

พฤติกรรมสถิตของรอยต่อแบบทาบเดี่ยวระหว่างเหล็กและพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ยึดเหนี่ยวด้วยวัสดุ
ประสาน

นายบารมี กุลเกียรติอนันต์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.



2971436726

CU Thesais 5870186721 thesis / recv: 02082562 17:24:40 / seq: 13



5870186721_2971436726

Static behavior of adhesive-bonded FRP-steel single-lap joints

Mr. Baramee Kulkiatanant

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University



2971436726

CU Thesisis 5870186721 thesis / recv: 02082562 17:24:40 / seq: 13

บาร์มี กุลเกียรติอนันต์ : พฤติกรรมสถิติของรอยต่อแบบทาบเดี่ยวระหว่างเหล็กและพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ยึดเหนี่ยวด้วยวัสดุประสาน. (Static behavior of adhesive-bonded FRP-steel single-lap joints) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.อัศววัชร เล่นวารี

การยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและผิวเหล็กเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการเสริมกำลังภายนอกด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน ประกอบด้วยกำลังยึดเหนี่ยว ความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพ พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส และรูปแบบการวิบัติ โดยทำการทดสอบรอยต่อแบบทาบเดี่ยว (เหล็กรูปตัวเอชขนาด 150×150×7×10 มม. ยึดติดกับแผ่น CFRP ด้วยวัสดุเชื่อมประสาน) จำนวน 17 ตัวอย่าง ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย ความยาวของระยะยึดเหนี่ยว (75, 150, 250, และ 400 มม.) ขนาดรอยร้าวที่ผิว (0, 25, และ 50 มม.) อัตราส่วนสตีเฟนเนสของเหล็กต่อวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (5.33 และ 8.21) และผลของอีพอกซีบนรอยร้าวเริ่มต้น จากผลการทดสอบพบว่า ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของ FRP มีผลทำให้กำลังยึดเหนี่ยวลดลง 18% ระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 21% และพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสลดลง 59% รอยร้าวเริ่มต้นที่ยาวขึ้นมีผลทำให้กำลังยึดเหนี่ยวลดลง 15% ระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 7% และพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสลดลง 9% อีกทั้งอีพอกซีบนรอยร้าวเริ่มต้นมีผลทำให้กำลังยึดเหนี่ยวลดลง 2% แต่ไม่มีผลอย่างเห็นได้ชัดต่อระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพ และพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสลดลง 22% ประเภทการวิบัติของชิ้นงานไม่มีข้อสังเกตอย่างเห็นได้ชัดต่อผลของรอยร้าวเริ่มต้นแต่อัตราส่วนสตีเฟนเนสมีผลทำให้การวิบัติของชิ้นงานเปลี่ยนไปจากการวิบัติระหว่างผิวอีพอกซีและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเป็นแบบวิบัติระหว่างผิวอีพอกซีและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยผสมวิบัติจากการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย นอกจากนี้ผลของการใช้สมการทำนายกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุดและระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพได้ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบกับผลทดสอบ

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก



2971436726

CU Thesisis 5870186721 thesisis / recv: 02082562 17:24:40 / seq: 13

5870186721 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: FRP steel bond strength effective bond length bond-slip relation interfacial energy single lap joint

Baramee Kulkiatanant : Static behavior of adhesive-bonded FRP-steel single-lap joints. Advisor: Assoc. Prof. Akhrawat Lenwari, Ph.D.

Bonding between FRP and steel substrate is a significant factor influencing the effectiveness of strengthening method using externally bonded FRP materials. In this research, the bond behavior between H-beam (dimension of 150x150x7x10 mm) and carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) plates is experimentally investigated. The bond behavior includes bond strength, effective bond length, and mode of failure. A total of 17 single lap adhesive bonded joints was used in the experiment. The test variables include bond length (75, 150, 250, and 400 mm), interfacial crack length (0, 25, and 50 mm) and stiffness ratio between steel and CFRP plate (5.33 and 8.21). The test results show that elastic modulus of FRP effect cause bond strength to decrease 18%, effective bond length to increase 21% and interfacial energy to decrease 59%. Initial crack increases effect cause bond strength to decrease 15%, effective bond length to increase 7%, and interfacial energy to decrease 9%. Epoxy above initial crack cause bond strength to decrease 2%, but not significantly effect the effective bond length and interfacial energy decrease 22%. Failure mode is not changed when initial crack increases. However, the stiffness ratio between steel and CFRP plate changes failure mode of some example from pure adhesion failure to FRP-adhesion interface failure. A comparison of test results with previously proposed models is discussed in the thesis.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature



2971436726

CD :Thesis 5870186721 thesis / recv: 02082562 17:24:40 / seq: 13

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้านายบารมี กุลเกียรติอนันต์ ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.อัครวัชร เล่นวารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาให้คำปรึกษา ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จได้ด้วยดี

ขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาติรี ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัฒน์ชัย สมิตชากร และรองศาสตราจารย์ ดร. สายันต์ ศิริมนตรี กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำที่ดีในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่ และรุ่นน้อง โดยเฉพาะนายนายทศพร ประเสริฐศรี นายชนะชัย ทองโถม สำหรับคำแนะนำและกำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอบคุณทุนการศึกษาจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณนายสมนึก กุลเกียรติอนันต์ และนางรัชดา กุลเกียรติอนันต์ ผู้เป็นบิดาและมารดาของข้าพเจ้า ที่สั่งสอนและให้กำลังใจข้าพเจ้าตลอดมา

บารมี กุลเกียรติอนันต์

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ค |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ง |
| กิตติกรรมประกาศ..... | จ |
| สารบัญ..... | ฉ |
| สารบัญตาราง..... | ฉ |
| สารบัญรูปภาพ..... | ญ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย | 2 |
| 1.3 ขอบเขตการวิจัย | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 3 |
| บทที่ 2 ทบทวนงานวิจัย..... | 4 |
| 2.1 การเสริมกำลังรับแรงดัดของคานเหล็กด้วยแผ่น FRP..... | 4 |
| 2.2 พฤติกรรมของการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและวัสดุ FRP..... | 7 |
| 2.2.1 รูปแบบการทดสอบแรงเฉือน..... | 7 |
| 2.2.2 รูปแบบการวิบัติ..... | 10 |
| 2.3 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและแผ่น FRP..... | 14 |
| 2.3.1 ความยาวการยึดเหนี่ยว | 14 |
| 2.3.2 ความหนาของวัสดุเชื่อมประสาน | 18 |
| 2.3.3 ความยาวรอยร้าวเริ่มต้น..... | 20 |
| 2.3.4 อัตราส่วนสติเฟนระหว่างแผ่น FRP กับเหล็ก (EA) _{FRP} / (EA) _{steel} | 21 |



2971436726

CD IThesis 5870186721 thesis / rev: 02082562 17:24:40 / seq: 13

| | |
|--|----|
| 2.3.5 การเตรียมผิวเหล็ก..... | 23 |
| 2.4 สรุปการทบทวนงานวิจัย..... | 24 |
| บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... | 26 |
| 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไหล | 26 |
| 3.2 กำลังการยึดประสาน..... | 29 |
| 3.3 ระยะเวลายึดเหนี่ยวประสิทธิผลและพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส | 34 |
| บทที่ 4 รายละเอียดการทดสอบ..... | 36 |
| 4.1 คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ | 36 |
| 4.1.1 เหล็กรูปพรรณ..... | 36 |
| 4.1.2 แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย..... | 37 |
| 4.1.3 วัสดุเชื่อมประสาน | 37 |
| 4.2 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ | 38 |
| 4.3 การติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย..... | 43 |
| 4.4 ขั้นตอนการทดสอบ..... | 47 |
| บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ..... | 49 |
| 5.1 ประเภทของการวิบัติ | 49 |
| 5.2 กำลังยึดเหนี่ยวสูงสุด..... | 56 |
| 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังยึดเหนี่ยวและการไหล | 58 |
| 5.4 ระยะเวลายึดเหนี่ยวประสิทธิผล | 60 |
| 5.5 ผลการใช้สมการทำนาย | 64 |
| 5.5.1 ระยะเวลายึดเหนี่ยวประสิทธิผล..... | 64 |
| 5.5.2 กำลังยึดเหนี่ยวสูงสุด | 65 |
| 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไหล | 66 |
| 5.6 พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส..... | 70 |

| | |
|-----------------------------|----|
| บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย..... | 72 |
| 6.1 สรุปผลการวิจัย..... | 72 |
| 6.2 ข้อเสนอแนะ | 73 |
| รายการสัญลักษณ์..... | 74 |
| ภาคผนวก..... | 75 |
| บรรณานุกรม..... | 89 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 96 |



2971436726

CU Thesais 5870186721 thesais / recv: 02082562 17:24:40 / seq: 13

สารบัญตาราง

หน้า

| | |
|--|----|
| ตารางที่ 1 หน่วยแรงเฉือนและการไหลสำหรับอีพอกซีชนิดต่างๆ (Fawzia Zhao และคณะ 2010) | 16 |
| ตารางที่ 2 ผลการทดสอบเมื่อใช้ความหนาของชั้นเชื่อมประสานเป็นตัวแปรในการทดลอง | 19 |
| ตารางที่ 3 ผลการทดสอบของ Fewzia และคณะ (2005)..... | 23 |
| ตารางที่ 4 ตารางแสดงคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ (Product Datasheet) | 38 |
| ตารางที่ 5 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ..... | 40 |
| ตารางที่ 6 ค่ากำลังรับแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดและระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลจากการทดสอบ..... | 55 |
| ตารางที่ 7 ผลการทำนายสำหรับกำลังรับแรงดึงสูงสุดและระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผล | 65 |



2971436726

CD IThesis 5870186721 thesis / rev: 02082562 17:24:40 / seq: 13

สารบัญรูปภาพ

หน้า

| | |
|--|----|
| รูปที่ 1 การเสริมกำลังของคานเหล็กด้วยแผ่นพอลิเมอร์ ก) รูปด้านข้าง (Side view) ข) รูปตัดขวาง (Cross-sectional view) (Teng และคณะ 2012)..... | 5 |
| รูปที่ 2 รูปแบบการวิบัติของคานเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่น FRP (Teng และคณะ 2012) | 5 |
| รูปที่ 3 รูปแบบการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและวัสดุ FRP | 7 |
| รูปที่ 4 รูปแบบการวิบัติของแผ่นเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่น FRP (Teng และคณะ 2012)..... | 14 |
| รูปที่ 5 การเสริมกำลังโดยใช้รอยต่อแบบสลักเกลียว (Colombi และ Poggi 2006)..... | 15 |
| รูปที่ 6 ตัวอย่างทดสอบแรงเฉือนแบบรอยต่อทาบเดี่ยวและการติดตั้ง (Xia และ Teng 2005) | 18 |
| รูปที่ 7 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไหลเชิงเส้นสองช่วง (Xia และ Teng 2005)..... | 20 |
| รูปที่ 8 การติดตั้งการทดสอบแรงเฉือน (Ceroni และคณะ 2016) | 21 |
| รูปที่ 9 การติดตั้งตัวอย่างการทดสอบการยึดประสานของเหล็กกับวัสดุ FRP (Ceroni และคณะ 2016)..... | 21 |
| รูปที่ 10 การกระจายของหน่วยแรง (Fewzia และคณะ 2005)..... | 22 |
| รูปที่ 11 วิธีการทดสอบแรงเฉือน ก) แบบรอยต่อทาบเดี่ยว ข) แบบรอยต่อทาบคู่..... | 27 |
| รูปที่ 12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไหลสำหรับพฤติกรรมวัสดุเชื่อมประสานแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น ก) พฤติกรรมแบบเชิงเส้น ข) พฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น (Teng และคณะ 2012)..... | 28 |
| รูปที่ 13 การหาระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลจากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและตำแหน่งการติดตั้งมาตรวัดความเครียด (Nakaba และคณะ, 2001)..... | 34 |
| รูปที่ 14 การหาระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและตำแหน่งการติดตั้งมาตรวัดความเครียด (Diab และคณะ, 2014)..... | 35 |
| รูปที่ 15 การติดตั้งวัสดุยึดประสานของตัวอย่างที่ไม่มีวัสดุยึดประสานในตำแหน่งรอยร้าวเริ่มต้น | 41 |

รูปที่ 16 การติดตั้งวัสดุยึดประสานของตัวอย่างทดสอบที่มีวัสดุยึดประสานในตำแหน่งรอยร้าว
เริ่มต้น..... 42

รูปที่ 17 การติดตั้งแผ่น FRP บนเหล็กหน้าตัดรูปตัวเอช 43

รูปที่ 18 ภาพวาดตัวอย่างการทดสอบ..... 44

รูปที่ 19 ตัวอย่างการติดตั้งตัวอย่างกับโครงเหล็กประกอบ (มิติเป็น มม.)..... 47

รูปที่ 20 การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบ 48

รูปที่ 21 การวิบัติของชุดตัวอย่างที่ 1 ($a_0 = 0$ มม. FRP type M และไม่มีอีพอกซีบนรอยร้าวเริ่มต้น)
..... 51

รูปที่ 22 การวิบัติของชุดตัวอย่างที่ 2 ($a_0 = 25$ มม. FRP type M และไม่มีอีพอกซีบนรอยร้าว
เริ่มต้น)..... 52

รูปที่ 23 การวิบัติรูปแบบ 2 ของชุดตัวอย่าง J-400-50-M ($L = 400$ มม. $a_0 = 50$ มม. FRP type M
และไม่มีอีพอกซีบนรอยร้าวเริ่มต้น)..... 53

รูปที่ 24 การวิบัติของชุดตัวอย่างที่ 4 ($a_0 = 25$ มม. FRP type S และไม่มีอีพอกซีบนรอยร้าวเริ่มต้น)
..... 53

รูปที่ 25 การวิบัติของชุดตัวอย่างที่ 5 ($a_0 = 25$ มม. FRP type S และมีอีพอกซีบนรอยร้าวเริ่มต้น) 54

รูปที่ 26 ผลกระทบของตัวแปรต่างๆต่อกำลังยึดเหนี่ยว..... 57

รูปที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังยึดเหนี่ยวและการไหลของตัวอย่างทดสอบ 58

รูปที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดความเครียด ของตัวอย่าง J-
400-0-M..... 61

รูปที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดความเครียด ของตัวอย่าง J-
400-25-M..... 61

รูปที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดความเครียด ของตัวอย่าง J-
400-50-M..... 62

รูปที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดความเครียด ของตัวอย่าง J-
400-25-S..... 62

รูปที่ 32 ผลกระทบของตัวแปรต่างๆต่อระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผล 63

รูปที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลของตัวอย่าง J-150-0-M 66

รูปที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลของตัวอย่าง J-150-25-M 67

รูปที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลของตัวอย่าง J-150-25-S 67

รูปที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลของตัวอย่าง J-400-0-M 68

รูปที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลของตัวอย่าง J-400-25-M 68

รูปที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลของตัวอย่าง J-400-50-M 69

รูปที่ 39 ผลของรอยร้าวเริ่มต้นต่อพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส 71

รูปที่ 40 ผลของมอดูลัสยืดหยุ่นของ FRP ต่อพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส..... 71



2971436726

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันการใช้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (fiber-reinforced polymer, FRP) ในงานเสริมกำลัง งานซ่อมแซมหรือความต้องการให้โครงสร้างนั้นสามารถรับแรงได้มากขึ้น FRP จึงถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลาย เมื่อเทียบคุณสมบัติทางวัสดุของแผ่น FRP กับแผ่นเหล็ก พบว่าแผ่น FRP มีมอดุลัสยืดหยุ่นต่อน้ำหนักที่สูงกว่าทำให้มีการขนส่งที่ง่ายสามารถเสริมกำลังได้รวดเร็วกว่าการใช้เหล็กเหมาะสำหรับโครงสร้างที่ต้องการเสริมกำลังในเวลาที่ยาวนานอย่างเช่นการเสริมกำลังโครงสร้างสะพาน ทนการกัดกร่อนได้มากกว่า กำลังรับแรงดึงสูงกว่า ความต้านทานความร้อนได้ดีกว่า แต่ก็มีราคาที่สูงกว่าด้วยเช่นกัน ในการเชื่อมประสานวัสดุทั้งสองไว้ด้วยกันนั้นมีหลากหลายวิธี ในการติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์กับโครงสร้างเหล็กโดยทั่วไปจะใช้การเชื่อมประสานแบบสลักเกลียวหรือใช้อีพอกซี ซึ่งการใช้อีพอกซีนี้นั้นมีข้อดีคือ มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอของหน่วยแรงในอีพอกซี สามารถปิดช่องว่างของรอยต่อทำให้ทนต่อสภาพแวดล้อมได้หลากหลาย และทำให้ผิวของวัสดุประกอบเสริมกำลังราบเรียบ แต่มีข้อด้อยคือ รอยต่อสามารถรับแรงได้น้อยกว่าสลักเกลียว ในบางครั้งการใช้ประโยชน์ของแผ่น FRP นั้นถูกใช้อย่างไม่เต็มประสิทธิภาพ เนื่องจากการวิบัติของโครงสร้างไม่ได้เกิดจากการวิบัติจากการวิบัติของแผ่น FRP แต่อาจเกิดจากการหลุดล่อนหรือการวิบัติของอีพอกซี ดังนั้นการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการรับกำลังของเหล็กรูปพรรณที่เสริมกำลังด้วยแผ่น FRP จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นในการศึกษาเพื่อให้ได้การรับกำลังมีประสิทธิภาพสุดของวัสดุเสริมกำลัง

จากงานวิจัยต่างๆในอดีตพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อการเสริมกำลังของโครงสร้างเหล็กด้วยแผ่น FRP โดยใช้อีพอกซีเป็นวัสดุเชื่อมประสานพบว่า เมื่อเพิ่มความยาวของแผ่น FRP จะทำให้การรับกำลังนั้นมากขึ้นและยังทำให้โครงสร้างนั้นมีค่าสตีเฟนสมมากขึ้นอีกด้วย แต่เมื่อมีความยาวของแผ่น FRP เทียบเท่ากับระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลการรับกำลังของโครงสร้างนั้นจะถูกจำกัดและจะไม่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อความยาวมากขึ้น อีกทั้งยังมีตัวแปรอื่นๆที่มีผลต่อการรับกำลังเช่น ความหนาของแผ่น FRP ความหนาของวัสดุเชื่อมประสาน อัตราส่วนสตีเฟนสมระหว่างเหล็กและวัสดุ FRP เป็นต้น



2971436726

CD IThesis 5870186721 thesis / rev: 02082562 17:24:40 / seq: 13

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมระหว่างเหล็กและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) โดยศึกษาผลของความยาวยึดเหนี่ยว ขนาดรอยร้าวเริ่มต้น (initial crack) อัตราส่วนสติฟเนสระหว่างเหล็กและวัสดุ CFRP และอีพอกซีบนรอยร้าวเริ่มต้น เป็นตัวแปรในการศึกษาและทดสอบว่าตัวแปรเหล่านี้มีว่าผลต่อพฤติกรรมการยึดประสาน โดยการทดสอบด้วยวิธีการทดสอบแรงเฉือนแบบรอยต่อทาบเดี่ยว (single-lap shear test) เพื่อศึกษาลักษณะการวิบัติ ค่ากำลังยึดเหนี่ยว ระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผล แลความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถล

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. ศึกษาพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวของรอยต่อระหว่างแผ่น FRP กับเหล็กรูปพรรณที่มีอีพอกซีเป็นวัสดุเชื่อมประสาน
2. ศึกษาหาความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผล
3. ศึกษาผลกระทบของความยาวการยึดเหนี่ยวความหนาของชั้นวัสดุเชื่อมประสาน อัตราส่วนสติฟเนสระหว่างแผ่น FRP และเหล็กรูปพรรณ ความยาวรอยร้าวเริ่มต้น (initial crack) และอีพอกซีบนรอยร้าวเริ่มต้นที่มีผลต่อพฤติกรรมการยึดเหนี่ยว หน่วยแรงเฉือนและการไถล
4. รูปแบบการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้มีขอบเขต ดังนี้

1. พฤติกรรมที่ศึกษาประกอบไปด้วย
 - รูปแบบการวิบัติ
 - กำลังยึดเหนี่ยว
 - ระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผล
 - หน่วยแรงเฉือนและการไถล (slip)
 - พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส
2. ตัวแปรที่ศึกษาประกอบไปด้วย
 - ระยะยึดเหนี่ยว (0, 150, 250 และ 400 มม.)
 - ความยาวรอยร้าวเริ่มต้น (0, 25 และ 50 มม.)



2971436726

CU Thesisis 5870186721 thesisis / recv: 02082562 17:24:40 / seq: 13

- อัตราส่วนสติฟเนสระหว่างเหล็กและแผ่น FRP (5.33 และ 8.21)

3. ตัวแปรควบคุม

- แรงกระทำเป็นแบบสถิต
 - การทดสอบที่สภาวะอุณหภูมิห้อง
 - วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนประเภทมอดูลัสยืดหยุ่นปานกลางและต่ำ
 - เหล็กรูปพรรณมีหน้าตัดรูปตัวเอช (wide flange)
 - วัสดุเชื่อมประสานเชื่อมประสานอีพอกซีหนา 3.5 มม.
 - ทดสอบด้วยแรงดึงแบบรอยต่อทาบเดี่ยว (Single lap shear test)
- ### 4. สมการที่ใช้ทำนายกำลังยึดเหนี่ยวและระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพ
- Xia และTeng (2005)
 - Bocciarelli และคณะ (2007)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ คือ

1. พฤติกรรมการยึดเหนี่ยวของรอยต่อระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยกับเหล็กรูปพรรณที่มีอีพอกซีเป็นวัสดุเชื่อมประสาน
2. ระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพของตัวอย่างทดสอบ
3. ผลกระทบของตัวแปรออกแบบต่อพฤติกรรมของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยกับแผ่นเหล็กโดยใช้อีพอกซีเป็นวัสดุเชื่อมประสาน



2971436726

CD :Thesis 5870186721 thesis / rev: 02082562 17:24:40 / seq: 13

บทที่ 2

ทบทวนงานวิจัย

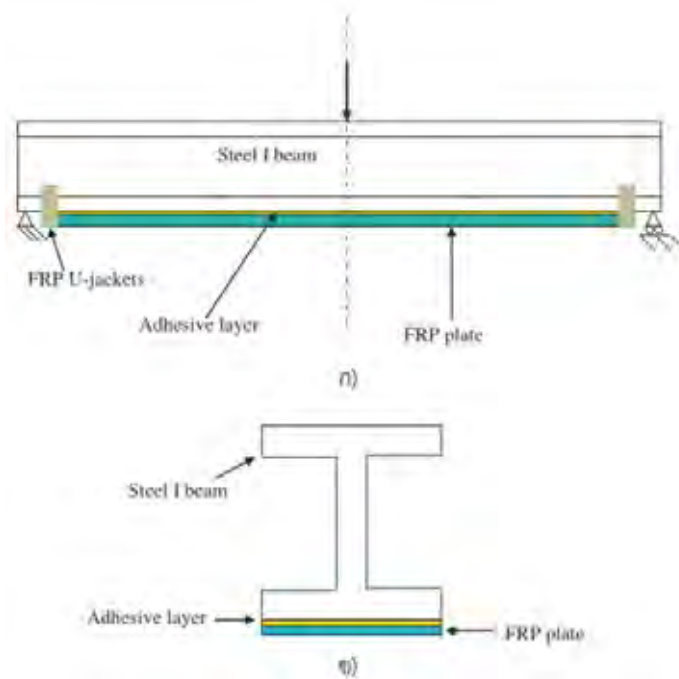
2.1 การเสริมกำลังรับแรงดัดของคานเหล็กด้วยแผ่น FRP

โดยทั่วไปการเสริมกำลังโดยใช้แผ่น FRP ของคานเหล็กจะทำการติดแผ่น FRP ไว้ที่ตำแหน่งที่รับแรงดัด (สมมติให้เกิดโมเมนต์บวกทั้งคาน ดังรูปที่ 1 การเสริมกำลังคานด้วยแผ่น FRP ไม่เพียงแต่ทำให้เพิ่มการรับกำลังสูงสุดแต่ยังทำให้สตีฟเนสของคานเพิ่มขึ้นอีกด้วย (โดยเฉพาะเมื่อเสริมกำลังด้วยวัสดุ FRP ที่มีสตีฟเนสสูง)

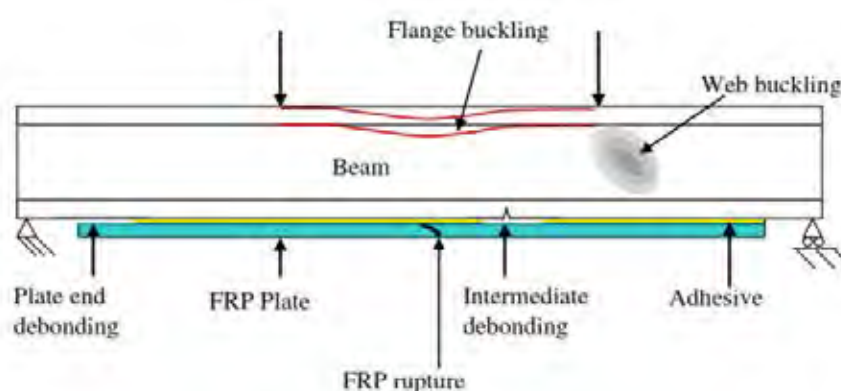
Mertz และ Gillespie (1996) ได้ทำการทดสอบตัวอย่าง W8x10 (W200x15) มีความยาวตั้งแต่ 1500-2000 มม. ถูกเสริมกำลังด้วยแผ่น FRP หนา 6 มม. ติด ณ ตำแหน่งที่รับแรงดัดทดสอบคานโดยวิธีใช้แรงกด 4 จุด (four-point loading) ผลการทดสอบได้พบว่าคานมีสตีฟเนสรับแรงดัดเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 20 และสามารถรับกำลังได้มากขึ้นมากถึงร้อยละ 50 ก่อนที่การทดสอบจะต้องหยุดเนื่องจากเกิดการโก่งตัวอีกทั้งมีการทดสอบคานโดยทำการทดสอบคานเหล็กรูปพรรณ 2 ชั้นที่มีความกว้าง 610 มม. และความยาวเท่ากับ 6400 มม. คานแรกเป็นคานที่สมบูรณ์และอีกคานเป็นคานที่ถูกกัดกร่อนอย่างรุนแรงที่ปีกกลาง ความหนาชั้นประสานของคานทั้งสองเท่ากับ 6 มม. ที่ตำแหน่งปีกกลางผลการทดสอบที่ได้คือ คานที่ถูกเสริมกำลังนั้นมีการรับกำลังสูงสุดของคานและสตีฟเนสการดัด (flexural stiffness) เพิ่มขึ้น

Colombi และ Poggi (2008) ได้ทำการศึกษาการเสริมกำลังคานเหล็กด้วยแผ่น FRP พบว่าความเครียดที่เกิดขึ้นในคานลดลงเมื่อให้แรงในการทดสอบเท่าเดิมอีกทั้งจุดครากยังถูกเลื่อนไปอีกด้วยรูปแบบการวิบัติของคานเหล็กเสริมแผ่น FRP ดังรูปที่ 2 มีรูปแบบการวิบัติดังนี้ (ก) การวิบัติในระนาบที่เกิดจากการดัด (in-plane bending failure) (Linghoff และคณะ 2009) (ข) การโก่งตัวด้านข้าง (lateral buckling) (Sallam และคณะ 2006) (ค) การหลุดล่อนตำแหน่งปลายแผ่นเสริมกำลัง (plate-end debonding) (Harries และคณะ 2009) (ง) การหลุดล่อนของแผ่นระหว่างกลางคาน (intermediate debonding) เนื่องจากรอยร้าวหรือการครากที่เกิดขึ้นห่างจากจุดปลายของแผ่น FRP (Harries และคณะ 2009) และยังมีรูปแบบการวิบัติเพิ่มเติมคือ (จ) การโก่งเตาะเฉพาะที่ (local buckling) ของปีกรับแรงอัดและ (ฉ) การโก่งเตาะเฉพาะที่ของเอว โดยทั่วไปการเสริมกำลัง

คานด้วย FRP มักจะเสริมด้านล่างของคาน (ปีกรับแรงดึง) ซึ่งการเสริมกำลังรูปแบบนี้ส่งผลให้คานเกิดการวิบัติจากการโก่งเดาะเฉพาะที่ก่อนเกิดการวิบัติรูปแบบอื่นได้



รูปที่ 1 การเสริมกำลังของคานเหล็กด้วยแผ่นพอลิเมอร์ ก) รูปด้านข้าง (Side view) ข) รูปตัดขวาง (Cross-sectional view) (Teng และคณะ 2012)



รูปที่ 2 รูปแบบการวิบัติของคานเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่น FRP (Teng และคณะ 2012)

การหลุดล่อนที่ตำแหน่งปลายแผ่นเสริมกำลัง (plate end debonding) เกิดจากหน่วยแรงเฉือนสูงที่ผิวและหน่วยแรงลอก (peeling stresses) บริเวณใกล้เคียงจุดปลายของแผ่น FRP โดย



ขนาดของหน่วยแรงเฉือนขึ้นอยู่กับโมเมนต์บิดและแรงเฉือน ณ จุดปลายของแผ่น FRP จากการศึกษาของ Smith และ Teng (2001) พบว่า การหลุดล่อนที่ตำแหน่งปลายแผ่นเสริมกำลัง เกิดขึ้นเมื่อปลายของแผ่น FRP อยู่ไกลจากจุดรองรับที่ใกล้ที่สุดเมื่อโมเมนต์ที่ปลายของแผ่น FRP มีค่าสูงมาก แต่การหลุดล่อนตำแหน่งปลายแผ่นเสริมกำลัง สามารถหลีกเลี่ยงได้เมื่อตำแหน่งปลายของแผ่น FRP อยู่ใกล้กับจุดรองรับมากๆ (Deng และ Lee 2007) ในปัจจุบันมีการศึกษา วิธีการลดหน่วยแรงเฉือนที่ผิวอยู่หลายวิธี เช่น การใช้วัสดุเชื่อมประสานที่มีความเหนียวน้อย (Fitton และ Broughton 2005) หรือการทำให้แผ่น FRP มีความเรียบที่จุดปลายของแผ่น (Schnerch และคณะ 2007) แต่โดยทั่วไปการป้องกันที่ดีที่สุดคือ การหนีบ (clamp) ในตำแหน่งที่คาดว่าจะเกิดการหลุดล่อนตำแหน่งปลายแผ่นเสริมกำลัง

จากการศึกษาของ Kim และคณะ (2011) พบว่าการหลุดล่อนของแผ่น FRP ระหว่างกลางคานเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งที่มีความผิดปกติเช่น รอยร้าวหรือตำแหน่งที่วัสดุที่เกิดการคราก ซึ่งทำให้แผ่น FRP เกิดหน่วยแรงที่สูง แม้ว่าการหลุดล่อนตำแหน่งปลายแผ่นเสริมกำลังและการหลุดล่อนระหว่างกลางคานเป็นการวิบัติที่ประหลาดทั้งคู่ แต่จากการศึกษาของ Fernando (2010) พบว่าการหลุดล่อนระหว่างกลางคานมีความแปรปรวนน้อยกว่าการหลุดล่อนตำแหน่งปลายแผ่นเสริมกำลังอยู่เล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบงานวิจัยการหลุดล่อน ทั้งสองพบว่า การหลุดล่อนตำแหน่งปลายแผ่นเสริมกำลังมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอยู่น้อยกว่าการหลุดล่อนระหว่างกลางคานในคานเหล็กเสริมแผ่น FRP นั้นมีพฤติกรรมเหมือนคานคอนกรีตเสริมกำลังด้วยแผ่น FRP ที่มีรอยร้าวอยู่ตรงกลางคาน (Teng และคณะ 2003) โดยการหลุดล่อนทั้งสองแบบมีหน่วยแรงตำแหน่งกึ่งกลางคานที่สูงและหน่วยแรงเฉือนที่พื้นผิวสูง ดังนั้นจึงคาดหวังได้ว่ากำลังของการหลุดล่อนระหว่างกลางคานขึ้นอยู่กับพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือน (Fernando 2010)



2971436726

2.2 พฤติกรรมของการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและวัสดุ FRP

2.2.1 รูปแบบการทดสอบแรงเฉือน

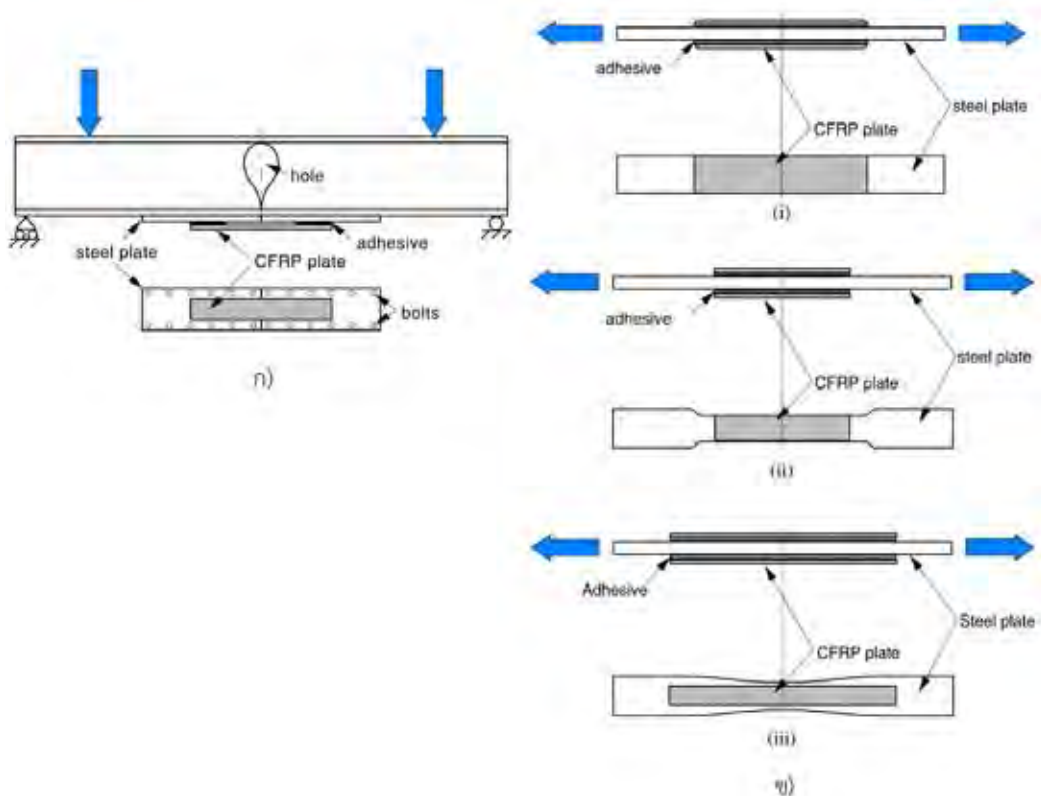
Zhao และ Zhang (2006) ได้ศึกษาการทดสอบพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวของรอยต่อวิธีต่างๆ ในปัจจุบันถูกนำไปใช้โดยนักวิจัยในจุดประสงค์ต่างๆ โดยสามารถจำแนกวิธีการทดสอบออกเป็น 4 ประเภท ดังรูปที่ 3

ประเภทที่ 1 : แรงกระทำต่อแผ่นเหล็กและแผ่น FRP ทางอ้อม (รูปที่ 3 ก.)

ประเภทที่ 2 : แรงกระทำต่อแผ่นเหล็กโดยตรงปราศจากช่องว่างระหว่างเหล็ก (รูปที่ 3 ข.)

ประเภทที่ 3 : แรงกระทำต่อแผ่นเหล็กโดยตรงมีช่องว่างระหว่างเหล็ก (รูปที่ 3 ค.)

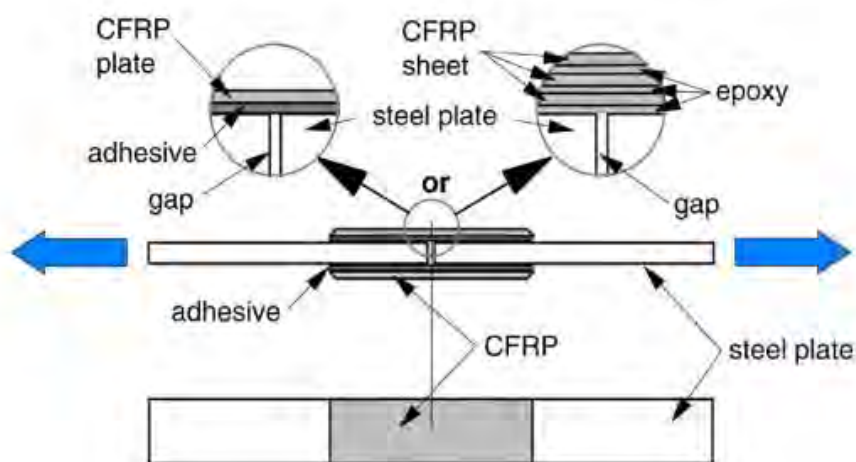
ประเภทที่ 4 : แรงกระทำที่ปลายแผ่น FRP (รูปที่ 3 ง.)



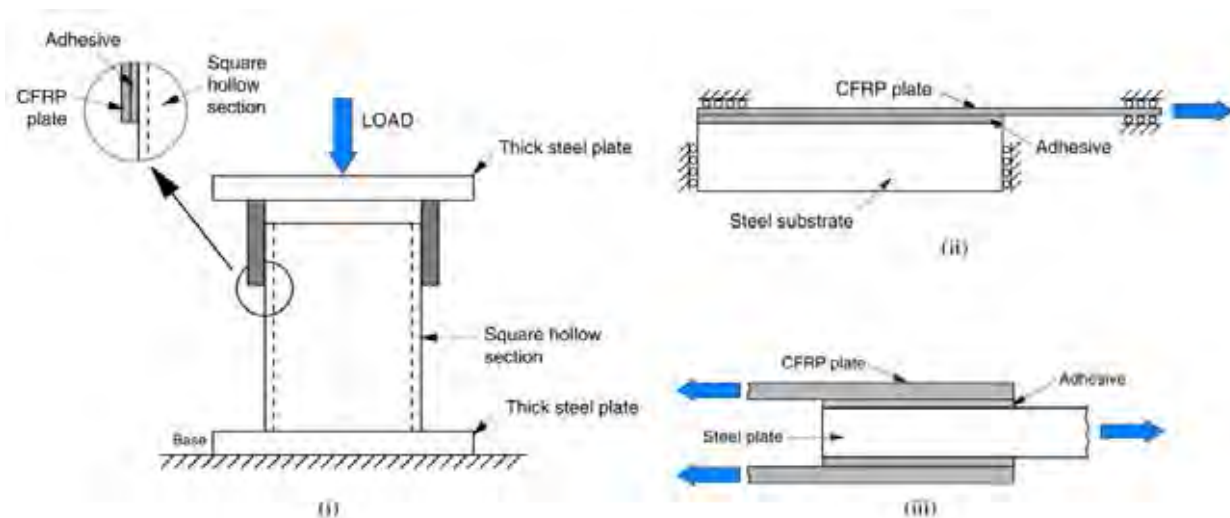
ก) ประเภท 1 : แรงกระทำต่อแผ่นเหล็กและแผ่น FRP ทางอ้อม ข) ประเภท 2 : แรงกระทำต่อแผ่นเหล็ก โดยตรงและปราศจากช่องว่างระหว่างเหล็ก

รูปที่ 3 รูปแบบการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและวัสดุ FRP

(Zhao และ Zhang 2007)



ค) ประเภทที่ 3 : แรงกระทำต่อแผ่นเหล็กโดยตรงและมีช่องว่างระหว่างเหล็กแบบการทดสอบแรงเฉือนแบบรอยต่อทาบคู่



ง) ประเภทที่ 4 : แรงกระทำที่ปลายแผ่น FRP (i) การทดสอบแรงเฉือนแบบปกติ (ii) การทดสอบแรงเฉือนแบบรอยต่อทาบเดี่ยว (iii) การทดสอบแรงเฉือนแบบรอยต่อทาบคู่

รูปที่ 3 รูปแบบการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและวัสดุ FRP (ต่อ) (Zhao และ Zhang 2007)

การทดสอบประเภทที่ 1 เป็นการทดสอบที่ใช้แผ่นเหล็กยึดติดกับปีกรับแรงดึงของคานด้วยสลักเกลียว แรงกระทำอยู่บนคานเพื่อให้บางส่วนภายในระยะของคานเกิดโมเมนต์ดัดเพียงอย่างเดียว (pure bending zone) ซึ่งการทดสอบประเภทนี้ จะเกิดแรงเฉือนภายในวัสดุเชื่อมประสาน

(adhesive shear) และหน่วยแรงลอก จากแรงดัด โดยเหมาะสมกับการพัฒนาแบบจำลองการยึดเหนี่ยวทั่วไปสำหรับคานเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่น FRP อย่างไรก็ตามผลของการทดลองนั้นขึ้นอยู่กับตัวอย่างการทดสอบ และแบบจำลองที่ถูกพัฒนานั้นไม่สามารถใช้กับตัวอย่างการทดสอบหน้าตัดอื่นๆ ได้โดยตรง

การทดสอบประเภทที่ 2 แรงจะถูกส่งผ่านจากวัสดุเหล็กไปสู่วัสดุ FRP การทดสอบใช้แผ่นเหล็กความยาวต่อเนื่องและมีความกว้างคงที่ถูกทดสอบโดย Miller และคณะ (2001) ดังรูปที่ 3 ข) (i) การครากของเหล็กจะเกิดขึ้นภายนอกส่วนที่ถูกเสริมกำลังโดยแผ่น FRP ถ้าตัวอย่างการทดสอบมีความกว้างคงที่ ตัวอย่างการทดสอบที่ถูกปรับความกว้าง ดังรูปที่ 3 ข) (ii) (iii) ถูกทำไปใช้โดย Hollaway และ Cadei (2002) เพื่อหลีกเลี่ยงการครากของเหล็ก ซึ่งการทดสอบประเภทที่ 2 นี้เหมาะกับการศึกษาการเสริมกำลังมากกว่าการศึกษาการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและวัสดุ FRP

การทดสอบแรงเฉือนแบบรอยต่อทาบคู่ (double-strap joint test) มักถูกนำไปใช้ในการทดสอบประเภทที่ 3 โดย Schnerch และคณะ (2004) ได้ทำการทดสอบนี้เพื่อศึกษาการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นเหล็กและแผ่น FRP ดังรูปที่ 3 ค) การทดสอบแรงเฉือนแบบรอยต่อทาบเดี่ยวมักถูกนำไปใช้ในการทดสอบประเภทที่ 3 Fawzia และคณะ (2005) และ Jiao และ Zhao (2004) ได้ศึกษาการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กกล่อง (steel tube) กับแผ่น FRP โดยใช้การทดสอบแรงเฉือนแบบรอยต่อทาบคู่ เนื่องจากการติดแผ่น FRP ด้านในของเหล็กก่อนนั้นทำได้ยากและทำการทดสอบโดยใช้ตัวอย่างที่ความยาวการยึดประสานทั้งสองด้านไม่เท่ากันเพื่อทำให้การหลุดล่อน (debonding) เกิดในช่วงที่มีความยาวการยึดประสานน้อยกว่า สิ่งที่น่ากังวลสำหรับการทดสอบประเภทที่ 3 นี้คือ ตำแหน่งการวิบัติแบบหลุดล่อน (debonding failure) นั้นไม่แน่นอน ซึ่งมีเส้นทางที่เป็นไปได้สำหรับการหลุดล่อนทั้งหมด 4 เส้นทาง อีกทั้งการติดตั้งอุปกรณ์และการสังเกตการณ์ของการทดสอบนี้ยังทำได้ยากอีกด้วย

ในการทดสอบประเภทที่ 4 นั้นสามารถใช้แรงอัด (Damatti และคณะ 2033) หรือแรงดึง (Xia และ Teng 2005) ในการทดสอบ โดยการติดตั้งเป็น ดังรูปที่ 3 ง) (i) เหมาะสำหรับการทดสอบการยึดเหนี่ยวเมื่อวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังถูกกระทำโดยแรงอัด แต่มีข้อเสียของการทดสอบด้วยแรงอัดคือ อาจเกิดการวิบัติภายในแผ่น FRP เนื่องจากกำลังรับแรงอัดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยไม่เพียงพอ (แผ่นพอลิเมอร์เหมาะสมสำหรับการรับแรงดึงมากกว่ารับแรงอัด) และรูปแบบอื่นในรูปที่ 3 ง) เป็นวิธีการทดสอบที่มีประโยชน์มากสำหรับใช้ในการศึกษาการยึดเหนี่ยวของเหล็กและวัสดุ

เสริมเส้นใยซึ่งการติดตั้งนั้นเป็น ดังรูปที่ 3 ง) (ii) ซึ่งถูกนำไปใช้โดย Xia และ Teng (2005) เพื่อช่วยในการตรวจสอบรายละเอียดและตรวจสอบการวิบัติ เนื่องจากมีเส้นทางสำหรับการหลุดล่อนที่เป็นไปได้เพียงหนึ่งเส้นทางเท่านั้น การทดสอบรูปแบบนี้ยังสามารถนำไปศึกษาการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและวัสดุ FRP อีกด้วย อย่างไรก็ตามสิ่งที่ท้าทายสำหรับวิธีการนี้คือ การทำให้ตัวอย่างการทดสอบยังคงอยู่ภายในระนาบเพื่อลดการเกิดการเอียงศูนย์ วิธีการทดสอบรูปแบบนี้ สำหรับการทดสอบแรงเฉือนโดยรอยต่อทาบคู่ ดังรูปที่ 3 ง) (iii) โดยวิธีนี้การทดสอบนี้จะช่วยลดการเอียงศูนย์ของชิ้นงานระหว่างทดสอบเนื่องจากความสมมาตรของชิ้นงานแต่ยากต่อการคาดเดาเส้นทางของการวิบัติเนื่องจากมีเส้นทางสำหรับการหลุดล่อนที่เป็นไปได้ทั้งหมด 2 เส้นทาง

จากการศึกษาการทดสอบแรงเฉือนประเภทต่างๆ พบว่าการทดสอบประเภทที่ 2.3 ง) (ii) เหมาะสมสำหรับการเสริมกำลังด้วยแผ่น FRP เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลระหว่างแผ่น FRP และเหล็ก

2.2.2 รูปแบบการวิบัติ

การวิบัติของแผ่นเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่น FRP โดยใช้หน้ายาเชื่อมประสานเป็นตัวยึดเหนี่ยวมีอยู่หลายรูปแบบ โดย Bukukozturk และคณะ (2004) ได้อธิบายกลไกการหลุดล่อนของการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นเหล็กกับแผ่น FRP พบว่าการหลุดล่อนที่เป็นไปได้นั้นมีอยู่ 4 ประเภท แบ่งออกเป็นการวิบัติระหว่างผิวเหล็กและวัสดุเชื่อมประสาน (adhesive failure at steel-adhesive interface) การวิบัติในชั้นวัสดุเชื่อมประสาน (cohesive failure within adhesive layer) การวิบัติระหว่างผิว FRP และวัสดุเชื่อมประสาน (adhesive failure at adhesive- FRP interface) และการวิบัติโดยเกิดการหลุดล่อนของแผ่น FRP (delaminate within FRP material)

ในการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นเหล็กและแผ่น FRP การวิบัติที่ผิวระหว่างเหล็กกับวัสดุเชื่อมประสานหรือแผ่น FRP กับวัสดุเชื่อมประสานอาจเกิดขึ้นได้ อย่างไรก็ตามการวิบัติระหว่างแผ่น FRP กับวัสดุเชื่อมประสานมักจะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุ FRP ถูกขึ้นรูปแบบเปียก (wet lay-up process) ในสถานที่ก่อสร้าง โดยการหลีกเลี่ยงการวิบัติระหว่างแผ่น FRP กับวัสดุเชื่อมประสานสามารถทำได้โดยใช้แผ่นลอกเรซิน (peel-ply) ซึ่งเป็นการกำจัดการยึดเหนี่ยวที่มีอยู่ก่อนหน้าเพื่อให้แน่ใจว่าผิวของแผ่น FRP นั้นสะอาดและขรุขระสำหรับการสร้างการยึดเหนี่ยวใหม่ของวัสดุเชื่อมประสาน (Hollaway และ Cadei 2002) หรือการขัดผิวและทำความสะอาดก่อนใช้งานยัง ในทางตรงกันข้าม



การวิบัติระหว่างผิวเหล็กกับวัสดุ FRP เป็นการวิบัติที่มักจะเกิดขึ้น สำหรับสาเหตุที่มากมายในการเกิด การวิบัตินี้ วิธีเตรียมและคุณสมบัติเฉพาะของผิวเหล็กสำหรับการยึดเหนี่ยวของวัสดุยึดประสานนั้น ได้รับความสนใจอย่างมากในการนำไปศึกษา

กำลังการยึดเหนี่ยวระหว่างผิวเหล็กและวัสดุเชื่อมประสานเกิดขึ้นจากการยึดเหนี่ยวเคมีและ การยึดเหนี่ยวทางกลระหว่างเหล็กและวัสดุ FRP (Balducci, 2004) เห็นได้ชัดว่าผิวสัมผัสระหว่างเหล็ก และวัสดุเชื่อมประสานที่แข็งแรงจำเป็นสำหรับวัสดุเชื่อมประสานในการสัมผัสกับผิวเหล็ก ซึ่ง หมายความว่าวัสดุเชื่อมประสานที่ใช้ควรมีความเหนียวที่ต่ำเพื่อให้ง่ายในการไหลบนพื้นผิวและเติม เต็มช่องว่างเล็กๆบนผิวของเหล็ก (Rosen 1993) และพื้นผิวของเหล็กควรถูกทำความสะอาดอีกทั้งผิว ของเหล็กควรมีพลังงานผิว (surface energy) ที่เพียงพอสำหรับการยึดเกาะของการยึดประสานที่ดี (Balducci และค, 2004) เมื่อเหล็กและวัสดุ FRP ถูกยึดประสานเข้าด้วยกัน โดยทั่วไปกำลังของการยึด ประสานจะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบทางเคมีของผิวเหล็กและวัสดุเชื่อมประสานว่ามีความเข้ากันได้ทาง เคมี (chemical compatible) หรือไม่ (Balducci, 2004) นอกเหนือจากคุณสมบัติของวัสดุเชื่อม ประสาน กำลังของการยึดเหนี่ยวขึ้นอยู่กับความขรุขระ (roughness) และลักษณะภูมิประเทศ (topography) ของผิวเหล็ก พบว่าความขรุขระของผิวเหล็กสามารถเพิ่มกำลังอย่างมีนัยสำคัญสำหรับ กำลังการยึดเหนี่ยวเชิงกล (Peckham 2003) แต่อาจจะเกิดการแยกชั้นเมื่อความขรุขระนั้นมาก เกินไป (Hitchcock และคณะ, 1981) ดังนั้นคุณสมบัติที่สำคัญของผิวเหล็กที่เหมาะสมในการทดสอบ คือ พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส ความเข้ากันได้ทางเคมีและความขรุขระของผิว

การเตรียมพื้นผิวของเหล็กเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการยึดเหนี่ยวทั้ง 2 ประเภท (การยึด เหนี่ยวทางกลและการยึดเหนี่ยวทางเคมี) โดยการทำความสะอาดผิวเหล็กและการเปลี่ยนคุณสมบัติ ของผิวเหล็ก วิธีการที่นิยมมากที่สุดคือ การทำความสะอาดผิวโดยตัวทำละลาย (solvent cleaning) และการสร้างรอยขีดข่วนเชิงกล (mechanical abrasion) โดยการใช้การพ่นทราย (grit blasting) (Balducci 2004) การทำความสะอาดด้วยตัวทำละลายจะกำจัดสารปนเปื้อนบนผิวเหล็กเช่นไขมัน น้ำมันและน้ำ แต่ไม่เปลี่ยนคุณสมบัติของผิวเหล็ก ดังนั้นวิธีการนี้จึงมีขีดจำกัดของผลกระทบสำหรับ กำลังการยึดประสาน (Harris และ Beevers 1999) อย่างไรก็ตามขั้นตอนเตรียมผิวของเหล็กนั้นเป็น สิ่งที่สำคัญและควรที่จะดำเนินการตั้งแต่ต้นของการบวนการติดตั้งการเสริมกำลัง (Schnerch และ คณะ 2007) การใช้ตัวทำละลายระเหย (volatile solvent) เช่นอะซิโตน (acetone) เพื่อลดสาร ปนเปื้อนให้เหลือน้อยที่สุด (Hollaway และ Teng 2008) การสร้างรอยขีดข่วนเชิงกลจะสร้างความ



2971436726

CD :Thesis 5870186721 thesis / rev: 02082562 17:24:40 / seq: 13

ขรุขระให้ผิวเหล็กและยังกำจัดชั้นผิวอ่อน (weak surface layer) เช่นชั้นออกไซด์ (oxide layer) ซึ่งเป็นชั้นที่เชื่อมซ้ต่อปฏิกิริยาเคมี (chemically inactive) (Baldan 2004) ดังนั้นผิวของเหล็กที่สัมผัสกับวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมคือ ผิวที่มีลักษณะขรุขระ สะอาดและไวต่อปฏิกิริยาเคมี (chemically active) จากหลากหลายวิธีการสร้างรอยขีดข่วนเชิงกลพบว่าการพ่นทราย (sand blasting) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด (Holloway 2002) ผลการทดสอบของ Teng และคณะ (2010) ได้แสดงให้เห็นว่าการวิบัติระหว่างผิวเหล็กกับวัสดุเชื่อมประสานนั้นสามารถหลีกเลี่ยงได้เมื่อผิวของเหล็กถูกปรับปรุงพื้นผิวโดยการพ่นทรายก่อนติดตั้งตัวอย่างการทดลอง

การพ่นทรายอาจใช้วัสดุหลายชนิดและหลายขนาด (particle size) โดยการศึกษาของ Teng และคณะ (2010) ได้แสดงให้เห็นว่าการเป่ากรวดนั้นสามารถปรับปรุงส่วนประกอบทางเคมีของพื้นผิวโดยการตกค้างของกรวดบนพื้นผิว ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญในการเลือกประเภทของกรวดซึ่งต้องมีความเข้ากันได้กับวัสดุเชื่อมประสาน ขนาดของกรวดอาจมีผลต่อพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสและความขรุขระของผิว แต่การศึกษาในปัจจุบันโดย Teng และคณะ (2010) ซึ่งใช้ขนาดของกรวดที่หลากหลายในการทดสอบ (0.125-0.5 มม.) พบว่าผลของขนาดกรวดต่อกำลังการยึดเหนี่ยวมีขีดจำกัด

ช่วงเวลาในการดำเนินการพ่นทราย ผงฝุ่นเล็กๆที่เกิดจากการขีดข่วนนั้นจะกลายเป็นสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิว (Holloway และ Cadei 2002) ดังนั้นการทำความสะอาดอีกครั้งหลังการพ่นทรายจึงเป็นสิ่งสำคัญ Holloway และ Cadei (2002) ได้แนะนำการกำจัดฝุ่นผงเล็กๆโดยวิธีการเช็ดแห้ง (dry-wiping) หรือการใช้หัวดูดตะกอน (vacuum head) แทนการใช้ตัวทำละลายเนื่องจากผู้ทำการวิจัยเชื่อว่าการใช้ตัวทำละลายสามารถกำจัดฝุ่นผงได้เพียงบางส่วนและส่วนที่เหลือจะถูกจัดเรียงตัวใหม่บนพื้นผิว อย่างไรก็ตาม El Damatty และ Abushagur (2003) ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวทำละลายที่มากพอสามารถกำจัดจะฝุ่นผงได้อย่างสมบูรณ์

หลังจากปรับปรุงพื้นผิวของเหล็กควรทำการติดตั้งแผ่น FRP กับวัสดุเชื่อมประสานอย่างรวดเร็วที่สุดเท่าที่เป็นไปได้เพื่อหลีกเลี่ยงสารปนเปื้อนบนพื้นผิวหรือการจัดเรียงใหม่ของชั้นอ่อนออกไซด์ (weak oxide layers) บนพื้นผิวเหล็ก (Allan และคณะ 1988) Cadei และคณะ (2004) แนะนำว่าช่วงเวลาระหว่างการพ่นทรายและการติดตั้งวัสดุเชื่อมประสานไม่ควรนานเกิน 2 ชม. ขณะที่ Schnerch และคณะ (2007) ได้แนะนำการใช้งานในทางปฏิบัติไม่ควรเกิน 24 ชม. สำหรับการใช้วัสดุเชื่อมประสาน



2971436726

CT :Thesis 5870186721 thesis / rev: 02082562 17:24:40 / seq: 13

นอกเหนือจากวิธีเตรียมพื้นผิวที่เหมาะสม การจำแนกพื้นผิวเพื่อวิเคราะห์ว่ากำลังของการยึดเหนี่ยวพัฒนาจนเพียงพอแล้ว โดยวิธีการจำแนกที่มีอยู่ประกอบไปด้วย ก) กล้องแสดงมุมสัมผัส (video contact angle, VCA) โดยอุปกรณ์นี้สามารถวัดมุมสัมผัสเพื่อวิเคราะห์พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส ข) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (scanning electron microscopy) ซึ่งสามารถใช้เพื่อวัดส่วนประกอบทางเคมีของพื้นผิว ค) เครื่องวัดความเรียบผิว (profilometer) สามารถใช้เพื่อวัดความเรียบของผิวและภูมิลักษณะของผิว (Teng และคณะ 2010) จากการใช้อุปกรณ์นี้โดย Teng และคณะ (2010) แสดงให้เห็นว่าคุณลักษณะของพื้นผิวนั้นจะไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากทำการพันกรวดโดยกรวดชนิดเดียวกัน อีกทั้งยังแนะนำว่าควรพัฒนามาตรฐานการเตรียมผิวเพื่อให้แน่ใจว่าผิวนั้นดีพอให้ได้กำลังการยึดเหนี่ยวที่พอเพียง

การวิบัติในชั้นวัสดุเชื่อมประสานเกิดขึ้นเมื่อหน่วยแรงเฉือนสูงสุดระหว่างรอยต่อมากเกินไปกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุเชื่อมประสาน โดยการป้องกันการวิบัตินี้สามารถทำได้โดยการปรับปรุงคุณสมบัติการรับกำลังของวัสดุเชื่อมประสาน การเพิ่มพื้นที่ของพื้นผิวการยึดประสานสามารถลดหน่วยแรงที่เกิดขึ้นได้และยังเป็นการเสริมกำลังการยึดเหนี่ยวได้อีกด้วย อีกทั้งการเพิ่มความกว้างของการยึดเหนี่ยวการยึดเหนี่ยวนั้นสามารถป้องกันการวิบัตินี้ได้มากกว่าการเพิ่มความยาวของการยึดเหนี่ยวอีกด้วย

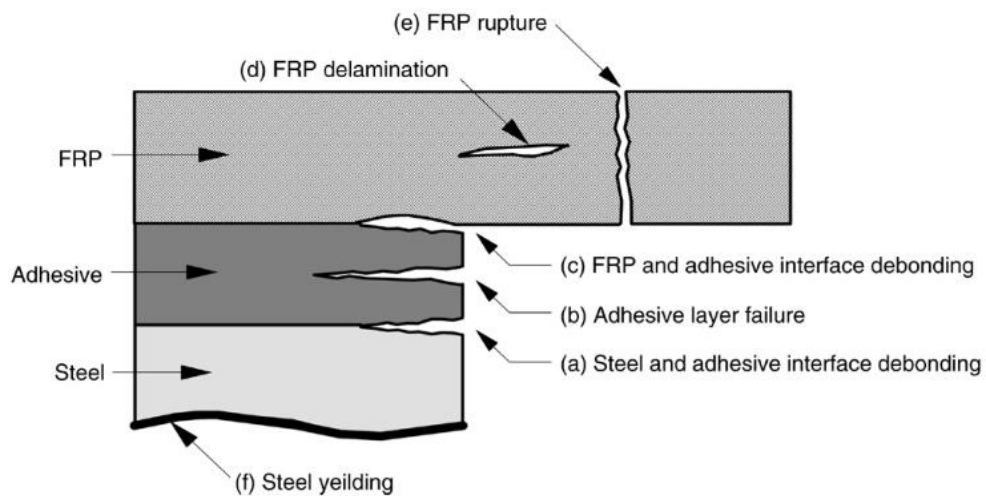
Bukukozturk และคณะ (2004) ได้ศึกษาพบว่าเมื่อแรงที่เกิดขึ้นมากเกินไปหน่วยแรงวิกฤติของชั้นวัสดุเชื่อมประสาน การหลุดล่อนอาจเกิดขึ้นจากการกระจายของรอยร้าวไปสู่ชั้นระหว่างแผ่นเหล็กและวัสดุเชื่อมประสาน ชั้นระหว่างแผ่น FRP และวัสดุเชื่อมประสาน ภายในชั้นวัสดุเชื่อมประสาน หรือภายในแผ่น FRP แนวโน้มในการเกิดการวิบัติแบบหลุดล่อน (debonding failure) สามารถทำให้ลดลงได้เมื่อทำการเตรียมผิวหรือทำการขยายความยาวของการยึดเหนี่ยวการยึดเหนี่ยวให้อยู่ใกล้จุดรองรับมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้และทำให้เกิดการวิบัติแบบการหลุดล่อนที่คาดการณ์ได้ยากอีกด้วย

การวิบัติของวัสดุ FRP จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อกำลังของการยึดเหนี่ยวนั้นเพียงพอและถูกใช้อย่างเหมาะสม การวิบัตินี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อแผ่น FRP มีความเครียดถึงจุดสูงสุด โดยทั่วไปมักจะเกิดขึ้นในช่วงที่มีโมเมนต์สูงสุดของคานเหล็ก จากการศึกษาพบว่า การวิบัติของของแผ่น FRP นั้นไม่ควรเกิดขึ้น



2971436726

CT :Thesis 5870186721 thesis / revv: 02082562 17:24:40 / seq: 13

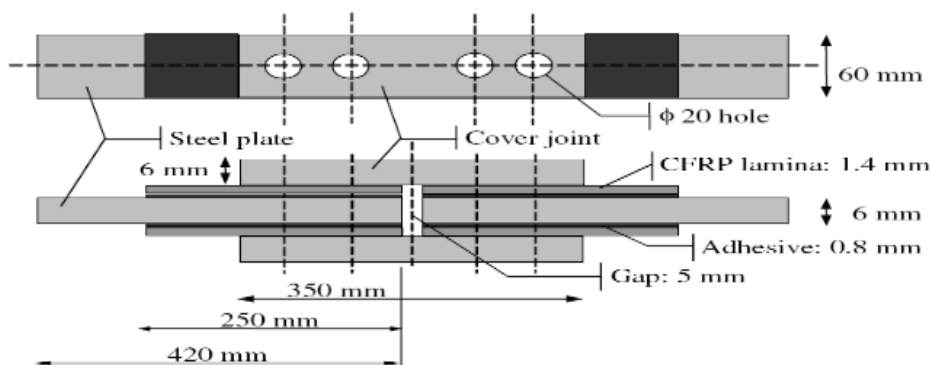


รูปที่ 4 รูปแบบการวิบัติของแผ่นเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่น FRP (Teng และคณะ 2012)

2.3 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและแผ่น FRP

2.3.1 ความยาวการยึดเหนี่ยว

Colombi และ Poggi (2006) ได้ทำการศึกษาการเสริมกำลังรอยต่อสลักเกลียวโดยใช้แผ่น FRP การทดสอบแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มแรกนั้นมีเป็นคานเหล็กต่อเนื่อง กลุ่มที่ 2 เป็นแผ่นเหล็ก 2 แผ่นที่มีช่องว่างระหว่างกลางเสริมกำลังด้วยแผ่น FRP และกลุ่มที่ 3 เป็นแผ่นเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่น FRP โดยใช้รอยต่อเป็นแบบสลักเกลียว แผ่น FRP ที่ใช้ในการทดสอบคือ Sika Carbodur M614 และใช้วัสดุเชื่อมประสานอีพอกซี Sikadur 30 ตัวอย่างถูกทดสอบภายใต้แรงดึงแบบสถิต ผลการทดสอบพบว่าจุดครากของตัวอย่างที่เสริมกำลังและตัวอย่างที่ไม่เสริมกำลังนั้นมีจุดครากต่างกันเล็กน้อย สำหรับตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วยแผ่น FRP ทั้งสองด้านนั้นมาวัดความเครียดที่ตำแหน่งอยู่ใกล้แรงที่กระทำและอยู่ไกลจากรอยต่อมีกราฟความเค้นและความเครียดเป็นแบบไม่เชิงเส้น เนื่องจากจากคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสาน (Sikadur 30) จะเป็นแบบไม่เชิงเส้นเมื่อมีการรับแรงที่สูง ขณะที่มาวัดความเครียดตัวอื่นนั้นได้ผลของกราฟความเค้นและความเครียดเป็นแบบเส้นตรง ในรอยต่อสลักเกลียว ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การเสริมกำลังโดยใช้รอยต่อแบบสลักเกลียว (Colombi และ Poggi 2006)

Fawzia และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาลักษณะเฉพาะของรอยต่อแบบทาบคู่ของแผ่นเหล็กกับแผ่น FRP ที่มีค้ำยังมอดูลัสยืดหยุ่นปานกลาง โดยที่แผ่น FRP มีความหนาชั้นละ 0.176 มม. ทั้งหมด 3 ชั้นและใช้อีพอกซี เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ตัวอย่างถูกทดสอบภายใต้แรงดึงด้วยอัตรา 2 มม.ต่อนาที ผลการทดสอบพบว่าความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผลนั้นเท่ากับ 75 มม. มีการติดตามวัดความเค้นตลอดความยาวของการยึดเหนี่ยวเพื่อวัดการกระจายของความเครียดพบว่าเมื่อแรงที่กระทำเพิ่มขึ้นความเค้นจะมากขึ้นเช่นกันในมาตรวัดความเครียดที่อยู่ใกล้แรงที่กระทำและความเค้นจะลดลงจนใกล้เคียงศูนย์เมื่อมาตรวัดความเครียดห่างจากแรงที่กระทำเท่ากับ 75 มม.

สำหรับการสร้างความยาวประสิทธิผลของการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นเหล็กกับแผ่น FRP นั้น Dawood และ Rizkalla (2007) ได้ทำการทดสอบตัวอย่างการทดสอบแรงเฉือนแบบรอยต่อทาบคู่เพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมในการลดความเข้มข้นของหน่วยแรง (stress concentration) ของการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นเหล็กกับแผ่น FRP ซึ่งมักเกิดขึ้นในตำแหน่งปลายของการยึดเหนี่ยวด้านที่อยู่ใกล้แรงที่กระทำ ผลลัพธ์ของการทดสอบพบว่าตัวอย่างทั้งหมดวิบัติโดยการการหลุดล่อนของวัสดุ FRP โดยที่วัสดุเชื่อมประสานบางส่วนยังคงเหลืออยู่บนแผ่นเหล็ก

Fawzia และคณะ (2010) ได้ศึกษาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไหลของรอยต่อแบบทาบคู่ระหว่างแผ่นเหล็กและแผ่น FRP มาตรวัดความเครียดถูกนำมาใช้เพื่อหาการกระจายของความเครียด การทดสอบนั้นมีตัวแปรที่ใช้คือ ค้ำมอดูลัสยืดหยุ่นของแผ่น FRP ชนิดของวัสดุเชื่อมประสาน จำนวนชั้นของ FRP ความยาวของการยึดเหนี่ยว โดยผู้ทำการวิจัยพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไหลของตัวอย่างที่ใช้วัสดุเชื่อมประสานชนิดAraldite

และMBrace มีการไถลที่ตำแหน่งที่เกิดแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับซึ่งเท่ากับ 0.05 มม. แต่จะเท่ากับ 0.04 มม.สำหรับตัวอย่างที่ใช้ Sikadur วัสดุเชื่อมประสานดังที่แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 หน่วยแรงเฉือนและการไถลสำหรับอีพอกซีชนิดต่างๆ (Fawzia Zhao และคณะ 2010)

| | Maximum shear stress (MPa) | Initial slip (mm) | Maximum slip (mm) |
|-----------------|----------------------------|-------------------|-------------------|
| Araldite 420 | 30 | 0.05 | 0.12 |
| Mbrace saturant | 23 | 0.05 | 0.12 |
| Sikadur 30 | 22 | 0.04 | 0.1 |

การวิบัติของการยึดเหนี่ยวสำหรับรอยต่อของแผ่นเหล็กและแผ่น FRP ทั้ง 3 ชนิดคือ รอยต่อ ทาบคู่ รอยต่อทาบเดี่ยว และรอยต่อรูปตัวที (T-peel joint) ถูกศึกษาโดย Chiew Yu และคณะ (2011) โดยใช้แผ่น FRP กำลังสูงซึ่งมีกำลังรับแรงดึงเท่ากับ 2492 เมกะปาสคาล และอีพอกซีมีกำลังรับแรงดึงเท่ากับ 15.5 เมกะปาสคาล สำหรับการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่น FRP และแผ่นเหล็ก รอยต่อ ถูกทดสอบภายใต้แรงดึง พบว่าความสามารถในการรับแรงสูงสุดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความกว้างของการยึดเหนี่ยว การวิบัติของตัวอย่างทั้งหมดนั้นเป็นการวิบัติระหว่างผิวเหล็กกับวัสดุ FRP

Wu และคณะ (2012) ได้ศึกษาลักษณะเฉพาะของการยึดเหนี่ยวของรอยต่อแบบทางคู่ ระหว่างแผ่นเหล็กและแผ่น FRP ที่มีมอดุลัสยืดหยุ่นสูงซึ่งเท่ากับ 460 จิกะปาสคาล และมีกำลังรับแรงดึงเท่ากับ 1500 เมกะปาสคาลการทดสอบใช้วัสดุเชื่อมประสานทั้งหมด 2 ชนิดคือ Araldite และ Sikadur ตัวอย่างถูกทดสอบภายใต้แรงดึงสถิตเพื่อตรวจสอบรูปแบบการวิบัติ ความยาวยึดเหนี่ยว ประสิทธิภาพ และความสามารถในการรับกำลังของการยึดเหนี่ยว จากการทดสอบพบว่าการวิบัติของตัวอย่างที่ใช้วัสดุเชื่อมประสานชนิด Sikadurเป็นแบบการหลุดล่อนระหว่างผิวเหล็กและวัสดุเชื่อมประสาน (cohesive) แต่ตัวอย่างที่ใช้วัสดุเชื่อมประสานชนิดAraldite พบว่ามีการวิบัติอยู่ 2 รูปแบบ คือ การหลุดล่อนและการวิบัติของแผ่น FRP ความสามารถในการรับกำลังของการยึดเหนี่ยวนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวของการยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้นจนถึงความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพ ซึ่งมีความยาวเท่ากับ 100-120 มม. สำหรับตัวอย่างที่ใช้วัสดุเชื่อมประสานชนิดAraldite และ 70-100 มม. สำหรับตัวอย่างที่ใช้วัสดุเชื่อมประสานชนิด Sikadur และผลการทดสอบยังพบอีกว่าความเครียดจะมากในตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับรอยต่อของเหล็กและจะลดลงเมื่อตำแหน่งอยู่ห่างจากรอยต่อ อีกทั้งหน่วยแรง

เดือนจะเพิ่มขึ้นเมื่อแรงที่กระทำมากขึ้นและหน่วยแรงเดือนจะลดลงเมื่อตำแหน่งของหน่วยแรงอยู่ห่าง ออกจากรอยต่อเช่นกัน

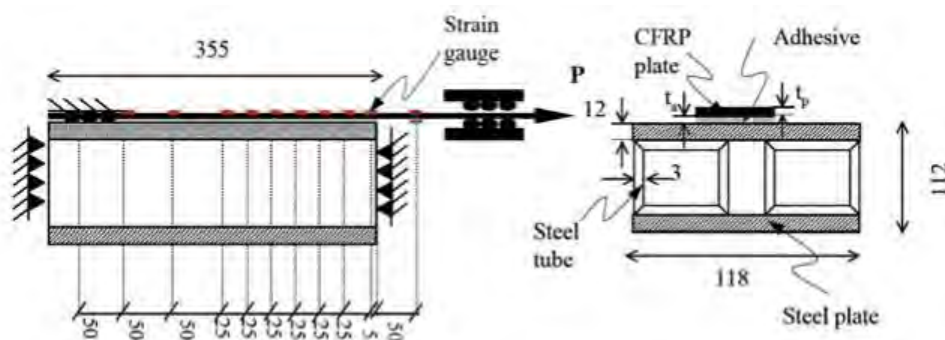
ในปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากที่ทำการศึกษาคความยาวประสิทธิผลของความยาวการ ยึดประสานซึ่งความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผลคือ ความยาวของการยึดประสานที่สั้นที่สุดและทำให้วัสดุที่ เสริมกำลังนั้นสามารถรับแรงได้มากที่สุด ซึ่งการเสริมกำลังโดยใช้ความยาวของวัสดุเสริมกำลังที่มากกว่า ยึด เหนี่ยวประสิทธิผลจะไม่ทำให้วัสดุประกอบสามารถรับแรงเพิ่มขึ้นได้อีกต่อไป กำลัง ในปี 2001 Miller และคณะได้ทำการศึกษากการถ่ายโอนแรง (force transfer) ที่เกิดขึ้นภายในการยึดเหนี่ยว ระหว่างแผ่นเหล็กกับแผ่น FRP จากการทดสอบการดึงเหล็กที่ถูกประกบด้วยแผ่น FRP ผลของการ ทดสอบและแบบจำลองการวิเคราะห์ (an analytical รูปแบบ) โดยใช้มาตรวัดความเครียด (strain gauge) ในการตรวจสอบผล ผลทดสอบบ่งบอกว่าร้อยละ 98 ของแรงเกิดขึ้นภายใน 100 มิลลิเมตร ของจุดปลายของแผ่น FRP Lam และคณะ (2004) ได้ทำศึกษาโดยใช้วัสดุเดียวกันกับ ได้สรุปว่าการ เพิ่งขึ้นของความยาวของแผ่น FRP จาก 100 มิลลิเมตรเป็น 300 มิลลิเมตร โดยใช้การทดสอบการ ทดสอบแรงเดือนแบบรอยต่อคู่ไม่ได้เพิ่มกำลังของการยึดเหนี่ยวของรอยต่อ ซึ่งเนื่องจากการมีอยู่ของ หน่วยแรงที่หนาแน่นที่อยู่ใกล้จุดปลายของแผ่น FRP และแผ่นเหล็ก แต่การเพิ่มความยาวของระยะการยึด เหนี่ยวนั้นยังคงทำให้ความเหนียวสูงสุดของวัสดุเชื่อมประสานเพิ่มขึ้น

ในปี 2005 Nozaka และคณะได้ทำการศึกษาคความยาวการยึดเหนี่ยวของชิ้นส่วนรับ โมเมนต์ดัด (flexural member) เสริมกำลังด้วยแผ่น FRP เป็นการทดลองเกี่ยวกับการซ่อมแซมรอย ร้าว (repair crack) ของคานเหล็กขนาดใหญ่ (steel girder) การทดสอบประกอบไปด้วยแผ่น FRP ติดเข้ากับแผ่นเหล็กสองแผ่นเสริมกำลังให้คานเหล็กขนาดใหญ่ด้วยสลักเกลียว ซึ่งทำรอยบากไว้ที่ปีก รับแรงดึงและเอว ณ ตำแหน่งกึ่งกลางคาน ตัวอย่างมีทั้งหมด 27 ชิ้นงานโดยใช้แผ่น FRP 2 ชนิดที่ คุณสมบัติแตกต่างกัน และใช้วัสดุเชื่อมประสานทั้งหมด 5 ชนิดในการทดสอบ ภายใต้แรงกระทำเป็น รอบ (cyclic load) วัสดุเชื่อมประสานเกิดการครากอย่างรวดเร็วเมื่อตัวอย่างทดสอบถูกแรงกระทำ จากการทดสอบพบว่าการวิบัติจากการทดสอบเป็นการวิบัติแบบหลุดล่อน และผลการทดสอบยังบ่ง บอกอีกว่าการเพิ่มจำนวนชั้น (layer) ของแผ่น FRP ทำให้กำลังรับแรงดึงของแรงยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้นอีก ทั้งยังลดความเครียดของแผ่น FRP ก่อนที่จะเกิดการหลุดล่อนอีกด้วย ระยะประสิทธิผลถูกพบว่าต้อง มีระยะน้อยกว่า 203 มิลลิเมตรและการเพิ่มขึ้นของระยะการยึดเหนี่ยวที่มากกว่าระยะยึดเหนี่ยว ประสิทธิผลจะไม่ทำให้ความสามารถในการรับแรงดึงเพิ่มขึ้นได้อีกต่อไป

ในปี 2006 Lenwari และคณะทำการศึกษาการวิเคราะห์วิธาคาดการณ์ ระยะประสิทธิผลโดยการทดสอบคานเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่น FRP ที่มีความยาวต่างกัน 3 ความยาว (500 มม. 650 มม. และ 1200 มม.) โดยที่ตัวอย่างที่ใช้ความยาวของแผ่น FRP เท่ากับ 500 มม. และ 650 มม. นั้นมีการวิบัติแบบการหลุดล่อน ขณะที่ตัวอย่างที่ใช้ความยาว 1200 มม. เกิดการวิบัติแบบการหักของวัสดุ FRP การวัดความเครียดนั้นจะทำการวัดจากระยะ 100 มม. ห่างจากจุดปลายของแผ่น FRP เพื่อให้ผลการทดสอบนั้นสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่าระยะประสิทธิผลเท่ากับ 100 มม.

2.3.2 ความหนาของวัสดุเชื่อมประสาน

Xia และ Teng (2005) ได้ทำการทดสอบแผ่นเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่น FRP ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อทำความเข้าใจการวิบัติแบบการหลุดล่อนในแผ่นเหล็กเสริมกำลังด้วยวัสดุ FRP โดยทำการทดสอบวิธีการทดสอบแรงเฉือนแบบรอยต่อทาบเดี่ยว ซึ่งง่ายต่อการสังเกตการวิบัติเนื่องจากเส้นทางการวิบัติมีเพียงเส้นทางเดียวที่เป็นไปได้ โดยทำการทดสอบแบบแรงกระทำที่ปลายกับแผ่น FRP และเหล็กถูกค้ำที่ตำแหน่งปลายเหล็กด้านที่อยู่ใกล้แรงที่กระทำ ดังรูปที่ 6 การทดสอบใช้วัสดุเชื่อมประสานทั้งหมด 3 ชนิดและใช้ความหนาของวัสดุเชื่อมประสานที่แตกต่างกัน ในการทดสอบทดสอบจะทำการเพ่งแรงจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติซึ่งผลการทดสอบเป็นไปดังตารางที่ 2 โดยที่ตัวอักษรตัวแรกบ่งบอกถึงชนิดของวัสดุเชื่อมประสาน ต่อมาเป็นตัวเลขที่บ่งบอกถึงความหนาของชั้นเชื่อมประสาน (มม.) และตัวอักษรสุดท้ายแสดงถึงการแบ่งตัวอย่างที่ใช้วัสดุชนิดเดียวกันออกจากกัน



รูปที่ 6 ตัวอย่างทดสอบแรงเฉือนแบบรอยต่อทาบเดี่ยวและการติดตั้ง (Xia และ Teng 2005)

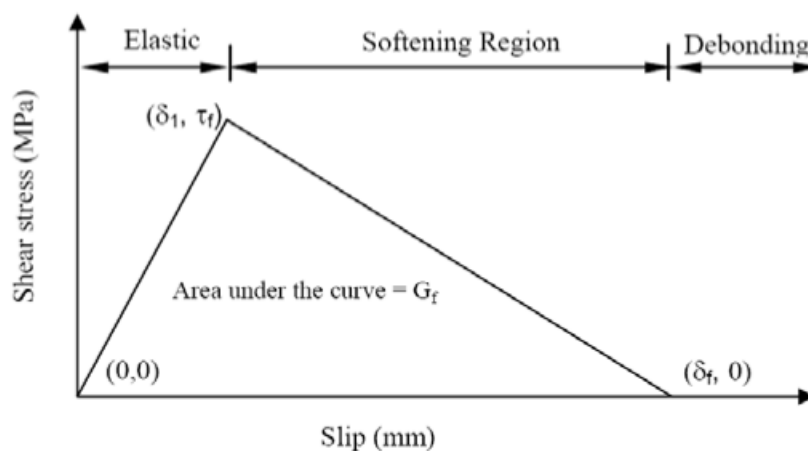


2971436726

โดยผลการทดสอบพบว่า ความหนาของชั้นวัสดุเชื่อมประสานมีผลต่อรูปแบบการวิบัติ เมื่อใช้ความหนาน้อยกว่า 2 มม. นั้นเกิดการวิบัติระหว่างผิวเหล็กและวัสดุ FRP ซึ่งเป็นการวิบัติแบบเหนียว แต่ถ้าชั้นประสานมีความหนามากกว่า 2 มม. นั้นการวิบัติจะเกิดจากการหลุดล่อนของวัสดุ FRP ซึ่งเป็นการวิบัติแบบเปราะและควรหลีกเลี่ยงให้เกิดในการปฏิบัติจริงอีกทั้งยังมีผลต่อกำลังยึดเหนี่ยวซึ่งเมื่อความหนาของชั้นยึดประสานสูงขึ้นมีผลทำให้กำลังยึดเหนี่ยวลดลง แสดงดังตารางที่ 2 พฤติกรรมในช่วงต้นของวัสดุเชื่อมประสานทั้งหมดนั้นเป็นแบบเชิงเส้นและจะกลายเป็นแบบไม่เชิงเส้นก่อนที่ตัวอย่างเกิดการวิบัติแบบหัก (rupture) อย่างไรก็ตามแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลเชิงเส้นสองช่วง (bi-linear bond slip รูปแบบ) สามารถประมาณค่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถล (bond slip) ได้ใกล้เคียงกับการทดลอง ในการสร้างแบบจำลองเชิงเส้นสองช่วงมี 3 ค่าหลักที่ต้องหา คือ จุดเริ่มต้น (0,0) จุดที่หน่วยแรงเฉือนสูงสุด (δ_1, τ_f) และจุดวิกฤติ ($\delta_f, 0$) พื้นที่ใต้กราฟของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลคือ พลังงานต้านทานการแตกหักพื้นผิวสัมผัส (interfacial fracture energy G_f) ดังที่แสดงในรูปที่ 7

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบเมื่อใช้ความหนาของชั้นเชื่อมประสานเป็นตัวแปรในการทดลอง (Xia และ Teng 2005)

| Test specimen | Intended/measured adhesive thickness (mm) | Test failure load (kN) | Debonding failure mode | Predictions of the proposed theoretical model | | |
|--------------------|---|------------------------|------------------------|---|----------------|----------------|
| | | | | L_e (mm) | P_{ult} (kN) | $P_{ult}/Test$ |
| A-1 | 1/1.07 | 60.5 | Adhesive | 95.55 | 54.82 | 0.906 |
| A-2a | 2/1.98 | 61.7 | Adhesive | 103.83 | 59.57 | 0.965 |
| A-2b | 2/1.84 | 55.6 | Delamination* | 102.81 | 58.98 | 1.060 |
| A-4 | 4/3.88 | 50.7 | Delamination | ----- | ----- | ----- |
| A-6 | 6/6.12 | 53.2 | Delamination | ----- | ----- | ----- |
| B-1 | 1/0.825 | 39.4 | Adhesive | 73.48 | 38.32 | 0.972 |
| B-2a | 2/1.90 | 42.4 | Adhesive | 82.24 | 42.89 | 1.011 |
| B-2b | 2/1.76 | 38.8 | Adhesive | 81.40 | 42.45 | 1.040 |
| B-4 | 4/3.98 | 47.5 | Adhesive/delamination | 90.88 | 47.39 | 0.997 |
| B-6 | 6/6.05 | 55.9 | Delamination | ----- | ----- | ----- |
| C-1 | 1/0.875 | 38.0 | Adhesive/delamination | 119.85 | 42.39 | 1.115 |
| C-2a | 2/1.58 | 46.8 | Adhesive/delamination | 129.80 | 45.91 | 0.981 |
| C-2b | 2/1.82 | 46.4 | Adhesive/delamination | 132.31 | 46.79 | 1.008 |
| Mean | | | | | | 1.006 |
| Standard Deviation | | | | | | 0.057 |



รูปที่ 7 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลเชิงเส้นสองช่วง (Xia และ Teng 2005)

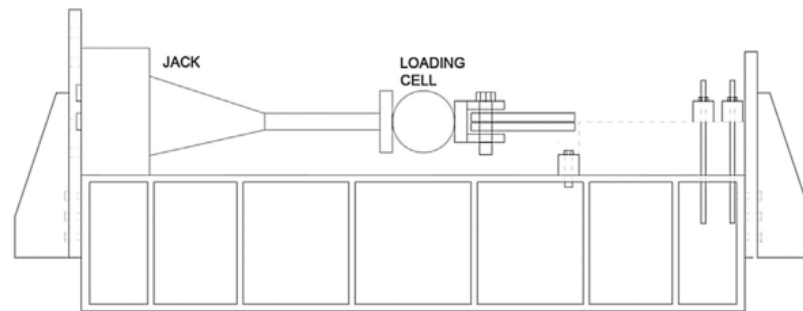
ตำแหน่งจุดสูงสุดและจุดวิกฤตินั้นจะได้มาจากผลการทดลอง เมื่อวัสดุเชื่อมประสานมีมอดุลัสยืดหยุ่นสูง กราฟของแรงและการเคลื่อนที่ (load-displacement curve) จะมีความชันที่สูงในช่วงแรกและในทางกลับกันความชันจะน้อยเมื่อวัสดุเชื่อมประสานมีมอดุลัสยืดหยุ่นที่ต่ำ

2.3.3 ความยาวรอยร้าวเริ่มต้น

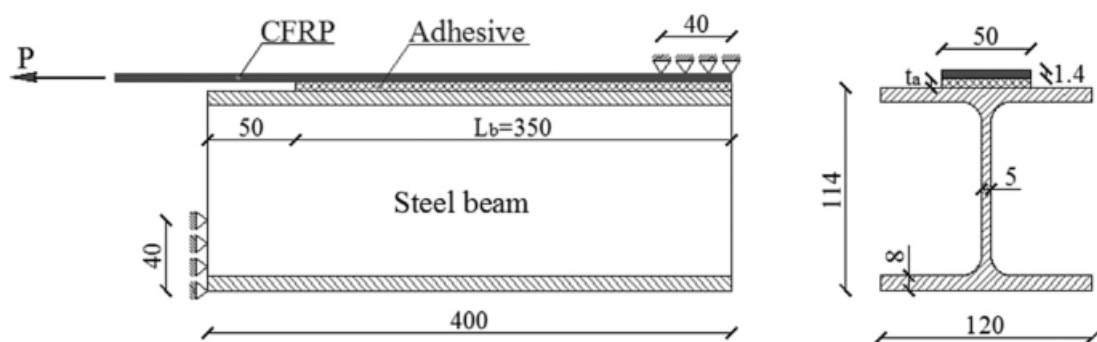
Ceroni และคณะ (2016) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมของการยึดเหนี่ยวของเหล็กกับวัสดุ FRP และคอนกรีตกับวัสดุ FRP โดยใช้การทดสอบ ดังรูปที่ 8 โดยที่ตัวอย่างการทดสอบที่ใช้เหล็กและวัสดุ FRP นั้นเว้นช่องว่างไว้ 50 มม. ดังรูปที่ 9 เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดหน่วยแรงที่หนาแน่นในพื้นที่ซึ่งคล้ายกับรอยร้าวที่มักจะเกิดที่กึ่งกลางคานทำให้เกิดหน่วยแรงที่หนาแน่นและยังทำให้การยึดประสานในพื้นที่นั้นเกิดความเสียหายอีกทั้งยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรนี้ไม่มาก ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงใช้ตัวแปรความยาวของระยะของช่องว่างเพื่อศึกษาเนื่องจากเล็งเห็นว่าตัวแปรนี้อาจจะมีผลต่อกำลังการยึดประสานระหว่างเหล็กและวัสดุ FRP



2971436726



รูปที่ 8 การติดตั้งการทดสอบแรงเฉือน (Ceroni และคณะ 2016)

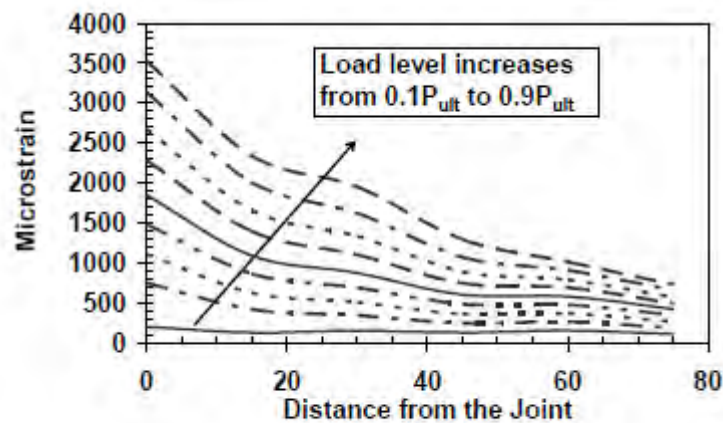


รูปที่ 9 การติดตั้งตัวอย่างการทดสอบการยึดประสานของเหล็กกับวัสดุ FRP (Ceroni และคณะ 2016)

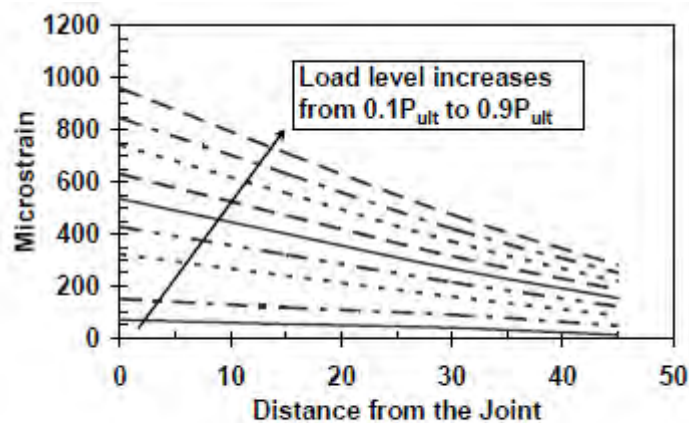
2.3.4 อัตราส่วนสติฟเนสระหว่างแผ่น FRP กับเหล็ก (EA)_{FRP} / (EA)_{steel}

Fawzia และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นเหล็กและแผ่น FRP โดยใช้การทดสอบแรงเฉือนแบบรอยต่อทาบคู่ ใช้แผ่น FRP ที่มีมอดุลัสยืดหยุ่นแบบปกติ (240 GPa) และแบบมอดุลัสยืดหยุ่นสูง (640 GPa) มาตรฐานความเครียดถูกติดตั้งไว้เพื่อวัดการกระจายของความเครียดตามความยาวของแผ่น FRP จากการทดสอบพบว่า การวิบัติของตัวอย่างการทดสอบที่ใช้แผ่น FRP มอดุลัสยืดหยุ่นปกติเป็นการวิบัติที่รอยต่อที่ซึ่งตัวอย่างที่ใช้วัสดุ FRP มอดุลัสยืดหยุ่นสูงนั้นเกิดการวิบัติจากการพังของเส้นใยสังเคราะห์ การกระจายของความเครียดตามความยาวของแผ่น FRP สามารถหาได้จากหน้าปัดของมาตรวัดความเครียด ซึ่งการอ่านค่าเฉลี่ยของอุปกรณ์นั้นสามารถสร้างเป็นกราฟได้ ดังรูปที่ 10 โดยที่ระดับการให้ระดับของแรง (load level) ถูกกำหนดให้เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงที่กระทำต่อแรงสูงสุด (maximum load, P_{ult}) ที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งเห็นได้ชัดว่าความเครียดจะลดลงเมื่อระยะนั้นออกห่างจากรอยต่อระหว่างเหล็กและวัสดุ

FRP การกระจายตัวของตัวอย่างที่ใช้วัสดุ FRP โมดูลัสยืดหยุ่นปกติดูเหมือนว่าจะเป็นแบบไม่เชิงเส้น ที่ซึ่งวัสดุโมดูลัสยืดหยุ่นสูงนั้นกราฟดูเหมือนว่าจะเป็นเส้นตรง และดังที่คาดหวังไว้ความเครียดของวัสดุโมดูลัสยืดหยุ่นสูงนั้นมีความเครียดที่น้อยกว่าเล็กน้อย สำหรับแรงวิกฤตินั้นสามารถดูได้จากตารางที่ 3 โดยที่ตัวอักษรแรก S มีความหมายคือ ตัวอย่างการทดสอบ (specimen) ตัวอักษรที่สอง N บ่งบอกถึงโมดูลัสยืดหยุ่นปกติ (normal modulus) และ H คือ โมดูลัสยืดหยุ่นสูง (high modulus) และตัวเลขด้านหลังบ่งบอกถึงระยะการยึดเหนี่ยวซึ่งพบว่าเมื่อความยาวของการยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้นและเมื่อเพิ่มโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ FRP กำลังการยึดเหนี่ยวจะเพิ่มมากขึ้น โดยพบว่าเมื่อระยะการยึดเหนี่ยวเท่ากันกำลังการยึดเหนี่ยววิกฤติของตัวอย่างที่ใช้วัสดุ FRP ที่มีโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกว่าจะสามารถรับกำลังได้มากกว่าตัวอย่างที่ใช้วัสดุ FRP ที่มีโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่า



(a) normal modulus CFRP



(b) high modulus CFRP

รูปที่ 10 การกระจายของหน่วยแรง (Fewzia และคณะ 2005)

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบของ Fewzia และคณะ (2005)

| Specimen Label | Bond Length L_f (mm) | Ultimate Load P_{ult} (kN) | Failure Mode |
|----------------|------------------------|------------------------------|--------------|
| SN20 | 20 | 33.7 | Bond Failure |
| SN40 | 40 | 49.9 | Bond Failure |
| SN50 | 50 | 69.8 | Bond Failure |
| SN70 | 70 | 80.8 | Bond Failure |
| SN80 | 80 | 81.3 | Bond Failure |
| SH20 | 20 | 42.8 | Fibre Break |
| SH40 | 40 | 53.1 | Fibre Break |
| SH60 | 60 | 52.2 | Fibre Break |

2.3.5 การเตรียมผิวเหล็ก

การเตรียมผิวของเหล็กเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อปรับปรุงรูปแบบของการยึดเหนี่ยวเคมีระหว่างผิวเหล็กและวัสดุเชื่อมประสาน การเตรียมผิวนั้นจะเน้นการทำความสะอาดเป็นส่วนใหญ่ โดยจะทำความสะอาดเพื่อกำจัดกำจัดชั้นอ่อน (weak layer) และทำความสะอาดอีกครั้งเพื่อให้มั่นใจว่าผิวของเหล็กนั้นสะอาดเพียงพอแล้ว (Mays และ Hutchinson 1992) ดังนั้น ความสำคัญของขั้นตอนแรกคือการกำจัดฝุ่นผงที่ผิวคราบไขมันและสารปนเปื้อนต่างๆ ซึ่งสามารถทำได้โดยชะล้างผิวเหล็กด้วยชนิดของตัวทำละลายและใช้ปริมาณตัวทำละลายที่พอเหมาะเพื่อป้องกันการปนเปื้อนอีกครั้งหลังจากตัวทำละลายระเหยไปนอกจากนี้สารละลายที่ใช้ทำความสะอาดนั้นไม่ควรนำมาใช้อีกครั้งเช่นกัน (Cadai และคณะ 2004)

ชั้นอ่อนแอบนผิวของเหล็กเนื่องจากการสีหรือสารกัดกร่อนบางชนิดซึ่งเป็นชั้นบางๆนั้นควรที่จะต้องกำจัดออกไปเพื่อเปิดเผยคุณสมบัติที่ผิวของวัสดุ และป้องกันการวิบัติของการยึดเหนี่ยวการยึดเหนี่ยวที่จะเกิดก่อนกำหนด จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง วิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดชั้นอ่อนแอและเพื่อให้กำลังยึดเหนี่ยวสามารถใช้ได้อย่างสูงสุดของกำลังนั้นสามารถทำได้โดยการทำความสะอาดด้วยวิธีการพ่นทรายทรายโดยที่จะสร้างผิวที่ไวต่อปฏิกิริยาเคมีบนผิวเหล็ก (chemically active steel surface) ซึ่งเสริมกำลังให้การยึดเหนี่ยวเคมีและการยึดเหนี่ยวทางกลระหว่างผิวเหล็กและวัสดุเชื่อมประสาน (Sykes, 1982 ; Holloway and Cadai, 2002) แต่พ่นทรายทรายนั้นยังทำให้เกิดรอยขีดข่วนซึ่งจะทำให้สารตกค้างนั้นค้างอยู่ในรอยขีดข่วนนั้นๆ (Cadei และคณะ 2004) Scnerch (2005) ได้ค้นพบว่าส่วนประกอบและขนาดของอนุภาคต้องเข้ากันได้กับวัสดุเชื่อมประสานที่ใช้ในการ

เสริมกำลัง เนื่องจากแต่ละอนุภาคของกรวดทรายนั้นเหมาะสมกับแต่ละผิวแต่ละชนิดซึ่งทำให้ได้การยึดเหนี่ยวที่ดีที่สุด

และในขั้นตอนสุดท้ายก่อนจะนำเหล็กมาใช้งานนั้นคือ การทำความสะอาดอีกครั้งเพื่อกำจัดเศษผงจากการขัดผิวที่อาจจะตกค้างอยู่บนผิวของเหล็ก Holloway และ Cadei (2002) ได้ยืนยันว่าเศษผงเหล่านี้ควรที่จะถูกกำจัดโดยใช้ปัดฝุ่นแบบแห้ง (dry wipe) หรือหัวเป่าสุญญากาศ (vacuum head with brushes) การล้างด้วยตัวทำละลายนั้นควรที่จะต้องหลีกเลี่ยงเนื่องจากจะกำจัดฝุ่นผงได้บางส่วนแล้วยังทำให้ฝุ่นที่ผิวเหล็กจัดเรียงตัวใหม่อีกด้วย

อย่างไรก็ตามมีการศึกษาที่หลากหลายได้แสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวทำละลายทำความสะอาดหลังจากการพ่นทรายไม่ได้ทำให้ประสิทธิภาพของการยึดเหนี่ยวที่ลดลงตัวทำละลายที่ใช้ควรที่จะต้องใช้อย่างมากพอเพื่อกำจัดฝุ่นผงบนผิวเหล็กโดยปราศจากการปนเปื้อนอีกครั้งหลังตัวทำละลายระเหยออกไป

หลังจากการเตรียมผิวของเหล็กโดยวิธีพ่นทรายและทำความสะอาดอีกครั้ง ควรติดตั้งวัสดุเชื่อมประสานภายในเวลาที่สั้นที่สุดเพื่อลดความเป็นไปได้ที่ผิวเหล็กจะมีการปนเปื้อนอีกครั้งหรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนผิวเหล็ก (Allen และคณะ 1988) และหลังจากการเตรียมผิวเสร็จสิ้นแล้วใช้เวลานานในการติดตั้งจะทำให้เกิดการวิบัติระหว่างผิวเหล็กกับวัสดุเชื่อมประสาน (Matta และคณะ 2004)

2.4 สรุปการทบทวนงานวิจัย

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการศึกษากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและแผ่น FRP มีอยู่ 2 ประเภทคือ การทดสอบเสริมกำลังรับแรงดัดโดยใช้แผ่น FRP ติดตั้งที่ได้ปีกล่างของคานเหล็กซึ่งเหมาะสมต่อการศึกษากการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและ FRP ของคานและศึกษากการวิบัติของการเสริมกำลังคานประเภทต่างๆ และการทดสอบแรงเฉือนซึ่งมีการติดตั้งทั้งหมด 4 ประเภทได้แก่ แรงกระทำต่อแผ่นเหล็กและแผ่น FRP ทางอ้อม, แรงกระทำต่อแผ่นเหล็กโดยตรงและปราศจากช่องว่างระหว่างเหล็ก, แรงกระทำต่อแผ่นเหล็กโดยตรงและมีช่องว่างระหว่างเหล็ก และแรงกระทำที่ปลายแผ่น FRP โดยจากการศึกษาพบว่าการทดสอบแรงเฉือนแบบแรงกระทำที่ปลายแผ่น FRP ประเภทรอยต่อทาบเดี่ยวเหมาะสำหรับการศึกษากการวิบัติระหว่างชั้นยึดประสานเนื่องจากมีเส้นทางการวิบัติเพียงเส้นทางเดียว และการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถล อีกทั้ง



2971436726

CD :Thesis 5870186721 thesis / rev: 02082562 17:24:40 / seq: 13

พบว่า ความยาวการยึดเหนี่ยว, ความหนาของชั้นวัสดุเชื่อมประสาน, อัตราส่วนสติฟเนสระหว่างเหล็กและแผ่น FRP , การเตรียมผิว และรอยร้าวเริ่มต้นมีผลต่อกำลังยึดเหนี่ยวและความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลอีกด้วย



2971436726

CU Theslis 5870186721 thesis / recv: 02082562 17:24:40 / seq: 13

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถล

ความแม่นยำของแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลสำหรับแผ่นเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่น FRP เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องเข้าใจเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างเหล็กเสริมกำลังด้วยวัสดุ FRP แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลนั้นเป็นความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนที่ผิวและการไถล (slip) ระหว่างแผ่นเหล็กและแผ่น FRP โดย ผลการทดลองของการทดสอบแรงเฉือนซึ่งใช้วิธีการทดสอบแรงเฉือนแบบรอยต่อทาบเดี่ยว ดังรูปที่ 11 สามารถคำนวณหน่วยแรงเฉือนและการไถลได้จากสมการที่ 3.1 และ 3.2 (Mohammadi และ Wan, 2015) ตามลำดับ ในการศึกษาพฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลของรอยต่อระหว่างคอนกรีตและวัสดุ FRP อาจเป็นการทดสอบที่เหมาะสมที่สุด (Yao และคณะ, 2005)

$$\tau_i = \frac{t_f \cdot E_f}{\Delta x} (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}) \quad (3.1)$$

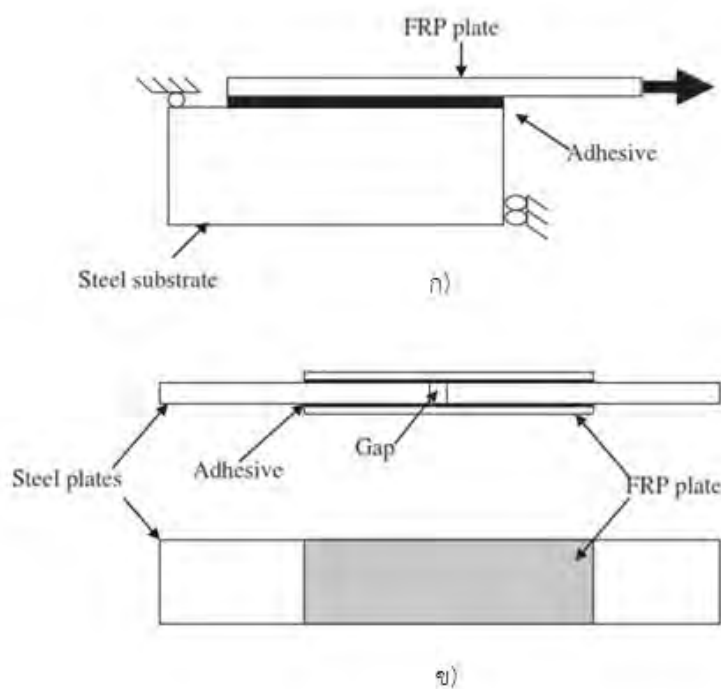
$$\delta_i = \frac{\Delta x}{2} (\varepsilon_0 + 2 \sum_{j=1}^{i-1} \varepsilon_j + \varepsilon_i) \quad (3.2)$$

โดยที่ τ_i = หน่วยแรงเฉือนที่ผิวของชั้นประสาน ณ ตำแหน่งใดๆ

ε_i = ความเครียด ณ ตำแหน่งใดๆ

E_f = มอดุลัสยืดหยุ่นของแผ่น FRP

t_f = ความหนาของแผ่น FRP

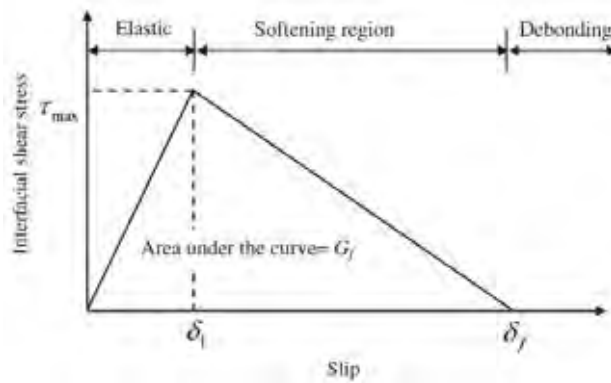


รูปที่ 11 วิธีการทดสอบแรงเฉือน ก) แบบรอยต่อทาเบเดี่ยว ข) แบบรอยต่อทาเบคู่
(Teng และคณะ 2012)

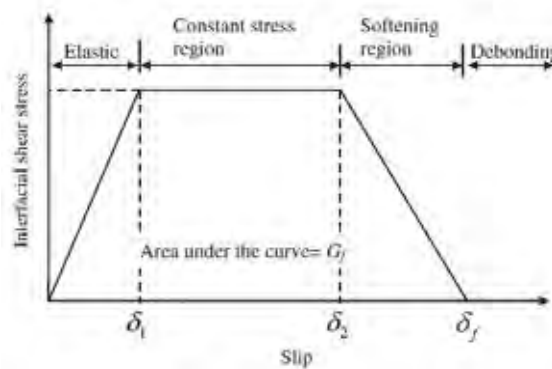
สำหรับรอยต่อระหว่างคอนกรีตและวัสดุ FRP นั้น Lu และคณะ (2005) ได้ทำการเสนอแบบจำลองเชิงเส้นสองช่วงว่าเป็นแบบจำลองอย่างง่ายที่สุดในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลสามารถให้ความแม่นยำที่สูงสำหรับการใช้งานจริง ดังรูปที่ 12 ตัวแปรที่สำคัญสำหรับแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลเชิงเส้นสองช่วง (bilinear bond-slip) คือ หน่วยแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในชั้นเชื่อมประสาน (τ_{max}) และการไถลที่สอดคล้องกับหน่วยแรงเฉือน (δ_1) การไถลสูงสุด (δ_f) เมื่อแรงเฉือนสูงสุดเริ่มเข้าใกล้ค่าศูนย์ และพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส (G_f) ซึ่งมีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถล โดยตัวแปรนี้จะสัมพันธ์กับกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต

แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลสำหรับพฤติกรรมวัสดุเชื่อมประสานแบบเชิงเส้นนั้นมักจะเกิดขึ้นกับรอยต่อระหว่างคอนกรีตและวัสดุ FRP เนื่องจากความเปราะของคอนกรีต อย่างไรก็ตามแบบจำลองดังกล่าวนี้ อาจจะไม่เหมาะสมสำหรับรอยต่อระหว่างเหล็กและวัสดุ FRP ที่ซึ่งรอยต่อเป็นน้ำยาเชื่อมประสานและอาจมีพฤติกรรมแบบเหนียวหรือเปราะ

จากการทดสอบของ Teng และคณะ (2012) พบว่ารูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลของผิวระหว่างวัสดุ FRP และเหล็กอาจจะเป็นแบบเหนียวหรือเปราะนั้น ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสาน และจากการทดสอบวิธีการทดสอบแรงเฉือนแบบรอยต่อทาบเดี่ยวของ Fernando (2010) โดยใช้วัสดุเชื่อมประสานที่แตกต่างกัน 4 ชนิด ผลการทดสอบพบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลสำหรับพฤติกรรมวัสดุเชื่อมประสานแบบเชิงเส้นเหมาะสมกับรอยต่อที่ใช้วัสดุเชื่อมประสานแบบเชิงเส้นและเปราะและไม่เหมาะสมกับรอยต่อที่มีความเหนียวมากและมีพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นซึ่งมีความสามารถในการเปลี่ยนรูปสูง (มากถึง 2.9%)



ก)



ข)

รูปที่ 12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลสำหรับพฤติกรรมวัสดุเชื่อมประสานแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น ก) พฤติกรรมแบบเชิงเส้น ข) พฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น (Teng และคณะ 2012)

3.2 กำลังการยึดประสาน

การวิบัติของแผ่นเหล็กหรือคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่น FRP ที่ควรจะต้องพิจารณาคือ การวิบัติแบบการหลุดล่อน ซึ่งการวิบัติจะเกิดขึ้นเนื่องจากแรงที่เกิดขึ้นในชั้นการยึดประสานระหว่างแผ่น FRP กับแผ่นเหล็กมากกว่าแรงที่สูงที่การยึดเหนี่ยวสามารถรับได้และไม่ทำให้รอยต่อระหว่างเหล็กและวัสดุ FRP เกิดการวิบัติ

ในปัจจุบันการประยุกต์ใช้งานของวัสดุ FRP ในชิ้นส่วนของเหล็กจะใช้วิธีเดียวกับประยุกต์ใช้ในชิ้นส่วนคอนกรีตซึ่งก็คือ การใช้ชั้นวัสดุเชื่อมประสานในการติดแผ่น FRP กับวัสดุที่ต้องการจะเสริมกำลัง อย่างไรก็ตามการพัฒนาสูตรการคำนวณหน่วยแรงในชั้นวัสดุเชื่อมประสานด้วยวัสดุเชื่อมประสานแบบยืดหยุ่น (elastic adherands) เป็นที่นิยมใช้ในการวิจัยตั้งแต่ปี 1930 และในช่วงปี 1980 ได้เริ่มมีการทำการวิจัยพัฒนาแบบจำลองทั่วไปสำหรับการวิเคราะห์หน่วยแรงก่อนที่จะมีการนำวัสดุ FRP มาเสริมกำลังให้วัสดุอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

ในปัจจุบันนั้นมิงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองกำลังยึดเหนี่ยว (bond strength รูปแบบ) สำหรับการคำนวณหาการรับแรงสูงสุดของการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นเหล็กกับแผ่น FRP โดยเฉพาะอย่างยิ่ง และการวิเคราะห์นั้นจะใช้หลักการของกลศาสตร์การแตกหัก (fracture mechanics approach) เพื่อคาดการณ์แรงดึงสูงสุดในแผ่นเสริมกำลัง FRP

Hart-Smith (1973) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการยึดเหนี่ยววัสดุเชื่อมประสานที่ติดกับวัสดุโลหะ ซึ่งทำการตรวจสอบอิทธิพลของคุณสมบัติทางกลของวัสดุเชื่อมประสานจากความสามารถในการรับแรงของการยึดเหนี่ยวของตัวอย่างแบบรอยต่อทาบคู่จากการทดลองพบว่า หน่วยแรงการลอกมีผลอย่างมากกับความหนาของแผ่น FRP และยังทำให้เกิดการวิบัติของวัสดุเชื่อมประสานที่ถูกกระทำโดยแรงเฉือนก่อนที่แผ่นจะเกิดการคราก ในทางตรงกันข้ามแผ่น FRP ที่บางมาก ๆ นั้น กำลังของการยึดเหนี่ยวจะเพิ่มขึ้นและการวิบัติเกิดขึ้นจากภายนอกของรอยต่อ นอกจากนี้รูปทรงของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชื่อมประสานนั้นถูกพบว่ามีอิทธิพลกับกำลังการยึดเหนี่ยว แต่ส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวของหน่วยแรงที่ผิว อีกทั้งผลของการทดสอบนั้นสามารถนำไปสร้างสมการหาแรงประลัย (P_{max}) ของรอยต่อเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$P_{max} = b_f \cdot \min\{P_i, P_o\} \quad (3.3)$$

$$P_i = \sqrt{2 \cdot \tau_{max} \cdot t_a \cdot \left(\frac{1}{2} \gamma_e \cdot \gamma_p\right) \cdot 2 \cdot E_s \cdot t_s \cdot \left(1 + \frac{E_s \cdot t_s}{2 \cdot E_f \cdot t_f}\right)} \quad (3.4)$$

ถ้า $E_s \cdot t_s < 2E_f \cdot t_f$

$$P_o = \sqrt{2 \cdot \tau_{max} \cdot t_a \cdot \left(\frac{1}{2} \gamma_e \cdot \gamma_p\right) \cdot 4 \cdot E_s \cdot t_s \cdot \left(1 + \frac{E_f \cdot t_f}{2 \cdot E_s \cdot t_s}\right)} \quad (3.5)$$

ถ้า $E_s \cdot t_s \geq 2E_f \cdot t_f$

- โดยที่
- P_{max} = กำลังประลัยของการยึดเหนี่ยว
 - b_f = ความกว้างของแผ่น FRP
 - P_i, P_o = กำลังยึดเหนี่ยวต่อหน่วยความกว้างของวัสดุประสาน
 - τ_{max} = แรงเฉือนสูงสุด
 - t_a = ความหนาของวัสดุเชื่อมประสาน
 - γ_e = ความเครียดเฉือนของวัสดุเชื่อมประสานแบบยึดหย่อน
 - γ_p = ความเครียดเฉือนของวัสดุเชื่อมประสานแบบพลาสติก
 - E_s = โมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นเหล็ก
 - t_s = ความหนาของแผ่นเหล็ก
 - b_s = ความกว้างของแผ่น FRP
 - G_a = โมดูลัสยืดหยุ่นแรงเฉือนของวัสดุเชื่อมประสาน

$$\text{และ } \gamma_e = \frac{\tau_{max}}{G_a}$$

โดยที่ $\gamma_p = 3\gamma_e$ สำหรับแผ่น FRP ทั่วไป

$\gamma_p = 5\gamma_e$ สำหรับแผ่น FRP ที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูง



2971436726

ในสมการที่ 3.2 นั้นสามารถใช้ได้ก็ต่อเมื่อระยะยึดเหนี่ยวมากกว่าระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพ (effective bond length, L_e) ซึ่งเป็นความยาวที่รอยต่อมีการพัฒนากำลังของการยึดเหนี่ยวได้สูงสุด และมีสมการการคำนวณดังต่อไปนี้

$$L_e = \frac{P_{max}}{2 \cdot \tau_{max} \cdot b_f} + \frac{2}{\lambda} \quad \lambda = \sqrt{\frac{G_a}{t_a} \cdot \left(\frac{1}{E_f \cdot t_f} + \frac{2}{E_s \cdot t_s} \right)} \quad (3.6)$$

ในปี 2005 Xia และ Teng ได้ทำการสร้างสูตรที่ใช้พื้นฐานของกลศาสตร์การแตกหัก (fracture mechanic) เพื่อใช้ในการประเมินกำลังการยึดเหนี่ยวของรอยต่อระหว่างคอนกรีตและแผ่น FRP อีกทั้งใช้กฎความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลเชิงเส้นสองช่วง (bi-linear bond-slip law) ในการประเมินกำลังอีกด้วย และการคาดการณ์กำลังของการยึดเหนี่ยว P_{max} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6 ดังต่อไปนี้

$$P_{max} = b_f \cdot \sqrt{2 \cdot G_f \cdot E_f \cdot t_f} \quad (3.7)$$

โดยที่ G_f คือ พลังงานต้านทานการแตกหักผิวสัมผัส (interfacial fracture energy) โดยที่สามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลหรือคำนวณจากสมการที่ 8 และหน่วยแรงเฉือนสูงสุดของการยึดเหนี่ยว τ_{max} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 9 ดังต่อไปนี้

$$G_f = \frac{62}{2} \cdot \left[\frac{f_{t,a}}{G_a} \right]^{0.56} \cdot t_a^{0.27} \quad (3.8)$$

โดยที่ $f_{t,a}$ = กำลังรับแรงดึงของการยึดเหนี่ยว

$$\tau_{max} = 0.8 \cdot f_{t,a} \quad (3.9)$$

โดยในท้ายสุดแล้วสมการในการหาความยาวประสิทธิผลของการยึดประสานที่ได้เป็นดังสมการ
ที่ 10

$$L_e = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{\tau_{max}/E_f \cdot t_p \cdot \delta_u}} \quad (3.10)$$

โดยที่ δ_u คือ การไถลวิกฤติ (ultimate slip) ของกราฟกฎความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง
เฉือนและการไถลเชิงเส้นสองช่วงซึ่งสามารถได้จากการทดสอบ และ t_p คือ ความหนาของวัสดุ FRP

ในปี 2007 Bocciarelli และคณะได้ทำการทดสอบแรงเฉือนแบบรอยต่อทาบคู่ โดยได้สร้าง
แบบจำลองการประมาณกำลังยึดเหนี่ยวของรอยต่อและพลังงานการแตกหัก ซึ่งเป็นดังสมการที่ 3.13

$$P_{max} = N \cdot \sqrt{\frac{\beta+1}{\beta}} \cdot b_f \cdot \sqrt{2 \cdot G_f \cdot E_f \cdot t_f} \quad (3.11)$$

$$G_f = \tau_{max}^2 \frac{t_a \cdot e}{G_a} \quad (3.12)$$

$$\beta = \frac{E_s \cdot t_s \cdot b_s}{N \cdot E_f \cdot t_f \cdot b_f} \quad (3.13)$$

โดยที่ N = จำนวนชั้นของวัสดุที่ใช้ในการเสริมกำลัง ($N = 2$ สำหรับการทดสอบทาบคู่ใช้
ตัวอย่างแบบรอยต่อทาบคู่)

e = ตัวเลขของออยเลอร์ (Euler's number)

τ_{max} = แรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในชั้นวัสดุเชื่อมประสาน สามารถคำนวณได้จากมาตราที่ 9

β = อัตราส่วนสติฟเนส (stiffness ratio) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 15



2971436726

สำหรับความยาวประสิทธิผลนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.15 ดังต่อไปนี้

$$L_e = 2.77 \sqrt{\frac{\beta}{\beta+1}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot G_f \cdot E_f \cdot t_f}{\tau_{max}}} \quad (3.14)$$

ต่อมาในปี 2010 Fernando พัฒนาจากงานวิจัยของ Xia และ Teng (2005) เพื่อสร้างแบบจำลองการประเมินกำลังการยึดเหนี่ยว โดยได้ทำการทดสอบแผ่นเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่น FRP และใช้วัสดุเชื่อมประสานชนิดที่แตกต่างกัน 3 ชนิดซึ่งวัสดุเชื่อมประสานทั้งหมดมีพฤติกรรมเป็นแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งได้สมการการประเมินกำลังการยึดเหนี่ยวและความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานการแตกหักเป็นไปดังสมการที่ 3.8 และการประมาณความยาวของระยะประสิทธิผลเป็นไปดังสมการที่ 3.10

$$P_{max} = \frac{\tau_{max} \cdot b_p}{\sqrt{\frac{\tau_{max}^2}{2G_f} \cdot \left(\frac{1}{E_f \cdot t_f} + \frac{b_f}{E_s \cdot t_s \cdot b_s} \right)}} \quad (3.15)$$

$$G_f = 628 \cdot \sqrt{t_a} \cdot R^2 \quad (3.16)$$

โดยที่ t_a = ความหนาของชั้นวัสดุเชื่อมประสาน

R = พื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียด

τ_{max} = หน่วยแรงแรงเฉือนสูงสุด ($\tau_{max} = 0.9 \cdot f_{t,a}$)

สำหรับค่าสติฟเนสแนวแกนของเหล็ก ($E_s \cdot t_s$) มีค่ามากกว่าสติฟเนสของแผ่น FRP ($E_f \cdot t_f$)

$\frac{b_f}{E_s \cdot t_s \cdot b_s}$ สามารถประมาณค่าให้เท่ากับศูนย์ได้

$$L_e = a_d + b_e + \frac{1}{\lambda_1} \cdot \ln \left(\frac{1+C}{1-C} \right) \quad (3.17)$$

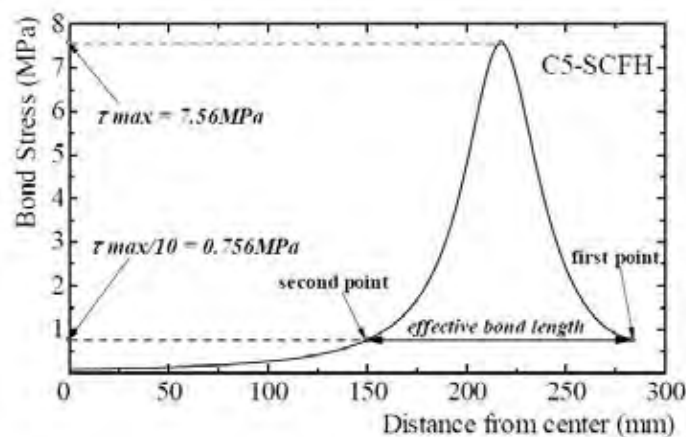
3.3 ระยะเวลายึดเหนี่ยวประสิทธิผลและพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส

ระยะเวลายึดเหนี่ยวประสิทธิผลคือ ความยาวของวัสดุเสริมกำลังที่สั้นที่สุดและทำให้วัสดุประกอบสามารถรับแรงได้มากที่สุด ซึ่งการเสริมกำลังโดยใช้ความยาวของวัสดุเสริมกำลังที่มากกว่าระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลจะไม่ทำให้วัสดุประกอบสามารถรับแรงเพิ่มขึ้นได้อีกต่อไป โดยจากการศึกษาการประมาณระยะเวลายึดเหนี่ยวประสิทธิผลพบว่าสามารถประมาณได้หลายวิธี

ระยะเวลายึดเหนี่ยวประสิทธิผลสามารถประมาณได้จากคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ตั้งสมการที่ (3.6) , (3.10) , (3.14) และ (3.17) โดยสมการเหล่านี้ได้มาจากการทดสอบต่างๆ ดังนั้นการเลือกใช้สมการเหล่านี้ควรศึกษาสมการที่ใช้อย่างถี่ถ้วนเพื่อให้เหมาะสมต่อการประมาณระยะเวลายึดเหนี่ยวประสิทธิผลนั้นๆ

ระยะเวลายึดเหนี่ยวประสิทธิผลสามารถประมาณได้จากการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวของตัวอย่าง โดยใช้ระยะเวลายึดเหนี่ยวเป็นตัวแปรในการทดสอบ เนื่องจากกำลังยึดเหนี่ยวของตัวอย่างจะไม่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลายึดเหนี่ยวมากกว่าหรือเท่ากับระยะเวลายึดเหนี่ยวประสิทธิผล

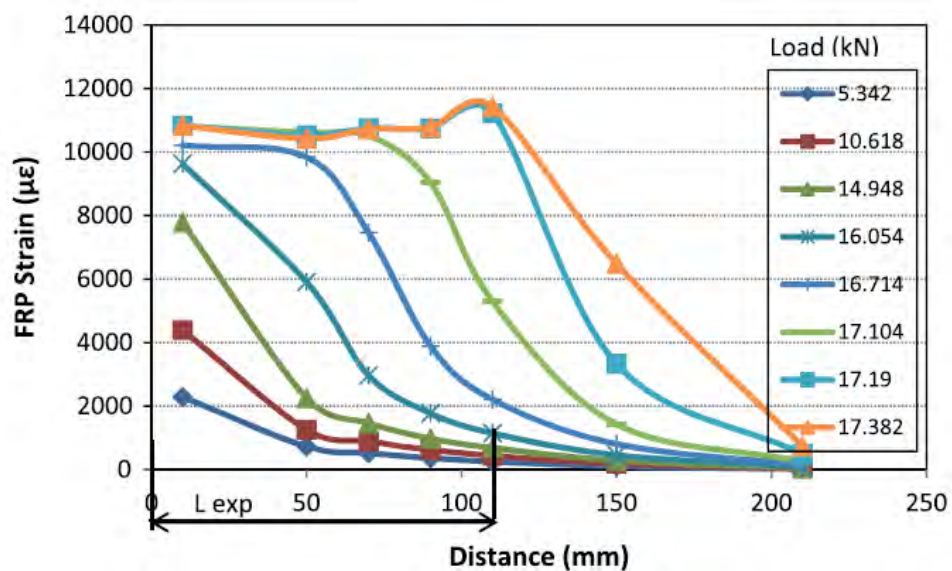
ระยะเวลายึดเหนี่ยวประสิทธิผลสามารถประมาณได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและตำแหน่งการติดตั้งมาตรวัดความเครียด จากการศึกษาวิจัยของ Nakaba และคณะ (2001) พบว่าสามารถประมาณระยะเวลายึดเหนี่ยวประสิทธิผลประมาณได้จากระยะห่างระหว่าง 2 ตำแหน่งซึ่งเป็นตำแหน่ง 10% ของหน่วยแรงเฉือนสูงสุดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและตำแหน่งการติดตั้งมาตรวัดความเครียดแสดง ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 การหาระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลจากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและตำแหน่งการติดตั้งมาตรวัดความเครียด (Nakaba และคณะ, 2001)

ระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลสามารถประมาณได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและตำแหน่งการติดตั้งมาตรวัดความเครียด จากการศึกษางานวิจัยของ Diab และคณะ (2014) พบว่าสามารถประมาณระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลประมาณได้จากระยะห่างระหว่างจุดเริ่มต้นมาตรวัดความเครียดถึงตำแหน่งการกระจายตัวของความเครียดซึ่งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ดังรูปที่ 14

ผลงานด้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสเป็นตัวแปรที่สามารถบ่งบอกถึงความสามารถในการรับแรงของชิ้นงานโดยสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถล



รูปที่ 14 การหาระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและตำแหน่งการติดตั้งมาตรวัดความเครียด (Diab และคณะ, 2014)

บทที่ 4

รายละเอียดการทดสอบ

การทดสอบแรงเฉือนมีหลายวิธี เช่นแบบรอยต่อทาบเดี่ยวและแบบรอยต่อทาบคู่ โดยวิธีการทดสอบแบบวิธีการทดสอบแรงเฉือนแบบรอยต่อทาบเดี่ยวมีประโยชน์สำหรับการศึกษาพฤติกรรมการยืดเหนียว (Zhao และ Zhang 2007) เนื่องจากทดสอบวิธีนี้จะมีเส้นทางการวิบัติเพียงเส้นทางเดียว แตกต่างจากการทดสอบโดยวิธีการทดสอบแรงเฉือนแบบรอยต่อทาบคู่ ซึ่งมีเส้นทางการวิบัติทั้งหมด 4 เส้นทาง ทำให้ยากต่อการทำนายทิศทางการเกิดการวิบัติ อีกทั้งลักษณะการเกิดหน่วยแรงในบริเวณวิกฤติ (critical region) ของการทดสอบแบบรอยต่อทาบเดี่ยวนั้นยังใกล้เคียงกับการเกิดในคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยอีกด้วย

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและเหล็กรูปพรรณ โดยทดสอบรอยต่อแบบทาบเดี่ยวจำนวน 17 ตัวอย่าง โดยตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย ความยาวของระยะยึดเหนียว (75, 150, 250 และ 400 มม.) ขนาดรอยร้าวที่ผิว (0, 25 และ 50 มม.) อัตราส่วนสติฟเนสของเหล็กต่อวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (5.33 และ 8.21) โดยพฤติกรรมที่ศึกษาประกอบด้วย ลักษณะการวิบัติ กำลังยึดเหนียวสูงสุด ระยะยึดเหนียวประสิทธิผล ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถล และพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส

4.1 คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการติดตั้งตัวอย่างทดสอบประกอบไปด้วย 3 ชนิด ได้แก่ เหล็กรูปพรรณแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และวัสดุเชื่อมประสาน ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

4.1.1 เหล็กรูปพรรณ

การทดสอบใช้เหล็กรูปพรรณหน้าตัดรูปตัวเอส (H) 150x150x7x10 มม. จากการทดสอบหาค่ากำลังครากพบว่าเหล็กรูปพรรณที่ใช้ในการทดสอบมีค่ากำลังครากเท่ากับ 178,091 เมกะปาสคาล ความกว้าง ความยาวและความสูงของเหล็กรูปพรรณที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดเท่ากับ 150, 150

และ 500 มิลลิเมตร ตามลำดับ มีความหนาของปีกเท่ากับ 10 มิลลิเมตร และความหนาของเอวเท่ากับ 7 มิลลิเมตร

4.1.2 แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

การทดสอบใช้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย 2 ชนิด คือ (1) แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยประเภทมอดูลัสปานกลาง (Sika Carbodur® M514) และ (2) ประเภทมอดูลัสยืดหยุ่นต่ำ (Sika Carbodur® S512) ความกว้างและความหนาของ Sika Carbodur® M514 เท่ากับ 50 และ 1.4 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากการทดสอบแรงดึง ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นและหน่วยแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 238,575 และ 2,522 เมกะปาสคาล ตามลำดับ สำหรับ Sika Carbodur® S512 มีความกว้างและความหนาเท่ากับ 50 และ 1.4 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากการทดสอบแรงดึง ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นและหน่วยแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 180,777 และ 3,303 เมกะปาสคาล ตามลำดับ

4.1.3 วัสดุเชื่อมประสาน

วัสดุเชื่อมประสาน Sikadur 30 ได้ใช้สำหรับเชื่อมประสานระหว่างเหล็กและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยทั้งชนิดมอดูลัสยืดหยุ่นต่ำและสูง โดยค่ามอดูลัสยืดหยุ่นและหน่วยแรงดึงสูงสุดของ Sikadur® 30 เท่ากับ 4,482 และ 24.8 เมกะปาสคาล ตามลำดับ อ้างอิงจากเอกสารข้อมูลผลิตภัณฑ์ Sika (Product Datasheet, Sikadur® 30)



2971436726

ตารางที่ 4 ตารางแสดงคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ (Product Datasheet)

| ชนิดวัสดุ | กำลังรับ แรงดึง (เมกะ ปาสคาล) | พื้นที่หน้าตัด (ตร.มม.) | ความ หนา (มม.) | ความ กว้าง (มม.) | มอดุลัส ยืดหยุ่น (เมกะ ปาสคาล) | มอดุลัส ยืดหยุ่น แรงเฉือน (เมกะ ปาสคาล) |
|--|--|----------------------------|----------------------|------------------------|---|---|
| แผ่น FRP Sika Carbodur® M514 | 3,200.0 | 70.0 | 1.4 | 50 | 210,000 | 87,500 |
| แผ่น FRP Sika Carbodur® S512 | 3,100.0 | 60.0 | 1.2 | 50 | 170,000 | 71,000 |
| วัสดุยึดประสาน อีพอกซี Sikadur® 30 | 24.8 | - | - | 50 | 11,200 | 17 |

4.2 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ 4 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ การทดสอบแรงเฉือนแบบรอยต่อทาบเดี่ยวประกอบด้วยตัวอย่างทั้งหมด 17 ชิ้นงาน โดยชื่อของชิ้นงานประกอบไปด้วย 4 ส่วน ส่วนที่ 1 หมายถึงการทดสอบแรงเฉือนแบบรอยต่อทาบเดี่ยว (J และ JA หมายถึงรอยต่อที่ไม่มีวัสดุเชื่อมประสานอยู่บนรอยร้าวเริ่มต้นและรอยต่อที่มีวัสดุเชื่อมประสานอยู่บนรอยร้าวเริ่มต้น ตามลำดับ) ส่วนที่ 2 หมายถึงความยาวของระยะยึดเหนี่ยวของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ส่วนที่ 3 หมายถึงความยาวของรอยร้าวเริ่มต้น และส่วนสุดท้ายหมายถึงชนิดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (M และ S หมายถึงวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยประเภทมอดุลัสยืดหยุ่นปานกลางและมอดุลัสยืดหยุ่นน้อยตามลำดับ) โดยสามารถแบ่งตัวอย่างการทดสอบเป็น 5 กลุ่มตัวอย่าง ซึ่งแตกต่างกันดังนี้

กลุ่มตัวอย่างที่ 1 ประกอบด้วยชิ้นงานจำนวน 4 ตัวอย่าง มีระยะการยึดเหนี่ยวแตกต่างกันคือ 400 250 150 และ 75 มม. และติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมอดูลัสยืดหยุ่นปานกลางชนิด Sika Carbodur® M514 ปราศจากการหลุดล่อนเริ่มต้น

กลุ่มตัวอย่างที่ 2 ประกอบด้วยชิ้นงานจำนวน 4 ตัวอย่าง มีระยะการยึดเหนี่ยวแตกต่างกันคือ 400 250 150 และ 75 มม. และติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมอดูลัสยืดหยุ่นปานกลางชนิด Sika Carbodur® M514 มีระยะหลุดล่อนเริ่มต้นเท่ากับ 25 มม. (ช่วงความยาวหลุดล่อนเริ่มต้นไม่มีวัสดุเชื่อมประสาน ดังรูปที่ 15 (ก))

กลุ่มตัวอย่างที่ 3 ประกอบด้วยชิ้นงานจำนวน 3 ตัวอย่าง มีการติดตั้งระยะหลุดล่อนเริ่มต้นแตกต่างกันคือ 0 25 และ 50 มม. (ช่วงความยาวหลุดล่อนเริ่มต้นไม่มีวัสดุเชื่อมประสาน) ระยะการยึดเหนี่ยวของตัวอย่างทั้ง 3 ชิ้นเท่ากับ 400 มม. และใช้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมอดูลัสยืดหยุ่นปานกลางชนิด Sika Carbodur® M514

กลุ่มตัวอย่างที่ 4 ประกอบด้วยชิ้นงานจำนวน 4 ตัวอย่าง มีระยะการยึดเหนี่ยวแตกต่างกันคือ 400 250 150 และ 75 มม. โดยมีระยะการหลุดล่อนเริ่มต้นเท่ากับ 25 มม. (ช่วงความยาวหลุดล่อนเริ่มต้นไม่มีวัสดุเชื่อมประสาน) โดยใช้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมอดูลัสยืดหยุ่นต่ำ Sika Carbodur® S512

กลุ่มตัวอย่างที่ 5 ประกอบด้วยชิ้นงานจำนวน 4 ตัวอย่าง มีระยะการยึดเหนี่ยวแตกต่างกันคือ 400 250 150 และ 75 มม. มีระยะการหลุดล่อนเริ่มต้นเท่ากับ 25 มม. โดยติดตั้งการดาชฉนวนระหว่างผิวเหล็กและวัสดุเชื่อมประสานเพื่อป้องกันไม่ให้วัสดุเชื่อมประสานทำปฏิกิริยากับผิวเหล็ก (ช่วงความยาวหลุดล่อนเริ่มต้นมีวัสดุเชื่อมประสาน ดังรูปที่ 15 (ข)) โดยใช้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมอดูลัสยืดหยุ่นต่ำ Sika Carbodur® S512



2971436726

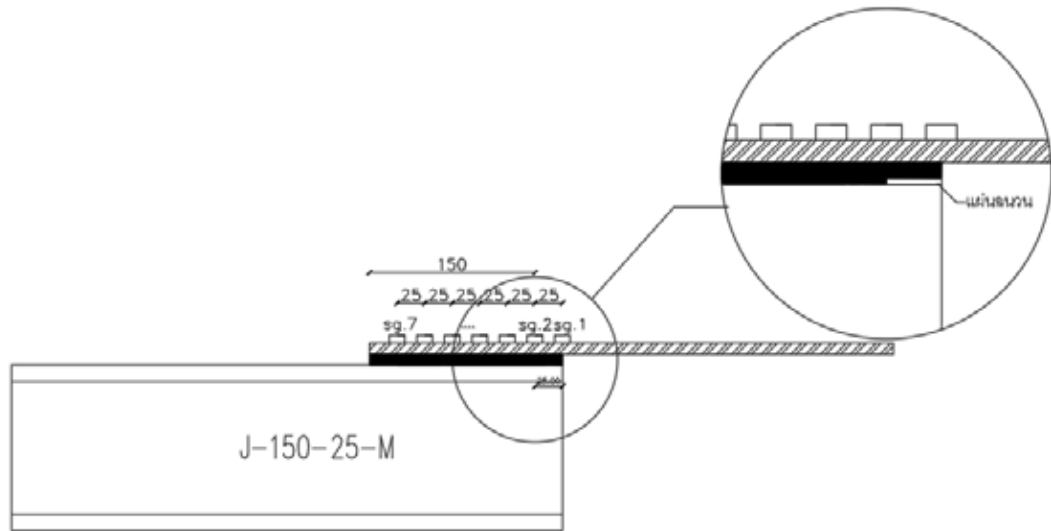
ตารางที่ 5 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ

| ชุด ตัวอย่าง | ชื่อชิ้นงาน | ความหนา วัสดุเชื่อม ประสาน (mm.) | ความยาวการ ยึดเหนี่ยว (mm.) | ความยาว รอยร้าว เริ่มต้น (mm.) | อัตราส่วน สตีเฟนส | อีพอกซีบน ตำแหน่ง รอยร้าว เริ่มต้น |
|-----------------|-------------|---|-----------------------------------|---|----------------------|---|
| 1 | J-400-0-M | 3.5 | 400 | 0 | 5.33 | ไม่มีอีพอกซี |
| | J-250-0-M | 3.5 | 250 | 0 | 5.33 | ไม่มีอีพอกซี |
| | J-150-0-M | 3.3 | 150 | 0 | 5.33 | ไม่มีอีพอกซี |
| | J-75-0-M | 3.5 | 75 | 0 | 5.33 | ไม่มีอีพอกซี |
| 2 | J-400-25-M | 4.3 | 400 | 25 | 5.33 | ไม่มีอีพอกซี |
| | J-250-25-M | 4.2 | 250 | 25 | 5.33 | ไม่มีอีพอกซี |
| | J-150-25-M | 3.4 | 150 | 25 | 5.33 | ไม่มีอีพอกซี |
| | J-75-25-M | 4.0 | 75 | 25 | 5.33 | ไม่มีอีพอกซี |
| 3 | J-400-0-M | 3.5 | 400 | 0 | 5.33 | ไม่มีอีพอกซี |
| | J-400-25-M | 4.3 | 400 | 25 | 5.33 | ไม่มีอีพอกซี |
| | J-400-50-M | 3.6 | 400 | 50 | 5.33 | ไม่มีอีพอกซี |
| 4 | J-400-25-S | 3.5 | 400 | 25 | 8.21 | ไม่มีอีพอกซี |
| | J-250-25-S | 3.5 | 250 | 25 | 8.21 | ไม่มีอีพอกซี |
| | J-150-25-S | 3.5 | 150 | 25 | 8.21 | ไม่มีอีพอกซี |
| | J-75-25-S | 3.5 | 75 | 25 | 8.21 | ไม่มีอีพอกซี |
| 5 | JA-400-25-S | 3.5 | 400 | 25 | 8.21 | มีอีพอกซี |
| | JA-250-25-S | 3.5 | 250 | 25 | 8.21 | มีอีพอกซี |
| | JA-150-25-S | 3.5 | 150 | 25 | 8.21 | มีอีพอกซี |
| | JA-75-25-S | 3.5 | 75 | 25 | 8.21 | มีอีพอกซี |

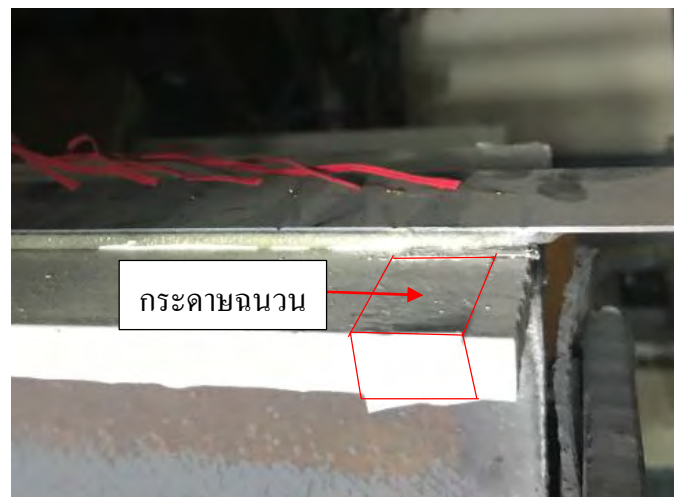


2971436726

CU :Thesis 5870186721 thesis / rev: 02082562 17:24:40 / seq: 13



ก) ภาพวาดการติดตั้งวัสดุยึดประสานของตัวอย่างที่ไม่มีวัสดุยึดประสานในตำแหน่งรอยร้าวเริ่มต้น

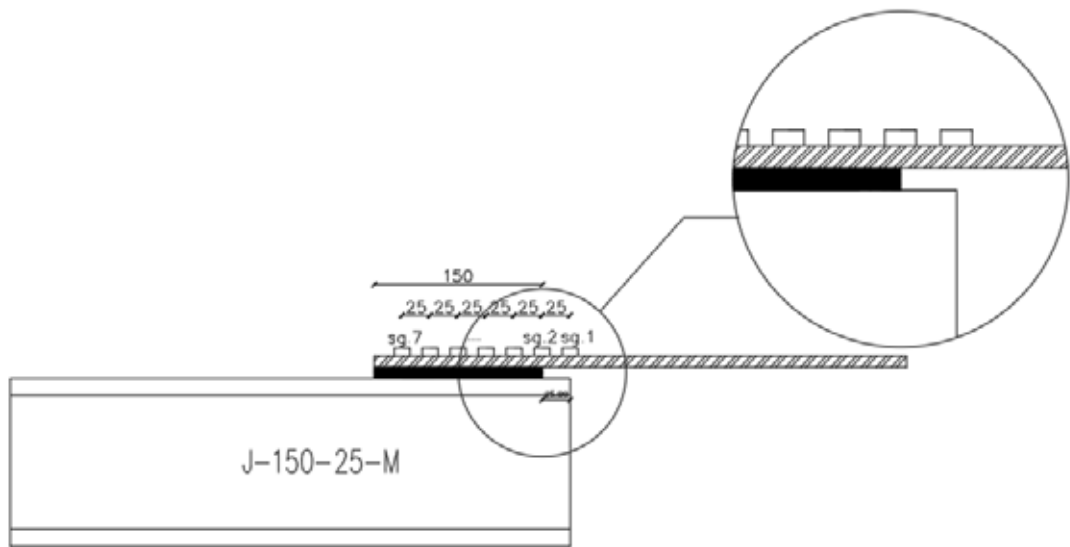


ข) ภาพถ่ายการติดตั้งวัสดุยึดประสานของตัวอย่างที่ไม่มีวัสดุยึดประสานในตำแหน่งรอยร้าวเริ่มต้น

รูปที่ 15 การติดตั้งวัสดุยึดประสานของตัวอย่างที่ไม่มีวัสดุยึดประสานในตำแหน่งรอยร้าวเริ่มต้น



2971436726



ก) ภาพวาดการติดตั้งวัสดุยึดประสานของตัวอย่างทดสอบที่มีวัสดุยึดประสานในตำแหน่งรอยร้าว
เริ่มต้น



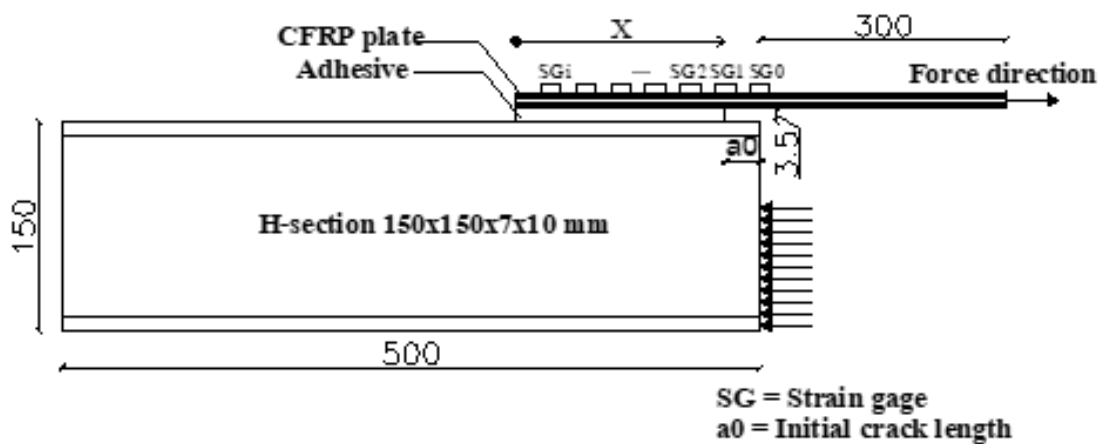
ข) ภาพถ่ายการติดตั้งวัสดุยึดประสานของตัวอย่างทดสอบที่มีวัสดุยึดประสานในตำแหน่งรอยร้าว
เริ่มต้น

รูปที่ 16 การติดตั้งวัสดุยึดประสานของตัวอย่างทดสอบที่มีวัสดุยึดประสานในตำแหน่งรอยร้าว
เริ่มต้น

4.3 การติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

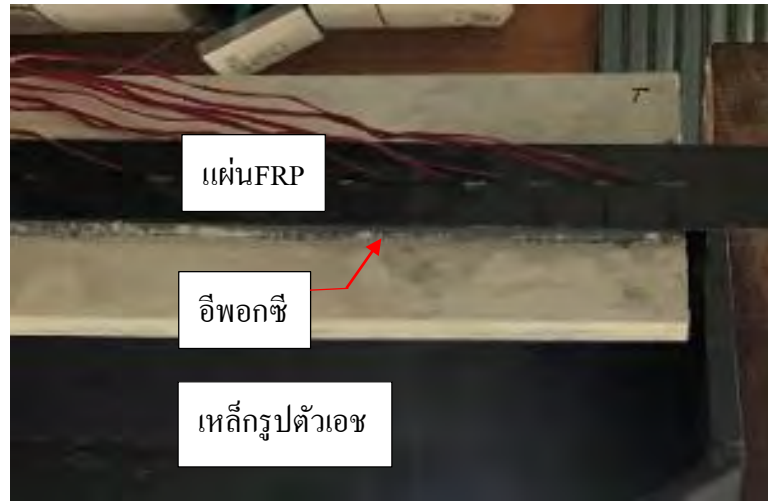
การติดตั้งชิ้นงานเริ่มจากการนำเหล็กหน้าตัดรูปตัวเอชขนาด 150x150 ไปทำความสะอาดผิวด้วยวิธีพ่นทราย (sand blast) ขนาดอนุภาค SA2.5 เพื่อทำความสะอาดและกำจัดสิ่งปนเปื้อนบนผิวเหล็ก โดยหลังจากพ่นทรายแล้วจำเป็นต้องนำชิ้นงานตัวอย่างไปติดตั้งวัสดุยึดประสานอีพอกซีภายใน 1 วันหลังการพ่นทรายเพื่อป้องกันการปนเปื้อนอีกครั้งของผิวเหล็กหลังจากพ่นทราย จึงทำการติดตั้งกระดาษฉนวนเพื่อสร้างรอยร้าวเริ่มต้น ความคุมความหนาของอีพอกซีเท่ากับ 3.5 มม. และนำแผ่น FRP ติดตรงกึ่งกลางเหล็ก ดังรูปที่ 16 โดยให้แผ่นพอลิเมอร์เลยขอบเหล็ก 300 มม. เพื่อให้มีระยะจับจากเครื่องทดสอบ และหาวัสดุที่มีน้ำหนักเล็กน้อยทับแผ่น FRP เพื่อให้อีพอกซีพัฒนากำลังสูงสุดและป้องกันการหลุดล่อนของแผ่น FRP หลุดออกจากวัสดุเชื่อมประสานอีพอกซี ขั้นตอนต่อมาเป็นการติดตั้งมาตรวัดความเครียดความยาว 5 มม. ในแต่ละตำแหน่งโดยระยะห่างระหว่างมาตรวัดความเครียดของความยาวการยึดประสานช่วง 150 มม. โกลัแรงกระทำ เท่ากับ 25 มม. และหลังจากนั้นจะติดมาตรวัดความเครียดห่างเป็นระยะ 50 มม. จากการคำนวณระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลจากสมการที่ 3.10 เท่ากับ 90 มม. และแสดงการติดตั้งตัวอย่างการทดสอบในรูปที่

17

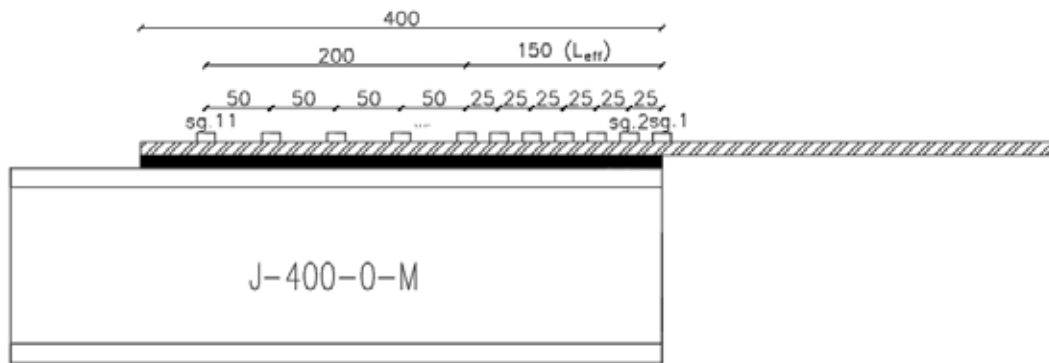


ก) ภาพวาดการติดตั้งแผ่น FRP บนเหล็กหน้าตัดรูปตัวเอช

รูปที่ 17 การติดตั้งแผ่น FRP บนเหล็กหน้าตัดรูปตัวเอช

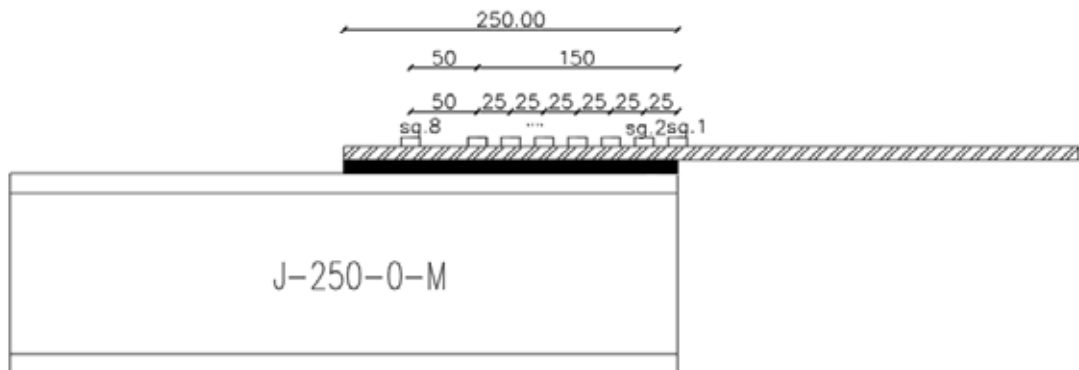


ข) ภาพถ่ายการติดตั้งแผ่น FRP บนเหล็กหน้าตัดรูปตัวเอช
รูปที่ 17 (ต่อ) การติดตั้งแผ่น FRP บนเหล็กหน้าตัดรูปตัวเอช



(ก)

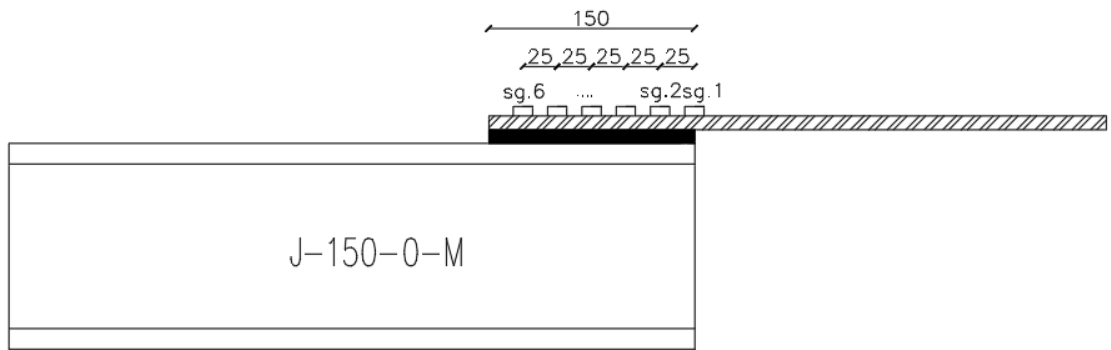
ตัวอย่างการทดสอบ J-400-0-M



(ข)

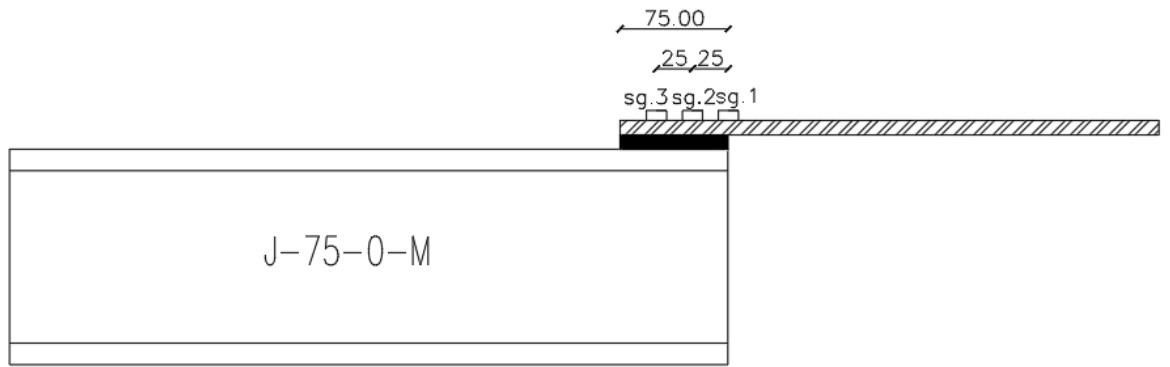
ตัวอย่างการทดสอบ J-250-0-M

รูปที่ 18 ภาพวาดตัวอย่างการทดสอบ



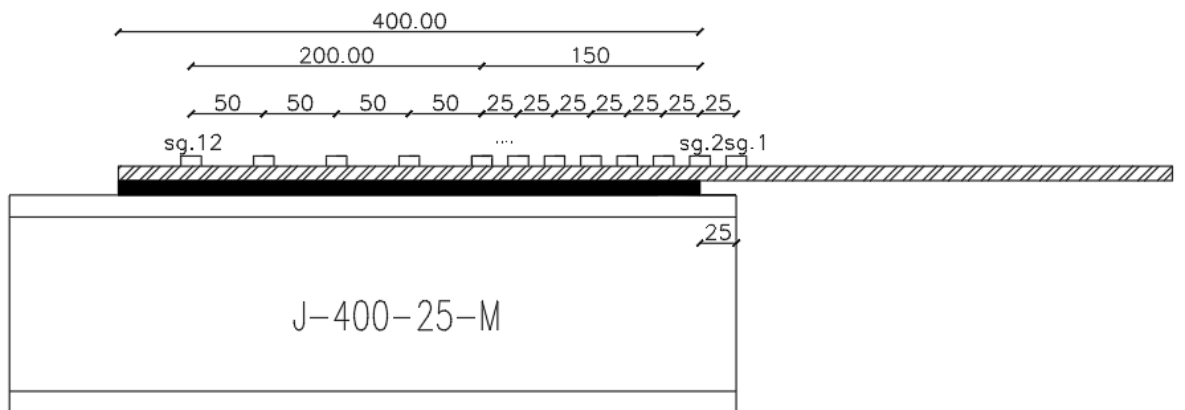
(ค)

ตัวอย่างการทดสอบ J-150-0-M



(ง)

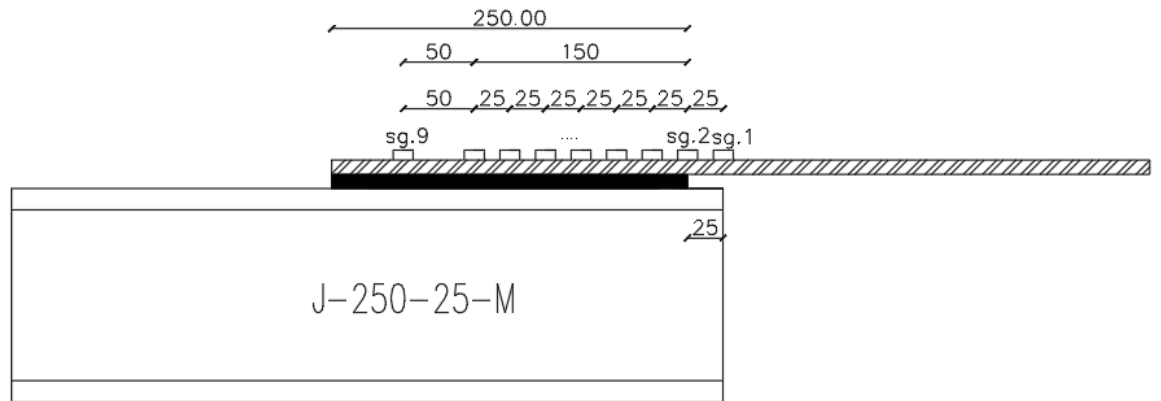
ตัวอย่างการทดสอบ J-75-0-M



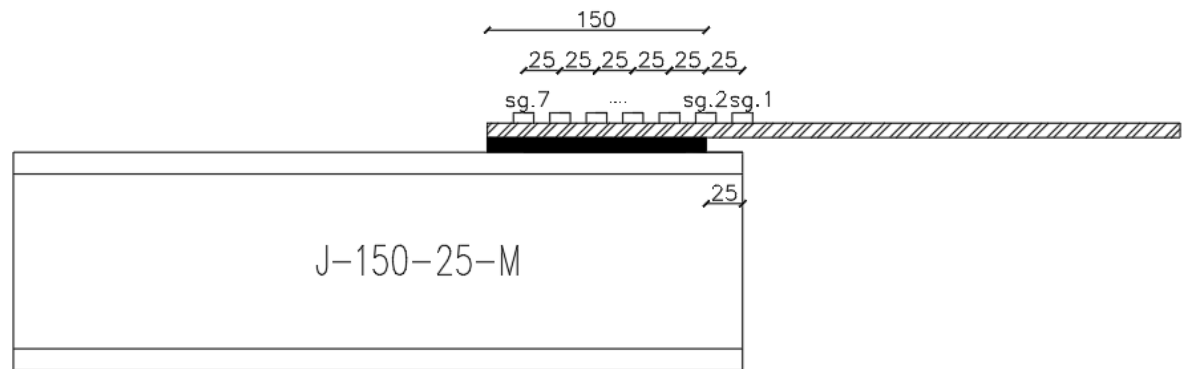
(จ)

ตัวอย่างการทดสอบ J-400-25-M

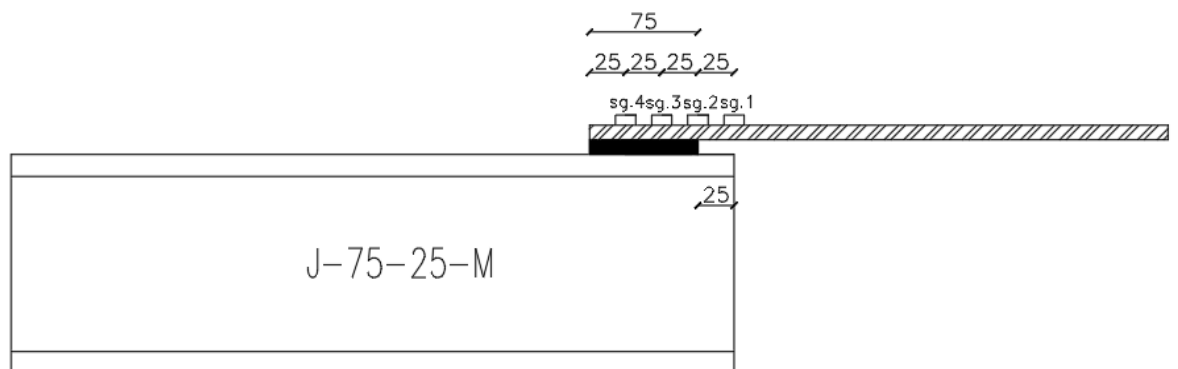
รูปที่ 18 ภาพวาดตัวอย่างการทดสอบ (ต่อ)



(ฉ)
ตัวอย่างการทดสอบ J-250-25-M



(ช)
ตัวอย่างการทดสอบ J-150-25-M

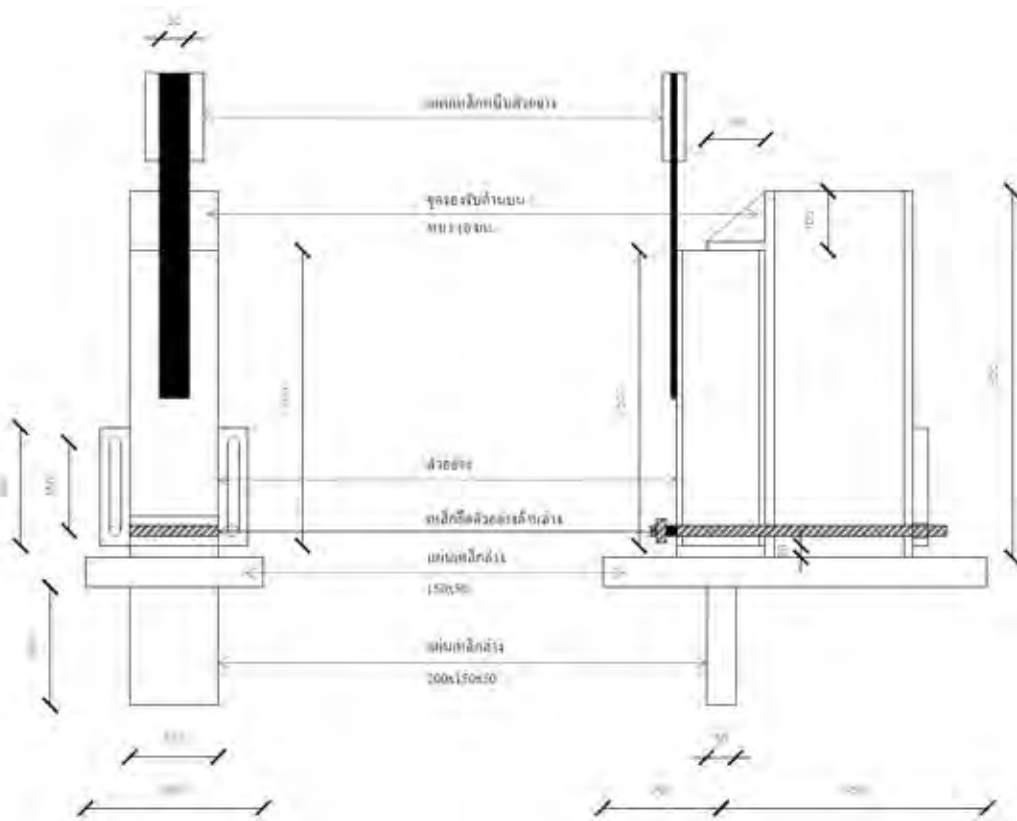


(ซ)
ตัวอย่างการทดสอบ J-75-25-M

รูปที่ 18 ภาพวาดตัวอย่างการทดสอบ (ต่อ)

4.4 ขั้นตอนการทดสอบ

ชิ้นงานทั้งหมดทดสอบด้วยเครื่อง Instron (ความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุด 100 ตัน) โดยนำตัวอย่างติดตั้งในโครงเหล็กทดสอบ ดังรูปที่ 19 ซึ่งโครงเหล็กทำหน้าที่ค้ำยันชิ้นงานไม่ให้เคลื่อนที่ในแนวดิ่งและมีจุดรองรับแรงให้แก่ตัวอย่างทดสอบเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดโมเมนต์ดัดหรือบิดในชิ้นงานขณะทำการทดสอบ โดยการทดสอบจะให้แรงกระทำในแนวดิ่ง โดยมีการควบคุมการเคลื่อนที่ (Displacement control) เท่ากับ 1.0 มม. ต่อนาที ความถี่ในการเก็บข้อมูลเท่ากับ 100 เฮิรตซ์ ทดสอบจนชิ้นงานเกิดการวิบัติจึงทำการหยุดการทดสอบ รูปที่ 19 และ 20 แสดงตัวอย่างการติดตั้งตัวอย่างกับโครงเหล็กทดสอบ ระหว่างการทดสอบได้มีการบันทึกข้อมูลแรงกระทำ และความเครียดจากมาตรวัดความเครียดบนแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยผ่านทางเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ



ก) ภาพวาดตัวอย่างการติดตั้งตัวอย่างกับโครงเหล็กประกอบ

รูปที่ 19 ตัวอย่างการติดตั้งตัวอย่างกับโครงเหล็กประกอบ (มิติเป็น มม.)



2971436726



ข) ภาพถ่ายตัวอย่างการติดตั้งตัวอย่างกับโครงเหล็กประกอบ
รูปที่ 19 (ต่อ) ตัวอย่างการติดตั้งตัวอย่างกับโครงเหล็กประกอบ



รูปที่ 20 การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบ

บทที่ 5

การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ในบทนี้แสดงผลจากการทดสอบ โดยทำการทดสอบกับเหล็กgrupพรรณเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์ เสริมเส้นใยจำนวน 17 ตัวอย่าง โดยศึกษาพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวซึ่งประกอบด้วยลักษณะการวิบัติ กำลังยึดเหนี่ยว ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังยึดเหนี่ยวและการไถล ระยะยึดเหนี่ยว ประสิทธิภาพ ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถล และพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส ซึ่งรายละเอียดการศึกษามีดังนี้

5.1 ประเภทของการวิบัติ

จากการทดสอบตัวอย่าง พบว่าการวิบัติเกิดขึ้นระหว่างรอยต่อแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยกับวัสดุเชื่อมประสาน สามารถแบ่งออกเป็นอีก 2 ประเภท ได้แก่ (1) การวิบัติระหว่างที่ผิวระหว่างวัสดุเชื่อมประสานและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยกับวัสดุ (Pure adhesion failure) และ (2) การวิบัติระหว่างระหว่างวัสดุเชื่อมประสานและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยผสมกับการวิบัติจากการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Pure adhesion failure and FRP-adhesion interface failure) จากการทดสอบทั้งหมด 5 ชุดตัวอย่างมีผลการวิเคราะห์ดังนี้

การวิบัติของชุดแรก ($a_0=0$, แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยชนิดมอดูลัสยืดหยุ่นปานกลาง, ไม่มีชั้นกาวบนรอยร้าวเริ่มต้น) เกิดการวิบัติระหว่างผิวพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและวัสดุเชื่อมประสานแสดงในรูปที่ 21 โดยตัวอย่างที่มีระยะยึดเหนี่ยวเท่ากับ 75 มม. หลังจากเกิดการวิบัติตัวอย่างไม่มีผิวของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยติดอยู่บนวัสดุเชื่อมประสาน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเป็นการวิบัติระหว่างที่ผิวของวัสดุเชื่อมประสานและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (รูปแบบ 1) ส่วนในกรณีที่ระยะยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้น (150, 250 และ 400 มม.) พบว่าหลังจากการวิบัติมีผิวของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยติดอยู่บนอีพอกซีบางส่วน ณ ตำแหน่งปลายอิสระ (Free end) หรือตำแหน่งที่ไถลแรงกระทำ จึงสรุปได้ว่าเป็นการวิบัติระหว่างผิววัสดุเชื่อมประสานและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยผสมกับการวิบัติจากการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (รูปแบบ 2)

การวิบัติของชุดตัวอย่างที่ 2 (ตัวอย่างที่มี $a_0=25$ แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยชนิดมอดูลัสยืดหยุ่นปานกลางและไม่มีชั้นกาวบนรอยร้าวเริ่มต้น) แสดงในรูปที่ 22 พบว่าการวิบัติเกิดขึ้นระหว่าง

แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและวัสดุเชื่อมประสาน โดยตัวอย่างที่มีระยะยึดเหนี่ยวเท่ากับ 75 มม. หลังจากเกิดการวิบัติมีผิวของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยติดอยู่บนชั้นวัสดุเชื่อมประสานอยู่เล็กน้อย ซึ่งยังสามารถสรุปได้ว่าเป็นการวิบัติระหว่างที่ผิววัสดุเชื่อมประสานและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยกับวัสดุ (รูปแบบ 1) และเมื่อระยะยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้น (150, 250 และ 400 มม.) พบว่าหลังจากการวิบัติมีผิวของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยติดอยู่บนอีพอกซีบางส่วน ณ ตำแหน่งปลายอิสระ จึงสรุปได้ว่าเป็นการวิบัติระหว่างผิววัสดุเชื่อมประสานและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยผสมกับการวิบัติจากการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (รูปแบบ 2) เช่นเดียวกับชุดตัวอย่างที่ 1

ชุดตัวอย่างที่ 3 เป็นการทดสอบตัวอย่างที่มี $a_0=50$ แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยชนิดมอดุลัสยืดหยุ่นต่ำและไม่มีชั้นกาวบนรอยร้าวเริ่มต้น พบว่าการวิบัติเกิดระหว่างชั้นแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและอีพอกซี โดยหลังจากการวิบัติพบว่าผิวของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยติดอยู่บนวัสดุเชื่อมประสานบางส่วน ณ ตำแหน่งปลายอิสระแสดง ดังรูปที่ 23 และจึงสรุปได้ว่าเป็นการวิบัติระหว่างผิววัสดุเชื่อมประสานและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยผสมกับการวิบัติจากการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (รูปแบบ 2)

ชุดตัวอย่างที่ 4 (ตัวอย่างที่มี $a_0=25$ แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยชนิดมอดุลัสยืดหยุ่นต่ำและไม่มีชั้นกาวบนรอยร้าวเริ่มต้น) และชุดตัวอย่างที่ 5 (ตัวอย่างที่มี $a_0=25$ แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยชนิดมอดุลัสยืดหยุ่นต่ำและมีชั้นกาวบนรอยร้าวเริ่มต้น) แสดงในรูปที่ 24 และรูปที่ 25 ตามลำดับ พบว่าการวิบัติของทุกตัวอย่างมีผิวของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยติดอยู่บนวัสดุเชื่อมประสานบางส่วน ณ ตำแหน่งปลายอิสระ ดังนั้นการวิบัติระหว่างผิววัสดุเชื่อมประสานและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยผสมกับการวิบัติจากการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (รูปแบบ 2)

เมื่อเปรียบเทียบการวิบัติของตัวอย่างเสริม FRP มอดุลัสยืดหยุ่นปานกลางและต่ำพบว่าการวิบัติของตัวอย่างทั้งหมดไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน (เกิดการวิบัติระหว่างผิววัสดุเชื่อมประสานอีพอกซีและแผ่น FRP ผสมกับการวิบัติจากการหลุดล่อนของแผ่น FRP) แต่เมื่อสังเกตการวิบัติของตัวอย่าง J-75-0-M, J-75-25-M และ J-75-25-S พบว่าตัวอย่างที่ไม่มีรอยร้าวเริ่มต้นการวิบัติระหว่างที่ผิวเชื่อมประสานอีพอกซีและแผ่น FRP และตัวอย่างที่มีรอยร้าวเริ่มต้นเกิดการวิบัติระหว่างผิววัสดุเชื่อมประสานอีพอกซีและแผ่น FRP ผสมกับการวิบัติจากการหลุดล่อนของแผ่น FRP ซึ่งสามารถสรุปได้ว่ารอยร้าวที่ผิวมีผลต่อรูปแบบการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ



2971436726

CT :Thesis 5870186721 thesis / rev: 02082562 17:24:40 / seq: 13



(ก.) การวิบัติรูปแบบที่ 1 ของตัวอย่าง J-75-0-M



(ข.) การวิบัติรูปแบบ 2
ของตัวอย่าง J-150-0-M



(ค.) การวิบัติรูปแบบ 2
ของตัวอย่าง J-250-0-M



(ง.) การวิบัติรูปแบบ 2 ของตัวอย่าง J-400-0-M

รูปที่ 21 การวิบัติของชุดตัวอย่างที่ 1 ($a_0 = 0$ มม. FRP type M และไม่มีอีพอกซีบนรอยร้าวเริ่มต้น)



2971436726

CU Thesisis 5870186721 thesis / rev: 02082562 17:24:40 / seq: 13



(ก.) การวิบัติรูปแบบ 1
ของตัวอย่าง J-75-25-M



(ข.) การวิบัติรูปแบบ 2
ของตัวอย่าง J-150-25-M



(ค.) การวิบัติรูปแบบ 2 ของตัวอย่าง J-250-25-M



(ง.) การวิบัติรูปแบบ (2 ของตัวอย่าง J-400-25-M



(ง.) การวิบัติรูปแบบ (2 ของตัวอย่าง J-400-25-M

รูปที่ 22 การวิบัติของชุดตัวอย่างที่ 2 ($a_0 = 25$ มม. FRP type M และไม่มีอีพอกซีบนรอยร้าว
เริ่มต้น)



2971436726

CU Thesisis 5870186721 thesis / rev: 02082562 17:24:40 / seq: 13



รูปที่ 23 การวิบัติรูปแบบ 2 ของชุดตัวอย่าง J-400-50-M

($L = 400$ มม. $a_0 = 50$ มม. FRP type M และไม่มีอีพอกซีบนรอยร้าวเริ่มต้น)



(ก.) การวิบัติรูปแบบ 2 ตัวอย่าง J-75-25-S



(ข.) การวิบัติรูปแบบ 2 ของตัวอย่าง J-150-25-S



(ค.) การวิบัติรูปแบบ 2 ตัวอย่าง J-250-25-S

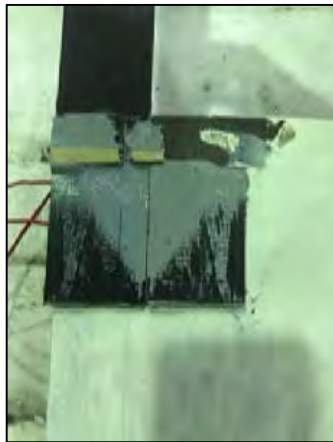


(ง.) การวิบัติรูปแบบ 2 ตัวอย่าง J-400-25-S

รูปที่ 24 การวิบัติของชุดตัวอย่างที่ 4 ($a_0 = 25$ มม. FRP type S และไม่มีอีพอกซีบนรอยร้าวเริ่มต้น)



2971436726



(ก.) การวิบัติรูปแบบ 2 ตัวอย่าง JA-75-25-S



(ข.) การวิบัติรูปแบบ 2 ตัวอย่าง JA-150-25-S



(ค.) การวิบัติรูปแบบ 2 ตัวอย่าง JA-250-25-S



(ง.) การวิบัติรูปแบบ 2 ตัวอย่าง JA-400-25-S

รูปที่ 25 การวิบัติของชุดตัวอย่างที่ 5 ($a_0 = 25$ มม. FRP type S และมีอิพอกซีบนรอยร้าวเริ่มต้น)



2971436726

ตารางที่ 6 ค่ากำลังรับแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดและระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลจากผลการทดสอบ

| ชุดตัวอย่าง | ชื่อชิ้นงาน | กำลังยึดเหนี่ยวสูงสุด (กิโลนิวตัน) | ระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผล (มม.) | หน่วยแรงเฉือนสูงสุด (เมกะปาสคาล) | การไถล ณ ตำแหน่งหน่วยเฉือนสูงสุด (มม./มม.) | การไถลวิบัติ (มม.) | พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส (นิวตัน/มม.) | รูปแบบการวิบัติ |
|-------------|-------------|------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--|--------------------|--|-----------------|
| 1 | J-75-0-M | 40.0 | >75 | 7.6 | 0.019 | 0.053 | N/A | 1 |
| | J-150-0-M | 53.0 | 145 | 16.0 | 0.066 | 0.232 | 1.864 | 2 |
| | J-250-0-M | 60.4 | 130 | 10.5 | 0.097 | 0.253 | 1.336 | 2 |
| | J-400-0-M | 61.3 | 140 | 14.2 | 0.047 | 0.230 | 1.632 | 2 |
| 2 | J-75-25-M | 32.8 | >75 | 8.8 | 0.052 | 0.125 | N/A | 1 |
| | J-150-25-M | 44.7 | 140 | 13.1 | 0.040 | 0.157 | 1.028 | 2 |
| | J-250-25-M | 52.4 | 135 | 11.8 | 0.053 | 0.190 | 1.121 | 2 |
| | J-400-25-M | 53.5 | 150 | 11.9 | 0.042 | 0.242 | 1.429 | 2 |
| 3 | J-400-0-M | 61.3 | 140 | 14.1 | 0.047 | 0.237 | 1.632 | 2 |
| | J-400-25-M | 53.5 | 150 | 11.9 | 0.042 | 0.241 | 1.429 | 2 |
| | J-400-50-M | 51.5 | 160 | 11.4 | 0.053 | 0.213 | 1.197 | 2 |
| 4 | J-75-25-S | 34.9 | >75 | 16.8 | 0.040 | 0.105 | N/A | 2 |
| | J-150-25-S | 40.2 | 110 | 24.4 | 0.047 | 0.245 | 2.923 | 2 |
| | J-250-25-S | 41.8 | 100 | 20.3 | 0.078 | 0.220 | 2.236 | 2 |
| | J-400-25-S | 42.0 | 120 | 23.5 | 0.091 | 0.253 | 2.940 | 2 |
| 5 | JA-75-25-S | 36.9 | >75 | 16.5 | 0.101 | 0.105 | N/A | 2 |
| | JA-150-25-S | 38.3 | 110 | 21.3 | 0.053 | 0.221 | 2.343 | 2 |
| | JA-250-25-S | 40.1 | 110 | 22.6 | 0.058 | 0.236 | 2.596 | 2 |
| | JA-400-25-S | 40.9 | 120 | 19.8 | 0.048 | 0.252 | 2.472 | 2 |



2971436726

CU :Thesis 5870186721 thesis / rev: 02082562 17:24:40 / seq: 13

หมายเหตุ: N/A = ไม่สามารถหาระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลได้; การวิบัติประเภทที่ 1 = การวิบัติระหว่างชั้นวัสดุเชื่อมประสานกับแผ่น FRP ; การวิบัติประเภทที่ 2 = การวิบัติระหว่างชั้นวัสดุเชื่อมประสานกับแผ่น FRP ผสมการวิบัติโดยการหลุดล่อนของวัสดุ FRP

5.2 กำลังยึดเหนี่ยวสูงสุด

จากการทดสอบตัวอย่างทั้งหมด 17 ตัวอย่าง ค่าของกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุด (แรงดึงสูงสุด) ได้แสดงในตารางที่ 6 จากการทดสอบจะศึกษาผลกระทบของระยะยึดเหนี่ยว ผลกระทบของรอยร้าวเริ่มต้น ประเภทของวัสดุเสริมเส้นใยต่อกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุด รูปที่ 26 (ก) แสดงผลกระทบของระยะยึดเหนี่ยว (75, 150, 250 และ 400 มม.) ต่อค่ากำลังยึดเหนี่ยวสูงสุด ในกรณีที่ไม่มีระยะของรอยร้าวเริ่มต้น ($a_0 = 0$ มม.) ในกรณีที่ใช้พอลิเมอร์เสริมเส้นใยประเภทมอดูลัสยืดหยุ่นปานกลาง จากผลการทดสอบพบว่า ระยะยึดเหนี่ยวมีผลต่อกำลังการยึดเหนี่ยว โดยเมื่อความยาวของระยะยึดเหนี่ยวมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าการยึดเหนี่ยวมีค่าเพิ่มขึ้น และกำลังการยึดเหนี่ยวจะไม่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อระยะการยึดเหนี่ยวอยู่ในช่วง 150 ถึง 250 มม.

รูปที่ 26 (ข) แสดงผลกระทบของรอยร้าวเริ่มต้นต่อกำลังยึดเหนี่ยว เมื่อตัวอย่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยประเภทมอดูลัสปานกลาง ที่มีระยะยึดเหนี่ยวเท่ากับ 400 มม. จากผลการทดสอบตัวอย่างที่มีรอยร้าวเริ่มต้น (a_0) เท่ากับ 25 และ 50 มม. จะมีค่ากำลังยึดเหนี่ยวลดลง 13% และ 16% ตามลำดับเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีรอยร้าวเริ่มต้น ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อรอยร้าวเริ่มต้นเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้กำลังยึดเหนี่ยวลดลง

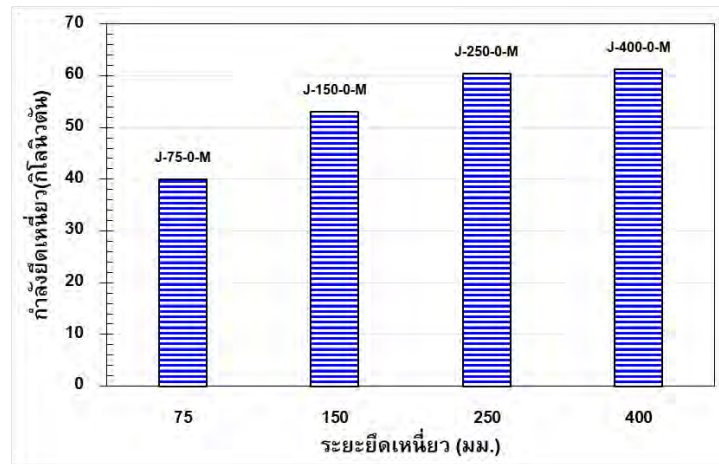
รูปที่ 26 (ค) แสดงผลกระทบของประเภทของวัสดุเสริมเส้นใยต่อกำลังยึดเหนี่ยวของตัวอย่างที่มีรอยร้าวเริ่มต้น (a_0) เท่ากับ 25 มม. ที่ระยะยึดเหนี่ยวต่างๆ (75, 150, 250 และ 400 มม.) ผลการทดสอบพบว่าที่ระยะยึดเหนี่ยวที่ 75 มม. กำลังยึดเหนี่ยวมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อระยะยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้น (150 250 และ 400 มม.) ตัวอย่างที่ใช้แผ่นพอลิเมอร์ ประเภทมอดูลัสยืดหยุ่นปานกลางมีค่ากำลังยึดเหนี่ยวมากกว่ามอดูลัสยืดหยุ่นประเภทต่ำอยู่ในช่วง 16 ถึง 18%

อีกทั้งเมื่อเทียบกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุดกับแรงดึงสูงสุดที่ทำให้ FRP เกิดการวิบัติ ทั้ง 2 ชนิดโดยกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุดของ FRP มอดูลัสยืดหยุ่นปานกลางและต่ำเท่ากับ 53 และ 42 กิโลนิวตันตามลำดับ และแรงดึงสูงที่ทำให้ FRP มอดูลัสยืดหยุ่นปานกลางและต่ำเกิดการวิบัติเท่ากับ 176 และ 198 กิโลนิวตัน ซึ่งคิดเป็น 30% และ 20% ของแรงที่ทำให้ FRP เกิดการวิบัติเท่านั้น

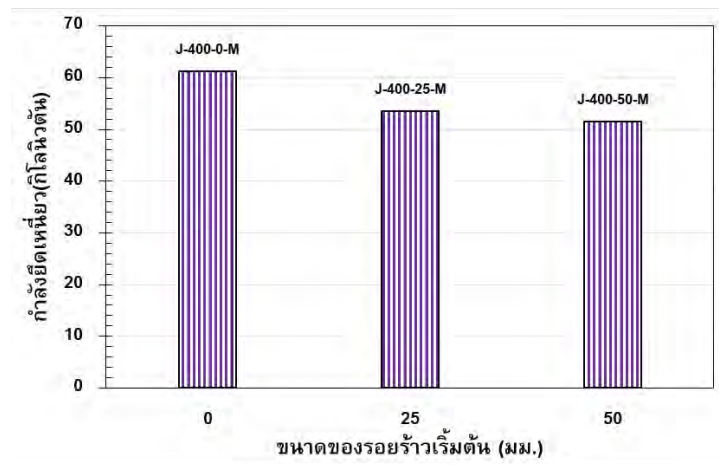


2971436726

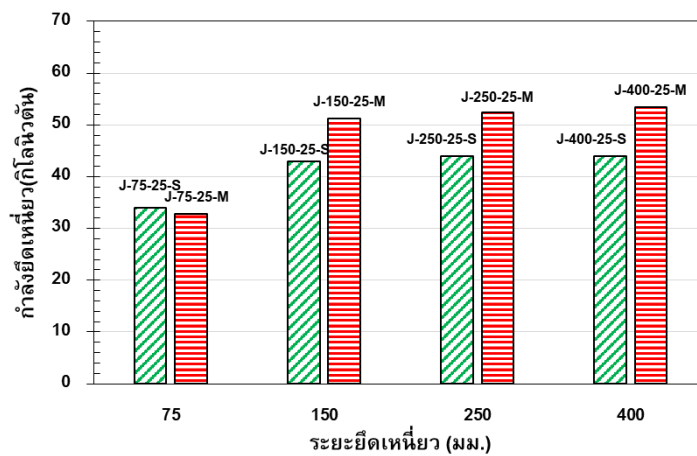
CD :Thesis 5870186721 thesis / rev: 02082562 17:24:40 / seq: 13



(ก) ผลกระทบของระยะยัดเหนี่ยวต่อกำลังยึดเหนี่ยว เมื่อ $a_0 = 0$ มม.



(ข) ผลกระทบของรอยร้าวเริ่มต้นต่อกำลังยึดเหนี่ยว เมื่อระยะยัดเหนี่ยวเท่ากับ 400 มม.



(ค) ผลกระทบของประเภทของวัสดุเสริมเส้นใยต่อกำลังยึดเหนี่ยว เมื่อ $a_0 = 25$ มม.

รูปที่ 26 ผลกระทบของตัวแปรต่างๆต่อกำลังยึดเหนี่ยว

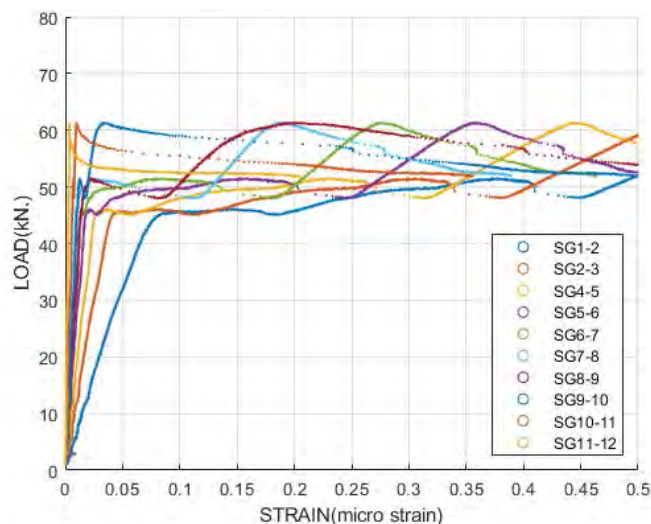


2971436726

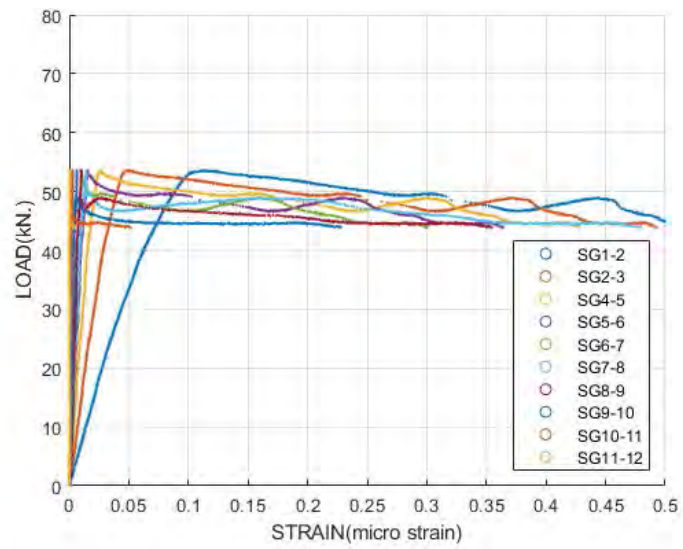
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังยึดเหนี่ยวและการไหล

การไหลสูงสุดสามารถคำนวณจากค่าความเครียดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยสามารถคำนวณจากสมการที่ (2) ตารางที่ 6 แสดงผลการไหลสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ ผลการทดสอบพบว่าเมื่อระยะยึดเหนี่ยวเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้การไหลมากขึ้นทั้งในกรณีที่ใช้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยชนิดมอดูลัสยืดหยุ่นปานกลางและมอดูลัสต่ำ เมื่อศึกษาผลกระทบของรอยร้าวเริ่มต้น พบว่ารอยร้าวเริ่มต้นมีผลทำให้การไหลสูงสุดของตัวอย่างทดสอบลดลง โดยการไหลสูงสุดของรอยร้าวเริ่มต้นเท่ากับ 25 และ 50 มม. มีค่าลดลง 18 และ 22 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ผลของค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยเปรียบเทียบผลของการไหลสูงสุด พบว่าการไหลสูงสุดของตัวอย่างมอดูลัสยืดหยุ่นต่ำมีค่าการไหลมากกว่าประเภทมอดูลัสยืดหยุ่นปานกลาง เพิ่มขึ้น 74% 96% 59% และ 49% ในกรณีระยะยึดเหนี่ยวเท่ากับ 100 200 300 และ 400 มม. ตามลำดับ

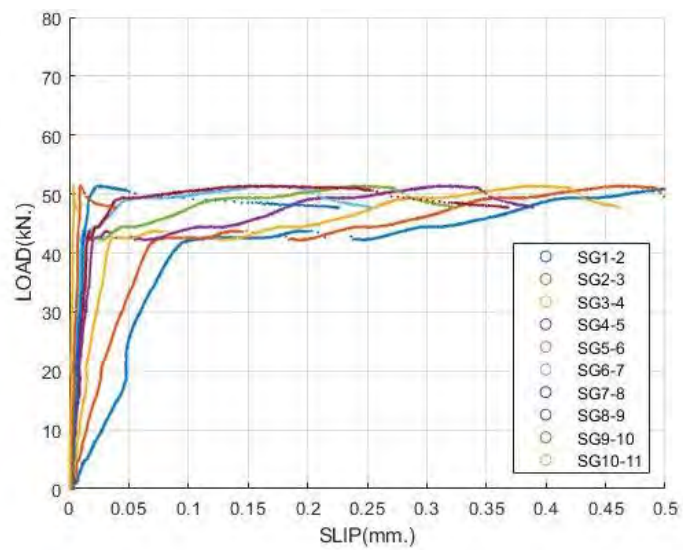
ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังยึดเหนี่ยวและการไหลของตัวอย่างระยะยึดเหนี่ยวเท่ากับ 400 มม. และมีรอยร้าวเริ่มต้นเท่ากับ 0 25 และ 50 มม. แสดงในรูปที่ 27 (ก) 27 (ข) และ 27 (ค) ตามลำดับ พบว่าความสัมพันธ์ของตัวอย่างที่มีรอยร้าวเริ่มต้นเท่ากับ 0 และ 25 มม. มีความคล้ายกันโดยเปรียบเทียบจากความชันของความสัมพันธ์ทั้งสองที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่มีรอยร้าวเริ่มต้นเท่ากับ 50 มม. พบว่ามีความชันมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด



(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังยึดเหนี่ยวและการไหลของตัวอย่าง J-400-0-M
รูปที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังยึดเหนี่ยวและการไหลของตัวอย่างทดสอบ



(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังยึดเหนี่ยวและการไหลของตัวอย่าง J-400-25-M



(ค) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังยึดเหนี่ยวและการไหลของตัวอย่าง J-400-50-M

รูปที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังยึดเหนี่ยวและการไหลของตัวอย่างทดสอบ (ต่อ)



2971436726

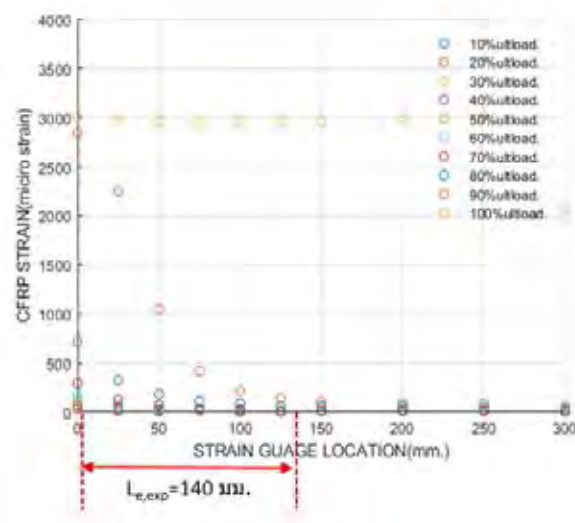
5.4 ระยะเวลายึดเหนี่ยวประสิทธิผล

หลักการในการหาระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลคือ การเพิ่มขึ้นของระยะเวลายึดเหนี่ยวไม่ทำให้กำลังยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้น (Chen และ Teng, 2001) ระยะเวลายึดเหนี่ยวประสิทธิผลเป็นตัวแปรที่สำคัญในการประมาณค่ากำลังยึดเหนี่ยวของรอยต่อเหล็กรูปพรรณเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย อีกทั้งระยะเวลายึดเหนี่ยวประสิทธิผลสามารถประมาณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและตำแหน่งติดตั้งมาตรฐานวัดความเครียดที่แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยระยะเวลายึดเหนี่ยวประสิทธิผลคือระยะทางระหว่างจุดให้แรงกระทำ (load end) ถึงระยะที่ความเครียดมีค่าใกล้ศูนย์ (Diab และ Farghal, 2014)

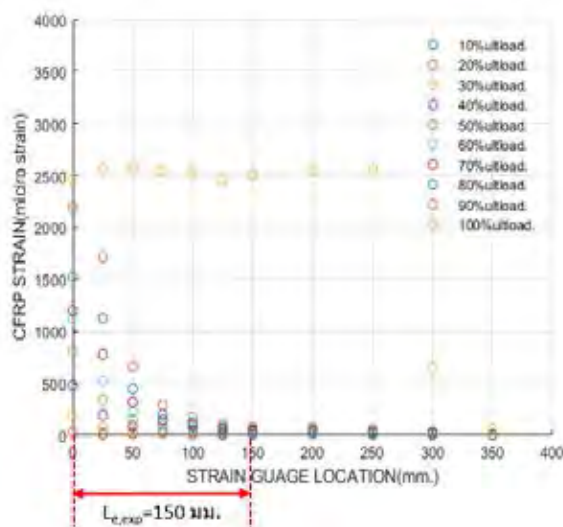
จากข้อมูลกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุดในตารางที่ 6 หรือรูปที่ 26 (ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุดและความยาวของระยะเวลายึดเหนี่ยวของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย พบว่าชุดตัวอย่างที่ 1 กำลังยึดเหนี่ยวสูงสุดเริ่มคงที่เมื่อระยะเวลายึดเหนี่ยวของตัวอย่างเท่ากับ 250 มม. (ตัวอย่างระยะเวลายึดเหนี่ยวเท่ากับ 250 และ 400 มม. กำลังยึดเหนี่ยวสูงสุดเท่ากับ 60.4 และ 61.3 กิโลนิวตัน ตามลำดับ) ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าระยะเวลายึดเหนี่ยวประสิทธิผลมีค่าอยู่ระหว่าง 150 มม. ถึง 250 มม. ชุดตัวอย่างที่ 2 กำลังยึดเหนี่ยวสูงสุดเริ่มคงที่เมื่อระยะเวลายึดเหนี่ยวของตัวอย่างเท่ากับ 250 มม. (ตัวอย่างระยะเวลายึดเหนี่ยวเท่ากับ 250 และ 400 มม. กำลังยึดเหนี่ยวสูงสุดเท่ากับ 52.4 และ 53.5 กิโลนิวตัน ตามลำดับ) ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าระยะเวลายึดเหนี่ยวประสิทธิผลนั้นค่าอยู่ระหว่าง 150 มม. ถึง 250 มม. สำหรับชุดตัวอย่างที่ 4 กำลังยึดเหนี่ยวสูงสุดเริ่มคงที่เมื่อระยะเวลายึดเหนี่ยวของตัวอย่างเท่ากับ 150 มม. (ตัวอย่างระยะเวลายึดเหนี่ยวเท่ากับ 150, 250 และ 400 มม. กำลังยึดเหนี่ยวสูงสุดเท่ากับ 40.2, 41.8 และ 42.0 กิโลนิวตัน ตามลำดับ) ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าระยะเวลายึดเหนี่ยวประสิทธิผลนั้นค่าอยู่ระหว่าง 75 มม. ถึง 150 มม. และชุดตัวอย่างที่ 5 กำลังยึดเหนี่ยวสูงสุดเริ่มคงที่เมื่อระยะเวลายึดเหนี่ยวของตัวอย่างเท่ากับ 150 มม. (ตัวอย่างระยะเวลายึดเหนี่ยวเท่ากับ 150, 250 และ 400 มม. กำลังยึดเหนี่ยวสูงสุดเท่ากับ 38.3, 40.1 และ 40.5 กิโลนิวตัน ตามลำดับ) ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าระยะเวลายึดเหนี่ยวประสิทธิผลนั้นค่าอยู่ระหว่าง 75 มม. ถึง 150 มม. สำหรับการประมาณระยะเวลายึดเหนี่ยวประสิทธิผลโดยวิธีของ Diab และ Farghal (2014) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและตำแหน่งติดตั้งมาตรฐานวัดความเครียดสร้างโดยพล็อตการกระจายตัวของความเครียดทุกๆ 10% ของกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุดจนถึง 100% ของกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุด ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความเครียดจะมีค่าสูง ณ ตำแหน่งใกล้แรงดึงและจะลดลงเมื่อตำแหน่งของความเครียดอยู่ไกล



ตำแหน่งให้แรงดึงออกไป เมื่อแรงดึงเพิ่มมากขึ้นค่าความเครียดจะเพิ่มขึ้นในทุกๆตำแหน่ง และความเครียดจะมีค่าคงที่และเข้าใกล้ศูนย์ ณ ตำแหน่งไกลแรงดึงเมื่อแรงดึงมีค่าสูง และระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดความเครียดของตัวอย่างทดสอบแสดง ดังรูปที่ 28-31 และแสดงระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลของตัวอย่างทดสอบทั้งหมดในตารางที่ 6



รูปที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดความเครียด
ของตัวอย่าง J-400-0-M

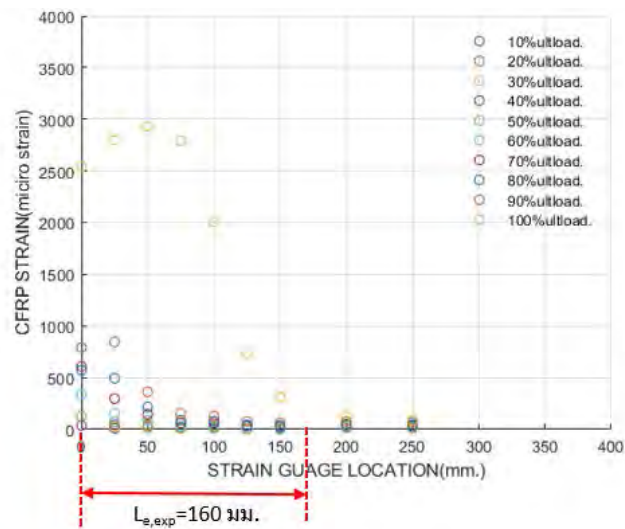


รูปที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดความเครียด
ของตัวอย่าง J-400-25-M

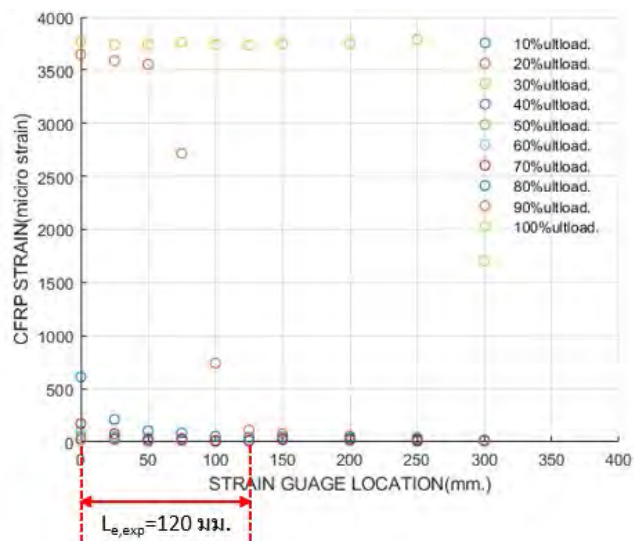


2971436726

CD :Thesis 5870186721 thesis / rev: 02082562 17:24:40 / seq: 13



รูปที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดความเครียด
ของตัวอย่าง J-400-50-M

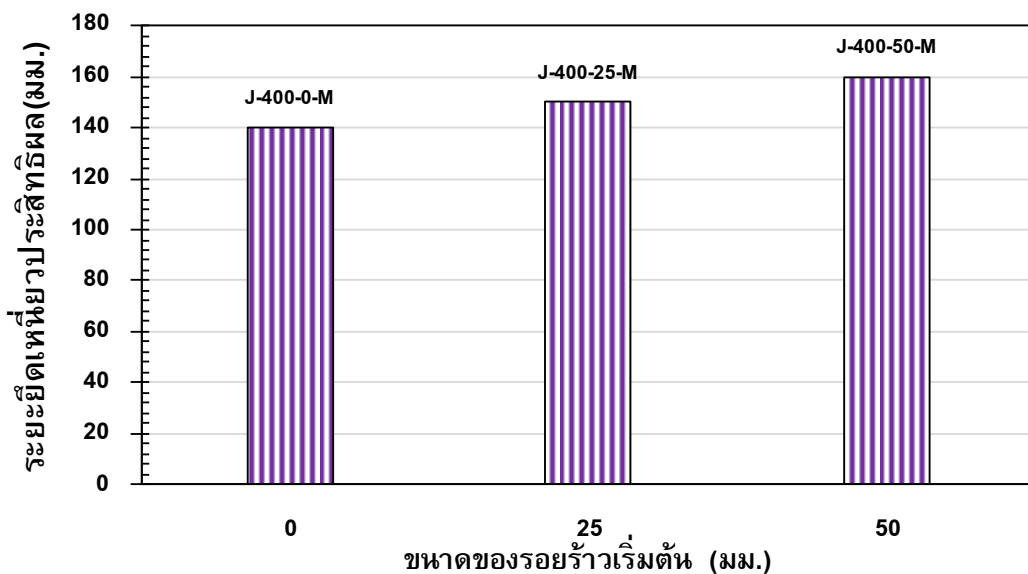


รูปที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดความเครียด
ของตัวอย่าง J-400-25-S

จากการประมาณระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลพบว่าตัวอย่างชุดการทดสอบที่ 1 ($a_0=0$ มม. ประเภทมอดูลัสยึดหยุ่นปานกลางและไม่มีวัสดุเชื่อมประสานบนรอยร้าวเริ่มต้น) ระยะยึดเหนี่ยวเท่ากับ 75 มม. ไม่สามารถประมาณค่าระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลได้เนื่องจากระยะยึดเหนี่ยวน้อยกว่าระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลและตัวอย่างระยะยึดเหนี่ยวเท่ากับ 150, 250 และ 400 มม. มีระยะยึด

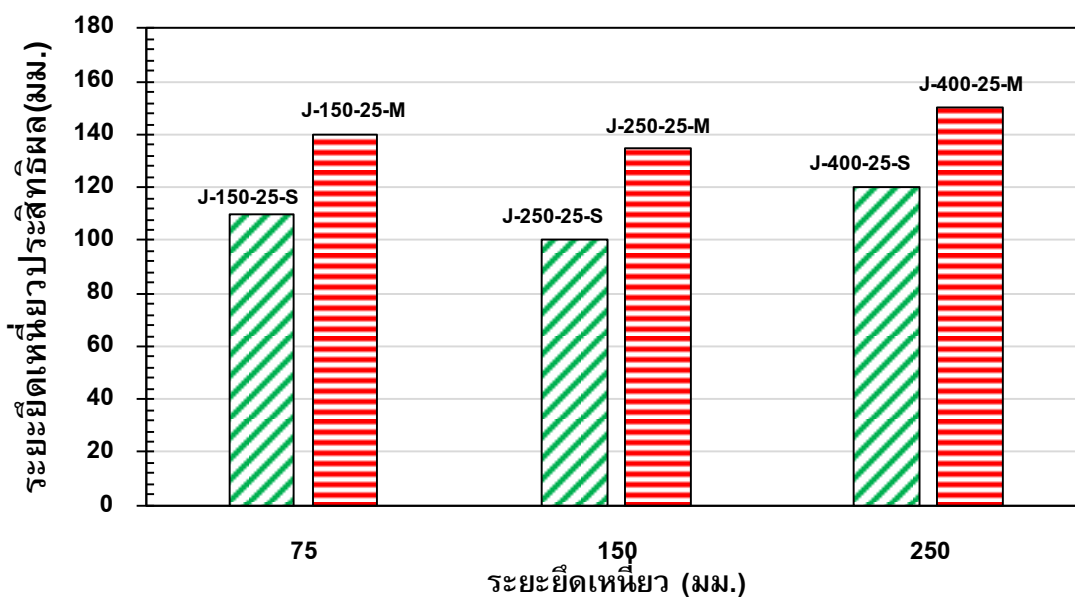
เหนียวเท่ากับ 145, 130 และ 140 มม. ตามลำดับ ชุดการทดสอบที่ 2 ($a_0=25$ มม. มอดูลัสยืดหยุ่น ประเภทปานกลางและไม่มีวัสดุเชื่อมประสานบนรอยร้าวเริ่มต้น) ระยะยึดเหนียวเท่ากับ 75, 150, 250 และ 400 มม. มีระยะยึดเหนียวประสิทธิผลเท่ากับ หาค่าไม่ได้, 140, 135 และ 150 มม. ตามลำดับ ชุดการทดสอบที่ 3 ($L=400$ มม. มอดูลัสยืดหยุ่น ประเภทปานกลางและไม่มีวัสดุเชื่อมประสานบนรอยร้าวเริ่มต้น) รอยร้าวเริ่มต้นเท่ากับ 0, 25 และ 50 มม. มีระยะยึดเหนียวประสิทธิผลเท่ากับ 140, 150 และ 160 มม. ชุดการทดสอบที่ 4 ($a_0=25$ มม. ประเภทมอดูลัสยืดหยุ่นต่ำและไม่มีวัสดุเชื่อมประสานบนรอยร้าวเริ่มต้น) ระยะยึดเหนียวเท่ากับ 75, 150, 250 และ 400 มม. มีระยะยึดเหนียวประสิทธิผลเท่ากับ หาค่าไม่ได้, 110, 100 และ 120 มม. ตามลำดับ และชุดการทดสอบสุดท้าย ($a_0=25$ มม., FRP type S และมีวัสดุเชื่อมประสานบนรอยร้าวเริ่มต้น) ระยะยึดเหนียวเท่ากับ 75, 150, 250 และ 400 มม. มีระยะยึดเหนียวประสิทธิผลเท่ากับ หาค่าไม่ได้, 110, 110 และ 120 มม. ตามลำดับ

จากผลการทดสอบของระยะยึดเหนียวประสิทธิผลเปรียบเทียบ ดังรูปที่ 32 พบว่าเมื่อระยะรอยร้าวที่ผิวมากขึ้นมีผลทำให้ระยะยึดเหนียวประสิทธิผลเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเมื่อค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีค่าต่ำมีผลทำให้ระยะยึดเหนียวประสิทธิผลมีค่าลดลง 22% และผลของวัสดุเชื่อมประสานบนรอยร้าวเริ่มต้นไม่ส่งผลต่อระยะยึดเหนียวประสิทธิผล



ก) แสดงการเปรียบเทียบผลของรอยร้าวเริ่มต้นต่อระยะยึดเหนียวประสิทธิผล

รูปที่ 32 ผลกระทบของตัวแปรต่างๆต่อระยะยึดเหนียวประสิทธิผล



ข) แสดงการเปรียบเทียบผลของมอดุลัสยืดหยุ่นของ FRP ต่อระยะยัดเหนียวประสิทธิภาพ
รูปที่ 32 ผลกระทบของตัวแปรต่างๆต่อระยะยัดเหนียวประสิทธิภาพ (ต่อ)

5.5 ผลการใช้สมการทำนาย

5.5.1 ระยะยัดเหนียวประสิทธิภาพ

การประมาณระยะยัดเหนียวประสิทธิภาพจากสมการที่ (3.6) และ (3.11) ซึ่งเป็นแบบจำลองของ Xia และ Teng (2005) และ Bocciarelli และคณะ (2007) ตามลำดับ แสดงในตารางที่ 7 พบว่าระยะยัดเหนียวประสิทธิภาพระยะยัดเหนียวประสิทธิภาพที่ประมาณจากแบบจำลองของ Xia และ Teng (2005) มีค่าเท่ากับ 145 มม. สำหรับตัวอย่างที่ใช้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยประเภทมอดุลัสยืดหยุ่นปานกลาง และ 125 มม. ให้ค่าแตกต่างจากผลการทดสอบอยู่ในช่วง 9 ถึง 15% (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6%)

สำหรับตัวอย่างที่ใช้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยประเภทมอดุลัสยืดหยุ่นต่ำ และระยะยัดเหนียวประสิทธิภาพระยะยัดเหนียวประสิทธิภาพที่ประมาณจากแบบจำลองของและ Bocciarelli และคณะ (2007) ค่าเท่ากับ 165 มม. สำหรับตัวอย่างที่ใช้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยประเภทมอดุลัสยืดหยุ่นปานกลาง และ 144 มม. สำหรับตัวอย่างที่ใช้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยประเภทมอดุลัสยืดหยุ่นต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบพบว่าสมการทำนายระยะยัดเหนียวประสิทธิภาพมีค่ามากกว่าผลการทดสอบ 15% ในทุกตัวอย่างการทดสอบ



2971436726

ตารางที่ 7 ผลการทำนายสำหรับกำลังรับแรงดึงสูงสุดและระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผล

| ชนิดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย | Xia และ Teng | | Bocciarelli และคณะ | |
|---------------------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| | แรงดึงสูงสุด (กิโลนิวตัน) | ระยะยึดเหนี่ยว ประสิทธิผล (มม.) | แรงดึงสูงสุด (กิโลนิวตัน) | ระยะยึดเหนี่ยว ประสิทธิผล (มม.) |
| มอดุลัสยืดหยุ่นปานกลาง | 82 | 145 | 62 | 165 |
| มอดุลัสยืดหยุ่นต่ำ | 71 | 125 | 54 | 144 |

5.5.2 กำลังยึดเหนี่ยวสูงสุด

จากการสมการทำนายกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดจากสมการที่ (3.7) ของ Xia และ Teng (2005) พบว่ากำลังรับแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดของชิ้นงานแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมอดุลัสยืดหยุ่นปานกลางและมอดุลัสยืดหยุ่นต่ำเท่ากับ 82.5 และ 71.8 กิโลนิวตัน ตามลำดับ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบพบว่าผลการทำนายกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุดมากกว่าผลการทดสอบ 34 ถึง 65% (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 52%) สมการทำนายกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุดของ Xia และ Teng (2005) มีค่าแตกต่างจากผลการทดสอบค่อนข้างมาก

ความสัมพันธ์ระหว่างการยึดเหนี่ยวและการไหลและการทำนายกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดจากสมการที่ (3.13) ของ Bocciarelli และคณะ (2007) พบว่ากำลังรับแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดของชิ้นงานแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมอดุลัสยืดหยุ่นปานกลางและมอดุลัสยืดหยุ่นต่ำเท่ากับ 62.6 และ 51.4 กิโลนิวตัน ตามลำดับ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่ไม่มีระยะของรอยร้าวเริ่มต้น ($a_0 = 0$ มม.) พบว่าสมการทำนายกำลังสูงสุดมีค่ามากกว่าผลการทดสอบประมาณ 1 ถึง 17% และผลการทำนายของตัวอย่างอื่นสูงกว่าผลการทดสอบประมาณ 16 ถึง 24% (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 24%)

จากผลการวิเคราะห์พบว่า สมการทำนายค่าสมการทำนายกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุดของ Bocciarelli และคณะ (2007) และ Xia และ Teng (2005) มีแนวโน้มที่ให้ค่าสูงกว่าผลการทดสอบโดยสมการทำนายของ Bocciarelli และคณะ (2007) มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากกว่า

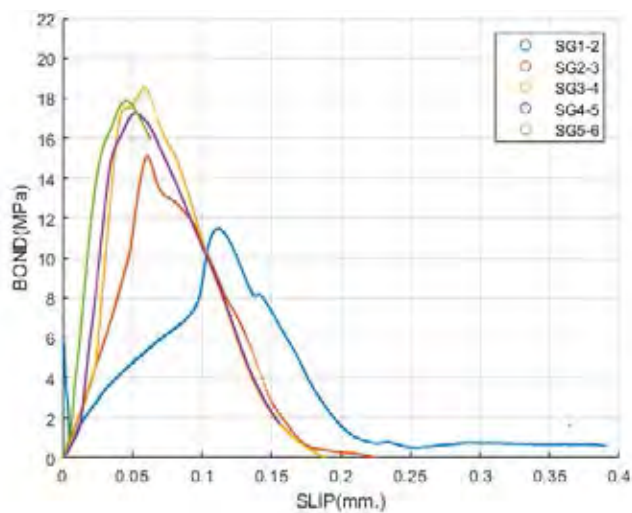


2971436726

CD :Thesis 5870186721 thesis / rev: 02082562 17:24:40 / seq: 13

5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถล

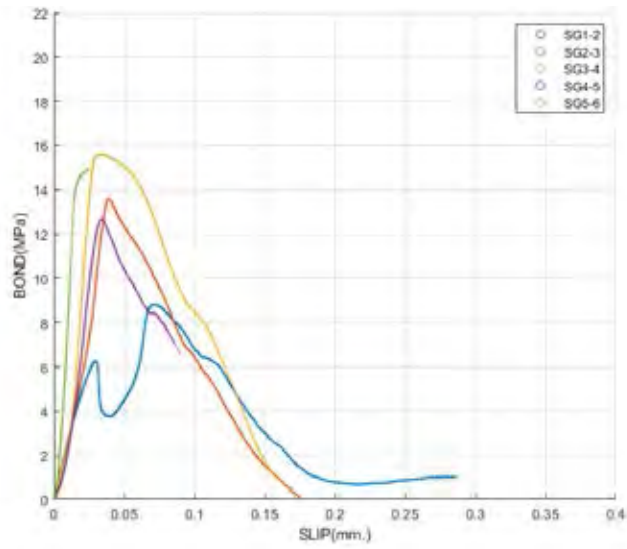
สำหรับการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยสามารถสร้างโดยสมการที่ (1) และ (2) โดยสร้างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลในแต่ละตำแหน่งของมาตรวัดความเครียดบนแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของตัวอย่างการทดสอบ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลของตัวอย่างการทดสอบทั้งหมดเป็นแบบเส้นโค้ง จากการเปรียบเทียบผลของรอยร้าวเริ่มต้นต่อความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลแสดง ดังรูปที่ 33-38 จากผลการทดสอบพบว่าไม่มีความแตกต่างระหว่างกราฟอย่างเห็นได้ชัดแต่สามารถสังเกตได้ว่าเมื่อรอยร้าวเริ่มต้นมีผลทำให้หน่วยแรงเฉือน ณ ตำแหน่งใกล้แรงดึงมีการผันผวนค่อนข้างสูง และในแต่ละตำแหน่งส่วนใหญ่มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน



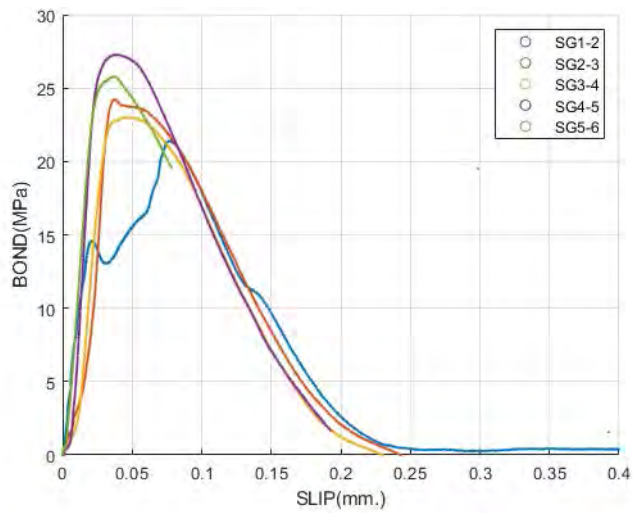
รูปที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลของตัวอย่าง J-150-0-M



2971436726



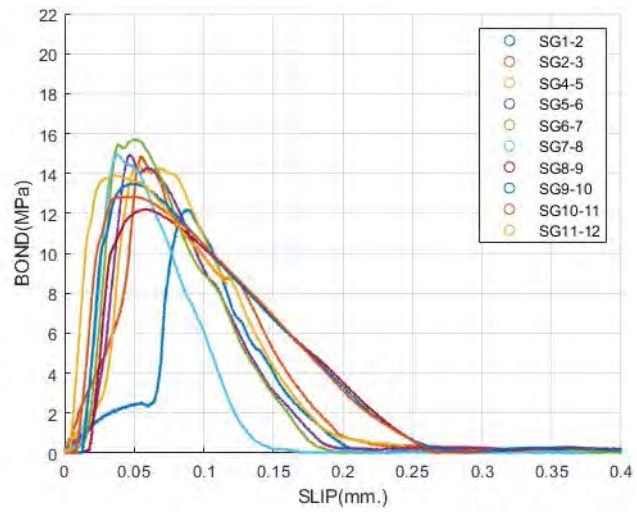
รูปที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลของตัวอย่าง J-150-25-M



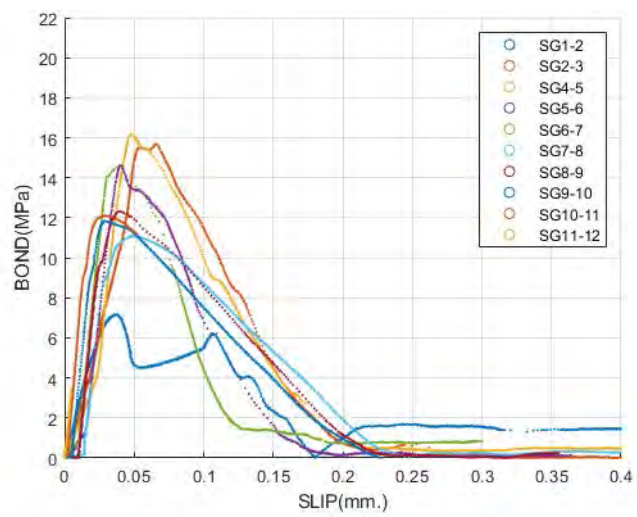
รูปที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลของตัวอย่าง J-150-25-S



2971436726



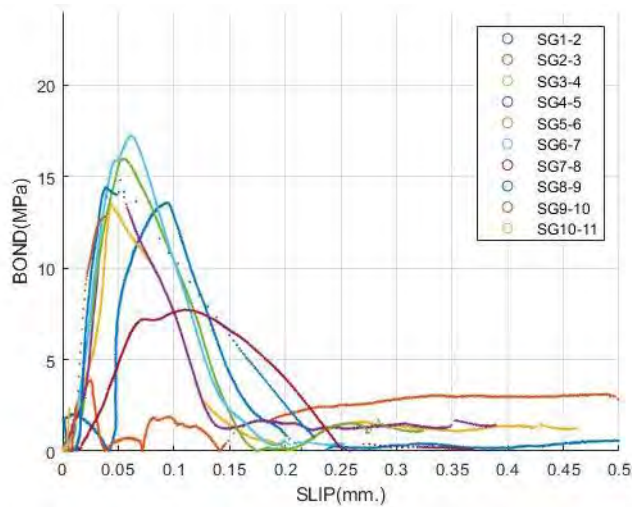
รูปที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลของตัวอย่าง J-400-0-M



รูปที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลของตัวอย่าง J-400-25-M



2971436726



รูปที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลของตัวอย่าง J-400-50-M

จากตารางที่ 6 แสดงค่าเฉลี่ยหน่วยแรงเฉือนสูงสุด ($\tau_{max,exp}$) การไถลเฉลี่ย ณ ตำแหน่งแรงเฉือนสูงสุด ($s_{max,exp}$) และการไถลวิบัติเฉลี่ย ($s_{ult,exp}$) สำหรับชุดการทดสอบที่ 1 ($a_0=0$ มม. ประเภทมอดูลีสียืดหยุ่นปานกลาง และไม่มีวัสดุเชื่อมประสานบนรอยร้าวเริ่มต้น) ค่าเฉลี่ยหน่วยแรงสูงสุดเท่ากับ 12.1 เมกะปาสคาล การไถล ณ ตำแหน่งแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 0.057 มม. และการไถลวิบัติเท่ากับ 0.405 มม. ชุดการทดสอบที่ 2 ($a_0=25$ มม., FRP type M และไม่มีวัสดุเชื่อมประสานบนรอยร้าวเริ่มต้น) ค่าเฉลี่ยหน่วยแรงสูงสุดเท่ากับ 11.4 เมกะปาสคาลและการไถล ณ ตำแหน่งแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 0.047 มม. และการไถลวิบัติเท่ากับ 0.420 มม. ชุดการทดสอบที่ 3 ($L=400$ มม., FRP type M และไม่มีวัสดุเชื่อมประสานบนรอยร้าวเริ่มต้น) รอยร้าวเริ่มต้นเท่ากับ 0, 25 และ 50 มม. หน่วยแรงสูงสุดเท่ากับ 14.2, 11.9 และ 11.0 เมกะปาสคาล ตามลำดับ การไถล ณ ตำแหน่งแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 0.04, 0.04 และ 0.05 มม. ตามลำดับ และการไถลวิบัติเท่ากับ 0.75, 0.61 และ 0.58 มม. ตามลำดับ ชุดการทดสอบที่ 4 ($a_0=25$ มม., FRP type S และไม่มีวัสดุเชื่อมประสานบนรอยร้าวเริ่มต้น) ค่าเฉลี่ยหน่วยแรงสูงสุดเท่ากับ 21.3 เมกะปาสคาล การไถล ณ ตำแหน่งแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 0.06 มม. และการไถลวิบัติเท่ากับ 0.69 มม. และชุดการทดสอบสุดท้าย ($a_0=25$ มม., FRP type S และมีอีพอกซีบนรอยร้าวเริ่มต้น) ค่าเฉลี่ยหน่วยแรงสูงสุดเท่ากับ 20.0 เมกะปาสคาล การไถล ณ ตำแหน่งแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 0.06 มม. และการไถลวิบัติเท่ากับ 0.61 มม. เมื่อเปรียบเทียบผลของรอยร้าวเริ่มต้นหน่วยแรงสูงสุดพบว่าเมื่อรอยร้าวเริ่มต้นมากขึ้นมีผลทำให้หน่วยแรงสูงสุดลดลงโดยตัวอย่างที่มีรอยร้าวเริ่มต้น 0 มม. มีค่าแรงเฉือนสูงสุดมากกว่าตัวอย่างที่มีรอยร้าว



2971436726

เริ่มต้นเท่ากับ 25 มม. 16% และตัวอย่างที่มีรอยร้าวเริ่มต้น 25 มม. มีค่าแรงเฉือนสูงสุดมากกว่า ตัวอย่างที่มีรอยร้าวเริ่มต้นเท่ากับ 50 มม. 4% จากการทดสอบผลของอัตราส่วนสติฟเนสระหว่างเหล็กและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อหน่วยแรงสูงสุดพบว่าตัวอย่างเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยประเภทมอดูลัสยืดหยุ่นต่ำมีค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดสูงกว่าตัวอย่างเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยประเภทมอดูลัสยืดหยุ่นปานกลาง 43% และจากการเปรียบเทียบผลของวัสดุเชื่อมประสานบนรอยร้าวเริ่มต้นพบว่าวัสดุเชื่อมประสานบนรอยร้าวเริ่มต้นไม่มีผลต่อหน่วยแรงเฉือนสูงสุด

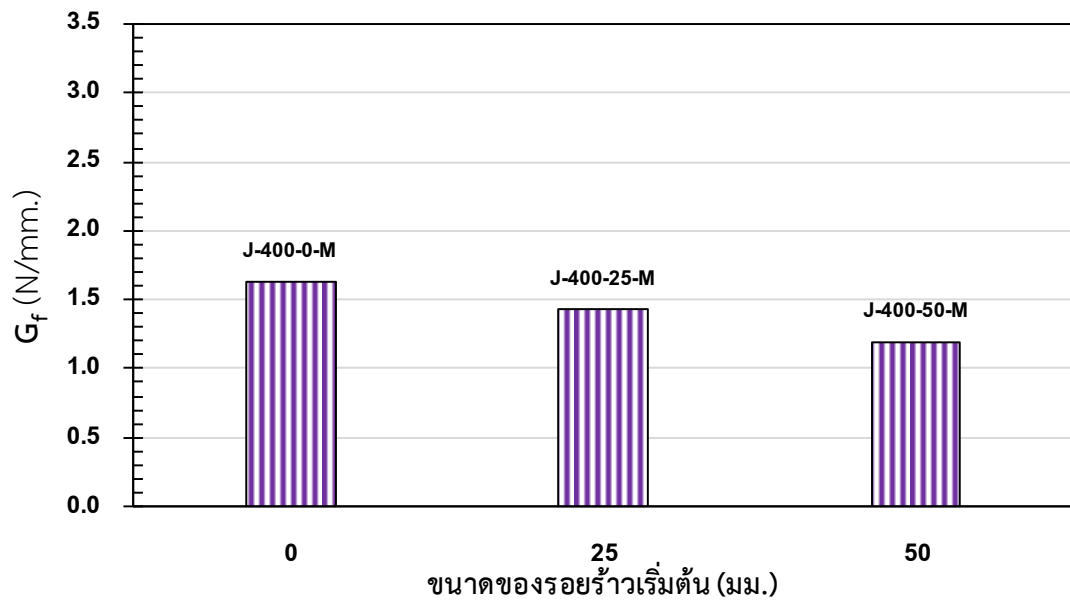
5.6 พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส

พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสของตัวอย่างทดสอบคำนวณโดยพื้นที่ใต้กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลต้งแสดงค่าในตารางที่ 6 แสดงพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสของตัวอย่างการทดสอบ โดยรูปที่ 39 ตัวอย่างรอยร้าวเริ่มต้นเท่ากับ 0 มม. เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยประเภทมอดูลัสยืดหยุ่นต่ำและไม่มีวัสดุเชื่อมประสานบนรอยร้าวเริ่มต้นมีพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสเท่ากับ 1.63 นิวตัน/มม. ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างรอยร้าวเริ่มต้นเท่ากับ 25 มม. เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยประเภทมอดูลัสยืดหยุ่นต่ำและไม่มีวัสดุเชื่อมประสานบนรอยร้าวเริ่มต้นมีพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสเท่ากับ 1.42 นิวตัน/มม. และตัวอย่างรอยร้าวเริ่มต้นเท่ากับ 50 มม. เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยประเภทมอดูลัสยืดหยุ่นต่ำและไม่มีวัสดุเชื่อมประสานบนรอยร้าวเริ่มต้นมีพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสเท่ากับ 1.19 นิวตัน/มม. เมื่อระยะของรอยร้าวมีค่า 25 และ 50 มม. ทำให้ค่าพลังงานการแตกหักที่ผิวสัมผัสมีค่าลดลง 12 และ 26 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีรอยร้าวเริ่มต้น ดังนั้น ระยะของรอยร้าวเริ่มต้นที่มากขึ้นมีผลทำให้พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสที่ผิวลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จากการเปรียบเทียบ ดังรูปที่ 40 ผลของอัตราส่วนสติฟเนสระหว่างเหล็กและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยพบว่าอัตราส่วนสติฟเนสมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส โดยตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยประเภทมอดูลัสยืดหยุ่นต่ำมีค่าพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสมากกว่าตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยประเภทมอดูลัสยืดหยุ่นต่ำมีปานกลางระหว่าง 50 - 60 เปอร์เซ็นต์ และผลของอีพอกซีบนรอยร้าวเริ่มต้นมีผลทำให้พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสลดลง 10-20 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีอีพอกซีบนรอยร้าวเริ่มต้น

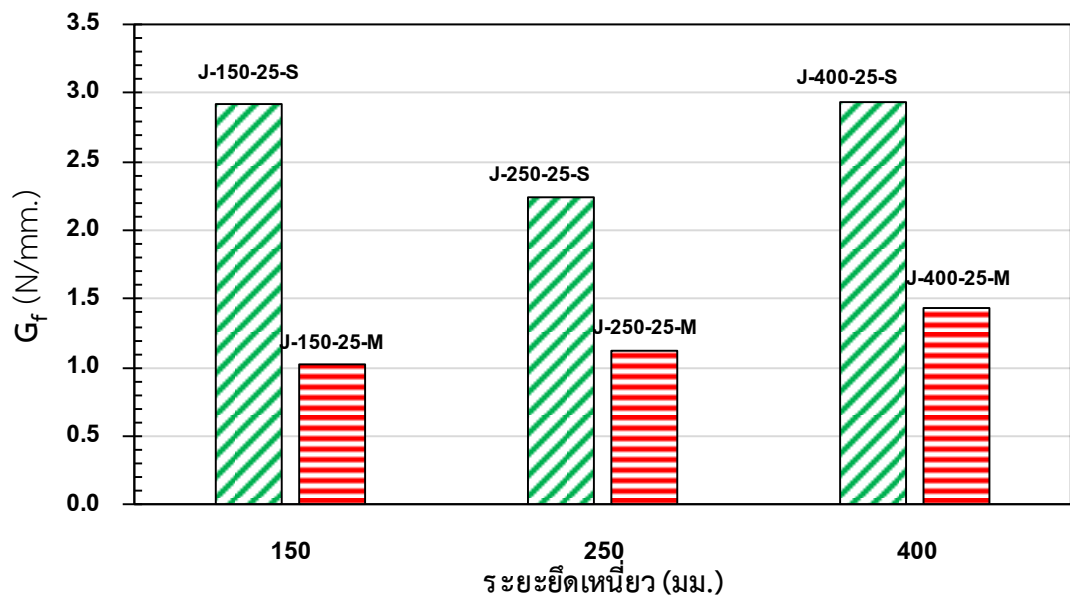


2971436726

CD :Thesis 5870186721 thesis / rev: 02082562 17:24:40 / seq: 13



รูปที่ 39 ผลของรอยร้าวเริ่มต้นต่อพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส



รูปที่ 40 ผลของมอดูลัสยึดหยุ่นของ FRP ต่อพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส



2971436726

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

6.1 สรุปผลการวิจัย

การยึดเหนี่ยวระหว่าง FRP และผิวเหล็กเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการเสริมกำลังภายนอกด้วยวัสดุ FRP งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและแผ่น CFRP ประกอบด้วยกำลังยึดเหนี่ยว ความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพ รูปแบบการวิบัติ ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถล และพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส โดยทำการทดสอบรอยต่อแบบทาบเดี่ยว (เหล็กรูปตัวเอชขนาด 150×150×7×10 มม. ยึดติดกับแผ่น CFRP ด้วยวัสดุเชื่อมประสาน) จำนวน 17 ตัวอย่าง ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย ความยาวของระยะยึดเหนี่ยว (75, 150, 250 และ 400 มม.) ขนาดรอยร้าวเริ่มต้น (0, 25 และ 50 มม.) อัตราส่วนสติฟเนสของเหล็กต่อวัสดุ FRP (5.33 และ 8.21) และอีพอกซีบนรอยร้าวจากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

1. เมื่อระยะยึดเหนี่ยวมากกว่าระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพกำลังยึดเหนี่ยวมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้แผ่นพอลิเมอร์ที่มีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นสูงขึ้นโดยเพิ่มขึ้นร้อยละ 18 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแผ่น FRP มอดูลัสยืดหยุ่นปานกลางและต่ำ และรอยร้าวเริ่มต้นมีผลทำให้กำลังยึดเหนี่ยวลดลงโดยลดลงร้อยละ 13 เมื่อเปรียบเทียบจากตัวอย่างรอยร้าวที่ผิวเท่ากับ 0 และ 25 มม. และลดลงร้อยละ 15 เมื่อเปรียบเทียบจากตัวอย่างรอยร้าวที่ผิวเท่ากับ 25 และ 50 มม.

2. ระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อรอยร้าวเริ่มต้นมีค่ามากขึ้น โดยเพิ่มขึ้นร้อยละ 7 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่มีรอยร้าวเริ่มต้นเท่ากับ 0 และ 25 มม. และเพิ่มขึ้นร้อยละ 6 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างรอยร้าวเริ่มต้นเท่ากับ 25 และ 50 มม. อีกทั้งระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพมีค่าลดลงร้อยละ 21 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างมอดูลัสของ FRP มีค่าลดลงจากมอดูลัสปานกลางเป็นมอดูลัสยืดหยุ่นต่ำ

3. หน่วยแรงเฉือนสูงสุดมีค่าลดลงเมื่อรอยร้าวเริ่มต้นมีค่ามากขึ้น โดยลดลง 16% เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างรอยร้าวเริ่มต้นเท่ากับ 0 และ 25 มม. และหน่วยแรงเฉือนเพิ่มขึ้นเมื่อรอยร้าวเริ่มต้นมากขึ้น 4% เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างรอยร้าวเริ่มต้นเท่ากับ 25 และ 50 มม. และเมื่อมอดูลัส



2971436726

CT :Thesis 5870186721 thesis / rev: 02082562 17:24:40 / seq: 13

ยึดหยุ่นของแผ่น FRP ลดลงหน่วยแรงเฉือนสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น 43% และการไม่มีอีพอกซีบนรอยร้าว เริ่มต้นไม่มีผลทำให้ค่าแรงเฉือนสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ

4. รอยร้าวเริ่มต้นมีผลต่อการไหลสูงสุดของตัวอย่างโดยพบว่าการไหลสูงสุดมีค่าลดลง 18% เมื่อรอยร้าวเริ่มต้นมีค่ามากขึ้น (รอยร้าวเริ่มต้น 0 และ 25 มม.) และลดลง 5% เมื่อรอยร้าวเริ่มต้นเพิ่มจาก 25 มม. เป็น 50 มม. และการไหลเฉือนสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น 33% เมื่อมอดูลัสยึดหยุ่นของแผ่น FRP เพิ่มขึ้นจาก 5.33 เป็น 8.21 และการไม่มีอีพอกซีบนรอยร้าวเริ่มต้นมีผลทำให้การไหลสูงสุดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

5. พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสมีค่าลดลง 6% และ 9% เมื่อรอยร้าวเริ่มต้นมีค่ามากขึ้นจาก 0 มม. เป็น 25 มม. และจาก 25 มม. เป็น 50 มม. ตามลำดับ มอดูลัสยึดหยุ่นของแผ่น FRP มีผลอย่างมากต่อพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสโดยพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น 59% เมื่อมอดูลัสยึดหยุ่นของแผ่น FRP เปลี่ยนจากมอดูลัสยึดหยุ่นปานกลางเป็นมอดูลัสยึดหยุ่นต่ำ มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และอีพอกซีบนรอยร้าวเริ่มต้นมีผลทำให้พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสลดลง 21 % เมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่มีรอยร้าวเริ่มต้นและไม่มีรอยร้าวเริ่มต้น

6. รอยร้าวเริ่มต้นไม่มีผลอย่างเห็นได้ชัดต่อการวิบัติของชิ้นงานแต่อัตราส่วนสติเฟนสและระยะยึดเหนี่ยวมีผลทำให้การวิบัติของบางชิ้นงานเปลี่ยนไปจากการวิบัติระหว่างผิวอีพอกซีและแผ่น FRP เป็นแบบวิบัติระหว่างผิวอีพอกซีและแผ่น FRP ผสมวิบัติจากการหลุดล่อนของแผ่น FRP

7. เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองของ Xia และTeng (2005) พบว่า แบบจำลองทำนายค่ากำลังยึดเหนี่ยวที่สูงกว่าผลการทดสอบ แต่ให้ค่าระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลใกล้เคียงกับผลการทดสอบ ในขณะที่แบบจำลองของ Bocciarelli และคณะ (2007) มีแนวโน้มให้ค่าของกำลังยึดเหนี่ยวและระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลใกล้เคียงผลการทดสอบแต่แบบจำลองทั้งสองไม่สามารถทำนายผลของรอยร้าวเริ่มต้นที่มีผลต่อกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุดและระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลได้

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. การทดสอบแรงเฉือนแบบรอยต่อทาบเดี่ยวควรระวังเรื่องแนวของการให้แรงให้ตรง เพื่อป้องกันการเกิดแรงดัดในการทดสอบ

2. ควรมีการศึกษาผลกระทบของตัวแปรรอยร้าวเริ่มต้นเพิ่มเติม

รายการสัญลักษณ์

| | | |
|-----------------|---|---|
| τ_i | = | หน่วยแรงเฉื่อยที่ผิวของชั้นประสาน ณ ตำแหน่งใดๆ |
| τ_{max} | = | แรงเฉือนสูงสุด |
| t_a | = | ความหนาของชั้นวัสดุเชื่อมประสาน |
| ε_i | = | ความเครียด ณ ตำแหน่งใดๆ |
| b_f | = | ความกว้างของแผ่น FRP |
| E_f | = | มอดุลัสยืดหยุ่นของแผ่น FRP |
| t_f | = | ความหนาของแผ่น FRP |
| b_s | = | ความกว้างของแผ่น FRP |
| E_s | = | มอดุลัสยืดหยุ่นของแผ่นเหล็ก |
| t_s | = | ความหนาของแผ่นเหล็ก |
| P_{max} | = | กำลังประลัยของการยึดเหนี่ยว |
| P_i, P_o | = | กำลังยึดเหนี่ยวต่อหนึ่งหน่วยความกว้างของวัสดุเชื่อมประสาน |
| γ_e | = | ความเครียดเฉือนของวัสดุเชื่อมประสานแบบยึดหยุ่น |
| γ_p | = | ความเครียดเฉือนของวัสดุเชื่อมประสานแบบพลาสติก |
| t_a | = | ความหนาของวัสดุเชื่อมประสาน |
| G_a | = | มอดุลัสยืดหยุ่นแรงเฉือนของวัสดุเชื่อมประสาน |
| $f_{t,a}$ | = | กำลังรับแรงดึงของการยึดเหนี่ยว |
| N | = | จำนวนชั้นของวัสดุที่ใช้ในการเสริมกำลัง ($N = 2$ สำหรับการทดสอบรอยต่อ |
| ทาบคู่) | | |
| e | = | ตัวเลขของออยเลอร์ (Euler's number) |
| β | = | อัตราส่วนสติฟเนส (stiffness ratio) |
| R | = | พื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียด |



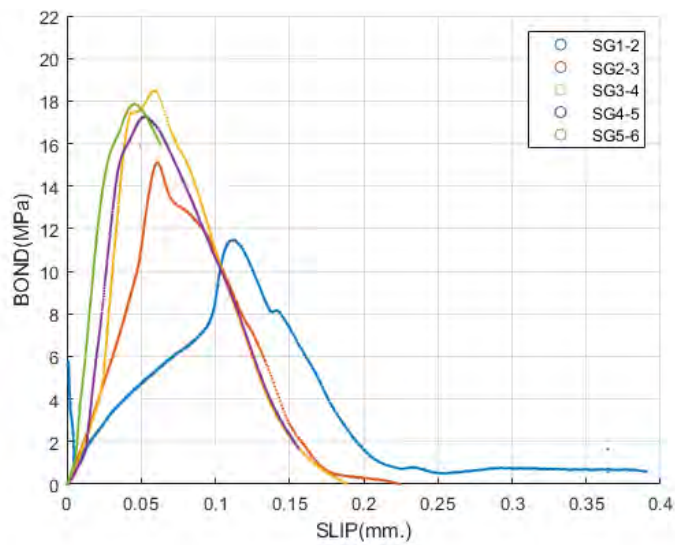
2971436726

CU Thesisis 5870186721 thesis / rev: 02082562 17:24:40 / seq: 13

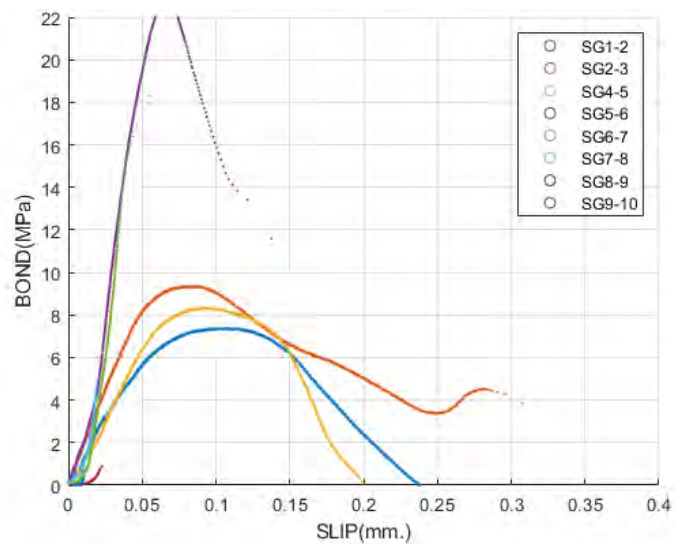
ภาคผนวก

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการไถล

รูปที่ ก.1-ก.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการไถลชุดตัวอย่างที่ 1



รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการไถลตัวอย่าง J-150-0-M

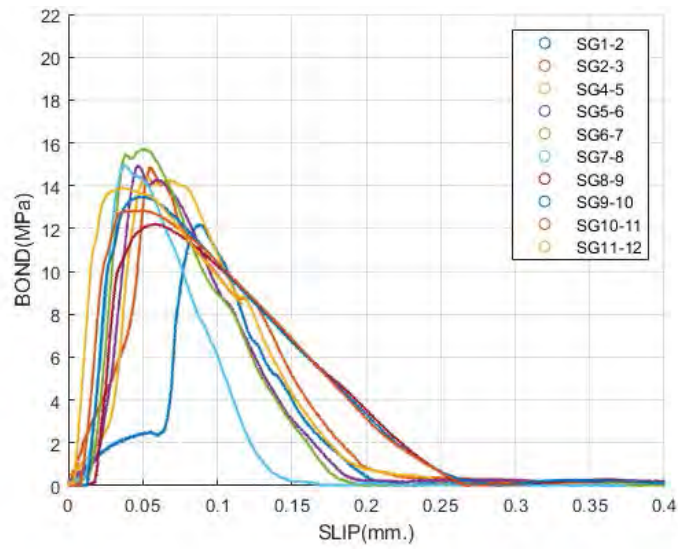


รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการไถลตัวอย่าง J-250-0-M



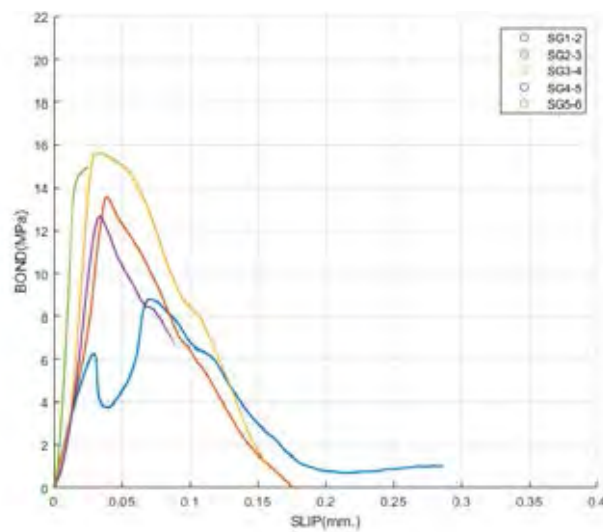
2971436726

CU Thesisis 5870186721 thesis / rev: 02082562 17:24:40 / seq: 13



รูปที่ ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการไถลตัวอย่าง J-450-0-M

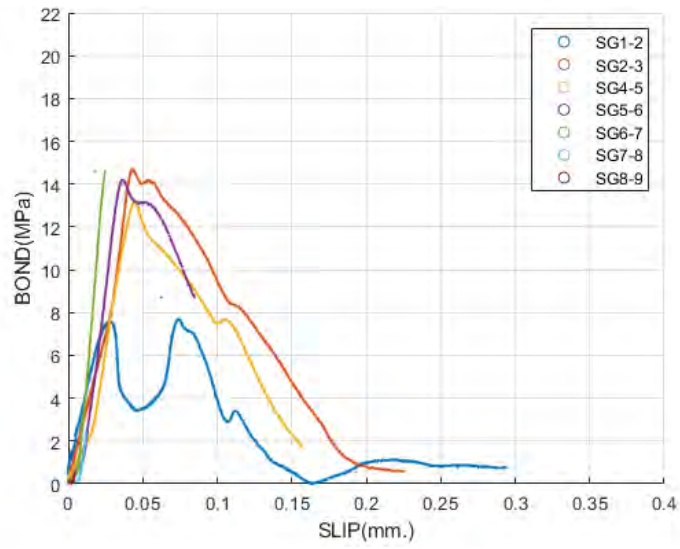
รูปที่ ก.4-ก.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการไถลชุดตัวอย่างที่ 2



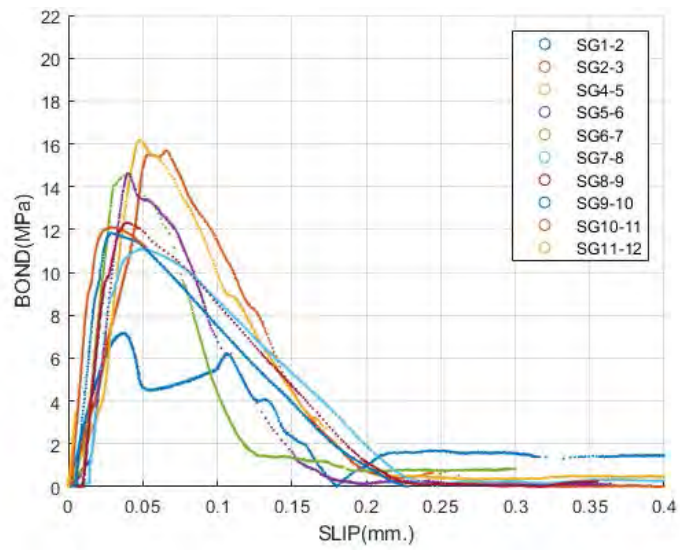
รูปที่ ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการไถลตัวอย่าง J-150-25-M



2971436726



รูปที่ ก.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการไถลตัวอย่าง J-250-25-M

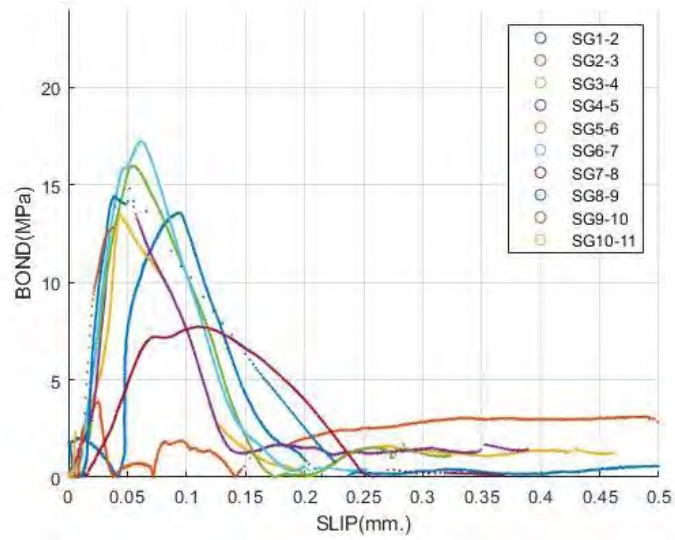


รูปที่ ก.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการไถลตัวอย่าง J-450-25-M



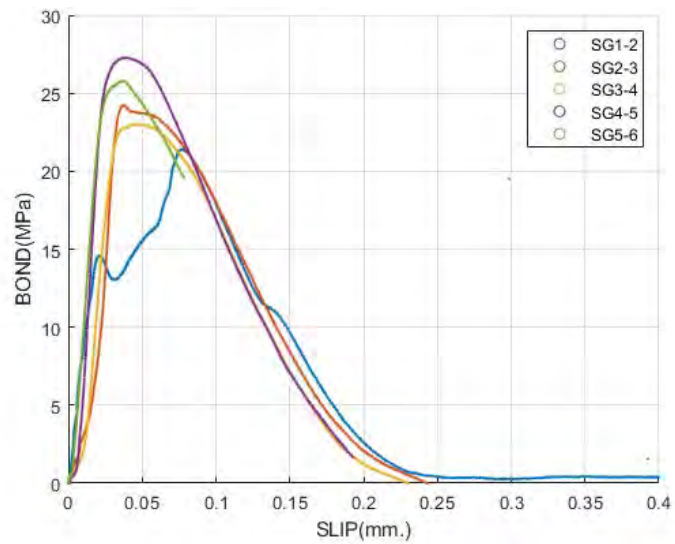
2971436726

รูปที่ ก.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการไถลชุดตัวอย่างที่ 3



รูปที่ ก.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการไถลตัวอย่าง J-450-50-M

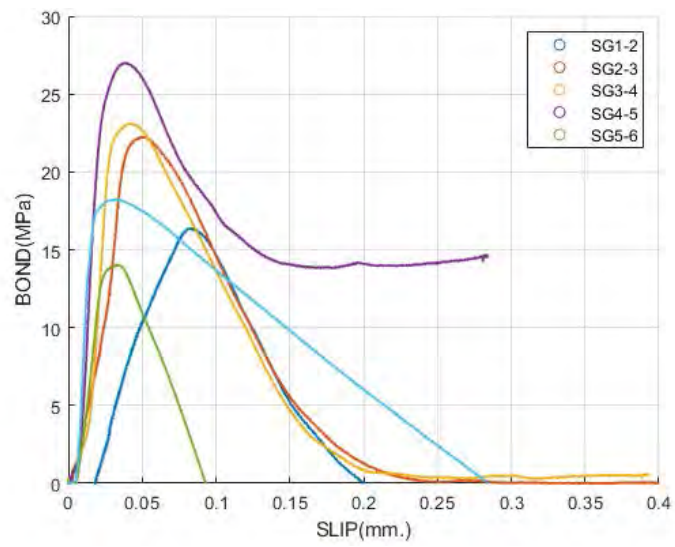
รูปที่ ก.8-ก.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการไถลชุดตัวอย่างที่ 4



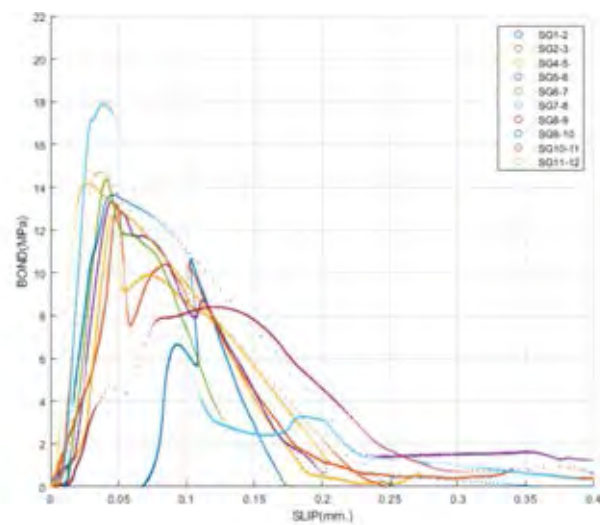
รูปที่ ก.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการไถลตัวอย่าง J-150-25-S



2971436726



รูปที่ ก.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการไถลตัวอย่าง J-250-25-S

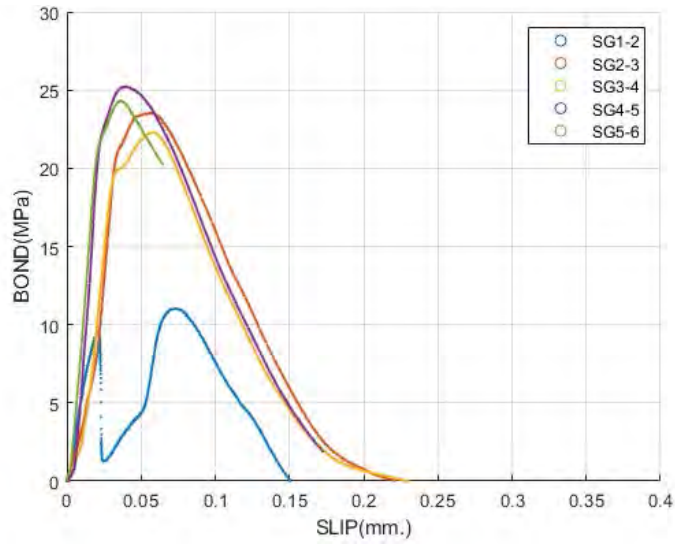


รูปที่ ก.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการไถลตัวอย่าง J-400-25-S

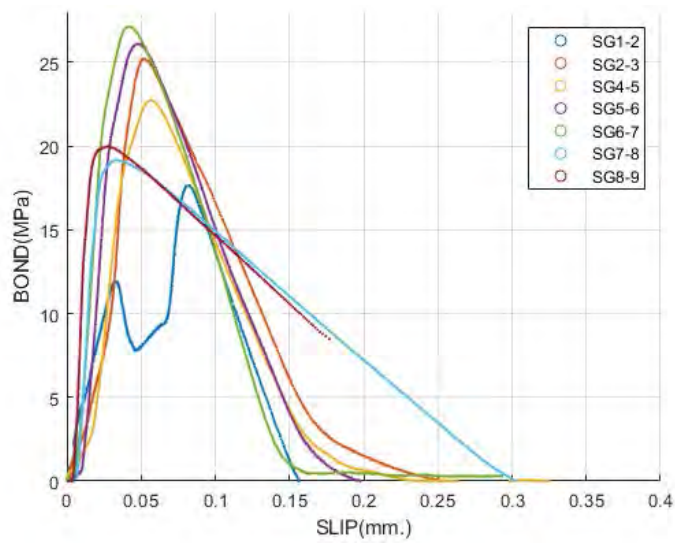


2971436726

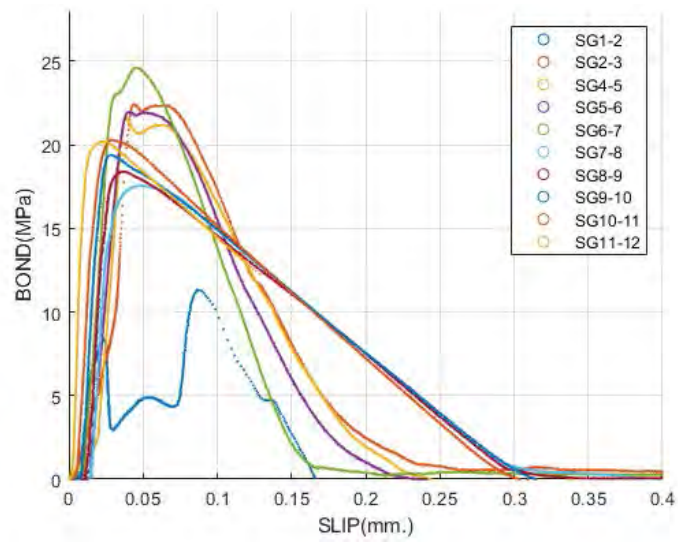
รูปที่ ก.11-ก.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการไถลชุดตัวอย่างที่ 5



รูปที่ ก.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการไถลตัวอย่าง JA-150-25-S



รูปที่ ก.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการไถลตัวอย่าง JA-250-25-S

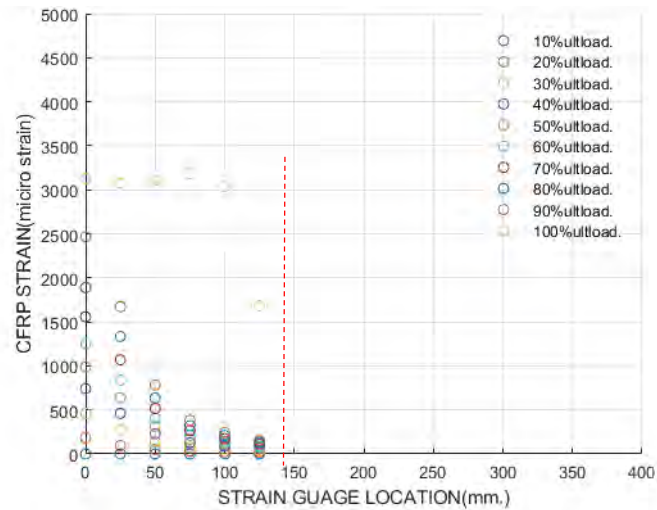


รูปที่ ก.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการไถลตัวอย่าง JA-400-25-S

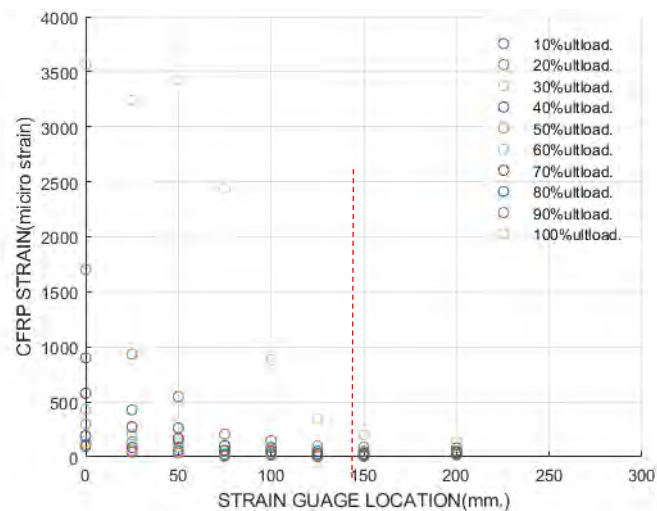


2971436726

ระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลและความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดความ
รูปที่ ก.14-ก.16 แสดงระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและ
ตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดความเครียดชุดที่ 1



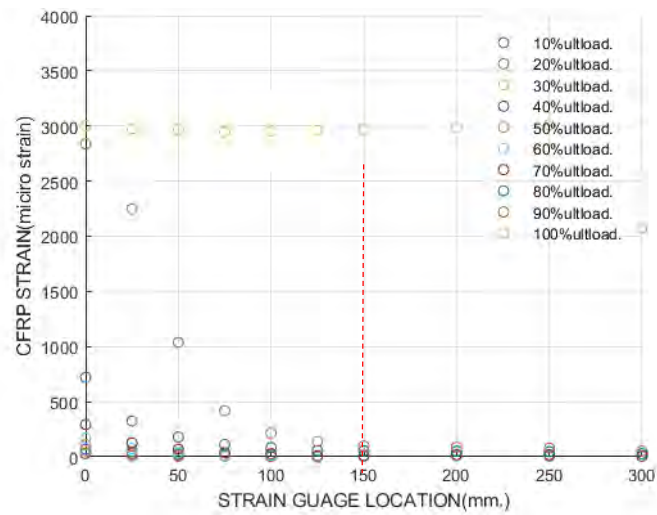
รูปที่ ก.14 ระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลเท่ากับ 145 มม. ของตัวอย่าง J-150-0-M



รูปที่ ก.15 ระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลเท่ากับ 130 มม. ของเคียดตัวอย่าง J-250-0-M

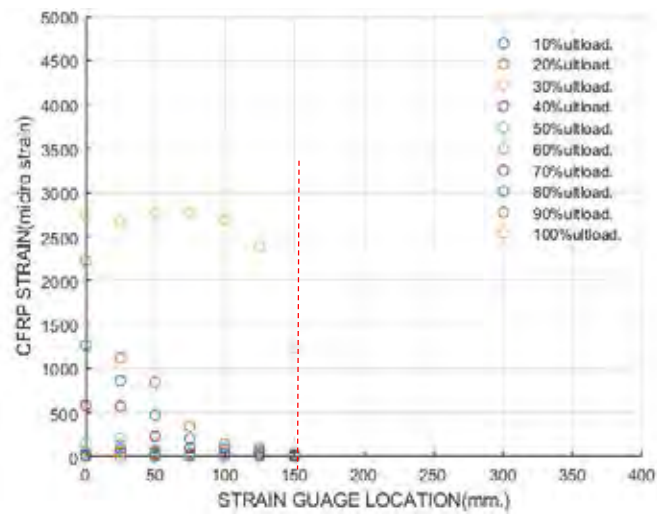


2971436726



รูปที่ ก.16 ระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลเท่ากับ 140 มม. ของตัวอย่าง J-250-0-M

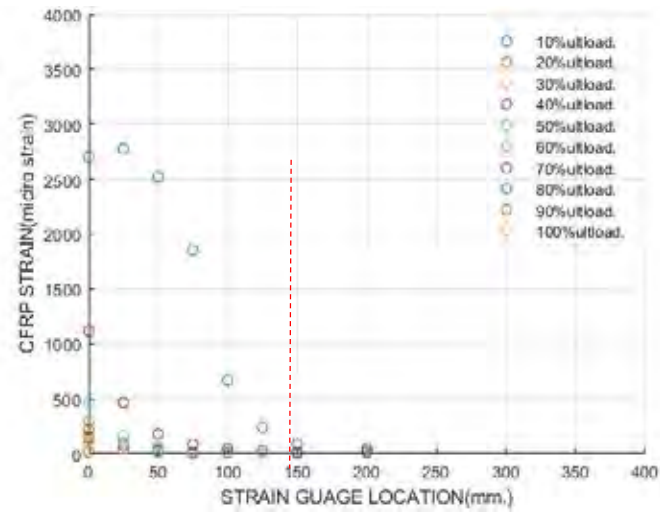
รูปที่ ก.17-ก.19 แสดงระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดความเครียดชุดที่ 2



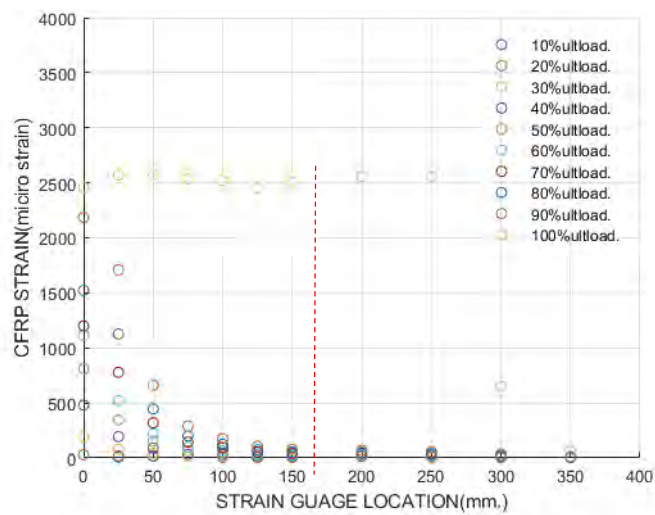
รูปที่ ก.17 ระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลเท่ากับ 140 มม. ของตัวอย่าง J-150-25-M



2971436726



รูปที่ ก.18 ระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลเท่ากับ 135 มม. ของตัวอย่าง J-250-25-M



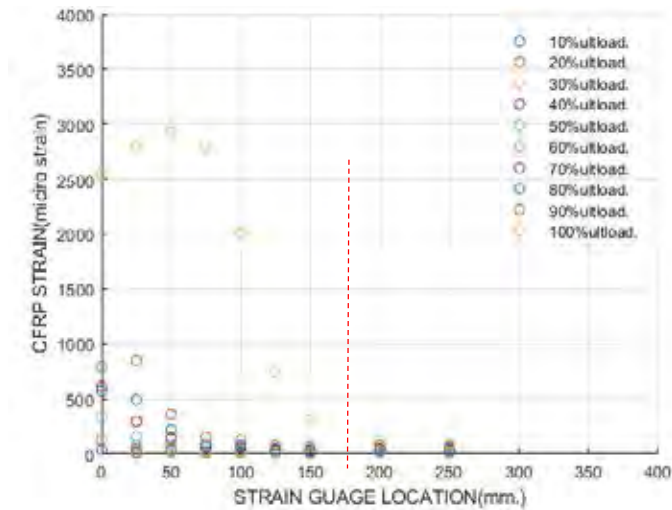
รูปที่ ก.19 ระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลเท่ากับ 150 มม. ของตัวอย่าง J-400-25-M



2971436726

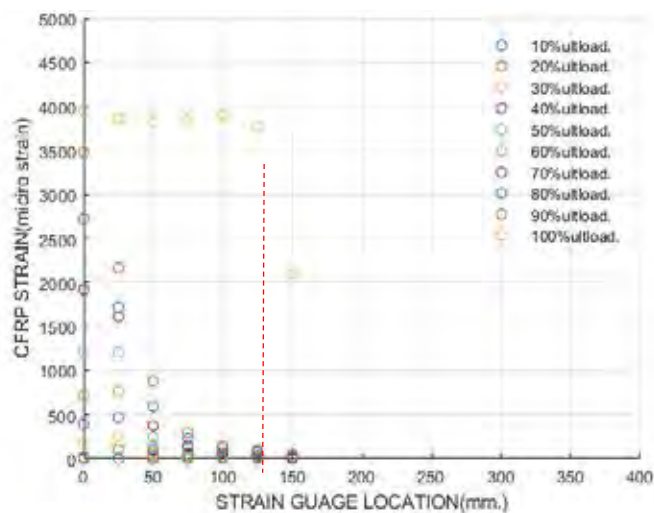
รูปที่ ก.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดความเครียดชุด

ที่ 3



รูปที่ ก.20 ระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลเท่ากับ 160 มม. ของตัวอย่าง J-400-50-M

รูปที่ ก.21-ก.23 แสดงระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดความเครียดชุดที่ 4

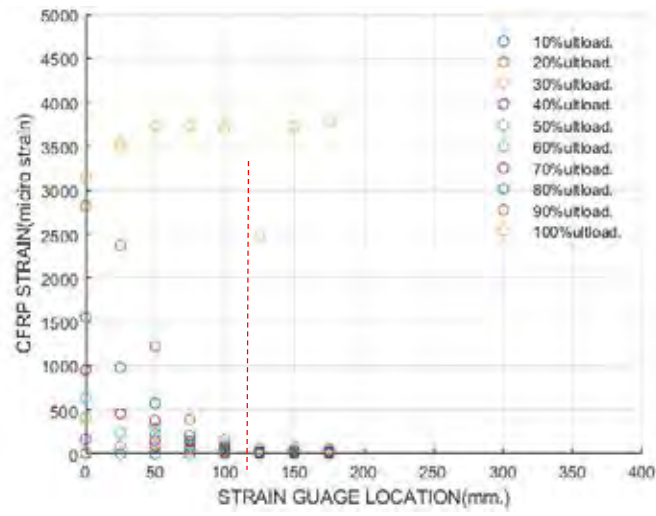


รูปที่ ก.21 ระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลเท่ากับ 110 มม. ของตัวอย่าง J-150-25-S

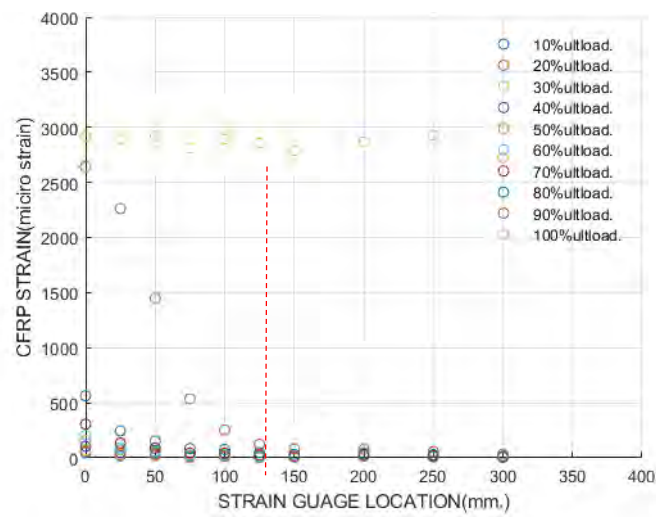


2971436726

CU Thesisis 5870186721 thesis / rev: 02082562 17:24:40 / seq: 13



รูปที่ ก.22 ระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลเท่ากับ 100 มม. ของตัวอย่าง J-250-25-S

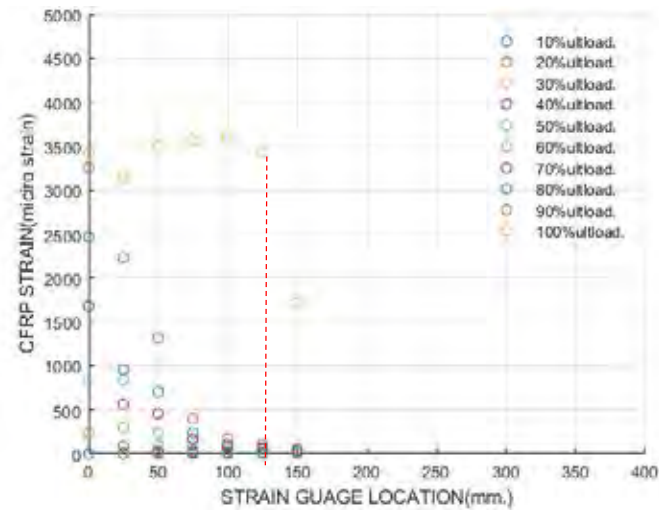


รูปที่ ก.23 ระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลเท่ากับ 120 มม. ของตัวอย่าง J-400-25-S

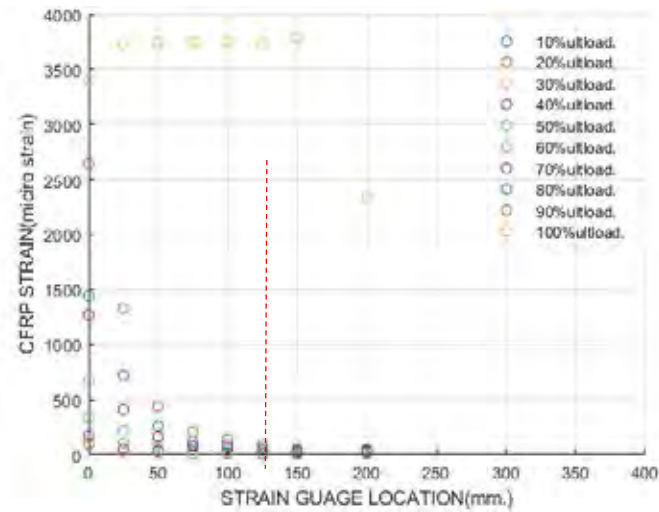


2971436726

รูปที่ ก.24-ก.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและตำแหน่งติดตั้งมาตรวัด
ความเครียดชุดที่ 5



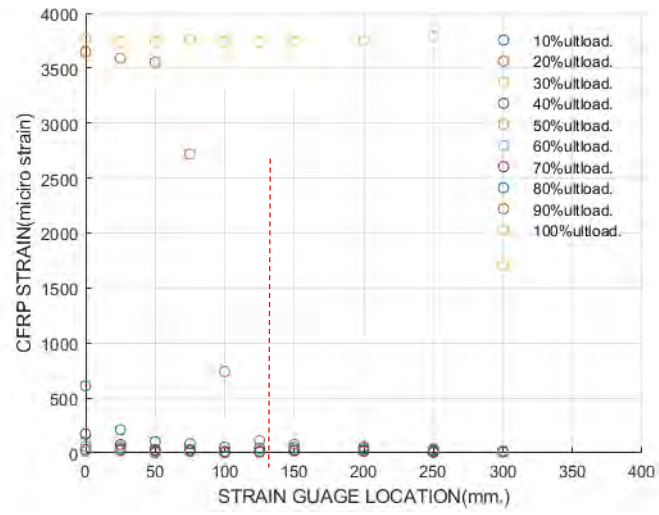
รูปที่ ก.24 ระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพเท่ากับ 110 มม. ของตัวอย่าง JA-150-25-S



รูปที่ ก.25 ระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพเท่ากับ 110 มม. ของตัวอย่าง JA-250-25-S



2971436726



รูปที่ ก.26 ระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลเท่ากับ 120 มม. ของตัวอย่าง JA-400-25-S



2971436726

บรรณานุกรม



2971436726

CU Theslis 5870186721 thesis / rcv: 02082562 17:24:40 / seq: 13

บรรณานุกรม

- Allan RC, Bird J, Clarke JD. "Use of adhesives in repair of cracks in ship structures."
Mater Sci Technol ,1988
- Baldan A. "Adhesively-bonded joints and repairs in metallic alloys polymers and composite materials: adhesives adhesion theories and surface pretreatment." J Mater Sci, 2004.
- Bocciarelli M, Colombi P, Fava G, Poggi C. "Interaction of interface delamination and plasticity in tensile steel members reinforced by C FRP plates." Int J Fract, 2007.
- Buyukozturk Oral, Oguz Gunes and Erdem Karaca. "Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites" Construction and Building Materials, 2004
- Cadei JMC, Stratford TJ, Hollaway LC, Duckett WG. "Strengthening metallic structures using externally bonded fibre-reinforced polymers- C595." London: CIRIA, 2004.
- Colombi P. and Poggi C. "Strengthening of tensile steel members and bolted joints using adhesively bonded C FRP plates." Construction and Building Materials, 2006.
- Dawood M. and S. Rizkalla "Bond and splice behavior of C FRP laminates for strengthening steel beams." Proceedings of the Advanced Composites in Construction Conference-ACIC United Kingdom: University of Bath, 2007
- Deng J, Lee MMK. "Behaviour under static loading of metallic beams reinforced with a bonded C FRP plate." Compos Struct;78:232-42, 2007.
- Diab, H. M., and Farghal, O. A. (2014) . Bond strength and effective bond length of FRP sheets/plates bonded to concrete considering the type of adhesive layer. *Composites Part B: Engineering*, 58, 618-624.



2971436726

CU Thesisis 5870186721 thesis / recv: 02082562 17:24:40 / seq: 13

- Dodiuk H. and S. Kenig. "The effect of surface preparation on the performance of acrylic adhesive joints" *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1988.
- El Damatty AA, Abushagur M. "Testing and ၂ုပ်ပွဲပွဲပွဲ of shear and peel behaviour for bonded steel/ FRP connections." *Thin-Walled Structures*, 2003.
- Ceroni F, Lanniciello M, Pecce M. "Bond behavior of FRP carbon plates externally bonded over steel and concrete elements." *Experimental outcomes and numerical investigations*, 2006.
- Fawzia S, Al-Mahaidi R, Zhao XL, Rizkalla S. "Strengthening of circular hollow steel tubular section using C FRP sheets." *Construction and Building Materials*, 2005.
- Fawzia S, Zhao XL, Al-Mahaidi R. "Bond-slip ၂ုပ်ပွဲပွဲပွဲ for C FRP sheets bonded to steel plate". In: *Third international conference on FRP composites in civil engineering*, 2006.
- Fawzia S, Al-Mahaidi R. and Zhao XL. "Experimental and finite element analysis of a double strap joint between steel plates and normal modulus C FRP ." *Composite Structures*, 2006.
- Fernando D. "Bond behaviour and debonding failures in C FRP -strengthened steel members". PhD Hong Kong Polytechnic University Kowloon, 2010.
- Fitton M Broughton I. "Variable modulus adhesives: an approach to optimised joint performance." *Int J Adhes Adhes*;25 (4) :329–36, 2005.
- Harries KA, Peck AJ, Abraham EJ. "Enhancing stability of structural steel sections using FRP . *Thin-Walled Structure*";47 (10) :1092–101, 2009.
- Harris AF, Beevers A. "The effects of grit-blasting on surface properties for adhesion". *Int J Adhes* , 1999.
- Hart-Smith LJ. "Adhesive-bonded double-lap joints." *Douglas Aircraft CompanyNASA; CR-112235* ,1973.
- Hitchcock SJ, Carroll NT, Nicholas MG. "Some effects of substrate roughness on wettability." *J Mater Sci*;16 (3) :714–32, 1981.

- Hollaway L.C, Cadei J. “Progress in the technique of upgrading metallic structures with advanced polymer composites.” *Progress in Structural Engineering and Materials*;4 (2) :131–48, 2002.
- Hollaway L.C, Teng JG. “Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre reinforced polymer (FRP) composites.” England: Woodhead Publishing and Maney Publishing; 2008.
- Hollaway L.C, and Cadei J. “Progress in the technique of upgrading metallic structures with advanced polymer composites” *Progress in Structural Engineering Materials* v. 4n. 2 April-June pp 131148 ,2002.
- Jiao H, Zhao XL. CFRP strengthened butt-welded very high strength (VHS) circular steel tubes. *Thin-Walled Structures*;42 (7) :963–78, 2004.
- Nakaba K, Kanakubo T, Furata T and Yoshisawa H. “ Bond Behavior between Fiber-Reinforced Polymer Laminates and Concrete” *ACI Structure Journal* title no.98-S34.
- Kim YJ, Harries KA. “Behaviour of tee-section bracing members retrofitted with C FRP strips subjected to axial compression.” *Compos B:Eng*;42 (4) :789–800, 2011.
- Lenwari A, Thepchatri T and Albrecht P. “Debonding Strength of Steel Beams “, 2006.
- Linghoff D, Haghani R, Al-Emrani M. “Carbon-fibre composites for strengthening steel structures.” *Thin-Walled Struct*;47 (10) :1048–58, 2009.
- Fabio M, Vistap M, Karbhari, Davide, Tinazzi and Vitaliani R.. “Static and fatigue behavior of steel/C FRP adhesive bonds for the rehabilitation of metallic bridges” *Mechanics of Masonry Structures*, 2004.
- Mays G.C, and A.R. Hutchinson. *Adhesives in Civil Engineering* Cambridge University Press New YorkNew York 333 p, 1992.
- Mertz D. and Gillespie J. “Rehabilitation of steel bridge girders through the application of advanced, 1996.

- Mertz D.R. and Gillespie J.W. "Rehabilitation of steel bridge girders through the application of advanced composite materials" Transportation Research Board Contract NCHRP-93-ID011 Washington D.C., 1996.
- Miller TC, Chajes MJ, Mertz DR, Hastings JN. "Strengthening of a steel bridge girder using C FRP plates." Journal of Bridge Engineering, 2001.
- Miller Trent C, Michael J, Chajes Dennis, R. Mertz and Jason N. Hastings "Strengthening of a steel bridge girder using C FRP plates". ASCE Journal of Bridge Engineering, 2001.
- Mohammadi T. and Wan B. "Sensitivity analysis of stress state and bond strength of fiber-reinforced polymer/concrete interface to boundary conditions in single shear pull-out test", 2015.
- Katsuyoshi N, Carol K. Shield and Jerome F. Hajjar. "Effective bond length of carbon-fiber-reinforced polymer strips bonded to fatigued steel bridge I-girders" Journal of Bridge Engineering ASCE, 2005.
- Packham DE. "Surface energy surface topography and adhesion." Int J Adhes Adhes;23 (6) :437-482003.
- Rosen SL. "Fundamental principles of polymeric materials." John Wiley and Sons, 1993.
- Sallam HEM, Ahmad SSE, Badawy AAM, Mamdouh W. "Evaluation of steel I-beams strengthened by various plating methods." Adv Struct Eng;9 (4) :535-44, 2006.
- Schnerch D, Dawood M, Rizkalla S, Sumner E. "Proposed design guidelines for strengthening of steel bridges with FRP materials." Constr Build Mater;21 (5) :1001-10, 2007.
- Schnerch D, Stanford K, Sumner E, Rizkalla S. "Strengthening steel structures and bridges with high modulus carbon fiber reinforced polymers: Resin selection and scaled monopole behaviour. "Transportation Research Record, 2004.

- Schnerch D. "Strengthening of steel structures with high modulus carbon fiber reinforced polymer (C FRP) materials." Ph.D. dissertation North Carolina State University Raleigh North Carolina, 2005.
- Sen R, Liby L, Mullins G. "Strengthening steel bridge sections using C FRP laminates." *Compos B:Eng* ;32 (4) :309–22, 2001.
- Smith ST, Teng JG. "Interfacial stresses in plated beams." *Eng Struct*;23 (7) :857–71, 2001.
- Sykes J.M. "Surface treatments for steel" *Surface Analysis and Pretreatment of Plastics and Metals* D.M. Brewis Ed. Applied Science Publishers Ltd. Essex England, 1982.
- Tavakkolizadeh M. and Saadatmanesh H. "Strengthening of steel-concrete composite girders using carbon fiber reinforced polymers sheets" *Journal of Structural Engineering ASTM* 129 (1) 30-40 2003.
- Teng JG, Fernando D, Yu T, Zhao XL. "Treatment of steel surfaces for effective adhesive bonding." *Proceedings of the 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering CICE-2010*. Beijing China; September 27–29, 2010.
- Teng JG, Smith ST, Yao J, Chen JF. Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs. *Constr Build Mater*;17 (6–7) :447–62, 2003.
- Teng JG, Yu T, and Fernando D. "Strengthening of steel structures with fiber-reinforced polymer composites.", 2012.
- Trent C, Michael J, Chajes Dennis, R. Mertz and Jason N. Hastings. "Strengthening of a steel bridge girder using C FRP plates" *ASCE Journal of Bridge Engineering*, 2001.
- Xia SH, Teng JG. "Behaviour of FRP -to-steel bonded joints." In: Chen JF Teng JG editors. *Proceedings of the international symposium on bond behaviour of FRP in structures*. Hong Kong: International Institute for FRP in Construction. p. 419–26, 2005

Xiao-Ling, Zhao Lei, Zhang “State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures.” 2006.

Yao J, Teng JG, Chen JF. “Experimental study on FRP -to-concrete bonded joints.” Compos B;36 (2) :99–113, 2005.



2971436726

CU iThesis 5870186721 thesis / recv: 02082562 17:24:40 / seq: 13

ประวัติผู้เขียน

| | |
|-------------------|---|
| ชื่อ-สกุล | นายบารมี กุลเกียรติอนันต์ |
| วัน เดือน ปี เกิด | 27 พฤษภาคม 2536 |
| สถานที่เกิด | นนทบุรี |
| วุฒิการศึกษา | สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2558 และเข้ารับการศึกษต่อในระดับปริญญามหาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตั้งแต่ปีการศึกษา 2558 จนถึงปัจจุบัน |
| ที่อยู่ปัจจุบัน | 110 ซ.รัตนานิเบศน์ 14 ต.บางกระสอ อ.เมือง จ.นนทบุรี 11000 |