

การเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กเก่าด้วยคาร์บอนไฟเบอร์

THE STRENGTHENING OF EXISTING REINFORCED CONCRETE BEAMS  
WITH CFRP



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2557

KMITL-2014-EN-M-093-112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STRENGTHENING OF EXISTING REINFORCED CONCRETE BEAMS  
WITH CFRP



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2014

KMITL-2014-EN-M-093-112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2014





FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

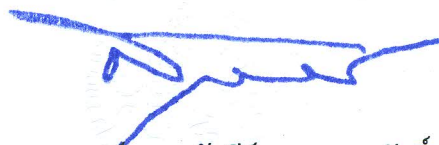
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กเก่าด้วยคาร์บอนไฟเบอร์  
Thesis Title The Strengthening of Existing Reinforced Concrete Beams with CFRP  
นักศึกษา นายสมชาย ศักดิ์สิทธิพร  
รหัสประจำตัว 54613004  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.สุวัฒน์ ถิระเศรษฐ์  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2014-EN-M-093-112

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.อำนาจ	พานิชกุลพงศ์	
ดร.อาทิตย์	เพชรศศิธร	
รศ.เอนก	ศิริพานิชกร	
รศ.สุวัฒน์	ถิระเศรษฐ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 เวลา 19.00 - 21.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(ศาสตราจารย์ ดร.สุชชีวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กเก่าด้วยคาร์บอนไฟเบอร์
นักศึกษา	นายสมชาย ศักดิ์สิทธิ์พร
รหัสประจำตัว	54613004
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
พ.ศ.	2557
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.สุวัฒน์ ธีรเศรษฐ์

## บทคัดย่อ

อาคารในประเทศไทยส่วนมากเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งบางแห่งใช้งานมาเป็นเวลานาน ย่อมส่งผลกระทบต่อกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้าง ในการศึกษาครั้งนี้จะมุ่งเน้นไปที่การค้ำ ซึ่งผลจากการค้ำ ของคอนกรีต จะส่งผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ลดลงตามมาด้วย การเสริมกำลังหรือซ่อมแซมโครงสร้างคานเพื่อเพิ่มกำลัง สามารถทำได้หลายวิธี เช่นการเพิ่มองค์อาคาร การเพิ่มค้ำยัน การเสริมด้วยแผ่นเหล็ก ซึ่งเป็นวิธีที่ค่อนข้างยุ่งยาก และใช้เวลานาน เพื่อแก้ปัญหาเรื่องนี้จึงได้มีการนำคาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber Reinforced Polymer: CFRP) มาใช้ แต่การทดสอบกำลังของโครงสร้างที่เสริมกำลังแล้วทำได้เพียงถึงน้ำหนักบรรทุกใช้งาน แต่ไม่สามารถทดสอบถึงน้ำหนักบรรทุกประลัยได้ เพราะยังต้องใช้งานอยู่ ดังนั้นการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลัง ด้วย CFRP จนถึงจุดวิบัติจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ มาก จุดประสงค์ของการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ ของกำลังรับน้ำหนัก บรรทุก ค่าการแอ่นตัว ค่าความเค้น ค่าความเครียด และกำลังรับโมเมนต์ดัดของคานเมื่อเสริมกำลังหรือทำการซ่อมแซมด้วย CFRP งานวิจัยนี้ได้ลดระยะเวลาในการทดสอบให้น้อยลง ด้วยทฤษฎีการค้ำ โดยใช้คานคอนกรีต มวลธรรมดา และคอนกรีตมวลเบา เนื่องจากคอนกรีต มวลเบา มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นน้อยกว่าคอนกรีต มวลธรรมดา โดยเทียบให้เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคานคอนกรีต มวลธรรมดาที่รับน้ำหนักกระทำมาเป็นเวลานาน วิธีการทดสอบคานตัวอย่างได้ให้ น้ำหนักบรรทุกไปก่อน 60 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักบรรทุกประลัย หลังจากนั้นค่อยทำการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมด้วย CFRP เพื่อจำลองการทดสอบให้เหมือนกับสภาวะใช้งานจริง

<b>Thesis</b>	The Strengthening of Existing Reinforced Concrete Beams with CFRP
<b>Student</b>	Mr.Somchai Saksittiporn
<b>Student ID.</b>	54613004
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Civil Engineering
<b>Year</b>	2014
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Suwat Dhirasedh

## ABSTRACT

Building structures in Thailand mostly are reinforced concrete. When some buildings have been used for a long time, carrying load capacity of the buildings will be affected. This is because the creep of the concrete results in the decreasing of the elastic modulus. The strengthening or repairing can be done in many ways such as increasing of member, increasing of bracing, supplement of steel plates which are quite difficult and time-consuming. For solving these problems, Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) was adopted. Typically the strength testing of strengthened structure can be performed under service load only but could not be done under ultimate load because the structure is routinely used. Therefore, the testing of reinforced concrete beams with CFRP until the critical points is very interesting. The purpose of the experiment is to find relationships between loadings with deflections, stresses and strains, bending moment of reinforced concrete beam strengthened or repaired with CFRP. This study aims for an alternative method reducing the time of determination by applying normal weight concrete and lightweight concrete beam. Because lightweight concrete has lower elastic modulus than normal weight concrete but has been carried load for period of time. The testing method of beam samples applied load amount 60 percent of ultimate load, and after that strengthened or repaired the samples with CFRP for the simulation test as same as runtime state.

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วย ความเมตตากรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.สุวัฒน์ ธิเรศรัษฐ์ ผู้จุดประกายความคิด ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ตลอดจนให้ความรู้และข้อคิดที่ดีแก่ข้าพเจ้าในหลายๆ ด้าน

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆ ท่านที่ได้ ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณบริษัท น้ำแข็งคอนกรีต (1992) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์คอนกรีตผสมเสร็จที่ใช้ในการทดสอบ

ขอขอบคุณบริษัท ไตรกรู๊ป รัชดา จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

ขอขอบคุณหัวหน้าอันเป็นที่เคารพของข้าพเจ้า คุณไพโรจน์ ศุภกิจจานุสันต์ ที่คอยให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้านเสมอมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง

สมชาย ศักดิ์สิทธิพร

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.4 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	6
2.1 กล่าวนำ.....	6
2.2 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต.....	6
2.3 การคืบ (Creep) ของคอนกรีต.....	9
2.4 คอนกรีตมวลเบา.....	9
2.5 การเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย.....	10
บทที่ 3 หลักการและทฤษฎีที่ใช้.....	13
3.1 การเสียรูปตามกาลเวลาของคอนกรีต.....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IV อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การคืบของคอนกรีต.....	15
3.2.1 การคืนกลับของการคืบในคอนกรีต.....	16
3.3 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต.....	17
3.3.1 การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต.....	17
3.3.2 การทำนายค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากการคืบของคอนกรีต.....	19
3.4 การแ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	20
3.4.1 การวิเคราะห์การแ่นตัวทันที.....	20
3.4.2 การวิเคราะห์การแ่นตัวระยะยาว.....	23
3.5 คาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber Reinforced Polymer : CFRP).....	25
3.6 คอนกรีตมวลเบา.....	33
3.6.1 โฟมคอนกรีต (Aerated of Foam Concrete).....	34
3.6.2 คอนกรีตที่ไม่มีส่วนละเอียด (No-Fines Concrete).....	34
3.6.3 คุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตมวลเบา.....	34
3.6.4 ข้อควรระวังของคอนกรีตมวลเบาในการใช้งาน.....	35
บทที่ 4 วิธีการศึกษาและผลการศึกษา.....	36
4.1 การทดสอบคอนกรีตรูปทรงกระบอก.....	36
4.1.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	36
4.1.2 วิธีการทดสอบ.....	41
4.2 วิธีการหาค่าของโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเมื่อเวลาผ่านไป.....	44
4.3 วิธีการเตรียมหล่อตัวอย่างคานทดสอบ.....	48
4.3.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	48
4.3.2 การหล่อตัวอย่างคานทดสอบ.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 การติดตั้ง CFRP ที่ตัวอย่างคานทดสอบ.....	62
4.4.1 คุณสมบัติของ CFRP.....	62
4.4.2 การติดตั้ง CFRP ที่ตัวอย่างคานทดสอบ.....	62
4.5 ตำแหน่งการติดตั้ง Strain Gauge ที่ผิวคอนกรีตคานทดสอบ.....	67
4.6 วิธีการทดสอบและติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ.....	71
4.6.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	71
4.6.2 ขั้นตอนการทดสอบตัวอย่างคาน.....	73
4.7 ผลการทดสอบคานทั้ง 16 ตัวอย่าง.....	77
4.7.1 ผลการทดสอบรับน้ำหนักบรรทุกทุกไม่มากกว่า 60% ของน้ำหนักบรรทุกประลัย...77	
4.7.1.1 ผลการทดสอบคาน B2.....	77
4.7.1.2 ผลการทดสอบคาน B2S.....	80
4.7.1.3 ผลการทดสอบคาน B2LS.....	83
4.7.1.4 ผลการทดสอบคาน B2CS.....	85
4.7.1.5 ผลการทดสอบคาน B2LS-F1.....	88
4.7.1.6 ผลการทดสอบคาน B2CS-F1.....	90
4.7.1.7 ผลการทดสอบคาน B2L-F2.....	93
4.7.1.8 ผลการทดสอบคาน B2C-F2.....	95
4.7.1.9 ผลการทดสอบคาน B1.....	98
4.7.1.10 ผลการทดสอบคาน B1S.....	100
4.7.1.11 ผลการทดสอบคาน B1LS.....	103
4.7.1.12 ผลการทดสอบคาน B1CS.....	105
4.7.1.13 ผลการทดสอบคาน B1LS-F1.....	108
4.7.1.14 ผลการทดสอบคาน B1CS-F1.....	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VI อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.7.1.15 ผลการทดสอบคาน B1L-F2.....	113
4.7.1.16 ผลการทดสอบคาน B1C-F2.....	115
4.7.2 ผลการทดสอบรับน้ำหนักบรรทุกมากกว่า 60% ของน้ำหนักบรรทุกประลัย....	118
4.7.2.1 ผลการทดสอบคาน B2.....	118
4.7.2.2 ผลการทดสอบคาน B2S.....	120
4.7.2.3 ผลการทดสอบคาน B2LS.....	122
4.7.2.4 ผลการทดสอบคาน B2CS.....	124
4.7.2.5 ผลการทดสอบคาน B2LS-F1.....	126
4.7.2.6 ผลการทดสอบคาน B2CS-F1.....	128
4.7.2.7 ผลการทดสอบคาน B2L-F2.....	131
4.7.2.8 ผลการทดสอบคาน B2C-F2.....	134
4.7.2.9 ผลการทดสอบคาน B1.....	137
4.7.2.10 ผลการทดสอบคาน B1S.....	139
4.7.2.11 ผลการทดสอบคาน B1LS.....	141
4.7.2.12 ผลการทดสอบคาน B1CS.....	143
4.7.2.13 ผลการทดสอบคาน B1LS-F1.....	145
4.7.2.14 ผลการทดสอบคาน B1CS-F1.....	147
4.7.2.15 ผลการทดสอบคาน B1L-F2.....	150
4.7.2.16 ผลการทดสอบคาน B1C-F2.....	153
บทที่ 5 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล.....	156
5.1 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล.....	156
5.1.1 การทดสอบรับน้ำหนักบรรทุกไม่มากกว่า 60% ของน้ำหนักบรรทุกประลัย....	156
5.1.1.1 พิจารณาคานกลุ่มที่ 1.....	158

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VII อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1.1.1 พิจารณาคานกลุ่มที่ 2.....	160
5.1.2 การทดสอบรับน้ำหนักบรรทุกมากกว่า 60% ของน้ำหนักบรรทุกประลัย.....	162
5.1.2.1 พิจารณาคานกลุ่มที่ 1.....	162
5.1.2.2 พิจารณาคานกลุ่มที่ 2.....	164
5.2 สรุปผลการทดสอบ.....	169
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	169
บรรณานุกรม.....	171
ภาคผนวก.....	173
ภาคผนวก ก.....	173
ภาคผนวก ก-1. วิธีการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต.....	174
ภาคผนวก ก-2. ส่วนผสมคอนกรีตมวลเบา.....	177
ภาคผนวก ก-3. การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	177
ภาคผนวก ก-4. การคำนวณหาค่าน้ำหนักกระทำ.....	179
ภาคผนวก ก-5. การคำนวณหาค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยของคาน.....	183
ภาคผนวก ข.....	187
ภาคผนวก ข-1. ข้อมูลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก.....	188
ภาคผนวก ข-2. ข้อมูลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกของคาน..	190
ภาคผนวก ข-3. การคำนวณหาค่า kd โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel.....	191
ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	198
ประวัติผู้เขียน.....	208

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาการแอนตัวผลการคำนวณกับผลการทดสอบ.....	7
2.2 แสดงรายละเอียดของการทดสอบ.....	39
3.1 คุณสมบัติของคอนกรีต เหล็ก เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน และพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน.....	25
3.2 ค่าตัวแปรลดกำลังของแผ่น CFRP สำหรับการเสริมกำลังเฉือน.....	27
3.3 การจำแนกคอนกรีตเบาตามการนำไปใช้.....	33
4.1 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา กับหน่วยน้ำหนัก และกำลังอัดประลัย.....	45
4.2 รูปแบบการเสริมเหล็ก และการเสริม CFRP ของคานทดสอบ กลุ่มที่ 1.....	54
4.3 รูปแบบการเสริมเหล็ก และการเสริม CFRP ของคานทดสอบ กลุ่มที่ 2.....	55
4.4 แสดงคุณสมบัติของ CFRP.....	62
4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอนตัว ความเครียด และความเค้นคาน B2.....	77
4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอนตัว ความเครียด และความเค้นคาน B2S.....	80
4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอนตัว ความเครียด และความเค้นคาน B2LS.....	83
4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอนตัว ความเครียด และความเค้นคาน B2CS.....	85
4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอนตัว ความเครียด และความเค้นคาน B2LS-F1.....	88
4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอนตัว ความเครียด และความเค้นคาน B2CS-F1.....	90
4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอนตัว ความเครียด และความเค้นคาน B2L-F2.....	93
4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอนตัว ความเครียด และความเค้นคาน B2C-F2.....	95
4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอนตัว ความเครียด และความเค้นคาน คาน B1.....	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IX อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B1S.....	100
4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B1LS.....	103
4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B1CS.....	105
4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B1LS-F1.....	108
4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B1CS-F1.....	110
4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B1L-F2.....	113
4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B1C-F2.....	115
4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B2.....	118
4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B2S.....	120
4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B2LS.....	122
4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B2CS.....	124
4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B2LS-F1.....	126

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางวิศวกร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ X อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B2CS-F1.....	128
4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B2L-F2.....	131
4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B2C-F2.....	134
4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B1.....	137
4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B1S.....	139
4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B1LS.....	141
4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B1CS.....	143
4.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B1LS-F1.....	145
4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B1CS-F1.....	147
4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B1L-F2.....	150
4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B1C-F2.....	153
5.1 แสดงระยะการแอ่นตัวจากการทดสอบและจากทฤษฎี.....	156
5.2 แสดงการวิบัติของคานตามทฤษฎี.....	166

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น เมืออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ XI อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่

หน้า

5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกจากการทดสอบและจากทฤษฎี.....167



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การเสริมกำลัง (1) พื้น (2) เสา (3) คาน คอนกรีตเสริมเหล็กด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP).....	2
2.1 แสดงรายละเอียดของคานทดสอบ.....	7
2.2 Secant Modulus ของหน้าตัด ACM-plate.....	8
2.3 (a) Secant Modulus ของหน้าตัดคอนกรีต (b) Secant Modulus ของเหล็ก (c) Secant Modulus ของหน้าตัด ACM.....	8
2.4 แสดงรายละเอียดของคานทดสอบ.....	11
2.5 ลักษณะการตีพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วแบบต่างๆ.....	12
3.1 การเสียรูปตามกาลเวลาของคอนกรีต.....	14
3.2 ผลการคืบต่อความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีต.....	15
3.3 การหดตัวแบบอีลาสติกและการคืบของคอนกรีต.....	16
3.4 การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต.....	18
3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับเวลา.....	20
3.6 การคำนวณโมเมนต์ของความเฉื่อยประสิทธิผลของหน้าตัด.....	21
3.7 การเปลี่ยนแปลงของ $I_e$ ตามอัตราส่วน $M_a / M_{cr}$ .....	22
3.8 ผลการคืบของคอนกรีตต่อค่าความโค้ง.....	23
3.9 การเปลี่ยนแปลงของค่าตัวประกอบตามกาลเวลา $\xi$ .....	24
3.10 แสดง stress และ strain ในโครงสร้างรับแรงคืบ.....	26
3.11 รูปตัดแสดงการหุ้มแผ่น CFRP เพื่อเสริมกำลังเฉือนของคานแบบต่างๆ .....	28
3.12 ขนาดและการติดตั้งแผ่น CFRP เพื่อเสริมกำลังเฉือนของคานแบบต่างๆ .....	29
4.1 วัสดุ และอุปกรณ์ (1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (2) สารเพิ่มฟองอากาศ (Foaming Agent) GRACE AE4 (3) บั้มลม (4) เครื่องเพิ่มแรงดันน้ำ .....	37

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 วัสดุและอุปกรณ์ (1) เครื่องฉีดโฟม (2) เครื่องผสมคอนกรีต (3) แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก (4) เครื่องชั่งน้ำหนัก.....	38
4.3 เครื่องมือวัดการยืดหดตัว (Strain Gauge) สำหรับติดตั้งที่เหล็ก และ .FRP.....	39
4.4 เครื่องมือวัดการยืดหดตัว (Strain Gauge) สำหรับติดตั้งที่คอนกรีต.....	39
4.5 วัสดุ Coating Material ใช้หุ้ม Strain Gauge ที่ติดตั้งบนเหล็กเสริม.....	39
4.6 วัสดุ Strain Gauge Cement เป็นกาใช้ติด Strain gauge.....	40
4.7 เครื่องบันทึกค่าการยืดหดตัว (Data Logger) และคอมพิวเตอร์.....	40
4.8 ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก.....	41
4.9 ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่ทดสอบหาโมดูลัสยืดหยุ่น และกำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ).....	41
4.10 การผสมคอนกรีตมวลเบา.....	42
4.11 การหล่อตัวอย่างคอนกรีตมวลเบารูปทรงกระบอก.....	43
4.12 ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก ที่ติดตั้ง Strain Gauge เสร็จแล้ว.....	43
4.13 การทดสอบเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่ากำลังอัดประลัย.....	44
4.14 โมดูลัสยืดหยุ่นของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา กับหน่วยน้ำหนัก.....	45
4.15 กำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบารูปทรงกระบอก กับหน่วยน้ำหนัก.....	46
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การคืบของคอนกรีตกับน้ำหนักบรรทุก 40% ของน้ำหนักบรรทุกประลัยกับเวลา (เฉลิม เพ็ชรสูงเนิน. 2548).....	46
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การคืบของคอนกรีตกับน้ำหนักบรรทุก 60% ของน้ำหนักบรรทุกประลัยกับเวลา (เฉลิม เพ็ชรสูงเนิน. 2548).....	47
4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักบรรทุกประลัย (เฉลิม เพ็ชรสูงเนิน. 2548).....	47
4.19 ไม้แบบหล่อคานคอนกรีต.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ XIV อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 ไม้แบบหล่อคานคอนกรีต (ต่อ).....	50
4.21 การเสริมเหล็กและผูกเหล็กถูกตั้ง.....	50
4.22 ตำแหน่งการติดตั้ง Strain Gauge ที่เหล็กเสริมก่อนการหล่อคานคอนกรีตคาน.....	51
4.23 การติดตั้งเครื่องมือวัดการยืดหดตัว (Strain Gauge) ที่เหล็กเสริมหลัก.....	51
4.24 การหุ้ม Coating Material ป้องกันการเสียหายของ Strain Gauge.....	52
4.25 การติดตั้งเครื่องมือวัดการยืดหดตัว (Strain Gauge) ที่เหล็กถูกตั้ง.....	52
4.26 รูปแบบการเสริมเหล็ก และการเสริม CFRP ของคานทดสอบ กลุ่มที่ 1.....	56
4.27 รูปแบบการเสริมเหล็ก และการเสริม CFRP ของคานทดสอบ กลุ่มที่ 2.....	57
4.28 ทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต (Slump Test).....	58
4.29 การหล่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา.....	58
4.30 การผสมคอนกรีตมวลเบาตามหน่วยน้ำหนักค่าต่างๆ.....	59
4.31 การหล่อคานคอนกรีตมวลเบา 3 ชั้น – โคง.....	59
4.32 การหล่อคานคอนกรีตมวลเบา 3 ชั้น - โคง (ต่อ).....	60
4.33 การเก็บตัวอย่างคอนกรีตมวลเบารูปทรงกระบอก.....	60
4.34 ตัวอย่างคานทดสอบที่ถอดแบบข้าง.....	61
4.35 การบ่มขึ้นตัวอย่างคานทดสอบ 28 วัน.....	61
4.36 การขัดผิวคานให้เรียบ และทำการลบลมคาน.....	62
4.37 Epoxy ประสานเนื้อคอนกรีตให้เป็นเนื้อเดียวกัน.....	63
4.38 น้ำยาประสานชั้นแรก Hydrapox CF-Primer part A และ part B.....	63
4.39 การทำน้ำยาประสานชั้นแรก.....	64
4.40 น้ำยาประสานชั้นที่สอง Hydrapox CF part A และ part B.....	64
4.41 การวัดขนาด และตัด CFRP.....	65
4.42 CFRP ที่ตัดตามขนาดเสร็จแล้ว.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และส่งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.43 การติดตั้ง CFRP ที่ท้องคาน.....	66
4.44 การติดตั้ง CFRP ที่ด้านข้างคานทั้งสองด้าน.....	66
4.45 คานที่ติดตั้ง CFRP เสร็จแล้ว.....	67
4.46 ตำแหน่งการติดตั้ง Strain Gauge ที่ผิวคอนกรีตคานทดสอบ ที่ไม่ได้เสริมกำลัง.....	67
4.47 ตำแหน่งการติดตั้ง Strain Gauge ที่ผิวคอนกรีตคานทดสอบ ที่เสริมกำลัง.....	68
4.48 การติดตั้ง Strain Gauge ที่ตำแหน่ง C.G. ของคอนกรีตแต่ละชั้น ช่วงกลางคาน.....	68
4.49 การติดตั้ง Strain Gauge บริเวณใกล้ Support.....	69
4.50 การติดตั้ง Strain Gauge ที่คานทดสอบที่ไม่เสริมกำลัง.....	69
4.51 การติดตั้ง Strain Gauge ที่ CFRP ช่วงกลางคาน.....	70
4.52 การติดตั้ง Strain Gauge ที่ CFRP บริเวณใกล้ Support.....	70
4.53 การติดตั้ง Strain Gauge ที่คานทดสอบที่เสริมกำลัง.....	71
4.54 วัสดุ และอุปกรณ์ (1) Loading Frame (2) Transfer Baem (3) Hydraulic Jack (4) Hydraulic Ram (5) Load Cell (6) เครื่องอ่านค่าน้ำหนักแบบดิจิตอล.....	72
4.55 โตะล้อเลื่อน และรอกผ่อนแรง.....	73
4.56 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ.....	73
4.57 การเคลื่อนย้ายคานเพื่อไปทดสอบ.....	74
4.58 การเคลื่อนย้ายคานมาไว้ที่ Loading Frame.....	74
4.59 การติดตั้งคานตัวอย่างทดสอบเข้ากับ Loading Frame.....	75
4.60 การติดตั้งคานตัวอย่างทดสอบเข้ากับ Loading Frame (ต่อ).....	75
4.61 การทดสอบคานตัวอย่าง.....	76
4.62 การติดตั้งเครื่องมือวัดการแอ่นตัว (Dial Gauge).....	76
4.63 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B2.....	78
4.64 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่กึ่งกลางคาน B2.....	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ XVI อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.65 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่บริเวณ Support คาน B2.....	79
4.66 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่บริเวณ Support คาน B2.....	79
4.67 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกทุกคาน B2S.....	81
4.68 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่กึ่งกลางคาน B2S.....	81
4.69 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่บริเวณ Support คาน B2S.....	82
4.70 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่บริเวณ Support คาน B2S.....	82
4.71 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกทุกคาน B2LS.....	84
4.72 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่กึ่งกลางคาน B2LS.....	84
4.73 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่บริเวณ Support คาน B2LS.....	84
4.74 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่บริเวณ Support คาน B2LS.....	85
4.75 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกทุกคาน B2CS.....	86
4.76 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่กึ่งกลางคาน B2CS.....	86
4.77 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่บริเวณ Support คาน B2CS.....	87
4.78 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่บริเวณ Support คาน B2CS.....	87
4.79 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกทุกคาน B2LS-F1.....	89
4.80 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่กึ่งกลางคาน B2LS-F1.....	89
4.81 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่บริเวณ Support คาน B2LS-F1.....	89
4.82 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่บริเวณ Support คาน B2LS-F1...90	
4.83 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกทุกคาน B2CS-F1.....	91
4.84 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่กึ่งกลางคาน B2CS-F1.....	91
4.85 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่บริเวณ Support คาน B2CS-F1.....	92
4.86 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่บริเวณ Support คาน B2CS-F1...92	
4.87 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกทุกคาน B2L-F2.....	94
4.88 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่กึ่งกลางคาน B2L-F2.....	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ XVII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.89 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่บริเวณ Support คาน B2L-F2.....	94
4.90 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่บริเวณ Support คาน B2L-F2.....	95
4.91 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกทุกคาน B2C-F2.....	96
4.92 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่กึ่งกลางคาน B2C-F2.....	96
4.93 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่บริเวณ Support คาน B2C-F2.....	97
4.94 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่บริเวณ Support คาน B2C-F2.....	97
4.95 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกทุกคาน B1.....	99
4.96 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่กึ่งกลางคาน B1.....	99
4.97 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่บริเวณ Support คาน B1.....	99
4.98 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่บริเวณ Support คาน B1.....	100
4.99 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกทุกคาน B1S.....	101
4.100 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่กึ่งกลางคาน B1S.....	101
4.101 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่บริเวณ Support คาน B1S.....	102
4.102 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่บริเวณ Support คาน B1S.....	102
4.103 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกทุกคาน B1LS.....	104
4.104 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่กึ่งกลางคาน B1LS.....	104
4.105 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่บริเวณ Support คาน B1LS.....	104
4.106 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่บริเวณ Support คาน B1LS.....	105
4.107 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกทุกคาน B1CS.....	106
4.108 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่กึ่งกลางคาน B1CS.....	106
4.109 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่บริเวณ Support คาน B1CS.....	107
4.110 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่บริเวณ Support คาน B1CS.....	107
4.111 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกทุกคาน B1LS-F1.....	109
4.112 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่กึ่งกลางคาน B1LS-F1.....	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยมีเงื่อนไขตามการขอ

ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และสงวนลิขสิทธิ์เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.113 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่บริเวณ Support คาน B1LS-F1...109	
4.114 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่บริเวณ Support คาน B1LS-F1.....110	
4.115 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B1CS-F1.....111	
4.116 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคาน B1CS-F1.....111	
4.117 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support คาน B1CS-F1...112	
4.118 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่บริเวณ Support คาน B1CS-F1.....112	
4.119 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B1L-F2.....114	
4.120 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคาน B1L-F2.....114	
4.121 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support คาน B1L-F2.....114	
4.122 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่บริเวณ Support คาน B1L-F2.....115	
4.123 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B1C-F2.....116	
4.124 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคาน B1C-F2.....116	
4.125 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support คาน B1C-F2.....117	
4.126 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่บริเวณ Support คาน B1C-F2.....117	
4.127 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B2.....118	
4.128 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติด้านหน้าของคาน B2.....119	
4.129 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติด้านหลังของคาน B2 (ต่อ).....119	
4.130 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B2S.....120	
4.131 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติด้านหน้าของคาน B2S.....121	
4.132 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติด้านหลังของคาน B2S (ต่อ).....121	

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.133 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุกาน B2LS.....	122
4.134 แสดงการแตกข้าวและการวิบัติของคาน B2LS.....	123
4.135 แสดงการแตกข้าวและการวิบัติของคาน B2LS (ต่อ).....	123
4.136 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุกาน B2CS.....	124
4.137 แสดงการแตกข้าวและการวิบัติของคาน B2CS.....	125
4.138 แสดงการแตกข้าวและการวิบัติของคาน B2CS (ต่อ).....	125
4.139 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุกาน B2LS-F1.....	126
4.140 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกึ่งกลางคาน B2LS-F1.....	127
4.141 แสดงการแตกข้าวและการวิบัติของคาน B2LS-F1.....	127
4.142 แสดงการแตกข้าวและการวิบัติของคาน B2LS-F1 (ต่อ).....	128
4.143 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุกาน B2CS-F1.....	129
4.144 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกึ่งกลางคาน B2CS-F1.....	129
4.145 แสดงการแตกข้าวและการวิบัติของคาน B2CS-F1.....	130
4.146 แสดงการแตกข้าวและการวิบัติของคาน B2CS-F1 (ต่อ).....	130
4.147 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุกาน B2L-F2.....	131
4.148 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกึ่งกลางคาน B2L-F2.....	132
4.149 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกึ่งบริเวณ Support คาน B2L-F2.....	132
4.150 แสดงการแตกข้าวและการวิบัติของคาน B2L-F2.....	133
4.151 แสดงการแตกข้าวและการวิบัติของคาน B2L-F2 (ต่อ).....	133
4.152 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุกาน B2C-F2.....	134
4.153 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกึ่งกลางคาน B2C-F2.....	135
4.154 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกึ่งบริเวณ Support คาน B2C-F2.....	135
4.155 แสดงการแตกข้าวและการวิบัติของคาน B2C-F2.....	136
4.156 แสดงการแตกข้าวและการวิบัติของคาน B2C-F2 (ต่อ).....	136

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของกรมการข้าว กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากกรมการข้าว

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และหรืออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.157 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุกาน B1.....	137
4.158 แสดงการแตก rå และ การวิบัติของคาน B1.....	138
4.159 แสดงการแตก rå และ การวิบัติของคาน B1 (ต่อ).....	138
4.160 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุกาน B1S.....	139
4.161 แสดงการแตก rå และ การวิบัติของคาน B1S.....	140
4.162 แสดงการแตก rå และ การวิบัติของคาน B1S (ต่อ).....	140
4.163 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุกาน B1LS.....	141
4.164 แสดงการแตก rå และ การวิบัติของคาน B1LS.....	142
4.165 แสดงการแตก rå และ การวิบัติของคาน B1LS (ต่อ).....	142
4.166 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุกาน B1CS.....	143
4.167 แสดงการแตก rå และ การวิบัติของคาน B1CS.....	144
4.168 แสดงการแตก rå และ การวิบัติของคาน B1CS (ต่อ).....	144
4.169 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุกาน B1LS-F1.....	145
4.170 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคาน B2LS-F1.....	146
4.171 แสดงการแตก rå และ การวิบัติของคาน B2LS-F1.....	146
4.172 แสดงการแตก rå และ การวิบัติของคาน B2LS-F1 (ต่อ).....	147
4.173 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุกาน B1CS-F1.....	148
4.174 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคาน B2CS-F1.....	148
4.175 แสดงการแตก rå และ การวิบัติของคาน B2CS-F1.....	149
4.176 แสดงการแตก rå และ การวิบัติของคาน B2CS-F1 (ต่อ).....	149
4.177 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุกาน B1L-F2.....	150
4.178 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคาน B1L-F2.....	151
4.179 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support คาน B1L-F2.....	151
4.180 แสดงการแตก rå และ การวิบัติของคาน B1L-F2.....	152

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ XXXI อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.181 แสดงการแตก rå และ การวิบัติของคาน B1L-F2 (ต่อ).....	152
4.182 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกทุกคาน B1C-F2.....	153
4.183 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่กึ่งกลางคาน B1C-F2.....	154
4.184 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่บริเวณ Support คาน B1C-F2.....	154
4.185 แสดงการแตก rå และ การวิบัติของคาน B1C-F2.....	155
4.186 แสดงการแตก rå และ การวิบัติของคาน B1C-F2 (ต่อ).....	155
5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวจากการทดสอบ และ จากทฤษฎี.....	157
5.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ระยะการแอ่นตัว ทดสอบ/ทฤษฎี.....	157
5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกทุกคาน กลุ่มที่ 1 (3 ชั้น-ตรง).....	158
5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกทุกคาน กลุ่มที่ 1 (3 ชั้น-โค้ง).....	159
5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกทุกคาน กลุ่มที่ 2 (3 ชั้น-ตรง).....	160
5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกทุกคาน กลุ่มที่ 2 (3 ชั้น-โค้ง).....	161
5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกทุกคาน กลุ่มที่ 1 (3 ชั้น-ตรง).....	162
5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกทุกคาน กลุ่มที่ 1 (3 ชั้น-โค้ง).....	163
5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกทุกคาน กลุ่มที่ 2 (3 ชั้น-ตรง).....	164
5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกทุกคาน กลุ่มที่ 2 (3 ชั้น-โค้ง).....	165
5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยจากการทดสอบ และ จากทฤษฎี.....	167
5.12 แสดงเปอร์เซ็นต์น้ำหนักบรรทุกทุกประลัย ทดสอบ/ทฤษฎี.....	168

# บทที่ 1

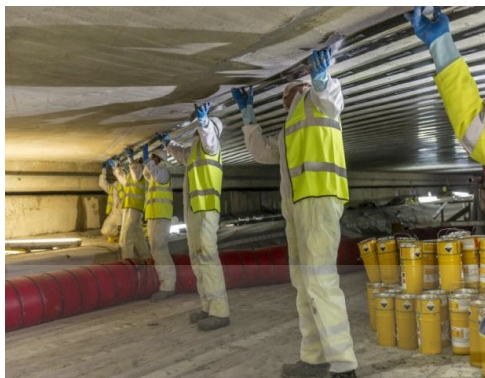
## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อาคารในประเทศไทยส่วนมากเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งบางแห่งใช้งานมาเป็นเวลานาน ทำให้ ส่งผลกระทบต่อกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้าง ในการศึกษาครั้งนี้จะมุ่งเน้นไปที่ การคืบ ซึ่งผล จากการคืบของคอนกรีต จะส่งผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตลดลงตามมาด้วย การเสริมกำลังหรือซ่อมแซมทำได้หลายวิธี เช่นการเพิ่มองค์อาคาร การเพิ่มค้ำยัน การเสริมด้วยแผ่นเหล็ก ซึ่งเป็นวิธีที่ค่อนข้างยุ่งยาก และใช้เวลามาก เพื่อแก้ปัญหาจึงได้มีการนำคาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber Reinforced Polymer : CFRP) มาใช้ในการซ่อมแซมและหรือเสริมกำลังให้กับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งวัสดุดังกล่าวมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานดังกล่าว เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนของกำลังต่อน้ำหนักที่สูง มีความต้านทานการผุกร่อนสูง มีน้ำหนักเบา และมีความสามารถในการ ดูดซับพลังงานสูง อย่างไรก็ตามวัสดุนี้ก็มีข้อจำกัดหลายอย่างเช่น มีพฤติกรรมแบบ Linear Elastic จนวิบัติทำให้ความเหนียวลดลง นอกจากนี้ก็มีค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อนไม่เท่าคอนกรีต และเมื่อมีค่าอุณหภูมิสูง อาจเสื่อมสภาพเร็วกว่าปกติหรืออาจวิบัติได้ (Hollaway, 1993)

แต่การทดสอบกำลังของโครงสร้างที่เสริมกำลังแล้ว เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย ดังนั้นการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) จนถึงจุดวิบัติจึงเป็นที่น่าสนใจมาก งานวิจัยนี้ได้ลดระยะเวลาในการทดสอบให้น้อยลงด้วยทฤษฎีการคืบ โดยใช้คานคอนกรีตมวลธรรมดา และคอนกรีต มวลเบา เนื่องจากคอนกรีต มวลเบา มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นน้อยกว่าคอนกรีตมวลธรรมดา โดยเทียบให้เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคานคอนกรีต มวลธรรมดาที่รับน้ำหนักกระทำมาเป็นเวลานาน วิธีการทดสอบคานตัวอย่างได้ให้น้ำหนักบรรทุกไปก่อน 60 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย หลังจากนั้น นค่อยทำการเสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) เพื่อจำลองการทดสอบให้เหมือนกับสภาวะใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(1)



(2)



(3)

รูปที่ 1.1 การเสริมกำลัง (1) พื้น (2) เสา (3) คาน คอนกรีตเสริมเหล็กด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการคืบ สำหรับใช้หาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ลดลง ที่กำลังอัด 240 กก./ตร.ซม. โดยใช้น้ำหนักบรรทุกคงค้างที่ระดับแตกต่างกันของน้ำหนักประลัยของคอนกรีต
2. เพื่อศึกษาหาการแอนตัวที่เกิดขึ้น เมื่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีการเปลี่ยนค่าโมดูลัสยืดหยุ่น เนื่องจากการคืบ โดยใช้คอนกรีตมวลธรรมดาปกคลุมเหล็กเสริมรับแรงดึงและคอนกรีตมวลเบาใช้รับแรงอัด
3. เพื่อศึกษาหาวัสดุที่นำมาใช้ทดแทนคอนกรีตมวลธรรมดา ที่มีการเปลี่ยนค่าโมดูลัสยืดหยุ่น เนื่องจากการคืบ โดยใช้คอนกรีตมวลเบาที่กำลังอัดเทียบเท่ากัน ที่หน่วยน้ำหนักแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เพื่อศึกษาหาแนวทางเบื้องต้น ในการพัฒนาแบบจำลองทำนายการแอ่นตัวที่เกิดขึ้น ที่ใช้คอนกรีตมวลธรรมดากับคอนกรีตมวลเบาภายในคานตัวเดียวกัน
5. เพื่อศึกษาความสอดคล้องของการแอ่นตัว ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา กับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ทั้งคอนกรีตมวลธรรมดากับคอนกรีตมวลเบา
6. เพื่อศึกษาการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP)
7. เพื่อเปรียบเทียบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังและไม่ได้เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP)
8. เพื่อศึกษาการวิบัติ ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP)

### 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. พิจารณาผลการคืบ ภายใต้น้ำหนัก บรรทุกคงค้าง 25% และ 50% ของน้ำหนักประลัยของคอนกรีต
2. ค่าการแอ่นตัวที่ได้จากคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ใช้คอนกรีตมวลธรรมดากับคอนกรีตมวลเบา เป็นค่า การแอ่นตัวระยะยาวที่เกิดขึ้น
3. ศึกษาคอนกรีตมวลธรรมดากับคอนกรีตมวลเบา ที่หน่วยน้ำหนักแตกต่างกัน แต่มีกำลังอัดเทียบ เท่ากัน
4. พิจารณาแต่คานที่เสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว (Single Reinforced Beam)
5. พิจารณาแต่คานแบบจูดรองรับแบบธรรมดา (Simple Beam)
6. พิจารณาแต่ผลของน้ำหนักกระทำแบบสถิต (Static Load)
7. ใช้เหล็กเสริมตามยาวมาตรฐาน SD40 และเหล็กลูกตั้งมาตรฐาน SR24

### 1.4 สมมติฐานของการศึกษา

สมมติฐานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. แรงแยกในหน้าตัดใดๆ ของคานจะต้องสมดุลกับแรงที่มากระทำ
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. หน้าตัดของคานทั้งก่อนและในขณะที่มีแรงกระทำบนคาน ต้องยังคงเป็นระนาบ
3. คอนกรีตและเหล็กเสริมเป็นไปตามกฎของฮุก นั่นคือ Stress กับ Strain มีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนโดยตรง
4. การยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมเป็นไปอย่างสมบูรณ์
5. คัดกำลังต้านแรงดึงของคอนกรีตแนวแกนสะเทินที่  $0.10f_c'$
6. หน่วยแรงและความเครียดที่อยู่ภายใต้การเปลี่ยนรูปเนื่องจากการคืบ ยังเป็นเชิงเส้น
7. พิจารณาแต่ผลการคืบของคอนกรีต

### 1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาพฤติกรรมและสมมติฐานต่างๆ รวมถึงรายงานการวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นความรู้พื้นฐาน และแนวทางในการทำวิจัย
2. เตรียมการทดสอบโดยมีการควบคุมให้เป็นมาตรฐานเดียวกันทุกตัวอย่าง เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลของตัวแปรต้นที่มีต่อผลตัวแปรตามได้อย่างถูกต้อง
3. ทำการทดสอบคานตัวอย่างและเก็บข้อมูลการทดสอบ
4. นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ พร้อมกับเปรียบเทียบผลที่ได้กับทฤษฎี และผลงานวิจัยที่ผ่านมา
5. สรุปผลการทดสอบพร้อมอธิบายลักษณะการวิจัยที่เกิดขึ้น
6. จัดทำบทสรุป รายงานผลการทดสอบพร้อมข้อเสนอแนะ

### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้สามารถหาค่าการแอ่นตัว เนื่องจากการคืบของคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีการลดค่าโมดูลัสของคานคอนกรีต ที่อยู่ภายใต้หน้าหนักค้ำ 25% และ 50% ของน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของคอนกรีต
2. ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริม และไม่เสริมเหล็กถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำให้ทราบถึงความแตกต่าง ของค่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นระหว่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา กับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ประกอบด้วยคอนกรีตมวลธรรมดากับคอนกรีตมวลเบา เมื่อทำการทดสอบจะได้รับการแอ่นตัวถูกต้องตามทฤษฎีหรือไม่
4. ทำให้ทราบถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อแบบจำลองที่ใช้ ในการทำคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ประกอบด้วยคอนกรีตมวลธรรมดากับคอนกรีตมวลเบา
5. ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของคานที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP)
6. ทำให้ทราบถึงวิธีการเสริมกำลัง และซ่อมแซมคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผ่านการรับน้ำหนักบรรทุกมาแล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# วรรณกรรมปริทัศน์

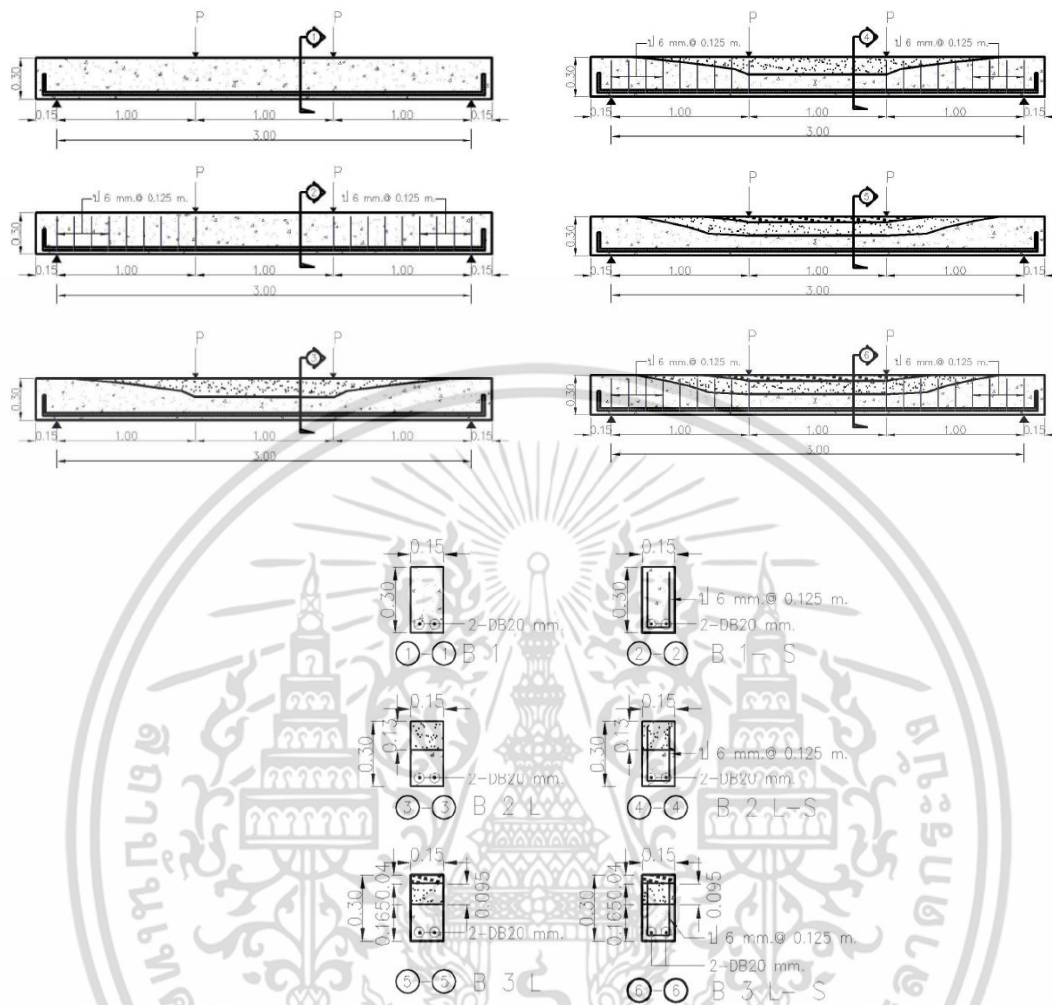
### 2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่น, การคืบของคอนกรีต, การแ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก และคอนกรีตมวลเบาที่มีความสัมพันธ์กันเพื่อใช้สำหรับเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมด้วยไฟเบอร์

### 2.2 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

ออมสิน คำหิรั (2553) ได้ศึกษาการทำนายการแ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้คอนกรีตมวลธรรมดาและคอนกรีตมวลเบา เนื่องจากคอนกรีตมวลเบาที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นน้อยกว่าคอนกรีตมวลธรรมดาที่กำลังอัดเท่ากัน โดยเทียบให้เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมวลธรรมดาที่รับน้ำหนักกระทำมาเป็นเวลานาน ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ผลโดยใช้ทฤษฎีการคืบและการวิเคราะห์หาค่าการแ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก จากการทดสอบพบว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็ก 2 ชั้น เมื่อเวลาผ่านไป 1 ปี ค่าการแ่นตัวจากผลของการทดสอบมีค่าน้อยกว่าค่าตามทฤษฎี 25% - 76% และคานคอนกรีตเสริมเหล็ก 3 ชั้น เมื่อเวลาผ่านไป 1 ปี ค่าการแ่นตัวจากผลของการทดสอบมีค่าน้อยกว่าค่าตามทฤษฎี 18% - 42% เพราะคอนกรีตมีค่าความเค้นอัดน้อยกว่าที่ออกแบบไว้ ดังนั้นจึงมีการแ่นตัวน้อยลง การเสริมเหล็กถูกต้องทำให้ค่าการแ่นตัวของคาน 2 ชั้น ลดลง 29% และของคาน 3 ชั้น ลดลง 13% - 17%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



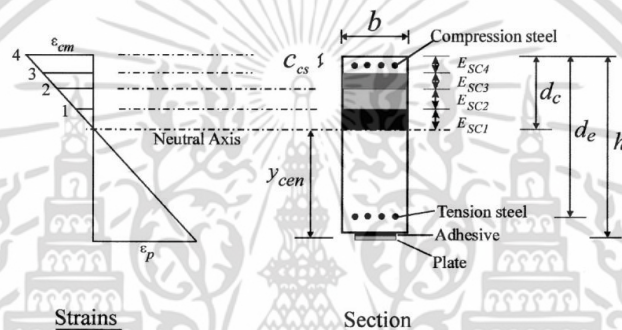
รูปที่ 2.1 แสดงรายละเอียดของคานทดสอบ

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบระยะการแอ่นตัวจากการคำนวณกับการทดสอบ

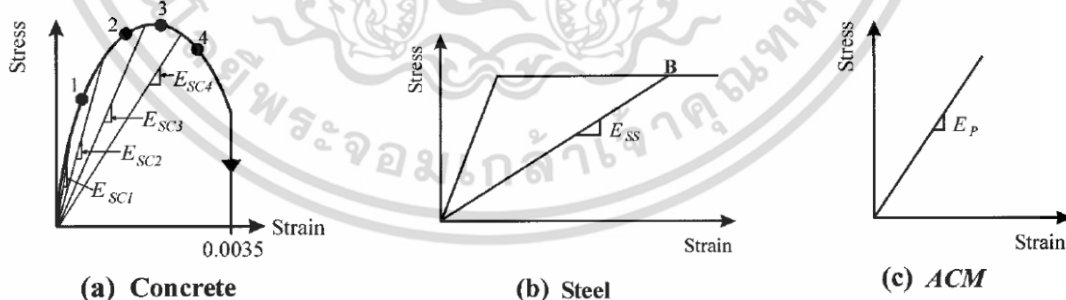
ชื่อคาน	B1	B1S	B1S	B2L	B2L-S	B3L	B3L-S	B3L-S
คำนวณ ( มม.)	7.39	7.39	7.39	22.16	22.16	15.97	15.97	15.97
ทดสอบ ( มม.)	10.75	10.38	12.28	17.70	12.59	13.55	11.85	11.25
%	31.26	28.80	39.83	-25.19	-76.01	-17.85	-34.77	-41.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sebastian W.M. (2003) ได้ทำการศึกษา ACM Plate (Adhesive Bonding of Plates of Advanced Composite Materials) โดยใช้หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งทำการวิเคราะห์ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของโครงสร้างประกอบแบ่งชิ้นส่วนเล็กๆ เนื่องจากแต่ละชั้นวัสดุไม่เหมือนกัน และทำการวิเคราะห์ Neutral Axis ของ ACM Plate โดยใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่มีหลายค่ามาวิเคราะห์ รวมทั้งวิเคราะห์ค่า Stress และ Strain ของโครงสร้างประกอบนี้ จากการวิจัยนี้พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่แตกต่างกันก็ทำให้เกิดค่า Stress และ Strain ที่แตกต่างกัน ดังนั้นวัสดุที่หลากหลายจึงจำเป็นที่จะต้องวิเคราะห์ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่แตกต่างกันด้วย



รูปที่ 2.2 Secant Modulus ของหน้าตัด ACM Plate



รูปที่ 2.3 (a) Secant Modulus ของหน้าตัดคอนกรีต (b) Secant Modulus ของเหล็ก (c) Secant Modulus ของหน้าตัด ACM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 การคืบ (Creep) ของคอนกรีต

เฉลิม เพ็ชรสูงเนิน (2548) ได้ทำการศึกษาการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นทันทีและการแอ่นตัวระยะยาวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้มวลรวมหยาบจากคอนกรีต ที่ถูกทำลายภายใต้น้ำหนักคงค้างมวลรวมหยาบจากคอนกรีตที่ถูกทำลาย ได้มาจากนำเอาคานคอนกรีตที่มีกำลังอัด  $200 \pm 10\%$  กก./ตร.ซม. และ  $400 \pm 10\%$  กก./ตร.ซม. มาย่อยให้เล็กลง จากนั้นนำเข้าเครื่องแยกขนาดละเอียดเพื่อเลือกส่วนที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 4,  $\frac{3}{8}$  และ  $\frac{1}{2}$  นิ้ว ขนาดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการทดสอบการแอ่นตัวมีขนาด  $10 \times 10 \times 150$  ซม. โดยคานคอนกรีตเสริมนี้เสริมด้วยเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9 มม. จำนวน 1 เส้น และถูกบ่มโดยการแช่น้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน น้ำหนักคงค้างที่ใช้มี 2 ระดับคือ 40% และ 60% ของน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย จากผลของการศึกษาพบว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้มวลรวมหยาบจากคอนกรีตที่ถูกทำลาย มีค่าการแอ่นตัวทั้งที่เกิดขึ้นทันทีและการโก่งตัวระยะยาว มากกว่า คานคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินธรรมชาติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการโก่งตัวที่เกิดขึ้นทันทีจะมีค่าความแตกต่างอย่างมาก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการลดลงของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากคอนกรีตที่ถูกทำลาย และการเปลี่ยนแปลงของค่าการคืบของคอนกรีต

## 2.4 คอนกรีตมวลเบา

ศิระ วาสาลา (2552) ทำการศึกษาอิทธิพลของ Foaming Agent ที่มีผลต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมในคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC ซึ่งใช้น้ำยาเคมีทำให้เกิดโฟมก่อนแล้วจึงนำไปผสมกับมอร์ตาร์ ซึ่งมีผลทำให้น้ำหนักของตัวอย่างลดลง โดยมุ่งเน้นการพัฒนา คอนกรีตเบาเพื่อใช้ในการก่อสร้าง ซึ่งมีค่าหน่วยน้ำหนักในช่วง  $1,200 - 2,000$  กก./ลบ.ม. และสามารถรับกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน มากกว่า  $180$  กก./ตร.ซม. ใช้อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ที่ 0.4 และ 0.5 และใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายโดยน้ำหนักที่ 1 : 1 ผลการทดลองพบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมโฟม ซึ่งมี ค่าหน่วยน้ำหนักอยู่ในช่วง  $1,200 - 2,000$  กก./ลบ.ม. มีค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง  $100 - 350$  กก./ตร.ซม. การหดตัวมีค่าอยู่ในช่วง  $393 \times 10^{-6} - 649 \times 10^{-6}$  และค่าแรงยึดเหนี่ยวในส่วนของมอร์ตาร์มีค่าระหว่าง  $25.83 - 47.49$  กก./ตร.ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

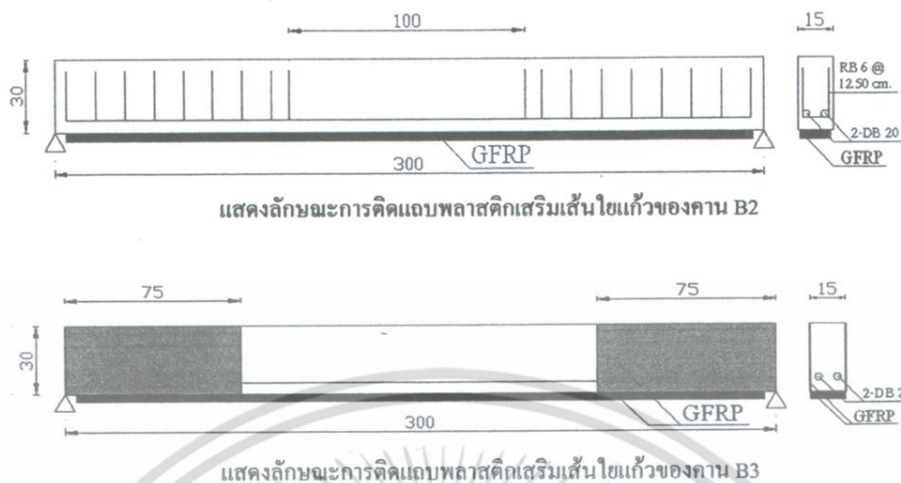
## 2.5 การเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย

คมสัน มณีเมือง และ วีรภัทร์ ทองประชา (2551) เกี่ยวกับการเสริมกำลังและซ่อมแซมคานคอนกรีตด้วยวัสดุพลาสติกเสริมใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced Polymer : GFRP) โดยคานที่นำมาทำการทดสอบเป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมคอนกรีตมวลเบาเป็นคาน 3 ชั้น เปรียบเสมือนเป็นคานเก่าที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 1 ปี จำนวน 3 ตัวอย่าง และคานคอนกรีตเสริมเหล็กมวลธรรมดา 3 ตัวอย่าง โดยคานตัวอย่างได้ให้น้ำหนักบรรทุกทุกไปก่อน 60% ของน้ำหนักบรรทุกประลัย ก่อนที่จะนำมาทำการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมด้วยแผ่น GFRP เพื่อจำลองคานให้เหมือนกับสภาวะการใช้งานจริง ในการเสริมกำลังหรือซ่อมแซม โดยคานตัวอย่างทั้งหมด 6 ตัวอย่าง แบ่งเป็นคานคอนกรีต 3 ชั้น ไม่เสริมกำลังเพื่อเป็นคานควบคุม 1 ตัวอย่าง คานคอนกรีต 3 ชั้นที่เสริมกำลังด้วยแผ่น GFRP ที่ท้องคาน 1 ตัวอย่าง คานคอนกรีต 3 ชั้นที่เสริมกำลังด้วยแผ่น GFRP ที่ท้องคานและด้านข้าง 1 ตัวอย่าง และคานคอนกรีตเสริมเหล็กไม่เสริมแผ่น GFRP 2 ตัวอย่าง แบ่งเป็นไม่ได้รับน้ำหนักบรรทุกมาก่อน 1 ตัวอย่าง และรับน้ำหนักบรรทุก 60% ของน้ำหนักบรรทุกประลัย 1 ตัวอย่าง ส่วนคานอีก 1 ตัวอย่างเสริมแผ่น GFRP ที่ท้องคาน เพื่อทดสอบหาความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัว และค่าความเครียดที่จุดต่างๆ และการเพิ่มกำลังรับโมเมนต์ดัดของคานเมื่อเสริมด้วยแผ่น GFRP จากการทดสอบพบว่าคานที่เสริมกำลังหรือซ่อมแซมด้วย GFRP จะมีกำลังสูงขึ้น 4% - 22% เมื่อเปรียบเทียบกับคานควบคุม และมีค่าการโก่งตัวสูงสุดที่กึ่งกลางคานลดลง ซึ่งคิดเป็น 11% ของคานควบคุม

ตารางที่ 2.2 แสดงรายละเอียดของการทดสอบ

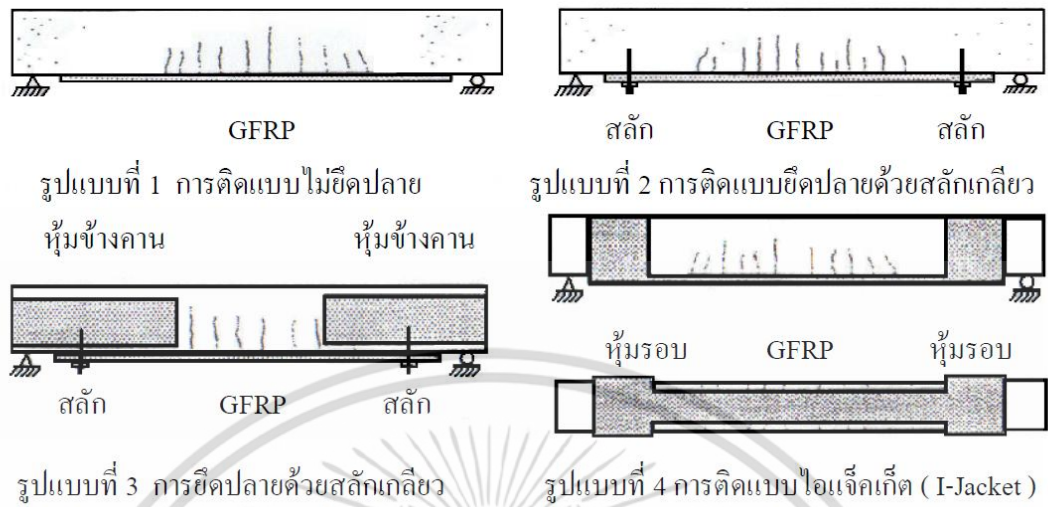
คาน	หน้าตัด (ซม.)	ยาว (ม.)	$f'_c$ (ksc)	เหล็กเสริม	เหล็กปลอก	GFRP
B1	15 x 30	3	240	2-DB 20	RB 6 @ 12.50 cm.	ไม่เสริม
B2	15 x 30	3	240	2-DB 20	RB 6 @ 12.50 cm.	เสริมที่ท้องคาน
B3	15 x 30	3	240	2-DB 20	ไม่เสริม	เสริมที่ท้องคาน และด้านข้าง 2 ด้าน
B4	15 x 30	3	240	2-DB 12	RB 6 @ 12.50 cm.	ไม่เสริม
B5	15 x 30	3	240	2-DB 12	RB 6 @ 12.50 cm.	เสริมที่ท้องคาน
B6	15 x 30	3	240	2-DB 12	RB 6 @ 12.50 cm.	ไม่เสริม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงรายละเอียดของคานทดสอบ

Alfarabi Sharif et.al. (1994) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการซ่อมคานด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) โดยการทดลองหารูปแบบการติดตั้งที่ต่างกัน การเสริมที่ทำให้เกิดการวิบัติอย่างสมบูรณ์ มีการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับการคำนวณทางทฤษฎี จากผลการทดสอบพบว่ารูปแบบที่มีการยึดส่วนปลายของแผ่นพลาสติกเสริมแรงด้วยสลักหรือท่อหุ้มรอบบริเวณที่เกิดแรงเฉือนใกล้จุดรองรับของคาน (รูปแบบที่ 2 และ 3) จะให้โมเมนต์ดัดในคานสูงกว่ารูปแบบที่ไม่หุ้มปลายหรือยึดส่วนปลาย (รูปแบบที่ 1) โดยที่ลักษณะการยึดปลายดังรูปแบบที่ 4 (I-Jacket) ของรูปที่ 2.5 จะให้โมเมนต์ดัดมากที่สุด และช่วยในเรื่องของแรงเฉือน การเสริมแผ่นพลาสติกที่หนา ทำให้อานทดสอบสามารถรับโมเมนต์ดัดได้มากขึ้น ขณะเดียวกันก็มีโอกาสทำให้อานวิบัติในส่วนบริเวณของปลายคานทดสอบ คือวิบัติด้วยแรงเฉือน และทำให้อานมีความเหนียวลดลงด้วย



รูปที่ 2.5 ลักษณะการติดพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# หลักการและทฤษฎีที่ใช้

### 3.1 การเสียรูปตามกาลเวลาของคอนกรีต

การเสียรูป (Deformation) และการแอ่นตัว (Deflection) ของชิ้นส่วนคอนกรีต เป็นสิ่งที่เชื่อว่าปรากฏขึ้นตามพฤติกรรมของหน่วยแรงและความเครียดของวัสดุ ที่เป็นการควบคุมได้โดยตรงที่มีวัสดุต่างๆ เป็นส่วนประกอบ การเสียรูปที่เกิดขึ้นประกอบด้วย ความเครียดจากการหดตัว (Shrinkage Strain) เกิดขึ้นเมื่อชิ้นส่วนเปิดออกมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศเป็นผลทำให้ผิวหน้าแห้ง ส่วนความเครียดยืดหยุ่นเริ่มต้น (Initial Elastic Strain) เกิดขึ้นเมื่อมีน้ำหนักมากระทำเริ่มแรก และความเครียดจากการคืบ (Creep Strain) เกิดขึ้นเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกค้างตลอดเวลา

การคืบ (Creep) เป็นสิ่งที่ทราบกันดีว่ามีความเครียดเพิ่มขึ้นภายในวัสดุภายใต้น้ำหนักค้างตลอดเวลา การเสียรูปเริ่มต้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเรียกว่าความเครียดยืดหยุ่น (Elastic Strain) ในขณะที่ความเครียดเพิ่มขึ้นหรือการเสียรูปที่ขึ้นอยู่กัเวลาเนื่องจากน้ำหนักค้างเรียกว่า ความเครียดจากการคืบ (Creep Strain) การคืบไม่สามารถหาได้โดยตรงนอกจากจะใช้วิธีลบค่าความเครียดยืดหยุ่น และความเครียดจากการหดตัว (Shrinkage Strain) ออกจากการเสียรูปทั้งหมด (Total Deformation) ถึงแม้ว่าการหดตัว (Shrinkage) และการคืบ (Creep) จะเป็นปรากฏการณ์ที่ไม่ขึ้นแก่กันก็ตาม แต่ก็สามารถรวมความเครียดตามกาลเวลา (Time Dependent Deformation) เข้าด้วยกัน ตามสมการ (3.1)

$$\text{ความเครียดรวม } \mathcal{E}_t = \text{ความเครียดยืดหยุ่น } \mathcal{E}_c + \text{ความเครียดจากการหดตัว } \mathcal{E}_{sh}$$

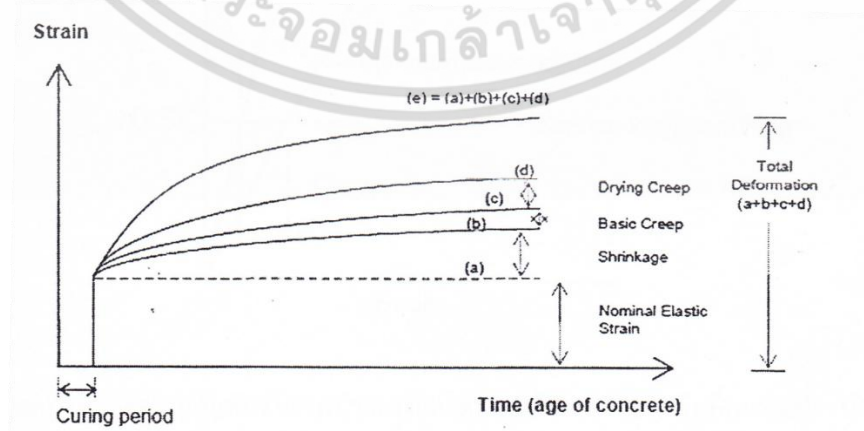
$$+ \text{ความเครียดจากการคืบ } \mathcal{E}_{cr} \quad (3.1)$$

การหดตัว (Shrinkage) เป็นคุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งที่ทำให้ส่วนของโครงสร้างเกิดการเสียรูปตามกาลเวลาเช่นเดียวกัน การหดตัวของคอนกรีตในลักษณะนี้เกิดจากการสูญเสียความชื้นที่เกิดขึ้นระยะเวลาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างกันของช่วงอายุคอนกรีตที่ไม่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักที่กระทำ การลดปริมาตรเมื่อคอนกรีตสูญเสียความชื้น ในทางตรงกันข้ามหากความชื้นเข้าสู่คอนกรีตจะเกิดการขยายตัว (Swelling) ดังนั้นการขยายตัวของคอนกรีตจึงเกิดจากการออกหรือเข้าของความชื้นนั่นเอง อย่างไรก็ตามคอนกรีตจะไม่ขยายตัวสู่ปริมาณเดิมเมื่อมันหดตัวถึงที่สุดแล้ว และได้รับความชื้นกลับมา

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นหาได้จากอัตราส่วนของหน่วยแรงอัดต่อหน่วยการหดตัวภายใต้จุดพิกัดสัดส่วน (Proportional Limit) โดยส่วนมากเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear) เนื่องจากมีการคืบเกิดขึ้นอยู่ ถึงแม้ว่าจะเป็นระยะเริ่มต้นของการรับน้ำหนักบรรทุก ดังนั้นการที่จะบ่งบอกถึงขอบเขตระหว่างความเครียดยืดหยุ่นเริ่มต้นและความเครียดจากการคืบที่เกิดขึ้นก่อนจึงเป็นการอธิบายได้ยาก สำหรับวัตถุประสงค์ในทางปฏิบัติที่จริงแล้ว ไม่มีกฎเกณฑ์ที่ตายตัวที่ทำให้เกิดการเสีรูปเริ่มต้นที่เป็นผลจากการพิจารณาหน่วยแรงที่ใช้ในการออกแบบที่ความเครียดยืดหยุ่นและการคืบที่ถือว่าความเครียดที่เกิดขึ้นภายหลังอยู่ภายใต้การรับน้ำหนักบรรทุกค้าง โมดูลัสของความยืดหยุ่นมีความสัมพันธ์กับชนิดของมวลรวมและกำลังอัดของคอนกรีต

