

พุดิกรรรมการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในคานเหล็กที่เสริมกำลังภายใต้แรง
กระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่



นายประวิทย์ สันติสุขโพธา

ศูนย์วิทยพัรพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณทิต


สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEBONDING BEHAVIORS OF CFRP PLATES IN STRENGTHENED STEEL BEAMS
SUBJECTED TO CONSTANT AMPLITUDE LOADINGS



Mr.Prawit Santisukpotha

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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

พฤติกรรมการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใย
คาร์บอนในคานเหล็กที่เสริมกำลังภายใต้แรงกระทำเป็นรอบ
แอมพลิจูดคงที่

โดย

นายประวิทย์ สันติสุขไพธา

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร. อัครวัชร เล่นวารี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาติศรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศศิริวงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จรูญ รุ่งอมรรัตน์)

.....
(อาจารย์ ดร. อัครวัชร เล่นวารี)

.....
(ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาติศรี)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ)

.....
(รองศาสตราจารย์ สายันต์ ศิริมนตรี)

ประวิทย์ สันติสุขโพธา : พฤติกรรมการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในคานเหล็กที่เสริมกำลังภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่. (DEBONDING BEHAVIORS OF CFRP PLATES IN STRENGTHENED STEEL BEAMS SUBJECTED TO CONSTANT AMPLITUDE LOADINGS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
หลัก : อ.ดร. อัครวัชร เล่นวารี และ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ศ.ดร. ทักษิณ เทพชาติศรี , 125 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในคานเหล็ก และพฤติกรรมการวิบัติ (การหลุดล่อน) ของรอยต่อชนิดแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรโดยการทดลองภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ รวมถึงใช้วิธีวิธีไฟโพรคอลเวิร์คคอนทัวริทิกวัล (RWCIM) เพื่อคำนวณค่าความเข้มของความเค้น (Q_y) ที่เกิดขึ้นในลิ้มของสองวัสดุ จากผลการศึกษาข้างต้นนำมาสร้างความสัมพันธ์ของช่วงของค่าความเข้มของความเค้นกับจำนวนรอบของแรงกระทำ ($\Delta Q_y - N_{s1}$) เพื่อทำนายอายุการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในคานเหล็ก

ผลการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ ที่อัตราส่วนความเค้น 0.2 ความถี่ 2 รอบต่อวินาที พบว่าพฤติกรรมการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ระยะคือ 1) ระยะไม่เกิดรอยร้าว 2) ระยะรอยร้าวเติบโต 1 3) ระยะรอยร้าวเติบโต 2 และ 4) ระยะหลุดล่อน ส่วนผลการทดลองแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตร พบว่าการวิบัติของแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรจะเกิดขึ้นทันทีเมื่อเกิดรอยร้าว โดยในงานวิจัยนี้จะสนใจที่จำนวนรอบที่ทำให้เริ่มเกิดรอยร้าว (N_{s1}) ซึ่งได้แก่จุดเริ่มต้นของระยะรอยร้าวเติบโต 1 และพบว่ารอยร้าวเริ่มต้นนี้จะเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างผิวเหล็กกับวัสดุประสานของทั้ง 2 ประเภทการทดลอง

การศึกษาพบว่า ในคานเหล็กค่าลำดับเอกฐานเด่น (dominant order of singularity, α_1) ที่ได้จากรหัส RWCIM และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้โครงข่ายละเอียดมากมีค่าเท่ากับ 0.271 ส่วนค่าความเข้มของความเค้นในพิกัดเชิงขั้ว Q_r , Q_θ และ $Q_{\theta\theta}$ มีความแตกต่างเท่ากับ 4.73%, 3.61% และ 2.86% ตามลำดับสำหรับในแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรเมื่อเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยในอดีต พบว่าค่าความเข้มของความเค้นในพิกัดเชิงขั้ว (Q_r , Q_θ และ $Q_{\theta\theta}$) ในกรณีความเค้นระนาบมีความแตกต่างเท่ากับ -2.73%, -2.75% และ -2.75% ตามลำดับ ส่วนในกรณีความเค้นระนาบมีความแตกต่างเท่ากับ -3.78% -3.78% และ -3.77% ตามลำดับ นอกจากนี้การศึกษายังพบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta Q_y - N_{s1}$ ของคานเหล็กกับของแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรทั้งสองกรณีไม่มีความสัมพันธ์กัน

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต *ปัทมา สันติสุขโพธา*
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก *อ.ดร.อ.*
ปีการศึกษา 2553 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม *อ.ดร.อ.*

5070336821 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS : FATIGUE / DEBONDING BEHAVIOR / CFRP-PLATE / ADHESIVE / STEEL BEAM / DOUBLE-STRAP JOINT / STRESS INTENSITY FACTOR / NO OF CYCLES

PRAWIT SANTISUKPOTHA : DEBONDING BEHAVIORS OF CFRP PLATES IN STRENGTHENED STEEL BEAMS SUBJECTED TO CONSTANT AMPLITUDE LOADINGS. THESIS ADVISOR : AKHRAWAT LENWARI, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : PROF.THAKSIN THEPCHATRI, Ph.D.,125 pp.

This research studies debonding behaviors of CFRP plates in strengthened steel beam and failure behaviors (debonding) of symmetrical double-strap steel joint subjected to constant amplitude loadings. The Reciprocal Work Contour Integral Method (RWCIM) is used to calculate stress intensity factor (Q_y) in bi-material wedge while the no. of cycle, N_{x1} , is obtained from tests. Relationships between range of stress intensity factors with no. of constant amplitude loadings ($\Delta Q_y - N_{x1}$) thus obtained will be used to predict life of debonding of CFRP plate in strengthened steel beam.

For strengthened steel beams, fatigue tests were conducted at the stress ratio (R) of 0.2 and loading frequency of 2 Hz. From tests, it has been found that debonding behavior can be divided into 4 steps i.e., 1) no crack, 2) crack propagation 1, 3) crack propagation 2 and 4) debonding at plate end. For symmetrical double-strap steel joints, on the other hand, failure always found to occur suddenly at the beginning of the stage of crack propagation 1. In addition, it has been observed from all tests that cracks are initiated at the location near steel/adhesive interface corners at plate ends. The number of cycles at this crack initiation (N_{x1}) were recorded from these tests.

For steel beams, the study has shown that the RWCIM and the FEM with very fine mesh yield the same dominant order of singularity (α_r) value at 0.271. For the stress intensity factors in polar coordinate (Q_r , Q_θ and $Q_{\theta\theta}$), however, results from RWCIM differ from FEM with very fine mesh by 4.73%, 3.61% and 2.86%, respectively. For symmetrical double-strap steel joints, these stress intensity factors, when compare with results obtained from past researcher are found to differ by -2.73%, -2.75% and -2.75%, respectively, for the plane stress condition. For the plane strain condition, the discrepancies are -3.78%, -3.78%, and -3.77% respectively. Finally, tests showed that relationships between range of stress intensity factors with number of cycle at crack initiation ($\Delta Q_y - N_{x1}$) of steel beams and of double-strap steel joints are not coincide.

Department : CIVIL ENGINEERING
Field of Study : CIVIL ENGINEERING
Academic Year : 2010

Student's Signature *Prawit Santisukpota*
Advisor's Signature *Akhawat Lenwari*
Co-Advisor's Signature *Thaksin Thepchatri*

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ ดร.อัศววัชร เล่นวารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และ ศ.ดร.ทักษิณ เทพชาติตรี อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ซึ่งได้ให้คำปรึกษาจัดหาข้อมูลที่สำคัญข้อชี้แนะ, ช่วยสอนการใช้เครื่องมือ และความช่วยเหลือในด้านต่างๆ เพื่อให้ผู้เขียนจะนำมาใช้ในการเรียบเรียงเนื้อหาในการจัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอกราบขอบพระคุณ คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ทุกท่านคือ ผศ.ดร.จรรุญ รุ่งอมรรัตน์, ผศ.ดร.จิระพงษ์ กสิวิทย์อำนวย และ รศ.สายันต์ ศิริมนตรี ที่ได้ให้คำปรึกษาให้แนวคิดและช่วยตรวจแก้ไขในส่วนที่บกพร่องต่างๆ ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งเขียนวิทยานิพนธ์สำเร็จเป็นรูปเล่ม

ขอกราบขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและ International School of Engineering (ISE) ที่ให้การเอื้อเฟื้อโปรแกรม Ansys version 12.1 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองของงานวิทยานิพนธ์นี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณฉานวัฒน์ ไกรรัตนสม เจ้าหน้าที่เทคนิคอาวุโสบริษัท ชีก้า (ประเทศไทย) จำกัด คุณกรกฎ บุษปภักดิ์ หัวหน้าวิศวกร-เทคนิคบริษัท ชีก้า (ประเทศไทย) จำกัด, คุณสุชาติ สุวิมลวรรณ ผู้จัดการธุรกิจก่อสร้างบริษัท ชีก้า (ประเทศไทย) จำกัด และ บริษัท เหล็กสยามยามาโตะ จำกัด ซึ่งได้อนุญาตและสละเวลาในการทำงานเพื่อช่วยเหลือในการทำงานวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ พี่น้องๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ได้ช่วยกระผมในการติดตั้งเครื่องมือและช่วยเฝ้าบันทึกผลการทดลองของงานวิทยานิพนธ์นี้

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในด้านการศึกษา ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ทำให้ผู้วิจัยมีกำลังใจจนสามารถทำการค้นคว้าอิสระฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 แผนดำเนินงาน.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่ผ่านมา	
2.1 ปัญหาความล่าช้าในคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กประกบ.....	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน, รอยต่อทาบเดี่ยวยและรอยต่อประกบคู่แบบสมมาตร.....	6
2.3 การวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นด้วยทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักเชิงเส้น.....	23
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
3.1 กลศาสตร์การแตกหักเชิงเส้น (Linear Elastic Fracture Mechanics).....	25
3.2 การวิเคราะห์ความเค้นในลิ้มของสองวัสดุ.....	26
3.3 คำจำกัดความและความสัมพันธ์พื้นฐานสำหรับการทดลองภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่.....	35

บทที่ 4 การทดลอง

4.1 การทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่.....	38
4.2 การทดลองแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงดึงกระทำเป็นรอบแอม พลิจูดคงที่.....	46

บทที่ 5 ผลการทดลอง

5.1 ผลการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่.....	52
5.2 ผลการทดลองแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงดึงกระทำเป็นรอบ แอมพลิจูดคงที่.....	59

บทที่ 6 การวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้น

6.1 วิธีการวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นด้วยวิธี Complex Potential และ วิธี Reciprocal Work Contour Integral (RWCIM).....	65
6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงค่าความเข้มของความเค้นกับจำนวนรอบของแรง กระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่.....	75
6.3 การเปรียบเทียบสมการความสัมพันธ์.....	82

บทที่ 7 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการทดลอง.....	85
7.2 ข้อเสนอแนะการศึกษาในอนาคต.....	88

รายการอ้างอิง 89

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.....	93
ภาคผนวก ข.....	102
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	125

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการวิเคราะห์จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Al-Mahaidi และคณะ, 2006)	20
2.2	ระดับแรงที่ใช้ในการทดลองรอยต่อรับแรงดึงที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (P. Colombi และคณะ, 2009)	21
3.1	ค่าสัมประสิทธิ์ในแต่ละเทอมของสมการที่ (3.19)	29
4.1	คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานทดลอง	40
5.1	ผลการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่	58
5.2	ผลการทดลองเหล็กประกักับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงดึงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่.....	62
6.1	กรณีวิเคราะห์คานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ภายใต้แรงกระทำ 1 ตันในความเค้นระนาบ	69
6.2	กรณีวิเคราะห์แผ่นเหล็กประกักับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงกระทำ 1 ตัน ในความเค้นระนาบ	70
6.3	กรณีวิเคราะห์แผ่นเหล็กประกักับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงกระทำ 1 ตัน ในความเค้นระนาบ	71
6.4	ผลการตรวจสอบความถูกต้องของค่าความเข้มของความเค้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้โครงข่ายละเอียดมากในกรณีการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน	72
6.5	แรงวิบัติและค่าความเข้มของความเค้นของแผ่นเหล็กประกักับคู่แบบสมมาตร (อัศววัชร เล่นวารี 2002)	74
6.6	ผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นโดยอ้างอิงแรงวิบัติจากตารางที่ 6.5	74
6.7	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นในกรณีการทดลองแผ่นเหล็กประกักับคู่แบบสมมาตร.....	75

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่		หน้า
6.8	ผลการวิเคราะห์ช่วงค่าความเข้มของความเค้นที่ทำให้แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน เกิดการหลุดร่อนออกจากคานที่เสริมกำลัง	76
6.9	ผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณผิวสัมผัสระหว่างผิวของแผ่นเหล็กประกบด้านข้างกับชั้นวัสดุเชื่อมประสาน	80
ก.1	ผลการสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงแบบพลวัตด้วย Proving ring ภายใต้แรงสถิต	94
ก.2	ผลการสอบเทียบผลจากการวัดค่าความเครียด ณ ตำแหน่งต่างๆ (DG = Dial Gauge (0.001 ซ.ม. / 1 ช่อง), และ % Ind = %Indicator)	97
ก.3	เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการสอบเทียบมาตรวัดความเครียดในขณะถ่ายแรง	99
ก.4	เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการสอบเทียบมาตรวัดความเครียดในขณะถอนแรง	100
ก.5	เปรียบเทียบค่าระยะการโก่งตัวจากระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการสอบเทียบ	101
ข.1	ลักษณะรูปแบบความเสียหายของแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตร	107

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
รูปที่ 2.1	กราฟ S-N ที่แสดงกำลังความล้าของรอยเชื่อมตามมาตรฐาน ASSHTO (1996)	5
รูปที่ 2.2	กราฟ S-N ที่แสดงกำลังความล้าของรอยเชื่อมตามมาตรฐาน JSSC (1995) ..	5
รูปที่ 2.3	การทดลองชิ้นส่วนสะพานเชิงประกอบ (Sen และคณะ, 2001)	6
รูปที่ 2.4	กราฟเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักกับระยะการยึดตัวของตัวอย่างแบบเสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนกับตัวอย่างที่ไม่เสริมกำลัง (Sen และคณะ, 2001)	7
รูปที่ 2.5	โมเดลของรอยต่อประกับคู่แบบสมมาตรโดยที่ $L_1 = 40, 60$ มม. และ $L_2 = 80$ มม. (Al-Mahaidi และคณะ, 2005)	10
รูปที่ 2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแรงกระทำซ้ำซากสูงสุดต่อแรงดึงประลัยกับจำนวนรอบของการหลุดร่อน (Al-Mahaidi และคณะ, 2005)	10
รูปที่ 2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับระยะการเคลื่อนที่ (ไถล) โดยที่เส้น SN-3 คือการทดสอบชิ้นงานภายใต้แรงดึงสถิตและเส้น N90-1 คือชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบภายใต้แรงกระทำซ้ำซากก่อนทดสอบแบบแรงดึงสถิต (Al-Mahaidi และคณะ, 2005)	11
รูปที่ 2.8	รอยต่อแบบทาบเดี่ยว (SE = มุมฉาก, F = มุมป้าน) (Quaresimin และ Ricotta, 2005)	11
รูปที่ 2.9	ผลกระทบของกำลังรับแรงดึงในรอยต่อแบบทาบเดี่ยวโดยพิจารณามุมที่ปลายระยะทาบ และระยะทาบของรอยต่อ (Quaresimin และ Ricotta, 2005)	12
รูปที่ 2.10	ผลการทดลองของระยะทาบต่างๆ ในรอยต่อแบบทาบเดี่ยวภายใต้แรงกระทำซ้ำซาก (Quaresimin และ Ricotta, 2005)	13
รูปที่ 2.11	โมเดลคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (ตำแหน่งแรงกระทำซ้ำซากเกิดขึ้นที่กึ่งกลางของคานเหล็ก) และตำแหน่งการติดตั้งเกจความเครียด (G), เกจความต่างศักย์ไฟฟ้า (T) (Deng และ Lee, 2005)	14

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.12	14
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการโก่งของคานกับจำนวนรอบของแรงกระทำซ้ำซาก (Deng และ Lee, 2005).....	14
รูปที่ 2.13	15
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดในบริเวณต่างๆกับจำนวนรอบของแรงกระทำซ้ำซาก (Deng และ Lee, 2005).....	15
รูปที่ 2.14	15
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับจำนวนรอบของแรงกระทำในคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (Deng และ Lee, 2005)	15
รูปที่ 2.15	16
ภาพของแบบจำลองตัวอย่างการทดสอบกำลังของวัสดุประสานด้วยวิธีการทดลองการรับแรงดัด (Schnerch และคณะ, 2006)	16
รูปที่ 2.16	17
ชนิดของรอยต่อประกับคู่แบบสมมาตรในงานทดลองนี้ (รูปด้านบน) รอยต่อชนิด A (รูปด้านกลาง) รอยต่อชนิด B และ (รูปด้านล่าง) รอยต่อชนิด C (Schnerch และคณะ, 2006)	17
รูปที่ 2.17	18
ผลการทดลองทดสอบกำลังของวัสดุประสานด้วยวิธีการทดสอบการรับแรงดึง (Schnerch และคณะ, 2006)	18
รูปที่ 2.18	19
โมเดลของรอยต่อประกับคู่แบบสมมาตรโดยที่ $L_1 = 40, 50, 70, 80$ มม. และ $L_2 = 80$ มม. (Al-Mahaidi และคณะ, 2006)	19
รูปที่ 2.19	19
รายละเอียดของโมเดลที่ปลายรอยต่อประกับคู่แบบสมมาตรในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น ($F =$ แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน, $A =$ วัสดุประสาน และ $S =$ แผ่นเหล็กรับแรงตามแนวแกน) (Al-Mahaidi และคณะ, 2006)	19
รูปที่ 2.20	20
เปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดตัวจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นกับผลการทดลอง (Al-Mahaidi และคณะ, 2006).	20
รูปที่ 2.21	21
รอยต่อรับแรงดึงที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (P. Colombi และคณะ, 2009)	21
รูปที่ 2.22	22
การกระจายความเค้นเฉือนและความเค้นกะเทาะตามระยะปลายแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (จุด A ถึงจุด B) (P. Colombi และคณะ, 2009)	22

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.23	23
รูปที่ 3.1	26
รูปที่ 3.2	32
รูปที่ 3.3	33
รูปที่ 3.4	33
รูปที่ 3.5	36
รูปที่ 3.6	36
รูปที่ 3.7	37
รูปที่ 4.1	40
รูปที่ 4.2	40
รูปที่ 4.3	41
รูปที่ 4.4	41
รูปที่ 4.5	42
รูปที่ 4.6	42
รูปที่ 4.7	42
รูปที่ 4.8	43
รูปที่ 4.9	44
รูปที่ 4.10	45

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.11	47
พ่นทรายแผ่นเหล็กขนาด 0.85x5.00x20.00 ซม. และขนาด 0.45x5.00x10.00 ซม. ตามมาตรฐาน SSPC A-SP 5	47
รูปที่ 4.12	47
ทาว์สดูประสานเข้ากับแผ่นเหล็กประกบ	47
รูปที่ 4.13	48
วางขดลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. เพื่อกำหนดชั้นความหนาของวัสดุประสาน	48
รูปที่ 4.14	48
การติดตั้งแผ่นเหล็กประกบด้านข้างของชิ้นงานแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตร	48
รูปที่ 4.15	49
ลักษณะชิ้นงานแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตร	49
รูปที่ 4.16	50
วงจรไฟฟ้าที่ด้านหน้าและด้านหลังชิ้นงานแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตร ...	50
รูปที่ 4.17	51
การติดตั้งแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตรเข้ากับเครื่องทดสอบแรงแบบพลวัต	51
รูปที่ 5.1	53
กราฟสัญญาณการตรวจจับการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในคานเหล็กด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม (BCS801N)	53
รูปที่ 5.2	54
การทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ในช่วงระยะกำเนิดรอยร้าว (รอยร้าวไม่เกิดขึ้น, BSC901S, จำนวนรอบของแรงกระทำประมาณ 500 รอบ)	54
รูปที่ 5.3	55
การทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ในช่วงระยะรอยร้าวเติบโต 1 โดยที่รอยร้าวเกิดขึ้นที่มุมด้านซ้ายของหน้าตัดระหว่างผิวของคานเหล็กกับชั้นวัสดุประสาน (BSC901S, จำนวนรอบของแรงกระทำประมาณ 3200 รอบ)	55
รูปที่ 5.4	56
การทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ในช่วงระยะรอยร้าวเติบโต 2 (BSC901S, จำนวนรอบของแรงกระทำประมาณ 6000 รอบ)	56
รูปที่ 5.5	57
การทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ในช่วงระยะการหลุดล่อนที่ปลายแผ่นโดนสมบูรณ์ (BSC901S, จำนวนรอบของแรงกระทำประมาณ 22040 รอบ)	57

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 5.6	กราฟสัญญาณการตรวจจับการวิบัติของแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรด้วยค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม (DSJ801)	60
รูปที่ 5.7	รูปแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตร (DSJ652) ในขณะที่ทำการทดลองในช่วงที่ 1	61
รูปที่ 5.8	รูปแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตร (DSJ652) ในช่วงที่ 2 (วิบัติ)	61
รูปที่ 5.9	ลักษณะการวิบัติของแผ่นเหล็กรับแรงตามแนวแกนในแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่	64
รูปที่ 6.1	ขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้น	65
รูปที่ 6.2	รูปทรงของเอลิเมนต์ plane 82 ที่ใช้ในการวิเคราะห์	66
รูปที่ 6.3	โมเดลคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	67
รูปที่ 6.4	โมเดลแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	68
รูปที่ 6.5	ความลู่เข้าของค่าตัวแปร c_1 กับจำนวนจุดในแต่ละวิถี C1, C2 และ C3 ของกรณีวิเคราะห์คานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำ 1 ตัน ในความเค้นระนาบ	70
รูปที่ 6.6	ความลู่เข้าของค่าตัวแปร c_1 กับจำนวนจุดในแต่ละวิถี C1, C2 และ C3 ของกรณีวิเคราะห์แผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงกระทำ 1 ตัน ในความเค้นระนาบ	71
รูปที่ 6.7	ความลู่เข้าของค่าตัวแปร c_1 กับจำนวนจุดในแต่ละวิถี C1, C2 และ C3 ของกรณีวิเคราะห์แผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงกระทำ 1 ตัน ในความเครียดระนาบ	72
รูปที่ 6.8	โมเดลละเอียดของคานเหล็กที่เสริมกำลังในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้โครงข่ายละเอียดมาก (ความเค้นระนาบ).....	73
รูปที่ 6.9	ค่าความเค้น (S) กับระยะผิวสัมผัสระหว่างผิวคานเหล็กกับชั้นวัสดุประสาน (r) จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้โครงข่ายละเอียดมากของคานเหล็กที่เสริมกำลัง (ความเค้นระนาบ)	73

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 6.10	77
รูปที่ 6.11	77
รูปที่ 6.12	78
รูปที่ 6.13	81
รูปที่ 6.14	81
รูปที่ 6.15	83
รูปที่ 7.1	85
รูปที่ 7.2	86
รูปที่ 7.3	87
รูปที่ ก.1	93
รูปที่ ก.2	94
รูปที่ ก.3	95

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ ก.4	โมเดลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	96
รูปที่ ก.5	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าความเครียด ณ ตำแหน่งใด ขณะถ่ายแรง	98
รูปที่ ก.6	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าความเครียด ณ ตำแหน่งใด ขณะถอนแรง	98
รูปที่ ก.7	เปรียบเทียบค่าความเค้นจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับค่าความเค้นจากการสอบเทียบเกจความเครียดขณะถ่ายแรง ณ จุด SG1.....	99
รูปที่ ก.8	เปรียบเทียบค่าความเค้นจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับค่าความเค้นจากการสอบเทียบเกจความเครียดขณะถอนแรง ณ จุด SG1	100
รูปที่ ก.9	เปรียบเทียบระยะเวลาการโก่งตัวจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับระยะเวลาการโก่งตัวจากการสอบเทียบ	101
รูปที่ ข.1	วิธีประมาณค่าตอบโดยวิธี Secant	102
รูปที่ ข.2	วิธีประมาณค่าตอบโดยวิธีมุลเลอร์	102
รูปที่ ข.3	พิกัดใดๆ (Carpenter, 1984)	104
รูปที่ ข.4	พิจารณาบริเวณปลายรูปลิ่มของสองวัสดุในงานวิจัยนี้ (ก). ลิ่มของสองวัสดุ และ (ข). ภาพแสดงความเค้นเอกฐานที่ปลายแผ่นจุด A และจุด B (อัศววัชรเล่นวารี, 2002)	105
รูปที่ ข.5	รายละเอียดในการประมาณ % ความเสียหายของแผ่นเหล็กประทับคู่แบบสมมาตร	110
รูปที่ ข.6	กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง BSC901	111
รูปที่ ข.7	กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง BSC801	112
รูปที่ ข.8	กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง BSC802	113
รูปที่ ข.9	กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง BSC651	114

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ ข.10	115
กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง BSC652	115
รูปที่ ข.11	116
กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง BSC601	116
รูปที่ ข.12	117
กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง BSC602	117
รูปที่ ข.13	118
กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง BSC501	118
รูปที่ ข.14	119
กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง BSC502	119
รูปที่ ข.15	120
กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง BSC401	120
รูปที่ ข.16	121
กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง BSC402	121
รูปที่ ข.17	121
กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง DSJ803 (sampling frequency 2 Hz)	121
รูปที่ ข.18	122
กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง DSJ704 (sampling frequency 2 Hz)	122
รูปที่ ข.19	122
กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง DSJ652 (sampling frequency 2 Hz)	122
รูปที่ ข.20	123
กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง DSJ603 (sampling frequency 5 Hz)	123
รูปที่ ข.21	123
กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง DSJ501 (sampling frequency 2 Hz)	123
รูปที่ ข.22	124
กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง DSJ403 (sampling frequency 10 Hz)	124

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

โครงสร้างสะพานเหล็กที่สร้างมานานอาจชำรุดเสียหายเนื่องจากอายุการใช้งานและการรับน้ำหนักบรรทุกเกินข้อกำหนดของสะพาน ดังนั้นการซ่อมบำรุงหรือการเสริมกำลังให้กับชิ้นส่วนของโครงสร้างจึงมีความสำคัญ

การเสริมกำลังคานเหล็ก ซึ่งมีวิธีการดังต่อไปนี้

1) การเสริมกำลังด้วยอัดแรงภายนอก (external post tension) เป็นการเพิ่มกำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงเฉือนให้กับโครงสร้างโดยวิธีนี้จะเหมาะกับโครงสร้างที่มีความลึกใหญ่พอที่จะเจาะโครงสร้างเพื่อติดตั้งยึดหัวจับลวดอัดแรงได้ ข้อดี 1) เพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้าง ข้อเสีย 1) จำเป็นจะต้องมีช่างที่ชำนาญในการติดตั้ง 2) ต้นทุนในการใช้จ่ายสูง 3) ระยะเวลาที่ใช้ในการติดตั้งนาน 4) การบำรุงรักษายาก

2) การเสริมกำลังโครงสร้างด้วยการใช้แผ่นเหล็กประกบ โดยการเสริมแผ่นเหล็กประกบด้านข้างเพื่อเพิ่มกำลังการรับแรงเฉือนของโครงสร้าง หรือ การเสริมแผ่นเหล็กประกบปีกคานเพื่อเพิ่มกำลังการรับโมเมนต์ดัดของโครงสร้าง ข้อดี 1) ประหยัดต้นทุนในการซ่อมแซม 2) วัสดุที่ใช้หาได้ง่าย และข้อเสีย 1) แผ่นเหล็กประกบมีน้ำหนักมาก 2) ปัญหาของการเกิดสนิมของแผ่นเหล็กประกบ 3) ระยะเวลาที่ใช้ในการติดตั้งนาน 4) การบำรุงรักษายาก

3) การเสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจะทำการเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างโดยการติดตั้งแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนปีกคานด้านล่างเพื่อเพิ่มกำลังการรับโมเมนต์ของโครงสร้าง ข้อดี 1) ทำการติดตั้งง่ายใช้ระยะเวลาในการติดตั้งรวดเร็วกว่า 2) การบำรุงรักษาง่าย (Demers, 1998 ; Sen และคณะ, 2001) ข้อเสียคือค่าใช้จ่ายสูง

นอกจากนี้ยังพบว่า การเสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนมีข้อดีคือ ไม่เกิดรอยร้าวในคานเหล็กภายใต้แรงกระทำซ้ำซาก สามารถติดตั้งได้ง่ายกว่าเนื่องจากน้ำหนักเบาและบำรุงรักษาแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนง่ายกว่าวิธีข้างต้นที่กล่าวมา แต่อย่างไรก็ตามแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนสามารถเกิดการหลุดล่อนได้ ซึ่งการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจะมีผลทำให้การรับน้ำหนักปลอดภัยของโครงสร้างที่เสริมกำลังนั้นลดลง พบว่าในปัจจุบันมีงานวิจัยเกี่ยวกับเรื่องการเสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนกับโครงสร้างเหล็กภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ยังมีน้อย (Sen และคณะ, 2001 ; อัครวัชร เล่นวารี, 2002 ; Deng และ Lee, 2005 ; Schnerch และคณะ, 2006) ดังนั้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์มีดังต่อไปนี้

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในคานเหล็ก ภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่อันเป็นผลจากความล้า
2. เพื่อศึกษาวิธีวิธีหาค่าปริมาตรคานตัวรับน้ำหนัก (RWCIM) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้หาค่าความเข้มของความเค้น (stress intensity factor, Q) ในลิ้มของสองวัสดุ (bi-material wedge)
3. ศึกษาปัญหาการหลุดล่อนโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของความเข้มของความเค้นกับจำนวนรอบของแรงกระทำกรณีการทดลองคานเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่และกรณีการทดลองแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตร (Double-Strap Joints, DSJ) ภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีขอบเขตของการทดลองมีดังต่อไปนี้

1. ไม่พิจารณาผลของสภาพสิ่งแวดล้อมที่มีผลทำให้เกิดการหลุดล่อนของวัสดุเช่น ความชื้นของอากาศและอุณหภูมิ เป็นต้น
2. พฤติกรรมคานเสริมกำลังอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic)
3. ช่วงของแรงกระทำมีแอมพลิจูด, ความถี่และอัตราส่วนความเค้นมีค่าคงที่

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้

1. ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
2. กำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย
3. ศึกษาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และโปรแกรม MatLab เพื่อวิเคราะห์หาค่าความเข้มของความเค้นโดยวิธี RWCIM
4. ทดสอบคานเหล็กเสริมที่กำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนและแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตรที่ระดับช่วงแรงกระทำต่างๆ
5. วิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นกรณีของคานเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนและแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตรเพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของความเข้มของความเค้นกับจำนวนรอบของแรงกระทำ

6. สรุปผลงานวิจัย
7. จัดทำวิทยานิพนธ์

1.5 แผนดำเนินการ

งานวิจัยนี้มีแผนดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้

1. ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต
2. ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
3. กำหนดวัตถุประสงค์ ขอบเขตของปัญหาและระเบียบวิธีวิจัย
4. ศึกษาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และโปรแกรม MatLab เพื่อวิเคราะห์หาค่าความเข้มของความเค้นโดยวิธี RWCIM
5. ทดสอบคานเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่ระดับช่วงแรงกระทำต่างๆ เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของค่าความเข้มของความเค้นกับจำนวนรอบของการหลุดล่อน
6. ทดสอบแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรที่ระดับช่วงแรงกระทำต่างๆ เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของค่าความเข้มของความเค้นกับจำนวนรอบของการหลุดล่อน
7. วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย
8. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ นำเสนอวิทยานิพนธ์และตีพิมพ์ผลงาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2 งานวิจัยที่ผ่านมา

2.1 ปัญหาความล้าในคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กประกบ

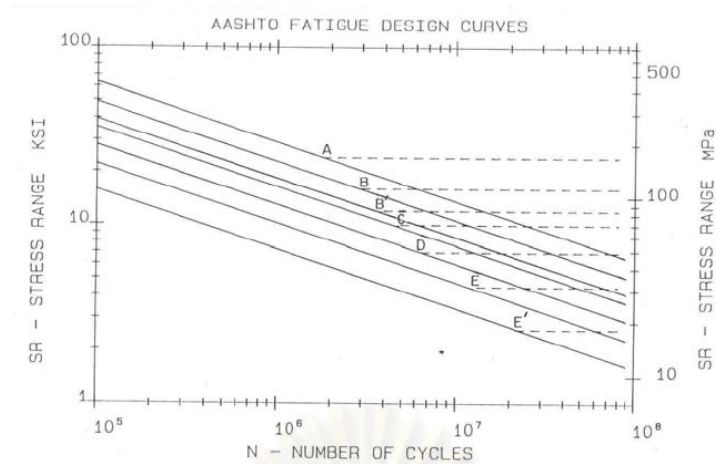
ความล้าเป็นพฤติกรรมการวิบัติของวัสดุที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำซ้ำซาก (แรงกระทำซ้ำซากเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่หรือแรงกระทำซ้ำซากเป็นรอบแอมพลิจูดไม่คงที่) ซึ่งความล้านี้จะทำให้เกิดรอยร้าวกับชิ้นส่วนของโครงสร้างและนำไปสู่การวิบัติของโครงสร้างได้ โดยปกติแล้วข้อต่อชนิดรอยเชื่อมในโครงสร้างจะมีโอกาสเกิดรอยร้าวล้าได้มากกว่าข้อต่อแบบสลักเกลียวเนื่องจากรอยต่อชนิดรอยเชื่อมมีควา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

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

ความเค้นสูง (stress concentration) มักจะเกิดในส่วนของรอยเชื่อมที่ไม่ต่อเนื่องบางส่วน อันเกิดจากการละเลยในกระบวนการเชื่อมหรือเทคนิคในการเชื่อมรอยต่อ นอกจากนี้ยังรวมถึงแผ่นเหล็กที่ใช้เสริมกำลังที่มีรอยเชื่อมขวางเป็นแนวตั้งฉากกับน้ำหนักบรรทุกจร ความเค้นดึงคงค้างสูง (high tensile residual stress) ที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมมักจะพบที่บริเวณฐานของรอยเชื่อมและความเค้นดึงคงค้างอาจจะมีค่าเท่ากับค่าความเค้นถึงที่จุดคราก

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' เป็นประเภทอายุของโครงสร้างที่มีกำลังความล้าได้ต่ำที่สุดแทนประเภท 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) ในประเภทเดียวกันจะไม่เกิดความเสียหาย ล้าทั้งในกรณีของแรงกระทำแบบแอมพลิจูดคงที่และแอมพลิจูดไม่คงที่

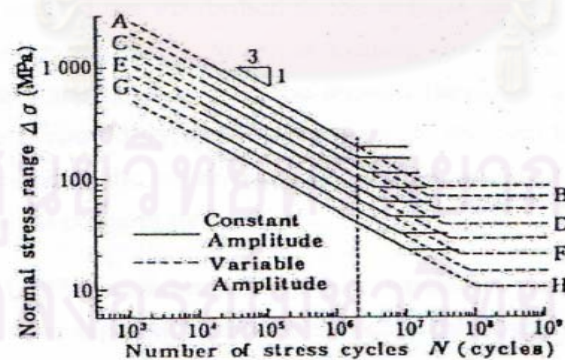


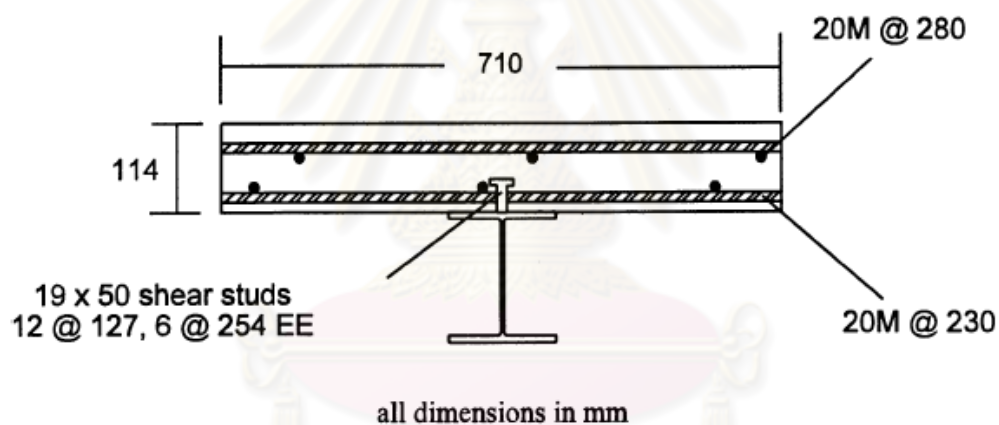
Fig.4.1 Fatigue design curves for joints subjected to normal stress

รูปที่ 2.2 กราฟ S-N ที่แสดงกำลังความล้าของรอยเชื่อมตามมาตรฐาน JSSC (1995)

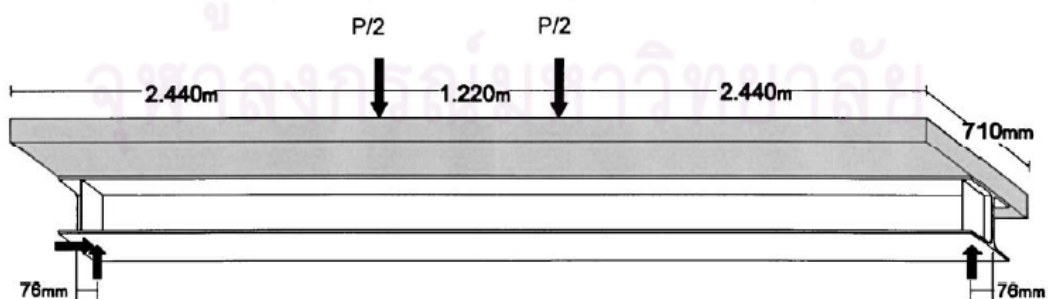
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน, รอยต่อทาบเดี่ยวและรอยต่อประกบคู่แบบสมมาตร

Sen และคณะ (2001) ศึกษาการเสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในชิ้นส่วนสะพานเหล็กเชิงประกอบที่ถูกต้องภายใต้แรงกระทำสถิต 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



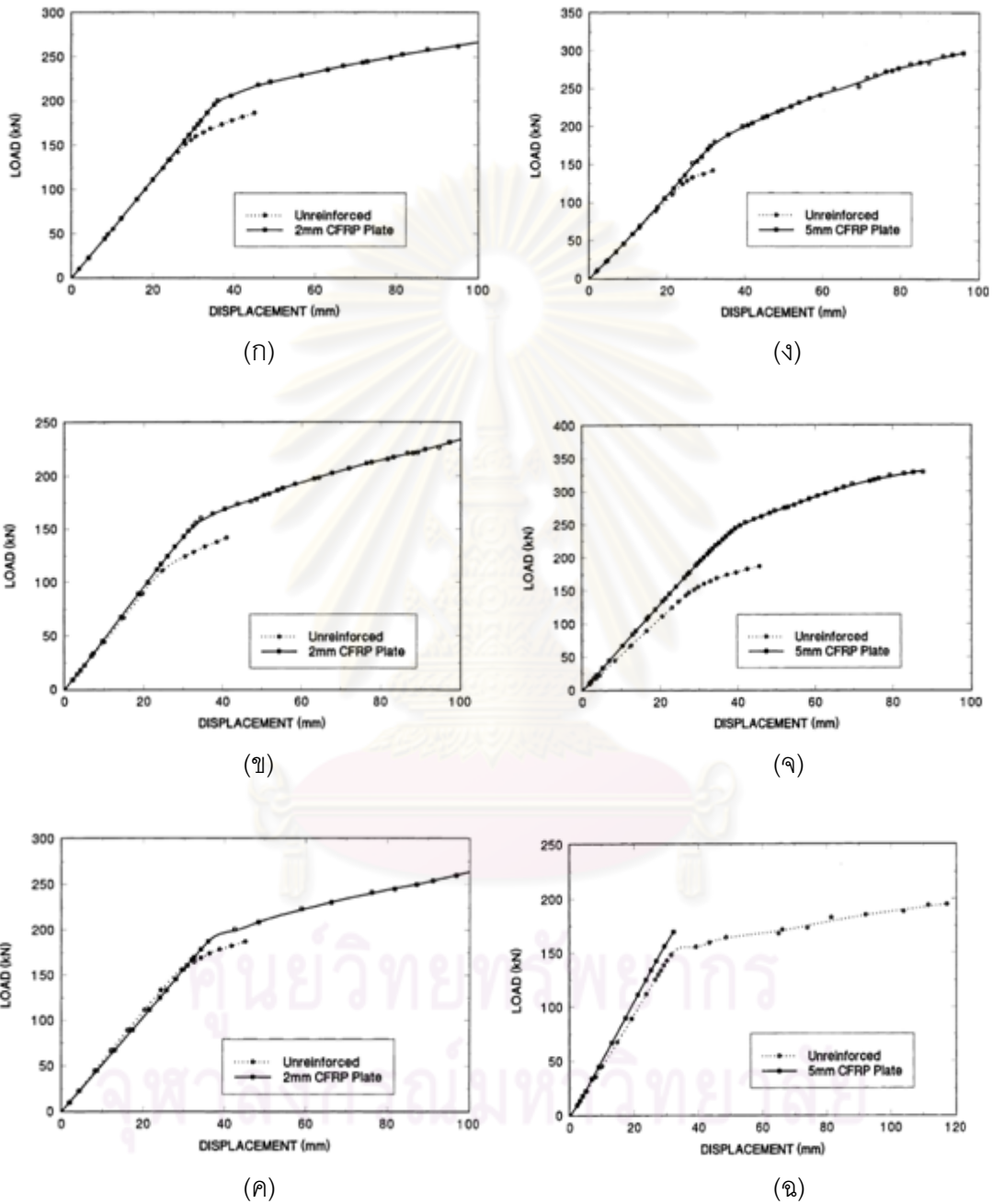
(ก) ภาพหน้าตัดของชิ้นส่วนสะพานเชิงประกอบ



(ข) แบบจำลองการทดลองชิ้นส่วนสะพานเชิงประกอบ (การทดลองแบบ 4 จุดดัด)

รูปที่ 2.3 การทดลองชิ้นส่วนสะพานเชิงประกอบ (Sen และคณะ, 2001)

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



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) กรณีขึ้นส่วนสะพานที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่มีความหนาเท่ากับ 2 มม. แสดงดังรูปที่ 2.4(ก) – รูปที่ 2.4(ค) และกรณีขึ้นส่วนสะพานที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่มีความหนาเท่ากับ 5 มม. แสดงดังรูปที่ 2.4(ง) – รูปที่ 2.4(ฉ)

3) กรณีขึ้นส่วนสะพานที่ซ่อมแซมด้วยการยึดติดแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนด้วยวัสดุประสานแสดงดังรูปที่ 2.4(ก) กับ รูปที่ 2.4(ฉ) และกรณีขึ้นส่วนสะพานที่ซ่อมแซมด้วยยึดติดแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนด้วยวัสดุประสานและสลักเกลียวแสดงดังรูปที่ 2.4(ข) – รูปที่ 2.4(จ)

จากผลการทดลองของงานวิจัยนี้พบว่า 1) ความแข็งแรงของโครงสร้างเพิ่มขึ้นเช่น กรณีที่คานเหล็กมีกำลังจุดครากเท่ากับ 310 เมกะปาสคาลพบว่ากำลังของขึ้นส่วนของสะพานเพิ่มขึ้น 21 และ 52% ในขึ้นส่วนสะพานที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่มีความหนา 2 และ 5 มม. ตามลำดับและกรณีที่คานเหล็กมีกำลังจุดครากเท่ากับ 370 เมกะปาสคาลพบว่ากำลังของขึ้นส่วนสะพานเพิ่มขึ้น 9 และ 32% ในขึ้นส่วนสะพานที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่มีความหนา 2 และ 5 มม. ตามลำดับ 2) ในการทดลองของกรณีขึ้นส่วนสะพานที่ซ่อมแซมด้วยการยึดติดแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่มีความหนา 2 มม. ไม่พบการฉีกขาดของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำสูงสุดที่แสดงตามรูปที่ 2.4(ก) – รูปที่ 2.4(ข) และกรณีขึ้นส่วนสะพานที่ซ่อมแซมด้วยการยึดติดแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่มีความหนา 5 มม. ด้วยวัสดุประสานและสลักเกลียวพบว่าแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนถูกฉีกขาดโดยสลักเกลียว

Messick (1996) ศึกษาสภาวะแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อระบบการเสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำสถิตและแรงกระทำซ้ำซากเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ ในการทดลองภายใต้แรงกระทำซ้ำซากพบว่าการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจะเกิดขึ้นที่ปลายแผ่นในขณะทดลอง

สาเหตุของการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนถูกคาดเดาว่ามาจากความไม่เหมาะสมของการเตรียมตัวอย่างเช่น แรงดันที่ไม่สม่ำเสมอที่เกิดจากผิวไม้กระทำกับแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน และจากการศึกษาวัสดุที่ช่วยลดผลกระทบการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจากสภาวะแวดล้อมพบว่าการใช้ไฮโปไฟลแอลกอฮอล์เช็ดทำความสะอาดผิวสัมผัสระหว่างเหล็กกับชั้นวัสดุประสานก่อนที่จะติดตั้งแผ่นเสริมกำลังดีกว่าการใช้อาซิโตนเช็ดทำความสะอาด

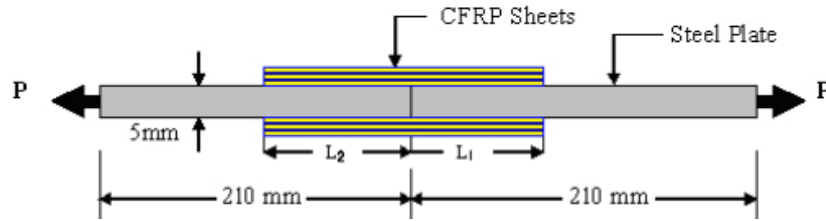
อัศววัชร เล่นวารี (2002) ศึกษาพฤติกรรมของคานเหล็กที่เสริมกำลังบางส่วนด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงสถิตและแรงกระทำซ้ำซากเพื่อกำหนดระยะปลายของแผ่นที่ต้องเผื่อออกไปจากจุดหยุดแผ่นที่กำหนดจากความต้องการด้านกำลัง

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

ในงานวิจัยนี้พบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบกำลังของรอยต่อชนิดแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรร่วมกับหลักการของกลศาสตร์การแตกหักเชิงเส้นสามารถนำไปอธิบายพฤติกรรมแบบที่ 1 ได้อย่างดี สำหรับพฤติกรรมแบบที่ 2 พบว่าการวิเคราะห์เชิงเส้นสามารถนำมาใช้ประเมินระยะที่แผ่นต้องการเพื่อพัฒนาหน่วยแรงดึงจนเกิดความเป็นคอมโพสิตของหน้าตัดได้ 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

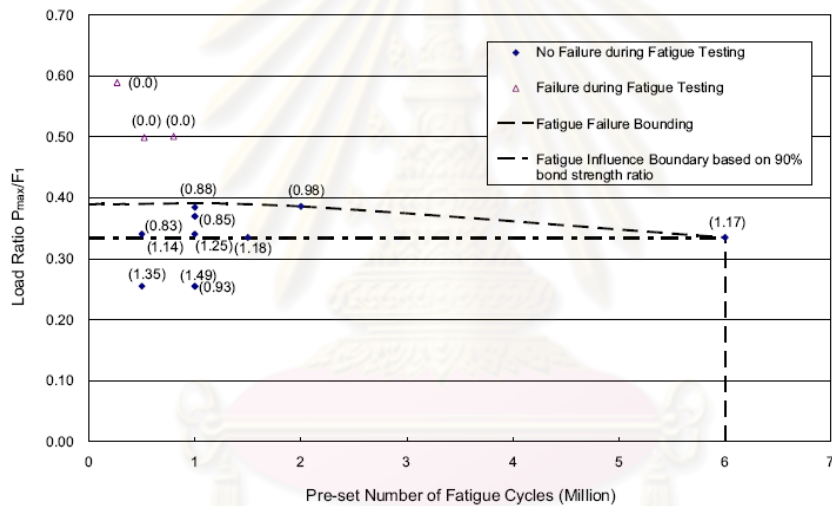
Al-Mahaidi และคณะ (2005) ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นในรอยต่อประกบกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงกระทำซ้ำซาก ในการทดลองใช้แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนชนิด CF130 และ CF530 ประกบกับแผ่นเหล็กที่มีความหนา 5 มม. แสดงดังรูปที่ 2.5



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

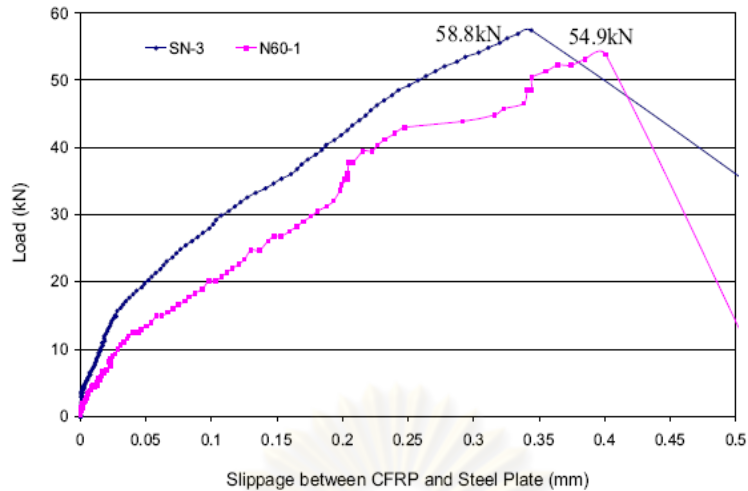
(Al-Mahaidi และคณะ, 2005)

จากการทดลองพบว่าภายใต้แรงกระทำซ้ำซากสูงสุดที่ต่ำกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ของแรงดึงประลัยนั้นจะทำให้ไม่เกิดการวิบัติและไม่มีผลกระทบต่อกำลังยึดเหนี่ยวภายใต้แรงกระทำซ้ำซากที่ต่ำกว่า 35 เปอร์เซ็นต์ของแรงดึงประลัยแสดงดังรูปที่ 2.6 แต่จะมีผลทำให้สติเฟ่นความต้านทานการไหลของชั้นประสานลดลงแสดงดังรูปที่ 2.7



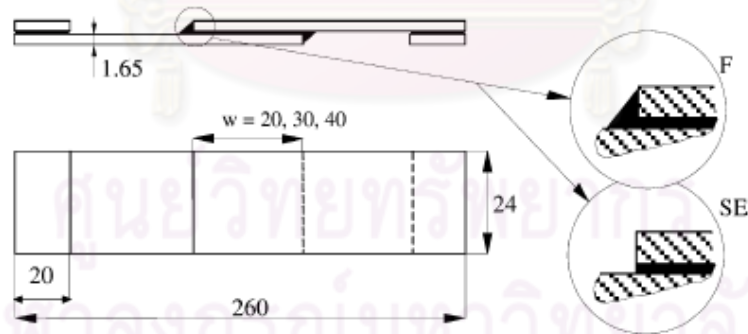
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแรงกระทำซ้ำซากสูงสุดต่อแรงดึงประลัยกับจำนวนรอบของการหลุดล่อน (Al-Mahaidi และคณะ, 2005)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับระยะการเคลื่อนที่ (ไถล) โดยที่เส้น SN-3 คือการทดสอบชิ้นงานภายใต้แรงดึงสถิตและเส้น N60-1 คือชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบภายใต้แรงกระทำซ้ำซาก ก่อนทดสอบแบบแรงดึงสถิต (Al-Mahaidi และคณะ, 2005)

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

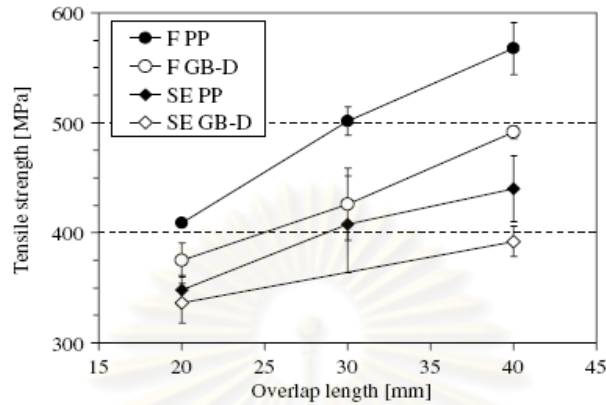


Geometry of single lap bonded joint (dimensions in millimetres), SE = square edge joints, F = spew fillet joints.

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

(Quaresimin และ Ricotta, 2005)

ผลการทดลองรอยต่อแบบทาบเดี่ยวภายใต้แรงดึงสถิตพบว่ากำลังของรอยต่อทาบจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทาบเพิ่มขึ้นและรอยต่อทาบเดี่ยวชนิดมูมปลายระยะทาบเป็นมูมป้าน (F) จะมีกำลังรับแรงดึงมากกว่ารอยต่อทาบเดี่ยวมูมปลายระยะทาบเป็นมูมฉาก (SE) แสดงผลดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ผลกระทบของกำลังรับแรงดึงในรอยต่อแบบทาบเดี่ยวโดยพิจารณาจากมุมที่ปลายระยะทาบ และระยะทาบของรอยต่อ (Quaresimin และ Ricotta, 2005)

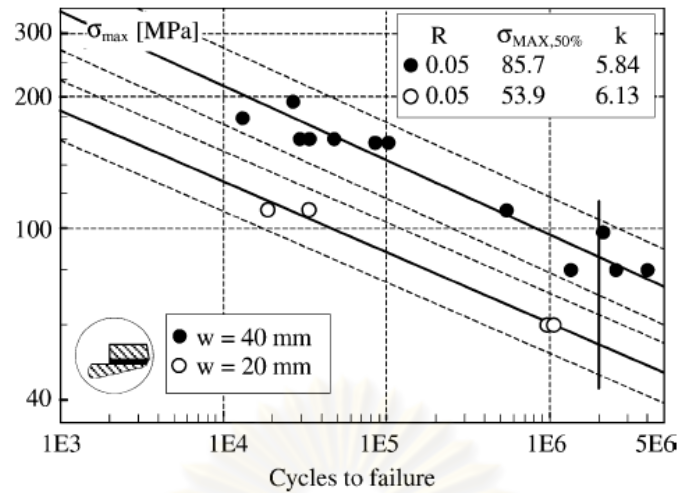
ผลการทดลองรอยต่อทาบเดี่ยวภายใต้แรงกระทำซ้ำซาก (แสดงดังรูปที่ 2.10) พบว่า

1) รอยร้าวลำทั้งหมดจะเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนกับชั้นวัสดุประสาน

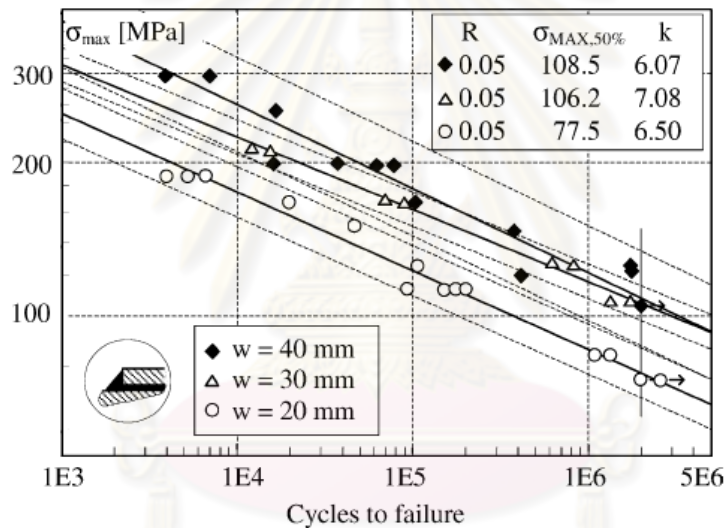
2) ในกรณีมูมปลายระยะทาบของรอยต่อต่างกันพบว่ารอยต่อแบบทาบเดี่ยวชนิดมูมปลายระยะทาบเป็นมูมป้าน (F) จะมีกำลังรับความด้ามากกว่ารอยต่อทาบเดี่ยวมูมปลายระยะทาบเป็นมูมฉาก (SE) ถึง 25%

3) ระดับของช่วงของความเค้นในการทดลองมีผลทำให้อัตราการเติบโตของรอยร้าวลำเพิ่มขึ้น

4) ระยะทาบไม่มีผลต่ออัตราการเติบโตของรอยร้าวลำแต่จะมีผลทำให้อายุของความด้าเพิ่มขึ้นในกรณีที่ระดับของช่วงของความเค้นในการทดลองเท่ากัน



(ก) ผลกระทบของระยะทาบใดๆ ในรอยต่อแบบทาบเดี่ยว (มุมปลายระยะทาบเป็นมุมฉาก)

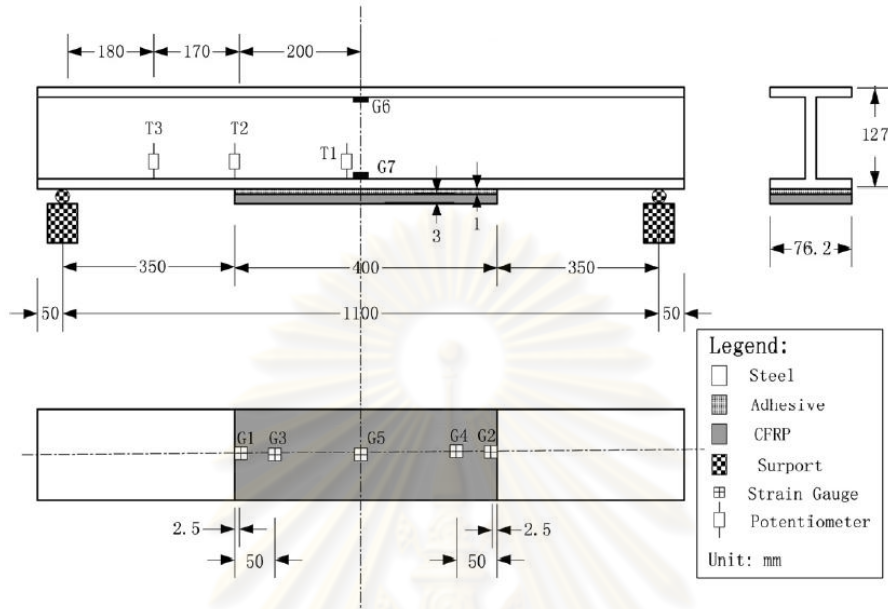


(ข) ผลกระทบของระยะทาบใดๆ ในรอยต่อแบบทาบเดี่ยว (มุมปลายระยะทาบเป็นมุมป้าน)
รูปที่ 2.10 ผลการทดลองของระยะทาบต่างๆ ในรอยต่อแบบทาบเดี่ยวภายใต้แรงกระทำซ้ำซาก

(Quaresimin และ Ricotta, 2005)

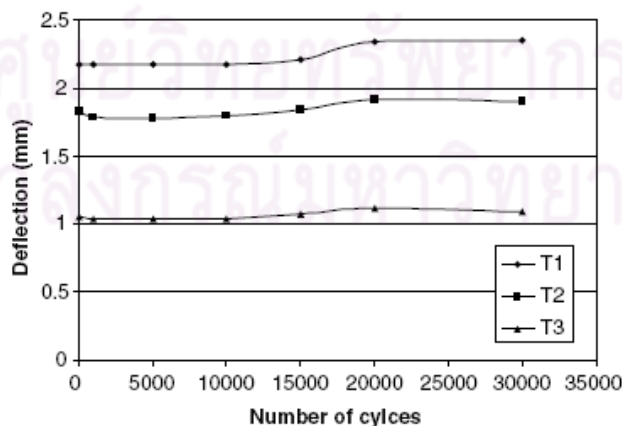
Deng และ Lee (2005) แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับจำนวนรอบการวิบัติของคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำซ้ำซากดังสมการ $y = -4.19\ln(x) + 78.62$, $R^2 = 0.96$ (แสดงดังรูปที่ 2.14) ในงานวิจัยนี้ใช้คานเหล็กชนิด 127x76UB13 ยาว 1200 มม. ซึ่งถูกเตรียมผิวด้วยมาตรฐานการพ่นทราย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

งานวิจัยนี้ใช้เกจความเครียดในการตรวจจับการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในคานเหล็กและวัดระยะการโก่งตัวของคานด้วยเกจความต่างศักย์ไฟฟ้า (Potentiometer) แสดงดังรูปที่ 2.11

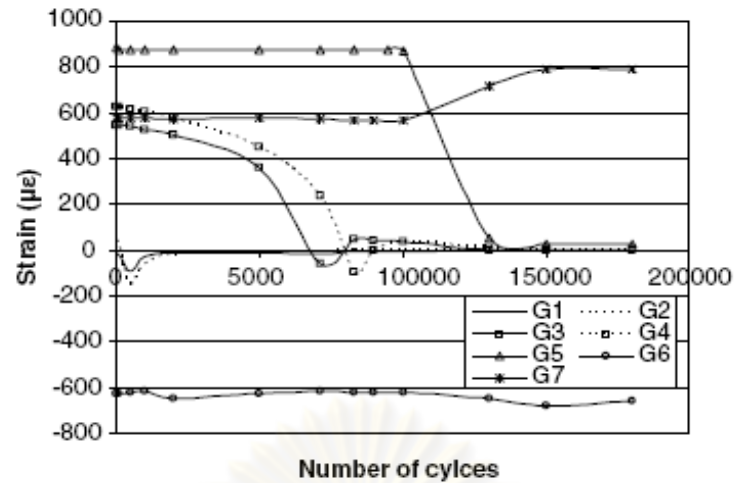


รูปที่ 2.11 โมเดลคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (ตำแหน่งแรงกระทำซ้ำซากเกิดขึ้นที่กึ่งกลางของคานเหล็ก) และตำแหน่งการติดตั้งเกจความเครียด (G), เกจความต่างศักย์ไฟฟ้า (T) (Deng และ Lee, 2005)

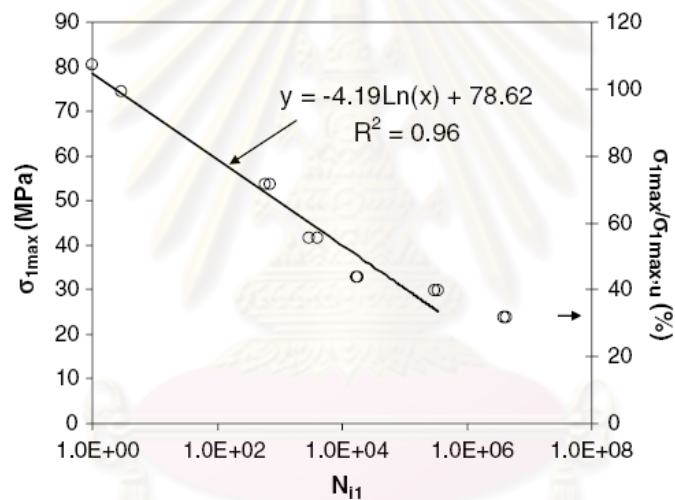
ในขณะที่ทำการทดลองพบว่าเมื่อปลายแผ่นเสริมกำลังเริ่มเกิดการหลุดล่อนจะมีผลทำให้ระยะการโก่งตัวเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 2.12 และค่าความเครียดที่ปลายแผ่นเสริมกำลังลดต่ำลงแสดงดังรูปที่ 2.13 จนกระทั่งแผ่นเสริมกำลังหลุดล่อนออกจากคานเหล็กทั้งหมด



รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการโก่งตัวของคานกับจำนวนรอบของแรงกระทำซ้ำซาก (Deng และ Lee, 2005)



รูปที่ 2.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดในบริเวณต่างๆกับจำนวนรอบของแรงกระทำซ้ำซาก (Deng และ Lee, 2005)

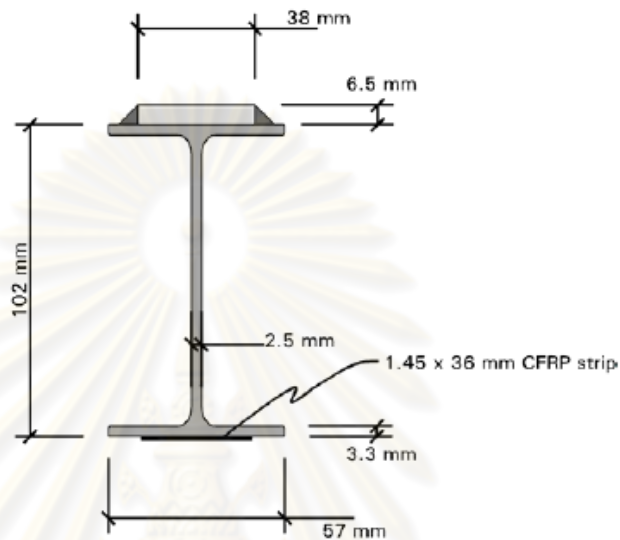


รูปที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับจำนวนรอบของแรงกระทำในคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (Deng และ Lee, 2005)

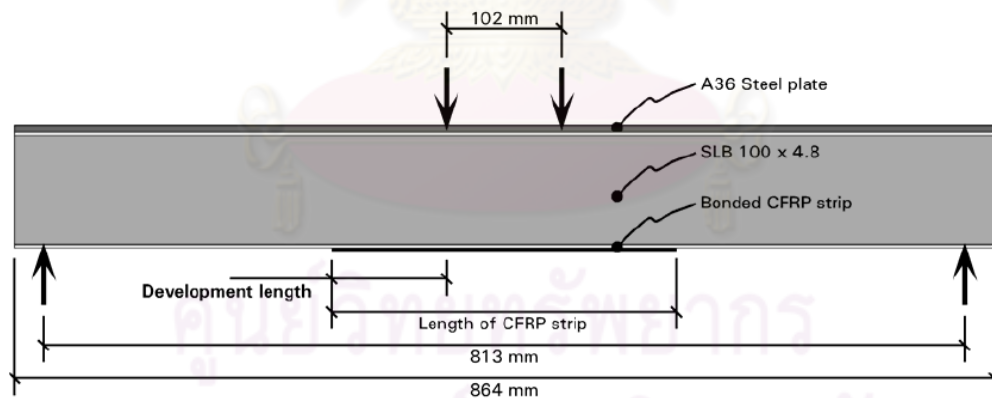
Schnerch และคณะ (2006) ศึกษาพฤติกรรมแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุประสานในแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่เสริมกำลังในโครงสร้างเหล็กโดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ประเภทคือ 1) การทดสอบกำลังในวัสดุประสานด้วยวิธีการทดลองการรับแรงดัดและ 2) การทดสอบกำลังในวัสดุประสานด้วยวิธีการทดสอบการรับแรงดึง

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,) มีระยะการเสริมความยาวแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเท่ากับ 50.8, 76.2, 101.6, 127, 152.4 และ 203.2 มม. ตามลำดับแสดงรูปตัวอย่างการทดลองดังรูปที่ 2.15



(ก) ภาพหน้าตัดของแบบจำลองตัวอย่างการทดลอง



(ข) ภาพด้านยาวของแบบจำลองตัวอย่างการทดลอง

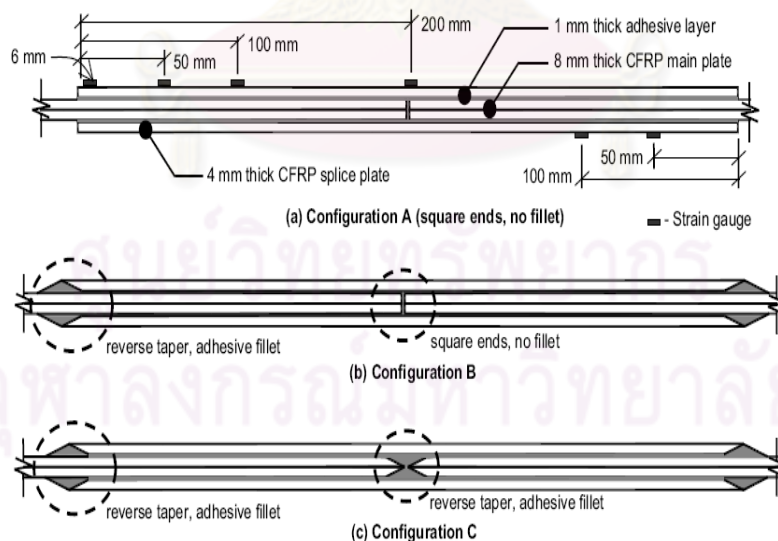
รูปที่ 2.15 ภาพของแบบจำลองตัวอย่างการทดสอบกำลังของวัสดุประสานด้วยวิธีการทดลองการรับแรงดัด (Schnerch และคณะ, 2006)

จากการทดสอบการรับแรงดัดพบว่า จะเกิดการฉีกขาดกับแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนชนิดโมดูลัสของความยืดหยุ่นสูงซึ่งเป็นการใช้แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนได้อย่างคุ้มค่า (โดยปกติแล้วแผ่นเสริมกำลังมักจะเกิดการหลุดล่อนก่อน) และความยาวของแผ่นพลาสติก-

เสริมเส้นใยคาร์บอนที่เสริมกำลังที่เท่ากันแต่ใช้วัสดุประสานต่างชนิดกันซึ่งวัสดุประสานชนิด SP Spabond 345 จะให้กำลังรับแรงเฉือนสูงสุด

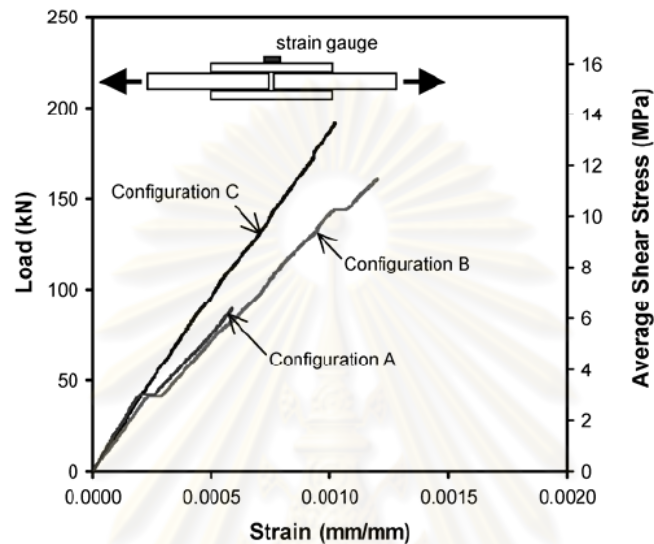
2) การทดสอบกำลังของวัสดุประสานด้วยวิธีการทดสอบการรับแรงดึงโดยใช้รอยต่อรับแรงเฉือน 2 ระบายซึ่งประกอบด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่มีความหนา 4 มม. ประกอบเป็นส่วนของแผ่นรับแรงตามแนวแกน 1 แผ่น และแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (ความหนา 1 มม.) ทาบเป็นระยะ 200 มม. ด้วยวัสดุประสานชนิด SP Spabond 345 (แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเป็นชนิดเดียวกับแผ่นเสริมกำลังในการ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

ในการทดลองนี้มีตัวแปรที่ใช้ศึกษาคือลักษณะมุมปลายการต่อชนระหว่างแผ่นรับแรงตามแนวแกนทั้งสองและมุมของวัสดุประสานที่ปลายแผ่นทาบ ซึ่งมีรายละเอียดของรอยต่อแต่ละชนิดดังต่อไปนี้ รอยต่อชนิด A มีมุมปลายของการต่อชนระหว่างแผ่นรับแรงตามแนวแกนทั้งสองเป็นมุมฉากและมุมของวัสดุประสานที่ปลายแผ่นทาบเป็นมุมฉากทั้งหมด, รอยต่อชนิด B มีมุมปลายของการต่อชนระหว่างแผ่นรับแรงตามแนวแกนทั้งสองเป็นมุมฉากและมุมของวัสดุประสานที่ปลายแผ่นทาบเป็นมุมแหลม 20 องศาที่บรรจบของผิวสัมผัสและรอยต่อชนิด C มีมุมปลายของการต่อชนระหว่างแผ่นรับแรงตามแนวแกนทั้งสองเป็นมุมแหลม 20 องศาที่บรรจบของผิวสัมผัสและมุมของวัสดุประสานที่ปลายแผ่นทาบเป็นมุมแหลม 20 องศาที่บรรจบของผิวสัมผัสแสดงดังรูปที่ 2.16

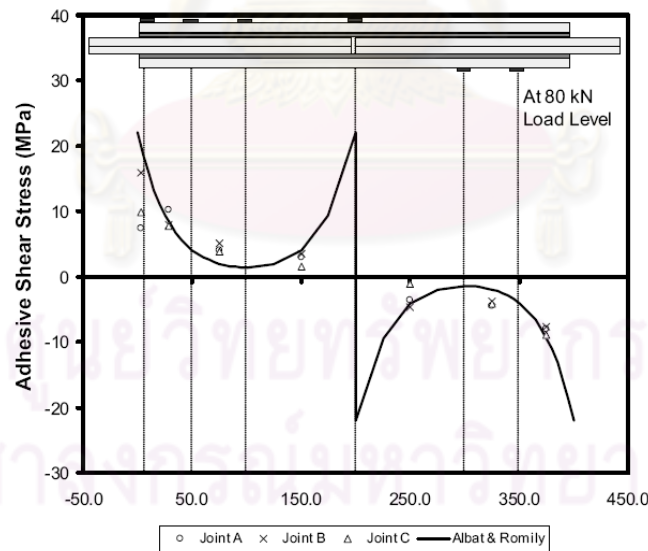


รูปที่ 2.16 ชนิดของรอยต่อประกับคู่แบบสมมาตรในงานทดลองนี้ (รูปด้านบน) รอยต่อชนิด A (รูปด้านกลาง) รอยต่อชนิด B และ (รูปด้านล่าง) รอยต่อชนิด C (Schnerch และคณะ, 2006)

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



(ก) ผลการทดลองภายใต้แรงดึงในรอยชนิด A, B และ C

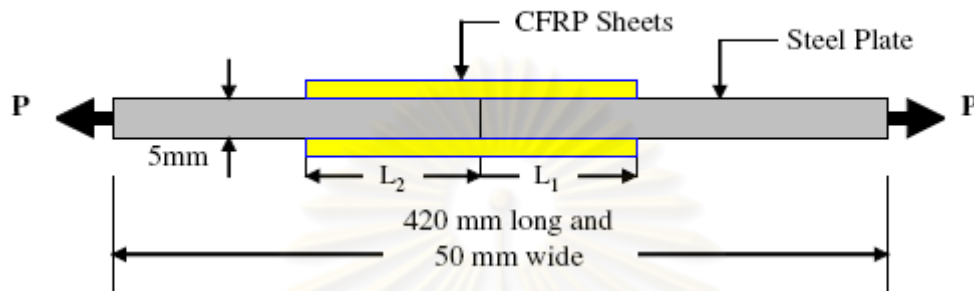


(ข) ความเค้นเฉือนในตำแหน่งต่างๆ ของรอยต่อชนิด A, B และ C จากการทดลองและผลทางระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์

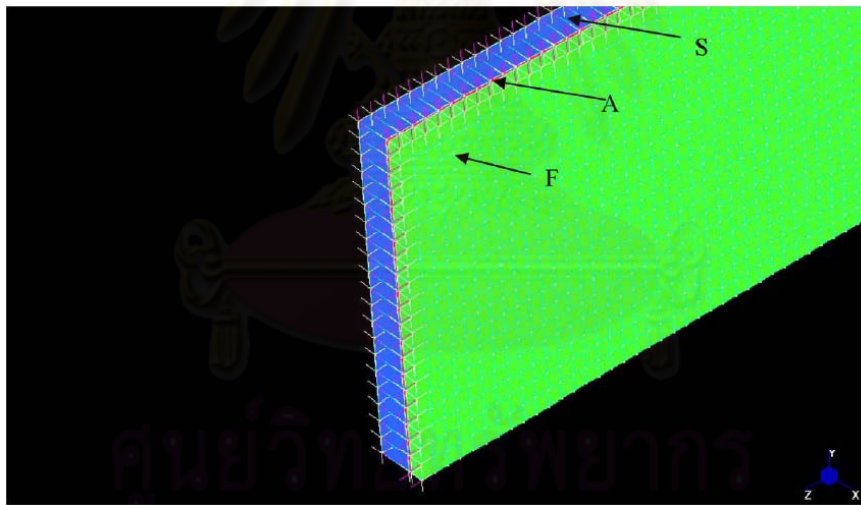
รูปที่ 2.17 ผลการทดลองทดสอบกำลังของวัสดุประสานด้วยวิธีการทดสอบการรับแรงดึง

(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

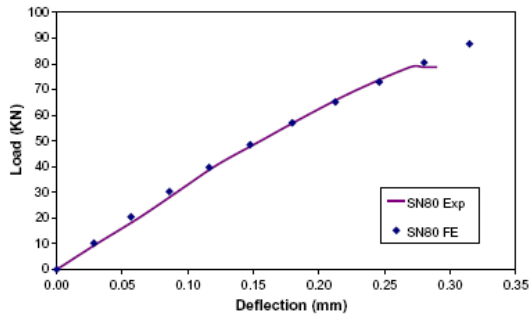
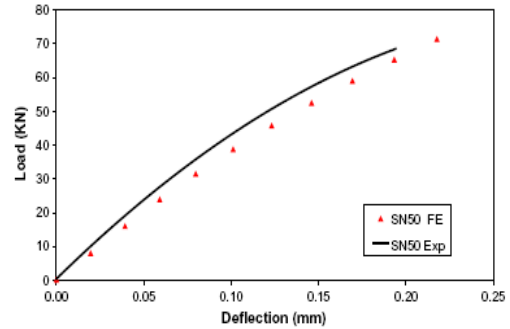
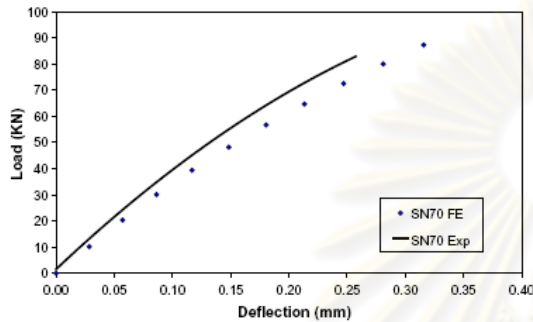
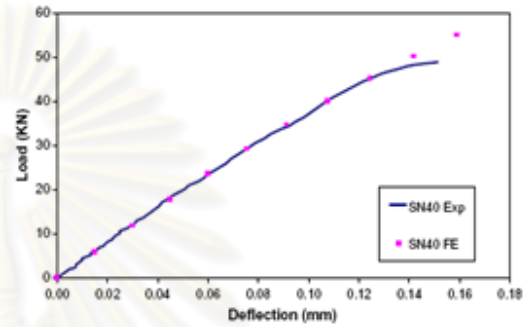


รูปที่ 2.18 โมเดลของรอยต่อประกับคู่แบบสมมาตรโดยที่ $L_1 = 40, 50, 70, 80$ มม. และ $L_2 = 80$ มม. (Al-Mahaidi และคณะ, 2006)



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.

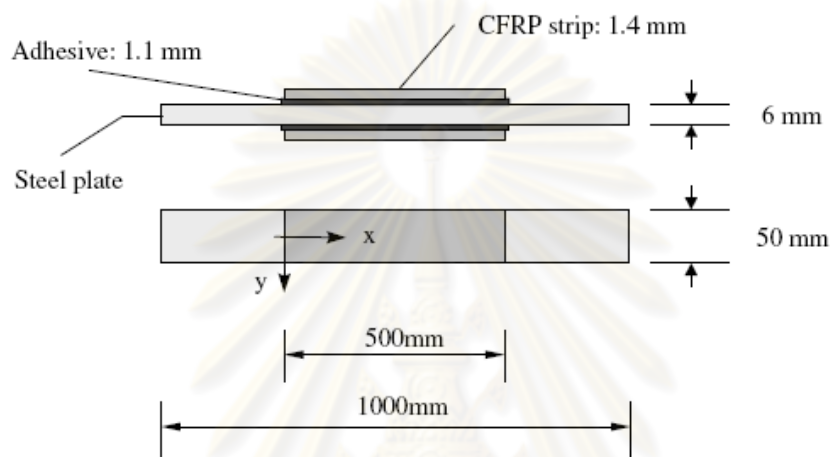
รูปที่ 2.20 เปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดิ่งกับการยืดตัวจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นกับผลการทดลอง (Al-Mahaidi และคณะ, 2006)

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



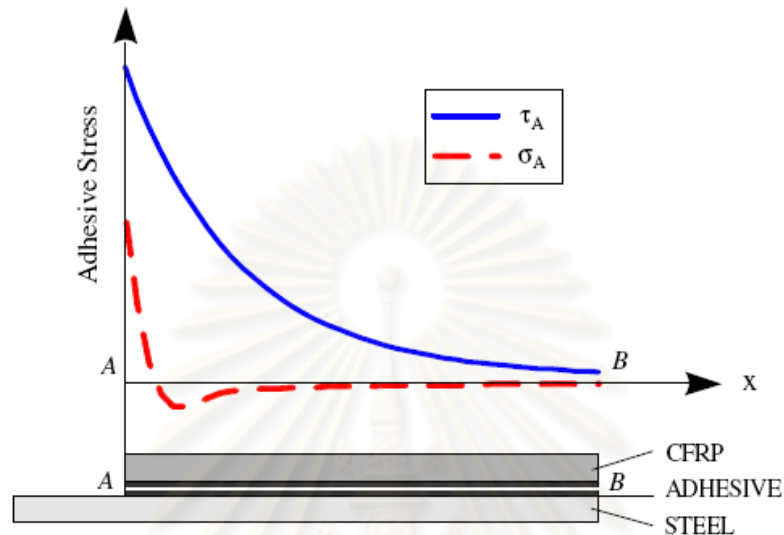
รูปที่ 2.21 รอยต่อรับแรงดึงที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

(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

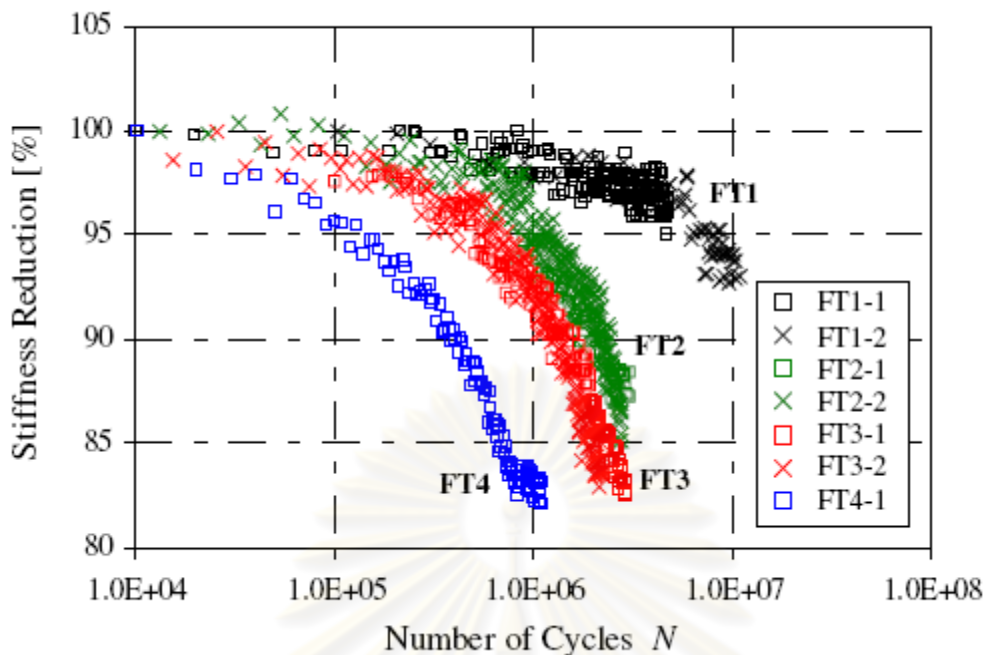
การทดลองรอยต่อรับแรงดึงที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำซ้ำซากพบว่าในการวิเคราะห์ความเค้นทดลองระดับเดียวกันที่ปลายของแผ่นเสริมกำลังจะเกิดความเค้นเฉือนและความเค้นกะเทาะ (peel stress) สูงสุด (แสดงดังรูปที่ 2.22) และที่ปลายแผ่นเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดรอยร้าวที่ผิวสัมผัสระหว่างชั้นวัสดุประสานกับผิวเหล็ก



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

นอกจากนี้ภายใต้แรงกระทำซ้ำซากจะมีผลทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อรับแรงดึงที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนลดลงดังต่อไปนี้ (แสดงดังรูปที่ 2.23)

- 1) เกิดรอยร้าวที่ผิวสัมผัสระหว่างชั้นวัสดุประสานกับผิวเหล็กจะทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อลดลงเหลือ 98%
- 2) ช่วงรอยร้าวเติบโตจะมีผลให้ความแข็งแรงของรอยต่อลดลงเหลือ 95%
- 3) หลังจากแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนหลุดล่อนจะทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อลดลงเหลือ 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) สามารถหาได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการแบ่งช่วงของเอลิเมนต์รอบปลายรอยร้าว (จุดเอกฐาน) ให้ละเอียดขึ้น

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

วิธีวิธีไฟโปรคอลเวิร์คคอนทัวริอินทิกรัล (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 โดยใช้ผลลัพธ์บริเวณรอบปลายรอยร้าวในการวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นในโหมดเปิดและโหมดของแรงเฉือน

Hong และ Stern (1978) พัฒนารหัส RWCIM เพื่อวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นในวัสดุเชิงประกอบที่มีรอยร้าวอยู่ภายในโดยที่ค่าความเข้มของความเค้นจะได้รับการอินทิเกรทของความเค้นและการจัดบนเส้นคอนทัวร์รอบๆปลายรอยร้าว

Carpenter (1984) พัฒนารหัส RWCIM ต่อจากของ Stern และคณะ (1976) โดยพิจารณารอยร้าวภายในแผ่นรับแรงดึง ต่อมา Carpenter and Byer (1987) พัฒนารหัส RWCIM เพื่อทำการวิเคราะห์ปัญหาลิ้มของสองวัสดุ โดยแปลงสมการความเค้นที่มาจากวิธีคอมเพลคซ์โพเทนเชียลของ Green และ Zirna (1968) ให้อยู่ในรูปของผลคูณระหว่างเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ (eigenvector) กับค่าสัมประสิทธิ์ c_1 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) วิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นในรอยต่อทาบชนิดคู่โดยใช้วิธี RWCIM

อัศววัชร เล่นวารี (2002) ประยุกต์ใช้วิธีคอมเพลคซ์โพเทนเชียลและวิธี RWCIM เพื่อทำการวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นในลิ้มของสองวัสดุ (กรณีคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนและรอยต่อประกับคู่แบบสมมาตร) เพื่อทำนายอายุการหลุดล่อนที่ปลายแผ่น

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

บทที่ 3 ทฤษฎี

บทนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับกลศาสตร์การแตกหักเชิงเส้น, วิธีคอมเพล็กซ์โพเทนเชียล, ทฤษฎีรีพรีเซนตชัน และ วิธีรีพรีเซนตชันเวกเตอร์คอนทัวร์อินทิกรัล (RWCIM) เพื่อใช้ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองและทำนายอายุการหลุดร่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในคานเหล็ก

3.1 กลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic Fracture Mechanics, LEFM)

กลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic Fracture Mechanics, LEFM) เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการแตกหักของวัสดุที่มีรอยร้าว โดยวัสดุบริเวณปลายรอยร้าวเสียรูปแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (ไม่เกิดการครากขึ้น) ดังนั้นโดยหลักการแล้วกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นจึงเหมาะสมกับการวิเคราะห์การแตกหักเปราะ (brittle fracture) เท่านั้น อย่างไรก็ตามข้อมูลการทดสอบการแตกหักชิ้นส่วนที่มีรอยร้าว แสดงให้เห็นว่ากลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นสามารถทำนายการแตกหักในกรณีที่มีรอยร้าวที่มีบริเวณครากขนาดเล็ก เมื่อเทียบกับความยาวรอยร้าวและมีมิติระนาบ (planar dimension) ของวัสดุได้ แต่อาจจะต้องปรับแก้ค่าของพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวเนื่องจากผลของบริเวณคราก

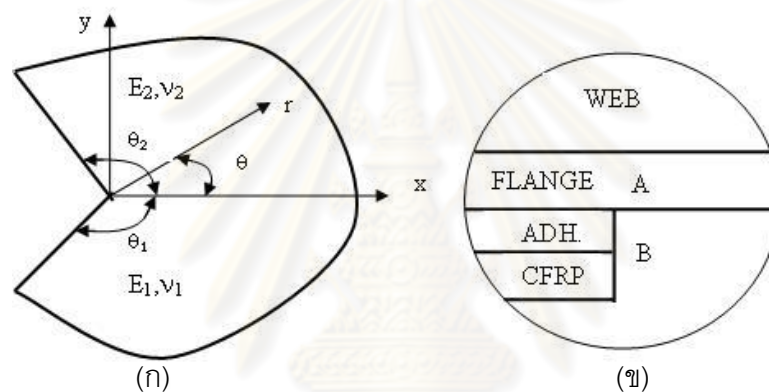
สำหรับการแตกหักเปราะ เมื่อแรงกระทำถึงค่าวิกฤติรอยร้าวจะเติบโตจากขนาดเริ่มต้นอย่างรวดเร็วจนทำให้ชิ้นส่วนเสียหาย เนื่องจากอัตราการเติบโตสูงมาก จึงเรียกว่าเป็นการเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพ (unstable growth) สำหรับวัสดุที่มีความเหนียวพอสมควร เช่น เหล็กกล้า ความแข็งแรงสูง หรือสถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าวเป็นแบบความเค้นระนาบ (plane stress) นั้น เมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นถึงค่าวิกฤติ รอยร้าวจะเติบโตจากความยาวเดิมด้วยอัตราเร็วที่ต่ำกว่ากรณีแตกหักเปราะอย่างมาก รอยร้าวจะเติบโตเป็นระยะทางหนึ่งแล้วจะหยุดการเติบโตของรอยร้าวในลักษณะนี้เรียกว่า การเติบโตอย่างมีเสถียรภาพ (stable growth) ขณะที่เพิ่มแรงกระทำขึ้นเรื่อยๆ รอยร้าวก็จะเติบโตไปอย่างมีเสถียรภาพ จนกระทั่งแรงกระทำเพิ่มถึงขีดจำกัดค่าหนึ่งรอยร้าวก็จะเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพในที่สุด การวิเคราะห์เสถียรภาพ (stability) ของรอยร้าวในกรณีที่ขนาดบริเวณครากยังไม่ขัดแย้งกับเงื่อนไขของกลศาสตร์การแตกหักเชิงยืดหยุ่นนั้นสามารถใช้พารามิเตอร์ปลายรอยร้าวของกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นได้ นอกจากนี้ปัญหาการแตกหักภายใต้แรงกระทำสลับแล้วกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นยังใช้ได้กับปัญหาการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า (fatigue crack growth) และการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากสภาวะแวดล้อม (จิวฟงส์ กสิวิทย์อำนาจ, 2553)

3.2 การวิเคราะห์ความเค้นในลิ้มของสองวัสดุ

ในงานวิจัยนี้ศึกษาทฤษฎีการวิเคราะห์ค่าความเค้นในลิ้มของสองวัสดุประกอบด้วยวิธีคอมเพล็กซ์โพเทนเชียลและวิธี RWCIM

3.2.1 วิธีคอมเพล็กซ์โพเทนเชียล

บริเวณปลายแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนอยู่ในลักษณะลิ้มของสองวัสดุ (Bi-Material wedge) แสดงดังรูปที่ 3.1(ข) ในหัวข้อนี้จะใช้วิธีคอมเพล็กซ์โพเทนเชียลวิเคราะห์ปัญหาลิ้มของสองวัสดุภายใต้ความเครียดระนาบและความเค้นระนาบได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 พิจารณาบริเวณปลายรูปลิ้มของสองวัสดุในงานวิจัยนี้ (ก) ลิ้มของสองวัสดุ และ (ข) ภาพแสดงความเค้นเอกฐานที่ปลายแผ่นจุด A และจุด B (อัศวินทร์ เล่นวารี, 2002)

Green และ Zirna (1968) ในเทอมของค่าจำนวนเชิงซ้อนผืนผ้า $z = x + iy = re^{i\theta}$ หรือรูปแบบสมการพื้นฐานในระนาบความยืดหยุ่นของวัสดุที่บากร่องจะมีลักษณะเฉพาะในเทอมของคอมเพล็กซ์โพเทนเชียลสองค่าคือ $\Omega_j(z)$ และ $\psi_j(z)$ แสดงในสมการที่ 3.1

$$U = u_r + iu_\theta = (2\mu_j)^{-1} e^{-i\theta} \left[\kappa \Omega(z) - z \bar{\Omega}'(\bar{z}) - \bar{\psi}(\bar{z}) \right]$$

$$\tau_r = \sigma_{rr} + i\sigma_{r\theta} = \Omega'(z) + \bar{\Omega}'(\bar{z}) - z \bar{\Omega}''(\bar{z}) - \bar{z} z^{-1} \bar{\psi}'(\bar{z})$$

$$\tau_\theta = \sigma_{\theta\theta} - i\sigma_{r\theta} = \Omega'(z) + \bar{\Omega}'(\bar{z}) + z \bar{\Omega}''(\bar{z}) + \bar{z} z^{-1} \bar{\psi}'(\bar{z}) \quad (3.1)$$

โดยที่เส้นบาร์หมายถึงสังยุคของจำนวนเชิงซ้อน (Complex Conjugate)

$$z = x + iy = re^{i\theta} \quad \text{จำนวนเชิงซ้อนผืนผ้า}$$

$$\kappa_j = 3 - 4\nu_j \quad \text{สำหรับปัญหาในแนวความเครียดระนาบของวัสดุ } j$$

$$\kappa_j = 3 - 4\nu_j / (1 + \nu_j) \quad \text{สำหรับปัญหาในแนวความเค้นระนาบของวัสดุ } j$$

$$v_j = \text{อัตราส่วนปริมาตรของของวัสดุ } j$$

$$\mu_j = \text{โมดูลัสความเค้นของวัสดุ } j$$

จากรูปที่ 3.1 แสดงปลายของวัสดุทั้ง 2 ซึ่งทำมุม θ_1 และ θ_2 กับผิวสัมผัสระหว่างวัสดุทั้งสองชนิดและคุณสมบัติของทั้งสองวัสดุเป็น E_1, ν_1 และ E_2, ν_2 ตามลำดับ ดังนั้นความเค้นและการขจัดรอบบริเวณนี้ (รอบมุมฉากของลิ้มของสองวัสดุ) สามารถอธิบายในเทอมของตัวแปรคอมเพล็กซ์โพเทนเชียล, Ω_j และ ψ_j ได้ตามนี้

$$\begin{aligned} U_j &= u_{jr} + iu_{j\theta} = (2\mu_j)^{-1} e^{-i\theta} \left[\kappa_j \Omega_j(z) - z \bar{\Omega}_j(\bar{z}) - \bar{\psi}_j(\bar{z}) \right] \\ \tau_{jr} &= \sigma_{jrr} + i\sigma_{jr\theta} = \Omega_j'(z) + \bar{\Omega}_j'(\bar{z}) - z \bar{\Omega}_j''(\bar{z}) - \bar{z} z^{-1} \bar{\psi}_j'(\bar{z}) \\ \tau_{j\theta} &= \sigma_{j\theta\theta} - i\sigma_{jr\theta} = \Omega_j'(z) + \bar{\Omega}_j'(\bar{z}) + z \bar{\Omega}_j''(\bar{z}) + \bar{z} z^{-1} \bar{\psi}_j'(\bar{z}) \end{aligned} \quad (3.2)$$

โดยที่ตัวอักษร j จะอ้างถึงวัสดุ 1 และ 2

Carpenter และ Byers (1987) ตั้งสมมุติฐานว่าคอมเพล็กซ์โพเทนเชียลอยู่ในรูปของ

$$\Omega_j(z) = A_j z^\lambda + a_j z^{\bar{\lambda}} \quad \text{และ} \quad \psi_j(z) = B_j z^\lambda + b_j z^{\bar{\lambda}} \quad (3.3)$$

โดยที่ A_j, B_j, a_j, b_j และ λ อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน

สภาวะเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาลิ้มของสองวัสดุ (ตามรูปที่ 3.1) คือความต่อเนื่องรอบผิวสัมผัสของลิ้มของสองวัสดุและ Traction อิสระรอบผิวของทั้งสองวัสดุ

1) ความต่อเนื่องของการขจัด ณ จุดที่ $\theta = 0^\circ$ จะได้ว่า

$$U_1(\theta = 0^\circ) = U_2(\theta = 0^\circ) \quad (3.4ก)$$

2) ความต่อเนื่องของความเค้น ณ จุดที่ $\theta = 0^\circ$ จะได้ว่า

$$\tau_{1\theta}(\theta = 0^\circ) = \tau_{2\theta}(\theta = 0^\circ) \quad (3.4ข)$$

3) สำหรับวัสดุที่ 1 เงื่อนไขความเค้นอิสระที่มุม $\theta = -\theta_1$ จะได้ว่า

$$\tau_{1\theta}(\theta = -\theta_1) = 0 \quad (3.4ค)$$

4) สำหรับวัสดุที่ 2 เงื่อนไขความเค้นอิสระที่มุม $\theta = \theta_2$

$$\tau_{2\theta}(\theta = \theta_2) = 0 \quad (3.4ง)$$

แทนสมการที่ 3.3 และสภาวะเงื่อนไขขอบเขตในสมการที่ 3.4ก-ง ลงในสมการที่ 3.2 จะได้ว่า

$$\{D\} [A_1 \ A_2 \ a_1 \ a_2 \ B_1 \ B_2 \ b_1 \ b_2]^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (3.5)$$

ค่าลักษณะเฉพาะ (eigenvalue, λ_k) ของสมการที่ 3.5 มีความสัมพันธ์เป็นค่าลำดับเอกฐาน (orders of singularities, $\alpha_k = 1 - \lambda_k$) ของสมการสนามความเค้นสามารถวิเคราะห์ได้จากวิธีมูลเลอร์ (Muller's Method) ซึ่งจะแสดงในภาคผนวก ข. ผลของค่าลักษณะเฉพาะแต่ละค่าจะให้เวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ (eigenvector) ซึ่งอยู่ในรูปของจำนวนจริงหรือจำนวนเชิงซ้อนก็ได้โดย

ขึ้นกับชนิดของค่าลักษณะเฉพาะนั้นๆ และค่าลักษณะเฉพาะในทอมนเด่นหรือ $\lambda_k = \lambda_1, (k=1)$ จะให้ค่าของจำนวนจริงในรูปจำนวนเชิงซ้อนผืนผ้าเป็นค่าที่น้อยที่สุดในระหว่าง $0 < \text{Re}(\lambda_k) < 1$ สำหรับเป็นจำนวนจริงบวก และเป็นค่าที่มากที่สุดในระหว่าง $-1 < \text{Re}(\lambda_k) < 0$ สำหรับจำนวนจริงลบ

Carpenter และ Byers (1987) พิจารณาค่าของคอมเพล็กซ์โพเทนเชียลในสมการที่ 3.3 ให้อยู่ในรูปของจำนวนจริงจะได้

$$\Omega_j(z) = A_j z^\lambda \quad \text{และ} \quad \psi_j(z) = B_j z^\lambda \quad (3.6)$$

โดยที่ค่า A_j และ B_j ถูกสมมติเป็นจำนวนเชิงซ้อน แทนสมการที่ 3.6 ลงในสมการที่ 3.2 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} 2\mu_j U_j &= r^\lambda (\kappa_j A_j e^{i\theta(\lambda-1)} - \bar{A}_j \lambda e^{i\theta(-\lambda+1)} - \bar{B}_j \lambda e^{i\theta(-\lambda-1)}) \\ 2\tau_{jr} &= r^{\lambda-1} (A_j \lambda e^{i\theta(\lambda-1)} - \bar{A}_j (\lambda^2 - 2\lambda) e^{i\theta(-\lambda+1)} - \bar{B}_j \lambda e^{i\theta(-\lambda-1)}) \\ 2\tau_{j\theta} &= r^{\lambda-1} (A_j \lambda e^{i\theta(\lambda-1)} + \bar{A}_j \lambda^2 e^{i\theta(-\lambda+1)} + \bar{B}_j \lambda e^{i\theta(-\lambda-1)}) \end{aligned} \quad (3.7)$$

โดยที่ $\lambda = \lambda_k$ และค่า $k = 1, 2, 3, \dots$ ตามลำดับ

จากสมการที่ 3.7 และสถานะเงื่อนไขขอบเขตข้างต้นจะได้

$$1) \text{ ความต่อเนื่องของการขจัด ณ จุดที่ } \theta = 0^\circ, U_1(\theta = 0^\circ) = U_2(\theta = 0^\circ)$$

$$\mu_2 \left(A_1 \kappa_1 - \bar{A}_1 \lambda - \bar{B}_1 \right) = \mu_1 \left(A_2 \kappa_2 - \bar{A}_2 \lambda - \bar{B}_2 \right) \quad (3.8)$$

$$2) \text{ ความเค้น ณ จุดที่ } \theta = 0^\circ : \tau_{1\theta}(\theta = 0^\circ) = \tau_{2\theta}(\theta = 0^\circ)$$

$$A_1 + \bar{A}_1 \lambda + \bar{B}_1 = A_2 + \bar{A}_2 \lambda + \bar{B}_2 \quad (3.9)$$

$$3) \text{ สำหรับวัสดุที่ 1 เงื่อนไขความเค้นอิสระที่มุม } \theta = -\theta_1 \text{ และ } \tau_{1\theta}(\theta = -\theta_1) = 0$$

$$\bar{B}_1 = -A_1 e^{-2i\lambda\alpha_1} - \bar{A}_1 \lambda e^{-2i\alpha_1} \quad (3.10)$$

$$4) \text{ สำหรับวัสดุที่ 2 เงื่อนไขความเค้นอิสระที่มุม } \theta = -\theta_2 \text{ และ } \tau_{2\theta}(\theta = -\theta_2) = 0$$

$$\bar{B}_2 = -A_2 e^{-2i\lambda\alpha_2} - \bar{A}_2 \lambda e^{2i\alpha_2} \quad (3.11)$$

แทนสมการที่ (3.10) และ (3.11) ลงในสมการที่ (3.8) และ (3.9) จะได้

$$A_1 d_1 + \bar{A}_1 d_2 + A_2 d_3 + \bar{A}_2 d_4 = 0 \quad (3.12)$$

$$A_1 d_5 + \bar{A}_1 d_6 + A_2 d_7 + \bar{A}_2 d_8 = 0 \quad (3.13)$$

โดยที่

$$d_1 = \kappa_1 + e^{-2i\lambda\alpha_1}$$

$$d_2 = -\lambda + \lambda e^{-2i\alpha_1}$$

$$d_3 = -\frac{\mu_1}{\mu_2} \kappa_2 - \frac{\mu_1}{\mu_2} e^{2i\lambda\alpha_2}$$

$$d_4 = \frac{\mu_1}{\mu_2} \lambda - \frac{\mu_1}{\mu_2} \lambda e^{2i\alpha_2}$$

$$d_5 = 1 - e^{-2i\lambda\alpha_1}$$

$$d_6 = \lambda(1 - e^{-2i\alpha_1})$$

$$d_7 = -1 + e^{2i\lambda\alpha_2}$$

$$d_8 = -\lambda(1 - e^{2i\alpha_2})$$

แก้สมการที่ 3.12 และ 3.13 จะได้

$$A_2 = \frac{d_4 d_5 - d_1 d_8}{d_3 d_8 - d_7 d_4} A_1 + \frac{d_6 d_4 - d_2 d_8}{d_3 d_8 - d_7 d_4} \bar{A}_1 = f_1 A_1 + f_2 \bar{A}_1 \quad (3.14)$$

หรือ
$$\bar{A}_2 = \bar{f}_2 A_1 + \bar{f}_1 \bar{A}_1 \quad (3.15)$$

ดังนั้น

$$\bar{A}_2 = \frac{d_5 d_3 - d_1 d_7}{d_4 d_7 - d_8 d_3} A_1 + \frac{d_6 d_3 - d_2 d_7}{d_4 d_7 - d_8 d_3} \bar{A}_1 = f_3 A_1 + f_4 \bar{A}_1 \quad (3.16)$$

จากสมการที่ 3.15 เท่ากับสมการที่ 3.16 จะได้

$$(\bar{f}_2 - \bar{f}_3) A_1 + (\bar{f}_1 - \bar{f}_4) \bar{A}_1 = g_1 A_1 + g_2 \bar{A}_1 = 0 \quad (3.17)$$

จัดรูปของสมการที่ (3.17) ให้อยู่ในระบบเมทริกซ์จะได้

$$\begin{bmatrix} Rg_1 + Rg_2 & Ig_2 - Ig_1 \\ Ig_1 + Ig_2 & Rg_1 - Rg_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} RA_1 \\ IA_1 \end{Bmatrix} = [D^*] \begin{Bmatrix} RA_1 \\ IA_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11}^* & d_{11}^* \\ d_{11}^* & d_{11}^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} RA_1 \\ IA_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.18)$$

ให้
$$\begin{Bmatrix} RA_1 \\ IA_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_{11} \\ p_{12} \end{Bmatrix} c_k = [P] c_k \quad (3.19)$$

กำหนดค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆในสมการที่ 3.19 (c_k , p_{11} และ p_{12}) แสดงในตารางที่ 3.1
ตารางที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์ในแต่ละเทอมของสมการที่ (3.19)

Largest $ d_{ij} $ location		c_k	p_{11}	p_{12}
i	j			
1	1	IA_1	$-d_{12}/d_{11}$	1
1	2	RA_1	1	$-d_{11}/d_{12}$
2	1	IA_1	$-d_{22}/d_{21}$	1
2	2	RA_1	1	$-d_{21}/d_{22}$

ดังนั้น

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ \bar{A}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & i \\ 1 & -i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} RA_1 \\ IA_1 \end{Bmatrix} = [F][P]c_k \quad (3.20)$$

จากสมการที่ (3.10) และ (3.20)

$$\begin{Bmatrix} A_1 \\ \bar{A}_1 \\ \bar{B}_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -e^{-2i\lambda\alpha_1} & -\lambda e^{-2i\alpha_1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_1 \\ \bar{A}_1 \end{Bmatrix} = [R_1] \begin{Bmatrix} A_1 \\ \bar{A}_1 \end{Bmatrix} = [R_1][F][P]c_k = [E_1^*]c_k \quad (3.21)$$

จากสมการที่ (3.14) และ (3.16)

$$\begin{Bmatrix} A_1 \\ \bar{A}_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 & f_2 \\ f_3 & f_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_1 \\ \bar{A}_1 \end{Bmatrix} = [S] \begin{Bmatrix} A_1 \\ \bar{A}_1 \end{Bmatrix} = [S][F][P]c_k \quad (3.22)$$

จากสมการที่ (3.11) และ (3.20)

$$\begin{Bmatrix} A_2 \\ \bar{A}_2 \\ \bar{B}_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -e^{2i\lambda\alpha_2} & -\lambda e^{2i\alpha_2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_2 \\ \bar{A}_2 \end{Bmatrix} = [R_2] \begin{Bmatrix} A_2 \\ \bar{A}_2 \end{Bmatrix} = [R_2][F][P]c_k = [E_2^*]c_k \quad (3.23)$$

จากสมการ (3.7), (3.21) และ (3.23) จะได้สมการสนามความเค้นดังนี้

$$\begin{Bmatrix} 2\mu_j U_j \\ \tau_{jr} \\ \tau_{j\theta} \end{Bmatrix} = [G_j^*] \begin{Bmatrix} A_j \\ \bar{A}_j \\ \bar{B}_j \end{Bmatrix} = [G_j^*][E_j^*]c_k = [J_j^*]c_k \quad (3.24)$$

โดยที่

$$[G_j] = \begin{bmatrix} r^\lambda \kappa_j e^{i\theta(\lambda-1)} & -r^\lambda \bar{A}_j e^{i\theta(-\lambda+1)} & -r^{\lambda-1} e^{i\theta(-\lambda-1)} \\ r^{\lambda-1} \lambda e^{i\theta(\lambda-1)} & -r^{\lambda-1} (\lambda^2 - 2\lambda) e^{i\theta(-\lambda+1)} & -r^{\lambda-1} \lambda e^{i\theta(-\lambda-1)} \\ r^{\lambda-1} \lambda e^{i\theta(\lambda-1)} & r^{\lambda-1} \lambda^2 e^{i\theta(-\lambda+1)} & r^{\lambda-1} \lambda e^{i\theta(-\lambda-1)} \end{bmatrix}$$

สุดท้าย

$$\begin{bmatrix} \mu_{jr} \\ \mu_{j\theta} \\ \sigma_{jrr} \\ \sigma_{jr\theta} \\ \sigma_{j\theta\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} RJ_j^*(1,1) / \mu_j \\ IJ_j^*(1,1) / \mu_j \\ RJ_j^*(2,1) \\ IJ_j^*(2,1) \\ RJ_j^*(3,1) \end{bmatrix} c_k = \{V_j(\lambda_k)\}c_k \quad (3.25)$$

จากสมการที่ 3.25 แต่ละค่าลักษณะเฉพาะในรูปของจำนวนจริงจะสามารถให้เวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ ($V_j(\lambda_1)$) หรือสมการสนามความเค้น โดยติดค่าสัมประสิทธิ์ c_k เป็นจำนวนจริง (ค่านี้สามารถคำนวณได้จากวิธี RWCIM โดยแสดงในหัวข้อที่ 3.2.3) และจากสมการที่ 3.25 สามารถคำนวณค่าความเข้มของความเค้นได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\sigma_{ij} = \frac{Q_{ij}}{r^{1-\lambda_1}} = \frac{Q_{ij}}{r^{\alpha_1}} \quad (3.26)$$

โดยที่ Q_{ij} เป็นค่าความเข้มของความเค้นและ λ_1 เป็นค่าลักษณะเฉพาะในรูปของจำนวนจริงในเทอมเด่นซึ่งทำให้ค่าลำดับเอกฐานเป็นเทอมเด่น และตัวห้อย ij แสดงในระบบพิกัดเชิงขั้วซึ่งแสดงได้ตามสมการที่ 3.26ก.

$$\sigma_{rr} = \frac{Q_{rr}}{r^{1-\lambda_1}}, \sigma_{r\theta} = \frac{Q_{r\theta}}{r^{1-\lambda_1}} \text{ และ } \sigma_{\theta\theta} = \frac{Q_{\theta\theta}}{r^{1-\lambda_1}} \quad (3.26ก)$$

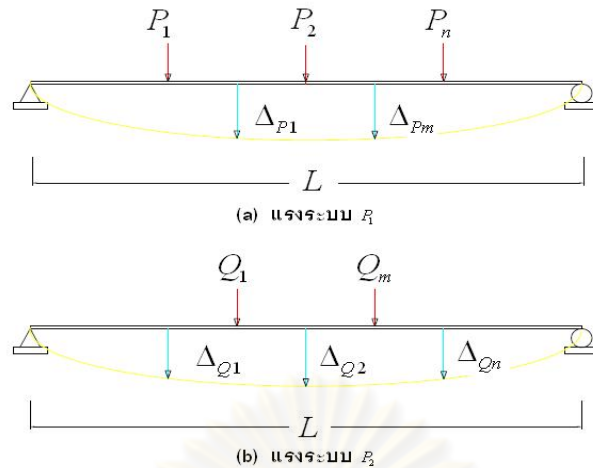
จากสมการที่ 3.25 และ 3.26 สามารถเขียนสมการในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ c_1 กับค่าความเข้มของความเค้นได้ดังต่อไปนี้

$$\{V_j(\lambda_1)\}c_1 = \frac{Q_{ij}}{r^{1-\lambda_1}} = \frac{Q_{ij}}{r^{\alpha_1}} \quad (3.27)$$

หมายเหตุ สมการทั้งหมดนี้แสดงอยู่ในระบบพิกัดเชิงขั้วและค่าความเข้มของความเค้นที่คำนวณได้จะอยู่ในโหมดรวมระหว่างโหมดเปิดและโหมดเฉือน

3.2.2 ทฤษฎีรีซิปโรคอล

จากรูปที่ 3.2 พิจารณาโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่นเชิงเส้นแรงกระทำทั้งสองระบบแสดงในรูปของเมทริกซ์ P_I และ P_{II} ตามลำดับ การขจัดอันเนื่องมาจากแรงกระทำทั้งสองแสดงในรูปของ U_I และ U_{II} ตามลำดับ ถ้าระบบแรงกระทำ P_I ถูกนำมาใช้ก่อนและตามด้วยระบบแรงกระทำ P_{II} งานเนื่องจากแรงกระทำภายนอกสามารถเขียนสมการได้ดังนี้



รูปที่ 3.2 พิจารณาโครงสร้างที่มีความแรงกระทำทั้งสองระบบแสดงในรูป P_i และ P_{ii} ตามลำดับ

$$W_{I,II} = \frac{1}{2} P_I^T U_I + \frac{1}{2} P_{II}^T U_{II} + P_I^T U_{II} \quad (3.28)$$

โดยที่สัญลักษณ์ I, II แสดงถึงลำดับของระบบของแรงกระทำ ในทำนองเดียวกันถ้าระบบแรงกระทำ P_{II} ถูกนำมาใช้ก่อน จะเขียนสมการได้ดังนี้

$$W_{II,I} = \frac{1}{2} P_{II}^T U_{II} + \frac{1}{2} P_I^T U_I + P_{II}^T U_I \quad (3.29)$$

เนื่องจากพลังงานศักย์ (Potential Energy, U) ที่ได้มาทั้งสองกรณีนี้จะต้องมีค่าเท่ากัน โดยไม่ขึ้นกับลำดับของแรงที่กระทำ

ดังนั้น $U = W_{I,II} = W_{II,I}$ (3.30)

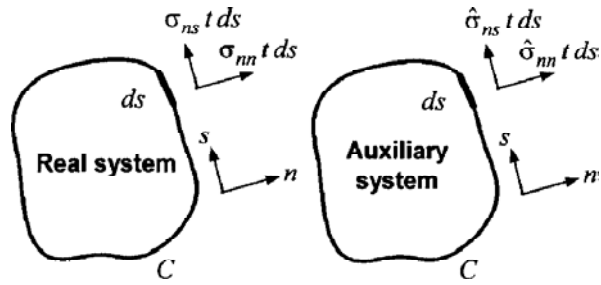
สุดท้าย $P_I^T U_{II} = P_{II}^T U_I$ (3.31)

จากสมการที่ 3.31 จะสอดคล้องกับทฤษฎีวิธีหิโปรคอลของ Betti นั่นคืองานที่เกิดจากแรงกระทำระบบ P_I ของการขจัด U_{II} มีค่าเท่ากับงานที่เกิดจากแรงกระทำระบบ P_{II} ของการขจัด U_I โดยที่ U_I และ U_{II} เป็นการขจัดของวัสดุเนื่องจากแรงระบบ P_I และ P_{II} ตามลำดับ

3.2.3 วิธีวิธีหิโปรคอลเวิร์คคอนทัวร์อินทิกรัล (RWCIM)

วิธีวิธีหิโปรคอลเวิร์คคอนทัวร์อินทิกรัล (RWCIM) ได้พัฒนาโดย Stern และคณะ (1976) โดยพิจารณาความเข้มของความเค้นในรอยแตกร้าว (Stress intensity factors, K) รูปร่างของมุมวัสดุที่เปิดอ้าและรอยแตกร้าวตามผิวรอยต่อของวัสดุ

ต่อมา Carpenter และ Byer (1987) ได้ประยุกต์ใช้วิธีการนี้ในปัญหาของสองวัสดุที่ปากร่องรูปตัววี

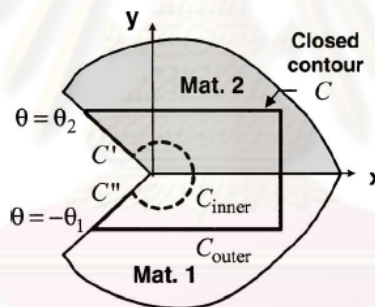


รูปที่ 3.3 ระบบจริงและระบบเสมือน (อัศววัชร เล่นวารี, 2002)

จากรูปที่ 3.3 แสดงความยืดหยุ่นเชิงเส้นของวัสดุแบบ 2 มิติ โดยมีความหนาเท่ากับ t ซึ่งมีแรงกระทำของทั้งสองระบบตามวิถี C (ทิศทางของแรงกระทำจะอยู่ในพิสัยตั้งฉากกับวิถี C หรือพิสัย $n-s$) และจากทฤษฎีรีซิปโพรคอลจะได้

$$\int_C (\hat{\sigma}_{nn} u_n + \hat{\sigma}_{ns} u_s - \sigma_{nn} \hat{u}_n - \sigma_{ns} \hat{u}_s) ds = 0 \quad (3.32)$$

โดยที่ u_n และ \hat{u}_n เป็นการขจัดในแกน n , u_s และ \hat{u}_s เป็นการขจัดในแกน s และการอินทิเกรตวิถี C ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาจะต้องสอดคล้องกับระบบพิสัย $n-s$



รูปที่ 3.4 ลิมของสองวัสดุทั่วไปและเส้นคอนทัวร์ (อัศววัชร เล่นวารี, 2002)

แทนค่ามุมลงในวิถี RWCIM ของปัญหาความยืดหยุ่นของลิมของสองวัสดุ วิถี C ที่แสดงในรูปที่ 3.4 จะเขียนอยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

$$C = C_{OUTER} + C' + C'' + C_{INNER} \quad (3.33)$$

วิถี C' และ C'' เป็นความเค้นอิสระ (traction free surface) จากสมการที่ (3.32) จะได้

$$\int_{C_{OUTER}} (\hat{\sigma}_{nn} u_n + \hat{\sigma}_{ns} u_s - \sigma_{nn} \hat{u}_n - \sigma_{ns} \hat{u}_s) ds + \int_{C_{INNER}} (\hat{\sigma}_{nn} u_n + \hat{\sigma}_{ns} u_s - \sigma_{nn} \hat{u}_n - \sigma_{ns} \hat{u}_s) ds = 0 \quad (3.34)$$

จาก Stern และคณะ (1976), Carpenter และ Byer (1987) ความเค้นและการขจัดตามวิถี C_{INNER} และ C_{OUTER} สำหรับในระบบเสมือนสามารถใช้ค่าลักษณะเฉพาะ $\lambda = -\lambda_1$ โดยที่ $-\lambda_1$ อยู่ในรูปของจำนวนจริง สำหรับในระบบจริงค่าความเค้นและการขจัดจากการวิเคราะห์จาก

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะใช้ตามวิธี C_{OUTER} และค่าลักษณะเฉพาะ $\lambda = \lambda_1$ จะใช้ตามวิธี C_{INNER} ดังนั้นการอินทิเกรตวิธี C_{INNER} เป็น

$$\int_{C_{INNER}} (\hat{\sigma}_m \mu_n + \hat{\sigma}_{ns} \mu_s - \hat{\sigma}_{nm} \mu_n - \hat{\sigma}_{ns} \mu_s) ds = - \int_{\theta=-\theta_1}^{\theta=\theta_2} \left(\{V_j(+\lambda_1)\}^T [I_2] \{V_j(-\lambda_1)\} \right) c_1 c_{-1} r_{inner} d\theta \quad (3.35)$$

โดยที่ c_1 และ c_{-1} เป็นตัวแปรที่ยังไม่ทราบค่าซึ่งมีความสอดคล้องกับเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ $V_j(+\lambda_1)$ และ $V_j(-\lambda_1)$

$$I_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, I_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

และ

$$j = \begin{cases} 1, & \text{if } \theta \leq 0 \\ 2, & \text{if } \theta > 0 \end{cases}$$

Gibson (1994) พิจารณาผลอินทิเกรตวิธี C_{outer} โดยใช้แปลงผลการวิเคราะห์ความเค้นและการขจัดทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในระบบพิกัด $x-y$ และผลการวิเคราะห์ความเค้นและการขจัดจากวิธีคอมเพล็กซ์โพเทนเชียลหรือค่าเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ $V_j(+\lambda_1)$ ในระบบพิกัด $r-\theta$ เป็นระบบพิกัด $n-s$ ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} u_n \\ u_s \\ \sigma_n \\ \sigma_s \end{bmatrix} = a[Y] = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & \sin(\gamma) & 0 & 0 & 0 \\ -\sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos^2(\gamma) & 2\cos(\gamma)\sin(\gamma) & \sin^2(\gamma) \\ 0 & 0 & -\sin(\gamma)\cos(\gamma) & (\cos^2(\gamma) - \sin^2(\gamma)) & \sin(\gamma)\cos(\gamma) \end{bmatrix} [Y] \quad (3.37)$$

จากสมการที่ 3.37 เมทริกซ์ a คือเมทริกซ์แปลงระบบพิกัด $x-y$ และระบบพิกัด $r-\theta$ ให้อยู่ในระบบพิกัด $n-s$ ซึ่งมุม γ ในการแปลงระบบพิกัดนั้นจะแสดงอยู่ในภาคผนวก ก. และ $[Y]$ คือเมทริกซ์ความเค้นและการขจัด (สนามความเค้น) โดยวิเคราะห์ผลมาจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ($[Y]_{FEM}$) และเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ $V_j(+\lambda_1)$ สำหรับผลการวิเคราะห์ทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถจัดอยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$[Y]_{FEM} = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ \sigma_{xx} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yy} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

อินทิเกรทวิถึ C_{OUTER} เขียนในรูปสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\int_{C_{OUTER}} (\hat{\sigma}_m u_n + \hat{\sigma}_{ns} u_s - \hat{\sigma}_m u_n - \hat{\sigma}_{ns} u_s) ds = \int_{C_{OUTER}} ([Y_{FEM}^{ns}]^T [I_1] [Y_{eig}^{ns}]) c_{-1} ds \quad (3.39)$$

โดยที่ $[Y_{FEM}^{ns}]$ และ $[Y_{eig}^{ns}]$ คือผลของสนามความเค้นในระบบพิกัด $n-s$ โดยมาจาก $[Y_{FEM}]$ และ $V_j (+\lambda_1)$ ตามลำดับ

จากสมการที่ (3.34), (3.35), และ (3.39) จะได้

$$GI.c_{-1} - QI.c_{-1}.c_{-1} = 0 \quad (3.40)$$

โดยที่ $c_1 = GI / QI \quad (3.41)$

$$QI = - \int_{\theta=-\theta_1}^{\theta=\theta_2} (\{V_j (+\lambda_1)\}^T [I_2] \{V_j (-\lambda_1)\}) r_{inner} d\theta \quad (3.42)$$

$$GI = \int_{C_{OUTER}} ([Y_{FEM}^{ns}] [I_1] [Y_{eig}^{ns}]) ds \quad (3.43)$$

3.3 คำจำกัดความและความสัมพันธ์พื้นฐานสำหรับการทดลองภายใต้แรงกระทำซ้ำซาก

ในหัวข้อนี้จะอธิบายความหมายของตัวแปรที่เกี่ยวกับการทดลองภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ (เฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้) ซึ่งจำเป็นต้องทราบดังนี้

1. แรงกระทำซ้ำซากแอมพลิจูดคงที่หรือแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ (constant amplitude fatigue load) คือ แรงกระทำซ้ำซากที่มีขนาดของแรงกระทำสูงสุด P_{max} และแรงกระทำต่ำสุด P_{min} คงที่ แต่ความถี่และรูปคลื่นสามารถเปลี่ยนแปลงได้ แสดงดังรูปที่ 3.5

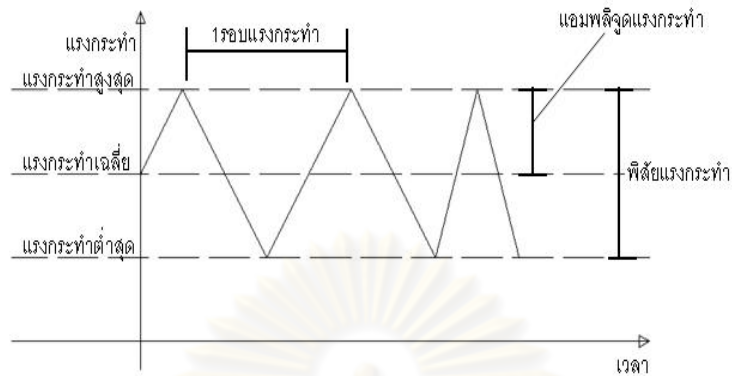
2. วัฏจักรของแรงกระทำ (load cyclic) หรือคาบ (period) หรือความถี่ของแรงกระทำ กรณีแรงกระทำซ้ำซากแอมพลิจูดคงที่คือ ระยะเวลาที่ขนาดของแรงกระทำมีการเปลี่ยนแปลงจากค่าๆ หนึ่งจนกลับมาค่าเดิมอีกครั้ง

3. ช่วงของแรงกระทำ (load range, ΔP) คือ ผลต่างระหว่างจุดยอดและจุดห้วงซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ 1. พิสัยบวก (positive range) คือ ช่วงที่แรงกระทำมีขนาดเพิ่มขึ้นตามเวลา และ 2. พิสัยลบ (negative range) คือ ช่วงที่แรงกระทำมีขนาดลดลงตามเวลา

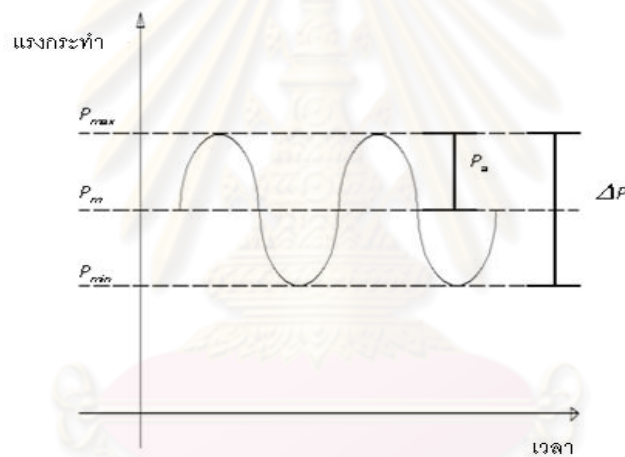
4. แอมพลิจูดแรงกระทำ (load amplitude, P_a) คือ ครึ่งหนึ่งของพิสัยแรงกระทำ

5. แรงกระทำเฉลี่ย (mean load, P_m) คือ ค่าเฉลี่ยของแรงกระทำสูงสุดและแรงกระทำต่ำสุดสำหรับแรงกระทำซ้ำซากแอมพลิจูดคงที่หรือค่าเฉลี่ยแรงกระทำที่จุดยอดและจุดห้วงสำหรับแรงกระทำซ้ำซากแอมพลิจูดคงที่

6. อัตราส่วนแรงกระทำ (load ration, R) คือ อัตราส่วนของแรงกระทำต่ำสุดและแรงกระทำสูงสุด



รูปที่ 3.5 แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ (จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ, 2553)



รูปที่ 3.6 สัญลักษณ์ของตัวแปรที่ใช้กำหนดลักษณะแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ (จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ, 2553)

สำหรับแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่แสดงดังรูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ที่ได้จากนิยามข้างต้นมีดังนี้

$$\Delta P = P_{\max} - P_{\min} \quad (3.44ก)$$

$$P_m = \frac{P_{\max} + P_{\min}}{2} \quad (3.44ข)$$

$$P_a = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{2} \quad (3.44ค)$$

$$R = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} \quad (3.44ด)$$

3.3.1 ความเสียหายล้าและแนวทางของกลศาสตร์การแตกหัก

แรงกระทำซ้ำซาก (แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูด) จะทำให้วัสดุเกิดความเสียหายสะสมไปเรื่อยๆ ในแต่ละรอบแรงกระทำ ความเสียหายนี้เรียกว่า “ความเสียหายล้า (fatigue damage)” จำนวนรอบแรงกระทำนับจากตอนเริ่มต้นซึ่งวัสดุไม่มีความเสียหายสะสมอยู่เลยจนถึงขณะที่ถือว่าวัสดุแตกหักอย่างสมบูรณ์เรียกว่า “อายุความล้า (fatigue life)” โดยทั่วไปแล้วกระบวนการสะสมความเสียหายล้าของวัสดุแบ่งได้ 3 ช่วงแสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 กระบวนการเกิดความเสียหายล้า (จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ, 2553)

1. ช่วงกำเนิดรอยร้าว (crack initiation period) เริ่มนับจากตอนที่วัสดุไม่มีรอยร้าวจนถึงตอนที่วัสดุมีรอยร้าวขนาดที่ตรวจพบได้ปรากฏขึ้น ขนาดรอยร้าวนี้เรียกว่า “ขนาดรอยร้าวกำเนิด (crack initiation size)” และจำนวนรอบแรงกระทำในช่วงนี้เรียกว่า “อายุการกำเนิดรอยร้าว (crack initiation life)”

2. ช่วงที่รอยร้าวเติบโต (crack propagation period) เริ่มนับจากรอยร้าวเติบโตจากขนาดรอยร้าวกำเนิด จนถึงขนาดรอยร้าววิกฤติและเรียกจำนวนรอบในช่วงนี้ว่า “อายุการเติบโตของรอยร้าว (crack propagation life)”

3. ช่วงแตกหัก (fracture period) เริ่มนับจากรอยร้าวเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพจนกระทั่งวัสดุเกิดการแตกหักโดยสมบูรณ์

ดังนั้นอายุความล้าของวัสดุ (N) จะมีค่าเท่ากับผลรวมของอายุการกำเนิดรอยร้าวกับอายุการเติบโตของรอยร้าว

บทที่ 4 วิธีการทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงวิธีการทดลองของงานวิจัยนี้ซึ่งประกอบด้วยวิธีการทดลอง 2 ประเภทดังต่อไปนี้ 1. การทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ และ 2. การทดลองแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ โดยวัสดุที่นำมาทดลองมีคุณสมบัติแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานทดลอง

ลำดับ	ประเภทวัสดุ	ชนิด	คุณสมบัติ			หัวข้อ
1	วัสดุประสาน	Sikadur®-30	โมดูลัสของความยืดหยุ่น	27500	กก./ตร.ซม.	4.1 และ 4.2
			Poisson's ratio	0.35		
2	แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน	Carbodur-S512	โมดูลัสของความยืดหยุ่น	1650000	กก./ตร.ซม.	4.1
			ความกว้าง	50.00	มม.	
			ความหนา	1.20	มม.	
			Poisson's ratio	0.30		
3	คานเหล็ก	W100x100x17.2 กก./ม. (SS400)	โมดูลัสของความยืดหยุ่น	2000000	กก./ตร.ซม.	4.1
			Poisson's ratio	0.30		
			หน่วยแรงที่จุดคราก	2500	กก./ตร.ซม.	
4	แผ่นเหล็ก	50x200x0.85 มม. และ 50x100x0.45 มม. (SS400)	โมดูลัสของความยืดหยุ่น	2000000	กก./ตร.ซม.	4.2
			Poisson's ratio	0.30		
			หน่วยแรงที่จุดคราก	2500	กก./ตร.ซม.	

4.1 การทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่

การทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ซึ่งเป็นการทดลองคานแบบ 4 จุดดัด (four points bending test) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการหลุดล่อนและอายุการหลุดล่อนที่ปลายแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนกับคานเหล็กภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ และมีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้ ขอบเขตการทดลอง, อุปกรณ์การทดลอง, ขั้นตอนการทดลอง, และวิธีการ

ตรวจจับการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจากคานเหล็กด้วยสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้า

4.1.1 ขอบเขตการทดลอง

ขอบเขตการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ มีดังต่อไปนี้

1. กำหนดใช้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่สูงสุด (P_{max}) เป็นตัวกำหนดระดับของการทดลองโดยคิดเป็นร้อยละ 0.40 ถึง 0.80 ของแรงสถิตที่ทำให้แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเกิดการหลุดล่อน (P_{static}) และอัตราส่วนแรงกระทำ (R) เท่ากับ 0.2
2. ความถี่ของแรงกระทำมีค่าคงที่เท่ากับ 2 เฮิรตซ์
3. แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนประเภท Carbodur-S512
4. วัสดุประสานประเภท Sikadur®-30

4.1.2 อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์การทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ มีดังต่อไปนี้

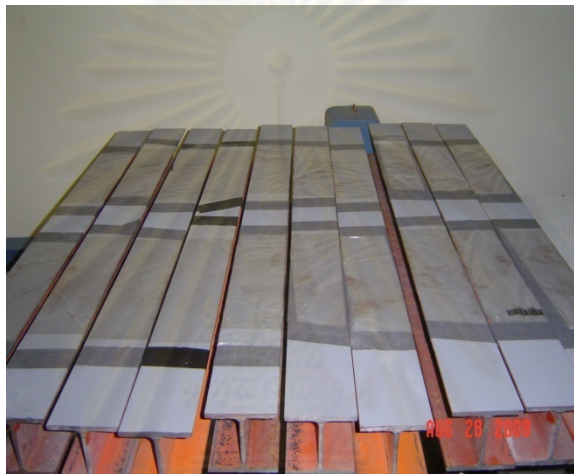
1. คานเหล็ก W100x17.2 kg/m ยาว 1.20 เมตร ตามมาตรฐาน SS400
2. วัสดุประสานชนิด Sikadur®-30
3. แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber Reinforce Polymers Carbodur-S512) ยาว 35 เซนติเมตร (ใช้ตามคำแนะนำของบริษัท ซิก้าประเทศไทย จำกัด)
4. คานเหล็กรองรับ W250x64.4 kg/m ยาว 1.50 เมตร และชุดฐานรองรับ
6. เครื่องทดสอบแรงแบบพลวัต (Servopulser)
7. ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl Alcohol)
8. ปากกาเขียนวงจรไฟฟ้า (Conductivity Pen)
9. มัลติมิเตอร์ จำนวน 2 เครื่อง
10. แบตเตอรี่ขนาด 1.5 โวลต์ จำนวน 2 ก้อน
11. แล็กเกอร์

4.1.3 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ มีดังต่อไปนี้

1. การเตรียมคานทดลอง

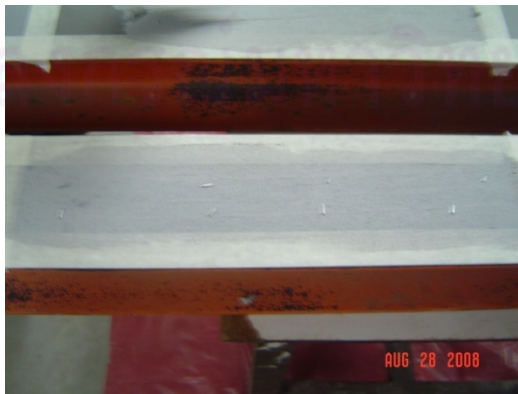
1.1 นำคานเหล็กชนิด W100x17.2 kg/m พ่นทรายบริเวณผิวที่จะติดตั้งแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนตามมาตรฐาน Steel Structure Paint Council Specification No. 5 (SSPC A-SP 5) แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 คานเหล็กหลังจากการพ่นทรายตามมาตรฐาน SSPC A-SP 5

1.2 ใช้ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ทำความสะอาดบริเวณผิวคานเหล็กจากนั้นทิ้งไว้ให้แห้ง

1.3 ทาว์สดูประสานบางๆบริเวณผิวคานเหล็กที่เตรียมไว้ จากนั้นใช้ชดลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. ที่เตรียมรอยลงบริเวณผิวที่ทาว์สดูประสานแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การโรยชดลวดเพื่อทำชั้นความหนาของวัสดุประสาน



รูปที่ 4.3 ขั้นตอนการทาวัดดูประสานเข้ากับแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

1.4 ทาวัดดูประสานบริเวณที่แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน จากนั้นนำไปติดตั้งกับบริเวณผิวคานเหล็กที่เตรียมไว้แสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4

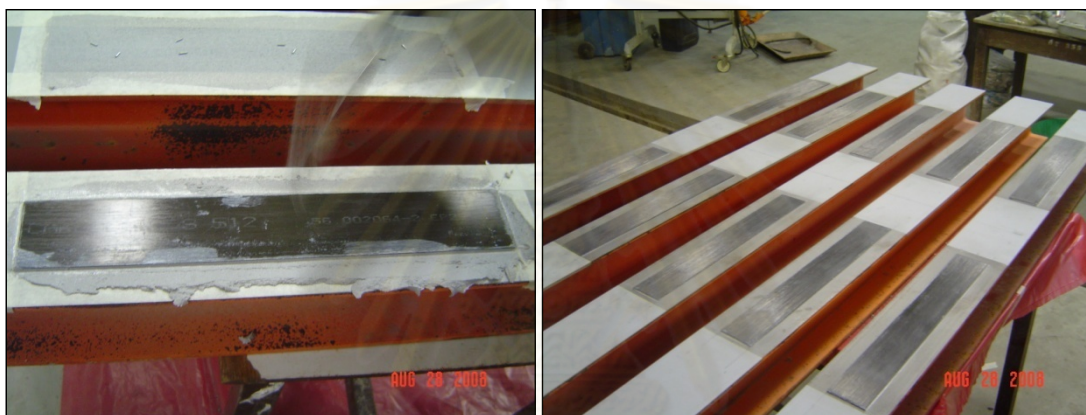


รูปที่ 4.4 ติดตั้งแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเข้ากับผิวคานเหล็ก

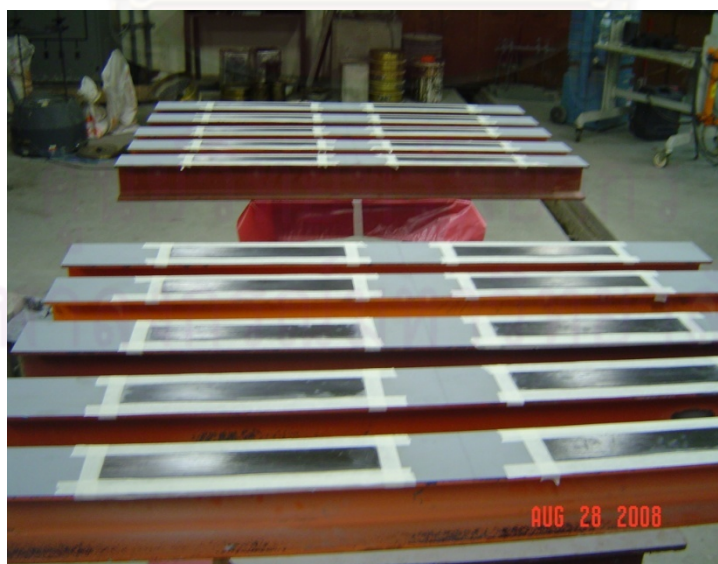
1.5 กลิ้งลูกกลิ้งบริเวณที่ติดตั้งแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนทำไปจนกว่าจะได้ความหนาของชั้นวัสดุประสานเท่ากับ 1 มม. แล้วปาดวัสดุประสานส่วนที่เกินออกจนได้ขอบของชั้นวัสดุประสานตั้งฉากกับคานเหล็ก จากนั้นทิ้งตัวอย่างทดลองที่ไว้ประมาณ 2 สัปดาห์แสดงดังรูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7



รูปที่ 4.5 การทำชั้นความหนาของวัสดุประสานให้มีความหนาเท่ากับ 1 มม.

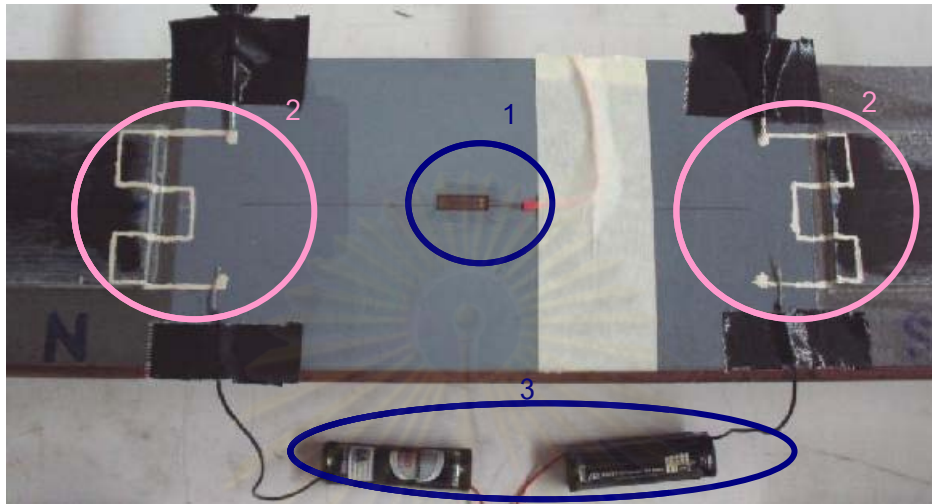


รูปที่ 4.6 การปาดขอบส่วนที่เกินของวัสดุประสานให้เป็นมุมตั้งฉากกับคานเหล็ก



รูปที่ 4.7 คานเหล็กที่ติดตั้งแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเสร็จสมบูรณ์

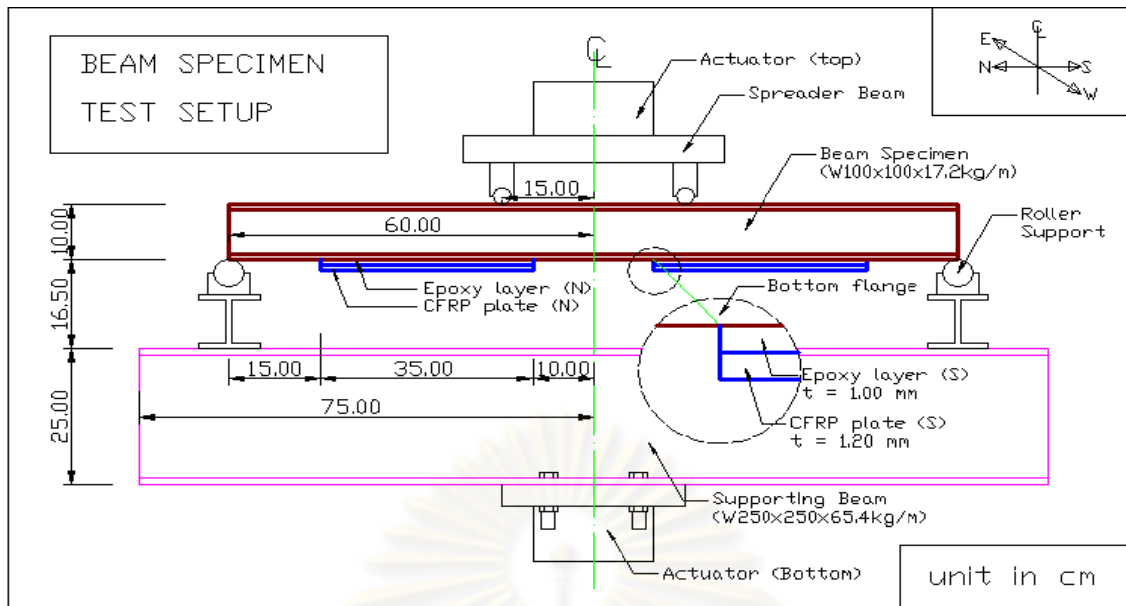
2. ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณการหลุดล่อนของแผ่นเสริมพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน โดยวิธีติดตั้งอุปกรณ์เริ่มจากใช้แล็กเกอร์ทำฉนวนไฟฟ้าบริเวณปลายแผ่นเสริมกำลัง จากนั้นสร้างวงจรไฟฟ้าคร่อมระหว่างทองคานเหล็กกับปลายแผ่นเสริมกำลังด้วยปากกาเขียนวงจรไฟฟ้าแล้วต่อเข้ากับแบตเตอรี่และมัลติมิเตอร์เพื่อบันทึกสัญญาณ ดังแสดงตามรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การติดตั้งเกจความเครียดและอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณการหลุดล่อนของแผ่นเสริมกำลัง (1-เกจค่าความเครียด, 2-วงจรไฟฟ้า, 3-แบตเตอรี่)

3. ติดตั้งคานทดลองเข้ากับจุดรองรับของคานรับรองและติดตั้งตำแหน่งของแรงกระทำ โดยห่างจากเส้นศูนย์กลางข้างละ 15 ซม. แสดงดังรูปที่ 4.9 จากนั้นติดตั้งเครื่องมือบันทึกผลทดลอง

4. ทำการทดลองคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงสถิต เพื่อหาค่าเฉลี่ยของแรงสถิตที่ทำให้ปลายแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเกิดการหลุดล่อนออกจากคานเหล็ก (P_{static}) อย่างน้อย 3 ตัวอย่าง จากนั้นใช้ค่าแรงสถิตต่ำที่สุดเป็นเกณฑ์ในการจัดระดับของแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่สูงสุด (P_{max}) ในแต่ละการทดลอง โดยคิดเป็นร้อยละ 80, 70, 60, 50 และ 40 ของแรงสถิตต่ำที่สุด และแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ต่ำสุด (P_{min}) จะมีอัตราส่วนเป็น 0.20 ของแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่สูงสุด



(ก) โมเดลการติดตั้งคานทดลองเข้ากับเครื่องมือทดสอบแรงแบบพลวัต

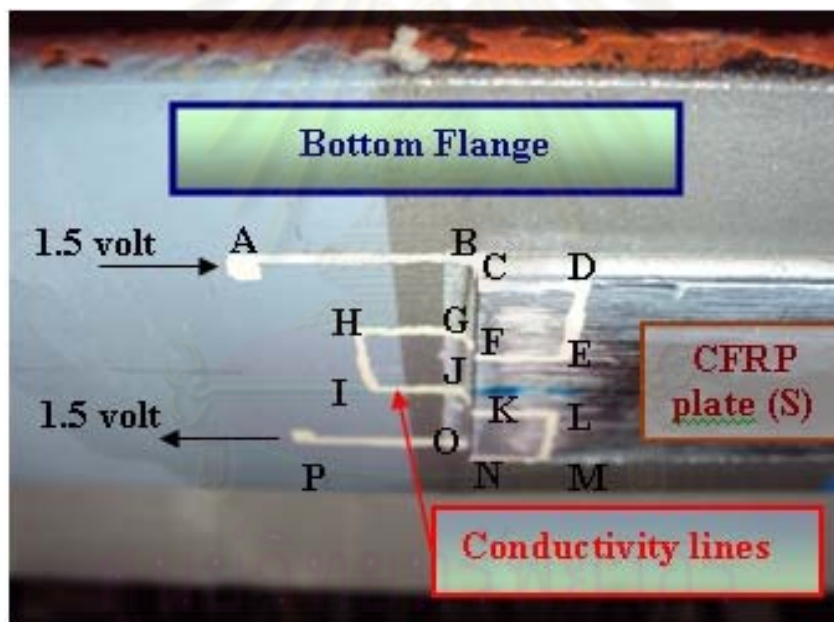


(ข) ติดตั้งคานทดลองเข้ากับเครื่องทดสอบแบบพลวัต

รูปที่ 4.9 การติดตั้งคานทดลองเข้ากับเครื่องทดสอบแรงแบบพลวัต

4.1.4 วิธีการตรวจจําการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจากคานเหล็กด้วยสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม

แนวความคิดของวิธีการตรวจจําการหลุดล่อนที่ปลายแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนนี้คือสร้างวงจรไฟฟ้าคร่อมระหว่างท้องคานเหล็กกับปลายแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (ห่างจากเส้นศูนย์กลางของคานเหล็กข้างละ 15 ซม. โดยช่วงนี้เกิดค่าความเค้นสูงสุด) และต่อแบตเตอรี่ความต่างศักย์ไฟฟ้าขนาด 1.5 โวลต์เข้ากับวงจร (แสดงดังรูปที่ 4.10) จากนั้นกระแสไฟฟ้าที่มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 1.5 โวลต์จะไหลเข้าจุด A ผ่านไปยังจุดต่างๆในวงจรไฟฟ้าที่สร้างไว้และกระแสไฟฟ้าไหลออกที่จุด P เข้าสู่มัลติมิเตอร์เพื่อทำการอ่านและบันทึกกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจรนี้ หากว่ามีรอยร้าวเกิดขึ้นผ่านวงจรค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มัลติมิเตอร์อ่านได้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมและหากมีการหลุดล่อนที่ปลายแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มัลติมิเตอร์อ่านได้จะมีค่าเท่ากับศูนย์โวลต์



รูปที่ 4.10 วงจรกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านระหว่างท้องคานกับปลายแผ่นเสริมกำลัง (สวิตช์ตรวจจําการหลุดล่อนระหว่างแผ่นเสริมกำลังกับคานเหล็ก)

4.2 การทดลองแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงดึงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่

การทดลองแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ทำนายอายุการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจากคานเหล็กภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่และแสดงขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้ ขอบเขตการทดลอง, อุปกรณ์การทดลอง, ขั้นตอนการทดลองและวิธีการตรวจจับการวิบัติของแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรด้วยสัญญาณไฟฟ้า

4.2.1 ขอบเขตการทดลอง

ขอบเขตของการทดลองแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่มีดังต่อไปนี้

1. กำหนดใช้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่สูงสุดเป็นตัวกำหนดระดับของการทดลองโดยคิดเป็นร้อยละ 0.40 ถึง 0.80 ของแรงกระทำสถิตที่ทำให้ขึ้นส่วนแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรวิบัติ/หลุดล่อน (P_{static}) และอัตราส่วนแรงกระทำ (P_{min}/P_{max}) เท่ากับ 0.2
2. ความถี่ของแรงกระทำมีค่าคงที่เท่ากับ 2 เฮิร์ตซ์
3. วัสดุประสานประเภท Sikadur®-30

4.2.2 อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่มีดังต่อไปนี้

1. แผ่นเหล็กชนิด A36 ขนาด 0.85x5.00x20.00 ซม. (แผ่นเหล็กรับแรงตามแกน) และขนาด 0.45x5.00x10.00 ซม. (แผ่นเหล็กประกบ)
2. วัสดุประสานประเภท Sikadur®-30
3. ปากกาเขียนวงจรไฟฟ้า (Conductivity pen)
4. แบตเตอรี่ขนาด 1.5 โวลต์ จำนวน 1 ก้อน
5. มัลติมิเตอร์ จำนวน 1 เครื่อง
6. เครื่องทดสอบแรงแบบพลวัต (Servopulser)
7. ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl Alcohol)
8. แลกเกอร์

4.2.3 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคังที่มีดังต่อไปนี้

1 การเตรียมแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตร

1.1 เตรียมผิวเหล็กโดยการนำแผ่นเหล็กพื้นทรายบริเวณที่จะทำการติดวัสดุประสานตามมาตรฐาน SSPC A-SP 5 แสดงดังรูปที่ 4.11

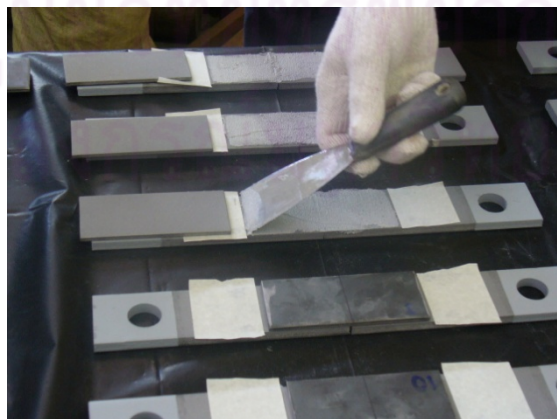


รูปที่ 4.11 พื้นทรายแผ่นเหล็กขนาด 0.85x5.00x20.00 ซม. และขนาด 0.45x5.00x10.00 ซม.

ตามมาตรฐาน SSPC A-SP 5

1.2 ใช้ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์เช็ดทำความสะอาดแผ่นเหล็กและทิ้งไว้ให้แห้ง

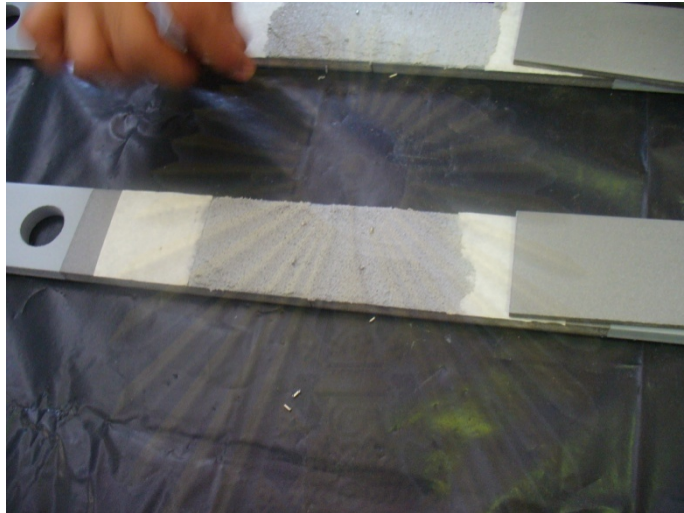
1.3 นำแผ่นเหล็กขนาด 0.85x5.00x20.00 ซม. วางต่อชนกันเป็นคู่ขึ้นงานโดยที่ระดับความสูงของทั้งสองแผ่นต้องเท่ากัน จากนั้นใช้วัสดุประสานทาที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้งสองบางๆ แสดงดังรูปที่ 4.12



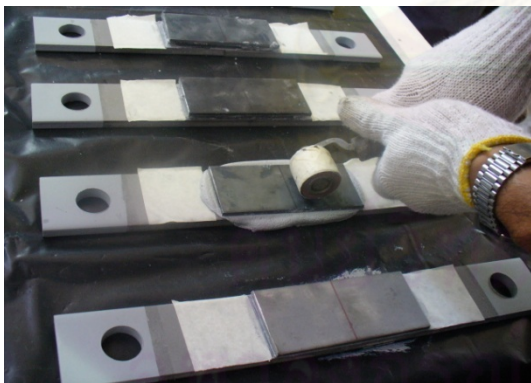
รูปที่ 4.12 ทาวัสดุประสานเข้ากับแผ่นเหล็กประกบ

1.4 ไรยขดลวดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. ลงบนผิวของแผ่นเหล็กที่ทาวัดดู
ประสานไว้แสดงดังรูปที่ 4.13

1.5 นำแผ่นเหล็กขนาด 0.45x5.00x10.00 ซม. ที่ทาวัดดูประสานกับแผ่นเหล็กขนาด
0.85x5.00x20.00 ซม. ที่เตรียมไว้ในข้อที่ 1.1-1.4 โดยควบคุมความหนาของวัสดุประสานให้มีค่า
เท่ากับ 1 มม. และควบคุมมุมของชั้นวัสดุประสานให้ตั้งฉากกับแผ่นเหล็กขนาดรับแรงตาม
แนวแกน จากนั้นทิ้งเวลาประมาณ 1 ชั่วโมงเพื่อให้วัสดุประสานแข็งตัวแสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.13 วางขดลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. เพื่อกำหนดชั้นความหนาของวัสดุประสาน



(ก) ควบคุมชั้นความหนาของวัสดุ
ประสาน

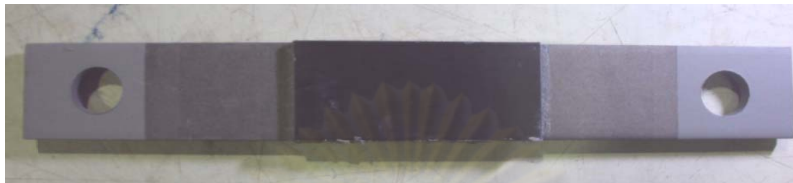


(ข) ควบคุมมุมของชั้นวัสดุเชื่อมประสาน
ให้ตั้งฉากกับแผ่นเหล็ก

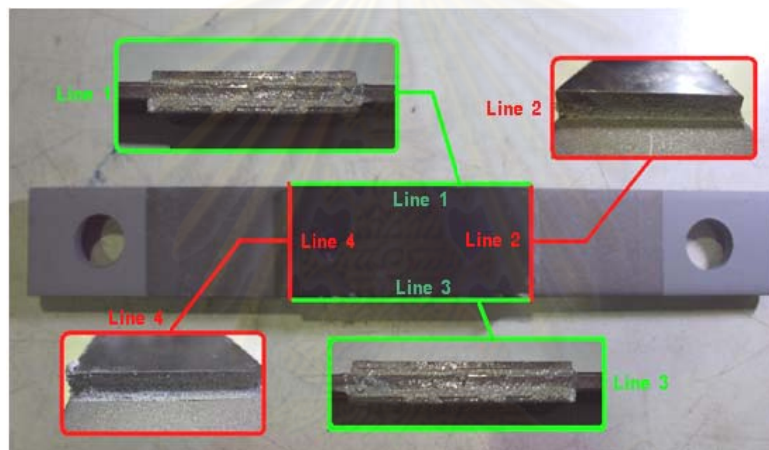
รูปที่ 4.14 การติดตั้งแผ่นเหล็กประกบด้านข้างของชิ้นงานแผ่นเหล็กประกบแบบสมมาตร

1.6 จากนั้นพลิกชิ้นงานเพื่อมาทำแผ่นเหล็กประกบด้านข้างอีกด้าน (ทำซ้ำข้อที่ 1.2 –1.5)
แล้วบ่มชิ้นงานประมาณ 14 วัน เมื่อบ่มชิ้นงานครบ 14 วันแล้วจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.15(ก)

จากรูปที่ 4.15(ข) แนวเส้นที่ 1 และ 3 (Line 1, 3) แสดงภาพด้านข้างของแผ่นประกบแผ่นบน, แผ่นล่างยึดติดกับแผ่นเหล็กรับแรงตามแนวแกนด้วยวัสดุประสานและแนวเส้นที่ 2 และ 4 (Line 2, 4) แสดงภาพด้านหน้าของแผ่นประกบแผ่นบนทั้งด้านซ้ายและขวายึดติดกับแผ่นเหล็กรับแรงตามแนวแกนด้วยวัสดุประสาน



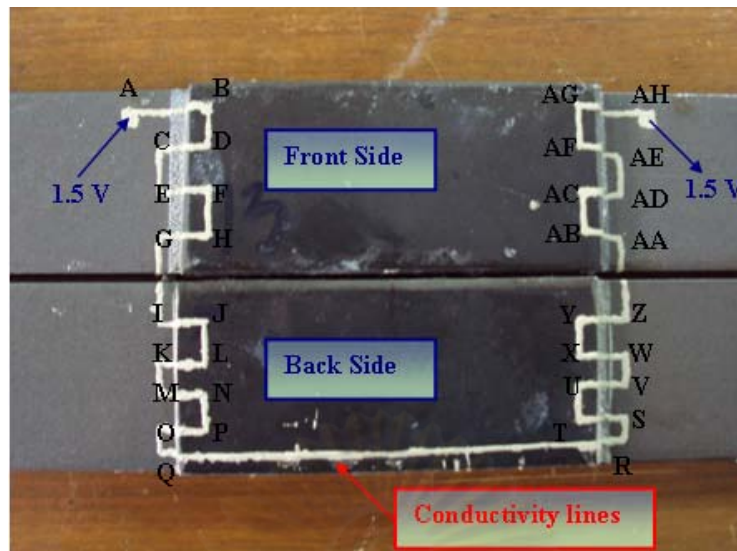
(ก) ตัวอย่างชิ้นงานแผ่นเหล็กประกบคู้แบบสมมาตร



(ข) ส่วนต่างๆของชิ้นงานแผ่นเหล็กประกบคู้แบบสมมาตร
รูปที่ 4.15 ลักษณะชิ้นงานแผ่นเหล็กประกบคู้แบบสมมาตร

2. ติดตั้งสัญญาณตรวจจับการหลุดล่อนของแผ่นเหล็กประกบคู้แบบสมมาตร

หลังจากบ่มชิ้นงานครบ 14 วันแล้ว ทำฉนวนไฟฟ้าด้วยแลกเกอร์ทั้งชิ้นงาน จากนั้นสร้างวงจรไฟฟ้าคร่อมระหว่างแผ่นเหล็กรับแรงตามแนวแกนกับแผ่นเหล็กประกบด้านข้างด้วยปากกาเขียนวงจรไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.16



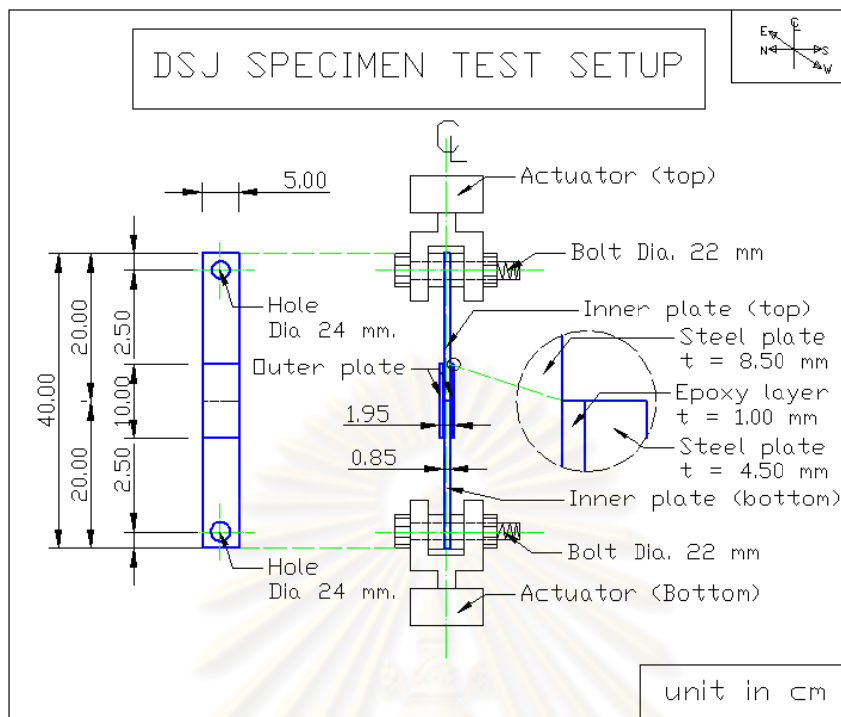
รูปที่ 4.16 วงจรไฟฟ้าที่ด้านหน้าและด้านหลังชิ้นงานแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตร

3. ติดตั้งชิ้นงานแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรเข้ากับเครื่องทดสอบแบบพลวัตแสดงดังรูปที่ 4.17

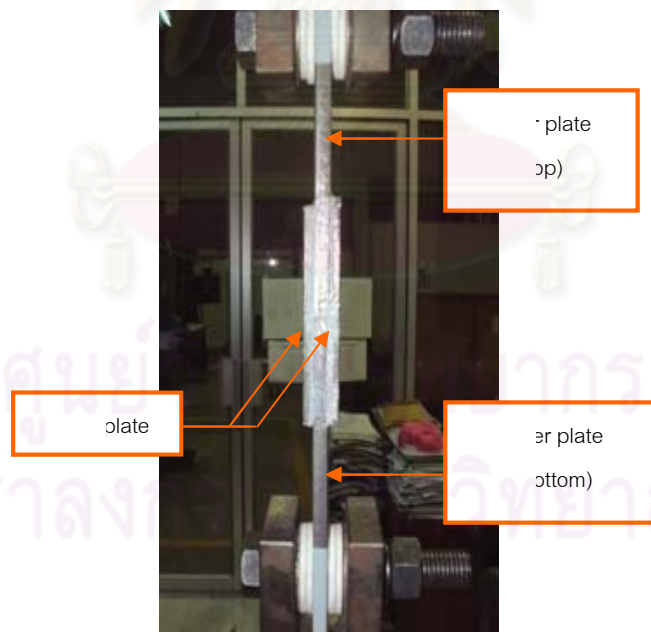
4. การทดสอบชิ้นงานแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงดึงสถิตเพื่อหาค่าเฉลี่ยของแรงดึงสถิตที่ทำให้วัสดุเกิดการวิบัติอย่างน้อย 3 ชิ้นงาน (P_{static}) เพื่อหาค่าแรงดึงสถิตต่ำที่สุดมาใช้เป็นตัวกำหนดขนาดแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่สูงสุด (P_{max}) โดยคิดเป็นร้อยละ 80, 70, 60, 50, และ 40 ของขนาดภาระสถิตที่ทำให้วัสดุเกิดการวิบัติ ตามลำดับและแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ต่ำสุด (P_{min}) ซึ่งเป็น 0.20 เท่าของแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่สูงสุด

4.2.4 ขั้นตอนการตรวจจับการวิบัติของแผ่นประกบคู่แบบสมมาตรด้วยสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม

แนวความคิดการตรวจจับการวิบัติ (การหลุดล่อน) ของแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรด้วยสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้า คือ สร้างวงจรไฟฟ้าคร่อมแผ่นเหล็กรับแรงตามแนวแกนและแผ่นเหล็กประกบทั้งชิ้นงาน (1 ชิ้นงานจะได้ 1 วงจรไฟฟ้า) เพื่อให้กระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้า 1.5 โวลต์ ไหลเข้าที่จุด A ผ่านไปยังจุดต่างๆในวงจรไฟฟ้าที่สร้างไว้และกระแสไฟฟ้าไหลออกที่จุด AH ไปเข้าสู่มัลติมิเตอร์เพื่อทำการอ่านและบันทึกกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจรนี้แสดงดังรูปที่ 4.16 หากว่าจำนวนรอบของแรงกระทำให้วัสดุวิบัตินั้นหมายถึงมีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นผ่านวงจรนี้ (ทั้งชิ้นงาน) และทำให้ค่าความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้าที่อ่านได้มีค่าเป็นศูนย์โวลต์



(ก) โมเดลการติดตั้งแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรเข้ากับเครื่องทดสอบแรงแบบพลวัต



(ข) ติดตั้งแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรเข้ากับเครื่องทดสอบแรงแบบพลวัต

รูปที่ 4.17 การติดตั้งแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรเข้ากับเครื่องทดสอบแรงแบบพลวัต

บทที่ 5

ผลการทดลอง

บทนี้แสดงผลการทดลองเป็นจำนวนรอบของการหลุดล่อนของปลายแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในคานเหล็ก, จำนวนรอบของการวิบัติของแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตรภายใต้ช่วงของแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ในระดับต่างๆ, พฤติกรรมการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่และพฤติกรรมการวิบัติ (การหลุดล่อน) ของแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่

5.1 ผลการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่

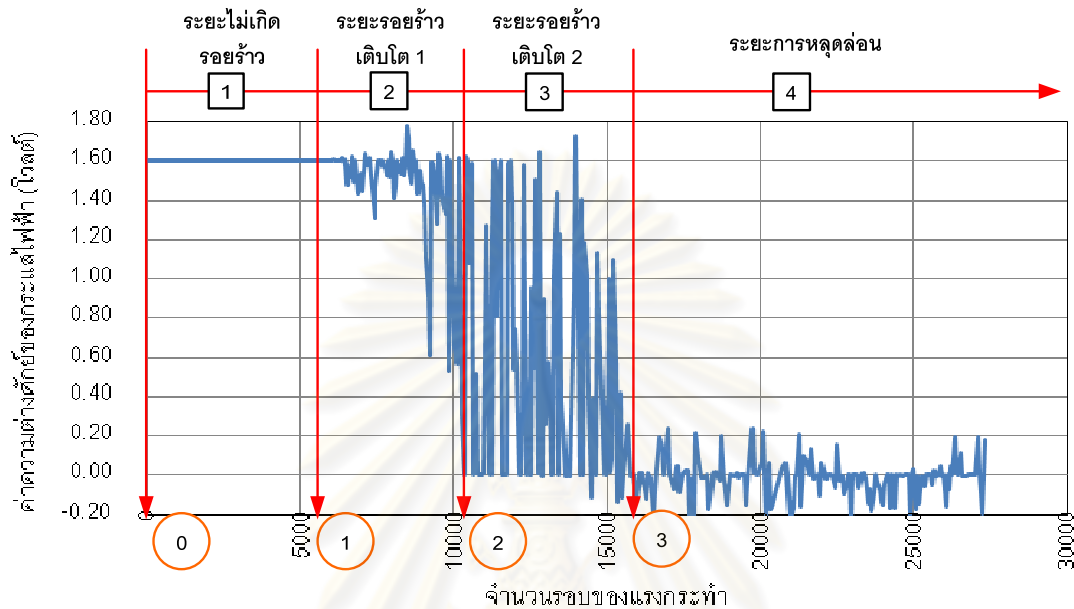
ผลการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงสถิตที่ทำให้แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเริ่มเกิดการหลุดล่อนเป็น 8.50, 8.66 และ 8.75 ตัน และแรงสถิตต่ำที่สุดทำให้ปลายแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเกิดการหลุดล่อน (P_{static}) เท่ากับ 8.50 ตัน

ในขณะที่ทำการทดลองคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่พบว่า พฤติกรรมการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจะเริ่มเกิดรอยร้าวระหว่างผิวคานเหล็กกับชั้นวัสดุประสานที่ปลายแผ่น (ห่างจากเส้นศูนย์กลาง 15 ซม.) จากนั้นรอยร้าวจะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบของแรงกระทำและทำให้แผ่นที่เสริมกำลังหลุดออกไปในที่สุด ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้พบว่าจุดที่น่าสนใจที่สุดของพฤติกรรมการหลุดล่อนของแผ่นเสริมกำลังนี้คือ ช่วงที่เริ่มเกิดรอยร้าวจนกระทั่งรอยร้าวมีขนาดทำให้ปลายแผ่นเกิดการหลุดล่อน และงานวิจัยนี้ได้แสดงผลของพฤติกรรมการหลุดล่อนที่ปลายแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในคานเหล็กภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำ แสดงดังรูปที่ 5.1

จากกราฟสัญญาณการตรวจจับการหลุดล่อนด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมของกรณีคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนสามารถอธิบายพฤติกรรมการหลุดล่อนที่ปลายแผ่นเสริมกำลังในคานเหล็กภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ได้ดังต่อไปนี้

1) ระยะที่ 1 “ระยะไม่เกิดรอยร้าว” (จุด 0 ถึงจุดที่ 1) ในช่วงแรกนั้นผิวสัมผัสระหว่างคานเหล็กและชั้นวัสดุประสานที่ปลายแผ่นนั้นไม่พบรอยร้าวแสดงดังรูปที่ 5.2 ดังนั้นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจึงอ่านได้เท่ากับ 1.5 โวลต์ จนกระทั่งถึงจุดที่ 1 แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่มี

จำนวนรอบที่ทำให้เกิดรอยร้าวขนาดเล็กตัดผ่านเส้นวงจรไฟฟ้าที่ครอบคลุมผิวสัมผัสระหว่างผิวเหล็กกับชั้นวัสดุประสานที่ปลายแผ่นเสริมกำลังทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้จึงเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเล็กน้อย (ในขณะที่เกิดแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่สูงที่สุด) ดังนั้นจุดที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้เปลี่ยนแปลงจากเดิมเรียกว่า “จุดกำเนิดรอยร้าว” หรือ N_{SL1} แสดงดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.1 กราฟสัญญาณการตรวจจับการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในคานเหล็กด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม (BCS801N)

2) ระยะที่ 2 “ระยะรอยร้าวเติบโต 1” (จุดที่ 1 ถึงจุดที่ 2) ในขณะที่เกิดแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่สูงที่สุดนั้นรอยร้าวจะเปิดอ้าทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้นั้นเปลี่ยนแปลงจากเดิมและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้จะกลับสู่ค่าเดิมอีกครั้งเมื่อเกิดแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ต่ำสุด ภายใต้จำนวนรอบของแรงกระทำเพิ่มขึ้นรอยร้าวจะมีขนาดโตขึ้นลึกขึ้นและมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้มากขึ้นตามจำนวนรอบของแรงกระทำเช่นกัน จนกระทั่งรอยร้าวที่งอกขึ้นตลอดหน้าตัดของผิวสัมผัสระหว่างผิวเหล็กกับชั้นวัสดุประสานที่วงจรไฟฟ้าลากผ่านทำให้อ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้เท่ากับศูนย์โวลต์ในขณะที่เกิดแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่สูงที่สุด ดังนั้นจุดนี้เรียกว่า “จุดรอยร้าวเติบโต 1” หรือ N_{SL2} (จุดที่ 2) แสดงดังรูปที่ 5.4

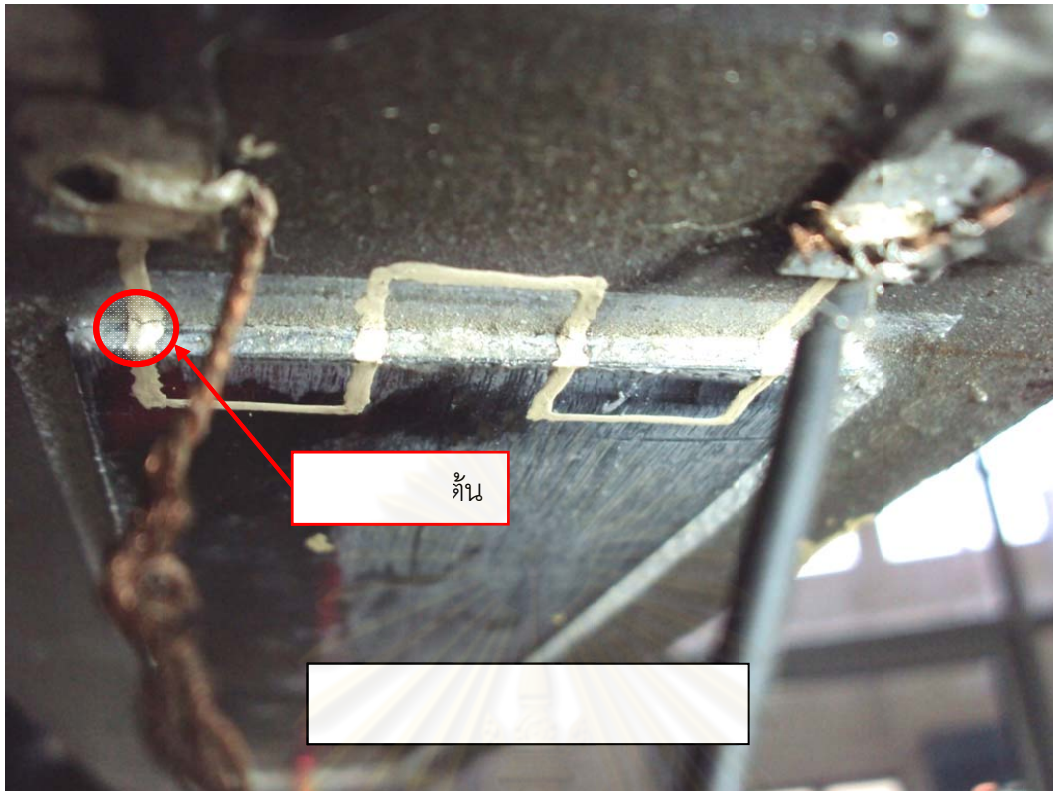
3) ระยะที่ 3 “ระยะรอยร้าวเติบโต 2” (จุดที่ 2 ถึงจุดที่ 3) เมื่อรอยร้าวเกิดตลอดหน้าตัดของผิวสัมผัสระหว่างผิวเหล็กกับชั้นวัสดุประสานแล้วรอยร้าวก็จะเริ่มขยายตัวออกด้านข้าง (ลึกขึ้น) และเกิดปรากฏการณ์ “สวิตช์เปิด/ปิดวงจรไฟฟ้า” ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง นั่นคือรอยร้าวที่ผิวสัมผัสระหว่างผิวเหล็กกับชั้นวัสดุประสานที่ปลายแผ่นเสริมกำลังทำหน้าที่เป็นสวิตช์ของ

วงจรไฟฟ้าคร่อมที่ปลายแผ่นเสริมกำลังนั่นเอง กล่าวคือ ในขณะที่เกิดแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่สูงสุดรอยร้าวจะเปิดอ้าออกและอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้เท่ากับศูนย์โวลต์และในขณะที่เกิดแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ต่ำสุดรอยร้าวจะปิดสนิทและอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้เท่ากับค่าเริ่มต้นการทดลองและภายใต้จำนวนรอบของแรงกระทำที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้รอยร้าวเริ่มปิดไม่สนิทในขณะที่เกิดแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ต่ำสุดรอยร้าว ดังนั้นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้จะมีค่าลดลงจากเดิม และดำเนินต่อไปจนกระทั่งรอยร้าวนั้นไม่สามารถปิดตัวได้ในขณะที่เกิดแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ต่ำสุด (อ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าได้เท่ากับศูนย์โวลต์) ดังนั้นจุดนี้เรียกว่า “จุดรอยร้าวเติบโต 2” หรือ จุดปลายแผ่นหลุดล่อน” หรือ N_{SL3} (จุดที่3) แสดงดังรูปที่ 5.5

4) ระยะที่ 4 “ระยะการหลุดล่อน” (จุดที่ 3 เป็นต้นไป) ในช่วงนี้รอยร้าวที่ผิวสัมผัสระหว่างผิวเหล็กกับชั้นวัสดุประสานด้านปลายแผ่นที่เสริมกำลังจะไม่สามารถปิดในขณะที่เกิดแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ต่ำสุดได้อีกต่อไปและรอยร้าวจะมีความยาวเพิ่มขึ้นออกด้านข้างไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน แสดงดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.2 การทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ในระยะก่าเนตรอยร้าว (รอยร้าวไม่เกิดขึ้น, BSC901S, จำนวนรอบของแรงกระทำประมาณ 500 รอบ)



รูปที่ 5.3 การทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ในระยะรอยร้าวเติบโต 1 โดยที่รอยร้าวเกิดขึ้นที่มุมด้านซ้ายของหน้าตัดระหว่างผิวของคานเหล็กกับชั้นวัสดุประสาน (BSC901S, จำนวนรอบของแรงกระทำประมาณ 3200 รอบ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

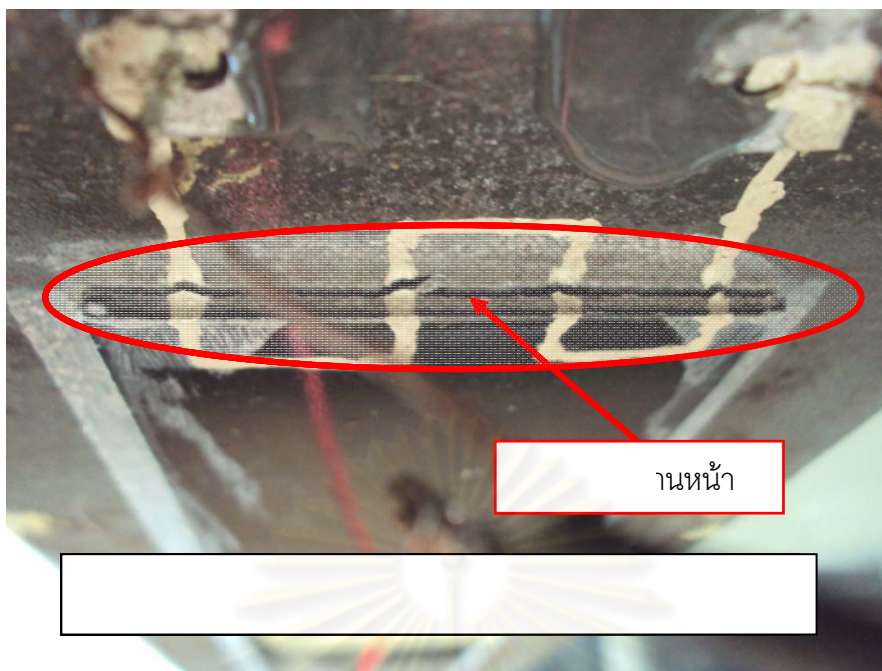


(ก) รอยร้าวที่ผิวสัมผัสระหว่างผิวเหล็กกับชั้นวัสดุประสานที่ด้านหน้าปลายแผ่นเสริม



(ข) รอยร้าวที่ผิวสัมผัสระหว่างผิวเหล็กกับชั้นวัสดุประสานที่ด้านข้างปลายแผ่นเสริม

รูปที่ 5.4 การทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ในระยะรอยร้าวเติบโต 2 (BSC901S, จำนวนรอบของแรงกระทำประมาณ 6000 รอบ)



(ก) รอยร้าวที่ผิวสัมผัสระหว่างผิวเหล็กกับชั้นวัสดุประสานที่ด้านหน้าปลายแผ่นเสริม



(ข) รอยร้าวที่ผิวสัมผัสระหว่างผิวเหล็กกับชั้นวัสดุประสานที่ด้านข้างปลายแผ่นเสริม
รูปที่ 5.5 การทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรง
กระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ในระยะการหลุดล่อน (BSC901S, จำนวนรอบของแรงกระทำ
ประมาณ 22040 รอบ)

จากจุดแบ่งช่วงพฤติกรรมการหลุดล่อนที่ปลายแผ่นเสริมกำลังที่กล่าวมาข้างต้นจะเป็นผลการทดลองเพื่อเป็นการศึกษาอายุการหลุดล่อนของแผ่นเสริมกำลังในคานเหล็กของงานวิจัยนี้ดังแสดงตามตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่

ตัวอย่าง การทดลอง คานเหล็ก	แผ่นเสริมกำลัง		t_a (มม.)	$\frac{P_{max}}{P_{static}}$	P_{min} (ตัน)	P_{max} (ตัน)	ΔP (ตัน)	σ_R (กก./ ตร.ซม)	จำนวนรอบของแรงกระทำ ณ จุด ไตๆ		
	แผ่นที่	ทิศ							N_{SL1}	N_{SL2}	N_{SL3}
BSC901	1	S	1.03	0.90	1.53	7.65	6.12	1792	2510	4554	6288
	2	N	1.01	0.90	1.53	7.65	6.12	1792	3542	5568	7542
BSC801	1	S	1.10	0.80	1.37	6.85	5.44	1605	18834	24002	27062
	2	N	0.80	0.80	1.37	6.85	5.44	1605	6086	10226	15540
BSC802	1	S	0.95	0.80	1.37	6.85	5.44	1605	11860	14795	20806
	2	N	0.86	0.80	1.37	6.85	5.44	1605	10638	10668	12440
BSC651	1	S	1.12	0.65	1.11	5.55	4.42	1300	19610	25698	27200
	2	N	0.84	0.65	1.11	5.55	4.42	1300	10148	11010	29772
BSC652	1	S	0.75	0.65	1.11	5.55	4.42	1300	4460	7340	12356
	2	N	0.82	0.65	1.11	5.55	4.42	1300	10422	10610	10670
BSC601	1	S	0.85	0.60	1.02	5.10	4.08	1195	47940	131160	210580
	2	N	0.90	0.60	1.02	5.10	4.08	1195	33034	95732	153132
BSC602	1	S	0.80	0.60	1.02	5.10	4.08	1195	40710	118828	185970
	2	N	0.80	0.60	1.02	5.10	4.08	1195	48898	122158	207440
BSC501	1	S	0.84	0.50	0.86	4.30	3.40	1007	150184	263468	336968
	2	N	1.02	0.50	0.86	4.30	3.40	1007	204664	318336	420720
BSC502	1	S	0.78	0.50	0.86	4.30	3.40	1007	227076	355552	544240
	2	N	0.90	0.50	0.86	4.30	3.40	1007	259156	422496	616356
BSC401	1	S	0.94	0.40	0.68	3.42	2.72	802	639404	2139442	2804844
	2	N	1.06	0.40	0.68	3.42	2.72	802	840550	1868140	3219310
BSC402	1	S	0.98	0.40	0.68	3.42	2.72	802	สัญญาณเกิดความขัดข้อง		
	2	N	0.90	0.40	0.68	3.42	2.72	802	871686	1393510	2095856

หมายเหตุเนื่องจาก BSC901 เกิดการหลุดล่อนค่อนข้างเร็วดังนั้นจึงทำการทดลองเพียง 1 ตัวอย่าง
N = ทิศเหนือ และ S = ทิศใต้

จากตารางที่ 5.1 ในสดมภ์ที่ 1, "ตัวอย่างการทดลองคานเหล็ก" แสดงชื่อการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังซึ่งอธิบายได้ดังต่อไปนี้เช่น "BSC801" ในตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 หมายถึงชนิดของการทดลองซึ่งในที่นี้คือการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใย

คาร์บอน ในตำแหน่งที่ 4, 5 หมายถึงร้อยละของแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่สูงสุดต่อแรงที่ทำให้แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนหลุดล่อนออกจากคานเหล็กซึ่งมาจากสดมภ์ที่ 4 และในตำแหน่งที่ 6 หมายถึง ลำดับของคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่นำมาทดลอง ทั้งหมดนี้จะตีความหมาย “BSC801” คือ การทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่สูงสุดเท่ากับร้อยละ 80 ของแรงที่ทำให้แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนหลุดล่อนออกจากคานเหล็กลำดับที่ 1 เป็นต้น สดมภ์ที่ 2, “แผ่นเสริมกำลังแผ่นที่ / ทิศ” แสดงชื่อและตำแหน่งของแผ่นเสริมกำลังตัวอย่างเช่น แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่ติดตั้งกับห้องคานเหล็กแผ่นที่ 1 ซึ่งแผ่นนี้ติดตั้งอยู่ในทิศใต้(S) เมื่ออ้างอิงจากเส้นศูนย์กลาง (Center line) เป็นต้น หรือใช้ร่วมกับชื่อตัวอย่างการทดลองเพื่อใช้แสดงผลการทดลองของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในตัวอย่างนั้นๆ ได้ เช่น “BSC901S” เป็นต้น, สดมภ์ที่ 3, “ t_a ” แสดงความหนาของชั้นวัสดุประสาน, สดมภ์ที่ 4, “ P_{max}/P_{static} ” คือ อัตราส่วนของแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่สูงสุดต่อแรงที่ทำให้แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนหลุดล่อนออกจากคานเหล็ก, สดมภ์ที่ 5, “ P_{min} ” คือขนาดของแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ต่ำสุด โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 20 ของแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ที่สูงสุด, สดมภ์ที่ 6, “ P_{max} ” คือขนาดของแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ที่สูงสุด, สดมภ์ที่ 7, “ ΔP ” คือพิสัยของแรงกระทำ, สดมภ์ที่ 8, “ σ_R ” คือช่วงของหน่วยแรงที่กึ่งกลางความยาวห้องคานซึ่งคำนวณจากสมการที่ 5.1

$$\sigma_R = \frac{(\Delta P/2)L_p y}{I_r} \quad (5.1)$$

โดยที่ $L_p = 45$ ซม., $y = 5$ ซม., $I_r = 384.25$ ซม.⁴ สดมภ์ที่ 9, “จำนวนรอบของแรงกระทำ ณ จุดใดๆ” คือจำนวนรอบของแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ซึ่งได้จากวิธีการตรวจจับการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในคานเหล็กด้วยสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม ณ จุด 3 จุดคือจุดที่ 1 จุดกำเนิดรอยร้าว “ N_{SL1} ”, จุดที่ 2 จุดรอยร้าวเติบโต 1 “ N_{SL2} ”, และจุดที่ 3 จุดรอยร้าวเติบโต 2 หรือจุดปลายแผ่นหลุดล่อน “ N_{SL3} ”

5.2 ผลการทดลองแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงดึงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่

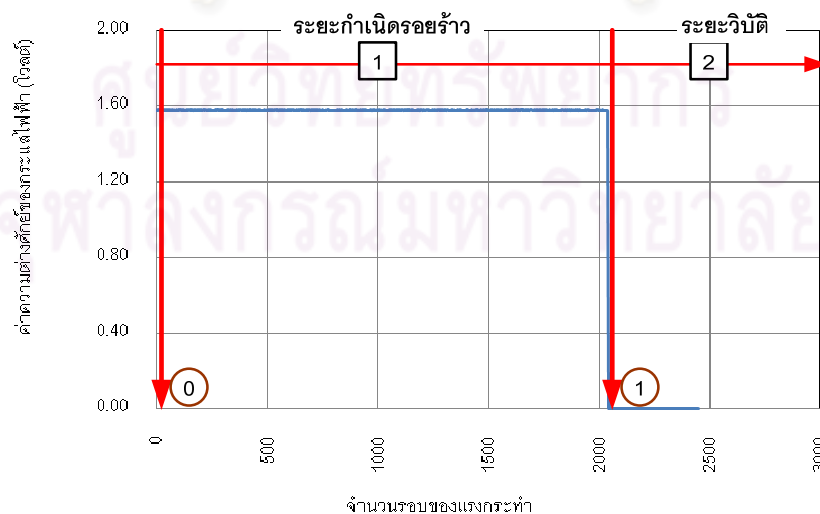
ผลการทดลองแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงดึงสถิตมีค่าดังต่อไปนี้ 8.60 ตัน, 9.60 ตัน และ 8.50 ตัน และแรงดึงสถิตต่ำสุดที่ทำให้แผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรเกิดการวิบัติ/หลุดล่อน (P_{static}) เท่ากับ 8.50 ตัน

ในขณะที่ทำการทดลองแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงดึงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่พบว่า พฤติกรรมการวิบัติ (การหลุดล่อน) ของแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงดึงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่นั้นจะเกิดขึ้นทันทีหลังจากเกิดรอยร้าวที่ปลายแผ่นประกบด้านใดด้านหนึ่งซึ่งในการศึกษาครั้งนี้พบว่าจุดที่น่าสนใจที่สุดของพฤติกรรมการวิบัตินี้คือ ช่วงกำเนิดรอยร้าว โดยแสดงผลของพฤติกรรมการวิบัติของแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงดึงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำ แสดงดังรูปที่ 5.6

จากรูปที่ 5.6 กราฟสัญญาณการตรวจจบการวิบัติของแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรด้วยค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมสามารถอธิบายพฤติกรรมการวิบัติของแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงดึงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ได้ดังต่อไปนี้

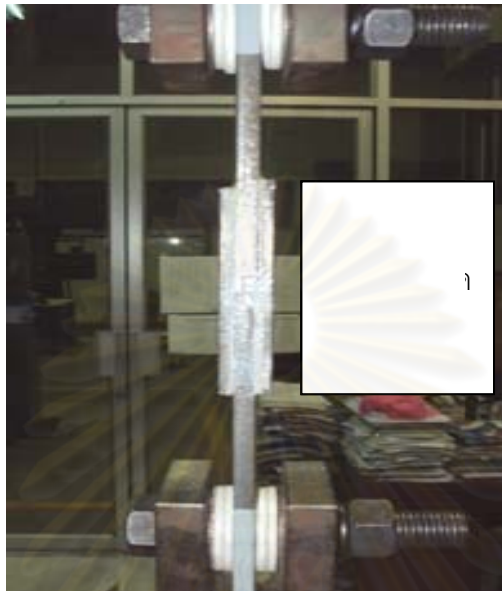
1) ระยะเวลาที่ 1 “ระยะกำเนิดรอยร้าว” (จุด 0 ถึงจุดที่ 1) ในขณะที่ทดลองแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงดึงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ ในช่วงแรกนั้นผิวสัมผัสระหว่างแผ่นเหล็กกับแรงตามแนวแกนและวัสดุประสานที่ปลายแผ่นประกบนั้นไม่พบรอยร้าว ดังนั้นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจึงอ่านได้เท่ากับ 1.5 โวลต์ จนกระทั่งแรงดึงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่มีจำนวนรอบที่ทำให้เกิดรอยร้าวและวิบัติทันทีอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านเท่ากับศูนย์โวลต์ ดังนั้นจุดที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านเท่ากับศูนย์โวลต์จะเรียกว่า “จุดกำเนิดรอยร้าว หรือ จุดวิบัติ” N_{SL1} (จุดที่ 1) แสดงดังรูปที่ 5.6

2) ระยะเวลาที่ 2 “ระยะวิบัติ (ระยะการหลุดล่อน)” (จุดที่ 1 เป็นต้นไป) ซึ่งงานเกิดการวิบัติภายใต้แรงดึงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่บันทึกได้เท่ากับศูนย์โวลต์



รูปที่ 5.6 กราฟสัญญาณการตรวจจบการวิบัติของแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรด้วยค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม (DSJ803)

จากรูปที่ 5.6 จุดที่ 0 คือจุดเริ่มต้นการทดลอง จุดที่ 1 (N_{SL1}) คือจุดกำเนิดรอยร้าวหรือจุดวิบัติ และแต่ละช่วงของสัญญาณการตรวจวัดของแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตรแสดงได้ดังรูปที่ 5.7 – 5.8



รูปที่ 5.7 รูปแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตร (DSJ652) ในขณะทำการทดลองในระยะที่ 1



รูปที่ 5.8 รูปแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตร (DSJ652) ในระยะที่ 2

จุดแบ่งช่วงพฤติกรรมการวิบัติของแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรที่กล่าวมาข้างต้นจะแสดงผลการทดลองตามตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงดึงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่

ตัวอย่างการทดลอง แผ่นเหล็กประกบกับคู่ แบบสมมาตร	t_a (มม.)	$\frac{P_{max}}{P_{static}}$	P_{min} (ตัน)	P_{max} (ตัน)	ΔP (ตัน)	จำนวนรอบ ของการวิบัติ (N_{SL1})	กรณีลักษณะของการวิบัติ			
							แผ่นบน		แผ่นล่าง	
							หน้า	หลัง	หน้า	หลัง
DSJ801	0.99	0.80	1.36	6.80	5.44	1146	6	6	6	1
DSJ802	1.05	0.80	1.36	6.80	5.44	3414	1	1	-	1
DSJ803	1.11	0.80	1.36	6.80	5.44	2046	1	6	1	1
DSJ701	1.04	0.70	1.19	5.95	4.76	13612	1	1	-	1
DSJ702	0.95	0.70	1.19	5.95	4.76	4164	1	1	2	1
DSJ703	1.22	0.70	1.19	5.95	4.76	2360	-	5	6	-
DSJ704	0.86	0.70	1.19	5.95	4.76	7860	6	1	1	1
DSJ651*	0.84	0.65	1.11	5.53	4.42	2116	6	-	2	1
DSJ652	1.14	0.65	1.11	5.53	4.42	17596	6	-	-	1
DSJ653	0.92	0.65	1.11	5.53	4.42	8070	1	-	6	5
DSJ654	1.25	0.65	1.11	5.53	4.42	23560	-	1	1	-
DSJ601	1.22	0.60	1.02	5.10	4.08	22728	1	1	-	6
DSJ602	0.98	0.60	1.02	5.10	4.08	7902	5	-	-	1
DSJ603	0.98	0.60	1.02	5.10	4.08	40668	-	6	6	1
DSJ501	0.77	0.50	0.85	4.25	3.40	148440	-	6	1	-
DSJ502	1.29	0.50	0.85	4.25	3.40	81818	-	1	6	-
DSJ503	1.08	0.50	0.85	4.25	3.40	131260	6	-	6	1
DSJ401	1.21	0.40	0.68	3.40	2.72	176720	-	6	2	1
DSJ402	0.86	0.40	0.68	3.40	2.72	422080	1	-	-	6
DSJ403	1.08	0.40	0.68	3.40	2.72	264040	-	6	1	6
DSJ404	1.33	0.40	0.68	3.40	2.72	398126	-	6	1	-
DSJ171	1.15	0.17	0.29	1.45	1.13	ไม่เกิดการวิบัติหยุดที่ 1697260				
DSJ172	0.84	0.17	0.29	1.45	1.13	ไม่เกิดการวิบัติหยุดที่ 2347042				
DSJ173	0.95	0.17	0.29	1.45	1.13	ไม่เกิดการวิบัติหยุดที่ 2347042				

หมายเหตุ : *หมายถึงชิ้นงานทดสอบ DSJ172 ที่ผ่านการทดสอบมาแล้วนำกลับมาทดสอบใหม่เป็น DSJ 651

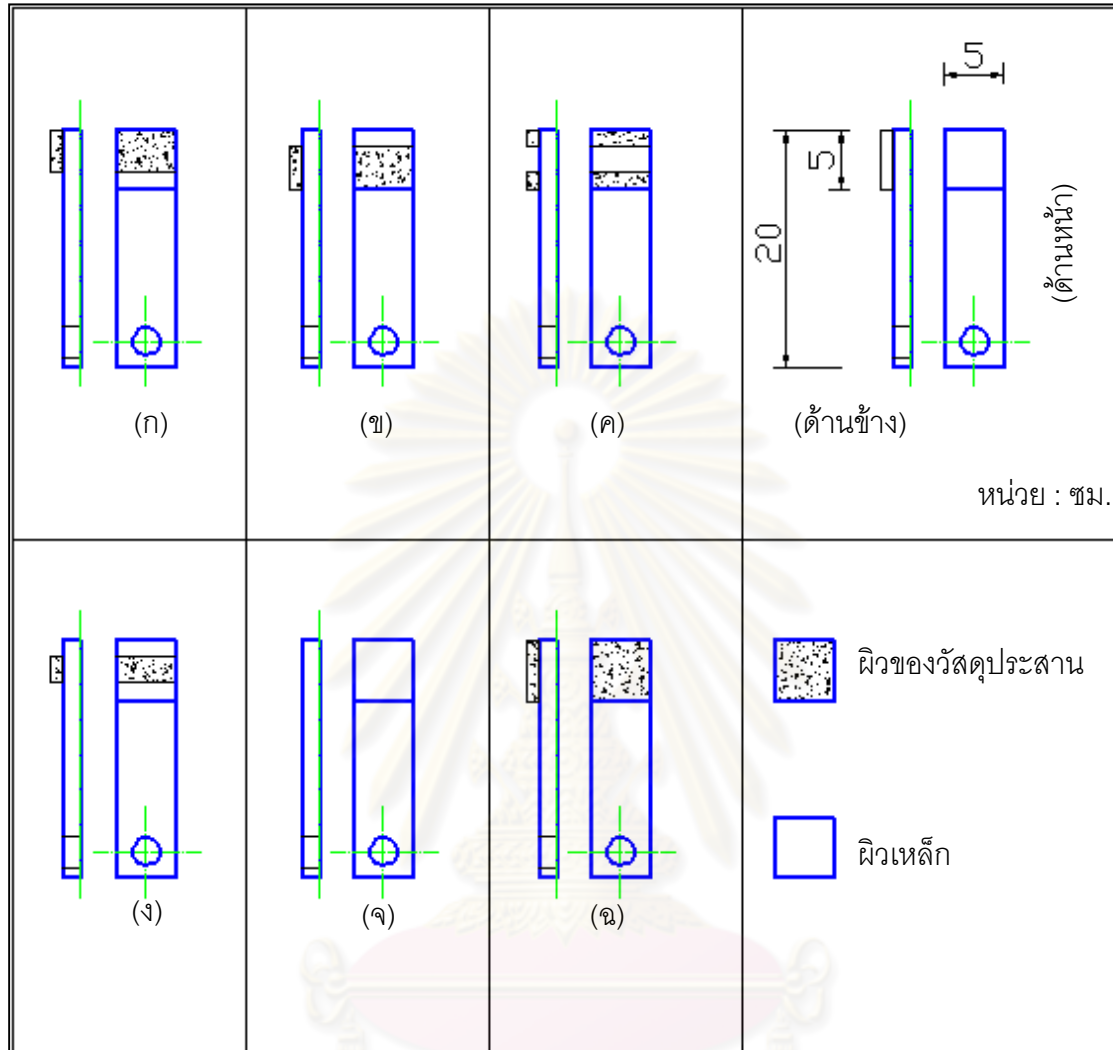
จากตารางที่ 5.2 ในสดมภ์ที่ 1, "ตัวอย่างการทดลองแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตร" ซึ่งอธิบายได้ดังต่อไปนี้คือการทดลองแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตร "DSJ801" ในตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 หมายถึงการทดลองแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงดึงเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ ในตำแหน่งที่ 4, 5 หมายถึง ร้อยละของแรงดึงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่สูงสุดต่อแรงดึงที่ทำให้แผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตรวิบัติซึ่งมาจากสดมภ์ที่ 3 และในตำแหน่งที่ 6 หมายถึงลำดับของแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตรที่นำมาทดลอง ทั้งหมดนี้เราจะตีความหมาย "DSJ801" คือ การทดลองแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงดึงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่สูงสุด เท่ากับร้อยละ 80 ของแรงดึงที่ทำให้แผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตรวิบัติลำดับที่ 1 เป็นต้น สดมภ์ที่ 2, " t_d " คือความหนาของชั้นวัสดุประสาน, สดมภ์ที่ 3, " P_{max}/P_{cr} " คืออัตราส่วนแรงดึงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่สูงสุดต่อแรงดึงที่ทำให้แผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตรวิบัติ, สดมภ์ที่ 4, " P_{min} " คือแรงดึงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ต่ำสุด โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 20 ของแรงดึงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่สูงสุด, สดมภ์ที่ 5, " P_{max} " คือแรงดึงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่สูงสุด, สดมภ์ที่ 6, " ΔP " คือพิสัยของแรงกระทำ, สดมภ์ที่ 7, "จำนวนรอบของการวิบัติ" คือจำนวนรอบของแรงกระทำที่ทำให้แผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตรวิบัติซึ่งได้จากวิธีความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม, สดมภ์ที่ 8, "ลักษณะการวิบัติ" ในสดมภ์นี้แสดงกรณีลักษณะการวิบัติของแผ่นเหล็กรับแรงตามแนวแกนแผ่นบนและแผ่นล่าง (ด้านหน้าและด้านหลังของทั้งสองแผ่นแสดงดังรูปที่ 4.17) ในแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตรซึ่งอ้างอิงจากรูปแสดงลักษณะการวิบัติของแผ่นเหล็กรับแรงตามแนวแกนในแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตร (แสดงดังรูปที่ 5.9)

กรณีลักษณะการวิบัติของแผ่นเหล็กรับแรงตามแนวแกน (บน/ล่าง) ในแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตรที่พบจากการทดลองมีดังต่อไปนี้

1. วัสดุประสานเกิดการหลุดล่อนออกจากแผ่นเหล็กรับแรงตามแนวแกนในบริเวณมุมฉากระหว่างผิวสัมผัสของแผ่นเหล็กตามแนวแกนกับชั้นวัสดุเชื่อมประสานแสดงดังรูปที่ 5.9ก
2. วัสดุประสานเกิดการหลุดล่อนออกจากแผ่นเหล็กรับแรงตามแนวแกนในบริเวณปลายแผ่นเหล็กรับแรงตามแนวแกนแสดงดังรูปที่ 5.9ข
3. วัสดุประสานเกิดการหลุดล่อนออกจากแผ่นเหล็กรับแรงตามแนวแกนในบริเวณระหว่างมุมฉากระหว่างผิวสัมผัสของแผ่นเหล็กตามแนวแกนกับชั้นวัสดุเชื่อมประสานกับปลายแผ่นเหล็กรับแรงตามแนวแกนแสดงดังรูปที่ 5.9ค
4. วัสดุประสานเกิดการหลุดล่อนออกจากแผ่นเหล็กรับแรงตามแนวแกนในบริเวณมุมฉากระหว่างผิวสัมผัสของแผ่นเหล็กตามแนวแกนกับชั้นวัสดุเชื่อมประสานและในบริเวณปลายแผ่นเหล็กรับแรงตามแนวแกนแสดงดังรูปที่ 5.9ง (ลักษณะที่ 1 และ 2 รวมกัน)
5. วัสดุประสานเกิดการหลุดล่อนออกทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 5.9จ

6. วัสดุประสานไม่เกิดการหลุดล่อนออกจากแผ่นเหล็กรับแรงตามแนวแกนแสดงดังรูปที่

5.9ด



รูปที่ 5.9 แสดงลักษณะการวิบัติของแผ่นเหล็กรับแรงตามแนวแกนในแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบ
สมมาตรภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่

จากการทดลองในตารางที่ 5.2 พบว่าลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นของแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรส่วนมากจะเกิดในกรณีที่ 1 (31 ใน 84) และไม่พบลักษณะการวิบัติในกรณีที่ 3 และ 4 ในการทดลอง

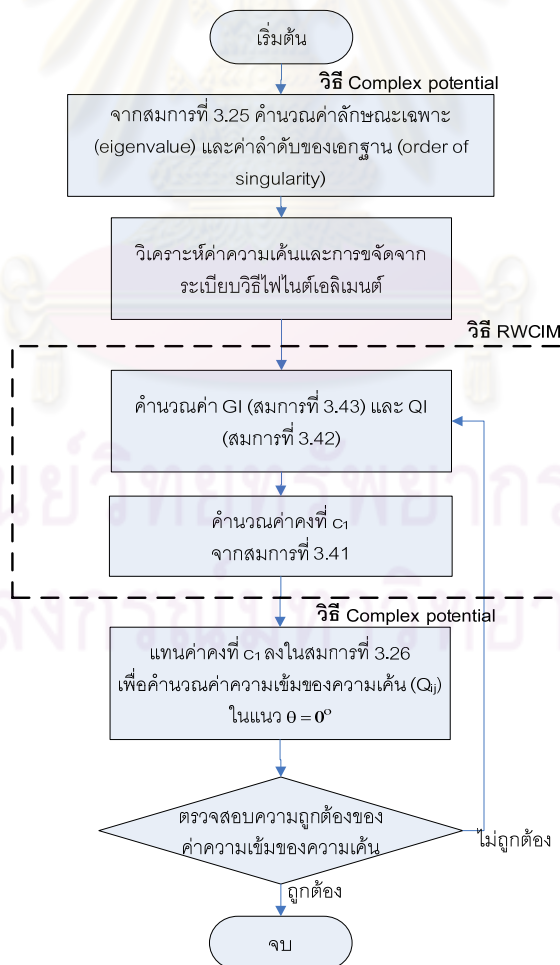
บทที่ 6

การวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้น

ในบทนี้กล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นด้วยวิธีคอมเพล็กซ์โพเทนเชียล และวิธีรีฟิโพรคอลเวิร์คคอนทัวริทิกัล (RWCIM), การวิเคราะห์ผลของค่าความเข้มของความเค้นกับจำนวนรอบของแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่และความสัมพันธ์ของช่วงของค่าความเข้มของความเค้นกับจำนวนรอบของแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ของการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังและการทดลองแผ่นเหล็กประทับคู่แบบสมมาตร

6.1 วิธีการวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นด้วยวิธีคอมเพล็กซ์โพเทนเชียลและวิธีรีฟิโพรคอลเวิร์คคอนทัวริทิกัล (RWCIM)

วิธีการวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นของลิ้มของสองวัสดุสามารถอธิบายได้ตามขั้นตอนของรูป flow chart (รูปที่ 6.1) ดังต่อไปนี้



รูปที่ 6.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้น

6.1.1 คำนวณค่าลักษณะเฉพาะ (eigenvalue, λ_1) ในสมการที่ 3.25 โดยวิธีมุลเลอร์ (แสดงวิธีมุลเลอร์ในภาคผนวก ข.) และผลมีดังต่อไปนี้

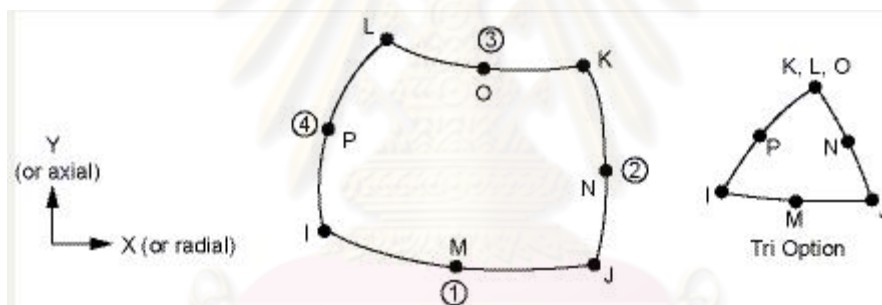
กรณีความเค้นระนาบมีค่าลักษณะเฉพาะเท่ากับ 0.729 และค่าลำดับเอกฐาน (order of singularity, α_1) เท่ากับ 0.271

และกรณีความเครียดระนาบค่าลักษณะเฉพาะเท่ากับ 0.674 และค่าลำดับเอกฐานเท่ากับ 0.326

6.1.2 วิเคราะห์ค่าความเค้นและการขจัดโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเอลิเมนต์ที่ใช้เป็นเอลิเมนต์ชนิด plane82 (แสดงดังรูปที่ 6.2) ซึ่งมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

6.1.2.1 ลักษณะเอลิเมนต์เป็นรูปสี่เหลี่ยมหรือสามเหลี่ยมโดยมีจำนวนจุดภายในเอลิเมนต์เท่ากับ 8 จุด (I, J, K, L, M, N, O, P) ถ้ากรณีเอลิเมนต์เป็นรูปสี่เหลี่ยมแต่ละจุดจะไม่มีการทับซ้อนกัน แต่ถ้ากรณีรูปสามเหลี่ยมจะมีจุดทับซ้อนกัน 3 จุดคือ K,L,O โดยงานวิจัยนี้ใช้เอลิเมนต์เป็นรูปสี่เหลี่ยมในการวิเคราะห์

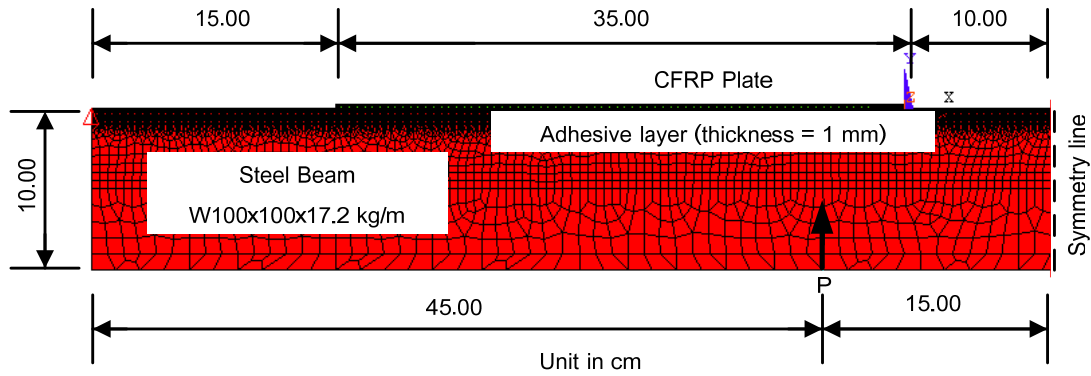
6.1.2.2 ทิศทางการขจัด (DOF) ในแต่ละจุดจะมี 2 ทิศทางคือ U_x (แกน x) และ U_y (แกน y)



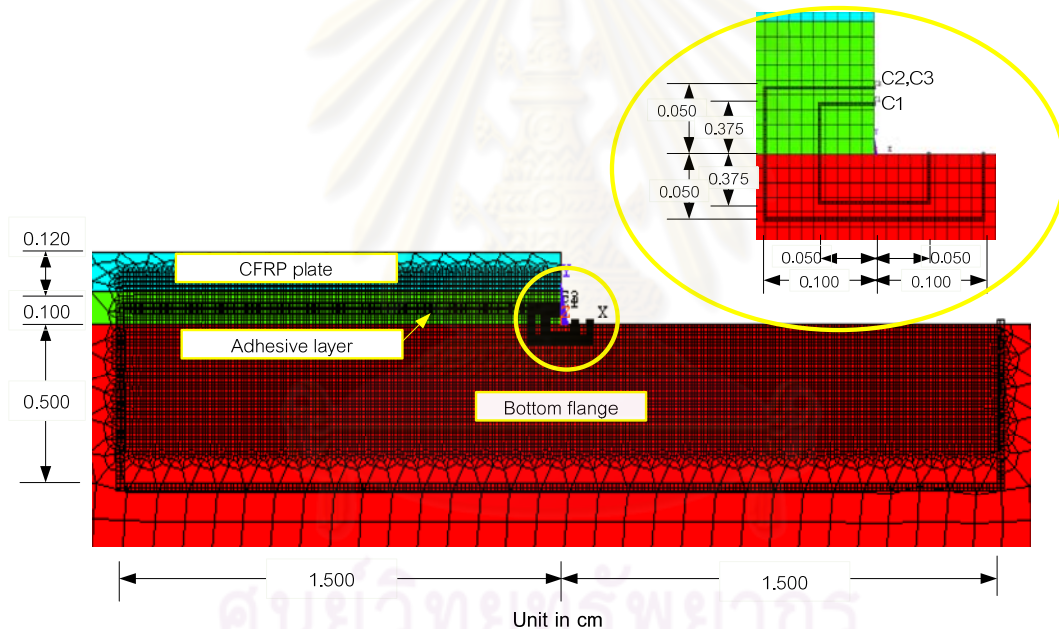
รูปที่ 6.2 รูปทรงของเอลิเมนต์ plane 82 ที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในกรณีโมเดลการวิเคราะห์คานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ใช้เอลิเมนต์ plane82 ชนิดความเค้นระนาบแบบมีความหนา

เนื่องจากโมเดลและแรงกระทำมีความสมมาตรรอบแกน y ดังนั้นจึงสามารถทำการวิเคราะห์โมเดลนี้เพียงครึ่งเดียวได้แสดงดังรูปที่ 6.3(ก) และแสดงผลการวิเคราะห์ภายในวิถี C1, C2 และ C3 (ระนาบ $x-y$) เพื่อใช้คำนวณค่าความเข้มของความเค้นแสดงดังรูปที่ 6.3(ข)



(ก) โมเดลคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนโดยมีจุด (0,0) ที่ผิวสัมผัสผิวด้านล่างของคานเหล็ก (bottom flange) กับชั้นวัสดุประสาน (adhesive layer) ที่ปลายแผ่นเสริมกำลัง ซึ่งโมเดลนี้มีจำนวนเอลิเมนต์เท่ากับ 92149 เอลิเมนต์และขนาดเอลิเมนต์เล็กสุดเท่ากับ 2.5×10^{-3} ซม.

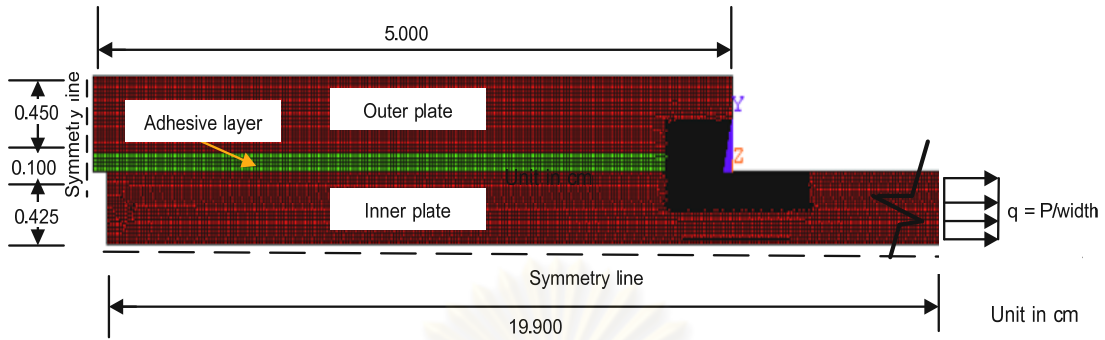


(ข) ภาพขยายบริเวณปลายแผ่นเสริมกำลัง (CFRP plate) กับท้องคานเหล็กเพื่อแสดงวิถี C1, C2 และ C3

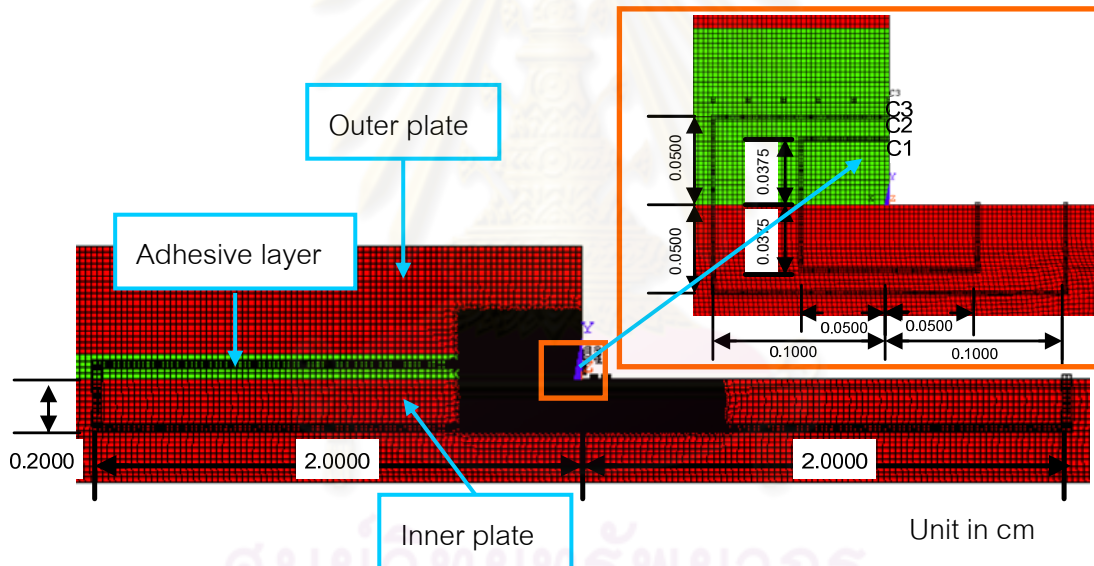
รูปที่ 6.3 โมเดลคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในกรณีโมเดลการวิเคราะห์แผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรใช้เอลิเมนต์ plane82 ชนิดความเค้นระนาบแบบมีความหนาและความเครียดระนาบ เนื่องจากโมเดลและแรงกระทำมีความสมมาตรทางด้านแกน x และ y ดังนั้นจึงสามารถทำการวิเคราะห์เพียง 1/4 ของโมเดลได้แสดงดัง

รูปที่ 6.4(ก) และแสดงผลการวิเคราะห์ภายในวิธี C1, C2 และ C3 (ระนาบ $x-y$) เพื่อใช้คำนวณค่าความเข้มของความเค้นแสดงดังรูปที่ 6.4(ข)



(ก) โมเดลแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตร โดยมีจุด (0,0) อยู่ที่มุมฉากของผิวสัมผัสระหว่างแผ่นเหล็กกับแรงตามแนวแกน (inner plate) กับชั้นวัสดุประสาน (adhesive layer) ซึ่งโมเดลนี้มีจำนวนเอลิเมนต์เท่ากับ 68943 เอลิเมนต์ และขนาดเอลิเมนต์เล็กสุดเท่ากับ 2.5×10^{-3} ซม.



(ข) ภาพขยายบริเวณปลายแผ่นเหล็กประกบ (outer plate) กับแผ่นเหล็กรับแรงตามแนวแกนเพื่อแสดงวิธี C1, C2 และ C3

รูปที่ 6.4 โมเดลแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

6.1.3 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์คั้งที่ c_1 ในสมการที่ 3.25 โดยใช้วิธี RWCIM ตามขั้นตอนต่อไปนี้

6.1.3.1 คำนวณค่า QI จากสมการที่ 3.42

$$QI = - \int_{\theta=-\theta_1}^{\theta=\theta_2} \left(\{V_j(+\lambda_1)\}^T [I_2] \{V_j(-\lambda_1)\} \right) r_{inner} d\theta \quad (3.42)$$

โดยที่ $\lambda_1 = 0.729$ สำหรับกรณีความเค้นระนาบ

$\lambda_1 = 0.674$ สำหรับกรณีความเค้นเครียดระนาบ

$r_{inner} = 0.0001$ ซม.

6.1.3.2 คำนวณค่า GI จากสมการที่ 3.43

$$GI = \int_{C_{OUTER}} ([Y_{FEM}^{ns}] [I_2] [Y_{eig}^{ns}]) ds \quad (3.43)$$

โดยที่ค่าสนามความเค้น Y_{FEM}^{ns} และ Y_{eig}^{ns} แสดงที่มาในภาคผนวก ข.

หมายเหตุ งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีกฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal rule) ในประมาณค่าจากการอินทิเกรตสมการที่ 3.42 และ 3.43 โดยที่ในสมการที่ 3.42 จะพิจารณาจุดบน r_{inner} (วิถีภายใน) จำนวน 100 จุด และสมการที่ 3.43 จะพิจารณาจุดบนวิถี

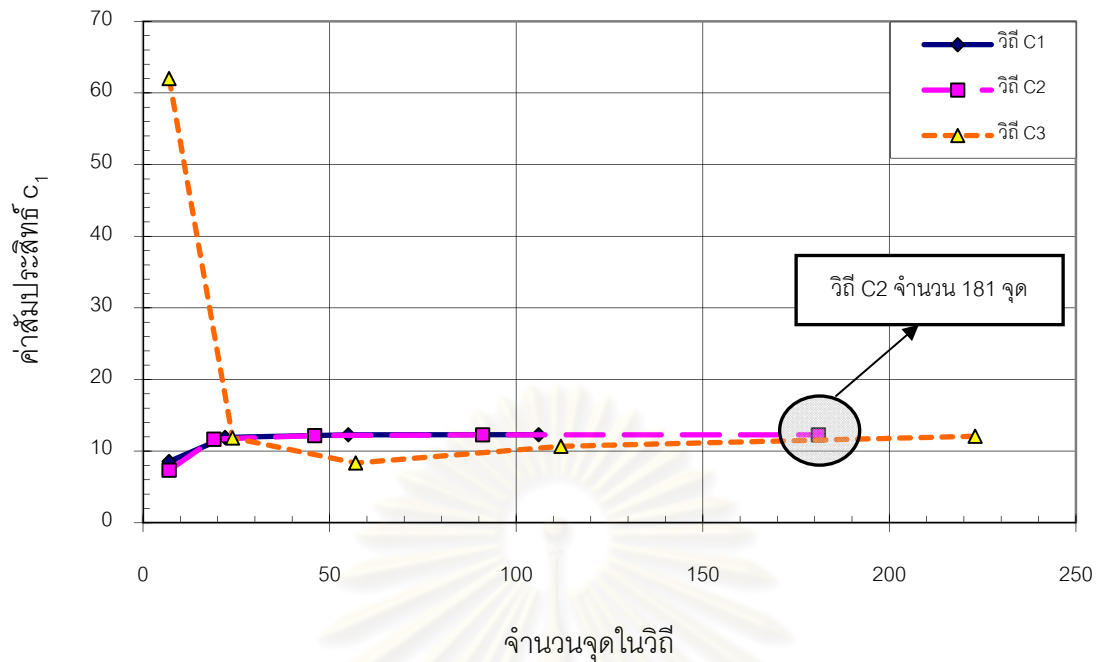
6.1.3.3 คำนวณค่าคงที่ c_1 จากสมการที่ 3.41

$$c_1 = GI / QI \quad (3.41)$$

จากนั้นตรวจสอบความลู่เข้าค่าของ c_1 ของค่าคงที่ c_1 ที่คำนวณได้จากวิธี RWCIM ในแต่ละวิถี (C1, C2 และ C3) ที่มาจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงดังตารางที่ 6.1-6.3 ตารางที่ 6.1 กรณีวิเคราะห์ค่าคงที่ c_1 ในคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำ 1 ตัน ในความเค้นระนาบ

จำนวนจุดในแต่ละวิถี	ค่า c_1 ที่คำนวณได้ในแต่ละวิถี		
	C1	C2	C3
7	8.550	7.342	62.010
19		11.664	
22	11.910		
24			11.840
46		12.164	
55	12.279		
57			8.344
91		12.278	
106	12.288		
112			10.665
181		12.283*	
223			12.079

จากตารางที่ 6.1 สามารถสร้างกราฟค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า c_1 ของแต่ละวิถี C1, C2, และ C3 กับจำนวนจุดในแต่ละวิถีเพื่อหาความลู่เข้าของค่า c_1 ได้ดังรูปที่ 6.5

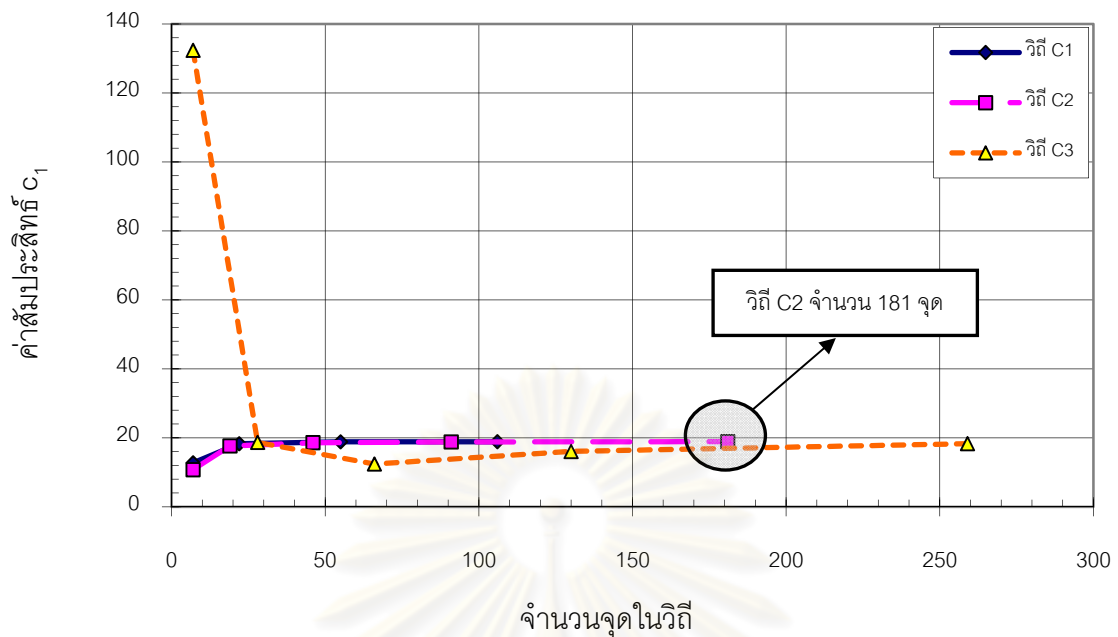


รูปที่ 6.5 ความถี่ของค่าตัวแปร c_1 กับจำนวนจุดในแต่ละวิธี C1, C2 และ C3 ของกรณีวิเคราะห์คานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำ 1 ตัน ในความเค้นระนาบ

ตารางที่ 6.2 กรณีวิเคราะห์แผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงกระทำ 1 ตัน ในความเค้นระนาบ

จำนวนจุดในแต่ละวิธี	ค่า c_1 ที่คำนวณได้ในแต่ละวิธี		
	C1	C2	C3
7	12.735	10.75	132.357
19		17.648	
22	18.271		
28			18.671
46		18.584	
54	18.824		
55			12.403
91		18.794	
106	18.863		
130			16.307
181		18.884*	
259			18.309

จากตารางที่ 6.2 สามารถสร้างกราฟค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า c_1 ของแต่ละวิธี C1, C2 และ C3 กับจำนวนจุดในแต่ละวิธีเพื่อหาความถี่ของค่า c_1 ได้ดังรูปที่ 6.6

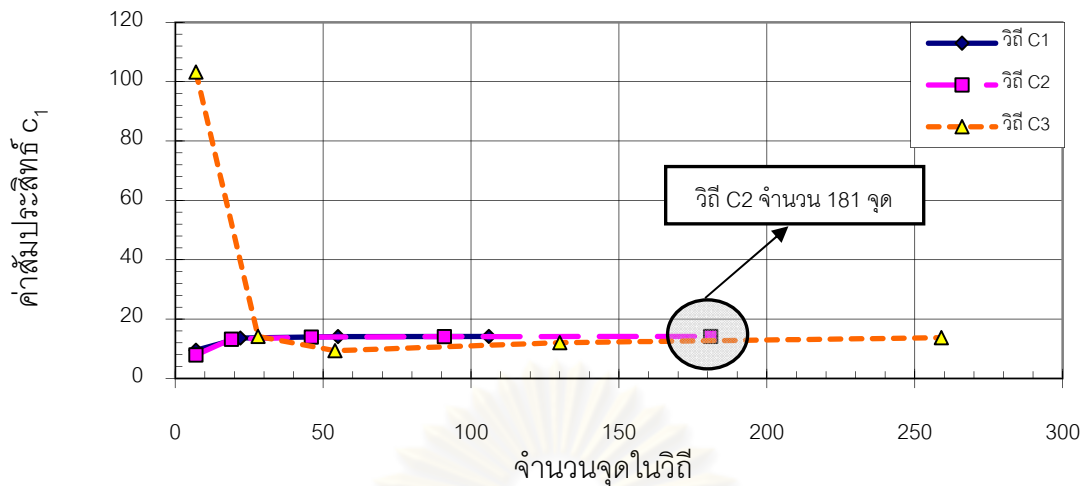


รูปที่ 6.6 ความถี่ของค่าตัวแปร c_1 กับจำนวนจุดในแต่ละวิถี C1, C2 และ C3 ของกรณีวิเคราะห์แผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงกระทำ 1 ตัน ในความเค้นระนาบ

ตารางที่ 6.3 กรณีวิเคราะห์แผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงกระทำ 1 ตัน ในความเค้นระนาบ

จำนวนจุดในแต่ละวิถี	ค่า c_1 ที่คำนวณได้ในแต่ละวิถี		
	C1	C2	C3
7	9.492	7.909	103.206
19		13.204	
22	13.602		
28			14.156
46		13.921	
55			9.362
66	14.107		
91		14.087	
106	14.140		
130			12.034
181		14.158*	
259			13.739

จากตารางที่ 6.3 สามารถสร้างกราฟค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า c_1 ของแต่ละวิถี C1, C2 และ C3 กับจำนวนจุดในวิถีเพื่อหาความถี่ของค่า c_1 ได้ดังรูปที่ 6.7



รูปที่ 6.7 ความถี่ของค่าตัวแปร c_1 กับจำนวนจุดในแต่ละวิธี C1, C2 และ C3 ของกรณีวิเคราะห์แผ่นเหล็กประทับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงกระทำ 1 ตัน ในความเครียดระนาบ

จากผลการวิเคราะห์ค่า c_1 พบว่าวิธี C2 ที่มีจำนวน 181 จุด จะให้ค่าเข้าใกล้ค่าคงที่มากที่สุดในทุกกรณี

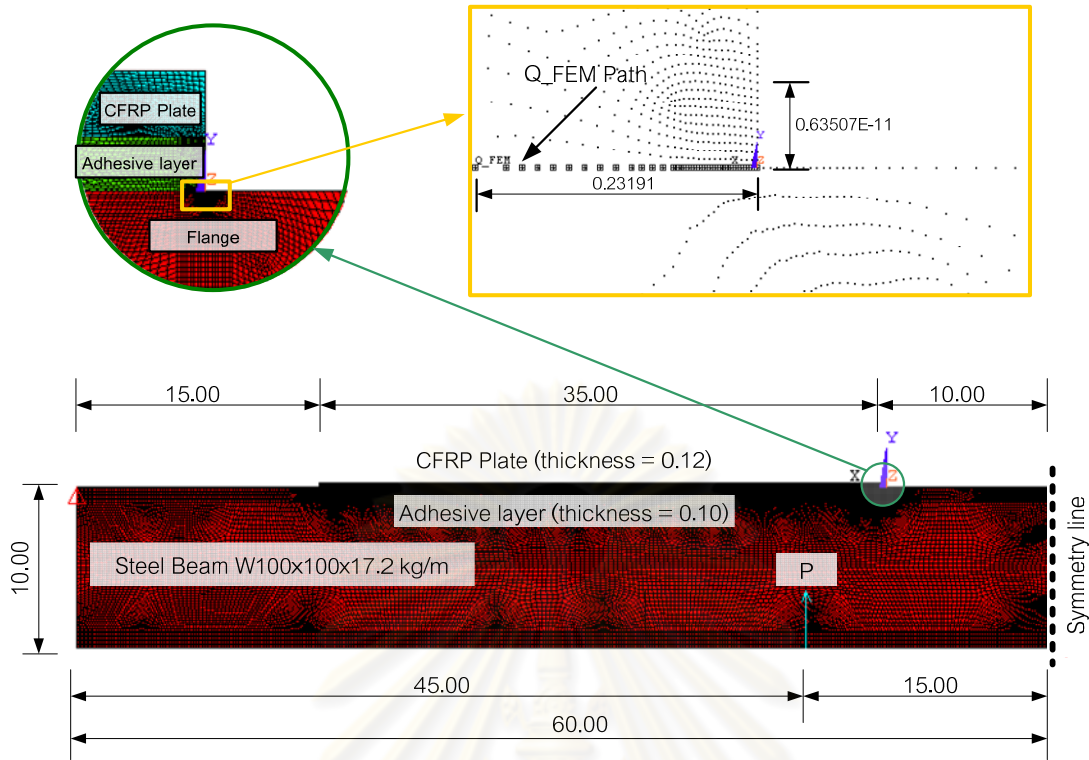
6.1.3.4 เลือกค่า c_1 ในวิธีที่มีค่าเข้าใกล้ค่าคงที่มากที่สุดแทนลงในสมการที่ 3.27

6.1.4 ทำการตรวจสอบค่าความเข้มของความเค้น

6.1.4.1 สำหรับกรณีคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ค่าความเข้มของความเค้นจากวิธี RWCIM จะถูกเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้โครงข่ายละเอียดมากในโมเดลคานเหล็กที่เสริมกำลัง (แสดงโมเดลการวิเคราะห์และการวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นดังรูปที่ 6.8 และ 6.9) เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง แสดงดังตารางที่ 6.4 (แสดงขั้นตอนในภาคผนวก ข.)

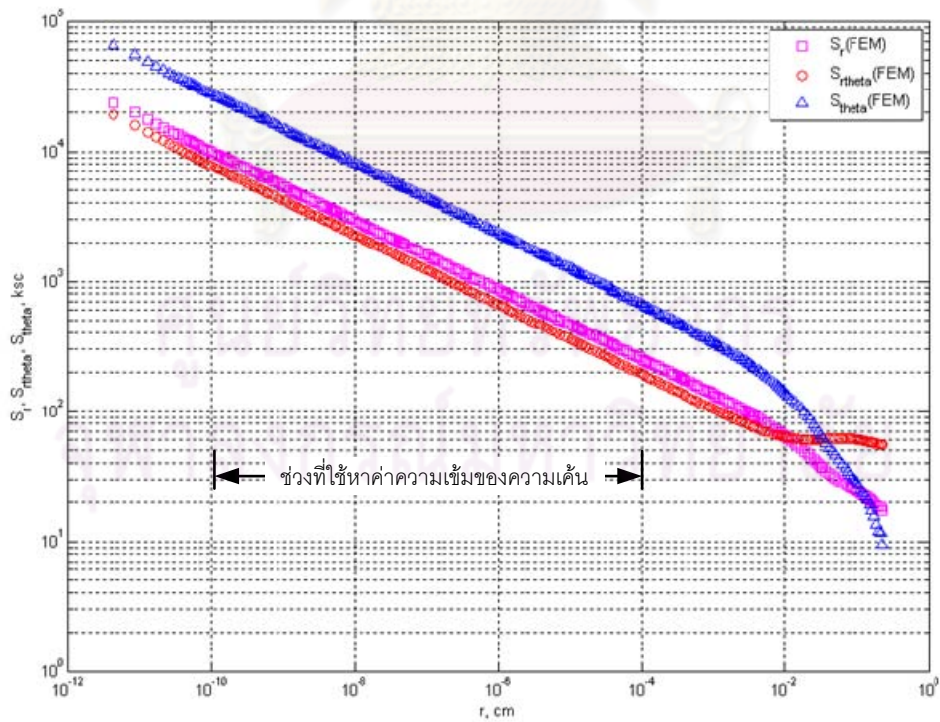
ตารางที่ 6.4 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของค่าความเข้มของความเค้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้โครงข่ายละเอียดมากในกรณีการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

แรง (กก.)	Q_{ij} , α_{ij} ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้โครงข่ายละเอียดมาก (กก./ตร.ซม.-ซม. ^{0.271})						Q_{ij} , α_{ij} จากวิธี RWCIM (กก./ตร.ซม.-ซม. ^{0.271})					
	Q_{rr}	α_{rr}	$Q_{r\theta}$	$\alpha_{r\theta}$	$Q_{\theta\theta}$	$\alpha_{\theta\theta}$	Q_{rr}	α_{rr}	$Q_{r\theta}$	$\alpha_{r\theta}$	$Q_{\theta\theta}$	$\alpha_{\theta\theta}$
4000	20.20	0.271	15.28	0.271	56.16	0.271	21.16	0.271	15.83	0.271	57.77	0.271
% ความคลาดเคลื่อนของวิธี RWCIM							4.73	0.00	3.61	0.00	2.86	0.00



Unit in cm

รูปที่ 6.8 โมเดลละเอียดของคานเหล็กที่เสริมกำลังในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้โครงข่ายละเอียดมาก (ความเค้นระนาบ)



รูปที่ 6.9 ค่าความเค้น (S) กับระยะผิวสัมผัสระหว่างผิวคานเหล็กกับชั้นวัสดุประสาน (r) จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้โครงข่ายละเอียดมาก (ความเค้นระนาบ)

จากรูปที่ 6.8 แสดงโมเดลละเอียดของคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในปัญหาแบบความเค้นระนาบ โดยโมเดลนี้มีจำนวนเอลิเมนต์เป็น 106203 เอลิเมนต์และขนาดเอลิเมนต์เล็กสุดเป็น 4.2338×10^{-12} ซม. และวิธีที่ใช้หาค่าความเข้มของความเค้น (Q_FEM Path)

จากกราฟ S_r (FEM), $S_{r_{\theta}}$ (FEM) และ S_{θ} (FEM) ในรูปที่ 6.9 พบว่าบริเวณเอกฐานเด่น (singularity dominate-zone) อยู่ในช่วง $10^{-10} < r < 10^{-4}$ ซึ่งช่วงนี้มีความชัน ($\alpha_1 = 1 - \lambda_1$) ในแต่ละเส้นเท่ากันทั้งสามเส้นคือ 0.271 และจากความชันนี้นำมาคำนวณค่าความเข้มของความเค้นในระนาบเชิงขั้ว (Q_{rr} , $Q_{r\theta}$ และ $Q_{\theta\theta}$) จะได้เท่ากับ 20.20, 15.28 และ 56.16 ตามลำดับ

จากตารางที่ 6.4 ลำดับของเอกฐานที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้โครงข่ายละเอียดมากมีความแตกต่างกับทฤษฎีเป็น 0.00 %, 0.00 % และ 0.00 % ตามลำดับ และค่าความเข้มของความเค้นที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ขนาดเล็กมีความแตกต่างจากทฤษฎีเป็น 4.73 %, 3.61 % และ 2.86 % ตามลำดับ

6.1.4.2 สำหรับกรณีแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตร ค่าความเข้มของความเค้นจากวิธี RWCIM ในแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตรจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าความเข้มของความเค้นในแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตรในงานวิจัยของ อัครวัชร เล่นวารี (2002) เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง แสดงดังตารางที่ 6.5 และ 6.6

ตารางที่ 6.5 แรงบิดและค่าความเข้มของความเค้นของแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตร (อัครวัชร เล่นวารี 2002)

ตัวอย่าง	แรงบิด (กก.)	ความเค้นระนาบ (กก./ตร.ซม.-ซม. ^{0.271})			ความเคียรระนาบ (กก./ตร.ซม.-ซม. ^{0.326})		
		Q_{rr}	$Q_{r\theta}$	$Q_{\theta\theta}$	Q_{rr}	$Q_{r\theta}$	$Q_{\theta\theta}$
NC-1	9858	82.3	61.6	224.8	88.8	56.9	160.6
NC-2	7580	63.3	47.4	172.9	68.3	43.8	123.5
NC-3	8956	74.8	56.0	204.2	80.7	51.7	145.9
NC-4	9831	82.1	61.4	224.2	88.5	56.8	160.2

ตารางที่ 6.6 ผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นโดยอ้างอิงแรงบิดจากตารางที่ 6.5

ตัวอย่าง	แรงบิด (กก.)	ความเค้นระนาบ (กก./ตร.ซม.-ซม. ^{0.271})			ความเคียรระนาบ (กก./ตร.ซม.-ซม. ^{0.326})		
		Q_{rr}	$Q_{r\theta}$	$Q_{\theta\theta}$	Q_{rr}	$Q_{r\theta}$	$Q_{\theta\theta}$
NC-1	9858	80.1	59.9	218.6	85.4	54.8	154.6
NC-2	7580	61.6	46.1	168.1	65.7	42.1	118.8
NC-3	8956	72.8	54.4	198.6	77.6	49.8	140.4
NC-4	9831	79.9	59.8	218.0	85.2	54.6	154.1

จากตารางที่ 6.5 และ 6.6 สามารถเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นของแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตร แสดงดังตารางที่ 6.7 ตารางที่ 6.7 เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนจากผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นในกรณีการทดลองแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตร

ตัวอย่างการทดลอง	แรงวิบัติ (กก.)	% ความคลาดเคลื่อนในกรณีความเค้นระนาบ			% ความคลาดเคลื่อนกรณีความเค้นดัดระนาบ		
		Q_{rr}	$Q_{r\theta}$	$Q_{\theta\theta}$	Q_{rr}	$Q_{r\theta}$	$Q_{\theta\theta}$
NC-1	9858	-2.70	-2.72	-2.74	-3.78	-3.72	-3.76
NC-2	7580	-2.73	-2.80	-2.77	-3.81	-3.83	-3.77
NC-3	8956	-2.74	-2.79	-2.72	-3.81	-3.74	-3.76
NC-4	9831	-2.73	-2.68	-2.75	-3.72	-3.82	-3.78
ค่าเฉลี่ย		-2.73	-2.75	-2.75	-3.78	-3.78	-3.77

จากตารางที่ 6.7 เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนจากผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นในแต่ละกรณีอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทั้งสองกรณี

นอกจากนี้ถ้านำค่าความเข้มของความเค้นในทิศทางใดๆ เปรียบเทียบกับค่าความเข้มของความเค้นในทิศทาง $r-r$ (Q_{rr}) พบว่าในกรณีความเค้นระนาบของทั้งสองการทดลองมีสัดส่วนเท่ากันคือ 1, 0.75 และ 2.73 และในกรณีความเค้นดัดระนาบในการทดลองรอยต่อประกบคู่แบบสมมาตรมีสัดส่วนเป็น 1, 0.64 และ 1.81

6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงค่าความเข้มของความเค้นกับจำนวนรอบของแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่

ในหัวข้อนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงค่าความเข้มของความเค้นกับจำนวนรอบการหลุดล่อนที่ปลายแผ่นเสริมกำลังในคานเหล็กและความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่วงความเข้มของความเค้นกับจำนวนรอบการวิบัติของแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตร

6.2.1 ผลวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นของการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่

จากการทดลองพบว่าพฤติกรรมการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนนั้นจะเกิดที่ปลายแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่ห่างออกจากเส้นศูนย์กลางออกไปข้างละ 15 ซม.

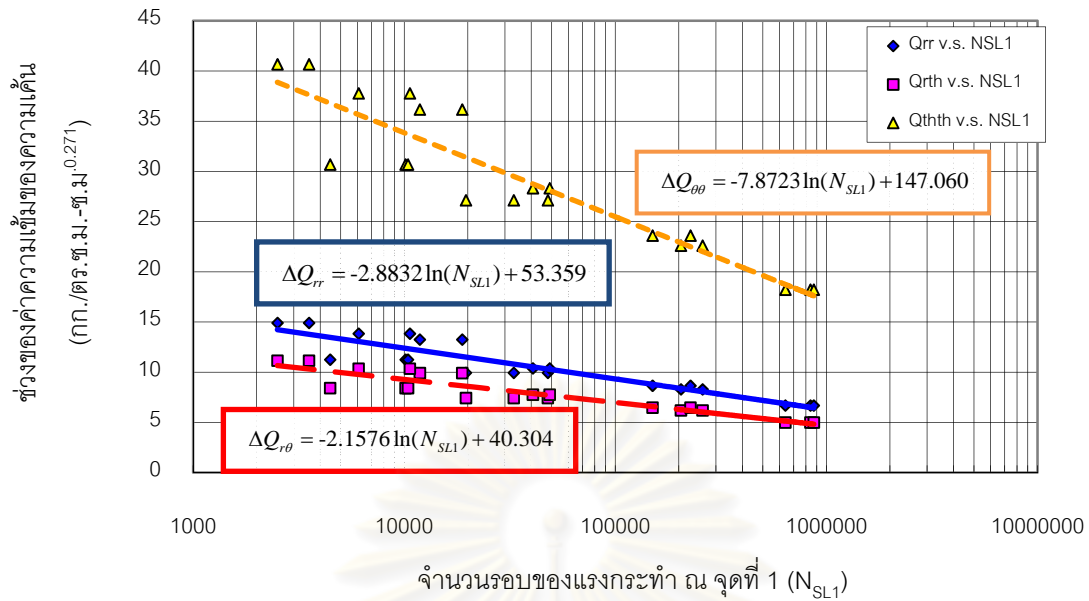
ซึ่งจุดนี้อยู่ในช่วงของความเค้นสูงสุด (ความเค้นเอกฐาน) โดยความเค้นสูงสุดนี้จะถูกอธิบายด้วยช่วงความเข้มของความเค้น และในบริเวณดังกล่าวนี้จะนำไปสู่การวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นด้วยวิธีคอมเพลกซ์โพเทนเชียลและวิธี RWCIM ซึ่งผลค่าความเข้มของความเค้นที่วิเคราะห์ได้แสดงดังตารางที่ 6.8

ตารางที่ 6.8 ผลการวิเคราะห์ช่วงค่าความเข้มของความเค้นที่ทำให้แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเกิดการหลุดล่อนออกจากคานที่เสริมกำลัง

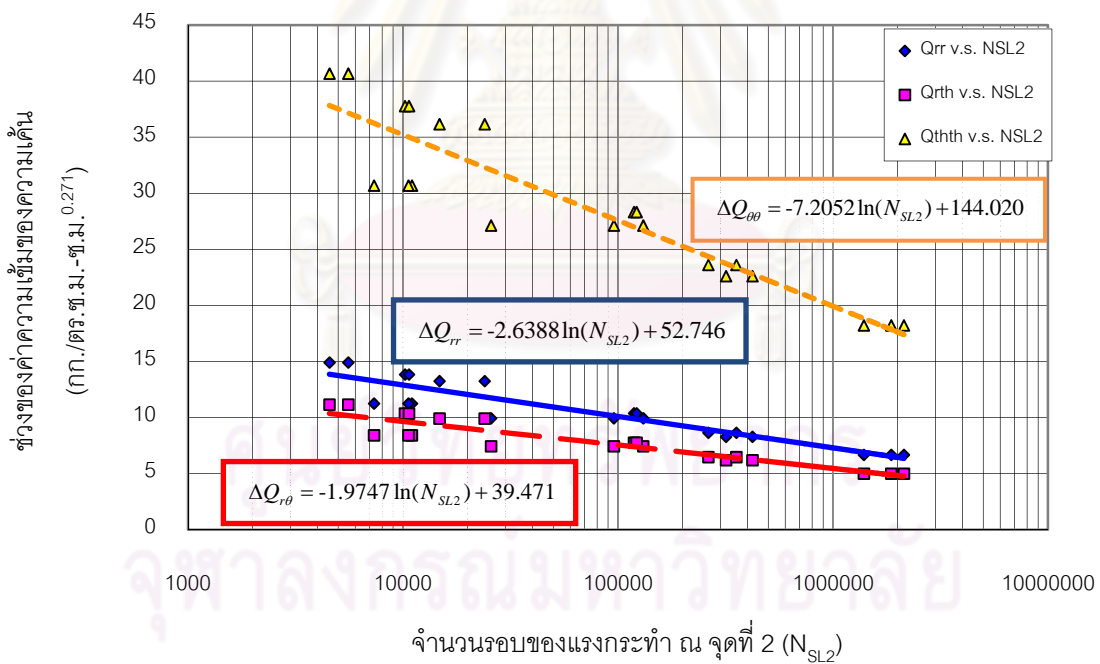
ลำดับ การทดลอง	ทิศแผ่น เสริมกำลัง	t_a (มม.)	$\frac{P_{max}}{P_{static}}$	ΔP (กก.)	ΔQ_{ij} (กก./ตร.ซม.-ซม. ^{0.271})		
					ΔQ_{rr}	$\Delta Q_{r\theta}$	$\Delta Q_{\theta\theta}$
BSC901	ใต้	1.03	0.90	6120	32.37	24.22	88.39
	เหนือ	1.01	0.90	6120	32.37	24.22	88.39
BSC801	ใต้	1.10	0.80	5440	28.77	21.53	78.56
	เหนือ	0.80	0.80	5440	30.37	22.72	82.91
BSC802	ใต้	0.95	0.80	5440	28.77	21.53	78.56
	เหนือ	0.86	0.80	5440	30.37	22.72	82.91
BSC651	ใต้	1.12	0.65	4420	23.38	17.49	63.83
	เหนือ	0.84	0.65	4420	24.67	18.46	67.36
BSC652	ใต้	0.75	0.65	4420	24.67	18.46	67.36
	เหนือ	0.82	0.65	4420	24.67	18.46	67.36
BSC601	ใต้	0.85	0.60	4080	22.77	17.04	62.18
	เหนือ	0.90	0.60	4080	22.77	17.04	62.18
BSC602	ใต้	0.80	0.60	4080	22.77	17.04	62.18
	เหนือ	0.80	0.60	4080	22.77	17.04	62.18
BSC501	ใต้	0.84	0.50	3400	18.98	14.20	51.82
	เหนือ	1.02	0.50	3400	17.98	13.46	49.10
BSC502	ใต้	0.78	0.50	3400	18.98	14.20	51.82
	เหนือ	0.90	0.50	3400	18.98	14.20	51.82
BSC401	ใต้	0.94	0.40	2720	14.39	10.77	39.28
	เหนือ	1.06	0.40	2720	14.39	10.77	39.28
BSC402	ใต้	0.98	0.40	2720	14.39	10.77	39.28
	เหนือ	0.90	0.40	2720	15.18	11.36	41.45

โดยที่ตัวอักษรเอียงหนาสีแดงในตารางที่ 6.8 หมายถึงคำนวณค่าความเข้มของความเค้นโดยพิจารณาความหนาของชั้นวัสดุประสาน (t_a) < 0.90 มม.

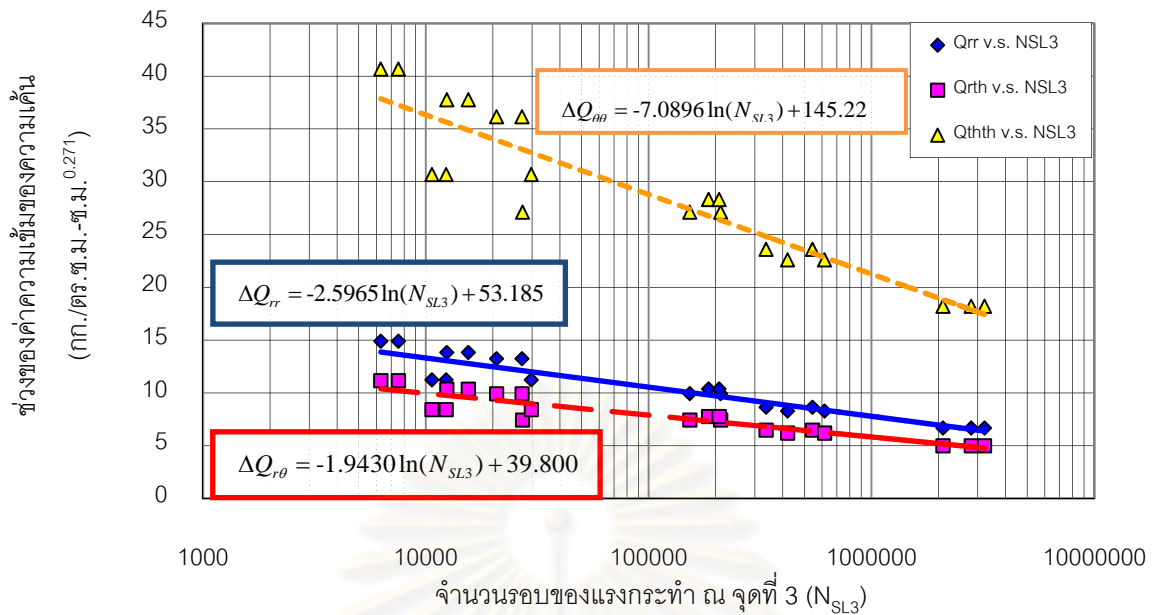
จากตารางที่ 6.8 สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของค่าความเข้มของความเค้น (ความเค้นระนาบ) กับจำนวนรอบของแรงกระทำ ณ จุด ใดๆ (ตารางที่ 5.1) ดังรูปที่ 6.10 - 6.12



รูปที่ 6.10 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของค่าความเข้มของความเค้นในความเค้นระนาบกับจำนวนรอบของแรงกระทำ ณ จุดที่ 1 ในการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่



รูปที่ 6.11 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของค่าความเข้มของความเค้นในความเค้นระนาบกับจำนวนรอบของแรงกระทำ ณ จุดที่ 2 ในการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่



รูปที่ 6.12 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของค่าความเข้มของความเค้นในความเค้นระนาบกับจำนวนรอบการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในคานเหล็กในการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่

จากรูปที่ 6.10 - 6.12 เขียนสมการความสัมพันธ์ของช่วงของค่าความเข้มของความเค้น (ในระบบพิกัดเชิงขั้ว) กับจำนวนรอบของแรงกระทำ ณ จุดที่ 1, 2, และ 3 ของกราฟสัญญาณการตรวจจับการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในคานเหล็กด้วยกระแสไฟฟ้า (รูปที่ 5.1) ได้ดังกรณีต่อไปนี้

กรณีที่ 1 ช่วงค่าความเข้มของความเค้นในกรณีการวิเคราะห์แบบความเค้นระนาบ (กก./ตร.ซม.-ซม.^{0.271}) กับจำนวนรอบของแรงกระทำ ณ จุดที่ 1 (จุดกำเนิดรอยร้าว) ในช่วงที่ 1 “ระยะกำเนิดรอยร้าว” (จุด 0 ถึงจุดที่ 1) สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของความเค้นกับจำนวนรอบของแรงกระทำ ณ จุดที่ 1 (N_{SL1}) ในการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลัง

$$\Delta Q_{rr} = -2.8832 \ln(N_{SL1}) + 53.359 \quad ; \quad R^2 = 0.88 \quad (6.1ก)$$

$$\Delta Q_{r\theta} = -2.1576 \ln(N_{SL1}) + 40.304 \quad ; \quad R^2 = 0.88 \quad (6.1ข)$$

$$\Delta Q_{\theta\theta} = -7.8723 \ln(N_{SL1}) + 147.060 \quad ; \quad R^2 = 0.88 \quad (6.1ค)$$

กรณีที่ 2 ช่วงค่าความเข้มของความเค้นในกรณีการวิเคราะห์แบบความเค้นระนาบ (กก./ตร.ซม.-ซม.^{0.271}) กับจำนวนรอบของแรงกระทำ ณ จุดที่ 2 (จุดรอยร้าวเติบโต 1) ในช่วงที่ 2 “ระยะรอยร้าวเติบโต 1” (จุด 1 ถึงจุดที่ 2) สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของความเค้นกับจำนวนรอบของแรงกระทำ ณ จุดที่ 2 (N_{SL2}) ในการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลัง

$$\Delta Q_{rr} = -2.6388 \ln(N_{SL2}) + 52.746 \quad ; \quad R^2 = 0.86 \quad (6.2ก)$$

$$\Delta Q_{r\theta} = -1.9747 \ln(N_{SL2}) + 39.471 \quad ; \quad R^2 = 0.86 \quad (6.2ข)$$

$$\Delta Q_{\theta\theta} = -7.2052 \ln(N_{SL2}) + 144.020 \quad ; \quad R^2 = 0.86 \quad (6.2ค)$$

กรณีที่ 3 ช่วงค่าความเข้มของความเค้นในกรณีการวิเคราะห์แบบความเค้นระนาบ (กก./ตร.ซม.-ซม.^{0.271}) กับจำนวนรอบของแรงกระทำ ณ จุดที่ 3 (จุดรอยร้าวเดบิต 2, จุดปลายแผ่นหลุดล่อน) ในช่วงที่ 3 “ระยะรอยร้าวเดบิต 2” (จุด 2 ถึงจุดที่ 3) สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของความเค้นกับจำนวนรอบของแรงกระทำ ณ จุดที่ 3 (N_{SL3}) ในการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลัง

$$\Delta Q_{rr} = -2.5965 \ln(N_{SL3}) + 53.185 \quad ; \quad R^2 = 0.87 \quad (6.3ก)$$

$$\Delta Q_{r\theta} = -1.9430 \ln(N_{SL3}) + 39.800 \quad ; \quad R^2 = 0.87 \quad (6.3ข)$$

$$\Delta Q_{\theta\theta} = -7.0896 \ln(N_{SL3}) + 145.22 \quad ; \quad R^2 = 0.87 \quad (6.3ค)$$

6.2.2 ผลวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นของการทดลองแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่

จากการทดลองพบว่าพฤติกรรมการหลุดวิบัติของแผ่นประกบคู่แบบสมมาตรนั้นจะเกิดขึ้นทันทีเมื่อเกิดรอยร้าว ซึ่งผลงานวิจัยส่วนใหญ่บอกว่าบริเวณผิวสัมผัสระหว่างทั้งสองวัสดุที่ปลายแผ่นประกบหรือปลายแผ่นทาบในรอยต่อมักจะเกิดความเค้นสูงที่สุด (ความเค้นเอกฐาน) ดังนั้นพารามิเตอร์ที่จะบอกความรุนแรงของความเค้นสูงที่สุด (ค่าความเข้มของความเค้น) นี้จะสามารถหาได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีคอมเพลคซ์โพเทนเชียลและวิธี RWCIM ซึ่งผลค่าความเข้มของความเค้นที่วิเคราะห์ได้แสดงดังตารางที่ 6.9

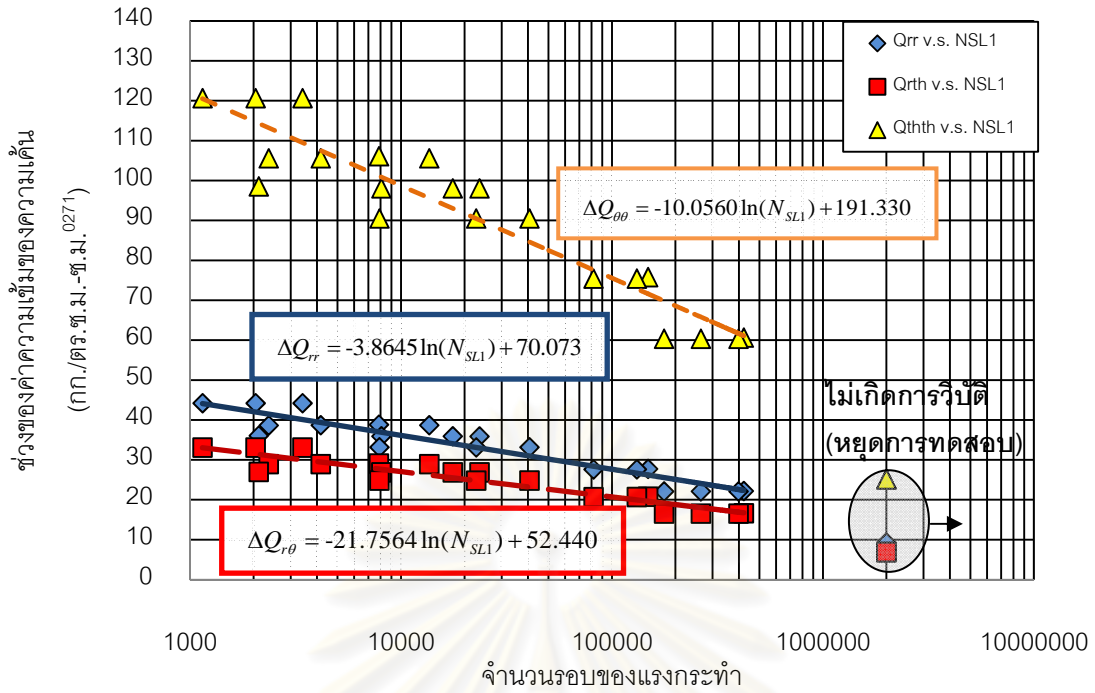
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.9 ผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณผิวสัมผัสระหว่างผิวของแผ่นเหล็กประกบกับด้านข้างกับชั้นวัสดุเชื่อมประสาน

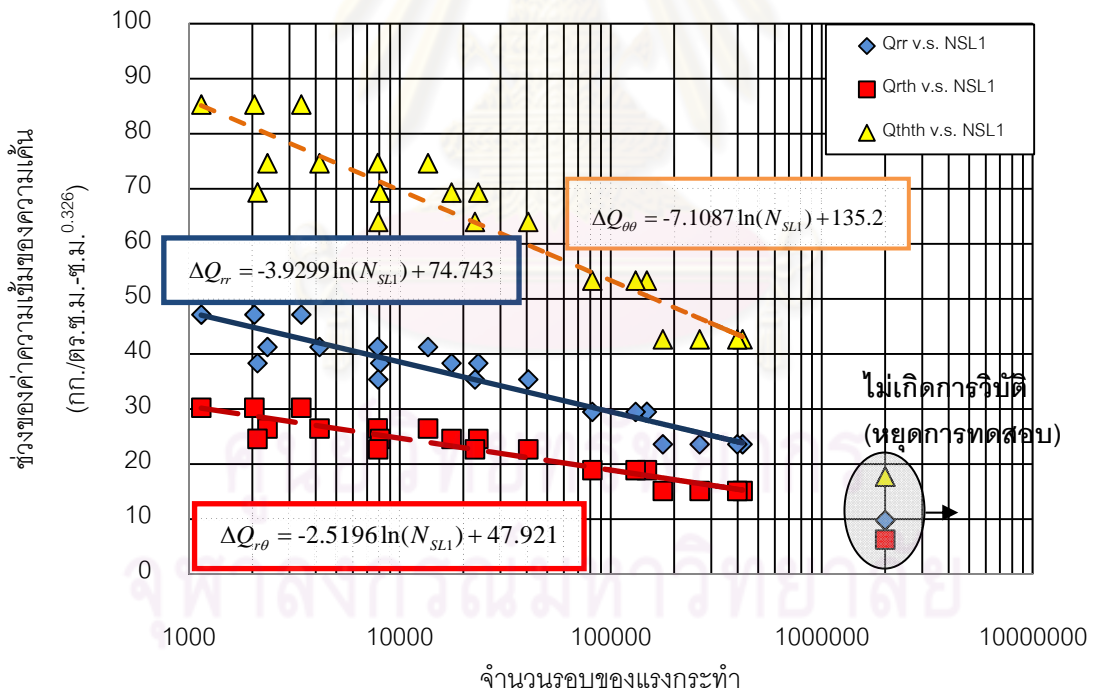
ตัวอย่าง ทดลอง	t_a (มม.)	$\frac{P_{max}}{P_{static}}$	ΔP (กก.)	ΔQ_{ij} ความเค้นระนาบ (กก./ตร.ซม.-ซม. ^{0.271})			ΔQ_{ij} ความเครียดระนาบ (กก./ตร.ซม.-ซม. ^{0.326})		
				ΔQ_{rr}	$\Delta Q_{r\theta}$	$\Delta Q_{\theta\theta}$	ΔQ_{rr}	$\Delta Q_{r\theta}$	$\Delta Q_{\theta\theta}$
DSJ801	0.99	0.80	5440	44.19	33.07	120.65	47.15	30.23	85.29
DSJ802	1.05	0.80	5440	44.19	33.07	120.65	47.15	30.23	85.29
DSJ803	1.11	0.80	5440	44.19	33.07	120.65	47.15	30.23	85.29
DSJ701	1.04	0.70	4760	38.67	28.93	105.57	41.26	26.45	74.63
DSJ702	0.95	0.70	4760	38.67	28.93	105.57	41.26	26.45	74.63
DSJ703	1.22	0.70	4760	38.62	28.93	105.57	41.26	26.45	74.63
DSJ704	0.86	0.70	4760	38.81	29.07	106.10	41.27	26.46	74.65
DSJ651	0.84	0.65	4420	36.04	26.99	98.52	38.32	24.57	69.32
DSJ652	1.14	0.65	4420	35.90	26.87	98.03	38.31	24.56	69.30
DSJ653	0.92	0.65	4420	35.90	26.87	98.03	38.31	24.56	69.30
DSJ654	1.25	0.65	4420	35.86	26.86	98.03	38.31	24.56	69.30
DSJ601	1.22	0.60	4080	33.10	24.80	90.49	35.36	22.67	63.97
DSJ602	0.98	0.60	4080	33.14	24.80	90.49	35.36	22.67	63.97
DSJ603	0.98	0.60	4080	33.14	24.80	90.49	35.36	22.67	63.97
DSJ501	0.77	0.50	3400	27.72	20.76	75.78	29.48	18.90	53.32
DSJ502	1.29	0.50	3400	27.59	20.66	75.41	29.47	18.89	53.31
DSJ503	1.08	0.50	3400	27.62	20.67	75.41	29.47	18.89	53.31
DSJ401	1.21	0.40	2720	22.07	16.53	60.33	23.58	15.12	42.65
DSJ402	0.86	0.40	2720	22.18	16.61	60.63	23.58	15.12	42.66
DSJ403	1.08	0.40	2720	22.09	16.53	60.33	23.58	15.12	42.65
DSJ404	1.33	0.40	2720	22.07	16.53	60.33	23.58	15.12	42.65
DSJ171	1.15	0.17	1130	9.21	6.89	25.14	9.79	6.28	17.72
DSJ172	0.84	0.17	1130	9.21	6.90	25.19	9.80	6.28	17.72
DSJ173	0.95	0.17	1130	9.20	6.88	25.14	9.79	6.28	17.72

โดยที่ตัวอักษรเอียงหนาสีแดงและตัวอักษรหนาสีน้ำเงินในตารางที่ 6.9 หมายถึงค่านวนค่าความเข้มของความเค้นโดยพิจารณาความหนาของชั้นวัสดุประสานในกรณี $t_a < 0.90$ มม. และ $t_a > 1.15$ มม. ตามลำดับ

จากตารางที่ 6.9 สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของค่าความเข้มของความเค้น (ความเค้นระนาบและความเครียดระนาบ) กับจำนวนรอบของแรงกระทำ ณ จุด ที่ 1 (ตารางที่ 5.4) แสดงดังรูปที่ 6.13 - 6.14



รูปที่ 6.13 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของค่าความเข้มของความเค้นในกรณีความเค้นระนาบกับจำนวนรอบการวิบัติของแผ่นเหล็กประทับคู่แบบสมมาตร



รูปที่ 6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของค่าความเข้มของความเค้นในกรณีความเค้นระนาบกับจำนวนรอบการวิบัติของแผ่นเหล็กประทับคู่แบบสมมาตร

จากรูปที่ 6.13 - 6.14 เขียนสมการความสัมพันธ์ของค่าความเข้มของความเค้น (ในระบบพิกัดเชิงขั้ว) กับจำนวนรอบของแรงกระทำ ณ จุดที่ 1 ของกราฟสัญญาณการตรวจจับการวิบัติของแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรด้วยค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม (รูปที่ 5.6) ได้ดังกรณีต่อไปนี้

กรณีที่ 1 ช่วงค่าความเข้มของความเค้นในกรณีการวิเคราะห์แบบความเค้นระนาบ (กก./ตร.ซม.-ซม.^{0.271}) กับจำนวนรอบของแรงกระทำ ณ จุดที่ 1 (จุดกำเนิดรอยร้าว, จุดวิบัติ) ในช่วงที่ 1 “ระยะกำเนิดรอยร้าว” (จุด 0 ถึงจุดที่ 1) สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของความเค้น (กรณีความเค้นระนาบ) กับจำนวนรอบของแรงกระทำ ณ จุดที่ 1 (N_{SL1}) ในการทดลองแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตร

$$\Delta Q_{rr} = -3.6845 \ln(N_{SL1}) + 70.073 \quad ; \quad R^2 = 0.88 \quad (6.4ก)$$

$$\Delta Q_{r\theta} = -2.7564 \ln(N_{SL1}) + 52.440 \quad ; \quad R^2 = 0.88 \quad (6.4ข)$$

$$\Delta Q_{\theta\theta} = -10.0560 \ln(N_{SL1}) + 191.330 \quad ; \quad R^2 = 0.88 \quad (6.4ค)$$

กรณีที่ 2 ช่วงค่าความเข้มของความเค้นในกรณีการวิเคราะห์แบบความเค้นเครียดระนาบ (กก./ตร.ซม.-ซม.^{0.326}) กับจำนวนรอบของแรงกระทำ ณ จุดที่ 1 (จุดกำเนิดรอยร้าว, จุดวิบัติ) ในช่วงที่ 1 “ระยะกำเนิดรอยร้าว” (จุด 0 ถึงจุดที่ 1) สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของความเค้น (กรณีความเค้นเครียดระนาบ) กับจำนวนรอบของแรงกระทำ ณ จุดที่ 1 (N_{SL1}) ในการทดลองแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตร

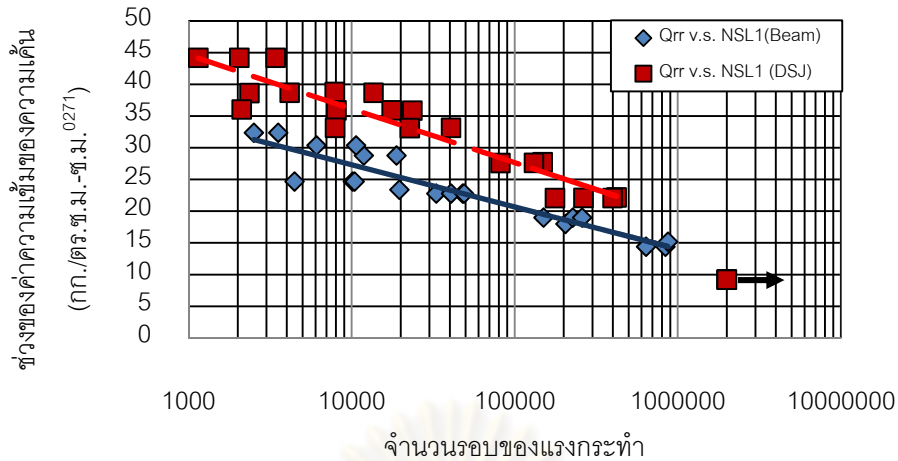
$$\Delta Q_{rr} = -3.9299 \ln(N_{SL1}) + 74.743 \quad ; \quad R^2 = 0.88 \quad (6.5ก)$$

$$\Delta Q_{r\theta} = -2.5196 \ln(N_{SL1}) + 47.921 \quad ; \quad R^2 = 0.88 \quad (6.5ข)$$

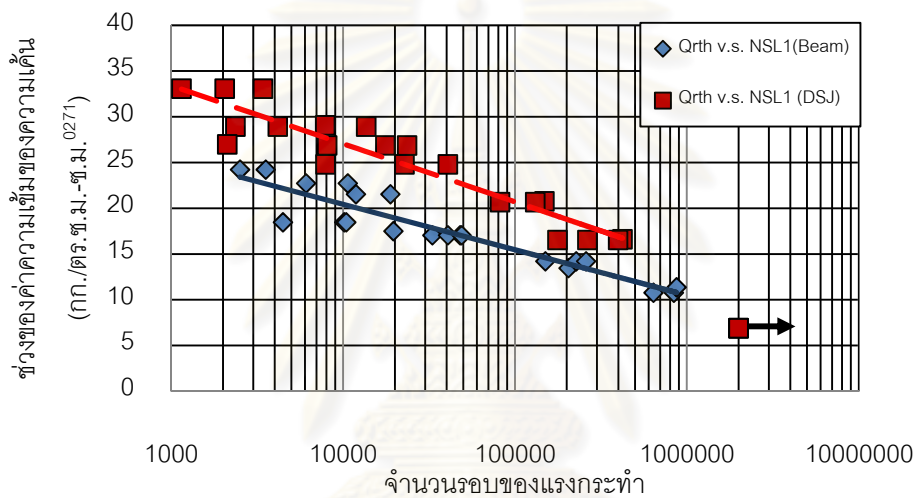
$$\Delta Q_{\theta\theta} = -7.1087 \ln(N_{SL1}) + 135.2 \quad ; \quad R^2 = 0.88 \quad (6.5ค)$$

6.3 การเปรียบเทียบสมการความสัมพันธ์

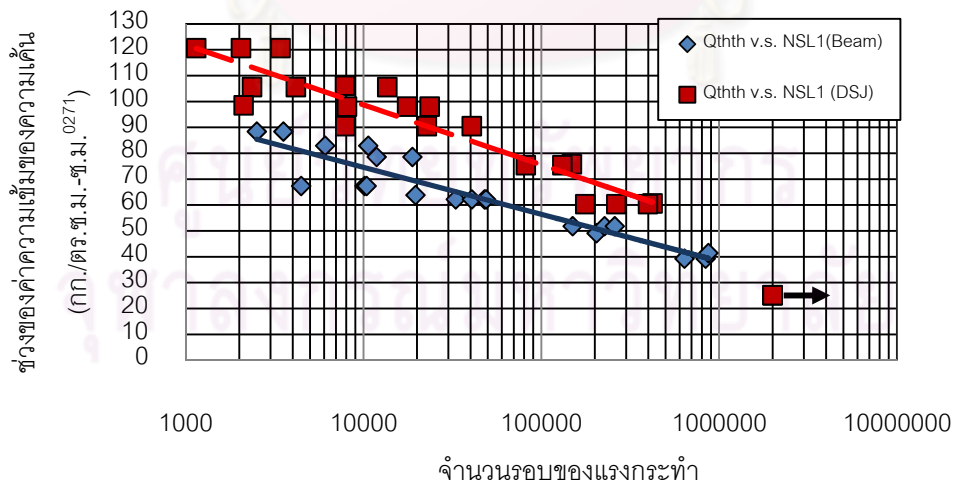
จากพฤติกรรมของการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่และพฤติกรรมการวิบัติของแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่จะมีช่วงที่ 1 เหมือนกัน (ระยะการกำเนิดรอยร้าว) หรือพฤติกรรมของช่วงที่ 1 ในสองการทดลองเหมือนกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำสมการความสัมพันธ์ของช่วงของค่าความเข้มของความเค้นกับจำนวนรอบที่ทำให้เกิดรอยร้าว (N_{SL1}) ในกรณีความเค้นระนาบของทั้งสองการทดลองมาเปรียบเทียบกันแสดงดังรูปที่ 6.15



(ก) ความเข้มของความเค้นในทิศทาง $r-r$ กับจำนวนรอบของแรงกระทำ



(ข) ความเข้มของความเค้นในทิศทาง $r-\theta$ กับจำนวนรอบของแรงกระทำ



(ค) ความเข้มของความเค้นในทิศทาง $\theta-\theta$ กับจำนวนรอบของแรงกระทำ

รูปที่ 6.15 เปรียบเทียบสมการความสัมพันธ์ของช่วงของค่าความเข้มของความเค้นกับจำนวนรอบที่ทำให้เกิดรอยร้าว (N_{SLI}) ของการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังกับการทดลองแผ่นเหล็กประกบคู่

แบบสมมาตร

จากรูปที่ 6.15 พบว่าสมการความสัมพันธ์ของช่วงของค่าความเข้มของความเค้นกับจำนวนรอบของแรงกระทำที่ทำให้เกิดรอยร้าวในการทดลองแผ่นเหล็กประกบกับคูแบบสมมาตรไม่ทับกับสมการความสัมพันธ์ของช่วงของค่าความเข้มของความเค้นกับจำนวนรอบของแรงกระทำที่ทำให้เกิดรอยร้าวในการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังซึ่งหมายถึง สมการทำนายการเกิดรอยร้าวในการทดลองแผ่นเหล็กประกบกับคูแบบสมมาตรภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ได้ไม่สามารถนำมาใช้ทำนายอายุการเกิดรอยร้าวในผิวสัมผัสระหว่างผิวเหล็กกับชั้นวัสดุประสานในการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ได้



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ และการทดลองแผ่นเหล็กประกบกับคูแบบสมมาตรภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่พบว่า

1. ในการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลัง พบว่าการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในคานเหล็กเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างผิวเหล็กกับชั้นวัสดุประสานบริเวณระยะปลายแผ่น ด้านใกล้กับตำแหน่งกึ่งกลางของความยาวคาน (แสดงดังรูปที่ 7.1 และ 7.2)



รูปที่ 7.1 การหลุดล่อนที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของผิวเหล็กกับวัสดุประสาน (BSC602S) (ก) ด้านหน้าของปลายแผ่น และ (ข) ด้านข้างของปลายแผ่น

พฤติกรรมการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนนี้สามารถแบ่งระยะเวลาของการเกิดรอยร้าวได้เป็น 4 ระยะดังต่อไปนี้

ก.) ระยะไม่เกิดรอยร้าว เริ่มจากจุดเริ่มต้นการทดลองถึงจุดกำเนิดรอยร้าว (N_{SL1}) และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลง

ข.) ระยะรอยร้าวเติบโต 1 เริ่มจากจุดกำเนิดรอยร้าว (N_{SL1}) ถึงจุดรอยร้าวเติบโต 1 (N_{SL2}) ช่วงแรกของระยะนี้รอยร้าวจะทำให้การเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าอ่านได้ต่างจากเดิมลดลงเพียงเล็กน้อยเนื่องจากรอยร้าวมีขนาดเล็ก ช่วงหลังของระยะนี้รอยร้าวจะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามจำนวนรอบของแรงกระทำที่เพิ่มขึ้นและทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงสูง



(ก) บริเวณทองคำหนัก



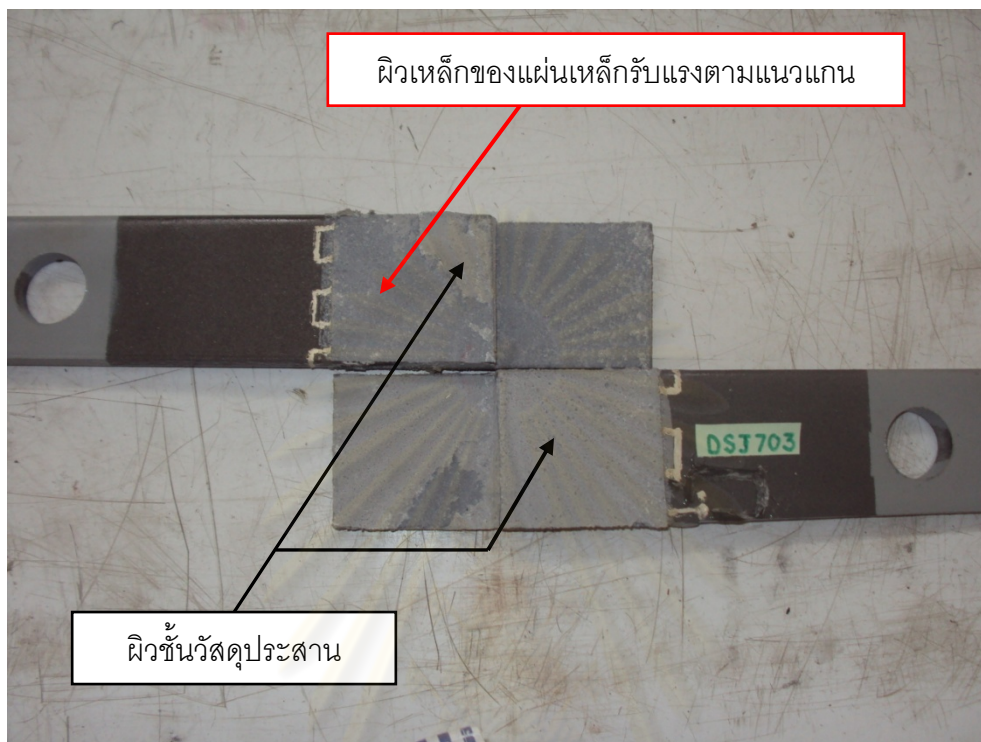
(ข) แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่มีวัสดุประสานติด

รูปที่ 7.2 พื้นที่การหลุดล่อนของชั้นวัสดุประสานในคานเหล็กที่เสริมกำลัง (BSC602S)

ค.) ระยะรอยร้าวเติบโต 2 เริ่มจากจุดรอยร้าวเติบโต 1 (N_{SL2}) ถึงจุดรอยร้าวเติบโต 2 หรือจุดปลายแผ่นหลุดล่อน (N_{SL3}) ในระยะนี้รอยร้าวจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งรอยร้าวมีขนาดใหญ่พอที่จะทำให้ปลายแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนหลุดออกจากคานเหล็กหรืออ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์โวลต์

ง.) ระยะการหลุดล่อน เริ่มจากจุดปลายแผ่นหลุดล่อนเป็นต้นไป จากพฤติกรรมนี้จึงสามารถบอกได้ว่ารอยร้าวขนาดเล็กนี้จะเป็นจุดเริ่มต้นของการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

2. ในการทดลองแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตร พบว่าการวิบัติ (การหลุดล่อน) ทันทีเมื่อเกิดรอยร้าว (ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นศูนย์โวลต์ทันที) โดยรอยร้าวที่พบนั้นอยู่ในบริเวณผิวสัมผัสระหว่างผิวเหล็กกับชั้นวัสดุประสาน แสดงดังรูปที่ 7.3



รูปที่ 7.3 บริเวณพื้นที่ที่เกิดรอยร้าวล้าในแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตร (DSJ703)

3. ในคานเหล็กพบว่าค่าลำดับเอกฐาน (order of singularity, α_1) ที่ได้จากวิธีรีซีพโพรคอลเวิร์คคอนทัวริอินทิกรัล (RWCIM) และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้โครงข่ายละเอียดมากมีค่าเท่ากับ 0.271 ส่วนค่าความเข้มของความเค้นในพิกัดเชิงขั้ว Q_{rr} , $Q_{r\theta}$ และ $Q_{\theta\theta}$ มีความแตกต่างเท่ากับ 4.73%, 3.61% และ 2.86% ตามลำดับ สำหรับในแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตร เมื่อเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยในอดีต ค่าความเข้มของความเค้นในพิกัดเชิงขั้ว Q_{rr} , $Q_{r\theta}$ และ $Q_{\theta\theta}$ ในกรณีความเค้นระนาบมีความแตกต่างเท่ากับ -2.73%, -2.75% และ -2.75% ตามลำดับ ส่วนในกรณีความเค้นระนาบมีความแตกต่างเท่ากับ -3.78% -3.78% และ -3.77% ตามลำดับ

4. ระดับของช่วงของค่าความเข้มของความเค้นมีผลต่ออายุของจุดกำเนิดรอยร้าวของการทดลองคานเหล็กและอายุของจุดกำเนิดรอยร้าว (การหลุดล่อน) ของการทดลองแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรดังสมการที่ 6.1, 6.4 และ 6.5 ตามลำดับ

5. สมการทำนายการเกิดวิบัติของการทดลองแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ไม่สามารถนำมาใช้ทำนายอายุจุดกำเนิดรอยร้าวในผิวสัมผัส

ระหว่างผิวเหล็กกับชั้นวัสดุประสานของการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ได้

7.2 ข้อเสนอแนะการศึกษาในอนาคต

การทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ในอนาคต

1. พิจารณาอัตราส่วนของแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่และความถี่ของแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ที่มีผลต่อการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในคานเหล็กที่เสริมกำลังภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่

2. พิจารณาปัญหาเกี่ยวกับสภาวะแวดล้อมที่ผลต่อการทำให้เกิดการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในคานเหล็กที่เสริมกำลังภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่

3. พิจารณาประเภทของคุณสมบัติของวัสดุประสานกับแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่นำมาเสริมกำลังให้กับคานเหล็กเพื่อศึกษาพฤติกรรมการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในคานเหล็กที่เสริมกำลังภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่และสร้างกราฟเปรียบเทียบสมการทำนายการเกิดรอยร้าวในคานเหล็ก (สมการนี้ได้จากผลของการทดลองแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่) กับกราฟสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของความเค้นกับจำนวนรอบของแรงกระทำ ณ จุดที่ 1 (N_{SL1}) ในการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลัง (ทิศทาง $\theta - \theta$ ในระบบพิกัดเชิงขั้ว)

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

จิรพงศ์ กสิทวิทย์อำนวย. กลศาสตร์การแตกหัก. กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.

ภาษาต่างประเทศ

Al-Mahaidi R., Liu H.B. and Zhao X.L. The effect of fatigue loading on bond strength of
cfrp bonded steel plate joints. Proceedings of the International Symposium on
Bond Behavior of FRP in Structures (2005) : 451-455.

Al-Mahaidi R., Fawzia S. and Zhao X.L. Experimental and finite element analysis of a
double strap joint between steel plates and normal modulus CFRP. Composite
Structures 75 (2006) : 156-162.

American Association of State Highway Bridges (ASSHTO). Standard Specifications for
Highway Bridges (1996) 16th Edition.

Anderson T.L. Fracture Mechanics : Fundamental and Applications (1991) CRC Press,
ISBN 0-8493-4277-5.

Bogy D.B. and Wang K.C. Stress Singularities at Interface Corners in Bonded Dissimilar
Isotropic Elastic Materials. International Journal of Solids and Structures 7 (1971)
: 993-1005.

Carpenter W.C. Calculation of fracture mechanics parameters for a general corner.
International Journal of Fracture 24 (1984) : 45-58.

Carpenter W.C. Mode I and mode II stress intensities for plates with cracks of finite
opening. International Journal of Fracture 26 (1984) : 201-214

Carpenter W.C. and Byers C. A path independent integral for computing stress
intensities for V-notched cracks in a bi-material. International Journal of Fracture
35 (1987) : 245-268.

Carpenter W.C. and Byers C. Insensitivity of the reciprocal work contour integral method
to higher order eigenvectors. International Journal of Fracture 73 (1995) : 93-108

- Colombi P., Bocciarelli M., Fava G. and Poggi C. Prediction of Debonding strength of tensile steel/cfrp joints using fracture mechanics and stress based criteria. Engineering Fracture Mechanics 76 (2009) : 299-313.
- Colombi P., Bocciarelli M., Fava G. and Poggi C. Fatigue performance of tensile steel members strengthened with cfrp plates. Engineering Fracture Mechanics 87 (2009) : 334-343.
- Deng J. and Lee M.K. Fatigue performance of metallic beam strengthened with a bonded CFRP plate. Composite Structures 78 (2007) : 222-23.
- Ernesto P.F. Analysis of singular regions in bonded joints. International Journal of Fracture 105 (2000) : 1-25.
- Fisher J.W., Frank K.H., Hirt M.A. and McNamee B.M. Effect of weldments on the fatigue strength of steel beams. NCHRP Report no.102, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. (1970)
- Fisher J.W., Albrecht P., Yen B.T., and Klingerman D.J. Fatigue strength of beams with stiffeners and attachments. NCHRP Report no.147, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. (1974)
- Fisher J.W., Mertz D.R. and Zhong A. Steel bridge members under variable amplitude long life fatigue loading. NCHRP Report no.267, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. (1983)
- Fisher J.W., Yen B.T. and Wang D. Fatigue and fracture evaluation for rating riveted Bridges. NCHRP Report no.302, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. (1987)
- Gradin P.A. and Groth H.L. A fracture criterion for adhesive joints in terms of material induced singularities. Proceeding of the Third International Conference on Numerical Methods in Fracture Mechanics (1984) : 711-720.
- Green A.E. and Zirna W. Theoretical Elasticity Oxford University Press (1968)
- Groth H.L. A method to predict fracture in an adhesively bonded joint. International Journal of adhesion and adhesives 5 (1985) : 19-22.
- Hong C.C. and Stern M. The computation of stress intensity factors in dissimilar materials. Journal of Elasticity 8 (1978) : 21-34.

- Japanese Society of Steel Construction (JSSC). Fatigue Design Recommendations for steel structures. (English version) (1995)
- Lenwari A. and Thepchatri T. Debonding Strength of Steel Beams Strengthened with CFRP Plates. ASCE Journal of Composites for Construction 10 (2006) : 69-78.
- Liechti K.M. and Mohammed I. The effect of corner angles in bimaterial structures. International Journal of Solids and Structures 38 (2001) : 4375-4394.
- Liu X.H., Suo Z. and Ma Q. Split singularities : stress field near the edge of silicon die on a polymer substrate. Acta mater. 47 (1999) : 67-76.
- Munz D. and Tang Y.Y. Stress singularities at the interface in bonded dissimilar material under mechanical and thermal loading. Journal of Applied Mechanics 59 (1992) : 857-861.
- Quaresimin M. and Ricotta M. Fatigue behavior and damage evolution of single lap bonded joints in composite material. Composites Sciences and Technology 66 (2005) : 176-187.
- Reedy Jr. E.D. Intensity of stress singularities at the interface corner between a bonded elastic and rigid layer. Engineering Fracture Mechanics. 36 (1990) : 575-583
- Schnerch D., Dawood M., Rizkalla S., Summer E. and Stanford K. Bond behavior of cfrp strengthened steel structures. Proceeding of the International Symposium on bond Behavior of FRP in Structures (BBFS2005) (2005) : 435-444.
- Shin K.C., Kim S.W. and Lee J.J. Application of stress intensity to design of anisotropic/isotropic bi-materials with a wedge. International Journal of Solids and Structures 44 (2007) : 7748-7766.
- Sills L.B. and Sherer A. A conservative integral for determining stress intensity factors of a bimaterial notch. International Journal of Fracture 115 (2002) : 1-26.
- Stern M., Becker E.B. and Dunham R.S. A contour integral computation of mixed-mode stress intensity factors. International Journal of Fracture 12 (1976) : 359
- Steel Structure Painting Council Specification 1991. Surface Preparation 2 : System and Specification 6th edition. Pittsburgh, P.A.
- Wang C.H. and Rose L.R.F. Compact solutions for corner singularity in bonded lap joints. International Journal of Adhesion and Adhesives 20 (2000) : 145-154.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

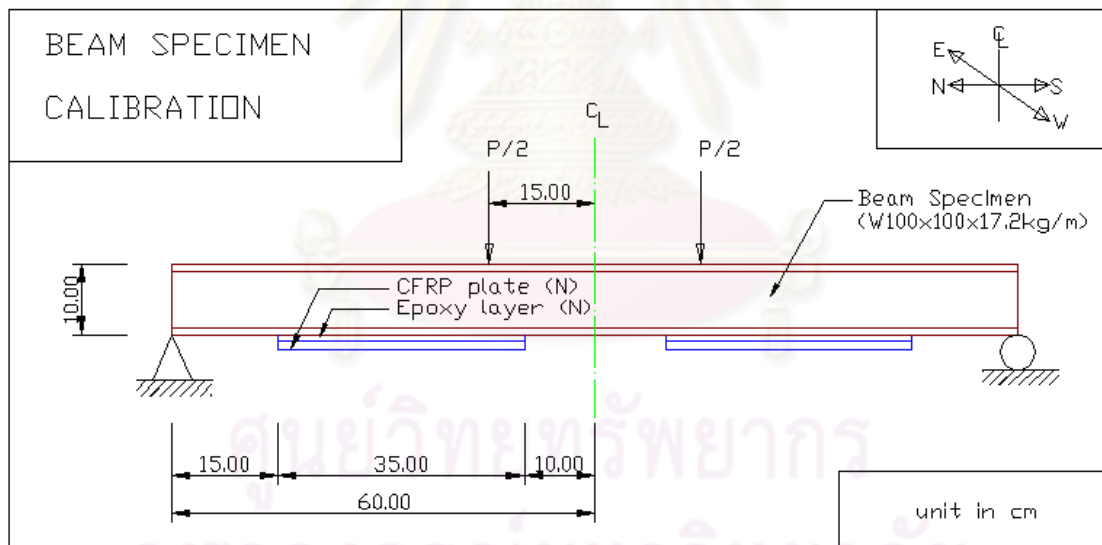
การสอบเทียบเครื่องมือ

1. การสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงแบบพลวัต (Servopulser) ด้วย Proving ring ภายใต้แรงสถิต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประมาณค่าแรงกระทำของเครื่องทดสอบแบบพลวัตโดยอ้างอิงขนาดของแรงกระทำจาก Proving ring

รายละเอียดการสอบเทียบเครื่องมือมีดังต่อไปนี้

- เครื่องทดสอบแรงแบบพลวัตขนาด 20 ตัน แสดงค่า %Indicator เป็นพารามิเตอร์ของแรงกระทำ
- Proving ring ขนาด 25 ตัน แสดงระยะจม (Penetration) 1 ช่อง (1 div) เท่ากับ 0.002 มม. หรือ 1 ช่องเท่ากับ 35.7 กิโลกรัม (อ้างอิงจาก Proving ring)

การติดตั้งการสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงแบบพลวัตด้วย Proving ring ภายใต้แรงสถิตแสดงดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 การติดตั้งการสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงแบบพลวัต (Servopulser) ด้วย Proving ring ภายใต้แรงสถิต

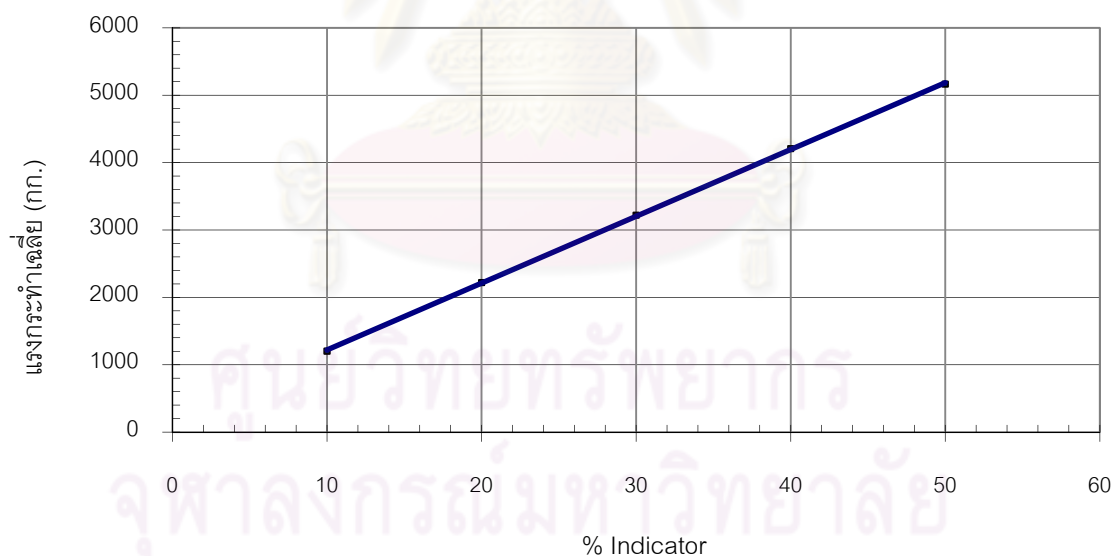
ในขณะที่สอบเทียบเครื่องมือเครื่องทดสอบแรงแบบพลวัตด้วย Proving ring ภายใต้แรงสถิต จะอ่านจำนวนช่องระยะจมของ Proving Ring กับค่า 10%, 20%, 30%, 40%, และ 50% Indicator ของเครื่องทดสอบแรงแบบพลวัต

ผลการสอบเทียบเครื่องมือเครื่องทดสอบแรงแบบพลวัตด้วย Proving ring ภายใต้แรงสถิต แสดงดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ผลการสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงแบบพลวัตด้วย Proving ring ภายใต้แรงสถิต

Indicator (%)	จำนวนช่องระยะจุ่มที่อ่านได้จาก Proving Ring				ระยะจุ่มเฉลี่ย (มม.)	แรงกระทำเฉลี่ย (กก.)
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ค่าเฉลี่ย		
10	34	34	33	33.7	0.067	1203.09
20	62	62.5	62	62.2	0.124	2220.54
30	90.5	90	90	90.2	0.180	3220.14
40	118	118	117.5	117.8	0.236	4205.46
50	144.5	145	144.5	144.7	0.289	5165.79

จากตารางที่ ก.1 สามารถนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง %Indicator กับแรงกระทำเฉลี่ย (อ่านจาก Proving Ring) เพื่อหาสมการของแรงกระทำของเครื่องทดสอบแรงแบบพลวัต ได้ดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ (อ่านจาก Proving Ring) กับ %Indicator

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ (อ่านจาก Proving Ring) กับ %Indicator สามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการได้ดังต่อไปนี้

$$P = 99.139(\%Ind) + 227.77 \quad (ก.1)$$

โดยที่ P = แรงกระทำ (กิโลกรัม)

$\%Ind$ = ร้อยละของแรงกระทำที่เครื่องทดสอบแบบพลวัตกระทำ

จากสมการที่ ก.1 จะได้ว่าเครื่องทดสอบแรงแบบพลวัตออกแรงกระทำ $1\%Ind$ จะเท่ากับแรงกระทำเฉลี่ยขนาด 326.91 กิโลกรัม

2. การสอบเทียบเกจความเครียดด้วยผลของระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ภายใต้แรงสถิต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นที่ได้จากการทดลองโดยใช้เกจความเครียดกับค่าความเค้นที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

รายละเอียดการสอบเทียบเครื่องมือมีดังต่อไปนี้

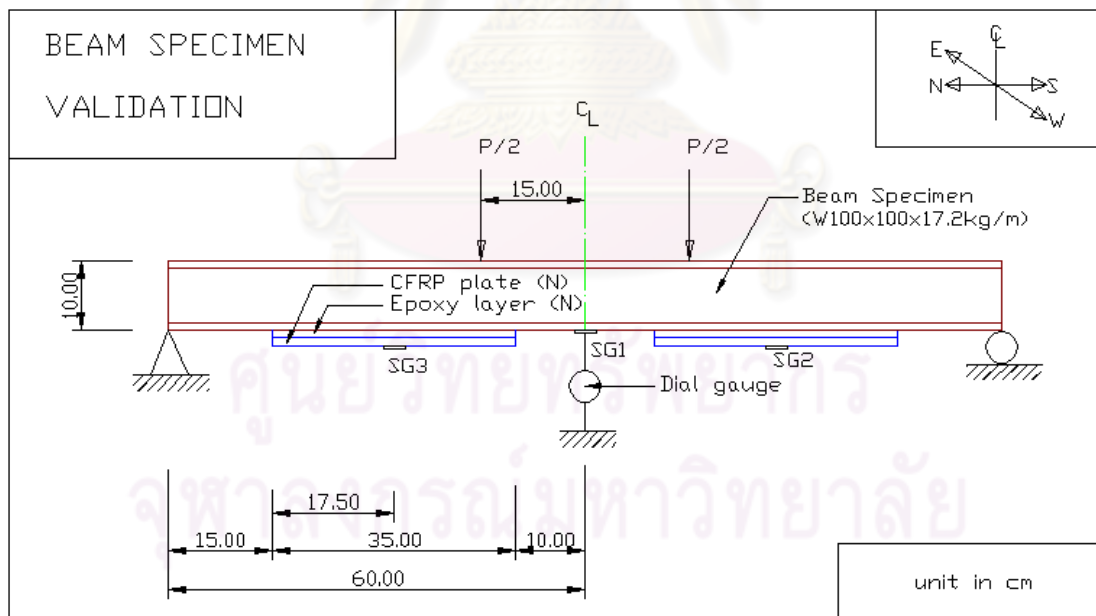
- เครื่องทดสอบแรงแบบพลวัตขนาด 20 ตัน แสดงค่า $\%Indicator$ เป็นพารามิเตอร์ของแรงกระทำสถิต

- Proving ring ขนาด 25 ตัน แสดงค่าระยะจม (Penetration) 1 ช่อง (1 div) เท่ากับ 0.002 มม. หรือ 1 ช่องเท่ากับ 35.7

- Dial Gauge แสดงค่าระยะจม (Penetration) 1 ช่อง เท่ากับ 0.001 ซม.

- เกจความเครียด (Strain gauge) และอุปกรณ์อ่านสัญญาณ (Data logger)

การติดตั้งการสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงแบบพลวัต (Servopulser) ด้วย Proving ring ภายใต้แรงสถิตแสดงดังรูปที่ ก.3



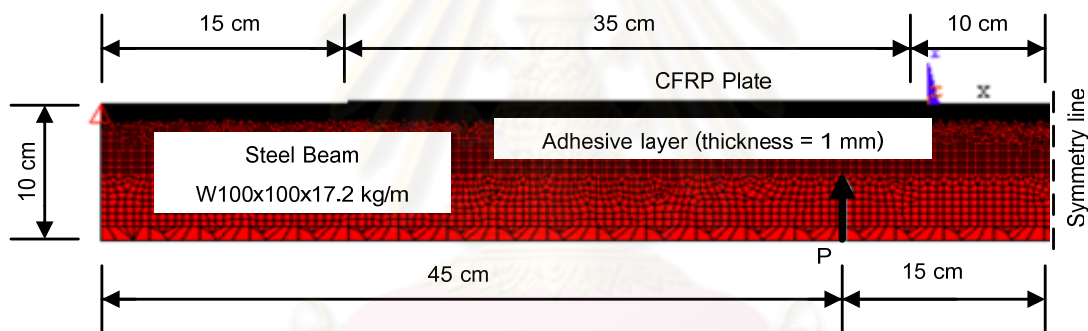
รูปที่ ก.3 ตำแหน่งการติดตั้งเกจความเครียดเพื่อสอบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์

เอลิเมนต์ โดยที่ SG = Strain Gauge, เกจความเครียด

จากรูปที่ ก.3 แสดงตำแหน่งการติดตั้งเกจความเครียด (SG) โดยที่ SG1 คือเกจความเครียดในตำแหน่งกึ่งกลางของความยาวคาน (ท้องคาน), SG2 และ SG3 คือเกจความเครียดในตำแหน่งกึ่งกลางของความยาวแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในทิศเหนือและทิศใต้ ตามลำดับ และ Dial gauge ในตำแหน่งกึ่งกลางของความยาวคาน (ท้องคาน)

ในขณะที่สอบเทียบเกจความเครียดภายใต้แรงสถิตจะอ่านค่าความเครียดที่เกิดขึ้นทั้ง 3 ตำแหน่งกับแรงกระทำที่อ่านได้จาก Proving ring (14 ช่องเท่ากับ 500 กิโลกรัม) เท่ากับ 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500, และ 6000 กิโลกรัม ในขณะที่เพิ่มแรง ตามลำดับ และ 5500, 5000, 4500, 4000, 3500, 3000, 2500, 2000, 1500, 1000, และ 500 กิโลกรัม ในขณะที่ลดแรง ตามลำดับ และค่าความเค้นที่ได้จากการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.2

การวิเคราะห์ค่าความเค้นจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้เอลิเมนต์ชนิด plane 82 (สี่เหลี่ยม/สามเหลี่ยม 8 จุด) ในความเค้นระนาบแบบมีความหนาแสดงดังรูปที่ ก.4 เพื่อใช้เปรียบเทียบค่าความเค้นที่ได้จากการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.3 และ ก.4 ตามลำดับ



รูปที่ ก.4 โมเดลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

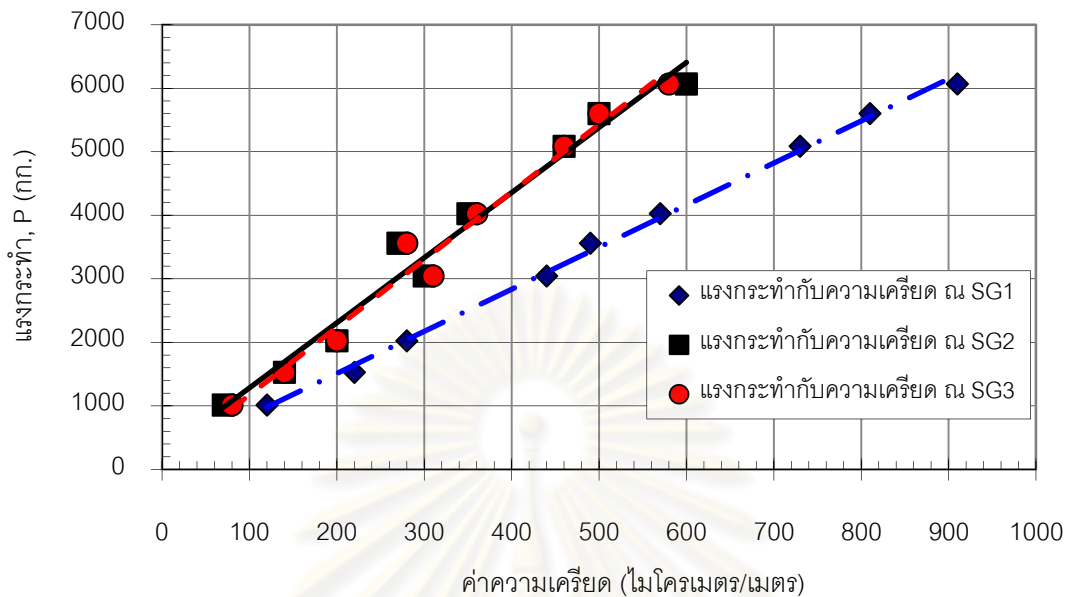
ตารางที่ ก.2 ผลการสอบเทียบผลจากการวัดค่าความเครียด ณ ตำแหน่งต่างๆ (DG = Dial Gauge (0.001 ซม. / 1 ช่อง), และ % Ind = % Indicator)

ลำดับ	ค่าจากการทดลองขณะเพิ่มแรง										ค่าจากการทดลองขณะลดแรง									
	% Ind	แรงกระทำ (กก.)	DG	ระยะโก่งตัว (ซม.)	ความเครียด ($\mu m/m$)			ความเค้น (กก./ตร.ซม.)			% Ind	แรงกระทำ (กก.)	DG	ระยะโก่งตัว (ซม.)	ความเครียด ($\mu m/m$)			ความเค้น (กก./ตร.ซม.)		
					SG1	SG2	SG3	σ_{SG1}	σ_{SG2}	σ_{SG3}					SG1	SG2	SG3	σ_{SG1}	σ_{SG2}	σ_{SG3}
1	7.9	1012.8	39	0.039	120	70	80	240	140	160	12.7	1488.5	55	0.055	240	120	130	480	240	260
2	13.1	1528.1	56	0.056	220	140	140	440	280	280	18.1	2023.6	78	0.078	300	120	130	600	240	260
3	18.1	2023.6	78	0.078	280	200	200	560	400	400	22.8	2489.4	93	0.093	390	150	170	780	300	340
4	28.4	3044.4	115	0.115	440	300	310	880	600	620	28.4	3044.4	114	0.114	450	230	240	900	460	480
5	33.6	3559.7	136	0.136	490	270	280	980	540	560	33.6	3559.7	135	0.135	520	300	300	1040	600	600
6	38.3	4025.4	154	0.154	570	350	360	1140	700	720	38.5	4045.3	152	0.152	580	340	330	1160	680	660
7	49.0	5085.8	189	0.189	730	460	460	1460	920	920	43.4	4530.9	171	0.171	650	380	380	1300	760	760
8	54.2	5601.1	210	0.210	810	500	500	1620	1000	1000	48.5	5036.3	187	0.187	710	410	390	1420	820	780
9	58.9	6066.9	229	0.229	910	600	580	1820	1200	1160	53.5	5531.8	209	0.209	750	470	460	1500	940	920

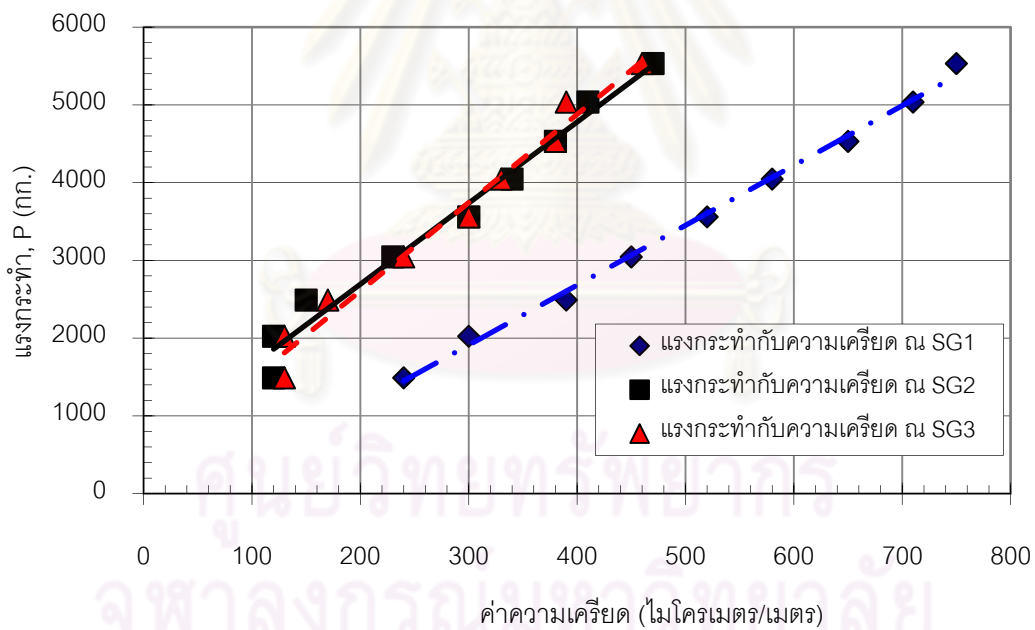
หมายเหตุแรงกระทำคำนวณจากสมการ ก.1 (กก.)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางที่ ก.2 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าความเครียดในขณะเพิ่มแรงและลดแรงได้ดังรูปที่ ก.5 และ ก.6



รูปที่ ก.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าความเครียด ณ ตำแหน่งใด ขณะเพิ่มแรง

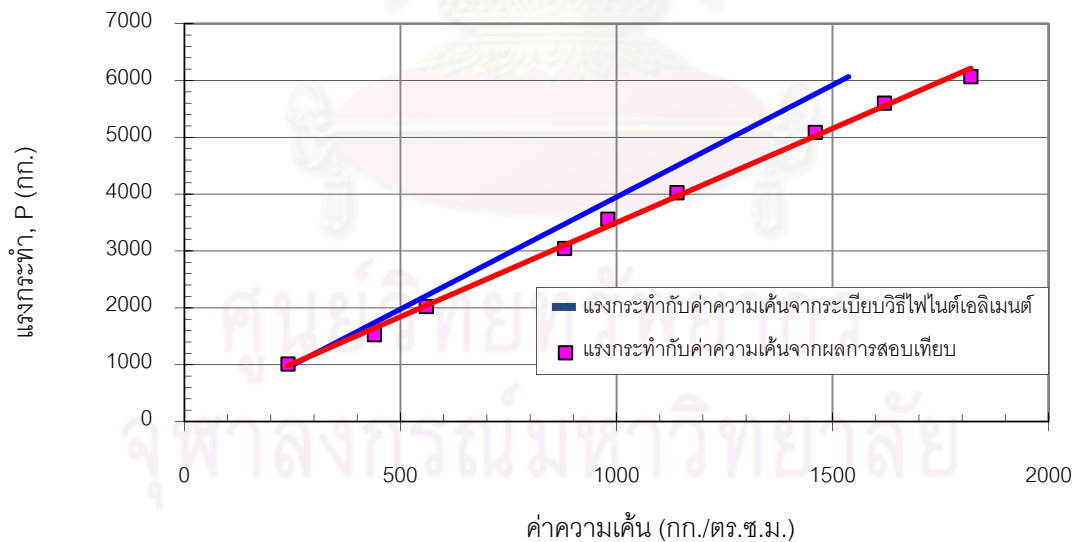


รูปที่ ก.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าความเครียด ณ ตำแหน่งใด ขณะลดแรง

จากผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นจากการทดลองในตารางที่ ก.2 สามารถเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมได้ดังตารางที่ ก.3 และ ก.4 และผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการสอบเทียบได้ดังรูปที่ ก.7 และ ก.8

ตารางที่ ก.3 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นจากระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์และการสอบเทียบเกจความเครียดในขณะเพิ่มแรง

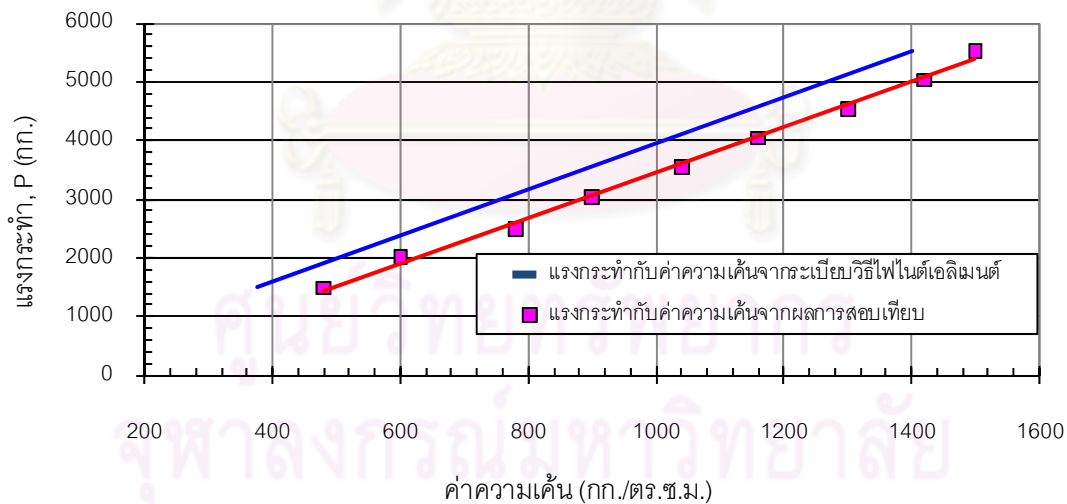
แรงกระทำ (กก.)	ค่าความเค้นจากระเบียบทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (กก./ตร.ซม.)			ค่าความเค้นจากการสอบเทียบขณะเพิ่มแรง (กก./ตร.ซม.)			% ความคลาดเคลื่อน		
	σ_1	σ_2	σ_3	σ_{SG1}	σ_{SG2}	σ_{SG3}	SG1	SG2	SG3
1012.8	253.34	146.16	146.16	240.00	140.00	160.00	-5.27	-4.21	9.47
1528.1	387.13	223.35	223.35	440.00	280.00	280.00	13.66	25.36	25.36
2023.6	512.66	295.77	295.77	560.00	400.00	400.00	9.23	35.24	35.24
3044.4	771.26	444.96	444.96	880.00	600.00	620.00	14.10	34.84	39.34
3559.7	901.81	520.28	520.28	980.00	540.00	560.00	8.67	3.79	7.63
4025.4	1019.80	588.36	588.36	1140.00	700.00	720.00	11.79	18.98	22.37
5085.8	1288.44	743.34	743.34	1460.00	920.00	920.00	13.32	23.77	23.77
5601.1	1418.99	818.66	818.66	1620.00	1000.00	1000.00	14.17	22.15	22.15
6066.9	1536.99	886.74	886.74	1820.00	1200.00	1160.00	18.41	35.33	30.82
ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของ % ความคลาดเคลื่อน							9.05	16.97	18.01



รูปที่ ก.7 เปรียบเทียบค่าความเค้นจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับค่าความเค้นจากการสอบเทียบเกจความเครียดขณะเพิ่มแรง ณ จุด SG1

ตารางที่ ก.4 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการ
สอบเทียบเกจความเครียดในขณะลดแรง

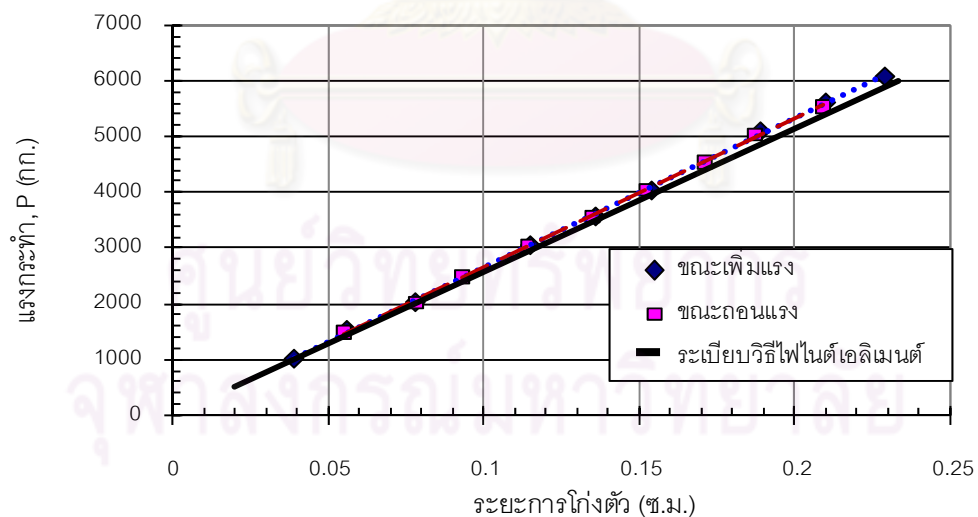
แรงกระทำ (กก.)	ค่าความเค้นจากระเบียบ ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (กก./ตร.ซม.)			ค่าความเค้นจากการสอบเทียบ ขณะลดแรง (กก./ตร.ซม.)			% ความคลาดเคลื่อน		
	σ_1	σ_2	σ_3	σ_{SG1}	σ_{SG2}	σ_{SG3}	SG1	SG2	SG3
1488.5	377.09	217.56	217.56	480.00	240.00	260.00	27.29	10.32	19.51
2023.6	512.66	295.77	295.77	600.00	240.00	260.00	17.04	-18.86	-12.09
2489.4	630.66	363.85	363.85	780.00	300.00	340.00	23.68	-17.55	-6.55
3044.4	771.26	444.96	444.96	900.00	460.00	480.00	16.69	3.38	7.87
3559.7	901.81	520.28	520.28	1040.00	600.00	600.00	15.32	15.32	15.32
4045.3	1024.83	591.26	591.26	1160.00	680.00	660.00	13.19	15.01	11.63
4530.9	1147.85	662.23	662.23	1300.00	760.00	760.00	13.26	14.76	14.76
5036.3	1275.89	736.10	736.10	1420.00	820.00	780.00	11.30	11.40	5.96
5531.8	1401.42	808.52	808.52	1500.00	940.00	920.00	7.03	16.26	13.79
ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ % ความคลาดเคลื่อน							16.09	13.65	11.94



รูปที่ ก.8 เปรียบเทียบค่าความเค้นจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับค่าความเค้นจากการสอบ
เทียบเกจความเครียดขณะลดแรง ณ จุด SG1

เปรียบเทียบค่าระยะการโก่งตัวของคานเหล็กในตารางที่ ก.2 กับค่าระยะการโก่งตัวของคานเหล็กจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงดังตารางที่ ก.5 และรูปที่ ก.9 ตารางที่ ก.5 เปรียบเทียบค่าระยะการโก่งตัวจากระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการสอบเทียบ

แรงกระทำ (กก.)		ระยะการโก่งตัวจากผลการสอบเทียบ (ซม.)		ระยะการโก่งตัวจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (ซม.)		% ความคลาดเคลื่อน	
เพิ่มแรง	ลดแรง	เพิ่มแรง	ลดแรง	เพิ่มแรง	ลดแรง	เพิ่มแรง	ลดแรง
1012.8	1488.5	0.039	0.055	0.039	0.057	0.13	-3.92
1528.1	2023.6	0.056	0.078	0.059	0.078	-4.71	0.22
2023.6	2489.4	0.078	0.093	0.078	0.096	0.22	-2.86
3044.4	3044.4	0.115	0.114	0.117	0.117	-1.78	-2.63
3559.7	3559.7	0.136	0.135	0.137	0.137	-0.66	-1.39
4025.4	4045.3	0.154	0.152	0.155	0.156	-0.53	-2.30
5085.8	4530.9	0.189	0.171	0.196	0.174	-3.37	-1.87
5601.1	5036.3	0.210	0.187	0.215	0.194	-2.51	-3.45
6066.9	5531.8	0.229	0.209	0.233	0.213	-1.85	-1.76
ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ % ความคลาดเคลื่อน							



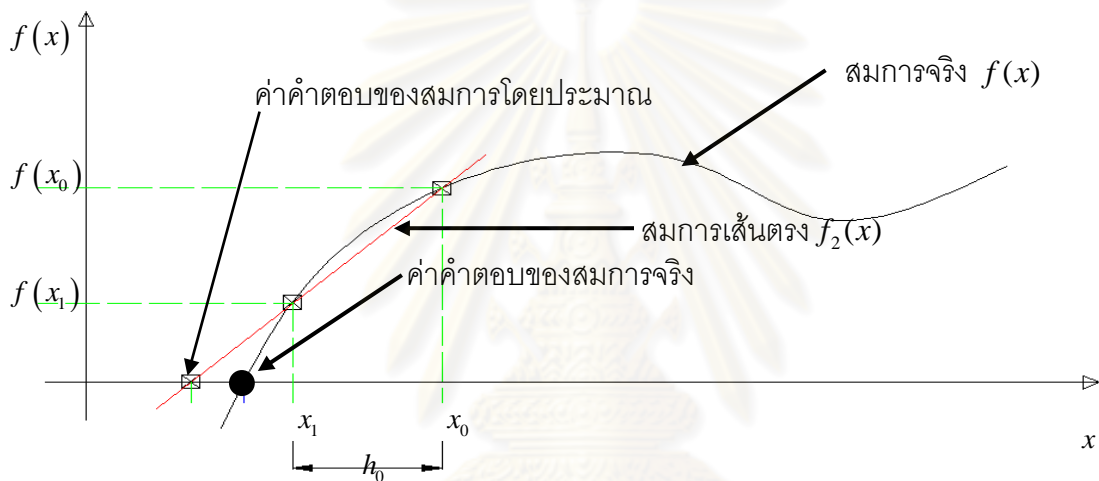
รูปที่ ก.9 เปรียบเทียบระยะการโก่งตัวจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับระยะการโก่งตัวจากการสอบเทียบ

ภาคผนวก ข.

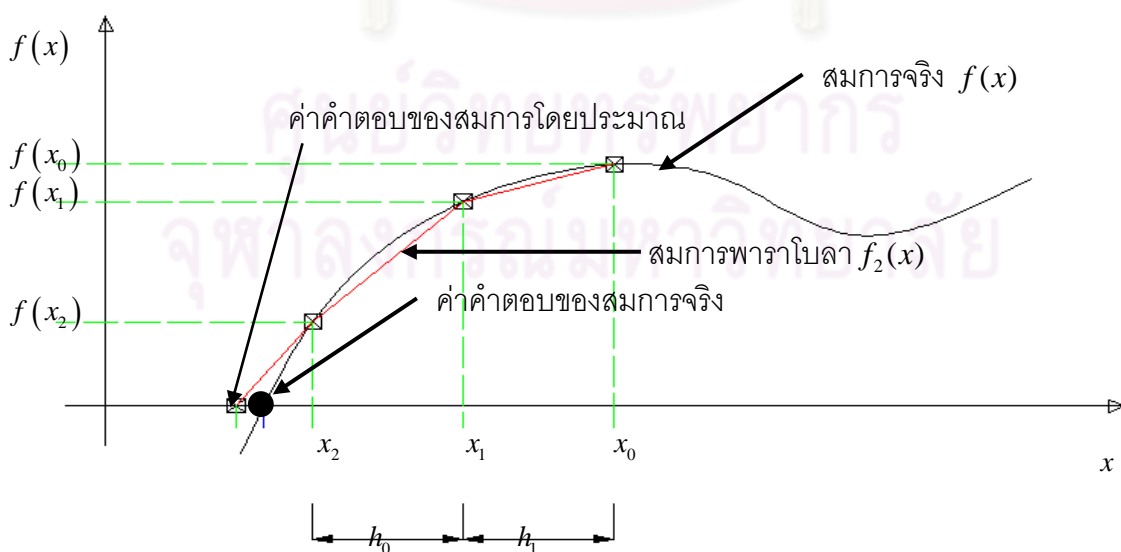
1. วิธีประมาณค่าลักษณะเฉพาะด้วยวิธีมุลเลอร์

เนื่องจากค่า $\text{Det}(D)=0$ ในสมการที่ 3.5 สามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการทั่วไปได้ ดังนั้นคำตอบของสมการสามารถประมาณค่าได้จากวิธีดังต่อไปนี้

วิธีมุลเลอร์เป็นวิธีการประมาณคำตอบของสมการโดยพัฒนามาจากวิธี Secant แสดงดังรูปที่ ข.1 โดยที่วิธีมุลเลอร์จะสร้างจุดตัดสมการ 3 จุดเพื่อสร้างสมการพาราโบลาในการประมาณค่าถัดไป ดังแสดงตามรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.1 วิธีประมาณคำตอบโดยวิธี Secant



รูปที่ ข.2 วิธีประมาณคำตอบโดยวิธีมุลเลอร์

วิธีมูลเลอร์เริ่มต้นจากกำหนดสมการพาราโบลาเพื่อใช้ในการหาคำตอบของสมการจริงดังสมการที่

$$f_2(x) = a(x - x_2)^2 + b(x - x_2) + c \quad (ข.1)$$

จากนั้นสมมติตัวแปร x_0, x_1 , และ x_2 และแทนลงในสมการจริง $f(x)$ ซึ่งจะได้ $f(x_0), f(x_1)$, และ $f(x_2)$ ช่วงผลต่างระหว่างจุด 0 กับ 1 และ 1 กับ 2 จะได้

$$h_0 = x_1 - x_0 \quad (ข.2ก)$$

$$h_1 = x_2 - x_1 \quad (ข.2ข)$$

ความชันระหว่างจุด 0 กับ 1 และ 1 กับ 2 จะได้

$$\delta_0 = \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} \quad (ข.3ก)$$

$$\delta_1 = \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \quad (ข.3ข)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ในสมการพาราโบลา

$$a = \frac{\delta_1 - \delta_0}{h_1 + h_0}$$

$$b = ah_1 + \delta_1$$

$$c = f(x_2) \quad (ข.4)$$

ค่าคำตอบของสมการโดยประมาณ

$$x_3 = x_2 - \frac{2c}{b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}} \quad (ข.5)$$

โดยที่ x_3 ค่าคำตอบของสมการโดยประมาณหรือค่าถัดไปในการหาค่าคำตอบของสมการโดยประมาณ

ค่าความคลาดเคลื่อน

$$\%error = 100 \times \left(\frac{x_3 - x_2}{x_3} \right) \quad (ข.6)$$

จากนั้นทำวนซ้ำจากสมการที่ ข.1-ข.6 จนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนจะอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือค่าคำตอบของสมการโดยประมาณมีค่าเข้าใกล้ศูนย์

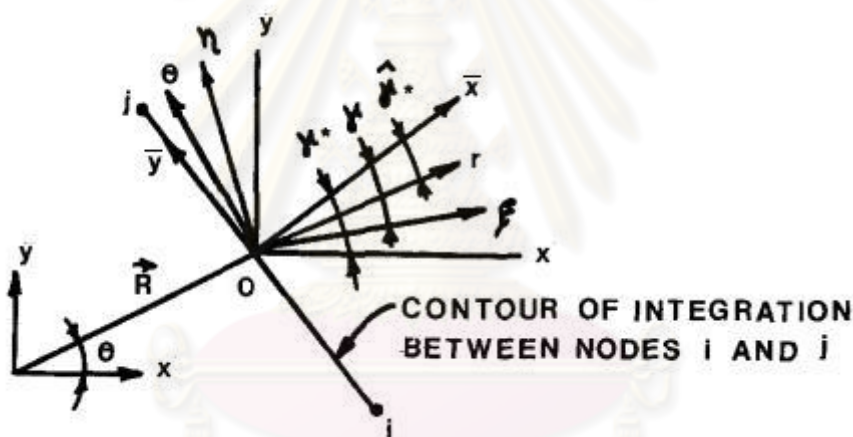
2. วิธีการแปลงพิกัดของค่าความเค้นและการขจัด

ในการแปลงผลของค่าความเค้นและการขจัดแสดงอยู่ในพิกัด $x-y$ หรือ $r-\theta$ ให้อยู่ในพิกัดตั้งฉาก $n-s$ นั้น จำเป็นต้องใช้เมทริกซ์แปลงพิกัด (transformation matrix) เป็นตัวคูณ

เพื่อให้ได้ผลของค่าความเค้นและการขจัดอยู่ในพิกัด $n-s$ และเมทริกซ์แปลงพิกัดประกอบด้วยฟังก์ชันตรีโกณมิติดังแสดงในสมการที่ (ข.7) โดยอ้างอิงจากสมการที่ 3.37

$$a = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & \sin(\gamma) & 0 & 0 & 0 \\ -\sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos^2(\gamma) & 2\cos(\gamma)\sin(\gamma) & \sin^2(\gamma) \\ 0 & 0 & -\sin(\gamma)\cos(\gamma) & (\cos^2(\gamma) - \sin^2(\gamma)) & \sin(\gamma)\cos(\gamma) \end{bmatrix} \dots(ข.7)$$

ค่ามุมแกมมา γ ในสมการ ข.7 จะสามารถหาได้จากรูปที่ ข-1 เวกเตอร์ ij ที่เกิดจากจุด i และ j (พิกัด $x-y$) บนวิถีภายนอกของค่าความเค้นและการขจัด (หมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา) โดยที่ตำแหน่งของจุดกลางของเวกเตอร์จะเป็นจุดอ้างอิงทำให้เกิดมุม θ ในพิกัด $x-y$ และทิศทางของเวกเตอร์นี้จะทำให้เกิดพิกัดที่ตั้งฉากกับเวกเตอร์ (ระนาบ $\bar{x}-\bar{y}$) และมุม θ ในพิกัด $x-y$ และพิกัด $\bar{x}-\bar{y}$ จะถูกใช้อ้างอิงในการหาค่ามุมแกมมาได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ ข.3 พิกัดใดๆ (Carpenter, 1984)

สำหรับกรณีแปลงค่าความเค้นและระยะการขจัดในพิกัด $x-y$ เป็นพิกัด $n-s$

ค่ามุมแกมมาสำหรับกรณีแปลงพิกัดค่าความเค้นและการขจัดในพิกัด $x-y$ เป็นพิกัด $n-s$ ซึ่งหาได้จากการลากเส้นตัดระหว่างเส้นของแกน x ในพิกัด $x-y$ กับเส้นของแกน \bar{x} ในพิกัด $\bar{x}-\bar{y}$ เกิดเป็นมุม $x\hat{o}\bar{x}$ หรือมุม γ^* แสดงดังรูปที่ ข.3 ดังนั้นค่าความเค้นและการขจัดจากผลการวิเคราะห์จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในพิกัดตั้งฉาก, $[Y_{FEM}^{n-s}]$ จะสามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

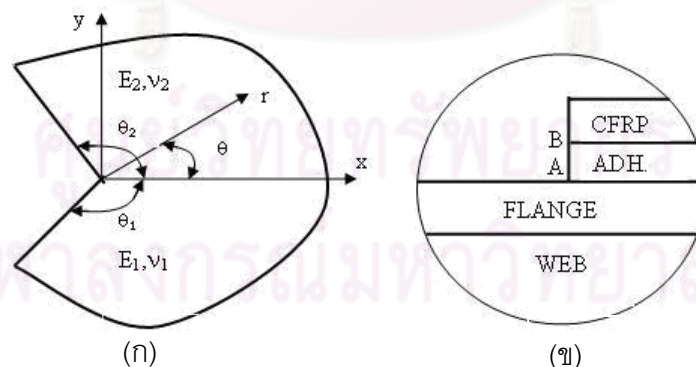
$$[Y_{FEM}^{n-s}] = \begin{bmatrix} \cos(\gamma^*) & \sin(\gamma^*) & 0 & 0 & 0 \\ -\sin(\gamma^*) & \cos(\gamma^*) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos^2(\gamma^*) & 2\cos(\gamma^*)\sin(\gamma^*) & \sin^2(\gamma^*) \\ 0 & 0 & -\sin(\gamma^*)\cos(\gamma^*) & (\cos^2(\gamma^*) - \sin^2(\gamma^*)) & \sin(\gamma^*)\cos(\gamma^*) \end{bmatrix} [Y_{FEM}] \quad (7.8)$$

สำหรับกรณีแปลงค่าความเค้นและการขจัดในพิกัด $r-\theta$ เป็นพิกัด $n-s$

ค่ามุมแกนมาสำหรับกรณีแปลงพิกัดค่าความเค้นและการขจัดในพิกัด $r-\theta$ เป็นพิกัด $n-s$ ซึ่งหาได้จากการลากเส้นตัดระหว่างเส้นของแกน r ในพิกัด $r-\theta$ (โดยที่พิกัด $r-\theta$ จะหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกาจากพิกัด $x-y$ เป็นมุม $\frac{\pi}{2}-\theta$) กับเส้นของแกน \bar{x} ในพิกัด $\bar{x}-\bar{y}$ เกิดเป็นมุม $\hat{\gamma}$ หรือมุม $\hat{\gamma}^*$ แสดงดังรูปที่ ข.3 ดังนั้นเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ (eigenvector, $V_j(\lambda_j)$) ในพิกัดตั้งฉาก, $[Y_{eig}^{n-s}]$ จะสามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$[Y_{eig}^{n-s}] = \begin{bmatrix} \cos(\hat{\gamma}^*) & \sin(\hat{\gamma}^*) & 0 & 0 & 0 \\ -\sin(\hat{\gamma}^*) & \cos(\hat{\gamma}^*) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos^2(\hat{\gamma}^*) & 2\cos(\hat{\gamma}^*)\sin(\hat{\gamma}^*) & \sin^2(\hat{\gamma}^*) \\ 0 & 0 & -\sin(\hat{\gamma}^*)\cos(\hat{\gamma}^*) & (\cos^2(\hat{\gamma}^*) - \sin^2(\hat{\gamma}^*)) & \sin(\hat{\gamma}^*)\cos(\hat{\gamma}^*) \end{bmatrix} (V_j(+\lambda_j))c_k \quad (7.9)$$

3. การคำนวณค่าความเข้มของความเค้นด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้เอลิเมนต์ขนาดละเอียดรอบจุดเอกฐาน



รูปที่ ข.4 พิจารณาบริเวณปลายรูปลิ่มของสองวัสดุในงานวิจัยนี้ (ก) ลิ่มของสองวัสดุ และ (ข) ภาพแสดงความเค้นเอกฐานที่ปลายแผ่นจุด A และจุด B (อัศวินทร์ เล่นวารี, 2002)

เมื่อสองวัสดุที่มีคุณสมบัติต่างกันยึดติดกันคล้ายรูปลิ่มนั้นคือลิ่มของสองวัสดุดังแสดงในรูปที่ ข.4(ก) โดยจุดกำเนิดของแกน x และแกน y ในรูปที่ ข.4(ก) หรือจุด A และ B ในรูปที่ ข.4(ข)

นั่นคือจุดเอกฐานของลิ้มของสองวัสดุ ดังนั้นความเค้นที่จุดเอกฐานจะเรียกว่า “ความเค้นเอกฐาน”
ความเค้นเอกฐานที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำใดๆ และอยู่ในเงื่อนไขของสมมุติฐานความยืดหยุ่นเชิงเส้นจะเขียนสมการสนามความเค้นรอบจุดเอกฐาน

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \sum_{k=1}^N \frac{K}{r^{1-\lambda_k}} \cdot f_{ijk}(\theta) + \sigma_{ijo}(\theta) \quad (ข.10)$$

โดยที่ r, θ คือรัศมีรอยร้าวและมุมที่ทำกับระนาบของรอยร้าวในระบบพิกัดเชิงขั้ว

$\sigma_{ij}(r, \theta)$ คือค่าความเค้นตามแนวของรัศมีรอยร้าวกับมุมที่ทำกับระนาบของรอยร้าว

K คือค่าความเข้มของความเค้น

N คือจำนวนของค่าลักษณะเฉพาะ

$f_{ijk}(\theta)$ คือฟังก์ชันไร้มิติที่ขึ้นกับมุมที่ทำกับระนาบของรอยร้าว

$\sigma_{ijo}(\theta)$ คือความเค้น

พิจารณาค่ามุมที่ทำกับระนาบของรอยร้าวเท่ากับ 0° และ $N=1$ สนามความเค้นรอบจุดเอกฐาน A จะถูกเขียนใหม่เป็น

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \frac{Q_{ij}}{r^{1-\lambda_k}} \quad (ข.11)$$

ให้ $Q_{ij} = K \cdot f_{ijk}(0^\circ)$

ดังนั้นค่าความเข้มของความเค้นตามแนวผิวสัมผัสของสองวัสดุเป็น

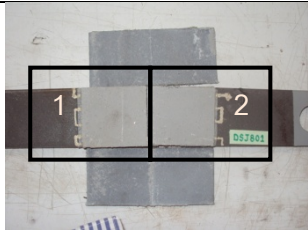
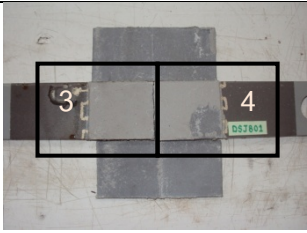
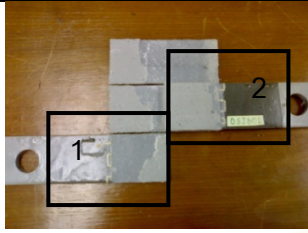
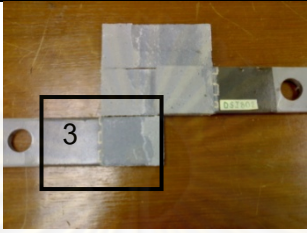
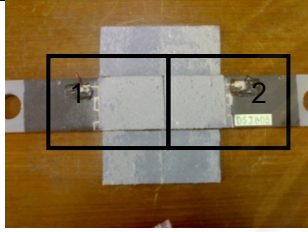
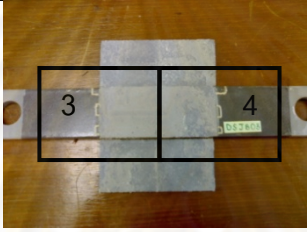
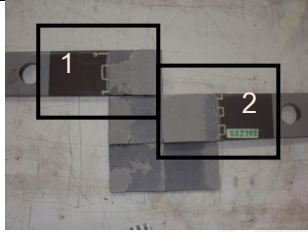

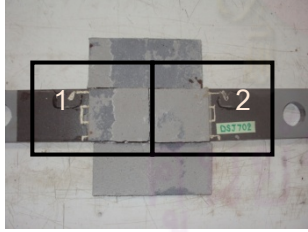
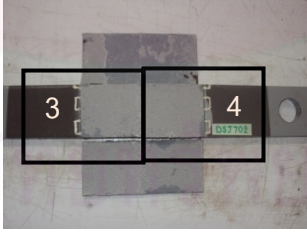
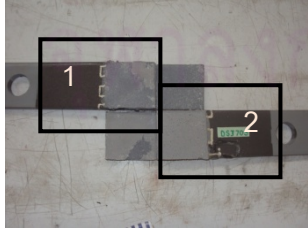
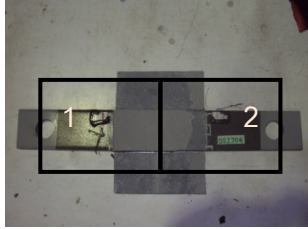
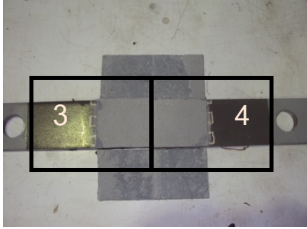
$$Q_{ij} = \lim_{r \rightarrow \infty} (\sigma_{ij}(r, \theta) r^{1-\lambda_k}) \quad (ข.12)$$

จากผลการวิเคราะห์โมเดลชนิดเอลิเมนต์ขนาดเล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะได้ค่าความเค้นบนระนาบเชิงขั้ว ($\sigma_{rr}, \sigma_{r\theta}, \sigma_{\theta\theta}$) ที่เกิดขึ้นในระยะของผิวสัมผัสระหว่างผิวเหล็กกับชั้นวัสดุประสาน (r) จากนั้นนำค่าที่ได้มาพล็อตในกราฟชนิด log-log scale แล้วเลือกช่วงของกราฟที่เป็นเส้นตรงมากที่สุดหรือเป็นบริเวณเอกฐานเด่น (singularity dominated-zone) เพื่อหาค่าความชันของเส้นตรง ($\alpha_1 = 1 - \lambda_1$) และคำนวณค่าความเข้มของความเค้น ($Q_{rr}, Q_{r\theta}, Q_{\theta\theta}$) จากสมการที่ ข.11 หรือใช้ทฤษฎีลิมิตดังสมการที่ ข.12

4. ลักษณะรูปแบบความเสียหายของรอยต่อแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่

ลักษณะรูปแบบการความเสียหายของการทดลองแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่แสดงดังตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 ลักษณะรูปแบบความเสียหายของแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตร

DSJ	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	No.	ด้าน	ลักษณะความเสียหาย	%ความเสียหาย
801			1	ล	6	5
			2	น	6	5
			3	น	6	5
			4	ล	1	25
802			1	น	1	70
			2	ล	1	10
			3	ล	1	75
803			1	น	1	10
			2	น	1	10
			3	ล	6	5
			4	ล	1	25
701			1	น	1	20
			2	น	1	20
			3	ล	1	25
702			1	น	1	30
			2	น	2	5
			3	ล	1	10
			4	ล	1	10
703			1	ล	5	90
			2	น	6	5
704			1	น	6	5
			2	น	1	25
			3	ล	1	10
			4	ล	1	10

ตารางที่ ข.1 แสดงลักษณะรูปแบบความเสียหายของแผ่นเหล็กประกบกับคูแบบสมมาตร (ต่อ1)

DSJ	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	No.	ด้าน	ลักษณะความเสียหาย	%ความเสียหาย
651			1	น	6	5
			2	น	6	5
			4	ล	1	10
652			1	น	6	5
			2	ล	1	25
653			1	น	1	10
			2	น	6	5
			4	ล	5	50
654			1	ล	1	50
			2	น	1	10
601			1	น	1	5
			2	ล	6	5
			3	ล	1	10
602			1	น	5	40
			2	ล	1	10
603			1	ล	6	5
			2	ล	1	10
			4	น	6	5

ตารางที่ ข.1 แสดงลักษณะรูปแบบความเสียหายของแผ่นเหล็กประกบกับคูแบบสมมาตร (ต่อ2)

DSJ	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	No.	ด้าน	ลักษณะความเสียหาย	%ความเสียหาย
501			1	ล	6	5
			2	น	1	30
502			1	ล	1	5
			2	น	6	5
503			1	น	6	5
			2	ล	1	40
			4	น	6	5
401			1	ล	6	5
			2	ล	1	5
			4	น	2	5
402			1	น	1	10
			2	ล	6	5
403			1	ล	6	5
			2	ล	6	5
			4	น	1	5
404			1	ล	6	5
			2	น	1	10

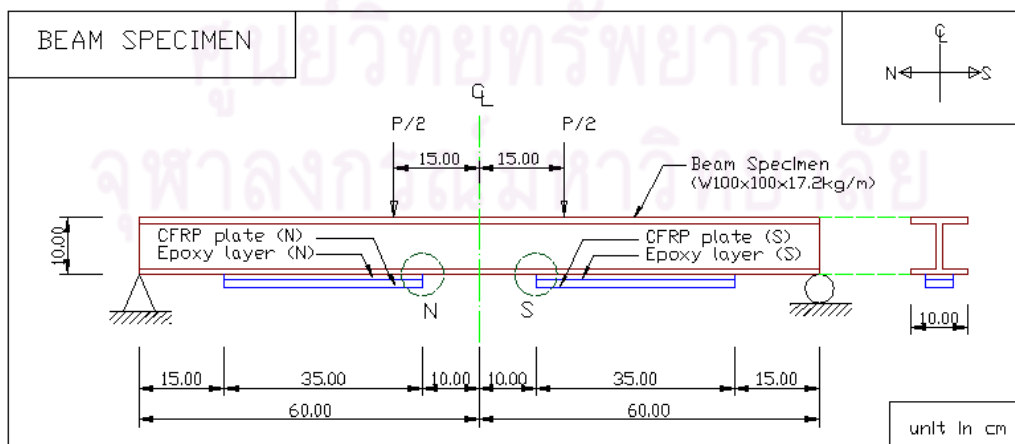
จากตารางที่ ๕.1 สดมภ์ที่ 2 และ 3 คือภาพด้านข้างทั้งสองด้านของแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตรหลังจากการทดลองภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ สดมภ์ที่ 4 คือรูปในกรอบของสดมภ์ที่ 2 และ 3 สดมภ์ที่ 5 บอกด้านของแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตรจากรูปในกรอบสดมภ์ที่ 3 (น = ด้านหน้า, ล = ด้านหลัง) ตัวเลขที่แสดงในสดมภ์ที่ 4 อธิบายกรณีความเสียหายของแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตรหลังจากการทดลอง (จากตารางที่ 5.2) และสดมภ์ที่ 5 อธิบายเปอร์เซ็นต์ความเสียหาย โดยประมาณจากพื้นที่ของวัสดุประสานในระยะทาบที่หายไปต่อพื้นที่วัสดุประสานในระยะทาบแบบเต็มบริเวณระยะทาบในแผ่นเหล็กรับแรงตามแนวแกน (inner plate)

5. กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำ

กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำคือพฤติกรรมของตัวอย่างทดลอง และกราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำแสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

5.1 กรณีการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่

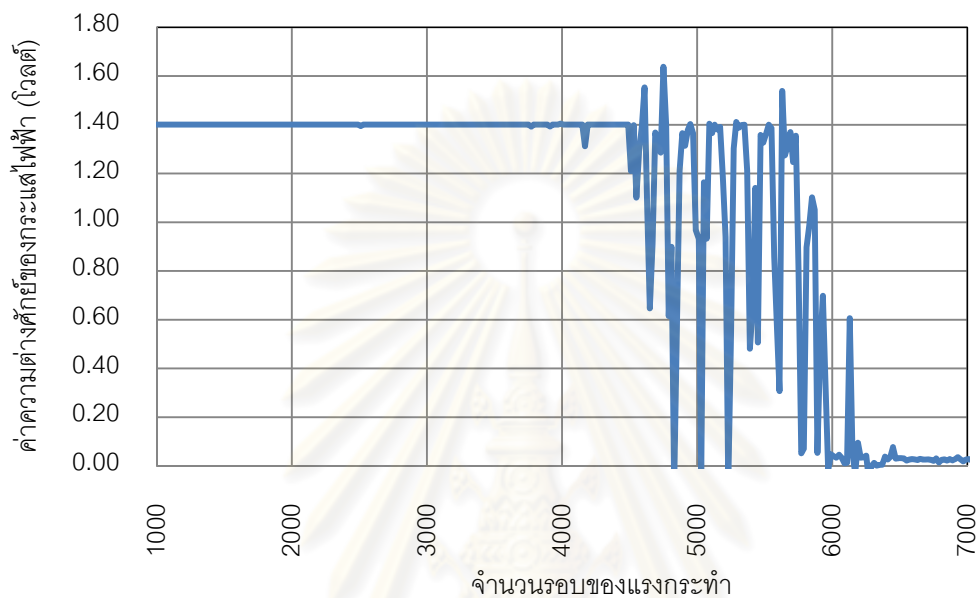
ในการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังจะแสดงผลกราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในทิศเหนือ (N) และทิศใต้ (S) จากปลายแผ่นเสริมกำลังทั้ง 2 แผ่นดังรูปที่ ๕.5



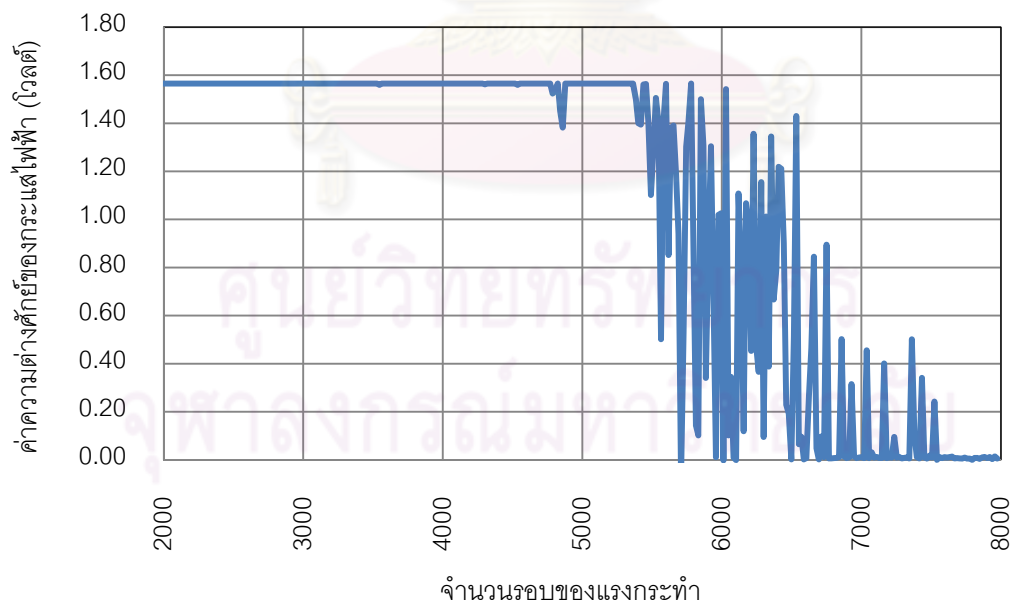
รูปที่ ๕.5 แสดงทิศของปลายแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในคานเหล็กที่แสดงกราฟสัญญาณค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำ

จากรูปที่ ข.5 ทิศของปลายแผ่นเสริมกำลังนำมาต่อท้ายกับชื่อตัวอย่างการทดลองเพื่อแสดงกราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำของปลายแผ่นเสริมกำลังในคานเหล็กที่เสริมกำลังได้เช่น BSC901N

ผลกราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำของคานเหล็กที่เสริมกำลังจำนวน 11 ตัวอย่าง (จำนวน 21 กราฟสัญญาณ) แสดงดังรูปที่ ข.6 – ข.16

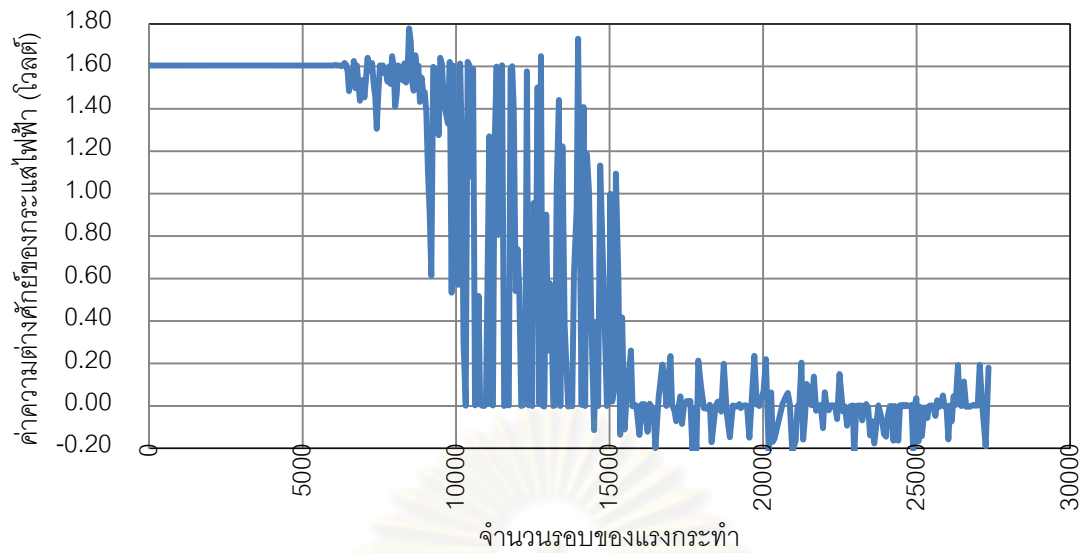


(ก) BSC901N (sampling frequency 10 Hz)

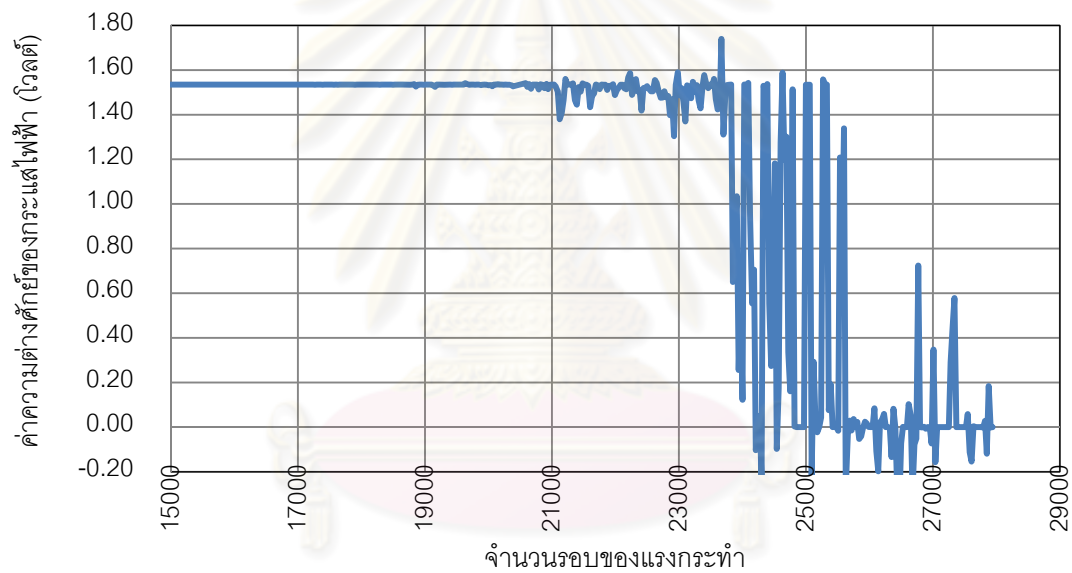


(ข) BSC901S (sampling frequency 10 Hz)

รูปที่ ข.6 กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง BSC901



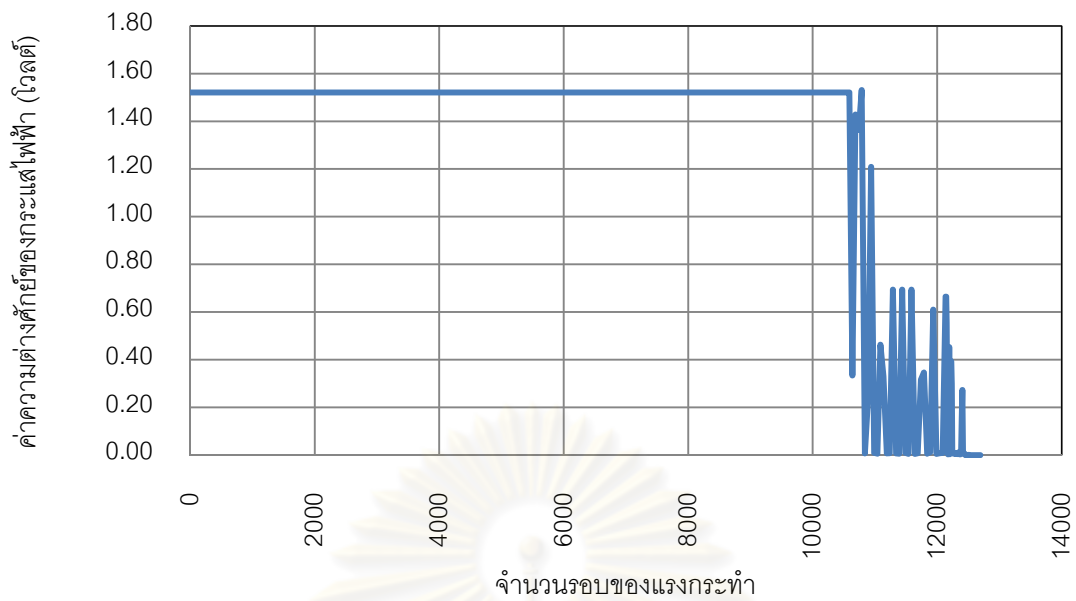
(ก) BSC801N (sampling frequency 5 Hz)



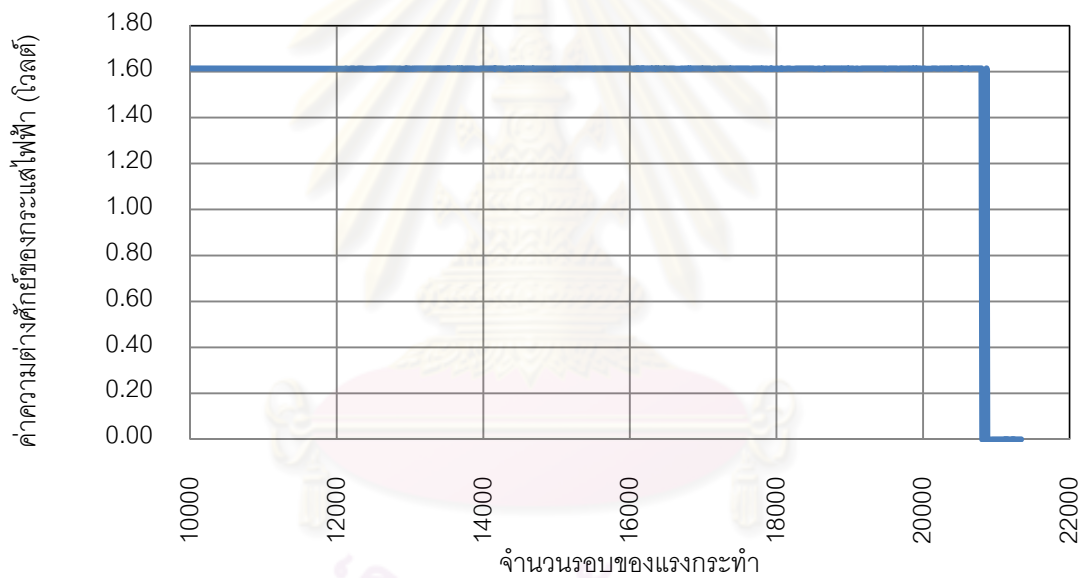
(ข) BSC801S (sampling frequency 5 Hz)

รูปที่ ข.7 กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง BSC801

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



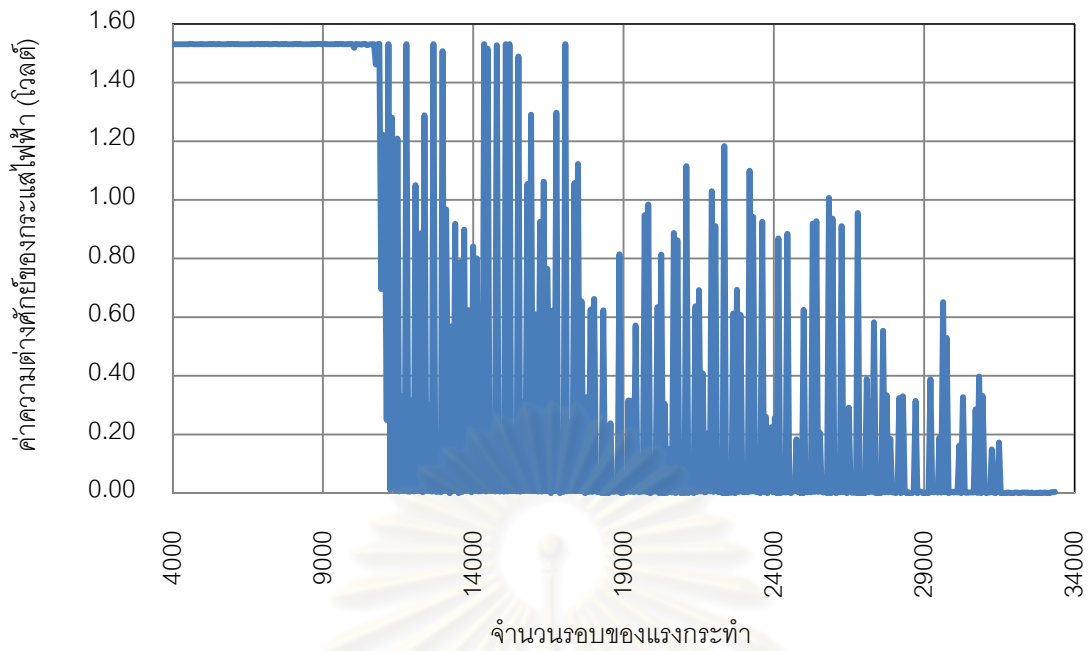
(n) BSC802N (sampling frequency 5 Hz)



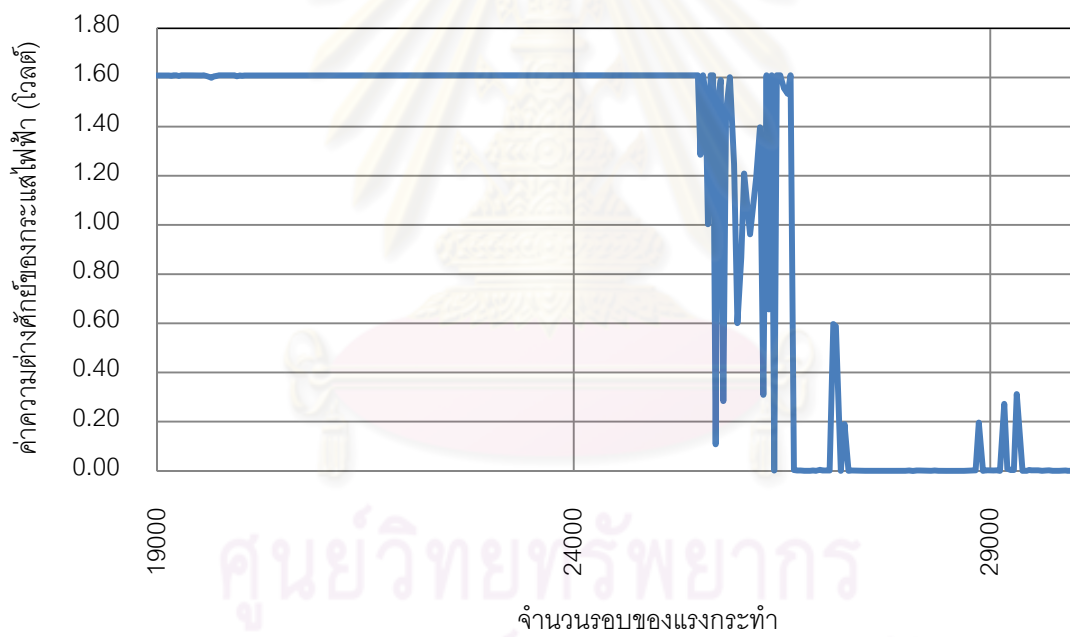
(ข) BSC802S (sampling frequency 5 Hz)

รูปที่ ๗.8 กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง BSC802

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

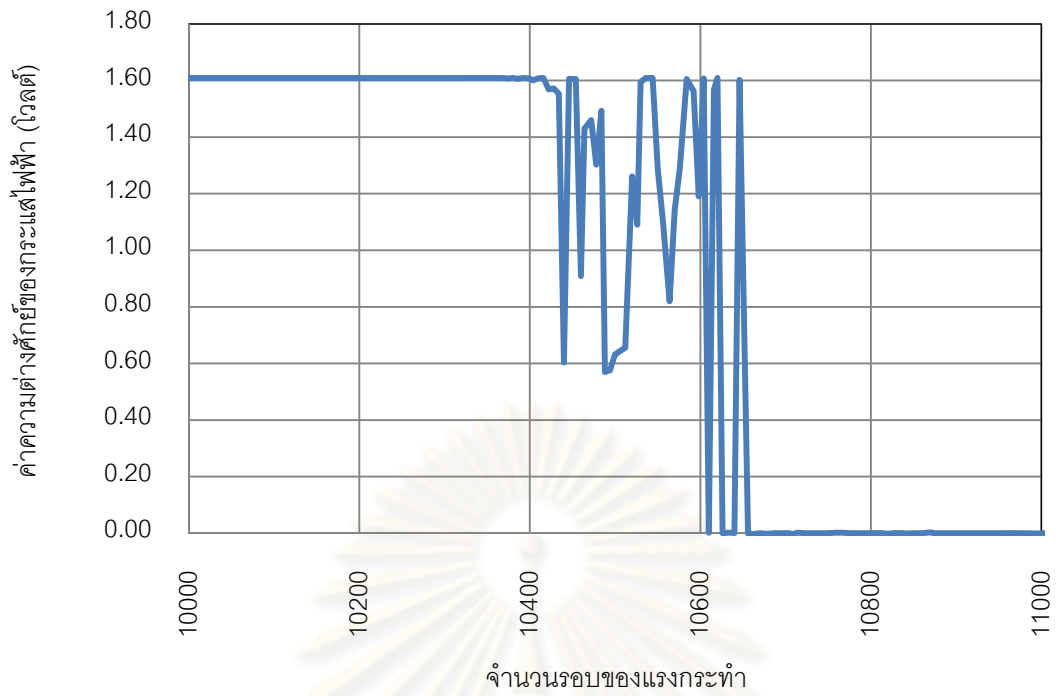


(ก) BSC651N (sampling frequency 3 Hz)

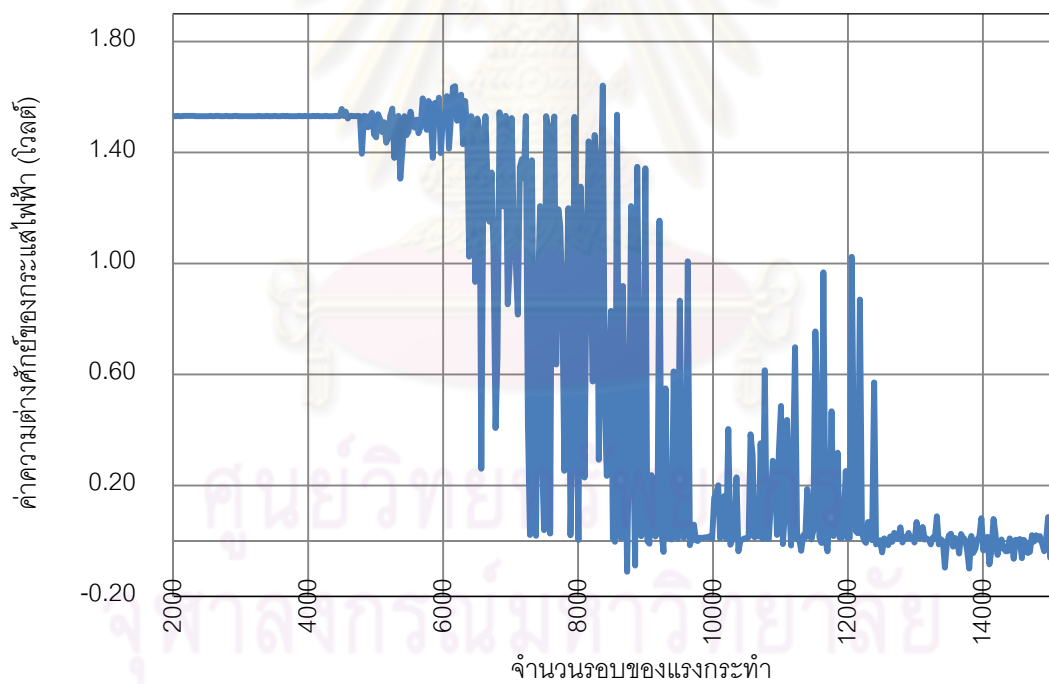


(ข) BSC651S (sampling frequency 3 Hz)

รูปที่ ๑.๙ กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง BSC651

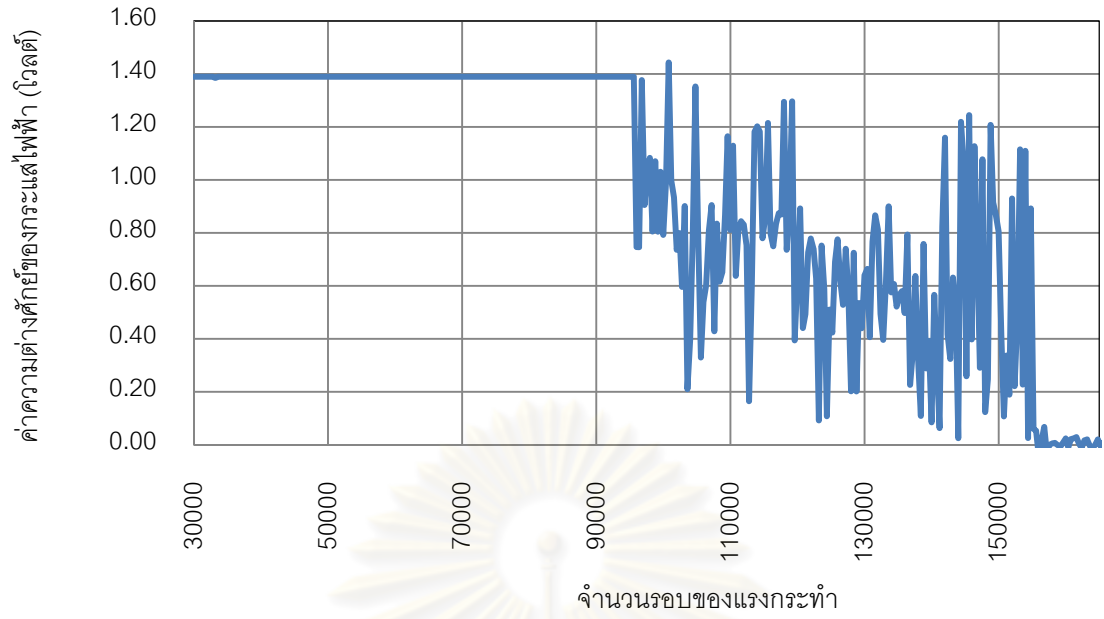


(ก) BSC652N (sampling frequency 3 Hz)

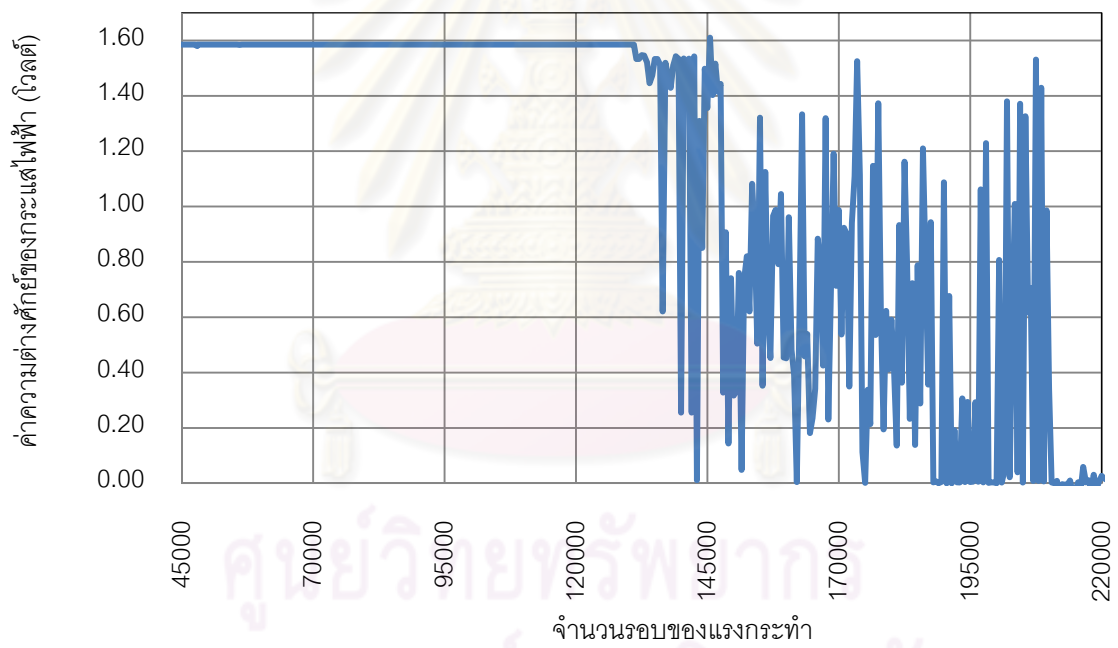


(ข) BSC652S (sampling frequency 3 Hz)

รูปที่ ข.10 กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง BSC652

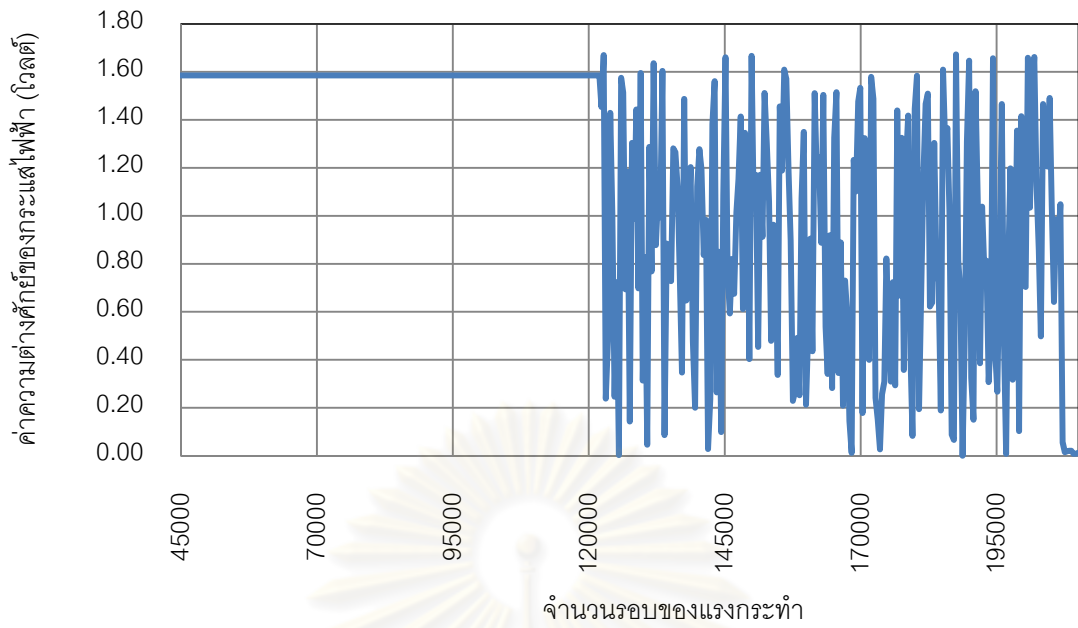


(ก) BSC601N (sampling frequency 10 Hz)

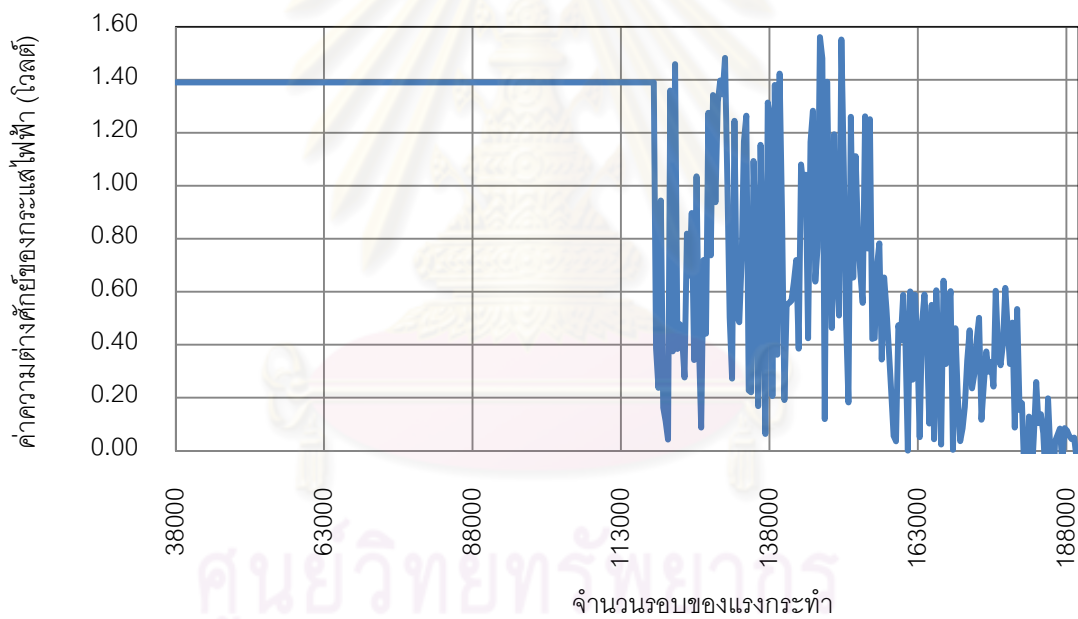


(ข) BSC601S (sampling frequency 10 Hz)

รูปที่ 11.11 กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง BSC601

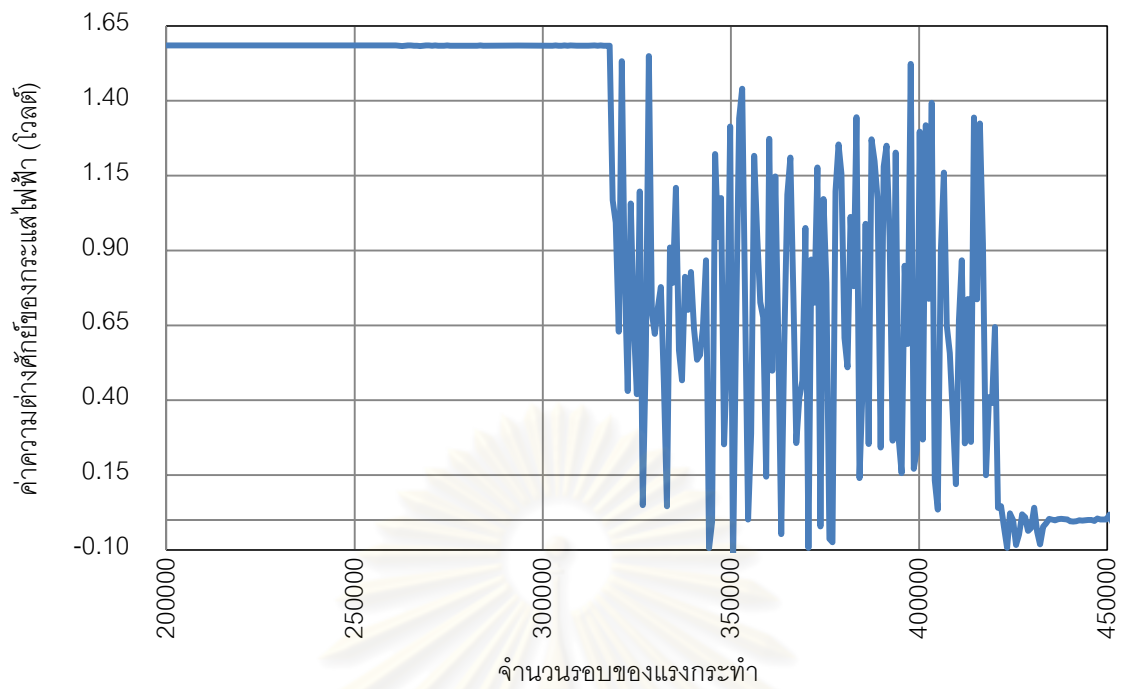


(ก) BSC602N (sampling frequency 20 Hz)

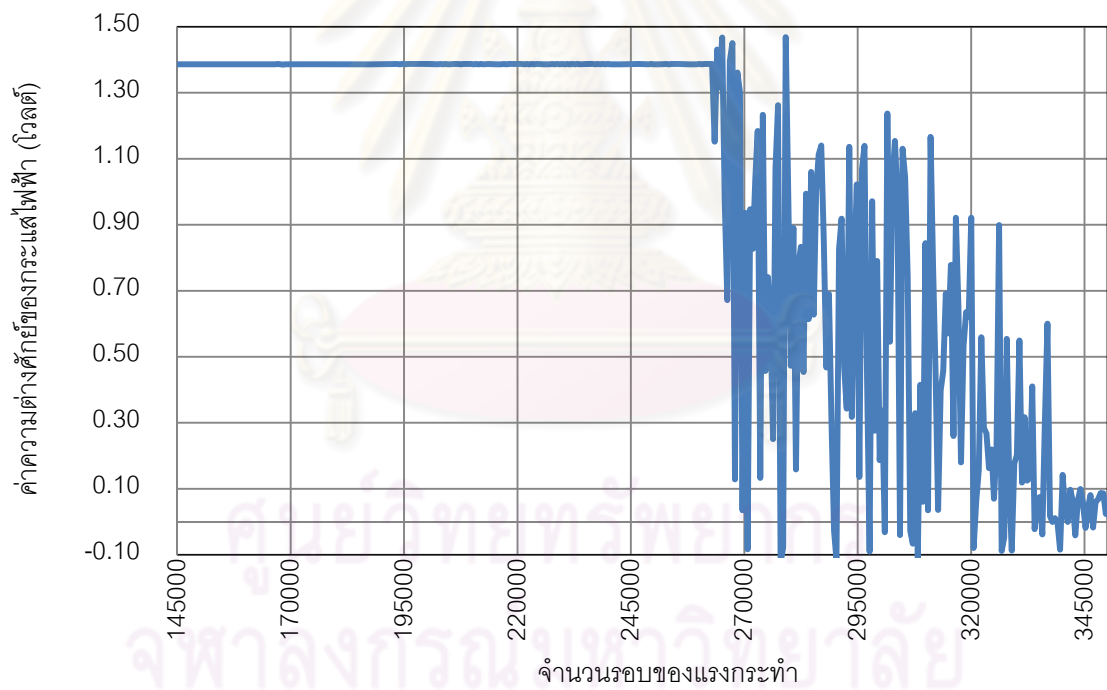


(ข) BSC602S (sampling frequency 20 Hz)

รูปที่ ข.12 กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง BSC602

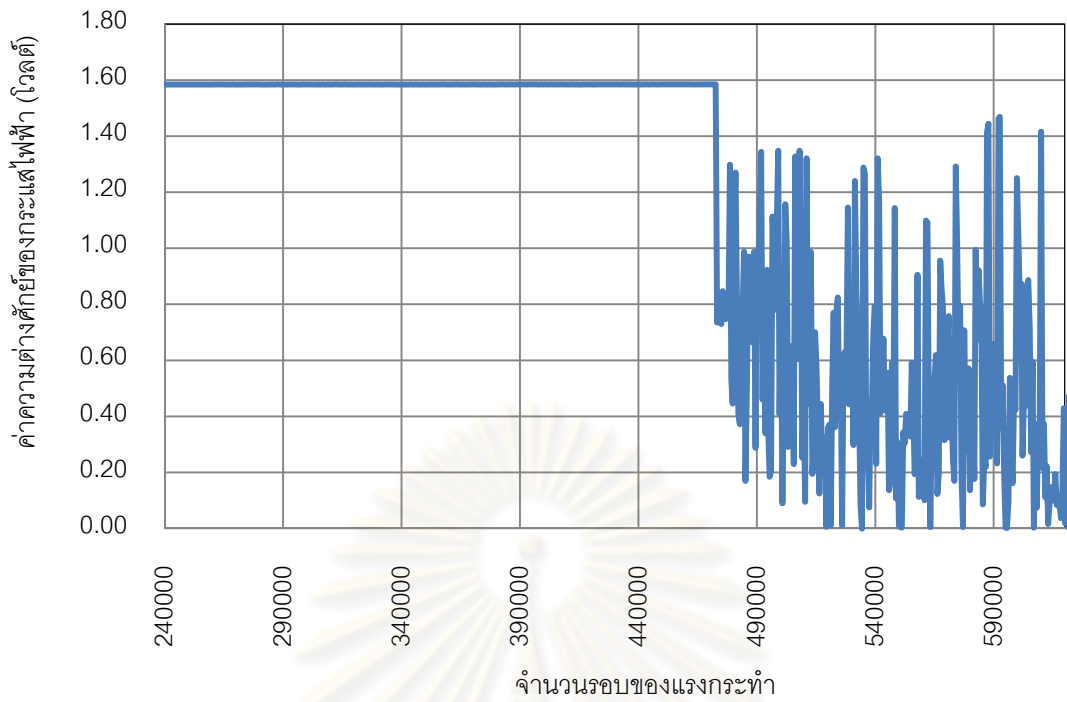


(ก) BSC501N (sampling frequency 20 Hz)

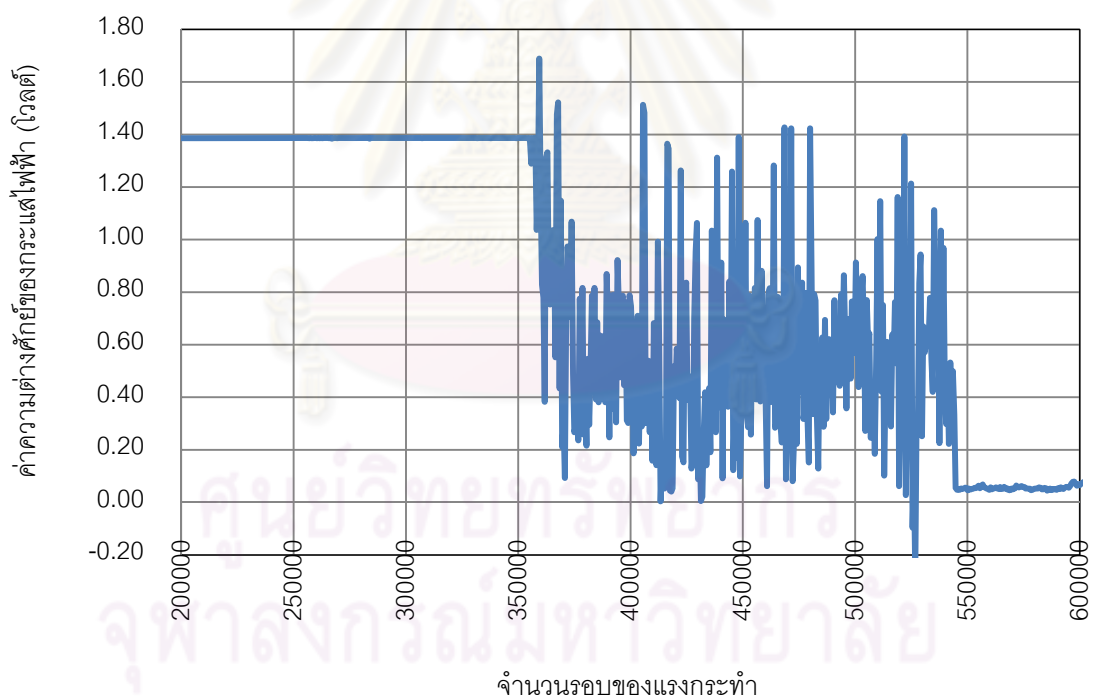


(ข) BSC501S (sampling frequency 20 Hz)

รูปที่ ข.13 กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง BSC501

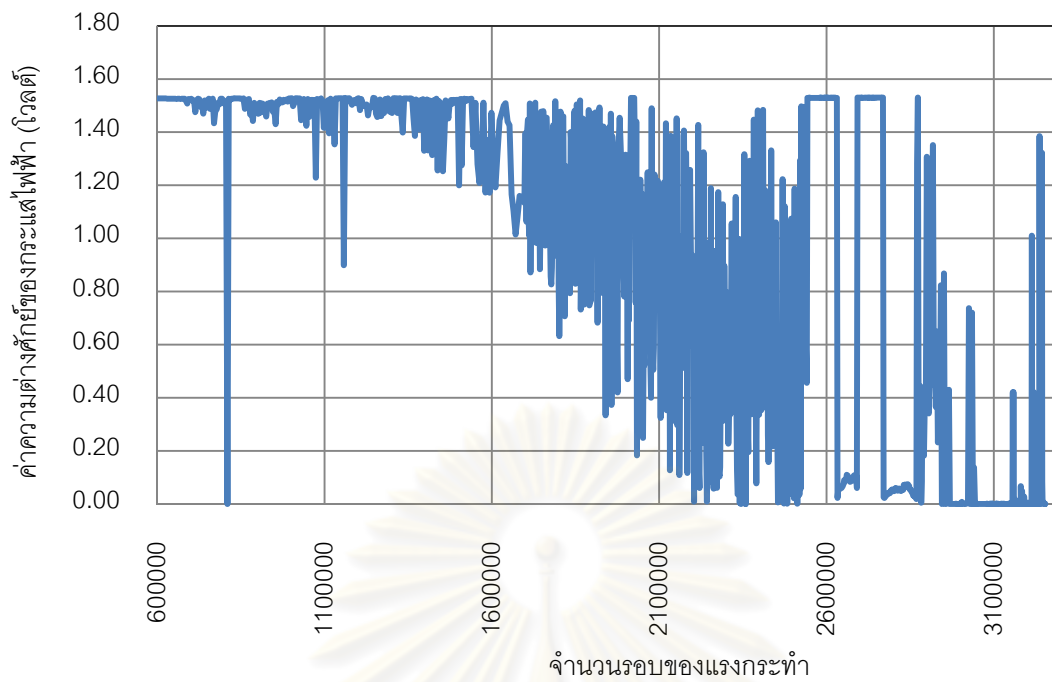


(ก) BSC502N (sampling frequency 10 Hz)

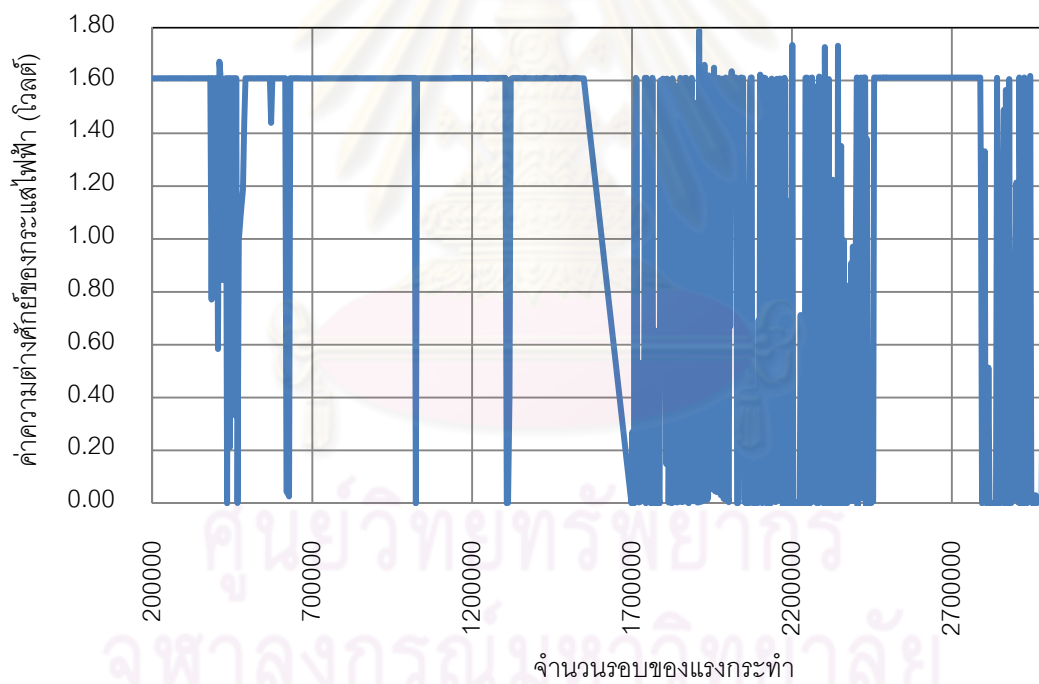


(ข) BSC502S (sampling frequency 10 Hz)

รูปที่ ข.14 กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง BSC502



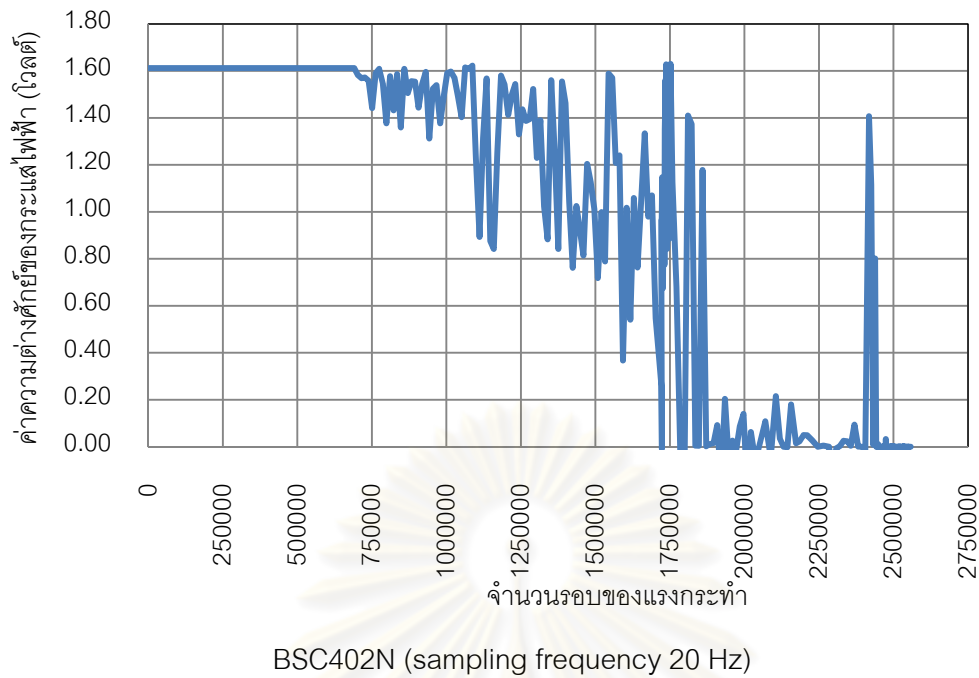
(ก) BSC401N (sampling frequency 20 Hz)



(ข) BSC401S (sampling frequency 20 Hz)

(หมายเหตุ : แบตเตอรี่รีชาร์จในช่วง 1550000 ถึง 1700000)

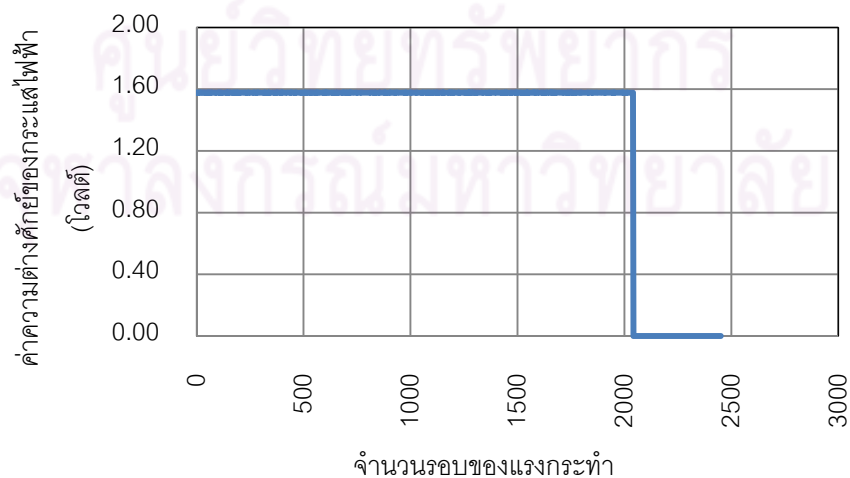
รูปที่ ข.15 กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง BSC401



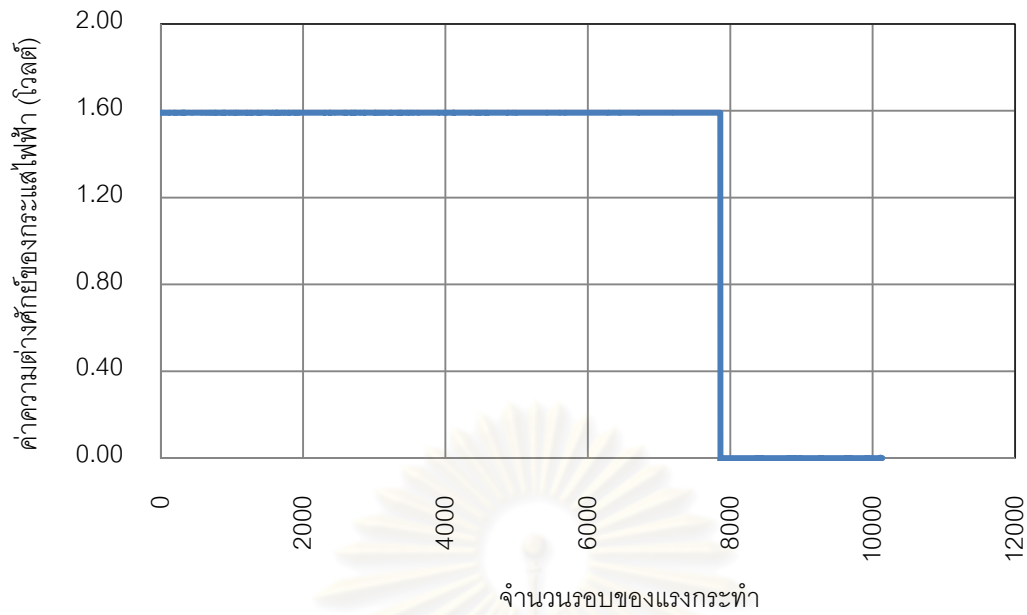
รูปที่ ข.16 กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง BSC402

5.2 กรณีการทดลองแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่

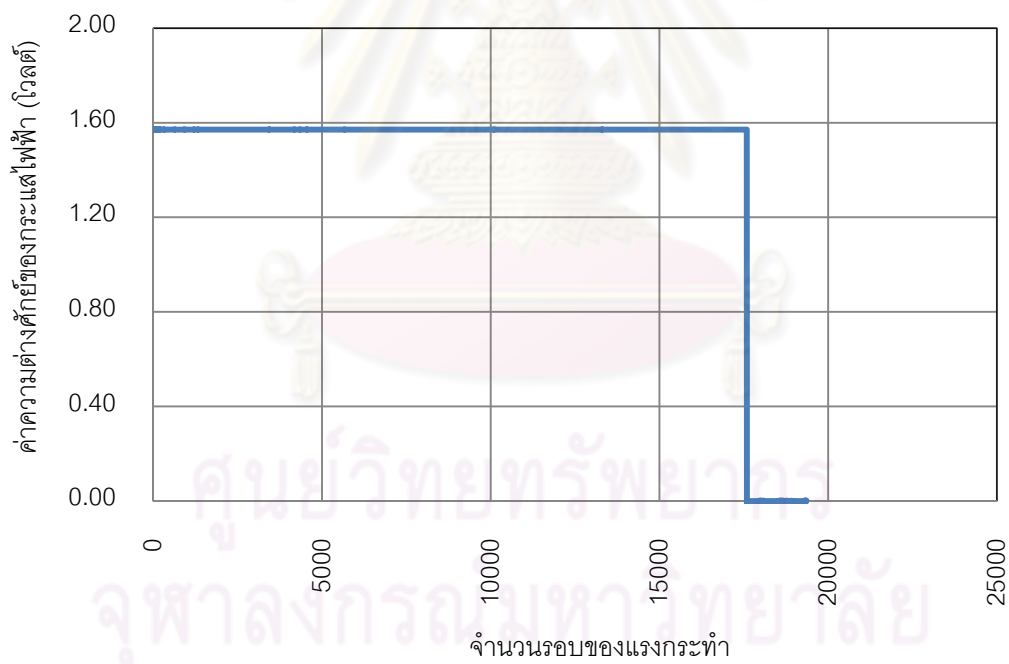
เนื่องจากพฤติกรรมการวิบัติของแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรมี 2 ช่วง (ระยะกำเนิดรอยร้าวและระยะวิบัติ) ดังนั้นงานวิจัยนี้ขอนำเสนอกาฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำของแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรที่เกิดการวิบัติจำนวน 6 ตัวอย่าง จาก 21 ตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ ข.17 – ข.22



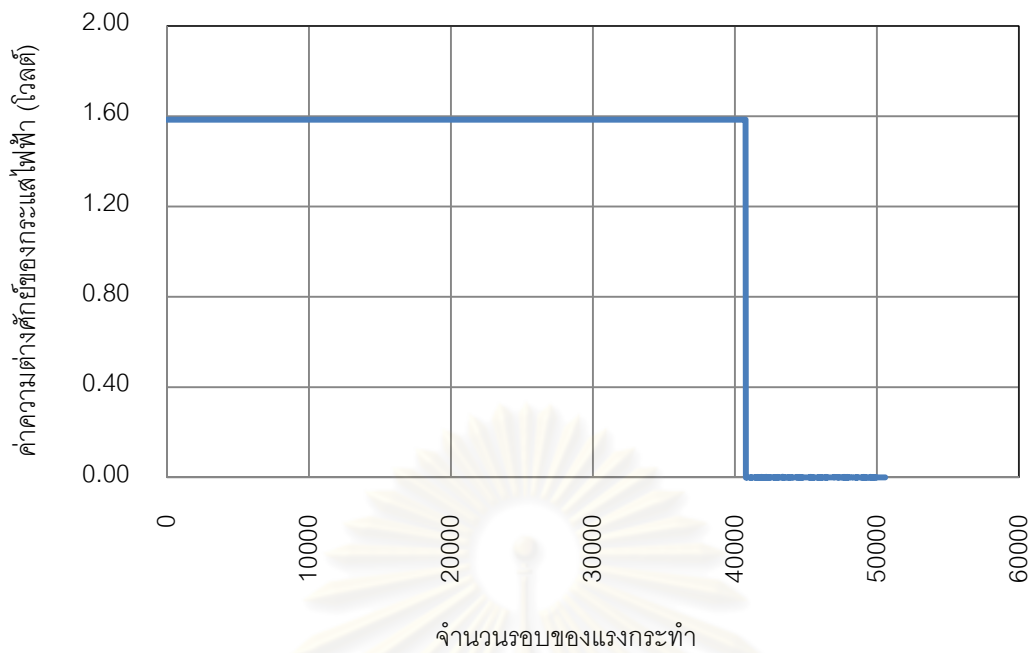
รูปที่ ข.17 กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง DSJ803 (sampling frequency 2 Hz)



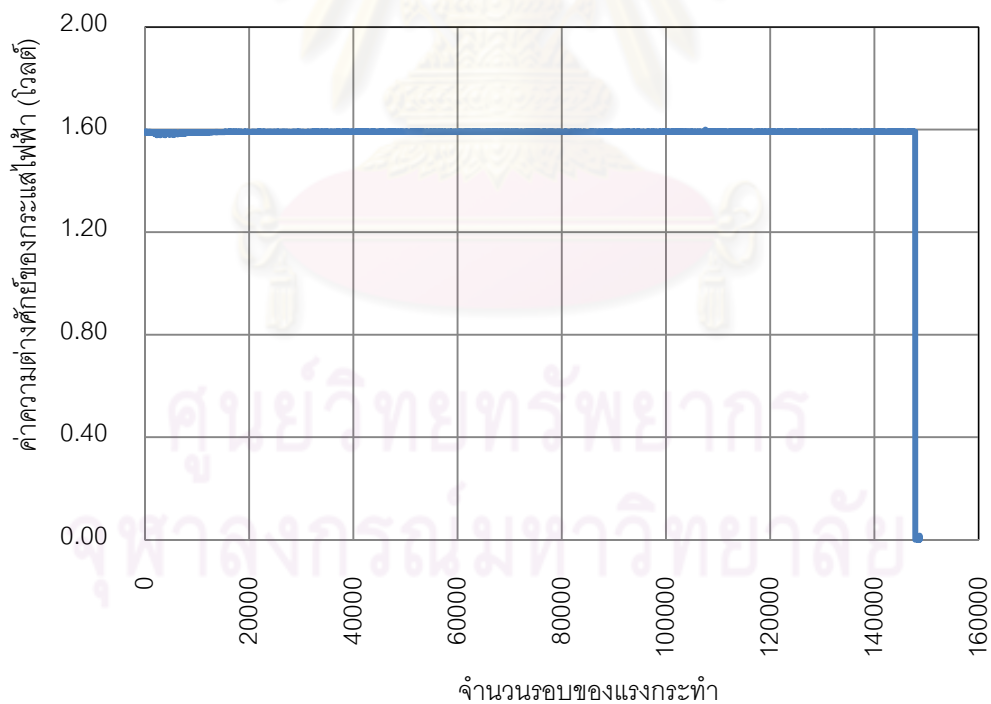
รูปที่ ข.18 กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง DSJ704
(sampling frequency 2 Hz)



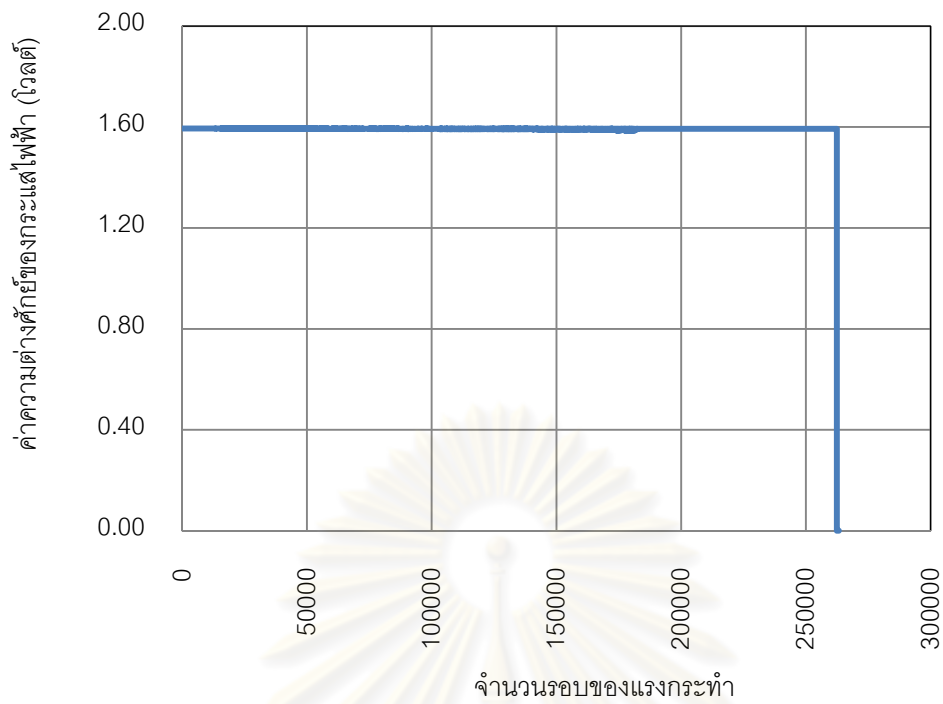
รูปที่ ข.19 กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง DSJ652
(sampling frequency 2 Hz)



รูปที่ ข.20 กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง DSJ603 (sampling frequency 5 Hz)



รูปที่ ข.21 กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง DSJ501 (sampling frequency 2 Hz)



รูปที่ ข.22 กราฟสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากับจำนวนรอบของแรงกระทำในตัวอย่าง DSJ403
(sampling frequency 10 Hz)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ประวิทย์ สันติสุขโพธา เกิดเมื่อวันที่ 19 ธันวาคม พุทธศักราช 2527 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาโยธา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒในปีการศึกษา 2549 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญา มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2550



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย