

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยการบรรเทาความเสียหายจากแผ่นดินไหวและสภาวะ  
แวดล้อมต่อระบบโครงสร้างไลฟ์ไลน์

ได้รับการสนับสนุนโดย

โครงการส่งเสริมการทำงานวิจัยเชิงลึกในสาขาวิชาที่มีศักยภาพสูง

กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

ปีงบประมาณ 2553

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาณัติ เรืองรัมย์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทคัดย่อ

เมื่อเสาคอนกรีตเสริมเหล็กได้รับแรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร จะส่งผลให้ความสามารถในการรับน้ำหนักลดลงเนื่องจากเหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะบริเวณจุดหมุนพลาสติก งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเพื่อชะลอการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักรจำนวน 2 ตัวอย่าง ซึ่งมีขนาดหน้าตัด 0.40 เมตร x 0.40 เมตร สูง 2.15 เมตร โดยเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม และไม่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ซึ่งทั้ง 2 ตัวอย่างมีอัตราส่วนเหล็กเสริมตามยาวเท่ากับ 0.0123 และมีอัตราส่วนปริมาตรของเหล็กเสริมตามขวางเท่ากับ 0.00424 จากผลการทดสอบเหล็กเสริมที่มีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมภายใต้แรงอัดตามแนวแกนพบว่าปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมสามารถเพิ่มกำลังหลังจุดครากของเหล็กเสริมตามยาวให้ดีขึ้นและมีการสลายพลังงานที่ดี

จากการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร พบว่าตัวอย่างเสาที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมีความสามารถในการต้านทานการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวได้เป็นอย่างดี โดยตัวอย่างเสาที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมีความเหนียวเพิ่มขึ้นประมาณ 27% เสาที่มีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมีระยะจุดหมุนพลาสติกน้อยกว่าเสาที่ไม่มีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

## สารบัญ

หน้า

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 งานวิจัยที่ผ่านมาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	3
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการทดสอบเสถียรภาพใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร .....	3
2.1.2งานวิจัยที่เกี่ยวกับพฤติกรรมการโก่งเดาะในการทดสอบเสริมเหล็กรับแรงกดและแรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร.....	14
2.2 คุณสมบัติของโครงสร้างที่จำเป็นต่อการต้านทานแรงแผ่นดินไหว .....	15
2.2.1 สติฟเนส (stiffness) .....	15
2.2.2 กำลังของโครงสร้าง (strength) .....	16
2.2.3 ความเหนียวโครงสร้าง (ductility).....	16
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความโค้งและค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนที่ .....	19
บทที่ 3 การทดสอบปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม.....	22
3.1 คุณสมบัติของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม .....	22
3.2 การเตรียมตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมสำหรับทดสอบ .....	23
3.3 การทดสอบตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม.....	25
3.4 ผลการทดสอบตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม .....	26
บทที่ 4 ตัวอย่างในการทดสอบ .....	30
4.1 ตัวอย่างเสาทดสอบ.....	30
4.2 คุณสมบัติของวัสดุในการทดสอบ .....	33
4.2.1 คอนกรีต.....	33
4.2.2 เหล็กเสริม .....	34
4.2.3 เกจวัดความเครียด .....	35
4.3 การเตรียมตัวอย่างเสา.....	36
4.4 ขั้นตอนการทดสอบ .....	38

บทที่ 5 ผลการทดสอบ.....	40
5.1 พฤติกรรมของตัวอย่างเสาที่สังเกตระหว่างการทดสอบ .....	40
5.1.1 ตัวอย่างเสา C-09-200 .....	40
5.1.2 ตัวอย่างเสา CC-09-200 .....	41
5.2 พฤติกรรมของเหล็กเสริมในระหว่างการทดสอบ .....	48
5.2.1 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา C-09-200.....	48
5.2.2 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวางในตัวอย่างเสา C-09-200 .....	50
5.2.3 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา CC-09-200 .....	51
5.2.4 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวางในตัวอย่างเสา CC-09-200.....	53
5.2.5 พฤติกรรมของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมในตัวอย่างเสา CC-09-200.....	55
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ด้านข้าง .....	56
5.3.1 ตัวอย่างเสา C-09-200 .....	56
5.3.2 ตัวอย่างเสา CC-09-200 .....	58
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้ง (moment-curvature relation).....	61
5.4.1 ตัวอย่างเสา C-09-200 .....	62
5.4.2 ตัวอย่างเสา CC-09-200 .....	64
5.5 ค่าความเหนียว .....	65
5.6 ความสามารถในการสลายพลังงาน.....	71
5.7 ค่าสติฟเนส (stiffness).....	73
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย.....	75
รายการอ้างอิง.....	76

# บทที่ 1

## บทนำ

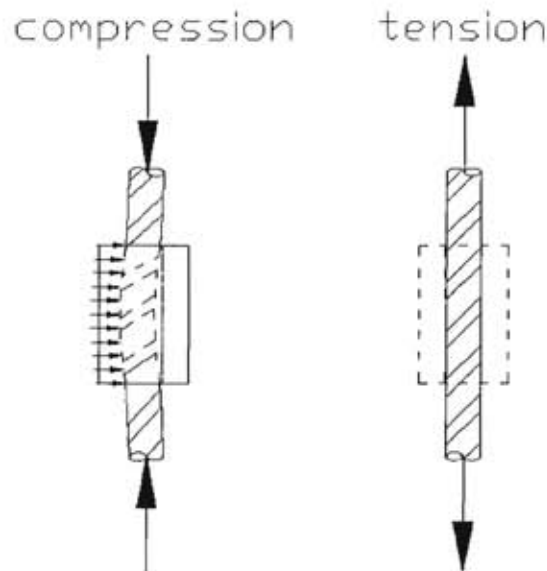
### 1.1 ความเป็นมา

แผ่นดินไหวเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่ยากแก่การพยากรณ์ไม่ว่าจะเป็นขนาดความแรงและเวลาที่เกิดของแผ่นดินไหว การเกิดแผ่นดินไหวทำให้โครงสร้างเกิดการเสียหายอาจถึงขั้นเกิดการพังทลายซึ่งทำลายทั้งชีวิตและทรัพย์สินเป็นอย่างมาก แผ่นดินไหวขนาดใหญ่ในอดีตได้คร่าชีวิตประชากรเป็นจำนวนมาก สาเหตุสำคัญของโครงสร้างเกิดการเสียหายและพังทลายเกิดจากโครงสร้างมีความสามารถในการรับแรงน้ำหนักลดลงเมื่อโครงสร้างเกิดการสั่นไหวเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว และเกิดการวิบัติโดยสิ้นเชิง

เมื่อเกิดแผ่นดินไหวกระทำต่อโครงสร้าง พบว่าเสาที่มีการเสริมเหล็กเสริมตามขวางไม่เพียงพอบริเวณจุดหมุนพลาสติก (plastic hinge length) ทำให้เหล็กเสริมตามยาวขาดการยึดรั้งที่เพียงพอจากทางด้านข้าง ส่งผลให้เหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะ (buckling) และทำให้สูญเสียกำลังรับน้ำหนักและเกิดการวิบัติโดยสิ้นเชิง งานวิจัยนี้จึงได้ปรับปรุงสมรรถนะของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยพัฒนาปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม (rebar-restraining collars) ติดตั้งโดยสวมทับเหล็กเสริมตามยาวบริเวณจุดหมุนพลาสติก เพื่อเพิ่มการยึดรั้งทางด้านข้างของเหล็กเสริม ป้องกันไม่ให้เหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะ, เพิ่มกำลังและความเหนียวให้กับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในเสาคอนกรีตเมื่อเสาได้รับแรงด้านข้างแบบวัฏจักรมากระทำเหล็กเสริมตามยาวจะทำหน้าที่รับแรงดึงและแรงอัดหนึ่งสลับไปมา ซึ่งเมื่อเหล็กเสริมตามยาวภายในเสาได้รับแรงอัดอาจส่งผลให้เหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะได้ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเพื่อชะลอการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว ซึ่งปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมจะทำงานก็ต่อเมื่อชิ้นส่วนของเหล็กเสริมนั้นทำหน้าที่รับแรงอัด ในทางกลับกันเมื่อชิ้นส่วนของเหล็กเสริมตามยาวรับแรงดึงปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมไม่ได้ช่วยรับแรงโดยยอมให้เหล็กเสริมยึดได้ตามความยาว หลักการทำงานของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมได้แสดงในรูปที่ 2.1 การเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเป็นการเพิ่มหน้าตัดขวางในการรับแรงอัดให้กับเหล็กเสริมตามยาว ซึ่งส่งผลให้มีเหล็กเสริมมีกำลังและความเหนียวเพิ่มขึ้นเมื่อรับแรงอัดตามแนวแกน พฤติกรรมของเสาเมื่อเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมสามารถช่วยชะลอการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวในบริเวณจุดหมุนพลาสติก เมื่อเหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะข้างลง จึงทำให้บริเวณจุดหมุนพลาสติกนั้นเกิด

เกิดความเสียหายลดลง ซึ่งส่งผลให้สามารถรับแรงกระทำทางด้านข้างได้เพิ่มขึ้นอีกทั้งยังเป็นการเพิ่มความเหนียวให้กับเสาอีกด้วย



รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำตามแนวแกน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยที่ศึกษามีวัตถุประสงค์ของงานวิจัยดังต่อไปนี้

1. พัฒนาปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเพื่อเพิ่มกำลังและความเหนียวให้กับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก
2. ศึกษาพฤติกรรมของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำตามแนวแกน
3. ศึกษาพฤติกรรมเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

## บทที่ 2

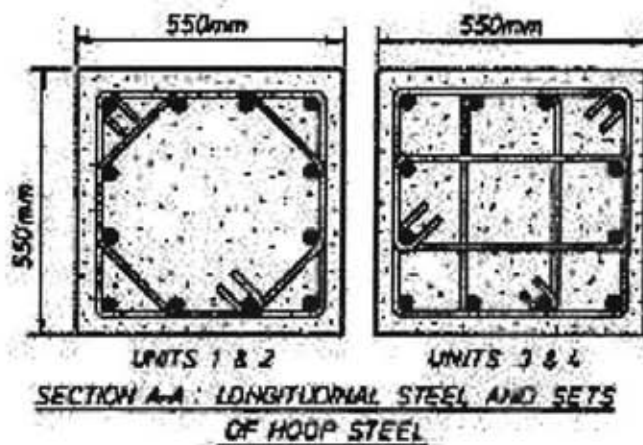
### งานวิจัยที่ผ่านมาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับผลจากแรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร และพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวเมื่อรับแรงอัดและแรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตซึ่งสามารถสรุปรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

##### 2.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการทดสอบเสาภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร

Park และคณะ (1982) ได้ทดสอบเสาขนาดหน้าตัด 0.55 ม. x 0.55 ม. สูง 3.30 ม. จำนวน 4 ต้น ภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักรและแรงตามแนวแกนคงที่ โดยพิจารณาผลแรงกระทำตามแนวแกนและปริมาณเหล็กเสริมตามขวาง โดยปริมาณของเหล็กเสริมตามขวางถูกออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบของนิวซีแลนด์ (New Zealand Code) ขนาดหน้าตัดและรูปแบบการเสริมเหล็กได้ดังในแสดงรูปที่ 2.1 และคุณสมบัติต่างๆของเสาแสดงในตารางที่ 2.1



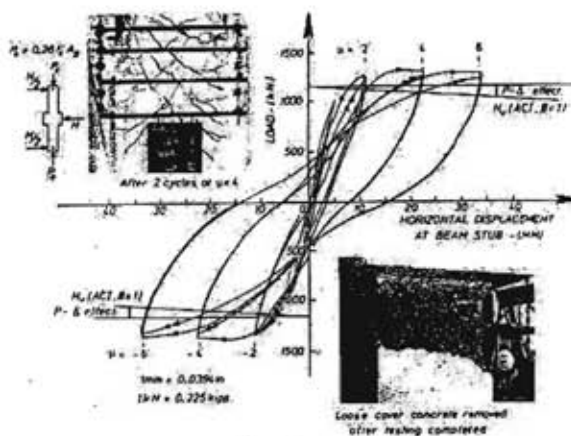
รูปที่ 2.1 ขนาดหน้าตัดและรูปแบบการเสริมเหล็ก (Park และคณะ, 1982)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของตัวอย่างเสา (Park และคณะ, 1982)

Test specimen	Concrete Strength (MPa)	Axial load		Reinforcement			
		Force (kN)	Ratio $P/f_c' A_g$	Longitudinal		Transverse	
				$f_y$ (MPa)	$\rho_l$	$f_y$ (MPa)	$\rho_s$
1	23.1	1815	0.26	375	0.0179	455	0.015
2	41.1	2680	0.214	375	0.0179	455	0.023
3	21.4	2719	0.42	375	0.0179	455	0.020
4	23.5	4265	0.60	375	0.0179	455	0.048

$f_y$  คือกำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมตามยาว,  $f_y$  คือกำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมตามขวาง

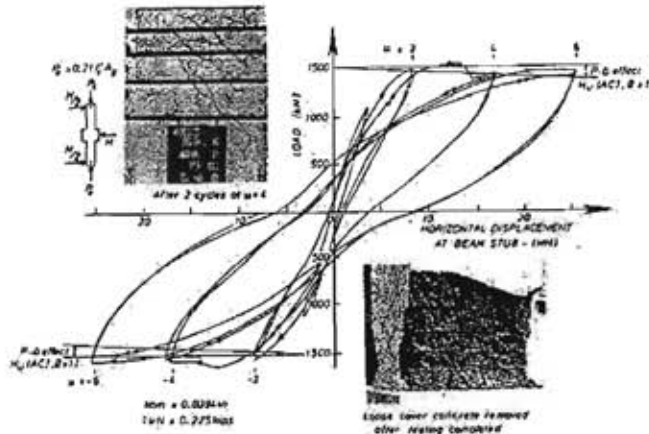
ผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างเสาที่ทดสอบมีค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนที่ (displacement ductility factor) มีค่าน้อยเท่ากับ 6 และมีค่าสูงสุดประมาณ 10 ค่าความเครียดสูงสุดของคอนกรีตในแกนคอนกรีตมีค่าระหว่าง 0.016-0.026 ดังแสดงในรูปที่ 2.2 หลังจากคอนกรีตหุ้มเกิดการหลุดล่อนออก นอกจากนั้นยังพบว่าค่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดที่แท้จริง จะมีค่ามากกว่าค่าต้านทานโมเมนต์ดัดตามทฤษฎี โดยเฉพาะในกรณีที่แรงอัดตามแนวแกนมีค่ามากและมีประสิทธิภาพการโอบรัดที่ดี เหล็กเสริมตามขวางมีค่าความเครียดถึงจุดคราก แต่ไม่ส่งผลต่อเสาเนื่องจากค่าความเครียดถึงจุดคราก แต่ยังไม่ถึงช่วงของการแข็งตัวเพิ่มขึ้น (hardening) ผลการทดสอบบ่งชี้ว่าปริมาณเหล็กเสริมตามขวางตามมาตรฐาน SEAOC (สมาคมวิศวกรโครงสร้างแห่งรัฐแคลิฟอร์เนีย) มีค่ามากพอที่จะรับได้สำหรับแรงกระทำตามแนวแกนคงที่ที่ระดับต่ำ แต่ไม่เป็นที่เหมาะสมสำหรับแรงกระทำตามแนวแกนคงที่ที่ระดับสูง



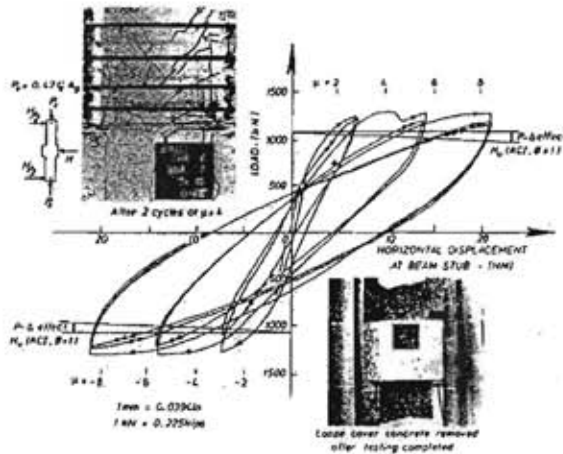
(ก) ตัวอย่างเสาต้นที่ 1

รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ด้านข้าง (Park และคณะ, 1982)

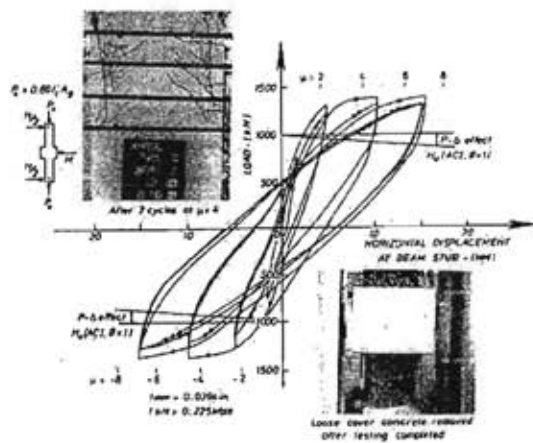




(ข) ตัวอย่างเสาต้นที่ 2



(ค) ตัวอย่างเสาต้นที่ 3

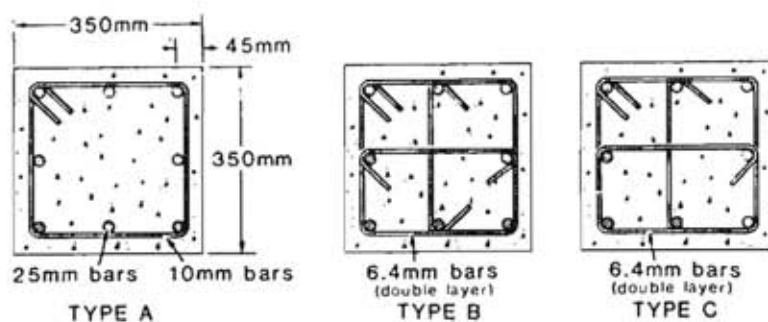


(ง) ตัวอย่างเสาต้นที่ 4

รูปที่ 2.2 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ด้านข้าง (Park และคณะ, 1982)

Ozcebe และ Staatcioglu (1987) ได้ทดสอบเสาขนาด 0.35 ม. x 0.35 ม. สูง 0.90 ม. จำนวน 4 ต้น ภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักรและแรงตามแนวแกนคงที่ โดยพิจารณาผล

ของระยะห่างของเหล็กเสริมตามขวาง และคอนกรีตที่มีการโอบรัดค้ำเนื่องถึงรายละเอียดการเสริมเหล็กเสริมตามขวาง หน้าตัดขวางของรายละเอียดของการเสริมเหล็กเสริมตามขวางแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ แบบแรกออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบของ ACI 318-83 เป็นการเสริมปลอกรัดรอบ (hoop ties) เพียงอย่างเดียว รูปแบบที่ 2 และ 3 มีการเพิ่มเหล็กยึดทางขวาง (crossties) จะมีผลต่อพฤติกรรมของเสาที่ต่ำกว่าการเสริมเหล็กเสริมตามขวางรัดรอบเพียงอย่างเดียว รูปแบบที่ 2 เหล็กยึดทางขวางใช้ของขนาด 135 องศาปลายทั้ง 2 ส่วนรูปแบบที่ 3 เหล็กยึดทางขวางปลายข้างหนึ่งองศาขนาด 135 องศา อีกข้างหนึ่ง 90 องศา ขนาดหน้าตัดและรูปแบบการเสริมเหล็กได้แสดงในตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.3



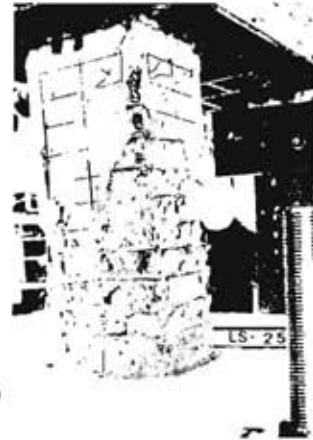
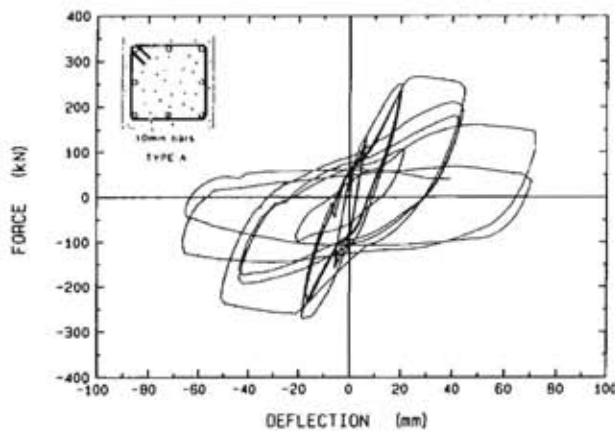
รูปที่ 2.3 ขนาดหน้าตัดและรูปแบบการเสริมเหล็ก (Ozceve และ Staacioglu, 1987)

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของตัวอย่างเสา (Ozcebe และ Staatcioglu, 1987)

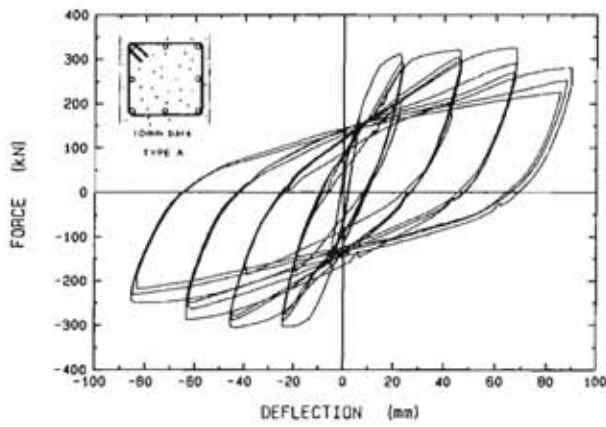
Test specimen	Concrete Strength (MPa)	Axial load Ratio $P/f_c'Ag$	Reinforcement					
			Longitudinal		Transverse			
			$f_y$ (MPa)	$\rho_l$	$f_y$ (MPa)	$\rho_s$	S (mm)	Type
U3	34.8	12	438	0.0327	470	0.0169	75	A
U4	32.0	12	438	0.0327	470	0.0254	50	A
U6	37.3	12	437	0.0327	425	0.0195	65	B
U7	39.0	12	437	0.0327	425	0.0195	65	C

ผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างที่มีระยะห่างของเหล็กเสริมตามขวางน้อยกว่า มีความสามารถในการรับแรงด้านข้างและมีความเหนียวมากกว่าตัวอย่างตามมาตรฐานการออกแบบของ ACI 318-83 สำหรับเสาที่มีการโอบรัดที่ต่ำกว่าโดยการเพิ่มเหล็กยึดทางขวาง (crossties) มีความสามารถในการรับแรงด้านแรงและมีความเหนียวมากกว่าแม้ว่าปริมาณเหล็กเสริมน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่มีการเพิ่มเหล็กยึดทางขวางก็ตาม นอกจากนี้ยังพบว่าเหล็กยึดทางขวาง

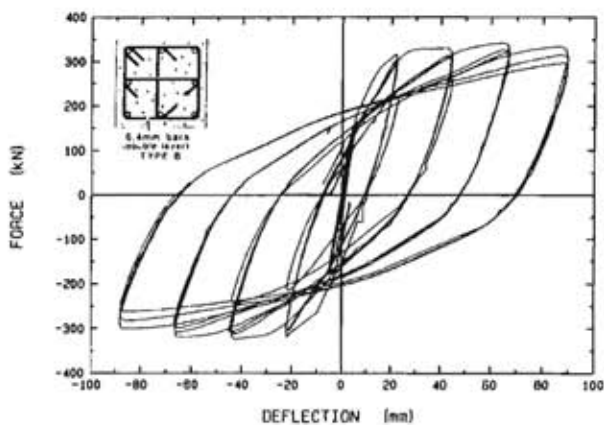
ของอ 135 องศาปลายทั้ง 2 มีประสิทธิภาพเหมือนเหล็กยึดทางขวางของอ 135 องศา อีกข้างหนึ่ง 90 องศา ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวอย่างได้แสดงในดังรูปที่ 2.4



(ก) ตัวอย่าง U4



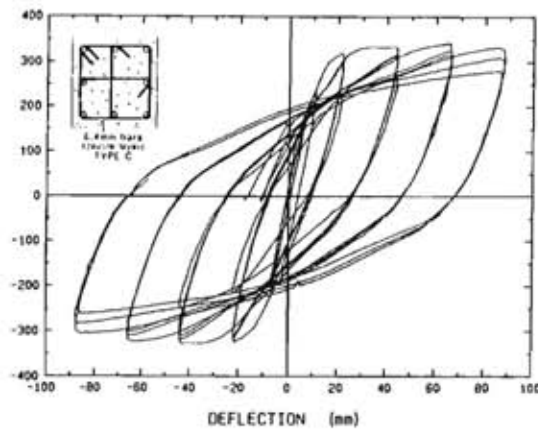
(ข) ตัวอย่าง U3



(ค) ตัวอย่าง U6

รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ด้านข้างและสภาพเสถียรหลังการทดสอบ

(Ozcebe และ Stacioglu, 1987)

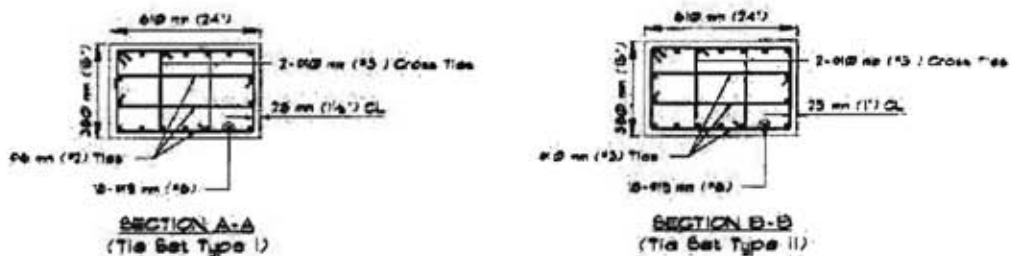


(ง) ตัวอย่าง U7

รูปที่ 2.4 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ด้านข้างและสภาพเสถียรหลังการทดสอบ (Ozcebe และ Staacioglu, 1987)

Wehbe และคณะ (1999) ได้ทดสอบเสาขนาด 0.38ม. x 0.61 ม. สูง 2.05 ม. จำนวน 4 ต้น ภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักรและแรงตามแนวแกนคงที่ โดยพิจารณาผลปริมาณการเสริมเหล็กเสริมตามขวางซึ่งมีปริมาณการโอบรัดในระดับปานกลางและแรงอัดตามแนวแกน ซึ่งปริมาณการเสริมเหล็กเสริมตามขวางที่พิจารณามีค่า 46 % และ 60 % ของปริมาณการเสริมเหล็กเสริมตามขวางมาตรฐานการออกแบบ AASHTO และแรงอัดตามแนวแกนมีค่า 0.1 ถึง 0.25  $f'_c A_g$  รายละเอียดการเสริมเหล็กตามขวางได้แสดงในรูปที่ 2.5 และคุณสมบัติของเสาได้แสดงในตารางที่ 2.3

ผลการทดสอบพบว่าค่าความเหนียวของเสามีค่าประมาณ 5 เมื่อเสริมเหล็กเสริมตามขวางประมาณ 50 % ของมาตรฐานการออกแบบของ AASHTO แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณเหล็กเสริมตามขวางเท่ากับค่าความเหนียวของเสาจะลดลงเมื่อแรงอัดในแนวแกนมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และเมื่อแรงอัดในแนวแกนมีค่าเท่ากับค่าความเหนียวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมตามขวาง การวิบัติในเสานั้นจะเกิดจากโค้งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวเนื่องจากการอัดออกของของอ 90 องศา

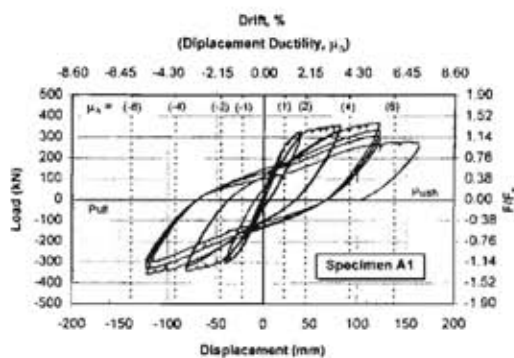


รูปที่ 2.5 ขนาดหน้าตัดและรูปแบบการเสริมเหล็ก (Wehbe และคณะ, 1999)

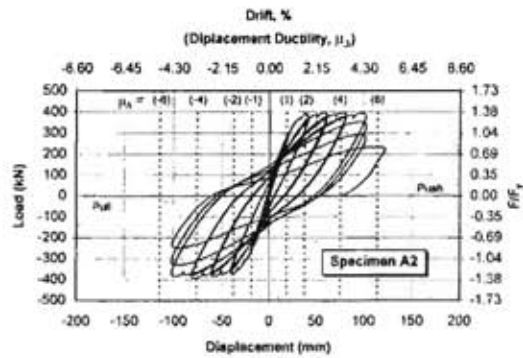
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของเสา (Wehbe และคณะ, 1999)

Test specimen	Concrete Strength (MPa)	Axial load		Longitudinal		Transverse reinforcement			
		Force (kN)	Ratio $P/fc'Ag$	$f_y$ (MPa)	$\rho_l$	$f_y$ (MPa)		$\rho_{s(d)}$	$\rho_{s(b)}$
						Ø6mm	Ø10mm		
A1	31.7	615	0.10	414	0.022	455	428	0.37	0.35
A2	27.2	1505	0.24	414	0.022	455	428	0.37	0.35
B1	29.7	601	0.09	414	0.022	455	428	0.48	0.46
B2	28.1	1514	0.23	414	0.022	455	428	0.48	0.46

