

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ปีที่ 2
ทุนอุดหนุนการวิจัย งบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2555

พฤติกรรมคาน-เสา-แผ่นพื้นสำเร็จรูปคอนกรีตเสริมเหล็กของเสาต้นริมที่ก่อสร้างในประเทศไทย
ภายใต้แรงแผ่นดินไหว

Behavior of Reinforced Concrete Beam-Column-Plank Slabs of Exterior Columns
Constructed in Thailand under Earthquake Load

๕ BK0170๕10

- 7 ก.ค. 2558

354964

เล่มบริการ

โดย

= 8 ก.ค. 2558

ผศ. ดร. อานนท์ วงษ์แก้ว
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

บทคัดย่อ

งานศึกษานี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมและศักยภาพของข้อต่อคาน-เสา-พื้นสำเร็จรูปของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ก่อสร้างโดยใช้มาตรฐานการก่อสร้างของประเทศไทยในการรับแรงแผ่นดินไหวด้วยการทดสอบตัวอย่างขนาดใหญ่ในห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา ตัวอย่างทดสอบที่ 1 ถูกออกแบบและมีรายละเอียดการเสริมเหล็กเพื่อรับแรงบรรทุกในแนวตั้งเท่านั้น ส่วนตัวอย่างทดสอบที่ 2 ถูกออกแบบเหมือนตัวอย่างที่ 1 ทุกประการยกเว้นมีรายละเอียดการเสริมเหล็กตามมาตรฐานการเสริมเหล็กสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อรับแรงแผ่นดินไหวตาม มยผ.1301-50 (มยผ.1302-52) ทั้งนี้ตัวอย่างทดสอบทั้งสองตัวอย่างก่อสร้างด้วยช่างที่ชำนาญงานก่อสร้างอาคารคอนกรีตในประเทศไทย ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเครื่องทดสอบ UTM สามารถประยุกต์ใช้ในการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตขนาดใหญ่นอกแกนเครื่องให้ผลการทดสอบดีมากเมื่อเทียบกับผลการทดสอบจากนักวิจัยท่านอื่นๆ ตัวอย่างที่ 2 รับแรงกระทำสูงสุดที่ปลายคานได้น้อยกว่าตัวอย่างที่ 1 เพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามตัวอย่างที่ 2 สามารถหมุนได้สูงสุดเท่ากับ 5% radian และตัวอย่างที่ 1 สามารถหมุนได้สูงสุดเท่ากับ 4% radian เพิ่มขึ้นคิดเป็น 25% นอกจากนี้ตัวอย่างที่ 2 สามารถสลายพลังงานได้มากกว่าตัวอย่างที่ 1 เท่ากับ 21% การเสริมเหล็กตามมาตรฐานการเสริมเหล็กสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อรับแรงแผ่นดินไหว มยผ.1301-50 (มยผ.1302-52) ไม่ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงของตัวอย่างคาน-เสาแผ่นพื้นสำเร็จรูป ค.ส.ล. แต่ช่วยเพิ่มความเหนียวและความสามารถในการสลายพลังงานจากแรงแผ่นดินไหว อย่างไรก็ตามการเพิ่มเหล็กปลอกในเสาและคานที่ตรงบริเวณด้านในข้อต่อและบริเวณรอบๆข้อต่อ สามารถลดการเกิดรอยแตกขนาดใหญ่ในคานหลักและเสา และช่วยลดเกิดรอยแตกด้านบนแผ่นพื้นสำเร็จรูปคอนกรีตเสริมเหล็ก

คำสำคัญ: ตัวอย่างทดสอบขนาดใหญ่, คาน-เสา-พื้นสำเร็จรูปคอนกรีตเสริมเหล็ก, แรงแผ่นดินไหว, มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ.1301-50 (มยผ.1302-52)

Abstract

This study is to evaluate the potential of a reinforced concrete beam-column-precast slab structure under fictitious earthquake loading through experiments of nearly full-scale specimens in the laboratory at Burapha University. The test program comprises of two specimens of the beam-column-precast slab: sp1 and sp2. Both of specimens are designed in accordance with ACI318-99 for a reinforced concrete structure under service of a gravity load. As a matter of fact, these specimens are constructed by highly skilled reinforced concrete workers. The reinforcing details as usually practice in Thailand are employed. Moreover, the reinforcing details of Thai standard for reinforced concrete buildings resistance earthquake 1301-50(1302-52) are implemented into parts of the beam-column connection of sp2. More stirrups are added to a beam and column part near the connection, and inside the connection as well. The results from the tests show that even though sp2 can resist insignificantly lower than sp1, sp2 can rotate as much as 5% radian comparing with 4% radian of sp1 as of 25% increment. In addition, sp2 can participate in energy absorption more than sp1 approximately 21%. Therefore, it can be concluded that the reinforcing details as described by Thai standard for reinforced concrete buildings resistance earthquake 1301-50(1302-52) can not increase strength of the reinforced concrete beam-column-precast slab, sp2. However, ductility and energy absorption of sp2 reasonably increases. Crack patterns of sp1 and sp2 are quite different as well. Sp1 has major cracks concentrating in the connection area especially at the main beam and column. On the other hand, cracks of sp2 rather occur in both sides of those minor beams. The cracks on the surface of slab of sp1 are also obviously noticed than sp2.

Keywords: Full-scale test specimen, Reinforced concrete beam-column-precast slab, Earthquake load, Thai standard for reinforced concrete buildings resistance earthquake 1301-50(1302-52)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัย เรื่องพฤติกรรมคาน-เสา-แผ่นพื้นสำเร็จรูปคอนกรีตเสริมเหล็กของเสาต้นริมที่ก่อสร้างในประเทศไทยภายใต้แรงแผ่นดินไหว ได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2555 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ. ที่นี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	5
1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 บทนำ	6
2.2 ข้อต่อคาน-เสา (Beam-Column Joint)	9
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
บทที่ 3 การสร้างตัวอย่างทดสอบ เครื่องมือ และวิธีการดำเนินการทดสอบ	
3.1 ขนาด และรายละเอียดตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ	22
3.2 รายละเอียดเหล็กเสริมของตัวอย่างทดสอบที่ 1 (มาตรฐานการออกแบบทั่วไป)	24

3.3	รายละเอียดเหล็กเสริมของตัวอย่างทดสอบที่ 2 (มาตรฐานประกอบ	
	การออกแบบอาคารเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว: มยผ.1301-50(มยผ.1302-52))	26
3.4	คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสร้างตัวอย่างทดสอบ	29
3.5	วิธีดำเนินการทดสอบ	31
บทที่ 4 ผลการทดสอบและการอภิปรายผล		
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคาน (Load) กับ %Drift ratio	50
4.2	การสลายพลังงานสะสม (Cumulative energy dissipation)	54
4.3	ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นและสังเกตได้จากการทดสอบตัวอย่างข้อต่อที่ 1 (ข้อต่อที่มีรายละเอียดการเสริมเหล็กเพื่อรับแรงในแนวตั้งและ ใช้ในงานก่อสร้างอาคาร ค.ส.ล.ทั่วไป)	56
4.4	ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นและสังเกตได้จากการทดสอบตัวอย่างข้อต่อที่ 2 (ข้อต่อที่มีรายละเอียดการเสริมเหล็กเพื่อรับแรงแผ่นดินไหวตาม มยผ. 1301-50 (มยผ. 1302-52))	67
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา		
	เอกสารอ้างอิง	81

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 3.1	กำลังของคอนกรีตและขนาดหน้าตัดของตัวอย่างที่ 1 และ 2	29
ตารางที่ 3.2	ชั้นคุณภาพและกำลังเหล็กเสริมมาตรฐานในประเทศไทย	30
ตารางที่ 3.3	ขนาดแผ่นพื้นสำเร็จรูปที่ใช้ในประเทศไทย	30
ตารางที่ 3.4	การติดตั้งอุปกรณ์วัดการยืด-หดตัวอิเล็กทรอนิกส์ (Strain gauges) ของตัวอย่างทดสอบตัวที่ 1 และ 2	43
ตารางที่ 3.5	ความยาวของคานและขนาดหน้าตัดเสาของตัวอย่างชิ้นที่ 1 และ 2	49
ตารางที่ 3.6	ระยะการเปลี่ยนตำแหน่งของปลายของคานที่ใช้ในการทดสอบ	49

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 เหตุการณ์แผ่นดินไหวในประเทศไทยเมื่อ 5 พฤษภาคม 2557	3
รูปที่ 1.2 เหตุการณ์แผ่นดินไหวในประเทศไทยเมื่อ 5 พฤษภาคม 2557	4
รูปที่ 2.1 การเสียรูป แรงเฉือน และโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในอาคาร ค.ส.ล. เมื่อรับแรงแนวตั้ง	8
รูปที่ 2.2 การเสียรูป แรงเฉือน และโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในอาคาร ค.ส.ล.เมื่อรับแรงแผ่นดินไหว	9
รูปที่ 2.3 ประเภทของข้อต่อคาน-เสา	10
รูปที่ 2.4 พฤติกรรมของข้อต่อคาน-เสา เมื่อรับแรงแผ่นดินไหว	11
รูปที่ 2.5 แบบจำลองการต้านทานแรงเฉือนในจุดต่อของ T. Paulay [16]	12
รูปที่ 2.6 การวิบัติของข้อต่อ [8]	14
รูปที่ 2.7 แสดงรายละเอียดการเสริมเหล็กในเสา และ คาน คสล. ตามมาตรฐานข้อกำหนด ACI 318-99	19
รูปที่ 2.8 รายละเอียดของการเสริมเหล็กทั่วไป ที่ก่อสร้างในประเทศไทย [7]	20
รูปที่ 2.9 รายละเอียดการก่อสร้างที่ใช้ในประเทศไทย	20
รูปที่ 2.10 การใช้แผ่นพื้นสำเร็จท้องเรียบ (Plank Slab) ในงานก่อสร้างอาคารในประเทศไทย	21
รูปที่ 3.1 ลักษณะทั่วไปของตัวอย่างคาน-เสา-พื้นสำเร็จรูป ค.ส.ล. ที่ใช้ในการทดสอบ	22
รูปที่ 3.2 รูปด้านบนและขนาดตัวอย่างทดสอบหน่วยเป็นมิลลิเมตร	23
รูปที่ 3.3 รูปด้านข้างและขนาดตัวอย่างทดสอบหน่วยเป็นมิลลิเมตร	23
รูปที่ 3.4 รายละเอียดการเสริมเหล็กของตัวอย่างที่ 1 แสดงภาพด้านข้าง	24

รูปที่ 3.5	รายละเอียดการเสริมเหล็กของตัวอย่างที่ 1 แสดงภาพด้านหลัง	25
รูปที่ 3.6	รายละเอียดการเสริมเหล็กของตัวอย่างที่ 2 แสดงภาพด้านข้าง	26
รูปที่ 3.7	รายละเอียดการเสริมเหล็กของตัวอย่างที่ 2 แสดงภาพด้านหลัง	28
รูปที่ 3.8	รายละเอียดของพื้นสำเร็จรูปที่ใช้ในทั้ง 2 ตัวอย่าง	29
รูปที่ 3.9(ก)	รายละเอียดเหล็กเสริมด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ	31
รูปที่ 3.9(ข)	รายละเอียดเหล็กเสริมด้านหน้าของตัวอย่างทดสอบ	32
รูปที่ 3.10	การเข้าแบบของตัวอย่างทดสอบ (ด้านข้าง)	32
รูปที่ 3.11	การประกอบแบบของตัวอย่างทดสอบ (ด้านหน้า)	33
รูปที่ 3.12	การเทคอนกรีต	33
รูปที่ 3.13	การจี้คอนกรีต	34
รูปที่ 3.14	การยกติดตั้งตัวอย่างทดสอบ	34
รูปที่ 3.15	การติดตั้งตัวอย่างชิ้นงานและยึดเสากับจุดรองรับ	35
รูปที่ 3.16	การติดตั้งพื้นสำเร็จรูป	35
รูปที่ 3.17	การติดตั้งเหล็กตะแกรง (Wire mesh)	36
รูปที่ 3.18	การประกอบแบบเพื่อเทคอนกรีตทับหน้า	36
รูปที่ 3.19	เหล็กตะแกรงที่ติดตั้งแล้วเสร็จ (ด้านบนของตัวอย่างชิ้นงาน)	37
รูปที่ 3.20	การเทคอนกรีตทับหน้า	37
รูปที่ 3.21	การเทคอนกรีตทับหน้าแล้วเสร็จ (ด้านบนของตัวอย่างชิ้นงาน)	38
รูปที่ 3.22	การบ่มคอนกรีตทับหน้า	38
รูปที่ 3.23	การใช้เหล็กฉากยึดประกบท้องและหลังพื้น	39

รูปที่ 3.24	การติดตั้งชิ้นงานและเครื่องมือทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบ	40
รูปที่ 3.25	การวิเคราะห์โครงสร้างหาแรงภายในของคาน เสา และข้อต่อ	41
รูปที่ 3.26	การติดตั้งและการเก็บสายไฟของ Strain gauges	42
รูปที่ 3.27	การติดตั้งอุปกรณ์วัดการยืด-หดตัวเชิงเส้น (LVDT) อิเล็กทรอนิกส์ และ Pi Gauge	44
รูปที่ 3.28	การติดตั้ง LVDT ที่ได้พื้นและปลายคาน	45
รูปที่ 3.29	การติดตั้ง LVDT ที่ได้คาน	45
รูปที่ 3.30	การติดตั้ง LVDT ที่เหนือพื้น	46
รูปที่ 3.31	การติดตั้ง LVDT ที่ด้านหลังของข้อต่อ	46
รูปที่ 3.32	การติดตั้ง Pi Gauge	47
รูปที่ 3.33	ลำดับการใส่ระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานกับตัวอย่างชิ้นงานที่ 1 และ 2	48
รูปที่ 4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคาน (Load) กับ % Drift ratio ของตัวอย่างชิ้นงานที่ 2	51
รูปที่ 4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคาน (Load) กับ % Drift ratio ของตัวอย่างชิ้นงานที่ 2	51
รูปที่ 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคาน (Load) และ %Drift ratio ของตัวอย่างชิ้นงานที่ 1 ในรอบการเคลื่อนที่ 0.35% Drift ratio	52
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคาน (Load) และ %Drift ratio ของตัวอย่างชิ้นงานที่ 1 ในรอบการเคลื่อนที่ 2.0% Drift ratio	52

รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำสูงสุด (Maximum Load) และ %Drift ratio ของตัวอย่างชิ้นงานที่ 1 และ 2	53
รูปที่ 4.6	การหาพื้นที่ใต้กราฟโดยประมาณจากกฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Rule)	54
รูปที่ 4.7	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Cumulative energy dissipation กับ %Drift Ratio ของตัวอย่างชิ้นงานที่ 1 และ 2	55

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ถ้าจะกล่าวถึงแรงในแนวนอนที่กระทำต่อโครงสร้างอย่างรุนแรง ปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เห็นได้อย่างชัดเจนก็คือแผ่นดินไหว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่สามารถสร้างความสูญเสียอย่างใหญ่หลวงกับโครงสร้างอาคาร บ้านพัก ตึกสูง สาธารณูปโภค และทรัพย์สินอื่น รวมถึงการสูญเสียชีวิตมนุษย์ด้วย ถึงแม้ว่าประเทศไทยจะไม่อยู่ในกลุ่มประเทศที่เสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหว แต่มีได้หมายความว่าประเทศไทยจะสามารถรอดพ้นจากความเสียหายเมื่อมีการเกิดแผ่นดินไหวได้ เพราะประเทศเพื่อนบ้านคือ พม่า และทางตอนใต้ของจีนนั้น ตั้งอยู่บนรอยเลื่อนของเปลือกโลกที่สามารถเกิดแผ่นดินไหวรุนแรงได้ด้วยเหตุนี้เมื่อเกิดแผ่นดินไหวในประเทศพม่าถึงแม้ว่าจะอยู่ในระยะที่ห่างออกไปหลายร้อยกิโลเมตร ก็จะสามารถส่งผลกระทบต่อสิ่งก่อสร้าง อาคาร ตึกสูง ในประเทศไทย ยกตัวอย่างเช่น การแตกร้าวของผนังอาคารสูงที่เกิดขึ้นเมื่อประมาณกลางเดือนกันยายน พ.ศ. 2546 ซึ่งมีจุดศูนย์กลางของแผ่นดินไหวเกิดขึ้นที่ประเทศพม่า ซึ่งห่างจากกรุงเทพฯ เป็นระยะทางกว่า 850 กิโลเมตร จากบันทึกข้อมูลการเกิด

แผ่นดินไหวครั้งใหญ่ในประเทศพม่าเมื่อปี พ.ศ. 2473 ที่เมืองเชียงกาน ซึ่งอยู่ห่างจากกรุงเทพฯ ประมาณ 500 กิโลเมตร และปี พ.ศ. 2510 ในทะเลอันดามันทางตอนใต้ของประเทศพม่า ซึ่งอยู่ห่างจากกรุงเทพฯ ประมาณ 400 กิโลเมตร ซึ่งทั้งสองครั้งเป็นแผ่นดินไหวขนาดรุนแรง (มากกว่า 7 ริกเตอร์สเกล) ดังนั้นถ้าเกิดขึ้นอีกจะส่งผลเสียหายอย่างใหญ่หลวงกับอาคารบ้านเรือน ตึกสูง สาธารณูปโภคในประเทศไทยได้ ที่กล่าวเช่นนี้ เพราะมีตัวอย่างให้เห็นได้อย่างชัดเจน คือการเกิดแผ่นดินไหวครั้งใหญ่ที่ประเทศ Mexico เมื่อปี พ.ศ. 2528 โดยจุดศูนย์กลางของแผ่นดินไหวอยู่ห่างจากเมือง Mexico (เป็นเมืองหลวงและเป็นเมืองที่ใหญ่ที่มีประชากรอาศัยอยู่หนาแน่นเหมือนกรุงเทพฯ) ถึง 350 กิโลเมตร แต่ส่งผลเสียหายอย่างรุนแรงต่ออาคาร ตึกสูง สะพาน เป็นต้น สิ่งก่อสร้างเหล่านี้เสียหายรุนแรงจนถึงขั้นพังทลาย ต้องทำลายทิ้งและสร้างใหม่ทั้งหมด ทั้งนี้ยังไม่รวมถึงการสูญเสียชีวิตประชากรเป็นจำนวนมากที่อาศัยอยู่ในเมืองนั้น

ระบบโครงสร้างอาคารซึ่งแต่ละชั้นประกอบด้วย คาน-เสา-แผ่นพื้นสำเร็จรูป โดยพื้นนั้นเป็นแผ่นพื้นสำเร็จที่หล่อสำเร็จรูปจากโรงงาน เป็นโครงสร้างที่นิยมก่อสร้างในประเทศไทยเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาคารประเภทตึกแถว บ้านพัก อาคารพาณิชย์ และอาคารขนาดเล็กถึงขนาดปานกลาง

ทั้งนี้เนื่องจาก ความรวดเร็วในการก่อสร้าง ราคาค่าก่อสร้าง และความชำนาญของช่างก่อสร้างในระดับ ทั่วๆ ไปสามารถก่อสร้างได้ ไม่ต้องอาศัยอุปกรณ์พิเศษ หรือผู้เชี่ยวชาญการพิเศษในการก่อสร้าง ส่วนการ ออกแบบอาคารเหล่านี้ วิศวกรจะออกแบบโดยใช้แรงในแนวตั้ง หรือน้ำหนักบรรทุกใช้งานของอาคารเป็นหลักในการออกแบบหน้าตัด คาน เสา และใช้ขนาดแผ่นพื้นสำเร็จที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไป ซึ่งจะระบุ น้ำหนักบรรทุกต่อพื้นที่หนึ่งตารางเมตร ไว้ใช้เป็นพื้นของอาคารแสดงในรูปที่ 3.3 เมื่อพิจารณาแล้วจะ พบว่า อาคารเหล่านี้ส่วนใหญ่ไม่ได้ออกแบบมาเพื่อรับแรงแผ่นดินไหว ทั้งนี้ปัจจุบันประเทศไทยได้ออก กฎหมายที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอาคารเพื่อรับแรงจากแผ่นดินไหวคือ “กฎกระทรวงกำหนดการรับ น้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคารและพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือน ของแผ่นดินไหว พ.ศ.2550” [4] ซึ่งมีพื้นฐานมาจากมาตรฐาน UBC-1985 ตามความในพระราชบัญญัติ ความคุ้มครองอาคาร พ.ศ.2522 มีผลบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 30 พฤศจิกายน 2550 ที่ผ่านมา ได้กำหนดพื้นที่ ควบคุมเป็น 3 บริเวณได้แก่

“บริเวณเฝ้าระวัง” เป็นพื้นที่หรือบริเวณที่อาจได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหว ได้แก่ จังหวัด กระบี่ ชุมพร พังงา ภูเก็ต ระนอง สงขลา และสุราษฎร์ธานี รวม 7 จังหวัด

“บริเวณที่ 1” เป็นพื้นที่หรือบริเวณที่เป็นดินอ่อนมากที่ได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหวระยะไกล ได้แก่ กรุงเทพมหานคร นนทบุรี ปทุมธานี สมุทรปราการ และสมุทรสาคร รวม 5 จังหวัด

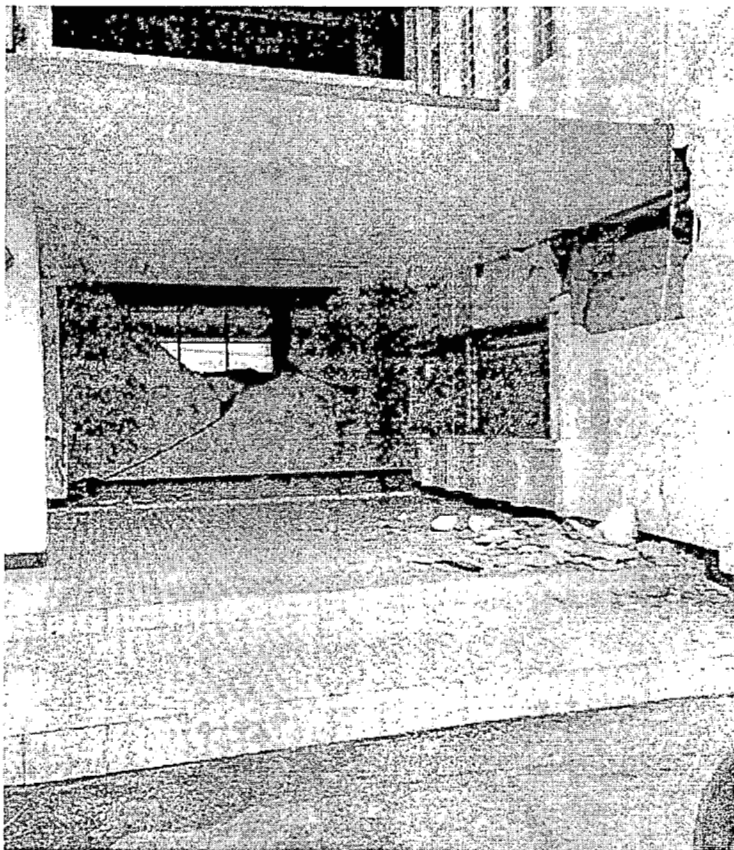
“บริเวณที่ 2” เป็นพื้นที่หรือบริเวณที่อยู่ใกล้รอยเลื่อนที่อาจได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหว ได้แก่ กาญจนบุรี เชียงราย เชียงใหม่ ตาก น่าน พะเยาแพร่ แม่ฮ่องสอน ลำปาง และ ลำพูน รวม 10 จังหวัด

นอกจากนั้นกรมโยธาธิการและผังเมืองได้จัดทำมาตรฐานประกอบการออกแบบอาคารเพื่อ ด้านต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวหรือ “มยผ.1301-50(มยผ. 1302-52)” ขึ้น เพื่อเพิ่มเติม รายละเอียดการคำนวณออกแบบอาคาร และรายละเอียดในการเสริมเหล็ก ซึ่งกฎกระทรวงและมาตรฐาน ได้มีการเชื่อมโยงกัน โดยกฎกระทรวงได้ระบุให้การจัดระบบโครงสร้างอาคารจะต้องมีความเหนียวอย่าง น้อยเทียบเท่าความเหนียวจำกัด (Limit Ductility) ตามที่กำหนดในมาตรฐาน

กฎกระทรวงดังกล่าวได้บังคับใช้กับอาคารที่มีความสูงมากกว่า 15 เมตรขึ้นไป และอาคาร เช่น สถานราชการ โรงเรียน โรงพยาบาล หรืออาคารที่มีความสำคัญเท่านั้น อย่างไรก็ตาม บ้านพักอาศัย อาคารพาณิชย์ที่มีความสูงน้อยกว่า 15 เมตร จะไม่เกิดความเสียหายจากแผ่นดินไหว จึงจำเป็นต้องศึกษา ถึงความพร้อมและศักยภาพขององค์อาคาร ค.ส.ล. เหล่านี้ ว่ามีความสามารถรับแรงแผ่นดินไหวได้ใน ระดับไหน ถ้ามีแผ่นดินไหวเกิดขึ้นจริง องค์อาคารจะมีความเสียหายระดับใด และทำอย่างไรจะให้องค์ อาคารเหล่านี้เตรียมพร้อมในการรับแผ่นดินไหวที่คาดการณ์ว่าจะเกิดขึ้นกับประเทศไทยในอนาคต

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะประเมินความสามารถและศึกษาพฤติกรรมของคาน-เสา-แผ่นพื้น สำเร็จรูป คอนกรีตเสริมเหล็ก (ค.ส.ล.) ของเสาต้นริม ที่มีรายละเอียดการเสริมเหล็ก และขนาดตามงาน

ก่อสร้างจริงในประเทศไทย และที่มีรายละเอียดการเสริมเหล็กตาม “มยผ. 1301-50 (มยผ. 1302-52)” ในการรับแรงแผ่นดินไหวโดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้จะทำการพัฒนาแบบจำลอง (Analytical Model) สำหรับวิเคราะห์โครงสร้างคาน-เสา-แผ่นพื้นสำเร็จรูป ค.ส.ล. ของเสาดันริม เพื่อเตรียมความพร้อมและปรับปรุงพฤติกรรมโครงสร้างนี้ เพื่อรองรับเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต ในส่วนผลการศึกษาในส่วนแรกจะมุ่งเน้นที่การศึกษาพฤติกรรมของคาน-เสา คอนกรีตเสริมเหล็กของเสาดันริมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 1.1 เหตุการณ์แผ่นดินไหวในประเทศไทยเมื่อ 5 พฤษภาคม 2557



รูปที่ 1.2 เหตุการณ์แผ่นดินไหวในประเทศไทยเมื่อ 5 พฤษภาคม 2557

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อรวบรวมข้อมูลวิธีการออกแบบ และรายละเอียดการก่อสร้างโครงสร้างคาน-เสา-แผ่นพื้นสำเร็จรูป ค.ส.ล. ของเสาต้นริม ที่ก่อสร้างในประเทศไทย
- 2) สร้างตัวอย่างชิ้นงานทดสอบคาน-เสา-แผ่นพื้นสำเร็จรูป ค.ส.ล. ของเสาต้นริม ที่มีรายละเอียดการก่อสร้างเหมือนกับข้อมูลการก่อสร้างที่ได้รวบรวมมา
- 3) ทำการทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ และวิเคราะห์ผลการทดสอบของตัวอย่างในข้อ 2 โดยจะประเมินจากผลตอบสนอง ลักษณะการพัง ความยืดหยุ่น และพลังงานแผ่นดินไหวที่ตัวอย่างทดสอบสามารถต้านทานได้
- 4) สร้างตัวอย่างชิ้นงานทดสอบคาน-เสา-แผ่นพื้นสำเร็จรูป ค.ส.ล. ของเสาต้นริม ที่เหมือนตัวอย่างในข้อ 2 ทุกประการ แต่เปลี่ยนให้มีรายละเอียดการเสริมเหล็กและการก่อสร้างตามมาตรฐาน “มยผ. 1301-50 (มยผ. 1302-52)”

- 5) ทำการทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ และวิเคราะห์ผลการทดสอบของตัวอย่างในข้อ 4 โดยจะประเมินจากผลตอบสนอง ลักษณะการพัง ความยืดหยุ่น และพลังงานแผ่นดินไหวที่ตัวอย่างทดสอบสามารถต้านทานได้
- 6) เปรียบเทียบผลการทดสอบตัวอย่างคาน-เสา-แผ่นพื้นสำเร็จรูป ค.ส.ล. ของเสาต้นริมที่ได้จากข้อ 3 และ 5

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1) เป็นการพัฒนาเครื่องมือ Universal Testing Machine (UTM) ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโครงสร้าง มหาวิทยาลัยบูรพา ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น สามารถทดสอบชิ้นงานขนาดใหญ่ นอกแกนเครื่อง UTM ได้ ซึ่งจะเป็นแนวทางในการทำงานวิจัยขั้นสูงต่อไป
- 2) ทำให้ทราบถึงพฤติกรรม คาน-เสา-พื้นสำเร็จรูปคอนกรีตเสริมเหล็กที่ก่อสร้างในประเทศไทย
- 3) ทำให้ประเมินความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวของคาน-เสา-พื้นสำเร็จรูปคอนกรีตเสริมเหล็กที่ก่อสร้างในประเทศไทยที่ออกแบบเพื่อรับแรงในแนวตั้งเท่านั้น และที่มีรายละเอียดการเสริมเหล็กเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวตามมาตรฐาน “มยผ. 1301-50 (มยผ. 1302-52)”

1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ มุ่งเน้นที่การประเมินพฤติกรรมตอบสนองต่อแผ่นดินไหว และความสามารถต้านทานแผ่นดินไหวของโครงสร้าง คาน-เสา-พื้นสำเร็จรูป ค.ส.ล. ของเสาต้นริม ที่ก่อสร้างในประเทศไทย โดยวิธีการทดสอบตัวอย่างขนาดเท่าของจริงในห้องปฏิบัติการ

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

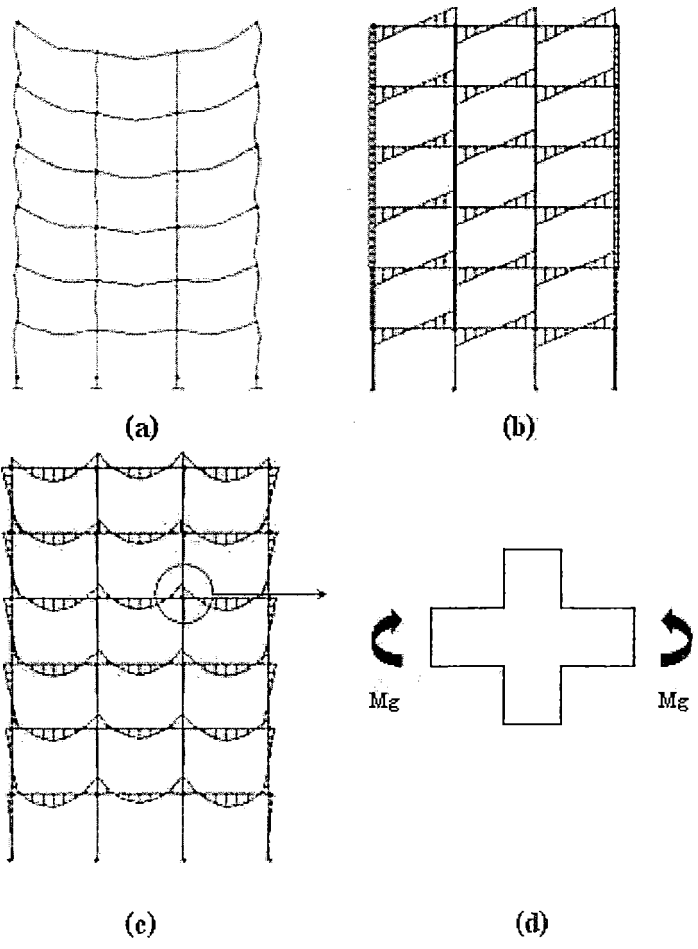
หลักการออกแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่เป็นที่ยอมรับกันอย่างสากลคือ ภายใต้อาคารขนาดเล็จะต้องไม่เกิดความเสียหายแก่ส่วนหนึ่งส่วนใดของตัวอาคาร ภายใต้อาคารขนาดปานกลางจะต้องไม่เกิดความเสียหายแก่ส่วนของโครงสร้างที่รับแรง และภายใต้อาคารขนาดใหญ่ อาคารอาจเกิดความเสียหายแก่ส่วนของโครงสร้างรับแรงได้ แต่ต้องไม่พังถล่มลงมา เพื่อความปลอดภัยแก่ชีวิตผู้อยู่อาศัย กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ โครงสร้างจะต้องถูกออกแบบให้มีความเหนียวดีพอ เพื่อให้อาคารนั้นสามารถทนต่อการสั่นไหว จนถึงขั้นเกิดการแตกร้าว และเกิดการครากขององค์อาคารได้พอสมควร โดยยังคงกำลังส่วนใหญ่ไว้ได้ (80% ของกำลังสูงสุด) ดังนั้น เมื่ออาคาร ค.ส.ล. ที่ถูกออกแบบรายละเอียดให้มีความเหนียว (มีรายละเอียดการเสริมเหล็กที่ดีพอ) จะสามารถดูดซับพลังงานจากการสั่นไหวเมื่อเกิดแผ่นดินไหวได้ดี โดยที่รักษากำลังส่วนใหญ่ของอาคารไว้ได้ และไม่พังทลายในขณะเกิดแผ่นดินไหว ในทางตรงกันข้าม ถ้าองค์อาคาร ค.ส.ล. ส่วนหนึ่งส่วนใดเช่น ข้อต่อ ไม่มีความเหนียวพอหรือไม่แข็งแรงพอ ก็จะไม่สามารถรับแรงแผ่นดินไหว และแรงแนวตั้งต่อไปได้ และเกิดการวิบัติเสียก่อน และจะทำให้องค์อาคารรวมเกิดการวิบัติตามมาอย่างรวดเร็ว

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก (ค.ส.ล.) ในประเทศไทยนั้น ส่วนใหญ่จะถูกออกแบบโดยคำนึงถึงแรงในแนวตั้ง (น้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจร) รวมกับแรงลมเป็นหลัก โดยวิศวกรจะคำนวณองค์อาคารแต่ละส่วนแยกกันเช่น พื้น คาน เสา และ ฐานราก วิศวกรทั่วไปจะออกแบบให้องค์อาคารมีกำลังเพียงพอับแรงดังกล่าว โดยใช้ความรู้พื้นฐานต่างๆ และมักไม่คำนึงถึงความสามารถในการเสีรูปขององค์อาคารย่อย และ/หรือองค์อาคารรวม การให้รายละเอียดของเหล็กเสริมในองค์อาคาร ค.ส.ล. เหล่านี้ ก็จะมุ่งเน้นไปที่ความสามารถในการรับแรงขององค์อาคารแต่ละส่วนดังกล่าวเป็นหลัก กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ วิศวกรโดยทั่วไป จะออกแบบอาคาร ค.ส.ล. ให้มีพฤติกรรมอยู่ในสภาวะอิลาสติก และควบคุมการเสีรูปขององค์อาคารให้อยู่ภายใต้ข้อกำหนด เช่น คาน ควรมีระยะแอนไม่เกินความยาวคาน ($L/360$) เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกจรกระทำ เป็นต้น

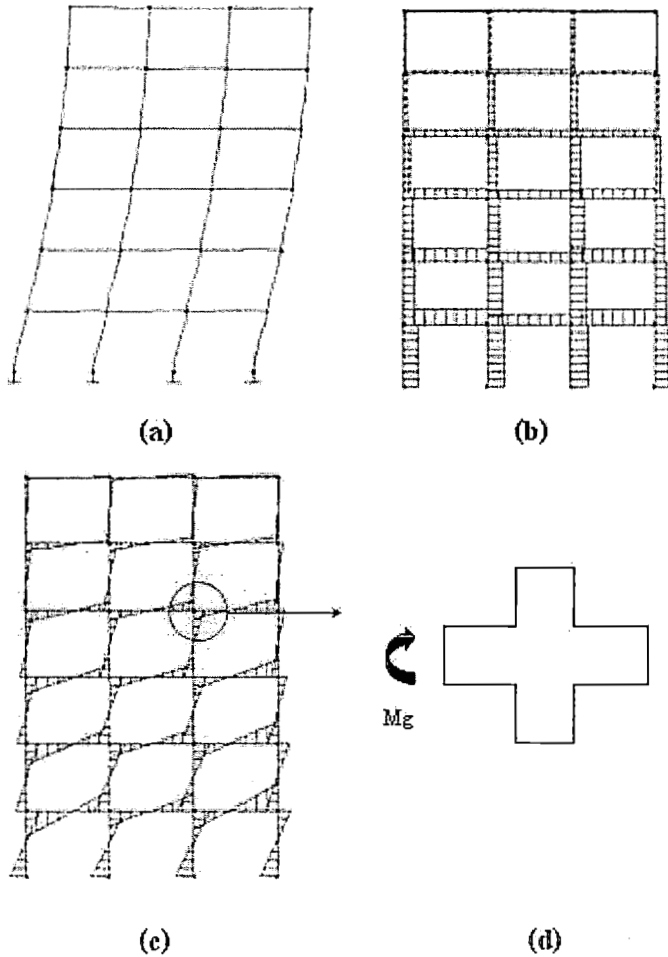
อย่างไรก็ตาม แรงแผ่นดินไหวมีผลกระทบต่อโครงสร้างในลักษณะที่แตกต่างจากแรงอื่นๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น กล่าวคือ แรงที่เกิดขึ้นในองค์อาคารจากแผ่นดินไหว เป็นผลจากการที่ฐานของอาคารถูกทำให้เคลื่อนตัวออกไป (โดยพื้นดิน) แต่มวลเฉื่อย (Inertia) ของอาคารทำให้ส่วนต่างๆ เช่น เสา คาน พื้น โครงหลังคาของอาคาร ไม่เคลื่อนตัวไปพร้อมกับฐานทันที ยังผลทำให้เกิดการเสีรูปในองค์อาคารต่างๆ เช่น เสา คาน ข้อต่อคาน-เสา เป็นต้น ดังนั้นจะเห็นว่า หลักการออกแบบอาคาร ค.ส.ล. ที่วิศวกรใช้อยู่

โดยทั่วไปในปัจจุบันนั้น มีความแตกต่างจากการออกแบบอาคาร ค.ส.ล. รับแรงแผ่นดินไหวเป็นอย่างมาก หากวิศวกรคำนวณแรง และออกแบบตามหลักวิชาการเดิมที่ใช้กันอยู่เพียงอย่างเดียว โดยไม่มีความเข้าใจ พฤติกรรมของอาคารโดยรวม และไม่ทำการออกแบบรายละเอียด (detailing) ให้เหมาะสม ให้มีความ เหนียวเพียงพอแล้ว อาคาร ค.ส.ล. ที่ออกแบบไว้ก็จะไม่สามารถทนต่อการโยกไปมาเนื่องจากแผ่นดินไหว ได้

เมื่อมีแรงแนวตั้งกระทำต่ออาคารค.ส.ล. อาคารจะมีการเปลี่ยนรูป โดยมีแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด ดังแสดงในรูปที่ 2.1 จากรูปจะเห็นว่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในคานที่บริเวณเหนือเสา เป็นโมเมนต์ลบ และ โมเมนต์ที่เกิดขึ้นที่บริเวณกลางช่วงคานเป็นโมเมนต์บวก ส่วนโมเมนต์ในเสามีค่าค่อนข้างน้อย โดยที่เสา ต้นใน มีโมเมนต์กระทำน้อยกว่าเสาด้านนอก ส่วนในรูปที่ 2.2 แสดงการเสีรูปร่างแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดใน อาคาร ค.ส.ล. เมื่อมีแรงแผ่นดินไหว หรือแรงแนวราบกระทำ จะเห็นได้ว่าโมเมนต์มีค่าสูงสุดที่ปลายคาน และปลายเสา โดยมีค่าน้อยที่กลางช่วงคานและเสา หรืออาจกล่าวได้ว่าจุดดัดกลับ เกิดขึ้นที่บริเวณกลาง ช่วงคานและเสา ดังนั้นเมื่อมีแรงแผ่นดินไหวมากระทำต่ออาคาร บริเวณที่จะเกิดความเสียหายก่อนจะเป็น บริเวณปลายคาน และบริเวณข้อต่อระหว่างคาน-เสา จากรูปที่ 2.2 จะเห็นว่า ข้อต่อระหว่างคาน-เสา นั้น มีความสำคัญเป็นอย่างมาก หรือจะกล่าวได้ว่าข้อต่อเป็นจุดเชื่อมต่ออ่อนแอที่สุดในอาคาร เพราะเป็นส่วน สำคัญที่จะส่งถ่ายแรงจากองค์อาคารส่วนหนึ่งไปยังองค์อาคารอีกส่วนหนึ่ง ดังนั้นข้อต่อคาน-เสานี้ ควรมีความ เหนียวเพียงพอที่จะสลายพลังงานแผ่นดินไหวได้ จากรูปที่ 2.1C จะเห็นได้ว่า ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุก แนวตั้ง ข้อต่อคาน-เสา ไม่ได้รับแรงอะไรมากมายนัก เพราะโมเมนต์ที่ปลายคานทั้งสองด้านของข้อต่อมี ทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้นจึงมีการถ่ายเท Unbalanced Moment สูงถ่ายเข้าไปที่ข้อต่อไม่มากนัก ในทางตรงกันข้าม เมื่อมีแรงแผ่นดินไหวกระทำต่ออาคาร ข้อต่อระหว่างคาน-เสา จะเป็นบริเวณที่มีการ ถ่ายถ่ายแรงสูงมาก ที่เป็นเช่นนี้เพราะโมเมนต์ที่ปลายคานทั้งสองด้านของข้อต่อมีทิศทางเดียวกัน ดังแสดงใน รูป 2.2C ดังนั้นจึงทำให้เกิด Unbalanced Moment สูงถ่ายเข้าไปที่ข้อต่อ



รูปที่ 2.1 การเสียรูป แรงเฉือน และโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในอาคาร ค.ส.ล. เมื่อรับแรงแนวตั้ง



รูปที่ 2.2 การเสียรูป แรงเฉือน และโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในอาคาร ค.ส.ล. เมื่อรับแรงแผ่นดินไหว

2.2 ข้อต่อคาน-เสา (Beam-Column Joint)

ข้อต่อคาน-เสา ในอาคาร ค.ส.ล. คือส่วนของโครงสร้างคานที่อยู่ใเสา หรือส่วนที่ตัดกันระหว่างเสา และคาน ซึ่งทำหน้าที่ถ่ายแรง และโมเมนต์จากปลายคานไปยังเสา ข้อต่อระหว่างคาน-เสา นั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ควรมีความแข็งแรง (Strength and Stiffness) และมีความเหนียว (Ductility) เพียงพอ ที่จะสลายพลังงานแผ่นดินไหวได้

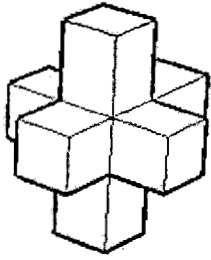
2.2.1 ประเภทของข้อต่อคาน-เสา

สำหรับข้อต่อคาน-เสา ของโครงสร้างอาคาร ค.ส.ล. นั้น ทางสถาบัน ACI Committee 352 [6] ได้จำแนกประเภทตามลักษณะรูปทรงของข้อต่อ (Joint Geometry) ดังนี้

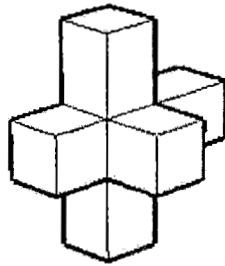
1) Interior beam-column joint โครงสร้างของคานทั้ง 4 ด้าน อยู่ในโครงสร้างของเสาในแนวตั้ง แสดงดังรูป 2.3 (a)

2.) Exterior beam-column joint โครงสร้างของคาน 1 ด้านอยู่ในโครงสร้างของเสาในแนวตั้ง และมีโครงสร้างของคานอีก 2 ด้าน ตั้งฉากกับข้อต่อ แสดงดังรูป 2.3 (b)

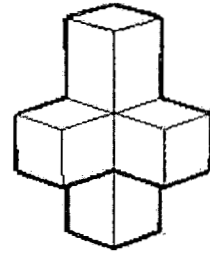
3.) Corner beam-column joint โครงสร้างของคานทั้ง 2 ด้าน อยู่ในโครงสร้างของเสาในแนวตั้ง โดยคานทั้งสอง มีทิศทางตั้งฉากกัน แสดงดังรูป 2.(c)



(a) Interior Joint



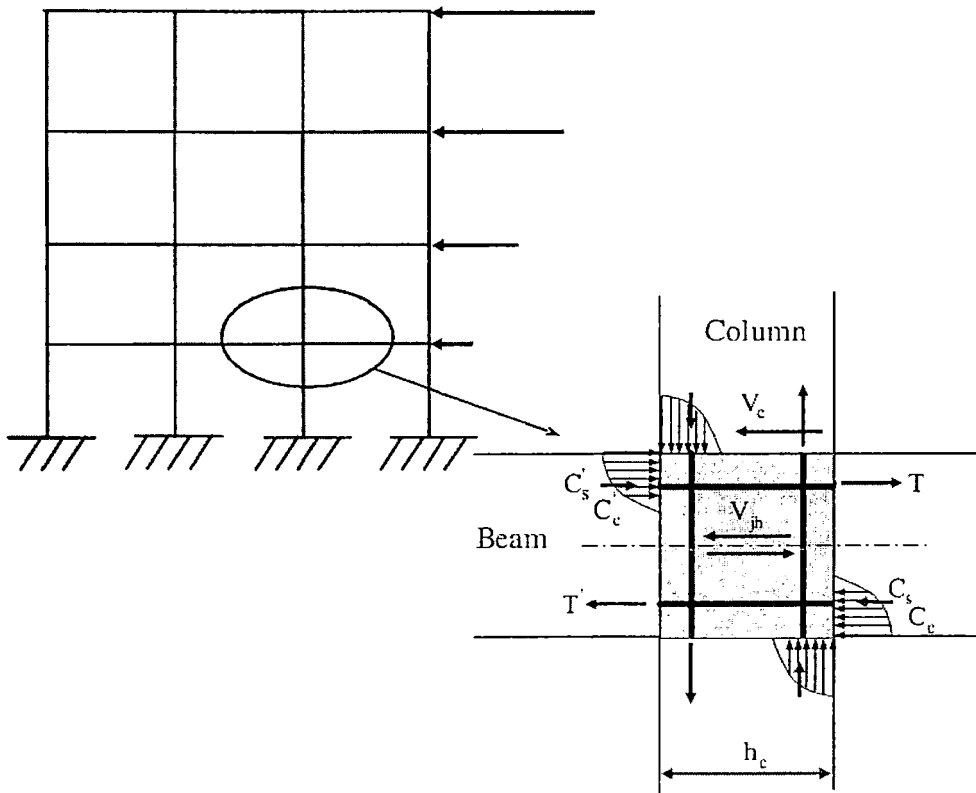
(b) Exterior Joint



(c) Corner Joint

รูปที่ 2.3 ประเภทของข้อต่อคาน-เสา

2.2.2 พฤติกรรมของข้อต่อคาน-เสา เมื่อรับแรงแผ่นดินไหว



รูปที่ 2.4 พฤติกรรมของข้อต่อคาน-เสา เมื่อรับแรงแผ่นดินไหว

เมื่อมีแรงแผ่นดินไหว หรือแรงแนวราบ กระทำต่ออาคาร ค.ส.ล. อาคาร ข้อต่อคาน-เสา จะมีการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 2.4 จากรูปสามารถหาแรงกระทำในแนวราบ ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของข้อต่อ V_{jh} หรือแรงเฉือนที่ข้อต่อ ได้ดังสมการ 2.1 และ 2.2

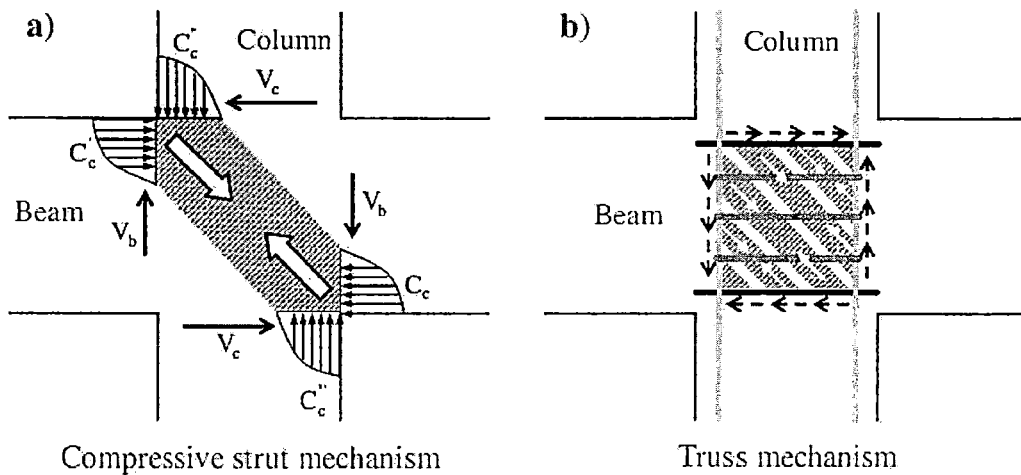
$$V_{jh} = T + C'_c + C'_s - V_c \quad (2.1)$$

$$V_{jh} = T + T' - V_c \quad (2.2)$$

เมื่อ T คือแรงดึงในเหล็กบน , T' คือแรงดึงในเหล็กล่าง, V_c คือแรงเฉือนในเสา , C'_c คือแรงอัดในคอนกรีต และ C'_s คือแรงอัดในเหล็กเสริม

2.2.3 กลไกการวิบัติของข้อต่อ

Paulay (1978) และคณะ [16] ได้สร้างแบบจำลอง (Model) อธิบายกำลังต้านทานแรงเฉือนในข้อต่อ ซึ่งนิยมใช้กันมากในปัจจุบัน มีอยู่ทั้งหมด 2 แบบจำลอง คือ Strut Mechanism และ Truss Mechanism ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แบบจำลองการต้านทานแรงเฉือนในข้อต่อของ T. Paulay [16]

กลไกของ Strut Mechanism คือกำลังรับแรงเฉือนของข้อต่อนั้นขึ้นอยู่กับกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตในแนวทแยง ดังนั้นเมื่อเหล็กเสริมเกิดการคราก แรงเฉือนทั้งหมดของข้อต่อ จะถูกถ่ายไปยังคอนกรีตในแนวทแยงเพื่อต้านทานการวิบัติ ดังแสดงในรูป 2.5a และกลไกของ Truss Mechanism คือรับแรงเฉือนของข้อต่อนั้นขึ้นอยู่กับกำลังครากของเหล็กรับแรงเฉือนในข้อต่อ โดยอาศัยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กนอนและคอนกรีต ดังแสดงในรูป 2.5b

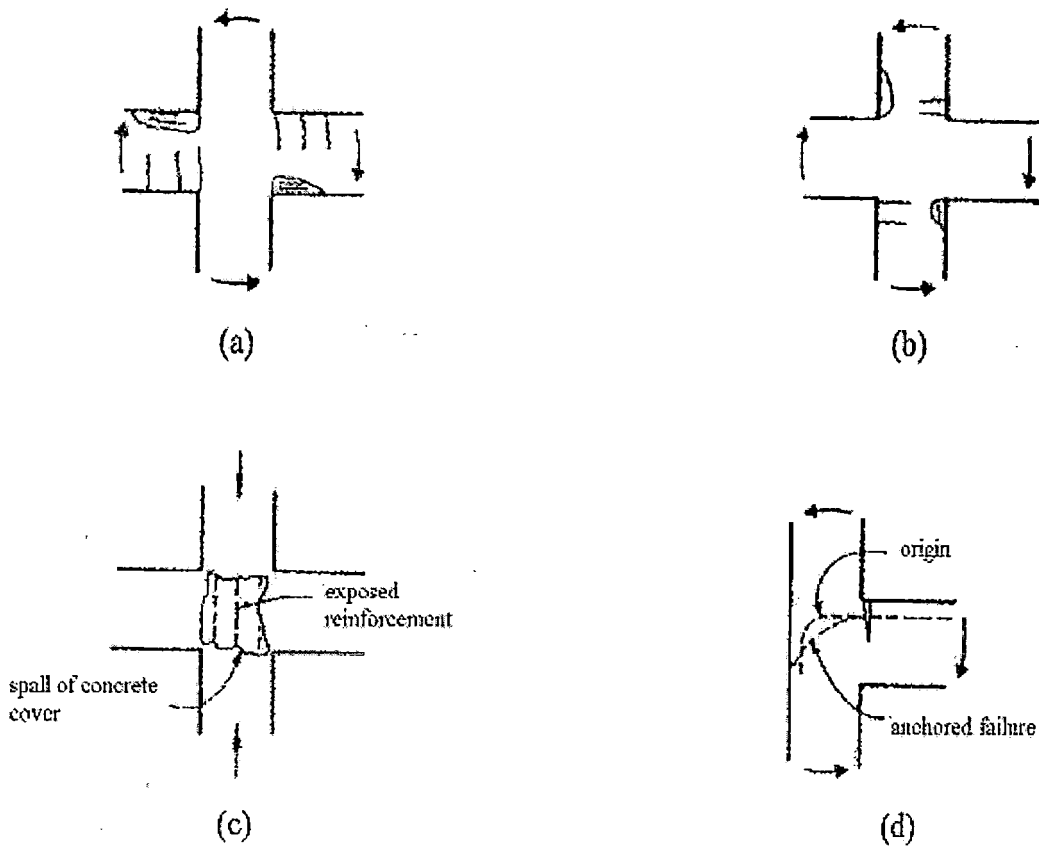
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในอดีตการศึกษาโครงสร้าง คาน-เสา-พื้นสำเร็จรูปมีน้อยมาก ส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาพฤติกรรมข้อต่อคาน-เสา หรือไม่ก็เป็นการศึกษาพฤติกรรมโครงสร้าง คาน-เสา-พื้นคอนกรีตอัดแรง อย่างไรก็ตาม การศึกษาเหล่านี้ ก็เป็นแนวทางที่สามารถนำมาเป็นพื้นฐานของการศึกษานี้ได้เป็นอย่างดี ดังนั้นจึงขอกกล่าวถึงการศึกษาเหล่านั้นดังนี้

อานนท์ วงษ์แก้ว และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยวิธีการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการทดสอบตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่หล่อในห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา และทำการวิเคราะห์แบบจำลอง เทียบผลการรับน้ำหนัก ค่าการแอ่นตัว และลักษณะการพังของแบบจำลองกับค่าที่วัดได้จากการทดสอบ จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องในระดับที่ดีมาก สามารถทำนายค่าโมเมนต์แตกร้าว ค่าโมเมนต์ที่สภาวะเหล็กเสริมเริ่มร้าว และค่าโมเมนต์ที่จุดสูงสุดได้ใกล้เคียงผลการทดสอบ โดยมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ยังแสดงลักษณะการพังของคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้แม่นยำใกล้เคียงกับผลการทดสอบอีกด้วย

Meinheit และ Jirsa [8] ได้ศึกษารูปแบบการวิบัติของข้อต่อคาน-เสา โดยมีการจำแนกรูปแบบของการวิบัติดังนี้

- a) Beam hinging failure เกิด Plastic hinge ที่ปลายคาน เนื่องจากคานรับแรงกระทำไม่ไหว ทำให้เกิดรอยร้าวบริเวณรอบๆคาน โดยคานจะพังก่อน ข้อต่อ และเสา การวิบัติแบบนี้ก่อให้เกิดความเสียหายไม่มากนัก
- b) Column hinging failure เกิด Plastic hinge ที่ปลายเสา เนื่องจากเสารับแรงกระทำไม่ไหว ทำให้เกิดรอยร้าวบริเวณรอบๆเสา โดยเสาจะเกิดการพังก่อน การวิบัติแบบนี้ก่อให้เกิดอันตรายอย่างมาก เพราะเมื่อเสาเสียหายทำให้โครงสร้างเกิดการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Side sway) ทำให้โครงสร้างทั้งหมดพังทลาย
- c) Joint shear failure เกิดขึ้นเนื่องจากกำลังรับแรงของข้อต่อไม่เพียงพอ เกิดรอยร้าวที่ข้อต่อ ทำให้คอนกรีตที่ผิวหลุดร่อนออกจากข้อต่อ ส่งผลให้เหล็กเสริมในเสาเกิดการดุ้ง (Buckle) ทำให้เสาพังลงมา การวิบัติแบบนี้อันตรายมาก
- d) Anchorage failure การวิบัตินี้เกิดขึ้นเฉพาะ Exterior Joint เท่านั้น เกิดจากระยะงอปลาย (Anchorage length) ไม่เพียงพอ ทำให้เหล็กเสริมในคานเกิดการรูด ส่งผลให้คานไม่สามารถรับแรงได้ตามที่ออกแบบไว้



รูปที่ 2.6 การวิบัติของข้อต่อ [8]

Thin et al. [9] ได้ทำการทดสอบ Interior beam-column ตัวอย่างแรกในประเทศไทย ภายใต้วิธีแรงวิบัติกึ่งสถิต ใช้ตัวอย่างขนาดครึ่งหนึ่งจากตัวอย่างจริง ที่มีรายละเอียดการเสริมเหล็กที่ออกแบบในประเทศไทย โดยขึ้นงานทดสอบให้ปลายคานและปลายเสาด้านล่างมีสภาพยึดรับแบบหมุนอิสระ (pin-connected) และปลายคานเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในแนวราบ จากการทดสอบพบว่าตัวอย่างมีการวิบัติที่ข้อต่อ และเป็นการวิบัติแบบเปราะ (Brittle failure) มีการสลายพลังงานแผ่นดินไหวน้อยมาก จึงไม่เหมาะสมในการต้านทานแผ่นดินไหว

Cheejaroen et al. [10] ได้ทำการทดสอบ Interior beam-column จำนวน 3 ตัวอย่าง แต่ละตัวอย่างเป็นตัวแทนของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ก่อสร้างในประเทศไทย โดยแบ่งเป็นกลุ่มตามพื้นที่อาณาเขตของเสา (Tributary area) จากผลการทดสอบพบว่า ตัวอย่างที่ 1 ที่เป็นตัวแทนของพื้นที่อาณาเขตเสามาก (40.5-57.0 ตรม.) เกิดการวิบัติที่ปลายคาน ด้านที่คอนกรีตรับแรงอัด ตัวอย่างมีความเหนียวพอควร จุดต่อเกิดความเสียหายน้อย ตัวอย่างที่ 2 ที่เป็นตัวแทนของพื้นที่อาณาเขตเสาปานกลาง (20-32.4 ตรม.) และตัวอย่างที่ 3 ที่เป็นตัวแทนของพื้นที่อาณาเขตเสาน้อย (9-17.5 ตรม.) เกิดการวิบัติที่จุด

(f) ด้านที่กว้างที่สุดของเสา

(g) 450 มิลลิเมตร

1.2) เหล็กปลอกอันแรกต้องห่างจากขอบคานไม่เกินครึ่งหนึ่งของ

1.3) นอกช่วง L_0 เหล็กปลอกต้องมีระยะห่างทุกๆระยะ S_1 โดย S_1 มีระยะไม่เกินค่าที่น้อยที่สุดของค่าต่อไปนี้

(h) 16 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กปลอก

(j) ด้านแคบของเสา

(k) 600 มิลลิเมตร

ในกรณีที่ต้องใช้เหล็กปลอกรับแรงเฉือนระยะ S_1 ต้องไม่เกินครึ่งหนึ่งของความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัดเสา

1.4) ระยะห่างของเหล็กปลอกช่วงข้อต่อต้องเป็น 2 เท่าของ S_0

1.5) การต่อทาบเหล็กยื่น ยอมให้ต่อทาบในช่วงกึ่งกลาง (Center Half) ของความยาวเสา โดยมีเหล็กปลอกรัดทุกระยะห่างไม่เกินค่าต่อไปนี้

(j) $1/4$ ของความกว้างน้อยที่สุดของเสา

(m) 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กยื่น

(n) S_x ตามสมการข้างล่างนี้

$$S = 100 + \frac{350 - h_x}{3}$$

เมื่อ h_x เท่ากับระยะแนวนอนที่มากที่สุดของเหล็กยื่นของทุกหน้าตัดเสาที่ถูกยึดเข้ามุมหรือของอของเหล็กปลอกหรือเหล็กปลอกรัดขวางใดๆ หน่วยเป็นมิลลิเมตร โดยที่ h_x ไม่ควรมากกว่า 350 มิลลิเมตร โดยค่าของ S ควรไม่เกิน 150 มิลลิเมตร และไม่จำเป็นต้องน้อยกว่า 100 มิลลิเมตร

2) รายละเอียดเหล็กเสริมในคาน

2.1) ที่ปลายทั้งสองข้างของคานในช่วงความยาว 2 เท่า ของความลึกคาน (h_x) วัดจากขอบเสาเข้าสู่กลางคาน เหล็กปลอกรัดรอบอันแรกต้องมีระยะห่างไม่เกิน 50 มิลลิเมตรจากขอบเสา และปลอกถัดไปต้องมีระยะห่างทุกๆระยะ S_2 โดยที่ S_2 ระยะไม่เกินค่าที่น้อยที่สุดของค่าต่อไปนี้

(a) $1/4$ ของความลึกประสิทธิภาพของคาน

(b) 8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมทางยาวที่เล็กที่สุด

(c) 24 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กปลอก

(d) 300 มิลลิเมตร

2.2) นอกเหนือจากข้อ 2.1 ระยะห่างของเหล็กปลอก (S_3) ต้องไม่เกินครึ่งหนึ่งของ ความลึกประสิทธิภาพของคานตลอดความยาวคาน

2.3) การต่อทาบเหล็กเสริมทางยาวจะต้องพับเหล็กปลอกช่วงทาบเหล็ก โดยที่ระยะ เหล็กปลอกห่างกันไม่เกิน $1/4$ ของความลึกประสิทธิภาพของคานหรือ 100 มิลลิเมตร สำหรับตำแหน่งของ เหล็ก ไม่ควรทาบเหล็กในบริเวณดังต่อไปนี้

(e) ภายในรอยต่อเสา-คาน

(f) ภายในระยะ 2 เท่าของความลึกคานจากขอบจุดต่อเสา-คาน

(g) ตำแหน่งที่การวิเคราะห์บ่งชี้ว่าจะเกิดการคลากจากการตัด (Flexural Yielding) หรือข้อหมุนพลาสติก (Plastic Hinging) จากการโยกตัวทางข้างของโครงเฟรมจนเป็น Inelastic

3) จุดต่อชิ้นส่วนโครงสร้างต่างๆ

ภายในจุดต่อจะต้องมีการฝังเหล็กเสริมจากชิ้นส่วนโครงสร้างเข้าจุดต่ออย่างเพียงพอ ไม่ครูดหลุด หรือแยกออกเมื่อเกิดการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวและจะต้องมีการพันเหล็กปลอกรัดเนื้อคอนกรีต (Confinement) อย่างเพียงพอเพื่อไม่ให้คอนกรีตแตกแยกจนสูญเสียกำลังส่วนใหญ่และเหล็กเส้นเสริม สูญเสียการยึดเหนี่ยว (Bonding)

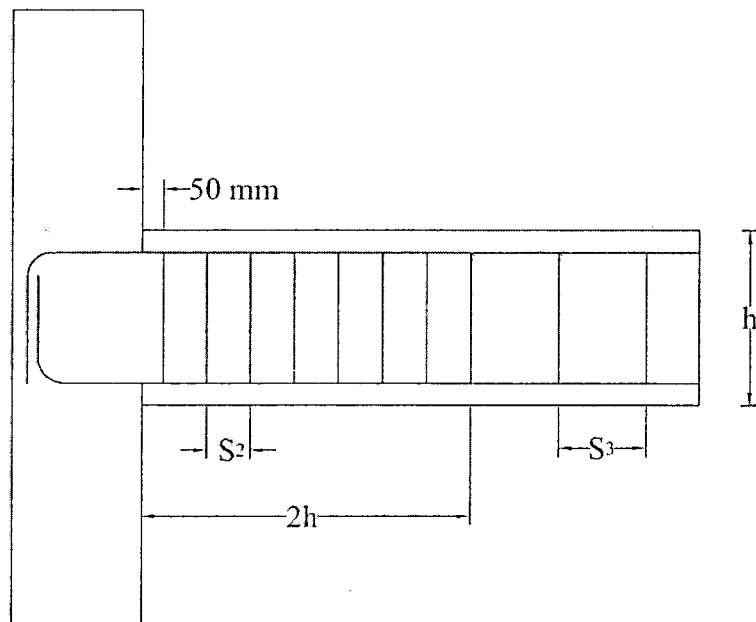
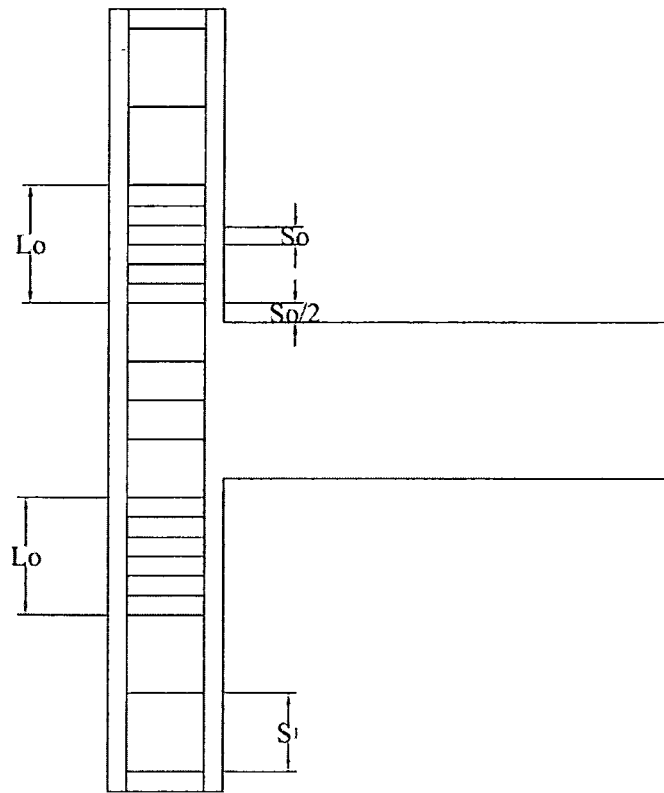
มาตรฐานข้อกำหนด ACI 352-1985 [7] เมื่อไม่คำนึงถึงแรงจากแผ่นดินไหว และอ้างอิงตาม มาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (WSD) และวิธีกำลัง (USD) ของ สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย การให้รายละเอียดเหล็กเสริมโดยทั่วไปแสดงดังรูปที่ 2.8 ซึ่ง สามารถสรุปได้ดังนี้

- ไม่มีเหล็กทางขวาง (Transverse reinforcement) ในข้อต่อคาน-เสา
- มีการทาบเหล็กยื่นในเสาที่ระดับเหนือพื้นเล็กน้อย โดยมีระยะทาบตามมาตรฐาน
- เหล็กปลอกในเสามีระยะเรียงห่างกันมาก ส่วนมากใส่ตามจำนวนเหล็กปลอกชั้นต่ำใน มาตรฐาน
- มีการต่อทาบเหล็กล่างในคาน ที่ตำแหน่งข้อต่อคาน-เสา

