

ผลกระทบแรงระเบิดต่อปริมาณเหล็กปลอม ขนาดหน้าตัดและรูปร่างของเสาคอนกรีตทั่วไป

นายกษิติเดช โภคศลสานต์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ ไม่สังกัดภาควิชา/เทียบเท่า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

EFFECT OF BLAST LOAD ON THE STIRRUP AMOUNTS, SECTION AREA AND SHAPE OF
THE CONVENTIONAL REINFORCED CONCRETE COLUMN

Mr. Kasidech Kosolsarn

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Defense Engineering and Technology

Common Course

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบแรงระเบิดต่อปริมาณเหล็กปลอก ขนาดหน้าตัด และรูปร่างของเสาคอนกรีตทั่วไป
โดย	นายกษิต์เดช โกศลสานต์
สาขาวิชา	วิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรเทพ สมราช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ เสนจันทร์ชัย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรเทพ สมราช)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.การุณ จันทร์รางคุ)

กษิติเดช โภศลศานต์ : ผลกระทบแรงระเบิดต่อปริมาณเหล็กปลอก ขนาดหน้าตัดและ
รูปร่างของเสาคอนกรีตทั่วไป. (EFFECT OF BLAST LOAD ON THE STIRRUP
AMOUNTS, SECTION AREA AND SHAPE OF THE CONVENTIONAL
REINFORCED CONCRETE COLUMN) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.วิฑิต ปานสุข, อ.ที่
ปรึกษาร่วม : พ.ท. ผศ. ดร.อมรเทพ สมราช

ความไม่สงบในชายแดนภาคใต้ของประเทศไทย เกิดขึ้นตั้งแต่ปี 2491 เหตุการณ์ความไม่
สงบเริ่มรุนแรงขึ้นเป็นระยะ และเริ่มบานปลายหลังปี 2547 ผู้ก่อความไม่สงบใช้อาวุธปืน และวัตถุ
ระเบิดทำการก่อการร้ายในรูปแบบต่างๆ อาทิเช่น ทำลายอาคาร บ้านเรือน และโรงเรียน เป็นต้น
ซึ่งเหตุการณ์ความไม่สงบนี้ส่งผลกระทบต่อประชาชน เป็นจำนวนมาก รวมทั้งยังส่งผลกระทบต่อ
เศรษฐกิจของประเทศไทยอีกด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพิจารณาและวิเคราะห์
ความสามารถในการรับแรงระเบิด ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งเสาคอนกรีตเสริมเหล็กนี้ มี
ปริมาณเหล็กปลอก ขนาดหน้าตัดเสา และรูปร่างเสาที่แตกต่างกัน ในการวิจัยใช้ระเบิด
Trinitrotoluene (TNT) ปริมาณ 2 ปอนด์ เป็นอุปกรณ์หลักในการทดสอบเสา โดยมีระยะห่างจาก
เสาถึงจุดศูนย์กลางระเบิด 500 mm ในการทดสอบนี้มีการตรวจวัด การโก่งตัวของเสาและความ
ดันของระเบิดที่กระทำต่อเสา จากนั้นนำเสาที่ได้ทำการทดสอบระเบิดแล้วไปทดสอบหากำลังต้าน
แรงอัดของเสาเปรียบเทียบกับเสาที่ไม่ได้ทดสอบระเบิดด้วย ผลสรุปแสดงให้เห็นว่าเสาคอนกรีต
เสริมเหล็กมีความสามารถในการรับแรงระเบิดได้ เมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กปลอก ขนาดหน้าตัดเสา
และมีรูปร่างเสาอย่างเหมาะสม

สาขาวิชา	วิศวกรรมและเทคโนโลยีการ ป้องกันประเทศ	ลายมือชื่อนิสิต
ปีการศึกษา	2561	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5970106621 : MAJOR DEFENSE ENGINEERING AND TECHNOLOGY

KEYWORD: Reinforced Concrete Columns, Dynamic Response, Blast Loading

Kasidech Kosolsarn : EFFECT OF BLAST LOAD ON THE STIRRUP AMOUNTS, SECTION AREA AND SHAPE OF THE CONVENTIONAL REINFORCED CONCRETE COLUMN. Advisor: Assoc. Prof. Withit Pansuk, Ph.D. Co-advisor: Lt.Col. Asst. Prof. Amornthep Somraj, Ph.D.

There has been an unrest in the south of Thailand since 1948 This unrest has continue to be more aggressive periodically. The situation has got worsen after the year 2004. Terrorists have used guns and explosives to destroy buildings, houses ,schools etc., which terrorised people and hurt Thailand's economy. This experiment was conducted to analyse the effect of the explosion on various sizes and designs of reinforce concrete columns. In the experiment we used 2 pounds of Trinitrotolene as the main source of experiment on reinforce concrete columns.The distance between columns and explosive is 500 mm. There were test on resistant of the reinforce columns. The result prove that reinforce concrete column can resist the pressure of explosion when increase the size of reinforce to the size of column accordingly.

Field of Study: Defense Engineering and Technology	Student's Signature
Academic Year: 2018	Advisor's Signature
	Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ สำเร็จได้อย่างสมบูรณ์ เพราะได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจากรศ.ดร.วิฑิต ปานสุข และพท.ผศ.ดร.อมรเทพ สมราช ที่ได้กรุณาสละเวลาอันมีค่าอบรม สั่งสอน ให้คำปรึกษา และคำแนะนำ รวมทั้งการสนับสนุนค่าใช้จ่ายตลอดจนช่วยเหลือตรวจสอบ ตรวจสอบ แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง ขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ อย่างดียิ่งในระหว่างศึกษาเล่าเรียน

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกๆท่านจากหลายหน่วยงานดังนี้ หลักสูตรวิศวกรรมและเทคโนโลยีป้องกันประเทศ, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กองวิชาเคมี, กองวิชาโยธา ส่วนการศึกษา และส่วนการวิชาทหาร โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า, สถาบันและเทคโนโลยีป้องกันประเทศ และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ได้ให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือ อำนวยความสะดวก และให้ยืมอุปกรณ์ รวมทั้งสถานที่ เพื่อใช้ในการทดสอบทำให้การวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนในทุกๆด้าน และให้กำลังใจมาโดยตลอด จนงานวิจัยนี้สำเร็จเสร็จสมบูรณ์

กษิต์เดช โกศลสานต์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง	ง
กิตติกรรมประกาศ.....จ	จ
สารบัญ.....ฉ	ฉ
สารบัญรูป..... 1	1
สารบัญตาราง..... 1	1
สารบัญกราฟ..... 1	1
บทที่ 1 บทนำ..... 3	3
1.1 ภูมิหลัง..... 3	3
1.2 ความมุ่งหมายของงานวิจัย..... 5	5
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... 6	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย..... 6	6
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 7	7
2.1 วัตุระเบิด..... 8	8
2.1.1 พฤติกรรม และความเป็นมาของระเบิด..... 8	8
2.1.2 การปรับขนาดของการระเบิด..... 9	9
2.1.3 การระเบิดกลางอากาศแบบอิสระ (free air explosion)..... 10	10
2.2 หลักการป้องกัน และบรรเทาความเสียหายของโครงสร้างอาคารอันเนื่องมาจากแรงระเบิด.. 11	11
2.2.1 หลักการออกแบบโครงสร้างป้องกันระเบิด..... 11	11
2.2.2 การพิจารณาปัจจัยเสี่ยงของความเสียหายในโครงสร้างอาคาร เมื่อได้รับแรงระเบิด และ มาตรการรองรับ..... 14	14
2.3 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงระเบิด..... 15	15

2.3.1	ความเป็นมาเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	15
2.3.2	พฤติกรรมของเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	15
2.3.2.1	พฤติกรรมช่วงอิลาสติก.....	15
2.3.2.2	พฤติกรรมช่วงพลาสติก.....	17
2.3.3	การพิจารณาปัจจัยที่เพิ่มความแข็งแรงในการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	18
2.3.3.1	ปริมาณเหล็กปลอก.....	19
2.3.3.2	ขนาดหน้าตัดเสา.....	20
2.3.3.3	รูปร่างของเสา.....	21
2.4	พฤติกรรมของวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้อัตราความเครียดสูง (High strain rate).....	21
2.4.1	ค่า DIF ของคอนกรีต.....	23
2.4.2	ค่า DIF ของเหล็กเส้น.....	25
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
บทที่ 3	วิธีการดำเนินงาน.....	29
3.1	วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	29
3.1.1	วัสดุที่ใช้ในการผลิตเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	29
3.1.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำทดสอบ.....	29
3.2	สถานที่ในการทำวิจัย.....	35
3.2.1	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	35
3.2.2	โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า.....	35
3.3	ขั้นตอนในการวิจัย.....	35
3.3.1	วางแผน และออกแบบ.....	35
3.3.2	การหล่อขึ้นรูปเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	39
3.3.3	การติดตั้งแท่นทดสอบ.....	41
3.3.4	การทดสอบแรงระเบิด การทดสอบภาคสถิติศาสตร์ และวิเคราะห์ผล.....	43

3.4 แผนภาพการดำเนินงาน.....	46
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	47
4.1 การศึกษาความรุนแรงของวัฏระเบิด.....	47
4.2 การศึกษาสภาพความเสียหายเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหลังจากที่ทดสอบระเบิด.....	53
4.3 การศึกษาความเครียดของเหล็กยื่นภายในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	63
4.4 การศึกษาการโก่งตัวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	72
4.5 การศึกษากำลังต้านทานแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	75
บทที่ 5 สรุป และอภิปรายผล.....	96
5.1 อภิปรายผลการวิจัย.....	96
5.2 ข้อเสนอแนะของงานวิจัย.....	99
5.3 สรุปโดยรวม.....	100
บรรณานุกรม.....	101
ประวัติผู้เขียน.....	104

สารบัญรูป

รูปที่ 1 สิ่งก่อสร้างในอดีตของประเทศไทย.....	3
รูปที่ 2 สิ่งก่อสร้างในปัจจุบันที่ใช้วิธีก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	3
รูปที่ 3 ลักษณะการระเบิดกลางอากาศแบบอิสระ.....	11
รูปที่ 4 ขั้นตอนในการพิจารณาการออกแบบโครงสร้างต้านทานแรงระเบิด (แหล่งข้อมูล Progressive Collapse Risk Analysis: Literature Survey, Relevant Construction Standards and Guidelines).....	13
รูปที่ 5 การถ่ายแรงต่อเนื่องในแนวระนาบและแนวตั้ง.....	14
รูปที่ 6 ระยะเรียงเหล็กปลอกในบริเวณปลายเสาที่เชื่อมต่อกับคานทั้งบน และล่าง.....	20
รูปที่ 7 พฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อได้รับผลจากแรงระเบิด.....	22
รูปที่ 8 แทนทดสอบ.....	29
รูปที่ 9 แทนติดตั้งวัตถุระเบิด.....	30
รูปที่ 10 แทนติดตั้ง Pressure gauge (ก.)ด้านหน้า, (ข.)ด้านข้าง.....	30
รูปที่ 11 วัตถุระเบิด TNT ขนาด 0.91 kg (2 ปอนด์).....	30
รูปที่ 12 แม่แรงไฮดรอลิก ขนาด 100 ตัน.....	31
รูปที่ 13 กล้องบันทึกภาพความเร็วสูง.....	31
รูปที่ 14 เครื่องทดสอบ Universal Testing machine Amsler ขนาด 500 ตัน.....	32
รูปที่ 15 เครื่องทดสอบ Test Material Compression machine.....	32
รูปที่ 16 เครื่องทดสอบ Universal Testing machine Amsler capacity ขนาด 20 ตัน.....	33
รูปที่ 17 Pressure gauge 200 MPa.....	33
รูปที่ 18 Strain gauge.....	33
รูปที่ 19 Bridge box.....	34
รูปที่ 20 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger).....	34
รูปที่ 21 อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัว.....	34

รูปที่ 22 แบบจำลองเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในงานวิจัย	36
รูปที่ 23 ตำแหน่งติด Strain gauge (T0, T1, T2 และ T3)	36
รูปที่ 24 แบบแท่นทดสอบที่ใช้ในการทดสอบระเบิด	39
รูปที่ 25 การจัดเรียงตัวของเหล็กเสริมเหล็กปลอก และระยะการติด strain gauge	39
รูปที่ 26 ติดตั้งแบบหล่อเสา และนำเหล็กวางเหล็กที่ได้ทำการสร้างไว้ภายในแบบหล่อ (ก.)แบบหล่อ เสาสี่เหลี่ยม (ข.)แบบหล่อเสากลม.....	40
รูปที่ 27 การหล่อเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	40
รูปที่ 28 เสาคอนกรีตที่ได้รับการบ่มเป็นเวลา 28 วัน.....	41
รูปที่ 29 การจัดซื้อจัดจ้างประกอบแท่นทดสอบ (ก.)การทำประกอบแท่นทดสอบ.....	41
รูปที่ 30 การปรับสถานที่ที่ใช้ในการทดสอบและขุดดินเตรียมเพื่อเตรียมติดตั้ง.....	42
รูปที่ 31 ติดตั้งแท่นทดสอบ แท่นซัพพอร์ต และหล่อฐานรากของแท่นทดสอบ	42
รูปที่ 32 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กถูกติดตั้งบนแท่นทดสอบ	43
รูปที่ 33 ติดตั้งแม่แรงไฮดรอลิค บนแท่นซัพพอร์ต.....	43
รูปที่ 34 ติดตั้งอุปกรณ์กล้องบันทึกภาพความเร็วสูง	44
รูปที่ 35 ติดตั้งอุปกรณ์ Pressure gauge ยึดติดกับแท่นทดสอบ (ก.)ด้านหน้า (ข.)ด้านหลัง	44
รูปที่ 36 ติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวของเสา.....	45
รูปที่ 37 การบรรจุ Bridge box และ Data logger ในกล่องเหล็กและวิธีป้องกันป้องกันโดยวาง รถยนต์ทำเป็นกำแพงต้านแรงระเบิดไว้บริเวณด้านหลังเสาซัพพอร์ต (ก.) Bridge box และ Data logger บรรจุในกล่องเหล็ก (ข.)กำแพงวางรถยนต์ป้องกันกล่องเหล็ก.....	45
รูปที่ 38 ติดตั้งวัตถุระเบิด TNT ขนาด 0.91 kg ไว้ที่จุดกึ่งกลางของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	45
รูปที่ 39 แรงระเบิด และเปลวไฟจากระเบิด TNT 2 ปอนด์ กระทำต่อเสา NRC-50-1 (ก.)เริ่มจุด ระเบิด แรงระเบิดเริ่มกำลังกระทำต่อเสาที่เวลา 0.2770 s (ข.)แรงระเบิดกระทำต่อเสาที่เวลา 0.2773 s (ค.)แรงระเบิดที่กระทำต่อเสาที่เวลา 0.2803 s (ง.)แรงระเบิดที่กระทำต่อเสาที่เวลา 0.2893 s	53
รูปที่ 40 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดเสา 200x200 mm ความสูง 2500 mm ระยะ เหล็กปลอก 180 ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 290 mm (ก.)ด้านหน้า (ข.)ด้านหลัง.....	54

รูปที่ 54 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-STA หลังการทดสอบ.....	78
รูปที่ 55 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-S31-50-STA ก่อนการทดสอบ	79
รูปที่ 56 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-S31-50-STA หลังการทดสอบ.....	80
รูปที่ 57 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-S31-STA ก่อนการทดสอบ	81
รูปที่ 58 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-S31-STA หลังการทดสอบ.....	81
รูปที่ 59 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-S62-50-STA ก่อนการทดสอบ	82
รูปที่ 60 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-S62-50-STA หลังการทดสอบ.....	83
รูปที่ 61 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-S62-STA ก่อนการทดสอบ	84
รูปที่ 62 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-S62-STA หลังการทดสอบ.....	85
รูปที่ 63 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-Large-50-STA ก่อนการทดสอบ ...	86
รูปที่ 64 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-Large-50-STA หลังการทดสอบ ...	87
รูปที่ 65 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-Large-STA ก่อนการทดสอบ.....	88
รูปที่ 66 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-Large-STA หลังการทดสอบ	89
รูปที่ 67 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-Round-50-STA ก่อนการทดสอบ (ก.), (ข.)ด้านหน้า.....	89
รูปที่ 68 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-Round-50-STA หลังการทดสอบ (ก.), (ข.)ด้านหน้า.....	90
รูปที่ 69 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-Round-STA ก่อนการทดสอบ	90
รูปที่ 70 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-Round-50-STA หลังการทดสอบ (ก.)ด้านหน้า (ข.)ด้านหลัง.....	90
รูปที่ 71 การทดสอบแรงอัดลูกปูน (ก.)การทดสอบครั้งที่ 4 (ข.)การทดสอบครั้งที่ 6	91
รูปที่ 72 การทดสอบแรงดึงของเหล็ก (ก.)กำลังทดสอบแรงดึงของเหล็ก.....	91

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 ค่า DIF ของคอนกรีต (TM 5-1300, 1990).....	24
ตารางที่ 2 ค่า DIF ของเหล็กเส้นประเภท เหล็กกล้าไร้สนิม, เหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็น, อลูมิเนียม.....	25
ตารางที่ 3 กำหนดการทดสอบระเบิดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีปริมาณเหล็กปลอก ขนาดหน้าตัด และรูปร่างแตกต่างกัน.....	37
ตารางที่ 4 กำหนดการภาคสถิติศาสตร์ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีปริมาณเหล็กปลอก ขนาดหน้าตัด และรูปร่างแตกต่างกัน.....	38
ตารางที่ 5 ค่าความรุนแรงของแรงระเบิด.....	48
ตารางที่ 6 การโค้งตัวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสูงสุดในช่วงขณะที่แรงระเบิดกระทำต่อเสาในช่วงเวลานั้น.....	73
ตารางที่ 7 ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้รับการทดสอบระเบิด.....	93
ตารางที่ 8 ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับการทดสอบระเบิด.....	94
ตารางที่ 9 ค่าแรงอัดที่กระทำต่อลูกปูน.....	94
ตารางที่ 10 ค่าแรงดึงที่กระทำต่อเหล็กเส้น.....	95

สารบัญกราฟ

กราฟที่ 1 อุปสงค์ อุปทาน และยอดขายคอนกรีตในกรุงเทพฯ.....	4
กราฟที่ 2 สถิติเหตุการณ์ก่อความไม่สงบใน 3 จังหวัดชายแดนภาคใต้ ระหว่างปีพุทธศักราช 2547-2558 (แหล่งข้อมูล https://www.thairath.co.th/content/718918)	5
กราฟที่ 3 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับเวลาของปฏิกิริยาจากการระเบิด.....	8
กราฟที่ 4 ความสัมพันธ์ความเค้น และความเครียดของคอนกรีต	22
กราฟที่ 5 ความสัมพันธ์ความเค้น และความเครียดของเหล็กเส้น	23
กราฟที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน และเวลาของแรงระเบิดของเสา NRC ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 500 mm	49
กราฟที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน และเวลาของแรงระเบิดของเสา NRC-S31 ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 500 mm	49
กราฟที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน และเวลาของแรงระเบิดของเสา NRC-S62 ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 500 mm	50
กราฟที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน และเวลาของแรงระเบิดของเสา NRC-Large ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 500 mm.....	50
กราฟที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน และเวลาของแรงระเบิดของเสา NRC-Round ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 500 mm.....	51
กราฟที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแรงระเบิด TNT ช่วงบวก และระยะปรับทอนของการระเบิดกลางอากาศ (ที่มา: Unified Facilities Criteria: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions (UFC 3-340-02))[17]	52
กราฟที่ 12 การตอบสนองของความเครียดในเหล็กยื่นเมื่อได้รับแรงระเบิด.....	64
กราฟที่ 13 การเปลี่ยนแปลงความเครียดช่วงเริ่มต้นรับแรงระเบิดของเสาประเภท NRC-50.....	65
กราฟที่ 14 การเปลี่ยนแปลงความเครียดช่วงเริ่มต้นรับแรงระเบิดของเสาประเภท NRC-S31-50....	65
กราฟที่ 15 การเปลี่ยนแปลงความเครียดช่วงเริ่มต้นรับแรงระเบิดของเสาประเภท NRC-S62-50....	66
กราฟที่ 16 การเปลี่ยนแปลงความเครียดช่วงเริ่มต้นรับแรงระเบิดของเสาประเภท NRC-Large	66

กราฟที่ 17 เปรียบเทียบความเครียดที่จุด T0 ของเสาประเภท NRC, NRC-S31 และ NRC-S62	67
กราฟที่ 18 เปรียบเทียบความเครียดที่จุด T1 ของเสาประเภท NRC, NRC-S31 และ NRC-S62	67
กราฟที่ 19 เปรียบเทียบความเครียดที่จุด T3 ของเสาประเภท NRC-S31 และ NRC-S62	68
กราฟที่ 20 เปรียบเทียบความเครียดที่จุด T0 ของเสาประเภท NRC และ NRC-Large	68
กราฟที่ 21 เปรียบเทียบความเครียดที่จุด T1 ของเสาประเภท NRC และ NRC-Large	69
กราฟที่ 22 เปรียบเทียบปริมาณของคอนกรีตที่เหลือของเสาแต่ละประเภท	72
กราฟที่ 23 เปรียบเทียบมุมการโก่งตัวสูงสุดของเสาแต่ละประเภท	74

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ภูมิหลัง

ประเทศไทยเป็นประเทศมีอดีตและความเป็นมาอันยาวนาน เช่นการเมืองการปกครอง วัฒนธรรม ประเพณี ศิลปะประติมากรรมต่างๆ ดังนั้นถ้าพูดความเป็นมาในการสร้างบ้านเรือนแล้วนั้น ก็มีความเป็นมาเวลานานมากเช่นกัน โดยการพัฒนาจากหินมาเป็นไม้ เช่นปราสาทหิน บ้านเรือนไทย สะพานตามรูปที่ 1



(ก.) ปราสาทหิน



(ข.) บ้านเรือนไทย

รูปที่ 1 สิ่งก่อสร้างในอดีตของประเทศไทย

ในเวลาต่อมาได้มีการนำเหล็กและปูนเข้ามาเป็นส่วนหนึ่งในการสร้างบ้านเรือนตามยุคสมัย เช่น อาคารสูง สะพาน ทางด่วนตามรูปที่ 2



(ก.) อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก



(ข.) สะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก

รูปที่ 2 สิ่งก่อสร้างในปัจจุบันที่ใช้วิธีก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศที่กำลังพัฒนาในด้านเศรษฐกิจ มีอัตราการสร้างอาคารบ้านเรือนที่สูงมากวัดจากอุปสงค์ อุปทาน และยอดขายจากคอนโดมิเนียมในกรุงเทพฯตามกราฟที่ 1

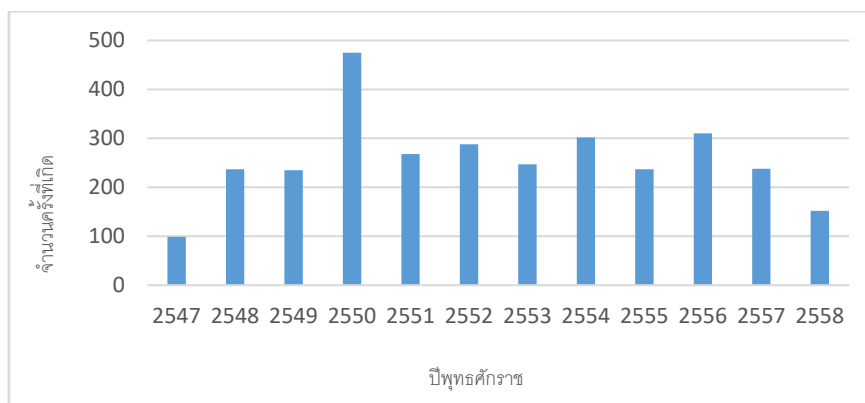


กราฟที่ 1 อุปสงค์ อุปทาน และยอดขายคอนโดมิเนียมในกรุงเทพฯ
(แหล่งข้อมูล

<http://www.realist.co.th/blog/%E0%B8%AD%E0%B8%AA%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%AB%E0%B8%B2-2560/>)

ดังนั้นเราจะพบเห็นกระบวนการก่อสร้างอาคาร บ้านเรือนเป็นจำนวนมากเพื่อมาตอบสนองต่อความต้องการของเศรษฐกิจในประเทศไทย

เมื่อประมาณ 10 ปีที่ผ่านมา ได้เกิดเหตุการณ์ความไม่สงบทางภาคใต้ที่มีการเรียกร้องขอแบ่งแยกดินแดนจากผู้ก่อความไม่สงบ ซึ่งใช้ยุทธวิธีที่โหดร้ายและรุนแรง เช่น การทำร้ายด้วยอาวุธปืน และวัตถุระเบิดประเภทต่างๆ โดยการก่อเหตุที่ส่งผลกระทบต่อผู้คนจำนวนมากนั้น คือระเบิดแสวงเครื่องจะถูกวางไว้ตามแหล่งสัญจรในชุมชน อาคารบ้านเรือน และระเบิดที่วางอยู่ยานพาหนะ (Car bomb) ซึ่งเหตุก่อความไม่สงบในแต่ละครั้งที่ผ่านมาล้วนแต่จะทวีความรุนแรงมากขึ้นทำให้ผลกระทบเหล่านั้นส่งผลกระทบต่อประชาชน อาคารบ้านเรือน หรือทรัพย์สินเสียหายอย่างมากเช่นเหตุการณ์ระเบิดปัตตานี 11 จุด ยะลา 4 จุด นราธิวาส 8 จุด และเผาเสาไฟฟ้าอีกจำนวนหนึ่งในวันที่ 6 เมษายน 2560 (แหล่งข้อมูล <http://news.thaipbs.or.th/content/261453> ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในเหตุการณ์ก่อความไม่สงบที่เกิดขึ้นในแต่ละปีของ 3 จังหวัดชายแดนภาคใต้ โดยแต่ละปีมีจำนวนในการเกิดเหตุการณ์ก่อความไม่สงบ) ตามกราฟที่ 2



กราฟที่ 2 สถิติเหตุการณ์ก่อความไม่สงบใน 3 จังหวัดชายแดนภาคใต้ ระหว่างปีพุทธศักราช 2547-2558 (แหล่งข้อมูล <https://www.thairath.co.th/content/718918>)

เพราะฉะนั้นงานวิจัยนี้มีความประสงค์ที่จะทำการปกป้อง หรือบรรเทาความเสียหายจากระเบิด ที่มาทำลายต่อโครงสร้างของอาคารบ้านเรือน

เพื่อเป็นการป้องกัน และบรรเทาความเสียหายของอาคารที่มีความเสี่ยงต่อการรับแรงระเบิด งานวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กต้านทานแรงระเบิด โดยการใช้หลักการเพิ่มกำลังชั้นส่วนภายในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นพื้นฐานที่ช่วยเพิ่มกำลัง หรือลดทอนความเสียหายของเสาคอนกรีต ได้มากน้อยเพียงใด ปัจจัยสำคัญที่ช่วยลดความเสียหายของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องมาเป็นตัวแปรในการทดลองนี้ได้แก่ การเพิ่มปริมาณเหล็กปลอก ขนาดหน้าตัดเสา รูปร่างของเสา ปัจจัยการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่กล่าวมาเป็นวิธีที่ง่าย สะดวก และมีพื้นฐานในการทำงานอยู่แล้วจึงง่ายต่อการนำไปใช้จริงเพื่อช่วยให้ป้องกัน บรรเทา และลดผลกระทบจากการระเบิดได้นับเป็นการลดความเสียหายทั้งชีวิต และทรัพย์สิน

1.2 ความมุ่งหมายของงานวิจัย

ในงานวิจัยเล่มนี้ผู้วิจัยมีจุดมุ่งหมาย ดังนี้

1. เพื่อพิจารณาสภาพความเสียหายของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อได้รับแรงระเบิด
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติการต้านทานแรงระเบิดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในการออกแบบปัจจุบันที่เป็นการเพิ่มปริมาณเหล็กปลอก เปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดเสา และรูปร่างหน้าตัดเสา

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการเพิ่มคุณสมบัติต้านทานแรงระเบิดโดยการเพิ่มปริมาณเหล็กปลอก เปลี่ยนแปลงขนาดหน้าตัดเสา และรูปร่างของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยกระบวนการทางวิศวกรรม
2. ใช้ปริมาณระเบิด Trinitrotoluene (TNT) 0.91 kg (2ปอนด์) ที่ระยะห่างจุดศูนย์กลางระเบิด 290 mm และ 500 mm เพื่อศึกษารอยแตกร้าวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก
3. นำเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีปริมาณเหล็กปลอก ขนาดหน้าตัดเสา และรูปร่างของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่แตกต่างกัน ไปทดสอบความเหนียวด้วยการระเบิดจาก TNT

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. ได้รับรู้กระบวนการต้านทานแรงระเบิดด้วยการเพิ่มปริมาณเหล็กปลอก เปลี่ยนแปลงขนาดหน้าตัดเสา และรูปร่างที่แตกต่างกัน
2. ได้ทราบถึงพฤติกรรมการแตกร้าว และความเสียหายของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีปริมาณเหล็กปลอก ขนาดหน้าตัดเสา และรูปร่างที่แตกต่างกันเมื่อได้รับแรงระเบิด
3. ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติความเหนียวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อมีปริมาณเหล็กปลอก ขนาดหน้าตัดเสา และรูปร่างแตกต่างกัน

บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ตามหัวข้อต่อไปนี้

2.1 วัตุระเบิด

2.1.1 พฤติกรรม และความเป็นมาของระเบิด

2.1.2 การปรับขนาดของการระเบิด

2.1.3 การระเบิดกลางอากาศแบบอิสระ (free air explosion)

2.2 หลักการป้องกัน และบรรเทาความเสียหายของโครงสร้างอาคารอันเนื่องมาจากแรงระเบิด

2.2.1 หลักการออกแบบโครงสร้างป้องกันระเบิด

2.2.2 การพิจารณาปัจจัยเสี่ยงของความเสียหายในโครงสร้างอาคารเมื่อได้รับแรงระเบิด และมาตรการรองรับ

2.3 เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.3.1 ความเป็นมาเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.3.2 พฤติกรรมของเสาต้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.4 พฤติกรรมของวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้อัตราความเครียดสูง (High strain rate)

2.4.1 ค่า DIF ของคอนกรีต

2.4.2 ค่า DIF ของเหล็ก

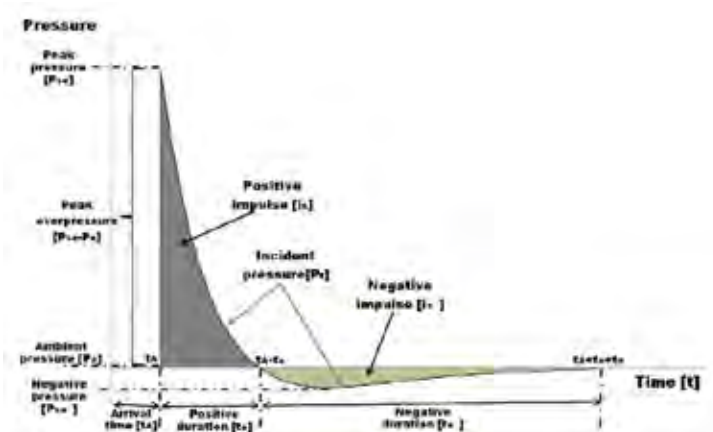
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัตถุระเบิด

2.1.1 พฤติกรรม และความเป็นมาของระเบิด

วัตถุระเบิดเป็นการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีโดยจะเกิดการสลายตัวของสารตั้งต้นที่เป็นส่วนเชื้อเพลิง (Fuel) และสารให้ออกซิเจน (oxygen) โดยวัตถุระเบิดแต่ละชนิดมีความเสถียร ความไวในการเกิดปฏิกิริยา ความเร็วการประทุที่แตกต่างกันออกไป ส่งผลต่อปริมาณก๊าซ ความร้อน และความดันที่แตกต่างกันออกไป เช่นวัตถุระเบิดบางประเภทให้ความร้อนออกมามากกว่าก๊าซ และความดันเป็นต้น เราสามารถจำแนกประเภทวัตถุระเบิดตามปฏิกิริยาการสลายตัวของวัตถุระเบิดเป็นระเบิดแรงสูง และระเบิดแรงต่ำ

วัตถุระเบิดแรงสูง (High Explosive)[1] เกิดจากการปะทุขึ้น ซึ่งจะต้องเกิดจากปฏิกิริยาเคมีเมื่อสารตั้งต้นของวัตถุระเบิดสลายตัวได้เป็นความดันที่มีความเร็วในการเคลื่อนตัวมีค่าระหว่าง 4400-9200 m/s[2] เมื่อเกิดการปะทุจากปฏิกิริยาเคมีจะเปลี่ยนสถานะของวัตถุระเบิดจากสถานะแข็ง หรือของเหลวเปลี่ยนเป็นสถานะก๊าซ โดยที่ก๊าซนั้นมีความดันสูง (Overpressure) ที่สภาวะความร้อนและความหนาแน่นสูงที่เกิดการขยายตัวออกจากจุดศูนย์กลางการระเบิด ทำให้คลื่นกระแทก (Shock Wave) เคลื่อนผ่านอากาศไป ขณะที่คลื่นเคลื่อนที่ออกไปนั้นความเร็วในการเคลื่อนที่ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไปกระทบกับกับโครงสร้าง หรือวัสดุใดๆ โครงสร้าง และวัสดุนั้นจะถูกล้อมรอบด้วยความดันของระเบิด (Side-on overpressure) นั้นไว้ ซึ่งการเกิดแบบนี้มีปัจจัยได้แก่คุณสมบัติของระเบิด, ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางศูนย์กลางระเบิด, ปริมาณของวัตถุระเบิด และการขยายตัวของความดันระเบิดจากการกระทบกับพื้นดิน โครงสร้าง หรือวัสดุใดๆ โดยที่สามารถเขียนแผนภาพของความดันกับเวลาได้ตามกราฟที่ 3



กราฟที่ 3 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับเวลาของปฏิกิริยาจากการระเบิด (แหล่งข้อมูล https://www.researchgate.net/figure/314417544_fig8_Figure-10-Ideal-blast-wave-pressure-time-history)

จากกราฟที่ 3 สามารถแสดงสมการความดันสูงสุด ของ Friedlander's

$$P(t) = \begin{cases} 0 & , t < t_a \\ P_{max} \left(1 - \frac{t - t_a}{t_d}\right) e^{-b\left(\frac{t-t_a}{t_d}\right)} & , t_a \leq t \leq t_a + t_d \\ 0 & , t > t_a + t_d \end{cases} \quad (2.1)$$

เมื่อ

$P(t)$ = ความดันสูงสุดในเวลา t หลังจากระเบิด

P_{max} = ความดันสูงสุด (kPa)

t_a = ระยะเวลาที่ความดันเดินทางจากจุดศูนย์กลางระเบิดถึงจุดพิจารณา (mm)

t_d = ระยะเวลาที่ความดันระเบิดเทียบเท่า ลดลงจากความดันสูงสุดเป็นศูนย์ หรือเรียกว่าระยะเวลาที่เป็นความดันช่วงบวก (mm)

ปัจจัยทั้ง 3 ข้อที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้ทราบแรงดล ระยะเวลา และผลกระทบตามของการเกิดระเบิดได้ ได้แก่ Ammonium Nitrate, TNT เป็นต้น นอกจากวัตถุระเบิดแรงสูงแล้ว ยังมีวัตถุระเบิดอีกประเภทหนึ่งเรียกว่า วัตถุระเบิดแรงต่ำ ซึ่งเป็นวัตถุระเบิดที่มีความเร็วในการระเบิดอยู่ระหว่าง 10-400 m/s เป็นการเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีที่มีส่วนผสมหลัก คือ ดินดำ (Black powder) ทำให้ส่วนผสมที่เป็นของแข็งเปลี่ยนเป็นก๊าซ และความร้อนเช่นกัน แต่ความดันที่เกิดขึ้นมีค่าไม่สูงมาก เนื่องจากมีอัตราการสลายตัวที่ต่ำ โดยวัตถุระเบิดความดัน ได้แก่ พลุ่ ดินส่งกระสุน เป็นต้น

2.1.2 การปรับขนาดของการระเบิด

ความดันระเบิดเมื่อถูกจุดขึ้นจะมีค่าความดันสูงสุด มีค่ามาก หรือน้อยนอกจากชนิดของวัตถุระเบิดแล้วนั้น ยังขึ้นอยู่กับน้ำหนักของวัตถุระเบิด และระยะห่างจุดศูนย์กลางระเบิด ดังนั้นจึงมีวิธีที่สามารถทำการปรับขนาดของวัตถุระเบิดได้ 2 วิธีคือ วิธี Sach's scaling และวิธี Hopkinson scaling เพื่อความเหมาะสมในใช้งานสำหรับงานวิจัยนี้ ขอแนะนำในวิธี Hopkinson scaling เนื่องจากเป็นวิธีที่เพียงพอสำหรับการระเบิดแบบธรรมดาของวัตถุระเบิดแรงสูง มีสมการดังนี้

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (2.2)$$

เมื่อ

Z = ระยะปรับทอน ($m/kg^{1/3}$)

R = ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด (m)

W = น้ำหนักวัตถุระเบิดเทียบเท่า TNT (kg)

วัตถุระเบิดทุกชนิดก่อนทำการคำนวณ ต้องทำการหาน้ำหนักวัตถุที่เทียบเท่า TNT เสียก่อนมีสมการดังนี้

$$W_{TNT} = \frac{H_{exp}}{H_{TNT}} W_{exp} \quad (2.3)$$

เมื่อ

W_{exp} = น้ำหนักของวัตถุระเบิดที่ใช้

H_{exp} = ความร้อนจากการระเบิดของวัตถุระเบิดที่ใช้

H_{TNT} = ความร้อนจากการระเบิดของ TNT

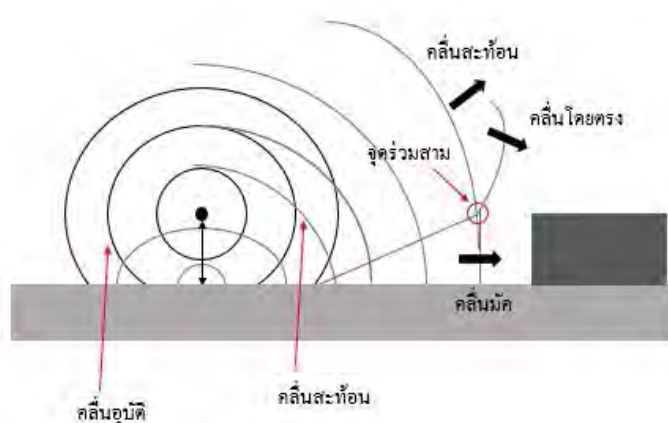
จากสมการ 2.3 สามารถคำนวณหาอัตราส่วนของพลังงานที่ออกมาของวัตถุระเบิดที่ใช้กับวัตถุระเบิด TNT ได้เรียกว่าค่าพลังงานเทียบเท่า TNT ซึ่งพลังงานที่ออกมาของวัตถุระเบิดชนิดต่างๆมีการบันทึกในตารางที่มีชื่อว่า TM-5 1300 (US Department of the Army, 1990)

2.1.3 การระเบิดกลางอากาศแบบอิสระ (free air explosion)

การระเบิดจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างอาคารบ้านเรือน นอกจากความดันระเบิด, ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด, น้ำหนักของวัตถุระเบิด การระเบิดกลางอากาศแบบอิสระก็มีความแตกต่างกับการระเบิดบนพื้นดินเพราะจะมีอิทธิพลของสะท้อนคลื่นปะทุที่พื้นเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย นอกจากนี้การขัดขวางแรงระเบิดที่เคลื่อนที่ผ่านอากาศ ยังสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ การระเบิดแบบไม่ปิดล้อม และการระเบิดแบบปิดล้อม ซึ่งการระเบิดโดยผู้ก่อความไม่สงบส่วนใหญ่เป็นการระเบิดจากภายนอกเข้ามายังตัวอาคารโครงสร้าง ดังนั้นงานวิจัยนี้ขอนำเสนอลักษณะการระเบิดกลางอากาศแบบอิสระ (Free Air Blasting) แบบไม่ปิดล้อม

การระเบิดกลางอากาศแบบอิสระคือ การระเบิดกลางอากาศที่ทำให้เกิดคลื่นกระแทก (Shock wave) แพร่กระจายออกจากจุดศูนย์กลางระเบิดไปกระทบกับพื้นดิน หรือโครงสร้างอาคาร

โดยเมื่อคลื่นกระแทกไปกระทบกับพื้นดิน จะเกิดการหักเห และสะท้อนกลับมาจากพื้นดินที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันทำให้คลื่นสะท้อน (Reflected Wave) เคลื่อนที่ไปรวมกับคลื่นอุบัติ (Incident Wave) จะกลายเป็นคลื่นรุนแรงสูงเรียกว่า คลื่นมัค (Mach stem) เหนือจากคลื่นมัคขึ้นไปจะเป็นจุดร่วมสาม (Triple point) ที่จะเกิดคลื่นมัคทวีคูณเสริมกันทำให้โครงสร้างอาคารบ้านเรือนเสียหายมากขึ้นตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 ลักษณะการระเบิดกลางอากาศแบบอิสระ

2.2 หลักการป้องกัน และบรรเทาความเสียหายของโครงสร้างอาคารอันเนื่องมาจากแรงระเบิด

ในปัจจุบันการก่อความไม่สงบส่วนใหญ่มักจะเป็นเหตุการณ์ และความรุนแรงที่เกิดจากการลอบวางระเบิดของผู้ก่อการร้ายเป็นหลัก เนื่องจากวัตถุระเบิดสามารถทำให้ความเสียหายแก่ประชาชนและอาคารบ้านเรือน ซึ่งเกิดจากการระเบิดได้เป็นบริเวณกว้าง โดยที่อาคารบ้านเรือน เมื่อถูกระเบิดจะทำให้เกิดการพังทลายของโครงสร้าง จึงต้องทำการพิจารณาหาปัจจัยเสี่ยง เมื่อได้รับผลกระทบจากการระเบิด ซึ่งต้องหาวิธีป้องกัน และบรรเทาความเสียหายของโครงสร้างอาคารต่อไปดังนี้

2.2.1 หลักการออกแบบโครงสร้างป้องกันระเบิด

ลักษณะของโครงสร้างของอาคารเฉพาะบางอย่างเช่น โรงงานผลิตสารเคมี อาคารเก็บเชื้อเพลิงจำพวกแก๊สไวไฟ โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ต่างๆ ล้วนมีโอกาสเสี่ยงสูงในการเกิดอุบัติเหตุระเบิดที่จะสร้างความเสียหายต่อชีวิต และทรัพย์สิน และจากสถานการณ์โลกปัจจุบันที่มีความเสี่ยงต่อผู้ก่อการร้ายเพิ่มสูงขึ้น การพิจารณาความแข็งแรงของโครงสร้างอาคาร ในกรณีที่ต้องรับแรง ซึ่งเกิดจากการระเบิด จึงเริ่มกลายเป็นหัวข้อที่สมควรต้องคำนึงถึงสำหรับอาคาร ซึ่งมีความสำคัญทั้งในแง่เศรษฐกิจ และความมั่นคง แม้ว่าโอกาสที่การระเบิดจะเกิดขึ้นได้นั้นมีน้อยมาก แต่ถ้าหากเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวขึ้นมาแล้ว ความเสียหายจากการระเบิดในอาคารเหล่านี้จะสร้างความเสียหาย

นับเป็นมูลค่าที่มหาศาลและมีผลกระทบต่อความรู้สึกของผู้คนในสังคมที่ประเมินเป็นมูลค่าไม่ได้อีกด้วย

ความเสียหายสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อโครงสร้างอาคารได้รับแรงจากการระเบิดนั้น คือการพังถล่มแบบต่อเนื่อง (Progressive Collapse) โดยความน่าจะเป็นในการเกิดความเสียหายชนิดนี้พิจารณาได้จากสมการของ Ellingwood and Dusenberry ดังนี้

$$P(C) = P(C|DH) \cdot P(D|H) \cdot P(H) \quad (2.4)$$

เมื่อ

$P(C)$ = ความน่าจะเป็นของการพังถล่มแบบต่อเนื่อง

$P(H)$ = ความน่าจะเป็นของอันตรายที่เกิดขึ้น

$P(D|H)$ = ความน่าจะเป็นของอันตรายที่เกิดขึ้นแล้วสร้างความเสียหายต่อโครงสร้างเฉพาะจุด

$P(C|DH)$ = ความน่าจะเป็นของความเสียหายเฉพาะจุดที่ทำให้โครงสร้างโดยรวมถล่ม

ความน่าจะเป็นที่สูญหายอาคารจะถล่มพังทั้งหลัง เริ่มจากการพิจารณาความน่าจะเป็นของโอกาสเกิดเหตุการณ์ที่จะสร้างความเสียหายขึ้นก่อน จากนั้นพิจารณาความน่าจะเป็นเมื่อเกิดเหตุการณ์นั้นแล้ว จะมีโอกาสเกิดความเสียหายต่อโครงสร้างอาคารเฉพาะจุดมากเพียงใด แล้วจึงมาพิจารณาถึงความน่าจะเป็นเมื่อเกิดความเสียหายเฉพาะจุดนั้นแล้ว มีโอกาสที่จะส่งผลต่อเนื่องให้โครงสร้างโดยรวมถล่มได้ หรือไม่ จากปัจจัยของความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ในแต่ละขั้นนี้ ช่วยให้เราสามารถพิจารณาหามาตรการเพื่อช่วยลดความเสี่ยงต่อความเสียหายจากการระเบิดได้ดังต่อไปนี้

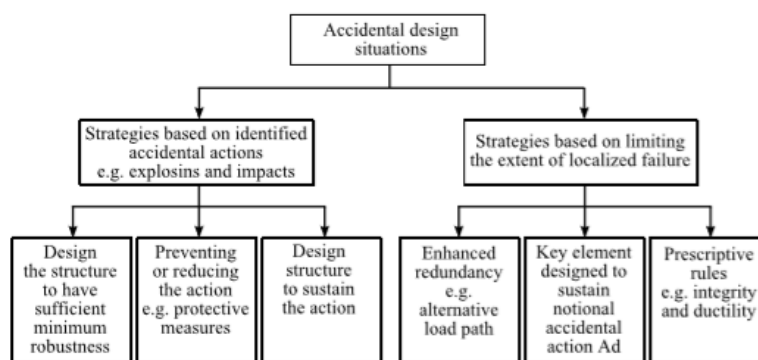
1. ความน่าจะเป็นของโอกาสเกิดเหตุการณ์ระเบิด ใช้มาตรการควบคุมเหตุการณ์ (Event control) โดยการสร้างระบบรักษาความปลอดภัย เพื่อมิให้เกิดเหตุการณ์ระเบิดขึ้น หรือสร้างมาตรการช่วยบรรเทาแรงระเบิดที่เกิดไม่ให้ความรุนแรงจนสามารถสร้างความเสียหายรุนแรงได้ โดยการลดค่าระยะปรับทอน (Scaled distance, Z) เช่น สร้างกำแพง หรือส่วนกั้นให้เพิ่มระยะห่างระหว่างวัตถุระเบิดกับเป้าหมาย (Standoff distance) หรือเข้มงวดการขนส่งวัตถุต้องสงสัย เพื่อควบคุมปริมาณวัตถุระเบิด หรือการห่อหุ้มด้วยวัสดุที่มีความสามารถช่วยซับแรงระเบิดจากการเสียรูปได้

2. ความน่าจะเป็นของโอกาสสร้างความเสียหายเมื่อเกิดเหตุระเบิด ใช้การออกแบบไปยังจุดที่ต้องรับแรงระเบิดโดยตรง (Direct design) เพื่อสร้างโครงสร้างที่หากต้องรับแรงระเบิดขึ้นมาแล้ว จะมีความเสียหายเฉพาะจุด (Local failure) เกิดขึ้นน้อยที่สุด ทำได้ด้วยการเพิ่มกำลังความแข็งแรง

ของชิ้นส่วน หรือเพิ่มคุณสมบัติความเหนียว (Ductility) เพื่อให้สามารถรับพลังงานจากแรงระเบิดได้ โดยที่ชิ้นส่วนยังไม่วิบัติ

3. ความน่าจะเป็นของโอกาสที่โครงสร้างพังถล่มแบบต่อเนื่อง เมื่อเกิดความเสียหายเฉพาะจุด ใช้การออกแบบโครงสร้างข้างเคียง (Indirect design) เพื่อให้แรงระเบิดที่เกิดขึ้นนั้นสามารถถ่ายเทไปยังโครงสร้างข้างเคียงได้ (Load transfer system) หรือออกแบบโดยเพิ่มกำลังหรือทำส่วนเผื่อ (Enhanced robustness or redundancy) สำหรับกรณีที่มีความเสียหายเฉพาะจุดขึ้นแล้ว แต่โครงสร้างข้างเคียงก็จะช่วยให้ตัวอาคารยังคงมีความเสถียรเพียงพอ หรือออกแบบให้แต่ละโครงสร้างเป็นแบบแยกส่วน (Segmentation) เพื่อไม่ให้ความเสียหายเฉพาะจุดที่เกิดขึ้นนั้นพัฒนาต่อไปจนเกิดการพังถล่มแบบต่อเนื่องไปทั้งโครงสร้างอาคารได้

เมื่อพิจารณาความน่าจะเป็นของการเกิดการระเบิดข้างต้นแล้ว ขั้นตอนการออกแบบจะพิจารณาถึงความเสี่ยงสูงสุด (ความน่าจะเป็นสูงสุด) ในแต่ละชั้นซึ่ง มีทั้งแนวทางพิจารณาจากการสันนิษฐาน ความรุนแรงของการระเบิดหรือ พิจารณาทามาตรการ เพื่อจำกัดความเสียหายที่เกิดขึ้นให้อยู่ในวงแคบ แนวทางการออกแบบในลักษณะดังกล่าวถือได้ว่าเป็นการออกแบบเพื่อรองรับโหลดที่ไม่ได้มีโอกาที่จะเกิดขึ้นได้ง่าย ๆ แต่ก็จะละเอียดไม่คำนึงถึงไม่ได้มาตรฐาน EN 1991-1-7 เรียกการออกแบบในกรณีดังกล่าวว่าเป็น การออกแบบโหลดที่เกิดอย่างไม่คาดฝัน (Accidental design) ซึ่งมีหลักการพิจารณาแสดงตามรูปที่ 4



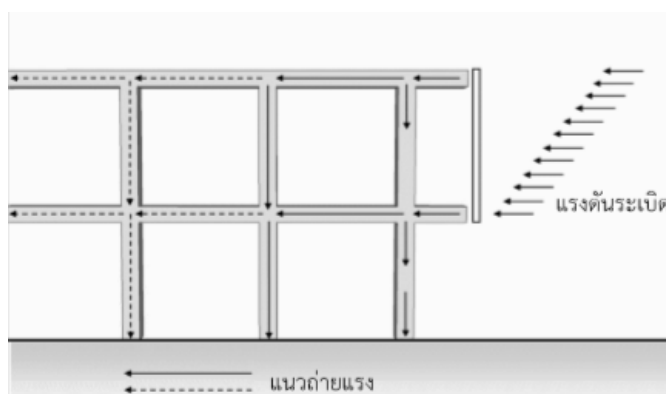
รูปที่ 4 ขั้นตอนในการพิจารณาการออกแบบโครงสร้างต้านทานแรงระเบิด (แหล่งข้อมูล Progressive Collapse Risk Analysis: Literature Survey, Relevant Construction Standards and Guidelines)

การวิจัยในครั้งนี้ต้องการที่จะพิจารณาผลกระทบของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC) เมื่อได้รับแรงระเบิด โดยทำการพิจารณาในส่วนของการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีที่ต้องรับแรงระเบิดโดยตรง เพื่อหาวิธีการเพิ่มกำลัง และความเหนียวให้มีเพียงพอต่อเหตุการณ์การก่อการร้าย โดยการวางระเบิดที่เป็นการระเบิดระยะใกล้ (Near-range explosion) ซึ่งมีกำลังระเบิดอยู่ในช่วงที่ส่งผลให้เสาคอนกรีตได้รับความเสียหายที่อาจถึงขั้นการวิบัติได้

2.2.2 การพิจารณาปัจจัยเสี่ยงของความเสียหายในโครงสร้างอาคาร เมื่อได้รับแรงระเบิด และมาตรการรองรับ

ปัจจัยเสี่ยงที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้าง เมื่อได้รับแรงระเบิด ผลกระทบจะมีทั้งความเสี่ยงทางตรงต่อความเสียหายแก่โครงสร้างหมายถึง ผลรวมของผลคูณมีผลโดยตรงต่อแต่ละเหตุการณ์กับความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ และจะสอดคล้องกันไป ความเสี่ยงทางอ้อมหมายถึง ผลรวมของผลกระทบทางอ้อมของเหตุการณ์ที่รุนแรงแต่ละครั้ง ดังนั้นโครงสร้างที่ได้รับการประเมินจะมีประสิทธิภาพสมบูรณ์ เมื่อความทนทานเท่ากับ 1 แต่อาจจะไม่ได้เสมอไป เพราะว่าผลกระทบทางอ้อมนั้นรวมผลกระทบจากเศรษฐกิจ ความน่าเชื่อถือเข้าไปด้วย ซึ่งจะทำป้องกัน หรือเสริมโครงสร้างจากเหตุการณ์ระเบิดต้องวิเคราะห์ต้นทุน ผลประโยชน์ที่ได้รับ การออกแบบและวิธีการต้านทานแรงระเบิดในตำแหน่งของโครงสร้าง เพราะฉะนั้นต้องคำนึงถึงปัจจัย เพื่อเป็นมาตรการในการออกแบบรองรับแรงระเบิดจากผู้ก่อความไม่สงบดังนี้

1. ต้องออกแบบโครงสร้างอาคารให้มีแนวการถ่ายแรงต่อเนื่องทั้งแรงกระทำในแนวระนาบ และแนวตั้ง โดยที่แนวถ่ายแรงแนวตั้งต้องมีความต่อเนื่องจนถึงฐานรากตามรูปที่ 5



รูปที่ 5 การถ่ายแรงต่อเนื่องในแนวระนาบและแนวตั้ง
(แหล่งข้อมูล การคำนวณแรงระเบิดและผลกระทบจากแรงระเบิดที่มีต่อโครงสร้างอาคาร)[2]

2. ชั้นส่วนของโครงสร้างอาคารทั้งหมดเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน เพื่อให้โครงสร้างอาคารสามารถพัฒนากำลังในการต้านทานแรงได้เต็มกำลัง
3. การออกแบบชั้นส่วนนั้นๆ ต้องมีความสมดุลกับกำลังต้านทานแรงของชั้นส่วนต่างๆ ภายในโครงสร้าง
4. โครงสร้างอาคารต้องมีความเหนียวเพียงพอเพื่อรองรับแรงระเบิดหมายถึง พฤติกรรมของวัสดุโครงสร้างที่สามารถยืดตัวได้ และยังคงรับแรงต่อไปได้จนกระทั่งการยืดตัวถึงขีดจำกัดโดยไม่เกิดการวิบัติตาม

5. โครงสร้างที่ออกแบบต้องคำนึงถึงแรงยกตัว และแรงกระทำกลับทิศ โดยที่แต่ละชั้นอาจจะพิจารณาเสริมโครงสร้างเพื่อรองรับแรงยกตัว และแรงกระทำกลับทิศที่เป็นแรงยกที่มีทิศตรงข้ามกับน้ำหนักบรรทุกทุกด้วยการเพิ่มเหล็กเสริม เสริมความแข็งแรงที่จุดเชื่อมต่อ และวัสดุคอมโพสิตประเภทเส้นใยแก้ว หรือเส้นใยคาร์บอนที่พื้น เป็นต้น โดยอ้างอิงจากความสัมพันธ์ของผลจากแรงระเบิดที่เข้ามาภายในอาคาร โดยที่ขนาดของแรงมากระทำต่อโครงสร้างจะแปรผันตรงต่อกำลังต้านทานของผนังภายนอกอาคารเป็นอันดับแรก จากนั้นถ้ามีแรงระเบิดเข้ามาภายในแล้วจะแปรผันต่อความสูงของพื้นอาคารด้วย

6. โครงสร้างที่มีคานถ่ายแรง ต้องมีการถ่ายแรงทางอ้อม เช่นการเพิ่มโครงสร้างออกแบบให้จุดเชื่อมต่อสามารถต้านทานแรงที่เพิ่มขึ้น จากการระเบิดได้ เพิ่มระยะถอยร่นของตัวอาคาร (ในกรณีที่ทำไม่ได้) การห่อหุ้มด้วยวัสดุที่มีความสามารถถ่ายเทแรงได้ดี เป็นต้น

7. โครงสร้างต้องคำนึงถึงการพังถล่มแบบต่อเนื่อง

8. โครงสร้างต้องคำนึงถึงวัสดุที่เป็นจุดเสี่ยง เพื่อป้องกันจากความเสียหายจากการกระแทกของเศษวัสดุ

2.3 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงระเบิด

2.3.1 ความเป็นมาเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

เสาคอนกรีตเสริมเหล็กทำหน้าที่รับแรงอัด แรงภายนอก และโมเมนต์ดัดที่มากกระทำต่อโครงสร้างอาคารตามแนวแกนจากคานถึงฐานราก โดยมีเหล็กเสริมช่วยรับน้ำหนัก และเหล็กปลอกช่วยให้เสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับน้ำหนักได้ดีขึ้น เมื่อรวมกับคอนกรีต มีรูปตัดเสาเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสสี่เหลี่ยมผืนผ้า และกลมโดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ เสาสั้น และเสายาว สามารถแบ่งตามลักษณะของเหล็กเสริมได้เป็น 3 ประเภทคือ เสาคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเดี่ยว เสาคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเกลียว และเสาคอมโพสิต ในงานวิจัยนี้อธิบายเฉพาะเสาสั้นประเภทเหล็กปลอกเดี่ยว เพราะฉะนั้น เสาสั้นคือ เสาที่รับแรงจะวิบัติเมื่อกำลังของวัสดุรับแรงกระทำ โดยการออกแบบเสาต้องมีขนาดอย่างน้อยที่สุดไม่เกิน 15 เท่าของอัตราส่วน $\frac{h}{t}$ โดย h = ความสูงระหว่างชั้น, t = ด้านแคบของเสาสี่เหลี่ยม หรือเส้นผ่าศูนย์กลางเสากลม ใช้คอนกรีตรับน้ำหนักเป็นส่วนใหญ่เพื่อรับแรงอัด และเหล็กเสริมมีไว้สำหรับรับโมเมนต์จากน้ำหนักเยื้องศูนย์กลางที่ทำให้เกิดโมเมนต์ดัด

2.3.2 พฤติกรรมของเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

เมื่อเสาสั้นได้รับแรงอัดที่กระทำตามแนวแกนนั้น อาจจะต้องพิจารณาการคืบตัว การหดตัวในการรับแรงระยะยาวต้องคำนึงเรื่องพฤติกรรมเป็น 2 ส่วน คือ พฤติกรรมช่วงอิลาสติก และพฤติกรรมช่วงพลาสติก

2.3.2.1 พฤติกรรมช่วงอิลาสติก

พฤติกรรมในช่วงอิลาสติกจะศึกษาความสัมพันธ์ของแรงอัด การคืบ และการหดตัวของคอนกรีต และเหล็กเสริมในเสาสั้นจะต้องเป็นค่าเป็นเส้นตรงนั้นหมายถึง ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น

ของคอนกรีตจะรับแรงได้ลดลงตามแรงที่อัดมากกระทำมากขึ้น และเหล็กเสริมจะสามารถรับแรงได้ดีอยู่ ในการวิเคราะห์จะใช้ทฤษฎีอิลาสติก (ตอกกุล กาญจนาลัย, 2528) เพื่อคำนวณหาแรงอัดตามแนวแกน และแรงจากภายนอกได้ในกรณีที่เป็นเสาสั้นหน้าตัดสี่เหลี่ยมในสมการที่ 2.5

$$P = f_c \{A_c + A_{st}n(1 + C_t)\} \quad (2.5)$$

$$P = f_s \left\{ \frac{A_c}{n(1 + C_t)} + A_{st} \right\} \quad (2.6)$$

เมื่อ

P = แรงอัดแนวแกน

f_c = หน่วยแรงอัดในคอนกรีต

f_s = หน่วยแรงอัดในเหล็กเสริม

A_{st} = พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม

A_c = พื้นที่หน้าตัดคอนกรีต

C_t = การคืบที่เวลาใดๆ

$$n = \frac{E_s}{E_c}$$

E_s = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม

E_c = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

จากสมการที่ 2.5 เมื่อความคืบมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปเป็นผลให้แรงอัดภายในเกิดการถ่ายเทแรงอัดไปที่เหล็กเสริม และเมื่อมีแรงกระทำที่เหล็กเสริมมากขึ้น ทำให้เกิดการครากเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนพฤติกรรมเป็นช่วงพลาสติก โดยแรงอัดที่กระทำมาจากสมการที่ 2.7 และหน่วยแรงอัดในคอนกรีตมาจากสมการที่ 2.7

$$P = f_c A_c + f_s A_{st} \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_c = \frac{f_c(1 + C_t)}{E_c} = n(1 + C_t); \varepsilon_c = \varepsilon_s \quad (2.8)$$

$$f_s = n(1 + C_t)f_c \quad (2.9)$$

เมื่อ

ε_c = ความเครียดในคอนกรีต

ε_s = ความเครียดอิสระในคอนกรีต

จากการหดตัวของคอนกรีตทำให้เกิดการสูญเสียในคอนกรีต ทำให้เกิดความเครียดมีค่าอยู่ประมาณ 0.0002-0.0010 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสัดส่วนวัสดุผสม และคอนกรีต ดังนั้นการหดตัวของคอนกรีตจะถูกยึดรั้งด้วยเหล็กเสริม ทำให้คอนกรีตหดตัวแบบไม่อิสระเกิดหน่วยแรงดึงขึ้นในทางกลับกันเหล็กเสริมจะเกิดหน่วยแรงอัดด้วยสามารถคำนวณจากสมการที่ 2.11

$$f_s = \varepsilon_s E_s \quad (2.10)$$

$$f_c = (\varepsilon_s - \varepsilon_c) \frac{E_c}{1 + C_t} \quad (2.11)$$

แทนค่า ε_s ในสมการที่ 2.11 จะได้

$$f_c = \left(\varepsilon_s - \frac{f_s}{E_s} \right) \frac{E_c}{1 + C_t} \quad (2.12)$$

จากสมการพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมจะทำให้หน่วยแรงดึงของคอนกรีตเพิ่มขึ้น

2.3.2.2 พฤติกรรมช่วงพลาสติก

พฤติกรรมในช่วงพลาสติกของเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กจะไม่มีผลของการคืบ และการหดตัวของคอนกรีตมาเกี่ยวข้อง เนื่องมาจากค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการหดตัวไม่เป็นเส้นตรง กำลังของเสาจะมีค่าสูงกว่าจุดครากของคอนกรีต หรือเหล็กเสริม ดังนั้นจึงสามารถจำแนกพฤติกรรมได้เป็น 2 กรณีคือ เหล็กเสริมถึงจุดครากก่อนคอนกรีตนั้น หมายถึงเสายังรับแรงเพิ่มขึ้นเมื่อเหล็กรับแรงครากคงที่, การหดตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้นจนถึงจุดประลัย และเกิดการวิบัติในที่สุด และคอนกรีตเกิดประลัยก่อนที่เหล็กเสริมจะถึงจุดครากตาม โดยการที่เสายังคงสภาพอยู่ได้นั้น มาจากผลของเหล็กปลอกที่รัดคอนกรีตทำหน้าที่เพิ่มความเหนียวแก่ตัวเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอยู่ แต่ยังคงต้องคำนึงถึงกำลังประลัยของคอนกรีตที่มีค่าวิบัติ $0.7f_c'$ ถึง $1f_c'$ โดยค่าเฉลี่ยการวิบัติอยู่ที่ $0.85f_c'$ ตามมาตรฐาน ACI 317 R2 (2002) นั้นหมายความว่าถ้าให้เสารับน้ำหนักเลยค่าเฉลี่ย ความสามารถในการรับน้ำหนักจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และเกิดการวิบัติของเสานั้นช่วงบริเวณด้านบน เพราะฉะนั้น

การคำนวณหาค่าการวิบัติเป็นส่วนสำคัญตามมาตรฐาน ACI 317 R2 (2002) จึงได้กำหนดสมการที่ 2.13 ขึ้นมา

$$P_0 = 0.85f_c'(A_g - A_s) + A_s f_y \quad (2.13)$$

เมื่อ

P_0 = แรงประลัยของเสา

f_c' = กำลังประลัยของคอนกรีตทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน

f_y = กำลังครากของเหล็กเสริม

A_g = หน้าตัดรวมของคอนกรีต

A_s = หน้าตัดรวมของเหล็กเสริม

จากสมการพบว่าเสาสั้นรับน้ำหนักนั้นจะไม่นำกำลังอัดของเหล็กปลอกมาคำนวณด้วย จะทำการคำนวณเฉพาะหน่วยแรงของคอนกรีต และเหล็กเสริม เพราะว่าเหล็กปลอกเดี่ยวสามารถกำหนดให้มีระยะโก่งเดาะในช่วงระยะห่างของเหล็กปลอก และการโอบรัดคอนกรีต ดังนั้นพฤติกรรมเสาสั้นปลอกเดี่ยวจะเกิดการวิบัติที่ต่อเมื่อเสารับน้ำหนักจนถึงจุดวิบัติคอนกรีตจะเกิดการหลุดร่อนจากนอกสุดไปสู่แกนกลางของเสา ทำให้เสาสูญเสียความแข็งแรงของเหล็กยี่น และเหล็กปลอกเดี่ยวจะรับน้ำหนักจนถึงจุดครากเกิดการหลุดตัวของเสาจนทำให้เสาเกิดการวิบัติไป

2.3.3 การพิจารณาปัจจัยที่เพิ่มความแข็งแรงในการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

ดังนั้นในการเพิ่มความแข็งแรงของการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อต้านทานแรงระเบิดนั้น สามารถทำได้หลายวิธี มีทั้งการออกแบบใหม่ (New structure) หรือทำการเสริมเพิ่มเติมความแข็งแรงของโครงสร้างเดิม (Retrofit structure) ในการทดลองนี้มุ่งเน้นในกรณีของการเริ่มต้นออกแบบเสา คอนกรีตเสริมเหล็ก ขึ้นใหม่ว่าจะพิจารณาเพิ่มประสิทธิภาพความแข็งแรงของเสาได้จากวิธีใดบ้าง ซึ่งจากการทดลองในต่างประเทศ ณ ปัจจุบันแล้ว มีการทดลองที่จะนำวัสดุใหม่ เช่น เส้นใยคาร์บอน โพลิเมอร์ หรือเส้นใยเหล็ก เพื่อเพิ่มกำลังต้านทานแรงดึง หรือใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูง เพื่อเพิ่มกำลังต้านทานแรงอัดให้เพิ่มสูงขึ้นจากเดิม จากการทดลองเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการเพิ่มกำลังขึ้นส่วนเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ขึ้นให้มากกว่าเดิม เพื่อให้โครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก มีความสามารถในการต้านทานแรงระเบิด

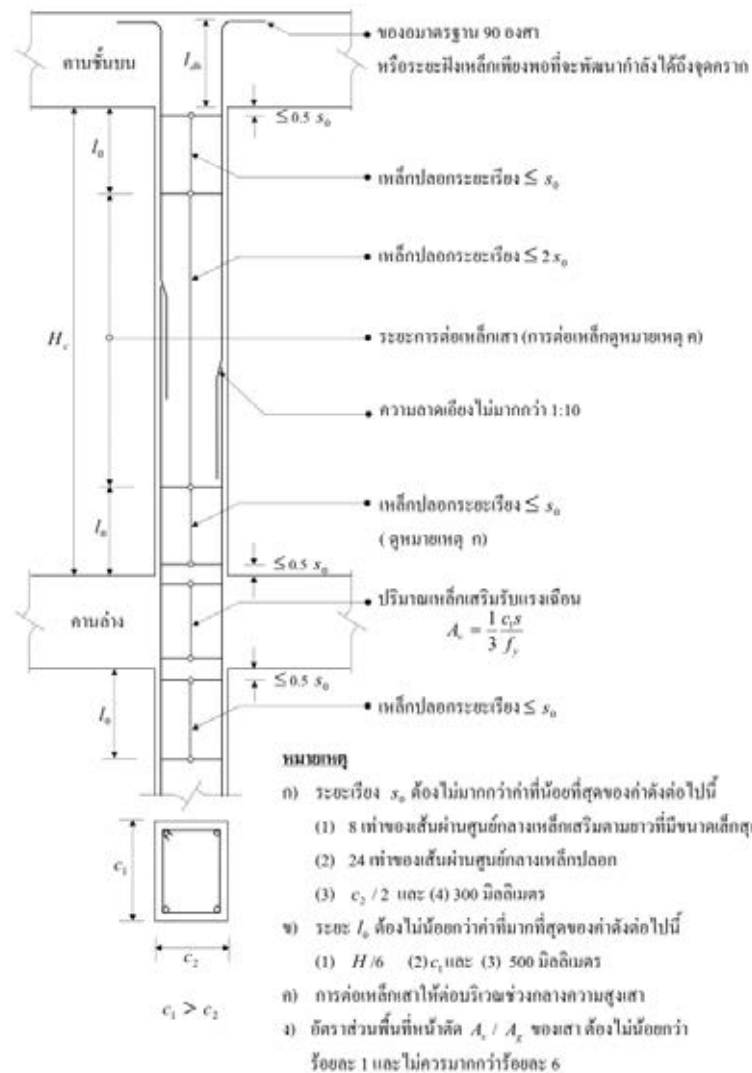
แม้ว่าการเพิ่มเติมวัสดุใหม่ เพื่อช่วยเพิ่มกำลังต้านทานของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก จะมีความเจาะจง และเห็นผลได้ค่อนข้างชัดเจน แต่วิธีการดังกล่าวยังมีข้อจำกัดในเรื่องของการจัดหา ต้นทุน การก่อสร้าง และวิธีการก่อสร้างที่ต้องปรับให้เหมาะสมกับการทำงาน การทดลองนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การใช้หลักการการเพิ่มกำลังขึ้นส่วนเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่มีมาแต่ดั้งเดิม (Conventional RC) ว่าหลักการออกแบบที่เป็นพื้นฐานจะสามารถช่วยเพิ่มกำลัง หรือลดทอนความเสียหายของเสาคอนกรีต

เสริมเหล็กได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยลดความเสียหายของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ในวิธีการดั้งเดิมที่ต้องการนำมาเป็นตัวแปรในการทดลองนี้มีดังต่อไปนี้

2.3.3.1 ปริมาณเหล็กปลอก

ตามมาตรฐานของ วสท. 1007-34 กำหนดการออกแบบเหล็กปลอกไว้ว่า ถ้าเป็นเหล็กปลอกเดี่ยวในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจะต้องมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เล็กกว่า 6 mm และมีระยะเรียงห่างกันไม่เกิน 16 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางเหล็กยื่น หรือไม่เกิน 48 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางเหล็กปลอก หรือไม่เกินด้านแคบของเสาอย่างใดอย่างหนึ่ง จุดประสงค์ของข้อกำหนดนี้เพื่อให้เหล็กปลอกช่วยรับแรงกรณีมีแรงเฉือน และแรงจากโมเมนต์กระทำในตำแหน่งเอียงศูนย์กลาง หรือในกรณีของเสาสูงชะลูดจะช่วยป้องกันการวิบัติจากการโก่งเดาะได้ เนื่องจากเหล็กปลอกจะช่วยเพิ่มหน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้าง (Confinement) ซึ่งทำให้กำลังอัดตามแนวแกนมีแนวโน้มสูงขึ้นด้วย

การเพิ่มปริมาณเหล็กปลอก โดยลดระยะเรียงให้ชิดกันมากขึ้น เป็นวิธีการที่ช่วยป้องกันการกรณที่มีแรงกระทำจากด้านข้างได้ดี จะเห็นได้ว่าในมาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวของกรมโยธาธิการ และผังเมือง (มยผ. 1301-50) จะลดระยะเรียงเหล็กปลอกให้ชิดกันมากขึ้น โดยเฉพาะในบริเวณปลายเสาที่เชื่อมต่อกับคานทั้งบน และล่าง (l_o) ตามรูปที่ 6 ระยะชิดจะลดลงเป็นครึ่งหนึ่งของการออกแบบปกติ เนื่องจากเมื่อเกิดแผ่นดินไหวจะทำให้มีแรงเฉือนกระทำที่บริเวณดังกล่าวอย่างรุนแรง



รูปที่ 6 ระยะเรียงเหล็กปลอกในบริเวณปลายเสาที่เชื่อมต่อกับคานทั้งบน และล่าง

การต้านทานแรงระเบิดที่เป็นแรงกระทำทางข้างนี้จึงพิจารณาปัจจัยด้านการเสริมเหล็กปลอก เพื่อให้โครงสร้างที่ต้องต้านแรงทางข้างที่อาจเกิดแรงเฉือนกระทำที่ปลายเสาสองข้าง และคุณสมบัติโอบรัดที่นอกจากจะเพิ่มกำลังตามแนวแกนแล้ว ในกรณีที่ต้องรับแรงระเบิดระยะใกล้จะช่วยลดปริมาณความเสียหายแบบจุด (Local failure) ได้ด้วยอีกทางหนึ่ง

2.3.3.2 ขนาดหน้าตัดเสา

เป็นที่ทราบกันดีว่าเมื่อเพิ่มขนาดของหน้าตัดเสา จะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดตามแนวแกน เนื่องจากหน่วยแรงของหน้าตัดมีพื้นที่มากขึ้น และในกรณีที่มีแรงกระทำด้านข้างจะทำให้พฤติกรรมการต้านทานแรงกระทำของเสามีพฤติกรรมที่เทียบเคียงได้กับคาน ขนาดหน้าตัดที่ใหญ่จะช่วยให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ (Area moment of inertia) มีมากขึ้น ซึ่งหมายถึงกำลังการต้านทานการเสียรูปของโครงสร้างหน้าตัดนั้นจะเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มขนาดหน้าตัดเสาจึง

เป็นวิธีที่ช่วยเพิ่มคุณสมบัติการต้านทานแรงระเบิดที่ง่าย และสะดวกแต่ก็ต้องจำเป็นต้องพิจารณาถึงเรื่องพื้นที่ใช้สอยที่ลดลง และค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างที่ต้องมีมากขึ้นตามมา การทดลองนี้จะพิจารณาในมุมมองของการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดเสาวว่ามีผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้าง เมื่อได้รับแรงระเบิดมากนักน้อยเพียงใด เมื่อเทียบกับปัจจัยการเพิ่มกำลังเสาในด้านอื่นๆ

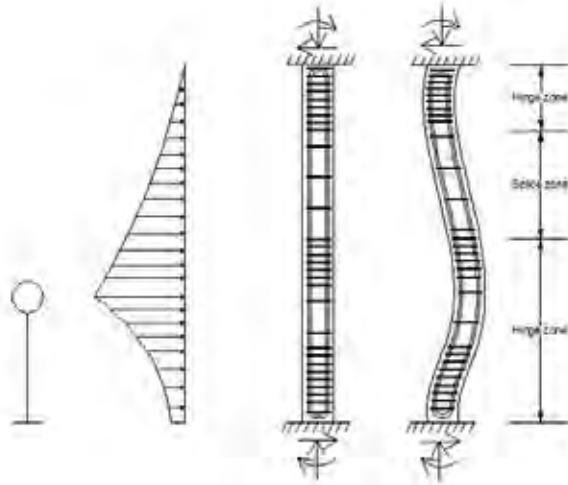
2.3.3.3 รูปร่างของเสา

การรับแรงระเบิดของชิ้นส่วนต่างในโครงสร้าง จะแตกต่างกันไปตามรูปร่าง และขนาด เนื่องจากแรงระเบิดเป็นการชนกระแทกของมวลอากาศที่มีลักษณะเป็นของไหล (Fluid) ซึ่งแรงกระทำกับวัตถุจะกระจายตัวไปได้ แม้ว่าจะเป็นลักษณะการระเบิดแบบระยะใกล้ก็ตาม ชิ้นส่วนเสาเองโดยทั่วไปแล้วจะมีลักษณะเรียวยาว ซึ่งเมื่อเทียบกับโครงสร้างแบบแผ่นแล้ว จะมีพื้นที่รับแรงระเบิดที่น้อยกว่า นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาในเรื่องของพื้นที่รับแรงอัดอากาศที่เป็นของไหล ลักษณะของเสาที่มีรูปร่างวงกลม (Circle) จะทำให้มีการหักเห และกระจายแรงระเบิดได้ดีกว่าระนาบตรง (Flat) การทดลองนี้จะทำการเปรียบเทียบเสาที่มีพื้นที่หน้าตัดใกล้เคียงกัน แต่มีรูปร่างที่แตกต่างกัน จะมีผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้าง เมื่อได้รับแรงระเบิดแตกต่างกัน

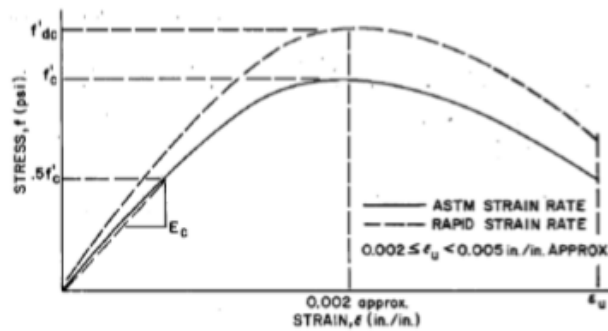
จากปัจจัยในการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยวิธีการดั้งเดิมที่กล่าวมาข้างต้นนี้เป็นวิธีที่สะดวก ง่าย และมีพื้นฐานในการทำงานอยู่แล้วจึงง่ายต่อการนำไปใช้ในการทำงานจริง แต่วิธีการเหล่านี้ ยังมีผลต่อการต้านทานแรงระเบิดเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยลดความเสียหายของเสา คอนกรีตเสริมเหล็ก

2.4 พฤติกรรมของวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้อัตราความเครียดสูง (High strain rate)

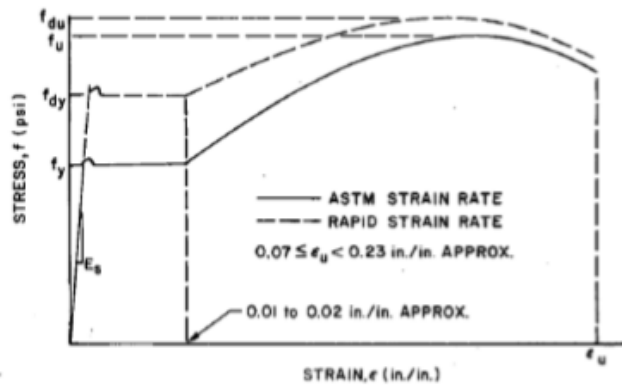
เสาคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างส่วนหนึ่งภายในอาคารที่ต้องทนต่อแรง และลักษณะของแรงต่างๆที่มากกระทำ ซึ่งต้องทนทานต่อแรงระเบิดที่มากกระทำในระยะเวลานานสั้น และขนาดของแรงนั้นสูงเมื่อเทียบกับแรงอื่นๆตามรูปที่ 7 พฤติกรรมของการต้านทานแรงระเบิดของวัสดุและความเสียหายที่เกิดขึ้นจะมีความแตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับขนาดของแรงที่มีขนาด และความเร็วทำให้เกิดค่าความเครียดที่มากกระทำต่อเสาแตกต่างกันเรียกว่า อัตราความเครียด (strain rate) ซึ่งวัสดุจะสามารถรับแรงกระทำที่เกิดความเครียดได้สองแบบ คือ ความเครียดแบบคืนรูป (elastic strain) และความเครียดแบบไม่คืนรูป (plastic strain) ในความเครียดสองลักษณะนี้ วัสดุจะสามารถเกิดการเสียรูปได้ (deformation) โดยเสาจะต้องรับความดันระเบิดที่มากกระทำแตกต่างกัน พบว่าเสาจะต้องรับการเปลี่ยนแปลงของความเครียดอย่างรวดเร็วในเวลาอันสั้นตามกราฟที่ 4 จากรูปที่กล่าวมา พบว่าแรงระเบิดมีอัตราความเครียดสูงกว่า เมื่อเทียบกับแรงกระทำแบบสถิตย์ (static load) ที่อัตราความเครียดประมาณ 10^{-7} ถึง $10^{-5} s^{-1}$ ดังนั้นคอนกรีตของเสาจะมีอัตราความเครียดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และกำลังอัด มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามกราฟที่ 4 เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM และเหล็กเส้นเมื่อเพิ่มความเค้น และความเครียดเข้าไปจะส่งผลให้เหล็กมีการยืดตัวเพิ่มมากขึ้นตามกราฟที่ 5 เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM เช่นกัน



รูปที่ 7 พฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อได้รับผลจากแรงระเบิด
(แหล่งข้อมูล Assessment of Risk of Disproportionate Collapse of Steel Building Structures Exposed to Multiple Hazards)



กราฟที่ 4 ความสัมพันธ์ความเค้น และความเครียดของคอนกรีต
(แหล่งข้อมูล Assessment of Risk of Disproportionate Collapse of Steel Building Structures Exposed to Multiple Hazards)



กราฟที่ 5 ความสัมพันธ์ความเค้น และความเครียดของเหล็กเส้น
(แหล่งข้อมูล Assessment of Risk of Disproportionate Collapse of Steel Building Structures Exposed to Multiple Hazards)

คุณสมบัติของคอนกรีต และเหล็กเส้น ซึ่งการเพิ่มความแข็งแรงจนมีอัตราที่สูงเทียบกับความเครียดในเชิงไดนามิกของ TM 5-1300, 1990 ดังนั้นคอนกรีต และเหล็กเส้น จึงต้องถูกวิเคราะห์ และออกแบบตามคุณสมบัติของค่าดังนี้

2.4.1 ค่า DIF ของคอนกรีต

การหาค่า Dynamic increase factor (DIF) นั้นมาจากการคิดค้นสมการขึ้นจาก Malvar และ Crawford (1998) ต่อมา Comite European du Beton (CEB) ทำการเพิ่มเติมแบบของคอนกรีต และได้รับการยอมรับจากนักวิจัยส่วนใหญ่ โดยที่ค่า DIF เป็นการแสดงพฤติกรรมการบีบอัดของคอนกรีตโดยมีสมการดังนี้

1. สมการ DIF ของ Malvar และ Crawford

$$DIF = \frac{f_c}{f_{cs}} = \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_s}\right)^{1.026\alpha_s} ; \epsilon \leq 30s^{-1} \quad (2.14)$$

$$DIF = \frac{f_c}{f_{cs}} = \gamma_s \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_s}\right)^{1.026\alpha_s} ; \epsilon \leq 30s^{-1} \quad (2.15)$$

เมื่อ

f_c = ค่าความแข็งแรงในการรับแรงอัดเชิงไดนามิกของความเค้น

f_{cs} = ค่าความแข็งแรงในการรับแรงอัดเชิงสถิตของความเค้น

$\frac{f_c}{f_{cs}}$ = ค่า DIF

ϵ = ค่าความเค้นช่วงเวลา 10×10^{-6} ถึง $300 s^{-1}$

ϵ_s = ค่าความเค้นเชิงสถิตในช่วงเวลา $300 s^{-1}$

$\text{Log } \gamma_s = 6.156\alpha_s - 2$

$$\alpha_s = \frac{1}{5 + \frac{9f_{cs}}{f_{c0}}}$$

$$f_{c0} = 10 \text{ Mpa} = 1450 \text{ psi}$$

2. สมการ DIF ของ Comite European du Beton

$$DIF = \frac{f_c}{f_{cs}} = \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_s}\right)^{1.026\delta} ; \epsilon \leq 30s^{-1} \quad (2.16)$$

$$DIF = \frac{f_c}{f_{cs}} = \beta \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_s}\right)^{\frac{1}{3}} ; \epsilon > 30s^{-1} \quad (2.17)$$

เมื่อ

f_c = ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเชิงไดนามิกของความเค้น

f_{cs} = ค่าแรงดึงเชิงสถิตย์

$\frac{f_c}{f_{cs}}$ = ค่า DIF

ϵ = ค่าความเค้นช่วงเวลา 10×10^{-6} ถึง $300 s^{-1}$

ϵ_s = ค่าความเค้นเชิงสถิตย์ในช่วงเวลา 10×10^{-6}

$$\text{Log } \beta = 7.11\delta - 2.33$$

$$\delta = \frac{1}{10 + \frac{6f_{cs}}{f_{c0}}}$$

$$f_{c0} = 10 \text{ Mpa} = 1450 \text{ psi}$$

สมการ DIF ใช้ในการออกแบบถูกกำหนดขึ้น และนำไปเปรียบเทียบกับกรทดลอง เพื่อวิเคราะห์ผลในปัจจัยต่างๆ สามารถสรุปออกมาในตารางที่ 1 เรียกตารางนี้ว่า TM 5-1300

ตารางที่ 1 ค่า DIF ของคอนกรีต (TM 5-1300, 1990)

Type of stress	Far design range			Close-in design range		
	Reinforcing steel		Concrete	Reinforcing steel		Concrete
	f_{dy}/f_y	f_{du}/f_u	f_{dc}/f_c	f_{dy}/f_y	f_{du}/f_u	f_{dc}/f_c
Bending	1.17	1.05	1.19	1.23	1.05	1.25
Diagonal Tension	1.00	-	1.00	1.10	1.00	1.00
Direct Shear	1.10	1.00	1.10	1.10	1.00	1.10
Bond	1.17	1.05	1.00	1.23	1.05	1.00
Compression	1.10	-	1.12	1.13	-	1.16

2.4.2 ค่า DIF ของเหล็กเส้น

สมการ DIF ของเหล็กเส้นมีลักษณะคล้ายคลึงกับคอนกรีต จากนั้น Furlong, 1967; Slutter และ Driscoll, 1963; Sharma, 1986; Norton, 1929; Flathau et al., 1989 ได้คำนวณ และ ทดสอบผลความแข็งแรงสูงสุดภายใต้ความเค้นสูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่า DIF ของเหล็กเส้นประเภท เหล็กกล้าไร้สนิม, เหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็น, อลูมิเนียม

Materials	DIF		
	Yield stress		Ultimate stress
	Bending shear		
	f_{dy}/f_y	f_{dy}/f_y	f_{du}/f_u
A36	1.29	1.19	1.10
A588	1.19	1.12	1.05
A514	1.09	1.05	1.00
A446	1.10	1.10	1.00
Stainless steel type 304	1.18	1.15	1.00
Aluminum 6061-T6	1.02	1.00	1.00

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่ได้ทำการค้นคว้าการทดสอบความแข็งแรงของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยการระเบิด พบว่ามีการทดสอบของแต่ละบุคคลมีวิธีการทำที่คล้ายคลึงกัน โดยเริ่มจากแทนทดสอบสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทได้แก่ 1. แทนทดสอบแบบแนวตั้ง จะทำการติดตั้งเสาในแนวแกนตั้ง จากนั้นนำแทนทดสอบมาตั้งด้านข้าง เพื่อค้ำยันไม่ให้เสาเคลื่อนที่ไป และทำการทดสอบด้วยระเบิด โดยมี G. Daniel Williams[3], Xiaoli Bao[4], Farouk Siba[5], Hassan Aoude[6] และ Conrad Kyei[7, 8] เป็นบุคคลที่เลือกแทนทดสอบด้วยวิธีดังกล่าว 2. แทนทดสอบแบบแนวนอน จะทำการวางเสาไว้ในแกนนอน จากนั้นนำแทนทดสอบมาจับที่บริเวณหัว และท้ายเพื่อยึดให้เสานั้นอยู่กับที่ จากนั้นให้ระเบิดอยู่ด้านบนของแทนทดสอบที่ทำการยึดเกาะเสาไว้แล้วนั้น แต่ในกรณีมีข้อจำกัดอยู่ที่ระยะห่างจุดศูนย์กลางระเบิดไม่สามารถใช้ได้ในระยะที่ไกลๆได้ โดยมี Ke-Chiang Wu [9],[10], Juechun Xu [11], Zhikun Guo [12], Ganchai Tanapornraweekit[13], Fangrui Zhang[14] และ C. Wu[15] เป็นบุคคลที่เลือกแทนทดสอบด้วยวิธีดังกล่าว นอกจากนั้นนักวิจัยได้ทำการให้โหลดเพื่อทำหน้าที่จำลองน้ำหนักจริงที่กระทำต่อเสาที่เกิดขึ้นจริงในอาคาร จากนั้นในแต่ละบุคคลได้เลือกทำการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในแบบต่างๆได้แก่

Williams เขียนงานวิจัยชื่อ Response of Reinforced Concrete Bridge Columns Subjected to Blast Loads[3] ได้ทำการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อใช้ในสะพานจำนวน 2 แบบได้แก่ เสากลม กับเสาสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยในแต่ละเสาจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณจำนวน

เหล็กเสริม และวิธีการรัดเหล็กปลอก พบว่าการทดสอบด้วยระเบิดที่ระยะห่างจุดศูนย์กลางระเบิด 1500-2500 mm เสาจะเกิดการระเบิดจุดแนวแกนกลาง ผู้เขียนกำหนดไว้เกิดการแตกร้าวขึ้นจากด้านนอกสู่จุดศูนย์กลางของเสา จากกลไกการระเบิดนี้ เสาสามารถตอบสนองต่อแรงไดนามิก และเริ่มตอบสนองด้วยแรงดัด และแรงเฉือน นำไปสู่การเคลื่อนที่ และขยายตัวของเสา จะมีชิ้นส่วนของคอนกรีตออกมาจากเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

Bao เขียนงานวิจัยชื่อ Residual strength of blast damaged reinforced concrete columns[4] ได้ทำการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดหน้าตัดที่ 355x355 mm โดย Bao ทำการศึกษาว่า การเปลี่ยนความสูงของเสาที่ระยะ 3480, 2840, 2130 mm เปลี่ยนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเหล็กเสริม 2 แบบคือ ขนาด 8T20 กับ 8T25 และสุดท้ายเปลี่ยนวิธีการมัดของเหล็กปลอกเป็นแบบขาเดียวกับแบบมัด เมื่อทำการทดสอบด้วยระเบิดด้วยน้ำหนักเทียบเท่า TNT 1000 kg ที่ระยะห่างจุดศูนย์กลางระเบิด 5000 mm พบว่าเสาที่มีขนาดความยาวมาก โดยจัดอยู่ในประเภทเสายาวนั้น มีค่าความแข็งแรงน้อยกว่าเสาที่ถูกจัดอยู่ในประเภทเสาสั้น การเพิ่มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสริมเหล็กมีผลต่อโครงสร้าง โดยทำให้สามารถรับแรงระเบิดได้มากขึ้น เพิ่มแรงยึดตัวตามแนวแกนตั้ง ลดอัตราการโก่งตัวของเสาได้ จากการเปลี่ยนวิธีการมัดเหล็กปลอก สามารถรัดคอนกรีตในการเปลี่ยนรูป และป้องกันการหลุดร่อนของคอนกรีตได้ดีกว่าแบบขาเดี่ยว

Siba เขียนงานวิจัยชื่อ Near-Field Explosion Effects on Reinforced Concrete Columns: An Experimental Investigation[5] ได้ทำการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส 300x300 mm สูง 3 m โดย Siba ทำการศึกษาว่าเสาทั่วไปที่มีระยะห่างเหล็กปลอก 30 mm เสาต้านทานแผ่นดินไหวที่มีระยะเหล็กปลอก 75 mm สามารถต้านทานแรงระเบิดได้หรือไม่ ดังนั้น Siba ได้ทำการทดสอบด้วยระเบิด ANFO 100 kg และ TNT 82 kg ที่ระยะห่างจุดศูนย์กลางระเบิด 1100, 2700 และ 4300 mm ตามลำดับพบว่าเสาทั่วไปมีการวิบัติที่ระยะปรับทอน $0.22 m/kg^{1/3}$ เสาต้านทานแผ่นดินไหว สามารถต้านทานแรงระเบิดได้ เมื่อลดระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกให้ใกล้กันมากขึ้น

Aoude เขียนงานวิจัยที่มีชื่อว่า Behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete columns under blast loading[6] ได้ทำการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส 152x152 mm สูง 2468 mm โดย Aoude ทำการศึกษาด้วยการเปลี่ยนปริมาณระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก 38 และ 75 mm จากนั้นเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กเข้าไปจำนวน 2-6% และได้ใส่โพลีเอสเตอร์เข้าไปในเสา 294 kN ประมาณ 30% เมื่อทำการทดสอบด้วยระเบิด พบว่าการเสริมระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก และปริมาณด้วยเส้นใยเหล็ก สามารถต้านทานแรงระเบิดได้ดีขึ้นก่อนจะเกิดการวิบัติของเสา โดยที่เส้นใยเหล็กไม่ควรเกิน 4% อันเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กไปจะไม่ผลต่อความสามารถต้านทานแรงระเบิดอีกต่อไป

Conrad เขียนงานวิจัยที่มีชื่อว่า Effects of blast loading on seismically detailed reinforced concrete columns[8] ได้ทำการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส 300x300 mm สูง 3000 mm ที่มีระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก 75, 150, 300 mm เมื่อทำการทดสอบระเบิดประเภท Hemispherical ที่มีน้ำหนัก 100, 250, 500 และ 1000 kg มีระยะปรับทอน

0.8, 1.0 และ $1.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ พบว่าการลดระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก สามารถต้านทานแรงระเบิดได้แต่จะเกิดการโก่งตัวของเสามากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณระเบิด และระยะปรับทอน นอกจากนี้

Conrad ได้เขียนงานวิจัยอีกฉบับที่มีชื่อว่า Effects of transverse reinforcement spacing on the response of reinforced concrete columns subjected to blast loading[7] ได้ทำการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส $300 \times 300 \text{ mm}$ สูง 3000 mm ที่มีระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก 150, 300 mm และอีกตัวแปรมีระยะระหว่างเหล็กปลอก 75 mm ที่บริเวณกลางเสาถ้าออกมาจะมีระยะ 150 mm ได้ทำการทดสอบด้วยระเบิด ANFO มีน้ำหนัก 100, 250, 500 และ 1000 kg มีระยะปรับทอน 0.8, 1.0 และ $1.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ พบว่า การลดระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกทั้งหมดภายในเสาสามารถต้านทานแรงระเบิดได้แต่ใช้ได้ดีเฉพาะการระเบิดขนาดเล็กหรือการระเบิดในพื้นที่ปิด และการเพิ่มปริมาณเหล็กปลอก เฉพาะบริเวณตรงกลางใช้ได้ดีเฉพาะการระเบิดขนาดใหญ่ หรือการระเบิดที่มีระยะห่างค่อนข้างไกล

Wu เขียนงานวิจัยชื่อ The effects of explosive mass ratio on residual compressive capacity of contact blast damaged composite columns[9] ได้ทำการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดหน้าตัด $400 \times 400, 600 \times 600 \text{ mm}$ ที่ความสูง 3000, 4400 mm โดย Wu ทำการศึกษาด้วยการเปลี่ยนเหล็กเสริมเป็นเหล็ก H-beam มี 4 ขนาดได้ $H310 \times 310 \times 20 \times 28, H300 \times 300 \times 20 \times 30, H400 \times 400 \times 20 \times 20, H450 \times 400 \times 25 \times 40$ เมื่อทำการทดสอบด้วยระเบิดน้ำหนักเทียบเท่า TNT 25 kg ที่ระยะห่างจุดศูนย์กลางระเบิด 900 mm พบว่าการเพิ่มพื้นที่หน้าตัด การวางแผนโครงสร้างเหล็กเสริม ขนาด และความหนาของเหล็กเสริมสามารถเพิ่มความต้านทานการระเบิดได้ และเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักในแกนตั้งอย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนั้น Wu ได้เขียนงานวิจัยอีกฉบับมีชื่อว่า Residual axial compression capacity of localized blast-damaged RC columns[10] ได้ทำการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดย Wu ทำการศึกษาด้วยการเปลี่ยน ขนาดหน้าตัด $400 \times 400 \text{ mm}$ สูง 2400 mm, $400 \times 400 \times 3000 \text{ mm}, 600 \times 600 \times 3000 \text{ mm}, 600 \times 600 \times 4400 \text{ mm}, 900 \times 900 \times 3000 \text{ mm}$ และทำการเพิ่มจำนวน และระยะห่างการถักเหล็กปลอก เมื่อทำการทดสอบด้วยระเบิดน้ำหนักเทียบเท่า TNT 25 kg ที่ระยะห่างจุดศูนย์กลางระเบิด 200, 500 mm พบว่าการเพิ่มพื้นที่ของคอนกรีตมากขึ้น ทำให้โมดูลัสของเสา แรงเฉือน การดัดเพิ่มสูงขึ้น แต่การเพิ่มพื้นที่หน้าตัดจะต้องรับแรงระเบิด และมีความเสียหายเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน แต่ยังสามารถรับน้ำหนักในแกนตั้งได้ การเพิ่มระยะการถักเหล็กปลอก สามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรงเฉือนของเสา และเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดคอนกรีตให้อยู่ภายในเสา ลดผลกระทบความเสียหายจากการกระเด็นของคอนกรีตได้ และสามารถยับยั้งการโก่งตัวของเสาได้

Juechu เขียนงานวิจัยชื่อ Behaviour of ultra high performance fiber reinforced concrete columns subjected to blast loading[11] ได้ทำการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดหน้าตัด $200 \times 200 \text{ mm}$ สูง 2500 mm โดย Juechun ทำการศึกษาด้วยการเพิ่ม Micro steel fiber (MF) ผสมเข้าไป 2.5% เข้าไปในเสาโดยมวล MF ทำหน้าที่เป็นวัสดุคอมพอสิตเพื่อเสริมการรับแรงดึง เพราะว่ามีคุณสมบัติรับแรงดึงได้ถึง 4000 MPa เมื่อทำการทดสอบด้วยระเบิดน้ำหนักเทียบเท่า TNT 1-35 kg ตามลำดับ พบว่าเสา UHPFRC สามารถต้านทานแรงระเบิด

และแรงกระแทกได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ปริมาณคอนกรีตภายในเนื้อเสาพบว่ายังสามารถเกาะกันได้อย่างดี มีรอยแตกร้าวแนวแกนขวางเพียงเล็กน้อย บริเวณกลางเสาเมื่อเทียบกับเสา HSRC

Guo เขียนงานวิจัยชื่อ Post fire blast-resistances of RPC-FST columns using improved Grigorian model[16] ได้ทำการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแบบกลม โดยให้แผ่นเหล็กความหนา 12 mm โอบรัดคอนกรีตไว้ด้านใน โดยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางทั้งหมด 194 mm สูง 2500 mm โดย Guo ทำการศึกษาด้วยการคงขนาดของเสากลมนี้ไว้โดยทำการเปลี่ยนปริมาณของระเบิดที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งปริมาณที่ใช้เทียบเท่า TNT ได้แก่ 17.5, 35 kg ติดตั้งระเบิดที่ระยะห่างจุดศูนย์กลางระเบิด 1500 mm เพื่อศึกษาผลกระทบของระเบิด และเปลวไฟ จากการระเบิดที่ส่งผลกระทบต่อเสากลมนั้น พบว่าการเลือกออกแบบเสาด้วยวิธีนี้สามารถทนต่อเปลวไฟจากการระเบิดได้และสามารถเพิ่มความสามารถป้องกันเสากลมไม่ให้เกิดความเสียหายจากการระเบิดได้ โดยคอนกรีตได้รับความเสียหายค่อนข้างน้อย หรือแทบไม่มีผลกระทบใดๆ ยังผลให้สามารถรับน้ำหนักตามแนวแกนตั้งได้ จากการทดสอบผลกระทบต่อเสาในแนวแกนขวาง จะมีผลโดยตรง ซึ่งจะมีความแตกต่างต่อเสาขึ้นอยู่กับวัสดุ

Zhang เขียนงานวิจัยชื่อ Experimental and numerical study of blast resistance of square CFST columns with steel-fibre reinforced concrete[14] ได้ทำการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาด 210x210 mm สูง 2500 mm นอกจากนั้นเสานี้มีรูอยู่ตรงกลางขนาด 100x100 mm มีเส้นใยเหล็กขนาด 100x100x100 mm และ 100x100x400 mm โดยมีแผ่นเหล็กห่อหุ้มเสาขนาด 5 m บริเวณด้านนอก และด้านในรูของเสาด้วย ได้ทำการทดสอบด้วยระเบิด TNT มีน้ำหนัก 35 และ 50 kg มีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 1500 m นอกจากนั้นได้ทำการใส่แรงตามแนวแกนด้วย ขนาด 0 และ 1000 kN พบว่าน้ำหนักระเบิด 35 kg ไม่สามารถทำให้เกิดความเสียหายระเบิดน้ำหนัก 50 kg ทำให้เกิดการโก่งตัวของเสาบริเวณกลางเสา อัตรารูตรงกลางเสา 0-0.5 ไม่ส่งผลต่อการโก่งตัวของเสาเมื่อทดสอบระเบิด เส้นใยเหล็กมีผลทำให้การโก่งตัวน้อยลงเมื่อมีปริมาณเหล็กที่มากขึ้น การเพิ่มความหนาของแผ่นเหล็กหุ้มเสาบริเวณด้านในและด้านนอกมีผลทำให้เกิดการโก่งตัวของเสาในช่วงบริเวณจุดกึ่งกลางโดยแผ่นเหล็กหุ้มเสาด้านนอกมีผลกระทบมากกว่าด้านใน

จากการทำการศึกษางานวิจัยดังกล่าว พบว่ามีการศึกษาลักษณะสำคัญคือ การเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก การเพิ่มเส้นผ่าศูนย์กลางเหล็กเสริม เพิ่มระยะ และวิธีการถักเหล็กปลอก การนำแผ่นเหล็กมาโอบล้อมเสาคอนกรีต และการนำวัสดุเสริมแรงมาช่วยเสริมแรงในเนื้อคอนกรีตของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อนำมาตรวจสอบคุณสมบัติทางด้านกำลัง พลังการรับ การตอบสนอง และลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการศึกษาในแต่ละงานวิจัย ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติหรือพฤติกรรมของโครงสร้างที่ใช้ เพื่อนำไปคาดการณ์ความสามารถในการทนต่อแรงระเบิด งานวิจัยในเล่มนี้ และเลือกใช้วัสดุที่สามารถป้องกันหรือบรรเทาได้เมื่อเกิดเหตุการณ์ก่อความไม่สงบด้วยระเบิด

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

การวิจัยนี้เป็นการสร้างเสาอาคารต้านทานจากแรงระเบิดโดยใช้รูปแบบคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นวัสดุตั้งต้น โดยปรับปริมาณเหล็กปลอก ขนาดหน้าตัดและรูปร่างของเสาคอนกรีต และทดสอบด้วยการระเบิดด้วย Trinitrotoluene (TNT) ปริมาณ 0.91 kg ตามลำดับ

3.1 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการผลิตเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

วัสดุที่ใช้ในการผลิตเสาคอนกรีตเสริมเหล็กประกอบไปด้วย

1. คอนกรีต กำลังอัด 240 kg/cm²
2. เหล็กข้ออ้อย ระดับมาตรฐาน DB 12
3. เหล็กปลอกกลม ระดับมาตรฐาน RB 6
4. แบบหล่อเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ประเภทไม้แบบสำหรับเสาสี่เหลี่ยม และแบบกระดาษสำหรับเสากลม
5. เครื่องผสมคอนกรีต

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำทดสอบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งเพื่อทดสอบระเบิด ทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด และอุปกรณ์วัดผลการทดสอบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. แท่นทดสอบขนาด 2200x4700 mm สูง 1500 mm ใช้เพื่อวางเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจากข้อที่ 3.1.1 และแม่แรงไฮดรอลิก ขนาด 100 ตัน ตามรูปที่ 8



รูปที่ 8 แท่นทดสอบ

2. แทนติดตั้งวัตถุระเบิด เพื่อใช้ติดตั้งวัตถุระเบิด TNT 0.91 kg (2 ปอนด์) จำนวนทั้งหมด 12 ครั้ง ที่ระยะห่างจากเสา 290 และ 500 mm ตามรูปที่ 9



รูปที่ 9 แทนติดตั้งวัตถุระเบิด

3. แทนติดตั้ง Pressure gauge ใช้สำหรับยึดเกาะ Pressure gauge ให้อยู่กับแทนทดสอบที่ระยะห่างจากวัตถุระเบิด 1000 mm ตามรูปที่ 10



(ก.) ด้านหน้า

(ข.) ด้านข้าง

รูปที่ 10 แทนติดตั้ง Pressure gauge (ก.)ด้านหน้า, (ข.)ด้านข้าง

4. วัตถุระเบิด TNT ขนาด 0.91 kg (2 ปอนด์) ใช้สำหรับการทดสอบระเบิด โดยทำการทดสอบทั้งหมด 12 ครั้ง ตามรูปที่ 11



รูปที่ 11 วัตถุระเบิด TNT ขนาด 0.91 kg (2 ปอนด์)

5. แม่แรงไฮดรอลิก ขนาด 100 ตัน ใช้สำหรับการให้แรงกระทำที่ตัวเสาคล้ายกับเสาที่อยู่โครงสร้างอาคาร โดยที่ให้แรงกระทำที่ 10 ตัน ตามรูปที่ 12



รูปที่ 12 แม่แรงไฮดรอลิก ขนาด 100 ตัน

6. กล้องบันทึกภาพความเร็วไฟกัสสูง ใช้สำหรับบันทึกภาพ และวิดีโอเพื่อทราบถึงพฤติกรรมของแรงระเบิดที่กระทำต่อเสา ตามรูปที่ 13



รูปที่ 13 กล้องบันทึกภาพความเร็วสูง

7. เครื่องทดสอบ Universal Testing machine Amsler ขนาด 500 ตัน ใช้สำหรับการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด โดยทำการกดเสาแต่ละประเภท ทั้งก่อนการทดสอบ และหลังการทดสอบด้วยระดับในแนวแกนตามรูปที่ 14



รูปที่ 14 เครื่องทดสอบ Universal Testing machine Amsler ขนาด 500 ตัน

8. เครื่องทดสอบ Test Material Compression machine ใช้ทดสอบแรงอัดที่กระทำต่อลูกป้อน ตามรูปที่ 15



รูปที่ 15 เครื่องทดสอบ Test Material Compression machine

9. เครื่องทดสอบ Universal Testing machine Amsler capacity ขนาด 20 ตัน ใช้ทดสอบแรงดึงในเหล็กเส้นที่เป็นวัสดุในการหล่อเสาตามรูปที่ 16



รูปที่ 16 เครื่องทดสอบ Universal Testing machine Amsler capacity ขนาด 20 ตัน

10. Pressure gauge 200 MPa ใช้เพื่อวัดค่าแรงระเบิด TNT 0.91 kg (2 ปอนด์) ที่กระทำต่อเสาตามรูปที่ 17



รูปที่ 17 Pressure gauge 200 MPa

11. strain gauge ใช้สำหรับวัดค่าความเครียดของเหล็กยื่นภายในเสา ขณะทำการทดสอบระเบิดตามรูปที่ 18



รูปที่ 18 Strain gauge

12. Bridge box ใช้สำหรับเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่าง strain gauge เข้ากับ Data logger เพื่อวัดค่า และบันทึกค่าความเครียดของเหล็กยื่น ขณะทำการทดสอบระเบิดตามรูปที่ 19



รูปที่ 19 Bridge box

13. เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) อุปกรณ์บันทึกผลการวัดแรงระเบิดที่ได้จากการระเบิด และความเครียดที่เกิดของเหล็กภายในเสา ขณะทดสอบระเบิดตามรูปที่ 20



รูปที่ 20 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger)

14. อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัว ใช้สำหรับการวัดผลการโก่งตัวสูงสุดของเสาแต่ละประเภท เพื่อทราบการเคลื่อนตัวของเสาในขณะทำการทดสอบระเบิดตามรูปที่ 21



รูปที่ 21 อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัว

3.2 สถานที่ในการทำวิจัย

3.2.1 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถานที่ที่ใช้เพื่อทำการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ณ หน่วยวิจัย และห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในระหว่างวันที่ 20-21 มิถุนายน พ.ศ. 2562

3.2.2 โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

สถานที่ที่ใช้เพื่อทำการทดสอบระเบิด ณ สนามยิงปืนภายในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ในระหว่างวันที่ 16-19 มิถุนายน พ.ศ. 2562

3.3 ขั้นตอนในการวิจัย

3.3.1 วางแผน และออกแบบ

1. ทำการวางแผน แนวทางการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยมีเหล็กเสริมแบบข้ออ้อย (SD12) และเหล็กปลอก (RB6) เป็นแบบกลมตามรูปที่ 22 โดยมี

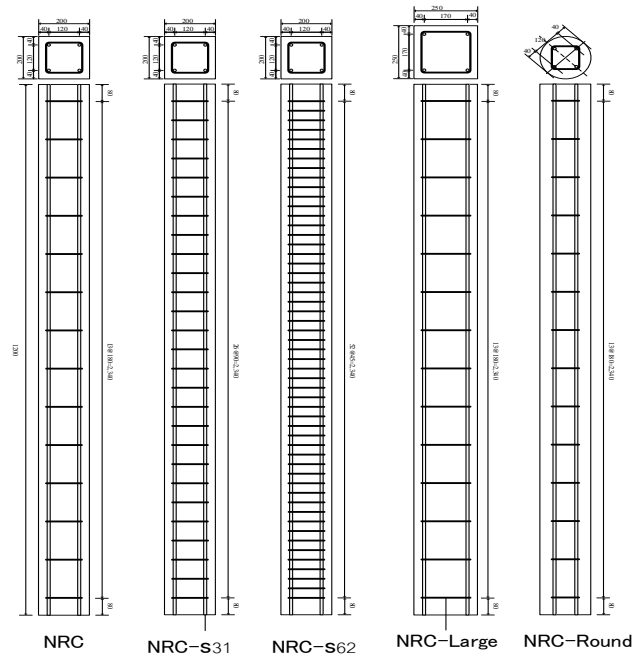
- เสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดหน้าตัดเสา 200x200 mm และความสูง 2500 mm ที่มีระยะเหล็กปลอก 180 mm จำนวน 6 แห่ง เรียกเสาประเภทนี้ว่าเสา NRC

- เสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดหน้าตัดเสา 200x200 mm และความสูง 2500 mm ที่มีระยะเหล็กปลอก 90 mm จำนวน 4 แห่ง เรียกเสาประเภทนี้ว่าเสา NRC-S31

- เสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดหน้าตัดเสา 200x200 mm และความสูง 2500 mm ที่มีระยะเหล็กปลอก 45 mm จำนวน 4 แห่ง เรียกเสาประเภทนี้ว่าเสา NRC-S62

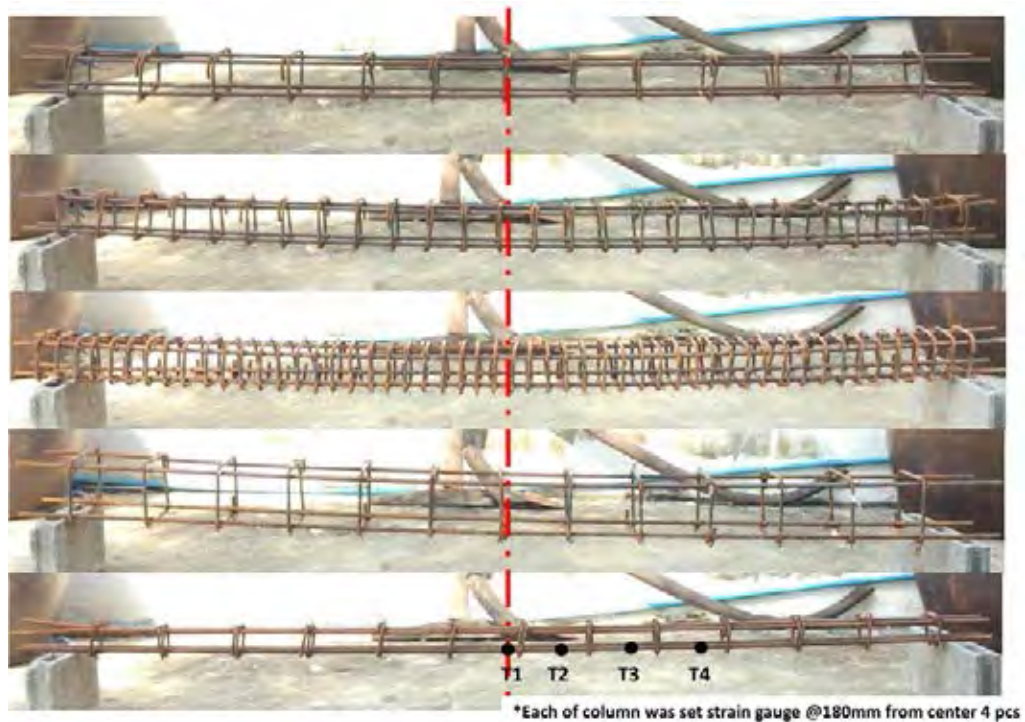
- เสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดหน้าตัดเสา 250x250 mm และความสูง 2500 mm ที่มีระยะเหล็กปลอก 180 mm จำนวน 4 แห่ง เรียกเสาประเภทนี้ว่าเสา NRC-Large

- เสาคอนกรีตเสริมเหล็กแบบกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 200 mm และความสูง 2500 mm มีระยะเหล็กปลอก 180 mm จำนวน 4 แห่ง เรียกเสาประเภทนี้ว่า NRC-Round



รูปที่ 22 แบบจำลองเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในงานวิจัย

2. ทำการกำหนดตำแหน่งในการติด Strain gauge จำนวน 4 จุด โดยจุดแรก (T0) ทำการติดไว้ที่จุดกึ่งกลางของเสา จุดที่ 2-3 (T1-T3) ติดไว้ถัดออกมาจากจุด T0 ทุกระยะ 180 mm ตามรูปที่ 23 จากรูปเรียงโครงเหล็กจากด้านบนสุดของรูปเรียงลงมาด้านล่างสุดได้เป็นโครงเหล็กของเสาประเภท NRC NRC-S31 NRC-S62 NRC-Large และ NRC-Round



*Each of column was set strain gauge @180mm from center 4 pcs

รูปที่ 23 ตำแหน่งติด Strain gauge (T0, T1, T2 และ T3)

3. ทำการกำหนดการใช้วัตถุระเบิด TNT ระยะห่างจุดศูนย์กลางระเบิด และระยะปรับทอนตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 กำหนดการทดสอบระเบิดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีปริมาณเหล็กปลอก ขนาดหน้าตัด และรูปร่างแตกต่างกัน

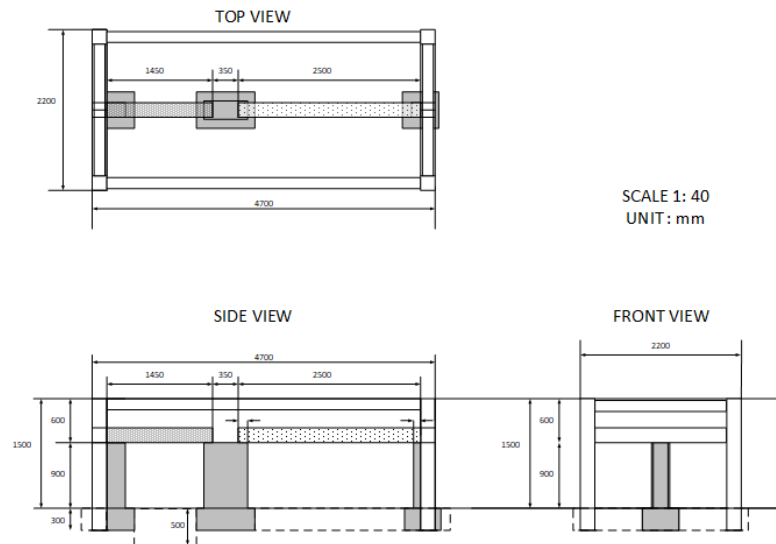
ลำดับ	รหัสตัวอย่าง	ประเภทคอนกรีต	กำลังอัดคอนกรีต[f_c'] (kg/cm ²)	แรงในแนวแกน (kg)	ปริมาณระเบิด (kg)	ระยะห่างจุดศูนย์กลางระเบิด (mm)	ระยะปรับทอน (m/kg) ^{1/3}
1	NRC-29	CVC	240	10000	0.91	290	0.30
2	NRC-50-1	CVC	240	10000	0.91	500	0.52
3	NRC-50-2	CVC	240	10000	0.91	500	0.52
4	NRC-50-3	CVC	240	10000	0.91	500	0.52
5	NRC-S31-50-1	CVC	240	10000	0.91	500	0.52
6	NRC-S31-50-2	CVC	240	10000	0.91	500	0.52
7	NRC-S62-50-1	CVC	240	10000	0.91	500	0.52
8	NRC-S62-50-2	CVC	240	10000	0.91	500	0.52
9	NRC-Large-50-1	CVC	240	10000	0.91	500	0.52
10	NRC-Large-50-2	CVC	240	10000	0.91	500	0.52
11	NRC-Round-50-1	CVC	240	10000	0.91	500	0.52
12	NRC-Round-50-2	CVC	240	10000	0.91	500	0.52

4. กำหนดการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อใช้ทดสอบภาคสถิติศาสตร์ตาม ตารางที่ 4 โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ เสาคอนกรีตเสริมเหล็กแบบไม่ได้ทดสอบระเบิด และได้ทดสอบระเบิดแล้ว

ตารางที่ 4 กำหนดการภาคสถิติศาสตร์ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีปริมาณเหล็กปลอก ขนาดหน้าตัด และรูปร่างแตกต่างกัน

ลำดับ	รหัสตัวอย่าง	ประเภทคอนกรีต	กำลังอัดคอนกรีต[fc'] (kg/cm ²)	ปริมาณระเบิด (kg)	ระยะห่างจุดศูนย์กลางระเบิด (mm)	ระยะปรับทอน (m/kg) ^{1/2}
1	NRC-STA 1	CVC	240	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
2	NRC-STA 2	CVC	240	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
3	NRC-S31-STA 1	CVC	240	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
4	NRC-S31-STA 2	CVC	240	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
5	NRC-S62-STA 1	CVC	240	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
6	NRC-S62-STA 2	CVC	240	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
7	NRC-Large-STA 1	CVC	240	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
8	NRC-Large-STA 2	CVC	240	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
9	NRC-Round-STA 1	CVC	240	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
10	NRC-Round-STA 2	CVC	240	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
11	NRC-29-STA	CVC	240	0.91	290	0.30
12	NRC-50-STA 1	CVC	240	0.91	500	0.52
13	NRC-50-STA 2	CVC	240	0.91	500	0.52
14	NRC-50-STA 3	CVC	240	0.91	500	0.52
15	NRC-S31-50-STA 1	CVC	240	0.91	500	0.52
16	NRC-S31-50-STA 2	CVC	240	0.91	500	0.52
17	NRC-S62-50-STA 1	CVC	240	0.91	500	0.52
18	NRC-S62-50-STA 2	CVC	240	0.91	500	0.52
19	NRC-Large-50-STA 1	CVC	240	0.91	500	0.52
20	NRC-Large-50-STA 2	CVC	240	0.91	500	0.52
21	NRC-Round-50-STA 1	CVC	240	0.91	500	0.52
22	NRC-Round-50-STA 2	CVC	240	0.91	500	0.52

5. ทำการออกแบบแท่นทดสอบ และเสาซัพพอร์ตเพื่อใช้ในการรองรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กขณะทำการทดสอบระเบิดตามรูปที่ 24



รูปที่ 24 แบบแท่นทดสอบที่ใช้ในการทดสอบระเบิด

3.3.2 การหล่อชิ้นรูปเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

1. ทำการสร้างแกนเหล็กเสริม และเหล็กปลอกภายในเสาตามที่ออกแบบ และติด strain gauge เข้าไปในเหล็กปลอกภายใน ตามรูปที่ 25



รูปที่ 25 การจัดเรียงตัวของเหล็กเสริมเหล็กปลอก และระยะการติด strain gauge

2. ทำการประกอบไม้แบบเพื่อเป็นแบบหล่อเสา จากนั้นนำโครงเหล็กมาวางไว้ภายในแบบหล่อ และติดตั้งไม้ค้ำยันให้โครงเหล็กอยู่ในตำแหน่งที่ออกแบบตามรูปที่ 26



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 26 ติดตั้งแบบหล่อเสา และนำเหล็กวางเหล็กที่ได้ทำการสร้างไว้ภายในแบบหล่อ (ก.)แบบหล่อเสาสีเขียว (ข.)แบบหล่อเสากลม

3. รดน้ำให้ชุ่มแบบหล่อ และเหล็กเสริมเพื่อลดอุณหภูมิ และการดูน้ำของคอนกรีต จากนั้นเทปูนซีเมนต์ที่ผสมเสร็จเรียบร้อยแล้วเข้าไปในแบบหล่อตามรูปที่ 27



รูปที่ 27 การหล่อเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

4. เมื่อคอนกรีตแข็งตัวเรียบร้อยแล้ว โดยใช้เวลาประมาณ 2 วัน จากนั้นถอดแบบหล่อออก และทำการบ่มเสาเป็นเวลา 28 วันตามรูปที่ 28



รูปที่ 28 เสาคอนกรีตที่ได้รับการบ่มเป็นเวลา 28 วัน

3.3.3 การติดตั้งแท่นทดสอบ

1. ทำการจัดซื้อจัดจ้างประกอบแท่นทดสอบจากบริษัท Siam Yamato Steel Company Limited และเสาซีพอร์ตรองรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามแบบที่ได้ออกแบบไว้โดยว่าจ้างผู้รับเหมาทำการหล่อแบบตามรูปที่ 29



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 29 การจัดซื้อจัดจ้างประกอบแท่นทดสอบ (ก.)การทำประกอบแท่นทดสอบ
(ข.)ทำการหล่อเสาซีพอร์ตรองรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

2. ทำการปรับสถานที่ที่ใช้ในการทดสอบ และขุดดินเตรียมติดตั้งแท่นทดสอบเข้าในหลุม
นั้นตามแผนที่ได้ออกแบบไว้ตามรูปที่ 30



รูปที่ 30 การปรับสถานที่ที่ใช้ในการทดสอบและขุดดินเตรียมเพื่อเตรียมติดตั้ง

3. ติดตั้งแท่นทดสอบ แท่นซัพพอร์ตลงในหลุมดินตามที่ได้ออกแบบไว้ หล่อฐานรากของ
แท่นทดสอบทั้ง 4 มุม เพื่อยึดตรึงแท่นทดสอบไม่ให้เคลื่อนตัวในระหว่างการทดสอบระเบิดตามรูปที่

31



รูปที่ 31 ติดตั้งแท่นทดสอบ แท่นซัพพอร์ต และหล่อฐานรากของแท่นทดสอบ

3.3.4 การทดสอบแรงระเบิด การทดสอบภาคสถิติศาสตร์ และวิเคราะห์ผล

1. นำเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการหล่อเรียบร้อยแล้วในรูปแบบต่างๆกัน จากนั้นนำมาติดตั้งกับแท่นทดสอบตามแนวแกน ตามรูปที่ 32



รูปที่ 32 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กถูกติดตั้งบนแท่นทดสอบ

2. ติดตั้งแม่แรงไฮดรอลิก ขนาด 100 ตัน โดยใส่แรงขนาด 10 ตัน เข้าไปในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อจำลองเหตุการณ์ของเสาที่รับน้ำหนักบรรทุกทุกถาวรของอาคาร บ้าน เรือนทั่วไป ซึ่งเป็นแรงกระทำแก่เสาในแนวแกนตั้งตามรูปที่ 33 จากนั้นนำฝาคออปไฮดรอลิกป้องกันระเบิด



รูปที่ 33 ติดตั้งแม่แรงไฮดรอลิก บนแท่นซีพอร์ต

3. ติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลอันได้แก่ กล้องบันทึกภาพความเร็วสูง ติดตั้งห่างจากแท่นทดสอบออกไปประมาณ 300 m ได้รับการสนับสนุนอุปกรณ์จากสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศตามรูปที่ 34 นำ Pressure gauge ติดตั้งกับแท่นยึดติดเพื่อให้ Pressure gauge ยึดติดกับแท่นทดสอบมีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิดประมาณ 1 m จากนั้นนำสายต่อเข้ากับ Data logger ตามรูปที่ 35 จากนั้นอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวของเสา ติดตั้งไว้ด้านล่างของเสามี 4 ตัว โดยจะ

ติดตั้งที่ จุดกึ่งกลางของเสา และถัดออกมาทุกๆระยะ 0.3 m ตามรูปที่ 36 เรียบแล้วทำการต่อสาย Strain gauge เข้าสู่เครื่อง Bridge box จากนั้นต่อเข้ากับเครื่อง Data logger อีกครั้ง และนำเครื่อง Bridge box และ Data logger บรรจุในกล่องเหล็ก และป้องกันโดยการนำยางรถยนต์มาเรียงต่อกัน ทำเป็นกำแพงต้านแรงระเบิดไว้บริเวณด้านหลังเสาซีพพอร์ต เนื่องมาจากหลุมที่ได้ทำการขุดเพื่อฝัง อุปกรณ์ต่างๆมีน้ำขังจนไม่สามารถฝังได้ ซึ่งเกิดจากฝนตกหนัก และวันที่ทำการทดสอบประจวบเหมาะกะบมรสุมเข้า จากนั้นนำอุปกรณ์บันทึกข้อมูลต่อกับกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ขนาด 12 v โดยต่อกับอุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้าเพื่อให้อุปกรณ์บันทึกผลพร้อมใช้ในบันทึกผลตามรูปที่ 37



รูปที่ 34 ติดตั้งอุปกรณ์กล้องบันทึกภาพความเร็วสูง



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 35 ติดตั้งอุปกรณ์ Pressure gauge ยึดติดกับแท่นทดสอบ (ก.)ด้านหน้า (ข.)ด้านหลัง



รูปที่ 36 ติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวของเสา



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 37 การบรรจุ Bridge box และ Data logger ในกล่องเหล็กและวิธีป้องกันป้องกันโดยวางรถยนต์ทำเป็นกำแพงต้านแรงระเบิดไว้บริเวณด้านหลังเสาซัพพอร์ต (ก.) Bridge box และ Data logger บรรจุในกล่องเหล็ก (ข.) กำแพงยางรถยนต์ป้องกันกล่องเหล็ก

4. ทำติดตั้งวัตถุระเบิด TNT ขนาด 0.91 kg ไว้ที่จุดกึ่งกลางของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยการใช้ท่อ PVC ทำขึ้นมาเป็นแท่นเพื่อติดระเบิดไว้ตามระยะที่กำหนดได้แก่ 290 และ 500 mm ตามลำดับตามรูปที่ 38 และทำการต่อขนวนระเบิดเข้ากับวัตถุระเบิดโดยผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทาง

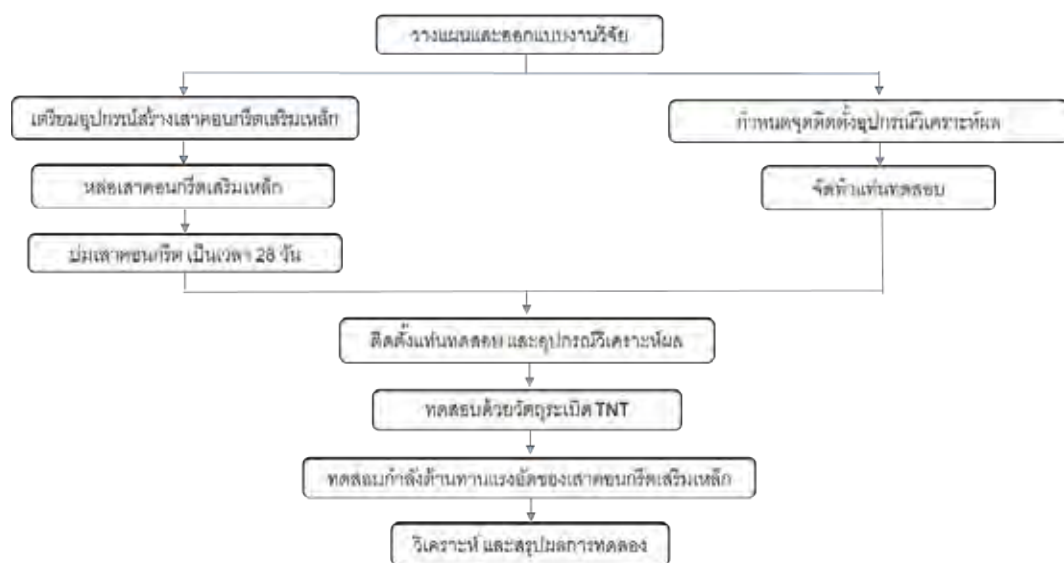


รูปที่ 38 ติดตั้งวัตถุระเบิด TNT ขนาด 0.91 kg ไว้ที่จุดกึ่งกลางของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

5. ทำการทดสอบด้วยวัตถุระเบิดซ้ำ กับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามตารางที่ 3
6. นำเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามที่ได้ทดสอบด้วยวัตถุระเบิด และยังไม่ได้ทดสอบไปทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดด้วยเครื่อง Universal Testing machine ขนาด 500 ตัน ตามตารางที่ 4
7. นำผลการทดสอบแรงระเบิดมาวิเคราะห์ เพื่อเปรียบเทียบ เพื่อศึกษาผลของปริมาณเหล็กปลอก ขนาดหน้าตัด และรูปร่างของเสาคอนกรีตที่มีต่อความทนทานต่อการแตกหักของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบกำลังโครงสร้างเชิงไดนามิก เพื่อศึกษาความทนทานของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับผลกระทบของแรงระเบิดต่อปริมาณเหล็กปลอก ขนาดหน้าตัด และรูปร่างของเสาคอนกรีตทั่วไป ซึ่งจะนำมาเพื่อทดสอบด้วยแรงระเบิด ดังนั้นขั้นตอนการวิจัยนี้จะชี้แจงเกี่ยวกับแผนภาพการดำเนินงานในหัวข้อที่ 6

3.4 แผนภาพการดำเนินงาน



บทที่ 4 ผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ทำการศึกษา และพิจารณาสภาพความเสียหาย และผลกระทบของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีปริมาณเหล็กปลอก ขนาดหน้าตัด และรูปร่าง โดยที่เสาเป็นแบบสี่เหลี่ยม ขนาดหน้าตัดเสา 200x200 mm ความสูง 2500 mm, ขนาดหน้าตัดเสา 250x250 mm และความสูง 2500 mm และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 200 mm และความสูง 2500 mm จากนั้นนำไปทดสอบด้วยวัตถุระเบิด TNT 2 ปอนด์ และนำไปทดสอบแรงอัดด้วยเครื่อง Universal Testing machine

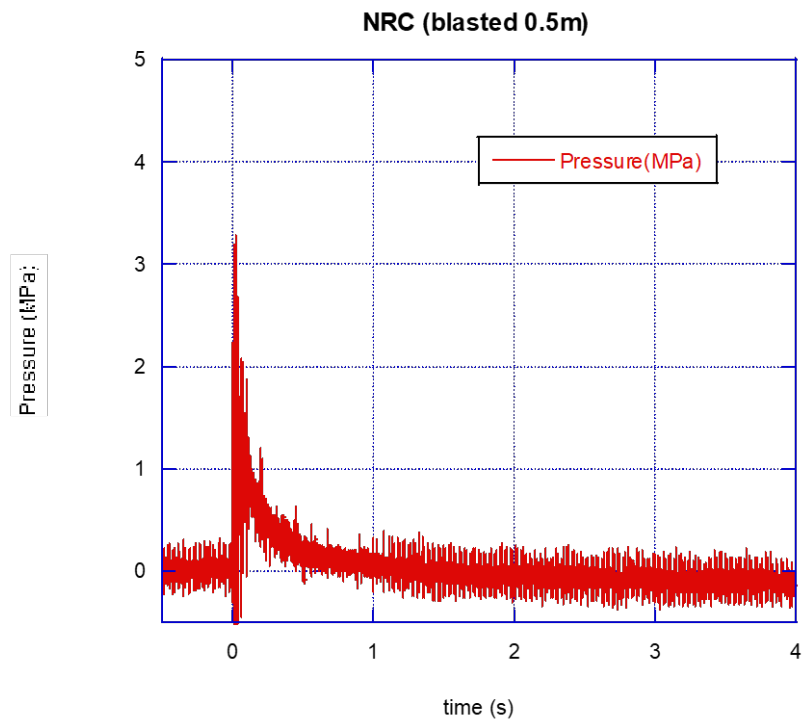
4.1 การศึกษาความรุนแรงของวัตถุระเบิด

เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้นำมาทดสอบด้วยวัตถุระเบิดที่ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 290 mm และ 500 mm เพื่อใช้ในการทดสอบหาค่าแรงระเบิดที่กระทำต่อเสาที่ใช้ในการทดสอบ ขั้นตอนนี้ทำโดยมีเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความยาว 2500 mm เป็นวัสดุทดสอบที่มีปริมาณเหล็กปลอก ขนาดหน้าตัด และรูปร่างแตกต่างกันในแต่ละประเภทจำนวน 2-3 ต้น ซึ่งสามารถวัดค่าด้วยการใช้อุปกรณ์ Pressure gauge ตามตารางที่ 5 ที่ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 1 m เนื่องจากในการทดสอบไม่สามารถทำการติดตั้งอุปกรณ์ Pressure gauge ไว้ที่เสาได้ อันเนื่องมาจากเปลวไฟ และความดันของระเบิดจะเคลื่อนที่ครอบคลุมทั้งเสาไว้ทั้งหมด ทำให้อุปกรณ์ Pressure gauge ไม่มีที่กำบัง และมีความเสี่ยงต่ออุปกรณ์เสียหายสูง จึงทำการติดอุปกรณ์ Pressure gauge ไว้ที่แท่นทดสอบแทน ค่าของความดันที่ได้จากการระเบิดตามตารางที่ 5 จะเป็นค่าความดันที่อุปกรณ์ Pressure gauge วัดได้ แม้ว่าจะไม่ได้เป็นค่าจริงที่เสาได้รับ แต่เป็นค่าความดันที่ระเบิดออกมาได้จริง และได้ถ่ายรูปตามรูปที่ 39 ด้วยเครื่องบันทึกภาพความเร็วไฟท์สูงได้รับการสนับสนุนจากสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ เห็นได้ว่าแรงระเบิด และเปลวไฟจะเคลื่อนที่ครอบคลุมเสาแล้วผ่านเสาลงไปด้านล่าง จากนั้นจะเคลื่อนที่กลับขึ้นมาขึ้นมาอีกครั้งหนึ่ง ทำให้ทราบว่าพฤติกรรมของการระเบิดเป็นไปตามทฤษฎีพฤติกรรมของระเบิดที่ได้กล่าวในบทที่ 2 และเป็นไปตามกราฟที่ 3

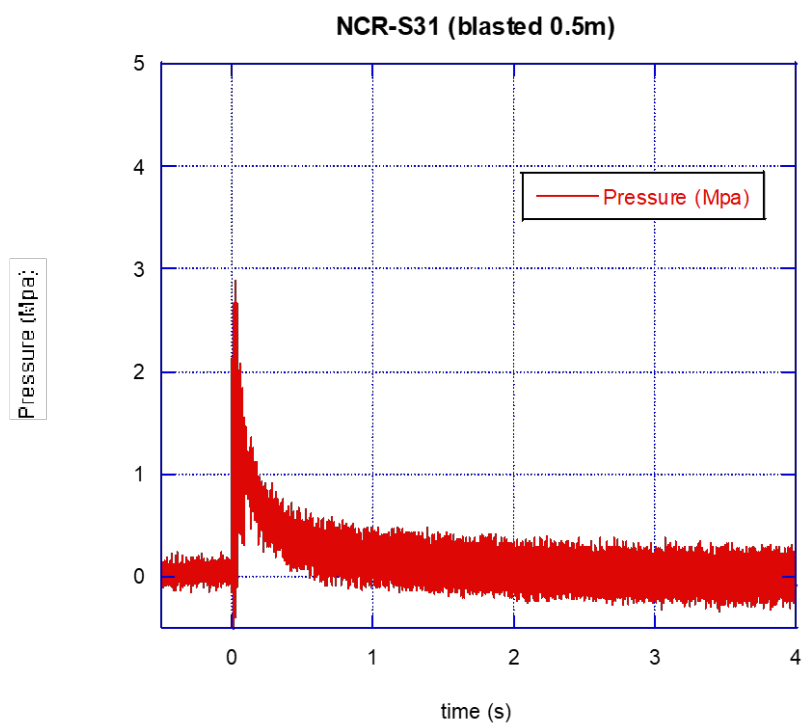
ตารางที่ 5 ค่าความรุนแรงของแรงระเบิด

ตัวอย่าง	ความดันที่ได้ จากการทดสอบ (MPa)	ความดันที่ได้ จากการคำนวณ (MPa)
NRC-29	3.08	3.45
NRC-50-1	2.57	
NRC-50-2	3.11	
NRC-50 3	3.3	
NRC-S31-50-1	3.0	
NRC-S31-50-2	2.9	
NRC-S62-50-1	2.95	
NRC-S62-50-2	3.5	
NRC-Large-50-1	2.7	
NRC-Large-50-2	ไม่สามารถหาค่าได้	
NRC-Round-50-1	2.9	
NRC-Round-50-2	3.2	
เฉลี่ย	3.02	

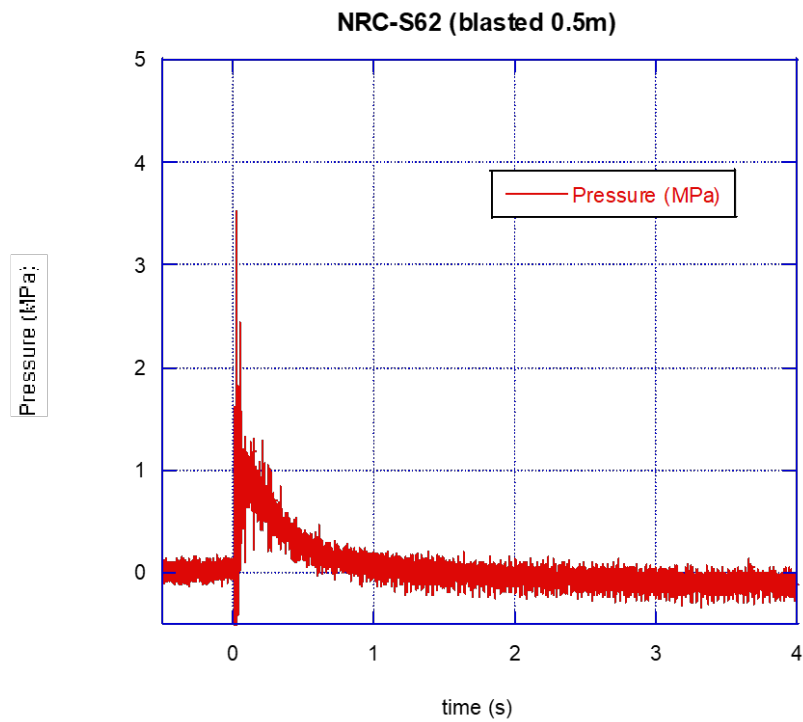
ผลการวิเคราะห์ของการทดสอบแรงระเบิดกระทำต่อเสาคอนกรีตเสริมเหล็กพบว่ามีค่าเฉลี่ย 3.02 MPa โดยที่ค่าของแรงระเบิดที่มากที่สุดคือ NRC-S62-50-2 อยู่ที่ 3.5 MPa และต่ำสุดอยู่ที่ 2.57 MPa ของเสา NRC-50-1 ตามกราฟที่ 6-10 เมื่อเทียบกับการคำนวณแรงระเบิดด้วยสมการที่ 2 ที่หาระยะปรับทอน (Z) ได้ค่า $1.13 \text{ m/kg}^{1/3}$ ที่มีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 1 m ซึ่งค่าระยะปรับทอนในการทดสอบมีค่าต่ำกว่า $1.2 \text{ m/kg}^{1/3}$ ถือว่าเป็นการระเบิดระยะใกล้ (Near-rang explosion) จากนั้นนำไปเทียบกับกราฟที่ 11 เพื่อหาค่าความดันเหนือความดันบรรยากาศ (p_{so}) ได้ค่าประมาณ 3.45 MPa ซึ่งค่าที่แรงระเบิดที่ได้ทำการทดลองไปอยู่ในช่วงของค่าของสมการการคำนวณนี้



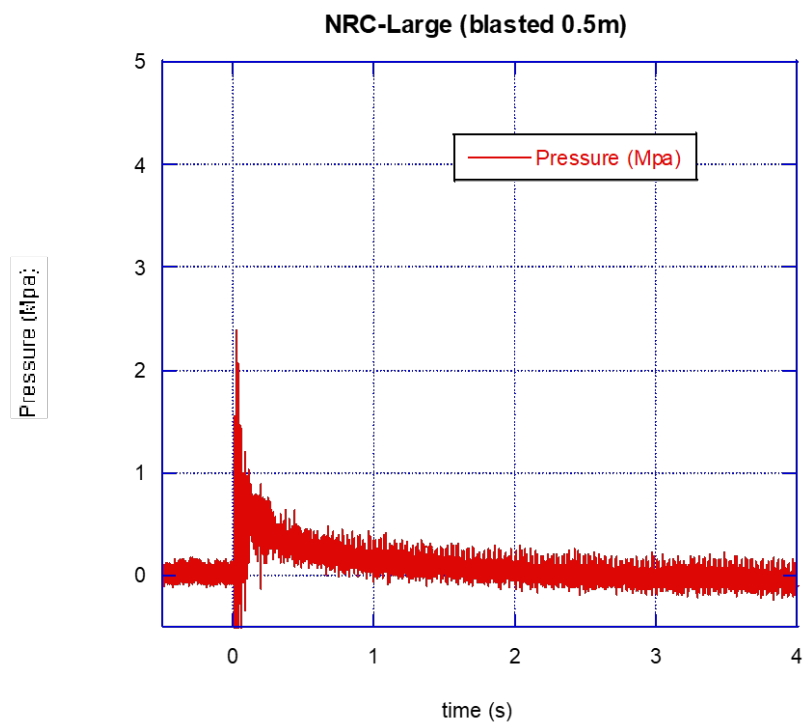
กราฟที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน และเวลาของแรงระเบิดของเสา NRC ระยะห่างจากจุด
ศูนย์กลางระเบิด 500 mm



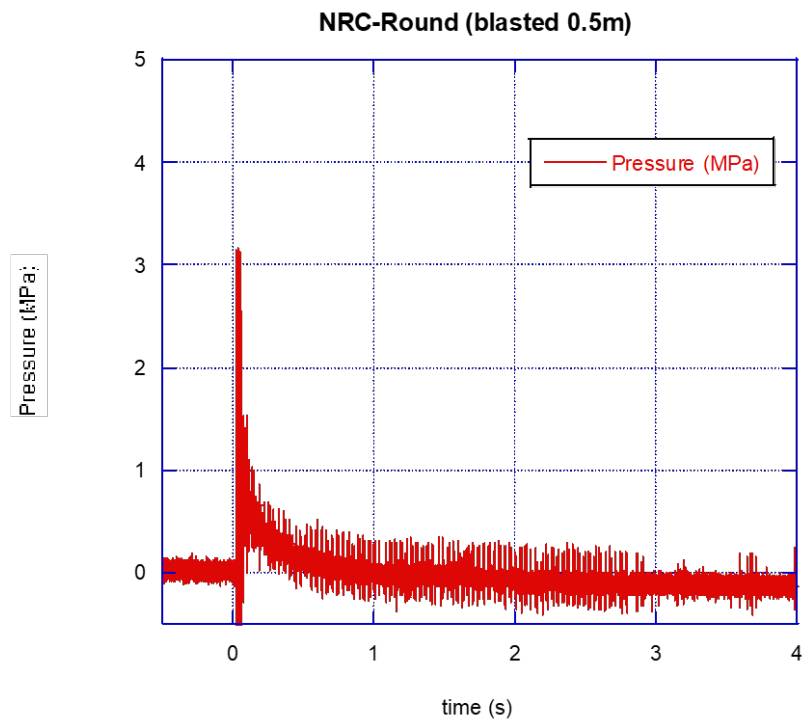
กราฟที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน และเวลาของแรงระเบิดของเสา NCR-S31 ระยะห่างจากจุด
ศูนย์กลางระเบิด 500 mm



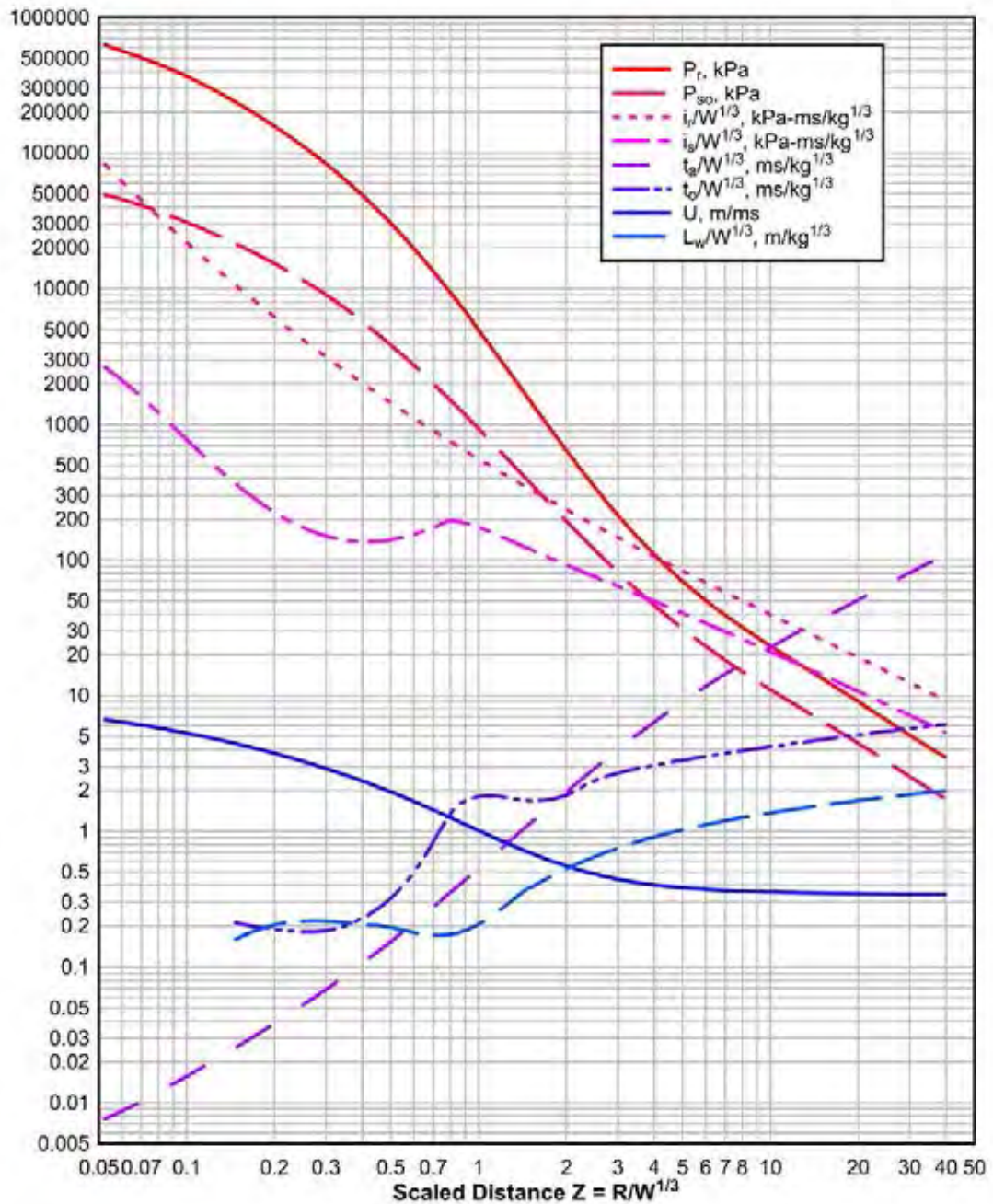
กราฟที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน และเวลาของแรงระเบิดของเสา NRC-S62 ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 500 mm



กราฟที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน และเวลาของแรงระเบิดของเสา NRC-Large ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 500 mm



กราฟที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน และเวลาของแรงระเบิดของเสา NRC-Round ระยะห่าง
จากจุดศูนย์กลางระเบิด 500 mm



กราฟที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแรงระเบิด TNT ช่วงบวก และระยะปรับทอนของการระเบิด
กลางอากาศ (ที่มา: Unified Facilities Criteria: Structures to Resist the Effects of
Accidental Explosions (UFC 3-340-02))[17]



รูปที่ 39 แรงระเบิด และเปลวไฟจากระเบิด TNT 2 ปอนด์ กระทำต่อเสา NRC-50-1 (ก.)เริ่มจุดระเบิด แรงระเบิดเริ่มกำลังกระทำต่อเสาที่เวลา 0.2770 s (ข.)แรงระเบิดกระทำต่อเสาที่เวลา 0.2773 s (ค.)แรงระเบิดที่กระทำต่อเสาที่เวลา 0.2803 s (ง.)แรงระเบิดที่กระทำต่อเสาที่เวลา 0.2893 s (จ.)แรงระเบิดที่กระทำต่อเสาที่เวลา 0.3103 s (ฉ.)แรงระเบิดที่เคลื่อนที่ออกจากเสาที่เวลา 0.243 s

4.2 การศึกษาสภาพความเสียหายเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหลังจากที่ทดสอบระเบิด

ขั้นตอนนี้ทำได้โดยกระบวนการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแรงระเบิดที่ติดตั้งอยู่บนแท่นทดสอบ และให้แรงกระทำในแนวแกน 10 ตันเป็นการจำลองว่าเสาได้รับแรงบรรทุกถาวรเหมือนโครงสร้างจริง ซึ่งในตอนแรกได้ทำการวางแผนไว้ให้แรงที่ 50 ตัน แต่เนื่องด้วยปัญหาด้านสถานที่ที่เป็นสนามหญ้าไร้สิ่งก่อสร้างโดยรอบเป็นระยะ 300 m บริเวณที่ทำการทดสอบไม่มีไฟฟ้าใช้ประจวบเหมาะกับการเป็นช่วงฤดูฝน วันที่ทำการทดสอบเป็นช่วงมรสุมเช้า จึงไม่เป็นการเสี่ยงอย่างมากที่จะทำ

การต่อเต้าเสียบจากอาคารมาที่บริเวณทำการทดสอบ ดังนั้นแม่แรงไฮดรอลิกที่นำมาทำการทดสอบ จึงเป็นแบบโยกที่ใช้แรงคน ทำให้แรงคนที่ทำการโยกให้ได้ 50 ตันจึงเป็นไปได้ยากจึงปรับแรงใน แนวแกนเหลือ 10 ตัน จากนั้นทำการติดตั้งวัตถุระเบิดที่มีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 290 mm และ 500 mm จากนั้นทำการศึกษาเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ทำการทดสอบเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ด้วยการถ่ายภาพ โดยสามารถแบ่งประเภทเสาคอนกรีตเป็น 5 กลุ่ม คือ เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มี ขนาดหน้าตัดเสา 200x200 mm ความสูง 2500 mm ระยะเหล็กปลอก 180 mm, เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดเสา 200x200 mm ความสูง 2500 mm ระยะเหล็กปลอก 90 mm, เสา คอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดเสา 200x200 mm ความสูง 2500 mm ระยะเหล็กปลอก 45 mm, เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดเสา 250x250 mm ความสูง 2500 mm ระยะเหล็ก ปลอก 180 mm เสาคอนกรีตเสริมเหล็กแบบกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 200 mm และความสูง 2500 mm ระยะเหล็กปลอก 180 mm ผลจากการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย แสดงลักษณะของเสา คอนกรีตเสริมเหล็กตามรูปที่ 40-45



(ก.)

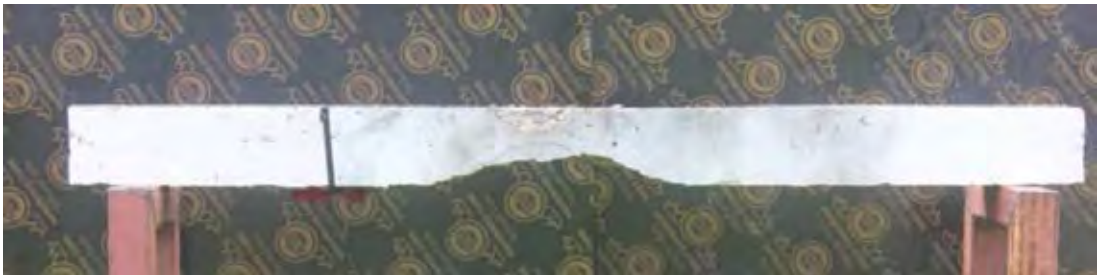


(ข.)

รูปที่ 40 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดเสา 200x200 mm ความสูง 2500 mm ระยะเหล็กปลอก 180 ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 290 mm (ก.)ด้านหน้า (ข.)ด้านหลัง



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 41 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดเสา 200x200 mm ความสูง 2500 mm ระยะเหล็กปลอก 180 ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 500 mm (ก.)ด้านหน้า (ข.)ด้านหลัง



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 42 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดเสา 200x200 mm ความสูง 2500 mm ระยะเหล็กปลอก 90 mm ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 500 mm (ก.)ด้านหน้า (ข.)ด้านหลัง



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 43 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดเสา 200x200 mm ความสูง 2500 mm ระยะเหล็กปลอก 45 mm ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 500 mm (ก.)ด้านหน้า (ข.)ด้านหลัง



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 44 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดเสา 250x250 mm ความสูง 2500 mm ระยะเหล็กปลอก 180 mm ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 500 mm (ก.)ด้านหน้า (ข.)ด้านหลัง



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 45 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กแบบกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 200 mm และความสูง 2500 mm ระยะเหล็กปลอก 180 mm ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 500 mm (ก.)ด้านหน้า (ข.)ด้านหลัง

ผลการศึกษาพบว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก พบว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดเสา 200x200 mm ความสูง 2500 mm ระยะเหล็กปลอก 180 mm ที่ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 290 mm (NRC-29) เนื้อคอนกรีตได้เกิดการกะเทาะ (scabbing) บนผิวรับแรงระเบิด และการหลุดล่อน (spalling) เกิดที่ผิวอีกด้านของเสาคอนกรีตอันเนื่องมาจากเกิดการโก่งตัวของเหล็ก ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณคอนกรีตภายในบริเวณกึ่งกลางเสาเหลือน้อยมาก เกิดการโก่งตัวของเสาคอนกรีต และมีการเสียรูปของเหล็กย่น ทำให้เสาคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการวิบัติ ตามรูปที่ 46



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 46 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดเสา 200x200 mm ความสูง 2500 mm ระยะเหล็กปลอก 180 ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 290 mm (ก.)ด้านหน้าหน้ารับแรงระเบิด (ข.)ด้านหลังรับแรงระเบิด

ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 500 mm ที่ผิวด้านบนที่รับแรงระเบิดมีการกะเทาะของคอนกรีตเพียงเล็กน้อย การหลุดล่อนของคอนกรีตด้านล่างของเสาคอนกรีตหลุดออกไปเป็นจำนวนมากสามารถเห็นเนื้อเหล็กภายในเสาได้ จากการหลุดล่อนของคอนกรีตทำให้เห็นได้ว่าเหล็กเสริมไม่ได้เสียรูปแต่อย่างใด และโดยรวมของเสามีการโก่งตัวเล็กน้อยตามรูปที่ 47



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 47 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดเสา 200x200 mm ความสูง 2500 mm ระยะเหล็กปลอก 180 ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 500 mm (ก.)ด้านหน้ารับแรงระเบิด (ข.)ด้านหลังรับแรงระเบิด

เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดเสา 200x200 mm ความสูง 2500 mm ระยะเหล็กปลอก 90 mm ที่ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 500 mm ที่ผิวด้านบนรับแรงระเบิดมีการกะเทาะเกิดขึ้น และสามารถเห็นเนื้อเหล็กภายในเสาได้ ซึ่งพบว่าเหล็กไม่ได้มีความผิดรูปเกิดขึ้น ด้านข้างของเสาเกิดรอยร้าวแบบเฉือนคล้ายกับเสาประเภท NRC แต่น้อยกว่า ส่วนด้านผิวด้านหลังของเสามีรอยร้าวแนวขวางของเสาเกิดขึ้น และมีการโก่งตัวของเสาเล็กน้อยตามรูปที่ 48



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 48 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดเสา 200x200 mm ความสูง 2500 mm ระยะเหล็กปลอก 90 mm ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 500 mm (ก.)ด้านหน้าหน้ารับแรงระเบิด
(ข.)ด้านหลังรับแรงระเบิด

เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดเสา 200x200 mm ความสูง 2500 mm ระยะเหล็กปลอก 45 mm ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 500 mm ที่บริเวณผิวด้านบนของเสา มีการกะเทาะทำให้เนื้อคอนกรีตหลุดหายไปจนถึงบริเวณกึ่งกลางของเสา เมื่อเรามองเข้าไปด้านหน้า และสามารถเห็นเหล็กได้ชัดเจน ซึ่งทำให้เห็นได้ว่าเหล็กยื่นมีการคด และโก่งตัวไป ด้านข้างของเสาเกิดรอยร้าวแบบเฉือนคล้ายกับเสาประเภท NRC แต่น้อยกว่า ส่วนด้านล่างของเสามีรอยร้าวแนวขวางกับแนวแกนด้วย และโดยภาพรวมของเสามีการโก่งตัว ซึ่งเป็นเพราะมีโพรงอากาศภายในตัวเสาอันเนื่องมาจากเสามีระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกที่ 45 mm ซึ่งมีระยะที่แคบไปทำให้คอนกรีต และหินไม่สามารถแทรกผ่านเหล็กปลอกลงไปได้เต็มเสาได้อย่างที่ออกแบบไว้ ซึ่งเป็นความผิดพลาดเกิดจากการหล่อเสาตามรูปที่ 49



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 49 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดเสา 200x200 mm ความสูง 2500 mm ระยะเหล็กปลอก 45 mm ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 500 mm (ก.)ด้านหน้ารับแรงระเบิด
(ข.)ด้านหลังรับแรงระเบิด

เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดเสา 250x250 mm ความสูง 2500 mm ระยะเหล็ก
 ปลอก 180 mm ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 500 mm บริเวณผิวด้านบนรับแรงระเบิดของเสา
 มีการกะเทาะของคอนกรีตออกไป แต่เนื่องด้วยเสามีพื้นที่หน้าตัด และมีปริมาณคอนกรีตมากกว่า
 ตัวอย่างอื่นจึงมีความเสียหายน้อยกว่า บริเวณด้านข้างของเสาเกิดรอยร้าวแบบเหินคล้ายกับเสา
 ประเภท NRC แต่น้อยกว่า และด้านล่างของเสาพบว่ามีรอยร้าวแนวขวางแต่ไม่มีการหลุดล่อนของ
 คอนกรีต และพบการโก่งตัวของเสาตามรูปที่ 50



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 50 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดเสา 250x250 mm ความสูง 2500 mm ระยะ
 เหล็กปลอก 180 mm ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 500 mm (ก.)ด้านหน้าหน้ารับแรงระเบิด
 (ข.)ด้านหลังรับแรงระเบิด

เสาคอนกรีตเสริมเหล็กแบบกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 200 mm และความสูง 2500 mm ระยะเหล็กปลอก 180 mm ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 500 mm บริเวณผิวด้านบนรับแรงระเบิดของเสามีการกะเทาะเพียงแคผิวนอกเล็กน้อย ด้านข้างของเสาเกิดรอยร้าวแบบเฉือนคล้ายกับเสาประเภท NRC แต่น้อยกว่า และมีรอยร้าวบริเวณด้านล่างของเสาเป็นแนวขวาง แต่ไม่มีการหลุดล่อนของคอนกรีตแต่อย่างใด คาดการณ์ว่าเกิดจากเสามีรูปร่างโค้งมนอาจจะแรงระเบิดเคลื่อนที่ผ่านไปได้ดีกว่าเสาที่เป็นสี่เหลี่ยมตามรูปที่ 51



(ก.)



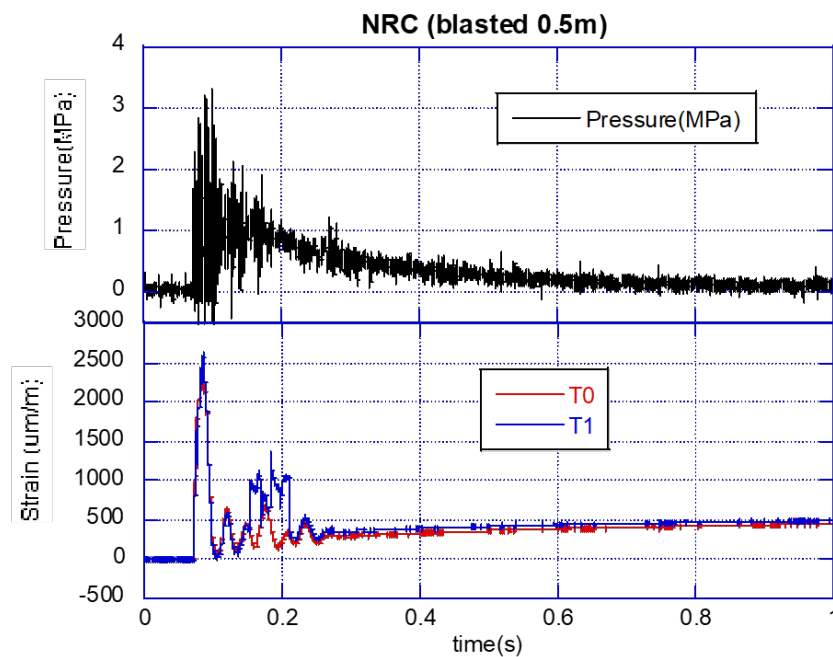
(ข.)

รูปที่ 51 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กแบบกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 200 mm และความสูง 2500 mm ระยะเหล็กปลอก 180 mm ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 500 mm (ก.)ด้านหน้ารับแรงระเบิด (ข.)ด้านหลังรับแรงระเบิด

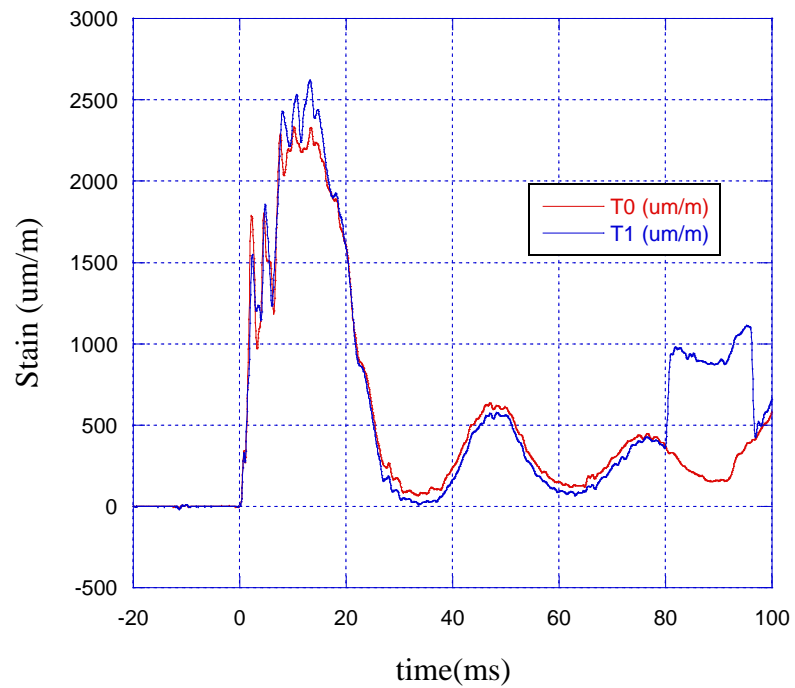
4.3 การศึกษาความเครียดของเหล็กยื่นภายในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่นำไปทดสอบด้วยแรงระเบิดที่ติดตั้งอยู่บนแท่นทดสอบ มีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 290 mm และ 500 mm โดยทำการศึกษาความเครียดที่เกิดขึ้นของเหล็กยื่นด้วยการบันทึกผลในขณะที่ทำการทดสอบระเบิดด้วย Data logger ผลที่ได้รับมาเกิดจากการวัดผลด้วย Strain gauge ที่ถูกติดไว้กับเหล็กยื่นทั้งหมดจำนวน 4 จุดในกระบวนการหล่อขึ้นรูปเสา โดยจุด

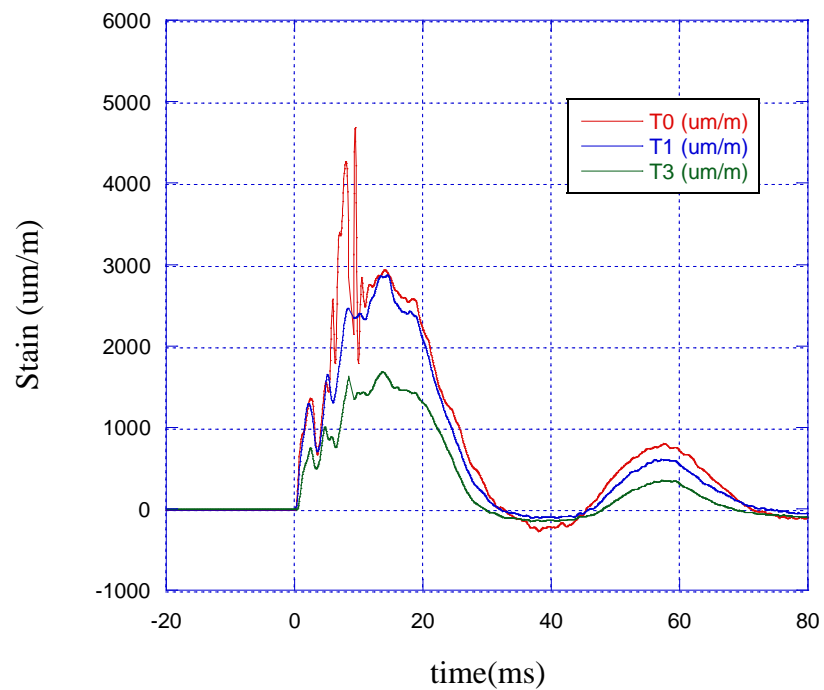
แรกที่ทำการศึกษา Strain gauge (T0) ไว้ที่จุดกึ่งกลางของเสาจุดที่ 2-3 (T1-T3) ติดไว้ถัดออกมาจากจุด T0 ทุกระยะ 180 mm ผลการศึกษาค่าความเครียดของเหล็กยื่นในเสาเทียบกับความดันที่ได้จากแรงระเบิดได้ค่าตามตัวอย่างกราฟที่ 12 แสดงให้เห็นว่าในขณะที่ทำการระเบิดจะมีแรงมากระทำต่อเสา ทำให้เหล็กยื่นภายในเสาเกิดความเครียดภายใน โดยความเครียดที่เกิดขึ้นจะค่อยๆเพิ่มเป็นรูปคลื่นไซน์ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะได้ค่าจากกราฟจะแปรผันตรงตามกันกับค่าความดันของระเบิด ตามตัวอย่างกราฟที่ 13-16



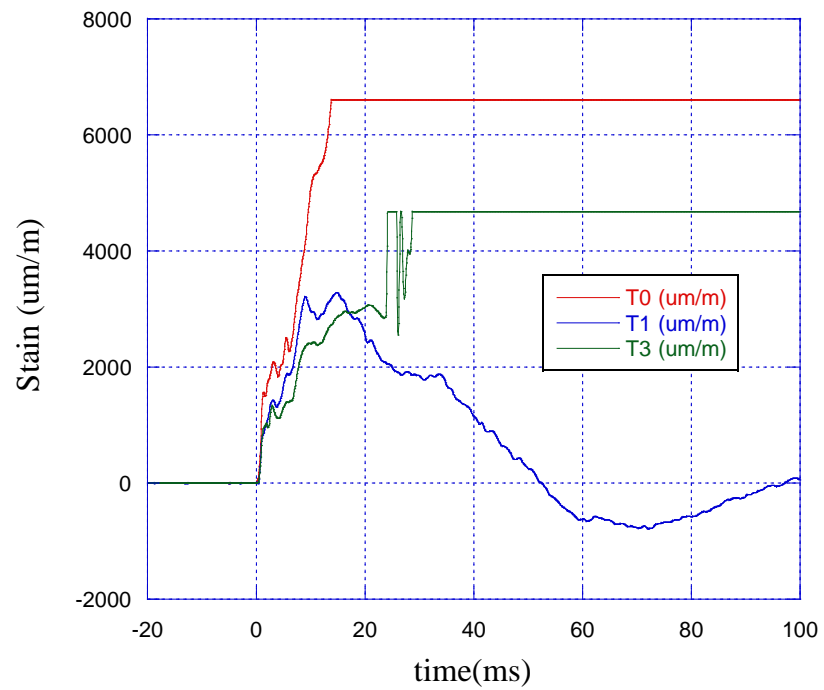
กราฟที่ 12 การตอบสนองของความเครียดในเหล็กยื่นเมื่อได้รับแรงระเบิด



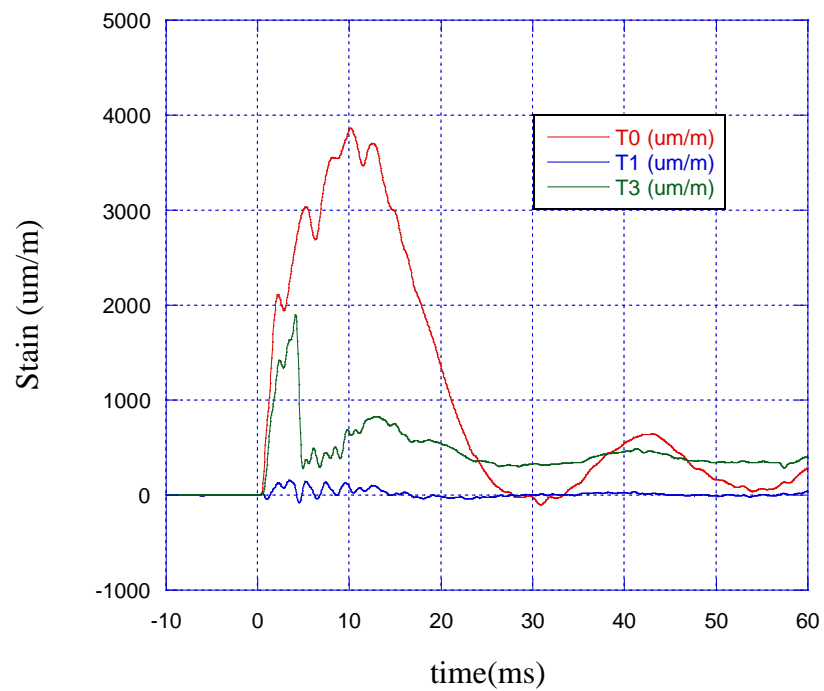
กราฟที่ 13 การเปลี่ยนแปลงความเครียดช่วงเริ่มต้นรับแรงระเบิดของเสาประเภท NRC-50



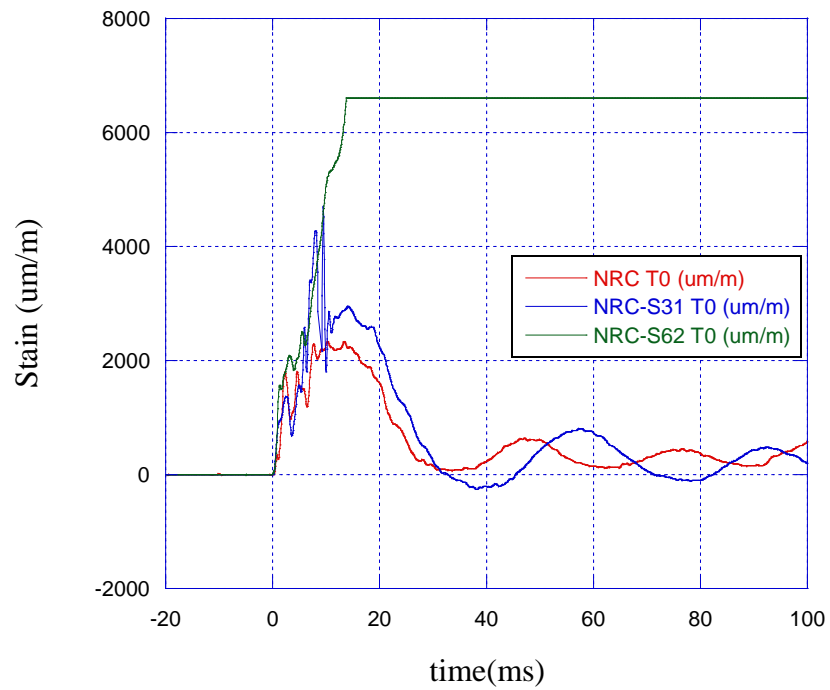
กราฟที่ 14 การเปลี่ยนแปลงความเครียดช่วงเริ่มต้นรับแรงระเบิดของเสาประเภท NRC-S31-50



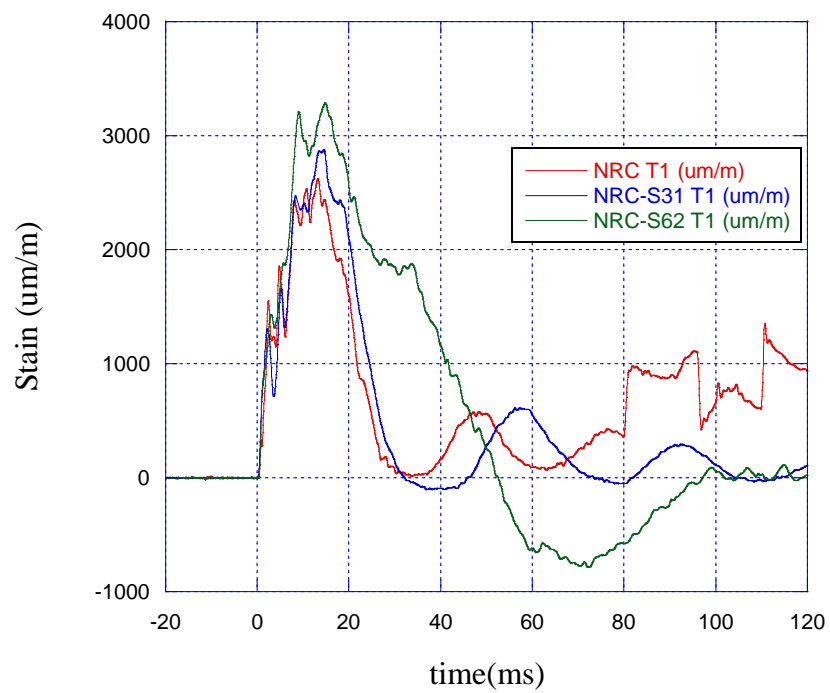
กราฟที่ 15 การเปลี่ยนแปลงความเครียดช่วงเริ่มต้นรับแรงระเบิดของเสาประเภท NRC-S62-50



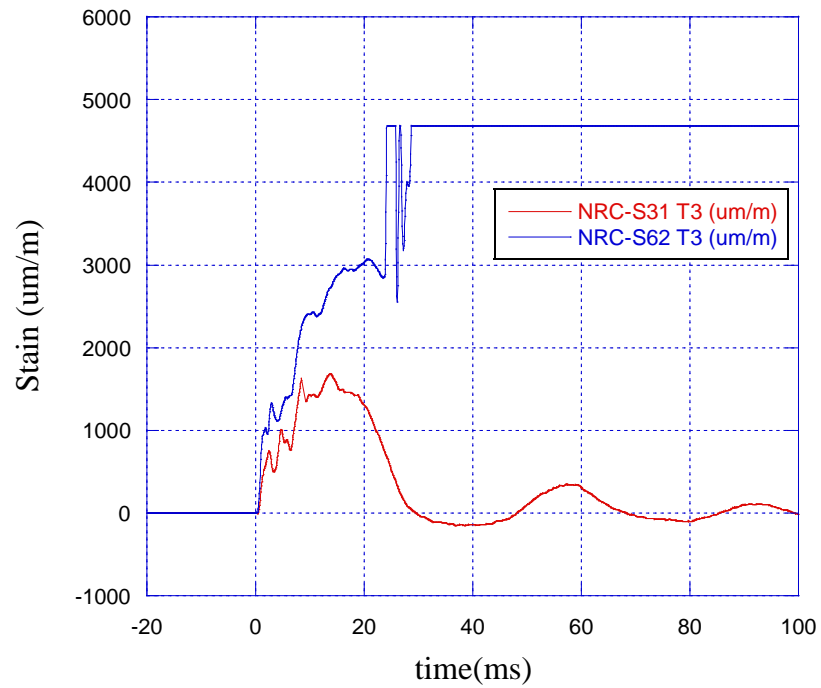
กราฟที่ 16 การเปลี่ยนแปลงความเครียดช่วงเริ่มต้นรับแรงระเบิดของเสาประเภท NRC-Large



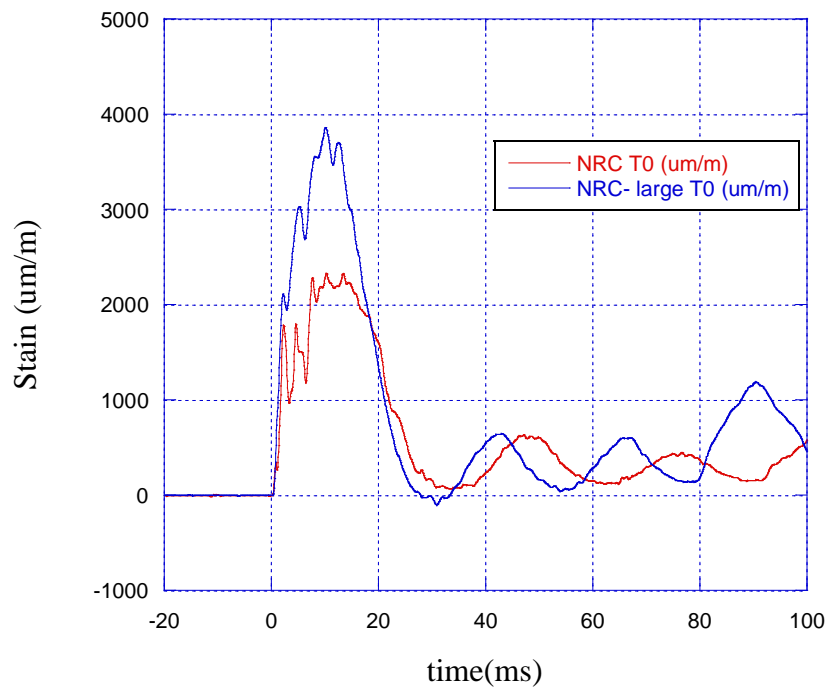
กราฟที่ 17 เปรียบเทียบความเครียดที่จุด T0 ของเสาประเภท NRC, NRC-S31 และ NRC-S62



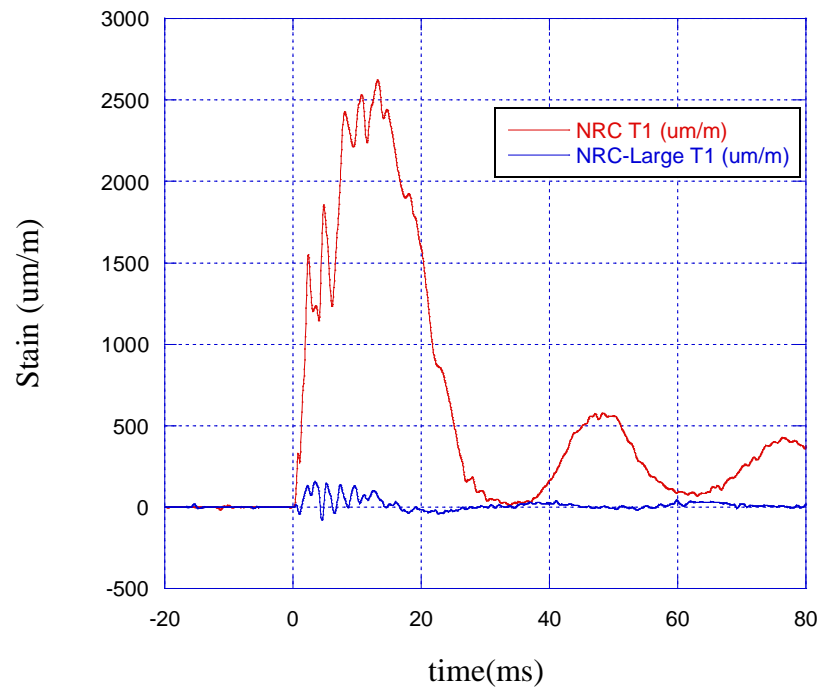
กราฟที่ 18 เปรียบเทียบความเครียดที่จุด T1 ของเสาประเภท NRC, NRC-S31 และ NRC-S62



กราฟที่ 19 เปรียบเทียบความเครียดที่จุด T3 ของเสาประเภท NRC-S31 และ NRC-S62

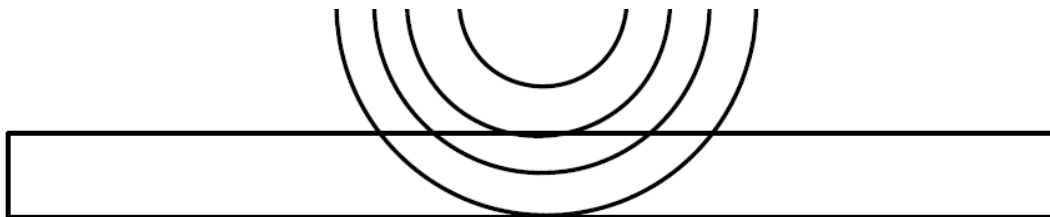


กราฟที่ 20 เปรียบเทียบความเครียดที่จุด T0 ของเสาประเภท NRC และ NRC-Large



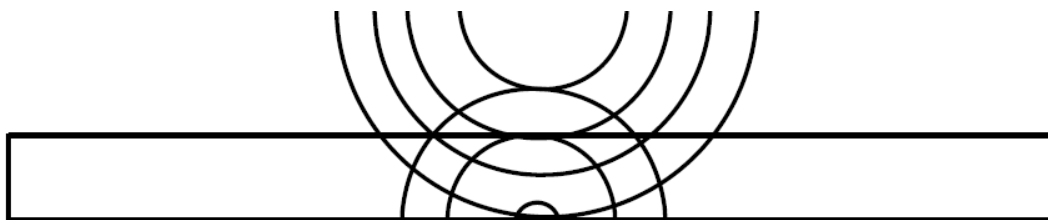
กราฟที่ 21 เปรียบเทียบความเครียดที่จุด T1 ของเสาประเภท NRC และ NRC-Large

จากกราฟบ่งบอกถึงการเพิ่มขึ้นของกราฟความเครียดคล้ายคลื่นไซน์ โดยที่เสาแต่ละประเภท จะมีคาบของการเคลื่อนที่ไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับวัสดุที่เป็นองค์ประกอบของเสานั้น ซึ่งเสาแต่ละประเภท สามารถอธิบายได้ด้วยหลักของไดนามิก ซึ่งต้องอธิบายสภาพความเสียหาย และการกระจายแรงที่อยู่ในรูปของกราฟความเครียด ดังนั้นเกิดการระเบิดขึ้น ความดันที่เกิดขึ้นเป็นกระจุกอยู่บริเวณตรงกลาง มากกว่ากระจายทั่วเสา โดยความดันจะเคลื่อนที่เป็นคลื่นแผ่กระจายเป็นรัศมีออกไปเมื่อเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปมากกระทบต่อเสาดังตามรูปที่ 52



รูปที่ 52 แสดงการเคลื่อนตัวของความดันที่กระทำต่อเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

เสาจะได้รับความดันของระเบิดที่ระยะเวลาอันสั้นเป็นผลให้ค่าความเครียดแบบอัดเกิดขึ้นที่จุด T0 จะมามีค่ามากที่สุด แต่จะมีการกระจายแรงออกไปที่ปลายเสาค่อนข้างน้อย ซึ่งเทียบกับแบบสถิตที่ค่าของกราฟจะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง เมื่อความดันเคลื่อนที่ถึงปลายเสา ความดันจะเคลื่อนที่กลับขึ้นยังเสา ทำให้ความดันที่กลับขึ้นมาเปลี่ยนสภาพกระทำต่อเสาเป็นแบบดึงตามรูปที่ 53



รูปที่ 53 แสดงการเคลื่อนตัวของความดันที่กระทำต่อเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก และเคลื่อนตัวกลับด้านของความดัน

เสาจะเกิดการแตกร้าวแบบเฉือนเกิดขึ้น และหลุดล่อนบริเวณด้านล่างเสา NRC ตามรูปที่ 41 การเพิ่มปริมาณเหล็กปลอกมากขึ้นจะทำให้เสารับความเครียดที่จุด T0 มากขึ้นตามกราฟที่ 17 ซึ่งทำให้ลดการแตกร้าวแบบเฉือนน้อยลง จะเปลี่ยนการแตกร้าวที่บริเวณกลางเสาเพิ่มขึ้นตามรูปที่ 54 และจะเกิดการกะเทาะที่บริเวณด้านบนของเสาแทนดังเช่นเสาประเภท NRC-S31 และ NRC-S62 ตามรูปที่ 42-43



รูปที่ 54 ตัวอย่างสภาพการเกิดรอยร้าวแบบเฉือนของเสา NRC-S31

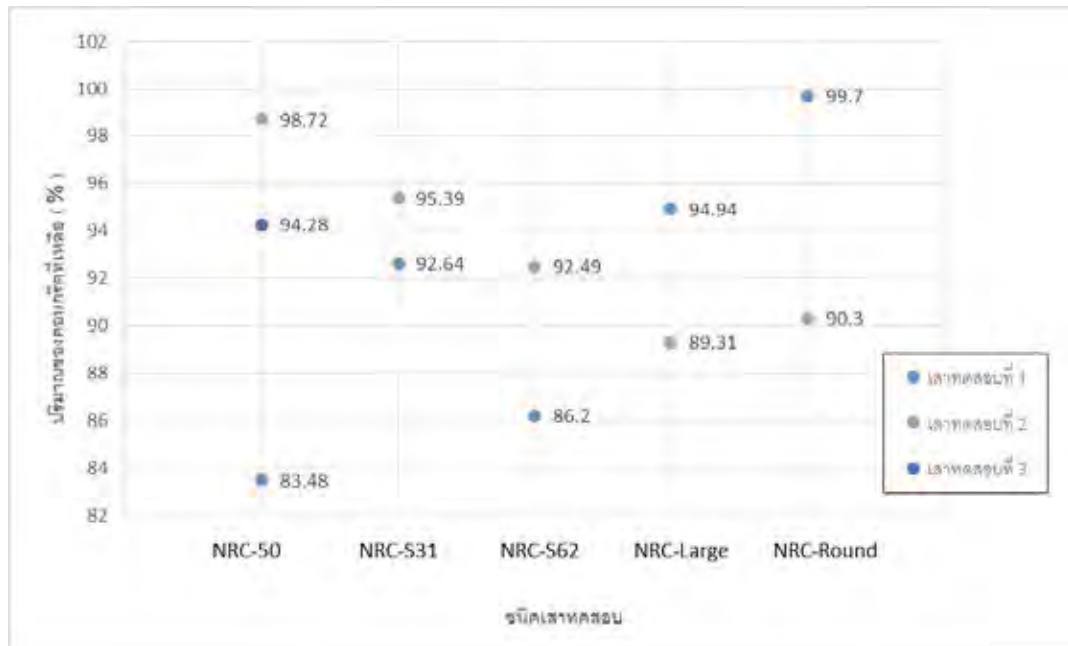
เสาประเภท NRC-Large เป็นการเพิ่มปริมาณเนื้อคอนกรีตของเสามากขึ้น แต่เหล็กยื่นปริมาณเหล็กปลอก และระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก เท่ากับเสาประเภท NRC จากกราฟที่ 20 สามารถอธิบายได้ว่าค่าความเครียดที่มากกว่าเพราะว่าเสามีพื้นที่หน้าตัดในการรับความดันจากระเบิดมากกว่า เมื่อมาเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงแล้วเสาที่มีพื้นที่หน้าตัดมากกว่าจะมีค่าความแข็งแรงของวัสดุที่มากกว่า จึงทำให้รับความเครียดที่เกิดขึ้นภายในเสาได้มากกว่าด้วยเช่นกัน การเกิดรอยร้าวก็จะเกิดขึ้นเป็นแบบเฉือน และรอยร้าวที่บริเวณกลางเสาค้ำยกับเสาประเภท NRC-S31 และ NRC-S62 เช่นกัน ตามรูปที่ 55



รูปที่ 55 สภาพการเกิดรอยร้าวแบบเฉือนของเสา NRC-Large

เสาประเภท NRC-Round เป็นเสาที่มีรูปร่างกลมจะทำให้มีพื้นที่รับแรงระเบิดที่น้อยกว่า นอกจากนั้นลักษณะของเสาที่มีรูปร่างกลม จะทำให้มีการหักเห และกระจายแรงระเบิดได้ดีกว่า ระนาบตรงซึ่งการเกิดรอยร้าวก็จะเกิดขึ้นเป็นแบบเฉือน และรอยร้าวที่บริเวณกลางเสาคล้ายกับเสา ประเภท NRC-S31, NRC-S62 และ NRC-Large เช่นกันตามรูปที่ 45

เมื่อนำเสาคอนกรีตประเภทต่างๆ ที่ได้ทำการทดสอบระเบิดไปแล้ว นำมาเปรียบเทียบสภาพ ความเสียหาย และค่าความเครียดจากกราฟ ด้วยวิธีการหาพื้นที่ที่มีคอนกรีตเหลืออยู่ในเสาจาก โปรแกรม Autocad ที่ทำการปรับขนาดให้เท่ากับของจริง ผลที่ได้จากการวัดตามกราฟที่ 22 พบว่า เสาที่มีปริมาณคอนกรีตเหลือภายในเสาทดสอบที่ 1 มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น และมีความสัมพันธ์กับค่า ความเครียดที่ได้กล่าวไป แต่ในการทดลองเสาครั้งที่ 2-3 เสา NRC เมื่อได้รับแรงระเบิดแต่เสาเกิดรอย ร้าวแบบเฉือนแต่คอนกรีตไม่หลุดล่อนออกจากเสา แต่เมื่อนำเสาประเภท NRC-S31 และ NRC-S62 มาเปรียบเทียบพบว่าเสายังลักษณะคล้ายกับเสาทดสอบที่ 1



กราฟที่ 22 เปรียบเทียบปริมาณของคอนกรีตที่เหลือของเสาแต่ละประเภท

เนื่องด้วยปัญหาในขั้นตอนการหล่อเสา NRC-S62 ที่มีระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกที่ 45 mm ทำให้เกิดโพรงภายในเสาเกิดขึ้น ส่งผลให้ค่าที่ได้ทำการทดลองผิดเพี้ยนไป และสาย Strain gauge ชำรุดเนื่องจากปัญหาในการเคลื่อนย้าย และจากสภาพแวดล้อม ณ สถานที่ได้ทำการทดสอบ และกองโยธา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าที่ได้ทำการเก็บเสาคอนกรีตเสริมเหล็กไว้ ส่งผลให้ไม่สามารถวัดค่าความเครียดของเสา NRC-Round และบางจุดของเสาประเภทอื่นๆ

4.4 การศึกษาการโก่งตัวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

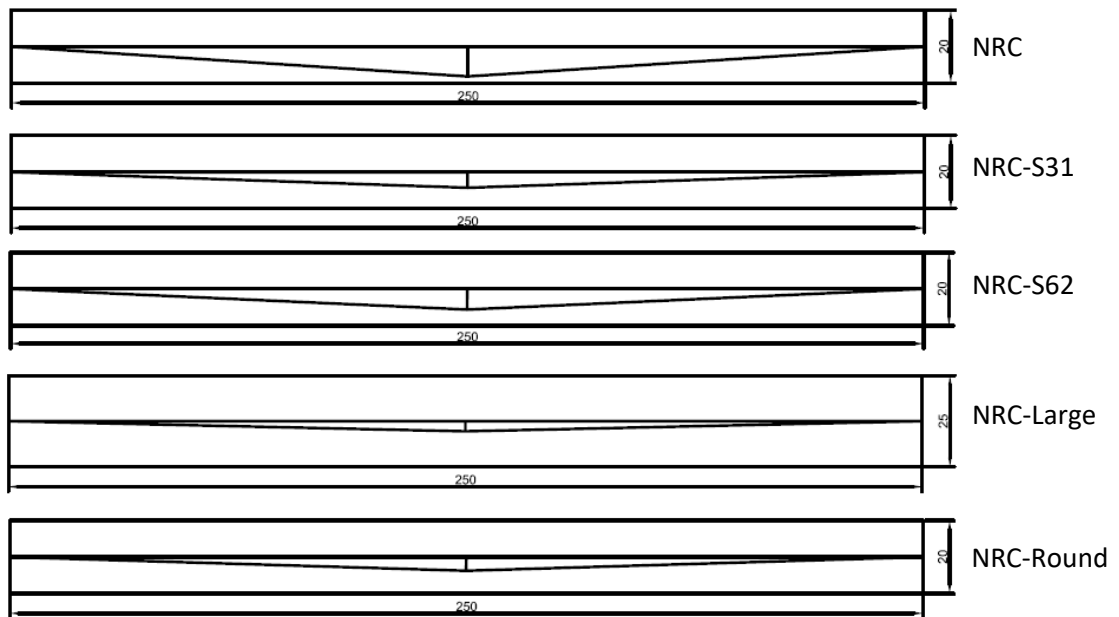
เสาคอนกรีตเสริมเหล็กนำไปทดสอบด้วยวัตุระเบิดมีผลที่เกิดขึ้น ทำให้เสาถูกกดด้วยแรงระเบิดลงไปตามล่าง อาจจะทำให้เสามีการโก่งตัวได้ ซึ่งต้องทำการศึกษาด้วยอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวที่จะตั้งไว้บริเวณจุดกึ่งกลาง และถัดออกมาจากกึ่งกลางมาระยะ D1 ที่ 300 mm, D2 ที่ 600 mm และ D3 ที่ 900 mm ตามลำดับโดยจะทำวัดความสูงเสาอากาศของอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวทั้งก่อนการทดสอบและหลังทำการทดสอบด้วยวัตุระเบิดตามได้ตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การโค้งตัวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสูงสุดในช่วงขณะที่แรงระเบิดกระทำต่อเสา
ในช่วงเวลานั้น

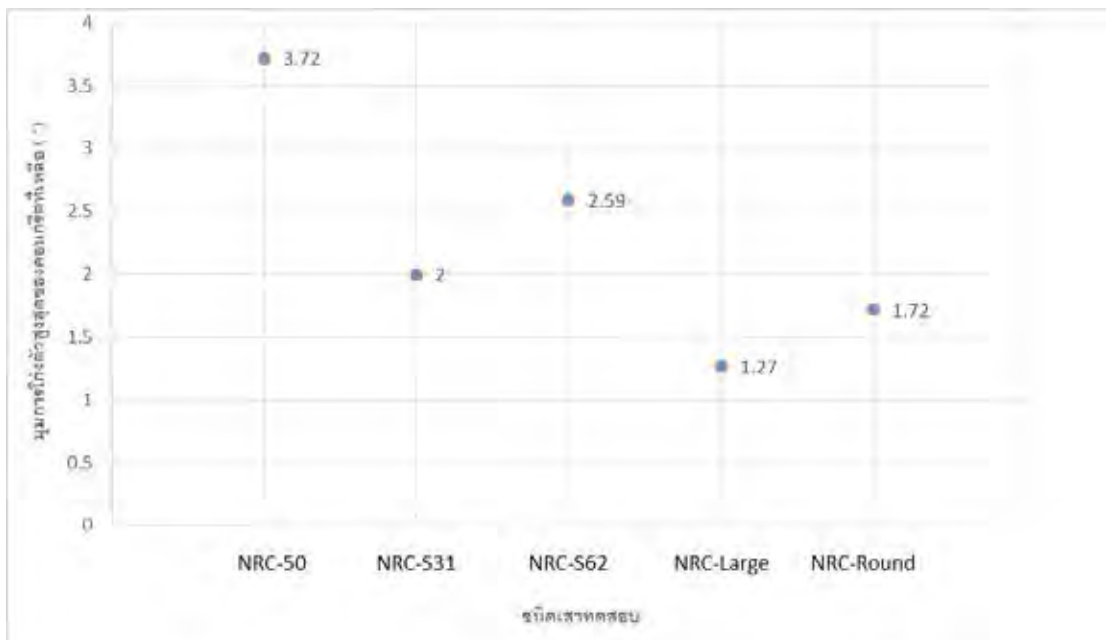
No.	ตัวอย่าง	ระยะห่างจุดศูนย์กลาง ระเบิด (mm)	ระยะเคลื่อนตัว (mm)							
			จุดกึ่งกลาง		D1		D2		D3	
			ก่อนการทดสอบ	หลังการทดสอบ	ก่อนการทดสอบ	หลังการทดสอบ	ก่อนการทดสอบ	หลังการทดสอบ	ก่อนการทดสอบ	หลังการทดสอบ
1	NRC-29	290	ไม่สามารถวัดได้	ไม่สามารถวัดได้	880	720	880	830	880	850
2	NRC-50 1	500	900	ไม่สามารถวัดได้	890	820	880	880	880	880
3	NRC-50 2	500	890	890	890	890	900	900	900	900
4	NRC-50 3	500	890	890	890	890	900	890	900	890
5	NRC-S31-50 1	500	900	880	900	890	890	885	890	870
6	NRC-S31-50 2	500	880	855	890	890	890	890	890	890
7	NRC-S62-50 1	500	890	810	890	835	890	850	890	860
8	NRC-S62-50 2	500	900	860	900	860	890	880	890	880
9	NRC-Large-50 1	500	890	810	890	835	890	850	890	860
10	NRC-Large-50 2	500	900	890	900	895	890	890	890	890
11	NRC-Round-50 1	500	ไม่สามารถวัดได้							
12	NRC-Round-50 2	500	ไม่สามารถวัดได้							

จากตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทต่างๆ บริเวณกลางเสาที่ตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวมีการโค้งตัวสูงสุดในช่วงขณะที่แรงระเบิดกระทำต่อเสาในช่วงเวลานั้น มีเสียบางอันมีการโค้งตัวประมาณ 10-80 mm ซึ่งมีค่ามากขึ้นเมื่อมีปริมาณเหล็กปลอกที่มากขึ้น และขนาดหน้าตัดที่มากขึ้นด้วยเช่นกัน แต่ไม่สามารถวัดค่าของเสากลมได้ และเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพภายนอกหลังจากทดสอบแล้วตามรูปที่ 45-50 เสาสามารถคืนตัวเป็นเหมือนเดิมได้ ยกเว้นกรณีเสาประเภท NRC-29 NRC-Large-50-1 และ NRC-Large-50-2 เป็นต้น เนื่องมาจากความดันที่ได้จากวัตถุระเบิดเคลื่อนที่ผ่านมาถึงอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวทำให้เสาอากาศของอุปกรณ์นี้มีการเคลื่อนตัวออกจากเสา มีการโค้งตัว ช้ำรูด นอกจากนั้นที่ไม่สามารถวัดค่าได้มาจากคอนกรีตเกิดการหลุดล่อนออกจากเสาไปกดทับเสาอากาศ ทำให้ไม่สามารถวัดค่าการโค้งของเสาทุกประเภทได้

นอกจากนั้นเสาที่ได้ทำทดสอบด้วยวัตถุระเบิดมีผลที่เกิดขึ้นในระหว่างที่ถูกความดันของระเบิดกระทำต่อเสาอยู่นั้น เสามีการโค้งตัวขึ้นลงตลอดระยะเวลาที่เกิดการระเบิด ดังนั้นต้องทำการศึกษาดูด้วยการนำภาพที่ได้จากกล้องความเร็วสูงมาประมวล เพื่อหามุมการโค้งตัวสูงสุดขณะที่ได้รับความดัน โดยทำการอ้างอิงจากเสาอากาศของอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวของเสาที่มีการโค้งตัวอย่างเห็นได้ชัด และเวลาที่เกิดการโค้งตัวสูงสุดของเสา จากนั้นนำรูปภาพที่ได้มาใส่ในโปรแกรม Auto cad จากนั้นทำการปรับขนาดให้เท่ากับขนาดจริง ทำการลากเส้นจำลองเสาก่อนการระเบิด หลังจากนั้นทำการลากเส้นการโค้งตัวตามภาพทั้งสองด้านให้มาบรรจบกันได้ตามรูปที่ 56



รูปที่ 56 การจำลองเสาประเภทต่างๆ ด้วยการเขียนด้วยโปรแกรม Autocad เมื่อได้ภาพที่มีขนาดเทียบเท่าของจริง จากนั้นทำการหามุมของการโก่งตัวสูงสุดด้วยการวัดระยะโก่งตัวสูงสุด และนำไปคำนวณในสมการ $\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\delta}{L/2} \right) \delta$ คือระยะโก่งตัวสูงสุด, L คือความยาวของเสา จะได้เป็นกราฟที่ 23



กราฟที่ 23 เปรียบเทียบมุมการโก่งตัวสูงสุดของเสาแต่ละประเภท

จากกราฟพบว่ามุมของการโก่งตัวสูงสุด มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กปลอก ขนาดหน้าตัวเสา และการเปลี่ยนรูปร่างของเสาเมื่อเทียบกับเสาประเภท NRC แสดงว่าเสามีค่าความแข็งแรงที่มากขึ้น มาจากวัสดุที่ได้จากการเพิ่มไปในเสา ทำให้บริเวณกลางเสาที่มีความแข็งแรงมากกว่าจะรับแรงได้ดี มีระยะการโก่งตัวที่น้อยลง ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับกราฟความเครียด และสภาพความเสียหายที่เกิดขึ้น

4.5 การศึกษากำลั้งต้านทานแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ทดสอบระเบิด และยังไม่ได้ทดสอบระเบิด โดยมีปริมาณเหล็กปลอก ขนาดหน้าตัด และรูปร่างที่แตกต่างกันตามตารางที่ 4 ในขั้นตอนนี้จะนำไปทดสอบกำลั้งต้านทานแรงอัดด้วยเครื่อง Universal Testing machine Amsler ขนาด 500 ตัน ตามรูปที่ 14 จากนั้นนำลูกป้อนไปทดสอบแรงอัดด้วยเครื่อง Test Material Compression machine เพื่อหาค่าการรับกำลั้งของคอนกรีตตามรูปที่ 15 และเหล็กเส้นที่ใช้เป็นเหล็กยึนภายในเสาคอนกรีตจะนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing machine Amsler capacity ขนาด 20 ตัน เพื่อหาค่าแรงดึงตามรูปที่ 16



(ก.)



(ข.)

(ค.)

รูปที่ 57 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-50-STA (ก.)ก่อนการทดสอบ
(ข.)หลังการทดสอบด้านหน้า (ค.) หลังการทดสอบด้านข้าง



(ก.)



(ข.)



(ค.)



(ง.)

รูปที่ 58 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-STA ก่อนการทดสอบ (ก.)ด้านหน้า
(ข.)ด้านหลัง (ค.), (ง.)ด้านข้าง



(ก.)



(ข.)



(ค.)

รูปที่ 59 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-STA หลังการทดสอบ (ก.), (ข.), (ค.) ด้านข้าง



(ก.)



(ข.)



(ค.)

รูปที่ 60 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-S31-50-STA ก่อนการทดสอบ
(ก.), (ข.) ด้านหน้า (ค.)ด้านข้าง



(ก.)



(ข.)



(ค.)

รูปที่ 61 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-S31-50-STA หลังการทดสอบ
(ก.)ด้านหน้า (ข.),(ค.) ด้านข้าง



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 62 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-S31-STA ก่อนการทดสอบ
(ก.)ด้านหน้า (ข.) ด้านข้าง



(ก.)



(ข.)



(ค.)

รูปที่ 63 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-S31-STA หลังการทดสอบ
(ก.)ด้านหน้า (ข.) ด้านข้าง (ค.)ด้านหลัง



(ก.)



(ข.)



(ค.)



(ง.)

รูปที่ 64 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-S62-50-STA ก่อนการทดสอบ
(ก.), (ข.) ด้านหน้า (ค.)ด้านหลัง (ง.)ด้านข้าง



(ก.)



(ข.)



(ค.)

รูปที่ 65 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-S62-50-STA หลังการทดสอบ (ก.), (ข.)ด้านหลัง (ค.)ด้านข้าง



(ก.)



(ข.)



(ค.)

รูปที่ 66 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-S62-STA ก่อนการทดสอบ
(ก.), (ข.)ด้านหลัง (ค.)ด้านข้าง



(ก.)

(ข.)



(ค.)

รูปที่ 67 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-S62-STA หลังการทดสอบ
(ก.), (ข.)ด้านข้าง (ค.)ด้านหลัง



(ก.)



(ข.)



(ค.)

รูปที่ 68 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-Large-50-STA ก่อนการทดสอบ
(ก.)ด้านหน้า (ข.), (ค.)ด้านข้าง



(ก.)

(ข.)



(ค.)

รูปที่ 69 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-Large-50-STA หลังการทดสอบ
(ก.)ด้านหน้า (ข.), (ค.)ด้านข้าง



(ก.)



(ข.)



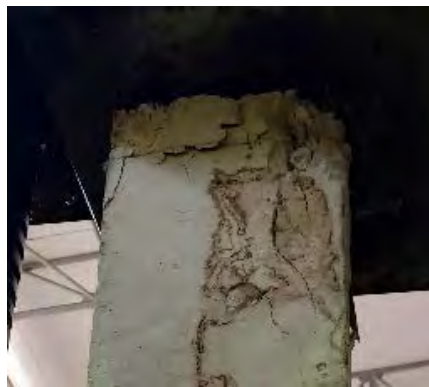
(ค.)

รูปที่ 70 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-Large-STA ก่อนการทดสอบ
(ก.)ด้านหน้า (ข.)ด้านข้าง (ค.) ด้านหลัง



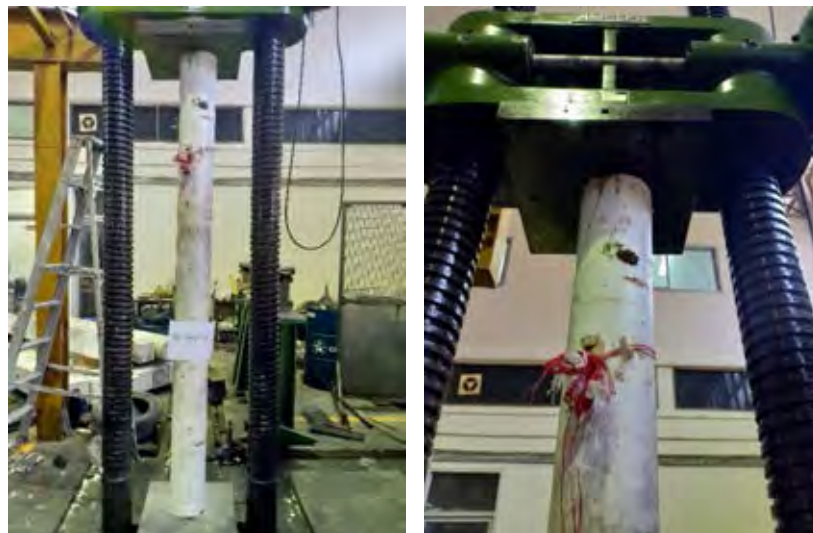
(ก.)

(ข.)



(ค.)

รูปที่ 71 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-Large-STA หลังการทดสอบ
(ก.), (ข.)ด้านหน้า (ค.)ด้านหลัง



(ก.)

(ข.)

รูปที่ 72 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-Round-50-STA ก่อนการทดสอบ
(ก.), (ข.)ด้านหน้า



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 73 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-Round-50-STA หลังการทดสอบ
(ก.), (ข.)ด้านหน้า



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 74 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-Round-STA ก่อนการทดสอบ
(ก.), (ข.)ด้านหน้า



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 75 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเสาประเภท NRC-Round-50-STA หลังการทดสอบ
(ก.)ด้านหน้า (ข.)ด้านหลัง



(ก.)

(ข.)

รูปที่ 76 การทดสอบแรงอัดลูกปูน (ก.)การทดสอบครั้งที่ 4 (ข.)การทดสอบครั้งที่ 6



(ก.)



(ก.)

(ข.)

รูปที่ 77 การทดสอบแรงดึงของเหล็ก (ก.)กำลังทดสอบแรงดึงของเหล็ก
(ข.)ระยะการขาดตัวของเหล็ก (ค.)รอยขาดของเหล็ก

ผลการวิเคราะห์เบื้องต้นด้วยภาพถ่ายพบว่า การทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเสาที่ได้รับแรงระเบิดประเภทเสา NRC-50-STA เหล็กยื่นภายในเสามีการโก่งตัวจนเสียรูป ผิวคอนกรีตด้านนอกมีการแตกร้าว และเริ่มกะเทาะออกมา ส่วนเสาที่ไม่ได้รับแรงระเบิด NRC-STA เกิดรอยแตกร้าวที่บริเวณปลายบริเวณด้านบนไม่พบรอบแตก หรือร้าวบริเวณกลางเสา เมื่อเทียบค่าของผลการทดสอบพบว่าเสา NRC-50-STA ที่สามารถรับแรงอัดได้น้อยที่สุด 4100 MPa เทียบกับเสา NRC-STA ได้ค่าเฉลี่ย 5300 MPa คิดเป็น 77.36% รายละเอียดในตารางที่ 7-8

เสาประเภท NRC-S31-50-STA เหล็กยื่นภายในเสามีการโก่งตัวจนเสียรูป ผิวคอนกรีตด้านนอกมีการแตกร้าวมากขึ้น มีรอยแตกร้าวแบบเฉือนเกิดขึ้น เทียบกับเสา NRC-S31-STA เกิดการแตกร้าว มีคอนกรีตกะเทาะออกมาจนเห็นเหล็กยื่นได้อย่างชัดเจนเป็นจำนวนมาก ค่าของผลการทดสอบพบว่าเสา โดยค่าที่ได้ผลจากการทดสอบของเสา NRC-S31-50-STA รับแรงอัดได้น้อยที่สุด 4100 MPa ซึ่งเทียบกับเสา NRC-S31-STA ได้ค่าเฉลี่ย 5650 MPa คิดเป็น 72.57% เสาประเภท NRC-S31-50-STA มีส่วนของคอนกรีตบริเวณกลางเสากะเทาะออกจากเสาไปรายละเอียดในตารางที่ 7-8

เสาประเภท NRC-S62-STA เกิดการกะเทาะที่ผิวของเสาและรอยร้าวที่บริเวณปลายด้านบนของเสาเมื่อเทียบค่าที่ได้จากการทดสอบของเสา NRC-S62-50-STA รับแรงอัดได้น้อยที่สุด 500 MPa เทียบกับเสา NRC-S62-STA ได้ค่าเฉลี่ย 5550 MPa คิดเป็น 9.01% ซึ่งเป็นเพราะมีโพรงอากาศภายในตัวเสาอันเนื่องมาจากเสามีระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกที่ 45 mm ซึ่งมีระยะที่แคบไปทำให้คอนกรีต และหินไม่สามารถแทรกผ่านเหล็กปลอกลงไปได้เต็มเสาได้อย่างที่ออกแบบไว้รายละเอียดในตารางที่ 7-8

เสาประเภท NRC-Large-50-STA มีรอยร้าวที่ผิวยาวมากขึ้นซึ่งเกิดมาจากรอยร้าวที่มีอยู่แล้ว เทียบกับเสา NRC-Large-STA เกิดการกะเทาะที่ผิวของเสา และรอยร้าวที่บริเวณปลายด้านบนของเสา โดยค่าที่ได้ผลจากการทดสอบของเสา NRC-Large-50-STA รับแรงอัดได้น้อยที่สุด 6700 MPa เทียบกับเสา NRC-S62-STA ได้ค่าเฉลี่ย 7950 MPa คิดเป็น 84.28% รายละเอียดในตารางที่ 7-8

เสาประเภท NRC-Round-50-STA มีรอยร้าวที่ผิวยาวมากขึ้นซึ่งเกิดมาจากรอยร้าวที่มีอยู่แล้ว เทียบกับเสา NRC-Round-STA เกิดรอยร้าวรอบเสาเป็นจำนวนมาก เมื่อถอนแรงออกจากตัวเสาพบว่าคอนกรีตที่เกิดรอยร้าวมีกะเทาะออกมาจนเหลือแต่เหล็กยื่นและคอนกรีตภายในเหล็กยื่นเท่านั้น เมื่อนำผลของการทดสอบมาเปรียบเทียบระหว่าง NRC-Round-50-STA มีค่ารับแรงอัดได้น้อยที่สุด 1900 MPa เทียบกับเสา NRC-Round-STA ที่มีค่ารับแรงอัดได้มากที่สุด 2400 MPa คิดเป็น 79.17% รายละเอียดในตารางที่ 7-8

จากการทดสอบเสาด้วยเครื่อง Universal Testing machine Amsler ขนาด 500 ตัน มีความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากคน เนื่องมาจากขั้นตอนในการติดตั้งเสาเข้าไปในเครื่องมีความอันตราย

สูง นอกจากนั้นเจ้าหน้าที่ไม่ได้ทำการเทแป้งเพื่อปรับสภาพหัวเสา โดยเจ้าหน้าที่ให้สาเหตุมาว่าการปรับสภาพหัว ท้ายเสา หรือไม่ปรับสภาพหัว ท้ายเสาค่าทำการทดสอบออกมาไม่ต่างกันจึงไม่ทำให้ และเจ้าหน้าที่ไม่ได้ทำการตั้งจุดศูนย์ถ่วงของเสาให้ตั้งตรง เนื่องจากเสียเวลาในการทำการทดสอบ ทำให้เสาบางต้นไม่ได้รับแรงกดที่จุดกึ่งกลางเป็นผลให้ค่าที่ทำการสอบมาได้คาดเคลื่อนได้

ผลการวิเคราะห์เมื่อทำการทดสอบลูกปูน และเหล็กเส้นที่เป็นวัสดุในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก พบว่าลูกปูนสามารถรับแรงอัดได้อยู่ค่าเฉลี่ย 3.26 MPa มีน้ำหนักอยู่ที่ 14.3 kg ทรายละเอียดในตารางที่ 9 และเหล็กเส้นมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 11.5 mm ความยาวเหล็กเส้นที่ใช้ในการทดสอบ 596-602 mm น้ำหนักอยู่ในช่วง 0.297-0.305 kg Yield strength อยู่ในช่วง 552.6-574 MPa Ultimate strength อยู่ในช่วง 667.6-676.2 MPa และระยะเหล็กขาดอยู่ในช่วง 15-17 mm ซึ่งแต่ละตัวอย่างจะมีผลที่แตกต่างกันโดยที่มีอยู่ในช่วงที่ได้กล่าวไปตามตารางที่ 10

ตารางที่ 7 ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้รับการทดสอบระเบิด

ตัวอย่าง	แรงอัด (MPa)
NRC	ไม่สามารถวัดค่าได้
NRC-STA 1	12.99
เฉลี่ย	12.99
NRC-S31-STA 1	13.97
NRC-S31-STA 2	13.73
เฉลี่ย	13.85
NRC-S62-STA 1	11.28
NRC-S62-STA 2	15.94
เฉลี่ย	13.61
NRC-Large-STA 1	21.33
NRC-Large-STA 2	17.65
เฉลี่ย	19.49
NRC-Round-STA 1	5.88
NRC-Round-STA 2	3.19
เฉลี่ย	4.54

ตารางที่ 8 ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับการทดสอบระเบิด

ตัวอย่าง	แรงอัด (MPa)
NRC-29-STA	ไม่สามารถวัดค่าได้
เฉลี่ย	ไม่สามารถวัดค่าได้
NRC-50-STA 1	10.05
NRC-50-STA 2	17.16
NRC-50-STA 3	12.75
เฉลี่ย	13.31
NRC-S31-50-STA 1	11.03
NRC-S31-50-STA 2	10.05
เฉลี่ย	10.54
NRC-S62-50-STA 1	1.23
NRC-S62-50-STA 2	1.25
เฉลี่ย	1.24
NRC-Large-50-STA 1	19.12
NRC-Large-50-STA 2	16.43
เฉลี่ย	17.77
NRC-Round-50-STA 1	4.66
NRC-Round-50-STA 2	ไม่สามารถวัดค่าได้
เฉลี่ย	4.66

ตารางที่ 9 ค่าแรงอัดที่กระทำต่อลูกปูน

ตัวอย่าง	แรงอัด (MPa)
ลูกปูน 1	38.32
ลูกปูน 2	46.01
ลูกปูน 3	46.37
ลูกปูน 4	39.58
ลูกปูน 5	46.79
ลูกปูน 6	45.40
เฉลี่ย	41.48

ตารางที่ 10 ค่าแรงดึงที่กระทำต่อเหล็กเส้น

No.	ตัวอย่าง	น้ำหนัก (kg)	ความยาว (mm)	แรงดึง		ระยะ เหล็ก ขาด (mm)
				Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	
1	เหล็กเส้น 1	0.303	600	552.6	672.1	17
2	เหล็กเส้น 2	0.297	596	557	667.6	15
3	เหล็กเส้น 3	0.305	602	574	676.2	15

บทที่ 5 สรุป และอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีปริมาณเหล็กปลอก ขนาดหน้าตัด และรูปร่างแตกต่างกัน ที่มีความยาว 2500 mm ขนาดหน้าตัดเสาสี่เหลี่ยม 200x200, 250x250 mm และมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 mm ตามลำดับโดยมีเหล็กยื่นภายในเสาจำนวน 4 เส้น ระยะเหล็กปลอกมาตรฐาน 180 mm และมีเสาที่มีระยะเหล็กปลอกที่ 90 และ 45 mm ทำการหล่อเสาภายในแบบหล่อ และบ่มเสาเป็นเวลา 28 วัน

5.1 อภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้พิจารณาสภาพความเสียหายของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อได้รับแรงระเบิด และศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติการต้านทานแรงระเบิดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในการออกแบบปัจจุบันที่เป็นการเพิ่มปริมาณเหล็กปลอก เปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดเสา และรูปร่างหน้าตัดเสาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ผลการศึกษาความรุนแรงของวัตถุระเบิด TNT จำนวน 0.91 kg ด้วย Pressure gauge ที่มีความสามารถในการวัดได้ 200 MPa โดยแรงระเบิดที่รุนแรงที่สุด 3.5 MPa มีค่าเฉลี่ยของแรงระเบิดที่ 3.02 MPa ซึ่งอยู่ภายในช่วงความดันที่มากกว่าความดันบรรยากาศ (p_{so}) ของระเบิดที่มาจากการคำนวณ

2. ผลการศึกษาสภาพความเสียหายเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหลังจากที่ทดสอบการระเบิด ด้วยการประเมินจากภาพถ่าย พบว่าเสาประเภท NRC-29 เสาวิบัติอันเนื่องมาจากเหล็กยื่นมีโก่งตัวจนเสียรูปและเกิดการกะเทาะ และหลุดล่อนของคอนกรีตบริเวณกลางเสา เสาประเภท NRC-50 เกิดการกะเทาะที่ผิวด้านบนรับแรงระเบิดเล็กน้อย และมีการหลุดล่อนของคอนกรีตที่บริเวณด้านหลังของเสาเป็นไปตามพฤติกรรมของเสาที่ถูกวัตถุระเบิดกระทำ เสาประเภท NRC-S31-50 มีการโก่งตัวของเสาเล็กน้อย และเกิดกะเทาะที่ด้านบนรับแรงระเบิด และมีรอยร้าวเกิดขึ้นที่ด้านหลัง เสาประเภท NRC-S62-50 เกิดกะเทาะที่ด้านบนรับแรงระเบิดให้เนื้อคอนกรีตหลุดหายไปจนถึงบริเวณกึ่งกลางเสา พบการคด และโก่งตัวของเหล็กยื่น และด้านล่างของเสามีรอยร้าวที่เห็นได้อย่างชัดเจนตามแนวขวางกับตามแนวแกน เสาประเภท NRC-Large-50 เกิดกะเทาะที่ด้านบนรับแรงระเบิดบริเวณกลางเสาเพียงบางส่วน และมีรอยร้าวเกิดขึ้นที่ด้านหลัง เสาประเภท NRC-Round-50 เกิดกะเทาะที่ด้านบนรับแรงระเบิดที่ผิวเพียงนิดหน่อย

3. ผลการศึกษาความเครียดของเหล็กยื่นภายในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้รับการบันทึกค่าด้วยเครื่อง Data logger พบว่าเหล็กยื่นที่อยู่ภายในเสาในขณะที่ความดันจากการระเบิดกระทำต่อเสาเกิดความเครียดขึ้น จึงได้กราฟเป็นเส้นรูปคลื่นไซน์ และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นค่าความเครียดจะเพิ่มตามกราฟความดัน ซึ่งกราฟทั้งสองมีความสอดคล้องกัน ค่าความเครียดสามารถอธิบายได้ด้วยหลักของได

นามิกที่ต้องอธิบายสภาพความเสียหาย และการกระจายแรงที่อยู่ในรูปของกราฟความเครียดไปด้วยกัน ดังนั้นเกิดการระเบิดขึ้นเสาจะได้รับความดันของระเบิดที่ระยะเวลาอันสั้นเป็นผลให้ค่าความเครียดแบบอัดเกิดขึ้นที่จุด T0 จะมีค่ามากที่สุด แต่จะมีการกระจายแรงออกไปที่ปลายเสาค่อนข้างน้อย ซึ่งเทียบกับแบบสถิตที่ค่าของกราฟจะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง สภาพความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเป็นรอยแตกร้าวแบบเฉือน และหลุดล่อนบริเวณด้านล่างเสา NRC ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี

การเพิ่มปริมาณเหล็กปลอกมากขึ้นจะทำให้เสารับความเครียดที่จุด T0 มากขึ้นตามกราฟที่ 17 ซึ่งทำให้ลดการแตกร้าวแบบเฉือนน้อยลง จะเปลี่ยนการแตกร้าวที่บริเวณกลางเสาเพิ่มขึ้น และจะเกิดการกะเทาะที่บริเวณด้านบนของเสาแทนดังเช่นเสาประเภท NRC-S31 และ NRC-S62

เสาประเภท NRC-Large เป็นการเพิ่มปริมาณเนื้อคอนกรีตของเสามากขึ้น แต่เหล็กยื่นปริมาณเหล็กปลอก และระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก เท่ากับเสาประเภท NRC จากกราฟที่ 20 สามารถอธิบายได้ว่าค่าความเครียดที่มากกว่าเพราะว่าเสามีพื้นที่หน้าตัดในการรับความดันจากรเบิดมากกว่า เมื่อมาเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงแล้วเสาที่มีพื้นที่หน้าตัดมากกว่าจะมีค่าความแข็งแรงของวัสดุที่มากกว่า จึงทำให้รับความเครียดที่เกิดขึ้นภายในเสาได้มากกว่าด้วยเช่นกัน การเกิดรอยร้าวก็จะเกิดขึ้นเป็นแบบเฉือน และรอยร้าวที่บริเวณกลางเสาคลายกับเสาประเภท NRC-S31 และ NRC-S62

เสาประเภท NRC-Round เป็นเสาที่มีรูปร่างกลมจะทำให้มีพื้นที่รับแรงระเบิดที่น้อยกว่า นอกจากนั้นลักษณะของเสาที่มีรูปร่างวงกลม จะทำให้มีการหักเห และกระจายแรงระเบิดได้ดีกว่าระนาบตรงซึ่งการเกิดรอยร้าวก็จะเกิดขึ้นเป็นแบบเฉือน และรอยร้าวที่บริเวณกลางเสาคลายกับเสาประเภท NRC-S31, NRC-S62 และ NRC-Large เช่นกันตามรูปที่ 45

เมื่อนำเสาคอนกรีตประเภทต่างๆ ที่ได้ทำการทดสอบระเบิดไปแล้ว นำมาเปรียบเทียบสภาพความเสียหาย และค่าความเครียดจากกราฟ ด้วยวิธีการหาพื้นที่ที่มีคอนกรีตเหลืออยู่ภายในเสาจากโปรแกรม Autocad ที่ทำการปรับขนาดให้เท่ากับของจริง ผลที่ได้จากการวัดตามกราฟที่ 22 พบว่าเสามีปริมาณคอนกรีตเหลือภายในเสาทดสอบที่ 1 มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น และมีความสัมพันธ์กับค่าความเครียดที่ได้กล่าวไป แต่ในการทดลองเสาคั้งที่ 2-3 เสา NRC เมื่อได้รับแรงระเบิดแต่เสาเกิดรอยร้าวแบบเฉือนแต่คอนกรีตไม่หลุดล่อนออกจากเสา แต่เมื่อนำเสาประเภท NRC-S31 และ NRC-S62 มาเปรียบเทียบพบว่าเสายังลักษณะคล้ายกับเสาทดสอบที่ 1

เนื่องด้วยปัญหาในขั้นตอนการหล่อเสา NRC-S62 ที่มีระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกที่ 45 mm ทำให้เกิดโพรงภายในเสาเกิดขึ้น ส่งผลให้ค่าที่ได้ทำการทดลองผิดเพี้ยนไป และสาย Strain gauge ขำรุดเนื่องจากปัญหาในการเคลื่อนย้าย และจากสภาพแวดล้อม ณ สถานที่ได้ทำการทดสอบ และกองโยธา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าที่ได้ทำการเก็บเสาคอนกรีตเสริมเหล็กไว้ ส่งผลให้ไม่สามารถวัดค่าความเครียดของเสา NRC-Round และบางจุดของเสาประเภทอื่นๆ

4. ผลการศึกษาการโก่งตัวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีการโก่งตัวสูงสุดในช่วงขณะที่แรงระเบิดกระทำต่อเสาในช่วงเวลานั้นมีการโก่งตัวในช่วงประมาณ 10-80 mm โดยเสาที่ปริมาณเหล็กปลอกที่มากขึ้น และขนาดหน้าตัดที่มากขึ้นจะทำให้เกิดการโก่งตัวมากขึ้น แต่เสากลม NRC-Round-50 ไม่สามารถวัดค่าได้เนื่องจากเกิดปัญหาในขณะที่ระเบิดทำให้อุปกรณ์วัดถูกแรงระเบิดดันให้ออกจากเสาไป

นอกจากนั้นเสาที่ได้ทำทดสอบด้วยวัตถุระเบิดมีผลที่เกิดขึ้นในระหว่างที่ถูกความดันของระเบิดกระทำต่อเสาอยู่นั้น เสามีการโก่งตัวขึ้นลงตลอดระยะเวลาที่เกิดการระเบิด ดังนั้นต้องทำการศึกษาดูการนำภาพที่ได้จากกล้องความเร็วสูงมาประมวล เพื่อหามุมการโก่งตัวสูงสุดขณะที่ได้รับความดัน ที่ทำขึ้นด้วยการจำลองเสาจากโปรแกรม Autocad พบว่ามุมของการโก่งตัวสูงสุด มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กปลอก ขนาดหน้าตัดเสา และการเปลี่ยนรูปร่างของเสาเมื่อเทียบกับเสาประเภท NRC แสดงว่าเสามีค่าความแข็งแรงที่มากขึ้น มาจากวัสดุที่ได้จากการเพิ่มไปในเสา ทำให้บริเวณกลางเสาที่มีความแข็งแรงมากกว่าจะรับแรงได้ดี มีระยะการโก่งตัวที่น้อยลง ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับกราฟความเครียด และสภาพความเสียหายที่เกิดขึ้น

5. ผลการศึกษากำลังต้านทานแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยเครื่อง Universal Testing machine Amsler ขนาด 500 ตัน พบว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับการทดสอบด้วยวัตถุระเบิดประเภท NRC NRC-S31 NRC-Large และ NRC-Round มีค่ารับแรงอัดเฉลี่ย 4100 4100 6700 1900 MPa ซึ่งคิดเป็น 77.36 72.57 84.28 79.17 เปอร์เซ็นต์ของค่ารับแรงอัดสูงสุดของเสา คอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้รับการทดสอบด้วยวัตถุระเบิด โดยที่ยกเว้นเสาประเภท NRC-S62 มีค่ารับแรงอัดเฉลี่ย 505 MPa ซึ่งคิดเป็น 9.01 เปอร์เซ็นต์ของค่ารับแรงอัดสูงสุดของเสา คอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้รับการทดสอบด้วยวัตถุระเบิดเท่านั้น โดยมีความเป็นไปได้ว่ามีโพรงอากาศภายในตัวเสาอันเนื่องมาจากความผิดพลาดในการหล่อเสาของผู้รับเหมา[17]

จากการศึกษาที่ได้กล่าวมา การเพิ่มปริมาณเหล็กปลอกแบบเดียวกันมีแนวโน้มที่สามารถเพิ่มกำลังต้านทานแรงจากระเบิดขึ้นได้ เนื่องมาจากเหล็กปลอกจะทำการตรึงคอนกรีตให้ยังอยู่ภายในเสาไว้ ลดการกะเทาะบริเวณด้านหน้าของเสา ลดการหลุดล่อนของคอนกรีตบริเวณด้านหลังเสาเป็นรอยร้าวตามแนวแกนขวาง และเสาสามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกถาวรเพิ่มขึ้นได้ แต่การเพิ่มปริมาณเหล็กปลอกจะทำให้ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกลดลง จะทำให้เกิดโพรงภายในเสาขณะทำการหล่อเสา เพราะคอนกรีต และหินไม่สามารถแทรกตัวเข้าไปในตัวเหล็กเสริมได้เช่นเสาประเภท NRC-S62 เป็นต้น ซึ่งทำให้ผลการต้านทานแรงระเบิดลดลง สภาพความเสียหายเพิ่มขึ้นมาอีกครั้ง ดังนั้นการเพิ่มปริมาณเหล็กปลอกภายในเสาสามารถทำได้ แต่ต้องทำโดยการควบคุม ดูแลเป็นพิเศษ จากวิศวกรผู้ชำนาญการ นอกจากนั้นการเพิ่มขนาดหน้าตัดเสา และเปลี่ยนรูปร่างของเสายังเป็นการดีต่อ

โครงสร้างอาคาร เนื่องจากตามทฤษฎีแล้วการเพิ่มขนาดหน้าตัดเสาทำให้หน่วยแรงของหน้าตัดมีพื้นที่มากขึ้น ในกรณีที่มีแรงกระทำด้านข้างจะทำให้พฤติกรรมทางด้านทานแรงกระทำของเสามีพฤติกรรมที่เทียบเคียงได้กับคาน ขนาดหน้าตัดที่ใหญ่จะช่วยให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่มีมากขึ้น และการเปลี่ยนรูปร่างจากเสาสี่เหลี่ยมจัตุรัสเป็นเสากลมจะทำให้มีพื้นที่รับแรงระเบิดที่น้อยกว่า นอกจากนี้ลักษณะของเสาที่มีรูปร่างวงกลม จะทำให้มีการหักเห และกระจายแรงระเบิดได้ดีกว่าระนาบตรง ซึ่งจากการศึกษาพบว่าเสาที่ได้ทำการทดสอบเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไปในบทที่ 2 จะเป็นการยิ่งถ้าได้ทำการออกแบบเสาที่มีเพิ่มปริมาณเหล็กปลอก เพิ่มขนาดหน้าตัดเสา และเปลี่ยนรูปร่างของเสาให้อยู่ในเสาต้นเดียวกัน

5.2 ข้อเสนอแนะของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้พบปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างทำการทดสอบในขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. กระบวนการหล่อเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เป็นแบบแวนอน โดยเสาประเภท NRC-S62 มีระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกที่ 45 mm ทำให้ขั้นตอนในการหล่อเสาเกิดปัญหาขึ้น เนื่องจากระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกที่แคบจนเกินไป คอนกรีต และหินไม่สามารถแทรกตัวเข้าไปในตัวเหล็กเสริมได้ จึงเป็นผลให้เสาประเภทนี้เกิดโพรงที่ด้านในขึ้นส่งผลให้ค่าที่ได้ทำการทดลองผิดเพี้ยนไป วิธีแก้ไขคือ การเปลี่ยนวัสดุในการหล่อเสาจากหินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กกว่าปกติที่ใช้ในการก่อสร้างปัจจุบันให้มีขนาดเล็กลง เพื่อให้หินไหลลงไปในบริเวณกลางเสาดีขึ้น ซึ่งจำเป็นต้องได้รับการควบคุม ดูแลจากวิศวกรผู้เชี่ยวชาญอย่างใกล้ชิด หรือหลีกเลี่ยงการตั้งตัวแปรของการทดลองที่มีระยะเหล็กปลอกต่ำกว่า 90 mm

2. สาย Strain gauge ชำรุดเนื่องจากปัญหาในการเคลื่อนย้าย และจากสภาพแวดล้อม ณ สถานที่ได้ทำการทดสอบ และกองโยธา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าที่ได้ทำการเก็บเสาคอนกรีตเสริมเหล็กไว้ อันเกิดจากสัตว์ตัวเล็กกัดสาย Strain gauge ขาดจึงเป็นผลให้เสียบางต้นไม่สามารถวัดค่าได้เช่น NRC-Round เป็นต้น วิธีแก้ไขทำได้โดยการระมัดระวังการเคลื่อนย้าย หมั่นตรวจเช็คเสาอย่างสม่ำเสมอ และหาอุปกรณ์กำจัดสัตว์มาดักไว้ไม่ให้ทำอันตรายต่อเสา

3. อุปกรณ์ Pressure gauge ไม่สามารถติดตั้งไว้ที่เสาได้ เนื่องจากเปลวไฟ และความดันของระเบิดจะเคลื่อนที่ครอบคลุมทั้งเสาไว้ทั้งหมด ทำให้อุปกรณ์ Pressure gauge ไม่มีที่กำบัง และมีความเสี่ยงต่ออุปกรณ์เสียหายสูง จึงทำการติดอุปกรณ์ Pressure gauge ไว้ที่แท่นทดสอบแทนที่มีระยะห่างจากจุดศูนย์กลาง 1 m วิธีแก้ไขทำได้โดยหาอุปกรณ์ทนไฟมาหุ้มสายของ อุปกรณ์ Pressure gauge หรือออกแบบแท่นติดอุปกรณ์ Pressure gauge ที่สามารถติดตั้งกับเสาได้ และป้องกันความดันของระเบิดที่เคลื่อนที่ผ่านมาโอบล้อมอุปกรณ์ Pressure gauge ได้

4. การติดตั้งแท่นทดสอบจำเป็นต้องปรับหน้าดิน และการขุดหลุมเพื่อทำการหล่อฐานลากตรึงแท่นทดสอบอยู่กับที่ แต่สภาพบริเวณที่ทำการทดสอบเป็นดินผสมหินภูเขาจึงเป็นการยากถ้าทำการติดตั้งในช่วงฤดูร้อน จึงเห็นควรให้ทำในช่วงฤดูฝน หรือฤดูหนาวจึงเป็นการดี เนื่องจากสภาพดินจะมีความอ่อนตัวง่ายต่อการปรับหน้าดิน และการขุดดิน แต่ถ้ามีความจำเป็นต้องทำในช่วงฤดูร้อนให้ทำการติดต่อจัดหาหารถแม็คโครขนาดเล็กที่ทำการรับเหมาอยู่ภายในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าจะเป็นง่ายต่อการทำงาน

5. แรงที่ใส่ในแนวแกนเพื่อจำลองเสมือนน้ำหนักบรรทุกทุกถาวรที่เสารับในโครงสร้างจริงที่ทำการวางแผนไว้ที่ 50 ตัน เนื่องจากเกิดปัญหาจากสภาพแวดล้อมที่เป็นสนามหญ้ากว้างที่ไม่มีสิ่งก่อสร้าง โดยห่างจากบริเวณที่ทำการทดสอบระเบิดเป็นระยะ 300 m เป็นผลให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าต้องการลากสายไฟ จากนั้นจึงต้องลากเต้าเสียบมายังบริเวณทำการทดสอบระเบิด และวันที่ทำการทดสอบเป็นช่วงมรสุมเข้า จึงไม่เป็นการเสียอย่างมากที่จะทำการต่อเต้าเสียบจากอาคารมาที่บริเวณทำการทดสอบ ดังนั้นแม่แรงไฮดรอลิกที่นำมาทำการทดสอบจึงเป็นแบบโยกที่ใช้แรงคน ทำให้แรงคนที่ทำการโยกให้ได้ 50 ตัน จึงเป็นไปได้ยากจึงปรับแรงในแนวแกนเหลือ 10 ตัน จึงเห็นควรให้จัดการทดสอบระเบิดในช่วงฤดูร้อน เพื่อเป็นการง่ายต่อการดำเนินการทดสอบ

6. อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวทำการดัดแปลงมาจากเสาอากาศวิทยุสื่อสารหล่อเข้ากับฐานคอนกรีต เมื่อทำการทดสอบด้วยวัตถุระเบิด ความดันที่ได้จากวัตถุระเบิดมีการเคลื่อนตัวผ่านเสามายังอุปกรณ์ ดังนั้นเสาอากาศจึงเกิดการโก่งตัว ชำรุด และไม่สามารถวัดค่าได้ เนื่องมาจากคอนกรีตของเสาที่ได้รับความดันจะเกิดการหลุดล่อนหล่นลงมาทับเสาอากาศ ทำให้ไม่สามารถค่าโก่งตัวของเสาได้ทุกประเภทได้ จึงเห็นควรว่าหาวิธีการกำบังเสาอากาศไม่ให้ความดันจากแรงระเบิดมากระทำ

7. การทดสอบทดสอบเสาด้วยเครื่อง Universal Testing machine Amsler ขนาด 500 ตันมีความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากคน เนื่องมาจากขั้นตอนในการติดตั้งเสาเข้าไปในเครื่องมีความอันตรายสูง นอกจากนั้นเจ้าหน้าที่ไม่ได้ทำการเทแป้งเพื่อปรับสภาพหัวเสา โดยเจ้าหน้าที่ให้สาเหตุมาว่าการปรับสภาพหัว ท้ายเสา หรือไม่ปรับสภาพหัว ท้ายเสาค่าทำการทดสอบออกมาไม่ต่างกันจึงไม่ได้ทำให้ และเจ้าหน้าที่ไม่ได้ทำการตั้งจุดศูนย์ถ่วงของเสาให้ตั้งตรง เนื่องจากเสียเวลาในการทำการทดสอบทำให้เสาบางต้นไม่ได้รับแรงกดที่จุดกึ่งกลางเป็นผลให้ค่าที่ทำการสอบมาได้คาดเคลื่อนได้

5.3 สรุปโดยรวม

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบโครงสร้างของอาคารทั่วไปที่มีแรงระเบิดเป็นองค์ประกอบสำคัญของงานวิจัยนี้ นั้นหมายความว่า การออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีใช้ในปัจจุบันสามารถใช้เพื่อการอยู่รอดของโครงสร้างทั้งหมด ซึ่งเป็นการป้องกันทั้งหลายที่เกิดจากแรงระเบิด ดังนั้นเมื่อทำการทดสอบระเบิดแล้วได้ทราบถึงสภาพความเสียหาย การตอบสนองการโก่งตัว และกำลังต้านแรงอัดเทียบระหว่างเสาที่ได้รับแรงระเบิด และไม่ได้รับแรงระเบิดของเสาที่ได้ออกแบบในงานวิจัยประเภทต่างๆ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พิสูจน์แล้วว่า การเพิ่มปริมาณเหล็กปลอกมีแนวโน้มที่ป้องกันแรงระเบิดได้ดีขึ้น การกะเทาะ และการหลุดล่อนของคอนกรีต ป้องกันการแตกร้าว การหดตัวของคอนกรีต นอกจากนั้นการเพิ่มขนาดหน้าตัด และเปลี่ยนรูปร่างของเสาก็ยังสามารถป้องกันการกะเทาะ และการหลุดล่อนของคอนกรีต ป้องกันการแตกร้าว การหดตัวของคอนกรีตได้ดีขึ้นอีกด้วย ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้ได้แสดงให้เห็นว่าสภาพความเสียหายของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อได้รับแรงระเบิดที่แตกต่างกันมาจากปัจจัยของการเพิ่มปริมาณเหล็กปลอก เพิ่มขนาดหน้าตัดเสา และการเปลี่ยนรูปร่างของเสา จึงเหมาะสำหรับการเป็นตัวช่วยเพื่อออกแบบโครงสร้างอาคารที่มีแนวโน้มที่จะเกิดการระเบิดโดยเฉพาะอย่างยิ่งอาคาร บ้าน เรือนโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสามจังหวัดชายแดนภาคใต้

บรรณานุกรม

1. มาตรฐานการใช้วัตถุระเบิดในงานวิศวกรรม, สภาวิศวกร. 2550, กรุงเทพฯ. 274.
2. กระทรวงมหาดไทย, ก., การคำนวณแรงระเบิดและผลกระทบจากแรงระเบิดที่มีต่อโครงสร้างอาคาร. 2559. 90.
3. Williamson, G.D.W.a.E.B., *Response of Reinforced Concrete Bridge Columns Subjected to Blast Loads*. J. Struct. Eng, 2011. **137(9)**: p. 903-913.
4. Xiaoli Bao, B.L., *Residual strength of blast damaged reinforced concrete columns*. International journal of Impact Engineering, 2009. **37**: p. 295-308.
5. Farouk., S., *Near-Field Explosion Effects on Reinforced Concrete Columns: An Experimental Investigation*, in *Civil Engineering*. 2014, Carleton University: Ottawa, Ontario. p. 195.
6. Aoude, H., Dagenais P. Frederic., Burrell P. Russell., Saatcioglu Murat, *Behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete columns under blast loading*. International Journal of Impact Engineering, 2015. **80**: p. 185-202.
7. Kyei, C., Braimah Abass., *Effects of transverse reinforcement spacing on the response of reinforced concrete columns subjected to blast loading*. Engineering Structures, 2017. **142**: p. 148-164.
8. Kyei, C., *Effects of blast loading on seismically detailed reinforced concrete columns*, in *Civil Engineering*. 2014, Carleton University: Ottawa, Ontario. p. 142.
9. Ke-Chiang Wu, B.L.a.K.-C.T., *The effects of explosive mass ratio on residual compressive capacity of contact blast damaged composite columns*. Journal of Constructional Steel Research, 2010. **67**: p. 602-612.
10. Ke-Chiang Wu, B.L.a.K.-C.T., *Residual axial compression capacity of localized blast-damaged RC columns*. International journal of Impact Engineering, 2010. **38**: p. 29-40.
11. Juechun Xu, C.W., Hengbo Xiang and et al, *Behaviour of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete Columns subjected to blast loading*. Engineering Structures., 2016. **118**: p. 97-107.

12. Xu, G., *Assessment of Risk of Disproportionate Collapse of Steel Building Structures Exposed to Multiple Hazards*. 2011: p. 156.
13. Ganchai Tanapornraweekit., *Finite Element Simulation of FRP Strengthened Reinforced Concrete Slabs Under Two Independent Air Blasts*. researchgate, 2010. **1**: p. 469-488.
14. Zhang, F., Wu Chengqing., Zhao Xiao-Ling., Heidarpour Amin., Li Zhongxian., *Experimental and numerical study of blast resistance of square CFDST columns with steel-fibre reinforced concrete*. Engineering Structures, 2017. **149**: p. 50-63.
15. Wu, C., Oehlers D.J., Rebentrost M., Leach J., Whittaker A.S.. *Blast testing of ultra-high performance fibre and FRP-retrofitted concrete slabs*. Engineering Structures, 2009. **31**: p. 2060-2069.
16. Guo Zhikun., C.W., Zhang Yanyan., Zou Huihui., *Post fire blast-resistances of RPC-FST columns using improved Grigorian model*. International Journal of Impact Engineering, 2017. **107**: p. 80-95.
17. UFC3-340-02., *Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*. UNIFIED FACILITIES CRITERIA, 2008

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	กษิติเดช โกลสสานต์
วัน เดือน ปี เกิด	25 กุมภาพันธ์ 2537
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กำลังศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	122/55 ซ.ลาดพร้าว37 ถ.ลาดพร้าว แขวงจันทระเกษม เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
ผลงานตีพิมพ์	การวิเคราะห์ SDOF อย่างง่ายสำหรับคำนวณการตอบสนอง แรงระเบิดในแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก การประชุมวิชาการวิศวกรรม โยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 24 วันที่ 10-12 กรกฎาคม 2562 จ.อุดรธานี

