

ประสิทธิภาพต้านทานแผ่นดินใหวของโครงคอนกรีตเสริมเหล็ก

ภายในที่ใช้เหล็กเส้นความเหนียวสูง Seismic Performance of Reinforced Concrete

Interior Frames Using Super Ductile Reinforcing Steel Bar

รัฐพล เกติยศ*^{,1} และ ชยานนท์ หรรษภิญโญ²

Rattapon Ketiyot¹ and Chayanon Hansapinyo²

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 239 ถ.ห้วยแก้ว อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200 Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University 239 Huay Kaew Road, Muang District, Chiang Mai, 50200, Thailand E-mail: ^{*, 1}rattapon.ste7@rmutl.ac.th, ²chayanon@eng.cmu.ac.th Telephone Number: 053-944156, Fax: 053-892376

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการทคสอบตัวอย่างส่วนย่อยโครงคาน-เสาภายในอาคารที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกัน ภายใต้แรง สลับทิศ จำนวน 2 ตัวอย่างที่ใช้เหล็กเส้นเสริมตามยาวที่มีคุณภาพแตกต่างกัน ใด้แก่ เหล็กเส้นเสริมข้ออ้อยทั่วไป ชั้น คุณภาพ SD40 และเหล็กเส้นข้ออ้อยที่มีสมบัติเหนียวพิเศษ ชั้นคุณภาพ SD40s ในการศึกษาได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพ การด้านทานแผ่นดินไหวของตัวอย่างทดสอบโครงกอนกรีต ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าความเครียดที่จุดคราก (*E*,) และที่จุด Hardening (*E*_{sh}) ของเหล็กเสริมมีผลต่อค่าการเสียรูปที่จุดครากและแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนัก บรรทุกและการเคลื่อนตัวค้านข้างของตัวอย่างทดสอบ นอกจากนั้น ด้านอัตราส่วนกำลังสูงสุดของชิ้นส่วนกอนกรีตที่เสริม เหล็กสมบัติเหนียวพิเศษต่อชิ้นส่วนโครงกอนกรีตที่เสริมเหล็กชั้นคุณภาพปกติมีค่าเท่ากับ 1.02 ซึ่งใกล้เคียงและสอดกล้อง กับอัตราส่วนกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SD40s กับเหล็กเสริมปกติชั้นคุณภาพ SD40 ด้านสมบัติของ อัตราส่วนกวามเหนียวและความสามารถในการสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบพบว่า ตัวอย่างทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน

ABSTRACT

This paper presents the experimental result of two monotonic reinforced concrete under reversal cyclic loading of two monolithic reinforced concrete beam-column as interior frames using different grades of longitudinal reinforcing steel rebars in each specimens. The longitudinal bars were divided into two groups i.e. the conventional deformed rebar (SD40) and the modern rebars, super ductile rebar (SD40s). The seismic performance of the concrete specimens with the modern rebar was compared with that of test specimen with conventional one. The results revealed that the yield strain (\mathcal{E}_y) and hardening strain (\mathcal{E}_{sh}) of each grades of longitudinal bars directly affected the yield displacements and post-yield trend of lateral load versus displacement relationship of concrete specimens. Furthermore, the loading capacity ratio of concrete specimens with SD40s longitudinal bar against test specimen with the conventional bar was 1.02 and observed be close to the ratio of yield strength of bare bar from uniaxial tensile test of bare bars. For ductility factor and energy dissipation of both specimens, the results were very similar.

Keywords: Super ductile bar, seismic performance, cyclic loading

ด้านทานแผ่นดินไหวของโครงสร้างกอนกรีตเสริมเหล็กที่ ใช้เหล็กเสริมความเหนียวสูงในปัจจุบันมีก่อนข้างจำกัด รวมทั้งพฤติกรรมของชิ้นส่วนกอนกรีตเสริมเหล็กไม่ได้ ขึ้นอยู่กับสมบัติของเหล็กเสริมเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่ กับสมบัติของกอนกรีตและปฏิสัมพันธ์ระหว่างกอนกรีต กับเหล็กเสริมซึ่งอยู่ในรูปแบบของแรงยึดเหนี่ยวอีกด้วย

จากเหตุผลที่กล่าวมา บทความนี้ ได้นำเสนอ พฤติกรรมของจุดต่อคาน-เสาภายในอาคารคอนกรีตเสริม เหล็กที่ใช้เหล็กความเหนียวพิเสษเป็นเหล็กเสริมตามยาว เปรียบเทียบกับการใช้เหล็กเสริมทั่วไปภายใต้แรงแบบวัฏ จักรซึ่งเทียบเท่ากับแรงแผ่นดินไหว ในการศึกษาได้เปรียบ เทียบประสิทธิภาพด้านทานแรงแผ่นดินไหวของ โครงสร้าง ได้แก่ กำลังของจุดต่อ (strength) ค่าความ เหนียว (ductility) การเสื่อมลดของค่าแข็งเกร็งและกำลัง (stiffness and strength degradation) การดูดซับ พลังงาน (energy dissipation) พฤติกรรมความเครียด ของเหล็กเสริม (strain profile) และแบบฉบับการวิบัดิ (mode of failure)

2. วิชีวิจัย

ในการศึกษานี้ ได้ทำการทดสอบชิ้นส่วนคอนกรีต เสริมเหล็ก จำนวน 2 ตัวอย่าง ซึ่งจำลองพฤติกรรมแรงดัด ของส่วนประกอบอาการส่วนจุดต่อกาน-เสาภายในอาการ ในขณะที่รับแรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร

2.1 คุณสมบัติวัสดุ

ตัวอย่างทคสอบทั้งหมคในการศึกษา ใช้คอนกรีตที่มี กำลังอัดเท่ากับ 44.03 MPa ในส่วนของเหล็กเสริมตาม ขวางใช้เหล็กชั้นคุณภาพ SR24 มีกำลังที่จุดกรากเท่ากับ 372 MPa ในส่วนคุณสมบัติของเหล็กเสริมตามยาวจาก การทดสอบกำลังรับแรงดึงของวัสดุ (uniaxial tensile test) แสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 สำหรับในรูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเก้นและความเกรียดของ เหล็กเสริม

จากการทคสอบกุณสมบัติของเหล็กเสริมตามยาว พบว่า กำลังที่จุดครากของเหล็ก SD40 และ SD40s มีค่า

1. บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่า สมบัติของเหล็กเสริมคอนกรีตมี บทบาทสำคัญต่อพฤติกรรมและประสิทธิภาพของ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเฉพาะแรงกระทำที่มี รูปแบบทางพลศาสตร์ เช่น แรงแผ่นดินไหว ที่มีขนาดของ แรงเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดและสลับทิศ ในการออกแบบ โครงสร้างต้านทานแผ่นดินใหว สมบัติทางกลของเหล็ก เสริมเป็นหนึ่งในตัวแปรที่มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความ เหนียวให้กับอาการกอนกรีตเสริมเหล็ก การก่อสร้างอาการ คอนกรีตเสริมเหล็กในปัจจุบันใช้เหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SD40 ซึ่งเป็นเหล็กที่นิยมใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรม ก่อสร้าง อย่างไรก็ตาม หลังจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ อ.แม่ลาว จ. เชียงราย ในปี พ.ศ. 2557 ซึ่งทำให้อาการใน พื้นที่เกิดความเสียหายเป็นอย่างมาก ด้วยเหตุนี้ อุตสาหกรรมการผลิตเหล็กเสริมสำหรับงานก่อสร้างใน ประเทศไทยได้นำเสนอผลิตภัณฑ์ใหม่สู่ตลาด เพื่อเพิ่ม ความสามารถในการเสียรูปและคงกำลังของอาการ คอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาวะเหตุการณ์แผ่นดินไหว ใด้แก่ เหล็กเสริมที่มีความเหนียวพิเศษ ชั้นคุณภาพ SD40s (super ductile bar หรือ seismic bar) ซึ่งเป็น เหล็กเสริมที่ถูกปรับปรุงในกระบวนการผลิตให้มีค่าการยืด ตัว (elongation) สูงกว่าเหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SD40 ตามมาตรฐาน มอก.24-2548 [1]

ในปัจจุบันสำหรับการก่อสร้างอาการขนาดใหญ่ พิเศษ อาการสูง และอาการที่ตั้งอยู่ในเขตพื้นที่เสี่ยงภัย แผ่นดินไหว มีแนวโน้มที่จะเลือกใช้เหล็กเสริมชนิดใหม่นี้ ในงานโกรงสร้างกอนกรีต เพื่อประโยชน์ทั้งในด้าน วิสวกรรมและด้านการตลาดของโกรงการ กล่าวคือ ทั้ง วิสวกรและผู้บริโภกส่วนใหญ่มีกวามเชื่อว่า การใช้เหล็ก เสริมกวามเหนียวพิเศษ จะช่วยปรับปรุงสมบัติด้านทาน แผ่นดินไหวของอาการดังกล่าวให้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การใช้เหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SD40 จากการศึกษาที่ผ่าน มา [2-5] แสดงให้เห็นว่าสมบัติของเหล็กเสริมมีผลต่อ พฤติกรรมการตอบสนองของโกรงสร้างกอนกรีตในช่วง หลังจุดยึดหยุ่น อย่างไรก็ตาม การศึกษาประสิทธิภาพการ เท่ากับ 454 และ 468 MPa ตามลำดับ ร้อยละการยืดตัว ของเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับ 16 และ 20 สำหรับเหล็กเสริม SD40 และ SD40s ตามลำดับ ในส่วนของก่าความเครียด ที่จุดครากของเหล็ก SD40s มีระยะการยืดสูงกว่าเหล็ก SD40 นอกจากนี้ยังพบว่าความยาวของความเครียดที่มีค่า ความเค้นครากคงที่ (Yield Plateau Strain) ของเหล็ก เสริมชั้นคุณภาพ SD40 มีค่าต่ำกว่าเหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SD40s ซึ่งแสดงจากค่าความเครียดที่จุด Hardening (*Esh*) ของเหล็กเส้นชั้นคุณภาพ SD40 จะมีค่าต่ำกว่า เหล็กเส้นชั้นคุณภาพ SD40s

ตารางที่ 1 สมบัติของเหล็กเสริมตามยาว

ชั้น	กำลังดึงที่	มอดูถัส	กำลัง	ค่าการ
คุณภาพ	จุดคราก,	ยืดหยุ่น,	ประลัย,	ยืดตัว
	σ_y	E_s	σ_{u}	(%)
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	
SD40	454	215,746	632	16
SD40s	468	188,332	568	20

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบสมบัติของเหล็กเสริม

ชั้น	ความเครียด	ความเครียดที่จุด	มอดูถัส
คุณภาพ	ที่จุดคราก,	Hardening,	พลาสติก,
-	$\varepsilon_y \times 10^{-6}$	$\varepsilon_{sh} \times 10^{-6}$	E_p
			(MPa)
SD40	2,104	8,887	2,696
SD40s	2,485	29,476	1,348



รูปที่ 1 ความเค้น-ความเครียดของเหล็กเสริม

2.2 ตัวอย่างทดสอบ

การศึกษาได้สร้างขึ้นส่วนทดสอบจุดต่อภายในคาน-เสา ที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกัน ออกแบบชิ้นส่วนคานและเสา ตาม ACI 318-14 [6] และออกแบบจุดต่อตาม ACI 352R-02 [7] โดยกำหนดโครงสร้างให้มีพฤติกรรมเป็น เสาแข็ง-คานอ่อนตามวิธีออกแบบ capacity โดย Hollings [8-9] ซึ่งเป็นผู้นำเสนอวิธีการนี้ ขนาด โครงสร้างที่ใช้ในการศึกษาเท่ากับ 2/3 เท่าของขนาดจริง สำหรับอาการสูงปานกลางโดยประมาณ (อาการพาณิชย์ ความสูงไม่เกิน 4 ชั้น) จำนวน 2 ตัวอย่าง ซึ่งแบ่งตามชั้น กุณภาพของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างทดสอบ ได้แก่ เหล็กเสริมปกติ (SD40) และเหล็กเสริมเหนียวพิเศษ (SD40s) สำหรับ ดัวอย่าง M-SD40-EXP และ M-SD40s-EXP ตามลำดับ ตัวอย่างทั้งสองมีมิติของ โครงสร้างคอนกรีต ปริมาณเหล็กและรายละเอียดการเสริม เหล็กในทกชิ้นส่วนเหมือนกัน ดังแสดงในรูปที่ 2

การติดตั้งของชุดทดสอบแสดงในรูปที่ 3 กำหนดให้ ปลายคานทั้ง 2 ด้านมีสภาวะยึดรั้งแบบหมุนอิสระและ เคลื่อนที่ได้ 1 มิติ (linked support) ที่ตำแหน่งฐานเสา ด้านล่างกำหนดให้มีสภาวะยึดรั้งแบบหมุนอิสระ (pinned support) ส่วนที่ปลายเสาด้านบนถูกปล่อยให้มีการ เคลื่อนที่โดยอิสระ (free-end) และจำลองบรรทุกน้ำหนัก กระทำในแนวราบแบบสลับทิศที่ตำแหน่งปลายเสา ด้านบนในการทดสอบได้กำหนดแรงในแนวแกนให้ กระทำกับเสาตลอดการทดสอบ เท่ากับ ร้อยละ 10 ของ กำลังรับแรงอัดเสา (0.1Actic)

ในตารางที่ 2 แสดง มิติและปริมาณเหล็กเสริมของ ชิ้นส่วนคานและเสา สำหรับตารางที่ 3 และ 4 แสดงดัชนึ และกำลังของชิ้นส่วนคาน เสาและจุดต่อ ซึ่งสัมพันธ์กับ ขนาดของแรงเฉือนของคาน (R) และแรงเฉือนระหว่างชั้น (H) ที่สามารถรับได้ สำหรับค่าอัตราส่วนกำลังรับโมเมนต์ ระบุต่อกำลังรับแรงเฉือนระบุของหน้าตัด (M_n/a_bV_n) ใช้สำหรับประเมินลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ หากอัตราส่วนดังกล่าวมีค่ามากกว่า 1.0 แสดงว่าหน้าตัคมี ค่ากำลังรับโมเมนต์ระบุมากกว่ากำลังรับแรงเฉือนระบุ เป็นผลให้ชิ้นส่วนของโครงสร้างจะวิบัติในลักษณะของ แรงเฉือน ในส่วนกำลังแรงรับเฉือนของจุดต่อพิจารณาตาม ACI352R-02 ซึ่งค่า b_j คือความกว้างประสิทธิผลของจุด ต่อและ γ คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของจุดต่อ ในการศึกษาออกแบบให้เกิดการวิบัติในชิ้นส่วนคานก่อน

การวิบัติในชิ้นส่วนอื่น ๆ จากการออกแบบพบว่า ค่าแรง เฉือนจากการคำนวณระหว่างชั้นสูงสุด (H_{cal}) ของตัวอย่าง M-SD40-EXP และ M-SD40s-EXP มีค่าเท่ากับ 43.25 และ 40.30 kN ตามลำดับ

ตัวอย่าง		ค	าน		เสา		
	มิติ	ปริมาณเหล็กเสริม		ปริมาณเหล็ก	มิติ	ปริมาณ	ปริมาณ
	$(b_b \times h_b)$	ตามยาว		เสริมตาม	$\left(b_c \times h_c \right)$	เหล็กเสริม	เหล็กเสริม
	<i>(mm)</i>	ด้านบน	ด้านถ่าง	ขวาง	<i>(mm)</i>	ตามยาว	ตามขวาง
M-SD40-EXP	150×300	4-DB12	3-DB12	RB6 @ 65 mm.	200×300	10-DB12	RB6 @ 65 mm.
M-SD40s-EXP	150×300	4-DB12	3-DB12	RB6 @ 65 mm.	200 × 300	10-DB12	RB6 @ 65 mm.

ตารางที่ 2 สมบัติของชิ้นส่วนคอนกรีต

ตารางที่ 3 ดัชนีทางโครงสร้างของคาน

ตัวอย่าง	ความยาว, <i>a_b</i> (mm.)	$\frac{a_b}{h_b}$	$\frac{M_n^+}{\text{(kN-m)}}$	M_n^- (kN-m)	V _n (kN)	$\frac{M_n^+}{a_b V_n}$	$\frac{M_n^-}{a_b V_n}$	R _{max} (kN)	H _{b-max} (kN)
M-SD40-EXP	1,350	4.50	44	56	172	0.159	0.215	32.59	43.25
M-SD40s-EXP	1,350	4.50	41	55	172	0.164	0.220	30.37	40.30

ตารางที่ 4 คัชนีทางโครงสร้างของเสาและจุดต่อ

ตัวอย่าง	เสา					จุดต่อ			
	ความยาว, ^a c (mm)	$\frac{a_b}{h_c}$	<i>M</i> _{<i>n</i>} (kN-m)	<i>V_n</i> (kN)	$\frac{M_n}{a_b V_n}$	H _{c-max} (kN)	γ (Type 2)	<i>b</i> _{<i>j</i>} (mm.)	H _{j-max} (kN)
M-SD40-EXP	980	3.27	67	192	0.334	68.37	15	200	495.67
M-SD40s-EXP	980	3.27	67	192	0.345	68.37	15	200	495.67



รูปที่ 3 ลักษณะการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ

การเปลี่ยนแปลงของค่าความเครียคในระหว่างการทคสอบ ซึ่งติดตั้งบนเหล็กเสริมตามยาวด้านบนและด้านล่างของ หน้าตัดคาน บริเวณปลายคานหน้าเสาภายในระยะความลึก ประสิทธิผลของคาน (effective beam depth, d) ผ่าน จุดต่อระหว่าง คาน-เสา ดังรูปที่ 6 แสดงตำแหน่งในการ ติดตั้งแถบวัดก่าความเครียดบนเหล็กเสริมตามยาวของคาน



รูปที่ 5 การควบคุมอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์



เสริมตามยาวของคาน

3. ผลการทดสอบ

3.1 ลักษณะการวิบัติ (Failure Mode)

ในระหว่างการทดสอบทิศทางของรอยร้าวใน ตัวอย่างทดสอบทั้งสองมีพฤติกรรมคล้ายกันเนื่องจาก มีรายละเอียดการเสริมเหล็กเหมือนกัน ในการทดสอบที่ ระดับการเกลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่าง 0.15%-0.50% ปรากฎรอยร้าวแรงคัดเริ่มด้น (flexural crack) กระจาย ภายในระยะกวามลึกประสิทธิผลของคาน (d) ที่บริเวณ ปลายกานต่อกับเสา เมื่อเพิ่มระดับการเกลื่อนตัวสัมพันธ์ รอยร้าวแรงคัดคังกล่าว จะขยายแนวให้ยาวเพิ่มขึ้นตลอด

2.3 การควบคุมอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์

ในการทดสอบ ได้ควบคุมอัตราส่วนการเคลื่อนตัว ด้าน ข้างสัมพัทธ์ (inter-story drift ratio) ซึ่งเป็น อัตราส่วนระหว่างระยะการเคลื่อนตัวที่ปลายเสา (Δ) กับ ความสูงของเสา (h) ดังแสดงในรูปที่ 4 สำหรับการ คำนวณอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์แสดงในสมการที่ (1)

Drift Ratio,
$$\theta = \frac{\Delta}{h} \times 100\%$$
 (1)

โดยที่ θ= อัตราส่วนการเกลื่อนดัวสัมพัทธ์ Δ = การเกลื่อนตัวในแนวราบ h = ความสูงของเสา



รูปที่ 4 การตรวจสอบค่าอัตราส่วนการเกลื่อนตัวสัมพัทธ์

ในการศึกษา กำหนดการเกลื่อนตัวในแนวราบที่ ด้านบนของเสาเป็นแบบกึ่งสถิตแบบสลับทิศ ตาม ข้อกำหนด ACI T1.1-01[10] ในแต่ละระดับการเกลื่อน ตัวจะทำการทดสอบซ้ำจำนวน 3 รอบ เพื่อตรวจสอบ เสถียรภาพด้านกำลังของโครงสร้าง จากนั้นจึงเพิ่มระดับ การเกลื่อนตัวในระดับต่อไปจนกระทั่งชิ้นส่วนเกิดการ วิบัติหรือก่าระยะเกลื่อนตัวสัมพัทธ์มีก่าเท่ากับร้อยละ 4.0 ในรูปที่ 5 แสดงจำนวนรอบและระดับการเกลื่อนตัว สัมพัทธ์ ที่ใช้ในการทดสอบ

2.4 การตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงของค่า ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวของคาน

ในการศึกษาทำการติดตั้งแถบวัดก่ากวามเกรียด (strain gauges) บนเหล็กเสริมตามยาวของกานเพื่อวัด



รูปที่ 7 การวิบัติของตัวอย่าง M-SD40-EXP (ระดับอัตราการเกลื่อนตัวสัมพัทธ์เท่ากับ 4.00%)



ร**ูปที่ 8** การวิบัติของตัวอย่าง M-SD40s-EXP (ระดับอัตราการเกลื่อนตัวสัมพัทธ์เท่ากับ 4.00%)

3.2 พฤติกรรมการวนซ้ำ (Hysteretic) และเส้นโค้ง ขอบนอก (Envelope Curve)

รูปที่ 9 และ 10 แสดงพฤติกรรมการวนซ้ำและเส้น โค้งขอบนอกของตัวอย่าง M-SD40-EXP และ M-SD40s-EXP ตามลำคับ พฤติกรรมแบบยืดหยุ่นของ ด้วอย่างทดสอบทั้งสามอยู่ภายในระดับเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ เท่ากับ ±0.50% ถึง ±1.00% หลังจากนั้น เส้นโค้งขอบนอก มีกำลังค้านทานเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและพื้นที่ในวงรอบ ของลูปวนซ้ำ (hysteresis loop) มีขนาดเพิ่มขึ้น แสดงถึง การครากของเหล็กตามยาวในคาน รอยร้าวของคอนกรีตที่ จุดต่าง ๆ ของคานและจุดต่อต่างช่วยกันสลายพลังงาน (energy dissipation) ได้ดี เหล็กปลอกสามารถป้องกัน การวิบัติแบบเมือนทั้งในจุดต่อและคานได้ ในระหว่างการ ทดสอบทั้งสองตัวอย่างไม่ปรากฏพฤติกรรมอัดแน่น (Pinching) สำหรับแนวโน้มของกราฟขอบนอก หลังจาก จุดครากของชิ้นส่วนทั้งสอง พบว่า ที่ระดับอัตราการ

ความลึกของคาน เมื่อถึงระดับการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ 0.50% ปรากฏรอยร้าวทแยง (diagonal crack) ที่จุดต่อ คาน-เสา ในระหว่างการทดสอบพบรอยร้าวแรงคัดจำนวน มากกระจุกตัวที่บริเวณปลายคานหน้าเสาและเกิดรอยร้าว แรงคัดกระจายไปทั่วชิ้นส่วนคาน เมื่อเคลื่อนตัวสัมพันธ์ เพิ่มขึ้นถึงระดับ 3.50% คอนกรีตที่ด้านบนและล่างของ ห น้าตัด คาน บริเวณ ห น้าเสาถูก บ ด แตกละเอียด (crushing) จนสามารถเห็นเหล็กเสริมได้ เมื่อระดับการ เคลื่อนตัวสัมพันธ์เพิ่มขึ้นเป็น 4.00% เหล็กเสริมตามยาว ด้านท้องคานบริเวณหน้าเสาเกิดการวิบัติจากการโก่งเคาะ (buckling) เป็นสาเหตุทำให้กำลังของ โครงสร้างทั้ง ระบบลดลงอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ รอยร้าวแรงคัดของเสา ปรากฏอยู่ด้านบนและด้านล่างจุดต่อคาน-เสา เพียงเล็กน้อย

ในรูปที่ 7 และ 8 แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่าง M-SD40-EXP และ M-SD40s-EXP ตามลำคับ จาก รูปแบบของการวิบัติของทั้งสองตัวอย่างพบว่ามีข้อ แตกต่างของแนวรอยร้าวคอนกรีตและระดับการแตกของ กอนกรีต ตัวอย่างเช่น การวิบัติของตัวอย่าง M-SD40-EXP (รูปที่ 7) ปรากฏการแตกละเอียดของคอนกรีตมี จำกัดอยู่ในบริเวณ โครงสร้างคานหน้าเสาเท่านั้นและพบ รอยแตกบนจุดต่อเป็นรอยแตกทแยงหลักอย่างชัดเจนซึ่ง เป็นตัวแทนของแบบฉบับการวิบัติในแนวที่เป็นค้ำยันรับ แรงอัด (strut mechanism) สำหรับการวิบัติของตัวอย่าง M-SD40s-EXP (รูปที่ 8) พบการแตกอัดของคอนกรีตที่ หน้าตัดกานและบริเวณจุดต่อที่ติดกับปลายท้องกาน และ การกระจายของรอยแตกบนจดต่อซึ่งปรากฎรอยแตกทแยง ้จำนวนมากซึ่งบ่งบอกถึงพถติกรรมการวิบัติทั้งแบบแรงอัด ในค้ำยันและแรงยึคเหนี่ยว (strut and truss/bond mechanism)



ร**ูปที่ 11** ความเครียดของเหล็กเสริมบนตามยาวของหน้า ตัดคานที่ระดับอัตราการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ -2.50%

จากข้อมูลของการกระจายระดับความเครียดของ เหล็กเส้น SD40 และ SD40s ภายในชิ้นส่วนทคสอบดัง แสดงในรูปที่ 11 พบว่า ที่บริเวณหน้าเสาติดกับคาน ระดับ ความเครียดของเหล็กทั้งสองชั้นคุณภาพมีค่าใกล้เคียงกัน (8,000-10,000 x 10⁻⁶ mm/mm) อย่างไรก็ตาม เมื่อ พิจารณาจากรูปที่ 1 พบว่าที่ระดับความเครียดดังกล่าว เหล็ก SD40 มีหน่วยแรงมากกว่าเหล็ก SD40s ที่ยังอยู่ ในช่วงหน่วยแรงครากคงที่ ซึ่งแรงภายในของโครงสร้าง คอนกรีตที่ใช้เหล็กเสริม SD40s มีค่าต่ำกว่าเหล็กเสริม SD40 ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงทำให้เกิดการ โก่งเคาะ เฉพาะที่ของเหล็กเสริมล่างของหน้าตัดคานโดยแรงอัด ภายในเหล็กเสริมของตัวอย่าง M-SD40-EXP ก่อน ตัวอย่าง M-SD40s-EXP

3.3 กำลังสูงสุด (Ultimate Strength)

ในรูปที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบของเส้น envelope ของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเฉือนระหว่าง ชั้นและอัตราส่วนการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของทั้ง 2 ตัวอย่าง จากผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 3 พบว่า ค่ากำลัง สูงสุดจากการทดสอบ (H_{EXP}) ทั้งสองทิศทางของตัวอย่าง M-SD40-EXP และ M-SD40s-EXP มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนกำลังสูงสุดเฉลี่ยของ ตัวอย่าง M-SD40s-EXP กับตัวอย่าง M-SD40-EXP มีค่าเท่ากับ 1.02 ซึ่งค่าอัตราส่วนกำลังสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกับ อัตราส่วนกำลังสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกับ

เคลื่อนตัวสัมพัทธ์เท่ากับ 4.00% พฤติกรรมเส้นโก้งขอบ นอกลคลงเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม จากพฤติกรรมกา รวนซ้ำของรอบที่ 3 พบว่ากำลังด้านทานของหน้าตัคลคลง เหลือต่ำกว่า 85% จึงถือได้ว่าชิ้นทคสอบเกิคการวิบัติแล้ว

จากผลการทดสอบตัวอย่าง M-SD40-EXP และ M-SD40s-EXP จะเห็นได้ว่าพฤติกรรม hysteretic และ ลักษณะของเส้นโด้ง envelope มีความคล้ายกัน จะแตกต่างกันเพียงแนวโน้มของเส้นโด้ง envelope ที่ ระดับอัตราการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ 4.00% พฤติกรรมด้าน กำลังของตัวอย่าง M-SD40-EXP มีแนวโน้มลดลงแต่ สำหรับตัวอย่าง M-SD40s-EXP มีแนวโน้มของกำลังที่ ดงที่ เนื่องมาจากช่วงความยาวของความเครียดที่มีหน่วย แรงครากคงที่ (yield plateau strain) ของเหล็กเสริม สองชั้นคุณภาพที่ไม่เท่ากัน



ซึ่งแสดงให้เห็นว่า กำลังครากของเหล็กเสริมมีผล โดยตรง ต่อกำลังสูงสุดของ โกรงสร้างกอนกรีต เมื่อเปรียบเทียบก่า กำลังสูงสุดจากการทดสอบกับก่าจากการออกแบบพบว่า ก่ากำลังทั้งสองมีก่าใกล้เกียงกัน

ตารางที่ 3 ค่ากำลังสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่าง	$H_{_{EXP}}(\mathrm{kN})$ Push/Pull	H _{cal} (kN)	$\frac{H_{EXP}}{H_{cal}}$
M-SD40-EXP	44.43/42.08	43.25	1.03/0.97
M-SD40s-EXP	44.03/44.24	40.30	1.09/1.10



รูปที่ 12 เส้นโค้งรอบนอก (backbone curve)

3.4 ความเหนียว (Ductility Factor, μ)

ค่าความเหนียวเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์สำคัญเพื่อ ประเมินสมรรถนะในการเสียรูปของโครงสร้างคอนกรีต แบบอินอิลาสติกขณะเกิดแผ่นดินไหว ซึ่งเป็นอัตราส่วน ระหว่างการเสียรูปที่จุดคราก (yield deformation, d_y) กับการเสียรูปที่จุดประลัย (ultimate deformation, d_u) สำหรับการประเมินตำแหน่งการเสียรูปที่จุดครากและจุด ประลัยในการศึกษานี้ได้ใช้วิธีการประเมินจากการศึกษา ของ Park [11] ดังแสดงในรูปที่ 13

ตารางที่ 4 ค่าความเหนียวของตัวอย่างทคสอบ

ตัวอย่าง	ทิศทาง	ตำแหน่งกา	ш	
		$d_u(\%)$	d _y (%)	μ
M-SD40-	Push	4.00 +	0.90	4.00 +
EXP	Pull	4.00 +	1.00	4.00 +
M-SD40s-	Push	4.00+	1.00	4.00+
EXP	Pull	4.00+	1.00	4.00+



ร**ูปที่ 13** ค่าความเหนียวของตัวอย่างทคสอบ

ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4 พบว่า ความ เหนียวของตัวอย่าง M-SD40-EXP และ M-SD40s-EXP มีค่าใกล้เกียง 4.00 ในทั้งสองตัวอย่าง เมื่อพิจารณา ในส่วนของการเสียรูปที่จุดครากของตัวอย่างพบว่า ตำแหน่งจุดครากของตัวอย่าง M-SD40-EXP และ M-SD40s-EXP มีค่าเฉลี่ยที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัว สัมพัทธ์เท่ากับ 0.95% และ 1.00% ตามลำดับ สอดคล้อง กับความเกรียดของเหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SD40 ที่มีค่า น้อยกว่าเหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SD40s ดังแสดงในตาราง ที่ 2

3.5 ความเสื่อมถอยของกำลัง (Strength Degradation)

น้ำหนักบรรทุกกระทำซ้ำแบบวัฎจักรในอัตราเคลื่อน ตัวสัมพัทธ์ระดับเดียวกัน 3 ครั้ง เป็นสาเหตุให้กำลัง ด้านทานในรอบถัคมาลดลงจากก่ากำลังด้านทานในรอบ แรก รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเสื่อมถอย ของกำลังเทียบกับกำลังสูงสุดในรอบแรกกับอัตราส่วนการ เคลื่อนตัวสัมพัทธ์ในรอบที่ 3 (H₃/H₁) จากการทดสอบจะ เห็นได้ว่าทั้งสองตัวอย่างแสดงก่าการเสื่อมถอยของกำลัง ในระดับที่ใกล้เกียงกันซึ่งมีก่าการเสื่อมของกำลังน้อยกว่า 15% อย่างไรก็ตาม เมื่ออัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ เพิ่มขึ้นถึงระดับ 4.00% พบว่าตัวอย่าง M-SD40-EXP และ M-SD40s-EXP มีกำลังคงเหลือเท่ากับ 73% และ 80% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากำลังกงเหลือของตัวอย่าง M-SD40s-EXP ทำได้ดีกว่า M-SD40-EXP ที่อัตราส่วน การเกลื่อนตัวสัมพัทธ์ในระดับที่โกรงสร้างเกิดการวิบัติ



โดยทั่วไป ค่าความแข็งเกร็ง (stiffness) ของ ้โครงสร้างจะลดลงเมื่อระดับอัตราเคลื่อนตัวสัมพัทธ์เพิ่ม มากขึ้นเรื่อย ๆ หรือมีการเคลื่อนตัวแบบสลับทิศ เนื่องจาก การเสียหายของโครงสร้างจะสะสมมากขึ้น การตรวจสอบ ้ความความเสื่อมถอยของความแข็งเกร็งในการศึกษานี้ ใช้ค่าความแข็งเกร็งโดยวิธี Secant (secant stiffness, K_{sec}) ในรอบสุดท้ายของค่าอัตราการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ใน แต่ละระดับ (รอบที่ 3) และพิจารณาค่าอัตราส่วนความแข็ง เกร็งเปรียบเทียบ (normalized stiffness, K_{Norm}) โดย เปรียบเทียบเทียบค่าความแข็งเกร็งที่อัตราการเคลื่อนตัว สัมพัทธ์ในระดับต่างๆ กับค่าความแข็งเกร็งในรอบสุดท้าย ของอัตราส่วนการเกลื่อนตัวสัมพัทธ์ในระดับแรกกือ 0.15% ซึ่งถือเป็นค่าความแข็งเกร็งเริ่มต้น (initial secant stiffness) จากการทดสอบพบว่า การเสื่อมถอย ของค่าความแข็งเกร็งของตัวอย่าง M-SD40-EXP มีมากกว่าตัวอย่าง M-SD40s-EXP ในช่วงอัตราส่วนการ เคลื่อนตัวสัมพัทธ์ต่ำกว่า 2.00% และเมื่อการเคลื่อนตัว สัมพัทธ์เพิ่มขึ้นสู่ระคับ 2.50% การเสื่อมถอยของค่าความ แข็งเกร็งของทั้งสองตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกันจนกระทั่งจบ การทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 15 ที่อัตราส่วนการเคลื่อน สัมพัทธ์ระดับสุดท้าย พบว่าตัวอย่าง M-SD40-EXP และ M-SD40s-EXP มีความแข็งเกร็งคงเหลือเท่ากับ 16.4% และ 8.9% ตามลำคับ





3.7 อัตราส่วนความหน่วงหนืดเทียบเท่า (Equivalent Damping Ratio)

ในการศึกษานี้ ใช้ก่าอัตราส่วนความหน่วงหนืด เทียบเท่า (ζ_{eq}) ตามการศึกษาของ Chopra [12] เป็น ด้วแทนในการประเมินสมรรถนะในการสถายพลังงาน จากการทดสอบพบว่า การสถายพลังงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อ ระยะเคลื่อนตัวเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเกิดการเสียหายเกิด สะสมมากขึ้น ในรูปที่ 16 จะเห็นได้ว่า ด้วอย่าง M-SD40-EXP และ M-SD40s-EXP มีอัตราหน่วงหนืด เทียบเท่าที่ใกล้เคียงกันแต่จะมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันใน ระดับการเคลื่อนตัวที่ 4.00% ซึ่งอัตราหน่วงหนืดเทียบเท่า ของตัวอย่าง M-SD40-EXP มีแนวโน้มลดลง แต่ตัวอย่าง M-SD40s-EXP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



สรุป

บทความนี้ นำเสนอการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ด้านทานแผ่นดินไหวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ใช้เหล็กความเหนียวสูงชั้นคุณภาพ SD40s กับเหล็ก เสริมปกติชั้นคุณภาพ SD40 เป็นเหล็กเสริมตามยาว โดย ทดสอบโครงสร้างกาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายใน อาการ ภายใต้แรงวัฏจักรตามมาตรฐาน ACI T1.1-01 จากการทดสอบสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- กำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมตามขาวมีผล โดยตรงต่อกำลังสูงสุดของชิ้นส่วนโครงสร้าง คอนกริต แสดงให้เห็นจากอัตราส่วนกำลังสูงสุด เฉลี่ยของ ตัวอย่าง M-SD40s-EXP กับตัวอย่าง M-SD40-EXP ซึ่งมีก่าใกล้เกียงและสอดกล้อง กับอัตราส่วนกำลังครากของเหล็กเส้นเสริมชั้น กุณภาพ SD40s กับเหล็กเส้นเสริมชั้นกุณภาพ SD40
- ลักษณะการแตกร้าวของจุดต่อคาน-เสาคอนกรีต มีลักษณะแตกต่างกัน ซึ่งตัวอย่าง M-SD40-EXP ปรากฏรอยแตกบนจุดต่อปรากฏรอยแตก ทแยงหลักอย่างชัดเจนซึ่งเป็นตัวแทนของ พฤติกรรมวิบัติในแนวรับแรงอัด (Strut Mechanism) สำหรับการวิบัติของตัวอย่าง M-SD40s-EXP แสดงการกระจายของรอยแตก บนจุดต่อซึ่งปรากฏรอยแตกทแยงจำนวนมากซึ่ง บ่งบอกถึงพฤติกรรมการวิบัติทั้งแบบแรงอัดและ แรงยึดเหนี่ยว (Strut and Truss/Bond Mechanism)
- ระดับความเครียดที่จุดครากและระดับ ความเครียดที่จุด Hardening ของเหล็กเสริม ตามยาวมีผลโดยตรงต่อพฤติกรรมของชิ้นส่วน โครงสร้างคอนกรีต

- ค่าความเหนียวของโครงสร้างคอนกรีตที่ใช้เหล็ก เสริมตามยาวชั้นคุณภาพ SD40 มีค่าใกล้เคียงกับ โครงสร้างคอนกรีตที่ใช้เหล็กเสริมตามยาวชั้น คุณภาพ SD40s อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมของ โครงสร้างคอนกรีตหลังจากจุดครากพบว่า ตำแหน่งของค่าความเครียดที่จุด hardening ของเหล็กเสริมตามยาวมีผลต่อพฤติกรรม ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและการเคลื่อนตัวใน แนวราบของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก หลังจากจุดครากของตัวอย่างทดสอบ
- ความเสื่อมถอยของกำลังของตัวอย่างคอนกรีต ทั้งสองมีระดับที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม เมื่อ อัตราส่วนการเคลื่อนสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นถึงระดับ 4.00% พบว่ากำลังคงเหลือของตัวอย่าง M-SD40s-EXP มีค่ามากกว่า M-SD40-EXP
- ในช่วงอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ต่ำกว่า 2.00% การเสื่อมถอยของก่าความแข็งเกรึ่งของ ตัวอย่าง M-SD40-EXP มากกว่าตัวอย่าง M-SD40s-EXP อย่างไรก็ตาม ค่าการเสื่อมถอย ของก่าความแข็งเกรึ่งของทั้งสองตัวอย่างมีก่า ใกล้เกียงกันเมื่อการเกลื่อนตัวสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นสู่ ระดับ 2.50% จนกระทั่งจบการทคสอบที่อัตราส่วน การเกลื่อนสัมพัทธ์ระดับสุดท้าย พบว่า ก่าความ แข็งเกร็งกงเหลือของตัวอย่าง M-SD40-EXP สงกว่าตัวอย่าง M-SD40s-EXP
- ความสามารถในการสถายพลังงานของชิ้นส่วน คอนกรีตที่ใช้เหล็กเสริมตามขาวชั้นคุณภาพ SD40 และชั้นคุณภาพ SD40s มีค่าใกล้เคียงกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] มอก. 24-2548. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต: เหล็กข้ออ้อย. สำนักงานมาตรฐาน ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548.
- [2] Andres, L., Hooman, T., Santiago, P. and Jeffrey, M.R. High-performance steel bars and fibers as concrete reinforcement for seismic-resistant frames. *Advances in Civil Engineering*, 2012.
- [3] Tavallali, H. Cyclic response of concrete beams reinforced with ultrahigh strength steel. Doctoral dissertation, The Pennsylvania State University, 2011.

- [4] Rautenberg, J. M. Drift capacity of concrete columns reinforced with high-strength steel. Doctoral dissertation, Purdue University West Lafayette, 2011.
- [5] Rautenberg, J. M., Pujol, S., Tavallali, H. and Lepage, A. Drift capacity of concrete columns reinforced with high-strength steel. *ACI Structural Journal*, 2013; 110(2): 307-317.
- [6] ACI committee 318. ACI 318-14: Building code requirements for structural concrete and commentary. American Concrete Institute, Detroit, 2014.
- [7] ACI-ASCE Committee 352. ACI 352R-02: Recommendations for design of beam-column connection in monolithic reinforced concrete structures. American Concrete Institute, Detroit, 2002.
- [8] Hollings, J.P. reinforced concrete seismic design. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 1968; 2(3): 217-250.
- [9] Hollings, J.P. A reinforced concrete building in Wellington. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 1968; 2(4): 420-442.
- [10] ACI Innovation Task Group 1 and Collaborators. ACI T1.1-01: Acceptance criteria for moment frames based on structural testing. American Concrete Institute, Detroit, 2001.
- [11] Park, R. Evaluation of ductility of structures and structural assemblages from laboratory testing. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 1989; 22(3): 155-166.
- [12] Chopra, A. K. Dynamic of structures-theory and applications to earthquake engineering. 4th edition, Pearson, New Jersey, 2011.