

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



249598

พฤติกรรมกรรหูคุดอนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในคอนกรีตที่เสริมกำลังภายใต้แรง  
กระทำเป็นรอบบนผลึกเกลือ

นายประวิทย์ สันติสุขโตธา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2553  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



พฤติกรรมการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในคานเหล็กที่เสริมกำลังภายใต้แรง  
กระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่



นายประวิทย์ สันติสุขไพธา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2553  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



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

Mr.Prawit Santisukpotha

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

พฤติกรรมการณ์หลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใย  
คาร์บอนในคานเหล็กที่เสริมกำลังภายใต้แรงกระทำเป็นรอบ  
แอมพลิจูดคงที่

โดย

นายประวิทย์ สันติสุขไพธา

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร. อัครวัชร เล่นวารี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาติตรี

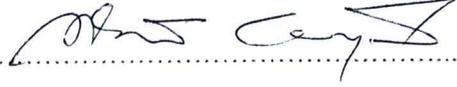
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศนัทธวงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จริญญา รุ่งอมรรัตน์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร. อัครวัชร เล่นวารี)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาติตรี)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จีรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ สายันต์ ศิริมนตรี)

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

249598

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในคานเหล็กและพฤติกรรมการวิบัติ (การหลุดล่อน) ของรอยต่อชนิดแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรโดยการทดลองภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ รวมถึงใช้วิธีวิธีไฟโพรคอลเวิร์คคอนทิวรัลอินทิกรัล (RWCIM) เพื่อคำนวณค่าความเข้มของความเค้น ( $\sigma_y$ ) ที่เกิดขึ้นในลิ้มของสองวัสดุ จากผลการศึกษาข้างต้นนำมาสร้างความสัมพันธ์ของช่วงของค่าความเข้มของความเค้นกับจำนวนรอบของแรงกระทำ ( $\Delta\sigma_y - N_{su}$ ) 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 ( $N_{su1}$ ) ซึ่งได้แก่จุดเริ่มต้นของระยะรอยร้าวเติบโต 1 และพบว่ารอยร้าวเริ่มต้นนี้จะเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างผิวเหล็กกับวัสดุประสานของทั้ง 2 ประเภทการทดลอง

การศึกษาพบว่า ในคานเหล็กค่าลำดับเอกฐานเด่น (dominant order of singularity,  $\alpha_1$ ) ที่ได้จากวิธี RWCIM และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้โครงข่ายละเอียดมากมีค่าเท่ากับ 0.271 ส่วนค่าความเข้มของความเค้นในพิกัดเชิงขั้ว  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  และ  $\sigma_{r\theta}$  มีความแตกต่างเท่ากับ 4.73%, 3.61% และ 2.86% ตามลำดับสำหรับในแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรเมื่อเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยในอดีต พบว่าค่าความเข้มของความเค้นในพิกัดเชิงขั้ว ( $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  และ  $\sigma_{r\theta}$ ) ในกรณีความเค้นระนาบมีความแตกต่างเท่ากับ -2.73%, -2.75% และ -2.75% ตามลำดับ ส่วนในกรณีความเค้นระนาบมีความแตกต่างเท่ากับ -3.78% -3.78% และ -3.77% ตามลำดับ นอกจากนี้การศึกษายังพบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta\sigma_y - N_{su1}$  ของคานเหล็กกับของแผ่นเหล็กประกบกับคู่แบบสมมาตรทั้งสองกรณีไม่มีความสัมพันธ์กัน

ภาควิชา..... วิศวกรรมโยธา..... ลายมือชื่อนิสิต..... *ประวิทย์ 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.

249598

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,  $N_{st}$ , is obtained from tests. Relationships between range of stress intensity factors with no. of constant amplitude loadings ( $\Delta Q_y - N_{st}$ ) 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 ( $N_{st1}$ ) 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 ( $\alpha_1$ ) value at 0.271. For the stress intensity factors in polar coordinate ( $Q_r$ ,  $Q_{\theta}$  and  $Q_{\phi}$ ), 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 ( $\Delta Q_y - N_{st1}$ ) of steel beams and of double-strap steel joints are not coincide.

