

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

ในบทนี้ ได้ทำการบรรยายและอธิบายถึงผลการทดสอบของเสาตัวอย่างทั้ง 3 ตัวอย่าง ภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร โดยจะได้อธิบายถึงผลการทดสอบต่างๆ ดังนี้ พฤติกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบของตัวอย่าง รูปแบบรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น แสดงผลการทดสอบในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ต่างๆ ได้แก่ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง ความสามารถในการสลายพลังงานและค่าความเหนียวของตัวอย่างทดสอบ ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ที่กระทำกับค่าความโค้ง ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเปลี่ยนรูปเนื่องจากแรงเฉือน ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กเสริมทางขวางกับแรงกระทำด้านข้าง นอกจากนั้นยังได้เปรียบเทียบถึงผลของปริมาณเหล็กเสริมตามขวาง ที่มีต่อพฤติกรรมของเสาตัวอย่างอีกด้วย

4.1 พฤติกรรมต่างๆ ของเสาคอนกรีตที่สังเกตได้ในระหว่างการทดสอบ

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอ พฤติกรรมทั่วไปที่สังเกตได้ในระหว่างการทดสอบเสาคอนกรีตภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรของแต่ละตัวอย่างทดสอบ ระดับความเสียหายในแต่ละอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างต่อความสูงของเสา องค์ประกอบของการเสียรูปที่เกิดจากแรงดัด จากรอยต่อเคลื่อนและแรงเฉือน ค่าความโค้งที่เกิดตามความสูงของเสาตัวอย่างทดสอบ พฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบก่อนและหลังแรงกระทำด้านข้างสูงสุด รูปแบบการวิบัติ ตำแหน่งและระยะความสูงจากโคนเสาที่เกิดการโก่งเดาะที่เกิดขึ้น ผลของแรงอัดตามแนวแกนที่ทำให้กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของหน้าตัดลดลง ($P\Delta$ effect) และระยะการเคลื่อนที่ในแนวแกนของเสาตัวอย่าง ตำแหน่งการวิบัติเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกในจากแรงโน้มถ่วง (gravity load collapse)

4.1.1 เสาตัวอย่างทดสอบ S1

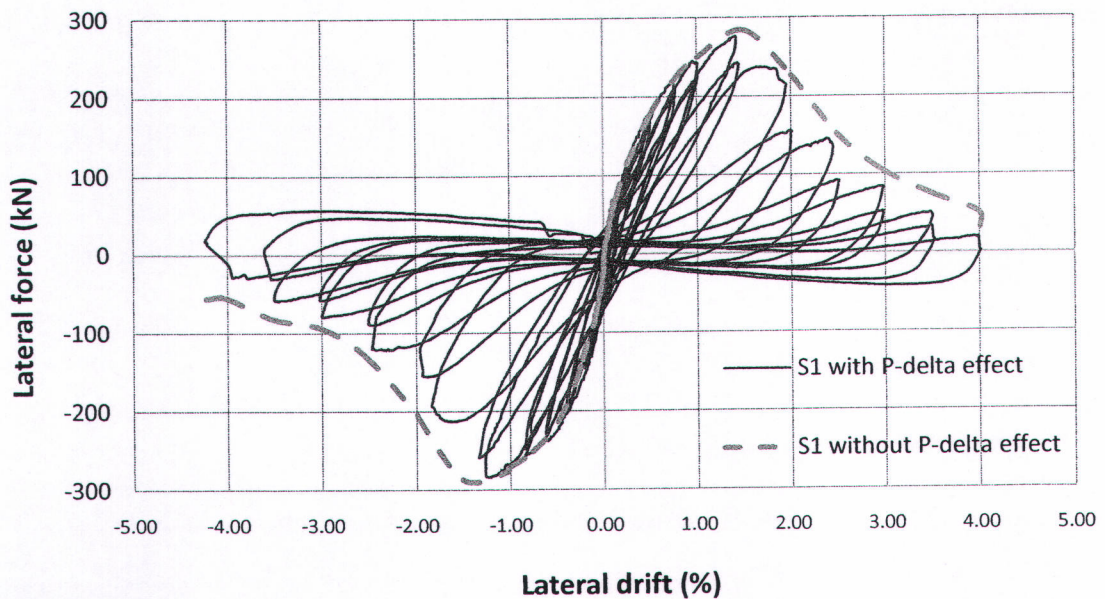
4.1.1.1 ผลการทดสอบเสาตัวอย่างทดสอบ S1

จากการทดสอบพบว่าเสาตัวอย่างทดสอบ S1 มีระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างที่เหล็กเสริมเส้นแรกเกิดการคราก เท่ากับ 15.50 มม. ที่อัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างประมาณ 1.00% ต่อความสูง มีระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างที่จุดคราก (75% secant approach) เท่ากับ 13.25 มม. ที่อัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างประมาณ 0.9% ต่อความสูง และแรงกระทำด้านข้างที่จุดคราก เท่ากับ 131.2 กิโลนิวตัน โดยที่มีระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดเท่ากับ 63.31 มม. ที่อัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างประมาณ 4.00% ต่อความสูง และแรงกระทำด้านข้างสูงสุด เท่ากับ 283.9 กิโลนิวตัน ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แรงกระทำด้านข้าง, โมเมนต์ดัดและระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวอย่าง S1

แรงกระทำ ด้านข้าง (kN)	แรงกระทำด้านข้างที่เกิดรอยแตกร้าวเริ่มแรก (P_{cr})	90.3
	แรงกระทำด้านข้างที่จุดคราก (P_y)	131.2
	แรงกระทำด้านข้างสูงสุด (P_m)	283.9
	แรงกระทำด้านข้างที่ลดลง $0.8 P_{max}$ (P_{δ_m})	227.1
โมเมนต์ดัด (kN-m)	โมเมนต์ดัดที่ทำให้เริ่มเกิดรอยแตกร้าว (M_{cr})	135.5
	โมเมนต์ดัดที่จุดคราก (M_y)	196.8
	โมเมนต์ดัดสูงสุด (M_m)	425.9
	โมเมนต์ดัดที่ $0.8 P_{max}$ (M_{δ_m})	340.7
ระยะการเคลื่อนตัว ด้านข้าง, มม.(%drift)	ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างที่เกิดรอยแตกร้าวเริ่มแรก (δ_{cr})	1.88(0.125%)
	ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างที่เหล็กเสริมถึงจุดคราก (δ_{yi})	15.50(1.00%)
	ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างที่จุดคราก (δ_y)	13.25(0.90%)
	ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างที่แรงกระทำด้านข้างสูงสุด (δ_{P_m})	21.75 (1.45%)
	ระยะการเคลื่อนตัวที่สูญเสียความต้านทานด้านข้าง หรือที่ $0.8 P_{max}$ (δ_m)	29.95 (2.0%)
	ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างที่เกิดการวิบัติ ($\delta_{collapse}$)	63.31 (4.0%)

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเคลื่อนด้านข้างของความสูงกับแรงกระทำทางด้านข้างของเสา แสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าตัวอย่างเสาคอนกรีตวิบัติแบบเฉือน โดยในช่วงแรกเสามีสติฟเนสสูง เมื่อทดสอบถึงการเคลื่อนตัวด้านข้างค่าประมาณ 1.50% ของความสูง จะได้ค่าแรงกระทำด้านข้างสูงสุดเท่ากับ 283.9 กิโลนิวตัน และหลังจากนั้นน้ำหนักที่กระทำด้านข้างเริ่มลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดการโก่งเดาะสูงขึ้นมาจากฐานคอนกรีต 600 มม. โดยพฤติกรรมของเสาตัวอย่างไม่ค่อยไม่เสถียรภาพมากนัก ซึ่งระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดเท่ากับ 63.31 มม. ที่การเคลื่อนตัวด้านข้างค่าประมาณ 4.00% ของความสูง ตลอดจนเสาเกิดการวิบัติที่รุนแรงและอันตราย เนื่องจากเป็นการวิบัติแบบเฉือน ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเคลื่อนด้านข้างของความสูงกับแรงกระทำทางด้านข้างของตัวอย่าง S1



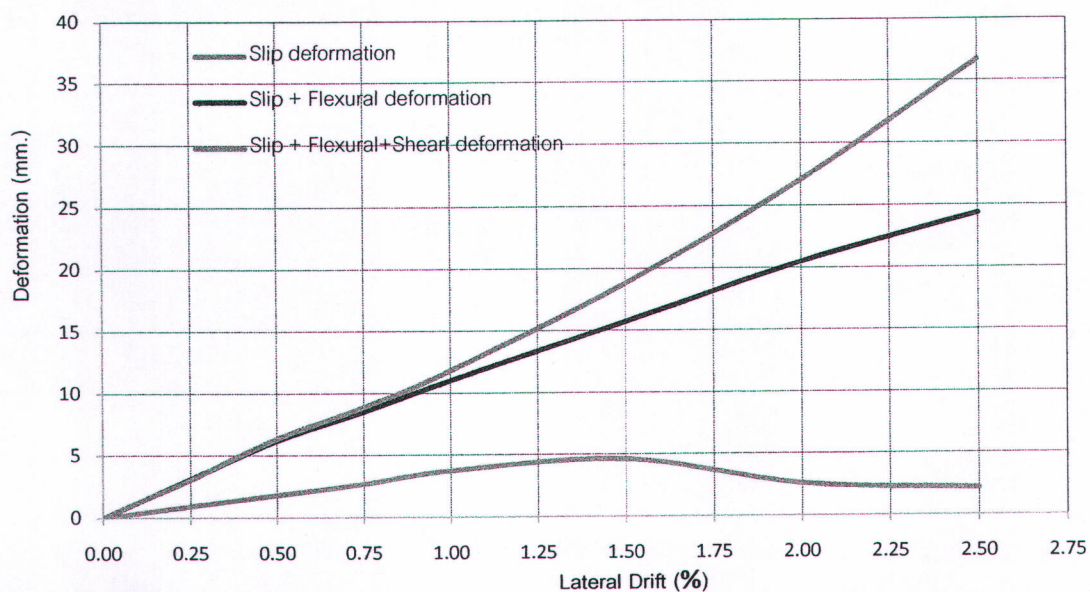
รูปที่ 4.2 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่าง S1 หลังการทดสอบ

4.1.1.2 ระดับความเสียหายในแต่ละอัตราการเคลื่อนตัวด้านข้างต่อความสูงของตัวอย่าง S1

ในช่วงแรกนั้นพบว่ารอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นไม่มากนัก โดยเริ่มเห็นรอยแตกร้าวที่การเคลื่อนตัวด้านข้างมีค่าประมาณ 0.25% ของความสูง มีลักษณะเป็นเส้นตรงขวางกับเสา และจะมีรอยแตกร้าวมากขึ้นตามระยะการเคลื่อนตัวด้านข้าง รอยแตกร้าวที่มีลักษณะเป็นเส้นทแยงจะเกิดขึ้นที่การเคลื่อนตัวด้านข้างค่าประมาณ 0.75% ของความสูง จะเริ่มเกิดการหลุดร่อนเป็นชิ้นเล็กๆ ของคอนกรีตบริเวณกึ่งกลางของเสาที่การเคลื่อนตัวด้านข้างค่าประมาณ 1.00% ของความสูง การเคลื่อนตัวด้านข้างค่าประมาณ -1.50% ของความสูง มีการรอยแตกเป็นแนวทแยงยาวขึ้นและมีรอยแตกหลุดร่อนที่บริเวณโคนเสา การเคลื่อนตัวด้านข้างค่าประมาณ 2.00% ของความสูง มีการเกิดที่มีขนาดใหญ่และคอนกรีตหลุดร่อนออกมาเป็นก้อน โดยที่คอนกรีตหลุดร่อนจนเริ่มเห็นเหล็กเสริมในเสาคอนกรีต และการหลุดร่อนของคอนกรีตจะเพิ่มมากขึ้นตามระยะการเคลื่อนตัวด้านข้าง โดยจุดที่เกิดเหล็กเสริมตามแนวยาวเกิดการวิบัติลักษณะโก่งเดาะ เนื่องจากน้ำหนักบรรทุก ที่การเคลื่อนตัวด้านข้าง 2.00% ของความสูง ซึ่งคอนกรีตที่ห่อหุ้มเหล็กเสริมในเสาเกิดการวิบัติแตกออกเนื่องจากการม้วนและดึงกลับ ในลักษณะการให้แรงแบบวัฏจักร และเสาคอนกรีตเสริมเหล็กไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุก

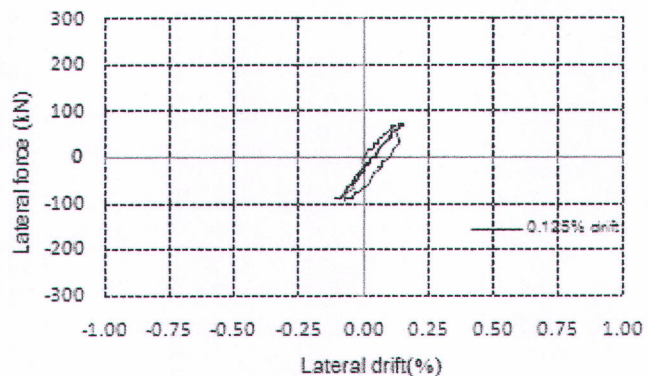
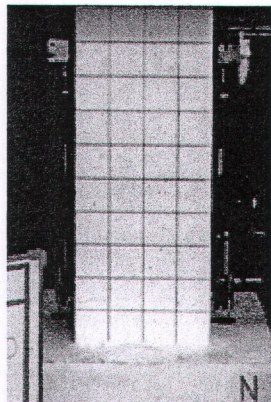
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของการเสียรูปด้านข้างในแต่ละสถานะของตัวอย่าง S1

อัตรา การเคลื่อนที่	การเสียรูป จากแรงดัด (%)	การเสียรูป จากรอยต่อเคลื่อน (%)	การเสียรูป จากแรงเฉือน (%)	รวม (%)
0.125%	58.67	24.75	0.46	83.87
0.25%	58.51	24.75	1.14	82.11
0.50%	58.07	24.36	2.23	84.66
0.75%	51.67	23.97	3.31	78.96
1.00%	48.63	24.94	5.40	78.97
1.50%	49.42	20.49	13.71	83.63
2.00%	59.60	8.70	22.01	90.32
2.50%	59.20	5.80	32.96	97.96

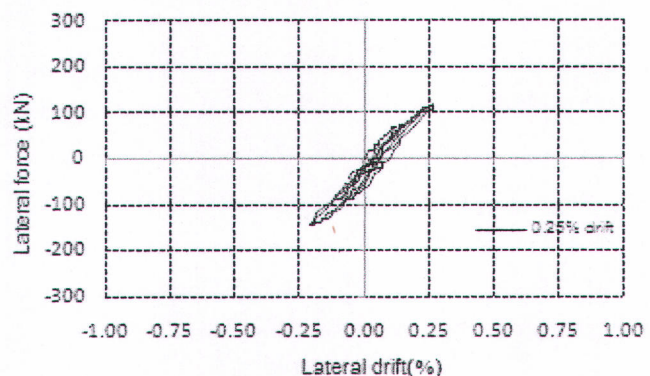
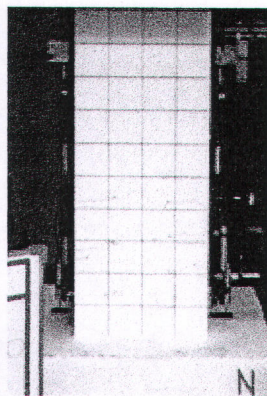


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของการเสียรูปด้านข้างในแต่ละองค์ประกอบกับร้อยละอัตราเคลื่อนที่ด้านข้าง ของเสาตัวอย่าง S1

ในแนวดิ่งได้อีกที่การเคลื่อนตัวด้านข้าง 4.00% ของความสูง โดยตารางที่ 4.2 แสดงถึงองค์ประกอบของการเสียรูปที่เกิดจากการเคลื่อนตัวด้านข้างจากแรงดัด, จากรอยต่อเคลื่อนและจากแรงเฉือน ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของการเสียรูปด้านข้างในแต่องค์ประกอบกับร้อยละอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งรูประดับความเสียหายในแต่ละร้อยละอัตราการเคลื่อนตัวด้านข้างต่อความสูงของตัวอย่าง S1 จะแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.4

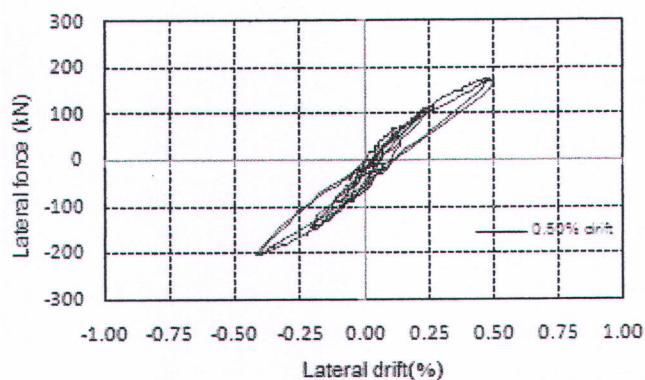
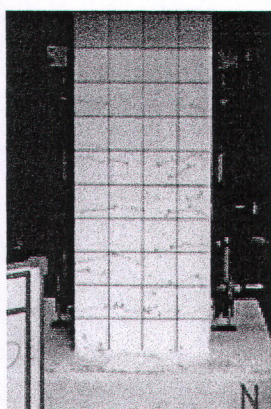


(ก) ที่ 0.125% drift (ระยะการเคลื่อนที่ ± 1.88 มม.)

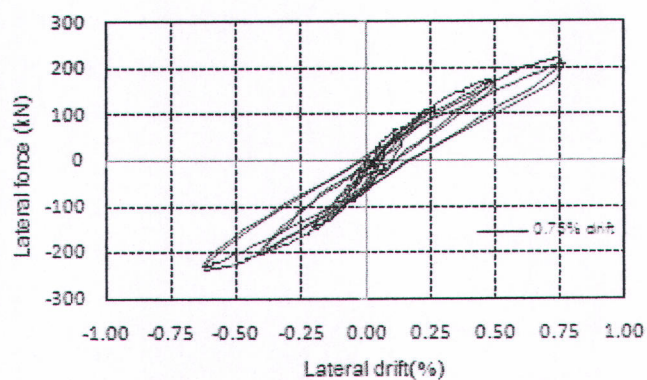
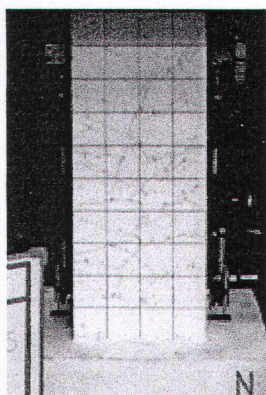


(ข) ที่ 0.25% drift (ระยะการเคลื่อนที่ ± 3.75 มม.)

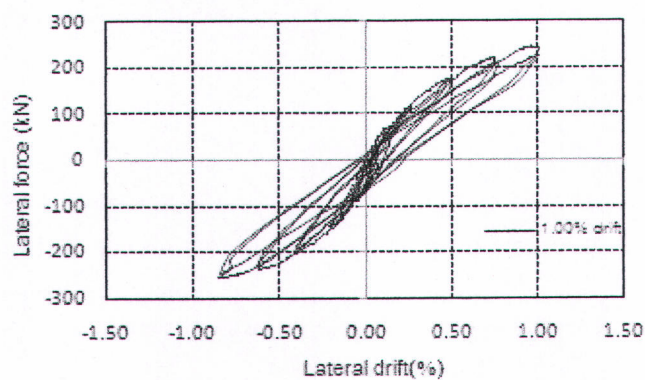
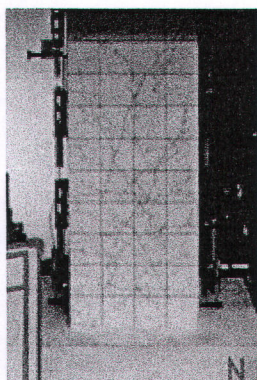
รูปที่ 4.4 ระดับความเสียหายในแต่ละอัตราการเคลื่อนตัวด้านข้างต่อความสูงของตัวอย่าง S1



(ค) ที่ 0.50% drift (ระยะการเคลื่อนที่ ± 7.50 มม.)

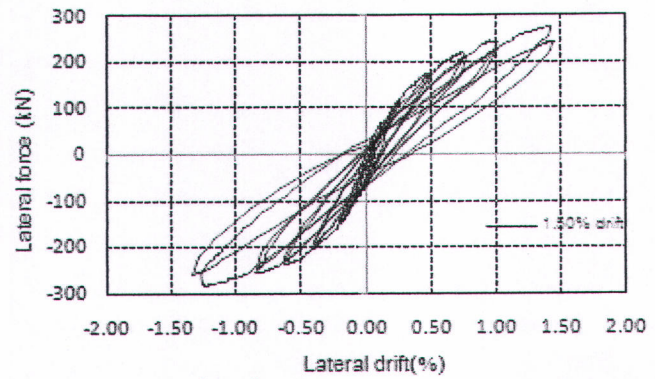
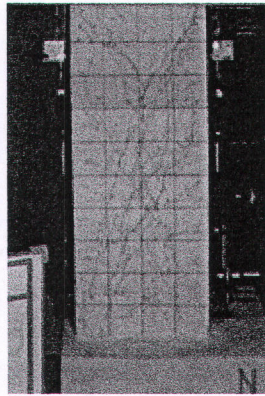


(ง) ที่ 0.75% drift (ระยะการเคลื่อนที่ ± 11.25 มม.)

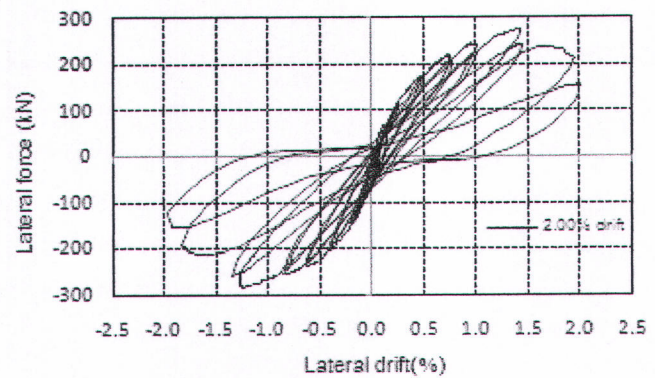
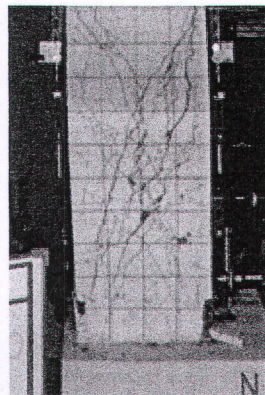


(จ) ที่ 1.00% drift (ระยะการเคลื่อนที่ ± 15.00 มม.)

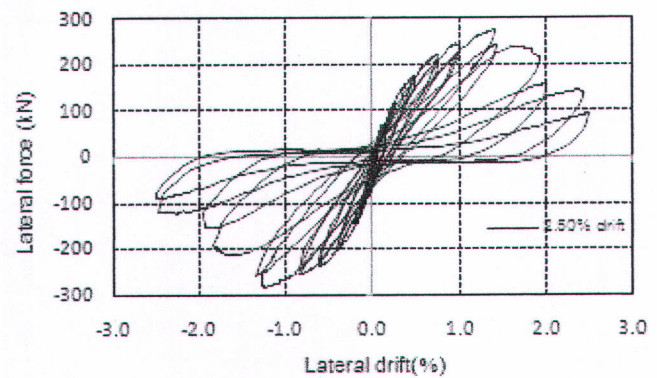
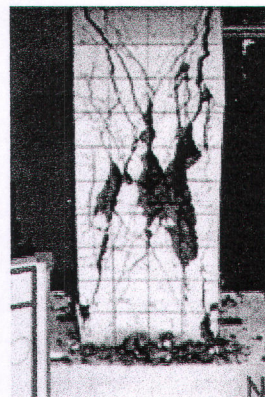
รูปที่ 4.4 ระดับความเสียหายในแต่ละอัตราการเคลื่อนตัวด้านข้างต่อความสูงของตัวอย่าง S1 (ต่อ)



(ฉ) ที่ 1.50% drift (ระยะการเคลื่อนที่ ± 22.50 มม.)

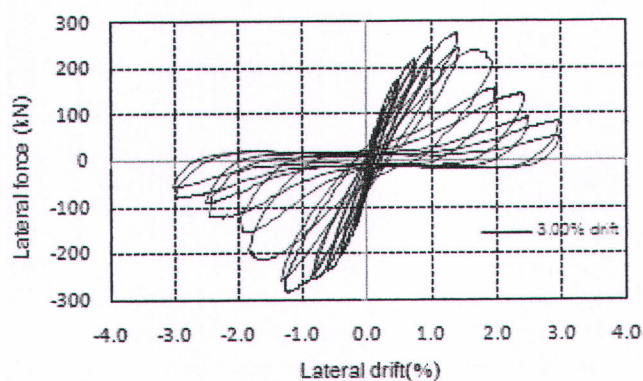
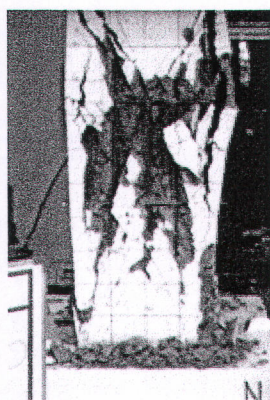


(ซ) ที่ 2.00% drift (ระยะการเคลื่อนที่ ± 30.00 มม.)

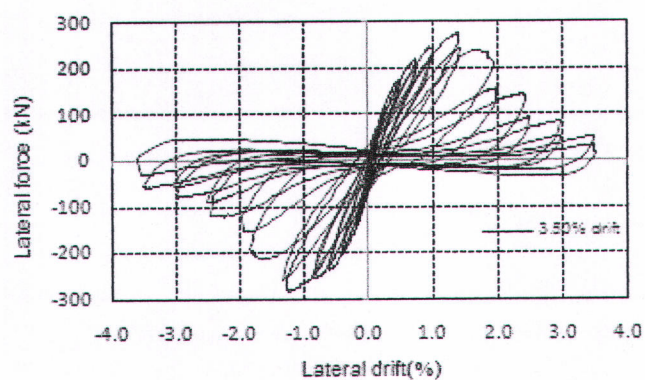


(ช) ที่ 2.50% drift (ระยะการเคลื่อนที่ ± 37.50 มม.)

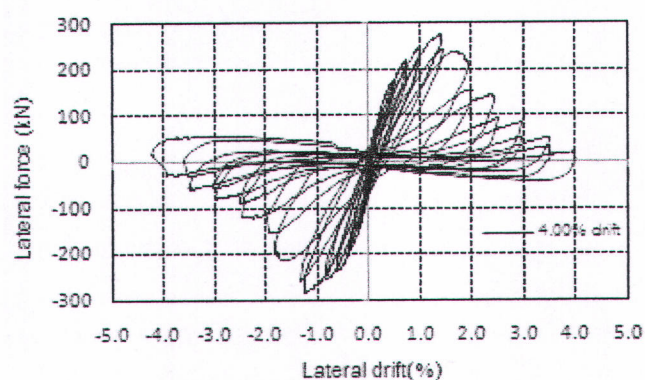
รูปที่ 4.4 ระดับความเสียหายในแต่ละอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างต่อความสูงของตัวอย่าง S1 (ต่อ)



(ณ) ที่ 3.00% drift (ระยะการเคลื่อนที่ ± 45.00 มม.)



(ญ) ที่ 3.50% drift (ระยะการเคลื่อนที่ ± 52.50 มม.)

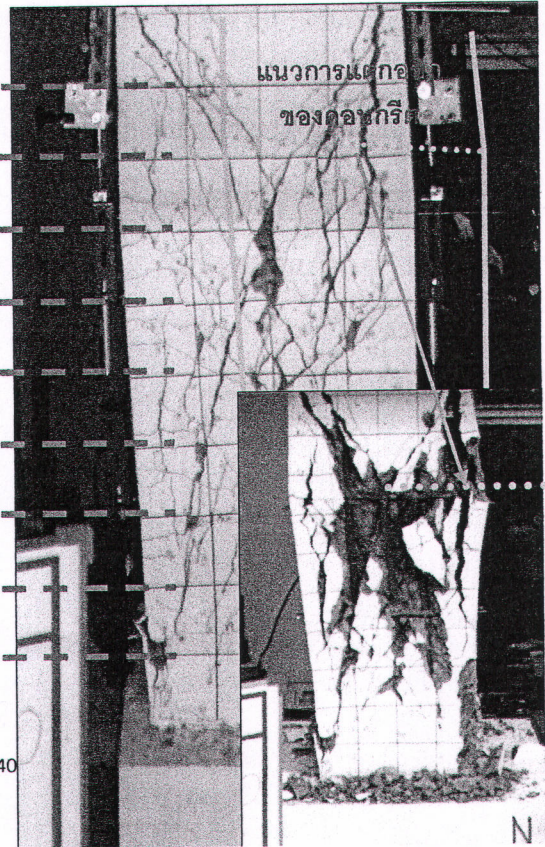
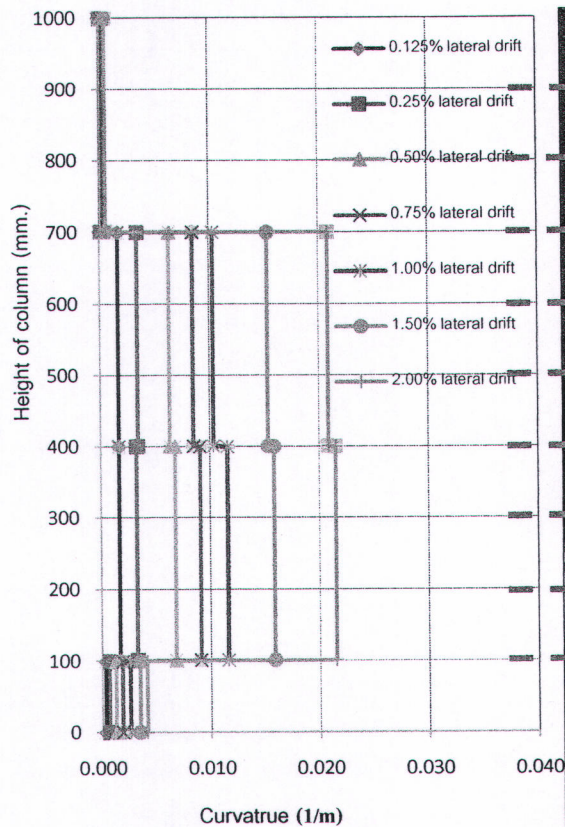


(ฏ) ที่ 4.00% drift (ระยะการเคลื่อนที่ ± 60.00 มม.)

รูปที่ 4.4 ระดับความเสียหายในแต่ละอัตราการเคลื่อนที่ตัวด้านข้างต่อความสูงของตัวอย่าง S1 (ต่อ)

4.1.1.3 ความโค้งของเสาตัวอย่างทดสอบ S1

การวัดค่าความโค้งของเสาตัวอย่าง ทำการวัดโดยใช้เครื่องวัดแบบไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่ด้านข้างเสาตามความสูงของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งสามารถหาได้ตามสมการที่ 3.5 โดยรูปที่แสดงค่าความโค้งตามความสูงของเสาตัวอย่างทดสอบ ซึ่งพบว่า ในช่วงแรกของร้อยละอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างค่าความโค้งของเสาคอนกรีตยังมีค่าไม่มากนัก และเมื่อร้อยละอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างเพิ่มขึ้นขึ้น ที่การเคลื่อนที่ด้านข้างค่าประมาณ 1.50% ของความสูง และที่การเคลื่อนที่ด้านข้างค่าประมาณ



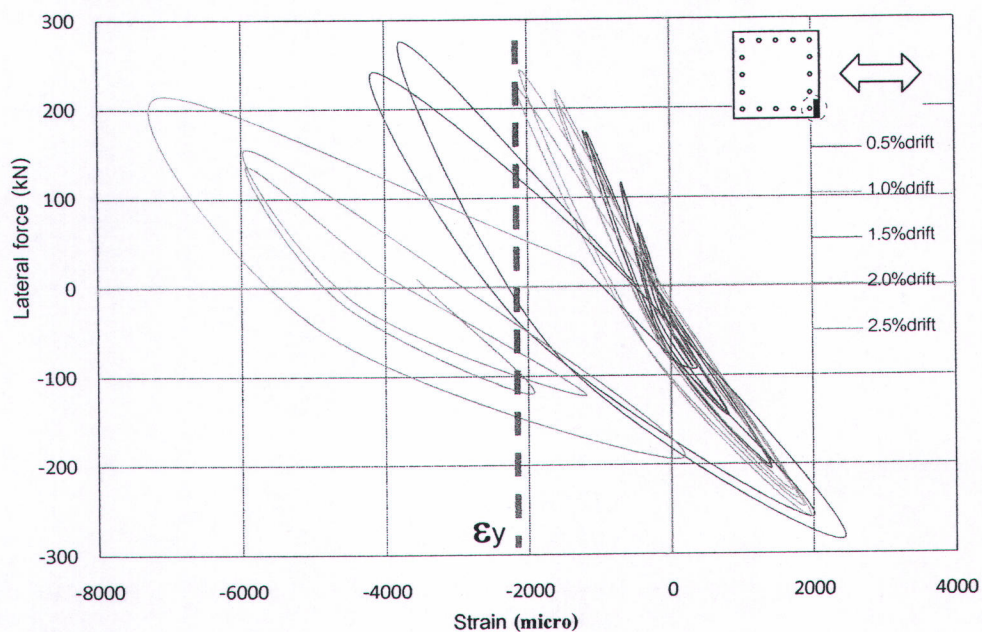
รูปที่ 4.5 แสดงค่าความโค้งตามความสูงของเสาตัวอย่างทดสอบ S1

2.00% ของความสูง มีค่าความโค้งที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน และเกิดแตกร้าวนหลุดร่อนของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมเป็นแนวขนาดก้นแนวการให้แรงทางด้านข้าง เนื่องจากน้ำที่กักตักบนหัวเสา คอนกรีตเสริมเหล็กและการเคลื่อนที่ด้านข้างของหัวเสาที่มากขึ้น โดยการผลักและดึงกลับของเครื่องให้แรงด้านข้าง(actuator) ดังแสดงรูปที่ 4.5 แสดงถึงค่าความโค้งตามความสูงของเสาดัวอย่างทดสอบ S1 เปรียบเทียบกับรูปที่เกิดการแตกร้าวนขึ้นตามความสูงของเสาดัวอย่าง

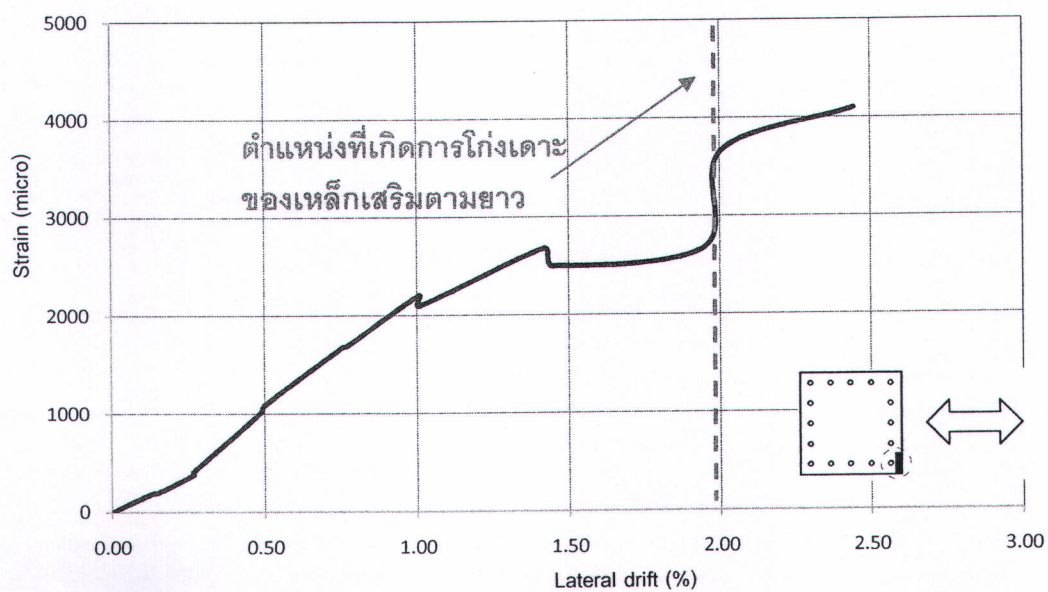
4.1.1.4 ความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่าง S1

การวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาว ทำการวัดจากเกจวัดความเครียดที่ติดไว้ในเหล็กเสริมของตัวอย่างทดสอบ S1 ซึ่งแสดงตำแหน่งของเกจวัดความเครียดในรูปที่ 3.7 จากค่าความเครียดที่วัดได้สามารถได้กราฟความความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาว ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งติดตั้งที่ตำแหน่ง 50 มม.จากฐาน โดยความความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมมีประโยชน์มากในประเมินการถ่ายเทความเครียดระหว่างเหล็กเสริมตามยาวกับคอนกรีต เหล็กเสริมตามยาวถึงจุดครากที่การเคลื่อนตัวด้านข้างค่าประมาณ 1.00% ของความสูง ซึ่งมีความเครียดที่จุดคราก ประมาณ 2573 ไมโคร(micro)ของความเครียด โดยหลังจากการเคลื่อนตัวด้านข้างค่าประมาณ 1.50% ของความสูง ค่าความเครียดมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้คอนกรีตการแตกร้าวนที่กว้างขึ้น มีการหลุดร่อนออกของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม

ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละอัตราการเคลื่อนตัว(%drift) กับค่าความเครียด แสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งตำแหน่งของเกจวัดความเครียดอยู่ขึ้นมาจากฐานคอนกรีต 550 มม. ที่การเคลื่อนตัวด้านข้างค่าประมาณ 2.00% ของความสูง จากนั้นเหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะขึ้น เนื่องจากคอนกรีตที่หุ้มเกิดการหลุดร่อนออก ซึ่งตำแหน่งที่เกิดการโก่งเดาะอยู่สูงขึ้นมาจากฐานประมาณ 600 มม. แสดงในรูปที่ 4.2 และค่าความเครียดที่บันทึกได้มีค่าที่ไม่ถูกต้องโดยค่าความเครียดบางส่วนนั้นไม่สามารถบันทึกค่าได้ เนื่องจากการแตกร้าวนที่เพิ่มมากขึ้นจาก การให้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักรซ้ำไปซ้ำมาหลายรอบ ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมลดลงเป็นเหตุให้เกิดการหลุดของเกจวัดความเครียด และที่การเคลื่อนตัวด้านข้างค่าประมาณ 4.00% ของความสูง เสาดัวอย่างทดสอบได้วิบัติด้วยน้ำหนักรบรรทุกจากแรงโน้มถ่วงในแนวดิ่ง



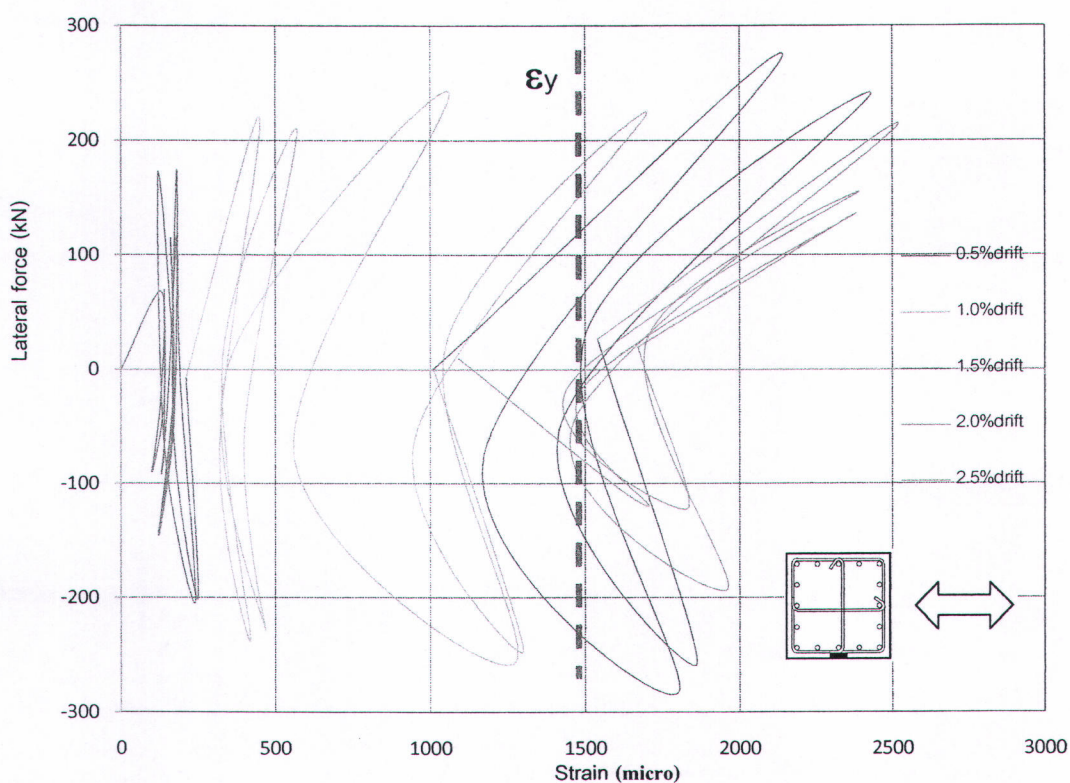
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริม
ตามยาวของตัวอย่าง S1



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละอัตราการเคลื่อนตัว(%drift) กับความเครียด
ในเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่าง S1

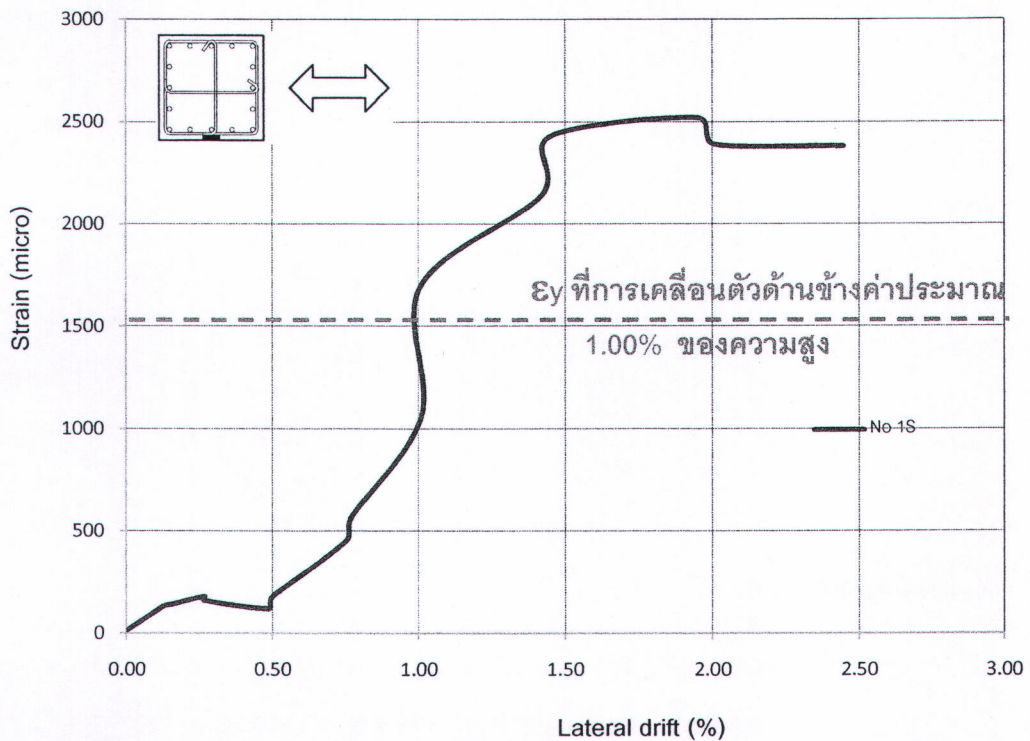
4.1.1.5 ความเครียดในเหล็กเสริมตามขวางของตัวอย่าง S1

ในการวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามขวาง ได้ทำติดตั้งเกจวัดความเครียดไว้ในเหล็กเสริมตามขวางของแต่ละชั้นของเหล็กเสริม ที่ระยะ 150 มม. 450 มม. และ 750 มม. จากฐาน ซึ่งแสดงตำแหน่งของเกจวัดความเครียดในรูปที่ 3.8 โดยค่าความเครียดที่วัดได้สามารถได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามขวาง ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามขวาง
ของตัวอย่าง S1

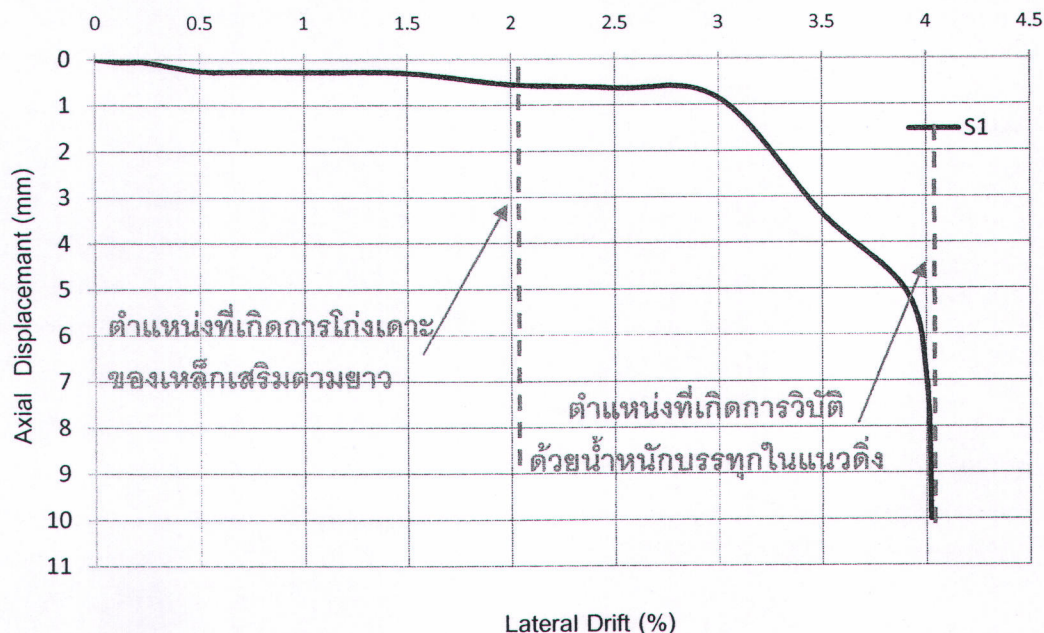
ซึ่งติดตั้งจากฐานขึ้นมา 150 มม. ทางทิศทางทิศใต้ โดยพฤติกรรมที่เราสามารถพบนั้น ค่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวาง ค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งอาจมีรูปร่างคล้ายรูปพระจันทร์เสี้ยว โดยสังเกตได้ว่า มีการถ่ายเทแรงจากคอนกรีตไปสู่เหล็กเสริมตามขวางเกิดขึ้นอย่างฉับพลัน เนื่องจากการวิบัติแบบเฉือน และในรูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละอัตราการเคลื่อนตัว (%drift) กับความเครียดในเหล็กเสริมตามขวางทางทิศใต้ ที่ตำแหน่ง 150 มม. จากฐานของเสา ตัวอย่างทดสอบ ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนเหล็กเสริมตามขวางถึงจุดครากที่การเคลื่อนตัวด้านข้าง ค่าประมาณ 1.00% ของความสูง ซึ่งมีความเครียดที่จุดคราก ประมาณ 1495 ไมโคร(micro)ของความเครียด โดยหลังจากการเคลื่อนตัวด้านข้างค่าประมาณ 2.50% ของความสูง ค่าความเครียดมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนไม่สามารถวัดค่าความเครียดไม่ได้ เนื่องจากความพยายามผลักดันของเหล็กเสริมตามยาวจนเกิดการโก่งเดาะ ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกหลุดร่อนและการฉีกออกของเหล็กเสริมตามขวาง



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละอัตราการเคลื่อนตัว (%drift) กับความเครียด
ในเหล็กเสริมตามขวางของตัวอย่าง S1

4.1.1.6 การเสียรูปในแนวแกนของตัวอย่าง S1

การเสียรูปในแนวแกนหรือระยะการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของเสาคอนกรีตนั้นมีความสำคัญมาก ในการนำข้อมูลการเคลื่อนที่ดังกล่าว มาวิเคราะห์การวิบัติเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่ง การโก่งเดาะวิบัติของเหล็กเสริมในแนวยาวได้ โดยในระหว่างการทดสอบได้สังเกตเห็นการเคลื่อนตัวในแนวแกนมีการเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตั้งแต่เริ่มการทดสอบจน ถึงการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ 2.00% ของความสูง เริ่มเกิดการโก่งเดาะขึ้นซึ่งวัดจากค่าความเครียดที่ได้ทำการบันทึกไว้ ทำให้ยังการเคลื่อนตัวในแนวแกนมีค่าประมาณ 0.7 มม. การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ 3.00% ของความสูง ระยะการเคลื่อนตัวในแนวแกนมีการเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน เนื่องจากคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมตามยาวได้แตกหลุดออกเป็นพื้นที่กว้างจำนวนมากโดยรอบเสา ทำให้เหล็กเสริมตามยาวเกิดการเร่งการโก่งเดาะ และการวิบัติจากน้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่งเกิดขึ้นที่การเคลื่อนที่ด้านข้างเท่ากับ 4% ของความสูง ดังแสดงในรูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเคลื่อนที่ด้านข้างของความสูงกับระยะการเคลื่อนตัวในแนวแกนของ ตัวอย่าง S1



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเคลื่อนที่ด้านข้างต่อความสูงกับระยะการเคลื่อนตัวใน แนวแกนของตัวอย่าง S1

4.1.2 เสาตัวอย่างทดสอบ S2s

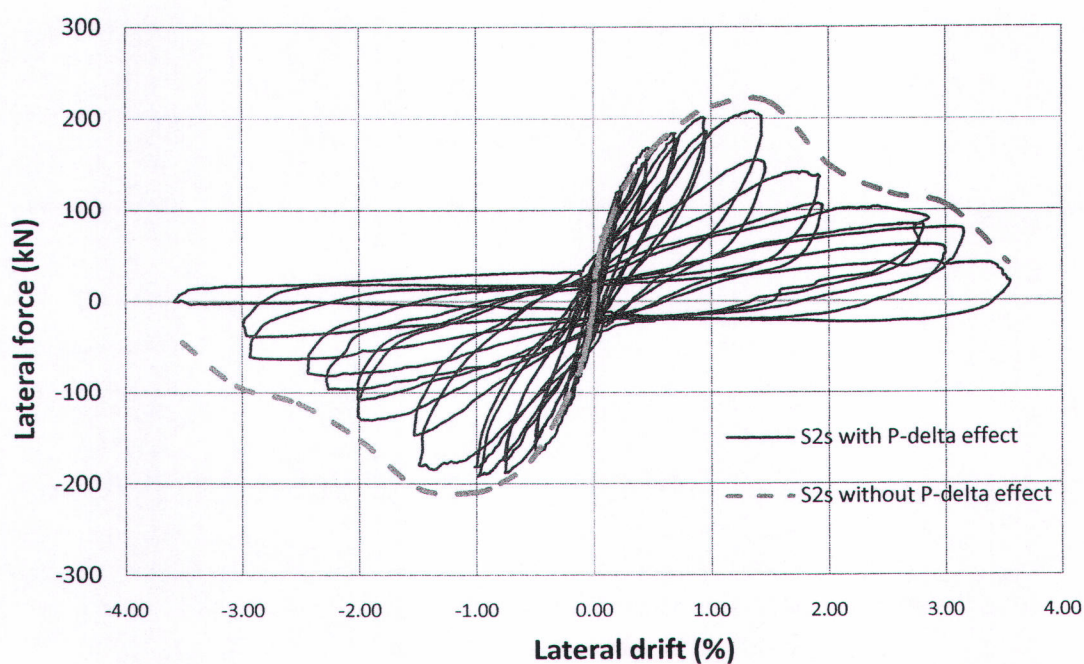
4.1.2.1 ผลการทดสอบเสาตัวอย่างทดสอบ S2s

ซึ่งเสาตัวอย่าง S2s มีระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างที่จุดคราก(75% secant approach) เท่ากับ 7.5 มม.หรือเท่ากับการเคลื่อนตัวด้านข้างค่าประมาณ 0.50% ของความสูง มีระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างที่เหล็กเสริมเส้นแรกเกิดการครากเท่ากับ 11.25 มม. ที่อัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างประมาณ 0.75% ต่อความสูง และแรงกระทำด้านข้างที่จุดคราก เท่ากับ 125.4 กิโลนิวตัน โดยที่มีระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดเท่ากับ 52.6 มม. หรือเท่ากับการเคลื่อนตัวด้านข้างค่าประมาณ 3.50% ของความสูง และแรงกระทำด้านข้างสูงสุด เท่ากับ 208.1 กิโลนิวตัน แสดงในตารางที่ 4.3

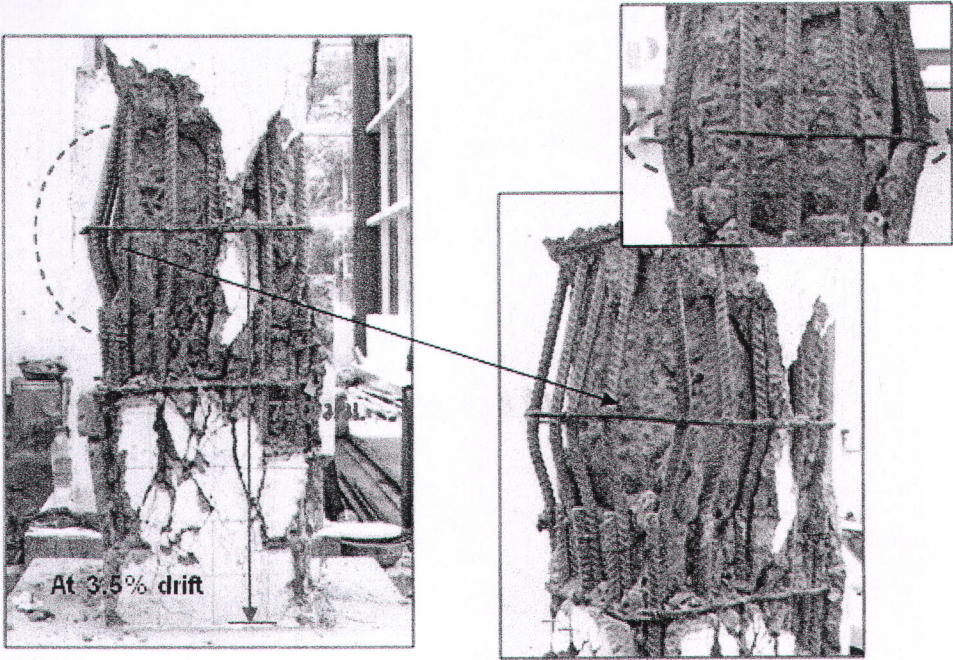
ตารางที่ 4.3 แรงกระทำด้านข้าง, โมเมนต์ดัดและระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่าง S2s

แรงกระทำ ด้านข้าง (kN)	แรงกระทำด้านข้างที่เกิดรอยแตกร้าวเริ่มแรก (P_{cr})	78.5
	แรงกระทำด้านข้างที่จุดคราก (P_y)	125.4
	แรงกระทำด้านข้างสูงสุด (P_m)	208.1
	แรงกระทำด้านข้างที่ลดลง $0.8 P_{max}$ (P_{δ_m})	166.5
โมเมนต์ดัด (kN-m)	โมเมนต์ดัดที่ทำให้เริ่มเกิดรอยแตกร้าว (M_{cr})	117.7
	โมเมนต์ดัดที่จุดคราก (M_y)	188.1
	โมเมนต์ดัดสูงสุด (M_m)	312.1
	โมเมนต์ดัดที่ $0.8 P_{max}$ (M_{δ_m})	249.7
ระยะการ เคลื่อนตัว ด้านข้าง, มม.(%drift)	ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างที่เกิดรอยแตกร้าวเริ่มแรก (δ_{cr})	1.88(0.125%)
	ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างที่เหล็กเสริมถึงจุดคราก (δ_{yi})	11.25(0.75%)
	ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างที่จุดคราก (δ_y)	7.50(0.5%)
	ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างที่แรงกระทำด้านข้างสูงสุด (δ_{P_m})	18.88 (1.25%)
	ระยะการเคลื่อนตัวที่สูญเสียความต้านทานด้านข้าง หรือที่ $0.8 P_{max}$ (δ_m)	25.50 (1.7%)
	ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างที่เกิดการวิบัติ ($\delta_{collapse}$)	52.62 (3.5%)

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเคลื่อนที่ด้านข้างของความสูงกับแรงกระทำทางด้านข้างของเสา แสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าตัวอย่างเสาคอนกรีตวิบัติแบบเฉือน การแตกร้าวเกิดขึ้นส่วนใหญ่อยู่สูงจากโคนเสา 400 มม. ขึ้นไป โดยที่จะเห็นเหล็กเสริมตามแนวยาวที่โค้งงอชัดเจนที่บริเวณสูงจากโคนเสา ขึ้นมา 750 มม. แสดงในรูปที่ 4.12



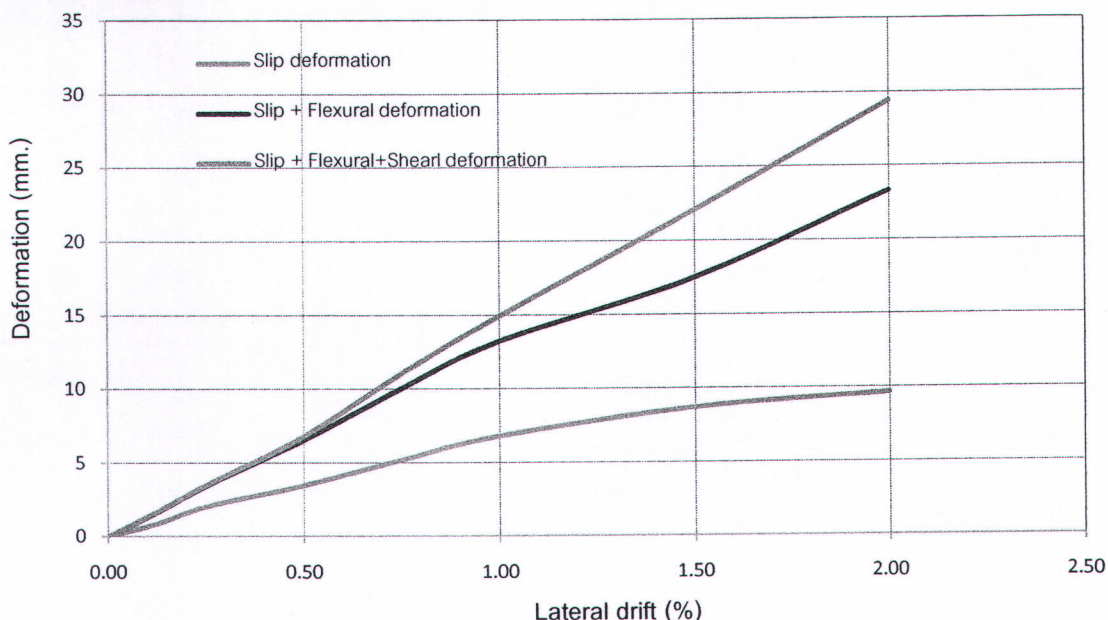
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเคลื่อนที่ด้านข้างของความสูงกับแรงกระทำทางด้านข้างของตัวอย่าง S2s



รูปที่ 4.12 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่าง S2s หลังการทดสอบ

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบของการเสียรูปด้านข้างในแต่ละสถานะของตัวอย่าง S2s

อัตราการเคลื่อนที่	การเสียรูปจากแรงดัด (%)	การเสียรูปจากรอยต่อเคลื่อน (%)	การเสียรูปจากแรงเฉือน (%)	รวม (%)
0.125%	41.01	46.40	1.83	89.24
0.25%	37.65	54.13	1.37	93.16
0.50%	40.95	46.40	3.37	90.72
0.75%	43.00	46.14	9.03	98.18
1.00%	42.85	45.43	11.43	99.71
1.50%	39.20	38.67	20.32	98.19
2.00%	45.54	32.19	20.36	98.09

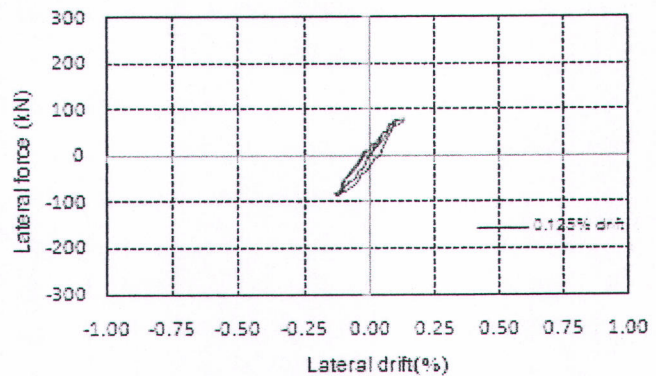
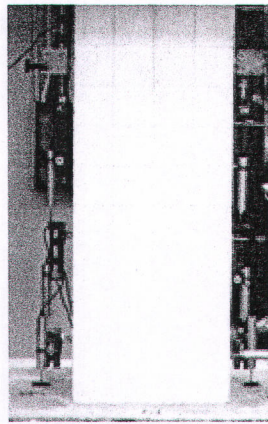


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของการเสียรูปด้านข้างในแตงค้ประกอบกับร้อยละอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้าง ของเสาตัวอย่าง S2s

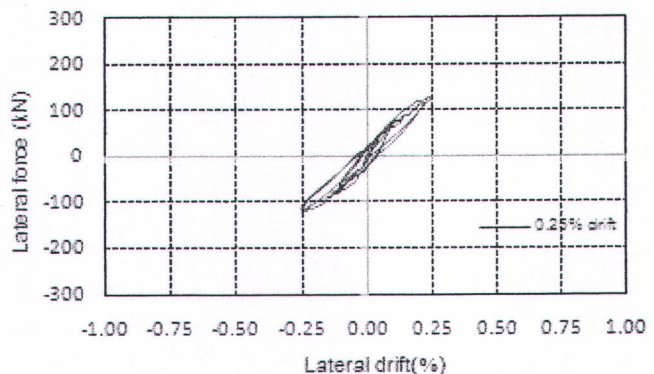
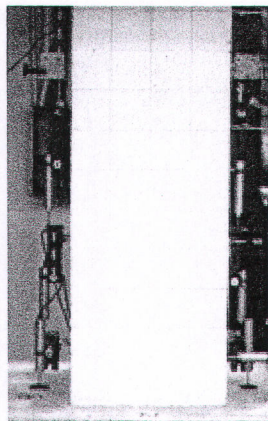
4.1.2.2 ระดับความเสียหายในแต่ละอัตราการเคลื่อนตัวด้านข้างต่อความสูงของตัวอย่าง S2s

ระดับความเสียหายในแต่ละอัตราการเคลื่อนตัวด้านข้างต่อความสูง สามารถแสดงผลดังตารางที่ 4.4 องค์ประกอบของการเสียรูปที่เกิดจากเคลื่อนตัวด้านข้างจากแรงดัด, จากรอยต่อเคลื่อนและจากแรงเฉือน ซึ่งสามารถเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของการเสียรูปด้านข้างในแตงค้ประกอบกับร้อยละอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้าง แสดงดังรูปที่ 4.13 รอยแตกร้าวจะเริ่มแตกในรูปแบบทแยงกับเสา ที่บริเวณปลายของเหล็กเสริมที่มีการต่อทาบ สูงจากโคนเสาขึ้นมา 600 มม. ที่การเคลื่อนตัวด้านข้างที่ 0.50% ของความสูง และที่การเคลื่อนตัวด้านข้างที่ 0.75% ของความสูง มีรอยแตกร้าวกว้างประมาณ 3 มม. และรอยแตกร้าวจะค่อยๆกว้างเพิ่มขึ้นตามระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างที่มากขึ้น ลักษณะเป็นเส้นทแยงมุม โดยที่การเคลื่อนตัวด้านข้างที่ 1.0% ของความสูง คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมเริ่มเกิดการแตกหลุดร่อนออกมา ที่การเคลื่อนตัวด้านข้างที่ 1.5% ของความสูง มีเสียงดังขึ้นจากตัวอย่างทดสอบ รอยแตกร้าวมีขนาดใหญ่มาก คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมเกิดการแตกออกมาเป็นชิ้นใหญ่ขึ้น สามารถ

เห็นเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตด้วยตาเปล่าได้ และจุดที่เกิดเหล็กเสริมตามแนวยาวเกิดการวิบัติลักษณะโก่งเดาะ เนื่องจากน้ำหนักบรรทุก ที่การเคลื่อนตัวด้านข้าง 3.00% ของความสูง ซึ่งจะแสดงดังรูปที่ 4.12 ซึ่งคอนกรีตที่ห่อหุ้มเหล็กเสริมในเสาเกิดการวิบัติแตกออกจนเห็นเหล็กเสริมที่มีลักษณะโก่งงอ และเสาคอนกรีตเสริมเหล็กไม่สามารถรับน้ำหนักในแนวดิ่งได้อีก โดยระดับความเสียหายในแต่ละอัตราการเคลื่อนตัวด้านข้างต่อความสูง แสดงดังรูปที่ 4.14

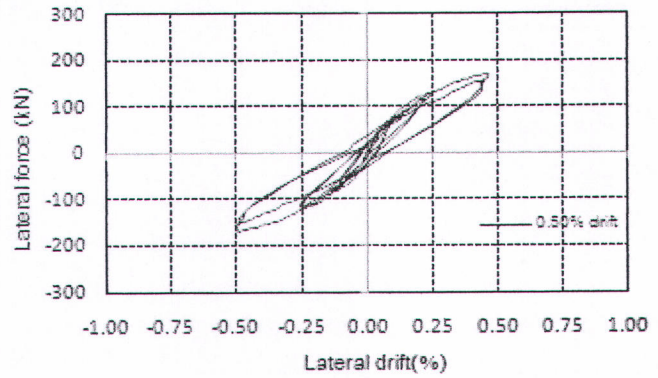
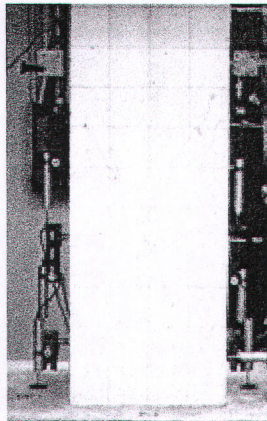


(ก) ที่ 0.125% drift (ระยะการเคลื่อนที่ ± 1.88 มม.)

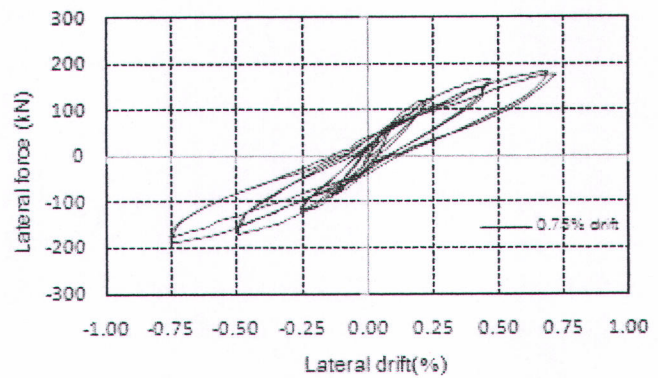
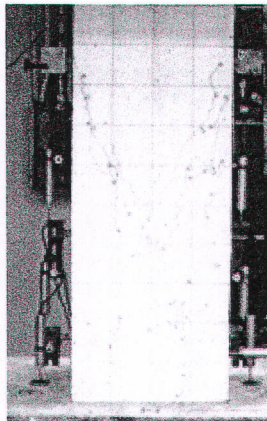


(ข) ที่ 0.25% drift (ระยะการเคลื่อนที่ ± 3.75 มม.)

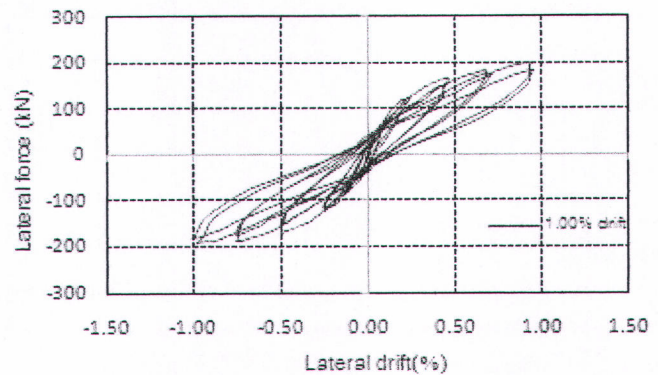
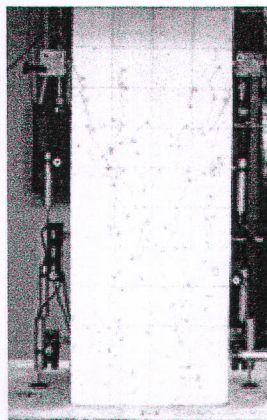
รูปที่ 4.14 ระดับความเสียหายในแต่ละอัตราการเคลื่อนตัวด้านข้างต่อความสูงของตัวอย่าง S2s



(ค) ที่ 0.50% drift (ระยะการเคลื่อนที่ ± 7.50 มม.)

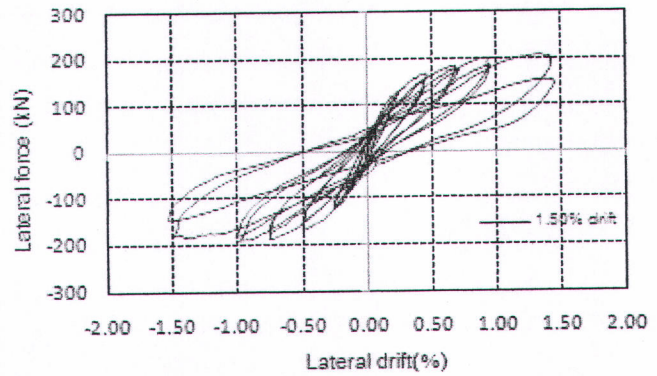
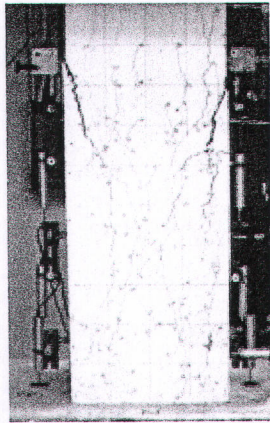


(ง) ที่ 0.75% drift (ระยะการเคลื่อนที่ ± 11.25 มม.)

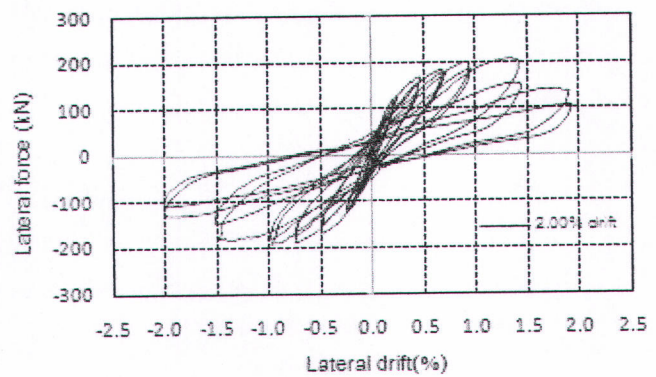
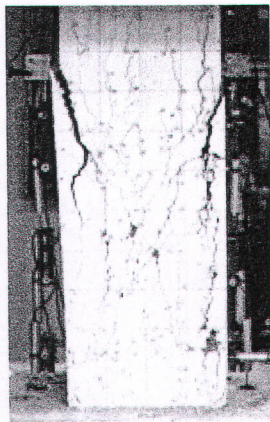


(จ) ที่ 1.00% drift (ระยะการเคลื่อนที่ ± 15.00 มม.)

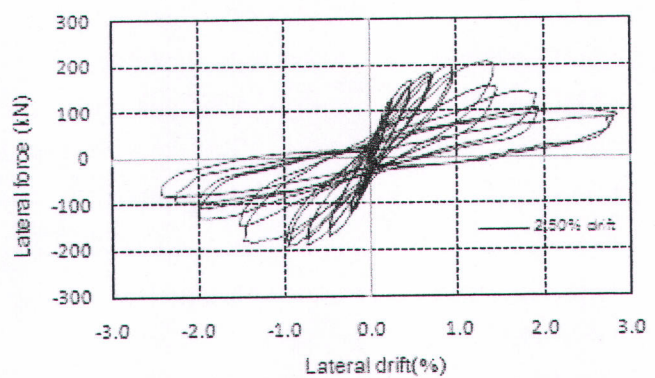
รูปที่ 4.14 ระดับความเสียหายในแต่ละอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างต่อความสูงของตัวอย่าง S2s (ต่อ)



(จ) ที่ 1.50% drift (ระยะการเคลื่อนที่ ± 22.50 มม.)

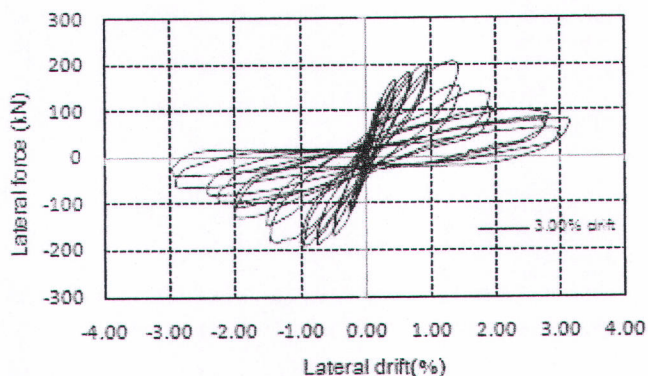
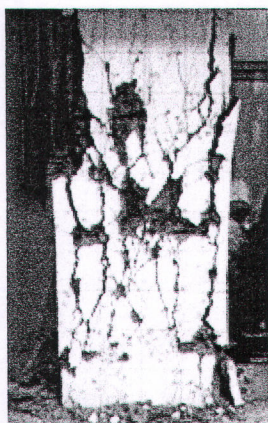


(ข) ที่ 2.00% drift (ระยะการเคลื่อนที่ ± 30.00 มม.)

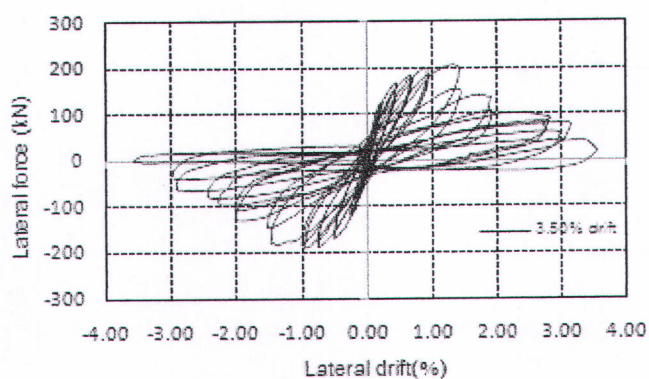
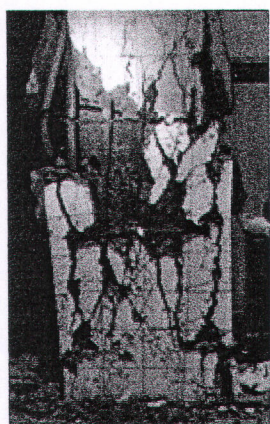


(ค) ที่ 2.50% drift (ระยะการเคลื่อนที่ ± 37.50 มม.)

รูปที่ 4.14 ระดับความเสียหายในแต่ละอัตราการเคลื่อนตัวด้านข้างต่อความสูงของตัวอย่าง S2s (ต่อ)



(ฉ) ที่ 3.00% drift (ระยะการเคลื่อนที่ ± 45.00 มม.)



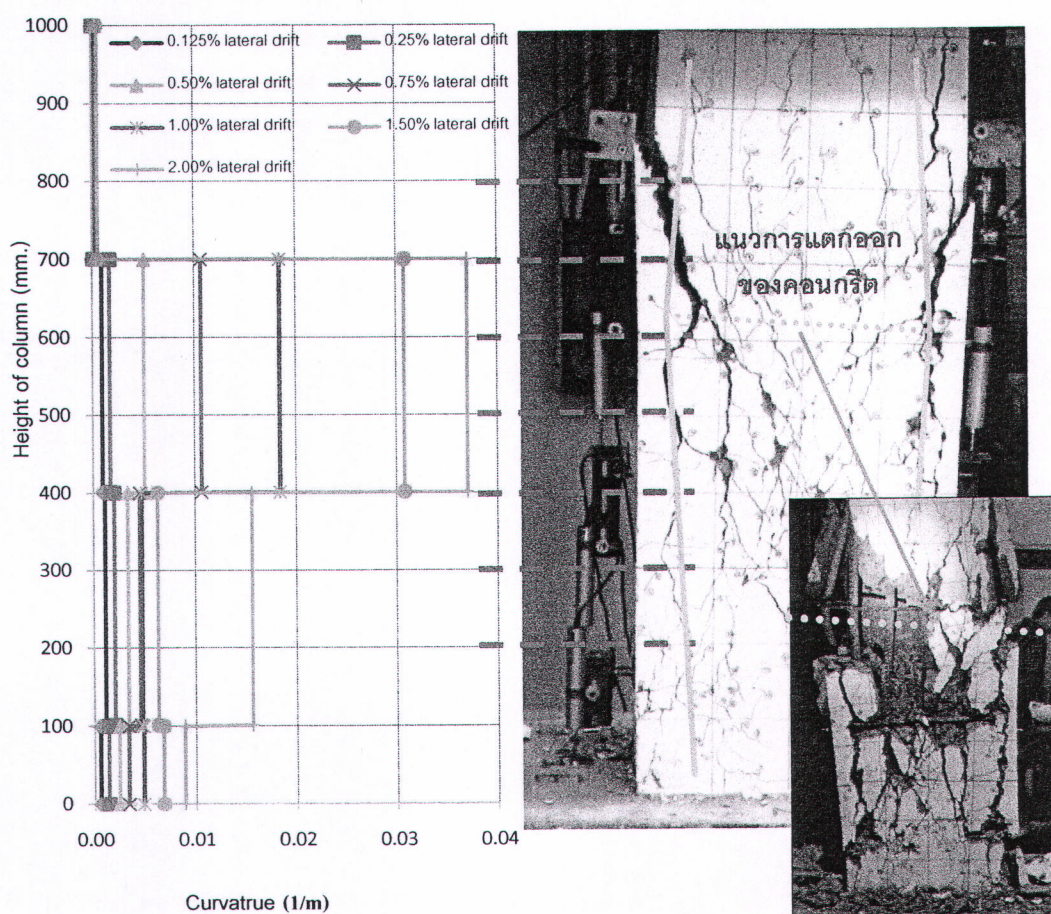
(ญ) ที่ 3.50% drift (ระยะการเคลื่อนที่ ± 52.50 มม.)

รูปที่ 4.14 ระดับความเสียหายในแต่ละอัตราการเคลื่อนตัวด้านข้างต่อความสูงของตัวอย่าง S2s (ต่อ)

4.1.2.3 ความโค้งงอของเสาตัวอย่างทดสอบ S2s

ค่าความโค้งตามความสูงของเสาตัวอย่างทดสอบ S2s ดังแสดงรูปที่ 4.15 โดยเปรียบเทียบกับรูปที่เกิดการแตกร้าวขึ้นตามความสูงของเสาตัวอย่าง ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เกิดรอยแตกร้าวจนเกิดการหลุดออกของคอนกรีตในลักษณะแนวทะแยงมุม ที่ความสูงจากฐานคอนกรีต ประมาณ 850 มม. ซึ่งในเสาตัวอย่าง S2s ได้มีการต่อทาบเหล็กเสริมตามแนวยาว มีระยะการต่อทาบ 600 มม. จากฐานคอนกรีต ผลที่พบค่าความโค้งของเสาตัวอย่าง มีค่าความโค้งที่ในช่วง 400 มม. ถึง 700 มม. ซึ่ง

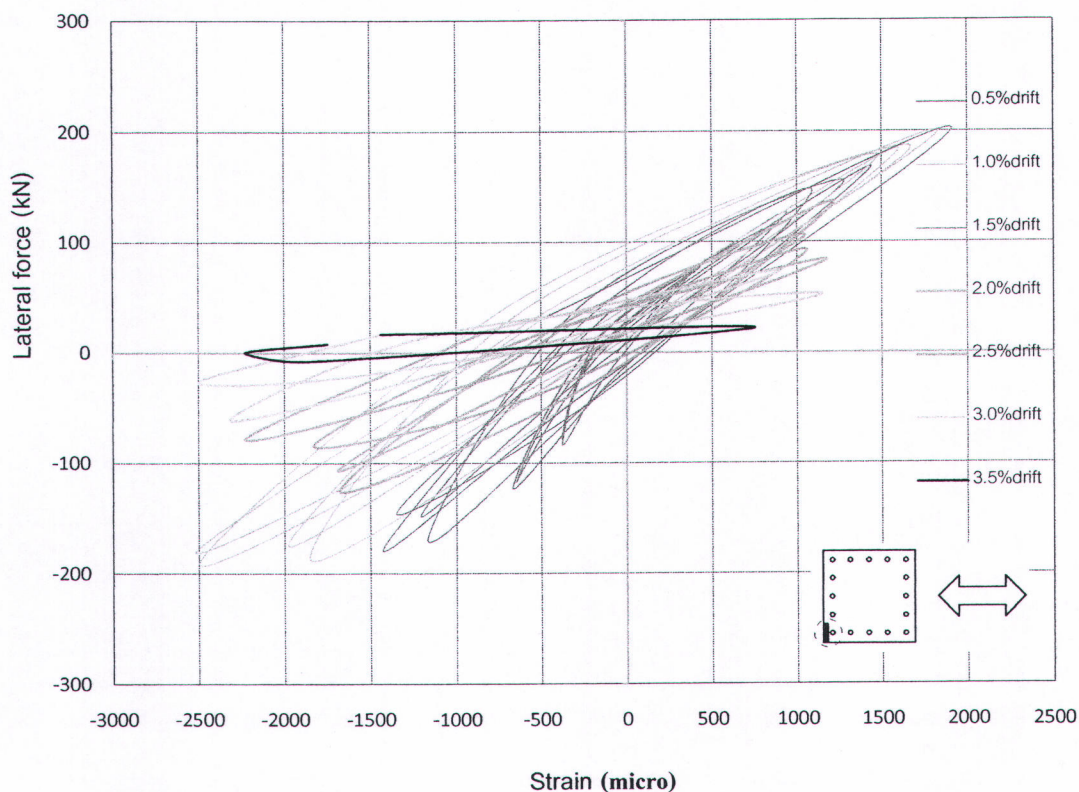
เป็นช่วงของการติดตั้งเครื่องวัดแบบไฟฟ้าเพื่อเก็บข้อมูลการเสียรูปเนื่องจากแรงดัด โดยความเป็นจริงแล้วค่าความโค้งในช่วงนี้ควรมีค่าความโค้งที่น้อยกว่าค่าความโค้งที่ในช่วง 100 มม. ถึง 400 มม. ที่อยู่ในระดับต่ำกว่า โดยสิ่งที่ให้ค่าความโค้งมีค่าที่สูงขึ้นนั้น น่าจะมีเหตุผลมาจากการสั่นหลุนของเหล็กเสริมตามยาวที่มีการตอพบกัน จึงทำให้ค่าความโค้งในชั้นดังกล่าวมีค่าที่สูงได้



รูปที่ 4.15 แสดงค่าความโค้งตามความสูงของเสาตัวอย่างทดสอบ S2s

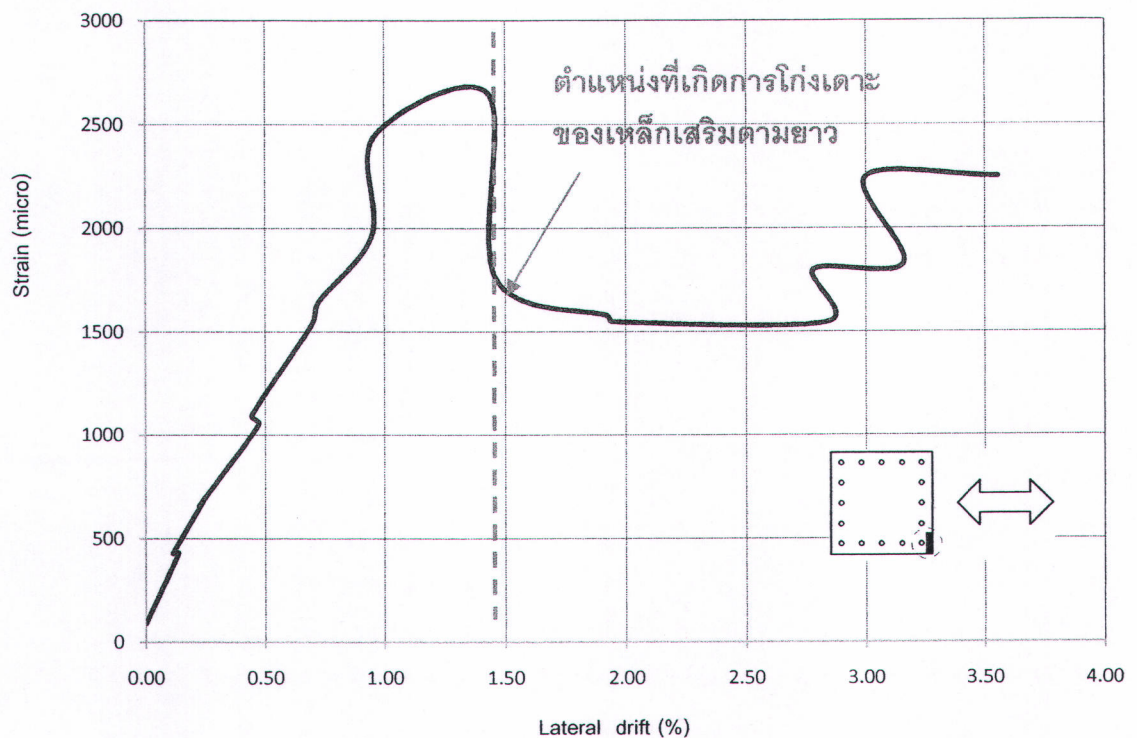
4.1.2.4 ความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่าง S2s

ตำแหน่งของเกจวัดความเครียดที่ติดไว้ในเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างทดสอบ S2s แสดงตำแหน่งรูปที่ 3.9 ซึ่งจากการทดสอบสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาว แสดงดังในรูปที่ 4.16 และความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละอัตราการเคลื่อนตัว(%drift) กับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาว แสดงดังในรูปที่ 4.16 ซึ่งติดตั้งที่ตำแหน่ง 50 มม.จากฐานคอนกรีต เหล็กเสริมตามยาวถึงจุดครากที่การเคลื่อนตัวด้านข้างค่าประมาณ 0.75% ของความสูง ซึ่งมีความเครียดที่จุดคราก ประมาณ 2573 ไมโคร(micro) ของความเครียด



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียด
ในเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่าง S2s

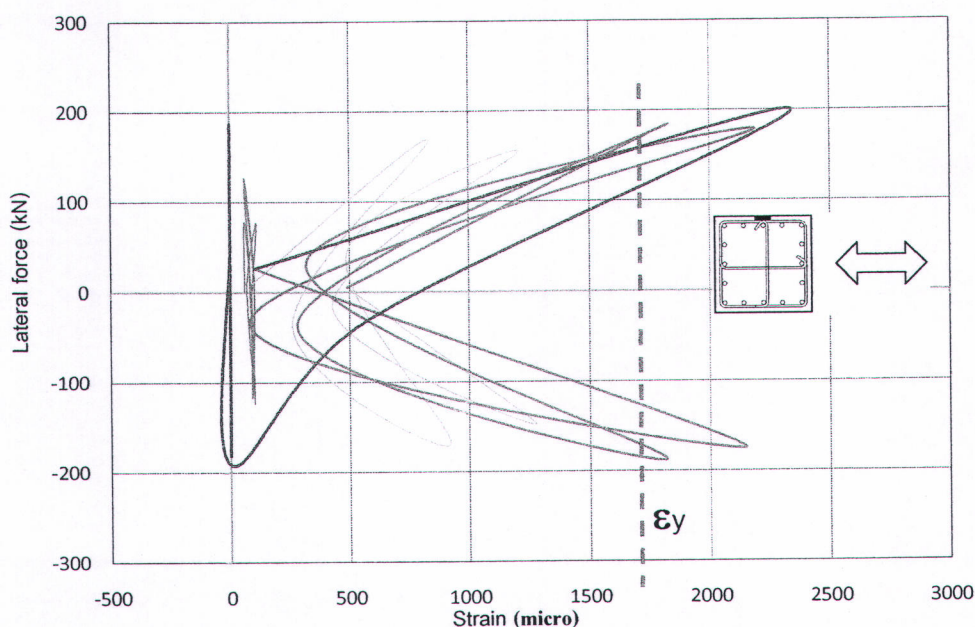
โดยหลังจากการเคลื่อนตัวด้านข้างค่าประมาณ 1.50% ของความสูง ค่าความเครียดมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและคอนกรีตการแตกร้าวมากขึ้น มีการหลุดร่อนออกของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม จึงทำให้เกิดการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวขึ้น ซึ่งตำแหน่งที่เกิดการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวอยู่สูงขึ้นมาประมาณ 750 มม. จากฐานคอนกรีต ที่การเคลื่อนตัวด้านข้างค่าประมาณ 2.50% ของความสูง สามารถสังเกตเห็นเหล็กตามยาวได้อย่างชัดเจน ที่การให้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักรรอบแรกของการเคลื่อนตัวด้านข้างค่าประมาณ 3.50% ของความสูง เสาตัวอย่างทดสอบได้วิบัติด้วยน้ำหนักบรรทุกจากแรงโน้มถ่วงในแนวดิ่ง



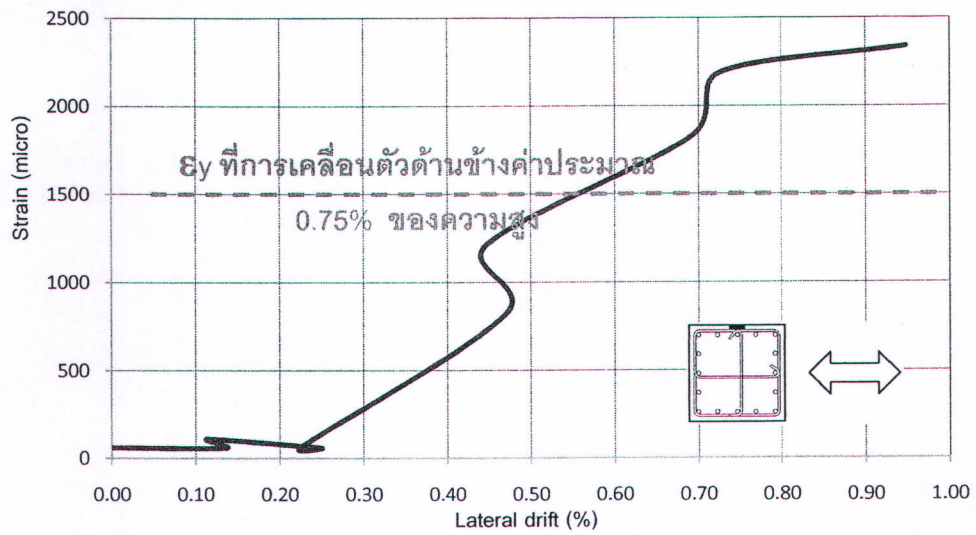
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเคลื่อนตัว(%drift) กับความเครียด
ในเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างเสา S2s

4.1.2.5 ความเครียดในเหล็กเสริมตามขวางของตัวอย่าง S2s

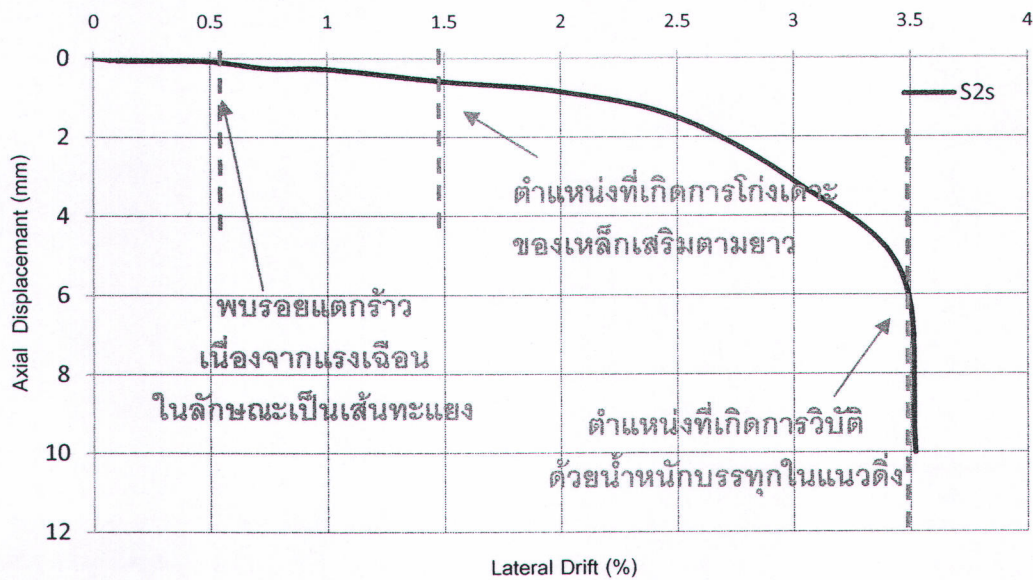
ในเสาตัวอย่างทดสอบ S2s ได้ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียดไว้ในเหล็กเสริมตามขวางของแต่ละชั้นของเหล็กเสริม เหมือนกับเสาตัวอย่างทดสอบ S1 ที่ระยะ 150 มม. 450 มม. และ 750 มม. จากฐาน ซึ่งแสดงตำแหน่งของเกจวัดความเครียดในรูปที่ 3.10 โดยรูปที่ 4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามขวาง ที่วัดค่าความเครียดจากการทดสอบ ซึ่งตำแหน่งของเกจวัดความเครียดนั้นอยู่เหนือชั้นมาจากฐานคอนกรีต ประมาณ 450 มม. ที่วัดค่าความเครียดจากการทดสอบ เหล็กเสริมตามขวางถึงจุดครากที่การเคลื่อนตัวด้านข้างค่าประมาณ 0.75% ของความสูง ซึ่งมีความเครียดที่จุดคราก ประมาณ 14950 ไมโคร(micro)ของความเครียด และในรูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละอัตราการเคลื่อนตัว(%drift) กับความเครียดในเหล็กเสริมตามขวาง ทางทิศใต้ ที่ตำแหน่ง 450 มม. จากฐานของเสาตัวอย่างทดสอบ และเหล็กเสริมตามขวางมีการฉีดขาดที่ตำแหน่ง 750 มม. ขึ้นมาจากฐานคอนกรีต เนื่องจากแรงดันออกของเหล็กเสริมตามยาวที่เกิดการโก่งเดาะ



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียด
ในเหล็กเสริมตามขวางของตัวอย่าง S2s



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละอัตราการเคลื่อนตัว(%drift) กับความเครียด
ในเหล็กเสริมตามขวางของตัวอย่าง S2s



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเคลื่อนที่ด้านข้างของความสูงกับระยะการเคลื่อนตัวใน แนวแกนของตัวอย่าง S2s

4.1.2.6 การเสียรูปในแนวแกนของตัวอย่าง S2s

การสังเกตในระหว่างการทดสอบได้เห็นการเคลื่อนตัวในแนวแกนมีการเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนถึงการเคลื่อนที่ด้านข้าง 1.50% ของความสูง พบว่าเหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะเกิดขึ้นจากข้อมูลความเครียดที่วัดได้ ที่การเคลื่อนที่ด้านข้าง 2.50% ของความสูง คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมตามยาวได้แตกร้าวเป็นบริเวณเสาตัวอย่างและหลุดร่อนออกมาจำนวนมาก โดยหลังจากนั้นระยะการเคลื่อนตัวในแนวแกนมีการเพิ่มขึ้นมากขึ้นเรื่อยๆ แสดงดังรูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเคลื่อนที่ด้านข้างของความสูงกับระยะการเคลื่อนตัวในแนวแกนของตัวอย่าง S2s และได้เกิดการวิบัติด้วยน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวตั้งที่การเคลื่อนที่ด้านข้างประมาณ 3.50% ของความสูง

4.1.3 เสาตัวอย่างทดสอบ S3

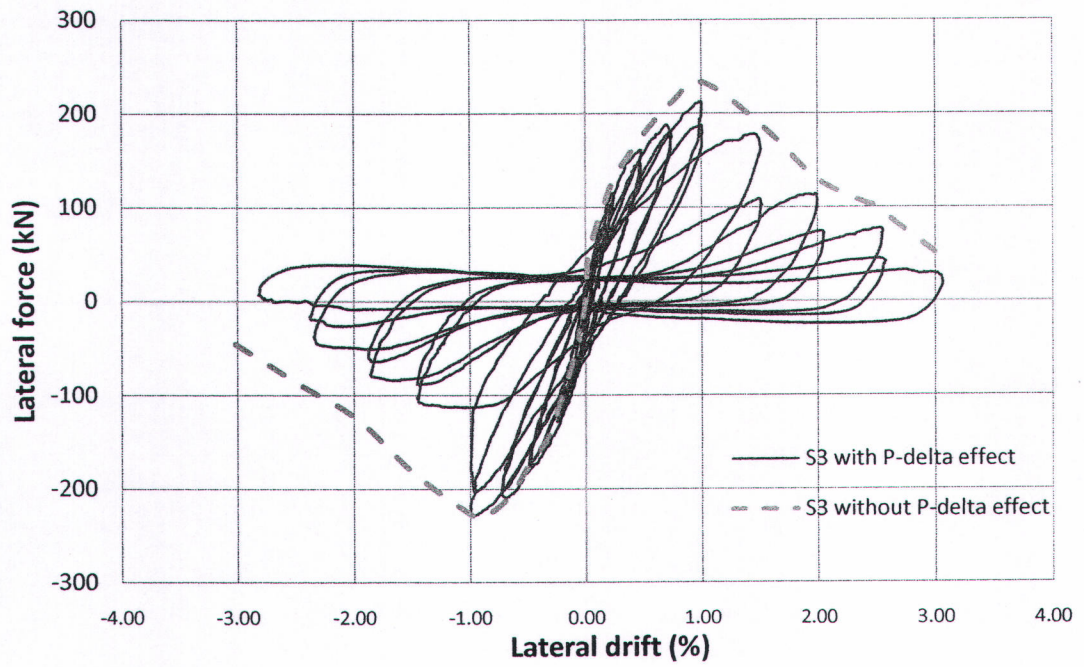
4.1.3.1 ผลการทดสอบเสาตัวอย่างทดสอบ S3

การทดสอบเสาตัวอย่าง S3 ซึ่งลดปริมาณเหล็กเสริมตามขวางลงประมาณ 50% จากตัวอย่าง S1 โดยที่ตัวอย่างทดสอบนี้ มีระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างที่จุดคราก (75% secant approach) เท่ากับ 9.75 มม. หรือระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างค่าประมาณ 0.65% ของความสูง สูง มีระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างที่เหล็กเสริมเส้นแรกเกิดการคราก (1^{st} steel yielding) เท่ากับ 11.25 มม. ที่อัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างประมาณ 0.75% ต่อความสูง และแรงกระทำด้านข้างที่จุดคราก เท่ากับ 121.2 กิโลนิวตัน โดยที่มีระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดเท่ากับ 43.67 มม. หรือระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างค่าประมาณ 3.00% ของความสูง และแรงกระทำด้านข้างสูงสุด เท่ากับ 227.7 กิโลนิวตัน แสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเคลื่อนที่ด้านข้างของความสูงกับแรงกระทำทางด้านข้างของเสา แสดงในรูปที่ 4.7 และรูปแบบการวิบัติของเสาแสดงในรูปที่ 4.8 เป็นการวิบัติแบบเฉือน

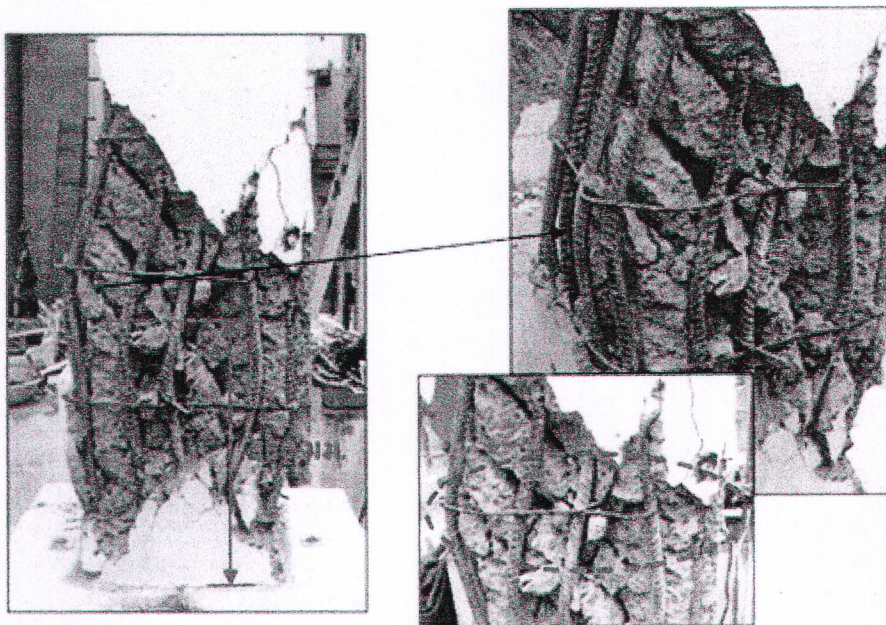


ตารางที่ 4.5 แรงกระทำด้านข้าง, โมเมนต์ดัดและระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่าง S3

แรงกระทำ ด้านข้าง (kN)	แรงกระทำด้านข้างที่เกิดรอยแตกร้าวเริ่มแรก (P_{cr})	86.0
	แรงกระทำด้านข้างที่จุดคราก (P_y)	121.2
	แรงกระทำด้านข้างสูงสุด (P_m)	227.7
	แรงกระทำด้านข้างที่ลดลง $0.8 P_{max}$ (P_{δ_m})	182.2
โมเมนต์ ดัด (kN-m)	โมเมนต์ดัดที่ทำให้เริ่มเกิดรอยแตกร้าว (M_{cr})	129.1
	โมเมนต์ดัดที่จุดคราก (M_y)	181.8
	โมเมนต์ดัดสูงสุด (M_m)	341.5
	โมเมนต์ดัดที่ $0.8 P_{max}$ (M_{δ_m})	273.2
ระยะการ เคลื่อนตัว ด้านข้าง, มม. (%drift)	ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างที่เกิดรอยแตกร้าวเริ่มแรก (δ_{cr})	1.88(0.125%)
	ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างที่เหล็กเสริมถึงจุดคราก (δ_{yi})	11.25(0.75%)
	ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างที่จุดคราก (δ_y)	9.75(0.65%)
	ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างที่แรงกระทำด้านข้างสูงสุด (δ_{p_m})	14.35(0.95%)
	ระยะการเคลื่อนตัวที่สูญเสียความต้านทานด้านข้าง หรือที่ $0.8 P_{max}$ (δ_m)	21.41(1.5%)
	ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างที่เกิดการวิบัติ ($\delta_{collapse}$)	44.79 (3.0%)



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเคลื่อนด้านข้างของความสูงกับแรงกระทำทางด้านข้างของตัวอย่าง S3



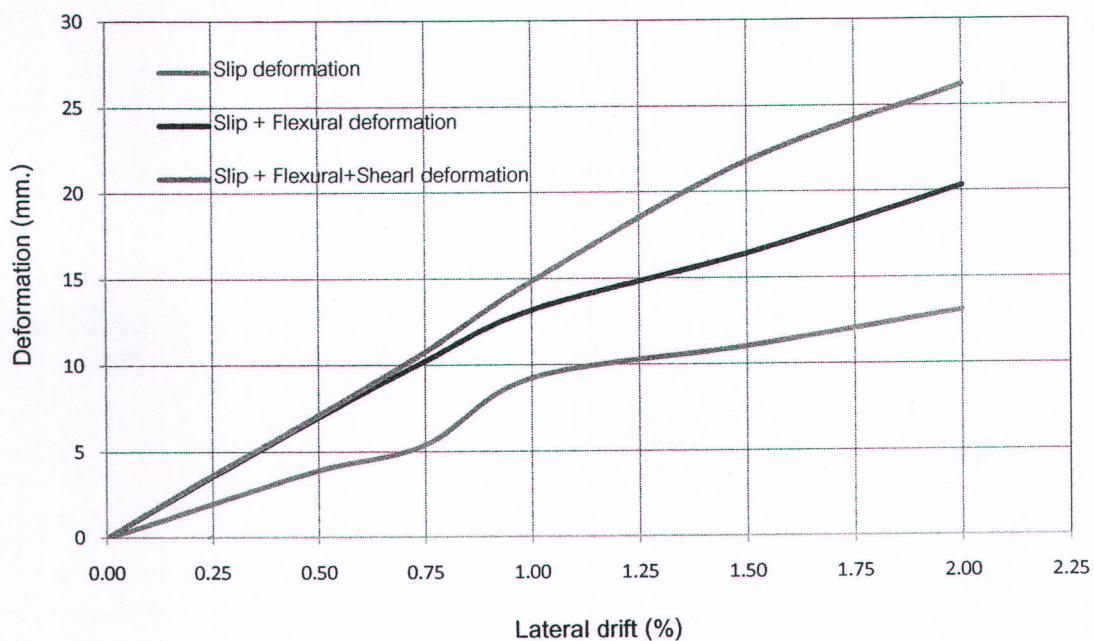
รูปที่ 4.22 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่าง S3 หลังการทดสอบ

4.1.3.2 ระดับความเสียหายในแต่ละอัตราการเคลื่อนตัวด้านข้างต่อความสูงของตัวอย่าง S3

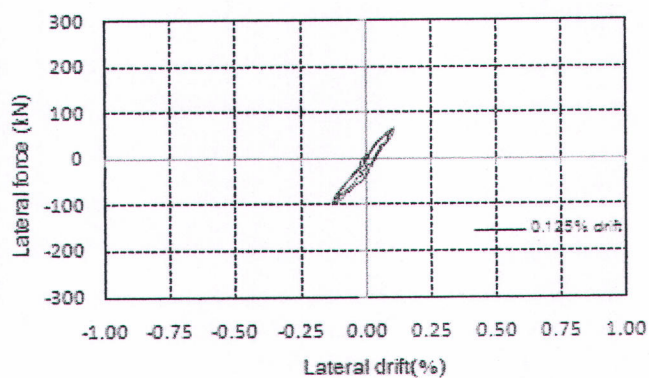
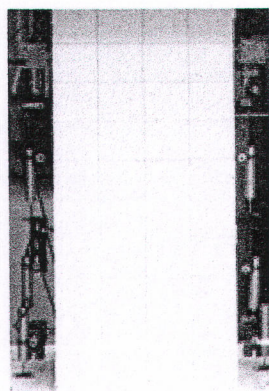
ผลการทดสอบจะเริ่มเห็นรอยแตกร้าวที่การเคลื่อนตัวด้านข้างที่ 0.50% ของความสูง ในลักษณะขนาดกับเสาทดสอบ และเกิดการแตกร้าวรอยที่มีลักษณะเป็นเส้นทแยงจะเกิดขึ้นที่การเคลื่อนตัวด้านข้าง 0.75% ของความสูง โดยที่การเคลื่อนตัวด้านข้าง 1.00% ของความสูง พบว่ารอยแตกร้าวมีกว้างประมาณ 3 มม. และคอนกรีตจะเริ่มเกิดการหลุดร่อน ที่ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้าง 1.50% ของความสูง สามารถเห็นเหล็กเสริมในเสาตัวอย่างได้ ซึ่งรอยแตกร้าวจะเพิ่มมากขึ้นตามระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างที่มากขึ้น และที่ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้าง 3.00% ของความสูง เสาตัวอย่างไม่สามารถรับแรงอัดในแนวแกนได้ และถือว่าเสาตัวอย่างเกิดการวิบัติด้วยน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวดิ่ง โดยระดับความเสียหายในแต่ละอัตราการเคลื่อนตัวด้านข้างต่อความสูง ที่วัดได้ในระหว่างการทดสอบสามารถแสดงผลดัง ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบของการเสียรูปที่เกิดจากการเคลื่อนตัวด้านข้างจากแรงดัด, จากรอยต่อเคลื่อนและจากแรงเฉือน ซึ่งรวมกันได้เป็นการเสียรูปทั้งหมดที่เกิดขึ้นในเสาตัวอย่างทดสอบ โดยสามารถเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของการเสียรูปด้านข้างในแต่ละองค์ประกอบกับร้อยละอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้าง ของตัวอย่าง S3 ดังแสดงรูปที่ 4.23 และระดับความเสียหายในแต่ละอัตราการเคลื่อนตัวด้านข้างต่อความสูง แสดงดังรูปที่ 4.24

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบของการเสียรูปด้านข้างในแต่ละสถานะของตัวอย่าง S3

อัตราการเคลื่อนที่	การเสียรูปจากแรงดัด (%)	การเสียรูปจากรอยต่อเคลื่อน (%)	การเสียรูปจากแรงเฉือน (%)	รวม (%)
0.125%	45.07	51.04	1.83	97.94
0.25%	42.53	52.59	1.94	97.06
0.50%	41.01	52.20	1.66	94.87
0.75%	43.08	47.95	4.72	95.75
1.00%	26.32	61.67	11.11	99.11
1.50%	23.92	49.11	23.85	96.87
2.00%	24.01	43.69	19.7	87.40

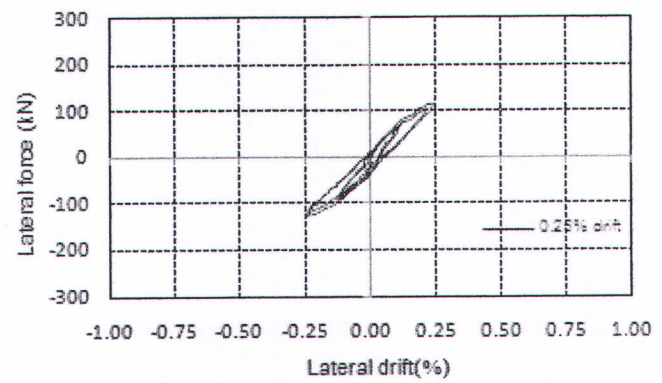
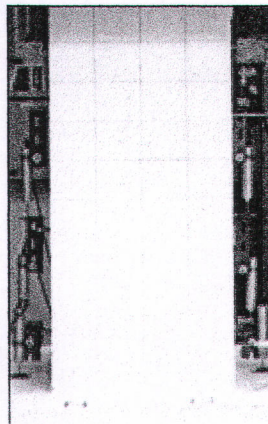


รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของการเสียรูปด้านข้างในแตงองค์ประกอบกับร้อยละอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้าง ของเสาตัวอย่าง S3

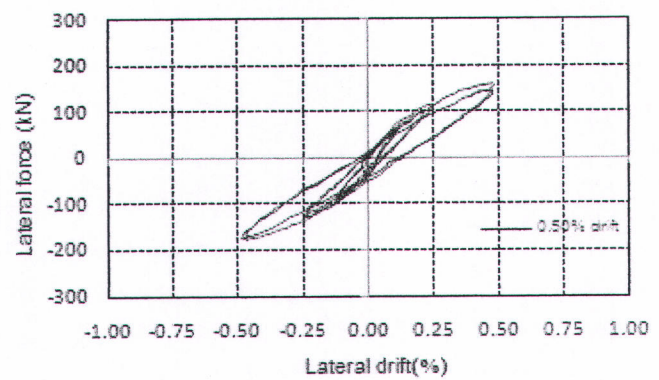
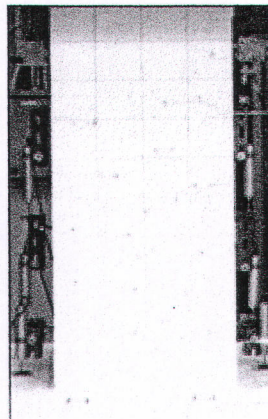


(ก) ที่ 0.125% drift (ระยะการเคลื่อนที่ ± 1.88 มม.)

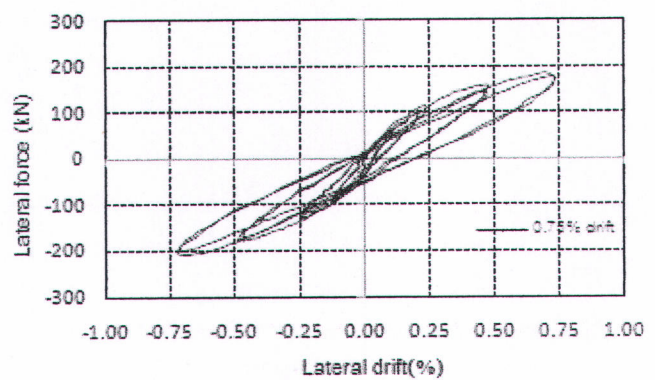
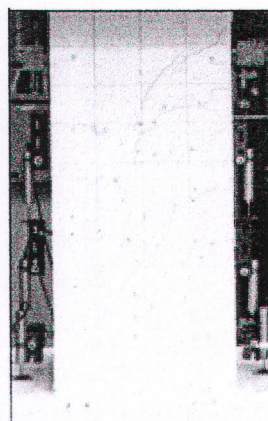
รูปที่ 4.24 ระดับความเสียหายในแต่ละอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างต่อความสูงของตัวอย่าง S3



(ข) ที่ 0.25% drift (ระยะการเคลื่อนที่ ± 3.75 มม.)

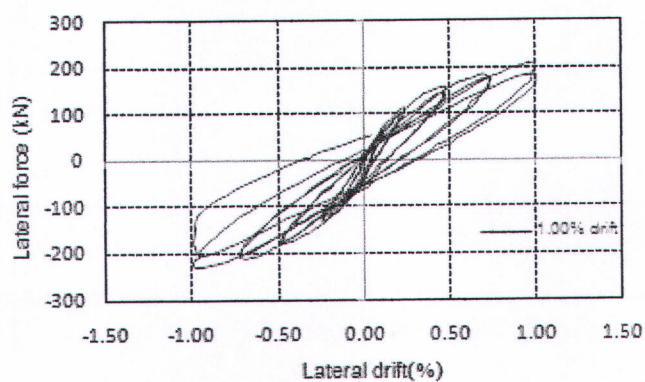
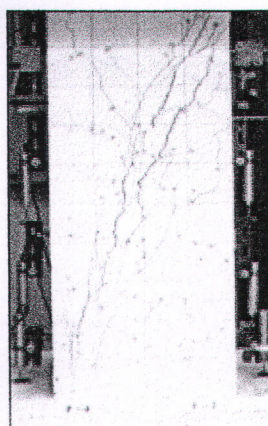


(ค) ที่ 0.50% drift (ระยะการเคลื่อนที่ ± 7.50 มม.)

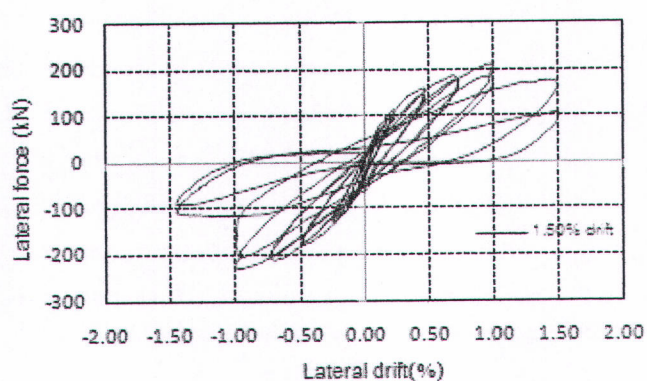
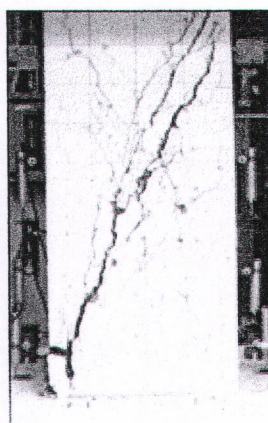


(ง) ที่ 0.75% drift (ระยะการเคลื่อนที่ ± 11.25 มม.)

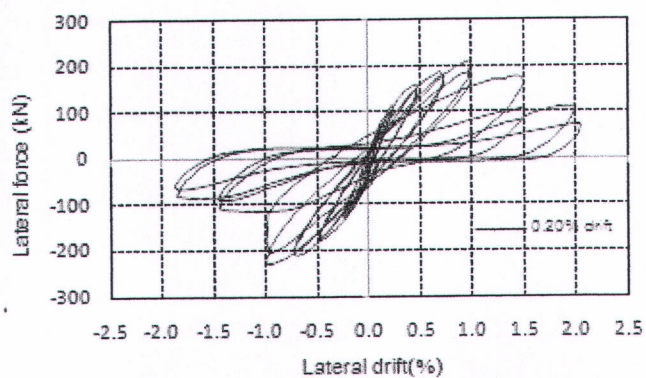
รูปที่ 4.24 ระดับความเสียหายในแต่ละอัตราการเคลื่อนตัวด้านข้างต่อความสูงของตัวอย่าง S3 (ต่อ)



(จ) ที่ 1.00% drift (ระยะการเคลื่อนที่ ± 15.00 มม.)

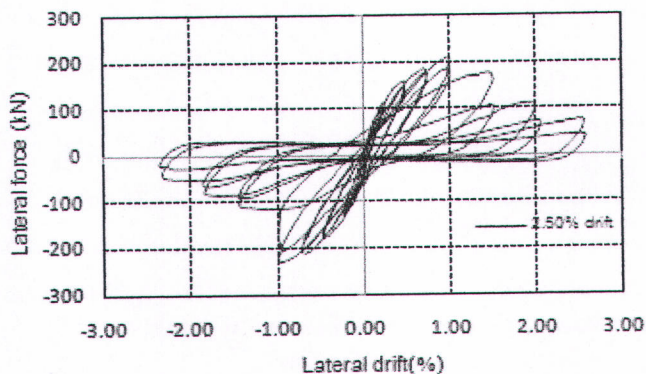


(ข) ที่ 1.50% drift (ระยะการเคลื่อนที่ ± 22.50 มม.)

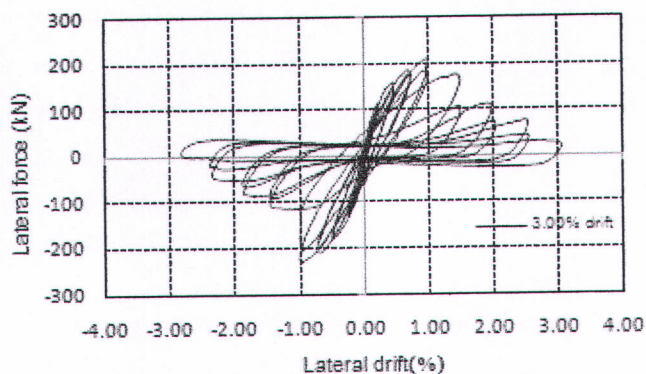


(ค) ที่ 2.00% drift (ระยะการเคลื่อนที่ ± 30.00 มม.)

รูปที่ 4.24 ระดับความเสียหายในแต่ละอัตราการเคลื่อนตัวด้านข้างต่อความสูงของตัวอย่าง S3 (ต่อ)



(ข) ที่ 2.50% drift (ระยะการเคลื่อนที่ ± 37.50 มม.)



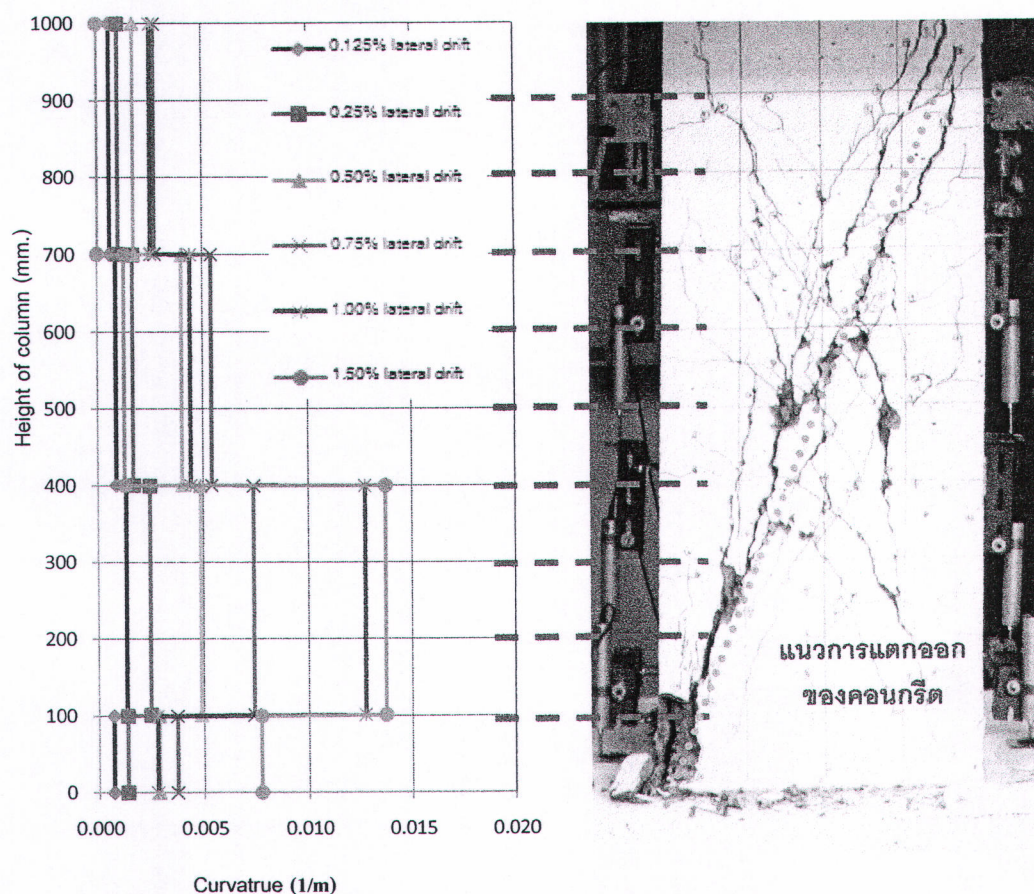
(ณ) ที่ 3.00% drift (ระยะการเคลื่อนที่ ± 45.00 มม.)

รูปที่ 4.24 ระดับความเสียหายในแต่ละอัตราการเคลื่อนตัวด้านข้างต่อความสูงของตัวอย่าง S3 (ต่อ)

4.1.3.3 ความโค้งงอของเสาตัวอย่างทดสอบ S3

เสาตัวอย่าง S3 ลดปริมาณเหล็กเสริมตามขวางลงประมาณครึ่งหนึ่งจากเสาตัวอย่าง S1 และเสาตัวอย่าง S2s โดยเสาตัวอย่าง S3 ใช้เหล็กกลมผิวเรียบ ขนาด 6 มม. เป็นเหล็กเสริมตามขวาง วางห่างกัน 250 มม. ซึ่งจากการทดสอบค่าความโค้งงอตามความสูงของเสาตัวอย่างทดสอบ S3 จะมีค่าสูงในช่วงระดับล่างที่มีการติดตั้งเครื่องวัดแบบไฟฟ้าเพื่อเก็บข้อมูลการเสียรูปเนื่องจากแรงดัด และจะมีค่าลดลงเมื่อทำการวัดที่ระดับที่สูงขึ้น ดังแสดงรูปที่ 4.25 โดยเปรียบเทียบกับรูปที่เกิดการแตกร้าวขึ้น

ตามความสูงของเสาตัวอย่าง ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนว่า รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะแนวทะแยงมุม จากโคนเสาตัวอย่างที่ความสูงจากฐานคอนกรีต ประมาณ 1000 มม.

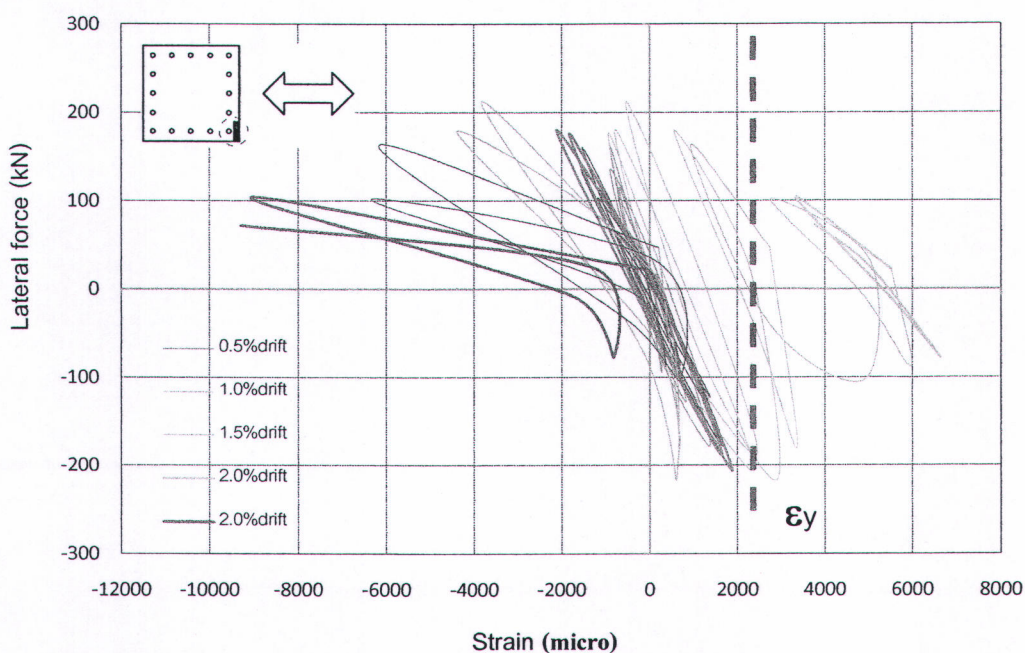


รูปที่ 4.25 แสดงค่าความโค้งตามความสูงของเสาตัวอย่างทดสอบ S3

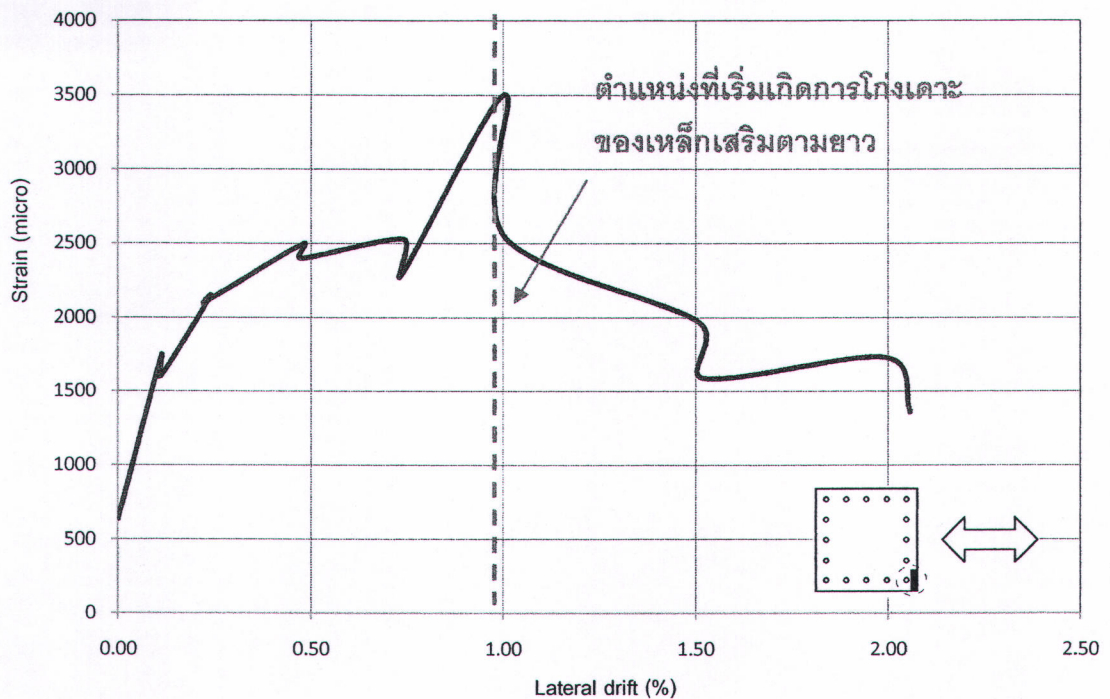
4.1.3.4 ความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่าง S3

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาว ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ซึ่งติดตั้งที่ตำแหน่ง 50 มม.จากฐานคอนกรีต ตำแหน่งเกจวัดความเครียดที่ติดใน

เหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างทดสอบ S3 เหมือนกับตัวอย่างทดสอบ S1 และ S2s ซึ่งแสดงตำแหน่งของเกจวัดความเครียดในรูปที่ 3.11 ในการระหว่างการทดสอบพบว่า เหล็กเสริมตามยาวถึงจุดครากที่การเคลื่อนตัวด้านข้างค่าประมาณ 0.75% ของความสูง ซึ่งมีความเครียดที่จุดคราก ประมาณ 2573 ไมโคร(micro)ของความเครียด และเนื่องจากการแตกหลุดร่อนของคอนกรีตมีผลให้ เหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะที่ตำแหน่ง 550 มม. จากฐานคอนกรีต ที่การเคลื่อนตัวด้านข้างค่าประมาณ 1.00% ของความสูง จากนั้นการแตกร้าวมากขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้คอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมหลุดร่อนออก จึงทำให้เกจวัดความเครียดที่ติดในเหล็กเสริมไม่สามารถวัดค่าได้ ที่การเคลื่อนตัวด้านข้างค่าประมาณ 2.00% ของความสูง ในการทดสอบเสาตัวอย่าง S3 มีการวิบัติแบบเฉือน ด้วยน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวตั้งที่การเคลื่อนตัวด้านข้างค่าประมาณ 3.00% ของความสูง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละอัตราการเคลื่อนตัว(%drift) กับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่าง S3 แสดงดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวตัวอย่าง S3

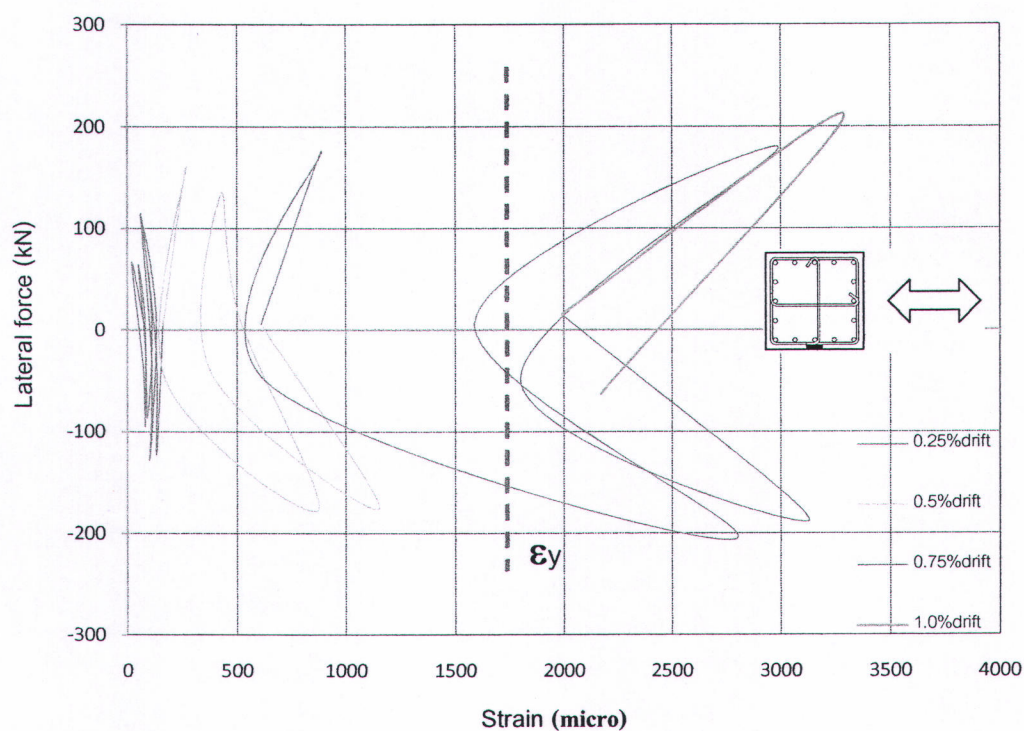


รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละอัตราการเคลื่อนตัว(%drift) กับความเครียด
ในเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่าง S3

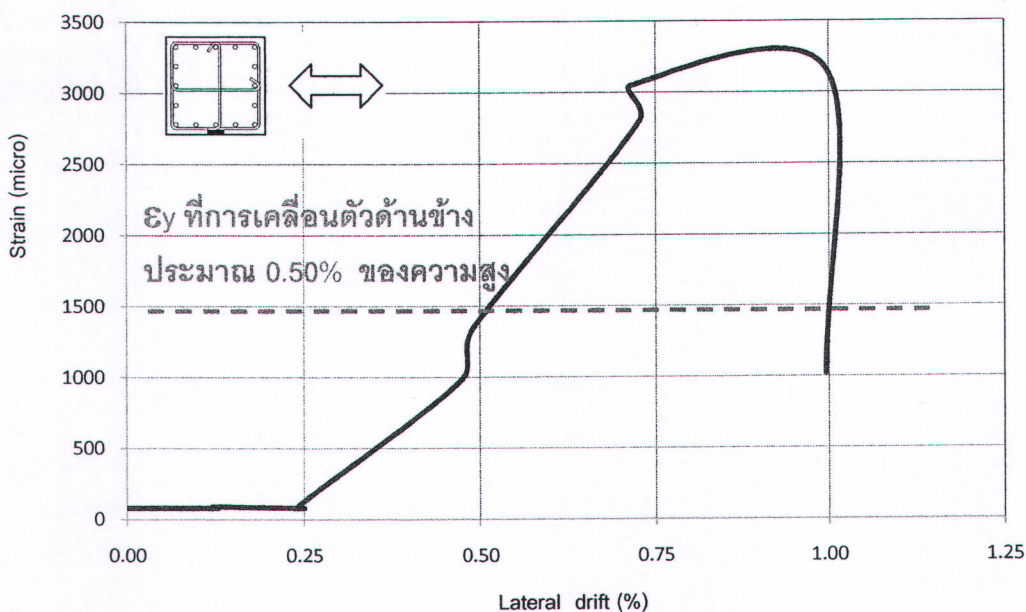
4.1.3.5 ความเครียดในเหล็กเสริมตามขวางของตัวอย่าง S3

ตำแหน่งติดตั้งเกจวัดความเครียดไว้ในเหล็กเสริมตามขวางของแต่ละชั้นของเหล็กเสริม อยู่ที่ระยะ 100 มม., 350 มม. และ 600 มม. จากฐานคอนกรีต แสดงตำแหน่งของเกจวัดความเครียดในรูปที่ 3.12 ซึ่งตำแหน่งของเหล็กเสริมตามขวางในแต่ละระดับไม่เหมือนกับเสาตัวอย่าง S1 และเสาตัวอย่าง S2s เนื่องการลดปริมาณของเหล็กเสริมตามขวางลงประมาณครึ่งหนึ่งจากเสาตัวอย่าง S1 และเสาตัวอย่าง S2s เพื่อเปรียบเทียบการบิดของเหล็กเสริมตามขวาง ซึ่งกราฟความความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามขวาง ดังแสดงในรูปที่ 4.282 ซึ่งติดตั้งจากฐานขึ้นมา 600 มม. ทางทิศใต้ของเสาตัวอย่าง ในการทดสอบพบว่าเหล็กเสริมตามขวางถึงจุดครากที่การเคลื่อนตัวด้านข้างค่าประมาณ 0.50% ของความสูง ซึ่งมีความเครียดที่จุดคราก ประมาณ

1488 ไมโคร(micro)ของความเครียด และความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเคลื่อนตัว (%drift) กับความเครียดในเหล็กเสริมตามขวางของตัวอย่าง S3 ที่ติดอยู่ที่คได้เสาตัวอย่าง แสดงในรูปที่ 4.29 ที่ตำแหน่ง 600 มม. จากฐานคอนกรีต ซึ่งเหล็กเสริมตามขวางมีการฉีกขาดแยกตัวออก ด้วยแรงเฉือนที่กระทำกับเสาตัวอย่างทำให้เหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะและปริมาณเหล็กเสริมตามขวางที่มีน้อยอยู่แล้ว ส่งผลให้ลัดต้นเหล็กเสริมตามขวางเกิดการฉีกขาดแยกตัวออกรุนแรงและเห็นได้ชัดเจน



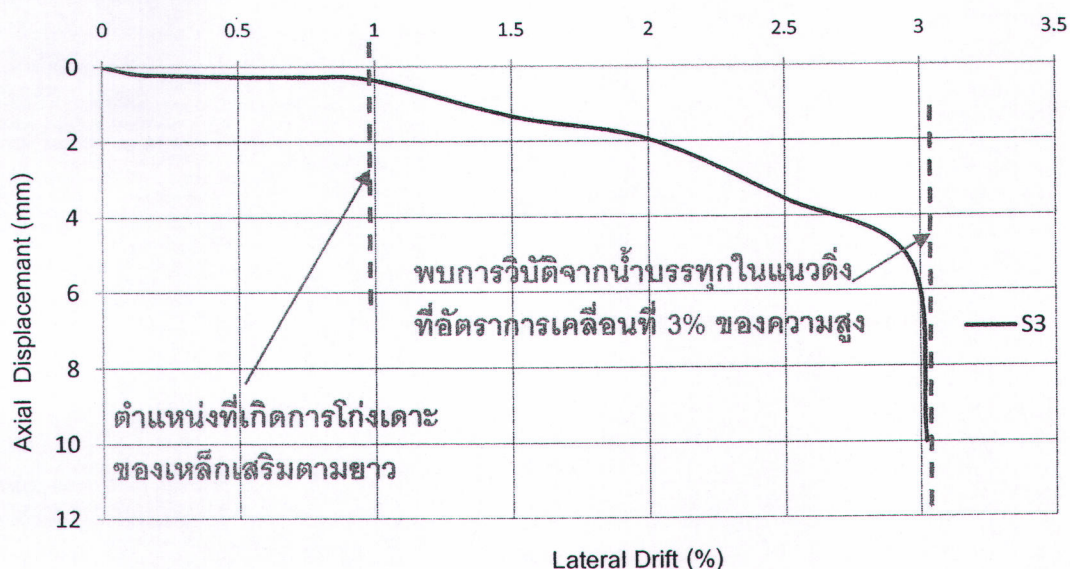
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียด
ในเหล็กเสริมตามขวางของตัวอย่าง S3



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละอัตราการเคลื่อนตัว(%drift) กับความเครียด
ในเหล็กเสริมตามขวางของตัวอย่าง S3

4.1.3.6 การเสียรูปในแนวแกนของตัวอย่าง S3

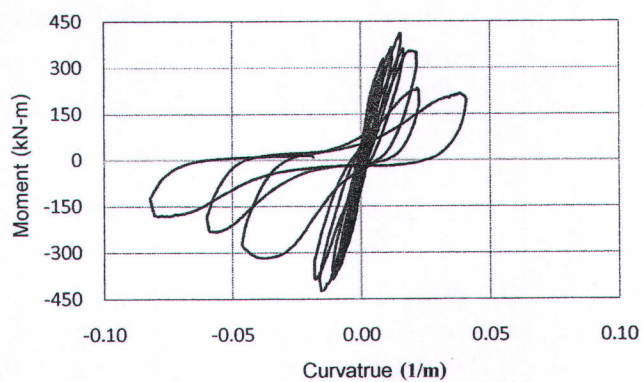
ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเคลื่อนที่ด้านข้างของความสูงกับระยะการเคลื่อนตัวในแนวแกนของ ตัวอย่าง S3 แสดงดังรูปที่ 4.30 ซึ่งระยะการเคลื่อนตัวในแนวแกนมีการเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนถึงที่การเคลื่อนที่ด้านข้าง 1.00% ของความสูง พบว่าเหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะขึ้นจาก ข้อมูลความเครียดที่ได้ทำการบันทึกไว้ โดยระยะที่เกิดการโก่งเดาะสูงขึ้นมาจากฐานคอนกรีต ประมาณ 550 มม. หลังจากเกิดการโก่งเดาะระยะการเคลื่อนตัวในแนวแกนมีการเพิ่มขึ้นมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากปริมาณเหล็กตามขวางที่มีปริมาณน้อยไม่เพียงพอที่โอบรัดหรือช่วยลดลงการโก่งตัวของเหล็กเสริมตามยาวที่เกิดขึ้นหลังจากการโก่งเดาะ โดยที่การเคลื่อนที่ด้านข้าง 3% ของความสูง ระยะการเคลื่อนตัวในแนวแกนมีการเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกจากแรงโน้มถ่วงในแนวตั้ง



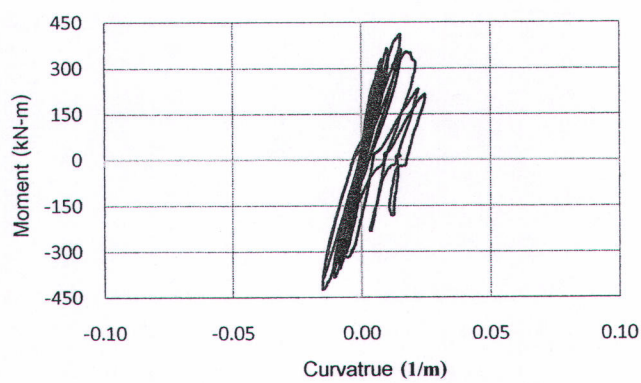
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเคลื่อนที่ด้านข้างของความสูงกับระยะการเคลื่อนตัวใน แนวแกนของตัวอย่าง S3

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับค่าความโค้ง

สำหรับการคำนวณหาค่าความโค้ง ในแต่ละชั้นของกลุ่มการคำนวณนั้น จะคำนวณจากระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งที่วัดได้จากเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้า ด้านข้างผิวของเสาตัวอย่างทดสอบชั้นละ 2 ตัว โดยที่ค่าความโค้งในแต่ละชั้นนั้นคำนวณจาก ผลต่างของระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง ที่วัดได้จากการทดสอบ ส่วนด้วยผลคูณของระยะความห่างสุทธิระหว่างเครื่องมือวัดในแนวราบกับระยะความยาวของแต่ละชั้นของกลุ่มการคำนวณ ซึ่งจะอธิบายการคำนวณในสมการที่ 3.4 และสมการที่ 3.5 แสดงดังรูปที่ 3.19 การคำนวณหาค่าความโค้ง (curvature) เมื่อสามารถหาค่าความโค้ง (curvature) ได้แล้วนั้น จึงสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับค่าความโค้งได้ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.31 สำหรับเสาตัวอย่างทดสอบ S1 โดยที่รูปที่ 4.32 และรูปที่ 4.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับค่าความโค้งของเสาตัวอย่างทดสอบ S2s และ S3 ตามลำดับ

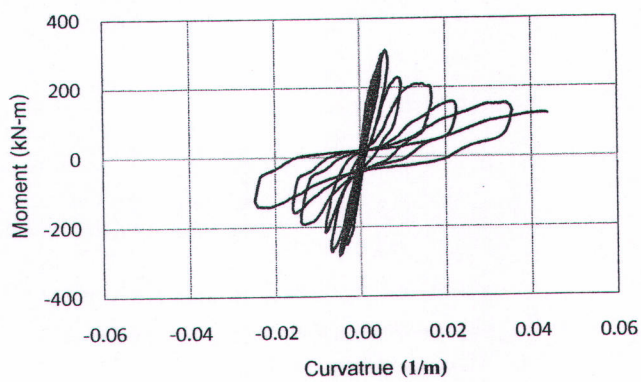


(ก) ระดับที่ 1

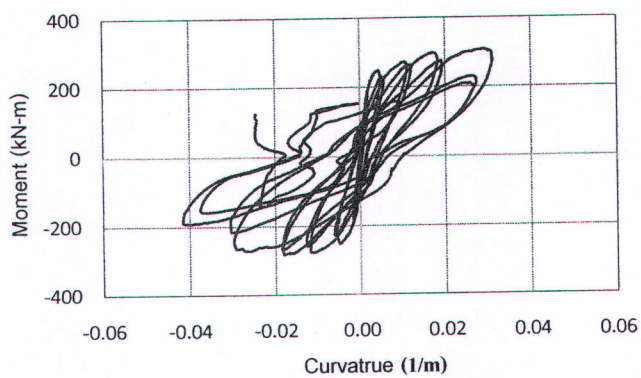


(ข) ระดับที่ 2

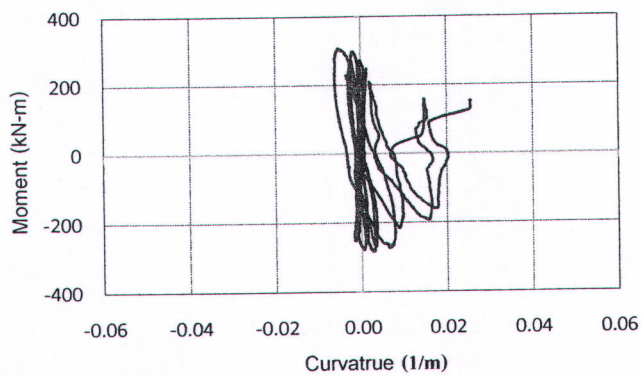
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับค่าความโค้งของตัวอย่าง S1



(ก) ระดับที่ 1

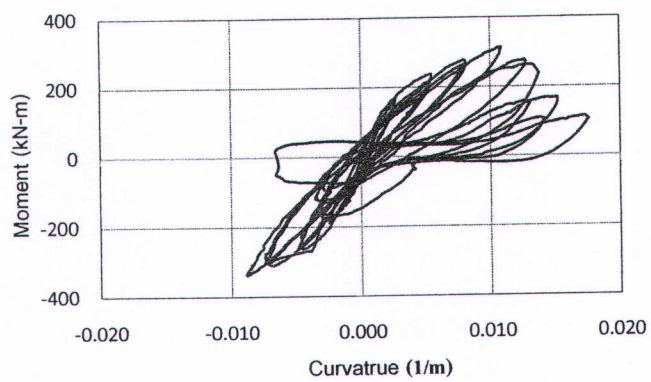


(ข) ระดับที่ 2

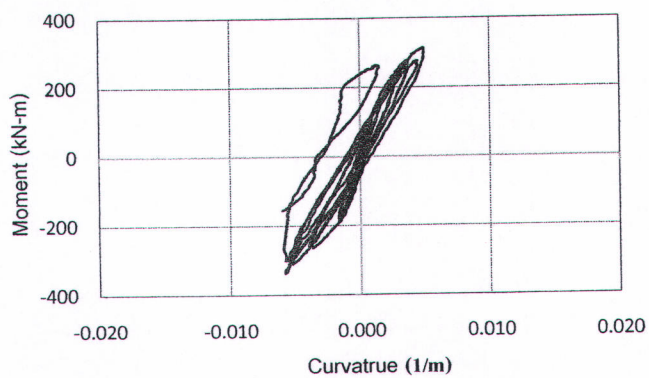


(ค) ระดับที่ 3

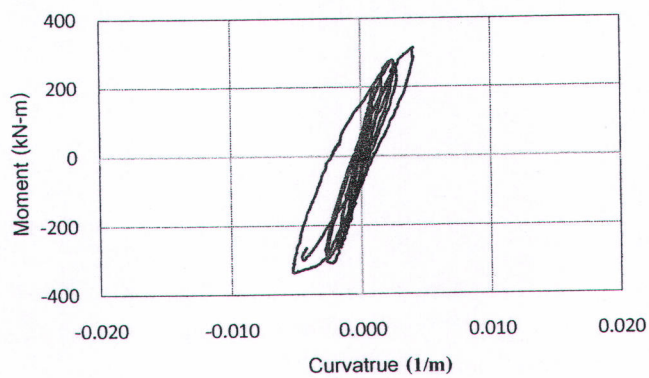
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับค่าความโค้งของตัวอย่าง S2s



(ก) ระดับที่ 1



(ข) ระดับที่ 2

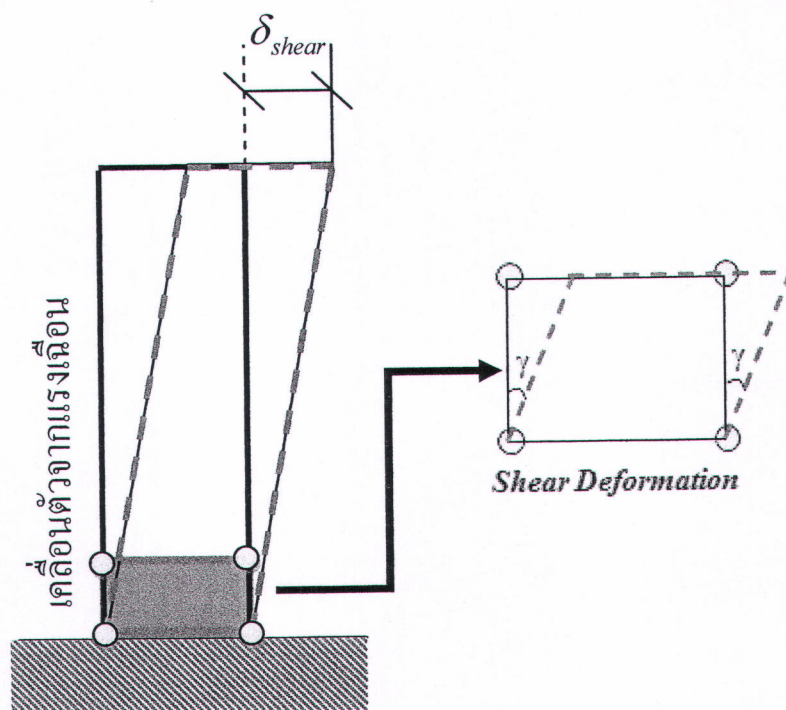


(ค) ระดับที่ 3

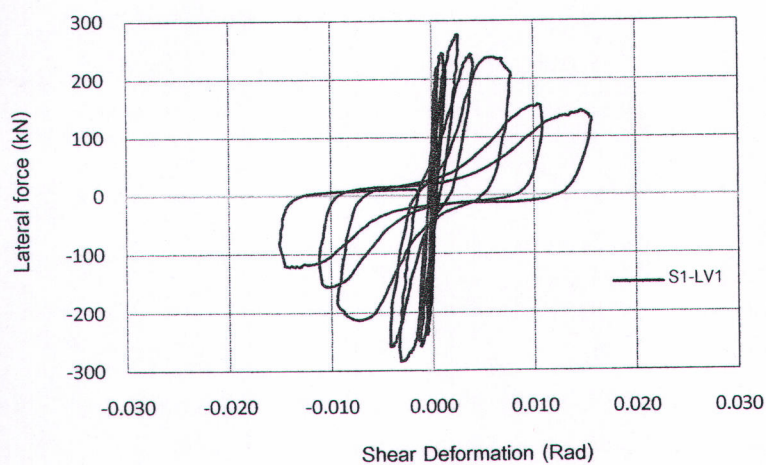
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับค่าความโค้งของตัวอย่าง S3

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือน

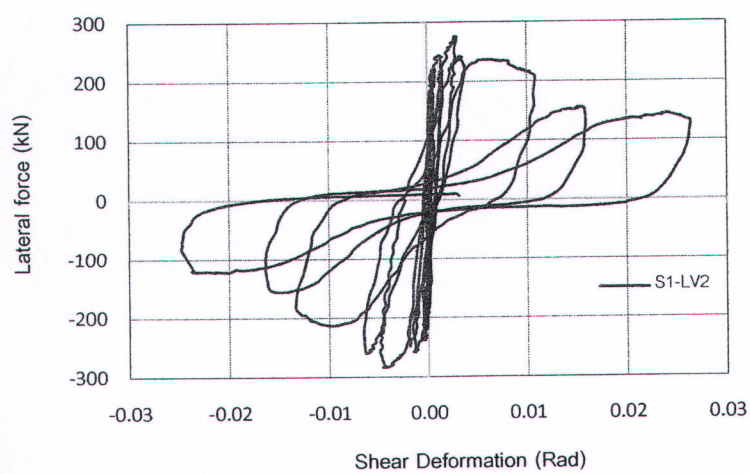
ระยะการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนเกิดขึ้นในแนวทแยงมุมบนผิวหน้าเสาตัวอย่างด้านขนานกับทิศทางการให้แรงกระทำทางด้านข้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.34 เป็นรูปร่างแบบการเสียรูปจากแรงเฉือน โดยการคำนวณการเปลี่ยนแปลงความยาวของระยะเคลื่อนที่ในแนวทแยงมุมที่วัดได้จากเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้า ให้เป็นระยะการเคลื่อนที่ในแนวราบ ซึ่งแสดงการคำนวณการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงเฉือนตามสมการที่ 3.8 ถึงสมการที่ 3.15 โดยรูปที่ 3.21 ตัวอย่างการคำนวณการเสียรูปแบบเฉือน ระยะการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนที่ได้จากการคำนวณ สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับมุมการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงเฉือนได้ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.35 สำหรับเสาตัวอย่างทดสอบ S1 โดยที่รูปที่ 4.36 และรูปที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงเฉือนของเสาตัวอย่างทดสอบ S2s และ S3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.34 รูปแบบการเสียรูปจากแรงเฉือน

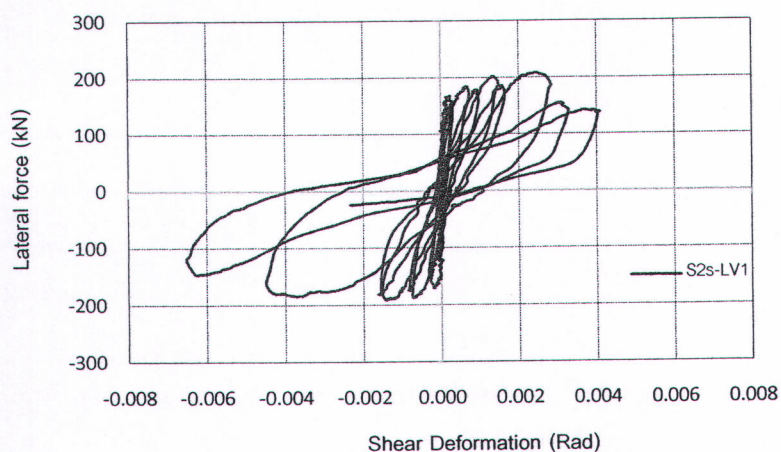


(ก) ระดับที่ 1

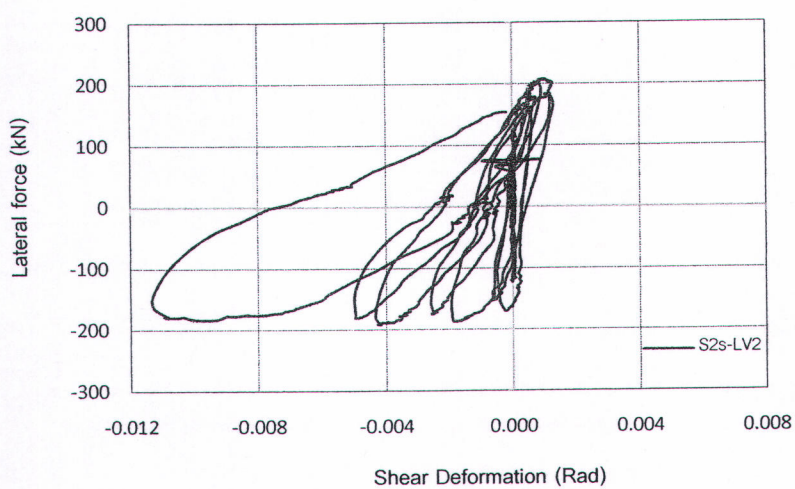


(ข) ระดับที่ 2

รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงเฉือนของ
เสาตัวอย่างทดสอบ S1

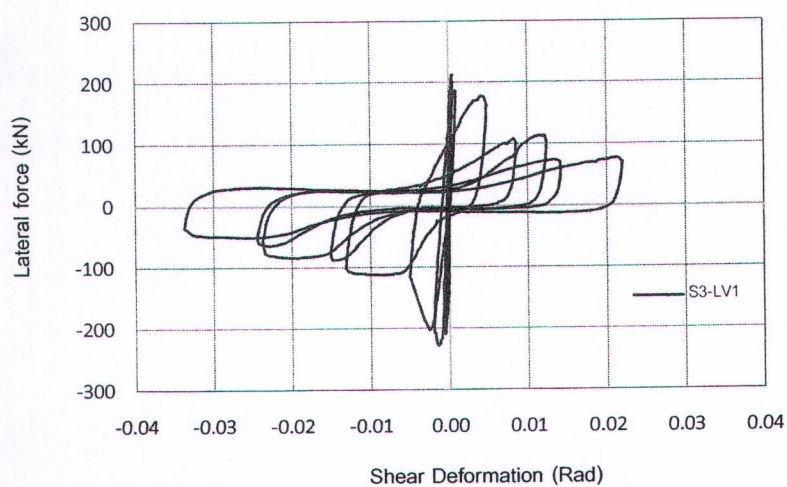


(ก) ระดับที่ 1

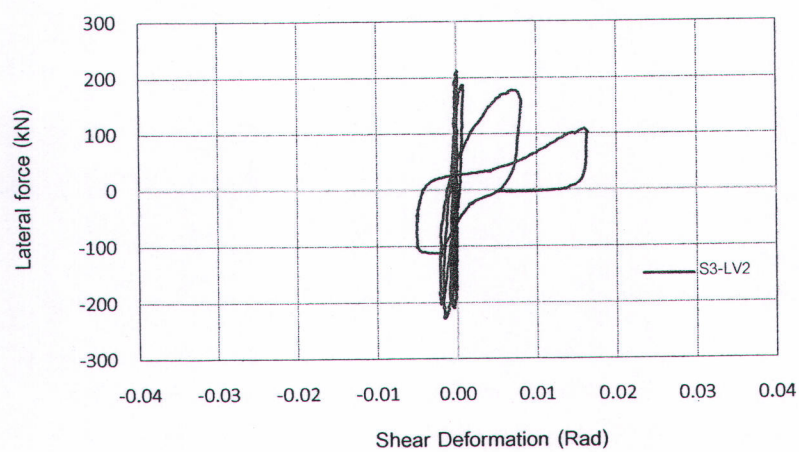


(ข) ระดับที่ 2

รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงเฉือนของ
เสาตัวอย่างทดสอบ S2s



(ก) ระดับที่ 1



(ข) ระดับที่ 2

รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงเฉือนของ
เสาตัวอย่างทดสอบ S3

4.4 การเปรียบเทียบพฤติกรรมของเสาตัวอย่างทดสอบ

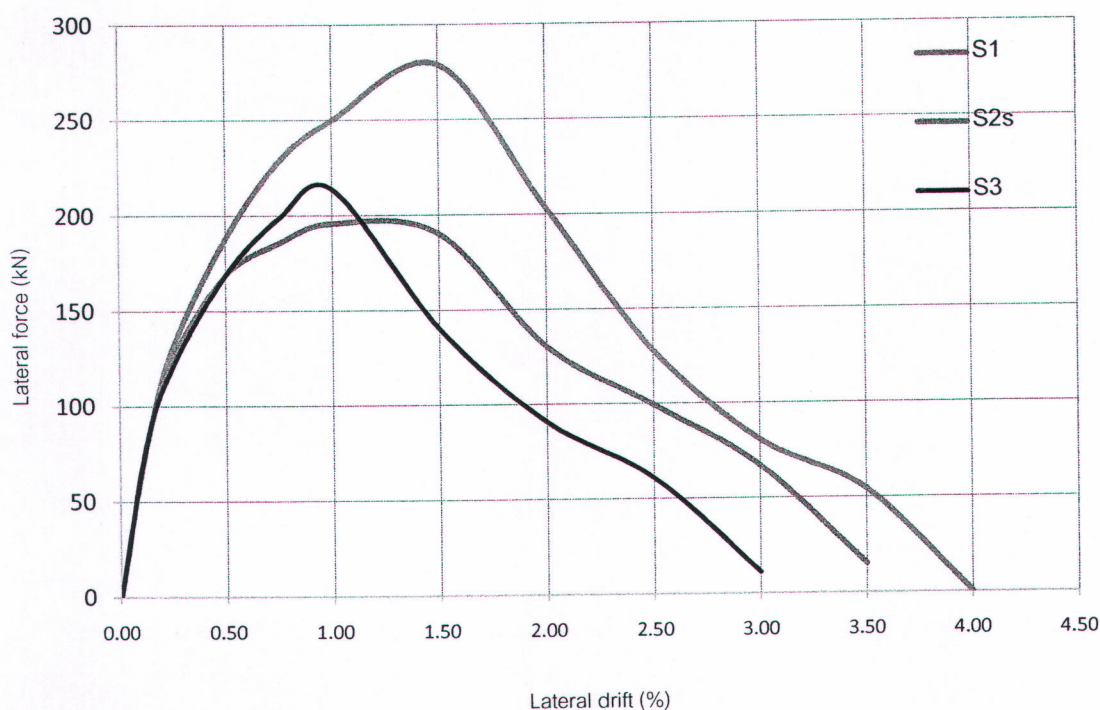
ในส่วนนี้จะนำเสนอการเปรียบเทียบพฤติกรรมต่างภายใต้น้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่งและแรงกระทำแบบวัฏจักร จากผลการทดสอบของเสาตัวอย่าง S1, S2s และ S3 ในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับร้อยละการเคลื่อนที่ด้านข้างต่อความสูงในลักษณะของเส้นโค้งขอบนอก (envelop curve) เพื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างเสาตัวอย่างทดสอบ ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวแกนกับร้อยละการเคลื่อนที่ด้านข้างต่อความสูง และรูปการวิบัติของเสาตัวอย่างทดสอบ

4.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับร้อยละการเคลื่อนที่ด้านข้างต่อความสูง

ระยะการเสียรูปเนื่องจากแรงกระทำด้านข้างนั้น สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับร้อยละการเคลื่อนที่ด้านข้างต่อความสูงได้ ในการเปรียบเทียบกำลังรับแรงด้านข้าง ระยะการเคลื่อนที่ด้านข้าง ค่าความเหนียวที่เกิดขึ้นของเสาตัวอย่างทดสอบแต่ละตัวอย่างนั้น สามารถนำผลการทดสอบทั้ง 3 ตัวอย่าง มาเขียนกราฟเส้นโค้งขอบนอก (envelop curve) เปรียบเทียบความสามารถรับกำลังต่างๆ ได้ ซึ่งรูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์เส้นโค้งขอบนอกระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับร้อยละการเคลื่อนที่ด้านข้างต่อความสูง ซึ่งกราฟแสดงผลเป็นค่าบวกเท่านั้น เพื่อง่ายต่อการเข้าใจ และจากกราฟความสัมพันธ์เส้นโค้งขอบนอกระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับร้อยละการเคลื่อนที่ด้านข้างต่อความสูง สามารถสรุปแรงกระทำทางด้านข้างได้ดังตารางที่ 4.4

จากการทดสอบพบว่าในช่วงแรกของเส้นโค้งขอบนอกเสาตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 ตัวอย่างมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันจนถึงอัตราการเคลื่อนตัว 0.25% ความสูง เริ่มมีความแตกต่างของเสาตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 ตัวอย่าง โดยที่เสาตัวอย่าง S1 มีแรงด้านข้างกระทำที่จุดครากประมาณ 131.2 กิโลนิวตัน และแรงด้านข้างกระทำสูงสุดประมาณ 283.9 กิโลนิวตัน ที่อัตราการเคลื่อนตัวประมาณ 1.45% ความสูง ซึ่งเป็นค่าที่มากสูงสุดของเสาตัวอย่างทั้งหมด เสาตัวอย่าง S2s ที่มีการต่อทาบเหล็กเสริมตามยาวบริเวณโคนเสา มีแรงด้านข้างกระทำที่จุดครากประมาณ 125.4 กิโลนิวตัน และแรงด้านข้างกระทำสูงสุดประมาณ 208.1 กิโลนิวตัน ที่อัตราการเคลื่อนตัวประมาณ 1.25% ความสูง และเสาตัวอย่าง S3 ที่มีการลดปริมาณเหล็กเสริมตามขวางลงครึ่งหนึ่งจากเสาตัวอย่าง S1 และ S2s มีแรง

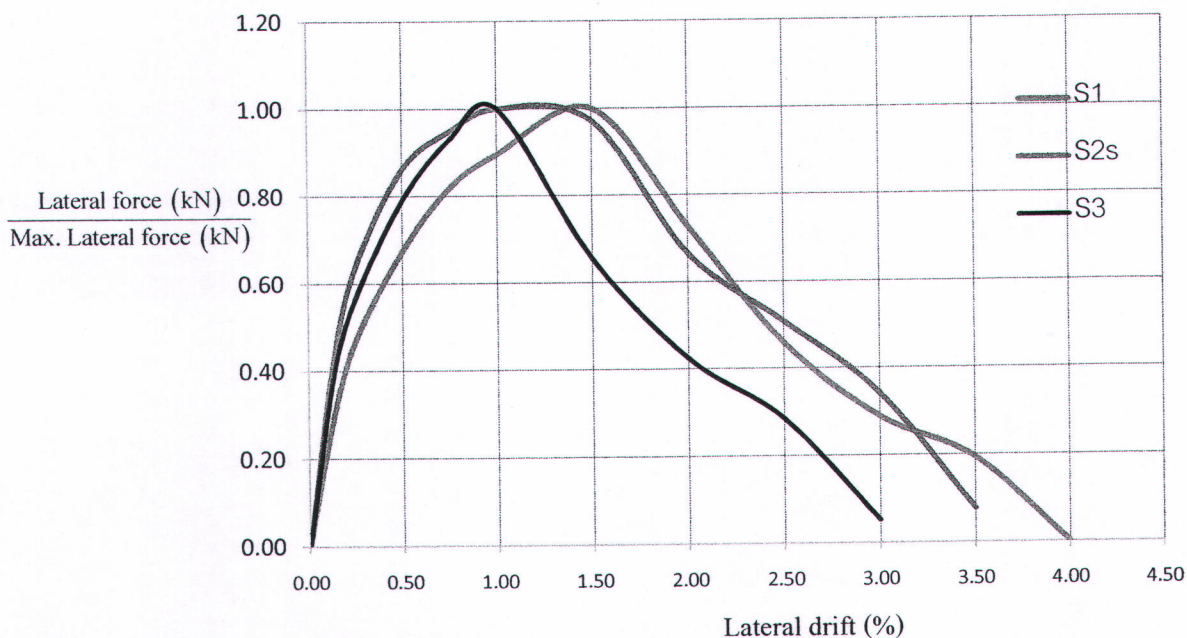
ด้านข้างกระทำที่จุดครากประมาณ 121.2 กิโลนิวตัน และแรงด้านข้างกระทำสูงสุดประมาณ 227.7 กิโลนิวตัน ที่อัตราการเคลื่อนตัวประมาณ 0.95% ความสูง โดยหลังจากนั้นการลดลงของแรงกระทำด้านข้างของเสาตัวอย่าง S1 และ S3 เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อาจจะมีผลมาจากปริมาณเหล็กเสริมตามขวางที่ค่อนข้างน้อย ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนในเสาตัวอย่าง S3 ส่วนเสาตัวอย่าง S2s แรงกระทำด้านข้างไม่ได้ลดลงอย่างฉับพลัน โดยสามารถคงแรงกระทำด้านข้างไปได้ตั้งแต่อัตราการเคลื่อนที่ด้านข้าง 1.00% จนถึง 1.50% ต่อความสูง ซึ่งระยะประมาณ 0.5% อัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างต่อความสูง แต่จากการสำรวจระหว่างการทดสอบนั้นเสาตัวอย่าง S2s ไม่มีเสถียรภาพมากนัก เนื่องจากเกิดรอยแตกกว้างขึ้นอย่างรวดเร็วต่อเนื่องและกระจายตัวเต็มผิวหน้าของเสาทดสอบก่อนที่จะเกิดการหลุดร่อนของคอนกรีต โดยเสาตัวอย่าง S2s มีแรงกระทำด้านข้างที่น้อยที่สุด



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์เส้นโค้งขอบบนระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับร้อยละการเคลื่อนด้านข้างต่อความสูง

ตารางที่ 4.7 สรุปกำลังรับแรงด้านข้างจากผลการทดสอบของเสาตัวอย่าง S1 S2s และ S3

ชื่อเสาตัวอย่างทดสอบ		S1	S2s	S3
แรงกระทำ ด้านข้าง (kN)	แรงกระทำด้านข้างที่เกิดรอยแตกร้าวเริ่มแรก (P_{cr})	90.3	78.5	86.0
	แรงกระทำด้านข้างที่จุดคราก (P_y)	131.2	125.4	121.2
	แรงกระทำด้านข้างสูงสุด (P_m)	283.9	208.1	227.7
	แรงกระทำด้านข้างที่ลดลง $0.8 P_{max}$ (P_{δ_m})	227.1	166.5	182.2
โมเมนต์ ดัด (kN-m)	โมเมนต์ดัดที่ทำให้เริ่มเกิดรอยแตกร้าว (M_{cr})	135.5	117.7	129.1
	โมเมนต์ดัดที่จุดคราก (M_y)	196.8	188.1	181.8
	โมเมนต์ดัดสูงสุด (M_m)	425.9	312.1	341.5
	โมเมนต์ดัดที่ $0.8 P_{max}$ (M_{δ_m})	340.7	249.7	273.2



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์เส้นโค้งขอบนอกระหว่างอัตราการรับแรงกระทำทางด้านข้าง (Normalized) กับร้อยละการเคลื่อนด้านข้างต่อความสูง

ตารางที่ 4.8 สรุประยะเคลื่อนที่ด้านข้างจากผลการทดสอบของเสาตัวอย่าง S1 S2s และ S3

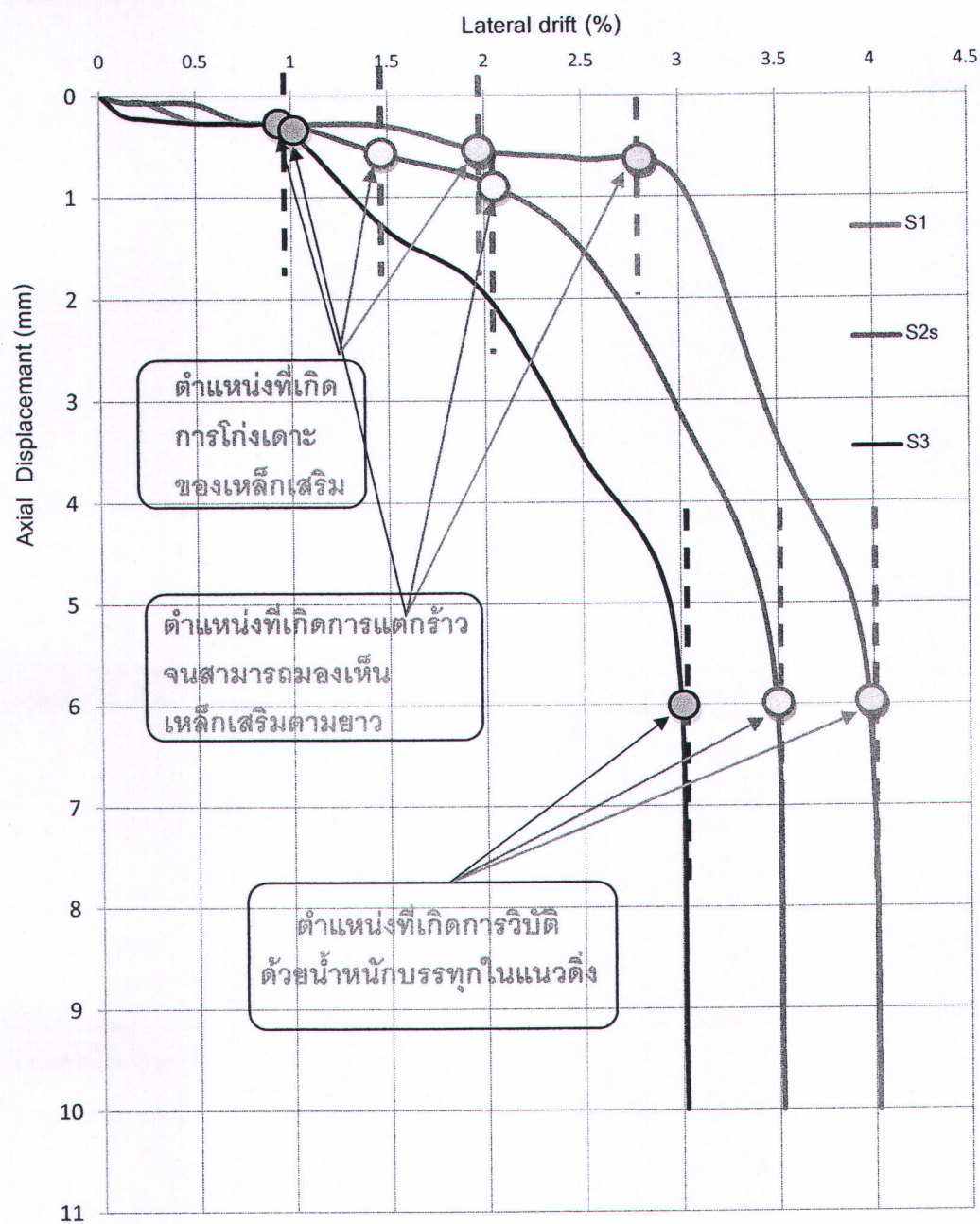
ชื่อเสาตัวอย่างทดสอบ		S1	S2s	S3
ระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ทำให้เริ่มเกิดรอยแตกร้าวเริ่มแรก (δ_{cr})	ระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ทำให้เริ่มเกิดรอยแตกร้าวเริ่มแรก (δ_{cr})	1.88 (0.125%)	1.87 (0.125%)	1.88 (0.125%)
	ระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างที่เหล็กเสริมถึงจุดคราก (δ_{yi})	16.5 (1.0%)	11.25 (0.75%)	11.25 (0.75%)
	ระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างที่จุดคราก (δ_y)	13.25 (0.90%)	7.50 (0.50%)	9.75 (0.65%)
	ระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างที่แรงกระทำด้านข้างสูงสุด (δ_{p_m})	21.75 (1.45%)	18.88 (1.25%)	14.35 (0.95%)
	ระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างที่สูญเสียความต้านทานด้านข้างหรือที่ $0.8P_{max}$ (δ_m)	29.95 (2.0%)	25.50 (1.7%)	21.41 (1.5%)
	ระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างที่เกิดการวิบัติ ($\delta_{collapse}$)	63.31 (4.0%)	52.62 (3.5%)	44.79 (3.0%)
ความเหนียวเชิงการเคลื่อนที่ด้านข้างที่สูญเสียความต้านทานด้านข้างหรือที่ $0.8P_{max}$ ($\mu_m = \frac{\delta_m}{\delta_y}$)		2.35	3.40	2.20
ความเหนียวเชิงการเคลื่อนที่ด้านข้างที่เกิดการวิบัติ ($\mu_{collapse} = \frac{\delta_{collapse}}{\delta_y}$)		4.97	7.02	4.59

โดยจากรูปที่ 4.39 และ ตารางที่ 4.8 แสดงผลการสรุประยะเคลื่อนที่ด้านข้างจากการทดสอบของเสาตัวอย่างทั้ง 3 ตัวอย่างพบว่าเสาตัวอย่าง S1 ซึ่งเป็นตัวแทนในการเปรียบเทียบมีระยะเคลื่อนที่ด้านข้างสูงสุด โดยมีความมากกว่าเสาตัวอย่าง S2s และ S3 ซึ่งมีระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างที่เริ่มเกิดรอยแตกร้าว เสาตัวอย่างทั้ง 3 ต้น มีค่าเท่ากัน คือ 1.88 มม. ที่อัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างประมาณ 0.125% ต่อความสูง มีระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างที่จุดคราก (75% secant approach) ของเสาตัวอย่าง S1, S2s และ S3 มีค่าเท่ากับ 13.25 มม., 7.50 มม. และ 9.75 มม. ที่อัตราการเคลื่อนที่

ด้านข้างประมาณ 0.9%, 0.5%, 0.65% ต่อความสูง ตามลำดับ หลังจากที่เกิดเหล็กเสริมเส้นแรกเกิดการคราก (δ_y , 1st steel yielding) และเสารับแรงกระทำด้านข้างสูงสุด ซึ่งมีระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างที่ตำแหน่งนี้ แสดงดังตารางที่ 4.8 โดยระยะการเคลื่อนตัวที่สูญเสียความต้านทานด้านข้างหรือตำแหน่งที่แรงกระทำด้านข้างลดลง 20% ของแรงกระทำด้านข้างสูงสุด ของเสาตัวอย่างทั้ง 3 ต้น มีระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างที่สูญเสียความต้านทานด้านข้าง เท่ากับ 29.95 มม., 25.50 มม. และ 21.41 มม. ที่อัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างประมาณ 2.0%, 1.7%, 1.5% ต่อความสูง ความเหนียวเชิงการเคลื่อนที่ด้านข้างที่สูญเสียความต้านทานด้านข้าง มีค่าเท่ากับ 2.35, 3.40, 2.20 ตามลำดับ และจุดที่เกิดการวิบัติเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวดิ่ง มีค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนที่ด้านข้างที่เกิดการวิบัติ เท่ากับ 4.97, 7.02, 4.59 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าค่าความเหนียวของเสาตัวอย่าง S2s มีสูงสุด แต่ในระหว่างการทดสอบนั้นสำรวจพบว่า เสาตัวอย่าง S2s ไม่มีเสถียรภาพมากนัก เนื่องเกิดรอยแตกกว้างขึ้นอย่างรวดเร็วต่อเนื่อง ทั้งในแนวทแยงมุมที่เกิดจากแรงเฉือน ในแนวดิ่งเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่กดทับ และกระจายตัวเต็มผิวหน้าของเสาทดสอบก่อนที่เกิดการหลุนร่องของคอนกรีต ซึ่งระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของเสาตัวอย่าง S2s นั้นถึงจุดครากเร็วที่สุด จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เสาคอนกรีตมีค่าความเหนียวสูงกว่าเสาอย่าง S1 และ S3

4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนในแนวก้นกับร้อยละการเคลื่อนด้านข้างต่อความสูง

ระยะการเคลื่อนที่ในแนวก้นที่หัวเสาตัวอย่างทดสอบที่ขึ้นนั้นเนื่องจาก น้ำหนักบรรทุกจากแรงโน้มถ่วง ประมาณ คงที่ $0.2 f'_c A_g$ กระทำในแนวดิ่งที่หัวเสา ดังนั้นระยะการเคลื่อนที่ในแนวก้นที่เกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มทดสอบจนถึงจนเกิดการวิบัติด้วยน้ำหนักบรรทุกจากแรงโน้มถ่วง สามารถนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนในแนวก้นกับร้อยละการเคลื่อนด้านข้างต่อความสูง แสดงดังรูปที่ 4.40 เพื่อเปรียบเทียบระยะและรูปแบบการเคลื่อนตัวในแนวก้นที่เกิดขึ้นของเสาตัวอย่างทดสอบ S1 S2s และ S3 จากผลการทดสอบพบว่า เสาตัวอย่างทั้ง 3 ตัวอย่างมีระยะเคลื่อนที่ในแนวก้นก่อนเกิดการวิบัติ ประมาณ 6 มม. เมื่อเทียบช่วงความสูงของเสาตัวอย่างทดสอบ 1.5 เมตร พบว่ามีค่าการยุบตัวของเสาประมาณ 0.4% ซึ่งการเพิ่มระยะการเคลื่อนที่ในแนวก้นของเสาตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 ต้น จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และมีค่ามากขึ้นเมื่อเกิดการโก่งเดาะขึ้น โดยจะมีค่าอย่างรวดเร็วมื่อเกิดการแตกร้าวจนคอนกรีตหลุนร้อนออกมา จนสามารถมองเห็นเหล็กเสริมตามยาวด้วยตาเปล่า



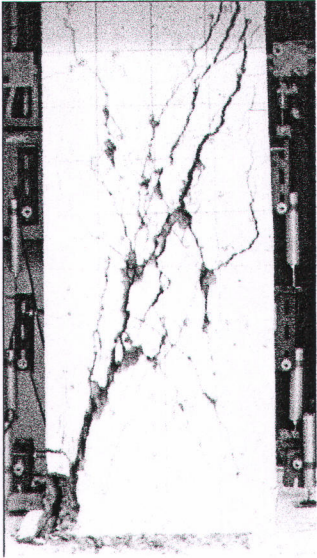
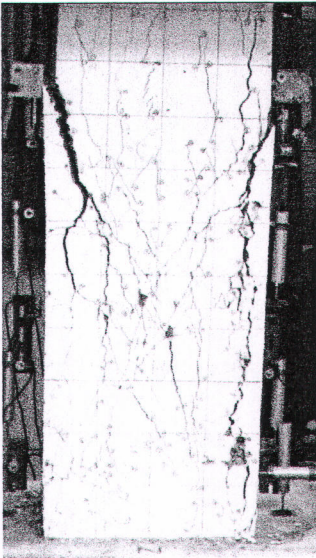
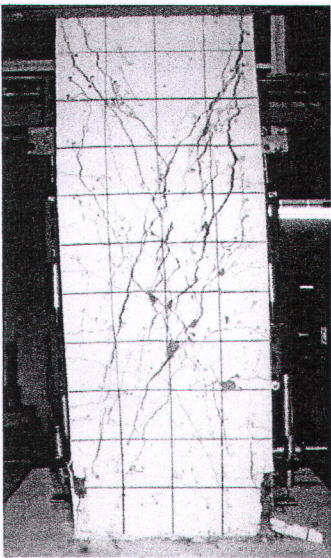
รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนในแนวแกนกับร้อยละการเคลื่อนด้านข้าง
ต่อความสูงของเสาตัวอย่างทดสอบ S1 S2s และ S3

4.4.3 รูปการวิบัติของเสาตัวอย่างทดสอบ

การทดสอบเสาตัวอย่างภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักรและแรงกระทำในแนวแกนคงที่ $0.2 f'_c A_g$ จนเกิดการวิบัติด้วยน้ำหนักรรทุกจากแรงโน้มถ่วง ทำให้เกิดรอยแตกกว้างมากมาย การหลุดร่อนของคอนกรีตที่ห่อหุ้มเหล็กเสริม เกิดการฉีกขาดโค้งงอของเหล็กเสริมตามขวาง และเกิดการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว โดยการโก่งเดาะของเสาตัวอย่าง S1, S2s และ S3 ที่อัตราการเคลื่อนที่ด้านข้าง 2.00%, 1.50%, และ 1.00% ของความสูง โดยเสาตัวอย่างทั้ง 3 ต้น มีรอยแตกกว้างเป็นลักษณะเส้นทะแยงมุม เห็นได้ชัดเจนในเสาตัวอย่าง S1 และ S3 แต่เสาตัวอย่าง S2s ที่มีรอยแตกกว้างกระจายตัวเต็มผิวหน้าของเสา ในลักษณะเส้นทแยงมุมและยังมีรอยแตกกว้างในแนวตั้งด้วย ซึ่งแตกต่างจากเสาตัวอย่าง S1 และ S3 ที่ไม่พบ อาจเป็นสาเหตุมาจากการถ่ายเทน้ำหนักรรทุกในแนวตั้งที่ไม่ดีมากนัก เนื่องจากเสาตัวอย่าง S2s มีการต่อทาบเหล็กเสริมในแนวตั้ง และจากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า เสาตัวอย่างทดสอบ S1 S2s และ S3 เกิดการวิบัติแบบเฉือน (shear Failure Mode) ดังแสดงในรูปที่ 4.41 การวิบัติแบบเฉือนของเสาตัวอย่างทดสอบ และรูปที่ 4.42 แสดงการวิบัติหลังหยุดการทดสอบของเสาตัวอย่างทดสอบ S1 S2s และ S3 โดยอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างต่อความสูงที่เกิดการวิบัติด้วยน้ำหนักรรทุกในแนวตั้ง เท่า 4.0%, 3.5% และ 3.0% ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ทำนายอัตราการเคลื่อนที่ที่เกิดการวิบัติน้ำรรทุกในแนวแกน ที่ได้พัฒนาขึ้นโดย Elwood และ Moehle, (2005) ได้อธิบายถึงแบบจำลองอย่างง่ายสำหรับการจำลองความสามารถการเสียรูปที่จุดวิบัติด้วยน้ำหนักรรทุกในแนวตั้งของเสาที่เสียหายเนื่องจากแรงเฉือน (หลังจากเกิดการครากเนื่องจากแรงดัด) แสดงดังรูปที่ 2.11 และการคำนวณตามสมการที่ 2.19 ผลในการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าอัตราการเคลื่อนที่ที่ได้ในการคำนวณของ Elwood และ Moehle, (2005) ใช้ทำนายอัตราการเคลื่อนที่ของเสาในประเทศไทยหรือประเทศที่เกิดแผ่นดินไหวน้อยไม่ได้ เนื่องจากสูตรในการคำนวณนี้มีสมมุติฐานในการวิเคราะห์ที่รับการเกิดแผ่นดินไหวรุนแรง ซึ่งจะแสดงผลของการเปรียบเทียบ ดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบผลของอัตราการเคลื่อนที่ ที่เกิดการวิบัติด้วยน้ำบรรทุกในแนวแกนที่

ชื่อเสาตัวอย่าง	อัตราการเคลื่อนที่ ที่เกิดการวิบัติด้วยน้ำ บรรทุกในแนวแกนที่คาดว่าจะเกิดขึ้น $\left(\frac{\Delta}{L}\right)_{axial} = \frac{4}{100} \frac{1 + (\tan \theta_s)^2}{\tan \theta_s + P \left(\frac{s}{A_v f_{yh} d_c \tan \theta_s} \right)}$	อัตราการเคลื่อนที่ ที่เกิดการวิบัติ ด้วยน้ำบรรทุกในแนวแกนจากผล การทดสอบ
S1	0.5 %	4.0 %
S2s	0.7 %	3.5 %
S3	0.4 %	3.0 %

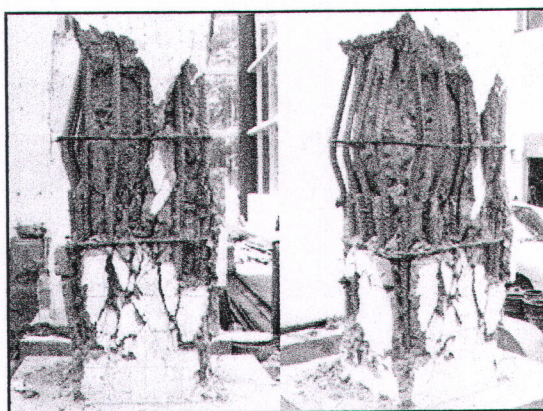


(ก) เสาตัวอย่าง S1(2.0%) (ข) เสาตัวอย่าง S2s (2.0%) (ค) เสาตัวอย่าง S3 (2.0%)

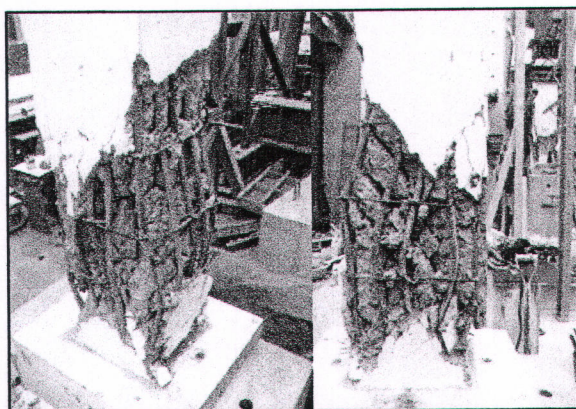
รูปที่ 4.41 การวิบัติแบบเฉือนของเสาตัวอย่างทดสอบ S1 S2s และ S3



(ก) รูปการทดสอบหลังการวิบัติของเสาตัวอย่างทดสอบ S1



(ข) รูปการทดสอบหลังการวิบัติของเสาตัวอย่างทดสอบ S2s



(ค) รูปการทดสอบหลังการวิบัติของเสาตัวอย่างทดสอบ S3

รูปที่ 4.42 แสดงการวิบัติหลังการทดสอบของเสาตัวอย่างทดสอบ S1 S2s และ S3