การศึกษาเบื้องต้นของประสิทธิภาพมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็กต่อการต้านทานแรงกระแทกจากกระสุนและแรงระเบิด

Preliminary study on Performance of Steel Fiber Mortar to Bullet Impact and Blast loading Resistance

สิทธิศักดิ์ แจ่มนาม[1] อภิสิทธิ์ เตชพัฒนากร[1] ปิติ สุคนธสุขกุล[1] บูชิต มาโห้[2,*] ธนพัฒน์ น้ำจันทร์[2]
กฤษดา เสือเอี่ยม[2] เฉลิมพล ไชยแก้ว[3] พีรศักดิ์ เอี่ยมละออ[4]

[1] ข [illegible] ข [illegible] ข [illegible] ข [illegible] ข
ข ข ข ข
[3] ข ข ข ข
[4] ข

Corresponding author; E mail address buchit.m@rmutp ac th

บทคัดย่อ

สถานการณ์ก่อความไม่สงบในประเทศไทยยังคงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในเหตุการณ์แต่ละครั้งนำมาซึ่งการสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินจำนวนมาก โครงสร้างที่สามารถป้องกันกระสุนและระเบิดจึงมีความสำคัญต่อการปกป้องผู้คนจากเหตุการณ์เหล่านี้ การศึกษาครั้งนี้จึงมีจุดประสงค์ในการศึกษาประสิทธิภาพในการต้านทานแรงกระแทกจากกระสุนปืนและระเบิดของมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็ก (Steel Fiber Reinforced Mortar, SFRM) เพื่อใช้เป็นโครงสร้างสำเร็จรูปในการป้องกันแรงกระแทก การทดสอบได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การศึกษาประสิทธิภาพในการต้านทานกระสุนปืนขนาด 7.62 มม. ของผนังมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็กปริมาณ 2% โดยปริมาตร ที่ความหนาแตกต่างกัน ส่วนที่ 2 การศึกษาประสิทธิภาพในการต้านทานแรงระเบิด TNT ขนาด 0.5 ปอนด์ โดยทำการติดตั้งระเบิดห่างจากตัวอย่างทดสอบเป็นระยะปรับทอน (Z) เท่ากับ 0.75 $m/kg^{1/3}$ ผลการทดสอบพบว่ามอร์ต้าเสริมเส้นเหล็กมีประสิทธิภาพในการต้านทานกระสุนเมื่อมีความหนาตั้งแต่ 80 มิลลิเมตรขึ้นไป ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นในช่วงที่ความหนาน้อยกว่า 80 มิลลิเมตร เนื่องจากการกะเทาะจากแรงกระแทกของกระสุน สำหรับการทดสอบการต้านทานแรงระเบิดพบว่าผนังมอร์ต้าธรรมดาเกิดการวิบัติโดยสมบูรณ์ แตกต่างจากผนังมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็กที่เกิดเพียงรอยร้าวเล็กน้อย เนื่องจากมีเส้นใยช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านการต้านทานแรงกระแทก

คำสำคัญ: มอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็ก, แรงกระแทก, กระสุนปืน, แรงระเบิด, ผนังป้องกันแรงระเบิด

Abstract

The violence and unrest situation in Thailand still occurred continuously which the loss of many lives and properties. The protective structures are important to prevent the people from those losses. This study aims to investigate the performance of steel fiber reinforced mortar (SFRM) on impaction of bullet and blast resistance for used to the pre-cast protective structure. The experimental can be divided into 2 parts; 1) study on performance bulletproof of SFRM panel with 2% fiber (by volume) subjected with 7.62 mm bullet by varied the thicknesses. 2) study on the performance of SFRM panel to blast resistance by explosive with 0.5 lb. TNT at the scaled distance (Z) of 0.75 $m/kg^{1/3}$. The experimental results shows that the SFRM can be prevented the bullet with the thickness beyond 80 mm. The increase of the percentage of weight was observed with the thickness of panel below 80 mm. due to the spalling by bullet impaction. For the blast resistance test, a completely flexural fracture was observed on a plain mortar panel. Unlike, the SFRM panel only shows the small cracking due to steel fiber enhanced the impact resistance.

Keywords: Steel fiber reinforced mortar, Impaction, Bullet, Blast load, Blast-resistance panel.

1. ที่มาและความสำคัญ

การก่อการร้ายเป็นภัยคุกคามความมั่นคงในรูปแบบใหม่ที่มีความรุนแรงและสร้างความเสียหายต่อสังคม ในประเทศไทยเหตุการณ์ความขัดแย้ง ความรุนแรง รวมทั้งความไม่สงบในจังหวัดชายแดนภาคใต้มีความยืดเยื้อมานานหลายสิบปี ทำให้เกิดความสูญเสียเป็นจำนวนมาก เนื่องจากโครงสร้างที่ใช้เป็นที่กำบังส่วนใหญ่นั้นไม่มีความสามารถในการต้านทาน

กระสุนและระเบิดจากผู้ก่อการร้ายได้อย่างเพียงพอ การพัฒนาโครงสร้างที่สามารถป้องกันอันตรายจากกระสุนและระเบิดได้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการลดการสูญเสียในชีวิตและทรัพย์สินของทั้งเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานและประชาชนที่ได้รับผลกระทบ

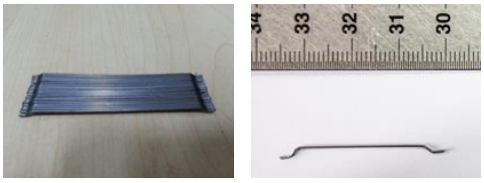
คอนกรีตที่มีความความแข็งแรงสูงและมีต้นทุนต่ำ จึงเป็นวัสดุก่อสร้างที่เหมาะสมในการนำมาทำเป็นโครงสร้างป้องกันกระสุนและระเบิด แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุเปราะ และมีคุณสมบัติรับแรงดึงต่ำ ทำให้รับแรงกระแทกได้ไม่ดีนัก [1] จึงได้นำเส้นใยเหล็กที่สามารถรับแรงดึงได้สูง และมีขนาดเล็กสามารถกระจายได้ทั่วทั้งเนื้อคอนกรีตเข้ามาช่วยปรับปรุงคุณสมบัติดังกล่าว ซึ่งเส้นใยเหล็กเหล่านี้สามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล แรงกระแทก และเพิ่มความเหนียวให้กับคอนกรีตได้ [2-5] ในการทดสอบความสามารถต้านทานกระสุนของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก (Steel Fiber Reinforced Concrete, SFRC) Feng และคณะ [6] และ Sovjak และคณะ [7] พบว่าคอนกรีตเสริมเส้นใยในสัดส่วนร้อยละ 1-3 โดยปริมาตร สามารถลดการความเสียหายของคอนกรีตเนื่องจากแรกกระแทกจากกระสุนปืนได้เป็นอย่างดี ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ ที่พบว่าการใช้คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กปริมาณร้อยละ 2 โดยปริมาตร ที่ความหนาตั้งแต่ 50 มม. ขึ้นไป มีประสิทธิภาพเพียงพอในการป้องกันกระสุนขนาด 9 มม., 11 มม. และ .44 Magnum ได้ [8-11] ในกรณีของการป้องกันระเบิด การทดสอบเกี่ยวกับพฤติกรรมของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กภายใต้แรงระเบิดยังคงมีการศึกษาไม่มากนักเนื่องจากข้อจำกัดทางด้านการทดสอบและความอันตราย แต่งานวิจัยบางส่วนแสดงให้เห็นว่าการใส่เหล็กเสริม (Reinforced bar) มีส่วนช่วยในการลดการแตกร้าวของคอนกรีต และปรับปรุงคุณสมบัติต้านทานแรงกระแทกเนื่องจากแรงระเบิดได้ [12]

เพื่อต่อยอดองค์ความรู้จากงานวิจัยเดิม งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาเบื้องต้นของพัฒนาผนังมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็กปริมาณร้อยละ 2 ในการต้านทานกระสุนขนาด 7.62 มม. และระเบิด สำหรับใช้เป็นโครงสร้างเพื่อป้องกันภัยจากการก่อการร้าย

2. วิธีการวิจัย

2.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 1-2555
- ทรายแม่น้ำ ขนาด 0.30-1.19 มิลลิเมตร
- น้ำประปาสะอาด สำหรับผสมคอนกรีต
- เส้นใยเหล็กชนิดงอปลาย (Hooked-end fiber) ที่มีกำลังรับแรงดึง 1345 MPa, โมดูลัสยืดหยุ่น 200 GPa, ความยาว 35 มิลลิเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.55 มิลลิเมตร และอัตราส่วนความชะลูดเท่ากับ 65 ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 เส้นใยเหล็กชนิดงอปลาย

- กระสุนปืนขนาด 7.62 มม. คุณสมบัติดังตารางที่ 1
- วัตถุระเบิดชนิด TNTs ขนาด 0.5 lb. จุดระเบิดด้วยฉนวนไฟฟ้า ผ่านแบตเตอรี่ขนาด 12 V
- ฐานรองรับ (Support) สำหรับจับยึดชิ้นงานทดสอบ ประกอบขึ้นจากเหล็กรูปพรรณ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของกระสุนขนาด 7.62 มม.

Properties	Details	
Caliber	7.62 mm	
Manufacture	Winchester	
Bullet weight	9.6 g	
Bullet type	Full metal jacket	
Muzzle velocity	824 m/s	
Muzzle energy	3259 N-m	

2.2 สัดส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

2.2.1 สัดส่วนผสม

สัดส่วนผสมมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็กประกอบไปด้วย ปูนซีเมนต์ ทราย น้ำสะอาด และเส้นใยเหล็ก โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.4 อัตราส่วนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 ปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 2 โดยปริมาตร ในการทดสอบประสิทธิภาพการต้านทานกระสุนได้แปรผันความหนาของมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็กเท่ากับ 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 มิลลิเมตร จำนวนอย่างละ 3 ตัวอย่าง และมอร์ต้าธรรมดา (C) สำหรับเปรียบเทียบในการทดสอบประสิทธิภาพในการต้านทานระเบิดดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสม

สัญลักษณ์	ความหนา (มิลลิเมตร)	สัดส่วนผสม (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)			
		ซีเมนต์	น้ำ	ทราย	เส้นใยเหล็ก
C*	-	580	230	1600	-
SFRM50	50	580	230	1600	156
SFRM60	60				
SFRM70	70				
SFRM80	80				
SFRM90	90				
SFRM100	100				

**Plain mortar (C) was compared with SFRM in blast resistance test. The compressive and flexural strength are 30.88 MPa and 2.65 MPa.*
หมายเหตุ Compressive strength of SFRM is 27.99 MPa and Flexural strength of SFRM is 8.63 MPa.

2.2.2 การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็กเริ่มจากการเตรียมสัดส่วนผสมดังตารางที่ 2 แล้วทำการผสมปูนซีเมนต์ ทราย และน้ำสะอาด เข้าด้วยกัน เป็นเวลา 2-3 นาที ด้วยเครื่องผสมคอนกรีต (Pan mixer) เมื่อผสม

มอร์ต้าเข้ากันดีแล้วจึงทำการเติมเส้นใยเหล็กและผสมให้เข้ากันอีกเป็นเวลา 3 นาที จนได้เป็นมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็ก จากนั้นจึงทำการเทลงแบบหล่อขนาด 400x400 มิลลิเมตร และขนาด 500x1000 มิลลิเมตร สำหรับตัวอย่างทดสอบประสิทธิภาพในการต้านทานกระสุนและระเบิดตามลำดับ

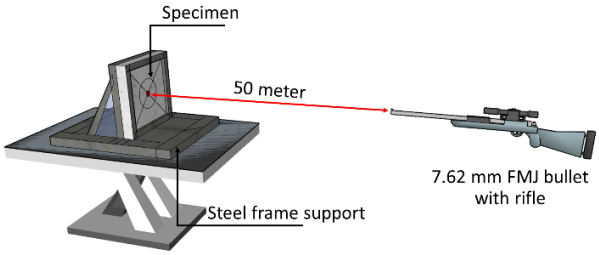
ตัวอย่างสำหรับทดสอบประสิทธิภาพในการต้านทานระเบิดได้มีการเสริมเหล็กเส้นกลมในระหว่างการหล่อตัวอย่าง เพื่อป้องกันการแตกร้าวระหว่างขนย้ายเนื่องจากตัวอย่างทดสอบนั้นมีความบาง โดยจะทำการเสริมกันร้าวขนาด 6 มม. ที่ระยะห่าง 200 มิลลิเมตร เท่าๆกัน (RB6@0.20ม.)

2.3 วิธีการทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการทดสอบความสามารถในการต้านทานกระสุนขนาด 7.62 มม. ของผนังมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็กที่ความหนาแตกต่างกัน จากผลการทดสอบในรูปแบบของการวิบัติ และการสูญเสียน้ำหนัก จะถูกนำพิจารณาเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมในการต้านทานกระสุน และนำไปดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพการต้านทานแรงระเบิดในส่วนถัดไป

2.3.1 การทดสอบประสิทธิภาพในการต้านทานกระสุน (Bullet test)

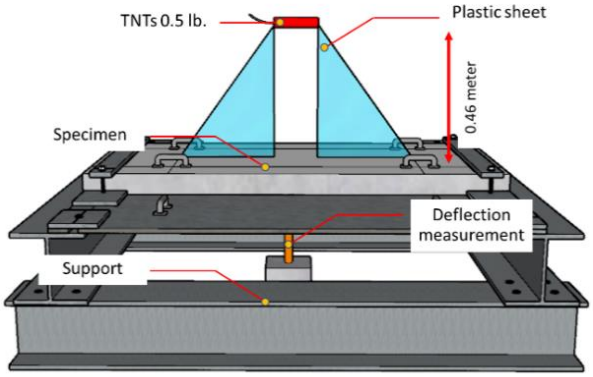
ผนังมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็กขนาด 400x400 มิลลิเมตร ที่ความหนาแตกต่างกันจะถูกนำมาศึกษาความสามารถในการต้านทานกระสุน โดยผนังนำมาติดตั้งกับฐานรองรับและทำการยิงทดสอบด้วยกระสุนขนาด 7.62 มม. ที่ระยะ 50 เมตร เข้าบริเวณกึ่งกลางผนังเป็นจำนวน 1 นัด ดังรูปที่ 2 จากนั้นผลการทดสอบในรูปแบบของความเสียหาย และร้อยละการสูญเสียน้ำหนักจะถูกนำมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบ



รูปที่ 2 การทดสอบประสิทธิภาพในการต้านทานกระสุน (Bullet test)

2.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพในการต้านทานระเบิด (Blast test)

เมื่อพิจารณาความหนาที่เหมาะสมจากผลการศึกษาในส่วนที่แล้วมาดำเนินการทดสอบความประสิทธิภาพในการต้านทานระเบิด TNTs ขนาด 0.5 lb ในการทดสอบตัวอย่างผนังขนาด 500x1000 มิลลิเมตร จะถูกติดตั้งเข้ากับฐานรองรับที่ทำจากเหล็กรูปพรรณ แล้วทำการติดตั้งวัตถุระเบิดห่างจากตัวอย่างที่ระยะ 0.46 เมตร (ระยะปรับทอน [13], Scale distance Z = 0.75 m/kg$^{1/3}$) ดังรูปที่ 3 จากผลการทดสอบนำมาวิเคราะห์รูปแบบความเสียหาย ระยะโก่งถาวร (Permanent deflection) และระยะโก่งตัวสูงสุด (maximum deflection) โดยการติดตั้งเสาอากาศวิทยุไว้ใต้ตัวอย่าง อีกทั้งทำการประเมินประสิทธิภาพในการต้านทานแรงระเบิดอีกเปรียบเทียบกับผนังมอร์ต้าธรรมดา (ไม่เสริมเส้นใยเหล็ก, C)



รูปที่ 3 การทดสอบประสิทธิภาพในการต้านทานระเบิด (Blast test)

2.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

2.4.1 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก (Percentage of weight loss)

ในการทดสอบประสิทธิภาพในการต้านทานกระสุน ตัวอย่างจะถูกนำมาชั่งน้ำหนักก่อนและหลังจากการทดสอบยิงด้วยกระสุน เพื่อนำมาคำนวณเป็นร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการต้านทานกระสุนขนาด 7.62 มม. ดังสมการที่ 1

$$\text{Weight loss (\%)} = \frac{w_0 + w_1}{w_0} x100\% \quad (1)$$

เมื่อ w_0 = น้ำหนักของตัวอย่างก่อนทดสอบ (กิโลกรัม) และ w_1 = น้ำหนักของตัวอย่างหลังการทดสอบ (กิโลกรัม)

2.4.2 การโก่งตัวและประสิทธิภาพการต้านทานระเบิด

หลังจากการทดสอบเสร็จสิ้น ตัวอย่างได้ถูกนำมาวัดหาระยะโก่งตัวถาวร (Permanent deflection) และสามารถคำนวณมาเป็นองศาการหมุนที่ฐานรองรับสูงสุด (Maximum Support Rotation, S_r) ดังสมการที่ 2 ซึ่งสามารถนำไปประเมินระดับความเสียหายเบื้องต้นได้ ตามมาตรฐานของทหารช่างประเทศสหรัฐอเมริกา (PDC-TR 06-08) [14] มีเกณฑ์การพิจารณาเกณฑ์ความเสียหายในลักษณะการวิบัติแบบโก่งดัด (Flexural failure) ของชิ้นส่วนคอนกรีตเมื่อได้รับแรงระเบิดตามขีดจำกัดขององศาการหมุนที่ฐานรองรับสูงสุดดังตารางที่ 3

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\delta}{L/2}\right) = \frac{2\delta}{L} \quad (2)$$

เมื่อ θ คือ องศาการหมุนที่ฐานรองรับสูงสุด (องศา), δ คือระยะการโก่งตัวถาวร และ L คือระยะฐานรองรับเท่ากับ 850 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3 เกณฑ์ประเมินประสิทธิภาพในการต้านทานแรงระเบิดตามมาตรฐาน PDC-TR 06-08 [14]

ระดับการป้องกัน (Level of protection, LOP)	สภาพความเสียหาย	องศาการหมุนที่ฐานรองรับ
High	ไม่พบการเสียรูปถาวร มองไม่เห็นร่องรอยความเสียหาย	-
Medium	เกิดการเสียรูปถาวรบางส่วนแต่สามารถซ่อมแซมได้ และสามารถ	ไม่เกิน 2°

	เปลี่ยนชิ้นส่วนใหม่ได้หากพิจารณาแล้วว่ามีความคุ้มค่าเพียงพอ	
Low	ชิ้นส่วนยังไม่ถึงขั้นวิบัติแต่มีการเสียรูปถาวรอย่างมากจนไม่สามารถซ่อมแซมได้	ไม่เกิน 5°
Very low	ชิ้นส่วนเกิดสภาพวิบัติและมีสะเก็ดหลุดกระเด็นออกมาอย่างเห็นได้ชัดเจน	ไม่เกิน 10°
Below standard	ชิ้นส่วนถูกแรงระเบิดทำลายเป็นสะเก็ดหลุดกระเด็นด้วยความเร็วสูง	10° ขึ้นไป

3. ผลการวิจัย

3.1 การทดสอบประสิทธิภาพในการต้านทานกระสุน (Bullet test)

การทดสอบประสิทธิภาพการต้านทานกระสุน ผนังจะที่มีความหนา 50-100 มิลลิเมตร จะถูกยิงทดสอบด้วยกระสุน 7.62 มม. เข้าที่บริเวณกึ่งกลางผนังจำนวน 1 นัด ผลการทดสอบแสดงดังนี้

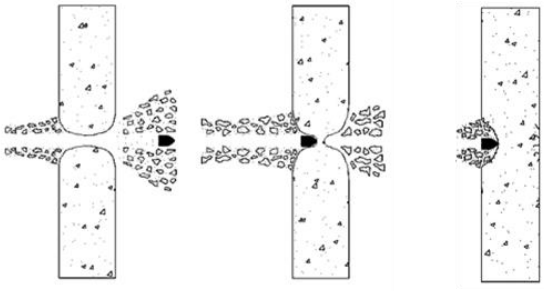
3.1.1 รูปแบบความเสียหายจากการทดสอบต้านทานกระสุนปืน

หลังจากการทดสอบยิงด้วยกระสุน พบรูปแบบความเสียหาย 3 รูปแบบ ได้แก่ กระสุนทะลุ กระสุนไม่ทะลุแต่เกิดความเสียหายด้านหลัง และกระสุนไม่ทะลุและไม่เกิดความเสียหายด้านหลัง ซึ่งความรุนแรงของความเสียหายมีแนวโน้มลดลงความหนาของผนังมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้น

- กระสุนทะลุ (Perforation) เกิดขึ้นกับผนังที่มีความหนา 50 มิลลิเมตร โดยสามารถเห็นรูของการทะลุผ่านของกระสุนได้อย่างชัดเจน มีการกะเทาะและหลุดล่อนของเศษคอนกรีตบริเวณด้านหลังสูงกว่าด้านหน้า ดังรูปที่ 4ก

- กระสุนไม่ทะลุแต่เกิดการกะเทาะ (Penetration with spalling) เกิดขึ้นกับผนังที่มีความหนา 60-70 มิลลิเมตร โดยกระสุนไม่สามารถทะลุผ่านผนัง พบการกะเทาะหลุดล่อนของเศษคอนกรีตในบริเวณด้านหน้าสูงกว่าด้านหลัง เนื่องจากแรงกระแทกของกระสุน ดังรูปที่ 4ข

- กระสุนไม่ทะลุและไม่เกิดความเสียหายด้านหลัง (Penetration without rear damage) พบได้ในผนังที่มีความหนามากกว่า 80 มิลลิเมตรขึ้นไป การวิบัติรูปแบบนี้กระสุนจะไม่ทะลุผ่านผนังและไม่เกิดความเสียหายหรือมีเศษวัสดุปลิวหลุดร่อนบริเวณด้านหลังของผนัง แต่มีเพียงบริเวณด้านหน้าที่ยังคงเกิดความเสียหายจากแรงกระแทกของกระสุนดังรูปที่ 4ค

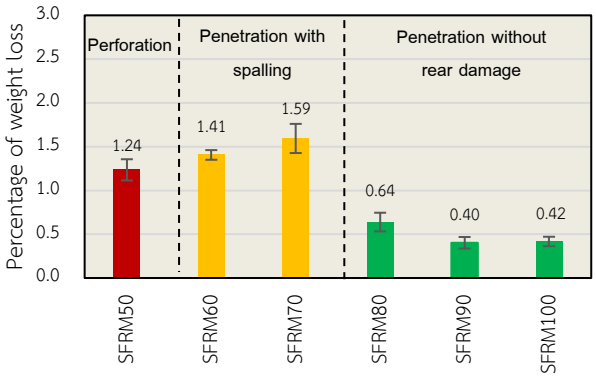


(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 4 รูปแบบความเสียหายของการทดสอบประสิทธิภาพในการต้านทานกระสุนขนาด 7.62 มม. (ก) กระสุนทะลุ, (ข) กระสุนไม่ทะลุแต่เกิดความเสียหายด้านหลัง และ (ค) กระสุนไม่ทะลุและไม่เกิดความเสียหายด้านหลัง

3.1.2 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก (Percentage of weight loss)

ก่อนและหลังการทดสอบยิงด้วยกระสุน ผนังจะถูกนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อนำมาคำนวณเป็นร้อยละการสูญเสียน้ำหนักดังรูปที่ 5 จากผลการทดสอบในช่วงที่กระสุนทะลุผ่านผนังมีการสูญเสียน้ำหนักมาก เนื่องจากผนังเกิดกะเทาะหลุดร่อนของเศษวัสดุ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นเข้าสู่ช่วงที่กระสุนไม่ทะลุผ่านแต่เกิดการกะเทาะด้านหลัง พบว่าผนังมีความรุนแรงของความเสียหายเพิ่มขึ้น โดยเห็นได้จากการสูญเสียน้ำหนักที่สูงกว่าช่วงที่กระสุนทะลุผ่าน ทั้งนี้เป็นสาเหตุมาจากการที่กระสุนไม่ทะลุผ่านผนังทำให้กระสุนถ่ายเทพลังงานจลน์ให้กับผนัง และเมื่อผนังมีความแข็งแรงไม่เพียงพอ (ความหนาไม่เพียงพอ) จึงทำให้เกิดความเสียหายที่รุนแรงขึ้น ต่างจากความเสียหายแบบทะลุที่กระสุนยังคงหลงเหลือพลังงานจลน์อยู่ และเมื่อผนังมีความแข็งแรงมากเพียงพอ (ความหนา 80 มิลลิเมตรขึ้นไป) ผนังไม่เกิดการกะเทาะหลุดร่อนของเศษวัสดุด้านหลัง มีเพียงแต่การสูญเสียน้ำหนักจากการกะเทาะเนื่องจากแรงกระแทกของกระสุนด้านหน้าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 5 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก

จากการทดสอบประสิทธิภาพในการต้านทานกระสุนของผนังมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็ก แสดงให้เห็นว่าผนังที่มีความหนา 80 มิลลิเมตรขึ้นไปสามารถป้องกันกระสุนขนาด 7.62 มม. ได้ ดังนั้นในการทดสอบประสิทธิภาพการต้านทานระเบิดจึงได้เลือกใช้ความหนาเท่ากับ 80 มิลลิเมตร มาใช้สำหรับการทดสอบ

3.2 การทดสอบประสิทธิภาพในการต้านทานระเบิด (Blast test)

3.2.1 ความเสียหายจากการทดสอบต้านทานแรงระเบิด

จากพฤติกรรมการระเบิดของระเบิด TNT ในพื้นที่ไม่ปิดล้อม (การระเบิดกลางอากาศแบบอิสระ) เนื่องจากแรงระเบิดโดยตรง (Incident pressure) ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายจากคลื่นกระแทก (Shock wave) [13] ซึ่งจะเห็นในลักษณะที่ลูกไฟกระจายออกจากจุดศูนย์กลางระเบิดไปกระทำต่อตัวอย่างทดสอบในลักษณะแรงกระแทกแบบดัดดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ลักษณะการกระจายตัวของแรงระเบิด

สภาพความเสียหายของแผ่นมอร์ต้า (C) ภายหลังรับแรงระเบิด พบว่าผนังเกิดความเสียหายอย่างสมบูรณ์ (Completely flexural fracture) บริเวณด้านหน้าของผนังเกิดการแตกร้าวจากแรงอัดของระเบิดและมีการกะเทาะหลุดหลุนของเศษวัสดุ บริเวณด้านหลังพบรอยแตกร้าวขนาดใหญ่ซึ่งเกิดจากการวิบัติแบบดัด ดังรูปที่ 7

เสริมเส้นใยเหล็ก (SFRM80) พบว่าบริเวณด้านที่ปะทะกับแรงระเบิดไม่พบความเสียหายจากแรงระเบิด (No damage) มีเพียงรอยไหม้ซึ่งเกิดการระเบิดของ TNT เพียงเท่านั้น ส่วนบริเวณด้านหลังพบรอยขนาดเล็กบริเวณกึ่งกลางตัวอย่างทดสอบ ดังรูปที่ 8 เนื่องมาจากพฤติกรรมการระเบิดแบบอิสระ โดยด้านหน้าของตัวอย่างที่ปะทะกับแรงระเบิดจะเกิดแรงกระทำแบบอัด และด้านหลังจะเกิดแรงกระทำแบบดึง ซึ่งการเกิดรอยร้าวขนาดเล็กนี้บ่งชี้ได้ว่าเส้นใยเหล็กมีส่วนช่วยในเพิ่มคุณสมบัติการต้านทานแรงดึงภายใต้แรงกระแทก [15] ซึ่งคล้ายกันกับงานวิจัยของ Mindess และคณะ [16] และ Lai และคณะ [17] ที่พิสูจน์ให้เห็นว่าเส้นใยเหล็กมีส่วนช่วยในการปรับปรุงความสามารถในการต้านทานแรงระเบิดของมอร์ต้า อีกทั้งเส้นใยเหล็กยังช่วยยับยั้งการแตกร้าว ป้องกันการวิบัติแบบเฉียบพลัน และลดการกะเทาะหลุดร่อนของเศษคอนกรีตที่เกิดจากแรงกระแทกและแรงดัด [18-21]



ก) ด้านหน้า (ปะทะแรงระเบิด)



ข) ด้านหลัง

รูปที่ 7 ความเสียหายของผนังมอร์ต้าหลังการทดสอบประสิทธิภาพต้านทานการระเบิด



ก) ด้านหน้า (ปะทะแรงระเบิด)

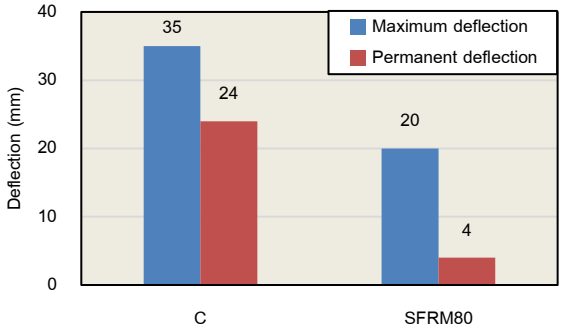


ข) ด้านหลัง

รูปที่ 8 ความเสียหายของผนังมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็กหลังการทดสอบประสิทธิภาพต้านทานการระเบิด

3.2.2 การโก่งตัวและประสิทธิภาพในการต้านทานแรงระเบิด

หลังจากการทดสอบระเบิดเสร็จสิ้นและตรวจสอบความปลอดภัยแล้ว ทำการวัดระยะโก่งตัวสูงสุด (Maximum deflection) ได้จากความสูงที่เปลี่ยนไปของเสาอากาศใต้แผ่นมอร์ต้า และระยะโก่งตัวถาวร (Permanent deflection) โดยนำแท่งเหล็กที่มีความตรงวางบนแผ่นตัวอย่างและวัดระยะห่างของแท่งเหล็ก จากการทดสอบพบว่า ระยะโก่งตัวถาวรและระยะโก่งตัวสูงสุดของผนังมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็ก (SFRM80) มีการโก่งตัวน้อยกว่ามอร์ต้าธรรมดา (C) ถึง 15 และ 20 มิลลิเมตร ซึ่งคิดเป็น 42.8 และ 83.3 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 9 จากผลการทดสอบดังกล่าวบ่งชี้ว่า ขณะเกิดการระเบิดแผ่นตัวอย่างเกิดการโก่งตัวสูงสุดเนื่องจากแรงกระทำจึงทำให้เกิดการแตกร้าวขึ้นบริเวณด้านหลังแต่ยังสามารถคงรูปอยู่ได้ไม่เกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด เนื่องจากมีเส้นใยเหล็กช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงดัด [22-23] และเมื่อเวลาผ่านไปแรงระเบิดมีค่าลดลงทำให้แผ่นมอร์ต้ามีระยะโก่งตัวลดลง แต่ยังคงพบการเสียรูปถาวรเนื่องจากแรงระเบิด



รูปที่ 9 ระยะโก่งตัว

ข้อมูลการโก่งตัวที่ได้นี้ สามารถนำไปประเมินประสิทธิภาพในการป้องกันระเบิดเบื้องต้นตามมาตรฐานของทหารช่างประเทศสหรัฐอเมริกา (PDC-TR 06-08) [14] โดยทั่วไปการประเมินความเสียหายจะใช้ความเสียหายที่เกิดขึ้นและองศาการหมุนที่ฐานรองรับตามสมการที่ 2 มาพิจารณา จากผลการประเมินแสดงดังตารางที่ 4 พบว่าผนังมอร์ต้าธรรมดาเกิดการวิบัติโดยมีการเสียรูปถาวรอย่างมากจนไม่สามารถซ่อมแซมได้ โดยมีองศาการหมุนที่ฐานรองรับเท่ากับ 3.2 องศา ซึ่งจัดอยู่ในระดับการป้องกันที่ต่ำ ในกรณีผนังมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็ก เนื่องจากผนังมีเพียงรอยร้าวขนาดเล็กเกิดขึ้นบริเวณด้านหลัง อีกทั้งยังมีองศาการหมุนที่ฐานรองรับเท่ากับ 0.5 องศา และสามารถใช้งานต่อได้ทันทีหลังซ่อมแซม จึงถูกจัดอยู่ในระดับการป้องกันปานกลาง ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าเส้นใยเหล็กมีส่วนช่วยอย่างมากในการเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานระเบิดของผนังมอร์ต้า โดยเส้นใยเหล็กจะทำหน้าที่ยึดรั้งรอยแตกร้าว เพิ่มกำลังรับแรงดึง

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพในการต้านทานแรงระเบิด

Specimen	C	SFRM80
Specimen thickness (mm)	80	80
Damages	Completely flexural fracture	Small cracking
Permanent deflection (mm)	24	4
Support rotation (degree)	3.2	0.5
Level of protection	Low	Medium

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้แสดงผลการศึกษาเบื้องต้นของมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็กต่อการต้านทานกระสุนปืนขนาด 7.62 มม. และแรงระเบิด สามารถสรุปผลได้ดังนี้

- ผนังมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็กปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ป้องกันการทะลุผ่านของกระสุนปืนขนาด 7.62 มม. จำนวน 1 นัดได้ ตั้งแต่ความหนา 80 มิลลิเมตรขึ้นไป
- รูปแบบความเสียหายจากการทดสอบยิงด้วยกระสุนเกิดขึ้น 3 รูปแบบ คือ กระสุนทะลุผ่าน กระสุนไม่ทะลุผ่านแต่เกิดการกะเทาะ และกระสุนไม่ทะลุผ่านและไม่เกิดความเสียหายด้านหลัง
- ในช่วงที่กระสุนทะลุ และไม่ทะลุแต่เกิดความเสียหายด้านหลังมีแนวโน้มในของร้อยละการสูญเสียน้ำหนักสูงกว่าช่วงที่กระสุนไม่ทะลุและไม่เกิดความเสียหายด้านหลัง เนื่องจากการกะเทาะหลุดร่อนของเศษวัสดุ
- จากการระเบิดด้วย TNT ขนาด 0.5 lb ที่ระยะปรับทอน Z = 0.75 m/kg$^{1/3}$ ผนังมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็กมีประสิทธิภาพในการต้านทานแรงระเบิดได้อยู่ในระดับปานกลาง โดยพบเพียงรอยแตกร้าวขนาดเล็กบริเวณด้านหลัง แตกต่างจากผนังมอร์ต้าธรรมดาที่เกิดความเสียหายอย่างรุนแรง ซึ่งเป็นการวิบัติแบบดัดโดยสมบูรณ์ และมีระดับการป้องกันที่ต่ำ
- เส้นใยเหล็กมีส่วนช่วยในการปรับปรุงประสิทธิภาพในการต้านทานแรงระเบิดได้ โดยเส้นใยเหล็กจะช่วยยึดรั้งรอยแตกร้าวและเพิ่มกำลังรับแรงดึง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการทุนพัฒนาศักยภาพนักวิจัยด้านยุทโธปกรณ์เพื่อเพิ่มศักยภาพของกองทัพและการป้องกันประเทศ ประจำปีงบประมาณ 2562 และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ มหาวิทยาลัยราชมงคลพระนคร และโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ที่สนับสนุนสถานที่ อุปกรณ์สำหรับการเตรียมตัวอย่างทดสอบ และการจัดหาเครื่องกระสุนและวัตถุระเบิดที่ใช้ทดสอบนี้ด้วย สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอรำลึกถึง พันโท อมรเทพ สมราช ที่ทุ่มเทช่วยเหลืองานวิจัยนี้มาโดยตลอด

เอกสารอ้างอิง

[1] H. W. Reinhardt. (2013). Factors affecting the tensile properties of concrete. In H.W.Reinhardt, *Understanding the Tensile Properties of Concrete* (pp. 19-51). Germany: Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. doi:https://doi.org/10.1533/9780857097538.1.19

[2] Larsen, I. L., & Thorstensen, R. T. (2020). The influence of steel fibres on compressive and tensile strength of ultra high performance concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 119459. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119459

[3] Sukontasukkul, P., Mindess, S., Banthia, N., & Mikami, T. (2001). Impact resistance of laterally confined fibre reinforced concrete plates. *Materials and Structures*, 34(10), 612-618.

[4] Yoo, D.-Y., & Banthia, N. (2016). Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 73, 267-280. doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.08.001

[5] Yoo, D.-Y., & Banthia, N. (2019). Impact resistance of fiber-reinforced concrete – A review. *Cement and Concrete Composites*, 14. doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103389.

[6] Feng, J., Gao, X., Li, J., Dong, H., Yao, W., Wang, X., & Sun, W. (2019). Influence of fiber mixture on impact response of ultra-high-performance hybrid fiber reinforced cementitious composite. *Composites Part B: Engineering*, 163, 487-496. doi:https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.141.

[7] Sovják, R., Vav iník, T., Zatloukal, J., Máca, P., Mičunek, T., & Frydrýn, M. (2015). Resistance of slim UHPFRC targets to projectile impact using in-service bullets. *International Journal of Impact Engineering*, 76, 166-177.

[8] Sukontasukkul, P., Jamnam, S., Sappakittipakorn, M., & Banthia, N. (2012). Preliminary study on bullet resistance of double-layer concrete panel made of rubberized and steel fiber reinforced concrete. *Materials and Structures*, 47, 1-2.

[9] Maho, B., Sukontasukkul, P., Jamnam, S., Yamaguchi, E., Fujikake, K., & Banthia, N. (2019). Effect of rubber insertion on impact behavior of multilayer steel fiber reinforced concrete bulletproof panel. *Construction and Building Materials*, 216, 476-484. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.243.

[10] Maho, B., Jamnam, S., Sukontasukkul, P., Fujikake, K., & Banthia, N. (2017). Preliminary Study on Multilayer Bulletproof Concrete Panel: Impact Energy Absorption and Failure Pattern of Fibre Reinforced Concrete, Para-Rubber and Styrofoam Sheets. *Procedia Engineering*, 210, 369-376. doi:https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.090

[11] Jamnam, S., Maho, B., Techaphatthanakon, A., Sonoda, Y., Yoo, D.-Y., & Sukontasukkul, P. (2020). Steel fiber reinforced concrete panels subjected to impact projectiles with different caliber sizes and muzzle energies. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00360. doi:https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00360

[12] Luccioni, B. M., & Luege, M. (2006). Concrete pavement slab under blast loads. *International Journal of Impact Engineering*, 32(8), 1248-1266. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2004.09.005.

[13] กรมโยธาธิการและผังเมือง (2016), *คู่มือการคำนวณแรงระเบิดและผลกระทบจากแรงระเบิดที่มีต่อโครงสร้างอาคาร*, สำนักพิมพ์กรุงเทพมหานคร, กระทรวงมหาดไทย

[14] PDC-TR 06-01 (2008), Single Degree of Freedom Blast Design Spreadsheet (SBEDS) Methodology. Manual, *U.S. Army Corps of Engineers Protective Design Center Technical Report*, 2008.

[15] Tran, N., Tran, T., & Kim, D. (2015). ; High rate response of ultra-high-performance fiber-reinforced concretes under direct tension, . *Cement and Concrete Research, 69*, 72-87.

[16] Mindess, S., Young, J., & Darwin, D. (2003). *Concrete, second ed.* New Jersey: Pearson Education Inc.

[17] Lai, J., & Sun, W. (2009). Dynamic behaviour and visco-elastic damage model of ultrahigh performance cementitious composite. Cement and Concrete Research, 39(11), 1044-1051.

[18] Sappakittipakorn, M., PitiSukontasukkul, Higashiyama, H., & Chindaprasirt, P. (2018). Properties of hooked end steel fiber reinforced acrylic modified concrete. *Construction and Building Materials, 186*, 1247-1255. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.055

[19] Wille, K., Xu, M., El-Tawil, S., & Naaman, A. (2016). Dynamic impact factors of strain hardening UHP-FRC under direct tensile loading at low strain rates. *Materials and Structures, 49*(4), 1351-1365.

[20] D.Y., Yoo, & Banthia N., (2016). Impact resistance of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete with different steel fibers. 9th RILEM International Symposium on Fiber Reinforced Concrete (BEFIB 2016). Pacific Gateway Hotel, Vancouver, BC, Canada..

[21] Sukontasukkul, P., Pongsopha, P., Chindaprasirt, P., & Songpiriyakij, S. (2018). Flexural performance and toughness of hybrid steel and polypropylene fibre reinforced geopolymer. *Construction and Building Materials, 161*, 37-44. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.122.

[22] Sukontasukkul, P. (2004). Tensile behaviour of hybrid fibre-reinforced concrete. *Advances in Cement Research, 16*(3), 115-122. doi:https://doi.org/10.1680/adcr.2004.16.3.115

[23] Yoo, D.-Y., Je, J., Choi, H.-J., & Sukontasukkul, P. (2020). Influence of embedment length on the pullout behavior of steel fibers from ultra-high-performance concrete. *Materials Letters, 276*, 128233. doi:https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.12823.