รูปที่ 3.1 แสดงกราฟการเสีรูปที่แตกต่างกัน เป็นกราฟที่ประกอบด้วยความเครียดเทียบกับเวลา หลังจากการรับน้ำหนักบรรทุก เส้นแนวราบ (a) แสดงถึงความเครียดยืดหยุ่น (Elastic strain) ขณะที่เส้นโค้งแรก (b) ที่อยู่เหนือเส้นแนวราบแสดงถึงความเครียดจากการหดตัว (Shrinkage Strain) ส่วนการคืบ (Creep) และการคืบตัวแห้ง (Drying Creep) แสดงตามเส้นโค้ง (c) และ (d) ตามลำดับ การเสีรูปทั้งหมดแสดงตามเส้นที่สูงสุด (e) ในกราฟ



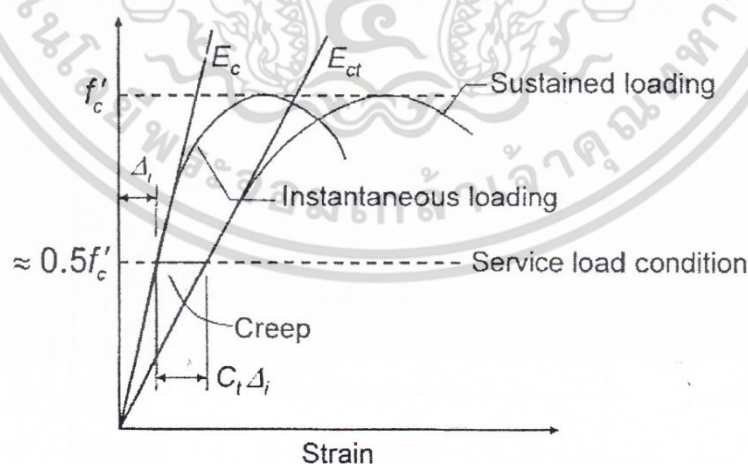
รูปที่ 3.1 การเสีรูปตามกาลเวลาของคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การคืบของคอนกรีต

โดยส่วนใหญ่แล้วคอนกรีตในสภาพใช้งานอาจมีการเสีรูปร่างตามกาลเวลา โดยมีสาเหตุที่สำคัญ 2 ประการ คือ 1) การเสีรูปร่างที่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักบรรทุก (Load Dependent Deformation) ได้แก่ การคืบ (Creep) 2) การเสีรูปร่างที่ไม่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักบรรทุก (Load Independent Deformation) ได้แก่ การหดตัว (Shrinkage) แต่ในงานวิจัยนี้พิจารณาการเสีรูปร่างตามกาลเวลาเนื่องจากการคืบเท่านั้น

การคืบของคอนกรีต คือ การเสีรูปร่างของคอนกรีตภายใต้น้ำหนักหรือแรงกดที่บรรทุกค้างไว้เป็นเวลานาน โดยมีข้อสันนิษฐานว่าการคืบของคอนกรีตเกิดจากการหดตัวของช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต การไหลหนืดของซีเมนต์เพสต์ การไหลของผลึกในวัสดุผสม และการซึมของน้ำจากซีเมนต์เจล เมื่อมีน้ำหนักหรือภายนอกกระทำต่อคอนกรีต การเสีรูปร่างเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การเสีรูปร่างที่เกิดขึ้นทันที และการเสีรูปร่างที่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งจะเริ่มเกิดขึ้นที่แต่ต่อเนื่องด้วยอัตราที่ลดลงตลอดเวลาที่คอนกรีตรับน้ำหนักบรรทุกโดยการเสีรูปร่างทั้งหมดจะมีค่าประมาณ 1.5 ถึง 4 เท่าของการเสีรูปร่างที่เกิดขึ้นทันที อนึ่ง เมื่อน้ำหนักหรือแรงอัดที่กระทำซึ่งทำให้หน่วยแรงอัดในคอนกรีตมีค่าไม่เกิน  $0.5f'_c$  การคืบของคอนกรีตจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ ดังรูปที่ 3.2 การคืบของคอนกรีตจะลดลงเมื่อคอนกรีตกำลังต้านทานแรงอัดสูงขึ้น



รูปที่ 3.2 ผลการคืบต่อความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีต

ที่สภาวะน้ำหนักบรรทุกใช้งาน

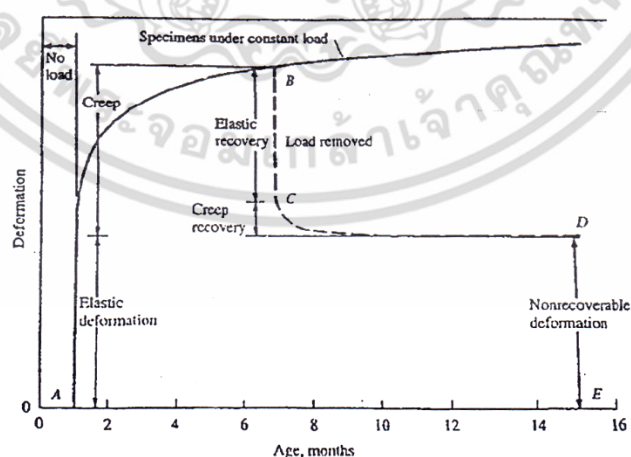
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกการคืบแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ 1) การคืบพื้นฐาน (Basic Creep) คือการเสียรูปที่เกิดขึ้นภายใต้กำลังอัดคงที่ ซึ่งปราศจากการสูญเสียความชื้น 2) การคืบแห้ง (Drying Creep) ส่วนใหญ่เป็นการสูญเสียความชื้นภายในคอนกรีตซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและขนาดของชิ้นส่วน

ปัจจัยที่มีผลต่อการคืบของคอนกรีต, ขนาดของแรง, อายุและกำลังของคอนกรีตเมื่อได้รับแรง, ระยะเวลาที่คอนกรีตรับแรง ซึ่งการคืบยังมีผลมาจากปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพของคอนกรีตและสภาวะที่ได้รับ เช่น ประเภทปริมาณและขนาดใหญ่มากที่สุดของมวลรวม, ชนิดของซีเมนต์, ปริมาณซีเมนต์เพสต์, ขนาดและรูปร่างของชิ้นส่วนคอนกรีต, อัตราส่วนปริมาณการต่อพื้นผิวของชิ้นส่วนของคอนกรีต, ปริมาณเหล็กเสริม, สภาพการบ่ม, อุณหภูมิ และความชื้น

### 3.2.1 การคืนกลับของการคืบในคอนกรีต

พฤติกรรมการคืบของคอนกรีต จะมีความสัมพันธ์ระหว่างการเสียรูปหรือระยะการหดตัวของคอนกรีตกับระยะเวลาที่น้ำหนักบรรทุกคงที่กระทำค้างไว้ รูปที่ 3.3 แสดงผลการคืบโดยแสดงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของการหดตัวของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานภายใต้แรงอัด จะเห็นว่าหลังจากการหดตัวเบื้องต้น การคืบจะเริ่มขึ้นทันทีในปริมาณค่อนข้างมากในตอนแรก แล้วก็ลดลงเรื่อยๆ ประมาณร้อยละ 75 ของการคืบจะเกิดขึ้นในปีแรก และจะเกิดต่อไปเรื่อยๆ จนสิ้นสุดประมาณสิ้นปีที่สามหรือสี่ ถ้าเอาแรงออก (เส้นประ BC) จะเกิดการยืดตัวกลับแบบอีลาสติกตามด้วยการยืดตัวกลับจากการคืบ แต่อย่างไรก็ตามจะมีการหดตัวแบบถาวรคงอยู่ สังเกตได้จากระยะระหว่าง จุด D และ จุด E



รูปที่ 3.3 การหดตัวแบบอีลาสติกและการคืบของคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

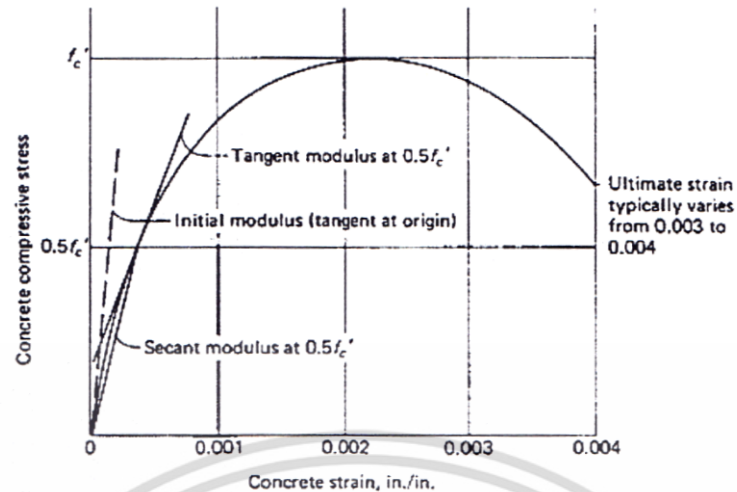
ถึงแม้ว่าการคืบที่เกิดขึ้นภายใต้น้ำหนักใช้งานทั่วไปจะไม่ลด กำลังขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่จะมีผลต่อพฤติกรรม เช่น เนื่องจากการคืบขึ้นอยู่กับเวลา ดังนั้นการแอนตัวสุดท้ายของคานอาจจะมากกว่าการแอนตัวทันทีประมาณ 2 ถึง 3 เท่า ส่วนในคอนกรีตอัดแรง เมื่อเกิดการคืบขึ้นในองค์อาคาร จะส่งผลให้เกิดการเสื่อมลดของแรงอัดทำให้องค์อาคารเกิดการแตกร้าวและแอนตัวมากขึ้นภายใต้แรงอัดคงที่เมื่อการคืบในคอนกรีตที่เกิดขึ้น เหล็กเสริมซึ่งยึดเหนี่ยวติดกับเนื้อคอนกรีตก็จะหดตัวตามไปด้วย ทำให้แรงที่เหล็กเสริมต้องรับเพิ่มขึ้นตามแรงที่เนื้อคอนกรีตรับลดลงเนื่องจากการคืบ

### 3.3 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

#### 3.3.1 การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ( $E_c$ ) เป็นตัวบ่งบอกหรือแสดงถึงความต้านทานการเสียรูป (Deformation) ของคอนกรีตเมื่อมีน้ำหนักหรือแรงกดอัดกระทำ พบว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าแปรเปลี่ยนตามกำลังของคอนกรีต หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ตลอดจนขนาดและระยะเวลาที่รับน้ำหนักบรรทุก เมื่อคอนกรีตรับน้ำหนักบรรทุกอยู่ในช่วงใช้งานแลกระทำในช่วงระยะเวลาสั้นๆ อาจสมมติว่าคอนกรีตเป็นวัสดุยืดหยุ่น (Elastic Material) โดยมีความเครียดยืดหยุ่น (Elastic Strain) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับหน่วยแรงอัดที่กระทำ แต่เมื่อคอนกรีตรับน้ำหนักบรรทุกค้างเป็นเวลานาน (Long Term Loading) ต้องพิจารณารวมความเครียดเนื่องจากการคืบ (Creep Strain) ด้วย เพราะโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจะลดน้อยลงตามลำดับ ทำให้คอนกรีตเกิดการเสียรูปมากขึ้นและจะมีการเสียรูปอย่างถาวรเมื่อลดน้ำหนักหรือแรงกระทำ

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตหาได้จากอัตราส่วนของหน่วยแรงอัดต่อหน่วยการหดตัวของเส้นสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบหากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต ซึ่งโดยทั่วไปเส้นสัมพันธ์นี้มีลักษณะเป็นรูปโค้งพาราโบลาใน รูปที่ 3.4 แต่สามารถหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตได้ 3 วิธีการต่างๆ ดังนี้ สำหรับงานวิจัยนี้จะหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแบบ Secant Modulus



รูปที่ 3.4 การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

1. Initial Tangent Modulus คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นสัมผัสซึ่ง ได้จากการลากเส้นจากจุดเริ่มต้นให้กับเส้นความสัมพันธ์ของหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัวที่จุดเริ่มต้นนั้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่หาได้โดยวิธีนี้เป็นค่าที่สมมติว่าคอนกรีตเป็นเสมือนวัสดุยืดหยุ่น (Elastic) เช่นเดียวกับเหล็ก โดยคิดว่าไม่มีการเสียรูปอย่างถาวรเมื่อลดน้ำหนักหรือเอาแรงกระทำ นั่นคือไม่คิดการหดตัวแบบพลาสติกหรือการคืบของคอนกรีต
2. Secant Modulus คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นที่ลากจากจุดเริ่มต้นกับจุดใดๆ ที่ต้องการหา ซึ่งมักพิจารณาที่จุดซึ่งมีหน่วยแรงอัดเท่ากับ 40% ถึง 50% ของหน่วยแรงอัดสูงสุด บนเส้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดกับหน่วยการหดตัว มาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท. ถือว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่หาได้โดยวิธีนี้เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่แท้จริงของคอนกรีตในช่วงใช้งานเพราะเป็นค่าที่ได้รวมถึงการหดตัวแบบพลาสติกหรือการคืบของคอนกรีต
3. Tangent Modulus คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นที่ลากสัมผัสจุดใดๆ บนเส้นสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัวของคอนกรีต ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่หาได้โดยวิธี นี้เป็นค่าที่แท้จริงของคอนกรีตทุกระดับของหน่วยแรงอัด

ในทางปฏิบัติถือว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่หาโดยวิธี Secant Modulus เป็นค่าแท้จริงที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีต ซึ่งรับน้ำหนักในช่วงใช้งานเนื่องจากจะพิจารณาถึงหน่วยการหดตัวแบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลาสติกเข้าไปด้วย จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าสูงขึ้นเมื่อ ริงอัตราการเพิ่มหน่วยแรงอัด หากทำการทดสอบกำลังต้านแรงอัดโดยวิธีมาตรฐาน พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะขึ้นอยู่กับกำลังต้านทานแรงอัดประลัยของคอนกรีตและหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต

มาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท กำหนดสูตรสำหรับหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตโดยให้ขึ้นกับกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดและหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ตามสมการ (3.2)

$$E_c = w^{1.5} 4270 \sqrt{f'_c} \text{ กก./ตร.ซม.} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $E_c$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต กก./ตร.ซม.

$w$  = หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ตัน/ลบ.ม.

$f'_c$  = กำลังอัดสูงสุดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกเมื่ออายุ 28 วัน กก./ตร.ซม. สำหรับคอนกรีตธรรมดา (หน่วยน้ำหนัก  $w = 2.323$  ตัน/ลบ.ม) จะได้ว่า

$$E_c = \text{โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต} = 15100 \sqrt{f'_c} \text{ กก./ตร.ซม.}$$

### 3.3.2 การทำนายค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากการคืบของคอนกรีต

การคาดคะเนการคืบของคอนกรีตที่เวลาใดๆ อาจพิจารณาได้จาก สมการที่ 3.3 ซึ่งเป็นสมการของค่าสัมประสิทธิ์การคืบ ที่สภาวะมาตรฐาน (Standard Creep Coefficient) โดย Branson เสนอไว้สำหรับคอนกรีตที่มีค่ายุบตัวไม่เกิน 10 ซม. ความชื้นสัมพัทธ์ 40% โดยได้รับการบ่มชื้น และรับน้ำหนักหลังจากที่หล่อเสร็จแล้ว 7 วัน

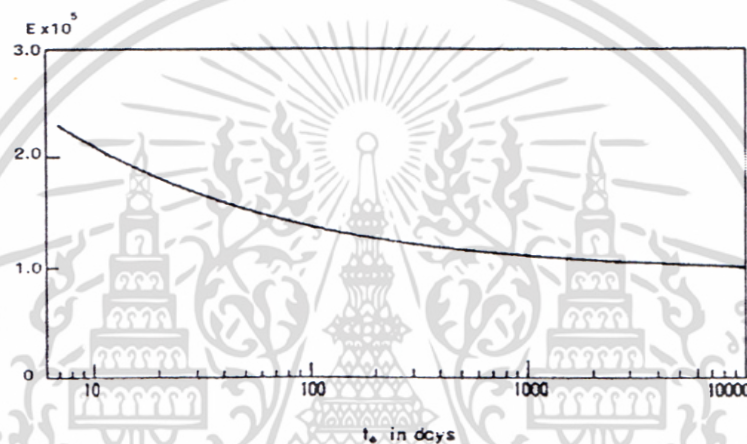
การคำนวณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่เวลาต่างๆ จะใช้สมการซึ่งเป็นสมการอ้างอิงที่ได้จากมาตรฐาน ACI 209R-92

$$E_{ce}(t) = \frac{E_{ci}}{1+\phi(t)} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $E_{ce}$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ณ เวลา  $t$

$E_{ci}$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเมื่อมีน้ำหนักกระทำปกติใช้ที่การบ่ม 28 วัน

$\phi(t)$  = สัมประสิทธิ์การคืบ



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับเวลา

### 3.4 การแอนตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

#### 3.4.1 การวิเคราะห์การแอนตัวทันที

การแอนตัวทันทีมาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท ให้พิจารณาหาระยะโก่งตัวทันทีที่มากที่สุดโดยใช้ทฤษฎีอีลาสติก ของการวิเคราะห์โครงสร้างสำหรับส่วนโครงสร้างที่เสริมเหล็กทางเดียวและรับน้ำหนักบรรทุกใช้งานดังนี้

$$\text{ระยะโก่งทันที } \Delta_i = K \frac{M_a L^2}{E_c I_e} \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $E_c =$  โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตธรรมดา =  $15100\sqrt{f'_c}$  กก./ตร.ซม.

$I_e =$  โมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผลของรูปตัด ซม.<sup>4</sup>

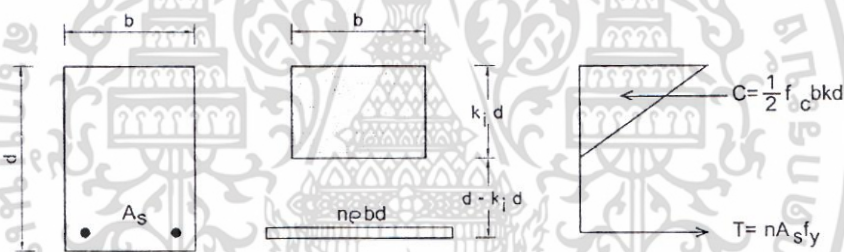
$$= (M_{cr} / M_a)^3 I_g + [1 - (M_{cr} / M_a)^3] I_{cr} \leq I_g \quad (3.5)$$

$M_{cr} =$  โมเมนต์ตัดแตกเร็ว =  $f_r I_g / y$  กก.-ซม. ( $f_r = 2.0\sqrt{f'_c}$  กก./ตร.ซม.)

$M_a =$  โมเมนต์ดัดมากที่สุดที่กระทำอันเนื่องมาจากน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน กก.-ซม.

$I_g =$  โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดทั้งหมด ซม.<sup>4</sup>

$I_{cr} =$  โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดแปลงเร็ว ซม.<sup>4</sup>



รูปที่ 3.6 การคำนวณโมเมนต์ของความเฉื่อยประสิทธิผลของหน้าตัด

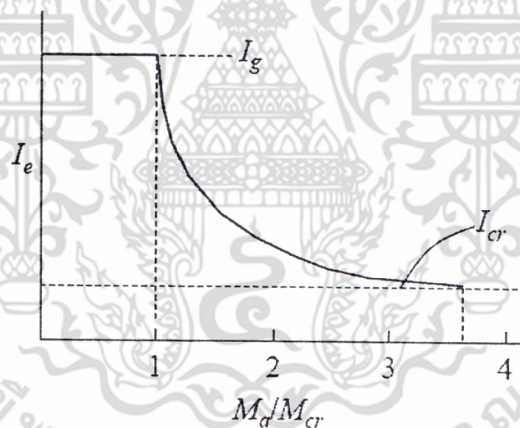
จากทฤษฎีเส้นตรง ระยะแกนสะเทิน  $k = \sqrt{2pn + (pn)^2} - pn \quad (3.6)$

จากรูปหน้าตัดเร็วเปลี่ยนพื้นที่  $I_e = b(kd)^3 / 3 + nA_s(d-kd)^2 \quad (3.7)$

หน้าตัดประสิทธิผลของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก จะแปรเปลี่ยนไปตามความยาวของคาน เนื่องจากปริมาณเหล็กเสริมที่ไม่เท่ากันและการแตกเร็วที่แตกต่างกัน รวมทั้งความไม่คงที่ของเนื้อวัสดุ ส่งผลให้การคาดคะเนระยะแอนตัวให้ถูกต้องเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบริเวณที่แรงดัดต่ำจนไม่รอยแตกร้าวในคาน โมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผล ( $I_e$ ) จะมีค่าเท่ากับโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดคอนกรีตทั้งหมด ในบริเวณที่แรงดัดสูงจนเกิดการแตกร้าวมาก โมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผลมีค่าเท่ากับโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดคอนกรีต ส่วนที่ยังไม่แตกร้าว รวมกับค่าของเหล็กเสริมที่แปลงเป็นเนื้อคอนกรีต การที่จะหาโมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผลที่ทุกตำแหน่ง จะต้องใช้เวลามาก มาตรฐานการออกแบบจึงยอมให้ใช้ค่าโดยประมาณสำหรับคานยื่น คานช่วงเดียว และ คานต่อเนื่องในบริเวณระหว่างตำแหน่งที่ โมเมนต์เปลี่ยนค่า (Inflection Point) สมการที่ 2.6 จะใช้ได้ดีเมื่อ  $1 \leq M_a / M_{cr} \leq 3$  แต่ถ้า  $M_a / M_{cr} \leq 3$  แสดงว่าการแตกร้าวมีมากเกินไป ควรจะใช้  $I_e = I_{cr}$  เลย แต่ถ้า  $M_a / M_{cr} \geq 1$  ก็แสดงว่าไม่มีการแตกร้าวขึ้นในหน้าตัด ดังนั้นใช้  $I_e = I_{cr}$  วิธีการในการคำนวณค่า  $I_e$  และ  $I_{cr}$  ที่ระบุโดย ACI นั้นจะใช้ได้กับการคำนวณระยะโก่งตัวของคานก่อนที่เหล็กเสริมจะถึงจุดคราก และไม่สามารถที่จะใช้ในการคำนวณระยะการโก่งตัวของคานในช่วงภายหลังการครากของเหล็กเสริมได้ เนื่องจากวิธีการนี้จะสมมติให้ค่าโมเมนต์ดัด ของคานมีค่าคงที่ภายหลังที่เหล็กเสริมคราก

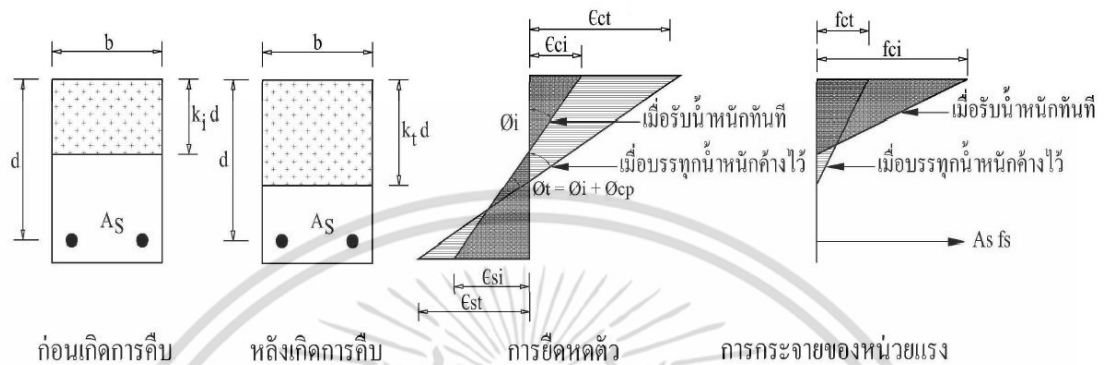


รูปที่ 3.7 การเปลี่ยนแปลงของ  $I_e$  ตามอัตราส่วน  $M_a / M_{cr}$

### 3.4.2 การวิเคราะห์การแอ่นตัวระยะยาว

เมื่อคานมีแรงปกติกระทำเป็นเวลานานเช่นแรงตายตัวเนื่องจากน้ำหนักคาน แรงตายตัวอื่นๆหรือแรงจรถาวร คอนกรีตส่วนที่เหนือแกนสะเทินซึ่งรับหน่วยแรงอัดจะเกิดการคืบ และเกิดการหดตัวของไฟเบอร์ต่างๆ ซึ่งมีผลทำให้ความเค้นของอิเลเมนต์ของคานเพิ่มขึ้น และคานเกิดการแอ่นตัวเพิ่มขึ้นจากการแอ่นตัวทันทีทันใดเมื่อคานมีแรงปกติกระทำ การแอ่นตัวทันที  $\Delta$ , รวมกับการแอ่นตัวที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคืบและการหดตัวในคอนกรีต เรียกว่าการแ่นตัวระยะยาว  $\Delta_t$  การแ่นตัวระยะยาวที่เพิ่มขึ้นใน  
ระยะแรกจะค่อนข้างมาก และจะมีอัตราลดลงภายหลัง 5 ปีผ่านไป



รูปที่ 3.8 ผลการคืบของคอนกรีตต่อค่าความเค้น

การวิเคราะห์โดยละเอียดจะได้จากการพิจารณารูปแสดงหน่วยการยึดหดตัวของหน้าตัด ดังรูปที่ 3.8 เนื่องจากโมเมนต์ดัดบนพื้นที่หน้าตัดมีค่าคงที่ การคืบทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการแจกแจงความเคียดและหน่วยแรงอัดในหน้าตัด กล่าวคือแกนสะเทินเลื่อนต่ำลง ความเค้น  $\phi_t$  มีค่ามากกว่า  $\phi_i$  และหน่วยแรงอัดที่ผิวบนลดลงจาก  $f_{ci}$  เป็น  $f_{ct}$  แต่จะไม่มีผลกระทบต่อกรยึดตัวของเหล็กเสริม

มาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท ให้พิจารณาระยะโง่งที่เพิ่มขึ้นตามกาลเวลาเนื่องจากการคืบ และการหดตัวของคอนกรีต โดยจากการคูณระยะโง่งทันที ที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกค้าง ( $\Delta_i$ ) ด้วยตัวประกอบเนื่องจากการล้า (creep factor :  $\lambda$ ) นั่นคือ

$$\text{ค่าการแ่นตัวที่เพิ่มขึ้นตามกาลเวลา} \quad \Delta_t = \lambda \Delta_i$$

$$\text{ตัวคูณประกอบเนื่องจากการล้า} \quad \lambda = \frac{\xi}{1+50\rho} \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $\rho' =$  อัตราส่วน  $A'_s/bd$  โดยให้พิจารณาที่กึ่งกลางคานสำหรับคานช่วงเดียวหรือคานต่อเนื่อง และพิจารณาที่ฐานรองสำหรับ คานยื่น เมื่อมีเหล็กเสริม รับแรงอัด แม้ว่าในการคำนวณออกแบบโดยวิธีกำลังจะไม่ต้องการเหล็กเสริมนี้

$\xi =$  ตัวประกอบตามกาลเวลาที่มีน้ำหนักบรรทุกค้าง (Time Dependent Factor) ซึ่งมีค่าดังนี้

เมื่อบรรทุกค้างนาน 5 ปี หรือมากกว่า  $\xi = 2.0$

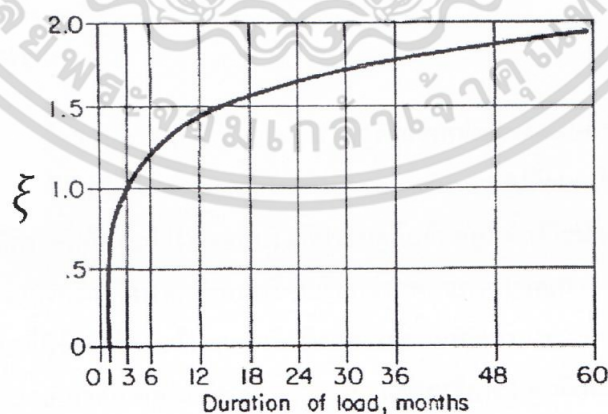
12 เดือน  $\xi = 1.4$

6 เดือน  $\xi = 1.2$

3 เดือน  $\xi = 1.0$

เมื่อระยะเวลาของการบรรทุกน้ำหนักค้างไม่ตรงตามที่กำหนด ให้หาค่าของ  $\xi$  โดยใช้การเทียบส่วนแบบเชิงเส้น

ดังนั้น การโก่งตัวทั้งหมด (Total Long-Term Deflection) =  $\Delta_i + \Delta_l$  (3.9)



รูปที่ 3.9 การเปลี่ยนแปลงของค่าตัวประกอบตามกาลเวลา  $\xi$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 คาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber Reinforced Polymer: CFRP)

วัสดุคอมโพสิต (Composite Material) เป็นวัสดุที่ประกอบไปด้วยวัสดุที่มากกว่า 2 ชนิดขึ้นไปที่ถูกนำมารวมกันในระดับ Macroscopic วัสดุที่ถูกนำมาประกอบเข้าด้วยกันนั้นจะต้องมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน และคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่ได้จะต้องมีคุณสมบัติแตกต่างจากวัสดุที่ถูกนำมาประกอบเข้าด้วยกันโดยทั่วไปแล้วคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่ได้จะเป็นคุณสมบัติที่โดดเด่นของวัสดุที่ถูกนำมาประกอบ ถ้าเปรียบเทียบกับวัสดุคอมโพสิตประเภทพลาสติกเสริมเส้นใย (Fiber Reinforced Plastic หรือ FRP) กับคอนกรีตเสริมเหล็กจะพบว่า เส้นใยทำหน้าที่เปรียบเสมือนเหล็กเสริมและพลาสติกทำหน้าที่เปรียบเสมือนคอนกรีต

สิทธิชัย แสงอาทิตย์ (2545) ได้กล่าวถึงข้อควรพิจารณาในการเสริมกำลังและซ่อมแซมองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก คุณสมบัติของวัสดุประเภทต่างๆ เช่น คอนกรีต เหล็ก เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน และพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ดังนี้

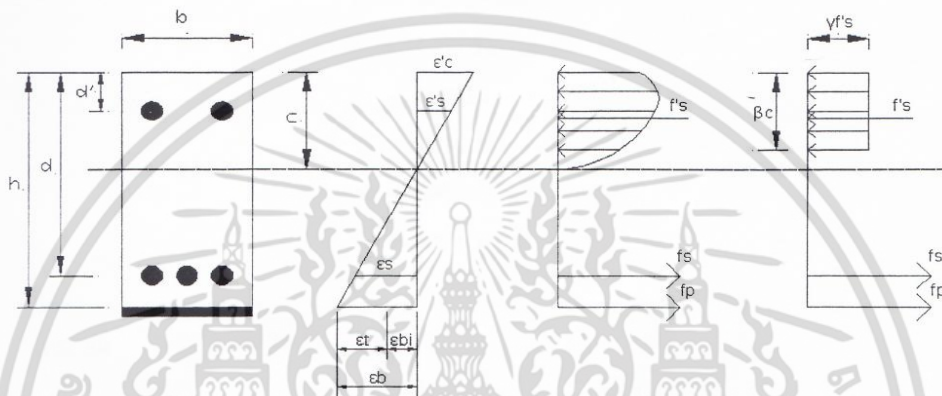
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของคอนกรีต เหล็ก เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน และพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

คุณสมบัติ	คอนกรีต	เหล็ก	เส้นใยแก้ว	เส้นใยคาร์บอน	พลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (Fiber Volume Fraction = 60%)	
					ขนานกับแนวเส้นใย	ตั้งฉากกับแนวเส้นใย
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	1.6	7.8	2.54-2.62	1.75-1.80	1.6	1.6
โมดูลัสแรงดึง (GPa)	2.5	200	72.5	230	160	10
กำลังรับแรงดึง (MPa)	3.5	400 (yielding)	3450	3000	1725	40
Strain ที่จุดแตกหัก	-	0.2% (yielding)	3% ถึง 5%	0.9% ถึง 1.5%	1.1%	1.5%
Poisson's ratio	0.2	0.3	0.15-0.26	0.2	0.22-0.28	0.015-0.02
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิ (10 <sup>-6</sup> /°C)	10	12	5	-0.4	0.02-0.04	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปวัสดุ FRP จะมีคุณสมบัติด้าน รับแรงดึงได้สูงกว่าเหล็กมาก แต่คุณสมบัติด้านการรับแรงอัดจะต่ำกว่าหลายเท่า ซึ่งสามารถเพิ่ม Flexural Capacity และ Shear Capacity ให้กับโครงสร้างคอนกรีตได้โดยตรง แต่การพันรอบเพื่อเพิ่ม Confinement ก็สามารถเพิ่ม Compressive Strength และ Ductility ให้กับโครงสร้างเสาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในโครงสร้างคานและพื้น เหล็กเสริมจะทำหน้าที่รับแรงดึง ขณะที่คอนกรีตรับแรงอัดวัสดุ FRP จะใช้เสริมกำลังด้านรับแรงดึงเช่นเดียวกับเหล็กเสริมดังใน รูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดง stress และ strain ในโครงสร้างรับแรงดัด

การออกแบบจะต้องคำนึงถึง Stress และ Strain ในคอนกรีตและเหล็กเสริมเดิม เนื่องจากน้ำหนักเดิมที่มีอยู่ซึ่งแตกต่างกับการออกแบบใหม่

การคำนวณหา Nominal Moment Capacity ของคานซึ่งเสริมกำลังด้วย FRP จากมาตรฐาน ACI 440 มีสมการเบื้องต้นดังนี้

$$M_n = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + A'_s f'_s \left( \frac{\beta_1 c}{2} - d \right) + \phi A_f f_f \left( h' - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (3.10)$$

การใช้ค่า  $f_s$  และค่า  $f'_s$  เนื่องจากการเพิ่ม FRP เข้าไปอาจทำให้เกิด Over Reinforcement เหล็กเสริมอาจยังไม่ถึงจุด Yield ค่า factor  $\phi$  เป็นค่าที่ใช้ปรับลดแรงที่ได้จากค่ากำลังประลัยของ Fiber ซึ่งมักใช้ที่ประมาณ 0.85 ซึ่งค่านี้อาจจะเปลี่ยนแปลงตามความเหมาะสม และดุลพินิจของวิศวกรผู้ออกแบบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบจะต้องคำนึงถึง Mode of Failure ที่จะเกิดขึ้นในส่วนรับแรงอัด โดยสามารถตรวจสอบจากค่าของ Strain ดังนี้

$$\text{ถ้า } \varepsilon_{fu} + \varepsilon_{bi} > \varepsilon_{cu} \left( \frac{h-c}{c} \right) \text{ จะถูกควบคุมโดย Concrete Crushing} \quad (3.11)$$

$$\text{ถ้า } \varepsilon_{fu} + \varepsilon_{bi} < \varepsilon_{cu} \left( \frac{h-c}{c} \right) \text{ จะถูกควบคุมโดย Fiber Rupture} \quad (3.12)$$

การออกแบบสำหรับการเสริมกำลังเฉือน และการติดตั้งแผ่น CFRP ขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กตามข้อกำหนดของ ACI 440.2R โดย ACI 440.2R ได้กำหนดแนวทางสำหรับการเสริมกำลังเฉือนด้วยแผ่น CFRP กำลังเฉือนสมบูรณแบบ  $V_n$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.13) และ (3.16) ตัวแปร  $\phi$  เป็นตัวคูณลดกำลัง กำลังเฉือนขึ้นอยู่กับเหล็กปลอก กำลังของคอนกรีต และกำลังของแผ่น CFRP ตัวแปร  $\Psi_f$  เป็นตัวคูณลดกำลังของแผ่น CFRP ดังแสดงในตารางที่ 3.2

$$V_u = \phi V_n \quad (3.13)$$

$$V_u = \phi (V_c + V_s + \Psi_f V_f) \quad (3.14)$$

ตารางที่ 3.2 ค่าตัวแปรลดกำลังของแผ่น CFRP สำหรับการเสริมกำลังกำลังเฉือน

$\Psi_f = 0.95$	สำหรับการหุ้ม 4 ด้านอย่างสมบูรณ
$\Psi_f = 0.85$	สำหรับการหุ้ม 2 ด้าน 3 ด้านหรือรูปตัวยู

การเสริมกำลังเฉือนของคานหรือเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยการหุ้มแผ่นเส้นใยเสริมแรงอาจทำเป็น 3 รูปแบบ ดังในภาพที่ 3.11

การหุ้ม 4 ด้าน อย่างสมบูรณจะให้ประสิทธิภาพมากที่สุด ส่วนการหุ้มที่ลักษณะรูปตัวยูหรือการหุ้ม 3 ด้าน และ การหุ้ม 2 ด้านจะให้ประสิทธิภาพรองลงมาตามลำดับ สมการที่ (3.16) ให้ค่าการเสริมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังเฉือนด้วยแผ่น CFRP ขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยปรับค่ากำลังของวัสดุคานประกอบ และอาศัยการสมมุติรูปแบบของการแตกร้าว (Khalifa et al. 1998) การคำนวณการเสริมกำลังเฉือนด้วยแผ่น CFRP สามารถหาได้จากการคำนวณจากหน่วยความเค้นดึงดังแสดงในสมการที่ (3.17)

$$V_f = A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cot \alpha) d_f / s_f \quad (3.15)$$

ซึ่ง

$$A_{fv} = 2ntfw_f \quad (3.16)$$

โดยที่  $V_f$  = แรงเฉือนของแผ่น CFRP

$A_{fv}$  = พื้นที่หน้าตัดของแผ่น CFRP

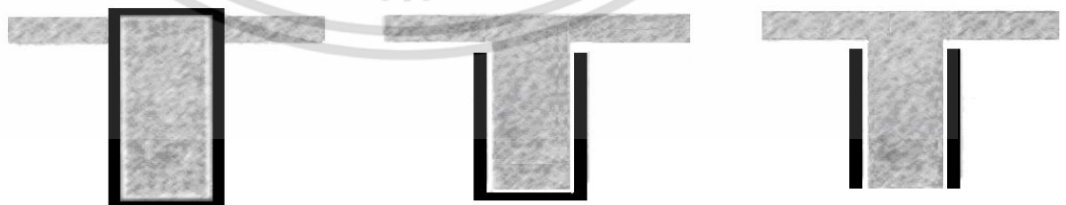
$n$  = จำนวนชั้นของแผ่น CFRP

$S_f$  = ระยะห่างของแถบแผ่น CFRP

$w_f$  = ความกว้างของแผ่น CFRP

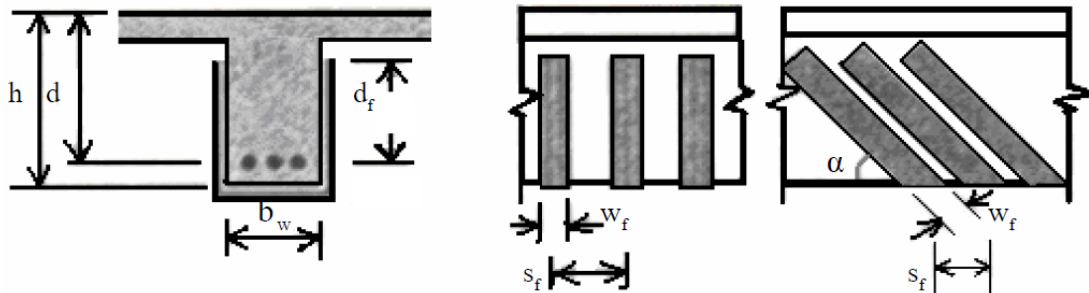
$d_f$  = ความลึกของแผ่น CFRP

$t_f$  = ความหนาของแผ่น CFRP



รูปที่ 3.11 รูปตัดแสดงการหุ้มแผ่น CFRP เพื่อเสริมกำลังเฉือนของคานแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 ขนาดและการติดตั้งแผ่น CFRP เพื่อเสริมกำลังเอ็นของคานแบบต่างๆ

ความเค้นดึงของแผ่น CFRP ที่จุดประลัยแปรโดยตรงกับค่าความเครียดในเนื้อวัสดุ สามารถนำมาประยุกต์ในการเสริมกำลังแรงเอ็นดังแสดงในสมการ (3.17)

$$f_{fe} = \epsilon_{fe} E_f \quad (3.17)$$

โดยที่  $f_{fe}$  = ความเค้นประลัยทึผลของแผ่น CFRP

$\epsilon_{fe}$  = ความเครียดออกแบบของแผ่น CFRP

$E_f$  = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของ CFRP

ผลของความเครียดในแผ่น CFRP ที่มากที่สุด สามารถให้การเสริมกำลังเอ็นที่เหมาะสมโดยควบคุมขีดจำกัดของความเครียดที่น้ำหนักประลัย ชนิดรูปแบบของการหุ้มแผ่น CFRP และกำลังของคอนกรีตที่เสริมองค์อาคาร วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องพิจารณารูปแบบของการหุ้มทั้งหมดที่เป็นไปได้ ใช้ผลความเครียดที่เกิดขึ้นและชนิดการหุ้มที่จุดวิกฤต เพื่อความเข้าใจในการกำหนดแนวทางการคำนวณจากผลกระทบความเครียด และความแตกต่างของรูปแบบการหุ้มแผ่น CFRP ที่ใช้สำหรับการเสริมกำลังเอ็นขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

การหุ้มอย่างสมบูรณ์ทั้ง 4 ด้านสำหรับการเสริมกำลังของคานและเสาด้วยแผ่น CFRP อาจทำให้เกิดการสูญเสียกำลังของวัสดุผสมคอนกรีต จะสังเกตเห็นได้ขณะเกิดความเครียดของแผ่น CFRP น้อยกว่า

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของวิศวกรรมเสถียรภาพการเชิงในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นต้นการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่จุดประลัย ในการทดลองคอนกรีตอาจจะหลุดติดมากับแผ่น CFRP แสดงว่ากำลังยึดเหนี่ยวของแผ่น CFRP มากกว่ากำลังของคอนกรีต เมื่อเริ่มเห็นลักษณะของการวิบัติทำให้กำหนดความเครียดสูงสุดได้ สำหรับการออกแบบอาจใช้ความเครียดประสิทธิผลได้ถึง 0.40% แต่ไม่เกิน 0.75% ของความเครียดประลัยสำหรับการหุ้มอย่างสมบูรณ์ทั้ง 4 ด้านด้วยแผ่น CFRP ดังสมการที่ (3.18)

$$\mathcal{E}_{fe} = 0.004 \leq 0.75 \mathcal{E}_{fu} \quad (3.18)$$

โดยที่  $\mathcal{E}_{fe}$  = ความเครียดออกแบบของแผ่น CFRP

$\mathcal{E}_{fu}$  = ความเครียดที่จุดประลัยของแผ่น CFRP

ค่าความเครียดของแผ่น CFRP ขึ้นอยู่กับการทดสอบ (Priestley et al. 1996) ค่าความเครียดที่สูงมากไม่นำมาประยุกต์ใช้สำหรับการเสริมกำลังเฉือน

แรงยึดเหนี่ยวจากการหุ้ม CFRP 3 ด้านแบบรูปตัวยู หรือหุ้มด้านข้าง 2 ด้าน ไม่เกิดขึ้นโดยรอบของหน้าตัดโครงสร้าง เป็นการสังเกตจากการยึดหยุ่นของคอนกรีต ก่อนการสูญเสียกำลังของวัสดุผสมของหน้าตัดคอนกรีต ด้วยเหตุผลดังกล่าว หน่วยแรงยึดเหนี่ยวใช้วิเคราะห์กำหนดขนาดของการใช้หน่วยแรงอย่างเต็มที่สำหรับการเสริมกำลัง และประสิทธิภาพของระดับความเครียดที่สามารถนำมาใช้งานได้ผลสมบูรณ์แบบ (Triantafillou. 1998) ค่าความเครียดประสิทธิผลได้จากค่าสัมประสิทธิ์ลดกำลังยึดเหนี่ยว  $k_v$  สำหรับการเสริมกำลังเฉือนโดยการหุ้ม CFRP เป็นรูปตัวยู หรือยึดเหนี่ยว 2 ด้าน สามารถใช้

$$\mathcal{E}_{fe} = k_v \mathcal{E}_{fu} \leq 0.004 \quad (3.19)$$

สัมประสิทธิ์การลดกำลังยึดเหนี่ยว  $k_v$  เป็นตัวกำหนดกำลังของคอนกรีตและรูปแบบของการหุ้มที่ใช้ สติฟเนสของแผ่น CFRP และสัมประสิทธิ์ของการยึดเหนี่ยวระหว่างผิววัสดุแต่ละชนิดสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.20)

$$k_v = k_1 k_2 L_e / 11900 \mathcal{E}_{fu} \leq 0.75 \quad (3.20)$$

ความยาวต่อเนื่องของการยึดเหนี่ยว  $L_e$  ระหว่างผิวต้องเป็นความยาวที่เพียงพอสำหรับการยึดเหนี่ยวหลังจากที่ใช้ในการเสริมกำลัง ความยาวของการยึดเหนี่ยวแสดงในสมการที่ (3.21)

$$L_e = 23,300 / (n t_f \mathcal{E}_{fe})^{0.58} \quad (3.21)$$

สัมประสิทธิ์การลดแรงยึดเหนี่ยว  $k_v$  มี 2 ตัวแปรคือ  $k_1$  และ  $k_2$  สำหรับประยุกต์การเสริมกำลังของคอนกรีตและชนิดของการหุ้มใช้งานตามลำดับ และคำนวณค่าได้จากสมการที่ (3.22) และ (3.23)

$$k_1 = (f'_c / 27)^{2/3} \quad (3.22)$$

$$k_2 = (d_f - L_e) d_f \quad (\text{สำหรับการหุ้มแบบตัวยู และ 4 ด้าน})$$

$$k_2 = (d_f - 2L_e) d_f \quad (\text{สำหรับการหุ้ม 2 ด้าน}) \quad (3.23)$$

โดยที่  $k_v$  = สัมประสิทธิ์ของการลดกำลังยึดเหนี่ยว

$k_1$  = สัมประสิทธิ์ของการยึดเหนี่ยวระหว่างผิว

$k_2$  = สัมประสิทธิ์ของการยึดเหนี่ยวระหว่างผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$L_e$  = ความยาวต่อเนื่องของการยึดเหนี่ยวระหว่างผิว

$d_f$  = ความลึกของแผ่น CFRP

$f'_c$  = กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

วิธีการคำนวณหาค่า  $k_v$  ที่เหมาะสมถูกต้อง เฉพาะสำหรับองค์อาคารที่อยู่ในเงื่อนไขของขอบเขตของแรงเฉือนสูงและโมเมนต์ต่ำ เช่น คานรองรับน้ำหนักช่วงเดียวอย่างง่าย ข้อยกเว้นของวิธีการจะไม่นับสำหรับการเสริมกำลังเอ็นในบริเวณที่เกิดการผสมของแรงดัด และความเค้นเฉือน หรือบริเวณแผ่นเอว (Web) ของคานที่เกิดแรงอัดเนื่องจากโมเมนต์ลบ ระยะห่างของแถบ CFRP ที่ใช้เสริมกำลังเอ็นจะถูกกำหนดขีดจำกัดโดย ACI 318-99 สำหรับเหล็กเสริมภายในรับแรงเฉือน ระยะห่างของแถบ CFRP จะถูกจำกัดระหว่างศูนย์กลางของแถบปลอก ในการทดสอบโครงสร้างจะเปลี่ยนค่าการใช้โดยตรงของระยะห่างของแถบ CFRP สำหรับการเสริมกำลังเอ็น (Hutchinson et al. 1998)

ขีดจำกัดของการเสริมกำลัง การรวมผลของการเสริมกำลัง จะรวมผลของการเสริมกำลังเอ็นด้วยแผ่น CFRP และเหล็กเสริม กำลังเอ็นดังกล่าวจะถูกจำกัดกำลังบนพื้นฐานของคุณสมบัติค่ากำลังที่ใช้คำนวณสำหรับเหล็กเสริมปลอกอย่างเดียว ยังไม่รวมกำลังของคอนกรีตในหน้าตัดคานหรือเสา ACI 318-99 Section 11.5.6.9 กำหนดขีดจำกัดไว้ดังแสดงในสมการที่ (3.26)

$$V_s + V_f \leq 0.66 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (3.24)$$

โดยที่

$V_s$	= กำลังเฉือนของเหล็กปลอก
$V_f$	= กำลังเฉือนของ CFRP
$f'_c$	= กำลังอัดประลัยของคอนกรีต
$b_w$	= ความกว้างของคาน
$d$	= ความลึกประสิทธิผลของคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 คอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตมวลเบา คือ คอนกรีตที่มีความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนักน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไป โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดตามวัสดุที่ใช้คือ

1. มวลรวมเบาที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ หินที่เป็นลาวาที่พองตัวโดยธรรมชาติ มวลรวมชนิดนี้ใช้ผสมคอนกรีตที่ไม่ต้องการกำลังสูง และมวลรวมจะดูดซึมน้ำมาก
2. มวลรวมเบาที่ได้จากกระบวนการผลิต 3 กระบวนการคือ Expanded Clay Aggregate ได้จากการนำดินเหนียวผสมกับสารก่อพองอากาศและนำไปเผาในหม้อเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส มีความแข็งแรงค่อนข้างดี จึงนิยมนำมาทำคอนกรีตมวลเบาและขบวนการที่สาม Sintered Fly Ash ได้จากการนำเถ้าลอยน้ำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส ทำให้อนุภาคเกาะติดกัน ผิวของมวลรวมค่อนข้างเรียบ
3. มวลรวมเบาที่ได้จากสารอินทรีย์ ได้แก่ การใช้ไม้หรือพลาสติกผสมในคอนกรีต
4. มวลรวมที่ได้จากของเหลือของกระบวนการผลิต ได้แก่ เถ้าหนักที่ได้จากโรงงานไฟฟ้าถ่านหินหรือจากการพ่นน้ำไปบน Slag ที่หลอมเหลว แต่ถ้าจำแนกคอนกรีตเบาตามการนำไปใช้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ดังแสดงใน ตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การจำแนกคอนกรีตเบาตามการนำไปใช้ ACI 211.2-18

ประเภท	กำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์ (กก./ตร.ซม.)	หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม)
คอนกรีตเบาสำหรับงานโครงสร้าง (Structural Lightweight Concrete)	180-480	1,400-1,800
คอนกรีตสำหรับงานก่อ (Masonry Concrete)	100-180	500-800
คอนกรีตสำหรับงานฉนวนกันความร้อน (Insulating Concrete)	10-100	น้อยกว่า 800

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.1 โฟมคอนกรีต (Aerated of Foam Concrete)

คอนกรีตประเภทนี้เป็นคอนกรีตที่ได้จากการทำให้เกิดฟองอากาศ หรือที่เรียกว่า “โฟม” ขนาด 0.1 ถึง 1.0 มิลลิเมตรในเนื้อคอนกรีต มีการผลิต 2 ระบบคือ

1. Autoclaved Aerated Concrete (AAC) โดยที่ฟองอากาศเกิดจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างส่วนผสมทำให้เกิดก๊าซและขยายตัวขึ้น ฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะถูกกักอยู่ในเนื้อคอนกรีต คอนกรีตมวลเบาประเภทนี้ถูกเรียกกันทั่วไปว่าคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ เนื่องจากคอนกรีตประเภทนี้ส่วนใหญ่ต้องนำไปอบไอน้ำก่อน

2. Cellular Lightweight Concrete (CLC) ฟองอากาศที่ได้เกิดจากการใส่ฟองอากาศหรือสารกักฟองอากาศลงไป และทำให้ผสมฟองอากาศร่วมกับสัดส่วนผสมคอนกรีตหรือมอร์ตาร์เมื่อผสมคอนกรีตหรือมอร์ตาร์แข็งตัว จะเกิดโพรงอากาศกระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อคอนกรีต

### 3.6.2 คอนกรีตที่ไม่มีส่วนละเอียด (No-Finesness Concrete)

คอนกรีตประเภทนี้เป็นคอนกรีตที่ไม่มีมวลรวมละเอียด (ทราย) อยู่ในส่วนผสม ส่วนผสมหลักจะประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ น้ำ และมวลรวมหยาบ การยึดเกาะติดกันระหว่างมวลรวมหยาบจะเกิดจากผิวที่ถูกเคลือบด้วยซีเมนต์เพสต์หนาประมาณ 1 ถึง 3 มม. เมื่อคอนกรีตแข็งตัวจะเกิดช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบนั้น และทำให้น้ำหนักของคอนกรีตลดลง หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตประเภทนี้ประมาณ 1,600 ถึง 2,000 กก./ลบ.ม. ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของมวลรวมที่ใช้ได้แก่ กรวดไม่ หินไม่ เป็นต้น ขนาดของมวลรวมควรมีขนาดเท่าๆ กัน ขนาดที่ใช้อยู่ในช่วง 9.5 ถึง 20.0 มม. มีกำลังต้านทานแรงอัด 60 ถึง 140 กก./ตร.ซม. ทั้งนี้กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตประเภทนี้ ขึ้นอยู่กับมวลรวมที่ใช้และปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใช้ โดยทั่วไปส่วนผสมที่ใช้จะประมาณ 1 : 8 โดยปริมาตร และอัตราส่วนผสมของน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) ประมาณ 0.4

### 3.6.3 คุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตมวลเบาชนิดนี้

1. ความแข็งแรง ค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตมวลเบาจะมีค่าประมาณ 10 ถึง 140 กก./ตร.ซม. ยกเว้นคอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบาสำหรับโครงสร้าง ซึ่งมีกำลังต้านทานแรงอัด 100 ถึง 400 กก./ตร.ซม. สำหรับค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตเบาทั่วไปอาจทำให้สูงขึ้น โดยการใช้ทรายธรรมชาติแทนมวลรวมน้ำหนักเบา แต่จะทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่ำ จะมีค่าความแข็งแรงน้อยกว่าคอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูงกว่า

2. ความคงทน คอนกรีตมวลเบาทั่วไปไม่สามารถทนการกัดกร่อนจากสารเคมีความเค็มทางกายภาพและการกระทบกระแทกจากแรงภายนอก เนื่องจากคอนกรีตมวลเบาไม่มีโพรงอากาศอยู่ภายใน

ดังนั้นคอนกรีตมวลเบาจึงไม่เหมาะสมกับการใช้งานในสภาพที่มีสารจำพวกซัลเฟตเจือปนอยู่ หรือในสภาพดินชั้น ดั้งนั้นในการนำไปใช้งานควรมีการฉาบผิวเพื่อป้องกันการสึกกร่อน

3. การหดตัว คอนกรีตมวลเบามีการหดตัวมากกว่าคอนกรีตธรรมดาประมาณ 5% - 40% แต่คอนกรีตมวลเบาที่ใช้วัสดุผสมซึ่งเป็นผลผลิตจากดินเผา ดินดานหรือตะกอนจะหดตัวน้อยลง

4. การนำความร้อน คอนกรีตมวลเบาเป็นตัวนำความร้อนที่เลว เนื่องจากในเนื้อคอนกรีตมีโพรงอากาศมากทำให้คอนกรีตมวลเบานำความร้อนได้ไม่ดี

5. หน่วยน้ำหนักหรือความหนาแน่นประมาณ 300 - 1,800 กก./ลบ.ม.

6. การดูดซึมน้ำ คอนกรีตมวลเบามีการดูดซึมน้ำได้มากกว่าคอนกรีตธรรมดาเนื่องจากมีรูพรุนมากกว่า

7. ความสามารถเตได้ ในปริมาณความสามารถเตได้ที่เท่ากัน คอนกรีตมวลเบาจะมีค่ายุบตัวน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา

8. การทนไฟ คอนกรีตมวลเบามีความต้านทานเพลิงไหม้ได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา

9. สัมประสิทธิ์การขยายตัวของคอนกรีตเบาประมาณ  $7 \times 10^{-6}$  ถึง  $14 \times 10^{-6}$  ต่อองศาเซลเซียส ซึ่งน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา

#### 3.6.4 ข้อควรระวังของคอนกรีตมวลเบาในการใช้งาน

1. การแยกตัว ถ้าส่วนผสมมีค่ายุบตัวมากกว่าหรือการจี้แยกเขย่ามากเกินไป คอนกรีตจะเกิดการแยกตัว มวลรวมที่หนักจะตกไปอยู่กองกันแบบ และน้ำจะเยิ้มออกมาสู่ผิวหน้าคอนกรีตมาก ทำให้เกิดการแตงผิวหน้าทำได้ยากขึ้น

2. การดูดซึมน้ำของมวลรวมจะมาก ดังนั้นในการออกแบบสัดส่วนผสมต้องนำปัจจัยนี้มาพิจารณารวมทั้งกำหนดวิธีการผสม

3. การผสมต้องผสมให้ถูกวิธี ถ้าใช้เวลาในการผสมที่นานเกินไป อาจทำให้มวลรวมเบาแตกได้

4. ความทนทานในงานคอนกรีตเสริมเหล็ก

## บทที่ 4

# วิธีการศึกษาและผลการศึกษา

### 4.1 การทดสอบตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก

#### 4.1.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
2. ทรายน้ำจืด ตามมาตรฐาน ASTM C-33
3. หินปูนขนาด  $\frac{3}{4}$  นิ้ว ตามมาตรฐาน ASTM C-33
4. สารเพิ่มฟองอากาศ (Foaming Agent) GRACE AE4
5. เครื่องมือวัดการยืดหดตัว (Strain Gauge)
6. เครื่อง UTM
7. แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐาน ASTM C 192
8. เครื่องผสมคอนกรีต
9. เครื่องฉีดโฟม
10. บั้มลม
11. เครื่องเพิ่มแรงดันน้ำ
12. เครื่องชั่งน้ำหนัก
13. กระบอกตวง
14. เครื่องบันทึกค่าการยืดหดตัว (Data Logger)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(1)



(2)



(3)



(4)

รูปที่ 4.1 วัสดุ และอุปกรณ์ (1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (2) สารเพิ่มฟองอากาศ

(Foaming Agent) GRACE AE4 (3) บั้มลม (4) เครื่องเพิ่มแรงดันน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(1)



(2)



(3)

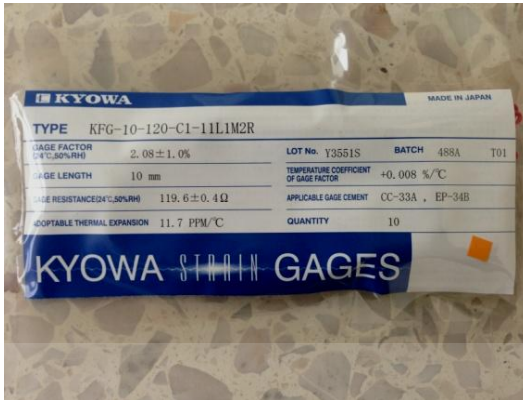


(4)

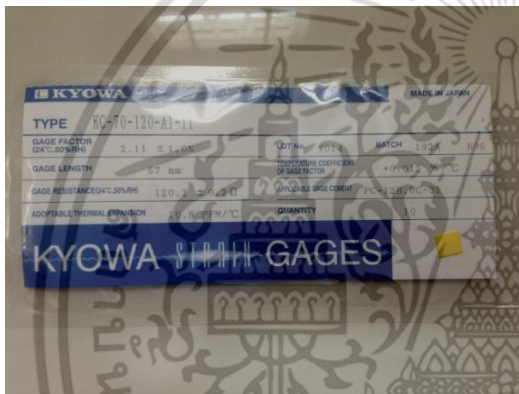
รูปที่ 4.2 วัสดุและอุปกรณ์ (1) เครื่องฉีดโฟม (2) เครื่องผสมคอนกรีต

(3) แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก (4) เครื่องชั่งน้ำหนัก

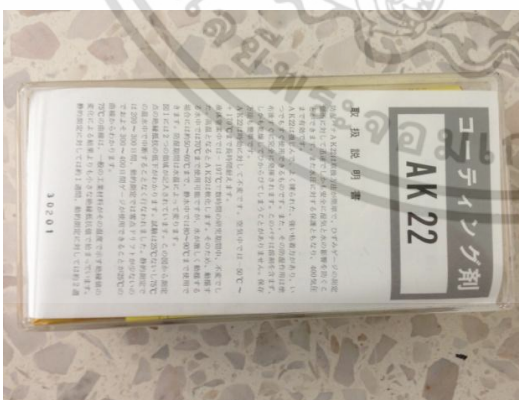
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 เครื่องมือวัดการยืดหดตัว (Strain Gauge) สำหรับติดตั้งที่เหล็ก และ CFRP



รูปที่ 4.4 เครื่องมือวัดการยืดหดตัว (Strain Gauge) สำหรับติดตั้งที่คอนกรีต

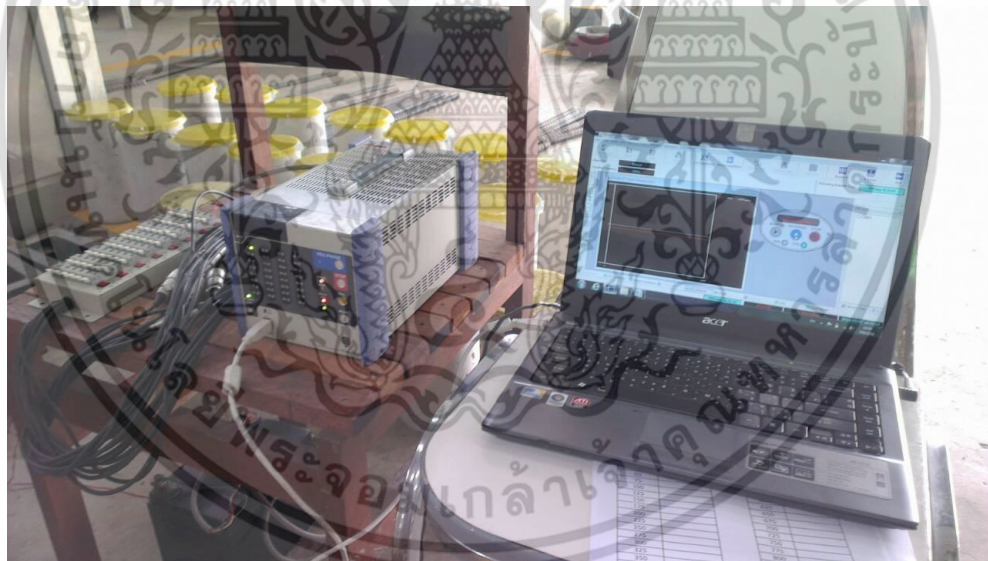


รูปที่ 4.5 วัสดุ Coating Material ใช้หุ้ม Strain Gauge ที่ติดตั้งบนเหล็กเสริม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 วัสดุ Strain Gauge cement เป็นกาวใช้ติด Strain Gauge



รูปที่ 4.7 เครื่องบันทึกค่าการยืดหดตัว (Data Logger) และคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 วิธีการทดสอบ

1. คำนวณส่วนผสมคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 240 กก./ตร.ซม. แล้วทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก ทำการบ่มที่ 28 วัน จำนวน 5 ตัวอย่าง



รูปที่ 4.8 ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก

2. นำเครื่องมือวัดการยืดหดตัว (Strain Gauge) ติดที่ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก ทำการทดสอบเพื่อหาค่าการหดตัว และนำไปคำนวณหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต ( $E_c$ ) รวมทั้งเปรียบเทียบค่ากำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) ที่ได้จากการทดสอบ กับที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 4.9 ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่ทดสอบหาโมดูลัสยืดหยุ่น และกำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ศึกษาและเปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ( $E_c$ ) กับระยะเวลาตามการทดสอบกับทฤษฎี แล้วทำการหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ที่ระยะเวลา 1 ปี โดย

- ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นค่าที่ 1 ( $E_{50}$ ) เป็นค่าที่ได้จากการค้ำแรงกระทำไว้ที่ 50% ของน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย

- ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นค่าที่ 2 ( $E_{25}$ ) เป็นค่าที่ได้จากการค้ำแรงกระทำไว้ที่ 25% ของน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย

4. หล่อตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาไม่ผสมมวลรวมหยาบ รูปทรงกระบอกจำนวน 5 ตัวอย่างของแต่ละหน่วยน้ำหนัก รวม 25 ตัวอย่าง โดยมีหน่วยน้ำหนักที่ 1,600, 1,700, 1,800, 1,900 และ 2,000 กก./ลบ.ม. โดยประมาณ ทำการบ่ม และทดสอบที่ 28 วัน



รูปที่ 4.10 การผสมคอนกรีตมวลเบา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 การหล่อตัวอย่างคอนกรีตมวลเบารูปทรงกระบอก

5. นำตัวอย่างคอนกรีตมวลเบารูปทรงกระบอก ที่ได้ทำการบ่มไว้แล้วข้างต้น มาทำการทดสอบ เพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่ากำลังอัดประลัย ของ คอนกรีตมวลเบาในแต่ละหน่วยน้ำหนัก โดยนำ Strain Gauge มาติดบนตัวอย่างคอนกรีตมวลเบารูปทรงกระบอก และเชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกค่าการยืดหดตัว (Data Logger) จากนั้นจึงทำการทดสอบ แล้วบันทึกค่าการหดตัวเป็นระยะๆ



รูปที่ 4.12 ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก ที่ติดตั้ง Strain Gauge เสร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 การทดสอบเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่ากำลังอัดประลัย

6. นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาวิเคราะห์ โดยทำการเขียนกราฟระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่น กับ ค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบา ซึ่งจะนำค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่ระยะเวลา 1 ปี ( $E_{50}, E_{25}$ ) มาทำการหาค่าหน่วยน้ำหนักที่เหมาะสม โดยจะต้องให้ค่ากำลังอัดประลัย ( $f'_c$ ) มีค่าประมาณ 240 กก./ตร.ซม. จะได้ 2 หน่วยน้ำหนัก เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับทฤษฎีต่อไป

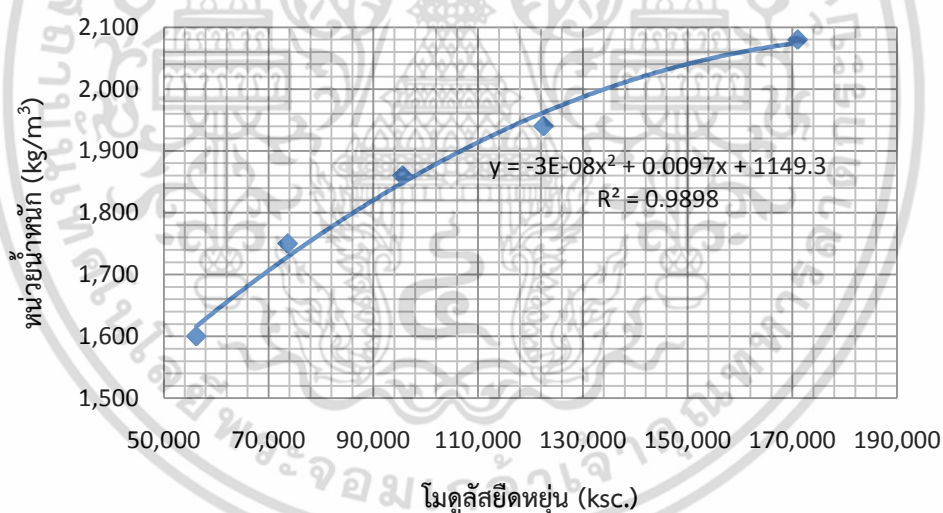
#### 4.2 วิธีการหาค่าของโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเมื่อเวลาผ่านไป

จากงานวิจัยที่ผ่านมา (อมสิน ดำหริห์ . 2553) ได้ทำการทดสอบกำลังอัดตัวอย่างคอนกรีตมวลเบารูปทรงกระบอก ได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของหน่วยน้ำหนัก 1,600, 1,750, 1,860, 1,940 และ 2,080 กก./ลบ.ม. ดังตารางที่ 4.1 นำค่าไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมวลเบารูปทรงกระบอก กับหน่วยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.14 และระหว่างกำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบารูปทรงกระบอก กับหน่วยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

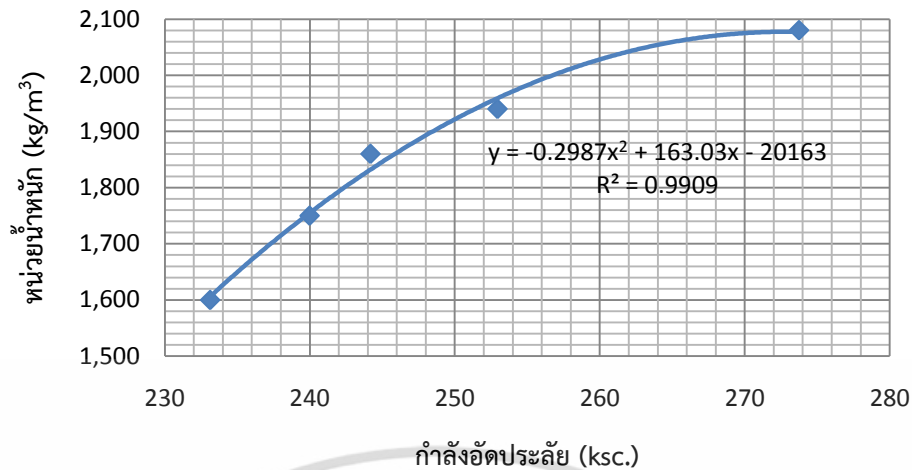
ตารางที่ 4.1 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบากับหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดประลัย  
(อมสิน ดำหรีห์. 2553)

หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)	กำลังอัดประลัย (กก./ตร.ซม.)	โมดูลัสยืดหยุ่นคอนกรีตมวลเบา (กก./ตร.ซม.)
1,600	233.13	56,221.71
1,750	239.99	73,666.88
1,860	244.19	95,561.86
1,940	252.95	122,483.00
2,080	273.75	171,005.77



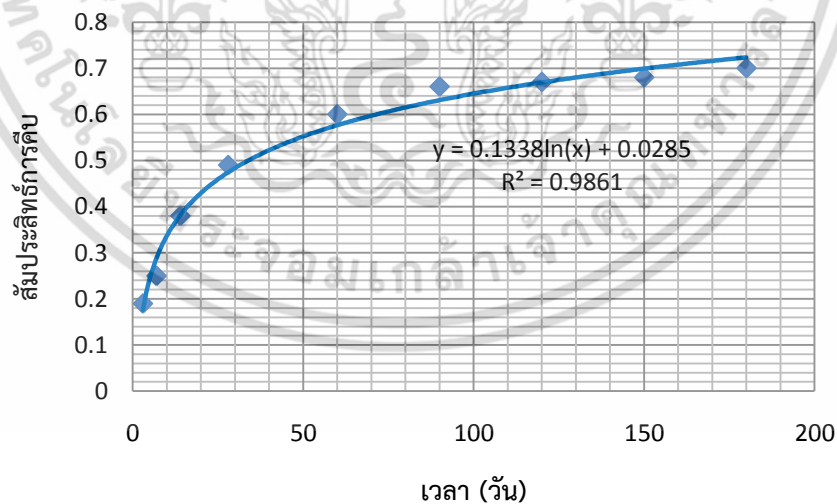
รูปที่ 4.14 โมดูลัสยืดหยุ่นของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบากับหน่วยน้ำหนัก (อมสิน ดำหรีห์. 2553)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



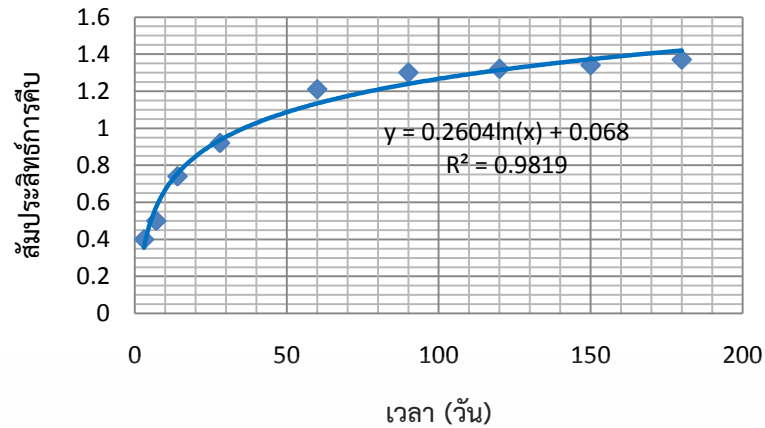
รูปที่ 4.15 กำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบารูปทรงกระบอก กับหน่วยน้ำหนัก (อมสิน คำหรีห์. 2553)

4. ข้อมูลจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การคืบของคอนกรีต ที่รับน้ำหนักบรรทุก 40% และ 60% ของน้ำหนักบรรทุกประลัยกับเวลา (รูปที่ 4.16 และ รูปที่ 4.17) สามารถหาสัมประสิทธิ์การคืบของคอนกรีตกับน้ำหนักบรรทุก 40% และ 60% ของน้ำหนักบรรทุกประลัยที่เวลา 365 วัน



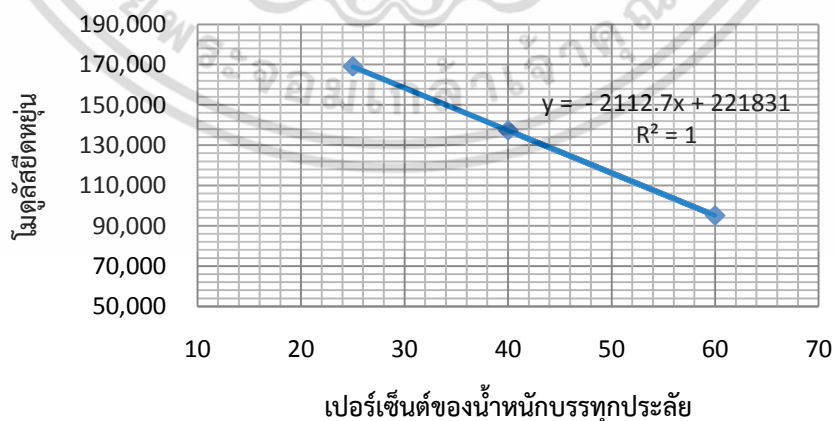
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การคืบของคอนกรีตกับน้ำหนักบรรทุก 40% ของน้ำหนักบรรทุกประลัยกับเวลา (เฉลิม เพ็ชรสูงเนิน. 2548)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การคืบของคอนกรีตกับน้ำหนักบรรทุก 60% ของน้ำหนักบรรทุกประลัยกับเวลา (เฉลิม เพ็ชรสูงเนิน. 2548)

5. จากกราฟจะได้สัมประสิทธิ์การคืบของคอนกรีตที่รับน้ำหนักบรรทุก 40% และ 60% ของน้ำหนักบรรทุกประลัยที่เวลา 365 วัน เท่ากับ 0.80, 1.60 ตามลำดับ จากนั้นหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่รับน้ำหนักบรรทุก 40% และ 60% ของน้ำหนักบรรทุกประลัยจากสมการ  $E_{ce}(t) = \frac{E_{ci}}{1+\phi(t)}$  จะได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่รับน้ำหนักบรรทุก 40% และ 60% ของน้ำหนักบรรทุกประลัย ได้เท่ากับ 137,324 กก./ตร.ซม. 95,070 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จากนั้นนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นกับเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักบรรทุกประลัย (รูปที่ 4.18)



รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักบรรทุกประลัย

(เฉลิม เพ็ชรสูงเนิน. 2548)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. จากกราฟจะได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่รับน้ำหนักบรรทุก 25% ( $E_{25}$ ) และ 50% ( $E_{50}$ ) ของน้ำหนักบรรทุกประลัยเท่ากับ 169,008 กก./ตร.ซม. และ 95,222 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ และจากรูปที่ 4.14 จะได้ค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาเท่ากับ 1,950 กก./ลบ.ม. และ 1,850 กก./ลบ.ม. ตามลำดับ

7. เมื่อได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตธรรมดา ( $E_c$ ) และโมดูลัสยืดหยุ่นที่รับน้ำหนักบรรทุก 25% ( $E_{25}$ ) และ 50% ( $E_{50}$ ) ของน้ำหนักบรรทุกประลัยเท่ากับ 227,700 กก./ตร.ซม., 169,008 กก./ตร.ซม. และ 95,222 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ นำค่าทั้งหมดมาวิเคราะห์เพื่อหาแนวระดับของแต่ละชั้น โดยการวิเคราะห์จะทำการ Trial & Error โดยใช้โปรแกรม EXCEL

### 4.3 วิธีการเตรียมหล่อตัวอย่างคานทดสอบ

#### 4.3.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1
2. ทรายน้ำจืด ตามมาตรฐาน ASTM C-33
3. หินปูนขนาด  $\frac{3}{4}$  นิ้ว ตามมาตรฐาน ASTM C-33
4. เหล็กเสริมตามแนวยาวเป็นเหล็กข้ออ้อย ชั้นคุณภาพ SD40 กำลังครากมีค่าไม่น้อยกว่า 4,000 กก./ตร.ซม. กำลังรับแรงดึงประลัยไม่น้อยกว่า 5,700 กก./ตร.ซม. และมีค่าการยืดหดตัวไม่น้อยกว่า 15%
5. เหล็กปลอกที่ใช้เป็นเหล็กเส้นกลม SR24 กำลังครากมีค่าไม่น้อยกว่า 2,400 กก./ตร.ซม. และมีค่าการยืดหดตัวไม่น้อยกว่า 21%
6. ไม้อัดหนา 15 มม. ทำการยึดโครงด้วยไม้เนื้อแข็งขนาด  $1\frac{1}{2}$  "x 3" ทุกระยะ 40 ซม.
7. พลาสติก สำหรับปมคานคอนกรีต
8. เครื่องผสมคอนกรีต
9. เครื่องฉีดโฟม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. ป้ลม
11. เครื่องเพิ่มแรงดันน้ำ
12. เครื่องซังน้ำหนัก
13. กระบอกลง
10. เครื่องมือวัดการหดตัว (Strain gage)
11. สารเพิ่มฟองอากาศ (Foaming Agent) GRACE AE4

#### 4.3.2 การหล่อตัวอย่างคานทดสอบ

1. ประกอบไม้แบบหล่อคานทั้ง 2 ประเภทขนาด 15x30 ซม. ยาว 3.30 ม. จำนวนทั้งหมด 16 ตัวอย่าง



รูปที่ 4.19 ไม้แบบหล่อคานคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 ไม้แบบหล่อคานคอนกรีต (ต่อ)

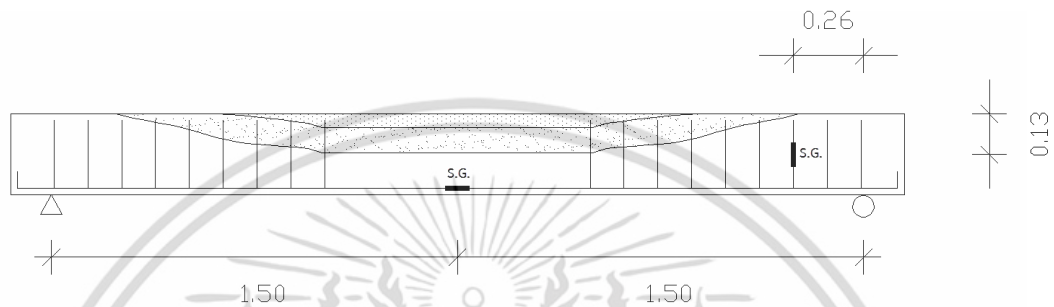
2. เหล็กเสริมจะใส่เฉพาะเหล็กเสริมรับแรงดึง โดยตัดเหล็กให้ได้ความยาวตามต้องการและทำการผูกเหล็กด้วยลวดผูกเหล็ก



รูปที่ 4.21 การเสริมเหล็กและผูกเหล็กปลอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดการยืดหดตัว (Strain Gauge) ที่เหล็กเสริม โดยจะต้องทำให้ผิวของเหล็กเสริมในตำแหน่งที่ต้องการเรียบ และ สะอาดก่อนทำการติดตั้ง หลังจากนั้นทำการหุ้มด้วย Coating Material ป้องกันการเสียหายของ Strain Gauge



รูปที่ 4.22 ตำแหน่งการติดตั้ง Strain Gauge ที่เหล็กเสริมก่อนการหล่อคอนกรีตคาน



รูปที่ 4.23 การติดตั้งเครื่องมือวัดการยืดหดตัว (Strain Gauge) ที่เหล็กเสริมหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 การหุ้ม Coating Material ป้องกันการเสียหายของ Strain Gauge



รูปที่ 4.25 การติดตั้งเครื่องมือวัดการยืดหดตัว (Strain Gauge) ที่เหล็กปลอก

4. ทำการตรวจสอบระยะหุ้ม ระยะเรียงของเหล็กปลอก และตำแหน่งของ Strain Gauge ก่อนทำการเทคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ตัวอย่างคานทดสอบที่ใช้ในการทดลองเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวที่มีหน้าตัดกว้าง 0.15 ม. ลึก 0.30 ม. และยาว 3.30 ม. กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 240 กก./ตร.ซม. จำนวน 16 ตัวอย่าง ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 เสริมเหล็ก 2-DB20 ชั้นคุณภาพ SD40

- เป็นคานคอนกรีตมวลธรรมดาไม่เสริมเหล็กปลูกตั้ง จำนวน 1 ตัวอย่าง และเสริมเหล็กปลูกตั้ง RB6@12.50 ซม. เว้นระยะ L/3 ช่วงกึ่งกลางคาน จำนวน 1 ตัวอย่าง

- คานคอนกรีตมวลธรรมดา และคอนกรีตมวลเบา 3 ชั้น-ตรง และ 3 ชั้น-โค้ง โดยชั้นล่างสุดของคานเป็นคอนกรีตมวลธรรมดา และชั้นถัดมาเป็นคอนกรีตมวลเบาที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก 1,950 กก./ลบ.ม. และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ( $E_{25}$  ที่มีน้ำหนักบรรทุกทุกค้ำที่ 25%) 169,008 กก./ตร.ซม. ชั้นบนสุดเป็นคอนกรีตมวลเบาที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก 1,850 กก./ลบ.ม. และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ( $E_{50}$  ที่มีน้ำหนักบรรทุกทุกค้ำที่ 50%) 95,222 กก./ตร.ซม. เสริมเหล็กปลูกตั้ง RB6@12.50 ซม. จำนวน 2 ตัวอย่าง โดยคานชนิดนี้เปรียบเสมือนคานเก่าที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 1 ปี และคานมีน้ำหนักกระทำมาแล้ว 60% ของน้ำหนักประลัย แล้วเสริม CFRP ที่ท้องคาน จำนวน 2 ตัวอย่าง อีกหนึ่งตัวอย่างไม่เสริม

- คานคอนกรีตธรรมดา และคอนกรีตมวลเบา 3 ชั้น-ตรง และ 3 ชั้น-โค้ง โดยชั้นล่างสุดของคานเป็นคอนกรีตมวลธรรมดา และชั้นถัดมาเป็นคอนกรีตมวลเบาที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก 1,950 กก./ลบ.ม. และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ( $E_{25}$  ที่มีน้ำหนักบรรทุกทุกค้ำที่ 25%) 169,008 กก./ตร.ซม. ชั้นบนสุดเป็นคอนกรีตมวลเบาที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก 1,850 กก./ลบ.ม. และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ( $E_{50}$  ที่มีน้ำหนักบรรทุกทุกค้ำที่ 50%) 95,222 กก./ตร.ซม. ไม่เสริมเหล็กปลูกตั้ง จำนวน 2 ตัวอย่าง โดยคานชนิดนี้เปรียบเสมือนคานเก่าที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 1 ปี และคานมีน้ำหนักกระทำมาแล้ว 60% ของน้ำหนักประลัย แล้วเสริม CFRP ที่ท้อง และด้านข้างคานทั้งสองด้าน

ส่วนคานกลุ่มที่ 2 เปลี่ยนเหล็กเสริมเป็น 2-DB16 ชั้นคุณภาพ SD40 แทน

ตารางที่ 4.2 รูปแบบการเสริมเหล็ก และการเสริม CFRP ของคานทดสอบ กลุ่มที่ 1

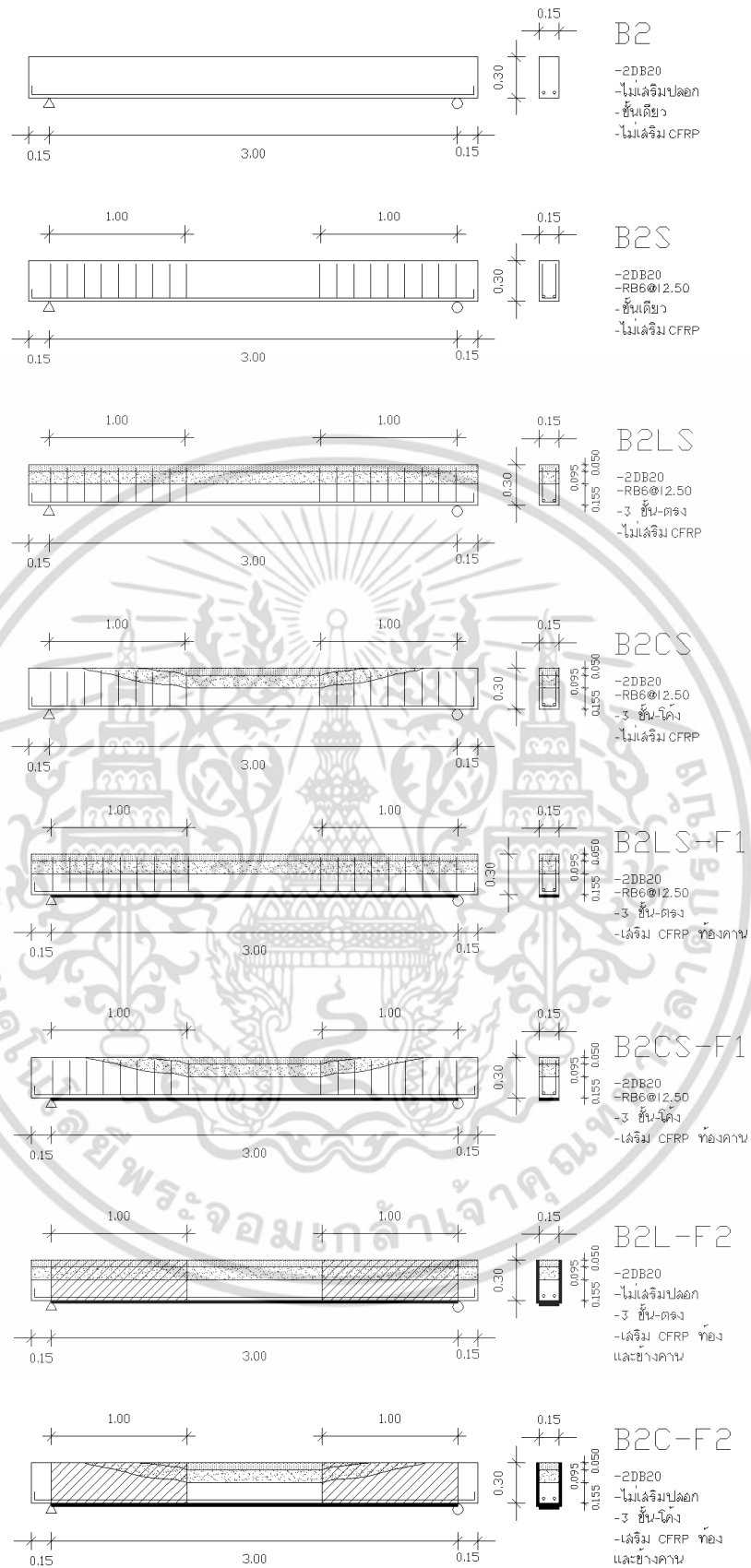
ตัวอย่างคาน	เหล็กเสริม	เหล็กกุกตั้ง	CFRP	หมายเหตุ
B2	2-DB20	ไม่เสริม	ไม่เสริม	คอนกรีตธรรมดาชั้นเดียว
B2S	2-DB20	RB6@12.50 ซม.	ไม่เสริม	คอนกรีตธรรมดาชั้นเดียว
B2LS	2-DB20	RB6@12.50 ซม.	ไม่เสริม	คอนกรีตธรรมดา และคอนกรีตมวลเบา 3 ชั้น-ตรง
B2CS	2-DB20	RB6@12.50 ซม.	ไม่เสริม	คอนกรีตธรรมดา และคอนกรีตมวลเบา 3 ชั้น-โค้ง
B2LS-F1	2-DB20	RB6@12.50 ซม.	เสริมท้องคาน	คอนกรีตธรรมดา และคอนกรีตมวลเบา 3 ชั้น-ตรง
B2CS-F1	2-DB20	RB6@12.50 ซม.	เสริมท้องคาน	คอนกรีตธรรมดา และคอนกรีตมวลเบา 3 ชั้น-โค้ง
B2L-F2	2-DB20	ไม่เสริม	เสริมท้องคาน และด้านข้าง คาน 2 ด้าน	คอนกรีตธรรมดา และคอนกรีตมวลเบา 3 ชั้น-ตรง
B2C-F2	2-DB20	ไม่เสริม	เสริมท้องคาน และด้านข้าง คาน 2 ด้าน	คอนกรีตธรรมดา และคอนกรีตมวลเบา 3 ชั้น-โค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 รูปแบบการเสริมเหล็ก และการเสริม CFRP ของคานทดสอบ กลุ่มที่ 2

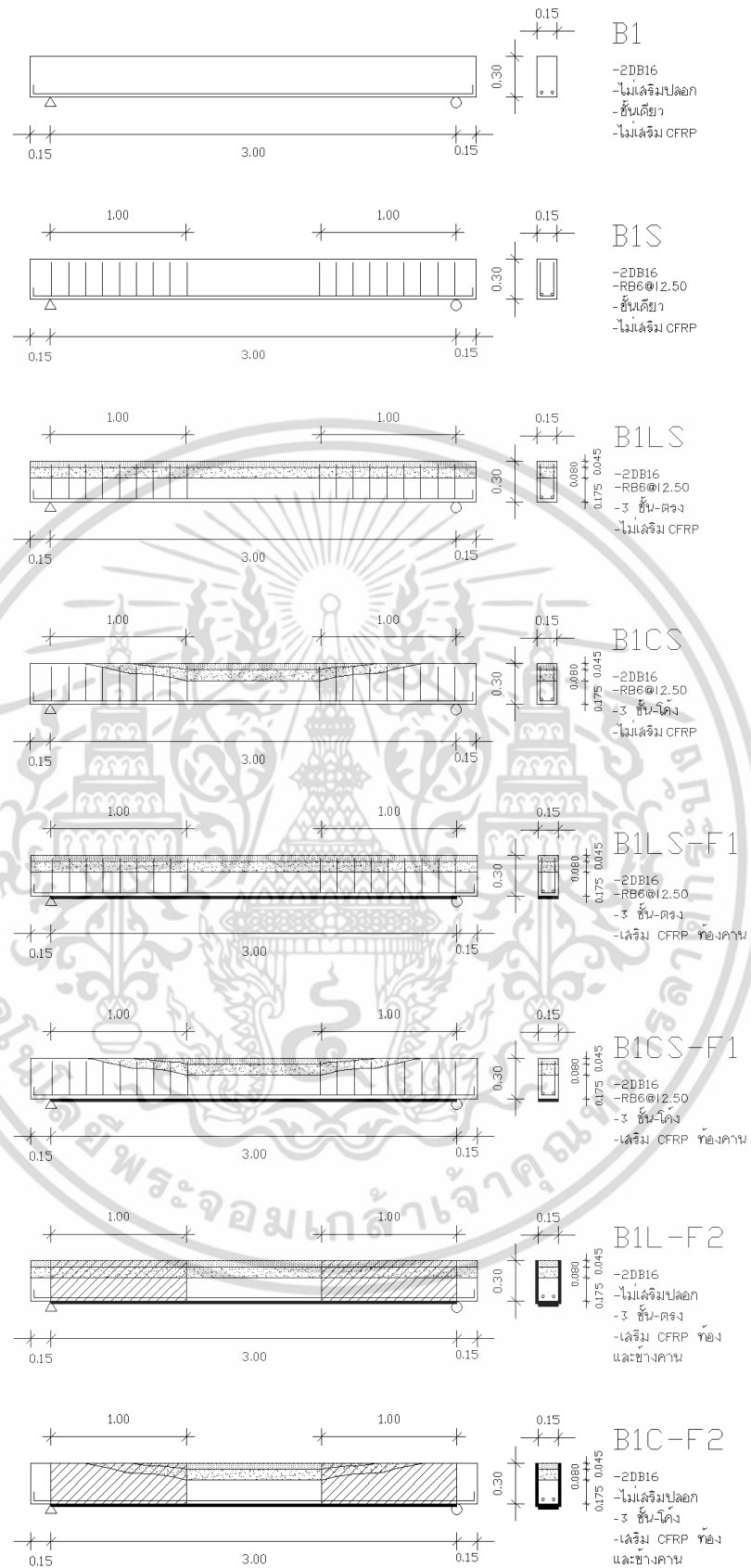
ตัวอย่างคาน	เหล็กเสริม	เหล็กกุกตั้ง	CFRP	หมายเหตุ
B1	2-DB16	ไม่เสริม	ไม่เสริม	คอนกรีตธรรมดาชั้นเดียว
B1S	2-DB16	RB6@12.50 ซม.	ไม่เสริม	คอนกรีตธรรมดาชั้นเดียว
B1LS	2-DB16	RB6@12.50 ซม.	ไม่เสริม	คอนกรีตธรรมดา และคอนกรีตมวลเบา 3 ชั้น-ตรง
B1CS	2-DB16	RB6@12.50 ซม.	ไม่เสริม	คอนกรีตธรรมดา และคอนกรีตมวลเบา 3 ชั้น-โค้ง
B1LS-F1	2-DB16	RB6@12.50 ซม.	เสริมท้องคาน	คอนกรีตธรรมดา และคอนกรีตมวลเบา 3 ชั้น-ตรง
B1CS-F1	2-DB16	RB6@12.50 ซม.	เสริมท้องคาน	คอนกรีตธรรมดา และคอนกรีตมวลเบา 3 ชั้น-โค้ง
B1L-F2	2-DB16	ไม่เสริม	เสริมท้องคาน และด้านข้าง คาน 2 ด้าน	คอนกรีตธรรมดา และคอนกรีตมวลเบา 3 ชั้น-ตรง
B1C-F2	2-DB16	ไม่เสริม	เสริมท้องคาน และด้านข้าง คาน 2 ด้าน	คอนกรีตธรรมดา และคอนกรีตมวลเบา 3 ชั้น-โค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 รูปแบบการเสริมเหล็ก และการเสริม CFRP ของคานทดสอบ กลุ่มที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

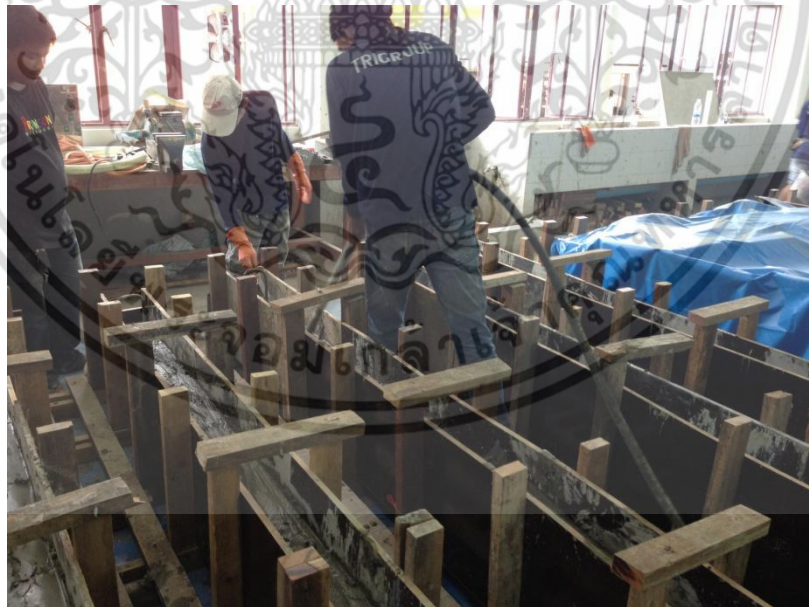


รูปที่ 4.27 รูปแบบการเสริมเหล็ก และการเสริม CFRP ของคานทดสอบ กลุ่มที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอกโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 ทดหาสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต (Slump Test)



รูปที่ 4.29 การหล่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 การผสมคอนกรีตมวลเบาตามหน่วยน้ำหนักค่าต่างๆ



รูปที่ 4.31 การหล่อคานคอนกรีตมวลเบา 3 ชั้น-โค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 การหล่อคานคอนกรีตมวลเบา 3 ชั้น-โค้ง (ต่อ)



รูปที่ 4.33 การเก็บตัวอย่างคอนกรีตมวลเบารูปทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 ตัวอย่างคานทดสอบที่ถอดแบบข้าง



รูปที่ 4.35 การปมขึ้นตัวอย่างคานทดสอบ 28 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.4 การติดตั้ง CFRP ที่ตัวอย่างคานทดสอบ

### 4.4.1 คุณสมบัติของ CFRP

ตารางที่ 4.4 แสดงคุณสมบัติของ CFRP

ความหนา (มม.)	0.165
กำลังรับแรงดึงประลัย (กก./ตร.ซม.)	35,500
โมดูลัสยืดหยุ่น (กก./ตร.ซม.)	$2.35 \times 10^6$
น้ำหนัก (กรัม/ตร.ม.)	300

### 4.4.2 การติดตั้ง CFRP ที่ตัวอย่างคานทดสอบ

หลังจากให้น้ำหนักกระทำที่คานทดสอบ 60% ของน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยแล้ว ก็ทำการติดตั้ง CFRP ซึ่งมีขั้นตอน ดังนี้

1. ทำการขัดผิวคานให้เรียบ และทำการลบมุมคาน เนื่องจากต้องพัน CFRP รอบคานทั้ง 3 ด้าน ในส่วนที่เสริมกำลังรับแรงเฉือน ทั้งนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายแรงของ CFRP



รูปที่ 4.36 การขัดผิวคานให้เรียบ และทำการลบมุมคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เนื่องจากคานที่นำมาเสริมกำลังด้วย CFRP ได้ผ่านการรับน้ำหนักบรรทุกมาแล้วจึงมีรอยร้าวเกิดขึ้น ต้องทำการ Epoxy Injection เข้าไปในรอยร้าว เพื่อประสานเนื้อคอนกรีตให้เป็นเนื้อเดียวกัน



รูปที่ 4.37 Epoxy ประสานเนื้อคอนกรีตให้เป็นเนื้อเดียวกัน

3. ผสมน้ำยาประสานชั้นแรก Hydrapox CF-Primer part A และ part B ในอัตราส่วน 2 ต่อ 1 ให้เข้ากัน แล้วทาลงบนผิวคานในส่วนที่จะติดตั้งแผ่น CFRP



รูปที่ 4.38 น้ำยาประสานชั้นแรก Hydrapox CF-Primer part A และ part B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 การทำน้ำยาประสานชั้นแรก

4. ผสมน้ำยาประสานชั้นที่สอง Hydrapox CF part A และ part B ในอัตราส่วน 2 ต่อ 1 ให้เข้ากัน แล้วทาที่บลงบนน้ำยาชั้นแรก

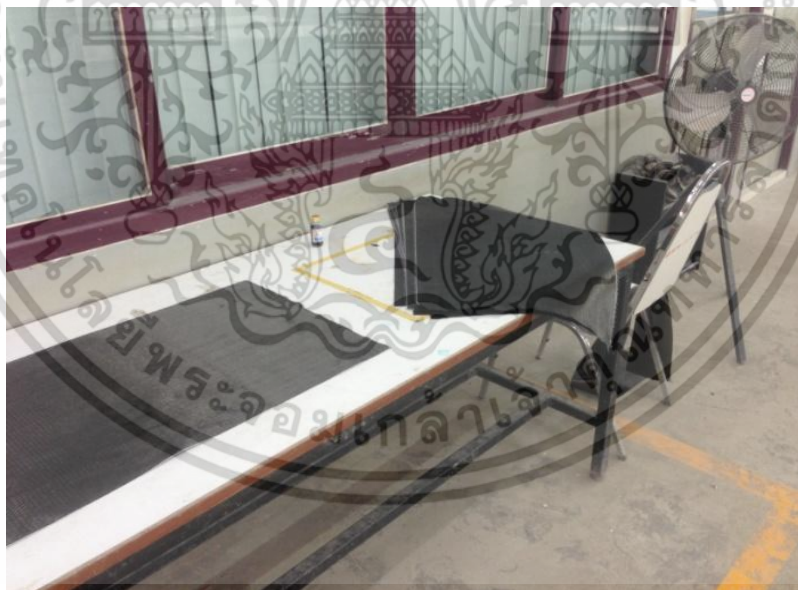


รูปที่ 4.40 น้ำยาประสานชั้นที่สอง Hydrapox CF part A และ part B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.41 การวัดขนาด และตัด CFRP



รูปที่ 4.42 CFRP ที่ตัดตามขนาดเสร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.43 การติดตั้ง CFRP ที่ห้องคาน



รูปที่ 4.44 การติดตั้ง CFRP ที่ด้านข้างคานทั้งสองด้าน

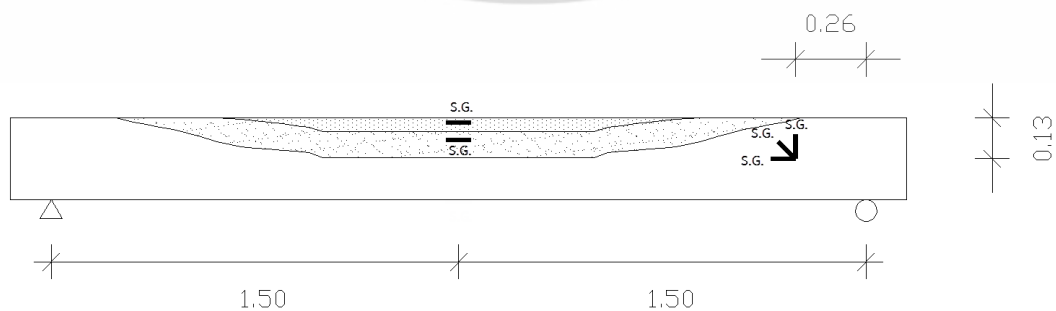
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ทาน้ำยาประสานชั้นที่สองอีกครั้ง แล้วทำการติดตั้งแผ่น CFRP ตามแบบที่กำหนดไว้ เมื่อติดตั้งเสร็จเรียบร้อยแล้ว ปล่อยให้แห้ง 3 วันก่อนทำการทดสอบคาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของน้ำยาประสานระหว่างคอนกรีตกับแผ่น CFRP

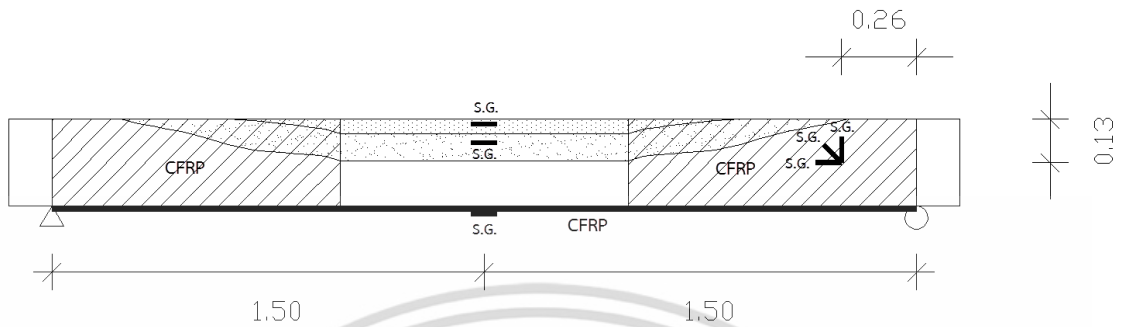


รูปที่ 4.45 คานที่ติดตั้ง CFRP เสร็จแล้ว

#### 4.5 ตำแหน่งการติดตั้ง Strain Gauge ที่ผิวคอนกรีตคานทดสอบ



รูปที่ 4.46 ตำแหน่งการติดตั้ง Strain Gauge ที่ผิวคอนกรีตคานทดสอบ ที่ไม่ได้เสริมกำลัง  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.47 ตำแหน่งการติดตั้ง Strain Gauge ที่ผิวคอนกรีตคานทดสอบ ที่เสริมกำลัง



รูปที่ 4.48 การติดตั้ง Strain Gauge ที่ตำแหน่ง C.G. ของคอนกรีตแต่ละชั้น ช่วงกลางคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.49 การติดตั้ง Strain Gauge บริเวณใกล้ Support



รูปที่ 4.50 การติดตั้ง Strain Gauge ที่คานทดสอบที่ไม่เสริมกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.51 การติดตั้ง Strain Gauge ที่ CFRP ช่วงกลางคาน

รูปที่ 4.52 การติดตั้ง Strain Gauge ที่ CFRP บริเวณใกล้ Support

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.53 การติดตั้ง Strain Gauge ที่คานทดสอบที่เสริมกำลัง

#### 4.6 วิธีการทดสอบและติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ

##### 4.6.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. เครื่องมือวัดการยืดหดตัวของคอนกรีต (Strain Gauge)
2. เครื่องบันทึกค่าการยืดหดตัว (Data Logger)
3. เครื่องมือวัดการแฉกตัว
4. Loading Frame
5. คานถ่ายแรง (Transfer Beam)
6. Load Cell
7. เครื่องอ่านค่าน้ำหนักแบบดิจิตอล
8. Hydraulic Jack
9. โต้ะล้อเลื่อน
10. รอกผ่อนแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(1)



(2)



(3)



(4)



(5)



(6)

รูปที่ 4.54 วัสดุ และอุปกรณ์ (1) Loading Frame (2) Transfer Baem (3) Hydraulic Jack

(4) Hydraulic Ram (5) Load Cell (6) เครื่องอ่านค่าน้ำหนักแบบดิจิตอล

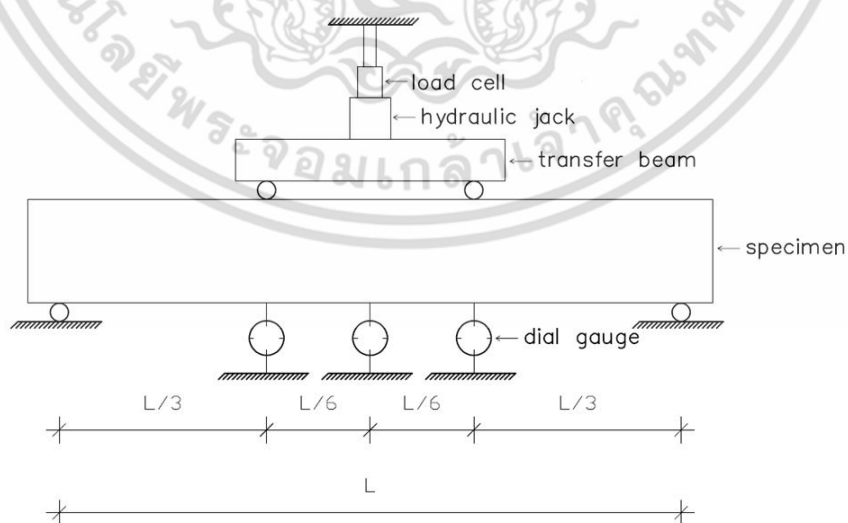
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.55 โตะล้อเลื่อน และรอกผ่อนแรง

#### 4.6.2 ขั้นตอนการทดสอบตัวอย่างคานมีดังนี้

1. ทำการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับ Loading Frame ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยจุดรองรับของคานทั้งสองด้านจะเป็นแบบหมุด
2. ติดตั้ง Dial Gauge ใต้ตัวอย่างทดสอบ ที่ตำแหน่งกึ่งกลางความยาวคาน จำนวน 1 ตัวและที่ระยะเท่ากับ  $L/6$  ถัดจาก Dial Gauge ตัวแรกไปทางด้านซ้ายและด้านขวา จำนวนด้านละ 1 ตัวเพื่อวัดระยะแอ่นตัวของตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 4.56 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.57 การเคลื่อนย้ายคานเพื่อไปทดสอบ



รูปที่ 4.58 การเคลื่อนย้ายคานมาไว้ที่ Loading Frame (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.59 การติดตั้งคานตัวอย่างทดสอบเข้ากับ Loading Frame

3. ทำการต่อสายไฟจาก Strain Gauge

4. การทดสอบตัวอย่างคานจะกระทำแบบ Four Points Loading Test โดยใช้เหล็กตัว I-Beam ถ่ายแรงจาก Hydraulic Ram ลงสู่คานตัวอย่าง



รูปที่ 4.60 การติดตั้งคานตัวอย่างทดสอบเข้ากับ Loading Frame (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.61 การทดสอบคานตัวอย่าง

5. ดำเนินการทดสอบโดยใช้ Hydraulic Pump อัดน้ำมัน Hydraulic ไปยัง Hydraulic Ram อย่างช้าๆ บันทึกค่าน้ำหนักบรรทุก การแอนตัวของคานตัวอย่างจาก Dial Gauge ทั้ง 3 ตัว และค่าความเครียดจาก Strain Gauge



รูปที่ 4.62 การติดตั้งเครื่องมือวัดการแอนตัว (Dial Gauge)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ทำการทดสอบอย่างต่อเนื่องโดยทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกอย่างสม่ำเสมอ จนกระทั่งถึง 60% ของน้ำหนักบรรทุกประลัย แล้วเอาน้ำหนักบรรทุกออก หลังจากนั้นทำการติดตั้ง CFRP แล้วจึงให้น้ำหนักบรรทุกต่อจนจนวินาที ขณะทำการทดสอบจะสังเกตเห็นรอยร้าว ที่คานทดสอบพร้อมทั้งจดค่าน้ำหนักไว้ที่รอยแตกนั้นๆ ค่าความเครียด ค่าการแอ่นตัว ทั้งของคอนกรีต และ CFRP

## 4.7 ผลการทดสอบคานทั้ง 16 ตัวอย่าง

### 4.7.1 ผลการทดสอบรับน้ำหนักบรรทุกไม่มากกว่า 60% ของน้ำหนักบรรทุกประลัย

#### 4.7.1.1 ผลการทดสอบคาน B2

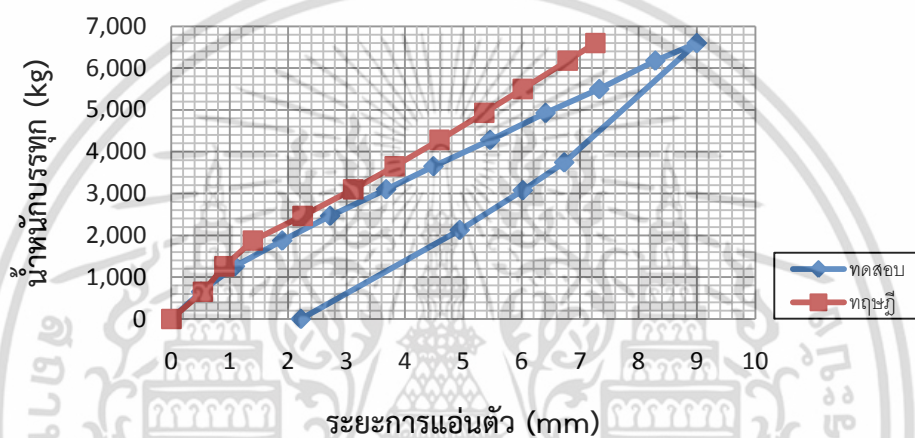
ตารางที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้น  
คาน B2

น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอ่นตัว (mm)				$\epsilon_s$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_s$ (ksc)	$\epsilon_c$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_c$ (ksc)	$\epsilon_{cH}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_{cH}$ (ksc)	$\epsilon_{cD}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_{cD}$ (ksc)	$\epsilon_{cV}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_{cV}$ (ksc)	$T_{max}$ (ksc)	
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี											ทดสอบ	ทฤษฎี
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
650	0.42	0.51	0.44	0.54	27	55	-84	-20	-5	-1	-9	-2	4	1	1.92	1.08
1260	0.99	1.09	0.91	0.91	67	136	-175	-41	-14	-3	-15	-4	3	1	2.55	2.10
1874	1.71	1.9	1.54	1.39	161	328	-268	-63	-19	-4	-24	-6	7	2	4.44	3.12
2467	2.36	2.72	2.22	2.25	282	574	-411	-96	-21	-5	-34	-8	10	2	6.49	4.11
3101	3.17	3.68	3.02	3.11	420	856	-477	-112	-20	-5	-46	-11	4	1	7.97	5.17
3653	3.96	4.49	3.7	3.82	527	1074	-503	-118	-24	-6	-52	-12	7	2	9.23	6.09
4281	4.79	5.46	4.51	4.59	645	1316	-613	-143	-34	-8	-68	-16	11	3	12.16	7.14
4929	5.63	6.41	5.32	5.36	766	1563	-636	-149	-34	-8	-74	-17	17	4	14.05	8.21
5501	6.4	7.33	6.05	6.02	872	1778	-729	-171	-46	-11	-70	-16	19	4	13.03	9.17
6179	7.2	8.29	6.88	6.79	968	1974	-765	-179	-42	-10	-74	-17	19	4	13.90	10.30
6600	7.91	9	7.44	7.26	1039	2120	-743	-174	-41	-10	-80	-19	19	4	15.04	11.00
3745	6.12	6.73	5.74	3.94	731	1490	-398	-93	-19	-4	-20	-5	0	0	2.83	6.24
3078	5.5	6.02	5.17	3.08	641	1308	-316	-74	-12	-3	-8	-2	-3	-1	0.91	5.13
2128	4.57	4.94	4.26	1.76	511	1041	-211	-49	-9	-2	4	1	-12	-3	2.91	3.55
0	2.17	2.22	1.84	0.14	218	444	142	33	1	0	30	7	-21	-5	8.29	0.00

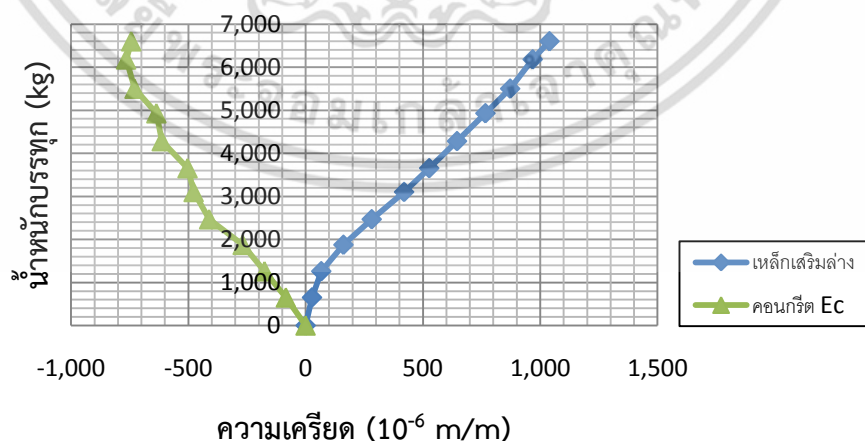
จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรรทุก 6,500 กก. มีการแอ่นตัว 8.83 มม. และจากทฤษฎีมีค่า 7.34 มม. ค่าที่ได้จากการทดสอบมากกว่าทฤษฎี 20.30% เพราะความเค้นอัดที่วัดได้ในคานทดสอบมีค่า 175.19 กก./ตร.ซม. ค่าที่ได้มากกว่าค่าที่ใช้ออกแบบคือ 120 กก./ตร.ซม. จึงทำให้เกิดการแอ่นตัวมากขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กเสริมล่าง มีค่าน้อยในตอนแรก เนื่องจากคอนกรีตช่วยรับแรงดึง จนน้ำหนักบรรทุก 1,500 กก. ความเครียดจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนถึงความเครียดสูงสุดประมาณ 0.001039 ม./ม. ค่าความเครียดนี้น้อยกว่าค่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม.

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียด Strain Rosette ความเครียดมีค่าประมาณศูนย์ในตอนแรก และค่าความเครียดสูงสุดมีค่าน้อยกว่าค่าความเครียดประลัยของคอนกรีตที่มีค่า 0.003 ม./ม.

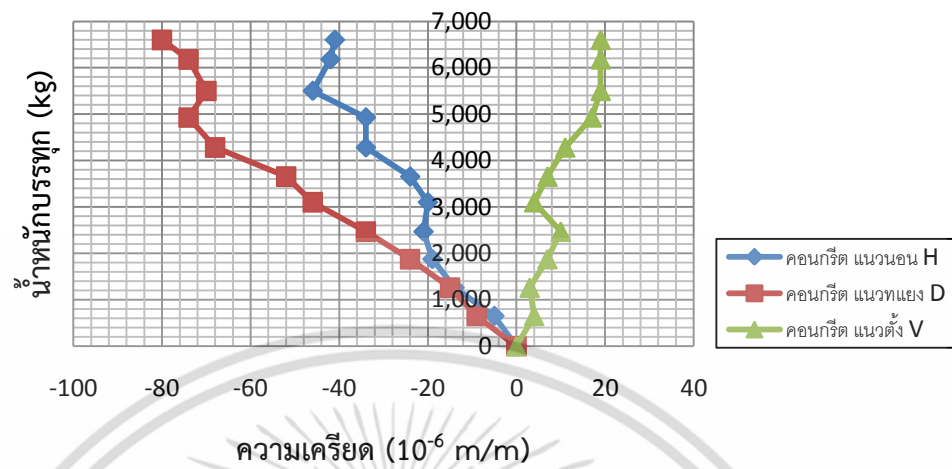


รูปที่ 4.63 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B2

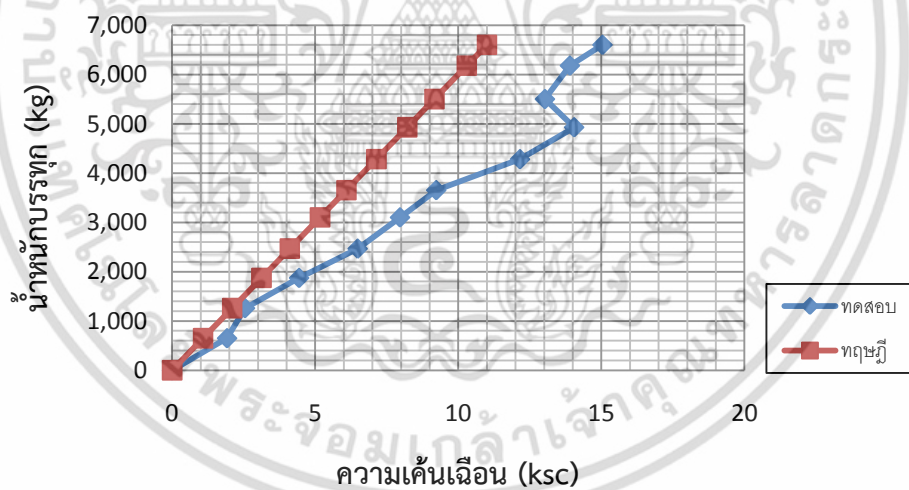


รูปที่ 4.64 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคาน B2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.65 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรทุกที่บริเวณ Support คาน B2



รูปที่ 4.66 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรทุกที่บริเวณ Support คาน B2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.7.1.2 ผลการทดสอบคาน B2S

ตารางที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้น

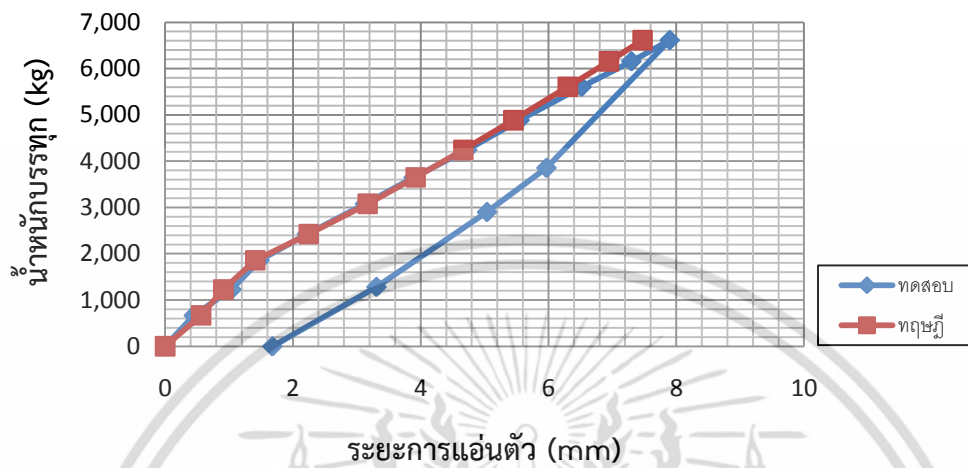
คาน B2S

น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอ่นตัว (mm)				$\epsilon_s$	$\sigma_s$	$\epsilon_c$	$\sigma_c$	$\epsilon_{st}$	$\sigma_{st}$	$\epsilon_{cH}$	$\sigma_{cH}$	$\epsilon_{cD}$	$\sigma_{cD}$	$\epsilon_{cV}$	$\sigma_{cV}$	$T_{max}$ (ksc)	
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี	( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	(ksc)	( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	(ksc)	( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	(ksc)	( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	(ksc)	( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	(ksc)	( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	(ksc)	ทดสอบ	ทฤษฎี
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
667	0.42	0.45	0.42	0.56	51	103	-75	-18	42	86	-123	-29	-11	-3	-4	-1	15.87	1.11
1225	0.99	1.04	0.97	0.91	88	180	-161	-38	16	33	-145	-34	-20	-5	-401	-94	56.69	2.04
1858	1.37	1.48	1.33	1.41	146	298	-237	-55	40	82	-160	-37	-32	-7	-407	-95	56.02	3.10
2425	1.99	2.22	1.92	2.25	268	546	-305	-71	49	100	-178	-42	-36	-8	-412	-96	56.82	4.04
3078	2.75	3.13	2.66	3.17	415	847	-139	-33	20	41	-174	-41	-50	-12	-407	-95	53.43	5.13
3647	3.38	3.89	3.25	3.92	554	1129	-444	-104	23	47	-176	-41	-60	-14	-412	-96	52.40	6.08
4242	4.07	4.73	3.92	4.67	710	1447	-512	-120	54	110	-186	-44	-69	-16	-466	-109	58.51	7.07
4885	4.75	5.55	4.63	5.45	850	1734	-582	-136	50	102	-193	-45	-78	-18	-900	-211	117.34	8.14
5604	5.54	6.52	5.46	6.30	1025	2091	-824	-193	56	114	-209	-49	-81	-19	-963	-225	126.00	9.34
6156	6.19	7.3	6.23	6.95	1130	2305	-755	-177	56	114	-273	-64	-94	-22	-1004	-235	131.12	10.26
6614	6.82	7.9	6.78	7.47	1231	2510	-812	-190	78	159	-290	-68	-95	-22	-1000	-234	130.88	11.02
3854	5.22	5.97	5.19	4.18	927	1891	-608	-142	28	57	-316	-74	-68	-16	-979	-229	133.48	6.42
2900	4.44	5.04	4.4	2.92	795	1622	-507	-119	45	92	-311	-73	-58	-14	-980	-229	135.17	4.83
1282	2.99	3.31	2.52	0.95	520	1061	-310	-73	8	16	-297	-69	-38	-9	-987	-231	139.07	2.14
0	1.57	1.68	1.47	0.15	314	640	-123	-29	74	151	-293	-69	-30	-7	-576	-135	85.68	0.00

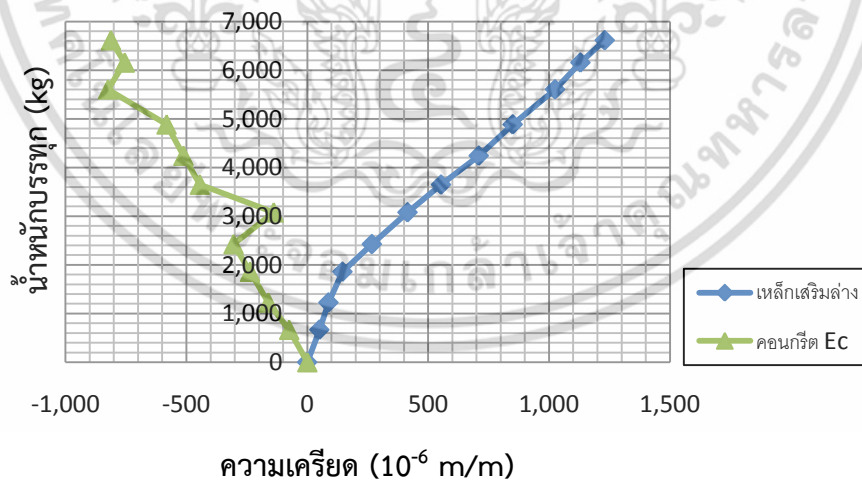
จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรรทุก 6,500 กก. มีการแอ่นตัว 7.75 มม. และจากทฤษฎีมีค่า 7.34 มม. ค่าที่ได้จากการทดสอบมากกว่าทฤษฎี 5.59% เพราะความเค้นอัดที่วัดได้ในคานทดสอบมีค่า 184.40 กก./ตร.ซม. ค่าที่ได้มากกว่าค่าที่ใช้ออกแบบคือ 120 กก./ตร.ซม. จึงทำให้เกิดการแอ่นตัวมากขึ้น

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กเสริมล่าง มีค่าน้อยใน ตอนแรก เนื่องจากคอนกรีตช่วยรับแรงดึง จนน้ำหนักบรรทุก 1,800 กก. ความเครียดจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนถึงความเครียดสูงสุดประมาณ 0.001231 ม./ม. ค่าความเครียดนี้น้อยกว่าค่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม.

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียด Strain Rosette ความเครียดมีค่าประมาณศูนย์ในตอนแรก และค่าความเครียดสูงสุดมีค่าน้อยกว่าค่าความเครียดประลัยของคอนกรีตที่มีค่า 0.003 ม./ม.

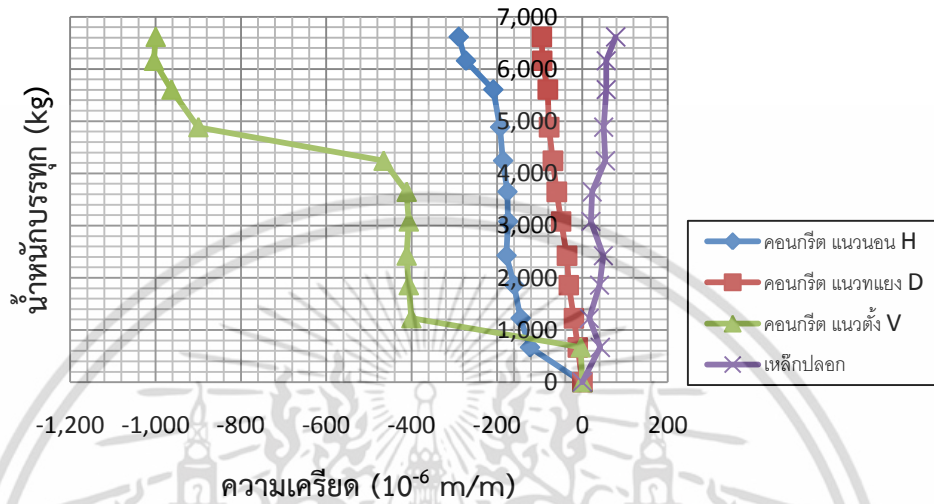


รูปที่ 4.67 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุกทุกคัน B2S

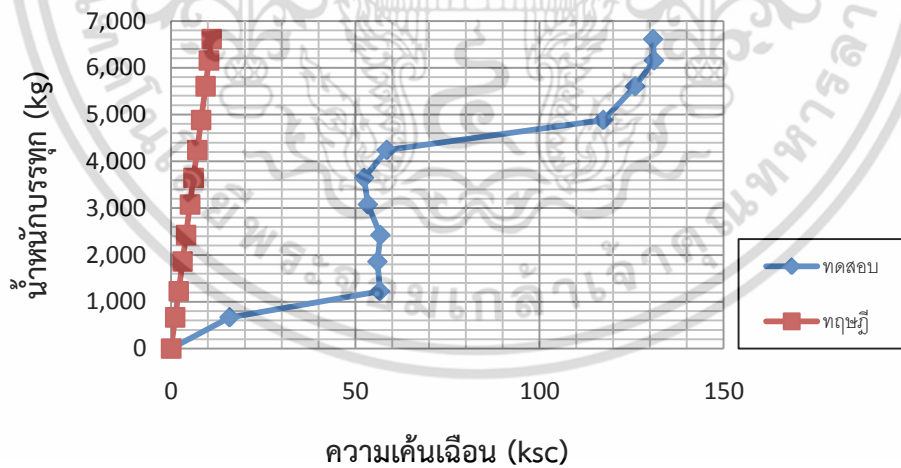


รูปที่ 4.68 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกทุกที่กึ่งกลางคาน B2S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.69 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support คาน B2S



รูปที่ 4.70 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support คาน B2S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.7.1.3 ผลการทดสอบคาน B2LS

ตารางที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้น

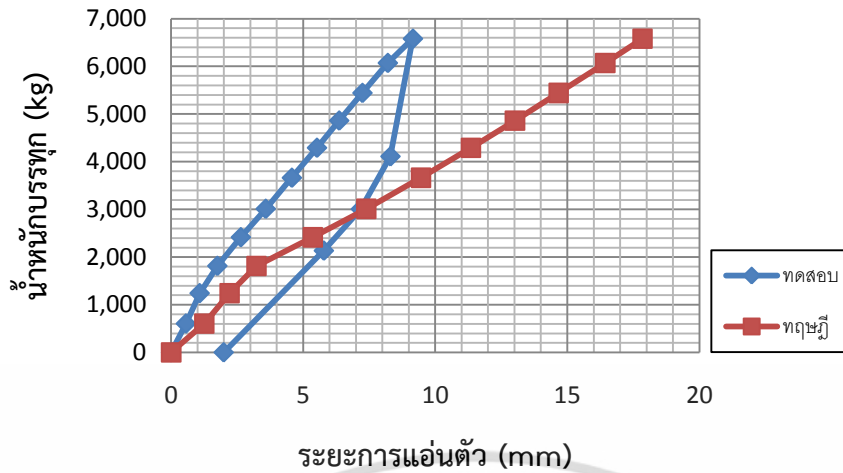
คาน B2LS

น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอ่นตัว (mm)				$\epsilon_s$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_s$ (ksc)	$\epsilon_{c25}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{c25}$ (ksc)	$\epsilon_{c50}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{c50}$ (ksc)	$\epsilon_{st}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{st}$ (ksc)	$\epsilon_{cH}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{cH}$ (ksc)	$\epsilon_{cD}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{cD}$ (ksc)	$\epsilon_{cV}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{cV}$ (ksc)	$T_{max}$ (ksc)		
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี															ทดสอบ	ทฤษฎี	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
603	0.5	0.56	0.5	1.26	171	348	-78	-13	-125	-12	-1	-2	-19	-4	-17	-4	-5	-1	1.72	1.01	
1242	0.99	1.08	0.98	2.21	245	500	-50	-8	-263	-25	1	2	-29	-7	-28	-7	-3	-1	3.54	2.07	
1814	1.66	1.75	1.6	3.23	245	500	-169	-29	-417	-40	-1	-2	-43	-10	-49	-11	-21	-5	4.05	3.02	
2416	2.49	2.64	2.4	5.36	479	977	-251	-42	-582	-55	2	4	-48	-11	-67	-16	5	1	10.53	4.03	
3012	3.31	3.58	3.23	7.39	610	1243	-224	-38	-743	-71	3	6	-54	-13	-78	-18	5	1	12.22	5.02	
3664	4.21	4.57	4.14	9.46	760	1550	-255	-43	-926	-88	-3	-6	-69	-16	-107	-25	-1	0	15.92	6.11	
4293	5.09	5.52	4.98	11.36	798	1627	-249	-42	-937	-89	-3	-6	-77	-18	-125	-29	3	1	19.33	7.15	
4863	5.85	6.36	5.76	13.02	1008	2056	-261	-44	-958	-91	-1	-2	-84	-20	-138	-32	10	2	22.27	8.11	
5443	6.65	7.24	6.58	14.67	1108	2259	-280	-47	-1001	-95	5	10	-101	-24	-137	-32	19	4	22.63	9.07	
6072	7.52	8.2	7.42	16.44	1132	2309	-300	-51	-1114	-106	7	14	-113	-26	-173	-40	23	5	28.98	10.12	
6581	8.25	9.15	8.16	17.85	1192	2432	-334	-56	-1231	-117	7	14	-123	-29	-175	-41	-17	-4	23.52	10.97	

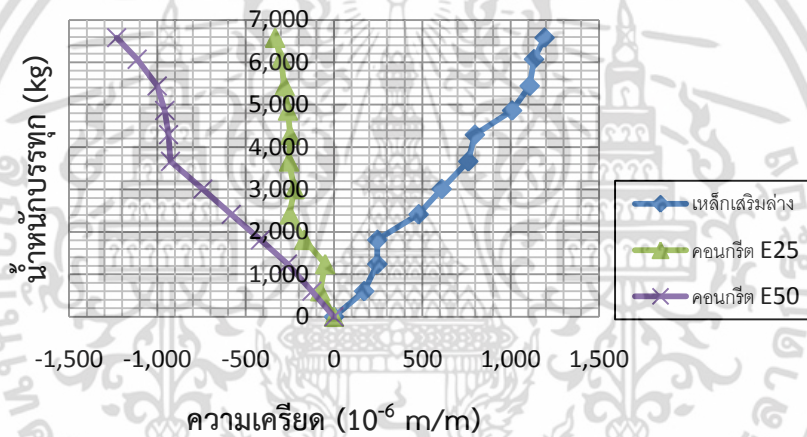
จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรรทุก 6,500 กก. มีการแอ่นตัว 9.00 มม. และจากทฤษฎีมีค่า 17.62 มม. ค่าที่ได้จากการทดสอบน้อยกว่าทฤษฎี 48.92% เพราะความเค้นอัดที่วัดได้ในคานทดสอบของคอนกรีตมวลเบาชั้นกลางมีค่า 115.69 กก./ตร.ซม. และคอนกรีตมวลเบาชั้นบนสุดมีค่า 55.17 กก./ตร.ซม. ค่าที่ได้น้อยกว่าค่าที่ใช้ออกแบบคือ 120 กก./ตร.ซม. และ 60 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จึงทำให้เกิดการแอ่นตัวน้อยลง

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กเสริมล่าง มีค่าน้อยในตอนแรก เนื่องจากคอนกรีตช่วยรับแรงดึง จนน้ำหนักบรรทุก 1,850 กก. ความเครียดจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงความเครียดสูงสุดประมาณ 0.001192 ม./ม. ค่าความเครียดนี้น้อยกว่าค่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม.

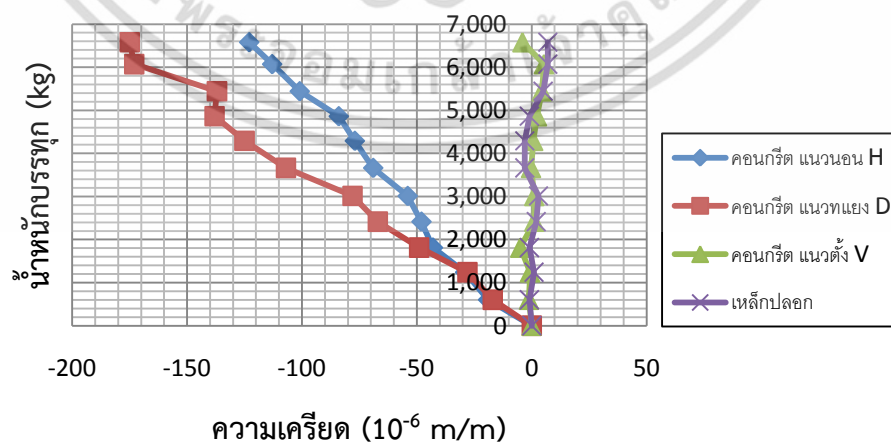
จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียด Strain Rosette ความเครียดมีค่าประมาณศูนย์ในตอนแรก และค่าความเครียดสูงสุดมีค่าน้อยกว่าค่าความเครียดประลัยของคอนกรีตที่มีค่า 0.003 ม./ม.



รูปที่ 4.71 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรรจุทุกคัน B2LS

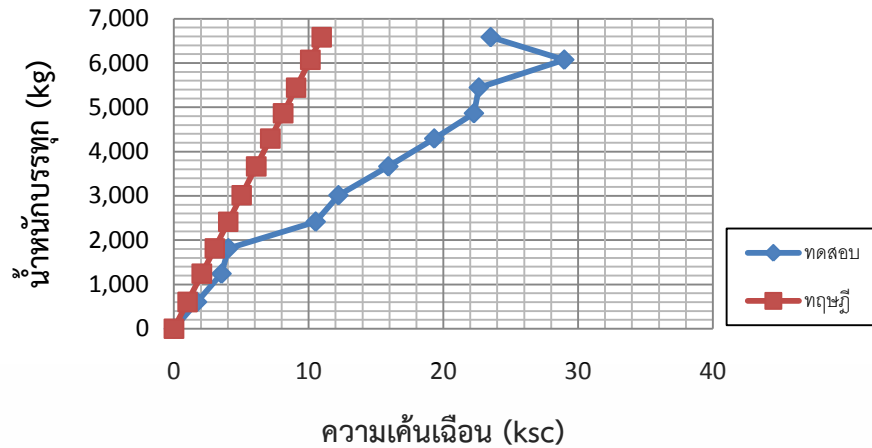


รูปที่ 4.72 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรจุทุกที่กึ่งกลางคัน B2LS



รูปที่ 4.73 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรจุทุกที่บริเวณ Support คัน B2LS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.74 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรทุกที่บริเวณ Support คาน B2LS

#### 4.7.1.4 ผลการทดสอบคาน B2CS

ตารางที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรทุก การแอนตัว ความเครียด และความเค้น คาน B2CS

น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอนตัว (mm)				E <sub>s</sub> (μm/m)	σ <sub>s</sub> (ksc)	ε <sub>c25</sub> (μm/m)	σ <sub>c25</sub> (ksc)	ε <sub>c50</sub> (μm/m)	σ <sub>c50</sub> (ksc)	ε <sub>st</sub> (μm/m)	σ <sub>st</sub> (ksc)	ε <sub>cH</sub> (μm/m)	σ <sub>cH</sub> (ksc)	ε <sub>cD</sub> (μm/m)	σ <sub>cD</sub> (ksc)	ε <sub>cV</sub> (μm/m)	σ <sub>cV</sub> (ksc)	T <sub>max</sub> (ksc)		
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี															ทดสอบ	ทฤษฎี	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
699	0.73	0.73	0.71	1.40	45	92	-72	-12	-133	-13	5	10	-6	-1	-23	-5	-25	-6	2.42	1.17	
1320	1.61	1.72	1.6	2.33	121	246	-166	-28	-305	-29	7	14	-21	-5	-103	-24	17	4	20.55	2.20	
1862	2.29	2.5	2.3	3.40	315	642	-196	-33	-449	-43	3	6	-23	-5	-166	-39	-80	-19	23.59	3.10	
2526	3.27	3.6	3.24	5.75	452	921	-218	-37	-604	-58	-31	-63	-19	-4	-368	-86	-166	-39	57.01	4.21	
3136	4.25	4.73	4.21	7.79	665	1356	-156	-26	-735	-70	-20	-41	-27	-6	-554	-130	-219	-51	88.29	5.23	
3712	5.19	5.83	5.16	9.61	823	1679	-106	-18	-851	-81	-16	-33	-35	-8	-741	-173	-411	-96	110.18	6.19	
4317	6.21	6.99	6.13	11.43	959	1956	-84	-14	-973	-93	-39	-80	-35	-8	-759	-178	-431	-101	112.37	7.20	
4973	7.24	8.2	7.13	13.34	1159	2363	-103	-17	-998	-95	3	6	-38	-9	-777	-182	-429	-100	115.48	8.29	
5520	8.11	9.2	7.99	14.89	1312	2675	-136	-23	-1006	-96	23	47	-35	-8	-813	-190	-254	-59	135.44	9.20	
6178	9.17	10.44	9.04	16.73	1425	2907	-167	-28	-1157	-110	5	10	-74	-17	-826	-193	-254	-59	133.58	10.30	
6646	10.34	11.76	10.16	18.03	1585	3232	-176	-30	-1209	-115	-10	-20	-42	-10	-877	-205	-286	-67	144.63	11.08	
4258	7.87	8.88	7.76	11.25	1203	2454	-112	-19	-905	-86	19	39	8	2	-827	-193	-213	-50	146.53	7.10	
3185	6.4	7.18	6.29	7.95	910	1855	-74	-13	-786	-75	19	39	15	4	-770	-180	-229	-54	134.78	5.31	
2243	5.21	5.78	5.08	3.71	703	1433	-37	-6	-570	-54	23	47	21	5	-754	-176	-249	-58	130.78	3.74	
0	1.92	1.99	1.77	0.36	224	456	129	22	7	1	14	29	7	2	-31	-7	-632	-148	85.14	0.00	

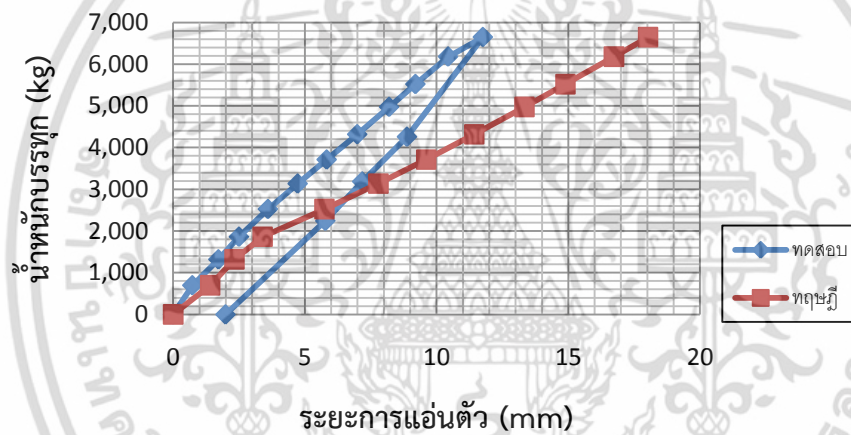
จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรทุก 6,500 กก. มีการแอนตัว 11.35 มม. และจากทฤษฎีมีค่า 17.62 มม. ค่าที่ได้จากการทดสอบน้อยกว่าทฤษฎี 35.58% เพราะความเค้นอัดที่วัดได้ในคานทดสอบของคอนกรีตมวลเบาชั้นกลางมีค่า 113.17 กก./ตร.ซม. และคอนกรีตมวลเบาชั้นบนสุดมีค่า 29.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

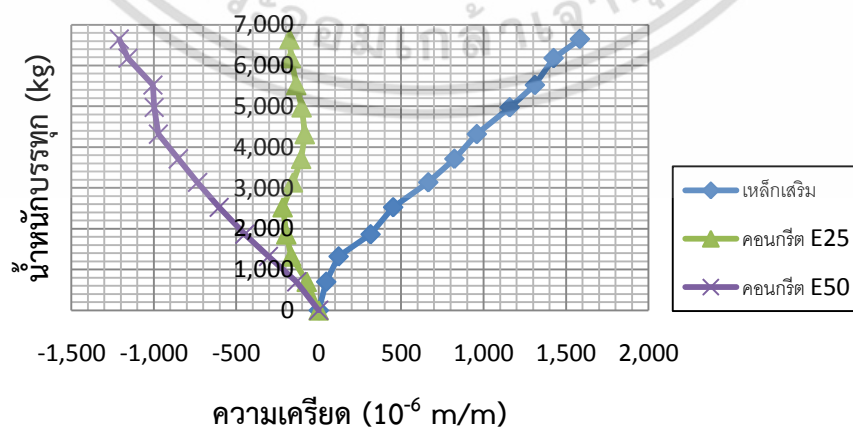
กก./ตร.ซม. ค่าที่ได้้น้อยกว่าค่าที่ใช้ออกแบบคือ 120 กก./ตร.ซม. และ 60 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จึงทำให้เกิดการแอ่นตัวน้อยลง

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กเสริมล่าง มีค่าน้อยในตอนแรก เนื่องจากคอนกรีตช่วยรับแรงดึง จนน้ำหนักบรรทุก 1,400 กก. ความเครียดจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงความเครียดสูงสุดประมาณ 0.001585 ม./ม. ค่าความเครียดนี้น้อยกว่าค่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม.

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและ Strain Rosette ความเครียดมีค่าประมาณศูนย์ในตอนแรก และค่าความเครียดสูงสุดมีค่าน้อยกว่าค่าความเครียดประลัยของคอนกรีตที่มีค่า 0.003 ม./ม.

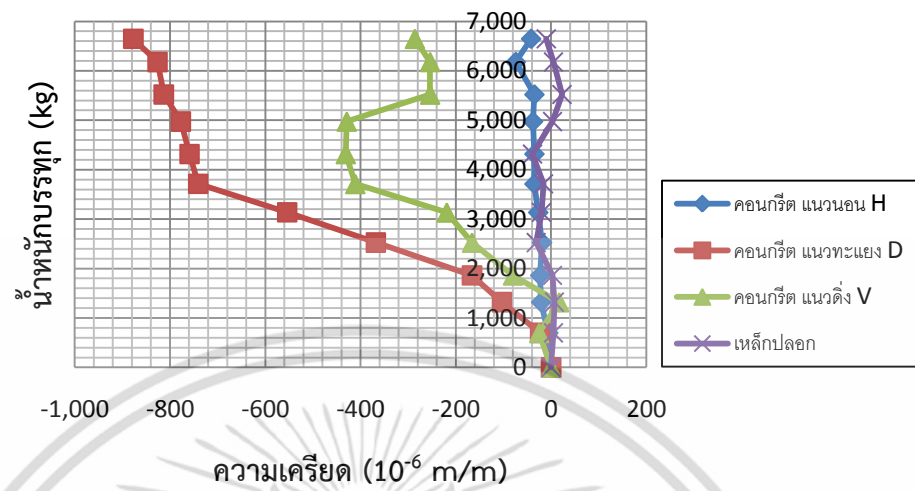


รูปที่ 4.75 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B2CS

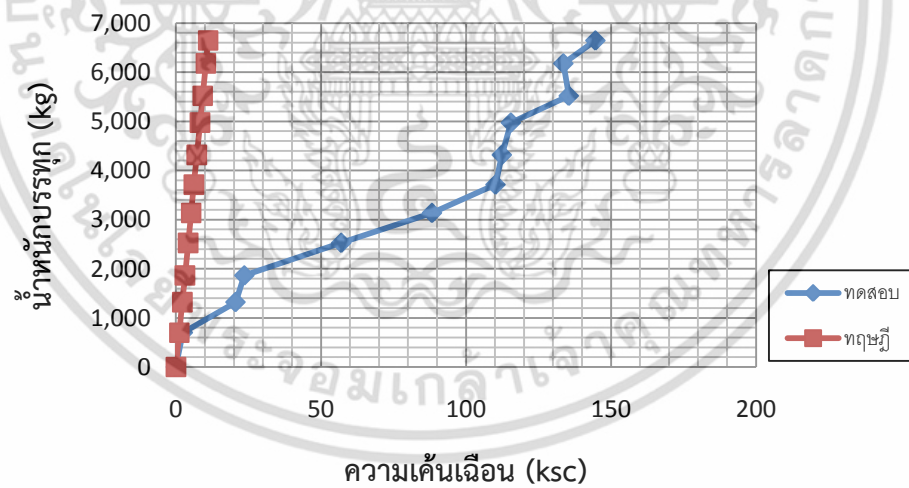


รูปที่ 4.76 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคาน B2CS

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.77 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support คาน B2CS



รูปที่ 4.78 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support คาน B2CS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7.1.5 ผลการทดสอบคาน B2LS-F1

ตารางที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้น

คาน B2LS-F1

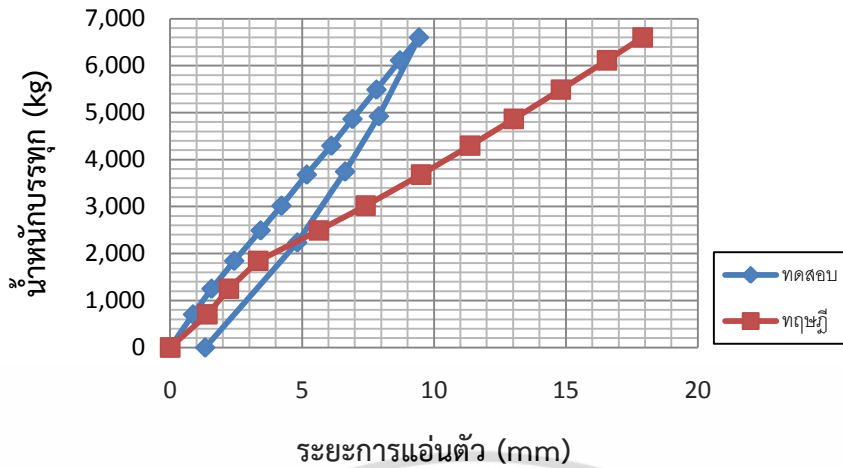
น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอ่นตัว (mm)					$\epsilon_s$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_s$ (ksc)	$\epsilon_{c25}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{c25}$ (ksc)	$\epsilon_{c50}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{c50}$ (ksc)	$\epsilon_{st}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{st}$ (ksc)	$\epsilon_{cH}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{cH}$ (ksc)	$\epsilon_{cD}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{cD}$ (ksc)	$\epsilon_{cV}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{cV}$ (ksc)	$T_{max}$ (ksc)		
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี	ทดสอบ															ทฤษฎี		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
704	0.85	0.87	0.78	1.41	105	213	-92	-16	-179	-17	18	37	-13	-3	-20	-5	-48	-11	4.08	1.17		
1252	1.48	1.57	1.38	2.23	241	492	-165	-28	-339	-32	-20	-41	-16	-4	-31	-7	-56	-13	4.12	2.09		
1846	2.3	2.43	2.15	3.34	359	731	-225	-38	-506	-48	5	10	-16	-4	-39	-9	-56	-13	4.04	3.08		
2493	3.21	3.43	3.04	5.63	495	1010	-282	-48	-716	-68	-8	-16	-24	-6	-50	-12	-140	-33	13.24	4.16		
3019	3.94	4.22	3.73	7.41	605	1234	-327	-55	-880	-84	-5	-10	-29	-7	-57	-13	-192	-45	19.49	5.03		
3682	4.82	5.18	4.54	9.51	734	1497	-362	-61	-907	-86	-17	-35	-32	-7	-62	-15	-195	-46	19.28	6.14		
4298	5.66	6.11	5.34	11.37	857	1747	-433	-73	-954	-91	-12	-24	-34	-8	-71	-17	-184	-43	16.81	7.16		
4866	6.39	6.91	6.01	13.03	963	1965	-486	-82	-987	-94	11	22	-27	-6	-89	-21	-203	-47	18.35	8.11		
5492	7.22	7.82	6.78	14.81	1070	2182	-297	-50	-1006	-96	-15	-31	-29	-7	-107	-25	-211	-49	18.38	9.15		
6114	8.00	8.71	7.55	16.55	1191	2429	-299	-51	-1102	-105	25	51	-21	-5	-110	-26	-219	-51	19.89	10.19		
6603	8.67	9.43	8.17	17.91	1286	2622	-313	-53	-1124	-107	32	65	-15	-4	-109	-25	-231	-54	21.77	11.01		
4925	7.35	7.91	6.9	13.20	1053	2147	-295	-50	-1002	-95	5	10	3	1	-76	-18	-2535	-593	347.83	8.21		
3747	6.23	6.63	5.81	9.71	854	1742	-193	-33	-954	-91	-10	-20	17	4	-54	-13	-2518	-589	348.50	6.25		
2236	4.62	4.82	4.29	3.70	586	1194	-30	-5	-923	-88	1	2	27	6	-25	-6	-2514	-588	351.97	3.73		
0	1.62	1.33	1.35	0.36	175	357	243	41	-200	-19	-7	-14	47	11	35	8	-2655	-621	380.31	0.00		

จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรรทุก 6,500 กก. มีการแอ่นตัว 9.28 มม. และจากทฤษฎีมีค่า 17.62 มม. ค่าที่ได้จากการทดสอบน้อยกว่าทฤษฎี 47.33% เพราะความเค้นอัดที่วัดได้ในคานทดสอบของคอนกรีตมวลเบาชั้นกลางมีค่า 105.67 กก./ตร.ซม. และคอนกรีตมวลเบาชั้นบนสุดมีค่า 52.08 กก./ตร.ซม. ค่าที่ได้น้อยกว่าค่าที่ใช้ออกแบบคือ 120 กก./ตร.ซม. และ 60 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จึงทำให้เกิดการแอ่นตัวน้อยลง

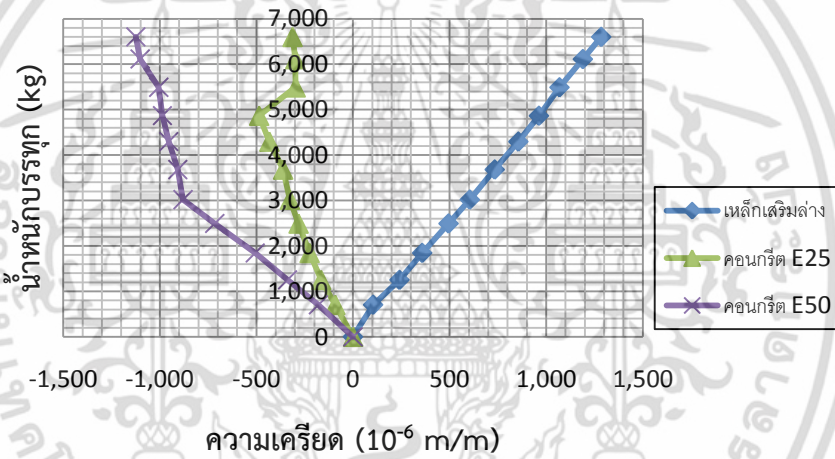
จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กเสริมล่าง มีค่าน้อยในตอนแรก เนื่องจากคอนกรีตช่วยรับแรงดึง จนน้ำหนักบรรทุก 1,250 กก. ความเครียดจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงความเครียดสูงสุดประมาณ 0.001286 ม./ม. ค่าความเครียดนี้น้อยกว่าค่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม.

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียด Strain Rosette ความเครียดมีค่าประมาณศูนย์ในตอนแรก และค่าความเครียดสูงสุดมีค่าน้อยกว่าค่าความเครียดประลัยของคอนกรีตที่มีค่า 0.003 ม./ม.

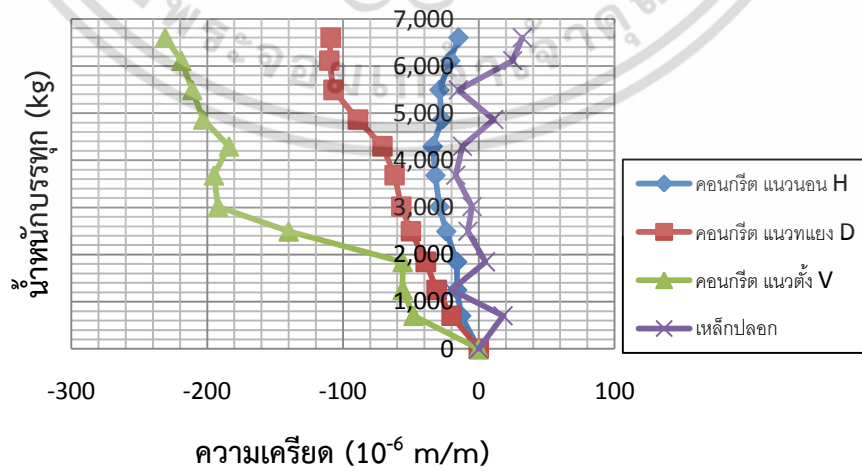
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



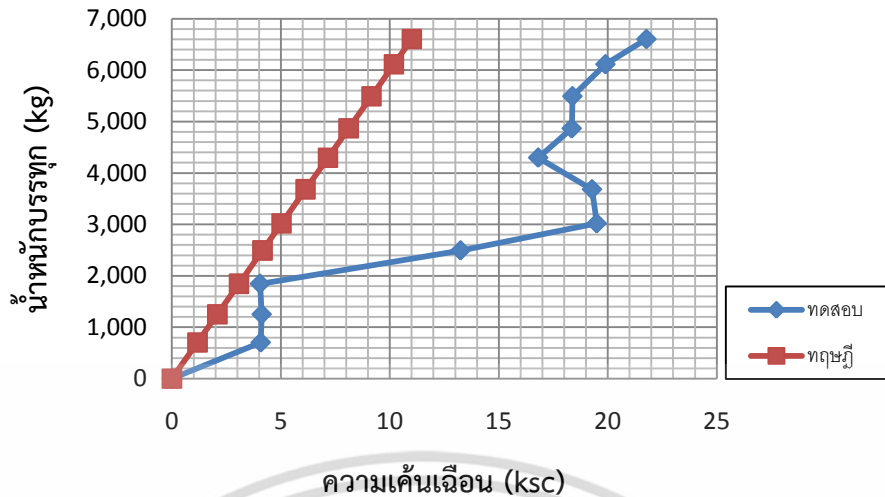
รูปที่ 4.79 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B2LS-F1



รูปที่ 4.80 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเคียดกับน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคาน B2LS-F1



รูปที่ 4.81 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเคียดกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support คาน B2LS-F1  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นแจ้งหรือมีข้อสงสัย  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.82 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรทุกที่บริเวณ Support

คาน B2LS-F1

4.7.1.6 ผลการทดสอบคาน B2CS-F1

ตารางที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรทุก การแอนตัว ความเครียด และความเค้น

คาน B2CS-F1

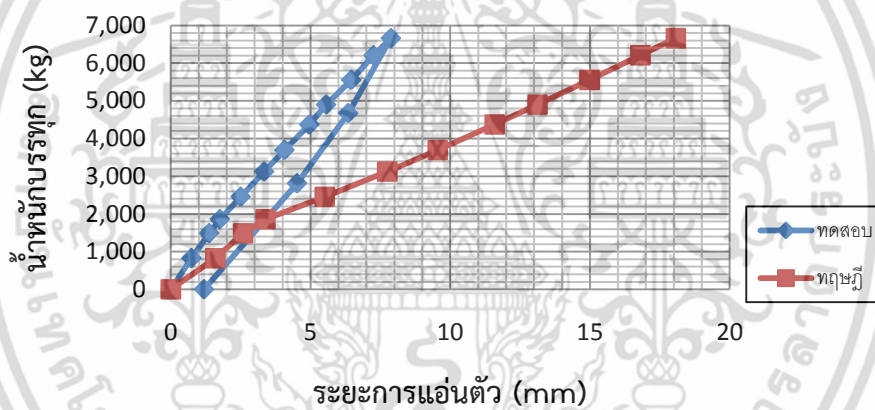
น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอนตัว (mm)				$\epsilon_s$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_s$ (ksc)	$\epsilon_{c25}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{c25}$ (ksc)	$\epsilon_{c50}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{c50}$ (ksc)	$\epsilon_{st}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{st}$ (ksc)	$\epsilon_{cH}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{cH}$ (ksc)	$\epsilon_{cD}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{cD}$ (ksc)	$\epsilon_{cV}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{cV}$ (ksc)	$T_{max}$ (ksc)		
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี															ทดสอบ	ทฤษฎี	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
827	0.62	0.74	0.64	1.59	65	133	-87	-15	-160	-15	6	12	-11	-3	-5	-1	5	1	1.65	1.38	
1488	1.14	1.37	1.17	2.58	143	291	-97	-16	-342	-33	-1	-2	-21	-5	-15	-4	5	1	2.95	2.48	
1860	1.46	1.76	1.53	3.39	216	441	-219	-37	-500	-48	-3	-6	-30	-7	-18	-4	9	2	4.18	3.10	
2457	2.11	2.5	2.19	5.50	368	751	-278	-47	-721	-69	-4	-8	-36	-8	-25	-6	9	2	5.05	4.09	
3122	2.85	3.34	2.91	7.75	511	1042	-317	-54	-877	-84	-6	-12	-47	-11	-36	-8	14	3	7.24	5.20	
3694	3.48	4.07	3.56	9.55	629	1283	-366	-62	-899	-86	-7	-14	-58	-14	-50	-12	27	6	10.94	6.16	
4371	4.27	4.96	4.32	11.59	756	1542	-427	-72	-956	-91	-9	-18	-48	-11	-61	-14	26	6	12.44	7.29	
4898	4.86	5.56	4.93	13.12	873	1781	-350	-59	-989	-94	-12	-24	-35	-8	-53	-12	28	7	11.73	8.16	
5554	5.58	6.46	5.64	14.98	995	2030	-298	-50	-999	-95	-10	-20	-38	-9	-62	-15	48	11	15.92	9.26	
6205	6.26	7.26	6.33	16.81	1120	2284	-301	-51	-1107	-105	-9	-18	-35	-8	-58	-14	48	11	15.33	10.34	
6662	6.78	7.88	6.82	18.07	1208	2463	-320	-54	-1200	-114	-15	-31	-37	-9	-57	-13	56	13	16.22	11.10	
4673	5.51	6.35	5.69	12.47	1004	2047	-286	-48	-998	-95	-3	-6	-41	-10	-39	-9	48	11	12.30	7.79	
2811	3.91	4.52	4.05	6.72	698	1424	-187	-32	-932	-89	-10	-20	-36	-8	-25	-6	42	10	9.60	4.69	
0	0.96	1.19	0.91	0.36	206	419	-45	-8	-356	-34	-38	-78	-33	-8	-7	-2	28	7	6.16	0.00	

จากการทดสอบที่น้ำหนักบรทุก 6,500 กก. มีการแอนตัว 7.66 มม. และจากทฤษฎีมีค่า 17.62 มม. ค่าที่ได้จากการทดสอบน้อยกว่าทฤษฎี 56.53% เพราะความเค้นอัดที่วัดได้ในคานทดสอบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

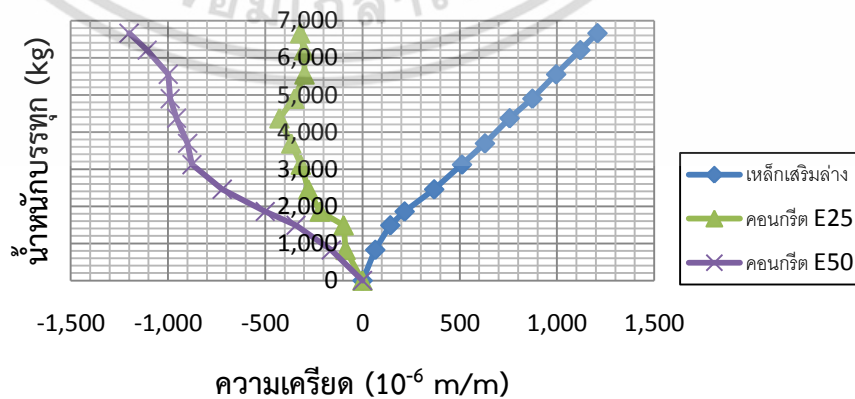
ของคอนกรีตมวลเบาชั้นกลางมีค่า 112.97 กก./ตร.ซม. และคอนกรีตมวลเบาชั้นบนสุดมีค่า 53.04 กก./ตร.ซม. ค่าที่ได้้น้อยกว่าค่าที่ใช้ออกแบบคือ 120 กก./ตร.ซม. และ 60 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จึงทำให้เกิดการแอ่นตัวน้อยลง

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กเสริมล่าง มีค่าน้อยในตอนแรก เนื่องจากคอนกรีตช่วยรับแรงดึง จนน้ำหนักบรรทุก 1,500 กก. ความเครียดจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนถึงความเครียดสูงสุดประมาณ 0.001208 ม./ม. ค่าความเครียดนี้น้อยกว่าค่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม.

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและ Strain Rosette ความเครียดมีค่าประมาณศูนย์ในตอนแรก และค่าความเครียดสูงสุดมีค่าน้อยกว่าค่าความเครียดประลัยของคอนกรีตที่มีค่า 0.003 ม./ม.

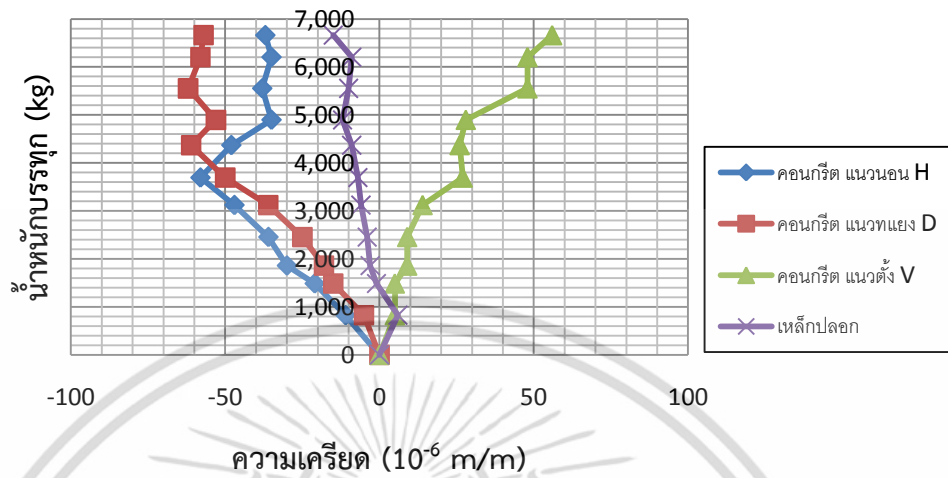


รูปที่ 4.83 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B2CS-F1

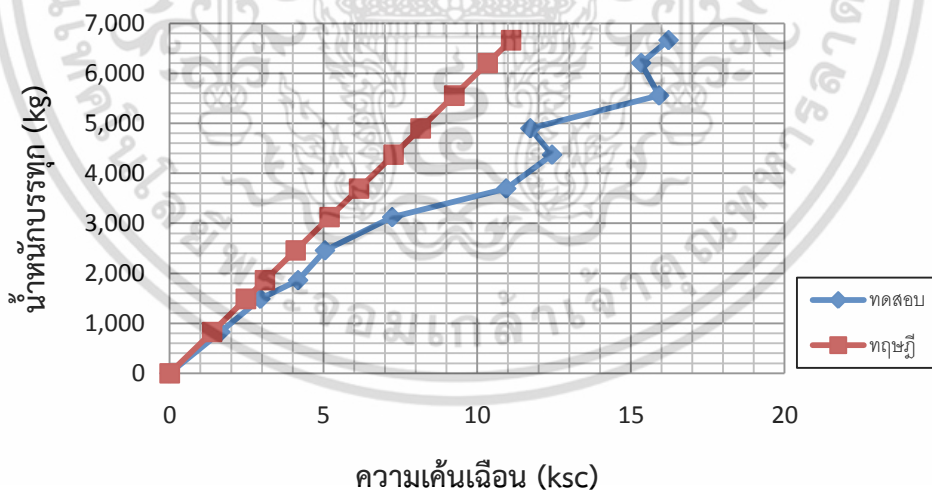


รูปที่ 4.84 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคาน B2CS-F1

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของวิศวกรรมเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.85 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support คาน B2CS-F1



รูปที่ 4.86 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support คาน B2CS-F1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.7.1.7 ผลการทดสอบคาน B2L-F2

ตารางที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอนตัว ความเครียด และความเค้น  
คาน B2L-F2

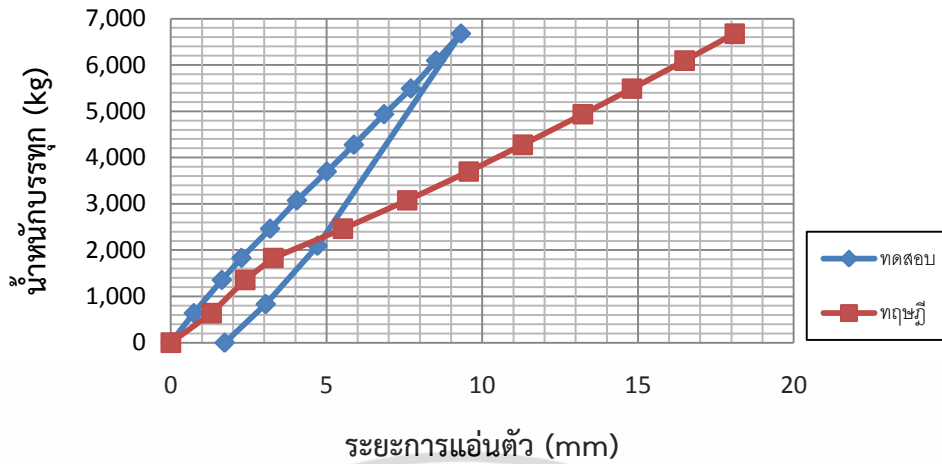
น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอนตัว (mm)				$E_s$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_s$ (ksc)	$\epsilon_{c25}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{c25}$ (ksc)	$\epsilon_{c50}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{c50}$ (ksc)	$\epsilon_{cH}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{cH}$ (ksc)	$\epsilon_{cD}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{cD}$ (ksc)	$\epsilon_{cV}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{cV}$ (ksc)	$T_{max}$ (ksc)	
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี													ทดสอบ	ทฤษฎี
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
638	0.66	0.74	0.76	1.31	70	143	-76	-13	-144	-14	-7	-2	-9	-2	3	1	1.72	1.06
1356	1.44	1.64	1.62	2.38	179	365	-113	-19	-326	-31	-14	-3	-22	-5	5	1	3.98	2.26
1832	1.99	2.27	2.22	3.29	262	534	-133	-22	-460	-44	-20	-5	-34	-8	5	1	5.86	3.05
2463	2.78	3.19	3.04	5.53	384	782	-142	-24	-611	-58	-26	-6	-38	-9	11	3	7.13	4.10
3074	3.53	4.05	3.82	7.59	491	1001	-152	-25	-764	-73	-21	-5	-49	-11	22	5	10.79	5.12
3697	4.34	5.01	4.66	9.56	597	1218	-90	-15	-925	-88	-29	-7	-62	-15	21	5	12.63	6.16
4275	5.07	5.88	5.43	11.30	689	1405	-226	-38	-986	-94	-35	-8	-66	-15	30	7	14.26	7.13
4936	5.92	6.85	6.29	13.23	796	1623	-248	-42	-1009	-96	-26	-6	-60	-14	46	11	15.74	8.23
5490	6.62	7.71	7.02	14.81	886	1806	-345	-58	-1111	-106	-26	-6	-68	-16	47	11	17.31	9.15
6094	7.31	8.52	7.75	16.50	968	1975	-266	-45	-1151	-110	-29	-7	-68	-16	50	12	17.57	10.16
6676	7.92	9.32	8.44	18.11	1072	2187	-306	-52	-1191	-113	-25	-6	-73	-17	51	12	18.80	11.13
2094	3.97	4.71	4.42	4.22	478	974	-173	-29	-709	-68	3	1	13	3	19	4	1.65	3.49
834	2.5	3.05	2.95	1.60	277	564	-92	-16	-397	-38	7	2	25	6	7	2	3.60	1.39
0	1.31	1.73	1.79	0.36	150	305	0	0	-155	-15	23	5	30	7	0	0	4.36	0.00

จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรรทุก 6,500 กก. มีการแอนตัว 9.08 มม. และจากทฤษฎีมีค่า 17.62 มม. ค่าที่ได้จากการทดสอบน้อยกว่าทฤษฎี 48.47% เพราะความเค้นอัดที่วัดได้ในคานทดสอบของคอนกรีตมวลเบาชั้นกลางมีค่า 111.97 กก./ตร.ซม. และคอนกรีตมวลเบาชั้นบนสุดมีค่า 50.74 กก./ตร.ซม. ค่าที่ได้น้อยกว่าค่าที่ใช้ออกแบบคือ 120 กก./ตร.ซม. และ 60 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จึงทำให้เกิดการแอนตัวน้อยลง

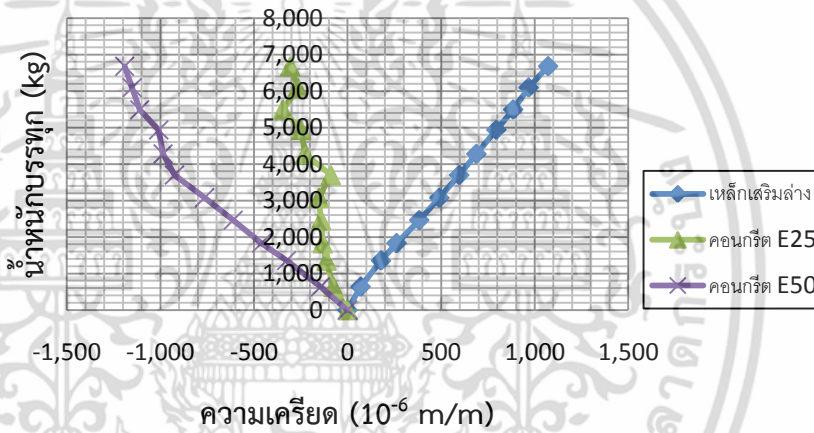
จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กเสริมล่าง มีค่าน้อยในตอนแรก เนื่องจากคอนกรีตช่วยรับแรงดึง จนน้ำหนักบรรทุก 1,250 กก. ความเครียดจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงความเครียดสูงสุดประมาณ 0.001072 ม./ม. ค่าความเครียดนี้น้อยกว่าค่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม.

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียด Strain Rosette ความเครียดมีค่าประมาณศูนย์ในตอนแรก และค่าความเครียดสูงสุดมีค่าน้อยกว่าค่าความเครียดประลัยของคอนกรีตที่มีค่า 0.003 ม./ม.

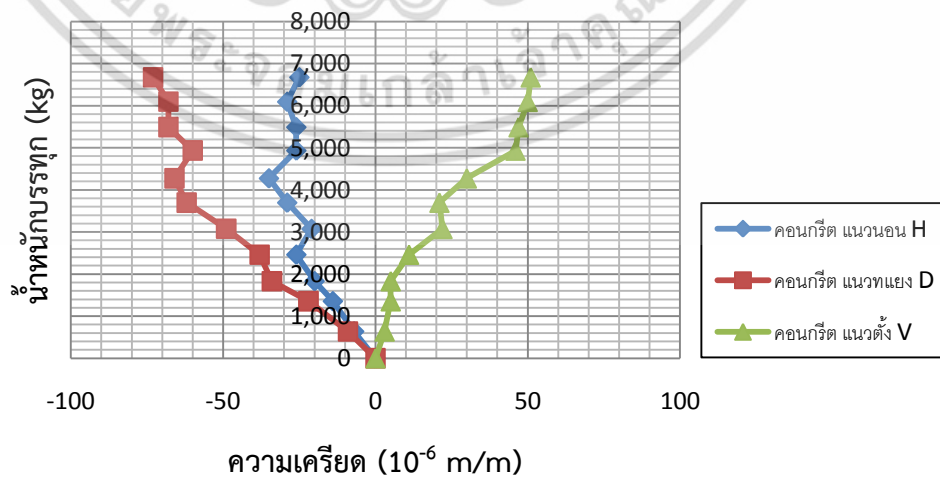
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



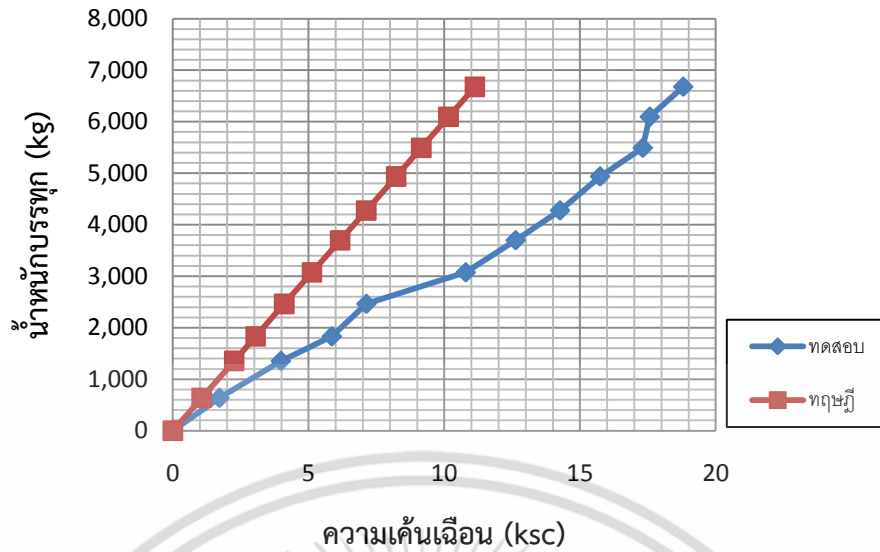
รูปที่ 4.87 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรทุกคาน B2L-F2



รูปที่ 4.88 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเคียดกับน้ำหนักบรทุกที่กึ่งกลางคาน B2L-F2



รูปที่ 4.89 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเคียดกับน้ำหนักบรทุกที่บริเวณ Support คาน B2L-F2  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นใบแจ้งประโยชน์นี้แล้ว  
 ไม่ควรกรณิใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.90 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support คาน B2L-F2

4.7.1.8 ผลการทดสอบคาน B2C-F2

ตารางที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้น คาน B2C-F2

น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอ่นตัว (mm)				$\epsilon_s$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_s$ (ksc)	$\epsilon_{c25}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{c25}$ (ksc)	$\epsilon_{c50}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{c50}$ (ksc)	$\epsilon_{cH}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{cH}$ (ksc)	$\epsilon_{cD}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{cD}$ (ksc)	$\epsilon_{cV}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{cV}$ (ksc)	$T_{max}$ (ksc)		
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี													ทดสอบ	ทฤษฎี	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
705	0.73	0.79	0.69	1.41	67	137	-56	-9	-129	-12	-6	-1	-5	-1	-93	-22	12.44	1.18	
1286	1.32	1.45	1.26	2.28	145	296	-103	-17	-256	-24	-14	-3	-15	-4	-125	-29	15.55	2.14	
1888	1.96	2.24	1.88	3.49	272	554	-127	-21	-382	-36	-20	-5	-23	-5	-132	-31	15.42	3.15	
2467	2.65	3.06	2.6	5.54	420	857	-147	-25	-517	-49	-29	-7	-36	-8	-147	-34	15.72	4.11	
3068	3.41	3.92	3.34	7.57	563	1149	-167	-28	-654	-62	-21	-5	-23	-5	-180	-42	22.20	5.11	
3751	4.18	4.78	4.09	9.73	696	1419	-197	-33	-799	-76	-29	-7	-36	-8	-214	-50	25.18	6.25	
4343	4.92	5.65	4.88	11.50	826	1685	-214	-36	-727	-69	-34	-8	-52	-12	-248	-58	27.83	7.24	
4966	5.67	6.48	5.61	13.32	958	1954	-246	-42	-899	-86	-25	-6	-9	-2	-250	-58	34.15	8.28	
5501	6.36	7.26	6.28	14.83	1034	2109	-331	-56	-997	-95	-26	-6	-22	-5	-254	-59	32.80	9.17	
6139	7.05	8.06	7	16.62	1153	2351	-291	-49	-1057	-101	-25	-6	-31	-7	-250	-58	30.97	10.23	
6616	7.65	8.73	7.62	17.94	1239	2528	-305	-52	-1163	-111	-25	-6	-36	-8	-255	-60	31.00	11.03	
4015	5.86	6.61	5.73	10.53	917	1870	-200	-34	-986	-94	3	1	47	11	-324	-76	52.82	6.69	
2653	4.54	5.1	4.43	6.18	668	1363	-137	-23	-723	-69	8	2	64	15	-324	-76	55.42	4.42	
0	1.39	1.56	1.25	0.36	180	367	27	5	-121	-12	23	5	99	23	916	214	116.00	0.00	

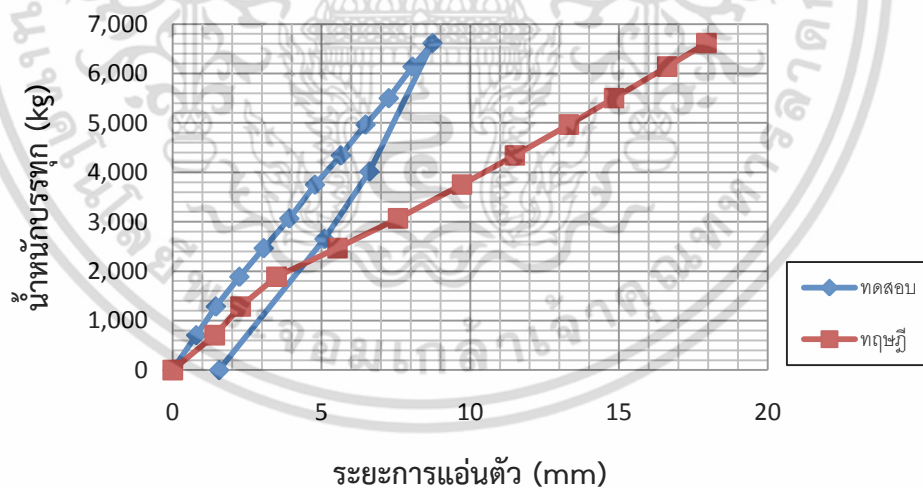
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรรทุก 6,500 กก. มีการแอ่นตัว 8.57 มม. และจากทฤษฎีมีค่า 17.62 มม. ค่าที่ได้จากการทดสอบน้อยกว่าทฤษฎี 51.36% เพราะความเค้นอัดที่วัดได้ในคานทดสอบของคอนกรีตมวลเบาชั้นกลางมีค่า 109.88 กก./ตร.ซม. และคอนกรีตมวลเบาชั้นบนสุด

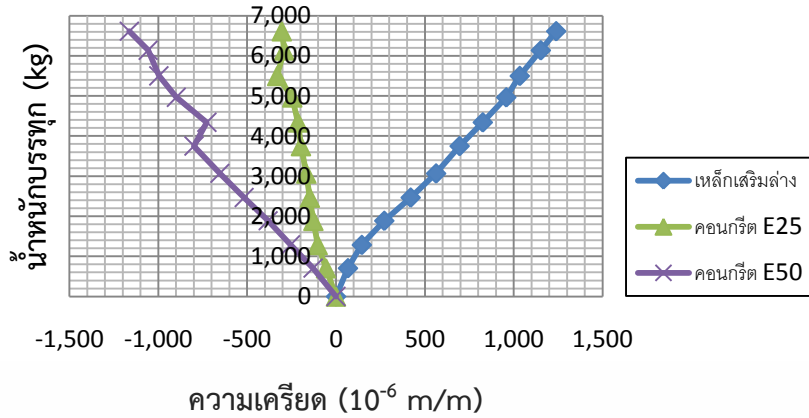
มีค่า 51.43 กก./ตร.ซม. ค่าที่ได้น้อยกว่าค่าที่ใช้ออกแบบคือ 120 กก./ตร.ซม. และ 60 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จึงทำให้เกิดการแอ่นตัวน้อยลง

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กเสริมล่าง มีค่าน้อยในตอนแรก เนื่องจากคอนกรีตช่วยรับแรงดึง จนน้ำหนักบรรทุก 1,400 กก. ความเครียดจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนถึงความเครียดสูงสุดประมาณ 0.001239 ม./ม. ค่าความเครียดนี้น้อยกว่าค่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม.

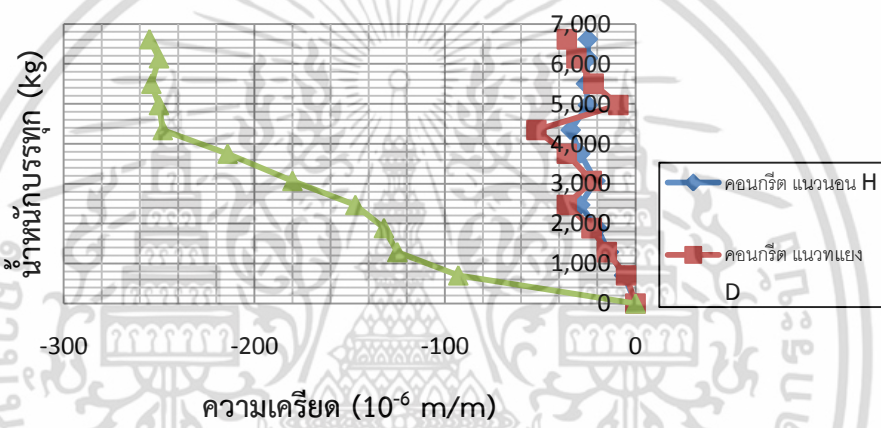
จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียด Strain Rosette ความเครียดมีค่าประมาณศูนย์ในตอนแรก และค่าความเครียดสูงสุดมีค่าน้อยกว่าค่าความเครียดประลัยของคอนกรีตที่มีค่า 0.003 ม./ม.



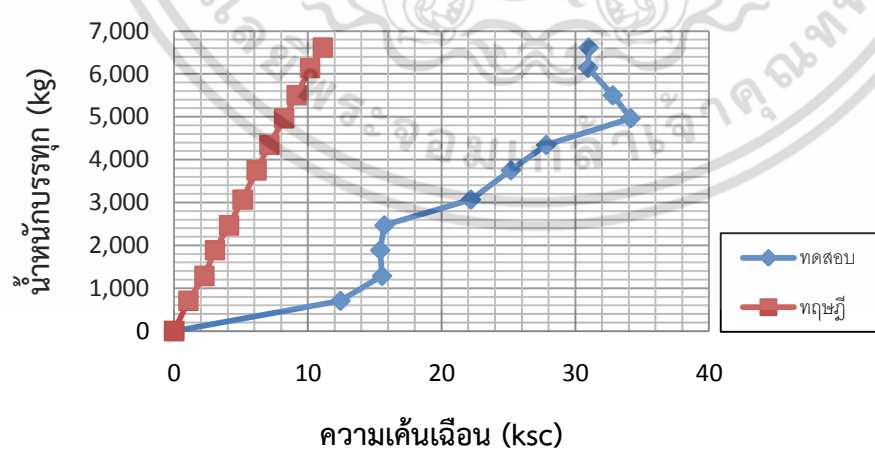
รูปที่ 4.91 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B2C-F2



รูปที่ 4.92 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคาน B2C-F2



รูปที่ 4.93 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support คาน B2C-F2



รูปที่ 4.94 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support คาน B2C-F2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.7.1.9 ผลการทดสอบคาน B1

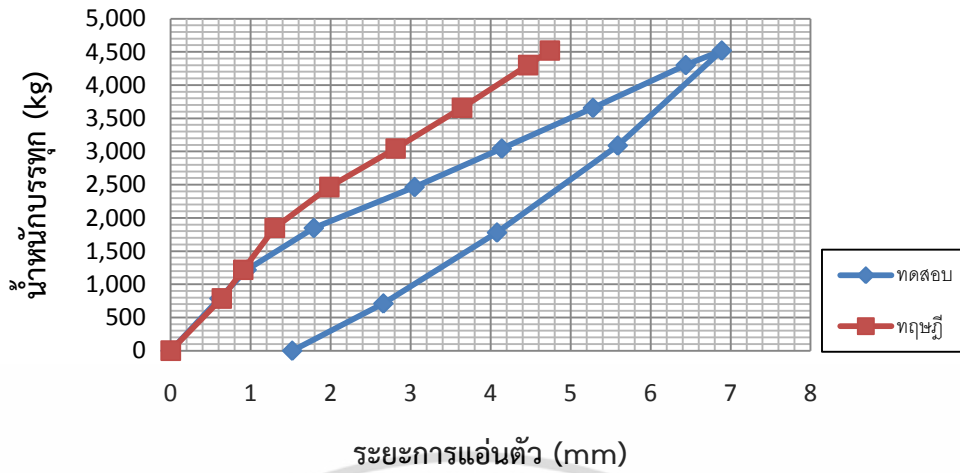
ตารางที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอนตัว ความเครียด และความเค้นคาน B1

น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอนตัว (mm)				$\epsilon_s$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_s$ (ksc)	$\epsilon_c$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_c$ (ksc)	$\epsilon_{cH}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_{cH}$ (ksc)	$\epsilon_{cD}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_{cD}$ (ksc)	$\epsilon_{cV}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_{cV}$ (ksc)	$T_{\max}$ (ksc)	
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี											ทดสอบ	ทฤษฎี
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
787	0.57	0.61	0.55	0.64	42	85	-97	-23	-7	-2	-20	-5	-4	-1	2.91	1.31
1218	0.87	0.95	0.85	0.91	61	123	-162	-38	-13	-3	-29	-7	-7	-2	3.85	2.03
1848	1.57	1.79	1.55	1.30	135	275	-231	-54	-22	-5	-39	-9	-8	-2	5.00	3.08
2465	2.63	3.05	2.57	1.98	566	1154	-299	-70	-30	-7	-52	-12	-4	-1	7.46	4.11
3045	3.56	4.14	3.49	2.81	757	1544	-364	-85	-32	-7	-56	-13	-2	0	8.35	5.07
3657	4.55	5.28	4.46	3.64	927	1891	-476	-111	-36	-8	-53	-12	-21	-5	5.12	6.10
4302	5.52	6.44	5.46	4.47	1099	2241	-567	-133	17	4	-80	-19	82	19	26.69	7.17
4521	5.89	6.89	5.84	4.74	1157	2360	-627	-147	16	4	-80	-19	78	18	26.14	7.53
3090	4.84	5.59	4.76	2.87	885	1805	-431	-101	21	5	-45	-11	73	17	19.11	5.15
1780	3.52	4.08	3.47	1.26	609	1241	-245	-57	28	7	-34	-8	66	15	16.63	2.97
712	2.34	2.66	2.25	0.59	364	742	-73	-17	32	7	-26	-6	59	14	14.55	1.19
0	1.29	1.52	1.23	0.15	199	406	-61	-14	37	9	-11	-3	56	13	11.65	0.00

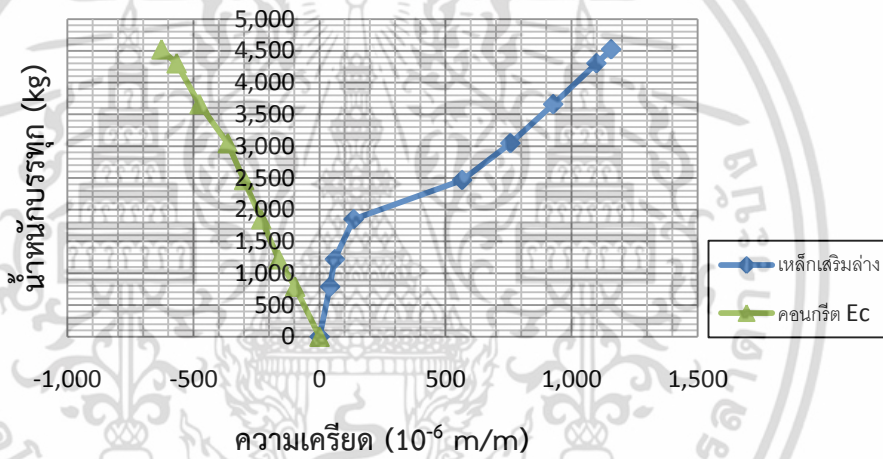
จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรรทุก 4,500 กก. มีการแอนตัว 6.85 มม. และจากทฤษฎีมีค่า 4.71 มม. ค่าที่ได้จากการทดสอบมากกว่าทฤษฎี 45.44% เพราะความเค้นอัดที่วัดได้ในคานทดสอบมีค่า 146.78 กก./ตร.ซม. ค่าที่ได้มากกว่าค่าที่ใช้ออกแบบคือ 120 กก./ตร.ซม. จึงทำให้เกิดการแอนตัวมากขึ้น

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กเสริมล่าง มีค่าน้อยใน ตอนแรก เนื่องจากคอนกรีตช่วยรับแรงดึง จนน้ำหนักบรรทุก 1,800 กก. ความเครียดจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนถึงความเครียดสูงสุดประมาณ 0.001157 ม./ม. ค่าความเครียดนี้น้อยกว่าค่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม.

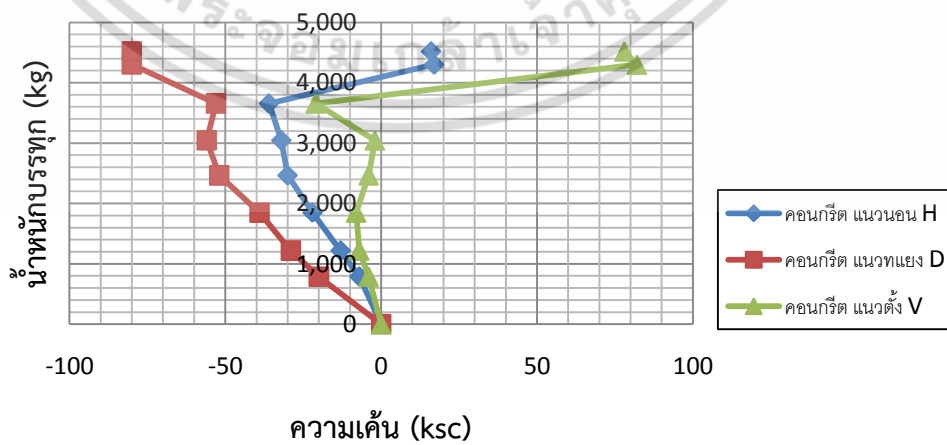
จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียด Strain Rosette ความเครียดมีค่าประมาณศูนย์ในตอนแรก และค่าความเครียดสูงสุดมีค่าน้อยกว่าค่าความเครียดประลัยของคอนกรีตที่มีค่า 0.003 ม./ม.



รูปที่ 4.95 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B1

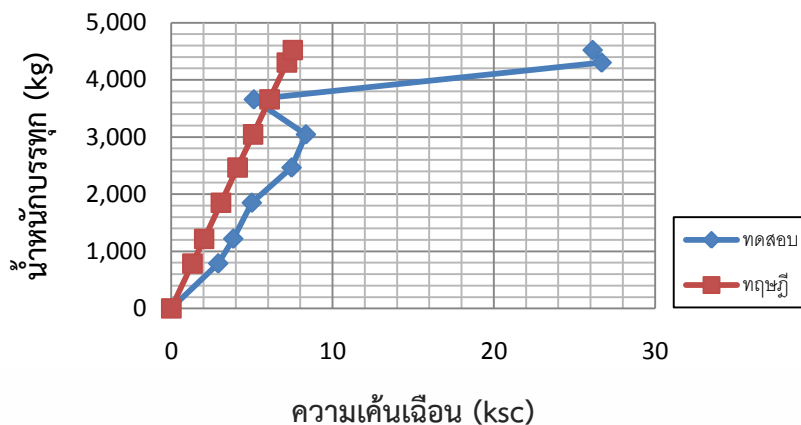


รูปที่ 4.96 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเคียดกับน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคาน B1



รูปที่ 4.97 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเคียดกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support คาน B1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.98 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรทุกที่บริเวณ Support คาน B1

#### 4.7.1.10 ผลการทดสอบคาน B1S

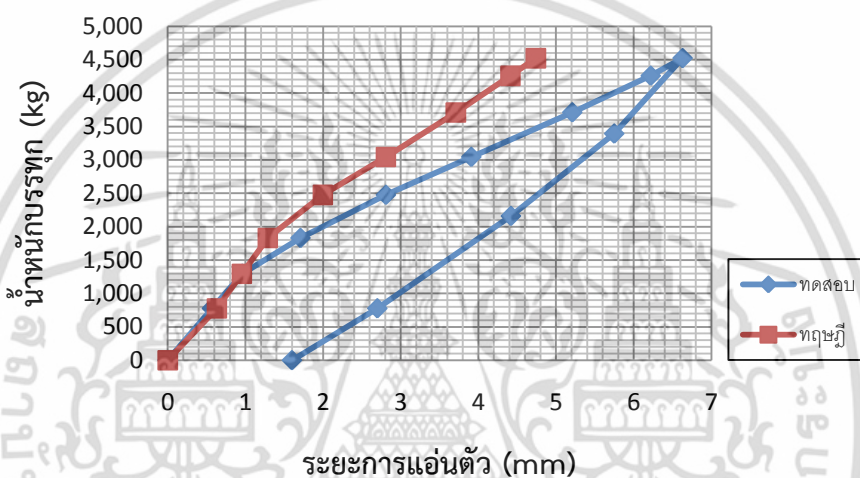
ตารางที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้น คาน B1S

น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอ่นตัว (mm)				$\epsilon_s$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_s$ (ksc)	$\epsilon_c$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_c$ (ksc)	$\epsilon_{st}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_{st}$ (ksc)	$\epsilon_{cH}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_{cH}$ (ksc)	$\epsilon_{cD}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_{cD}$ (ksc)	$\epsilon_{cV}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_{cV}$ (ksc)	$T_{max}$ (ksc)		
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี													ทดสอบ	ทฤษฎี	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
777	0.51	0.57	0.53	0.63	36	73	-193	-45	1	2	-5	-1	-15	-4	-1	0	2.43	1.29	
1294	0.86	0.96	0.89	0.95	104	212	-294	-69	-3	-6	-5	-1	-18	-4	4	1	3.61	2.16	
1830	1.49	1.71	1.56	1.29	384	782	-400	-94	4	8	-11	-3	-25	-6	3	1	4.43	3.05	
2475	2.43	2.81	2.53	2.00	610	1243	-502	-117	5	10	-15	-4	-32	-7	6	1	5.89	4.13	
3043	3.38	3.91	3.55	2.81	809	1649	-566	-132	-6	-12	-15	-4	-44	-10	6	1	8.17	5.07	
3709	4.48	5.21	4.68	3.71	1004	2047	-619	-145	-5	-10	-17	-4	-55	-13	9	2	10.52	6.18	
4258	5.35	6.22	5.59	4.41	1180	2407	-613	-143	10	20	-21	-5	-59	-14	14	3	11.64	7.10	
4521	5.71	6.63	5.97	4.74	1235	2519	-684	-160	-3	-6	-21	-5	-61	-14	16	4	12.27	7.53	
3391	4.94	5.75	5.18	3.29	1086	2215	-546	-128	5	10	-14	-3	-46	-11	10	2	9.12	5.65	
2159	3.79	4.42	3.99	1.54	820	1673	-415	-97	6	12	-6	-1	-29	-7	4	1	5.69	3.60	
777	2.34	2.7	2.46	0.63	475	969	-441	-103	4	8	1	0	-14	-3	-2	0	2.72	1.29	
0	1.34	1.6	1.4	0.15	281	572	-540	-126	-6	-12	4	1	-1	0	-7	-2	1.10	0.00	

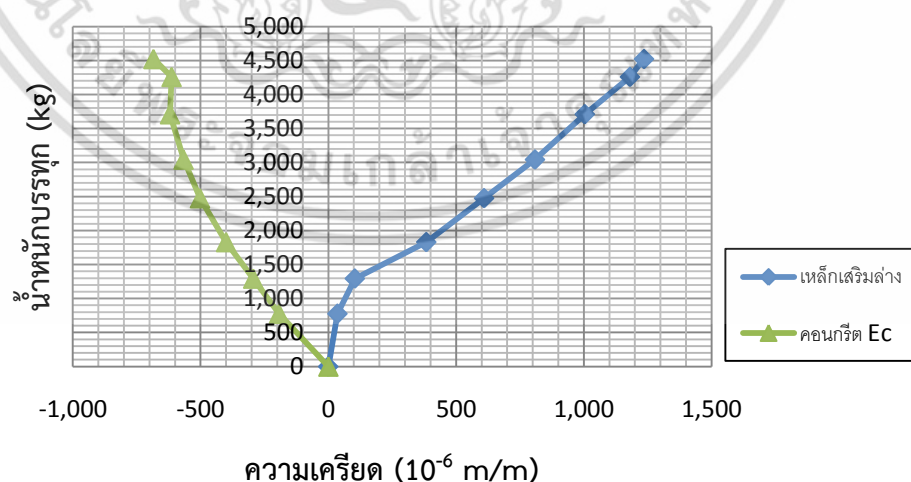
จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรทุก 4,500 กก. มีการแอ่นตัว 6.60 มม. และจากทฤษฎีมีค่า 4.71 มม. ค่าที่ได้จากการทดสอบมากกว่าทฤษฎี 40.13% เพราะความเค้นอัดที่วัดได้ในคานทดสอบมีค่า 146.78 กก./ตร.ซม. ค่าที่ได้มากกว่าค่าที่ใช้ออกแบบคือ 120 กก./ตร.ซม. จึงทำให้เกิดการแอ่นตัวมากขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กเสริมล่าง มีค่าน้อยใน ตอนแรก เนื่องจากคอนกรีตช่วยรับแรงดึง จนน้ำหนักบรรทุก 1,300 กก. ความเครียดจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนถึงความเครียดสูงสุดประมาณ 0.001235 ม./ม. ค่าความเครียดนี้น้อยกว่าค่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม.

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียด Strain Rosette ความเครียดมีค่าประมาณศูนย์ในตอนแรก และค่าความเครียดสูงสุดมีค่าน้อยกว่าค่าความเครียดประลัยของคอนกรีตที่มีค่า 0.003 ม./ม.

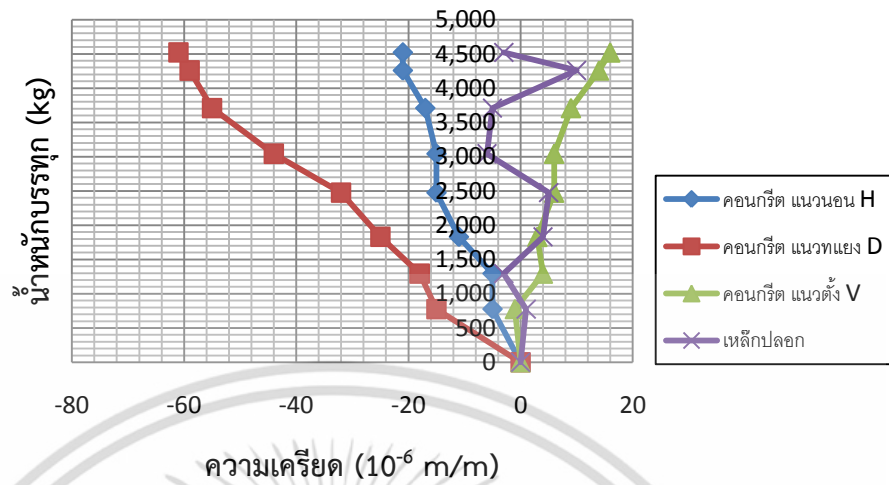


รูปที่ 4.99 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B1S

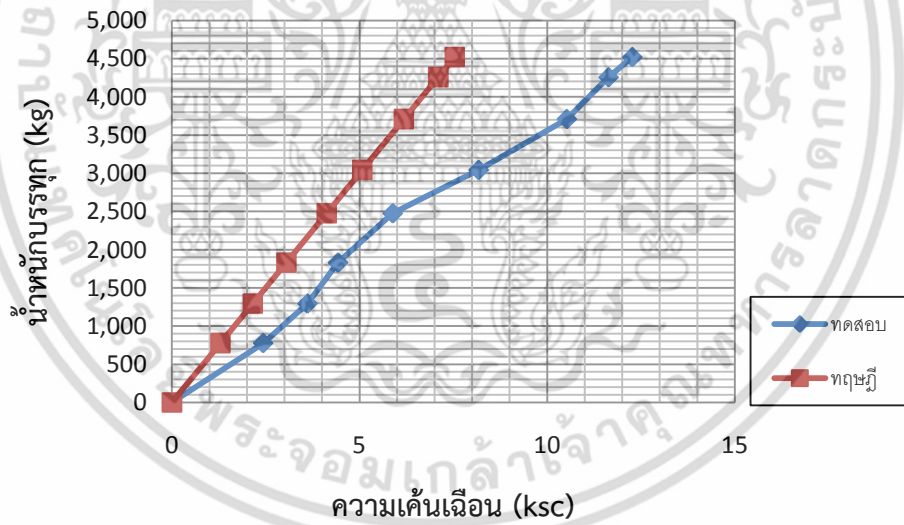


รูปที่ 4.100 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคาน B1S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.101 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support คาน B1S



รูปที่ 4.102 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support คาน B1S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.7.1.11 ผลการทดสอบคาน B1LS

ตารางที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้น

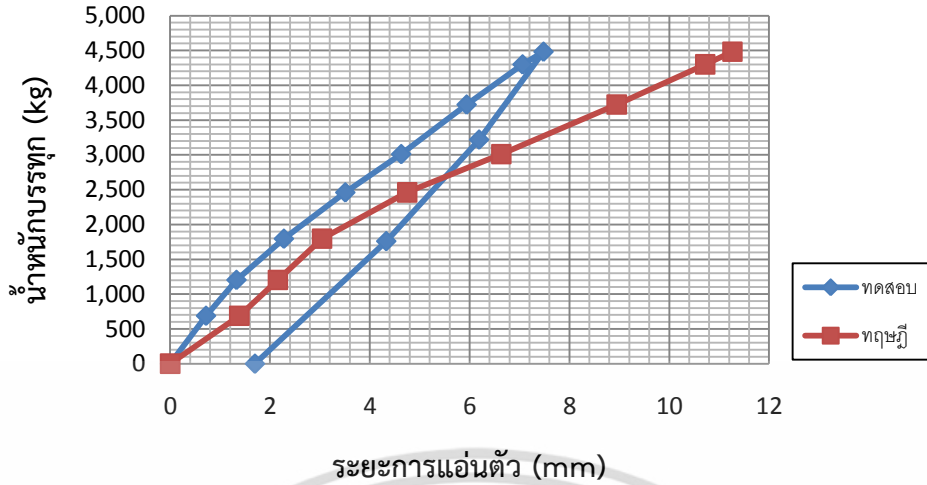
คาน B1LS

น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอ่นตัว (mm)				$\epsilon_s$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_s$ (ksc)	$\epsilon_{c25}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{c25}$ (ksc)	$\epsilon_{c50}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{c50}$ (ksc)	$\epsilon_{st}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{st}$ (ksc)	$\epsilon_{cH}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{cH}$ (ksc)	$\epsilon_{cD}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{cD}$ (ksc)	$\epsilon_{cV}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{cV}$ (ksc)	$T_{max}$ (ksc)		
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี															ทดสอบ	ทฤษฎี	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
689	0.67	0.72	0.67	1.39	89	182	-80	-14	-148	-14	18	37	-13	-3	-12	-3	4	1	2.27	1.15	
1205	1.19	1.33	1.22	2.16	271	553	-130	-22	-300	-29	10	20	-26	-6	-26	-6	9	2	4.95	2.01	
1796	2.03	2.28	2.04	3.04	479	976	-157	-27	-388	-37	-5	-10	-34	-8	-40	-9	12	3	7.40	2.99	
2462	3.1	3.51	3.08	4.75	705	1437	-160	-27	-478	-46	1	2	-42	-10	-58	-14	21	5	11.40	4.10	
3012	4.11	4.63	4.05	6.64	893	1821	-181	-31	-670	-64	11	22	-52	-12	-76	-18	18	4	13.72	5.02	
3724	5.26	5.94	5.16	8.95	1126	2296	-189	-32	-743	-71	-2	-4	-55	-13	-99	-23	-189	-44	14.16	6.21	
4301	6.26	7.06	6.14	10.72	1316	2684	-243	-41	-858	-82	-7	-14	-58	-14	-114	-27	-191	-45	13.46	7.17	
4483	6.62	7.48	6.5	11.27	1382	2819	-255	-43	-902	-86	-1	-2	-66	-15	-117	-27	-186	-44	12.13	7.47	
3220	5.54	6.19	5.4	7.33	1112	2267	-137	-23	-566	-54	11	22	-52	-12	-92	-22	-197	-46	15.89	5.37	
1761	3.92	4.33	3.79	2.99	739	1507	-79	-13	-377	-36	17	35	-30	-7	-50	-12	-205	-48	22.10	2.94	
0	1.64	1.7	1.42	0.36	261	531	-12	-2	-78	-7	0	0	-5	-1	-9	-2	-216	-51	29.27	0.00	

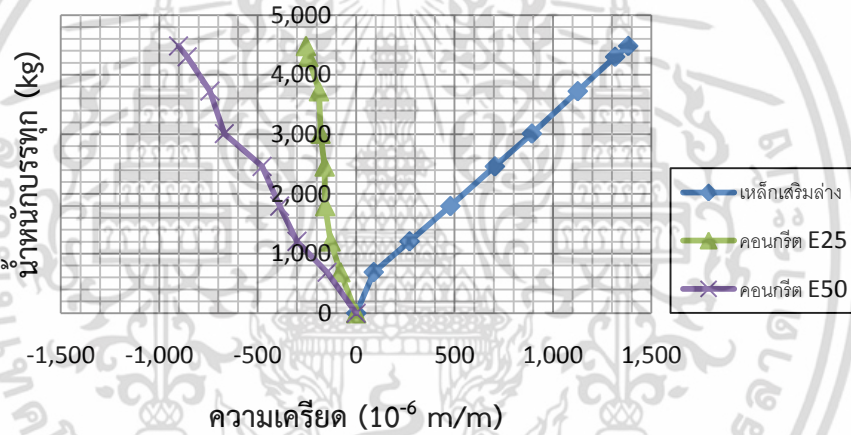
จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรรทุก 4,500 กก. มีการแอ่นตัว 7.52 มม. และจากทฤษฎีมีค่า 11.32 มม. ค่าที่ได้จากการทดสอบน้อยกว่าทฤษฎี 33.57% เพราะความเค้นอัดที่วัดได้ในคานทดสอบของคอนกรีตมวลเบาชั้นกลางมีค่า 86.55 กก./ตร.ซม. และคอนกรีตมวลเบาชั้นบนสุดมีค่า 43.75 กก./ตร.ซม. ค่าที่ได้น้อยกว่าค่าที่ใช้ออกแบบคือ 120 กก./ตร.ซม. และ 60 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จึงทำให้เกิดการแอ่นตัวน้อยลง

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กเสริมล่าง มีค่าน้อยในตอนแรก เนื่องจากคอนกรีตช่วยรับแรงดึง จนน้ำหนักบรรทุก 700 กก. ความเครียดจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงความเครียดสูงสุดประมาณ 0.001382 ม./ม. ค่าความเครียดนี้น้อยกว่าค่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม.

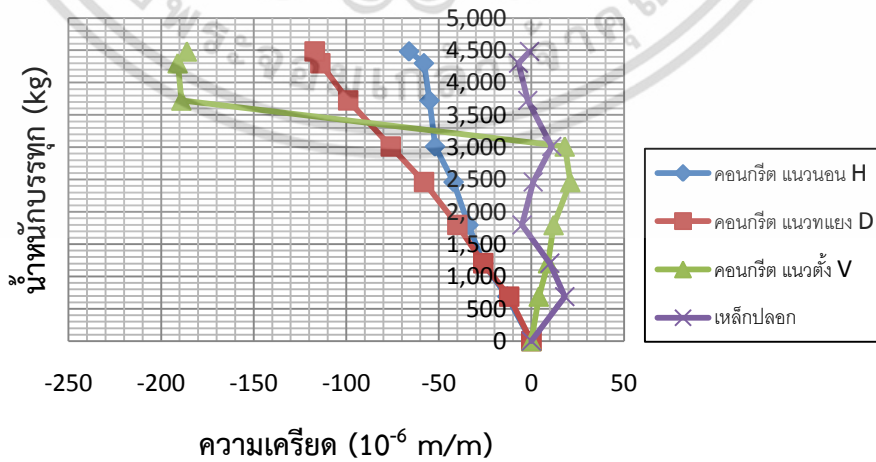
จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียด Strain Rosette ความเครียดมีค่าประมาณศูนย์ในตอนแรก และค่าความเครียดสูงสุดมีค่าน้อยกว่าค่าความเครียดประลัยของคอนกรีตที่มีค่า 0.003 ม./ม.



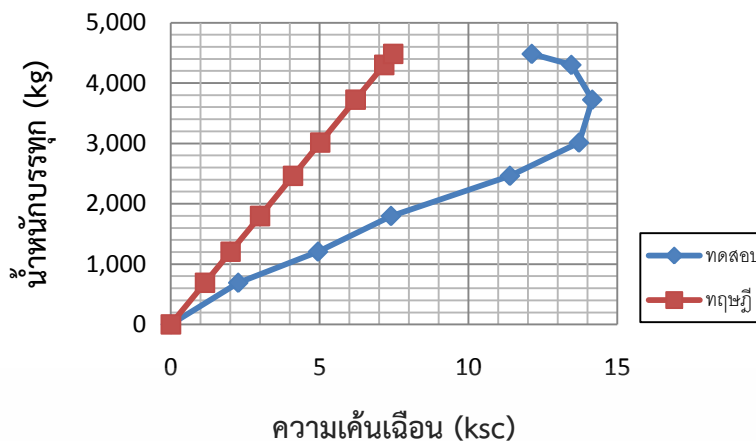
รูปที่ 4.103 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B1LS



รูปที่ 4.104 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคาน B1LS



รูปที่ 4.105 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support คาน B1LS เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.106 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support คาน B1LS

4.7.1.12 ผลการทดสอบคาน B1CS

ตารางที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้น คาน B1CS

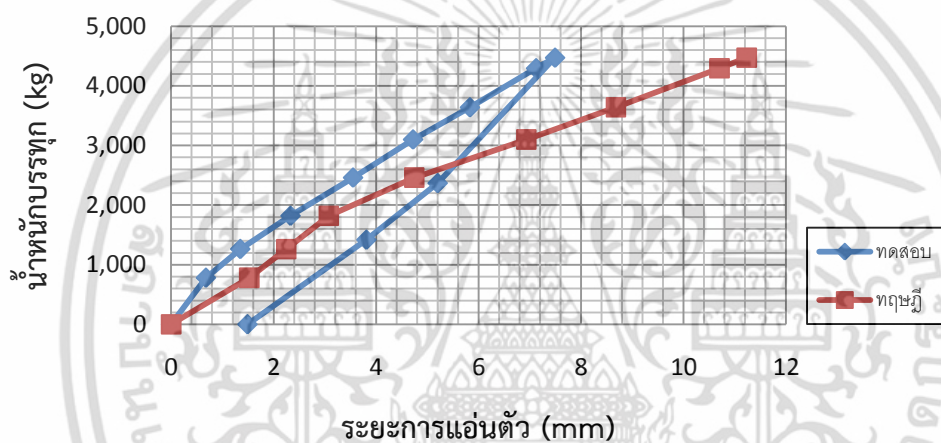
น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอ่นตัว (mm)				ε <sub>s</sub> (μm/m)	σ <sub>s</sub> (ksc)	ε <sub>c25</sub> (μm/m)	σ <sub>c25</sub> (ksc)	ε <sub>c50</sub> (μm/m)	σ <sub>c50</sub> (ksc)	ε <sub>st</sub> (μm/m)	σ <sub>st</sub> (ksc)	ε <sub>cH</sub> (μm/m)	σ <sub>cH</sub> (ksc)	ε <sub>cD</sub> (μm/m)	σ <sub>cD</sub> (ksc)	ε <sub>cV</sub> (μm/m)	σ <sub>cV</sub> (ksc)	T <sub>max</sub> (ksc)		
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี															ทดสอบ	ทฤษฎี	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
781	0.58	0.68	0.58	1.52	78	159	-93	-16	-140	-13	41	84	-5	-1	-7	-2	-11	-3	0.63	1.30	
1263	1.15	1.35	1.15	2.25	186	379	-136	-23	-256	-24	8	16	-12	-3	-13	-3	-14	-3	0.20	2.10	
1820	2	2.33	2.01	3.08	367.5	750	-151	-26	-378	-36	27	55	-17	-4	-21	-5	-20	-5	0.58	3.03	
2461	3.06	3.55	3.06	4.75	524	1069	-160	-27	-508	-48	-6	-12	-18	-4	-32	-7	-17	-4	2.90	4.10	
3100	4.1	4.72	4.12	6.93	669.5	1366	-175	-30	-622	-59	-27	-55	-24	-6	-40	-9	-17	-4	3.96	5.17	
3639	5.07	5.83	5.1	8.68	805.5	1643	-189	-32	-720	-69	-31	-63	-24	-6	-47	-11	-20	-5	5.01	6.07	
4295	6.17	7.12	6.2	10.70	972	1983	-223	-38	-839	-80	-7	-14	-19	-4	-61	-14	-27	-6	7.64	7.16	
4472	6.5	7.49	6.51	11.23	1010	2060	-228	-39	-874	-83	-12	-24	-23	-5	-61	-14	-36	-8	6.43	7.45	
2368	4.55	5.2	4.57	4.42	699.5	1427	-130	-22	-546	-52	25	51	-8	-2	-39	-9	-81	-19	7.38	3.95	
1418	3.34	3.81	3.35	2.48	475	969	-82	-14	-358	-34	-7	-14	-4	-1	-32	-7	-88	-21	8.85	2.36	
0	1.36	1.49	1.35	0.36	182	371	-4	-1	-64	-6	26	53	-1	0	-26	-6	-103	-24	11.45	0.00	

จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรรทุก 4,500 กก. มีการแอ่นตัว 7.55 มม. และจากทฤษฎีมีค่า 11.32 มม. ค่าที่ได้จากการทดสอบน้อยกว่าทฤษฎี 33.24% เพราะความเค้นอัดที่วัดได้ในคานทดสอบของคอนกรีตมวลเบาชั้นกลางมีค่า 84.99 กก./ตร.ซม. และคอนกรีตมวลเบาชั้นบนสุดมีค่า 39.87 กก./ตร.ซม. ค่าที่ได้น้อยกว่าค่าที่ใช้ออกแบบคือ 120 กก./ตร.ซม. และ 60 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จึงทำให้เกิดการแอ่นตัวน้อยลง

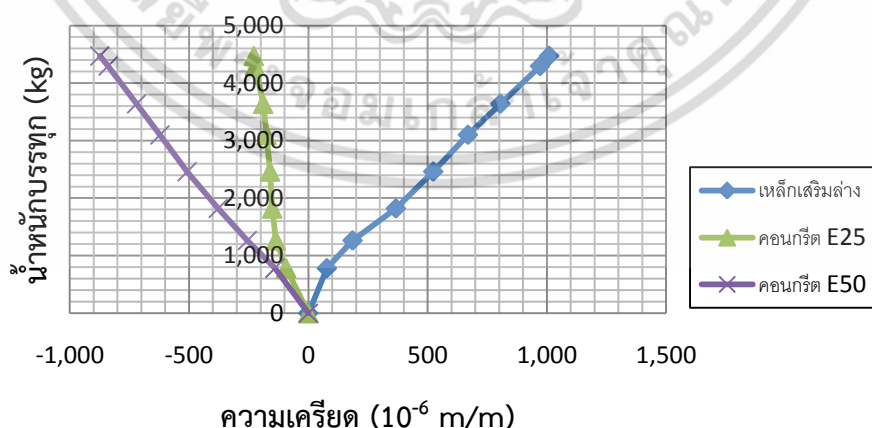
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กเสริมล่าง มีค่าน้อยในตอนแรก เนื่องจากคอนกรีตช่วยรับแรงดึง จนน้ำหนักบรรทุก 900 กก. ความเครียดจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงความเครียดสูงสุดประมาณ 0.001010 ม./ม. ค่าความเครียดนี้น้อยกว่าค่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม.

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียด Strain Rosette ความเครียดมีค่าประมาณศูนย์ในตอนแรก และค่าความเครียดสูงสุดมีค่าน้อยกว่าค่าความเครียดประลัยของคอนกรีตที่มีค่า 0.003 ม./ม.

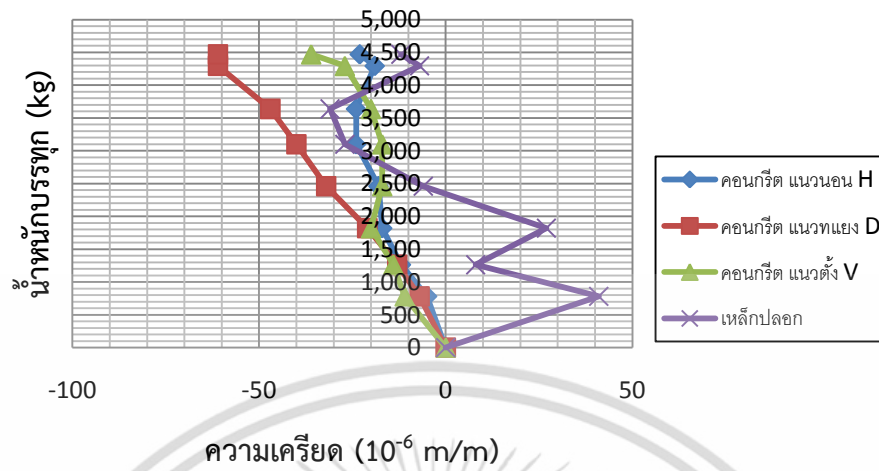


รูปที่ 4.107 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B1CS

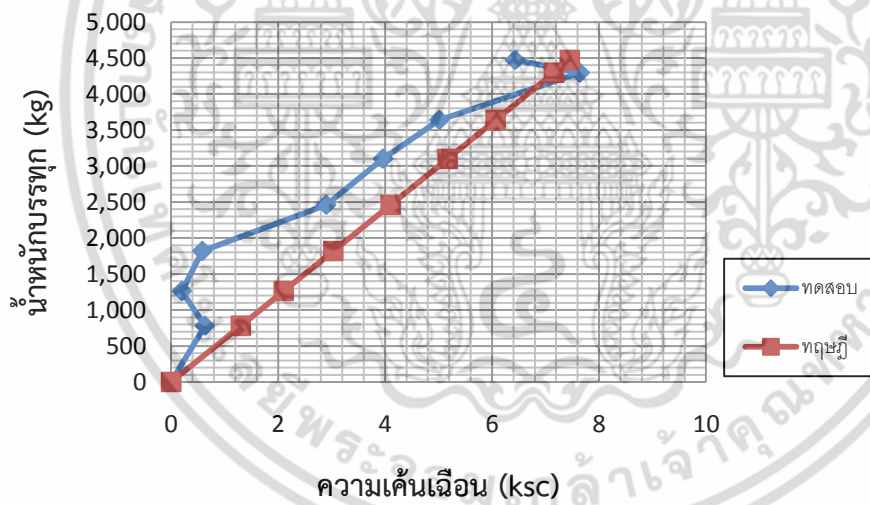


รูปที่ 4.108 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคาน B1LS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.109 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support คาน B1CS



รูปที่ 4.110 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support คาน B1CS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.7.1.13 ผลการทดสอบคาน B1LS-F1

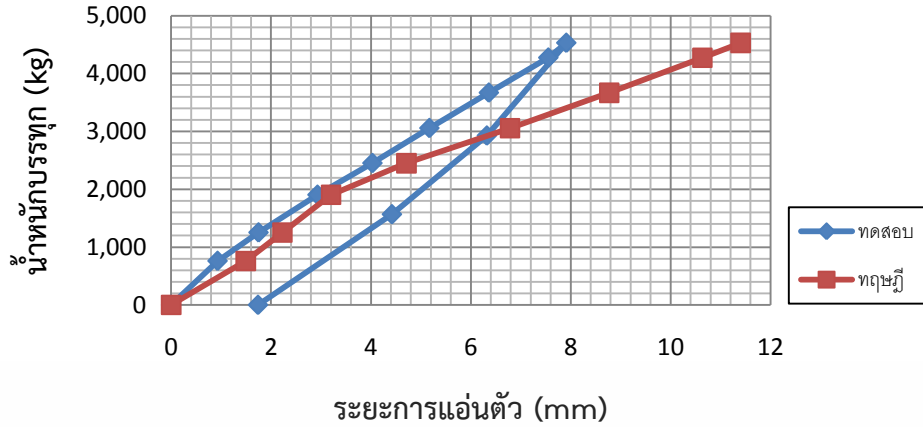
ตารางที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอนตัว ความเครียด และความเค้น  
คาน B1LS-F1

น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอนตัว (mm)				$\epsilon_s$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_s$ (ksc)	$\epsilon_{c25}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{c25}$ (ksc)	$\epsilon_{c50}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{c50}$ (ksc)	$\epsilon_{st}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{st}$ (ksc)	$\epsilon_{cH}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{cH}$ (ksc)	$\epsilon_{cD}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{cD}$ (ksc)	$\epsilon_{cV}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{cV}$ (ksc)	$T_{max}$ (ksc)		
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี															ทดสอบ	ทฤษฎี	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
760	0.87	0.93	0.83	1.49	95	193	-111	-19	-176	-17	4	8	-13	-3	-15	-4	8	2	3.26	1.27	
1252	1.55	1.75	1.54	2.23	325	663	-182	-31	-342	-33	56	114	-19	-4	-23	-5	16	4	5.54	2.09	
1903	2.52	2.93	2.58	3.20	508	1036	-264	-45	-556	-53	52	106	-30	-7	-40	-9	67	16	15.19	3.17	
2451	3.43	4.03	3.53	4.71	629	1282	-298	-50	-719	-68	-1	-2	-34	-8	-58	-14	71	17	18.55	4.08	
3056	4.37	5.17	4.49	6.78	804	1640	-344	-58	-890	-85	-1	-2	-41	-10	-74	-17	77	18	21.85	5.09	
3668	5.42	6.36	5.54	8.77	1008	2055	-404	-68	-1033	-98	23	47	-50	-12	-101	-24	72	17	25.50	6.11	
4273	6.42	7.55	6.59	10.64	1163	2372	-435	-74	-1068	-102	-18	-37	-52	-12	-117	-27	78	18	29.06	7.12	
4529	6.74	7.91	6.94	11.40	1220	2489	-447	-76	-1145	-109	-7	-14	-58	-14	-124	-29	80	19	30.31	7.55	
2926	5.46	6.32	5.42	6.34	929	1894	-986	-167	-930	-89	-32	-65	-30	-7	-83	-19	65	15	22.23	4.88	
1566	3.86	4.42	3.75	2.70	623	1271	-113	-19	-596	-57	-23	-47	-15	-4	-50	-12	52	12	15.25	2.61	
0	1.44	1.74	1.24	0.36	264	538	-207	-35	-137	-13	0	0	6	1	-15	-4	-1	0	3.57	0.00	

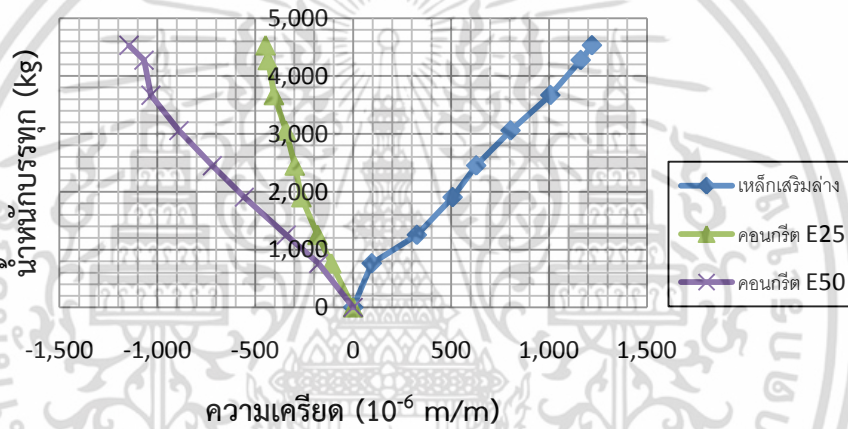
จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรรทุก 4,500 กก. มีการแอนตัว 7.55 มม. และจากทฤษฎีมีค่า 11.32 มม. ค่าที่ได้จากการทดสอบน้อยกว่าทฤษฎี 33.24% เพราะความเค้นอัดที่วัดได้ในคานทดสอบของคอนกรีตมวลเบาชั้นกลางมีค่า 108.95 กก./ตร.ซม. และคอนกรีตมวลเบาชั้นบนสุดมีค่า 75.14 กก./ตร.ซม. ค่าที่ได้น้อยกว่าค่าที่ใช้ออกแบบคือ 120 กก./ตร.ซม. และ 60 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จึงทำให้เกิดการแอนตัวน้อยลง

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กเสริมล่าง มีค่าน้อยในตอนแรก เนื่องจากคอนกรีตช่วยรับแรงดึง จนน้ำหนักบรรทุก 800 กก. ความเครียดจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนถึงความเครียดสูงสุดประมาณ 0.001220 ม./ม. ค่าความเครียดนี้น้อยกว่าค่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม.

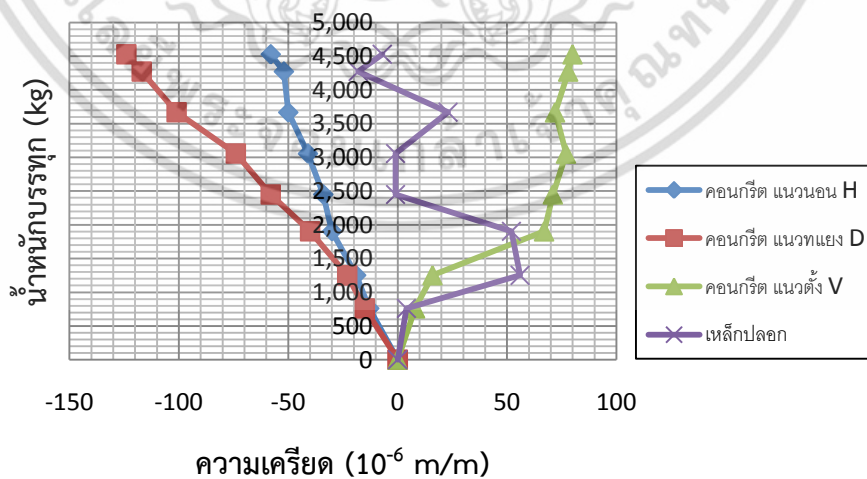
จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียด Strain Rosette ความเครียดมีค่าประมาณศูนย์ในตอนแรก และค่าความเครียดสูงสุดมีค่าน้อยกว่าค่าความเครียดประลัยของคอนกรีตที่มีค่า 0.003 ม./ม.



รูปที่ 4.111 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B1LS-F1

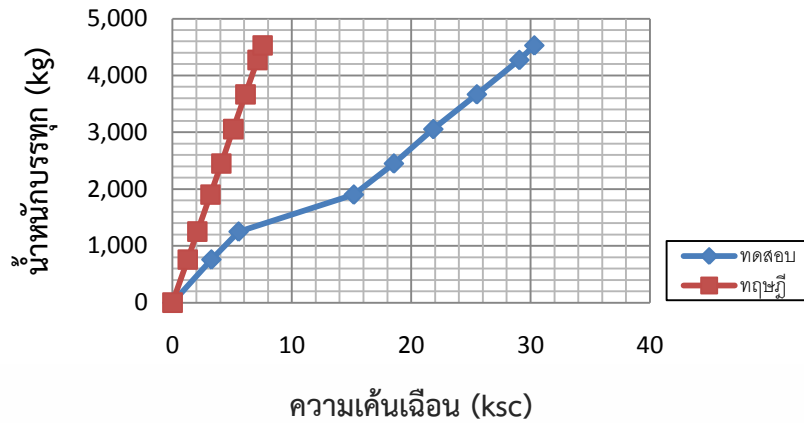


รูปที่ 4.112 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคาน B1LS-F1



รูปที่ 4.113 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support คาน B1LS-F1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.114 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรรจุที่บริเวณ Support

คาน B1LS-F1

4.7.1.14 ผลการทดสอบคาน B1CS-F1

ตารางที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรจุ การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้น

คาน B1CS-F1

น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอ่นตัว (mm)				$\epsilon_s$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_s$ (ksc)	$\epsilon_{c25}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_{c25}$ (ksc)	$\epsilon_{c50}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_{c50}$ (ksc)	$\epsilon_{st}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_{st}$ (ksc)	$\epsilon_{cH}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_{cH}$ (ksc)	$\epsilon_{cD}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_{cD}$ (ksc)	$\epsilon_{cV}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_{cV}$ (ksc)	$T_{max}$ (ksc)		
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี															ทดสอบ	ทฤษฎี	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
673	0.63	0.67	0.76	1.36	76	154	-76	-13	-139	-13	32	65	-4	-1	-11	-3	2	0	2.09	1.12	
1386	1.49	1.64	1.46	2.43	276	562	-168	-28	-370	-35	-14	-29	-13	-3	-26	-6	5	1	4.75	2.31	
1831	2.15	2.42	2.32	3.10	434	884	-207	-35	-523	-50	-27	-55	-20	-5	-37	-9	5	1	6.41	3.05	
2433	3.21	3.65	3.41	4.65	612	1248	-234	-40	-698	-66	-34	-69	-28	-7	-46	-11	7	2	7.91	4.06	
3114	4.31	4.88	4.49	6.98	880	1795	-239	-40	-884	-84	34	69	-25	-6	-68	-16	7	2	12.22	5.19	
3751	5.31	6.04	5.49	9.04	998	2036	-244	-41	-1055	-100	-48	-98	-21	-5	-83	-19	9	2	15.68	6.25	
4340	6.34	7.19	6.53	10.84	1195	2438	-240	-41	-1198	-114	-38	-78	-24	-6	-98	-23	10	2	18.51	7.23	
4512	6.64	7.55	6.85	11.35	1236	2520	-244	-41	-1211	-115	-29	-59	-25	-6	-99	-23	11	3	18.74	7.52	
3300	5.68	6.39	5.83	7.59	995	2029	-170	-29	-1021	-97	-28	-57	-16	-4	-78	-18	3	1	14.42	5.50	
1678	3.77	4.21	3.92	2.87	626	1276	-72	-12	-639	-61	1	2	1	0	-46	-11	-3	-1	9.01	2.80	
0	1.34	1.49	1.3	0.36	253	516	56	9	-172	-16	62	126	7	2	-30	-7	-5	-1	6.31	0.00	

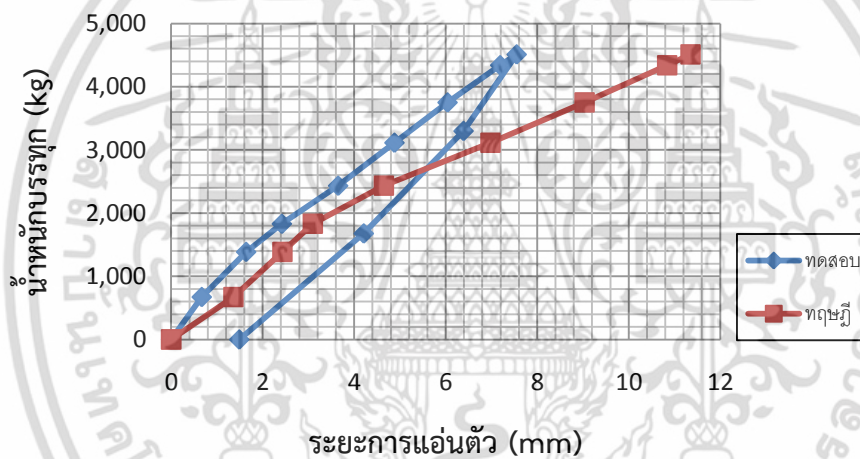
จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรรจุ 4,500 กก. มีการแอ่นตัว 7.53 มม. และจากทฤษฎีมีค่า 11.32 มม. ค่าที่ได้จากการทดสอบน้อยกว่าทฤษฎี 33.48% เพราะความเค้นอัดที่วัดได้ในคานทดสอบของคอนกรีตมวลเบาชั้นกลางมีค่า 114.88 กก./ตร.ซม. และคอนกรีตมวลเบาชั้นบนสุดมีค่า 41.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

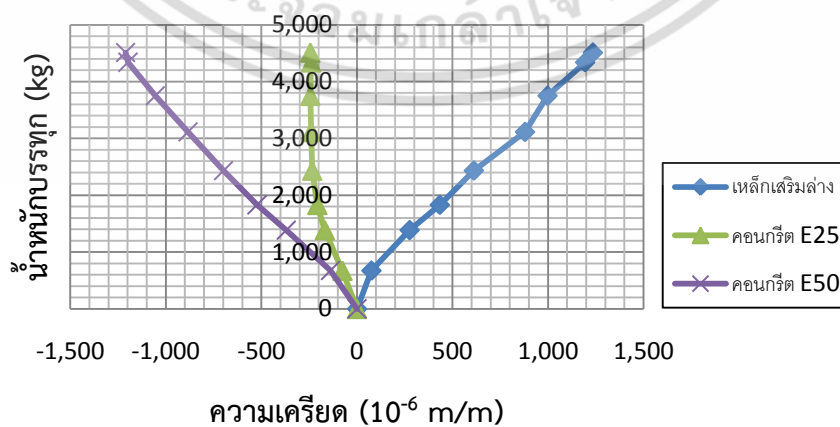
กก./ตร.ซม. ค่าที่ได้น้อยกว่าค่าที่ใช้ออกแบบคือ 120 กก./ตร.ซม. และ 60 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จึงทำให้เกิดการแอ่นตัวน้อยลง

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กเสริมล่าง มีค่าน้อยในตอนแรก เนื่องจากคอนกรีตช่วยรับแรงดึง จนน้ำหนักบรรทุก 700 กก. ความเครียดจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนถึงความเครียดสูงสุดประมาณ 0.001236 ม./ม. ค่าความเครียดนี้น้อยกว่าค่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม.

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและ Strain Rosette ความเครียดมีค่าประมาณศูนย์ในตอนแรก และค่าความเครียดสูงสุดมีค่าน้อยกว่าค่าความเครียดประลัยของคอนกรีตที่มีค่า 0.003 ม./ม.

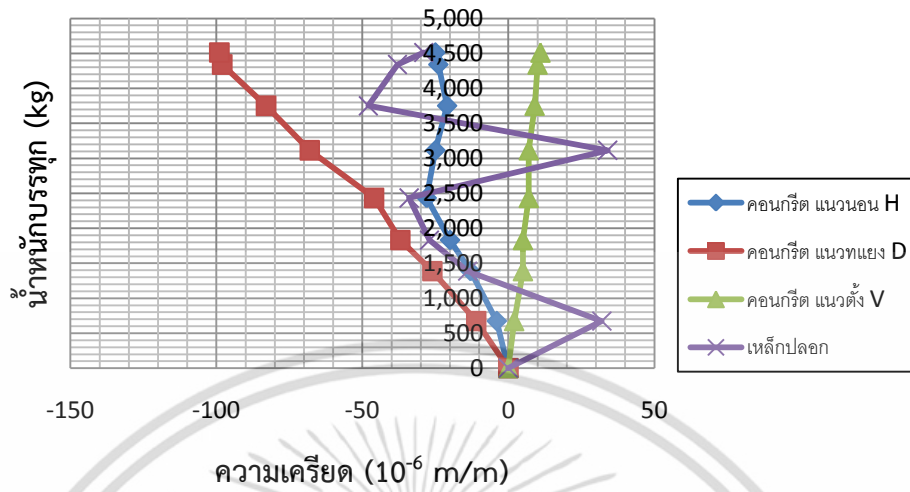


รูปที่ 4.115 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B1CS-F1

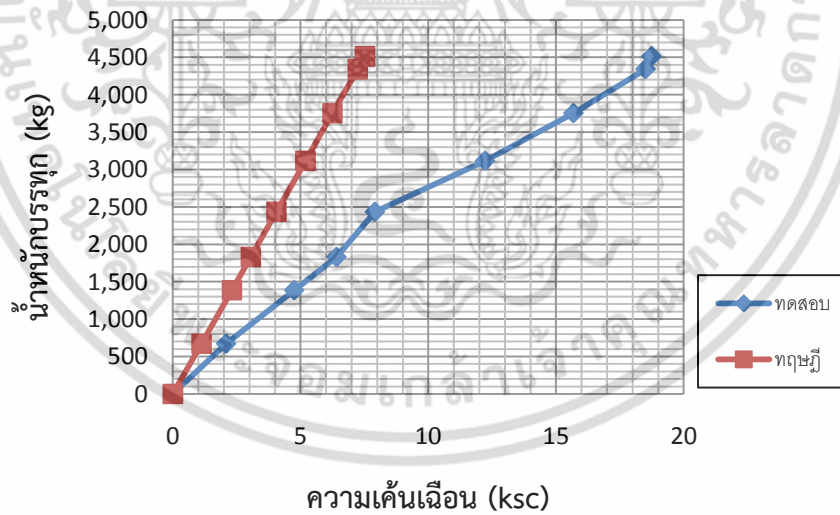


รูปที่ 4.116 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคาน B1CS-F1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้  
 ใ้แก่ผู้อื่นได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.117 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support คาน B1CS-F1



รูปที่ 4.118 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support

คาน B1CS-F1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.7.1.15 ผลการทดสอบคาน B1L-F2

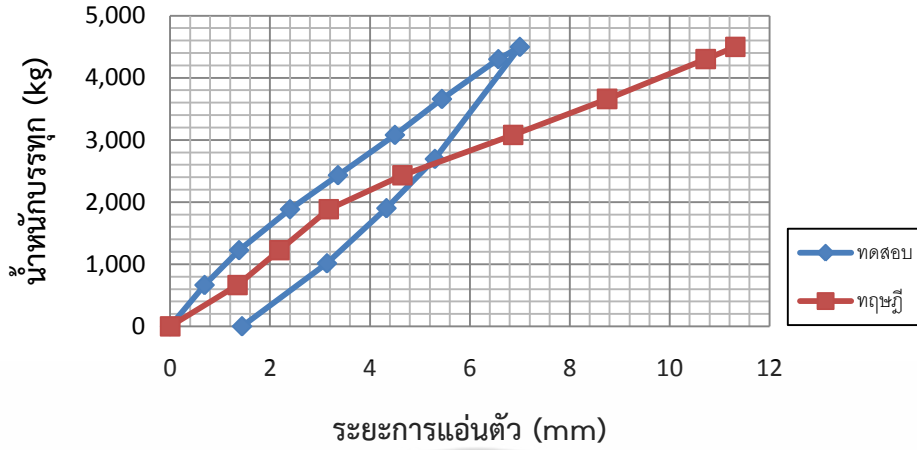
ตารางที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้น  
คาน B1L-F2

น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอ่นตัว (mm)				$\epsilon_s$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_s$ (ksc)	$\epsilon_{c25}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_{c25}$ (ksc)	$\epsilon_{c50}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_{c50}$ (ksc)	$\epsilon_{cH}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_{cH}$ (ksc)	$\epsilon_{cD}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_{cD}$ (ksc)	$\epsilon_{cV}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_{cV}$ (ksc)	$T_{\max}$ (ksc)	
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี													ทดสอบ	ทฤษฎี
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
665	0.6	0.69	0.57	1.35	41	84	-83	-14	-136	-13	-4	-1	-9	-2	-11	-3	0.76	1.11
1225	1.2	1.38	1.18	2.19	287	584	-199	-34	-339	-32	-7	-2	-17	-4	-13	-3	1.52	2.04
1885	2.11	2.4	2.03	3.18	507	1033	-209	-35	-543	-52	-9	-2	-27	-6	-19	-4	2.78	3.14
2433	2.99	3.36	2.88	4.65	673	1373	-265	-45	-589	-56	-19	-4	-46	-11	-24	-6	4.92	4.06
3082	3.98	4.5	3.89	6.87	857	1748	-288	-49	-605	-58	-25	-6	-71	-17	-30	-7	8.71	5.14
3661	4.85	5.44	4.69	8.75	1004	2048	-301	-51	-808	-77	-33	-8	-103	-24	-26	-6	14.71	6.10
4302	5.83	6.57	5.67	10.72	1154	2354	-312	-53	-1040	-99	-36	-8	-123	-29	-29	-7	18.11	7.17
4499	6.21	7.00	6.04	11.31	1259	2568	-333	-56	-1099	-105	-36	-8	-140	-33	-32	-7	21.20	7.50
2695	4.79	5.3	4.54	5.56	863	1760	-289	-49	-998	-95	-19	-4	-98	-23	-57	-13	12.58	4.49
1902	3.91	4.33	3.70	3.20	670	1367	-234	-40	-871	-83	-15	-4	-87	-20	-62	-15	10.78	3.17
1014	2.81	3.14	2.66	1.87	455	928	-167	-28	-592	-56	-13	-3	-68	-16	-72	-17	7.80	1.69
0	1.24	1.44	1.13	0.36	215	439	-82	-14	-232	-22	-7	-2	-47	-11	-72	-17	6.67	0.00

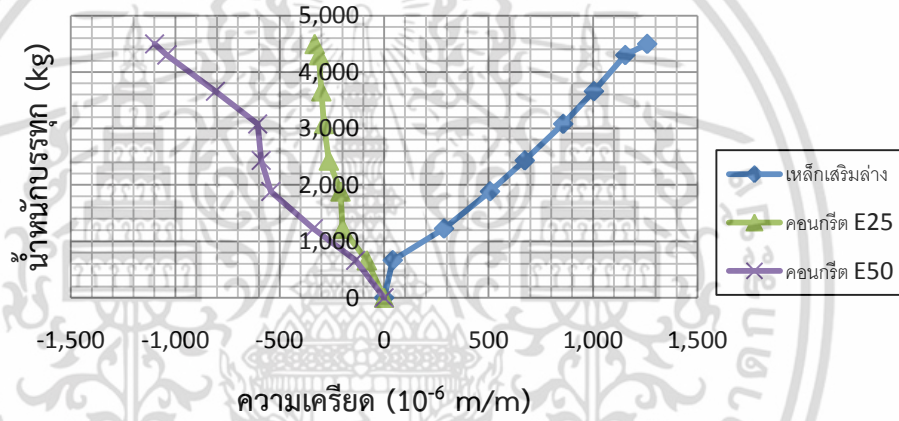
จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรรทุก 4,500 กก. มีการแอ่นตัว 7.00 มม. และจากทฤษฎีมีค่า 11.32 มม. ค่าที่ได้จากการทดสอบน้อยกว่าทฤษฎี 38.16% เพราะความเค้นอัดที่วัดได้ในคานทดสอบของคอนกรีตมวลเบาชั้นกลางมีค่า 105.00 กก./ตร.ซม. และคอนกรีตมวลเบาชั้นบนสุดมีค่า 56.00 กก./ตร.ซม. ค่าที่ได้น้อยกว่าค่าที่ใช้ออกแบบคือ 120 กก./ตร.ซม. และ 60 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จึงทำให้เกิดการแอ่นตัวน้อยลง

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กเสริมล่าง มีค่าน้อยในตอนแรก เนื่องจากคอนกรีตช่วยรับแรงดึง จนน้ำหนักบรรทุก 700 กก. ความเครียดจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนถึงความเครียดสูงสุดประมาณ 0.001259 ม./ม. ค่าความเครียดนี้น้อยกว่าค่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม.

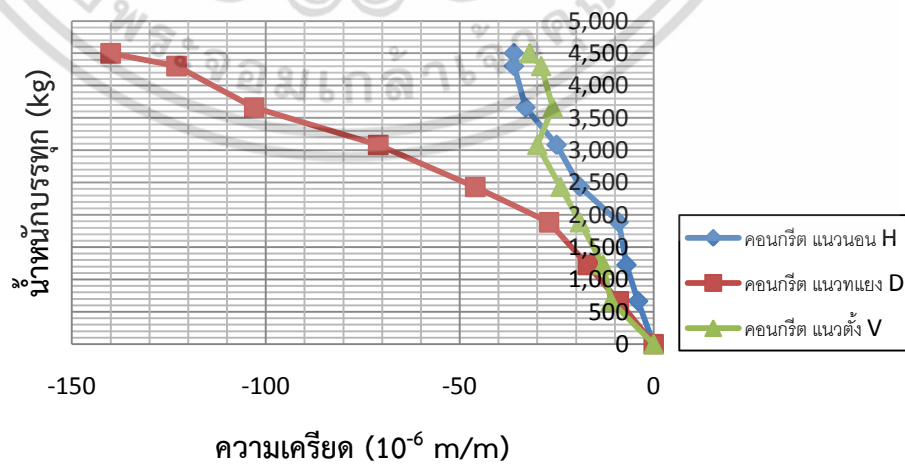
จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียด Strain Rosette ความเครียดมีค่าประมาณศูนย์ในตอนแรก และค่าความเครียดสูงสุดมีค่าน้อยกว่าค่าความเครียดประลัยของคอนกรีตที่มีค่า 0.003 ม./ม.



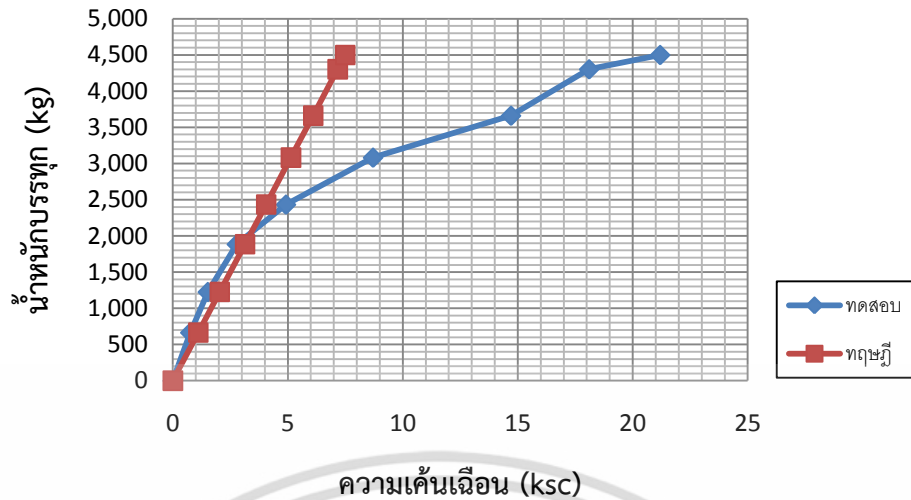
รูปที่ 4.119 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B1L-F2



รูปที่ 4.120 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคาน B1L-F2



รูปที่ 4.121 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support คาน B1L-F2 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.122 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรทุกที่บริเวณ Support

คาน B1L-F2

4.7.1.16 ผลการทดสอบคาน B1C-F2

ตารางที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรทุก การแ่นตัว ความเครียด และความเค้น

คาน B1C-F2

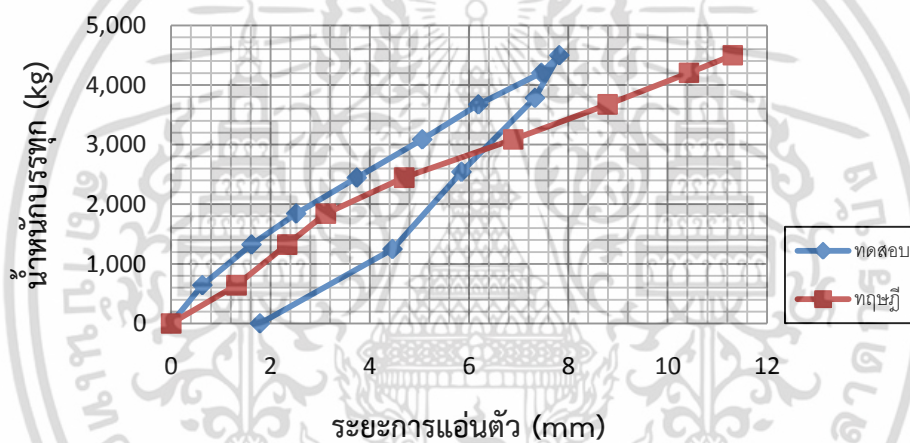
น้ำหนัก (kg)	ระยะการแ่นตัว (mm)					$\epsilon_s$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_s$ (ksc)	$\epsilon_{c25}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_{c25}$ (ksc)	$\epsilon_{c50}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_{c50}$ (ksc)	$\epsilon_{cH}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_{cH}$ (ksc)	$\epsilon_{cD}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_{cD}$ (ksc)	$\epsilon_{cV}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_{cV}$ (ksc)	$T_{\text{max}}$ (ksc)		
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี	ทดสอบ													ทฤษฎี		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
642	0.53	0.63	0.53	1.32	128	260	-47	-8	-157	-15	-6	-1	-4	-1	-20	-5	2.28	1.07		
1324	1.32	1.62	1.17	2.34	222	452	-123	-21	-291	-28	11	3	-3	-1	-16	-4	2.70	2.21		
1843	2.12	2.52	1.98	3.11	446	910	-189	-32	-485	-46	6	1	-9	-2	-14	-3	2.24	3.07		
2445	3.18	3.74	3.08	4.69	703	1434	-244	-41	-707	-67	3	1	-14	-3	-18	-4	2.47	4.08		
3088	4.3	5.06	4.05	6.89	858	1750	-245	-41	-852	-81	1	0	-20	-5	-6	-1	3.57	5.15		
3674	5.35	6.19	5.08	8.79	1109	2263	-277	-47	-1050	-100	-12	-3	-35	-8	-5	-1	5.34	6.12		
4204	6.47	7.46	6.19	10.43	1228	2504	-288	-49	-1060	-101	-21	-5	-46	-11	-1	0	7.28	7.01		
4499	6.81	7.82	6.51	11.31	1251	2552	-302	-51	-1156	-110	-21	-5	-47	-11	-2	0	7.35	7.50		
3784	6.35	7.33	6.04	9.14	1141	2327	-276	-47	-980	-93	-11	-3	-36	-8	15	4	8.03	6.31		
2543	5.03	5.85	4.7	4.16	949	1936	-247	-42	-880	-84	-1	0	-26	-6	11	3	6.31	4.24		
1248	3.81	4.46	3.45	2.22	661	1348	-209	-35	-566	-54	8	2	-17	-4	7	2	4.90	2.08		
0	1.55	1.79	1.02	0.36	236	482	-98	-17	12	1	23	5	-2	0	1	0	3.56	0.00		

จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรทุก 4,500 กก. มีการแ่นตัว 7.82 มม. และจากทฤษฎีมีค่า 11.32 มม. ค่าที่ได้จากการทดสอบน้อยกว่าทฤษฎี 30.92% เพราะความเค้นอัดที่วัดได้ในคานทดสอบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

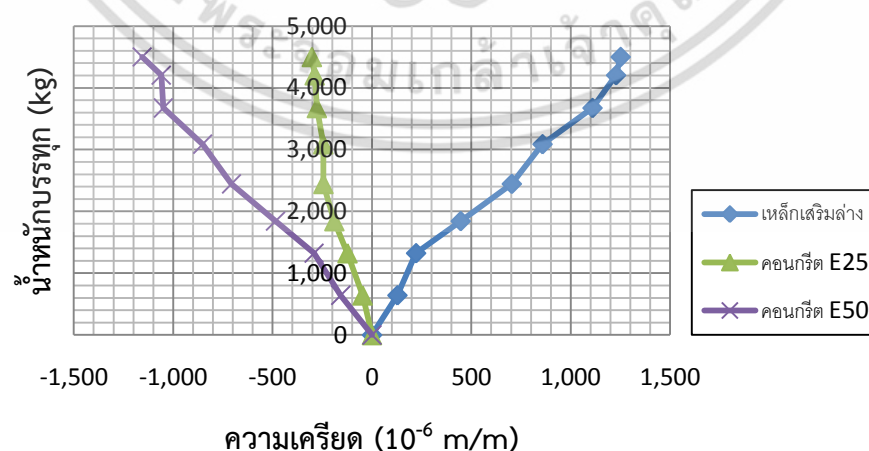
ของคอนกรีตมวลเบาชั้นกลางมีค่า 110.00 กก./ตร.ซม. และคอนกรีตมวลเบาชั้นบนสุดมีค่า 51.00 กก./ตร.ซม. ค่าที่ได้น้อยกว่าค่าที่ใช้ออกแบบคือ 120 กก./ตร.ซม. และ 60 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จึงทำให้เกิดการแอ่นตัวน้อยลง

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กเสริมล่าง มีค่าน้อยในตอนแรก เนื่องจากคอนกรีตช่วยรับแรงดึง จนน้ำหนักบรรทุก 1,300 กก. ความเครียดจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนถึงความเครียดสูงสุดประมาณ 0.001251 ม./ม. ค่าความเครียดนี้น้อยกว่าค่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม.

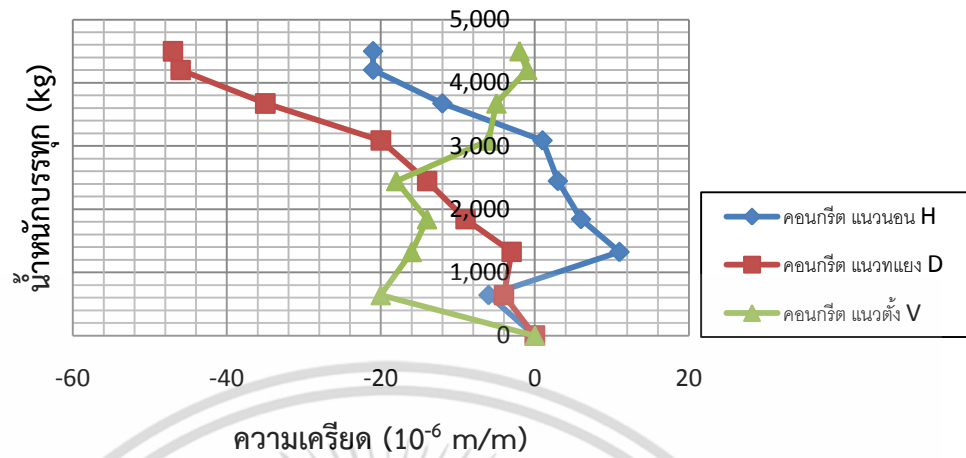
จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความ Strain Rosette ความเครียดมีค่าประมาณศูนย์ในตอนแรก และค่าความเครียดสูงสุดมีค่าน้อยกว่าค่าความเครียดประลัยที่มีค่า 0.003 ม./ม.



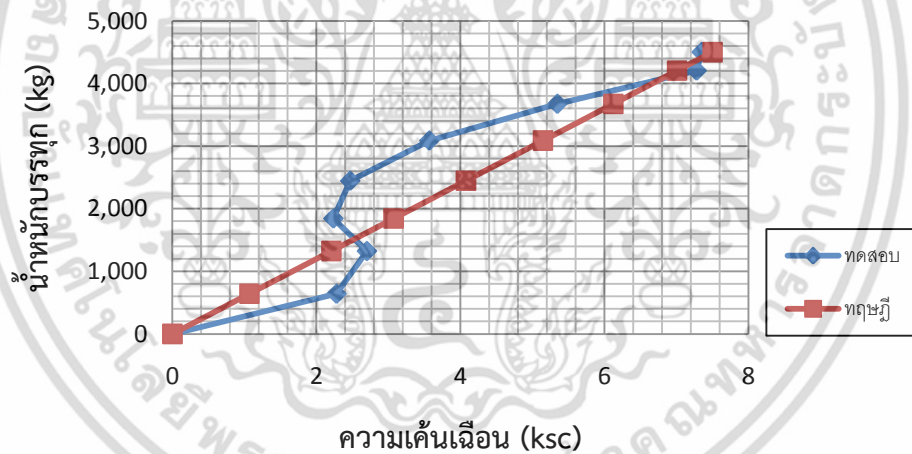
รูปที่ 4.123 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B1C-F2



รูปที่ 4.124 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคาน B1C-F2  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.125 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเคียวกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support คาน B1C-F2



รูปที่ 4.126 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support คาน B1C-F2

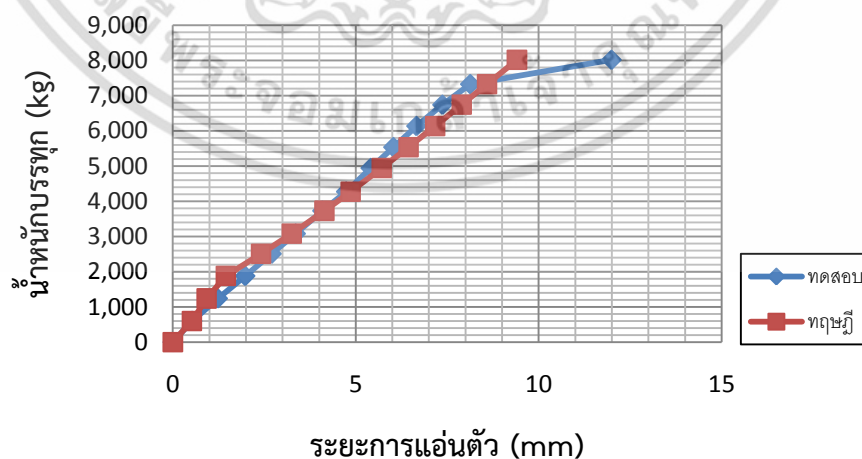
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.7.2 ผลการทดสอบรับน้ำหนักบรรทุกมากกว่า 60% ของน้ำหนักบรรทุกปกติ

### 4.7.2.1 ผลการทดสอบคาน B2

ตารางที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B2

น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอ่นตัว (mm)				$\epsilon_s$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_s$ (ksc)
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี		
0	0	0	0	0	0	0
600	0.43	0.53	0.45	0.52	43	87
1242	1.02	1.23	1.05	0.92	119	243
1880	1.65	1.98	1.67	1.45	226	461
2508	2.24	2.7	2.28	2.41	338	690
3081	2.79	3.36	2.81	3.25	439	895
3730	3.38	4.09	3.43	4.15	551	1123
4273	3.94	4.74	3.96	4.86	653	1332
4943	4.51	5.41	4.5	5.71	756	1542
5537	5.01	6.03	4.99	6.44	850	1734
6137	5.55	6.66	5.51	7.17	947	1931
6741	6.19	7.37	6.08	7.89	1059	2159
7326	6.83	8.13	6.69	8.59	1171	2389
8016	14.87	11.99	8.16	9.41	63	128



รูปที่ 4.127 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดที่กึ่งกลางคานความเครียดสูงสุดของเหล็กเสริมล่างมีค่า 0.001171 ม./ม. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม. แสดงว่าเหล็กเสริมล่างยังไม่คราก



รูปที่ 4.128 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติด้านหน้าของคาน B2

จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรรทุก 8,000 กก. มีการแอ่นตัว 11.90 มม. และคานมีน้ำหนักบรรทุกประลัย 8,016 กก. ลักษณะการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน (Shear Failure)



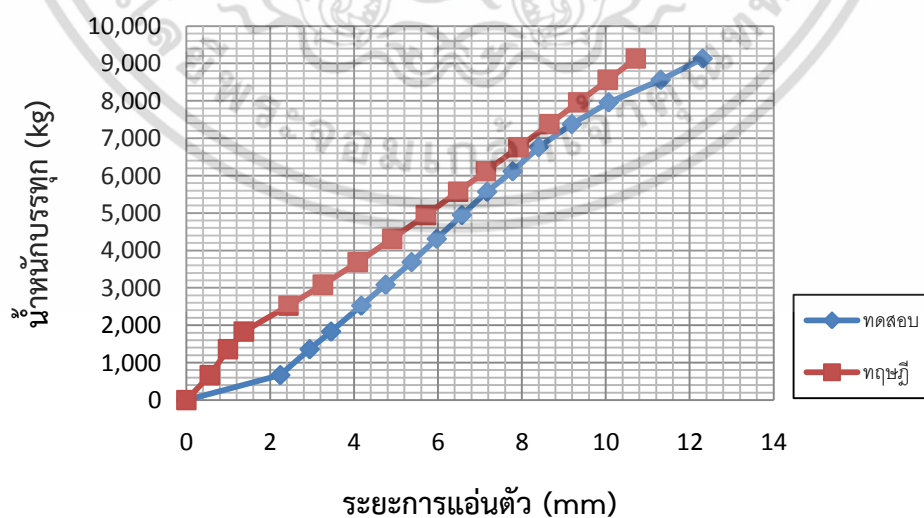
รูปที่ 4.129 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติด้านหลังของคาน B2 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.7.2.2 ผลการทดสอบคาน B2S

ตารางที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอนตัว ความเครียด และความเค้นคาน B2S

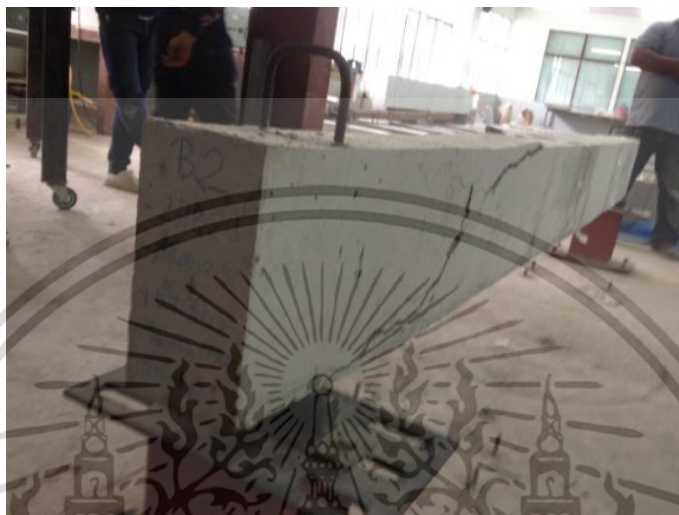
น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอนตัว (mm)				$\epsilon_s$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_s$ (ksc)
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี		
0	0	0	0	0	0	0
667	2.05	2.24	2.02	0.56	33	67
1359	2.64	2.94	2.55	1.00	112	227
1831	3.04	3.45	2.96	1.37	165	337
2524	3.63	4.17	3.55	2.43	285	581
3084	4.09	4.75	4.01	3.26	389	794
3687	4.6	5.37	4.55	4.09	470	958
4310	5.11	5.97	5.13	4.91	586	1195
4947	5.62	6.57	5.64	5.71	668	1363
5569	6.11	7.17	6.15	6.48	774	1578
6116	6.69	7.78	6.67	7.15	863	1761
6761	7.17	8.4	7.2	7.92	900	1836
7378	7.83	9.19	7.86	8.65	1064	2171
7959	8.59	10.07	8.6	9.34	1174	2394
8562	9.4	11.31	9.42	10.05	1286	2622
9131	10.75	12.31	10.57	10.72	1417	2891



รูปที่ 4.130 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B2S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดที่กึ่งกลางคาน ความเครียดสูงสุดของเหล็กเสริมล่างมีค่า 0.002013 ม./ม. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม. แสดงว่าเหล็กเสริมล่างคราก



รูปที่ 4.131 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติด้านหน้าของคาน B2S

จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรรทุก 8,000 กก. มีการแอ่นตัว 8.47 มม. และคานมีน้ำหนักบรรทุกพยุหะ 9,131 กก. ลักษณะการวิบัติเนื่องจากโมเมนต์



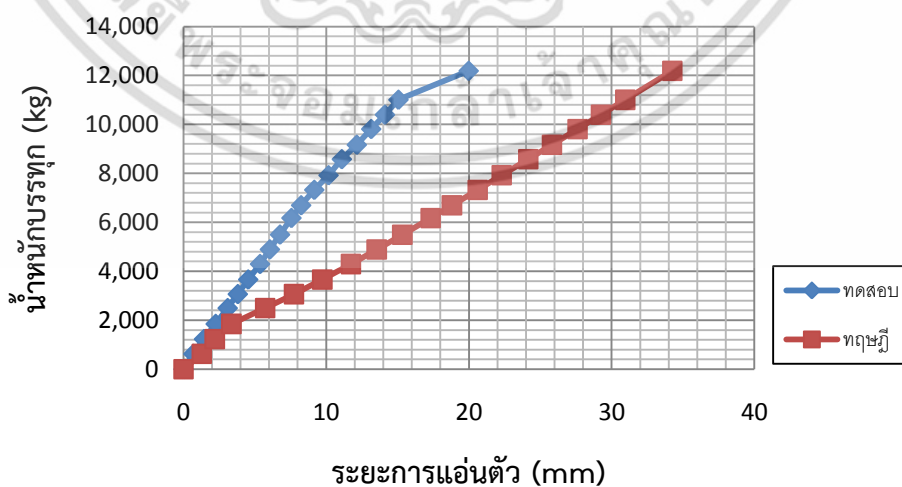
รูปที่ 4.132 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติด้านหลังของคาน B2S (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.7.2.3 ผลการทดสอบคาน B2LS

ตารางที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B2LS

น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอ่นตัว (mm)				$\epsilon_s$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_s$ (ksc)
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี		
0	0	0	0	0	0	0
623	0.73	0.69	0.67	1.29	76	154
1227	1.38	1.43	1.36	2.19	175	357
1848	2.08	2.25	2.09	3.36	279	569
2493	2.79	3.09	2.85	5.73	405	825
3065	3.41	3.8	3.51	7.75	506	1031
3661	4.04	4.53	4.15	9.73	604	1232
4295	4.74	5.36	4.86	11.73	721	1471
4891	5.34	6.05	5.48	13.54	816	1665
5495	5.96	6.76	6.12	15.34	921	1878
6175	6.68	7.56	6.84	17.32	1039	2120
6694	7.27	8.24	7.46	18.81	1130	2304
7324	8.09	9.16	8.29	20.61	1250	2550
7920	9.03	10.16	9.21	22.30	1366	2786
8578	9.89	11.09	10.07	24.16	1481	3021
9166	10.85	12.14	11	25.81	1600	3264
9810	11.79	13.15	11.95	27.62	1718	3504
10396	12.33	14.11	12.83	29.26	1837	3747
11006	13.57	15.06	13.72	30.96	1954	3985
12187	19.53	19.98	17.55	34.25	2187	4460



รูปที่ 4.133 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B2LS เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดที่กึ่งกลางคาน ความเครียดสูงสุด ของเหล็กเสริมล่างมีค่า 0.002187 ม./ม. ซึ่งมีค่ามากกว่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม. แสดงว่าเหล็กเสริมล่างคราก



รูปที่ 4.134 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติของคาน B2LS

จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรรทุก 8,000 กก. มีการแอ่นตัว 10.27 มม. และคานมีน้ำหนักบรรทุกประลัย 12,187 กก. ลักษณะการวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ (Flexural Failure)



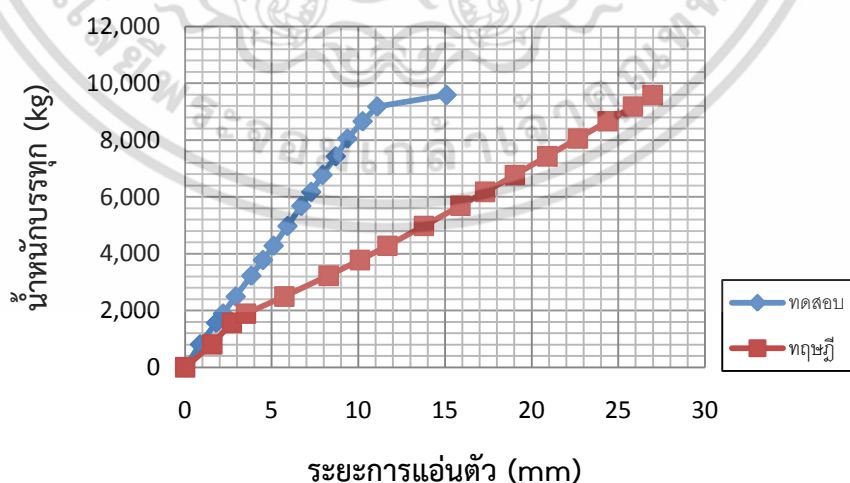
รูปที่ 4.135 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติของคาน B2LS (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.7.2.4 ผลการทดสอบคาน B2CS

ตารางที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B2CS

น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอ่นตัว (mm)				$\epsilon_s$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_s$ (ksc)
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี		
0	0	0	0	0	0	0
807	0.77	0.86	0.7	1.56	90	183
1568	1.56	1.79	1.49	2.70	173	352
1891	1.9	2.19	1.83	3.51	260	530
2492	2.55	2.92	2.49	5.73	372	759
3223	2.33	3.82	3.24	8.29	495	1010
3775	3.91	4.49	3.82	10.09	553	1128
4278	4.42	5.11	4.34	11.68	654	1334
4971	5.1	5.91	5.03	13.78	794	1619
5682	5.79	6.71	5.72	15.88	937	1910
6173	6.24	7.28	6.19	17.31	1001	2042
6768	6.81	7.93	6.76	19.02	1121	2287
7426	7.51	8.7	7.4	20.90	1228	2505
8051	8.11	9.37	8.02	22.67	1307	2666
8659	8.86	10.25	8.79	24.39	1456	2970
9176	9.61	11.09	9.52	25.84	1565	3192
9582	15.85	15.1	12.21	26.98	1369	2792



รูปที่ 4.136 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B2CS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดที่กึ่งกลางคาน ความเครียดสูงสุด ของเหล็กเสริมล่างมีค่า 0.001565 ม./ม. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม. แสดงว่าเหล็กเสริมล่างยังไม่คราก



รูปที่ 4.137 แสดงการแตกร้าวและการวัดของคาน B2CS

จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรรทุก 8,000 กก. มีการแอ่นตัว 9.32 มม. และคานมีน้ำหนักบรรทุกประลัย 9,582 กก. การทดสอบเกิดการผิพลาต เนื่องจากคอนกรีตที่บริเวณแรงกระทำเกิดอัดแตก



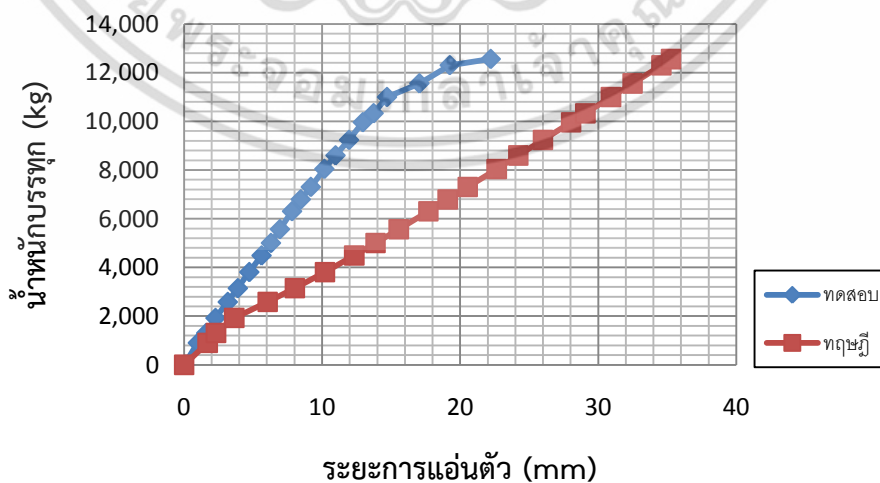
รูปที่ 4.138 แสดงการแตกร้าวและการวัดของคาน B2CS (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.7.2.5 ผลการทดสอบคาน B2LS-F1

ตารางที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอนตัว ความเครียด และความเค้นคาน B2LS-F1

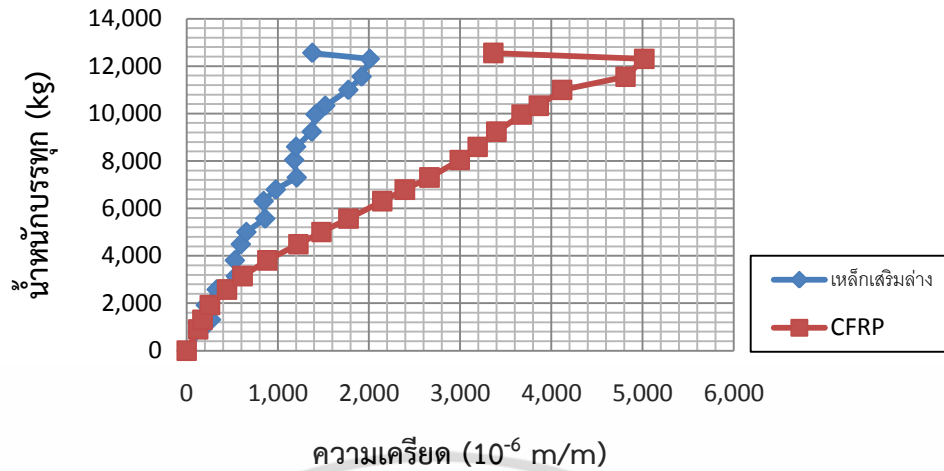
น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอนตัว (mm)				$\epsilon_s$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_s$ (ksc)	$\epsilon_{\text{CFRP}}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_{\text{CFRP}}$ (ksc)
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี				
0	0	0	0	0	0	0	0	0
904	0.97	0.99	1.00	1.71	166	339	127	298
1309	1.52	1.60	1.53	2.31	267	545	175	411
1925	2.14	2.27	2.15	3.64	210	427	256	602
2582	2.88	3.16	2.90	6.05	329	670	443	1041
3146	3.48	3.89	3.51	8.02	540	1102	614	1443
3809	4.18	4.72	4.24	10.21	529	1078	886	2082
4489	4.93	5.61	4.99	12.33	594	1212	1226	2881
5003	5.54	6.29	5.58	13.88	655	1336	1480	3478
5569	6.14	6.94	6.13	15.55	862	1757	1776	4174
6306	6.90	7.82	6.89	17.70	845	1723	2146	5043
6793	7.47	8.45	7.43	19.10	978	1994	2393	5624
7304	8.12	9.18	8.07	20.55	1208	2464	2664	6260
8043	9.01	10.16	8.92	22.65	1180	2407	2995	7038
8598	9.73	10.97	9.62	24.22	1202	2451	3192	7501
9233	10.62	11.95	10.47	26.00	1374	2802	3398	7985
9958	11.53	12.95	11.33	28.03	1414	2885	3675	8636
10328	12.25	13.73	12.06	29.07	1522	3104	3862	9076
10994	13.11	14.70	12.91	30.93	1775	3621	4120	9682
11555	15.23	17.05	14.99	32.49	1921	3919	4815	11315
12302	17.25	19.25	16.97	34.57	2010	4100	5019	11795
12555	18.35	22.22	22.98	35.28	1380	2814	3365	7908



รูปที่ 4.139 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B2LS-F1

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.140 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคาน B2LS-F1

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดที่กึ่งกลางคาน ความเครียดสูงสุดของเหล็กเสริมลวดมีค่า 0.001896 ม./ม. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม. แสดงว่าเหล็กเสริมลวดยังไม่คราก และความเครียดสูงสุดของ CFRP มีค่า 0.005019 ม./ม. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความเครียดประลัยที่มีค่า 0.015106 ม./ม. แสดงว่า CFRP ยังไม่ประลัย



รูปที่ 4.141 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติของคาน B2LS-F1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรรทุกทุก 8,000 กก. มีการแอ่นตัว 10.10 มม. และคานมีน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย 12,555 กก. ลักษณะการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน (Shear Failure) โดยที่ CFRP ยังไม่เสียหายเลย



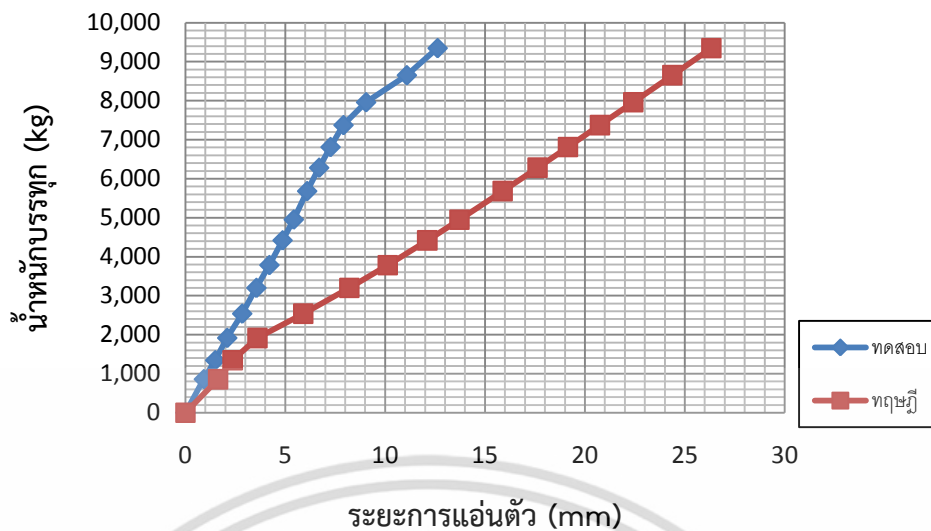
รูปที่ 4.142 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติของคาน B2LS-F1 (ต่อ)

#### 4.7.2.6 ผลการทดสอบคาน B2CS-F1

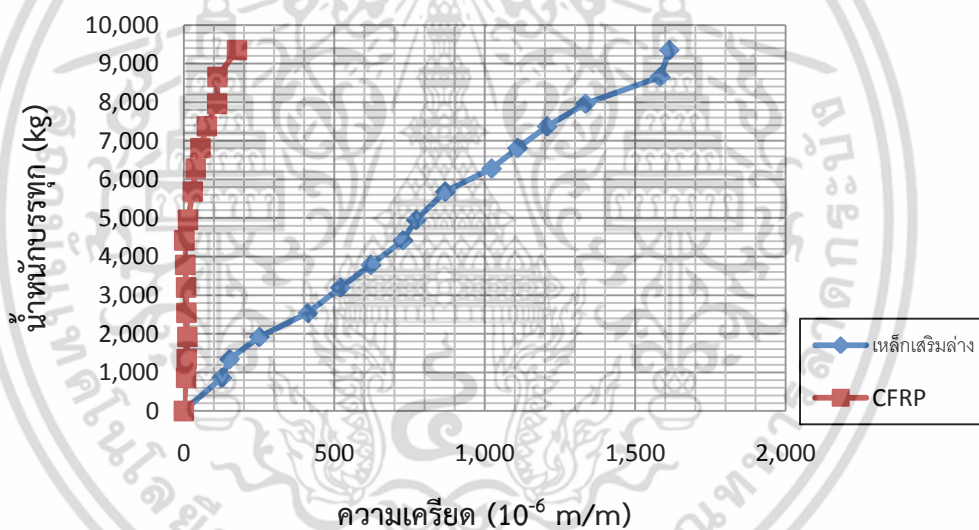
ตารางที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B2CS-F1

น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอ่นตัว (mm)				$E_s$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_s$ (ksc)	$E_{CFRP}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{CFRP}$ (ksc)
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี				
0	0	0	0	0	0	0	0	0
858	0.84	0.92	0.97	1.640	126	257	8	19
1344	1.33	1.49	1.48	2.366	152	310	10	24
1916	1.86	2.09	2.03	3.608	251	512	12	28
2539	2.51	2.84	2.70	5.899	413	842	9	21
3200	3.10	3.55	3.28	8.207	521	1062	8	19
3785	3.65	4.20	3.83	10.128	622	1268	5	12
4419	4.27	4.86	4.43	12.112	729	1486	2	5
4951	4.78	5.42	4.96	13.724	772	1575	14	33
5682	5.40	6.09	5.58	15.885	869	1773	30	71
6281	5.92	6.69	6.13	17.626	1023	2087	40	94
6811	6.40	7.26	6.65	19.149	1110	2263	56	132
7374	6.99	7.91	7.22	20.755	1208	2463	77	181
7960	7.97	9.04	8.23	22.417	1336	2724	111	261
8653	9.75	11.08	10.07	24.372	1584	3230	112	263
9349	10.74	12.62	12.20	26.326	1614	3293	177	416

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.143 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรรจุทุกคาน B2CS-F1



รูปที่ 4.144 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรจุทุกที่กึ่งกลางคาน B2CS-F1

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรจุทุกกับความเครียดที่กึ่งกลางคาน ความเครียดสูงสุดของเหล็กเสริมล่งมีค่า 0.001614 ม./ม. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม. แสดงว่าเหล็กเสริมล่งยังไม่คราก และความเครียดสูงสุดของ CFRP มีค่า 0.000177 ม./ม. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความเครียดประลัยที่มีค่า 0.015106 ม./ม. แสดงว่า CFRP ยังไม่ประลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.145 แสดงการแตกร้าวและการวัดของคาน B2CS-F1

จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรรทุกทุก 8,000 กก. มีการแอนตัว 9.16 มม. และคานมีน้ำหนักบรรทุกเฉลี่ย 9,349 กก. ลักษณะการร้าวของคอนกรีตที่ตำแหน่งแรงกระทำที่คาน โดยที่ CFRP ยังไม่เสียหายเลย การทดสอบเกิดการผิพลาต เนื่องจากคอนกรีตที่บริเวณแรงกระทำเกิดอัดแตก



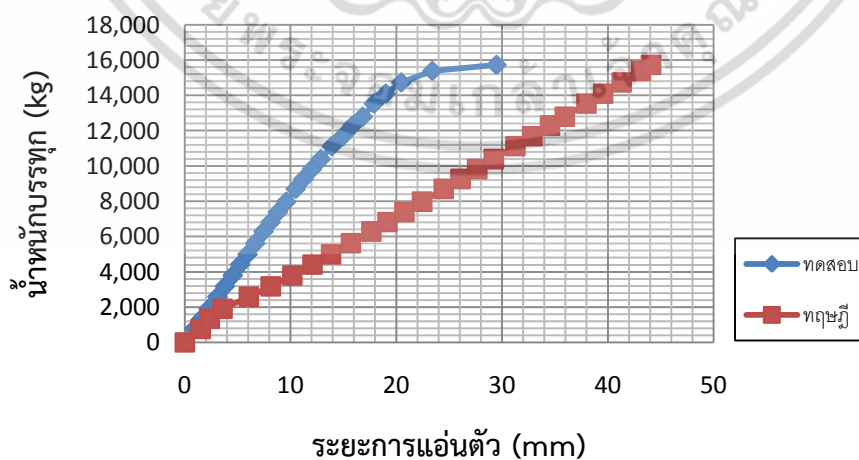
รูปที่ 4.146 แสดงการแตกร้าวและการวัดของคาน B2CS-F1 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.7.2.7 ผลการทดสอบคาน B2L-F2

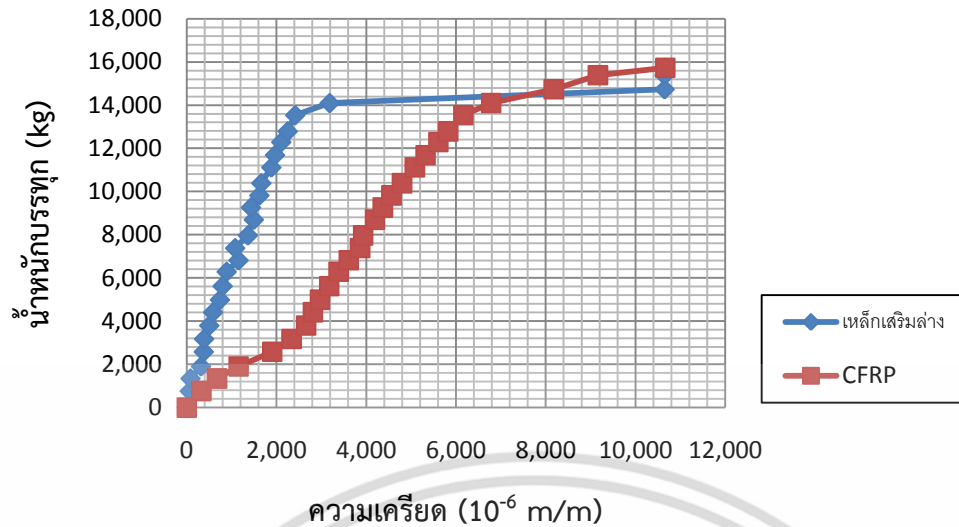
ตารางที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอนตัว ความเครียด และความเค้น  
คาน B2L-F2

น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอนตัว (mm)				$\epsilon_s$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_s$ (ksc)	$\epsilon_{CFRP}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{CFRP}$ (ksc)	$\epsilon_{HCFRP}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{HCFRP}$ (ksc)	$\epsilon_{DCF}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{DCF}$ (ksc)	$\epsilon_{VCFRP}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{VCFRP}$ (ksc)
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี										
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
768	0.88	0.88	0.87	1.50	66	134	328	771	-3	-7	-10	-24	5	12
1349	1.59	1.59	1.56	2.37	83	169	676	1589	-6	-14	-12	-28	7	16
1907	2.21	2.26	2.17	3.57	317	646	1160	2726	-11	-26	-18	-42	8	19
2585	2.98	3.08	2.93	6.06	379	772	1906	4479	-14	-33	-27	-63	8	19
3178	3.62	3.79	3.55	8.13	385	785	2339	5497	-15	-35	-30	-71	11	26
3799	4.29	4.54	4.21	10.17	501	1021	2664	6260	-19	-45	-36	-85	12	28
4412	4.93	5.23	4.85	12.09	585	1193	2813	6611	-21	-49	-40	-94	13	31
4990	5.57	5.93	5.46	13.84	738	1506	2969	6977	-27	-63	-50	-118	13	31
5623	6.20	6.67	6.10	15.71	799	1629	3175	7461	-25	-59	-52	-122	17	40
6287	6.88	7.45	6.77	17.64	888	1812	3387	7959	-34	-80	-62	-146	14	33
6818	7.44	8.12	7.33	19.17	1153	2352	3612	8488	-36	-85	-68	-160	21	49
7382	8.04	8.81	7.95	20.78	1077	2197	3864	9080	-36	-85	-74	-174	20	47
7971	8.80	9.59	8.61	22.45	1362	2777	3933	9243	-35	-82	-78	-183	25	59
8696	9.65	10.49	9.44	24.49	1495	3049	4196	9861	-40	-94	-83	-195	25	59
9261	10.35	11.23	10.10	26.08	1429	2915	4371	10272	-38	-89	-81	-190	25	59
9821	11.05	12.03	10.80	27.65	1618	3301	4564	10725	-38	-89	-85	-200	29	68
10385	11.79	12.86	11.55	29.23	1661	3388	4798	11275	-38	-89	-91	-214	28	66
11115	12.86	13.91	12.48	31.27	1884	3842	5085	11950	-34	-80	-93	-219	29	68
11686	13.79	14.96	13.38	32.86	1966	4010	5324	12511	-9	-21	-80	-188	11	26
12286	14.63	15.87	14.17	34.53	2105	4293	5610	13184	-3	-7	-73	-172	6	14
12786	15.58	16.83	15.06	35.92	2249	4587	5825	13689	-8	-19	-76	-179	1	2
13531	16.56	17.89	16.03	37.99	2416	4928	6165	14488	-6	-14	-119	-280	14	33
14094	17.64	19.00	17.03	39.56	3184	6495	6787	15949	34	80	-191	-449	21	49
14730	18.90	20.48	18.27	41.32	10650	21725	8180	19223	87	204	-253	-595	38	89
15384	21.27	23.42	20.47	43.14	10650	21725	9164	21535	145	341	-311	-731	59	139
15725	25.21	29.49	25.49	44.08	10650	21725	10666	25065	187	439	-365	-858	77	181

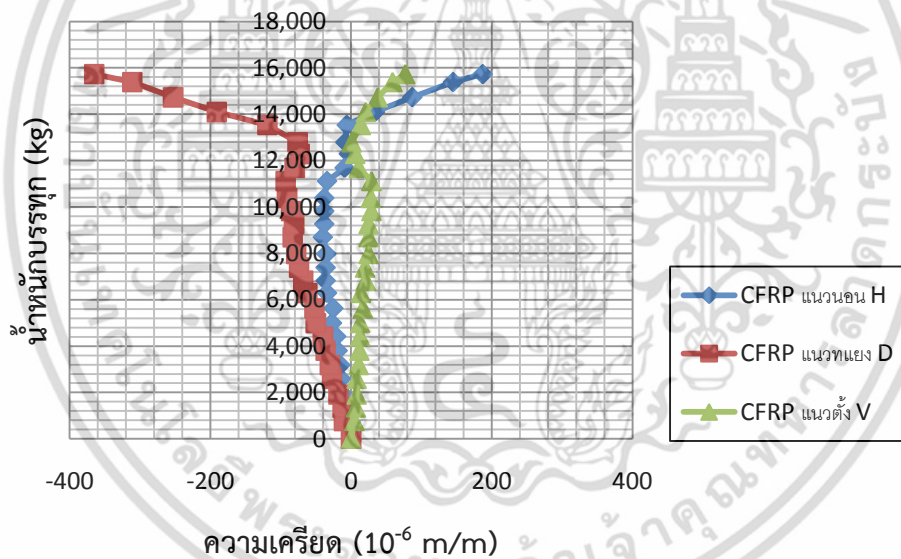


รูปที่ 4.147 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B2L-F2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.148 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคาน B2L-F2



รูปที่ 4.149 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support คาน B2L-F2

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดที่กึ่งกลางคาน ความเครียดสูงสุดของเหล็กเสริมล่างมีค่า 0.010650 ม./ม. ซึ่งมีค่ามากกว่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม. แสดงว่าเหล็กเสริมล่างคราก และความเครียดสูงสุดของ CFRP มีค่า 0.010666 ม./ม. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความเครียดประลัยที่มีค่า 0.015106 ม./ม. แสดงว่า CFRP ยังไม่ประลัย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.150 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติของคาน B2L-F2

จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรรทุกทุก 8,000 กก. มีการแอ่นตัว 9.63 มม. และคานมีน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย 15,725 กก. ลักษณะการวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ (Flexural Failure)



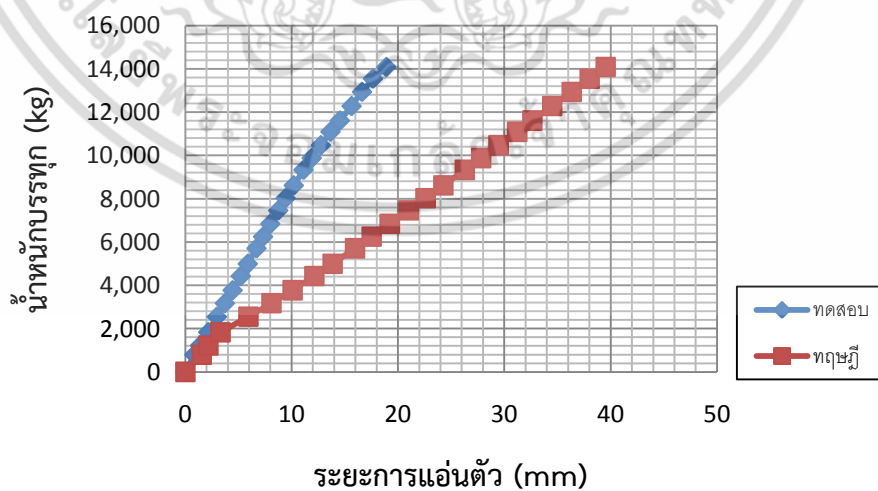
รูปที่ 4.151 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติของคาน B2L-F2 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.2.8 ผลการทดสอบคาน B2C-F2

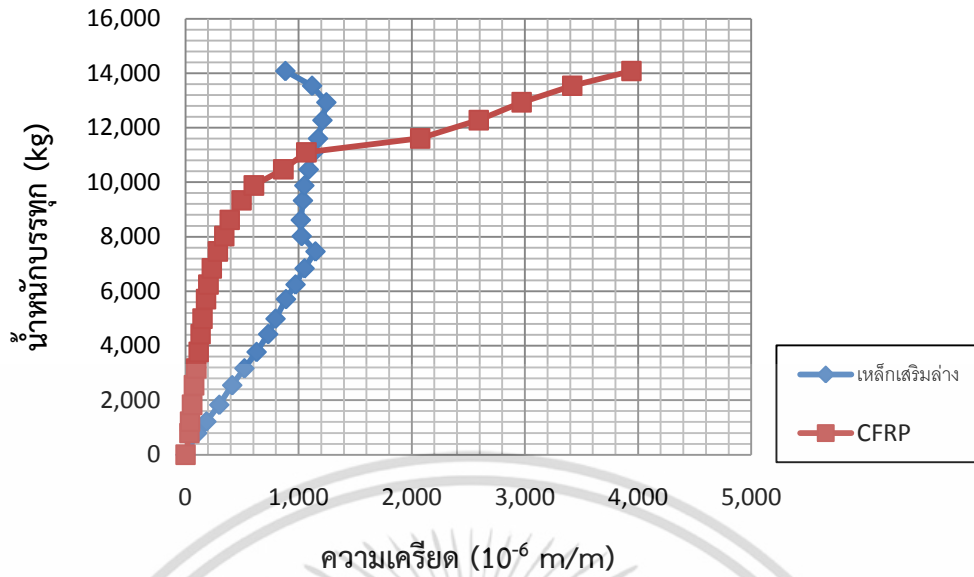
ตารางที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B2C-F2

น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอ่นตัว (mm)				$\epsilon_s$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_s$ (ksc)	$\epsilon_{CFRP}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{CFRP}$ (ksc)	$\epsilon_{HCFRP}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{HCFRP}$ (ksc)	$\epsilon_{DCF}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{DCF}$ (ksc)	$\epsilon_{VCFRP}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{VCFRP}$ (ksc)
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี										
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
797	0.72	0.84	0.73	1.55	103	210	35	82	0	0	-8	-19	7	16
1220	1.21	1.38	1.18	2.18	184	375	41	96	0	0	-13	-31	8	19
1833	1.88	2.15	1.82	3.30	298	608	59	139	-9	-21	-21	-49	10	24
2551	2.61	2.96	2.51	5.94	413	842	76	179	-9	-21	-28	-66	10	24
3171	3.26	3.71	3.15	8.11	521	1062	96	226	-11	-26	-36	-85	11	26
3773	3.93	4.44	3.79	10.09	628	1281	116	273	-17	-40	-44	-103	15	35
4428	4.60	5.21	4.43	12.14	731	1490	133	313	-20	-47	-55	-129	9	21
4993	5.24	5.87	5.00	13.85	796	1623	151	355	-21	-49	-59	-139	13	31
5712	5.96	6.69	5.68	15.97	888	1812	182	428	-25	-59	-65	-153	13	31
6248	6.48	7.31	6.20	17.53	973	1984	203	477	-30	-71	-74	-174	12	28
6840	7.12	7.99	6.79	19.23	1053	2147	233	548	-32	-75	-76	-179	13	31
7461	7.78	8.74	7.44	21.00	1149	2344	287	674	-31	-73	-80	-188	17	40
8024	8.38	9.43	8.03	22.60	1027	2095	343	806	-35	-82	-80	-188	13	31
8617	9.07	10.20	8.70	24.27	1019	2079	391	919	-40	-94	-84	-197	15	35
9331	9.91	11.11	9.51	26.28	1038	2118	496	1166	-47	-110	-88	-207	19	45
9881	10.59	11.89	10.17	27.82	1051	2143	605	1422	-58	-136	-86	-202	23	54
10470	11.36	12.75	10.92	29.46	1089	2222	865	2033	-66	-155	-97	-228	27	63
11093	12.19	13.65	11.70	31.20	1132	2308	1069	2512	-56	-132	-117	-275	17	40
11609	13.03	14.54	12.47	32.64	1172	2390	2075	4876	-42	-99	-118	-277	7	16
12277	14.03	15.64	13.43	34.50	1211	2469	2592	6091	-77	-181	-107	-251	15	35
12934	14.93	16.62	14.30	36.33	1245	2540	2972	6984	-104	-244	-89	-209	29	68
13543	15.86	17.65	15.19	38.03	1119	2283	3418	8032	-127	-298	-4	-9	61	143
14084	17.12	18.91	16.21	39.53	883	1801	3942	9264	-155	-364	197	463	118	277

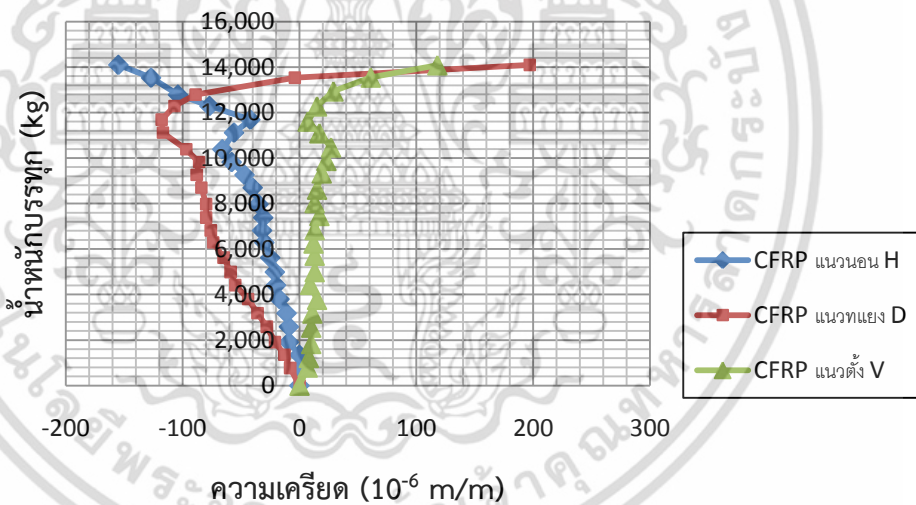


รูปที่ 4.152 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B2C-F2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.153 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคาน B2C-F2



รูปที่ 4.154 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support คาน B2C-F2

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดที่กึ่งกลางคาน

ความเครียดสูงสุด ของเหล็กเสริมลางมีค่า 0.001245 ม./ม. ซึ่งมีค่ามากกว่าความเครียดครากที่มีค่า

0.001961 ม./ม. แสดงว่าเหล็กเสริมลางคราก และความเครียดสูงสุดของ CFRP มีค่า 0.003942

ม./ม. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความเครียดประลัยที่มีค่า 0.015106 ม./ม. แสดงว่า CFRP ยังไม่ประลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.155 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติของคาน B2C-F2

จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรรทุกทุก 8,000 กก. มีการแอ่นตัว 9.40 มม. และคานมีน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย 14,084 กก. ลักษณะการวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ (Flexural Failure)



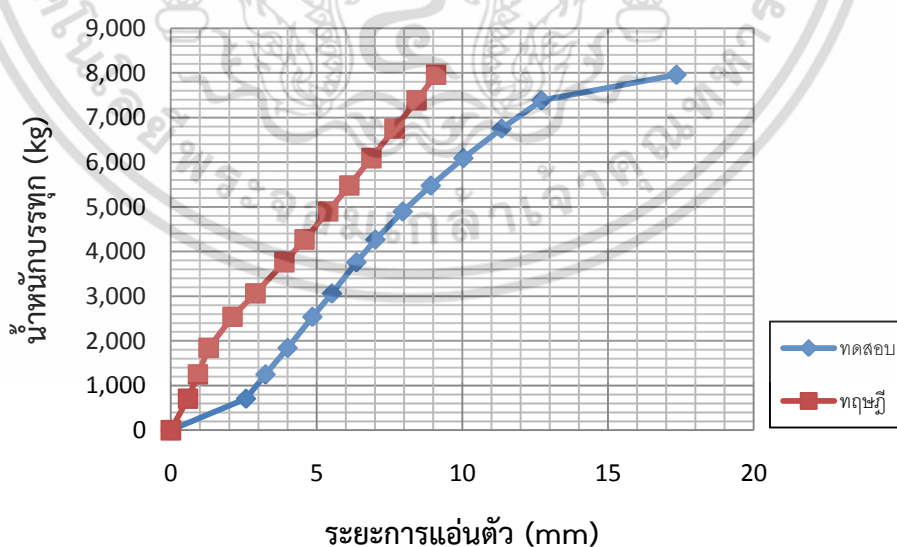
รูปที่ 4.156 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติของคาน B2C-F2 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.7.2.9 ผลการทดสอบคาน B1

ตารางที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B1

น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอ่นตัว (mm)				$\epsilon_s$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_s$ (ksc)
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี		
0	0	0	0	0	0	0
707	2.23	2.58	2.21	0.59	117	238
1251	2.81	3.25	2.81	0.93	238	486
1844	3.45	4.01	3.44	1.30	384	783
2539	4.16	4.86	4.17	2.12	547	1116
3062	4.73	5.53	4.72	2.90	675	1377
3761	5.45	6.37	5.41	3.90	850	1733
4270	6	7.02	5.97	4.58	970	1978
4896	6.77	7.96	6.76	5.40	1133	2310
5477	7.66	8.92	7.63	6.13	1293	2638
6092	8.61	10.04	8.56	6.88	1481	3020
6754	9.7	11.35	9.67	7.68	1687	3440
7386	10.87	12.72	10.83	8.43	1901	3877
7958	14.11	17.35	14.11	9.10	286	582



รูปที่ 4.157 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B1

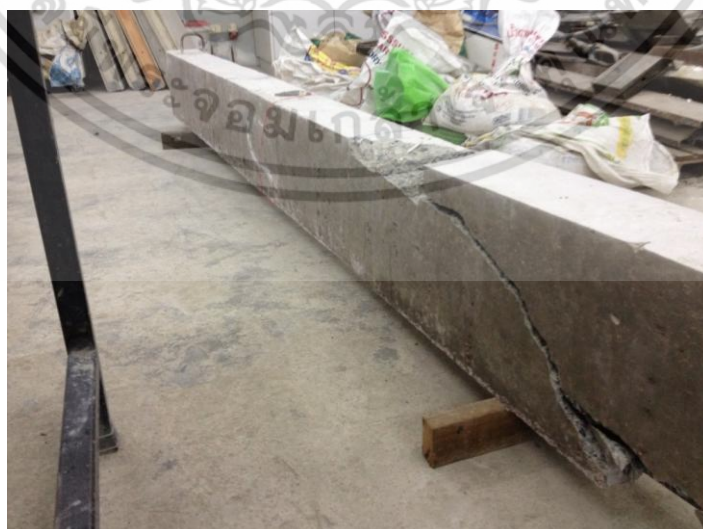
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดที่กึ่งกลางคาน ความเครียดสูงสุด ของเหล็กเสริมล่างมีค่า 0.001901 ม./ม. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม. แสดงว่าเหล็กเสริมล่างยังไม่คราก



รูปที่ 4.158 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติของคาน B1

จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรรทุก 5,500 กก. มีการแอนตัว 7.15 มม. และคานมี น้ำหนักบรรทุกประลัย 7,958 กก. ลักษณะการวิบัติเนื่องแรงเฉือน (Shear Failure)



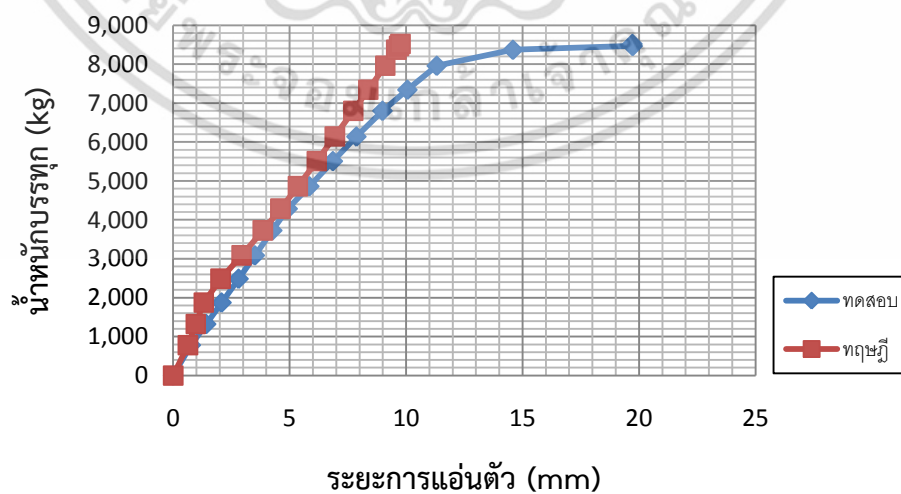
รูปที่ 4.159 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติของคาน B1 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.7.2.10 ผลการทดสอบคาน B1S

ตารางที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B1S

น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอ่นตัว (mm)				$\epsilon_s$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_s$ (ksc)
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี		
0	0	0	0	0	0	0
781	0.65	0.76	0.7	0.64	103	210
1321	1.21	1.42	1.28	0.97	237	482
1875	1.78	2.08	1.88	1.32	365	744
2486	2.41	2.81	2.53	2.04	511	1042
3087	2.99	3.51	3.14	2.94	636	1296
3728	3.62	4.26	3.81	3.85	778	1587
4286	4.2	4.92	4.41	4.61	914	1865
4862	5.02	5.85	5.25	5.35	1074	2191
5509	5.89	6.86	6.21	6.17	1252	2553
6140	6.77	7.87	7.14	6.94	1421	2898
6802	7.77	8.99	8.17	7.74	1588	3239
7343	8.74	10.06	9.18	8.38	1741	3551
7959	9.87	11.32	10.37	9.10	1914	3904
8369	12.15	14.59	13.09	9.58	2010	4099
8467	17.41	19.73	19.32	9.69	1551	3163
8521	19.57	19.72	22.72	9.76	1415	2887



รูปที่ 4.160 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B1S

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดที่กึ่งกลางคาน ความเครียดสูงสุด ของเหล็กเสริมล่างมีค่า 0.002010 ม./ม. ซึ่งมีค่ามากกว่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม. แสดงว่าเหล็กเสริมล่างคราก และคอนกรีตผิวบนที่กึ่งกลางคานถูกอัดแตก



รูปที่ 4.161 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติของคาน B1S

จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรรทุก 5,500 กก. มีการแอ่นตัว 6.85 มม. และคานมีน้ำหนักบรรทุกประลัย 8,521 กก. ลักษณะการวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ (Flexural Failure)



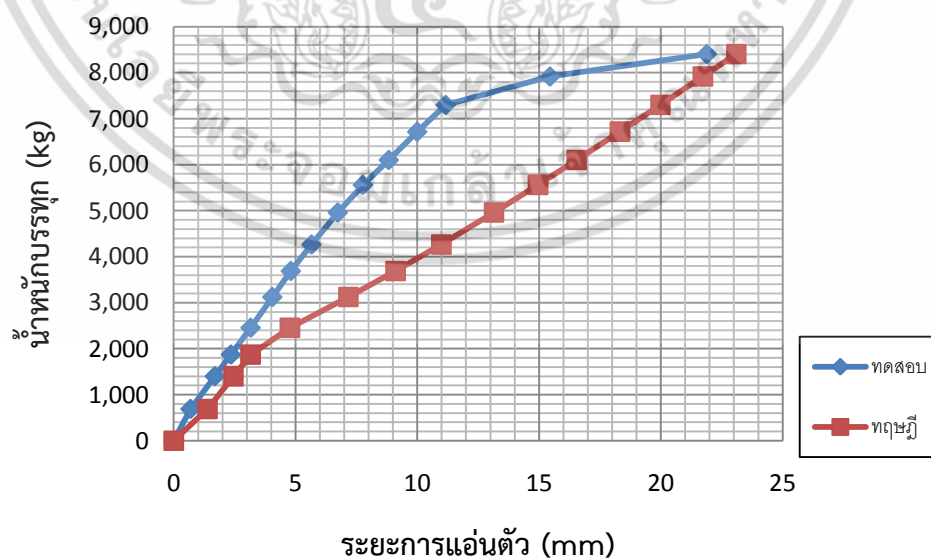
รูปที่ 4.162 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติของคาน B1S (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.7.2.11 ผลการทดสอบคาน B1LS

ตารางที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B1LS

น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอ่นตัว (mm)				$\epsilon_s$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_s$ (ksc)
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี		
0	0	0	0	0	0	0
689	0.62	0.69	0.65	1.39	121	247
1401	1.49	1.69	1.55	2.45	316	644
1872	2.07	2.35	2.14	3.16	443	904
2455	2.78	3.16	2.84	4.77	601	1226
3122	3.55	4.05	3.6	7.17	775	1581
3688	4.22	4.81	4.26	9.11	921	1879
4265	4.93	5.66	4.99	10.99	1084	2211
4961	5.9	6.74	5.96	13.15	1268	2587
5562	6.85	7.77	6.85	14.96	1437	2930
6103	7.8	8.83	7.76	16.55	1604	3272
6717	8.86	10	8.76	18.32	1795	3661
7300	9.91	11.17	9.78	19.98	2006	4091
7916	12.24	15.45	12.85	21.72	849	1732
8407	12.23	21.89	17.48	23.10	782	1594



รูปที่ 4.163 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B1LS  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดที่กึ่งกลางคาน ความเครียดสูงสุด ของเหล็กเสริมล่างมีค่า 0.002006 ม./ม. ซึ่งมีค่ามากกว่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม. แสดงว่าเหล็กเสริมล่างคราก



รูปที่ 4.164 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติของคาน B1LS

จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรรทุก 5,500 กก. มีการแอ่นตัว 7.66 มม. และคานมีน้ำหนักบรรทุกประลัย 8,407 กก. ลักษณะการวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ (Flexural Failure)



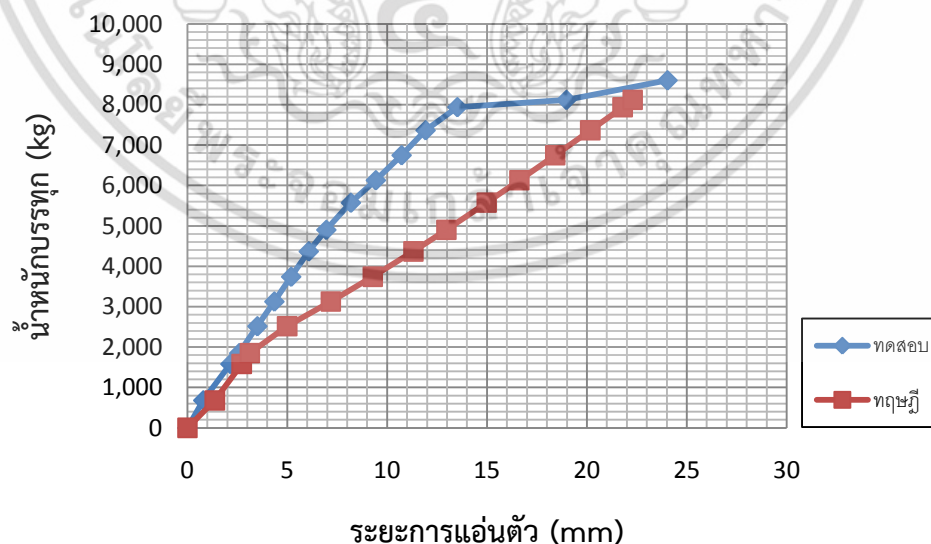
รูปที่ 4.165 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติของคาน B1LS (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.7.2.12 ผลการทดสอบคาน B1CS

ตารางที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B1CS

น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอ่นตัว (mm)				$\epsilon_s$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_s$ (ksc)
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี		
0	0	0	0	0	0	0
681	0.66	0.79	0.65	1.37	82	166
1581	1.83	2.15	1.85	2.72	381	776
1850	2.22	2.59	2.25	3.12	385	784
2516	3.01	3.5	3.04	5.00	582	1187
3126	3.75	4.35	3.79	7.19	742	1513
3741	4.46	5.19	4.5	9.28	869	1773
4368	5.19	6.07	5.22	11.31	1027	2094
4901	5.95	6.95	5.98	12.97	1221	2490
5573	7.04	8.18	7.03	14.99	1365	2784
6129	8.23	9.43	8.15	16.62	1570	3203
6748	9.36	10.72	9.28	18.41	1598	3259
7366	10.42	11.92	10.32	20.17	1676	3418
7939	13.22	13.51	13.8	21.79	420	856
8117	18.68	18.97	19.26	22.29	425	867
8602	23.74	24.03	24.32	23.65	444	906



รูปที่ 4.166 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B1CS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดที่กึ่งกลางคาน ความเครียดสูงสุด ของเหล็กเสริมล่างมีค่า 0.001678 ม./ม. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม. แสดงว่าเหล็กเสริมล่างยังไม่คราก และคอนกรีตผิวบนคานที่กึ่งกลางคานถูกอัดแตก



รูปที่ 4.167 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติของคาน B1CS

จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรรทุก 5,500 กก. มีการแอ่นตัว 8.05 มม. และคานมีน้ำหนักบรรทุกประลัย 8,602 กก. ลักษณะการวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ (Flexural Failure)



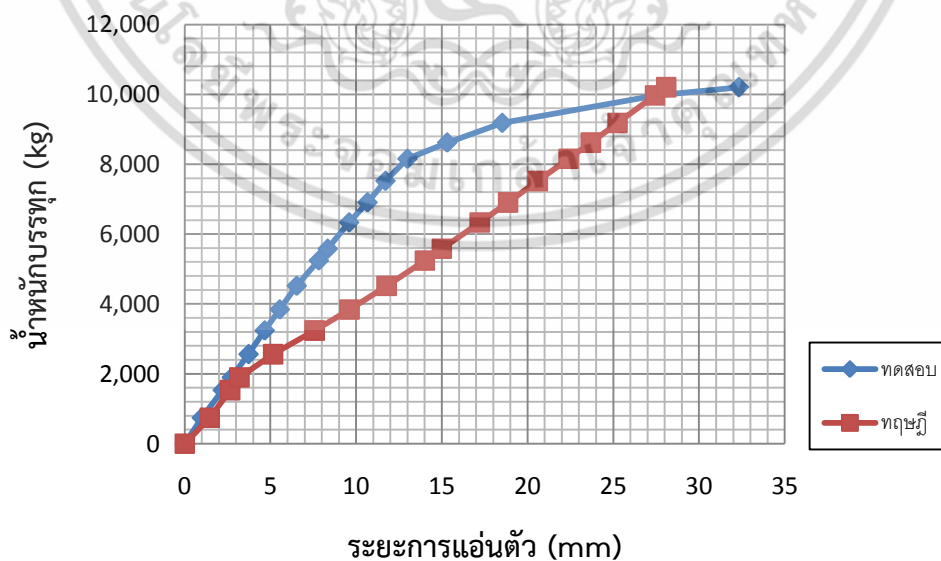
รูปที่ 4.168 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติของคาน B1CS (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

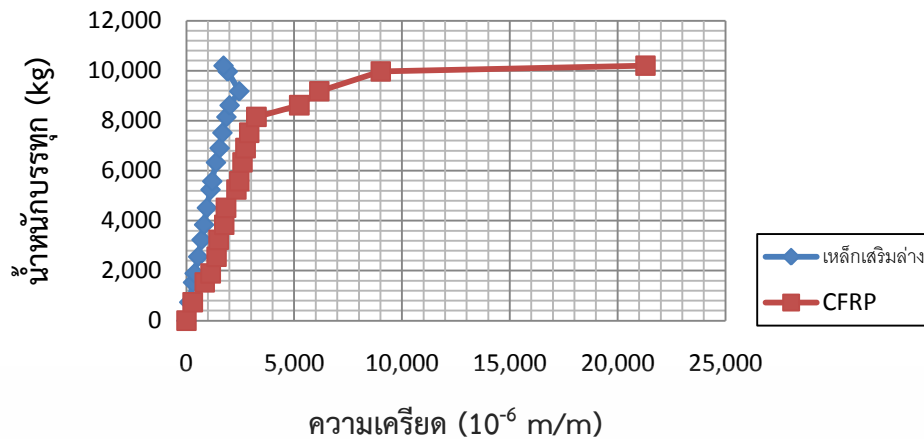
## 4.7.2.13 ผลการทดสอบคาน B1LS-F1

ตารางที่ 4.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอนตัว ความเครียด และความเค้นคาน B1LS-F1

น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอนตัว (mm)				$\epsilon_s$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_s$ (ksc)	$\epsilon_{\text{CFRP}}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_{\text{CFRP}}$ (ksc)
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี				
0	0	0	0	0	0	0	0	0
741	0.83	0.99	0.86	1.46	128	260	294	691
1533	1.84	2.21	1.93	2.65	302	615	849	1995
1895	2.31	2.74	2.40	3.19	377	769	1128	2651
2561	3.14	3.72	3.27	5.16	541	1104	1396	3281
3239	3.96	4.66	4.09	7.58	697	1422	1498	3520
3841	4.71	5.54	4.86	9.61	817	1666	1756	4127
4517	5.49	6.53	5.67	11.78	947	1931	1838	4319
5243	6.57	7.82	6.84	14.00	1115	2275	2321	5454
5578	7.02	8.34	7.30	15.01	1195	2437	2459	5779
6332	8.06	9.59	8.40	17.21	1367	2788	2599	6108
6905	9.01	10.66	9.37	18.86	1538	3137	2744	6448
7520	9.90	11.71	10.28	20.61	1667	3401	2914	6848
8153	11.02	12.99	11.43	22.39	1852	3778	3249	7635
8618	12.70	15.31	13.16	23.69	2001	4082	5237	12307
9180	14.99	18.52	15.82	25.26	2448	4994	6167	14492
9968	22.10	27.50	24.84	27.44	1913	3903	9018	21192
10204	25.52	32.33	29.50	28.09	1719	3506	21299	50053



รูปที่ 4.169 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B1LS-F1 เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อผู้ใดเห็นใจขอใช้เอกสารนี้โดยไม่ผ่านการชำระค่า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.170 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคาน B1LS-F1

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดที่กึ่งกลางคาน ความเครียดสูงสุด ของเหล็กเสริมล่างมีค่า 0.002488 ม./ม. ซึ่งมีค่ามากกว่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม. แสดงว่าเหล็กเสริมล่างคราก และความเครียดสูงสุดของ CFRP มีค่า 0.021299 ม./ม. ซึ่งมีค่ามากกว่าความเครียดประลัยที่มีค่า 0.015106 ม./ม. แสดงว่า CFRP ประลัย



รูปที่ 4.171 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติของคาน B1LS-F1

จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรรทุก 5,500 กก. มีการแอ่นตัว 8.22 มม. และคานมีน้ำหนักบรรทุกประลัย 10,204 กก. ลักษณะการวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ (Flexural Failure) โดย CFRP ฉีกขาดออกจากกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



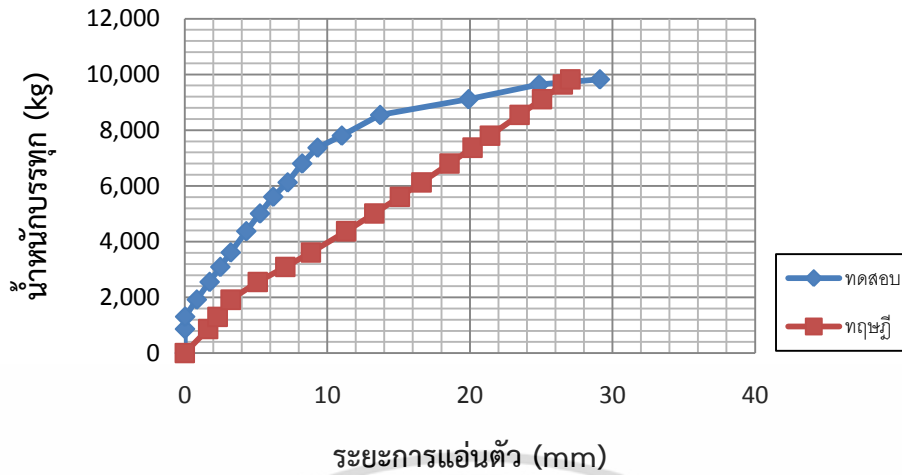
รูปที่ 4.172 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติของคาน B1LS-F1 (ต่อ)

#### 4.7.2.14 ผลการทดสอบคาน B1CS-F1

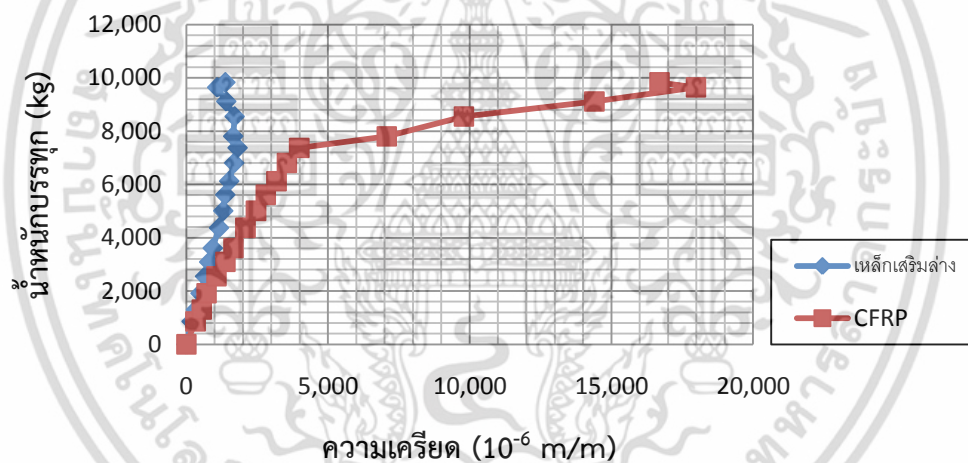
ตารางที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B1CS-F1

น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอ่นตัว (mm)				$\epsilon_s$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_s$ (ksc)	$\epsilon_{\text{CFRP}}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma_{\text{CFRP}}$ (ksc)
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี				
0	0	0	0	0	0	0	0	0
862	1.01	0.01	1.16	1.65	183	372	324	761
1305	1.59	0.02	1.78	2.31	340	693	549	1290
1917	2.37	0.84	2.57	3.23	498	1016	718	1687
2551	3.13	1.74	3.35	5.13	660	1345	1069	2512
3091	3.79	2.49	4.02	7.06	805	1641	1383	3250
3611	4.44	3.22	4.68	8.85	930	1897	1665	3913
4372	5.39	4.31	5.63	11.33	1153	2352	2087	4904
5008	6.19	5.27	6.50	13.30	1303	2657	2462	5786
5610	7.05	6.20	7.38	15.10	1375	2804	2807	6596
6124	7.96	7.21	8.34	16.61	1514	3089	3182	7478
6803	8.88	8.23	9.30	18.57	1689	3445	3554	8352
7371	9.86	9.31	10.27	20.18	1810	3691	3985	9365
7804	11.32	11.01	11.68	21.41	1656	3377	7074	16624
8546	13.34	13.70	13.71	23.49	1706	3480	9799	23028
9112	18.01	19.90	19.56	25.07	1409	2874	14400	33840
9637	22.19	24.85	23.94	26.52	1088	2219	17987	42269
9826	26.80	29.11	27.68	27.04	1379	2812	16695	39233

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

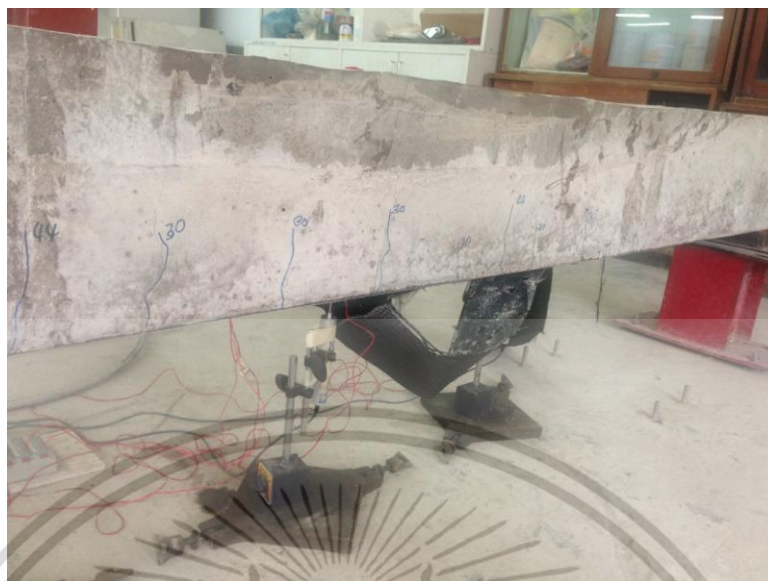


รูปที่ 4.173 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B1CS-F1



รูปที่ 4.174 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคาน B1CS-F1

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดที่กึ่งกลางคาน ความเครียดสูงสุด ของเหล็กเสริมล่างมีค่า 0.001810 ม./ม. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม. แสดงว่าเหล็กเสริมล่างยังไม่คราก และความเครียดสูงสุดของ CFRP มีค่า 0.017987 ม./ม. ซึ่งมีค่ามากกว่าความเครียดประลัยที่มีค่า 0.015106 ม./ม. แสดงว่า CFRP ประลัย



รูปที่ 4.175 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติของคาน B1CS-F1

จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรรทุก 5,500 กก. มีการแอ่นตัว 6.03 มม. และคานมีน้ำหนักบรรทุกประลัย 9,826 กก. การทดสอบเกิดข้อผิดพลาด เนื่องจาก CFRP หลุดร่อนออกจากคาน ลักษณะการวิบัติแบบเฉพาะที่ (Local Failure)



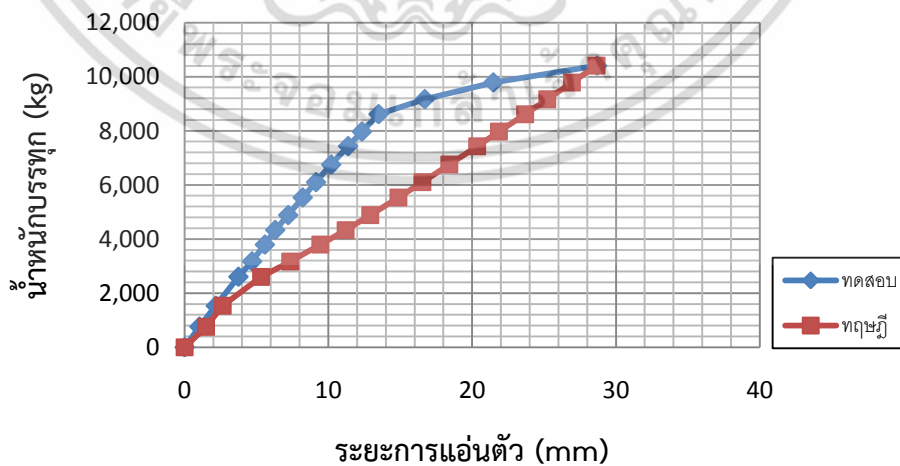
รูปที่ 4.176 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติของคาน B1CS-F1 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.7.2.15 ผลการทดสอบคาน B1L-F2

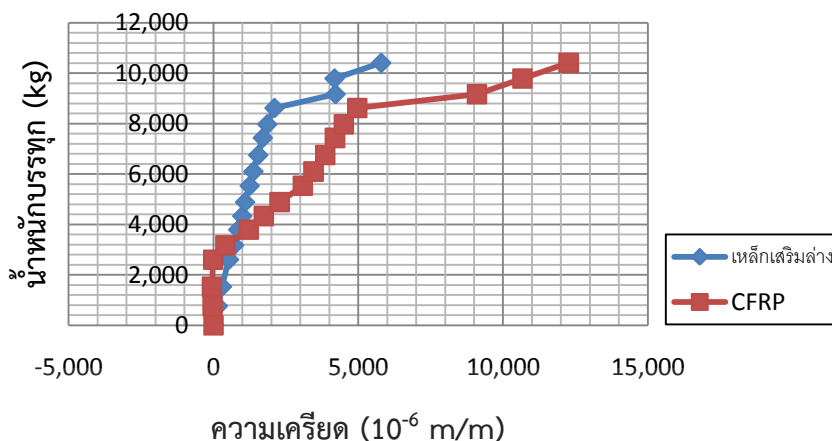
ตารางที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้น  
คาน B1L-F2

น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอ่นตัว (mm)				$\epsilon_s$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_s$ (ksc)	$\epsilon_{CFRP}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{CFRP}$ (ksc)	$\epsilon_{HCFRP}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{HCFRP}$ (ksc)	$\epsilon_{DCFPR}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{DCFPR}$ (ksc)	$\epsilon_{VCFRP}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{VCFRP}$ (ksc)
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี										
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
760	0.84	1.03	1.01	1.49	150	306	-32	-75	-7	-2	-4	-1	3	1
1531	1.80	2.17	2.08	2.65	291	593	-53	-125	-11	-3	-2	0	9	2
2604	3.10	3.74	3.55	5.32	536	1092	-8	-19	-23	-6	-7	-2	10	2
3173	3.80	4.69	4.36	7.35	710	1447	414	973	-29	-7	-9	-2	9	2
3791	4.56	5.58	5.20	9.45	853	1740	1220	2867	-29	-7	-11	-3	10	2
4333	5.20	6.30	5.89	11.20	993	2026	1738	4084	-37	-9	-15	-4	7	2
4883	5.99	7.20	6.65	12.91	1090	2223	2287	5374	-39	-10	-22	-5	5	1
5533	6.94	8.21	7.52	14.87	1249	2548	3085	7250	-38	-9	-23	-6	9	2
6100	7.76	9.14	8.34	16.54	1380	2814	3457	8124	-42	-10	-29	-7	4	1
6748	8.66	10.19	9.25	18.41	1545	3151	3860	9071	-43	-11	-30	-7	8	2
7432	9.68	11.37	10.23	20.36	1705	3477	4196	9861	-40	-10	-23	-6	9	2
7969	10.54	12.33	11.08	21.87	1858	3789	4499	10573	-38	-9	-25	-6	12	3
8615	11.63	13.49	12.09	23.68	2108	4299	4969	11677	-46	-11	-22	-5	20	5
9166	14.34	16.70	14.53	25.22	4220	8608	9100	21385	-47	-12	-25	-6	20	5
9786	18.04	21.47	18.25	26.93	4185	8536	10669	25072	-44	-11	-33	-8	21	5
10406	24.40	28.69	24.79	28.65	5798	11828	12265	28823	7	2	-26	-6	-7	-2

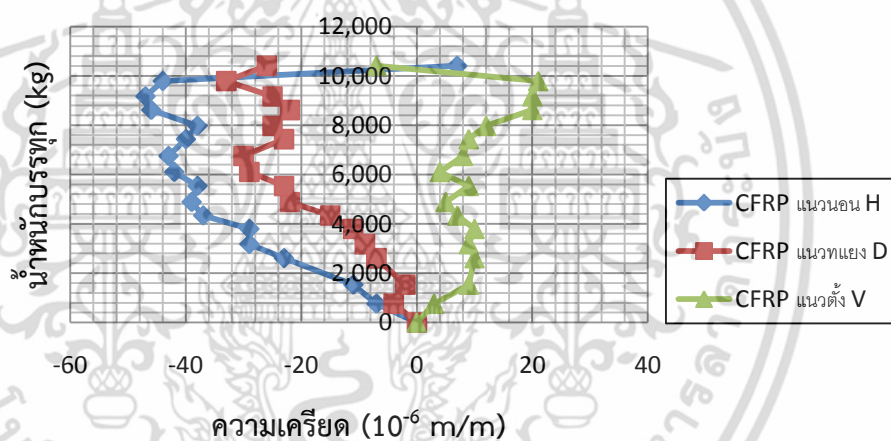


รูปที่ 4.177 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B1L-F2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.178 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคาน B1L-F2

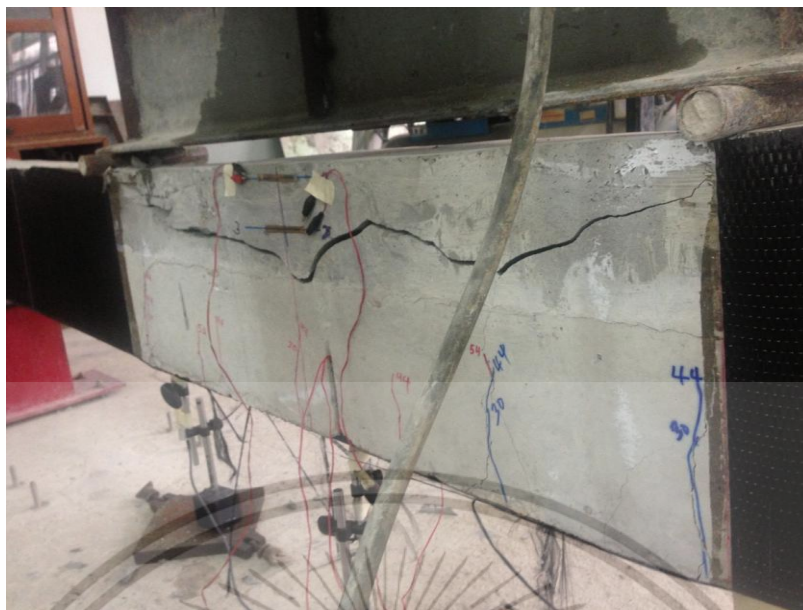


รูปที่ 4.179 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support คาน B1L-F2

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดที่กึ่งกลางคาน

ความเครียดสูงสุด ของเหล็กเสริมล่างมีค่า 0.005798 ม./ม. ซึ่งมีค่ามากกว่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม. แสดงว่าเหล็กเสริมล่างคราก และความเครียดสูงสุดของ CFRP มีค่า 0.012265 ม./ม. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความเครียดประลัยที่มีค่า 0.015106 ม./ม. แสดงว่า CFRP ยังไม่ประลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.180 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติของคาน B1L-F2



รูปที่ 4.181 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติของคาน B1L-F2 (ต่อ)

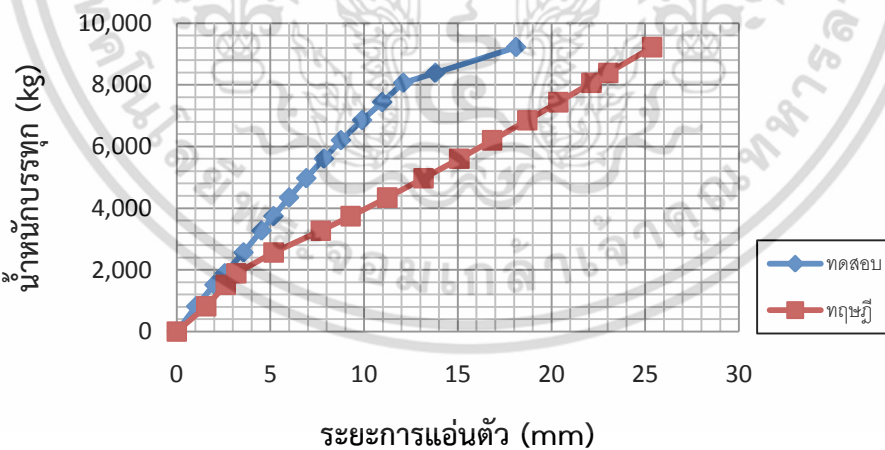
จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรรทุก 5,500 กก. มีการแอ่นตัว 8.16 มม. และคานมีน้ำหนักบรรทุกประลัย 10,406 กก. ลักษณะการวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ (Flexural Failure) โดย CFRP ฉีกขาดออกจากกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.7.2.16 ผลการทดสอบคาน B1C-F2

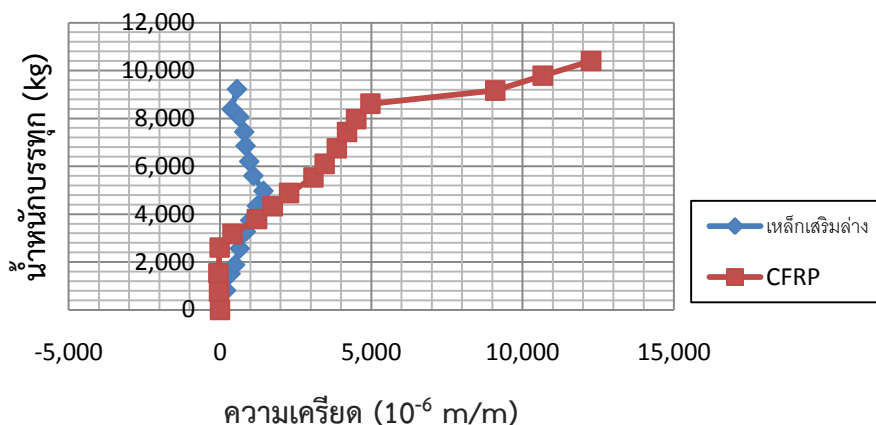
ตารางที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว ความเครียด และความเค้นคาน B1C-F2

น้ำหนัก (kg)	ระยะการแอ่นตัว (mm)				$\epsilon_s$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_s$ (ksc)	$\epsilon_{CFRP}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{CFRP}$ (ksc)	$\epsilon_{HCFRP}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{HCFRP}$ (ksc)	$\epsilon_{DCF}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{DCF}$ (ksc)	$\epsilon_{VCFRP}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\sigma_{VCFRP}$ (ksc)
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ทฤษฎี										
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
818	0.94	1.03	0.97	1.58	199	406	1	0	-2	0	8	2	37	75
1513	1.77	2.01	1.85	2.62	350	714	-7	-2	-1	0	7	2	46	94
1886	2.22	2.56	2.32	3.18	499	1018	-12	-3	-5	-1	7	2	51	104
2564	3.05	3.56	3.21	5.17	651	1328	-17	-4	-9	-2	9	2	66	135
3270	3.87	4.52	4.08	7.69	853	1740	-22	-5	-11	-3	9	2	84	171
3740	4.39	5.16	4.65	9.28	1000	2040	-27	-7	-16	-4	11	3	98	200
4343	5.10	5.99	5.40	11.23	1221	2491	-25	-6	-15	-4	15	4	122	249
4969	5.91	6.91	6.27	13.18	1437	2931	-30	-7	-11	-3	17	4	161	328
5603	6.62	7.85	7.09	15.08	1104	2252	-34	-8	-27	-7	15	4	223	455
6201	7.23	8.76	7.90	16.83	967	1973	-40	-10	-25	-6	17	4	302	616
6853	8.20	9.89	8.91	18.71	844	1722	-48	-12	-26	-6	21	5	406	828
7435	9.12	10.96	9.86	20.37	800	1632	-56	-14	-28	-7	19	5	505	1030
8061	9.99	12.09	10.89	22.13	638	1302	-83	-21	-31	-8	32	8	645	1316
8383	11.21	13.80	12.22	23.03	384	783	-83	-21	-34	-8	32	8	944	1926
9220	14.71	18.11	15.59	25.37	560	1142	-77	-19	-41	-10	36	9	9060	18482

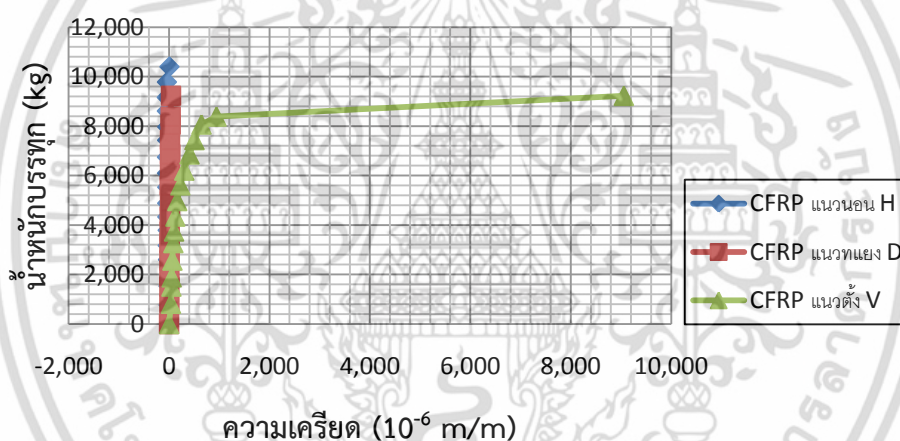


รูปที่ 4.182 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน B1C-F2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.183 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคาน B1C-F2



รูปที่ 4.184 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณ Support คาน B1C-F2

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดที่กึ่งกลางคาน ความเครียดสูงสุด ของเหล็กเสริมล่างมีค่า 0.001437 ม./ม. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความเครียดครากที่มีค่า 0.001961 ม./ม. แสดงว่าเหล็กเสริมล่างยังไม่คราก และความเครียดสูงสุดของ CFRP มีค่า 0.000083 ม./ม. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความเครียดประลัยที่มีค่า 0.015106 ม./ม. แสดงว่า CFRP ยังไม่ประลัย



รูปที่ 4.185 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติของคาน B1C-F2

จากการทดสอบคานที่น้ำหนักบรรทุกทุก 5,500 กก. มีการแอ่นตัว 7.70 มม. และคานมีน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย 9,220 กก. การทดสอบเกิดข้อผิดพลาด เนื่องจากเกิดการเลื่อน (Slip) ระหว่างชั้นของคอนกรีต



รูปที่ 4.186 แสดงการแตกร้าวและการวิบัติของคาน B1C-F2 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

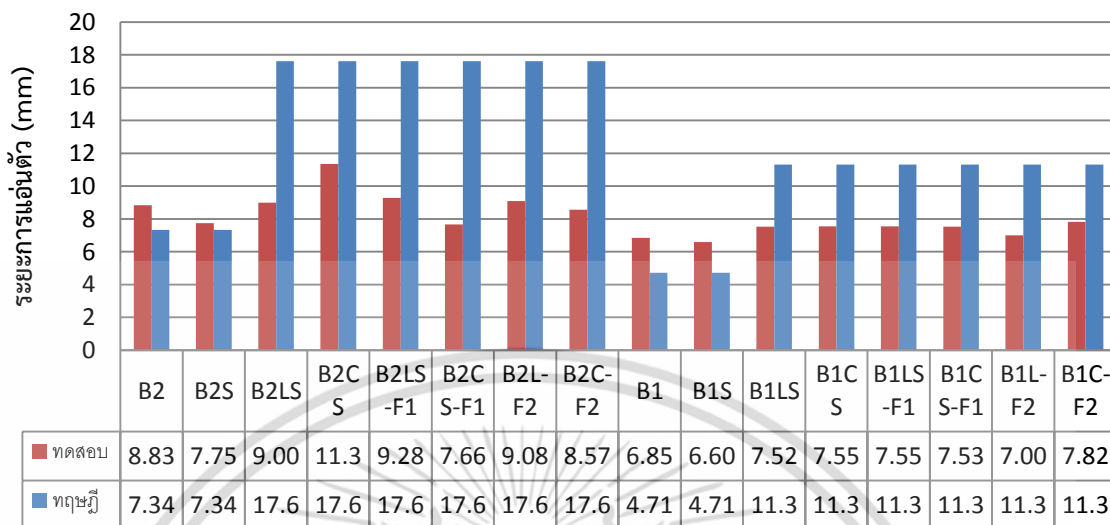
#### 5.1 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

5.1.1 พิจารณาการทดสอบรับน้ำหนักบรรทุกไม่มากกว่า 60% ของน้ำหนักบรรทุกประลัย

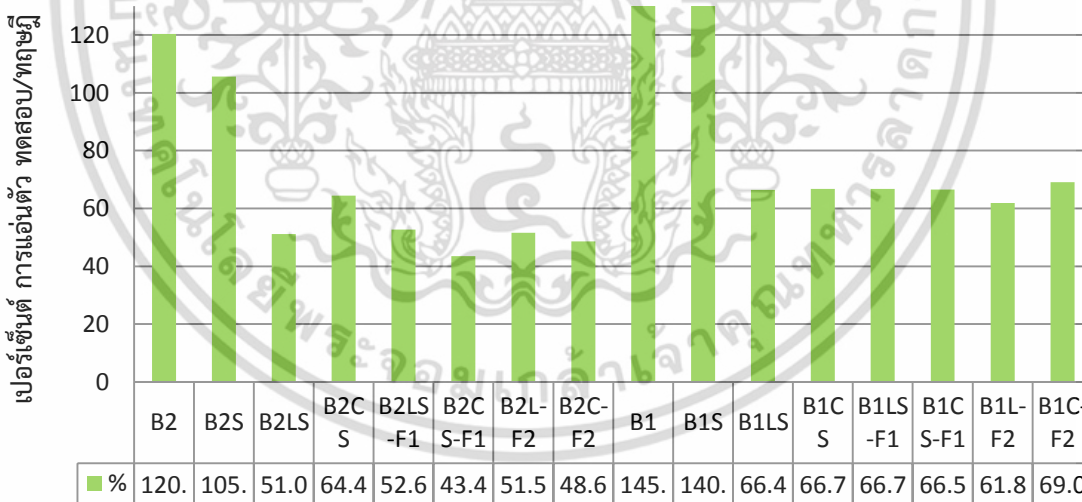
ตารางที่ 5.1 แสดงระยะการแอ่นตัวจากการทดสอบและจากทฤษฎี

คานทดสอบ	ระยะการแอ่นตัว (mm)	
	ทดสอบ	ทฤษฎี
B2	8.83	7.34
B2S	7.75	7.34
B2LS	9.00	17.62
B2CS	11.35	17.62
B2LS-F1	9.28	17.62
B2CS-F1	7.66	17.62
B2L-F2	9.08	17.62
B2C-F2	8.57	17.62
B1	6.85	4.71
B1S	6.60	4.71
B1LS	7.52	11.32
B1CS	7.55	11.32
B1LS-F1	7.55	11.32
B1CS-F1	7.53	11.32
B1L-F2	7.00	11.32
B1C-F2	7.82	11.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



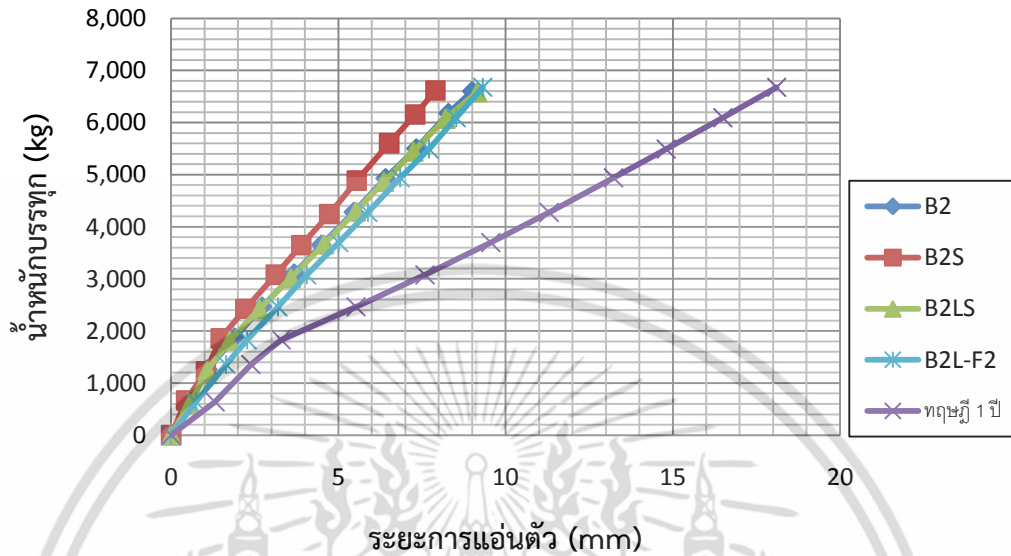
รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวจากการทดสอบ และจากทฤษฎี



รูปที่ 5.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ระยะการแอนตัว ทดสอบ/ทฤษฎี

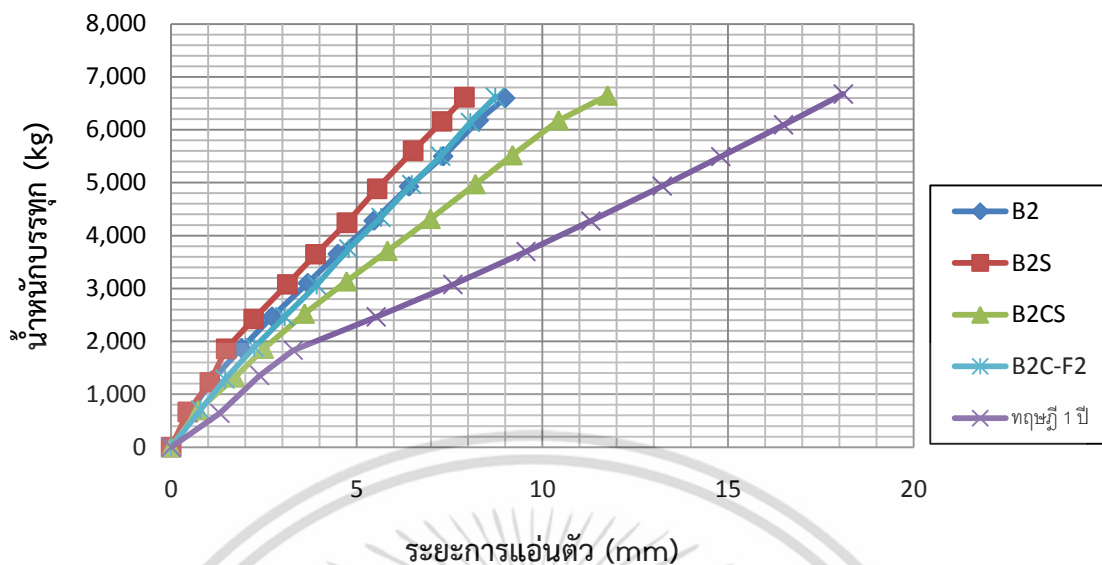
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.1.1 พิจารณาคานกลุ่มที่ 1



รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรทุกคาน กลุ่มที่ 1 (3 ชั้น-ตรง)

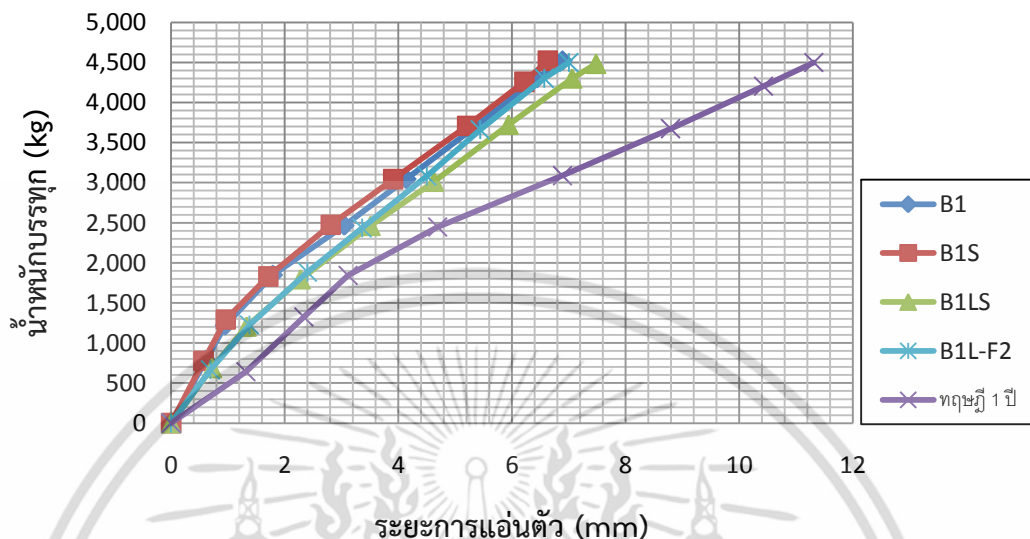
จากรูปที่ 5.3 ผลการทดสอบคานกลุ่มที่ 1 (3 ชั้น-ตรง) พบว่าการแอนตัวของคานคอนกรีตธรรมดา B2 และคาน 3 ชั้นไม่เสริมเหล็กปลอก B2L-F2 มีค่า 8.83 มม. และ 9.08 มม. ตามลำดับ ซึ่งจากทฤษฎีมีค่า 7.34 มม. และ 17.62 มม. ตามลำดับ ค่าที่ได้จากการทดสอบคานคอนกรีตธรรมดา มีค่ามากกว่าค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี 20.30% ส่วนคาน 3 ชั้น ค่าที่ได้จากการทดสอบมีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี 48.47% เพราะค่าความเค้นที่วัดได้ในคานทดสอบมีค่า 175.19 กก./ตร.ซม. ค่าที่ได้มากกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบคือ 120 กก./ตร.ซม. จึงทำให้เกิดการแอนตัวมากกว่าขึ้น ส่วนคาน 3 ชั้นค่าความเค้นที่วัดได้ในคานทดสอบของคอนกรีตมวลเบาชั้นกลางมีค่า 49.88 กก./ตร.ซม. และคอนกรีตมวลเบาชั้นบนสุดมีค่า 112.09 กก./ตร.ซม. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าที่ใช้ในการออกแบบคือ 60 กก./ตร.ซม. และ 120 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ ดังนั้นจึงมีการแอนตัวน้อยลง



รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุกาน กลุ่มที่ 1 (3 ชั้น-โค้ง)

จากรูปที่ 5.4 ผลการทดสอบคานกลุ่มที่ 1 (3 ชั้น-โค้ง) พบว่าการแอนตัวของคานคอนกรีตธรรมดา B2 และคาน 3 ชั้นไม่เสริมเหล็กปลอก B2C-F2 มีค่า 8.83 มม. และ 8.57 มม. ตามลำดับ ซึ่งจากทฤษฎีมีค่า 7.34 มม. และ 17.62 มม. ตามลำดับ ค่าที่ได้จากการทดสอบคานคอนกรีตธรรมดา มีค่ามากกว่าค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี 20.30% ส่วนคาน 3 ชั้น ค่าที่ได้จากการทดสอบมีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี 51.36% เพราะค่าความเค้นที่วัดได้ในคานทดสอบมีค่า 175.19 กก./ตร.ซม. ค่าที่ได้มากกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบคือ 120 กก./ตร.ซม. จึงทำให้เกิดการแอนตัวมากกว่าชั้น ส่วนคาน 3 ชั้นค่าความเค้นที่วัดได้ในคานทดสอบของคอนกรีตมวลเบาชั้นกลางมีค่า 51.27 กก./ตร.ซม. และคอนกรีตมวลเบาชั้นบนสุดมีค่า 108.57 กก./ตร.ซม. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าที่ใช้ในการออกแบบคือ 60 กก./ตร.ซม. และ 120 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ ดังนั้นจึงมีการแอนตัวน้อยลง

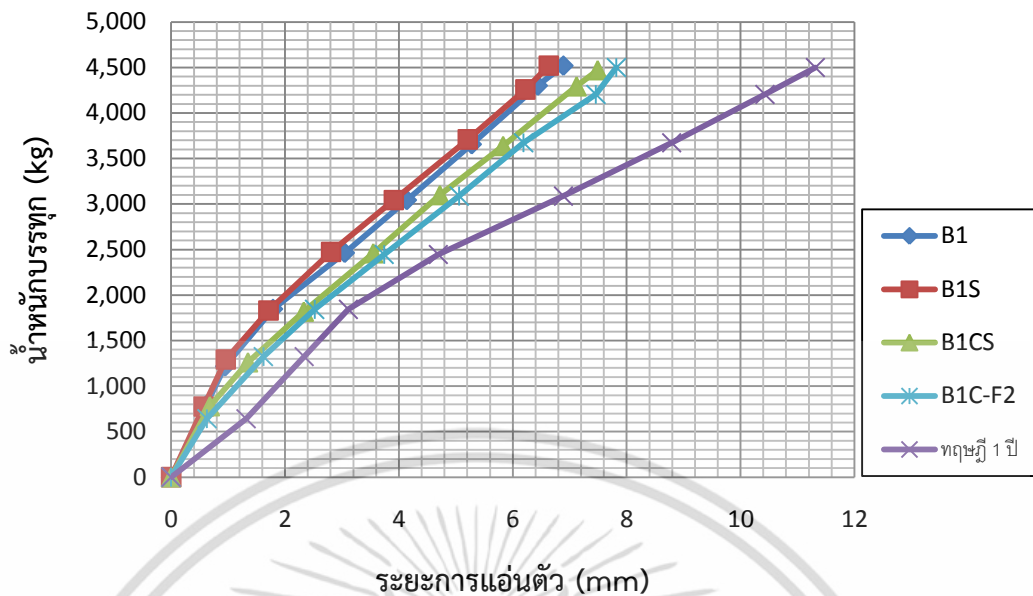
### 5.1.1.2 พิจารณาคานกลุ่มที่ 2



รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน กลุ่มที่ 2 (3 ชั้น-ตรง)

จากรูปที่ 5.5 ผลการทดสอบคานกลุ่มที่ 1 (3 ชั้น-ตรง) พบว่าการแอ่นตัวของคานคอนกรีตธรรมดา B1 และคาน 3 ชั้นไม่เสริมเหล็กปลอก B1L-F2 มีค่า 6.85 มม. และ 7.00 มม. ตามลำดับ ซึ่งจากทฤษฎีมีค่า 4.71 มม. และ 11.31 มม. ตามลำดับ ค่าที่ได้จากการทดสอบคานคอนกรีตธรรมดา มีค่ามากกว่าค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี 45.44% ส่วนคาน 3 ชั้น ค่าที่ได้จากการทดสอบมีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี 38.11% เพราะค่าความเค้นที่วัดได้ในคานทดสอบมีค่า 146.89 กก./ตร.ซม. ค่าที่ได้มากกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบคือ 120 กก./ตร.ซม. จึงทำให้เกิดการแอ่นตัวมากกว่าชิ้น ส่วนคาน 3 ชั้นค่าความเค้นที่วัดได้ในคานทดสอบของคอนกรีตมวลเบาชั้นกลางมีค่า 56.13 กก./ตร.ซม. และคอนกรีตมวลเบาชั้นบนสุดมีค่า 105.17 กก./ตร.ซม. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าที่ใช้ในการออกแบบคือ 60 กก./ตร.ซม. และ 120 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ ดังนั้นจึงมีการแอ่นตัวน้อยลง

และจากการทดสอบ พบว่าคาน 3 ชั้นไม่เสริมเหล็กปลอก B2L-F2 และคาน 3 ชั้น เสริมเหล็กปลอก B2LS ค่าการแอ่นตัว 9.08 มม. และ 9.0 มม. ตามลำดับ ซึ่งพบว่าการเสริมเหล็กปลอกในคาน ทำให้ระยะการแอ่นตัวน้อยลง



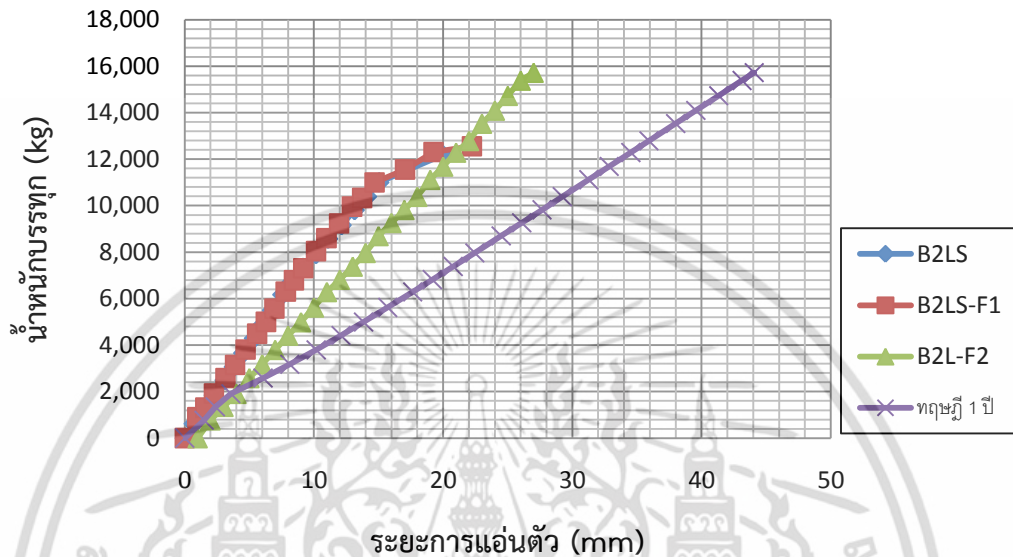
รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุกาน กลุ่มที่ 2 (3 ชั้น-โค้ง)

จากรูปที่ 5.6 ผลการทดสอบคานกลุ่มที่ 1 (3 ชั้น-โค้ง) พบว่าการแอนตัวของคานคอนกรีตธรรมดา B1 และคาน 3 ชั้นไม่เสริมเหล็กปลอก B1C-F2 มีค่า 6.85 มม. และ 7.82 มม. ตามลำดับ ซึ่งจากทฤษฎีมีค่า 4.71 มม. และ 11.31 มม. ตามลำดับ ค่าที่ได้จากการทดสอบคานคอนกรีตธรรมดา มีค่ามากกว่าค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี 45.44% ส่วนคาน 3 ชั้น ค่าที่ได้จากการทดสอบมีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี 30.86% เพราะค่าความเค้นที่วัดได้ในคานทดสอบมีค่า 146.89 กก./ตร.ซม. ค่าที่ได้มากกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบคือ 120 กก./ตร.ซม. จึงทำให้เกิดการแอนตัวมากกว่าชั้น ส่วนคาน 3 ชั้นค่าความเค้นที่วัดได้ในคานทดสอบของคอนกรีตมวลเบาชั้นกลางมีค่า 51.23 กก./ตร.ซม. และคอนกรีตมวลเบาชั้นบนสุดมีค่า 110.19 กก./ตร.ซม. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าที่ใช้ในการออกแบบคือ 60 กก./ตร.ซม. และ 120 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ ดังนั้นจึงมีการแอนตัวน้อยลง

และจากการทดสอบ พบว่าคอนกรีตธรรมดา ไม่เสริมเหล็กปลอก B1 และคาน 3 ชั้น เสริมเหล็กปลอก B1S ค่าการแอนตัว 6.85 มม. และ 6.60 มม. ตามลำดับ ซึ่งพบว่าการเสริมเหล็กปลอกในคาน ทำให้ระยะเวลาแอนตัวน้อยลง

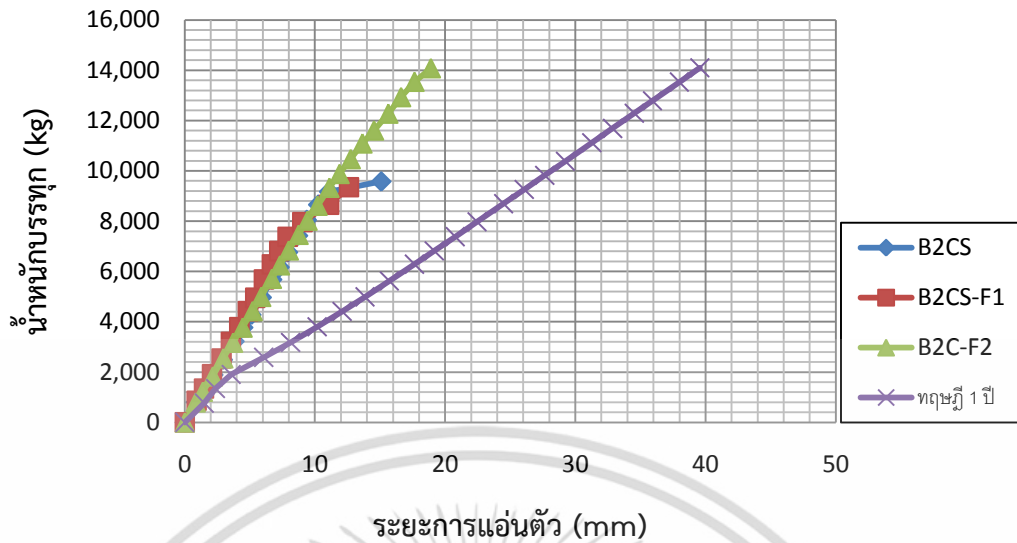
## 5.1.2 พิจารณาการทดสอบรับน้ำหนักบรรทุกมากกว่า 60% ของน้ำหนักบรรทุกทุกระลัย

### 5.1.2.1 พิจารณาคานกลุ่มที่ 1



รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน กลุ่มที่ 1 (3 ชั้น-ตรง)

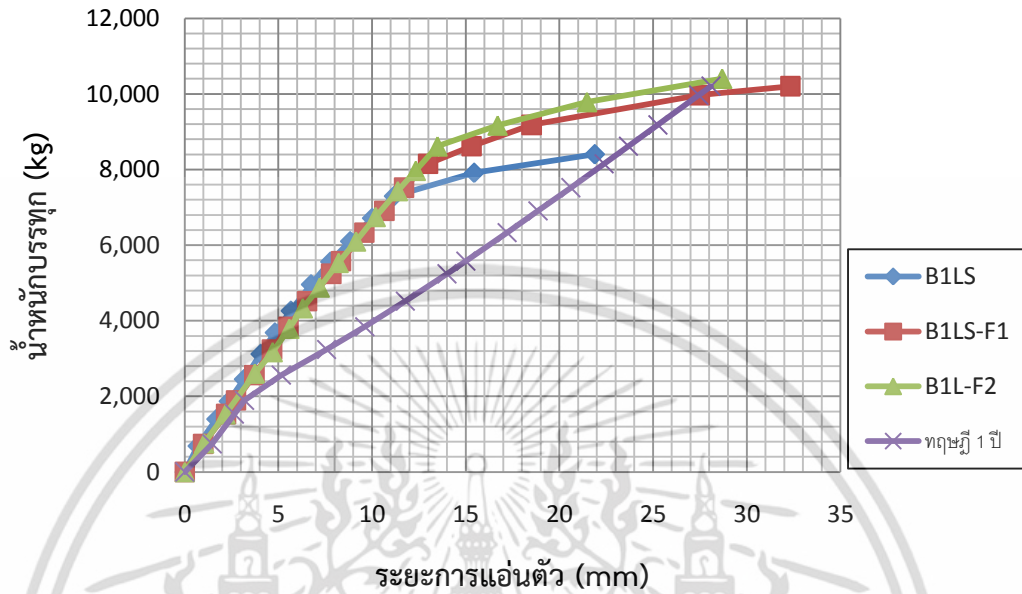
จากรูปที่ 5.7 เมื่อพิจารณาที่การแอ่นตัว คานทดสอบกลุ่มที่ 1 (3 ชั้น-ตรง) เปรียบเทียบกับน้ำหนักบรรทุก 8,000 กก. คานควบคุม ไม่มีการเสริม CFRP คือคาน B2LS มีการแอ่นตัวเท่ากับ 10.27 มม. และคานที่มีการเสริม CFRP ที่ท้องคาน B2LS-F1 มีการแอ่นตัวเท่ากับ 10.10 มม. ลดลง 1.66% ส่วนคานที่มีการเสริม CFRP ที่ท้อง และด้านข้างคานทั้งสองด้าน B2L-F2 มีการแอ่นตัวเท่ากับ 9.63 มม. ลดลง 6.23%



รูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกทุกคัน กลุ่มที่ 1 (3 ชั้น-โค้ง)

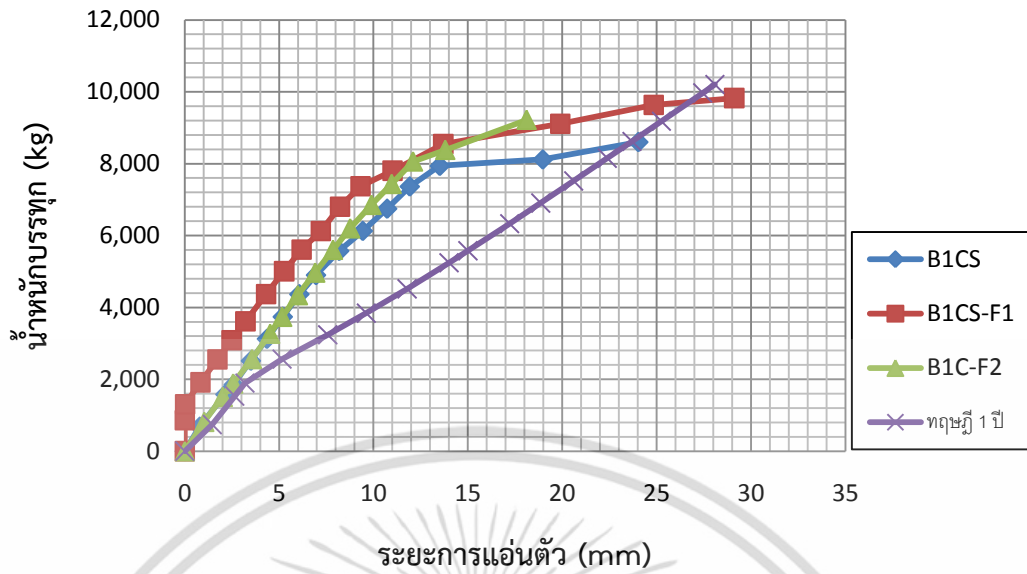
จากรูปที่ 5.8 เมื่อพิจารณาที่การแอ่นตัว คานทดสอบกลุ่มที่ 1 (3 ชั้น-โค้ง) เปรียบเทียบที่น้ำหนักบรรทุก 8,000 กก. คานควบคุม ไม่มีการเสริม CFRP คือคาน B2CS มีการแอ่นตัวเท่ากับ 9.32 มม. และคานที่มีการเสริม CFRP ที่ท้องคาน B2CS-F1 มีการแอ่นตัวเท่ากับ 9.16 มม. ลดลง 1.72% ส่วนคานที่มีการเสริม CFRP ที่ท้อง และด้านข้างคานทั้งสองด้าน B2C-F2 มีการแอ่นตัวเท่ากับ 9.40 มม. เพิ่มขึ้น 0.86%

### 5.1.2.2 พิจารณาคานกลุ่มที่ 2



รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน กลุ่มที่ 2 (3 ชั้น-ตรง)

จากรูปที่ 5.9 เมื่อพิจารณาที่การแอ่นตัว คานทดสอบกลุ่มที่ 2 (3 ชั้น-ตรง) เปรียบเทียบกับน้ำหนักบรรทุก 5,500 กก. คานควบคุม ไม่มีการเสริม CFRP คือคาน B1LS มีการแอ่นตัวเท่ากับ 7.66 มม. และคานที่มีการเสริม CFRP ที่ท้องคาน B1LS-F1 มีการแอ่นตัวเท่ากับ 8.22 มม. เพิ่มขึ้น 7.31% ส่วนคานที่มีการเสริม CFRP ที่ท้อง และด้านข้างคานทั้งสองด้าน B1L-F2 มีการแอ่นตัวเท่ากับ 8.16 มม. เพิ่มขึ้น 6.53%



รูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคาน กลุ่มที่ 2 (3 ชั้น-โค้ง)

จากรูปที่ 5.10 เมื่อพิจารณาที่การแอ่นตัว คานทดสอบ กลุ่มที่ 2 (3 ชั้น-โค้ง) เปรียบเทียบที่น้ำหนักบรรทุก 5,500 กก. คานควบคุม ไม่มีการเสริม CFRP คือคาน B1CS มีการแอ่นตัวเท่ากับ 8.05 มม. และคานที่มีการเสริม CFRP ที่ท้องคาน B1CS-F1 มีการแอ่นตัวเท่ากับ 6.03 มม. ลดลง 25.09% ส่วนคานที่มีการเสริม CFRP ที่ท้อง และด้านข้างคานทั้งสองด้าน B1C-F2 มีการแอ่นตัวเท่ากับ 7.70 มม. ลดลง 4.35%

ตารางที่ 5.2 แสดงลักษณะการวิบัติของคานตามทฤษฎี

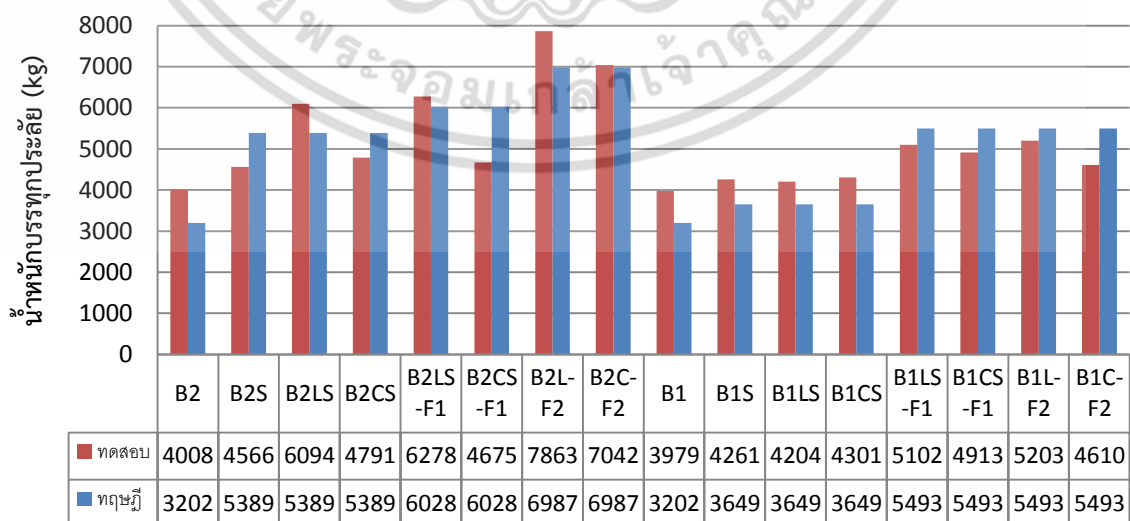
คานทดสอบ	กำลังรับน้ำหนัก เนื่องจากโมเมนต์ (kg)	กำลังรับน้ำหนัก เนื่องจากแรงเฉือน (kg)	กำลังรับน้ำหนัก (kg)	ลักษณะการวิบัติ
B2	5389	3202	3202	shear failure
B2S	5389	6028	5389	flexural failure
B2LS	5389	6028	5389	flexural failure
B2CS	5389	6028	5389	flexural failure
B2LS-F1	6987	6028	6028	shear failure
B2CS-F1	6987	6028	6028	shear failure
B2L-F2	6987	9654	6987	flexural failure
B2C-F2	6987	9654	6987	flexural failure
B1	3649	3202	3202	shear failure
B1S	3649	6028	3649	flexural failure
B1LS	3649	6028	3649	flexural failure
B1CS	3649	6028	3649	flexural failure
B1LS-F1	5493	6028	5493	flexural failure
B1CS-F1	5493	6028	5493	flexural failure
B1L-F2	5493	9654	5493	flexural failure
B1C-F2	5493	9654	5493	flexural failure

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกจากการทดสอบและจากทฤษฎี

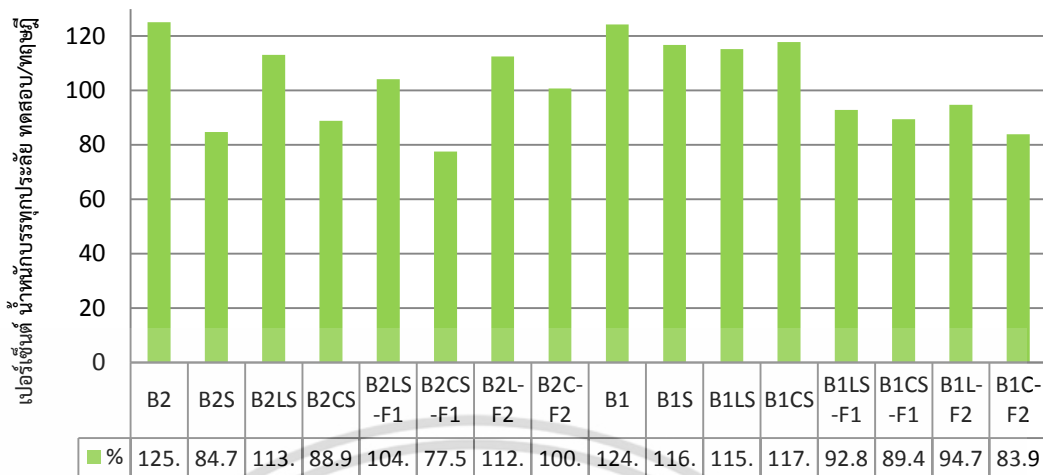
ลักษณะการวิบัติของคานทดสอบ

คานทดสอบ	น้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (kg)		ลักษณะการวิบัติ		หมายเหตุ
	ทดสอบ	ทฤษฎี	ทดสอบ	ทฤษฎี	
B2	4008	3202	Shear Failure	Shear Failure	
B2S	4566	5389	Flexural Failure	Flexural Failure	
B2LS	6094	5389	Flexural Failure	Flexural Failure	
B2CS	4791	5389	Error	Flexural Failure	คอนกรีตอัดแตกที่แรงกระทำ
B2LS-F1	6278	6028	Shear Failure	Shear Failure	
B2CS-F1	4675	6028	Error	Shear Failure	คอนกรีตอัดแตกที่แรงกระทำ
B2L-F2	7863	6987	Flexural Failure	Flexural Failure	
B2C-F2	7042	6987	Flexural Failure	Flexural Failure	
B1	3979	3202	Shear Failure	Shear Failure	
B1S	4261	3649	Flexural Failure	Flexural Failure	
B1LS	4204	3649	Flexural Failure	Flexural Failure	
B1CS	4301	3649	Flexural Failure	Flexural Failure	
B1LS-F1	5102	5493	Flexural Failure	Flexural Failure	
B1CS-F1	4913	5493	Error	Flexural Failure	CFRP หลุดร่อน (Local Failure)
B1L-F2	5203	5493	Flexural Failure	Flexural Failure	
B1C-F2	4610	5493	Error	Flexural Failure	เกิดการเลื่อนที่รอยต่อชั้นของคอนกรีต



รูปที่ 5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยจากการทดสอบ และจากทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ผ่านการคัดลอก หรือการแก้ไขเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 แสดงเปอร์เซ็นต์น้ำหนักบรรทุกประลัย ทดสอบ/ทฤษฎี

จากรูปที่ 5.12 เมื่อพิจารณาที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานทดสอบกลุ่มที่ 1 (3 ชั้น-ตรง) B2LS-F1 มีกำลังมากกว่าคานควบคุม B2LS แค่เพียง 3.02% เพราะคานออกแบบให้วิบัติด้วยแรงเฉือน จึงได้ใช้ประสิทธิภาพการเสริมกำลังจาก CFRP น้อยมาก ส่วนคาน B2L-F2 มีกำลังมากกว่าคานควบคุม B2LS มากถึง 29.03% เพราะคานออกแบบให้วิบัติด้วยโมเมนต์ จึงได้ใช้ประสิทธิภาพการเสริมกำลังจาก CFRP อย่างเต็มประสิทธิภาพ

และเมื่อพิจารณาที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานทดสอบกลุ่มที่ 1 (3 ชั้น-โค้ง) B2CS-F1 มีกำลังน้อยกว่าคานควบคุม B2CS แค่เพียง 2.42% เพราะคานออกแบบให้วิบัติด้วยแรงเฉือน จึงได้ใช้ประสิทธิภาพการเสริมกำลังจาก CFRP น้อยมาก ส่วน B2C-F2 มีกำลังมากกว่าคานควบคุม B2CS มากถึง 46.98% เพราะคานออกแบบให้วิบัติด้วยโมเมนต์ จึงได้ใช้ประสิทธิภาพการเสริมกำลังจาก CFRP อย่างเต็มประสิทธิภาพ

จากรูปที่ 5.12 เมื่อพิจารณาที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานทดสอบกลุ่มที่ 2 (3 ชั้น-ตรง) B1LS-F1 และ B1L-F2 มีกำลังมากกว่าคานควบคุม B1LS เท่ากับ 21.36% และ 23.76% ตามลำดับ

และเมื่อพิจารณาที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานทดสอบกลุ่มที่ 2 (3 ชั้น-โค้ง) B1CS-F1 และ B1C-F2 มีกำลังมากกว่าคานควบคุม B1CS เท่ากับ 14.23% และ 7.18% ตามลำดับ

กรณีเปรียบเทียบผลการทดสอบกับทฤษฎีของคานที่เสริมกำลังด้วย CFRP แล้ว จะเห็นได้ว่าคานทดสอบกลุ่มที่ 1 รับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากการทดสอบมากกว่าทฤษฎี 0.70% - 12.50% ส่วนคานกลุ่มที่ 2 รับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากการทดสอบน้อยกว่าทฤษฎี 5.28% - 16.08%

## 5.2 สรุปผลการทดสอบ

1. จากการทดสอบ พบว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กเก่า เมื่อเวลาผ่านไป 1 ปี คานกลุ่มที่ 1 ค่าการแอ่นตัวจากผลของการทดสอบมีค่าน้อยกว่าค่าตามทฤษฎี 49% - 51% และคานกลุ่มที่ 2 ค่าการแอ่นตัวจากผลของการทดสอบมีค่าน้อยกว่าค่าตามทฤษฎี 31% - 38% เพราะคอนกรีตมีความเค้นอัดน้อยกว่าที่ออกแบบไว้ ดังนั้นจึงมีการแอ่นตัวน้อยลง
2. การเสริมเหล็กกึ่งคานจะทำให้ค่าการแอ่นตัวลดลง 4% - 12% เมื่อเปรียบเทียบกับคานควบคุมที่ไม่ได้เสริมกำลัง
3. การใช้ CFRP เสริมกำลังทำให้คานมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกได้มากขึ้น 7% - 47% เมื่อเปรียบเทียบกับคานควบคุมที่ไม่ได้เสริมกำลัง
4. การใช้ CFRP เสริมกำลังทำให้ค่าการแอ่นตัวลดลง 1% - 6% เมื่อเปรียบเทียบกับคานควบคุมที่ไม่ได้เสริมกำลัง
5. การใช้ CFRP เสริมที่ด้านข้างแทนเหล็กกึ่งคาน ทำให้รับน้ำหนักเพิ่มมากขึ้นและไม่วิบัติ ด้วยแรงเฉือน แสดงให้เห็นว่า CFRP สามารถเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนได้แทนเหล็กกึ่งคาน
6. จากการทดสอบมีแนวโน้มว่าการเสริมกำลังด้วย CFRP สำหรับคานกลุ่มที่ 1 ซึ่งเสริมเหล็ก DB20 มีความปลอดภัยเพียงพอ แต่สำหรับคาน กลุ่มที่ 2 ซึ่งเสริมเหล็ก DB16 ต้องมีการลดกำลังรับน้ำหนักบรรทุกจากทฤษฎีลงอีก 5% - 15% เพื่อความปลอดภัย

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบครั้งนี้ สามารถสรุปข้อเสนอแนะได้ดังนี้

1. จากการทดสอบคานรับน้ำหนักบรรทุกได้น้อยกว่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี เนื่องจากคานที่นำมาทดสอบได้ผ่านการรับน้ำหนักบรรทุกมาแล้ว ซึ่งจำลองให้เหมือนสภาวะการใช้งานจริง แต่ทฤษฎีนั้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณมาจากคานที่ไม่ได้รับน้ำหนักบรรทุกมาเลย ดังนั้นการนำ CFRP ไปใช้ในการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมจริง ควรต้องมีการคำนวณเพื่อกำลังเอาไว้ด้วย

2. คานที่นำมาทดสอบควรออกแบบให้วิบัติที่ผิวรับแรงดึง เพื่อให้ CFRP ที่นำมาเสริมกำลังหรือซ่อมแซม ได้ทำงานอย่างเต็มประสิทธิภาพก่อนที่คานจะวิบัติ ซึ่งจะช่วยให้คานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้เพิ่มขึ้นอีก

3. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการใช้ CFRP เสริมกำลังรับแรงเฉือนอย่างเดียว

4. ในการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมองค์อาคารด้วย CFRP ต้องระวังในเรื่องการติดตั้งมากเป็นพิเศษ ควรติดตั้งโดยผู้เชี่ยวชาญ เพื่อผลการทดสอบที่แม่นยำ และ CFRP มีราคาสูงมาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

กระทรวงอุตสาหกรรม. 2543. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.20-2543) เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต เหล็กเส้นกลม.** : กรุงเทพฯ.

กระทรวงอุตสาหกรรม. 2536. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.20-2536) เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต เหล็กข้ออ้อย.** : กรุงเทพฯ.

กระทรวงอุตสาหกรรม. 2525. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.409-2525) วิธีการทดสอบความต้านทานของแท่งคอนกรีต.** : กรุงเทพฯ.

คมสัน มณีเมือง และ วีรภัทร์ ทองประชา . 2551. “กรณีศึกษาการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้ว.” ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เฉลิม เพ็ชรสูงเนิน . 2548. “การศึกษาการแอ่นตัวของคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้มวลรวมหยาบจากคอนกรีตที่ถูกทำลายภายใต้น้ำหนักคงค้าง.” วิทยานิพนธ์ครุศาสตรอุตสาหกรรมมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

วินิต ช่อวิเชียร. 2540. **การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก.** กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วินิต ช่อวิเชียร. 2540. **คอนกรีตเทคโนโลยี.** กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2544. **มาตรฐานการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน มาตรฐาน ว .ส.ท. 1000.38.** กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย.

ศรักริช หิรัญมาศ. 2550. **การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก.** กรุงเทพฯ : สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศิวะ วาสาลส. 2552. “อิทธิพล Foaming Agent ระบบ CLC ที่มีต่อแรงยึดเหนี่ยวในคอนกรีตเสริมเหล็ก.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ออมสิน ดำริห์. 2553. “การทำนายการแอ่นตัวเนื่องจากการคืบของคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีลดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

Alfarabi Sharif, G.J. Al-Sulaimani, I.A. Basunbul, M.H. Baluch and B.N. Ghaleh. “Sthengthening of Initially Loaded Reinforced Concrete Beams Using FRP Plate.” *ACI Structural Journal* Vol.91, March-April 1994. pp.160-168.

American Concrete Institute (ACI) 440.2R. 2003. **Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures.**

Hollaway, L. “Polymer Composites for Civil and Structural Engineering” **Blackie Academic & Professional** 1<sup>st</sup> Edit. 1993.

Sebastian, W.M. 2003. “Prediction of Interface Shear Stress in Elastoplastic Moment-Varying Zones of Advanced Composite Material-Strengthened Concrete Members.” Lecturer, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Bristol.



ภาคผนวก ก.

ก-1. วิธีการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต

ก-2. ส่วนผสมคอนกรีตมวลเบา

ก-3. การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ก-4. การคำนวณหาค่าน้ำหนักกระทำ

ก-5. การคำนวณหาค่ารับน้ำหนักประลัยของคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ก-1 วิธีการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต

กำหนดกำลังอัดประลัยเฉลี่ย  $f_c'$  ของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 240 ksc.

มาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบ

- กำหนดให้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีความถ่วงจำเพาะ 3.15
- มวลรวมหยาบขนาดโตสุด 20 mm. (3/4") มีความถ่วงจำเพาะ 2.70 ค่าการดูดซึม 0.5%
- มวลรวมละเอียดความถ่วงจำเพาะ 2.65 ค่าการดูดซึม 0.7% ค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.80
- แนวทางปฏิบัติต่างๆ ไปเห็นว่าควรใช้ค่าความยุบตัว 8 - 10 cm.
- กำหนดให้ใช้ขนาดโตสุดของวัสดุผสมหยาบเป็น 20 cm.

การออกแบบ

ขั้นตอนที่ (1)

ในการออกแบบจะต้องออกแบบคอนกรีตให้มีกำลังอัดมากกว่ากำลังอัดของงานที่กำหนดไว้ ดังสมการ

$$f_{cr} = f_c' + ks$$

โดยที่  $f_c'$  = กำลังอัดที่กำหนดไว้ในแบบ

$ks$  = ส่วนเผื่อซึ่งประกอบด้วย

$k$  = ค่าคงที่

$s$  = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังอัด จากก้อนตัวอย่าง 30 ค่า หรือมากกว่า

หรือ ส่วนเผื่อเมื่อไม่มีผลทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าส่วนเผื่อกำลังอัด

ค่ากำลังอัดที่กำหนด $f'_c$	กำลังอัดที่ต้องเพิ่ม
น้อยกว่า 210	70
210 - 350	85
350 หรือมากกว่า	100

ดังนั้นกำลังที่ต้องผลิต  $f_{cr} = 240 + 85 = 325 \text{ ksc.}$

ขั้นตอนที่ (2) ปริมาณน้ำที่ใช้และน้ำหนักซีเมนต์

- ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบเป็น 20 mm. ค่าความยุบตัว 8 - 10 cm. ไม่ต้องใช้สารกักกระจายฟองอากาศจะได้ปริมาณน้ำที่ต้องใช้เท่ากับ 200 ลิตร/ลบ.เมตร ของคอนกรีต

- คอนกรีตที่ต้องการกำลัง 325 ksc. และคอนกรีตไม่กระจายกักฟองอากาศ จะได้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนัก ที่ต้องใช้เท่ากับ 0.52

- น้ำหนักซีเมนต์ที่ต้องการเท่ากับ  $200/0.52$  เท่ากับ 385 kg.

ขั้นตอนที่ (3) หาปริมาณซีเมนต์

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรซีเมนต์} &= \text{น้ำหนักซีเมนต์/ความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์} \\ &= 385/3.15 \\ &= 123 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ (4) หาปริมาณทราย

โดยทั่วไปจะใช้ปริมาณปูน + ปริมาตรทรายเท่ากับ 40% โดยปริมาตร หรือ 400 ลิตร

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรทราย} &= 400 - 123 \\ &= 277 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ (5) หาน้ำหนักทราย

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักทราย} &= \text{ปริมาตรทราย} \times \text{ความถ่วงจำเพาะของทราย} \\ &= 277 \times 2.65 \\ &= 735 \text{ กก.} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ (6) หาปริมาตรหิน

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรหิน} &= 1,000 - \text{ปริมาตรซีเมนต์} - \text{ปริมาตรน้ำ} - \text{ปริมาตรทราย} \\ &= 1,000 - 123 - 200 - 277 \\ &= 400 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ (7) หาน้ำหนักของหิน

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักหิน} &= \text{ปริมาตรหิน} \times \text{ความถ่วงจำเพาะของหิน} \\ &= 400 \times 2.70 \\ &= 1,080 \text{ กก.} \end{aligned}$$

สรุป ส่วนผสมใน 1 ลบ.ม. คอนกรีตเป็นดังนี้

ซีเมนต์ 385 กก.

น้ำ 200 ลิตร

ทราย 735 กก.

หิน 1,080 กก.

รวม 2,390 กก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ก-2 ส่วนผสมคอนกรีตมวลเบา

หน่วยน้ำหนักออกแบบ 1,600, 1,700, 1,800, 1,900 และ 2,000 kg/m<sup>3</sup>

1. อัตราส่วนผสม ปูนซีเมนต์ต่อทรายละเอียด (โดยน้ำหนัก) = 1 : 1
2. อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) = 0.3
3. อัตราส่วนผสม สารเพิ่มฟองอากาศต่อน้ำ (โดยปริมาตร) = 1 : 30

### ก-3 การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน แสดงรายการคำนวณเพื่อตรวจสอบแรงเฉือน

$$\begin{aligned} \text{Allowable Shear Stress; } V &= 0.29\sqrt{f_c'} \\ &= 0.29\sqrt{240} \\ &= 4.49 \text{ ksc.} \end{aligned}$$

จาก  $V = P/A$

$$P = 4.49 \times 15 \times 26 = 1,752 \text{ kg.}$$

ซึ่งแรงเฉือนที่ยอมให้ต้านทานได้เพียง 1,752 kg. < 3,100 kg. (แรงกระทำ  $P$  ที่กระทำลงคาน)

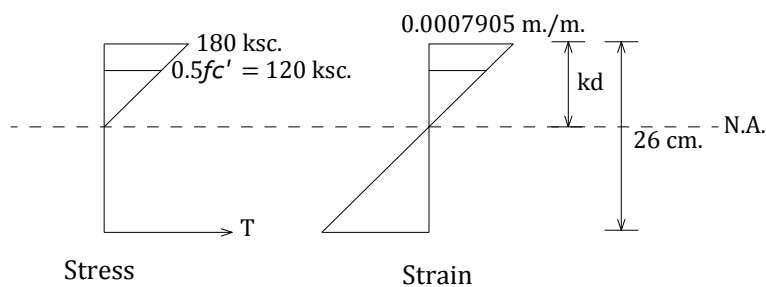
ดังนั้นจึงต้องใส่เหล็กเสริมรับแรงเฉือน

$$\begin{aligned} A_v &= \frac{V_s S}{f_v d} \\ &= \frac{(3,100 - 1,752)(12.5)}{1,200(26)} \\ &= 0.54 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

ใช้ RB6@12.50 cm. ระยะห่างมากที่สุด  $d/2 = 26/2 = 13$  ใช้ 12.50 cm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาเหล็กเสริมในคอนกรีต



รูปที่ ก.1 แสดงหน่วยแรง และความเครียดในหน้าตัดคาน

$$\varepsilon_c = \frac{f_c}{E_c} = \frac{180}{227,700} = 0.0007905 = 7.905 \times 10^{-4}$$

$$\frac{\varepsilon_s}{d - kd} = \frac{\varepsilon_c}{kd}$$

$$\varepsilon_s = \frac{7.905 \times 10^{-4} (26 - kd)}{kd}$$

$$\frac{1}{2} f_c b k d = A_s f_s$$

$$\frac{1}{2} (180)(15)(kd) = A_s \varepsilon_s E_s$$

$$1,350kd = 6.28 \times \left( \frac{7.905 \times 10^{-4} (26 - kd)}{kd} \right) \times 2.04 \times 10^6$$

$$1,350(kd)^2 = 263,308.6 - 10,127.25kd$$

$$1,350(kd)^2 + 10,127.25kd - 263,308.6 = 0$$

$$kd = 10.71 \text{ cm.}$$

ตรวจสอบค่า Stress ในเหล็กเมื่อใช้เหล็ก 2-DB20

$$\frac{180}{227,700} = 7.905 \times 10^{-4}$$

$$\varepsilon_s = \frac{7.905 \times 10^{-4} (26 - kd)}{kd}$$

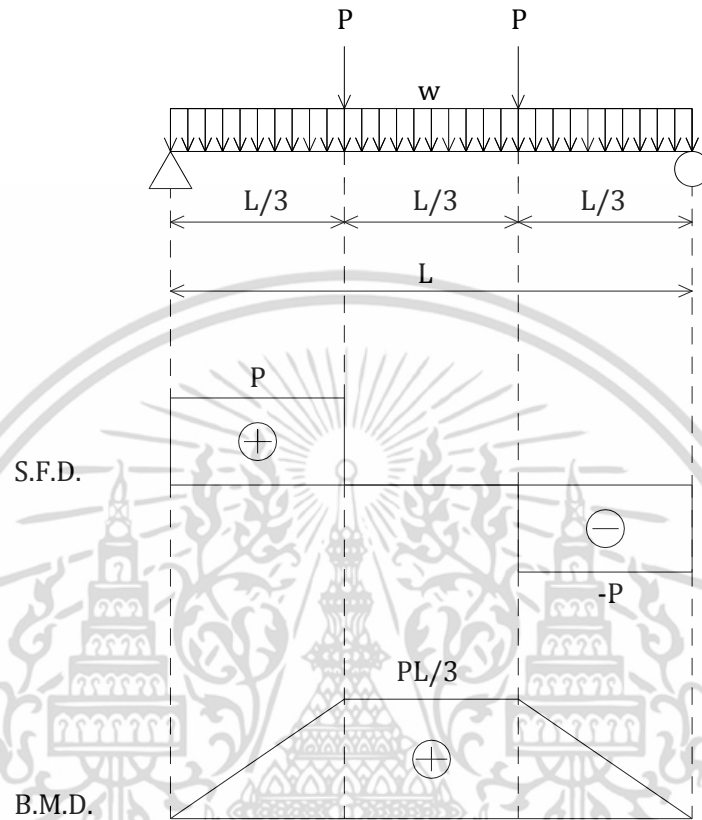
$$\varepsilon_s = 1.129 \times 10^{-3}$$

$$\sigma_s = 2,302.24 \text{ ksc.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### ก-4 การคำนวณหาค่าน้ำหนักกระทำ $P$

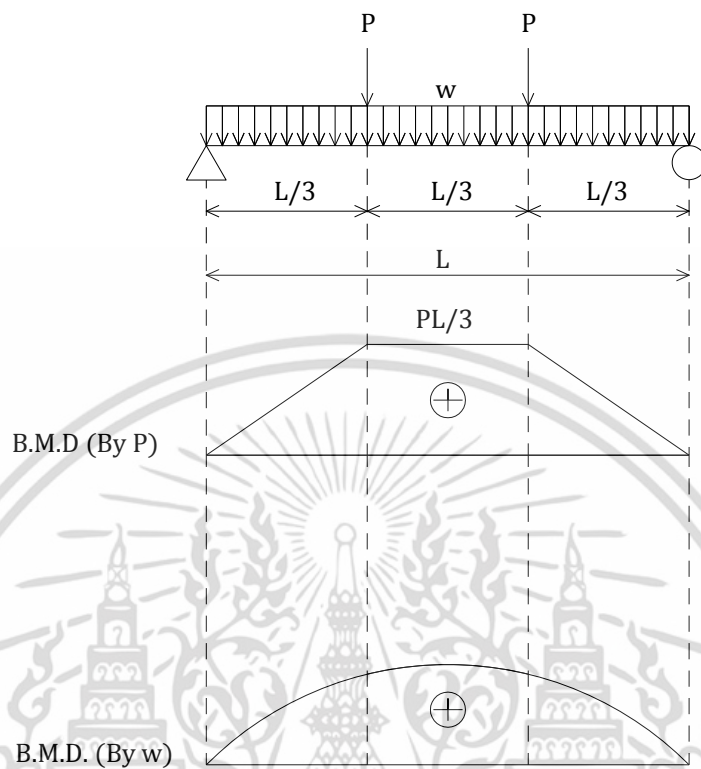
พิจารณาคานช่วงเดี่ยว (Simple Beam)



รูปที่ ก.2 แสดงแผนภาพของแรงเฉือน และแผนภาพของโมเมนต์ตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่โมเมนต์ที่พิจารณานั้นต้องพิจารณน้ำหนักเนื่องจากตัวของคานเอง ซึ่งถือว่ามิต่ำกว่ามาก  
เราจะนำมาพิจารณาเฉพาะหาค่าโมเมนต์ด้วยจะได้



รูปที่ ก.3 แสดงแผนภาพของแรงเฉือน และแผนภาพของโมเมนต์ตัด

$$M = \frac{PL}{3} + \left(\frac{WL}{2}\right)\left(\frac{L}{3}\right) - \left(\frac{WL}{3}\right)\left(\frac{L}{3}\right)\left(\frac{1}{2}\right)$$

$$= \frac{PL}{3} + \left(\frac{WL^2}{6}\right) - \left(\frac{WL^2}{18}\right) = \frac{PL}{3} + \left(\frac{WL^2}{9}\right)$$

แทนค่าลงในสมการ

$$M = \frac{P(3)}{3} + \left(\frac{108(3)^2}{9}\right)$$

$$= P + 108$$

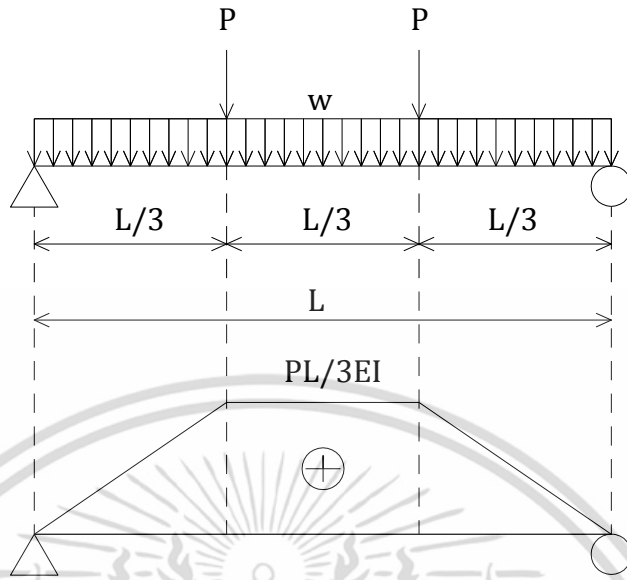
และจากการคำนวณจะได้ค่าโมเมนต์  $M = 3,167 \text{ kg-m}$ .

$$P = 3,167 - 108$$

$$= 3,059 \text{ kg}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาระยะแอนตัวของคาน



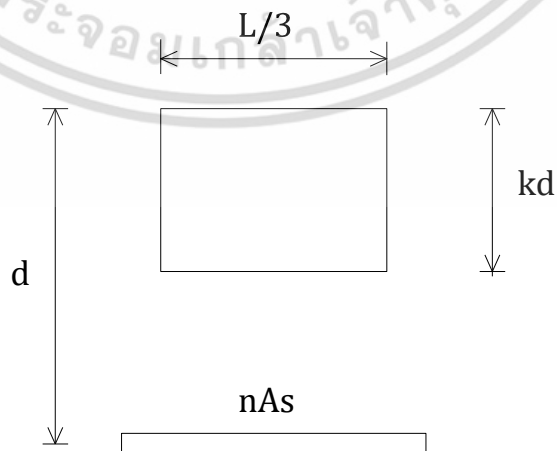
รูปที่ ก.4 แสดงน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำ และแผนภาพของโมเมนต์ตัด

$$R'_A = \frac{PL}{3EI} \cdot \frac{L}{3} \cdot \frac{1}{2} + \frac{PL}{3EI} \cdot \frac{L}{6} = \frac{PL^2}{9EI}$$

$$\Delta_i = \frac{PL^2}{9EI} \left(\frac{L}{2}\right) - \frac{PL^2}{18EI} \cdot \frac{5L}{18} - \frac{PL^2}{18EI} \cdot \frac{L}{12}$$

$$= \frac{PL^3}{18EI} - \frac{5PL^3}{324EI} - \frac{PL^3}{216EI}$$

$$\Delta_i = \frac{23PL^3}{648EI}$$



รูปที่ ก.5 หน้าตัดแปลงร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$kd = 10.71 \text{ cm.}$$

$$\begin{aligned} I_{cr} &= \frac{b(kd)^3}{3} + nA_s(d - kd)^2 \\ &= \frac{15(10.71)^3}{3} + 56.27(26 - 10.71)^2 \\ &= 19,297 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_g &= \frac{1}{12}bh^3 \\ &= \frac{1}{12}(15)(30)^3 = 33,750 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

$$f_r = 2\sqrt{f'_c} = 2\sqrt{240} = 30.98 \text{ ksc.}$$

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} = \frac{30.98(33,750)}{10.71} = 97,626 \text{ kg} \cdot \text{cm.}$$

หาระยะแอ่นตัวของคาน คสล. 3 ชั้น ตามวิธี ACI

$$\begin{aligned} I_e &= \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] \cdot I_{cr} \leq I_g \\ I_e &= \left(\frac{97,626}{305,900}\right)^3 \cdot 33,750 + \left[1 - \left(\frac{97,626}{305,900}\right)^3\right] \cdot 19,297 \leq 33,750 \\ &= 19,767 \text{ cm}^4 \leq 33,750 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

$$\Delta_i = K \left(\frac{23PL^3}{648E_c I_e}\right) + K \left(\frac{5WL^4}{384E_c I_e}\right)$$

$K = 1$  (สำหรับคานช่วงเดี่ยวธรรมดา)

$$\begin{aligned} \Delta_i &= 1 \left(\frac{23(3,059)(300)^3}{648(227,700)(19,767)}\right) + 1 \left(\frac{5(108/100)(300)^4}{384(227,700)(19,767)}\right) \\ &= 0.651 + 0.025 = 0.676 \text{ cm.} \end{aligned}$$

$$\lambda = \frac{\delta}{1+50p'} \quad p' = \frac{A_s'}{bd}$$

$$\delta = 1.4 \quad \text{สำหรับบรรทุกน้ำหนักค้างนาน 12 เดือน}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda = 1.4$$

$$\Delta_a = \lambda \Delta_i$$

$$= (1.4)(0.676) = 0.946$$

$$\Delta_T = \Delta_i + \Delta_a = 0.676 + 0.946 = 1.622 \text{ cm.}$$

#### ก-5 การหาค่าลึงประลัยของคาน คสล.

การหาค่าลึงรับโมเมนต์ดัดประลัยของคาน คสล. กลุ่มที่ 1

$$f_y = 4,000 \text{ ksc.} \quad f_c' = 240 \text{ ksc.} \quad \text{Section} = 15 \times 30 \text{ cm.}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก } M_n &= A_s f_y \left( d - 0.59 \frac{A_s f_y}{f_c' b} \right) \\ &= 6.28 \times 4,000 \left( 26 - 0.59 \left( \frac{6.28 \times 4,000}{240 \times 15} \right) \right) \\ &= 549,703.75 \text{ kg. cm.} \\ &= 5,497 \text{ kg. m.} \\ P &= M_n - 108 = 5,497 - 108 = 5,389 \text{ kg.} \end{aligned}$$

การหาค่าลึงรับโมเมนต์ดัดประลัยของคาน คสล. กลุ่มที่ 2

$$\begin{aligned} \text{จาก } M_n &= 4.02 \times 4,000 \left( 26 - 0.59 \left( \frac{4.02 \times 4,000}{240 \times 15} \right) \right) \\ &= 375,703.84 \text{ kg. cm.} \\ &= 3,757 \text{ kg. m.} \\ P &= M_n - 108 = 3,757 - 108 = 3,649 \text{ kg.} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่ากำลังรับโมเมนต์ตัดประลัยจากการเสริม CFRP ที่ท้องคาน

$$f_y = 4,000 \text{ ksc.} \quad f_c' = 240 \text{ ksc.}$$

- $T_f = 0.165 \text{ mm.}$
- $f_{fu} = 3,550 \text{ MPa} = 36,188 \text{ ksc.}$
- $E_f = 235 \text{ kN/mm}^2 = 2.3955 \times 10^6 \text{ ksc.}$

$$\begin{aligned} \text{จาก } M_n &= A_f f_y \left( d - \frac{0.59 A_s f_y + A_f f_f}{f_c' b} \right) \\ &\quad + \phi A_f f_f \left( h - \frac{0.59 A_s f_y + A_f f_f}{f_c' b} \right) \end{aligned}$$

การหาค่ากำลังรับโมเมนต์ตัดประลัยจากการเสริม CFRP ที่ท้องคาน คานกลุ่มที่ 1

$$\begin{aligned} M_n &= 6.28 \times 4,000 \left[ 26 - 0.59(6.28 \times 4,000) + \frac{15 \times 0.0165 \times 36,188}{240 \times 15} \right] \\ &\quad + 0.85 \times 15 \times 0.0165 \times 36,188 \left[ 30 - 0.59 + \frac{6.28 \times 4,000 + 15 \times 0.0165 \times 36,188}{240 \times 15} \right] \\ &= 512,830.71 + 185,874.42 \\ &= 698,705.13 \text{ kg. cm.} \\ &= 6,987 \text{ kg.m.} \\ P &= M_n - 108 = 6,987 - 108 = 6,879 \text{ kg.} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่ากำลังรับโมเมนต์ดัดประลัยจากการเสริม CFRP ที่ห้องคาน คานกลุ่มที่ 2

$$\begin{aligned}
 M_n &= 4.02 \times 4,000 \left[ 26 - 0.59 + \frac{(4.02 \times 4,000 + 15 \times 0.0165 \times 36,188)}{240 \times 15} \right] \\
 &+ 0.85 \times 15 \times 0.0165 \times 36,188 \left[ 30 - 0.59 + \frac{4.02 \times 4,000 + 15 \times 0.0165 \times 36,188}{240 \times 15} \right] \\
 &= 352,100.40 + 197,153.58 \\
 &= 549,253.68 \text{ kg. cm.} \\
 &= 5,493 \text{ kg. m.}
 \end{aligned}$$

$$P = M_n - 108 = 5,493 - 108 = 5,385 \text{ kg.}$$

การหาค่ากำลังรับแรงเฉือนประลัยของการเสริม CFRP ที่ด้านข้างคาน ACI 440.2R ทั้ง 2 กลุ่ม

$$- f_{fu}^* = 3,550 \text{ MPa} \quad - t_f = 0.165 \text{ mm}$$

$$- E_f = 235 \text{ kN/mm}^2$$

จาก  $V_f = A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) df/s_f$

$$A_{fv} = 2n t_f w_f = 2 \times 1 \times 0.165 \text{ mm.} \times 1,000 \text{ mm.} = 330 \text{ mm}^2$$

$$k_1 = (f_c'/27)^{2/3} (24/27)^{2/3} = 0.92$$

$$L_e = 23,300 / (n t_f E_f)^{0.58} = 23,300 / (1 \times 0.165 \text{ mm.} \times 235,000 \text{ N/mm}^2)^{0.58}$$

$$= 50.8 \text{ mm.}$$

$$k_2 = (d_f - L_e) / d_f \quad \text{กรณีหุ้มแบบรูปตัวยู U (3 ด้าน)}$$

$$= (260 - 50.8) / 260 = 0.80$$

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* = 0.95(3,550) = 3,372.5 \text{ MPa.}$$

$$\epsilon_{fu}^* = f_{fu}^* / E_f = 3,550 / 235,000 = 0.0151$$

$$\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^* = 0.95 \times 0.0151 = 0.0144$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_v = k_1 k_2 L_e / 11,900 \epsilon_{fu}$$

$$= (0.92)(0.80)(50.8) / 11,900(0.0144) = 0.22 < 0.75 \text{ o.k}$$

$$\epsilon_{fe} = K_v \epsilon_{fu} = 0.22 \times 0.0144 = 0.0032 < 0.004 \text{ o.k}$$

$$f_{fe} = \epsilon_{fe} E_f = 0.0032 \times 235,000 = 752 \text{ MPa.}$$

$$V_f = 330 \times 752(1+0) 260 / 1,000 = 64,521.6 \text{ N.}$$

$$V_f = 6,452 \text{ kg.}$$

ดังนั้น คานที่ไม่เสริมเหล็กปลอก แต่เสริม CFRP ที่ด้านข้างคานทั้งสองด้าน

มีกำลัง  $V_n = V_f + V_c = 6,452 + 3,202 \text{ kg.}$

$$V_n = 9,654 \text{ kg.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข.

ข-1. ข้อมูลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก

ข-2. ข้อมูลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกของคาน

ข-3. การคำนวณหาค่า  $k_d$  โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข-1 ข้อมูลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบคอนกรีตธรรมดาทรงกระบอกอายุ 28 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	น้ำหนัก (kg)	แรงอัดประลัย (kg)	กำลังอัดประลัย (ksc)	โมดูลัสยืดหยุ่น (ksc)	หน่วยน้ำหนัก (kg/m <sup>3</sup> )
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	ความสูง (cm)						
1	15.08	30.15	178.49	12.727	51269.11	290.26	321299.97	2365.02
2	15.17	30.13	180.68	12.950	53811.42	304.66	173001.85	2379.17
3	15.14	30.15	180.03	12.801	57415.90	325.06	247092.12	2358.39
4	15.08	30.18	178.60	12.806	56113.15	317.69	193958.23	2376.15
5	15.03	30.13	177.36	12.832	56807.34	321.62	142066.12	2401.62
เฉลี่ย						311.86	215483.66	2376.07

ตารางที่ ข.7 ผลการทดสอบคอนกรีตมวลเบาหน่วยน้ำหนัก 1,600 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอกอายุ 28 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	น้ำหนัก (kg)	แรงอัดประลัย (kg)	กำลังอัดประลัย (ksc)	โมดูลัสยืดหยุ่น (ksc)	หน่วยน้ำหนัก (kg/m <sup>3</sup> )
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	ความสูง (cm)						
1	15.07	30.10	178.37	8.930	39992.86	224.33	80175.35	1663.29
2	14.99	30.13	176.54	9.041	35677.88	202.20	58156.42	1700.01
3	15.00	30.05	176.71	8.978	35750.25	202.40	62222.52	1690.69
4	15.10	30.13	179.08	9.004	47702.34	266.51	55849.20	1669.03
5	15.06	30.15	178.19	8.909	47238.53	265.24	76058.60	1658.28
เฉลี่ย						232.13	66492.42	1676.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.19 ผลการทดสอบคอนกรีตมวลเบาหน่วยน้ำหนัก 1,800 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอกอายุ 28 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	น้ำหนัก (kg)	แรงอัดประลัย (kg)	กำลังอัดประลัย (ksc)	โมดูลัสยืดหยุ่น (ksc)	หน่วยน้ำหนัก (kg/m <sup>3</sup> )
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	ความสูง (cm)						
1	15.12	30.07	179.61	10.322	62528.03	353.07	131773.81	1910.98
2	15.01	30.00	176.95	10.165	68093.78	385.02	64116.83	1914.85
3	15.02	30.08	177.19	10.194	61842.00	349.19	133482.21	1912.97
4	15.02	30.10	177.25	10.168	72133.54	407.30	110932.42	1905.88
5	15.07	30.15	178.25	10.223	75692.15	424.85	69476.21	1902.23
เฉลี่ย						383.89	101956.30	1909.38

ตารางที่ ข.25 ผลการทดสอบคอนกรีตมวลเบาหน่วยน้ำหนัก 1,900 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอกอายุ 28 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	น้ำหนัก (kg)	แรงอัดประลัย (kg)	กำลังอัดประลัย (ksc)	โมดูลัสยืดหยุ่น (ksc)	หน่วยน้ำหนัก (kg/m <sup>3</sup> )
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	ความสูง (cm)						
1	15.04	30.05	177.54	10.626	57594.29	324.57	161176.27	1991.72
2	15.00	30.05	176.71	10.716	66082.57	374.13	75170.13	2017.98
3	15.23	30.15	182.24	10.980	91743.12	503.70	110028.25	1998.40
4	15.08	30.18	178.66	10.789	63287.46	354.41	143294.71	2001.23
5	15.03	30.05	177.48	10.731	94012.23	529.97	98561.58	2012.07
เฉลี่ย						417.36	117646.19	2004.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.31 ผลการทดสอบคอนกรีตมวลเบาหน่วยน้ำหนัก 2,000 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอกอายุ 28 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	น้ำหนัก (kg)	แรงอัดประลัย (kg)	กำลังอัดประลัย (ksc)	โมดูลัสยืดหยุ่น (ksc)	หน่วยน้ำหนัก (kg/m <sup>3</sup> )
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	ความสูง (cm)						
1	15.12	30.15	179.43	10.910	48838.94	270.53	123371.07	2016.65
2	15.06	30.13	178.01	10.907	71550.46	402.15	90114.58	2033.89
3	14.98	30.23	176.30	10.994	49739.04	282.27	198140.10	2063.15
4	15.17	30.18	180.62	11.141	50651.38	280.57	123134.13	2044.10
5	15.08	30.20	178.60	10.962	94719.67	530.61	189808.44	2032.31
เฉลี่ย						353.23	144913.67	2038.02

ข-2 ข้อมูลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกของคาน

ตารางที่ ข.37 ผลการทดสอบคอนกรีตมวลเบาหน่วยน้ำหนัก 1,850 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอกอายุ 28 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	น้ำหนัก (kg)	แรงอัดประลัย (kg)	กำลังอัดประลัย (ksc)	โมดูลัสยืดหยุ่น (ksc)	หน่วยน้ำหนัก (kg/m <sup>3</sup> )
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	ความสูง (cm)						
1	15.06	30.20	178.19	10.609	76985.73	432.26	104745.66	1971.44
2	15.09	30.05	178.78	10.677	74940.88	419.39	98562.43	1987.38
3	14.95	30.20	175.54	10.624	56065.24	319.55	138923.17	2004.05
4	15.11	30.03	179.38	10.672	70421.00	392.80	128384.14	1981.53
5	14.98	30.25	176.13	10.565	82524.97	468.79	102956.64	1982.99
เฉลี่ย						406.56	114714.41	1985.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

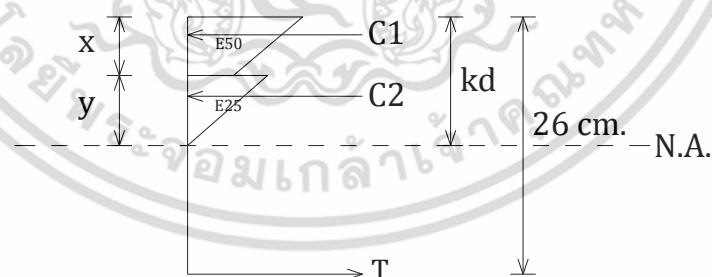
ตารางที่ ข.43 ผลการทดสอบคอนกรีตมวลเบาหน่วยน้ำหนัก  $1,950 \text{ kg/m}^3$  ทรงกระบอกอายุ 28 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่หน้าตัด ( $\text{cm}^2$ )	น้ำหนัก (kg)	แรงอัดประลัย (kg)	กำลังอัดประลัย (ksc)	โมดูลัสยืดหยุ่น (ksc)	หน่วยน้ำหนัก ( $\text{kg/m}^3$ )
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	ความสูง (cm)						
1	15.06	30.10	178.19	11.101	65713.56	371.73	187175.85	2069.72
2	15.08	30.23	178.49	11.055	91255.86	511.52	186343.69	2049.22
3	15.10	30.18	179.08	11.095	79726.81	445.40	125934.08	2053.22
4	15.03	30.18	177.30	11.053	87774.72	495.31	425642.51	2065.92
5	15.03	30.05	177.30	11.005	64907.24	366.27	187417.57	2065.51
เฉลี่ย						438.05	222502.74	2060.72

### ข-3. การคำนวณโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel

การหาระยะ 3 layer

การใช้โปรแกรม Microsoft Excel เพื่อหาค่าระยะ kd ดังภาพในกรณีที่คานเกิดการคืบแล้วที่ 1 ปี ซึ่งได้แบ่งคานออกเป็นสามชั้น โดยค่า Elastic Modulus ต่างกัน



รูปที่ ข.41 ภาพการสมดุลของโมเมนต์ในคาน 3 ชั้น

- ทำการหาค่า kd

สูตร จาก  $E_{50} = 95,222 \text{ kg/cm}^2$

$$E_{25} = 169,008 \text{ kg/cm}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_c = 227,700 \text{ kg/cm}^2$$

ให้ Stress 1 ที่ C.G. เป็น 50% ของ  $f_c'$  ดังนั้น

$$\sigma_{1 \text{ C.G.}} = 120 \text{ kg/cm}^2$$

ให้ Stress 2 ที่ C.G. เป็น 25% ของ  $f_c'$  ดังนั้น

$$\sigma_{2 \text{ C.G.}} = 60 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{จะได้ } \sigma_2 = 90 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_1 = \frac{120 \cdot k}{(k-x) + \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{(3-\frac{x}{k})}{(2-\frac{x}{k})} \cdot x\right)}$$

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_{50}}$$

$$\epsilon_2 = \frac{\epsilon_1 \cdot (kd - x)}{kd}$$

$$\epsilon_s = \frac{\epsilon_1 \cdot (26 - kd)}{kd}$$

$$\sigma_s = \epsilon_s \cdot 2.04 \cdot 10^6$$

$$\sigma_{12} = \frac{\sigma_1 \cdot (kd - x)}{kd}$$

$$C_1 = 15 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot (\sigma_1 + \sigma_{12}) \cdot x\right)$$

$$C_2 = 15 \cdot \frac{1}{2} \cdot (kd - x) \cdot \sigma_2$$

$$T = C_1 + C_2$$

$$T = \sigma_s \cdot 6.28$$

$$M = (C_1 \cdot (26 - x + \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{(3-\frac{x}{kd})}{(2-\frac{x}{kd})} \cdot x\right))) + (C_2 \cdot (26 - kd + \left(\frac{2}{3} \cdot (kd - x)\right)))$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.49 แสดงตัวอย่างการหาค่า N.A. ที่เหมาะสมที่สุดของคาน 3 ชั้นช่วงกึ่งกลางคาน กลุ่มที่ 1

kd	14.00	kd	14.50	kd	15.00
x	9.50	x	5.00	x	2.50
y	4.50	y	9.50	y	12.50
$\sigma_1$ c.g.	120.00	$\sigma_1$ c.g.	120.00	$\sigma_1$ c.g.	120.00
$\sigma_2$ c.g.	60.00	$\sigma_2$ c.g.	60.00	$\sigma_2$ c.g.	60.00
$\epsilon_1$	0.001753	$\epsilon_1$	0.001501	$\epsilon_1$	0.001371
$\epsilon_2$	0.000564	$\epsilon_2$	0.000983	$\epsilon_2$	0.001143
$\epsilon_s$	0.001503	$\epsilon_s$	0.001190	$\epsilon_s$	0.001005
$\sigma_s$	3065.68	$\sigma_s$	2428.59	$\sigma_s$	2051.03
$\sigma_1$	166.95	$\sigma_1$	142.93	$\sigma_1$	130.55
$\sigma_{12}$	53.66	$\sigma_{12}$	93.65	$\sigma_{12}$	108.79
$E_c$	227700.00	$E_c$	227700.00	$E_c$	227700.00
E25	169008.00	E25	169008.00	E25	169008.00
E50	95222.00	E50	95222.00	E50	95222.00
C1	15718.38	C1	8871.65	C1	4487.64
C2	3037.50	C2	6412.50	C2	8437.50
C	18755.88	C	15284.15	C	12925.14
T	19252.47	T	15251.55	T	12880.44
M	392358.00	M	324380.21	M	274364.01
C-T	-496.60	C-T	32.60	C-T	44.70

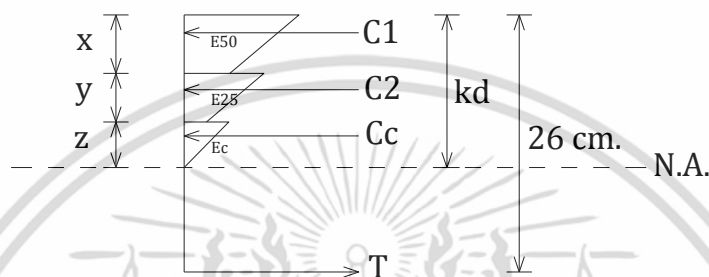
ตารางที่ ข.50 แสดงตัวอย่างการหาค่า N.A. ที่เหมาะสมที่สุดของคาน 3 ชั้นช่วงกึ่งกลางคาน กลุ่มที่ 2

kd	12.00	kd	12.50	kd	13.00
x	8.00	x	4.50	x	2.00
y	4.00	y	8.00	y	11.00
$\sigma_1$ c.g.	120.00	$\sigma_1$ c.g.	120.00	$\sigma_1$ c.g.	120.00
$\sigma_2$ c.g.	60.00	$\sigma_2$ c.g.	60.00	$\sigma_2$ c.g.	60.00
$\epsilon_1$	0.001745	$\epsilon_1$	0.001513	$\epsilon_1$	0.001362
$\epsilon_2$	0.000582	$\epsilon_2$	0.000968	$\epsilon_2$	0.001153
$\epsilon_s$	0.002036	$\epsilon_s$	0.001634	$\epsilon_s$	0.001362
$\sigma_s$	4152.90	$\sigma_s$	3332.47	$\sigma_s$	2778.65
$\sigma_1$	166.15	$\sigma_1$	144.03	$\sigma_1$	129.70
$\sigma_{12}$	55.38	$\sigma_{12}$	92.18	$\sigma_{12}$	109.75
$E_c$	227700.00	$E_c$	227700.00	$E_c$	227700.00
E25	169008.00	E25	169008.00	E25	169008.00
E50	95222.00	E50	95222.00	E50	95222.00
C1	13292.31	C1	7971.96	C1	3591.69
C2	2700.00	C2	5400.00	C2	7425.00
C	15992.31	C	13371.96	C	11016.69
T	16694.67	T	13396.51	T	11170.17
M	346292.31	M	292346.40	M	240866.92
C-T	-702.36	C-T	-24.55	C-T	-153.49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้โปรแกรม Microsoft Excel เพื่อหาค่าระยะ  $x, y, z$  ดังภาพ จากค่า  $kd$  ที่ได้คำนวณจากโปรแกรมข้างต้น ในกรณีที่คานเกิดการคืบแล้วที่ 1 ปี ซึ่งได้แบ่งคานออกเป็นสามชั้น โดยค่า Elastic Modulus ต่างกัน

การหาระยะ  $x, y, z$  จะแบ่งคานออกเป็นชั้นๆ ทีละ 1 ซม. เพื่อนำไปออกแบบบรยะโค้งแต่ละชั้นของคาน



รูปที่ ข.42 ภาพการสมดุลของโมเมนต์ในคาน 3 ชั้น

- ทำการหาค่าระยะ  $x, y, z$

จาก  $E_{50} = 95,222 \text{ kg/cm}^2$

$$E_{25} = 169,008 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_c = 227,700 \text{ kg/cm}^2$$

ให้ Stress 1 ที่ C.G. เป็น 50% ของ  $f_c'$  ดังนั้น

$$\sigma_{1 \text{ c.g.}} = 120 \text{ kg/cm}^2$$

ให้ Stress 2 ที่ C.G. เป็น 25% ของ  $f_c'$  ดังนั้น

$$\sigma_{2 \text{ c.g.}} = 60 \text{ kg/cm}^2$$

จะได้  $\sigma_c = 24 \text{ kg/cm}^2$  (ใช้ 10% ของ Strength เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงจากการคืบน้อยมาก) ดังนั้น

$$\sigma_{c \text{ c.g.}} = 16 \text{ kg/cm}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_1 = \frac{120 \cdot kd}{(kd-x) + \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{(3-\frac{x}{kd})}{(2-\frac{x}{kd})} \cdot x\right)}$$

$$\sigma_2 = \frac{60 \cdot (kd-x)}{(kd-x-y) + \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{(3-\frac{y}{kd-x})}{(2-\frac{y}{kd-x})} \cdot y\right)}$$

$$C_1 = 15 \cdot \left(\frac{1}{2}(\sigma_1 + (\sigma_1 - \frac{\sigma_1 \cdot x}{kd}))\right) \cdot x$$

$$C_2 = 15 \cdot \left(\frac{1}{2}(\sigma_2 + (\sigma_2 - \frac{\sigma_2 \cdot y}{kd-x}))\right) \cdot y$$

$$C_c = \frac{1}{2} \cdot 24 \cdot 15 \cdot (kd-x-y)$$

$$M = (C_1 \cdot (26-x + \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{(3-\frac{x}{kd})}{(2-\frac{x}{kd})} \cdot x\right))) \\ + (C_2 \cdot (26-x-y + \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{(3-\frac{y}{kd-x})}{(2-\frac{y}{kd-x})} \cdot y\right))) \\ + (C_c \cdot (26-kd + \left(\frac{2}{3} \cdot (kd-x-y)\right)))$$

$$C_1 + C_2 + C_c = T$$

$$T = \left(\frac{\sigma_1}{95,222}\right) \cdot \left(\frac{(26-kd)}{kd}\right) \cdot 2,040,000 \cdot 6.28$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.51 แสดงตัวอย่างการหาค่า N.A. ที่เหมาะสมที่สุดของคาน 3 ชั้นช่วงกึ่งกลางคาน กลุ่มที่ 1

X	kd	x	y	z	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_{12}$	$\sigma_{2c}$	$\sigma_s$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_s$
0.95	14.80	3.40	9.46	1.94	134.82	87.83	103.84	14.95	2185.70	0.001416	0.001091	0.001071
0.90	15.00	2.80	9.42	2.78	131.89	86.35	107.27	19.68	2072.04	0.001385	0.001127	0.001016
0.85	15.20	2.10	9.95	3.15	128.67	85.99	110.89	20.68	1958.60	0.001351	0.001165	0.000960
0.80	15.45	1.50	10.04	3.91	126.01	84.80	113.78	23.77	1843.46	0.001323	0.001195	0.000904
0.75	15.70	0.98	10.10	4.62	123.82	83.72	116.09	26.28	1740.34	0.001300	0.001219	0.000853
0.70	16.00	0.38	10.29	5.33	121.44	82.81	118.55	28.26	1626.01	0.001275	0.001245	0.000797
0.61	16.72	0.00	8.68	8.04	120.00	77.85	120.00	37.42	1426.88	0.001260	0.001260	0.000699
0.55	17.40	0.00	6.90	10.50	120.00	73.34	120.00	44.26	1270.65	0.001260	0.001260	0.000623
0.50	18.00	0.00	5.55	12.45	120.00	70.16	120.00	48.53	1142.60	0.001260	0.001260	0.000560
0.45	18.50	0.00	4.50	14.00	120.00	67.87	120.00	51.36	1042.23	0.001260	0.001260	0.000511
0.40	19.14	0.00	3.27	15.87	120.00	65.41	120.00	54.24	921.42	0.001260	0.001260	0.000452
0.35	19.70	0.00	2.25	17.17	120.00	63.56	120.00	56.30	822.15	0.001260	0.001260	0.000403
0.30	20.30	0.00	1.23	19.07	120.00	61.85	120.00	58.11	721.86	0.001260	0.001260	0.000354
0.24	21.06	0.00	0.00	21.06	120.00	60.00	120.00	60.00	603.49	0.001260	0.001260	0.000296
0.20	21.06	0.00	0.00	21.06	120.00	60.00	120.00	60.00	603.04	0.001260	0.001260	0.000296
0.10	21.06	0.00	0.00	21.06	120.00	60.00	120.00	60.00	603.04	0.001260	0.001260	0.000296

ตารางที่ ข.52 แสดงตัวอย่างการหาค่า N.A. ที่เหมาะสมที่สุดของคาน 3 ชั้นช่วงกึ่งกลางคาน กลุ่มที่ 1 (ต่อ)

X	kd	x	y	z	C1	C2	Cc	C	T	C-T	M Require	M
0.95	14.80	3.40	9.46	1.94	6085.84	7291.70	349.20	13726.74	13726.23	0.51	2906.18	2911.51
0.90	15.00	2.80	9.42	2.78	5022.26	7490.64	500.40	13013.30	13012.42	0.88	2753.22	2761.18
0.85	15.20	2.10	9.95	3.15	3773.07	7960.19	567.00	12300.26	12300.04	0.22	2600.26	2602.80
0.80	15.45	1.50	10.04	3.91	2697.66	8174.88	703.80	11576.34	11576.94	-0.61	2447.31	2443.46
0.75	15.70	0.98	10.10	4.62	1763.39	8332.50	831.60	10927.49	10929.32	-1.84	2294.35	2298.45
0.70	16.00	0.38	10.29	5.33	683.97	8571.70	959.40	10215.07	10211.34	3.73	2141.39	2133.83
0.61	16.72	0.00	8.68	8.04	0.00	7507.66	1446.48	8954.14	8960.81	-6.67	1866.07	1875.85
0.55	17.40	0.00	6.90	10.50	0.00	6085.92	1890.00	7975.92	7979.67	-3.74	1682.52	1684.52
0.50	18.00	0.00	5.55	12.45	0.00	4940.29	2241.00	7181.29	7175.51	5.78	1529.57	1521.00
0.45	18.50	0.00	4.50	14.00	0.00	4024.28	2520.00	6544.28	6545.23	-0.95	1376.61	1384.15
0.40	19.14	0.00	3.27	15.87	0.00	2934.47	2856.60	5791.07	5786.52	4.54	1223.65	1214.67
0.35	19.70	0.00	2.25	17.17	0.00	2022.53	3141.00	5163.53	5163.09	0.44	1070.70	1066.85
0.30	20.30	0.00	1.23	19.07	0.00	1106.64	3432.60	4539.24	4533.30	5.94	917.74	913.05
0.24	21.06	0.00	0.00	21.06	0.00	0.00	3790.26	3790.26	3789.92	0.34	718.90	719.43
0.20	21.06	0.00	0.00	21.06	0.00	0.00	3790.80	3790.80	3787.08	3.72	611.83	719.49
0.10	21.06	0.00	0.00	21.06	0.00	0.00	3790.80	3790.80	3787.08	3.72	305.91	719.49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.53 แสดงตัวอย่างการหาค่า N.A. ที่เหมาะสมที่สุดของคาน 3 ชั้นช่วงกึ่งกลางคาน กลุ่มที่ 2

X	kd	x	y	z	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_{12}$	$\sigma_{2c}$	$\sigma_s$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_s$
0.95	12.75	3.30	7.92	1.53	136.83	88.01	101.42	14.25	3046.36	0.001437	0.001065	0.001493
0.90	13.00	2.90	7.14	2.96	134.36	84.39	104.39	24.73	2878.47	0.001411	0.001096	0.001411
0.85	13.30	2.50	6.67	4.13	131.97	81.39	107.17	31.12	2699.84	0.001386	0.001125	0.001323
0.80	13.60	2.10	6.42	5.08	129.74	79.27	109.70	35.02	2534.20	0.001362	0.001152	0.001242
0.75	13.90	1.75	6.19	5.96	127.87	77.49	111.77	38.01	2384.68	0.001343	0.001174	0.001169
0.70	14.20	1.25	6.38	6.57	125.44	76.87	114.39	39.00	2233.12	0.001317	0.001201	0.001095
0.65	14.60	0.90	6.09	7.61	123.77	75.10	116.14	41.72	2070.51	0.001300	0.001220	0.001015
0.60	14.80	0.00	7.51	7.29	120.00	77.42	120.00	38.13	1945.50	0.001260	0.001260	0.000954
0.55	15.33	0.00	6.33	9.00	120.00	73.93	120.00	43.42	1789.36	0.001260	0.001260	0.000877
0.50	16.00	0.00	5.04	10.96	120.00	70.40	120.00	48.22	1606.78	0.001260	0.001260	0.000788
0.45	16.60	0.00	4.00	12.60	120.00	67.80	120.00	51.46	1455.78	0.001260	0.001260	0.000714
0.40	17.30	0.00	2.91	14.39	120.00	65.33	120.00	54.33	1292.85	0.001260	0.001260	0.000634
0.35	17.90	0.00	2.02	15.88	120.00	63.51	120.00	56.34	1163.34	0.001260	0.001260	0.000570
0.24	19.43	0.00	0.00	19.43	120.00	60.00	120.00	60.00	869.30	0.001260	0.001260	0.000426
0.10	19.43	0.00	0.00	19.43	120.00	60.00	120.00	60.00	869.30	0.001260	0.001260	0.000426

ตารางที่ ข.54 แสดงตัวอย่างการหาค่า N.A. ที่เหมาะสมที่สุดของคาน 3 ชั้นช่วงกึ่งกลางคาน กลุ่มที่ 2 (ต่อ)

X	kd	x	y	z	C1	C2	Cc	C	T	C-T	M <sub>Require</sub>	M
0.95	12.75	3.30	7.92	1.53	5896.57	6074.50	275.40	12246.47	12246.38	0.09	2674.69	2676.13
0.90	13.00	2.90	7.14	2.96	5192.72	5843.79	532.80	11569.31	11571.45	-2.14	2533.92	2537.05
0.85	13.30	2.50	6.67	4.13	4483.92	5628.54	743.40	10855.86	10853.34	2.51	2393.14	2389.54
0.80	13.60	2.10	6.42	5.08	3771.20	5502.97	914.40	10188.57	10187.50	1.07	2252.37	2247.74
0.75	13.90	1.75	6.19	5.96	3145.27	5362.18	1072.80	9580.25	9586.43	-6.17	2111.60	2116.58
0.70	14.20	1.25	6.38	6.57	2248.41	5544.56	1182.60	8975.57	8977.13	-1.55	1970.82	1976.77
0.65	14.60	0.90	6.09	7.61	1619.45	5335.74	1369.80	8325.00	8323.46	1.54	1830.05	1831.77
0.60	14.80	0.00	7.51	7.29	0.00	6508.26	1312.20	7820.46	7820.93	-0.47	1689.28	1686.20
0.55	15.33	0.00	6.33	9.00	0.00	5568.80	1620.54	7189.34	7193.23	-3.89	1548.51	1557.16
0.50	16.00	0.00	5.04	10.96	0.00	4483.77	1972.80	6456.57	6459.25	-2.68	1407.73	1401.26
0.45	16.60	0.00	4.00	12.60	0.00	3577.62	2268.00	5845.62	5852.23	-6.61	1266.96	1265.60
0.40	17.30	0.00	2.91	14.39	0.00	2615.23	2589.48	5204.71	5197.27	7.44	1126.19	1116.66
0.35	17.90	0.00	2.02	15.88	0.00	1815.84	2858.40	4674.24	4676.64	-2.40	985.41	988.28
0.24	19.43	0.00	0.00	19.43	0.00	0.00	3497.40	3497.40	3494.58	2.82	675.71	682.81
0.10	19.43	0.00	0.00	19.43	0.00	0.00	3497.40	3497.40	3494.58	2.82	281.55	682.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

สมชาย ศักดิ์สิทธิ์พร, รศ.สุวัฒน์ ธีรเศรษฐ์, ผศ.ศักดิ์ชัย สกานพงษ์, “การเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กเก่าด้วยคาร์บอนไฟเบอร์”, การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 52, เล่มที่ 5, หน้า 9-16, ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ, 4-7 กุมภาพันธ์ 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**KASETSART UNIVERSITY ANNUAL CONFERENCE**

**Agricultural Sciences:  
Leading Thailand to World Class Standards**

เกษตรศาสตร์นำไทยสู่มาตรฐานสากล



เล่มที่ **5**

สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์

และวิศวกรรมศาสตร์

Architecture and Engineering

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กเก่าด้วยคาร์บอนไฟเบอร์

## THE STRENGTHENING OF OLD REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH CFRP

สมชาย ศักดิ์สิทธิ์พร<sup>1</sup> สุวัฒน์ ธีรเศรษฐ์<sup>1</sup> และศักดิ์ชัย สกานูพงษ์<sup>1</sup>Somchai Saksittiporn<sup>1</sup>, Suwat Dhirasedh<sup>1</sup> and Sakchai Skanupong<sup>1</sup>

## บทคัดย่อ

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้งานมาเป็นระยะเวลาอันยาวนาน ย่อมส่งผลกระทบต่อกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้าง เนื่องจากการคืบของคอนกรีต และส่งผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ลดลงตามมาด้วย การเสริมกำลังทำได้หลายวิธี เช่น การเพิ่มค้ำยัน การเสริมด้วยแผ่นเหล็ก ซึ่งเป็นวิธีที่ค่อนข้างยุ่งยาก และใช้เวลามาก เพื่อแก้ปัญหาจึงได้นำคาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Reinforced Polymer : CFRP) มาใช้ การทดสอบกำลังของโครงสร้างที่เสริมกำลังแล้ว ทำได้เพียงถึงน้ำหนักบรรทุกใช้งาน เพราะยังต้องใช้งานอยู่ ดังนั้นการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP จนถึงจุดวิบัติจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจยิ่ง จุดประสงค์ของการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ของกำลังรับน้ำหนัก การแอ่นตัว ความเค้น และความเครียด โดยวิธีการทดสอบคานตัวอย่างได้ให้น้ำหนักบรรทุกไปก่อน 60 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักบรรทุกประลัย หลังจากนั้นค่อยทำการเสริมกำลังด้วย CFRP

## ABSTRACT

When buildings have been used for a long time, carrying load capacity of the buildings will be affected. This is because the creep of the concrete results in the decreasing of the elastic modulus. The strengthening can be done in many ways such as increasing of bracing, supplement of steel plates which are quite difficult and time-consuming. For solving these problems, CFRP was adopted. Typically the strength testing of strengthened structure can be performed under service load only because the structure is routinely used. Therefore, the testing of reinforced concrete beams with CFRP until the critical points is very interesting. The purpose of the experiment is to find relationships between loadings with deflections, stresses and strains. The testing method of beam samples applied load amount 60 percent of ultimate load, and after that strengthened the samples with CFRP.

Key Words: Creep, Carbon Fiber Reinforced Polymer, Reinforced Concrete, Strengthening

e-mail address: neng\_yo@hotmail.com

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทนำ

โครงสร้างอาคารส่วนมากในประเทศไทยเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งอาคารบางแห่งใช้งานมาเป็นระยะเวลาาน หรือโครงสร้างต้องรับน้ำหนักมากกว่าที่ออกแบบไว้ เช่น การต่อเติมอาคาร เปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากที่ออกแบบไว้ หรือต้องรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นโดยไม่ได้คาดคิดไว้ ย่อมส่งผลกระทบต่อกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้าง เนื่องจากการคืบของคอนกรีต และส่งผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ลดลงตามมาด้วยการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมทำได้หลายวิธี เช่นการเพิ่มองค์อาคาร การเพิ่มค้ำยัน การเสริมด้วยแผ่นเหล็ก ซึ่งเป็นวิธีที่ค่อนข้างยุ่งยาก และใช้เวลามาก เพื่อแก้ปัญหาจึงได้มีการนำคาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber Reinforced Polymer : CFRP) มาใช้ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนของกำลังต่อน้ำหนักที่สูง มีความต้านทานการผุกร่อนสูง มีน้ำหนักเบา และมีความสามารถในการดูดซับพลังงานสูง (Hollaway, 1993) ในการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก การทดสอบกำลังของโครงสร้างที่เสริมกำลังแล้ว ทำได้เพียงถึงน้ำหนักบรรทุกใช้งาน แต่ไม่สามารถทดสอบถึงกำลังประลัยได้เพราะยังต้องใช้งานอยู่ ดังนั้นการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP จนถึงจุดวิบัติจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจยิ่ง จุดประสงค์ของการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ ของกำลังรับน้ำหนัก ค่าการแอ่นตัว ค่าความเค้น ค่าความเครียด และกำลังรับโมเมนต์ดัดของคานเมื่อเสริมกำลังหรือซ่อมแซมด้วย CFRP งานวิจัยนี้ได้ลดระยะเวลาในการทดสอบให้น้อยลงด้วยทฤษฎีการคืบ โดยใช้คานคอนกรีตธรรมดา และคอนกรีตมวลเบา เนื่องจากคอนกรีตมวลเบา มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา โดยเทียบให้เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคานคอนกรีตธรรมดาที่รับน้ำหนักกระทำมาเป็นเวลานาน วิธีการทดสอบคานตัวอย่างได้ให้น้ำหนักบรรทุกไปก่อน 60 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักบรรทุกประลัย หลังจากนั้นค่อยทำการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมด้วย CFRP เพื่อจำลองการทดสอบให้เหมือนกับสภาวะใช้งานจริงๆ แล้วจึงทดสอบต่อจนคานถึงจุดวิบัติ

## อุปกรณ์และวิธีการ

### ทฤษฎีการวิเคราะห์

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากการคืบของคอนกรีต การคำนวณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่เวลาต่างๆ จะใช้สมการซึ่งเป็นสมการอ้างอิงที่ได้จากมาตรฐาน ACI 209R-82

$$E_{cs}(t) = \frac{E_c}{1+\phi(t)}$$

$E_{cs}$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ณ เวลา  $t$ ,  $E_c$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเมื่อมีน้ำหนักกระทำปกติใช้ที่การบ่ม 28 วัน,  $\phi(t)$  = สัมประสิทธิ์การคืบ

จากงานวิจัยที่ผ่านมา (เฉลิม, 2548) ได้มีการศึกษาเกี่ยวน้ำหนักบรรทุกค้ำทั้ง 40% และ 60% ของน้ำหนักบรรทุกประลัยของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัส

ยืดหยุ่นกับเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักบรรทุกประลัย ดังรูป Figure 1(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

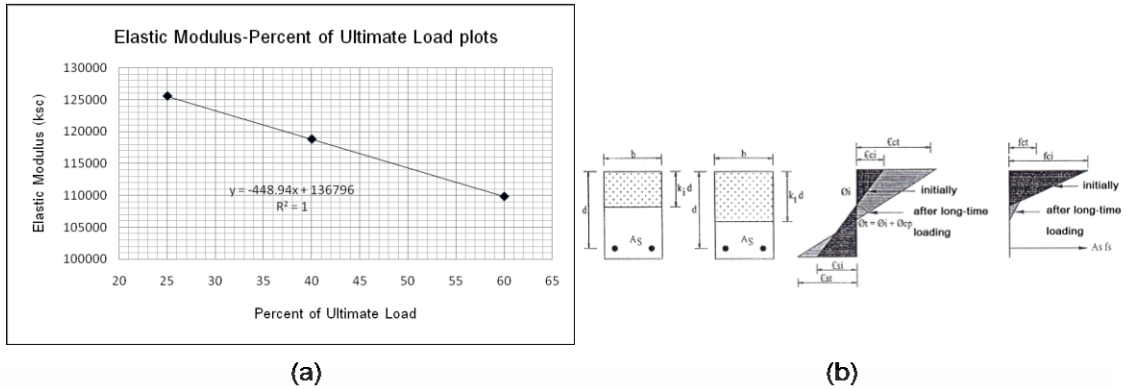


Figure 1 (a) Elastic modulus-percent of ultimate load (b) Stress-Strain under sustained loads (Samra, 1997)

จากงานวิจัยที่ผ่านมา (ออมสิน, 2553) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบา จะได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่รับน้ำหนักบรรทุก 50% (E50) และ 25% (E25) ของน้ำหนักบรรทุกปกติเท่ากับ 95,222 กก./ตร.ซม. และ 169,008 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ และจากการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาที่หน่วยน้ำหนักต่างๆ จะได้ค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาเท่ากับ 1,850 กก./ลบ.ม. และ 1,950 กก./ลบ.ม. ตามลำดับ

การแอ่นตัวทันที มาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท ให้พิจารณาหาการแอ่นตัวทันทีมากที่สุดโดยใช้ทฤษฎีอิลาสติก ของการวิเคราะห์โครงสร้างสำหรับส่วนโครงสร้างที่เสริมเหล็กทางเดียวและน้ำหนักบรรทุกใช้งานดังนี้

$$\Delta_i = \frac{K W_d L^2}{E_c I_e}$$

การแอ่นตัวที่เพิ่มขึ้นตามกาลเวลา มาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท ให้พิจารณาระยะโค้งที่เพิ่มขึ้นตามกาลเวลาเนื่องจากการคืบและการหดตัวของคอนกรีตดังรูป Figure 1(b) โดยจากการคูณระยะโค้งทันทีที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกค้ำ ( $\Delta_{i,sus}$ ) ด้วยตัวประกอบเนื่องจากการค้ำ (creep factor :  $\lambda$ ) นั่นคือ

ค่าการแอ่นตัวที่เพิ่มขึ้นตามกาลเวลา

$$\Delta_a = \lambda \Delta_{i,sus}$$

ตัวคูณประกอบเนื่องจากการค้ำ

$$\lambda = \frac{\xi}{1 + 50 \rho'} \quad \text{โดยที่ } \rho' = \text{อัตราส่วน } A_s' / bd$$

$\xi$  = ตัวประกอบตามกาลเวลาที่มีน้ำหนักบรรทุกค้ำ (time-dependent factor) มีค่า 2.0 เมื่อ

บรรทุกคงค้ำ 5 ปี หรือมากกว่า, 1.4 คงค้ำ 12 เดือน, 1.2 คงค้ำ 6 เดือน, 1.0 คงค้ำ 3 เดือน

ดังนั้น การโค้งตัวทั้งหมด 
$$\Delta_t = \Delta_i + \Delta_a$$

Carbon Fiber Reinforced Polymer: CFRP โดยทั่วไป CFRP จะมีคุณสมบัติรับแรงดึงได้สูงกว่าเหล็กมาก แต่การรับแรงอัดจะต่ำกว่าหลายเท่า CFRP จะใช้เสริมกำลังด้านรับแรงดึงเช่นเดียวกับเหล็กเสริม

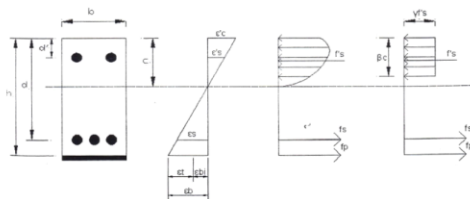


Figure 2 Stress and strain distributions of strengthened beam

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหา Nominal moment capacity ของคานซึ่งเสริมกำลังด้วย CFRP จากมาตรฐาน ACI Committee 440 มีสมการเบื้องต้นดังนี้

$$M_n = A_s f_c \left( d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + A'_s f_s \left( \frac{\beta_1 c}{2} - d \right) + \phi A_f f_f \left( h - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

**วิธีการทดสอบ**

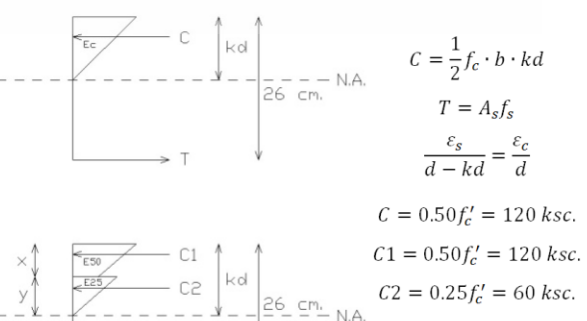
การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยได้ทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) คือการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก ตามมาตรฐาน มอก. 409-2525 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเส้นกลมและเหล็กข้ออ้อย ตามมาตรฐาน มอก. 20-2543 และ มอก. 24-2536 ตามลำดับ

**ตัวอย่างทดสอบ**

ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการทดลองเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวที่มีหน้าตัดกว้าง 0.15 ม. ลึก 0.30 ม. และยาว 3.30 ม. กำลังอัดประลัย ( $f'_c$ ) 240 กก./ตร.ซม. จำนวน 10 ตัวอย่าง ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรก เสริมเหล็ก 2-DB20 ชั้นคุณภาพ SD40 เป็นคานคอนกรีตธรรมดาไม่เสริมเหล็กปลอกจำนวน 1 ตัวอย่าง และเสริมเหล็กปลอก RB6@12.50 ซม. เว้นระยะ L/3 ช่วงกึ่งกลางคาน จำนวน 1 ตัวอย่าง คานคอนกรีตธรรมดา และคอนกรีตมวลเบา 3 ชั้น โดยชั้นล่างสุดของคานเป็นคอนกรีตธรรมดา และชั้นถัดมาเป็นคอนกรีตมวลเบาที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก 1,950 กก./ลบ.ม. และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E25 ที่มีน้ำหนักบรรทุกคงค้างที่ 25%) 169,008 กก./ตร.ซม. ชั้นบนสุดเป็นคอนกรีตมวลเบาที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก 1,850 กก./ลบ.ม. และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E50 ที่มีน้ำหนักบรรทุกคงค้างที่ 50%) 95,222 กก./ตร.ซม. เสริมเหล็กปลอก RB6@12.50 ซม. จำนวน 2 คาน โดยคานชนิดนี้เปรียบเสมือนคานเก่าที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 1 ปี และคานมีน้ำหนักกระทำมาแล้ว 60% ของน้ำหนักประลัย แล้วเสริม CFRP ที่ห่อคาน จำนวน 1 ตัวอย่าง อีกหนึ่งตัวอย่างไม่เสริม โดย CFRP ที่ใช้มีความหนา 0.165 มม. ค่ากำลังดึงประลัย 35,500 กก./ตร.ซม. และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 2,350,000 กก./ตร.ซม. ตัวอย่างสุดท้ายคานคอนกรีตธรรมดา และคอนกรีตมวลเบา 3 ชั้นไม่เสริมเหล็กปลอก เสริม CFRP ที่ห่อ และด้านข้างคานทั้งสองด้าน ส่วนคานกลุ่มที่สอง เปลี่ยนเหล็กเสริมเป็น 2-DB16 ชั้นคุณภาพ SD40 แทน

Figure 3 (a) Steel reinforcement and CFRP of beams (b) Stress and strain distributions

Beam No.	Re-Bar	Layer	Stirrup	CFRP
B20L1	2-DB20	1	-	Unstrengthened
B20L1-S	2-DB20	1	RB6@12.50 cm	Unstrengthened
B20L3-S	2-DB20	3	RB6@12.50 cm	Unstrengthened
B20L3-SF	2-DB20	3	RB6@12.50 cm	Flexural-Strengthened
B20L3F	2-DB20	3	-	Flexural plus Shear-Strengthened
B16L1	2-DB16	1	-	Unstrengthened
B16L1-S	2-DB16	1	RB6@12.50 cm	Unstrengthened
B16L3-S	2-DB16	3	RB6@12.50 cm	Unstrengthened
B16L3-SF	2-DB16	3	RB6@12.50 cm	Flexural-Strengthened
B16L3F	2-DB16	3	-	Flexural plus Shear-Strengthened



เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินส่วนราชการ การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

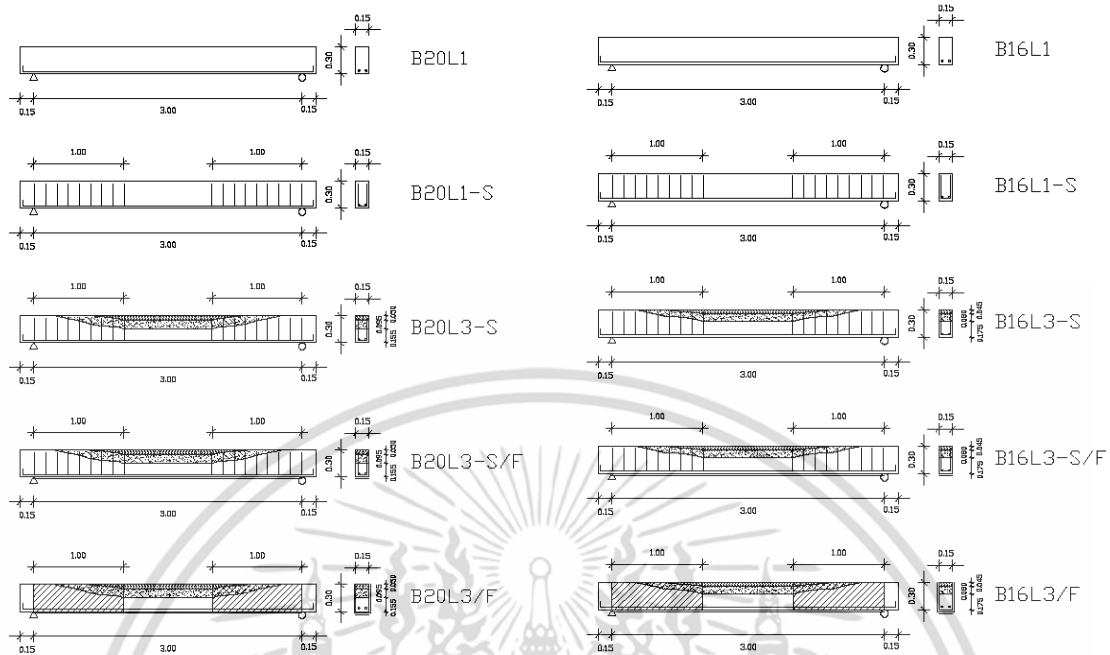
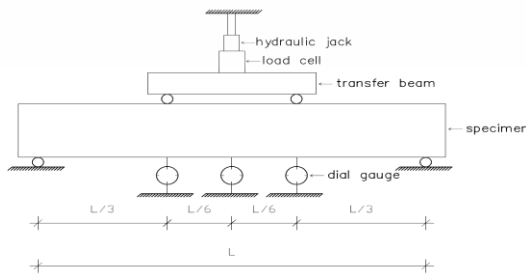


Figure 4 Details of RC Beam (Units: m.)

สำหรับการออกแบบหน้าตัดคาน จะใช้สมมูลของแรงภายในที่  $C = T$  เพื่อหาตำแหน่งของแนวสะเทินที่ทำให้แรงหน้าตัดมีค่าใกล้เคียงกัน ดังรูป Figure 3(b)

**วิธีการทดสอบและการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ**

ขั้นตอนการทดสอบตัวอย่างคานมี ดังนี้ 1) ติดตั้งตัวอย่างคานทดสอบเข้ากับ loading frame ดังรูป Figure 5 โดยจุดรองรับของคานทั้งสองด้านจะเป็นแบบหมุด 2) ติดตั้ง dial gauge ที่ตำแหน่งกึ่งกลางความยาวคาน 1 ตัว และที่ระยะเท่ากับ  $L/6$  ถัดจาก dial gauge ตัวแรกไปด้านซ้ายและขวา ด้านละ 1 ตัว 3) ติดตั้ง data logger เข้ากับ strain gauge indicator 4) การทดสอบตัวอย่างคานกระทำแบบ four points loading test โดยใช้เหล็ก I-beam ถ่ายแรงจาก hydraulic pump ขับน้ำมัน hydraulic ไปยัง hydraulic ram อย่างช้าๆ บันทึกค่าน้ำหนักบรรทุกทุกการอ่านตัวของคานตัวอย่างจาก dial gauge ทั้ง 3 ตัว และค่าความเครียดจาก strain gauge indicator 6) ทดสอบอย่างต่อเนื่อง โดยทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไปจนกระทั่งตัวอย่างคานเกิดการวิบัติ



(a)

(b)

Figure 5 Test setup for loading (a) Four point loading test (b) Strengthened beam

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ผลและวคคการผลการทคคอง

#### พคคการนาในช้วงที่นำหนักกระทำ 60 เปอร์เซนต์ของน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (ก่อนเสริม CFRP)

จากผลการทคคองคานกลุ่มแรก พบว่าการแอ่นตัวของคานคอนกรีตธรรมดาค B20L1 และคาน 3 ช้้นไม่เสริมเหล็กปลอก B20L3/F มีค่า 9.00 มม. และ 11.76 มม. ตามล้าคบ ช้้นจากทฤษฎีมีค่า 7.74 มม. และ 18.59 มม. ค่าที่ได้จากการทคคองมีค่ามากกว่าค่าที่ค้ำนวณได้จากทฤษฎี 16.28% ส่วนคาน 3 ช้้น ค่าที่ได้จากการทคคองมีค่าน้อยกว่าค่าที่ค้ำนวณได้จากทฤษฎี 36.74% เพราะค่าความเค้นที่วัดได้ในคานทคคองมีค่า 182.12 กก./ตร.ซม. ค่าที่ได้มากกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบค้คือ 120 กก./ตร.ซม. จ้่งทำให้เกิดการแอ่นตัวมากกว่าช้้น ส่วนคาน 3 ช้้น ค่าความเค้นที่วัดได้ในคานทคคองของคอนกรีตมวลเบาช้้นกลางมีค่า 50.34 กก./ตร.ซม. และคอนกรีตมวลเบาช้้นบนสุดมีค่า 111.27 กก./ตร.ซม. ช้้นมีค่าน้อยกว่าที่ใช้ในการออกแบบค้คือ 60 กก./ตร.ซม. และ 120 กก./ตร.ซม. ตามล้าคบ ด้ังน้ันจ้่งมีการแอ่นตัวน้อยลง

และจากผลการทคคองคานกลุ่มที่สอง พบว่าการแอ่นตัวของคานคอนกรีตธรรมดาค B16L1 และคาน 3 ช้้นไม่เสริมเหล็กปลอก B16L3/F มีค่า 6.89 มม. และ 7.82 มม. ตามล้าคบ ช้้นจากทฤษฎีมีค่า 4.91 มม. และ 11.73 มม. ค่าที่ได้จากการทคคองมีค่ามากกว่าค่าที่ค้ำนวณได้จากทฤษฎี 40.33% ส่วนคาน 3 ช้้น ค่าที่ได้จากการทคคองมีค่าน้อยกว่าค่าที่ค้ำนวณได้จากทฤษฎี 33.33% เพราะค่าความเค้นที่วัดได้ในคานทคคองมีค่า 167.37 กก./ตร.ซม. ค่าที่ได้มากกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบค้คือ 120 กก./ตร.ซม. จ้่งทำให้เกิดการแอ่นตัวมากกว่าช้้น ส่วนคาน 3 ช้้น ค่าความเค้นที่วัดได้ในคานทคคองของคอนกรีตมวลเบาช้้นกลางมีค่า 54.95 กก./ตร.ซม. และคอนกรีตมวลเบาช้้นบนสุดมีค่า 114.71 กก./ตร.ซม. ช้้นมีค่าน้อยกว่าที่ใช้ในการออกแบบค้คือ 60 กก./ตร.ซม. และ 120 กก./ตร.ซม. ตามล้าคบ ด้ังน้ันจ้่งมีการแอ่นตัวน้อยลง

จากการทคคองคานกลุ่มแรก พบว่าคาน 3 ช้้นไม่เสริมเหล็กปลอก B20L3/F และคาน 3 ช้้นเสริมเหล็กปลอก B20L3-S ค่าการแอ่นตัว 11.76 มม. และ 9.32 มม. ตามล้าคบ และจากการทคคองคานกลุ่มที่สอง พบว่าคาน 3 ช้้นไม่เสริมเหล็กปลอก B16L3/F และคาน 3 ช้้นเสริมเหล็กปลอก B16L3-S มีค่าการแอ่นตัว 7.82 มม. และ 7.49 มม. ตามล้าคบ ช้้นพบว่าการเสริมเหล็กปลอกในคานท้ังสองกลุ่ม ทำให้ระยการแอ่นตัวน้อยลง

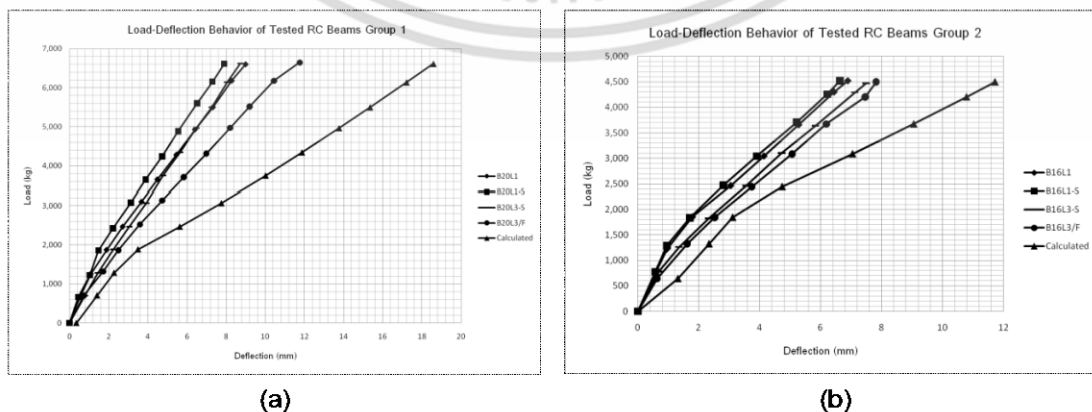


Figure 6 Load-Deflection plots before 60 percent of ultimate load (a) group 1 (b) group 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

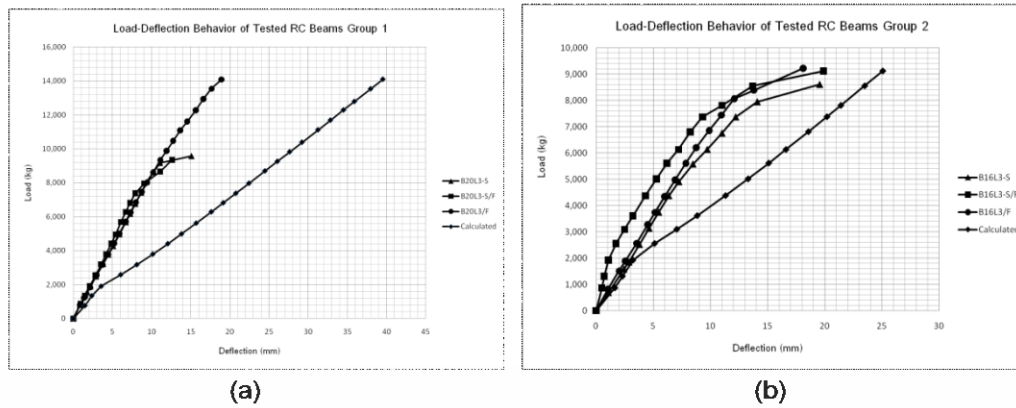


Figure 7 Load-Deflection plots after 60 percent of ultimate load (a) group 1 (b) group 2

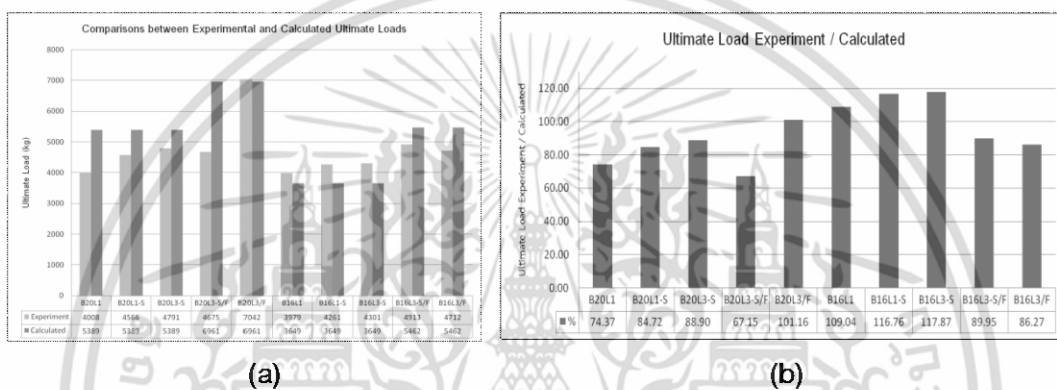


Figure 8 Comparisons between experimental and calculated ultimate loads

**พิจารณาหลังจากเสริมกำลังด้วย CFRP**

เมื่อพิจารณาที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดคานทดสอบกลุ่มแรก B20L3-S/F มีกำลังน้อยกว่าคานควบคุม B20L3-S แค่เพียง 2.42% เนื่องจากในการทดสอบเกิดการเคลื่อนที่รอยต่อระหว่างคอนกรีต จึงทำให้ผลที่ได้ น้อยกว่าทฤษฎี และคานออกแบบให้วิบัติด้วยแรงเฉือน จึงได้ใช้ประสิทธิภาพการเสริมกำลังจาก CFRP น้อยมาก ส่วน B20L3/F มีกำลังมากกว่าคานควบคุม B20L3-S มากถึง 46.98% เพราะคานออกแบบให้วิบัติด้วยโมเมนต์ จึงได้ใช้ประสิทธิภาพการเสริมกำลังจาก CFRP อย่างเต็มประสิทธิภาพ และเมื่อพิจารณาคานทดสอบกลุ่มที่สอง B16L3-S/F และ B16L3/F มีกำลังมากกว่าคานควบคุม B16L3-S เท่ากับ 14.23% และ 9.56% ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาที่การแอ่นตัว คานทดสอบกลุ่มแรก เปรียบเทียบที่น้ำหนักบรรทุก 8,000 กก. คานควบคุม ไม่มีการเสริม CFRP คือคาน B20L3-S มีการแอ่นตัวเท่ากับ 9.31 มม. และคานที่มีการเสริม CFRP ที่ท้องคาน B20L3-S/F มีการแอ่นตัวเท่ากับ 9.14 มม. ส่วนคานที่มีการเสริม CFRP ที่ท้อง และด้านข้างคานทั้งสองด้าน B20L3/F มีการแอ่นตัวเท่ากับ 9.40 มม. แสดงว่าการเสริม CFRP ไม่ได้ช่วยในการลดค่าการแอ่นตัวมากนัก และเมื่อพิจารณาคานทดสอบกลุ่มที่สอง เปรียบเทียบที่น้ำหนักบรรทุก 5,500 กก. คานควบคุม ไม่มีการเสริม CFRP คือคาน B16L3-S มีการแอ่นตัวเท่ากับ 8.47 มม. และคานที่มีการเสริม CFRP ที่ท้องคาน B16L3-S/F มีการแอ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลาชลาปตัยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 52 ตัวเท่ากับ 6.20 มม. ลดลง 26.87% ส่วนคานที่มีการเสริม CFRP ที่ท้อง และด้านข้างคานทั้งสองด้าน B16L3/F มีการแอ่นตัวเท่ากับ 7.85 มม. ลดลง 7.32%

### สรุป

1. จากการทดสอบคานกลุ่มแรก พบว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่จำลองให้เก่ามีอายุ 1 ปี จากผลของการทดสอบมีค่าน้อยกว่าค่าตามทฤษฎี 37% และจากการทดสอบคานกลุ่มที่สอง พบว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่จำลองให้เก่ามีอายุ 1 ปี ค่าการแอ่นตัวจากผลของการทดสอบมีค่าน้อยกว่าค่าตามทฤษฎี 33% เพราะคอนกรีตมีค่าความเค้นอัด น้อยกว่าที่ออกแบบไว้ ดังนั้นจึงมีการแอ่นตัวน้อยลง

2. การเสริมเหล็กปลอกคานจะทำให้ค่าการแอ่นตัวลดลง

3. การใช้ CFRP เสริมกำลังทำให้คานมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกได้มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับคานควบคุมที่ไม่ได้เสริมกำลัง

4. การใช้ CFRP เสริมกำลังทำให้คานมีการแอ่นตัวลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับคานควบคุมที่ไม่ได้เสริมกำลัง

### เอกสารอ้างอิง

เฉลิม เพ็ชรสูงเนิน. 2548. การศึกษาการแอ่นตัวของคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้มวลรวมหยาบจากคอนกรีตที่ถูกทำลายภายใต้น้ำหนักคงค้าง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ออมสิน ดำริห์. 2553. การทำนายนการแอ่นตัวเนื่องจากการคืบของคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีลดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

American Concrete Institute (ACI) 440.2R. 2003. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures.

Hollaway, L. 1993. Polymer Composites for Civil and Structural Engineering. Blackie Academic & Professional 1<sup>st</sup> Edit.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายสมชาย ศักดิ์สิทธิพร  
วัน เดือน ปีเกิด 30 ตุลาคม 2523 ที่จังหวัดสกลนคร  
ที่อยู่ 1/35 หมู่บ้านศิรินิม ซอยผู้ใหญ่ผืนอนุสรณ์ ถนนลาดพร้าว 101  
แขวงคลองจั่น เขตบางกะปิ กรุงเทพฯ 10240 โทร. 081-8595130

## ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2542 มัธยมศึกษา โรงเรียนสกลนครพัฒนศึกษา จังหวัดสกลนคร  
พ.ศ.2546 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (เกียรตินิยมอันดับ 2)  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## ประสบการณ์การทำงาน

พ.ศ.2549-2551 ตำแหน่งวิศวกรสนาม บริษัท ไตรกรุป รัชดา จำกัด  
พ.ศ.2551-2552 ตำแหน่งวิศวกรโครงการ บริษัท ไตรกรุป รัชดา จำกัด  
พ.ศ.2552-ปัจจุบัน ตำแหน่งผู้จัดการโครงการ บริษัท ไตรกรุป รัชดา จำกัด

## ผลงานทางวิชาการ

พ.ศ.2557 “การเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กเก่าด้วยคาร์บอนไฟเบอร์”  
การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 52