

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูปภาพ	ฉ
รายการสัญลักษณ์	ฐ
<b>บทที่</b>	
<b>1. บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาของปัญหางานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์	2
<b>2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 ผนังรับแรงเฉือน (Shear Wall)	4
2.2 โครงสร้างระบบผนังรับแรงเฉือนคู่ควบ (Concrete Coupling Wall, CCW)	5
2.3 โครงสร้างระบบผนังรับแรงเฉือนคู่ควบแบบผสมที่มีจุดต่อแบบฝังยึด (Hybrid Coupling Wall with Fully Restrained Connection)	8
2.4 จุดต่อยึดครึ่งบางส่วน (Partially Restrained Connection)	12
2.5 พฤติกรรมและการออกแบบสลักเกลียวสำหรับการยึดคานเหล็กกับผนังรับแรงเฉือน	16
<b>3. การออกแบบตัวอย่างทดสอบ</b>	<b>24</b>
3.1 อาคารต้นแบบ	24
3.2 การออกแบบตัวอย่างทดสอบ	26

	หน้า
3.2.1 การออกแบบคานเหล็กเชื่อมต่อผนัง (Link Beam)	26
3.2.2 การออกแบบจุดต่อ	28
3.2.2.1 จุดต่อยึดครึ่งบางส่วน (Partially Restrained Connection)	28
3.2.2.2 การออกแบบสลักเกลียว (Bolt)	31
3.2.2.3 การออกแบบสลักเกลียวส่วนที่ฝังกับผนัง (Anchor Bolt)	32
3.3 คุณสมบัติของวัสดุของตัวอย่างทดสอบ	37
3.3.1 เหล็กเสริมคอนกรีต (Steel Reinforcement)	37
3.3.2 เหล็กแผ่น (Plate) และเหล็กฉาก (Angle)	37
3.3.3 สลักเกลียวทั่วไปและสลักเกลียวสำหรับฝังกับคอนกรีต (Bolt and Anchor rod)	38
3.3.4 คอนกรีต (Concrete)	38
3.4 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ	38
3.4.1 การจำลองคานเหล็กเชื่อมต่อผนังรับแรงเฉือน (Link Beam)	40
3.4.2 การจำลองขนาดผนังรับแรงเฉือน (Shear Wall of Specimen)	42
3.4.3 การจำลองบล็อกคอนกรีต (Reaction Block)	42
3.5 การติดตั้งเครื่องมือวัด	43
3.6 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ	44
3.7 การให้แรงสลับทิศในการทดสอบ	46
<b>4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล</b>	<b>48</b>
4.1 ผลการทดสอบโดยรวมและลักษณะการวิบัติ	48
4.2 ค่ากำลังรับแรง	67
4.3 สติฟเนส (Stiffness)	71
4.4 การสลายพลังงาน	72
4.5 การแข็งขึ้นของกำลังรับแรง (Hardening)	76
4.6 การเสียหายของสลักเกลียว	77
<b>5. สรุปผลการทดสอบ</b>	<b>81</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย	81
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>82</b>

	หน้า
<b>ภาคผนวก</b>	<b>84</b>
ภาคผนวก ก	การออกแบบตัวอย่างทดสอบ
ภาคผนวก ข	การคำนวณค่าความเครียดหลัก (Principle Strain)
<b>ประวัติผู้วิจัย</b>	<b>104</b>

## รายการตาราง

ตาราง	หน้า	
2.1	ตัวแปรของการทดลองในแต่ละชั้นตัวอย่าง	11
3.1	มิติกานเหล็กเชื่อมผนังของอาคารต้นแบบในการศึกษาของ Gong และ Shahrooz	25
3.2	มิติน้ำรับแรงเฉือนของอาคารต้นแบบ	26
3.3	กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมคอนกรีต	37
3.4	กำลังรับแรงดึงของเหล็ก	37
3.5	กำลังรับแรงดึงของสลักเกลียวทั่วไปและสลักเกลียวสำหรับฝังกับคอนกรีต	38
3.6	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต	38
3.7	รายละเอียดคานเหล็กเชื่อมต่อผนังสำหรับตัวอย่างทดสอบที่ 1 และ 2	40
3.8	รายละเอียดขนาดเหล็ก สลักเกลียว และระยะต่างๆ สำหรับตัวอย่างทดสอบที่ 1 และ 2	40
3.9	อัตราส่วนกำลังรับแรงดัดต่อกำลังรับแรงเฉือน	41
3.10	อัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมต่อหน้าตัดผนังรับแรงเฉือน	42
4.1	ค่าความเครียดแข็ง (Strain Hardening)	76

## รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
1.1 โครงสร้างผนังรับแรงเฉือนคู่ควบแบบผสมโดยใช้จุดต่อแบบยึดแน่น	1
2.1 การรับแรงของผนังรับแรงเฉือน	5
2.2 ลักษณะของแรงที่กระทำกับ โครงสร้างเหล็กและลักษณะแรงภายในที่เกิดขึ้น	6
2.3 การรับแรงคัดและแรงเฉือนของคานเชื่อมต่อผนังรับแรงเฉือน	7
2.4 การวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังสิ้นสุดแผ่นดินไหว	7
2.5 ลักษณะ โครงสร้างระบบ HCW ที่มีจุดต่อแบบฝังยึด	8
2.6 ตัวแปรระยะสำหรับสมการที่ 2.5	10
2.7 ตัวอย่างทดสอบของ Gong และ Shahrooz	10
2.8 ภาพตัด A-A ตัวอย่างทดสอบของ Gong และ Shahrooz	11
2.9 ผลความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปจากการทดสอบของ Gong และ Shahrooz	11
2.10 สภาพการเสียหายหลังสิ้นสุดการทดสอบของ Gong และ Shahrooz	12
2.11 จุดต่อยึดครึ่งบางส่วน	12
2.12 กราฟความต้านทานการหมุนกับมุมการเสียรูปของจุดต่อยึดครึ่งบางส่วน	13
2.13 จุดต่อยึดครึ่งบางส่วนรูปแบบ Top and Seat Angle with Double Web Angle สำหรับคานเหล็กเชื่อมผนังรับแรงเฉือน	14
2.14 ความสัมพันธ์โมเมนต์คัตกับมุมการเสียรูปของการออกแบบจุดต่อแบบยึดครึ่งบางส่วน	15
2.15 ตัวอย่างที่ใช้ในงานจำลองไฟในคัลลิเมนต์	15
2.16 ผลการกระจายความเครียดของเหล็กจากด้านบน (Top Angle) ของ Komuro et al.	16
2.17 การกระจายความเครียดสลักเกลียวด้านบน (Bolt at Top Angle) ของ Komuro et al.	16
2.18 การรับแรงของจุดต่อและสลักเกลียว	17
2.19 รูปแบบสลักเกลียวที่ฝังกับคอนกรีตหรือ Anchor Rod สำหรับติดตั้งก่อนก่อสร้างผนัง	19
2.20 รูปแบบสลักเกลียวที่ฝังกับคอนกรีตหรือ Anchor Rod สำหรับติดตั้งหลังก่อสร้างผนัง	19
2.21 การเชื่อมแหวนรองหัวสลักเกลียว	21
2.22 การเชื่อมแหวนรองหัวสลักเกลียวและแรงคัตเกิดขึ้นในตัวสลักเกลียว	21
2.23 ลักษณะการเสียหายของคอนกรีต	22
2.24 เหล็กเสริมพิเศษรับแรงการแตกออกของคอนกรีต	23
3.1 แปลนอาคารต้นแบบ	25
3.2 ความสัมพันธ์โมเมนต์คัตกับมุมการเสียรูปของการออกแบบรอยต่อแบบยึดครึ่งบางส่วน	29

รูป	หน้า
3.3 ลักษณะการถ่ายแรงของจุดต่อแบบ Top and Seat Angle with Double Web Angle	29
3.4 ลักษณะการถ่ายแรงของเหล็กฉากด้านบน (Top Angle)	30
3.5 ลักษณะการถ่ายแรงของเหล็กฉากที่เอว (Web Angle)	30
3.6 ลักษณะการถ่ายแรงของเหล็กฉากด้านล่าง (Seat Angle)	30
3.7 ลักษณะจุดต่อแบบ Top and Seat Angle with Double Web Angle	31
3.8 ลักษณะของสลักเกลียวเมื่อรับแรงดึง แรงเฉือน และแรงคัต	33
3.9 การแตกออกของคอนกรีต	34
3.10 ระยะที่สามารถนำเหล็กเสริมมาใช้ในการคำนวณกำลังได้	35
3.11 ขั้นตอนการออกแบบ	36
3.12 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบที่ 1 และ 2	39
3.13 ภาพตัดส่วนของบล็อกคอนกรีตและผนังรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบที่ 1 และ 2	39
3.14 ภาพตัดส่วนของคานเหล็กเชื่อมต่อผนังรับแรงเฉือน	39
3.15 เครื่องมือให้แรงทดสอบแบบสลักทิศทาง (Actuator)	43
3.16 สเตรนเกจ (Strain Gage)	43
3.17 ตำแหน่งติดตั้งสเตรนเกจ	44
3.18 การติดตั้งชิ้นตัวอย่างทดสอบ	45
3.19 ชุดติดตั้งคานเหล็กเชื่อมต่อผนังเข้ากับเครื่องมือให้แรงทดสอบแบบสลักทิศทาง	45
3.20 การติดตั้งค้ำยันด้านข้าง	46
3.21 รูปแบบการให้แรงสลักทิศทางกับตัวอย่างทดสอบในห้องปฏิบัติการ	47
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปของตัวอย่างที่ 1	49
4.2 ค่าความเครียดการเฉือน (Rosette Strain) สูงสุดในแต่ละรอบการทดสอบที่เอวคานเหล็กของตัวอย่างทดสอบที่ 1	50
4.3 ตำแหน่งสลักเกลียว (Anchor Bolt) ที่ฝังกับผนังรับแรงเฉือน	50
4.4 ค่าความเครียดสูงสุดที่แต่ละรอบของการรับแรงของสลักเกลียวที่ฝังในผนังรับแรงเฉือนจากแรงดึงถอนตัวที่ 1	50
4.5 ค่าความเครียดสูงสุดที่แต่ละรอบของการรับแรงของสลักเกลียวที่ฝังในผนังรับแรงเฉือนจากแรงดึงถอนตัวที่ 2	51
4.6 ค่าความเครียดสูงสุดที่แต่ละรอบของการรับแรงของสลักเกลียวที่ฝังในผนังรับแรงเฉือนจากแรงดึงถอนตัวที่ 3	51

รูป	หน้า
4.7 ค่าความเครียดสูงสุดที่แต่ละรอบของการรับแรงของสลักเกลียวที่ฝังในผนังรับแรง เนื่องจากแรงดึงถอนตัวที่ 4	51
4.8 สลักเกลียวของตัวอย่างทดสอบที่ 1 ถูกถอนออก 1-1.5 เซนติเมตร	52
4.9 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเสียวรูป 0.015 เรเดียน	52
4.10 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเสียวรูป 0.02 เรเดียน	53
4.11 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเสียวรูป 0.03 เรเดียน	53
4.12 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเสียวรูป 0.04 เรเดียน	54
4.13 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเสียวรูป 0.05 เรเดียน	54
4.14 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเสียวรูป 0.07 เรเดียน	55
4.15 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเสียวรูป 0.09 เรเดียน	55
4.16 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเสียวรูป 0.11 เรเดียน	56
4.17 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเสียวรูป 0.13 เรเดียน	56
4.18 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเสียวรูป 0.15 เรเดียน	57
4.19 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเสียวรูป 0.17 เรเดียน	57
4.20 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 ที่สิ้นสุดการทดสอบ	58
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียวรูปของตัวอย่างที่ 2	59
4.22 ค่าความเครียดการดึงที่ปีกคานเหล็กของตัวอย่างทดสอบที่ 2	60
4.23 ค่าความเครียดการเฉือนที่เอวคานเหล็กของตัวอย่างทดสอบที่ 2	60
4.24 สลักเกลียวของตัวอย่างทดสอบที่ 2 ถูกถอนออก 1-1.5 เซนติเมตร	61
4.25 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเสียวรูป 0.015 เรเดียน	61
4.26 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเสียวรูป 0.02 เรเดียน	62
4.27 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเสียวรูป 0.03 เรเดียน	62
4.28 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเสียวรูป 0.04 เรเดียน	63
4.29 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเสียวรูป 0.05 เรเดียน	63
4.30 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเสียวรูป 0.07 เรเดียน	64
4.31 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเสียวรูป 0.09 เรเดียน	64
4.32 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเสียวรูป 0.11 เรเดียน	65
4.33 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเสียวรูป 0.13 เรเดียน	65
4.34 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเสียวรูป 0.15 เรเดียน	66
4.35 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 ที่สิ้นสุดการทดสอบ (0.17 เรเดียน)	66

รูป	หน้า	
4.36	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปของตัวอย่างที่ 1 และ 2	67
4.37	กำลังรับแรงหลัก (Backbone Curve) ของตัวอย่างทดสอบที่ 1	68
4.38	กำลังรับแรงหลัก (Backbone Curve) ของตัวอย่างทดสอบที่ 2	69
4.39	เปรียบเทียบกำลังรับแรงหลัก (Backbone Curve) ของตัวอย่างทดสอบที่ 1 และ 2	70
4.40	เปรียบเทียบกำลังรับแรงหลัก (Backbone Curve) ของตัวอย่างทดสอบที่ 1, 2 และ CB1	71
4.41	การสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบที่ 1	73
4.42	การสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบที่ 2	74
4.43	เปรียบเทียบการสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบที่ 1 และ 2	75
4.44	เปรียบเทียบการสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบที่ 1, 2 และ CB1	76
4.45	สลักเกลียวที่ฝังกับผนังเกิดการถอนและโค้งงอ	77
4.46	ลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นกับเหล็กฉากบนและสลักเกลียว	78
4.47	ความเสียหายของคานเหล็กเชื่อมต่อผนังรับแรงเฉือนที่มุมการเสียรูป 0.05 เเรเดียน	79
4.48	ความเสียหายของคานเหล็กเชื่อมต่อผนังรับแรงเฉือนที่มุมการเสียรูป 0.09 เเรเดียน	80
4.49	ความเสียหายของคานเหล็กเชื่อมต่อผนังรับแรงเฉือนที่มุมการเสียรูป 0.11 เเรเดียน	80
ก.1	ความสัมพันธ์โมเมนต์ดัดกับมุมการเสียรูปของตัวอย่างทดสอบที่ 1	91
ก.2	ความสัมพันธ์โมเมนต์ดัดกับมุมการเสียรูปของตัวอย่างทดสอบที่ 2	96
ก.3	เหล็กตามขวางเสริมพิเศษด้านบน	99
ก.4	เหล็กตามขวางเสริมพิเศษด้านข้าง	100
ข.1	ลักษณะการติดตั้งแบบ Rectangular Rosette Strain Gage	102
ข.2	วงกลมมอร์สำหรับ Rosette Strain	103

### รายการสัญลักษณ์

$a$	=	ระยะช่วงเนียนคานเชื่อมผนัง
$A_b$	=	พื้นที่หน้าตัดสลักเกลียว (ไม่คำนึงถึงผลกระทบของเกลียว)
$A_g$	=	พื้นที่หน้าตัดผนังรับแรงเฉือน
$A_{gb}$	=	พื้นที่เหล็กเสริมพิเศษ
$A_s$	=	พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม
$b_f$	=	ความกว้างปีกคานเหล็ก
$d_u$	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่รับผลกระทบจากการทำเกลียว
$e$	=	ระยะช่วงเนียนคานเชื่อมผนัง
$f_c'$	=	กำลังรับแรงอัดคอนกรีต
$f_{nt}$	=	หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้น
$f_{nv}$	=	หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้น
$f_t$	=	ความเค้นดึงจุดครากของสลักเกลียว
$f_{ta}$	=	หน่วยแรงตามแนวแกนจากแรงตามแนวแกน
$f_{tb}$	=	หน่วยแรงตามแนวแกนจากแรงดัด
$f_v$	=	ความเค้นเฉือนที่จุดครากของสลักเกลียว
$f_y$	=	กำลังรับแรงที่จุดครากของเหล็ก
$F_{nt}$	=	กำลังรับหน่วยแรงดึงที่ยอมให้
$F_{nv}$	=	กำลังรับหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้
$F_u$	=	กำลังรับหน่วยแรงดึงสูงสุด
$k$	=	ตัวคูณลดสัมประสิทธิ์ความยาว
$K_{ia}$	=	ค่าสถิติเฟนสเริ่มต้นของเหล็กจากที่เอวคานเหล็ก
$K_{is}$	=	ค่าสถิติเฟนสเริ่มต้นของเหล็กจากด้านล่าง
$K_{it}$	=	ค่าสถิติเฟนสเริ่มต้นของเหล็กจากด้านบน
$l$	=	ความยาวที่ถูกดัด
$L$	=	ความยาวทั้งหมดของคานเชื่อมต่อผนังของระบบ HCW
$L'$	=	ความยาวช่วงเนียนของคานเชื่อมผนัง
$L_e$	=	ระยะฝังคานในผนัง
$M$	=	แรงโมเมนต์ที่กระทำสลักเกลียว
$M_{os}$	=	กำลังรับแรงโมเมนต์ของเหล็กจากด้านล่าง

$M_p$	=	กำลังรับแรงคัต
$M_{pt}$	=	กำลังรับแรงโมเมนต์พลาสติกของเหล็กฉากด้านบน
$M_u$	=	ผลรวมของโมเมนต์ต้านทานที่เกิดจากเหล็กฉาก
$n$	=	จำนวนสลักเกลียว
$P_b$	=	กำลังรับแรงดึงของสลักเกลียว
$R_{ki}$	=	สติฟเนส (Stiffness) รวมของเหล็กฉาก
$t_{wall}$	=	ความหนาของผนัง
$T_u$	=	กำลังรับแรงดึงเหล็กเสริมพิเศษ
$V$	=	กำลังรับแรงของสลักเกลียว
$V_b$	=	กำลังรับแรงเฉือนของสลักเกลียว
$V_p$	=	กำลังรับแรงเฉือน
$V_{pt}$	=	แรงเฉือนพลาสติกของเหล็กฉากแนวตั้งด้านบน
$V_{pa}$	=	แรงเฉือนพลาสติกของเหล็กฉากแนวตั้งที่เอวคานเหล็ก
$V_u$	=	แรงเฉือนที่เกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางคานเชื่อมผนัง
$Z$	=	โมดูลัสพลาสติก
$\gamma_p$	=	มุมการเสยรูปของคานเชื่อมผนัง
$\beta_1$	=	ตัวปรับแก้การกระจายแรงอัดคอนกรีต
$\theta$	=	มุมหมุนของจุดต่อ
$\theta_0$	=	มุมหมุนอ้างอิง
$\theta_p$	=	มุมการเสยรูปของผนัง
$\phi$	=	ตัวคูณลดแรง
$\rho$	=	ปริมาณเหล็กเสริมต่อหน้าตัดผนังรับแรงเฉือน