บทที่ 3

การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบนี้ กล่าวถึงการกำหนดลักษณะเสาที่จะนำมาทดสอบ ขนาดหน้าตัดของเสา ความสูงของเสา รายละเอียดของเหล็กเสริมระยะการต่อทาบของเหล็กยืนในตัวอย่างเสาคอนกรีต คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ อาทิเช่น กำลังคอนกรีต ขนาดเหล็กเสริม แบบหล่อคอนกรีต ตลอดจนจะอธิบายถึงขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบ การเตรียมการทดสอบ และขั้นตอนการทดสอบแต่ละขั้นตอน อาทิเช่น วิธีการติดเกจวัดความเครียด(Strain gages) กับเหล็กเสริมในเสาคอนกรีต วิธีการหล่อเสาตัวอย่างทดสอบ คุณสมบัติของโครงข้อแข็งทดสอบ (Test-Frame) ที่ใช้สำหรับให้แรงอัดตามแนวแกน การติดตั้งเสาตัวอย่างทดสอบกับพื้นที่ในห้องปฏิบัติการและโครงข้อแข็งทดสอบที่ให้แรงอัดตามแนวแกน วิธีการติดตั้งและตำแหน่งของเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้า (Linear Variable Displacement Transducer) วิธีการเก็บข้อมูลในระหว่างการทดสอบโดยใช้ Data Logger ขั้นตอนการให้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักรกับเสาตัวอย่างทดสอบ โดยที่แรงอัดในแนวแกนคงที่ตลอดการทดสอบ รวมถึงแนวทางการพัฒนาแบบจำลองแรงและการเคลื่อนตัวอย่างง่าย เพื่อเป็นแนวทางการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไป

3.1 การกำหนดลักษณะเสาที่จะนำมาทดสอบ

เสาที่จะนำมาทดสอบ เป็นเสาที่มีขนาดมาจากเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในอาคารสูงระดับปานกลางโดยทั่วไป (5 – 10 ชั้น ประมาณ 23 เมตร ตามกฎหมาย) จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าการต่อทาบเหล็กยืนบริเวณปลายเสา ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการก่อสร้างที่ใช้ทั่วไปอาจทำให้ความสามารถในการเคลื่อนตัว และความเหนียวของเสาลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เสาที่วิบัติเนื่องจากแรงเฉือน ดังนั้นตัวอย่างเสาที่จะนำมาทดสอบจะเน้นศึกษาถึงผลของการต่อทาบปลายเหล็กเสริมของเสาที่วิบัติเนื่องจากแรงเฉือน และผลของการลดประมาณเหล็กเสริมตามขวาง ดังนั้นตัวแปรหลักที่ใช้ในการทดลองนี้คือ วิธีการต่อเหล็กเสริมบริเวณโคนเสา ปริมาณเหล็กเสริมตามขวาง และความสูงของเสาซึ่งจะมีผลต่อรูปแบบการวิบัติของเสา

3.2 ตัวอย่างทดสอบ

สำหรับตัวอย่างเสาที่จะนำมาทดสอบในงานวิจัยนี้ จะมีตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 3 ตัวอย่าง โดยรายละเอียดเหล็กยืน เหล็กเสริมตามขวาง ระยะการต่อทาบเหล็กเสริม และขนาดของตัวอย่างเสาที่ทดสอบจะได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.1 ถึง รูปที่ 3.3 ซึ่งตัวอย่างเสาที่ทดสอบจะขนาดหน้าตัดเสา 0.40 ม. X 0.40 ม. มีความสูงของเสา 1.65 ม. โดยระยะความสูงของเสาจนถึงศูนย์กลางแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร 1.50 ม. มีอัตราส่วนของระยะความสูงของเสาจนถึงศูนย์กลางแรงกระทำทางด้านข้างกับความกว้างของหน้าเสา (Shear span ratio) เท่ากับ 3.75 การออกแบบเหล็กเสริมตามขวางในงานวิจัยนี้เป็นไปตาม ACI 318-05 และมาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 โดยมีร้อยละพื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอกต่อผลคูณระหว่างระยะห่างของเหล็กปลอกกับระยะจุดศูนย์กลางถึงจุดศูนย์ของเหล็กปลอกของหน้าตัดเสา(A_{sh}/sh_c %)เท่ากับ 0.181% ซึ่งใช้เหล็กกลมผิวเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม.(RB9) และร้อยละพื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอกต่อผลคูณระหว่างระยะห่างของเหล็กปลอกกับระยะจุดศูนย์กลางถึงจุดศูนย์ของเหล็กปลอกของหน้าตัดเสา เท่ากับ 0.098% ใช้เหล็กกลมผิวเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. (RB6) มีกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมตามขวาง (f_y) ไม่น้อยกว่า 2400 กก./ซม.^{2} ส่วนเหล็กเสริมตามยาวมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมต่อพื้นที่ทั้งหมดของหน้าตัด(A_{st}/A_g %) เท่ากับ 3.14% ใช้เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. (DB20) วางด้านละ 5 เส้น รวมทั้งหมด 16 เส้น โดยมีกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมตามยาว (f_y) ไม่น้อยกว่า 4000 กก./ซม.^{2} ซึ่งตัวอย่างเสาทดสอบทั้ง 3 ต้น มีอัตราส่วนระหว่างแรงอัดที่กระทำในแนวแกนกับแรงอัดประลัยเท่ากับ 0.2 โดยชื่อที่กำหนดของตัวอย่างทดสอบที่ใช้เปรียบเทียบลักษณะต่างๆ ของตัวอย่างทดสอบ สามารถอธิบายได้ดังนี้

ชื่อตัวอย่างเสาทดสอบ S-(X_1)-(x_2)

(X_1) แสดงลำดับของตัวอย่างทดสอบ

(X_2) แสดงลักษณะของเหล็กยืน ที่มีการต่อทาบที่โคนเสาหรือไม่มีการต่อทาบที่โคนเสา

3.2.1 ตัวอย่างเสาทดสอบ S1

ตัวอย่างเสาทดสอบ S1 หมายถึง เสาคอนกรีตที่มีขนาด 400 X 400 มม. ของเหล็กปลอกที่รัดรอบ (hoop ties) และเหล็กปลอกที่ยึดตามขวาง (crossties) ตามปริมาณต่ำสุดของมาตรฐาน ACI318-05 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์เท่ากับ 9 มม. ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกเท่ากับ 300 มม. ซึ่งมีร้อยละพื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอกต่อผลคูณระหว่างระยะห่างของเหล็กปลอกกับระยะจุดศูนย์กลางถึงจุดศูนย์ของเหล็กปลอกของหน้าตัดเสา เท่ากับ 0.181% มีกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมตามขวาง (f_y) เท่ากับ 3050 กก./ซม.^{2} ส่วนเหล็กเสริมตามยาวมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมต่อพื้นที่ทั้งหมดของหน้าตัด(A_{st}/A_g %) เท่ากับ 3.14% มีกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมตามยาว (f_y) เท่ากับ 5250 กก./ซม.^{2} โดยไม่มีการต่อทาบเหล็กเสริมตามยาวที่โคนเสา มีกำลังอัดประลัยคอนกรีต เท่ากับ 350 กก./ซม.^{2} โดยรับแรงอัดในแนวแกน เท่ากับ 1098.7 กิโลนิวตัน (0.2 $f_c^{'}A_g$) และมีรูปแบบรูปแบบที่คาดว่าจะวิบัติคือ การวิบัติแบบดัด-เฉือน (Flexure-Shear Failure)

3.2.2 ตัวอย่างเสาทดสอบ S2s

ตัวอย่างเสาทดสอบ S2s หมายถึง เสาคอนกรีตที่มีขนาด 400 X 400 มม. ของเหล็กปลอกที่รัดรอบ (hoop ties) และเหล็กปลอกที่ยึดตามขวาง (crossties) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์เท่ากับ 9 มม. ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกเท่ากับ 300 มม. ซึ่งมีร้อยละพื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอกต่อผลคูณระหว่างระยะห่างของเหล็กปลอกกับระยะจุดศูนย์กลางถึงจุดศูนย์ของเหล็กปลอกของหน้าตัดเสา เท่ากับ เท่ากับ 0.181% มีกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมตามขวาง (f_y) เท่ากับ 3050 กก./ซม.^{2} ส่วนเหล็กเสริมตามยาวมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมต่อพื้นที่ทั้งหมดของหน้าตัด(A_{st}/A_g %) เท่ากับ 3.14% มีกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมตามยาว (f_y) เท่ากับ 5250 กก./ซม.^{2} โดยมีการต่อทาบเหล็กเสริมตามยาวที่โคนเสาเป็นระยะ 600 มม.มีกำลังอัดประลัยคอนกรีต เท่ากับ 210 กก./ซม.^{2} โดยรับแรงอัดในแนวแกน เท่ากับ 659.2 กิโลนิวตัน (0.2 $f_c^{'}A_g$) และมีรูปแบบรูปแบบที่คาดว่าจะวิบัติคือ การวิบัติแบบดัด-เฉือน (Flexure-Shear Failure)

3.2.3 ตัวอย่างเสาทดสอบ S3

ตัวอย่างเสาทดสอบ S3 หมายถึง เสาคอนกรีตที่มีขนาด 400 X 400 มม. ของเหล็กปลอกที่รัดรอบ (hoop ties) และเหล็กปลอกที่ยึดตามขวาง (crossties) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 6 มม. ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกเท่ากับ 250 มม. ซึ่งมีร้อยละพื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอกต่อผลคูณระหว่างระยะห่างของเหล็กปลอกกับระยะจุดศูนย์กลางถึงจุดศูนย์ของเหล็กปลอก

ของหน้าตัดเสา เท่ากับ 0.098% มีกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมตามขวาง (f_y) เท่ากับ 3035 กก./ซม.^{2} ส่วนเหล็กเสริมตามยาวมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมต่อพื้นที่ทั้งหมดของหน้าตัด(A_{st}/A_g %) เท่ากับ 3.14% มีกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมตามยาว (f_y) เท่ากับ 5250 กก./ซม.^{2} โดยไม่มีการต่อทาบเหล็กเสริมตามยาวที่โคนเสา มีกำลังอัดประลัยคอนกรีตเท่ากับ 210 กก./ซม.^{2} โดยรับแรงอัดในแนวแกน เท่ากับ 659.2 กิโลนิวตัน (0.2 $f_c^{'}A_g$) และมีรูปแบบรูปแบบที่คาดว่าจะวิบัติคือ การวิบัติแบบดัด-เฉือน (Flexure-Shear Failure)

3.3 การแปรผันเปรียบเทียบตัวอย่างทดสอบ

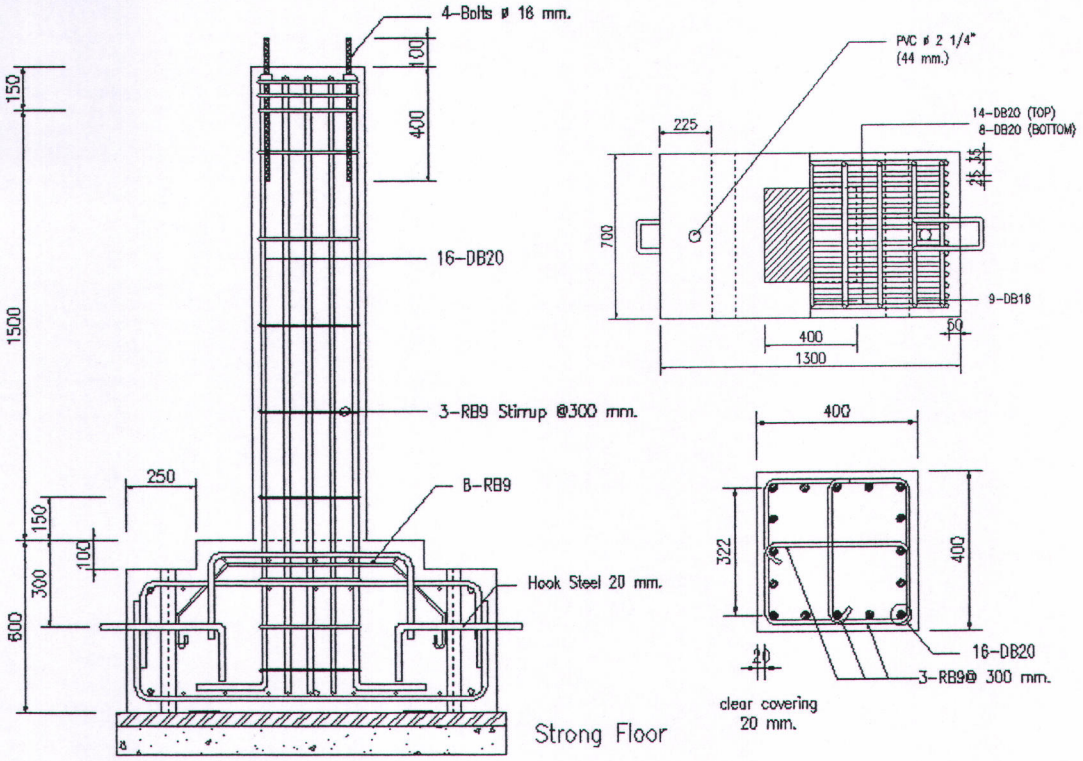
การแปรผันเปรียบเทียบตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 ต้น มีการแปรผันเปรียบเทียบดังนี้

1. เปรียบเทียบการต่อทาบเหล็กเสริมตามยาวโดยตัวอย่างทดสอบ S1 เป็นตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการต่อทาบ เปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบ S2s ที่มีการต่อทาบที่โคนเสาด้วยระยะ 600 มม. ซึ่งขนาดและระยะห่างของเหล็กเสริมตามขวางทั้งสองตัวอย่างทดสอบเท่ากัน โดยระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมเท่ากับ 300 มม. และขนาดของเหล็กเสริมตามขวางเท่ากับ 9 มม. ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ACI318-05

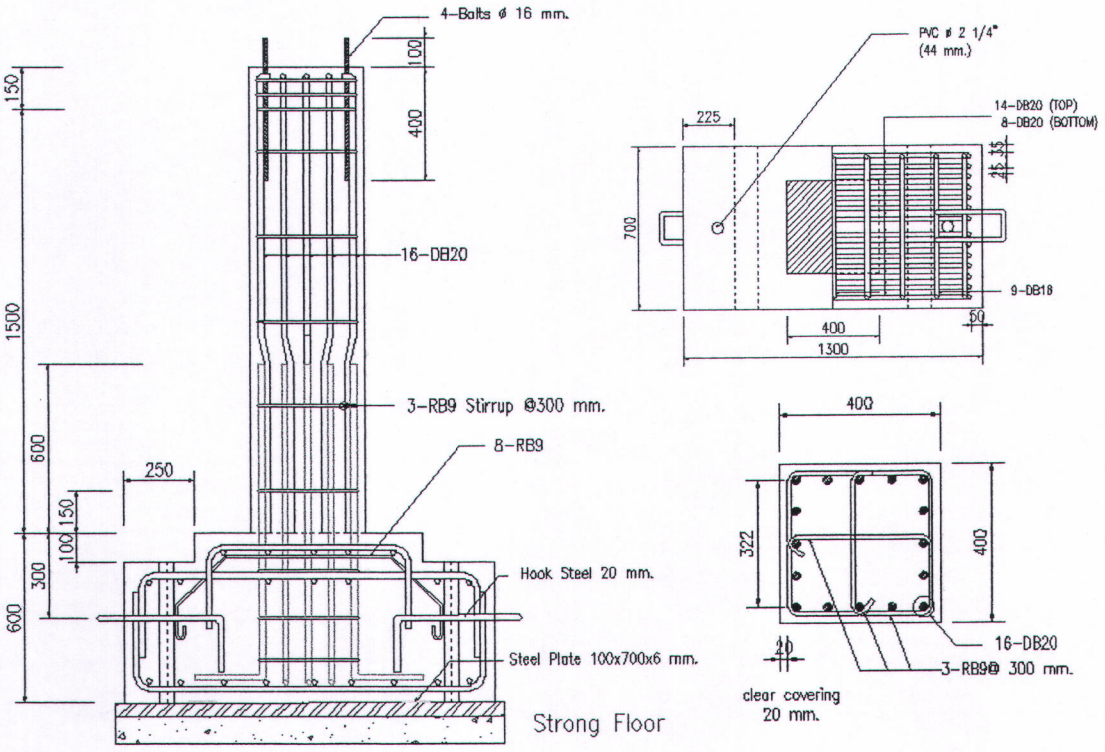
2. แปรผันปริมาณเหล็กตามขวางโดยตัวอย่างทดสอบ S1 แทนตัวอย่างเสาอาคารสูงปานกลางที่ใช้เหล็กเสริมตามขวางขนาด 9 มม. ซึ่งเป็นขนาดที่ใช้กันทั่วไปแต่มีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริม 300 มม. มีร้อยละพื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอกต่อผลคูณระหว่างระยะห่างของเหล็กปลอกกับระยะจุดศูนย์กลางถึงจุดศูนย์ของเหล็กปลอกของหน้าตัดเสา เท่ากับ 0.181% เปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบ S3 ซึ่งจะใช้เหล็กเสริมขนาด 6 มม. และจะมีร้อยละพื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอกต่อผลคูณระหว่างระยะห่างของเหล็กปลอกกับระยะจุดศูนย์กลางถึงจุดศูนย์ของเหล็กปลอกของหน้าตัดเสา เท่ากับ 0.098% ซึ่งลดปริมาณเหล็กเสริมลงประมาณครึ่งหนึ่งจากตัวอย่างทดสอบ S1 แต่ระยะระหว่างเหล็กเสริมลดลงด้วย โดยมีระยะห่างเท่ากับ 250 มม. รายละเอียดเหล็กเสริมตามขวางทั้งหมดเป็นไปตาม มาตรฐาน ACI 318-05 และมาตรฐาน ว.ส.ท. 1007-34 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของตัวอย่างเสาที่จะนำมาทดสอบ

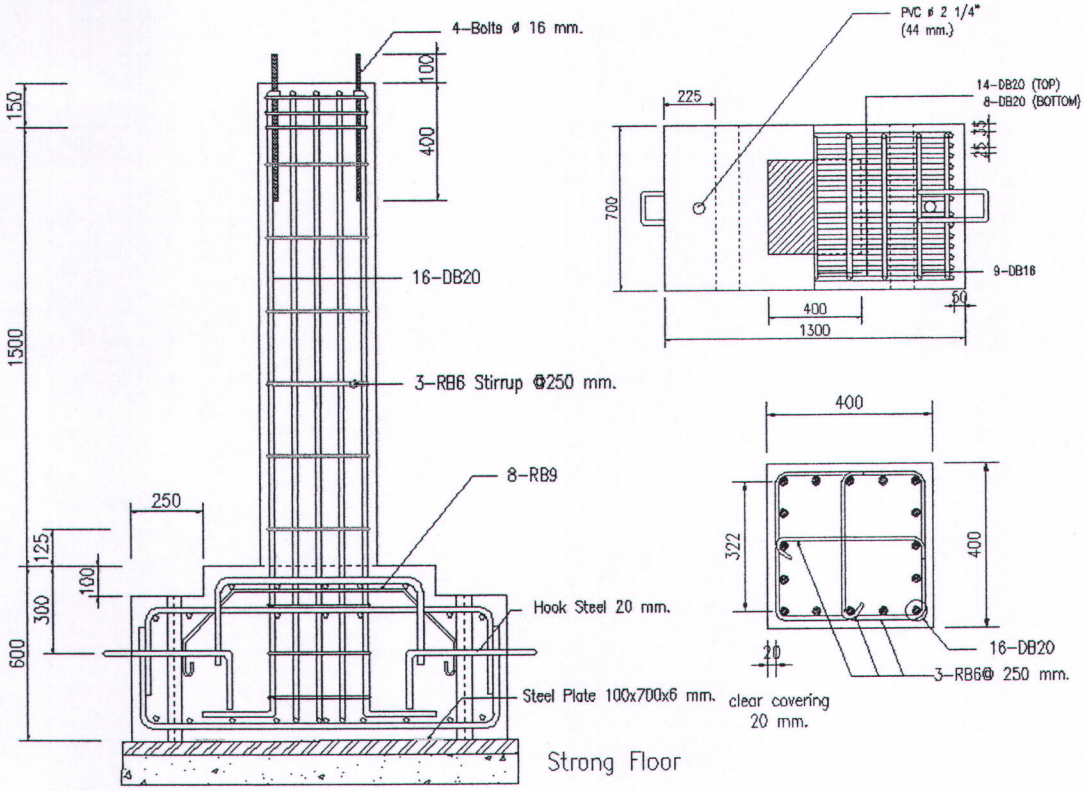
ชื่อตัวอย่างเสาทดสอบ		S1	S2s	S3
กำลังประลัยคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)		350	210	
ขนาดตัวอย่างเสา	ความกว้าง	0.40 ม.		
	ความลึก	0.40 ม.		
	ความสูงที่แรงด้านข้างกระทำ	1.50 ม.		
ความสูงต่อความลึกหน้าตัด		3.75		
เหล็กเสริมตามยาว	จำนวน/ขนาดเหล็ก	16-DB20		
	ร้อยละ A_{st}/A_g	3.14%		
	กำลังที่จุดคราก	5250 (กก./ตร.ซม.)		
เหล็กเสริมตามขวาง	จำนวน/ขนาดเหล็ก	3-RB9 @300		3-RB6@250
	ร้อยละ A_{sh}/sh_c	0.181%		0.098%
	กำลังที่จุดคราก	3050 (กก./ตร.ซม.)		3035 (กก./ตร.ซม.)
อัตราส่วนแรงในแนวแกน $\frac{P}{f_c^{'} \cdot A_g}$		0.2	0.2	0.2
อัตราส่วน $\frac{M_n}{a \cdot V_n}$		1.16	1.26	1.49
มีการต่อทาบเหล็กเสริมตามยาว		ไม่มี	มี	ไม่มี
รูปแบบการวิบัติที่คาดว่าจะเกิดขึ้น		แบบเฉือน		



รูปที่ 3.1 ลักษณะการเสริมการเหล็กและขนาดของตัวอย่างทดสอบ S1



รูปที่ 3.2 ลักษณะการเสริมการเหล็กและขนาดของตัวอย่างทดสอบ S2s

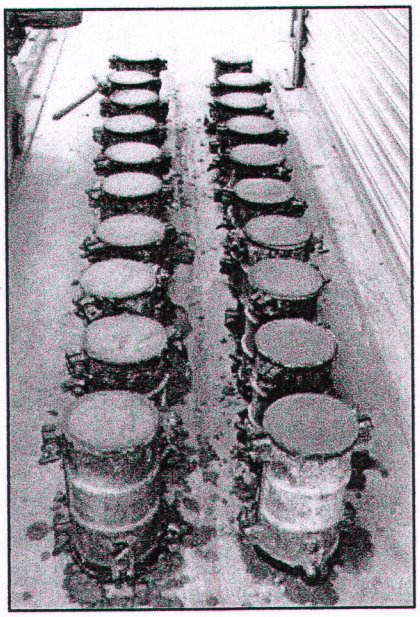


รูปที่ 3.3 ลักษณะการเสริมการเหล็กและขนาดของตัวอย่างทดสอบ S3

3.4 คุณสมบัติของวัสดุ

3.4.1 คอนกรีต

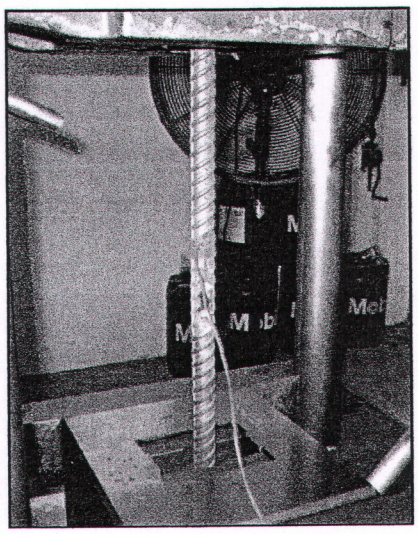
สำหรับคอนกรีตที่ใช้หล่อตัวอย่างเสาทดสอบทั้ง 3 ต้นนี้ เป็นคอนกรีตผสมเสร็จหน่วยน้ำหนักปกติ มีค่ายุบตัวเท่ากับ 10 ± 2.5 มีกำลังอัดประลัย (f_c') ที่ใช้ในการออกแบบตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกเท่ากับ 210 กก./ซม.^{2} โดยแบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่ใช้ในการหล่อคอนกรีตตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. ซึ่งในการเก็บตัวอย่างคอนกรีตต้องเก็บตัวอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง ซึ่งแสดงการเก็บตัวอย่างคอนกรีตดังรูปที่ 3.4 แต่ในเสาตัวอย่างทดสอบ S1 ที่มีปัญหาในการควบคุมกำลังอัดของคอนกรีตเนื่องจากปัจจัยภายนอกหลายอย่าง จึงทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 350 กก./ซม.^{2} และได้สรุปค่ากำลังอัดของเสาตัวอย่างทดสอบคอนกรีตไว้ในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.4 แสดงการเก็บตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่ทดสอบกำลังอัด

3.4.2 เหล็กเสริม

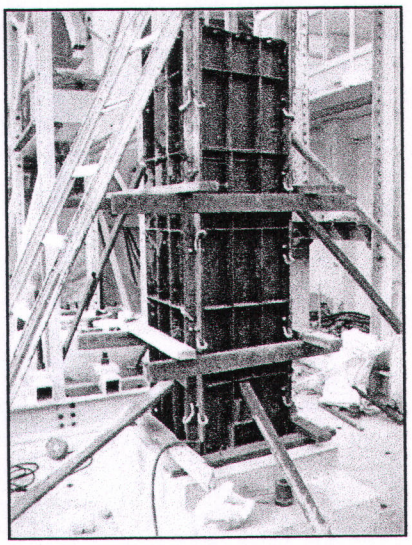
สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้เหล็กเสริม 3 ขนาดด้วยกัน ได้แก่ เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม.(DB20) ใช้เป็นเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 ตัวอย่าง ซึ่งมีกำลังที่จุดครากไม่น้อยกว่า 4000 กก./ซม.^{2} ซึ่งมีกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมตามยาว (f_y) เท่ากับ 5250 กก./ซม.^{2} เหล็กกลมผิวเรียบเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม.(RB9) ใช้เป็นเหล็กปลอกที่รัดรอบ (hoop ties) และเหล็กปลอกที่ยึดตามขวาง (crossties) ในตัวอย่างทดสอบ C_L9 และ C_S9 และเหล็กกลมผิวเรียบเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม.(RB6) ใช้เป็นเหล็กปลอกที่รัดรอบ (hoop ties) และเหล็กปลอกที่ยึดตามขวาง (crossties) ในตัวอย่างทดสอบ C_L6 ซึ่งมีกำลังที่จุดครากทั้ง 2 ขนาดไม่น้อยกว่า 2400 กก./ซม.^{2} ซึ่งมีกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมตามขวาง (f_y) เท่ากับ 3035 กก./ซม.^{2} โดยนำตัวอย่างเหล็กเสริมทุกขนาดไปทดสอบหาคุณสมบัติต่างๆ เช่น ค่ากำลังรับแรงดึงที่จุดคราก ค่ากำลังรับแรงดึงประลัย ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม เป็นต้น ซึ่งจะแสดงตัวอย่างการทดสอบคุณสมบัติของเหล็กเสริมในรูปที่ 3.5 และได้สรุป ค่ากำลังรับแรงดึงที่จุดคราก ในเหล็กเสริมทุกขนาดของแต่ละเสาตัวอย่างสอบ แสดงดัง ตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.5 แสดงตัวอย่างการทดสอบคุณสมบัติของเหล็กเสริม

3.4.3 แบบหล่อคอนกรีต

แบบหล่อคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัย เป็นแบบหล่อที่มีความมั่นคงแข็งแรง ทนทานต่อกระแทก การจี้เครื่องจี้คอนกรีตในระหว่างการเทโดยไม่มีการเสียรูป ปริเปิดออก บิดงอ ร่วมถึงการยึดรั้งที่จุดต่อต้องแข็งแรงมั่นคง ในการตั้งเหล็กเสริมในเสาก่อนเทคอนกรีต ที่พื้นต้องมีไม้แบบวางรองก่อน และก่อนการประกอบแบบหล่อคอนกรีตเข้าด้านข้างของเสา จำเป็นต้องทางน้ำมันที่ผิวของแบบหล่อก่อนเสมอ เพื่อป้องกันติดของคอนกรีตกับแบบหล่อคอนกรีต ซึ่งในการประกอบแบบหล่อคอนกรีตด้านข้างจะต้องมีการตรวจสอบว่าได้แนวดิ่งทั้ง 4 ด้าน โดยการค้ำยันให้แข็งแรงไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ด้านข้างได้ ในกรณีที่แบบหล่อมีรูรั่วหรือช่องว่างต้องทำการอุดรูรั่วให้เรียบร้อยด้วย ตัวอย่างการเข้าแบบหล่อเสาคอนกรีตแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงตัวอย่างการเข้าแบบหล่อเสาคอนกรีต

3.5 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

สำหรับการเตรียมตัวอย่างเสาที่จะนำมาทดสอบในงานวิจัยนี้ เริ่มจากการเตรียมเหล็กเสริมที่จะทำตัวอย่างทดสอบทั้งหมดให้ครบถ้วน จากนั้นทำการตัดเหล็กเสริมตามระยะที่ต้องการ และทำการผูกเหล็กเสริมโดยเริ่มจากผูกเหล็กเสริมที่ฐานรากก่อน แล้วเริ่มขึ้นเหล็กยืนและเหล็กปลอก เมื่อทำการผูกเหล็กเสริมถูกต้องตามแบบแล้ว จากนั้นนำเหล็กเสริมในเสาตัวอย่างมาวางในตำแหน่งที่เตรียมไว้โดยรองไม้แบบที่พื้นเพื่อป้องกันไม่ให้คอนกรีตติดกับพื้นที่ในห้องปฏิบัติการ โดยระหว่างเหล็กเสริมกับไม้แบบมีการรองด้วยลูกคอนกรีตก่อน

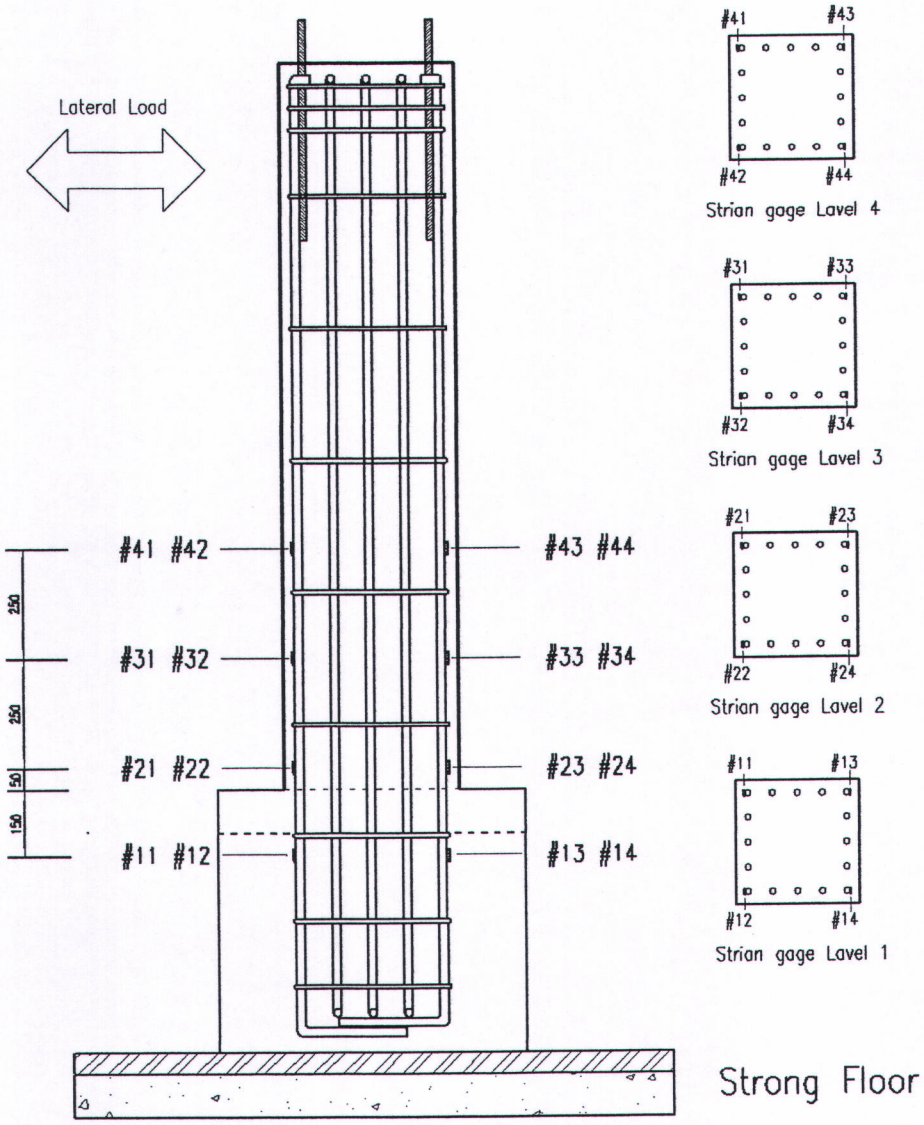
จากนั้นทำการติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gages) ที่เหล็กเสริมและเหล็กยืนตามตำแหน่งต่างๆดังแสดงในรูปที่ 3.7 ถึง รูปที่ 3.12 โดยขั้นตอนการติดตั้งเกจวัดความเครียดมีดังต่อไปนี้

1. ในการติดตั้งเกจวัดความเครียดบนเหล็กเสริม ให้ใช้เครื่องเจียรเจียรส่วนที่เป็นปล้องของเหล็กข้ออ้อยออกในบริเวณที่จะทำการติดตั้งเกจวัดความเครียด
2. ใช้กระดาษทรายชนิดละเอียดขัดผิวเหล็กเสริมที่จะติดเกจวัดความเครียดให้เรียบ
3. ทำความสะอาดบริเวณที่จะติดเกจวัดความเครียดด้วยสารอะซิโตน (acetone)
4. ใช้กาวไซยาโนอะครีเลต (Cyano-Acrylate Adhesive) ชนิด CC-33A ยี่ห้อ Kyowa ทาลงบนตัวเกจวัดความเครียด

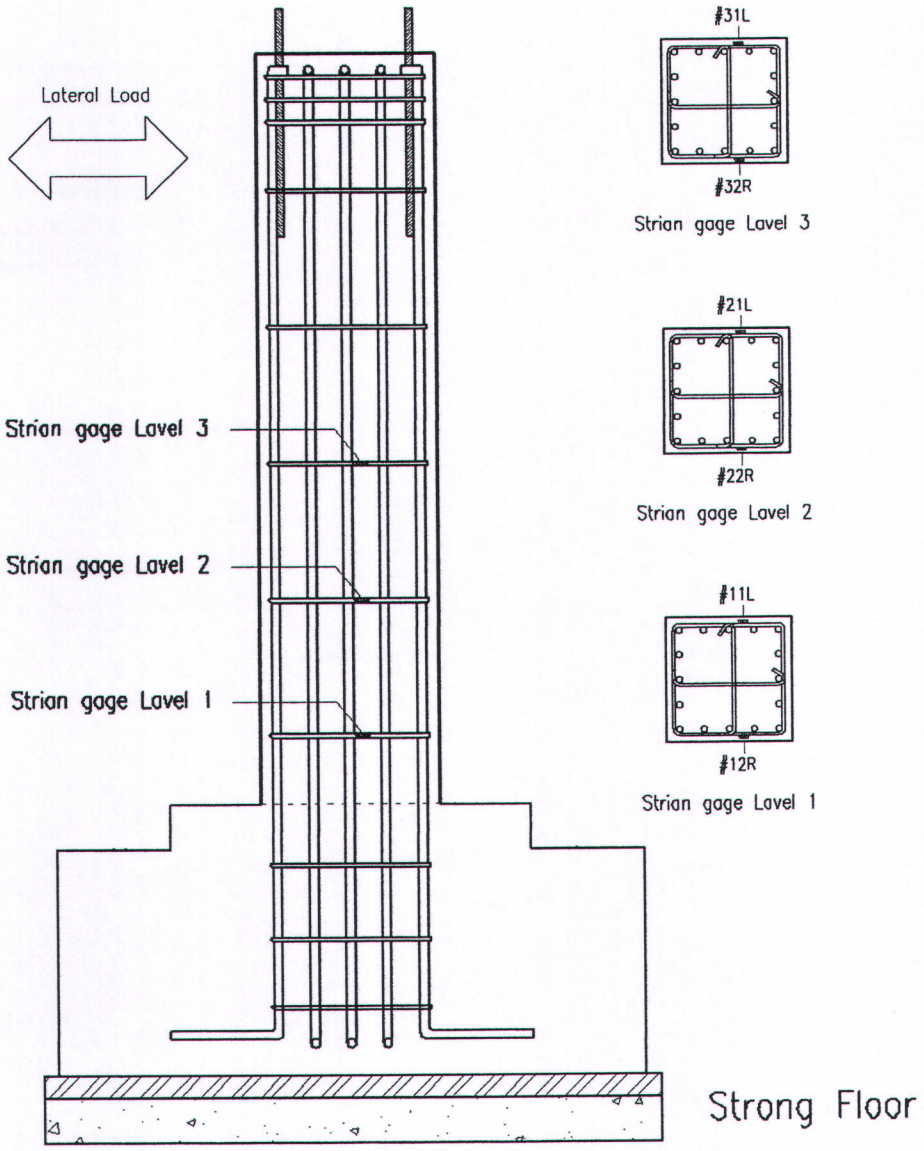
5. จากนั้นทำการติดเกจวัดความเครียดลงบนตำแหน่งที่ต้องการ โดยใช้แผ่นพลาสาติกกดทับเกจวัดความเครียดไว้ประมาณ 20 วินาทีเพื่อใช้กาวแห้งตัว

6. หุ้มเกจวัดความเครียดด้วยเทปกันน้ำและกันกระแทก Vinyl Mastic Tape (VM Tape) เพื่อป้องกันความเสียหายในระหว่างเทคอนกรีต

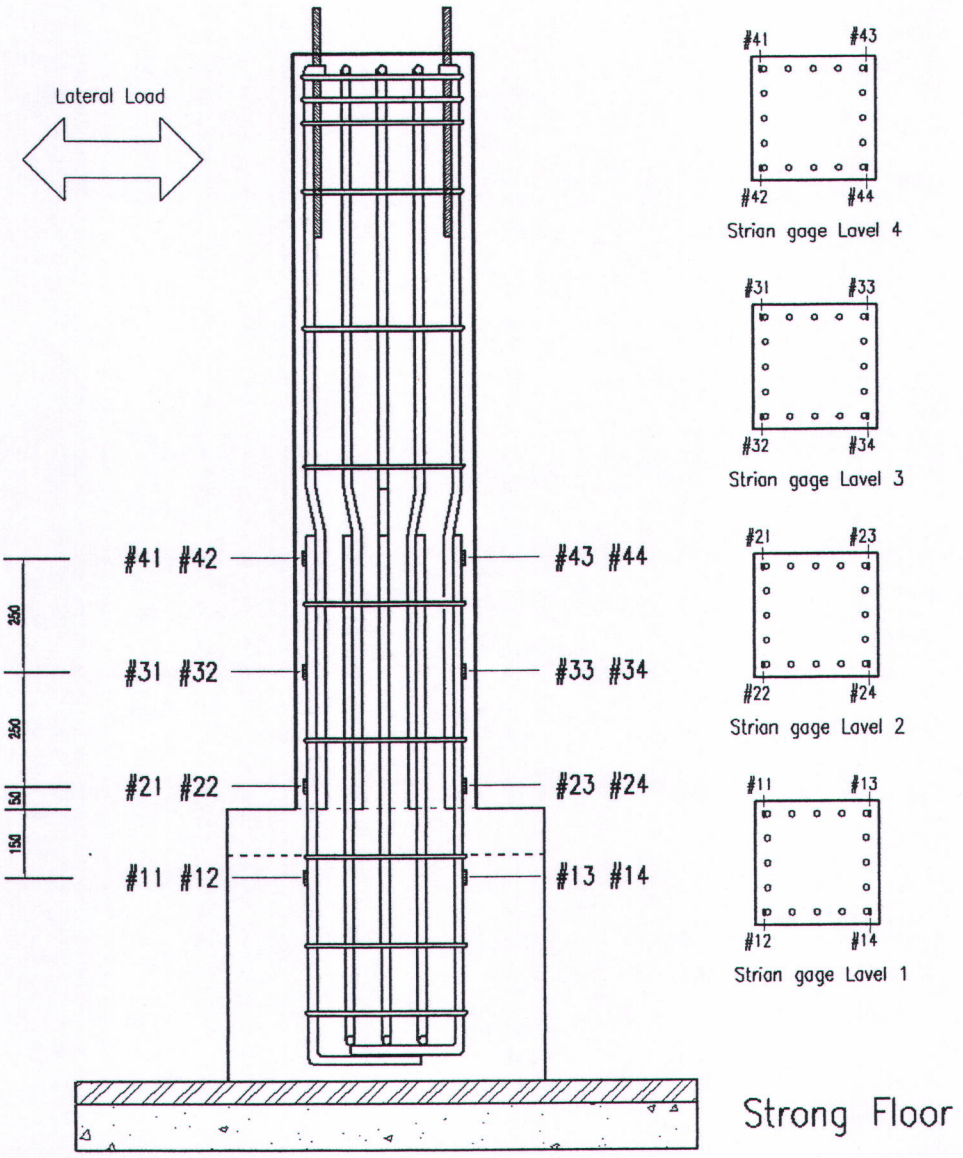
เมื่อติดตั้งเกจวัดความเครียดบนเหล็กเสริมเสร็จแล้ว ทำการประกอบแบบหล่อด้านข้างของฐานราก แล้วเทคอนกรีตที่ฐานรากก่อน โดยต้องมีการค้ำยันเหล็กยืนที่ผูกไว้แล้วเพื่อป้องกันการเอียงของหล็กยืน เมื่อคอนกรีตที่ฐานรากแข็งตัวแล้วทำการทาน้ำมันและประกอบแบบหล่อเสาด้านข้าง โดยยึดให้มั่งคงค้ำยันให้แข็งแรง หลังจากนั้นทำการติดตั้งน็อตที่ไว้สำหรับยึดกับตัวเพลาเหล็กที่หน้าที่เป็นจุดต่อหมุน (hinge)



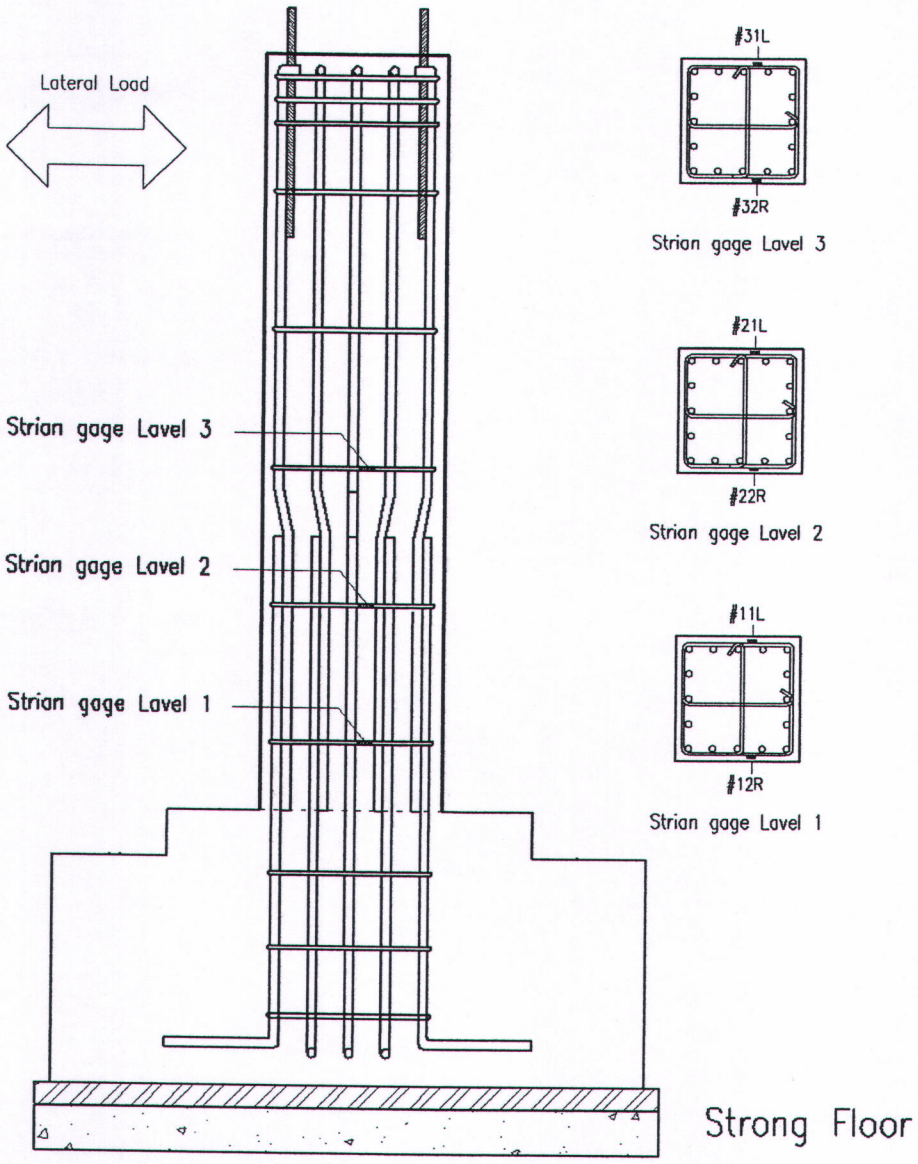
รูปที่ 3.7 ตำแหน่งของเกจวัดความเครียดบนเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างทดสอบ S1



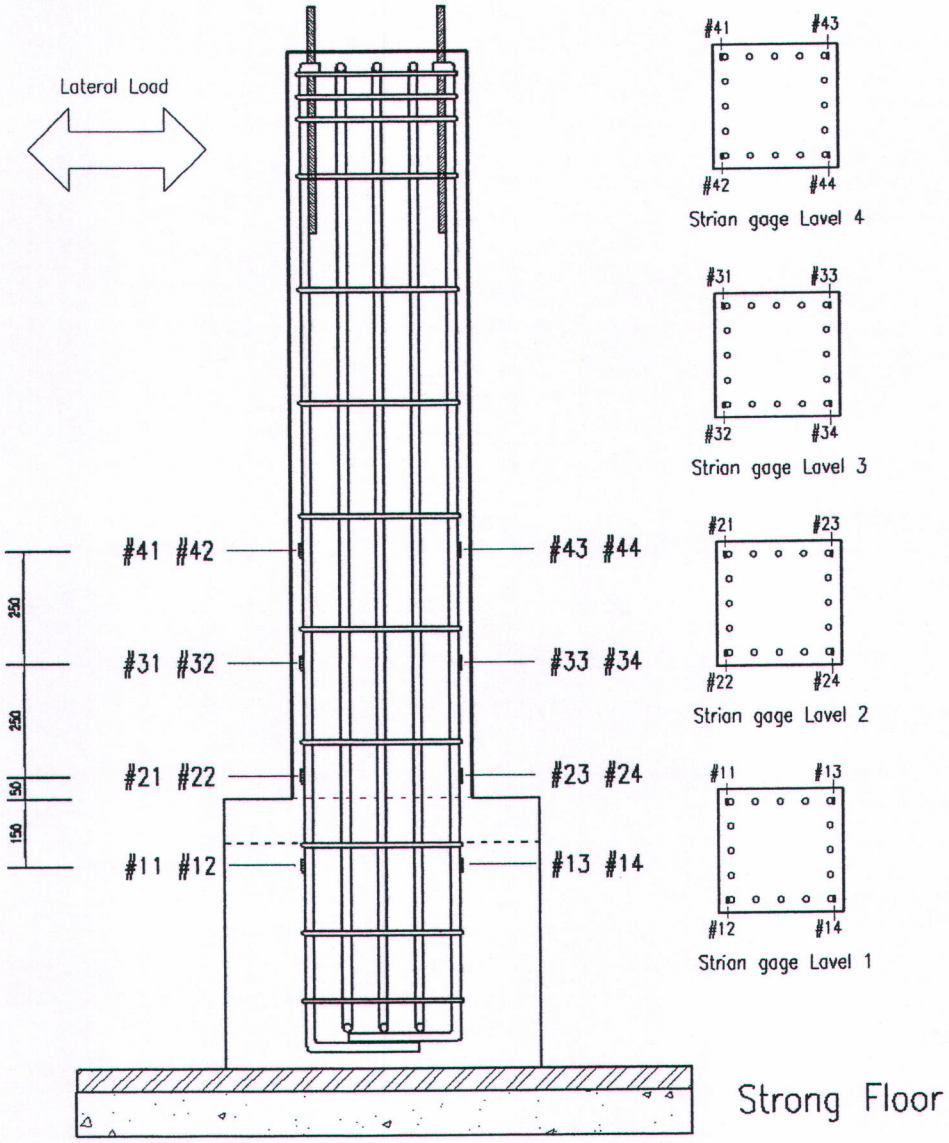
รูปที่ 3.8 ตำแหน่งของเกจวัดความเครียดบนเหล็กเสริมตามขวางของตัวอย่างทดสอบ S1



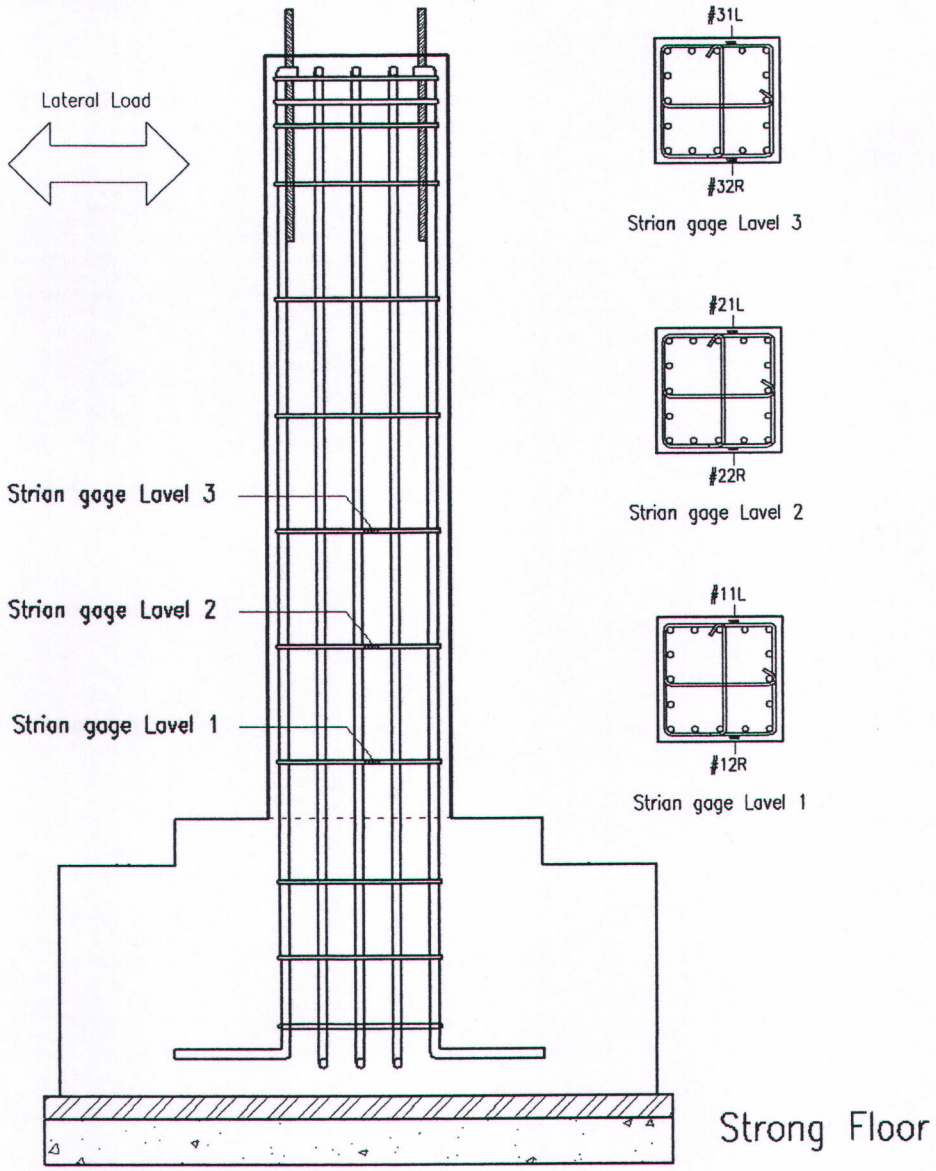
รูปที่ 3.9 ตำแหน่งของเกจวัดความเครียดบนเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างทดสอบ S2s



รูปที่ 3.10 ตำแหน่งของเกจวัดความเครียดบนเหล็กเสริมตามขวางของตัวอย่างทดสอบ S2s



รูปที่ 3.11 ตำแหน่งของเกจวัดความเครียดบนเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างทดสอบ S3

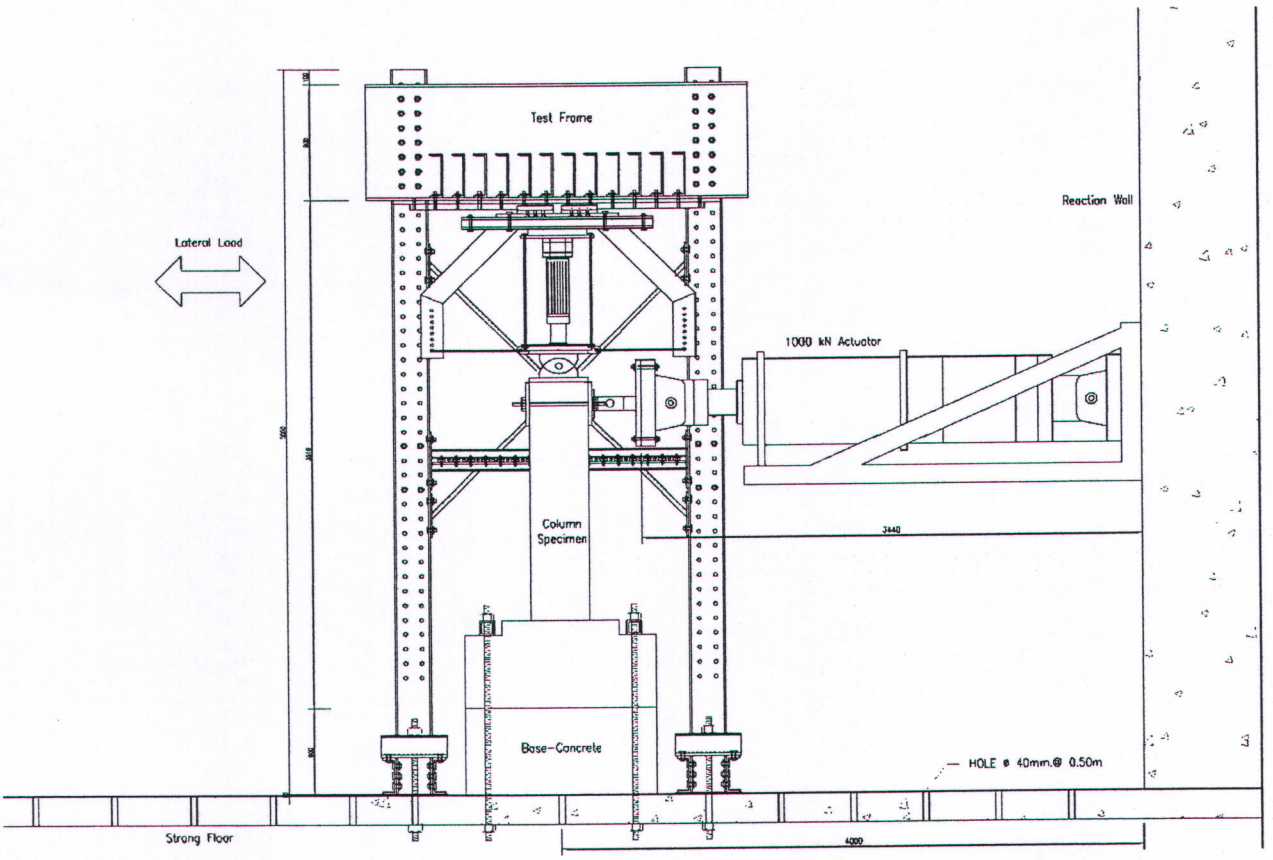


รูปที่ 3.12 ตำแหน่งของเกจวัดความเครียดบนเหล็กเสริมตามขวางของตัวอย่างทดสอบ S3

3.6 ขั้นตอนการทดสอบ

ในขั้นตอนการทดสอบนี้จะอธิบายถึงการติดตั้งเสาตัวอย่างทดสอบกับพื้นที่ในห้องปฏิบัติการและโครงข้อแข็งทดสอบที่ให้แรงอัดตามแนวแกน วิธีการติดตั้งและตำแหน่งของเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้า (Linear Variable Displacement Transducer , LVDT) วิธีการเก็บข้อมูลในระหว่างการทดสอบโดยใช้ Data Logger ขั้นตอนการให้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักรกับเสาตัวอย่างทดสอบ โดยที่แรงอัดในแนวแกนคงที่ตลอดการทดสอบ โดยจะลำดับในการดำเนินการดังนี้

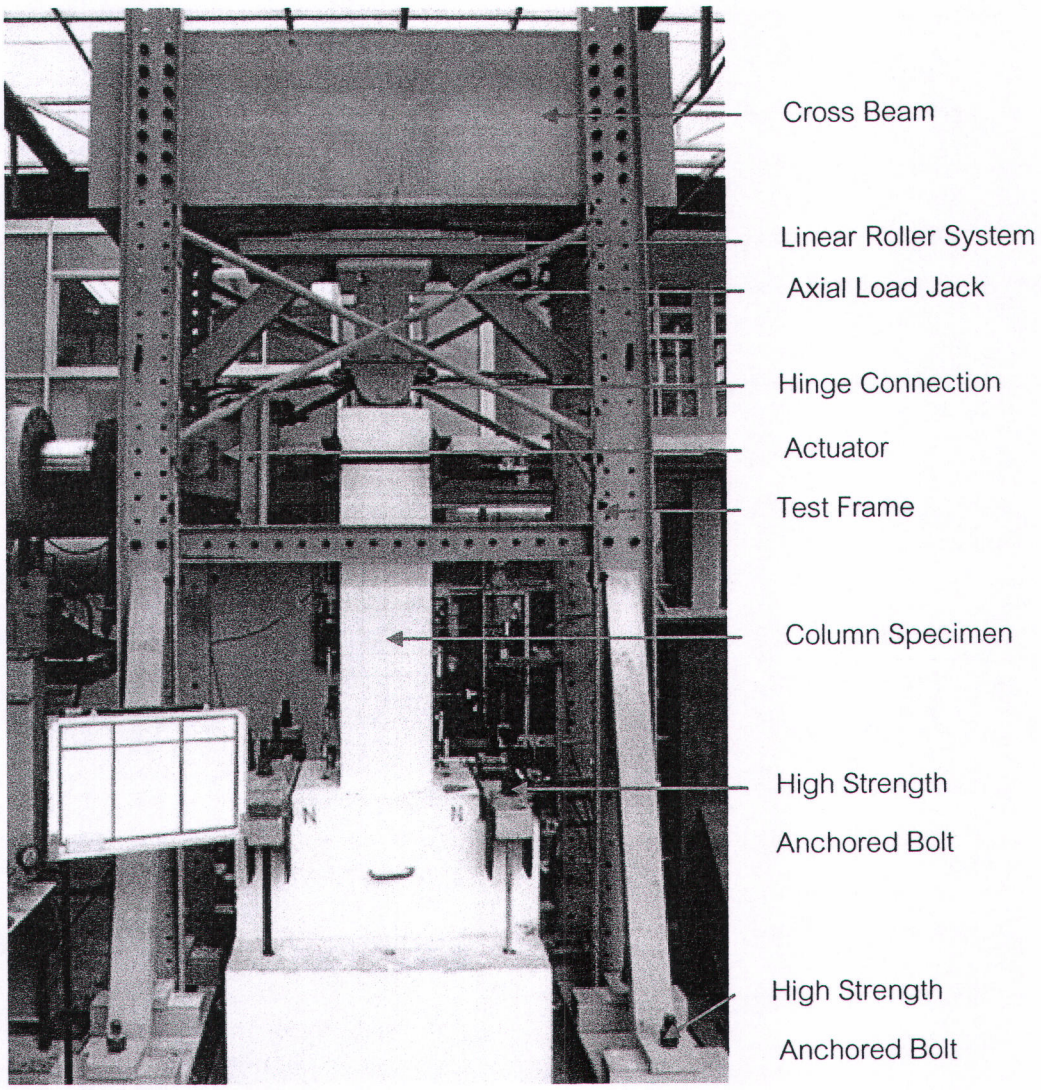
1. ติดตั้งเพลาเหล็กที่ทำหน้าที่เป็นจุดต่อหมุน (hinge) บนหัวเสาเสาคอนกรีต



รูปที่ 3.13 แบบจำลองการทดสอบ

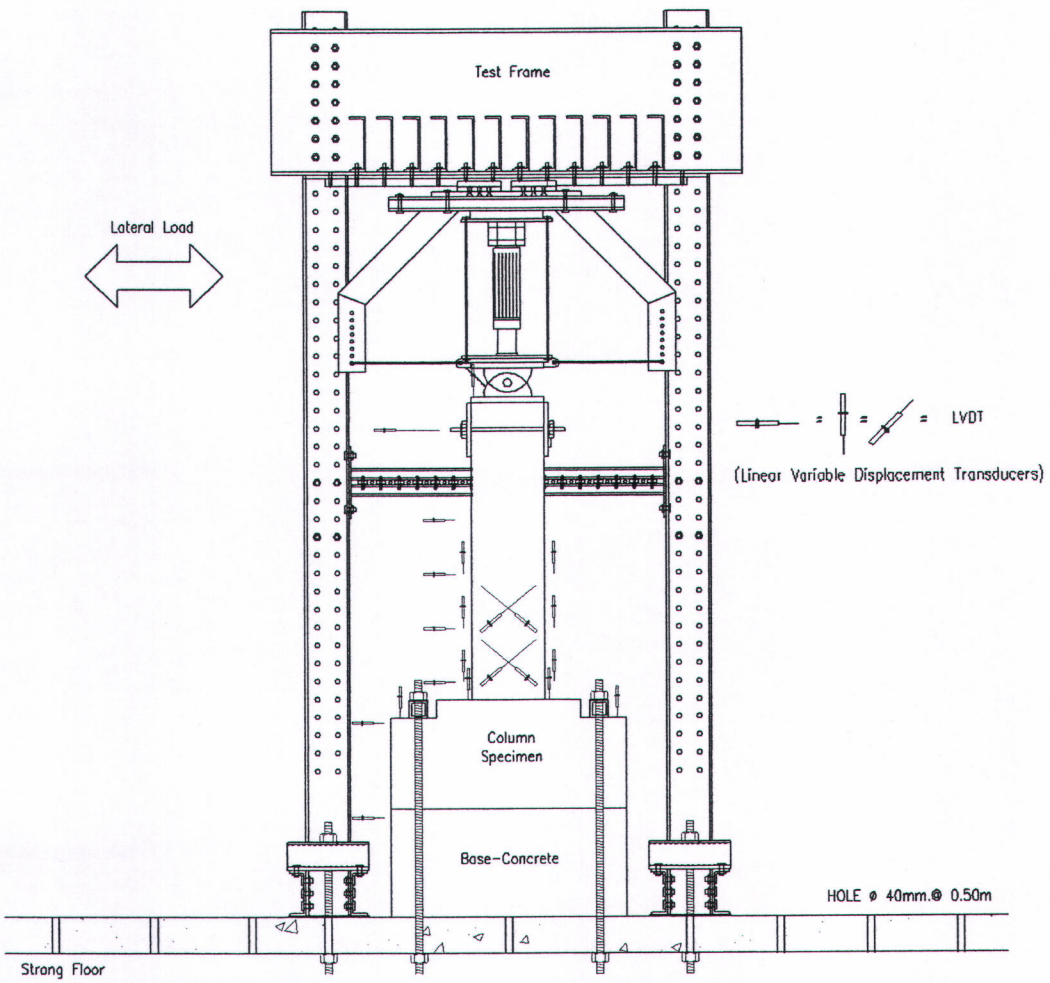
2. ทำการติดตั้งตัวอย่างทดสอบกับพื้นในห้องปฏิบัติการ แต่การทดสอบนี้ไม่ต้องทำการเคลื่อนย้ายตำแหน่งของเครื่องให้แรงด้านข้าง (Actuator) จึงจำเป็นต้องจัดทำแท่นคอนกรีตรองตัวอย่างทดสอบ จากนั้นปรับระดับของเสาตัวอย่างทดสอบให้ได้แนว

ระนาบและแนวดิ่ง แล้วยึดตัวอย่างทดสอบด้วยแท่งเหล็กกำลังสูงผ่านฐานรอง 6 จุด โดยมี 2 จุด ที่การยึดด้วยวิธีอัดแรง โดยแบบจำลองการทดสอบจะแสดงในรูปที่ 3.13 และตัวอย่างการติดตั้งเสาตัวอย่างทดสอบเข้ากับโครงข้อแข็งทดสอบ (Test Frame) เพื่อทำการทดสอบ แสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ตัวอย่างการติดตั้งเสาตัวอย่างทดสอบกับโครงข้อแข็งทดสอบ (Test Frame)

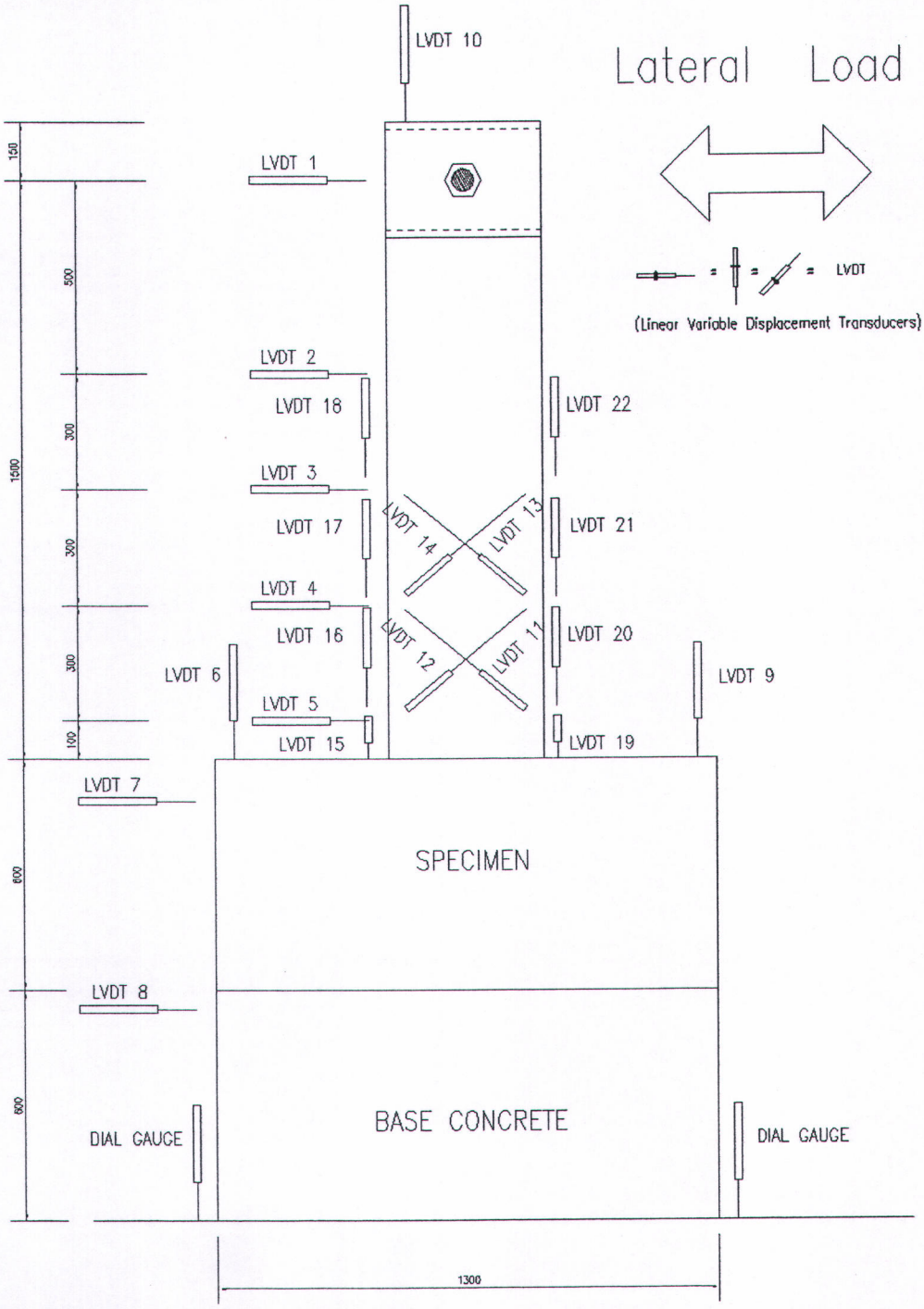
3. ทำการทาสีขาวที่ตัวอย่างทดสอบเพื่อช่วยในการสังเกตุรอยแตกร้าวให้เห็นชัดเจนขึ้น และมีการตีเส้นเป็นตารางขนาด 100 มม. X 100 มม. บนตัวอย่างเสาทดสอบเพื่อง่ายต่อการบันทึกรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ
4. ติดตั้งแม่แรง (Hydraulic Jack) แบบไฟฟ้าที่แรงอัดในแนวแกน กับหัวเสาตัวอย่างคอนกรีต โดยจะต้องวางอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของหัวเสาตัวอย่างให้ได้ทั้งสองแกน แสดงการติดตั้งแม่แรงแบบไฟฟ้าบนหัวเสาตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.15 แบบร่างการติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้าในระหว่างการทดสอบ

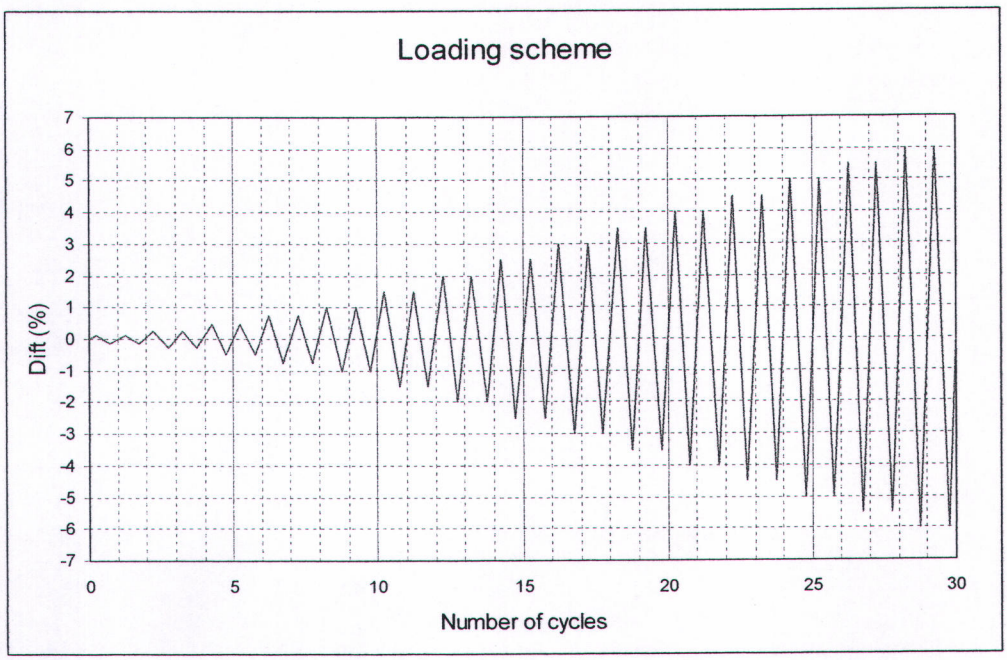
5. ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้า โดยมีการฝังน็อตเพื่อยึดกับตัวอย่างทดสอบและจัดทำฐานจัดเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้า ที่ตำแหน่งต่างๆ แบบ

ร่างการติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้าในระหว่างการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3.14 และตำแหน่งระยะการติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้าตามรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.16 ตำแหน่งระยะการติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้า

6. ต่อเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้า เกจวัดความเครียดชนิดที่ใช้สำหรับวัดความเครียดบนเหล็กเสริม รวมถึงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากเครื่องให้แรงด้านข้าง (Actuator) กับ Data Logger แบบ Data Acquisition Unit เพื่อเก็บข้อมูลที่ได้ขนาดการทดสอบและเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ PC (Personal Computer) เพื่อรับข้อมูลที่ได้จาก Data Logger มาเพื่ออ่านค่าระหว่างการทดสอบและบันทึกผลการทดสอบ
7. การทดสอบเสาตัวอย่าง จะดำเนินการโดยเริ่มให้แรงอัดตามแนวแกนที่มีน้ำหนักคงที่ตลอดการทดสอบ หลังจากนั้นจะให้แรงทางด้านข้างแบบวัฏจักรกระทำกับเสาตัวอย่างทดสอบ โดยการควบคุมการให้แรงกระทำด้านข้างจะใช้การควบคุมระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของหัวเสาตัวอย่างทดสอบ (Displacement Control) ซึ่งแสดงประวัติการรับน้ำหนักของเสาตัวอย่างทดสอบโดยการควบคุมระยะการเคลื่อนที่ของหัวเสาตัวอย่างในรูปที่ 3.15 และทำการบันทึกข้อมูลระหว่างการทดสอบโดยการถ่ายรูปขั้นตอนการให้แรงกระทำด้านข้าง รอยแตกร้าวพฤติกรรมต่างๆที่เกิดขึ้นรวมถึงบันทึกผลระหว่างการทดสอบโดยละเอียด เช่น การเคลื่อนที่ด้านข้างของเสาตัวอย่างจาก LVDT , เกจวัดความเครียดในเหล็กเสริม , รอยแตกร้าว , พฤติกรรมการวิบัติเป็นต้น

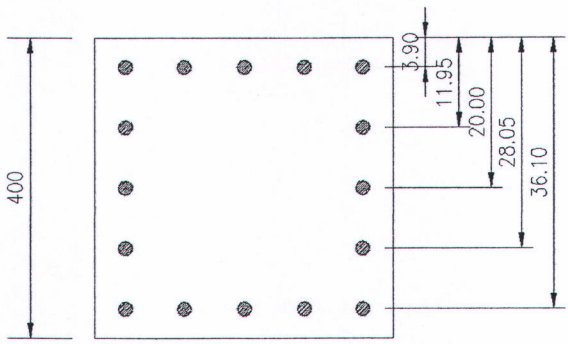


รูปที่ 3.17 แสดงประวัติการรับแรงด้านข้างของเสาตัวอย่างทดสอบ (Loading scheme)

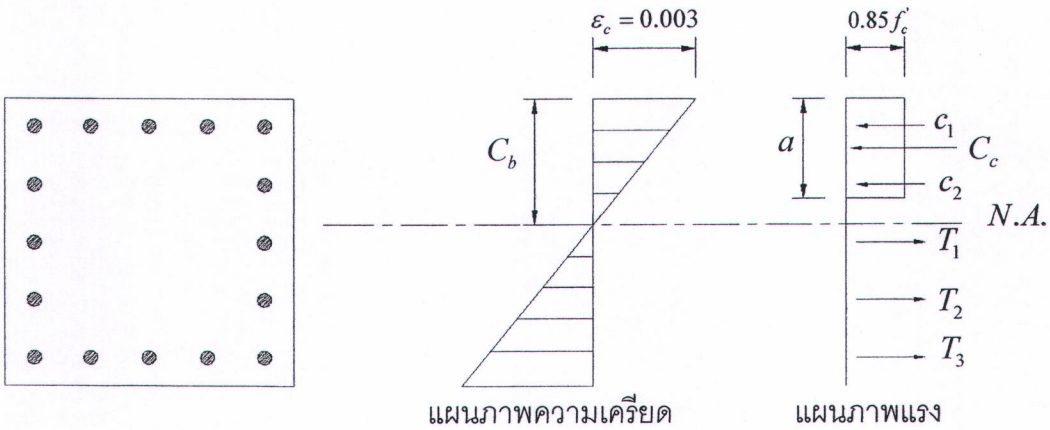
8. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ นำเสนอผลการทดสอบ
9. สรุปผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบกับผลจาก

3.7 การประเมินการรับแรงกระทำและการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสาตัวอย่าง

จากหัวข้อที่ 3.2 อธิบายเกี่ยวเสาคอนกรีตทั้ง 3 ต้น ที่มีขนาด 400 X 400 มม. ของเหล็กปลอกที่รัดรอบ (hoop ties) และเหล็กปลอกที่ยึดตามขวาง (crossties) ตามปริมาณต่ำสุดของมาตรฐาน ACI318-05 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์เท่ากับ 9 มม.ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกเท่ากับ 300 มม. และมาตรฐาน E.I.T1007-34 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์เท่ากับ 6 มม.ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกเท่ากับ 250 มม. ซึ่งมีร้อยละพื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอกต่อผลคูณระหว่างระยะห่างของเหล็กปลอกกับระยะจุดศูนย์กลางถึงจุดศูนย์ของเหล็กปลอกของหน้าตัดเสา เท่ากับ 0.181% และ 0.098% มีกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมตามขวาง (f_y) เท่ากับ 3050 กก./ซม.^{2} และ 3035 กก./ซม.^{2} ส่วนเหล็กเสริมตามยาวมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมต่อพื้นที่ทั้งหมดของหน้าตัด(A_{st}/A_g %) เท่ากับ 3.14% แสดงตำแหน่งของเหล็กเสริมตามยาวดังรูปที่ 3.18 มีกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมตามยาว (f_y) เท่ากับ 5250 กก./ซม.^{2} โดยไม่มีการต่อทาบเหล็กเสริมตามยาวที่โคนเสา มีกำลังอัดประลัยคอนกรีต เท่ากับ 350 กก./ซม.^{2} และ 210 กก./ซม.^{2} โดยรับแรงอัดในแนวแกน(0.2 $f_c^{'}A_g$) เท่ากับ 1098.7 กิโลนิวตัน และ659.2 กิโลนิวตัน มีรูปแบบรูปแบบที่คาดว่าจะวิบัติคือ การวิบัติแบบดัด-เฉือน (Flexure-Shear Failure) โดยพิจารณาจากค่าโมเมนต์ดัด (M_n) จากหลักการที่แสดงในรูปที่ 3.19 โดยค่าแรงดัดจะคำนวณได้จาก $\frac{M_n}{a}$ ซึ่งค่า M_n ได้มาจากการคำนวณโดยโปรแกรม Respones-2000 เปรียบเทียบกับค่าแรงเฉือนที่จากสูตรการคำนวณตามมาตรฐาน ACI318-05 และเปรียบเทียบกับค่าแรงเฉือนที่จากสูตรการคำนวณตามมาตรฐาน FEMA-273(1997) ดังสมาการที่ 3.1 ถึงสมาการที่ 3.4 ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณดังกล่าว แสดงดังตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.18 แสดงตำหน่งของเหล็กเสริมตามยาว



รูปที่ 3.19 แผนภาพแสดงความเครียดและแรงของหน้าตัด

พิจารณาการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน; V_n

$$V_n = V_c + V_s \tag{3.1}$$

โดยที่ V_n = กำลังรับแรงเฉือน

V_c = กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต

V_s = กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กเสริมตามขวาง

กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตตามมาตรฐาน ACI318-05 ;

$$V_{c,ACI318-05} = 0.17\sqrt{f_c'}bd\left[1+\frac{N_u}{14A_g}\right] \quad ;\text{(MPa)} \tag{3.2}$$

โดยที่ $V_{c,ACI318-05}$ = กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต

f_c' = กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต

b = ความกว้างของหน้าตัดเสา

d = ความลึกประสิทธิผลของหน้าตัดเสา

N_u = แรงอัดตามแนวแกน ถ้าเป็นดึงให้มีค่าเท่ากับ 0

A_g = พื้นที่หน้าตัดของเสา

กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตตามมาตรฐาน FEMA-273(1997);

$$V_{c,FEMA-273} = 0.29\lambda\sqrt{f_c'}bd\left[k_\mu + \frac{N_u}{13.8A_g}\right] \text{ ; (MPa)} \tag{3.3}$$

โดยที่ $V_{c,FEMA-273}$ = กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต

k_μ = 1 สำหรับ พื้นที่ต้องการค่าความเหนียวน้อย

= 0 สำหรับ พื้นที่ต้องการค่าความเหนียวปานกลางถึงสูง

λ = 1 สำหรับ คอนกรีตทั่วไป (normal weight)

= 0. สำหรับ คอนกรีตมวลเบา (light weight)

กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กเสริมตามขวาง ;

$$V_s = \frac{A_v f_{yh} d}{s} \tag{3.4}$$

โดยที่ s = ระยะห่างของเหล็กเสริมทางขวางวัดจากศูนย์กลางถึงศูนย์กลาง

A_g = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมตามขวาง

f_{yh} = กำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมทางขวาง

ตารางที่ 3.2 สรุปการประเมินความสามารถของเสาตัวอย่างทดสอบ (กิโลนิวตัน)

ชื่อเสาตัวอย่าง	$\frac{M_n}{a}$	$V_{n,ACI-05}$	$V_{n,FEMA-273}$ $(k_\mu = 1)$	$V_{n,FEMA-273}$ $(k_\mu = 0)$	$V_{n,\text{Moehle-1999}}$
S1	257	281	438	202	305
S2s	217	210	313	130	237
S3	217	178	280	98	203

ตารางที่ 3.3 สรุปรูปแบบการวิบัติที่คาดว่าจะเกิดขึ้นของเสาตัวอย่างทดสอบ

ชื่อเสาตัวอย่าง	$\frac{M_n}{aV_{n,ACI-05}}$	$\frac{M_n}{aV_{n,FEMA-273}}$ $(k_\mu = 1)$	$\frac{M_n}{aV_{n,FEMA-273}}$ $(k_\mu = 0)$	$\frac{M_n}{aV_{n,\text{Moehle-1999}}}$	Expected Failure Mode
S1	0.92	0.59	1.27	0.85	Flexure-shear
S2s	1.03	0.69	1.67	0.92	Flexure-shear
S3	1.22	0.77	2.21	1.07	Flexure-shear

จากหัวข้อที่ 2.1.4 การโก่งตัวเนื่องจากแรงดัด อธิบายถึงหลักการแล้วการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของเสาที่เกิดขึ้น อันมีเป็นผลเนื่องมาจากแรงดัด ซึ่งเสาจะเกิดจุดหมุนพลาสติกขึ้นที่บริเวณหน้าตัดวิกฤต ซึ่งจากสมการที่ 2.2 ถึงสมการที่ 2.9 สามารถแสดงระยะการโก่งเนื่องจากผลของแรงดัดได้ ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สรุประยะเคลื่อนที่จากแรงดัดที่คาดว่าจะเกิดขึ้นของเสาตัวอย่างทดสอบ (มม.)

ชื่อเสาตัวอย่าง	δ_f ; Park & Priestley (1987)	δ_f ; Paulay และ Priestley (1992)	δ_f ; $(l_p = 0.5h)$
S1	24	21	23
S2s	44	34	40
S3	44	34	40

จากหัวข้อที่ 2.1.4 ขีดจำกัดระยะเคลื่อนตัวที่สภาวะการวิบัติด้วยน้ำหนักบรรทุกของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้อธิบายถึงแบบจำลองอย่างง่ายสำหรับการจำลองความสามารถการเสียรูปที่จุดวิบัติด้วยน้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่งของเสาที่เสียหายเนื่องจากแรงเฉือน (หลังจากเกิดการคราก เนื่องจากแรงดัด) ที่พัฒนาโดย Elwood และ Moehle,(2005) สามารถทำนายอัตราการเคลื่อนที่ ที่เกิดการวิบัติน้ำบรรทุกในแนวแกน ได้จากสมการที่ 2.19 และแสดงผลการคำนวณจากสมการที่ 2.19 ดังแสดงตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 สรุปอัตราการเคลื่อนที่ ที่เกิดการวิบัติด้วยน้ำบรรทุกในแนวแกนที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

ชื่อเสาตัวอย่าง	การเคลื่อนที่ ที่เกิดการวิบัติน้ำบรรทุกในแนวแกนที่คาดว่าจะเกิดขึ้น $\left(\frac{\Delta}{L}\right)_{axial} = \frac{4}{100}\frac{1+(\tan\theta_s)^2}{\tan\theta_s + P\left(\frac{s}{A_v f_{yh} d_c \tan\theta_s}\right)}$
S1	0.5 %
S2s	0.7 %
S3	0.4 %

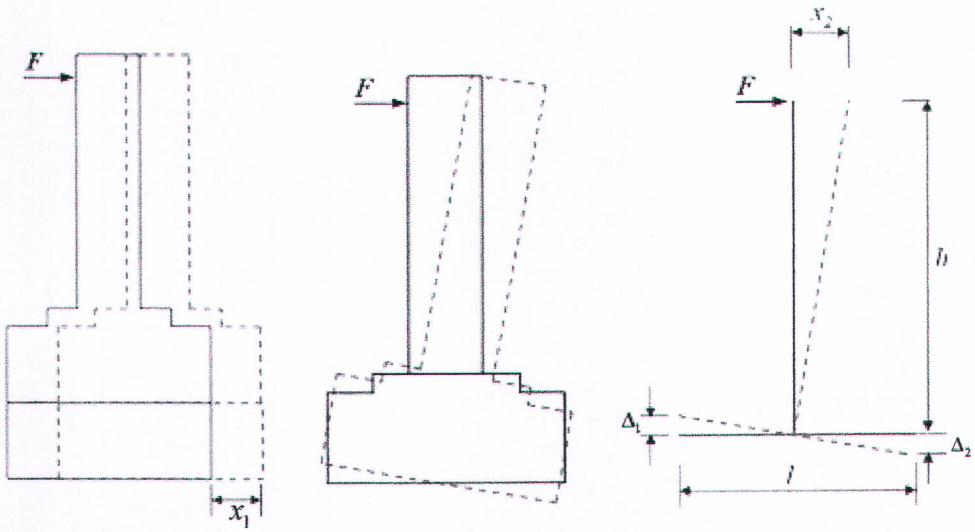
3.8 การปรับแก้ผลการทดสอบและการคำนวณอัตราร้อยละเคลื่อนที่ด้านข้าง

ในขั้นตอนการปรับแก้ผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการร้อยละเคลื่อนที่ด้านข้าง จากผลการทดสอบนี้จะอธิบายถึงการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งในระหว่างการทดสอบนั้นอาจมีการเคลื่อนและการหมุนของฐานเสาตัวอย่างทดสอบเนื่องจากแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักรซึ่งจำเป็นต้องปรับแก้ผลการทดสอบก่อนที่จะนำข้อมูลไปวิเคราะห์ผลการทดสอบ และการคำนวณอัตราการร้อยละเคลื่อนที่ด้านข้าง เพื่อที่สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับอัตราร้อยละการเคลื่อนที่

3.8.1 การปรับแก้การเคลื่อนที่เนื่องจากการเลื่อนไถลและการหมุนของฐานราก

ในการทดสอบภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักรจากเครื่องให้แรงกระทำ ซึ่งเนื่องจากในการทดสอบมีการวางเสาตัวอย่างทดสอบบนฐานคอนกรีตรองรับเพื่อให้ระยะความสูงของเสาตัวอย่าง มีความสูงถึงระยะเครื่องให้แรงกระทำทางด้านข้าง ดังนั้นในระหว่างการทดสอบอาจมีผลทำให้ฐานรองรับและฐานของเสาตัวอย่างทดสอบมีการเคลื่อนที่ไปได้ ซึ่งทำให้ระยะการเคลื่อนที่

ของเสาตัวอย่างนั้นมีค่าที่ไม่ถูกต้องตามจริง โดยต้องมีการปรับแก้จะกระทำโดยนำระยะการเคลื่อนที่ของทั้งระบบที่เกิดขึ้นบนหัวเสาตัวอย่างทดสอบซึ่งได้ทำการเก็บข้อมูลการเคลื่อนจากเคลื่อนวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้านำมาลบออกจากระยะการเคลื่อนที่ของฐานรองรับและฐานเสาตัวอย่างเสาที่วัดได้ ทั้งนี้ ฐานเสาตัวอย่างทดสอบอาจเกิดการหมุนตัวของฐาน ซึ่งการหมุนตัวอย่างฐานนั้น จะทำให้ระยะการเคลื่อนที่ของเสาตัวอย่างเกิดความผิดพลาดไม่ถูกต้อง จึงจำเป็นต้องมีการปรับแก้ โดยการคำนวณหาระยะการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่เกิดจากการหมุนของฐานตัวอย่างทดสอบจากความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์แล้วทำการลบออกจากระยะการเคลื่อนที่ของทั้งระบบที่เกิดขึ้นบนหัวเสาตัวอย่างทดสอบ ซึ่งรูปที่ 3.20 แสดงภาพประกอบการปรับแก้เนื่องจากการเคลื่อนที่ทางด้านข้างและการหมุนของฐานคอนกรีตรองรับและฐานของเสาตัวอย่าง ซึ่งสมการที่ 3.5 และ สมการที่ 3.6 แสดงถึงการปรับแก้เนื่องจากการเคลื่อนที่และการหมุนที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.20 การปรับแก้เนื่องจากการเคลื่อนที่และการหมุนของฐานราก

$$\Delta_{real} = \Delta_{record} - x_1 - x_2 \tag{3.5}$$

$$x_2 = (\Delta_1 + \Delta_2)/(h/l) \tag{3.6}$$

โดยที่ x_1 = ระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างเนื่องจากการไถลที่เกิดขึ้น

x_2 = ระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างเนื่องการหมุนที่เกิดขึ้น

Δ_1 = การหมุนเอียงที่เกิดขึ้น 1

Δ_2 = การหมุนเอียงที่เกิดขึ้น 2

h = ระยะจากจุดหมุนของเสาถึงจุดที่ให้แรงกระทำทางด้านข้าง

l = ระยะห่างระหว่างเครื่องวัดระยะการเคลื่อนที่ทั้งสองตัว

3.8.2 การคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้าง (%drift)

การเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ถูกการผลักและดึงกลับโดยเครื่องให้แรงด้านข้างนั้นถูกกำหนดโดยเครื่องหมาย + หมายถึงแรงทางด้านข้างที่ผลักหัวเสาตัวอย่างทดสอบให้เคลื่อนที่ออกไปทิศทางด้านที่อยู่ตรงข้ามกับเครื่องให้แรงด้านข้าง (Actuator) และเครื่องหมาย – หมายถึงแรงกระทำทางด้านข้างที่ดึงหัวเสาตัวอย่างทดสอบเคลื่อนที่กลับมาทิศทางด้านที่เครื่องให้แรงด้านข้างอยู่ โดยค่าสูงสุดในการเคลื่อนที่ด้านข้างจะควบคุมด้วยอัตราร้อยละการเคลื่อนที่ด้านข้าง(%drift) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 3.7 และสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกกระทำทางด้านข้างกับอัตราร้อยละการเคลื่อนที่ด้านข้างได้จาก ค่าแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดบันทึกได้กับค่าสูงสุดของอัตราร้อยละการเคลื่อนที่ด้านข้าง

$$\text{อัตราร้อยละการเคลื่อนที่ด้านข้าง} = \frac{\delta}{H} \times 100 \qquad (3.7)$$

โดยที่ δ คือระยะการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่หัวเสา

H คือระยะความสูงของเสา

3.9 การคำนวณการเสียรูปด้านข้างจากผลการทดสอบ

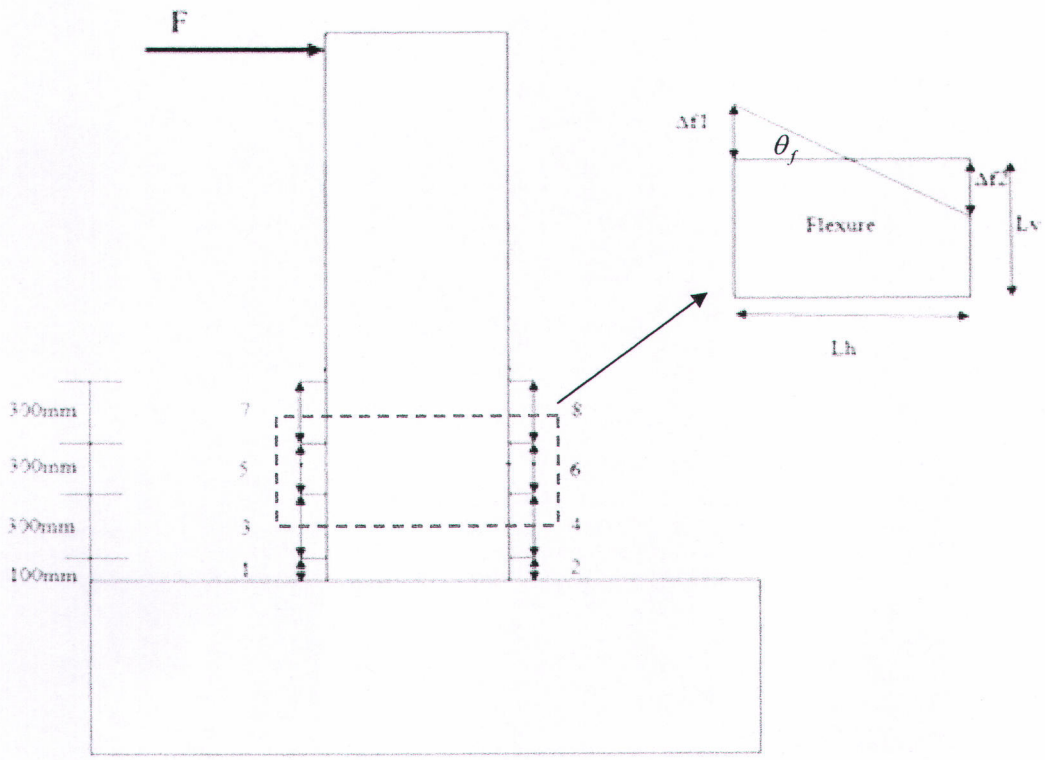
หลังได้มีการปรับแก้ผลการทดสอบจากผลการทดสอบ ในส่วนการคำนวณการเสียรูปด้านข้างจากผลการทดสอบนี้จะอธิบายถึงการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบ การคำนวณการเสียรูปด้านข้างจากผลการทดสอบ จากเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้าที่ถูกติดตั้งเข้าเสาตัวอย่างทั้งหมด สามารถนำมาคำนวณหาระยะการเคลื่อนที่เสียรูปไปทั้งหมดของเสาตัวอย่างทดสอบ ซึ่งสามารถแยกองค์ประกอบของการเคลื่อนที่ด้านข้างอันเนื่องมาจาก แรงดัด แรงเฉือน

และระยะการเคลื่อนตัวจากรอยต่อเคลื่อน โดยในส่วนนี้จะกล่าวถึงวิธีการคำนวณหาระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างเหล่านี้

3.9.1 การคำนวณการเสียรูปแบบโค้งดัด

สำหรับคำนวณการเสียรูปแบบโค้งดัดเนื่องจากแรงดัดนั้น สามารถคำนวณจากการแบ่งช่วงความยาวเสาออกเป็นหลายส่วนของความโค้งที่ตำแหน่งใดๆ จากนั้นคำนวณหารมุมหมุนเนื่องจากแรงดัด (θ_f) โดยการนำผลต่างค่าการเคลื่อนที่วัดโดยเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้าสองชิ้นที่ติดตั้งระดับเดียวกัน ระหว่างชั้นของกลุ่มการคำนวณมาหารด้วยระยะในแนวราบสุทธิของเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้าทั้งสองชิ้นในทุกชั้นของกลุ่มการคำนวณ ซึ่งอาจแสดงการคำนวณในรูปที่ 3.21

หลังจากนำค่ามุมความโค้งในแต่ละชั้นของกลุ่มการคำนวณ มาหารด้วยระยะในแนวดิ่งสุทธิระหว่างชั้นของกลุ่มการคำนวณ คือ ค่ามุมความโค้งในแต่ละชั้น(φ) โดยการนำค่าความโค้งดัดนั้นคูณกับความสูงสุทธิของแต่ละชั้นของกลุ่มการคำนวณ แสดงในสมการที่ 3.8 และ สมการที่ 3.9



รูปที่ 3.21 ตัวอย่างการคำนวณการเสียรูปแบบโค้งดัด

ค่าความโค้งดัด(Curvature); $\varphi = \dfrac{\theta_f}{L_v}$ (3.8)

$$\varphi = \frac{\Delta f_1 + \Delta f_2}{L_h} \cdot \frac{1}{L_v} \tag{3.9}$$

โดยที่ φ = ค่าค่าความโค้งดัด(Curvature)

θ_f = ค่ามุมที่เกิดจากการความโค้งดัด

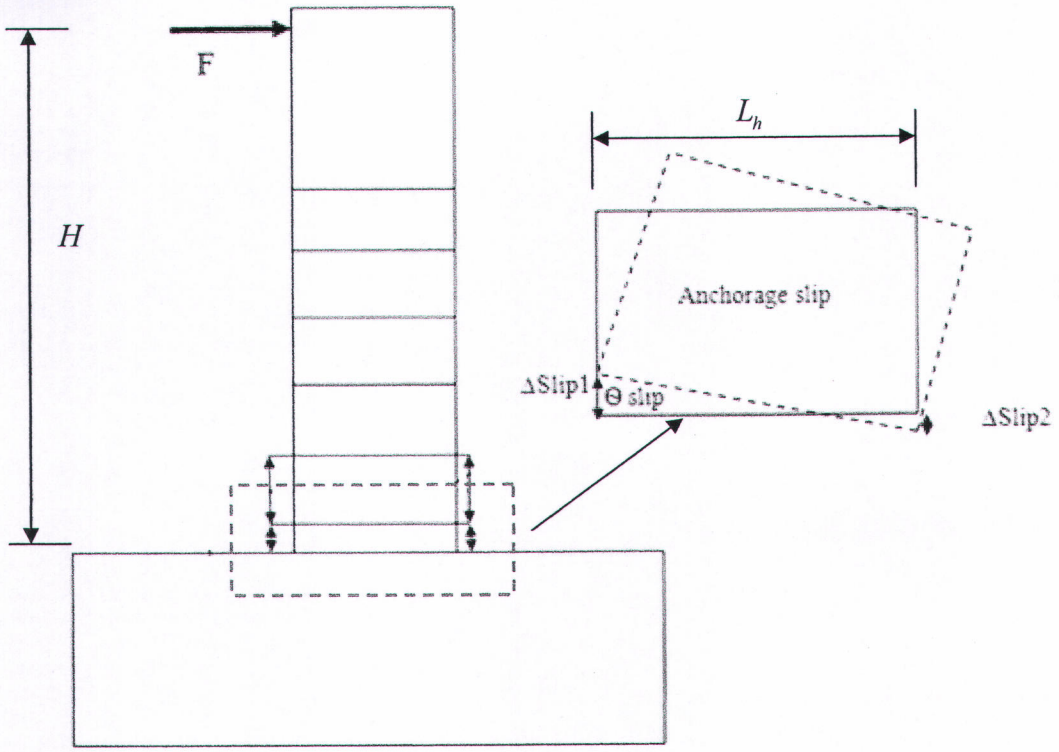
Δf_i = ระยะการเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงไป

L_h = ความกว้างแนวราบสุทธิของแต่ละชั้นของกลุ่มการคำนวณ

L_v = ความสูงแนวดิ่งสุทธิของแต่ละชั้นของกลุ่มการคำนวณ

3.9.2 การคำนวณการเสียรูปจากรอยต่อเคลื่อน

เนื่องจากการเสียรูปแบบรอยต่อเคลื่อน เกิดจาการเคลื่อนตัวระว่างรอยต่อเชื่อมของเสาตัวอย่างทดสอบกับฐานคอนกรีต ซึ่งทำให้เกิดการหมุนขึ้น จึงเป็นผลให้เกิดระยะการเคลื่อนตัวเนื่องจากการหมุนนี้ นำสู่การเคลื่อนตัวที่หัวเสาตัวอย่างจากรอยต่อเชื่อมกัน(Δs) สำหรับคำนวณการเสียรูปจากรอยต่อเคลื่อนนั้น คำนวณได้จากสมการที่ 3.10 และสมการที่ 3.11 ซึ่งได้มาจากค่าการเคลื่อนที่ ที่วัดโดยเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้าสองชิ้นที่ติดตั้งใกล้กับฐานของเสาตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 ตัวอย่างการคำนวณการเสียรูปจากรอยต่อเคลื่อน

$$\Delta s = \theta_{Slip} H \tag{3.10}$$

$$\theta_{Slip} = \frac{\Delta_{Slip1} + \Delta_{Slip2}}{L_h} \tag{3.11}$$

โดยที่ Δs = ค่าค่าความโค้งดัด(Curvature)

θ_{Slip} = ค่ามุมที่เกิดจากการความโค้งดัด

H = ระยะความสูงเสาสุทธิ

$\Delta_{Slip\ i}$ = ระยะการเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงไป

L_h = ความกว้างแนวราบสุทธิของแต่ละชั้นของกลุ่มการคำนวณ

3.8.3 การคำนวณการเสียรูปแบบเฉือน

การเสียรูปแบบเฉือน(Shear deformation) เกิดจากแรงเฉือนที่มากระทำ จะมีลักษณะรอยแตกร้าวเป็นเส้นทะแยงมุมขนานกับแนวการให้แรงกระทำทางด้านข้างของเสาตัวอย่างทดสอบ ระยะการเคลื่อนตัวแบบเฉือนนั้นมีความรุนแรงมาก ซึ่งสามารถวัดได้จากเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้าสองชิ้นที่ติดตั้งในแต่ละชั้นของกลุ่มการคำนวณ ซึ่งการคำนวณหามุมหมุนการที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงเฉือนหาได้จากสมการที่ 3.12 โดยติดตั้งในแนวทแยงมุมบนหน้าเสาด้านที่ขนานกับทิศทางแนวแรงกระทำด้านข้าง ซึ่งในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงความยาวของระยะเคลื่อนที่ในแนวทะแยงมุมที่วัดได้จากเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้า ให้เป็นระยะการเคลื่อนที่ในแนวราบ โดยรูปที่ 3.23 แสดงตัวอย่างการคำนวณการเสียรูปแบบเฉือน

$$\gamma = \frac{V}{L_v} \tag{3.12}$$

โดยสมมุติฐาน มุมหมุนการที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงเฉือนเล็กมาก จะได้ว่า

$$V_1 \cong \frac{\Delta_{shear1}}{\cos\theta_{shear}} \tag{3.13}$$

$$V_2 \cong \frac{\Delta_{shear2}}{\cos\theta_{shear}} \tag{3.14}$$

ดังนั้น จากสมการที่ 3.12 ถึงสมการที่ 3.14 จะได้ว่า

$$\gamma_1 \cong \frac{\Delta_{Shear1}}{L_g \cdot \cos\theta_{shear}} \tag{3.15}$$

$$\gamma_2 \cong \frac{\Delta_{Shear2}}{L_g \cdot \cos\theta_{shear}} \tag{3.16}$$

ซึ่งค่าเฉลี่ยของมุมหมุนการที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงเฉือน หาได้จากสมการที่ 3.17 และ สมการที่ 3.18

$$\gamma = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \tag{3.17}$$

$$\gamma = \frac{\Delta_{Shear1} + \Delta_{Shear2}}{2 \cdot L_v \cdot \cos\theta_{shear}} \tag{3.18}$$

โดยที่ γ = มุมหมุนที่เกิดการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือน

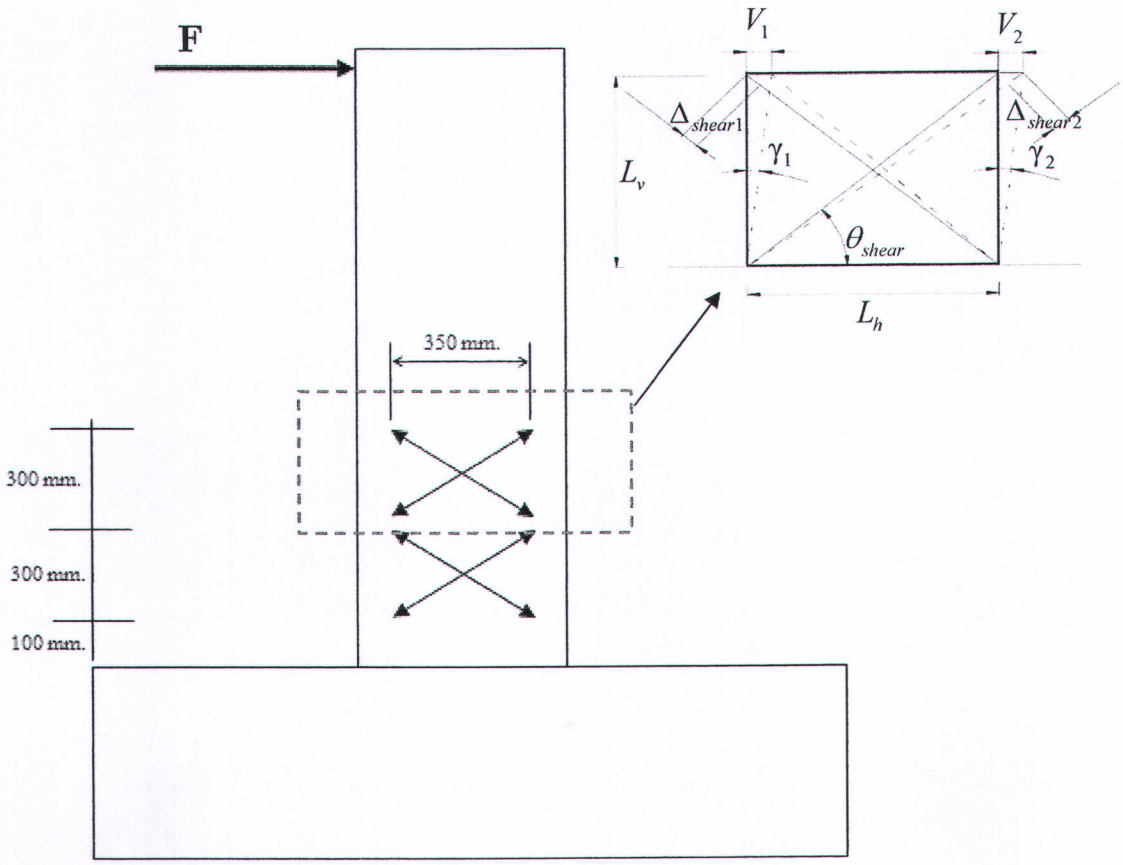
V = การเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนของแต่ละชั้นการคำนวณ

θ_{shear} = ค่ามุมที่เกิดเนื่องจากแรงเฉือน

$\Delta_{shear\ i}$ = ระยะการเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงไปที่วัดได้จากเครื่องมือวัด

L_h = ความกว้างแนวราบสุทธิของแต่ละชั้นของกลุ่มการคำนวณ

L_v = ความสูงแนวดิ่งสุทธิของแต่ละชั้นของกลุ่มการคำนวณ



รูปที่ 3.23 ตัวอย่างการคำนวณการเสียรูปแบบเฉือน

โดยการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นของเสาตัวอย่างทดสอบทั้งหมด หาได้จากผลรวมของ การเสียรูปแบบเฉือนในแต่ละชั้นของกลุ่มการคำนวณ รวมกันทั้งหมดดังแสดงในสมการที่ 3.19

$$\delta_{shear} = \sum V_i \tag{3.19}$$

3.10 การสังเกตุค่าที่ได้จากผลทดสอบเสาตัวอย่าง

ในส่วนนี้จะนำเสนอคำจำกัดความของแต่ละสถานะเกิดความเสียหายที่แตกต่างกันในระหว่างการทดสอบแบบวัฏจักรของเสาตัวอย่างจากการเริ่มต้นแตกร้าวจนถึงการวิบัติด้วยน้ำหนักบรรทุกจากแรงโน้มถ่วง

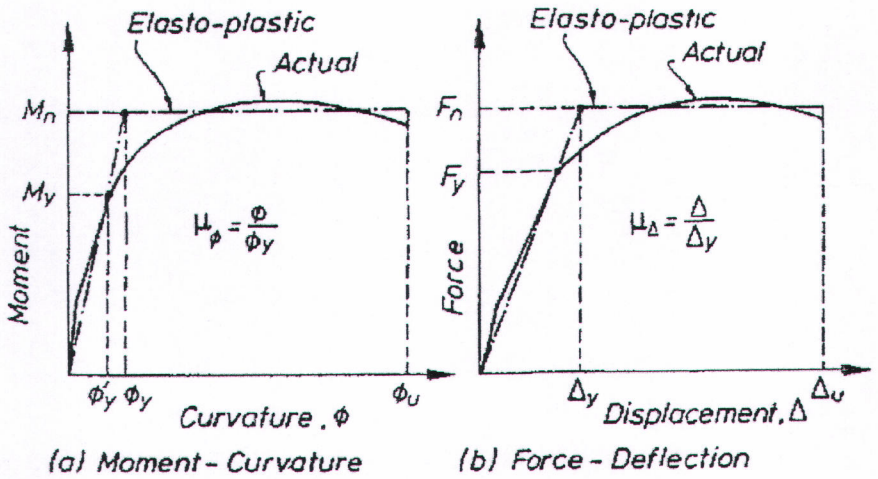
3.10.1 การแตกร้าวที่จุดเริ่มต้น

เมื่อความต้านแรงดึงของคอนกรีตที่ได้รับมากเกินจากนั้นเริ่มเกิดการแตกร้าวขึ้นบนผิวหน้าของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ความสามารถต้านแรงดึงของเสาภายใต้ภาระการรับน้ำบรรทุกในแนวแกนและโมเมนดัดสามารถประมาณได้เท่ากับ $0.7\sqrt{f_c^{'}}$ ซึ่ง $f_c^{'}$ คือค่าหน่วยกำลังอัดของคอนกรีต และเมื่อความสามารถต้านทานแรงดึงของเสาตัวอย่างมีค่าโดยประมาณเท่ากับ $0.7\sqrt{f_c^{'}}$ ในระหว่างการทดสอบ โดยเมื่อมีรอยแตกร้าวเป็นรูปเกิดขึ้นจะถูกบันทึกเป็นจุดเริ่มต้นแตกร้าว

3.10.2 ระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างที่จุดคราก

การหาระยะการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่จุดครากที่ได้จากผลการทดสอบ ได้มีการเสนอวิธีการหาหลายวิธี สามารถหาค่าระยะการเคลื่อนที่ที่จุดครากได้ วิธีที่แรก คือ การหาระยะการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง ณ จุดครากจากจุดที่เหล็กยืนรับแรงดึงเส้นแรกเริ่มคราก (δ_{yi} , 1st steel yielding) วิธีนี้แนะนำโดย Xiao and Yun (2002) และยังสามารถหาค่าระยะการเคลื่อนที่ที่จุดคราก โดยการหาจากการลากเส้นจากจุดเริ่มต้นมาตัดผ่านจุดที่แรงกระทำทางด้านข้างมีค่าเท่ากับ 75 % ของแรงกระทำสูงสุด (75% secant approach) จนไปถึงเส้นตรงที่ขนานกับแกนนอนที่ลากจากจุดที่แรงกระทำทางด้านข้างมีค่ามากสุด วิธีนี้แนะนำโดย Priestly (1992) จากนั้นลากเส้น

ขนานกับแกนตั้งไปตัดกับแกนการเคลื่อนที่ด้านข้างคือ ระยะการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่จุดคราก(δ_y) โดยรูปที่ 3.24 แสดงวิธีการหาค่าความเหนียวโดยการประมาณการตอบสนองด้านข้าง



รูปที่ 3.24 วิธีการหาค่าความเหนียวโดยการประมาณการตอบสนองด้านข้าง (Priestly,1992)

3.10.3 การโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว

การโก่งเดาะของเหล็กเสริมที่เกิดขึ้น เมื่อคอนกรีตที่ปกคุมเหล็กเสริมตามแนวยาวเกิดการแตกร้าวเสียหายหรือเกิดการหลุดร่อนออก จึงทำให้หน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กไม่สามารถรับแรงจากน้ำหนักบรรทุกในแนวแกนได้ เหล็กเสริมจึงเกิดการโก่งเดาะ ในการโก่งเดาะเกิดจากการสะสมความเครียดในเหล็กเสริมตามยาว ซึ่งวัดจากการติดตั้งเกจวัดความเครียดในตำแหน่งตามยาวของเหล็กเสริม โดยการโก่งเดาะจะเกิดขึ้นเมื่อเกจวัดความเครียดวัดค่าได้ค่าความเครียดอัดสูงมาก แต่แตกต่างกับกรณีที่มีการต่อทาบเหล็กเสริมตามยาวซึ่งอาจจะเกิดโก่งเดาะก่อนกำหนดการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว

3.10.4 การสูญเสียความต้านทานด้านข้าง

การสูญเสียความต้านทานด้านข้างจะกำหนดโดยลดลง 20% ของแรงกระทำด้านข้างสูงสุด โดยการเสียรูปและความแข็งแรงจะถูกบันทึกไว้ในขั้นตอนนี้ก่อนเป็นขั้นต้น

3.10.5 การวิบัติด้วยน้ำหนักบรรทุกจากแรงโน้มถ่วง

ในระหว่างการทดสอบนั้นเสาคอนกรีตมีการรับน้ำหนักบรรทุกในแนวแกน โดยทำการทดสอบไปจนถึงจุดที่เสาคอนกรีตไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกในแนวแกนได้ จะพิจารณาให้เป็นตำแหน่งที่เกิดการวิบัติด้วยน้ำหนักบรรทุกจากแรงโน้มถ่วง เมื่อโมเมนต์ดัดที่ได้เกิดจากผลของตำแหน่งแรงอัดในแนวแกน (P- Δ effect) มากกว่าโมเมนต์ข้างด้านข้างที่เสารับได้ ซึ่งเสาจะไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกในแนวแกนได้ โดยการตรวจสอบว่าเสาไม่สามารถทำการรับแรงได้อีกให้ผลักเสาไปทางทิศบวกและดึงกลับมาทางทิศลบ ซึ่งเสาไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ ข้อนี้เป็นตัวบ่งชี้และถือว่าตำแหน่งนี้ การวิบัติด้วยน้ำหนักบรรทุกจากแรงโน้มถ่วง และบันทึกข้อมูลเมื่อสิ้นสุดการทดสอบ