สารบาญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบาญตาราง	ฎ
สารบาญภาพ	ฐ
สารบาญตารางภาคผนวก	ท
สารบาญภาพภาคผนวก	ธ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 สรุปสาระสำคัญจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.2.1 งานศึกษาเกี่ยวกับจุดต่อคาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	2
1.2.2 งานศึกษาเกี่ยวกับจุดต่อเสริมกำลังกับโดยการหุ้มแผ่นไฟเบอร์	8
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	20
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	21
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	21
บทที่ 2 ทฤษฎี	22
2.1 จุดต่อคาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	22
2.1.1 พฤติกรรมจุดต่อคาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงวัฏจักร	22
2.1.2 แรงเฉือนแนวราบที่กระทำกับจุดต่อคาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	24
2.1.3 แบบจำลองในการออกแบบจุดต่อเพื่อต้านทานแรงเฉือน	25
2.1.4 พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงวัฏจักร	28
2.1.5 พฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงวัฏจักร	30
2.2 ทฤษฎีไฟไนต์อิลิเมนต์	30
2.2.1 การวิเคราะห์อิลิเมนต์ชนิดหนึ่งมิติ	30
2.2.2 การวิเคราะห์อิลิเมนต์ชนิดสองมิติ	33

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญ(ต่อ)

	หน้า
2.2.3 การวิเคราะห์อิลิเมนต์ชนิดสามมิติ	38
2.3 การวิเคราะห์ไร้เชิงเส้น	42
2.3.1 การวิเคราะห์ไร้เชิงเส้นเบื้องต้น	42
2.3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างที่มีพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นโดยวิธีเมตริกซ์	43
2.3.3 สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์และผลลัพธ์ที่ได้	45
2.3.4 การวิเคราะห์โครงสร้างที่มีพฤติกรรมไร้เชิงเส้นทางเรขาคณิต	46
2.3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างที่มีพฤติกรรมของวัสดุไร้เชิงเส้น	53
2.4 การเสริมกำลังอาคารด้วยวัสดุคอมโพสิตประเภทโพลิเมอร์เสริมเส้นใย	57
2.4.1 คุณสมบัติของเส้นใยและแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใย	58
2.4.2 การติดตั้งระบบแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใย	60
2.4.3 การออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังโดยการหุ้มแผ่นไฟเบอร์	62
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	74
3.1 การวิเคราะห์จุดต่ออาคารเสริมกำลังโดยการหุ้มแผ่นไฟเบอร์	75
3.1.1 Element Type	78
3.1.2 Real Constant	80
3.1.3 Material Properties	81
3.1.3 Modeling	86
3.1.4 Meshing	88
3.1.5 Numbering Controls	91
3.1.6 Loads and Boundary Conditions	91
3.2 การสอบเทียบแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์	95
บทที่ 4 ผลวิเคราะห์การเสริมกำลังจุดต่อโดยแผ่นไฟเบอร์	106
4.1 ผลวิเคราะห์พฤติกรรมจุดต่อภายใต้แรงวัฏจักร	106
4.1.1 แบบจำลอง J1-CFRP1	106

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญ(ต่อ)

	หน้า
4.1.2 แบบจำลอง J1-CFRP2	110
4.1.3 แบบจำลอง J1-GFRP1	114
4.1.4 แบบจำลอง J1-GFRP2	117
4.1.5 แบบจำลอง J2	121
4.1.6 แบบจำลอง J2-CFRP1	124
4.1.7 แบบจำลอง J2-CFRP2	128
4.1.8 แบบจำลอง J2-GFRP1	131
4.1.9 แบบจำลอง J2-GFRP2	134
4.2 ผลวิเคราะห์กำลังรับแรงแนวราบสูงสุด	138
4.3 ผลวิเคราะห์ความเหนียว	139
4.4 ผลวิเคราะห์ความเสื่อมถอยของสติฟเนส	141
4.5 ผลวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับพลังงาน	143
4.6 ผลวิเคราะห์ความเครียดเหล็กเสริมในคานบริเวณจุดต่อ	146
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	155
บรรณานุกรม	165
ภาคผนวก	170
ภาคผนวก ก คุณสมบัติพื้นฐานของเส้นใย	171
ภาคผนวก ข การออกแบบเสริมกำลังจุดต่ออาคารโดยแผ่นไฟเบอร์ที่ใช้ในงานวิจัย และ ตัวอย่างการออกแบบเสริมกำลังชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กโดยแผ่นไฟเบอร์	175
ภาคผนวก ค การตั้งค่าโปรแกรมวิเคราะห์ไฟไนต์อิลิเมนต์	188
ภาคผนวก ง การคำนวณกำลังรับแรงแนวราบสูงสุดของแบบจำลองจุดต่ออาคารเพื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์ไฟไนต์อิลิเมนต์	197
ประวัติผู้เขียน	202

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ (Tsonos et. at., 1992)	7
1.2 คุณสมบัติคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัย (Mahini and Dalalbashi, 2008)	14
1.3 รายละเอียดการติดตั้งแผ่นไฟเบอร์ (Mostofinejad, D. และ Talaeitaba, S.B., 2006)	16
1.4 คุณสมบัติแผ่นไฟเบอร์ (Mostofinejad and Talaeitaba, 2006)	17
2.1 ค่า γ ที่ใช้ในการคำนวณหาแรงเฉือนที่จุดต่อ	27
2.2 คุณสมบัติของเส้นใย	59
2.3 คุณสมบัติของแผ่นคอมโพสิตเสริมเส้นใย	59
2.4 คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริดเสริมเส้น	60
2.5 ตัวคูณลดกำลัง (C_E) ที่สภาวะแวดล้อมต่างกัน	63
2.6 ความเค้นของแผ่นไฟเบอร์ภายใต้แรงสลับทิศ	67
3.1 แบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์ที่ทำการวิเคราะห์	75
3.2 ค่า Real Constant ของแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์	81
3.3 คุณสมบัติวัสดุของอิลิเมนต์ Solid65	81
3.4 คุณสมบัติวัสดุของอิลิเมนต์ Link8 (เหล็กเส้นกลม RB6)	84
3.5 คุณสมบัติวัสดุของอิลิเมนต์ Link8 (เหล็กข้ออ้อย DB16)	84
3.6 คุณสมบัติวัสดุของอิลิเมนต์ Solid45	84
3.7 คุณสมบัติวัสดุของแผ่นไฟเบอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง	85
3.8 การกำหนดคุณสมบัติของอิลิเมนต์ย่อย	88
3.9 จำนวนอิลิเมนต์ในแบบจำลองจุดต่อ	90
3.10 แรงแนวราบ (H) สูงสุดของแบบจำลอง J1 กับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ	103
3.11 ความเหนียวของแบบจำลองJ1 กับ การทดสอบในห้องปฏิบัติการ	103
4.1 กำลังรับแรงแนวราบสูงสุดของแบบจำลองจุดต่อ	138
4.2 ความเหนียวของแบบจำลองจุดต่อ	140
4.3 ค่าสติฟเนสสูงสุดของแบบจำลองจุดต่ออริมอาคาร	141
4.4 ค่าสติฟเนสสูงสุดของแบบจำลองจุดต่อภายในอาคาร	143

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญตาราง(ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.5 การดูดซับพลังงานของแบบจำลองจุดต่อริมอาคาร	145
4.6 การดูดซับพลังงานของแบบจำลองจุดต่อภายในอาคาร	146
5.1 รูปแบบการวิบัติของแบบจำลองจุดต่อ	156
5.2 เปรียบเทียบกำลังสูงสุดของแบบจำลองจุดต่อ	160
5.3 เปรียบเทียบความเหนียวของแบบจำลองจุดต่อ	161
5.4 เปรียบเทียบความเครียดในเหล็กเสริมคานของแบบจำลองจุดต่อ	162
5.5 สรุปผลการวิเคราะห์แบบจำลองจุดต่อ	163

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ

ภาพ	หน้า
1.1 รายละเอียดตัวอย่าง A1 และ E2	3
1.2 รายละเอียดตัวอย่าง E2 และ G1	4
1.3 การแบ่งกลุ่มตัวอย่างจุดต่อตามพื้นที่ถ่ายแรงลงสู่เสา	5
1.4 รูปแบบของตัวอย่างทดสอบ (Pimanmas and Supaviriyakit, 2008)	5
1.5 หน้าตัดและรายละเอียดการเสริมเหล็กของตัวอย่างทดสอบ (Pimanmas and Supaviriyakit, 2008)	6
1.6 รายละเอียดการเสริมเหล็กภายในจุดต่อในกลุ่มเดียวกัน (Tsonos et. al., 1992)	7
1.7 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ (Antonopoulos and Triantafillou, 2003)	9
1.8 รูปแบบตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรม (Antonopoulos and Triantafillou, 2003)	9
1.9 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบก่อนเสริมกำลัง (Gencoglu and Mobasher, 1998)	11
1.10 รูปแบบการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (Gencoglu and Mobasher, 1998)	11
1.11 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ (Karayannis and Sirkelis, 2002)	12
1.12 รายละเอียดการเสริมเหล็กในจุดต่อ และรูปแบบการเสริมกำลังโดยแผ่นไฟเบอร์ (Karayannis and Sirkelis, 2002)	13
1.13 รายละเอียดและรูปแบบการเสริมกำลังโดยการหุ้มแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (Mahini and Dalalbashi, 2008)	14
1.14 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรม ANSYS กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Mahini and Dalalbashi, 2008)	15
1.15 รายละเอียดตัวอย่างที่นำมาสอบเทียบความถูกต้องของการวิเคราะห์โดยโปรแกรม (Mostofinejad and Talaeitaba, 2006)	16
1.16 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรมกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Mostofinejad and Talaeitaba, 2006)	16
1.17 รูปแบบการติดตั้งแผ่นไฟเบอร์ (Mostofinejad and Talaeitaba, 2006)	17
1.18 รูปแบบการทดสอบพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีต กับแผ่นไฟเบอร์	18

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ(ต่อ)

ภาพ	หน้า
1.19 เปรียบเทียบผลวิเคราะห์ไฟไนต์อิลิเมนต์ กับ การทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Lu et. al., 2004)	19
1.20 Bond Slip Curve	19
1.21 รูปแบบความเสียหายจากแรงเฉือนของผิวคอนกรีต กับ แผ่นไฟเบอร์	20
2.1 แรงเฉือนแนวราบที่กระทำกับจุดต่อภายในอาคาร	22
2.2 แรงเฉือนแนวราบที่กระทำกับจุดต่อริมอาคาร	23
2.3 แรงกระทำกับเหล็กเสริมในจุดต่อในสภาวะสมดุล	23
2.4 รอยร้าว และแรงภายในจุดต่อเมื่อรับแรงแผ่นดินไหว	24
2.5 แรงลัพธ์ที่เกิดจากหน่วยแรงอัดในคอนกรีตของคานและเสา	25
2.6 แบบจำลองจุดต่อระหว่างคานกับเสา	26
2.7 พื้นที่ประสิทธิผลของจุดต่อ	27
2.8 พื้นที่ประสิทธิผลของจุดต่อ	28
2.9 รูปแบบการวิบัติของคานเนื่องจากได้รับผลของโมเมนต์ดัดมาก	29
2.10 รูปแบบการวิบัติของคานเนื่องจากได้รับผลของแรงเฉือนมาก	29
2.11 การแบ่งชิ้นส่วนหลักออกเป็นชิ้นส่วนย่อย	30
2.12 อิลิเมนต์หนึ่งมิติ และ เส้นแสดงการกระจัดของอิลิเมนต์	31
2.13 อิลิเมนต์สองมิติแบบสี่เหลี่ยม และ เส้นแสดงการกระจัดภายในอิลิเมนต์	34
2.14 อิลิเมนต์สองมิติแบบสามเหลี่ยม และ เส้นแสดงการกระจัดภายในอิลิเมนต์	36
2.15 อิลิเมนต์สามมิติชนิดสี่โหนด	39
2.16 อิลิเมนต์สามมิติชนิดแปดโหนด	41
2.17 การหาคำตอบ Simultaneous Nonlinear Equation	46
2.18 ชิ้นส่วนของโครงสร้างที่มีพฤติกรรมไร้เชิงเส้นทางเรขาคณิต	47
2.19 พฤติกรรม Elastic-Perfectly Plastic ของชิ้นส่วนโครงสร้าง	55
2.20 พฤติกรรมวัสดุที่ไม่มีพฤติกรรมแบบพลาสติกโดยสมบูรณ์	56
2.21 ความเค้น และ ความเครียดภายในหน้าตัดสี่เหลี่ยมเสริมกำลังรับแรงดัด	68

