# บทที่ 4

# การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบ

หน้าที่หลักของกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กหรือที่เรียกว่าผนังรับแรงเฉือน (Shear Walls) ที่อยู่ในอาคารสูงก็คือใช้ในการรับแรงด้านข้างทั้งแรงลมและแรงแผ่นดินไหว ซึ่งในการออกแบบกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น จะต้องออกแบบให้มีทั้งกำลัง (Strength) และสติฟเนสด้านข้าง (Lateral Stiffness) เพียงพอต่อแรงด้านข้างที่กระทำ และสำหรับการออกแบบกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในเขตแผ่นดินไหวนั้น ความสามารถในการกระจายพลังงาน (Energy Dissipation Capacity) ของกำแพงนับว่ามีความสำคัญเป็นอย่างมาก ดังนั้นปัจจัยสำคัญต่างๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมแบบเป็นวัฏจักร (Cyclic Behavior) ซึ่งประกอบด้วย กำลัง, สติฟเนสด้านข้าง และความสามารถในการกระจายพลังงาน สามารถอธิบายได้ด้วยโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างที่กระทำและการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ส่วนบนสุดของกำแพง

ดังนั้นในบทนี้จะเป็นการนำผลการทดสอบที่ได้ซึ่งอยู่ในรูปของโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างที่กระทำและการเคลื่อนที่ด้านข้าง, โค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างที่กระทำและการเสียรูปด้วยแรงเฉือน และโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างที่กระทำและความเครียดในเหล็กเสริม มาทำการวิเคราะห์ถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมของกำแพง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่เกี่ยวกับความสามารถในการกระจายพลังงาน และการเสียรูปในลักษณะของแรงเฉือน จากนั้นในช่วงท้ายของบทนี้ จะทำการเปรียบเทียบค่ากำลังสูงสุด (Maximum Load) ของกำแพงที่ได้จากผลการทดสอบ และค่ากำลังสูงสุดของกำแพงที่ได้จากการคำนวณตามข้อกำหนดของ ACI (7)

## 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างที่กระทำและการเคลื่อนที่ด้านข้าง

เมื่อกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างที่กระทำและการเคลื่อนที่ด้านข้าง ก็จะต้องกล่าวถึงความสามารถในการกระจายพลังงาน (Energy Dissipation Capacity) ด้วย เนื่องจากเป็นสิ่งสำคัญมากสำหรับการออกแบบโครงสร้างที่ต้องรับแรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักรหรือแรงแผ่นดินไหว โดยการเคลื่อนที่ด้านข้างที่นำมาพิจารณานั้นจะใช้การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ส่วนบนสุดของโครงสร้าง ซึ่งในงานวิจัยนี้ การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ส่วนบนสุดจะอยู่ในระดับเดียวกับระดับของแรงด้านข้างที่กระทำคือ ที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานของตัวอย่างทดสอบ ดัง

นั้น ในส่วนของเนื้อหาที่จะกล่าวหลังจากนี้ เมื่อกล่าวถึงการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ส่วนบนสุดก็จะหมายถึง การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานของตัวอย่างทดสอบ

จากผลการทดสอบที่ได้สามารถนำมาเขียนเป็นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างที่กระทำและการเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวอย่างทดสอบทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ถึง 4.6 ซึ่งในโค้งความสัมพันธ์นี้ โดยทั่วไปจะถูกควบคุมด้วยรูปแบบการเสียรูปสองรูปแบบคือ การเสียรูปในลักษณะของแรงดัด (Flexural Deformation) และการเสียรูปในลักษณะของแรงเฉือน (Shear Deformation) ในรูปแบบการเสียรูปในลักษณะของแรงดัดนั้น ตัวอย่างทดสอบซึ่งเป็นกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กจะเสียรูปโดยการเปลี่ยนแปลงความโค้ง (Curvature) ตลอดความสูงของกำแพง และการเสียรูปในลักษณะของแรงดัดนี้จะถูกควบคุมโดยสติฟเนสการดัด (Flexural Stiffness) ของกำแพง และภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักร กำแพงที่มีการเสียรูปในลักษณะของแรงดัดจะกระจายพลังงานออกมาในรูปของการคราก (Yield) ของเหล็กเสริมรับแรงดัด จึงเป็นผลให้กำแพงมีความสามารถในการกระจายพลังงานที่ดี ส่วนในรูปแบบการเสียรูปในลักษณะของแรงเฉือนนั้นจะเกิดขึ้นเมื่อกำแพงเสียรูปโดยมีการเปลี่ยนแปลง Shear Distortion ในบริเวณส่วนล่างของกำแพง ซึ่งการเสียรูปในลักษณะของแรงเฉือนนี้จะถูกควบคุมโดยสติฟเนสการเฉือน (Shear Stiffness) ของกำแพง และโดยทั่วไปจะไม่ต้องการให้กำแพงเกิดการเสียรูปในลักษณะของแรงเฉือน เนื่องจากโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างที่กระทำและการเคลื่อนที่ด้านข้างของกำแพงที่มีการเสียรูปในลักษณะของแรงเฉือน สามารถที่จะเกิดลักษณะคอดตรงกลาง หรือที่เรียกว่า Pinching ได้ ซึ่งผลอันนี้จะทำให้กำแพงมีความสามารถในการกระจายพลังงานที่ต่ำ และสามารถที่จะเกิดการวิบัติอย่างฉับพลัน หรือการวิบัติแบบ Web Crushing ได้

โดยทั่วไปกำแพงจะเกิดการเสียรูปในรูปแบบที่มีพลังงานความเครียด (Strain Energy) และสติฟเนส (Stiffness) ต่ำสุด ซึ่งจะเห็นได้จากรูปที่ 4.7 เมื่อกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กได้รับแรงกระทำด้านข้างจนกระทั่งความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดัดใน Boundary Element ด้านที่รับแรงดึงเลยจุดอีลาสติก ทำให้ความกว้างของรอยแตกร้าวมีมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.7(ก) จากนั้นทำการลด (Unload) แรงด้านข้างที่กระทำกับกำแพงลงจนเป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 4.7(ข) ที่ตำแหน่งนี้ถึงแม้จะไม่มีแรงด้านข้างกระทำแล้วก็ตาม แต่รอยแตกร้าวก็ยังปิดไม่สนิท ยังคงเปิดอยู่ ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดัดใน Boundary Element ด้านที่รับแรงดึง บางส่วนยังเหลือค้างอยู่ (Plastic Strain) และเมื่อเริ่มให้แรงด้านข้างกระทำในทิศทางตรงกันข้ามดังแสดงในรูปที่ 4.7(ค) สติฟเนสของกำแพงในช่วงนี้จะน้อยกว่าในช่วงแรก เนื่องจากรอยแตกร้าวในบริเวณที่รับแรงอัดยังคงเปิดอยู่ ซึ่งหมายความว่าแรงอัดจะต้องถูกรับโดยเหล็กเสริมรับแรงดัดใน Boundary Element ด้านที่รับแรงอัดเท่านั้น

ดังนั้นในช่วงนี้โมเมนต์ดัดภายในจะมีค่าเท่ากับโมเมนต์คู่ควบของเหล็กเสริมรับแรงดัดที่อยู่ใน Boundary Element ทั้งสองด้านเท่านั้น ไม่มีส่วนของคอนกรีตมาช่วยเลย สติฟเนสของกำแพงช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับเหล็กเสริมเท่านั้น และสติฟเนสนี้จะค่อยๆ ลดลงไปเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มแรงกระทำด้านข้างมากขึ้น เนื่องจากผลของ Bauschinger Effect จนกระทั่งเมื่อรอยแตกร้าวในบริเวณที่รับแรงอัดปิดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.7(ง) สติฟเนสของกำแพงก็จะกลับเพิ่มขึ้นมาอีก เนื่องจากคอนกรีตช่วยรับแรงอัดได้อีกครั้งหนึ่ง และจากที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นนี้สามารถอธิบายได้ในรูปของโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างที่กระทำและการเคลื่อนที่ด้านข้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.7(จ) การเปิดและปิดของรอยแตกร้าวซ้ำไปซ้ำมาหลายๆ ครั้ง ในที่สุดก็จะทำให้เกิดการเสื่อมลด (Degradation) ของกำลังในการรับแรงอัดของคอนกรีต เพราะผิวของรอยแตกร้าวประกบกันไม่สนิท เนื่องจากการเลื่อน (Sliding) หรือการเสียรูปในลักษณะของแรงเฉือน (Shear Deformation) ดังนั้นจึงทำให้กำลังและสติฟเนสของกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กลดลงเมื่อรับแรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักรไปหลายๆ รอบ

จากโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างที่กระทำและการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ส่วนบนสุดของตัวอย่างทดสอบที่ 1, 2 และ 3 ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ถึง 4.3 จะเห็นได้ว่า จะมีลักษณะอ่อนตัวลงเมื่อแรงกระทำด้านข้างมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และมีลักษณะคอดตรงกลางหรือ Pinching เกิดขึ้น เนื่องจากมีการเสียรูปในลักษณะของแรงเฉือนภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักร ซึ่งจะทำให้กำแพงมีสติฟเนสน้อยเมื่อแรงเฉือนหรือแรงด้านข้างที่กระทำมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และจะมีสติฟเนสเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเสียรูป (Deformation) เพิ่มมากขึ้น และสำหรับตัวอย่างทดสอบที่ 4 ซึ่งมีโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างที่กระทำและการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ส่วนบนสุดดังแสดงในรูปที่ 4.4 จากรูปจะเห็นได้ว่ากำลังของตัวอย่างทดสอบ จะลดลงในทุกรอบของแรงกระทำ และในที่สุดตัวอย่างทดสอบก็จะเกิดการวิบัติด้วย Sliding Shear ที่รอยต่อระหว่างตัวกำแพงและฐานกำแพง ส่วนในตัวอย่างทดสอบที่ 5 และ6 โค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างที่กระทำและการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ส่วนบนสุดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.5 และ 4.6 ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมของกำแพงที่มีความเหนียว (Ductile Behavior) อย่างชัดเจน โดยสังเกตได้จากการที่กำลังในการรับน้ำหนักของกำแพงไม่ลดลงมากในแต่ละรอบของการเคลื่อนที่ที่เพิ่มขึ้น และจะเห็นได้ว่าโค้งความสัมพันธ์ดังกล่าวจะไม่มีลักษณะของ Pinching เกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลให้กำแพงเกิดการเสียรูปในลักษณะของแรงดัด

## 4.2 ความสามารถในการกระจายพลังงาน

ในการออกแบบโครงสร้างที่ต้องรับแรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักรหรือแรงแผ่นดินไหวนั้น สิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณานอกจากความเหนียว (Ductility) ก็คือ ความสามารถใน

การกระจายพลังงาน (Energy Dissipation Capacity) ดังนั้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงความสามารถในการกระจายพลังงานของกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งถูกใช้เป็นตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยนี้ และวิธีการที่ง่ายและสะดวกที่สุดในการคำนวณหาการกระจายพลังงานก็คือ การคำนวณหาพื้นที่ใต้โค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างที่กระทำและการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ส่วนบนสุดของกำแพง โดยพลังงานที่กระจายในแต่ละรอบของแรงกระทำจะถูกแทนด้วยพื้นที่ใต้โค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างที่กระทำและการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ส่วนบนสุดในรอบนั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และจากการคำนวณหาการกระจายพลังงานของตัวอย่างทดสอบทั้งหมด สามารถนำมาเขียนเป็นกราฟแสดงการกระจายพลังงานสะสม (Cumulative Energy Dissipation) ของตัวอย่างทดสอบในแต่ละรอบได้ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ถึง 4.14

จากกราฟจะเห็นได้ว่า ก่อนที่เหล็กเสริมรับแรงดัดใน Boundary Element จะเกิดการคราก การกระจายพลังงานของตัวอย่างทดสอบทั้งหมดมีค่าน้อยมาก และหลังจากที่เหล็กเสริมรับแรงดัดใน Boundary Element เกิดการครากไปแล้ว ค่าการกระจายพลังงานของตัวอย่างทดสอบทั้งหมดจะเพิ่มสูงขึ้น โดยตัวอย่างทดสอบที่ 5 และ 6 ซึ่งเป็นตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนกระจายในแนวทแยง จะมีความสามารถในการกระจายพลังงานสูงที่สุด ซึ่งก็สอดคล้องกับรูปแบบการวิบัติที่เกิดขึ้นคือการวิบัติจะเกิดในลักษณะของแรงดัด ส่วนในตัวอย่างทดสอบที่ 1, 2 และ 3 ซึ่งเป็นตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนกระจายอยู่ในแนวนอนและแนวดิ่งตามปกติ จะมีความสามารถในการกระจายพลังงานต่ำ ซึ่งเป็นผลให้ตัวอย่างทดสอบดังกล่าวเกิดการวิบัติในลักษณะของแรงเฉือน ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.1 และเนื่องจากตัวอย่างทดสอบที่ 4 ซึ่งเป็นตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเป็นแบบมัดรวมกันในแนวทแยง และมีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวนอนและแนวดิ่งในปริมาณต่ำสุดที่กำหนดไว้ใน ACI (7) เกิดการวิบัติแบบ Sliding Shear ซึ่งเป็นผลให้กำลังของตัวอย่างทดสอบลดลงในทุกรอบของแรงกระทำ ดังนั้น จึงมีผลทำให้ความสามารถในการกระจายพลังงานต่ำไปด้วย

## 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างที่กระทำและการเสียรูปด้วยแรงเฉือน

การเสียรูปด้วยแรงเฉือนหรือ Shear Distortion ในบริเวณส่วนล่างของตัวอย่างทดสอบสามารถที่จะหาได้จากการเคลื่อนที่ของจุดที่อยู่ที่มุมทั้งสี่ของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งอยู่ในบริเวณกำแพงส่วนล่างของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.15 โดยค่าการเคลื่อนที่เหล่านี้สามารถหาได้จาก LVDT's ซึ่งได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 2.4 และโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างที่กระทำและการเสียรูปด้วยแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบทั้งหมดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.16 ถึง 4.21 จากโค้งความสัมพันธ์ที่ได้จะเห็นได้ว่า ในตัวอย่างทดสอบที่ 1, 2 และ 3 โค้ง

ความสัมพันธ์จะมีลักษณะของ Pinching เกิดขึ้นมาก และในตัวอย่างทดสอบที่ 1 จะมีการเสียรูปด้วยแรงเฉือนหรือมี Shear Distortion มากที่สุด ส่วนในตัวอย่างทดสอบที่ 5 และ 6 โค้งความสัมพันธ์จะมีลักษณะของ Pinching เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และมี Shear Distortion น้อยกว่าในตัวอย่างทดสอบที่ 1, 2 และ 3 ซึ่งผลอันนี้สามารถแสดงให้เห็นว่า เหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวทแยงมีประสิทธิผลอย่างมากในการช่วยลดการเสียรูปในลักษณะของแรงเฉือน และยังช่วยปรับปรุงความสามารถในการกระจายพลังงานให้ดีขึ้นด้วย สำหรับตัวอย่างทดสอบที่ 4 เนื่องจากเกิดการวิบัติด้วย Sliding Shear ตรงรอยต่อระหว่างตัวกำแพงและฐานกำแพง ดังนั้นแรงด้านข้างหรือแรงเฉือนแบบเป็นวัฏจักรที่มากระทำกับกำแพงจะไม่ถ่ายผ่าน Compressive Struts และเหล็กเสริมที่อยู่ในกำแพง แต่จะถ่ายผ่านระนาบ (Plane) ที่เกิดการเลื่อน (Slip) ตรงรอยต่อระหว่างตัวกำแพงกับฐานกำแพงแทน จึงเป็นผลทำให้กำแพงมี Shear Distortion เกิดขึ้นน้อยมาก

## 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างที่กระทำและความเครียดในเหล็กเสริม

โค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างที่กระทำและความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมรับแรงดัดที่อยู่ใน Boundary Element และเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่อยู่ในกำแพง (Web) ของตัวอย่างทดสอบทั้งหมดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.22 ถึง 4.27 และตำแหน่งที่ติดเกจวัดความเครียดในเหล็กเสริมของตัวอย่างทดสอบทั้งหมดได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.8 และ 2.9 และเนื่องจากตัวอย่างทดสอบต้องรับแรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักรซ้ำไปซ้ำมาหลายรอบจนทำให้แรงยึดเหนี่ยว (Bond) ระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมลดลง เป็นผลให้เกิดการเลื่อน (Slip) ระหว่างผิวของวัสดุทั้งสอง ทำให้เกจวัดความเครียดหลุดออกจากเหล็กเสริมก่อนที่ตัวอย่างทดสอบจะเกิดการวิบัติ ซึ่งจะทำให้โค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างที่กระทำและความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมมีความไม่สมบูรณ์ กล่าวคือ ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในช่วงท้ายของการทดสอบจะหายไป แต่ถึงอย่างไรก็ตามโค้งความสัมพันธ์ที่ได้ก็มีความละเอียดมากพอที่จะอธิบายพฤติกรรมต่างๆ ของตัวอย่างทดสอบได้ดังนี้

### 4.4.1 ความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมรับแรงดัด

จากโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างที่กระทำและความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมรับแรงดัดที่อยู่ใน Boundary Element ของตัวอย่างทดสอบทั้งหมดจะเห็นได้ว่าหลังจากที่ตัวอย่างทดสอบได้รับแรงด้านข้างแบบเป็นวัฏจักรกระทำจนกระทั่งเหล็กเสริมรับแรงดัดใน Boundary Element เริ่มเกิดการคราก และเมื่อตัวอย่างทดสอบกลับมาอยู่ในช่วงที่ไม่มี

แรงด้านข้างกระทำหรือแรงด้านข้างที่กระทำเป็นศูนย์ (Unload) จะพบว่าในเหล็กเสริมรับแรงดัดจะมีหน่วยการยืดตัวหรือ Tensile Strain เหลือค้างอยู่ ซึ่งก็หมายความว่ารอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นใน Boundary Element บริเวณด้านล่างของตัวอย่างทดสอบยังปิดไม่สนิทในช่วงที่ไม่มีแรงด้านข้างกระทำหลังจากที่เหล็กเสริมรับแรงดัดเริ่มครากไปแล้ว แต่สำหรับตัวอย่างทดสอบที่ 3 เมื่อสังเกตโค้งความสัมพันธ์ที่ได้จะพบว่า ไม่เกิดการครากของเหล็กเสริมรับแรงดัดใน Boundary Element เนื่องจากมีการใช้เหล็กเดือยเสริมในบริเวณส่วนล่างที่อยู่ต่ำกว่าระดับ 20 ซม. เหนือฐานกำแพงเพื่อถ่ายแรงเฉือนที่ฐานกำแพงแทนการใช้เหล็กเสริมรับแรงเฉือนทั่วไปดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.1 ดังนั้นจึงทำให้บริเวณนี้มีปริมาณเหล็กมาก และอาจจะทำให้เหล็กเสริมรับแรงดัดใน Boundary Element เกิดการครากที่ตำแหน่งอื่นซึ่งอยู่เหนือบริเวณนี้ และประกอบกับเกจวัดความเครียดที่ติดบนเหล็กเสริมรับแรงดัดใน Boundary Element ก็อยู่ในบริเวณนี้เช่นกัน จึงไม่สามารถวัดค่าความเครียดในตำแหน่งที่เกิดการครากได้

### 4.4.2 ความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

จากโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างที่กระทำและความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบที่ 1, 2 และ 3 จะเห็นได้ว่า ความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่อยู่ในแนวนอนจะมีค่าน้อยมากในช่วงก่อนที่จะเกิดรอยแตกร้าวขึ้นในกำแพง และสำหรับตัวอย่างทดสอบที่ 1 และ 2 จะพบว่า หลังจากที่เหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวดิ่งเกิดการคราก ค่าของหน่วยการยืดตัว (Tensile Strain) ที่เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบที่ 1 จะมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าตัวอย่างทดสอบที่ 2 ซึ่งมีผลทำให้รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณส่วนล่างของกำแพง (Web) ของตัวอย่างทดสอบที่ 1 มีความกว้างมากกว่าตัวอย่างทดสอบที่ 2 ส่วนในตัวอย่างทดสอบที่ 3 หลังจากที่เหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวดิ่งเกิดการคราก ค่าหน่วยการยืดตัว (Tensile Strain) จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวดิ่งไม่ได้ฝังลงไปในฐานกำแพง แต่จะใช้เหล็กเดือยเพื่อถ่ายแรงเฉือนที่ฐานกำแพงแทน ดังนั้นจึงทำให้บริเวณด้านล่างของกำแพงที่เสริมเหล็กเดือยไม่มีรอยแตกร้าวเกิดขึ้น แต่รอยแตกร้าวจะเกิดขึ้นเหนือบริเวณที่เสริมเหล็กเดือย และความกว้างของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กกว่าในตัวอย่างทดสอบที่ 1

สำหรับตัวอย่างทดสอบที่ 4 จะเห็นได้ว่า ความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมรับแรงเฉือนทั้งหมดมีค่าน้อยมาก เนื่องจากตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติแบบ Sliding Shear จึงทำให้บริเวณกำแพงของตัวอย่างทดสอบมีความเสียหายเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และในตัวอย่างทดสอบที่ 5 และ 6 จะเห็นได้ว่า เหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวทแยงนอกจากจะมีหน่วยการยืดตัว (Tensile Strain) เกิดขึ้นแล้ว ยังมีหน่วยการหดตัว (Compressive Strain) เกิด

ขึ้นด้วย ซึ่งหมายความว่า เหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่อยู่ในแนวทแยงจะช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดให้กับ Compressive Struts ในการถ่ายแรงเฉือนลงสู่ฐานกำแพงอย่างแน่นอน

## 4.5 กำลังของคอนกรีตขณะเกิดการวิบัติแบบ Web Crushing

### 4.5.1 การวิเคราะห์โดยใช้วิธี Truss Analogy

Truss Analogy เป็นวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างที่ต้องรับแรงเฉือน โดยสมมุติว่าคานหรือกำแพงจะทำหน้าที่เป็นโครงข้อหมุนที่หาค่าได้ทางสถิตยศาสตร์ (Statically Determinate Truss) ดังแสดงในรูปที่ 4.28 โดยที่เหล็กเสริมรับแรงดัดที่อยู่ใน Boundary Element ด้านที่รับแรงดึงจะถูกสมมุติให้ทำหน้าที่เป็น Tension Cord ส่วนเหล็กเสริมรับแรงดัดและคอนกรีตที่อยู่ใน Boundary Element อีกด้านหนึ่งจะถูกสมมุติให้ทำหน้าที่รับแรงอัด และเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่อยู่ในแนวนอนและคอนกรีตที่อยู่ระหว่างรอยแตกร้าวในแนวทแยงจะถูกสมมุติให้ทำหน้าที่เป็น Tension Ties และ Compressive Struts ตามลำดับ

จากหลักการของความสมดุล (Equilibrium) สามารถหาสมการที่ใช้ในการหากำลังของ Compressive Struts ของกำแพงในรูปที่ 4.28 ขณะเกิด Web Crushing ได้ดังนี้

$$kf_c' = \frac{V_{wc}}{hd\cos\beta\sin\beta} = \frac{v_{wc}}{\cos\beta\sin\beta}$$

หรือ

$$v_{wc} = \frac{V_{wc}}{hd} = kf_c'\cos\beta\sin\beta \qquad (1)$$

เมื่อ $v_{wc}$ คือ หน่วยแรงเฉือนของกำแพงขณะเกิด Web Crushing

$V_{wc}$ คือ กำลังรับแรงเฉือนของกำแพงขณะเกิด Web Crushing

$h$ คือ ความหนาของกำแพง (Web)

$d$ คือ ระยะจากผิวนอกสุดของ Boundary Element ด้านที่รับแรงอัดถึงศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมที่อยู่ใน Boundary Element ด้านที่รับแรงดึง (เพื่อความสะดวกอาจจะสมมุติให้มีค่าเป็น $0.8l_w$)

$l_w$ คือ ความกว้างของกำแพง

$kf_c'$ คือ กำลังอัดเฉลี่ยของ Compressive Struts

$\beta$ คือ มุมที่ Compressive Struts ทำกับแนวดิ่ง

### 4.5.2 มุมที่ Compressive Struts ทำกับแนวดิ่ง

จากผลการทดสอบของตัวอย่างทดสอบที่ 1, 2 และ 3 แสดงให้เห็นว่า มุมที่ Compressive Struts ทำกับแนวดิ่ง ($\beta$) ส่วนใหญ่จะมีค่าอยู่ระหว่าง 30-60 องศา อย่างไรก็ตาม จะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อนำค่ามุม $\beta$ แทนลงในสมการที่ (1) ผลที่ได้จะทำให้กำลังรับแรงเฉือนของกำแพงเปลี่ยนแปลงไม่มาก กล่าวคือ ค่าของ $\cos\beta\sin\beta$ ในสมการที่ (1) จะอยู่ระหว่าง 0.43 และ 0.50 เท่านั้น ดังนั้นจึงสามารถลดรูปสมการที่ (1) ลงได้ โดยสมมุติให้มุม $\beta$ มีค่าเท่ากับ 45 องศา ซึ่งจะทำให้เทอมของ $\cos\beta\sin\beta$ ในสมการที่ (1) มีค่าเป็น 0.50 และจะได้ว่า

$$v_{wc} = \frac{V_{wc}}{hd} = 0.50kf_c' \qquad (2)$$

### 4.5.3 ค่ากำลังอัดเฉลี่ยของ Compressive Struts

จากผลการทดสอบของตัวอย่างทดสอบที่ 1, 2 และ 3 สามารถหาค่ากำลังอัดเฉลี่ยของ Compressive Struts ในบริเวณส่วนล่างของตัวอย่างทดสอบได้โดยใช้สมการที่ (2) ซึ่งจะได้ว่า ขณะเกิด Web Crushing ค่ากำลังอัดเฉลี่ยของ Compressive Struts ของตัวอย่างทดสอบที่ 1, 2 และ 3 จะมีค่าเท่ากับ $0.160f_c'$, $0.163f_c'$ และ $0.188f_c'$ ตามลำดับ

จากผลการทดสอบที่ได้ในงานวิจัยนี้พบว่า การเกิดการวิบัติแบบ Web Crushing จะเกิดขึ้นเมื่อหน่วยแรงเฉือนในคอนกรีตบริเวณส่วนล่างของกำแพง (Web) มีค่าสูง และถึงแม้ว่าจะมีการเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือนให้เกินกว่าค่าแรงเฉือนที่ต้องการ ก็ไม่สามารถที่จะป้องกันการวิบัติแบบนี้ได้ ดังนั้น วิธีการที่ดีที่สุดที่จะป้องกันการวิบัติแบบ Web Crushing ก็คือ การลดค่าหน่วยแรงเฉือนระบุ (Nominal Shear Strength) หรือ $v_n$ ลงอีก ซึ่งตามมาตรฐานของ ACI (7) สำหรับการออกแบบกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องรับแรงด้านข้างแบบเป็นวัฏจักร ได้กำหนดให้ $v_n$ มีค่าไม่เกิน $2.1\sqrt{f_c'}$ (ksc) อย่างไรก็ตาม จากตารางที่ 4.1 พบว่า ค่าดังกล่าวยังคงสูงเกินไป และอาจจะยังคงทำให้กำแพงเกิดการวิบัติแบบ Web Crushing ได้

## 4.6 การเปรียบเทียบผลการทดสอบ

ในหัวข้อนี้จะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างกำลังสูงสุดของตัวอย่างทดสอบที่ได้จากการคำนวณตามวิธีของ ACI (7) และกำลังสูงสุดของตัวอย่างทดสอบที่ได้จากผลการทดสอบ ซึ่งผลการเปรียบเทียบได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 และวิธีการหาค่ากำลังสูงสุดของตัวอย่างทดสอบตามวิธีของ ACI (7) ได้แสดงไว้ในภาคผนวก จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า ในตัวอย่างทดสอบที่ 1 และ 2 กำลังสูงสุดที่ได้จากการทดสอบจะมากกว่าที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีของ ACI (7) ประมาณ 10-13 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ทั้งๆ ที่ไม่ได้คิดผลของ Strain Hardening ของเหล็กเสริม ซึ่งแสดงให้เห็นว่า กำลังรับน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบที่เสริมเหล็กรับแรงเฉือนในแนวนอนและแนวดิ่งตามปกติ อาจจะถูกจำกัดหรือลดลงเนื่องจากตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติแบบ Web Crushing ส่วนในตัวอย่างทดสอบที่ 5 จะเห็นได้ว่า กำลังสูงสุดที่ได้จากการทดสอบจะมากกว่าที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีของ ACI (7) ถึง 35 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่กระจายในแนวทแยงนอกจากจะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการวิบัติแบบ Web Crushing แล้ว ยังสามารถช่วยให้ตัวอย่างทดสอบมีกำลังในการรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นอีกด้วย และสำหรับตัวอย่างทดสอบที่ 6 ซึ่งมีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่กระจายในแนวทแยงเหมือนกับตัวอย่างทดสอบที่ 5 แต่มีปริมาณมากกว่า จะเห็นได้ว่า กำลังสูงสุดที่ได้จากการทดสอบจะมากกว่าที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีของ ACI (7) 13 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยกว่าในตัวอย่างทดสอบที่ 5 นั่นแสดงว่า เหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวทแยงที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นในตัวอย่างที่ 6 ถึงแม้จะช่วยป้องกันไม่ให้ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติแบบ Web Crushing และช่วยให้กำลังรับน้ำหนักเพิ่มขึ้น แต่ก็มีปริมาณมากเกินความพอดี (Optimum) ที่จะทำให้ตัวอย่างทดสอบมีประสิทธิผลสูงสุด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย