

การทดสอบโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงสลับทิศ
Cyclic Test of Reinforced Concrete Moment Frame Structures

เจนศักดิ์ คชนิล¹ สุรศักดิ์ นิยมพานิชพัฒนา² สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์¹ และเป็นหนึ่ง วานิชชัย²
Jensak Koschanin¹, Surasak Niyompanitpatana², Sutat Leelatawivut¹ and Pennung Warnitchai²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้การรับแรงแผ่นดินไหวในห้องปฏิบัติการ โดยมุ่งเน้นไปที่โครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการก่อสร้างจริงในประเทศไทย ในการศึกษาจะเน้นไปที่อาคารที่มีรูปแบบเหมือนกับอาคารที่ใช้งานจริง และเป็นตัวแทนของอาคารที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในประเทศ บทความนี้นำเสนอ แนวทางและขั้นตอนในการศึกษา รายละเอียดการออกแบบตัวอย่างทดสอบให้มีลักษณะทางโครงสร้างใกล้เคียงกับโครงอาคารต้นแบบ วิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และผลจากการทดสอบที่สำคัญ ผลจากการศึกษาจะทำให้ทราบถึงความสามารถโดยรวมในการต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารและรูปแบบการวิบัติ และสามารถใช้เป็นแนวทางในการหาทางแก้ไขและเสริมกำลังโครงสร้างต่อไป

คำสำคัญ : โครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก แรงแผ่นดินไหว จุดต่อหมุน การพัฒนารอยร้าว

ABSTRACT

The research presented herein involves experimental study to determine seismic behavior of existing reinforced concrete structures by means of cyclic testing. The study focuses on the type of reinforced concrete structures which can be commonly found in Thailand. This paper presents the overall methodology, the design of the test specimen which represents the actual structure, the testing procedure, and key experimental results. The test results will lead to the determination of seismic capacity of the structure and its dominant failure mode. The results will be used as a tool for future seismic retrofitting study of the structure.

Keywords : reinforced concrete frame, seismic forces, plastic hinges, crack developments

E-mail : jensak_k@hotmail.com

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

Department of Civil Engineer, Faculty of Engineer, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140

² สำนักวิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย จ. ปทุมธานี 12120

School of Engineering and Technology, Asian Institute of Technology, Pathumthani 12120

คำนำ

จากการศึกษาวิจัยอย่างต่อเนื่องที่ผ่านมา ทำให้หน่วยงานต่างๆ ทั้งของภาครัฐและเอกชน ตลอดจนบุคคลทั่วไปได้ตระหนักถึงภัยจากแผ่นดินไหวที่อาจเกิดขึ้นในประเทศไทยหรือในบริเวณใกล้เคียง ซึ่งมาตรการที่เชื่อว่ามีประสิทธิภาพในการบรรเทาผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากภัยพิบัตินี้ได้แก่ (1) กำหนดให้อาคารและสิ่งปลูกสร้างที่จะเกิดขึ้นใหม่ ต้องได้รับการออกแบบก่อสร้างให้สามารถต้านทานแผ่นดินไหวได้ในระดับที่เหมาะสม, (2) ปรับปรุงอาคารที่มีอยู่ในปัจจุบันที่อ่อนแอให้สามารถต้านทานแผ่นดินไหวได้โดยไม่เกิดความเสียหายรุนแรง, และ (3) เตรียมพร้อมรับสถานการณ์ฉุกเฉินภายหลังเกิดภัยพิบัติ

ในส่วนการออกแบบก่อสร้างอาคารใหม่ให้สามารถต้านทานแผ่นดินไหวได้ในระดับที่เหมาะสม ได้มีการออกกฎกระทรวง[1] และมาตรฐานการให้รายละเอียดโครงสร้างโดยภาครัฐ ซึ่งมีผลบังคับใช้แล้วในปัจจุบันกฎกระทรวงและมาตรฐานนี้เมื่อนำไปใช้อย่างถูกต้องจะทำให้อาคารมีความปลอดภัยต่อชีวิตและสามารถต้านทานแผ่นดินไหวได้อย่างเพียงพอ อย่างไรก็ตามยังมีอาคารที่สร้างแล้วเสร็จเป็นจำนวนมากมายทั่วประเทศที่ไม่ได้คำนึงถึงแรงแผ่นดินไหวในการออกแบบ ซึ่งหากเกิดแผ่นดินไหวขึ้นในระดับที่ผู้เชี่ยวชาญคาดการณ์ไว้ อาจทำให้อาคารเหล่านี้จำนวนมากเกิดความเสียหายขึ้นและอาจเกิดความสูญเสียที่ประเมินค่าไม่ได้ ทั้งในด้านของชีวิตและทรัพย์สิน

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่ การศึกษาความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารที่มีอยู่ในปัจจุบันซึ่งไม่ได้ถูกออกแบบมาสำหรับแรงแผ่นดินไหวว่าจะสามารถทนต่อแรงแผ่นดินไหวได้ในระดับไหนและจะเกิดความเสียหายมากน้อยเพียงใด โดยจะอาศัยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ตัวอย่างทดสอบขนาดใหญ่(Large-scale) ที่เป็นตัวแทนของโครงสร้างที่พบเห็นได้ทั่วไปในประเทศไทย

วิธีการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการเป็นไปตามขั้นตอนดังต่อไปนี้ คือ

1. การคัดเลือกอาคารต้นแบบเพื่อทำการศึกษาในห้องปฏิบัติการ

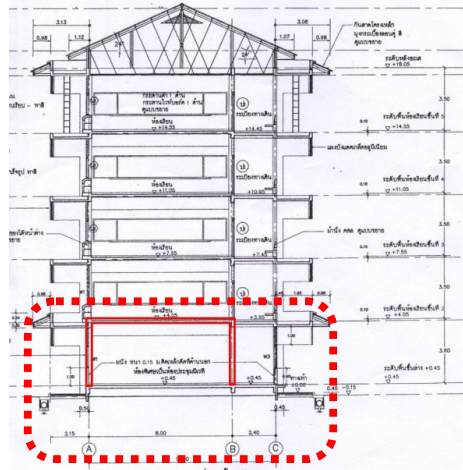
งานวิจัยขั้นนี้ผู้วิจัยต้องการศึกษาพฤติกรรมการวิบัติของโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เป็นอาคารที่ก่อสร้างจริง ดังนั้นการคัดเลือกอาคารต้นแบบจะเน้นไปที่อาคารที่มีรูปแบบเหมือนกับอาคารที่ใช้งานจริง และเป็นตัวแทนของอาคารที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในประเทศ และมีความสำคัญต่อสาธารณะ เช่น อาคารโรงเรียน เป็นต้น โดยอาคารต้นแบบที่เลือกมาทำการศึกษา เป็นอาคารโรงเรียนแบบที่ใช้ในการก่อสร้างจริงในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร โดยเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 5 ชั้น มีพื้นที่ใช้งานประมาณ 1,500 ตารางเมตร มีช่วงคานยาวที่สุด 8 เมตร โดยในแง่ทางโครงสร้าง อาคารโรงเรียนต้นแบบ มีลักษณะต่างๆ ที่มีความเสี่ยงสูงจากแผ่นดินไหว อาทิเช่น

- มีลักษณะชั้นล่างเปิดโล่ง มีแนวโน้มที่จะเกิดการพังทลายแบบ “Soft Story”
- เสามีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับขนาดของคาน มีแนวโน้มที่จะเกิดการพังทลายแบบเสาอ่อน คานแข็ง (Weak Column - Strong Beam)
- เสามีการเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล็กเสริมอย่างรวดเร็วตามความสูง มีแนวโน้มที่จะเกิดการพังทลายแบบ “Soft Story” ในชั้นบน

- เสาที่มีปริมาณเหล็กปลอกต่ำมีแนวโน้มที่จะเกิดการเสียหายจากแรงเฉือน(ลักษณะการพังทลายแบบเปราะ) ลักษณะอาคารต้นแบบที่เลือกมาศึกษามีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2



รูปที่ 1 ลักษณะอาคารโรงเรียนที่ก่อสร้างจริง



รูปที่ 2 รูปตัดทัวไปของอาคารต้นแบบและตำแหน่งของโครงอาคารตัวอย่างที่นำมาศึกษาในห้องปฏิบัติการ

2. การออกแบบตัวอย่างทดสอบเพื่อทำการศึกษาในห้องปฏิบัติการ

ในการวิจัยนี้จะทำการสร้างแบบจำลองของอาคารต้นแบบ เพื่อทำการศึกษาความสามารถในการรับแรงของโครงอาคารต้นแบบในห้องปฏิบัติการ โดยได้เลือกใช้ส่วนของอาคารที่ประกอบด้วยเสาบริเวณชั้น 1 และคานของอาคารในชั้นที่ 2 ดังแสดงตำแหน่งในรูปที่ 2 ทั้งนี้เนื่องจากอาคารส่วนใหญ่มักเกิด Soft Story ในชั้นล่าง ตัวอย่างทดสอบที่ใช้มีขนาด 1/2 เท่าของขนาดจริง

การออกแบบตัวอย่างทดสอบในการศึกษานี้ ใช้หลักการคือ จะออกแบบให้ตัวอย่างทดสอบมีดัชนีโครงสร้าง (Structural index) เหมือนหรือใกล้เคียงกับอาคารต้นแบบ ดัชนีโครงสร้าง คือ ตัวเลขที่ใช้บ่งบอกถึงพฤติกรรมขององค์อาคารภายใต้แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว[2]ดัชนีโครงสร้างของอาคารสามารถคำนวณได้จากรูปร่างลักษณะพื้นที่หน้าตัด พื้นที่ของเหล็กเสริมตามยาวและตามขวาง โดยดัชนีโครงสร้างที่สำคัญประกอบด้วย อัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกคาน (Shear span ratio, a/h) อัตราส่วนกำลังรับแรงดัดต่อกำลังรับแรงเฉือน (Normalized nominal flexural-to-shear strength ratio, M_n/aV_n) อัตราส่วนเหล็กปลอกรับแรงเฉือน (Transverse steel index, $\rho_s \sqrt{b''/s}$) อัตราส่วนแรงเฉือนต่อกำลังของหน้าตัด (Normalized associated shear force index, $V_a/b_w d \sqrt{f'_c}$) อัตราส่วนเหล็กเสริมตามยาว (Longitudinal Reinforcing index, $\rho = A_s/b_w d$) อัตราส่วนแรงตามแนวแกน (Axial force ratio, $P/f'_c A_g$)

จากผลการคำนวณดัชนีโครงสร้างของอาคารต้นแบบ สามารถจำลองอาคารต้นแบบเป็นตัวอย่างทดสอบในห้องปฏิบัติการได้โดยมีรายละเอียดการเสริมเหล็กดังแสดงในรูปที่ 3 ค่าดัชนีโครงสร้างของตัวอย่างทดสอบเปรียบเทียบกับดัชนีโครงสร้างของอาคารต้นแบบแสดงใน ตารางที่ 1 และ 2 ทั้งนี้ การคำนวณดัชนีนี้มีพื้นฐานบนหน่วยแรงอัดคอนกรีตเท่ากับ 21 MPa และหน่วยแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมเท่ากับ 390 MPa

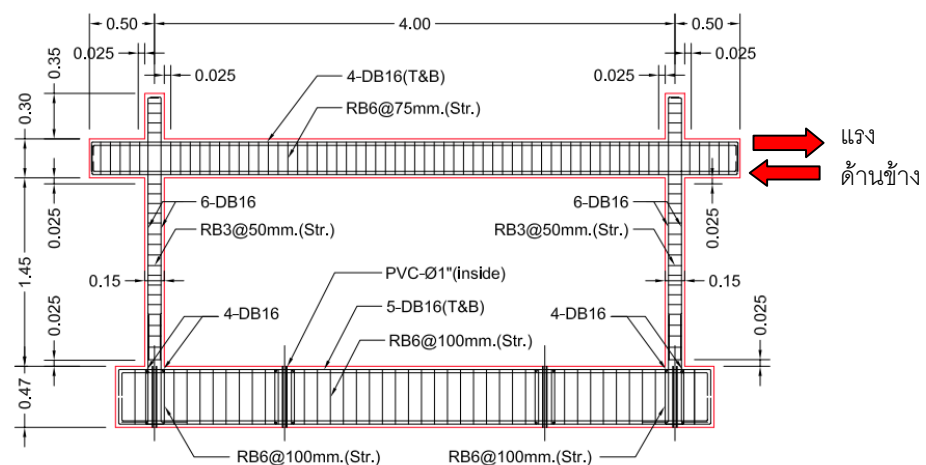
ตารางที่ 1 ดัชนีโครงสร้างของเสาโครงอาคารต้นแบบและตัวอย่างทดสอบ

Structure	Story height	a/h	M_n/aV_n	$\rho = A_s/b_w d$	$\rho = A'_s/b_w d$	$\rho_s \sqrt{b''/s}$	$V_a/b_w d \sqrt{f'_c}$
อาคารต้นแบบ	3.50	4.833	0.554	0.0357	0.0357	0.0080	1.315
ตัวอย่างทดสอบ	1.75	4.833	0.557	0.0415	0.0415	0.0082	1.181

ตารางที่ 2 ดัชนีโครงสร้างของคานโครงอาคารต้นแบบและตัวอย่างทดสอบ

Structure	Span	a/h	M_n/aV_n	$\rho = A_s/b_w d$	$\rho = A'_s/b_w d$	$\rho_s \sqrt{b''/s}$	$V_a/b_w d \sqrt{f'_c}$
อาคารต้นแบบ	8.00	6.417	0.408	0.0244	0.0244	0.0100	0.770
ตัวอย่างทดสอบ	4.00	6.417	0.396	0.0226	0.0226	0.0133	0.687

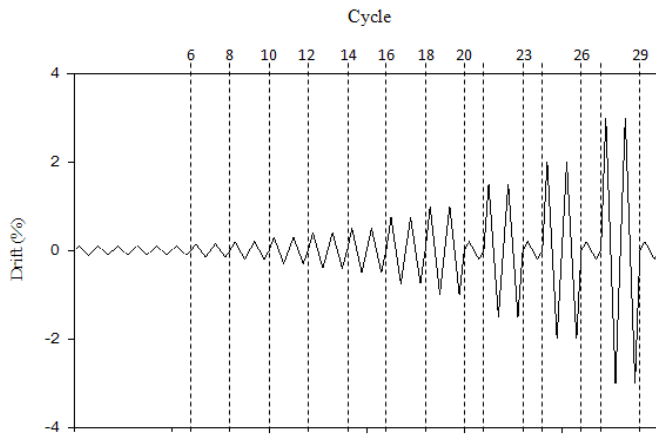
หมายเหตุ a คือ ระยะครึ่งหนึ่งของช่วงความยาวระหว่างขึ้นส่วนของค้ำอาคาร, h คือ ความลึกของหน้าตัดของค้ำอาคาร, M_n คือ กำลังต้านทานโมเมนต์ขององค้ำอาคาร, V_n คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนขององค้ำอาคาร, ρ_s คือ ปริมาตรของเหล็กปลอกทั้งหมดในหนึ่งชั้นหารด้วยปริมาตรของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดภายในเหล็กปลอก, b'' คือ ความกว้างของหน้าตัดเสาคัดที่ระยะระหว่างศูนย์กลางเหล็กปลอกที่ตั้งฉากกับทิศทางที่มีแรงกระทำ, s คือ ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก, V_a คือ ค่าแรงเฉือนของเสาที่ทำให้เกิดการวิบัติ, b_w คือ ความกว้างขององค้ำอาคาร, d คือ ความลึกประสิทธิภาพ, และ f'_c คือ กำลังประลัยของคอนกรีต



รูปที่ 3 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบในห้องปฏิบัติการ

3. การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ (Test Set-Up)

ก่อนการทดสอบ ตัวอย่างทดสอบจะถูกติดตั้งด้วยอุปกรณ์การตรวจวัด (Sensor) ต่าง ๆ เพื่อวัดการเสียรูปของโครงสร้าง ในรูปแบบต่างๆ เช่น การเคลื่อนที่ที่ปลายเสา การเสียรูปเนื่องจากการเฉือน (Shear Deformations) ในเสามุมหมุนดัด (Flexural rotation) และ ความเครียด ในเหล็กเสริมทั้งในเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กเสริมตามขวางในจุดต่างๆ ที่สำคัญ ในการศึกษานี้ใช้วิธีการทดสอบแบบสถิตเสมือน (Quasi-Static Test) โดยให้แรงกระทำด้านข้างสลับทิศทางตั้งและอัดที่ปลายคานด้านบน เป็นการจำลองการเคลื่อนตัวไปกลับของชั้นทดสอบภายใต้แรงกระทำของแผ่นดินไหว ในการทดสอบจะทำการกำหนดการเคลื่อนตัวเป้าหมาย (Displacement Target) ตามมาตรฐาน ATC-40 [3] โดยให้แรงกระทำด้านข้าง จนเกิดการเคลื่อนตัวที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Story Drift) เท่ากับ 0.1%, 0.15%, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5%, 0.75%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, และ 3.0% ดังแสดงใน รูปที่ 4 ส่วนแรงอัดตามแนวแกนที่เสาต้องแบกทานนั้นใช้กระบอกลิควาล์วให้แรงกระทำคงที่เท่ากับ 150 kN บนเสาแต่ละต้น เพื่อจำลองน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวตั้งที่กระทำในเสา ภาพรวมของการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเป็นดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 4 รูปแบบการให้แรงกับตัวอย่างทดสอบในห้องปฏิบัติการ

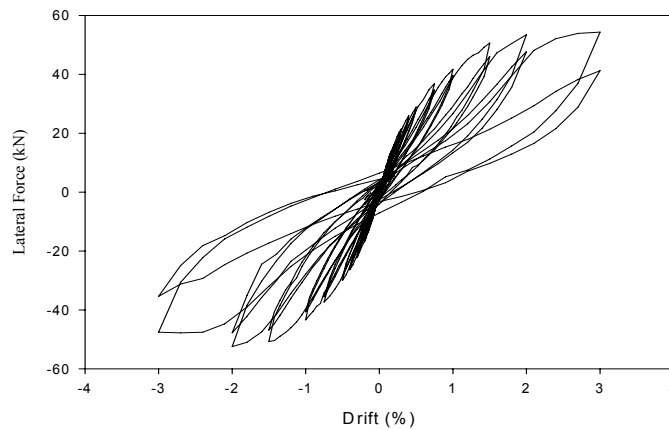


รูปที่ 5 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ผลการทดลอง

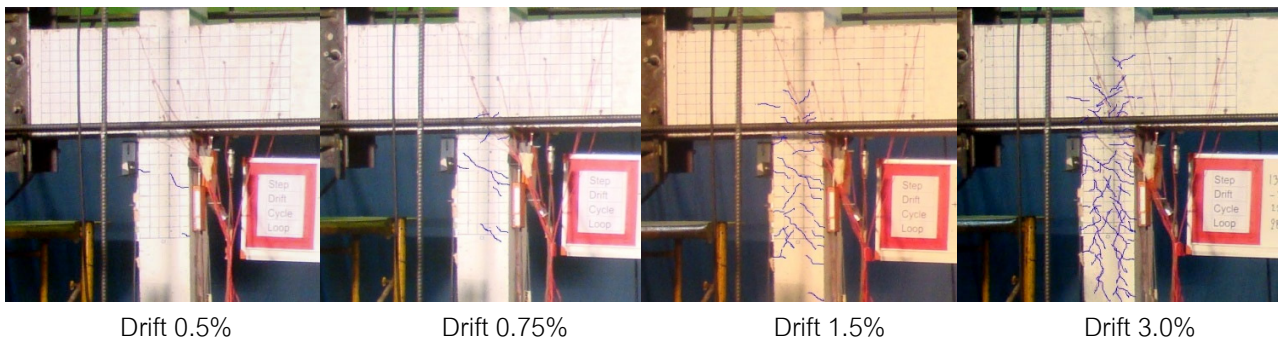
1. พฤติกรรมในภาพรวม และ Hysteretic Loop

รูปที่ 6 แสดงกำลังรับแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ (Hysteretic Loop) ในภาพรวมพบว่า โครงอาคารมีความเหนียวในระดับปานกลาง โดยมีค่าอัตราส่วนความเหนียว (Ductility Ratio) เท่ากับ 2 อย่างไรก็ตาม รูปแบบในการสลายพลังงานที่พบได้จากรูปกราฟกำลังรับแรงยังมีลักษณะที่ค่อนข้างแคบ (Pinched Hysteretic) ซึ่งทำให้สลายพลังงานได้ไม่ดีเท่าที่ควร



รูปที่ 6 กำลังรับแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ (Hysteretic Loop)

ในขณะที่ทดสอบเกิดรอยร้าวขนาดเล็ก (Hairline Crack) ขึ้นครั้งแรกจากการเกิดแรงดึงที่ผิวคอนกรีตเนื่องจากการตัด ที่การเคลื่อนตัวสัมพันธ์ 0.5% ที่บริเวณปลายเสาด้านบน ที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพันธ์ 0.75% พบว่าเริ่มเกิดรอยร้าวแนวทแยงแรกขึ้นที่บริเวณหัวเสาด้านบน ต่อจากนั้นเริ่มปรากฏรอยร้าวเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ โดยส่วนใหญ่เกิดที่บริเวณโคนเสาและหัวเสา และเกิดจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) ที่เห็นได้ชัด จนถึงระยะเคลื่อนตัวสัมพันธ์ 3.0% โครงทดสอบสามารถรับแรงได้สูงสุดก่อนที่ผิวคอนกรีตจะเริ่มแตกหลุดร่อนออกมาและโครงสร้างเกิดการวิบัติในที่สุด ลักษณะรอยร้าวที่เกิดขึ้นเป็นดังแสดงในรูปที่ 7 ลักษณะการเสียรูปที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพันธ์ 3% เป็นดังแสดงในรูปที่ 8



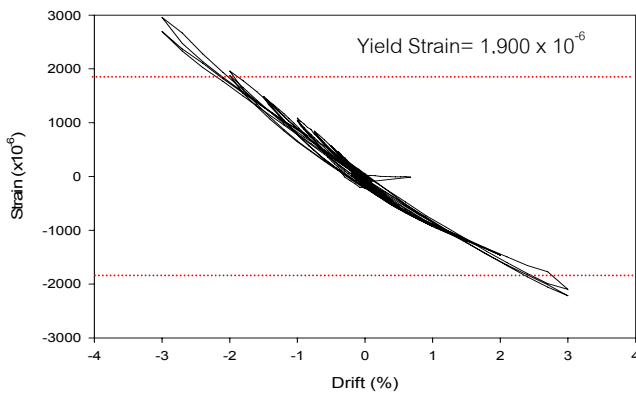
รูปที่ 7 การพัฒนารอยร้าวบริเวณจุดต่อหมุน (Plastic Hinge) ของเสาด้านบนซ้าย



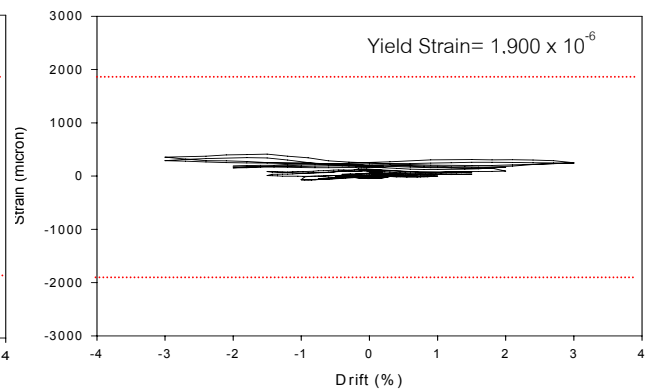
รูปที่ 8 ลักษณะการเสียรูปที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ 3%

2. พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กเสริมตามขวาง

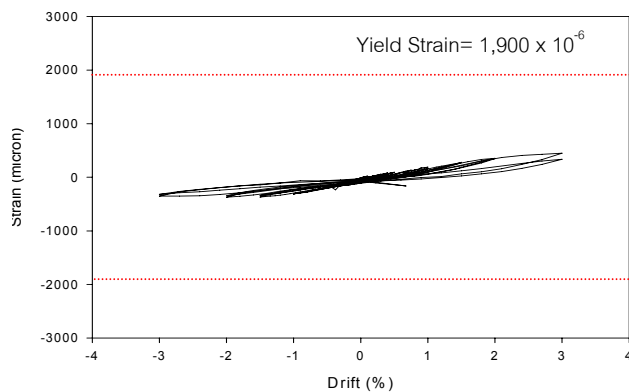
ค่าความเครียดที่อ่านได้จาก Strain Gauge ในจุดที่สำคัญ แสดงไว้ในรูปที่ 9 ถึงรูปที่ 12 ที่ระยะเคลื่อนตัวตั้งแต่ 0.1% - 3.0% ค่าความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวของเสา (รูปที่ 9) มีค่าสูงขึ้นตามลำดับจนเลยจุดคราก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) เมื่อพิจารณาค่าความเครียดในเหล็กปลอกของเสา (รูปที่ 10) พบว่าส่วนใหญ่ยังไม่เกิดการครากขึ้น ในทำนองเดียวกันพบว่า ค่าความเครียดในเหล็กตามยาวของคาน (รูปที่ 11) มีค่าต่ำและไม่เกิดการครากขึ้น แสดงให้เห็นว่าพลังงานส่วนใหญ่จะถูกสลายไปจากการครากในเสา ซึ่งเป็นลักษณะการเสียรูปแบบเสาอ่อน คานแข็ง (Weak Column – Strong Beam) ซึ่งเป็นรูปแบบการเสียรูปที่อาจนำไปสู่การพังทลายแบบ Soft Story ได้ในกรณีที่เกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความเครียดที่บริเวณจุดต่อทาบเหล็ก (Lab Splice) มีค่าน้อยและไม่สามารถที่จะพัฒนากำลังจนถึงจุดครากได้ (รูปที่ 12) ทั้งนี้เนื่องมาจากระยะทาบของเหล็กเสริมตามยาวมีน้อยเกินไป



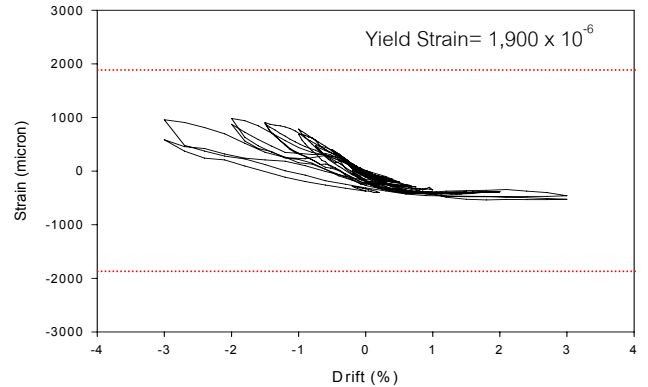
รูปที่ 9 ค่าความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวของเสา



รูปที่ 10 ค่าความเครียดในเหล็กปลอกของเสา



รูปที่ 11 ค่าความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวของคาน



รูปที่ 12 ค่าความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวของเสา

บริเวณ Lab Splice

ผลสรุป

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้การรับแรงแผ่นดินไหว โดยอาศัยการทดสอบตัวอย่างทดสอบขนาดใหญ่ (Large-Scale) ที่เป็นตัวแทนของโครงอาคารที่พบเห็นได้ทั่วไปในประเทศไทย จากผลการทดสอบโครงอาคารที่จำลองมาจากโครงอาคารต้นแบบ พบว่า จะเริ่มเกิดรอยร้าวเกิดขึ้นตั้งแต่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ 0.5% และปรากฏเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ 3.0% จึงเกิดการวิบัติขึ้น ในภาพรวมโครงอาคารมีความเหนียวในระดับที่พอประมาณ อย่างไรก็ตามรูปแบบในการสลายพลังงานที่พบได้จากกราฟกำลังรับแรงยังมีลักษณะที่ค่อนข้างแคบ (Pinched Hysteretic) นอกจากนั้นพลังงานส่วนใหญ่จะถูกสลายไปในเสา และเกิดการวิบัติในรูปแบบเสาอ่อน-คานแข็ง ซึ่งเป็นรูปแบบการเสียรูปที่อาจนำไปสู่การพังทลายแบบ Soft Story ได้ในกรณีที่เกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงควรที่จะมีการศึกษาหาวิธีการเสริมกำลังโครงอาคาร โดยเฉพาะการเสริมกำลังเพื่อป้องกันการวิบัติแบบ Soft Story ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว) ภายใต้โครงการลดภัยพิบัติจากแผ่นดินไหวในประเทศไทย (ระยะที่ 2)

เอกสารอ้างอิง

- [1] กฎกระทรวง (2550) “กำหนดการรับน้ำหนักความต้านทาน ความคงทนของอาคารและพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ.2550”
- [2] Kiattivisanchai, S. (2001). “Evaluation of Seismic Performance of an Existing Medium-Rise Reinforced Concrete Frame Building in Bangkok,” M.Eng. Thesis, Asian Institute of Technology, Thailand.
- [3] Applied Technology Council (ATC). (1996). “Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Building,” ATC-40 Report, Redwood City, California.