



พฤติกรรมของมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็กภายใต้แรงระเบิด

บุชิต มาโก้ และ กฤษดา เสือเอี่ยม

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

สิทธิศักดิ์ แจ่มนาม* อภิสัทธี เตชพัฒนากร และ ปิติ สุคนธสุขกุล

ศูนย์วิจัยวัสดุอาคารและงานก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

อมรเทพ สมราช และ พีรศักดิ์ เอี่ยมละออ

ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 7055 4055 อีเมล: sittisak.j@eng.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.05.001

รับเมื่อ 1 กรกฎาคม 2564 แก้ไขเมื่อ 25 สิงหาคม 2564 ตอฉบับเมื่อ 2 กันยายน 2564 เผยแพร่ออนไลน์ 22 พฤษภาคม 2566

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

ความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการก่อการร้ายเป็นสิ่งที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ในจังหวัดชายแดนใต้ของประเทศไทยได้เกิดความขัดแย้ง และความรุนแรงมาตั้งแต่ พ.ศ. 2547 จนถึงปัจจุบัน ทำให้มีการสูญเสียที่ไม่สามารถประเมินค่าได้ เหตุการณ์ส่วนใหญ่เกิดจากการกราดยิงและใช้วัตถุระเบิดซึ่งทำให้ผู้บาดเจ็บและเสียชีวิตเป็นจำนวนมากเนื่องจากไม่มีที่กำบังหรือที่หลบภัยที่สามารถป้องกันได้ ดังนั้นโครงสร้างที่สามารถป้องกันกระสุนและระเบิดจึงเป็นสิ่งสำคัญในการป้องกันความเสียหายเหล่านี้ งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายในการปรับปรุง และเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานแรงระเบิดของผนังมอร์ต้าโดยใช้เส้นใยเหล็กชนิดปลายงอ ปริมาณร้อยละ 2 โดยปริมาตร เพื่อศึกษาความสามารถและพฤติกรรมในการต้านทานแรงระเบิด จึงทำการทดสอบด้วยระเบิด TNT ขนาด 0.5 ปอนด์ ที่ระยะปรับทอน เท่ากับ 0.55 0.65 และ 0.75 ผลการทดสอบพบว่า มอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็กมีประสิทธิภาพในการต้านทานแรงระเบิดได้ดีกว่ามอร์ต้าธรรมดาในทุกกรณี โดยจากความเสียหายที่เกิดขึ้นนั้นพบว่ามอร์ต้าธรรมดาเกิดการวิบัติที่มีความรุนแรง และเสียหายโดยเกิดเป็นรอยร้าวขนาดใหญ่บริเวณกึ่งกลางผนัง แตกต่างกับมอร์ต้าที่มีเส้นใยเหล็กที่สามารถช่วยกระจายแรงและยึดรั้งรอยแตกร้าวทำให้เกิดความเสียหายลดลงจนกระทั่งแทบไม่เกิดความเสียหายใดๆ อีกทั้งยังมีความสามารถในการรับกำลังหลังจากรับแรงระเบิดได้สูงกว่ามอร์ต้าธรรมดาได้อีกด้วย

คำสำคัญ: มอร์ต้าเสริมเส้นใย เส้นใยเหล็ก ระเบิดที่เอ็นที แรงกระแทก ผนังต้านทานแรงระเบิด

การอ้างอิงบทความ: บุชิต มาโก้, กฤษดา เสือเอี่ยม, สิทธิศักดิ์ แจ่มนาม, อภิสัทธี เตชพัฒนากร, ปิติ สุคนธสุขกุล, อมรเทพ สมราช และ พีรศักดิ์ เอี่ยมละออ, “พฤติกรรมของมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็กภายใต้แรงระเบิด”, วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 33, ฉบับที่ 3, หน้า 1-11, เลขที่บทความ 233-085357, ก.ค.-ก.ย. 2566.



Behaviors of Steel Fiber Reinforced Mortar Subjected to Blast Impaction

Buchit Maho and Gritsada Sua-lam

Department of civil engineering, Faculty of engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok, Thailand

Sittisak Jamnam* Apisit Techaphatthanakon 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

Amornthep Somrat and Peerasak Aemlaor

Education Division, Chulachomklao Royal Military Academy, Nakhon Nayok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 7055 4055, E-mail: sittisak.j@eng.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.05.001

Received 1 July 2021; Revised 25 August 2021; Accepted 2 September 2021; Published online: 22 May 2023

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Damages caused by terrorism are unpredictable. Since 2004, conflicts and violence have occurred in southern Thailand causing invaluable loss. Most of the incidents were mass shootings and explosives which resulted in many injuries and deaths due to the lack of defensible cover or shelter. Therefore, the bullet and explosions proof structures are essential for preventing damages in these events. This research aims to improve and enhance the efficiency of explosion resistance of mortar walls using the hooked-end steel fiber as 2% by volume. For comparison in behavior and effectiveness, the steel fiber reinforced mortar (SFRM) specimens which subjected to 0.5 lb TNT with varied scaled distance (Z) of 0.55 0.65 and 0.75 were investigated. The experimental results showed that the SFRM had better explosion resistance performance than the plain mortar for all cases. Due to the force distribution and crack retention of fiber, the SFRM was shown in less damaged than the plain mortar that occurred violent damages and cracks at the center of the specimen. In addition, the strength after the explosion event or residual strength of SFRM was also found higher than that of the plain mortar.

Keywords: Fiber Reinforced Mortar, Steel Fiber, TNTs Explosive, Blast Impaction, Blast Resistance Panel

Please cite this article as: B. Maho, G. Sua-lam, S. Jamnam, A. Techaphatthanakon, P. Sukontasukkul, A. Somrat, and P. Aemlaor, "Behaviors of steel fiber reinforced mortar subjected to blast impaction," *The Journal of KMUTNB*, vol. 33, no. 3, pp. 1–11, ID. 233-085357, Jul.-Sep. 2023 (in Thai).

1. บทนำ

การก่อการร้ายเป็นภัยคุกคามที่มีความรุนแรงและสร้างความเสียหายต่อสังคมเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งประเทศไทยได้เกิดเหตุการณ์ความขัดแย้ง ความรุนแรงและความไม่สงบในจังหวัดชายแดนใต้ที่มีความยืดเยื้อมานานหลายสิบปี ทำให้เกิดความสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สินเป็นจำนวนมาก จากฐานข้อมูลของศูนย์เฝ้าระวังสถานการณ์ภาคใต้ (Deep South Watch Database) [1] รายงานว่าตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2547 ถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2564 มีเหตุการณ์ความรุนแรงเกิดขึ้นทั้งสิ้นรวม 20,971 เหตุการณ์ ซึ่งการใช้วัตถุระเบิดเป็นเหตุการณ์รณรงค์ลงมาจากกราดยิงคิดเป็นประมาณร้อยละ 17.6 โดยประมาณ อย่างไรก็ตามเหตุการณ์การใช้วัตถุระเบิดนี้ได้ส่งผลกระทบต่อชีวิตและสร้างความเสียหายมากกว่าการกราดยิงทำให้เกิดการบาดเจ็บและการเสียชีวิตเป็นจำนวนมาก

โครงสร้างผนังอาคารโดยส่วนใหญ่ที่ทำจากอิฐมวลเบาหรืออิฐมวลเบา นั้น ไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อป้องกันการระเบิด จึงทำให้เกิดความเสียหาย และอันตรายต่อผู้ที่หลบภัยถึงแม้จะเป็นผนังหรือโครงสร้างที่ทำจากคอนกรีต ถ้าไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อป้องกันแรงระเบิดก็อาจเกิดการพังทลายหรือการกระเทาะ ปลิวหลุดร่อนของเศษวัสดุ ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายได้เช่นเดียวกัน [2]–[5] จึงมีนักวิจัยหลายท่านได้พยายามพัฒนาคุณสมบัติด้านการต้านทานระเบิดหรือแรงกระแทกของคอนกรีตโดยใช้เส้นใยเหล็ก ซึ่งพบว่าเส้นใยเหล็กสามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านแรงดึงและแรงกระแทกของคอนกรีตได้เป็นอย่างดี โดยเส้นใยเหล็กจะทำหน้าที่กระจายแรงกระทำและยึดรั้งรอยแตกร้าว [6]–[10] ตัวอย่างเช่น Sukontasukkul [11] Sittisak [12] และ Sovjak [13] รายงานว่าการใช้เส้นใยเหล็กสามารถช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของคอนกรีตในการต้านทานแรงกระแทกและการทะลุผ่านของกระสุน และลดการปลิวหลุดร่อนของเศษคอนกรีตได้ โดยปริมาณที่เหมาะสมอยู่ที่ร้อยละ 2 โดยปริมาตร รวมทั้งเส้นใยชนิดสั้น (Short Fiber) ยังมีประสิทธิภาพในการต้านทานแรงกระแทกได้ดีกว่าแบบยาวอีกด้วย [14], [15] ในกรณีของแรงระเบิดมีงานวิจัย

บางส่วนอธิบายว่าการเสริมเหล็กในคอนกรีต (Reinforced Concrete) ของคาน และพื้น เพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานแรงกระแทกได้ โดยทำให้ระยะการโก่งตัวสูงสุด (Maximum Deflection) และระยะโก่งตัวคงค้าง (Residual Deflection) ลดลง [16] อีกทั้งยังเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานแรงระเบิดได้ อย่างไรก็ตามการเสริมเหล็กหรือการเสริมเส้นใยเพียงอย่างเดียวยังคงทำให้เกิดความเสียหายที่รุนแรง โดยเกิดการทะลุ และมีเศษวัสดุปลิวหลุดร่อน อีกทั้งยังมีการศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตภายใต้แรงระเบิดหรือการออกแบบอาคารที่สามารถต้านทานแรงระเบิดได้ในส่วนน้อย จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาและพัฒนาโครงสร้างคอนกรีตในการต้านทานแรงระเบิด เพื่อลดการสูญเสีย และปกป้องชีวิตของประชาชน และเจ้าหน้าที่จากการก่อการร้าย งานวิจัยนี้ได้สังเกตเห็นผลกระทบของการสูญเสียดังกล่าวข้างต้น จึงมีแนวคิดในการต่อยอดการวิจัยและพัฒนาผนังมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็กเพื่อศึกษาผลของการระเบิดต่อผนังมอร์ต้าต่อไป

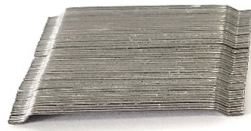
2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Portland Cement Type I) ทหยาละเอียดขนาด 0.30–1.19 มิลลิเมตร น้ำสะอาด และเส้นใยเหล็ก โดยเส้นใยเหล็กมีคุณสมบัติดังตารางที่ 1 และลักษณะของเส้นใยเหล็กดังรูปที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเส้นใยเหล็ก

คุณสมบัติ	รายละเอียด
กำลังรับแรงดึง	1345 MPa
โมดูลัสยืดหยุ่น	200000 MPa
ความเครียดที่ก้ำกัประลัย	0.8%
ความยาว (l)	35 mm
เส้นผ่านศูนย์กลาง (d)	0.55 mm
อัตราส่วนชะลูด (l/d)	65
ลักษณะ	ติดเป็นแพ ประสานกันด้วยกาวที่สามารถละลายน้ำได้



รูปที่ 1 เส้นใยเหล็ก

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

เตรียมตัวอย่างโดยการผสมปูนซีเมนต์และทรายให้เข้ากันเป็นเวลาประมาณ 1–2 นาที เติมน้ำสะอาดและผสมให้เข้ากันอีกเป็นเวลา 3 นาที แล้วจึงเติมเส้นใยเหล็กลงไปผสมเป็นเวลาอีก 3 นาที (สัดส่วนผสมดังตารางที่ 2) จากนั้นเมื่อผสมจนเข้ากันแล้ว เทใส่แบบหล่อขนาด 1,000 × 500 มิลลิเมตรหนา 60 มิลลิเมตร ที่วางเหล็กกลม (Round Bar) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร เป็นระยะห่าง 200 มิลลิเมตร โดยมีระยะหุ้มคอนกรีต (Covering) ประมาณ 30 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2 แล้วจึงปาดผิวหน้าให้เรียบแล้วหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นเป็นเวลา 1 วัน แล้วจึงถอดแบบและทำการบ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน เพื่อนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดและแรงดัดที่อายุ 28 วันตามมาตรฐาน ASTM C39 และ ASTM C78 ตามลำดับ ซึ่งมีผลทดสอบดังตารางที่ 3

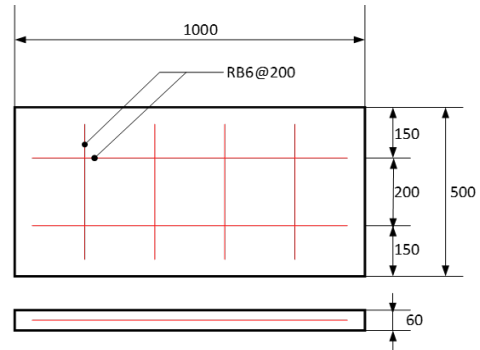
ตารางที่ 2 สัดส่วนผสม

ชื่อ	อัตราส่วนน้ำ ต่อปูนซีเมนต์	สัดส่วนผสม (kg/m ³)			
		ปูนซีเมนต์	น้ำ	ทราย	เส้นใยเหล็ก
M	0.40	580	230	1,600	0
SFRM	0.40				156

ตารางที่ 3 กำลังรับแรงอัดและดัดของมอร์ต้าและมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็ก

กำลัง (MPa)	M	SFRM
กำลังรับแรงอัดประลัย	30.9	28.0
กำลังรับแรงดัดประลัย	2.52	8.63

จากผลการทดสอบกำลังอัดและดัดของมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็กพบว่า ผลของการใส่เส้นใยเหล็กทำให้กำลังรับแรงดัดของมอร์ต้าเพิ่มขึ้น ตรงกันข้ามกลับทำให้กำลังรับแรงอัด

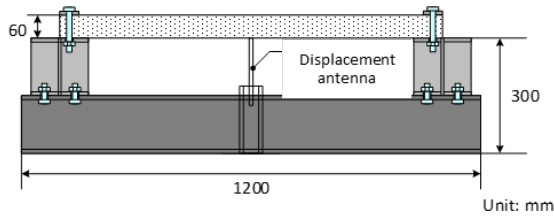


รูปที่ 2 ตัวอย่างแผ่นมอร์ต้าทดสอบ

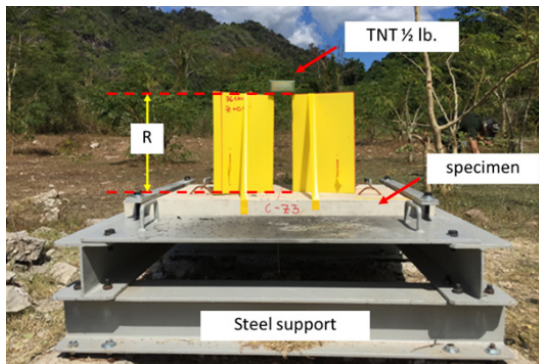
ประลัยลดลงเนื่องจากการเส้นใยเหล็กมีคุณสมบัติด้านการรับกำลังดึงเป็นหลัก และสามารถรับกำลังดึงได้สูง เมื่อทำการใส่เข้าไปผสมกลับคอนกรีตทำให้ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพในการรับแรงดึงและการรับแรงดัด เพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่เนื่องด้วยการใส่เส้นใยเหล็กในปริมาณสูง อาจจะทำให้เกิดช่องว่างหรือโพรงอากาศ ที่เกิดจากการอัดแน่นที่ไม่ดี จึงทำให้กำลังอัดลดลง [17]

2.3 วิธีการทดสอบการต้านทานระเบิด

การทดสอบการต้านทานแรงระเบิดของมอร์ต้าและมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็ก ตัวอย่างทดสอบจะถูกติดตั้งเข้ากับฐานรองรับที่ทำด้วยเหล็กรูป H-beam ขนาด 1200 × 1200 × 300 มิลลิเมตร ซึ่งทำการยึดรั้งแผ่นตัวอย่างไว้ที่ปลายทั้งสองด้าน ติดตั้งเสาวิหุญซึ่งนำมาใช้เป็นอุปกรณ์วัดการโก่งตัวสูงสุด (Maximum Deflection; δ_m) ไว้ที่บริเวณด้านกลางกึ่งกลางแผ่นทดสอบดังรูปที่ 3 แล้วจึงทำการติดตั้งวัตถุระเบิดชนิด TNT ขนาด 0.5 ปอนด์ ที่ระยะจากระยะปรับทอน (Z) เท่ากับ 0.55 0.65 และ 0.75 ดังรูปที่ 4 โดยพิจารณาและนำมาคำนวณย้อนกลับเป็นระยะห่างของระเบิด (R) กับแผ่นตัวอย่างทดสอบ ตามสมการที่ (1) [18] (จำนวนการทดสอบดังตารางที่ 4) ทำการบันทึกความเสียหายและระยะการโก่งตัวคงค้าง (Permanent Deflection; δ_p) ของแผ่นตัวอย่างหลังรับแรงระเบิด เพื่อศึกษาพฤติกรรมของมอร์ต้าและมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็กที่ระดับความรุนแรงของระเบิดแตกต่างกัน



รูปที่ 3 การติดตั้งตัวอย่างและอุปกรณ์ตรวจวัดระยะโก่งตัว



รูปที่ 4 การติดตั้งวัตถุระเบิด

$$Z = \frac{R}{W_E^{1/3}} \quad (1)$$

โดยที่ Z คือ ระยะปรับทอน (เมตร/กิโลกรัม^{1/3}) R คือ ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางวัตถุระเบิดกับเป้าหมาย (เมตร) และ W_E คือ น้ำหนักวัตถุระเบิดเทียบเท่าที่เอ็นที (กิโลกรัม)

ตารางที่ 4 ตัวอย่างการทดสอบ

ตัวอย่างมอร์ต้า	ระยะปรับทอน Z (m/kg ^{1/3})	ระยะห่างระเบิด R (m)	สัญลักษณ์
M	0.75	0.46	M-Z0.75
	0.65	0.40	M-Z0.65
	0.55	0.36	M-Z0.55
SFRM	0.75	0.46	SFRM-Z0.75
	0.65	0.40	SFRM-Z0.65
	0.55	0.36	SFRM-Z0.55

ข้อมูลการโก่งตัวถาวร (δ_p) ที่ได้จากการทดสอบสามารถนำไปประเมินระดับความเสียหายเบื้องต้นตามมาตรฐานของทหารช่างประเทศสหรัฐอเมริกา (PDC-TR 06-08) ได้ [19]

ซึ่งมีเกณฑ์การพิจารณาเกณฑ์ความเสียหายในลักษณะการวิบัติแบบโก่งตัว (Flexural Failure) ของชิ้นส่วนคอนกรีตเมื่อได้รับแรงระเบิดตามองศาการหมุนที่ฐานรองรับสูงสุด (Maximum Support Rotation; θ) ดังสมการที่ (2) และตารางที่ 5 นอกจากนี้มีการทดสอบกำลังรับแรงดัดของแผ่นมอร์ต้าก่อนและหลังการรับแรงระเบิดด้วย

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

โดยที่ θ คือ มุมการหมุนสูงสุดที่ฐานรองรับ (องศา) δ_p คือ ระยะโก่งตัวถาวร (เมตร) และ L คือ ระยะของฐานรองรับ (เมตร)

ตารางที่ 5 เกณฑ์การพิจารณาระดับความเสียหายเบื้องต้นตามมาตรฐาน (PDC-TR 06-08)

ระดับความเสียหาย	สภาพความเสียหายที่เกิดขึ้น	การหมุนที่ฐานรองรับสูงสุด	
		ไม่มีเหล็กเพิ่มกำลังเฉือน	มีเหล็กเพิ่มกำลังเฉือน
ระดับต่ำ (Superficial)	ไม่พบการเสียรูปถาวร มองไม่เห็นร่องรอยความเสียหาย	-	-
ระดับปานกลาง (Moderate)	เกิดการเสียรูปถาวรบางส่วนแต่สามารถซ่อมแซมได้ และสามารถเปลี่ยนชิ้นส่วนใหม่ได้หากพิจารณาแล้วว่ามี ความคุ้มค่าเพียงพอ	ไม่เกิน 2°	ไม่เกิน 4°
ระดับสูง (Heavy)	ชิ้นส่วนยังไม่ถึงขั้นวิบัติแต่มีการเสียรูปถาวรอย่างมากจนไม่สามารถซ่อมแซมได้	ไม่เกิน 5°	ไม่เกิน 6°
ระดับร้ายแรง (Hazardous)	ชิ้นส่วนเกิดสภาพวิบัติและมีสะเก็ดหลุดกระเด็นออกมาอย่างเห็นได้ชัดเจน	ไม่เกิน 10°	ไม่เกิน 10°
ระดับปลิวกระเด็น (Blowout)	ชิ้นส่วนถูกแรงระเบิดทำลายเป็นสะเก็ดหลุดกระเด็นด้วยความเร็วสูง	10° ขึ้นไป	10° ขึ้นไป

3. ผลการทดลอง

3.1 ความเสียหายของแผ่นตัวอย่างหลังได้รับแรงระเบิด

เมื่อทำการติดตั้งแผ่นตัวอย่างเข้ากับฐานรองรับพร้อมระเบิดที่เอ็นที ขนาด 0.5 ปอนด์ ระหว่างการระเบิดได้ทำการบันทึกภาพซึ่งทำให้เห็นพฤติกรรมของระเบิดดังรูปที่ 5 ระเบิดที่เอ็นทีที่ใช้มีลักษณะแท่งสี่เหลี่ยม (ปริซึมทรงสี่เหลี่ยม) ลักษณะการระเบิดเกิดเป็นลูกไฟพุ่งออกจากผิวทั้งหมดด้านบนจะหดตัวและพุ่งออกไปยังอากาศด้านบน โดยสามารถอธิบายพฤติกรรมทั่วไปของระเบิดได้คือ เมื่อเกิดการระเบิดคลื่นแรงดันอากาศจะแบ่งออกเป็น 2 เฟส ได้แก่ คลื่นแรงดันบวกหรือผลึกออก (Positive Impulse Phase) ซึ่งช่วงที่แรงดันระเบิดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนทำให้เกิดแรงดันสูงสุดกระทำต่อโครงสร้าง จากนั้นแรงดันจะลดลงไปอย่างต่อเนื่องจนถึงค่าแรงดันลบสูงสุด ซึ่งจะเป็นจุดที่อนุภาคอากาศเริ่มเกิดการไหลกลับทำให้แรงดันปรับเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเกิดสมดุลของแรงดัน (Negative Impulse Phase) [20]

หลังจากการระเบิดเสร็จสิ้น ทำการตรวจสอบความปลอดภัย จึงตรวจสอบความเสียหายของแผ่นตัวอย่าง พบว่า มอร์ดำธรรมดาที่ไม่ได้เสริมเส้นใยเหล็กเกิดการแตกร้าวที่บริเวณกึ่งกลางแผ่นในทุกๆ ระยะการปรับทอน (Z) ปรากฏเป็นเส้นที่ขีดในทิศทางด้านกว้างทั้งบริเวณด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นตัวอย่างคล้ายกับความเสียหายอันเนื่องมาจากแรงอัดแสดงดังรูปที่ 6 ความเสียหายนี้เกิดขึ้นเมื่อวัตถุระเบิดถูกติดตั้งห่างจากผิวของแผ่นตัวอย่าง และอยู่ในพื้นที่อิสระที่แรงระเบิดสามารถกระจายออกได้ [21] ซึ่งแตกต่างกับการติดตั้งวัตถุระเบิดไว้กับผิวของตัวอย่างที่แสดงให้เห็นถึงความเสียหายแบบกะเทาะ และเป็นรูทะลุในบริเวณที่ถูกแรงกระแทกจากระเบิด [12], [22]–[25] อีกทั้งการยึดรั้งแผ่นตัวอย่างไว้ที่ปลายทั้งสองข้างยังอาจส่งผลต่อรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นอีกด้วย

สำหรับมอร์ดำเสริมเส้นใยเหล็กพบว่า มอร์ดำเสริมเส้นใยนั้นมีประสิทธิภาพในการต้านทานแรงกระแทกจากระเบิดได้ดีกว่ามอร์ดำธรรมดา เห็นได้จากความเสียหายที่รุนแรงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับมอร์ดำธรรมดาที่ระยะปรับทอน (Z) เท่ากัน [26], [27] โดยที่ระยะปรับทอนเท่ากับ 0.75



วินาทีที่ 0

วินาทีที่ 0.1



วินาทีที่ 0.2

วินาทีที่ 0.3

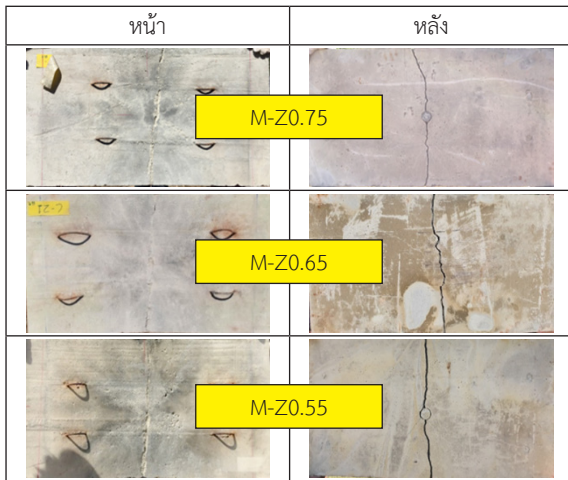


วินาทีที่ 0.4

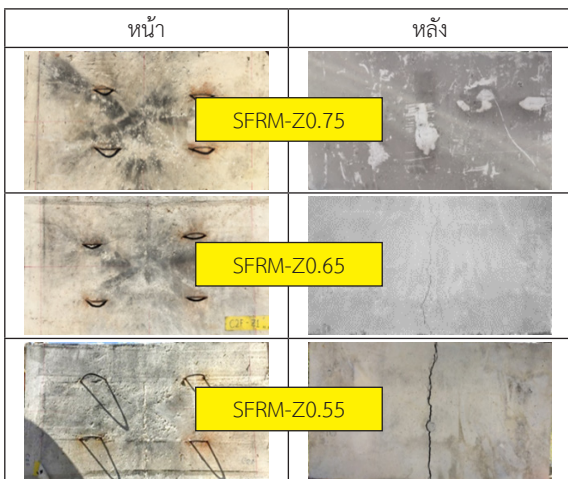
วินาทีที่ 0.5

รูปที่ 5 พฤติกรรมการระเบิดของ TNT

แผ่นตัวอย่างสามารถต้านทานระเบิดได้โดยไม่เกิดความเสียหายทั้งด้านหน้าและด้านหลัง พบเพียงแต่รอยไหม้อันเนื่องมาจากแรงระเบิดที่บริเวณผิวด้านหน้าเท่านั้น และเมื่อลดระยะปรับทอนเป็น 0.65 พบว่า แผ่นตัวอย่างเริ่มเกิดรอยร้าวบริเวณกึ่งกลางแผ่นคล้ายกับมอร์ดำที่ไม่ได้เสริมเส้นใยเหล็กแต่มีขนาดที่เล็กกว่า อีกทั้งยังพบการแตกร้าวเล็กๆ กระจายทั่วบริเวณ บ่งชี้ว่าเส้นใยเหล็กที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อมอร์ดำช่วยกระจายแรงดึงที่เกิดขึ้นจากแรงระเบิดและลดการแตกร้าวได้ [28], [29] แต่อย่างไรก็ตามเมื่อลดระยะปรับทอนลงจนเหลือ 0.55 หลังการระเบิดยังคงพบการแตกร้าวที่ชัดเจนบริเวณกึ่งกลางแผ่นคล้ายกับตัวอย่างมอร์ดำที่ไม่ได้เสริมเส้นใยเหล็ก ดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 ความเสียหายของมอร์ต้า



รูปที่ 7 ความเสียหายของมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็ก

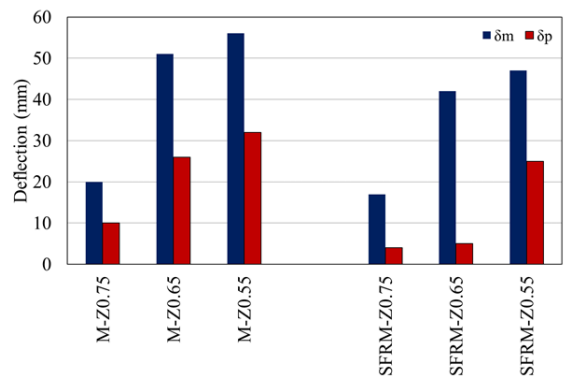
3.2 ระยะเวลาโก่งตัวสูงสุดและระยะโก่งตัวถาวร

ในขณะที่เกิดการระเบิด แรงกระแทกส่งผลให้แผ่นตัวอย่างเกิดการแอ่นตัวเป็นระยะการโก่งตัวสูงสุด (δ_m) จากนั้นระยะการแอ่นตัวจะเกิดดิ่งกลับ (Rebound) ทำให้เกิดระยะการโก่งตัวถาวร (δ_p) แสดงดังรูปที่ 8 ทั้งนี้เกิดจากการที่แผ่นตัวอย่างได้มีการเสริมกำลังด้วยเหล็กเสริมทำให้มีความสามารถรับกำลังดึงมากขึ้น และมีการคำนวณขนาดของระเบิดไม่ให้เกิดการทำลายจนไม่สามารถวัดค่าได้

จากผลการทดสอบพบว่า มอร์ต้าธรรมดา (M) มีระยะ



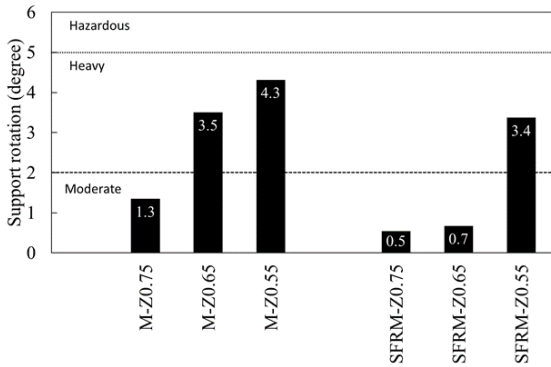
รูปที่ 8 ระยะการโก่งตัวถาวร



รูปที่ 9 ระยะโก่งตัว

โก่งตัวสูงสุดและระยะโก่งตัวถาวรที่สูงกว่ามอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็ก (SFRM) ดังรูปที่ 9 เป็นผลมาจากการที่เส้นใยเหล็กที่กระจายอยู่ของแผ่นแบบ SFRM สามารถช่วยกระจายแรงและปรับปรุงกำลังรับแรงดัดที่เกิดจากแรงระเบิดได้มากขึ้น เมื่อพิจารณาถึงผลของระยะปรับทอนต่อแผ่นตัวอย่าง ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่า เมื่อระยะปรับทอนลดลงหรือวัตถุระเบิดเข้าใกล้ตัวอย่างมากขึ้น ส่งผลทำให้ตัวอย่างเกิดความเสียหายและมีการโก่งตัวที่เพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ประเมินความเสียหายเบื้องต้นตามมาตรฐาน PDC-TR 06-08 ซึ่งพิจารณาองศาการหมุนที่ฐานรองรับสูงสุด จากการคำนวณด้วยสมการที่ (2) ดังรูปที่ 10 พบว่า มอร์ต้าธรรมดา (M) มีแนวโน้มในการเกิดความเสียหายในระดับรุนแรง (Heavy) การเสียรูปถาวรอย่างมาก จนไม่สามารถซ่อมแซมได้ ต่างจากมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็กที่เกิดการเสียหายในระดับปานกลาง (Moderate) ที่เกิดการเสียรูปถาวรบางส่วน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อระยะปรับทอนลดลงเท่ากับ 0.55 ยังคงทำให้เกิดความเสียหายที่รุนแรงต่อมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็กได้เช่นกัน

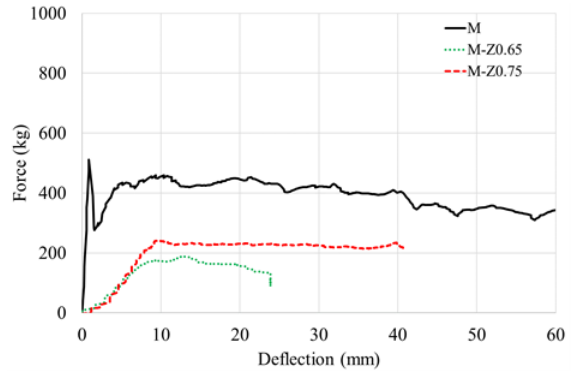


รูปที่ 10 องศาการหมุนที่ฐานรองรับสูงสุด

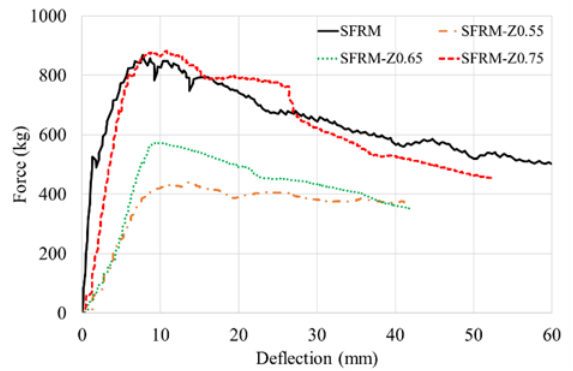
3.3 กำลังรับแรงดัดก่อนและหลังการระเบิด

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบความสามารถในการรับกำลังดัด ก่อน และหลังรับแรงกระแทกจากระเบิด ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะโก่งตัวภายใต้แรงดัดแสดงดังรูปที่ 11 (เนื่องจากตัวอย่าง M-Z0.55 เกิดความเสียหายที่รุนแรงจึงทำให้ไม่สามารถนำมาทดสอบกำลังรับแรงดัดหลังการระเบิดและเปรียบเทียบได้) พบว่า กำลังรับแรงดัดของแผ่นมอร์ต้า (M) และเสริมเส้นใยเหล็ก (SFRM) ก่อนรับแรงระเบิดจะมีแนวโน้มค่าที่สูงกว่ากำลังรับแรงดัดหลังจากรับแรงระเบิด โดยจากความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ามอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็กยังคงมีความสามารถในการรับกำลังดัดภายใต้การระเบิดได้สูงกว่ามอร์ต้าธรรมดาในทุกๆระยะปรับทอน โดยความสามารถในการรับกำลังดัดหลังการระเบิดจะมีแนวโน้มลดลงตามระยะปรับทอนทั้งในมอร์ต้าและมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็ก ยกเว้นในกรณีของมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็กที่ระยะปรับทอนเท่ากับ 0.75 (SFRM-Z0.75) แสดงให้เห็นว่ากำลังดัดและกำลังดัดคงค้างมีค่าใกล้เคียงกัน หรืออาจกล่าวได้ว่าแรงระเบิดไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังดัดของมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็กที่ระยะ $Z = 0.75$

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการใส่เส้นใยเหล็กมีส่วนช่วยยืดรั้วรอยแตกกว้างแล้วเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงระเบิดได้ดี



(ก) มอร์ต้า



(ข) มอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็ก

รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะโก่งตัวก่อนและหลังการทดสอบต้านทานแรงระเบิด

4. สรุปผลการทดสอบ

รูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่ามอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็กมีความเสียหายที่รุนแรงน้อยกว่ามอร์ต้าธรรมดาที่ระยะปรับทอน (Z) หรือที่แรงระเบิดเท่ากัน โดยที่ระยะ Z เท่ากับ 0.75 มอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็กไม่พบความเสียหายมีแต่เพียงรอยไหม้จากระเบิดที่บริเวณด้านที่สัมผัสกับระเบิดเท่านั้น แตกต่างกับมอร์ต้าธรรมดาที่เกิดการวิบัติแบบดัดหรือเกิดการร้าวขนาดใหญ่บริเวณกึ่งกลางแผ่นตัวอย่างทดสอบขึ้นในทุกๆระยะปรับทอนที่กำหนด

ระยะโก่งตัวสูงสุดและระยะโก่งตัวถาวร มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะปรับทอนที่ลดลง โดยมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็กแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของระยะโก่งตัวสูงสุดและระยะ

โค้งถาวรมากกว่ามอร์ต้าธรรมดา นอกจากนี้กำลังดัดคงค้างหลังจากได้รับแรงระเบิดของมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็กมีแนวโน้มสูงกว่ามอร์ต้าธรรมดาในทุกกรณีอีกด้วย กล่าวคือ การเสริมเส้นใยเหล็กสามารถช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพในการรับแรงดัดอันเนื่องมาจากแรงระเบิด ทำให้เกิดความเสียหายที่รุนแรงลดลงและมีคุณสมบัติด้านกำลังดัดที่ดีขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการทุนพัฒนาศักยภาพนักวิจัยด้านยุทธโศภกรณ์เพื่อเพิ่มศักยภาพของกองทัพและป้องกันประเทศ ประจำปีงบประมาณ 2562 ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่อนุเคราะห์สถานที่ในการจัดเตรียมตัวอย่างและเครื่องมือในการทดสอบ รวมทั้งขอขอบคุณผู้เชี่ยวชาญและโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าที่ให้ความอนุเคราะห์ในการจัดเตรียมวัสดุระเบิดและควบคุมการทดสอบในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Deep South Watch (DSW). (2021, July). *Deep South Watch*. [Online]. (in Thai). Available: <https://deepsouthwatch.org>
- [2] P. Sukontasukkul, S. Mindess, and N. Banthia, "Penetration resistance of hybrid fibre reinforced concrete under low velocity impact loading," Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Quebec, Canada, June 2002.
- [3] M. Nili, A. H. Ghorbankhani, A. AlaviNia, and M. Zolfaghari, "Assessing the impact strength of steel fibre-reinforced concrete under quasi-static and high velocity dynamic impacts." *Construction and Building Materials*, vol. 107, pp. 264–271, 2016.
- [4] X. Xu, T. Ma, and J. Ning, "Failure mechanism of reinforced concrete subjected to projectile," *Engineering Failure Analysis*, vol. 96, pp. 468–483, 2019.
- [5] T. Zhan, Z. Wang, and J. Ning, "Failure behaviors of reinforced concrete beams subjected to high impact loading," *Engineering Failure Analysis*, vol. 56, pp. 233–243, 2015.
- [6] D.Y. Yoo, U. Gohil, T. Gries, and Y.S. Yoon, "Comparative low-velocity impact response of textile-reinforced concrete and steel-fiber-reinforced concrete beams," *Journal of Composite Materials*, vol. 50, no. 17, pp. 2421–2431, 2016.
- [7] N. Banthia, P. Gupta, and C. Yan, "Impact resistance of fiber reinforced wet-mix shotcrete - Part I: beam tests," *Materials Structures*, vol. 32, no. 8, pp. 563–570, 1999.
- [8] V. Bindiganavile and N. Banthia, "Polymer and steel fiber-reinforced cementitious composites under impact loading-Part 2: Flexural toughness," *ACI Materials Journal*, vol. 98, no. 1, pp. 17–24, 2001.
- [9] P. Gupta, N. Banthia, and C. Yan, "Fiber reinforced wet-mix shotcrete under impact," *Journal of Materials Civil Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 81–90, 2000.
- [10] D. Y. Yoo and N. Banthia, "Impact resistance of fiber-reinforced concrete – A review," *Cement and Concrete Composites*, vol. 104, 2019.
- [11] 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.
- [12] S. Jamnam, B. Maho, A. Techaphatthanakon,



- Y. Sonoda, D. Y. 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.
- [13] R. Sovják, T. Vavriník, 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. 166–177, 2015.
- [14] P. Máca, R. Sovják, and P. Konvalinka, "Mix design of UHPFRC and its response to projectile impact," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 63, pp. 158–163, 2014
- [15] P. Máca, R. Sovják, and T. Vavriník, "Resistance of ultra high performance fibre reinforced concrete to projectile impact," in *Structures Under Shock and Impact XII*. UK: WIT Press, 2013, pp. 261–272.
- [16] D. Y. Yoo, N. Banthia, S. W. Kim, and Y. S. Yoon, "Response of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams with continuous steel reinforcement subjected to low-velocity impact loading," *Composite Structure*, vol. 126, pp. 233–245, 2015.
- [17] A. M. Zeyad, "Effect of fibers types on fresh properties and flexural toughness of self-compacting concrete," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 3, pp. 4147–4158, 2020.
- [18] W. D. Kennedy, *Explosions and explosives in air*, Washington DC, USA: NDRC, 1946.
- [19] PDC-TR 06-01, "Single Degree of Freedom Blast Design Spreadsheet (SBEDS) Methodology. Manual," U.S. Army Corps of Engineers Protective Design Center Technical Report, 2008.
- [20] TM-5-855-1, "Fundamentals of protective design for conventional weapons" *Washington DC, USA: Technical Manual*, US Department of the Army, 1986.
- [21] C. Wu, J. Li, and Y. Su, "Ultra-high performance concrete slabs under blast loads, Development of Ultra-High Performance Concrete Against Blasts From Materials to Structures," in *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*, Woodhead Publishing, 2018, pp. 95–213.
- [22] J. Li, C. Wu, and H. Hao, "Investigation of ultra-high performance concrete slab and normal strength concrete slab under contact explosion," *Engineering Structure*, vol. 102, pp. 395–408, 2015.
- [23] J. Li, C. Wu, H. Hao, Z. Wang, and Y. Su, "Experimental investigation of ultra-high performance concrete slabs under contact explosions," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 93, pp. 62–75, 2016.
- [24] B. Maho, P. Sukontasukkul, S. Jamnam, E. Yamaguchi, K. Fujikake, and N. Banthia, "Effect of rubber insertion on impact behavior of multilayer steel fiber reinforced concrete bulletproof panel," *Construction and Building Materials*, vol. 216, pp. 476–484, 2019.
- [25] B. Maho, S. Jamnam, P. Sukontasukkul, K. Fujikake, and N. Banthia, "Preliminary study on multilayer bulletproof concrete panel: impact energy absorption and failure pattern of fibre reinforced concrete, Para-rubber and styrofoam sheets,"



- Procedia Engineering*, vol. 210, pp. 369–376, 2017.
- [26] C. Wu, D.J. Oehlers, M. Rebstrost, J. Leach, and A.S. Whittaker, “Blast testing of ultra-high performance fibre and FRP-retrofitted concrete slabs,” *Engineering Structure*, vol. 31, no. 9, pp. 2060–2069, 2009.
- [27] D. Y. Yoo, N. Banthia, S. W. Kim, and Y. S. Yoon, “Response of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams with continuous steel reinforcement subjected to low-velocity impact loading,” *Composite Structure*, vol. 126, pp. 233–245, 2015.
- [28] B. M. Luccioni and M. Luege, “Concrete pavement slab under blast loads,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 32, pp. 1248–1266, 2006.
- [29] R. Hajek, M. Foglarand, and A. Kohoutkova “Recent development in blast performance of fiber-reinforced concrete,” *Materials Science and Engineering*, vol. 246, no. 1, 2017.