

การวิเคราะห์แรงดันระเบิด และพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีต
ภายใต้แรงระเบิด
Analysis of Blast Pressure and Behavior of RC Structures
under Blast Loading

ดร.กนต์ไชย ธนาพรวิกิจตี¹
ศาสตราจารย์ ดร.สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล²

¹อาจารย์ ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

E-mail: ganchai@siit.tu.ac.th

²ผู้อำนวยการ และศาสตราจารย์ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา
สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

E-mail: somnuk@siit.tu.ac.th

บทคัดย่อ : บทความนี้ได้รวบรวมการคำนวณแรงดันระเบิดที่แปรเปลี่ยนไปตามเวลาโดยสามารถหาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระเบิด และเวลาได้โดยใช้แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Blast Scaled Distance และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง เช่น แรงดันระเบิดสูงสุด ระยะเวลาที่แรงระเบิดเดินทางถึงโครงสร้าง ระยะเวลาที่แรงระเบิดกระทำกับโครงสร้าง การลดลงจากการระเบิด และความเร็วของคลื่นการระเบิดที่ให้อยู่ใน UFC 3-340-02 รวมไปถึงวิธีการคำนวณหาแรงดันระเบิดภายใต้สภาพแวดล้อมที่คลื่นการระเบิดมีการสะท้อน เสริม และหักเหจากโครงสร้างใกล้เคียง ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในโครงสร้างที่มีรูปร่างซับซ้อน และหรือตั้งอยู่ในบริเวณที่มีโครงสร้างอื่นอยู่ใกล้เคียง ในการคำนวณหาแรงดันระเบิด และการกระจายของคลื่นการระเบิดในกรณีหลังนี้จำเป็นต้องใช้วิธีการวิเคราะห์ทาง CFD (Computational Fluid Dynamics) เข้ามาช่วย ในบทความนี้ได้กล่าวถึงการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างโดยวิธี Single Degree of Freedom (SDOF) และ Finite Element Method (FEM) พร้อมทั้งยกตัวอย่างการวิเคราะห์ FEM เพื่อประเมินน้ำหนักเทียบเท่าดินระเบิด TNT ที่ใช้ในเหตุการณ์ระเบิดเมื่อวันที่ 17 ส.ค. 2558 ณ บริเวณศาลท้าวมหาพรหม ราชประสงค์ โดยการเปรียบเทียบระดับความเสียหายของโครงสร้างเสาเข็ม และพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กจากการวิเคราะห์ และที่เกิดขึ้นจริงดังที่เห็นในภาพข่าว

คำสำคัญ : แรงดันระเบิด วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ความเสียหาย คอนกรีตเสริมเหล็ก

ABSTRACT : This article reviews approaches to determine blast pressure-time histories by finding related parameters from the chart given in UFC 3-340-02. The related parameters such as blast peak pressure, arrival time, duration time, impulse and velocity of wavefront can be determined from the chart by specifying blast scaled distance. A CFD (Computational Fluid Dynamics) analysis is another approach used to analyze blast pressure-time histories on structures with complex shape and/or surrounded by other structures. It is possible to simulate phenomenon of blast waves such as reflection, constructive superposition and refraction which are normally observed in real incidences. This article also discusses about Single Degree of Freedom (SDOF) and Finite Element Method (FEM) as analysis approaches used to investigate behavior of blast loaded structures. An FEM simulation employed to analyze the equivalent weight of bare charge TNT used in the bomb blast incidence at Erawan shrine, Ratchaprasong on August 17, 2015 is presented in this article as a case study.

Keywords : Blast Pressure, Finite Element Method, Damage, Reinforced Concrete

1. บทนำ

ในปัจจุบันภัยที่เกิดจากการระเบิดได้เกิดขึ้นในหลายพื้นที่ของประเทศไทย เริ่มมาตั้งแต่การระเบิดที่ชายแดนภาคใต้ มาถึงการระเบิดในใจกลางกรุงเทพ เช่นการระเบิดที่ศาลท้าวมหาพรหม ที่สี่แยกราชประสงค์ นอกเหนือจากการระเบิดสร้างสถานการณ์เพื่อให้เกิดความรุนแรง หรือจากการก่อการร้าย ก็ยังมีวินาศภัยที่เกิดจากการระเบิดของโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับสารเคมี ก๊าซ และน้ำมัน สำหรับการระเบิดที่เกิดจากอุบัติเหตุในโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารเคมี ก๊าซ และน้ำมัน โดยปกติแล้วจะเป็นการระเบิดที่แรงดันระเบิดเกิดขึ้นเป็นระยะเวลายาวนานกว่า แต่มีแรงดันระเบิดสูงสุดที่ต่ำกว่าการระเบิดที่เกิดจากดินระเบิด High Explosive (HE) เช่น TNT

Comp-B Comp-C4 RDX และ HMX รวมไปถึงการระเบิดของโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับสารเคมี ก๊าซ และน้ำมันยังก่อให้เกิดอัคคีภัยตามมาด้วย อย่างไรก็ตามการจะระบุถึงความรุนแรงของการระเบิดในแต่ละประเภทนั้น ต้องประเมินจากปริมาณดินระเบิด และสารเคมีที่เกี่ยวข้องที่ทำให้เกิดการระเบิดว่ามีปริมาณมากน้อยเพียงไร ในบทความนี้จะกล่าวถึงความเสียหายของโครงสร้างเสารั้ว และพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณศาลท้าวมหาพรหมที่ได้รับแรงดันระเบิดจาก Bare Charge TNT หรือดินระเบิด TNT ที่ไม่ได้อยู่ในภาชนะบรรจุ แต่มีความรุนแรงเทียบเท่ากับระเบิดแสวงเครื่องบรรจุในท่อประปาเหล็กชุบกลวไนซ์รูปแบบเดียวกับ Pipe Bomb ที่ใช้ในเหตุการณ์ครั้งนี้ [1]

