

บทที่ 2 งานวิจัยที่ผ่านมา

2.1 ปัญหาความล้าในคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กประกบ

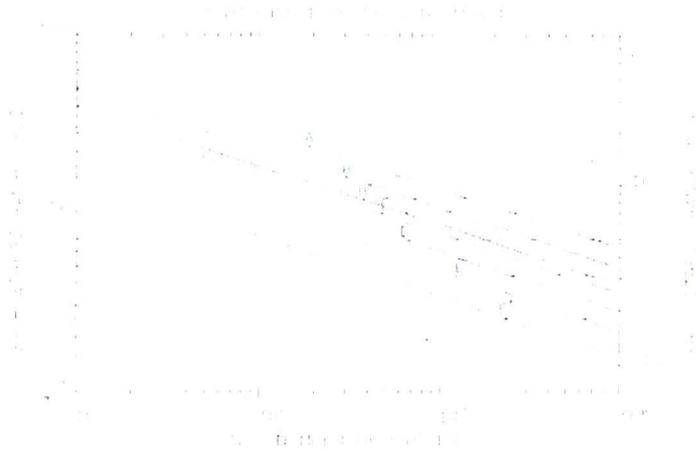
ความล้าเป็นพฤติกรรมการวิบัติของวัสดุที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำซ้ำซาก (แรงกระทำซ้ำซากเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่หรือแรงกระทำซ้ำซากเป็นรอบแอมพลิจูดไม่คงที่) ซึ่งความล้านี้จะทำให้เกิดรอยร้าวกับชิ้นส่วนของโครงสร้างและนำไปสู่การวิบัติของโครงสร้างได้ โดยปกติแล้วข้อต่อชนิดรอยเชื่อมในโครงสร้างจะมีโอกาสเกิดรอยร้าวล้าได้มากกว่าข้อต่อแบบสลักเกลียวเนื่องจากรอยต่อชนิดรอยเชื่อมมีความต้านทานในการรับกำลังความล้าได้ต่ำที่สุด (Albrecht และคณะ, 1983 ; Hassan และ Bowman, 1995)

Fisher และคณะ (1970, 1974, 1983, 1987, 1993) รายงานผลการทดลองรอยเชื่อมตั้งแต่ปี 1960 เป็นต้นมา รอยร้าวล้าทั้งหมดเริ่มเกิดขึ้นที่ส่วนไม่ต่อเนื่องในรอยเชื่อมหรือขอบของรอยเชื่อมและรอยร้าวล้าเติบโตไปควบคู่กับหน่วยแรงดึงที่กระทำเป็นรอบ

ความเค้นสูง (stress concentration) มักจะเกิดในส่วนของรอยเชื่อมที่ไม่ต่อเนื่องบางส่วน อันเกิดจากการละเลยในกระบวนการเชื่อมหรือเทคนิคในการเชื่อมรอยต่อ นอกจากนี้ยังรวมถึงแผ่นเหล็กที่ใช้เสริมกำลังที่มีรอยเชื่อมขวางเป็นแนวตั้งฉากกับน้ำหนักรรทุกจร ความเค้นดึงคงค้างสูง (high tensile residual stress) ที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมมักจะพบที่บริเวณฐานของรอยเชื่อม และความเค้นดึงคงค้างอาจจะมีค่าเท่ากับค่าความเค้นดึงที่จุดคราก

อัตราส่วนความเค้นที่ใช้ในการทดลอง ($R = \frac{S_{min}}{S_{max}}$) ไม่มีบทบาทสำคัญในการกำหนดกำลังความล้าในรายละเอียดของรอยเชื่อมภายใต้แรงกระทำเป็นรอบเพราะว่าค่าความเค้นสูงสุดและค่าความเค้นต่ำสุดที่จุดเริ่มเกิดรอยร้าวและเติบโต (บริเวณรอยเชื่อมหรือฐานของรอยเชื่อม) จะเป็นค่าความเค้นดึงที่มาจากความเค้นดึงคงค้างสูงและ Fisher (1997) พบว่าช่วงของความเค้น (stress range) จะมีผลต่อกำลังความล้าในวัสดุ

ASSHTO (1996) จำแนกประเภทรอยเชื่อมที่ใช้ในตามสะพานที่แสดงกำลังความล้าจากความสัมพันธ์ของช่วงของความเค้นกับจำนวนรอบของแรงกระทำไว้ 5 ประเภท (แสดงดังรูปที่ 2.1) และในรายละเอียดประเภท E เป็นประเภทที่อายุของโครงสร้างที่รับกำลังความล้าได้ต่ำที่สุด ต่อมา ASSHTO ได้เพิ่มประเภท E' เป็นประเภทอายุของโครงสร้างที่มีกำลังความล้าได้ต่ำที่สุด แทนประเภท E



รูปที่ 2.1 กราฟ S-N ที่แสดงกำลังความล้าของรอยเชื่อมตามมาตรฐาน ASSHTO (1996)

นอกจากนี้ยังมี JSSC (1995) ซึ่งระบุประเภทของรอยเชื่อมใช้ในตามสะพานที่แสดงกำลังความล้าจากความสัมพันธ์ของช่วงของความเค้นกับจำนวนรอบของแรงกระทำไว้ 8 ประเภท (แสดงดังรูปที่ 2.2) และใน 8 ประเภทถูกแบ่งตามแอมพลิจูดของแรงกระทำเป็น 2 กรณีคือ

- 1) ประเภทแรงกระทำแบบแอมพลิจูดคงที่ (Constant amplitude)
- 2) ประเภทแรงกระทำแบบแอมพลิจูดไม่คงที่ (Variable amplitude)

และกำหนดว่าช่วงของความเค้นที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างต่ำกว่าช่วงของความเค้นที่จำนวนรอบของแรงกระทำเท่ากับ 2×10^6 รอบ (cut-off limit) ในประเภทเดียวกันจะไม่เกิดความเสียหายล้าทั้งในกรณีของแรงกระทำแบบแอมพลิจูดคงที่และแอมพลิจูดไม่คงที่

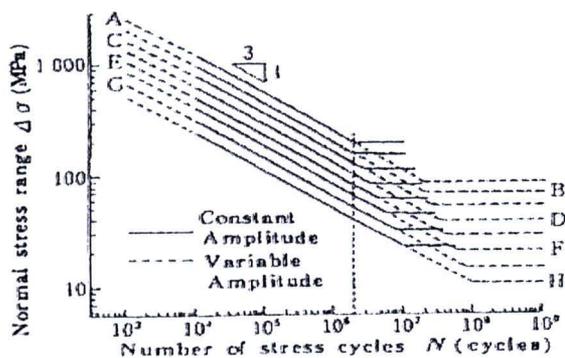


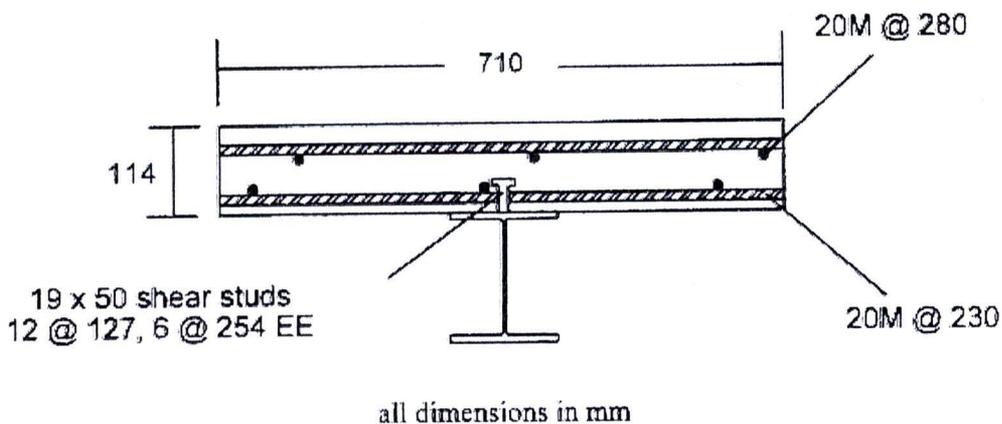
Fig.4.1 Fatigue design curves for joints subjected to normal stress

รูปที่ 2.2 กราฟ S-N ที่แสดงกำลังความล้าของรอยเชื่อมตามมาตรฐาน JSSC (1995)

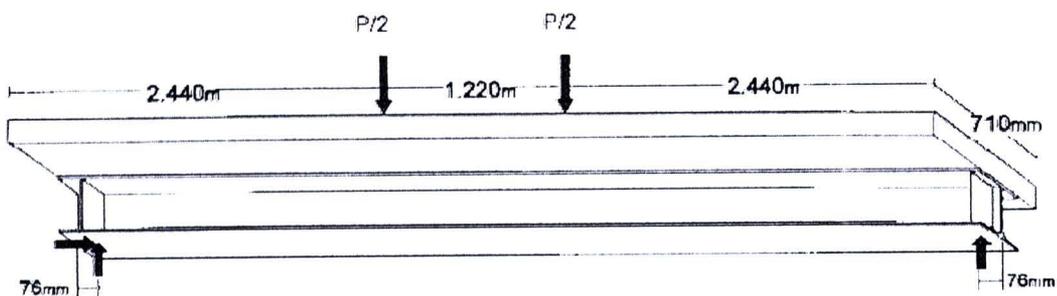
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน, รอยต่อทาบเดี่ยวและรอยต่อประกบคู่แบบสมมาตร