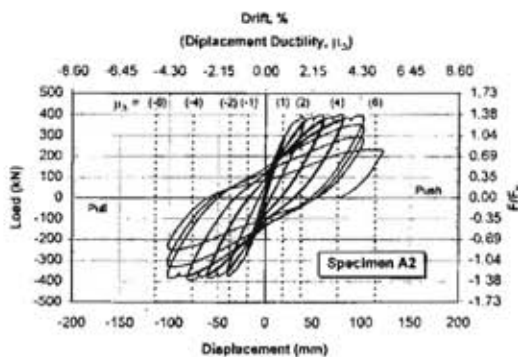
$\rho_{s(d)}$  และ  $\rho_{s(b)}$  คืออัตราส่วนเหล็กเสริมตามขวางทางความลึกและทางความหนาของหน้าตัด



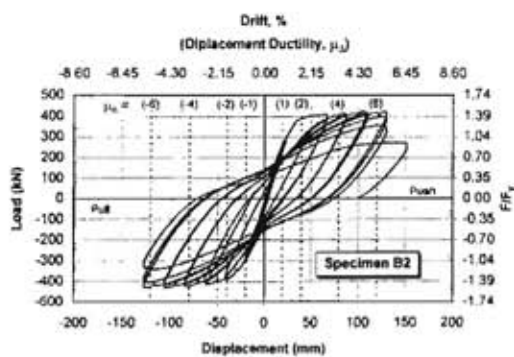
(ก) ตัวอย่าง A1



(ข) ตัวอย่าง A2



(ค) ตัวอย่าง A2

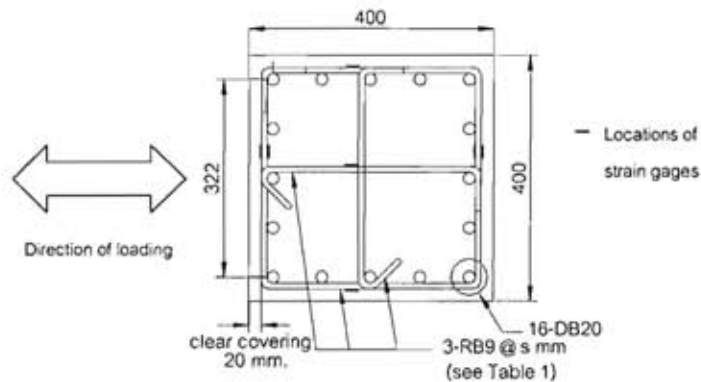


(ง) ตัวอย่าง B2

รูปที่ 2.6 ผลของแรงตามแนวแกนที่มีต่อความเหนียวเชิงการเคลื่อนที่ (Wehbe และคณะ, 1999)

Lukkunaprasit และ Sittipunt (2003) ได้ทดสอบเสาขนาด 0.40ม. x 0.40ม. สูง 1.5 ม. จำนวน 5 ต้น ภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักรและแรงตามแนวแกนคงที่ โดยพิจารณาผลของระยะห่างของเหล็กเสริมตามขวาง ซึ่งปริมาณการเสริมเหล็กเสริมตามขวางมีปริมาณการโอบรัดในระดับปานกลางตามข้อกำหนดโดยมาตรฐานการออกแบบ ACI และเพิ่มคิลิปยึดของ 90 องศา

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการโอบรัดเสาของเสาคอนกรีต เนื่องจากของอ 90 องศา จะเกิดการเปิดแยกออกจากกันเมื่อมีระยะเคลื่อนที่ของเสาที่ทำให้คอนกรีตหุ้มเกิดการหลุดร่อน (spalling) ผู้วิจัยจึงได้ทดสอบและเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างเสาที่ไม่มีคลิปยึดของอกับตัวอย่างเสาที่มีคลิปยึดของอ ขนาดหน้าตัดและรูปแบบการเสริมเหล็กได้ดังแสดงในรูปที่ 2.7 คุณสมบัติของตัวอย่างเสาได้แสดงในตารางที่ 2.4



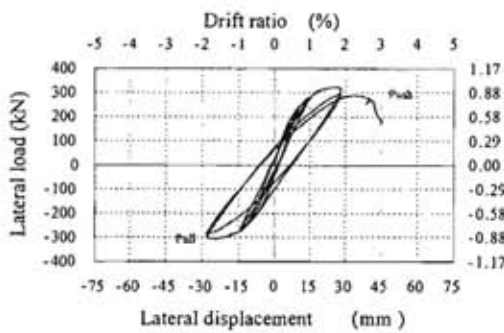
รูปที่ 2.7 ขนาดหน้าตัดและรูปแบบการเสริมเหล็ก (Lukkunaprasit และ Sittipunt, 2003)

ผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มแรงอัดตามแนวแกนส่งผลให้ค่าความเหนียวและการสลายพลังงานสะสมมีค่าน้อยลง และยังพบอีกว่า ตัวอย่างเสาที่มีการเพิ่มคลิปยึดของอ 90 องศา มีความสามารถในการรับแรงด้านแรงและมีความเหนียวมากกว่าเสาที่มีของอ 135 องศา และยังมี การสลายพลังงานที่ต่ำกว่าอีกด้วย เนื่องจากตัวอย่างเสาที่มีการเพิ่มคลิปยึดของอ 90 องศา จะมีการโอบรัดของคอนกรีตที่ต่ำกว่าเสาที่มีของอ 135 องศา ประสิทธิภาพของคลิปยึดของอทำให้ ความเครียดของเหล็กยึดทางขวาง (crossties) มีค่ามากขึ้นในบริเวณจุดหมุนพลาสติก และยังพบ อีกว่ารูปแบบประวัติการรับน้ำหนัก (loading history) ที่แตกต่างกันมีผลทำให้ค่าความเหนียวและ ค่าการสลายพลังงานแตกต่างกัน ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวอย่าง เสาได้แสดงในรูปที่ 2.8

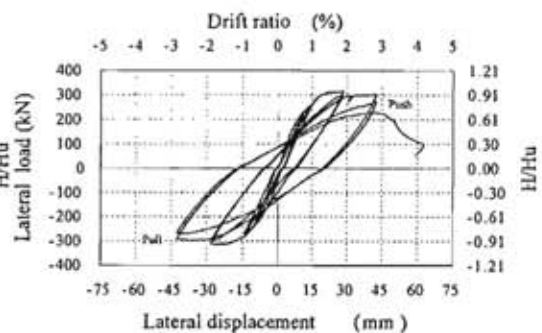
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของตัวอย่างเสา Lukkunaprasit และ Sittipunt (2003)

Test specimen	Concrete Strength (MPa)	Axial load Ratio $P/f_c' A_g$	Reinforcement				
			Longitudinal		Transverse		
			$f_y$ (MPa)	$\rho_l$	$f_y$ (MPa)	$f_y/sh_c$ (%)	Hook configuration
1	38.9	0.30	471	0.0314	305	0.453	90 deg; no clips
2	35.7	0.30	471	0.0314	305	0.453	135 deg; no clips
3	31.7	0.30	471	0.0314	305	0.453	90 deg; with clips
4	30.5	0.37	471	0.0314	305	0.453	135 deg; no clips
5	32.4	0.37	471	0.0314	305	0.453	90 deg; with clips

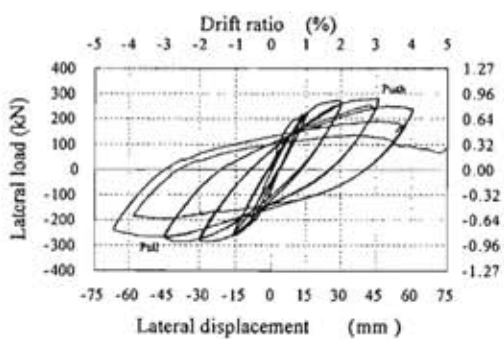
$h_c$  คือระยะความยาวของหน้าตัดตามขวางโดยวัดจากกึ่งกลางกึ่งกลางของเหล็กเสริมถึงกึ่งกลางของเหล็กเสริม



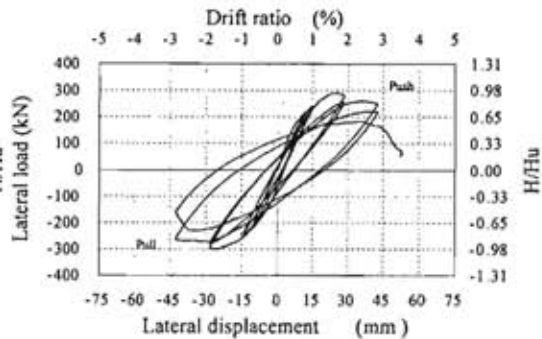
(ก) ตัวอย่างเสาต้นที่ 1



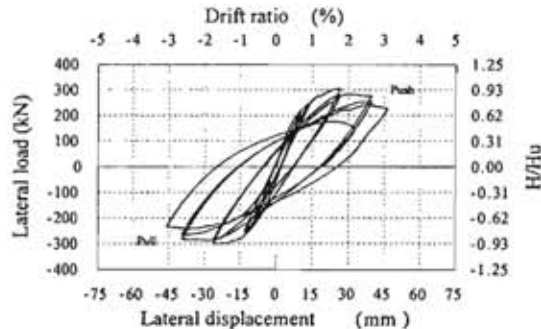
(ข) ตัวอย่างเสาต้นที่ 2



(ค) ตัวอย่างเสาต้นที่ 3



(ง) ตัวอย่างเสาต้นที่ 4



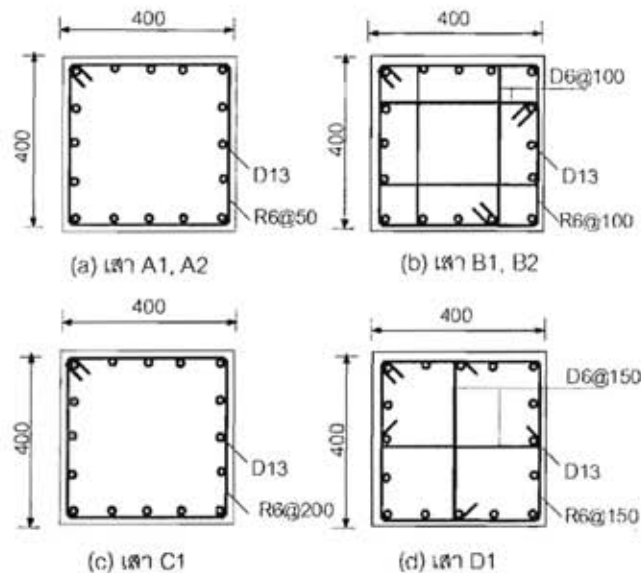
(จ) ตัวอย่างเสาต้นที่ 5

รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวอย่างเสา (Lukkunaprasit และ Sittipunt, 2003)

Ongsupankul และคณะ (2006) ทดสอบเสาขนาดหน้าตัด 0.40ม. x 0.40ม. สูง 1.55 ม. จำนวน 6 ต้นภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรทางด้านข้างและให้แรงอัดตามแนวแกนคงที่กระทำแบบเยื้องศูนย์กลางและแบบศูนย์กลางเสา โดยพิจารณาปริมาณเหล็กเสริมตามขวางและการจัดเรียงเหล็กเสริมตามขวาง ซึ่งปริมาณการเสริมเหล็กเสริมตามขวางมีปริมาณ 25% ของข้อกำหนดของมาตรฐาน AASHTO(1992) ที่คำนึงถึงผลแผ่นดินไหวและเสริมเหล็กตามข้อกำหนดของมาตรฐาน



AASHTO(1992) ที่ไม่คำนึงถึงผลแผ่นดินไหว จากนั้นผู้วิจัยได้เปรียบเทียบผลการทดสอบกับแบบจำลองไฟเบอร์ (fiber model) ขนาดหน้าตัดและรูปแบบการเสริมเหล็กได้ดังแสดงในรูปที่ 2.9 คุณสมบัติของเสาได้แสดงในตารางที่ 2.5



รูปที่ 2.9 ขนาดหน้าตัดและรูปแบบการเสริมเหล็ก (Ongsupankul และคณะ, 2006)

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของตัวอย่างเสา Ongsupankul และคณะ (2006)

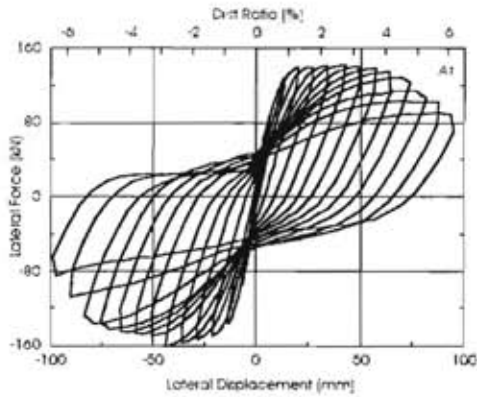
Test specimen	Concrete Strength (MPa)	Axial load Ratio $P/f_c' A_g$	$e/h$	Longitudinal		Transverse reinforcement		
				$f_y$ (MPa)	$\rho_l$	$f_y$ (MPa)	$\rho_s$	Configuration
A1	32.4	0.074	0	390	0.0127	235	0.0075	25% AASHTO; Seismic
A2	32.4	0.074	0.15	390	0.0127	235	0.0075	25% AASHTO; Seismic
B1	29.6	0.081	0	390	0.0127	235	0.0126	25% AASHTO; Seismic
B2	29.6	0.081	0.15	390	0.0127	235	0.0126	25% AASHTO; Seismic
C1	32.4	0.07	0	390	0.0127	235	0.019	AASHTO; Non-Seismic
D1	29.6	0.08	0	390	0.0127	235	0.005	AASHTO; Non-Seismic

$e$  คือระยะเยื้องศูนย์กลางของแรงกระทำในแนวตั้ง

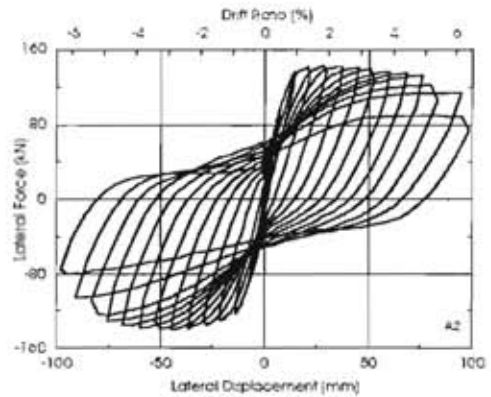
ผลการทดสอบพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของเสาซึ่งให้แรงอัดตามแนวแกนที่กระทำเยื้องศูนย์กลางที่ระยะ 0.15 ของขนาดเสากับเสาที่ให้แรงอัดกระทำแบบตรงศูนย์กลาง ซึ่งจะเห็นได้ว่าเสายังคงมีพฤติกรรมที่ไม่แตกต่างกันมาก การใช้เหล็กยึดทางขวาง (cross-ties) เพิ่มเข้ามานั้นจะมีผลต่อพฤติกรรมของเสาที่ดีกว่าการเสริมเหล็กเสริมตามขวางรักรอบเพียงอย่างเดียว โดยมีค่าความเหนียวและการสลายพลังงานที่ดีกว่า แต่ปริมาณอัตราส่วนของเหล็กเสริมตามขวางไม่มีผลอย่างชัดเจนต่อกำลังต้านทานแรงด้านข้างทั้งแรงสูงสุด การใช้เหล็กยึด



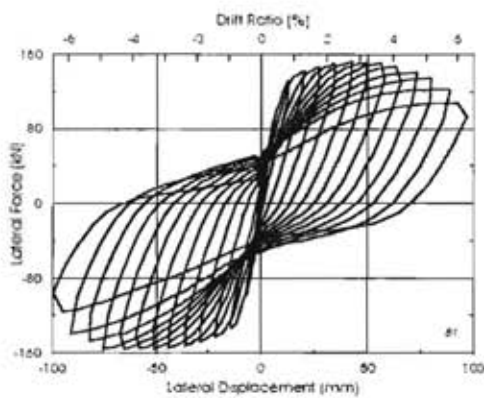
ทางขวางยังจะช่วยไม่ให้เหล็กเสริมปลอกรัดรอบโค้งงอและยังช่วยยึดรั้งเหล็กเสริมตามยาวและลดการถูกอัดจนแตกของแกนคอนกรีต รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของตัวอย่างเสา



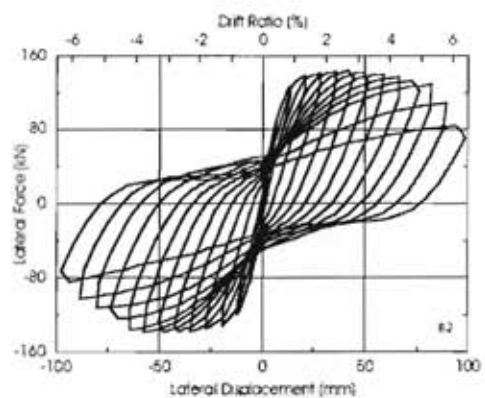
(ก) ตัวอย่างเสาต้นที่ A1



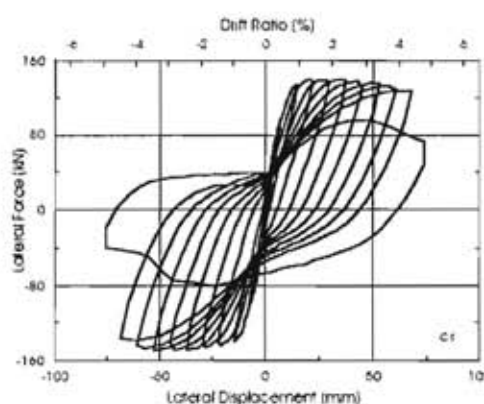
(ข) ตัวอย่างเสาต้นที่ A2



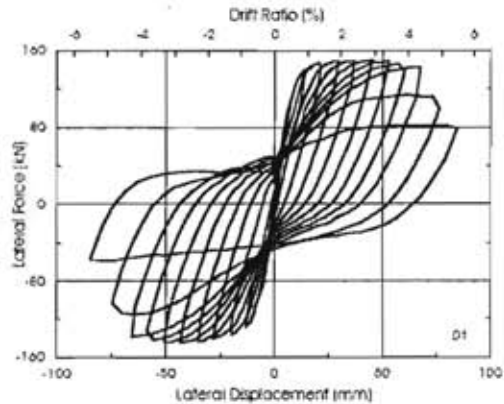
(ค) ตัวอย่างเสาต้นที่ B1



(ง) ตัวอย่างเสาต้นที่ B2



(จ) ตัวอย่างเสาต้นที่ C1



(ฉ) ตัวอย่างเสาต้นที่ D2

รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของตัวอย่างเสา (Ongsupankul และคณะ, 2006)

### 2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับพฤติกรรมกรรมการโค้งเดาะในการทดสอบเสริมเหล็กรับแรงกดและแรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร

Gomes และ Appleton (1996) ได้เสนอแบบจำลองของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กเสริมโดยพิจารณาการโค้งเดาะของเหล็กเสริม แบบจำลองนี้ได้ปรับปรุงมาจากแบบจำลองของ Menegotto และ Pinto(1973) ซึ่งเดิมที่ไม่ได้พิจารณาผลของการโค้งเดาะของเหล็ก ผู้วิจัยได้เสนอแบบจำลองโดยพิจารณาการโค้งเดาะของเหล็กเสริม ซึ่งอาศัยหลักการความสมดุลของพฤติกรรมพลาสติก (equilibrium of a plastic mechanism) เมื่อเหล็กเสริมที่เกิดการโค้งเดาะ แบบจำลองของการโค้งเดาะจะพิจารณาลงคองกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมเกิดการหลุดล่อน โดยในช่วงของการถอนแรงกระทำ (unload) ได้พิจารณาผลของการโค้งเดาะเข้าไปด้วย ผู้วิจัยได้ทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรจำนวน 9 ผลของค่าโมเมนต์ดัดกับความโค้งของหน้าตัดเสาคอนกรีตได้นำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองไฟเบอร์ (fiber model) และได้เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์พบว่าผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองให้ความถูกต้องและสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์

Bae และคณะ (2005) ได้เสนอแบบจำลองของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะเคลื่อนที่ด้านข้าง และความสัมพันธ์ระหว่างระยะเคลื่อนที่ด้านข้างกับความเครียดตามแนวแกนเนื่องจากผลของการโค้งเดาะ ซึ่งได้จากการทดสอบเหล็กเสริมรับแรงอัดจำนวน 162 ตัวอย่าง โดยพิจารณาอัตราส่วนระหว่างความยาวกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่าง และอัตราส่วนระหว่างระยะแรงกระทำเยื้องศูนย์กลางกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่าง ทดสอบโดยใช้เครื่องให้แรงและติดตั้งเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่จำนวน 2 เครื่อง เพื่อวัดระยะเคลื่อนที่ทั้งแนวตั้งและแนวราบ แบบจำลองของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่ได้เสนอ มีค่าความเค้นสูงสุดที่ความเครียดเท่ากับ 0.04 หลังจากนั้นความเค้นจะมีค่าลดลงเนื่องจากผลของการโค้งเดาะของตัวอย่าง หลังจากผ่านจุดครากแล้วค่าความเค้นจะลดลงโดยมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดเป็นเส้นตรงจนถึงค่าที่ความเครียดมีค่าเท่ากับ 0.2

Berry และ Eberhard (2005) ได้เสนอแบบจำลองเพื่อหาระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่สอดคล้องเมื่อเหล็กเสริมตามยาวเกิดการโค้งเดาะในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยมี 3 ความสัมพันธ์ที่นำมาพิจารณา คือ การหมุนแบบพลาสติก (plastic rotation), อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ด้านข้าง (drift ratio) และค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนที่ที่สอดคล้องเมื่อเหล็กเสริมตามยาวเกิดการโค้งเดาะ โดยผู้วิจัยได้ทดสอบเสาที่มีเหล็กเสริมตามขวางรูปสี่เหลี่ยมจำนวน 62 ต้น เสากลมที่มีการเสริมเป็นเหล็กเสริมตามขวางเกลียวจำนวน 42 ต้น วิธีที่ใช้วิเคราะห์คือ การวิเคราะห์จุดหมุนพลาสติก (plastic-hinge analysis), ค่าการวิเคราะห์โมเมนต์ดัดกับความโค้ง

(moment-curvature analysis) และการคาดคะเนผลของการบิดทงด้านข้างของเหล็กเสริมตามขวาง ผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนระหว่างระยะที่วัดได้เมื่อเหล็กเสริมตามยาวเกิดการโค้งเคาะกับระยะที่คำนวณได้จากแบบจำลองที่ได้เสนอนั้นมีค่าเท่ากับ 1.01 และ 0.97 สำหรับเสาที่มีเหล็กเสริมตามขวางรูปสี่เหลี่ยม และเสากลมที่มีการเสริมเป็นเหล็กเสริมตามขวางเกลียวตามลำดับ

Mounnarath (2006) ได้ศึกษาและพัฒนาการต่อทาบของเหล็กเสริมระหว่างชิ้นส่วนคอนกรีตหล่อสำเร็จและโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยปลอกต่อทาบ (coupler) ทดสอบเหล็กเสริมที่มีปลอกต่อทาบได้ทดสอบภายใต้แรงดึง, ภายใต้แรงอัดและแรงกระทำแบบวัฏจักรตามแนวแกน ซึ่งกำลังของปลอกต่อทาบต้องมีกำลังที่จุดครากมากกว่า 1.25 เท่าของกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมเหล็กเสริมตามมาตรฐานของ UBC(1997) โดยพิจารณาความหนาของปลอกต่อทาบ, ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมทั้ง 2 ด้านภายในปลอกต่อทาบ และความยาวของปลอกต่อทาบ ผู้วิจัยได้ศึกษาผลของกำลัง, ความเหนียว และการสลายพลังงานของเหล็กเสริมที่มีการต่อทาบด้วยปลอกต่อทาบ ผลการทดสอบเหล็กเสริมที่มีการต่อทาบภายใต้แรงดึงพบว่าความหนาของปลอกต่อทาบมีผลต่อกำลังของเหล็กเสริม ความหนาและระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมทั้ง 2 ด้านในปลอกต่อทาบมีผลต่อค่าความเหนียว อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อตัวอย่างเหล็กเสริมมีกำลังสูงจะส่งผลให้ค่าความเหนียวและการสลายพลังงานลดลง การทดสอบภายใต้แรงอัดพบว่าตัวอย่างเหล็กเสริมที่มีปลอกต่อทาบสามารถรับแรงกระทำได้ซึ่งมีค่าสูงสุดใกล้เคียงกันและเมื่อเกิดการโค้งเคาะส่งผลให้ความสามารถความในการรับแรงจะลดลง ตัวอย่างเหล็กเสริมที่มีปลอกต่อทาบมีค่าความเหนียวและการสลายพลังงานที่ดี ส่วนการทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรตามแนวแกนมีการเลื่อนไถลระหว่างตัวอย่างของเหล็กเสริมและหัวจับของเครื่องให้แรงจึง ให้ผลการทดสอบที่ไม่สมบูรณ์

## 2.2 คุณสมบัติของโครงสร้างที่จำเป็นต่อการต้านทานแรงแผ่นดินไหว

คุณสมบัติของโครงสร้างที่จำเป็นต่อการต้านทานแรงแผ่นดินไหว จาก Paulay และ Priestly (1992) ได้เสนอคุณสมบัติที่จำเป็น 3 คุณสมบัติ คือ สติฟเนส, กำลังของโครงสร้าง และ ความเหนียวโครงสร้าง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.2.1 สติฟเนส (stiffness)

สติฟเนส คือ ความสามารถในการต้านทานแรงของโครงสร้างเมื่อกระทำให้โครงสร้างเกิดการโก่งตัว โดยสติฟเนสเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะโก่งตัวของโครงสร้าง ซึ่งเป็นคุณสมบัติของโครงสร้างที่จำเป็นต่อการต้านทานแรงแผ่นดินไหว ความสัมพันธ์ของระหว่างแรง

กระทำกับระยะโก่งตัวของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรในช่วงเชิงเส้น คือ  $K = P_y / \Delta_y$  ขั้นตอนการออกแบบภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรต้องตรวจสอบระยะเคลื่อนที่ของแต่ละชั้น โดยที่ผลตอบสนองของโครงสร้างต้องอยู่ในช่วงที่ยอมให้โครงสร้างพังทลายได้บางส่วนแต่ยังไม่วิบัติ และสามารถซ่อมแซมได้ (serviceability limit state)

### 2.2.2 กำลังของโครงสร้าง (strength)

กำลังของโครงสร้างเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นต่อการต้านทานแรงแผ่นดินไหว ซึ่งหมายถึงโครงสร้างต้องมีกำลังที่เพียงพอต่อการต้านทานแรงกระทำต่อภายในของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหวในช่วงยืดหยุ่นได้ โดยกำลังของโครงสร้างจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับสติฟเนส

### 2.2.3 ความเหนียวโครงสร้าง (ductility)

ความเหนียวโครงสร้าง คือ ระยะการโก่งตัวของโครงสร้างหลังจากเลยช่วงยืดหยุ่นไปแล้ว โดยความเหนียวของโครงสร้างขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ในโครงสร้าง เพื่อให้จะให้โครงสร้างเกิดการวิบัติด้วยความเหนียวพังทลายที่น้อยที่สุดและยังคงสภาพอยู่ได้ภายใต้แรงกระทำด้านททางจากแผ่นดินไหวระดับปานกลาง ค่าความเหนียวของโครงสร้างมีผลต่อการดูดซับพลังงานในพฤติกรรมแบบฮิสเทรีซิส ค่าจำกัดความของความเหนียวได้แสดงในสมการที่ 2.1

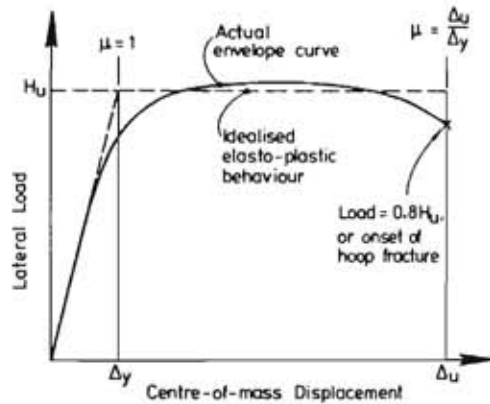
$$\mu = \Delta / \Delta_y > 1 \quad (2.1)$$

โดยที่  $\Delta$  คือ ระยะเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งใดๆ หลังจากจุดคราก

$\Delta_y$  คือ ระยะเคลื่อนที่ ณ จุดคราก

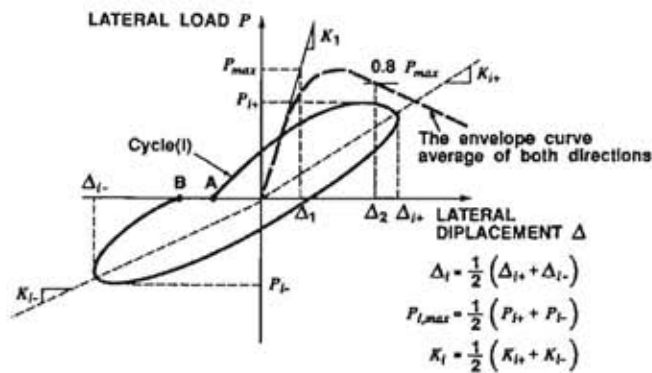
ความเหนียวที่ได้นิยามเมื่อโครงสร้างใกล้จะเกิดการวิบัติได้ว่า  $\mu_u = \Delta_u / \Delta_y$  ซึ่งในงานวิจัยได้ศึกษาวิธีการหาระยะเคลื่อนที่ ณ จุดครากและระยะเคลื่อนที่สูงสุดที่ได้มีการเสนอมา โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Priestley และ Park (1897) ได้เสนอวิธีการหาความเหนียวของโครงสร้างโดยการเปลี่ยนเส้นโค้งขอบนอก (envelope curve) ที่ได้จากการทดสอบเป็นเส้นโค้งในอุดมคติซึ่งมีพื้นที่ใต้กราฟของเส้นโค้งในอุดมคติดีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟเส้นโค้งขอบนอกจากการทดสอบ ซึ่งระยะเคลื่อนที่ ณ จุดครากหาได้จากเส้นที่เปลี่ยนความชันจากเส้นโค้งในอุดมคติ และระยะเคลื่อนที่สูงสุดหาได้จากระยะเคลื่อนที่ที่มีแรงกระทำของเส้นโค้งในอุดมคติสูงสุดคงเหลือ 80% รูปแบบการหาความเหนียวได้แสดงในรูปที่ 2.11



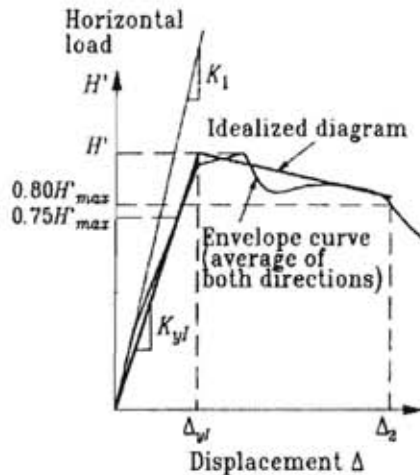
รูปที่ 2.11 ระยะเคลื่อนที่ที่จุดครากและระยะเคลื่อนที่สูงสุดของ Priestley และ Park (1897)

Sheikh และ Khoury (1993) ได้เสนอวิธีการหาความเหนียวของโครงสร้าง ซึ่งระยะเคลื่อนที่ ณ จุดครากหาได้สตีฟเนสเริ่มต้น (initial stiffness) ไปบรรจบที่ระดับเดียวกับแรงกระทำสูงสุด ซึ่งจากตำแหน่งนี้สามารถหาค่าระยะเคลื่อนที่ ณ จุดครากได้ และระยะเคลื่อนที่สูงสุดหาได้จากระยะเคลื่อนที่มีแรงกระทำสูงสุดคงเหลือ 80% รูปแบบการหาความเหนียวได้แสดงในรูปที่ 2.12



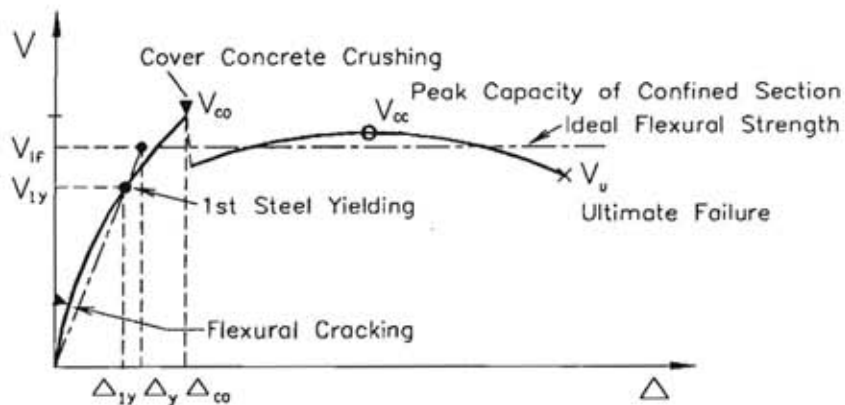
รูปที่ 2.12 ระยะเคลื่อนที่ที่จุดครากและระยะเคลื่อนที่สูงสุดของ Sheikh และ Khoury (1993)

Paultre และคณะ (2001) ได้เสนอวิธีการหาความเหนียวของโครงสร้าง ซึ่งระยะเคลื่อนที่ ณ จุดครากหาได้การลากความชันในช่วงยืดหยุ่นผ่านค่า 75%ของแรงกระทำสูงสุดไปบรรจบที่ระดับเดียวกับแรงกระทำสูงสุด ซึ่งจากตำแหน่งนี้สามารถหาค่าระยะเคลื่อนที่ ณ จุดครากได้ และระยะเคลื่อนที่สูงสุดหาได้จากระยะเคลื่อนที่มีแรงกระทำสูงสุดคงเหลือ 80% รูปแบบการหาความเหนียวได้แสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ระยะเวลาเคลื่อนที่ที่จุดครากและระยะเวลาเคลื่อนที่สูงสุดของ Paultre และคณะ (2001)

Legeron และ Paultre (2002) ได้เสนอวิธีการหาความเหนียวของโครงสร้างโดยการเปลี่ยนเส้นโค้งขอบนอกได้จากการทดสอบเป็นเส้นโค้งในอุดมคติซึ่งลากความชันในช่วงยืดหยุ่นผ่านตำแหน่งของแรงกระทำที่เหล็กเสริมเกิดการคราก ซึ่งระยะเวลาเคลื่อนที่ ณ จุดครากหาได้จากเส้นที่เปลี่ยนความชันจากเส้นโค้งในอุดมคติ โดยเส้นโค้งในอุดมคติมีพื้นที่ใต้กราฟมีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟเส้นโค้งขอบนอกจากการทดสอบ และระยะเวลาเคลื่อนที่สูงสุดหาได้จากระยะเวลาเคลื่อนที่ที่มีแรงกระทำของเส้นโค้งในอุดมคติสูงสุดคงเหลือ 80% รูปแบบการหาความเหนียวได้แสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ระยะเวลาเคลื่อนที่ที่จุดครากและระยะเวลาเคลื่อนที่สูงสุดของ Legeron และ Paultre (2002)

วิธีการหาความเหนียวของโครงสร้างวิธีสุดท้ายเป็นการหาความเหนียวของโครงสร้างซึ่งระยะเวลาเคลื่อนที่ ณ จุดครากหาได้จากระยะเวลาเคลื่อนที่ขณะที่เหล็กเสริมเกิดการครากครั้งแรกซึ่งทราบ

ได้จากเกิดวัดความเครียดจากการทดสอบและระยะเคลื่อนที่สูงสุดหาได้จากระยะเคลื่อนที่มีแรงกระทำสูงสุดคงเหลือ 80%

### 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความโค้งและค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนที่

สำหรับเสาที่มีลักษณะคานยื่นจากความสัมพันธ์ระหว่างความโค้งและค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนที่ (curvature-displacement ductility relation) ที่ได้เสนอโดย Paulay และ Priestly (1992) สามารถหาค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนที่ได้จากการปรับแก้ความโค้งตลอดความยาวเสาดังสมการที่ 2.2

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_m}{\Delta_y} = \frac{\int \phi(x) x dx}{\int \phi_c(x) x dx} \quad (2.2)$$

โดยที่  $\phi(x)$  คือ ค่าการกระจายตัวของความโค้งที่ค่าสูงสุด

$\phi_c(x)$  คือ ค่าการกระจายตัวของความโค้งที่ค่าจุดคราก

ระยะเคลื่อนที่ที่จุดครากสามารถหาค่าได้โดยตรงจากค่าการกระจายตัวของความโค้งที่ค่าจุดคราก,  $\phi_c(x)$  ซึ่งเริ่มเข้าสู่สภาวะไม่เชิงเส้น ระยะเคลื่อนที่ที่จุดครากสามารถประมาณค่าเท่ากับสมการที่ 2.3 และระยะเคลื่อนที่สูงสุดซึ่งต้องคิดผลของการเกิดจุดหมุนพลาสติกเนื่องจากพฤติกรรมไม่เชิงเส้นโดยระยะเคลื่อนที่ทั้งหมดหาได้จาก  $\Delta_m = \Delta_y + \Delta_p$  สามารถประมาณค่าเท่ากับสมการที่ 2.4

$$\Delta_y = \phi_y l^2 / 3 \quad (2.3)$$

$$\Delta_m = \Delta_y + (\phi_p) l_p (l - 0.5 l_p) \quad (2.4)$$

โดยที่  $\phi_p$  คือ ค่าการกระจายตัวของความโค้งที่ค่าจุดหมุนพลาสติกมีค่าเท่ากับ  $\phi_m - \phi_y$

$l_p$  คือ ระยะพลาสติกของเสาลักษณะคานยื่น

ระยะจุดหมุนพลาสติกที่ได้มีการศึกษามาซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Barker และ Amarakone (1964) ได้เสนอระยะจุดหมุนพลาสติก ซึ่งมีระยะจุดหมุนพลาสติกอยู่ในช่วง 0.4 ถึง 2.4 เท่าของระยะความลึกประสิทธิภาพ (effective dept) และได้เสนอสมการระยะจุดหมุนพลาสติกดังสมการที่ 2.5

$$l_p = 0.8 k_1 k_3 \left( \frac{z}{d} \right) c \quad (2.5)$$

โดยที่  $d$  คือ ความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัดเสาหรือคาน

$z$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กตามยาว

$c$  คือ ระยะที่วัดจากบริเวณที่เกิดแรงอัดมากที่สุดถึงแกนสะเทิน



$k_1$  คือ ค่าคงที่มีค่า 0.7 สำหรับเหล็กรีดร้อน และ 0.9 สำหรับเหล็กรีดเย็น

$k_2$  คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 0.6 สำหรับ  $f_c' = 5100$  psi และ 0.9 สำหรับ  $f_c' = 1700$  psi

Corley (1966) ได้ทดสอบคานคอนกรีตจำนวน 40 ตัวอย่าง เป็นคานที่มีฐานรองรับอย่างง่าย (simple beam) กระทำด้วยแรงแบบจุด (point loads) โดยพิจารณาการบิดของคอนกรีตและขนาดของตัวอย่างเป็นหลัก ได้เสนอว่าระยะจุดหมุนพลาสติกขึ้นอยู่กับลักษณะเรขาคณิตของคานคอนกรีตเป็นหลัก และได้เสนอสมการระยะจุดหมุนพลาสติกดังสมการที่ 2.6

$$l_p = \frac{d}{2} + 0.2 \frac{z}{\sqrt{d}} \quad (2.6)$$

โดยที่  $d$  คือ ความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัดเสาหรือคาน (นิ้ว)

$z$  คือ ระยะระหว่างหน้าตัดวิกฤตถึงจุดให้แรง (นิ้ว)

Mattock (1967) ได้ปรับปรุงสมการของตนเองให้ง่ายขึ้นที่เคยได้เสนอในอดีต ซึ่งได้ทดสอบคานจำนวน 37 ต้น และได้เสนอสมการการหาระยะจุดหมุนพลาสติกดังสมการที่ 2.7

$$l_p = \frac{d}{2} + 0.05z \quad (2.7)$$

โดยที่  $d$  คือ ความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัดเสาหรือคาน

$z$  คือ ระยะระหว่างหน้าตัดวิกฤตถึงจุดให้แรง

Park และคณะ (1982) ได้ทดสอบเสาคอนกรีตขนาด 0.55 ม. x 0.55 ม. จำนวน 4 ต้น จากผลการทดสอบผู้วิจัยได้เสนอระยะจุดหมุนพลาสติกดังสมการที่ 2.8

$$l_p = 0.4h \quad (2.8)$$

โดยที่  $h$  คือ ความลึกของหน้าตัดเสา

Priestley และ Park (1987) ได้เสนอสมการระยะจุดหมุนพลาสติกโดยคิดผลของการโมเมนต์ดัดของเสาและการครากของเหล็กเสริมภายในฐานราก ได้เสนอสมการการหาระยะจุดหมุนพลาสติกดังสมการที่ 2.9

$$l_p = 0.08L + 6d_b \quad (2.9)$$

โดยที่  $L$  คือ ความยาวของเสา (ม.)

$d_b$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กตามยาว (ม.)



Paulay และ Priestley (1992) ได้แก้ไขสมการที่ 2.9 ได้ที่เสนอโดย Priestley และ Park (1987) โดยได้แบ่งระดับของเหล็กเสริมตามยาว ซึ่งเสนอสมการการหาระยะจุดหมุนพลาสติกดังสมการที่ 2.10

$$l_p = 0.08L + 0.022f_y d_b \quad (2.10)$$

โดยที่  $L$  คือ ความยาวของเสา (ม.)

$d_b$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กตามยาว (ม.)

$f_y$  คือ กำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมตามยาว (เมกะปาสคาล)

Sheikh และ Khaoury (1993) ได้ทดสอบเสาคอนกรีตภายใต้แรงกระทำในแนวตั้งที่สูง ซึ่งเสนอสมการการหาระยะจุดหมุนพลาสติกดังสมการที่ 2.10 โดยเสนอสมการการหาระยะจุดหมุนพลาสติกดังสมการที่ 2.11

$$l_p = 1.0h \quad (2.11)$$

โดยที่  $h$  คือ ความลึกของหน้าตัดเสา

Bae และ Bayrak (2008) ได้ทดสอบเสาจำนวน 4 ต้น พบว่าระดับของแรงกระทำในแนวแกนมีผลต่อระยะจุดหมุนพลาสติก โดยได้เสนอสมการการหาระยะจุดหมุนพลาสติกดังสมการที่ 2.12

$$\frac{l_p}{h} = \left[ 0.3 \left( \frac{P}{P_o} \right) + 3 \left( \frac{A_s}{A_g} \right) - 0.1 \right] \left( \frac{L}{h} \right) + 0.25 \geq 0.25 \quad (2.12)$$

โดยที่  $P_o$  คือ แรงกระทำตามแนวแกนสูงสุดตามข้อกำหนด ACI 318-05 โดยที่มีค่าเท่ากับ

$$0.85f'_c (A_g - A_s) + f_y A_s$$

$P$  คือ แรงกระทำตามแกน

$A_s$  คือ พื้นที่รับแรงดึงของเหล็กเสริม

$A_g$  คือ พื้นที่รับแรงอัดของคอนกรีต

$L$  คือ ความยาวของเสา

$h$  คือ ความลึกของหน้าตัดเสา

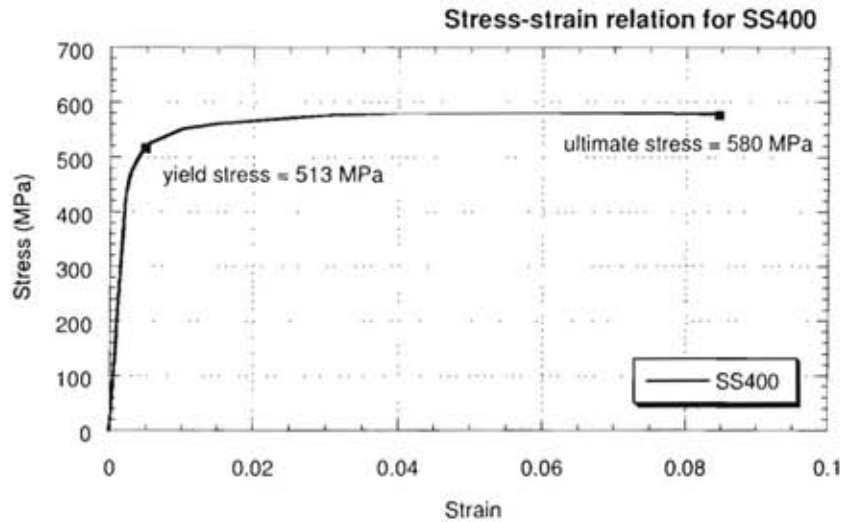
## บทที่ 3

### การทดสอบปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเสาคอนกรีตที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมตามยาว และศึกษาพฤติกรรมของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ซึ่งบทนี้จะกล่าวถึงพฤติกรรมของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของตัวอย่างเสาที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ ได้แก่ คุณสมบัติของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม, การเตรียมตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม, การทดสอบตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม และผลการทดสอบตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

#### 3.1 คุณสมบัติของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำจากเหล็กเกรด SS400 ซึ่งเป็นเหล็กที่ไม่มีผลของสเตรนฮาร์ดนิง (strain hardening) มีกำลังที่จุดคราก (yield strength) ต้องไม่น้อยกว่า 392 เมกกะปาสคาล (4000 กก./ซม.<sup>2</sup>) ใช้เสริมในตัวอย่างเสาโดยทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติก่อนที่นำปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมไปเสริมในตัวอย่างเสา ซึ่งคุณสมบัติของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่สำคัญสามารถหาได้จากทดสอบรับแรงดึงในห้องปฏิบัติการ ผลการทดสอบจากรูปที่ 3.1 พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเท่ากับ 199173 เมกกะปาสคาล, กำลังรับแรงดึงที่จุดครากมีค่าเท่ากับ 513 เมกกะปาสคาล และกำลังรับแรงดึงประลัยค่าเท่ากับ 580 เมกกะปาสคาล ซึ่งพบว่าเหล็กเกรด SS400 มีคุณสมบัติที่โดดเด่นคือ ในการทดสอบรับแรงดึงพบว่าหลังจุดครากขณะที่ความเครียดเพิ่มแต่ความเค้นค่อนข้างคงที่จนกระทั่งถึงจุดวิบัติ โดยค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดได้แสดงในดังรูปที่ 3.1 และตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติของเหล็กเกรด SS400 ที่ใช้ทำปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กเกรด SS400

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเหล็กเกรด SS400 ที่ใช้ทำปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

คุณสมบัติ	กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก, $f_y$ (เมกกะปาสคาล)	กำลังรับแรงดึงประลัย, $f_u$ (เมกกะปาสคาล)	โมดูลัสยืดหยุ่น, $E_s$ (เมกกะปาสคาล)
SS400	513	580	199173

### 3.2 การเตรียมตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมสำหรับทดสอบ

ตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมประกอบด้วยเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. (DB25) เหล็กขนาดเดียวกับเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างเสาผสมด้วยปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม การทำปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมทำจากเหล็กเพลลาเกรด SS400 กิ่งให้ได้ขนาดตามกำหนดโดยมีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวงซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 27 มม. ทั้งหมด 5 ขนาด รวม 6 ตัวอย่าง ลักษณะการให้รายละเอียดของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 ซึ่งได้แปรผันตามความยาวและความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมได้แสดงในรูปที่ 3.2 ถึงรูปที่ 3.3

ตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ทดสอบรวมทั้ง 6 ตัวอย่าง กำหนดชื่อตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมซึ่งให้ง่ายต่อการเข้าใจได้สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

L150-T6 หมายถึง ตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีปลอกยึดรั้งขนาดความยาว 150 มม. มีความหนา 6 มม. (เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 33 มม.)

L100-T9 หมายถึง ตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีปลอกยึดรั้งขนาดความยาว 100 มม. มีความหนา 9 มม. (เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 36 มม.)

L100-T6 หมายถึง ตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีปลอกยึดรั้งขนาดความยาว 100 มม. มีความหนา 6 มม. (เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 33 มม.)

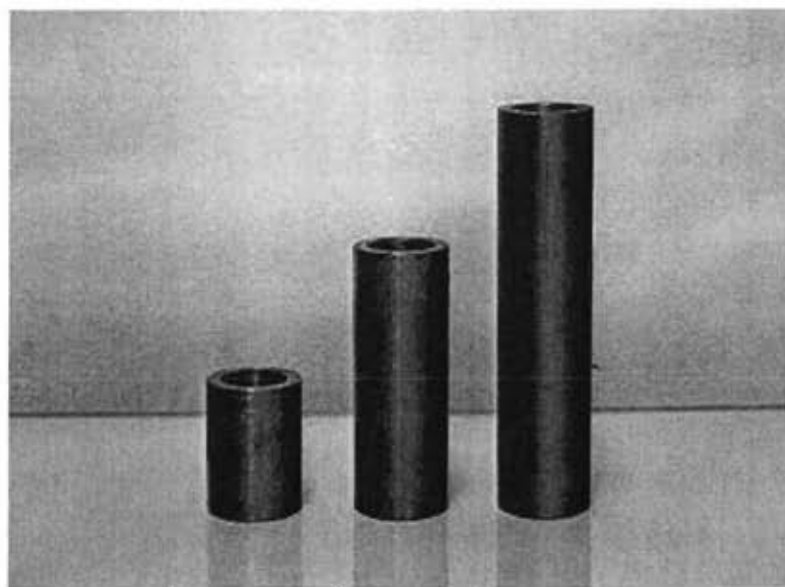
L100-T3 หมายถึง ตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีปลอกยึดรั้งขนาดความยาว 100 มม. มีความหนา 3 มม. (เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 30 มม.)

L50-T6 หมายถึง ตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีปลอกยึดรั้งขนาดความยาว 50 มม. มีความหนา 6 มม. (เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 33 มม.)

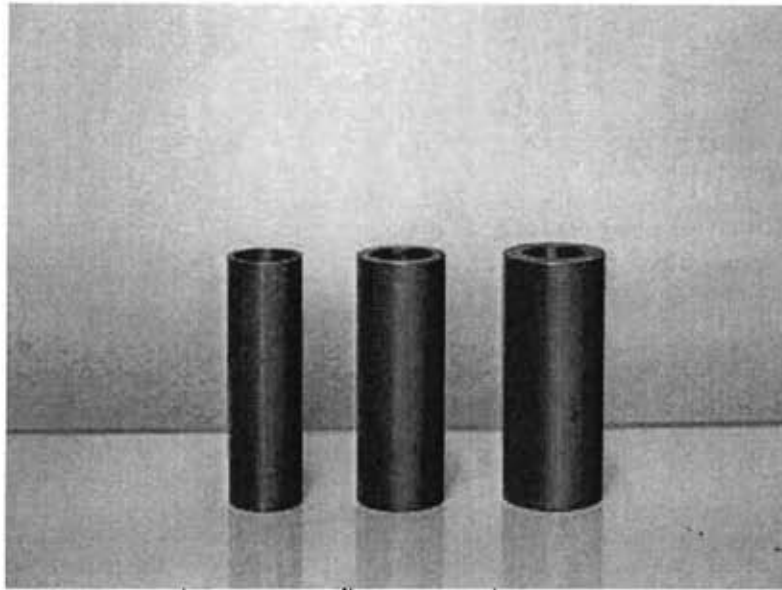
No-collar หมายถึง เหล็กเสริมที่ไม่มีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดขนาดปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

ความยาว (มม.)	ความหนา (มม.)		
	9	6	3
150	-	L150-T6	-
100	L100-T9	L100-T6	L100-T3
50	-	L50-T6	-



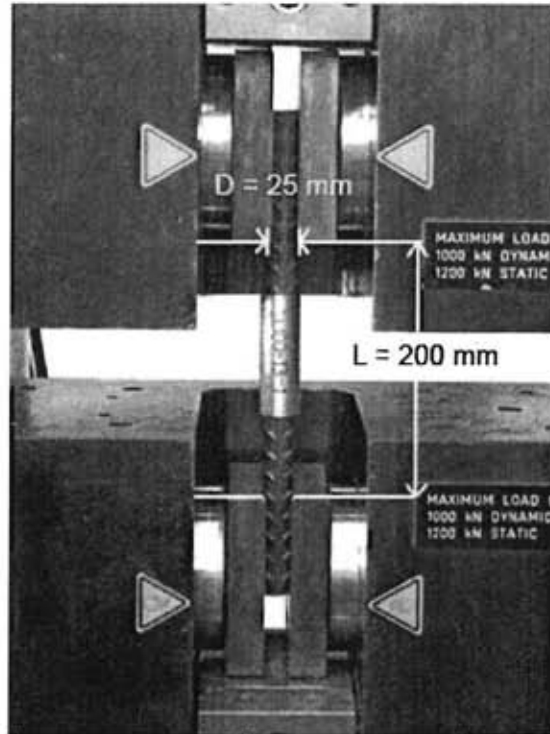
รูปที่ 3.2 ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่แปรผันความยาว



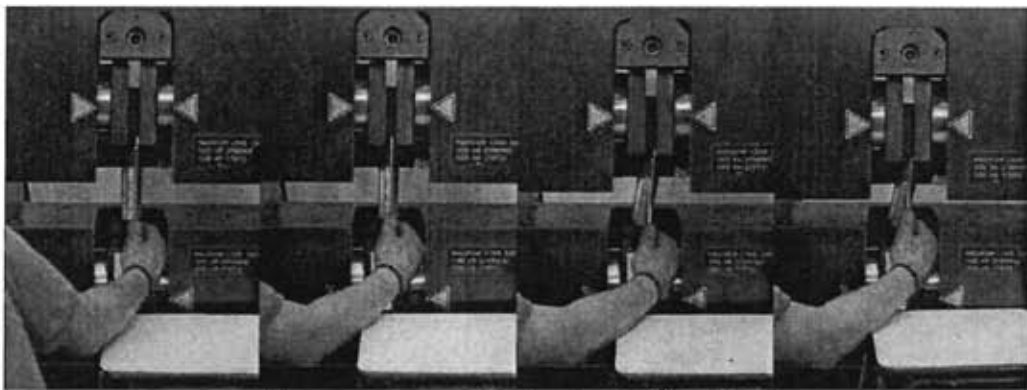
รูปที่ 3.3 ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่แปรความหนา

### 3.3 การทดสอบตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

การทดสอบตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมทดสอบรับแรงอัดตามแนวแกนเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของแต่ละตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมซึ่งได้ทดสอบด้วยเครื่องให้แรงตามแนวแกนโดยการควบคุมการเคลื่อนที่ (displacement control) ซึ่งได้กำหนดอัตราความเครียดอย่างช้า (slow strain rate) การทดสอบได้ติดตั้งตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมให้อยู่กึ่งกลางของหัวจับทั้งสองของเครื่องให้แรงตามแนวแกน โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างหัวจับทั้งสองเท่ากับ 200 มม. หรือมีอัตราส่วนระหว่างความยาวกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมที่ได้สวมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม (L/D) 8 เท่า ซึ่งการเลือกระยะห่างระหว่างหัวจับทั้งสองเท่ากับ 200 มม. เปรียบเสมือนปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมสอดเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา CC-09-200 โดยมีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมตามขวางเท่ากับ 200 มม. เหล็กเสริมตามขวางทำหน้าที่ยึดรั้งทางด้านข้างเปรียบเสมือนหัวจับของเครื่องให้แรงตามแนวแกน เพื่อที่จะหาขนาดของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่เหมาะสมที่สามารถใช้กับตัวอย่างเสาจริงได้ ซึ่งรูปแบบการติดตั้งและการทดสอบตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมได้แสดงในรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5 ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 รูปแบบการติดตั้งตัวอย่างปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริม



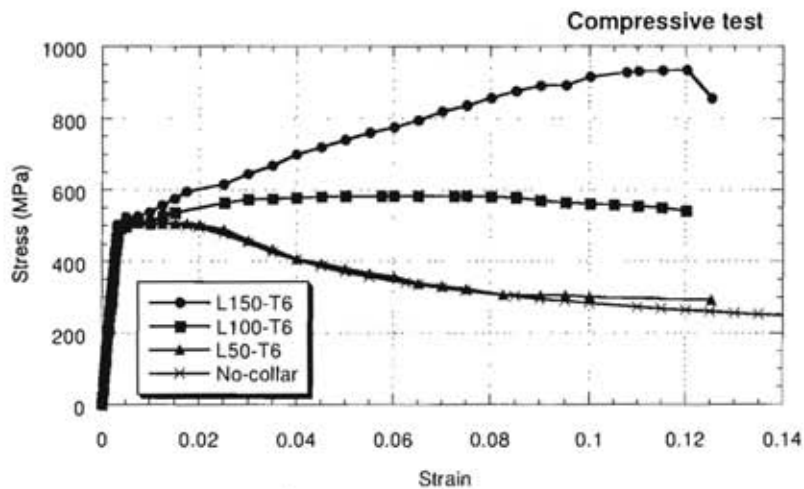
รูปที่ 3.5 การทดสอบตัวอย่างปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริม

### 3.4 ผลการทดสอบตัวอย่างปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริม

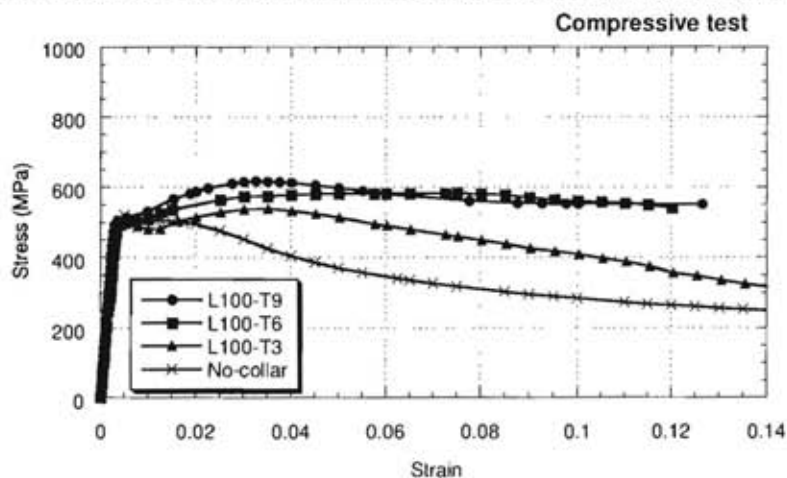
ผลการทดสอบตัวอย่างปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริมรับแรงอัดตามแนวแกน พบว่าทุกตัวอย่างปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริมมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นใกล้เคียงและค่ากำลังรับแรงอัดที่จุดครากใกล้เคียงกัน โดยมีค่าแตกต่างกันหลังจุดคราก และพบว่าตัวอย่างปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริม L50-T6 และเหล็กเสริมที่ไม่มีปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริมมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่ใกล้เคียงกัน ทั้ง 2 ตัวอย่าง ไม่มีความสามารถในการรับแรงด้านข้างที่เกิดจากการโก่งเดาะของเหล็กเสริม มีค่าสลายพลังงานที่ใกล้เคียงกัน คือ 4.38 กิโลนิวตัน-เมตร และ 4.23 กิโลนิวตัน-เมตร ตามลำดับ

ตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม L150-T6 สามารถรับแรงอัดกระทำตามตามแนวแกนเพิ่มขึ้นหลังจุดครากจนถึงจุดวิบัติ ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมสามารถรับแรงด้านข้างที่เกิดจากการโก่งเดาะของเหล็กเสริมได้มากที่สุด โดยมีค่าสลายพลังงานสูงสุดเท่ากับ 8.80 กิโลนิวตัน-เมตร

ตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่เหมาะสมสามารถรับแรงอัดกระทำตามตามแนวแกนได้ค่อนข้างคงที่หลังจุดคราก และมีการสลายพลังงานที่เหมาะสมซึ่งมี 2 ขนาด คือ ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม L100-T9 และปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม L100-T6 มีค่าสลายพลังงานที่ใกล้เคียงกัน คือ 6.64 และ 6.49 กิโลนิวตัน-เมตร ตามลำดับ เพราะฉะนั้นจึงเลือกตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมขนาดที่มีความยาว 100 มม. และมีความหนา 6 มม. ผลการทดสอบตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมรับแรงอัดตามแนวแกนแปรผันขนาดความยาวและความหนาดังแสดงในรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7 ตามลำดับ

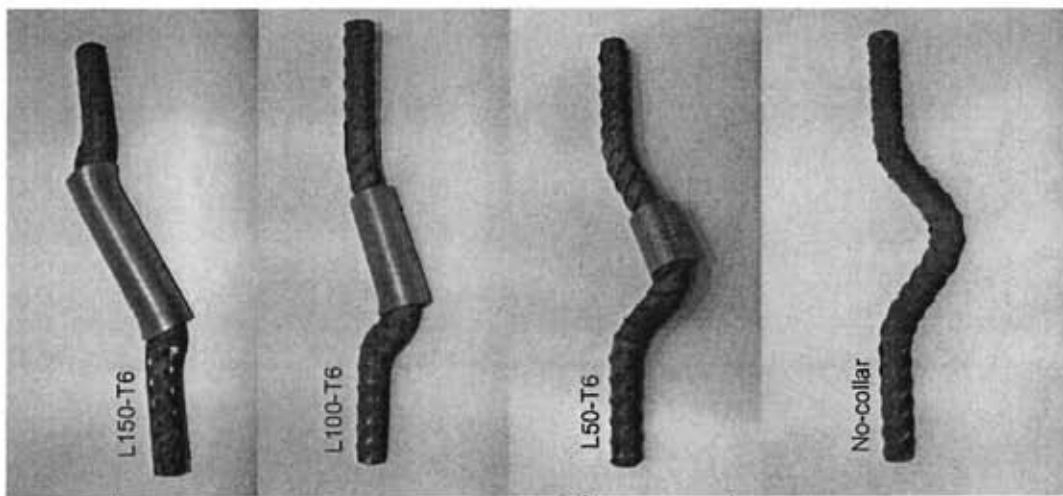


รูปที่ 3.6 ผลทดสอบตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมรับแรงอัดตามแนวแกนแปรผันขนาดความยาว



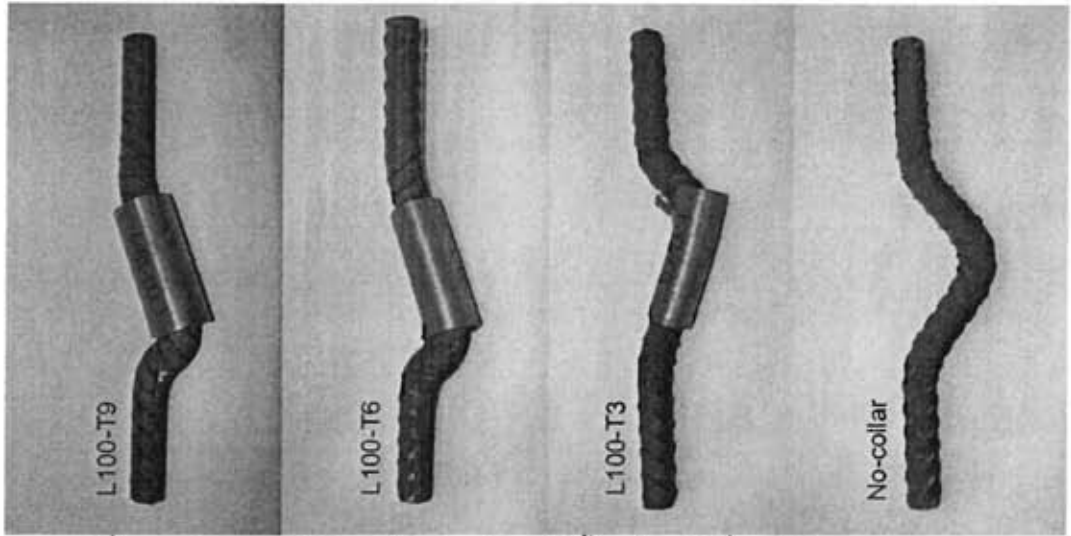
รูปที่ 3.7 ผลทดสอบตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมรับแรงอัดตามแนวแกนแปรผันขนาดความหนา

รูปที่ 3.8 แสดงตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมหลังการทดสอบรับแรงอัดตามแนวแกนซึ่งแปรผันขนาดตามความยาว พบว่าจากรูปแบบการวิบัติของตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม L50-T6 ไม่ได้ช่วยยึดรั้งการโก่งเดาะ และตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม L150-T6 มีการยึดรั้งทางด้านข้างดีที่สุดในรูปที่ 3.9 แสดงตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมหลังการทดสอบรับแรงอัดตามแนวแกนซึ่งแปรผันความหนาตามลำดับ พบว่าการวิบัติของตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม L100-T9 และ L100-T6 มีรูปแบบที่คล้ายกันคือมีระยะการโก่งเดาะทางด้านข้างมีใกล้เคียงกันและมีลักษณะการโก่งเดาะที่คล้ายกัน ตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม L100-T3 พบว่าปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมีการฉีกขาดเนื่องจากมีความหนาที่ไม่เพียงพอต่อการยึดรั้งการโก่งเดาะ



รูปที่ 3.8 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมซึ่งแปรผันขนาดความยาว





รูปที่ 3.9 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่างปลอกยึดตรงเหล็กเสริมซึ่งแปรผันขนาดความหนา

## บทที่ 4

### ตัวอย่างในการทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้ทดสอบตัวอย่างเสาจำนวน 2 ต้น ซึ่งเป็นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดตามขวางรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 0.40 ม. x 0.40 ม. งานวิจัยนี้ได้ทดสอบตัวอย่างเสาเพื่อหาสมรรถนะของตัวอย่างเสาที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมในบริเวณจุดหมุนพลาสติก ในบทนี้ได้กล่าวถึงรายละเอียดของตัวอย่างเสาที่ทดสอบ, รายละเอียดการเตรียมตัวอย่างเสา, คุณสมบัติของวัสดุในการทดสอบ และขั้นตอนการเตรียมการทดสอบและการปรับแก้ผลการทดสอบ

#### 4.1 ตัวอย่างเสาทดสอบ

ขนาดและรายละเอียดของตัวอย่างเสาได้เลือกเสาที่มีหน้าตัดตามขวางรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 0.40 ม. x 0.40 ม. เป็นขนาดของเสาสะพานตามแบบมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบทสำหรับสะพานชุมชนที่มีช่วงยาว 10 ม. ซึ่งเป็นรูปแบบที่ใช้ในการก่อสร้างสะพานในสายทางในปัจจุบันถูกซึ่งออกแบบโดยไม่พิจารณาแรงแผ่นดินไหว

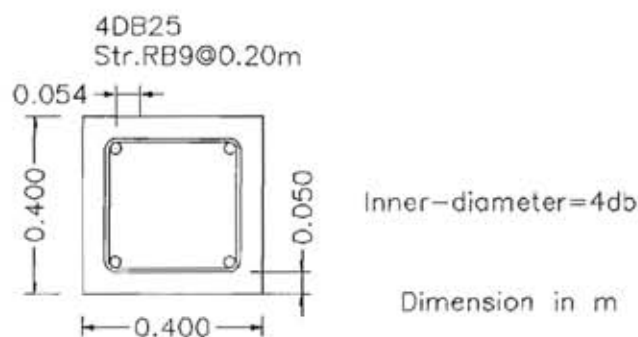
ตัวอย่างเสาในงานวิจัยนี้เป็นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 2 ตัวอย่าง โดยตัวอย่างได้มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม และไม่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ซึ่งมีลักษณะการเสริมเหล็กและการให้รายละเอียดของตัวอย่างเสาแสดงในตารางที่ 4.1 หน้าตัดตามขวางของตัวอย่างเสาแสดงรายละเอียดเหล็กเสริมแสดงในรูปที่ 4.1 โดยมีขนาดและรายละเอียดของการเสริมเหล็กเหมือนกันซึ่งได้แสดงขนาดของตัวอย่างเสาในรูปที่ 4.2 และรายละเอียดการเสริมเหล็กบริเวณจุดหมุนพลาสติกได้แสดงในรูปที่ 4.3 โดยตัวอย่างทดสอบมีรายละเอียดดังนี้ เหล็กเสริมตามยาวใช้เหล็กข้ออ้อยขนาด 25 มม. (DB25) จำนวน 4 เส้น กำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมตามยาว ( $f_y$ ) ไม่น้อยกว่า 392 เมกกะปาสคาล (4000 กก./ซม.<sup>2</sup>) เหล็กเสริมตามขวางใช้เหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. (RB9) กำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมตามขวาง ( $f_{yh}$ ) ไม่น้อยกว่า 235 เมกกะปาสคาล (2400 กก./ซม.<sup>2</sup>) ความยาวปลายของของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าไม่น้อยกว่า 54 มม. โดยสลับนปลายขอในแต่ละชั้นระดับความสูงของการติดตั้งเหล็กเสริมตามขวาง ตัวอย่างเสาอีกต้นได้เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเพิ่มเติมระหว่างเหล็กเสริมตามขวาง 2 ปลอกแรกจากฐานราก ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 39 มม. และมีความหนา 6 มม. ที่มาของขนาดปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมได้ทดสอบได้กล่าวในบทที่ 3 โดยตัวอย่างเสาได้ถูกกำหนดชื่อ ซึ่งประกอบด้วยตัวอักษรและตัวเลขสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

C-09-200 หมายถึง เสาที่ไม่มีเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม, ใช้เหล็กกลมเป็นเหล็กเสริมตามขวางซึ่งมีขนาด 9 มม. (RB9) และระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมตามขวาง 200 มม.

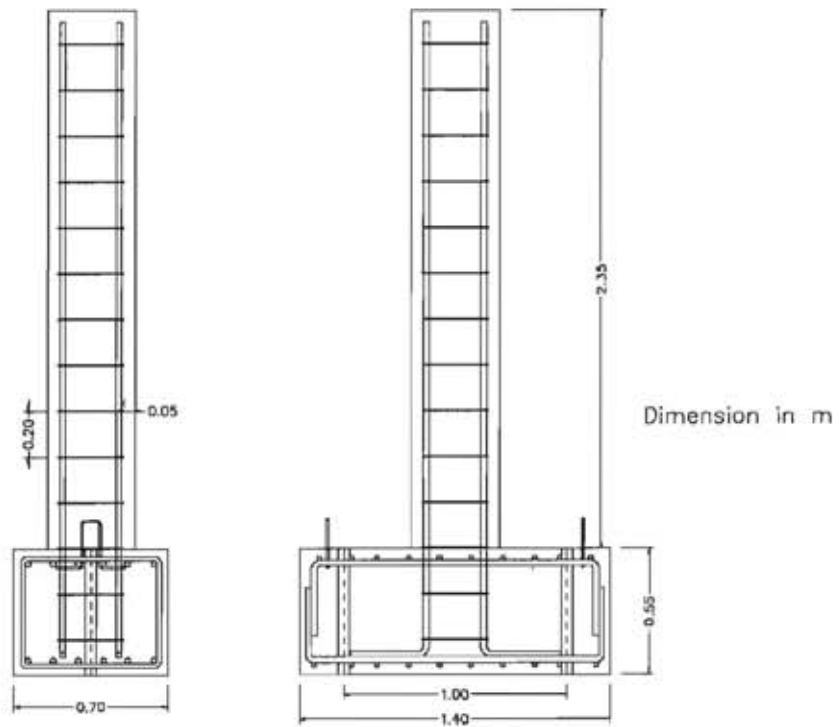
CC-09-200 หมายถึง เสาที่มีเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม, ใช้เหล็กกลมเป็นเหล็กเสริมตามขวางซึ่งมีขนาด 9 มม. (RB9) และระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมตามขวาง 200 มม.

ตารางที่ 4.1 สรุปการออกแบบของตัวอย่างเสา

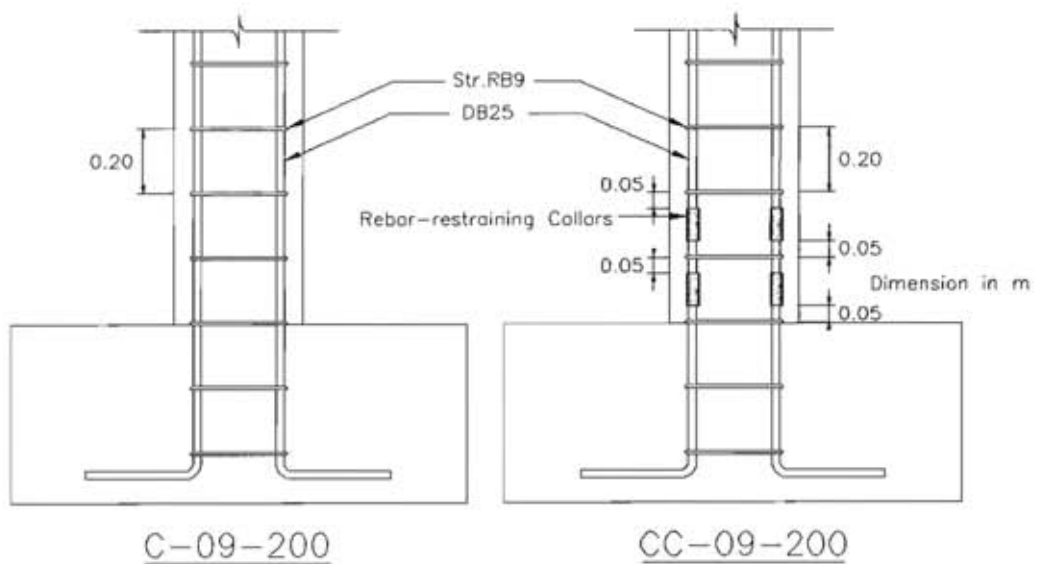
รายละเอียดของตัวอย่างเสา	C-09-200	CC-09-200
ขนาดหน้าตัด (ม.)	0.40x0.40	
ความสูงประสิทธิภาพ (ม.)	2.15	
ความสูงต่อความลึกหน้าตัด (aspect ratio)	5.4	
อัตราส่วนของเหล็กเสริมตามยาว	0.0123	
อัตราส่วนโดยปริมาตรของเหล็กเสริมตามขวาง (volumetric ratio)	0.00424	
กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (เมกกะปาสคาล)	34.3	
ชนิดของเหล็กเสริมตามยาว	4-DB25	
ชนิดของเหล็กเสริมตามขวาง	RB9@200	
ชนิดของเหล็กของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม	-	SS400
แรงอัดตามแนวแกน (กิโลนิวตัน)	314	
อัตราส่วนแรงในแนวแกน $P/fc'Ag$ (%)	5.7	



รูปที่ 4.1 รายละเอียดเหล็กเสริมของหน้าตัดของเสาตามขวางของตัวอย่างเสา



รูปที่ 4.2 ขนาดและรายละเอียดการเสริมเหล็กของตัวอย่างเสา



รูปที่ 4.3 รายละเอียดการเสริมเหล็กเสริมและปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมบริเวณจุดหมุนพลาสติก

## 4.2 คุณสมบัติของวัสดุในการทดสอบ

### 4.2.1 คอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นคอนกรีตที่ผสมเสร็จซึ่งมีหน่วยน้ำหนักปกติ โดยใช้คอนกรีตรูปทรงกระบอกในการออกแบบมีค่ากำลังอัดประลัย ( $f'_c$ ) เท่ากับ 34.3 เมกกะปาสคาล (350 กก./ซม.<sup>2</sup>) ซึ่งเป็นกำลังอัดของคอนกรีตที่พบในเสาสะพานที่ตรวจสอบภาคสนามเป็นส่วนใหญ่ โดยการตรวจสอบค่าการยุบตัว (slump) เท่ากับ  $15 \pm 2.5$  ซม. การหล่อตัวอย่างเสาได้เก็บตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. จำนวน 12 ตัวอย่าง ทดสอบหาค่ากำลังอัดทุกสัปดาห์ของการบ่มคอนกรีต ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้แสดงไว้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

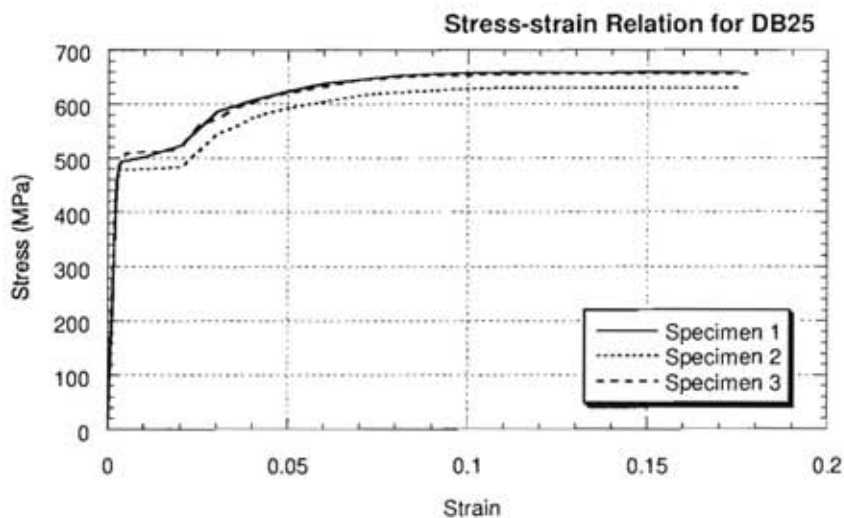
อายุ (วัน)	ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	แรงกด (กิโลนิวตัน)	ค่ากำลังอัดประลัย, $f'_c$ (เมกกะปาสคาล)	หมายเหตุ
7	1	149.7	513.3	29.1	
	2	150.4	376.0	21.2	
	3	149.9	443.7	25.1	
	เฉลี่ย	-	-	25.1	
14	1	150.9	466.1	26.1	
	2	149.3	530.2	30.3	
	3	149.5	519.0	29.6	
	เฉลี่ย	-	-	28.6	
21	1	150.0	517.7	29.3	
	2	150.4	527.5	30.0	
	3	150.8	524.4	29.4	
	เฉลี่ย	-	-	29.4	
28	1	150.6	612.8	34.4	
	2	151.2	289.5	-	ยกเว้น
	3	151.5	599.5	33.2	
	เฉลี่ย	-	-	33.8	

#### 4.2.2 เหล็กเสริม

เหล็กเสริมที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 2 ขนาด ซึ่งประกอบด้วยเหล็กข้ออ้อยเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. (DB25) เป็นเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กเสริมในฐานรากมีกำลังที่จุดคราก ( $f_y$ ) ไม่น้อยกว่า 392 เมกกะปาสคาล (4000 กก./ซม.<sup>2</sup>) และเหล็กกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. (RB9) เป็นเหล็กเสริมตามขวางมีกำลังที่จุดคราก ( $f_{yh}$ ) ไม่น้อยกว่า 235 เมกกะปาสคาล (2400 กก./ซม.<sup>2</sup>) โดยในแต่ละขนาดได้สุ่มตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่าง เพื่อทดสอบโดยค่าคุณสมบัติต่างๆ ของเหล็กเสริม เช่น ค่ากำลังรับแรงดึงที่จุดคราก ( $f_y$ ), ค่ากำลังรับแรงดึงประลัย ( $f_m$ ) และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม ( $E_s$ ) ของทั้งเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กเสริมตามขวาง ซึ่งผลการทดสอบได้แสดงในตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 ตามลำดับ โดยรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กเสริมได้แสดงใน

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างเหล็กเสริม DB25

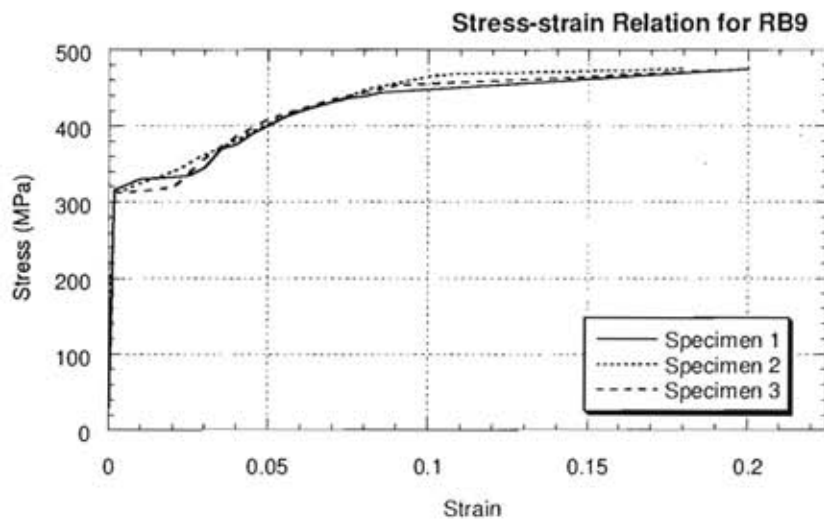
ตัวอย่าง	กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก, $f_y$ (เมกกะปาสคาล)	กำลังรับแรงดึงประลัย, $f_m$ (เมกกะปาสคาล)	โมดูลัสยืดหยุ่น, $E_s$ (เมกกะปาสคาล)
1	495	658	194238
2	479	630	189333
3	503	656	197181
เฉลี่ย	492	648	193584



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กเสริม DB25

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างเหล็กเสริม RB9

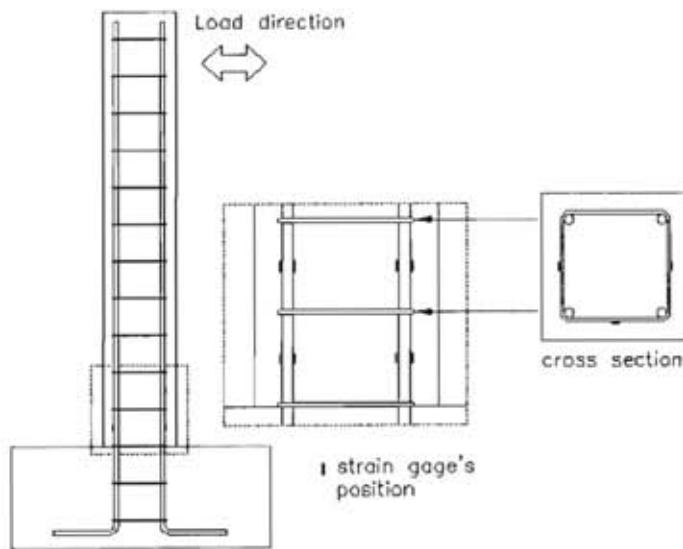
ตัวอย่าง	กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก, $f_y$ (เมกกะปาสคาล)	กำลังรับแรงดึงประลัย, $f_{su}$ (เมกกะปาสคาล)	โมดูลัสยืดหยุ่น, $E_s$ (เมกกะปาสคาล)
1	316	444	203067
2	311	469	199143
3	313	453	205029
เฉลี่ย	313	455	202413



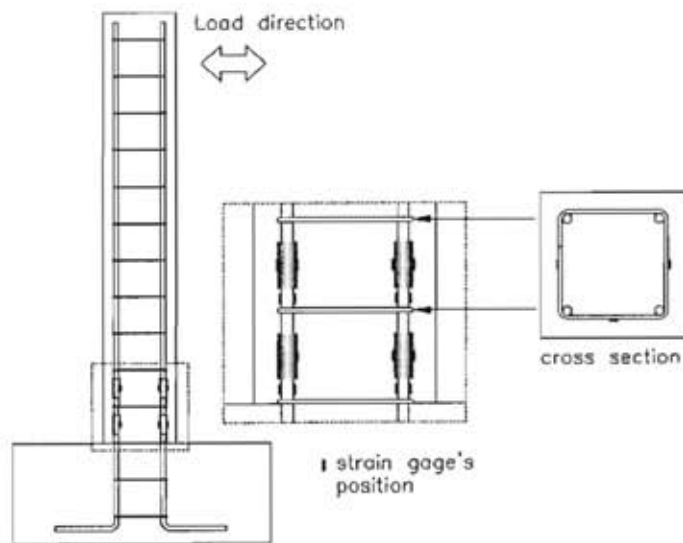
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กเสริม RB9

#### 4.2.3 เกจวัดความเครียด

เกจวัดความเครียด (strain gage) ที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นเกจวัดความเครียดสำหรับวัดความเครียดในเหล็กเสริมยี่ห้อ Kyowa ชนิด KFG-10-120-C1-11 มีขนาดความยาวเกจ 10 มม. ความยาวของสายสัญญาณ 10 ม. มีค่าความต้านทานเท่ากับ  $119.8 \pm 0.2$  โอห์ม มีค่าปรับแก้ของเกจ (gage factor) เท่ากับ 2.11 ในงานวิจัยนี้ใช้เกจวัดความเครียดที่ใช้จำนวน 64 ตัว ซึ่งแบ่งออกเป็นเกจวัดความเครียดในตัวอย่างเสา C-09-200 จำนวน 24 ตัวและในตัวอย่างเสา CC-09-200 จำนวน 40 ตัว รูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.6 แสดงรูปแบบตำแหน่งการติดตั้งเกจวัดความเครียดของตัวอย่างเสา C-09-200 และ CC-09-200 ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 ตำแหน่งการติดตั้งเกจวัดความเครียดของตัวอย่างเสา C-09-200

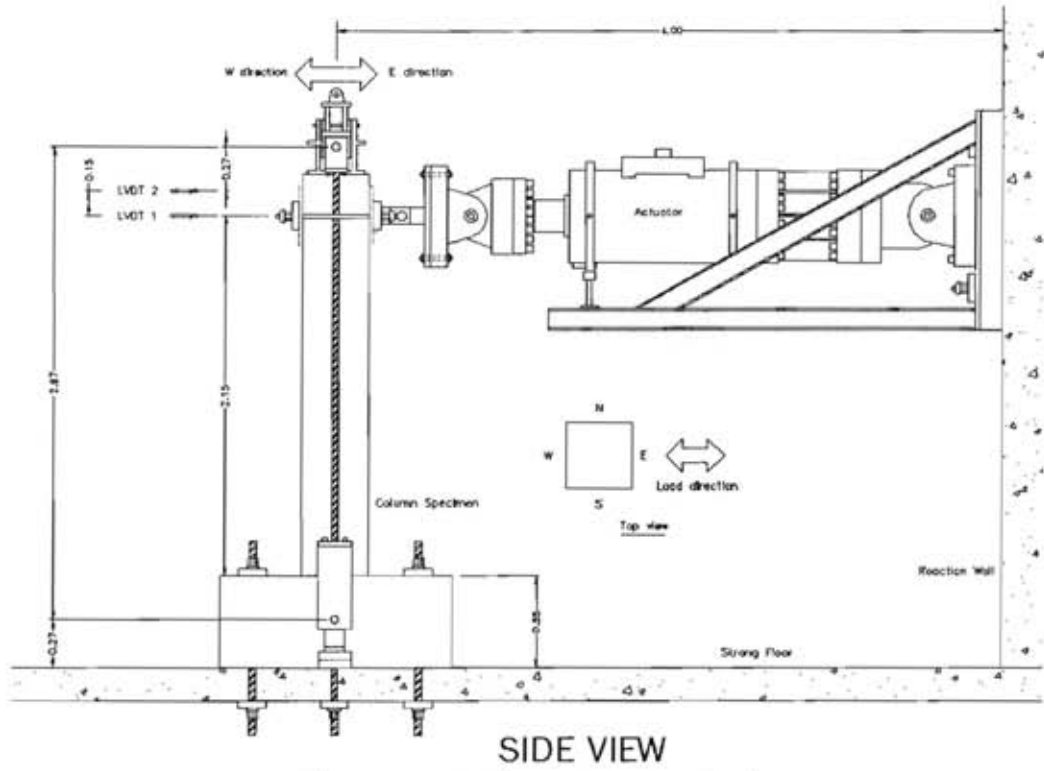


รูปที่ 4.7 ตำแหน่งการติดตั้งเกจวัดความเครียดของตัวอย่างเสา CC-09-200

#### 4.3 การติดตั้งตัวอย่าง

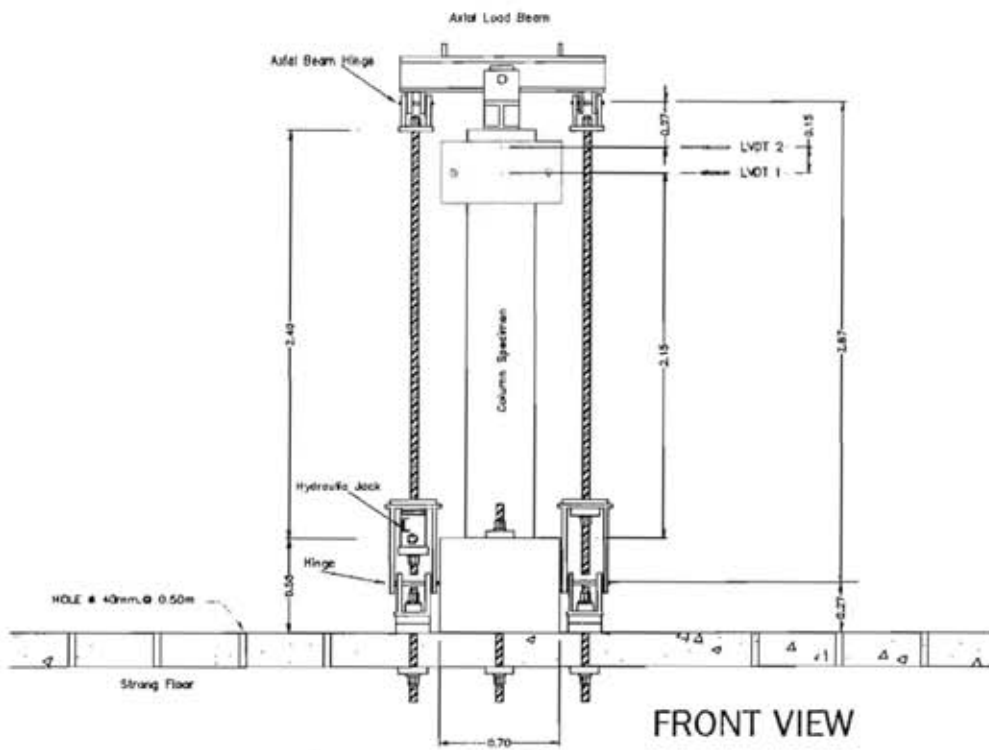
ในการติดตั้งจะทำการการยึดฐานรากของตัวอย่างเสาและพื้นห้องปฏิบัติการด้วยวิธีอัดแรง (prestress) เพื่อไม่ให้ฐานรากของตัวอย่างเสาเกิดการเคลื่อนที่หรือให้เกิดการเคลื่อนที่น้อยที่สุดเมื่อให้แรงกระทำทางด้านข้างโดยเครื่องให้แรงด้านข้าง (hydraulic jack) ดังแสดงในรูปที่ 4.8-4.10





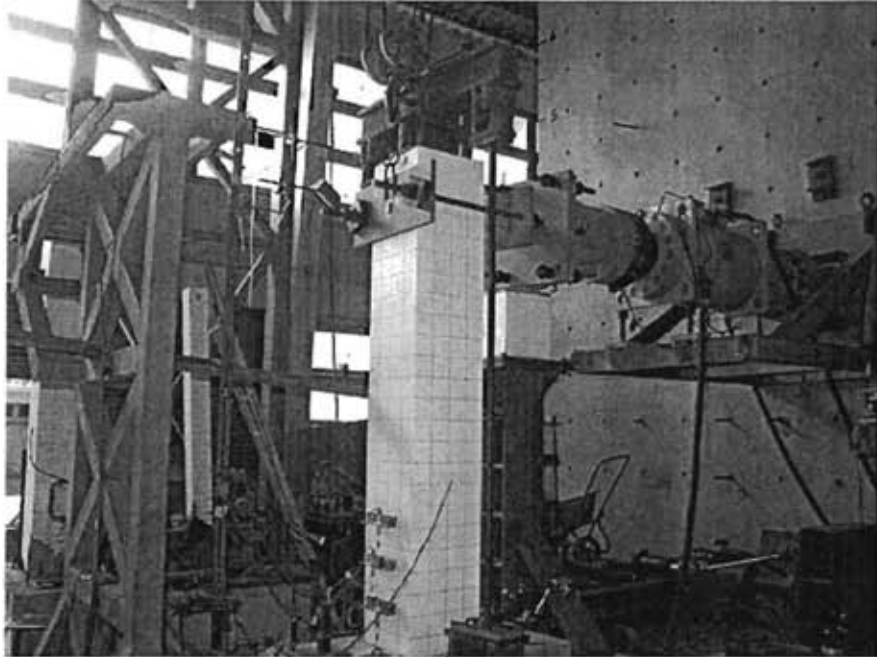
SIDE VIEW

รูปที่ 4.8 รูปแบบติดตั้งเสาทดสอบทางด้านข้าง



FRONT VIEW

รูปที่ 4.9 รูปแบบการติดตั้งเสาทางด้านหน้า



รูปที่ 4.10 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ

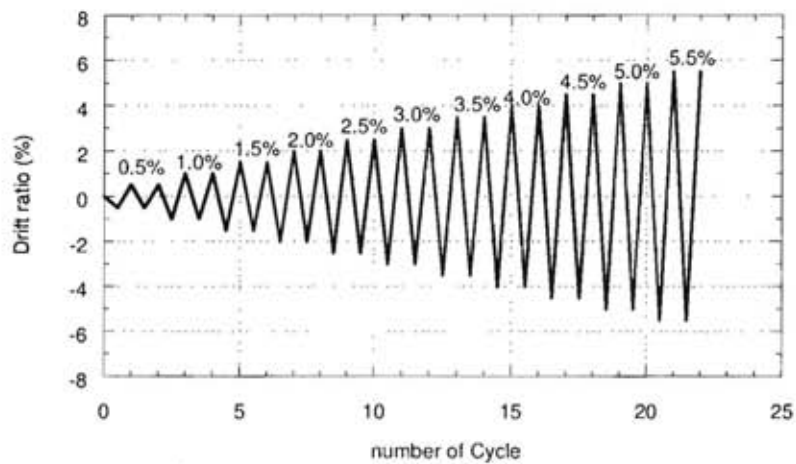
#### 4.4 ขั้นตอนการทดสอบ

ขั้นตอนการทดสอบมีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เครื่องให้แรงในแนวตั้งให้แรงอัดตามแนวแกนคองที่ซึ่งกำหนดแรงอัดตามแนวแกนไว้ที่ 314 กิโลนิวตัน (32 ตัน) ซึ่งต้องตรวจสอบแรงอัดตามแนวแกนให้มีแรงตามแนวแกนคองที่ตลอดเวลาขณะทดสอบ
2. กำหนดทิศการเคลื่อนที่โดยให้เครื่องหมายลบ(-) หมายถึงแรงกระทำทางด้านข้างที่ทำให้ตัวอย่างเสกเกิดแรงอัดจากเครื่องให้แรงทำให้เสกเคลื่อนที่ไปทางด้านทิศตะวันตก และเครื่องหมายบวก(+) หมายถึงแรงกระทำทางด้านข้างที่ทำให้ตัวอย่างเสกเกิดแรงดึงจากเครื่องให้แรงทำให้เสกเคลื่อนที่ไปทางด้านทิศตะวันออก ในการทดสอบได้กำหนดให้แรงกระทำต่อตัวอย่างเสกให้เคลื่อนที่ไปทางลบ(-) ก่อน
3. เก็บค่าความเครียดจากเกจวัดความเครียด, ระยะเวลาเคลื่อนที่ของเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ และแรงกระทำด้านข้างโดยการเก็บข้อมูลโดยเครื่องเก็บข้อมูล (data logger) เริ่มต้นตั้ง ยังไม่ได้ให้แรงกระทำ ซึ่งขั้นตอนการเก็บบันทึกค่าจะสิ้นสุดการทดสอบ
4. การให้แรงจากเครื่องให้แรงกระทำทางด้านข้าง โดยให้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักรควบคุมเครื่องให้แรงโดยควบคุมระยะเคลื่อนที่ (displacement control) ทดสอบ 2 รอบ แต่ละอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่โดยได้กำหนดประวัติการเคลื่อนที่ที่ใช้ในการทดสอบซึ่งได้แสดงในรูปที่ 4.11 ขณะทดสอบเมื่อระยะเคลื่อนที่ด้านข้างถึงอัตราการเคลื่อนที่ที่กำหนด

จะหยุดเพื่อบันทึกข้อมูลค่าความเครียดจากเกจวัดความเครียด, ระยะเวลาเคลื่อนที่ของเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ และบันทึกผลรายละเอียดต่างๆที่สังเกตจากภายนอกซึ่งได้แก่พฤติกรรมของเสาที่เกิดขึ้นและรอยแตกร้าวของแต่ละอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่

5. ทดสอบตามประวัติการเคลื่อนที่ที่ใช้ในการทดสอบที่ได้กำหนดไว้หรือทดสอบถึงตัวอย่างเสาเกิดการวิบัติก่อนจนไม่สามารถทดสอบต่อไปได้



รูปที่ 4.11 ประวัติการเคลื่อนที่ที่ใช้ในการทดสอบ

## บทที่ 5

### ผลการทดสอบ

ในบทนี้กล่าวถึงคำอธิบายพฤติกรรมและผลการทดสอบของตัวอย่างเสาที่ทดสอบ ซึ่งได้บรรยายเหตุการณ์และพฤติกรรมต่างๆ ระหว่างการทดสอบได้แก่ พฤติกรรมของเหล็กเสริมและรอยแตกร้าวที่สังเกตได้ ในส่วนของผลทดสอบได้บรรยายในรูปแบบของความสัมพันธ์ต่างๆ ได้แก่ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับให้แรง, ค่าความเหนียว, ความสามารถในการสลายพลังงาน และค่าสติเฟนสซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 5.1 พฤติกรรมของตัวอย่างเสาที่สังเกตระหว่างการทดสอบ

##### 5.1.1 ตัวอย่างเสา C-09-200

พฤติกรรมภายนอกของตัวอย่างเสา C-09-200 ที่สังเกตระหว่างการทดสอบเมื่อให้แรงกระทำด้านข้างต่อตัวอย่างเสากระทำให้มีระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ต่างๆ พบว่า

- ก. ที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 0.5% พบว่าตัวอย่างเสาที่ทดสอบทุกด้านเกิดรอยแตกร้าวยาวตลอดในแนวนอนที่ระดับความสูง 20, 40, 60, 80 และ 100 ซม. ซึ่งวัดจากผิวบนของฐานราก จากนั้นตัวอย่างเสาเกิดรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้นตามรอยแตกร้าวเดิมซึ่งขยายเปิดกว้างมากขึ้นจนกระทั่งการเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 1.5%
- ข. ที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 1.5% ตัวอย่างเสามีรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้นบริเวณโคนเสาทั้งด้านทิศตะวันออกและตะวันตก
- ค. ที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 2.0% ผิวคอนกรีตหลุดร่อน (spalling) บริเวณมุมโคนเสาเนื่องจากแรงอัด จากนั้นพบรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้นตามรอยแตกร้าวเดิมขยายเปิดกว้างมากขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งการเคลื่อนที่ด้านข้างที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 3.5%
- ง. ซึ่งระหว่างการทดสอบที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ +3.0% รอบการทดสอบที่ 2 เครื่องให้แรงทางด้านข้างลดลงเนื่องจากน้ำที่ใช้หล่อเย็นในระบบหล่อลื่นทำให้เครื่องมีความร้อนมากเกินไป ส่งผลให้แรงกระทำทางด้านข้างลดลง
- จ. ที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 3.5% พบว่าตัวอย่างเสาบริเวณมุมเสาหลุดร่อนมากขึ้น และสังเกตเห็นรอยแยกระหว่างเสาและฐานรากซึ่งมีขนาดค่อนข้างกว้าง

- จ. ที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 4.0% ตัวอย่างเสาเกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งมีความยาวประมาณ 15-20 ซม. บริเวณโคนเสาเหนือบริเวณรอยแยกระหว่างเสาและฐานราก เมื่อการเคลื่อนที่ด้านข้างอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 4.5%
- ข. ที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 4.5% ตัวอย่างเกิดการหลุดร่อนของผิวคอนกรีตขนาดใหญ่บริเวณโคนเสาซึ่งสามารถเห็นเหล็กเสริมตามขวางที่ระดับของผิวฐานรากได้ในทางด้านทิศเหนือของตัวอย่างเสา
- ช. ที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 5.0% พบว่าผิวคอนกรีตหลุดร่อนของขนาดใหญ่ทั้งบริเวณโคนเสาและมุมเสาทั้ง 4 มุม สามารถมองเห็นเหล็กเสริมตามยาว
- ณ. และที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 5.5% พบว่าคอนกรีตบริเวณโคนเสาส่วนใหญ่เกิดการหลุดร่อนออกทั้งหมดสามารถมองเห็นเหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะ (buckling) ได้อย่างชัดเจน

การวิบัติของตัวอย่างเสา C-09-200 เห็นได้ว่าเป็นการวิบัติแบบการดัด (flexure failure) ซึ่งสังเกตได้จากรอยแตกร้าวได้แสดงในรูปที่ 5.1 การวิบัติและรอยแตกร้าวหลังสิ้นสุดการทดสอบของตัวอย่างเสา C-09-200 บริเวณโคนเสาได้แสดงรูปที่ 5.2

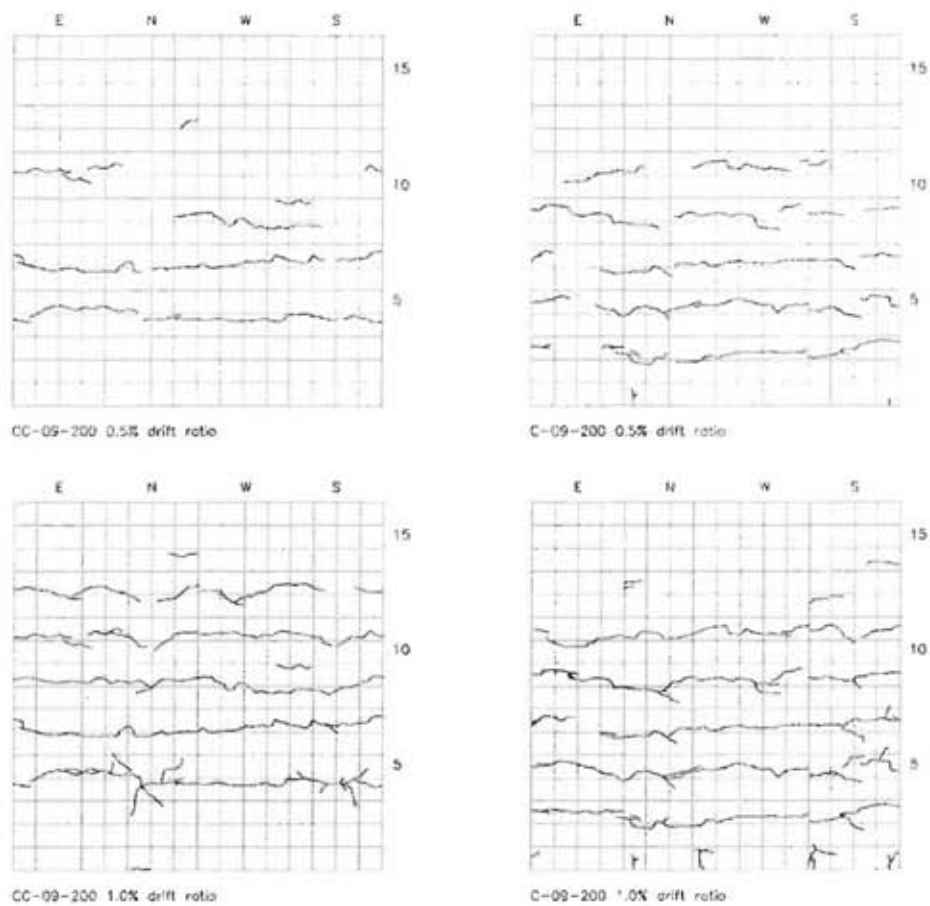
#### 5.1.2 ตัวอย่างเสา CC-09-200

พฤติกรรมภายนอกของตัวอย่างเสา CC-09-200 ที่สังเกตระหว่างการทดสอบเมื่อให้แรงกระทำด้านข้างต่อตัวอย่างเสากระทำให้มีระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ต่างๆ พบว่า

- ก. ที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 0.5% พบว่าตัวอย่างเสาทางด้านทิศตะวันตกและตะวันตกเกิดรอยแตกร้าวยาวตลอดในแนวนอนที่ระดับความสูง 40, 60, 80, และ 100 ซม. ซึ่งวัดผิวบนของฐานราก ส่วนด้านทิศเหนือและใต้เกิดรอยแตกร้าวเล็กน้อยในแนวนอนที่ระดับความสูง 40, 60, 80 และ 100 ซม. จากนั้นตัวอย่างเสาเกิดรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้นจากรอยแตกร้าวเดิมซึ่งขยายเปิดกว้างมากขึ้นจนกระทั่งการเคลื่อนที่ด้านข้างที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 2.0%
- ข. ที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 2.0% ตัวอย่างเสาเกิดรอยแตกร้าวยาวตลอดในแนวนอนที่ระดับความสูง 10 ซม. และเกิดรอยแยกระหว่างเสาและฐานราก เมื่อการเคลื่อนที่ด้านข้างที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 3.5%
- ค. ที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 3.5% พบว่าผิวคอนกรีตหลุดร่อนที่โคนเสาบริเวณทั้ง 4 มุม เนื่องจากแรงอัดและรอยแยกระหว่างเสาและฐานรากเปิดขยายกว้างขึ้น

- ง. ที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 4.5% พบว่าผิวคอนกรีตหลุดร่อนของบริเวณโคนเสา ขยายลึกลงไปในตัวเสา รอยแตกร้าวขยายเปิดกว้างมากและการหลุดร่อนของผิวคอนกรีตบริเวณโคนเสาขยายลึกลงไปในตัวเสามากขึ้นจนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบ ที่การเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 5.5%

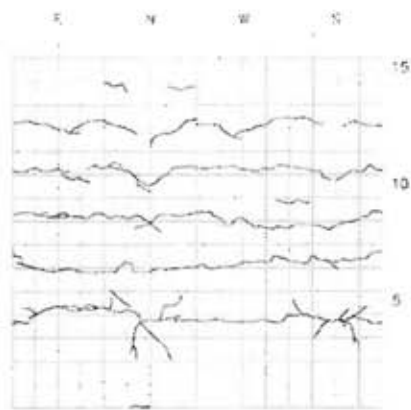
การวิบัติของตัวอย่างเสา CC-09-200 เห็นได้ว่าเป็นการวิบัติของตัวอย่างเสา CC-09-200 เป็นการวิบัติแบบการตัด ซึ่งสังเกตได้จากรอยแตกร้าวที่มีลักษณะแตกร้าวในแนวนอนดังแสดง แสดงในรูปที่ 5.1 การวิบัติและรอยแตกร้าวหลังสิ้นสุดการทดสอบของตัวอย่างเสา CC-09-200 บริเวณโคนเสาได้แสดงในรูปที่ 5.3



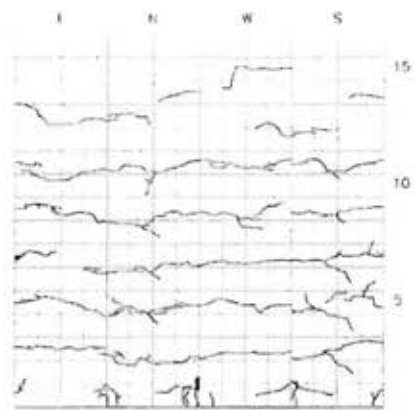
ก) ตัวอย่างเสา CC-09-200

ข) ตัวอย่างเสา C-09-200

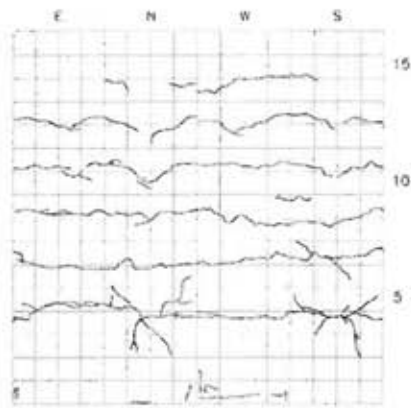
รูปที่ 5.1 รอยการแตกร้าวได้ได้บันทึกที่ระหว่างการทดสอบ



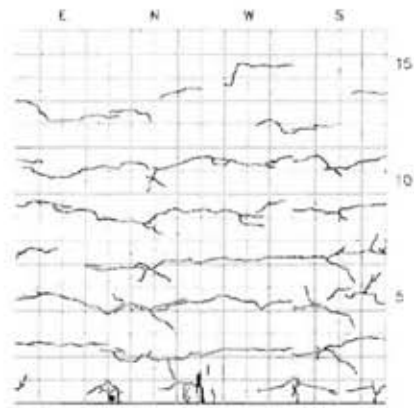
CC-09-200 1.5% drift ratio



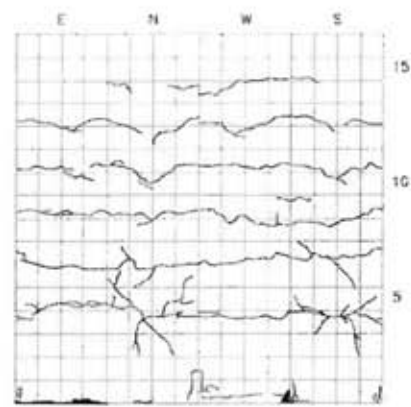
C-09-200 1.5% drift ratio



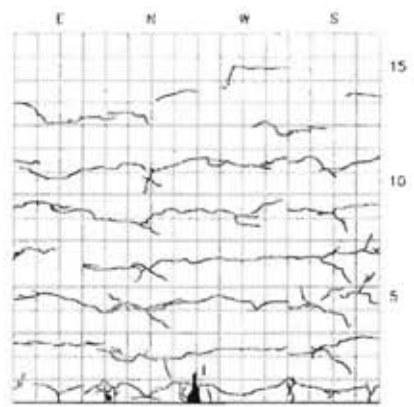
CC-09-200 2.0% drift ratio



C-09-200 2.0% drift ratio



CC-09-200 2.5% drift ratio

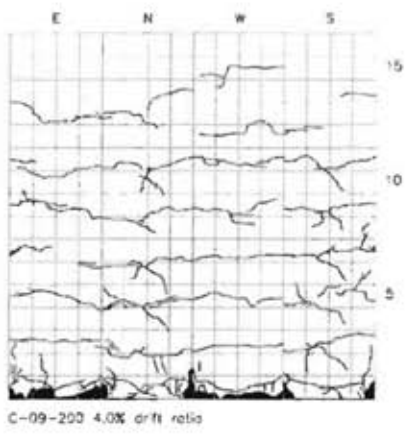
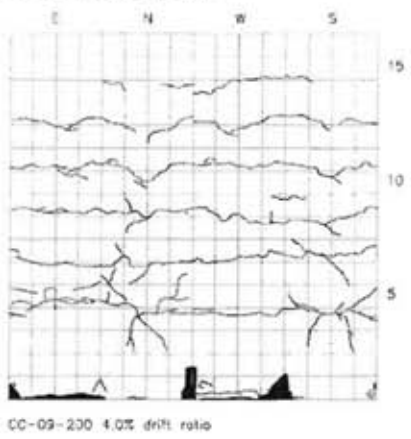
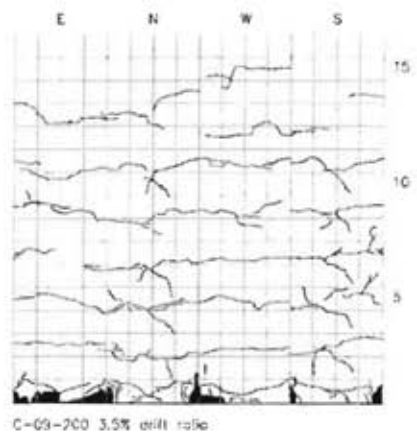
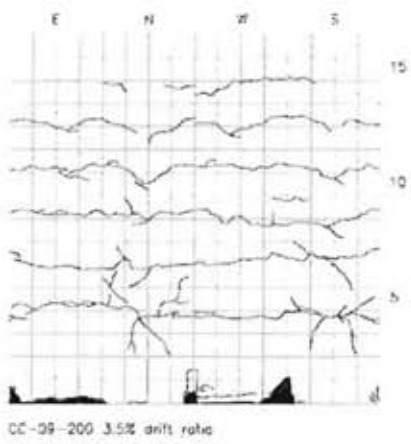
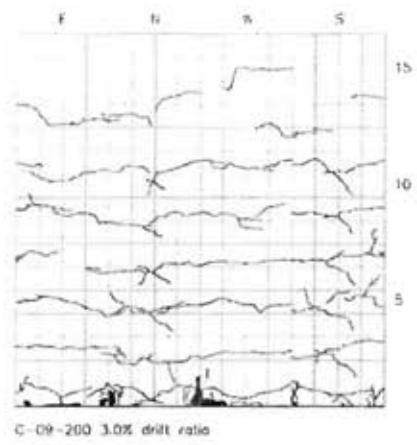
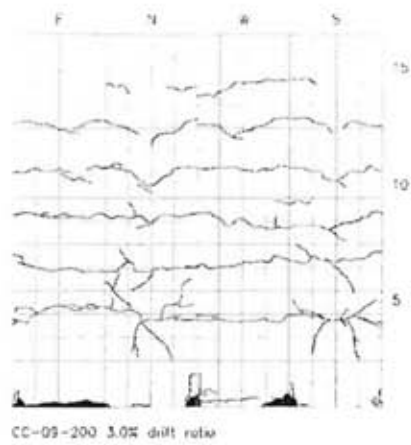


C-09-200 2.5% drift ratio

ก) ตัวอย่างเสา CC-09-200

ข) ตัวอย่างเสา C-09-200

รูปที่ 5.1 (ต่อ) รอยการแตกร้าวได้ได้บันทึกระหว่างการทดสอบ

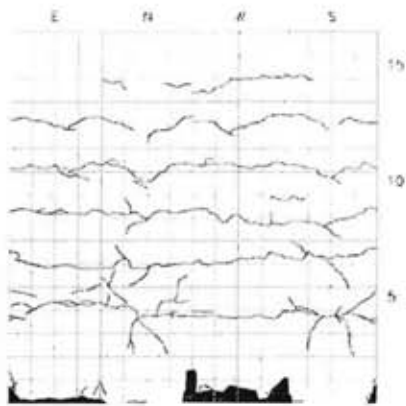


ก) ตัวอย่างเสา CC-09-200

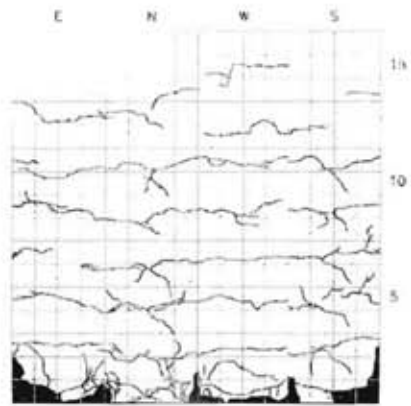
ข) ตัวอย่างเสา C-09-200

รูปที่ 5.1 (ต่อ) รอยการแตกร้าวได้ได้บันทึกระหว่างการทดสอบ

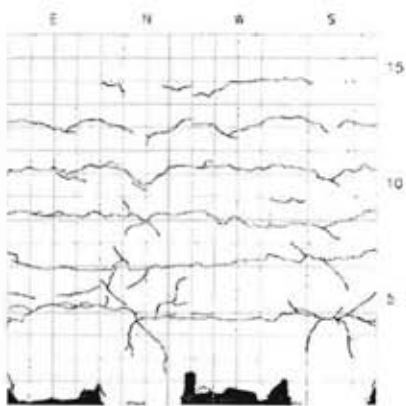




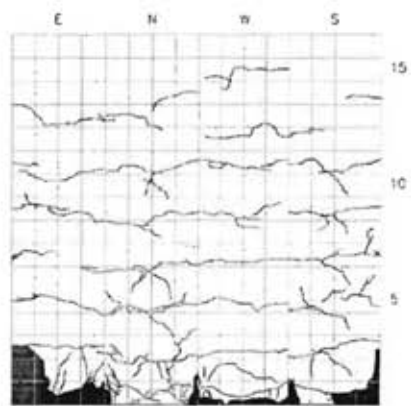
CC-09-200 4.5% drift ratio



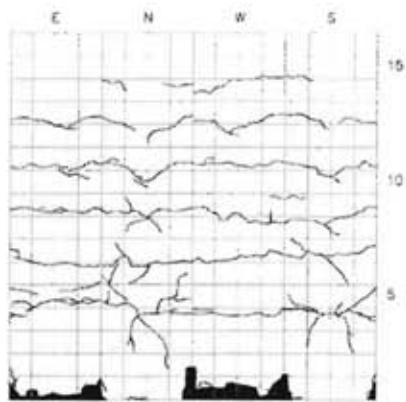
C-09-200 4.5% drift ratio



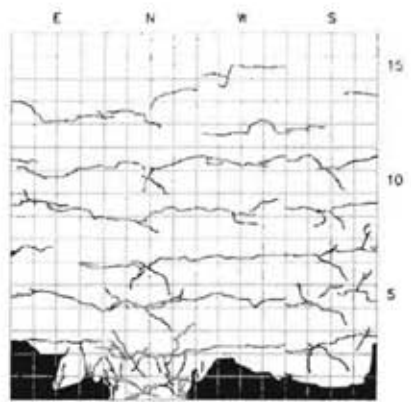
CC-09-200 5.0% drift ratio



C-09-200 5.0% drift ratio



CC-09-200 5.5% drift ratio



C-09-200 5.5% drift ratio

ก) ตัวอย่างเสา CC-09-200

ข) ตัวอย่างเสา C-09-200

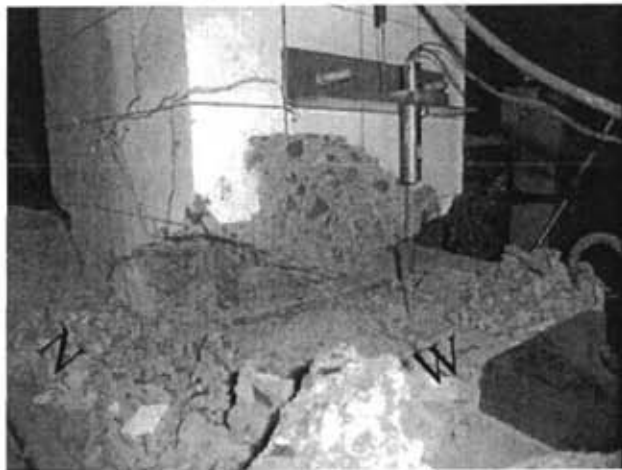
รูปที่ 5.1 (ต่อ) รอยการแตกร้าวได้ได้บันทึกระหว่างการทดสอบ



(ก) ทิศตะวันออก-ทิศใต้



(ข) ทิศตะวันตก-ทิศใต้



(ค) ทิศตะวันตก-ทิศเหนือ

รูปที่ 5.2 การวิบัติและรอยแตกร้าวหลังสิ้นสุดการทดสอบของตัวอย่างเสา C-09-200



(ก) ทิศตะวันออกเฉียง-ทิศใต้



(ข) ทิศตะวันตก-ทิศใต้



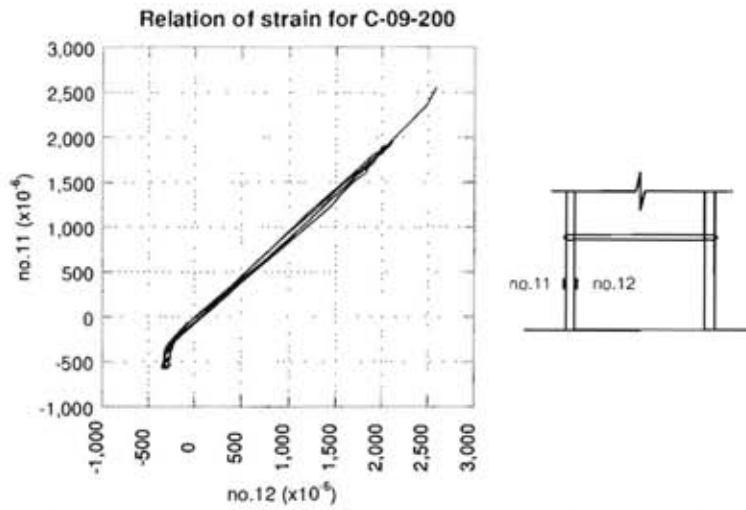
(ค) ทิศตะวันตก-ทิศเหนือ

รูปที่ 5.3 การวิบัติและรอยแตกร้าวหลังสิ้นสุดการทดสอบของตัวอย่างเสา CC-09-200

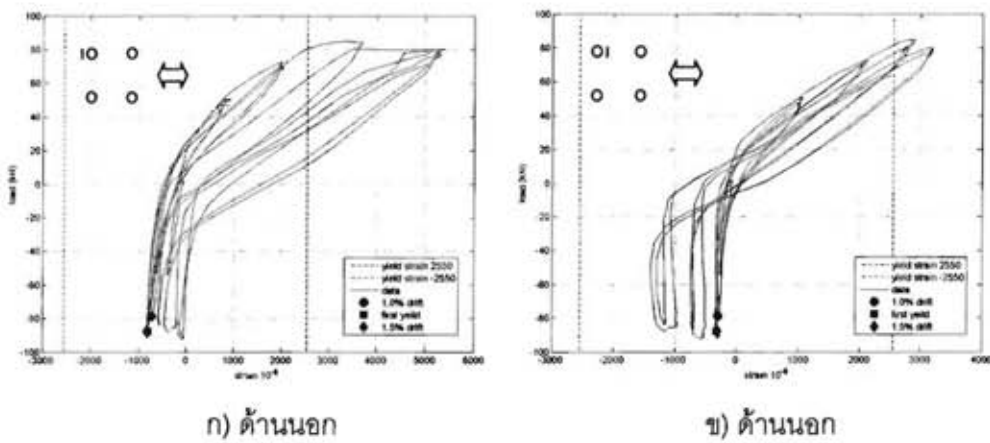
## 5.2 พฤติกรรมของเหล็กเสริมในระหว่างการทดสอบ

### 5.2.1 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา C-09-200

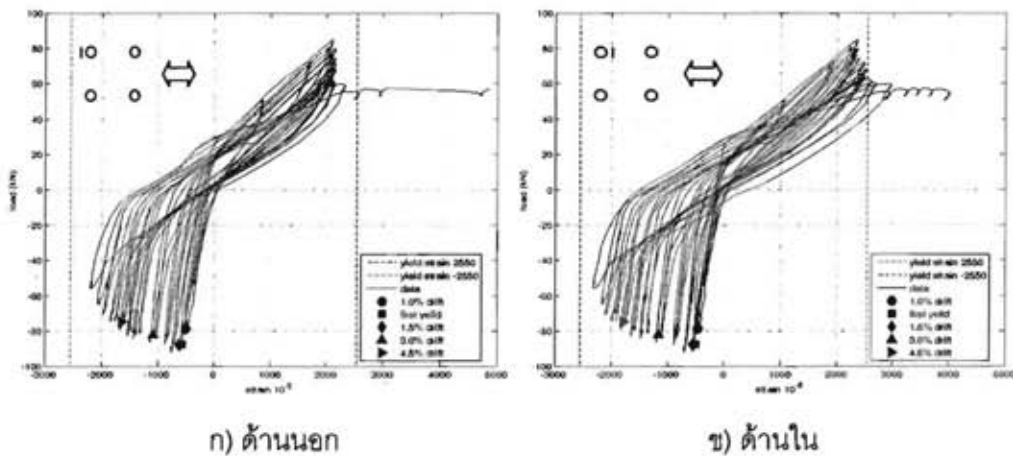
พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่าง C-09-200 ที่สังเกตได้พบว่าคุณสมบัติความเครียดที่วัดได้จากเกจวัดความเครียดที่ตำแหน่งเกจวัดความเครียดที่เหล็กเสริมตามยาวระดับล่างคือ ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวด้านนอกกับด้านในที่ระดับล่างมีค่าใกล้เคียงกันทั้งทางด้านรับแรงอัดและแรงดึง เมื่อมีการเคลื่อนที่ด้านข้างไปทางด้านลบเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันตกได้รับแรงอัด ส่วนเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกเหล็กเสริมตามยาวได้รับแรงดึง ซึ่งในการรกลบกันเมื่อมีการเคลื่อนที่ด้านข้างไปทางด้านบวก เหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันตกได้รับแรงดึง ส่วนเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกได้รับแรงอัด ซึ่งได้แสดงตัวอย่างในรูปที่ 5.4 โดยที่ no.11 คือเกจวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ด้านนอก และ no.12 คือเกจวัดความเครียดที่อยู่ด้านในของเหล็กเสริมตามยาว รูปที่ 5.5 แสดงความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับล่าง พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวระดับแรงเป็นเช่นนี้ในช่วงที่กระทำใหตัวอย่างมีระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 0.0% ถึง 1.5% และพบว่าเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับล่างเกิดการครากที่ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 1.20 % ส่วนพฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวระดับบนมีลักษณะเดียวกับเหล็กเสริมตามยาวระดับล่างเพิ่มขึ้นพฤติกรรมเป็นแบบนี้จนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบ แต่พบว่าเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับบนไม่เกิดการคราก รูปที่ 5.6 แสดงความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับบน ซึ่งเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับบนมีความเครียดมากกว่าที่สุดเท่ากับ 2200 ไมโครเมตร ที่ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 5.5%



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวด้านนอกกับด้านในที่ระดับล่างของตัวอย่างเสา C-09-200



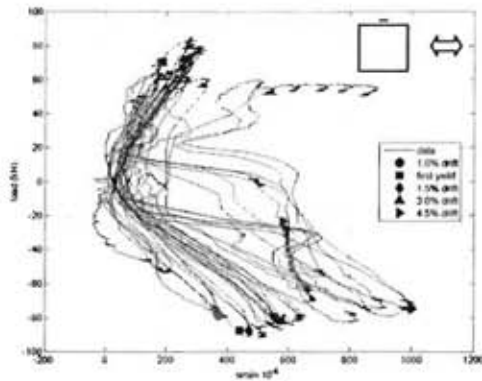
รูปที่ 5.5 ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับล่างของตัวอย่างเสา C-09-200



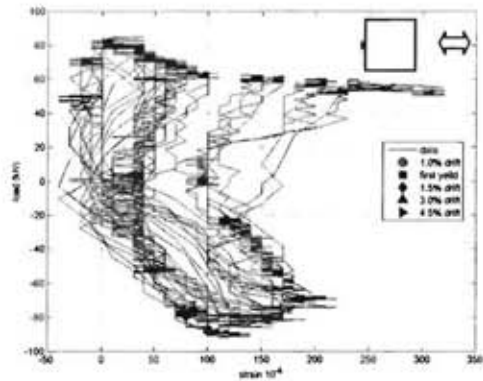
รูปที่ 5.6 ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับบนของตัวอย่างเสา C-09-200

## 5.2.2 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวางในตัวอย่างเสา C-09-200

เมื่อให้แรงกระทำด้านข้างต่อตัวอย่างเสา C-09-200 ให้มีระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 0.5% รูปที่ 5.7 แสดงความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางที่ระดับล่าง พบว่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางปลอกแรกมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย ส่วนเหล็กเสริมตามขวางปลอกที่สองทางด้านทิศเหนือและทิศใต้มีความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย เมื่อระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 1.0% พบว่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางปลอกแรกทางด้านทิศเหนือและทิศใต้มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 0.5% เป็นสองเท่า แต่เหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยมาก รูปที่ 5.8 แสดงความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางที่ระดับบน พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวางปลอกที่สองมีลักษณะคล้ายคลึงกับเหล็กเสริมตามขวางปลอกแรกคือเหล็กเสริมตามขวางปลอกแรกทางด้านทิศเหนือและทิศใต้มีค่าความเครียดเพิ่มขึ้นมากกว่าอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 0.5% เป็นสองเท่า แต่ทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกความเครียดมีค่าค่อนข้างคงที่ เมื่อระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 1.5% พบว่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางปลอกแรกทางด้านทิศเหนือและทิศใต้มีค่าเพิ่มขึ้นมีค่าความเครียดประมาณ 500 ไมโครสเตรน แต่เหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยมาก ส่วนเหล็กเสริมตามขวางปลอกที่สองมีพฤติกรรมคล้ายคลึงกับเหล็กเสริมตามขวางปลอกแรกคือเหล็กเสริมตามขวางปลอกแรกทางด้านทิศเหนือและทิศเหนือมีค่าความเครียดเพิ่มขึ้นแต่ทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกความเครียดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยมีค่าใกล้เคียงกับส่วนเหล็กเสริมตามขวางปลอกแรก ซึ่งเหล็กเสริมตามขวางมีความเครียดเพิ่มขึ้นมีพฤติกรรมเป็นแบบนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบที่ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 5.5%

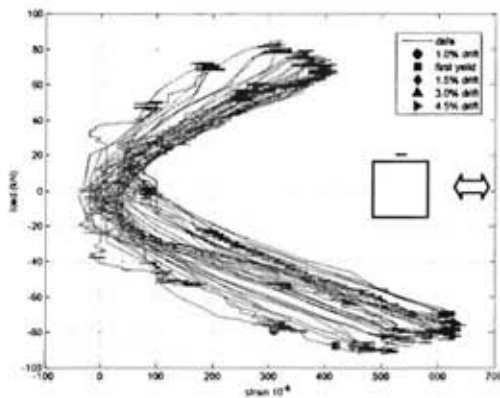


ก) ด้านขนานกับแรงกระทำ

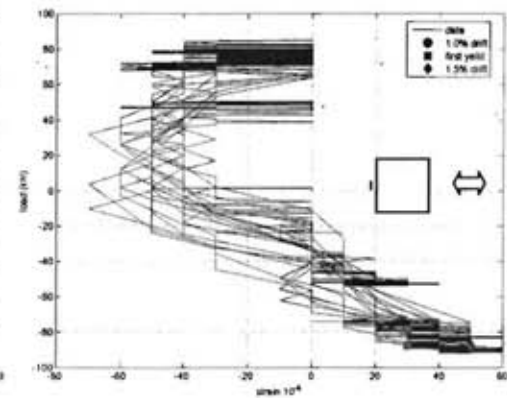


ข) ด้านตั้งฉากกับแรงกระทำ

รูปที่ 5.7 ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางที่ระดับล่างของตัวอย่างเสา C-09-200



ก) ด้านขนานกับแรงกระทำ



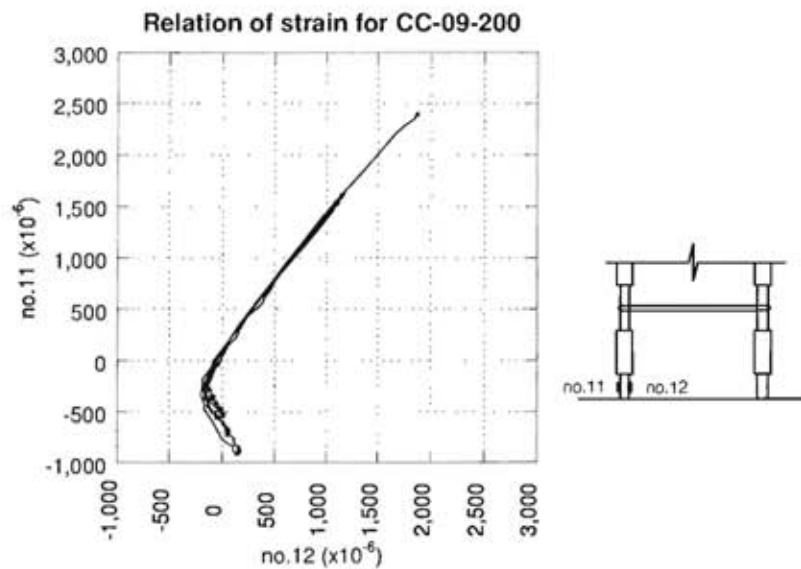
ข) ด้านตั้งฉากกับแรงกระทำ

รูปที่ 5.8 ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางที่ระดับบนของตัวอย่างเสา C-09-200

### 5.2.3 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา CC-09-200

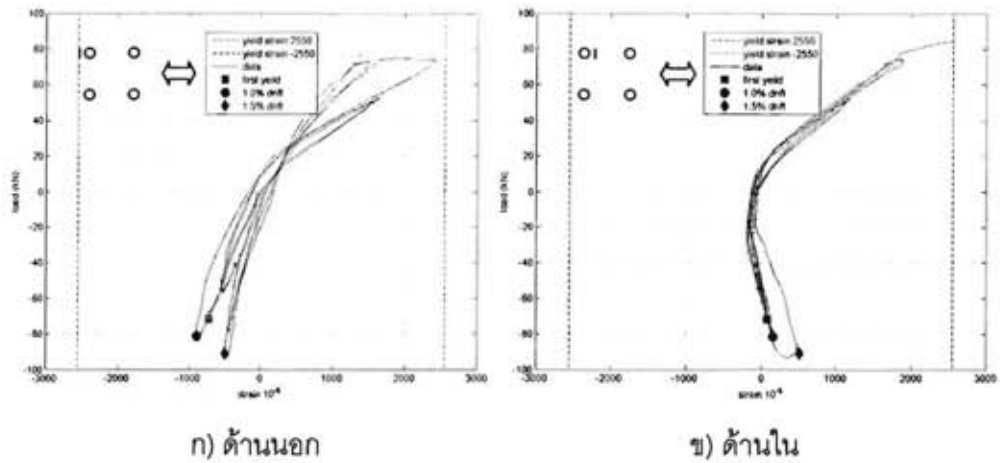
พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างเสา C-09-200 ที่สังเกตได้เมื่อมีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม พบว่าเกิดจุดหมุนของเสาที่ระดับความสูง 10 ซม. ณ ตำแหน่งเกจวัดความเครียดที่เหล็กเสริมตามยาวระดับล่าง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดของเหล็กเสริมด้านนอกกับความเครียดของเหล็กเสริมด้านในระดัปล่าง เมื่อเหล็กเสริมตามยาวรับแรงดึงเหล็กเสริมด้านนอกจะรับแรงดึงมากกว่า และเมื่อเหล็กเสริมตามยาวรับแรงอัดพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดของเหล็กเสริมด้านนอกกับความเครียดของเหล็กเสริมด้านในไม่เป็นเส้นตรง คือ เหล็กเสริมด้านนอกรับแรงอัด ส่วนเหล็กเสริมด้านในตามยาวรับแรงดึง ซึ่งได้แสดงตัวอย่างในรูปที่ 5.9 โดยที่ no.11 คือเกจวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ด้านนอก และ no.12 คือเกจวัดความเครียดที่อยู่ด้านในของเหล็กเสริมตามยาว รูปที่ 5.10 แสดงความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับล่าง พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวมีพฤติกรรมเป็นเช่นนี้ในช่วงมีระยะ

เคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 0.0% ถึง 1.5% ช่วงหลังการอัดรายการเคลื่อนที่ 1.5% ไม่สามารถวัดค่าความเครียดของเหล็กเสริมได้ และพบว่าเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับล่างเกิดการครากที่ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 0.78 % ส่วนพฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวระดับบนเป็นไปโดยปกติคือเมื่อมีการเคลื่อนที่ด้านข้างไปทางด้านลบ เหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกจะได้รับแรงอัด ส่วนเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกได้รับแรงดึง ซึ่งในการกลับกันเมื่อมีการเคลื่อนที่ด้านข้างไปทางด้านบวก เหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันตกจะได้รับแรงดึง รูปที่ 5.11 แสดงความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับบน ส่วนเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกได้รับแรงอัด พบว่าความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับบนเกิดการครากที่ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 2.5% ซึ่งเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับบนจะมีความเครียดเพิ่มขึ้น พฤติกรรมเป็นแบบนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบที่ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 5.5%

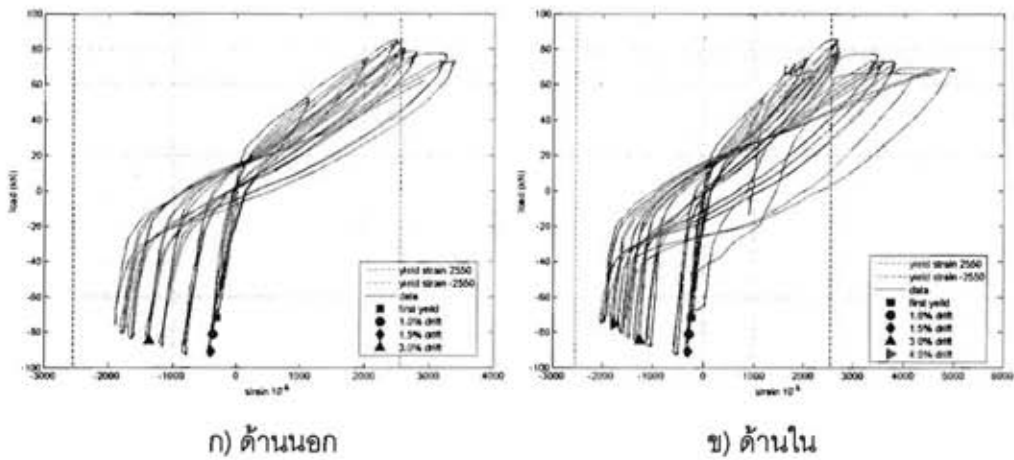


รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวด้านนอกกับด้านในระดับล่างของตัวอย่างเสา CC-09-200





รูปที่ 5.10 ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับล่างของตัวอย่างเสา CC-09-200

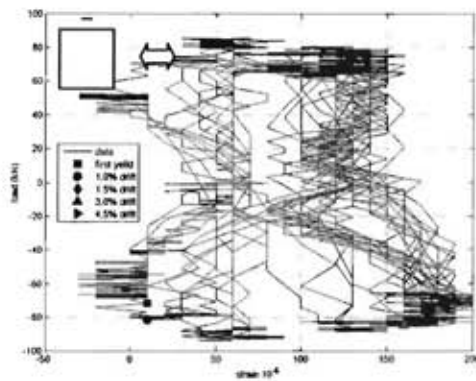


รูปที่ 5.11 ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับบนของตัวอย่างเสา CC-09-200

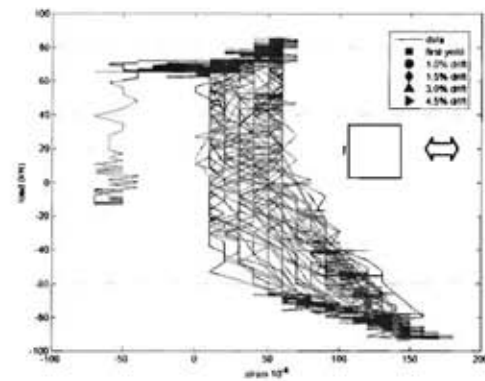
#### 5.2.4 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวางในตัวอย่างเสา CC-09-200

เมื่อให้แรงกระทำด้านข้างต่อเสาตัวอย่าง C-09-200 ให้มีระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 0.5% รูปที่ 5.12 แสดงความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางที่ระดับล่าง พบว่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางปลอกแรกมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อยแต่ค่อนข้างน้อยมาก เพราะเป็นปลอกที่อยู่ระหว่างการเสริมปลอกยัดรังเหล็กเสริม ส่วนเหล็กเสริมตามขวางปลอกที่สองความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อยซึ่งการเปลี่ยนแปลงนั้นมีค่าน้อยกว่าเหล็กเสริมตามขวางปลอกแรก เมื่อระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 1.0% พบว่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางปลอกแรกมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อยไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน ส่วนเหล็กเสริมตามขวางปลอกที่สองความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมอย่างเห็นได้ชัดโดยเฉพาะเหล็กเสริมตามขวางด้านทิศเหนือและใต้มีค่าความเครียดประมาณ 700 ไมโครสเตรน เมื่อระยะ

เคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 1.5% พบว่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางปลอกแรกไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน รูปที่ 5.13 แสดงความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางที่ระดับบน เหล็กเสริมตามขวางปลอกที่สองความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะเหล็กเสริมตามขวางด้านทิศเหนือและใต้มีค่าความเครียดประมาณ 800 ไมโครสเตรน และ 1000 ไมโครสเตรน ตามลำดับ ซึ่งเหล็กเสริมตามขวางมีความเครียดเพิ่มขึ้นพฤติกรรมเป็นแบบนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 5.0% พบว่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางปลอกแรกยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน ส่วนเหล็กเสริมตามขวางปลอกที่สองความเครียดจากที่มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเรื่อยๆ อย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและใต้มีค่าความเครียดลดลงเหลือประมาณ 500 ไมโครสเตรน

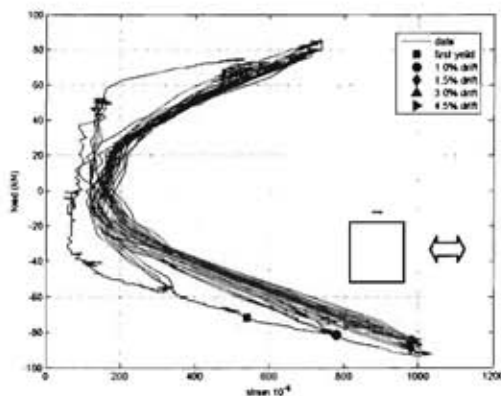


ก) ด้านขนานกับแรงกระทำ

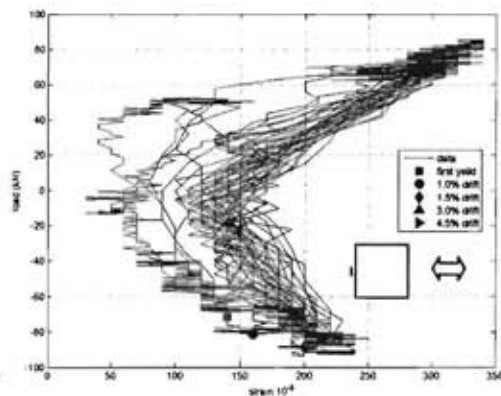


ข) ด้านตั้งฉากกับแรงกระทำ

รูปที่ 5.12 ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางที่ระดับล่างของตัวอย่างเสา CC-09-200



ก) ด้านขนานกับแรงกระทำ

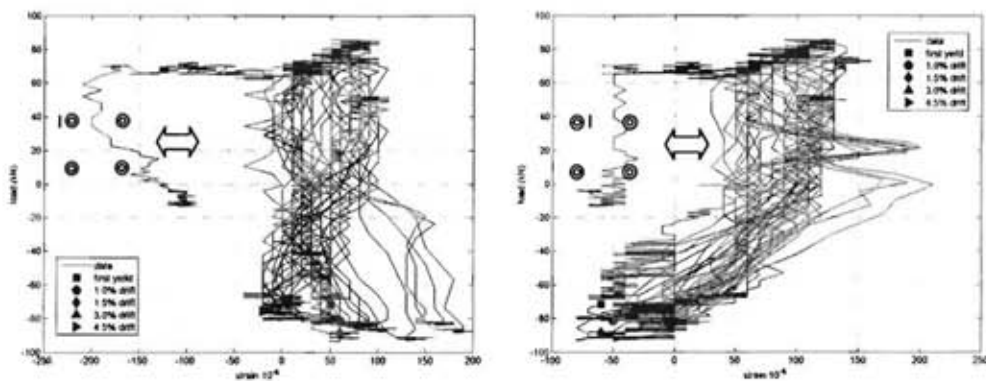


ข) ด้านตั้งฉากกับแรงกระทำ

รูปที่ 5.13 ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางที่ระดับบนของตัวอย่างเสา CC-09-200

### 5.2.5 พฤติกรรมของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมในตัวอย่างเสา CC-09-200

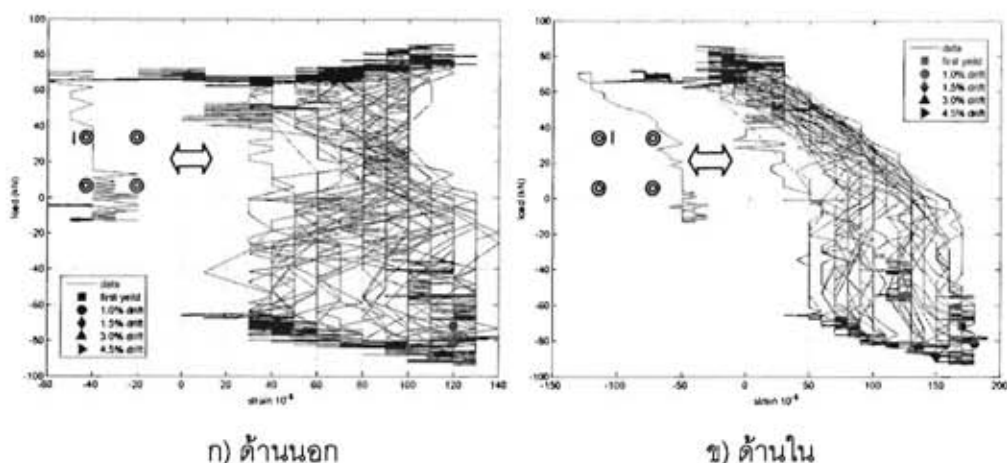
เมื่อให้แรงกระทำด้านข้างต่อตัวอย่างเสา CC-09-200 กระทำให้ตัวอย่างมีระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 0.5% ซึ่งแยกออกเป็นการเคลื่อนที่ทางด้านลบทางทิศตะวันตกและทางด้านบวกทางทิศตะวันออก พบว่าเมื่อมีการเคลื่อนที่ด้านข้างไปทางด้านลบคือมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ -0.5% ความเครียดของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่อยู่ทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความเครียดของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่อยู่ทางด้านทิศตะวันตกมีค่าลดลงพฤติกรรมเหมือนกันทั้ง 2 ระดับของตำแหน่งที่วัดค่าความเครียด และเมื่อมีการเคลื่อนที่ด้านข้างไปทางด้านบวกคือมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ +0.5% มีพฤติกรรมในทางตรงกันข้าม คือ ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมที่อยู่ทางด้านทิศตะวันออกมีค่าลดลง ซึ่งเหล็กเสริมตามยาวมีความเครียดเพิ่มขึ้นมีพฤติกรรมเป็นแบบนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบที่ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 5.5% ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของความเครียดมีค่าน้อยมากตั้งแต่ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 0.5% จนถึง 5.5%



ก) ด้านนอก

ข) ด้านใน

รูปที่ 5.14 ความเครียดของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ระดับล่างของตัวอย่างเสา CC-09-200



รูปที่ 5.15 ความเครียดของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ระดับล่างของตัวอย่างเสา CC-09-200

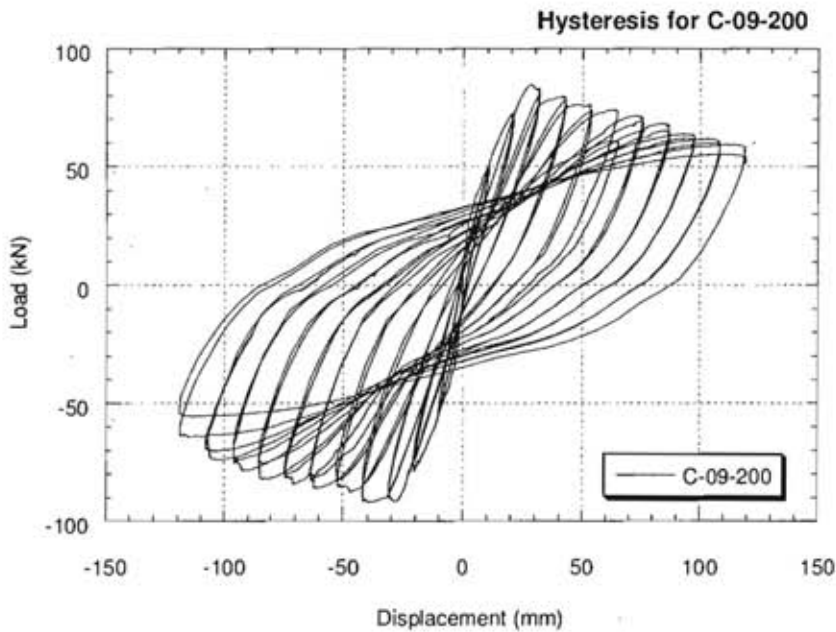
### 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ด้านข้าง

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของ CC-09-200 และ C-09-200 เห็นได้ว่ากราฟความสัมพันธ์เป็นรูปแบบของวงรอบฮิสเทรีซิส ซึ่งเป็นการเคลื่อนแบบกลับไปกลับมา โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่ได้จากการทดสอบมีผลของการไถลของฐานรากและการหมุนของฐานรากรวมอยู่ด้วย จึงต้องการปรับแก้ค่าผลเนื่องจากผลของแรงอัดตามแนวแกนที่ไม่อยู่ในแนวตั้งตามหัวข้อที่ 3.6.1 และการเคลื่อนที่ทางด้านข้างนั้นได้ปรับแก้ผลของการไถลของฐานรากและการหมุนของฐานรากตามหัวข้อที่ 3.6.2 ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวอย่างเสา CC-09-200 และ C-09-200 มีดังต่อไปนี้

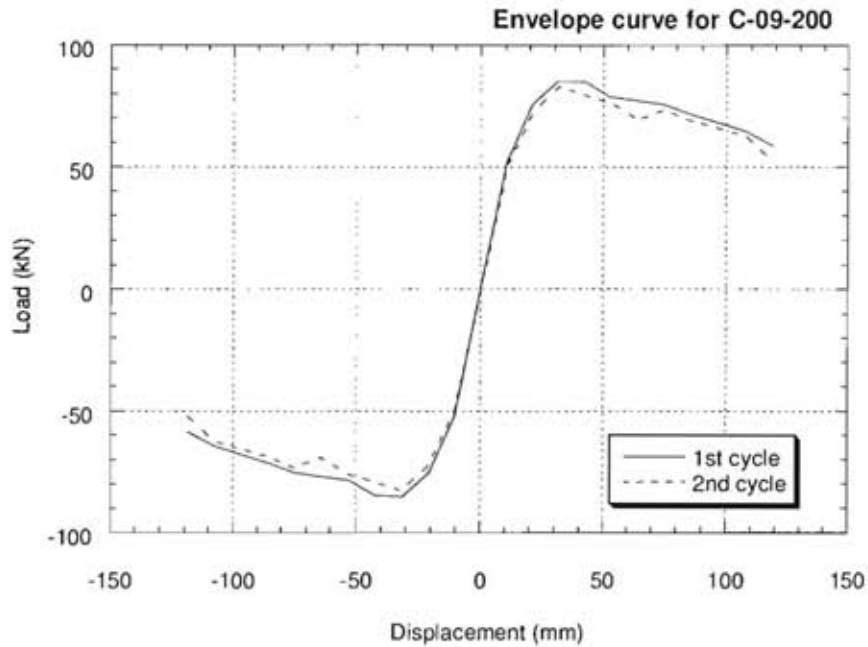
#### 5.3.1 ตัวอย่างเสา C-09-200

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวอย่างเสา C-09-200 ได้แสดงในรูปที่ 5.16 ซึ่งพบว่าแรงกระทำด้านข้างสูงสุดมีค่าเท่ากับ +81.6 กิโลนิวตัน ที่ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเท่ากับ -31.7 มม. (อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ -1.47%) และมีแรงกระทำด้านข้างต่ำสุดมีค่าเท่ากับ -91.0 กิโลนิวตัน ที่ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเท่ากับ -41.8 มม. (อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ -1.94%) ในระหว่างการทดสอบเกิดเหตุการณ์แรงดันของเครื่องให้แรงทางด้านข้างลดลงที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ +3.0% รอบการทดสอบรอบที่ 2 จึงส่งผลให้แรงกระทำทางด้านข้างลดลง เนื่องจากน้ำที่ใช้หล่อเย็นในระบบหล่อลดลงทำให้เครื่องมีความร้อนมากเกินไปซึ่งได้แสดงในรูปที่ 5.16

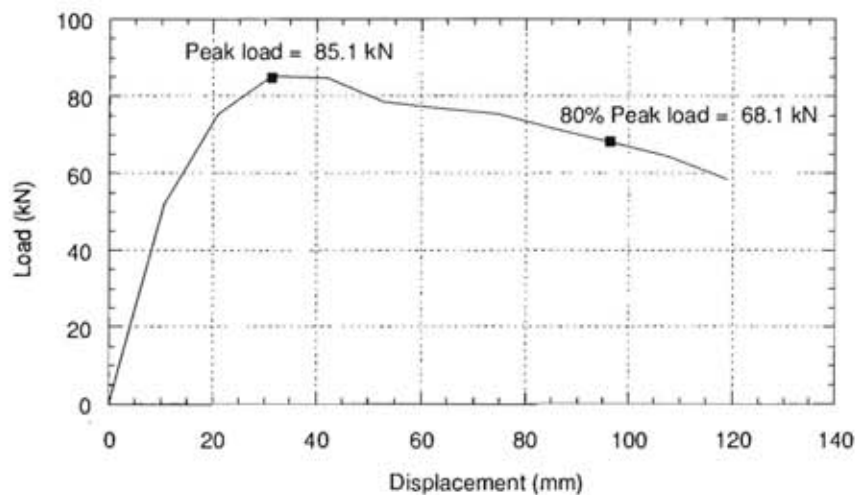
เมื่อทราบแรงกระทำด้านข้างสูงสุดและแรงกระทำด้านข้างต่ำสุดทั้ง 2 รอบการทดสอบแต่ละอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่แล้ว โดยแยกแรงกระทำด้านข้างสูงสุดและแรงกระทำด้านข้างต่ำสุดของแต่ละรอบการทดสอบนำมาเฉลี่ยเพื่อเขียนเป็นเส้นโค้งขอบนอกดังแสดงในรูปที่ 5.17 ค่าเฉลี่ยของแรงกระทำด้านข้างสูงสุดเท่ากับ 85.1 กิโลนิวตัน ที่ค่าเฉลี่ยของระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเท่ากับ 31.4 มม. (อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 1.46%) เสาเกิดวิบัติที่แรงกระทำทางด้านข้างลดลงเหลือ 80% ค่าเฉลี่ยแรงกระทำด้านข้างคงเหลือ 68.4 กิโลนิวตัน ที่ค่าเฉลี่ยของระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเฉลี่ยเท่ากับ 96.4 มม. (อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 4.59%) และเมื่อสิ้นสุดการทดสอบพบว่าค่าเฉลี่ยของแรงกระทำด้านข้างคงเหลือเท่ากับ 58.5 กิโลนิวตัน ที่ค่าเฉลี่ยของระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเฉลี่ย 118.8 มม. (อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 5.53%) ซึ่งแรงกระทำด้านข้างมีค่าลดลงเหลือ 68.7%



รูปที่ 5.16 วงรอบฮิสเทรีซิสของตัวอย่างเสา C-09-200



รูปที่ 5.17 เส้นโค้งขอบนอกของตัวอย่างเสา C-09-200

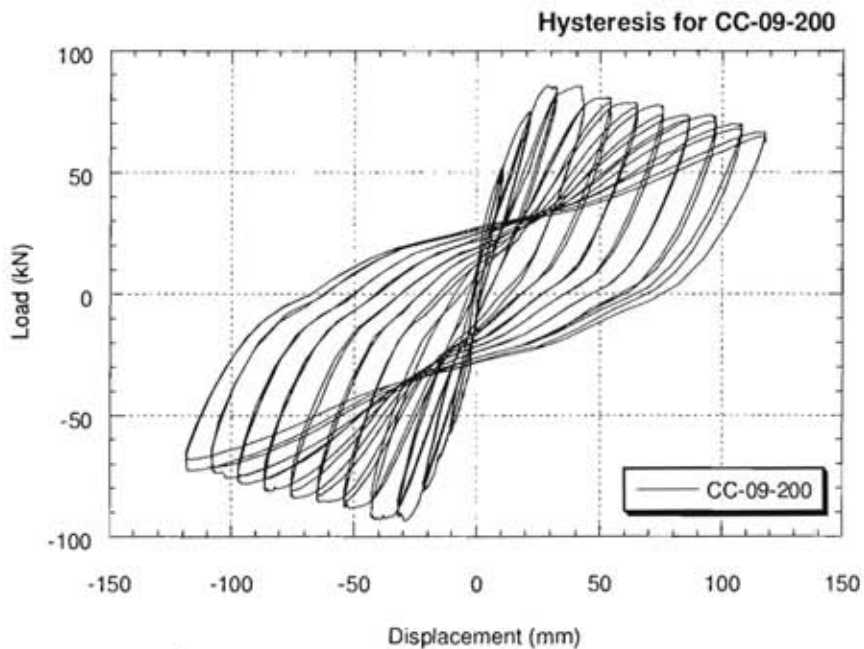


รูปที่ 5.18 เส้นโค้งขอบนอกแสดงแรงกระทำสูงสุดและแรงที่เกิดการวิบัติตัวอย่างเสา C-09-200

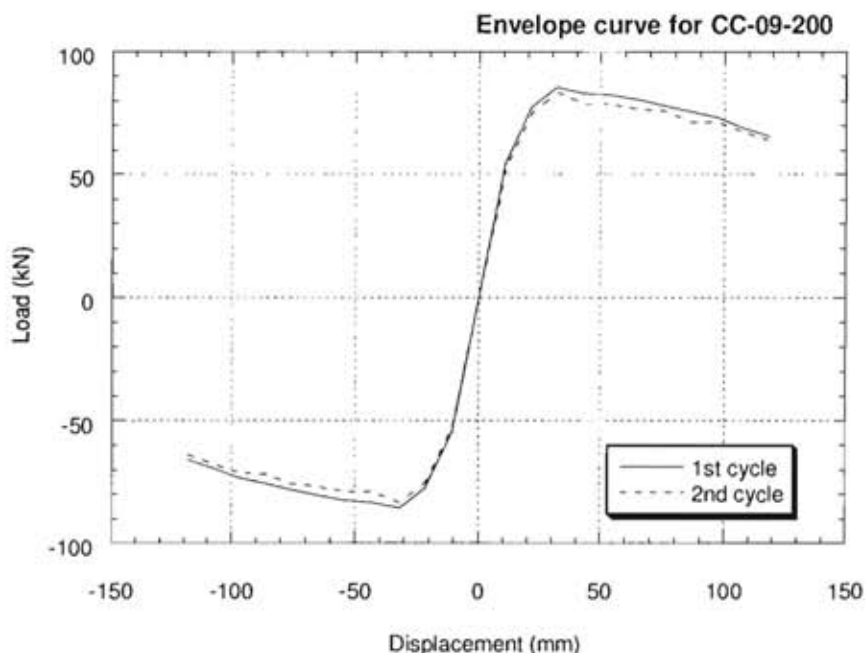
### 5.3.2 ตัวอย่างเสา CC-09-200

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวอย่างเสา CC-09-200 ดังแสดงในรูปที่ 5.19 ซึ่งพบว่าแรงกระทำด้านข้างสูงสุดมีค่าเท่ากับ +83.1 กิโลนิวตัน ที่ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเท่ากับ +32.1 มม. (อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ +1.49%) และมีแรงกระทำด้านข้างต่ำสุดมีค่าเท่ากับ -91.1 กิโลนิวตัน ที่ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเท่ากับ -43.1 มม. (อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ -2.00%)

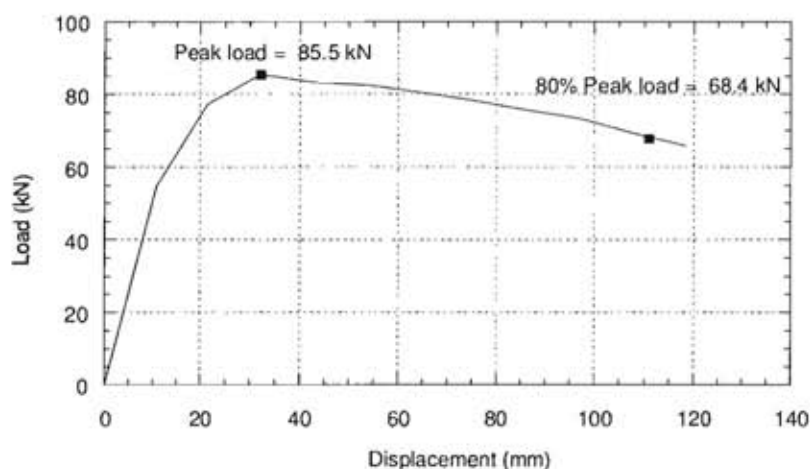
เมื่อทราบแรงกระทำด้านข้างสูงสุดและแรงกระทำด้านข้างต่ำสุดทั้ง 2 รอบการทดสอบแต่ละอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่แล้ว โดยแยกแรงกระทำด้านข้างสูงสุดและแรงกระทำด้านข้างต่ำสุดของแต่ละรอบการทดสอบนำมาเฉลี่ยเพื่อเขียนเป็นเส้นโค้งขอบนอกดังแสดงในรูปที่ 5.20 ค่าเฉลี่ยของแรงกระทำด้านข้างสูงสุดเท่ากับ 85.5 กิโลนิวตัน ที่ค่าเฉลี่ยของระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเท่ากับ 32.2 มม. (อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 1.50%) เสาเกิดวิบัติที่แรงกระทำทางด้านข้างลดลงเหลือ 80% ค่าเฉลี่ยแรงกระทำด้านข้างคงเหลือเท่ากับ 68.1 กิโลนิวตัน ที่ค่าเฉลี่ยของระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเฉลี่ยเท่ากับ 110.2 มม. (อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 5.25%) เมื่อสิ้นสุดการทดสอบพบว่าค่าเฉลี่ยของแรงกระทำด้านข้างคงเหลือเท่ากับ 65.8 กิโลนิวตัน ที่ค่าเฉลี่ยของระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเฉลี่ยเท่ากับ 117.9 มม. (อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 5.48%) ซึ่งแรงกระทำด้านข้างมีค่าลดลงเหลือ 77%



รูปที่ 5.19 วงรอบฮิสเทรีซิสของตัวอย่างเสา CC-09-200



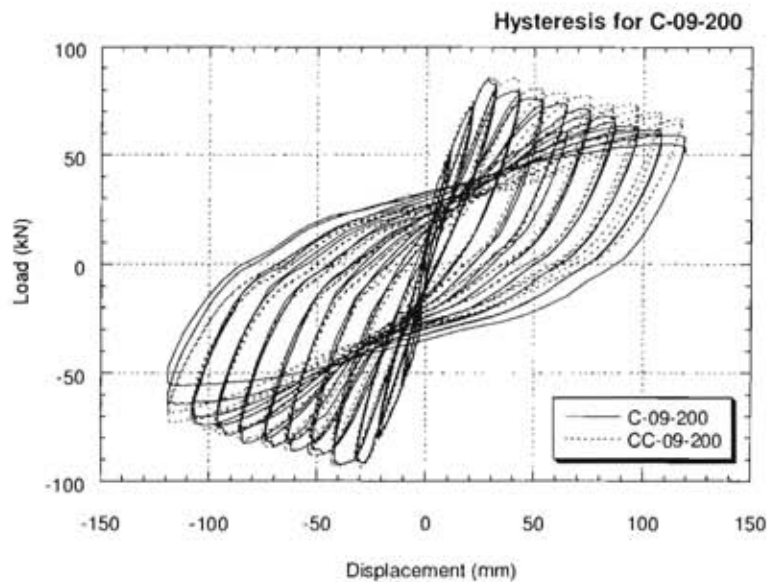
รูปที่ 5.20 เส้นโค้งขอบนอกของตัวอย่างเสา CC-09-200



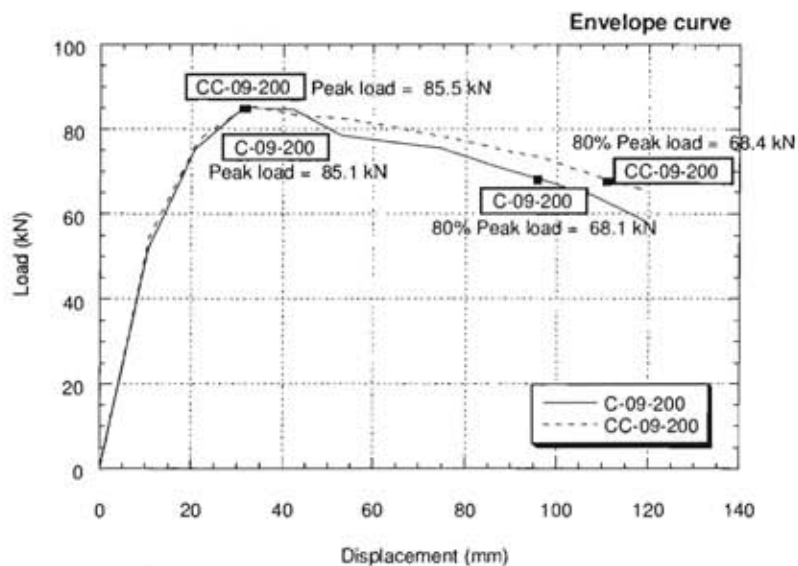
รูปที่ 5.21 เส้นโค้งขอบนอกแสดงแรงกระทำสูงสุดและแรงที่เกิดการวิบัติตัวอย่างเสา CC-09-200 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวอย่างเสา CC-09-200 และ C-09-200 ซึ่งได้เปรียบเทียบแสดงในรูปที่ 5.23 พบว่าตัวอย่างเสา CC-09-200 และ C-09-200 มีแรงกระทำด้านข้างสูงสุดเท่ากับ -93.5 กิโลนิวตัน และ -92 กิโลนิวตันตามลำดับ ได้เสนอเป็นกราฟเส้นโค้งขอบนอกดังแสดงรูปที่ 5.22 และรูปที่ 5.23 เพื่อง่ายต่อการเปรียบเทียบผลของแรงกระทำด้านข้างและระยะเคลื่อนที่ด้านข้างในแต่ละอัตราการเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นค่าที่เฉลี่ยแล้ว พบว่าแรงกระทำด้านข้างของตัวอย่างเสา CC-09-200 มีแรงกระทำด้านข้างสูงสุดเท่ากับ 84.5 กิโลนิวตัน ซึ่งมากกว่าตัวอย่างเสา C-09-200 มีค่าเท่ากับ 84 กิโลนิวตัน และที่เห็นได้ชัดคือ ตัวอย่างเสา CC-09-200 มีการลดของแรงกระทำด้านข้างในแต่ละอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ที่มีค่า



น้อยกว่าตัวอย่างเสา C-09-200 เนื่องจากตัวอย่างเสา C-09-200 มีการหลุดร่อนของคอนกรีตหุ้ม และเหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งงอ



รูปที่ 5.22 การเปรียบเทียบวงรอบฮิสเทอรีซิสของตัวอย่างเสา CC-09-200 และ C-09-200



รูปที่ 5.23 การเปรียบเทียบจากกราฟเส้นโค้งขอบนอก

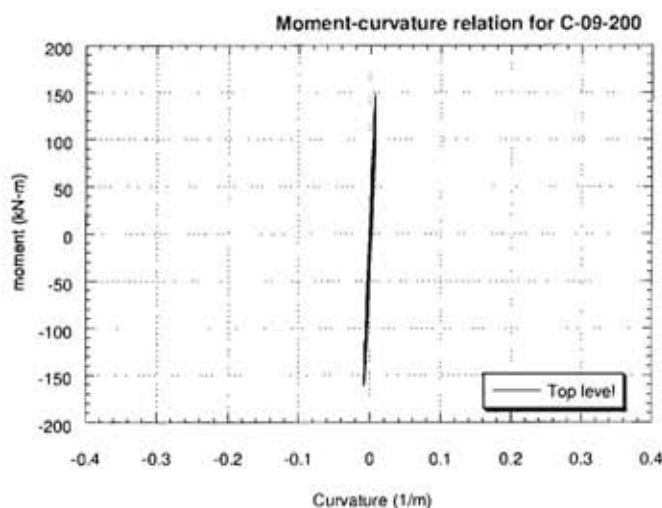
#### 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้ง (moment-curvature relation)

ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้ง ซึ่งความโค้งมีความสัมพันธ์กับระยะเคลื่อนที่ที่ระยะให้แรง โดยความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้ง คือ  $\phi = \frac{M}{EI}$  ซึ่งสามารถหาค่า  $IE$  ได้จากความความชันจากความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้ง ความโค้ง

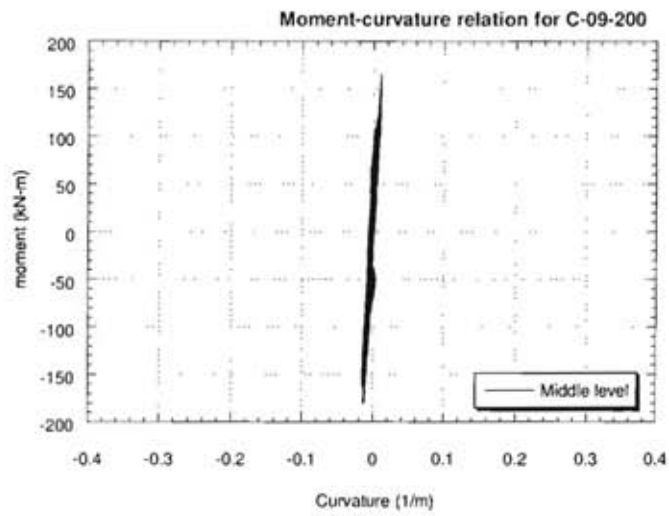
สามารถหาได้จากทดสอบโดยวัตรระยะการหมุนของตำแหน่งของตัวอย่างเสา 3 ช่วง ช่วงละ 0.20 ม. จากระดับความสูงจากผิวบนฐานราก ซึ่งผลของความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้ง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 5.4.1 ตัวอย่างเสา C-09-200

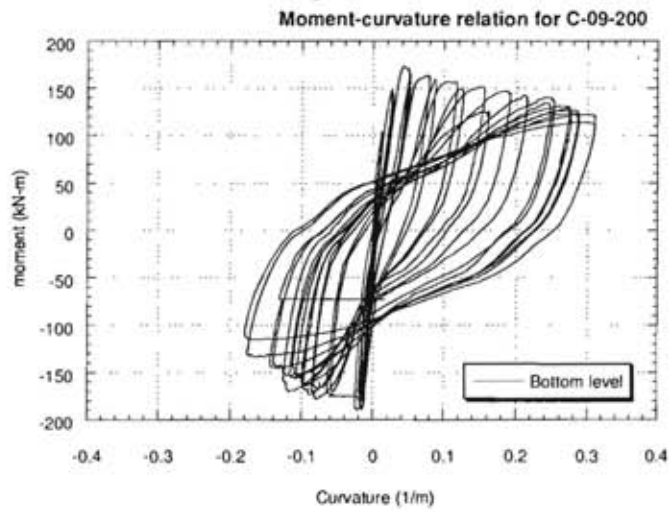
ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้งที่พบได้ในตัวอย่างเสา พบว่าความโค้ง ช่วงความสูง 0.40 ถึง 0.60 ม. และช่วงความสูง 0.20 ถึง 0.40 ม. จากผิวบนฐานราก ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้งมีลักษณะเป็นเส้นตรงเช่นเดียวกับตัวอย่างเสา CC-09-200 และความโค้งที่ช่วงความสูง 0.00 ถึง 0.20 ม. พบว่าลักษณะความสัมพันธ์เป็นลักษณะฮิสเทรีซิส ซึ่งจากผลของความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้งที่ช่วงความสูง 0.00 ถึง 0.20 ม. สามารถทราบได้ว่าระยะจุดสมดุลพลาสติกอยู่ในช่วงความสูง 0.00 ถึง 0.20 ม. แต่ในการทดสอบเกิดเหตุสุดวิสัยไม่สามารถหาความโค้งที่ช่วงความสูง 0.00 ถึง 0.20 ม. เนื่องจากกระจกรองเครื่องวัตรระยะเคลื่อนที่หลุดระหว่างการทดสอบสามารถอ่านค่าได้ถึงอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 1.0% รูปที่ 5.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้งในตัวอย่างเสา C-09-200 โดยช่วงความสูงจากเรียงจากบนลงล่าง การหลุดร่อนของกระจกรองเครื่องวัตรระยะเคลื่อนที่ได้แสดงในรูปที่ 5.25



(ก) ช่วงความสูง 0.40 ถึง 0.60 ม.

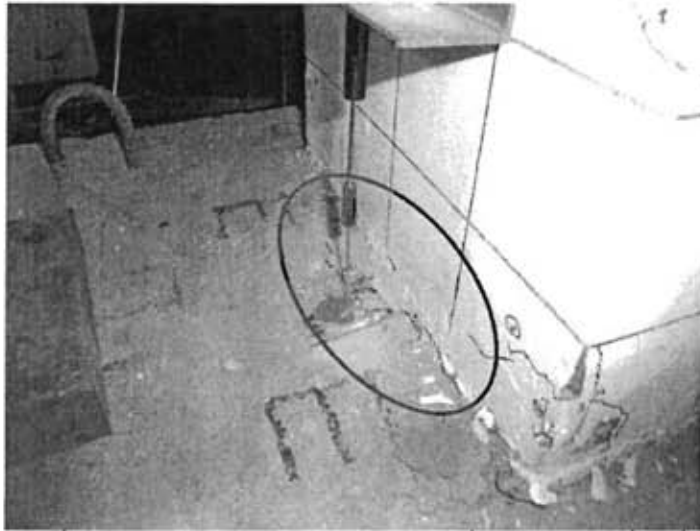


(ข) ช่วงความสูง 0.20 ถึง 0.40 ม.



(ค) ช่วงความสูง 0.00 ถึง 0.20 ม.

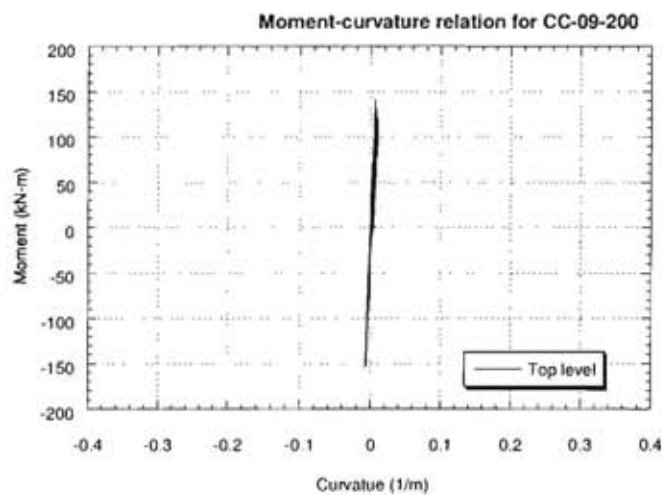
รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้งในตัวอย่างเสา C-09-200



รูปที่ 5.25 การหลุดร่อนของกระจกรองเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่

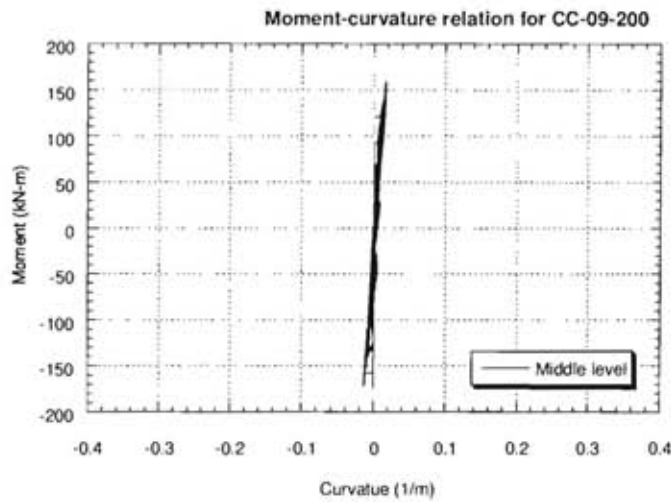
#### 5.4.2 ตัวอย่างเสา CC-09-200

ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้งที่พบได้ในตัวอย่างเสา พบว่าความโค้งช่วงความสูง 0.40 ถึง 0.60 ม. และช่วงความสูง 0.20 ถึง 0.40 ม. จากผิวบนฐานรากมีความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้งมีลักษณะเป็นเส้นตรง และความโค้งที่ช่วงความสูง 0.40 ถึง 0.60 ม. พบว่าลักษณะความสัมพันธ์เป็นลักษณะฮิสเทียรีซิส ซึ่งจากผลของความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้งที่ช่วงความสูง 0.20 ถึง 0.40 ม. สามารถทราบได้ว่าระยะจุดหมุนพลาสติกอยู่ในภายในระยะความสูงช่วงล่าง รูปที่ 5.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้งในตัวอย่างเสา CC-09-200 โดยช่วงความสูงจากเรียงจากบนลงล่างตามลำดับ

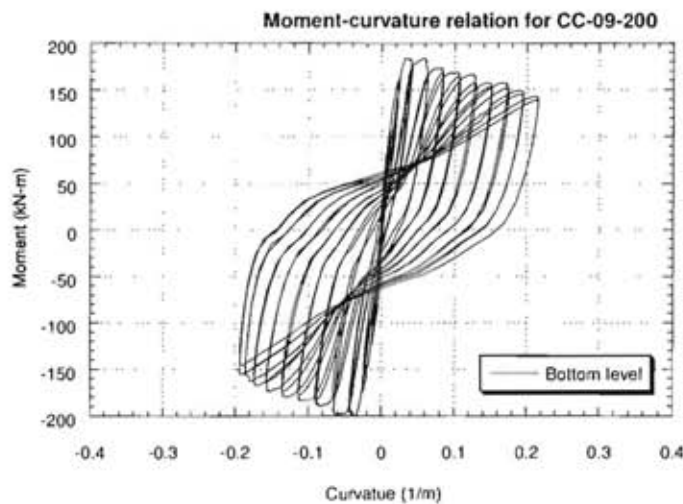


(ก) ช่วงความสูง 0.40 ถึง 0.60 ม.

รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้งในตัวอย่างเสา CC-09-200



(ข) ช่วงความสูง 0.20 ถึง 0.40 ม.

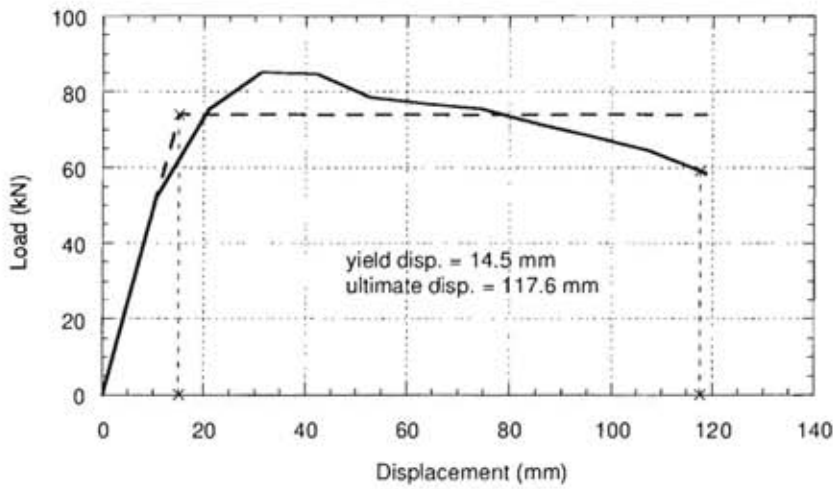


(ค) ช่วงความสูง 0.00 ถึง 0.20 ม.

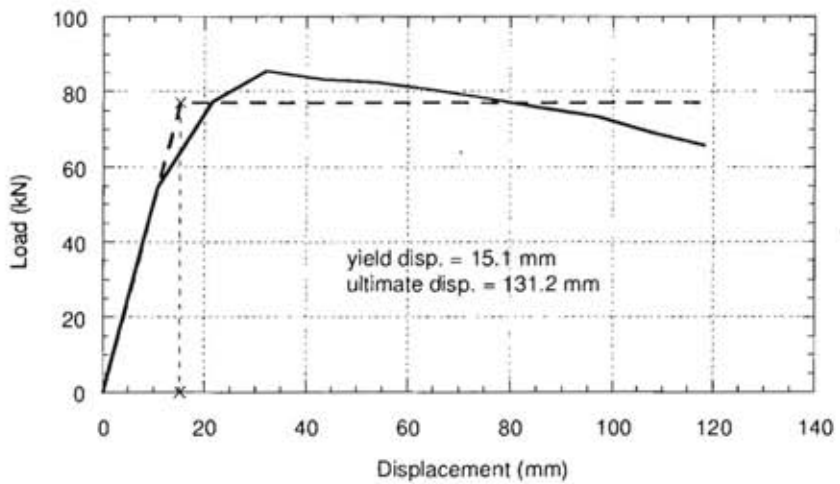
รูปที่ 5.26 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้งในตัวอย่างเสา CC-09-200

## 5.5 ค่าความเหนียว

ค่าความเหนียวของตัวอย่างเสา ( $\mu$ ) ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของระยะเคลื่อนที่ด้านข้างสูงสุด ( $\Delta_u$ ) และระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่จุดคราก ( $\Delta_y$ ) สามารถหาได้จากเส้นโค้งขอบนอก (envelope curve) ที่พล็อตระหว่างแรงกระทำด้านข้างและระยะเคลื่อนที่ด้านข้างสูงสุดของแต่ละอัตราดัดเคลื่อนที่ของการทดสอบ ซึ่งวิธีการหาระยะเคลื่อนที่ด้านข้างสูงสุดและระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่จุดครากมีการหาที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้ได้แสดงวิธีการหาค่าความเหนียว 5 วิธี ซึ่งมีวิธีการหาความเหนียวดังตารางที่ 5.1 ดังแสดงในรูปที่ 5.27 ถึงรูปที่ 5.31

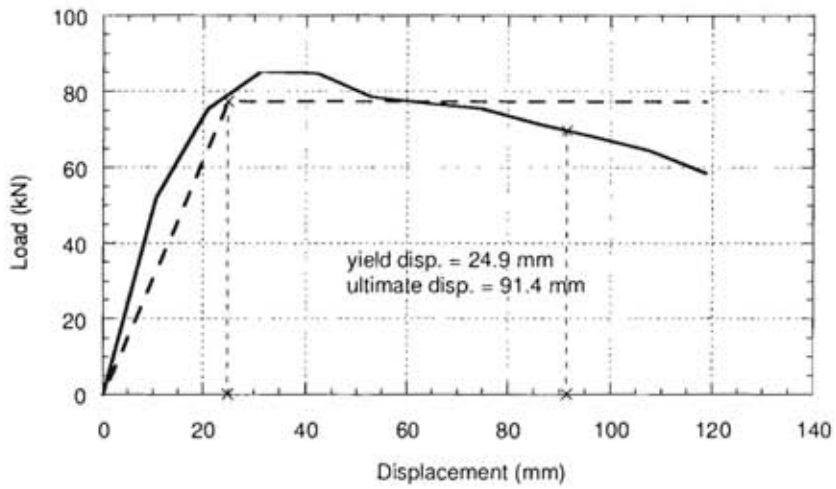


(ก) ตัวอย่างเสา C-09-200

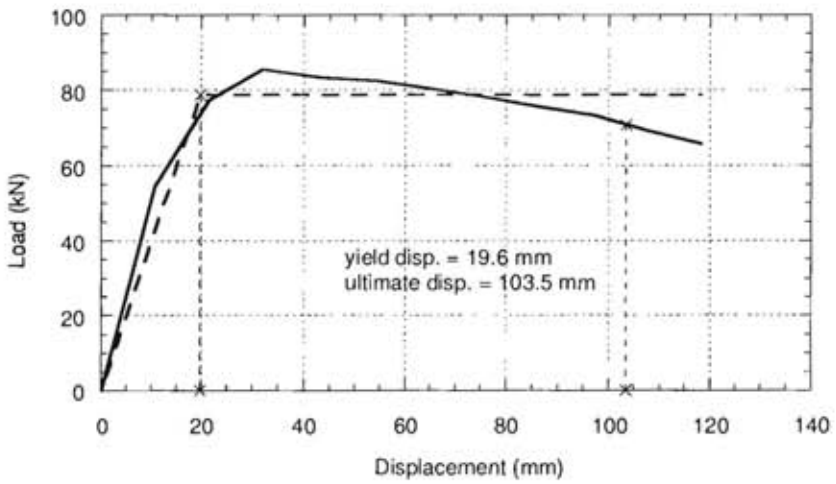


(ข) ตัวอย่างเสา CC-09-200

รูปที่ 5.27 ค่าความเหนียวที่เสนอโดย Priestley และ Park (1987)

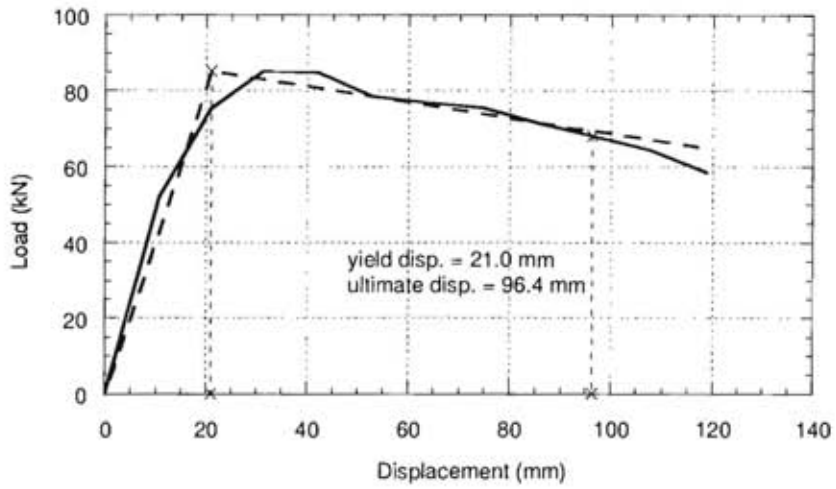


(ก) ตัวอย่างเสา C-09-200

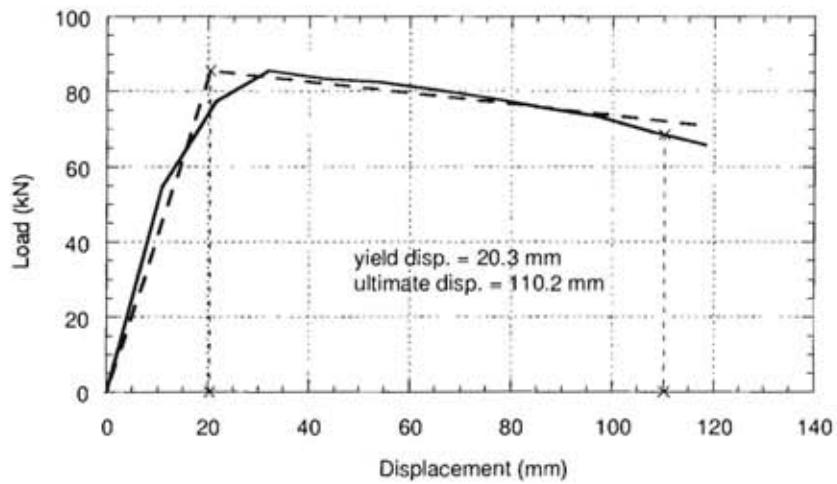


(ข) ตัวอย่างเสา CC-09-200

รูปที่ 5.28 ค่าความเหนียวที่เสนอโดย Sheikh และ Houry (1993)



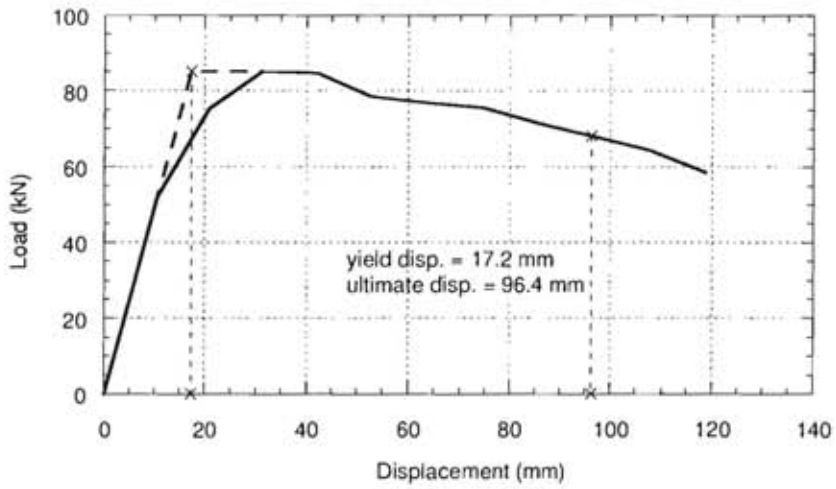
(ก) ตัวอย่างเสา C-09-200



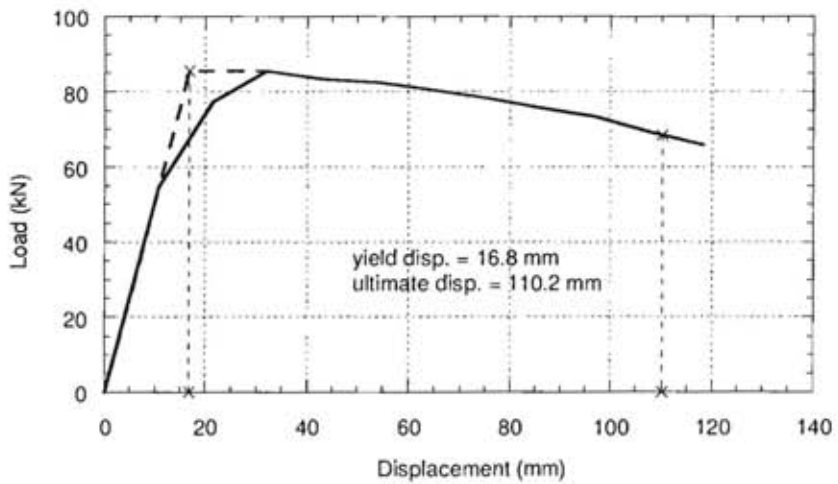
(ข) ตัวอย่างเสา CC-09-200

รูปที่ 5.29 ค่าความเหนียวที่เสนอโดย Paultre และคณะ (2001)



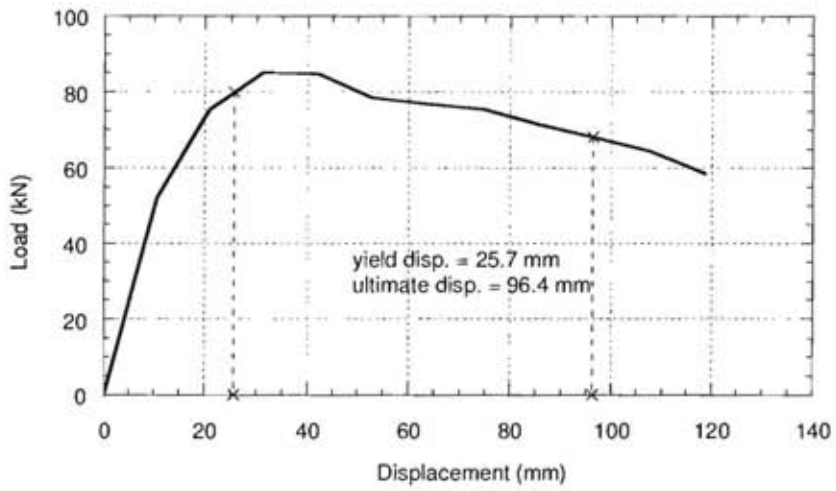


(ก) ตัวอย่างเสา C-09-200

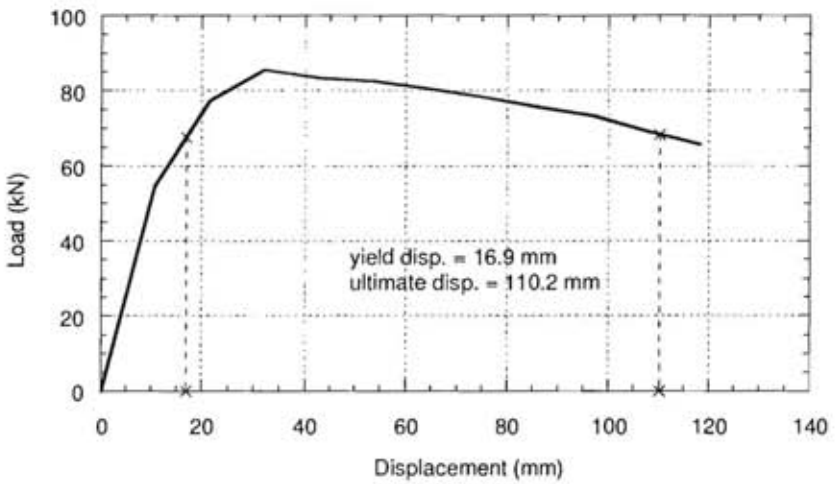


(ข) ตัวอย่างเสา CC-09-200

รูปที่ 5.30 ค่าความเหนียวที่เสนอโดย Sheikh และ Houry (2002)



(ก) ตัวอย่างเสา C-09-200



(ข) ตัวอย่างเสา CC-09-200

รูปที่ 5.31 ค่าความเหนียวที่จุดครากแรกของเหล็กเสริม

ตารางที่ 5.1 ค่าความเหนียวจากวิธีที่ได้มีการเสนอในแบบต่างๆ

วิธีหาค่าความเหนียวเสนอโดย	ระยะเคลื่อนที่ทางด้านข้าง		ค่าความเหนียว, $\mu$
	ที่จุดคราก, $\Delta_x$ (มม.)	สูงสุด, $\Delta_y$ (มม.)	
Priestley และ Park (1897)			
C-09-200	14.5	117.6	8.1
CC-09-200	15.1	มากกว่า131.8	มากกว่า8.7
Sheikh และ Khoury (1993)			
C-09-200	24.9	91.4	3.7
CC-09-200	19.6	103.5	5.3
Paultre และคณะ (2001)			
C-09-200	21.0	96.4	4.6
CC-09-200	20.3	110.2	7.6
Legeron และ Pualtre (2002)			
C-09-200	17.2	96.4	5.6
CC-09-200	16.8	110.2	6.6
First yield			
C-09-200	25.7	96.4	3.8
CC-09-200	16.9	110.2	6.5

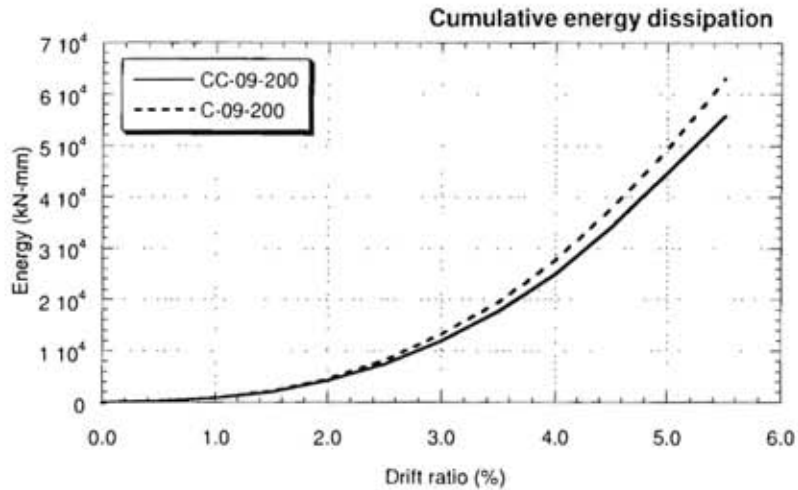
## 5.6 ความสามารถในการสลายพลังงาน

วิธีการคำนวณการสลายพลังงาน (energy dissipation) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้คำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวอย่างในแต่ละรอบของการเคลื่อนที่ ซึ่งตัวแทนของพื้นที่ใต้กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและระยะเคลื่อนที่ด้านข้างในแต่ละรอบที่คำนวณนั้นเริ่มคำนวณจากการเคลื่อนที่ด้านข้างเท่ากับศูนย์ จากนั้นเคลื่อนที่ไปทางด้านทิศทางลบและเคลื่อนที่ไปทางด้านทิศทางบวก ของแต่ละอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ในประวัติการเคลื่อนที่ที่ใช้ในการทดสอบ จากนั้นเคลื่อนที่กลับมาที่การเคลื่อนที่เท่ากับศูนย์ ถือว่าเป็นการเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบ

ค่าการสลายพลังงานของตัวอย่างเสา CC-09-200 และตัวอย่างเสา C-09-200 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าการสลายพลังงานกับอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ ในช่วงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ด้านข้างยังเป็นเส้นตรงนั้นคือ ในช่วงอัตราการเคลื่อนที่เท่ากับ

0.00% ถึง 1.00% ค่าการสลายพลังงานมีค่าใกล้เคียงกันมาก พบว่าตัวอย่างเสา CC-09-200 และ C-09-200 มีค่าการสลายพลังงานสะสมมีค่าเท่ากับ 893 และ 884 กิโลนิวตัน-มิลลิเมตร ตามลำดับ ในช่วงอัตราการเคลื่อนที่เท่ากับ 1.50% ถึง 5.50% ค่าการสลายพลังงานของแต่ละรอบของตัวอย่างเสา C-09-200 มากกว่าตัวอย่างเสา CC-09-200 มีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับในแต่ละอัตราการเคลื่อนที่ โดยเมื่อสิ้นสุดการทดสอบที่อัตราการเคลื่อนที่ 5.50% พบว่ามีค่าการสลายพลังงานสะสมของตัวอย่างเสา C-09-200 เท่ากับ 63131 กิโลนิวตัน-มิลลิเมตร ซึ่งมีค่ามากกว่าตัวอย่างเสา CC-09-200 ซึ่งมีค่าการสลายพลังงานสะสมเท่ากับ 55947 กิโลนิวตัน-มิลลิเมตร ตัวอย่างเสา C-09-200 มีค่าการสลายพลังงานสะสมที่มากกว่าตัวอย่างเสา CC-09-200 ตารางที่ 5.2 การสลายพลังงานของตัวอย่างเสาแต่ละอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่

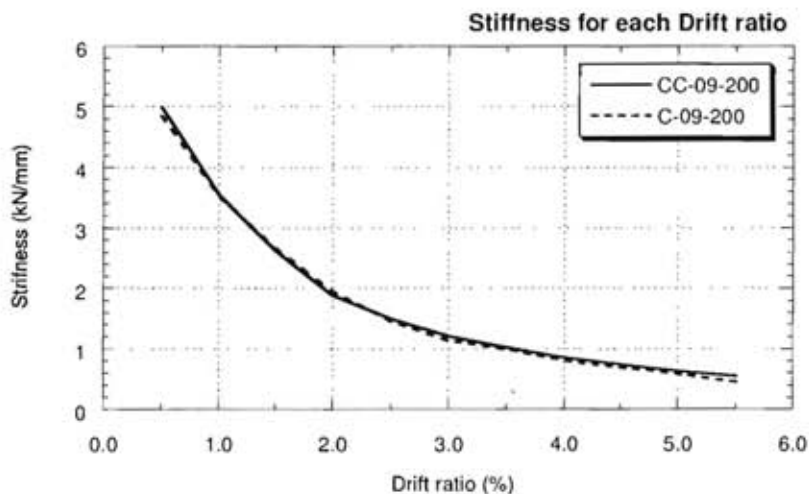
อัตราการเคลื่อนที่ (%)	ค่าการสลายพลังงาน (กิโลนิวตัน-มิลลิเมตร)			
	C-09-200		CC-09-200	
	แต่ละรอบทดสอบ	สะสม	แต่ละรอบทดสอบ	สะสม
0.0	0	0	0	0
0.5	235	235	255	255
1.0	647	882	638	893
1.5	1315	2197	1187	2080
2.0	2433	4630	2246	4326
2.5	3650	8280	3139	7465
3.0	5033	11313	4513	11978
3.5	6200	19513	5739	17717
4.0	8152	27665	7328	25045
4.5	9898	37563	8996	34041
5.0	11743	49306	10605	44646
5.5	13832	63138	11301	55947



รูปที่ 5.32 การสลายพลังงานสะสมของตัวอย่างเสาที่ทดสอบ

### 5.7 ค่าสติฟเนส (stiffness)

ค่าสติฟเนสซึ่งหาได้จากความชันของความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของแต่ละรอบอัตราการเคลื่อนที่ ซึ่งพล็อตเปรียบเทียบค่าสติฟเนสของแต่ละตัวอย่างเสาที่ทดสอบ พบว่าค่าสติฟเนสของตัวอย่างเสา CC-09-200 มีค่ามากกว่า C-09-200 ซึ่งมากกว่าเล็กน้อยทุกอัตราการเคลื่อนที่ ยกเว้นที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 2.0% ซึ่งมีค่าสติฟเนสน้อยกว่า และจากรูปที่ 5.33 เห็นได้ว่าค่าสติฟเนสมีใกล้เคียงกันมาก แต่ตัวอย่างเสา C-09-200 มีแนวโน้มว่าค่าสติฟเนสลดลงเมื่อการเคลื่อนที่ของเสามีค่าอัตราการเคลื่อนที่มากกว่า 5.0% ซึ่งถ้ามีการเคลื่อนที่ของตัวอย่างเสาในการทดสอบมากกว่า 5.5% สามารถเห็นค่าสติฟเนสที่แตกต่างได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 5.33 ค่าสติฟเนสของตัวอย่างเสาที่ทดสอบ

ตารางที่ 5.3 ค่าสถิติเฟสของตัวอย่างเสาในแต่ละรอบการทดสอบ

อัตรา การ เคลื่อนที่ (%)	รอบ ทดสอบ	ค่าสถิติเฟส, K (กิโลนิวตันต่อมิลลิเมตร)					
		C-09-200			CC-09-200		
		ทิศลบ (-)	ทิศบวก (+)	เฉลี่ย	ทิศลบ (-)	ทิศบวก (+)	เฉลี่ย
0.0	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	1	-5.16	4.73	4.86	-5.31	4.89	5.00
	2	-5.12	4.41		-5.09	4.70	
1.0	1	-3.77	3.47	3.53	-3.76	3.45	3.55
	2	-3.58	3.28		-3.63	3.33	
1.5	1	-2.86	2.57	2.67	-2.75	2.59	2.63
	2	-2.74	2.51		-2.70	2.49	
2.0	1	-2.18	1.837	1.943	-2.11	1.752	1.883
	2	-1.977	1.781		-1.912	1.767	
2.5	1	-1.573	1.408	1.460	-1.594	1.462	1.493
	2	-1.498	1.360		-1.541	1.385	
3.0	1	-1.292	1.119	1.144	-1.235	1.182	1.211
	2	-1.248	0.916		-1.245	1.122	
3.5	1	-1.095	0.929	0.996	-1.087	0.984	1.020
	2	-1.054	0.905		-1.054	0.957	
4.0	1	-0.900	0.761	0.816	-0.932	0.826	0.854
	2	-0.871	0.729		-0.863	0.797	
4.5	1	-0.779	0.628	0.693	-0.779	0.729	0.742
	2	-0.735	0.631		-0.753	0.708	
5.0	1	-0.653	0.545	0.588	-0.653	0.628	0.633
	2	-0.633	0.522		-0.642	0.610	
5.5	1	-0.503	0.483	0.473	-0.564	0.550	0.554
	2	0.433	0.440		-0.548	0.554	

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาในงานวิจัยนี้สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. จากการทดสอบเหล็กเสริมแรงกระทำภายใต้แรงอัดพบว่าเหล็กเสริมที่มีปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมขนาดที่มีความยาว 100 มม. และมีความหนา 9 มม. และขนาดที่มีความยาว 100 มม. และมีความหนา 6 มม. สามารถรับแรงกระทำตามแนวแกนหลังจุดครากได้คงที่ และมีค่าการสลายพลังงานที่ใกล้เคียงกันคือ 6.64 และ 6.49 กิโลนิวตัน-เมตร ตามลำดับ จึงเลือกใช้ปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมขนาดที่มีความยาว 100 มม. และมีความหนา 6 มม. เป็นปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมที่มีขนาดเหมาะสมและใช้เสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร
2. ปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมสามารถต้านทานการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวในบริเวณระยะพลาสติกได้เป็นอย่างดี ตัวอย่างเสาที่มีการเสริมปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม CC-09-200 ไม่พบรอยแตกร้าวและการหลุดร่อนของคอนกรีตหุ้มมากบริเวณโคนเสา ซึ่งแตกต่างกับตัวอย่างเสา C-09-200 ที่พบรอยแตกร้าวที่มากกว่าและการหลุดร่อนของคอนกรีตหุ้มบริเวณโคนเสาซึ่งเห็นการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวได้อย่างชัดเจน
3. จากเส้นโค้งขอบนอกพบว่าตัวอย่างเสาที่มีการเสริมปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม CC-09-200 และตัวอย่างเสาที่ไม่มีการเสริมปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม C-09-200 โดยมีค่าแรงกระทำด้านข้างสูงสุดเท่ากับ 85.5 kN และ 85.1 kN ตามลำดับและจากผลการทดสอบสามารถหาค่าความเหนียวจากวิธีการหาค่าความเหนียวที่ได้เสนอในอดีตทั้งหมด 5 วิธี ซึ่งตัวอย่างเสา CC-09-200 มีค่าความเหนียวมากกว่าตัวอย่างเสา C-09-200 เฉลี่ยมากกว่า 27%
4. ตัวอย่างเสาที่มีการเสริมปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม CC-09-200 มีค่าการสลายพลังงานที่น้อยกว่าตัวอย่างเสา C-09-200 เห็นได้จากวงรอบของความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวอย่างเสา CC-09-200 แต่ละอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่มีวงรอบแคบกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจน เนื่องจากตัวอย่างเสามีการลดลงของระยะจุดหมุนพลาสติก

## รายการอ้างอิง

- Bae, S. and Bayrak O. 2008. Plastic Hinge Length of Reinforced Concrete Columns. ACI Structural Journal. 105(3) : 290-300
- Bae, S., Miseses, A. M.; and Bayrak, O. 2005. Inelastic Buckling of Reinforcing Bar. ASCE Journal of Structural Engineering. 131(2) : 314-321
- Baker, A. L. L., and Amarakane, A. M. N. 1964. Inelastic Hyperstatic Frame Analysis. Flexure Mechanics of Reinforced Concrete, American Concrete Institute. Farmington Hills, MI. SP-12 : 85-142
- Bayrak, O., and Sheikh, S. A. 1998. Confinement Reinforcement Design Consideration for HSC Columns. Journal of Structural Engineering. 124(9) : 999-1010.
- Berry, P. B. and Eberhard, M. O. 2005. Practical Performance Model for Bar Buckling. ACSE Journal of Structural Engineering. 131(7) : 1060-1070
- Corley, W. G. 1966. Rotational Capacity of Reinforced Concrete Beams. Journal of the Structure Division, ASCE. 92(ST5) : 121-146
- Gomes, A. and Appleton, J. 1997. Nonlinear Cyclic Stress-Strain Relation of Reinforcing Bars Including Buckling, Elsevier Engineering Structural Division. 19(10) : 822-826
- Hoshikuma, J., Kawashima, K., Nagaya, K., and Taylor, A.W. 1997. Stress-Strain Model for Confined Reinforced Concrete in Bridge Piers. ASCE Journal of Structural Engineering. 123(5) : 624-633
- Kent, D. C. and Park, R. 1971. Flexural members with confined concrete. ASCE Journal of Structural Engineering. 97(7) : 1969-1990
- Legeron, F. and Pualtre, P. 2000. Behavior of High-Strength Concrete Columns under Cyclic Flexure and Constant Axial Load. ACI Structural Journal. 97(4) : 591-601
- Lukknasit, P. and Sittipunt, C. 2003. Ductility Enhancement of Moderate Confined Concrete Tied Columns with Hook-Clips. ACI Structural Journal. 100(4) : 422-429
- Mattock, A. H., 1967. Discussion of Rotation Capacity of Hinging Region in Reinforced Concrete Beams. Journal of the Structure Division, ASCE. 93(ST2) : 519-522
- Menegoto, M. and Pinto, P.E. 1973. Method of Analysis for Cyclically Loaded R.C. Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-Elastic Behavior of Elements under Combined Normal Force and Bending", Proc. of IABSE Symposium on



- Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads. pp. 15-22. Lisbon, Portugal.
- Mounnarath, P. 2006. Seismic Performance of a Precast Concrete Column with Threaded Mechanical Splices. Report 2006. Degree of Master of Engineering, Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkon University
- Ongsupankul, S., Kanchanalai, T. and Kawashima, K. 2007. Behavior of Reinforced to Moderate Seismic Load. Science Asia 33. : 175-185
- Ozcebe, G. and Saatcioglu, M. 1987. Confinement of Concrete Columns for Seismic Loading. ACI Structural Journal. 84(4) : 308-315
- Park, R., Priestley, M. J. N., and Gill, W.D. 1982. Ductility of Square-Confined Concrete Columns. Journal of the Structure Division, ASCE. 108(ST4) : 929-950
- Paulay, T. and Priestly, M. J. N. 1992. Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings. John Wiley & Sons, New York.
- Paultre, P., Legeron, F. and Mongeau, D. 2001. Influence of Concrete Strength and Transverse Reinforcement Yield Strength on Behavior of High-Strength Concrete Column. ACI Structural Journal. 98(4) : 490-501
- Priestley, M. J. N., and Park, R. 1987. Strength and Ductility of Concrete Bridge Columns Under Seismic Loading. ACI Structural Journal. 84(1) : 61-76
- Sakai, J and Kawashima K. 2006. Unloading and Reloading Stress-strain Model for Confine Concrete. Journal of the Structure Division, ASCE. 132(1) : 112-122
- Sheikh, S. A., and Khoury, S. S. 1993. Confined Concrete Columns with Stubs. ACI Structural Journal. 90(4) : 414-431
- Wehbe, N. I., Saiidi, M. S., and Sanders, D. H. 1999. Seismic Performance of Rectangular Bridge Columns with Moderate Confinement. ACI Structural Journal. 96(2) : 284-259