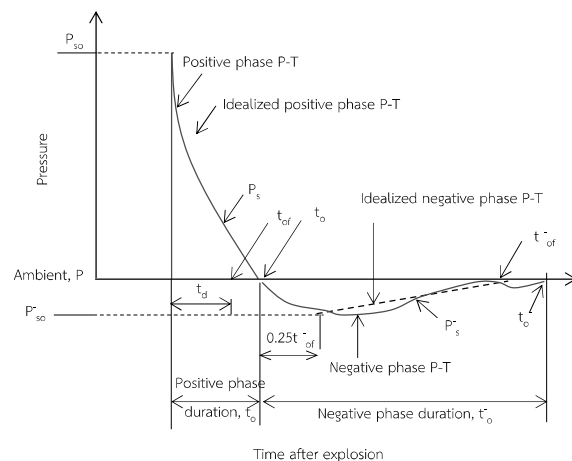
2. องค์ความรู้ที่เกี่ยวข้อง

2.1 การระเบิด และแรงดันระเบิด

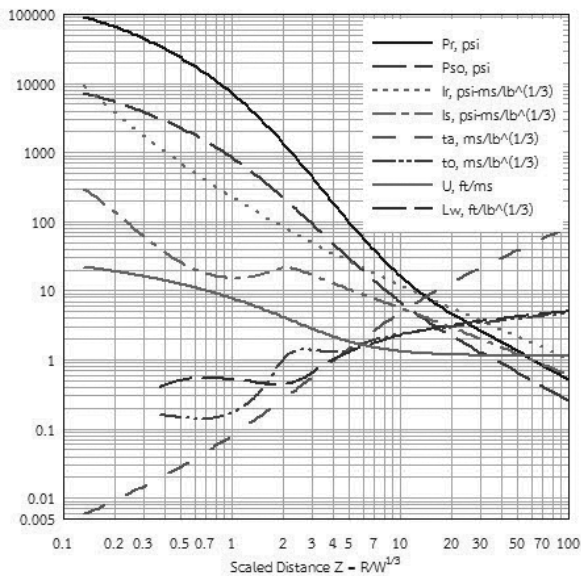
การระเบิดเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีในดินระเบิด หรือสารเคมีผสมเป็นดินระเบิด ซึ่งปฏิกิริยาเคมีนี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยมีความเร็วของการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับความเร็วจุดระเบิด (Detonation Velocity) ซึ่งจะส่งผลให้เกิดคลื่นแรงดันระเบิด (Blast Pressure Wave) อัดอากาศ และความร้อนแผ่ออกไปจากจุดศูนย์กลางการระเบิด ค่าแรงดันระเบิดนี้จะแปรเปลี่ยนไปตามเวลาที่เกิดขึ้น โดยแรงดันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดสูงสุดเมื่อ Blast Wave เดินทางมาถึงตำแหน่งที่ทำการวัดค่าแรงดัน และจะตกลงอย่างรวดเร็วเมื่อ Blast Wave นั้นผ่านไป โดยแรงดันจะลดลงสู่ศูนย์ และเกิดแรงดันกลับ (Negative Pressure) ในทิศทางตรงข้ามกับแรงดันที่เกิดขึ้นในครั้งแรก โดยจะมีความรุนแรงที่น้อยลงมาก ดังแสดงในภาพที่ 1 ความรุนแรงของการระเบิดในแต่ละครั้ง จะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำหนักดินระเบิด ชนิดดินระเบิด วิธีการบรรจุดินระเบิด โดยเฉพาะภาชนะที่ใช้ในการบรรจุ และระยะห่างระหว่างศูนย์กลางการระเบิด ถึงจุดเป้าหมาย ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลต่อกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระเบิดและเวลา ดังแสดงในภาพที่ 1 ความรุนแรงของการระเบิดในแต่ละครั้ง สามารถประเมินได้จากค่าแรงดัน (Pressure) และการดล (Impulse) จากการระเบิด โดยที่การดล คือ พื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงดัน และเวลาในภาพที่ 1

สำหรับการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระเบิด และเวลา สามารถทำได้หลายวิธีเช่น การคำนวณตามสมการที่ได้มีการเสนอไว้ดังเช่นในเอกสารอ้างอิง [3] หรือการ

คำนวณโดยใช้สมการ และกราฟจาก TM 5-855-1 [4] ดังตัวอย่างที่แสดงใน ภาพที่ 2 อย่างไรก็ตาม การหาแรงดันระเบิด จากวิธีข้างต้นจะคำนวณจากน้ำหนักของดินระเบิดมาตรฐาน TNT ทรงกลม (Spherical TNT) ถ้าเป็นดินระเบิดชนิดอื่น จะต้องแปลงให้เป็นน้ำหนักเทียบเท่าดินระเบิด TNT โดยคูณค่า TNT Equivalent เข้าไปกับน้ำหนักดินระเบิดชนิดนั้นๆก่อน โดยที่ค่า TNT Equivalent นี้จะมีค่าเท่ากับอัตราส่วนพลังงานที่ได้จากการระเบิดของดินระเบิดชนิดนั้นๆ ต่อพลังงานที่ได้จากการระเบิดของดินระเบิด TNT ซึ่งค่า TNT Equivalent ของดินระเบิดชนิดต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1



ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระเบิด และเวลา
[2]



ภาพที่ 2 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการคำนวณแรงดันระเบิดสูงสุด ระยะเวลาที่แรงระเบิดเดินทางถึงโครงสร้าง ระยะเวลาที่แรงระเบิดกระทำกับโครงสร้าง แรงดลจากการระเบิด และความเร็วของคลื่นการระเบิด [4]

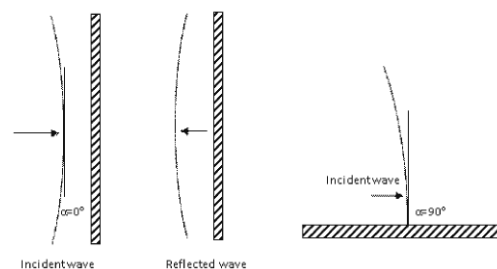
ตารางที่ 1 ค่า TNT equivalent ของดินระเบิดชนิดต่าง ๆ [4]

ชนิดดินระเบิด	TNT equivalent
ANFO	0.82
Comp A-3	1.09
Comp B	1.11
Comp C-4	1.37
H-6	1.38
HBX-1	1.17
Octal	1.06
Pentolite	1.42
RDX	1.14
TNT	1.00
Tritonal	1.07

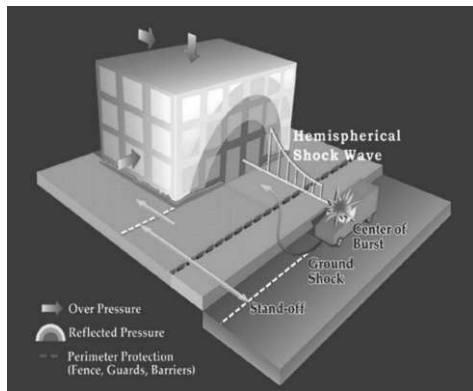
ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงระเบิดนั้น ก่อนอื่นต้องเข้าใจถึงประเภทของแรงดันระเบิดก่อน ซึ่งแรงดันระเบิด

มี 2 ประเภท ได้แก่ Incident Blast Pressure และ Reflected Blast Pressure โดย Incident Blast Pressure คือแรงดันระเบิดที่ผ่านไปในอากาศ รวมถึงแรงดันระเบิดที่ผ่านโครงสร้างไป โดยไม่ได้มีการสะท้อนของคลื่นการระเบิดกับพื้นที่รับแรงของโครงสร้าง ในขณะที่ Reflected Blast Pressure คือแรงดันระเบิดที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการสะท้อนของคลื่นการระเบิดจากพื้นที่รับแรงของโครงสร้าง ดังแสดงในภาพที่ 3 โดยแรงดันระเบิดจะไม่เกิดการสะท้อนจากพื้นที่รับแรงของโครงสร้างในกรณีที่ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นการระเบิดขนานกับโครงสร้าง หรืออีกนัยหนึ่งคือเส้นสัมผัส (Tangent Line) ของคลื่นการระเบิดทำมุมตั้งฉากกับพื้นที่รับแรงของโครงสร้าง

ในการวิเคราะห์โครงสร้างที่รับแรงระเบิดนั้นส่วนใหญ่จะคำนึงถึง Reflected Blast Pressure อย่างไรก็ตามในกรณีที่ทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นส่วนโครงสร้างที่แรงดันระเบิดผ่านโครงสร้างไปโดยไม่มีการสะท้อนกลับของแรงดันระเบิด เช่นกำแพงด้านข้าง หรือหลังคาของอาคาร จะต้องคำนึงถึง Incident Blast Pressure หรือ Overpressure ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของการระเบิดเทียบกับผังของโครงสร้างที่ทำการวิเคราะห์ ดังแสดงในภาพที่ 4



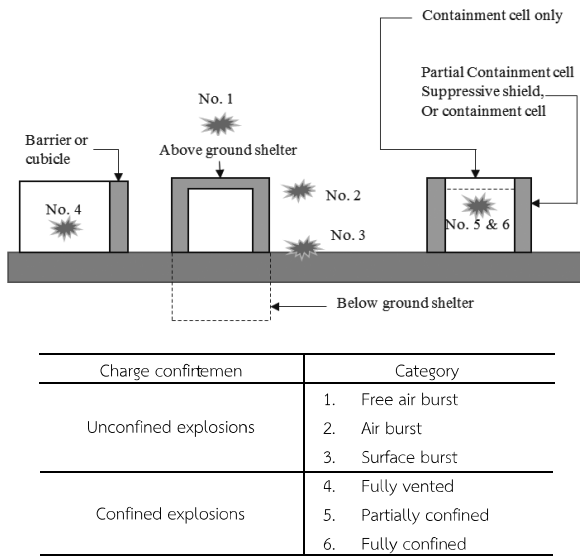
ภาพที่ 3 ความแตกต่างระหว่าง Incident และ Reflected Blast Waves



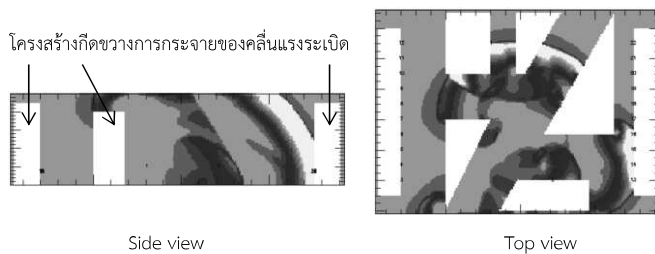
ภาพที่ 4 Incident Pressure (Over Pressure) และ Reflected Blast Pressure ที่กระทำบนด้านต่าง ๆ ของอาคาร [5]

สำหรับการวิเคราะห์หาแรงดันระเบิดที่กระทำบนโครงสร้างนั้น มีปัจจัยที่ต้องคำนึงเพิ่มเติมอีก นั่นคือ ตำแหน่งของการระเบิดเกิดขึ้นอย่างอิสระในอากาศ (Free Air Burst) หรือการระเบิดเกิดขึ้นใกล้พื้นดิน (Air Burst/Surface Burst) รวมถึงสภาพแวดล้อมที่เกิดการระเบิดว่าเป็นการระเบิดในโครงสร้างปิดทึบ (Fully Confined) หรือโครงสร้างที่มีการระบายของแรงระเบิดออกไปสู่ภายนอกได้หรือไม่ (Partially Confined/Fully Vented) ปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ จะส่งผลถึงรูปร่างของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระเบิด และเวลา (ภาพที่ 1) ภาพที่ 5 แสดงถึงรูปแบบการระเบิดทั้งหมด 6 ประเภท โดยที่การระเบิดประเภทที่ 1 2 และ 3 เป็นการระเบิดในสภาพแวดล้อมเปิด (Unconfined Explosions) และการระเบิดประเภทที่ 4 5

และ 6 เป็นการระเบิดภายใต้สภาพแวดล้อมปิด (Confined Explosions) โดยทั่วไปแล้วการระเบิดภายใต้สภาพแวดล้อมแบบเปิด จะเกิดแรงดันระเบิดที่น้อยกว่า และมีความซับซ้อนน้อยกว่า การระเบิดภายใต้สภาพแวดล้อมแบบปิด ที่คลื่นการระเบิดสามารถสะท้อน และเกิดการเสริมกันของคลื่นได้ การคำนวณแรงดันระเบิดภายใต้สภาพแวดล้อมแบบปิด ไม่สามารถทำได้โดยการคำนวณโดยใช้สมการ และกราฟที่ให้ไว้ใน TM 5-855-1 [4] ได้ อย่างไรก็ตามถึงแม้การระเบิดจะเกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมแบบเปิด แต่มีการหักเหของ Blast Waves จากโครงสร้างข้างเคียง การวิเคราะห์หาแรงระเบิดก็ไม่สามารถทำได้โดยใช้สมการ และกราฟที่ให้ไว้ใน TM 5-855-1 [4] แต่จำเป็นต้องใช้วิธีการวิเคราะห์ทาง CFD (Computational Fluid Dynamics) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis) โดยมีสมการ Navier-Stokes เป็นสมการที่ใช้อธิบายฟิสิกส์สำหรับการไหลของของไหล โดยในการแก้สมการเพื่อให้ได้มาซึ่งความเร็ว และแรงดันระเบิดที่เกิดขึ้นในอากาศ จะใช้หลักการอนุรักษ์ของพลังงาน มวล และโมเมนตัมมาประกอบ [6] อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีซอฟต์แวร์ที่สามารถวิเคราะห์หาการกระจายตัวของคลื่นการระเบิดที่สามารถพิจารณาการหักเห เสริมและสะท้อนกันของคลื่นการระเบิดจากโครงสร้างที่อยู่รายล้อมได้ ซอฟต์แวร์ดังกล่าวเช่น Air3d [7] ANSYS AUTODYN [8] และ LS-DYNA [9]



ภาพที่ 5 รูปแบบของการระเบิด [2]

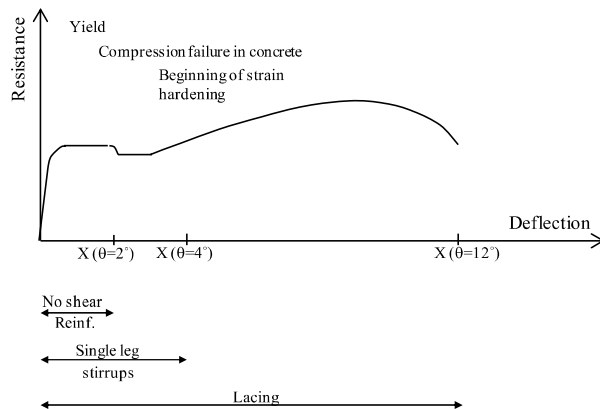


ภาพที่ 6 ตัวอย่างแบบจำลองที่สามารถพิจารณาถึงการหักเห เสริมและสะท้อนกันของคลื่นการระเบิดจากโครงสร้างที่อยู่รายล้อม [10]

2.2 พฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงระเบิด

เมื่อโครงสร้างต้องรับภาระแรงดันจากการระเบิด พลังงานจากการระเบิดจะแปรเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความเครียด (Strain Energy) ของโครงสร้างที่แอ่นตัวไป ภาพที่ 7 แสดงรูปแบบโดย

ทั่วไปของความสัมพันธ์ระหว่างการแอ่นตัวและความต้านทานการแอ่นตัวของโครงสร้างภายใต้แรงระเบิด จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกของการรับแรง ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานและการแอ่นตัวของโครงสร้างยังเป็นเส้นตรงจนกระทั่งเหล็กเสริมในโครงสร้างถึงจุดคราก หลังจากนั้นความต้านทานของการแอ่นตัวจะมีค่าคงที่ ในขณะที่การแอ่นตัวยังมีค่ามากขึ้น จากภาพที่ 7 จะเห็นได้ว่าความสามารถในการแอ่นตัวของโครงสร้างซึ่งสอดคล้องกับมุมการหมุนที่จุดรองรับ (Support Rotation) ก่อนที่คอนกรีตจะถูกบดอัด (Concrete Crushing) นั้นโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับลักษณะของเหล็กปลอกที่เพิ่มความเหนียวให้กับโครงสร้าง โดย UFC 3-340-02 [2] ได้ให้แนวทางในการออกแบบโครงสร้างภายใต้แรงระเบิดดังนี้ ในกรณีที่หน้าตัดของชิ้นส่วนโครงสร้างไม่มีเหล็กปลอกเลย โครงสร้างก็จะสามารถแอ่นตัวได้ถึงระยะที่สอดคล้องกับมุมการหมุนที่จุดรองรับประมาณ 2° แต่ถ้าในชิ้นส่วนโครงสร้างมีเหล็กปลอกขาเดียว (Single Leg Stirrups) โครงสร้างนั้นก็สามารถแอ่นตัวได้มากขึ้น เทียบเท่ากับมุมการหมุนที่จุดรองรับประมาณ 4° ในขณะที่ถ้าหน้าตัดโครงสร้างประกอบไปด้วยเหล็กปลอกเกลียว (Lacing) จะเพิ่มความเหนียวให้กับหน้าตัดได้มากขึ้น โดยที่โครงสร้างนั้นสามารถแอ่นตัวได้เทียบเท่ากับมุมการหมุนที่จุดรองรับถึงประมาณ 12° อย่างไรก็ตามเกณฑ์เหล่านี้เป็นเพียงแนวทางเบื้องต้นในการออกแบบเท่านั้น



ภาพที่ 7 พฤติกรรมดัดของโครงสร้างภายใต้แรงระเบิด
[2]

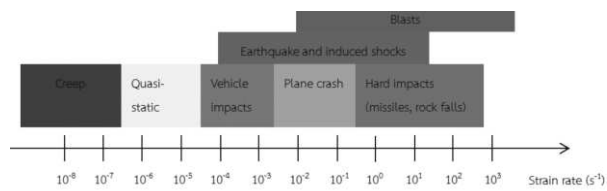
2.3 การตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แรงระเบิด

เนื่องจากการระเบิดเกิดขึ้นภายในเวลาที่สั้นมาก ในระดับ Millisecond และโครงสร้างที่ได้รับแรงระเบิดก็จะเกิดการเคลื่อนตัวภายในเวลาอันสั้น ส่งผลให้โครงสร้างมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเครียด (Strain Rate) ที่เร็วมาก ภาพที่ 8 แสดงช่วง Strain Rate ที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำแบบต่างๆ จะเห็นได้ว่า strain rate ของโครงสร้างภายใต้แรงระเบิดนั้นอยู่ในช่วงตั้งแต่ $10^2/s$ ถึง $10^3/s$ Strain Rate ของโครงสร้างที่ได้รับแรงกระทำจากแผ่นดินไหวจะอยู่ในช่วง $10^{-4}/s$ ถึง $10/s$ ในขณะที่ภายใต้แรงกระทำแบบสถิตย์ Strain Rate ของโครงสร้างจะมีค่าอยู่ในช่วง $10^{-7}/s$ ถึง $10^{-5}/s$ เท่านั้น จะเห็นได้ว่า Strain Rate ของโครงสร้างภายใต้แรงแบบพลวัต (เช่น แรงแผ่นดินไหว แรงกระแทก แรงระเบิด) นั้นมีค่าสูงกว่า Strain Rate ของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำแบบสถิตย์มาก

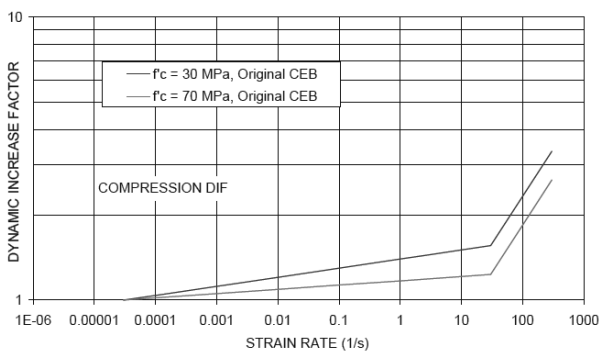
จากการทดสอบคุณสมบัติทางกล เช่น กำลังรับแรงดึง และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต และ

เหล็กเสริมภายใต้ Strain Rate หลากๆ ค่า ตั้งแต่ Strain Rate ในย่านแรงกระทำแบบสถิตย์ จนถึง Strain Rate ในย่านของแรงระเบิด จะเห็นว่าทั้งคอนกรีต และเหล็กเสริมมีกำลังรับแรงดึง และแรงอัดที่สูงขึ้น ดังแสดงใน ภาพที่ 9 ถึง ภาพที่ 12 โดยกำลังรับแรงของวัสดุที่เพิ่มขึ้นแสดงออกมาในรูปของอัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงของวัสดุภายใต้แรงกระทำแบบพลวัตต่อกำลังรับแรงของวัสดุภายใต้แรงกระทำแบบสถิตย์ หรือเรียกว่า Dynamic Increase Factor (DIF) จากภาพที่ 9 ถึง ภาพที่ 11 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ของ DIF และ Strain Rate จะเป็น Bi-Linear เมื่อนำมาพล็อตบน Semi-Log หรือ Log-Log Scale ในขณะที่ความสัมพันธ์ของ DIF และ Strain Rate ของกำลังรับแรงประลัยของเหล็กเสริมที่แสดงในภาพที่ 12 เป็นความสัมพันธ์แบบ Linear

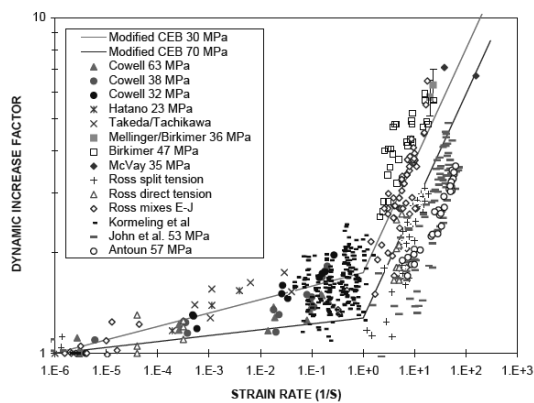
เมื่อพิจารณาผลของ Strain Rate ในคอนกรีต จะเห็นได้ว่า Strain Rate มีผลต่อกำลังรับแรงดึง มากกว่ากำลังรับแรงอัด โดยที่ DIF ของคอนกรีตภายใต้กำลังรับแรงดึงมีค่าประมาณ 10 เมื่อ Strain Rate มีค่า $100/s$ (ภาพที่ 10) ในขณะที่ DIF ของคอนกรีตภายใต้แรงอัดมีค่าประมาณ 2 เมื่อ Strain Rate มีค่า $100/s$ (ภาพที่ 9) ในขณะที่ผลของ Strain Rate ในเหล็กเสริมต่อกำลังรับแรงดึงที่จุดคราก และกำลังรับแรงดึงประลัย ส่งผลให้ DIF มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.9 และ 1.2 ตามลำดับ (ภาพที่ 11 และภาพที่ 12) จากผลของ Strain Rate ต่อกำลังของวัสดุ ดังที่ได้กล่าวมานี้ เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องใกล้เคียงกับพฤติกรรม และการตอบสนองของโครงสร้างจริงภายใต้แรงระเบิด จำเป็นต้องพิจารณาถึงผลของ Strain Rate ในการวิเคราะห์ด้วย



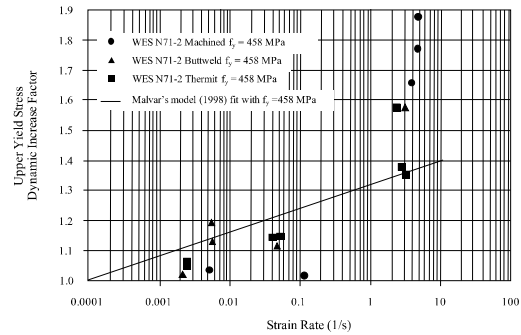
ภาพที่ 8 ช่วงอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำแบบต่างๆ [11]



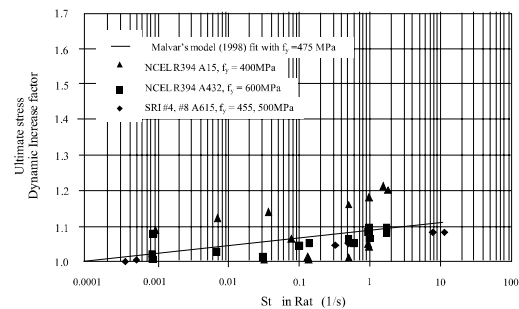
ภาพที่ 9 DIFs สำหรับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตั้งแต่ 30MPa ถึง 70MPa จาก CEB formulation [12]



ภาพที่ 10 DIFs สำหรับกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดตั้งแต่ 30MPa ถึง 70MPa จาก Modified CEB Formulation [12]



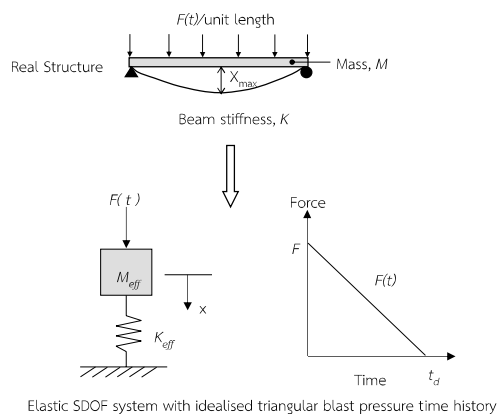
ภาพที่ 11 DIFs สำหรับกำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม [13, 14]



ภาพที่ 12 DIFs สำหรับกำลังรับแรงดึงประลัยของเหล็กเสริม [13, 14]

การวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แรงระเบิดนั้น สามารถทำการวิเคราะห์ได้หลายวิธี เช่นการวิเคราะห์แบบ Single Degree Of Freedom (SDOF) Multi Degree Of Freedom (MDOF) และการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลีเมนต์ การวิเคราะห์ที่สามารถทำนายพฤติกรรมและการตอบสนองได้ใกล้เคียงกับของโครงสร้างจริงมากที่สุดก็คือการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์โดยวิธีนี้ค่อนข้างมีความซับซ้อนทั้งในเรื่องของแบบจำลองโครงสร้าง แบบจำลองคุณสมบัติวัสดุ รวมไปถึงแบบจำลอง DIFs ของวัสดุ และประเภทของอีลีเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลอง ในขณะนั้น

ที่การวิเคราะห์แบบ MDOF และ SDOF มีความซับซ้อนและความสามารถในการทำนายพฤติกรรมและการตอบสนองของโครงสร้างที่น้อยลงตามลำดับ แต่โดยส่วนใหญ่แล้วการวิเคราะห์แบบ SDOF หรือการวิเคราะห์ที่พิจารณาโครงสร้างเป็น Lump Mass ที่มีความแข็งแกร่งเทียบเท่ากับโครงสร้างจริง ก็สามารถคำนวณการตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แรงระเบิดได้มีความถูกต้องในระดับหนึ่ง [15] อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแกร่งเทียบเท่าของแบบจำลอง SDOF จะต้องพิจารณาถึงผลของการแตกร้าวของคอนกรีต และผลของ Strain Rate ต่อคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต และเหล็กเสริมด้วย [2]



ภาพที่ 13 แบบจำลอง SDOF ของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำ Triangular Blast Pressure Time History

ภาพที่ 13 แสดงแบบจำลอง SDOF ของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำ Triangular Blast Pressure Time History ซึ่งแรงกระทำรูปสามเหลี่ยมนี้ได้ถูกจำลองให้เทียบเท่ากับค่าแรงดันระเบิดที่เปลี่ยนไปตามเวลา ที่แสดงในภาพที่ 1 โดยที่ F สอดคล้องกับแรงดันระเบิดสูงสุดที่เกิดขึ้น และลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์เมื่อเวลา t_d ซึ่ง

ฟังก์ชันแรงระเบิดนี้แสดงในสมการที่ 1 เมื่อแทนฟังก์ชันแรงระเบิดนี้ลงไปในสมการการเคลื่อนที่แบบพลวัต ก็จะได้ดังสมการที่ 2 โดยที่ $x(t)$ คือ ค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างที่เวลา t เนื่องจากแรงระเบิด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 อย่างไรก็ตามเมื่อแรงระเบิดผ่านไปหลังจากเวลา t_d โครงสร้างก็ยังคงมีการสั่นแบบอิสระ (Free Vibration) สำหรับการวิเคราะห์การแอ่นตัวของโครงสร้างในช่วง $t > t_d$ สามารถทำได้โดยแทนค่า $F(t) = 0$ ลงในสมการการเคลื่อนที่แบบพลวัต ดังแสดงในสมการที่ 4 และการแอ่นตัวในช่วงเวลาดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5

$$F(t) = F \left(1 - \frac{t}{t_d} \right) \quad (1)$$

$$M_{eff} \ddot{x}(t) + K_{eff} x(t) = F \left(1 - \frac{t}{t_d} \right) \quad (2)$$

$$x(t) = \frac{F}{K_{eff}} (1 - \cos \omega t) + \frac{F}{K_{eff} t_d} \left(\frac{\sin \omega t}{\omega} - t \right) \quad (3)$$

$$M_{eff} \ddot{x}(t) + K_{eff} x(t) = 0 \quad (4)$$

$$x(t) = \frac{F}{K_{eff} \omega t_d} [\sin \omega t_d - \sin \omega(t - t_d)] - \frac{F}{K_{eff}} \cos \omega t \quad (5)$$

โดย $F(t)$ คือ ค่าแรงดันระเบิด ณ เวลา t , F คือ ค่าแรงดันระเบิดสูงสุด t_d คือ ระยะเวลาที่แรงดันระเบิดกระทำกับโครงสร้าง M_{eff} และ K_{eff} คือ มวลและความแข็งแกร่งเทียบเท่าของโครงสร้าง SDOF ตามลำดับ $\ddot{x}(t)$ และ $\dot{x}(t)$ คือ ค่าการแอ่นตัวและความเร็วของโครงสร้าง ณ เวลา t ตามลำดับ และ ω คือ ความถี่เชิงมุมธรรมชาติของโครงสร้าง SDOF

สำหรับการวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แรงระเบิดด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

ถึงแม้จะมีขั้นตอนที่ซับซ้อนมากกว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธี SDOF แต่การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์เป็นวิธีที่ผู้วิเคราะห์สามารถจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างรูปร่างใดๆ ได้โดยไม่ต้องมีการแปลงโครงสร้างให้เป็นโครงสร้างเทียบเท่าทั้งในแง่ของน้ำหนักของโครงสร้าง แรงกระทำและลักษณะการยึดรั้งของโครงสร้างที่ใช้ในวิธีวิเคราะห์ SDOF ซึ่งขั้นตอนเหล่านี้เป็นการลดทอนความถูกต้องของการวิเคราะห์หลังรวมไปถึงการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์อีลีเมนต์สามารถนำผลของ DIF ที่มีค่าเปลี่ยนไปตาม Strain Rate ของโครงสร้างเองเพิ่มเติมลงไปในแบบจำลองคุณสมบัติของวัสดุได้ และยังสามารถกำหนดค่าแรงดันระเบิดที่เปลี่ยนไปตามเวลา (Blast Pressure-Time Histories) ในแต่ละตำแหน่งของโครงสร้างได้ ด้วยเหตุผลเหล่านี้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์จึงสามารถทำนายพฤติกรรมและการตอบสนองได้ใกล้เคียงกับของโครงสร้างจริงภายใต้แรงระเบิดได้ดีกว่า

3. การประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ Finite Element Method (FEM) ในการวิเคราะห์ความเสียหาย และน้ำหนักดินระเบิดในเหตุการณ์ระเบิดที่ราชประสงค์

3.1 การวิเคราะห์ความเสียหายของโครงสร้างเสาเข็ม และพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

จากความเสียหายในบริเวณศาลท้าวมหาพรหมที่รายงานออกมาทางสื่อฯ ต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 14 นั้น เห็นได้ว่าโครงสร้างที่เกิดความเสียหายชัดเจนที่สุด เกิดขึ้นกับเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณศาลฯ รวมถึงเหล็กรั้วที่เกิดการแอ่นตัว และฉีกขาด และพื้นคอนกรีตที่เกิดการแตกหลุดร่อนออกมาเป็นวงกว้าง

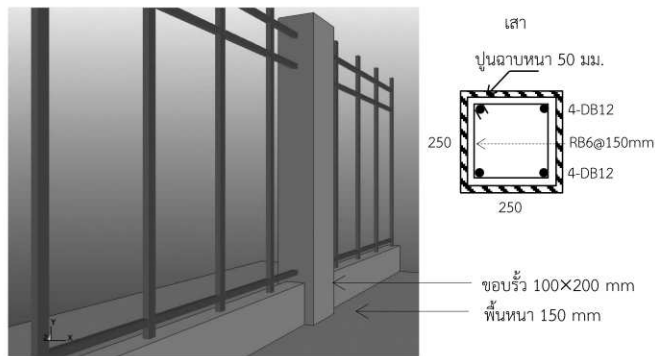
เป็นไปในแนวทิศทางของแรงดันระเบิดที่ออกมา นั้น ระดับความเสียหายเหล่านี้เป็นข้อมูลสำคัญ ที่สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ถึงปริมาณน้ำหนักดินระเบิดที่ใช้ก่อเหตุในครั้งนี้ได้ โดยการเปรียบเทียบความเสียหายของเสาเข็ม และพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กดังกล่าวเมื่อได้รับแรงดันระเบิดจากดินระเบิดขนาดน้ำหนักต่างๆ ภายใต้แบบจำลองไฟไนต์อีลีเมนต์

ในการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลีเมนต์ของโครงสร้างภายใต้แรงระเบิดนี้ จะทำการวิเคราะห์ด้วย Explicit Finite Element Code LS-DYNA [9] โดยแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์เสาเข็ม และพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กถูกสร้างขึ้นมาจากขนาดเสาคอนกรีต และรั้วเหล็กได้ทำการวัดจากสถานที่จริง รวมไปถึงได้มีการใช้ Cover Meter เพื่อที่จะตรวจสอบขนาดและจำนวนเหล็กเส้นหลัก ขนาดและระยะห่างของเหล็กปลอก เพื่อนำมาใช้สร้างแบบจำลองในการวิเคราะห์ จากการตรวจสอบในภาคสนามพบว่าเสาเข็มขนาดหน้าตัดเท่ากับ 250 mm x 250 mm โดยมีปูนฉาบหนา 50 mm ในแต่ละด้านของเสา ความสูงเสาเท่ากับ 1600 mm มีเหล็กเสริมหลักเป็นเหล็ก DB12 จำนวน 4 เส้น โดยมีเหล็กปลอกขนาด RB6@150 mm ดังแสดงในภาพที่ 15 โดยที่กำลังอัดของคอนกรีตสมมติให้มีค่าเท่ากับ 25 MPa และกำลังรับแรงดึงดัดครากของเหล็กเสริม DB12 และ RB9 มีค่าเท่ากับ 500 MPa และ 360 MPa ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ได้รวบรวมจากการทดสอบกำลังดัดครากของเหล็กเสริมดังกล่าวในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้แบบจำลองคุณสมบัติของคอนกรีตและเหล็กเสริมได้พิจารณาถึงผลของอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดโดยการระบุความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลง

ความเครียด และDIFs ที่ได้จากภาพที่ 9 ถึงภาพที่ 12 ลงไปในแบบจำลองคุณสมบัติของทั้งคอนกรีตและเหล็กเสริมด้วย



ภาพที่ 14 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับรั้วและพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณศาลท้าวมหาพรหม [16, 17]

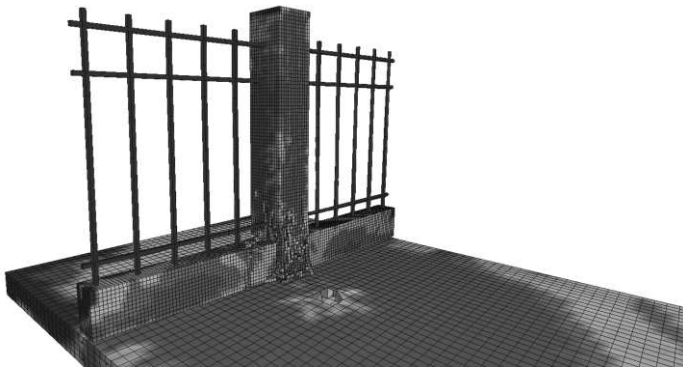


ภาพที่ 15 แบบจำลองเสา คสล.ขนาด 250×250 มม. (รวมความหนาปูนฉาบด้านละ 50 มม.) ขอบรั้ว 100×200 มม.

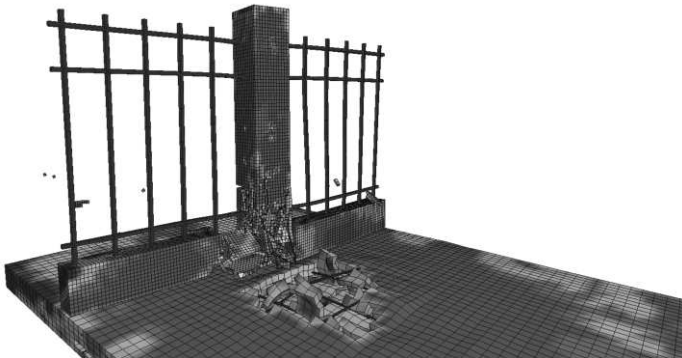
แบบจำลองที่วิเคราะห์ทั้งหมด 3 แบบจำลอง แตกต่างกันที่น้ำหนักของดินระเบิด โดยในบทความนี้ขอใช้สมมติฐานเบื้องต้นก่อนว่าดินระเบิดที่ใช้เป็นระเบิด Bare Charge TNT ที่ไม่ได้

ถูกบรรจุอยู่ใน casing และทำการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นจากระเบิด TNT น้ำหนัก 2kg 3kg และ 4kg โดยในแบบจำลองการวิเคราะห์นั้น ได้ประเมินตำแหน่งที่เกิดการระเบิดอยู่ห่างจากเสารั้วเท่ากับ 0.5m โดยประมาณ สำหรับแรงระเบิดที่แปรเปลี่ยนไปตามเวลา ที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักดินระเบิดต่างๆเหล่านี้คำนวณได้จากคำสั่ง LOAD_BLAST_ENHANCED ซึ่งเป็นชุดคำสั่งสำหรับการวิเคราะห์แรงระเบิดที่เกิดขึ้นชุดคำสั่งนี้สามารถคำนึงถึงรูปแบบการระเบิด เช่นการระเบิดแบบ Spherical Free Air Burst และแบบ Hemi-Spherical Surface Burst [2] ที่พิจารณาถึงผลของการสะท้อนของคลื่นการระเบิดจากพื้นดิน รวมถึงการพิจารณาถึงแรงระเบิดดันกลับ (Negative Pressure Phase) โดยผลการวิเคราะห์ในบทความนี้จะแสดงให้เห็นในแง่ของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเสารั้วคอนกรีตเสริมเหล็ก และพื้นบริเวณที่เกิดการระเบิดเท่านั้น

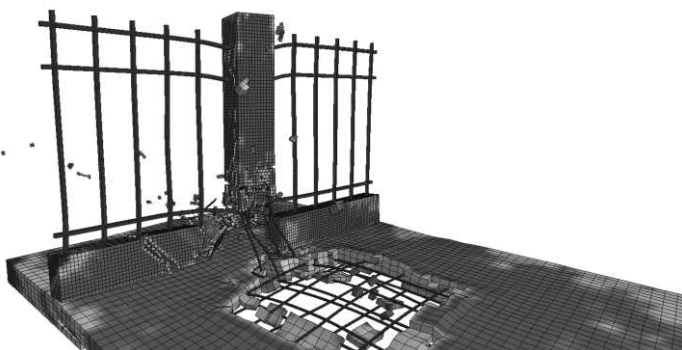
จากภาพที่ 16 ภาพที่ 17 และภาพที่ 18 แสดงให้เห็นถึงระดับความเสียหายต่างๆ ไล่เพิ่มมาตั้งแต่ความเสียหายที่เกิดขึ้นเมื่อการระเบิดเกิดจากดินระเบิด TNT น้ำหนัก 2 kg 3 kg และ 4 kg ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นจริงในภาพที่ 14 กับความเสียหายที่ได้จากการวิเคราะห์ (ภาพที่ 16 ถึง ภาพที่ 18) พบว่าน้ำหนักดินระเบิดที่น่าจะใช้ในการก่อเหตุครั้งนี้อยู่ที่ 3 kg สำหรับดินระเบิด TNT



ภาพที่ 16 การจำลองความเสียหายของเสารั้วคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดขึ้นจากการระเบิดของ TNT น้ำหนัก 2 kg



ภาพที่ 17 การจำลองความเสียหายของเสารั้วคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดขึ้นจากการระเบิดของ TNT น้ำหนัก 3 kg



ภาพที่ 18 การจำลองความเสียหายของเสารั้วคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดขึ้นจากการระเบิดของ TNT น้ำหนัก 4 kg

4. สรุป

บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับพฤติกรรมและการวิเคราะห์แรงดันระเบิด รวมไปถึงพฤติกรรมของวัสดุและโครงสร้างที่อยู่ในสภาวะที่เกิดอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเครียดสูงเนื่องจากแรงระเบิด โดยในบทความนี้ได้ประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อที่จะวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของปริมาณดินระเบิดเทียบเท่า TNT ที่น่าจะใช้ในเหตุการณ์ระเบิดที่ราชประสงค์เมื่อวันที่ 17 ส.ค. 58 โดยในการวิเคราะห์นั้นยังอยู่บนพื้นฐานที่สมมติข้อมูลต่างๆ ขึ้นมาเช่นขนาดและเหล็กเสริมของเสารั้วคอนกรีตเสริมเหล็ก กำลังอัดของคอนกรีตของเสารั้ว และพื้นที่บริเวณศาลท้าวมหาพรหม รวมไปถึงระยะห่างจากจุดศูนย์กลางการระเบิดถึงเสารั้วที่ทำการวิเคราะห์ จากการวิเคราะห์พบว่าดินระเบิดที่ใช้ในการก่อเหตุครั้งนี้มีความรุนแรงเทียบเท่ากับ Bare Charge TNT น้ำหนัก 3 kg ทำให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างเสารั้ว และพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กในระดับที่ใกล้เคียงกับความเสียหายที่เกิดขึ้นจริงจากเหตุระเบิด อย่างไรก็ตามถ้าสามารถได้ข้อมูลในที่เกิดเหตุฯ ดังที่กล่าวมา ก็จะสามารถวิเคราะห์ปริมาณดินระเบิดเทียบเท่า Bare Charge TNT ได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

- (1) กันตไชย ธนาพรวิจิตร และสมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, 2558. การใช้เทคนิค Forensic Engineering ในการวิเคราะห์เหตุการณ์ระเบิดที่ราชประสงค์. วารสารคอนกรีต ฉบับที่ 24 :1-10.
- (2) U.S. Department of Defense, (2008.) Structures to resist the effects of accidental explosions, UFC 3-340-02.
- (3) Baker, W.E., (1973.) Explosions in Air. Austin : University of Texas Press.
- (4) U.S. Department of Army, TM5-855-1, (1986.) Fundamental of protective design for conventional weapons effects.
- (5) FEMA 427, (2003.) Primer for Design of Commercial Buildings to Mitigate Terrorist Attacks.
- (6) Karamcheti, K., (1980.) Principles of ideal-fluid aerodynamics. Florida : Krieger publishing.
- (7) Rose, T. A., (2001.) An approach to the evaluation of blast loads on finite and semi infinite structure. Ph.D. Thesis, Cranfield University.
- (8) Century Dynamics, (2005.) AUTODYN theory manual revision 4.3
- (9) J.O. Hallquist, (2015.) LS-DYNA Keyword User's Manual Version R8.0, Livermore Software and Technology Corporation, Livermore CA.
- (10) Forth, S., (2012.) ProSAir User Guide. Applied Mathematics and Scientific Computing, Cranfield University.
- (11) Riisgaard B, Ngo T, Mendis P, Georgakis C, Stang H., (2007.) Dynamic Increase Factors for High Performance Concrete in Compression using Split Hopkinson Pressure Bar. In Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures.
- (12) Crawford, J. E. and Malvar, L. J., (2006.) User's and theoretical manual for K&C concrete model, TR-06-19.1, Karagozian & Case.
- (13) Malvar, L. J., (1998.) Review of static and dynamic properties of steel reinforcing bars. ACI Materials Journal, Vol. 95, No. 5 : 609-616.
- (14) Flathau, W. J., (1971.) Dynamic tests of large reinforcing bar splices, Technical Report N-71-2, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.
- (15) Smith, P. D. and Mays, G. C., (1995.) Blast effects on buildings. London : Thomas Telford.
- (16) ASTV manager online (News on August 18, 2015)
- (17) ภาพจากมูลนิธิท่านท้าวมหาพรหม