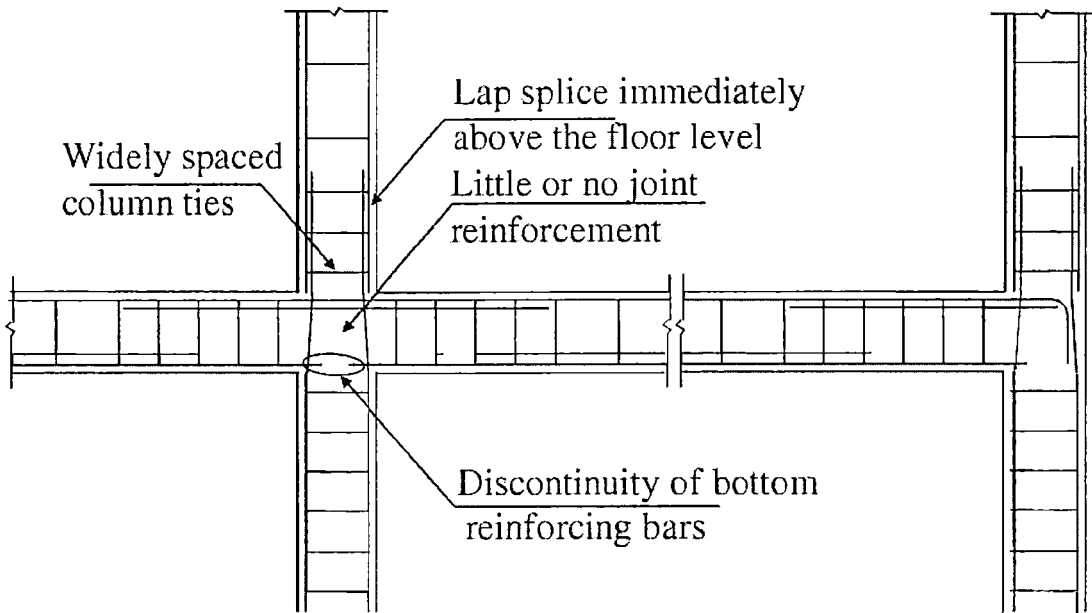
ส่วนในรูปที่ 2.9 แสดงรายละเอียดการก่อสร้างและขนาดแผ่นพื้นสำเร็จรูปที่ใช้ในประเทศไทย จากรูปพบว่า เมื่อผู้ออกแบบเลือกขนาดของแผ่นพื้นตามตารางที่ระบุน้ำหนักบรรทุกปลอดภัย (กก./ตรม.) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับจำนวนลวดอัดแรง ช่วงความยาวแผ่นพื้นที่ใช้ และความหนาของคอนกรีตที่ใช้เททับ ด้านบน เช่น 4 ซม. หรือ 5 ซม. ลักษณะการก่อสร้าง จะนำแผ่นพื้นสำเร็จรูปที่ได้เลือกขนาดตามตารางมา วางพาดบนคานทั้งสองฝั่ง โดยใช้คานเป็นที่รองรับ จากนั้นด้านบนจะปูด้วยเหล็กกลมขนาด 6 มม. สาน เป็นตะแกรงขนาด 20 ซม. ที่บริเวณปลายแผ่นพื้นสำเร็จรูปที่วางอยู่บนคาน จะมีเหล็กกลม dowel ขนาด

9 มม. วางไว้ที่ระยะห่างทุกๆ 15 ซม. นอกจากนี้ยังมีเหล็กกลม(เหล็กหนวดกุ้ง) ขนาด 6 มม. ซึ่งโผล่ขึ้นมาจากคานด้านบน ถูกหักทาบไว้อีกเป็นระยะๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับช่างในแต่ละที่ว่าจะวางห่างกันเท่าไร ปกติจะอยู่ที่ประมาณ 15 ซม. สลับกับเหล็กกลม 9 มม. รูปที่ 2.10 แสดงการทำงานที่บริเวณหน้างานก่อสร้างจริง

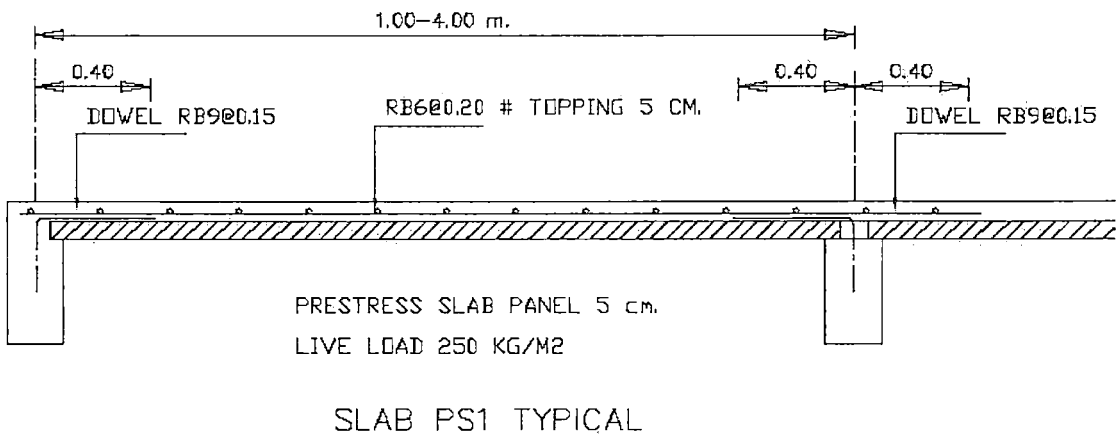
ดังได้กล่าวไปแล้วข้างต้น การก่อสร้างอาคารด้วยวิธีนี้ ได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน สำหรับอาคารขนาดเล็กถึงขนาดปานกลาง แต่ยังคงขาดการประเมินความสามารถของอาคารเหล่านี้ เมื่อมีการสั่นไหว อาจจะเนื่องจากแผ่นดินไหวรุนแรง แผ่นดินไหว หรือแรงลมขนาดรุนแรงเช่น ใต้ฝุ่น หรือพายุ จึงทำให้อาคารเหล่านี้อาจไม่ปลอดภัย หรืออาจพังทลายได้เมื่อเหตุการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้น



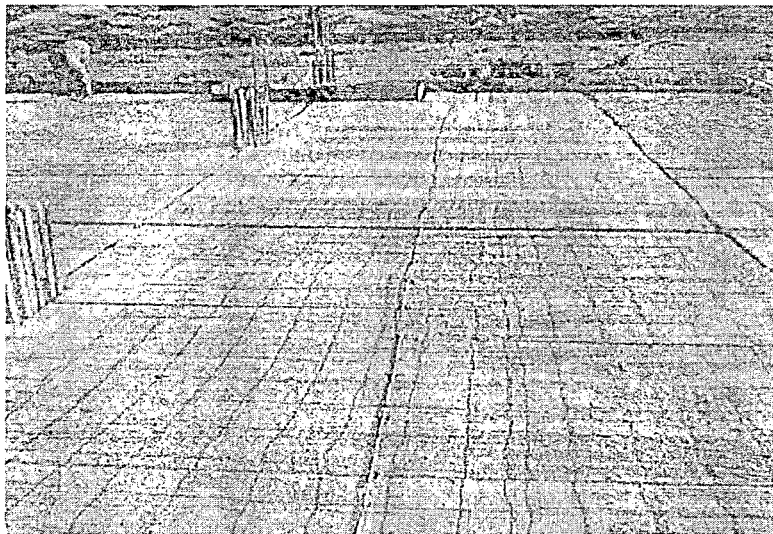
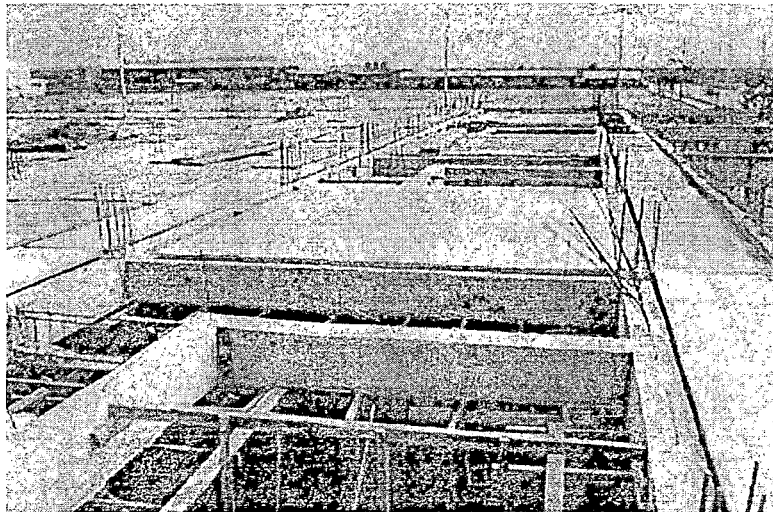
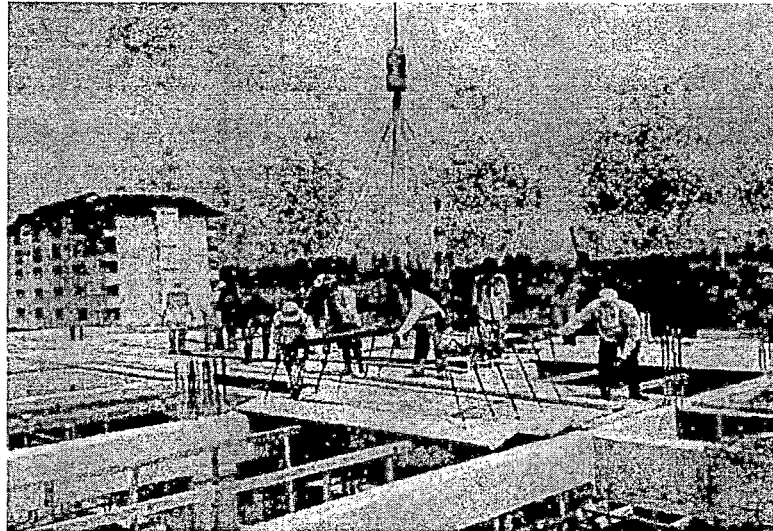
รูปที่ 2.7 แสดงรายละเอียดการเสริมเหล็กในเสา และ คาน คสล. ตามมาตรฐานข้อกำหนด ACI 318-99



รูปที่ 2.8 รายละเอียดของการเสริมเหล็กทั่วไป ที่ก่อสร้างในประเทศไทย [7]



รูปที่ 2.9 รายละเอียดการก่อสร้างที่ใช้ในประเทศไทย

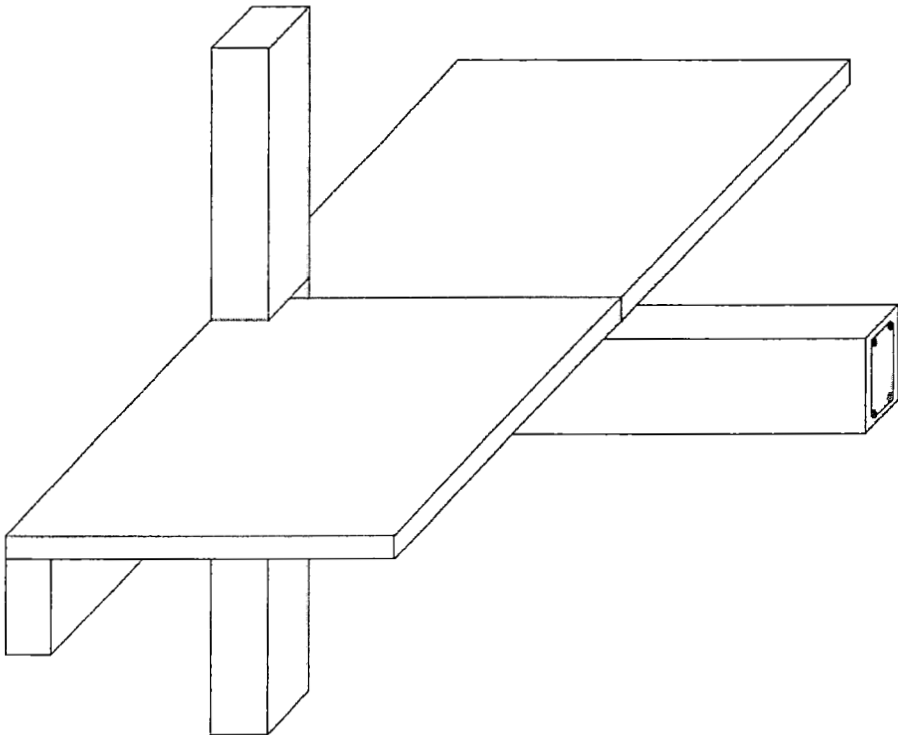


รูปที่ 2.10 การใช้แผ่นพื้นสำเร็จทอเรียบ (Plank Slab) ในงานก่อสร้างอาคารในประเทศไทย

บทที่ 3
การสร้างตัวอย่างทดสอบ เครื่องมือ และวิธีการดำเนินการทดสอบ

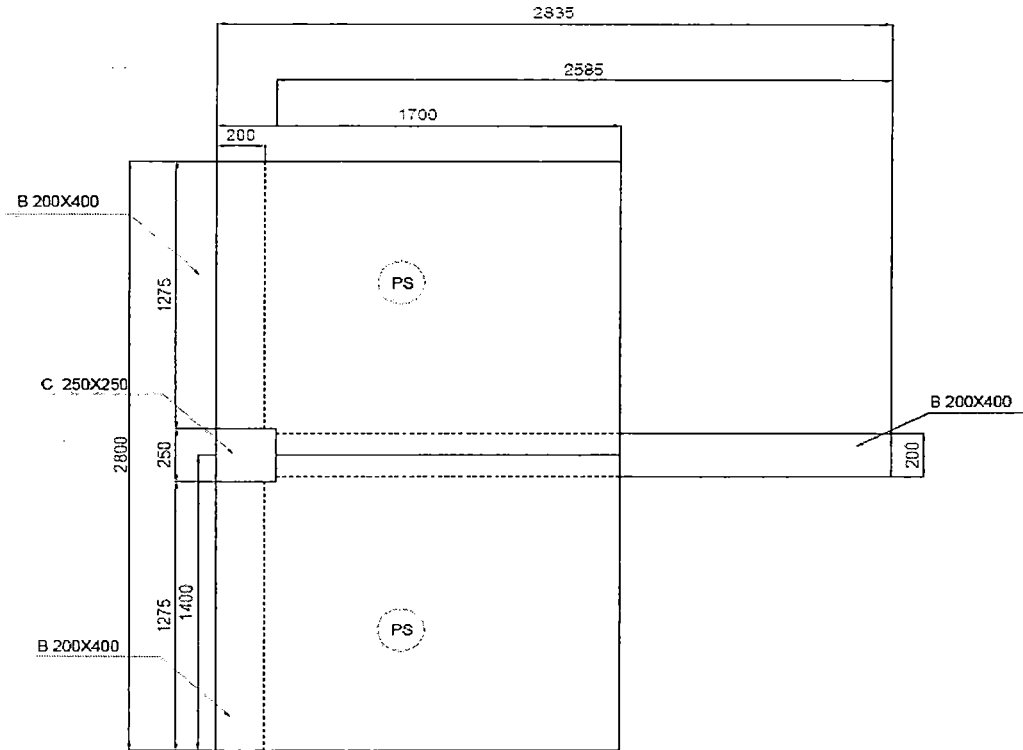
3.1 ขนาด และรายละเอียดตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

ในการทดสอบข้อต่อของคาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็กและพื้นสำเร็จรูป ด้วยเครื่อง UTM นี้ จะประกอบด้วยชิ้นงาน 2 ตัวอย่าง ซึ่งรายละเอียดโครงสร้างที่ใช้ในการออกแบบตัวอย่างชิ้นงานที่ 1 และ 2 นี้ใช้มาตรฐานการออกแบบทั่วไปของประเทศไทย (ว.ส.ท. 1008-38) และมาตรฐานประกอบการออกแบบอาคารเพื่อต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวตามลำดับ การใส่รายละเอียดโครงสร้างของตัวอย่างชิ้นงานทั้ง 2 ตัวอย่าง มีการงอปลายเหล็กเสริมบนและล่างของคานฝังเข้าไปในเสาเพื่อป้องกันการวิบัติบริเวณข้อต่อเนื่องจากแรงเฉือนพร้อมทั้งเลือกใช้แผ่นพื้นสำเร็จรูปที่เป็นที่นิยมมากในปัจจุบัน แต่ตัวอย่างที่ 2 จะเพิ่มความถี่ในการใส่เหล็กปลอกของคานและเสาบริเวณข้อต่อ ตามมาตรฐานข้อกำหนด มยผ. 1301-50 (มยผ. 1302-52) ตามรูปที่เสนอไว้ในบทที่ 2 รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะทั่วไปของตัวอย่างคาน-เสา-พื้นสำเร็จรูป คอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ รูปที่ 3.2 และ 3.3 แสดงรูปด้านบน ด้านข้าง และขนาดที่ใช้ในการหล่อตัวอย่างทดสอบที่ 1 และ 2 หน่วยเป็นมิลลิเมตร

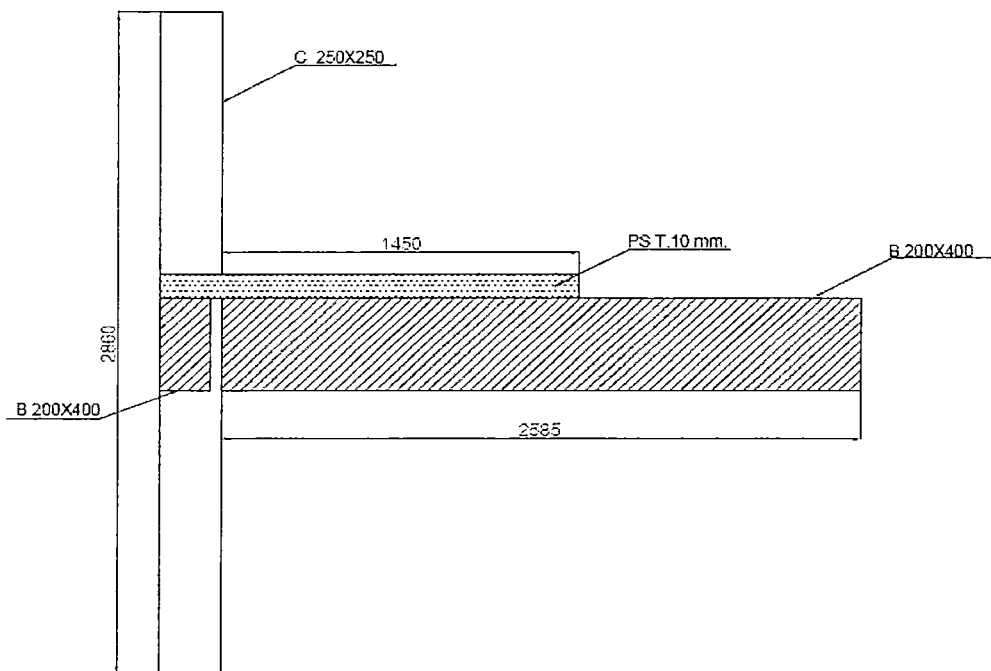


รูปที่ 3.1 ลักษณะทั่วไปของตัวอย่างคาน-เสา-พื้นสำเร็จรูป ค.ส.ล. ที่ใช้ในการทดสอบ

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา
 ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131



รูปที่ 3.2 รูปด้านบนและขนาดตัวอย่างทดสอบหน่วยเป็นมิลลิเมตร



รูปที่ 3.3 รูปด้านข้างและขนาดตัวอย่างทดสอบหน่วยเป็นมิลลิเมตร

๒๔. ๗๖๕๔๗

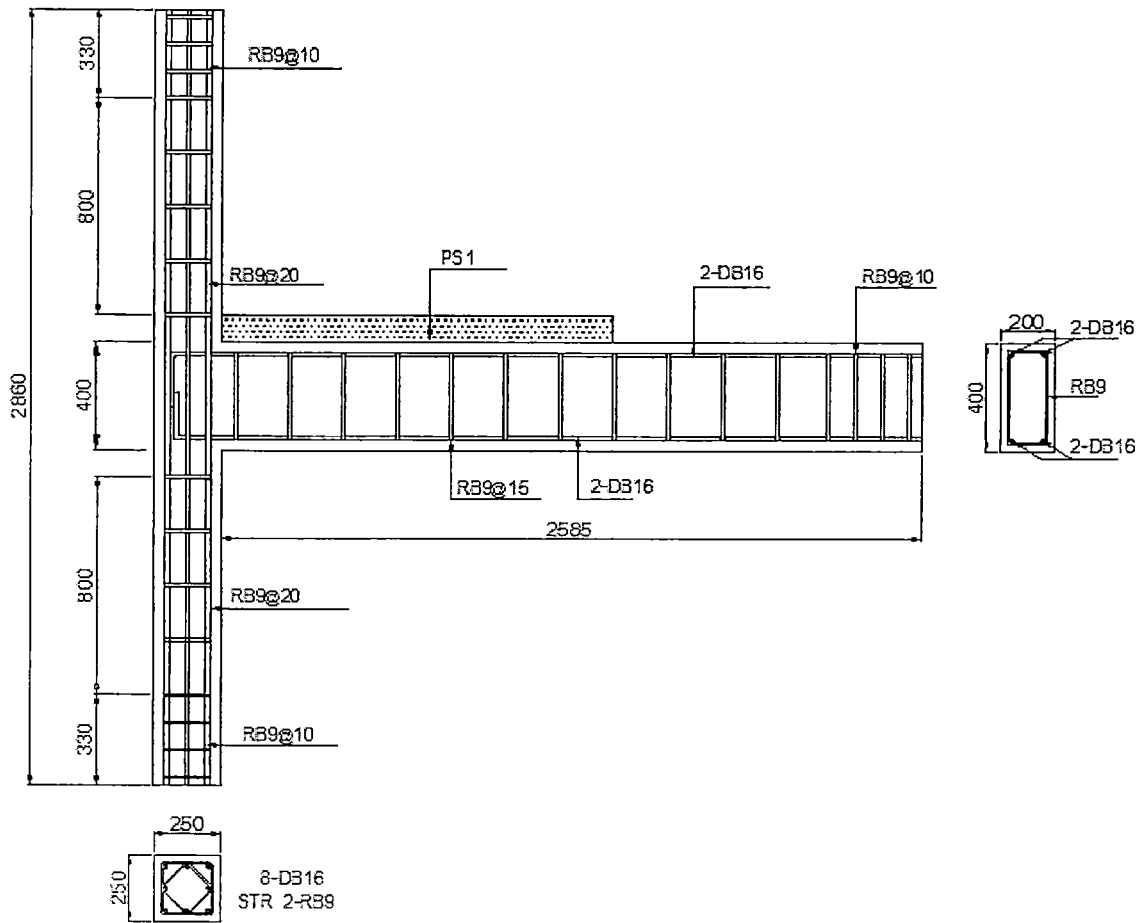
๐๒๓ พ

๑๖๖๖

๕. ๕

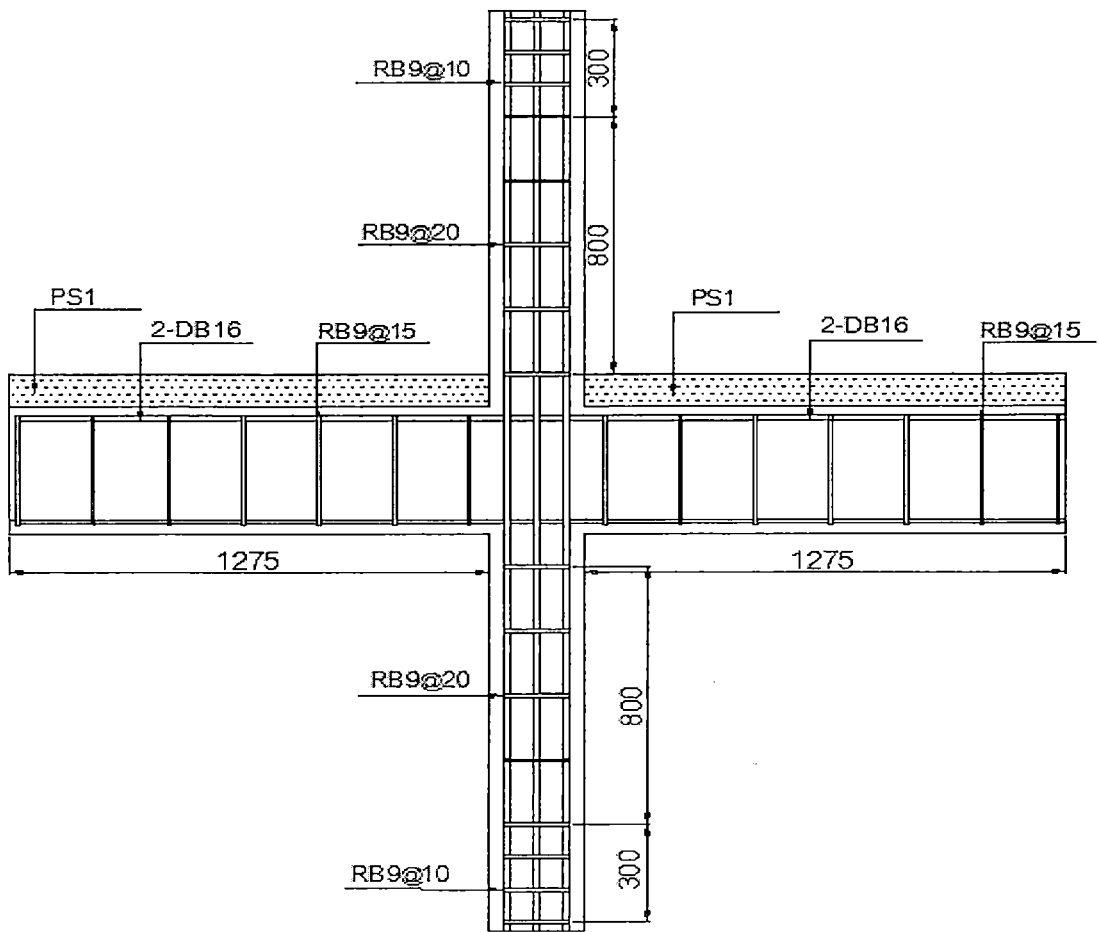
354964

3.2 รายละเอียดเหล็กเสริมของตัวอย่างทดสอบที่ 1 (มาตรฐานการออกแบบทั่วไป)



รูปที่ 3.4 รายละเอียดการเสริมเหล็กของตัวอย่างที่ 1 แสดงภาพด้านข้าง

รูปที่ 3.4 แสดงรายละเอียดการเสริมเหล็กยื่นและเหล็กปลอกในคานและเสาของตัวอย่างทดสอบที่ 1 จากรูปเสามีขนาด 250x250 มม. เหล็กเสริมหลักมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. จำนวน 8 เส้น เหล็กปลอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. จำนวน 2 วงต่อชั้น ระยะห่างระหว่างชั้นเท่ากับ 200 มม. ตลอดความสูงของเสา ยกเว้นที่ระยะปลายเสาดบนและล่าง ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกเท่ากับ 100 มม. เป็นระยะ 300 มม. จากปลายทั้งสอง ทั้งนี้เพื่อป้องกันการแตกที่บริเวณจุดรองรับที่อาจเกิดจากการติดตั้ง นอตยึด นอกจากนี้เหล็กปลอกในเสาจะหยุดที่ระยะ 1100 มม. วัดจากปลายเสาด้านบนและล่าง และไม่มีเหล็กปลอกในบริเวณข้อต่อระหว่างคานและเสา เหล็กปลอกจะหยุดที่บริเวณระดับท้องและหลังคาน ซึ่งเป็นลักษณะการทำงานโดยทั่วไปของการก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทย

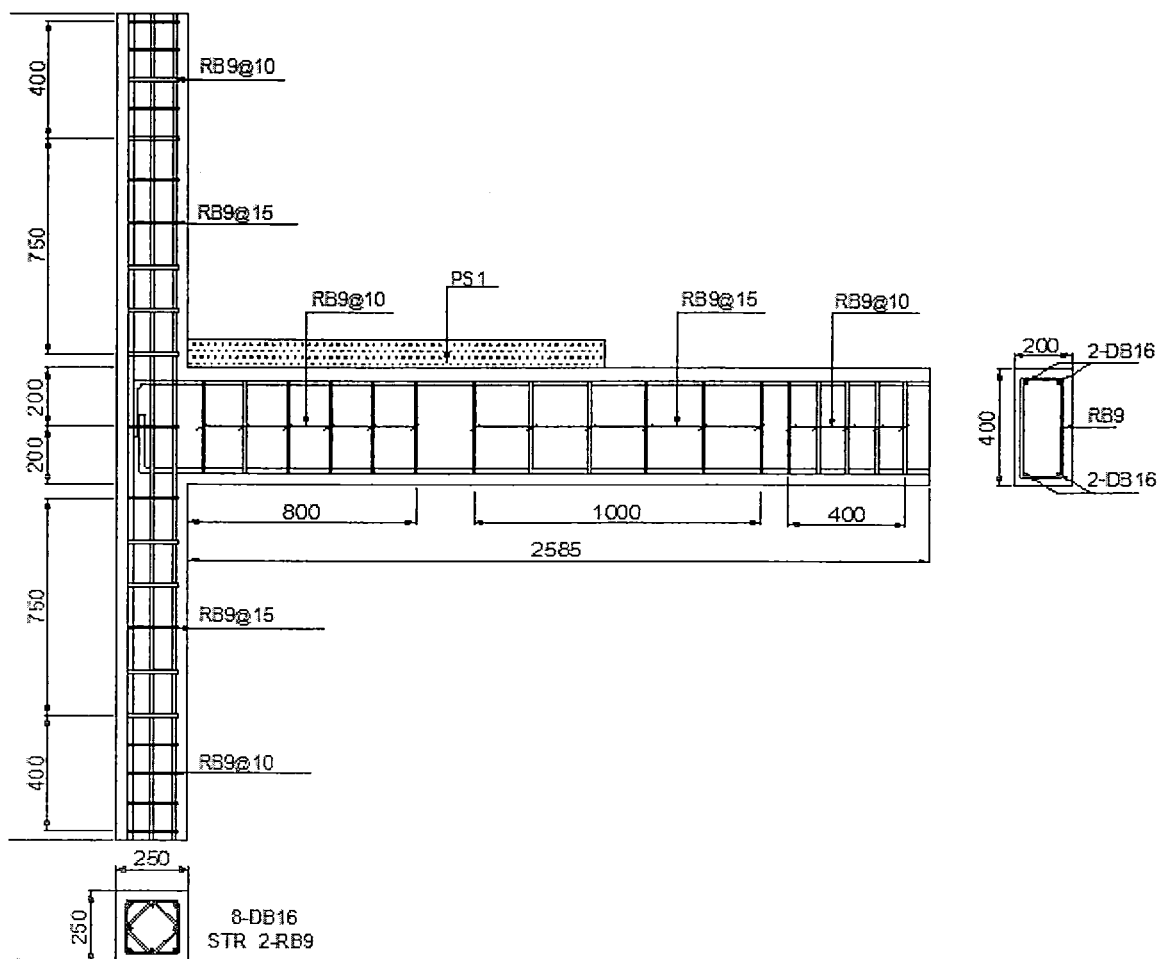


รูปที่ 3.5 รายละเอียดการเสริมเหล็กของตัวอย่างที่ 1 แสดงภาพด้านหลัง

รูปที่ 3.5 แสดงรายละเอียดการใส่เหล็กเสริมเสาและคานรองของตัวอย่างที่ 1 รายละเอียดของเสาได้กล่าวในข้างต้นแล้ว ส่วนคานรองมีความกว้าง 200 มม. และความลึก 400 มม. ใช้เหล็กเสริมตามยาวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. จำนวน 4 เส้น โดยแบ่งเป็นเหล็กกลาง 2 เส้น และเหล็กบน 2 เส้นเหล็กเสริมตามยาวของคานรองฝังผ่านทะลุเข้าไปภายในข้อต่อโดยไม่มีกรงอปลาย ใช้เหล็กปลอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. จำนวน 1 วงต่อชั้น ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกเท่ากับ 150 มม. เหล็กปลอกทั้งในคานหลักและรองจะหยุดอยู่ที่หน้าเสาและเหล็กปลอกในเสาจะหยุดอยู่ที่ระดับท้องและหลังคานซึ่งเป็นลักษณะการก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไปในประเทศไทย

3.3 รายละเอียดเหล็กเสริมของตัวอย่างทดสอบที่ 2

(มาตรฐานประกอบการออกแบบอาคารเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว: มยผ.1301-50(มยผ. 1302-52))

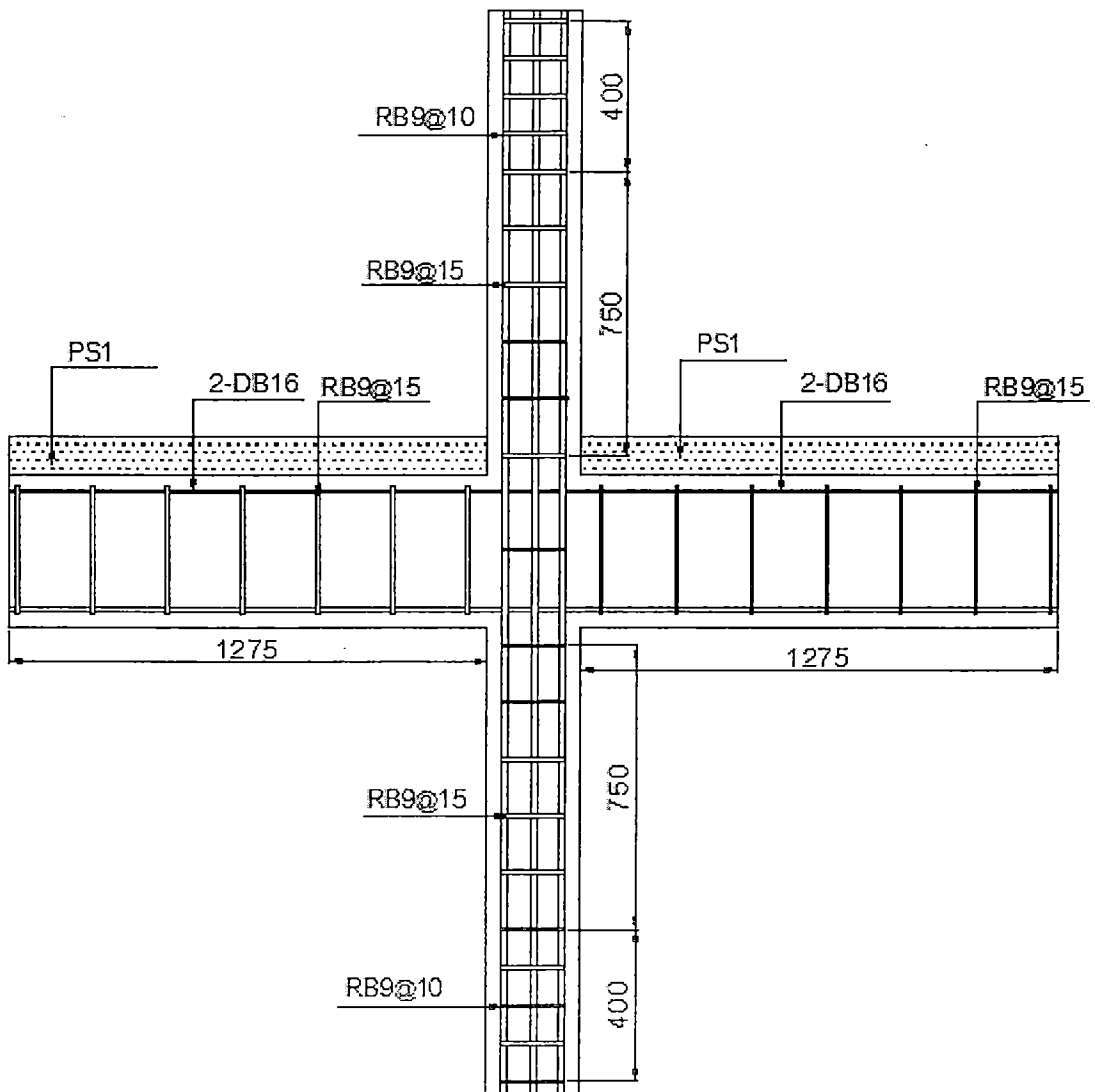


รูปที่ 3.6 รายละเอียดการเสริมเหล็กของตัวอย่างที่ 2 แสดงภาพด้านข้าง

รูปที่ 3.6 แสดงรายละเอียดการใส่เหล็กเสริมเสาและคานหลักของตัวอย่างที่ 2 เสามีความกว้าง 250 มม. และความลึก 250 มม. ใช้เหล็กเสริมตามยาวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. จำนวน 8 เส้น ใช้เหล็กปลอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. จำนวน 2 วงต่อชั้น ใช้ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกเท่ากับ 150 มม. ในเสาทั้งบนและล่างวัดจากหน้าเสาไปตามแนวยาวของเสา รวมเป็นระยะ 750 มม. ยกเว้นที่ระยะปลายเสาดบนและล่างใช้ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกเท่ากับ 100 มม. รวมเป็นระยะ 400 มม. ทั้งนี้เพื่อป้องกันการแตกร้าวที่บริเวณจุดรองรับที่อาจเกิดจากการติดตั้งน็อตยึด คานหลักมีความกว้าง 200 มม. และความลึก 400 มม. ใช้เหล็กเสริมตามยาวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. จำนวน 4 เส้น โดย

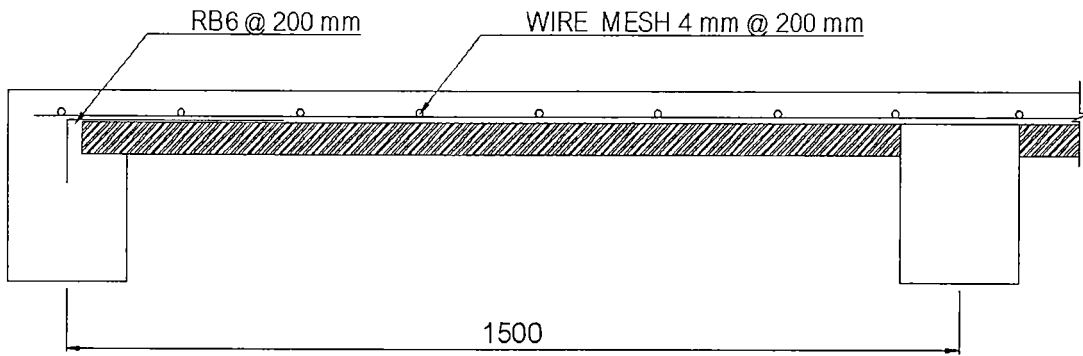
แบ่งเป็นเหล็กล่าง 2 เส้น และเหล็กบน 2 เส้น ปลายของเหล็กเสริมตามยาวของคานฝังเข้าไปภายใน ข้อต่อด้านที่ไกลที่สุดและงอปลาย 90 องศา ใช้เหล็กปลอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. จำนวน 1 วงต่อชั้น ใช้ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกเท่ากับ 100 มม. ในคานที่วัดจากหน้าเสาไปตามแนวยาวของ คานรวมเป็นระยะ 800 มม. ที่ระยะปลายคานใช้ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกเท่ากับ 100 มม. รวม เป็นระยะ 400 มม. ทั้งนี้เพื่อป้องกันการแตกร้าวที่บริเวณจุดรองรับที่อาจเกิดจากการติดตั้งนอตยึด เช่นเดียวกับที่ปลายเสา และนอกเหนือจากนั้นใช้ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกเท่ากับ 150 มม. นอกจากนี้เหล็กปลอกในคานจะหยุดที่ระยะ 500 มม. วัดจากหน้าเสา และเหล็กปลอกในเสาบนและ ล่างจะหยุดที่ระยะ 500 มม. วัดจากระดับท้องและหลังคาน มีการเสริมเหล็กปลอกภายในข้อต่อ จำนวน 1 วงที่กึ่งกลางของข้อต่อ

รูปที่ 3.7 แสดงรายละเอียดการใส่เหล็กเสริมเสาและคานรองของตัวอย่างที่ 2 รายละเอียดของเสา ได้กล่าวในข้างต้นแล้ว ส่วนคานรองมีความกว้าง 200 มม. และความลึก 400 มม. ใช้เหล็กเสริม ตามยาวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. จำนวน 4 เส้น โดยแบ่งเป็นเหล็กล่าง 2 เส้น และเหล็กบน 2 เส้น เหล็กเสริมตามยาวของคานรองฝังผ่านทะลุเข้าไปภายในข้อต่อโดยไม่มีกรงอปลาย ใช้เหล็ก ปลอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. จำนวน 1 วงต่อชั้น ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกเท่ากับ 150 มม. เหล็กปลอกในคานรองจะหยุดที่ระยะ 500 มม. วัดจากหน้าเสา



รูปที่ 3.7 รายละเอียดการเสริมเหล็กของตัวอย่างที่ 2 แสดงภาพด้านหลัง

รายละเอียดของพื้นสำเร็จรูปจะเหมือนกันทั้ง 2 ชั้นงานดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งจะใช้พื้นสำเร็จรูป กว้าง 35 ซม. ยาว 150 ซม. และหนา 5 ซม. ลวดอัดแรง (PC wire) 4 มม. จำนวน 4 เส้นต่อพื้น 1 แผ่น ใช้ เหล็กเสริมรัตรอบ 6 มม. ระยะห่าง 20 ซม. พร้อมทั้งใช้เหล็กตะแกรง (Wire mesh) 4 มม. ระยะห่าง 20 ซม. และเทคอนกรีตทับหน้า 5 ซม. โดยใช้กำลังของคอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน เท่ากับ 280 กก./ ตร.ซม.



รูปที่ 3.8 รายละเอียดของพื้นสำเร็จรูปที่ใช้ในทั้ง 2 ตัวอย่าง

3.4 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสร้างตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ 3.1 แสดงกำลังของคอนกรีตและขนาดหน้าตัดของคานหลัก คานรอง เสา และพื้นสำเร็จรูป เห็นได้ว่าการออกแบบขนาดหน้าตัดและกำลังของคอนกรีตของทั้งสองตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบนั้นมีขนาดเท่ากัน เนื่องจากเพื่อวัตถุประสงค์มุ่งเน้นศึกษาความแตกต่างระหว่างโครงสร้างที่ใส่รายละเอียดเหล็กเสริมตามมาตรฐานการออกแบบทั่วไปของประเทศไทย และ มาตรฐานประกอบการออกแบบอาคารเพื่อดำเนินงานการสันสีเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ. 1301-50) และเพื่อง่ายต่อการเปรียบเทียบผลการทดลองจึงกำหนดให้ขนาดหน้าตัดและกำลังของคอนกรีตเท่ากัน

ตารางที่ 3.1 กำลังของคอนกรีตและขนาดหน้าตัดของตัวอย่างที่ 1 และ 2

ตัวอย่าง	กำลังคอนกรีต ทรงกระบอก (กก./ตร.ซม.)	เสา	คาน		พื้นสำเร็จรูป
			คานหลัก	คานรอง	
1	280	25 x 25	20 x 40	20 x 40	35 x 150 x 5
2	280	25 x 25	20 x 40	20 x 40	35 x 150 x 5

ตารางที่ 3.2 แสดงชั้นคุณภาพและกำลังเหล็กเสริมมาตรฐานในประเทศไทย ชั้นคุณภาพหรือเกรดของเหล็กนั้น ในกรณีที่เป็นเหล็กกลมผิวเรียบจะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6–25 มม. ผลิตตามมอก. 20–2543 ในชั้นคุณภาพ SR24 คือ มีกำลังคราก 2,400 กก./ตร.ซม. ถ้าเป็นเหล็กข้ออ้อยจะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10–40 มม. ตามมอก. 24–2536 ชั้นคุณภาพ SD30 SD40 และ SD ซึ่งมีกำลังคราก 3,000 4,000 และ 5,000 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 ชั้นคุณภาพและกำลังเหล็กเสริมมาตรฐานในประเทศไทย

ชั้นคุณภาพ	กำลังคราก f_y (กก./ตร.ซม.)	กำลังประลัย f_u (กก./ตร.ซม.)
SR24	2,400	3,900
SD30	2,400	3,900
SD40	4,000	5,700
SD40	4,000	5,700

พื้นสำเร็จรูปหรือแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงท้องเรียบ (Prestressed concrete slab) โดยใช้ลวดอัดแรง (PC Wire) ที่ใช้ในการหล่อตัวอย่างทดสอบที่ 1 และ 2 แสดงไว้ในตารางที่ 3.3 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มม. มีกำลังรับแรงดึงสูงสุด 17,600 กก./ตร.ซม. ซึ่งดึงลวดด้วยแรงดึง 70% ของแรงดึงสูงสุดก่อนเทโดยทั่วไปแล้วสามารถรับน้ำหนักได้สูงสุด 200-1,950 กก./ตร.ม. (ตามจำนวนเส้นลวดและความยาวของแผ่นพื้น)

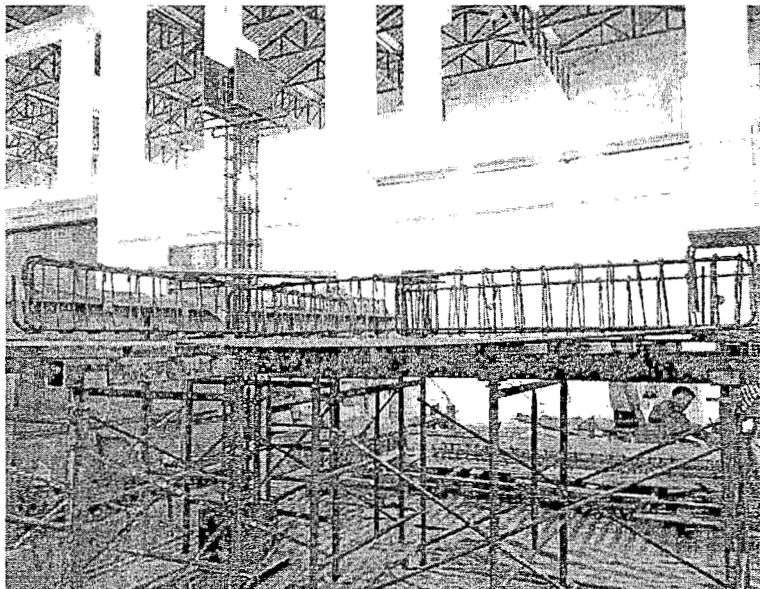
ตารางที่ 3.3 ขนาดแผ่นพื้นสำเร็จรูปที่ใช้ในประเทศไทย

ลวดอัดแรง (PC. WIRE)	น้ำหนักบรรทุกทุกปลอดภัย (กก. / ตร.ม.)													
	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	3.75	4.00	4.25	4.50	4.75	5.00	
ช่วงความยาว (ม.)														
จำนวน - ขนาด	แผ่นพื้นสำเร็จรูป หนา 5 ซม. ทับหน้า 4 ซม. ความหนารวม 9 ซม.													
4 - Ø 4 มม.	950	660	520	420	340	275	220							
5 - Ø 4 มม.	1260	875	620	500	410	553	270	230						
6 - Ø 4 มม.	1550	1110	800	595	480	400	325	275	230					
7 - Ø 4 มม.	1550	1360	1000	725	560	460	380	325	270	225				
8 - Ø 4 มม.	1550	1360	1200	895	650	525	435	370	310	265	225			
	แผ่นพื้นสำเร็จรูป หนา 5 ซม. ทับหน้า 5 ซม. ความหนารวม 10 ซม.													
5 - Ø 4 มม.	1060	800	670	520	430	360	315	260						
6 - Ø 4 มม.	1440	970	770	620	515	430	360	310	260	225				
5 - Ø 4 มม.	1550	1200	880	720	595	500	425	360	305	265	230			
7 - Ø 4 มม.	1550	1360	1130	820	675	575	485	415	355	305	265	230		

3.5 วิธีดำเนินการทดสอบ

3.5.1 การสร้างและการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ

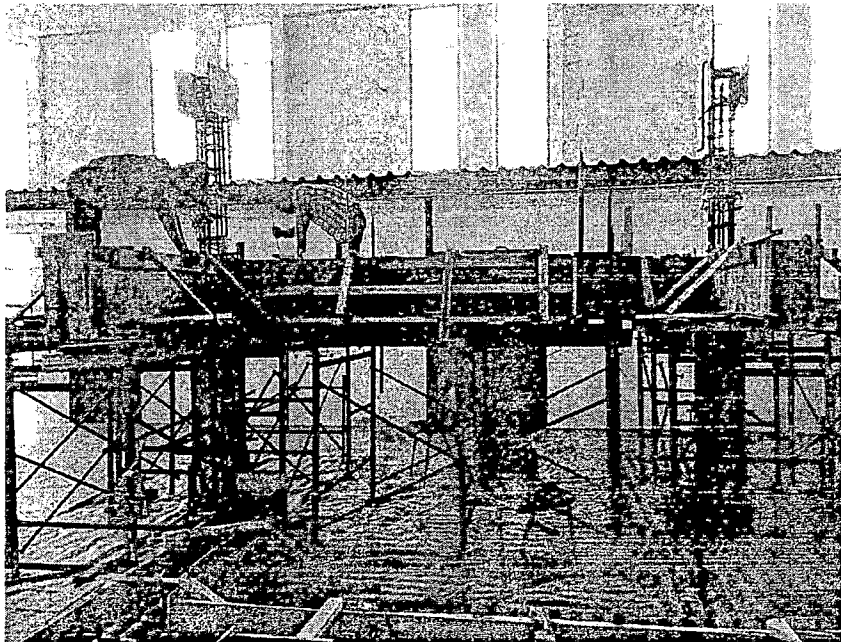
ขั้นตอนการก่อสร้างตัวอย่างทดสอบและการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ แสดงให้ดังรูปที่ 3.9-3.23 สิ่งที่สำคัญในการสร้างตัวอย่างทดสอบหรือการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปนั้น วิศวกรต้องตรวจสอบรายละเอียดเหล็กเสริม ขนาดมิติของโครงสร้าง และระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กให้ถูกต้องตามแบบกำหนดเนื่องจากที่ปลายของคานและเสาต้องยึดติดกับเครื่องทดสอบ ดังนั้นจำเป็นต้องติดตั้งแผ่นเหล็กที่ปลายเสาและปลายคานซึ่งต้องตรวจสอบตำแหน่งที่ติดตั้งแผ่นเหล็กและขนาดรูเจาะให้ถูกต้องก่อนเทคอนกรีตนั้นต้องตรวจสอบ Slump การเทคอนกรีตควรเลือกวิธีเทคอนกรีตให้เหมาะสมเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการแยกตัวพร้อมทั้งเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบกำลังอัดและจี้เขย่าคอนกรีตให้ถูกวิธี หลังจากคอนกรีตได้อายุถอดแบบแล้วควรบ่มทันทีด้วยวิธีที่เหมาะสม ข้อควรระวังในการยกตัวอย่างทดสอบนั้นควรผูกสายเบลท์ให้ถูกตำแหน่งเพื่อรักษาสมดุล มิฉะนั้นจะเกิดการถ่วงเทน้ำหนักและโมเมนต์ซึ่งอาจทำให้เกิดรอยแตกภายในและแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักตัวมันเองได้ หลังจากคอนกรีตทับหน้าพื้นเริ่มแข็งตัวให้ทำการขัดหยาบผิวหน้าพื้นเพื่อป้องกันการแตกร้าวที่ผิวหน้า



รูปที่ 3.9(ก) รายละเอียดเหล็กเสริมด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ



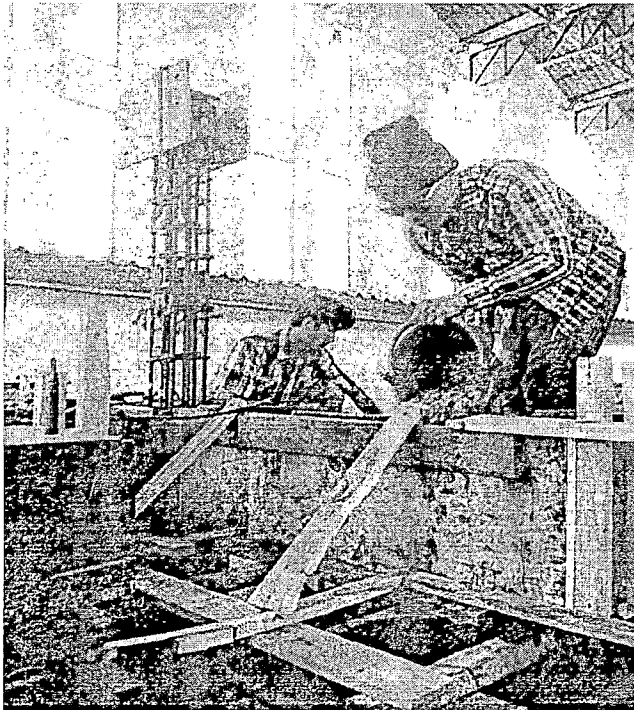
รูปที่ 3.9(ข) รายละเอียดเหล็กเสริมด้านหน้าของตัวอย่างทดสอบ



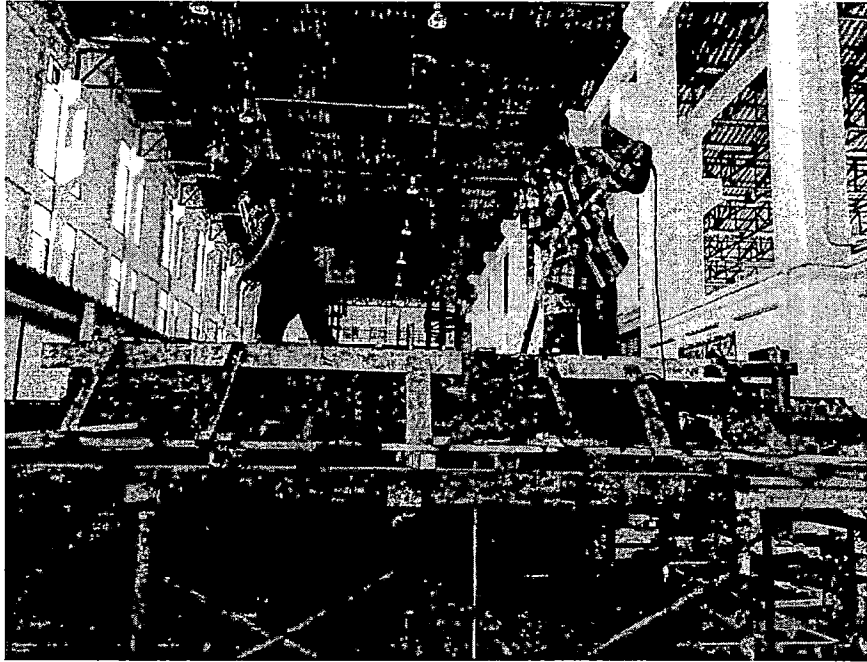
รูปที่ 3.10 การเข้าแบบของตัวอย่างทดสอบ (ด้านข้าง)



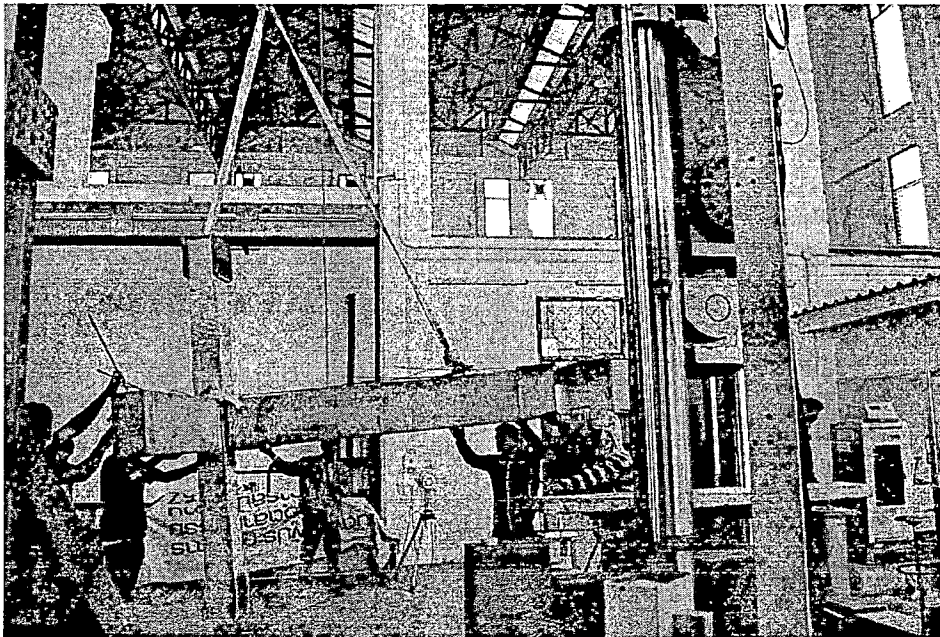
รูปที่ 3.11 การประกอบแบบของตัวอย่างทดสอบ (ด้านหน้า)



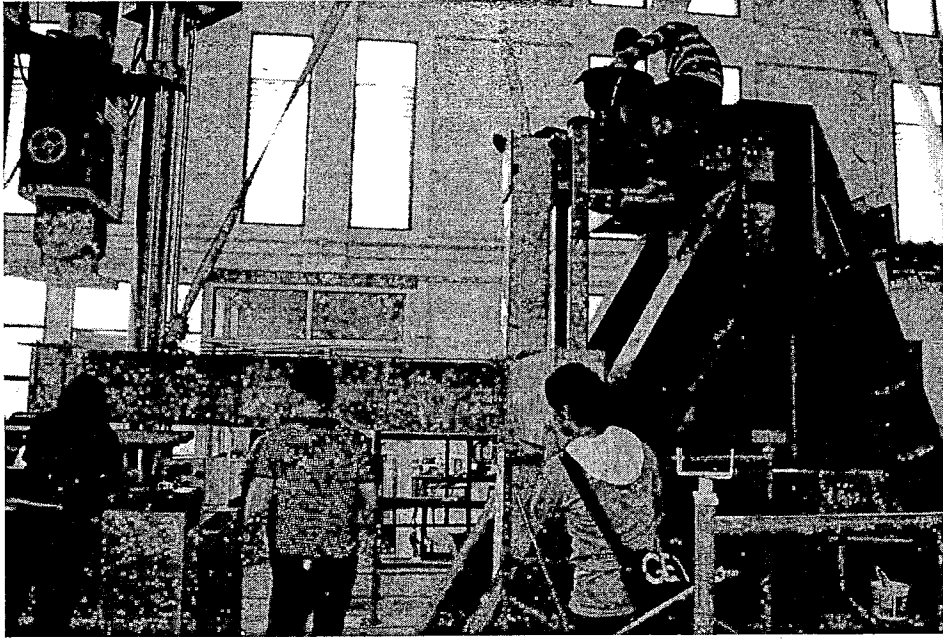
รูปที่ 3.12 การเทคอนกรีต



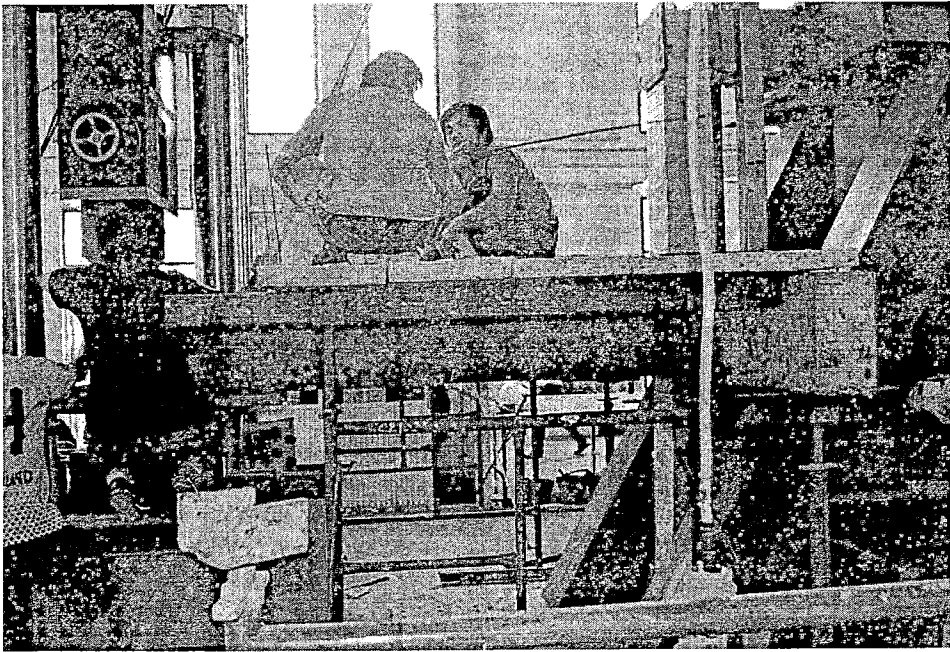
รูปที่ 3.13 การจี้คอนกรีต



รูปที่ 3.14 การยกติดตั้งตัวอย่างทดสอบ



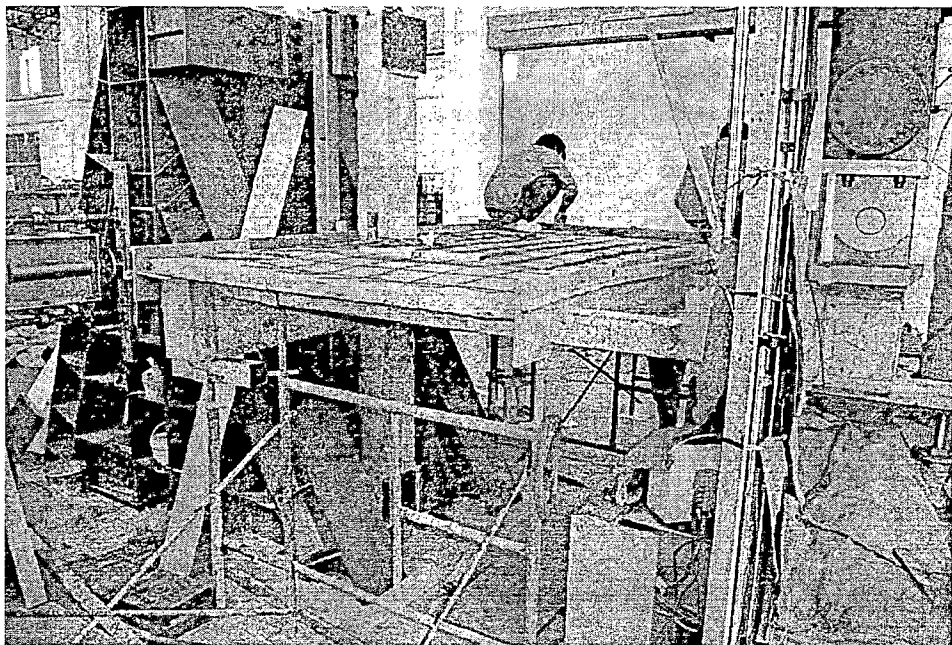
รูปที่ 3.15 การติดตั้งตัวอย่างชิ้นงานและยึดเสากับจุดรองรับ



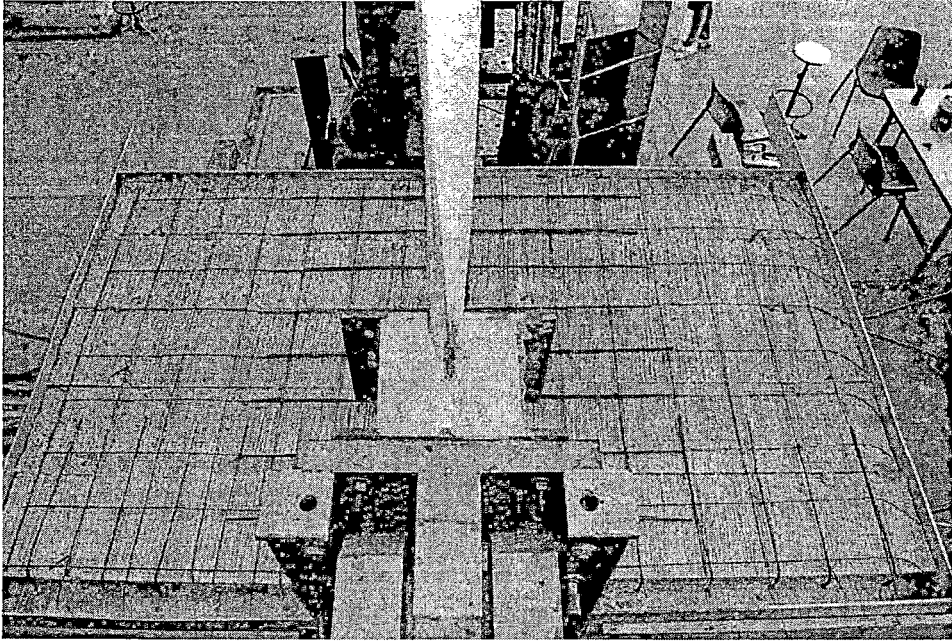
รูปที่ 3.16 การติดตั้งพื้นสำเร็จรูป



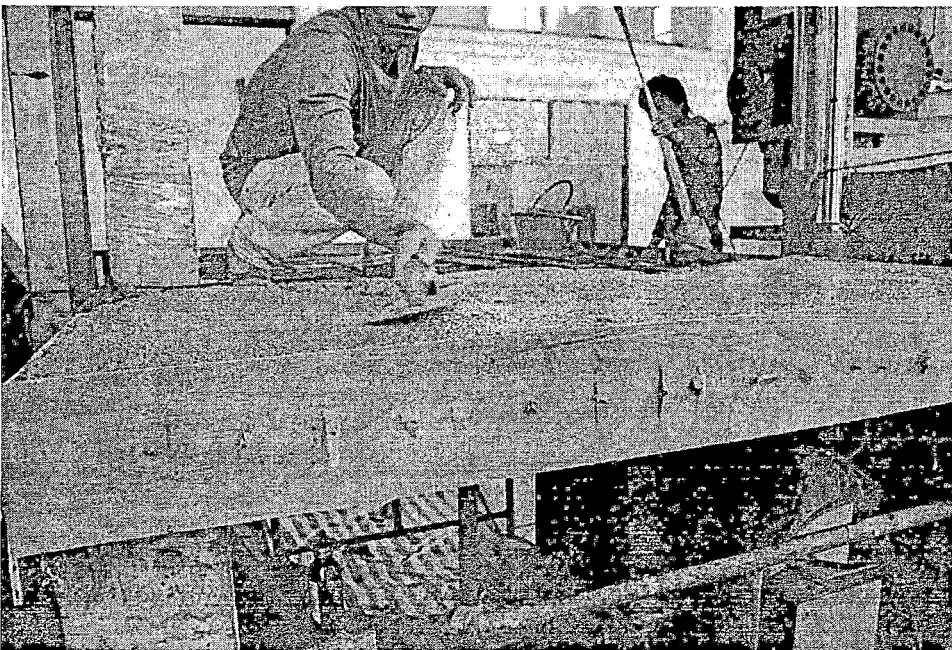
รูปที่ 3.17 การติดตั้งเหล็กตะแกรง (Wire mash)



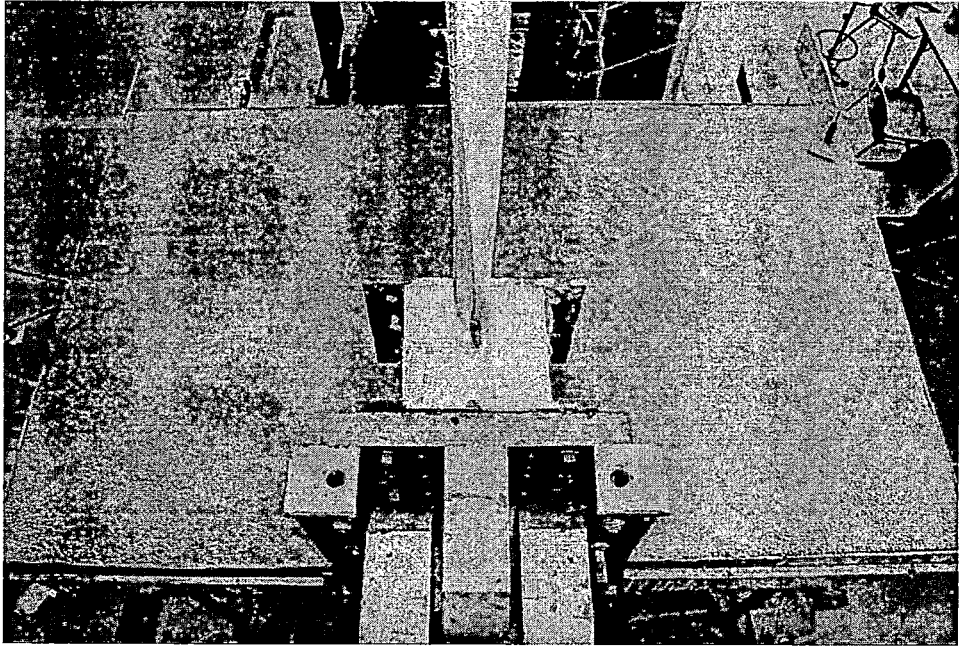
รูปที่ 3.18 การประกอบแบบเพื่อเทคอนกรีตทับหน้า



รูปที่ 3.19 เหล็กตะแกรงที่ติดตั้งแล้วเสร็จ (ด้านบนของตัวอย่างชิ้นงาน)



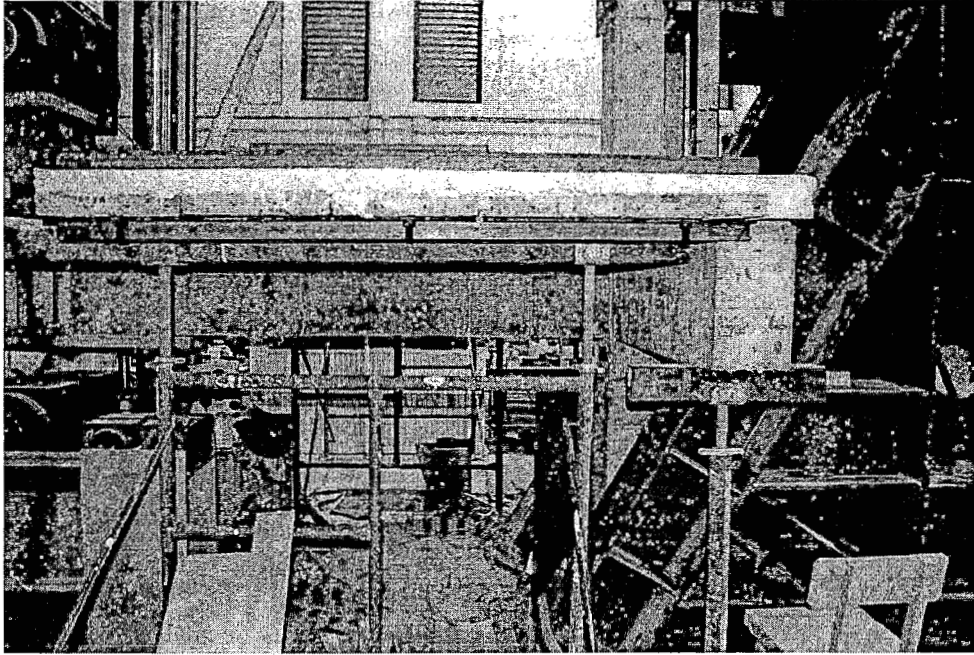
รูปที่ 3.20 การเทคอนกรีตทับหน้า



รูปที่ 3.21 การเทคอนกรีตทับหน้าแล้วเสร็จ (ด้านบนของตัวอย่างชิ้นงาน)



รูปที่ 3.22 การบ่มคอนกรีตทับหน้า



รูปที่ 3.23 การใช้เหล็กฉากยึดประกบท้องและหลังพื้น

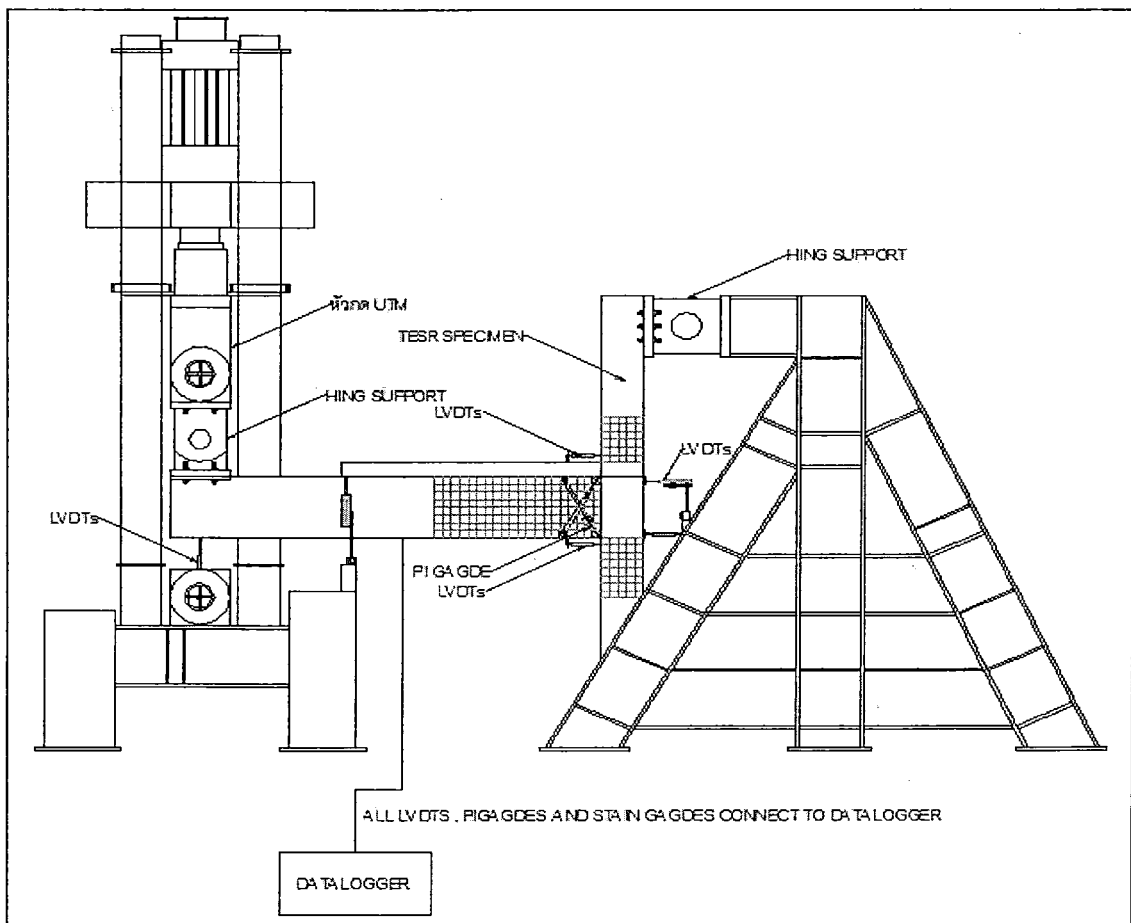
จากรูปที่ 3.23 แสดงการใช้เหล็กฉากหนีบพื้น เนื่องจากพื้นมีลักษณะเป็นพื้นยื่น การที่นำพื้นสำเร็จรูปเป็นแผ่นมาเรียงต่อกันโดยไม่มีจุดรองรับที่ปลายพื้น และความที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันเหมือนพื้นหล่อที่อาจทำให้ขณะทดสอบพื้นหลุดแยกออกจากกันได้ แก้ปัญหานี้โดยใช้เหล็กฉากหนีบประกบท้องและหลังพื้นโดยการเจาะรูที่เหล็กฉาก และพื้นให้มีตำแหน่งตรงกันแล้วยึดติดกันด้วยสลักเกลียว

3.5.2 เครื่องทดสอบ เครื่องมือวัดผลและการเก็บข้อมูล

ในการทดสอบใช้เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล UTM ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา และเครื่องมือวัดของทั้ง 2 ตัวอย่าง ประกอบไปด้วย Strain gauges LVDT และ Pi gauges โดยที่เครื่องมือวัดเหล่านี้ ถูกโยงสัญญาณจากสายไฟเชื่อมต่อเข้าสู่เครื่อง Data logger ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณนี้และเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลและเก็บข้อมูลต่างๆ

3.5.2.1 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal testing machine)

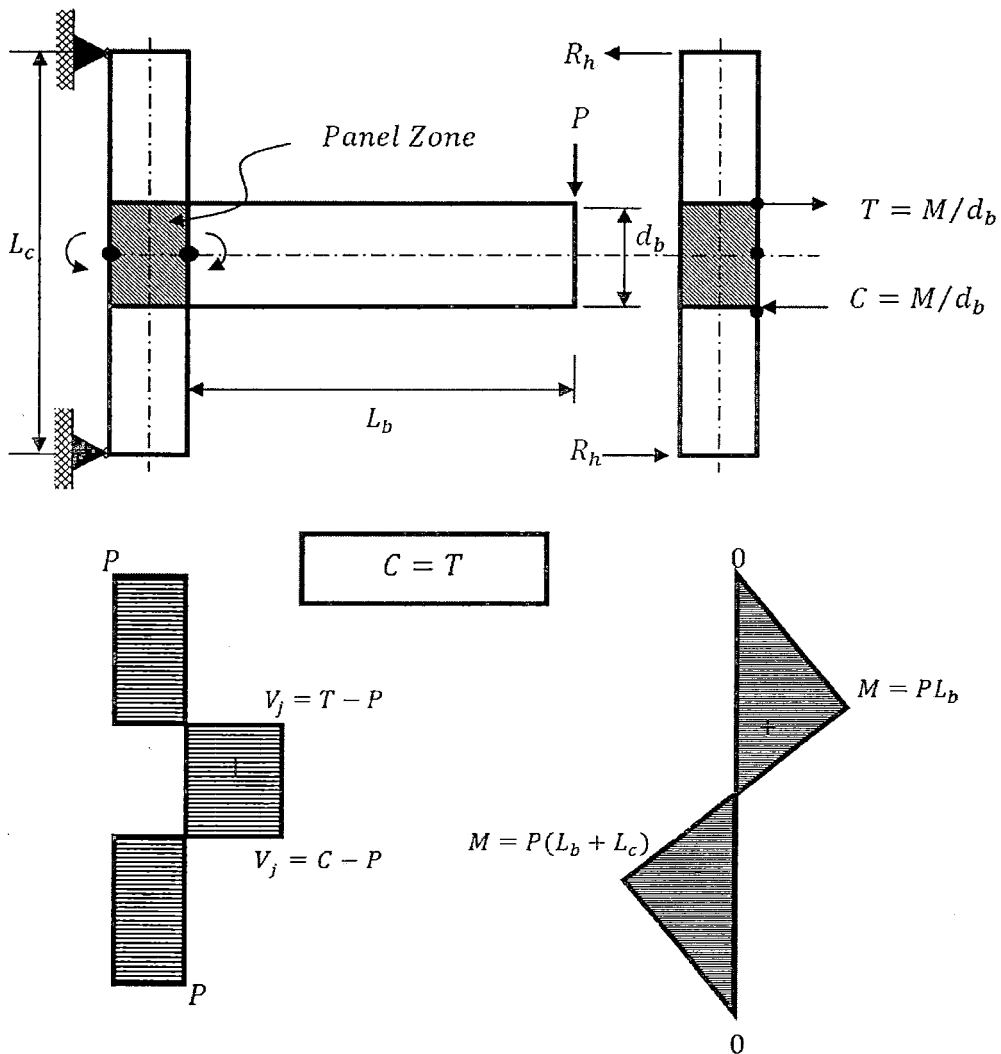
การทำงานของเครื่องทดสอบ UTM จะใช้แรงดันน้ำมันไฮดรอลิกส์ในการควบคุมกระบอกสูบไฮดรอลิกส์ให้เคลื่อนที่ขึ้นลง ซึ่งกระบอกสูบไฮดรอลิกส์สามารถเคลื่อนที่สูงสุดได้ 250 มม. โดยแบ่งเป็นเคลื่อนที่ขึ้น 125 มม.และเคลื่อนที่ลง 125 มม. เครื่องทดสอบ UTM นี้มีกำลังสูงสุด 150 กิโลนิวตัน



รูปที่ 3.24 การติดตั้งชิ้นงานและเครื่องมือทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบ

รูปที่ 3.24 แสดงการยึดเสาดัดกับจตุรรองรับทั้งบนและล่าง โดยที่จตุรรองรับนี้ถูกติดกับโครงสร้างรับแรงปฏิกิริยาซึ่งมีหน้าที่รองรับแรงปฏิกิริยา (Reaction) ที่เกิดขึ้น ลักษณะของจตุรรองรับนั้นเป็นจุดหมุน (Hinge Support) สามารถหมุนขึ้น-ลงได้อิสระส่วนที่ปลายของคานถูกติดกับจตุรรองรับที่มีลักษณะเดียวกันกับเสา แต่จตุรรองรับนี้ถูกติดกับหัวกด UTM ซึ่งเพื่อใส่แรงให้กับตัวอย่างชิ้นงานบริเวณที่ปลายของคาน

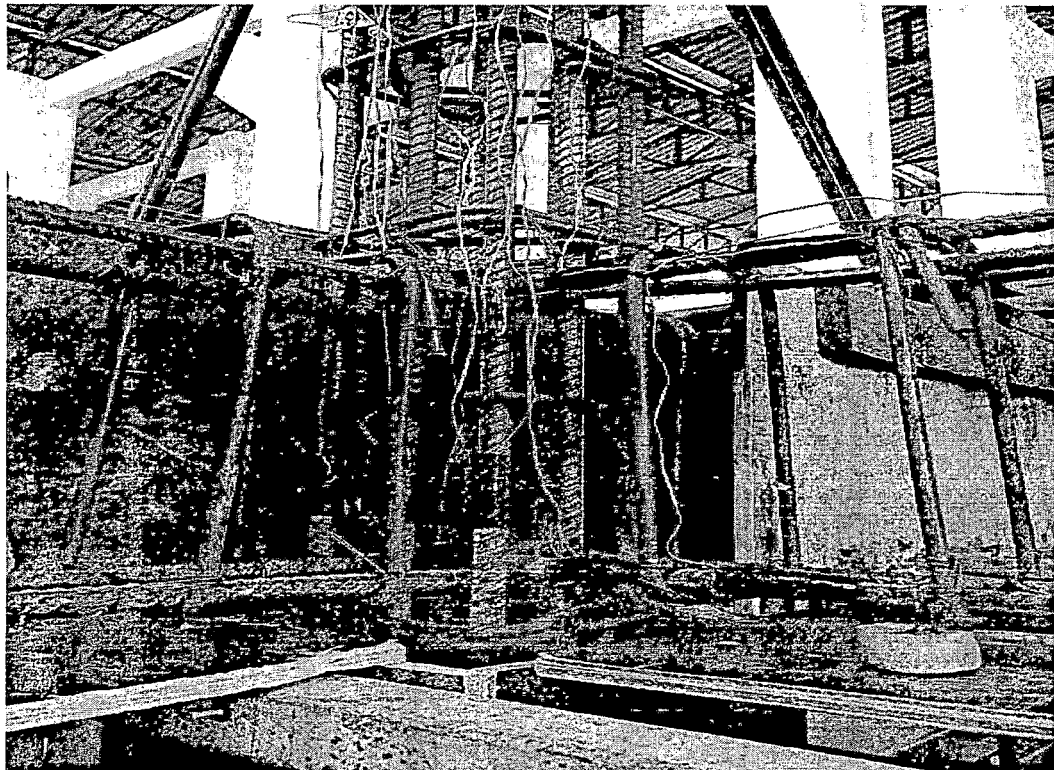
ในการทดลองนั้น การเก็บข้อมูลแรงที่ปลายของคานที่วัดได้จากเครื่องทดสอบ UTM จะเก็บข้อมูลผ่านซอฟต์แวร์ที่ถูกติดตั้งไว้ในคอมพิวเตอร์ซึ่งถูกเชื่อมโยงไว้กับเครื่องทดสอบ UTM เมื่อตัวอย่างชิ้นงานถูกแรงนี้กระทำเกิดเป็นแรงภายในขึ้นทั้งในเหล็กเสริมและคอนกรีต เป็นทั้งแรงดึงและแรงอัดที่จะถ่ายเข้าสู่ข้อต่อซึ่งสามารถคำนวณหาแรงภายในต่างๆเหล่านี้ได้โดยจากการวิเคราะห์โครงสร้างและกฎสมดุล ดังแสดงในรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 การวิเคราะห์โครงสร้างหาแรงภายในของคาน เสา และข้อต่อ

3.5.2.2 การติดตั้งอุปกรณ์วัดการยืด-หดตัวแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Strain gauges)

อุปกรณ์วัดการยืด-หดตัวแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Strain gauges) เป็นเครื่องมือวัดความเครียดของวัสดุ เช่น เหล็กเสริม คอนกรีต ทองเหลือง เป็นต้น ซึ่งค่าที่วัดออกมาได้มีหน่วยเป็นไมโครสเตรน ($\mu\epsilon$) สำหรับในการทดลองครั้งนี้ใช้ Strain gauges วัดค่าความเครียดของเหล็กเสริม เพื่อตรวจสอบว่าเหล็กเสริมมีการยืดหรือหดตัวอยู่ในสภาวะยืดหยุ่นหรือไม่ Strain gauges ถูกวางบนเหล็กเสริมทั้งในตามยาวและตามขวาง ตำแหน่งของ Strain gauges นั้นติดตั้งบริเวณภายในและรอบๆข้อต่อคาน-เสา ดังแสดงในรูปที่ 3.26 แสดงไว้ด้านล่าง Strain gauges ที่ถูกติดตั้งบริเวณโดยรอบข้อต่อคาน-เสานั้นถูกวางไว้บนเหล็กเสริมตามยาวของคานบริเวณด้านหน้าข้อต่อคาน-เสา และวัดจากด้านหน้าข้อต่อคาน-เสาเป็นระยะ $d_c/2$ สำหรับสายไฟที่แนบมากับ Strain gauges แต่ละตัวนั้นรวบรวมไว้และวิ่งไปตามกึ่งกลางของเหล็กเสริมไปหาตำแหน่งที่ใกล้ที่สุดเพื่อนำสายไฟออกมาจากตัวอย่างทดสอบ ข้อควรระวัง การนำมาใช้นั้นควรต้องป้องกัน Strain gauges ไม่ให้เสียหายหรือโดนน้ำ โดยเฉพาะในกระบวนการการหล่อคอนกรีต ตารางที่ 3.4 แสดงรายละเอียดตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดการยืด-หดตัวแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Strain gauges)



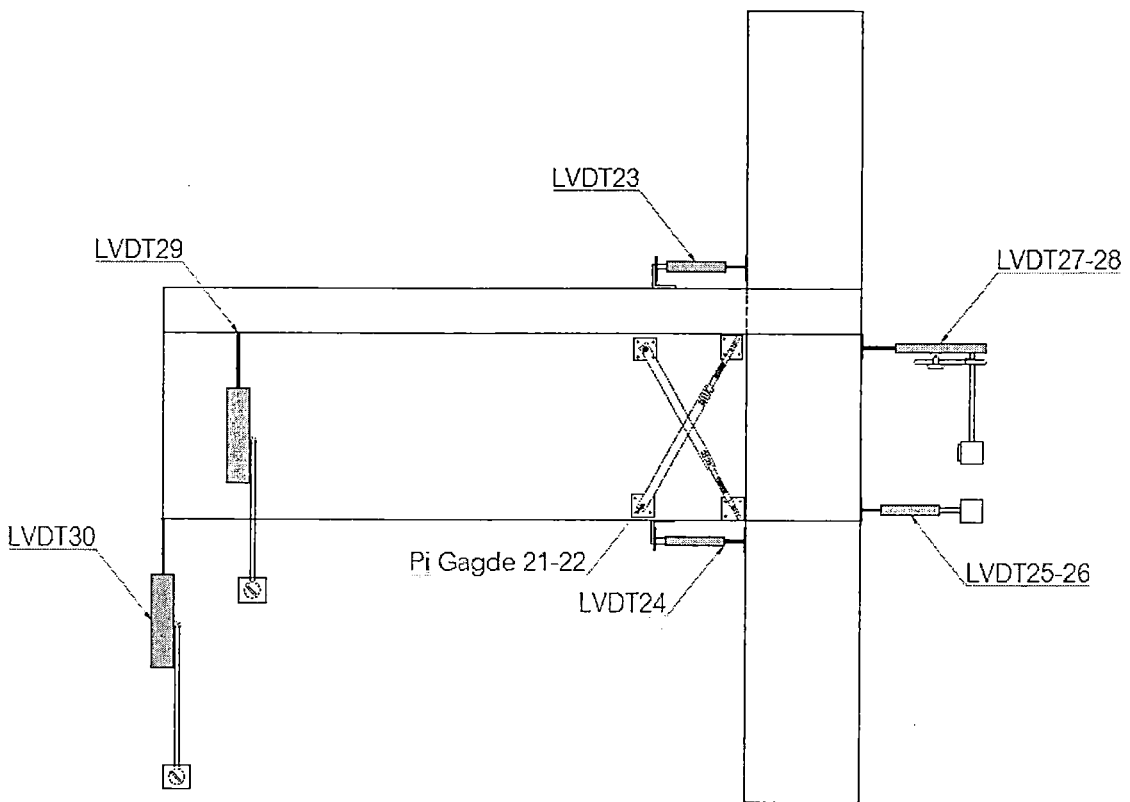
รูปที่ 3.26 การติดตั้งและการเก็บสายไฟของ Strain gauges

ตารางที่ 3.4 การติดตั้งอุปกรณ์วัดการยืด-หดตัวอิเล็กทรอนิกส์ (Strain gauges) ของตัวอย่างทดสอบตัวที่ 1 และ 2

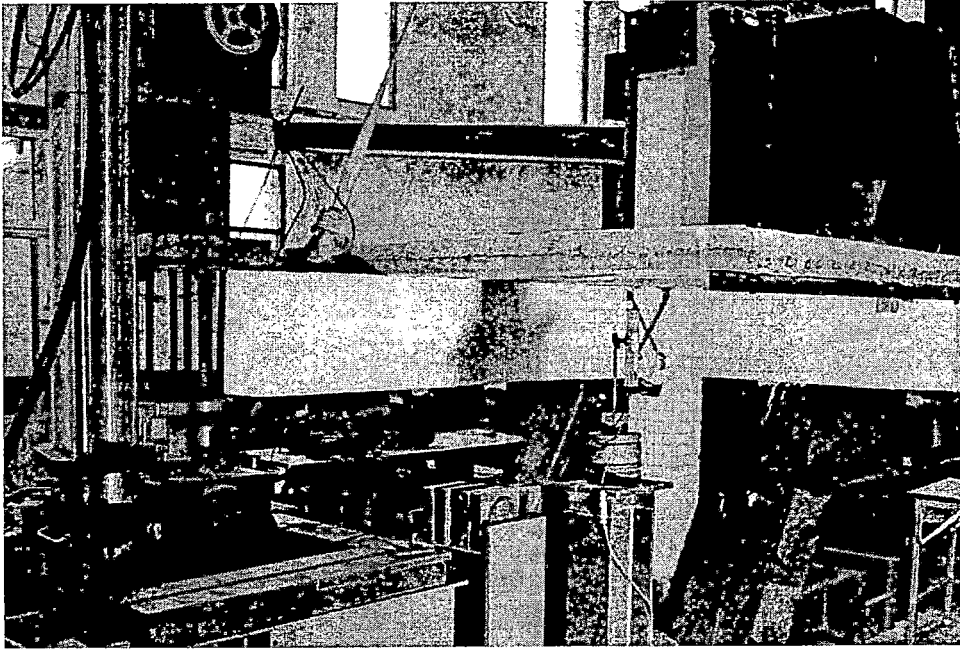
หมายเลข	ตำแหน่งที่ติดตั้ง Strain gauges	
S1	เหล็กเสริมล่างของคาน	กึ่งกลางอปลาย
S2	เหล็กเสริมล่างของคาน	ส่วนโค้ง
S3	เหล็กเสริมล่างของคาน	กึ่งกลางข้อต่อ
S4	เหล็กเสริมล่างของคาน	ด้านหน้าภายในข้อต่อ
S5	เหล็กเสริมล่างของคาน	ด้านหน้าภายนอกข้อต่อ
S6	เหล็กเสริมล่างของคาน	ห่างจากด้านหน้าข้อต่อออกมา $d/2$
S7	เหล็กเสริมบนของคาน	กึ่งกลางอปลาย
S8	เหล็กเสริมบนของคาน	ส่วนโค้ง
S9	เหล็กเสริมบนของคาน	กึ่งกลางข้อต่อ
S10	เหล็กเสริมบนของคาน	ด้านหน้าภายในข้อต่อ
S11	เหล็กเสริมบนของคาน	ด้านหน้าภายนอกข้อต่อ
S11	เสา	มุมบนเหล็กเส้น 1
S13	เสา	กึ่งกลางเหล็กเส้น 1
S14	เสา	มุมล่างเหล็กเส้น 1
S15	เสา	มุมบนเหล็กเส้น 2
S16	เสา	มุมล่างเหล็กเส้น 1
S17	เสา	มุมบนเหล็กเส้น 2
S18	เสา	มุมล่างเหล็กเส้น 1
S19	เสา	มุมบนเหล็กเส้น 4
S10	เสา	มุมล่างเหล็กเส้น 1

3.5.2.3 การติดตั้งอุปกรณ์วัดการยืด-หดตัวแบบเชิงเส้น Linear Variable Differential Transformer (LVDT) แบบอิเล็กทรอนิกส์

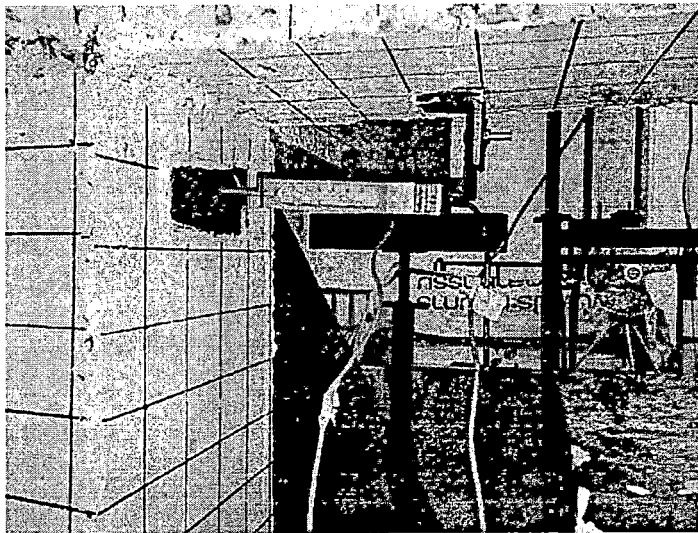
อุปกรณ์วัดการยืด-หดตัวแบบเชิงเส้น Linear Variable Differential Transformer (LVDT) แบบอิเล็กทรอนิกส์ เป็นเครื่องมือวัดการเปลี่ยนตำแหน่งแบบเชิงเส้น สำหรับในการทดสอบสามารถประยุกต์ใช้ LVDT วัดการเปลี่ยนตำแหน่ง ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่ต้องการดังแสดงในรูปที่ 3.27 ซึ่งติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งดังนี้ (1) ปลายของคาน (2) ด้านบนและด้านล่างของคานบริเวณเหนือข้อต่อ (3) ด้านที่ไกลที่สุดของข้อต่อคาน-เสา และ (4) ใต้พื้น ซึ่งข้อมูลที่ได้จาก LVDT นำไปคำนวณหาค่าต่างๆต่อไป รูปที่ 3.28-3.32 แสดงภาพถ่ายการติดตั้งอุปกรณ์วัดต่างๆ ที่ตัวอย่างทดสอบที่ 1 และ 2



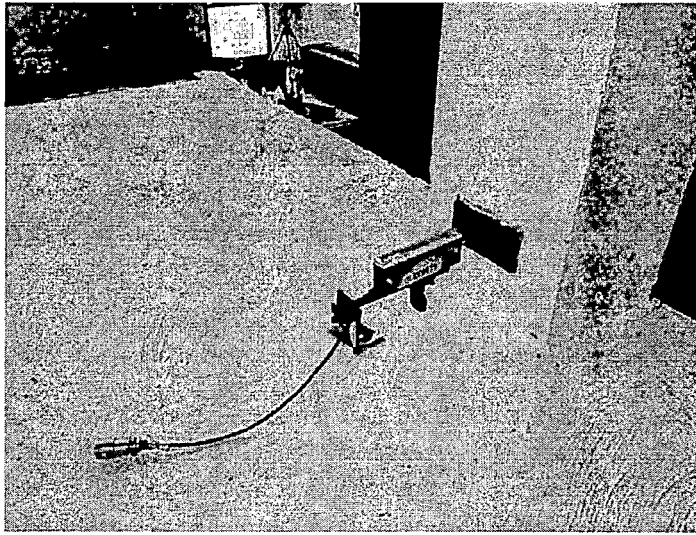
รูปที่ 3.27 การติดตั้งอุปกรณ์วัดการยืด-หดตัวเชิงเส้น (LVDT) อิเล็กทรอนิกส์ และ Pi Gauge



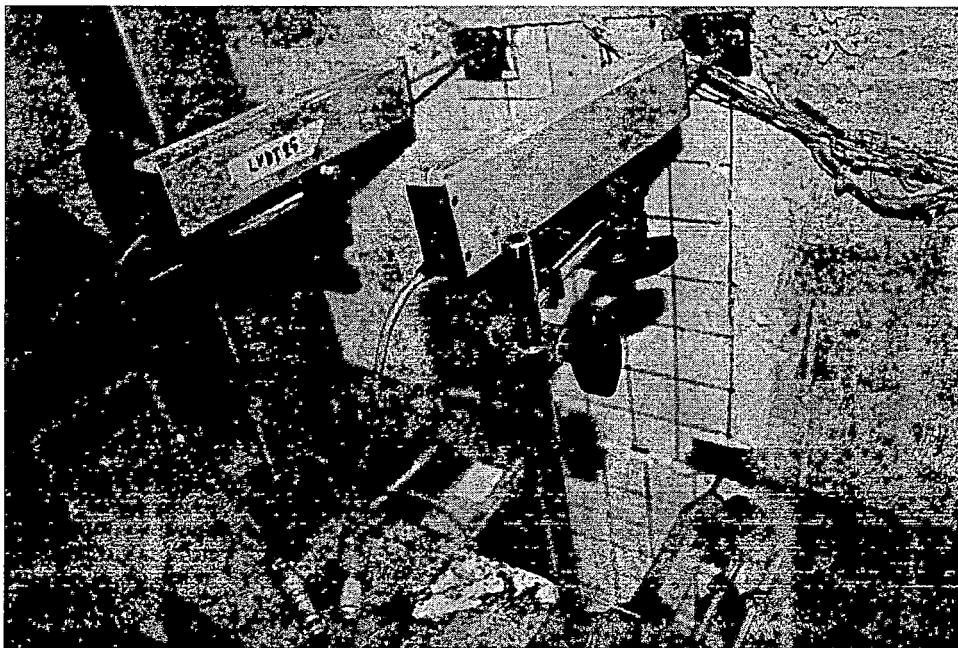
รูปที่ 3.28 การติดตั้ง LVDT ที่ใต้พื้นและปลายคาน



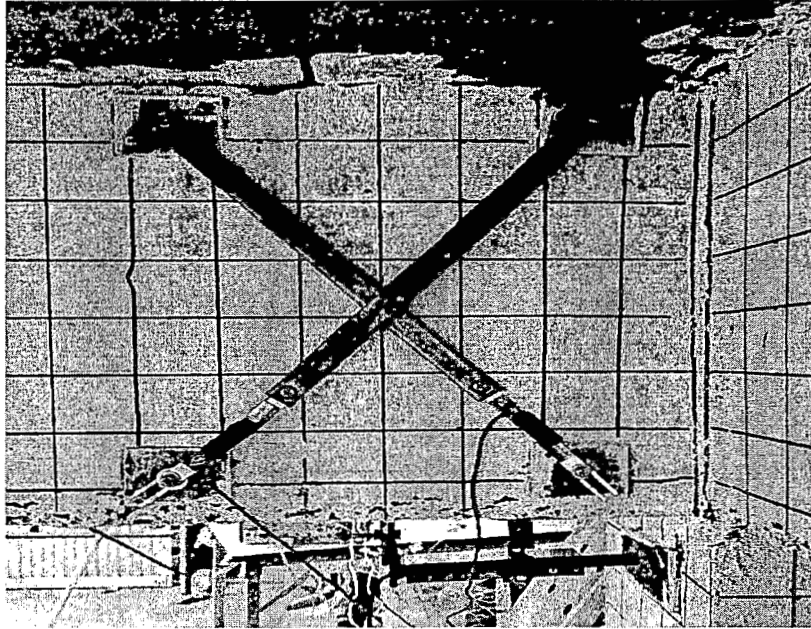
รูปที่ 3.29 การติดตั้ง LVDT ที่ใต้คาน



รูปที่ 3.30 การติดตั้ง LVDT ที่เหนือพื้น



รูปที่ 3.31 การติดตั้ง LVDT ที่ด้านหลังของข้อต่อ



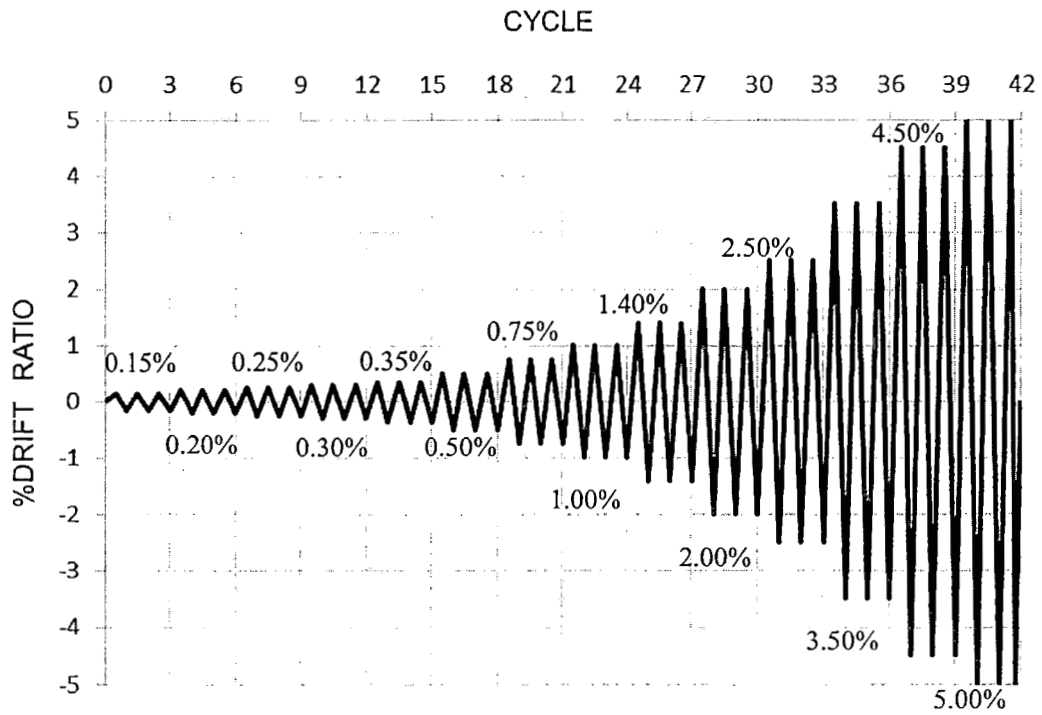
รูปที่ 3.32 การติดตั้ง Pi Gauge

3.5.3 การกำหนดแรงสลับทิศทาง (Cyclic loading)

การทดสอบชิ้นงานภายใต้แรงแผ่นดินไหวกำหนดจะใช้ค่าการเปลี่ยนตำแหน่งที่ปลายของเป็นตัวควบคุมในการทดลอง ซึ่งกำหนดค่าการเปลี่ยนตำแหน่งที่ปลายของคานได้ดังสมการ 3.1

$$\Delta = \theta \times \left(L_b + \frac{d_c}{2} \right) \quad (3.1)$$

โดยลำดับของการบังคับให้ปลายของคานเคลื่อนที่ขึ้นและลง แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.33 ซึ่งในแต่ละ Drift นั้นบังคับให้ปลายของคานเคลื่อนที่ทั้งหมด 3 รอบ



รูปที่ 3.33 ลำดับการใส่ระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานกับตัวอย่างชิ้นงานที่ 1 และ 2

รูปที่ 3.33 ลำดับการใส่ระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานกับตัวอย่างชิ้นงานที่ 1 และ 2 ซึ่งใช้ตามคำแนะนำโดย ACI T1.1-01 (ACI 2001) ในการเคลื่อนบังคับนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ (1) เคลื่อนที่ขึ้น และ (2) เคลื่อนที่ลง โดยการบังคับปลายของคานของตัวอย่างชิ้นงานเคลื่อนที่ขึ้นไปตามระดับที่กำหนด แล้วบังคับให้เคลื่อนที่ลงมาที่ระดับเริ่มต้น จากนั้นบังคับให้เคลื่อนที่ลงไปตามระดับเดียวกับเคลื่อนที่ขึ้น สุดท้ายบังคับให้ตัวอย่างชิ้นงานกลับขึ้นมาที่ระดับเริ่มต้นซึ่งจะสิ้นสุดการทดสอบ 1 รอบ (cycle) แล้วจะกระทำซ้ำเป็นจำนวนทั้งหมด 3 รอบ จึงจะเปลี่ยนค่าระดับการเคลื่อนที่ให้เพิ่มมากขึ้น ตารางที่ 3.5 แสดงความยาวของคานและขนาดหน้าตัดเสาของตัวอย่างชิ้นที่ 1 และ 2 และตารางที่ 3.6 แสดงการคำนวณระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน คำนวณจากสมการข้างต้นเพื่อใช้ในการทดสอบตัวอย่างที่ 1 และ 2 อย่างไรก็ตามเนื่องจากเครื่องทดสอบ UTM มีความสามารถเคลื่อนที่ได้สูงสุดเท่ากับ 125 มิลลิเมตร จึงกำหนดระยะการเคลื่อนที่สูงสุดสำหรับการทดสอบไว้ที่ 125 มิลลิเมตร การใส่ระยะการเคลื่อนที่จะดำเนินไปเรื่อยๆ และหยุดเมื่อตัวอย่างทดสอบ เมื่อตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำได้น้อยกว่า 50% ของแรงกระทำสูงสุด หรืออาจเกิดอันตรายจากการทดสอบ

ตารางที่ 3.5 ความยาวของคานและขนาดหน้าตัดเสาของตัวอย่างชั้นที่ 1 และ 2

ตัวอย่างที่	L_b (ซม.)	d_c (ซม.)	$(L_b+d_c)/2$ (ซม.)
1	241	23	252.5
1	241	23	252.5

ตารางที่ 3.6 ระยะเวลาเปลี่ยนตำแหน่งของปลายของคานที่ใช้ในการทดสอบ

%Drift Ratio	Drift (θ , rad)	Cycle	Δ (มม.)
0.15%	0.0015	3	3.787
0.20%	0.002	3	5.050
0.25%	0.0025	3	6.312
0.25%	0.0025	3	8.837
0.50%	0.005	3	12.625
0.75%	0.0075	3	18.937
1.00%	0.01	3	25.250
1.00%	0.014	3	35.350
1.00%	0.01	3	50.500
2.50%	0.025	3	63.125
3.50%	0.035	3	88.375
3.50%	0.005	3	113.625
5.0%	0.05	3	126.25

บทที่ 4

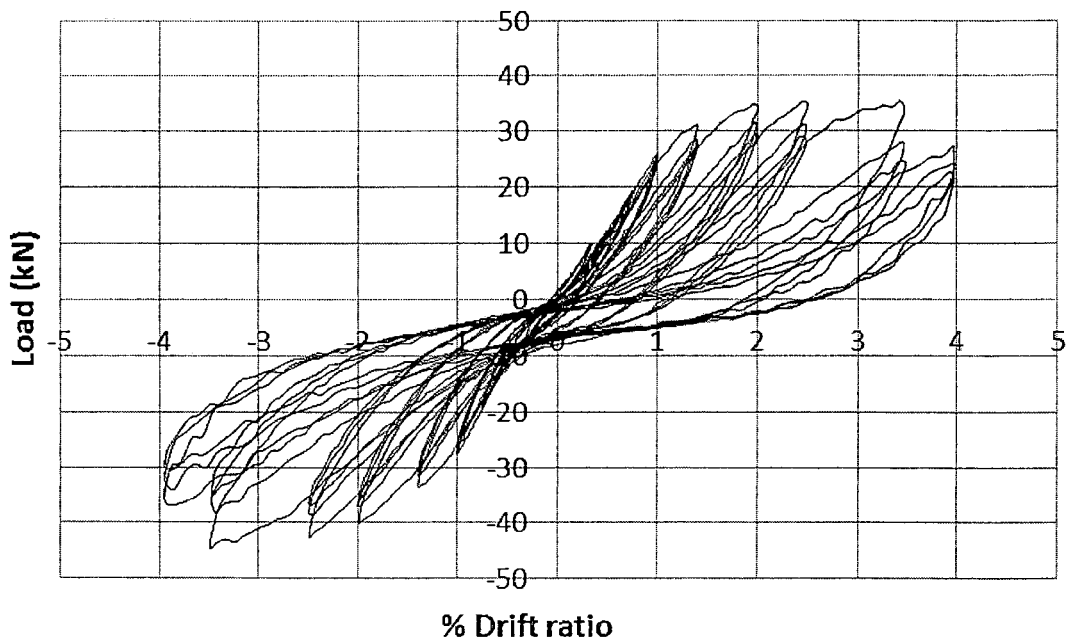
ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคาน (Load) กับ %Drift ratio

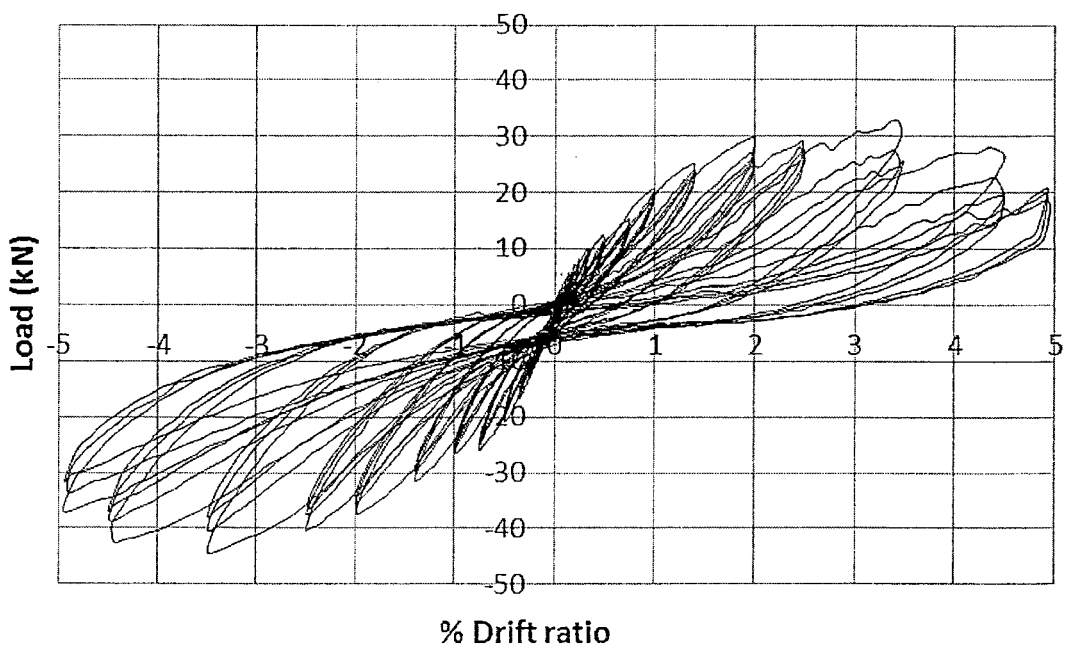
ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคาน Load กับ %Drift ratio ของตัวอย่างชิ้นงานที่ 1 และ 2 แสดงไว้ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ โดย แรงกระทำที่ปลายคาน (Load) เป็นข้อมูลที่บันทึกได้จากเครื่องทดสอบ UTM และ %Drift ratio ที่คำนวณได้จากสมการ 3.1 เมื่อเครื่องทดสอบ UTM เคลื่อนที่ขึ้น เครื่องจะดึงปลายคานขึ้นค่าแรงที่บันทึกได้จะมีค่าเป็นบวกและค่า %Drift ratio ที่คำนวณได้มีค่าเป็นบวกเช่นกัน ในทิศทางกลับกันเมื่อเครื่องทดสอบ UTM เคลื่อนที่ลง เครื่องจะกดปลายคานลงค่าแรงที่บันทึกได้จะมีค่าเป็นลบและค่า %Drift ratio ที่คำนวณได้มีค่าเป็นลบ รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคาน (Load) กับ %Drift ratio ของตัวอย่างชิ้นงานที่ 1 แรงในทิศทางขึ้นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 33.4 kN เกิดที่ 3.5% Drift ratio และแรงกระทำในทิศทางลงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 44.4 kN เกิดที่ 3.5% Drift ratio เช่นกัน รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคาน (Load) กับ %Drift ratio ของตัวอย่างชิ้นงานที่ 2 แรงในทิศทางขึ้นสูงสุดเกิดที่ %Drift ratio 3.5% มีค่าเท่ากับ 30.1 kN และแรงกระทำในทิศทางลงสูงสุด มีค่าเท่ากับ 44.5 kN และเกิดขึ้นที่ 3.5% Drift ratio เช่นกัน

รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคาน (Load) กับ %Drift ratio ของตัวอย่างชิ้นงานที่ 1 ในรอบการเคลื่อนที่ปลายคานที่ %Drift ratio เท่ากับ 0.35% เส้นกราฟทั้งสองเส้นทับกันสนิทเป็นวงรอบ (Loop) เล็กและเป็นเส้นตรงแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างทดสอบที่ 1 ยังอยู่ในสภาวะยืดหยุ่น และเมื่อสังเกตจากตัวอย่างยังไม่พบรอยแตกที่ผิวบนตัวอย่าง ส่วนในรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคาน (Load) กับ %Drift ratio ของตัวอย่างชิ้นงานที่ 1 ในรอบการเคลื่อนที่ปลายคานที่ %Drift ratio เท่ากับ 2.0% เมื่อเทียบกับรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าเมื่อ %Drift เพิ่มขึ้นแรงที่เกิดขึ้นก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วยโดยเพิ่มขึ้นจากแรงสูงสุดเท่ากับ 10 kN. เป็น 35 kN. อย่างไรก็ตามในค่าการเคลื่อนที่นี้จะสังเกตเห็นว่าแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละรอบของการเคลื่อนที่มีค่าค่อยๆลดลง ถึงแม้ว่าระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานมีค่าเท่ากัน นอกจากนี้ความชันของกราฟยังลดลงอีกด้วย และเมื่อสังเกตจากตัวอย่างทดสอบพบรอยแตกเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างคานและเสา บางส่วนในคานและเสา รอยต่อ จากรูปกราฟยังพบอีกว่าลักษณะกราฟมีการบิดและขนาดความกว้างของกราฟแคบลงที่บริเวณตรงกลางรูปกราฟเมื่อเทียบกับความกว้างของกราฟที่บริเวณด้านบนและล่างของกราฟ พฤติกรรมนี้นักวิจัยท่านอื่นๆ ได้รายงานไว้แล้วก่อนหน้านี้ โดยได้เรียกพฤติกรรมนี้ว่า “Pinching effect”

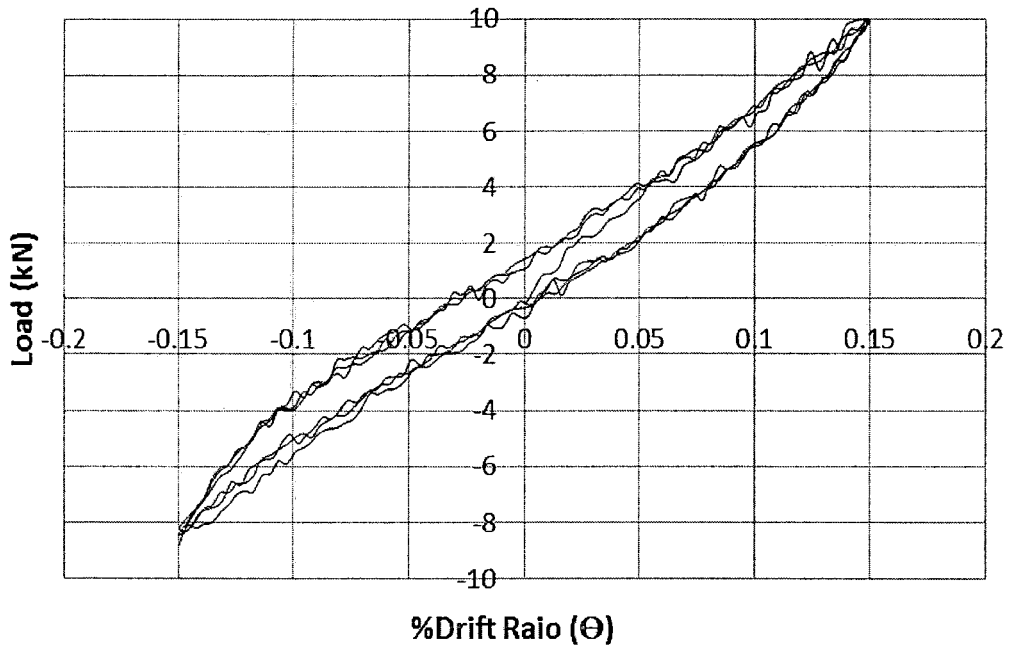
พฤติกรรมโดยรวมที่เกิดขึ้นในรอบการเคลื่อนที่นี้สรุปได้ว่าเกิดขึ้นเนื่องจากการแตกของคอนกรีตด้านนอกที่บริเวณข้อต่อและรอบๆ และเป็นรอยแตกสังเกตได้ชัดเจน แสดงว่าตัวอย่างเข้าสู่สภาวะไม่เชิงเส้นแล้ว



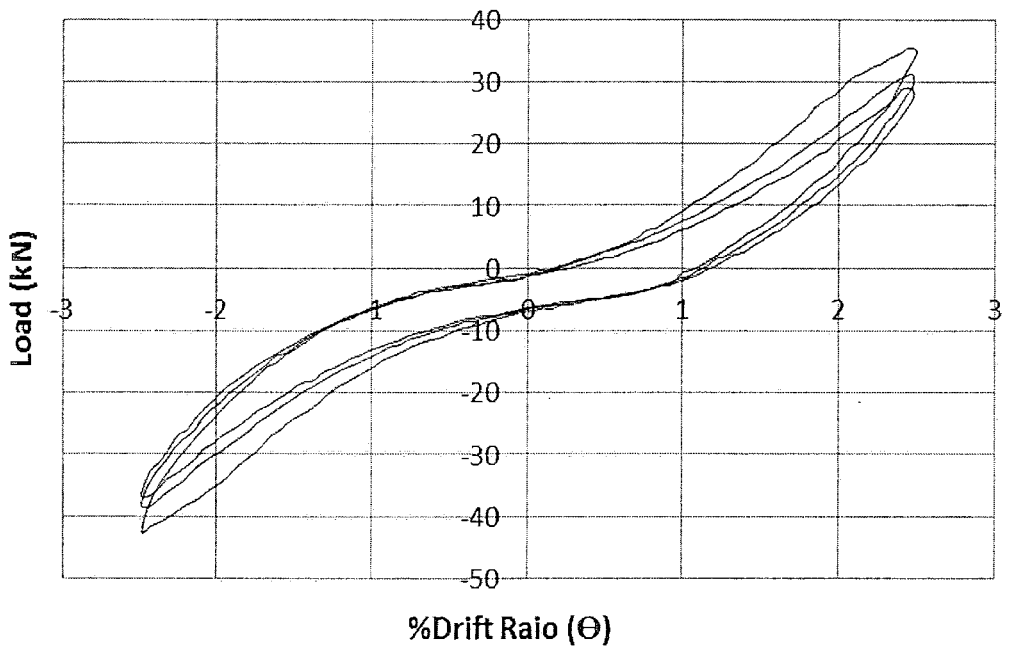
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคาน (Load) กับ % Drift ratio ของตัวอย่างชิ้นงานที่ 1



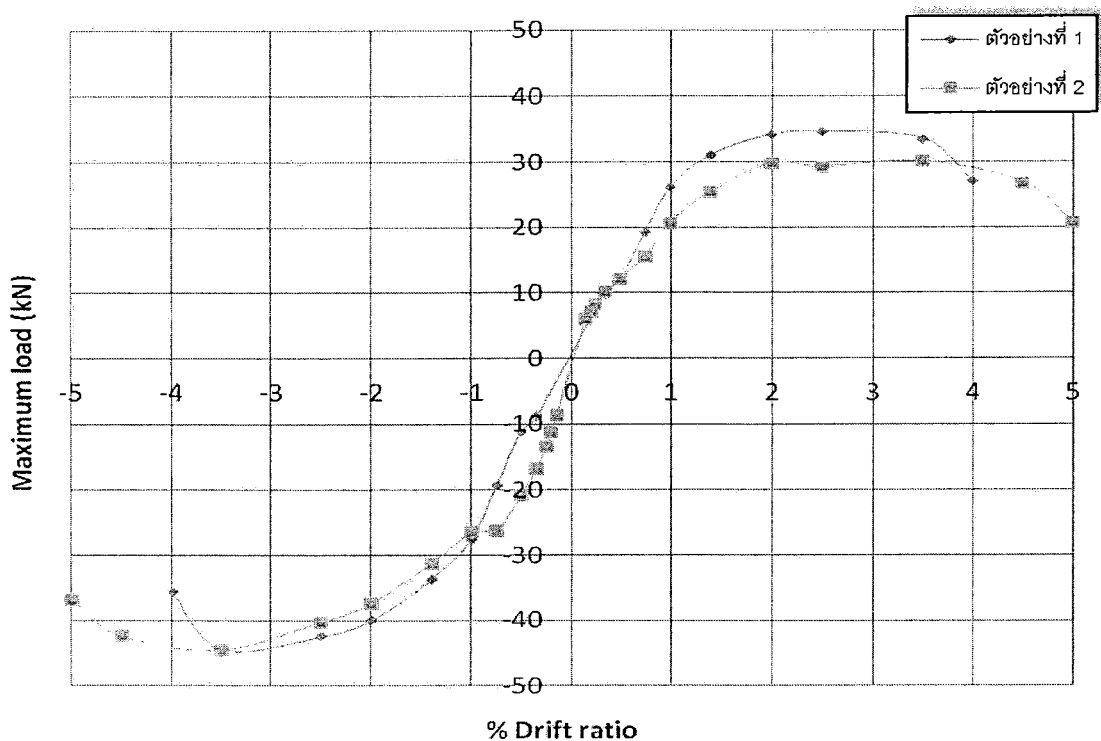
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคาน (Load) กับ % Drift ratio ของตัวอย่างชิ้นงานที่ 2



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคาน (Load) และ %Drift ratio ของตัวอย่างชิ้นงานที่ 1 ในรอบการเคลื่อนที่ 0.35% Drift ratio



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคาน (Load) และ %Drift ratio ของตัวอย่างชิ้นงานที่ 1 ในรอบการเคลื่อนที่ 2.0% Drift ratio



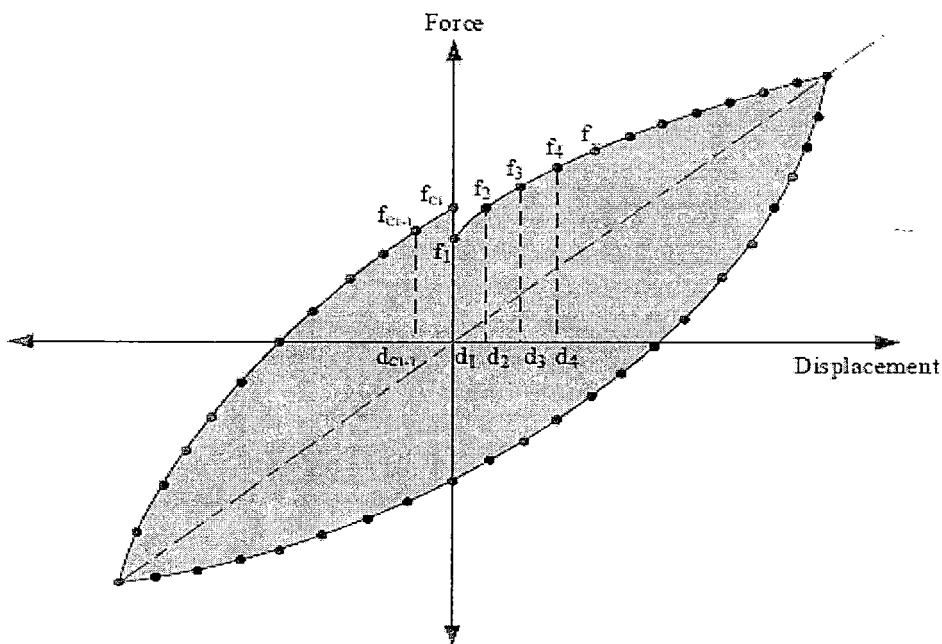
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำสูงสุด (Maximum Load) และ %Drift ratio ของตัวอย่างชิ้นงานที่ 1 และ 2

รูปที่ 4.5 เป็นการเปรียบเทียบค่าแรงกระทำสูงสุดที่เกิดในแต่ละ %Drift ratio ที่เกิดขึ้นของตัวอย่างทดสอบทั้งสอง จากรูปพบว่าเมื่อปลายคานเคลื่อนที่ขึ้นตัวอย่างที่ 1 รับแรงกระทำสูงสุดได้มากกว่าตัวอย่างที่ 2 ประมาณ 5 kN. และเมื่อปลายคานเคลื่อนที่ลงทั้งสองตัวอย่างรับแรงกระทำที่ปลายคานได้เท่ากันที่ประมาณ 45 kN. ส่วนค่า %Drift ratio สูงสุดของทั้งสองตัวอย่างมีค่าเท่ากับโดยมีค่าเท่ากับ 2.5% เมื่อปลายคานเคลื่อนที่ขึ้นและ 3.5% เมื่อปลายคานเคลื่อนที่ลง ตัวอย่างที่ 1 แสดงพฤติกรรมยืดหยุ่นจนถึงประมาณ 1% Drift ratio โดยประมาณทั้งด้านบวกและลบ สามารถสังเกตได้จากความชันของเส้นกราฟที่เป็นเส้นตรงในช่วงนี้ และตัวอย่างสามารถหมุนได้สูงสุดเท่ากับ 4% Drift ratio จากนั้นตัวอย่างที่ 1 เกิดการเสียหายอย่างรุนแรง มีการกระเทาะออกของคอนกรีตจนทำให้ไม่สามารถดำเนินการทดสอบต่อได้ ส่วนตัวอย่างที่ 2 นั้นมีพฤติกรรมแตกต่างจากตัวอย่างที่ 1 กล่าวคือ พฤติกรรมยืดหยุ่นของตัวอย่างที่ 2 นี้มีค่าอยู่ที่ 0.5% และสามารถหมุนได้สูงสุดเท่ากับ 5% Drift ratio จากนั้นตัวอย่างเกิดการเสียหายอย่างรุนแรงจนต้องหยุดการทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของตัวอย่างทั้งสองพบว่า ข้อต่อตัวอย่างที่ 1 สามารถรับแรงที่ปลายคานและมีค่าความแข็งของข้อต่อมากกว่าตัวอย่างที่ 2 เล็กน้อย แต่ข้อต่อตัวอย่างที่ 2 สามารถการหมุนตัวได้มากกว่า และเมื่อพิจารณาจากรูปกราฟที่ 4.3

และ 4.4 (Hysteretic Loop) จะเห็นว่ามีความใหญ่กว่า จึงสรุปได้ว่าข้อต่อตัวอย่างที่ 2 ที่มีรายละเอียดการเสริมเหล็กสำหรับรับแรงแผ่นดินไหวมีความเหนียวมากกว่าข้อต่อตัวอย่างที่ 1 ที่มีรายละเอียดการเสริมเหล็กแบบรับแรงในแนวตั้งเท่านั้น

4.2 การสลายพลังงานสะสม (Cumulative energy dissipation)

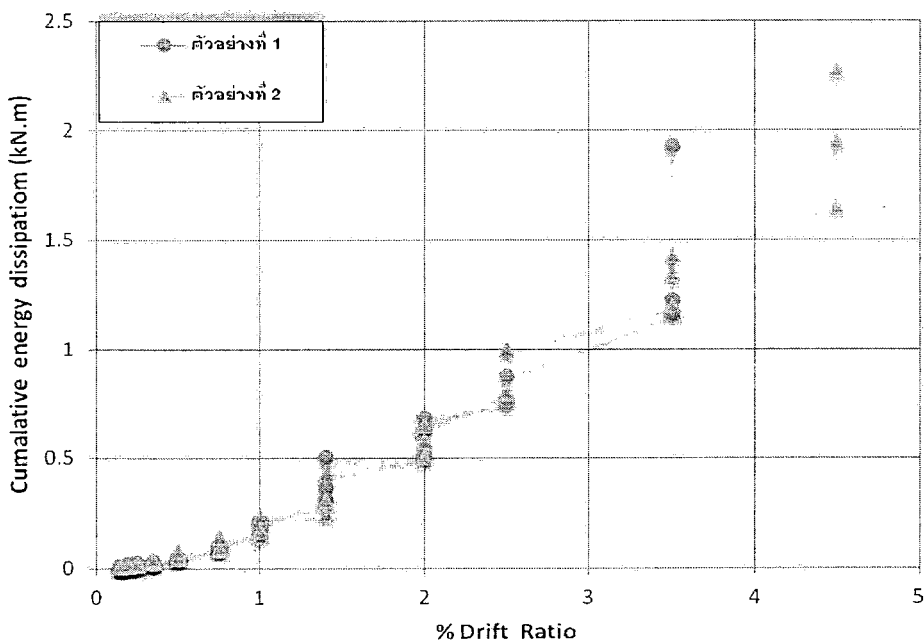
การสลายพลังงานของข้อต่อคาน-เสาเกิดจากการรอยแตกกว้างในคอนกรีตและการยืดตัวของเหล็กเสริม พลังงานสามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเปลี่ยนรูป) ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งพื้นที่ส่วนที่แรเงาของกราฟแรงกระทำและการเคลื่อนที่ (Hysteretic Loop) ในแต่ละรอบแสดงการดูดซับพลังงานของตัวอย่างชิ้นงานทดสอบ เนื่องจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนรูปไม่สามารถเขียนในรูปฟังก์ชันได้ ดังนั้นการหาพื้นที่ใต้กราฟจึงจำเป็นต้องอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) โดยวิธีที่เลือกใช้คือวิธีการประมาณโดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Rule) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.1 และรูปกราฟประกอบการคำนวณ



รูปที่ 4.6 การหาพื้นที่ใต้กราฟโดยประมาณจากกฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Rule)

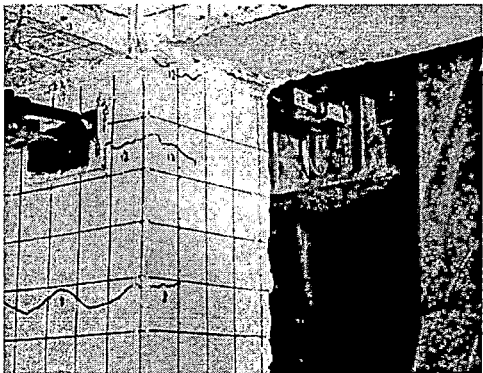
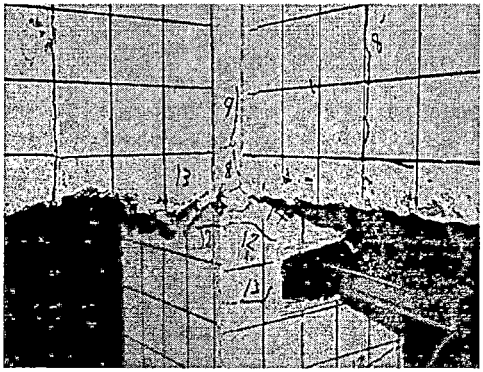
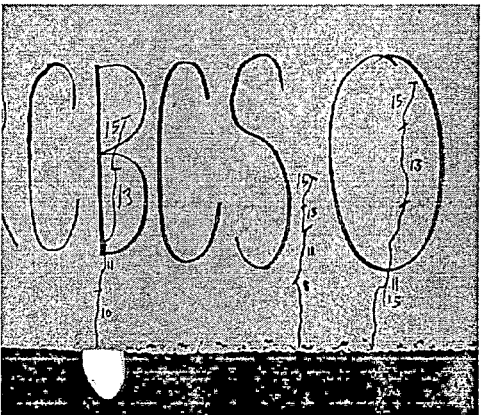
$$E_1 = \frac{1}{2}((f_1 + f_2) \times (d_2 - d_1) + (f_2 + f_3) \times (d_3 - d_2)) \quad (4.1)$$


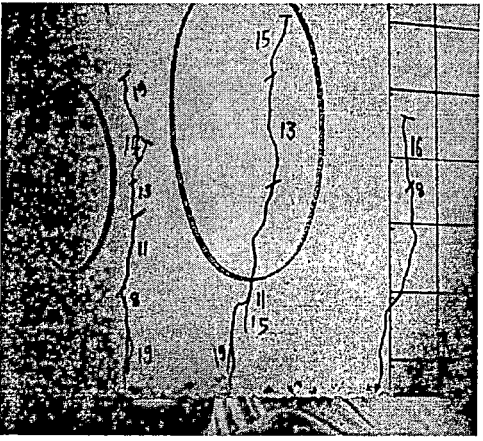
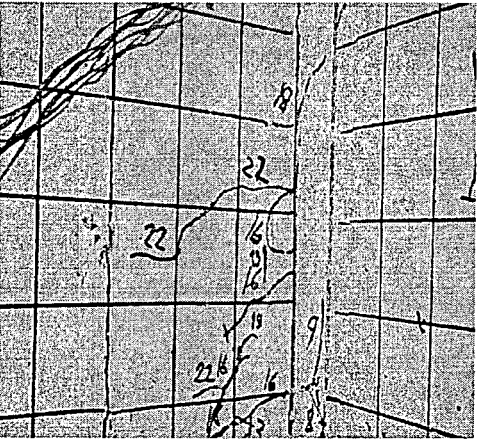
ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานดูดซับสะสม (Cumulative energy dissipation) และ %Drift Ratio ของตัวอย่างชิ้นงานที่ 1 และ 2 แสดงไว้ในรูปที่ 4.7 จุดแต่ละจุดแสดงค่าพลังงานสะสมที่ตัวอย่างชิ้นงานสามารถดูดซับได้ในแต่ละรอบของการทดสอบ จะเห็นได้ว่าในแต่ละรอบจะมีค่าพลังงานไม่เท่ากัน ถึงแม้ทดสอบด้วยค่า Drift ที่เท่ากัน โดยในรอบแรกของแต่ละ Drift สามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่าในรอบอื่นๆ เนื่องจากในรอบแรกของแต่ละ Drift สามารถรับแรงได้มากกว่ารอบอื่นและทำให้เกิดรอยแตกกว้างเพิ่มขึ้นจึงทำให้รอบอื่นหลังจากรอบแรกจึงรับแรงได้น้อยลง ส่งผลให้ค่าพลังงานที่ดูดซับลดน้อยลงด้วย การสลายพลังงานของตัวอย่างชิ้นงานที่ 1 เกิดขึ้นสูงสุดที่ Drift Ratio 3.5% มีค่าเท่ากับ 1.9 kN-m และการสลายพลังงานของตัวอย่างชิ้นงานที่ 2 เกิดขึ้นสูงสุดที่ Drift Ratio 4.5% มีค่าเท่ากับ 2.3 kN-m โดยตัวอย่างที่ 2 สามารถสลายพลังงานได้เพิ่มขึ้น 21% จากตัวอย่างที่ 1 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าตัวอย่างข้อต่อที่มีรายละเอียดการเสริมเหล็กเพื่อรับแรงแผ่นดินไหว (ตัวอย่างที่ 2) โดยการเพิ่มเหล็กปลอกในข้อต่อ และเพิ่มเหล็กปลอกในบริเวณคานและเสาใกล้ๆข้อต่อ สามารถสลายพลังงานได้ดีกว่าตัวอย่างข้อต่อที่มีรายละเอียดการเสริมเหล็กเพื่อรับแรงในแนวตั้งเท่านั้น (ตัวอย่างที่ 1)

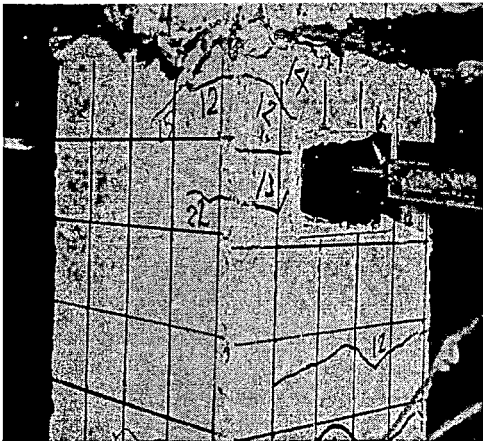
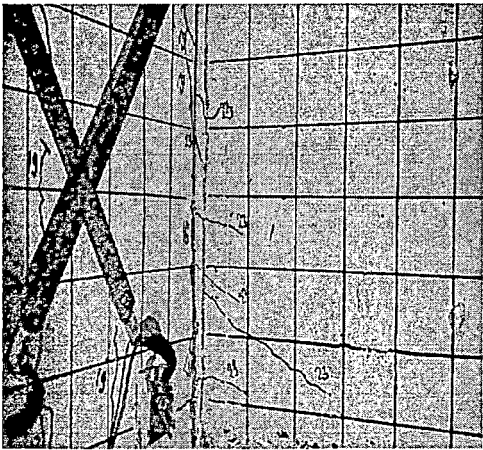
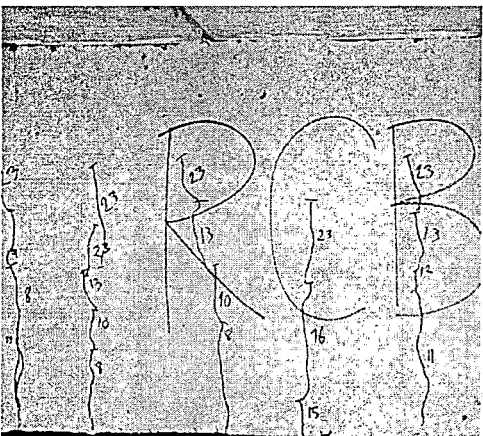


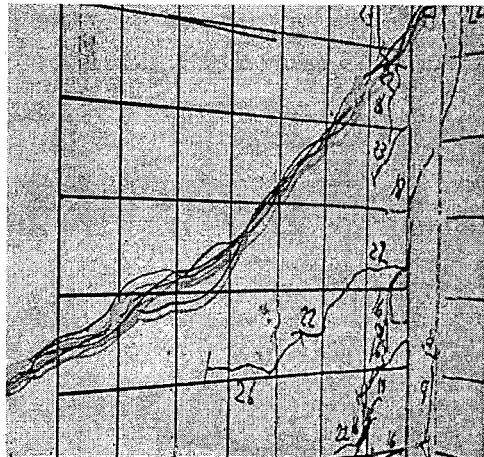
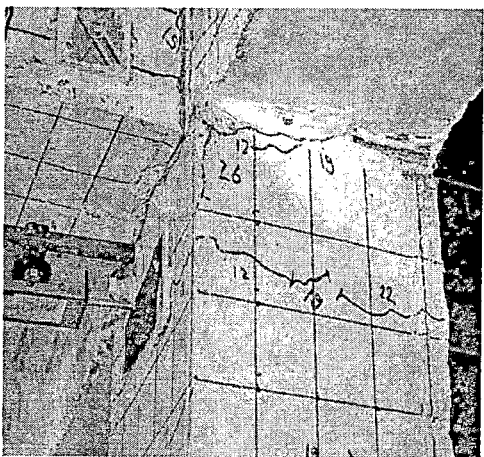
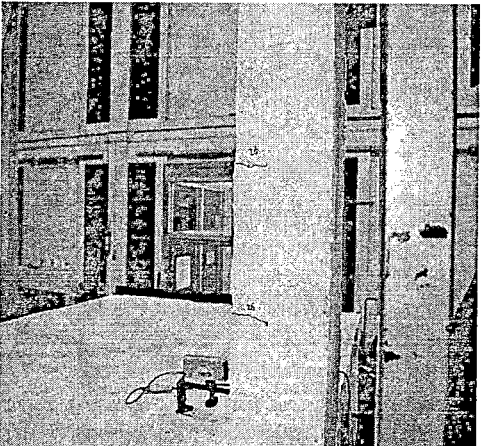
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Cumulative energy dissipation กับ %Drift Ratio ของตัวอย่างชิ้นงานที่ 1 และ 2


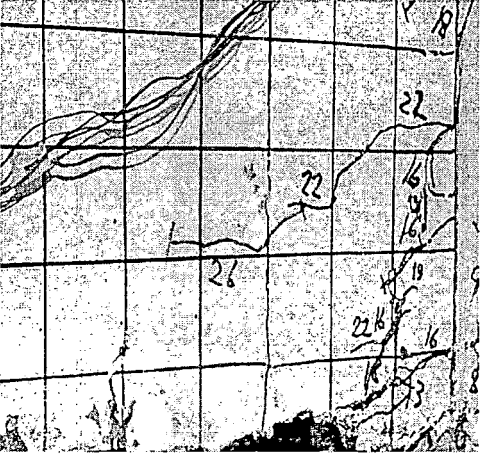
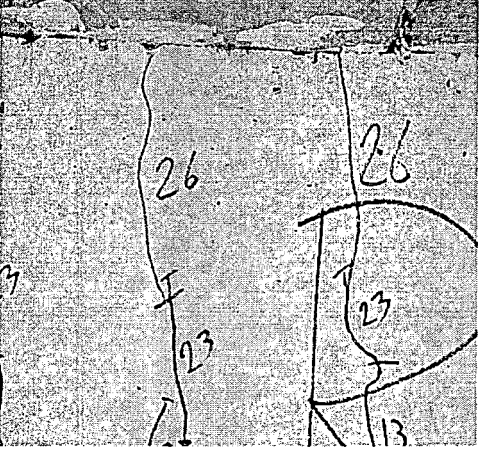
4.3 ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นและสังเกตได้จากการทดสอบตัวอย่างข้อต่อที่ 1
 (ข้อต่อที่มีรายละเอียดการเสริมเหล็กเพื่อรับแรงในแนวตั้งและใช้ในงานก่อสร้างอาคาร ค.ส.ส.ทั่วไป)

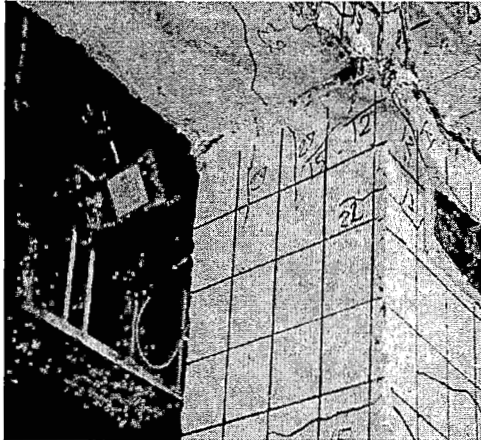
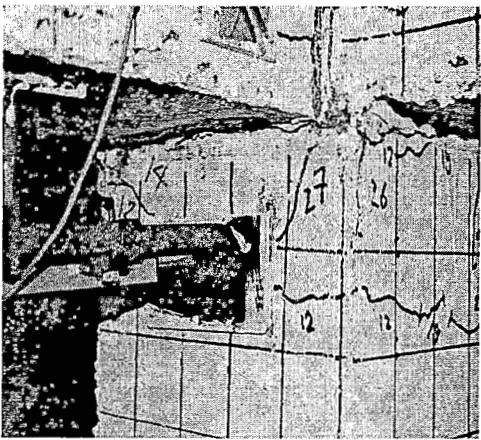
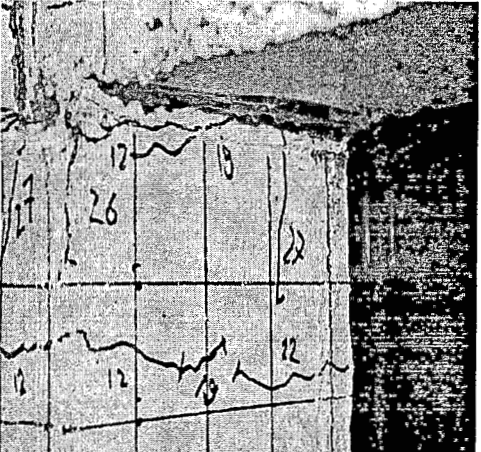
ลำดับที่	Drift Ratio @ Cycle	ภาพความเสียหายของตัวอย่างที่ 1	ลักษณะการเสียหาย
1	8		-เสาเกิดรอยแตกร้าวในแนวราบเนื่องจากโมเมนต์เพิ่มขึ้น
2	8-13		-เสาเกิดรอยแตกร้าวในแนวราบเนื่องจากโมเมนต์ต่อจากรอยแตกเดิม -ข้อต่อเกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งบริเวณจุดต่อเนื่องจากโมเมนต์และเกิดรอยแตกเป็นแนวทแยงมุมเบนออกจากข้อต่อเนื่องจากแรงเฉือน -คานเกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งเนื่องจากโมเมนต์
3	8-15		-คานเกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งและเอียงเป็นมุมเล็กน้อยซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากโมเมนต์และแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้น

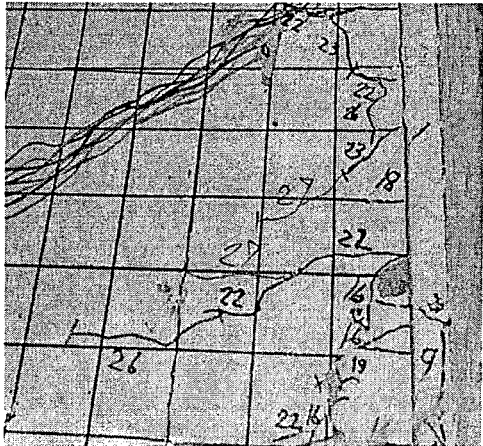
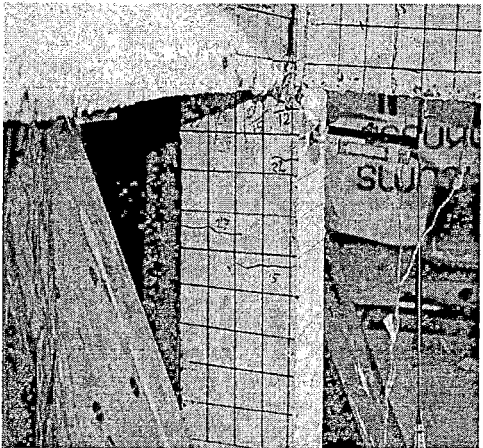
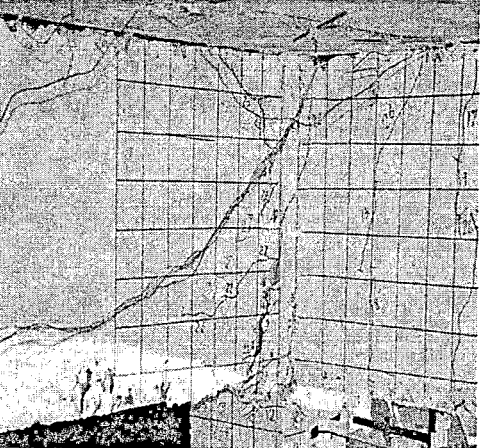
ลำดับที่	Drift Ratio @ Cycle	ภาพความเสียหายของตัวอย่างที่ 1	ลักษณะการเสียหาย
4	8-16		<p>-ข้อต่อเกิดรอยแตกเป็นแนวทแยงมุมเบนออกจากข้อต่อไป หากานรองเนื่องจากแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้น โดยที่รอยแตกมีขนาดยาวขึ้นต่อจากรอบก่อน</p>
5	8-19		<p>-คานเกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งและเอียงเป็นมุมเล็กน้อยซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากโมเมนต์และแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้น โดยที่รอยแตกมีขนาดยาวขึ้นต่อจากรอบก่อน</p>
5	8-19		<p>-ข้อต่อเกิดรอยแตกเป็นแนวทแยงมุมเบนออกจากข้อต่อไป หากานรองเนื่องจากแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้น โดยที่รอยแตกมีขนาดยาวขึ้นต่อจากรอบก่อน</p>


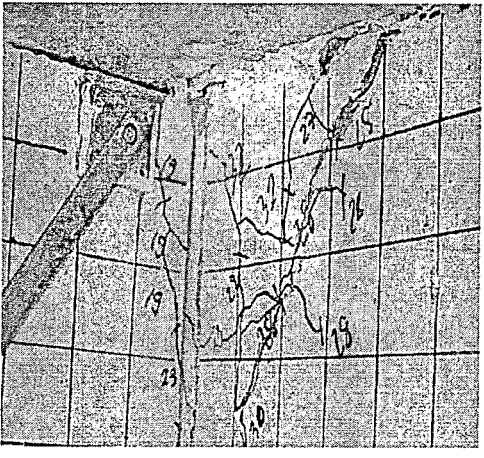
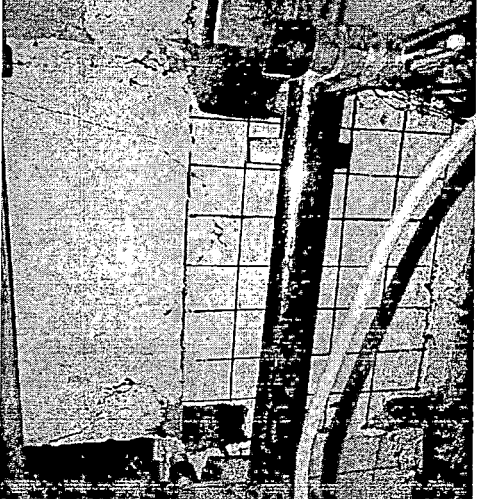
ลำดับที่	Drift Ratio @ Cycle	ภาพความเสียหายของตัวอย่างที่ 1	ลักษณะการเสียหาย
7	12-22		<p>-เสาเกิดรอยแตกกร้าวในแนวราบเนื่องจากโมเมนต์ต่อจากรอยแตกเดิม</p>
8	15-23		<p>-ข้อต่อเกิดรอยแตกเป็นแนวทแยงมุมเบนออกจากข้อต่อไป ทิศทางรองเนื่องจากแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้น โดยที่รอยแตกมีขนาดยาวขึ้นต่อจากรอบก่อน</p> <p>-คานเกิดรอยแตกกร้าวในแนวตั้งและเอียงเป็นมุมเล็กน้อยซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากโมเมนต์และแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้น</p>
7	8-23		<p>-คานเกิดรอยแตกกร้าวในแนวตั้งเนื่องจากโมเมนต์และทแยงมุมเล็กน้อยเนื่องจากแรงเฉือนเพิ่มขึ้นโดยที่รอยแตกมีขนาดยาวขึ้นต่อจากรอบก่อน</p>

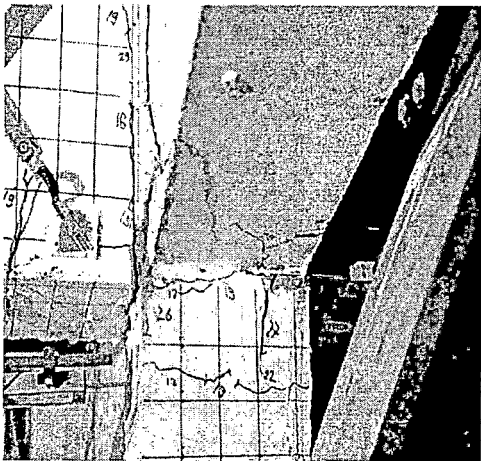


ลำดับที่	Drift Ratio @ Cycle	ภาพความเสียหายของตัวอย่างที่ 1	ลักษณะการเสียหาย
10	8-26		<p>-ข้อต่อเกิดรอยแตกเป็นแนวทแยงมุมเบนออกจากข้อต่อไปหาคานรองรับเนื่องจากแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้น โดยที่รอยแตกมีขนาดยาวขึ้นต่อจากรอบก่อน</p>
11	8-26		<p>-เสาเกิดรอยแตกร้าวในแนวราบเนื่องจากโมเมนต์ต่อจากรอยแตกเดิม และมีรอยแตกเป็นแนวทแยงมุมเบนออกจากข้อต่อเข้าสู่เสาซึ่งเกิดจากแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้น</p>
11	8-26		<p>-เสาเกิดรอยแตกร้าวในแนวราบของเสาช่วงบนเนื่องจากโมเมนต์</p>

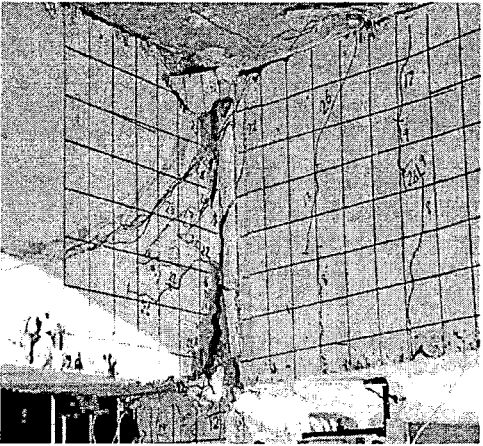
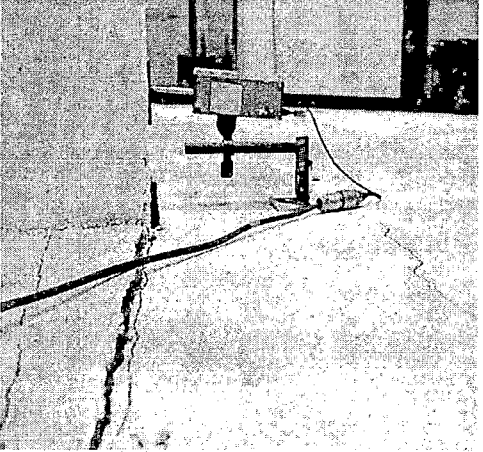
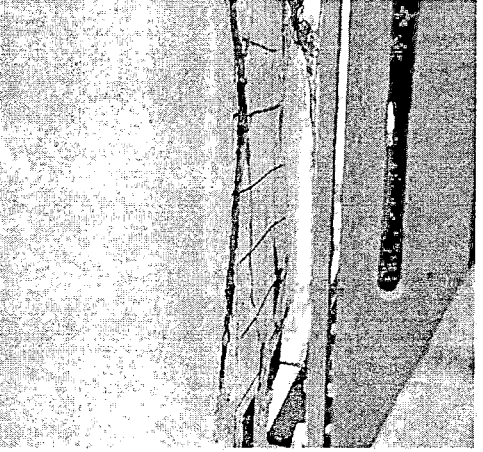
ลำดับที่	Drift Ratio @ Cycle	ภาพความเสียหายของตัวอย่างที่ 1	ลักษณะการเสียหาย
13	26		-พื้นเกิดรอยแตกร้าวบริเวณรอยต่อของพื้นสำเร็จรูป
14	8-26		-ข้อต่อเกิดรอยแตกเป็นแนวทแยงมุมเบนออกจากข้อต่อไป หากานรองเนื่องจากแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้น โดยที่รอยแตกมีขนาดยาวขึ้นต่อจากรอบก่อน และรอยแตกมีขนาดกว้างขึ้นจนทำให้คอนกรีตเริ่มกะเทาะหลุดร่อน
15	8-26		-คานเกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งเนื่องจากโมเมนต์และทแยงมุมเล็กน้อยเนื่องจากแรงเฉือนเพิ่มขึ้นต่อจากรอยแตกกรอบก่อน

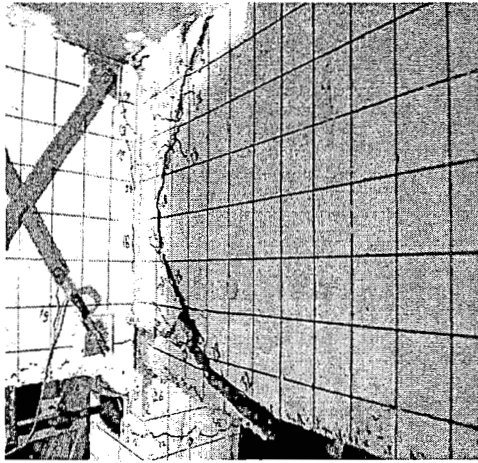
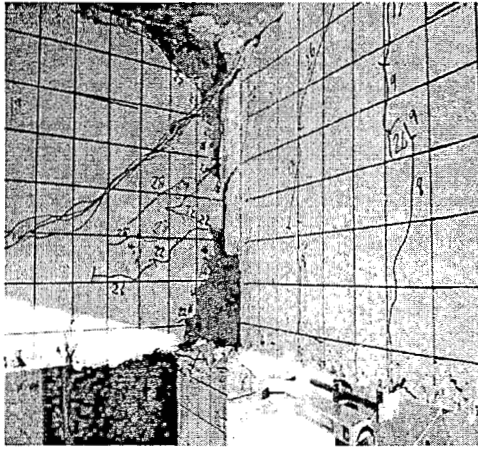
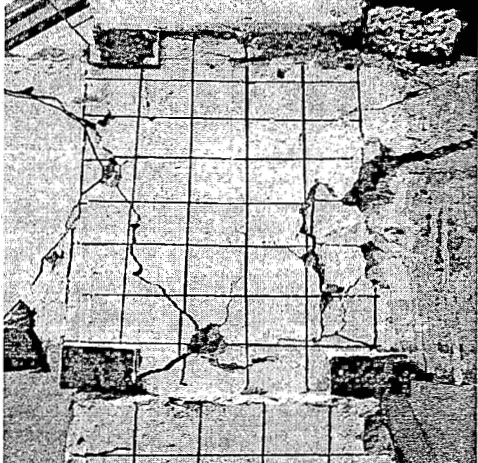
ลำดับที่	Drift Ratio @Cycle	ภาพความเสียหายของตัวอย่างที่ 1	ลักษณะการเสียหาย
16	8-27		<p>-คานเกิดรอยแตกบริเวณใต้คานด้านยาวโดยที่รอยแตกพุ่งออกจากข้อต่อ</p> <p>-เสาเกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งโดยที่รอยแตกพุ่งออกจากข้อต่อ</p>
17	8-27		<p>-เสาเกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งโดยที่รอยแตกพุ่งออกจากข้อต่อ</p>
17	8-27		<p>-เสาเกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งโดยที่รอยแตกพุ่งออกจากข้อต่อ</p>

ลำดับที่	Drift Ratio @ Cycle	ภาพความเสียหายของตัวอย่างที่ 1	ลักษณะการเสียหาย
19	8-27		<p>-ข้อต่อเกิดรอยแตกเป็นแนวทแยงมุมเบนออกจากข้อต่อเข้าสู่คานรองเนื่องจากแรงเฉือนเพิ่มขึ้น โดยที่รอยแตกมีขนาดยาวขึ้นต่อจากรอบก่อน</p>
10	8-27		<p>-เสาเกิดรอยแตกร้าวในแนวราบเนื่องจากโมเมนต์ต่อจากรอยแตกเดิม</p>
19	8-27		<p>รอยแตกเป็นแนวทแยงมุมที่คานรองบริเวณติดกับข้อต่อมีขนาดกว้างขึ้นกว่ารอบก่อน และมีเศษคอนกรีตกะเทาะหลุดร่อนเพิ่มขึ้น</p>

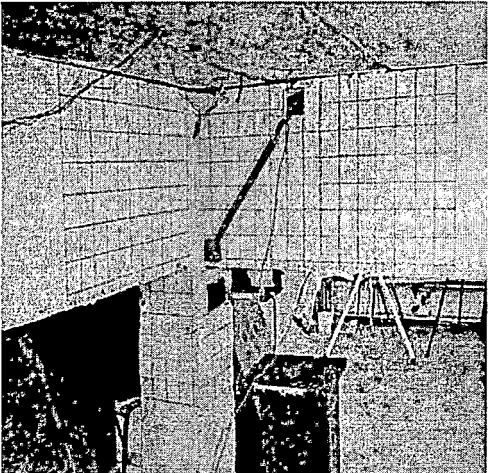
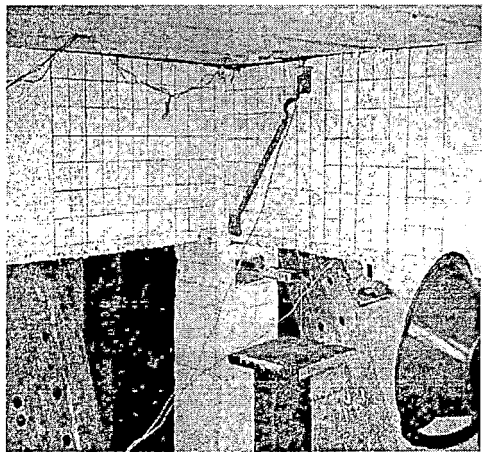
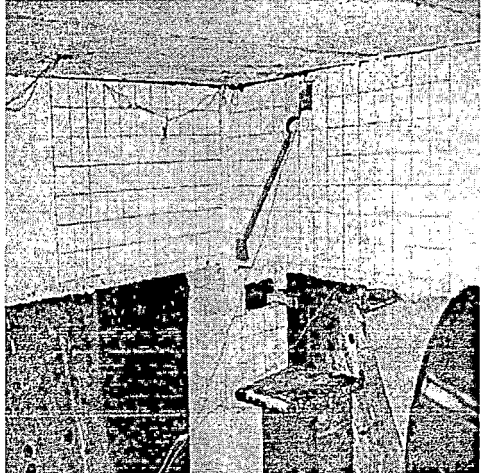
ลำดับที่	Drift Ratio @ Cycle	ภาพความเสียหายของตัวอย่างที่ 1	ลักษณะการเสียหาย
22	28		<p>-ข้อต่อเกิดรอยแตกเป็นแนวทแยงมุมเบนออกจากข้อต่อเข้าสู่คานรองเนื่องจากแรงเฉือนเพิ่มขึ้น โดยที่รอยแตกมีขนาดยาวขึ้นต่อจากรอบก่อน</p>
23	28		<p>-ข้อต่อเกิดรอยแตกเป็นแนวทแยงมุมเบนออกจากข้อต่อเข้าสู่คานรองเนื่องจากแรงเฉือนเพิ่มขึ้น โดยที่รอยแตกมีขนาดยาวขึ้นต่อจากรอบก่อนและรอยแตกมีขนาดกว้างขึ้น</p>
24	28		<p>-ข้อต่อเกิดรอยแตกเป็นแนวทแยงมุมที่ด้านหลังข้อต่อเนื่องจากแรงเฉือน</p>

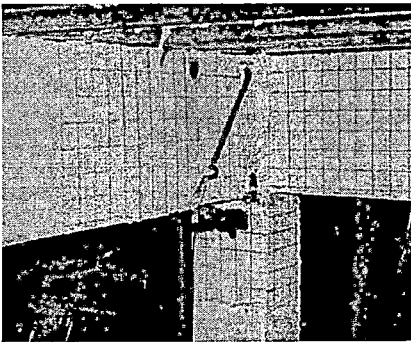
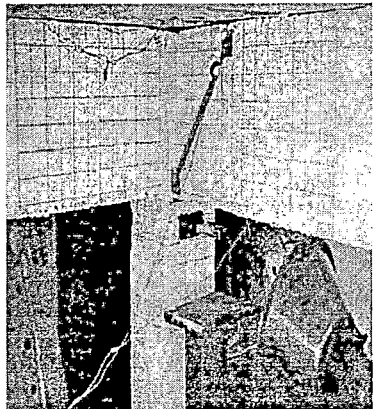
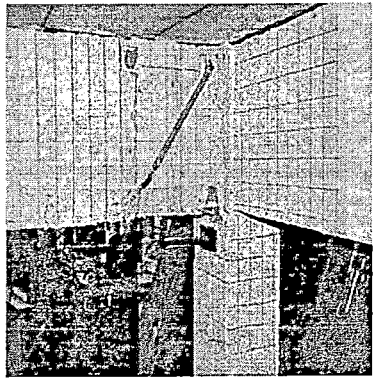
ลำดับที่	Drift Ratio @Cycle	ภาพความเสียหายของตัวอย่างที่ 1	ลักษณะการเสียหาย
25	30		รอยแตกบริเวณรอยต่อของคานและเสาเปิดกว้างขึ้นอย่างเห็นได้ชัด
26	31		รอยแตกร้าบริเวณจุดต่อระหว่างคานรองและเสาที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเฉือนมีขนาดกว้างขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและมีเนื้อคอนกรีตกะเทาะหลุดร่อน
27	32		รอยแตกร้าบริเวณจุดต่อระหว่างคานรองและเสาที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเฉือนมีขนาดกว้างขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและมีเนื้อคอนกรีตกะเทาะหลุดร่อน

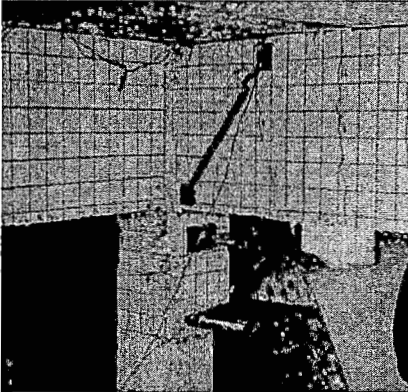
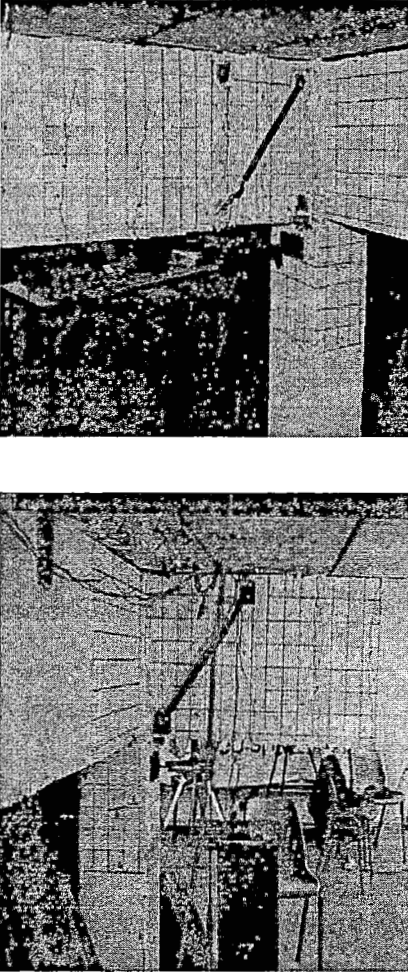
ลำดับที่	Drift Ratio @ Cycle	ภาพความเสียหายของตัวอย่างที่ 1	ลักษณะการเสียหาย
28	33		<p>รอยแตกร้าวบริเวณจุดต่อระหว่างคานรองและเสาที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเฉือนมีขนาดกว้างขึ้นจากรอบก่อนอย่างเห็นได้ชัดและมีเนื้อคอนกรีตกะเทาะหลุดร่อน</p>
29	33		<p>-พื้นรอยแตกบริเวณรอยต่อของพื้นสำเร็จรูปมีขนาดกว้างขึ้น</p>
20	33		<p>-ข้อต่อรอยแตกเป็นแนวทแยงมุมที่ด้านหลังข้อต่อเนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในรอบก่อนมีขนาดกว้างขึ้นอย่างเห็นได้ชัด</p>

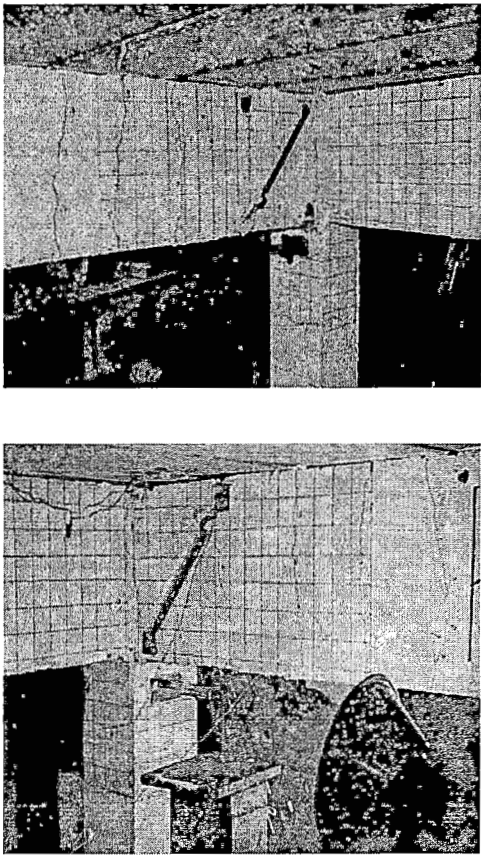
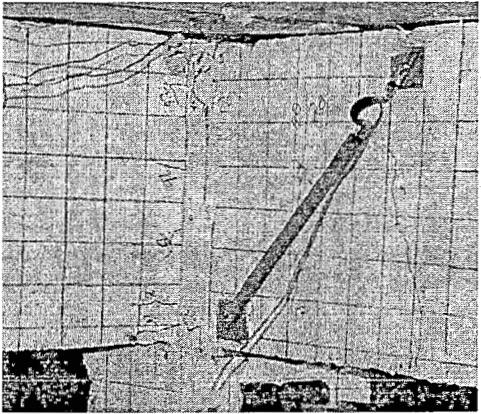
ลำดับที่	Drift Ratio @ Cycle	ภาพความเสียหายของตัวอย่างที่ 1	ลักษณะการเสียหาย
31	33		<p>รอยแตกร้าวบริเวณจุดต่อระหว่างคานรองและเสาที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเฉือนมีขนาดกว้างและยาวขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและมีเนื้อคอนกรีตกะเทาะหลุดร่อนเพิ่มขึ้นจากรอบก่อน</p>
32	33		<p>เนื้อคอนกรีตที่คานรองบริเวณจุดต่อระหว่างคานและเสาหลุดร่อนออกเป็นแผ่นขนาดใหญ่</p>
31	สิ้นสุดการทดสอบ		<p>-ข้อต่อรอยแตกเป็นแนวทแยงมุมที่ด้านหลังข้อต่อเนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นทั้งหมดหลังจากการทดสอบ</p>

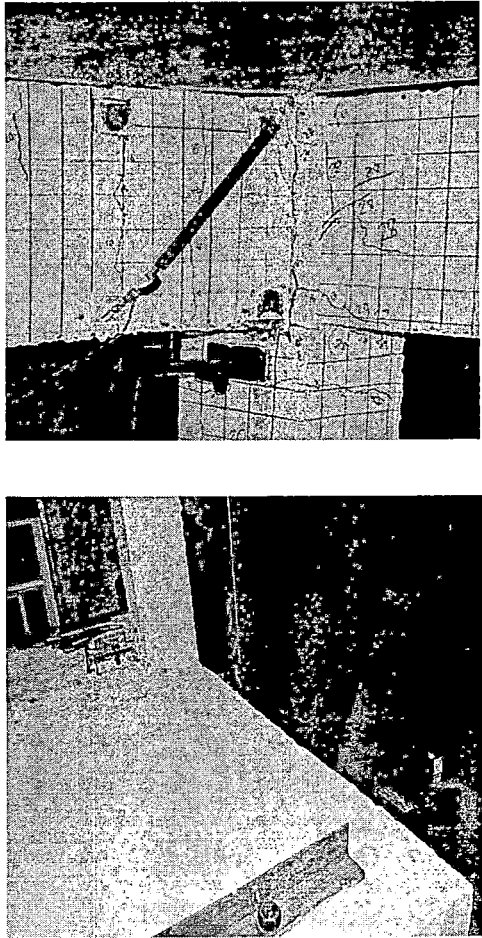
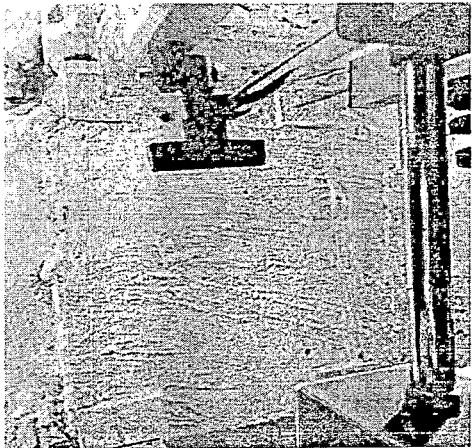
4.4 ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นและสังเกตได้จากการทดสอบตัวอย่างข้อต่อที่ 2
(ข้อต่อที่มีรายละเอียดการเสริมเหล็กเพื่อรับแรงแผ่นดินไหวตาม มยผ. 1301-50 (มยผ. 1302-52))

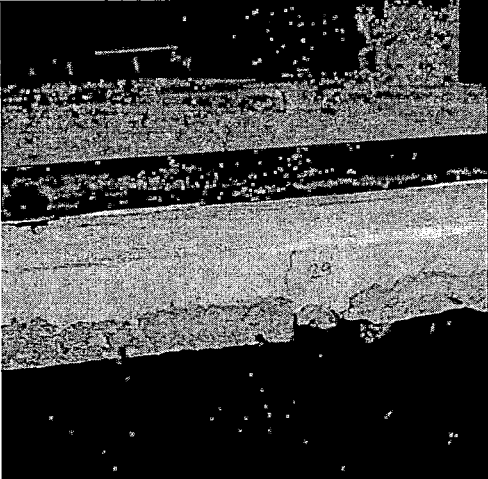
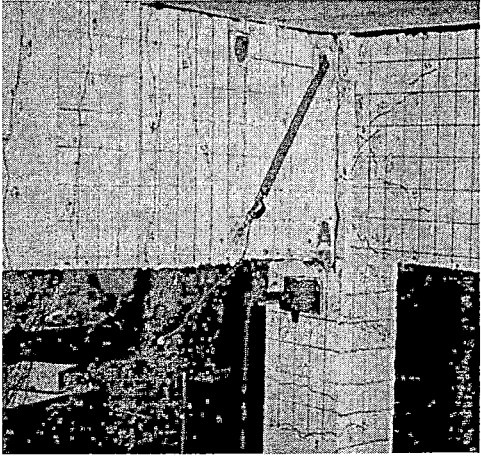
ลำดับที่	Drift Ratio @ Cycle	ภาพความเสียหายของตัวอย่างที่ 2	ลักษณะการเสียหาย
1	8		<ul style="list-style-type: none"> -ข้อต่อ ไม่มีรอยแตกร้าว -คาน ไม่มีรอยแตกร้าว -เสาดังกล่าวเกิดรอยแตกร้าวในแนวราบเนื่องจากโมเมนต์
2	8		<ul style="list-style-type: none"> -ข้อต่อ เกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งบริเวณจุดต่อเนื่องจากโมเมนต์ -เสาดังกล่าวเกิดรอยแตกร้าวในแนวราบเนื่องจากโมเมนต์ต่อจากรอยแตกเดิม
2	6		<ul style="list-style-type: none"> -คาน เกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งเนื่องจากโมเมนต์และทะแยงมุมเล็กน้อยเนื่องจากแรงเฉือนเพิ่มขึ้น

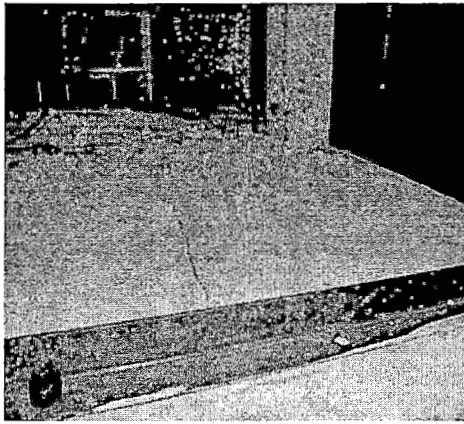
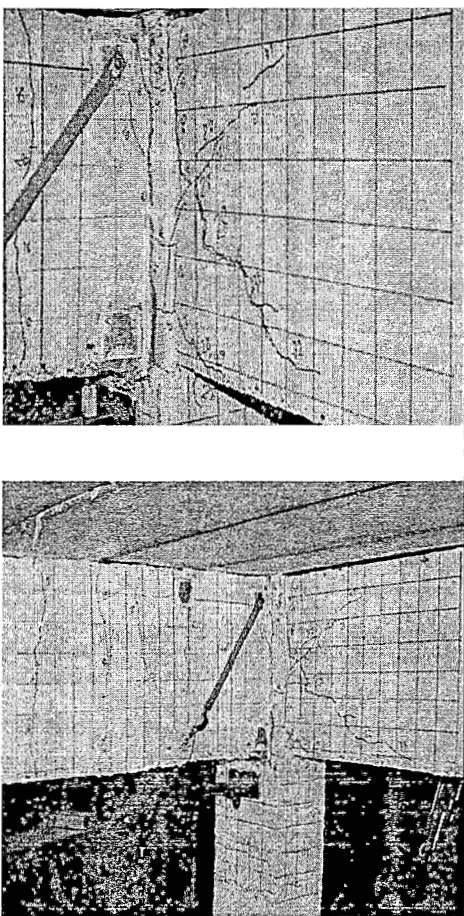
ลำดับที่	Drift Ratio @ Cycle	ภาพความเสียหายของตัวอย่างที่ 2	ลักษณะการเสียหาย
4	10		<p>-ข้อต่อ เกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้ง บริเวณจุดต่อเนื่องจากโมเมนต์ขนาดเท่าเดิม</p> <p>-คาน เกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้ง เนื่องจากโมเมนต์บริเวณที่ติดอุปกรณ์</p> <p>-เสา เกิดรอยแตกร้าวในแนวราบ เนื่องจากโมเมนต์ต่อจากรอยแตกเดิม</p>
5	15		<p>-ข้อต่อ เกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้ง บริเวณจุดต่อเนื่องจากโมเมนต์ขนาดเท่าเดิม</p> <p>-คานเกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งเบน ออกเป็นแนวทแยงมุมเนื่องจากโมเมนต์ และแรงเฉือนเพิ่มขึ้นยาวเพิ่มขึ้นจากรอยเดิมเกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งเบน ออกเป็นแนวทแยงมุมรอยใหม่เพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเมนต์และแรงเฉือน</p> <p>-เสาเกิดรอยแตกร้าวในแนวราบ เนื่องจากโมเมนต์ต่อจากรอยแตกเดิม</p>
6	16		<p>-ข้อต่อเกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งและแนวทแยงมุมเบนเข้าหาคานบริเวณจุดต่อเนื่องจากโมเมนต์และแรงเฉือนเพิ่มขึ้น</p> <p>-คานเกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งเบน ออกเป็นแนวทแยงมุมเนื่องจากโมเมนต์และแรงเฉือนเพิ่มขึ้นยาวเพิ่มขึ้นจากรอยเดิม</p> <p>-เสาเกิดรอยแตกร้าวในแนวราบ เนื่องจากโมเมนต์ต่อจากรอยแตกเดิม</p>

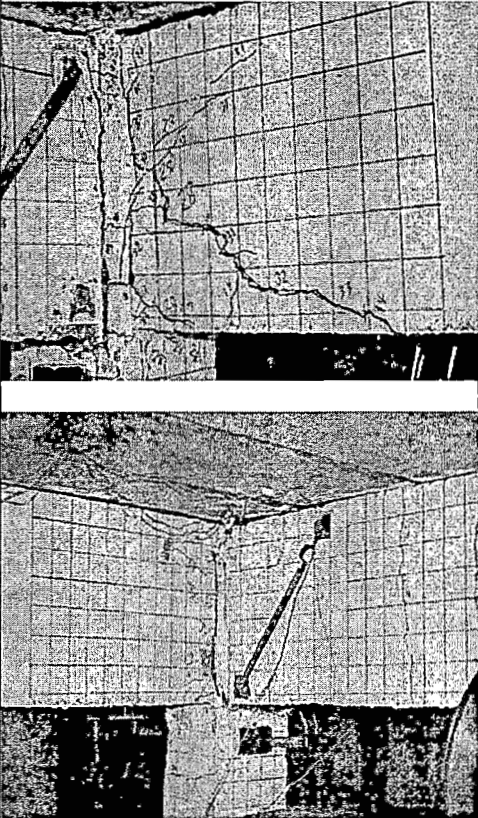
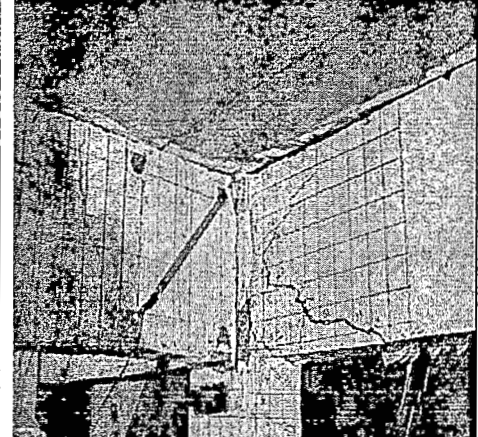
ลำดับที่	Drift Ratio @ Cycle	ภาพความเสียหายของตัวอย่างที่ 2	ลักษณะการเสียหาย
7	17		<p>-คานเกิดรอยแตกร้าวรอยใหม่ รอยแตกมีลักษณะในแนวตั้งเบนออกเป็นแนวทแยงมุมเนื่องจากโมเมนต์และแรงเฉือน</p>
8	17-18		<p>-ข้อต่อเกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งและแนวทแยงมุมเบนเข้าหาคานบริเวณจุดต่อเนื่องจากโมเมนต์และแรงเฉือนเพิ่มขึ้น</p> <p>-คานเกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งเบนออกเป็นแนวทแยงมุมเนื่องจากโมเมนต์และแรงเฉือนเพิ่มขึ้นยาวเพิ่มขึ้นจากรอยเดิม</p> <p>-เสาเกิดรอยแตกร้าวในแนวราบเนื่องจากโมเมนต์ต่อจากรอยแตกเดิม</p>

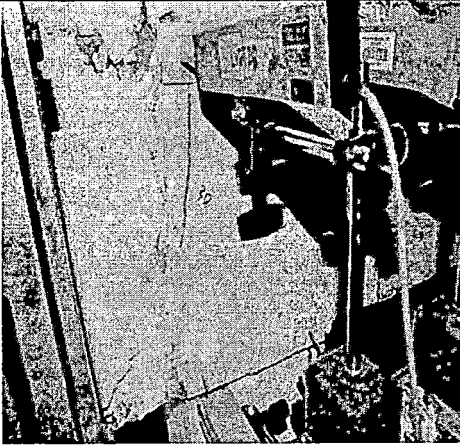
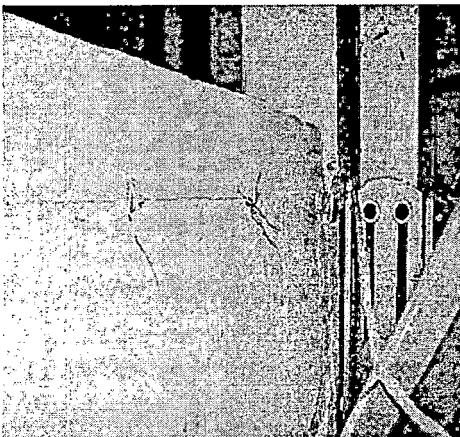
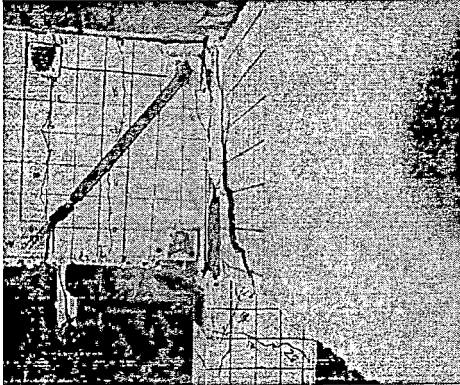
ลำดับที่	Drift Ratio @ Cycle	ภาพความเสียหายของตัวอย่างที่ 2	ลักษณะการเสียหาย
9	19-21		<p>-ข้อต่อ เกิดรอยแตกร้าวยาวขึ้นจากรอยแตกเดิมซึ่งมีลักษณะแตกเป็นแนวทแยงมุมเบนออกจากข้อต่อเข้าหาคานเนื่องจากแรงเฉือนเพิ่มขึ้นและมีรอยแตกใหม่ซึ่งมีลักษณะเดียวกันเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งอื่น</p> <p>-คาน เกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งเบนออกเป็นแนวทแยงมุมเนื่องจากโมเมนต์และแรงเฉือนเพิ่มขึ้นยาวเพิ่มขึ้นจากรอยเดิมและมีรอยแตกใหม่ซึ่งมีลักษณะเดียวกันเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งอื่น</p> <p>-เสา เกิดรอยแตกร้าวในแนวราบเนื่องจากโมเมนต์ต่อจากรอยแตกเดิมและมีรอยแตกใหม่ซึ่งมีลักษณะเดียวกันเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งอื่น</p>
10	22-26		<p>-ข้อต่อ เกิดรอยแตกร้าวยาวขึ้นจากรอยแตกเดิมซึ่งมีลักษณะแตกเป็นแนวทแยงมุมเบนออกจากข้อต่อเข้าหาคานเนื่องจากแรงเฉือนเพิ่มขึ้นและมีรอยแตกใหม่ซึ่งมีลักษณะเดียวกันเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งอื่น</p>

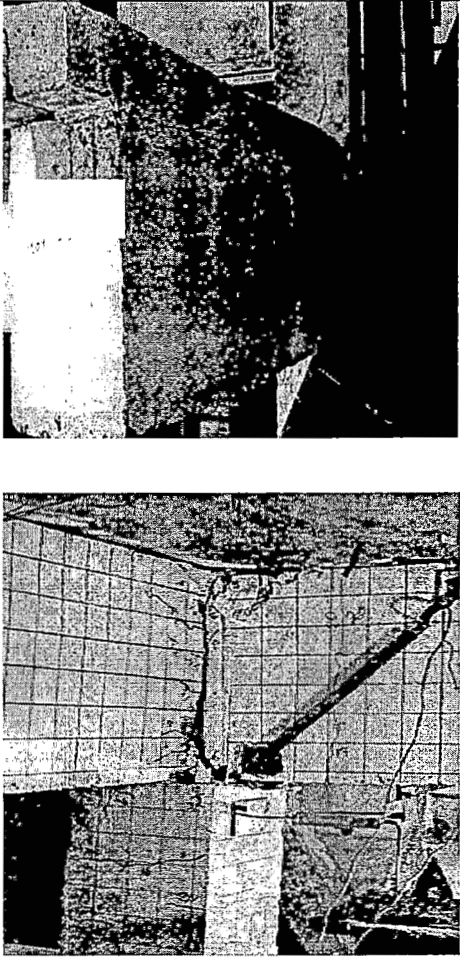
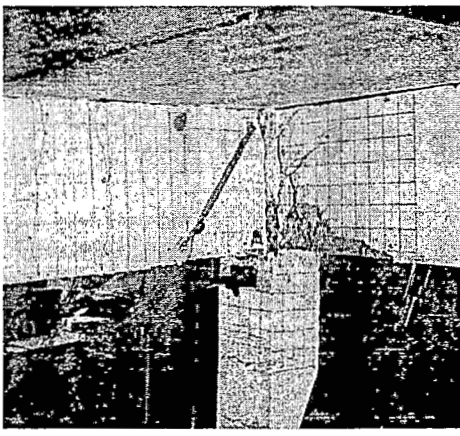
ลำดับที่	Drift Ratio @ Cycle	ภาพความเสียหายของตัวอย่างที่ 2	ลักษณะการเสียหาย
11	27-28		<p>-ข้อต่อเกิดรอยแตกกว้างยาวขึ้น</p> <p>จากรอยแตกเดิมซึ่งมีลักษณะแตกเป็นแนวทแยงมุมเบนออกจากข้อต่อเข้าหาคานเนื่องจากแรงเฉือนเพิ่มขึ้นและมีรอยแตกใหม่ซึ่งมีลักษณะเดียวกันเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งอื่น</p> <p>-เสาเกิดรอยแตกร้าวในแนวราบเนื่องจากโมเมนต์ต่อจากรอยแตกเดิมและมีรอยแตกใหม่ซึ่งมีลักษณะเดียวกันเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งอื่น และแตกเป็นแนวทแยงมุมเบนออกจากข้อต่อเข้าหาเสาด้านล่างเนื่องจากแรงเฉือนเพิ่มขึ้น</p> <p>-พื้นเกิดรอยแตกบริเวณรอยต่อพื้นสำเร็จรูปมีลักษณะเป็นแนวยาววิ่งจากปลายพื้นเข้าเข้าสู่เสา</p>
12	29		<p>-ข้อต่อเกิดรอยแตกกว้างเป็นแนวทแยงมุมบริเวณข้อต่อด้านหลังเสา</p>

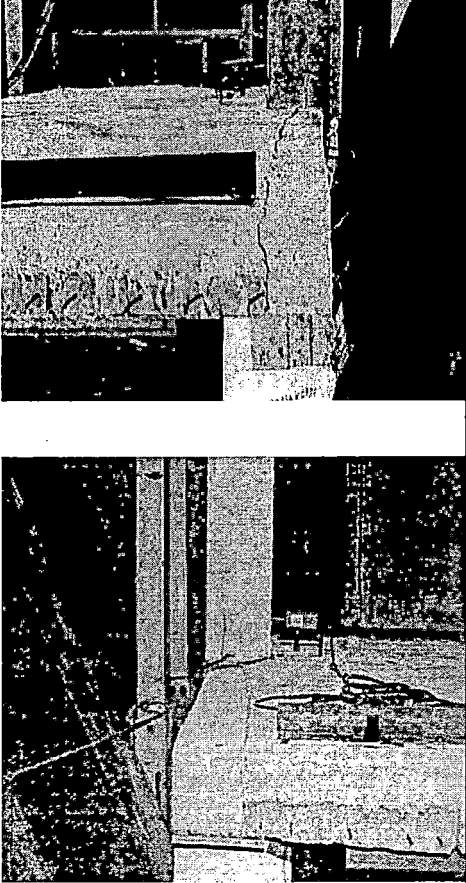

ลำดับที่	Drift Ratio @ Cycle	ภาพความเสียหายของตัวอย่างที่ 2	ลักษณะการเสียหาย
13	29		<p>-พื้นเกิดรอยแตกใหม่บริเวณรอยต่อพื้นสำเร็จรูป</p>
14	31		<p>-ข้อต่อเกิดรอยแตกร้าวยาวขึ้นจากรอยแตกเดิมซึ่งมีลักษณะแตกเป็นแนวทแยงมุมเบนออกจากข้อต่อเข้าหาคานเนื่องจากแรงเฉือนเพิ่มขึ้นและมีรอยแตกใหม่ซึ่งมีลักษณะเดียวกันเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งอื่นที่คานตัวสั้น</p> <p>-เสาเกิดรอยแตกร้าวในแนวราบเนื่องจากโมเมนต์ต่อจากรอยแตกเดิมและมีรอยแตกใหม่ซึ่งมีลักษณะเดียวกันเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งอื่น และแตกเป็นแนวทแยงมุมเบนออกจากข้อต่อเข้าหาเสาด้านล่างเนื่องจากแรงเฉือนเพิ่มขึ้น</p>

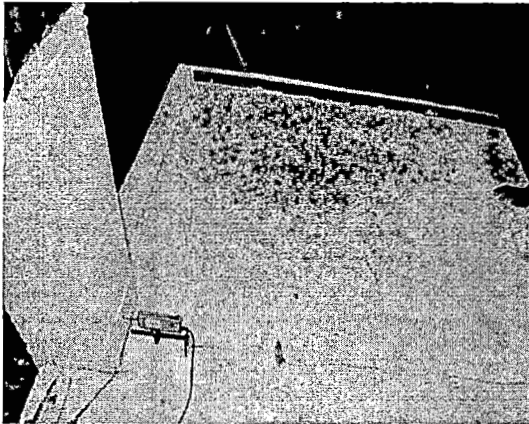
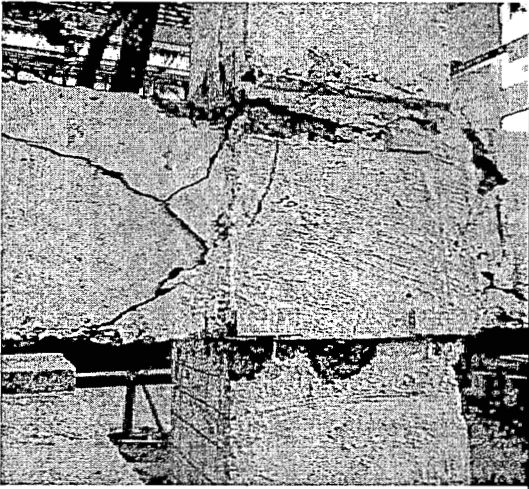
ลำดับที่	Drift Ratio @ Cycle	ภาพความเสียหายของตัวอย่างที่ 2	ลักษณะการเสียหาย
15	31		<p>-พื้นเกิดรอยแตกบริเวณรอยต่อพื้นสำเร็จรูปยาวขึ้นจากรอบก่อน</p>
16	32-33		<p>-ข้อต่อเกิดรอยแตกร้าวยาวขึ้นจากรอยแตกเดิมซึ่งมีลักษณะแตกเป็นแนวทแยงมุมเบนออกจากข้อต่อเข้าหาคานเนื่องจากแรงเฉือนเพิ่มขึ้น</p>

ลำดับที่	Drift Ratio @ Cycle	ภาพความเสียหายของตัวอย่างที่ 2	ลักษณะการเสียหาย
17	34		<p>-ข้อต่อเกิดรอยแตกกว้างขึ้นจากรอยแตกเดิมซึ่งมีลักษณะแตกเป็นแนวทแยงมุมเบนออกจากข้อต่อเข้าหากานเนื่องจากแรงเฉือนเพิ่มขึ้น คอนกรีตที่คานรองเปิดกว้างขึ้นและกะเทาะหลุดร่อน</p>
18	35		<p>-ข้อต่อคอนกรีตที่คานรองเปิดกว้างขึ้นมากกว่าเดิมและกะเทาะหลุดร่อน</p>

ลำดับที่	Drift Ratio @ Cycle	ภาพความเสียหายของตัวอย่างที่ 2	ลักษณะการเสียหาย
19	35		<p>-ข้อต่อเกิดรอยแตกร้าวเป็นแนวทแยงมุมบริเวณข้อต่อด้านหลังเสาเนื่องจากแรงเฉือนยาวเพิ่มขึ้นจากรอยเดิม</p>
20	36		<p>-ข้อต่อเกิดรอยแตกร้าวเป็นแนวทแยงมุมหลังคานรองที่ติดกับข้อต่อเนื่องจากแรงเฉือนยาวเพิ่มขึ้น</p>
21	36		<p>-รอยแตกเดิมในคอนกรีตที่คานรองเปิดกว้างขึ้นและกะเทาะหลุดร่อน</p>

ลำดับที่	Drift Ratio @ Cycle	ภาพความเสียหายของตัวอย่างที่ 2	ลักษณะการเสียหาย
22	37		<p>-ข้อต่อเกิดรอยแตกกว้างเป็นแนวทแยงมุมหลังคานรองที่ติดกับข้อต่อเนื่องจากแรงเฉือนขนาดใหญ่ขึ้นและยาวเพิ่มขึ้นไปตามแนวรอยต่อพื้นที่กับคาน</p> <p>-รอยแตกเดิมที่คานรองบริเวณที่ติดกับข้อต่อมีขนาดกว้างขึ้นและมีคอนกรีตกะเทาะหลุดร่อน</p>
23	38		<p>-คอนกรีตกะเทาะหลุดร่อนขนาดใหญ่จากรอยแตกเดิมคานรองบริเวณที่ติดกับข้อต่อ</p>

ลำดับที่	Drift Ratio @ Cycle	ภาพความเสียหายของตัวอย่างที่ 2	ลักษณะการเสียหาย
24	39		<p>-รอยแตกเดิมบริเวณรอยต่อพื้นสำเร็จรูปทั้งสองฝั่งมีขนาดกว้างขึ้น</p>
25	39		<p>-รอยแตกร้าวลักษณะเป็นแนวทแยงมุมหลังคานรองที่ติดกับข้อต่อมีขนาดใหญ่และยาวเพิ่มขึ้นไปจากรอบก่อน ซึ่งเกิดจากแรงเฉือนเพิ่มขึ้น</p>

ลำดับที่	Drift Ratio @ Cycle	ภาพความเสียหายของตัวอย่างที่ 2	ลักษณะการเสียหาย
26	39		<p>-รอยแตกบริเวณรอยต่อพื้นเป็นแนวขนานกับคานด้านยาวหลังจากสิ้นสุดการทดลอง</p>
27	39		<p>-รอยแตกทั้งหมดที่บริเวณข้อต่อและคานรองหลังจากสิ้นสุดการทดลอง</p>

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา

งานศึกษานี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมและศักยภาพของข้อต่อคาน-เสา-พื้นสำเร็จรูปของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ก่อสร้างโดยใช้มาตรฐานการก่อสร้างของประเทศไทยในการรับแรงแผ่นดินไหวด้วยการทดสอบตัวอย่างขนาดใหญ่ในห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา ตัวอย่างทดสอบที่ 1 ถูกออกแบบและมีรายละเอียดการเสริมเหล็กเพื่อรับแรงบรรทุกในแนวตั้งเท่านั้น ส่วนตัวอย่างทดสอบที่ 2 ถูกออกแบบเหมือนตัวอย่างที่ 1 ทุกประการยกเว้นมีรายละเอียดการเสริมเหล็กตามมาตรฐานการเสริมเหล็กสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อรับแรงแผ่นดินไหวตาม มยผ.1301-50 (มยผ.1302-52) ทั้งนี้ตัวอย่างทดสอบทั้งสองตัวอย่างก่อสร้างด้วยช่างที่ชำนาญงานก่อสร้างอาคารคอนกรีตในประเทศไทย จากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) เครื่องทดสอบ UTM สามารถประยุกต์ใช้ในการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตขนาดใหญ่ นอกแกน เครื่องทดสอบ UTM ให้ผลการทดสอบดีมากเมื่อเทียบกับผลการทดสอบจากนักวิจัยท่านอื่นๆ
- 2) ตัวอย่างที่ 1 รับแรงกระทำที่ปลายคานได้สูงสุดเท่ากับ 33.4 kN เมื่อปลายคานเคลื่อนที่ขึ้น และสามารถรับแรงได้เท่ากับ 44.4 kN เมื่อปลายคานเคลื่อนที่ลง
- 3) ตัวอย่างที่ 2 รับแรงกระทำที่ปลายคานได้สูงสุดเท่ากับ 30.1 kN เมื่อปลายคานเคลื่อนที่ขึ้น และสามารถรับแรงได้เท่ากับ 44.5 kN เมื่อปลายคานเคลื่อนที่ลง
- 4) ตัวอย่างที่ 1 สามารถหมุนได้สูงสุดเท่ากับ 4% radian และตัวอย่างที่ 2 สามารถหมุนได้สูงสุดเท่ากับ 5% radian
- 5) ตัวอย่างที่ 1 สามารถสลายพลังงานได้สูงสุดเท่ากับ 1.9 kN-m และตัวอย่างที่ 2 สามารถสลายพลังงานได้สูงสุดเท่ากับ 2.3 kN-m โดยตัวอย่างที่ 2 สามารถสลายพลังงานได้เพิ่มขึ้น 21%
- 6) การเสริมเหล็กตามมาตรฐานการเสริมเหล็กสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อรับแรงแผ่นดินไหว มยผ.1301-50 (มยผ.1302-52) ไม่ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงของตัวอย่างคาน-เสา-พื้นสำเร็จรูป ค.ส.ล. แต่ช่วยเพิ่มความเหนียวและความสามารถในการสลายพลังงานจากแรงแผ่นดินไหว
- 7) ความเสียหายของตัวอย่างที่ 1 เกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อระหว่างคานหลักและเสา โดยรอยแตกมีขนาดใหญ่เกิดขึ้นจากท้องคานหลักและขยายตัวขึ้นสู่ด้านบนของคานรองทั้งสองด้าน รอยแตกนี้จะค่อยๆขยายใหญ่มากขึ้นเมื่อการเคลื่อนที่ของปลายคานเพิ่มขึ้น นอกจากนี้มีรอยแตกเกิดขึ้นในเสาและคานรอบๆข้อต่อ ส่วนผิวบนของแผ่นพื้นเกิดการรอยแตกใหญ่ขึ้นในแนวตั้งฉากกับคานหลัก รอยแตกเกิดที่บริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นพื้นสำเร็จรูปกับคานรองทั้งสองด้าน โดยรอยแตกเกิดจากปลายฝั่งหนึ่งไปสุดปลายอีกฝั่งหนึ่ง รอยแตกนี้เป็นรอยใหญ่และลึก

8) ความเสียหายของตัวอย่างที่ 2 มีความแตกต่างจากตัวอย่างที่ 1 กล่าวคือ รอยแตกขนาดใหญ่จะเกิดขึ้นในคานรองทั้งสองฝั่งบริเวณรอยต่อระหว่างคานรองกับเสา ส่วนในคานหลักเกิดรอยแตกขนาดเล็กๆ มีรอยแตกเกิดขึ้นในเสาและคานรอบๆ ข้อต่อแต่เป็นรอยขนาดเล็กๆ ส่วนผิวบนของแผ่นพื้นเกิดการรอยแตกเหมือนกับตัวอย่างที่ 1 แต่เป็นรอยแตกขนาดเล็กกว่า นอกจากนี้มีรอยแตกบนผิวที่บริเวณกึ่งกลางพื้นจากเครื่อง UTM มาถึงเสาเป็นเส้นตรง

เอกสารอ้างอิง (References)

- 1) ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์ และ เป็นหนึ่ง วานิชชัย (1994), “ความเสียหายจากแผ่นดินไหวที่อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย” , โยธาสาร วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ปีที่ 7 ฉบับที่ 1 หน้า 9-16.
- 2) เป็นหนึ่ง วานิชชัย (1995), “บทเรียนจากแผ่นดินไหวที่โกเบ” , เอกสารประกอบการประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 2 วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, เชียงใหม่ 9-11 พฤศจิกายน หน้า 79-84.
- 3) เป็นหนึ่ง วานิชชัย และ อาเคะ ลิชานโตโน (1994), “การวิเคราะห์ความเสียหายแผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทย” , วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, วิศวกรรมสารแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, ปีที่ 5 ฉบับที่ 1 พ.ศ. 2537, หน้า 69-91.
- 4) กระทรวงมหาดไทย, กฎกระทรวงฉบับที่ 50 (พ.ศ. 2550) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522
- 5) American Concrete Institute Committee 318 (1999), Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318), American Concrete Institute (ACI), Farmington Hills, Michigan, USA.
- 6) ACI Committee 2005. Building Code requirements for structural concrete (ACI 318-05) American Concrete Institute, Farmington Hills, MI 48331.
- 7) ACI-ASCE Committee 352 (1985). Recommendations for Design of Beam-Column Joints in Monolithic Reinforced Concrete Structures. ACI Structural Journal. Proceedings Vol. 82 No. 3 : 266 – 283.
- 8) Meinheit, D. F., and Jirsa, J. O. (1981). “Shear Strength of Reinforced Concrete Beam-Column Connections”. Journal of The Structural Division. Vol. 107(11) : 2227 – 2244.
- 9) Do Tein Thinh. (2003). “Seismic Performance of Reinforced Concrete Beam-Column Subassemblages without Seismic Detailing”. Thesis No. ST-03-30, Asian Institute of Technology.
- 10) Chayut Cheejaroen. (2004). “Effect of Bond Deterioration on Seismic of R/C Interior Beam-Column Joint without Seismic Detailing”. Thesis No. ST-04-5, Asian Institute of Technology.

- 11) Worakanchara,K ,”Quasi-Static cyclic loading test of reinforce concrete columns with lap splice”. Proceedings of the National Convention on Civil Engineering (NCCE-8), Khon Khen, Thailand. STR 77-82.2002
- 12) Penelis G. and Kappos J. (1997), Earthquake-Resistance Concrete Structures, E&FN Spon (Inprint of Chapman & Hall), London.
- 13) MacGregor G. (1997), Reinforced Concrete: Mechanics and Design, 3rd Ed., Prentice Hall.
- 14) K. Maekawa, A. Pimanmas and H.Okamura, 2003. Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete Spon Press.
- 15) R. Park and T. Paulay, 1975. Reinforced Concrete Structures. USA: John-Wiley & Sons.
- 16) T. Paulay and M.J.N. Priestley, 1992. Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings. USA: John-Wiley & Sons.
- 17) Banon, H., Biggs, J. M., and Irvine, H. M. (1981), “Seismic Damage in Reinforced Concrete Frames,” Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 107, No. DT9, pp. 1713-1729.
- 18) Durrani, A. J., and Wight, J. K. (1985). “Behavior of Interior Beam-to-Column Connections Under Earthquake-Type Loading,” ACI Journal, May-June, pp. 343-349.
- 19) Ehsani, M. R., and Wight, J. K. (1985). “Exterior Reinforced Concrete Beam-to-Column Connections Subjected to Earthquake-Type Loading,” ACI Journal, July-August, pp. 492-499.
- 20) อานนท์ วงษ์แก้ว และ คณะ (2552), “การพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานคองกรีตเสริม”, โครงการทางวิศวกรรมโยธา, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา