

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ทั่วไปโดยปกติอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการก่อสร้างก่อนที่พระราชบัญญัติของการออกแบบเพื่อป้องกันแรงกระทำจากการเกิดแผ่นดินไหวจะมีนั้น มีความจำเป็นต้องกลับมาตรวจสอบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กดังกล่าว ถึงกำลังความแข็งแรงของโครงสร้าง หากเกิดแผ่นดินไหวขึ้น ซึ่งประเทศไทยด้วยเช่นกันเนื่องจากจัดอยู่ในเขตแผ่นดินไหวระดับปานกลาง จากเหตุนี้เองจึงควรมีการออกแบบอาคารเพื่อป้องกันการวิบัติด้วยน้ำหนักบรรทุกจากแรงโน้มถ่วง ซึ่งเสาอันเป็นองค์ประกอบหลักในโครงสร้างอาคาร หากเสาเกิดการวิบัติพังทลายอาจส่งผลทำให้อาคารเกิดการถล่มได้ โดยการก่อสร้างในประเทศไทยในอดีตนั้น มีการตอหาบเหล็กเสริมที่บริเวณโคนเสาและอาจมีการใช้ปริมาณเหล็กปลอกในปริมาณที่ไม่มากนัก ซึ่งส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับแรงของเสา เสาเหล่านี้จึงเรียกว่าเป็นเสาที่ไม่มีความเหนียว ดังนั้นเสาดังกล่าวจึงมีจำเป็นต้องมีการปรับปรุงเพิ่มความสามารถหรือทำการก่อสร้างใหม่เพื่อทดแทนเพื่อที่จะสามารถรับแรงจากแผ่นดินไหวที่อาจนะเกิดขึ้นได้ แต่ก่อนที่จะปรับปรุงหรือก่อสร้างใหม่เพื่อทดแทนนั้นต้องมีการตรวจสอบความสามารถของเสาก่อน และวิเคราะห์รายละเอียดต่างๆ ของเสาที่ไม่มีความเหนียวนี้ เพื่อเลือกใช้วิธีการในการเพิ่มกำลังความแข็งแรงของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้อย่างมีประสิทธิภาพและประหยัด ซึ่งในบทนี้ ได้ทำการบรรยายและอธิบายถึงผลการทดสอบของเสาดตัวอย่างทั้ง 3 ตัวอย่าง ภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร โดยจะได้อธิบายถึงผลการทดสอบต่างๆ ดังนี้ พฤติกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบมีผลดังต่อไปนี้

1. จากผลการทดสอบ พบว่าในช่วงแรกของเส้นโค้งขอบนอกเสาดตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 ตัวอย่างมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันจนถึงอัตราการเคลื่อนตัว 0.25% ความสูง เริ่มมีความแตกต่างของเสาดตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 ตัวอย่าง โดยที่เสาดตัวอย่าง S1 มีแรงด้านข้างกระทำด้านข้างมากสูงสุดของเสาดตัวอย่างทั้งหมด เสาตัวอย่าง S3 ที่มีการลดปริมาณเหล็กเสริมตามขวางลงครึ่งหนึ่งจากเสา

ตัวอย่าง S1 และ S2s มีแรงต้านข้างกระทำด้านข้างใกล้เคียงกับเสาตัวอย่าง S2s ที่มีการต่อทาบเหล็กเสริมตามยาวบริเวณโคนเสา โดยหลังจากนั้นการลดลงของแรงกระทำด้านข้างของเสาตัวอย่าง S1 และ S3 เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อาจจะมีผลมาจากปริมาณเหล็กเสริมตามขวางที่ค่อนข้างน้อย ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนในเสาตัวอย่าง S3 ส่วนเสาตัวอย่าง S2s แรงกระทำด้านข้างไม่ได้ลดลงอย่างฉับพลัน โดยสามารถคงแรงกระทำด้านข้างไปได้ตั้งแต่อัตราการเคลื่อนที่ด้านข้าง 1.00% จนถึง 1.50% ต่อความสูง ซึ่งระยะประมาณ 0.5% อัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างต่อความสูง แต่จากการสำรวจระหว่างการทดสอบนั้นเสาตัวอย่าง S2s ไม่มีเสถียรภาพมากนัก เนื่องเกิดรอยแตกกว้างขึ้นอย่างรวดเร็วต่อเนื่อง และกระจายตัวเต็มผิวหน้าของเสาทดสอบก่อนที่จะเกิดการหลุดร่อนของคอนกรีต โดยเสาตัวอย่าง S2s มีแรงกระทำด้านข้างที่น้อยที่สุด

2. จากผลการทดสอบพบว่าเสาตัวอย่าง S1 ซึ่งเป็นตัวแทนในการเปรียบเทียบมีระยะเคลื่อนที่ด้านข้างสูงที่สุด โดยมีค่ามากกว่าเสาตัวอย่าง S2s และ S3 โดยเสาตัวอย่าง S3 มีระยะเคลื่อนที่ด้านข้างน้อยที่สุด ซึ่งมีระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างที่เริ่มเกิดรอยแตกกว้าง เสาตัวอย่างทั้ง 3 ต้น ซึ่งจะเห็นว่าค่าความเหนียวของเสาตัวอย่าง S2s มีสูงสุด ซึ่งระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของเสาตัวอย่าง S2s นั้นถึงจุดครากเร็วมาก จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เสาคอนกรีตมีค่าความเหนียวสูงกว่าเสาอย่าง S1 และ S3 และในระหว่างการทดสอบนั้นสำรวจพบอีกว่า เสาตัวอย่าง S2s ไม่มีเสถียรภาพมากนัก เนื่องเกิดรอยแตกกว้างขึ้นอย่างรวดเร็วต่อเนื่อง ทั้งในแนวทแยงมุมที่เกิดจากแรงเฉือน ในแนวดิ่งเนื่องจากน้ำบรรทุกที่กดทับและกระจายตัวเต็มผิวหน้าของเสาทดสอบก่อนที่จะเกิดการหลุดร่อนของคอนกรีต และยังพบอีกว่าค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนที่ด้านข้างที่เกิดการวิบัติของเสาตัวอย่างทั้ง 3 ต้น มีค่าประมาณ 2.1 เท่าของค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนที่ด้านข้างที่สูญเสียความต้านทานด้านข้างหรือที่แรงกระทำด้านข้างลดลง 20% จากแรงกระทำสูงสุด

3. จากผลการทดสอบพบว่า เสาตัวอย่างทั้ง 3 ตัวอย่างมีระยะเคลื่อนที่ในแนวแกนก่อนเกิดการวิบัติ ประมาณ 6 มม. เมื่อเทียบช่วงความสูงของเสาตัวอย่างทดสอบ 1.5 เมตร พบว่ามีค่าการยุบตัวของเสาประมาณ 0.4% ซึ่งการเพิ่มระยะการเคลื่อนที่ในแนวแกนของเสาตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 ต้น จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และมีค่ามากขึ้นเมื่อเกิดการโก่งเดาะขึ้น โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดการแตกกว้างจนคอนกรีตหลุดร่อนออกมา จนสามารถมองเห็นเหล็กเสริมตามยาวด้วยตาเปล่า



4. ในการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสาด้วยแรงผลักดันให้รอยแตกกว้างมากมาย เกิดการหลุดร่อนของคอนกรีตที่ห่อหุ้มเหล็กเสริม ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดเกิดการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว โดยการโก่งเดาะของเสาดังตัวอย่าง S1, S2s และ S3 ที่อัตราการเคลื่อนที่ด้านข้าง 2.00%, 1.50%, และ 1.00% ของความสูง ระยะที่เกิดการโก่งเดาะวัดขึ้นมาจากฐานคอนกรีต มีค่าประมาณ 600 มม., 750 มม. และ 550 มม. ตามลำดับ ซึ่งพบว่าระยะที่เกิดการโก่งเดาะของเสาดังตัวอย่าง S2s มีค่าแตกต่างกับเสาดังตัวอย่าง S1 และ S3 มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากการตอบสนองเหล็กเสริมตามยาว 600 มม. ( $30 d_b$ ) จึงทำให้การโก่งเดาะเกิดขึ้นไปจากระยะตอบสนอง และเสาดังตัวอย่างทั้ง 3 ต้น มีการฉีกขาดโค้งงอของเหล็กเสริมตามขวางเนื่องจากการพยายามโก่งตัวของเหล็กเสริมตามยาวและเกิดการหลุดร่อนของคอนกรีตที่ห่อหุ้มเหล็กเสริม

5. การแตกร้าวที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบเสาดังตัวอย่างจนเกิดการวิบัติด้วยน้ำหนักบรรทุกจากแรงโน้มถ่วง เสาทั้ง 3 อย่างมีการแตกร้าวในช่วงแรก เกิดขึ้นลักษณะแนวขนานกับหน้าเสาซึ่งเกิดจากแรงดัด (flexural crack) ก่อน หลังจากนั้นมียอยแตกร้าวเป็นลักษณะเส้นทแยงมุมเนื่องจากแรงเฉือน (shear crack) เห็นได้ชัดเจนในเสาดังตัวอย่าง S1 และ S3 แต่เสาดังตัวอย่าง S2s ที่มีรอยแตกร้าวกระจายตัวเต็มผิวหน้าของเสา ในลักษณะเส้นทแยงมุมและยังมีรอยแตกร้าวในแนวตั้งด้วย ซึ่งแตกต่างจากเสาดังตัวอย่าง S1 และ S3 ที่ไม่พบ อาจเป็นสาเหตุมาจากการถ่ายเทน้ำหนักบรรทุกในแนวตั้งที่ไม่ดีมากนัก เนื่องจากเสาดังตัวอย่าง S2s มีการตอบสนองเหล็กเสริมในแนวตั้ง และจากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า เสาตัวอย่างทดสอบ S1 S2s และ S3 เกิดการวิบัติแบบดัด-เฉือน (flexure-shear Failure) ซึ่งตรงกับที่คาดการณ์ไว้เบื้องต้น

6. ผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับแบบจำลองที่ทำนายอัตราการเคลื่อนที่ ที่เกิดการวิบัติ น้ำหนักบรรทุกในแนวแกน ที่ได้พัฒนาขึ้นโดย Elwood และ Moehle, (2005) ได้อธิบายถึงแบบจำลองอย่างง่ายสำหรับการจำลองความสามารถการเสียรูปที่จุดวิบัติด้วยน้ำหนักบรรทุกในแนวตั้งของเสาที่เสียหายเนื่องจากแรงเฉือน (หลังจากเกิดการครากเนื่องจากแรงดัด) พบว่าการคำนวณของ Elwood และ Moehle, (2005) ที่ใช้ในการทำนายอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างต่างจากผลการทดสอบที่ได้มาก เนื่องจากสูตรในการคำนวณนี้มีสมมุติฐานในการวิเคราะห์ที่รับภาระเกิดแผ่นดินไหวรุนแรง จึงไม่สามารถใช้การคำนวณนี้กับเสาในประเทศไทยหรือประเทศที่เกิดแผ่นดินไหวน้อยได้

7. การต่อทาบเหล็กเสริมตามยาวของเสาตัวอย่างทดสอบ S2s ส่งผลทำให้ถ่ายเทความเค้น ความเครียดและกำลังรับแรงไม่ดีเหมือนกับเสาตัวอย่าง S1 และ S3 ที่ไม่มีการต่อทาบ ดังนั้นการรับแรงกระทำด้านข้างของเสาตัวอย่าง S2s จึงมีค่าน้อยกว่าเสาตัวอย่าง S1 และ S3

8. การลดปริมาณและขนาดของเหล็กเสริมตามขวาง โดยใช้เหล็กกลม RB6 ปริมาณ 0.098% ตามมาตรฐาน E.I.T 1007-34 ที่ลดปริมาณลงประมาณครึ่งหนึ่งจากเสาตัวอย่าง S1 และ S2s ที่ใช้ ปริมาณ 0.181% ตามมาตรฐาน ACI318-05 นั้น ทำให้ประสิทธิภาพการบิดลดลง ซึ่งมีผลต่อค่า ความเหนียวเชิงการเคลื่อนที่ด้านข้างที่สูญเสียความต้านทานด้านข้างหรือที่แรงกระทำด้านข้างลดลง 20% จากแรงกระทำสูงสุด และค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนที่ด้านข้างที่เกิดการวิบัติ น้อยกว่าจาก เสาตัวอย่าง S1 และ S2s ตลอดจนระยะการเคลื่อนที่และกำลังรับแรงด้านข้างที่น้อย ซึ่งด้วยเหตุนี้ อาจทำให้เกิดการวิบัติกับโครงสร้างอาคารได้ง่าย หากเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว

อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบเสาตัวอย่างทั้ง 3 ตัวอย่าง พบได้ว่าเมื่อแรงกระทำทาง ด้านข้างลดลง 20% จากแรงกระทำสูงสุด เสาตัวอย่างยังสามารถรับน้ำหนักบรรทุกในแนวแกนได้และ ยังถือว่าเสายังไม่เกิดการวิบัติเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกขององค์อาคาร โดยผลการทดสอบในครั้งนี้จะเป็น แนวทางในการจัดทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อออกแบบโครงสร้างที่สามารถรับแรงแผ่นดินไหว และเป็นข้อมูลสำหรับงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องต่อไปในอนาคต

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การวิเคราะห์ข้อมูลจากงานวิจัยนี้ สามารถสรุปข้อเสนอแนะแนวทางปฏิบัติ ที่ควร จะ ทำการศึกษาค้นคว้าในอนาคตได้ ดังต่อไปนี้

1. งานวิจัยนี้ไม่ได้มีการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ นั้นจึงควรมีการจำลอง โครงสร้างของคอนกรีตและเหล็กเสริม มาวิเคราะห์เพื่อให้มีความถูกต้องมากขึ้น โดยควรคำนึงถึงผล



ของการโก่งเดาะ (bucking) ของเหล็กเสริม ระยะการต่อทาบของเหล็กเสริมตามยาว ปริมาณเหล็กเสริมตามขวาง ซึ่งจะส่งผลต่อการวิบัติในโครงสร้างเสา จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

2.ในงานวิจัยนี้ เสาตัวอย่างทดสอบ S1 มีกำลังอัดประลัยของคอนกรีตแตกต่างจากเสาตัวอย่าง S2s และเสาตัวอย่าง S3 จึงควรทำการทดสอบตัวอย่างเสาเพิ่มเติมให้มีกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่เท่ากันเพื่อเห็นความแตกต่างระหว่างตัวอย่างทดสอบได้ดีขึ้น อีกทั้งในงานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษา ระยะการต่อทาบจากมาตรฐาน E.I.T1007-34 มีระยะการต่อทาบที่สั้นกว่า เพื่อจะทราบถึงพฤติกรรมของการต่อทาบที่มีระยะที่สั้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กได้อย่างชัดเจนขึ้น