, Witoszek B (2002) Static and dynamic behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete. *Cem Concr Res* 32(10):1587–1596
17. Liu F, Chen G, Li L, Guo Y (2012) Study of impact performance of rubber reinforced concrete. *Constr Build Mater* 36:604–616
18. Atahan A, Yücel AÖ (2012) Crumb rubber in concrete: static and dynamic evaluation. *Constr Build Mater* 36:617–622

Preliminary Study on Bullet Resistance of Double-layer Concrete Panel made of Rubberized and Steel Fiber Reinforced Concrete

Piti Sukontasukkul¹, Manote Sappakittipakorn², Nemkumar Banthia³

¹Associate Professor, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand

²Lecturer, King Mongkut's University of Technology-North Bangkok, Thailand

³University of British Columbia, Canada

Abstract

In this study, the impact resistance of double-layer concrete panels made of rubberized and steel fiber reinforced concrete subjected to direct fire weapon (11 mm bullet) is investigated. Concrete panels with dimensions of 400x400x50 mm are subjected to impact force from 11mm bullets at a distance of 15 m. Three types of concrete panels are tested: single layer steel fiber reinforced concrete (SFRC), single layer crumb rubber concrete (CRC) and double layer CRC/SFRC. For a double layer CRC/SFRC, the CRC layer of 12.5mm is added to the front surface to partially replace part of the SFRC panel. It is expected that with its flexibility, the CRC will act as a cushion layer to absorb impact energies from the bullet and reduce the damage to the concrete panel. During the impact event, the acceleration of the plate is measured using an accelerometer. The measured acceleration is then used for calculating the force acting on the plate and also its displacement.

Key Words: Multilayer Concrete Panel, Bullet Resistance, Rubberized Concrete, Fiber Reinforced Concrete

1. Introduction

Worldwide, terrorist threats have become widespread. In Thailand, terrorist threats have occurred more frequently especially at the southern parts of the country. Each attack causes damage to properties and life. It becomes essential to develop structures or structural elements which could resist terrorist attacks like bombs or direct fire weapons.

In Thailand, most residential buildings are constructed using reinforced concrete structural system in which the main structural components such as slabs, beams and columns are made of reinforced concrete and walls are made of bricks. When subjected to direct fire weapon or bomb, the bullet could either penetrate through the wall or cause flying hazardous debris which could harm people inside the building.

In the case of military buildings such as bunker or guard post, this kind of structures is often a nonpermanent structure (Fig. 1). Some are made of timber or wooden panel surrounded by sand bags. The advantages of sand bags are price, availability and its high efficiency in stopping bullet. However, there are several disadvantages for example, sand bags are heavy (slow installation), easy to disintegrate (sensitive to moisture and UV), and need a replacement once it got puncture. In the case of emergency, when military units are required to construct bunkers or guard posts in the battle zone quickly, the weight of the sand bags could be become a factor to slowing them down.



Fig. 1 Example of military guard post or bunker
(<http://www.arty16.com/data/modules.php?name=News&file=article&sid=42>)

In this study, a bullet proof concrete panel with the thickness of about 50 mm made from layers of steel fiber reinforced concrete and rubberized concrete is proposed. The panel is expected to sustain Class 3A fire weapon according to the Department of Defense standard for bullet proof panel or shield [1].

In general, concrete is a quasi-brittle material, when subjected to an impact loading, concrete usually fractures catastrophically. This causes pieces of broken concrete to take off in all directions which may harm people or cause damage to properties inside the building. In order to prevent it, concrete wall must not only prevent a bullet from penetrating through, it must also maintain its integrity to keep the flying hazardous debris to minimum.

In order to improve concrete brittleness and ability to absorb impact energy, small fibers are mixed uniformly into concrete mixture (fiber reinforced concrete, FRC). With the ability of fibers to bridge across the cracks, the toughness as well as the impact resistance of FRC is much more superior to that of plain concrete [2]. However, there are still some disadvantages on the use of FRC material as a bullet proof panel. An example is the rebounding the bullet off the surface. Since the surface of the FRC plate is hard and strong, for some type of bullets, quite often it is found to bounce back at high velocity in arbitrary direction and become harmful to people on the front side.

Therefore, in this study, to eliminate or minimize the rebounding effect, a layer of crumb rubber concrete (CRC) or rubberized concrete is introduced and used for partially replacing part of the FRC layer. It is expected by adding a highly flexible rubberized concrete layer to the front, some kinetic energies of the bullet could be absorbed by the rubberized layer and caused the bullet to may be stop or bounce back at lower velocity. Another advantage of replacing FRC with rubberized concrete is the reduction the weight of the plate because rubberized concrete is lighter than normal concrete by about 20% to 50%.

2. Experimental Procedure

2.1. Materials

- Type I Portland Cement
- River Sand
- Hooked End Steel Fiber (Table 1)
- Crumb Rubber (Table 2)

Table 1 Fiber Properties

Mat.	SG	Shape	L (mm)	Section (mm)	Aspect Ratio (l/d)	Tensile Strength (N/mm ²)
------	----	-------	-----------	-----------------	--------------------------	---

Steel	7.8	Hooked End	35	Circle dia.- 0.55	64	1000
-------	-----	------------	----	-------------------	----	------

Table 2 Properties of Crumb Rubber and Fine Aggregate

Categories	Crumb Rubber	Fine Aggregate
Average Bulk Specific Gravity	0.96	2.43
Average Bulk Specific Gravity (SSD)	0.97	2.47
Average Apparent Specific Gravity	0.97	2.55
Average Absorption (%)	0.92	2.04
Finess Modulus	4.93	2.9

2.2. Specimen Preparation

For all specimens, the concrete is mixed in a pan mixer, carefully poured into the mold and vibrated on a vibrating table. After 24 hours, the specimens are demolded and cured in water for 28 days. Three types of specimen with dimensions of 400x400x50 mm are prepared (Table 3):

- Single layer SFRC plate. For this specimen, hooked end fibers are mixed with concrete at 2%, 3% and 4% by volume fractions.
- Single layer CRC plate. For this type of specimen, the fine aggregate is partially replaced by the crumb rubber at 25% and 50% by volume fractions.
- Double layer SFRC+CRC concrete plate. The specimen's thickness is divided into two layers: the top layer of 12.5mm is made of CRC and the bottom layer of 37.5mm is made of SFRC.

Table 3 Casting Details

Type	Thickness (mm)		Material		No. of Spec.
	t1	t2	t1	t2	
R25	50	-	25%CRC		
R50	50	-	50%CRC		
S2	50	-	2%SFRC		
S3	50	-	3%SFRC		
S4	50	-	4%SFRC		
R25/S2	12.5	37.5	25%CRC	2%SFRC	3
R50/S2	12.5	37.5	50%CRC	2%SFRC	3
R25/S3	12.5	37.5	25%CRC	3%SFRC	3
R50/S3	12.5	37.5	50%CRC	3%SFRC	3
R25/S4	12.5	37.5	25%CRC	4%SFRC	3
R25/S4	12.5	37.5	50%CRC	4%SFRC	3

2.3. Testing

The specimen is set on the support as shown in Fig. 2. Prior to the shooting, an accelerometer is attached to the back and at the top of the specimen to measure the acceleration of the plate during impact. Three shots are attempted per specimen using 11mm size bullets (0.44 Magnum) from 15 meters distance. The acceleration is measured and recorded using a computer based data acquisition system.



Fig. 2 Specimen Setup

2.4. Data Analysis

Using the obtained acceleration data, the velocity and the displacement at any time and the location for the accelerometer can be calculated using Eq.1 and 2 [3].

$$\dot{u}(t) = \int_0^t \ddot{u}(t) dt \quad (1)$$

$$u(t) = \int_0^t \dot{u}(t) dt \quad (2)$$

where $\ddot{u}(t)$ is the acceleration at any time t
 $\dot{u}(t)$ is the velocity at any time t
 $u(t)$ is the displacement at any time t

By assuming linear distribution of the acceleration from top to support of the specimen and by applying the principle of Virtual Work, the inertia force acting on the specimen can be calculated using Eq.3 and 4 [3].

$$dI = \rho A \ddot{u}(x, t) dx \quad (3)$$

$$P_I(t) \delta u = \int \rho A \ddot{u}(x, t) \delta u(x, t) dx \quad (4)$$

where ρ is the concrete density
 A is the thickness of the specimen

3. Results and Discussion

3.1. Acceleration

The acceleration is one of the key performances to demonstrate the movement or the response of materials under impact loading. By using the relationship between acceleration and time, velocity and displacement can be obtained using Eq.1 and 2.

Results from tests are given in Fig. 3. Two points are discussed: impact duration and value of acceleration.

For the impact duration, the impact events are found to vary from about 0.0002 seconds to about 0.0004 seconds depending on the type of specimen. The impact duration of the SFRC plates (about 0.0002 seconds) are shorter than those of the CRC plates (about 0.0004 seconds). Shorter impact event for the SFRC plate indicates that the bullet is reflecting out of the plate surface immediately right after the contact. However, in the case of CRC plate, because of its highly flexible and softer surface, the bullet is allowed to penetrate deep into the surface before bouncing back and causes the impact event to extend slightly further.

In case of the acceleration, comparing among the single layer plates, the CRC plates (400 to 650 m/s^2) exhibit much lower acceleration as compare to the SFRC plates (1700 to 2700 m/s^2) (Fig.3a and b). Lower acceleration indicates that the CRC plate is being accelerated less than the SFRC plates, which in some way imply that the CRC is better in absorbing kinetic energy than the SFRC. In addition, for both types of materials, the accelerations are also found to decrease with the increasing fiber and crumb rubber content.

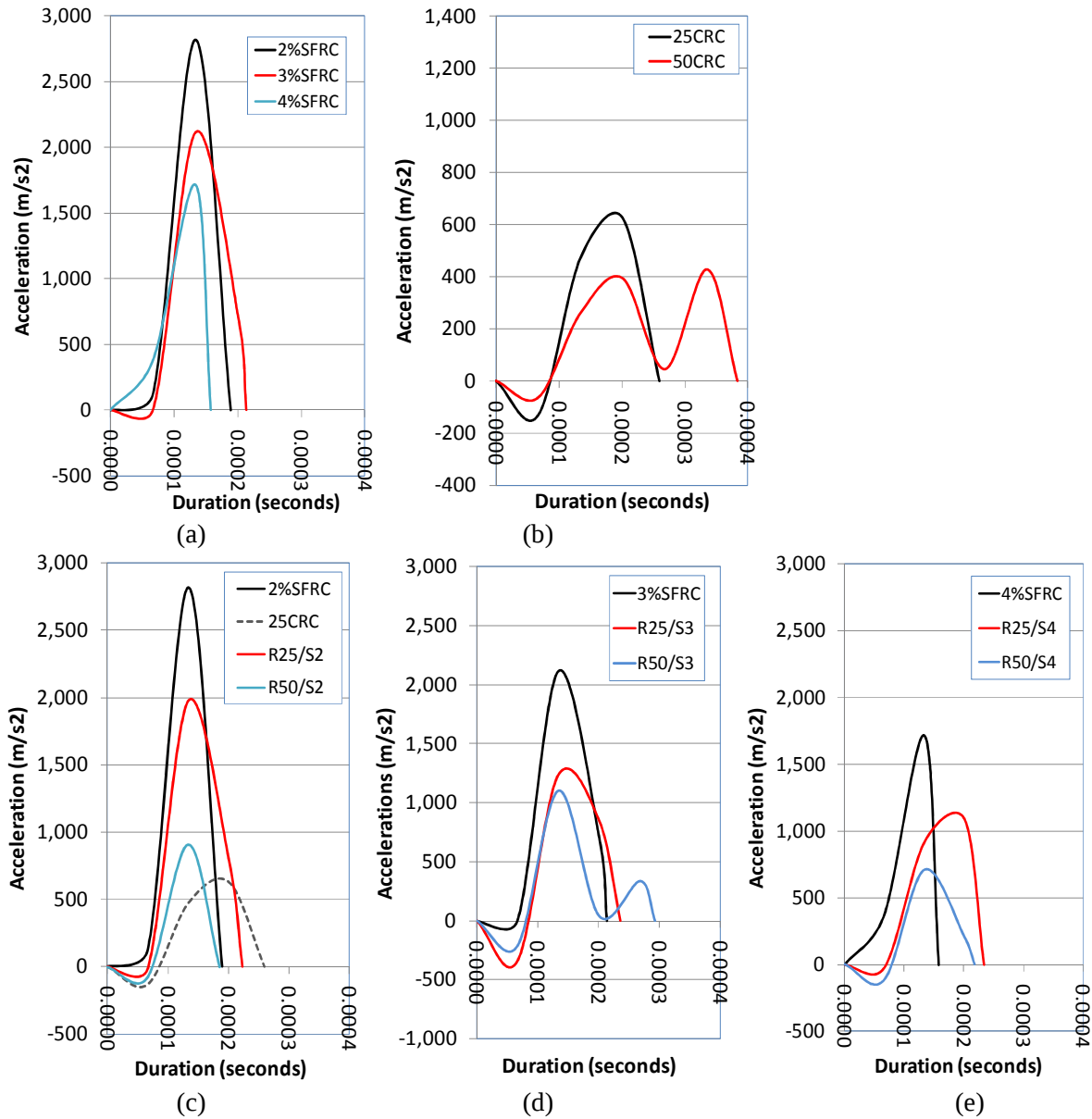


Fig.3 Acceleration of (a) SFRC, (b) CRC and (c)-(e) Double Layer Plates

For the double layer plates, all of them exhibit less acceleration as compared to the single layer plates (Fig. 6c-e). This proof that a layer of CRC material is able to provide a cushion effect for

the plate which causes a reduction in impact energy and plate acceleration. The acceleration also decreases with the increasing rubber content of the CRC layer.

3.2. Inertia Force

Inertia force is the force used in accelerating a subject from its rest position. It can be calculated using Eq.4 and the results are shown in Fig. 4.

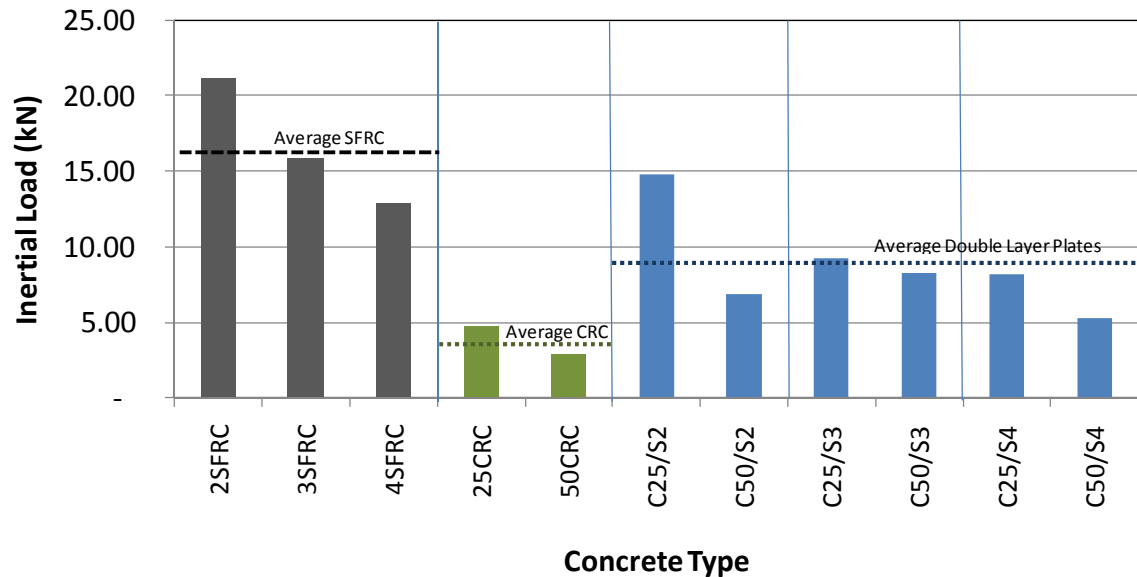


Fig. 4 Inertia Load

From Fig. 4, it could be seen that the average values of the inertia loads acting on specimens are highest on the single layer SFRC plates, followed by the double layer plates and the CRC plates. The results indicate that the harder the surface, the higher the inertia loads. It also proves that specimens with harder surface resist more to the impact force than those with softer surface and cause higher inertia force. For the double layer plates, the values which fall between the upper and lower bound indicate the combined effect of soft and hard materials in one specimen. The soft material absorbs parts of the energy while hard material resists the surplus energy.

3.3. Failure Patterns

For all specimens, the patterns of failure are typically scabbing (fragments of specimen falling off the top surface[4]). However, in some cases of the CRC plates, both scabbing and spalling (fragments of specimen falling off the bottom surface[4]) failures are observed. Even though most specimens fail under scabbing mode, different crater sizes are observed. For the SFRC plates, the crater sizes are smaller than those of CRC and CRC+SFRC plates. This indicates also that the CRC layer allows the bullet to penetrate deeper than the SFRC layer and absorbs part of the kinetic energies during the impact.

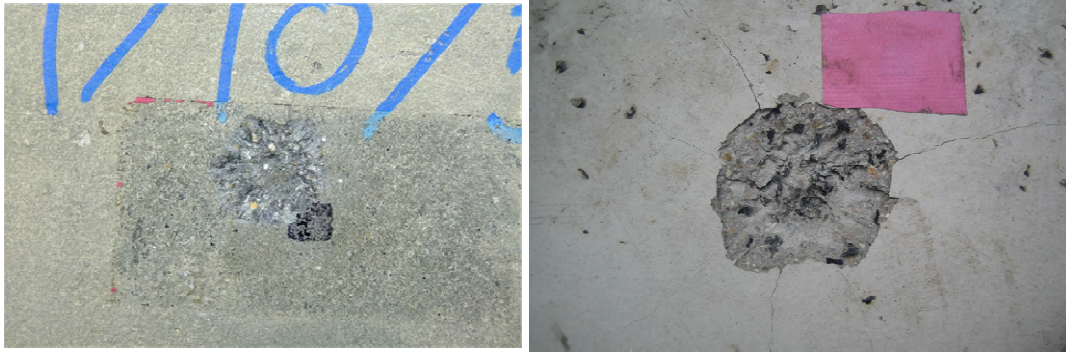


Fig. 5 Failure Patterns of SFRC plate (left) and CRC+SFRC plate (right)

4. Conclusion

This manuscript is a preliminary result of the experimental series on impact resistance of multilayer plate subjected to direct fire weapons. In this study, the 11mm (0.44 Magnum) bullet type is used. The 0.44 magnum are different from other bullet that it provides more impact force but less penetration. It has been proofed that a combination of soft and hard material can be used to sustain impact force from this fire arm. The soft layer is acting as a cushion layer to absorb part of the energy and allow less impact force to act on the SFRC plate. Addition studies will be carried out on different kinds of fire arm and different combination of material thicknesses.

5. Acknowledgement

The authors would like to thank Thailand Research Fund (TRF) and Faculty of Engineering (KMUTNB) for financially support the experiment. Thank also to SR.Fiber Co., Ltd. for providing steel fibers.

6. References

- [1] Department Defense, Kingdom of Thailand, "Standard for Bullet Proof Shield", 2006.
- [2] Sukontasukkul, P., Impact Behavior of Concrete under Multiaxial Loading, PhD Thesis, University of British Columbia, Canada, 2001.
- [3] Banthia, N., Impact Resistance of Concrete, PhD Thesis, University of British Columbia, Canada, 1987
- [4] Mindess S, and Yan C. Perforation of Plain and Fibre Reinforced Concretes Subjected to Low-Velocity Impact Loading. Cement and Concrete Research 1993 (23), pp. 83-92.

USE OF HIGH CONTENT CRUMB RUBBER FROM WASTED TIRE IN BULLETPROOF CONCRETE PANELS

Piti SUKONTASUKKUL

Associate Prof., Department of Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand

Sittisak JAMNAM,

PhD Candidate, Department of Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand

Piyarat PREMANOCH

Lecturer, Department of Environmental Engineering, Ramkhamhaeng University, Thailand

Manote SAPPAKITTIPAKORN

Assistant Prof., Department of Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand

Nemkumar BANTHIA

Professor, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Canada

ABSTRACT

Wasted or abandoned tires are an environmental problem worldwide. One way to get rid of them is to grind them into small particles called crumb rubber. During the past years, crumb rubber has found its use in several applications including the rubberized concrete. In this study, the rubberized concrete is used to improve the bullet resistance of steel fiber reinforced concrete (SFRC) panels. In general, a major requirement for a bulletproof panel is to be able to stop bullet from penetrating through the panel. However, when using hard materials like SFRC, though the bullet cannot penetrate the panel, it bounces or ricochets back at high velocity and in random directions which in a way is still able to cause damage. In this study, a double layer bulletproof panel made of crumb rubberized concrete (CRC) in the front and SFRC in the back is introduced. The rubberized concrete (CRC) layer in the front is expected to behave as a cushion layer which absorbs impact energy from a bullet prior to reaching the SFRC layer and to stop the bullet from bouncing back or to reduce the ricocheting velocity. Data are collected in from of acceleration and displacement occurred during the impact.

Key words: Wasted Tires, Crumb Rubber, Bulletproof Panel, Environmental Performance

1. INTRODUCTION

Since the industrial revolution, the number of vehicles has been increased drastically. According to Ward's Report [1], the number of vehicles in the world has already exceeded 1.05 billion in 2010. With the rising number of vehicle comes a new problem of disposing wasted tires. Because of its difficulty to dispose, wasted tires are mostly ended up in landfills and most likely to become fire hazard. However, during the past

two decades, several researches have been carried out in order to find solutions to the problem; one of them is a product called 'crumb rubber'. The crumb rubber is one of the products coming out from grinding wasted tires into small particles. They are used in several applications such as asphaltic pavement, lightweight concrete, rubber tiles, reclaimed rubber, etc.



Fig.1 Abandoned Tires in Landfill

In the field of concrete technology, crumb rubbers are used in the production of lightweight concrete (Crumb Rubberized Concrete, CRC). The rubberized concrete is made by replacing portions of fine aggregates with crumb rubber particles. The percentage of replacing is depending on the purpose of the use. For structural purpose, the percentage replacement should not exceed 20% by volume fractions. For insulating purpose, the replacement could be up to 100% replacement by volume fraction. The rubberized concrete usually has low compressive strength, high energy absorption and good insulating properties (both sound and thermal) [2-4].

In our study, the rubberized concrete made with high crumb rubber content is utilized as an energy absorption layer for the bulletproof concrete panel. Conventionally, the bulletproof concrete panels are usually made of steel fiber reinforced concrete (SFRC) at different volume fractions. Though the steel fibers provide superior impact or ballistic resistance to the concrete panel, there are still rooms for improvement. For example, because of the hardness and strong surface of the SFRC panel, most of the bullets which cannot penetrate the panel, can ricochet back at high speed in random directions. These ricocheted bullets are quite dangerous and could cause serious injury to personnel in front of the shield. Therefore it is one of the objectives of this study that is to reduce the impact energy of the bullet by placing an energy absorption layer such as rubberized concrete in the front of the SFRC panel.

The concrete panels used in this study consist of two different types: single layer and double layer type (details are described in 2). Each panel is subjected to a 9 mm-bullet at the distance of 10 meters. The variation of the acceleration during the impact event is measured

using accelerometer attached to the back surface of the panel. The rubberized concrete layer is added to the front of the SFRC panel by beams of replacing part of SFRC's thickness. With a layer of rubberized concrete to the front surface, the impact energy of the bullet is expected to be absorbed partly and decrease prior to reach the SFRC layer. In addition to that, by replacing part of the SFRC's thickness with rubberized concrete which is lighter in weight, the weight of the panel is also expected to decrease as well.

2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

2.1 Materials

- Type I Portland Cement
- River Sand
- Hooked End Steel Fiber (Table 1)
- Crumb Rubber passing Sieve No. 6 (Table 2)

2.2 Specimen Preparation

For all specimens, the concrete is mixed in a pan mixer, poured into the mold. After 24 hours, the specimens are demolded and cured in water for 28 days. Three types of specimen with dimensions of 400x400x50 mm are prepared (Table 3):

- Single layer SFRC plate: for this specimen, hooked end fibers are mixed with concrete at 2%, 3% and 4% by volume fractions.
- Single layer CRC plate: for this specimen, fine aggregate is replaced partially with crumb rubber at 50%, 75% and 100% by volume fractions.
- Double layer SFRC+CRC concrete plate. For this specimen, the thickness is divided into two layers: the top layer is made of CRC with the thickness of 5 mm. The bottom layer is made of SFRC with the thickness of 25 mm (Table 3).

Table 1 Fiber Properties

Mat.	SG	L (mm)	AspectRatio (l/d)	Tensile Strength (N/mm ²)
Steel	7.8	35	64	1000

Note:- Hooked End Dramix Steel Fiber

Table 2 Properties of Crumb Rubber and Fine Aggregate

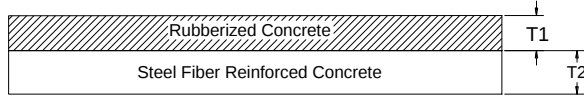
Categories	Crumb Rubber	Fine Aggregate
Average Bulk Specific Gravity	0.96	2.43
SSD Specific Gravity	0.97	2.47
Apparent Specific Gravity	0.97	2.55
Average Absorption (%)	0.92	2.04
Finess Modulus	4.93	2.9

2.3 Ballistic Testing

Prior to the ballistic test, each specimen's weight is measured and recorded. The specimen is then placed on the support anvil with four sides secured by a steel frame to provide simple support along the edges as shown in Fig. 2. Two accelerometers (Table 4) with a capacity of 5000g are attached at the quarter and at the center location of the back surface to measure the accelerations during the impact. Each specimen is shot by a 9mm bullet (Luger FMJ ©Winchester) at a distance of 10 meters (bullet dimensions and specification given in Table 5). The acceleration during the impact event is measured and recorded using a computer based data acquisition system (NI USB-6225).

Table 3 Casting Details

Type	Thickness (mm)		Material		No. of Spec.
	t1	t2	t1	t2	
R25	-	30	50%CRC	-	3
R50	-	30	75%CRC	-	3
R75	-	30	100%CRC	-	3
S2	-	30	2%SFRC	-	3
S3	-	30	3%SFRC	-	3
S4	-	30	4%SFRC	-	3
R50/S2	5	25	50%CRC	2%SFRC	3
R75/S2	5	25	75%CRC	2%SFRC	3
R100/S2	5	25	100%CRC	2%SFRC	3
R50/S3	5	25	50%CRC	3%SFRC	3
R75/S3	5	25	75%CRC	3%SFRC	3
R100/S3	5	25	100%CRC	3%SFRC	3
R50/S4	5	25	50%CRC	4%SFRC	3
R75/S4	5	25	75%CRC	4%SFRC	3
R100/S4	5	25	100%CRC	4%SFRC	3



2.4 Data Analysis

Using the obtained acceleration data, the velocity and the displacement at any time and at the location of the accelerometer can be calculated using Eq.1 and 2 [5,6].

$$u(t) = \int_0^t \dot{u}(t) dt \quad (1)$$

$$u(t) = \iint_0^t \ddot{u}(t) dt \quad (2)$$

where $\ddot{u}(t)$ is the acceleration at any time t
 $\dot{u}(t)$ is the velocity at any time t
 $u(t)$ is the displacement at any time t

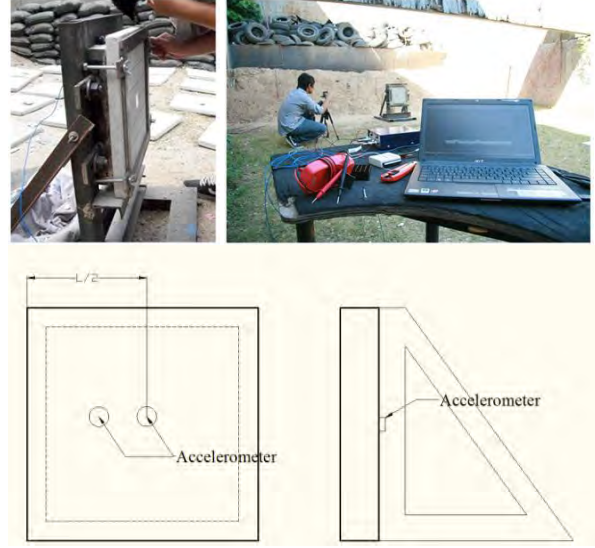


Fig. 2 Test Setup

Table 4 Accelerometer Specification

Performance	
Sensitivity ($\pm 15\%$)	1.0 mV/g
Measurement Range	± 5000 g pk
Frequency Range ($\pm 10\%$)	0.4 to 7500 Hz
Electrical Filter Cutoff Freq (-10%)	≥ 7.5 kHz
Resonant Frequency	≥ 50 kHz
Non-Linearity	$\leq 1\%$
Transverse Sensitivity	$\leq 5\%$

Table 5 Bullet Specification

Technical Information		
Caliber	9mm Luger	
Bullet Weight	115 grains (7.45 grams)	
Bullet Style	Full Metal Jacket	
Case Type	Brass	
Ballistics Information:		
Muzzle Velocity	1190 fps	362 m/s
Muzzle Energy	362 ft.lbs.	492 N.m

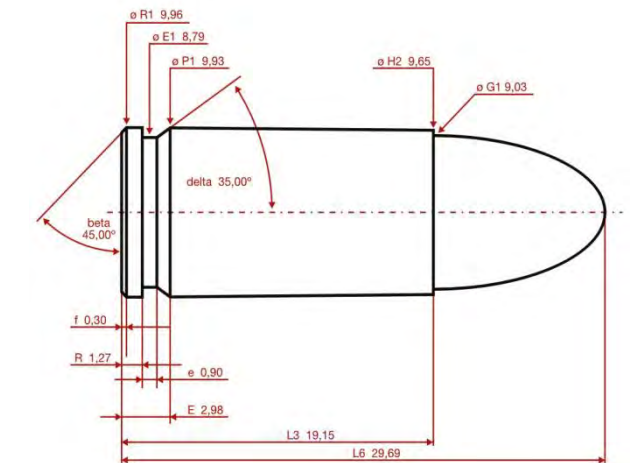


Photo source: http://en.wikipedia.org/wiki/File:9x19mm_Parabellum.svg[7]

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Failure Patterns

There are five typical failure patterns found in this study as summarized in Table 6 and Figure 2. The classification for passing or not-passing the standard of each specimen is judged based on a standard of Thailand Minister of Defense regarding bulletproof shield testing which briefly states that a bulletproof shield is considered failure if a bullet is able to perforate through its thickness.

Type I: Flexural Failure. This type of failure only occurs in the plain concrete plates. Because of its brittleness, under the ballistic force, the plain concrete plates usually crack and shatter into several pieces (Fig. 3a). This type of failure is considered not pass.

Type II: Perforation. All single layer rubberized concrete panels fail in this manner. This is because of its low strength; the bullet can penetrate through panel's thickness and create the perforation failure type (Fig. 3b). This type is also considered not pass.

Type III: Scabbing at the Front surface. This type of failure is found mostly in single layer SFRC plates which also show no sign of flexural cracking in all cases. At the back surface, spalling is found in some specimens but in all cases, the spalling pieces are remain intact the specimen and there is also no sign of perforation. This phenomenon indicates the ability fibers to bridge across the cracks and to enhance the impact resistance of concrete (Fig. 3c). This type is considered pass the requirement.

Type IV: Penetration. This type of failure is found in some of the double layer plates where the bullet is found to penetrate through the layer of the rubberized concrete and the completely stop at the layer of SFRC. This is some spalling in the back surface but no sign of perforation (Fig. 3d). This type is also considered pass the requirement.

Type V: Penetrating + Scabbing. This is a typical failure mode for most of the double layer plates where the bullet is able to penetrate through the thickness of the rubberized concrete layer cause the scabbing at the front surface but does not cause perforation or flexural cracking (Fig. 3e). This type is also considered pass the requirement.

Table 6 Failure Patterns Summary

Type	Failure Type	Classification
R25	Perforation	not pass
R50	Perforation	not pass
R75	Perforation	not pass
S2	Scabbing	pass
S3	Scabbing	pass
S4	Scabbing	pass
R50/S2	Penetrating+Scabbing	pass
R75/S2	Penetrating+Scabbing	pass
R100/S2	Penetrating+Scabbing	pass
R50/S3	Penetrating+Scabbing	pass
R75/S3	Penetrating+Scabbing	pass
R100/S3	Penetrating+Scabbing	pass
R50/S4	Penetrating+Scabbing	pass
R75/S4	Penetrating+Scabbing	pass
R100/S4	Penetrating+Scabbing	pass

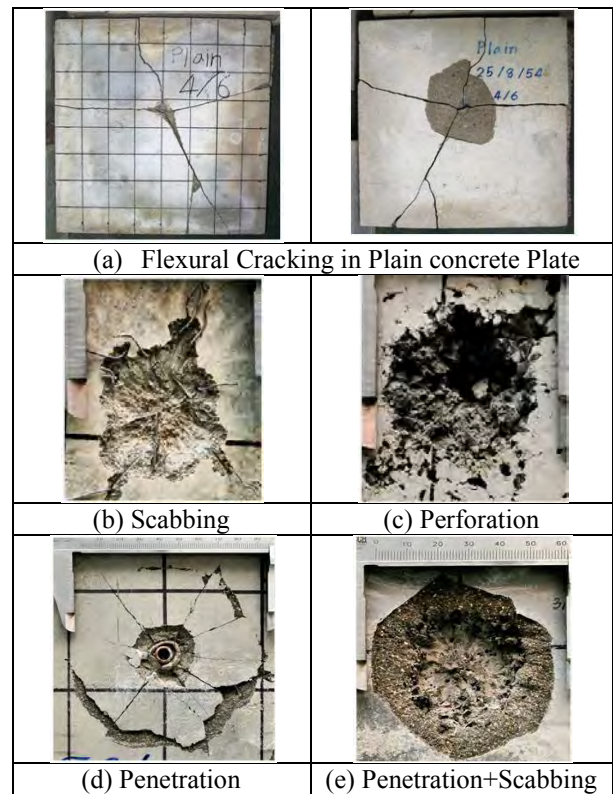
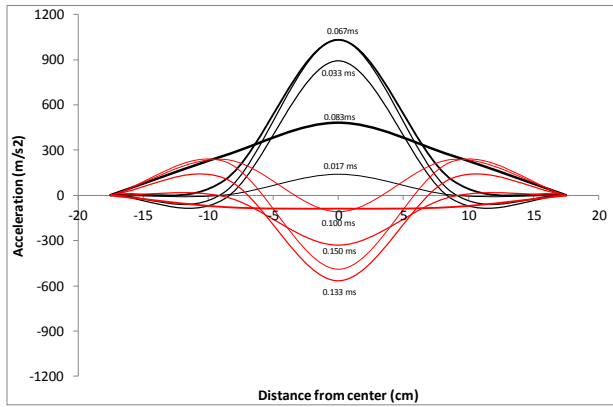


Fig. 3 Failure Modes

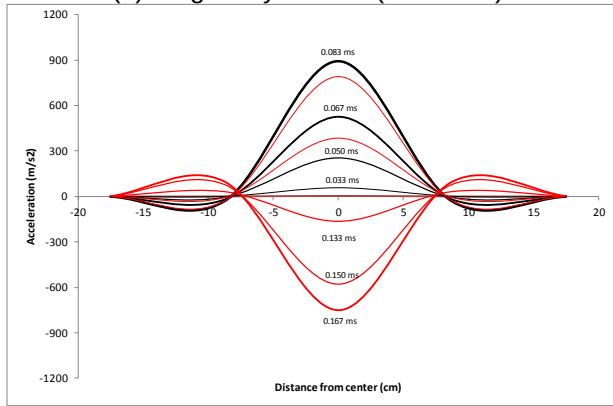
3.2 Acceleration

Typical responses of acceleration vs. time of plates during the impact event are shown in Figure 4 to 6. In general, the acceleration is mostly confined at the center of the plate (where the bullet comes into contact). This causes the side accelerometer to response the impact slower than the center one. For single layer SFRC, the peak acceleration appears to decrease with the fiber content. Comparing between single layer and double

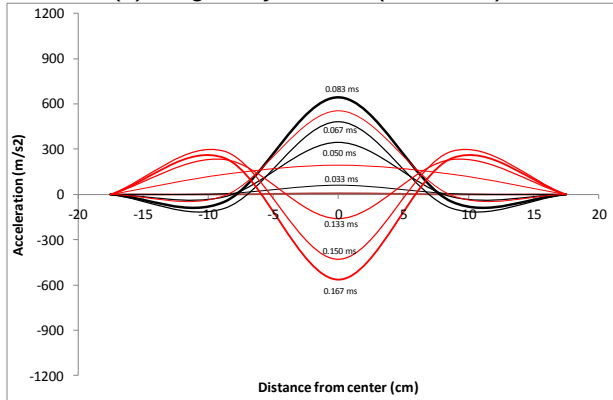
layer plates, the accelerations of the double layer plates seem to be smaller than those of single layer plates (results are summarized in Figure 5).



(a) Single Layer Plate (2%SFRC)



(b) Single Layer Plate (3%SFRC)



(c) Double Layer Plate (50R40S)

Fig. 4 Acceleration Response during Impact Event

Lower acceleration indicates that less impact energy is acting on the plate during the impact. It also implies that the part of the impact energy from the bullet is absorbed by the rubberized concrete layer. The effectiveness of rubberized concrete in absorbing impact energy is also found to increase with rubber content as seen in Fig. 5.

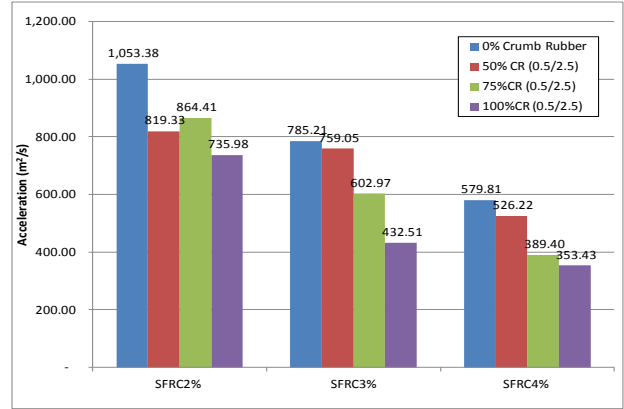


Fig. 5 Peak Center Acceleration

3.3 Displacement and D/W Ratio

By integrating the acceleration as shown in Equation 2, the displacement of the plate during the impact can be obtained. Calculating results are as shown in Table 6.

Results show that the displacements of the double layer plates are smaller than those single layer plates in all specimen types. This indicates the effectiveness of the rubberized concrete layer to absorb the impact energy and cause the plate to deform.

Table 6 Center Displacement

Type	Center Displ. (mm)	% Comparison	Spec. Weight (kg)	D/W ratio (mm/kg)
S2	0.46	100	11.52	0.040
S3	0.44	100	11.18	0.038
S4	0.42	100	11.14	0.036
R50/S2	0.35	76	11.15	0.031
R75/S2	0.28	61	11.68	0.025
R100/S2	0.25	54	11.30	0.022
R50/S3	0.39	89	11.16	0.035
R75/S3	0.37	84	11.02	0.033
R100/S3	0.32	73	11.57	0.029
R50/S4	0.37	88	11.16	0.033
R75/S4	0.33	79	10.95	0.030
R100/S4	0.28	67	10.74	0.026

In addition to the measured displacement, the displacement per weight ratio (D/W) is also calculated. As shown in Table 6, the average weight of double layer concrete plate is found to decrease gradually with the increasing crumb rubber content. The D/W ratio represents the effectiveness of the plate in term of allowing the deflection to occur per weight of the specimen. Lower D/W ratio indicates higher effectiveness which in this case, the double layer plates seem to be more effective than those single layer plates.

4. CONCLUSION

Crumb rubber is one of the solutions to reduce waste from discarded tires. It is used in this study to enhance the efficiency of the bulletproof concrete panels. Because of its ability to dissipate energy, the rubberized concrete layer is partially replaced the front layer of the SFRC plate. The results are successfully shown that the rubberized concrete layer is able to act as a cushion layer and absorb the impact energy from the bullet test as seen by the decreasing values of acceleration, displacement and D/W ratios.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank the faculty of Engineering, KMUTNB, Thailand Research Fund (TRF) and The Golden Jubilee PhD Program for financially support this study.

REFERENCES

- [1] Ward's Automotive Group, Vehicle in Operation by Country Report, Penton Media Inc., 2011.
- [2] Fattuhi NI, Clark LA., Cement-based materials containing shredded scrap truck Tyre rubber, Construction and Building Mat, 10/4, 1996, 229–36.
- [3] Topçu, I.B., Assessment of the brittleness index of rubberized concretes. Cement and Concrete Research, 27, 1997, 177-183.
- [4] Sukontasukkul P. Use of crumb rubber to improve thermal and sound Properties of pre-cast concrete panel, Construction and Building Mat. 2009, 23(2), 1084–92.
- [5] Banthia, N., “Impact Resistance of Concrete” PhD Dissertation, UBC, Canada, 1987
- [6] Sukontasukkul, P., “Impact Behavior of Concrete under Multiaxial Loading”, PhD Dissertation, University of British Columbia, Canada, 2001.
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/File:9x19mm_Parabellum.svg