Sen และคณะ (2001) ศึกษาการเสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในชิ้นส่วนสะพานเหล็กเชิงประกอบที่ถูกทดสอบภายใต้แรงกระทำสถิต นำชิ้นส่วนสะพานเชิงประกอบเสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนประกอบในคานเหล็ก W 8x24 ยาว 6.10 ม. (กำลังที่จุดครากเท่ากับ 310 เมกะปาสคาลและกำลังที่จุดครากเท่ากับ 370 เมกะปาสคาล) โดยมีแผ่นพื้นคอนกรีตขนาด 114x710 มม. (ความลึกxความกว้าง) ยึดติดด้วยสลักเกลียว A36 ตลอดความยาวคาน (แสดงดังรูปที่ 2.3) ทดลองภายใต้แรงกระทำสถิต

จากนั้นใช้วัสดุประสานชนิด FR 1272 กับแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนชนิด T300 (ความหนา 2 มม. และ 5 มม.) ซ่อมแซมชิ้นส่วนสะพานที่ถูกทดลองและนำไปทดลองภายใต้แรงกระทำสถิตอีกครั้ง



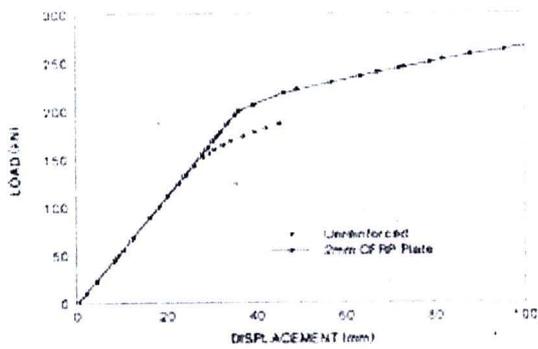
(ก) ภาพหน้าตัดของชิ้นส่วนสะพานเชิงประกอบ



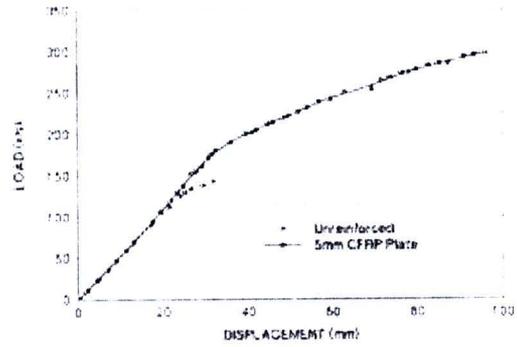
(ข) แบบจำลองการทดลองชิ้นส่วนสะพานเชิงประกอบ (การทดลองแบบ 4 จุดตัด)

รูปที่ 2.3 การทดลองชิ้นส่วนสะพานเชิงประกอบ (Sen และคณะ, 2001)

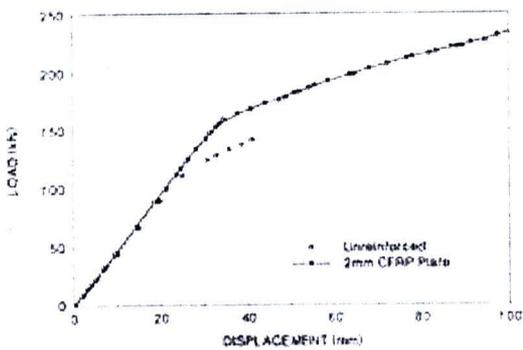
ผลการทดลองการเสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (ความหนา 2 และ 5 มม.) ในชิ้นส่วนสะพาน (คานเหล็ก) เชิงประกอบ (แผ่นพื้นคอนกรีตวางบนคานเหล็ก) แสดงผลดังรูปที่ 2.4



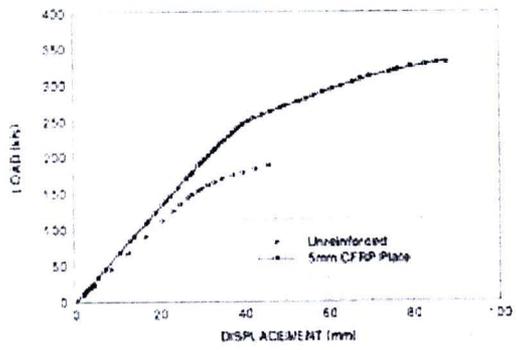
(ก)



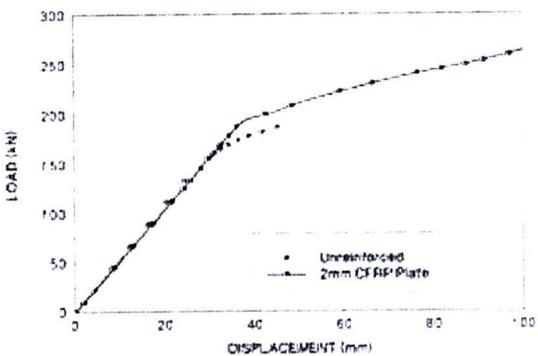
(ง)



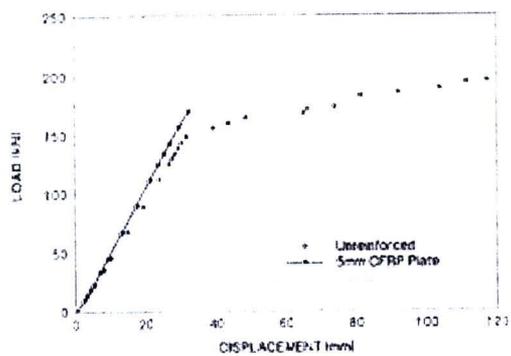
(ข)



(จ)



(ค)



(ฉ)

รูปที่ 2.4 กราฟเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักกับระยะการยืดตัวของชิ้นส่วนของสะพานกับชิ้นส่วนของสะพานที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (Sen และคณะ, 2001)

จากรูปที่ 2.4 แบ่งประเภทของตัวอย่างการทดลองได้ดังนี้

1) กำลังที่จุดครากของคานเหล็กเท่ากับ 370 เมกะปาสคาลแสดงดังรูปที่ 2.4(ก) กับรูปที่ 2.4(ค) นอกจากนั้นกำลังที่จุดครากของคานเหล็กเท่ากับ 310 เมกะปาสคาล

2) กรณีชั้นส่วนสะพานที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่มีความหนาเท่ากับ 2 มม. แสดงดังรูปที่ 2.4(ก) – รูปที่ 2.4(ค) และกรณีชั้นส่วนสะพานที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่มีความหนาเท่ากับ 5 มม. แสดงดังรูปที่ 2.4(ง) – รูปที่ 2.4(ฉ)

3) กรณีชั้นส่วนสะพานที่ซ่อมแซมด้วยการยึดติดแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนด้วยวัสดุประสานแสดงดังรูปที่ 2.4(ก) กับ รูปที่ 2.4(ฉ) และกรณีชั้นส่วนสะพานที่ซ่อมแซมด้วยยึดติดแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนด้วยวัสดุประสานและสลักเกลียวแสดงดังรูปที่ 2.4(ข) – รูปที่ 2.4(จ)

จากผลการทดลองของงานวิจัยนี้พบว่า 1) ความแข็งแรงของโครงสร้างเพิ่มขึ้นเช่น กรณีที่คานเหล็กมีกำลังจุดครากเท่ากับ 310 เมกะปาสคาลพบว่ากำลังของชั้นส่วนของสะพานเพิ่มขึ้น 21 และ 52% ในชั้นส่วนสะพานที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่มีความหนา 2 และ 5 มม. ตามลำดับและกรณีที่คานเหล็กมีกำลังจุดครากเท่ากับ 370 เมกะปาสคาลพบว่ากำลังของชั้นส่วนสะพานเพิ่มขึ้น 9 และ 32% ในชั้นส่วนสะพานที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่มีความหนา 2 และ 5 มม. ตามลำดับ 2) ในการทดลองของกรณีชั้นส่วนสะพานที่ซ่อมแซมด้วยการยึดติดแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่มีความหนา 2 มม. ไม่พบการฉีกขาดของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำสูงสุดที่แสดงตามรูปที่ 2.4(ก) – รูปที่ 2.4(ข) และกรณีชั้นส่วนสะพานที่ซ่อมแซมด้วยการยึดติดแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่มีความหนา 5 มม. ด้วยวัสดุประสานและสลักเกลียวพบว่าแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนถูกฉีกขาดโดยสลักเกลียว

Messick (1996) ศึกษาสภาวะแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อระบบการเสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำสถิตและแรงกระทำซ้ำซากเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ในการทดลองภายใต้แรงกระทำซ้ำซากพบว่าการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจะเกิดขึ้นที่ปลายแผ่นในขณะทดลอง

สาเหตุของการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนถูกคาดเดาว่ามาจากความไม่เหมาะสมของการเตรียมตัวอย่างเช่น แรงดันที่ไม่สม่ำเสมอที่เกิดจากผิวไม้กระทำกับแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน และจากการศึกษาวัสดุที่ช่วยลดผลกระทบการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจากสภาวะแวดล้อมพบว่าการใช้โพรพิลแอลกอฮอล์ทำความสะอาดผิวสัมผัสระหว่างเหล็กกับชั้นวัสดุประสานก่อนที่จะติดตั้งแผ่นเสริมกำลังดีกว่าการใช้อะซิโตนเช็ดทำความสะอาด

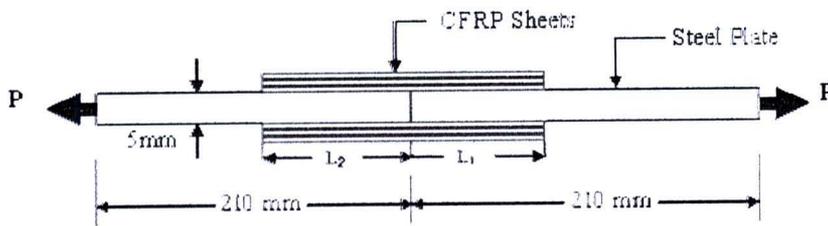
อัศวินทร์ เลื่อนวารี (2002) ศึกษาพฤติกรรมของคานเหล็กที่เสริมกำลังบางส่วนด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงสถิตและแรงกระทำซ้ำซากเพื่อกำหนดระยะปลายของแผ่นที่ต้องเผื่อออกไปจากจุดหยุดแผ่นที่กำหนดจากความต้องการด้านกำลัง

พฤติกรรม 3 แบบที่ใช้กำหนดระยะปลายของแผ่นเสริมกำลังนี้ได้แก่ 1) การวิบัติที่เกิดจากการหลุดจับปลิ้นของแผ่นภายใต้แรงสถิต 2) การเกิดความเป็นคอมโพสิตของหน้าตัดโดยแผ่นมีหน่วยแรงดึงสอดคล้องกับหน่วยแรงจากการวิเคราะห์หน้าตัดคาน และ 3) การเกิดการหลุดล่อนที่ปลายแผ่นภายใต้แรงกระทำซ้ำซาก โดยระยะที่มากที่สุดจากการพิจารณาทั้ง 3 กรณีนี้จะเป็นระยะปลายของแผ่นที่ต้องการ

ในงานวิจัยนี้พบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบกำลังของรอยต่อชนิดแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตรร่วมกับหลักการของกลศาสตร์การแตกหักเชิงเส้นสามารถนำไปอธิบายพฤติกรรมแบบที่ 1 ได้อย่างดี สำหรับพฤติกรรมแบบที่ 2 พบว่าการวิเคราะห์เชิงวิเคราะห์สามารถนำมาใช้ประเมินระยะที่แผ่นต้องการเพื่อพัฒนาหน่วยแรงดึงจนเกิดความเป็นคอมโพสิตของหน้าตัดได้ สำหรับพฤติกรรมแบบที่ 3 พบว่าช่วงของความเค้นมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการทำนายอายุของการหลุดล่อนที่ปลายแผ่นจากผลการทดสอบคานที่มีแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำซ้ำซากที่อัตราส่วนความเค้น 0.2 ความถี่ประมาณ 2 รอบต่อวินาที ซึ่งในทุกชิ้นงานที่ทำการทดสอบไม่พบรอยร้าวที่ปีกคานซึ่งเป็นข้อดีของการใช้วัสดุเชื่อมประสาน จากการศึกษาพบว่าคุณสมบัติการยึดเหนี่ยวระหว่างผิวเหล็กและวัสดุเชื่อมประสานเป็นสิ่งสำคัญที่มีผลต่อพฤติกรรมแบบที่ 1 และแบบที่ 3

จากการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อระยะปลายของแผ่นอันได้แก่ ความหนาของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน, ความหนาของชั้นวัสดุเชื่อมประสาน, โมดูลัสของแผ่นที่ใช้เสริมกำลังและโมดูลัสของวัสดุเชื่อมประสานพบว่าเมื่อพิจารณาพฤติกรรมแบบที่ 1 และ 3 ระยะแผ่นที่ต้องการจะเพิ่มขึ้นตามทุกตัวแปร ยกเว้นกรณีที่ชั้นวัสดุเชื่อมประสานหนาขึ้นระยะที่แผ่นต้องการจะลดลง สำหรับพฤติกรรมแบบที่ 2 ระยะที่แผ่นต้องการจะเพิ่มขึ้นตามทุกตัวแปร ยกเว้นกรณีที่โมดูลัสของวัสดุเชื่อมประสานเพิ่มขึ้นระยะที่แผ่นต้องการจะลดลง

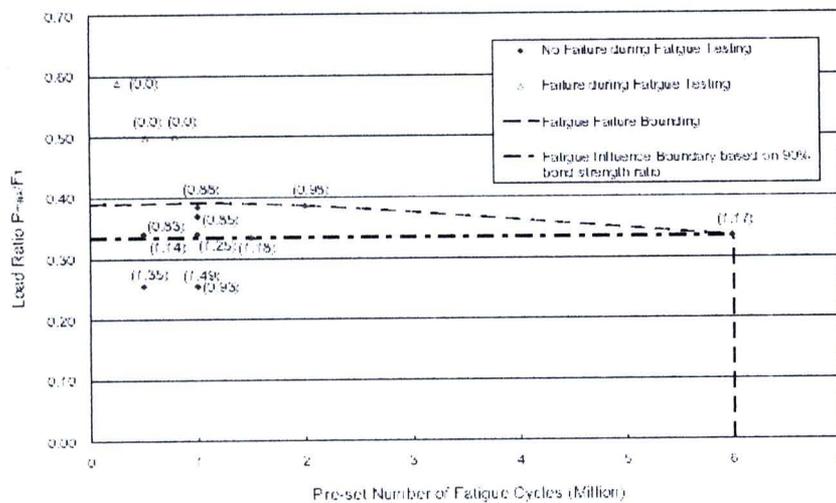
Al-Mahaidi และคณะ (2005) ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นในรอยต่อประกบคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงกระทำซ้ำซาก ในการทดลองใช้แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนชนิด CF130 และ CF530 ประกบกับแผ่นเหล็กที่มีความหนา 5 มม. แสดงดังรูปที่ 2.5



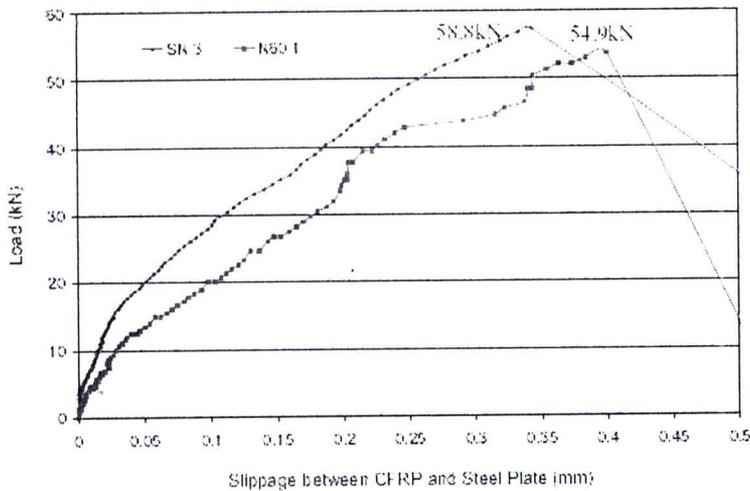
รูปที่ 2.5 โมเดลของรอยต่อประกับคู่แบบสมมาตรโดยที่ $L_1 = 40, 60$ มม. และ $L_2 = 80$ มม.

(Al-Mahaidi และคณะ, 2005)

จากการทดลองพบว่าภายใต้แรงกระทำซ้ำซากสูงสุดที่ต่ำกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ของแรงดึงประลัยนั้นจะทำให้ไม่เกิดการวิบัติและไม่มีผลกระทบต่อกำลังยึดเหนี่ยวภายใต้แรงกระทำซ้ำซากที่ต่ำกว่า 35 เปอร์เซ็นต์ของแรงดึงประลัยแสดงดังรูปที่ 2.6 แต่จะมีผลทำให้สตีฟเนสความต้านทานการไถลของชั้นประสานลดลงแสดงดังรูปที่ 2.7

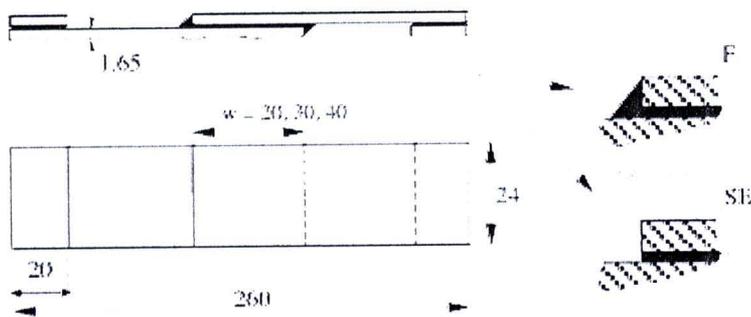


รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแรงกระทำซ้ำซากสูงสุดต่อแรงดึงประลัยกับจำนวนรอบของการหลุดล่อน (Al-Mahaidi และคณะ, 2005)



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับระยะการเคลื่อนที่ (ไถล) โดยที่เส้น SN-3 คือการทดสอบชิ้นงานภายใต้แรงดึงสถิตและเส้น N90-1 คือชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบภายใต้แรงกระทำซ้ำๆาก่อนทดสอบแบบแรงดึงสถิต (Al-Mahaidi และคณะ, 2005)

Quaresimin และ Ricotta (2005) ศึกษาผลกระทบของระยะทาบและมุมปลายระยะทาบในรอยต่อแบบทาบเดี่ยวภายใต้แรงดึงสถิตและภายใต้แรงกระทำซ้ำๆาก โดยรอยต่อแบบทาบเดี่ยวประกอบด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนชนิด Seal Texipreg® CC206, T300 ยึดติดกันด้วยวัสดุประสานชนิด Scotch Weld 9323 โดยมีระยะทาบเท่ากับ 20, 30, และ 40 มม. ตามลำดับ และมุมปลายระยะทาบเป็นมุมฉากและมุมป้าน แสดงดังรูปที่ 2.8

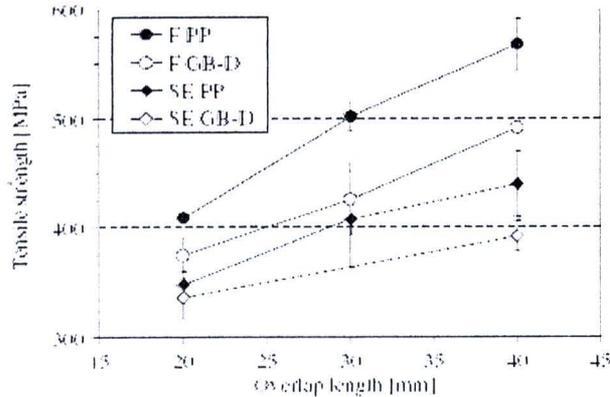


Geometry of single lap bonded joint (dimensions in millimetres). SE = square edge joints, F = spew fillet joints.

รูปที่ 2.8 รอยต่อแบบทาบเดี่ยว (SE = มุมฉาก, F = มุมป้าน)

(Quaresimin และ Ricotta, 2005)

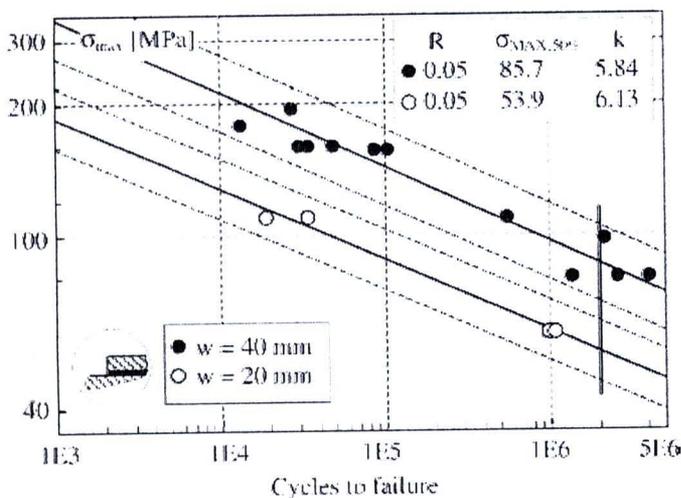
ผลการทดลองรอยต่อแบบทาบเดี่ยวภายใต้แรงดึงสถิตพบว่ากำลังของรอยต่อทาบจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทาบเพิ่มขึ้นและรอยต่อทาบเดี่ยวชนิดมูมปลายระยะทาบเป็นมูมบ้าน (F) จะมีกำลังรับแรงดึงมากกว่ารอยต่อทาบเดี่ยวมูมปลายระยะทาบเป็นมูมฉาก (SE) แสดงผลดังรูปที่ 2.9



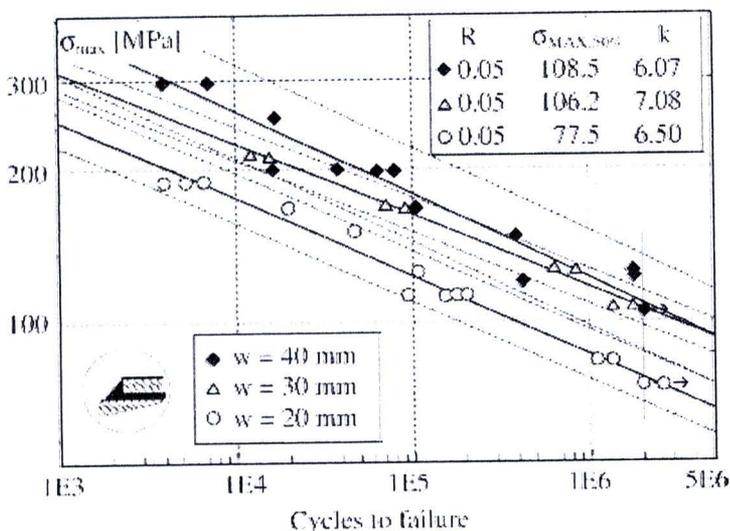
รูปที่ 2.9 ผลกระทบของกำลังรับแรงดึงในรอยต่อแบบทาบเดี่ยวโดยพิจารณามุมที่ปลายระยะทาบและระยะทาบของรอยต่อ (Quaresimin และ Ricotta, 2005)

ผลการทดลองรอยต่อทาบเดี่ยวภายใต้แรงกระทำซ้ำซาก (แสดงดังรูปที่ 2.10) พบว่า

- 1) รอยร้าวล้าทั้งหมดจะเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนกับชั้นวัสดุประสาน
- 2) ในกรณีมูมปลายระยะทาบของรอยต่อต่างกันพบว่ารอยต่อแบบทาบเดี่ยวชนิดมูมปลายระยะทาบเป็นมูมบ้าน (F) จะมีกำลังรับความล้ามากกว่ารอยต่อทาบเดี่ยวมูมปลายระยะทาบเป็นมูมฉาก (SE) ถึง 25%
- 3) ระดับของช่วงของความเค้นในการทดลองมีผลทำให้อัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าเพิ่มขึ้น
- 4) ระยะทาบไม่มีผลต่ออัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าแต่จะมีผลทำให้อายุของความล้าเพิ่มขึ้นในกรณีที่ระดับของช่วงของความเค้นในการทดลองเท่ากัน



(ก) ผลกระทบของระยะทาบใดๆ ในรอยต่อแบบทาบเดี่ยว (มุมปลายระยะทาบเป็นมุมฉาก)



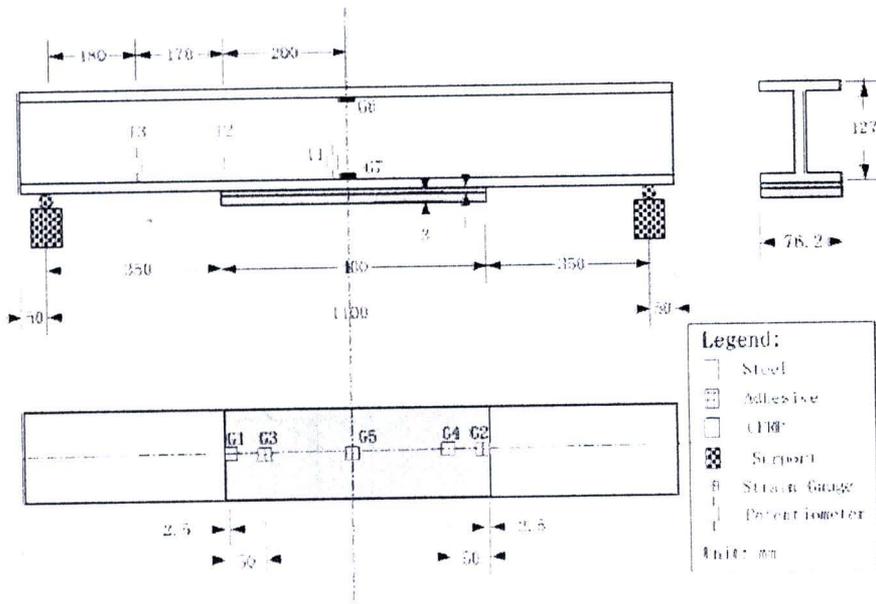
(ข) ผลกระทบของระยะทาบใดๆ ในรอยต่อแบบทาบเดี่ยว (มุมปลายระยะทาบเป็นมุมป้าน)
รูปที่ 2.10 ผลการทดลองของระยะทาบต่างๆ ในรอยต่อแบบทาบเดี่ยวภายใต้แรงกระทำซ้ำซาก

(Quaresimin และ Ricotta, 2005)

Deng และ Lee (2005) แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับจำนวนรอบการวิบัติของคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำซ้ำซากดังสมการ $y = -4.19 \ln(x) + 78.62$, $R^2 = 0.96$ (แสดงดังรูปที่ 2.14) ในงานวิจัยนี้ใช้คานเหล็กชนิด 127x76UB13 ยาว 1200 มม. ซึ่งถูกเตรียมผิวด้วยมาตรฐานการพ่นทราย Sa 2.5 เพื่อยึดติดกับแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนชนิด K13710 (ความหนา 3 มม., ความกว้าง 76 มม., และความยาว 400 มม.) ด้วยวัสดุประสานชนิด Sikadur-31

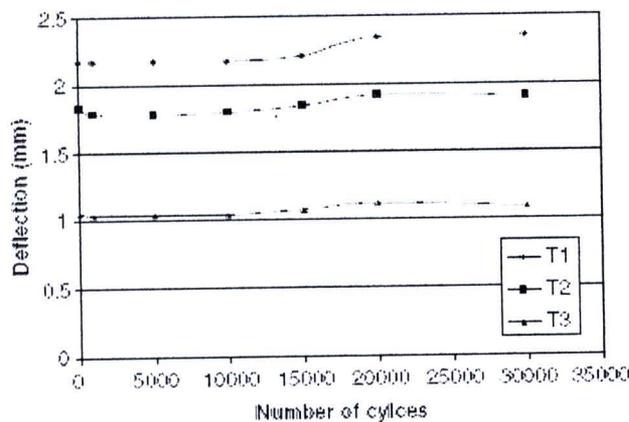
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
 ห้องสมุดงานวิจัย
 วันที่.....1.3.ก.ย. 2555
 เลขทะเบียน.....249598
 เลขเรียกหนังสือ.....

งานวิจัยนี้ใช้เกจความเครียดในการตรวจจับการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในคานเหล็กและวัดระยะการโก่งตัวของคานด้วยเกจความต่างศักย์ไฟฟ้า (Potentiometer) แสดงดังรูปที่ 2.11

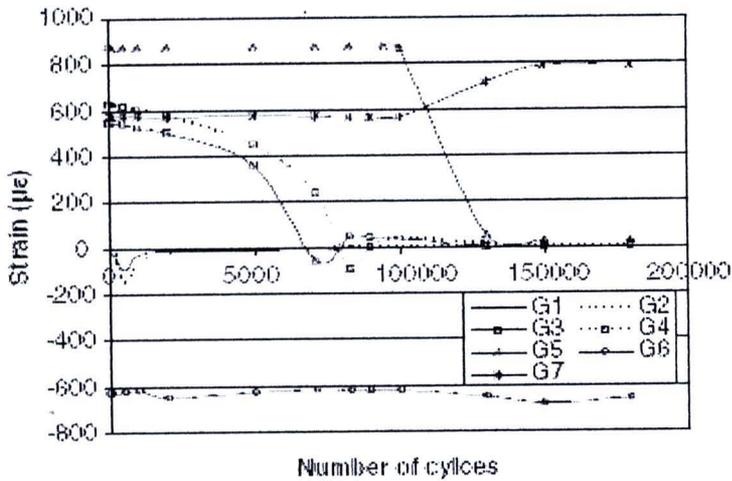


รูปที่ 2.11 โมเดลคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (ตำแหน่งแรงกระทำซ้ำซากเกิดขึ้นที่กึ่งกลางของคานเหล็ก) และตำแหน่งการติดตั้งเกจความเครียด (G), เกจความต่างศักย์ไฟฟ้า (T) (Deng และ Lee, 2005)

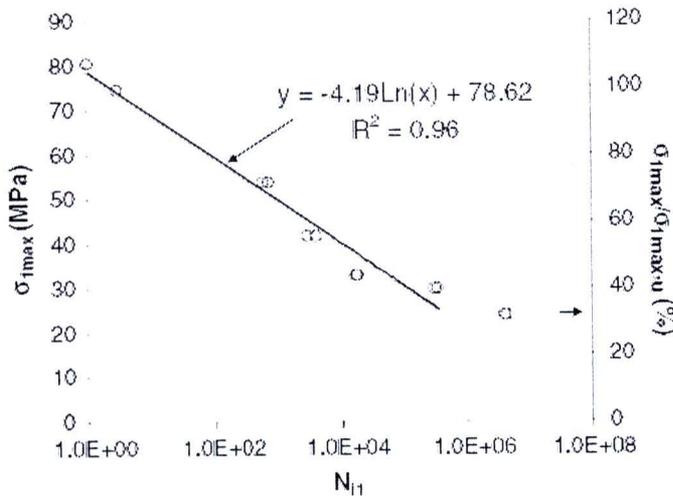
ในขณะที่ทำการทดลองพบว่าเมื่อปลายแผ่นเสริมกำลังเริ่มเกิดการหลุดล่อนจะมีผลทำให้ระยะการโก่งตัวเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 2.12 และค่าความเครียดที่ปลายแผ่นเสริมกำลังลดต่ำลงแสดงดังรูปที่ 2.13 จนกระทั่งแผ่นเสริมกำลังหลุดล่อนออกจากคานเหล็กทั้งหมด



รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการโก่งของคานกับจำนวนรอบของแรงกระทำซ้ำซาก (Deng และ Lee, 2005)



รูปที่ 2.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดในบริเวณต่างๆกับจำนวนรอบของแรงกระทำซ้ำซาก (Deng และ Lee, 2005)

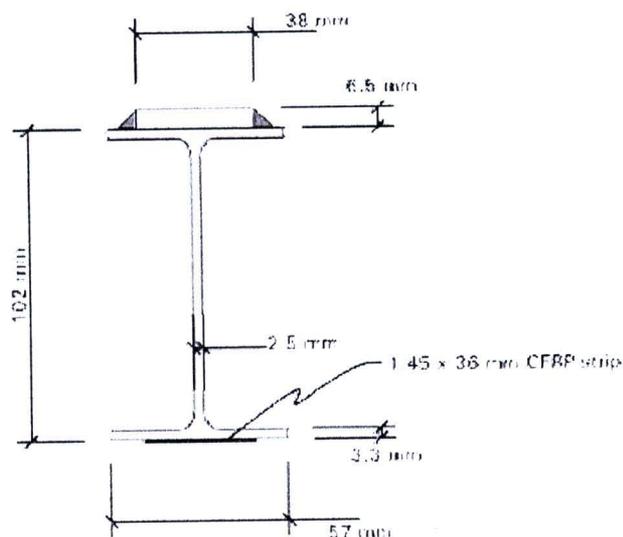


รูปที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับจำนวนรอบของแรงกระทำในคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (Deng และ Lee, 2005)

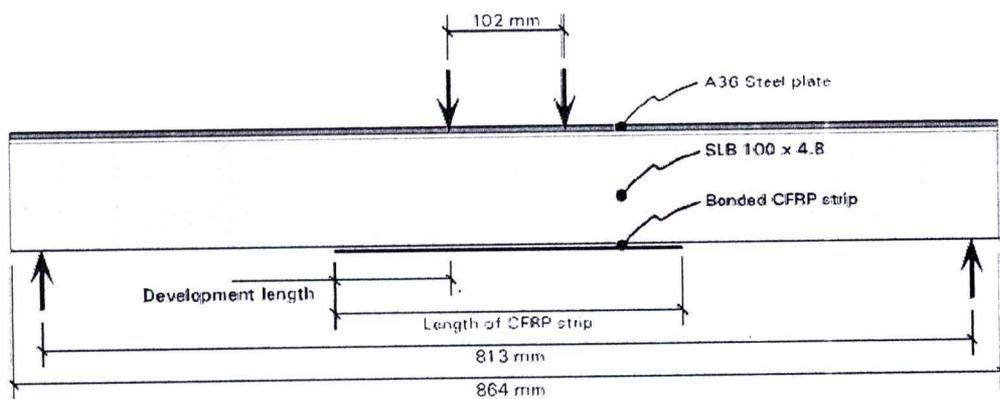
Schnerch และคณะ (2006) ศึกษาพฤติกรรมแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุประสานในแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่เสริมกำลังในโครงสร้างเหล็กโดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ประเภทคือ 1) การทดสอบกำลังในวัสดุประสานด้วยวิธีการทดลองการรับแรงดัดและ 2) การทดสอบกำลังในวัสดุประสานด้วยวิธีการทดสอบการรับแรงดึง

1) การทดสอบกำลังของวัสดุประสานด้วยวิธีการทดลองการรับแรงดัด วัสดุที่ใช้ทำการทดลองประกอบด้วยคานเหล็ก SLB 100x4.8 โดยปักคานด้านบนเชื่อมแผ่นเหล็กชนิด A36 ด้วยลวดเชื่อมชนิด E70 และปักคานด้านล่างเสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนชนิด

โมดูลัสของความยืดหยุ่นสูง (ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น 460 เมกะปาสคาล, ความหนาของแผ่น 1.45 มม. และความกว้างของแผ่น 36 มม.) ด้วยวัสดุประสานชนิดต่างๆ (Weld-On SS620, SP Spaboand 345, Vantico Araldite 2015,) มีระยะเวลาเสริมความยาวแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเท่ากับ 50.8, 76.2, 101.6, 127, 152.4 และ 203.2 มม. ตามลำดับแสดงรูปตัวอย่างการทดลองดังรูปที่ 2.15



(ก) ภาพหน้าตัดของแบบจำลองตัวอย่างการทดลอง



(ข) ภาพด้านยาวของแบบจำลองตัวอย่างการทดลอง

รูปที่ 2.15 ภาพของแบบจำลองตัวอย่างการทดสอบกำลังของวัสดุประสานด้วยวิธีการทดลองการรับแรงดัด (Schnerch และคณะ, 2006)

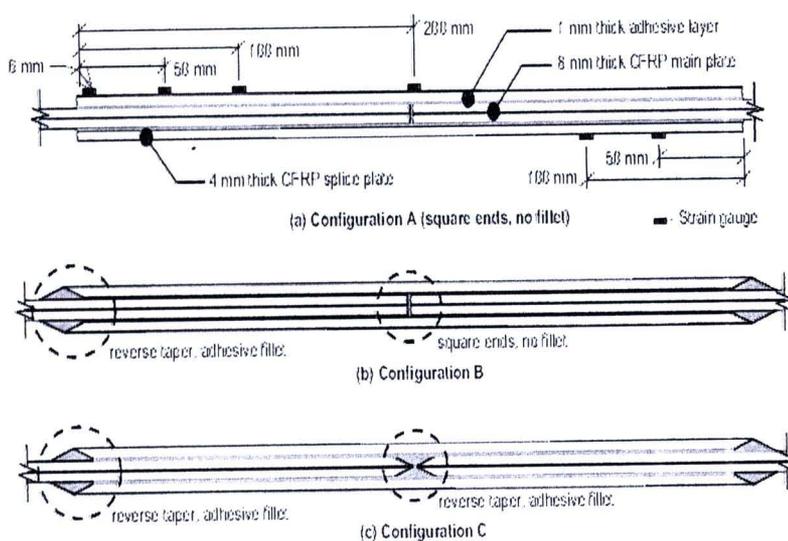
จากการทดสอบการรับแรงดัดพบว่า จะเกิดการฉีกขาดกับแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนชนิดโมดูลัสของความยืดหยุ่นสูงซึ่งเป็นการใช้แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนได้อย่างคุ้มค่า (โดยปกติแล้วแผ่นเสริมกำลังมักจะเกิดการหลุดล่อนก่อน) และความยาวของแผ่นพลาสติก

เสริมเส้นใยคาร์บอนที่เสริมกำลังที่เท่ากันแต่ใช้วัสดุประสานต่างชนิดกันซึ่งวัสดุประสานชนิด SP Spabond 345 จะให้กำลังรับแรงเฉือนสูงสุด

2) การทดสอบกำลังของวัสดุประสานด้วยวิธีการทดสอบการรับแรงดึงโดยใช้รอยต่อรับแรงเฉือน 2 ระนาบซึ่งประกอบด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่มีความหนา 4 มม. ประกอบเป็นส่วนของแผ่นรับแรงตามแนวแกน 1 แผ่น และแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (ความหนา 1 มม.) ทาบเป็นระยะ 200 มม. ด้วยวัสดุประสานชนิด SP Spabond 345 (แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเป็นชนิดเดียวกับแผ่นเสริมกำลังในการทดสอบกำลังของวัสดุประสานด้วยวิธีการทดลองการรับแรงดัด)

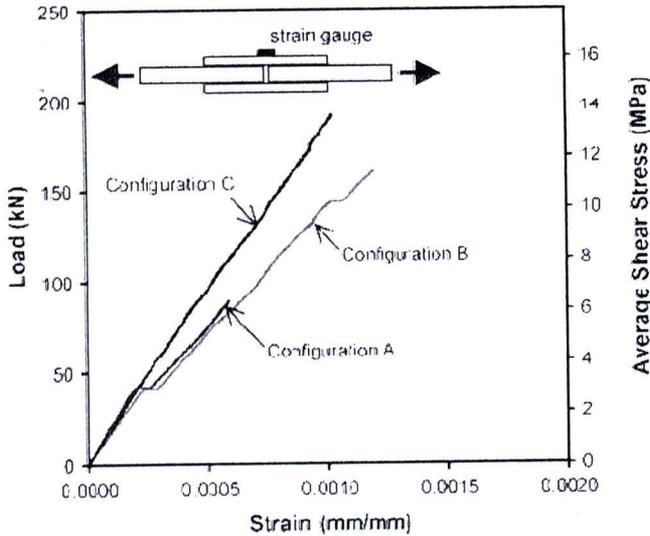
ในการทดลองนี้มีตัวแปรที่ใช้ศึกษาคือลักษณะมุมปลายการต่อชนระหว่างแผ่นรับแรงตามแนวแกนทั้งสองและมุมของวัสดุประสานที่ปลายแผ่นทาบ ซึ่งมีรายละเอียดของรอยต่อแต่ละชนิดดังต่อไปนี้ รอยต่อชนิด A มีมุมปลายของการต่อชนระหว่างแผ่นรับแรงตามแนวแกนทั้งสองเป็นมุมฉากและมุมของวัสดุประสานที่ปลายแผ่นทาบเป็นมุมฉากทั้งหมด, รอยต่อชนิด B มีมุมปลายของการต่อชนระหว่างแผ่นรับแรงตามแนวแกนทั้งสองเป็นมุมฉากและมุมของวัสดุประสานที่ปลายแผ่นทาบเป็นมุมแหลม 20 องศาที่ระนาบของผิวสัมผัสและรอยต่อชนิด C มีมุมปลายของการต่อชนระหว่างแผ่นรับแรงตามแนวแกนทั้งสองเป็นมุมแหลม 20 องศาที่ระนาบของผิวสัมผัสและมุมของวัสดุประสานที่ปลายแผ่นทาบเป็นมุมแหลม 20 องศาที่ระนาบของผิวสัมผัสแสดงดังรูปที่

2.16

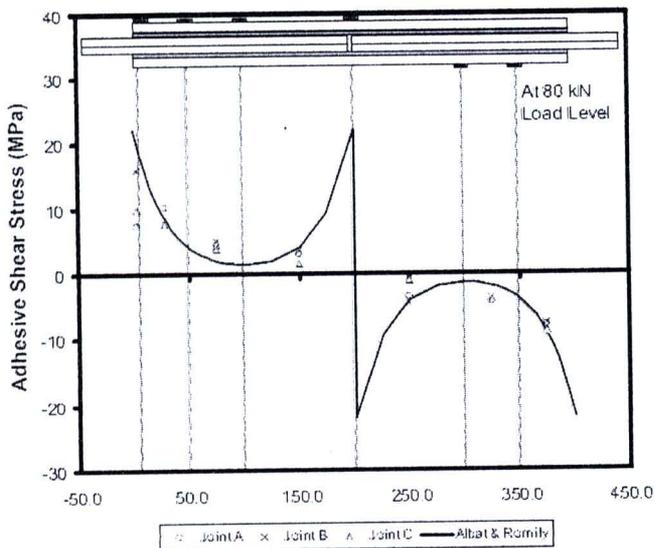


รูปที่ 2.16 ชนิดของรอยต่อประกับคู่แบบสมมาตรในงานทดลองนี้ (รูปด้านบน) รอยต่อชนิด A (รูปด้านกลาง) รอยต่อชนิด B และ (รูปด้านล่าง) รอยต่อชนิด C (Schnerch และคณะ, 2006)

จากการทดสอบการรับแรงดึงด้วยรอยต่อแบบรับแรงเฉือน 2 ระบายพบว่าลักษณะมุมปลายการต่อชนระหว่างแผ่นรับแรงตามแนวแกนทั้งสองและมุมของวัสดุประสานที่ปลายแผ่นทาบจะมีผลต่อกำลังรับแรงดึงของรอยต่อ ดังแสดงตามรูปที่ 2.17 ซึ่งเรียงลำดับของกำลังรับแรงดึงของรอยต่อแต่ละชนิดได้ดังต่อไปนี้ 1) รอยต่อชนิด C, 2) รอยต่อชนิด B และ 3) รอยต่อชนิด A ดังแสดงตามรูปที่ 2.17



(ก) ผลการทดลองภายใต้แรงดึงในรอยชนิด A, B และ C

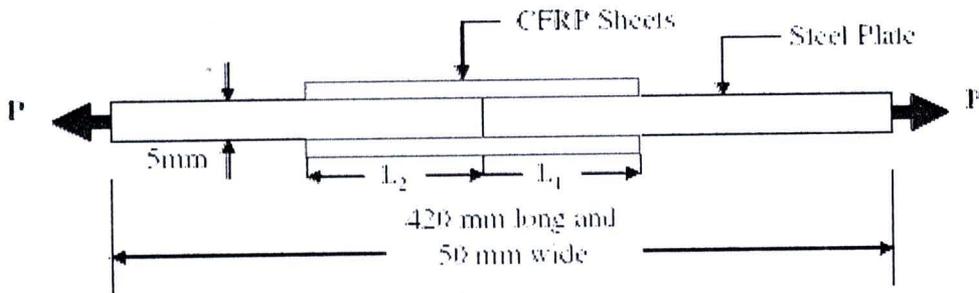


(ข) ความเค้นเฉือนในตำแหน่งต่างๆ ของรอยต่อชนิด A, B และ C จากการทดลองและผลทางระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์

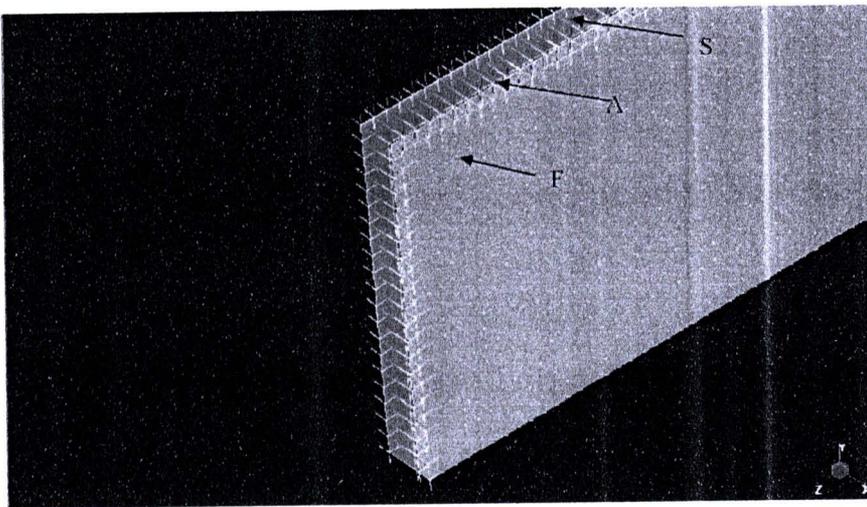
รูปที่ 2.17 ผลการทดลองทดสอบกำลังของวัสดุประสานด้วยวิธีการทดสอบการรับแรงดึง

(Schnerch และคณะ, 2006)

Al-Mahaidi และคณะ (2006) เปรียบเทียบผลวิเคราะห์จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นกับผลการทดลองในรอยต่อประกับคู่แบบสมมาตร (แสดงดังรูปที่ 2.20) โดยรอยต่อประกับคู่แบบสมมาตรจะถูกพิจารณาความยาวระยะของแผ่นประกับเท่ากับ 40, 50, 70, และ 80 มม. ตามลำดับแสดงดังรูปที่ 2.18 และรูปที่ 2.19 แสดงโมเดลรอยต่อประกับคู่แบบสมมาตรในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น

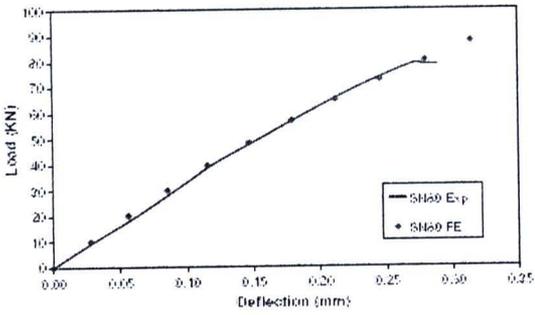
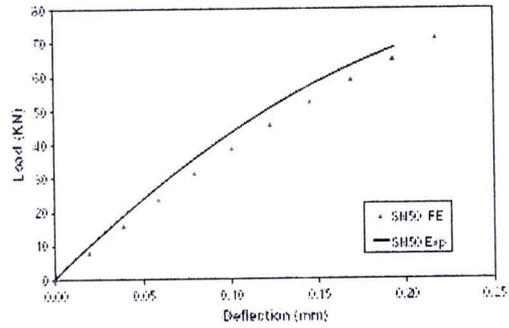
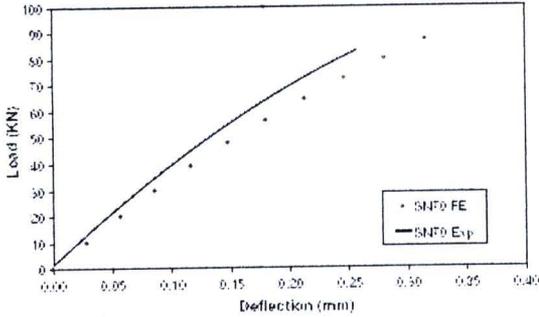
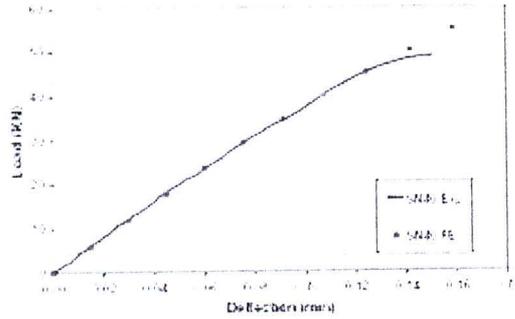


รูปที่ 2.18 โมเดลของรอยต่อประกับคู่แบบสมมาตรโดยที่ $L_1 = 40, 50, 70, 80$ มม. และ $L_2 = 80$ มม. (Al-Mahaidi และคณะ, 2006)



รูปที่ 2.19 รายละเอียดของโมเดลที่ปลายรอยต่อประกับคู่แบบสมมาตรในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น (F = แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน, A = วัสดุประสาน และ S = แผ่นเหล็กรับแรงตามแนวแกน) (Al-Mahaidi และคณะ, 2006)

ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นแสดงดังตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.20

รูปที่ 2.20(ก) ระยะ $L_1 = 40$ มม.รูปที่ 2.20(ข) ระยะ $L_1 = 50$ มม.รูปที่ 2.20(ค) ระยะ $L_1 = 70$ มม.รูปที่ 2.20(ง) ระยะ $L_1 = 80$ มม.

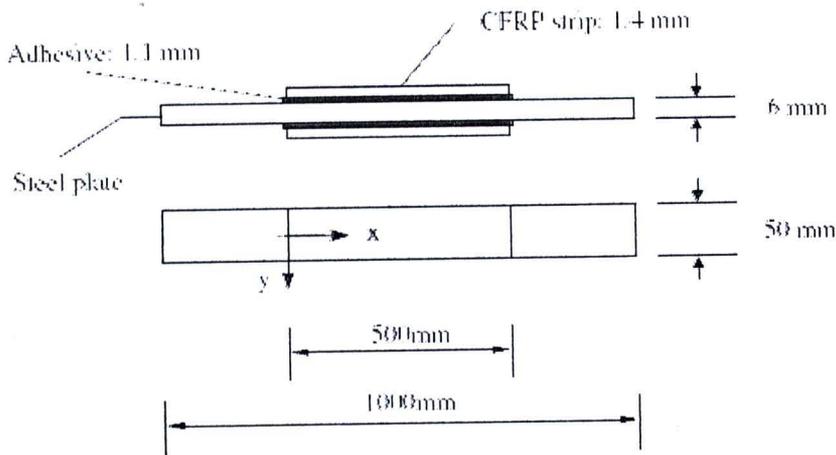
รูปที่ 2.20 เปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดตัวจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นกับผลการทดลอง (Al-Mahaidi และคณะ, 2006)

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการวิเคราะห์จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Al-Mahaidi และคณะ, 2006)

Bond length (mm)	Experimental failure load P_{exp} (kN)	Finite element Failure load P_{fe} (kN)	$\frac{P_{fe}}{P_{exp}}$
40	49.9	55.2	1.106
50	59.8	71.3	1.022
70	80.8	87.2	1.080
80	81.3	87.7	1.079
Mean			1.072
COV			0.033

จากตารางที่ 2.1 พบว่าอัตราส่วนของความถูกต้อง (ผลการวิเคราะห์จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นกับผลการทดลอง) มีค่าเท่ากับ 1.072 หรือมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ +7.2 เปอร์เซ็นต์และค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนเท่ากับ 0.033 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

P. Colombi และคณะ (2009) ศึกษาผลของความล้าในรอยต่อรับแรงดึงที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่ประกอบด้วยแผ่นเหล็ก (S275) มีความหนา 6 มม., ความกว้าง 50 มม., และความยาว 1000 มม. เป็นแผ่นเหล็กรับแรงตามแนวแกนและเสริมกำลังด้านข้างด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนชนิด Sika Carbodur M614 โดยทั้งสองถูกยึดติดด้วยวัสดุประสานชนิด Sikadur 30 แสดงดังรูปที่ 2.21 และระดับแรงที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 2.2

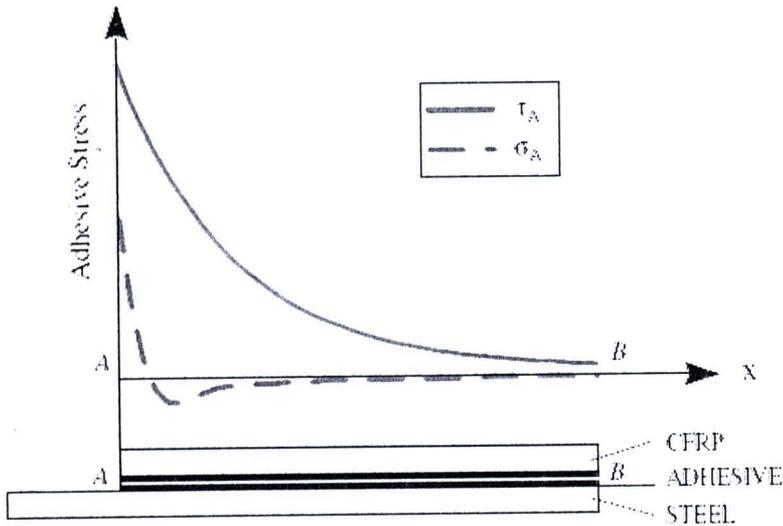


รูปที่ 2.21 รอยต่อรับแรงดึงที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน
(P. Colombi และคณะ, 2009)

ตารางที่ 2.2 ระดับแรงที่ใช้ในการทดลองรอยต่อรับแรงดึงที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (P. Colombi และคณะ, 2009)

Specimen	Axial load (min;max) [kN]	σ_s (min;max) [kN]	$\Delta\sigma$ [MPa]	Stress ratio
FT1-1	(17;42)	(57;140)	83	0.4
FT1-2	(17;42)	(57;140)	83	0.4
FT2-1	(20;50)	(67;167)	100	0.4
FT2-2	(20;50)	(67;167)	100	0.4
FT3-1	(24;60)	(80;200)	120	0.4
FT3-2	(24;60)	(80;200)	120	0.4
FT4-1	(32;80)	(107;267)	160	0.4

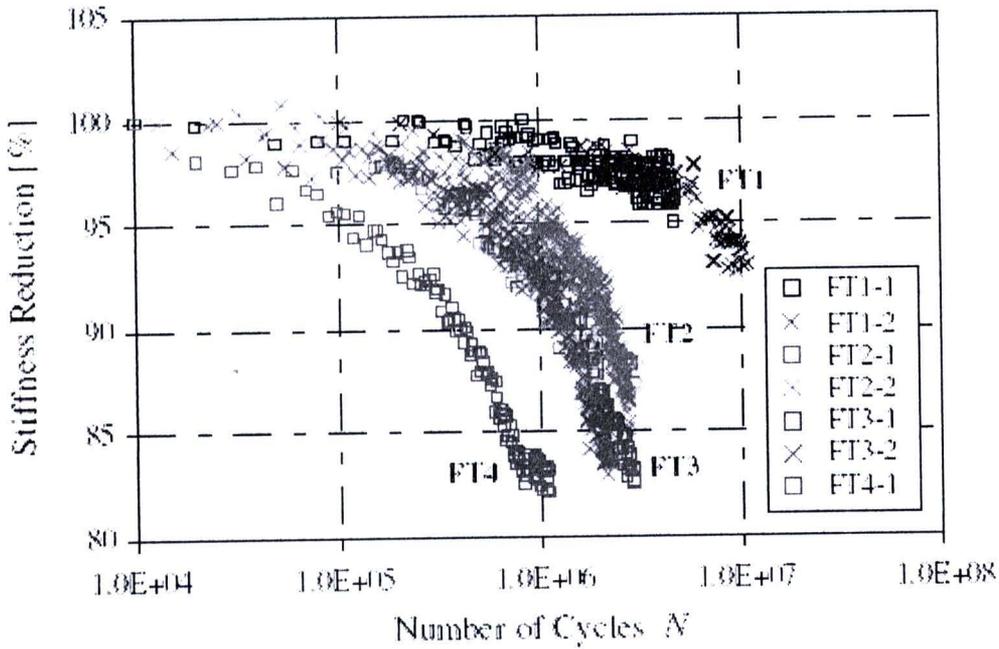
การทดลองรอยต่อรับแรงดึงที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำซ้ำๆ พบว่าในการวิเคราะห์ความเค้นทดลองระดับเดียวกันที่ปลายของแผ่นเสริมกำลังจะเกิดความเค้นเฉือนและความเค้นกะเทาะ (peel stress) สูงสุด (แสดงดังรูปที่ 2.22) และที่ปลายแผ่นเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดรอยร้าวที่ผิวสัมผัสระหว่างชั้นวัสดุประสานกับผิวเหล็ก



รูปที่ 2.22 การกระจายความเค้นเฉือนและความเค้นกะเทาะตามระยะปลายแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (จุด A ถึงจุด B) (P. Colombi และคณะ, 2009)

นอกจากนี้ภายใต้แรงกระทำซ้ำๆ จะส่งผลทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อรับแรงดึงที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนลดลงดังต่อไปนี้ (แสดงดังรูปที่ 2.23)

- 1) เกิดรอยร้าวที่ผิวสัมผัสระหว่างชั้นวัสดุประสานกับผิวเหล็กจะให้ความแข็งแรงของรอยต่อลดลงเหลือ 98%
- 2) ช่วงรอยร้าวเติบโตจะมีผลให้ความแข็งแรงของรอยต่อลดลงเหลือ 95%
- 3) หลังจากแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนหลุดล่อนจะให้ความแข็งแรงของรอยต่อลดลงเหลือ 85%



รูปที่ 2.23 การลดลงของความแข็งแรงในรอยต่อที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำซ้ำซาก (P. Colombi และคณะ, 2009)

2.3 การวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นด้วยทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหัก

Anderson (1999) ระบุว่าระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นที่นิยมสำหรับการวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นมาก่อนที่จะมีวิธีคำนวณค่าความเข้มของความเค้นโดยตรง

Reedy (1990), Munz และ Yang (1992), Liu และคณะ (1999), Wang และ Rose (2000) พบว่าค่าความเข้มของความเค้นในวัสดุต่างชนิดกัน (dissimilar material) สามารถหาได้จาก การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการแบ่งช่วงของเอลิเมนต์รอบปลายรอยร้าว (จุดเอกฐาน) ให้ละเอียดขึ้น

Gradin และ Groth (1984), Groth (1985) คำนวณค่าความเข้มของความเค้นจากความสัมพันธ์ของระยะระหว่างจุดของเอลิเมนต์ละเอียดกับค่าความเค้นจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ชนิดเอลิเมนต์ที่ละเอียด

วิธีวิธีไฟโปรคอลเวิร์คคอนทัวรินทิกรัล (RWCIM) ซึ่งเป็นวิธีที่ถูกพัฒนามาจากกฎของ Betti นั่นคือวิธี RWCIM ใช้ผลลัพธ์จากสูตรสำเร็จ (classical solution) รอบๆ ค่าความเค้นเอกฐานกับผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์รอบๆ ปลายรอยร้าวทำการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ c_1 เพื่อหาค่าความเข้มของความเค้น วิธี RWCIM มีข้อดีดังต่อไปนี้คือ

1. ไม่จำเป็นต้องใช้เอลิเมนต์ชนิดพิเศษในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2. สามารถใช้ผลของการแบ่งช่วงเอลิเมนต์แบบหยาบได้

3. สามารถวิเคราะห์วัสดุเชิงประกอบและพิจารณาเงื่อนไขของแรงกระทำได้หลายรูปแบบ

Stern และคณะ (1976) ได้พัฒนาวิธีการคำนวณค่าความเข้มของความเค้นในระนาบสองมิติซึ่งวิธีนี้มีความคล้ายกับวิธี J-Integral โดยใช้ผลลัพธ์บริเวณรอบปลายรอยร้าวในการวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นในโหมดเปิดและโหมดดของแรงเฉือน

Hong และ Stern (1978) พัฒนาวิธี RWCIM เพื่อวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นในวัสดุเชิงประกอบที่มีรอยร้าวอยู่ภายในโดยที่ค่าความเข้มของความเค้นจะได้รับการอินทิเกรทของความเค้นและการจัดบนเส้นคอนทัวร์รอบๆปลายรอยร้าว

Carpenter (1984) พัฒนาวิธี RWCIM ต่อจากของ Stern และคณะ (1976) โดยพิจารณารอยร้าวภายในแผ่นรับแรงดึง ต่อมา Carpenter and Byer (1987) พัฒนาวิธี RWCIM เพื่อทำการวิเคราะห์ปัญหาลิมของสองวัสดุ โดยแปลงสมการความเค้นที่มาจากวิธีคอมเพล็กซ์โพเทนเชียลของ Green และ Zirna (1968) ให้อยู่ในรูปของผลคูณระหว่างเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ (eigenvector) กับค่าสัมประสิทธิ์ c_i โดยค่าสัมประสิทธิ์นี้สามารถคำนวณได้จากวิธี RWCIM

F.E. Penado (2000) ศึกษาผลของค่าความเค้นและการจัดรอบจุดเอกฐานจากทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในรอยต่อแบบทาบเดี่ยวเพื่อวิเคราะห์หาค่าลักษณะเฉพาะ (eigenvalue)

I. Mohammed และ K.M. Liechti (2001) กำหนดกรณีรอยร้าวระดับนิวเคลียสสามารถเกิดได้ทุกมุมของผิวสัมผัสระหว่างสองวัสดุโดยใช้วิธีประมาณการเชิงตัวเลขวิเคราะห์การแยกตัวในโมเดลรอยต่อแบบทาบเดี่ยวระหว่างผิวสัมผัสของทั้งสองวัสดุ

L.B. Sills และ A. Sherer (2002) ศึกษาค่าความเข้มของความเค้นในสองวัสดุบากร่องรูปตัววีและ K.C. Shin, W.S. Kim และ J.J. Lee (2007) วิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นในรอยต่อทาบนิดคู่โดยใช้วิธี RWCIM

อัศววัชร เล่นวารี (2002) ประยุกต์ใช้วิธีคอมเพล็กซ์โพเทนเชียลและวิธี RWCIM เพื่อทำการวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นในลิมของสองวัสดุ (กรณีคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนและรอยต่อประกบคู่แบบสมมาตร) เพื่อทำนายอายุการหลุดล่อนที่ปลายแผ่น

P. Colombi และคณะ (2009) ทำนายกำลังการหลุดล่อนของรอยต่อรับแรงเฉือน 2 ระนาบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, Stress based approach กับผลการทดลองและนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง