บทที่ 3

ผลการทดสอบ

จากการทดสอบตัวอย่างกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กในงานวิจัยนี้ ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจากจะอยู่ในรูปของข้อมูลทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งได้แก่ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าจาก Load cell ซึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็นค่าของแรงกระทำทางด้านข้าง, สัญญาณแรงดันไฟฟ้าจาก LVDT's ซึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็นค่าการเปลี่ยนตำแหน่ง (Displacement) และ สัญญาณความต้านทานจากเกจวัดความเครียด (Strain Gage) ซึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็นค่าความเครียด (Strain) ในเหล็กเสริมแล้ว ยังข้อมูลที่ได้จากการสังเกต เช่น ความกว้างของรอยแตกร้าว (Crack Width) และลักษณะแตกร้าว (Crack Pattern) ที่เกิดขึ้น ซึ่งข้อมูลทั้งหมดดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น จะถูกนำไปใช้ในการอธิบายพฤติกรรมต่าง ๆ ของตัวอย่างกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็ก

ดังนั้นในบทนี้ จะเป็นการนำข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบมาอธิบายพฤติกรรมทั่ว ๆ ไปและลักษณะการแตกร้าวของตัวอย่างทดสอบ จากนั้นจะทำการสรุปรูปแบบการวิบัติที่เกิดขึ้นพร้อมทั้งอธิบายถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดการวิบัติ

3.1 พฤติกรรมทั่วไปและลักษณะการแตกร้าว

3.1.1 ตัวอย่างทดสอบที่ 1

การแตกร้าวครั้งแรกเริ่มสังเกตได้ในรอบที่ 1 ซึ่งมีแรงกระทำด้านข้าง +20 ตัน และมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงประมาณ +1.66 มม. รอยร้าวจะเริ่มเกิดที่บริเวณส่วนล่างของตัวอย่างทดสอบ โดยมีแนวเอียงประมาณ 30-45 องศาเทียบกับแนวราบแตกนั้นในรอบที่ 4 รอยร้าวเริ่มขยายไปที่บริเวณส่วนบนของตัวอย่างทดสอบ โดยมีแนวเอียงประมาณ 60 องศาเทียบกับแนวราบ และเหล็กเสริมรับแรงดัดใน Boundary Element ด้านที่มีเครื่องกดน้ำหนักเริ่มตราก ซึ่งสามารถวัดการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงได้ประมาณ +7.90 มม. และมีแรงกระทำด้านข้าง +45 ตัน จากนั้นรอยร้าวทั้งในกำแพงและใน Boundary Element เริ่มมีมากขึ้นเรื่อย ๆ

จนกระทั่งในรอบที่ 7 ซึ่งมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพง ±15.00 มม. รอยแตกร้าวในกำแพงและใน Boundary Element เริ่มต่อเป็นเส้น

เดียวกัน และในรอบที่ 8 ซึ่งมีการคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเท่ากับในรอบที่ 7 คือ ±15.00 มม. บริเวณส่วนล่างของตัวอย่างทดสอบ รอยแตกร้าวจะเปิดกว้างมากขึ้น โดยมีความกว้างประมาณ 2-3 มม. จากนั้นในรอบที่ 10 ซึ่งมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงคือ ±22.50 มม. รอยแตกร้าวในบริเวณส่วนล่างของตัวอย่างทดสอบจะมีความกว้างมากกว่ารอยแตกร้าวที่อยู่ในบริเวณส่วนบนทั้งหมด ซึ่งรอยแตกร้าวที่วัดได้ในบริเวณด้านล่างจะมีความกว้างประมาณ 3 มม.

จากนั้นในรอบที่ 15 ซึ่งมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเป็น -30.00 มม. คอนกรีตใน Boundary Element ด้านที่ติดกับเครื่องกดน้ำหนักเริ่มเกิดการแตก (Crushing). และในรอบที่ 16 เมื่อการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเป็น +37.50 มม. คอนกรีตใน Boundary Element ด้านที่อยู่ตรงข้ามกับเครื่องกดน้ำหนักเริ่มแตก (Crushing) และมีการเลื่อน (Slip) ไปมาตรงรอยต่อระหว่างตัวกำแพงกับฐานกำแพงประมาณ 6 มม. จากนั้นในรอบที่ 17 ซึ่งมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเป็น -37.50 มม. เหล็กเสริมรับแรงดัดใน Boundary Element ด้านที่ติดกับเครื่องกดน้ำหนักเริ่มเกิดการโก่งเดาะ (Buckle) และตัวอย่างทดสอบเริ่มเกิดการสูญเสียกำลังรับน้ำหนักอย่างกระทันหันในรอบที่ 19 เมื่อมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเป็น +45.00 มม. โดยคอนกรีตในบริเวณกำแพง (Web) ส่วนล่างเหนือฐานกำแพงขึ้นมาประมาณ 40-45 ซม. จะเกิดการแตก (Crushing) จากขวาไปซ้าย

ตารางที่ 3.1 เป็นการสรุปพฤติกรรมที่เกิดขึ้นทั้งหมดที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น, รูปที่ 3.1 แสดงรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น, รูปที่ 3.2 แสดงการเคลื่อนที่ด้านข้างตลอดความสูงของตัวอย่างทดสอบ และรูปที่ 3.3 แสดงการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งที่ขอบล่างสุดตลอดความกว้างของตัวอย่างทดสอบ

3.1.2 ตัวอย่างทดสอบที่ 2

เริ่มสังเกตเห็นรอยแตกร้าวได้ในรอบที่ 1 ซึ่งมีแรงด้านข้างกระทำ +20 ตัน และมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงประมาณ +2.00 มม. รอยร้าวเริ่มเกิดขึ้นที่บริเวณส่วนล่างของตัวอย่างทดสอบ โดยมีแนวเอียงประมาณ 30-45 องศาเทียบกับแนวราบ จากบนลงล่าง จากนั้นในรอบที่ 4 รอยร้าวเริ่มขยายขึ้นไปสู่บริเวณส่วนบนของตัวอย่างทดสอบ โดยมีแนวเอียงประมาณ 45 องศาเทียบกับแนวราบ เช่นเดียวกับบริเวณส่วนล่าง และเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวดิ่งที่อยู่ในกำแพง (Web) เกิดการดรากก่อนเหล็กเสริมรับแรงดัดใน Boundary Element ขณะที่มีแรงด้านข้างกระทำ +37 ตัน และเมื่อแรงกระทำด้านข้างมีค่า

เป็น +45 ตัน เหล็กเสริมรับแรงดัดใน Boundary Element ด้านที่ติดกับเครื่องกดน้ำหนักเริ่มดราก ซึ่งสามารถวัดการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงได้ประมาณ +7.77 มม.

จากนั้นในรอบที่ 7 ซึ่งมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเป็น ±15.00 มม. รอยแตกร้าวทั้งในกำแพงและใน Boundary Element เริ่มมีมากขึ้นเรื่อยๆ และเริ่มต่อเป็นเส้นเดียวกัน และในรอบที่ 10 เมื่อการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเป็น ±22.50 มม. รอยแตกร้าวในบริเวณส่วนล่างของตัวอย่างทดสอบจะมีความกว้างมากกว่ารอยแตกร้าวที่อยู่บริเวณส่วนบน โดยรอยแตกร้าวในบริเวณส่วนล่างที่วัดได้จะมีความกว้างประมาณ 1.50 มม. ซึ่งมีความกว้างน้อยกว่าตัวอย่างทดสอบที่ 1

จากนั้นในรอบที่ 15 ซึ่งมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเท่ากับรอบที่ 13 คือ ±30.00 มม. คอนกรีตใน Boundary Element ทั้งสองด้านเริ่มเกิดการแตก (Crushing) และในรอบที่ 16 เมื่อการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเป็น -37.50 มม. คอนกรีตใน Boundary Element ทั้งสองด้านเกิดการแตกกะเทาะ (Spalling) หลุดออกมา และเหล็กเสริมรับแรงดัดใน Boundary Element ทั้งสองด้านเกิดการโก่งเดาะ (Buckle) จากนั้นคอนกรีตในบริเวณกำแพง (Web) ส่วนล่างเหนือฐานกำแพงขึ้นมาประมาณ 20-30 ซม. โดนแรงอัดกระทำมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดการแตก (Crushing) จากขวาไปซ้าย และทำให้ตัวอย่างทดสอบเกิดการสูญเสียกำลังรับน้ำหนักในที่สุด

ตารางที่ 3.2 ได้สรุปพฤติกรรมที่เกิดขึ้นทั้งหมดที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น, รูปที่ 3.4 แสดงรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น, รูปที่ 3.5 แสดงการเคลื่อนที่ด้านข้างตลอดความสูงของตัวอย่างทดสอบ และรูปที่ 3.6 แสดงการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งที่ขอบล่างสุดตลอดความกว้างของตัวอย่างทดสอบ

3.1.3 ตัวอย่างทดสอบที่ 3

รอยแตกร้าวครั้งแรกเริ่มสังเกตได้ในรอบที่ 1 เมื่อมีแรงกระทำด้านข้าง +15 ตัน และมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงประมาณ 1.06 มม. โดยรอยร้าวจะเริ่มเกิดขึ้นที่ส่วนล่างของตัวอย่างทดสอบ โดยมีแนวเอียงประมาณ 30-45 องศาเทียบกับแนวราบ จากนั้นในรอบที่ 4 รอยร้าวเริ่มขยายขึ้นไปสู่ส่วนบนของตัวอย่างทดสอบ โดยมีแนวเอียงประมาณ 50-60 องศาเทียบกับแนวราบ ในตัวอย่างทดสอบนี้ไม่เกิดการดรากของเหล็กเสริมรับแรงดัดใน Boundary Element เนื่องจากมีการใช้เหล็กเดือย (Dowel Bars) เสริมในบริเวณส่วนล่างที่อยู่ต่ำกว่าระดับ 20 ซม. เหนือฐานกำแพงเพื่อถ่ายแรงเฉือนที่ฐานกำแพงแทนการใช้เหล็ก

เสริมรับแรงเฉือนทั่วไปดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.1 ดังนั้นจึงทำให้บริเวณนี้มีปริมาณเหล็กมาก และอาจจะทำให้เหล็กเสริมรับแรงดัดใน Boundary Element เกิดการครากที่ตำแหน่งอื่นซึ่งอยู่เหนือบริเวณนี้ และประกอบกับเกจวัดความเครียดที่ติดบนเหล็กเสริมรับแรงดัดใน Boundary Element ก็อยู่ในบริเวณนี้เช่นกัน จึงไม่สามารถวัดค่าความเครียดที่ตำแหน่งที่เกิดการครากได้ ดังนั้นประวัติการรับน้ำหนักในช่วง Displacement Control จึงใช้นับบเดียวกับตัวอย่างทดสอบตัวอื่นๆ คือ ให้การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพง ขณะที่เหล็กเสริมรับแรงดัดใน Boundary Element เริ่มครากมีค่าประมาณ ±7.50 มม.

จากนั้นในรอบที่ 7 ซึ่งมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเป็น ±15.00 มม. รอยแตกร้าวทั้งในกำแพงและใน Boundary Element เริ่มมีมากขึ้นเรื่อยๆ จนเริ่มต่อเป็นเส้นเดียวกัน และในรอบที่ 8 ซึ่งมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเท่ากับในรอบที่ 7 คือ ±15.00 มม. บริเวณส่วนล่างซึ่งอยู่เหนือฐานกำแพงขึ้นมาประมาณ 20 ซม. รอยแตกร้าวเริ่มมีความชันลดลงจนกระทั่งอยู่ในแนวนอน ส่วนบริเวณที่อยู่ต่ำกว่าระดับ 20 ซม. เหนือฐานกำแพงคอนกรีตยังอยู่ในสภาพปกติ มีเพียงรอยแตกร้าวขนาดเล็กปรากฏอยู่เท่านั้น จากนั้นในรอบที่ 10 ซึ่งมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเป็น ±22.50 มม. รอยแตกร้าวบริเวณส่วนล่างของตัวอย่างทดสอบมีความกว้างประมาณ 2-3 มม. ซึ่งใกล้เคียงกับตัวอย่างทดสอบที่ 1

ในรอบที่ 13 ซึ่งมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเป็น ±30.00 มม. เริ่มเกิดรอยแตกร้าวในบริเวณที่อยู่ต่ำกว่าระดับ 20 ซม. เหนือฐานกำแพง ซึ่งมีแนวเอียงประมาณ 30-45 องศาเทียบกับแนวราบ และคอนกรีตที่อยู่บริเวณกำแพง (Web) ส่วนล่างเหนือฐานกำแพงขึ้นมาประมาณ 20-25 ซม. เริ่มเกิดการแตกกะเทาะ (Spalling) ห่างจาก Boundary Element ทั้งสองด้านประมาณ 10-20 ซม. จากนั้นในรอบที่ 16 เมื่อการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเป็น +37.50 มม. คอนกรีตใน Boundary Element ด้านที่อยู่ตรงข้ามกับเครื่องกดน้ำหนักเริ่มแตก (Crushing) และไม่มีการโก่งเดาะ (Buckle) ของเหล็กเสริมรับแรงดัดใน Boundary Element และจากนั้นคอนกรีตในบริเวณกำแพง (Web) ส่วนล่างเหนือฐานกำแพงขึ้นมาประมาณ 30 ซม. ซึ่งอยู่ติดกับ Boundary Element ด้านตรงข้ามกับเครื่องกดน้ำหนักเริ่มแตก (Crushing) เป็นวงกว้าง และทำให้ตัวอย่างทดสอบเกิดการสูญเสียกำลังรับน้ำหนักอย่างกระทันหัน

ตารางที่ 3.3 ได้สรุปพฤติกรรมที่เกิดขึ้นทั้งหมด, รูปที่ 3.7 แสดงรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น, รูปที่ 3.8 แสดงการเคลื่อนที่ด้านข้างตลอดความสูงของตัวอย่างทดสอบ และรูปที่ 3.9 แสดงการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งที่ขอบล่างสุดตลอดความกว้างของตัวอย่างทดสอบ

3.1.4 ตัวอย่างทดสอบที่ 4

เริ่มสังเกตเห็นรอยแตกร้าวได้ในรอบที่ 1 ซึ่งมีแรงกระทำด้านข้าง ±20 ตัน และมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงประมาณ ±1.70 มม. โดยรอยร้าวที่เกิดขึ้นในช่วงแรกนี้จะต่างจากตัวอย่างทดสอบที่ 1, 2 และ 3 คือ รอยร้าวที่เกิดขึ้นที่ในบริเวณส่วนล่างของกำแพง (Web) จะมีเพียงสองเส้นตัดกันในแนวทแยงโดยมีแนวเอียง 45 องศาเทียบกับแนวราบ ซึ่งจะแตกร้าวในแนวเดียวกับเหล็กเสริมทแยง DB20 ที่อยู่ในบริเวณส่วนล่างของตัวอย่างทดสอบ จากนั้นในรอบที่ 4 รอยร้าวเริ่มขยายขึ้นไปสู่บริเวณส่วนบนของตัวอย่างทดสอบและมีรอยร้าวขนาดเล็กเกิดขึ้นกระจัดกระจายทั่วกำแพงทั้งบริเวณส่วนบนและส่วนล่าง แต่รอยร้าวที่สังเกตเห็นได้ชัดเจนในบริเวณส่วนบนของตัวอย่างทดสอบคือ รอยร้าวสองเส้นที่ตัดกันในแนวทแยงโดยมีแนวเอียง 45 องศาเทียบกับแนวราบ ซึ่งจะแตกร้าวในแนวเดียวกับเหล็กเสริมทแยง DB20 ที่อยู่บริเวณส่วนบนของตัวอย่างทดสอบ และเหล็กเสริมรับแรงดัดใน Boundary Element ด้านที่ติดกับเครื่องกดน้ำหนักเริ่มครากเมื่อมีแรงกระทำด้านข้าง +50 ตัน และมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเป็น +7.80 มม.

จากนั้นในรอบที่ 7 ซึ่งมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเป็น ±15.00 มม คอนกรีตในบริเวณกำแพง (Web) ที่อยู่ต่ำกว่าระดับ 10 ซม. เหนือฐานกำแพงยังอยู่ในสภาพปกติ มีเฉพาะรอยแตกร้าวแนวนอนเกิดขึ้นใน Boundary Element เท่านั้น และในรอบที่ 8 ซึ่งมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเท่ากับรอบที่ 7 คือ ±15.00 มม. เริ่มมีรอยแตกร้าวในบริเวณด้านล่างของ Boundary Element ทั้งสองด้านมากขึ้น จากนั้นในรอบที่ 10 การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเป็น ±22.50 มม. มีรอยแตกร้าวแนวนอนเกิดขึ้นในบริเวณกำแพง (Web) ที่อยู่ต่ำกว่าระดับ 10 ซม. เหนือฐานกำแพง และรอยแตกร้าวที่อยู่ในบริเวณส่วนล่างของตัวอย่างทดสอบยังมีขนาดเล็กโดยมีความกว้างประมาณ 0.20 มม. และมีการเลื่อน (Slip) ไปมาตรงรอยต่อระหว่างตัวกำแพงกับฐานกำแพงประมาณ 2 ซม. จากนั้นในรอบที่ 12 ซึ่งมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเท่ากับรอบที่ 10 คือ ±22.50 มม. คอนกรีตใน Boundary Element ทั้งสองด้านเกิดการแตกกะเทาะ (Spalling) หลุดออกมาจนเห็นเหล็กเสริมรับแรงดัดที่อยู่ข้างใน และความกว้างของรอยแตกร้าวบริเวณส่วนล่างของตัวอย่างทดสอบเปิดกว้างขึ้นเล็กน้อย โดยมีความกว้างประมาณ 0.35-0.40 มม.

ในรอบที่ 13 ซึ่งมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเป็น +30.00 มม. คอนกรีตในบริเวณกำแพง (Web) ส่วนล่างที่อยู่ด้านตรงข้ามกับเครื่องกดน้ำหนักและอยู่เหนือฐานกำแพงประมาณ 5 ซม. เริ่มแตกกะเทาะ (Spalling) หลุดออกมาเป็นแนวยาว

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประมาณ 25 ซม. และหลังจากนั้นตัวอย่างทดสอบเริ่มเกิดการสูญเสียกำลังรับน้ำหนัก ในรอบที่ 16 ซึ่งมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเป็น -37.50 มม. โดยเกิดการแตกกะเทาะ (Spalling) บริเวณด้านล่างของ Boundary Element ทั้งสองด้านอย่างรวดเร็ว และมีการเลื่อน (Slip) ไปมาตรงรอยต่อระหว่างตัวกำแพงกับฐานกำแพงประมาณ 3.50 ซม. ซึ่งรอยแตกร้าวและความกว้างของรอยแตกร้าวในบริเวณกำแพง (Web) ของตัวอย่างทดสอบนี้ หลังจากการสูญเสียกำลังรับน้ำหนักมีน้อยมากเมื่อเทียบกับตัวอย่างทดสอบตัวอื่นๆ

ตารางที่ 3.4 เป็นการสรุปพฤติกรรมที่เกิดขึ้นทั้งหมดที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น, รูปที่ 3.10 แสดงรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น, รูปที่ 3.11 แสดงการเคลื่อนที่ด้านข้างตลอดความสูงของตัวอย่างทดสอบ และรูปที่ 3.12 แสดงการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งที่ขอบล่างสุดตลอดความกว้างของตัวอย่างทดสอบ

3.1.5 ตัวอย่างทดสอบที่ 5

เริ่มสังเกตเห็นรอยแตกร้าวได้ในรอบที่ 1 ซึ่งมีแรงด้านข้างกระทำ +20 ตัน และมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงประมาณ +1.67 มม. รอยร้าวเริ่มเกิดขึ้นที่บริเวณส่วนล่างของตัวอย่างทดสอบ โดยมีแนวเอียงประมาณ 45 องศาเทียบกับแนวราบ จากนั้นในรอบที่ 4 รอยร้าวเริ่มขยายขึ้นไปสู่บริเวณส่วนบนของตัวอย่างทดสอบ และยังคงมีแนวเอียง 45 องศาเทียบกับแนวราบ เหมือนบริเวณส่วนล่าง โดยรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในกำแพง (Web) ทั้งหมดในขณะนี้ จะมีลักษณะการแตกร้าวคล้ายกับรูปแบบการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนในแนวทแยงของตัวอย่างทดสอบ และเหล็กเสริมรับแรงดัดใน Boundary Element ด้านที่ติดกับเครื่องกดน้ำหนักเริ่มคราก พร้อมกับเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในกำแพง (Web) ในขณะที่มีแรงกระทำด้านข้าง +44 ตัน และมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเป็น +8.02 มม. จากนั้นในรอบที่ 5 และ 6 รอยแตกร้าวทั้งในกำแพง (Web) และใน Boundary Element ยังคงมีความหนาแน่นและมีลักษณะการแตกร้าวเหมือนกับในรอบที่ 4

จนกระทั่งในรอบที่ 7 ซึ่งมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเป็น +15.00 มม. คอนกรีตในบริเวณด้านล่างของ Boundary Element ที่อยู่ตรงข้ามกับเครื่องกดน้ำหนักเริ่มเกิดการแตก (Crushing) จากนั้นในรอบที่ 10 เมื่อตัวอย่างทดสอบมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเป็น +22.50 มม. รอยแตกร้าวในกำแพง (Web) จะมีแนวเอียงพุ่งเข้าสู่ด้านล่างสุดของ Boundary Element ที่อยู่ตรงข้ามกับเครื่องกดน้ำหนัก ซึ่งจะทำให้คอนกรีตใน Boundary Element ด้านนี้เกิดการแตกกะเทาะ (Spalling) หลุดออกมา และเมื่อการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเป็น -22.50 มม.

Boundary Element ที่อยู่ด้านเดียวกับเครื่องกดน้ำหนักก็เริ่มเกิดการแตก (Crushing) และรอยแตกร้าวในบริเวณกำแพง (Web) ส่วนล่างที่วัดได้จะมีความกว้างประมาณ 0.90-1.50 มม. ซึ่งน้อยกว่าตัวอย่างทดสอบที่ 1

จากนั้นในรอบที่ 13 ซึ่งมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเป็น ±30.00 มม. คอนกรีตใน Boundary Element ทั้งสองด้านเริ่มแตกกะเทาะ (Spalling) หลุดออกมามากขึ้น และในรอบที่ 14 เมื่อมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเป็น +30.00 มม. เหล็กเสริมรับแรงดัดใน Boundary Element ด้านที่อยู่ตรงข้ามกับเครื่องกดน้ำหนักเกิดการโก่งเตาะ (Buckle) จากนั้นในรอบที่ 15 เมื่อการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงกำลังเข้าสู่ +30.00 มม. คอนกรีตบริเวณส่วนล่างของกำแพง (Web) ซึ่งอยู่ติดกับ Boundary Element ด้านตรงข้ามกับเครื่องกดน้ำหนักเกิดการแตกกะเทาะ (Spalling) หลุดออกมาเป็นวงกว้าง ทำให้เหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่อยู่บริเวณนั้นเกิดการโก่งเตาะ (Buckle) และทำให้ตัวอย่างทดสอบเกิดการสูญเสียกำลังในการรับน้ำหนักในที่สุด

ตารางที่ 3.5 ได้สรุปพฤติกรรมที่เกิดขึ้นทั้งหมดที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น, รูปที่ 3.13 แสดงรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น, รูปที่ 3.14 แสดงการเคลื่อนที่ด้านข้างตลอดความสูงของตัวอย่างทดสอบ และรูปที่ 3.15 แสดงการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งที่ขอบล่างสุดตลอดความกว้างของตัวอย่างทดสอบ

3.1.6 ตัวอย่างทดสอบที่ 6

รอยแตกร้าวครั้งแรกเริ่มสังเกตได้ในรอบที่ 1 เมื่อมีแรงกระทำด้านข้าง +20 ตัน และมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงประมาณ +1.28 มม. โดยจะเกิดรอยร้าวแนวนอนขึ้นในกำแพง (Web) ที่ระดับ 65 ซม. เหนือฐานกำแพง จากนั้นในรอบที่ 4 รอยร้าวเริ่มขยายขึ้นไปสู่บริเวณส่วนบน และส่วนล่างของตัวอย่างทดสอบ โดยจะมีแนวเอียงประมาณ 45 องศาเทียบกับแนวราบ และเหล็กเสริมรับแรงดัดใน Boundary Element ด้านที่ติดกับเครื่องกดน้ำหนักเริ่มคราก ขณะที่มีแรงด้านข้างกระทำกับตัวอย่างทดสอบ +49 ตัน ซึ่งสามารถวัดการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงได้ประมาณ +7.05 มม.

จากนั้นในรอบที่ 7 ซึ่งมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเป็น ±15.00 มม. รอยร้าวที่เกิดขึ้นทั้งในบริเวณกำแพง (Web) และใน Boundary Element เริ่มหนาแน่นขึ้นเรื่อยๆ จนเริ่มต่อเป็นเส้นเดียวกัน และคอนกรีตบริเวณด้านล่างของ Boundary Element ด้านที่อยู่ตรงข้ามกับเครื่องกดน้ำหนักเริ่มแตก (Crushing) ในรอบที่ 8 ซึ่ง

มีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเป็น +15.00 มม. และที่ระดับ 10-15 ซม. เหนือฐานกำแพง รอยแตกร้าวในกำแพง (Web) ส่วนนี้เริ่มมีความชันน้อยลง โดยมีแนวเอียงประมาณ 15-20 องศาเทียบกับแนวราบ และมีบางแนวที่รอยแตกร้าวเกือบจะอยู่ในแนวนอน จากนั้นในรอบที่ 10 ซึ่งมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเป็น ±22.50 มม. รอยแตกร้าวบริเวณด้านล่างของกำแพง (Web) เริ่มเปิดกว้างมากขึ้น โดยมีความกว้างของรอยแตกร้าวประมาณ 0.80-1.00 มม. ส่วนบริเวณด้านบนของกำแพงรอยแตกร้าวค่อนข้างแคบ คือมีความกว้างประมาณ 0.10-0.25 มม. เท่านั้น

ในรอบที่ 13 ซึ่งมีการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเป็น +30.00 มม. คอนกรีตใน Boundary Element ด้านที่อยู่ตรงข้ามกับเครื่องกดน้ำหนักมีการแตกกะเทาะ (Spalling) ออกมามากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งในรอบที่ 15 เมื่อการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงเป็น +30.00 มม. เหล็กเสริมรับแรงดัดใน Boundary Element ด้านที่อยู่ตรงข้ามกับเครื่องกดน้ำหนักเกิดการโก่งเดาะ (Buckle) จนทำให้เหล็กปลอก (Tied) ที่ทำหน้าที่โอบรัดเหล็กเสริมรับแรงดัดโก่งตัวออกมาด้วย ส่วนคอนกรีตใน Boundary Element ด้านที่ติดกับเครื่องกดน้ำหนักมีการแตกกะเทาะ (Spalling) หลุดออกมาเล็กน้อย และตัวอย่างทดสอบก็เริ่มเกิดการสูญเสียกำลังรับน้ำหนักในรอบที่ 16 ซึ่งการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับ 2.10 ม. เหนือฐานกำแพงกำลังเข้าสู่ -37.50 มม.

ตารางที่ 3.6 เป็นการสรุปพฤติกรรมที่เกิดขึ้นทั้งหมดที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น, รูปที่ 3.16 แสดงรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น, รูปที่ 3.17 แสดงการเคลื่อนที่ด้านข้างตลอดความสูงของตัวอย่างทดสอบ และรูปที่ 3.18 แสดงการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งที่ขอบล่างสุดตลอดความกว้างของตัวอย่างทดสอบ

3.2 รูปแบบการวิบัติ

รูปแบบของการวิบัติที่สังเกตได้ในการทดสอบนี้มี 3 แบบที่แตกต่างกันคือ การวิบัติเนื่องจากแรงอัดในแนวทแยง (Diagonal Compression Failure) หรือที่เรียกว่า การวิบัติแบบ Web Crushing, การวิบัติเนื่องจาก Sliding Shear และการวิบัติเนื่องจากแรงดัด (Flexural Failure)

3.2.1 การวิบัติเนื่องจากแรงอัดในแนวทแยง

การวิบัติชนิดนี้จะเกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบที่ 1, 2 และ 3 ซึ่งเป็นตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในกำแพงอยู่ในแนวนอนและแนวดิ่งตามปกติ โดยไม่มีการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนในแนวทแยง การวิบัติแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อคอนกรีตในกำแพงต้องรับแรงเฉือนจำนวนมาก จากนั้นแรงเฉือนจะถ่ายผ่านแท่ง Struts ที่รับแรงอัด ซึ่งเกิดขึ้นในแนวทแยงลงสู่ฐานกำแพง และเมื่อมีแรงเฉือนแบบเป็นวัฏจักรกระทำก็จะทำให้กำแพงเกิดแท่ง Struts ทั้งสองด้านไขว้กันเป็นรูปกากบาท โดยที่แท่ง Struts ด้านหนึ่งจะเกิดแรงอัด หรือที่เรียกว่า Compressive Struts ส่วนแท่ง Struts อีกด้านหนึ่งจะเกิดแรงดึง และเมื่อแรงเฉือนในกำแพงมีค่าสูงมากๆ ก็จะทำให้มีความเครียดเฉือน (Shear Strain) จำนวนมากเกิดขึ้นในบริเวณส่วนล่างของกำแพง ซึ่งจะเป็นผลให้กำแพงเกิดการเสียรูปในลักษณะของแรงเฉือน (Shear Deformation) และประกอบกับแรงอัดใน Compressive Struts ที่มีค่าสูงอยู่แล้ว เมื่อรวมกับผลของการกระทำซ้ำซากจากแรงด้านข้างแบบเป็นวัฏจักร ก็จะทำให้คอนกรีตในบริเวณด้านล่างของ Compressive Struts เกิดถึงจุดวิบัติด้วยแรงอัดดังแสดงในรูปที่ 3.1, 3.4 และ 3.7

3.2.2 การวิบัติเนื่องจาก Sliding Shear

การวิบัติชนิดนี้จะเกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบที่ 4 ซึ่งเป็นตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในกำแพง ทั้งในแนวดิ่งและแนวนอน ในปริมาณต่ำสุดที่กำหนดใน ACI Building Code (7) ส่วนแรงเฉือนจะถูกถ่ายโดยการใช้เหล็กเสริม 4DB20 ซึ่งเสริมในแนวทแยงทั้งสองทิศทาง ทั้งส่วนบนและส่วนล่างของกำแพงและเป็นที่ทราบกันดีว่า กลไกการถ่ายแรงเฉือนผ่านรอยแตกร้าวในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมี 2 วิธีคือ การเกาะเกี่ยวกันของมวลรวม (Aggregate Interlock) และปฏิกิริยาของเหล็กเดือย (Dowel Action) ดังนั้นเมื่อตัวอย่างทดสอบได้รับแรงกระทำจนถึงช่วงอินอีลาสติก และได้รับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรกระทำย้อนกลับไปมาแล้ว รอยแตกร้าวตรงรอยต่อระหว่างตัวกำแพงกับฐานกำแพงก็จะเปิดกว้างมากขึ้น ทำให้ความสามารถในการถ่ายแรงเฉือนโดยการเกาะเกี่ยวกันของมวลรวม และปฏิกิริยาของเหล็กเดือยลดลง ประกอบกับในตัวอย่างทดสอบนี้ได้ใช้เหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวดิ่งในปริมาณต่ำสุดดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จึงทำให้ปฏิกิริยาของเหล็กเดือยที่เกิดขึ้นน้อยกว่าในตัวอย่างทดสอบที่ 1, 2 และ 3 ดังนั้นจึงทำให้ตัวอย่างทดสอบนี้เกิดการวิบัติด้วย Sliding Shear ที่ฐานของกำแพง และคอนกรีตในบริเวณกำแพงของตัวอย่างทดสอบนี้มีความเสียหายเกิดขึ้นน้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 3.10

3.2.3 การวิบัติเนื่องจากแรงดัด

การวิบัติชนิดนี้จะเกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบที่ 5 และ 6 ซึ่งเป็นตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในกำแพงกระจายอยู่ในแนวทแยงทั้งสองทิศทาง โดยไม่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวดิ่งและแนวนอน และดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.2.1 คือ เมื่อกำแพงต้องรับแรงเฉือนแบบเป็นวัฏจักร จะทำให้เกิดแท่ง Struts ขึ้นสองด้านซึ่งมีลักษณะไขว้กันเป็นรูปกากบาท โดยที่แท่ง Struts ด้านหนึ่งจะเกิดแรงอัด หรือที่เรียกว่า Compressive Struts ส่วนแท่ง Struts อีกด้านหนึ่งจะเกิดแรงดึง และเมื่อกำแพงมีการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนในแนวทแยงคล้ายกับการเกิดแท่ง Struts เหล็กเสริมในแนวทแยงดังกล่าวจะทำหน้าที่ช่วยรับแรงดึงในแนวทแยงที่เกิดขึ้นในแท่ง Struts ที่รับแรงดึง และจะช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดให้กับ Compressive Struts นอกจากนี้เหล็กเสริมในแนวทแยงยังช่วยลดความเครียดเฉือน (Shear Strain) ที่เกิดขึ้นในบริเวณส่วนล่างของกำแพง ซึ่งจะเป็นผลให้กำแพงเกิดการเสียรูปในลักษณะของแรงดัด (Flexural Deformation) แทนที่จะเกิดการเสียรูปในลักษณะของแรงเฉือน (Shear Deformation) และในที่สุดกำแพงก็จะเกิดการวิบัติด้วยแรงดัด (Flexural Failure)

ดังนั้นจากที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นจะเห็นได้ว่า ในตัวอย่างทดสอบที่ 5 และ 6 ลักษณะการวิบัติจะเกิดขึ้นโดย คอนกรีตในบริเวณกำแพง (Web) ไม่เกิดการแตก (Crushing) แต่จะมีเฉพาะรอยแตกร้าวในแนวทแยงเกิดขึ้นเท่านั้น ส่วนใน Boundary Element ทั้งสองด้านของตัวอย่างทดสอบ คอนกรีตบริเวณด้านล่างจะเกิดการแตก (Crushing) เป็นวงกว้าง และทำให้เหล็กเสริมรับแรงดัดใน Boundary Element ด้านหนึ่งเกิดการยืดตัว ส่วนเหล็กเสริมรับแรงดัดใน Boundary Element อีกด้านหนึ่งจะเกิดการโก่งเดาะ (Buckle) สลับกัน จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการสูญเสียกำลังในการรับน้ำหนัก และเกิดการวิบัติด้วยแรงดัด (Flexural Failure) ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และ 3.16

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย