

การศึกษาพฤติกรรมความเครียดเฉพาะที่ระหว่างเกิดแผ่นดินไหวโดยการประเมิน
ความล้ารอบต่ำของเสาตอม่อสะพานเหล็กกำลังสูง

LOCAL STRAIN BEHAVIORS DURING EARTHQUAKES FROM LOW-CYCLE
FATIGUE ASSESSMENT OF HIGH-STRENGTH STEEL BRIDGE PIERS

รวิชญ์ ธรรมาธิวัฒน์

Rawit Thammathiwat

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สิ่งแวดล้อม และการจัดการงานก่อสร้าง
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2568

KMITL-2025-EN-M-097-083

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LOCAL STRAIN BEHAVIORS DURING EARTHQUAKES FROM LOW-CYCLE
FATIGUE ASSESSMENT OF HIGH-STRENGTH STEEL BRIDGE PIERS

Rawit Thammathiwat

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING ENVIRONMENTAL ENGINEERING AND
CONSTRUCTION MANAGEMENT
SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2025

KMITL-2025-EN-M-097-083

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2025

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาพฤติกรรมการความเครียดเฉพาะที่ระหว่างเกิดแผ่นดินไหวโดย การประเมินความล้ารอบต่ำของเสาต่อม่อสะพานเหล็กกำลังสูง
นักศึกษา	นายรัชชัญญ์ ธรรมาธิวัฒน์
รหัสประจำตัว	63601130
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา สิ่งแวดล้อม และการจัดการงานก่อสร้าง
พ.ศ.	2568
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ณัฐดนัย สีนสมุทรผดุง

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาพฤติกรรมการความเครียดเฉพาะที่ (Local strain) ในเสาต่อม่อสะพานเหล็กภายใต้สภาวะแผ่นดินไหว โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์เหตุการณ์แผ่นดินไหวครั้งใหญ่ในประเทศญี่ปุ่นและประเทศไทย โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเสาต่อม่อสะพานเหล็กที่ผลิตจากเหล็กกำลังปกติและเหล็กกำลังสูง พบว่าเสาสะพานเหล็กได้รับความเสียหายจากความล้ารอบต่ำ (Low-cycle fatigue damage) ที่อยู่ในช่วงความเครียดเชิงพลาสติกขนาดใหญ่ (Large plastic region) การประเมินความรุนแรงของความเสียหายดังกล่าวดำเนินการโดยใช้วิธีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method - FEM) ร่วมกับแนวคิด Effective Notch Strain ซึ่งถูกนำเสนอโดย International Institute of Welding (IIW) ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่า คลื่นแผ่นดินไหวส่งผลให้เกิดค่าความเครียดเฉพาะที่ (Local strain) อัตราความเครียด (Strain rate) และพลังงานความเครียดสะสมรวม (Plastic strain energy density) ในเสาต่อม่อสะพานเหล็กที่ผลิตจากเหล็กกำลังสูงสูงกว่าเสาต่อม่อสะพานเหล็กที่ผลิตจากเหล็กกำลังปกติ นอกจากนี้ เหล็กกำลังสูงจะมีพื้นที่การคราก (Yielding area) ที่เล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกำลังปกติ ดังนั้น ดัชนีพลังงานต่อหน่วยพื้นที่การคราก ควรได้รับการพิจารณาเพื่อยืนยันรูปแบบการวิบัติของเสาต่อม่อสะพานเหล็กกำลังสูง

Thesis	Local Strain Behaviors During Earthquakes from Low-Cycle Fatigue Assessment of High-Strength Steel Bridge Piers
Student	Mr.Rawit Thammathiwat
Student ID.	63601130
Degree	Master of Engineering
Program	Civil Engineering
Year	2025
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Natdanai Sinsamutpadung

ABSTRACT

The objective of this research is to study the behavior of local strain in steel bridge piers under earthquake conditions. This research focuses on the analysis of major earthquakes in Japan and Thailand by comparing the performance of steel bridge piers made of normal strength steel and high-strength steel. It was found that steel bridge piers suffered from low-cycle fatigue damage in the large plastic region. The severity of such damage was assessed by using the Finite Element Method (FEM) with the concept of Effective Notch Strain introduced by the International Institute of Welding (IIW). The result indicates that earthquake waves result in higher local strain, strain rate, and plastic strain energy in steel bridge piers made of high-strength steel than steel bridge piers made of normal strength steel. In addition, high-strength steel has a smaller yielding area compared to normal strength steel. Therefore, the yielding energy per area index should be considered to confirm the mode of failure of high-strength steel bridge piers.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ณัฐดนัย สิ้นสมุทร ผดุง ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯ คุนทหาร สถาบัน ที่ได้ให้ความรู้ในทุกๆ รายวิชาที่ศึกษาเพื่อเป็นพื้นฐาน โดยคณาจารย์ท่านต่างๆ ได้ถ่ายทอด ความรู้ทั้งทางด้านวิชาการ ความรู้ทั่วไป และประสบการณ์ต่าง ๆ จนสามารถนำมาใช้ในการทำงานและการดำเนินชีวิตได้อย่างดีเยี่ยม ตลอดจนขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ร่วมเป็นกรรมการในการสอบ

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอด ประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

รวิชญ์ ธรรมาธิวัฒน์



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 โครงสร้างเป้าหมาย (Target structures).....	3
1.3 ประวัติความเร่งของแผ่นดินไหว (Earthquake acceleration histories).....	3
1.4 รายละเอียดวัสดุของโมเดล (Material of models).....	4
1.5 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	6
1.6 ขอบเขตของการวิจัย.....	6
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเชิงพลาสติกและอายุความ ล้า.....	7
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของเสาตอม่อสะพานเหล็กด้วยวิธีระเบียบวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์ (Finite Element Method - FEM) และการเกิดแตกร้าวแบบเปราะ (brittle fracture).....	8
2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ Effective Notch Strain.....	9
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ cyclic hardening	10
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความถูกต้องของแบบจำลอง.....	11
บทที่ 3 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	13
3.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาตอม่อสะพาน (Procedure for inspecting bridge pier behavior).....	13
3.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ปลายรอยเชื่อม (Analysis flow of weld toe).....	13

3.2.1 แบบจำลองเสาตอม่อสะพาน (Global model).....	13
3.2.2 แบบจำลองมุม (Corner model).....	13
3.2.3 แบบจำลองปลายรอยเชื่อม (Weld toe model).....	14
3.3 การกำหนดค่าการวิเคราะห์ (Analytical configurations).....	15
บทที่ 4 การวิเคราะห์.....	17
4.1 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาตอม่อสะพาน (Results of bridge pier behavior analysis).....	17
4.1.1 ประวัติการเคลื่อนตัว (Displacement history).....	17
4.1.2 ค่าความเครียดเชิงพลาสติก (Plastic strain).....	19
4.1.3 พลังงานความเครียดสะสม (Plastic strain energy density).....	20
4.2 การกำหนดค่าการวิเคราะห์ (Analytical configurations).....	22
4.2.1 ประวัติการเคลื่อนตัว (Displacement history).....	22
4.2.2 ขนาดของความเครียดเชิงพลาสติก (Plastic strain magnitudes).....	24
4.2.3 ประวัติอัตราความเครียด (Strain rate histories).....	27
4.2.4 Effective notch strain range.....	29
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	32
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	32
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	32
เอกสารอ้างอิง.....	33

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 รายละเอียดวัสดุเหล็ก.....	5
1.2 รายละเอียดวัสดุคอนกรีต.....	5
3.1 การกำหนดค่าการวิเคราะห์.....	16



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 รอยแตกร้าวที่รอยเชื่อมระหว่างเสาและคานของเสาสะพานเหล็กในระหว่างแผ่นดินไหวที่เมืองโกเบ เมื่อปี 1995.....	1
1.2 รายละเอียดคุณสมบัติของเสาตอม่อสะพานเหล็ก (Typical bridge pier).....	3
1.3 ประวัติความแรงของแผ่นดินไหวโกเบ.....	4
1.4 ประวัติความแรงของแผ่นดินไหว JR Takatori.....	4
1.5 ประวัติความแรงของแผ่นดินไหวคумаโมโตะ.....	4
1.6 ประวัติความแรงของแผ่นดินไหวเชียงราย.....	4
1.7 นิยามของพารามิเตอร์ hardening.....	5
2.1 พารามิเตอร์ hardening เปรียบเทียบกับผลการทดสอบของเหล็กกำลังสูง (SBHS500).....	11
2.2 รายละเอียดของวัสดุเหล็ก SS400.....	12
2.3 กราฟเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัว (Displacement).....	12
3.1 Analysis Flow.....	15
4.1 การเคลื่อนตัวของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบเต็มคลื่น.....	17
4.2 การเคลื่อนตัวของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ 50%.....	18
4.3 การเคลื่อนตัวของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ 25%.....	18
4.4 การเคลื่อนตัวของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ 10%.....	18
4.5 ค่าความเครียดเชิงพลาสติกภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบเต็มคลื่น.....	19
4.6 ค่าความเครียดเชิงพลาสติกภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ 50%.....	19
4.7 ค่าความเครียดเชิงพลาสติกภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ 25%.....	20
4.8 ค่าความเครียดเชิงพลาสติกภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ 10%.....	20
4.9 พลังงานความเครียดสะสมของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ.....	21
4.10 ประวัติการเคลื่อนตัวของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ.....	22
4.11 ประวัติการเคลื่อนตัวของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวทาคาโทริ.....	23
4.12 ประวัติการเคลื่อนตัวของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวคумаโมโตะ.....	23
4.13 ประวัติการเคลื่อนตัวของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวเชียงราย.....	23
4.14 ขนาดความเครียดเชิงพลาสติกของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ.....	24
4.15 ขนาดความเครียดเชิงพลาสติกของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวทาคาโทริ.....	25
4.16 ขนาดความเครียดเชิงพลาสติกของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวคумаโมโตะ.....	25

4.17 ขนาดความเครียดเชิงพลาสติกของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวแผ่นดินไหว เชียงราย.....	25
4.18 พื้นที่การกระจายของความเครียดของคลื่นแผ่นดินไหวโกเบ.....	26
4.19 อัตราความเครียดของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ.....	27
4.20 อัตราความเครียดของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวทาคาโทริ.....	28
4.21 อัตราความเครียดของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวคุมาโมโตะ.....	28
4.22 อัตราความเครียดของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวเชียงราย.....	28
4.23 การกระจาย Effective notch strain range ของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว โกเบ.....	30
4.24 การกระจาย Effective notch strain range ของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว ทาคาโทริ.....	30
4.25 การกระจาย Effective notch strain range ของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว คุมาโมโตะ.....	31
4.26 การกระจาย Effective notch strain range ของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว เชียงราย.....	31

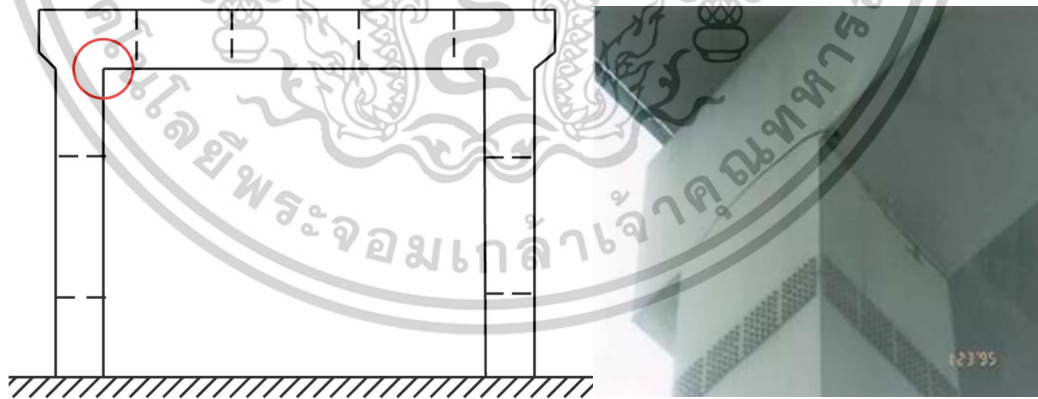
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

สะพานเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่มีบทบาทสำคัญในระบบขนส่งระดับนานาชาติ โครงสร้างเหล่านี้ช่วยอำนวยความสะดวกด้านการจราจรและการขนส่ง รวมถึงมีบทบาทสำคัญในสถานการณ์ฉุกเฉิน [1] เหล็กเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการก่อสร้างสะพานโดยเฉพาะในเขตเมือง เช่น ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งเป็นผู้นำระดับโลกในอุตสาหกรรมเหล็ก [2] มีการใช้เสาสะพานเหล็กมากกว่า 5,000 ต้นทั่วประเทศ [3] เนื่องจากโครงสร้างที่กะทัดรัดและความเร็วในการก่อสร้างที่เพิ่มขึ้นจากการผลิตชิ้นส่วนสำเร็จรูปจากโรงงาน รวมทั้งสามารถลดค่าใช้จ่ายด้านแรงงานได้จากระยะเวลาการทำงานที่ลดลง [4] ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นนี้ทำให้มีการพัฒนาอุตสาหกรรมเหล็กอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ

ปัจจุบันมีการนำเหล็กกำลังสูงมาใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความแข็งแรงสูงขึ้น โดยมีค่าจุดคราก (f_y) ตั้งแต่ 460 MPa ขึ้นไป และอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักที่เหนือกว่าเมื่อเทียบกับเหล็กกำลังปกติ อย่างไรก็ตาม เหล็กกำลังสูงมีความเหนียวต่ำกว่าและมีค่าความเค้นสูงสุดลดลงเมื่ออัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของโครงสร้างเพิ่มขึ้น ซึ่งแตกต่างจากเหล็กกำลังปกติ [5-7] ดังนั้น พฤติกรรมของโครงสร้างที่ใช้เหล็กกำลังสูงภายใต้สภาวะแผ่นดินไหวจึงควรจะต้องมีการตรวจสอบ



รูปที่ 1.1 รอยแตกร้าวที่รอยเชื่อมระหว่างเสาและคานของเสาสะพานเหล็กในระหว่างแผ่นดินไหวที่เมืองโกเบ เมื่อปี 1995

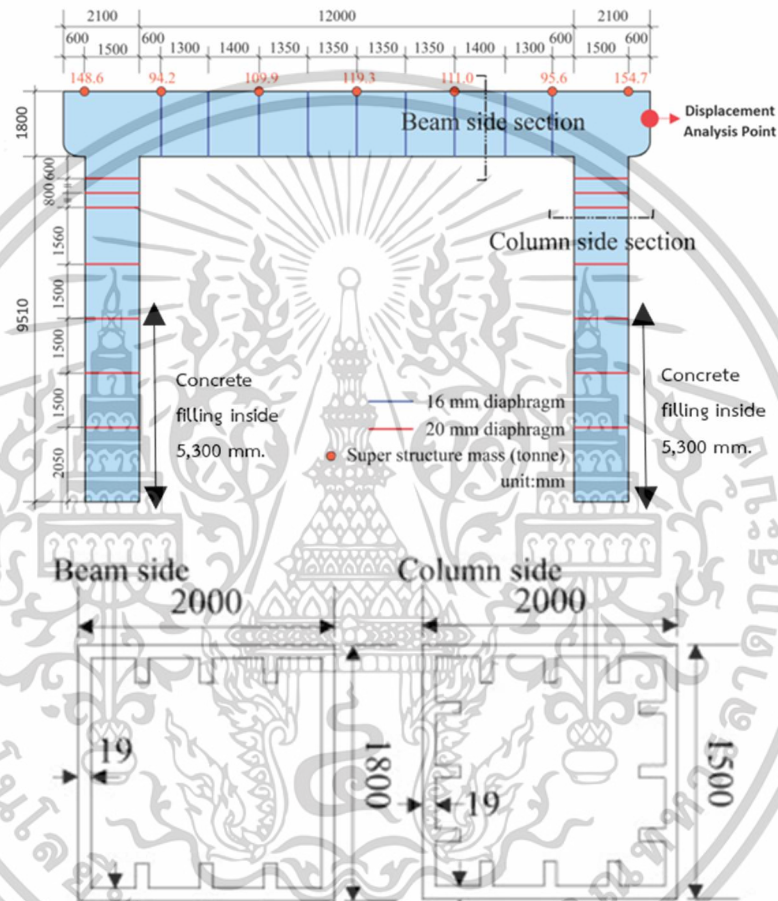
ในปี 1995 เมืองโกเบ ญี่ปุ่นประเทศญี่ปุ่นประสบเหตุแผ่นดินไหวครั้งรุนแรงที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างสะพานเหล็ก โดยพบว่าพฤติกรรมความล้ารอบต่ำ (Low-cycle fatigue) เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดรอยแตกร้าวบริเวณรอยเชื่อมระหว่างเสาและคาน ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกร้าวแบบเปราะ (brittle fractures) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 เพราะฉะนั้นจึงบ่งชี้ว่าพฤติกรรมของความเครียดเฉพาะที่ (Local strain) อาจทำให้เข้าใจในพฤติกรรมที่เกิดขึ้นนี้มากขึ้น [8-11]

พฤติกรรมของความเครียดเฉพาะที่ (Local strain) ถูกค้นพบว่ามีความสัมพันธ์กับอายุความล้า (Fatigue life) โดยเริ่มจากในปี 1855 ด้วยการนำ S-N Curve มาใช้เพื่อระบุพฤติกรรมความล้า [12] และต่อมาในช่วงปี 1950 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและอายุความล้า (Fatigue life) ได้รับการพัฒนาขึ้นนำไปสู่แนวคิดเรื่องความเครียดเฉพาะที่ (Local strain) และอายุความล้า (Fatigue life) ความก้าวหน้าดังกล่าวนำไปสู่การพัฒนาความสัมพันธ์ของแมนสัน-คอฟฟิน (Manson-Coffin relationship) [13] ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์ร่วมกับวิธีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method - FEM) [3], [14-18], [24] ซึ่งทำให้ได้พฤติกรรมของความเครียดเฉพาะที่ (Local strain) ที่มีความแม่นยำมาก อย่างไรก็ตาม ในโครงสร้างที่ซับซ้อนนั้น การสร้างแบบจำลองนั้นทำได้ยาก เช่นแบบจำลองปลายรอยเชื่อม (Weld toe model) ซึ่งบางครั้งรายละเอียดของการเชื่อมจะอยู่ภายในชิ้นส่วนเหล็กที่ฝังอยู่ภายใน ดังนั้นจึงไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงที่แน่นอนได้ ดังนั้นจากความยากลำบากนี้ทาง International Institute of Welding (IIW) จึงแนะนำแนวคิด Effective Notch Strain โดยจำลองรัศมี 1 มม. สำหรับปลายรอยแตก (Crack tip) เพื่อให้การศึกษาความล้าระหว่างการทดลองและการวิเคราะห์สามารถเปรียบเทียบได้ ดังนั้น แนวคิด Effective Notch Strain ควรได้รับการนำไปใช้ในการตรวจสอบ

ในการศึกษานี้ได้ทำการตรวจสอบพฤติกรรมของความเครียดเฉพาะที่ (Local strain) ของเสาต่อม่อสะพานเหล็กภายใต้สภาวะแผ่นดินไหว โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเสาต่อม่อสะพานเหล็กที่ผลิตจากเหล็กกำลังปกติและเหล็กกำลังสูง ทั้งนี้ ได้เลือกเสาต่อม่อสะพานเหล็กที่พบได้ทั่วไปในประเทศญี่ปุ่น [19] เป็นตัวแทนในการศึกษาและทำการวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลแผ่นดินไหวครั้งใหญ่ที่เกิดขึ้นทั้งในญี่ปุ่นและไทย [20-21] รอยแตกร้าวที่เกิดจากความล้ารอบต่ำ (Low-cycle fatigue) สามารถทำความเข้าใจได้จากพฤติกรรมของความเครียดเฉพาะที่ (Local strain) ซึ่งในการศึกษานี้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method - FEM) ร่วมกับแนวคิด Effective Notch Strain เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมดังกล่าว การวิเคราะห์นี้ช่วยให้สามารถทำความเข้าใจพฤติกรรมของความเครียดเฉพาะที่ (Local strain) ระหว่างเกิดแผ่นดินไหว รวมถึงประเมินการตอบสนองของพลังงานความเครียดสะสมรวม (Plastic strain energy) และตรวจสอบผลกระทบของอัตราความเครียด (Strain rate) ต่อโครงสร้างของเสาต่อม่อสะพานเหล็ก

1.2 โครงสร้างเป้าหมาย (Target structures)

การศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์พฤติกรรมความเครียดเฉพาะที่ (Local strain) ของเสาตอม่อสะพานเหล็ก โดยตรวจสอบพฤติกรรมของเสาตอม่อสะพานเหล็กที่พบได้ทั่วไปในประเทศญี่ปุ่น รายละเอียดคุณสมบัติของเสาตอม่อสะพานเหล็กแสดงอยู่ในรูปที่ 1.2 [19], [25]

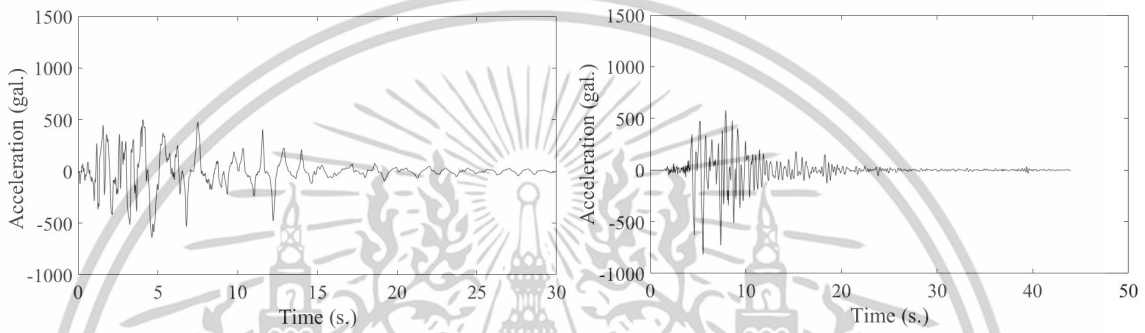


รูปที่ 1.2 รายละเอียดคุณสมบัติของเสาตอม่อสะพานเหล็ก (Typical bridge pier)

1.3 ประวัติความเร่งของแผ่นดินไหว (Earthquake acceleration histories)

เพื่อตอบสนองต่อความเสียหายร้ายแรงที่เกิดขึ้นกับเสาตอม่อสะพานเหล็กในประเทศญี่ปุ่นจากแผ่นดินไหวโกเบในปี 1995 การศึกษานี้ได้วิเคราะห์ข้อมูลประวัติความเร่งของแผ่นดินไหวจากข้อมูลที่บันทึกไว้ของสำนักงานอุตุนิยมวิทยาญี่ปุ่นแสดงโดยคลื่นโกเบในรูปที่ 1.3 และข้อมูลของสถานี JR Takatori แสดงโดยคลื่นทาคาโทริ ในรูปที่ 1.4 นอกจากนี้ ยังพิจารณาข้อมูลประวัติความเร่งของ

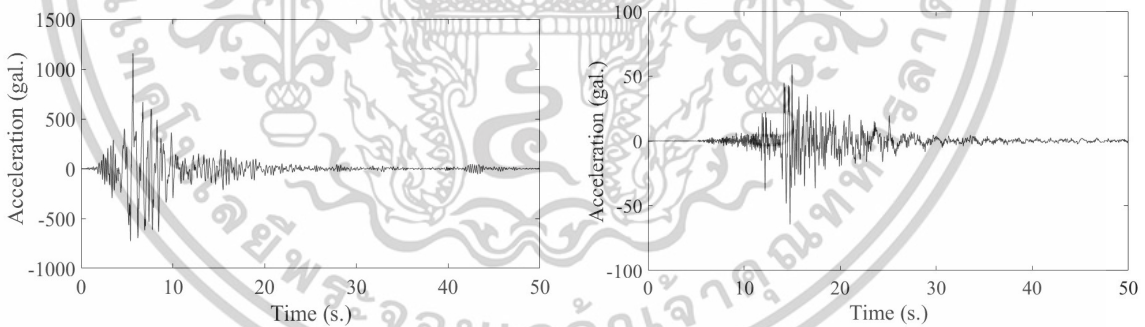
แผ่นดินไหวคумаโมโตะที่เกิดในปี 2016 ซึ่งส่งผลกระทบต่อโครงสร้างพื้นฐานและชุมชน โดยเลือกใช้ข้อมูลที่ถูกบันทึกไว้ที่สถานี KMMH16 ในเมืองมาซึกิ (คลื่นคумаโมโตะ) ซึ่งมีค่าข้อมูลแผ่นดินไหวที่รุนแรงที่สุดจากเหตุการณ์นี้ ดังที่แสดงในรูปที่ 1.5 นอกจากนี้ ประเทศไทยซึ่งมีการใช้เสาตอม่อสะพานเหล็กเช่นกัน ได้ประสบกับแผ่นดินไหวที่รุนแรงที่สุดที่เคยบันทึกไว้ในปี 2014 ในจังหวัดเชียงราย (คลื่นแผ่นดินไหวเชียงราย) ซึ่งแสดงในรูปที่ 1.6 เหตุการณ์แผ่นดินไหวนี้ได้ถูกนำมาประกอบเป็นกรณีศึกษาในการวิเคราะห์ด้วย



รูปที่ 1.3 ประวัติความเร่งของแผ่นดินไหวโกเบ

รูปที่ 1.4 ประวัติความเร่งของแผ่นดินไหว

JR Takatori



รูปที่ 1.5 ประวัติความเร่งของแผ่นดินไหว

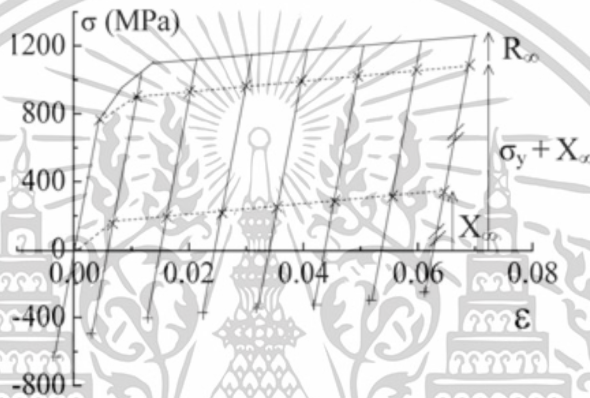
คумаโมโตะ

รูปที่ 1.6 ประวัติความเร่งของแผ่นดินไหว

เชียงราย

1.4 รายละเอียดวัสดุของโมเดล (Material of models)

เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเหล็กกำลังสูงระหว่างเหตุการณ์แผ่นดินไหว งานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบเหล็กกำลังสูงกับเหล็กกำลังปกติ โดยมีเป้าหมายเพื่อให้เข้าใจประสิทธิภาพของวัสดุทั้งสองภายใต้สภาวะแผ่นดินไหวอย่างลึกซึ้ง คุณสมบัติวัสดุถูกกำหนดผ่านการทดลองแรงดึงแบบปล่อยโหลดซ้ำบนเหล็กแท่งกลมจนถึงค่าความเค้นครากแรงอัด โดยเน้นศึกษาพฤติกรรม cyclic hardening ผ่านพารามิเตอร์ไอโซทรอปิก (Isotropic) และคิเนมาติก (kinematic) รายละเอียดของเหล็กแสดงในตารางที่ 1.1 [22] และวัสดุคอนกรีตในโครงสร้างเสาตอม่อสะพานที่แปลงหน้าตัดเป็นเหล็กแสดงในตารางที่ 1.2



รูปที่ 1.7 นิยามของพารามิเตอร์ hardening

ตารางที่ 1.1 รายละเอียดวัสดุเหล็ก

Steel type	Yield stress (σ_y)	R_∞	b	X_∞	Gamma (γ)	Density of Steel (ρ)	Elastic Modulus (E)	Poisson's Ratio
	MPa							
SM490	304	143	4	233	33	7.85	200	0.3
SBHS500	452	143	4	190	36	7.85	200	0.3

ตารางที่ 1.2 รายละเอียดวัสดุคอนกรีต

Density of Concrete (ρ)	Elastic Modulus (E)	Poisson's Ratio
(t/m^3)	(GPa)	
7.85	23.15	0.3

1.5 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

วัตถุประสงค์หลักของการศึกษาคั้งนี้คือการชี้แจงพฤติกรรมความล้ารอบต่ำของโครงสร้างเสาต่อม่อสะพานเหล็กกำลังสูงภายใต้สภาวะแผ่นดินไหวผ่านการศึกษาและการวิเคราะห์ วัตถุประสงค์ของการศึกษามีดังต่อไปนี้

1. ชี้แจงพฤติกรรมของความเครียดเฉพาะที่ระหว่างเกิดแผ่นดินไหวของเหล็กกำลังสูงและเหล็กกำลังปกติโดยใช้แนวคิด Effective Notch Strain

2. เข้าใจถึงการกระจายตัวของความเครียดเฉพาะที่ระหว่างเหล็กกำลังสูงและเหล็กกำลังปกติ จากการพิจารณาพื้นที่การคราก

3. เปรียบเทียบพฤติกรรมการเคลื่อนตัว, ความเครียดเชิงพลาสติกและพลังงานความเครียดสะสมภายใต้สภาวะแผ่นดินไหวความรุนแรงหลายระดับ

1.6 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาต่อม่อสะพานเหล็กซึ่งพบได้ทั่วไปในประเทศญี่ปุ่น โดยโครงสร้างเป้าหมายประกอบด้วยส่วนประกอบหลักคือ เหล็กและคอนกรีต งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างดังกล่าวภายใต้อิทธิพลของคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นจริงจากประเทศญี่ปุ่นและประเทศไทย โดยพิจารณาทั้งเหล็กกำลังสูงและเหล็กกำลังปกติเป็นวัสดุในการวิเคราะห์ และใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method - FEM) ควบคู่กับการสร้างแบบจำลองย่อย และแนวคิด Effective Notch Strain เพื่อประเมินพฤติกรรมของความเครียดเฉพาะที่ซึ่งเกิดจากความล้ารอบต่ำ

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเชิงพลาสติกและอายุความล้า

จากการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเชิงพลาสติกและอายุความล้า มีความสัมพันธ์ของ Manson-Coffin เกี่ยวข้องและได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์พฤติกรรมความล้าแบบรอบต่ำ (Low-cycle fatigue) โดยเฉพาะในวัสดุที่อยู่ภายใต้การเสียรูปแบบพลาสติกอย่างมีนัยสำคัญ สมการนี้เสนอโดย S. Manson และ L. Coffin แยกกันในช่วงปี 1950s ซึ่งใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเครียดเชิงพลาสติกต่อรอบ (Plastic strain per cycle) กับ อายุการล้า (fatigue life) ได้อย่างแม่นยำในวัสดุหลายประเภท โดยมีสมการรูปแบบทั่วไปดังสมการที่ (1)

$$\frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \epsilon'_f (2N_f)^c$$

(1)

เมื่อ

$\Delta \epsilon_p$: plastic strain range

ϵ'_f : fatigue ductility coefficient

N_f : number of cycles to failure

c : fatigue ductility exponent

งานวิจัยของ Manson (1953) และ Coffin (1954) ได้พิสูจน์ว่า ความล้ารอบต่ำของวัสดุสามารถคาดการณ์ได้อย่างแม่นยำผ่านสมการข้างต้นนี้ โดยเฉพาะในกรณีที่วัสดุถูกโหลดจนเกิดความเครียดเชิงพลาสติกแบบสะสม

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของสะพานเหล็กด้วยวิธีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method - FEM) และการเกิดแตกร้าวแบบเปราะ (brittle fracture)

จากการศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของสะพานเหล็กด้วยวิธีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method - FEM) และการเกิดแตกร้าวแบบเปราะ (Brittle fracture) มิ่งงานวิจัย K. Okashita (1998) ได้ศึกษาเหตุการณ์แผ่นดินไหวเฮียวโกะตอนใต้ หรือที่รู้จักกันทั่วไปว่าแผ่นดินไหวโกเบ นับเป็นหนึ่งในเหตุการณ์ภัยพิบัติทางธรรมชาติที่สร้างความเสียหายอย่างรุนแรงต่อโครงสร้างพื้นฐานของประเทศญี่ปุ่น ในบรรดาสิ่งปลูกสร้างที่ได้รับความเสียหาย สะพานมอสะพานเหล็กบนทางหลวงท่าเรือโกเบ ถือเป็นกรณีศึกษาที่สำคัญ เนื่องจากเกิดรอยร้าวขนาดใหญ่ที่บริเวณมุมของโครงสร้างซึ่งส่งผลกระทบต่อตรงต่อความมั่นคงและความสามารถในการรับน้ำหนักของสะพาน เพื่อหาสาเหตุที่แท้จริงของการเกิดรอยร้าวและลักษณะการเสียหาย นักวิจัยได้ดำเนินการศึกษาอย่างละเอียด โดยแบ่งการศึกษาออกเป็นสามส่วนหลัก ได้แก่ การตรวจสอบพื้นผิวการแตกหัก การทดสอบคุณสมบัติวัสดุ และการวิเคราะห์ประมาณการความเครียดที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นดินไหวด้วยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method - FEM)

จากการตรวจสอบพื้นผิวการแตกหัก พบว่ารอยร้าวส่วนใหญ่เริ่มเกิดขึ้นที่บริเวณปลายรอยเชื่อมชนิดฟิลเลต (Fillet weld) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการสะสมของความเครียดสูง โดยรอยแตกแสดงลักษณะการแตกร้าวแบบเปราะ (Brittle fracture) กล่าวคือ การแตกหักเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วโดยแทบไม่แสดงอาการเสียรูปถาวร ทำให้โครงสร้างไม่สามารถกระจายพลังงานได้ทัน นอกจากนี้ การทดสอบคุณสมบัติวัสดุได้ชี้ให้เห็นว่าส่วนของโครงสร้างใกล้จุดเริ่มต้นรอยร้าวมีความเครียดคงค้าง (Pre-strain) ในระดับที่สูงเกินค่า yield strain ของวัสดุ ซึ่งเป็นผลมาจากการรับน้ำหนักสะสมก่อนหน้านี้ ความเครียดคงค้างที่สูงนี้ส่งผลให้วัสดุสูญเสียความเหนียว (Ductility) ไปบางส่วน ทำให้ไม่สามารถเสียรูปถาวรได้มากเหมือนวัสดุที่อยู่ในสภาวะปกติ ดังนั้นจึงมีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดการแตกร้าวแบบเปราะ

ส่วนผลการวิเคราะห์ FEM พบว่าบริเวณดังกล่าวของโครงสร้างมีทั้งค่าความเครียด และอัตราความเครียด (Strain rate) ที่อยู่ในระดับสูงมากระหว่างการเกิดแผ่นดินไหว ซึ่งหมายความว่าโครงสร้างต้องเผชิญกับการเสียรูปอย่างรวดเร็วและรุนแรงในช่วงเวลาสั้นๆ ทำให้ไม่มีเวลาสำหรับการกระจายความเสียหายหรือการคลายความเครียดผ่านกลไกการเสียรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation) จึงนำไปสู่การแตกร้าวแบบเปราะในที่สุด

จากการศึกษาทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า สาเหตุหลักที่ทำให้เสถียรภาพของสะพานเหล็กเกิดความเสียหายรุนแรงในเหตุการณ์แผ่นดินไหวโกเบเกิดจากการที่วัสดุมีความเหนียวลดต่ำลงเนื่องจากความเครียดคงค้างที่สูงเกินกว่าค่า yield strain เมื่อรวมกับอัตราการเสียรูปที่รวดเร็วและรุนแรงระหว่าง

แผ่นดินไหวจึงทำให้เกิดการแตกร้าวแบบเปราะ ซึ่งเป็นแนวทางในการวิเคราะห์พฤติกรรมสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ Effective Notch Strain

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ Effective Notch Strain มาจาก Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components โดย A. Hobbacher (2007, 2015) กล่าวถึง การประเมินความล้าของรอยเชื่อมในโครงสร้างเหล็กและโลหะผสมอลูมิเนียมเป็นหัวข้อสำคัญที่ได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางในวงการวิศวกรรมวัสดุ โดยเฉพาะในกรณีของการเกิดความล้าในบริเวณรอยบาก (Notch) ซึ่งเป็นจุดที่มักมีความเครียดสะสมสูงและนำไปสู่การแตกหักของวัสดุในระยะยาว หนึ่งในแนวทางที่ใช้ในการประเมินความล้าคือการใช้แนวคิด Effective Notch Strain ซึ่งเป็นการวัดความเครียดที่เกิดขึ้นที่จุดโคนของรอยบาก (Notch root) เพื่อพิจารณาความแตกต่างของพารามิเตอร์รูปร่างของรอยเชื่อม รวมถึงพฤติกรรมวัสดุที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่จุดโคนรอยบาก

ในกรณีของการศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมเหล็กโครงสร้างและโลหะผสมอลูมิเนียม พบว่ารูปร่างรอยเชื่อมจริงมักจะถูกแทนที่ด้วย Effective Weld Contour เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ โดยกำหนดให้รัศมี Effective Notch Root Radius มีค่า $r = 1$ มม. ซึ่งได้รับการยืนยันว่าให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับการคำนวณและการทดสอบในหลายกรณี วิธีการนี้เหมาะสมสำหรับการประเมินการเชื่อมที่มีการตรวจสอบความล้าจากปลายรอยเชื่อม (Weld toe) หรือรอยเชื่อมตรง (Weld root) ที่อาจเกิดจากความล้า

การประเมินความล้าจากรอยเชื่อมในโครงสร้างสามารถทำได้ด้วยการวิเคราะห์เพิ่มเติมที่ปลายรอยเชื่อมของวัสดุหลัก โดยใช้ความเครียดจากจุด hot-spot ของโครงสร้าง ซึ่งเป็นจุดที่มีความเครียดสูงสุดในโครงสร้างที่รับภาระโหลดในสถานะต่างๆ วิธีการนี้เป็นที่นิยมในกรณีที่ต้องการเปรียบเทียบรูปร่างรอยเชื่อมที่แตกต่างกัน หากไม่ได้ระบุไว้มีการแนะนำให้ทำการจำลองรอยเชื่อมด้วยมุมด้านข้าง (Flank angles) ที่ 30 องศาสำหรับรอยเชื่อมชนิด butt weld และ 45 องศาสำหรับรอยเชื่อมชนิด fillet weld เพื่อให้ได้การประเมินที่เหมาะสมและแม่นยำ

Effective Notch Strain สามารถคำนวณได้โดยใช้สูตรพารามิเตอร์ (Parametric formulae) หรือการคำนวณด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element models) โดยการกำหนดรัศมี Effective Notch Root Radius ซึ่งการใช้การวิเคราะห์ FEA (Finite element analysis) มีข้อกำหนดสำคัญที่ต้องคำนึงถึง ขนาดขององค์ประกอบ (Element sizes) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ไม่ควรเกิน $1/4$ ของรัศมี และต้องใช้ขนาดเหล่านี้ทั้งในส่วนที่โค้งและในจุดเริ่มต้นของส่วนตรงของพื้นผิวรอยบากในทิศทางตามขวางและตามแนวปกติของพื้นผิว เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและเหมาะสมในการประเมินความล้าของรอยเชื่อม

การใช้ Effective Notch Strain เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ความล้าในโครงสร้างรอยเชื่อมได้รับการพิสูจน์ว่าเป็นวิธีที่มีความแม่นยำสูง โดยเฉพาะในกรณีที่มีการตรวจสอบและประเมินผลที่มีความซับซ้อนของโครงสร้าง

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ cyclic hardening

จากการศึกษาเกี่ยวกับ cyclic hardening มีงานวิจัย K. Saiprasertkit (2012) ได้ศึกษา พฤติกรรมการล้าต่ำรอบ (Low-cycle fatigue) โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์ขึ้นทดสอบที่ถูกโหลดและปลดโหลดซ้ำ ๆ จนเกิน จุดคราก (Yield point) ซึ่งในกรณีนี้จำเป็นต้องพิจารณาพฤติกรรม cyclic hardening เพื่อให้การประเมินพฤติกรรมของวัสดุมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น งานวิจัยนี้ได้ใช้ สมการ constitutive equations (2) - (4) ในการวิเคราะห์ โดยวัสดุที่นำมาทดสอบประกอบด้วย เหล็กกำลังสูง (High strength steel) และ เหล็กกำลังปกติ (Normal strength steel) ทั้งนี้ ผลลัพธ์ที่ได้จากสมการและการทดลองดังกล่าวถูกนำมาใช้เป็น รายละเอียดวัสดุของโมเดล (Material of models) ของงานวิจัยนี้สำหรับ เหล็กทั้งสองประเภทในการจำลองและวิเคราะห์พฤติกรรม

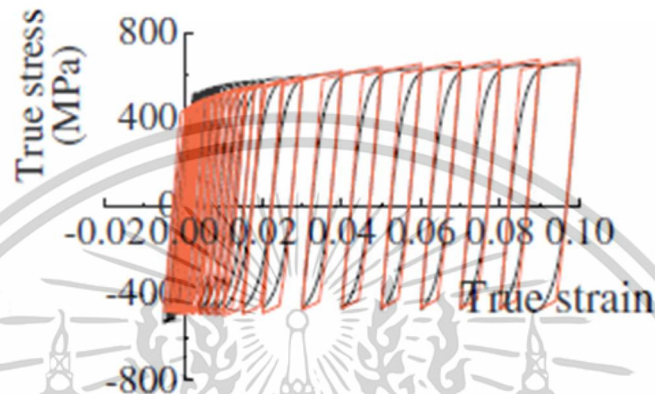
$$f = \bar{\sigma} - X - R - \sigma_y = 0 \quad (2)$$

$$R = R_\infty (1 - \exp(-b \cdot \bar{\epsilon}_p)) \quad (3)$$

$$X = X_\infty (1 - \exp(-\gamma \cdot \bar{\epsilon}_p)) \quad (4)$$

เมื่อ R : the isotropic hardening
 X : the back stress
 $\sigma_y, R_\infty, b, X_\infty, \gamma$: material parameters
 $\bar{\epsilon}_p$: equivalent plastic strain
 $\bar{\sigma}$: equivalent stress.

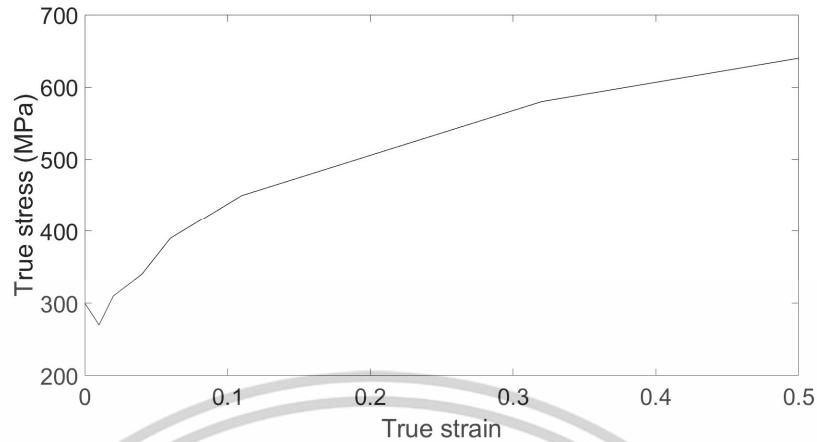
เมื่อวิเคราะห์ค่ารายละเอียดของเหล็กกำลังปกติและเหล็กกำลังสูงจากตารางที่ 1.1 โดยเปรียบเทียบพารามิเตอร์ hardening กับผลการทดสอบ พบว่าผลลัพธ์จากการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกันอย่างใกล้ชิดกับผลการทดสอบตามที่แสดงในรูปที่ 2.1



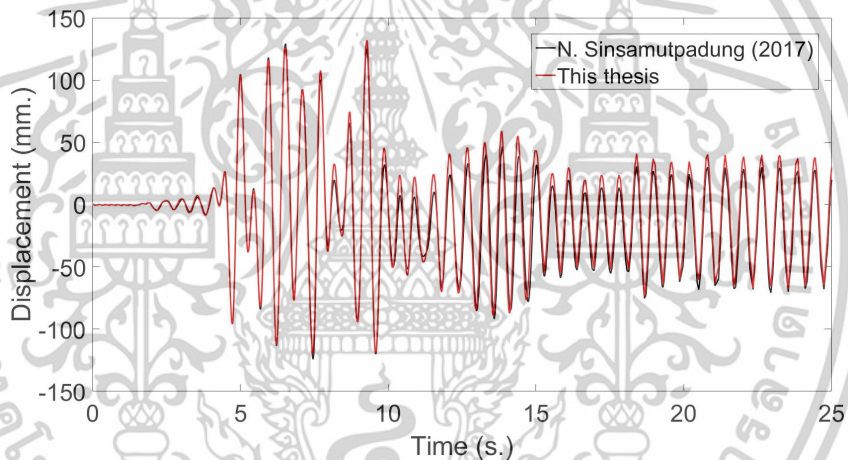
รูปที่ 2.1 พารามิเตอร์ hardening เปรียบเทียบกับผลการทดสอบของเหล็กกำลังสูง (SBHS500) (กราฟสีแดงผลลัพธ์จากนิยามของพารามิเตอร์ hardening/กราฟสีดำผลลัพธ์จากการทดสอบ)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความถูกต้องของแบบจำลอง

เพื่อประเมินความถูกต้องของแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ ได้มีการอ้างอิงงานวิจัยของ N. Sinsamutpadung (2017) ซึ่งได้ศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำจากแผ่นดินไหว โดยใช้แบบจำลองและโครงสร้างเป้าหมายในลักษณะเดียวกันกับงานวิจัยฉบับนี้ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้จัดทำแบบจำลองโครงสร้างเสาต่อม่อสะพานเหล็กเป้าหมายขึ้นโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ผ่านโปรแกรม ABAQUS รุ่น 6.14 และทำการวิเคราะห์ภายใต้สภาวะแผ่นดินไหวเดียวกัน โดยเลือกใช้ประวัติความเร่งของแผ่นดินไหวโกเบ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 1.3 สำหรับวัสดุเหล็กที่ใช้ในแบบจำลองเป็นเหล็ก SS400 โดยมีรายละเอียดตามที่แสดงในรูปที่ 2.2 จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบผลการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง และเปรียบเทียบกับค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากงานวิจัยของ N. Sinsamutpadung (2017) ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 รายละเอียดของวัสดุเหล็ก SS400



รูปที่ 2.3 กราฟเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัว (Displacement)

จากผลการเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง พบว่าผลลัพธ์จากแบบจำลองในงานวิจัยฉบับนี้มีความใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ในงานวิจัยของ N. Sinsamutpadung (2017) อย่างมีนัยสำคัญ ความแตกต่างที่ปรากฏอาจเกิดจากปัจจัยด้านเทคนิคการสร้างแบบจำลอง อาทิ การแบ่งองค์ประกอบ (mesh) ที่มีความละเอียดต่างกัน การตั้งค่าช่วงเวลา (time setting) และการกำหนดผลลัพธ์ที่ต้องการบันทึก (Field Output) ที่ไม่เหมือนกัน อีกทั้งงานวิจัยของ N. Sinsamutpadung (2017) ใช้หน่วย SI มาตรฐาน ขณะที่งานวิจัยฉบับนี้ใช้หน่วย SI (mm.) ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้มีความถูกต้องและให้ผลการวิเคราะห์ที่เชื่อถือได้

บทที่ 3

การวิเคราะห์

3.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาตอม่อสะพาน (Procedure for inspecting bridge pier behavior)

การวิเคราะห์นี้อธิบายขั้นตอนการวิเคราะห์ เริ่มจากการสร้างแบบจำลองเสาตอม่อสะพาน การดำเนินการนี้ใช้โปรแกรม ABAQUS 6.14 ในการดำเนินการวิเคราะห์แบบไดนามิกโดยใช้วิธีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method - FEM) โดยใช้ช็องค์ประกอบ quad shape shell 4 โหนด ดังที่แสดงในรูปที่ 3.1a วิเคราะห์กับคลื่นแผ่นดินไหวโกเบ โดยแบ่งคลื่นแผ่นดินไหวออกเป็น 4 ระดับได้แก่ คลื่นแผ่นดินไหวโกเบเต็มคลื่น, 50% ของคลื่นแผ่นดินไหวโกเบ, 25% ของคลื่นแผ่นดินไหวโกเบ และ 10% ของคลื่นแผ่นดินไหวโกเบ

3.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ปลายรอยเชื่อม (Analysis flow of weld toe)

การศึกษานี้ อธิบายขั้นตอนการวิเคราะห์ เริ่มจากการสร้างแบบจำลองเสาตอม่อสะพาน ตามด้วยการใช้เทคนิคการสร้างแบบจำลองย่อยเพื่อสร้างแบบจำลองมุม และในลำดับถัดไปคือการสร้างแบบจำลองปลายรอยเชื่อม ตามที่แสดงในรูปที่ 3.1 การดำเนินการนี้ใช้โปรแกรม ABAQUS 6.14 ในการดำเนินการวิเคราะห์แบบไดนามิกโดยใช้วิธีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method - FEM)

3.2.1 แบบจำลองเสาตอม่อสะพาน (Global model)

แบบจำลองเสาตอม่อสะพานถูกสร้างโดยใช้ช็องค์ประกอบ quad shape shell 4 โหนด ดังที่แสดงในรูปที่ 3.1a โครงสร้างของแบบจำลองซึ่งอ้างอิงจากโครงสร้างที่เป็นเป้าหมายแสดงในรูปที่ 1.2 วิเคราะห์กับคลื่นแผ่นดินไหว

3.2.2 แบบจำลองมุม (Corner model)

ตามที่แสดงในรูปที่ 3.1b แบบจำลองมุมแสดงขอบเขตของแบบจำลองย่อยที่จุดเชื่อมระหว่างเสาและคานของเสาตอม่อสะพานเหล็ก แบบจำลองนี้ใช้ช็องค์ประกอบ hexagonal solid 8 โหนด และวิเคราะห์โดยใช้ฟังก์ชัน shell-driven-solid ของ ABAQUS ซึ่งช่วยให้สามารถประเมินพฤติกรรมความเครียดในบริเวณมุมได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากอาจมีข้อจำกัดในเรื่องการกระจายความเครียดอย่าง

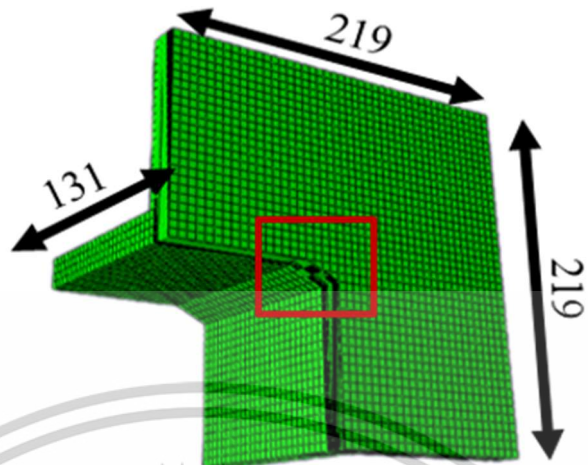
ละเอียด แนวคิด Effective Notch Strain จึงถูกนำมาใช้เพื่อเสริมสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมความเครียดเฉพาะที่

3.2.3 แบบจำลองปลายรอยเชื่อม (Weld toe model)

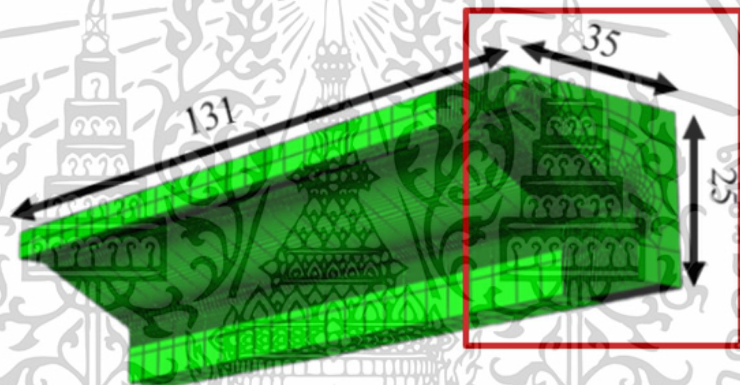
รูปที่ 3.1c แสดงแบบจำลองปลายรอยเชื่อมที่เรียกว่า Effective Notch Model ซึ่งกำหนดขอบเขตบริเวณปลายจุดเชื่อม โดยใช้องค์ประกอบแบบ hexagonal solid 8 โหนด และแนวคิด Effective Notch Strain ตามคำแนะนำของ International Institute of Welding (IIW) การตั้งคาร์ซีมรอยเชื่อมที่ 1 มม. และขนาด mesh ที่ 0.25 มม. (หนึ่งในสี่ของรัศมีรอยเชื่อม) [23] มีจุดมุ่งหมายเพื่อวิเคราะห์ความเครียดเฉพาะที่ (Local strain) ที่สัมพันธ์กับความล้ารอบต่ำ (low-cycle fatigue) ดังแสดงในรูปที่ 3.1d



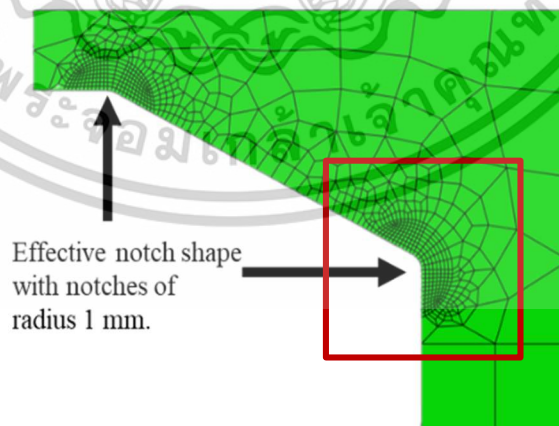
a) Global model



b) Corner model



c) Weld toe model



d) คำแนะนำของสถาบันการเชื่อมระหว่างประเทศ (IIW)

รูปที่ 3.1 Analysis Flow

3.3 การกำหนดค่าการวิเคราะห์ (Analytical configurations)

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้มีการวิเคราะห์แบบไดนามิกโดยใช้โปรแกรม ABAQUS เพื่อตรวจสอบเสถียรภาพของสะพานเหล็กที่พบได้ทั่วไปในประเทศญี่ปุ่นภายใต้เหตุการณ์แผ่นดินไหวโกเบ, ทาคาโทริ, คุมาโมโตะ และแผ่นดินไหวเชียงราย วิเคราะห์ร่วมกับเหล็กกำลังสูงและเหล็กกำลังปกติ ซึ่งแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การกำหนดค่าการวิเคราะห์

No.	Pier	Earthquake Acceleration Histories	Steel Type
1	Typical bridge pier	Kobe wave	SM490
2	Typical bridge pier		SBHS500
3	Typical bridge pier	Kobe wave 50%	SM490
4	Typical bridge pier		SBHS500
5	Typical bridge pier	Kobe wave 25%	SM490
6	Typical bridge pier		SBHS500
7	Typical bridge pier	Kobe wave 10%	SM490
8	Typical bridge pier		SBHS500
9	Typical bridge pier	JR Takatori wave	SM490
10	Typical bridge pier		SBHS500
11	Typical bridge pier	Kumamoto wave	SM490
12	Typical bridge pier		SBHS500
13	Typical bridge pier	Chiang Rai wave	SM490
14	Typical bridge pier		SBHS500

บทที่ 4

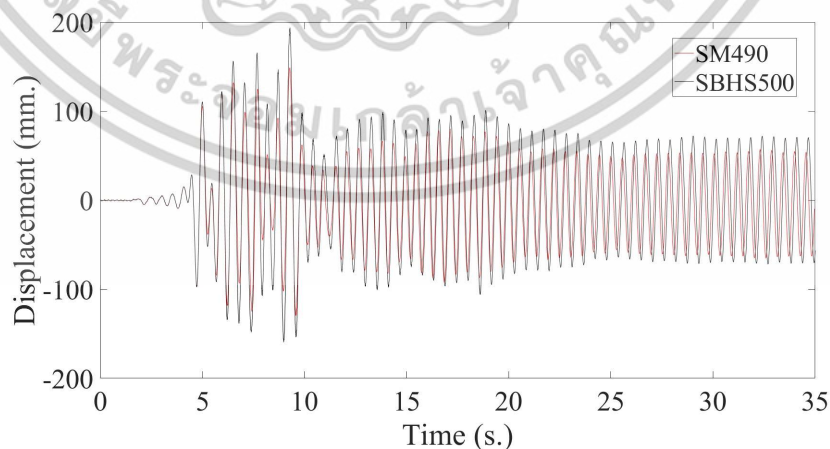
การวิเคราะห์

4.1 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาตอม่อสะพาน (Results of bridge pier behavior analysis)

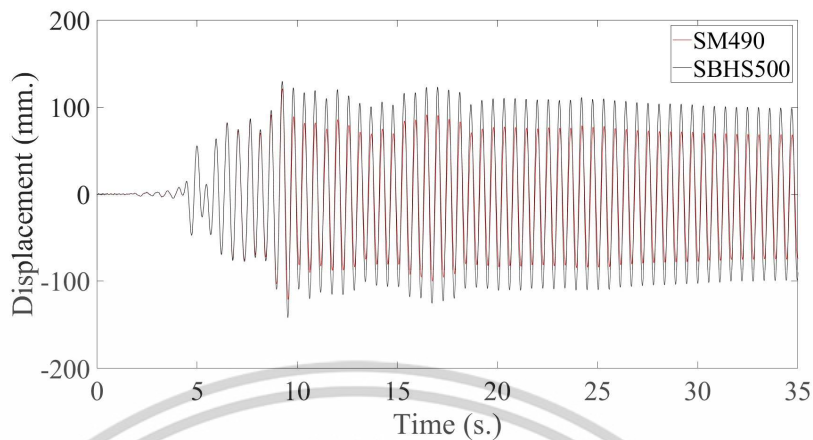
การศึกษานี้มุ่งเน้นการตรวจสอบพฤติกรรมของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ 4 ระดับ โดยมีการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างเหล็กกำลังสูงและเหล็กกำลังปกติ

4.1.1 ประวัติการเคลื่อนตัว (Displacement history)

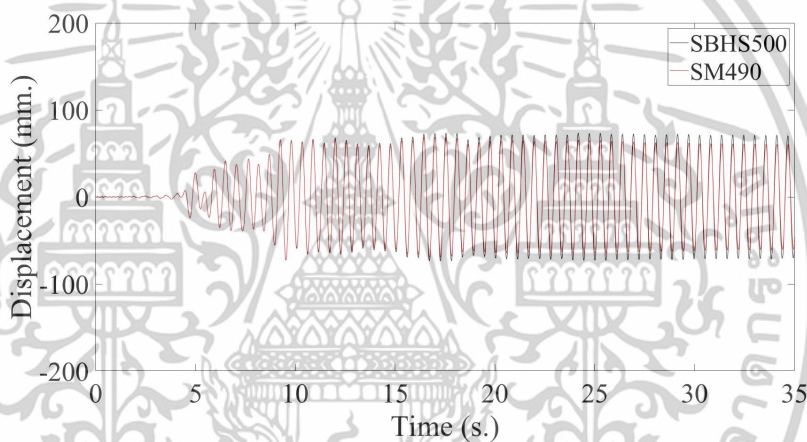
ในการวิเคราะห์เชิงไดนามิกนี้ ได้ประเมินแบบจำลองเสาตอม่อสะพานภายใต้ผลกระทบของคลื่นแผ่นดินไหวโกเบ เป็นระยะเวลา 35 วินาที โดยบันทึกการเคลื่อนตัวที่ปลายเสาตอม่อสะพานเหล็ก ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 1.2 ผลการศึกษาพบว่า ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวเต็มคลื่น, 50% และ 25% การเคลื่อนตัวของเสาตอม่อที่ใช้เหล็กกำลังสูงและเหล็กกำลังปกติมีค่าเท่ากันในช่วงเริ่มต้น แต่ภายหลังเหล็กกำลังสูงมีค่าการเคลื่อนตัวมากกว่า ดังตัวอย่างกราฟที่แสดงในรูปที่ 4.1, 4.2, 4.3 อย่างไรก็ตาม เมื่อความรุนแรงของคลื่นลดลงเหลือ 10% การเคลื่อนตัวยังคงใกล้เคียงกันทั้งสองชนิดเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งขัดแย้งกับแนวคิดทั่วไปที่ว่าเหล็กกำลังสูงควรมีการเคลื่อนตัวน้อยกว่า ดังนั้นจึงควรพิจารณาปัจจัยอื่นเพิ่มเติมในการตีความผลลัพธ์ นอกจากนี้ เมื่อนำการเคลื่อนตัวภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ 10%, 25%, 50% และ เต็มคลื่นมาเปรียบเทียบจะพบว่าเหล็กกำลังสูงจะถูกกระทำจากการเคลื่อนตัวที่สูงกว่าเหล็กกำลังปกติสูงขึ้นในระดับที่มากขึ้นตามลำดับ



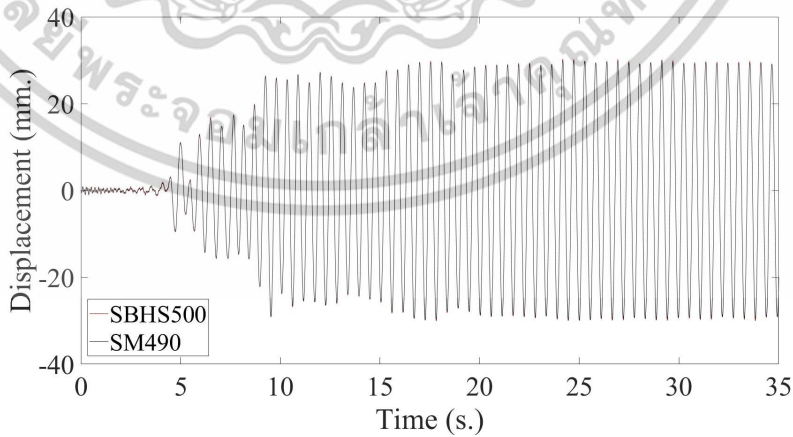
รูปที่ 4.1 การเคลื่อนตัวของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบเต็มคลื่น



รูปที่ 4.2 การเคลื่อนตัวของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ 50%



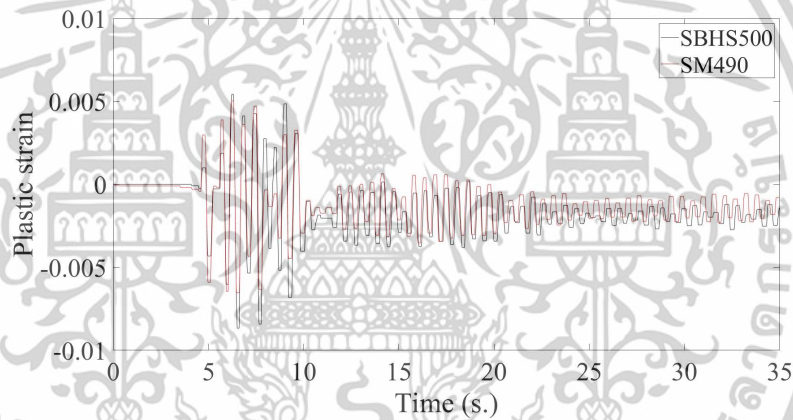
รูปที่ 4.3 การเคลื่อนตัวของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ 25%



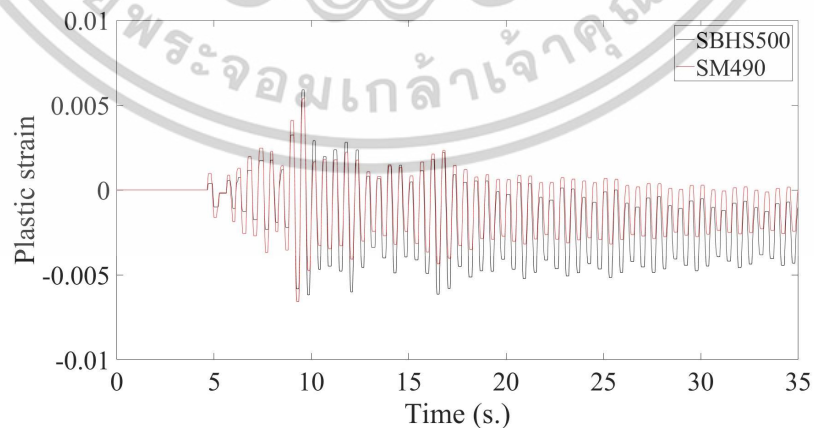
รูปที่ 4.4 การเคลื่อนตัวของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ 10%

4.1.2 ค่าความเครียดเชิงพลาสติก (Plastic strain)

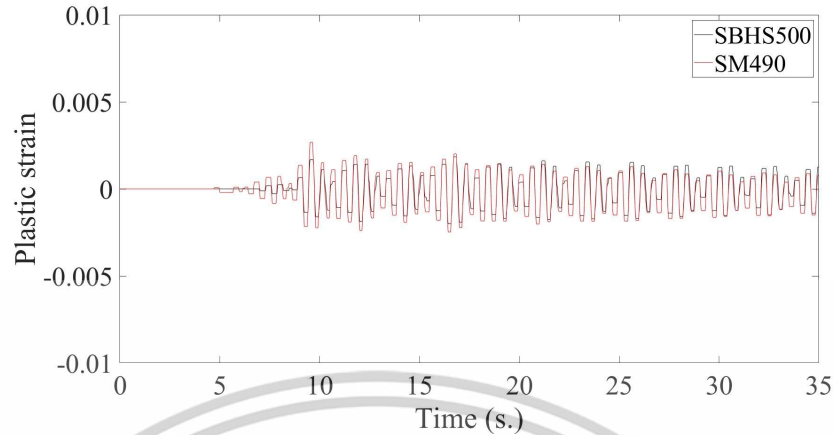
จากการวิเคราะห์โครงสร้างเสาตอม่อสะพานเหล็กภายใต้ผลกระทบจากคลื่นแผ่นดินไหว โดยพิจารณาค่าความเครียดที่มุมรอยต่อระหว่างเสาและคาน พบว่าสำหรับคลื่นแผ่นดินไหวโกเบเต็มคลื่น, 50% ค่าความเครียดของเหล็กกำลังปกติสูงกว่าเหล็กกำลังสูง จนกระทั่งความเครียดเชิงพลาสติกอยู่ในช่วง 0.4% ถึง 0.6% หลังจากนั้น ค่าความเครียดเชิงพลาสติกของเหล็กกำลังสูงเริ่มสูงกว่าเหล็กกำลังปกติ ดังกราฟรูปที่ 4.5, 4.6 สำหรับการวิเคราะห์ 25% ของคลื่นแผ่นดินไหว ค่าความเครียดของเหล็กกำลังปกติยังคงสูงกว่าเหล็กกำลังสูงในค่าของช่วงความเครียดระหว่าง 0.1% ถึง 0.2% หลายรอบจนถึงจุดหนึ่งหลังจากนั้น ที่ค่าความเครียดของทั้งเหล็กกำลังสูงและเหล็กกำลังปกติมีค่าคล้ายกัน ดังกราฟรูปที่ 4.7 ซึ่งต่างจากผลการวิเคราะห์ 10% ของคลื่นแผ่นดินไหวเหล็กกำลังปกติยังมีค่าความเครียดสูงกว่าเหล็กกำลังสูงตลอดการวิเคราะห์ ดังรูปที่ 4.8



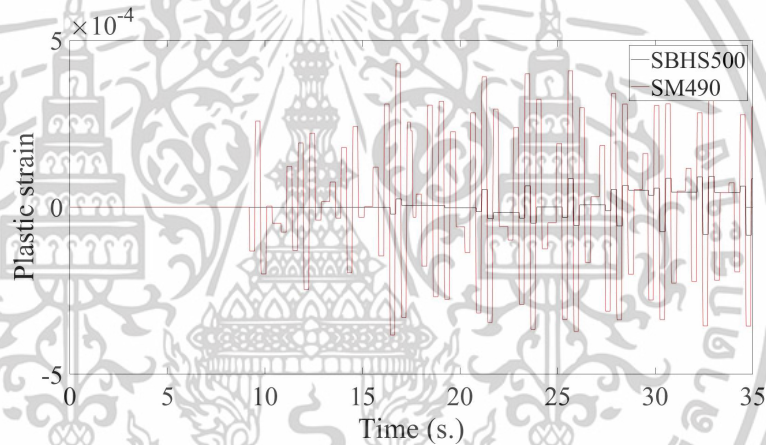
รูปที่ 4.5 ค่าความเครียดเชิงพลาสติกภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบเต็มคลื่น



รูปที่ 4.6 ค่าความเครียดเชิงพลาสติกภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ 50%



รูปที่ 4.7 ค่าความเครียดเชิงพลาสติกภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ 25%



รูปที่ 4.8 ค่าความเครียดเชิงพลาสติกภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ 10%

4.1.3 พลังงานความเครียดสะสม (Plastic strain energy density)

การวิเคราะห์เสถียรภาพของสะพานเหล็กภายใต้ผลกระทบจากคลื่นแผ่นดินไหวได้พิจารณาค่าความเครียดเชิงพลาสติกและความเค้นที่มูรรอยต่อระหว่างเสาและคาน โดยได้สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดเชิงพลาสติกและความเค้นจากนั้นใช้พื้นที่ใต้กราฟ หรือใช้สมการที่ (5) ในการคำนวณพลังงานความเครียดสะสมที่เกิดขึ้น ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ในกรณีของคลื่นแผ่นดินไหวโกเบเต็มคลื่น, 50% และ 25% ของคลื่นแผ่นดินไหว พลังงานความเครียดสะสมของเหล็กกำลังปกติสูงกว่าเหล็กกำลังสูงในช่วงแรก หลังจากนั้นพลังงานความเครียดสะสมของเหล็กกำลังสูงมีค่าสูงกว่าเหล็กกำลังปกติ อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์สำหรับคลื่นแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรง 10% แสดงให้เห็นว่า พลังงานความเครียดสะสมของเหล็กกำลังปกติสูงกว่าเหล็กกำลังสูงตลอดการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.9

$$\Delta w_p = \int_0^{\varepsilon} \sigma d\varepsilon_p$$

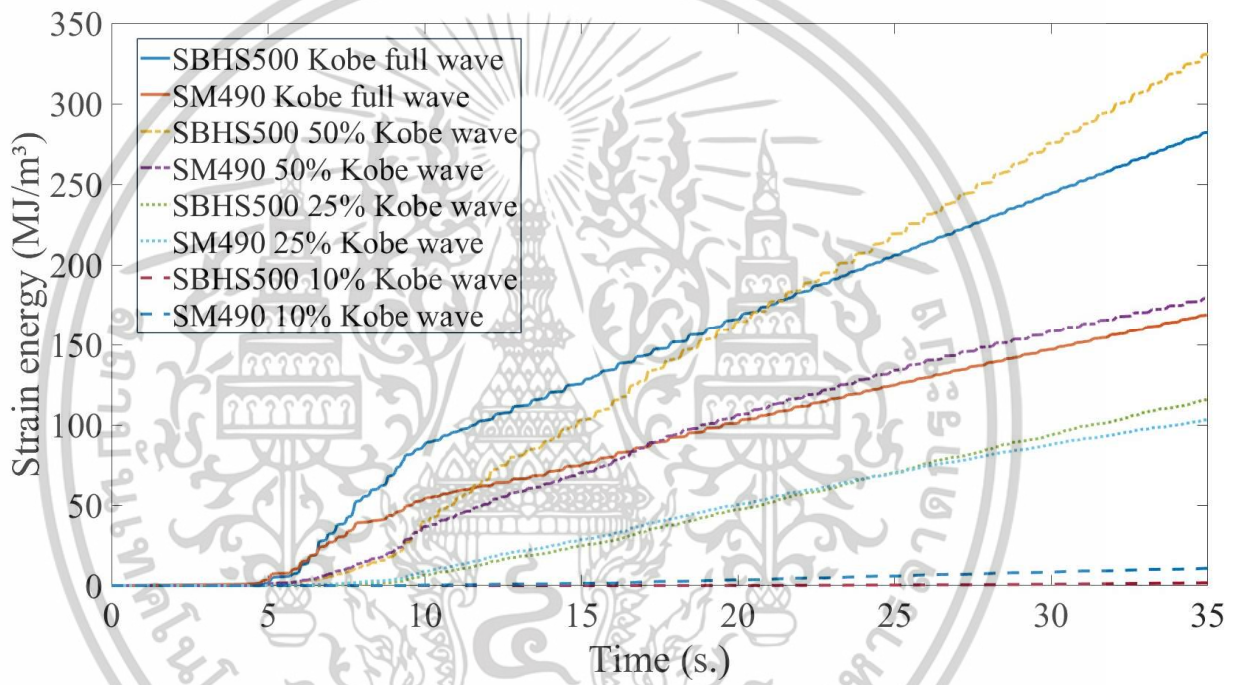
(5)

เมื่อ

σ : the stress

ε_p : the plastic strain

Δw_p : the plastic strain energy density



รูปที่ 4.9 พลังงานความเครียดสะสมของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ

จากการวิเคราะห์ประวัติการเคลื่อนตัว, ค่าความเครียดเชิงพลาสติก และพลังงานความเครียดสะสม พบว่า สำหรับคลื่นแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงต่ำ เช่น 10% ของคลื่นแผ่นดินไหวโกเบ ประวัติการเคลื่อนตัวของเหล็กกำลังสูงและเหล็กกำลังปกติมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าความเครียดเชิงพลาสติกและพลังงานความเครียดสะสมของเหล็กกำลังสูงต่ำกว่าเหล็กกำลังปกติ แสดงให้เห็นว่าแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงต่ำมีผลกระทบต่อพฤติกรรมของเหล็กกำลังสูงน้อยกว่าเหล็กกำลังปกติ

สำหรับคลื่นแผ่นดินไหวโกเบเต็มคลื่น, 50% และ 25% ของคลื่นแผ่นดินไหวโกเบ พบว่า ค่าความเครียดเชิงพลาสติกและประวัติการเคลื่อนตัวของเหล็กกำลังสูงเริ่มสูงกว่าเหล็กกำลังปกติหลังจาก

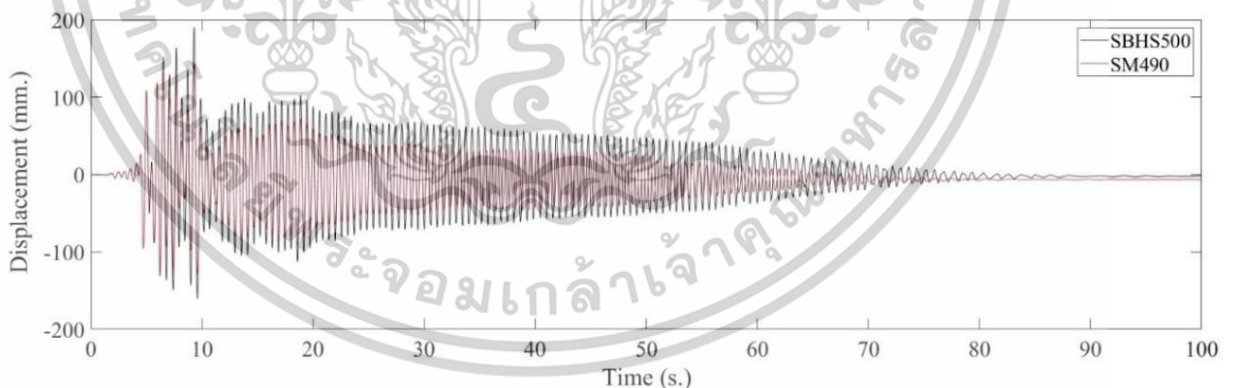
เกิดค่าความเครียดขนาดใหญ่ หรือค่าความเครียดเชิงพลาสติกกระทำซ้ำๆ ซึ่งต่อมาจะเกิดจุดตัดของกราฟพลังงานสะสมของเหล็กกำลังสูงและเหล็กกำลังปกติขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในกรณีแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงสูง เหล็กกำลังสูงมีพฤติกรรมที่ด้อยกว่าหรือเสื่อมประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับเหล็กกำลังปกติ อาจเนื่องจากการเกิดรอยแตกร้าวหรือการเสียรูปร่างถาวร

4.2 ผลการวิเคราะห์ปลายรอยเชื่อม (Results of weld toe analysis)

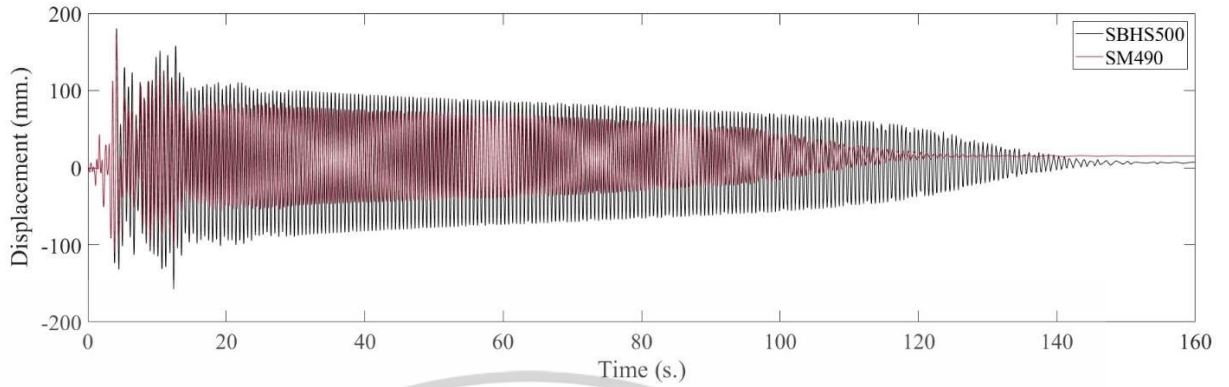
4.2.1 ประวัติการเคลื่อนตัว (Displacement history)

ในการวิเคราะห์เชิงไดนามิกนี้ แบบจำลองทั้งหมดได้รับการประเมินภายใต้ผลกระทบจากคลื่นแผ่นดินไหว โดยกระบวนการประเมินจะดำเนินต่อไปจนกว่าโครงสร้างจะหยุดการสั่นสะเทือน ข้อมูลต่างๆ ถูกเก็บรวบรวมจากปลายเสาต่อม่อสะพานเหล็ก ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 1.2

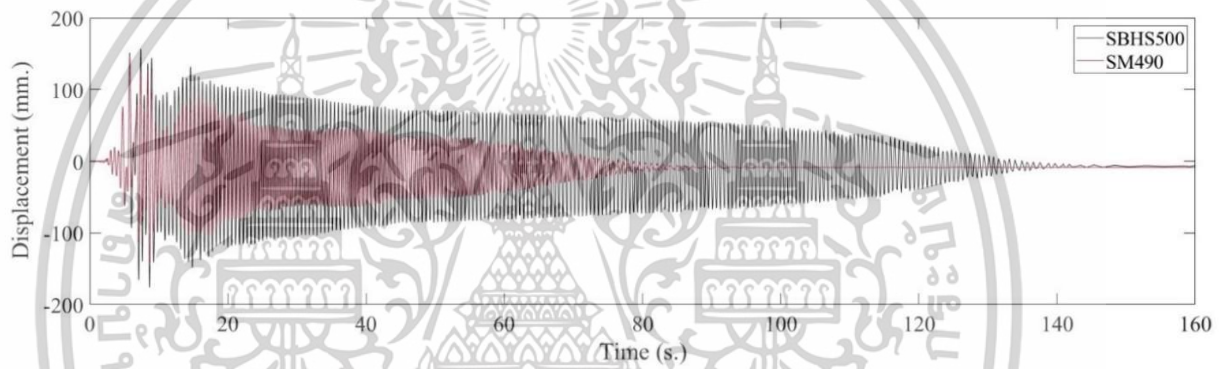
ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า เมื่อเกิดแผ่นดินไหวโกเบ, ทาคาโทริ และคумаโมโตะ พบว่าเหล็กกำลังสูงจะมีระยะเวลาการสั่นสะเทือนที่นานกว่าเหล็กกำลังปกติ แต่การเคลื่อนตัวสูงสุดของทั้งสองประเภทเหล็กนั้นใกล้เคียงกัน โดยเหล็กกำลังสูงมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย ตามที่ปรากฏในรูปที่ 4.10, 4.11, 4.12 สำหรับการวิเคราะห์แผ่นดินไหวเชียงราย ซึ่งมีความรุนแรงน้อยกว่าคลื่นแผ่นดินไหวที่ศึกษาไว้ก่อนหน้านี้ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการสั่นสะเทือนจะหยุดลงพร้อมกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การเคลื่อนตัวสูงสุดของเหล็กกำลังสูงจะต่ำกว่าเหล็กกำลังปกติ ตามที่แสดงในรูปที่ 4.13



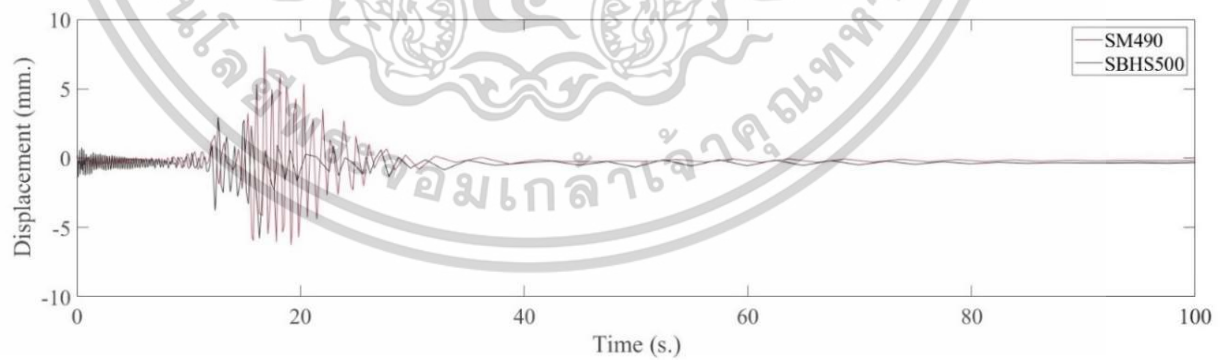
รูปที่ 4.10 ประวัติการเคลื่อนตัวของเสาต่อม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ



รูปที่ 4.11 ประวัติการเคลื่อนตัวของเสาต่อม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวทาคาโทริ



รูปที่ 4.12 ประวัติการเคลื่อนตัวของเสาต่อม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวคุมาโมโตะ



รูปที่ 4.13 ประวัติการเคลื่อนตัวของเสาต่อม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวเชียงราย

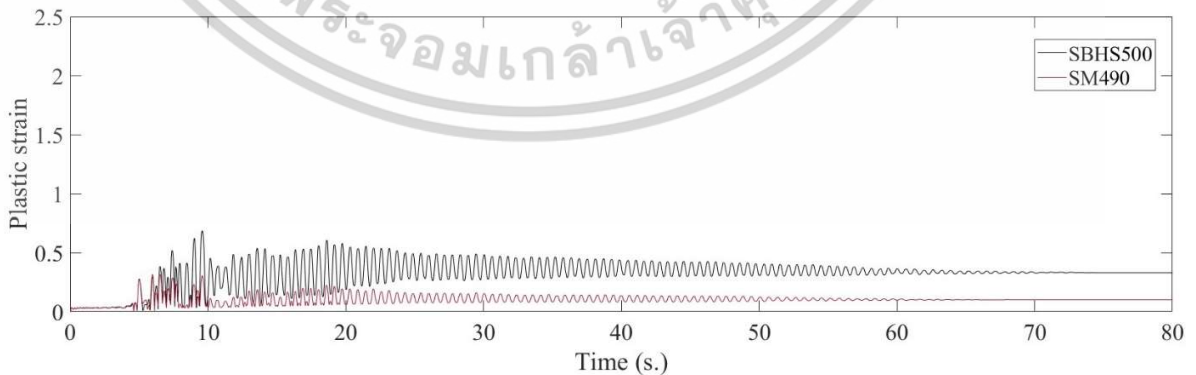
4.2.2 ขนาดของความเครียดเชิงพลาสติก (Plastic strain magnitudes)

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มุ่งเน้นการตรวจสอบขนาดความเครียดเชิงพลาสติกในบริเวณรอยเชื่อมโดยพิจารณาจุดที่อยู่ในพื้นที่การคราก (Yielding area) โดยเลือกตำแหน่งที่มีขนาดความเครียดเชิงพลาสติกสูงสุดจากแต่ละคลื่นแผ่นดินไหว ทั้งในกรณีของเหล็กกำลังสูงและเหล็กกำลังปกติ ซึ่งมีความสำคัญเนื่องจากอาจบ่งชี้ถึงการเริ่มต้นของรอยแตกร้าว โดยสามารถหาขนาดความเครียดเชิงพลาสติกได้จากสมการที่ (6) การวิเคราะห์นี้ใช้ข้อมูลจากคลื่นแผ่นดินไหวหลายชุด โดยเฉพาะคลื่นที่เกิดจากแผ่นดินไหวโกเบ, ทาคาโทริ และคумаโมโตะ ผลการศึกษาพบว่า สำหรับเหล็กกำลังสูง ขนาดความเครียดเชิงพลาสติกสูงสุดที่สังเกตก่อนที่การสั่นของกราฟจะเข้าสู่สถานะคงที่นั้นอยู่ในช่วง 60% ถึง 80% ขณะที่เหล็กกำลังปกติแสดงค่าที่ต่ำกว่าอยู่ในช่วง 30% ถึง 40% ตามที่แสดงในรูปที่ 4.14, 4.15, 4.16 อย่างไรก็ตาม ในกรณีของคลื่นแผ่นดินไหวเซียงราย ผลการศึกษามีความแตกต่างอย่างชัดเจน การวิเคราะห์พบว่าขนาดความเครียดเชิงพลาสติกของเหล็กทั้งสองประเภท (เหล็กกำลังสูงและเหล็กกำลังปกติ) ใกล้เคียงกัน โดยขนาดความเครียดเชิงพลาสติกสูงสุดอยู่ในช่วง 3% ถึง 4% เท่านั้น ดังที่แสดงในรูปที่ 4.17

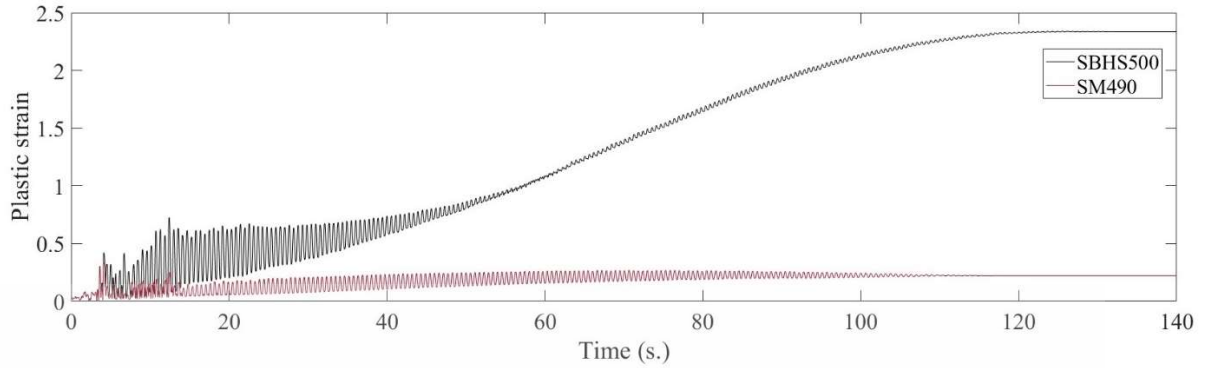
$$\Delta \bar{\epsilon}_p = \sqrt{\frac{2}{9} \left[\left(\Delta \epsilon_{p,x} - \Delta \epsilon_{p,y} \right)^2 + \left(\Delta \epsilon_{p,y} - \Delta \epsilon_{p,z} \right)^2 + \left(\Delta \epsilon_{p,z} - \Delta \epsilon_{p,x} \right)^2 + 3 \left(\Delta \gamma_{p,xy}^2 + \Delta \gamma_{p,yz}^2 + \Delta \gamma_{p,zx}^2 \right) \right]}$$

(6)

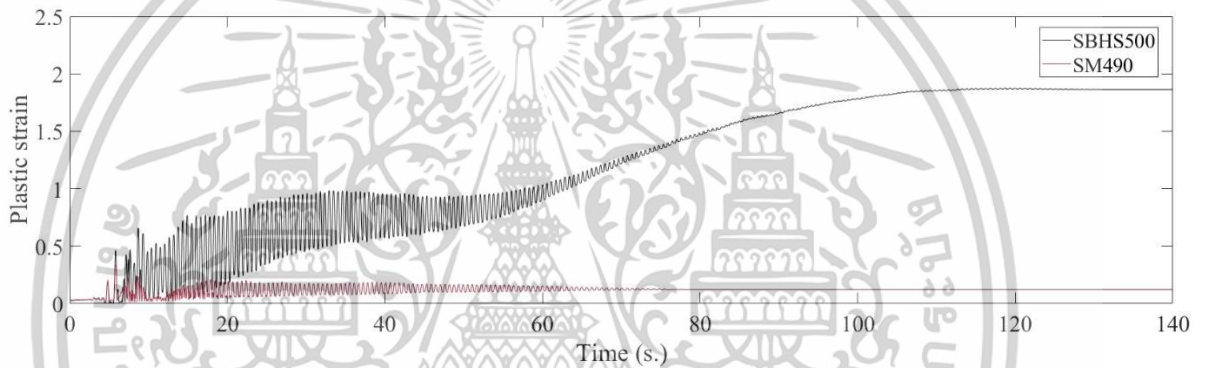
เมื่อ $\Delta \epsilon_p$: the normal plastic strain range
 $\Delta \gamma_p$: the shear plastic strain range
 x, y, z : x, y, z directions, respectively
 $\Delta \bar{\epsilon}_p$: the equivalent plastic strain range



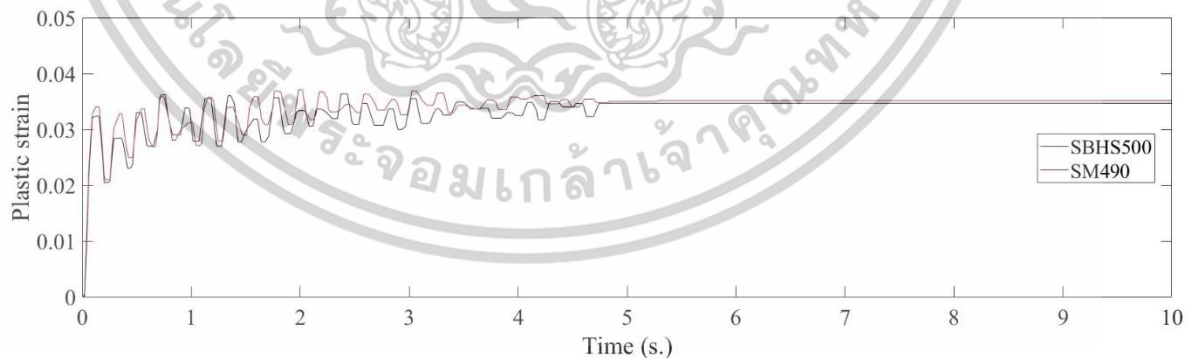
รูปที่ 4.14 ขนาดความเครียดเชิงพลาสติกของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ



รูปที่ 4.15 ขนาดความเครียดเชิงพลาสติกของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวทาคาโทริ



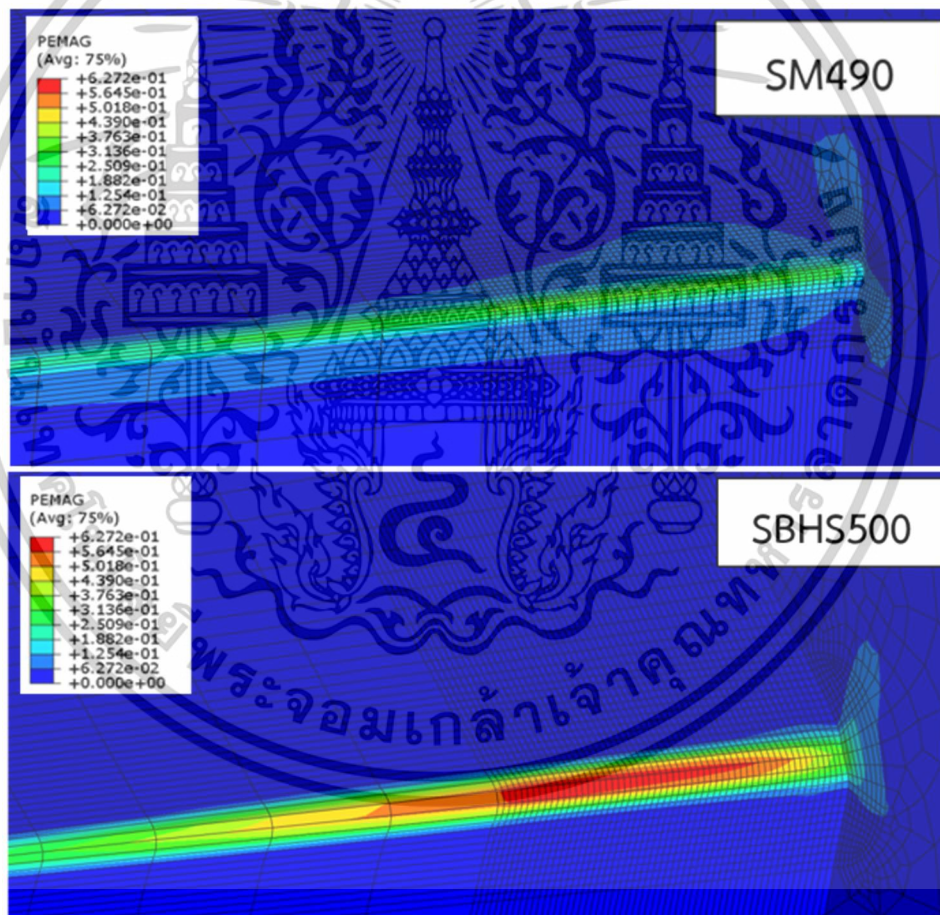
รูปที่ 4.16 ขนาดความเครียดเชิงพลาสติกของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวคุมาโมโตะ



รูปที่ 4.17 ขนาดความเครียดเชิงพลาสติกของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวแผ่นดินไหว เชียงราย

ข้อสรุปจากการวิเคราะห์นี้คือ ในเหตุการณ์แผ่นดินไหวรุนแรง เช่น โโกเบ, ทาคาโตรี และคุมาโมโต เหล็กกำลังสูงจะมีขนาดความเครียดเชิงพลาสติกสูงกว่าผลลัพธ์ที่ได้จากเหล็กกำลังปกติอย่างเห็นได้ชัด ขณะที่ในเหตุการณ์ แผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงน้อยกว่า เช่น แผ่นดินไหวเชียงราย ขนาดความเครียดเชิงพลาสติกในเหล็กทั้งสองประเภทจะมีค่าใกล้เคียงกัน

ซึ่งเมื่อนำมาวิเคราะห์ร่วมกับค่าการเคลื่อนตัวโดยในความเข้าใจทั่วไปที่หลายคนคิดว่าวัสดุที่กำลังต่ำ การเคลื่อนตัวจะมากกว่าวัสดุที่กำลังสูงภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวเดียวกันหรือแรงที่มากระทำเท่ากัน แต่สำหรับคลื่นแผ่นดินไหวโกเบที่เกิดความเครียดเชิงพลาสติกขนาดใหญ่จำนวนมากทำให้ค่าของการเคลื่อนตัวขัดแย้งกับความเข้าใจทั่วไปข้างต้น ส่วนแผ่นดินไหวเชียงรายนั้นเกิดความเครียดเชิงพลาสติกเพียงเล็กน้อยซึ่งมีขนาดไม่ใหญ่มากพอทำให้ค่าของการเคลื่อนตัวตรงกับกับความเข้าใจทั่วไปที่หลายคนคิด



รูปที่ 4.18 พื้นที่การกระจายของความเครียดของคลื่นแผ่นดินไหวโกเบ

อย่างไรก็ตามเมื่อใช้แบบจำลองปลายรอยเชื่อม (Weld toe model) มาสังเกตเพิ่มเติมพบว่าพื้นที่ของขนาดความเครียดเชิงพลาสติก (Plastic strain magnitudes area) หรือพื้นที่การคราก (Yielding area) มีพื้นที่การกระจายของความเครียดที่มีลักษณะเหมือนกันในทุกคลื่นแผ่นดินไหว นั่นคือเหล็กกำลังสูงจะมีพื้นที่การกระจายของความเครียดที่น้อยกว่าดังรูปที่ 4.18

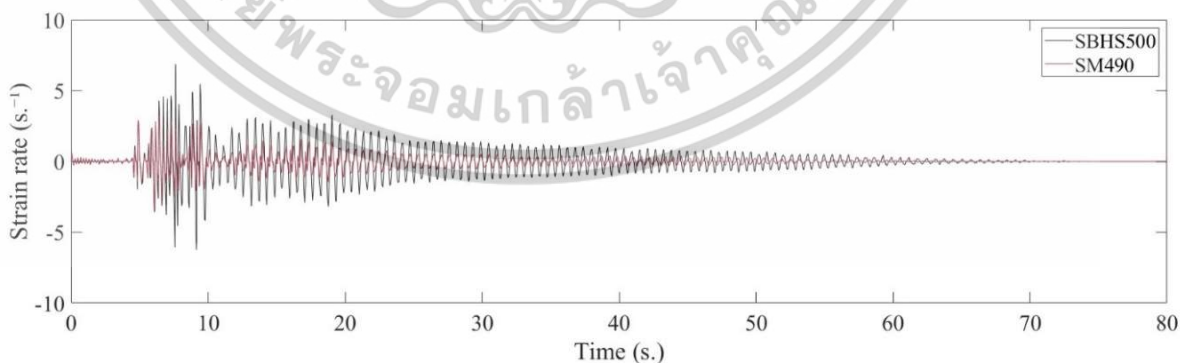
4.2.3 ประวัติอัตราความเครียด (Strain rate histories)

อัตราความเครียด (Strain rate) เป็นตัวชี้วัดที่สำคัญในการประเมินความเสียหายที่เกิดขึ้นในรอยเชื่อมระหว่างเหตุการณ์แผ่นดินไหวตามสมการ (7) การวิเคราะห์รอยเชื่อมพบว่าอัตราความเครียดสูงสุดในระหว่างแผ่นดินไหวโกเบ, ทาคาโทริ และคумаโมโตะ โดยตำแหน่งที่เลือกตรวจสอบเป็นตำแหน่งเดียวกับค่าความเครียดเชิงพลาสติก (Plastic strain magnitudes) สำหรับเหล็กกำลังสูงและเหล็กกำลังปกติในช่วงอัตราความเครียดสูงสุดประมาณ 1 s^{-1} ถึง 10 s^{-1} ตามที่แสดงในรูปที่ 4.19, 4.20, 4.21 ในขณะที่การวิเคราะห์แผ่นดินไหวที่เซียงรายพบว่าอัตราความเครียดสูงสุดสำหรับเหล็กทั้งสองประเภทอยู่ในช่วงประมาณ 0.1 s^{-1} ถึง 1 s^{-1} ตามที่แสดงในรูปที่ 4.22

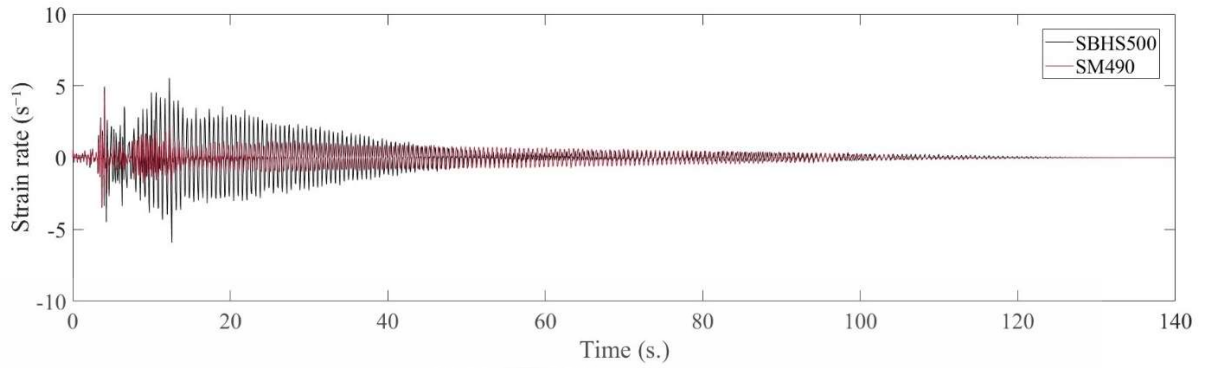
โดยรวมแล้วผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าอัตราความเครียดสูงสุดในทุกกรณีมีค่าสูงซึ่งบ่งชี้ว่าอัตราความเครียดที่สูงอาจมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อพฤติกรรมความล้ารอบต่ำ (low-cycle fatigue) ของวัสดุในระหว่างเหตุการณ์แผ่นดินไหว ข้อค้นพบนี้เน้นย้ำถึงความสำคัญของการพิจารณาอัตราความเครียดเมื่อประเมินประสิทธิภาพการทำงานของรอยเชื่อมภายใต้สภาวะแผ่นดินไหว

$$\dot{\epsilon}_p = \frac{d\epsilon_p(t)}{dt}$$

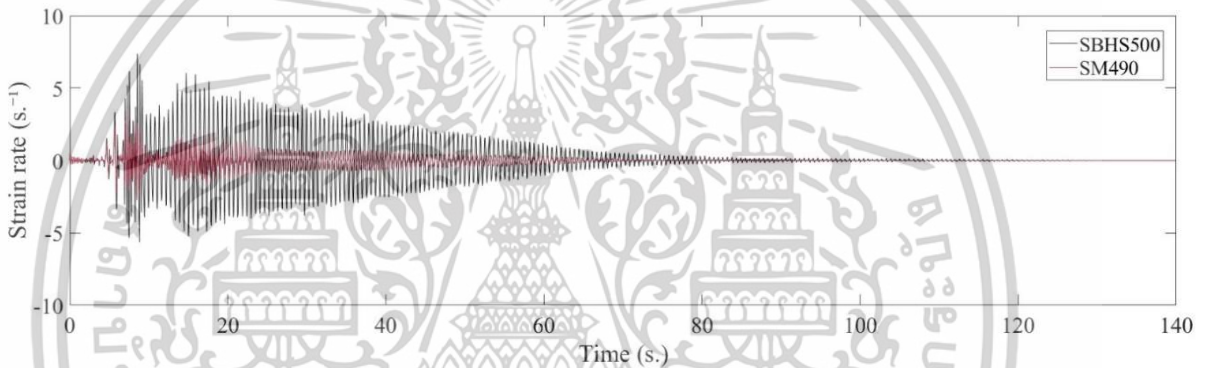
(7)



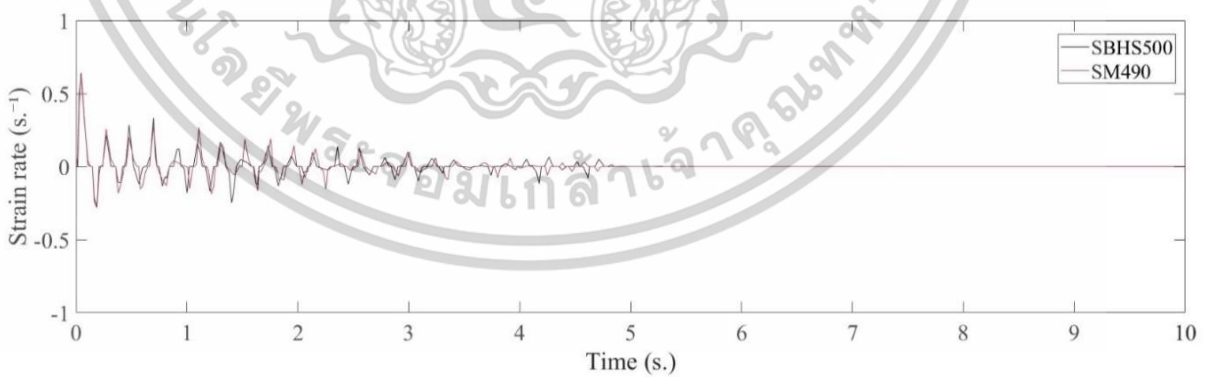
รูปที่ 4.19 อัตราความเครียดของเสาต่อม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ



รูปที่ 4.20 อัตราความเครียดของเสาต่อม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวทาคาโทริ



รูปที่ 4.21 อัตราความเครียดของเสาต่อม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวคูมาโมโตะ



รูปที่ 4.22 อัตราความเครียดของเสาต่อม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวเชียงราย

4.2.4 Effective notch strain range

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้มีการสร้างแบบจำลองโดยอิงตามแนวคิด Effective Notch Strain โดยใช้รัศมีมาตรฐานของ Effective Notch Strain ซึ่งนำเสนอโดย International Institute of Welding (IIW) เพื่อคำนวณ Equivalent total strain range ซึ่งมีค่าเทียบเท่ากับ Effective notch strain range ที่ประกอบด้วยความเครียดแบบคืนรูป (Elastic strain) และความเครียดเชิงพลาสติก (Plastic strain) ความสัมพันธ์นี้แสดงในสมการ (8) ส่วนประกอบของความเครียดแบบคืนรูปและความเครียดเชิงพลาสติก มีรายละเอียดในสมการ (9) และ (6) โดยตำแหน่งที่เลือกตรวจสอบนั้นเป็นตำแหน่งเดียวกับค่าความเครียดเชิงพลาสติก (Plastic strain magnitudes)

$$\Delta \varepsilon_{eff} = \Delta \bar{\varepsilon}_t = \frac{\Delta \bar{\sigma}}{E} + \Delta \bar{\varepsilon}_p \quad (8)$$

เมื่อ

- $\Delta \varepsilon_{eff}$: the effective notch strain range
- $\Delta \bar{\varepsilon}_t$: the equivalent total strain range
- $\Delta \bar{\sigma}$: the equivalent stress range
- $\Delta \bar{\varepsilon}_p$: the equivalent plastic strain range

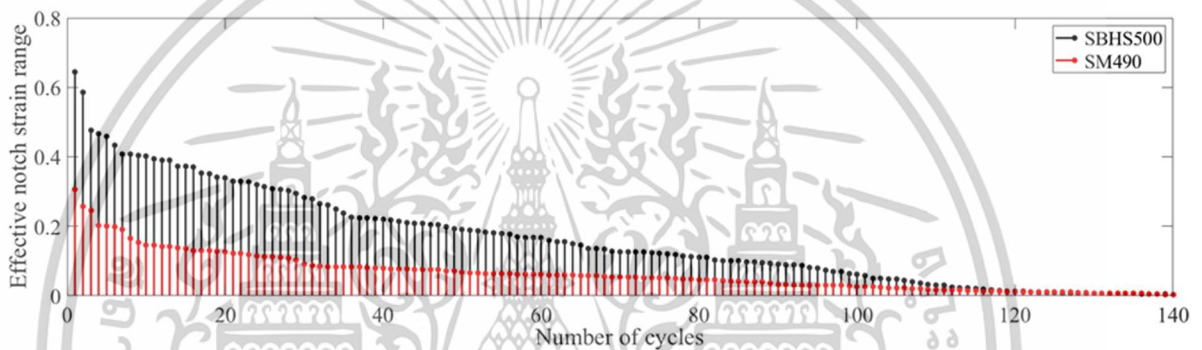
$$\Delta \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\Delta \sigma_x - \Delta \sigma_y)^2 + (\Delta \sigma_y - \Delta \sigma_z)^2 + (\Delta \sigma_z - \Delta \sigma_x)^2 + 6(\Delta \tau_{xy}^2 + \Delta \tau_{yz}^2 + \Delta \tau_{zx}^2) \right]} \quad (9)$$

เมื่อ

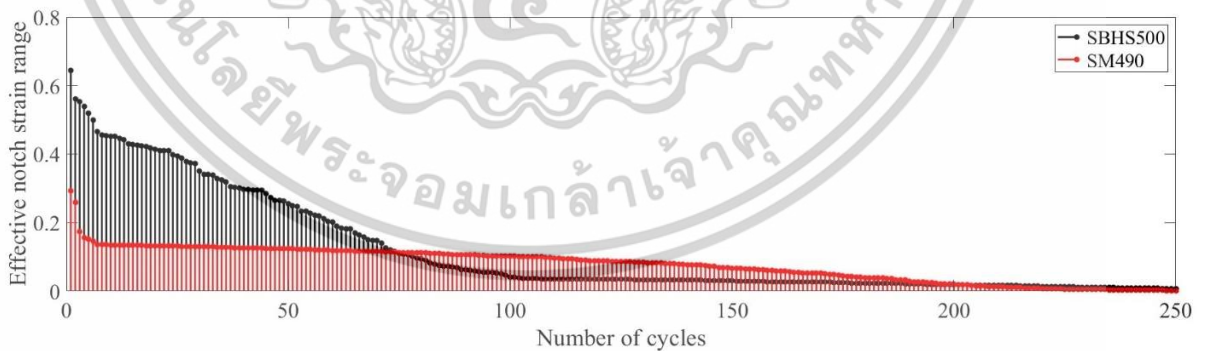
- $\Delta \sigma$: the normal stress range
- $\Delta \tau$: the shear stress range
- x, y, z : x, y, z directions, respectively
- $\Delta \bar{\sigma}$: the equivalent stress range

ผลการวิเคราะห์เผยให้เห็นการกระจายของ Effective notch strain ในระหว่างแผ่นดินไหว ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.23, 4.24, 4.25 และ 4.26 รูปเหล่านี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายของ Effective notch strain และจำนวนรอบในระหว่างแผ่นดินไหวการวิเคราะห์ Effective notch strain range สูงสุดในเสาตอม่อสะพานเหล็กภายใต้เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่แตกต่างกันเผยให้เห็นการตอบสนองที่แตกต่างระหว่างเหล็กกำลังสูงและเหล็กกำลังปกติ ในระหว่างแผ่นดินไหวที่รุนแรง เช่น โทเบ, ทาคาโทริ

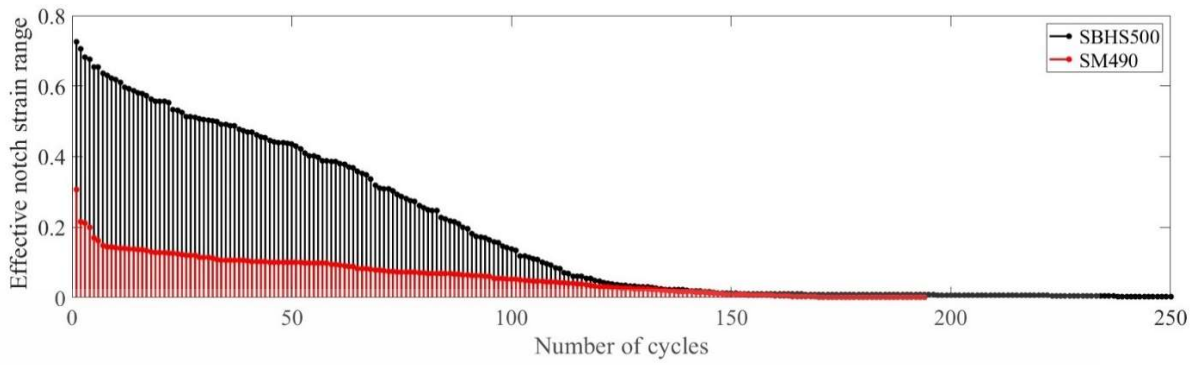
และคามาโมโตะ เหล็กกำลังสูงมีช่วงความเครียดอยู่ระหว่าง 60% ถึง 80% ในขณะที่เหล็กกำลังปกติจะมีช่วงความเครียดต่ำกว่าอยู่ที่ 20% ถึง 40% โดยทั่วไป Effective notch strain range ของเหล็กทั้งสองประเภทมีแนวโน้มลดลงภายในช่วง 20% ถึง 0% ภายใต้แผ่นดินไหวเหล่านี้ และสำหรับแผ่นดินไหวเชียงรายซึ่งมีความรุนแรงน้อยกว่า effective notch strain range ของทั้งเหล็กกำลังสูง และเหล็กกำลังปกติอยู่ที่ประมาณ 1% เท่านั้นผลการวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าเหล็กกำลังสูงมี Effective notch strain range สูงสุดที่สูงกว่าเหล็กกำลังปกติอย่างมีนัยสำคัญเมื่อตอบสนองต่อแผ่นดินไหวที่รุนแรงอย่างไรก็ตาม สำหรับแผ่นดินไหวที่รุนแรงน้อยกว่า Effective notch strain range ระหว่างเหล็กกำลังสูงและเหล็กกำลังปกติจะมีความใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.23 การกระจาย Effective notch strain range ของเสาต่อม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ



รูปที่ 4.24 การกระจาย Effective notch strain range ของเสาต่อม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวทาคาโทริ



รูปที่ 4.25 การกระจาย Effective notch strain range ของเสาต่อม่อสะพานภายใต้
คลื่นแผ่นดินไหวคุมาโมโตะ



รูปที่ 4.26 การกระจาย Effective notch strain range ของเสาต่อม่อสะพานภายใต้
คลื่นแผ่นดินไหวเชียงราย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษานิวเคลียร์ความเครียดเฉพาะที่ (Local strain) ภายใต้แผ่นดินไหวได้ดำเนินการจากมุมมองของพฤติกรรมความล้า โดยมีการศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมความล้า เช่น ความเครียดเฉพาะที่ (Local strain), อัตราความเครียด (Strain rate) และพลังงานความเครียดสะสมรวม (Plastic strain energy density) การศึกษายึดหลักการตามข้อเสนอแนะของ IIW โดยใช้ Effective Notch Strain พร้อมทั้งกำหนดรัศมีของรอยเชื่อมที่ 1 มม. และกำหนดขนาดของ mesh ที่ R/4 ภายใต้พฤติกรรมของ cycle hardening ได้สรุปผลดังนี้

1. จากการวิเคราะห์โดยใช้แนวคิด Effective Notch Strain พบว่าเหล็กกำลังสูงเกิดความเครียดเฉพาะที่สูงกว่าเหล็กกำลังปกติ โดยเฉพาะเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะแผ่นดินไหวความรุนแรงสูง
 2. เหล็กกำลังสูงมีพื้นที่การคราก (yielding area) น้อยกว่าแต่มีระดับความเครียดเฉพาะที่ (Local strain) สูงกว่า ขณะที่เหล็กกำลังปกติมีพื้นที่การครากกว้างกว่าแต่ความเครียดเฉพาะที่ต่ำกว่า ซึ่งแสดงถึงความสำคัญในการเลือกใช้เหล็กแต่ละชนิดในแต่ละบริเวณของโครงสร้าง
 3. เหล็กกำลังสูงมีการเคลื่อนตัวและเกิดความเครียดเชิงพลาสติกมากกว่าเหล็กกำลังปกติ ส่งผลให้พลังงานความเครียดสะสมสูงขึ้น และเมื่อระดับพลังงานสะสมถึงจุดหนึ่ง จะเกิดจุดตัดพฤติกรรมกับเหล็กกำลังปกติ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เหล็กกำลังสูงตอบสนองรุนแรงกว่าภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวเดียวกัน
- ดังนั้น จากผลการศึกษาทั้งหมดทำให้เราทราบว่าเหล็กกำลังสูงนั้นมีคุณสมบัติที่ด้อยลงขณะเกิดแผ่นดินไหวที่รุนแรงสูง

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการนำเหล็กกำลังสูงมาใช้ในงานเสถียรต่อมอสหพานเหล็กหรือโครงสร้างประเภทอื่น ควรพิจารณาดัชนีพลังงานต่อหน่วยพื้นที่การครากเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญในการออกแบบเพื่อรองรับแรงแผ่นดินไหว เนื่องจากผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า การสลายพลังงานภายในโครงสร้างส่งผลต่อการลดทอนคุณสมบัติของเหล็กกำลังสูง อีกทั้งพื้นที่การครากยังสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดบริเวณที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายได้ ดังนั้น การเลือกใช้เหล็กที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้าง จะช่วยลดผลกระทบจากความเครียดและเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Alim, “Reliability based seismic performance analysis of retrofitted bridge bent,” presented at the IABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering-III, Dhaka, Bangladesh, Aug. 21–22, 2015.
- [2] The Technical Society, The Iron and Steel Institute of Japan, “Production and Technology of Iron and Steel in Japan during 2023,” *ISIJ International*, vol. 64, no. 8, pp. i–xix, 2024.
- [3] T. Hanji, K. Saiprasertkit, and C. Miki, “Low- and High-cycle Fatigue Behavior of Load-carrying Cruciform Joints with Incomplete Penetration and Strength Under-match,” *International Journal of Steel Structures*, vol. 11, no. 4, pp. 409–425, 2011.
- [4] P. Hiremath and A. H. Tantray, “Comparison of Conventional RCC Columns, Steel Columns and Composite Columns,” *Journal of Structural Engineering and Management*, vol. 10, no. 3, pp. 35–44, 2023.
- [5] G. Shi, F. Hu, and Y. Shi, “Recent Research Advances of High Strength Steel Structures and Codification of Design Specification in China,” *International Journal of Steel Structures*, vol. 14, no. 4, pp. 873–887, 2014.
- [6] G. Shi, K. Xu, H. Ban and C. Lin, “Local buckling behavior of welded stub columns with normal and high strength steels,” *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 119, pp. 144–153, 2016.
- [7] G. Shi, W. Zhou, Y. Bai, and Z. Liu, “Local Buckling of Steel Equal Angle Members with Normal and High Strengths,” *International Journal of Steel Structures*, vol. 14, no. 3, pp. 447–455, 2014.
- [8] K. Okashita, R. Ohminami, K. Michiba, A. Yamamoto, M. Tomimatsu, Y. Tanji and C. Miki, “Investigation of the Brittle Fracture at the Corner of P75 Rigid-frame Pier in Kobe Harbor Highway During the Hyogoken-nanbu Earthquake,” *Doboku Gakkai Ronbunshu*, vol. 1998, no. 591, pp. 243–261, 1998.
- [9] C. Miki, T. Aizawa and K. Anami, “Brittle Fracture at Beam-to-Column Connection During Earthquake,” *Doboku Gakkai Ronbunshu*, vol. 1998, no. 591, pp. 273–281, 1998.

- [10]H. Ge, L. Kang, and Y. Tsumura, “Extremely Low-Cycle Fatigue Tests of Thick-Walled Steel Bridge Piers,” *Journal of Bridge Engineering*, vol. 18, no. 9, pp. 858–870, 2013.
- [11]C. Miki and E. Sasaki, “Fracture in Steel Bridge Piers due to Earthquakes,” *International Journal of Steel Structures*, 5, pp. 133–140, 2005.
- [12]A. Wöhler, “Theorie rechteckiger eiserner Brückenbalken mit Gitterwänden und mit Blechwänden,” *Zeitschrift für Bauwesen*, 5, pp. 121–166, 1855.
- [13]L. Coffin, “A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal,” *Journal of Fluids Engineering*, vol. 76, no. 6, pp. 931–949, 1954.
- [14]R. Jones, M. Phoplonker and J. Byrne, “Local Strain Approach to Fatigue Crack Formation Life at Notches,” *International journal of fatigue*, vol. 11, no. 4, pp. 255–259, 1989.
- [15]T. Hanji, C. Miki and K. Saiprasertkit, “Low-and High-Cycle Fatigue Behaviour of Load-Carrying Cruciform Joints Containing Incomplete Penetration and Strength Mismatch,” *Welding in the World*, vol. 56, no. 5-6, pp. 133–146, 2013.
- [16]D. Radaj, C. Sonsino, and W. Fricke, *Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches*, Woodhead Publishing, 2006.
- [17]A. Hobbacher, *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*, IIW Documentation, XIII-2151-07/XV-1254-07, 2007.
- [18]W. Fricke, *Guideline for the Fatigue Assessment by Notch Stress Analysis for Welded Structures*, IIW Documentation, XIII-2240r2-08/XV-1289r2-08, 2008.
- [19]E. Sasaki and C. Miki, “Required Fracture Toughness of Steel to Prevent Brittle Fracture During Earthquakes in Steel Bridge Piers,” *Doboku Gakkai Ronbunshu*, vol. 2003, no. 731, pp. 93–102, 2003.
- [20]National Disaster Warning Center Staff, National Disaster Warning Center, 2019.Report
- [21]Seismological Bureau, “Chiang rai Earthquake Report,” Meteorological Department, Bangkok, Thailand, Tech. Document No. 550.341-01-2014, May.
- [22]K. Saiprasertkit, T. Hanji and C. Miki, “Fatigue Strength Assessment of Load-Carrying Cruciform Joints with Material Mismatching in Low- and High-Cycle Fatigue Regions Based on the Effective Notch Concept,” *International Journal of Fatigue*, vol. 40, pp. 120–128, 2012.

- [23]A. Hobbacher, Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components, IIW Documentation, IIW-2259-15 ex XIII-2460-13/XV-1440-13, 2015.
- [24]K. Okashita, R. Ohminami, K. Michiba, A. Yamamoto, M. Tomimatsu, Y. Tanji, C. Miki, “Investigation of the brittle fracture at the corner of P75 rigid-frame pier in Kobe harbor highway during the Hyogoken-nanbu earthquake,” Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, JSCE, 59/143, 243-261, 1998.
- [25]N. Sinsamutpadung, “A study on low-cycle fatigue behaviors of steel member in large plastic strain region under earthquake loading,” Ph.D.dissertation, Tokyo Institute of Technology, 2017.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นาย รัชญ์ ธรรมาธิวัฒน์
วัน เดือน ปีเกิด เกิดวันที่ 12 พฤศจิกายน พุทธศักราช 2541
ที่อยู่ 300/131 หมู่บ้านพาทีโอ ศรีนครินทร์ - พระราม9 ถ.กรุงเทพกรีฑา แขวงหัวหมาก
เขตบางกะปิ กรุงเทพฯ 10240
ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2559 - 2563
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2563 – 2567(ปัจจุบัน)
คณะวิศวกรรมศาสตร์ หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สิ่งแวดล้อม และการจัดการงานก่อสร้าง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง