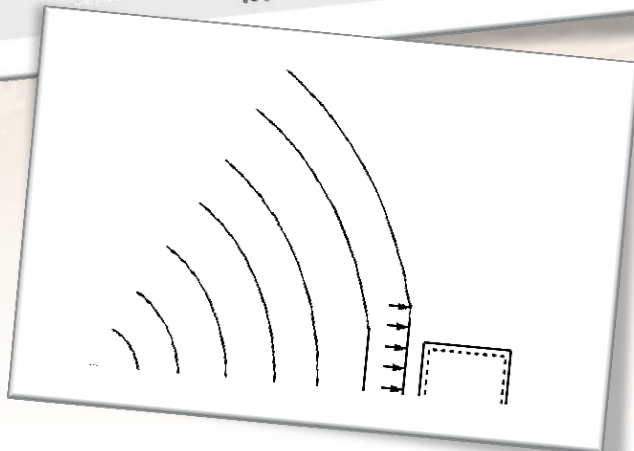
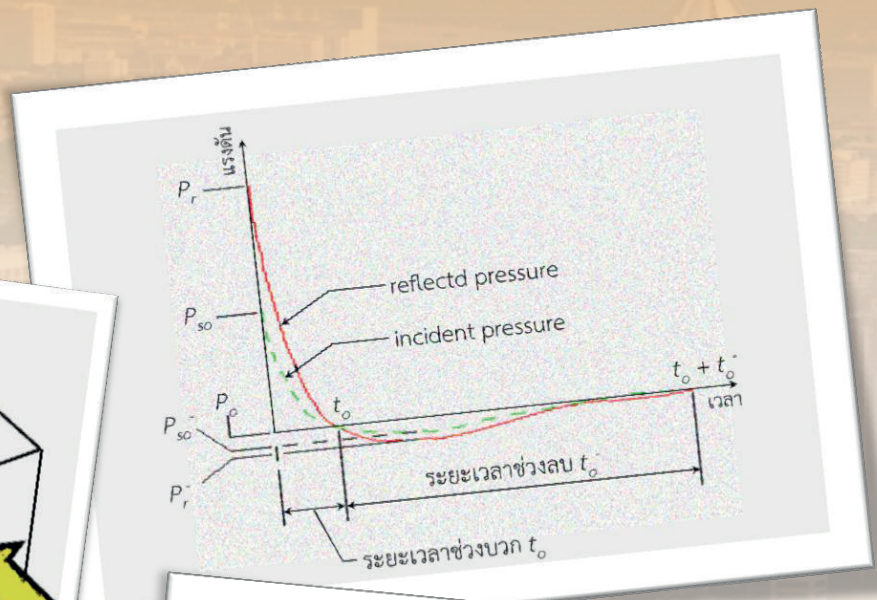
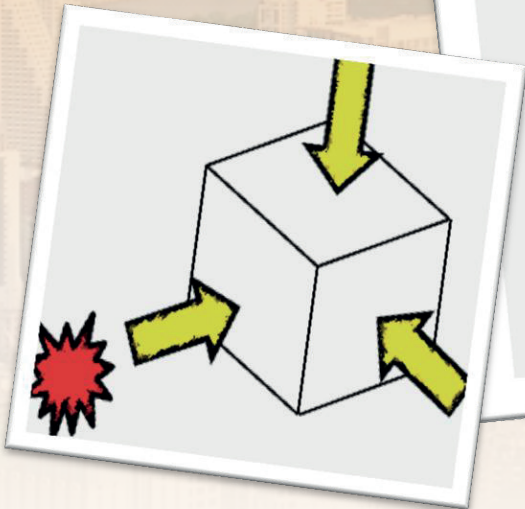




การคำนวณแรงระเบิดและผลกระทบ จากแรงระเบิดที่มีต่อโครงสร้างอาคาร



กรมโยธาธิการและผังเมือง
กระทรวงมหาดไทย พ.ศ. 2559
Department of Public Works and Town & Country Planning



คำนำ

ปัจจุบันภัยก่อการร้ายด้วยการวางระเบิดเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งและเกิดขึ้นทั่วโลก การวางระเบิดภายในหรือภายนอกอาคารเป็นวิธีการหนึ่งที่ผู้ก่อการร้ายมักเลือกใช้เพราะสามารถทำให้เกิดความสูญเสียในชีวิตและทรัพย์สินเป็นอย่างมาก อีกทั้งยังอาจส่งผลให้อาคารเป้าหมายเกิดการพังถล่ม ซึ่งยิ่งเป็นการเพิ่มความสูญเสียให้มากขึ้นอีก ดังนั้นแล้วหากเจ้าของอาคารมีความต้องการให้อาคารสามารถต้านทานต่อแรงที่เกิดจากการระเบิดได้ วิศวกรผู้ออกแบบอาคารย่อมจะต้องหาวิธีการคำนวณแรงที่เกิดจากการระเบิดให้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด และยังจำเป็นต้องทราบถึงผลกระทบของแรงระเบิดที่มีต่อโครงสร้างอาคารด้วย เพื่อสามารถออกแบบให้โครงสร้างอาคารทนต่อแรงระเบิดที่เกิดขึ้นได้

กรมโยธาธิการและผังเมือง ในฐานะหน่วยงานในสังกัดกระทรวงมหาดไทย มีหน้าที่ในการดูแล บำบัดทุกข์ บำรุงสุข ให้กับประชาชนในด้านงานอาคาร ได้ตระหนักถึงความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นต่อชีวิต ร่างกาย และทรัพย์สินของประชาชนจากภัยดังกล่าว จึงได้จัดทำคู่มือการคำนวณแรงที่เกิดจากการระเบิด และผลกระทบที่มีต่อโครงสร้างอาคาร เพื่อเป็นแนวทางในการคำนวณแรงและออกแบบอาคารให้สามารถทนต่อแรงระเบิดได้โดยมีเนื้อหาสำคัญประกอบด้วยรายละเอียดเหตุการณ์ระเบิดที่สำคัญชนิดของวัตถุระเบิด พฤติกรรมของการระเบิด การคำนวณแรงที่เกิดจากการระเบิด และหลักการในการออกแบบ ซึ่งผู้ออกแบบอาคารสามารถนำคู่มือฉบับนี้ไปใช้ประกอบในการออกแบบโครงสร้างอาคารต้านทานแรงระเบิดได้อย่างถูกต้องตามหลักวิชาการเพื่อเป็นการสร้างความมั่นใจให้กับประชาชนว่า โครงสร้างอาคารมีความมั่นคงแข็งแรง และปลอดภัยต่อแรงระเบิดในระดับที่เหมาะสมได้



(นายมนทล สุตประเสริฐ)
อธิบดีกรมโยธาธิการและผังเมือง

คณะผู้จัดทำ

ที่ปรึกษา

นายมนทล สุตประเสริฐ	อธิบดีกรมโยธาธิการและผังเมือง
นางสาวศิริภา วาระเลิศ	รองอธิบดีกรมโยธาธิการและผังเมือง
นายโอฬาร ศักยโรจน์กุล	รองอธิบดีกรมโยธาธิการและผังเมือง
นายสมชาย เมธวัฒน์ธรากุล	รองอธิบดีกรมโยธาธิการและผังเมือง
นายพิชัย อุทัยเชนทร์	รองอธิบดีกรมโยธาธิการและผังเมือง
นายเกียรติศักดิ์ จันทรา	วิศวกรใหญ่

ที่ปรึกษาคณะทำงาน

ดร.เสถียร เจริญเหรียญ	ผู้อำนวยการสำนักวิศวกรรมโครงสร้างและงานระบบ
-----------------------	---

ประธานคณะทำงาน

นายสินธุ์ บุญสิทธิ์	ผู้อำนวยการสำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร
---------------------	---------------------------------------

คณะทำงาน

นายอนวัช บุรพาชน	วิศวกรโยธาเชี่ยวชาญ
นายพรชัย สังข์ศรี	วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ
นางสาวนครินทร์ สิมหัตถ์	วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ
นายสมโชค เล่งห้วงศ์	วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ
นายวิโชค กัณภัย	วิศวกรโยธาชำนาญการ
นายศุภกิจ จันทาน	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ
นายชัยธัช กัญญะจิตร	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ
นายฐิติพงศ์ สุขเสริม	พนักงานวิศวกรโยธา

เลขานุการและคณะทำงาน

ดร.ธนิต ใจสอาด	วิศวกรโยธาชำนาญการ
----------------	--------------------

ผู้ช่วยเลขานุการและคณะทำงาน

ดร.ทยากร จันทรางศุ	วิศวกรโยธาชำนาญการ
นายวรกร ชณะรัตน์	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ

สารบัญ

คำนำ.....	i
คณะผู้จัดทำ.....	ii
บทที่ 1 บททั่วไป.....	1-1
1.1.วัตถุประสงค์.....	1-1
1.2.ขอบเขต.....	1-1
1.3.มาตรฐานที่อ้างอิง.....	1-1
1.4.นิยาม.....	1-2
1.5.สัญลักษณ์.....	1-4
บทที่ 2 เหตุการณ์ระเบิดที่สำคัญในอดีตที่ส่งผลกระทบต่ออาคาร.....	2-1
2.1. ข้อมูลสถิติเหตุการณ์ก่อการร้ายด้วยระเบิดในประเทศไทย.....	2-1
2.2. เหตุการณ์ระเบิดที่สำคัญในต่างประเทศที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างอาคาร.....	2-2
2.3. เหตุการณ์ระเบิดที่สำคัญในประเทศไทยที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างอาคาร.....	2-7
2.4. การคาดคะเนความเสียหายที่จะเกิดขึ้นจากการระเบิด.....	2-9
บทที่ 3 ชนิดของวัตถุระเบิดและค่าเปรียบเทียบกำลัง.....	3-1
3.1. ชนิดของวัตถุระเบิด.....	3-1
3.2. ค่าเปรียบเทียบกำลัง (Relative Effectiveness Factors).....	3-5
บทที่ 4 พฤติกรรมของการระเบิดและประเภทของแรงระเบิด.....	4-1
4.1. พฤติกรรมของการระเบิด.....	4-1
4.2. ประเภทของแรงระเบิด.....	4-1
4.3. พฤติกรรมของคลื่นแรงระเบิด.....	4-4
บทที่ 5 การคำนวณแรงกระทำเนื่องจากการระเบิด.....	5-1
5.1. ส่วนปลอดภัย (Safety Factor).....	5-1
5.2. การหาค่าตัวแปรแรงระเบิดของการระเบิดแบบไม่ปิดล้อม.....	5-1
5.3. การคำนวณแรงระเบิดที่กระทำต่อโครงสร้าง.....	5-11
บทที่ 6 พฤติกรรมของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกกระทำด้วยแรงระเบิด.....	6-1
6.1. พฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงระเบิด.....	6-1

6.2. พฤติกรรมแบบเหินยาวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากการระเบิดระยะไกล (far-range explosion).....	6-3
6.3. พฤติกรรมแบบเหินยาวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากการระเบิดระยะใกล้ (near-range explosion).....	6-3
6.4. พฤติกรรมแบบเปราะของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากแรงระเบิด.....	6-4
บทที่ 7 หลักการเบื้องต้นในการออกแบบโครงสร้างอาคารเพื่อต้านทานแรงระเบิด.....	7-1
7.1. ลักษณะโครงสร้างอาคารที่เสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายอย่างหนักจากแรงระเบิด.....	7-1
7.2. ข้อพิจารณาในการออกแบบเพื่อต้านทานแรงระเบิดสำหรับระบบโครงสร้างแต่ละประเภท.....	7-11
บรรณานุกรม.....	บ-1
ภาคผนวก ก. ผลการศึกษาศักยภาพการคำนวณแรงดันระเบิดเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟในมาตรฐาน UFC 3-340-02.....	ก-1
ภาคผนวก ข. ตัวอย่างการคำนวณแรงระเบิด.....	ข-1

บทที่ 1 บททั่วไป

1.1 วัตถุประสงค์

คู่มือการคำนวณแรงที่เกิดจากการระเบิดและผลกระทบของแรงระเบิดที่มีต่อโครงสร้างอาคารนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะเสนอแนะวิธีการคำนวณแรงที่เกิดจากการระเบิดและอธิบายถึงผลกระทบจากแรงระเบิดที่มีต่อโครงสร้างอาคาร เพื่อให้วิศวกรผู้ออกแบบอาคารมีแนวทางในการออกแบบโครงสร้างอาคารให้สามารถต้านทานแรงที่เกิดจากการระเบิดต่อไปได้ นอกจากนี้ยังมีจุดมุ่งหมายที่จะพัฒนาความรู้ความเข้าใจในมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแรงระเบิดของต่างประเทศให้กับวิศวกรและผู้ที่เกี่ยวข้องอีกด้วย

1.2 ขอบเขต

1.2.1 คู่มือนี้เป็นการอธิบายถึงลักษณะของการระเบิดทั้งแบบที่มีการปิดล้อม (confined explosion) และแบบที่ไม่มีการปิดล้อม (unconfined explosion) เพื่อให้ผู้ใช้คู่มือเข้าใจถึงความแตกต่างระหว่างการระเบิดทั้งสองแบบ แต่ในส่วนของการอธิบายวิธีการหาแรงกระทำที่เกิดจากการระเบิดคู่มือนี้จะกล่าวเฉพาะกรณีของการระเบิดแบบไม่มีการปิดล้อมเท่านั้น เนื่องจากหลักการออกแบบโครงสร้างอาคารต้านทานแรงระเบิดในกรณีที่เกิดการระเบิดภายในอาคารโดยทั่วไปไม่ถือว่าเป็นลักษณะปิดล้อมเพราะอาคารเหล่านี้ส่วนใหญ่จะมีที่ว่างหรือช่องเปิดเป็นจำนวนมากทำให้แรงระเบิดสามารถรั่วไหลไปสู่พื้นที่ส่วนอื่นได้ ยกเว้นอาคารบางประเภท เช่น อาคารกำบังภัย อาคารกักเก็บวัตถุระเบิด

1.2.2 การคำนวณแรงระเบิดในคู่มือนี้ครอบคลุมเฉพาะกรณีที่เป็นการระเบิดด้วยระเบิดแสงเครื่อง (improvised explosive devices หรือ IED) ที่ประกอบขึ้นจากวัตถุระเบิดแรงสูง (high explosive) ซึ่งจะไม่รวมถึงการระเบิดที่เกิดจากสาเหตุอื่น เช่น ไอน้ำ น้ำมันเชื้อเพลิง เตาปฏิกรณ์ปรมาณู หรือจรวด เป็นต้น หรือการระเบิดของวัตถุระเบิดแรงต่ำ (low explosive)

1.2.3 คู่มือนี้ครอบคลุมเฉพาะการหาแรงที่เกิดจากการระเบิดและผลกระทบของแรงระเบิดที่มีต่อโครงสร้างอาคารเท่านั้น ทั้งนี้รายละเอียดการออกแบบอาคารเพื่อต้านทานแรงระเบิดจะไม่รวมอยู่ในคู่มือนี้

1.2.4 คู่มือนี้จะแสดงทั้งหน่วย SI (International Systems of Units) และหน่วย US Customary โดยการแสดงหน่วยจะแสดงดังนี้ SI (US) ยกเว้นแผนภูมิภาพและสมการคำนวณที่อ้างอิงจาก UFC 3-340-02 และรวมถึงตัวอย่างการคำนวณแรงระเบิดในภาคผนวก ข. ที่จะใช้หน่วย US Customary เป็นหลักเพื่อให้สอดคล้องกับที่มาของแผนภูมิภาพและสมการคำนวณเหล่านั้น

1.3 มาตรฐานที่อ้างอิงถึง

มาตรฐานที่ใช้อ้างอิงประกอบด้วย

1.3.1 *Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions* (UFC 3-340-02), U.S. Department of Defense, 2008.

1.3.2 *Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings* (FEMA-426/BIPS-06), U.S. Department of Homeland Security, 2011.

1.3.3 *Blast Protection of Buildings* (ASCE/SEI 59-11), American Society of Civil Engineers (ASCE), 2011.

1.3.4 *Facilities Standards for the Public Buildings Service* (PBS-P100), General Services Administration (GSA), 2005.

1.3.5 “Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions,” *Army Technical Manual TM 5-1300; Navy Publication NAVFAC P-397; Air Force Regulation AFR 88-22*, Department of the Army, the Navy, and the Air Force, 1990.

1.4 นิยาม

“การระเบิด” (explosion หรือ blast หรือ burst) หมายถึง ปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่ทำให้เกิดเสียง ความร้อน และการขยายตัวของมวลอากาศที่รุนแรง

“วัตถุระเบิด” (explosive) หมายถึง วัสดุหรืออุปกรณ์ที่สามารถก่อให้เกิดการระเบิดได้เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะ เช่น ความร้อน การกระแทก การเสียดสี ที่เหมาะสม

“วัตถุระเบิดแรงสูง” (high explosive) หมายถึง วัตถุระเบิดที่มีความเร็วในการจุดระเบิดอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 9 กิโลเมตรต่อวินาที (3,000 ถึง 30,000 ฟุตต่อวินาที) และเมื่อเกิดการระเบิดจะก่อให้เกิดคลื่นระเบิดที่มีความเร็วเหนือเสียง

“วัตถุระเบิดแรงต่ำ” (low explosive) หมายถึง วัตถุระเบิดที่มีความเร็วในการสลายตัวในช่วงที่เกิดปฏิกริยาเคมีช้ากว่าความเร็วเสียง การสลายตัวของวัตถุระเบิดชนิดนี้จะอยู่ในรูปของเปลวไฟเป็นหลักซึ่งจะเคลื่อนที่ช้ากว่าคลื่นกระแทกของวัตถุระเบิดแรงสูง

“น้ำหนักวัตถุระเบิดเทียบเท่า” (effective charge weight) หมายถึง ปริมาณของวัตถุระเบิด TNT ที่เมื่อเกิดระเบิดแล้วจะให้พลังงาน แรงดัน และแรงดลเท่ากับปริมาณของวัตถุระเบิดที่พิจารณาอยู่

“ความเร็วในการจุดระเบิด” (explosive velocity หรือ detonation velocity) หมายถึง ความเร็วของคลื่นกระแทกที่เคลื่อนที่ในวัตถุระเบิดในระหว่างที่เกิดปฏิกริยาเคมีของการระเบิด

“การระเบิดระยะไกล” (far-range explosion) หมายถึง การระเบิดที่มีระยะห่างจุดศูนย์กลางระเบิดที่ทำให้แรงระเบิดที่กระทำ ณ ตำแหน่งที่พิจารณาไม่เหมาะสมต่อพื้นที่ที่รับแรงระเบิด ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะเป็นการระเบิดที่มีค่าระยะปรับทอนมากกว่าหรือเท่ากับ 1.2 เมตรต่อกิโลกรัม^{1/3} (3 ฟุตต่อปอนด์^{1/3})

“การระเบิดระยะใกล้” (near-range explosion) หมายถึง การระเบิดที่มีระยะห่างจุดศูนย์กลางระเบิดที่ทำให้แรงระเบิดที่กระทำ ณ ตำแหน่งที่พิจารณาไม่เหมาะสมต่อพื้นที่ที่รับแรงระเบิด ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะเป็นการระเบิดที่มีค่าระยะปรับทอนน้อยกว่า 1.2 เมตรต่อกิโลกรัม^{1/3} (3 ฟุตต่อปอนด์^{1/3})

“ระยะปรับทอน” (scaled distance) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างระยะห่างจุดศูนย์กลางระเบิดกับรากที่สามของน้ำหนักวัตถุระเบิดเทียบเท่า โดยค่าอัตราส่วนนี้จะถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการหาค่าตัวแปรต่างๆ ของแรงระเบิด

“ความสูงปรับทอน” (scaled height) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างความสูงจากพื้นกับรากที่สามของน้ำหนักวัตถุระเบิดเทียบเท่า

“ระยะห่างจุดศูนย์กลางระเบิด” (standoff distance) หมายถึง ระยะทางระหว่างพื้นผิวของอาคารหรือส่วนหนึ่งส่วนใดของอาคารกับตำแหน่งของการระเบิด

“ส่วนปลอดภัย” (safety factor) หมายถึง ตัวเลขที่ใช้คูณน้ำหนักวัตถุระเบิดเทียบเท่าเพื่อเพิ่มระดับความปลอดภัยจากความไม่แน่นอนของตัวแปรที่ไม่ทราบค่า เช่น การสะท้อนของคลื่นระเบิดที่ไม่ได้คาดคิดไว้ วิธีการก่อสร้าง คุณภาพของวัสดุก่อสร้าง เป็นต้น

“การระเบิดแบบปิดล้อม” (confined explosion) หมายถึง การระเบิดที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้าง โดยค่าแรงดันระเบิดและคลื่นกระแทกจะมีค่าสูงมากซึ่งเป็นผลจากการขยายขนาดของแรงดันระเบิดและคลื่นกระแทกเนื่องจากการสะท้อนภายในโครงสร้าง

“การระเบิดแบบไม่ปิดล้อม” (unconfined explosion) หมายถึง การระเบิดที่เกิดขึ้นภายนอกโครงสร้าง ซึ่งแรงดันระเบิดที่กระทำต่อโครงสร้างจะไม่มีการเสริมแรงเนื่องจากการสะท้อนของแรงดันระเบิดภายในโครงสร้าง

“คลื่นกระแทก” (shock wave หรือ shock front) หมายถึง คลื่นแรงดันระเบิดความดันสูงที่เคลื่อนผ่านมวลอากาศด้วยความเร็วเหนือเสียง โดยคลื่นกระแทกจะมีลักษณะของการเพิ่มขึ้นของแรงดันอย่างทันทีทันใดแล้วตามด้วยการลดลงของแรงดันอย่างรวดเร็ว

“คลื่นระนาบตรง” (plane wave) หมายถึง ระนาบของคลื่นระเบิดที่ถูกสมมติให้เป็นระนาบในแนวตั้ง ในขณะที่เคลื่อนที่เข้ากระทบโครงสร้างเพื่อหลีกเลี่ยงความซับซ้อนเนื่องจากการกระจายแรงดันที่ไม่สม่ำเสมอบนพื้นผิวที่รับแรง

“แรงดันระเบิดโดยตรง” (incident pressure) หมายถึง ค่าแรงดันระเบิดในขณะที่กระทบกับวัตถุใด ๆ ก่อนที่จะเกิดการเสริมแรงเนื่องจากการผานของคลื่นระเบิดที่เคลื่อนที่ตามมาด้านหลังและคลื่นแรงระเบิดที่สะท้อนกลับมาจากผิววัตถุ

“แรงดันระเบิดสะท้อน” (reflected pressure) หมายถึง ค่าแรงดันระเบิดที่มีการขยายขนาดเนื่องจากการผานของคลื่นแรงระเบิดที่เคลื่อนที่ตามมาด้านหลังและคลื่นแรงระเบิดที่สะท้อนกลับมาจากผิววัตถุ

“แรงดันระเบิดช่วงบวก” (positive phase) หมายถึง ค่าแรงดันระเบิดในช่วงเวลาที่แรงดันระเบิดมีค่าสูงกว่าแรงดันบรรยากาศ

“แรงดันระเบิดช่วงลบ” (negative phase) หมายถึง ค่าแรงดันระเบิดในช่วงเวลาที่แรงดันระเบิดมีค่าต่ำกว่าแรงดันบรรยากาศ

“แรงดันเหนือแรงดันบรรยากาศ” (overpressure) หมายถึง แรงดันที่มีค่าสูงกว่าแรงดันบรรยากาศ

“แรงดันพลศาสตร์” (dynamic pressure) หมายถึง แรงดันที่เกิดขึ้นต่ออนุภาคของมวลอากาศที่เป็นผลเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ผ่านของคลื่นกระแทกแนวหน้า

“แรงดล” (impulse) หมายถึง ผลรวมของพลังงานจากการระเบิดในช่วงเวลาใดๆ ซึ่งโดยทั่วไปจะคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟแรงดันระเบิดกับเวลาจนถึง ณ เวลาที่พิจารณา

“แรงดันประสิทธิผลสูงสุด” (maximum effective pressure) หมายถึง ค่าแรงดันที่สูงกว่าระหว่างแรงดันระเบิดโดยตรง ผลรวมของแรงดันระเบิดโดยตรงกับแรงดันระเบิดพลศาสตร์ หรือแรงดันระเบิดสะท้อน

“สภาพแวดล้อมอิสระ” (free field) หมายถึง สภาพแวดล้อมที่ปราศจากสิ่งกีดขวางซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อขนาดของคลื่นระเบิดก่อนกระทบวัตถุ

“การออกแบบช่วงแรงดันสูง” (high-pressure design range) หมายถึง การออกแบบเพื่อต้านทานแรงดันระเบิดที่มีค่าสูงมากแต่มีระยะเวลาที่แรงกระทำต่อโครงสร้างนั้นสั้นมากเมื่อเทียบกับระยะเวลาที่โครงสร้างเกิดการโก่งตัวสูงสุด ซึ่งการออกแบบในสภาวะนี้จะเป็นการออกแบบเพื่อต้านทานแรงดลเป็นหลัก

“การออกแบบช่วงแรงดันต่ำ” (low-pressure design range) หมายถึง การออกแบบเพื่อต้านทานแรงดันระเบิดที่มีค่าน้อยแต่ในขณะเดียวกันมีระยะเวลาที่แรงกระทำต่อโครงสร้างนานซึ่งบางครั้งอาจนานกว่าระยะเวลาที่โครงสร้างเกิดการโก่งตัวสูงสุด โดยการออกแบบในสภาวะนี้จะเป็นการออกแบบเพื่อต้านทานแรงดันที่มีความสม่ำเสมอตลอดทั้งพื้นที่เป็นหลัก

“คลื่นทุติยภูมิ” (secondary wave) หมายถึง คลื่นแรงระเบิดที่ก่อตัวขึ้นที่ด้านหลังของโครงสร้าง โดยเกิดขึ้นจากการผานของคลื่นแรงระเบิดที่เคลื่อนที่ผ่านขอบพื้นหลังคาและผนังด้านข้าง

“ระดับการป้องกัน” (level of protection) หมายถึง ระดับของความเสียหายที่ยอมรับได้เมื่ออาคารถูกกระทำด้วยแรงระเบิดตามขนาดที่คาดการณ์ไว้ เช่น เมื่อเกิดระเบิดโครงสร้างส่วนใหญ่ของอาคารจะได้รับความเสียหายมากแต่จะไม่พังถล่มลงมา หรือ เมื่อเกิดระเบิดโครงสร้างอาคารไม่ได้รับความเสียหายแต่อุปกรณ์ประกอบอาคารต่างๆ ที่ไม่ใช่โครงสร้างอาจได้รับความเสียหายอย่างหนัก เป็นต้น

“แรงต้านทาน” (resistance) หมายถึง กำลังที่ต้องการของชิ้นส่วนโครงสร้างเพื่อต้านทานแรงภายในเมื่อชิ้นส่วนโครงสร้างนั้นๆ เกิดการเปลี่ยนรูป

“การคราก” (yield) หมายถึง พฤติกรรมที่วัสดุเริ่มยืดโดยไม่ต้องเพิ่มแรงดันขึ้นอีก

“พฤติกรรมแบบแผ่นบางแรงอัด” (compressive membrane) หมายถึง พฤติกรรมการถ่ายเทแรงอัดโดยตรงสู่ฐานรองรับของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดการแตกร้าวตลอดความลึกของหน้าตัดส่งผลให้ชิ้นส่วนโครงสร้างนั้นๆ ไม่สามารถต้านทานแรงดลได้อีกต่อไป

1.5 สัญลักษณ์

- C_D = สัมประสิทธิ์แรงหน่วง (drag coefficient)
- C_E = สัมประสิทธิ์แรงเทียบเท่า (equivalent load factor)
- C_r = ความเร็วของคลื่นเสียงในช่วงที่เกิดแรงดันสะท้อน มีหน่วยเป็น เมตรต่อมิลลิวินาที (ฟุตต่อมิลลิวินาที)
- $C_{r\alpha}$ = สัมประสิทธิ์แรงดันสะท้อนสำหรับมุมตกกระทบค่าต่างๆ
- G = ค่าที่มากกว่าระหว่างความสูงของอาคารและความกว้างของอาคาร มีหน่วยเป็น เมตร (ฟุต)
- H = ความสูงของอาคาร มีหน่วยเป็น เมตร (ฟุต)
- H_c = ความสูงจุดศูนย์กลางระเบิด มีหน่วยเป็น เมตร (ฟุต)
- H_s = ความสูงของผนังด้านหลัง มีหน่วยเป็น เมตร (ฟุต)
- H_T = ความสูงของคลื่นมัค มีหน่วยเป็น เมตร (ฟุต)
- i = แรงดลช่วงบวก (positive impulse) มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล-มิลลิวินาที (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว-มิลลิวินาที)

- i^- = แรงดันช่วงลบ (negative impulse) มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล-มิลลิวินาที (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว-มิลลิวินาที)
- i_s = แรงดันโดยตรงช่วงบวก มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล-มิลลิวินาที (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว-มิลลิวินาที)
- i_s^- = แรงดันโดยตรงช่วงลบ มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล-มิลลิวินาที (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว-มิลลิวินาที)
- i_r = แรงดันสะท้อนสูงสุดช่วงบวก มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล-มิลลิวินาที (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว-มิลลิวินาที)
- i_r^- = แรงดันสะท้อนสูงสุดช่วงลบ มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล-มิลลิวินาที (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว-มิลลิวินาที)
- $i_{r\alpha}$ = แรงดันสะท้อนสูงสุดเมื่อมุมตกกระทบมากกว่าศูนย์ มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล-มิลลิวินาที (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว-มิลลิวินาที)
- L = ความยาวของอาคาร มีหน่วยเป็น เมตร (ฟุต)
- L_w = ความยาวของคลื่นระเบิดช่วงบวก มีหน่วยเป็น เมตร (ฟุต)
- L_w^- = ความยาวของคลื่นระเบิดช่วงลบ มีหน่วยเป็น เมตร (ฟุต)
- P = แรงดันระเบิด มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)
- P_{so} = แรงดันระเบิดโดยตรงสูงสุดช่วงบวก (peak incident pressure) มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)
- P_{so}^- = แรงดันระเบิดโดยตรงสูงสุดช่วงลบ มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)
- P_{sob} = แรงดันระเบิดโดยตรงสูงสุดช่วงบวก ณ ขอบหลังคาด้านหลัง มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)
- P_{sof} = แรงดันระเบิดโดยตรงสูงสุดช่วงบวก ณ จุดเริ่มต้นโครงสร้างหลังคาหรือผนังด้านข้าง มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)
- P_s = แรงดันระเบิดโดยตรงช่วงบวก มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)
- P_s^- = แรงดันระเบิดโดยตรงช่วงลบ มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)
- P_R = แรงดันระเบิดเทียบเท่าสูงสุดช่วงบวกที่กระทำบนพื้นหลังคาหรือผนังด้านข้าง มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)
- P_R^- = แรงดันระเบิดเทียบเท่าสูงสุดช่วงลบที่กระทำบนพื้นหลังคาหรือผนังด้านข้าง มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)
- P_r = แรงดันระเบิดสะท้อน (reflected pressure) ช่วงบวก มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)
- P_r^- = แรงดันระเบิดสะท้อนช่วงลบ มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)
- $P_{r\alpha}$ = แรงดันระเบิดสะท้อนสำหรับมุมตกกระทบค่าต่างๆ มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)
- q_o = แรงดันพลศาสตร์สูงสุด (peak dynamic pressure) มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)
- q_{of} = แรงดันพลศาสตร์ ณ จุดเริ่มต้นโครงสร้างหลังคาหรือผนังด้านข้าง มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)
- R = ระยะห่างจุดศูนย์กลางระเบิด (standoff distance) มีหน่วยเป็น เมตร (ฟุต)

- R_A = ระยะทางตั้งฉากในแนวดิ่ง มีหน่วยเป็น เมตร (ฟุต)
 R_G = ระยะทางตั้งฉากในแนวราบ มีหน่วยเป็น เมตร (ฟุต)
 S = ค่าที่น้อยกว่าระหว่างความสูงของอาคารและความกว้างของอาคาร มีหน่วยเป็น เมตร (ฟุต)
 t_a = ระยะเวลาที่คลื่นระเบิดเดินทางจากจุดศูนย์กลางระเบิดถึงจุดที่พิจารณา (arrival time) มีหน่วยเป็น มิลลิวินาที
 t_c = ระยะเวลาที่แรงดันระเบิดสะท้อนมีผลต่อโครงสร้างอาคาร (clearing time) มีหน่วยเป็น มิลลิวินาที
 t_d = ระยะเวลาที่แรงดันระเบิดเทียบเท่าเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนมีค่าสูงสุด (rising time) มีหน่วยเป็น มิลลิวินาที
 t_f = ระยะเวลาที่คลื่นระเบิดเดินทางมาถึงจุดเริ่มต้นโครงสร้างหลังคาหรือผนังด้านข้าง มีหน่วยเป็น มิลลิวินาที
 t_o = ระยะเวลาของแรงดันระเบิดช่วงบวก มีหน่วยเป็น มิลลิวินาที
 t_o^- = ระยะเวลาของแรงดันระเบิดช่วงลบ มีหน่วยเป็น มิลลิวินาที
 t_{of} = ระยะเวลาที่แรงดันระเบิดช่วงบวกกระทำบนพื้นหลังคาหรือผนังด้านข้าง มีหน่วยเป็น มิลลิวินาที
 t_{of}^- = ระยะเวลาที่แรงดันระเบิดช่วงลบกระทำบนพื้นหลังคาหรือผนังด้านข้าง มีหน่วยเป็น มิลลิวินาที
 t_{ff} = ระยะเวลาของแรงดันระเบิดสะท้อนเทียบเท่าช่วงบวก ณ ผนังด้านหน้าอาคาร มีหน่วยเป็น มิลลิวินาที
 t_{ff}^- = ระยะเวลาของแรงดันระเบิดสะท้อนเทียบเท่าช่วงลบ ณ ผนังด้านหน้าอาคาร มีหน่วยเป็น มิลลิวินาที
 U = ความเร็วของคลื่นแรงระเบิด มีหน่วยเป็น เมตรต่อมิลลิวินาที (ฟุตต่อมิลลิวินาที)
 u = ความเร็วของอนุภาคอากาศ มีหน่วยเป็น เมตรต่อมิลลิวินาที (ฟุตต่อมิลลิวินาที)
 W = น้ำหนักวัตถุระเบิดเทียบเท่า TNT มีหน่วยเป็น กิโลกรัม (ปอนด์)
 W_s = ความกว้างของอาคาร มีหน่วยเป็น เมตร (ฟุต)
 Z = ระยะปรับทอน (scaled distance) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างระยะจุดศูนย์กลางระเบิด (R) และรากที่สามของน้ำหนักวัตถุระเบิดเทียบเท่า (W) มีหน่วยเป็น เมตรต่อกิโลกรัม^{1/3} (ฟุตต่อปอนด์^{1/3})
 Z_G = ระยะปรับทอนทางราบ ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างระยะทางในแนวราบ (R_G) และรากที่สามของน้ำหนักวัตถุระเบิดเทียบเท่า (W) มีหน่วยเป็น เมตรต่อกิโลกรัม^{1/3} (ฟุตต่อปอนด์^{1/3})

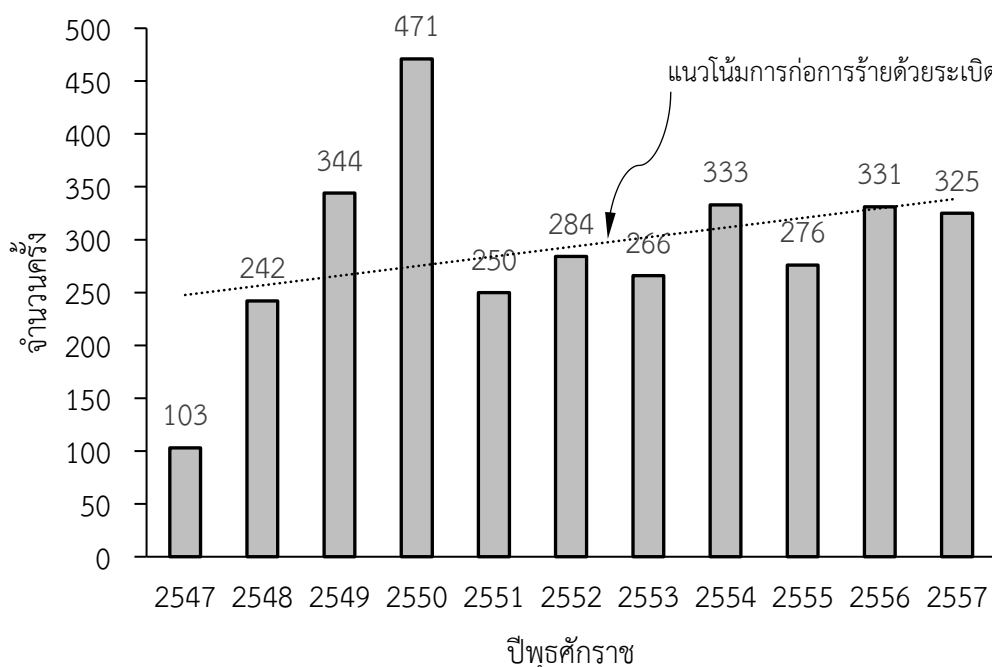
บทที่ 2

เหตุการณ์ระเบิดที่สำคัญในอดีตที่ส่งผลกระทบต่ออาคาร

การศึกษาผลกระทบที่มีต่อโครงสร้างของอาคารจากการโจมตีด้วยวัตถุระเบิดที่เกิดขึ้นในอดีตเป็นสิ่งที่ผู้ออกแบบสามารถนำมาพิจารณาประกอบการออกแบบอาคารต้านทานแรงระเบิดได้ โดยข้อมูลจากเหตุการณ์ระเบิดในอดีตสามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อระบุขนาดที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบและคาดคะเนความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับอาคารได้ ดังนั้นในบทนี้จึงได้รวบรวมเหตุการณ์ก่อการร้ายด้วยวัตถุระเบิดที่สำคัญๆ ซึ่งสร้างความเสียหายให้กับอาคารที่เป็นเป้าหมายในการโจมตี เพื่อผู้ออกแบบสามารถนำข้อมูลเหล่านี้ไปประกอบการออกแบบอาคารให้มีประสิทธิภาพต่อไป

2.1 ข้อมูลสถิติเหตุการณ์ก่อการร้ายด้วยระเบิดในประเทศไทย

ความขัดแย้งทางการเมืองในปัจจุบันส่งผลให้การโจมตีด้วยระเบิดในประเทศไทยมีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเริ่มตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ดังที่แสดงในรูปที่ 2-1 โดยจากผลการเก็บข้อมูลของกรมสรรพาวุธทหารบก กองทัพบก พบว่าจำนวนการโจมตีด้วยวัตถุระเบิดในประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึง 2557 มีจำนวนทั้งสิ้น 3,225 ครั้ง โดยเฉพาะในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2555 ถึง 2557 มีค่าเฉลี่ยการเกิดถึง 310 ครั้งต่อปี ซึ่งข้อมูลทางสถิติเหล่านี้เป็นสิ่งที่ผู้ที่เกี่ยวข้องสามารถนำมาพิจารณาถึงความจำเป็นของการออกแบบอาคารเพื่อต้านทานแรงระเบิดได้



รูปที่ 2-1 สถิติเหตุการณ์ก่อการร้ายด้วยระเบิดในประเทศไทย
(ที่มา: กรมสรรพาวุธทหารบก กองทัพบก)

2.2 เหตุการณ์ระเบิดที่สำคัญในต่างประเทศที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างอาคาร

2.2.1 อาคารรัฐบาลกลาง อัลเฟรด พี เมอร์ราห์ (Alfred P. Murrah Federal Building)

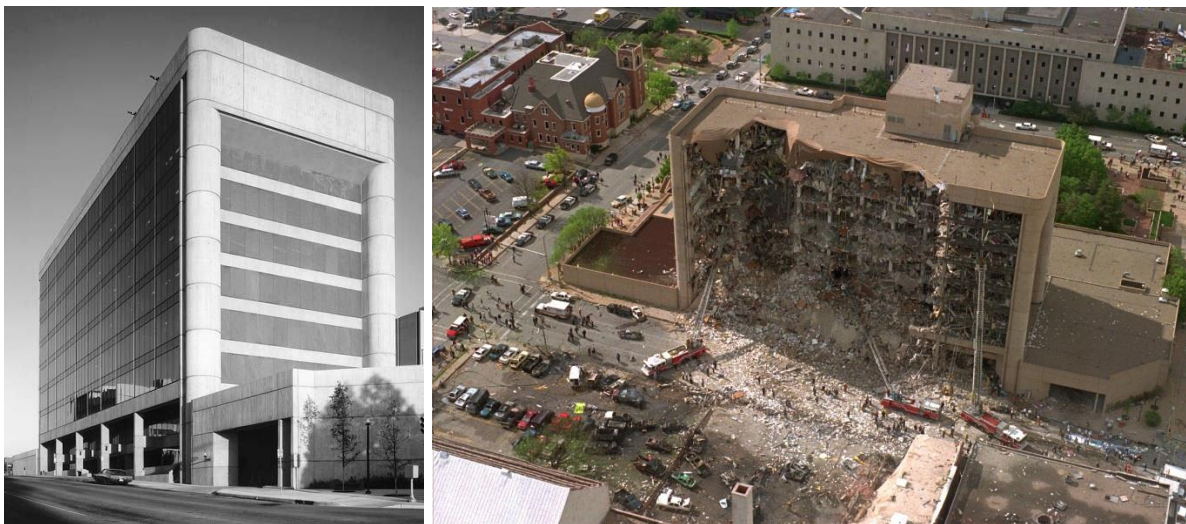
ที่ตั้ง: 200 N.W. 5th St เมืองโอคลาโฮมาซิตี รัฐโอคลาโฮมา ประเทศสหรัฐอเมริกา

วันที่: 19 เมษายน ค.ศ. 1995

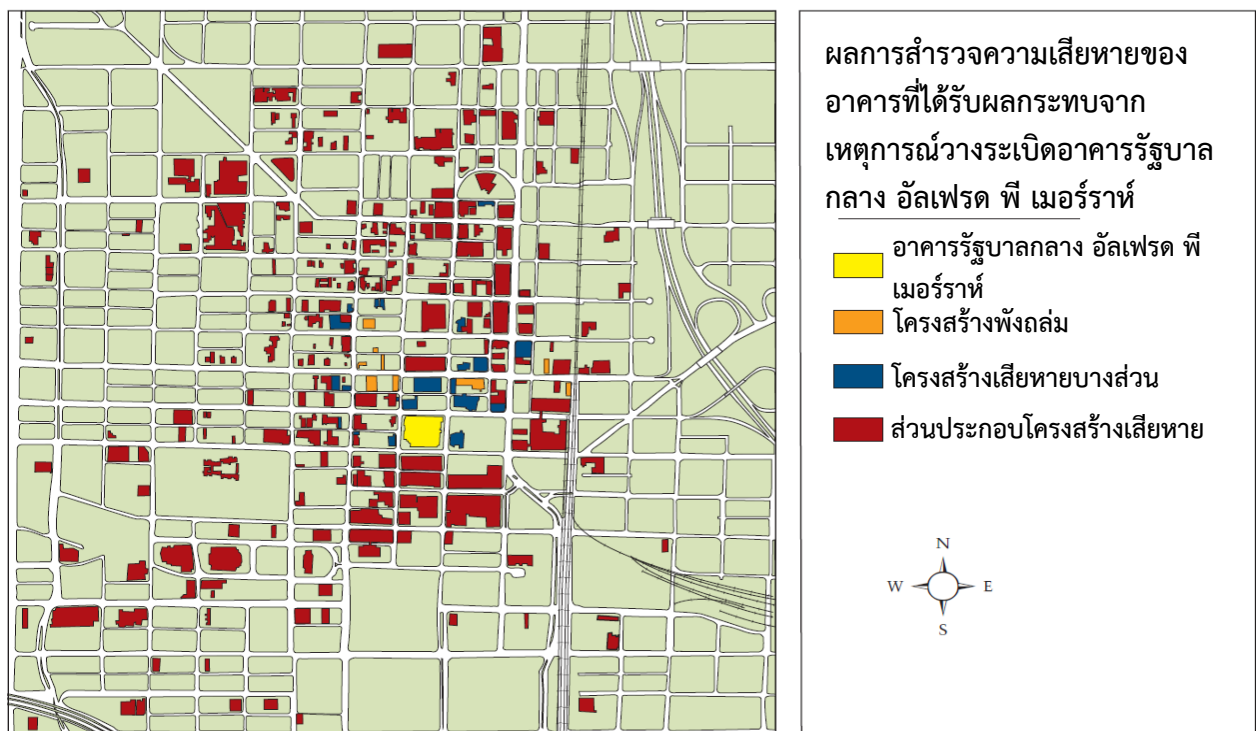
ชนิด/ขนาดวัตถุระเบิด: วัตถุระเบิดเป็นชนิดแสงเครื่องที่ถูกบรรจุในรถยนต์ (vehicle-borne improvised explosive device หรือ VBIED) ประกอบด้วยปุ๋ยแอมโมเนียมไนเตรต (ammonium nitrate fertilizer) ไนโตรมีเทน (nitromethane) และน้ำมันดีเซล ซึ่งคิดเป็นวัตถุระเบิดขนาด 3,175 กิโลกรัม (7,000 ปอนด์) ถูกบรรจุอยู่ในรถบรรทุกขนาดเล็กที่จอดทิ้งไว้ด้านหน้าอาคารโดยห่างจากตัวอาคารประมาณ 3 ถึง 5 เมตร

ความเสียหายต่อบุคคล: ในระหว่างเกิดเหตุระเบิดมีผู้อยู่ในอาคารประมาณ 646 คน โดยการระเบิดเป็นเหตุให้มีผู้เสียชีวิตทันที 20 คน โดยเป็นผู้ใหญ่ 14 คนและเด็ก 6 คน ซึ่งสุดท้ายแล้วมีผู้เสียชีวิตรวมทั้งสิ้น 168 คนและผู้บาดเจ็บรวมทั้งสิ้นกว่า 800 คน

ความเสียหายต่อโครงสร้างอาคาร: ผลของการระเบิดทำให้เสาด้านหน้าอาคารเกิดการวิบัติและส่งผลให้อาคารบางส่วนพังทลายลงมา (รูปที่ 2-2) นอกจากนี้ การระเบิดยังส่งผลให้อาคารอื่นๆ หลายหลังได้รับความเสียหายในระดับความรุนแรงที่แตกต่างกัน (รูปที่ 2-3)



รูปที่ 2-2 สภาพอาคารอัลเฟรด พี เมอร์ราห์ ก่อนและหลังการโจมตี
(ที่มา: http://en.wikipedia.org/wiki/Oklahoma_City_bombing)



รูปที่ 2-3 ผลกระทบต่ออาคารอื่นๆ จากเหตุการณ์วางระเบิดอาคารรัฐบาลกลาง อัลเฟรด พี เมอร์ราห์ (ที่มา: FEMA-426/BIPS-06)

2.2.2 อาคารศูนย์กลางการค้าโลก (World Trade Center)

ที่ตั้ง: ศูนย์กลางการค้าโลก อาคารฝั่งเหนือ (North Tower) เมืองนิวยอร์กซิตี รัฐนิวยอร์ก ประเทศสหรัฐอเมริกา

วันที่: 26 กุมภาพันธ์ ค.ศ. 1993

ชนิด/ขนาดวัตถุระเบิด: วัตถุระเบิดเป็นชนิดแสงเครื่องที่ถูกบรรจุในรถยนต์ (VBIED) โดยมียูเรียไนเตรต (urea nitrate) น้ำหนักประมาณ 600 กิโลกรัม (1,300 ปอนด์) เป็นส่วนประกอบหลัก และมีส่วนประกอบอื่นๆ ได้แก่ ผงอลูมิเนียม (aluminum particle) ผงแมกนีเซียม (magnesium particle) และผงเหล็ก (ferric oxide particle) และมีถังก๊าซไนโตรเจนอีกจำนวน 3 ถังเพื่อเสริมความรุนแรงของลูกไฟจากการระเบิด ส่วนประกอบทั้งหมดถูกบรรจุในรถบรรทุกขนาดเล็กซึ่งถูกนำไปจอดทิ้งไว้ ณ ที่จอดรถชั้นใต้ดินระดับ B-2 ของอาคารเหนือ โดยการระเบิดก่อให้เกิดแรงดันขนาด 1,000 เมกะปาสกาล (150,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)

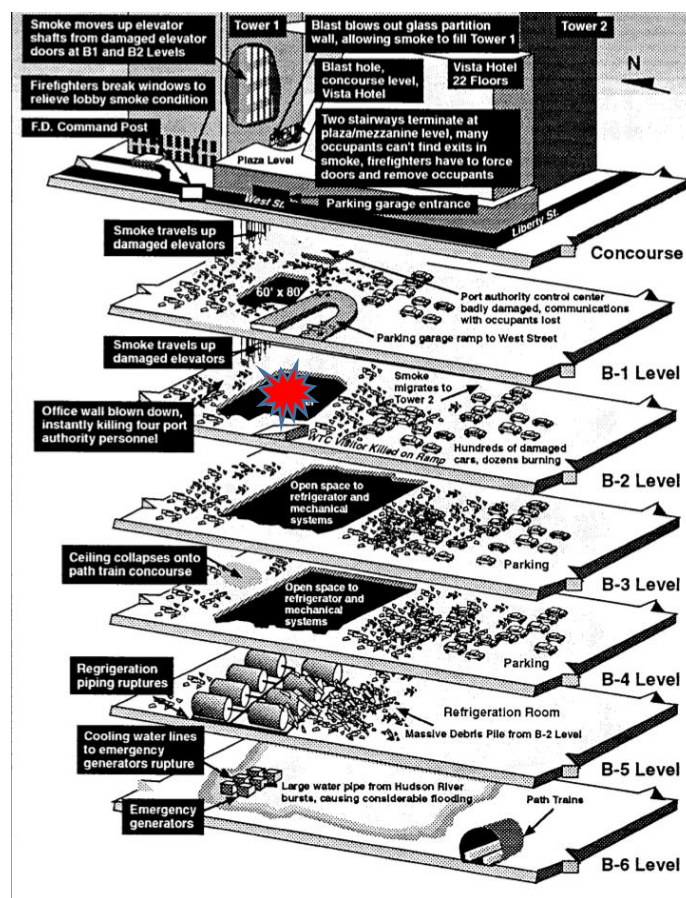
ความเสียหายต่อบุคคล: การระเบิดส่งผลให้มีผู้เสียชีวิตทั้งสิ้น 6 คน และมีผู้บาดเจ็บรวมทั้งสิ้น 1,042 คน โดยส่วนใหญ่ได้รับบาดเจ็บในขณะที่อพยพออกจากอาคารทั้งสองหลังจากการระเบิด

ความเสียหายต่อโครงสร้างอาคาร: ในเบื้องต้นผู้ก่อการร้ายตั้งใจที่จะให้การระเบิดสร้างความเสียหายอย่างหนักกับอาคารฝั่งเหนือจนเป็นเหตุให้อาคารล้มไปชนอาคารฝั่งใต้ และทำให้อาคารทั้งสองหลังถล่มลงมา แต่ปรากฏว่าแรงระเบิดส่งผลให้พื้นคอนกรีตเพียง 4 ชั้นเกิดรูกว้างขนาด 30 เมตร (98 ฟุต) (รูปที่ 2-4 และ 2-5) โดยไม่มีความเสียหายที่รุนแรงต่อโครงสร้างหลักของอาคารยกเว้นระบบไฟฟ้าหลักและระบบไฟแสงสว่าง

ฉุกเฉินที่ได้รับความเสียหายอย่างหนัก นอกจากนี้ควันจากการระเบิดยังได้แพร่กระจายขึ้นไปถึงชั้นที่ 93 ของอาคารทั้งสองหลัง และกระจายไปสู่ห้องบันไดหนีไฟที่ไม่มีระบบอัดอากาศซึ่งส่งผลต่อการอพยพผู้คนออกจากอาคาร



รูปที่ 2-4 ความเสียหายของพื้นที่ชั้นจอร์จไต้ดิน อาคารศูนย์กลางการค้าโลก
(ที่มา: https://en.wikipedia.org/wiki/1993_World_Trade_Center_bombing)



รูปที่ 2-5 แผนผังแสดงความรุนแรงของแรงระเบิด เหตุการณ์วางระเบิดอาคารศูนย์กลางการค้าโลก
(ที่มา: https://en.wikipedia.org/wiki/1993_World_Trade_Center_bombing)

2.2.3 ห้างสรรพสินค้ามาร์กแอนด์สเปนเซอร์ (Marks & Spencer Store)

ที่ตั้ง: ถนนคอร์ปอเรชั่น เมืองแมนเชสเตอร์ ประเทศอังกฤษ

วันที่: 15 มิถุนายน ค.ศ. 1996

ชนิด/ขนาดวัตถุระเบิด: วัตถุระเบิดเป็นชนิดแสงเครื่องที่ถูกบรรจุในรถยนต์ (VBIED) โดยมีส่วนผสมประกอบด้วย Semtex ซึ่งเป็นวัตถุระเบิดชนิดพลาสติกที่ใช้ทางการทหารและปุ๋ยแอมโมเนียมไนเตรต (ammonium nitrate fertilizer) วัตถุระเบิดมีน้ำหนักรวมประมาณ 1,500 กิโลกรัม (3,300 ปอนด์) ซึ่งบรรจุอยู่ในรถบรรทุกขนาดเล็กที่ถูกนำมาจอดทิ้งไว้หน้าห้างสรรพสินค้ามาร์กแอนด์สเปนเซอร์ โดยก่อนการระเบิดเจ้าหน้าที่ตำรวจเมืองแมนเชสเตอร์ได้รับโทรศัพท์ระบุถึงการวางระเบิดของกลุ่มกองกำลังเพื่อปลดแอกชาวไอริช (Provisional Irish Republican Army หรือ IRA) แต่ก็ไม่สามารถเก็บกู้ระเบิดได้

ความเสียหายต่อบุคคล: เนื่องจากเจ้าหน้าที่ตำรวจได้รับการแจ้งเตือนล่วงหน้าก่อนเกิดการระเบิด ทำให้สามารถอพยพผู้คนออกจากบริเวณดังกล่าวจึงส่งผลให้ไม่มีผู้เสียชีวิต แต่มีผู้ได้รับบาดเจ็บจำนวน 212 คนจากการที่มีเศษกระจกและก้อนอิฐลอยข้ามแนวกั้นของเจ้าหน้าที่ตำรวจซึ่งห่างจากจุดวางระเบิด 2.4 กิโลเมตร (1.5 ไมล์)

ความเสียหายต่อโครงสร้างอาคาร: การระเบิดทำให้โครงสร้างของอาคารที่อยู่ใกล้จุดศูนย์กลางระเบิดจำนวน 12 หลังได้รับความเสียหายอย่างหนักจนไม่สามารถซ่อมแซมให้ใช้งานได้อีก (รูปที่ 2-6) แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าไม่มีอาคารใดพังถล่มลงมา นอกจากนี้แรงระเบิดยังทำให้ผนังและกระจกตามช่องเปิดต่างๆ ของอาคารหลายหลังในบริเวณใกล้เคียงได้รับความเสียหาย โดยมูลค่าความเสียหายทั้งหมดถูกประเมินไว้ที่ 700 ล้านปอนด์ ซึ่งถือว่าเป็นเหตุการณ์ก่อการร้ายที่มีมูลค่าความเสียหายมากที่สุดของประเทศอังกฤษในเวลานั้น



รูปที่ 2-6 ความเสียหายของอาคารบริเวณที่เกิดเหตุการณ์ระเบิดห้างสรรพสินค้ามาร์กแอนด์สเปนเซอร์
(ที่มา: https://en.wikipedia.org/wiki/1996_Manchester_bombing)

2.2.4 อาคารที่ทำการรัฐบาล Regjeringskvartalet

ที่ตั้ง: กรุงออสโล ประเทศนอร์เวย์

วันที่: 22 กรกฎาคม ค.ศ. 2011

ชนิด/ขนาดวัตถุระเบิด: เป็นวัตถุระเบิดชนิด Ammonium Nitrate - Fuel Oil หรือ ANFO ซึ่งมีส่วนประกอบได้แก่ ปุ๋ยแอมโมเนียมไนเตรต (ammonium nitrate fertilizer) และน้ำมันเชื้อเพลิง โดยผู้เชี่ยวชาญด้านวัตถุระเบิดเชื่อว่าระเบิดมีน้ำหนักรวมประมาณ 950 กิโลกรัม (2,090 ปอนด์) ถูกบรรจุอยู่ในรถตู้ขนาดเล็กที่ถูกนำมาจอดทิ้งไว้ด้านหน้าอาคารสำนักงานของนายกรัฐมนตรี โดยในบริเวณใกล้เคียงกันยังเป็นที่ตั้งของอาคารที่ทำการหน่วยงานภาครัฐอื่นๆ เช่น อาคารกระทรวงเชื้อเพลิงและพลังงาน อาคารกระทรวงการคลัง เป็นต้น

ความเสียหายต่อบุคคล: คลื่นกระแทกจากการระเบิดทำให้มีผู้เสียชีวิตทันที 6 คน และมีผู้เสียชีวิตอีก 2 คนภายหลังจากการระเบิดเพียงไม่นานเนื่องจากทณพิษบาดแผลไม่ไหว ส่วนผู้บาดเจ็บมีจำนวนไม่น้อยกว่า 209 คน โดยในจำนวนนั้นเป็นผู้บาดเจ็บสาหัสจำนวน 12 คน

ความเสียหายต่อโครงสร้างอาคาร: การระเบิดส่งผลให้อาคารสำนักงานนายกรัฐมนตรีและอาคารกระทรวงเชื้อเพลิงและพลังงานเกิดไฟไหม้ นอกจากนั้นแรงระเบิดยังสร้างความเสียหายให้กับกระจกหน้าต่างในหลายๆ ชั้นของอาคารสำนักงานนายกรัฐมนตรี อาคารกระทรวงเชื้อเพลิงและพลังงาน อาคารสำนักหนังสือพิมพ์ VG และอาคารอื่นๆ ที่อยู่อีกด้านหนึ่งของจัตุรัส (รูปที่ 2-7 และ 2-8) และเป็นที่น่าสังเกตว่าโครงสร้างของอาคารดังกล่าวไม่พังถล่มลงมา แต่พบเพียงแค่ความเสียหายในระดับที่สามารถซ่อมแซมได้เท่านั้น



รูปที่ 2-7 ตำแหน่งการระเบิดจากเหตุการณ์โจมตีอาคารที่ทำการรัฐบาล Regjeringskvartalet



รูปที่ 2-8 สภาพความเสียหายของอาคารที่ตั้งอยู่โดยรอบอาคารที่ทำการรัฐบาล Regjeringskvartalet
(ที่มา: https://en.wikipedia.org/wiki/2011_Norway_attacks)

2.3 เหตุการณ์ระเบิดที่สำคัญในประเทศไทยที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างอาคาร

2.3.1 อาคารสมานเมตตาแมนชั่น

ที่ตั้ง: ตำบลโสนน้อย อำเภอบางบัวทอง จังหวัดนนทบุรี

วันที่: 5 ตุลาคม พ.ศ. 2553

ชนิด/ขนาดวัตถุระเบิด: วัตถุระเบิดในเหตุการณ์นี้เชื่อว่าเป็นระเบิดชนิดแสงเครื่อง (Improvised Explosive Device หรือ IED) ประกอบด้วยปุ๋ยยูเรีย (urea fertilizer) และน้ำมันเชื้อเพลิงถูกบรรจุในถังน้ำยาแอร์และถังดับเพลิง โดยวัตถุระเบิดมีน้ำหนักเทียบเท่าวัตถุระเบิดชนิดทีเอ็นที (TNT) ประมาณ 10 กิโลกรัม (20 ปอนด์) โดยทางเจ้าหน้าที่เชื่อว่าการระเบิดเกิดจากความผิดพลาดของผู้ประกอบระเบิดเองในขณะทำการประกอบระเบิด

ความเสียหายต่อบุคคล: แรงระเบิดทำให้มีผู้เสียชีวิต 4 คน โดยเจ้าหน้าที่เชื่อว่าผู้เสียชีวิตประกอบด้วยผู้ประกอบระเบิด คู่สามีและภรรยาที่อาศัยอยู่ในห้องพักข้างเคียง และประชาชนที่อาศัยอยู่ในอาคารที่อยู่ติดกับสถานที่เกิดเหตุ

ความเสียหายต่อโครงสร้างอาคาร: การระเบิดส่งผลให้ผนังและโครงสร้างอาคารได้รับความเสียหายอย่างหนักโดยเฉพาะคานและพื้นบริเวณที่เป็นจุดศูนย์กลางระเบิด โดยพื้นชั้นบนได้พังถล่มลงมาข้างล่าง (รูปที่ 2-9) แรงระเบิดยังทำให้โครงสร้างของอาคารที่อยู่ติดกันและอาคารทาว์นเฮาส์ที่อยู่ฝั่งตรงข้ามได้รับความเสียหายอย่างหนักอีกด้วย นอกจากนี้จากการเข้าตรวจสอบของเจ้าหน้าที่ท้องถิ่นในภายหลังพบว่าอาคารเกิดการทรุดตัวลง 5 ซม.



รูปที่ 2-9 สภาพความเสียหายของอาคารสมานเมตตาแมนชั้น
(ที่มา: <http://news.mthai.com/hot-news/89615.html>)

2.3.2 อาคารศูนย์การค้า ลี การ์เด้นส์ พลาซ่า

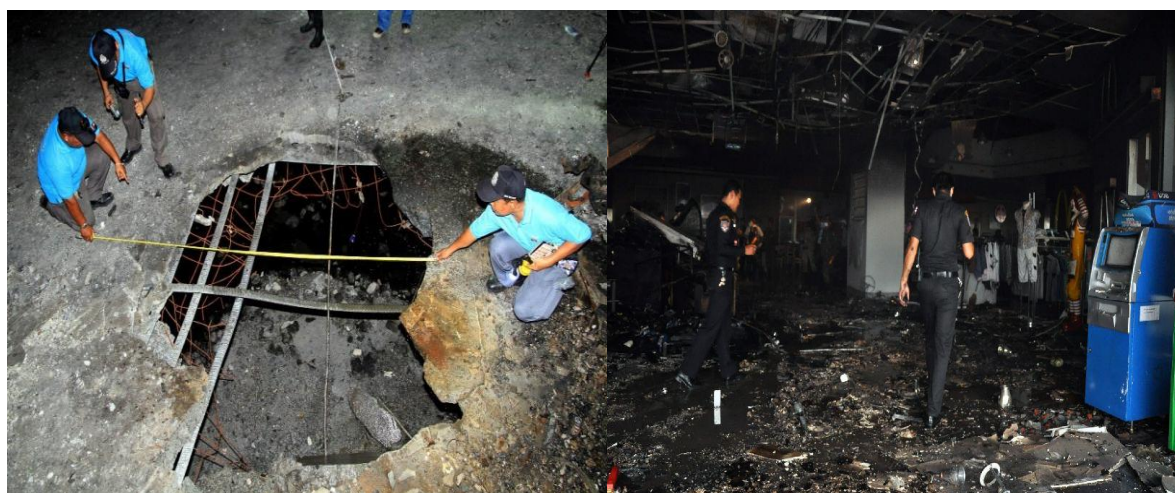
ที่ตั้ง: ถนนเสน่ห์อนุสรณ์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

วันที่: 31 มีนาคม พ.ศ. 2555

ชนิด/ขนาดวัตถุระเบิด: วัตถุระเบิดเป็นชนิดแสงเครื่องที่ถูกบรรจุในรถยนต์ (VBIED) ซึ่งบรรจุอยู่ในถังแก๊สของรถยนต์โดยสารขนาดเล็ก วัตถุระเบิดมีน้ำหนักประมาณ 15 กิโลกรัม (33 ปอนด์) โดยผู้ก่อการร้ายได้นำรถยนต์ดังกล่าวมาจอดทิ้งไว้ที่ที่จอดรถชั้นใต้ดินระดับ B-3 ของศูนย์การค้า แต่ทั้งนี้ไม่มีข้อมูลของส่วนประกอบของวัตถุระเบิดที่ใช้ในการก่อเหตุ

ความเสียหายต่อบุคคล: แรงระเบิดทำให้มีผู้เสียชีวิตจำนวน 5 รายและมีผู้บาดเจ็บจำนวน 354 ราย

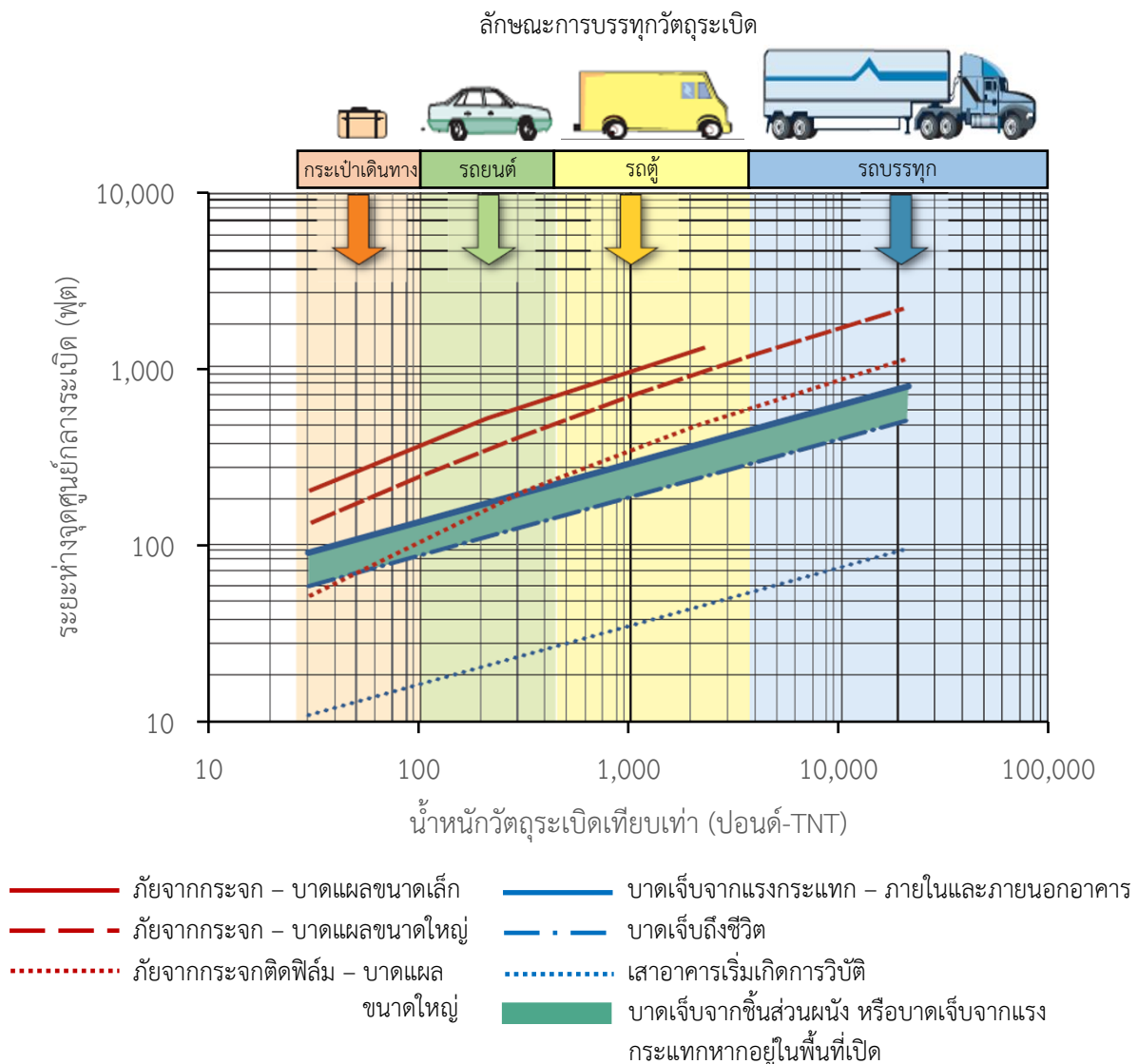
ความเสียหายต่อโครงสร้างอาคาร: แรงระเบิดทำให้พื้นตรงจุดที่เกิดการระเบิดเสียหายเป็นรูกว้าง 2.2 เมตร (รูปที่ 2-10) และการระเบิดยังก่อให้เกิดเพลิงไหม้ในอาคารตั้งแต่ชั้นที่ 1 ถึงชั้นที่ 4 (รูปที่ 2-10) โดยเจ้าหน้าที่เชื่อว่าสาเหตุของเพลิงไหม้เกิดจากเชื้อเพลิงของรถที่ใช้ในการก่อเหตุ หลังจากเหตุการณ์ดังกล่าวผู้เชี่ยวชาญได้ตรวจสอบสมรรถนะของโครงสร้างอาคารและสรุปว่าความเสียหายเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณพื้นที่จอดรถเท่านั้น โดยการระเบิดไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างส่วนอื่นๆ ของอาคาร



รูปที่ 2-10 สภาพความเสียหายอาคารศูนย์การค้า ลี การ์เด้น พลาซ่า
(ที่มา: ฐานข้อมูลข่าวจังหวัดชายแดนภาคใต้ <http://wbns.oas.psu.ac.th>)

2.4 การคาดคะเนความเสียหายที่จะเกิดขึ้นจากการระเบิด

จากเหตุการณ์โจมตีด้วยวัตถุระเบิดที่ถูกยกเป็นกรณีตัวอย่างในบทนี้ จะพบว่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจะมีทั้งในส่วนของความเสียหายของอาคารและการบาดเจ็บหรือเสียชีวิตของผู้บริสุทธิ์ โดยระดับความรุนแรงของความสูญเสียที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับขนาดและตำแหน่งของการระเบิดเป็นหลัก ซึ่งความสัมพันธ์ของขนาดและตำแหน่งของการระเบิดที่มีต่อระดับความรุนแรงของความสูญเสียนี้สามารถแสดงได้โดยใช้ Generic Range-to-Effects Chart (รูปที่ 2-11) ที่จัดทำขึ้นโดย Department of Defense (DOD) ของประเทศสหรัฐอเมริกา โดย Generic Range-to-Effects Chart นี้สามารถใช้ในการคาดคะเนความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นที่ระยะห่างต่างๆ จากจุดศูนย์กลางระเบิดเมื่อทราบขนาดของวัตถุระเบิด โดยแผนภาพนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อให้เจ้าหน้าที่มีแนวทางคร่าวๆ ในการกำหนดระยะที่ปลอดภัยในการอพยพผู้คนเมื่อมีการตรวจพบวัตถุระเบิด แต่ในทางปฏิบัติการกำหนดระยะห่างที่ปลอดภัยต้องพิจารณาถึงลักษณะพื้นที่ที่เกิดเหตุด้วย ดังนั้นแผนภาพนี้จึงเป็นเพียงข้อแนะนำในกรณีที่ไม่มีข้อมูลของลักษณะพื้นที่ที่เชื่อถือได้เท่านั้น แต่ไม่แนะนำให้ผู้ออกแบบนำแผนภาพนี้มาใช้เป็นหลักในการออกแบบอาคารเพื่อด้านทานแรงระเบิด



รูปที่ 2-11 แผนภูมิ Generic Range-to-Effects
(ที่มา: FEMA-426/BIPS-06)

เมื่อพิจารณาแผนภูมิในรูปที่ 2-11 จะสังเกตได้ว่าขนาดของวัตถุระเบิดได้ถูกจำแนกให้สอดคล้องตามประเภทของอุปกรณ์ที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายวัตถุระเบิด เช่น กระเป๋าเดินทางสามารถบรรจุวัตถุระเบิดน้ำหนักประมาณ 10 – 50 กิโลกรัม TNT (25 – 100 ปอนด์) เป็นต้น และเมื่อทราบขนาดของวัตถุระเบิดก็จะสามารถคาดคะเนระดับความสูญเสียที่จะเกิดขึ้นที่ระยะต่างๆ ได้ ยกตัวอย่างเช่น สำหรับวัตถุระเบิดขนาด 25 กิโลกรัม TNT (50 ปอนด์) จะทำให้เสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายในรัศมี 5 เมตร (15 ฟุต) จากจุดศูนย์กลางระเบิดเกิดการวิบัติ หรือสามารถทำให้บุคคลที่อยู่ในรัศมี 20 เมตร (70 ฟุต) จากจุดศูนย์กลางระเบิดเสียชีวิตได้ เป็นต้น

บทที่ 3

ชนิดของวัตถุระเบิดและค่าเปรียบเทียบกำลัง

วัตถุระเบิดสามารถจำแนกออกเป็นประเภทตามสถานะ ได้แก่ ของแข็ง ของเหลว หรือ ก๊าซ โดยวัตถุระเบิดที่เป็นของแข็งส่วนใหญ่ถือว่าเป็นวัตถุระเบิดแรงสูง ส่วนวัตถุระเบิดที่เป็นของเหลวและก๊าซมักจะถูกใช้เป็นส่วนประกอบในการผลิตสารเชื้อเพลิงและสารขับเคลื่อนต่างๆ ซึ่งไม่ถือว่าเป็นวัตถุระเบิดแรงสูง วัตถุระเบิดแรงสูงที่สามารถสร้างความเสียหายอย่างหนักต่ออาคารและบุคคลมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน โดยวัตถุระเบิดแต่ละชนิดมีลักษณะทางกายภาพและอนุภาพการทำลายที่แตกต่างกันไป และถึงแม้จะเป็นวัตถุระเบิดชนิดเดียวกันก็อาจมีอนุภาพที่แตกต่างกันได้ขึ้นอยู่กับวิธีและกระบวนการผลิต การเก็บรักษา การนำมาใช้งาน รวมไปถึงลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของตัววัตถุระเบิดเองด้วย ทั้งนี้ ในบทนี้จะกล่าวเฉพาะชนิดของวัตถุระเบิดแรงสูงที่มักจะถูกนำมาใช้ในการวางระเบิดอาคารสำคัญต่างๆ โดยจะอธิบายถึงลักษณะทางกายภาพและอนุภาพของวัตถุระเบิดเหล่านี้อย่างคร่าวๆ และรวมทั้งการเปรียบเทียบความรุนแรงของวัตถุระเบิดแต่ละชนิดเพื่อให้ผู้ออกแบบสามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลประกอบการออกแบบอาคารต้านทานแรงระเบิดเมื่อต้องคำนึงถึงชนิดของวัตถุระเบิด

3.1 ชนิดของวัตถุระเบิด

3.1.1 Trinitrotoluene (TNT)

- **ส่วนประกอบ:** $C_6H_2(NO_2)_3CH_3$ ซึ่งเกิดจากการผสมระหว่าง โทลูอีน (toluene) กรดซัลฟิวริก (sulfuric acid) และกรดไนตริก (nitric acid)
- **สี:** มีสีเหลืองถึงน้ำตาลอมเหลืองขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ (รูปที่ 3-1)
- **การใช้:** ใช้เป็นวัตถุระเบิดในยุทธโธปกรณ์กระสุนและดินทำลาย สามารถใช้เป็นดินขยายการระเบิดได้ โดยอัดเป็นแท่งและใช้ร่วมกับวัตถุระเบิดอื่น ๆ
- **ความเป็นพิษ:** เป็นพิษมาก เข้าสู่ร่างกายได้ทางผิวหนัง การสูดดมฝุ่นหรือไอระเหย มีอันตรายพอกับการกินเข้าไป เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะทำให้ น้ำตาไหล ตามัว ดีซ่าน และอาจทำให้ตาบอดได้ เมื่อสัมผัสกับผิวหนังอาจทำให้ผิวหนังนั้นเกิดพิษและเกิดผื่นคัน
- **ความไว:** เป็นวัตถุระเบิดที่ไม่ไวมากนัก โดยเฉพาะกับแรงกระแทก แรงเสียดสี เปลวไฟ แต่อาจเกิดระเบิดได้ถ้าได้รับการเสียดสีระหว่างโลหะ เช่น การขันเกลียว การยิงด้วยปืนเล็กนัดเดียวจะไม่ทำให้ระเบิด แต่ถ้ายิงด้วยปืนกลจะทำให้ระเบิด ถ้าถูกแสงแดดเป็นเวลานาน ๆ จะมีความไวขึ้น
- **ความคงทน:** มีความคงทนดีมากในการเก็บรักษา ถ้าเก็บในอุณหภูมิสูงจะมีการไหลเยิ้มแต่ไม่ไว ถ้าผสมด้วยไหมหรือฝ้ายจะเป็นวัตถุระเบิดแรงต่ำซึ่งง่ายต่อการจุดและลุกไหม้อย่างรวดเร็วจนอาจเกิดระเบิดได้ ไม่ดูดความชื้นและไม่เสื่อมเพราะความชื้น ไม่ทำปฏิกิริยากับโลหะ ยกเว้นเมื่อละลายในกรดดินประสิวจะเป็นอันตรายมาก ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลด์ เช่น แอมโมเนียม โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมคาร์บอเนต ซึ่งจะทำให้เกิดสารประกอบที่อันตราย ไวต่อความร้อน และแรงกระแทก



รูปที่ 3-1 ลักษณะของ TNT

3.1.2 Ammonium Nitrate and Fuel Oil (ANFO)

- **ส่วนประกอบ:** NH_4NO_3 (หรือแอมโมเนียมไนเตรต) และน้ำมันเชื้อเพลิง เช่น ดีเซล
- **สี:** แอมโมเนียมไนเตรตจะมีสีขาว (รูปที่ 3-2 (ก)) แต่เมื่อผสมกับน้ำมันเชื้อเพลิงแล้วจะมีสีชมพู (รูปที่ 3-2 (ข))
- **การใช้:** ใช้เป็นสารออกซิไดเซอร์ ใช้เป็นดินระเบิดหลุมและทำให้หินแตกร้าว และใช้เป็นส่วนผสมกับวัตถุระเบิดอื่น
- **ความเป็นพิษ:** เมื่อระเบิดแล้วจะเกิดควันที่เป็นพิษ แต่ไม่มีพิษและไม่ทำให้เกิดผื่นคันในขณะที่ยังคงสภาพของวัตถุระเบิดอยู่
- **ความไว:** ไม่ไวต่อแรงกระแทก อาจระเบิดได้เมื่อจุดด้วยเชื้อปะทุ ความไวจะเพิ่มขึ้นเมื่อผสมด้วยไนโตรกิลเซอร์รีน ไนโตรเซลลูโลส ไนโตรคอมแปด และเมื่อผสมด้วยสารที่ไม่ใช่วัตถุระเบิด เช่น ยางสน กำมะถัน ถ่าน ผงแป้ง น้ำตาล น้ำมันเชื้อเพลิง จะกลายเป็นออกซิไดเซอร์ที่ให้ออกซิเจนดี และจะไวขึ้นเมื่อได้รับความร้อนจากการลุกไหม้ของวัสดุติดไฟ
- **ความคงทน:** ความคงทนดีมาก จุดตัวเมื่อมีความร้อน 465 องศาเซลเซียส ถ้าชื้นจะทำปฏิกิริยากับทองแดง ทองเหลือง เหล็ก เหล็กอ่อน ตะกั่ว อลูมิเนียม
- **สารละลาย:** ละลายได้ดีในน้ำและน้ำยาแอมโมเนียมอาร์ซีเตรท 10% ละลายได้บางส่วนในเอซิล แอลกอฮอล์และเมทิลแอลกอฮอล์ และละลายได้น้อยมากในอะซิโตน



(ก) Ammonium Nitrate



(ข) ANFO

รูปที่ 3-2 ลักษณะของ Ammonium Nitrate และ ANFO

3.1.3 Composition 4 (C4)

- **ส่วนประกอบ:** ประกอบด้วย ดินระเบิดอาร์.ดี.เอกซ์. (R.D.X) กับปริมาณของน้ำมันพลาสติก ไดออกทิลเซบาเคต (dioctyl sebacate) โพลีไอโซบิวทีลีน (polyisobutylene) และน้ำมันมิเนอร์ล (mineral oil) ในอัตราส่วนที่ต่างกัน
- **สี:** มีสีขาวขุ่นถึงสีน้ำตาลอ่อน มักจะถูกห่อหุ้มด้วยพลาสติกสีเขียวเข้มหรือกระดาษสีน้ำตาล (รูปที่ 3-3)
- **การใช้:** ใช้เป็นวัตถุระเบิดในสรรพาวุธใต้น้ำและดินระเบิดทำลาย
- **ความเป็นพิษ:** ปกติไม่เป็นพิษ ไม่ทำให้เกิดผื่นคัน แต่ถ้าเข้าสู่ร่างกายจะทำอันตรายต่อเนื้อเยื่ออ่อน และทำให้เสียชีวิตได้
- **ความไว:** มีความไวเท่าวัตถุระเบิดชนิด TNT จุดระเบิดได้แน่นอนด้วยเชื้อประทุทางทหารหรือฝักกระเบิดเมื่อมัดเป็นปมหุ้มด้วยดินระเบิดชนิดนี้
- **ความคงทน:** คงทนในการเก็บรักษามาก ไม่ดูดความชื้น ไม่เสื่อมเมื่อถูกความชื้น และไม่ทำปฏิกิริยากับโลหะทุกชนิด
- **สารละลาย:** ละลายในสารละลายไดเฟนิลฟอมาไมด์ได้ดีมากและละลายในสารละลายอะซิโตนได้บางส่วน

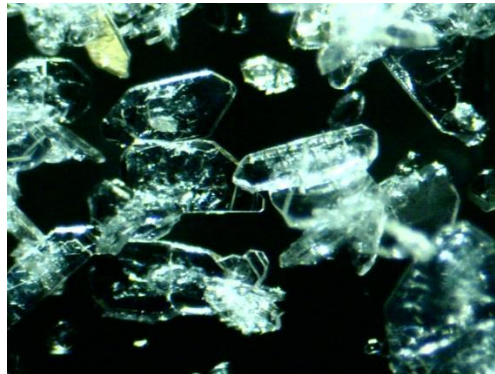


รูปที่ 3-3 ลักษณะของ C4

3.1.4 ยูเรียไนเตรต (Urea Nitrate)

- **ส่วนประกอบ:** ประกอบด้วย ปุ๋ยยูเรียและกรดไนตริก (nitric acid) โดยจะเกิดเป็นผลึกยูเรียไนเตรต เมื่อผสมส่วนประกอบทั้งสองอย่างถูกต้อง
- **สี:** เป็นผลึกสีขาวถึงเทาอ่อนหรือน้ำตาล (รูปที่ 3-4)
- **การใช้:** มักจะถูกใช้ทดแทนแอมโมเนียมไนเตรตในการประกอบระเบิดแสงเครื่องขนาดใหญ่ เนื่องจากความง่ายในการจัดหาวสดุและความไวต่อการระเบิดมากกว่าแอมโมเนียมไนเตรต
- **ความเป็นพิษ:** ปกติไม่เป็นพิษ แต่จะมีกลิ่นคล้ายน้ำมันเชื้อเพลิงหรือสารเคมี
- **ความไว:** เป็นวัตถุระเบิดที่ไม่มีความไวต่อสภาพแวดล้อม แต่จะติดไฟทันทีเมื่อผสมกับสารโซเดียมคลอไรด์

- **ความคงทน:** สามารถดูดซึมน้ำได้ทันที และถ้ามีการดูดซึมน้ำเกินกว่า 8% ของปริมาตรสารทั้งหมด จะกลายเป็นวัตถุระเบิดที่มีความอ่อนโยน



รูปที่ 3-4 ภาพขยายของผลึก Urea Nitrate

3.1.5 Triacetone Triperoxide (TATP)

- **ส่วนประกอบ:** ประกอบด้วย อะซิโตน (acetone) เฮกซาไมน์ (hexamine) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogenperoxide) และกรดซัลฟิวริก (sulfuric acid)
- **สี:** สีขาว มีลักษณะคล้ายผงเกล็ดหรือแป้ง (รูปที่ 3-5)
- **การใช้:** เนื่องจากมีความไม่เสถียรสูง วัตถุระเบิดชนิดนี้จึงมักจะถูกใช้เป็นส่วนประกอบหลักในระเบิดแสวงเครื่องขนาดเล็ก
- **ความเป็นพิษ:** ปกติไม่เป็นพิษ แต่จะมีกลิ่นคล้ายอะซิโตนหรือผลส้มเมื่อเกิดการสลายตัว
- **ความไว:** เป็นวัตถุระเบิดที่มีความไม่เสถียรสูงมาก สามารถเกิดการระเบิดได้เมื่อเจอความร้อน การเสียดสี หรือการกระแทก ซึ่งรวมถึงเป็นผลเนื่องจากการชนส่งด้วย
- **ความคงทน:** มีความคงทนและไม่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความชื้น



รูปที่ 3-5 ลักษณะของ TATP

3.2 ค่าเปรียบเทียบกำลัง (Relative Effectiveness Factors)

ค่าเปรียบเทียบกำลัง (Relative Effectiveness Factor หรือ R.E. Factor) เป็นค่าที่แสดงกำลังการระเบิดของวัตถุระเบิดเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุระเบิดมาตรฐานหนึ่งหน่วยมวล โดยวัตถุระเบิดมาตรฐานที่นำมาเปรียบเทียบคือวัตถุระเบิดชนิด TNT ซึ่งจะถูกกำหนดให้มีค่าเปรียบเทียบกำลังเท่ากับ 1.0 หากวัตถุระเบิดมีค่าเปรียบเทียบกำลังมากกว่า 1.0 จะแสดงว่าวัตถุระเบิดนั้นมีกำลังการระเบิดมากกว่า TNT ที่มีน้ำหนักเท่ากัน โดยค่าเปรียบเทียบกำลังสำหรับวัตถุระเบิดแต่ละประเภทยังได้แสดงอยู่ในตาราง 3-1

ตาราง 3-1 ความหนาแน่นและค่าเปรียบเทียบกำลัง (R.E. Factor) สำหรับวัตถุระเบิดแรงสูงแต่ละชนิด

ชนิดวัตถุระเบิด	ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	R.E. Factor
Ammonium nitrate (AN + <0.5% H ₂ O)	1.12	0.42
Black powder (75% KNO ₃ + 19% C + 6% S)	1.65	0.55
Tanerit Simply® (93% granulated AN + 6% red P + 1% C)	0.90	0.55
Hexamine dinitrate (HDN)	1.30	0.60
Dinitrobenzene (DNB)	1.50	0.60
HMTD (hexamine peroxide)	0.88	0.74
ANFO (94% AN + 6% fuel oil)	0.92	0.74
TATP (acetone peroxide)	1.18	0.80
Tovex® Extra (AN water gel) commercial product	1.33	0.80
Hydromite® 600 (AN water emulsion) commercial product	1.24	0.80
ANNMAL (66% AN + 25% NM + 5% Al + 3% C + 1% TETA)	1.16	0.87
Amatol (50% TNT + 50% AN)	1.50	0.91
Nitroguanidine	1.32	0.95
Trinitrotoluene (TNT)	1.60	1.00
Hexanitrostilbene (HNS)	1.70	1.05
Nitrourea	1.45	1.05
Tritonal (80% TNT + 20% aluminium)*	1.70	1.05
Amatol (80% TNT + 20% AN)	1.55	1.10
Nitrocellulose (13.5% N, NC)	1.40	1.10
Nitromethane (NM)	1.13	1.10

ตาราง 3-1 (ต่อ) ความหนาแน่นและค่าเปรียบเทียบกำลัง (R.E. Factor) สำหรับวัตถุระเบิดแรงสูงแต่ละชนิด

ชนิดวัตถุระเบิด	ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	R.E. Factor
PBXW-126 (22% NTO, 20% RDX, 20% AP, 26% Al, 12% PU's system)*	1.80	1.10
Diethylene glycol dinitrate (DEGDN)	1.38	1.17
PBXIH-135 EB (42% HMX, 33% Al, 25% PCP-TMETN's system)*	1.81	1.17
PBXN-109 (64% RDX, 20% Al, 16% HTPB's system)*	1.68	1.17
Triaminotrinitrobenzene (TATB)	1.80	1.17
Picric acid (TNP)	1.71	1.20
Trinitrobenzene (TNB)	1.60	1.20
Tetrytol (70% tetryl + 30% TNT)	1.60	1.20
Nobel's Dynamite (75% NG + 23% diatomite)	1.48	1.25
Tetryl	1.71	1.25
Torpex (aka HBX, 41% RDX + 40% TNT + 18% Al + 1% wax)*	1.80	1.30
Composition B (63% RDX + 36% TNT + 1% wax)	1.72	1.33
Composition C-3 (78% RDX)	1.60	1.33
Composition C-4 (91% RDX)	1.59	1.34
Pentolite (56% PETN + 44% TNT)	1.66	1.33
Semtex 1A (76% PETN + 6% RDX)	1.55	1.35
RISAL P (50% IPN + 28% RDX + 15% Al + 4% Mg + 1% Zr + 2% NC)*	1.39	1.40
Hydrazine mononitrate	1.59	1.42
Mixture: 24% nitrobenzene + 76% TNM	1.48	1.50
Mixture: 30% nitrobenzene + 70% nitrogen tetroxide	1.39	1.50
Nitroglycerin (NG)	1.59	1.54
Octol (80% HMX + 19% TNT + 1% DNT)	1.83	1.54
NTO (Nitrotriazolon)	1.87	1.60

ตาราง 3-1 (ต่อ) ความหนาแน่นและค่าเปรียบเทียบกำลัง (R.E. Factor) สำหรับวัตถุระเบิดแรงสูงแต่ละชนิด

ชนิดวัตถุระเบิด	ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	R.E. Factor
DADNE (1,1-diamino-2,2-dinitroethene, FOX-7)	1.77	1.60
Gelatine (92% NG + 7% nitrocellulose)	1.60	1.60
Plastics Gel® (in toothpaste tube: 45% PETN + 45% NG + 5% DEGDN + 4% NC)	1.51	1.60
Composition A-5 (98% RDX + 2% stearic acid)	1.65	1.60
Erythritol tetranitrate (ETN)	1.60	1.60
Chopin's Composition (10% PETN + 15% RDX + 72% ETN)	1.67	1.60
Hexogen (RDX)	1.78	1.60
PBXW-11 (96% HMX, 1% HyTemp, 3% DOA)	1.81	1.60
Penthrate (PETN)	1.71	1.66
Ethylene glycol dinitrate (EGDN)	1.49	1.66
TNAZ (trinitroazetidine)	1.85	1.70
Octogen (HMX grade B)	1.86	1.70
HNIW (CL-20)	1.97	1.80
Hexanitrobenzene (HNB)	1.97	1.85
MEDINA (Methylene dinitroamine)	1.65	1.93
DDF (4,4'-Dinitro-3,3'-diazenofuroxan)	1.98	1.95
Octanitrocubane (ONC)	1.95	2.38

หมายเหตุ *เนื่องจากวัตถุระเบิดเหล่านี้มีส่วนผสมของผงอะลูมิเนียม (aluminized mixtures) ซึ่งทำให้แรงระเบิดขึ้นอยู่กับลักษณะการประกอบระเบิด เช่น วัตถุระเบิดที่มีส่วนผสมผงอะลูมิเนียมและถูกบรรจุอยู่ในภาชนะปิดขนาดเล็กอาจมีอำนาจพลแรงระเบิดรุนแรงเพิ่มขึ้นถึงสองเท่า ดังนั้นค่า R.E. Factor ของวัตถุระเบิดเหล่านี้อาจไม่เป็นไปตามค่าในตารางนี้

โดยทั่วไปในการออกแบบอาคารต้านทานแรงระเบิด การคำนวณแรงระเบิดจะพิจารณาจากน้ำหนักของวัตถุระเบิดชนิด TNT เป็นหลัก ดังนั้นหากเป็นวัตถุระเบิดชนิดอื่น ผู้ออกแบบจำเป็นต้องคำนวณหาน้ำหนักวัตถุระเบิดเทียบเท่า (effective charge weight) โดยใช้ค่าเปรียบเทียบกําลังในตารางที่ 3-1 ซึ่งค่าน้ำหนักวัตถุระเบิดเทียบเท่านี้สามารถคำนวณได้ตามสมการ 3-1

$$\text{น้ำหนักวัตถุระเบิดเทียบเท่า} = \text{R.E. Factor ของวัตถุระเบิดที่พิจารณา} \times \text{น้ำหนักวัตถุระเบิดนั้นๆ} \quad (3-1)$$

โดยน้ำหนักวัตถุระเบิดเทียบเท่าที่คำนวณได้นี้จะนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าแรงดันระเบิดเพื่อใช้ในการออกแบบอาคารต้านทานแรงระเบิดต่อไป ซึ่งจะอธิบายในรายละเอียดในบทที่ 5

บทที่ 4

พฤติกรรมของการระเบิดและประเภทของแรงระเบิด

4.1 พฤติกรรมของการระเบิด

การที่วัตถุระเบิดแรงสูงที่ไม่มีวัสดุห่อหุ้มจะเกิดการระเบิดได้นั้นจำเป็นต้องทำให้เกิดการปะทุขึ้นก่อน มิฉะนั้นจะเกิดการเผาไหม้เพียงอย่างเดียว คำว่า “การปะทุ” นั้นหมายถึงปฏิกิริยาเคมีจากการสลายตัววัตถุระเบิดที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและคงที่ด้วยความเร็วที่เรียกว่า “ความเร็วในการปะทุ” ซึ่งมีความเร็วมากกว่าความเร็วเสียง โดยทั่วไปความเร็วในการปะทุของวัตถุระเบิดแรงสูงมีค่าอยู่ที่ระหว่าง 6,700 ถึง 8,500 เมตรต่อวินาที (22,000 ถึง 28,000 ฟุตต่อวินาที) โดยเมื่อเกิดการปะทุ วัตถุระเบิดที่เป็นของแข็งหรือของเหลวจะเปลี่ยนเป็นก๊าซแรงดันสูงที่มีความร้อนและความหนาแน่นสูงที่ขยายตัวออกจากจุดศูนย์กลางระเบิด ก่อให้เกิดคลื่นระเบิดที่รุนแรงหรือที่เรียกว่าคลื่นกระแทก (shock wave) ที่เคลื่อนที่ผ่านอากาศโดยรอบ โดยแรงดันที่เกิดขึ้นในทันทีที่ด้านหน้าของคลื่นกระแทก (shock front) มีค่าได้ตั้งแต่ 19,000 ถึง 34,000 เมกะปาสกาล (2,700,000 ถึง 4,900,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ในระหว่างการระเบิดของวัตถุระเบิดรุนแรงสูงส่วนใหญ่หนึ่งในสามของพลังงานเคมีจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจากการระเบิดจะถูกปล่อยออกมาในขั้นตอนของการปะทุ ส่วนพลังงานเคมีส่วนที่เหลือจะถูกปล่อยออกมาในระหว่างการเผาไหม้ของวัตถุระเบิดเมื่อทำปฏิกิริยากับอากาศซึ่งจะเกิดภายหลังการปะทุ ซึ่งพลังงานส่วนหลังนี้มีผลกระทบเพียงเล็กน้อยกับลักษณะและคุณสมบัติของคลื่นระเบิดเนื่องจากปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้มีความเร็วที่ช้ากว่าปฏิกิริยาของการปะทุเป็นอย่างมาก

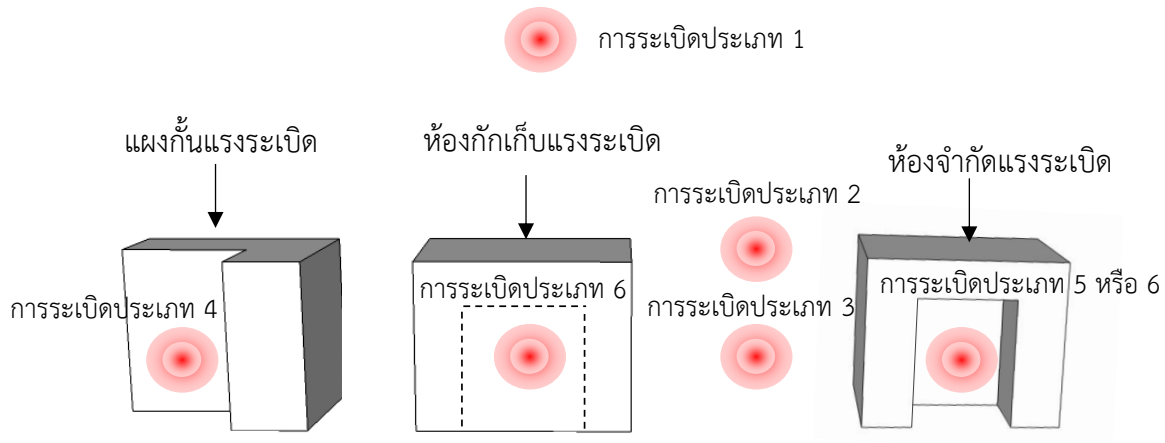
ในขณะที่คลื่นระเบิดขยายตัวออก ตัวคลื่นจะมีความรุนแรงและความเร็วลดลงเมื่อระยะเวลามากขึ้น และถ้ามีโครงสร้างอยู่ในเส้นทางของคลื่น คลื่นกระแทกด้านหน้าจะกระทบกับโครงสร้างและหลังจากนั้นโครงสร้างทั้งหมดจะถูกปกคลุมไปด้วยแรงดันระเบิด (blast pressure) โดยที่ขนาดและการกระจายของแรงดันระเบิดนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้ (1) คุณสมบัติของระเบิด เช่น ชนิดของวัตถุระเบิด พลังงานของการระเบิด และน้ำหนักวัตถุระเบิด (2) ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิดไปยังโครงสร้าง (3) ขนาดและการขยายขนาดของแรงดันระเบิดเนื่องจากปฏิกิริยสัมพันธ์กับพื้นดินหรือโครงสร้าง โดยสำหรับวัตถุระเบิดที่เป็นของแข็งและเป็นวัตถุระเบิดแรงสูง ผลจากการระเบิดของวัตถุระเบิดประเภทนี้ได้มีการศึกษาจนเป็นที่เข้าใจเป็นอย่างดี ทั้งในเรื่องของการหาแรงดัน แรงดล ระยะเวลา และผลกระทบอื่น ๆ ของการระเบิด

สำหรับวัตถุระเบิดประเภทอื่นที่เป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ ซึ่งไม่ใช่วัตถุระเบิดแรงสูง เมื่อเกิดการระเบิดแรงดันระเบิดจะมีค่าแตกต่างกันและการระเบิดมักจะเกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์ โดยมีวัตถุระเบิดเพียงบางส่วนเกิดการจุดระเบิดขึ้น ในขณะที่ส่วนอื่นๆ ของวัตถุระเบิดจะถูกเผาไหม้ไปอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการสลายของพลังงานเคมีจากปฏิกิริยาการระเบิดไปเป็นพลังงานความร้อนซึ่งก่อให้เกิดอันตรายจากเพลิงไหม้และรังสีความร้อนแทน

4.2 ประเภทของแรงระเบิด

แรงระเบิดที่กระทำกับโครงสร้างอาคาร สามารถแบ่งออกเป็นสองแบบโดยขึ้นอยู่กับลักษณะการปิดล้อมของการเกิดการระเบิด (confinement) อันได้แก่ การระเบิดแบบไม่ปิดล้อม (unconfined explosion) และการระเบิดแบบปิดล้อม (confined explosion) โดยการระเบิดทั้งสองแบบนี้สามารถแบ่งออกเป็น 6 ประเภทย่อยตามตำแหน่งและสภาพปิดล้อมของการระเบิด ซึ่งจะมีผลต่อค่าแรงดันระเบิด (รูปที่ 4-1)

โดยคำอธิบายลักษณะการระเบิดและประเภทของแรงระเบิดที่เกี่ยวข้องจะแสดงอยู่ในตาราง 4-1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการระเบิด 6 ประเภทย่อยนี้ก่อให้เกิดแรงดันระเบิดที่กระทำต่อโครงสร้างอาคาร 5 รูปแบบ ซึ่งเป็นแรงดันที่ผู้ออกแบบควรนำมาพิจารณาในการออกแบบโครงสร้างอาคารเพื่อให้สอดคล้องลักษณะของการระเบิดต่อไป



รูปที่ 4-1 ประเภทของแรงระเบิด

ตาราง 4-1 ประเภทของการระเบิด

การปิดล้อมของการระเบิด	ประเภทของการระเบิด	ชนิดของแรงดันที่กระทำกับอาคาร
การระเบิดแบบไม่ปิดล้อม (unconfined explosion)	1.การระเบิดกลางอากาศแบบอิสระ	ก. แรงดันระเบิดโดยตรง
	2.การระเบิดกลางอากาศ	ข. แรงดันระเบิดโดยตรง + คลื่นมัค
	3.การระเบิดบนพื้น	ข. คลื่นมัค
การระเบิดแบบปิดล้อม (confined explosion)	4.การระเบิดในสภาพที่มีช่องเปิด	ค. คลื่นกระแทกภายใน ง. แรงดันรั่วไหล
	5.การระเบิดแบบปิดล้อมบางส่วน	ค. คลื่นกระแทกภายใน ง. แรงดันรั่วไหล จ. แรงดันแก๊สภายใน
	6.การระเบิดแบบปิดล้อมทั้งหมด	ค. คลื่นกระแทกภายใน จ. แรงดันแก๊สภายใน

4.2.1 การระเบิดแบบไม่ปิดล้อม (unconfined explosion)

4.2.1.1 การระเบิดกลางอากาศแบบอิสระ (free air explosion)

การระเบิดกลางอากาศแบบอิสระคือการระเบิดที่ทำให้เกิดคลื่นกระแทก (shock wave) แพร่กระจายออกจากจุดศูนย์กลางของการระเบิด และกระทบกับโครงสร้างอาคารโดยไม่มีการขยายค่าระหว่างการเคลื่อนที่ ดังนั้นสำหรับการระเบิดประเภทนี้ แรงดันระเบิดที่กระทำต่อโครงสร้างอาคารจะมีเพียงแรงดันระเบิดโดยตรง (incident pressure) เท่านั้น

4.2.1.2 การระเบิดกลางอากาศ (air burst explosion)

การระเบิดกลางอากาศคือการระเบิดที่มีจุดศูนย์กลางระเบิดอยู่ในอากาศ ณ ตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับพื้นและโครงสร้างอาคาร ส่งผลให้คลื่นแรงระเบิดบางส่วนเกิดการขยายค่าเนื่องจากการผสมกับคลื่นแรงระเบิดที่สะท้อนจากพื้นก่อนกระทบกับโครงสร้างอาคาร โดยแรงดันระเบิดที่เกิดหลังจากการผสมนี้จะเรียกว่า คลื่นมัด (Mach wave) สำหรับคู่มือนี้การระเบิดกลางอากาศจะเกิดขึ้นเมื่อความสูงของจุดศูนย์กลางระเบิดอยู่ที่ประมาณ 2 ถึง 3 เท่าของความสูงของอาคารหนึ่งหรือสองชั้น ดังนั้นสำหรับการระเบิดประเภทนี้ แรงดันระเบิดที่กระทำต่อโครงสร้างอาคารจะมีทั้งแรงดันระเบิดโดยตรงและคลื่นมัด

4.2.1.3 การระเบิดบนพื้น (surface burst explosion)

การระเบิดบนพื้นคือการระเบิดที่เกิดใกล้พื้นผิวหรือบนพื้นผิว ซึ่งส่งผลให้คลื่นแรงดันระเบิดเกิดการขยายค่าจากการเสริมกำลังของคลื่นที่สะท้อนมาจากพื้นผิวกลายเป็นคลื่นมัดตั้งแต่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางระเบิด ดังนั้นสำหรับการระเบิดประเภทนี้ แรงดันระเบิดที่กระทำต่อโครงสร้างอาคารจะเป็นคลื่นมัดเพียงอย่างเดียว

4.2.2 การระเบิดแบบปิดล้อม (confined explosion)

4.2.2.1 การระเบิดในพื้นที่ที่มีช่องเปิด (fully vented explosion)

การระเบิดในพื้นที่ที่มีช่องเปิดคือการระเบิดที่เกิดขึ้นภายในพื้นที่หรืออยู่ติดกับโครงสร้างที่เป็นแผงกั้นหรือห้องที่มีด้านหนึ่งด้านใดหรือหลายด้านเปิดโล่งสู่ภายนอก โดยแรงดันระเบิดจะเกิดการขยายค่าจากการสะท้อนกลับของคลื่นระเบิดเมื่อกระทบกับโครงสร้างส่วนที่เป็นแผงกั้น และถูกระบายออกภายนอกโครงสร้างในรูปของคลื่นซึ่งเรียกว่าแรงดันรั่วไหล (leakage pressures) ที่เคลื่อนที่ออกจากตัวโครงสร้าง

4.2.2.2 การระเบิดแบบปิดล้อมบางส่วน (partially confined explosion)

การระเบิดแบบปิดล้อมบางส่วนคือการระเบิดที่เกิดขึ้นภายในพื้นที่ที่เป็นแผงกั้นหรือห้องที่มีช่องเปิดขนาดจำกัดหรือมีรอยแตกของพื้นผิว ทำให้เกิดแรงดันรั่วไหลในช่วงเวลาหนึ่ง ในขณะเดียวกันภายในโครงสร้างจะเกิดการสะสมของก๊าซที่มีความร้อนสูงซึ่งก่อให้เกิดแรงดันกึ่งสถิตย (quasi-static pressure) กระทำกับโครงสร้างอาคารเป็นระยะเวลาที่นานกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาของแรงดันกระแทก (shock pressure)

4.2.2.3 การระเบิดแบบปิดล้อมทั้งหมด (fully confined explosion)

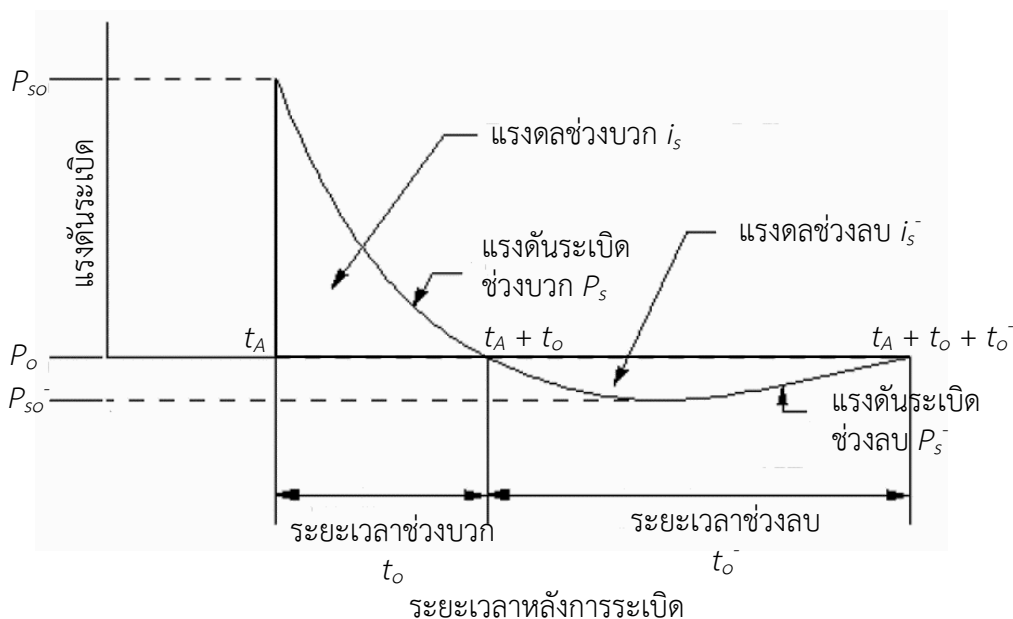
การระเบิดแบบปิดล้อมทั้งหมดคือการระเบิดที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างที่ออกแบบเพื่อการปิดล้อมทั้งหมดหรือเกือบทั้งหมด แรงระเบิดที่เกิดภายในโครงสร้างนี้จะประกอบด้วยแรงกระแทกที่ไม่มีการระบายสู่ภายนอก

และแรงดันก๊าซที่กระทำต่อโครงสร้างเป็นระยะเวลานานซึ่งขึ้นกับสภาพของการปิดล้อม ในกรณีนี้แรงดันรั่วไหลที่ระบายออกจากตัวโครงสร้างจะมีค่าต่ำมากและจะมีผลกระทบต่อโครงสร้างอื่นๆ ที่อยู่ภายนอกโครงสร้างที่ปิดล้อมเท่านั้น

4.3 พฤติกรรมของคลื่นแรงระเบิด

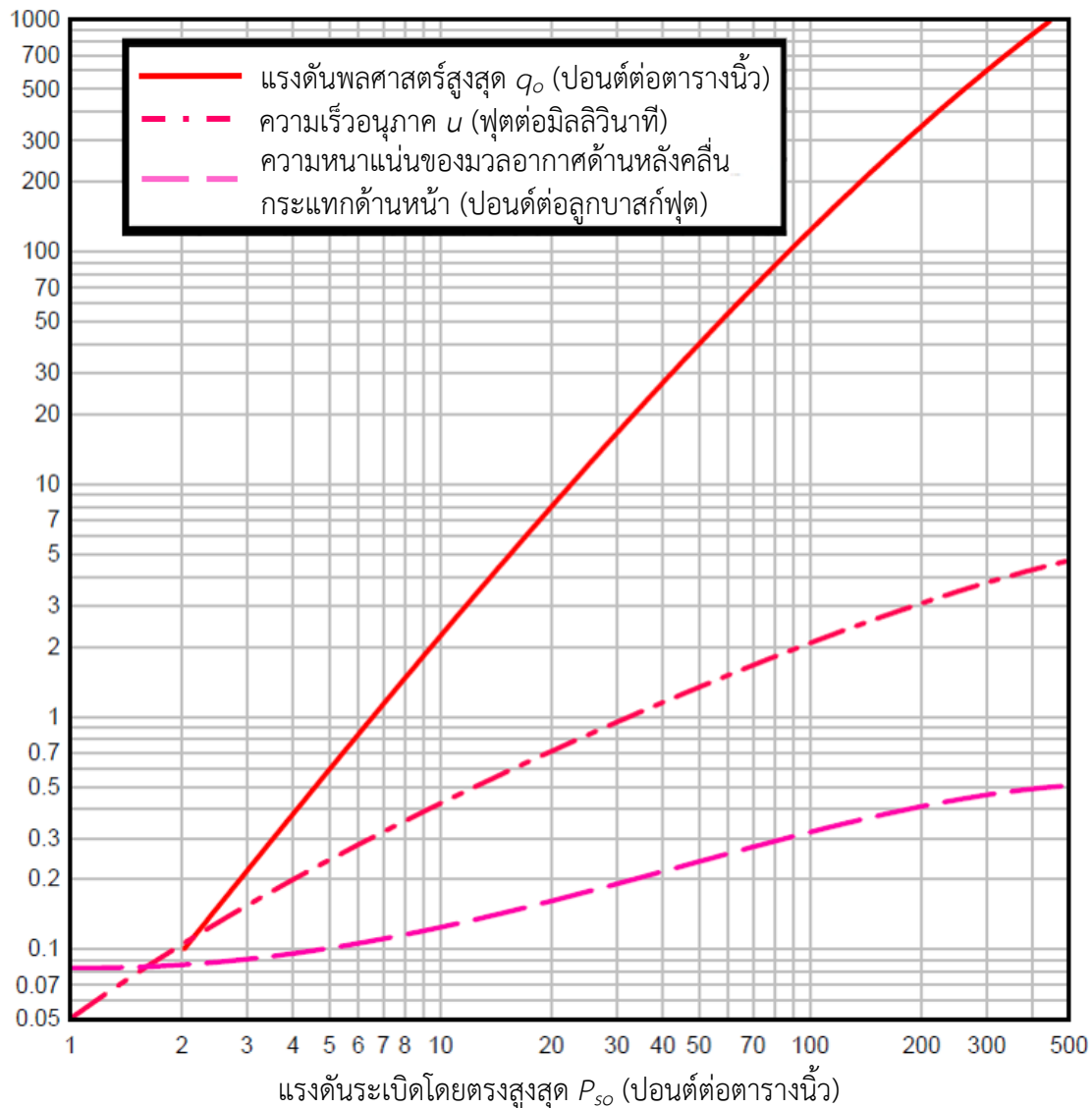
การปลดปล่อยพลังงานอย่างรุนแรงจากการระเบิดนั้นเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของวัตถุระเบิดจากของแข็งหรือของเหลวเป็นก๊าซแรงดันสูงที่มีอุณหภูมิสูงมาก ก๊าซแรงดันสูงนี้จะแพร่กระจายออกทุกทิศทางผ่านอากาศโดยรอบในลักษณะคลื่นกระแทกที่ถูกผลักดันโดยก๊าซร้อน คลื่นกระแทกด้านหน้า (shock front) หรือที่เรียกว่าคลื่นแรงระเบิดจะมีลักษณะเป็นการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของแรงดันจากระดับแรงดันบรรยากาศ (ambient pressure) จนถึงค่าแรงดันระเบิดโดยตรงสูงสุด (peak incident pressure) โดยการเปลี่ยนแปลงของแรงดันระเบิด ณ จุดใดๆ จากจุดศูนย์กลางระเบิดจะมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 4-2 โดยเริ่มต้นจากการที่คลื่นกระแทกด้านหน้าเดินทางมาถึงจุดใดๆ ที่เวลา t_A ซึ่งแรงดันที่จุดนั้นๆ จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงค่าแรงดันระเบิดโดยตรงสูงสุด P_{so} และหลังจากนั้นแรงดันระเบิดจะลดลงไปเรื่อยๆ จนเท่ากับแรงดันบรรยากาศเมื่อผ่านไปเป็นเวลา t_o โดยระยะเวลาช่วงนี้จะเรียกว่าช่วงบวก (positive phase) จากนั้นแรงดันจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงค่าแรงดันลบสูงสุด P_{so}^- ซึ่งจะเป็นจุดที่อนุภาคอากาศเริ่มเกิดการไหลกลับ ทำให้แรงดันปรับเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเกิดสมดุลของแรงดัน ณ จุดนั้นๆ หรือเท่ากับแรงดันบรรยากาศ โดยช่วงที่แรงดันระเบิดมีค่าต่ำกว่าแรงดันบรรยากาศนี้จะเรียกว่าช่วงลบ (negative phase) เป็นระยะเวลา t_o^- ซึ่งปกติจะยาวนานกว่าเวลาช่วงบวกมาก แต่ช่วงลบนี้มักจะไม่ถูกนำมาพิจารณาในการออกแบบโครงสร้างอาคารต้านทานแรงระเบิดเนื่องจากมีผลกระทบต่อโครงสร้างอาคารน้อยกว่าช่วงบวกเป็นอย่างมาก

นอกจากนี้ ในการหาผลตอบสนองของโครงสร้างอาคารภายใต้แรงระเบิดจำเป็นต้องทราบค่าแรงดล (impulse) โดยตรงจากการระเบิดซึ่งสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟ แรงดัน-เวลา ตามรูปที่ 4-2 นี้ โดยประกอบด้วย แรงดลช่วงบวก i_s และแรงดลช่วงลบ i_s^-



รูปที่ 4-2 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันระเบิด ณ จุดใดๆ จากจุดศูนย์กลางระเบิด

ในขณะที่คลื่นกระแทกด้านหน้าเคลื่อนที่ออกจากรูศูนย์กลางระเบิดในทุกทิศทาง คลื่นกระแทกจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว U ที่ลดลงเรื่อยๆ แต่ยังคงมีความเร็วมากกว่าความเร็วเสียงอยู่ ส่วนโมเลกุลของก๊าซที่อยู่ด้านหลังคลื่นกระแทกด้านหน้าจะเคลื่อนที่ตามด้วยความเร็วที่น้อยกว่าซึ่งเรียกว่าความเร็วอนุภาค u การเคลื่อนที่ของโมเลกุลก๊าซนี้ก่อให้เกิดแรงดันที่เรียกว่าแรงดันพลศาสตร์ (dynamic pressure) ซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ q_0 ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันโดยตรงสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 4-3



รูปที่ 4-3 ค่าแรงดันพลศาสตร์ ค่าความเร็วของอนุภาคอากาศ และความหนาแน่นของอากาศหลังแนวคลื่นกระแทก

(ที่มา: *Unified Facilities Criteria: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions* (UFC 3-340-02))

ในกรณีของการออกแบบช่วงแรงดันต่ำ (low-pressure design range) ค่าแรงดันพลศาสตร์สูงสุดหรือ q_o สามารถคำนวณโดยใช้สมการ 4-1 ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่า q_o ที่ได้จากรูปที่ 4-3 และสมการ 4-1 จะมีค่าใกล้เคียงกัน

$$q_o = 0.022 (P_{so})^2 \quad \text{ปอนด์ต่อตารางนิ้ว} \quad (\text{สมการ 4-1})$$

พฤติกรรมของคลื่นแรงระเบิดที่อธิบายในบทนี้เป็นเพียงกรณีทั่วๆ ไปเท่านั้น โดยในบทต่อไปจะเป็นการอธิบายถึงค่าตัวแปรต่างๆ เหล่านี้สำหรับการระเบิดประเภทต่างๆ แต่ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับขอบเขตของคู่มือฉบับนี้ ประเภทของการระเบิดจะจำกัดเฉพาะการระเบิดแบบไม่ปิดล้อมเท่านั้นซึ่งประกอบด้วยการระเบิดกลางอากาศแบบอิสระ การระเบิดกลางอากาศ และการระเบิดบนพื้น

บทที่ 5

การคำนวณแรงกระทำเนื่องจากการระเบิด

ในการออกแบบอาคารต้านทานแรงระเบิด ผลกระทบหลักจากการระเบิดได้แก่แรงดันระเบิด สะเก็ดจากการระเบิด และคลื่นกระแทกที่ส่งผ่านอากาศหรือพื้นดิน แต่แรงดันระเบิดเป็นตัวแปรหลักที่ส่งผลกระทบต่อ การตอบสนองของอาคาร จากผลการศึกษาพบว่าขนาดของแรงดันระเบิดขึ้นอยู่กับปริมาณวัตถุระเบิด ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นปริมาณที่เทียบเท่ากับวัตถุระเบิด TNT และระยะห่างระหว่างโครงสร้างอาคารและจุดศูนย์กลางระเบิด นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับลักษณะของการระเบิดอีกด้วย โดยในบทที่ 4 ได้อธิบายถึงลักษณะของการระเบิด แต่ละประเภทอย่างคร่าวๆ ไปแล้ว ในบทนี้จะอธิบายถึงการหาค่าแรงดันระเบิดและตัวแปรแรงระเบิดที่สำคัญๆ แต่จะเน้นเฉพาะการระเบิดแบบไม่ปิดล้อมเพื่อให้เป็นไปตามขอบเขตของคู่มือฉบับนี้ โดยข้อมูลที่ใช้ในการหาค่าแรงดันระเบิดและตัวแปรต่างๆ ได้นำมาจาก *Unified Facilities Criteria: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions* (UFC 3-340-02) เป็นหลัก

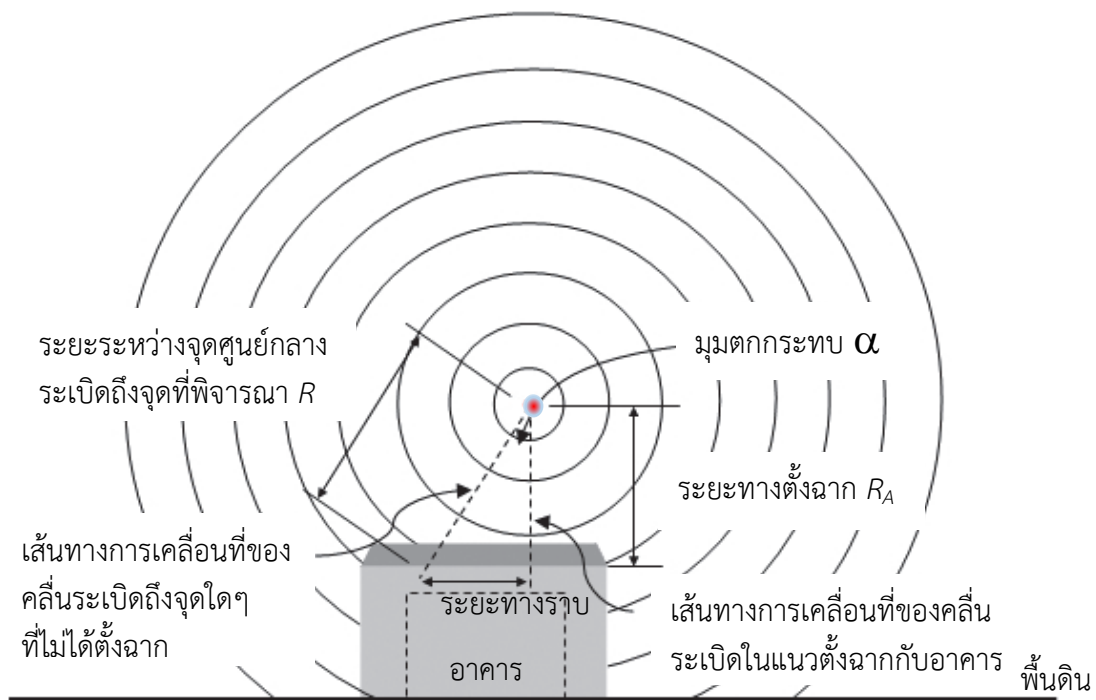
5.1 ส่วนปลอดภัย (Safety Factor)

ถึงแม้ว่าขั้นตอนการออกแบบใน UFC 3-340-02 ได้มีการตั้งสมมุติฐานเพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของแรงระเบิดและผลตอบสนองของโครงสร้างอาคารภายใต้แรงระเบิดได้ง่ายขึ้นซึ่งทำให้ระดับความปลอดภัยในการออกแบบโครงสร้างต้านทานแรงระเบิดเพิ่มขึ้น แต่ในสถานการณ์จริงอาจมีตัวแปรบางอย่างที่ผู้ออกแบบไม่ทราบ อาทิเช่น การสะท้อนของคลื่นระเบิดที่ไม่ได้คาดการณ์ไว้ วิธีการก่อสร้าง คุณภาพของวัสดุก่อสร้าง เป็นต้น ที่สามารถทำให้การประเมินความสามารถในการรับแรงระเบิดของโครงสร้างสูงเกินกว่าความเป็นจริง ดังนั้นเพื่อเป็นการชดเชยตัวแปรที่ไม่ทราบค่าเหล่านี้ UFC 3-340-02 จึงกำหนดให้เพิ่มน้ำหนักวัตถุระเบิด เทียบเท่า TNT อีกร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัตถุระเบิดเทียบเท่าที่เพิ่มขึ้นนี้จะนำมาใช้ในการออกแบบต่อไป

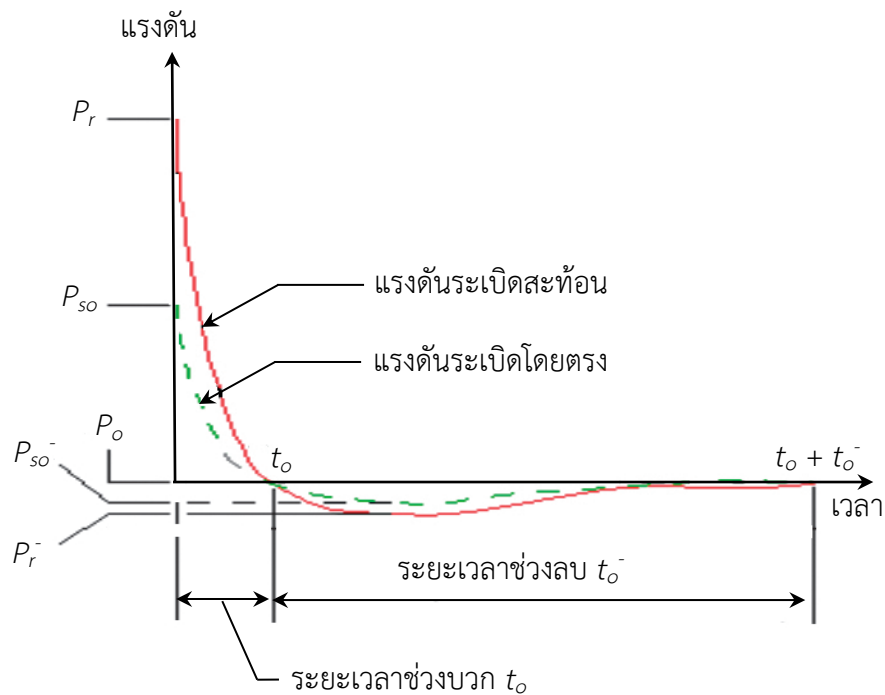
5.2 การหาค่าตัวแปรแรงระเบิดของการระเบิดแบบไม่ปิดล้อม

5.2.1 การระเบิดกลางอากาศแบบอิสระ

ตามที่ได้อธิบายในหัวข้อ 4.2.1.1 การระเบิดกลางอากาศแบบอิสระคือการระเบิดที่เกิดขึ้นเหนือโครงสร้างอาคารโดยไม่เกิดการขยายขนาดของคลื่นระเบิดโดยตรง (incident blast wave) ระหว่างที่คลื่นระเบิดเดินทางจากจุดศูนย์กลางระเบิดไปถึงโครงสร้างอาคารซึ่งสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 5-1 โดยก่อนที่คลื่นระเบิดกระทบกับโครงสร้างอาคาร แรงดันระเบิดโดยตรง (incident blast pressure) หรือ P_s และแรงดลโดยตรง (incident impulse) หรือ i_s จะเป็นไปตามรูปที่ 4-2 แต่เมื่อทันทีที่คลื่นระเบิดกระทบโครงสร้างอาคาร แรงดันระเบิดโดยตรง และแรงดลโดยตรงจะมีการเสริมแรงจากคลื่นระเบิดที่ตามมาภายหลังและสะท้อนกลับ ทำให้แรงดันระเบิดสะท้อนกลับ (reflected pressure) หรือ P_r นี้มีขนาดสูงกว่าแรงดันระเบิดโดยตรงตามที่แสดงในรูปที่ 5-2 แรงดันระเบิดสะท้อนกลับตามรูปที่ 5-2 นี้เป็นลักษณะทั่วไปของคลื่นระเบิดที่กระทบกับระนาบสะท้อนที่มีความยาวไม่จำกัด

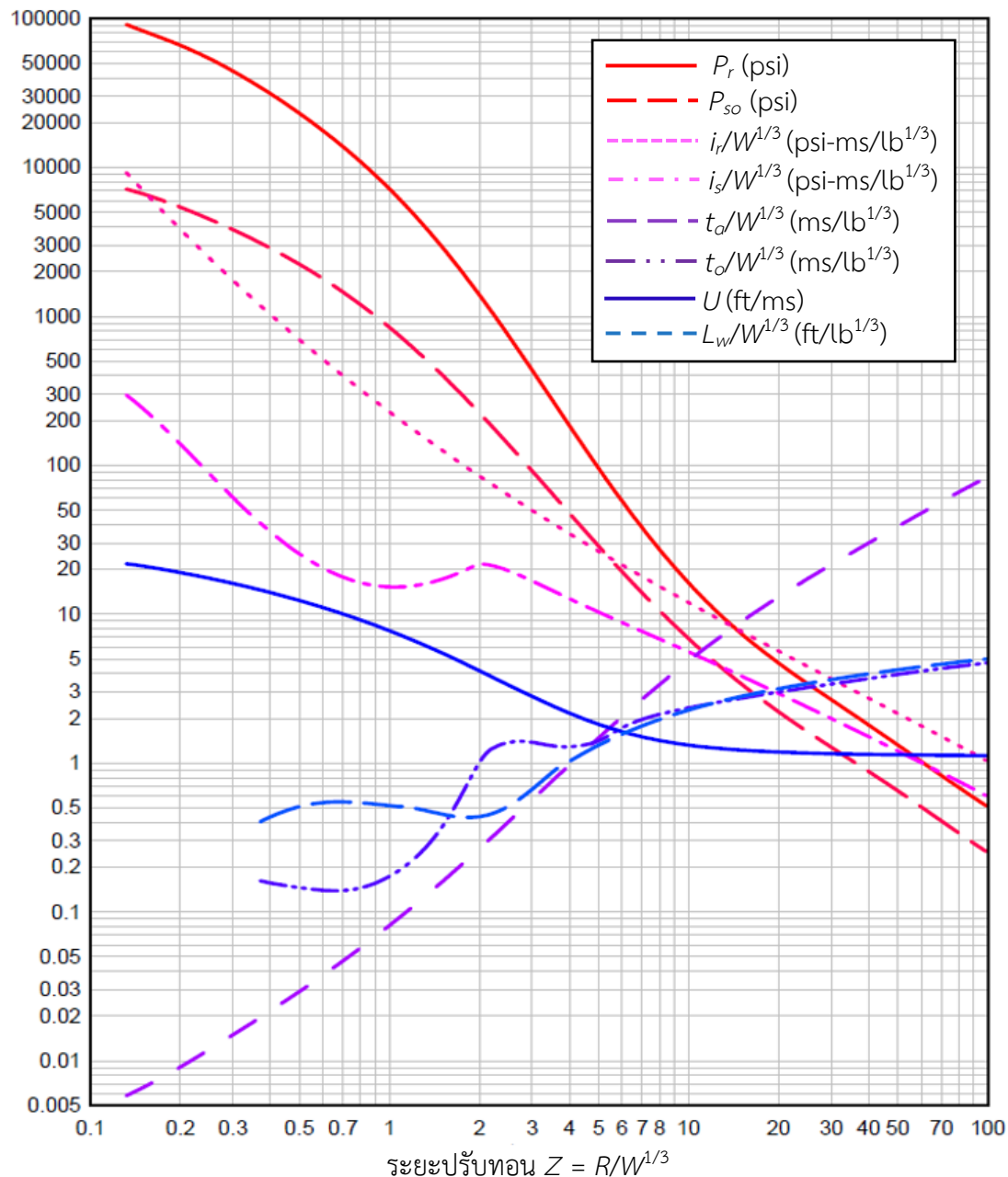


รูปที่ 5-1 การระเบิดกลางอากาศแบบอิสระ

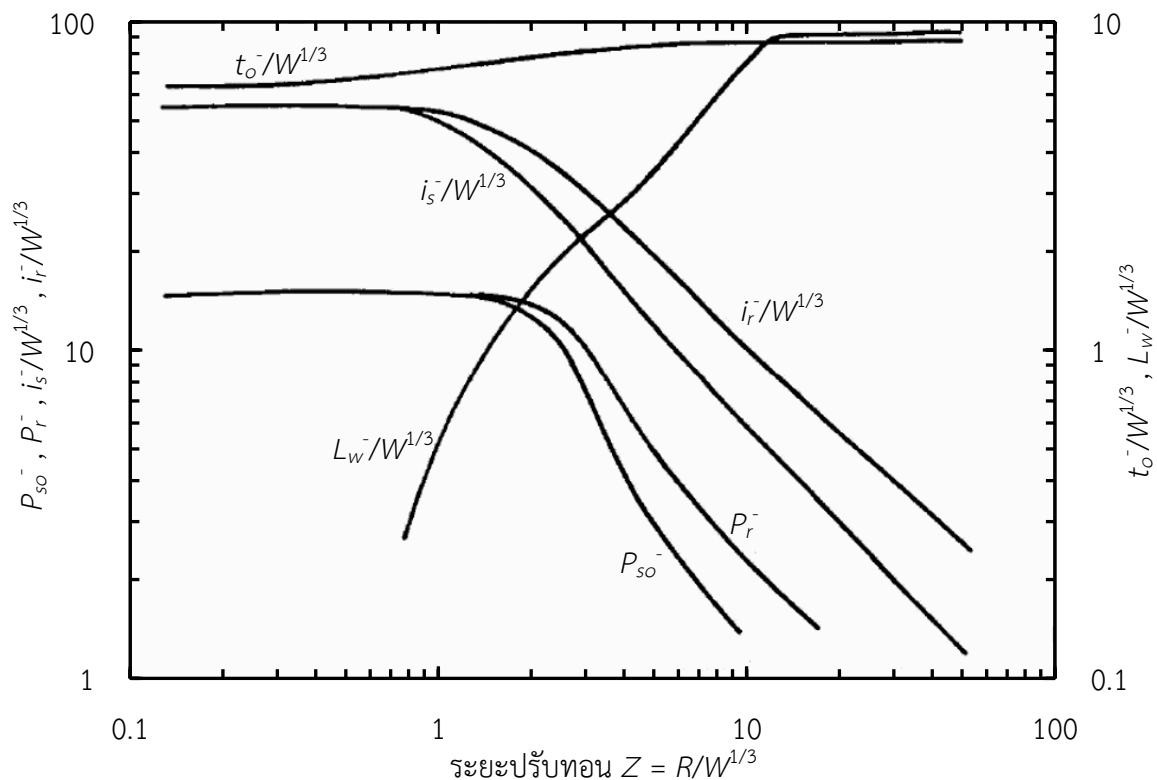


รูปที่ 5-2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระเบิดและเวลาของการระเบิดกลางอากาศแบบอิสระ

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าค่าตัวแปรแรงระเบิดต่างๆ ตามที่แสดงในรูปที่ 5-2 แรงดัน และความเร็วคลื่นระเบิด (U) จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักวัตถุระเบิดหรือ W ซึ่งเป็นน้ำหนักวัตถุระเบิดเทียบเท่า TNT และรากที่สามของระยะห่างจุดศูนย์กลางระเบิด (stand-off distance) หรือ R โดยอัตราส่วนนี้ถูกเรียกว่าระยะปรับทอนหรือ Z โดยความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรแรงระเบิดเหล่านี้และค่า Z จะเป็นไปตามที่แสดงในรูปที่ 5-3 สำหรับแรงระเบิดช่วงบวกและรูปที่ 5-4 สำหรับแรงระเบิดช่วงลบ



รูปที่ 5-3 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแรงระเบิดช่วงบวกและระยะปรับทอนของการระเบิดกลางอากาศ
(ที่มา: *Unified Facilities Criteria: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*
(UFC 3-340-02))



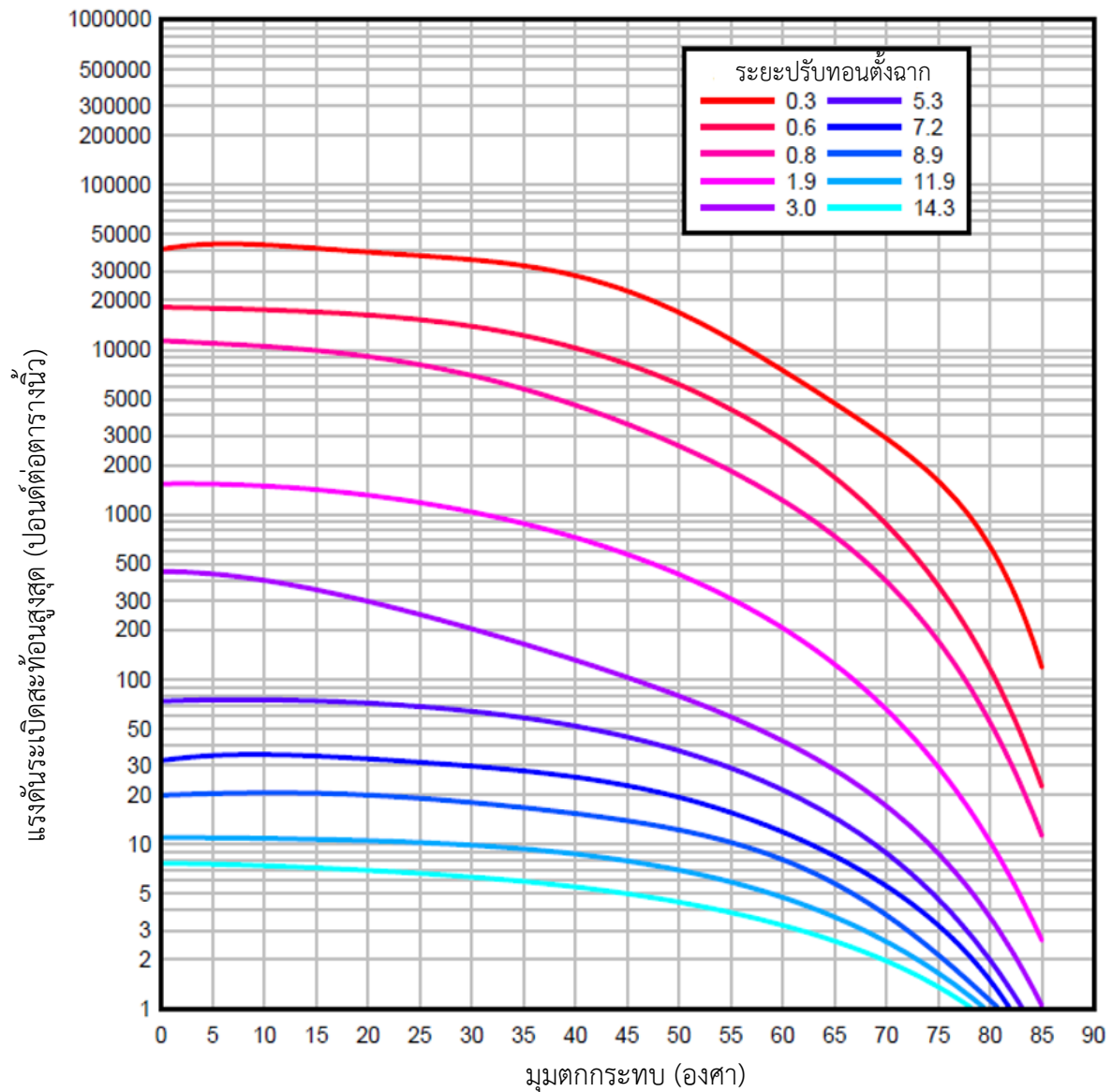
รูปที่ 5-4 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแรงระเบิดช่วงลบและระยะปรับทอน

(ที่มา: *Unified Facilities Criteria: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions* (UFC 3-340-02))

โดยทั่วไปคลื่นระเบิดช่วงลบนี้จะไม่นำมาพิจารณาในการออกแบบโครงสร้างอาคารเนื่องจากมีผลกระทบต่อโครงสร้างน้อยมากเมื่อเทียบกับคลื่นระเบิดช่วงบวก แต่ในบางกรณีตัวแปรแรงระเบิดต่างๆ ของคลื่นระเบิดช่วงลบตามที่แสดงในรูปที่ 5-4 อาจจำเป็นต่อการหาผลรวมของการเคลื่อนที่ทั้งหมดของโครงสร้างโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่น เช่น โครงสร้างเหล็ก เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตได้ว่าความสัมพันธ์เชิงเส้นของตัวแปรต่างๆ ของคลื่นระเบิดในรูปที่ 5-3 และ 5-4 จะถูกกำหนดไว้ที่ระยะปรับทอนเท่ากับ 40 เมตร/กิโลกรัม^{1/3} (100 ฟุต/ปอนด์^{1/3}) เนื่องจากหากระยะปรับทอนเกินกว่านี้ โครงสร้างอาคารโดยส่วนใหญ่จะมีความเสียหายเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อีกทั้งเมื่อระยะปรับทอนเกินกว่าค่าที่กำหนดนี้คลื่นระเบิดจะได้รับผลกระทบจากแรงดันบรรยากาศจนทำให้แรงดันระเบิดที่เกิดขึ้นจริงมีค่าแตกต่างไปจากค่าแรงดันระเบิดที่คำนวณได้เป็นอย่างมาก เพราะในการคำนวณค่าแรงดันระเบิดจะมีสมมุติฐานว่าคลื่นระเบิดเคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศที่มีความสม่ำเสมอ

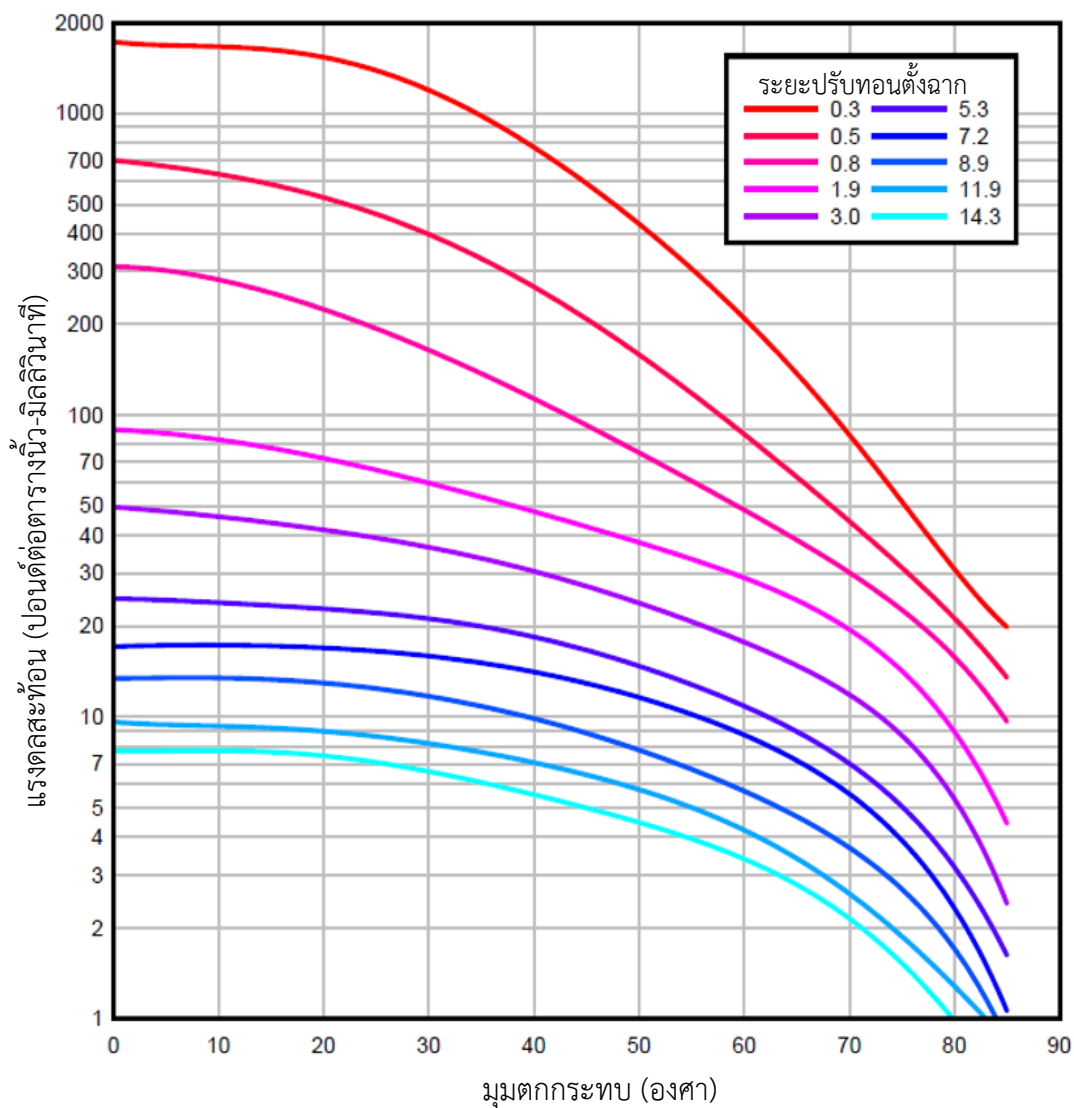
นอกจากนี้ยังพบว่าแรงดันระเบิดและแรงดลบนพื้นผิวโครงสร้างอาคารจะเปลี่ยนแปลงไปตามมุมตกกระทบ α ด้วย โดยมุมตกกระทบนี้จะวัดระหว่างเส้นตรงในแนวระยะตั้งฉาก R_A กับเส้นตรงที่วัดจากจุดศูนย์กลางระเบิดไปสู่จุดที่พิจารณาตามที่แสดงในรูปที่ 5-1 โดยทั่วไปจุดที่มีค่าแรงดันระเบิดและแรงดลสูงสุดจะเป็นจุดที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นระเบิด ส่วนจุดที่มีค่าต่ำสุดจะเป็นจุดที่ขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นระเบิด ค่าแรงดันระเบิดสะท้อนสูงสุดและแรงดลสะท้อนที่มุมตกกระทบต่างๆ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 5-5 และ 5-6 ตามลำดับ รูปทั้งสองแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างมุมตกกระทบกับ

แรงดันระเบิดสะท้อนสูงสุด (รูปที่ 5-5) และแรงดลสะท้อน (รูปที่ 5-6) ที่ระยะปรับทอนในแนวตั้งฉากค่าต่างๆ ส่วนค่าตัวแปรของแรงระเบิดอื่นๆ นั้นสามารถหาได้จากรูปที่ 5-3 และ 5-4 โดยใช้ค่าระยะปรับทอนซึ่งวัดในแนวเอียงถึงจุดที่พิจารณา



รูปที่ 5-5 ค่าแรงดันสะท้อนสูงสุดที่แปรผันตามมุมตกกระทบค่าต่างๆ

(ที่มา: *Unified Facilities Criteria: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions* (UFC 3-340-02))

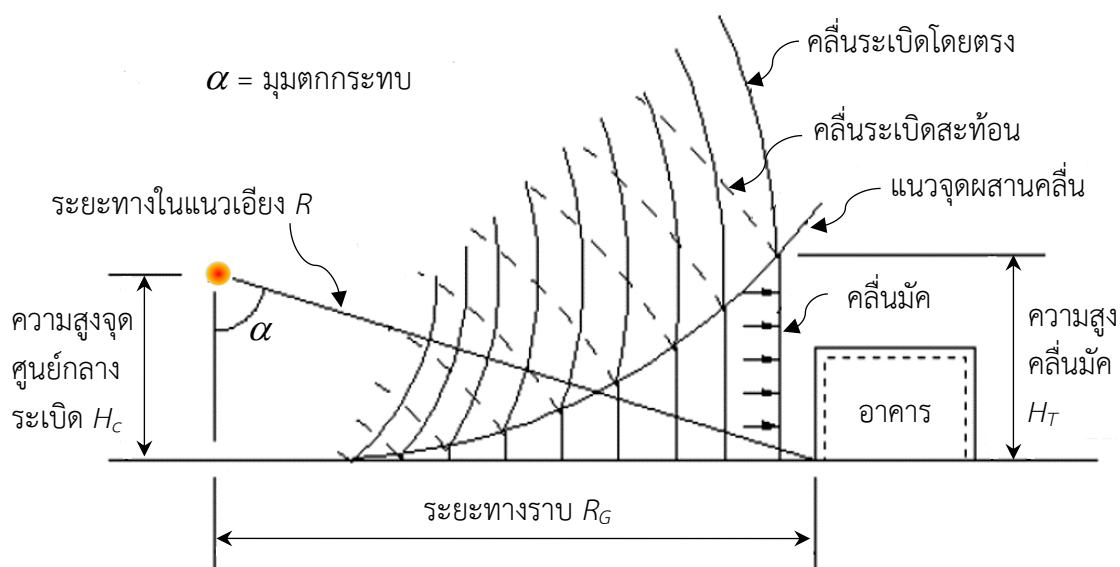


รูปที่ 5-6 ค่าแรงดลสะท้อนที่แปรผันตามมุมตกกระทบค่าต่างๆ

(ที่มา: *Unified Facilities Criteria: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions* (UFC 3-340-02))

5.2.2 การระเบิดกลางอากาศ

ตามที่ได้อธิบายในหัวข้อ 4.2.1.2 การระเบิดกลางอากาศเป็นการระเบิดที่เกิดเหนือพื้นดินและอยู่ห่างจากโครงสร้างพอสมควร โดยคลื่นระเบิดจะเคลื่อนที่ออกจากจุดศูนย์กลางระเบิดไปกระทบกับพื้นดินก่อนเดินทางมาถึงตัวโครงสร้าง ทำให้เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ต่อไปเรื่อยๆ คลื่นระเบิดโดยตรงจะผสมผสานกับคลื่นที่สะท้อนมาจากพื้นดินเกิดการขยายขนาดของคลื่นระเบิด ซึ่งคลื่นที่เป็นผลจากการผสมผสานกันของคลื่นทั้งสองนี้จะเรียกว่าคลื่นมัคตามที่แสดงในรูปที่ 5-7

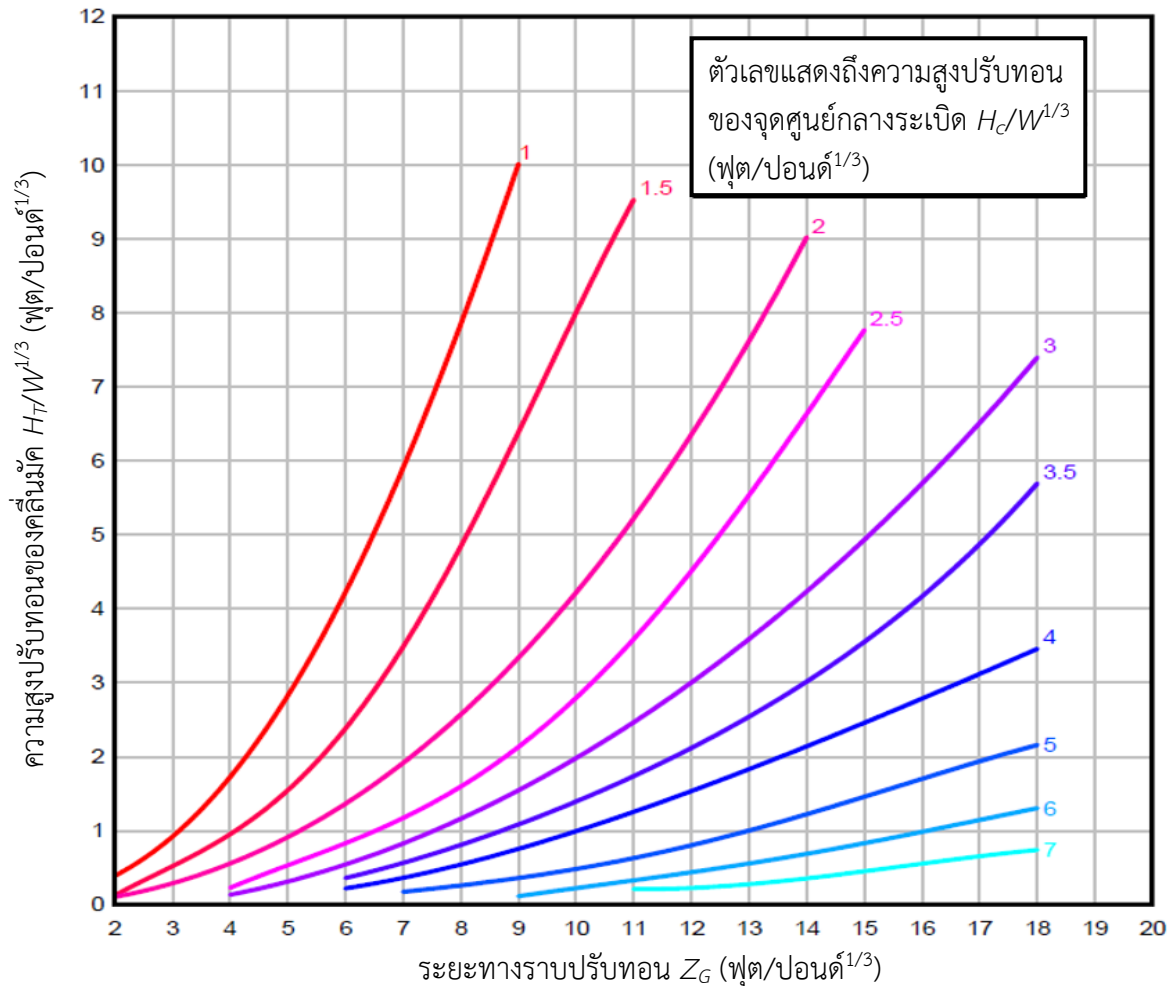


รูปที่ 5-7 ลักษณะคลื่นระเบิดของการระเบิดกลางอากาศ

ความสูงของคลื่นมัค H_T จะเพิ่มขึ้นเมื่อคลื่นระเบิดเคลื่อนที่ออกจากจุดศูนย์กลางระเบิดไปเรื่อยๆ โดยสามารถแสดงได้จากแนวจุดผสมผสานของคลื่นระเบิดโดยตรง คลื่นระเบิดสะท้อน และคลื่นมัคตามที่แสดงในรูปที่ 5-7 โครงสร้างจะถูกกระทำด้วยคลื่นมัคที่มีแรงดันสม่ำเสมอเมื่อ H_T มากกว่าความสูงของโครงสร้าง โดยค่า H_T สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความสูงปรับทอนของคลื่นมัค $H_T/W^{1/3}$ และระยะทางราบปรับทอน $Z_G = R_G/W^{1/3}$ สำหรับความสูงปรับทอนของจุดศูนย์กลางระเบิด $H_c/W^{1/3}$ ค่าต่างๆ ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 5-8 แต่ถ้า H_T มีค่าน้อยกว่าความสูงของโครงสร้าง แรงดันระเบิดที่กระทำที่ความสูงต่างๆ เหนือ H_T จะมีค่าไม่สม่ำเสมอและจะมีค่าน้อยกว่าแรงดันของคลื่นมัคเมื่อพิจารณาตามความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระเบิดและเวลา แต่สำหรับการออกแบบซึ่งโดยทั่วไปตำแหน่งของการระเบิดจะอยู่ห่างจากโครงสร้างพอสมควรทำให้แรงดันระเบิดที่กระทำบนโครงสร้างมีความสม่ำเสมอตลอดความสูงของโครงสร้าง

การหาขนาดของแรงดันระเบิดของคลื่นมัคจะเริ่มจากการหาค่าแรงดันสะท้อนสูงสุด ณ จุดที่คลื่นระเบิดมากระทบกับโครงสร้างอาคาร ซึ่งสามารถหาได้จากรูปที่ 5-5 โดยใช้ค่า $H_c/W^{1/3}$ สำหรับค่าระยะปรับทอนตั้งฉากและมุมตกกระทบ α ตามที่แสดงในรูปที่ 5-7 ส่วนขนาดของแรงดลสะท้อนสูงสุดของการระเบิดกลางอากาศนี้สามารถหาได้จากรูปที่ 5-6 เช่นเดียวกับการหาค่าแรงดันสะท้อนสูงสุด ซึ่งค่าแรงดันสะท้อนสูงสุดและแรงดลสะท้อนสูงสุดที่ได้มานี้จะถือเป็นค่าแรงดันโดยตรงสูงสุด P_{so} และแรงดลโดยตรง i_s ของคลื่นมัค จากนั้นจึงหาระยะปรับทอนที่สอดคล้องกับค่า P_{so} และ i_s จากรูปที่ 5-3 โดยระยะปรับทอนที่สอดคล้องกับค่า P_{so}

จะนำมาใช้ในการหาค่า P_r , P_{so} , $t_A/W^{1/3}$, U , $L_W/W^{1/3}$ และ $L_{\bar{W}}/W^{1/3}$ ในขณะที่ค่าระยะปรับทอนที่สอดคล้องกับ i_s จะนำมาใช้ในการหาค่า i_r , i_s , i_r , $t_o/W^{1/3}$ and $t_o/W^{1/3}$ ต่อไป

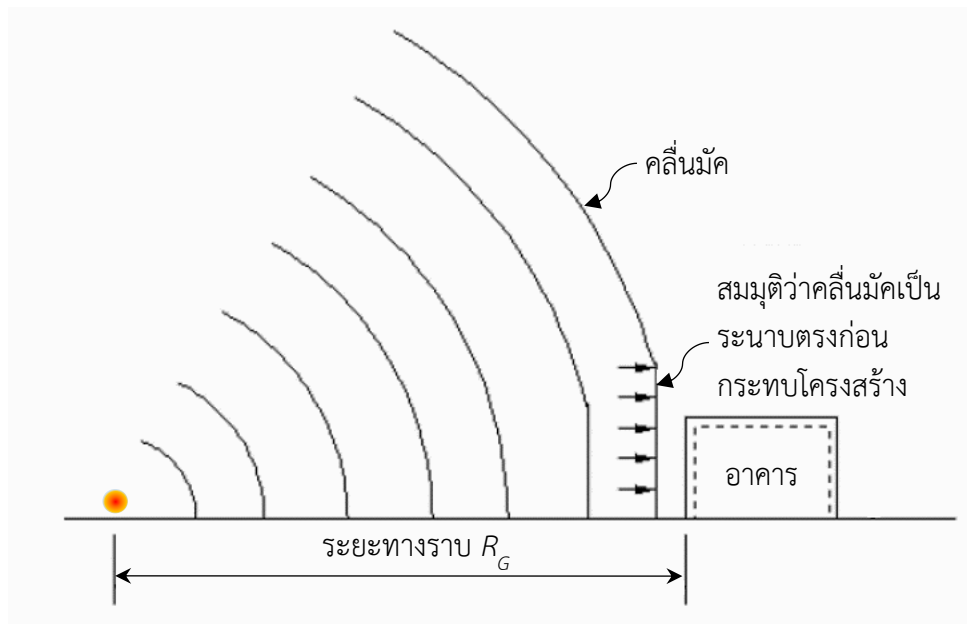


รูปที่ 5-8 ความสูงปรับทอนของคลิ่นม้ด

(ที่มา: *Unified Facilities Criteria: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions* (UFC 3-340-02))

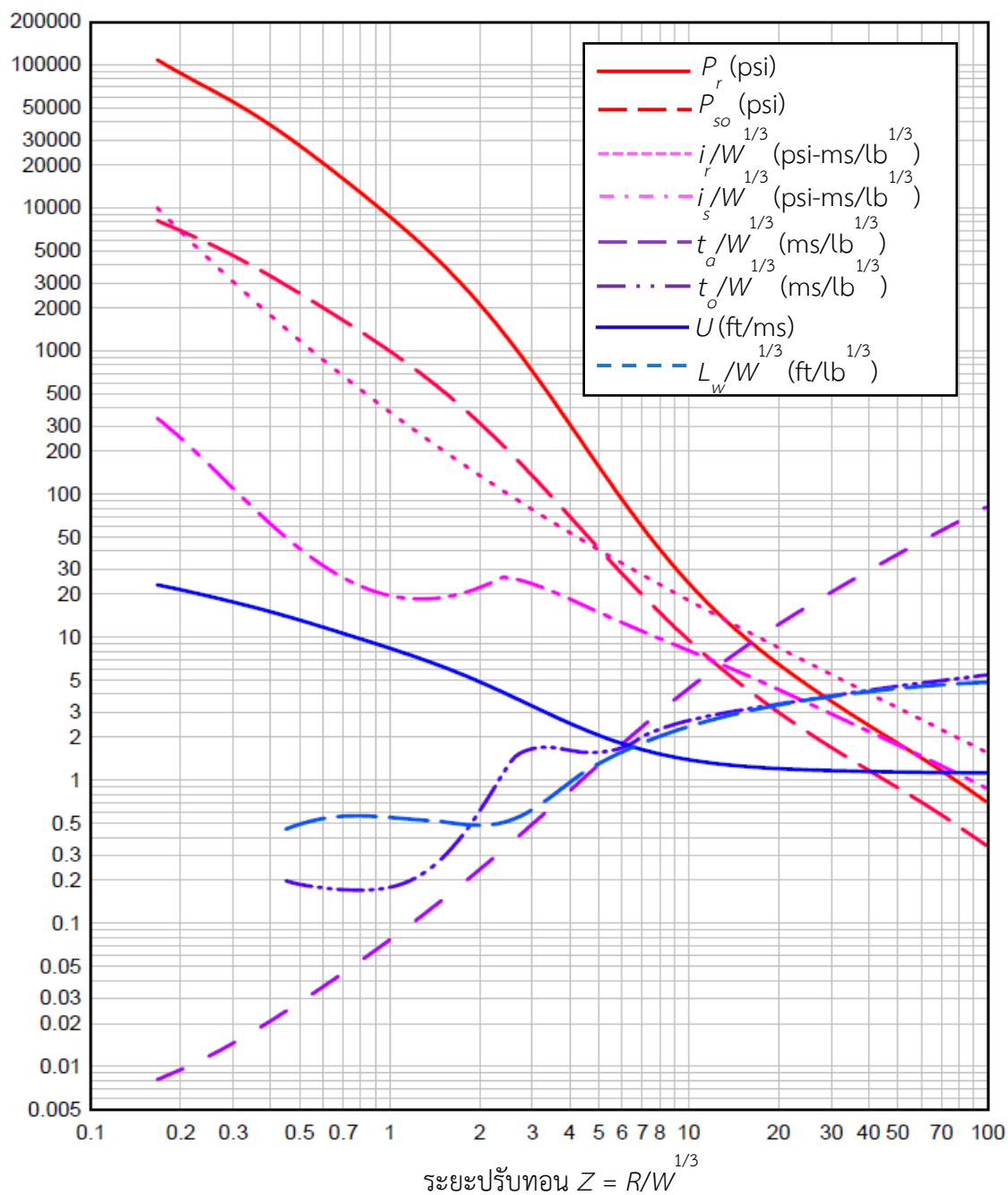
5.2.3 การระเบิดบนพื้น

ตามที่ได้อธิบายในหัวข้อ 4.2.1.3 การระเบิดที่เกิดใกล้พื้นหรือบนพื้นจะถือว่าการระเบิดบนพื้นซึ่งคลื่นระเบิดโดยตรงจะสะท้อนจากพื้นและเกิดการเสริมแรงซึ่งก่อให้เกิดคลื่นมัคทันทีเมื่อเกิดการระเบิด การระเบิดประเภทนี้จะแตกต่างกับการระเบิดกลางอากาศตรงที่คลื่นมัคที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นคลื่นลูกเดียวและเป็นรูปครึ่งทรงกลมเคลื่อนที่ออกจากจุดศูนย์กลางระเบิด ตามที่แสดงในรูปที่ 5-9

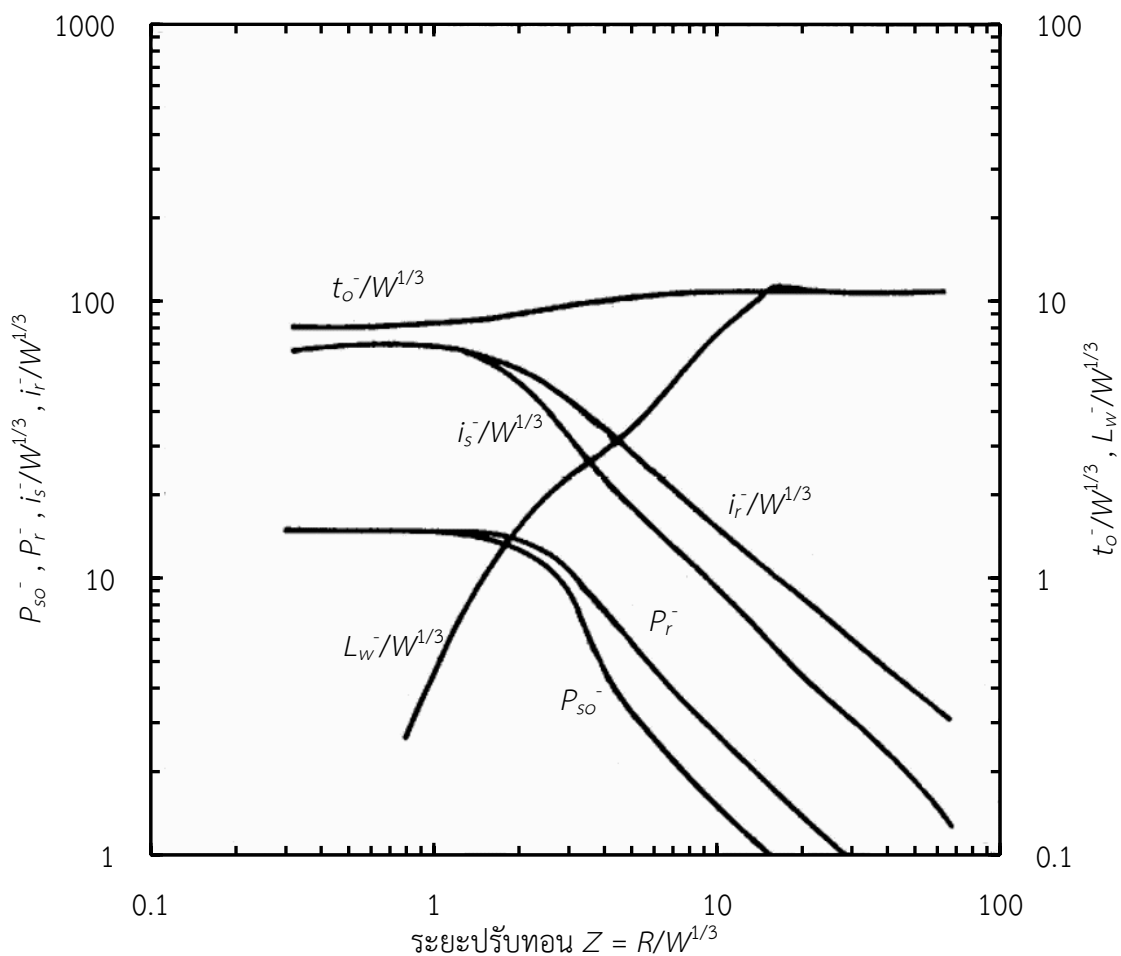


รูปที่ 5-9 การเกิดคลื่นระเบิดสะท้อนของการระเบิดบนพื้น

การหาค่าของตัวแปรแรงระเบิดต่างๆ ของการระเบิดบนพื้นนี้สามารถหาได้จากรูปที่ 5-10 สำหรับการระเบิดช่วงบวกและรูปที่ 5-11 สำหรับการระเบิดช่วงลบ ซึ่งจากการเปรียบเทียบตัวแปรเหล่านี้กับการระเบิดกลางอากาศแบบอิสระ (รูปที่ 5-3 และ 5-4) พบว่าที่ระยะและขนาดระเบิดเท่ากัน ตัวแปรแรงระเบิดทั้งหมดของการระเบิดบนพื้นจะมีค่ามากกว่าตัวแปรแรงระเบิดของการระเบิดกลางอากาศแบบอิสระ



รูปที่ 5-10 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแรงระเบิดช่วงบวกและระยะปรับทอนของการระเบิดบนพื้น
(ที่มา: *Unified Facilities Criteria: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*
(UFC 3-340-02))



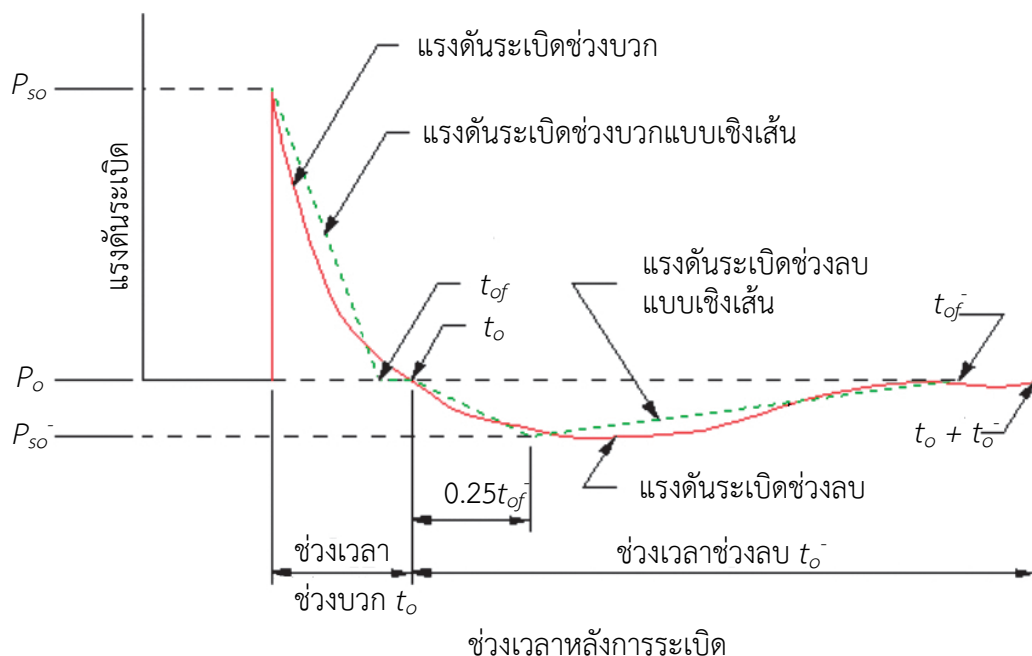
รูปที่ 5-11 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแรงระเบิดช่วงลบและระยะปรับทอนของการระเบิดบนพื้น
(ที่มา: *Unified Facilities Criteria: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*
(UFC 3-340-02))

5.3 การคำนวณแรงระเบิดที่กระทำต่อโครงสร้าง

5.3.1 พฤติกรรมของแรงระเบิดอย่างง่ายแบบเชิงเส้น (Simplified Linear Blast Load – Time Relationships)

แรงระเบิดที่กระทำต่อโครงสร้างจะเป็นผลเนื่องจากแรงดันระเบิดโดยตรงและแรงดันพลศาสตร์ (dynamic pressure) ซึ่งตามที่ได้อธิบายแล้วในหัวข้อ 4.3 แรงดันพลศาสตร์นี้เกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศที่อยู่ด้านหลังแนวคลื่นกระแทกด้านหน้า ก่อให้เกิดแรงดันบนผิววัตถุที่อยู่ในทิศทางเคลื่อนที่ของคลื่นระเบิด โดยในสภาพแวดล้อมที่เป็นอิสระขนาดของแรงดันพลศาสตร์นี้จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของมวลอากาศและความเร็วของอนุภาคมวลอากาศ (u) ซึ่งขนาดของแรงดันพลศาสตร์สูงสุด (q_o) ความหนาแน่นของมวลอากาศ และ u นี้สามารถหาได้จากค่าแรงดันระเบิดโดยตรงสูงสุด (P_{so}) โดยใช้ความสัมพันธ์ที่แสดงอยู่ในรูปที่ 4-3 หรือตามสมการ 4-1

นอกจากนี้แล้วในการออกแบบโครงสร้างต้านทานแรงระเบิดยังจำเป็นต้องทราบอัตราการเปลี่ยนแปลงหรือการลดลงของทั้งแรงดันระเบิดโดยตรงและแรงดันพลศาสตร์เมื่อเทียบกับเวลาด้วย เนื่องจากผลตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แรงระเบิดจะขึ้นอยู่กับขนาดสูงสุดของแรงที่กระทำและช่วงเวลาที่โครงสร้างถูกแรงกระทำ ซึ่งตามที่ได้อธิบายถึงพฤติกรรมของคลื่นระเบิดในหัวข้อ 4.3 และรูปที่ 4-2 แรงดันระเบิดโดยตรงจะเริ่มจากการเพิ่มของแรงดันอย่างทันทีทันใดจนถึงค่าสูงสุดแล้วลดลงไปเรื่อยๆ จนแรงดันมีค่าเท่าแรงดันบรรยากาศซึ่งแรงดันระเบิดช่วงนี้จะเรียกว่าแรงดันระเบิดช่วงบวก จากนั้นแรงดันจะลดต่ำกว่าแรงดันบรรยากาศซึ่งจะเรียกว่าแรงดันระเบิดช่วงลบ และเมื่อเวลาผ่านไปเรื่อยๆ แรงดันระเบิดจะเพิ่มกลับมาเท่ากับแรงดันบรรยากาศจนเกิดสมดุลของแรงดัน แต่เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระเบิดและเวลาตามที่แสดงในรูปที่ 4-2 จะเป็นแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear) จึงทำให้ยากต่อการนำมาใช้ในการออกแบบ ดังนั้นจึงได้มีการเสนอความสัมพันธ์อย่างง่ายแบบเชิงเส้น (linear) ตามที่แสดงอยู่ในรูปที่ 5-12 เพื่อให้ผู้ออกแบบสามารถนำความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระเบิดและเวลานี้ไปใช้ในการวิเคราะห์หาผลตอบสนองของโครงสร้างต่อไปได้



รูปที่ 5-12 ความสัมพันธ์อย่างง่ายแบบเชิงเส้นของแรงดันระเบิดเมื่อเทียบกับเวลา

โดยในความสัมพันธ์อย่างง่ายแบบเชิงเส้นของแรงดันระเบิด อัตราการลดลงของแรงดันระเบิดโดยตรงทั้งช่วงบวกและช่วงลบจะสมมติว่ามีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมเทียบเท่าที่มีค่าสูงสุดเท่ากับค่าแรงดันระเบิดโดยตรงสูงสุดและมีค่าแรงดล (พื้นที่ใต้กราฟ) เท่ากับค่าแรงดลจริงซึ่งหาได้จากรูปที่ 5-3 หรือ 5-10 โดยช่วงเวลาเทียบเท่าช่วงบวก (t_{of}) ตามที่แสดงในรูปที่ 5-12 นี้สามารถคำนวณได้ตามสมการ 5-1 โดยใช้ค่าแรงดลช่วงบวก (i) และค่าแรงดันระเบิดโดยตรงสูงสุดช่วงบวก (P_{so})

$$t_{of} = 2i/P_{so} \quad \text{มิลลิวินาที} \quad (\text{สมการ 5-1})$$

สมการ 5-1 นั้นนอกจากจะใช้กับแรงดันระเบิดโดยตรงแล้วยังสามารถใช้ได้กับแรงดันระเบิดสะท้อนอีกด้วย แต่จะใช้ค่าแรงดันระเบิดสะท้อนสูงสุด (P_r) และค่าแรงดลสะท้อน (i_r) แทน ซึ่งค่า t_{of} ที่ได้จะใกล้เคียงกัน ส่วนช่วงเวลาที่ยังแรงดันพลศาสตร์กระทำกับโครงสร้างจะสมมติว่าเท่ากับ t_{of} เช่นกัน

ส่วนการหาความสัมพันธ์อย่างง่ายแบบเชิงเส้นระหว่างแรงดันระเบิดช่วงลบและเวลาจะใช้วิธีเดียวกับแรงดันช่วงบวก โดยช่วงเวลาเทียบเท่าช่วงลบ (t_{of}) ตามที่แสดงในรูปที่ 5-12 สามารถคำนวณได้จากสมการ 5-2 แต่ค่าแรงดันสูงสุดช่วงลบจะเกิดขึ้นที่ระยะเวลาเท่ากับ 0.25 เท่าของ t_{of} ซึ่งแตกต่างจากแรงดันช่วงบวกที่กำหนดให้แรงดันสูงสุดเกิดขึ้นทันที ($t_{of} = 0$)

$$t_{of} = 2i^- / P_{so}^- \quad \text{มิลลิวินาที} \quad (\text{สมการ 5-2})$$

โดย i^- และ P_{so}^- เป็นค่าแรงดลและค่าแรงดันระเบิดโดยตรงสูงสุดในช่วงลบ และในลักษณะเช่นเดียวกับช่วงบวก ค่าแรงดลสะท้อน (i_r^-) และแรงดันระเบิดสะท้อนช่วงลบ (P_r^-) สามารถนำมาใช้แทนค่า i^- และ P_{so}^- ในสมการ 5-2 เพื่อหาค่า t_{of}^- ซึ่งจะได้ค่าใกล้เคียงกัน ส่วนผลของแรงดันพลศาสตร์ในช่วงลบนี้นี้จะไม่นำมาคิด

จากรูปที่ 5-12 จะสังเกตได้ว่าในกรณีของความสัมพันธ์อย่างง่ายแบบเชิงเส้น ช่วงเวลาเทียบเท่าช่วงบวก (t_{of}) จะมีค่าน้อยกว่าช่วงเวลาช่วงบวกจริงๆ (t_o) จึงทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของแรงดันระเบิดช่วงบวกและช่วงลบ ซึ่งในการวิเคราะห์โครงสร้าง ความไม่ต่อเนื่องของช่วงเวลานี้จะยังคงมีไว้เพื่อให้สอดคล้องกับช่วงเวลาจริงๆ ที่แรงกระทำในแต่ละช่วงเริ่มต้นกระทำต่อโครงสร้าง

5.3.2 แรงระเบิดที่กระทำต่อโครงสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยมเหนือพื้นดินและไม่มีช่องเปิด

แรงระเบิดที่กระทำบนโครงสร้างเหนือพื้นดินสามารถแบ่งได้ 4 ประเภทได้แก่ (1) แรงที่เป็นผลจากแรงดันระเบิดโดยตรง (2) แรงที่เกิดจากแรงดันพลศาสตร์ (3) แรงที่เป็นผลจากแรงดันระเบิดสะท้อน และ (4) แรงดันที่เกิดจากแรงดันระเบิดช่วงลบ โดยความสำคัญของแรงในแต่ละประเภทนั้นจะขึ้นอยู่กับรูปทรงและขนาดของโครงสร้าง ทิศทางการวางตัวของโครงสร้าง และส่วนของโครงสร้างที่แรงกระทำ เช่น การออกแบบผนังด้านหน้าจะพิจารณาแรงที่ผลจากแรงดันระเบิดสะท้อนเป็นหลัก

โดยทั่วไปแล้วปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระเบิดโดยตรงและโครงสร้างจะมีความซับซ้อนมาก ดังนั้นเพื่อเป็นการลดความซับซ้อนในการคิดแรงกระทำที่มีต่อโครงสร้างอาคารจึงสมมติให้ (1) โครงสร้างมีรูปทรงสี่เหลี่ยม (2) แรงดันระเบิดโดยตรงมีค่าไม่เกิน 1,378 กิโลปาสกาล (200 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) (3) โครงสร้างรองรับแรงดันระเบิดที่เป็นผลจากคลื่นมหัพภาคหรือการระเบิดบนพื้นและ (4) ระบายของคลื่นมหัพภาคมีความสูงมากกว่าความสูงของอาคาร

5.3.2.1 แรงกระทำที่ผนังด้านหน้า

สำหรับโครงสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยมเหนือพื้นดินและแรงดันระเบิดอยู่ในช่วงแรงดันต่ำสำหรับการออกแบบ (low-pressure design range) การเปลี่ยนแปลงของแรงดันระเบิดเมื่อเทียบกับเวลาที่ผนังด้านซึ่งหันหน้าเข้าหาจุดศูนย์กลางระเบิดและตั้งฉากกับทิศทางของคลื่นกระแทกแนวหน้าจะแสดงอยู่ในรูปที่ 5-13 ซึ่งทันทีที่คลื่นกระแทกด้านหน้ากระทบกับผนัง แรงดันจะเพิ่มขึ้นทันทีจนถึงค่าแรงดันระเบิดสะท้อน (P_r) โดยแรงดันระเบิดสะท้อนนี้จะมีผลต่อโครงสร้างเป็นระยะเวลา t_c ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ 5-3

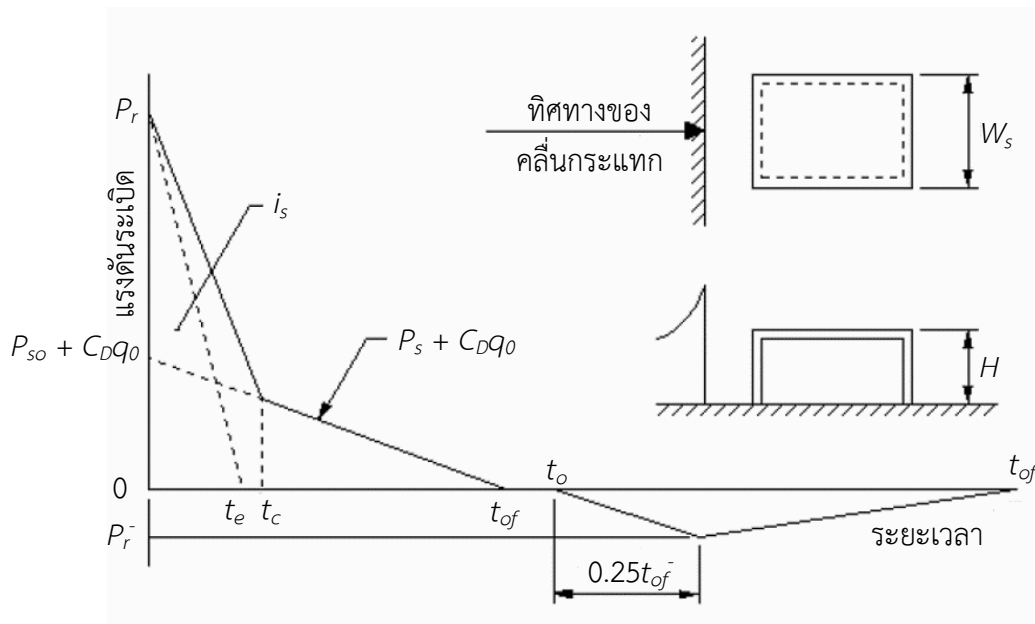
$$t_c = \frac{4S}{(1+R)C_r} \quad \text{มิลลิวินาที} \quad (\text{สมการ 5-3})$$

โดย

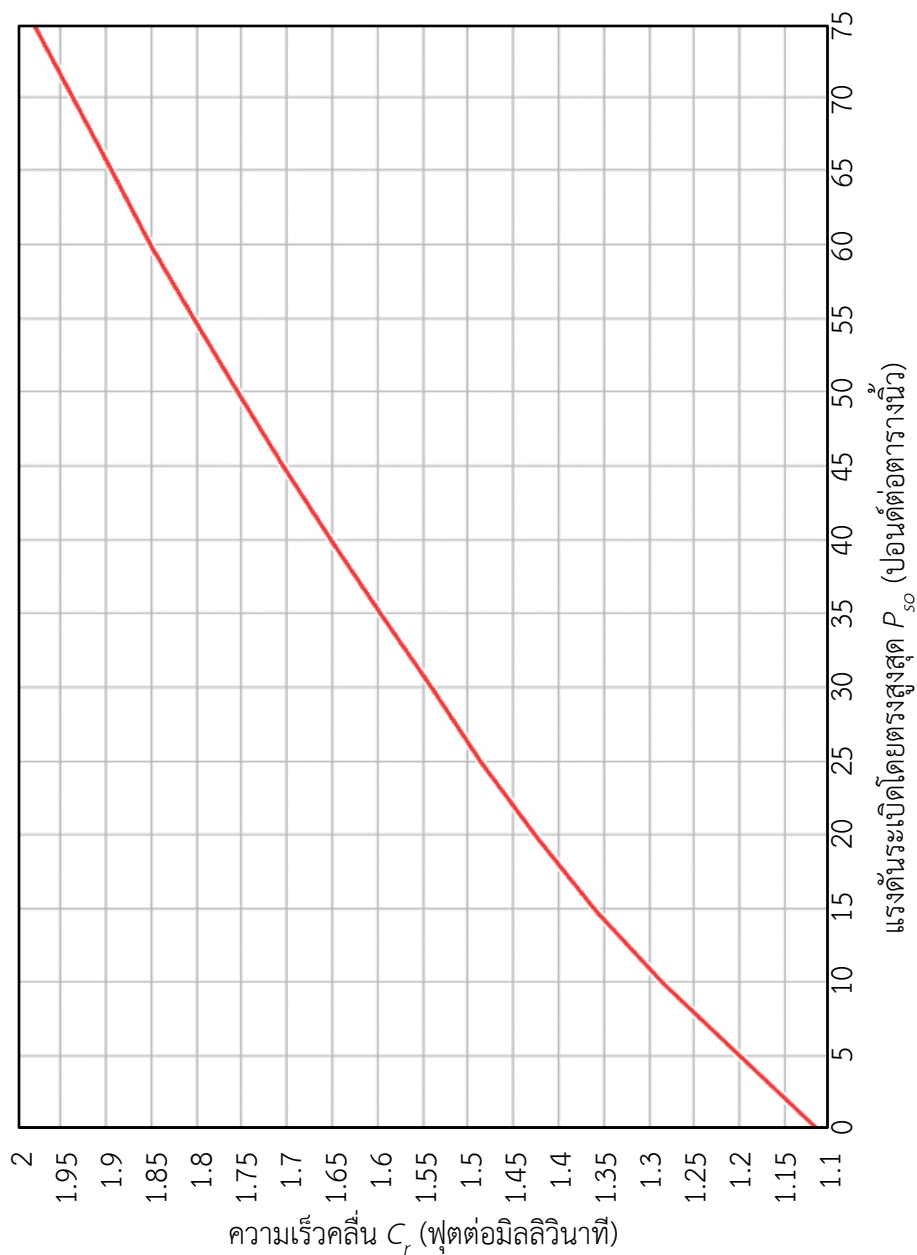
S = ค่าที่น้อยกว่าระหว่างความสูงและความกว้างของอาคาร (รูปที่ 5-13) (ฟุต)

R = อัตราส่วนระหว่าง S/G โดย G คือค่าที่มากกว่าระหว่างความสูงและความกว้างของอาคาร (ฟุต)

C_r = ค่าความเร็วของคลื่นเสียงในช่วงที่เกิดแรงดันสะท้อน หาได้จากรูปที่ 5-14



รูปที่ 5-13 แรงระเบิดที่กระทำที่ผนังด้านหน้า



รูปที่ 5-14 ความเร็วของคลื่นเสียงในช่วงที่เกิดแรงดันระเบิดสะท้อน

(ที่มา: *Unified Facilities Criteria: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions* (UFC 3-340-02))

ส่วนแรงดันระเบิด (P) ที่กระทำที่ผนังด้านหน้าหลังจากช่วงเวลา t_c จะเป็นผลรวมของแรงดันระเบิดโดยตรง (P_s) กับแรงดันหน่วง ($C_D q_0$) ตามที่แสดงในสมการ 5-4 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงหน่วง (C_D) นี้จะกำหนดให้เท่ากับ 1.0

$$P = P_s + C_D q_0 \quad \text{ปอนด์ต่อตารางนิ้ว} \quad (\text{สมการ 5-4})$$

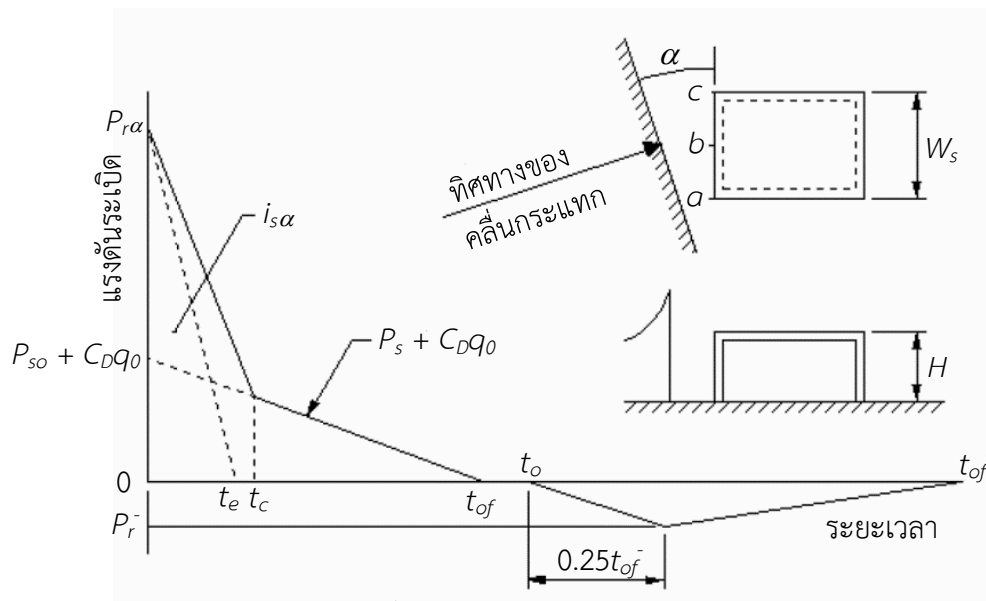
แต่หากเป็นการระเบิดที่อยู่ในช่วงแรงดันสูงมาก (higher-pressure design range) ค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและเวลาที่ได้จากวิธีการข้างต้นนี้อาจไม่แม่นยำเนื่องจากผลของช่วงเวลาที่สูงมากของแรงดันระเบิด ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องซึ่งสามารถทำได้โดยเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแรงดันและเวลาที่สร้างจากผลของแรงดลสะท้อนเทียบเท่า (i_s) (เส้นประในรูปที่ 5-13) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการ 5-5 โดยค่าช่วงเวลาเทียบเท่าของแรงดันสะท้อนช่วงบวก (t_e) สามารถคำนวณจากสมการ 5-6

$$i_s = 0.5(P_r - P_s)t_c + 0.5P_s t_o \quad \text{ปอนด์ต่อตารางนิ้ว-มิลลิวินาที} \quad (\text{สมการ 5-5})$$

$$t_e = 2i_s / P_r \quad \text{มิลลิวินาที} \quad (\text{สมการ 5-6})$$

โดย P_r คือค่าแรงดันระเบิดสะท้อนสูงสุดซึ่งหาได้จากรูปที่ 5-10 ซึ่งความสัมพันธ์ที่จะนำมาใช้ในการคำนวณแรงระเบิดที่กระทำต่อผนังด้านหน้าจะเป็นความสัมพันธ์ที่ให้ค่าแรงดล (พื้นที่ใต้กราฟ) ที่น้อยที่สุด

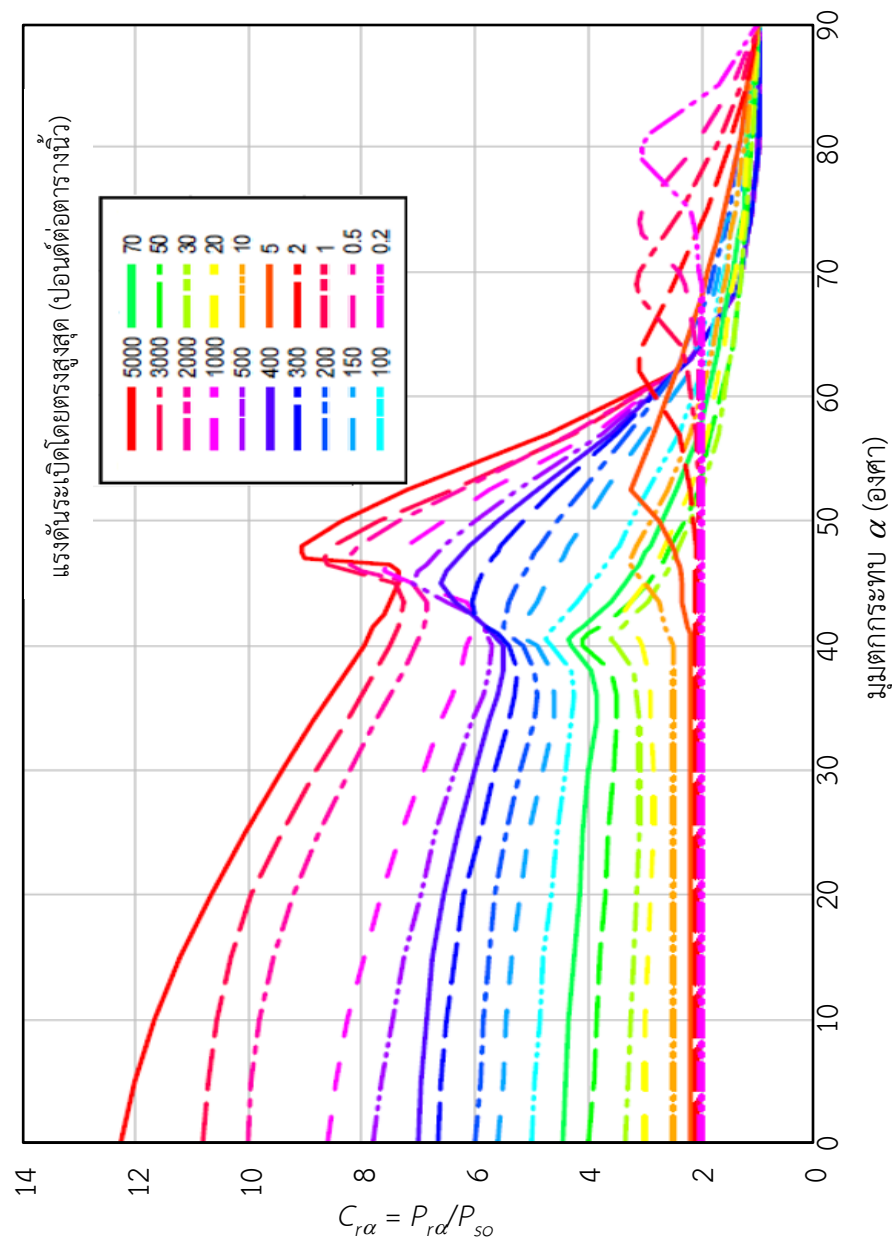
ในกรณีที่คลื่นกระแทกแนวหน้ามีทิศทางการกระแทกไม่ตั้งฉากกับผนังด้านหน้าตามที่แสดงในรูปที่ 5-15 ค่าแรงดันสูงสุดจะขึ้นอยู่กับแรงดันระเบิดโดยตรงและมุมกระแทก โดยมุมกระแทก α จะวัดระหว่างระนาบของคลื่นแนวหน้ากับแนวผนัง



รูปที่ 5-15 แรงดันระเบิดเมื่อมุมตกกระทบไม่ตั้งฉากกับแนวผนัง

ซึ่งค่าแรงดันสะท้อนสูงสุดสำหรับกรณีนี้สามารถคำนวณได้ตามสมการ 5-7 โดยค่า $C_r \alpha$ สามารถหาได้จากรูปที่ 5-16

$$P_{r\alpha} = C_r \alpha P_{s0} \quad \text{ปอนด์ต่อตารางนิ้ว} \quad (\text{สมการ 5-7})$$



รูปที่ 5-16 สัมประสิทธิ์แรงดันสะท้อนสำหรับมุมตกกระทบค่าต่างๆ (C_{ra})

(ที่มา: *Unified Facilities Criteria: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions* (UFC 3-340-02))

ในการทำงานเดียวกันช่วงเวลาของแรงดันระเบิดสะท้อนช่วงบวกเทียบเท่าเมื่อมุมกระทบมากกว่าศูนย์ สามารถคำนวณได้ตามสมการ 5-8

$$t_e = 2i_s\alpha / P_{ra} \quad \text{มิลลิวินาที} \quad (\text{สมการ 5-8})$$

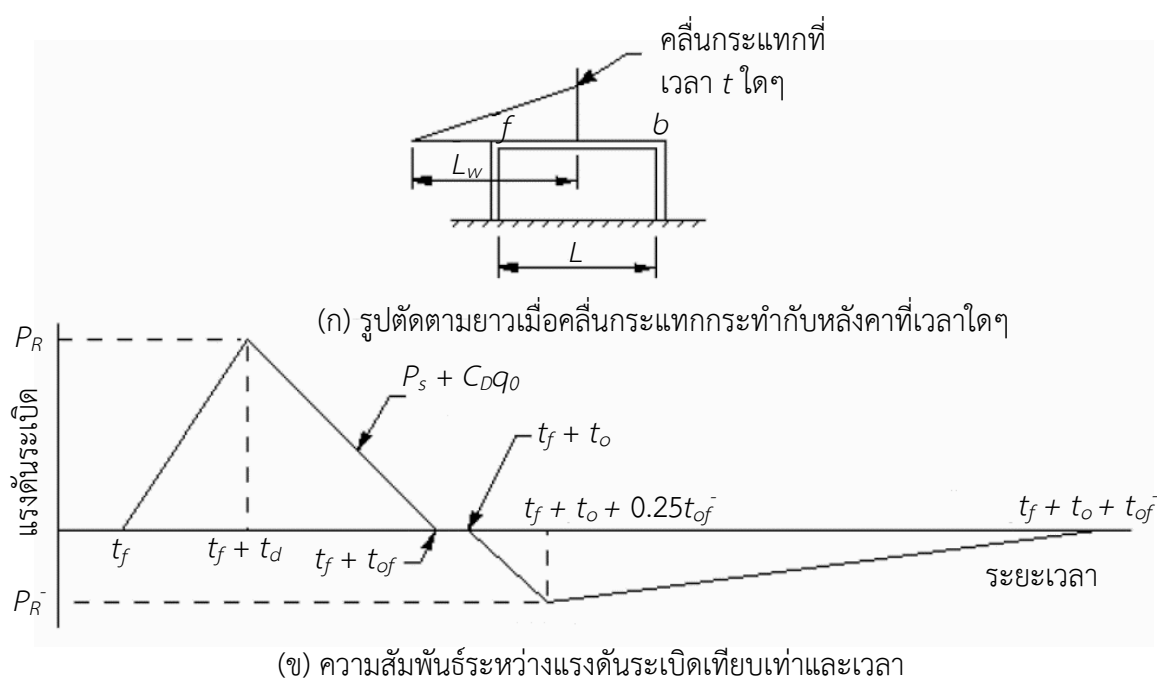
ส่วนค่าแรงดลสะท้อนสูงสุดเทียบเท่าเมื่อมุมกระทบมากกว่าศูนย์ ($i_s\alpha$) สามารถหาได้จากสมการ 5-9

$$i_{s\alpha} = 0.5(P_{r\alpha} - P_s)t_c + 0.5P_s t_o \quad \text{มิลลิวินาที} \quad (\text{สมการ 5-9})$$

โดยทั่วไปการคิดแรงระเบิดที่กระทำที่ผนังด้านหน้าจะคิดเฉพาะแรงดันระเบิดช่วงบวกเนื่องจากแรงดันระเบิดช่วงลบมีผลต่อการออกแบบโครงสร้างน้อยมาก แต่ในการหาผลตอบแทนทั้งหมดของโครงสร้างจะพิจารณาผลเนื่องจากแรงดันระเบิดช่วงลบด้วย โดยค่าแรงดันระเบิดสะท้อนและแรงดลสะท้อนของแรงดันระเบิดช่วงลบสามารถหาได้จากรูปที่ 5-11 ส่วนช่วงเวลาที่แรงดันมีค่าสูงสุด ($0.25t_{of}$) และช่วงเวลาของแรงดันช่วงลบ (t_{of}) สามารถคำนวณด้วยวิธีที่อธิบายในหัวข้อ 3.4.1

5.3.2.2 แรงกระทำที่หลังคาหรือผนังด้านข้าง

ในขณะที่คลื่นกระเปิดเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างอาคาร แรงดันกระเปิดบางส่วนจะกระทำที่หลังคาและผนังด้านข้าง โดยแรงดันจะมีค่าเท่ากับแรงดันกระเปิดโดยตรงหักลบด้วยค่าแรงดันหน่วง (negative drag pressure) ส่วนขนาดพื้นที่ที่รองรับแรงดันกระเปิดที่เวลาใดๆ นั้นจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของคลื่นกระแตกด้านหน้าซึ่งพิจารณาจากความยาวของคลื่นกระเปิดทั้งช่วงบวกและช่วงลบ (L_w และ L_w^-) ณ เวลานั้นๆ (รูปที่ 5-17 (ก)) โดยที่ความยาวของคลื่นกระเปิดคือระยะทางที่คลื่นกระแตกด้านหน้าเคลื่อนที่ไปได้ในช่วงเวลาที่แรงดันกระเปิดกระทำกับโครงสร้างซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 5-10 และเนื่องจากหลังคาและผนังด้านข้างอยู่ในทิศทางขนานกับการเคลื่อนที่ของคลื่นกระเปิด ค่าแรงดันกระเปิดจึงมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาและตำแหน่งต่างๆ บนผิวหลังคาหรือผนังด้านข้าง จึงทำให้การหาผลรวมของแรงดันกระเปิดที่กระทำบนผิวหลังคาและผนังด้านข้างอย่างถูกต้องจำเป็นต้องใช้การวิเคราะห์แบบทีละขั้นตอน (step-by-step) ในการหาการกระจายตัวของแรงดันกระเปิด แต่เพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบโครงสร้างจะสมมุติให้การกระจายตัวของแรงดันกระเปิดที่เวลาใดๆ มีความสม่ำเสมอตลอดพื้นที่ผิว โดยความสัมพันธ์ของแรงดันกระเปิดเทียบเท่านี้กับเวลาจะแสดงอยู่ในรูปที่ 5-17 (ข)



รูปที่ 5-17 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันระเบิดบนพื้นหลังคาและผนังด้านข้าง

$$L_w \text{ (หรือ } L_w^-) = U \times t_o \text{ (หรือ } t_o^-) \text{ ฟุต} \quad (\text{สมการ 5-10})$$

โดย U คือความเร็วคลื่นกระแทกหน่วยเป็นฟุตต่อมิลลิวินาที และ t_o และ t_o^- คือช่วงเวลาที่แรงดันระเบิดช่วงบวกและช่วงลบหน่วยเป็นมิลลิวินาทีตามลำดับ ซึ่งตัวแปรเหล่านี้หาได้จากรูปที่ 5-10 และ 5-11

ตามรูปที่ 5-17 (ก) เมื่อคลื่นกระแทกเดินทางมาถึงจุดเริ่มต้นของโครงสร้างหลังคาหรือผนังด้านข้าง (จุด f) แรงดันระเบิดเทียบเท่าจะเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นจากเวลา t_f จนถึงจุดที่แรงดันระเบิดเทียบเท่ามีค่าสูงสุด (จุด d) ที่เวลา t_d จากนั้นแรงดันจะเริ่มลดลงไปเรื่อยจนเท่ากับศูนย์เมื่อแรงดันระเบิดที่จุด b มีค่าเท่ากับศูนย์ที่เวลา t_{of} และในขณะที่คลื่นกระแทกเคลื่อนที่ผ่านหลังคา ความยาวคลื่นทั้งช่วงบวกและช่วงลบ (L_w และ L_w^-) จะเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ

ในการหาค่าแรงดันระเบิดเทียบเท่าสูงสุดบนหลังคาหรือผนังด้านข้างทั้งช่วงบวกและช่วงลบ (P_R และ P_R^-) ตามรูปที่ 5-17 (ข) สามารถคำนวณได้จากสมการ 5-11 โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงเทียบเท่า C_E สามารถหาได้จากรูปที่ 5-18 ส่วนค่าช่วงเวลาเทียบเท่าที่แรงดันมีค่าสูงสุด (scaled rise time หรือ t_d) และช่วงเวลาที่แรงดันระเบิดกระทำกับโครงสร้างทั้งช่วงบวกและช่วงลบ (t_{of} และ t_{of}^-) สามารถหาได้จากรูปที่ 5-19 และ 5-20 ตามลำดับ

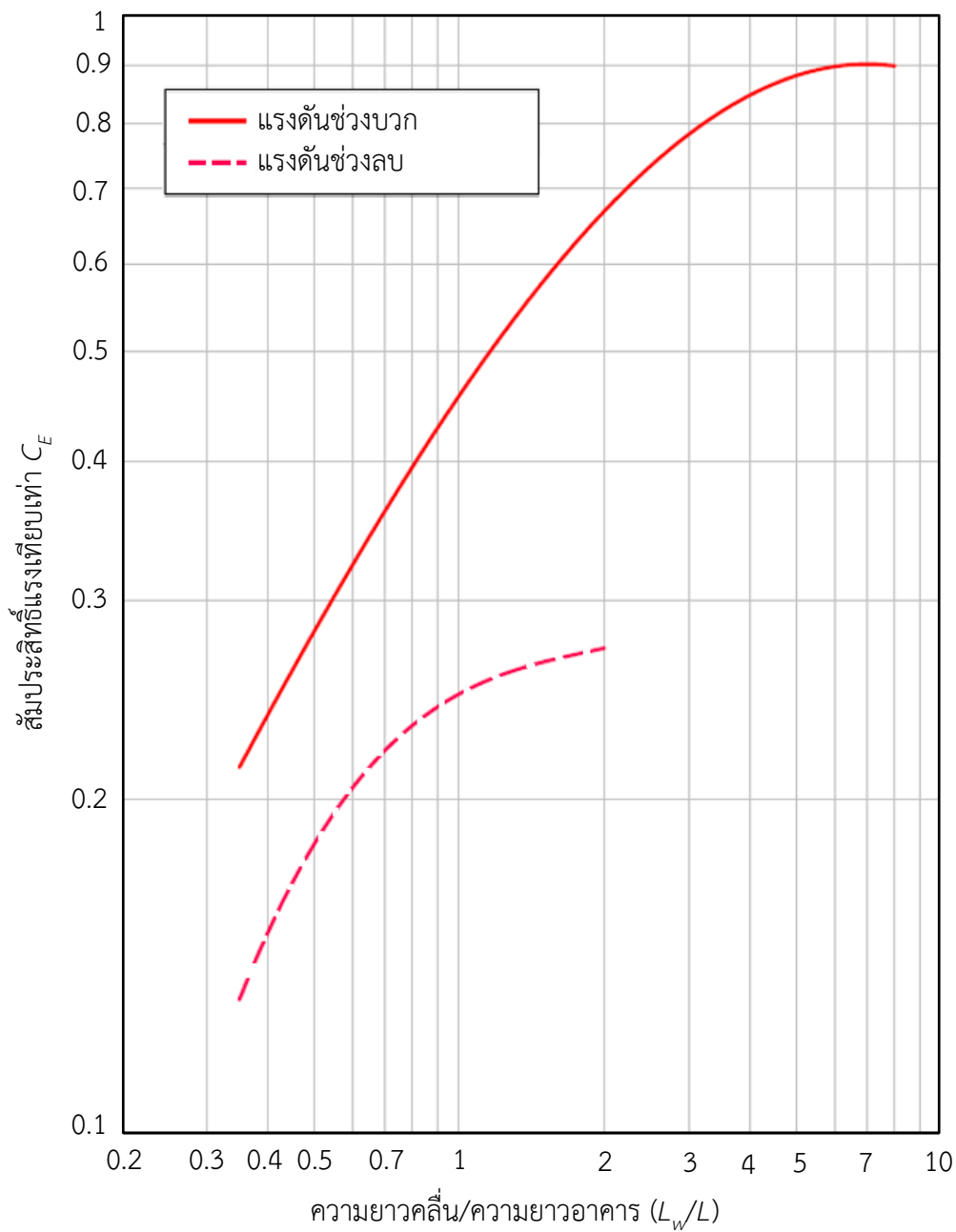
$$P_R = C_E P_{sof} + C_D q_{of} \quad \text{ปอนด์ต่อตารางนิ้ว} \quad (\text{สมการ 5-11})$$

โดย P_{sof} คือค่าแรงดันระเบิดโดยตรงสูงสุด ณ จุด f และ q_{of} คือค่าแรงดันพลศาสตร์ซึ่งหาได้จากรูปที่ 4-3 หรือ สมการ 4-1 ส่วนค่าสัมประสิทธิ์แรงหน่วง C_D สำหรับหลังคาและผนังด้านข้างในแต่ละช่วงแรงดันพลศาสตร์ได้แสดงไว้ในตาราง 5-1

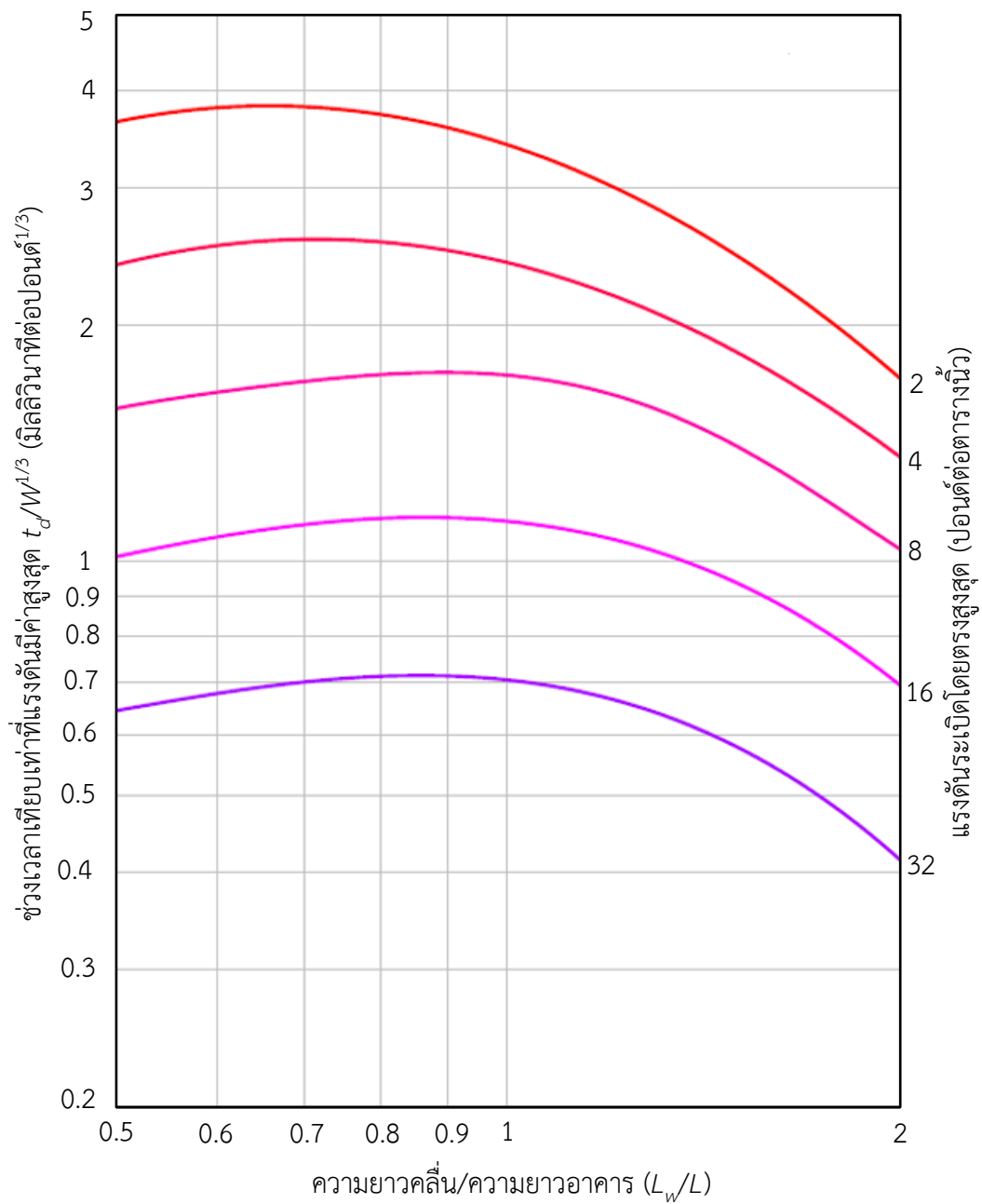
ในการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างอาคารจะพิจารณาแรงกระทำที่เป็นผลมาจากแรงดันระเบิดช่วงบวกเท่านั้น แต่หากต้องการหาผลรวมของผลตอบสนองของโครงสร้างจะต้องนำผลจากแรงดันระเบิดช่วงลบมาพิจารณาด้วย ซึ่งค่าแรงดันระเบิดเทียบเท่าสูงสุดช่วงลบที่กระทำบนพื้นผิวหลังคาและผนังด้านข้างสามารถหาได้โดยใช้วิธีเดียวกับการหาแรงดันระเบิดเทียบเท่าช่วงบวก ยกเว้นค่าช่วงเวลาที่แรงดันช่วงลบมีค่าสูงสุดจะเท่ากับ $0.25t_{of}$ ตามที่แสดงในรูปที่ 5-17

ตาราง 5-1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงหน่วง C_D สำหรับหลังคาและผนังด้านข้าง

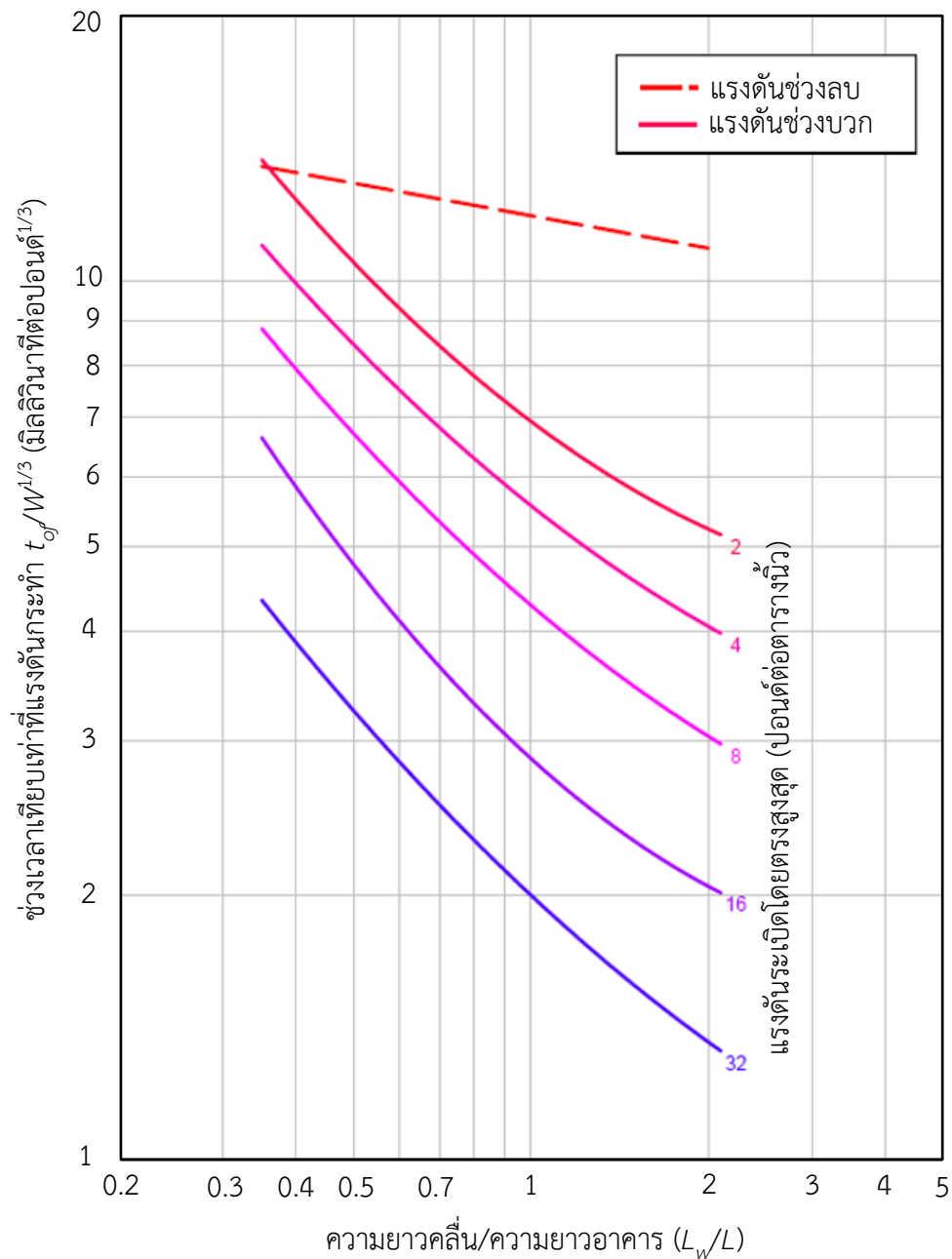
ค่าแรงดันพลศาสตร์สูงสุด (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	ค่าสัมประสิทธิ์ C_D
0-25	-0.40
25-50	-0.30
50-130	-0.20



รูปที่ 5-18 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเทียบเท่า (C_E) สำหรับหลังคาและผนังด้านข้าง
(ที่มา: *Unified Facilities Criteria: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*
(UFC 3-340-02))



รูปที่ 5-19 ช่วงเวลาเทียบเท่าที่แรงดันระเบิดมีค่าสูงสุด (สำหรับหลังคาและผนังด้านข้าง)
(ที่มา: *Unified Facilities Criteria: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*
(UFC 3-340-02))

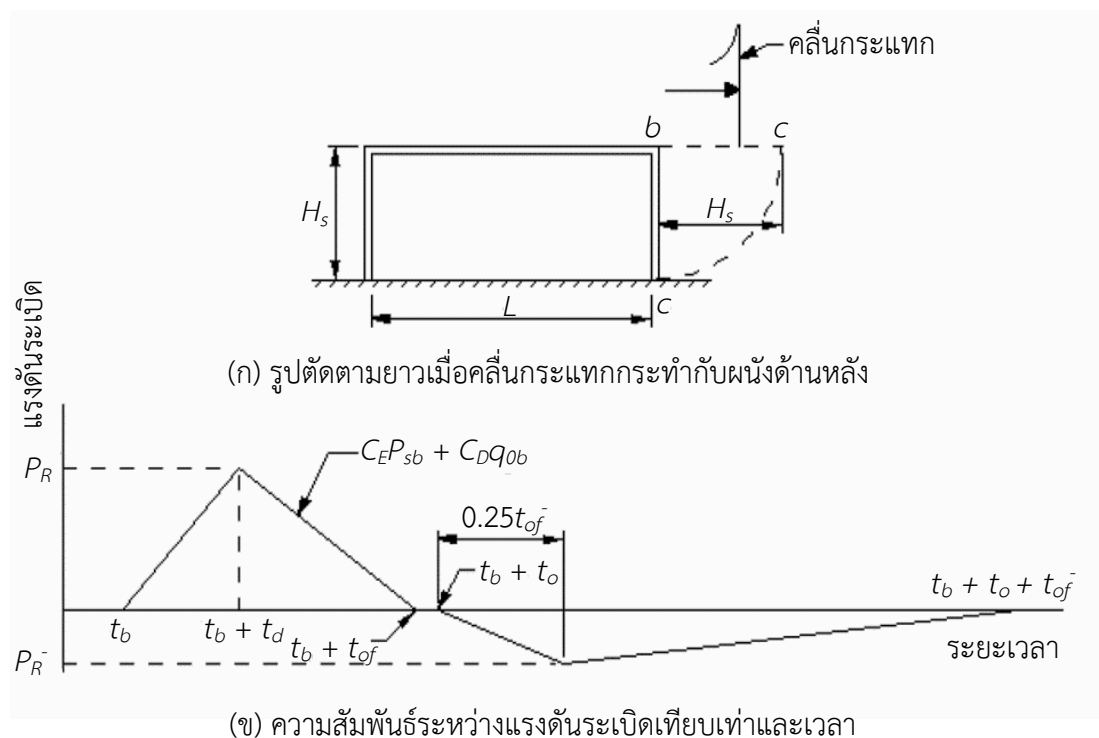


รูปที่ 5-20 ช่วงเวลาเทียบเท่าที่แรงดันระเบิดกระทำบนหลังคาและผนังด้านข้าง
(ที่มา: *Unified Facilities Criteria: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions* (UFC 3-340-02))

ในกรณีที่โครงสร้างอยู่ในตำแหน่งที่มุมตกกระทบของคลื่นกระแทกด้านหน้ามีค่ามากกว่าศูนย์ การหาค่าตัวแปรแรงระเบิดเหล่านี้สำหรับหลังคาและผนังด้านข้างจะใช้วิธีคำนวณเดียวกับวิธีที่ใช้สำหรับผนังด้านหน้า ในกรณีที่มุมตกกระทบมีค่ามากกว่าศูนย์เช่นกัน

5.3.2.3 แรงกระทำที่ผนังด้านหลัง

ในกรณีที่คลื่นกระแทกด้านหน้าเคลื่อนที่ผ่านขอบหลังคาหรือผนังด้านข้างด้านหลัง คลื่นระเบิดจะขยายตัวสู่ผนังด้านหลังและเกิดการผสานระหว่างคลื่นที่เคลื่อนที่มาจากขอบหลังคาและขอบผนังด้านข้าง ซึ่งตำแหน่งการผสานของคลื่นจะเกิดบริเวณจุดกึ่งกลางของผนังด้านหลัง หลังจากนั้นคลื่นระเบิดนี้จะมีเสริมแรงขึ้นอีกเมื่อผสานกับคลื่นระเบิดที่สะท้อนกลับมาเมื่อกระทบพื้นดินที่อยู่ด้านหลัง แต่ในการคำนวณหาค่าแรงระเบิดที่กระทำที่ผนังด้านหลังนี้จะพิจารณาเช่นเดียวกับการหาค่าแรงดันระเบิดที่กระทำที่หลังคาและผนังด้านข้าง เนื่องจากผนังด้านหลังจะหันหน้าออกจากจุดศูนย์กลางระเบิดตามที่แสดงในรูปที่ 5-21 (ก) จึงไม่เกิดการเสริมแรงของคลื่นระเบิดเนื่องจากการสะท้อนกลับของคลื่นซึ่งมีลักษณะคล้ายกับหลังคาและผนังด้านข้างที่มีทิศทางขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นกระแทก แต่ค่าแรงดันระเบิดโดยตรงสูงสุดที่จะนำมาใช้การคำนวณหาค่าแรงดันระเบิดเทียบเท่าสูงสุดช่วงบวกและช่วงลบ (P_R และ P_R^-) ตามที่แสดงในรูปที่ 5-21 (ข) จะเป็นค่าแรงดันระเบิดโดยตรงสูงสุดที่ขอบหลังคาด้านหลัง ณ ตำแหน่ง b (P_{sob}) แทนแรงดันระเบิดโดยตรงสูงสุด ณ ตำแหน่ง f (P_{sof}) นอกจากนี้การหาค่าตัวคูณแรงเทียบเท่า (C_E) จะใช้ค่าความยาวคลื่น ณ ตำแหน่ง b และความสูงของผนังด้านหลัง (H_s) ตามที่แสดงในรูปที่ 5-21 (ข) แทนความยาวคลื่น ณ ตำแหน่ง f และความยาวของอาคาร (L) ตามลำดับ



รูปที่ 5-21 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันระเบิด ณ เวลาต่างๆ ที่ผนังด้านหลัง

5.3.3 สรุปขั้นตอนการคำนวณแรงระเบิด

1. คำนวณการเกิดเหตุการณ์ระเบิดที่อาจจะเกิดขึ้น เพื่อกำหนดขนาด ชนิด และตำแหน่งของการระเบิด ซึ่งการกำหนดขนาดของวัตถุระเบิดควรพิจารณาจากวิธีการบรรเทาวัตถุระเบิดที่อาจถูกใช้ในการก่อการร้าย โดยอาจดูได้จากรูปที่ 2-11

2. การระเบิดอาจเกิดได้หลายตำแหน่ง ผู้ออกแบบควรแยกพิจารณาแต่ละกรณี เนื่องจากแรงที่กระทำที่ขึ้นส่วนโครงสร้างแต่ละชั้นส่วนจะแตกต่างกันไปในแต่ละกรณี

3. กำหนดพื้นผิวของโครงสร้างอาคารที่รองรับแรงระเบิด เพื่อผู้ออกแบบจะสามารถคำนวณหาตัวแปรแรงระเบิดสำหรับแต่ละพื้นผิวได้ โดยการกำหนดพื้นผิวนี้อาจพิจารณาจากระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิดและขนาดพื้นที่

4. คำนวณหาค่าน้ำหนักวัตถุระเบิดเทียบเท่า TNT (W) ตามสมการ 3-1 และค่าระยะปรับทอน (scaled distance) ในแต่ละกรณีที่คาดการณ์ไว้

5. หาค่าตัวแปรพื้นฐานต่างๆ ของแรงระเบิด ได้แก่ แรงดันระเบิดโดยตรงสูงสุด (P_{so}) แรงดันระเบิดสะท้อน (P_r) แรงคลโดยตรง (i) แรงคลสะท้อน (i_r) ความเร็วคลื่นระเบิดด้านหน้า (U) ระยะเวลาช่วงบว (t_o) ระยะเวลาที่คลื่นระเบิดเดินทางมากระทบโครงสร้างอาคาร (t_A) ความยาวคลื่นระเบิด (L_W) ตามรูปที่ 5-3 และ 5-10 โดยขึ้นอยู่กับประเภทของการระเบิด และแรงดันพลศาสตร์ (q_o) ตามรูปที่ 4-3 หรือสมการ 4-1

6. สร้างความสัมพันธ์เชิงเส้นอย่างง่ายระหว่างแรงดันระเบิดและเวลาสำหรับแต่ละพื้นผิวของโครงสร้างอาคาร โดยตัวแปรที่ต้องการนอกเหนือไปจากตัวแปรพื้นฐานตามข้อ 5 เพื่อใช้ในการสร้างความสัมพันธ์นี้มีดังนี้

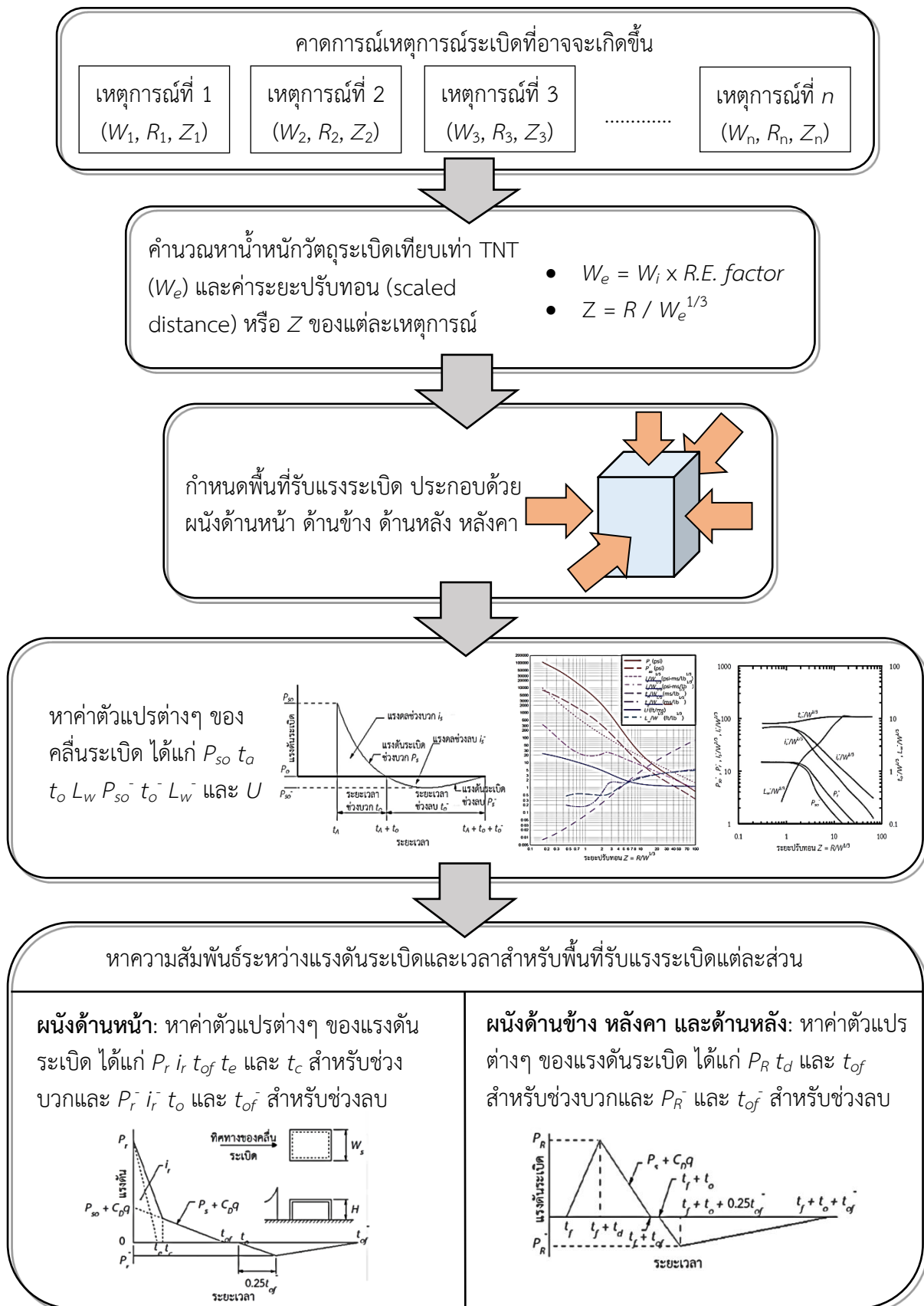
6.1 สำหรับผนังด้านหน้า ได้แก่ ระยะเวลาที่แรงดันสะท้อนกระทำ (t_c) ตามสมการ 5-3 ความเร็วคลื่นเสียงในช่วงที่เกิดแรงดันสะท้อน (C_r) ตามรูปที่ 5-14 ช่วงเวลาเทียบเท่าช่วงบว (t_{of}) ตามสมการ 5-1 และช่วงเวลาที่ยังแรงดันสะท้อนเทียบเท่ากระทำ (t_e) ตามสมการ 5-6

6.2 สำหรับพื้นหลังคาและผนังด้านข้าง ได้แก่ สัมประสิทธิ์แรงหน่วง (C_D) ตามตาราง 5-1 สัมประสิทธิ์แรงเทียบเท่า (C_E) ตามรูปที่ 5-18 ช่วงเวลาเทียบเท่าที่แรงดันมีค่าสูงสุด (t_d) ตามรูปที่ 5-19 ช่วงเวลาที่แรงดันระเบิดเทียบเท่ากระทำ (t_{of}) ตามรูปที่ 5-20

6.3 สำหรับผนังด้านหลัง จะใช้วิธีการเดียวกับการหาตัวแปรแรงระเบิดสำหรับพื้นหลังคาและผนังด้านข้าง ยกเว้นค่าตัวแปรพื้นฐานต่างๆ ของแรงระเบิดจะพิจารณาที่ขอบด้านหลังของพื้นหลังคาและผนังด้านข้าง

7. ในกรณีที่ต้องการหาพฤติกรรมโดยรวมของโครงสร้างอาคาร ผู้ออกแบบควรนำความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระเบิดช่วงลบและเวลามาพิจารณาดู ซึ่งค่าตัวแปรพื้นฐานของแรงดันระเบิดช่วงลบหาได้จากรูปที่ 5-4 และ 5-11 ขึ้นอยู่กับประเภทของการระเบิด ส่วนตัวแปรที่เหลือจะใช้วิธีการเดียวกันกับการหาค่าตัวแปรเหล่านั้นสำหรับแรงดันช่วงบว

8. ในการวิเคราะห์โครงสร้าง การรวมผลระหว่างแรงที่เกิดขึ้นจากแรงดันระเบิดที่กระทำในแต่ละพื้นผิวของโครงสร้างอาคารและแรงกระทำอื่นๆ ควรเป็นไปตามหลักการที่ใช้ในการออกแบบ เช่น การออกแบบโดยวิธีตัวคูลน้ำหนักกระทำและกำลังต้านทาน (Load and Resistance Factor Design หรือ LRFD) เป็นต้น ส่วนวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างอาจพิจารณาได้จากความสำคัญของอาคาร ถ้าเป็นโครงสร้างที่สำคัญมาก อาจจำเป็นต้องใช้วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างแบบไม่เชิงเส้นที่มีแรงกระทำเป็นแรงพลศาสตร์ (dynamic and nonlinear analysis)



รูปที่ 5-22 แผนผังการคำนวณแรงระเบิดที่กระทำต่อโครงสร้างอาคาร

บทที่ 6

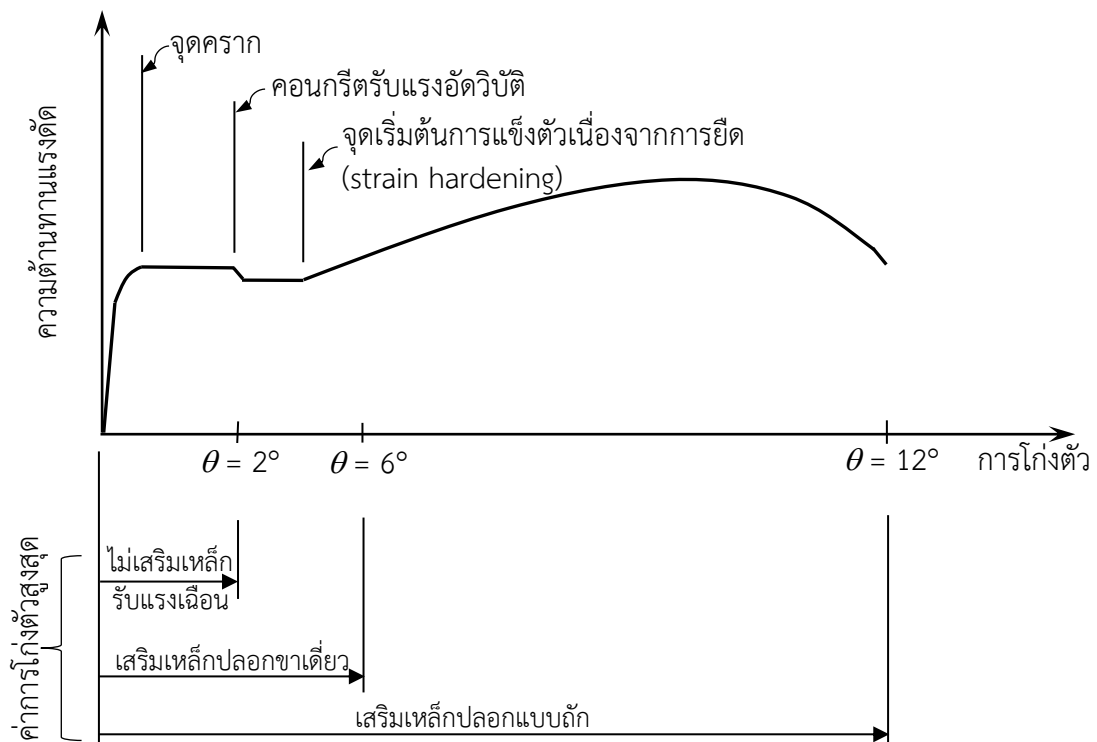
พฤติกรรมของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกกระทำด้วยแรงระเบิด

การออกแบบโครงสร้างอาคารเพื่อต้านทานแรงระเบิดนิยมใช้คอนกรีตเสริมเหล็กเป็นวัสดุหลัก เนื่องจากคอนกรีตมีมวลมากเมื่อเทียบกับวัสดุโครงสร้างชนิดอื่นๆ เช่น เหล็กgrupพรรณ ซึ่งทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถต้านทานแรงเฉื่อย (inertia force) ภายใต้แรงกระทำแบบพลศาสตร์ (dynamic loads) ได้มากกว่า นอกจากนั้นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยเฉพาะคอนกรีตประเภทหล่อในที่ที่มีจุดเชื่อมต่อที่ต่อเนื่องกัน ซึ่งช่วยเพิ่มเสถียรภาพโดยรวมขององค์อาคารเมื่อมีโครงสร้างบางส่วนเกิดความเสียหายอย่างหนัก ดังนั้นในบทนี้จึงอธิบายถึงพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกกระทำด้วยแรงระเบิดเพื่อให้ผู้ออกแบบมีความเข้าใจเบื้องต้นถึงข้อกำหนดต่างๆ ในการออกแบบซึ่งมีพื้นฐานมาจากพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงระเบิด

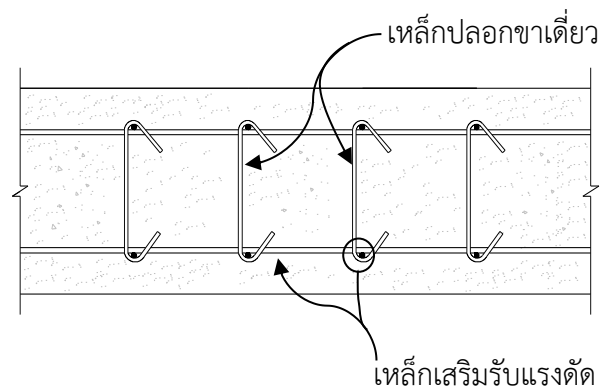
6.1 พฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงระเบิด

โดยทั่วไปพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกกระทำด้วยแรงภายนอกสามารถแสดงออกได้สองรูปแบบคือแบบเหนียว (ductile) และแบบเปราะ (brittle) สำหรับการตอบสนองแบบเหนียวชิ้นส่วนโครงสร้างสามารถโก่งตัวได้มากแต่ไม่เกิดการพังทลายทั้งหมด ส่วนการตอบสนองแบบเปราะชิ้นส่วนโครงสร้างมีการพังทลายบางส่วนหรือทั้งหมดเมื่อเกิดการโก่งตัวเพียงเล็กน้อย ซึ่งในการออกแบบอาคารต้านทานแรงระเบิดมักจะกำหนดให้ผลตอบสนองของโครงสร้างเป็นแบบเหนียว เพื่อลดความสูญเสียทั้งชีวิตและทรัพย์สินซึ่งมีแนวโน้มสูงหากอาคารเกิดการพังถล่มลงมา

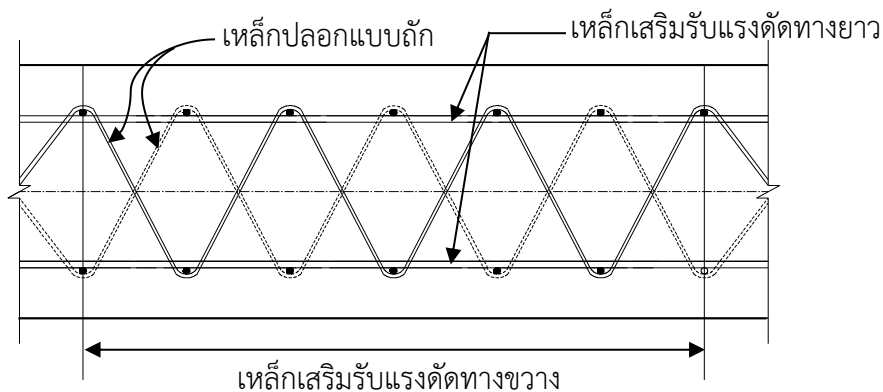
เมื่อชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กถูกกระทำด้วยแรงแบบพลศาสตร์ เช่น แรงระเบิด ชิ้นส่วนจะโก่งตัวจนกระทั่ง (1) พลังงานความเครียด (strain energy) ของชิ้นส่วนสมดุลกับพลังงานจลน์ (kinetic energy) จากการระเบิด (2) เกิดการแตกหักของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจนเป็นผลให้เกิดการพังทลายบางส่วนหรือทั้งหมด ซึ่งค่าการโก่งตัวสูงสุดที่ชิ้นส่วนโครงสร้างสามารถรองรับภายใต้แรงพลศาสตร์ได้ขึ้นอยู่กับช่วงความยาว ความลึก และรายละเอียดการเสริมเหล็กของชิ้นส่วนโครงสร้าง โดยความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัด (resistance) และการโก่งตัว (deflection) ของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 6-1 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงดัด โดยเมื่อชิ้นส่วนเริ่มต้นรับแรงดัด ความต้านทานและการโก่งตัวจะเพิ่มขึ้นด้วยความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรง (linear elastic) จนกระทั่งเหล็กเสริมเริ่มเกิดการคราก (yield) จากนั้นชิ้นส่วนยังคงโก่งตัวอย่างต่อเนื่องจนเหล็กเสริมทั้งหมดเกิดการคราก ซึ่งจากจุดนี้ไปความต้านทานแรงดัดจะมีค่าคงที่ในขณะที่การโก่งตัวยังคงเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ จนกระทั่งการหมุนที่ฐานรองรับ (support rotation หรือ θ) มีค่าเท่ากับ 2 องศาซึ่งจะทำให้คอนกรีตส่วนที่รับแรงอัดเกิดการวิบัติ (failure) สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนการวิบัติของคอนกรีตส่วนรับแรงอัดนี้จะส่งผลให้เกิดการพังทลายของชิ้นส่วน (collapse) ส่วนชิ้นส่วนที่มีการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนอย่างเหมาะสมทั้งแบบเหล็กปลอกขาเดียว (รูปที่ 6-2) และเหล็กปลอกแบบถัก (รูปที่ 6-3) การวิบัติของคอนกรีตส่วนที่รับแรงอัดจะมีผลต่อการสูญเสียกำลังของชิ้นส่วนเพียงเล็กน้อย เนื่องจากแรงอัดยังคงสามารถส่งผ่านไปสู่เหล็กเสริมต้านทานแรงอัดได้



รูปที่ 6-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงและการโก่งตัวของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก



รูปที่ 6-2 ตัวอย่างชิ้นส่วนพื้นและกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมเหล็กปลอกขาเดียว



รูปที่ 6-3 การเสริมเหล็กปลอกแบบถักในชิ้นส่วนพื้นและกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็ก

ตามรูปที่ 6-1 เมื่อชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีปริมาณเหล็กปลอกพอเพียงมีการโก่งตัวเพิ่มขึ้นหลังจากคอนกรีตส่วนที่รับแรงอัดเกิดการวิบัติ เหล็กเสริมในชิ้นส่วนโครงสร้างจะเข้าสู่ช่วงที่กำลังของเหล็กเสริมเพิ่มขึ้นในขณะที่มีการยืดตัวมากขึ้น (strain hardening) ซึ่งทำให้ชิ้นส่วนมีแรงต้านทานเพิ่มขึ้นพร้อมกับมีการโก่งตัวที่เพิ่มขึ้นด้วย ในช่วง strain hardening นี้ เหล็กปลอกขาเดียวจะสามารถยึดรั้งเหล็กเสริมรับแรงอัดได้ในช่วงเวลาสั้นๆ จากนั้นชิ้นส่วนโครงสร้างจะสูญเสียความสามารถในการรับแรงร่วมกัน (integrity) ระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริม ทำให้เกิดการวิบัติของชิ้นส่วนโครงสร้างเมื่อการหมุนที่ฐานมีค่าเท่ากับ 6 องศา ในขณะที่การเสริมเหล็กปลอกแบบถักจะสามารถยึดรั้งเหล็กเสริมรับแรงอัดได้ตลอดช่วงของ strain hardening จนกระทั่งเหล็กเสริมหลักหรือเหล็กเสริมรับแรงดึงเกิดการวิบัติด้วยแรงดึง (tension failure) เมื่อการหมุนที่ฐานมีค่าเท่ากับ 12 องศา และหากมีการยึดรั้งที่ปลายชิ้นส่วนที่ดีพอ ชิ้นส่วนโครงสร้างจะเกิดพฤติกรรมแผ่นบางรับแรงอัด (compressive membrane action) หลังจากเหล็กเสริมทั้งหมดเกิดการคราก ส่งผลให้ความต้านทานแรงดัดสูงสุดของชิ้นส่วนโครงสร้างเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่ในการออกแบบโครงสร้างเพื่อต้านทานแรงระเบิดจะถือว่าพฤติกรรมแผ่นบางรับแรงอัดนี้ไม่มีผลต่อความต้านทานแรงดัดสูงสุดของชิ้นส่วนโครงสร้าง

นอกจากการวิบัติเนื่องจากแรงดัดแล้ว การวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนเป็นสิ่งที่ผู้ออกแบบต้องพิจารณาด้วย ซึ่งกำลังรับแรงเฉือนของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอาจจะขึ้นอยู่กับกำลังของคอนกรีตเพียงอย่างเดียวหรือร่วมกับเหล็กเสริมรับแรงเฉือน โดยชิ้นส่วนโครงสร้างจะต้องมีกำลังรับแรงเฉือนที่เพียงพอ เพื่อสามารถพัฒนากำลังรับแรงดัดได้ตามที่แสดงในรูปที่ 6-1 มิฉะนั้นชิ้นส่วนโครงสร้างจะเกิดการวิบัติจากแรงเฉือนอย่างฉับพลันหากกำลังรับแรงดัดมากกว่ากำลังรับแรงเฉือน

6.2 พฤติกรรมแบบเหินยาวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากการระเบิดระยะไกล (far-range explosion)

ในการออกแบบโครงสร้างสำหรับการระเบิดระยะไกล (far-range explosion) แรงระเบิดที่กระทำต่อโครงสร้างจะแผ่กระจายอย่างสม่ำเสมอ และโครงสร้างเกิดการโก่งตัวเพียงเล็กน้อยเพื่อสลายพลังงานจากการระเบิด โดยผู้ออกแบบสามารถเลือกใช้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบต่างๆ ไปที่มีรายละเอียดการเสริมเหล็กตามมาตรฐานปกติได้ (ไม่ใช่การเสริมเหล็กแบบถัก) ซึ่งหากพิจารณาตามความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดและการโก่งตัวที่แสดงในรูปที่ 6-1 ชิ้นส่วนโครงสร้างในกรณีนี้จะถูกจำกัดค่าการโก่งตัวสูงสุดที่ค่าการหมุนที่ฐานเท่ากับ 2 องศาหากชิ้นส่วนโครงสร้างไม่มีการเสริมเหล็กรับแรงเฉือน แต่หากชิ้นส่วนโครงสร้างมีการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 6-2 ชิ้นส่วนโครงสร้างจะสามารถโก่งตัวสูงสุดได้จนถึงค่าการหมุนที่ฐานเท่ากับ 6 องศา ส่วนการเสริมเหล็กแบบถักนั้นสามารถนำมาใช้ได้เช่นกันแต่ควรคำนึงถึงค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก

6.3 พฤติกรรมแบบเหินยาวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากการระเบิดระยะใกล้ (near-range explosion)

การระเบิดระยะใกล้ (near-range explosion) ก่อให้เกิดแรงกระทำที่มีความไม่สม่ำเสมอและมีค่าสูงมาก ทำให้โครงสร้างต้องรองรับแรงกระทำขนาดสูงเฉพาะจุดซึ่งก่อให้เกิดการวิบัติเฉพาะที่ (local failure) เช่น การวิบัติแบบทะลุ เป็นต้น ดังนั้นเพื่อให้ชิ้นส่วนโครงสร้างสามารถรองรับแรงระเบิดประเภทนี้ได้และยัง

สามารถโก่งตัวได้มากเพื่อสลายพลังงานจลน์จากแรงระเบิด จึงได้มีการกำหนดให้ชั้นส่วนโครงสร้างที่รองรับแรงระเบิดประเภทนี้มีการเสริมเหล็กปลอกแบบถัก

ในการเสริมเหล็กปลอกแบบถักตามที่แสดงในรูปที่ 6-3 นั้น ชั้นส่วนโครงสร้างต้องมีการเสริมเหล็กแบบสมมาตร คือมีการเสริมเหล็กรับแรงอัดเท่ากับการเสริมเหล็กรับแรงดึง โดยเหล็กเสริมรับแรงดัด (ทั้งบนและล่าง) และเนื้อคอนกรีตที่อยู่ระหว่างกลางจะถูกยึดเข้าด้วยกันด้วยเหล็กเสริมทแยง (diagonal bars) ที่ยาวต่อเนื่องซึ่งจะทำหน้าที่เหมือนโครงถัก (truss) ที่ยึดโยงส่วนประกอบต่างๆ เข้าด้วยกัน โดยการเสริมเหล็กแบบนี้ส่งผลต่อความสามารถของชั้นส่วนในด้านต่างๆ ดังต่อไปนี้

- (1) เหล็กเสริมรับแรงดัดสามารถยึดตัวได้จนถึงขีดสุดซึ่งรวมถึงช่วง strain hardening ด้วย
- (2) คอนกรีตระหว่างเหล็กเสริมทั้งบนและล่างสามารถคงความเป็นเนื้อเดียวกันได้แม้เกิดรอยแตกกว้างขนาดใหญ่
- (3) เหล็กเสริมรับแรงอัดมีการยึดรั้งทำให้ไม่เกิดการโก่งเดาะ (buckling)
- (4) ชั้นส่วนโครงสร้างสามารถต้านทานแรงเฉือนที่มีค่าสูงในบริเวณฐานรองรับ
- (5) ป้องกันไม่ให้เกิดการวิบัติเฉพาะจุดเนื่องจากแรงเฉือนซึ่งเป็นผลมาจากแรงดันระเบิดที่มีขนาดสูงมาก
- (6) ช่วยลดปริมาณและความเร็วของสะเก็ดชิ้นส่วนโครงสร้างที่แตกออกมาเนื่องจากการวิบัติแบบเปราะ

หากพิจารณาตามความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดและการโก่งตัวที่แสดงอยู่ในรูปที่ 6-1 ชั้นส่วนโครงสร้างที่มีการเสริมเหล็กแบบถักนี้สามารถพัฒนาการยึดตัวของเหล็กรับแรงดึงได้จนถึงขีดสุดโดยที่ชั้นส่วนไม่พังทลาย จึงทำให้ชั้นส่วนโครงสร้างที่มีการเสริมเหล็กปลอกแบบถักนี้สามารถมีค่าโก่งตัวสูงสุดได้จนถึงค่าการหมุนที่ฐานเท่ากับ 12 องศา ถึงแม้ว่าเหล็กปลอกขาเดียวจะช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงระเบิดของชั้นส่วนโครงสร้างได้เช่นเดียวกับเหล็กปลอกแบบถัก แต่ในกรณีของการระเบิดระยะใกล้ การเสริมเหล็กปลอกแบบขาเดียวนี้อาจมีประสิทธิภาพน้อยกว่าการเสริมเหล็กปลอกแบบถักอย่างมาก

6.4 พฤติกรรมแบบเปราะของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากแรงระเบิด

พฤติกรรมแบบเปราะของชั้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นเกิดจากการวิบัติของคอนกรีต 3 ลักษณะได้แก่ การหลุดกะเทาะ (scabbing) การหลุดล่อน (direct spalling) และการเกิดชิ้นส่วนแตกหักหลังการวิบัติ (post-failure fragments) การหลุดกะเทาะเกิดจากการแยกตัวของเนื้อคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมรับแรงดัด เนื่องจากการรองรับแรงดันระเบิดที่มีความรุนแรงสูงตามที่แสดงในรูปที่ 6-4 (ก) ซึ่งการหลุดกะเทาะมักเกิดขึ้นทันทีที่แรงดันระเบิดกระทำต่อชั้นส่วนโครงสร้าง ส่วนการหลุดล่อนเกิดจากการแยกตัวของเนื้อคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมรับแรงดัดเช่นกัน แต่เป็นผลมาจากการที่ชั้นส่วนโครงสร้างเกิดการโก่งตัวอย่างมาก ซึ่งการหลุดล่อนนี้มักเกิดภายหลังการหลุดกะเทาะตามที่แสดงในรูปที่ 6-4 (ข) การวิบัติแบบหลุดกะเทาะและแบบหลุดล่อนนั้นยอมให้เกิดขึ้นได้ในโครงสร้างต้านทานแรงระเบิดที่ถูกออกแบบเพื่อปกป้องบุคคล อุปกรณ์ และวัสดุที่มีความสำคัญ ส่วนการเกิดชิ้นส่วนแตกหักนั้นโดยทั่วไปจะมีจำนวนมาก มีขนาดใหญ่ และมีความเร็วสูง ทำให้การวิบัติลักษณะนี้ยอมให้เกิดขึ้นได้ในกรณีของโครงสร้างที่ถูกออกแบบเพื่อป้องกันวัสดุหรืออุปกรณ์ที่มีความสำคัญไม่มากนัก

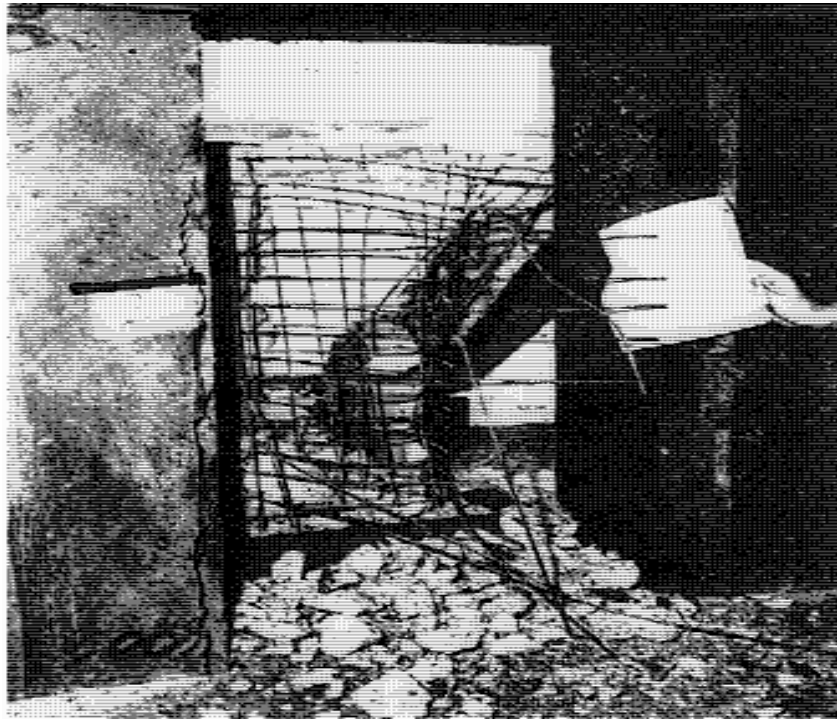


รูปที่ 6-4 การวิบัติแบบหลุดกะเทาะและแบบหลุดล่อน

ลักษณะของชิ้นส่วนแตกหักหลังการวิบัติขึ้นกับรูปแบบการเสริมเหล็ก โดยในชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีการเสริมเหล็กปลอกแบบถัก ขนาดของชิ้นส่วนแตกหักถูกกำหนดด้วยตำแหน่งของแนวการคราก (yield line) เนื่องจากชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีการเสริมเหล็กแบบถักมีการวิบัติเฉพาะที่ตำแหน่งแนวการคราก โดยส่วนที่อยู่ระหว่างแนวการครากยังคงเป็นชิ้นเดียวกัน จึงทำให้ชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีการเสริมเหล็กแบบถักเกิดชิ้นส่วนแตกหักขนาดใหญ่เพียงไม่กี่ชิ้น ดังตัวอย่างในรูปที่ 6-5 ในขณะที่ชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีการเสริมเหล็กแบบปกติ (แบบไม่ถัก) ชิ้นส่วนแตกหักจะมีลักษณะเป็นเศษคอนกรีตชิ้นเล็กชิ้นน้อย ดังตัวอย่างในรูปที่ 6-6 โดยความเร็วของชิ้นส่วนแตกหักของโครงสร้างที่มีการเสริมเหล็กทั้งสองแบบนี้ นอกจากขึ้นอยู่กับขนาดของการระเบิดเป็นหลักแล้วยังขึ้นอยู่กับลักษณะการเสริมเหล็กปลอกด้วย ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าชิ้นส่วนแตกหักจากโครงสร้างที่มีการเสริมเหล็กปลอกแบบถักจะมีความเร็วช้ากว่าชิ้นส่วนแตกหักจากโครงสร้างที่มีการเสริมเหล็กปลอกแบบปกติอยู่ประมาณร้อยละ 30



รูปที่ 6-5 ลักษณะของสะเก็ดแตกหักของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมเหล็กปลอกแบบถัก
(ที่มา: *Unified Facilities Criteria: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*
(UFC 3-340-02))



รูปที่ 6-6 ลักษณะสะเก็ดแตกหักของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมเหล็กปลอกแบบปกติ
(ที่มา: *Unified Facilities Criteria: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*
(UFC 3-340-02))

บทที่ 7

หลักการเบื้องต้นในการออกแบบโครงสร้างอาคารเพื่อด้านทานแรงระเบิด

การโจมตีอาคารที่มีผู้คนอยู่เป็นจำนวนมากด้วยวัตถุระเบิดจะมีจุดมุ่งหมายหลักเพื่อต้องการให้อาคารเป้าหมายเกิดความเสียหายจนพังถล่มลงมาและส่งผลให้มีผู้เสียชีวิตจำนวนมาก ซึ่งตัวอย่างของการโจมตีลักษณะนี้จะเห็นได้จากเหตุการณ์วางระเบิดอาคารรัฐบาลกลาง อัลเฟรด พี เมอร์ราห์ ที่เมืองโอคลาโฮมาซิตี รัฐโอคลาโฮมา ประเทศสหรัฐอเมริกา ในปี ค.ศ. 1995 โดยที่ร้อยละ 87 ของผู้เสียชีวิตเป็นผลมาจากการที่มีส่วนหนึ่งของอาคารพังถล่มลงมา ดังนั้นในการออกแบบโครงสร้างอาคารเพื่อด้านทานแรงระเบิดจึงเน้นที่การลดผลกระทบของแรงระเบิดที่มีต่อระบบโครงสร้างอาคารเพื่อป้องกันการพังถล่มของอาคาร ซึ่งหลักการทั่วไปที่ใช้ในการลดความเสียหายจากการระเบิดคือการออกแบบให้มีระยะห่างจุดศูนย์กลางระเบิด (stand-off distance) มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดและมีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด แต่ในกรณีที่ไม่สามารถออกแบบให้มีระยะห่างจุดศูนย์กลางระเบิดที่เพียงพอต่อการป้องกันอาคารได้ ระบบโครงสร้างของอาคารจะต้องมีการเสริมความมั่นคงแข็งแรงและควรมีการพิจารณาถึงการป้องกันการพังถล่มอย่างต่อเนื่อง (progressive collapse) ด้วย โดยในบทนี้จะมีการอธิบายถึงหลักการทั่วไปที่ผู้ออกแบบอาคารควรคำนึงถึง ในการออกแบบโครงสร้างอาคารเพื่อด้านทานแรงระเบิดซึ่งวิธีการที่มีความเหมาะสมและคุ้มค่าจะพิจารณาจากระดับการป้องกัน (protection level) ที่ต้องการและทรัพยากรที่มีอยู่ แต่ทั้งนี้วิธีการที่อธิบายในบทนี้จะครอบคลุมเฉพาะหลักการพื้นฐานในการออกแบบเท่านั้น ส่วนรายละเอียดเพิ่มเติมในการนำไปปฏิบัติสามารถหาได้จากเอกสารอ้างอิงอื่นๆ เช่น Minimum Antiterrorism Standards for Buildings (UFC 4-010-01) ของ Department of Defense (DOD) ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นต้น

7.1 ลักษณะโครงสร้างอาคารที่เสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายอย่างหนักจากแรงระเบิด

จากการศึกษาผลกระทบของเหตุการณ์การโจมตีอาคารด้วยวัตถุระเบิดในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมาทำให้เข้าใจเป็นอย่างดีถึงผลตอบสนองของโครงสร้างอาคารที่มีต่อแรงระเบิดและสามารถชี้ให้เห็นถึงลักษณะของระบบโครงสร้างอาคาร ชนิดวัสดุ และวิธีการออกแบบ ที่อาจลดความสามารถของอาคารในการต้านทานแรงระเบิด ซึ่งโครงสร้างลักษณะดังกล่าวประกอบด้วย

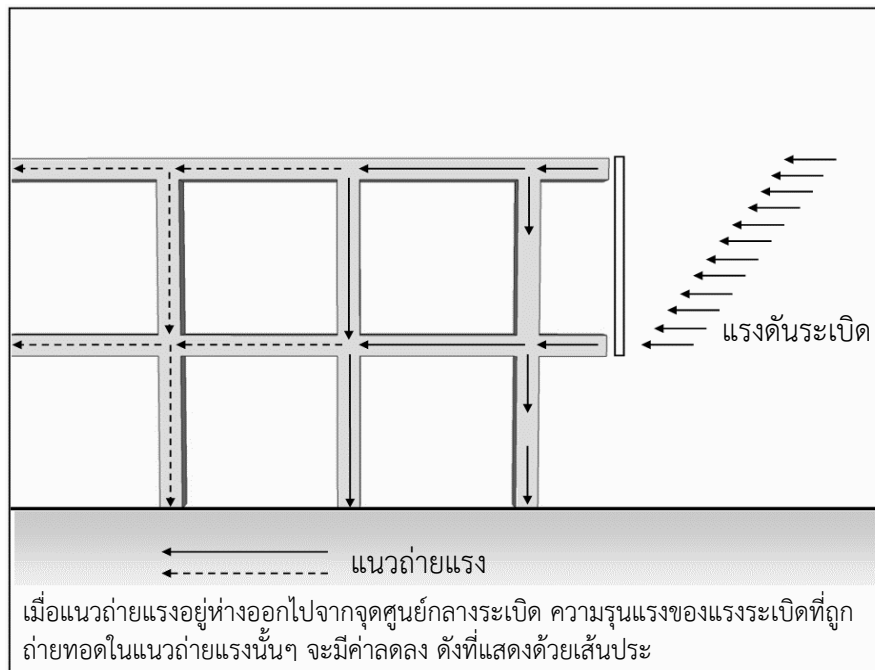
7.1.1 โครงสร้างที่ขาดระบบโครงสร้างอาคารส่วนเผื่อ (redundancy) และแนวถ่ายแรงทางอ้อม (indirect load path)

การออกแบบให้โครงสร้างอาคารมีแนวถ่ายแรงต่อเนื่องทั้งแรงกระทำในแนวดิ่งและแรงกระทำด้านข้างนั้นเป็นสิ่งที่ผู้ออกแบบควรพึงปฏิบัติอย่างยิ่ง ซึ่งโครงสร้างอาคารที่มีแนวถ่ายแรงที่ต่อเนื่องจะมีลักษณะดังนี้

1. ชิ้นส่วนโครงสร้างอาคารทั้งหมดเชื่อมต่อเข้าด้วยกันด้วยข้อต่อที่แข็งแรงเพียงพอที่จะทำให้ชิ้นส่วนโครงสร้างอาคารสามารถพัฒนากำลังในการต้านทานแรงได้อย่างเต็มที่
2. แรงกระทำทั้งหมดสามารถถ่ายเทสู่ฐานราก
3. แนวถ่ายแรงทางดิ่งมีความต่อเนื่องตลอดจากจุดสูงสุดของโครงสร้างจนถึงฐานราก

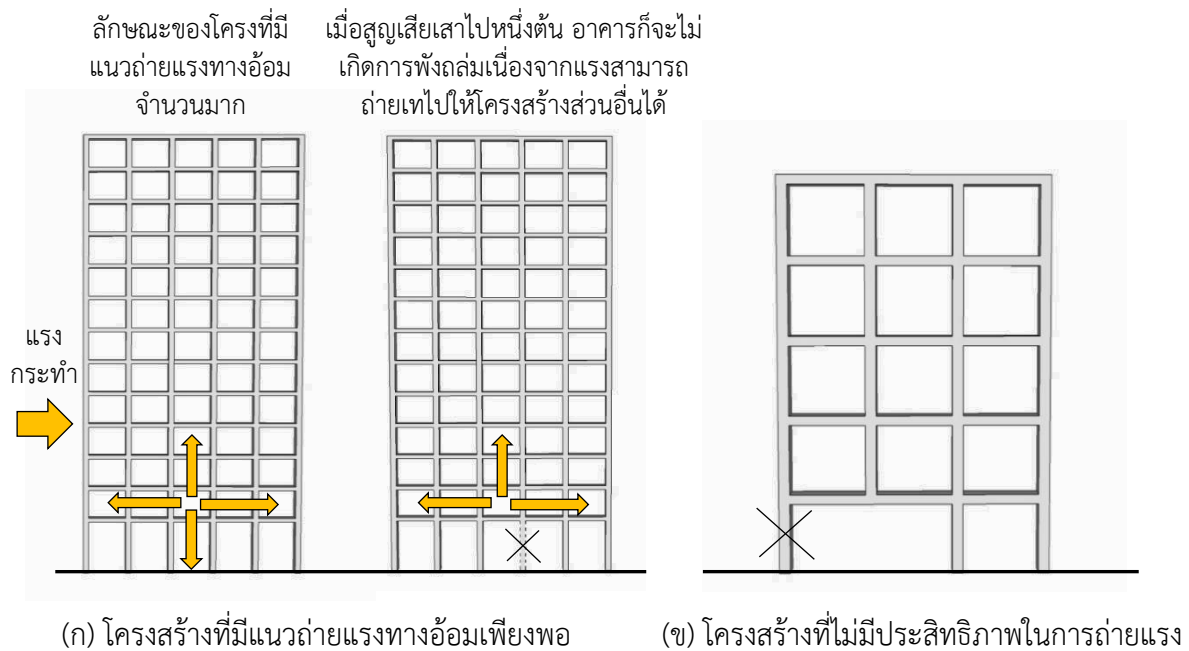
โดยแต่ละชิ้นส่วนโครงสร้างจะต้องถูกออกแบบให้กำลังต้านทานแรงของชิ้นส่วนนั้นๆ มีความสมดุลกับกำลังต้านทานแรงของชิ้นส่วนโครงสร้างส่วนอื่นๆ และยังต้องสมดุลกับกำลังต้านทานแรงของข้อต่อที่เชื่อมชิ้นส่วนโครงสร้างเหล่านั้นเข้าด้วยกันอีกด้วย ลักษณะโครงสร้างที่มีความต่อเนื่องนี้สามารถแสดงได้ด้วยรูปที่ 7-1 ซึ่ง

เมื่อแรงระเบิดกระทำที่ผนังภายนอกจะมีการถ่ายเทแรงสู่ชิ้นส่วนโครงสร้างต่างๆ ผ่านระบบโครงสร้างจนแรงทั้งหมดสามารถถ่ายเทลงสู่ฐานรากและพื้นดินต่อไปได้



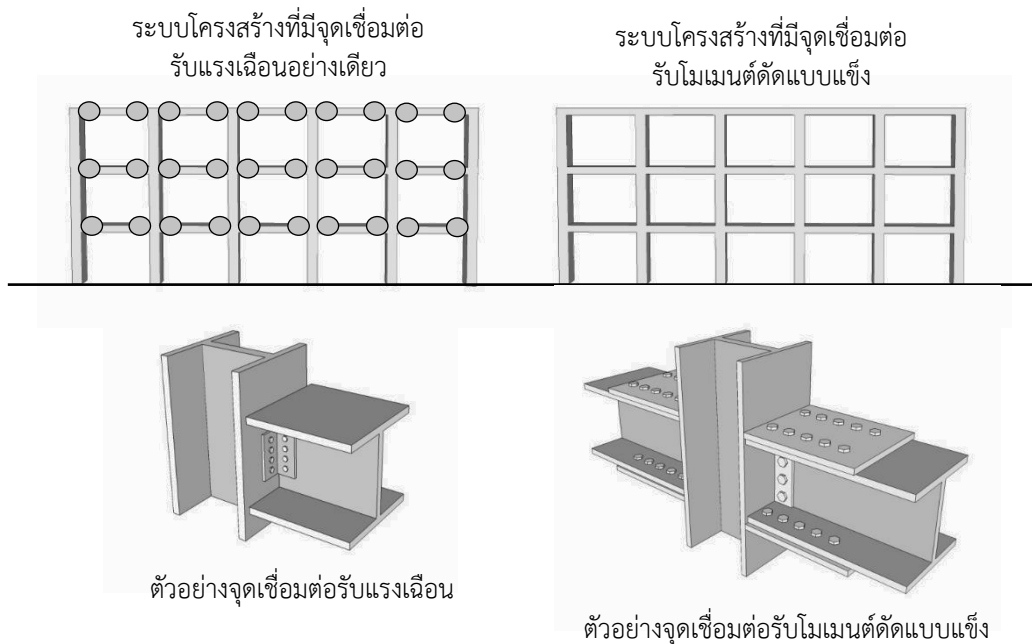
รูปที่ 7-1 หลักการของโครงสร้างที่มีความต่อเนื่อง

ส่วนการออกแบบให้โครงสร้างอาคารมีระบบโครงสร้างส่วนเผื่อ (redundancy) หรือมีแนวถ่ายแรงทางอ้อม (indirect load path) จำนวนมากเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถลดโอกาสการพังถล่มอย่างต่อเนื่องของอาคารได้ เนื่องจากหากแนวถ่ายแรงอันใดอันหนึ่งเกิดการวิบัติขึ้นส่วนโครงสร้างอาคารส่วนอื่นๆ ยังคงสามารถที่จะรองรับแรงต่อไปได้โดยไม่เกิดการพังถล่มลงมา ระบบโครงสร้างส่วนเผื่อที่มีประสิทธิภาพนั้นควรจะต้องมีจำนวนชิ้นส่วนโครงสร้างแนวดิ่งที่เพียงพอเพื่อรองรับการถ่ายเทแรงในระบบโครงสร้างหากชิ้นส่วนโครงสร้างแนวดิ่งบางส่วนเกิดการวิบัติ โดยในรูปที่ 7-2 (ก) ได้แสดงให้เห็นถึงระบบโครงสร้างอาคารที่มีแนวถ่ายแรงจำนวนมากเชื่อมต่อเข้าด้วยกันด้วยข้อต่อรับโมเมนต์แบบเหนียว ซึ่งหากเสาต้นใดต้นหนึ่งเกิดการวิบัติแรงจะถูกถ่ายเทไปตามแนวถ่ายแรงที่เหลืออยู่โดยที่อาคารยังคงมีเสถียรภาพอยู่ได้ ส่วนในรูปที่ 7-2 (ข) จะแสดงให้เห็นถึงตัวอย่างระบบโครงสร้างส่วนเผื่อที่ไม่มีประสิทธิภาพเนื่องจากอาคารจะสูญเสียเสถียรภาพทันทีเมื่อเสาชั้นแรกต้นใดต้นหนึ่งหายไป



รูปที่ 7-2 หลักการของระบบโครงสร้างส่วนเผื่อ

นอกเหนือจากจำนวนแนวถ่ายแรงทางอ้อมที่เพียงพอแล้ว ระบบโครงสร้างส่วนเผื่อที่มีประสิทธิภาพควรจะต้องมีจุดเชื่อมต่อโครงสร้างที่มีความแข็งแรงเพียงพอเพื่อสามารถถ่ายเทแรงระหว่างชิ้นส่วนโครงสร้างได้ โดยในรูปที่ 7-3 จะแสดงถึงชนิดของจุดเชื่อมต่อที่มีผลต่อความสามารถในการถ่ายเทแรงของระบบโครงสร้าง ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าโครงสร้างที่มีจุดเชื่อมต่อรับโมเมนต์ดัดแบบแข็ง (rigid moment connection) จะมีความสามารถในการถ่ายเทแรงไปสู่โครงสร้างส่วนอื่นๆ ได้ดีกว่าโครงสร้างที่มีจุดเชื่อมต่อแบบรับแรงเฉือน (shear connection) อย่างเดียว

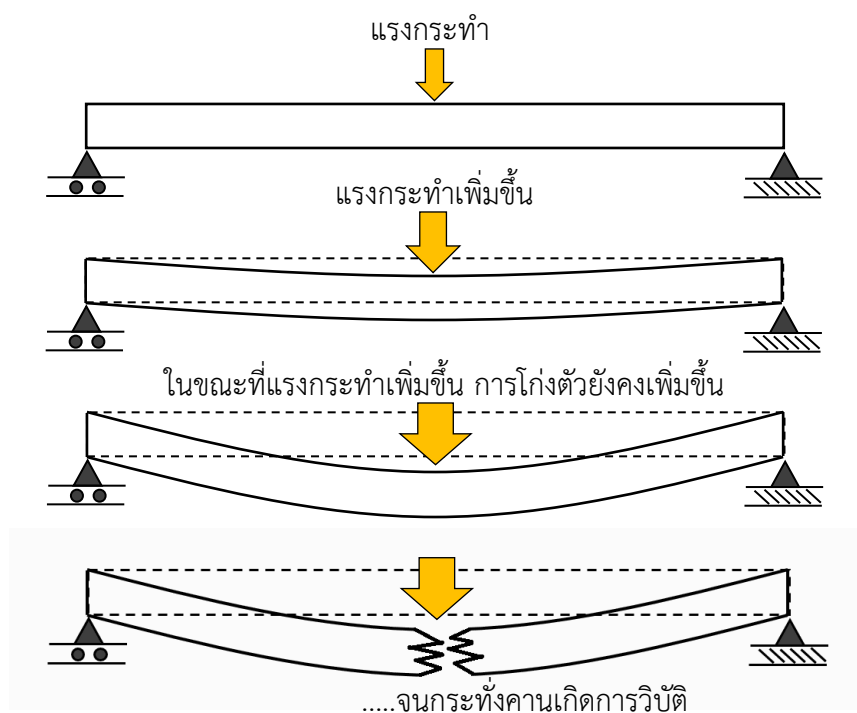


รูปที่ 7-3 การเปรียบเทียบจุดเชื่อมต่อแบบรับแรงเฉือนอย่างเดียวและแบบรับโมเมนต์ดัดแบบแข็ง

โดยทั่วไปในโครงสร้างอาคารที่ก่อสร้างแล้วการเพิ่มโครงสร้างส่วนเหนือหรือการเพิ่มแนวถ่ายแรงเป็นเรื่องที่กระทำได้ยากเมื่อเปรียบเทียบกับเสริมกำลังของโครงสร้างที่มีอยู่ เพราะโดยส่วนมากการเพิ่มโครงสร้างส่วนเหนือในอาคารที่ก่อสร้างแล้วมักจะกระทำได้โดยการเพิ่มเสาเพื่อลดช่วงความยาวของคานซึ่งจะมีค่าใช้จ่ายสูงมาก แต่ถ้าเป็นการเพิ่มโครงสร้างส่วนเหนือในอาคารที่ก่อสร้างใหม่ก็จะมีต้นทุนที่ต่ำกว่า ยิ่งไปกว่านั้นการเพิ่มเสายังสร้างปัญหาให้กับการจัดพื้นที่ใช้สอยในอาคารที่ก่อสร้างแล้วอีกด้วย อย่างไรก็ตามการทำให้มีโครงสร้างส่วนเหนือที่เหมาะสมก็ยังคงเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการจำกัดการพังถล่มอย่างต่อเนื่องของโครงสร้างได้

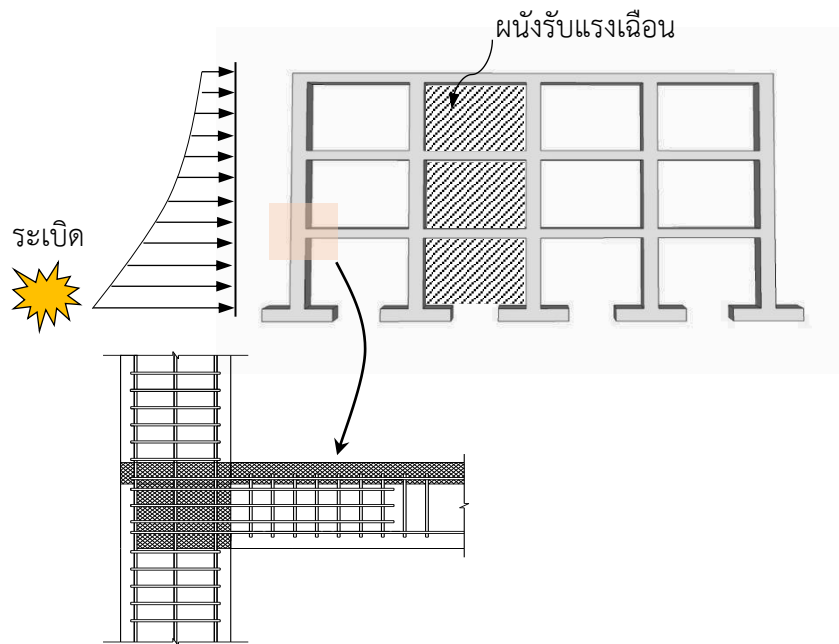
7.1.2 โครงสร้างที่ขาดความเหนียว (lack of ductility)

โครงสร้างอาคารต้านทานแรงระเบิดที่มีประสิทธิภาพควรมีชิ้นส่วนโครงสร้างอาคารและจุดเชื่อมต่อที่มีความเหนียวเพียงพอเพื่อสามารถรองรับแรงระเบิดต่อไปได้แม้จะเกิดการโก่งตัวอย่างมาก ซึ่งความเหนียวของโครงสร้างอาคารจะหมายถึงพฤติกรรมของวัสดุโครงสร้าง เช่น เหล็ก ที่สามารถยืดตัวได้มากแต่ยังคงรับแรงต่อไปได้จนกระทั่งการยืดตัวถึงขีดจำกัด และในขณะที่มีการยืดตัววัสดุโครงสร้างนั้นจะดูดซับพลังงานไว้แต่ยังไม่เกิดการวิบัติ โดยในรูปที่ 7-4 จะแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมความเหนียวของคานเหล็กที่มีการโก่งตัวเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ พร้อมกับแรงกระทำที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งเกิดการวิบัติ



รูปที่ 7-4 ตัวอย่างพฤติกรรมความเหนียวของคานเหล็ก

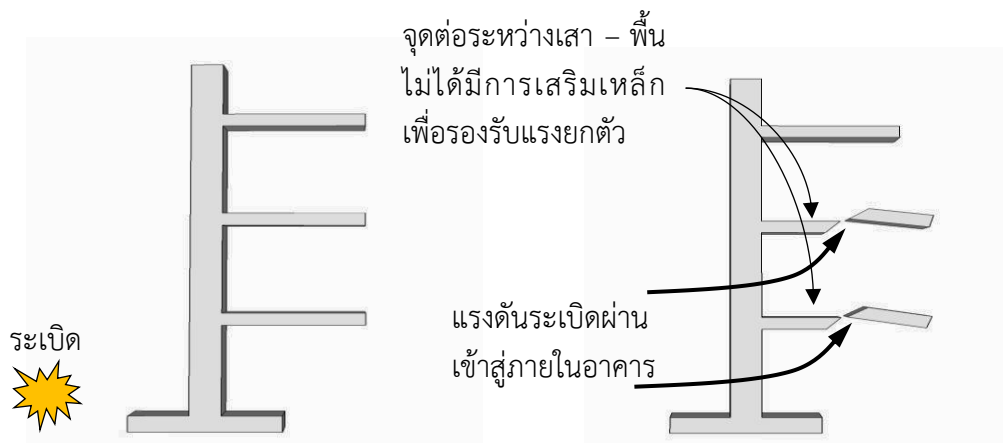
แต่ในกรณีของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ผู้ออกแบบสามารถออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างและจุดเชื่อมต่อให้มีความเหนียวได้โดยการจัดรายละเอียดการเสริมเหล็กด้วยปริมาณที่เหมาะสมนอกเหนือจากที่ต้องการเพื่อต้านทานแรงกระทำปกติตามตัวอย่างในรูปที่ 7-5



รูปที่ 7-5 ตัวอย่างการเสริมเหล็กพิเศษเพื่อเพิ่มความเหนียวให้กับข้อต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก

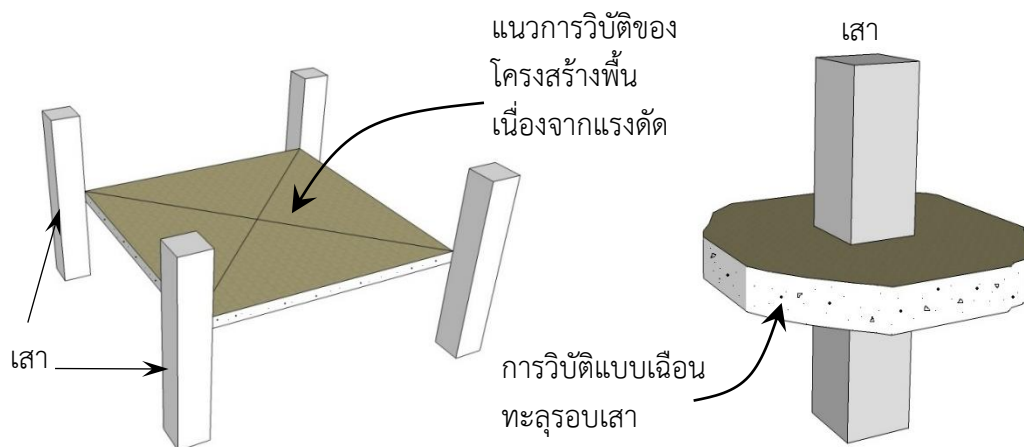
7.1.3 โครงสร้างที่ถูกออกแบบโดยไม่ได้คำนึงถึงผลของแรงยกตัว (uplift) และแรงกระทำกลับทิศ (load reversal)

ในกรณีของการระเบิดที่เกิดขึ้นใกล้กับอาคาร พื้นของอาคารแต่ละชั้นอาจจะต้องรองรับแรงยกตัว (uplift) ซึ่งเป็นผลจากแรงดันระเบิดที่สามารถผ่านเข้ามาภายในอาคารได้ตามรูปที่ 7-6 โดยขนาดของแรงยกตัวนี้จะแปรผันตามกำลังต้านทานของผนังภายนอกอาคาร (exterior façade) ซึ่งช่วยลดความรุนแรงของแรงดันระเบิดที่จะผ่านเข้ามาภายในอาคารและยังแปรผันตามความสูงของพื้นอาคารจากผิวดินด้วย แต่ในกรณีของการระเบิดที่เกิดขึ้นภายในอาคาร พื้นอาคารจะรองรับแรงยกตัวนี้อย่างเต็มที่ โดยทั่วไปแรงยกตัวนี้จะกระทำในทิศทางที่ตรงข้ามกับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบปกติซึ่งจะส่งผลให้เกิดแรงกระทำกลับทิศ (load reversal) ในชิ้นส่วนโครงสร้างต่างๆ ดังนั้นในการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างและจุดเชื่อมต่อของอาคารต้านทานแรงระเบิดจึงควรคำนึงถึงผลของแรงยกตัวและแรงกระทำกลับทิศนี้ด้วย



รูปที่ 7-6 ผลกระทบของแรงยกตัวที่เกิดจากการระเบิดภายนอกอาคาร

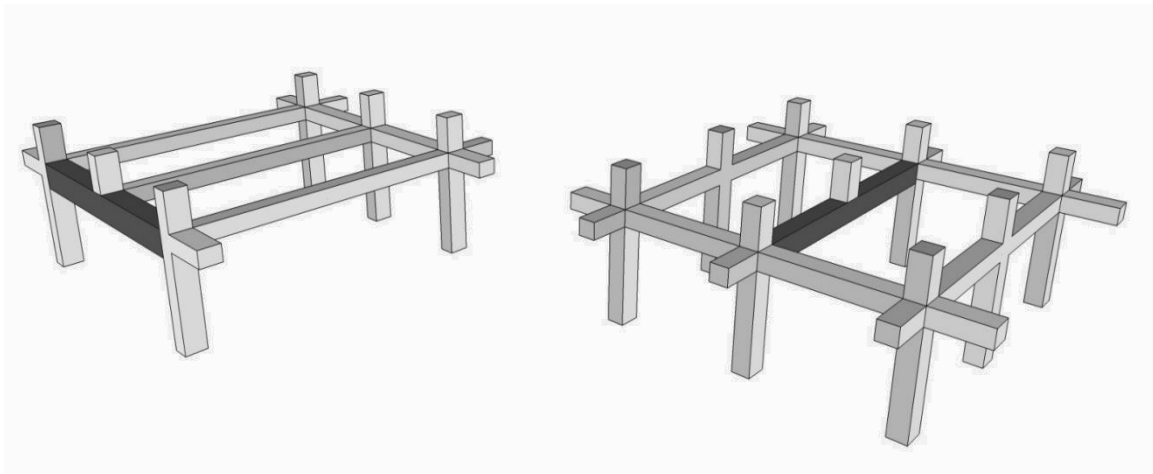
โครงสร้างพื้นอาคารโดยทั่วไปที่ถูกออกแบบให้ต้านทานเฉพาะน้ำหนักบรรทุกจากแรงโน้มถ่วงจะมีความสามารถในการต้านทานแรงดันยกตัวหรือแรงกระทำกลับทิศที่จำกัด ส่งผลให้โครงสร้างพื้นอาคารอาจเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงดัดหรือการวิบัติแบบเฉือนทะลุตามรูปที่ 7-7 ได้เมื่อต้องรองรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นจากแรงดันยกตัวหรือแรงกระทำกลับทิศนี้ ดังนั้นพื้นอาคารจึงจำเป็นต้องมีการเสริมเหล็กเพิ่มและมีการเสริมความแข็งแรงของจุดเชื่อมต่อระหว่างเสาและคานเพื่อรองรับการโก่งตัวกลับด้านซึ่งเป็นผลจากแรงยกตัวที่มีค่ามากกว่าน้ำหนักบรรทุกจากแรงโน้มถ่วง แต่ในกรณีของโครงสร้างพื้นอาคารที่ได้ก่อสร้างแล้วและไม่สามารถทำการเสริมเหล็กเพื่อรองรับแรงกระทำกลับด้านนี้ ผู้ออกแบบสามารถทำการเสริมกำลังด้วยการปูแผ่นวัสดุคอมโพสิตประเภทเส้นใยแก้วหรือเส้นใยคาร์บอนที่ผิวบนของโครงสร้างพื้นแทนได้ หรืออาจทำการเสริมแรงด้วยแท่งคอมโพสิตประเภทเส้นใยคาร์บอนโดยการเจาะร่องที่ผิวบนของโครงสร้างพื้นแล้วแทนที่ด้วยแท่งคอมโพสิต ฯ โดยมีข้อป้อนข้อเป็นวัสดุประสาน



รูปที่ 7-7 ลักษณะการพังทลายของแผ่นพื้นไร้คาน (flat slab)

7.1.4 โครงสร้างที่มีคานถ่ายแรง (transfer girders)

โดยทั่วไปคานถ่ายแรงคือคานช่วงยาวที่รองรับเสาจากด้านบนทำให้แนวการถ่ายเทแรงขาดความต่อเนื่องตามรูปที่ 7-8 คานถ่ายแรงมักจะถูกนำมาใช้ในอาคารบริเวณที่ต้องการพื้นที่โล่ง เช่น ห้องโถงขนาดใหญ่ พื้นที่ขนถ่ายสินค้า หอประชุม หรือโถงทางเข้า (lobby) เป็นต้น โดยในรูปที่ 7-9 ได้แสดงถึงกรณีตัวอย่างของพื้นที่โถงทางเข้าอาคารที่ต้องใช้คานถ่ายแรงเพื่อเพิ่มระยะห่างของช่วงเสาในบริเวณดังกล่าวหากเปรียบเทียบกับช่วงเสาของพื้นที่สำนักงานที่อยู่ชั้นบน



รูปที่ 7-8 ลักษณะของคานถ่ายแรง



รูปที่ 7-9 ตัวอย่างคานถ่ายแรงบริเวณโถงทางเข้าอาคาร
(ที่มา: FEMA-426/BIPS-06)

สำหรับคานถ่ายแรงที่รับน้ำหนักพื้นอาคารชั้นบนจำนวนหลายๆ ชั้นควรจะต้องมีข้อพึงระวังทั้งในด้านการออกแบบและการป้องกันเป็นพิเศษเนื่องจากการวิบัติของคานถ่ายแรงดังก้าวหรือเสาที่รองรับคานดังก้าวอาจก่อให้เกิดการวิบัติอย่างต่อเนื่องได้ ในกรณีที่ต้องออกแบบให้มีคานถ่ายแรง ผู้ออกแบบสามารถลดความเสี่ยงต่อความเสียหายของคานถ่ายแรงจากแรงระเบิดได้โดยใช้วิธีการดังต่อไปนี้

- การจัดให้มีแนวถ่ายแรงทางอ้อม เช่น การเพิ่มโครงแกว่งแน (bracing)
- การออกแบบคานถ่ายแรง จุดเชื่อมต่อ และเสาที่รองรับคานถ่ายแรงให้สามารถต้านทานแรงที่เพิ่มขึ้นจากการระเบิดได้
- การเพิ่มระยะถอยร่นของตัวอาคาร (ในกรณีที่สามารถกระทำได้) เพื่อลดผลกระทบจากแรงระเบิด
- การห่อหุ้มคานถ่ายแรงและเสาที่รองรับคานถ่ายแรงเพื่อป้องกันการโจมตีของผู้ก่อการร้าย

7.1.5 โครงสร้างที่ขาดการป้องกันความเสียหายจากการกระแทกของเศษวัสดุ

ในการระเบิดที่มีความรุนแรงน้อยหรือปานกลาง เช่น การระเบิดแรงต่ำในระยะใกล้ (low-intensity short-standoff explosion) การกระแทกจากเศษวัสดุที่เกิดจากการระเบิดลักษณะนี้อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างอาคารเพียงเล็กน้อย ซึ่งโดยส่วนมากจะเป็นความเสียหายเฉพาะจุดที่เกิดขึ้นที่ผนังภายนอกอาคาร (façade) แต่ในกรณีของการระเบิดแรงสูง (high-intensity explosion) ถึงแม้จะเกิดที่ระยะไกล การกระแทกของเศษวัสดุที่เกิดขึ้นอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างอาคารในวงกว้างได้ เนื่องจากเศษวัสดุที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่ มีปริมาณมาก และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง

นอกเหนือจากความเสียหายที่มีต่อโครงสร้างอาคารแล้ว เศษวัสดุที่เกิดขึ้นนี้ยังสามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้อาคารได้อีกด้วย ยกตัวอย่างเช่น เศษแก้วที่แตกกระจายจากแรงระเบิดจะมีความคมและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงซึ่งสามารถทำให้ผู้ที่อยู่ในอาคารได้รับบาดเจ็บสาหัสได้ ส่วนในกรณีของเศษวัสดุขนาดใหญ่อาจก่อให้เกิดการบาดเจ็บในลักษณะของการฟกช้ำเนื่องจากถูกเศษวัสดุกระแทกได้เช่นกัน

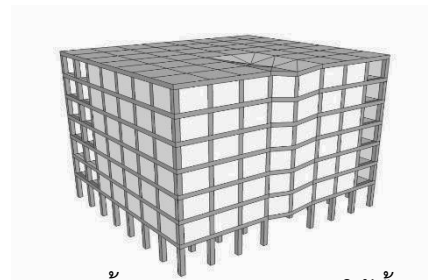
7.1.6 โครงสร้างขาดการป้องกันการพังถล่มแบบต่อเนื่อง

การพังถล่มแบบต่อเนื่อง (progressive collapse) หมายถึงการวิบัติของอาคารที่มีการขยายขอบเขตความเสียหายออกไปในลักษณะของปฏิกิริยาลูกโซ่ซึ่งเริ่มต้นจากการวิบัติของชิ้นส่วนโครงสร้างอาคารบางจุดและนำไปสู่การพังทลายของอาคารบางส่วนหรือทั้งหมด การพิจารณาว่าอาคารเกิดการพังถล่มแบบต่อเนื่องหรือไม่นั้นจะดูได้จากการวิบัติขั้นสุดท้ายที่จะมีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับการวิบัติในขั้นแรก

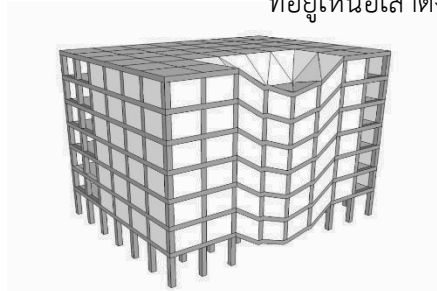
พฤติกรรมของการพังถล่มแบบต่อเนื่องนี้สามารถศึกษาได้จากเหตุการณ์การพังถล่มของอาคารศูนย์กลางการค้าโลก (World Trade Center) อาคาร 7 หรือ WTC-7 ซึ่งเป็นหนึ่งในอาคารจำนวนหลายหลังที่ได้รับผลกระทบจากการโจมตีอาคารศูนย์กลางการค้าโลก อาคาร 1 (WTC-1) และอาคาร 2 (WTC-2) ในเหตุการณ์ 9/11 โดยอาคาร WTC-7 เป็นอาคารสำนักงาน 47 ชั้น มีโครงสร้างอาคารประกอบด้วยโครงเหล็ก (steel frame) ทำหน้าที่รองรับน้ำหนักบรรทุกทุกเนื่องจากแรงโน้มถ่วง โครงรับโมเมนต์ดัด (moment frame) ที่อยู่โดยรอบอาคารทำหน้าที่ต้านทานแรงดัด และโครงแกนแน (braced frame) ซึ่งเป็นแกนของอาคารทำหน้าที่ต้านทานแรงด้านข้าง ผลการตรวจสอบการวิบัติของอาคารพบว่า การพังถล่มเริ่มต้นจากการที่อาคารได้รับความเสียหายจากเศษวัสดุของอาคาร WTC-1 ที่พังถล่มลงมา ซึ่งต่อมาพื้นที่บางส่วนภายในอาคารได้เกิดเพลิงไหม้อยู่เป็นระยะเวลาหนึ่งจนส่งผลให้เสาโครงสร้างหลักบางจุดสูญเสียกำลังในการรับแรง เกิดการโก่งเดาะและเกิดการวิบัติในที่สุด ทำให้โครงสร้างของอาคารส่วนที่อยู่เหนือเสาดังกล่าวเกิดการทรุดตัวลงมาพร้อมๆ กัน และส่งผลให้เกิดการพังถล่มอย่างต่อเนื่องซึ่งเกิดขึ้นหลังจากเริ่มเกิดเพลิงไหม้เป็นเวลา 7 ชั่วโมง ตัวอย่างของการเริ่มต้นและการขยายขอบเขตของการวิบัติจนนำไปสู่การพังถล่มอย่างต่อเนื่องจะแสดงอยู่ในรูปที่ 7-10



(ก) สภาพอาคารก่อนเริ่มวิบัติ



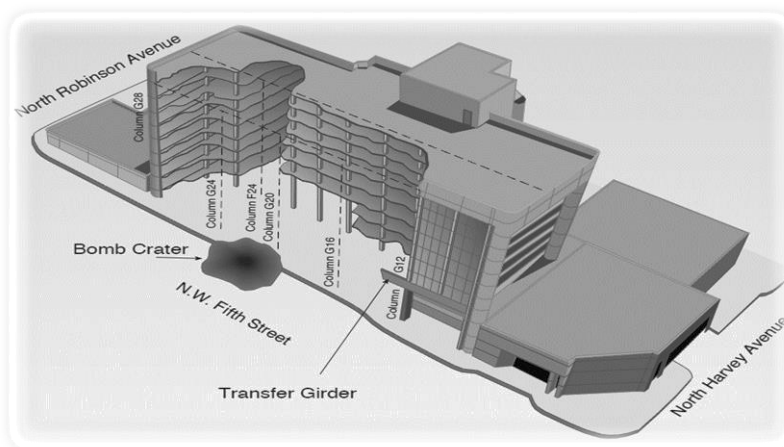
(ข) เสาอาคารชั้นล่างเกิดการวิบัติทำให้พื้นอาคารที่อยู่เหนือเสาดังกลางเกิดการทรุดตัวลงมา



(ค) เสาต้นถัดๆ ไปเกิดการวิบัติ ทำให้เกิดการพังถล่มแบบต่อเนื่อง

รูปที่ 7-10 ตัวอย่างแสดงขั้นตอนการเกิดการพังถล่มแบบต่อเนื่อง

เหตุการณ์วางระเบิดอาคารรัฐบาลกลาง อัลเฟรด พี เมอร์ราห์ ในเมืองโอคลาโฮมาซิตี รัฐโอคลาโฮมา ประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นอีกหนึ่งตัวอย่างที่สำคัญที่แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของการพังถล่มแบบต่อเนื่อง โดยเริ่มต้นจากการที่แรงระเบิดได้ทำลายเสาชั้นแรกของอาคารที่อยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิด 5 เมตร ซึ่งเสาดังกล่าวรองรับคานถ้อยแรง ส่งผลให้เสาที่อยู่ติดกันอีกสองต้นเกิดการวิบัติและนำไปสู่การพังถล่มของส่วนด้านหน้าอาคารทั้งหมดตามรูปที่ 7-11 จะสังเกตได้ว่าการพังถล่มเกิดเฉพาะที่ส่วนด้านหน้าอาคาร แต่ส่วนด้านริมอาคารทั้งสองฝั่งและส่วนด้านหลังอาคารไม่เกิดการพังถล่มลงมาด้วยเนื่องจากได้รับการออกแบบเป็นผนังรับแรง และยังช่วยพยุงให้โครงสร้างอาคารทั้งหมดไม่พังถล่มลงมา ไม่เช่นนั้นอาจส่งผลให้มีผู้เสียชีวิตและบาดเจ็บอีกเป็นจำนวนมาก



รูปที่ 7-11 การพังถล่มของอาคารรัฐบาลกลาง อัลเฟรด พี เมอร์ราห์
(ที่มา: FEMA-426/BIPS-06)

ดังนั้นในการออกแบบอาคารต้านทานแรงระเบิด การป้องกันการพังถล่มแบบต่อเนื่องเป็นสิ่งหนึ่งที่ผู้ออกแบบควรนำมาพิจารณาเพื่อที่จะจำกัดขนาดของความเสียหายที่จะเกิดขึ้น โดยข้อพิจารณาต่างๆ ในการออกแบบและความเกี่ยวข้องต่อการพังถล่มแบบต่อเนื่องนี้ได้ถูกสรุปอยู่ในตาราง 7-1

ตาราง 7-1 ข้อพิจารณาในการออกแบบและความเกี่ยวข้องต่อการพังถล่มแบบต่อเนื่อง

ข้อพิจารณา	ความเกี่ยวข้องต่อการพังถล่มแบบต่อเนื่อง
น้ำหนัก (weight)	แรงกระทำหลักในช่วงของการพังทลายแบบต่อเนื่องคือน้ำหนักบรรทุกจากแรงโน้มถ่วง ซึ่งลักษณะการกระจายของน้ำหนักอาคารสามารถบ่งบอกขอบเขตของการพังถล่มแบบต่อเนื่องได้ ดังนั้นเพื่อจำกัดขนาดของการพังถล่มแบบต่อเนื่องผู้ออกแบบควรออกแบบให้น้ำหนักบรรทุกจากแรงโน้มถ่วงมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ
แนวถ่ายแรง (load path) และระบบโครงสร้างส่วนเผื่อ (redundancy)	ระบบโครงสร้างที่แนวถ่ายแรงมีความต่อเนื่องและมีจำนวนโครงสร้างส่วนเผื่อที่เหมาะสมสามารถจำกัดการเริ่มต้นและการขยายขนาดของการพังถล่มได้
ความสูงของอาคาร	การพังถล่มแบบต่อเนื่องจะมีแนวโน้มที่มีความรุนแรงมากขึ้นตามความสูงของอาคาร
คานถ่ายแรง (transfer girder)	การออกแบบโครงสร้างอาคารที่มีคานถ่ายแรงจะมีแนวโน้มที่ทำให้เกิดการขยายขนาดของความเสียหายซึ่งส่งผลให้เกิดการพังถล่มแบบต่อเนื่องได้
ผนังรับน้ำหนัก	ผนังรับน้ำหนักแบบอิฐก่อที่ไม่มีการเสริมเหล็กจะมีโอกาสเกิดการพังถล่มแบบต่อเนื่องได้มากกว่าผนังคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งควรได้รับการออกแบบให้เป็นทั้งแนวถ่ายแรงทางตรงและเป็นส่วนหนึ่งของระบบโครงสร้างส่วนเผื่อได้
การต้านทานแรงด้านข้าง	ระบบโครงสร้างรับแรงด้านข้าง เช่น โครงแกนเหล็ก กำแพงรับแรงเฉือนคอนกรีต โครงต้านแรงดัด เป็นต้น ควรได้รับการออกแบบให้ยังคงมีเสถียรภาพอยู่ได้ทั้งในระหว่างและหลังการเกิดการพังทลายแบบต่อเนื่อง
ความเหนียว (ductility)	ชิ้นส่วนโครงสร้างและจุดเชื่อมต่อที่มีความเหนียวจะช่วยเพิ่มขีดความสามารถของโครงสร้างเพื่อรองรับความไม่แน่นอนของการพังถล่มแบบต่อเนื่องได้

การพัฒนาวิธีการมาตรฐานเพื่อลดความเสี่ยงต่อการเกิดการพังถล่มแบบต่อเนื่องนั้นเป็นสิ่งที่ทำได้ยากเนื่องจากโครงสร้างในแต่ละอาคารมีพฤติกรรมการวิบัติที่แตกต่างกัน ตั้งแต่การเริ่มต้นการวิบัติของชิ้นส่วนโครงสร้างชิ้นใดชิ้นหนึ่งหรือจำนวนหนึ่งซึ่งนำไปสู่การขยายขนาดความเสียหายเนื่องจากการวิบัติของชิ้นส่วนโครงสร้างส่วนอื่นๆ จนก่อให้เกิดการพังถล่มของอาคารในที่สุด นอกจากนี้การศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของโครงสร้างอาคารในระหว่างเกิดการพังถล่มแบบต่อเนื่องยังมีข้อมูลเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับพฤติกรรมของ

โครงสร้างอาคารภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกปกติ เช่น แรงโน้มถ่วง แรงลม แรงแผ่นดินไหว หรือแรงสั่นสะเทือน เป็นต้นซึ่งได้มีการศึกษาจนมีความเข้าใจเป็นอย่างดี

ในปัจจุบันการเพิ่มความสามารถในการต้านทานการพังถล่มแบบต่อเนื่องมีอยู่ 2 วิธี คือ วิธีทางอ้อม (indirect methods) และวิธีทางตรง (direct methods) ซึ่งวิธีทางอ้อมจะเป็นการปฏิบัติตามข้อกำหนดในการออกแบบโครงสร้างอาคาร โดยที่ผู้ออกแบบไม่จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์เพิ่มเติม ยกตัวอย่างเช่น มาตรฐานการออกแบบอาคารบริการสาธารณะ (Facility Standards for the Public Building Services) ของ General Service Administration (GSA) ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ระบุว่าเสาของอาคารควรสามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกทุกต่อไปได้ถึงแม้ว่าช่วงความสูงที่ปราศจากการค้ำยันด้านข้างเพิ่มจากหนึ่งชั้นเป็นสองชั้น หรือในอาคารจอดรถที่มีตั้งแต่สองชั้นขึ้นไปจะต้องออกแบบให้เสาสามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกได้ทุกได้หากความสูงของเสาที่ปราศจากการค้ำยันด้านข้างเพิ่มขึ้นจากหนึ่งชั้นเป็นสามชั้น เป็นต้น อีกตัวอย่างหนึ่งคือข้อกำหนดด้านการออกแบบเพื่อให้ชิ้นส่วนโครงสร้างให้มีการเชื่อมต่อที่แน่นหนา ตามที่ระบุอยู่ในคู่มือการออกแบบอาคารต้านทานการพังถล่มแบบต่อเนื่อง (Design of Buildings to Resist Progressive Collapse) หรือ UFC 4-023-03 ของ Department of Defense ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นต้น

ส่วนวิธีทางตรงจะใช้การวิเคราะห์โครงสร้างเป็นหลัก ซึ่งผู้ออกแบบจะพิจารณาถึงความสามารถในการต้านทานผลกระทบจากแรงกระทำที่ไม่ปกติโดยใช้วิธีการคำนวณโดยตรง โดยการวิเคราะห์ความต้านทานต่อการพังถล่มแบบต่อเนื่องของอาคารสามารถทำได้หลายวิธี ตั้งแต่วิธีสถิตยศาสตร์ที่พิจารณาคูณสมบัติของวัสดุเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic static analysis) ไปจนถึงวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์แบบพลศาสตร์ที่พิจารณาคูณสมบัติของวัสดุและรูปทรงเป็นแบบไม่เชิงเส้น (non-linear dynamic finite element analysis) โดย GSA และ Department of Defense (DOD) ได้กำหนดให้มีการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบการพังถล่มอย่างต่อเนื่องของอาคารโดยการสมมติให้ชิ้นส่วนโครงสร้างที่สำคัญเช่น เสา ผนังรับน้ำหนักบางส่วน หรือคานเกิดการวิบัติ ซึ่งหากโครงสร้างที่เหลืออยู่สามารถรองรับแรงที่กระทำได้ก็จะถือว่าโอกาสที่อาคารจะเกิดการพังถล่มแบบต่อเนื่องอยู่ในระดับต่ำ

7.2 ข้อพิจารณาในการออกแบบเพื่อต้านทานแรงระเบิดสำหรับระบบโครงสร้างแต่ละประเภท

7.2.1 ระบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดหล่อในที่ที่ถูกออกแบบให้มีความเหนียว (ductility) มักนำมาใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างต้านทานแรงระเบิด เนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตจะมีมวลที่มากเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างเหล็กส่งผลให้มีสมรรถนะในการต้านทานแรงเฉื่อยที่เพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถทนต่อแรงกระทำที่มีความเข้มสูงที่กระทำในช่วงเวลาสั้นๆ ที่เป็นผลจากการระเบิดระยะใกล้ได้ นอกจากนี้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กยังง่ายต่อการกำหนดสัดส่วน การเสริมกำลังเพื่อให้มีความเหนียว และมีความต่อเนื่องกันทั้งหมด การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีความเหนียวนอกจากจะช่วยให้ชิ้นส่วนโครงสร้างสามารถรองรับการโก่งตัวได้มากแล้ว ยังช่วยให้โครงสร้างสามารถรองรับแรงกระทำกลับทิศ (load reversal) ได้โดยไม่เกิดการพังถล่ม ตัวอย่างของหลักการออกแบบให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความเหนียวที่ผู้ออกแบบควรถือปฏิบัติมีดังนี้:

- มีการเสริมเหล็กแบบสมมาตร
- กำแพงควรต่อเนื่องจากพื้นชั้นล่างถึงพื้นชั้นถัดไป

- ตำแหน่งทาบเหล็กเสริมควรอยู่ห่างจากตำแหน่งที่มีความเค้นสูง
- ระยะห่างของเหล็กเสริมในกำแพงควรน้อยกว่าความหนาของกำแพงแต่ไม่น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความหนาของกำแพง
- มีรายละเอียดการเสริมเหล็กเพื่อให้โครงสร้างมีความเหนียวเป็นพิเศษเช่นเดียวกับที่ใช้ในอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว
- ควรจัดให้ระยะทาบและระยะฝังของเหล็กเสริม (development length) มีความยาวเพียงพอเพื่อให้ชิ้นส่วนอาคารสามารถพัฒนากำลังรับแรงดัดได้ถึงจุดสูงสุด (ultimate flexural capacity)
- เหล็กปลอกในคานควรมีระยะห่างไม่มากตลอดช่วงความยาวคาน ส่วนเสาควรใช้เหล็กปลอกแบบเกลียว (spiral) ที่บริเวณจุดเชื่อมต่อ โดยเหล็กปลอกควรมีมุมดัดไม่น้อยกว่า 135 องศา และมีระยะห่างไม่เกินครึ่งหนึ่งของความลึกประสิทธิภาพ (effective depth หรือ d)
- ควรตรวจสอบการพังถล่มแบบต่อเนื่องโดยสมมุติว่าส่วนของกำแพงที่อยู่ด้านนอกขนาดความสูงหนึ่งชั้นและความกว้างหนึ่งช่วงเสาเกิดการวิบัติ เป็นต้น

7.2.2 ระบบโครงสร้างชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปและโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง

ระบบโครงสร้างชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปและคอนกรีตอัดแรงมักถูกนำมาใช้ในการก่อสร้างอาคารพักอาศัยในเขตเมือง โดยในระบบโครงสร้างที่เป็นชิ้นส่วนสำเร็จรูปแบบแผ่น ผู้ออกแบบสามารถกำหนดรายละเอียดเพื่อให้โครงสร้างสามารถเกิดการเสียรูป (deformation) ได้อย่างมากจากแรงระเบิด ตัวอย่างหนึ่งที่แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะที่เพิ่มขึ้นของโครงสร้างชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีการกำหนดรายละเอียดเพิ่มเติมคือกรณีของอาคารทางทหาร Khobar Towers ในกรุงดาห์รานห์ ประเทศซาอุดีอาระเบีย ซึ่งถูกโจมตีในปี ค.ศ. 1996 ด้วยวัตถุระเบิดแสวงเครื่องที่บรรจุด้วยรยอนต์ โดยอาคารก่อสร้างด้วยโครงสร้างชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปที่เชื่อมต่อด้วยสลัก (bolt) ตามมาตรฐานโครงสร้างต้านทานแรงระเบิดของประเทศอังกฤษ (British Standard for Blast-Resistance Structures) แรงระเบิดเกิดขึ้นได้สร้างความเสียหายให้กับผนังด้านหน้าอาคารทั้งหมดแต่โครงสร้างส่วนใหญ่ของอาคารยังคงมีเสถียรภาพอยู่ได้ ตามรูปที่ 7-12



รูปที่ 7-12 ความเสียหายของอาคารทางทหาร Khobar Towers
(ที่มา: FEMA-426/BIPS-06)

โดยทั่วไปชิ้นส่วนโครงสร้างสำเร็จรูปจะได้รับการออกแบบให้มีฐานรองรับที่ปลายแผ่นโดยไม่มีการยึดด้วยสลักเหมือนแบบที่ใช้ในการออกแบบอาคาร Khobar ทำให้โครงสร้างเหล่านี้นั้นเสี่ยงต่อการพังถล่มแบบต่อเนื่องได้ ดังนั้นในการออกแบบโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูปจึงควรมีการกำหนดรายละเอียดการยึดของแผ่นชิ้นส่วนสำเร็จรูปเพื่อให้โครงสร้างมีกำลังและความเหนียวเพียงพอเพื่อสามารถต้านทานทั้งแรงอัดโดยตรงจากแรงระเบิดและแรงดึงที่เกิดจากการดีดกลับของชิ้นส่วนโครงสร้างได้

ส่วนระบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงนั้นจะไม่ค่อยมีประสิทธิภาพในการต้านทานแรงยก แรงกลับทิศ และแรงที่มีรูปแบบผิดปกติ แต่อย่างไรก็ตามการออกแบบแนวการวางลวดอัดแรง (cable profile) ที่มีการพิจารณาถึงแรงรูปแบบผิดปกติเหล่านี้หรือการเพิ่มเหล็กเสริมเข้าไปอีกอาจช่วยเพิ่มความสามารถของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงในการต้านทานการพังถล่มแบบต่อเนื่องซึ่งเป็นผลจากแรงระเบิดได้

7.2.3 ระบบโครงสร้างเหล็ก

ระบบโครงสร้างเหล็กได้ถูกนำมาใช้ในการก่อสร้างอาคารหลายประเภทโดยเฉพาะอาคารสูงเนื่องจากเหล็กเป็นวัสดุที่มีความเหนียวทำให้สามารถต้านทานการเสียรูปอย่างมากได้ ดังนั้นการออกแบบโครงสร้างเหล็กจึงควรมีการกำหนดรายละเอียดที่เหมาะสมเพื่อสามารถใช้ประโยชน์จากความเหนียวของวัสดุเหล็กได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ นอกจากนี้จุดเชื่อมต่อควรมีการออกแบบให้เหมาะสมเช่นเดียวกันเพื่อให้โครงสร้างมีความต่อเนื่อง

เนื่องจากการก่อสร้างอาคารโครงสร้างเหล็กโดยทั่วไปนิยมใช้เหล็กgrupพรรณชนิดหน้าตัดแบบปีกบาง (thin-flanged section) ซึ่งมีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายเฉพาะจุด (localized damage) ทำให้ชิ้นส่วนโครงสร้างไม่สามารถพัฒนากำลังจนถึงขีดสูงสุดได้ จึงมีการใช้คอนกรีตหุ้มเหล็กgrupพรรณนี้เพื่อป้องกันการวิบัติเฉพาะจุดและยังเป็นการเพิ่มความต้านทานแรงเฉื่อยให้กับระบบโครงสร้างซึ่งส่งผลให้ความต้านทานแรงระเบิดของโครงสร้างเหล็กเพิ่มขึ้น อีกทั้งการหุ้มด้วยคอนกรีตยังช่วยเรื่องการทนไฟของโครงสร้างเหล็กอีกด้วย โดยคอนกรีตที่หุ้มนี้ควรมีความหนาไม่น้อยกว่า 100 มิลลิเมตร (4 นิ้ว)

โดยทั่วไปโครงสร้างเหล็กเหมาะในการต้านทานแรงระเบิดชนิดความรุนแรงต่ำที่มีช่วงระยะเวลาที่ยาวซึ่งเกิดจากการระเบิดระยะไกล แต่ความยืดหยุ่นของโครงสร้างเหล็กอาจทำให้โครงสร้างต้องเผชิญกับการดีดกลับอย่างรุนแรง ดังนั้นในการออกแบบจึงจำเป็นต้องพิจารณาให้โครงสร้างสามารถต้านทานแรงกระทำกลับทิศนี้ได้ด้วย ยกตัวอย่างเช่น ในโครงสร้างเหล็กทั่วๆ ไปพื้นอาคารจะก่อสร้างด้วยคอนกรีตที่หล่อพร้อมกับแผ่นเหล็กขึ้นรูป (metal decking) ที่ทำหน้าที่เป็นทั้งเหล็กเสริมรับแรงดึงและแบบรอง (forming) ของพื้น ซึ่งการใช้แผ่นเหล็กขึ้นรูปนี้สามารถป้องกันการร่วงหล่นของเศษวัสดุที่ผิวล่างของแผ่นพื้นในกรณีที่เกิดการระเบิดบนพื้นอาคารแบบประชิด แต่หากเป็นการระเบิดภายในอาคารจะก่อให้เกิดแรงดันที่กระทำด้านล่างของพื้นอาคารชั้นบนทำให้คานที่รองรับพื้นนั้นต้องมีการเสริมเดือยเหล็ก (stud) อย่างแน่นหนาและควรมีจำนวนมากกว่าที่กำหนดไว้สำหรับการออกแบบเพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุกทุกจากแรงโน้มถ่วงเพื่อให้แผ่นพื้นสามารถถ่ายเทแรงสู่คานที่รองรับได้ และหากแผ่นพื้นมีการเชื่อมต่อกับโครงอาคารเหล็กอย่างเหมาะสม คานที่รองรับแผ่นพื้นเหล่านี้จะเกิดการโก่งตัวกลับด้านซึ่งเป็นผลจากแรงกระทำกลับทิศทำให้ปีกคานด้านล่าง ณ ตำแหน่งกลางคานต้องรองรับแรงอัดแทน ซึ่งอาจก่อให้เกิดการโก่งเดาะเฉพาะจุดได้หากไม่มีการค้ำยันที่เพียงพอ นอกจากนี้เนื่องจากแรงระเบิดจะกระทำต่อโครงสร้างในช่วงเวลาสั้นๆ ทำให้ในท้ายที่สุดปีกคานด้านล่าง ณ ตำแหน่งกลางคานจะกลับมารองรับแรงดึงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกจากแรงโน้มถ่วงเหมือนเดิม ดังนั้นถ้าหากไม่มีการค้ำยันที่เหมาะสม การโก่งเดาะที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้อาจส่งผลให้คานเหล็กเกิดการวิบัติเฉพาะจุดได้

ส่วนในกรณีที่ผู้ออกแบบต้องการลดความลึกของโครงสร้างโดยออกแบบให้ส่วนหนึ่งของหน้าตัดเหล็ก รูปพรรณฝังอยู่ในความหนาของแผ่นพื้นคอนกรีต ผู้ออกแบบควรกำหนดให้มีการเชื่อมเหล็กเส้นเสริมแรงของ แผ่นพื้นเข้ากับส่วนเอวของเหล็กรูปพรรณหรือเดินเหล็กทะลุผ่านรูที่ถูกเจาะไว้ที่ส่วนเอวเพื่อคงความต่อเนื่อง ของเหล็กเสริม ซึ่งการเชื่อมของเหล็กเสริมทั้งหมดจะต้องเป็นไปตามรายละเอียดงานเชื่อมสำหรับโครงสร้าง ต่ำนานแผ่นดินไหวเพื่อป้องกันการวิบัติแบบเปราะ

นอกจากนี้การต่อทาบเสาเหล็กจะต้องเป็นแบบที่สามารถถ่ายเทแรงตัดได้เต็มค่า (full-moment splices) และเพื่อใช้ประโยชน์จากกำลังและความเหนียวของเหล็กในการสลายพลังงานจากแรงระเบิดได้อย่างเต็มที่ จุด เชื่อมต่อระหว่างคานและเสาควรมีความแข็งแรงเพียงพอเพื่อให้ชิ้นส่วนโครงสร้างสามารถพัฒนากำลังรับแรง ตัดจนถึงจุดพลาสติก ซึ่งในกรณีนี้ผู้ออกแบบสามารถใช้รายละเอียดของจุดต่อเช่นเดียวกับที่ใช้สำหรับอาคาร ต่ำนานแผ่นดินไหวได้

บรรณานุกรม

1. U.S. Department of Defense, *Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions* (UFC 3-340-02), U.S. Department of Defense, Washington, DC, 2008.
2. Department of the Army, the Navy, and the Air Force, *Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*, *Army Technical Manual TM 5-1300*; *Navy Publication NAVFAC P-397*; *Air Force Regulation AFR 88-22*, Washington, DC, 1990.
3. U.S. Department of Homeland Security, *Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings* (FEMA-426/BIPS-06), U.S. Department of Homeland Security, Washington, DC, 2011.
4. American Society of Civil Engineers (ASCE), *Blast Protection of Buildings* (ASCE/SEI 59-11), American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2011.
5. Brode, H. L., Numerical Solution of Spherical Blast Waves, *Journal of Applied Physics*, American Institute of Physics, New York, 1955.
6. Mills, C. A., The Design of Concrete Structures to Resist Explosions and Weapon Effects, *Proceedings of the 1st Int. Conference on Concrete for Hazard Protections*, Edinburgh, UK, 1987.
7. Newmark, N. M., Hansen, R. J., Design of Blast Resistant Structures, *Shock and Vibration Handbook*, Vol. 3, Eds. Harris & Crede, McGraw-Hill, New York, 1961.
8. Naumenko, I. A., Petroskyi, I. G., *The Shock Wave of a Nuclear Explosion*, 1956.
9. Henrych, J., *The Dynamics of Explosion and Its Use*, Amsterdam, 1979.

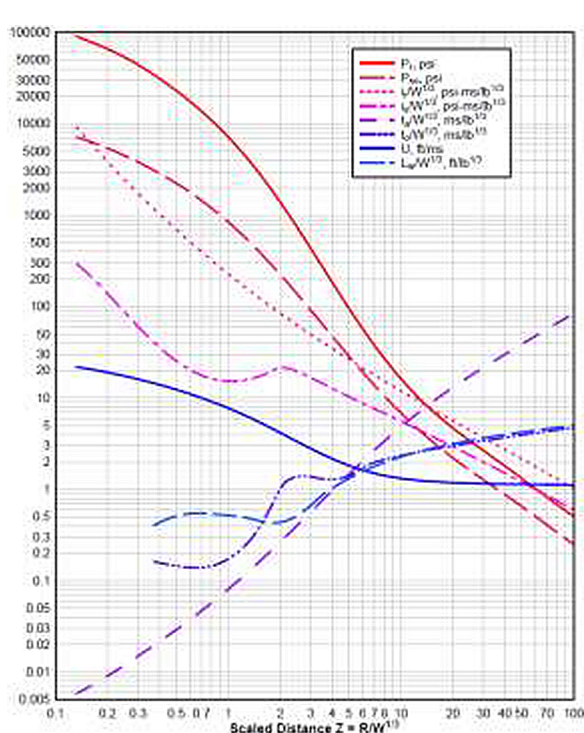
ภาคผนวก ก.

ผลการศึกษาสมการคำนวณแรงดันระเบิดเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟใน มาตรฐาน UFC 3-340-02

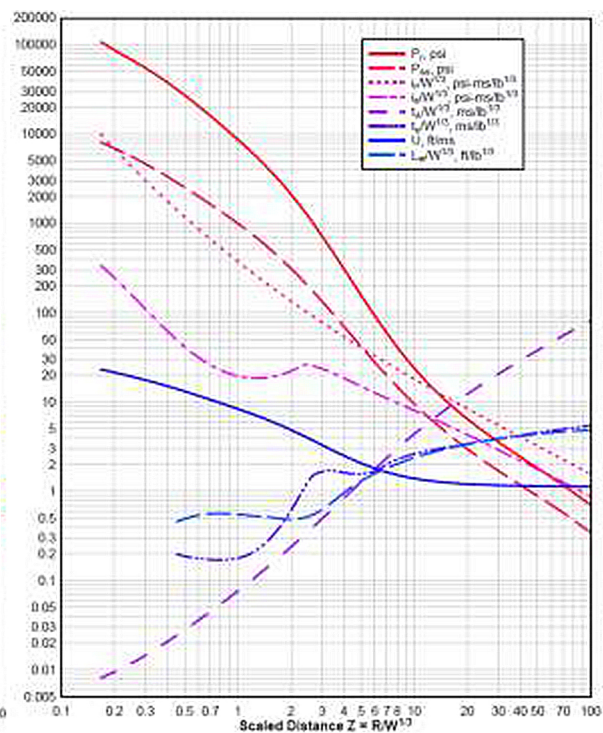
โดยทั่วไปการคิดแรงระเบิดที่กระทำต่ออาคารจะใช้ค่าแรงดันระเบิดสูงสุดและระยะเวลาของแรงดันระเบิดในช่วงบวกเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าพลังงานจากแรงระเบิดที่โครงสร้างต้องรองรับ ซึ่งจากผลงานวิจัยพบว่าค่าทั้งสองนี้มีความสัมพันธ์กับระยะปรับทอน (scaled distance หรือ Z) และได้มีการพัฒนาเครื่องมือ เช่น สมการ กราฟ โปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อนำมาใช้ในการทำนายค่าแรงดันระเบิดสูงสุด ระยะเวลาของแรงดันระเบิดในช่วงบวก และตัวแปรแรงระเบิดอื่นๆ ที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์ผลตอบสนองของโครงสร้างอาคาร ภายใต้แรงระเบิด ซึ่งในทางปฏิบัติการใช้กราฟที่อยู่ในคู่มือด้านเทคนิคของกองทัพบก ประเทศสหรัฐอเมริกา (Army Technical Manual หรือ TM 5-1300 หรือที่ต่อมาได้ปรับเปลี่ยนเป็น UFC 3-340-02) ได้รับการยอมรับมากที่สุดสำหรับการออกแบบอาคารต้านทานแรงระเบิด โดยกราฟดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้เป็นต้นแบบในการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ชื่อ Conwep ซึ่งสามารถประมาณค่าแรงดันระเบิดได้ใกล้เคียงกับการใช้กราฟใน UFC 3-340-02 โดยโปรแกรมประยุกต์ Conwep นี้ได้ถูกนำไปรวมในโปรแกรมคำนวณไฟไนต์อีลิเมนต์ เช่น LS-DYNA เป็นต้น เพื่อใช้ศึกษาผลตอบสนองของวัตถุภายใต้แรงกระทำเชิงพลศาสตร์ซึ่งเป็นผลจากแรงระเบิด แต่เนื่องจากค่าใช้จ่ายที่สูงในการใช้โปรแกรมคำนวณไฟไนต์อีลิเมนต์ที่มีการติดตั้ง Conwep และความไม่สะดวกและโอกาสที่จะเกิดความคลาดเคลื่อนจากการใช้กราฟใน UFC 3-340-02 ทำให้การใช้สมการเพื่อทำนายแรงระเบิดเป็นแนวทางที่เหมาะสมกว่าเมื่อผู้ออกแบบต้องการวิเคราะห์ผลตอบสนองของโครงสร้าง ภายใต้แรงระเบิดอย่างคร่าวๆ แต่เนื่องจากมีหลายงานวิจัยได้เสนอสมการสำหรับทำนายแรงดันระเบิดและยังไม่มีสมการใดที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลาย ดังนั้นผู้จัดทำคู่มือฉบับนี้จึงได้ทำการศึกษาความเหมาะสมของแต่ละสมการเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟใน UFC 3-340-02 และผลการศึกษาก็ได้ถูกสรุปอยู่ในภาคผนวกนี้ เพื่อผู้ออกแบบสามารถนำผลการศึกษามาใช้ประกอบการพิจารณาในการเลือกสมการที่เหมาะสมต่อไปได้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแรงระเบิดและระยะปรับทอน

ใน UFC 3-340-02 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแรงระเบิดช่วงบวกและระยะปรับทอนสำหรับการระเบิดแบบอิสระ (free-air burst) และการระเบิดบนพื้นดิน (surface burst) ได้ถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 5-3 และ 5-10 (รูปที่ ก-1 (a) และ (b) ในภาคผนวกนี้) ตามลำดับ ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแรงดันระเบิดช่วงลบและระยะปรับทอนสำหรับการระเบิดแบบอิสระและการระเบิดบนพื้นดินจะแสดงอยู่ในรูปที่ 5-4 และ 5-11 (รูป ก-2 (a) และ (b) ในภาคผนวกนี้) ตามลำดับ



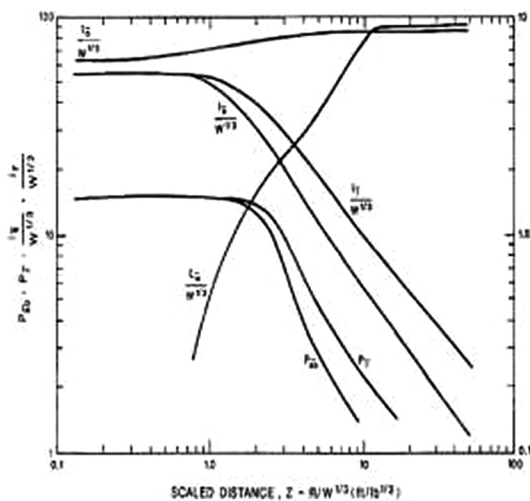
(a) สำหรับการระเบิดแบบอิสระ



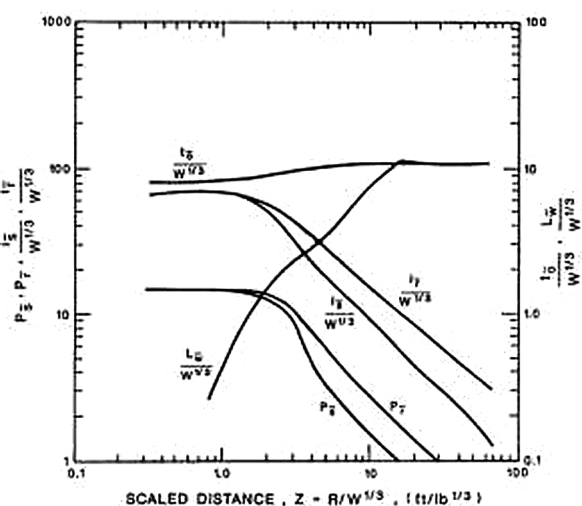
(b) สำหรับการระเบิดบนพื้นดิน

รูปที่ ก-1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแรงระเบิดช่วงบวกและระยะปรับทอน

(ที่มา: *Unified Facilities Criteria: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*
(UFC 3-340-02))



(a) สำหรับการระเบิดแบบอิสระ



(b) สำหรับการระเบิดบนพื้นดิน

รูปที่ ก-2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแรงดันระเบิดช่วงลบกับระยะปรับทอน

(ที่มา: *Unified Facilities Criteria: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*
(UFC 3-340-02))

โดยตัวแปรของแรงระเบิดที่สามารถหาค่าได้จากกราฟเหล่านี้จะประกอบด้วยแรงดันระเบิดสูงสุด (P_{so}) แรงดันระเบิดสะท้อนสูงสุด (P_r) แรงตลสูงสุด (i_s) แรงตลสะท้อนสูงสุด (i_r) ช่วงเวลาในการสลายแรงดันระเบิด (t_0) ช่วงเวลาในการเดินทางของคลื่นระเบิดจนมาถึงวัตถุ (t_d) ความเร็วของคลื่นกระแทก (U) และความยาวคลื่นระเบิด (L_w) ซึ่งผู้ออกแบบสามารถหาค่าของตัวแปรเหล่านี้ได้เมื่อทราบค่าระยะปรับทอนซึ่งหาได้จากอัตราส่วนระหว่างระยะห่างจุดศูนย์กลางระเบิด (R) และรากที่สามของน้ำหนักวัตถุระเบิด ($W^{1/3}$) หรือ $Z = R/W^{1/3}$ และจากผลการศึกษาพบว่าแรงดันระเบิดสูงสุดและแรงดันระเบิดสะท้อนสูงสุดเป็นตัวแปรแรงระเบิดหลักสำหรับการออกแบบโครงสร้างต้านทานระเบิดซึ่งผู้ออกแบบสามารถนำค่าตัวแปรแรงระเบิดทั้งสองนี้มาใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบแทนของโครงสร้างอาคารอย่างคร่าวๆ เชิงสถิติศาสตร์ต่อไปได้

สมการสำหรับทำนายแรงดันระเบิด

ถึงแม้ว่าการใช้กราฟใน UFC 3-340-02 เพื่อหาค่าแรงดันระเบิดสูงสุดและแรงดันระเบิดสะท้อนสูงสุดจะเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางสำหรับการออกแบบโครงสร้างต้านทานแรงระเบิด แต่การใช้กราฟอาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้และยังไม่เหมาะสำหรับการศึกษาเชิงความน่าเชื่อถือ (reliability study) ที่มักจะใช้การคำนวณเป็นหลัก จึงทำให้มีงานวิจัยที่พัฒนาสมการสำหรับทำนายค่าแรงดันระเบิดสูงสุดจากผลการทดสอบในสนามและได้มีการตีพิมพ์ในเอกสารวิจัยอยู่เป็นจำนวนหนึ่ง โดยในบทนี้ได้รวบรวมสมการสำหรับทำนายแรงดันระเบิดจากเอกสารวิชาการเหล่านั้นซึ่งประกอบด้วย

1. Brode (1955) ได้เสนอสมการสำหรับทำนายค่าแรงดันระเบิดสูงสุดสำหรับการระเบิดกลางอากาศแบบอิสระดังนี้

$$P_{so} = \frac{6.7}{Z^3} + 1 \text{ บาร์} \quad \text{สำหรับ } P_{so} > 10 \text{ บาร์}$$

$$P_{so} = \frac{0.975}{Z} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019 \text{ บาร์} \quad \text{สำหรับ } 0.1 \leq P_{so} \leq 10 \text{ บาร์}$$

2. Naumyenko and Petrovshyi (1956) ได้เสนอสมการในลักษณะใกล้เคียงกับของ Brode (1955) ดังนี้

$$P_{so} = \frac{10.7}{Z^3} - 1 \text{ บาร์} \quad \text{สำหรับ } Z \leq 1 \text{ เมตร/กิโลกรัม}^{1/3}$$

$$P_{so} = \frac{0.76}{Z} + \frac{2.55}{Z^2} + \frac{6.5}{Z^3} \text{ บาร์} \quad \text{สำหรับ } 1 < Z \leq 15 \text{ เมตร/กิโลกรัม}^{1/3}$$

3. Henrych (1979) ได้เสนอสมการสำหรับทำนายแรงดันระเบิดสูงสุดที่ถูกแบ่งออกตามช่วงของระยะปรับทอนจำนวนสามช่วงดังนี้

$$P_{so} = \frac{14.072}{Z} + \frac{5.540}{Z^2} - \frac{0.357}{Z^3} + \frac{0.00625}{Z^4} \text{ บาร์} \quad \text{สำหรับ } 0.05 \leq Z < 0.3 \text{ เมตร/กิโลกรัม}^{1/3}$$

$$P_{so} = \frac{6.194}{Z} - \frac{0.326}{Z^2} + \frac{2.132}{Z^3} \text{ บาร์} \quad \text{สำหรับ } 0.3 \leq Z \leq 1 \text{ เมตร/กิโลกรัม}^{1/3}$$

$$P_{so} = \frac{0.662}{Z} + \frac{4.05}{Z^2} + \frac{3.288}{Z^3} \text{ บาร์} \quad \text{สำหรับ } 1 < Z \leq 10 \text{ เมตร/กิโลกรัม}^{1/3}$$

4. Mills (1987) ได้เสนอสมการทำนายแรงดันระเบิดสูงสุดสำหรับหน่วยกิโลปาสกาล

$$P_{so} = \frac{1772}{Z^3} - \frac{114}{Z^2} + \frac{108}{Z} \text{ กิโลปาสกาล}$$

5. Newmark and Hansen (1961) ได้เสนอสมการทำนายแรงดันระเบิดสูงสุดสำหรับการระเบิดบนพื้นดิน ดังนี้

$$P_{so} = 6,784 \frac{W}{R^3} + 93 \left(\frac{W}{R^3} \right)^{1/2} \text{ กิโลปาสกาล}$$

$$\text{หรือ } P_{so} = \frac{6,784}{Z^3} + \frac{93}{(Z^{3/2})} \text{ กิโลปาสกาล}$$

ค่าแรงดันระเบิดสูงสุดที่คำนวณได้จากสมการเหล่านี้สามารถนำมาคำนวณเพื่อหาค่าแรงดันระเบิดสะท้อนสูงสุดซึ่งจะถือเป็นแรงที่กระทำต่อโครงสร้างอาคารด้านที่หันสู่จุดศูนย์กลางระเบิด สำหรับการคำนวณ Mills (1987) ได้เสนอสมการทำนายแรงดันระเบิดสะท้อนสูงสุดเมื่อคลื่นระเบิดกระทบกับวัตถุที่กีดขวางอยู่ในแนวของคลื่น ดังนี้

$$P_r = 2P_{so} \left\{ \frac{7P_o + 4P_{so}}{7P_o + P_{so}} \right\} \text{ กิโลปาสกาล}$$

$$\text{หรือ } P_r = 2P_{so} \left\{ \frac{710 + 4P_{so}}{710 + P_{so}} \right\} \text{ กิโลปาสกาล เมื่อคิดแรงดันบรรยากาศ (P_o) เท่ากับ 100 กิโลปาสกาล}$$

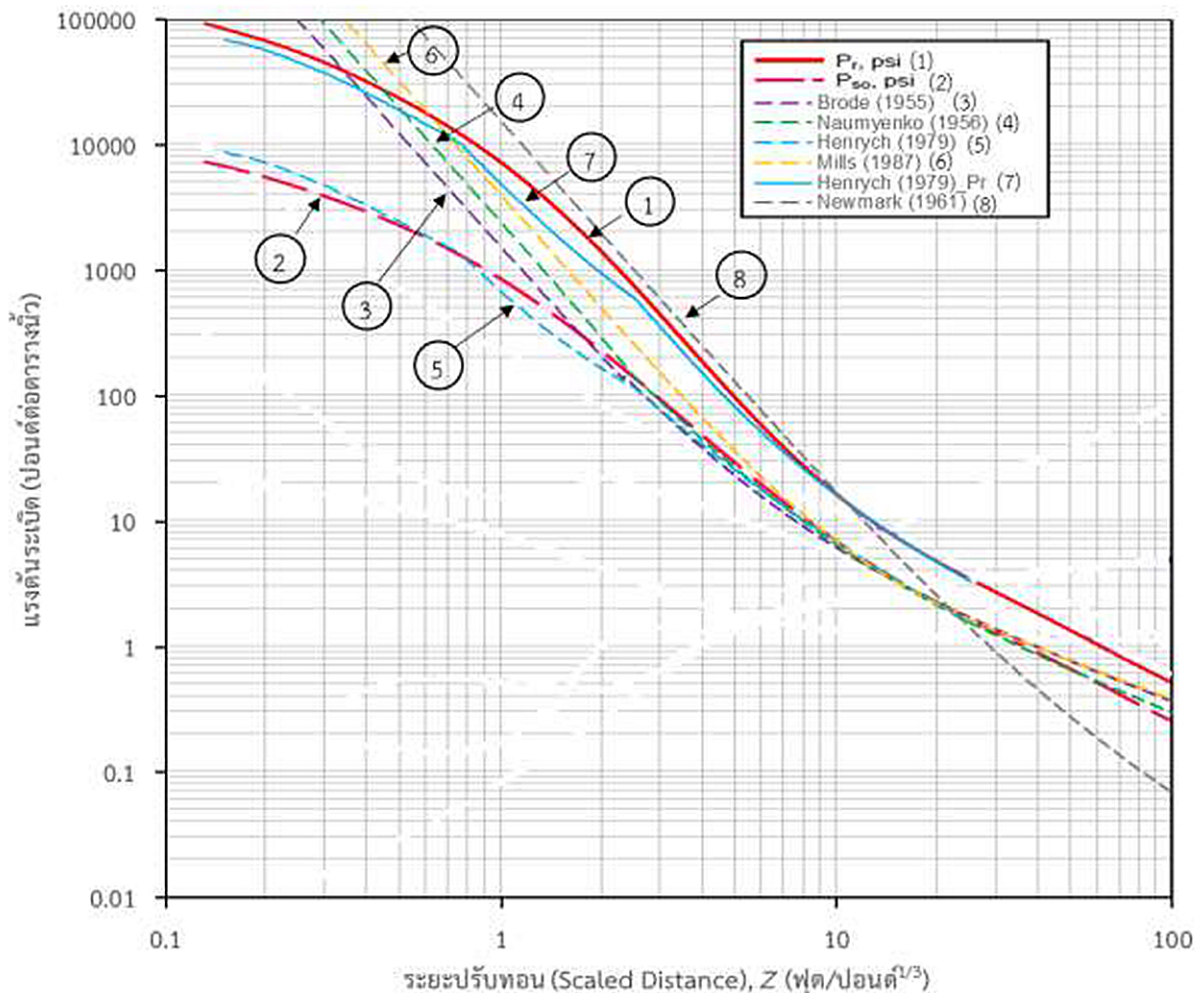
สมการคำนวณแรงดันระเบิดสูงสุดที่กล่าวมานี้มักจะถูกอ้างอิงอยู่ในเอกสารทางวิชาการจำนวนหนึ่งเพื่อแสดงให้เห็นถึงความไม่แน่นอนของการคำนวณแรงระเบิดเมื่อต้องการศึกษาความแปรปรวนของข้อมูลผลตอบแทนของอาคารที่ถูกกระทำด้วยแรงระเบิด แต่จากผลการศึกษาพบว่าแม้จะมีการอ้างอิงสมการเหล่านี้แต่ไม่มีหลักฐานที่แสดงถึงการเปรียบเทียบความถูกต้องของแต่ละสมการ ทำให้ผู้ที่นำสมการเหล่านี้ไปใช้ในการออกแบบขาดความมั่นใจ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงได้นำสมการเหล่านี้มาเปรียบเทียบกับกราฟของ UFC 3-340-02 ซึ่งถือว่าเป็นเครื่องมือการคิดแรงดันระเบิดสูงสุดที่เป็นที่ยอมรับ โดยผลการเปรียบเทียบนี้จะกล่าวอยู่ในหัวข้อถัดไป

ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันระเบิดสูงสุดระหว่างการใช้สมการคำนวณและการใช้กราฟ UFC 3-340-02

ในการเปรียบเทียบค่าแรงดันระเบิดสูงสุดจากวิธีคำนวณด้วยสมการและวิธีใช้กราฟ UFC 3-340-02 สมการคำนวณแรงดันระเบิดสูงสุดที่เสนอโดย Brode (1955) Naumyenko and Petrovshyi (1956) Henrych (1979) Mills (1987) และ Newmark and Hansen (1961) ได้ใช้ในการคำนวณหาค่าแรงดันระเบิดสูงสุดสำหรับระยะปรับทอนในช่วง 0.04 ถึง 40 เมตร/กิโลกรัม^{1/3} (0.1 ถึง 100 ฟุต/ปอนด์^{1/3}) และนำค่าดังกล่าวมาวาดเป็นกราฟลอการิทึมสเกล (Logarithm Scale) เพื่อสามารถเปรียบเทียบกับกราฟ UFC 3-340-02 ได้ โดยผลการเปรียบเทียบได้แสดงอยู่ในรูปที่ ก-3 เป็นที่สังเกตว่าผลการเปรียบเทียบนี้แสดงอยู่ในหน่วย US Customary เพื่อให้สอดคล้องกับกราฟต้นฉบับ

ผลการเปรียบเทียบพบว่าสมการคำนวณแรงดันระเบิดสูงสุดของ Henrych (1979) (เส้นหมายเลข 5) ให้ค่าแรงดันระเบิดสูงสุด (P_{so}) ใกล้เคียงกับค่าแรงดันระเบิดสูงสุดจากกราฟ UFC 3-340-02 (เส้นหมายเลข 2) มากที่สุด ส่วนสมการของ Brode (1955) (เส้นหมายเลข 3) และ Naumyenko and Petrovshyi (1956) (เส้นหมายเลข 4) จะให้ค่าใกล้เคียงกับกราฟ UFC 3-340-02 เมื่อระยะปรับทอนมีค่าตั้งแต่ 2 ฟุต/ปอนด์^{1/3} ขึ้นไป ส่วนสมการของ Mills (1987) (เส้นหมายเลข 6) จะให้ค่าใกล้เคียงกับกราฟ UFC 3-340-02 เมื่อระยะปรับทอนมีค่าตั้งแต่ 10 ฟุต/ปอนด์^{1/3} เป็นต้นไป แต่จะสังเกตได้ว่าสมการของ Newmark and Hansen

(1961) (เส้นหมายเลข 8) จะให้ค่าแตกต่างจากกราฟ UFC 3-340-02 เป็นอย่างมาก นอกจากนี้ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่าสมการคำนวณแรงดันระเบิดสะท้อนสูงสุดของ Henrych (1979) (เส้นหมายเลข 7) ยังให้ค่าใกล้เคียงกับค่าแรงดันระเบิดสะท้อนสูงสุดในกราฟ UFC 3-340-02 (เส้นหมายเลข 1) อีกด้วย



รูปที่ ก-3 การเปรียบเทียบค่าแรงดันระเบิดสูงสุดจากวิธีสมการคำนวณและกราฟของ UFC 3-340-02

อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษานี้เป็นเพียงการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงดันระเบิดสูงสุดที่คำนวณได้จากการใช้สมการคำนวณแรงระเบิดที่ตีพิมพ์อยู่ในเอกสารทางวิชาการกับค่าจากกราฟของ UFC 3-340-02 เท่านั้น เพื่อให้ผู้ออกแบบสามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจหากมีความต้องการใช้สมการคำนวณเพื่อทดแทนการใช้กราฟ แต่ทั้งนี้ผลการศึกษานี้ไม่ได้มีจุดประสงค์เพื่อแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องของสมการใดสมการหนึ่ง เนื่องจากไม่ได้มีการศึกษาถึงการพัฒนาสมการเหล่านี้ ซึ่งทำให้แต่ละสมการอาจมีข้อกำหนดในการใช้งานที่แตกต่างกันไป

ภาคผนวก ข.

ตัวอย่างการคำนวณแรงระเบิด

ในภาคผนวกนี้จะแสดงตัวอย่างการคำนวณแรงระเบิดด้วยวิธีเชิงประจักษ์ (empirical method) ที่ได้ อธิบายในบทที่ 5 ซึ่งวิธีเชิงประจักษ์นี้ได้มาจาก *Unified Facilities Criteria: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions* (UFC 3-340-02) ที่จัดทำโดย Department of Defense (DOD) ของ ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งในปัจจุบันถือได้ว่าเป็นวิธีการคำนวณแรงระเบิดที่ได้รับการยอมรับและใช้กันอย่าง แพร่หลาย และเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจของผู้อ่าน ตัวอย่างนี้จึงสมมติเป็นอาคารรูปทรงสี่เหลี่ยมหลังคาเรียบ ที่ถูกคลื่นแรงระเบิดกระทำที่ผนังด้านหน้าโดยคุณสมบัติของคลื่นแรงระเบิดที่กระทำที่ผนังด้านหน้าในแต่ละจุด มีค่าไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากวิธีเชิงประจักษ์ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาโดยใช้หน่วย US Customary เป็นหลัก ดังนั้นเพื่อให้สอดคล้องกับสูตรการคำนวณและแผนภาพต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณแรงระเบิดด้วยวิธีเชิง ประจักษ์นี้ หน่วยของตัวแปรต่างๆ ในตัวอย่างนี้จะใช้เป็นหน่วย US Customary เช่นกัน

1. การคำนวณค่าตัวแปรพื้นฐานต่างๆ ของคลื่นระเบิด

โดยข้อมูลของอาคาร ขนาดวัตถุระเบิด และตำแหน่งการระเบิดมีดังนี้

$$\text{ความกว้างของอาคารด้านหน้า } (B_W) = 150 \text{ ฟุต}$$

$$\text{ความลึกของอาคาร } (B_D) = 50 \text{ ฟุต}$$

$$\text{ความสูงของอาคาร } (B_H) = 20 \text{ ฟุต}$$

$$\text{ขนาดวัตถุระเบิด } (W) = 10,000 \text{ ปอนด์}$$

$$\text{ระยะห่างจุดศูนย์กลางระเบิด } (R) = 215 \text{ ฟุต}$$

$$\text{ดังนั้น ระยะปรับทอน } (Z) = \frac{R}{W^{1/3}} = \frac{215}{10,000^{1/3}} = 10.0 \text{ ฟุตต่อปอนด์}^{1/3}$$

เนื่องจากสมมติให้เป็นการระเบิดบนพื้นแบบไม่ปิดล้อม ดังนั้นค่าตัวแปรพื้นฐานต่างๆ ของคลื่นระเบิด สามารถหาได้จากรูปที่ 5-10 โดยตัวแปรต่างๆ มีค่าดังนี้

$$\text{แรงดันระเบิดโดยตรงสูงสุด } (P_{so}) = 10 \text{ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว}$$

$$\text{ความเร็วคลื่นระเบิด } (U) = 1.4 \text{ ฟุตต่อมิลลิวินาที}$$

$$\text{ช่วงเวลาปรับทอนช่วงบวก } \left(\frac{t_o}{W^{1/3}}\right) = 2.6 \text{ มิลลิวินาทีต่อปอนด์}^{1/3}$$

$$\text{ดังนั้น ช่วงเวลาช่วงบวก } (t_o) = (2.6 \text{ มิลลิวินาทีต่อปอนด์}^{1/3})(10,000 \text{ ปอนด์})^{1/3} = 56 \text{ มิลลิวินาที}$$

$$\text{ความยาวคลื่นช่วงบวก } (L_w) \text{ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 5-10}$$

$$\text{ดังนั้น } L_w = (U)t_o = (1.4 \text{ ฟุตต่อมิลลิวินาที})(56 \text{ มิลลิวินาที}) = 78 \text{ ฟุต}$$

ส่วนค่าแรงดันพลศาสตร์สูงสุด (q_o) สามารถหาได้จากรูปที่ 4-3 เมื่อทราบค่า P_{so}

$$\text{สำหรับ } P_{so} = 10 \text{ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ดังนั้น } q_o = 2.1 \text{ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว}$$

หรืออาจคำนวณ q_o ได้โดยใช้สมการ 4-1

$$\text{ดังนั้น } q_o = 0.022(P_{so})^2 = 0.022(10 \text{ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว})^2 = 2.2 \text{ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว}$$

2. การคำนวณแรงระเบิดที่ผนังด้านหน้าอาคาร

สำหรับตัวอย่างนี้ ผนังด้านหน้าอาคารจะถูกสมมติว่าเป็นผนังที่ตั้งตรงในแนวดิ่งโดยมีช่วงความสูงตั้งแต่ฐานรากถึงหลังคา โดยการคำนวณนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาค่าตัวแปรต่างๆ ที่แสดงอยู่ในความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระเบิดที่กระทำที่ผนังด้านหน้าอาคารและเวลาตามที่แสดงอยู่ในรูปที่ 5-13

ค่าแรงดันระเบิดสะท้อนสูงสุด (P_r) สามารถหาได้จากรูปที่ 5-10 โดยใช้ค่า Z ที่คำนวณได้ก่อนหน้านี้

ดังนั้น สำหรับ $Z = 10.0$ ฟุตต่อปอนด์^{1/3} ค่า $P_r = 25$ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ค่าช่วงเวลาที่แรงดันระเบิดสะท้อนมีผลต่อโครงสร้าง (t_c) สามารถคำนวณได้จากสมการ 5-3 ซึ่งจำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรอีก 3 ตัวแปรได้แก่

ค่าที่น้อยกว่าระหว่าง B_H หรือ $B_W = S = 20$ ฟุต

ค่าที่มากกว่าระหว่าง B_H หรือ $B_W = G = 150$ ฟุต

ค่าความเร็วของคลื่นเสียง (C_r) ซึ่งหาได้จากรูปที่ 5-14 โดยใช้ค่า P_{so} ที่ทราบค่าก่อนหน้านี้

ดังนั้น สำหรับ $P_{so} = 10$ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ค่า $C_r = 1.28$ ฟุตต่อมิลลิวินาที

$$\text{เพราะว่า } R = \frac{S}{G}$$

$$\text{ดังนั้น } t_c = \frac{4(20 \text{ ฟุต})}{(1 + (20 \text{ ฟุต})/(150 \text{ ฟุต}))1.28 \text{ ฟุตต่อมิลลิวินาที}} = 55.2 \text{ มิลลิวินาที} \approx t_o$$

ค่าแรงดันระเบิดพลศาสตร์สูงสุด (P_s) สามารถคำนวณได้จากสมการ 5-4 ซึ่งโดยทั่วไปสมมติให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงหวง (C_D) นี้จะกำหนดให้เท่ากับ 1.0

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } P_s &= P_{so} + C_D q_o = (10 \text{ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว}) + (1.0)(2.2 \text{ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว}) \\ &= 12.2 \text{ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว} \end{aligned}$$

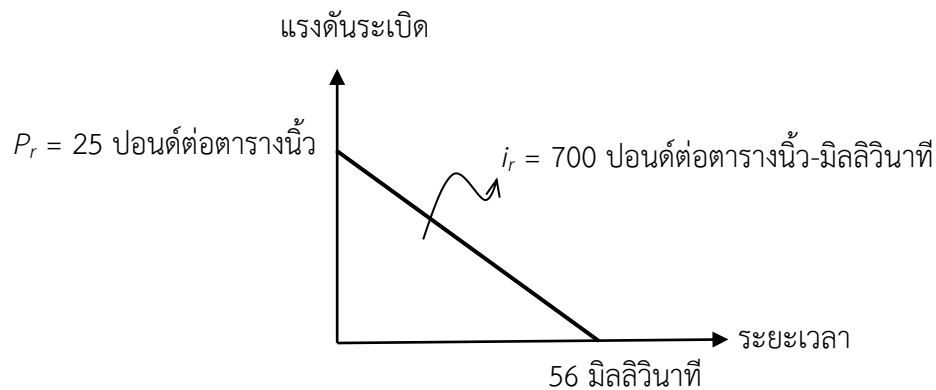
ในการหาความสัมพันธ์ของแรงดันสะท้อนเทียบเท่าเพื่อตรวจสอบว่าค่าตัวแปรต่างๆ ที่คำนวณได้ก่อนหน้านี้เป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ในข้อ 5.3.2 หรือไม่นั้น จะเริ่มจากการหาค่าแรงดลสะท้อนเทียบเท่า (i_s) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 5-5

$$\begin{aligned} \text{ค่าแรงดลสะท้อนเทียบเท่า } (i_s) &= 0.5(P_r - P_s)t_c + 0.5P_s t_o \text{ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว-มิลลิวินาที} \\ &= 0.5(25 - 10)(56) + 0.5(10)(56) \\ &= 700 \text{ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว-มิลลิวินาที} \end{aligned}$$

ส่วนค่าช่วงเวลาแรงดันสะท้อนช่วงบวกลบเทียบเท่า (t_e) สามารถคำนวณได้จากสมการ 5-6

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } t_e &= \frac{2i_s}{P_r} = 2(700 \text{ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว-มิลลิวินาที})/(25 \text{ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว}) \\ &= 56 \text{ มิลลิวินาที} \end{aligned}$$

ต่อจากนั้นนำค่าตัวแปรต่างๆ ของแรงดันระเบิดช่วงบวกลบที่กระทำที่ผนังด้านหน้าอาคารมาหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระเบิดและเวลา โดยความสัมพันธ์ที่จะนำพิจารณาเป็นแรงที่กระทำที่ผนังด้านหน้าอาคารจะเป็นความสัมพันธ์ที่ให้ผลรวมของแรงดลสะท้อน (พื้นที่ใต้กราฟ) ที่น้อยกว่า แต่เนื่องจาก $t_o = t_c = t_e$ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระเบิดที่กระทำที่ผนังด้านหน้าอาคารและเวลาจะเป็นไปตามรูปที่ ข-1



รูปที่ ข-1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระเบิดกระทำที่ผนังด้านหน้าอาคารและเวลา

3. การคำนวณแรงระเบิดที่ผนังด้านข้างและหลังคา

การหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระเบิดและเวลาที่กระทำที่ผนังด้านข้างและหลังคาตามที่ได้แสดงในรูปที่ 5-17 มีสมมุติฐานว่าผนังด้านข้างและหลังคาวางตัวอยู่ในแนวขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นระเบิด ดังนั้นผลของแรงดันระเบิดสะท้อนจึงไม่นำมาพิจารณา โดยค่าของตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างความสัมพันธ์ที่แสดงอยู่ในรูปที่ 5-17 มีดังต่อไปนี้

ค่าความลึกของอาคาร (L) = 50 ฟุต

ค่าความยาวคลื่นช่วงบวก (L_w) = 78 ฟุต

ดังนั้น $L_w/L = (78 \text{ ฟุต})/(50 \text{ ฟุต}) = 1.6$

ค่าสัมประสิทธิ์แรงเทียบเท่า (C_E) สามารถหาได้จากรูปที่ 5-18

ดังนั้น สำหรับ $L_w/L = 1.6$ ค่า $C_E \approx 0.6$

ค่าสัมประสิทธิ์แรงหน่วง (C_D) สามารถหาได้จากตาราง 5-1

ดังนั้น สำหรับ $q_o = 2.2$ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ค่า $C_D = -0.4$

ค่าแรงดันระเบิดเทียบเท่าช่วงบวก (P_R) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 5-11

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } P_R &= C_E P_{so} + C_D q_o \text{ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว} \\ &= (0.6)(10 \text{ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว}) + (-0.4)(2.2 \text{ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว}) \\ &= 5.1 \text{ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว} \end{aligned}$$

ค่าช่วงเวลาเทียบเท่าที่แรงดันระเบิดมีค่าสูงสุด ($t_d/W^{1/3}$) สามารถหาได้จากรูปที่ 5-19

ดังนั้น สำหรับ $L_w/L = 1.6$ และค่า $P_{so} = 10$ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ดังนั้น $t_d/W^{1/3} \approx 1.4$ มิลลิวินาทีต่อปอนด์^{1/3}

ดังนั้น $t_d = (1.4 \text{ มิลลิวินาทีต่อปอนด์}^{1/3})(10,000 \text{ ปอนด์})^{1/3} = 30 \text{ มิลลิวินาที}$

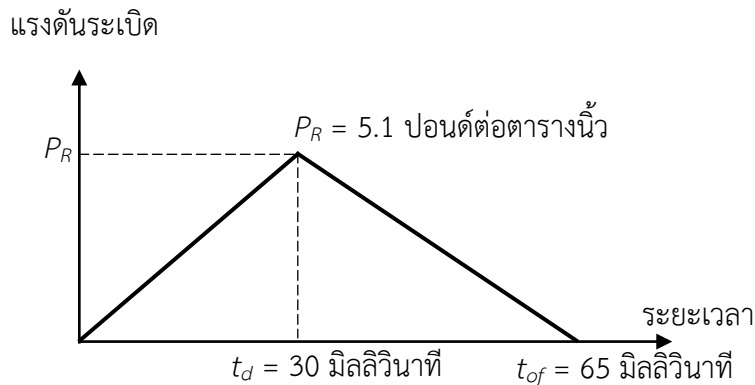
ค่าช่วงเวลาเทียบเท่าที่แรงดันระเบิดกระทำ ($t_{of}/W^{1/3}$) สามารถหาได้จากรูปที่ 5-20

สำหรับ $L_w/L = 1.6$ และค่า $P_{so} = 10$ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ดังนั้น $t_{of}/W^{1/3} \approx 3.0$ มิลลิวินาทีต่อปอนด์^{1/3}

ดังนั้น $t_{of} = (3.0 \text{ มิลลิวินาทีต่อปอนด์}^{1/3})(10,000 \text{ ปอนด์})^{1/3} = 65 \text{ มิลลิวินาที}$

ดังนั้น ความสัมพันธ์ของแรงดันระเบิดเทียบเท่าช่วงบวกและเวลาที่ผนังด้านข้างและหลังคา สามารถแสดงได้ตามรูปที่ ข-2



รูปที่ ข-2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระเบิดเทียบกับช่วงบวกและเวลาที่ผนังด้านข้างและหลังคา

4. การคำนวณแรงระเบิดที่ผนังด้านหลัง

การคำนวณแรงระเบิดที่กระทำที่ผนังด้านหลังจะใช้วิธีการคำนวณเช่นเดียวกับการคำนวณแรงระเบิดที่กระทำที่ผนังด้านข้างและหลังคา ซึ่งโดยทั่วไปจะสมมุติว่าผนังด้านหลังคือส่วนต่อของพื้นหลังคาแต่แรงระเบิดที่กระทำจะเริ่มพิจารณาเมื่อคลื่นแรงระเบิดเคลื่อนผ่านขอบผนังด้านข้างหรือหลังคา ดังนั้นในตัวอย่างนี้ ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระเบิดช่วงบวกที่กระทำที่ผนังด้านหลังและเวลา มีดังนี้

ระยะห่างจุดศูนย์กลางระเบิด (R) ที่ขอบหลังคาด้านหลัง = 215 ฟุต + 50 ฟุต = 265 ฟุต

$$\text{ดังนั้น ระยะปรับทอน (Z)} = \frac{R}{W^{1/3}} = \frac{265}{10,000^{1/3}} = 12.3 \text{ ฟุตต่อปอนด์}^{1/3}$$

สำหรับ $Z = 12.3$ ฟุต

แรงดันระเบิดโดยตรงสูงสุด (P_{so}) = 8 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ความเร็วคลื่นระเบิด (U) = 1.3 ฟุตต่อมิลลิวินาที

ช่วงเวลาปรับทอนช่วงบวก ($\frac{t_o}{W^{1/3}}$) = 3.0 มิลลิวินาทีต่อปอนด์^{1/3}

ดังนั้น ช่วงเวลาช่วงบวก (t_o) = (3.0 มิลลิวินาทีต่อปอนด์^{1/3})(10,000 ปอนด์)^{1/3} = 65 มิลลิวินาที

ความยาวคลื่นช่วงบวก (L_w) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 5-10

ดังนั้น $L_w = (U)t_o = (1.3 \text{ ฟุตต่อมิลลิวินาที})(65 \text{ มิลลิวินาที}) = 84.5$ ฟุต

ส่วนค่าแรงดันลมพลศาสตร์สูงสุด (q_o) สามารถหาได้จากรูปที่ 4-3 เมื่อทราบค่า P_{so}

สำหรับ $P_{so} = 8$ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ดังนั้น $q_o = 1.5$ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

หรืออาจคำนวณ q_o ได้โดยใช้สมการ 4-1

ดังนั้น $q_o = 0.022(P_{so})^2 = 0.022(8 \text{ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว})^2 = 1.4$ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ค่าความลึกของอาคาร (L) = 20 ฟุต

ดังนั้น $L_w/L = (84.5 \text{ ฟุต})/(20 \text{ ฟุต}) = 4.2$

ค่าสัมประสิทธิ์แรงเทียบเท่า (C_E) สามารถหาได้จากรูปที่ 5-18

ดังนั้น สำหรับ $L_w/L = 4.2$ ค่า $C_E \approx 0.86$

ค่าสัมประสิทธิ์แรงหน่วง (C_D) สามารถหาได้จากตาราง 5-1

ดังนั้น สำหรับ $q_o = 1.5$ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ค่า $C_D = -0.4$

ค่าแรงดันระเบิดเทียบเท่าช่วงบวกที่กระทำที่ผนังด้านหลัง (P_B) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 5-11

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } P_B &= C_E P_{sob} + C_D Q_{ob} \text{ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว} \\ &= (0.86)(8 \text{ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว}) + (-0.4)(1.5 \text{ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว}) \\ &= 6.3 \text{ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว} \end{aligned}$$

ค่าช่วงเวลาเทียบเท่าที่แรงดันระเบิดมีค่าสูงสุด ($t_d/W^{1/3}$) สามารถหาได้จากรูปที่ 5-19

ดังนั้น สำหรับ $L_w/L = 4.2$ และค่า $P_{sob} = 8$ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ดังนั้น $t_d/W^{1/3} \approx 0.6$ มิลลิวินาทีต่อปอนด์^{1/3}

ดังนั้น $t_d = (0.6 \text{ มิลลิวินาทีต่อปอนด์}^{1/3})(10,000 \text{ ปอนด์})^{1/3} = 13 \text{ มิลลิวินาที}$

ค่าช่วงเวลาเทียบเท่าที่แรงดันระเบิดกระทำ ($t_{of}/W^{1/3}$) สามารถหาได้จากรูปที่ 5-20

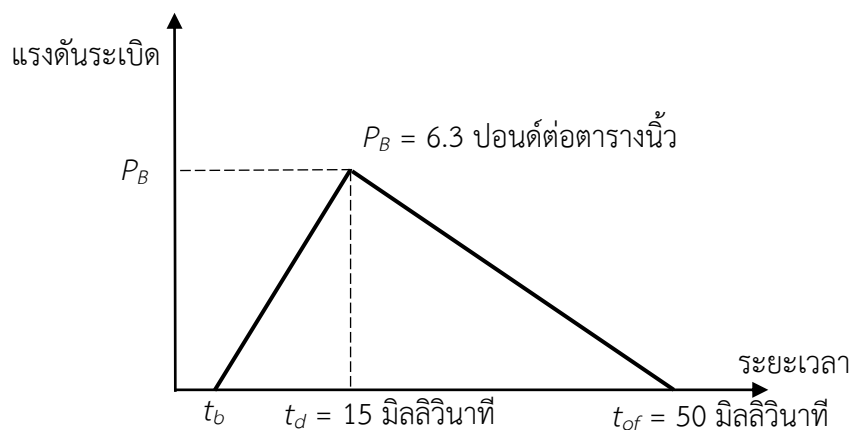
สำหรับ $L_w/L = 4.2$ และค่า $P_{sob} = 8$ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ดังนั้น $t_{of}/W^{1/3} \approx 2.3$ มิลลิวินาทีต่อปอนด์^{1/3}

ดังนั้น $t_{of} = (2.3 \text{ มิลลิวินาทีต่อปอนด์}^{1/3})(10,000 \text{ ปอนด์})^{1/3} = 50 \text{ มิลลิวินาที}$

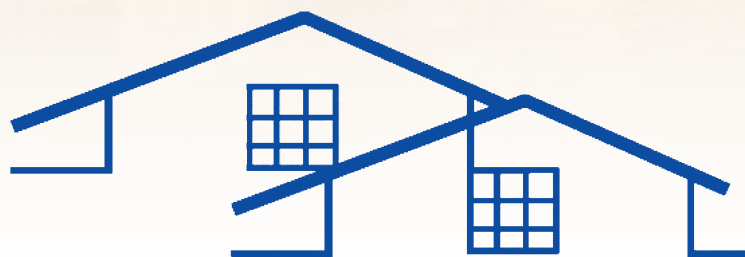
ดังนั้น ความสัมพันธ์ของแรงดันระเบิดเทียบเท่าช่วงบวกและเวลาที่ผนังด้านหลังสามารถแสดงได้ตามรูปที่

ข-3



รูปที่ ข-3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระเบิดเทียบเท่าช่วงบวกและเวลาที่ผนังด้านข้างและหลังคา

โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระเบิดและเวลาที่ผนังด้านต่างๆ เหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาผลตอบสนองของโครงสร้างอาคารด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ (dynamic analysis) หรือวิธีการวิเคราะห์แบบประวัติเวลา (time-history analysis) ต่อไป



**สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร
กรมโยธาธิการและผังเมือง
ถนนพระรามที่ 6 แขวงสามเสนใน เขตพญาไท
กรุงเทพฯ 10400 โทร 0-2299-4321 โทรสาร 0-2299-4321**