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ(ต่อ)

ภาพ	หน้า
2.22 การกระจายความเค้น และ ความเครียดในเหล็กเสริมของหน้าตัดเสริมกำลังรับแรงดัด	70
2.23 การติดตั้งแผ่นไฟเบอร์เสริมความสามารถรับแรงเฉือน	70
2.24 รูปแบบการติดตั้งแผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังรับแรงเฉือน	71
3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนของงานวิจัย	74
3.2 อิลิเมนต์ Solid65	78
3.3 อิลิเมนต์ Link8	79
3.4 อิลิเมนต์ Solid45	79
3.5 อิลิเมนต์ Solid46	80
3.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น กับ ความเครียดของคอนกรีต	83
3.7 แบบจำลองจุดต่อริมอาคาร J1	86
3.8 แบบจำลองจุดต่อภายในอาคาร J2	86
3.9 แบบจำลองเหล็กเสริมในจุดต่อริมอาคาร	87
3.10 แบบจำลองเหล็กเสริมในจุดต่อภายในอาคาร J2	87
3.11 การแบ่งอิลิเมนต์ย่อยของแบบจำลองจุดต่อริมอาคาร J1	89
3.12 การแบ่งอิลิเมนต์ย่อยของแบบจำลองจุดต่อภายในอาคาร J2	89
3.13 การแบ่งอิลิเมนต์ย่อยบริเวณจุดรองรับ	90
3.14 สภาวะจุดรองรับที่โคนเสาแบบ Pin Support ของจุดต่อริมอาคาร J1	91
3.15 สภาวะของจุดรองรับที่ยอดเสาแบบ Roller Support ของจุดต่อริมอาคาร J1	92
3.16 สภาวะจุดรองรับที่โคนเสาแบบ Pin Support ของจุดต่อภายในอาคาร J2	92
3.17 สภาวะของจุดรองรับที่ปลายคานแบบ Roller Support ของจุดต่อภายในอาคาร J2	93
3.18 ระนาบสมมาตร (Symmetry) ของแบบจำลอง	93
3.19 การให้ระยะเคลื่อนที่แนวดิ่งบริเวณปลายคานของจุดต่อริมอาคาร	94
3.20 การให้ระยะเคลื่อนที่แนวราบบริเวณเสาชั้นบนของจุดต่อภายในอาคาร	94
3.21 ตัวอย่างทดสอบจุดต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก (ชยานนท์, 2553)	95
3.22 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ (ชยานนท์, 2553)	96

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ(ต่อ)

ภาพ	หน้า
3.23 การติดตั้งและการให้ระยะเคลื่อนที่ของตัวอย่างทดสอบ (ชยานนท์, 2555)	97
3.24 การให้ระยะเคลื่อนที่ปลายคาน	97
3.25 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบ (ชยานนท์, 2555)	98
2.26 ความแตกต่างของหน้าตัดคานตัวอย่างทดสอบกับแบบจำลอง FEM	99
3.27 กราฟแรงแนวราบ (H) กับ Drift Ratio ของแบบจำลอง J1	99
3.28 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบจำลอง J1 กับ การทดสอบให้ปฏิบัติการ	100
3.29 รอยแตกร้าวในแบบจำลอง J1 ที่จุด A (Drift Ratio 0.13%)	101
3.30 รอยแตกร้าวในแบบจำลอง J1 ที่จุด B (Drift Ratio 0.91%)	101
3.31 รอยแตกร้าวในแบบจำลอง J1 ที่จุด C (Drift Ratio 1.40%)	102
3.32 รอยแตกร้าวในแบบจำลอง J1 ที่จุด D (Drift Ratio 3.50%)	102
3.33 ความเสื่อมถอยของสติฟเนสในแบบจำลอง J1 กับ การทดสอบในห้องปฏิบัติการ	104
3.34 การดูดซับพลังงานของแบบจำลอง J1 และ การทดสอบในห้องปฏิบัติการ	105
4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงแนวราบ (H) กับ Drift Ratio ของจุดต่อ J1-CFRP1	107
4.2 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J1-CFRP1 ที่จุด A (Drift Ratio 0.10%)	108
4.3 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J1-CFRP1ที่จุด B (Drift Ratio 1.40%)	108
4.4 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J1-CFRP1ที่จุด C (Drift Ratio 2.32%)	109
4.5 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J1-CFRP1ที่จุด D (Drift Ratio 3.50%)	109
4.6 รูปแบบการเสียรูปของแบบจำลองจุดต่อ J1-CFRP1	110
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงแนวราบ (H) กับ Drift Ratio ของจุดต่อ J1-CFRP2	110
4.8 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J1-CFRP2 ที่จุด A (Drift Ratio 0.10%)	111
4.9 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J1-CFRP2 ที่จุด B (Drift Ratio 1.40%)	112
4.10 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J1-CFRP2 ที่จุด C (Drift Ratio 2.50%)	112
4.11 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J1-CFRP2 ที่จุด D (Drift Ratio 3.50%)	113
4.12 รูปแบบการเสียรูปของแบบจำลองจุดต่อ J1-CFRP2	113
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงแนวราบ (H) กับ Drift Ratio ของจุดต่อ J1-GFRP1	114

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ(ต่อ)

ภาพ	หน้า
4.14 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J1-GFRP1 ที่จุด A (Drift Ratio 0.12%)	114
4.15 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J1-GFRP1 ที่จุด B (Drift Ratio 1.30%)	115
4.16 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J1-GFRP1 ที่จุด C (Drift Ratio 1.98%)	115
4.17 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J1-GFRP1 ที่จุด D (Drift Ratio 2.50%)	116
4.18 รูปแบบการเสียรูปของแบบจำลองจุดต่อ J1-GFRP1	116
4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงแนวราบ (H) กับ Drift Ratio ของจุดต่อ J1-GFRP2	118
4.20 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J1-GFRP2 ที่จุด A (Drift Ratio 0.10%)	118
4.21 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J1-GFRP2 ที่จุด B (Drift Ratio 1.40%)	119
4.22 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J1-GFRP2 ที่จุด C (Drift Ratio 2.00%)	119
4.23 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J1-GFRP2 ที่จุด D (Drift Ratio 3.50%)	120
4.24 รูปแบบการเสียรูปของแบบจำลองจุดต่อ J1-GFRP2	120
4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงแนวราบ (H) กับ Drift Ratio ของจุดต่อ J2	121
4.26 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J2 ที่จุด A (Drift Ratio 0.10%)	122
4.27 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J2 ที่จุด B (Drift Ratio 0.50%)	122
4.28 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J2 ที่จุด C (Drift Ratio 1.00%)	123
4.29 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J2 ที่จุด D (Drift Ratio 3.50%)	123
4.30 รูปแบบการเสียรูปของแบบจำลองจุดต่อ J2	124
4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงแนวราบ (H) กับ Drift Ratio ของจุดต่อ J2-CFRP1	125
4.32 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J2-CFRP1 ที่จุด A (Drift Ratio 0.10%)	125
4.33 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J2-CFRP1 ที่จุด B (Drift Ratio 1.02%)	126
4.34 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J2-CFRP1 ที่จุด C (Drift Ratio 2.00%)	126
4.35 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J2-CFRP1 ที่จุด D (Drift Ratio 3.50%)	127
4.36 รูปแบบการเสียรูปของแบบจำลองจุดต่อ J2-CFRP1	127
4.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงแนวราบ (H) กับ Drift Ratio ของจุดต่อ J2-CFRP2	128
4.38 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J2-CFRP2 ที่จุด A (Drift Ratio 0.10%)	129

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ(ต่อ)

ภาพ	หน้า
4.39 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J2-CFRP2 ที่จุด B (Drift Ratio 0.70%)	129
4.40 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J2-CFRP2 ที่จุด C (Drift Ratio 2.00%)	130
4.41 รูปแบบการเสียรูปของแบบจำลองจุดต่อ J2-CFRP2	130
4.42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงแนวราบ (H) กับ Drift Ratio ของจุดต่อ J2-GFRP1	131
4.43 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J2-GFRP1 ที่จุด A (Drift Ratio 0.12%)	132
4.44 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J2-GFRP1 ที่จุด B (Drift Ratio 0.67%)	132
4.45 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J2-GFRP1 ที่จุด C (Drift Ratio 2.00%)	133
4.46 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J2-GFRP1 ที่จุด D (Drift Ratio 3.50%)	133
4.47 รูปแบบการเสียรูปของแบบจำลองจุดต่อ J2-GFRP1	134
4.48 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงแนวราบ (H) กับ Drift Ratio ของจุดต่อ J2-GFRP2	135
4.49 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J2-GFRP2 ที่จุด A (Drift Ratio 0.12%)	135
4.50 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J2-GFRP2 ที่จุด B (Drift Ratio 1.21%)	136
4.51 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J2-GFRP2 ที่จุด C (Drift Ratio 2.00%)	136
4.52 รอยแตกร้าวในแบบจำลองจุดต่อ J2-GFRP2 ที่จุด D (Drift Ratio 3.50%)	137
4.53 รูปแบบการเสียรูปของแบบจำลองจุดต่อ J2-GFRP2	137
4.54 การคำนวณค่าความเหนียว	140
4.55 ค่าสติฟเนสของแบบจำลองจุดต่อริมอาคาร	142
4.56 ค่าสติฟเนสของแบบจำลองจุดต่อภายในอาคาร	143
4.57 การคำนวณค่าอัตราหน่วงหนืดเทียบเท่า	144
4.58 ความสามารถในการดูดซับพลังงานของแบบจำลองจุดต่อริมอาคาร	145
4.59 ความสามารถในการดูดซับพลังงานของแบบจำลองจุดต่อภายในอาคาร	146
4.60 ความเครียดเหล็กเสริมในคานบริเวณจุดต่อของแบบจำลอง J1	147
4.61 ความเครียดเหล็กเสริมในคานบริเวณจุดต่อของแบบจำลอง J1-CFRP1	148
4.62 ความเครียดเหล็กเสริมในคานบริเวณจุดต่อของแบบจำลอง J1-CFRP2	149
4.63 ความเครียดเหล็กเสริมในคานบริเวณจุดต่อของแบบจำลอง J1-GFRP1	149

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ(ต่อ)

ภาพ	หน้า
4.64 ความเครียดเหล็กเสริมในคานบริเวณจุดต่อของแบบจำลอง J1-GFRP2	150
4.65 ความเครียดเหล็กเสริมในคานบริเวณจุดต่อของแบบจำลอง J2	151
4.66 ความเครียดเหล็กเสริมในคานบริเวณจุดต่อของแบบจำลอง J2-CFRP1	152
4.67 ความเครียดเหล็กเสริมในคานบริเวณจุดต่อของแบบจำลอง J2-CFRP2	152
4.68 ความเครียดเหล็กเสริมในคานบริเวณจุดต่อของแบบจำลอง J2-GFRP1	153
4.69 ความเครียดเหล็กเสริมในคานบริเวณจุดต่อของแบบจำลอง J2-GFRP2	153
5.1 ความเครียดในแผ่นไฟเบอร์ของแบบจำลอง J1-GFRP2	157
5.2 ความเครียดในแผ่นไฟเบอร์ของแบบจำลอง J2-GFRP1	158
5.3 ความเครียดในแผ่นไฟเบอร์ของแบบจำลอง J2-GFRP2	158

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญตารางภาคผนวก

ตารางภาคผนวก	หน้า
ก-1 ผลของสภาพแวดล้อมต่อเส้นใย	170
ก-2 ตัวอย่างคุณสมบัติทางกลของเส้นใยภายใต้แรงดึง	170
ก-3 ตัวอย่างคุณสมบัติทางกลของแผ่น FRP ภายใต้แรงดึง	171
ก-4 คุณสมบัติของเส้นใยชนิดต่างๆ	171
ก-5 คุณสมบัติของแผ่นคอมโพสิตเสริมเส้นใย	172
ก-6 คุณสมบัติวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด	172
ข-1 ขนาดและคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ออกแบบคานเสริมกำลังรับแรงดัด	177
ข-2 น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ออกแบบคานเสริมกำลังรับแรงดัด	178
ข-3 คุณสมบัติของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) ที่ใช้เสริมกำลังคานรับแรงดัด	178
ข-4 ระยะและรูปแบบในการติดตั้งแผ่นไฟเบอร์ในคานเสริมกำลังรับแรงเฉือน	182
ข-5 คุณสมบัติของแผ่นไฟเบอร์ที่ใช้ในการเสริมกำลังรับแรงเฉือนในคาน	183
ข-6 คุณสมบัติของแผ่นไฟเบอร์ใยแก้ว (GFRP) เสริมกำลังเสารับแรงเฉือน	184
ค-1 การกำหนดระยะเคลื่อนที่และความระเอียดของแบบจำลองจุดต่อริมอาคาร	189
ค-2 การกำหนดระยะเคลื่อนที่และความระเอียดของแบบจำลองจุดต่อภายในอาคาร	190

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพภาคผนวก

ภาพภาคผนวก	หน้า
ข-1 รูปแบบตัวอย่างคานเสริมกำลังรับแรงดัดโดยการหุ้มแผ่นไฟเบอร์ที่นำมาวิเคราะห์	177
ข-2 รูปแบบตัวอย่างการติดตั้งระบบไฟเบอร์เสริมกำลังรับแรงเฉือน	183
ข-3 ผังแรงเฉือนในตัวอย่างคานเสริมกำลังรับแรงเฉือน	183
ค-1 การกำหนดวิธีการวิเคราะห์ในโปรแกรม	187
ค-2 การตั้งค่าในหัวข้อ Basic	188
ค-3 การตั้งค่าในหัวข้อ Sol'n Options	192
ค-4 การตั้งค่าในหัวข้อ Nonlinear	193
ค-5 การตั้งค่าในคำสั่ง Set Convergence Criteria	193
ค-6 การตั้งค่าในหัวข้อ Advanced NL	194

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved