



การพัฒนาผนังคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กสำหรับการต้านทานแรงกระแทกของกระสุนขนาด 7.62×51 มิลลิเมตร

อภิสิทธิ์ เตชพัฒนากร* บุชิต มาโห้ สิทธิศักดิ์ แจ่มนาม และ ปิติ สุนทรสุขกุล

ศูนย์วิจัยวัสดุอาคารและการก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 2555 2000 ต่อ 8126 อีเมล: apisit.civileng@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.08.005

รับเมื่อ 13 กรกฎาคม 2563 แก้ไขเมื่อ 18 สิงหาคม 2563 ตอรับเมื่อ 24 สิงหาคม 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 27 สิงหาคม 2564

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้ เป็นการพัฒนาผนังคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก ให้สามารถต้านทานกระสุนปืนขนาด 7.62×51 มม. ได้ ซึ่งผนังทดสอบเป็นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กที่สัดส่วน 2% โดยปริมาตรและแปรผันความหนา ตั้งแต่ 10–100 มม. และทดสอบด้วยการยิง 1 นัด บริเวณกึ่งกลางผนังพร้อมบันทึกภาพด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงที่อัตราเร็ว 40,000 เฟรมต่อวินาที สำหรับการวิเคราะห์ผลความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ของผนัง คำนวณจากผลต่างระหว่างพลังงานจลน์ของกระสุน (ก่อนและหลังการปะทะ) โดยความเร็วของกระสุนคำนวณได้จากภาพถ่ายความเร็วสูงจากผลทดสอบพบว่า การต้านทานกระสุน และความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์สูงขึ้นตามความหนาของผนังที่สูงขึ้น โดยผนังสามารถต้านทานการทะลุผ่านของกระสุนได้ที่ความหนา 60 มม. แต่ยังไม่พบการหลุดร่อนของเศษคอนกรีตที่ด้านหลัง และเมื่อผนังมีความหนามากกว่า 80 มม. ขึ้นไป ไม่พบการทะลุผ่านของกระสุนรวมถึงไม่พบรอยแตกร้าวของคอนกรีตที่พื้นผิวด้านหลัง ส่วนความเสียหายของผนัง (เส้นผ่านศูนย์กลางการกระแทก ร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก) สามารถแสดงผลเป็นความสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ของผนัง

คำสำคัญ: ผนังคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก กระสุนขนาด 7.62×51 มม. ความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ เส้นผ่านศูนย์กลางการกระแทก ร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก



Development of Steel Fiber Reinforced Concrete Panels to Resist Impact from 7.62 x 51 mm Caliber Size Bullets

Apisit Techaphatthanakon*, Buchit Maho, Sittisak Jamnam and Piti Sukontasukkul

Construction and Building Materials Research Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 2555 2000 Ext. 8126, E-mail: apisit.civileng@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.08.005

Received 13 July 2020; Revised 18 August 2020; Accepted 24 August 2020; Published online: 27 August 2021

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research aimed to develop the steel fiber reinforced concrete panels with an ability to resist impact force from 7.62 x 51 mm caliber size bullet. The panels were steel fiber reinforced concrete with 2% volume fraction of fiber and thickness varied from 10–100 mm. For the experimental procedure, the panel was shot by a bullet at the center and the impact event was captured using a high-speed camera with capture rate of 40,000 fps. In the data analysis, the kinetic energy absorption of panel can be calculated from the difference between the bullet kinetic energy (before and after impaction). The bullet velocities were calculated from images captured by the high-speed camera. The results showed that the impact resistance and the kinetic energy absorption ability increased with the increasing panel thickness. The bullet was resisted by the panel thickness of 60 mm but was observed the spalling and flying debris at the back surface. With the thickness larger than 80 mm, no perforation and cracking were observed on back surface. The damages of the panel (measured in forms of spalling diameter and weight loss percentage) related to the kinetic energy absorption ability of panel (E_p).

Keywords: Steel Fiber Reinforced Concrete Panel, 7.62 x 51 mm Size Bullet, Kinetic Energy Absorption Ability, Spalling Diameter, Weight Loss Percentage

Please cite this article as: A. Techaphatthanakon, B. Maho, S. Jamnam, and P. Sukontasukkul, "Development of steel fiber reinforced concrete panels to resist impact from 7.62 x 51 mm caliber size bullets," *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 2, pp. 305–316, Apr.–Jun. 2022 (in Thai).

1. บทนำ

การก่อการร้ายในปัจจุบันยังคงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชน จากข้อมูลทางสถิติของศูนย์ประชาสัมพันธ์การรณรงค์สร้างสันติสุข จังหวัดชายแดนภาคใต้ระยะเวลาตั้งแต่วันที่ 4 มกราคม พ.ศ. 2547 ถึง 4 มิถุนายน พ.ศ. 2563 พบการก่อการร้ายในรูปแบบของอาวุธปืน ระเบิด และอื่นๆ (วางเพลิง ทำร้ายร่างกาย) เกิดขึ้นประมาณ 48%, 36% และ 16% ตามลำดับ จากเหตุการณ์ทั้งหมด [1] ซึ่งแสดงถึงอาวุธปืนเป็นอาวุธหลักที่ใช้ในการก่อเหตุ สอดคล้องกับดัชนีการก่อการร้าย จากการสำรวจ 163 ประเทศทั่วโลก พบว่า ประเทศไทยมีดัชนีการก่อการร้ายอยู่ในลำดับที่ 18 จาก 138 ลำดับ และอยู่ลำดับที่ 2 ในทวีปเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ [2]

จากความไม่สงบดังกล่าว เป็นเหตุที่เกิดจากการใช้อาวุธปืนเป็นหลัก ซึ่งจากแรงกระแทกของกระสุนปืนที่มีพลังงานสูง ส่งผลให้ผนังคอนกรีตของอาคารทั่วไปเกิดการทะลุไม่สามารถต้านทานแรงกระแทกของกระสุนได้ จึงทำให้นักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการรับแรงกระแทกของคอนกรีตเสริมเส้นใย โดยการรับแรงกระแทกขึ้นอยู่กับกำลังและความสามารถในการดูดซับพลังงานของคอนกรีตทั่วไป ซึ่งสามารถปรับปรุงการรับแรงกระแทกให้สูงขึ้นด้วยการเสริมเส้นใยประเภทต่างๆ เช่น เส้นใยเหล็ก เส้นใยพอลิไพร์ฟลีน เส้นใยพอลิโพลีเอทิลีน เส้นใยไวนิลแอลกอฮอล์ เส้นใยบะซอลต์ และเส้นใยธรรมชาติ และจากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา พบว่า คอนกรีตที่เสริมด้วยเส้นใยเหล็กมีความสามารถในการรับแรงกระแทกสูงที่สุด นอกจากนี้รูปทรงของเส้นใยและสัดส่วนผสมของเส้นใย มีผลต่อความสามารถในการรับแรงกระแทกเช่นกัน ซึ่งรูปทรงของเส้นใยเหล็กแบบปลายตะขอ (Hooked-end) ส่งผลให้มีความสามารถในการรับแรงกระแทกได้สูงกว่าเส้นใยแบบรอยหยัก (Crimped) และแบบปลายแบน (Flat-end) ตามลำดับ สำหรับสัดส่วนผสมของเส้นใยที่สูงขึ้นทำให้ความสามารถในการรับแรงกระแทกสูงขึ้นเช่นกัน ดังนั้น จากการศึกษาดังกล่าว จึงทำการพัฒนาเป็นผนังคอนกรีตกันกระสุนต่อไป [3], [4]

จากการพัฒนาผนังคอนกรีตกันกระสุนที่ผ่านมา ใน

ระดับอาวุธปืนพกสามารถป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนได้โดยปิติ และคณะ [5] และ สิทธิศักดิ์ และคณะ [6], [7] ได้ทำการศึกษาความสามารถในการต้านทานกระสุนขนาด 9 มิลลิเมตร และ .44 Magnum ของผนังคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก สัดส่วนผสมเส้นใย 2% โดยปริมาตร พบว่า ผนังทดสอบมีความสามารถในการต้านทานการทะลุผ่านของกระสุนทั้ง 2 ชนิดได้ โดยผนังทดสอบต้องมีความหนา 30, 60 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งกระสุนดังกล่าวใช้สำหรับอาวุธปืนพก แต่เมื่อเปรียบเทียบกับปัจจุบันการก่อเหตุมีความรุนแรงมากขึ้น จากการใช้อาวุธที่สร้างความเสียหายในระดับที่สูงขึ้น คือ อาวุธปืนสงคราม จึงต้องมีการพัฒนาผนังคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก ให้สามารถป้องกันการทะลุผ่านของกระสุนในระดับอาวุธสงครามได้ด้วยเช่นกัน

สำหรับผนังคอนกรีตกันกระสุนในระดับอาวุธปืนสงคราม Sovjaka และคณะ [8], [9] ได้มีการศึกษาความสามารถในการต้านทานกระสุน ขนาด 7.62×39 มิลลิเมตรของผนังคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก สัดส่วนผสมเส้นใยเหล็กตั้งแต่ 0–3% โดยปริมาตร พบว่า การเสริมเส้นใยเหล็กส่งผลให้ผนังตัวอย่างหลังการทดสอบไม่แตกแยกออกจากกัน และเศษคอนกรีตที่เกิดจากการกะเทาะบริเวณด้านหลังมีความเร็วลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับผนังตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมเส้นใยเหล็ก และปริมาณการเสริมเส้นใยที่สูงขึ้น ส่งผลให้การกะเทาะบริเวณด้านหน้าและด้านหลัง มีขนาดลดลงตามลำดับ ซึ่งที่สัดส่วนผสมเส้นใย 2% โดยปริมาตร ไม่พบความเสียหายบริเวณด้านหลัง และ Feng [10] ศึกษาการตอบสนองภายใต้แรงกระแทกของคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษเสริมเส้นใย โดยแปรผันชนิดเส้นใย 3 ชนิด คือ เส้นใยพอลิไพร์ฟลีน เส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และเส้นใยเหล็ก สัดส่วนผสมเส้นใย 2% โดยปริมาตร ทำการทดสอบด้วยกระสุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14.5 มิลลิเมตร น้ำหนัก 54.2 กรัม ความเร็ว 800–1,050 เมตรต่อวินาที สำหรับผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษที่เสริมเส้นใยสามารถลดการกะเทาะได้ 79.0%, 69.9% และ 83.8% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ

งานวิจัยครั้งนี้ จึงเป็นการศึกษาและพัฒนาผนังคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก ให้มีความสามารถในการต้านทานกระสุนระดับอาวุธสงคราม โดยไม่เกิดการทะลุผ่านและไม่เกิดความเสียหายใดๆ ที่ด้านหลังของผนัง ซึ่งมีรายละเอียดในการดำเนินงานวิจัย ดังนี้


2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

2.1.1 วัสดุ

- 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- 2) ทราชที่ผ่านตะแกรง No.16 และค้ำ No.50
- 3) น้ำสะอาด
- 4) สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer; SP)
- 5) เส้นใยเหล็กชนิดงอปลาย (Single Hooked-end Steel Fiber; SHE) มีคุณสมบัติ ดังตารางที่ 1


ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเส้นใยเหล็ก

Shape	Length (mm)	Diameter (mm)	Aspect Ratio (L/d)	Tensile Strength (N/mm ²)
	35	0.55	64	1,000

2.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1) กระสุนปืนอาวุธสงคราม ขนาด 7.62 × 51 มม. นาโต้ มีคุณสมบัติ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติกระสุน ขนาด 7.62 × 51 มม. นาโต้

Bullet Shape (7.62 × 51 mm NATO)	Bullet Type	Mass (gram)	Velocity (m/s)	Energy (J)
	Full metal jacket	9.6	863	3,580

2) กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (High Speed Camera) มีคุณสมบัติ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง

Specifications	
Name	FASTCAM SA4
Maximum image resolution [pixels]	1024 × 1024
Maximum frame rate at full resolution [frame per seconds]	3600
Maximum frame rate at reduced image resolution [frame per seconds]	216 000
Minimum global shutter time per frame	1 μs

2.2 สัดส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

2.2.1 สัดส่วนผสม

สัดส่วนผสมคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) 0.3 อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 2 โดยปริมาตร สัดส่วนสารลดน้ำพิเศษ ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ และเสริมด้วยเส้นใยเหล็ก ร้อยละ 2 โดยปริมาตร แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สัดส่วนผสมคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

Materials	Cement	Sand	Water	SP	SHE
Proportion (kg/m ³)	800	1420	240	16	156

2.2.2 การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมผนังคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก เริ่มจากการเตรียมวัสดุตามสัดส่วนผสมในตารางที่ 4 จากนั้นทำการผสมมวลรวมแห้งให้เข้ากันด้วยเครื่องผสม เป็นเวลา 1 นาที จึงเติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษ ผสมให้วัสดุเป็นเนื้อเดียวกันอีก 3 นาที ต่อมาทำการผสมเส้นใยเหล็ก โดยให้เส้นใยกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ใช้เวลาในการผสมประมาณ 3 นาที จึงเทลงแบบหล่อขนาด 400 × 400 มิลลิเมตร

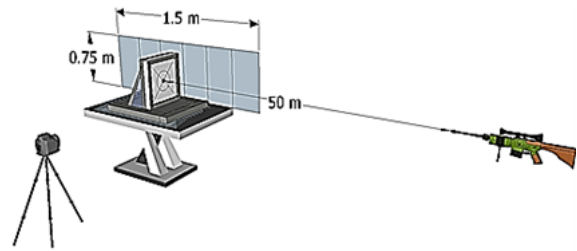
2.3 ประเภทของตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบ หล่อเป็นผนังคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กตามสัดส่วนผสมในตารางที่ 4 ขนาด 400 × 400 มิลลิเมตร

แปรผันความหนาตั้งแต่ 10–100 มิลลิเมตร ประเภทตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ประเภทของผนังคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

Type	SHE Volume Fraction	Thickness (mm)	No. of Specimens
2S 1	2%	10	3
2S 2		20	3
2S 3		30	3
2S 4		40	3
2S 5		50	3
2S 6		60	3
2S 7		70	3
2S 8		80	3
2S 9		90	3
2S 10		100	3



รูปที่ 1 การติดตั้งอุปกรณ์และผนังทดสอบ



(ก) $t_1 = 0$ ms, $s_1 = 0$ cm



(ข) $t_2 = 0.275$ ms, $s_2 = 25$ cm

รูปที่ 2 ขณะกระสุนเคลื่อนที่ผ่านเส้นอ้างอิง (ก่อนการปะทะ)

ทำได้โดยการคำนวณจากระยะเวลาและระยะทาง ขณะที่กระสุนเคลื่อนที่ผ่านเส้นอ้างอิง 2 เส้น ซึ่งมีระยะห่างจากเส้นต่อเส้น 25 เซนติเมตร ดังสมการที่ (1) โดยจากรูปที่ 2 และ 3 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายความเร็วสูง ที่ระบุเวลาและระยะทาง ขณะที่กระสุนเคลื่อนที่ผ่านเส้นอ้างอิง ทั้งก่อนและหลังการปะทะผนังทดสอบ ตามลำดับ

$$v = \frac{\Delta s_i}{\Delta t_i} \quad (1)$$

v คือ ความเร็ว (m/s)

Δs_i คือ ระยะทางระหว่างเส้นอ้างอิง (m)

Δt_i คือ ระยะเวลาระหว่างเส้นอ้างอิง (s)

2.4 วิธีการทดสอบ

ติดตั้งผนังคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กบนแท่นเหล็กทดสอบ มีระยะห่างจากจุดยิง 50 เมตร จากนั้นติดตั้งฉากบอกระยะและกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง ในทิศทางตั้งฉากกับผนังทดสอบ โดยตั้งค่าอัตราเร็วในการถ่ายภาพที่ 40,000 เฟรมต่อวินาที และทดสอบด้วยการยิงกระสุนปืนอาวุธสงครามขนาด 7.62×51 มิลลิเมตร นาโต้ จำนวน 1 นัด บริเวณกึ่งกลางผนังทดสอบ ดังรูปที่ 1

2.5 การเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผล

จากการบันทึกภาพถ่ายความเร็วสูง สามารถคำนวณเป็นความเร็วของกระสุน (ก่อนและหลังการปะทะตัวอย่าง) เพื่อนำไปคำนวณเป็นความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ของผนัง และสำหรับการวิบัติของผนังในแต่ละประเภทสามารถแสดงข้อมูลในรูปแบบของเส้นผ่านศูนย์กลางการกะเทาะ และร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก โดยมีการวิเคราะห์ผลดังนี้

2.5.1 ความเร็วของกระสุน (Bullet Velocity)

การคำนวณความเร็วของกระสุนจากภาพถ่ายความเร็วสูง



(ก) $t_1 = 1.525$ ms, $s_1 = 75$ cm



(ข) $t_2 = 2.325$ ms, $s_2 = 100$ cm

รูปที่ 3 ขณะกระสุนเคลื่อนที่ผ่านเส้นอ้างอิง (หลังการปะทะ)

2.5.2 ความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ของผนัง (Kinetic Energy Absorption Ability of Panel; E_p)

คำนวณได้จากความแตกต่างระหว่างพลังงานจลน์ของกระสุน ก่อนและหลังการปะทะผนังทดสอบ ซึ่งความแตกต่างระหว่างพลังงานจลน์ของกระสุน แสดงถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ของผนังคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก ดังสมการที่ (2)

$$E_p = \frac{1}{2}m(v_b^2 - v_a^2) \tag{2}$$

E_p คือ ความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ของผนัง (J)

m คือ น้ำหนักของกระสุน (kg)

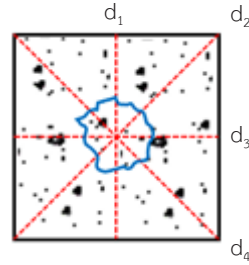
v_b คือ ความเร็วของกระสุนก่อนการปะทะ (m/s)

v_a คือ ความเร็วของกระสุนหลังการปะทะ (m/s)

2.5.3 เส้นผ่านศูนย์กลางการกะเทาะ (Spalling Diameter; d_{sp})

เก็บข้อมูลทดสอบ โดยการวัดความยาวรอยการกะเทาะของตัวอย่าง เนื่องจากแรงกระแทกของกระสุน ใน 4 ทิศทาง ดังรูปที่ 4 และบันทึกผลเป็นค่าเฉลี่ย ดังสมการที่ (3)

$$d_{sp} = \frac{\sum_{i=1}^4 d_i}{4} \tag{3}$$



รูปที่ 4 การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางการกะเทาะ 4 ทิศทาง

d_{sp} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางการกะเทาะเฉลี่ย (mm)

d_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางการกะเทาะใดๆ (mm)

2.5.4 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss Percentage; W_l)

คำนวณจากอัตราส่วนของผลต่างน้ำหนักของผนังตัวอย่าง (ก่อนและหลังการทดสอบ) กับน้ำหนักของผนังก่อนการทดสอบ จากนั้นคำนวณเป็นร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก ดังสมการที่ (4)

$$W_l = \frac{(w_b - w_a)}{w_b} \times 100 \tag{4}$$

W_l คือ ร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก (%)

w_b คือ น้ำหนักของตัวอย่างก่อนการทดสอบ (kg)

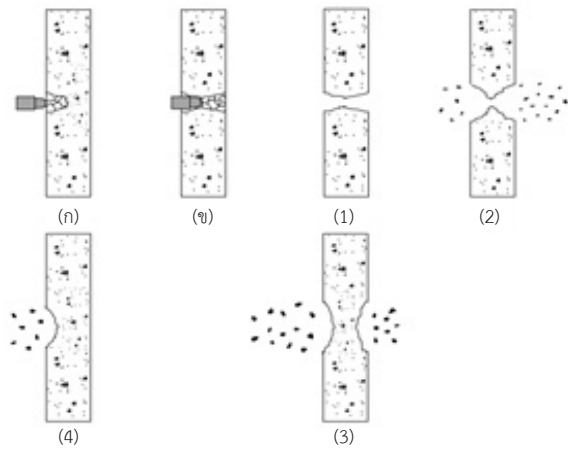
w_a คือ น้ำหนักของตัวอย่างหลังการทดสอบ (kg)

3. ผลการทดลอง

3.1 พฤติกรรมการรับแรงกระแทกของผนังคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

พฤติกรรมการรับแรงกระแทกของผนังคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก ทำการศึกษาจากภาพถ่ายความเร็วสูงและภาพถ่ายการวิบัติบริเวณด้านหน้าและด้านหลังของผนังทดสอบ โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

พฤติกรรมการรับแรงกระแทกของผนังคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก เริ่มเมื่อกระสุนกระทบกับด้านหน้าของผนังทดสอบ ดังรูปที่ 5 (ก) ซึ่งขณะนั้นกระสุนเริ่มมีการถ่ายเทพลังงานเข้าสู่ผนังและจากแรงกระแทกของกระสุน ส่งผลให้เกิดการกะเทาะบริเวณด้านหน้าของผนังทดสอบ ซึ่งลักษณะ



รูปที่ 5 พฤติกรรมการรับแรงกระแทกของผนังคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

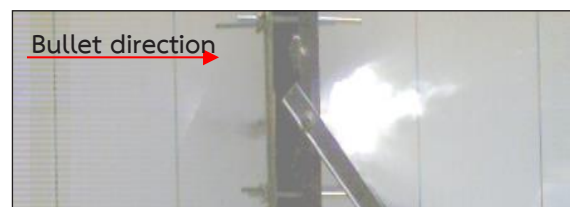
ความเสียหายดังกล่าว เป็นการวิบัติรูปแบบหนึ่ง ที่เกิดขึ้นกับผนังที่มีความสามารถในการต้านทานกระสุนสูง ดังรูปที่ 5 (4) แต่หากผนังมีความสามารถในการต้านทานกระสุนในระดับต่ำถึงปานกลาง ส่งผลให้มีลักษณะการวิบัติที่แตกต่างกัน ซึ่งจากพลังงานของกระสุนที่สูง ทำให้กระสุนมีความสามารถในการทะลุทะลวงเข้าสู่ภายในผนังได้ จนทำให้เกิดการแตกร้าวตั้งแต่กลางผนังจนถึงด้านหลังของผนังทดสอบ ดังรูปที่ 5 (ข) โดยผนังที่มีความสามารถในการต้านทานกระสุนในระดับต่ำมีการวิบัติใน 2 ลักษณะ คือ ผนังเกิดการทะลุ ดังรูปที่ 5 (1) และผนังเกิดการทะลุ พร้อมมีเศษคอนกรีตหลุดร่อนบริเวณด้านหน้าและด้านหลังของผนัง ดังรูปที่ 5 (2) สำหรับผนังที่มีความสามารถในการต้านทานกระสุนระดับปานกลาง ซึ่งเกิดการวิบัติ ดังรูปที่ 5 (3) แสดงถึงผนังมีความสามารถในการต้านทานการทะลุผ่านของกระสุนได้ แต่ยังพบการกะเทาะบริเวณด้านหน้า เนื่องจากแรงกระแทกของกระสุนขณะเข้าปะทะผนัง และการกะเทาะบริเวณด้านหลัง เนื่องจากการถ่ายเทพลังงานของกระสุนหลังจากทะลุเข้าสู่ผนังได้บางส่วน ดังรูปที่ 5 (ข)

3.2 รูปแบบการวิบัติ

จากการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกระแทกของผนังคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก ที่แปรผันความหนาตั้งแต่ 10–100



รูปที่ 6 การวิบัติ แบบ Perforation ด้านหน้า (ซ้าย) และด้านหลัง (ขวา)



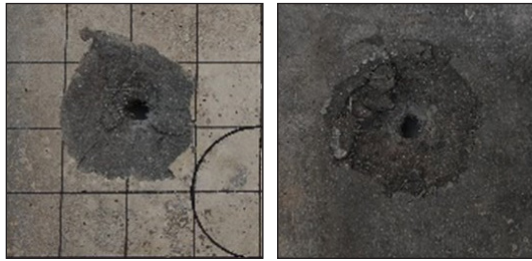
รูปที่ 7 ภาพถ่ายความเร็วสูงของการวิบัติแบบ Perforation

มิลลิเมตร พบว่า รูปแบบการวิบัติแปรผันตามความหนาของผนังทดสอบ ซึ่งมีการวิบัติใน 4 ลักษณะ ดังนี้

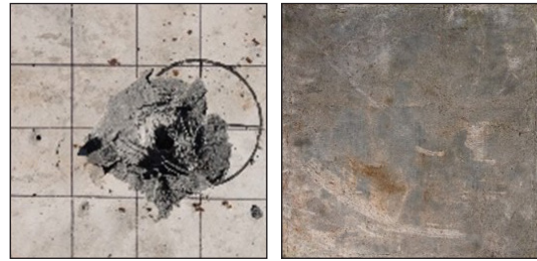
1) Perforation: ผนังทดสอบเกิดการทะลุ เนื่องจากแรงกระแทกของกระสุน โดยขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางการกะเทาะ บริเวณด้านหน้าและด้านหลังมีขนาดใกล้เคียงกัน และเศษคอนกรีตที่กะเทาะหลุดร่อนมีขนาดเล็ก ดังรูปที่ 6 และรูปที่ 7 ซึ่งการวิบัติแบบทะลุเกิดในช่วงที่ผนังทดสอบมีความหนาระหว่าง 10–40 มิลลิเมตร

2) Perforation + Back Spalling with Flying Debris: ผนังทดสอบเกิดการทะลุผ่านของกระสุน และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางการกะเทาะด้านหลังมีขนาดใหญ่กว่าการกะเทาะด้านหน้า จึงทำให้บริเวณด้านหลังพบเศษคอนกรีตที่หลุดร่อนขนาดใหญ่และมีจำนวนมากว่าด้านหน้า ดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9 ซึ่งเกิดการวิบัติที่ความหนา 50 มิลลิเมตร

3) Penetration + Back Spalling with Flying Debris: ผนังทดสอบไม่เกิดการทะลุ แต่เกิดการกะเทาะของผนังคอนกรีตบริเวณด้านหน้าและด้านหลัง และจากภาพถ่ายความเร็วสูงพบเศษคอนกรีตด้านหน้าที่กะเทาะหลุดร่อนมากกว่าด้านหลัง ดังรูปที่ 10 และรูปที่ 11 การวิบัติดังกล่าวเกิดในช่วงความหนาระหว่าง 60–70 มิลลิเมตร



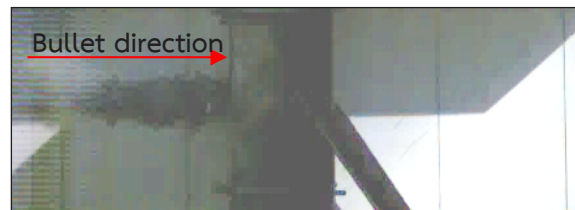
รูปที่ 8 การวิบัติ แบบ Perforation + Back Spalling with Flying Debris ด้านหน้า (ซ้าย) และด้านหลัง (ขวา)



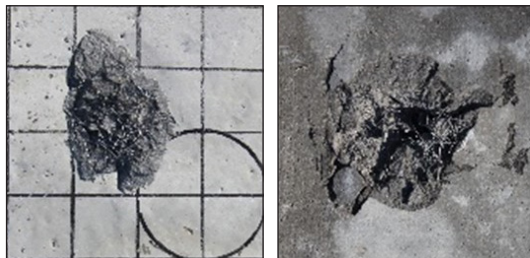
รูปที่ 12 การวิบัติแบบ Penetration + No Back Damage ด้านหน้า (ซ้าย) และด้านหลัง (ขวา)



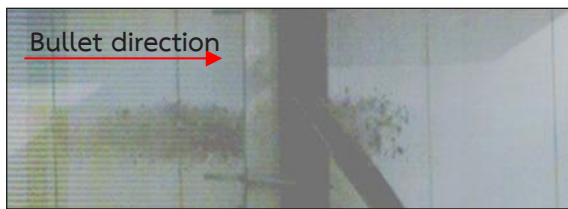
รูปที่ 9 ภาพถ่ายความเร็วสูงของการวิบัติแบบ Perforation + Back Spalling with Flying Debris



รูปที่ 13 ภาพถ่ายความเร็วสูงของการวิบัติแบบ Penetration + No Back Damage



รูปที่ 10 การวิบัติ แบบ Penetration + Back spalling with Flying Debris ด้านหน้า (ซ้าย) และด้านหลัง (ขวา)



รูปที่ 11 ภาพถ่ายความเร็วสูงของการวิบัติแบบ Penetration + Back Spalling with Flying Debris

4) Penetration + No Back Damage: ผนังทดสอบไม่เกิดการทะลุ และพบเพียงการกะเทาะบริเวณด้านหน้าเท่านั้น สำหรับด้านหลังของผนังทดสอบไม่มีความเสียหายใดๆ เนื่องจากแรงกระแทกของกระสุน ดังรูปที่ 12 และรูปที่ 13 ซึ่งพบการวิบัติ ในช่วงความหนาระหว่าง 80–100 มิลลิเมตร

จากรูปแบบการวิบัติที่แปรผันตามความหนาของผนังทดสอบ ทำให้สามารถแบ่งช่วงความหนาและรูปแบบการวิบัติ ตามความสามารถในการต้านทานกระสุนได้ใน 3 ระดับ ดังนี้ ช่วงความหนา ระหว่าง 10–50 มิลลิเมตร มีการวิบัติใน 2 รูปแบบ คือ Perforation และ Perforation + Back Spalling with Flying Debris เป็นช่วงที่ผนังมีความสามารถในการต้านทานกระสุนระดับต่ำ เมื่อผนังมีความหนาเพิ่มขึ้นระหว่าง 60–70 มิลลิเมตร ซึ่งวิบัติแบบ Penetration + Back Spalling with Flying Debris เป็นช่วงที่ผนังมีความสามารถในการต้านทานกระสุนระดับปานกลาง และผนังที่มีความหนา ระหว่าง 80–100 มิลลิเมตร วิบัติแบบ Penetration + No Back Damage เป็นช่วงที่ผนังมีความสามารถในการ

ด้านทานกระสุนระดับสูง ซึ่งแสดงความสามารถในการ
ด้านทานกระสุนได้ ดังตารางที่ 6

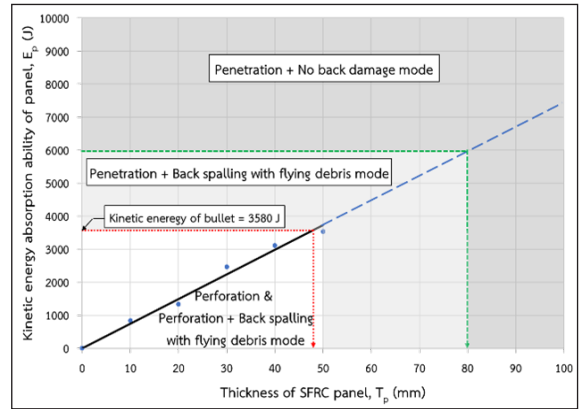
ตารางที่ 6 ความสามารถในการด้านทานกระสุนของผนัง
คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

Types	Failure Mode	Level of Bullet Resistance
2S 1	Perforation	Low
2S 2	Perforation	
2S 3	Perforation	
2S 4	Perforation	
2S 5	Perforation + Back spalling with flying debris	
2S 6	Penetration + Back spalling with flying debris	Moderate
2S 7	Penetration + Back spalling with flying debris	
2S 8	Penetration + No back damage	High
2S 9	Penetration + No back damage	
2S 10	Penetration + No back damage	

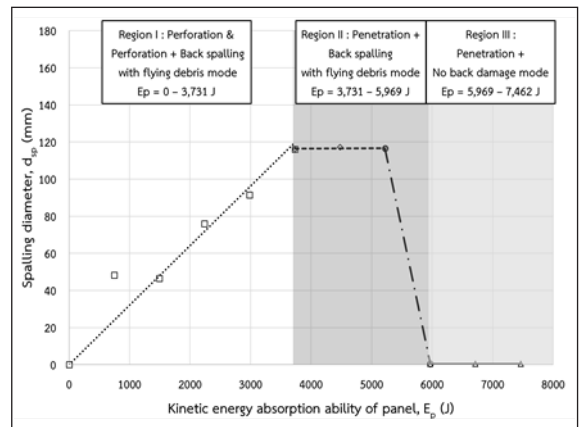
3.3 ความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ของผนัง (Kinetic Energy Absorption Ability of Panel; E_p)

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบ สำหรับผนังทดสอบที่เกิดการวิบัติแบบทะลุ (Perforation & Perforation + Back Spalling with Flying Debris Mode) โดยมีความหนา ระหว่าง 10-50 มิลลิเมตร แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ของผนัง (E_p) และความหนาของผนังทดสอบ (Panel Thickness; T_p) ดังสมการที่ (5) และดังรูปที่ 14 ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถทำนายความหนาสำหรับการป้องกันการทะลุผ่านของกระสุนได้โดยผนังไม่เกิดการวิบัติแบบทะลุ ที่ความหนา 48 มิลลิเมตร และสำหรับการป้องกันการทะลุผ่านของกระสุน โดยพื้นผิวด้านหลังของผนัง ไม่มีความเสียหายใดๆ ผนังต้องมีความหนา 80 มิลลิเมตร ขึ้นไป

$$E_p = 74.62T_p \quad (5)$$



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่าง E_p กับ T_p



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่าง d_{sp} กับ E_p

3.4 เส้นผ่านศูนย์กลางการกะเทาะ (Spalling Diameter; d_{sp})

จากผลการทดสอบ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางการกะเทาะ (d_{sp}) และความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ของผนัง (E_p) ดังรูปที่ 15 สามารถอธิบายเป็นความสัมพันธ์ 3 ช่วง ดังนี้

ช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่ผนังมีความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ ระหว่าง 0-3,731 จูล ซึ่งมีค่าต่ำกว่าพลังงานของกระสุนพบว่า ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางการกะเทาะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ของผนังที่สูงขึ้น เนื่องจากผนังมีความสามารถในการด้านทานการทะลุผ่านของกระสุนสูงขึ้นแสดงความสัมพันธ์

อภิสิทธิ์ เตชพัฒนาร และคณะ, “การพัฒนาผนังคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กสำหรับการด้านทานแรงกระแทกของกระสุนขนาด 7.62×51 มิลลิเมตร.”

ตั้งสมการที่ (6)

$$d_{sp} = 0.0321E_p \tag{6}$$

ช่วงที่ 2 ผนังมีความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ระหว่าง 3,731–5,969 จูล พบว่า เส้นผ่านศูนย์กลางการกะเทาะมีขนาดคงที่ เนื่องจากผนังมีความหนาเพียงพอในการต้านทานการทะลุผ่านของกระสุน (ความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ของผนังสูงกว่าพลังงานของกระสุน) แสดงความสัมพันธ์ ดังสมการที่ (7)

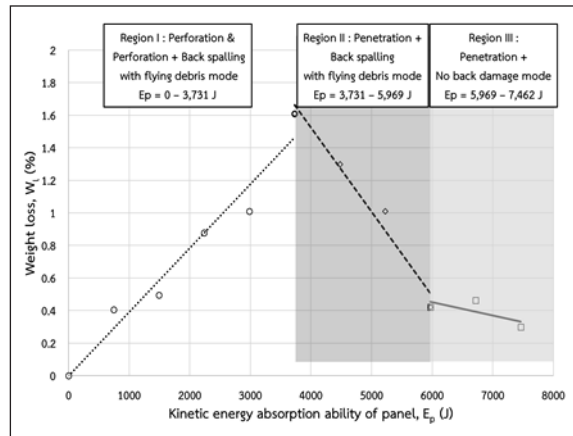
$$d_{sp} = (2 \times 10^{-4})E_p + 115.92 \tag{7}$$

ช่วงที่ 3 เมื่อผนังมีความสามารถในการดูดซับพลังงานระหว่าง 5,969–7,462 จูล ไม่พบความเสียหายใดๆ บริเวณด้านหลังของผนัง เนื่องจากแรงกระแทกของกระสุน

3.5 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss Percentage; W_l)

เป็นความเสียหายของผนังจากแรงกระแทกของกระสุน โดยเมื่อกระสุนเข้าปะทะผนังทดสอบ ทำให้ผนังเริ่มดูดซับพลังงานของกระสุน และมีการสลายพลังงานบางส่วนเป็นการกะเทาะของเศษคอนกรีต จึงมีการสูญเสียน้ำหนัก ซึ่งแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss; W_l) กับความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ของผนัง (E_p) ดังรูปที่ 16 และสามารถอธิบายเป็น 3 ช่วงความสัมพันธ์ ดังนี้

ช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่ผนังมีความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ ระหว่าง 0–3,731 จูล มีการสูญเสียน้ำหนักสูงขึ้นตามความสามารถในการดูดซับพลังงานที่สูงขึ้น เนื่องจากเป็นช่วงที่ผนังเกิดการวิบัติแบบ Perforation ซึ่งมีการกะเทาะทั้งบริเวณด้านหน้าและด้านหลัง ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักสูงขึ้นตามความสามารถในการต้านทานกระสุนที่สูงขึ้น และมีการสูญเสียน้ำหนักสูงสุด เมื่อผนังมีการวิบัติแบบ Perforation + Back Spalling with Flying Debris เนื่องจากผนังมีความสามารถในการดูดซับพลังงานใกล้เคียงกับพลังงานกระสุน



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่าง W_l กับ E_p

ทำให้บริเวณด้านหลังมีการกะเทาะเป็นบริเวณกว้างแสดงเป็นความสัมพันธ์ ดังสมการที่ (8)

$$W_l = (4 \times 10^{-4})E_p \tag{8}$$

ช่วงที่ 2 ผนังมีความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ระหว่าง 3,731–5,969 จูล พบว่า การสูญเสียน้ำหนักลดลงเนื่องจากผนังมีความสามารถในการต้านทานการทะลุผ่านของกระสุน หรือมีความหนาเพียงพอในการป้องกันการทะลุผ่านของกระสุน ซึ่งเป็นช่วงที่ผนังเกิดการวิบัติแบบ Penetration + Back Spalling with Flying Debris คือมีความเสียหายบริเวณด้านหน้าสูงกว่าด้านหลัง เกิดจากแรงกระแทกของกระสุน ดังสมการที่ (9)

$$W_l = -(5 \times 10^{-4})E_p + 3.588 \tag{9}$$

ช่วงที่ 3 เป็นช่วงที่ผนังมีความสามารถในการดูดซับพลังงาน 5,969–7,462 จูล พบการสูญเสียน้ำหนักเริ่มคงที่เนื่องจากผนังมีความเสียหายเฉพาะด้านหน้า จากการปะทะของกระสุนเท่านั้น สำหรับด้านหลังไม่มีความเสียหายใดๆ ซึ่งจัดเป็นการวิบัติแบบ Penetration + No Back Damage โดยแสดงความสัมพันธ์ได้ ดังสมการที่ (10)

อภิสิทธิ์ เดชพัฒนาการ และคณะ, “การพัฒนาผนังคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กสำหรับการต้านทานแรงกระแทกของกระสุนขนาด 7.62 x 51 มิลลิเมตร.”

$$W_i = -(8 \times 10^{-5}) E_p + 0.943 \quad (10)$$

4. สรุป

จากการทดสอบความต้านทานของผนังคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก ด้วยการยิงกระสุนระดับอาวุธสงคราม พบว่า ลักษณะการวิบัติแปรผันตามความหนาของผนังทดสอบ โดยมีการวิบัติใน 4 รูปแบบ คือ ลักษณะการวิบัติแบบ Perforation, Perforation + Back Spalling with Flying Debris, Penetration + Back Spalling with Flying Debris และ Penetration + No Back Damage

ความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ของผนังคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กแปรผันตามความหนา ซึ่งจากความสัมพันธ์สามารถทำนายความหนาของผนังที่มีความสามารถในการต้านทานการทะลุผ่านของกระสุนได้ ที่ความหนา 48 มิลลิเมตร และเมื่อผนังมีความหนา 80 มิลลิเมตร ขึ้นไปสามารถต้านทานการทะลุผ่านของกระสุนได้โดยบริเวณด้านหลังของผนังไม่มีความเสียหายใดๆ จากแรงกระแทกของกระสุน

สำหรับการวิบัติสามารถแสดงผลในรูปของเส้นผ่านศูนย์กลางการกระแทก และร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก โดยแปรผันตามความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ของผนัง เมื่อความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ต่ำกว่าพลังงานจลน์ของกระสุน (3,580 จูล) ส่งผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางการกระแทก และร้อยละการสูญเสียน้ำหนักสูงขึ้นตามความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ที่สูงขึ้น และเมื่อความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์สูงกว่าพลังงานของกระสุน ทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางการกระแทก และร้อยละการสูญเสียน้ำหนักมีแนวโน้มลดลง

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) สัญญาเลขที่ MSD 6210063

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Jitpiromsri, "Summary of Incidents in Southern Thailand," Center for Conflict Studies and Cultural Diversity, Prince of Songkla University, Pattani Campus, January 2004 – June 2020 (in Thai).
- [2] Institute for Economics & Peace. *Global Terrorism Index 2019: Measuring the impact of terrorism*, [Online]. Available: <http://visionofhumanity.org/reports/>
- [3] D.-Y. Yoo and N. Banthia, "Impact resistance of fiber-reinforced concrete – A review," *Cement and Concrete Composites*, vol. 104, 2019.
- [4] S. R. Abid, M. L. Abdul-Hussein, N. S. Ayooob, S. H. Ali, and A. L. Kadhum, "Repeated drop-weight impact tests on self-compacting concrete reinforced with micro-steel fiber," *Heliyon*, vol. 6, no. 1, 2020.
- [5] P. Sukontasukkul, S. Jamnam, K. Rodsin, and N. Banthia, "Use of rubberized concrete as a cushion layer in bulletproof fiber reinforced concrete panels," *Construction and Building Materials*, vol. 41, pp. 801–811, 2013.
- [6] S. Jamnam, B. Maho, A. Techaphatthanakon, and P. Sukontasukkul, "Investigation on bullet resistant of steel fiber reinforced concrete panel subjected to .44 Magnum bullet," *Journal of Thailand Concrete Association*, vol. 7, no. 1, pp. 39–46, 2019 (in Thai).
- [7] S. Jamnam, B. Maho, A. Techaphatthanakon, Y. Sonoda, D. Yoo, and P. Sukontasukkul, "Steel fiber reinforced concrete panels subjected to impact projectiles with different caliber sizes and muzzle energies," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 13, 2020.



- [8] R. Sovják, T. Vavřiník, J. Zatloukal, P. Máca, T. Mičunek, and M. Frydrýn, “Resistance of slim UHPFRC targets to projectile impact using in-service bullets,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 76, pp. 166–77, 2015.
- [9] R. Sovják, D. Shanbhag, P. Konrád, and J. Zatloukal, “Response of thin UHPFRC targets with various fibre volume fractions to deformable projectile impact,” in *Proceedings AMCM*, 2017, vol. 193, pp. 3–10.
- [10] J. Fenga, X. Gao, J. Li, H. Dong, W. Yao, X. Wang, and W. Sun, “Influence of fiber mixture on impact response of ultra-high-performance hybrid fiber reinforced cementitious composite,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 163, pp. 487–496, 2019.