

## สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง .....	VI
สารบัญภาพ .....	VII
บทที่	
1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กำลังรับโมเมนต์ดัดประลัยของคานคอนกรีตอัดแรง.....	4
2.2 กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตอัดแรง.....	6
2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธี Strut and Tie .....	12
2.4 การเสริมกำลังภายนอกเพื่อต้านทานแรงเฉือนด้วยวัสดุ FRP .....	18
2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
3 การดำเนินงานวิจัย.....	24
3.1 รายละเอียดขั้นตอนทดสอบ.....	24

3.2 รูปแบบการทดสอบและอุปกรณ์การตรวจวัด.....	25
3.3 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....	26
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานทดสอบ.....	27
4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	38
4.1 ผลการทดสอบคานคอนกรีตอัดแรง.....	38
4.2 การจำลอง Strut and Tie Model ของคานคอนกรีตอัดแรง.....	55
5 วิเคราะห์ผลดำเนินงาน.....	70
5.1 ผลกระทบของช่องเปิดขนาดใหญ่ที่มีต่อคานคอนกรีตอัดแรง.....	70
5.2 การจำลองโมเดลการถ่ายแรงภายในของคานคอนกรีตอัดแรงด้วยวิธี Strut and Tie.....	71
5.3 ผลของซ่อมรอยร้าวและการเสริมกำลังภายนอกด้วย CFRP ในคาน คอนกรีตอัดแรงที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่.....	73
5.4 วิเคราะห์และเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกของคานที่ได้จากการทดสอบ กับทฤษฎี.....	74
6 สรุปผลดำเนินงานและข้อเสนอแนะ.....	90
6.1 สรุปผลดำเนินงาน.....	90
6.2 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม.....	91
บรรณานุกรม.....	92
ภาคผนวก.....	94
ประวัติผู้วิจัย.....	113

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้าที่
2.1	ตัวคูณลดกำลังของท่อนแรงอัด $\beta_s$ .....	16
2.2	ตัวคูณลดกำลังของจุดต่อ $\beta_n$ .....	17
4.1	สรุปผลการทดสอบของคานตัวอย่าง.....	55
5.1	การเปรียบเทียบค่าแรงในท่อนดึงและแรงในท่อนอัดที่ได้จาก Strut and Tie กับ ผลการทดสอบ.....	72
5.2	การเปรียบเทียบแรงในชิ้นส่วนวิกฤติตามลักษณะการวิบัติของคานที่ได้จาก ผลการทดสอบกับ Strut and Tie.....	73
5.3	เปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากผลการทดสอบกับทฤษฎีของคานCB	77
5.4	เปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากผลการทดสอบกับทฤษฎีของคานBO	79
5.5	เปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากผลการทดสอบกับทฤษฎีของคาน BO-1.....	81
5.6	เปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากผลการทดสอบกับทฤษฎี ของคาน RBO-1.....	84
5.7	เปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากผลการทดสอบกับทฤษฎี ของคาน SBO.....	87
5.8	เปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากผลการทดสอบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์	88

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้าที่
1.1	การเจาะช่องเปิดในคาน.....	2
1.2	การเสริมกำลังด้วย FRP กับองค์อาคารต่างๆ.....	2
2.1	หน่วยการยึดหดตัวและหน่วยแรงที่สถานะประลัยของคานคอนกรีตอัดแรง.....	4
2.2	การเสริมเหล็กปลอกเพื่อต้านทานแรงเฉือนในคาน.....	11
2.3	D – Region and Discontinuities.....	12
2.4	Description of Deep Beam and Slender Beams.....	13
2.5	องค์ประกอบของแบบจำลอง Strut and Tie Model.....	14
2.6	Bottle – Shaped Strut.....	14
2.7	ประเภทของจุดต่อ.....	15
2.8	รูปแบบการพันเพื่อต้านทานแรงเฉือนด้วยวัสดุ FRP.....	18
2.9	รายละเอียดและสัญลักษณ์ที่ใช้พิจารณากำลังต้านทานแรงเฉือนด้วย FRP.....	19
3.1	รายละเอียดชิ้นทดสอบ.....	24
3.2	รูปแบบการทดสอบ.....	25
3.3	ตำแหน่ง Strain Gage และ Dial Gage ที่ติดตั้งในชิ้นทดสอบ.....	26
3.4	เหล็กเสริมอัดแรง (Strand 7 Wire Dia.12.7 mm. Grade 1860) .....	27
3.5	เหล็กเสริมไม่อัดแรง (DB12 mm. Grade SD40) .....	28
3.6	อุปกรณ์ทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมไม่อัดแรง...	28
3.7	ขณะดึงทดสอบเหล็กเสริม.....	28
3.8	การติดตั้งเหล็กเสริมอัดแรงกับแท่นยึด.....	29
3.9	ผลิตภัณฑ์ Strain Gage ที่ใช้ในการทดสอบ.....	29

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้าที่
3.10	เข้าแบบและค้ำยันแบบชั้นทดสอบ..... 30
3.11	การดึงเหล็กเสริมอัดแรงก่อนหล่อชั้นทดสอบ..... 30
3.12	การหล่อชั้นทดสอบ..... 31
3.13	ขั้นตอนการตัดเหล็กเสริมอัดแรงเมื่อคอนกรีตมีค่ากำลังอัดตามที่ออกแบบ..... 32
3.14	การติดตั้ง Strain Gage ที่ผิวคอนกรีตคาน..... 33
3.15	การติดตั้งเครื่องมือทดสอบ เครื่องมือวัดต่างๆและเตรียมความพร้อมก่อนทำการ ทดสอบ..... 34
3.16	ให้นำหน้าบรรทัดพร้อมกับบันทึกค่า Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงและไม่อัดแรง. 35
3.17	การขัดผิวคอนกรีตเพื่อเตรียมผิวก่อนติดตั้ง CFRP..... 35
3.18	ทาชั้น Primer ด้วย SMART CF-Resin..... 36
3.19	การ ปูวัสดุเตรียมผิวก่อนติดแผ่น CFRP..... 36
3.20	การตัดแผ่น SMARTFIBER - SHEET UT70-30 ให้ได้ขนาดที่ออกแบบไว้..... 36
3.21	การติดแผ่น SMARTFIBER - SHEET UT70-30..... 37
4.1	ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดอัดของลูกปูนที่อายุ 28 วัน ของการ หล่อคานครั้งที่ 1..... 38
4.2	ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดอัดของลูกปูนที่อายุ 28 วัน ของการ หล่อคานครั้งที่ 2..... 39
4.3	ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดดึงของเหล็กเสริมอัดแรง..... 39
4.4	ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดดึงของเหล็กเสริมไม่อัดแรง DB 12.... 40
4.5	ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดดึงของเหล็กเสริม ไม่อัดแรง RB9..... 41

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้าที่
4.6	รูปแบบการวิบัติและรอยร้าวที่เกิดขึ้นในคาน CB.....	42
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับค่า Strain ของเหล็กเสริมรับแรงดึงของคาน CB.....	42
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับค่า Strain ของเหล็กเสริมรับแรงอัดและคอนกรีตที่ผิวบนคาน CB.....	43
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับค่าการ โกงตัวในคาน CB.....	43
4.10	รูปแบบการวิบัติและรอยร้าวที่เกิดขึ้นในคาน BO.....	44
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับค่า Strain ของเหล็กเสริมรับแรงดึงของคาน BO.....	45
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับค่า Strain ของเหล็กเสริมรับแรงอัดและคอนกรีตที่ผิวบนคาน BO.....	45
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับค่าการ โกงตัวในคาน BO.....	4.13
4.14	รูปแบบการวิบัติและรอยร้าวที่เกิดขึ้นของคาน BO-1.....	47
4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับค่า Strain ของเหล็กเสริมรับแรงดึงของคาน BO-1.....	47
4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับค่า Strain ของเหล็กเสริมรับแรงอัดและคอนกรีตที่ผิวบนคาน BO-1.....	48
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับค่าการ โกงตัวในคาน BO-1.....	49
4.18	รูปแบบการวิบัติและรอยร้าวที่เกิดขึ้นของคาน RBO-1.....	50

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้าที่
4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับค่า Strain ของเหล็กเสริมรับแรงดึงและ CFRP ของคาน RBO-1..... 50
4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับค่า Strain ของเหล็กเสริมรับแรงอัดและ คอนกรีตที่ผิวบนของคาน RBO-1..... 51
4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับค่าการ โกงตัวในคาน RBO-1..... 51
4.22	รูปแบบการวิบัติและรอยร้าวที่เกิดขึ้นของคาน SBO..... 52
4.23	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับค่า Strain ของเหล็กเสริมรับแรงดึงและ CFRP ของคาน SBO..... 53
4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับค่า Strain ของเหล็กเสริมรับแรงอัดและ คอนกรีตที่ผิวบนของคาน SBO..... 53
4.25	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับค่าการ โกงตัวของคาน SBO..... 54
4.26	Strut and Tie Model รูปแบบทั่วไปของคาน CB..... 56
4.27	เปรียบเทียบแรงในท่อนดึงจากผลทดสอบกับการใช้ Strut and Tie มุมภายใน ต่างกันของคาน CB..... 56
4.28	เปรียบเทียบแรงในท่อนอัดจากผลทดสอบกับการใช้ Strut and Tie มุมภายใน ต่างกันของคาน CB..... 57
4.29	Strut and Tie Model ของคาน CB ที่ใกล้เคียงกับการทดสอบ..... 57
4.30	Strut and Tie Model รูปแบบทั่วไปของคาน BO..... 58
4.31	เปรียบเทียบแรงในท่อนดึงจากผลทดสอบกับการใช้ Strut and Tie มุมภายใน ต่างกันของคาน BO..... 59

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้าที่
4.32	เปรียบเทียบแรงในท่อนอัดจากผลทดสอบกับการใช้ Strut and Tie มุมภายใน ต่างกันของคาน BO.....	59
4.33	Strut and Tie Model ของคาน BO ที่ใกล้เคียงกับการทดสอบ.....	60
4.34	Strut and Tie Model รูปแบบทั่วไปของคาน BO-1.....	61
4.35	เปรียบเทียบแรงในท่อนอัดจากผลทดสอบกับการใช้ Strut and Tie มุมภายใน ต่างกันของคาน BO-1.....	62
4.36	เปรียบเทียบแรงในท่อนอัดจากผลทดสอบกับการใช้ Strut and Tie มุมภายใน ต่างกันของคาน BO-1.....	62
4.37	Strut and Tie Model ของคาน BO-1 ที่ให้ผลใกล้เคียงกับการทดสอบ.....	63
4.38	Strut and Tie Model รูปแบบทั่วไปของคาน RBO-1.....	64
4.39	เปรียบเทียบแรงในท่อนดึงจากผลทดสอบกับการใช้ Strut and Tie มุมภายใน ต่างกันของคานRBO-1.....	65
4.40	เปรียบเทียบแรงในท่อนอัดจากผลทดสอบกับการใช้ Strut and Tie มุมภายใน ต่างกันของคานRBO-1.....	65
4.41	Strut and Tie Model ของคาน RBO-1 ที่ใกล้เคียงกับการทดสอบ.....	66
4.42	Strut and Tie Model รูปแบบทั่วไปของคาน SBO.....	67
4.43	เปรียบเทียบแรงในท่อนดึงจากผลทดสอบกับการใช้ Strut and Tie มุมภายใน ต่างกันของคาน SBO.....	68
4.44	เปรียบเทียบแรงในท่อนอัดจากผลทดสอบกับการใช้ Strut and Tie มุมภายใน ต่างกันของคาน SBO.....	68



## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้าที่
4.45	Strut and Tie Model ของคาน SBO ที่ใกล้เคียงกับการทดสอบ.....	69
5.1	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับค่าการ โกงตัวของคาน CB และ BO.....	70
5.2	การวิบัติภายใต้แรงเฉือน (Shear Failure) ในคาน BO.....	71
5.3	Strut and Tie Model ของคาน CB.....	71
5.4	Strut and Tie Model ของคาน BO.....	71
5.5	Strut and Tie Model ของคาน BO-1.....	72
5.6	Strut and Tie Model ของคาน RBO-1.....	72
5.7	Strut and Tie Model ของคาน SBO.....	72
5.8	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับค่าการ โกงตัวของคาน BO-1,RBO-1 และ SBO.....	73
5.9	หาค่า c ด้วยหลักการ Strain Compatibility โดยใช้ค่า Strain ที่ได้จากการทดสอบ ของคาน CB.....	76
5.10	หาค่า c ด้วยหลักการ Strain Compatibility โดยใช้ค่า Strain ที่ได้จากการทดสอบ ของคาน RBO-1.....	83
5.11	หาค่า c ด้วยหลักการ Strain Cmpatibility โดยใช้ค่า Strain ที่ได้จากการทดสอบ ของคานSBO.....	86