Department : ..... CIVIL ENGINEERING .....

Student's Signature *Prawit Santisukpota*

Field of Study : ..... CIVIL ENGINEERING .....

Advisor's Signature *Akhawat Lenwari*

Academic Year : ..... 2010 .....

Co-Advisor's Signature *Thaksin Thepchatri*

## กิตติกรรมประกาศ

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

ขอกราบขอบพระคุณ คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ทุกท่านคือ ผศ.ดร.จรรยา รุ่งอมรรัตน์, ผศ.ดร.จิระพงษ์ กสิวิทย์อำนาจ และ รศ.สายันต์ ศิริมนตรี ที่ได้ให้คำปรึกษาให้แนวคิดและช่วยตรวจแก้ไขในส่วนที่บกพร่องต่างๆ ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งเขียนวิทยานิพนธ์สำเร็จเป็นรูปเล่ม

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

ขอกราบขอบพระคุณ คุณฉานวัฒน์ ไกรรัตนสม เจ้าหน้าที่เทคนิคอาวุโสบริษัท ซีก้า (ประเทศไทย) จำกัด คุณกรกฎ บุษปถ หัวหน้าวิศวกร-เทคนิคบริษัท ซีก้า (ประเทศไทย) จำกัด, คุณสุชาติ สุวิมลวรรณ ผู้จัดการธุรกิจก่อสร้างบริษัท ซีก้า (ประเทศไทย) จำกัด และ บริษัท เหล็กสยามยามาโตะ จำกัด ซึ่งได้อนุเคราะห์วัสดุและระยะเวลาในการทำงานเพื่อช่วยเหลือในการทำงานวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ได้ช่วยกระผมในการติดตั้งเครื่องมือและช่วยเฝ้าบันทึกผลการทดลองของงานวิทยานิพนธ์นี้

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในด้านการศึกษา ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ทำให้ผู้วิจัยมีกำลังใจจนสามารถทำการค้นคว้าอิสระฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
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 ปัญหาความล้มเหลวในคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กประกบ.....	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน, รอยต่อทาบเดี่ยวและรอยต่อประกบคู่แบบสมมาตร.....	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.....	33
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

## สารบัญญัตราจ

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	ผลการทดลองเหล็กประกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงดึงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่..... 62
6.1	กรณีวิเคราะห์คานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ภายใต้แรงกระทำ 1 ตันในความเค้นระนาบ ..... 69
6.2	กรณีวิเคราะห์แผ่นเหล็กประกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงกระทำ 1 ตัน ในความเค้นระนาบ ..... 70
6.3	กรณีวิเคราะห์แผ่นเหล็กประกับคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงกระทำ 1 ตัน ในความเค้นดระนาบ ..... 71
6.4	ผลการตรวจสอบความถูกต้องของค่าความเข้มของความเค้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้โครงข่ายละเอียดมากในกรณีการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ..... 72
6.5	แรงวิบัติและค่าความเข้มของความเค้นของแผ่นเหล็กประกับคู่แบบสมมาตร (อัศววัชร เล่นวารี 2002) ..... 74
6.6	ผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นโดยอ้างอิงแรงวิบัติจากตารางที่ 6.5 74
6.7	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นในกรณีการทดลองแผ่นเหล็กประกับคู่แบบสมมาตร..... 75

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่		หน้า
6.8	ผลการวิเคราะห์ช่วงค่าความเข้มของความเค้นที่ทำให้แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน เกิดการหลุดร่อนออกจากคานที่เสริมกำลัง .....	76
6.9	ผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณผิวสัมผัสระหว่างผิวของแผ่นเหล็กประกบกับด้านข้างกับชั้นวัสดุเชื่อมประสาน .....	80
ก.1	ผลการสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงแบบพลวัตด้วย Proving ring ภายใต้แรงสถิต .....	94
ก.2	ผลการสอบเทียบผลจากการวัดค่าความเครียด ณ ตำแหน่งต่างๆ ..... (DG = Dial Gauge (0.001 ช.ม. / 1 ช่อง), และ % Ind = %Indicator) .....	97
ก.3	เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการสอบเทียบมาตรวัดความเครียดในขณะถ่ายแรง .....	99
ก.4	เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการสอบเทียบมาตรวัดความเครียดในขณะถอนแรง .....	100
ก.5	เปรียบเทียบค่าระยะการโก่งตัวจากระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการสอบเทียบ .....	101
ข.1	ลักษณะรูปแบบความเสียหายของแผ่นเหล็กประกบกับคูแบบสมมาตร .....	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	กราฟเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักกับระยะเวลาการยึดตัวของตัวอย่างแบบเสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนกับตัวอย่างที่ไม่เสริมกำลัง (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	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับระยะเวลาเคลื่อนที่ (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).....	
รูปที่ 2.13	15
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดในบริเวณต่างๆกับจำนวนรอบของแรงกระทำซ้ำซาก (Deng และ Lee, 2005).....	
รูปที่ 2.14	15
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับจำนวนรอบของแรงกระทำในคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (Deng และ Lee, 2005) .....	
รูปที่ 2.15	16
ภาพของแบบจำลองตัวอย่างการทดสอบกำลังของวัสดุประสานด้วยวิธีการทดลองการรับแรงดัด (Schnerch และคณะ, 2006) .....	
รูปที่ 2.16	17
ชนิดของรอยต่อประกับคู่แบบสมมาตรในงานทดลองนี้ (รูปด้านบน) รอยต่อชนิด A (รูปด้านกลาง) รอยต่อชนิด B และ (รูปด้านล่าง) รอยต่อชนิด C (Schnerch และคณะ, 2006) .....	
รูปที่ 2.17	18
ผลการทดลองทดสอบกำลังของวัสดุประสานด้วยวิธีการทดสอบการรับแรงดึง (Schnerch และคณะ, 2006) .....	
รูปที่ 2.18	19
โมเดลของรอยต่อประกับคู่แบบสมมาตรโดยที่ $L_1 = 40, 50, 70, 80$ มม. และ $L_2 = 80$ มม. (Al-Mahaidi และคณะ, 2006) .....	
รูปที่ 2.19	19
รายละเอียดของโมเดลที่ปลายรอยต่อประกับคู่แบบสมมาตรในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น ( $F =$ แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน, $A =$ วัสดุประสาน และ $S =$ แผ่นเหล็กรับแรงตามแนวแกน) (Al-Mahaidi และคณะ, 2006) .....	
รูปที่ 2.20	20
เปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดตัวจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นกับผลการทดลอง (Al-Mahaidi และคณะ, 2006).	
รูปที่ 2.21	21
รอยต่อรับแรงดึงที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (P. Colombi และคณะ, 2009) .....	
รูปที่ 2.22	22
การกระจายความเค้นเฉือนและความเค้นกะเทาะตามระยะปลายแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (จุด A ถึงจุด B) (P. Colombi และคณะ, 2009)	

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.23	23
การลดลงของความแข็งแรงในรอยต่อที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำซ้ำซาก (P. Colombi และคณะ, 2009) .....	
รูปที่ 3.1	26
พิจารณาบริเวณปลายรูปสี่เหลี่ยมของสองวัสดุในงานวิจัยนี้ (ก). ลิ้มของสองวัสดุ และ (ข). ภาพแสดงความเค้นเอกฐานที่ปลายแผ่นจุด A และจุด B (อัศวินทร์ เล่นวารี, 2002) .....	
รูปที่ 3.2	32
พิจารณาโครงสร้างที่มีความแรงกระทำทั้งสองระบบแสดงในรูป $P_I$ และ $P_{II}$ ตามลำดับ .....	
รูปที่ 3.3	33
ระบบจริงและระบบเสมือน (อัศวินทร์ เล่นวารี, 2002) .....	
รูปที่ 3.4	33
ลิ้มของสองวัสดุทั่วไปและเส้นคอนทอร์ (อัศวินทร์ เล่นวารี, 2002) .....	
รูปที่ 3.5	36
แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ (จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ, 2553) .....	
รูปที่ 3.6	36
สัญลักษณ์ของตัวแปรที่ใช้กำหนดลักษณะแรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ (จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ, 2553) .....	
รูปที่ 3.7	37
กระบวนการเกิดความเสียหายล่า (จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ, 2553) .....	
รูปที่ 4.1	40
คานเหล็กหลังจากการพันทรายตามมาตรฐาน SSPC A-SP 5 .....	
รูปที่ 4.2	40
การโรยขดลวดเพื่อทำชั้นความหนาของวัสดุประสาน.....	
รูปที่ 4.3	41
ขั้นตอนการทาวัดประสานเข้ากับแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน .....	
รูปที่ 4.4	41
ติดตั้งแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเข้ากับผิวคานเหล็ก.....	
รูปที่ 4.5	42
การทำชั้นความหนาของวัสดุประสานให้มีความหนาเท่ากับ 1 มม. ....	
รูปที่ 4.6	42
การปาดขอบส่วนที่เกินของวัสดุประสานให้เป็นมุมตั้งฉากกับคานเหล็ก .....	
รูปที่ 4.7	42
คานเหล็กที่ติดตั้งแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเสร็จสมบูรณ์.....	
รูปที่ 4.8	43
การติดตั้งเกจค่าความเครียดและอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณการหลุดล่อนของแผ่นเสริมกำลัง (1-เกจค่าความเครียด, 2-วงจรไฟฟ้า, 3-แบตเตอรี่) .....	
รูปที่ 4.9	44
การติดตั้งคานทดลองเข้ากับเครื่องทดสอบแรงแบบพลวัต .....	
รูปที่ 4.10	45
วงจรกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านระหว่างห้องคานกับปลายแผ่นเสริมกำลัง (สวิทช์ตรวจจับการหลุดล่อนระหว่างแผ่นเสริมกำลังกับผิวเหล็ก) .....	

## สารบัญรูป(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
ทาว์สตูดูประสานเข้ากับแผ่นเหล็กประกบ .....	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
การทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ในช่วงระยะการหลุดล่อนที่ปลายแผ่นโตนสมบูร์น (BSC901S, จำนวนรอบของแรงกระทำประมาณ 22040 รอบ) .....	57

### สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 5.6	กราฟสัญญาณการตรวจจับการวิตติของแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตรด้วย ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม (DSJ801) ..... 60
รูปที่ 5.7	รูปแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตร (DSJ652) ในขณะที่ทำการทดลองในช่วงที่ 1 ..... 61
รูปที่ 5.8	รูปแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตร (DSJ652) ในช่วงที่ 2 (วิตติ) ..... 61
รูปที่ 5.9	ลักษณะการวิตติของแผ่นเหล็กรับแรงตามแนวแกนในแผ่นเหล็กประกบคู่แบบ สมมาตรภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ ..... 64
รูปที่ 6.1	ขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้น ..... 65
รูปที่ 6.2	รูปทรงของเอลิเมนต์ plane 82 ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ..... 66
รูปที่ 6.3	โมเดลคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในระเบียบ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ..... 67
รูปที่ 6.4	โมเดลแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตรในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ..... 68
รูปที่ 6.5	ความลู่เข้าของค่าตัวแปร $c_1$ กับจำนวนจุดในแต่ละวิถี C1, C2 และ C3 ของ กรณีวิเคราะห์คานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ภายใต้แรงกระทำ 1 ตัน ในความเค้นระนาบ ..... 70
รูปที่ 6.6	ความลู่เข้าของค่าตัวแปร $c_1$ กับจำนวนจุดในแต่ละวิถี C1, C2 และ C3 ของ กรณีวิเคราะห์แผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงกระทำ 1 ตันใน ความเค้นระนาบ ..... 71
รูปที่ 6.7	ความลู่เข้าของค่าตัวแปร $c_1$ กับจำนวนจุดในแต่ละวิถี C1, C2 และ C3 ของ กรณีวิเคราะห์แผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตรภายใต้แรงกระทำ 1 ตัน ใน ความเค้นระนาบ ..... 72
รูปที่ 6.8	โมเดลละเอียดของคานเหล็กที่เสริมกำลังในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ โครงข่ายละเอียดมาก (ความเค้นระนาบ)..... 73
รูปที่ 6.9	ค่าความเค้น (S) กับระยะผิวสัมผัสระหว่างผิวคานเหล็กกับชั้นวัสดุประสาน (r) จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้โครงข่ายละเอียดมากของคานเหล็กที่ เสริมกำลัง (ความเค้นระนาบ) ..... 73

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 6.10	ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของค่าความเข้มของความเค้นในความเค้นระนาบกับจำนวนรอบของแรงกระทำ ณ จุดที่ 1 ในการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ ..... 77
รูปที่ 6.11	ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของค่าความเข้มของความเค้นในความเค้นระนาบกับจำนวนรอบของแรงกระทำ ณ จุดที่ 2 ในการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ ..... 77
รูปที่ 6.12	ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของค่าความเข้มของความเค้นในความเค้นระนาบกับจำนวนรอบการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในคานเหล็กในการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังภายใต้แรงกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่ ..... 78
รูปที่ 6.13	ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของค่าความเข้มของความเค้นในกรณีความเค้นระนาบกับจำนวนรอบการวิบัติของแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตร ..... 81
รูปที่ 6.14	ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของค่าความเข้มของความเค้นในกรณีความเค้นระนาบกับจำนวนรอบการวิบัติของแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตร ..... 81
รูปที่ 6.15	เปรียบเทียบสมการความสัมพันธ์ของช่วงของค่าความเข้มของความเค้นกับจำนวนรอบที่ทำให้เกิดรอยร้าว ( $N_{SL1}$ ) ของการทดลองคานเหล็กที่เสริมกำลังกับการทดลองแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตร..... 83
รูปที่ 7.1	รอยร้าวล้าที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของผิวเหล็กกับวัสดุประสาน (BSC602S) (ก) แสดงรอยร้าวล้าด้านหน้าของปลายแผ่น และ (ข) แสดงรอยร้าวล้าด้านข้างของปลายแผ่น..... 85
รูปที่ 7.2	พื้นที่การหลุดล่อนของชั้นวัสดุประสานในคานเหล็กที่เสริมกำลัง (BSC602S) . 86
รูปที่ 7.3	บริเวณพื้นที่ที่เกิดรอยร้าวล้าในแผ่นเหล็กประกบคู่แบบสมมาตร (DSJ703) ... 87
รูปที่ ก.1	การติดตั้งการสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงแบบพลวัต (Servopulser) ด้วย Proving ring ภายใต้แรงสถิต ..... 93
รูปที่ ก.2	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ (อ่านจาก Proving Ring) กับ %Indicator ... 94
รูปที่ ก.3	ตำแหน่งการติดตั้งเกจความเครียดเพื่อสอบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยที่ SG = Strain Gauge, เกจความเครียด..... 95

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ ก.4	โมเดลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	96
รูปที่ ก.5	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าความเครียด ณ ตำแหน่งใด ขณะถ่าย แรง .....	98
รูปที่ ก.6	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าความเครียด ณ ตำแหน่งใด ขณะถอน แรง .....	98
รูปที่ ก.7	เปรียบเทียบค่าความเค้นจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับค่าความเค้นจาก การสอบเทียบเกจความเครียดขณะถ่ายแรง ณ จุด SG1.....	99
รูปที่ ก.8	เปรียบเทียบค่าความเค้นจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับค่าความเค้นจาก การสอบเทียบเกจความเครียดขณะถอนแรง ณ จุด SG1 .....	100
รูปที่ ก.9	เปรียบเทียบระยะการโก่งตัวจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับระยะการโก่ง ตัวจากการสอบเทียบ .....	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 (อัศวินทร์ เล่นวารี, 2002) .....	105
รูปที่ ข.5	รายละเอียดในการประมาณ % ความเสียหายของแผ่นเหล็กประกบกับคูแบบ สมมาตร .....	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

สารบัญรูป(ต่อ)

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