

การศึกษาพฤติกรรมความเครียดเฉพาะที่ระหว่างเกิดแผ่นดินไหวโดยการประเมินความล้ารอบต่ำของเสาตอม่อสะพานเหล็กกำลังสูง

Local Strain Behaviors During Earthquakes from Low-Cycle Fatigue Assessment of High-Strength Steel Bridge Piers

วิชัย ธรรมาธิวัฒน์^{1,*} และ ณัฏฐดนัย สิมสมุทรมงคล²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จ.กรุงเทพมหานคร

* Corresponding author; E-mail address: 63601130@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาพฤติกรรมของความเครียดเฉพาะที่ (Local strain) ในเสาตอม่อสะพานเหล็กภายใต้สภาวะแผ่นดินไหว โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์เหตุการณ์แผ่นดินไหวครั้งใหญ่ในประเทศญี่ปุ่นและประเทศไทย โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเสาตอม่อสะพานเหล็กที่ผลิตจากเหล็กกำลังปกติและเหล็กกำลังสูง พบว่าเสาสะพานเหล็กได้รับความเสียหายจากความล้ารอบต่ำ (Low-cycle fatigue damage) ที่อยู่ในช่วงความเครียดเชิงพลาสติกขนาดใหญ่ (Large plastic region) การประเมินความรุนแรงของความเสียหายดังกล่าวดำเนินการโดยใช้วิธีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method - FEM) ร่วมกับแนวคิด Effective Notch Strain ซึ่งถูกนำเสนอโดย International Institute of Welding (IIW) ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าคลื่นแผ่นดินไหวส่งผลให้เกิดค่าความเครียดเฉพาะที่ (Local strain) อัตราความเครียด (Strain rate) และพลังงานความเครียดสะสมรวม (Plastic strain energy density) ในเสาตอม่อสะพานเหล็กที่ผลิตจากเหล็กกำลังสูงสูงกว่าเสาตอม่อสะพานเหล็กที่ผลิตจากเหล็กกำลังปกติ นอกจากนี้ เหล็กกำลังสูงจะมีพื้นที่การคราก (Yielding area) ที่เล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกำลังปกติ ดังนั้น ดัชนีพลังงานต่อหน่วยพื้นที่การคราก ควรได้รับการพิจารณาเพื่อยืนยันรูปแบบการวิบัติของเสาตอม่อสะพานเหล็กกำลังสูง

คำสำคัญ: ความล้ารอบต่ำ, เสาสะพานเหล็ก, แผ่นดินไหว, เหล็กกำลังสูง, ความเครียดเฉพาะที่

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.

Keywords: low-cycle fatigue, steel bridge pier, earthquake, high-strength steel, local strain

1. บทนำ (Introduction)

1.1 ที่มา (Background)

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

ปัจจุบันมีการนำเหล็กกำลังสูงมาใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความแข็งแรงสูงขึ้น โดยมีค่าจุดคราก (f_y) ตั้งแต่ 460 MPa ขึ้นไป และอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักที่เหนือกว่าเมื่อเทียบกับเหล็กกำลังปกติ อย่างไรก็ตาม เหล็กกำลังสูงมีความเหนียวต่ำกว่าและมีค่าความเค้นสูงสุดลดลงเมื่ออัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของโครงสร้างเพิ่มขึ้น ซึ่งแตกต่างจาก

เหล็กกำลังปกติ [5-7] ดังนั้น พฤติกรรมของโครงสร้างที่ใช้เหล็กกำลังสูงภายใต้สภาวะแผ่นดินไหวจึงควรจะต้องมีการตรวจสอบ

ในปี 1995 เมืองโกเบ ญี่ปุ่น ประสบเหตุแผ่นดินไหวครั้งรุนแรงที่ส่งผลกระทบอย่างหนักต่อโครงสร้างสะพานเหล็ก โดยพบว่าพฤติกรรมความล้ารอบต่ำ (Low-cycle fatigue) เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดรอยแตกบริเวณรอยเชื่อมระหว่างเสาและคาน ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหักแบบเปราะ (brittle fractures) ดังแสดงในรูปที่ 1 เพราะฉะนั้นจึงบ่งชี้ว่าพฤติกรรมของความเครียดเฉพาะที่ (Local strain) อาจทำให้เข้าใจในพฤติกรรมที่เกิดขึ้นนั้นมากขึ้น [8-11]



รูปที่ 1 รอยแตกที่รอยเชื่อมระหว่างเสาและคานของเสาสะพานเหล็กในระหว่างแผ่นดินไหวที่เมืองโกเบ เมื่อปี 1995

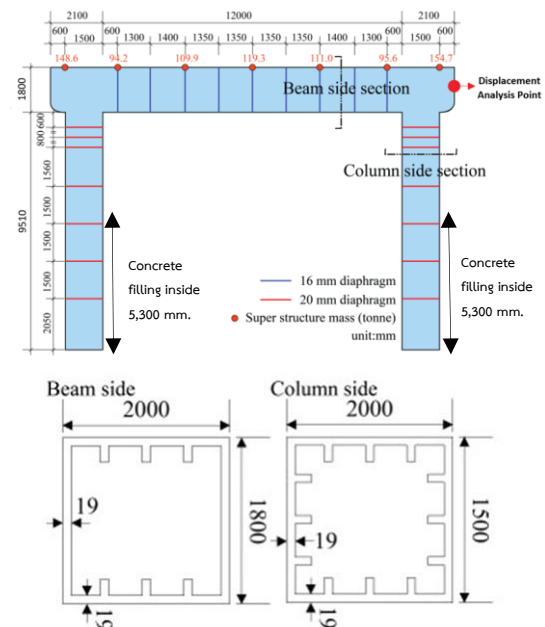
พฤติกรรมของความเครียดเฉพาะที่ (Local strain) ถูกค้นพบว่ามีความสัมพันธ์กับอายุความล้า (Fatigue life) โดยเริ่มจากในปี 1855 ด้วยการนำ S-N Curve มาใช้เพื่อระบุพฤติกรรมความล้า [12] และต่อมาในช่วงปี 1950 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและอายุความล้า (Fatigue life) ได้รับการพัฒนาขึ้น นำไปสู่แนวคิดเรื่องความเครียดเฉพาะที่ (Local strain) และอายุความล้า (Fatigue life) ความก้าวหน้าดังกล่าวนำไปสู่การพัฒนาความสัมพันธ์ของแมนสัน-คอฟฟิน (Manson-Coffin relationship) [13] ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์ร่วมกับวิธีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method - FEM) [3], [14-18] ซึ่งทำให้ได้ พฤติกรรมของความเครียดเฉพาะที่ (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 ดังนั้นแนวคิด Effective Notch Strain ควรได้รับการนำไปใช้ในการตรวจสอบ

ในการศึกษานี้ได้ทำการตรวจสอบพฤติกรรมของความเครียดเฉพาะที่ (Local strain) ของเสาตอม่อสะพานเหล็กภายใต้สภาวะแผ่นดินไหว โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเสาตอม่อสะพานเหล็กที่ผลิตจากเหล็กกำลังปกติและเหล็กกำลังสูง ทั้งนี้ ได้เลือกเสาตอม่อสะพานเหล็กที่พบได้ทั่วไปใน

ประเทศญี่ปุ่น [19] เป็นตัวแทนในการศึกษาและทำการวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลแผ่นดินไหวครั้งใหญ่ที่เกิดขึ้นทั้งในญี่ปุ่นและไทย [20-21] รอยแตกที่แตกหักจากความล้ารอบต่ำ (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) ต่อโครงสร้างของเสาตอม่อสะพานเหล็ก

1.2 โครงสร้างเป้าหมาย (Target structures)

การศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์พฤติกรรมความเครียดเฉพาะที่ (Local strain) ของเสาตอม่อสะพานเหล็ก โดยตรวจสอบพฤติกรรมของเสาตอม่อสะพานเหล็กที่พบได้ทั่วไปในประเทศญี่ปุ่น รายละเอียดคุณสมบัติของเสาตอม่อสะพานเหล็กแสดงอยู่ในรูปที่ 2 [19]

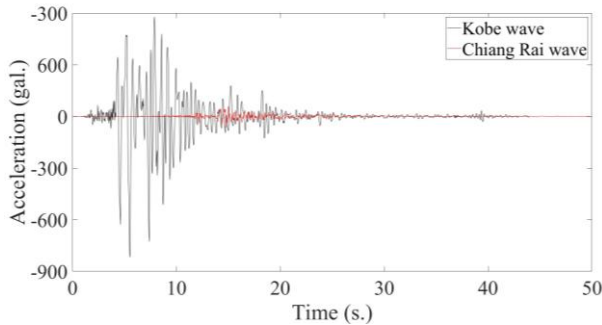


รูปที่ 2 รายละเอียดคุณสมบัติของเสาตอม่อสะพานเหล็ก (Typical bridge pier)

1.3 ประวัติความเร่งของแผ่นดินไหว (Earthquake acceleration histories)

เพื่อตอบสนองต่อความเสียหายร้ายแรงที่เกิดขึ้นกับเสาตอม่อสะพานเหล็กในประเทศญี่ปุ่นจากแผ่นดินไหวโกเบในปี 1995 การศึกษานี้ได้วิเคราะห์ข้อมูลประวัติความเร่งของแผ่นดินไหวจากข้อมูลบันทึกไว้ของสำนักงานอุตุนิยมวิทยาญี่ปุ่นแสดงโดยคลื่นโกเบ ในรูปที่ 3 ซึ่งส่งผลกระทบต่อโครงสร้างพื้นฐานและชุมชน ประเทศไทยซึ่งมีการใช้เสาตอม่อสะพานเหล็กเช่นกัน ได้ประสบกับแผ่นดินไหวที่รุนแรงที่สุดที่เคยบันทึกไว้

ในปี 2014 ในจังหวัดเชียงราย (คลื่นแผ่นดินไหวเชียงราย) ซึ่งแสดงในรูปที่ 3 เหตุการณ์แผ่นดินไหวนี้ได้ถูกนำมาประกอบเป็นกรณีศึกษาในการวิเคราะห์ด้วย



รูปที่ 3 ประวัติความเร่งของแผ่นดินไหว

1.4 วัสดุของโมเดล (Material of models)

เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเหล็กกำลังสูงระหว่างเหตุการณ์แผ่นดินไหว งานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบเหล็กกำลังสูงกับเหล็กกำลังปกติ โดยมีเป้าหมายเพื่อให้เข้าใจประสิทธิภาพของวัสดุทั้งสองภายใต้สภาวะแผ่นดินไหวอย่างลึกซึ้ง คุณสมบัติวัสดุถูกกำหนดผ่านการทดลองแรงดึงแบบปล่อยโหลดซ้ำบนเหล็กแท่งกลมจนถึงค่าความเค้นครากแรงอัด โดยเน้นศึกษาพฤติกรรม cyclic hardening ผ่านพารามิเตอร์ไอโซทรอปิก (Isotropic) และคิเนมาติก (kinematic) รายละเอียดของเหล็กแสดงในตารางที่ 1 [22] และวัสดุคอนกรีตในโครงสร้างเสาตอม่อสะพานที่แปลงหน้าตัดเป็นเหล็กแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 รายละเอียดวัสดุเหล็ก

Steel type	Yield stress (σ_y) (MPa)	Q_{inf} (MPa)	b	X_∞ (MPa)	Gamma (γ)	Density of Steel (ρ) (t/m ³)	Elastic Modulus (E) (GPa)	Poisson's Ratio
SM490	304	143	4	233	33	7.85	200	0.3
SBHS500	452	143	4	190	36	7.85	200	0.3

ตารางที่ 2 รายละเอียดวัสดุคอนกรีต

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

2. การวิเคราะห์ (Analysis)

2.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาตอม่อสะพาน (Procedure for inspecting bridge pier behavior)

การวิเคราะห์นี้อธิบายขั้นตอนการวิเคราะห์ เริ่มจากการสร้างแบบจำลองเสาตอม่อสะพาน การดำเนินการนี้ใช้โปรแกรม ABAQUS 6.14 ในการดำเนินการวิเคราะห์แบบไดนามิกโดยใช้วิธีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

(Finite Element Method - FEM) โดยใช้องค์ประกอบ quad shape shell 4 โหนด ดังที่แสดงในรูปที่ 4a วิเคราะห์กับคลื่นแผ่นดินไหวโกเบ โดยแบ่งคลื่นแผ่นดินไหวออกเป็น 4 ระดับได้แก่ คลื่นแผ่นดินไหวโกเบเต็มคลื่น, 50% ของคลื่นแผ่นดินไหวโกเบ, 25% ของคลื่นแผ่นดินไหวโกเบ และ 10% ของคลื่นแผ่นดินไหวโกเบ

2.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ปลายรอยเชื่อม (Analysis flow of weld toe)

การศึกษานี้อธิบายขั้นตอนการวิเคราะห์ เริ่มจากการสร้างแบบจำลองเสาตอม่อสะพาน ตามด้วยการใช้เทคนิคการสร้างแบบจำลองย่อยเพื่อสร้างแบบจำลองมุม และในลำดับถัดไปคือการสร้างแบบจำลองปลายรอยเชื่อมตามที่แสดงในรูปที่ 4 การดำเนินการนี้ใช้โปรแกรม ABAQUS 6.14 ในการดำเนินการวิเคราะห์แบบไดนามิกโดยใช้วิธีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method - FEM)

2.2.1 แบบจำลองเสาตอม่อสะพาน (Global model)

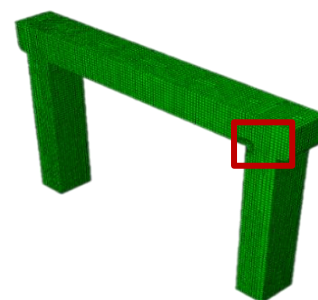
แบบจำลองเสาตอม่อสะพานถูกสร้างโดยใช้องค์ประกอบ quad shape shell 4 โหนด ดังที่แสดงในรูปที่ 4a โครงสร้างของแบบจำลองซึ่งอ้างอิงจากโครงสร้างที่เป็นเป้าหมายแสดงในรูปที่ 2 วิเคราะห์กับคลื่นแผ่นดินไหว

2.2.2 แบบจำลองมุม (Corner model)

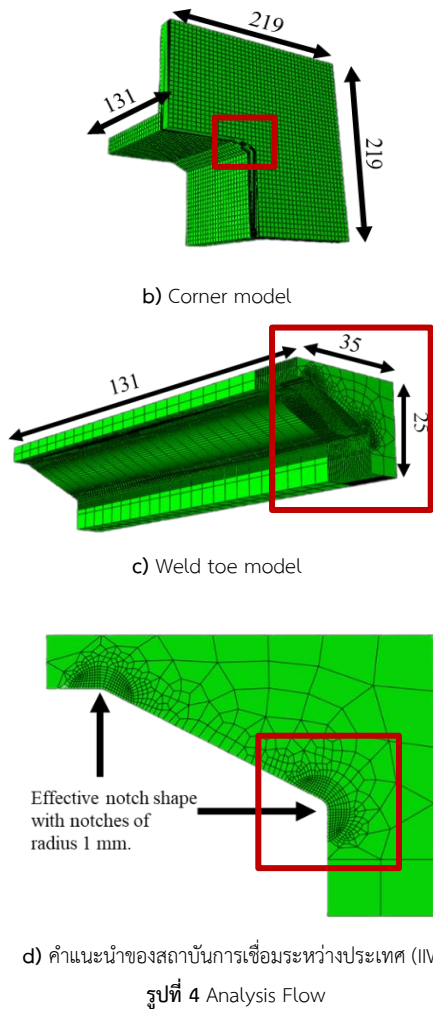
ตามที่แสดงในรูปที่ 4b แบบจำลองมุมแสดงขอบเขตของแบบจำลองย่อยที่จุดเชื่อมระหว่างเสาและคานของเสาตอม่อสะพานเหล็ก แบบจำลองนี้ใช้องค์ประกอบ hexagonal solid 8 โหนด และวิเคราะห์โดยใช้ฟังก์ชัน shell-driven-solid ของ ABAQUS ซึ่งช่วยให้สามารถประเมินพฤติกรรมความเครียดในบริเวณมุมได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากอาจมีข้อจำกัดในเรื่องการกระจายความเครียดอย่างละเอียด แนวคิด Effective Notch Strain จึงถูกนำมาใช้เพื่อเสริมสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมความเครียดเฉพาะที่

2.2.3 แบบจำลองปลายรอยเชื่อม (Weld toe model)

รูปที่ 4c แสดงแบบจำลองปลายรอยเชื่อมที่เรียกว่า Effective Notch Model ซึ่งกำหนดขอบเขตบริเวณปลายจุดเชื่อม โดยใช้องค์ประกอบแบบ hexagonal solid 8 โหนด และแนวคิด Effective Notch Strain ตามคำแนะนำของ International Institute of Welding (IIW) การตั้งค่ารัศมีรอยเชื่อมที่ 1 มม. และขนาด mesh ที่ 0.25 มม. (หนึ่งในสี่ของรัศมีรอยเชื่อม) [23] มีจุดมุ่งหมายเพื่อวิเคราะห์ความเครียดเฉพาะที่ (Local strain) ที่สัมพันธ์กับความล้ารอบต่ำ (low-cycle fatigue) ดังแสดงในรูปที่ 4d



a) Global model



2.3 การกำหนดค่าการวิเคราะห์ (Analytical configurations)

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้มีการวิเคราะห์แบบไดนามิกโดยใช้โปรแกรม ABAQUS เพื่อตรวจสอบเสาคอมม่อนสะพานเหล็กที่พบได้ทั่วไปในประเทศ ญี่ปุ่นภายใต้เหตุการณ์แผ่นดินไหวโกเบและแผ่นดินไหวเชียงราย วิเคราะห์ร่วมกับเหล็กกำลังสูงและเหล็กกำลังปกติ ซึ่งแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 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	Chiang Rai wave	SM490
10	Typical bridge pier		SBHS500

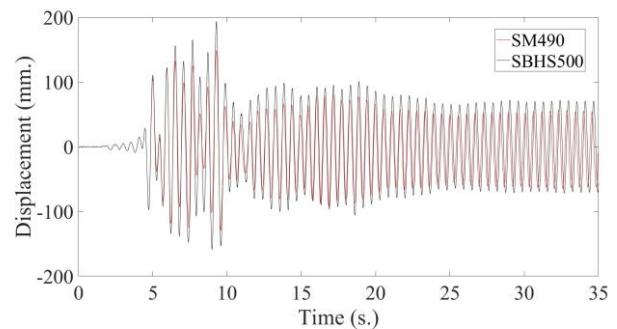
3. ผลการวิเคราะห์ (Analytical results)

3.1 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาคอมม่อนสะพาน (Results of bridge pier behavior analysis)

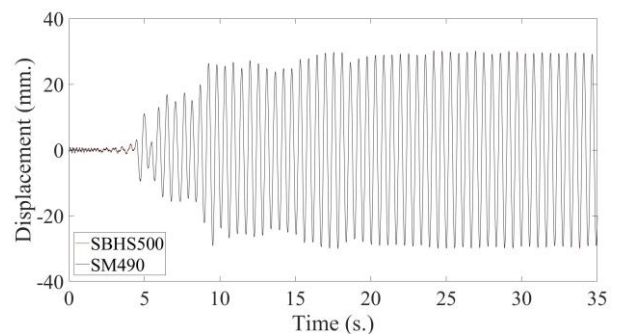
การศึกษานี้มุ่งเน้นการตรวจสอบพฤติกรรมของเสาคอมม่อนสะพาน ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ 4 ระดับ โดยมีการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างเหล็กกำลังสูง และเหล็กกำลังปกติ

3.1.1 ประวัติการเคลื่อนตัว (Displacement history)

ในการวิเคราะห์เชิงไดนามิกนี้ ได้ประเมินแบบจำลองเสาคอมม่อนสะพาน ภายใต้ผลกระทบของคลื่นแผ่นดินไหวโกเบ เป็นระยะเวลา 35 วินาที โดยบันทึกการเคลื่อนตัวที่ปลายเสาคอมม่อนสะพานเหล็ก ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2 ผลการศึกษาพบว่า ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวเต็มคลื่น, 50% และ 25% การเคลื่อนตัวของเสาคอมม่อนที่ใช้เหล็กกำลังสูงและเหล็กกำลังปกติมีค่าเท่ากัน ในช่วงเริ่มต้น แต่ภายหลัง เหล็กกำลังสูงมีการเคลื่อนตัวมากกว่า ดังตัวอย่างกราฟที่แสดงในรูปที่ 5 อย่างไรก็ตาม เมื่อความรุนแรงของคลื่นลดลงเหลือ 10% การเคลื่อนตัวของทั้งสองชนิดก็ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งขัดแย้งกับแนวคิดทั่วไปที่ว่าเหล็กกำลังสูงควรมีการเคลื่อนตัวน้อยกว่า ดังนั้นจึงควรพิจารณาปัจจัยอื่นเพิ่มเติมในการตีความผลลัพธ์ นอกจากนี้ เมื่อนำการเคลื่อนตัวของเสาคอมม่อนภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ 10%, 25%, 50% และ เต็มคลื่นมาเปรียบเทียบจะพบว่าเหล็กกำลังสูงจะถูกกระทำจากการเคลื่อนตัวที่สูงกว่าเหล็กกำลังปกติสูงขึ้นในระดับที่มากขึ้นตามลำดับ



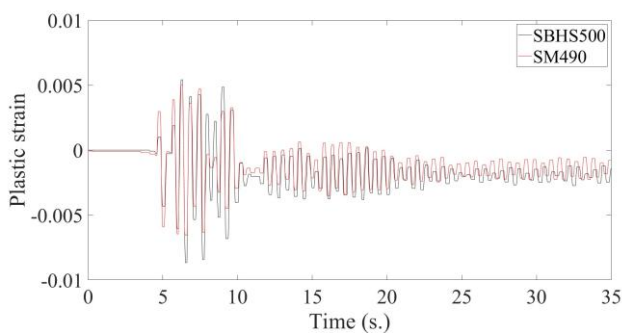
รูปที่ 5 การเคลื่อนตัวของเสาคอมม่อนสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบเต็มคลื่น



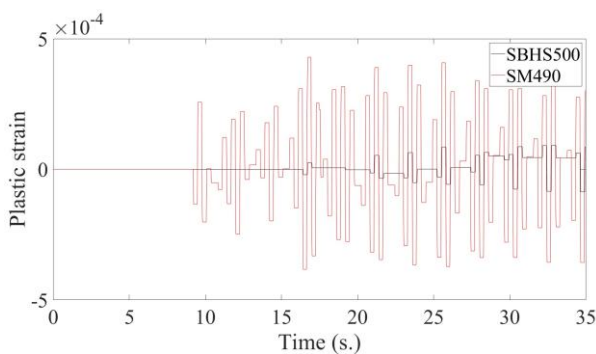
รูปที่ 6 การเคลื่อนตัวของเสาคอมม่อนสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ 10%

3.1.2 ค่าความเครียดเชิงพลาสติก (Plastic strain)

จากการวิเคราะห์โครงสร้างเสาตอม่อสะพานเหล็กภายใต้ผลกระทบจากคลื่นแผ่นดินไหว โดยพิจารณาค่าความเครียดที่มรยรอยต่อระหว่างเสาและคาน พบว่าสำหรับคลื่นแผ่นดินไหวโกเบเต็มคลื่น, 50% ค่าความเครียดของเหล็กกำลังปกติสูงกว่าเหล็กกำลังสูง จนกระทั่งความเครียดเชิงพลาสติกอยู่ในช่วง 0.4% ถึง 0.6% หลังจากนั้น ค่าความเครียดเชิงพลาสติกของเหล็กกำลังสูงเริ่มสูงกว่าเหล็กกำลังปกติ ดังตัวอย่างกราฟรูปที่ 7 สำหรับการวิเคราะห์ 25% ของคลื่นแผ่นดินไหว ค่าความเครียดของเหล็กกำลังปกติยังคงสูงกว่าเหล็กกำลังสูงในค่าของช่วงความเครียดระหว่าง 0.1% ถึง 0.2% หลายรอบจนถึงจุดหนึ่งหลังจากนั้น ที่ค่าความเครียดของทั้งเหล็กกำลังสูงและเหล็กกำลังปกติมีค่าคล้ายกัน ซึ่งต่างจากผลการวิเคราะห์ในกรณี 10% ของคลื่นแผ่นดินไหวเหล็กกำลังปกติมีค่าความเครียดสูงกว่าเหล็กกำลังสูงตลอดการวิเคราะห์ ดังรูปที่ 8



รูปที่ 7 ค่าความเครียดเชิงพลาสติกภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบเต็มคลื่น



รูปที่ 8 ค่าความเครียดเชิงพลาสติกภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ 10%

$$\Delta w_p = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon_p \quad (1)$$

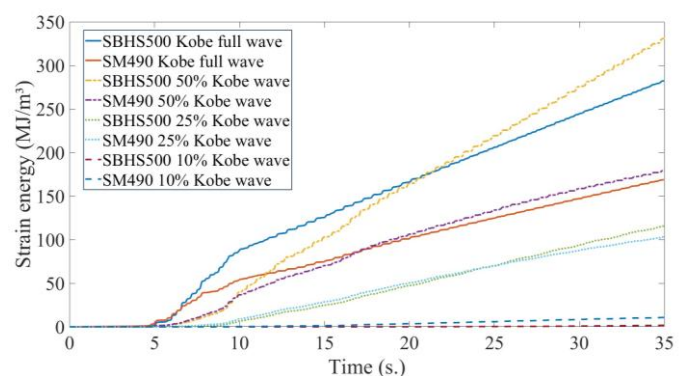
เมื่อ σ : the stress
 ϵ_p : the plastic strain
 Δw_p : the plastic strain energy density

3.1.3 พลังงานความเครียดสะสม (Plastic strain energy density)

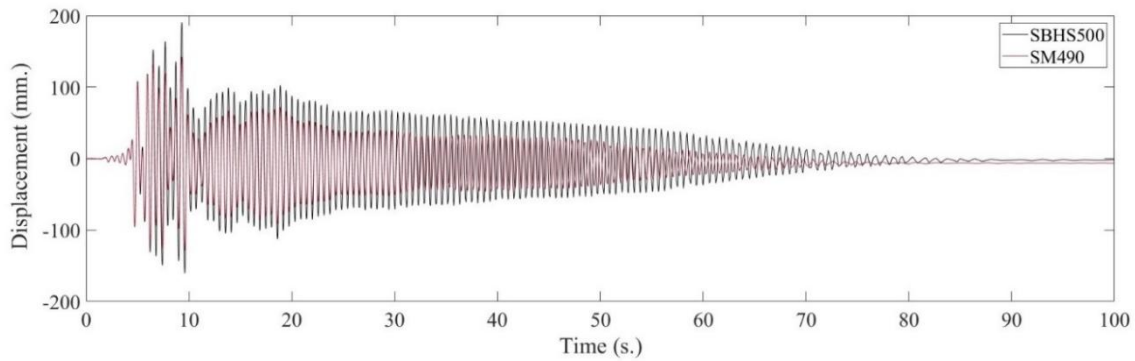
การวิเคราะห์เสาตอม่อสะพานเหล็กภายใต้ผลกระทบจากคลื่นแผ่นดินไหวได้พิจารณาค่าความเครียดเชิงพลาสติกและความเค้นที่มรยรอยต่อระหว่างเสาและคาน โดยได้สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเชิงพลาสติกและความเค้นจากนั้นใช้พื้นที่ใต้กราฟ หรือใช้สมการที่ 1 ในการคำนวณพลังงานความเครียดสะสมที่เกิดขึ้น ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ในกรณีของคลื่นแผ่นดินไหวโกเบเต็มคลื่น, 50% และ 25% ของคลื่นแผ่นดินไหว พลังงานความเครียดสะสมของเหล็กกำลังปกติสูงกว่าเหล็กกำลังสูงในช่วงแรก หลังจากนั้นพลังงานความเครียดสะสมของเหล็กกำลังสูงมีค่าสูงกว่าเหล็กกำลังปกติ อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์สำหรับคลื่นแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรง 10% แสดงให้เห็นว่า พลังงานความเครียดสะสมของเหล็กกำลังปกติสูงกว่าเหล็กกำลังสูงตลอดการวิเคราะห์ดังรูปที่ 9

จากการวิเคราะห์ประวัติการเคลื่อนตัว, ค่าความเครียดเชิงพลาสติกและพลังงานความเครียดสะสม พบว่า สำหรับคลื่นแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงต่ำ เช่น 10% ของคลื่นแผ่นดินไหวโกเบ ประวัติการเคลื่อนตัวของเหล็กกำลังสูงและเหล็กกำลังปกติมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าความเครียดเชิงพลาสติกและพลังงานความเครียดสะสมของเหล็กกำลังสูงต่ำกว่าเหล็กกำลังปกติ แสดงให้เห็นว่าแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงต่ำมีผลกระทบต่อพฤติกรรมของเหล็กกำลังสูงน้อยกว่าเหล็กกำลังปกติ

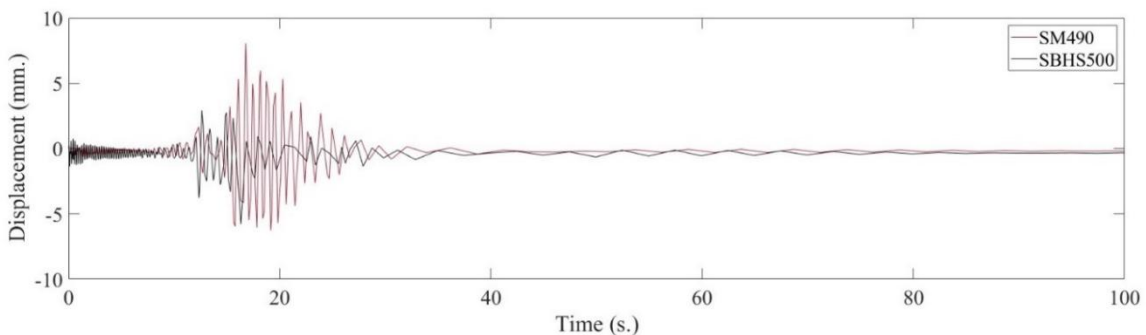
สำหรับคลื่นแผ่นดินไหวโกเบเต็มคลื่น, 50% และ 25% ของคลื่นแผ่นดินไหวโกเบ พบว่า ค่าความเครียดเชิงพลาสติกและประวัติการเคลื่อนตัวของเหล็กกำลังสูงเริ่มสูงกว่าเหล็กกำลังปกติหลังจากเกิดค่าความเครียดขนาดใหญ่ หรือค่าความเครียดเชิงพลาสติกกระทำซ้ำๆ ซึ่งต่อมาจะเกิดจุดตัดของกราฟพลังงานสะสมของเหล็กกำลังสูงและเหล็กกำลังปกติขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในกรณีแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงสูง เหล็กกำลังสูงมีพฤติกรรมที่ดีกว่าหรือเสื่อมประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับเหล็กกำลังปกติ อาจเนื่องจากการเกิดรอยแตกหรือการเสีรูปร่างการ



รูปที่ 9 พลังงานความเครียดสะสมของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ



รูปที่ 10 ประวัติการเคลื่อนตัวของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ



รูปที่ 11 ประวัติการเคลื่อนตัวของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวเชียงราย

3.2 ผลการวิเคราะห์ปลายรอยเชื่อม (Results of weld toe analysis)

3.2.1 ประวัติการเคลื่อนตัว (Displacement history)

ในการวิเคราะห์เชิงไดนามิกนี้ แบบจำลองทั้งหมดได้รับการประเมินภายใต้ผลกระทบจากคลื่นแผ่นดินไหว โดยกระบวนการประเมินจะดำเนินต่อไปจนกว่าโครงสร้างจะหยุดการสั่นสะเทือน ข้อมูลต่างๆ ถูกเก็บรวบรวมจากปลายเสาตอม่อสะพานเหล็ก ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 2

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า เมื่อเกิดแผ่นดินไหวโกเบ พบว่าเหล็กกำลังสูงจะมีระยะเวลาการสั่นสะเทือนที่นานกว่าเหล็กกำลังปกติ แต่การเคลื่อนตัวสูงสุดของทั้งสองประเภทเหล็กนั้นใกล้เคียงกัน โดยเหล็กกำลังสูงมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย ตามที่ปรากฏในรูปที่ 10 สำหรับการวิเคราะห์แผ่นดินไหวเชียงราย ซึ่งมีความรุนแรงน้อยกว่าคลื่นแผ่นดินไหวที่ศึกษาไว้ก่อนหน้านี้ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการสั่นสะเทือนจะหยุดลงพร้อมกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การเคลื่อนตัวสูงสุดของเหล็กกำลังสูงจะต่ำกว่าเหล็กกำลังปกติตามที่แสดงในรูปที่ 11

3.2.2 ขนาดของความเครียดเชิงพลาสติก (Plastic strain magnitudes)

การศึกษานี้มุ่งเน้นการตรวจสอบขนาดความเครียดเชิงพลาสติกในบริเวณรอยเชื่อมโดยพิจารณาจุดที่อยู่ในพื้นที่การคราก (Yielding area) โดยเลือกตำแหน่งที่มีขนาดความเครียดเชิงพลาสติกสูงสุดจากแต่ละคลื่นแผ่นดินไหว ทั้งในกรณีของเหล็กกำลังสูงและเหล็กกำลังปกติ ซึ่งมีความสำคัญเนื่องจากอาจบ่งชี้ถึงการเริ่มต้นของรอยแตกร้าว โดยสามารถหาขนาดความเครียดเชิงพลาสติกได้จากสมการที่ (2) การวิเคราะห์นี้ใช้

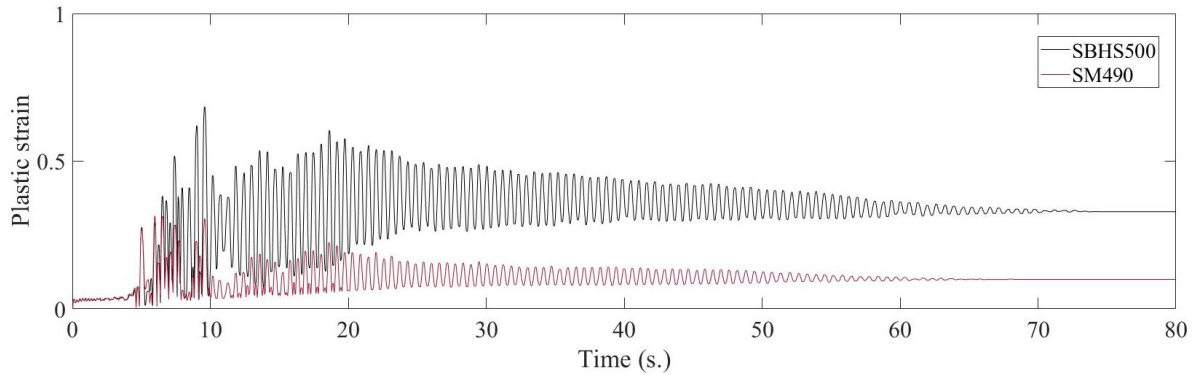
ข้อมูลจากคลื่นแผ่นดินไหวหลายชุด โดยเฉพาะคลื่นที่เกิดจากแผ่นดินไหวโกเบ ผลการศึกษาพบว่า สำหรับเหล็กกำลังสูง ขนาดความเครียดเชิงพลาสติกสูงสุดที่สังเกตก่อนที่การสั่นของกราฟจะเข้าสู่สถานะคงที่นั้นอยู่ในช่วง 60% ถึง 80% ขณะที่เหล็กกำลังปกติแสดงค่าที่ต่ำกว่าอยู่ในช่วง 30% ถึง 40% ตามที่แสดงในรูปที่ 12 อย่างไรก็ตาม ในกรณีของคลื่นแผ่นดินไหวเชียงราย ผลการศึกษามีความแตกต่างอย่างชัดเจน การวิเคราะห์พบว่าขนาดความเครียดเชิงพลาสติกของเหล็กทั้งสองประเภท (เหล็กกำลังสูงและเหล็กกำลังปกติ) ใกล้เคียงกัน โดยขนาดความเครียดเชิงพลาสติกสูงสุดอยู่ในช่วง 3% ถึง 4% เท่านั้น ดังที่แสดงในรูปที่ 13

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

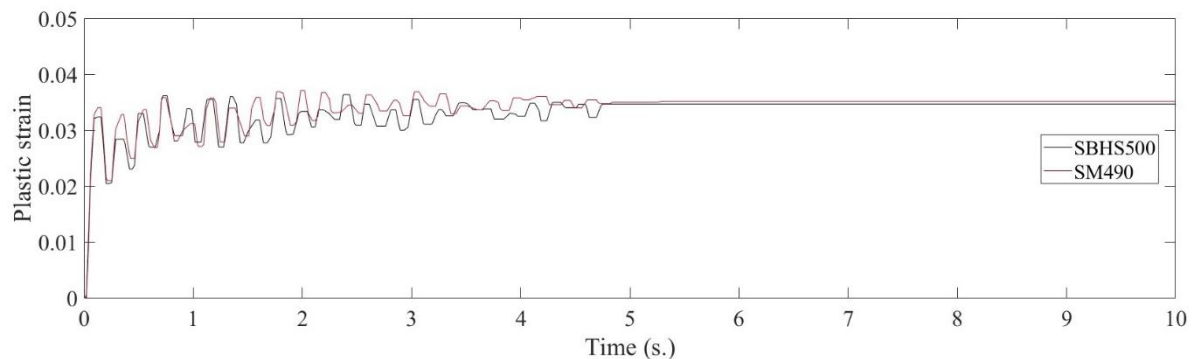
เมื่อ $\Delta \epsilon_p$: the normal plastic strain range
 $\Delta \gamma_p$: the shear plastic strain range
 x, y, z : x, y, z directions, respectively
 $\Delta \bar{\epsilon}_p$: the equivalent plastic strain range

ข้อสรุปจากการวิเคราะห์นี้คือ ในเหตุการณ์แผ่นดินไหวรุนแรง เช่น โโกเบ เหล็กกำลังสูงจะมีขนาดความเครียดเชิงพลาสติกสูงกว่าผลลัพธ์ที่ได้จากเหล็กกำลังปกติอย่างเห็นได้ชัด ขณะที่ในเหตุการณ์ แผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงน้อยกว่า เช่น แผ่นดินไหวเชียงราย ขนาดความเครียดเชิงพลาสติกในเหล็กทั้งสองประเภทจะมีค่าใกล้เคียงกัน

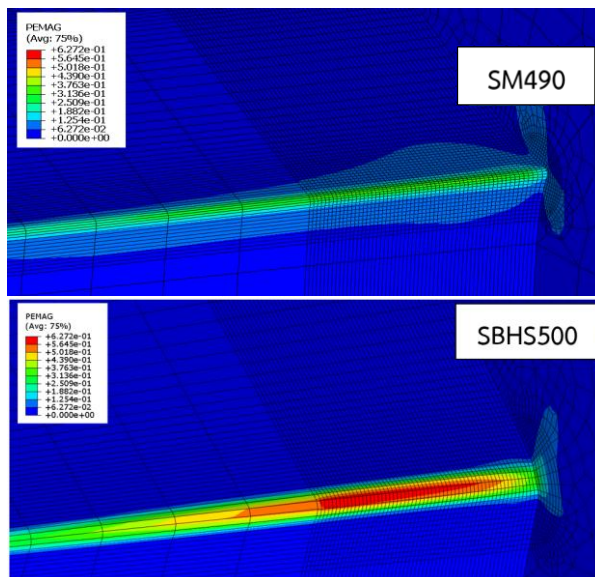
ซึ่งเมื่อนำมาวิเคราะห์ร่วมกับค่าการเคลื่อนตัวโดยในความเข้าใจทั่วไปที่หลายคนคิดว่าสิ่งที่กำลังต่ำการเคลื่อนตัวจะมากกว่าสิ่งที่กำลังสูงภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวเดียวกันหรือแรงที่มากระทำเท่ากัน แต่สำหรับคลื่นแผ่นดินไหวโกเบที่เกิดความเครียดเชิงพลาสติกขนาดใหญ่จำนวนมากทำให้ค่าของการเคลื่อนตัวขัดแย้งกับความเข้าใจทั่วไปข้างต้น ส่วนแผ่นดินไหว



รูปที่ 12 ค่าความเครียดเชิงพลาสติกของเสาต่อม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ



รูปที่ 13 ค่าความเครียดเชิงพลาสติกของเสาต่อม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวเชียงราย



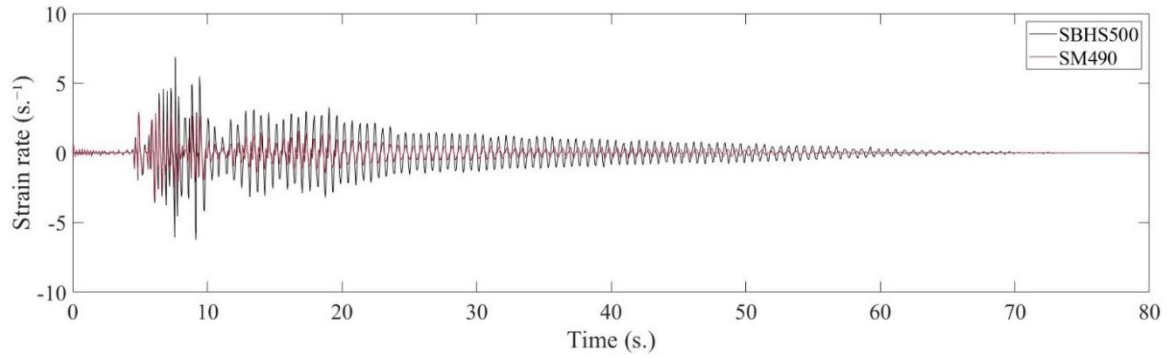
รูปที่ 14 พื้นที่การกระจายของความเครียดของคลื่นแผ่นดินไหวโกเบ

เชียงรายนั้นเกิดความเครียดเชิงพลาสติกเพียงเล็กน้อยซึ่งมีขนาดไม่ใหญ่มากพอทำให้ค่าของการเคลื่อนตัวตรงกับค่าที่เข้าใจทั่วไปที่หลายคนคิด

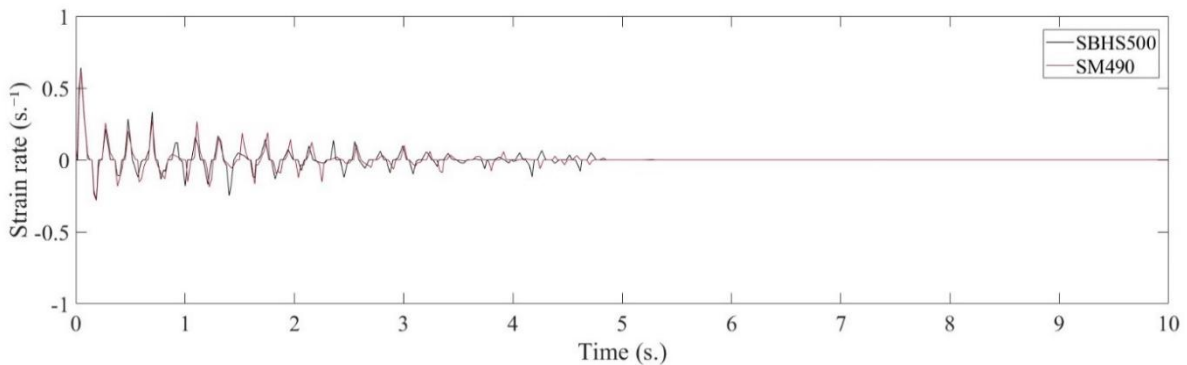
อย่างไรก็ตามเมื่อใช้แบบจำลองปลายรอยเชื่อม (Weld toe model) มาสังเกตเพิ่มเติมพบว่าพื้นที่ของขนาดความเครียดเชิงพลาสติก (Plastic strain magnitudes area) หรือพื้นที่การคราก (Yielding area) มีพื้นที่การกระจายของความเครียดที่มีลักษณะเหมือนกันในทุกคลื่นแผ่นดินไหว นั่นคือเหล็กกำลังสูงจะมีพื้นที่การกระจายของความเครียดที่น้อยกว่าดังรูปที่ 14

3.2.3 ประวัติอัตราความเครียด (Strain rate histories)

อัตราความเครียด (Strain rate) เป็นตัวชี้วัดที่สำคัญในการประเมินความเสียหายที่เกิดขึ้นในรอยเชื่อมระหว่างเหตุการณ์แผ่นดินไหวตามสมการ (3) การวิเคราะห์รอยเชื่อมพบว่าอัตราความเครียดสูงสุดในระหว่างแผ่นดินไหวโกเบ โดยตำแหน่งที่เลือกตรวจสอบเป็นตำแหน่งเดียวกับค่าความเครียดเชิงพลาสติก (Plastic strain magnitudes) สำหรับเหล็กกำลังสูงและเหล็กกำลังปกติมีช่วงอัตราความเครียดสูงสุดประมาณ 1 s^{-1} ถึง 10 s^{-1} ตามที่แสดงในรูปที่ 15 ในขณะที่การวิเคราะห์แผ่นดินไหวที่เชียงรายพบว่าอัตราความเครียดสูงสุดสำหรับเหล็กทั้งสองประเภทอยู่ในช่วงประมาณ 0.1 s^{-1} ถึง 1 s^{-1} ตามที่แสดงในรูปที่ 16



รูปที่ 15 อัตราความเครียดของเสาต่อม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ



รูปที่ 16 อัตราความเครียดของเสาต่อม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวเชียงราย

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

(3) เมื่อ

$$\Delta\epsilon_{eff} = \Delta\bar{\epsilon}_t = \frac{\Delta\bar{\sigma}}{E} + \Delta\bar{\epsilon}_p$$

(4)

$\Delta\epsilon_{eff}$: the effective notch strain range

$\Delta\bar{\epsilon}_t$: the equivalent total strain range

$\Delta\bar{\sigma}$: the equivalent stress range

$\Delta\bar{\epsilon}_p$: the equivalent plastic strain range

โดยรวมแล้วผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าอัตราความเครียดสูงสุดในทุกกรณีมีค่าสูงซึ่งบ่งชี้ว่าอัตราความเครียดที่สูงอาจมีผลกระทบต่อพฤติกรรมการล้ารอบต่ำ (low-cycle fatigue) ของวัสดุในระหว่างเหตุการณ์แผ่นดินไหว ข้อค้นพบนี้เน้นย้ำถึงความสำคัญของการพิจารณาอัตราความเครียดเมื่อประเมินประสิทธิภาพการทำงานของรอยเชื่อมภายใต้สภาวะแผ่นดินไหว

3.2.4 Effective notch strain range

ในการศึกษานี้ ได้มีการสร้างแบบจำลองโดยอิงตามแนวคิด Effective Notch Strain โดยใช้เครื่องมือมาตรฐานของ 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 (4) ส่วนประกอบของความเครียดแบบคืนรูปและความเครียดเชิงพลาสติกมีรายละเอียดในสมการ (5) และ (2) โดยตำแหน่งที่เลือกตรวจสอบนั้นเป็นตำแหน่งเดียวกับค่าความเครียดเชิงพลาสติก (Plastic strain magnitudes)

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

(5)

เมื่อ

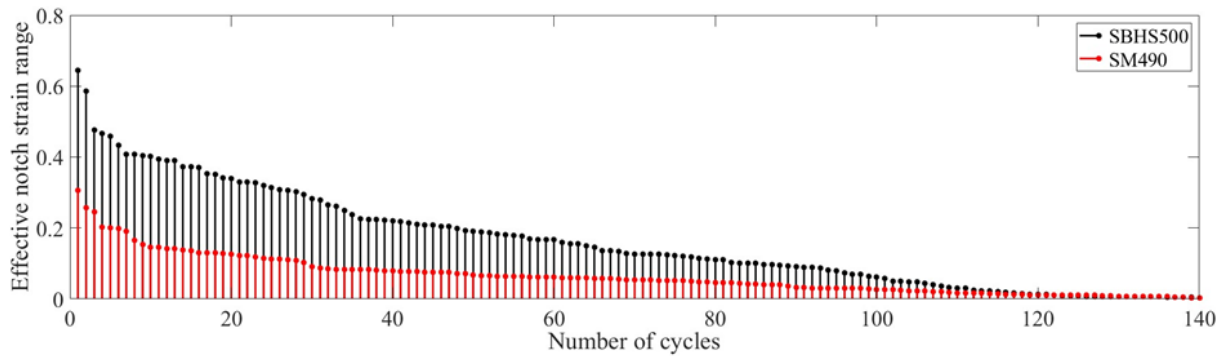
$\Delta\sigma$: the normal stress range

$\Delta\tau$: the shear stress range

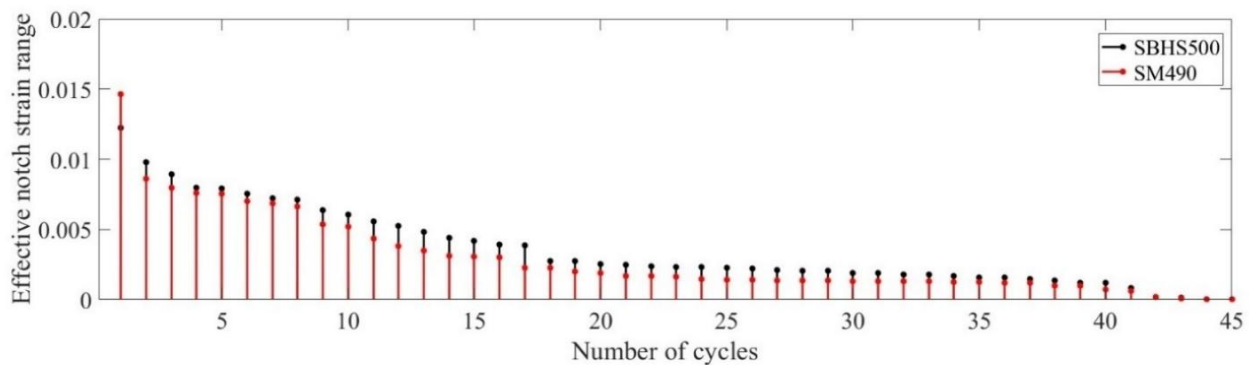
x, y, z : x, y, z directions, respectively

$\Delta\bar{\sigma}$: the equivalent stress range

ผลการวิเคราะห์เผยให้เห็นการกระจายของ Effective notch strain ในระหว่างแผ่นดินไหว ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 17 และ 18 รูปเหล่านี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายของ Effective notch strain และจำนวนรอบในระหว่างแผ่นดินไหวการวิเคราะห์ Effective notch strain range สูงสุดในเสาต่อม่อสะพานหลักภายใต้เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่แตกต่างกันเผยให้เห็นการตอบสนองที่แตกต่างระหว่างหลักกำลังสูงและหลักกำลังปกติ ในระหว่างแผ่นดินไหวที่รุนแรง เช่น โกเบ หลักกำลังสูงมีช่วง



รูปที่ 17 การกระจาย Effective notch strain range ของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวโกเบ



รูปที่ 18 การกระจาย Effective notch strain range ของเสาตอม่อสะพานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวเชียงราย

ความเครียดอยู่ระหว่าง 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 สูงสุดที่สูงกว่าเหล็กกำลังปกติอย่างมีนัยสำคัญเมื่อตอบสนองต่อแผ่นดินไหวที่รุนแรง อย่างไรก็ตาม สำหรับแผ่นดินไหวที่รุนแรงน้อยกว่า Effective notch strain range ระหว่างเหล็กกำลังสูงและเหล็กกำลังปกติจะมีความใกล้เคียงกัน

4. บทสรุป (Conclusion)

การศึกษาพฤติกรรมความเครียดเฉพาะที่ (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

พบว่าประสิทธิภาพของเหล็กกำลังสูงขณะเกิดแผ่นดินไหวที่รุนแรงมีปัจจัยที่ทำให้เกิดการเสียรูปหรือแตกหักจาก ค่าความเครียดเชิงพลาสติก ค่าพลังงานสะสมรวม และพฤติกรรมของ cycle hardening

สำหรับโครงสร้างเหล็กกำลังสูงที่เกิดแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงต่ำนั้น มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของเหล็กกำลังสูงค่อนข้างต่ำ

เหล็กกำลังสูงและเหล็กกำลังปกติแสดงอัตราความเครียด (Strain rate) สูงสุดอยู่ในช่วง 0.1 s^{-1} ถึง 10 s^{-1} ซึ่งจากอัตราความเครียดดังกล่าวถือเป็นอัตราความเครียดที่สูง และอาจเป็นปัจจัยสำคัญต่อพฤติกรรมความเครียดเฉพาะที่ระหว่างเกิดแผ่นดินไหว

ความเครียดเฉพาะที่ (Local strain) ของเหล็กกำลังสูงมีค่าที่สูงกว่าเหล็กกำลังปกติ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่การคราก (Yielding area) พบว่าเหล็กกำลังสูงจะมีพื้นที่การครากที่น้อยกว่าแต่มีความเครียดที่เกิดขึ้นสูงกว่า ซึ่งต่างจากเหล็กกำลังปกติที่มีพื้นที่การครากที่ใหญ่กว่าแต่มีความเครียดที่เกิดขึ้นต่ำกว่า ดังนั้น การนำเหล็กกำลังสูงมาใช้ในงานเสาตอม่อสะพานเหล็ก ควรพิจารณาดัชนีพลังงานต่อหน่วยพื้นที่การคราก เพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับรูปแบบการวิบัติภายใต้สภาวะแผ่นดินไหว และเลือกใช้เหล็กที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับแต่ละพื้นที่ของโครงสร้าง เพื่อช่วยลดผลกระทบจากความเครียดและพลังงานที่เกิดขึ้น

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.