

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

กรณีศึกษาการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้ว

**The Case Study of Strengthening of Reinforced Concrete Beam
with Glass Fiber-Reinforced Plastic Composite**



T104488

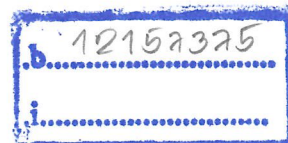
โดย

นายคมสัน มณีเมือง
นายวีรภัทร์ ทองประชาญ

ส.พ.

ค/152 ก

เลขหมู่..... 2551
เลขทะเบียน..... 104488
วัน,เดือน,ปี..... - 4 พ.ย. 2552



ปฏิญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2551

**The Case Study of Strengthening of Reinforced Concrete Beam
with Glass Fiber-Reinforced Plastic Composite**

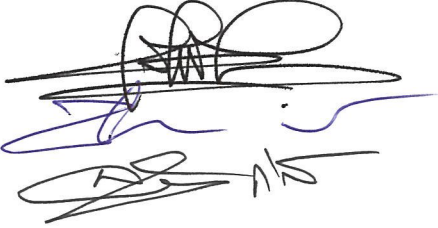
MR. KOMSAN MANEEMUENG
MR. WEERAPAT THONGPRACHAN

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2008

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ	กรณีศึกษาการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้ว		
นักศึกษา	นายคมสัน มณีเมือง	รหัสนักศึกษา	48010094
	นายวีรภัทร์ ทองประชาญ	รหัสนักศึกษา	48010848
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. สุวัฒน์ ธีรเศรษฐ์		

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
รศ.ศิริวัฒน์ ไชยชนะ ผศ.สมเกียรติ ขวัญพฤษ์ ผศ.สุวัฒน์ ธีรเศรษฐ์	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว



(ผศ.สุพจน์ ศรีนิล)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 17 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2552

หัวข้อ โครงการพิเศษ	กรณีศึกษาการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้ว		
	The Case Study of Strengthening of Reinforced Concrete Beam with Glass Fiber-Reinforced Plastic Composite		
นักศึกษา	นายคมสัน มณีเมือง	รหัสนักศึกษา	48010094
	นายวีรภัทร์ ทองประชาญ	รหัสนักศึกษา	48010848
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. สุวัฒน์ อภิระยษฐ์		
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา		
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์		
ปีการศึกษา	2551		

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับการเสริมกำลังและซ่อมแซมคานคอนกรีตด้วยวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว โดยคานที่นำมาทำการทดสอบเป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมคอนกรีตโฟมเป็นคาน 3 ชั้น เปรียบเสมือนเป็นคานเก่าที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 1 ปี จำนวน 3 ตัวอย่าง และคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา 3 ตัวอย่าง โดยคานตัวอย่างได้ให้น้ำหนักบรรทุกไปก่อน 60 % ของน้ำหนักบรรทุกประลัยก่อนที่จะนำมาทำการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมด้วยแผ่น GFRP เพื่อจำลองคานให้เหมือนกับสถานะการใช้งานจริงๆ ในการเสริมกำลังหรือซ่อมแซม โดยคานตัวอย่างทั้งหมด 6 ตัวอย่าง แบ่งเป็นคานคอนกรีต 3 ชั้นไม่เสริมกำลังเพื่อเป็นคานควบคุม 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

จากการทดสอบพบว่าคานที่เสริมกำลังหรือซ่อมแซมด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วจะมีกำลังสูงขึ้น 4 % - 22 % เมื่อเปรียบเทียบกับคานควบคุม และมีค่าการโก่งตัวสูงสุดที่กึ่งกลางคานลดลง ซึ่งคิดเป็น 11 % ของคานควบคุม

Title : The Case Study of Strengthening of Reinforced Concrete Beam with
Glass Fiber-Reinforced Plastic Composite

Name : MR. KOMSAN MANEEMUENG
MR. WEERAPAT THONGPRACHAN

Field : CIVIL ENGINEERING

Department : CIVIL ENGINEERING

Faculty : ENGINEERING

Advisor : ASST.PROF.SUWAT TEERASET

ABSTRACT

This research project present behavior of reinforced concrete beam strengthened and repaired with glass fiber reinforced polymer (GFRP). There were 6 specimens. 3 specimens were reinforced concrete beam mixes foam concrete , be compared as old beam usability comes to 1 already year, 2 specimens were strengthened and repaired with glass fiber reinforced polymer and 1 specimen normally reinforced concrete beam mixes foam concrete. Remain beam were reinforced concrete beam 3 specimens , 2 specimen were controlled beam and 1 specimen were strengthened and repaired with glass fiber reinforced polymer. The purpose of the experiment was to find relationships between loadings with deflections, stresses and strains at various points.

Test result showed that, GRRP strengthened and repaired specimens had 4 % - 22 % higher strength than the controlled beam. The maximum deflection at mid span could be reduced by 11 % of controlled beam.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ. สุวัฒน์ ธิเรษฐ ที่ปรึกษาโครงการพิเศษฉบับนี้ ที่ให้ความเอาใจใส่แนะนำช่วยเหลือให้ข้อคิดเห็นตลอดจน ตักเตือนและสั่งสอนถึงสิ่งที่มีและไม่มีในตำราเรียน อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการดำเนินการโครงการพิเศษและสำหรับชีวิตวิศวกร ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ผู้ประพันธ์ขอกล่าวขอบพระคุณสำหรับอาจารย์และบุคคลากรทุกท่านของภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่มอบทั้ง วิทยาการและประสบการณ์แก่ผู้ประพันธ์ตลอดระยะเวลาการศึกษาในสถาบันแห่งนี้

และขอขอบคุณเพื่อนๆนักศึกษาในภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่ให้แรงกายแรงใจช่วยเหลือการวิจัย ในโครงการพิเศษจนสำเร็จลุล่วงไปได้ในที่สุด

ท้ายสุดนี้ผู้ประพันธ์ใคร่ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และสมาชิกในครอบครัวทุกท่านที่คอยให้ กำลังใจ และช่วยผลักดันในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงจนจบการศึกษา

นายคมสัน มณีเมือง

นายวิรัช ทองประชาญ

ผู้ประพันธ์

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	ปกใน (ภาษาไทย)	ก
	ปกใน (ภาษาอังกฤษ)	ข
	หน้าอนุมัติ	ค
	บทคัดย่อภาษาไทย	ง
	บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
	กิตติกรรมประกาศ	ฉ
	สารบัญ	ช
	สารบัญรูป	๗
1	บทนำ	
	1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
	1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
	1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
	1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2	วรรณกรรมปริทัศน์	
	2.1 กล่าวนำ	5
	2.2 ทบทวนการศึกษาที่เกี่ยวข้อง	5
	2.2.1 วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย (Fiber-reinforced plastic composite)	5
	2.2.2 งานวิจัยด้านการเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย	10

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
3	หลักการและทฤษฎีที่ใช้	
	3.1 กล่าวนำ	16
	3.2 พฤติกรรมของคานประกอบ	16
	3.3 โมดูลัสยืดหยุ่น	
	3.3.1 การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต	19
	3.4 ความเค้น – ความเครียดของคอนกรีต	21
	3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีต	22
	3.6 คานคอนกรีตเสริมเหล็ก	
	3.6.1 นิยาม	23
	3.6.2 พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	23
	3.6.3 การเอนตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	26
	3.7 คอนกรีตมวลเบา	32
	3.8 Glass fiber rein-forced polymer	34
	3.9 กระบวนการทดสอบ	
	3.9.1 การทำคอนกรีต	35
	3.9.2 การบ่ม (Curing)	36
4	วิธีการดำเนินการวิจัย	
	4.1 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต	
	4.1.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดสอบ	38
	4.1.2 วิธีการทดสอบ	38
	4.1.3 ผลการทดลอง	40

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	4.2 การเตรียมตัวอย่างคานทดสอบ	41
	4.2.1 คุณสมบัติของวัสดุ	43
	4.2.2 การตัดมาตรวจวัดความเครียด	43
	4.2.3 การติดตั้งพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว	44
	4.3 การทดสอบคานและการเก็บข้อมูล	
	4.3.1 อุปกรณ์ในการทดสอบ	48
	4.3.2 วิธีการทดสอบ	49
	4.3.3 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง 5 ตัวอย่าง	50
5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
	5.1 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล	
	5.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการโก่งตัว	63
	5.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและหน่วยการยืดหดตัว	66
	5.1.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับทฤษฎีการวิเคราะห์	70
	5.2 สรุปผลการทดลอง	70
	5.2.1 การใช้ GFRP เสริมกำลังเพื่อเพิ่ม Live load ให้กับ โครงสร้างบ้านพักอาศัย	71
	5.3 วิจารณ์และข้อเสนอแนะ	73
	บรรณานุกรม	
	ภาคผนวก ก.	
	ก. วิธีการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต	ผก 1
	ข. ส่วนผสมคอนกรีตมวลเบา	ผก 4
	ค. การคำนวณ Moment จากทฤษฎีและการทดลอง	ผก 4
	ง. การคำนวณหาระยะแอนตัวของคาน	ผก 8

สารบัญ

บทที่ เรื่อง

หน้า

ภาคผนวก ข.

ก. ข้อมูลการทดสอบตัวอย่างทรงกระบอก

ผข 1

ข. ข้อมูลการทดสอบคาน

ผข 26

สารบัญตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
2.1	แสดงคุณสมบัติของคอนกรีต เหล็ก เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน และพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน	7
2.2	แสดงชนิดของ Glass fiber rein-forced polymer แต่ละตัวที่ทำการทดสอบ	14
3.1	แสดงตัวประกอบที่ขึ้นกับเวลา	30
3.2	แสดงค่าสูงสุดที่ยอมให้ของระยะแอนตัวที่คำนวณ	32
3.3	แสดงลักษณะการใช้งานกับหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบา	33
4.1	แสดงผลการทดสอบปรับแรงกดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอก	40
4.2	แสดงผลการทดสอบแท่งคอนกรีตโพรรูปทรงกระบอก หน่วยน้ำหนัก 1850 kg/m ³	40
4.3	แสดงผลการทดสอบแท่งคอนกรีตโพรรูปทรงกระบอก หน่วยน้ำหนัก 1950 kg/m ³	41
4.4	แสดงข้อมูลของคาน 5 ตัวอย่างที่ใช้ทำการทดสอบ	42
4.5	แสดงคุณสมบัติของวัสดุแผ่น GFRP	43
4.6	แสดงการแอนตัวของคาน B1	50
4.7	แสดงการแอนตัวของคาน B2	52
4.8	แสดงการแอนตัวของคาน B3	54
4.9	แสดงการแอนตัวของคาน B4 ขณะให้น้ำหนักบรรทุก 60%	56
4.10	แสดงการแอนตัวของคาน B4 ขณะให้น้ำหนักจนคานวิบัติ	57
4.11	แสดงการแอนตัวของคาน B5 ขณะให้น้ำหนักบรรทุก 60%	58
4.12	แสดงการแอนตัวของคาน B5 ขณะให้น้ำหนักจนคานวิบัติ	59
4.13	แสดงการแอนตัวของคาน B6 ขณะให้น้ำหนักจนคานวิบัติ	61
5.1	แสดงผลการทดสอบคาน	64
5.2	แสดงการวิเคราะห์ทฤษฎีเปรียบเทียบการทดสอบ	70
ผก 1	แสดงค่าส่วนเผื่อกำลังอัด	ผก2
ผข 1	ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน	ผข1

สารบัญตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
ผข 2	ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 1	ผข1
ผข 3	ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 2	ผข3
ผข 4	ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 3	ผข4
ผข 5	ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 4	ผข6
ผข 6	ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 5	ผข7
ผข 7	ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,850 kg/m ³ ทรงกระบอก อายุ 28 วัน	ผข9
ผข 8	ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,850 kg/m ³ ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 1	ผข9
ผข 9	ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,850 kg/m ³ ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 2	ผข11
ผข 10	ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,850 kg/m ³ ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 3	ผข13
ผข 11	ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,850 kg/m ³ ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 4	ผข14
ผข 12	ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,850 kg/m ³ ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 5	ผข16
ผข 13	ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,950 kg/m ³ ทรงกระบอก อายุ 28 วัน	ผข17
ผข 14	ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,950 kg/m ³ ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 1	ผข18
ผข 15	ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,950 kg/m ³ ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 2	ผข19

สารบัญตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
ผข 16	ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก $1,950 \text{ kg/m}^3$ ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่3	ผข21
ผข 17	ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก $1,950 \text{ kg/m}^3$ ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่4	ผข22
ผข 18	ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก $1,950 \text{ kg/m}^3$ ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่5	ผข24
ผข 19	แสดงการแอ่นตัวของคานลูกผสม 3 ชั้น ไม่เสริมแผ่น GFRP	ผข27
ผข 20	แสดงการแอ่นตัวของคานลูกผสม 3 ชั้นเสริมแผ่น GFRP ที่ห้องคาน	ผข28
ผข 21	แสดงการแอ่นตัวของคานลูกผสม 3 ชั้น ไม่มีเหล็กปลอกเสริมแผ่น GFRP ที่ห้องคาน และด้านข้างคาน	ผข29
ผข 22	แสดงการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก 2-DB 12 ไม่เสริมแผ่น GFRP	ผข30
ผข 23	แสดงการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก 2-DB 12 เสริมแผ่น GFRP ที่ห้องคาน	ผข31
ผข 24	แสดงการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก 2-DB 12 ไม่เสริมแผ่น GFRP และไม่ผ่านการรับน้ำหนักบรรทุกมาก่อน	ผข32

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
1.1	การเสริมกำลังและซ่อมแซมพื้น เสา คานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยพลาสติกเสริมเส้นใย	1
2.1	ภาพตัวอย่าง fiber แบบแผ่นเส้นใย (Fiber Sheet)	8
2.2	ภาพตัวอย่าง fiber แบบแผ่นแข็ง (Laminate)	9
2.3	ภาพตัวอย่าง fiber แบบเส้น (Rod)	9
2.4	แสดงลักษณะคานที่ทำการทดสอบ	11
2.5	ลักษณะการติดพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วแบบต่างๆ	12
2.6	รูปแสดงคานที่ทดสอบ	13
2.7	รูปคานที่ทำการทดสอบ	14
3.1	แสดงการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดก่อนหน้าตัดเกิดการแตกร้าว	17
3.2	แสดงการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดเมื่อหน้าตัดเริ่มแตกร้าว	17
3.3	แสดงความเค้นและความเครียดของหน้าตัดเมื่อความเค้นอัดของคอนกรีตมีค่าเกิน $0.5f_c'$	18
3.4	แสดงพฤติกรรมของคานประกอบภายใต้แรงกระทำจากภายนอก (ก) แสดงการยึดเหนี่ยวที่สมบูรณ์ (ข) แสดงการยึดเหนี่ยวที่ไม่สมบูรณ์	19
3.5	แสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (Mehta, 1986)	20
3.6	เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด ในอุดมคติสำหรับคอนกรีตรับแรงอัดแกนเดียว	21
3.7	เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดสำหรับคอนกรีตรูปทรงระบอก ให้แรงกระทำตามแนวแกนที่มีหน่วยแรงอัดต่างๆกัน	22
3.8	ให้แรงกระทำตามแนวแกนที่มีหน่วยแรงอัดต่างๆกัน	23
3.9	พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุก	24
3.10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแอนตัวกับเวลา	26

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
3.11	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการโก่งตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	27
3.12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า I_e กับค่า Ma/Mcr	29
3.13	การเปลี่ยนแปลงของค่าตัวประกอบตามกาลเวลา	31
3.14	แสดง stress และ strain ใน โครงสร้างรับแรงดัด	34
3.15	แสดงผลกระทบของระยะเวลาในการบ่มซึ่งมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต	37
4.1	แสดงลักษณะการติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วของคาน B2	42
4.2	แสดงลักษณะการติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วของคาน B3	42
4.3	แสดงลักษณะการติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วของคาน B5	42
4.4	แสดงตำแหน่งการติดตั้งมาตรวัดความเครียด (strain gage) ของคาน B2,B5	43
4.5	แสดงตำแหน่งการติดตั้งมาตรวัดความเครียด (strain gage) ของคาน B3	44
4.6	การ Epoxy Injection ในรอยแตกร้าวคาน	44
4.7	การผสมน้ำยา Epoxy	45
4.8	แสดงการทาวัดคู่ประสานชั้นแรก	45
4.9	แสดงการทาวัดคู่ประสานชั้นที่สอง	46
4.10	วัสดุประสานชั้นแรกและชั้นสอง ก.) Hydrapox Primer (A และ B) ข.) Hydrapox CF (A และ B)	46
4.11	การติดตั้งแผ่น Fiber	47
4.12	แสดงการตัดแผ่น Fiber	47
4.13	แสดงรูปแบบการติดตั้งของคาน B3	48
4.14	ลักษณะการติดตั้งเครื่องมือทดสอบ	49
4.15	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุกของคาน B1	51
4.16	ลักษณะการวิบัติของคาน B2	53
4.17	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุกของคาน B2	53

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
4.18	ลักษณะการวิบัติของคาน B3	55
4.19	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกของคานB3	55
4.20	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุก คานคอนกรีตเสริมเหล็ก 2-DB12 ไม่เสริมแผ่น GFRP	57
4.21	กราฟเปรียบเทียบการแอ่นตัวของคาน B4 ที่โหลด 60 % ของน้ำหนักประลัย และที่วิบัติ	58
4.22	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุก คานคอนกรีตเสริมเหล็ก 2-DB12 เสริมแผ่น GFRP	60
4.23	กราฟเปรียบเทียบการแอ่นตัวของคาน B5 ที่โหลด 60 % ของน้ำหนักประลัย และที่วิบัติ	60
4.24	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุก คานคอนกรีตเสริมเหล็ก 2-DB12 ไม่เสริมแผ่น GFRP (คาน B6)	62
5.1	กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุก ของคานกลุ่มที่ 1	63
5.2	กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุก ของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก 2-DB12 (กลุ่มที่ 2) ไม่เสริมแผ่น GFRP และเสริมแผ่น GFRP	64
5.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเหล็กและไฟเบอร์ กับน้ำหนักบรรทุกของคาน B2	66
5.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเหล็กและไฟเบอร์ กับน้ำหนักบรรทุกของคาน B3	67
5.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเหล็ก กับน้ำหนักบรรทุกของคาน B4	68
5.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเหล็กและไฟเบอร์ กับน้ำหนักบรรทุกของคาน B5	69

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
5.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Deflection เปรียบเทียบผลการทดลองกับทางทฤษฎี	71
ผก 1	แสดง Shear force Diagrams และ Bending Moment Diagrams	ผก5
ผก 2	ภาพแสดง stress และ strain ในคาน	ผก6
ผก 3	แสดงระยะลง Load และ Bending Moment Diagrams	ผก9
ผก 4	ภาพโครงสร้างประกอบของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	ผก9
ผข 1	กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 1	ผข2
ผข 2	กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 2	ผข4
ผข 3	กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 3	ผข5
ผข 4	กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 4	ผข7
ผข 5	กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 5	ผข8
ผข 6	กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,850 kg/m ³ ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 1	ผข11
ผข 7	กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,850 kg/m ³ ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 2	ผข12
ผข 8	กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,850 kg/m ³ ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 3	ผข14
ผข 9	กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,850 kg/m ³ ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 4	ผข15
ผข 10	กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,850 kg/m ³ ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 5	ผข17
ผข 11	กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,950 kg/m ³ ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 1	ผข19
ผข 12	กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,950 kg/m ³ ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 2	ผข20

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
ผข 13	กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,950 kg/m ³ ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 3	ผข22
ผข 14	กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,950 kg/m ³ ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 4	ผข23
ผข 15	กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,950 kg/m ³ ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 5	ผข25

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

ความหมาย

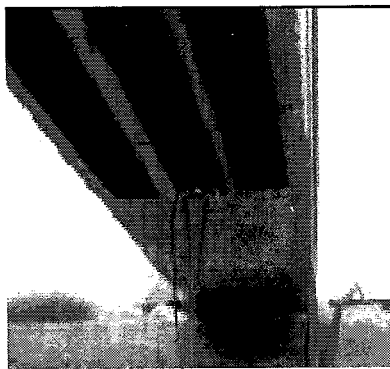
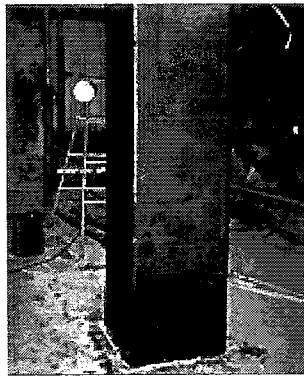
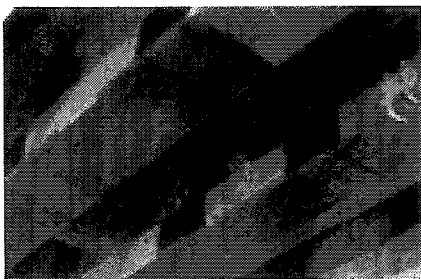
ω	หน่วยน้ำหนักคอนกรีต
t	เวลา
E_c	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต
E_{25}	โมดูลัสยืดหยุ่นที่มีน้ำหนักคงค้าง 25% ของน้ำหนักบรรทุกประลัย
E_{50}	โมดูลัสยืดหยุ่นที่มีน้ำหนักคงค้าง 50% ของน้ำหนักบรรทุกประลัย
E_1	โมดูลัสยืดหยุ่นที่มีน้ำหนักคงค้าง 50% ของน้ำหนักบรรทุกประลัย
E_2	โมดูลัสยืดหยุ่นที่มีน้ำหนักคงค้าง 25% ของน้ำหนักบรรทุกประลัย
N.A.	แกนสะเทิน
kd	ระยะแกนสะเทินจากผิวบน
λ	ตัวคูณประกอบจากการล่า
Δ_T	ระยะการแอ่นตัวทั้งหมด
Δ_i	ระยะการแอ่นตัวทันทีทันใด
δ	ตัวประกอบตามกาลเวลาที่มื่อน้ำหนักบรรทุกค้าง
ϕ	ตัวคูณปรับลดแรงที่ได้จากค่ากำลังประลัยของ fiber

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา (Problem Identification)

ในโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก มักมีปัญหาการแอ่นตัว หรือมีรอยแตกร้าว เนื่องมาจากโครงสร้างต้องรับน้ำหนักมากกว่าที่ออกแบบไว้ เช่น การต่อเติมอาคาร เปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากที่ออกแบบไว้ หรือต้องรับน้ำหนักเพิ่มขึ้น โดยไม่ได้คาดคิดไว้ เป็นต้น ซึ่งการเสริมกำลังนั้นก็มียวิธีเสริมอยู่หลายวิธี เช่น การเสริมโดยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย (Fiber-reinforced plastic composite : FRP) การเสริมโดยแผ่นใยคาร์บอน (Carbon Fiber Reinforced Polymer : CFRP) การเสริมกำลังโดยแผ่นเหล็ก เป็นต้น



รูปที่ 1.1 การเสริมกำลังและซ่อมแซมพื้น เสา คานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยพลาสติกเสริมเส้นใย

โดยทั่วไปแล้ว อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจะถูกซ่อมแซมและหรือเสริมกำลังโดยการเพิ่มองค์อาคารให้กับโครงสร้างเดิมของอาคาร การเพิ่มค้ำยัน และการติดแผ่นเหล็กเสริมให้อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มกำลังของ โครงสร้างของอาคารในการรับน้ำหนักบรรทุกมากขึ้น ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะค่อนข้างยุ่งยากและใช้เวลาค่อนข้างมาก เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ได้มีการนำวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย (fiber-reinforced plastic composite : FRP) มาใช้ในการซ่อมแซมและหรือเสริมกำลังให้กับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งวัสดุดังกล่าวมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานดังกล่าวเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนของกำลังต่อน้ำหนักที่สูง มีความต้านทานการผุกร่อนสูง มีน้ำหนักเบา และมีความสามารถในการดูดซับพลังงานสูง อย่างไรก็ตามวัสดุนี้ก็มีข้อจำกัดหลายอย่างเช่น มีพฤติกรรมแบบ Linear Elastic จนวิบัติทำให้ความเหนียวลดลง นอกจากนี้ก็มีค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อนไม่เท่าคอนกรีต และเมื่อมีค่าอุณหภูมิสูงอาจเสื่อมสภาพเร็วกว่าปกติหรืออาจวิบัติได้

การทดสอบกำลังของโครงสร้างที่เสริมกำลังแล้ว ทำได้เพียงถึงน้ำหนักบรรทุกใช้งานแต่ไม่สามารถทดสอบจนถึงกำลังประลัยได้เพราะยังต้องการใช้งานอาคารอยู่ ดังนั้นการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย FRP จนถึงจุดวิบัติจึงน่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการเสริมกำลังและซ่อมแซมคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้ว
- 1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังกับที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วยใยแก้ว
- 1.2.3 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้ว

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

เนื่องจากจุดมุ่งหมายคือการเสริมกำลังและซ่อมแซมให้กับคานด้วยเส้นใยแก้ว(Glass Fiber) ดังนั้นคานที่นำมาทดสอบจึงเป็นคานที่ผ่านการรับแรงมาแล้ว จากนั้นจึงนำคานมาประกอบด้วยวัสดุ GFRP เข้าไปเพื่อซ่อมแซมและเสริมกำลังให้กับคานที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว แล้วทำการทดสอบโดยให้แรงกระทำแบบ Middle Third จนกระทั่งคานวิบัติ

ในการทดสอบแบ่งคานออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 คานลูกผสม 3 ชั้น โดยชั้นล่างสุดของคานเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก ชั้นถัดมาเป็น โฟมซีเมนต์ที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก $1,950 \text{ kg/cm}^3$ และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) ที่มีน้ำหนักคงค้างที่ 25 %) $169,000 \text{ kg/cm}^2$ ชั้นบนสุดเป็น โฟมซีเมนต์ที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก $1,850 \text{ kg/cm}^3$ และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) ที่มีน้ำหนักคงค้างที่ 50 %) $95,220 \text{ kg/cm}^2$ โดยคานชนิดนี้เปรียบเสมือนคานเก่าที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 1 ปี โดยคานมีน้ำหนักกระทำมาแล้ว 60 %ของน้ำหนักประลัยจำนวน 3 ตัวอย่าง

- คานลูกผสม 3 ชั้นขนาด 15×30 เซนติเมตร ยาว 3 เมตร กำลังอัดประลัย (f_c) 240 ksc. มีขนาดเหล็กเสริม 2-DB 20 และเหล็กปลอก RB 6 @ 12.50 cm. จำนวน 2 ตัวอย่าง ทดสอบที่อายุ 28 วัน โดยตัวอย่างหนึ่งเสริมวัสดุพลาสติกเสริมใยแก้ว และอีกตัวอย่างไม่เสริมวัสดุพลาสติกเสริมใยแก้วเพื่อเป็นคานควบคุม
- คานลูกผสม 3 ชั้นขนาด 15×30 เซนติเมตร ยาว 3 เมตร กำลังอัดประลัย (f_c) 240 ksc. มีขนาดเหล็กเสริม 2-DB 20 ไม่เสริมเหล็กปลอก โดยจะเสริมวัสดุพลาสติกเสริมใยแก้วที่ด้านข้างคานแทน

กลุ่มที่ 2 คานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา ขนาดหน้าตัด 15×30 เซนติเมตร ยาว 3 เมตร กำลังอัดประลัย (f_c) 240 ksc. มีขนาดเหล็กเสริม 2-DB 12 และเหล็กปลอก RB 6 @ 12.50 cm. จำนวน 3 ตัวอย่าง ทดสอบที่อายุ 28 วัน แบ่งเป็นคานควบคุม 2 ตัวอย่าง โดยตัวอย่างหนึ่งให้น้ำหนักบรรทุกที่เดียวจนวิบัติ ส่วนอีกตัวอย่างให้น้ำหนักบรรทุก 60 %ของน้ำหนักประลัยก่อน แล้วหยุดให้น้ำหนักบรรทุก จากนั้นค่อยทดสอบจนวิบัติ คานอีก 1 ตัวอย่างจะเสริมวัสดุพลาสติกเสริมใยแก้วที่ท้องคาน หลังจากคานรับน้ำหนักบรรทุกมาแล้ว 60 %ของน้ำหนักประลัย

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาข้อมูลต่างๆเกี่ยวกับวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วคุณสมบัติของวัสดุเส้นใยแก้วและวิธีการเสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วให้กับคาน
- 1.4.2 ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุGFRPเพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ GFRP
- 1.4.3 ติดตั้งวัสดุ GFRP ให้กับคานตามที่กำหนด
- 1.4.4 ดำเนินการทดสอบคานทั้งหมด และเก็บข้อมูล
- 1.4.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบเปรียบเทียบกับทฤษฎี
- 1.4.6 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้ว
- 1.5.2 รู้ถึงวิธีการซ่อมแซมและเสริมกำลังให้กับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผ่านการรับแรงมาแล้ว

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว โดยแบ่งเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหลักการและคุณสมบัติต่างๆ ไปของการซ่อมแซมและเสริมกำลังด้วยวัสดุไฟเบอร์ชนิดต่างๆ และงานวิจัยในด้านการทดสอบคานที่เสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้วหรือคาร์บอน

2.2 ทบทวนการศึกษาที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย (Fiber-reinforced plastic composite)

วัสดุคอมโพสิต (composite material) เป็นวัสดุที่ประกอบไปด้วยวัสดุที่มากกว่า 2 ชนิดขึ้นไปที่ถูกนำมารวมกันในระดับ macroscopic วัสดุที่ถูกนำมาประกอบเข้าด้วยกันนั้นจะต้องมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนและคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่ได้จะต้องมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากวัสดุที่ถูกนำมาประกอบเข้าด้วยกัน โดยทั่วไปแล้ว คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่ได้จะเป็นคุณสมบัติที่โดดเด่นของวัสดุที่ถูกนำมาประกอบและในบางกรณีจะเป็นคุณสมบัติที่วัสดุที่ถูกนำมาประกอบไม่มี ถ้าเปรียบเทียบวัสดุคอมโพสิตประเภทพลาสติกเสริมเส้นใย (fiber-reinforced plastic หรือ FRP) กับคอนกรีตเสริมเหล็กจะพบว่า เส้นใยทำหน้าที่เปรียบเสมือนเหล็กเสริมและพลาสติกทำหน้าที่เปรียบเสมือนคอนกรีต(ผศ.ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์)

ความเป็นมาของพลาสติกเสริมแรงนั้นมีการค้นพบและพัฒนาทางด้านพลาสติกเสริมแรงนี้เริ่มต้นจากโพลีเอสเตอร์ก่อน โดยพบในปลายปี ค.ศ.1930 และ ต้น ค.ศ.1940 ระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 จึงทำให้เกิดคำว่า "Fiber glass Reinforced Plastics (FRP)" หรือ Glass Reinforced Plastic (GRP) โดยส่วนใหญ่อ้างอิงถึง โพลีเอสเตอร์ เรซินและเส้นใยแก้ว การใช้งานของวัสดุเสริมแรงนั้นมีมากขึ้นในสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 พลาสติกเสริมแรงในสมัยนั้นถูกนำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์ด้านอากาศยาน และเกราะป้องกันกระสุนเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากคุณสมบัติของเส้นใยแก้วมีการพัฒนาให้แข็งแรงขึ้น ในปัจจุบัน

วัสดุเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วได้เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย รวมทั้งเส้นใยประเภทอื่นๆ เช่น เส้นใยคาร์บอนและเส้นใยอะรามิก

วัสดุเส้นใย Fiber ที่นิยมใช้ในงานเสริมกำลังโดยทั่วไปคือ Carbon fiber , Aramid fiber และ Glass fiber ส่วน Resin ที่นิยมใช้ได้แก่ epoxy, polyester, vinyl ester และ phenolic เป็นต้น วัสดุ Composite ที่ประกอบด้วย fiber และ resin ต่างชนิดกันจะมีคุณสมบัติทางกลและทางเคมีที่แตกต่างกัน ด้วยการเลือกใช้วัสดุ composite จึงต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ เช่น ลักษณะการใช้งาน ระยะเวลาใช้งาน ขนาดน้ำหนักบรรทุก พฤติกรรมทางโครงสร้าง สภาพแวดล้อม ราคา และระยะเวลาทำงาน เป็นต้น

ในปัจจุบัน พลาสติกเสริมเส้นใย (fiberreinforced plastic หรือ FRP) โดยเฉพาะแบบอีพ็อกซี (epoxy) เสริมเส้นใยคาร์บอน (carbon fiber) หรือเส้นใยเคฟลาร์ (kevlar fiber) หรือเส้นใยแก้ว (glass fiber) ได้ถูกนำมาใช้งานวิศวกรรมโยธาในหลายด้าน เช่น ใช้แทนเหล็กเสริมและเคเบิล ใช้ในการเสริมกำลัง(strengthening) และซ่อมแซม (repair) โครงสร้างหรือองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก และใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างองค์อาคารและโครงสร้างต่างๆ โดยตรงโดยเฉพาะในงานที่ต้องการวัสดุที่มีอัตราส่วนของกำลังต่อน้ำหนักสูง มีน้ำหนักเบา และมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากสภาวะแวดล้อมและสารเคมีได้ดี

ผศ.ดร.สิทธิชัย (พ.ศ.2545) ได้กล่าวถึงข้อควรพิจารณาในการเสริมกำลังและซ่อมแซมองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก คุณสมบัติของวัสดุประเภทต่างๆ เช่น คอนกรีต เหล็ก เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน และพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ดังนี้

คุณสมบัติ	คอนกรีต	เหล็ก	เส้นใยแก้ว	เส้นใยคาร์บอน	พลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (fiber volume fraction = 60%)	
					ในแนวเส้นใย	ตั้งฉากกับแนวเส้นใย
ความหนาแน่น (g/cm^3)	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 ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	10	12	5	-0.4	0.02-0.04	20

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของคอนกรีต เหล็ก เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน และพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

นอกจากนี้ก็ได้นำเสนอรายละเอียดวิธีการการเสริมกำลังและซ่อมแซมองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งคาน เสา และแผ่นพื้นให้ถูกต้อง ตลอดจนวิธีการประกอบแผ่นไฟเบอร์เข้ากับคอนกรีตที่ถูกต้อง เนื่องจากความสำเร็จของการเสริมกำลังจะขึ้นอยู่กับความยึดเหนี่ยวและการถ่ายหน่วยแรงระหว่างผิวคอนกรีตและแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงควรเลือกวิธีการให้ถูกต้อง โดยมีวิธีการดังนี้

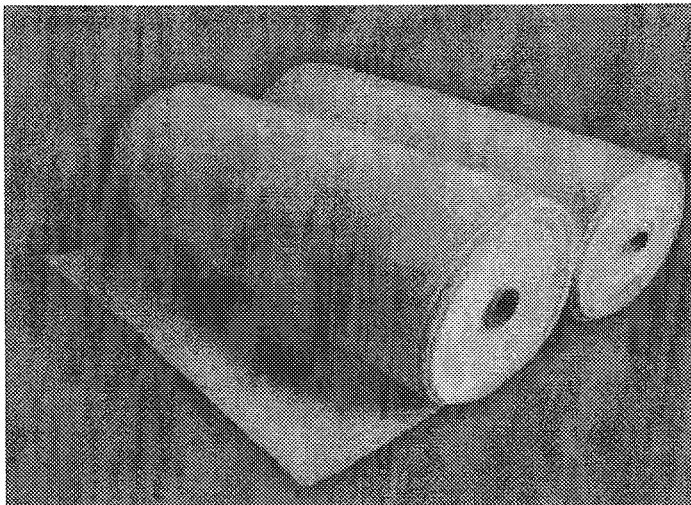
1. adhesive bonding – แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยที่ถูกผลิตและบ่มมาจากโรงงานถูกยึดเข้ากับผิวคอนกรีตโดยใช้กาวภายใต้ความดัน
2. wet lay-up – ทาเรซินบนผิวคอนกรีตจากนั้น วางพลาสติกเสริมเส้นใยที่อยู่ในรูปของ fabric และใช้ลูกกลิ้งกลิ้งไปบน fabric เพื่อรีดให้กาวส่วนเกินไหลออกมาเพื่อก่อให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวที่สมบูรณ์
3. resin infusion – จัดวาง fabric ลงบนพื้นที่ที่ต้องการเสริมกำลัง จากนั้น ทำการห่อพื้นที่ดังกล่าวด้วย vacuum bag และอัดเรซินให้ซึมเข้าไปใน fabric และให้ความดันแก่ vacuum bag เพื่อกดอัด fabric ให้สัมผัสกับผิวคอนกรีตอย่างแนบแน่น ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้เรซินซึมแทรกเข้าไปในรอยแตกของคานและพื้นด้วย

ธรรมชาติ (พ.ศ.2544) ได้กล่าวถึงรูปแบบการใช้งานวัสดุคอมโพสิตและรูปแบบผลิตภัณฑ์ วัสดุ Composites ตามการใช้งานดังนี้

ในตลาดวัสดุ composite มีรูปแบบผลิตภัณฑ์ที่นิยมอยู่ 3 ประเภท คือ แบบแผ่นเส้นใย(Fiber sheet) แบบแผ่นแข็ง(Laminate) และแบบเส้น(Rod)

- แบบแผ่นเส้นใย (Fiber Sheet)

มีลักษณะเป็นแผ่นเส้นใย fiber จัดเรียงตัวในทิศแนวเดียว(Unidirectional) หรือแบบจัดเรียง 2 ทิศทาง(Bidirectional) เส้นใย fiber ที่นิยมใช้ได้แก่ carbon aramid glass การใช้งานทำโดยวิธีการ wet lay up คือใช้ resin ทาลงบนผิวคอนกรีตและติดตั้งแผ่น fiber ลงไปแล้วทา resin ทับจากนั้นใช้ลูกกลิ้งรีดไล่ฟองอากาศ resin ที่ใช้อาจเป็น epoxy, polyester หรือ phenolic ตามความเหมาะสม ในการออกแบบจะใช้ขนาดหน้าตัดสุทธิของ fiber ในทิศทางการรับแรงดึงและหน่วยแรงประลัยของเส้นใย fiber เพื่อคำนวณหาความสามารถในการรับแรงดึง แผ่นเส้นใยก่อนการใช้งานมักอยู่ในลักษณะเป็นม้วน มีความกว้างตั้งแต่ 10-120 cm. และปริมาณเส้นใยตั้งแต่ 200-1200 gram/m² fiber แต่ละชนิดจะมีค่า tensile strength และ tensile modulus ต่างกัน โดยที่ carbon fiber จะมีค่า tensile strength สูงกว่า 30,000 ksc และ tensile modulus สูงกว่า 2.0×10^6 ในขณะที่ glass fiber จะมี modulus ต่ำกว่ามาก



รูปที่ 2.1 ภาพตัวอย่าง fiber แบบแผ่นเส้นใย (Fiber Sheet)

- แบบแผ่นแข็ง (Laminate)

เป็นแผ่น FRP สำเร็จรูปประกอบด้วย fiber ซึ่งจัดเรียงแบบทิศทางเดียวและ resin ซึ่งทำปฏิกิริยาสมบูรณ์แล้ว การติดตั้งลงบนผิวโครงสร้างคอนกรีตจะใช้วัสดุประเภท epoxy putty ซึ่งมีลักษณะเหนียว ในการออกแบบจะใช้ค่า tensile strength ของแผ่น laminate ซึ่งมักจะมีปริมาณ fiber content ตั้งแต่

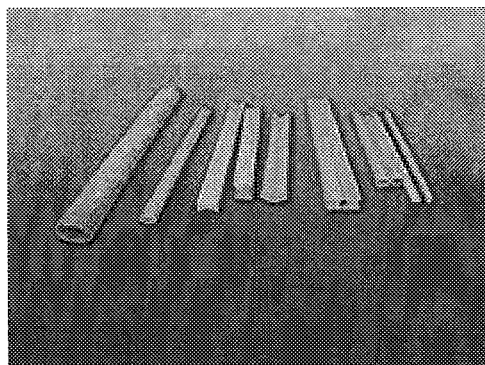
70 % ขึ้นไป ส่วนใหญ่เส้นใยที่ใช้มักเป็น carbon fiber ขนาดของแผ่น laminate ในตลาดจะกว้างประมาณ 5-15 cm. และมีความหนาประมาณ 1.2-1.5 mm. และมี tensile strength สูงกว่า 20,000 ksc



รูปที่ 2.2 ภาพตัวอย่าง fiber แบบแผ่นแข็ง (Laminate)

- แบบเส้น (Rod)

มีลักษณะคล้ายเหล็กเส้นและมีหลายขนาด เป็น composites ของเส้นใย fiber และ resin โดยมีปริมาณ fiber content ตั้งแต่ 70% ชนิดที่ผลิตจาก glass มักใช้ในการเสริมโครงสร้างคอนกรีตใหม่ในบริเวณที่มีการกัดกร่อนจากสภาพแวดล้อมสูง สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในงานเสริมกำลังโครงสร้างที่มีอยู่แล้วมักผลิตจาก carbon fiber และ aramid fiber เนื่องจากมี tensile strength สูง การใช้งานทำโดยตัดผิวคอนกรีตเป็นร่องแนวตรงกว้างและลึกประมาณ 1.5-2 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและฝัง rod ลงไป โดยยึดด้วย epoxy putty จนเต็มตลอดทั้งแนว มักมี tensile strength สูงกว่า 20,000 ksc ผู้ผลิตบางรายยังได้มีผลิตภัณฑ์รูปแบบตะแกรง (mesh) อีกด้วย



รูปที่ 2.3 ภาพตัวอย่าง fiber แบบเส้น (Rod)

ข้อแตกต่างในการใช้วัสดุทั้ง 3 รูปแบบ

แบบแผ่นเส้นใยจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสกว้าง ต้องการพื้นที่ในการเตรียมผิวมากกว่าจึงมักใช้เวลา ยาวนานกว่าแบบอื่น แต่มีการกระจายแรงที่ดี จึงค่อนข้างปลอดภัยจากการหลุดล่อนเมื่อรับแรงมากกว่า แบบอื่น จึงเหมาะสมกับการเสริมกำลัง flexural strength อีกทั้งยังเหมาะสมในการเสริมกำลังเพื่อเพิ่ม shear strength และ confinement

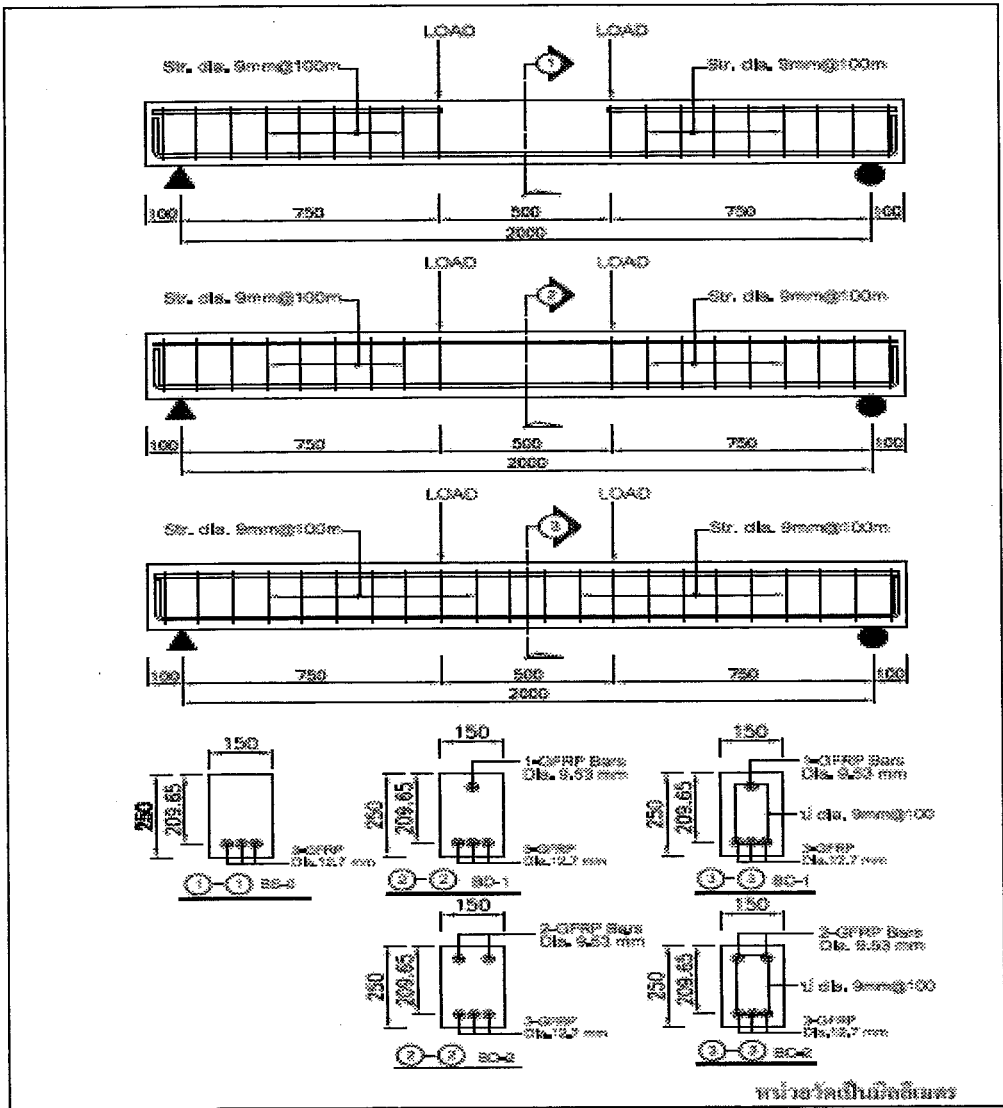
แบบแผ่นแข็งจะมีผิวสัมผัสน้อยกว่าแบบแผ่นเส้นใย จึงต้องการพื้นที่ในการเตรียมผิวน้อยกว่า แต่ความหนาของชั้น adhesive จะหนากว่าและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสจะมากกว่า จึงต้อง ระมัดระวังการเกิดหลุดร่อนเมื่อรับแรงซึ่งสามารถป้องกันได้ด้วยการเตรียมผิวและการติดตั้งที่ดี รวมทั้ง การทดสอบก่อนและหลังการติดตั้ง วัสดุประเภทนี้เหมาะสมกับการเสริมกำลัง flexural strength ของ คานและพื้น

แบบเส้นจะเหมาะสมกับการเสริมกำลัง flexural strength ในคาน เสา และแผ่นพื้นซึ่งมีพื้นที่ใน การติดตั้งน้อย ทั้งยังเหมาะสมกับการเสริม shear strength ในคาน เนื่องจากรับแรงได้สูงในพื้นที่จำกัด และควบคุมทิศทางได้ดี มีการยึดเกาะกับ โครงสร้างเดิมได้ดีเนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสตลอดรอบวง

2.2.2 งานวิจัยด้านการเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย

กฤษฎา ปานเกษม (พ.ศ.2551) ได้ทำการวิจัยการเสริมกำลังคานคอนกรีตที่เสริมกำลังโดย วัสดุท่อน GFRP (Glass fiber reinforced polymer) เป็นวัสดุเสริมกำลังทั้งแรงดึงและแรงอัด ซึ่งหน้าตัด ของคานที่ทำการเสริมกำลังมีขนาดเท่ากันหมด โดยออกแบบให้เกิดการวิบัติแบบ Concrete crushing failure

ซึ่งได้ทำการแบ่งคานออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มแรก เสริมกำลังด้วยท่อวัสดุ GFRP รับแรงดึงอย่าง เดียว กลุ่มที่สอง เสริมกำลังรับทั้งแรงดึงและแรงอัด กลุ่มที่สาม เสริมกำลังเหมือนกลุ่มที่ สอง แต่เสริม ระยะห่างของเหล็กดัดต่างกัน



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะคานที่ทำการทดสอบ

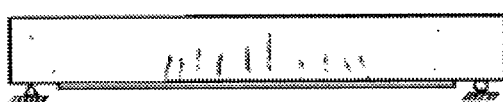
พบว่าคานที่ทำการเสริมกำลังมีค่าการรับกำลัง โดยน้ำหนักบรรทุกเพิ่มมากขึ้น จากการเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง load & Deflection ที่ได้จากการทดสอบ และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างกลุ่มคานที่สอง และกลุ่มคานที่สามมีอัตราที่น้อยเมื่อเทียบกับกลุ่มคานที่หนึ่ง เนื่องจากมีการเสริมท่อน GFRP เพื่อรับแรงอัด

ปิยะ รัตนวุฒิสวรรณ (พ.ศ.2546) ได้ทำการวิจัยการเสริมกำลังคานคอนกรีตและซ่อมแซมคานคอนกรีตด้วยแผ่นใยพลาสติกเสริมคาร์บอน โดยที่มุ่งเน้นศึกษาในพฤติกรรมและค่าหน่วยความเข้มของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีต โดยทำการแบ่งคานออกเป็น 2 แบบ 1. แบบที่เสริมกำลัง 2. แบบที่ทำการซ่อมแซม โดยทำการให้ load กับคานไปประมาณ 90 % ของ Untimate load ของคานตัวควบคุม แล้ว

เสริม โดยแผ่นใยพลาสติกคาร์บอนซึ่งคานทั้งหมดเป็นคาน แบบ Simple beam รับน้ำหนักกระทำแบบ 4-point load

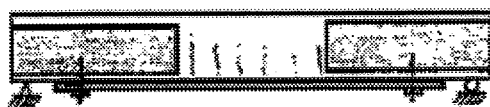
โดยการวิบัติของคานที่ทำการเสริมกำลังโดย แผ่นใยพลาสติกเสริมคาร์บอน จะมีอยู่ 2 ลักษณะ 1. การพังเฉพาะที่ (local failure) 2. การวิบัติด้วย โมเมนต์ดัด (flexural failure) จากผลการทดสอบจะพบว่าคานที่ทำการเสริมกำลังและคานที่ซ่อมแซมจะมีกำลังที่สูงขึ้น 41% – 166 % เมื่อเทียบกับคานตัวควบคุม ในขณะที่รอยร้าวจะเกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กและกระจายตัวสูงกว่า คานตัวควบคุม และมีค่า การโก่งตัวลดลงถึง 9%- 25% ของคานควบคุม

Alfarabi Sharif, G.J.AI – Sulaimani, I.A.Basumbul,M.H.Baluch and B.N. Ghaleh ได้ ทำการศึกษาเกี่ยวกับการซ่อมคานด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) โดยการทดลองหารูปแบบที่ ต่างกัน การเสริมที่ทำให้เกิดการวิบัติอย่างสมบูรณ์ มีการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับการ คำนวณทางทฤษฎี จากผลการทดสอบพบว่ารูปแบบที่มีการยึดส่วนปลายของแผ่นพลาสติกเสริมแรงด้วย สลักหรือท่อหุ้มรอบบริเวณที่เกิดแรงเฉือนใกล้จุดรองรับของคาน จะให้โมเมนต์ดัดในคานสูงกว่า รูปแบบที่ไม่หุ้มปลายหรือยึดส่วนปลาย ลักษณะรูปแบบการยึดปลายดังรูปแบบที่ 4 (I-Jacket) ของภาพที่ 2-4 จะให้โมเมนต์ดัดมากที่สุด และช่วยในเรื่องของแรงเฉือนการเสริมแผ่นพลาสติกที่หนาทำให้คาน ทดสอบสามารถรับโมเมนต์ดัดได้มากขึ้น ขณะเดียวกันก็มีโอกาสทำให้คานวิบัติในส่วนบริเวณของ ปลายคานทดสอบคือวิบัติด้วยแรงเฉือน และทำให้คานมีความเหนียวลดลงด้วย

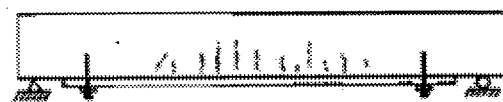


GFRP

ก. รูปแบบที่ 1 การติดแบบไม่ยึดปลาย หุ้มข้างคาน



สลัก GFRP สลัก



สลัก GFRP สลัก

ข. รูปแบบที่ 2 การติดแบบยึดปลายด้วยสลักเกลียว



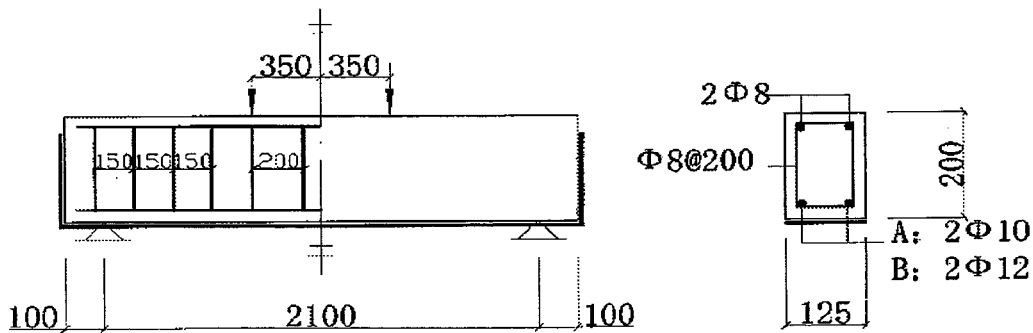
หุ้มรอบ GFRP หุ้มรอบ



ค. รูปแบบที่ 3 การยึดปลายด้วยสลักเกลียวและ ง. รูปแบบที่ 4 การติดแบบไอเจ็ทเก็ต (I-Jacket)

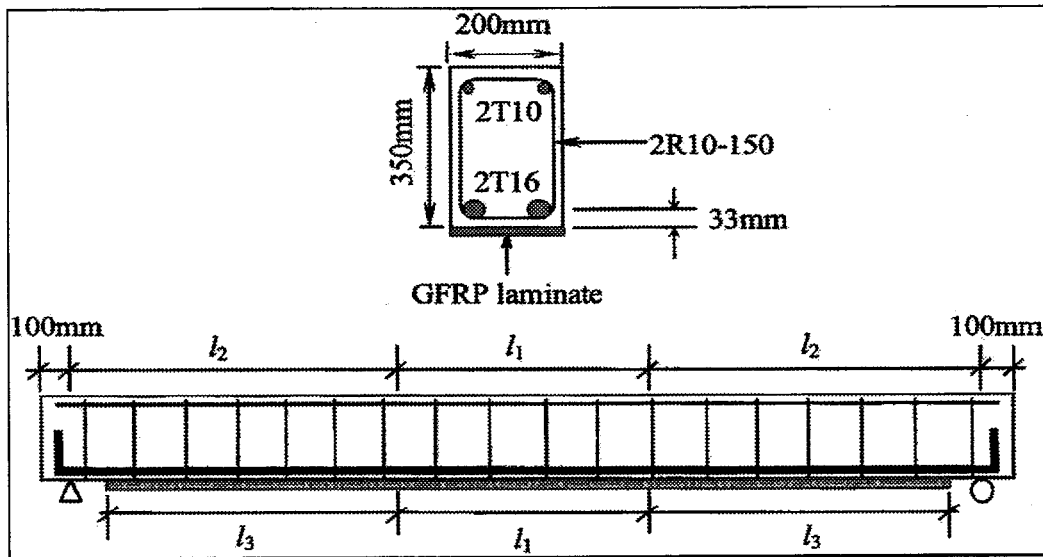
รูปที่ 2.5 ลักษณะการติดพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วแบบต่างๆ

G.J.Xiong ; J.Z.Yang; and Z.B.Ji. (2004) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการเสริมกำลังคานในลักษณะแผ่นเสริมคาร์บอนแบบผสม ตามอัตราส่วน ระหว่าง carbon fiber กับ glass fiber rein-forced polymer โดยทำการทำการแบ่งคานออกเป็น 3 กลุ่ม 1. คานเสริมกำลังด้วย carbon-fiber 100% 2. คานที่เสริมกำลังโดย hybrid – fiber ตามอัตราส่วน carbon-fiber 0.8/glass-fiber 1 โดยที่ความยึดเหนี่ยวของวัสดุผสมนี้เกิดน้อยมาก 3. คานที่ไม่ได้ทำการเสริมกำลัง เพื่อที่จะกำหนดเป็นตัวควบคุม โดยทำการทดสอบแบบ 2 –point load โดยให้ load ที่ ละ 50 KN. จนกว่าคานจะเกิดการวิบัติจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า วัสดุ Hybrid-carbon จะมีค่าการรับกำลังที่สูงกว่า



รูปที่ 2.6 รูปแสดงคานที่ทดสอบ

Sing-Ping Chiew, M.ASCE¹; Qin Sun²; and Yi Yu³ (2007) ได้ทำการวิจัยคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการเสริมกำลังโดยแผ่น Glass fiber rein-forced polymer โดยจัดการแบ่งคานขนาด $20 \times 35 \text{ cm}^2$ ขนาด 2.80 m. ทดสอบที่ระยะ จาก support – support ที่ระยะ 2.6 m. , 2.2 m. และ 1.9 m. ออกเป็น 2 กลุ่ม การทดสอบแบบ two-point load ที่ กลุ่ม A ทำการทดสอบที่ระยะ (l_1) 50 cm. ตรงกึ่งกลาง และ กลุ่ม B ทำการทดสอบที่ระยะ (l_1) 20 cm. ตรงกึ่งกลาง โดยในแต่ละกลุ่มจะมี คานควบคุม 1 ตัว การติดตั้ง Glass fiber rein-forced polymer ในแต่ละกลุ่มจะมีการเพิ่มความหนาและระยะการทดสอบตามตาราง



รูปที่ 2.7 รูปคานที่ทำการทดสอบ

Beam	Laminate thickness (mm.)	l_2 (mm.)	l_3 (mm.)	l_3 / l_2 (mm.)
A2	1.7	800	750	0.9375
A3	3.4	800	750	0.9375
A4	5.1	800	750	0.9375
A5	1.7	800	600	0.75
A6	1.7	800	450	0.5625
B2	1.7	1,100	1,050	0.95
B3	3.4	1,100	1,050	0.95
B4	5.1	1,100	1,050	0.95
B5	1.7	1,100	900	0.8
B6	1.7	1,100	750	0.65

ตารางที่ 2.2 ชนิดของ Glass fiber rein-forced polymer แต่ละตัวที่ทำการทดสอบ

จากผลการทดสอบที่ได้กำหนดข้างต้นจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเสริมกำลังโดย Glass fiber reinforced polymer ค่าการรับโมเมนต์ดัดเฉลี่ย มีค่าเพิ่มขึ้น 24.85 % ที่ ความหนา 1.7 mm. แล้ว เมื่อทำการ

เพิ่มความหนา เป็น 3.4 และ 5.1 mm. ตามลำดับ โมเมนต์ดัดประลัยมีค่าเพิ่มขึ้น 34.51% และ 46.32% ตามลำดับ ส่วนการทดสอบที่ทำการเปลี่ยนระยะ ทดสอบ จะมีค่ารับโมเมนต์ดัดประลัย ที่ระยะ 2.2 m. และ 1.9 m. เพิ่มขึ้น 20.25% และ 25.62%

บทที่ 3

หลักการและทฤษฎีที่ใช้

3.1 กล่าวนำ

เนื่องจากคานที่ซ่อมแซมหรือเสริมกำลังด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วมีพฤติกรรมเหมือนกับคานประกอบ ดังนั้นหลักการและทฤษฎีของคานประกอบจึงถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายพฤติกรรมโดยทั่วไป

3.2 พฤติกรรมของคานประกอบ

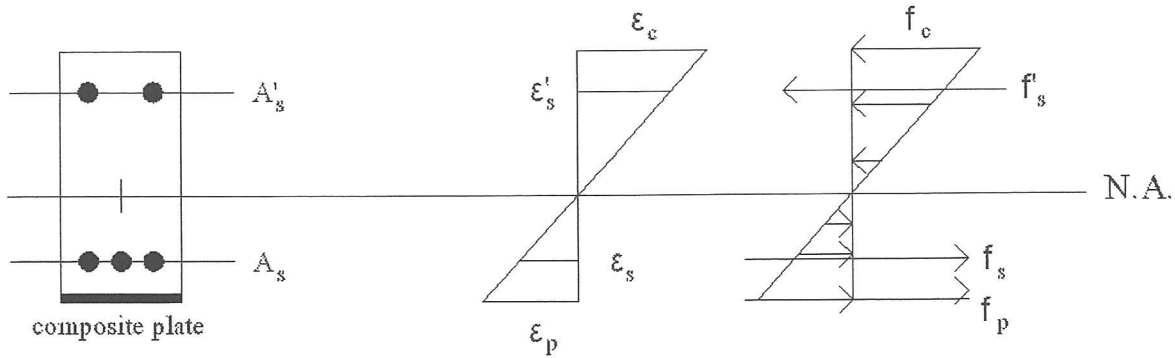
นับตั้งแต่เริ่มมีแรงภายนอกกระทำบนตัวคานจนกระทั่งเกิดการวิบัติ คานประกอบจะมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนอยู่หลายขั้นตอน ซึ่งพฤติกรรมเหล่านี้ต้องอาศัยสมมติฐานบางอย่างในการอธิบาย แต่พฤติกรรมของคานประกอบจะคล้ายคลึงกับพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา ดังนั้นสมมติฐานของคานคอนกรีตจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้กับคานประกอบดังนี้

1. แรงภายในที่หน้าตัดใดๆของคานประกอบจะต้องสมดุลกับแรงภายนอกที่มากระทำ
2. หน้าตัดของคานประกอบทั้งก่อนและในขณะที่มีแรงกระทำบนคานต้องยังคงเป็นระนาบราบ (plane)
3. ความเค้นบนหน้าตัดของคานประกอบขึ้นอยู่กับความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงภายนอกที่มากระทำ โดยเป็นไปตามความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของแต่ละวัสดุ
4. ค่าความเครียดของวัสดุเสริมกำลังและเหล็กเสริมจะต้องเท่ากับค่าความเครียดในเนื้อคอนกรีตที่อยู่ใกล้เคียง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่ามีการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมหรือวัสดุเสริมกำลังกับคานคอนกรีตโดยสมบูรณ์

เมื่อเริ่มให้มีแรงภายนอกมากระทำบนคาน โดยที่แรงภายนอกยังไม่ทำให้ความเค้นดึง (tensile stress) ในเนื้อคอนกรีตเกินค่าโมดูลัสแตกร้าวของคานคอนกรีต (modulus of rupture) หน้าตัดของคอนกรีตจะยังไม่เกิดรอยแตกร้าวและสามารถต้านทานแรงดึงและแรงอัดได้ ในขณะเดียวกันเหล็กเสริมและวัสดุเสริมแรงดึงจะมีความเครียดเกิดขึ้นเท่ากับคอนกรีตที่อยู่โดยรอบตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ เหล็กเสริมและวัสดุเสริมแรงดึงจึงต้องรับแรงดึงเหมือนกับคอนกรีต การกระจายตัวของความเค้นและความเครียดในช่วงนี้จะนำไปตามรูปที่ 3.1 และเมื่อเพิ่มแรงกระทำทำให้คานประกอบจนค่าความเค้นดึง

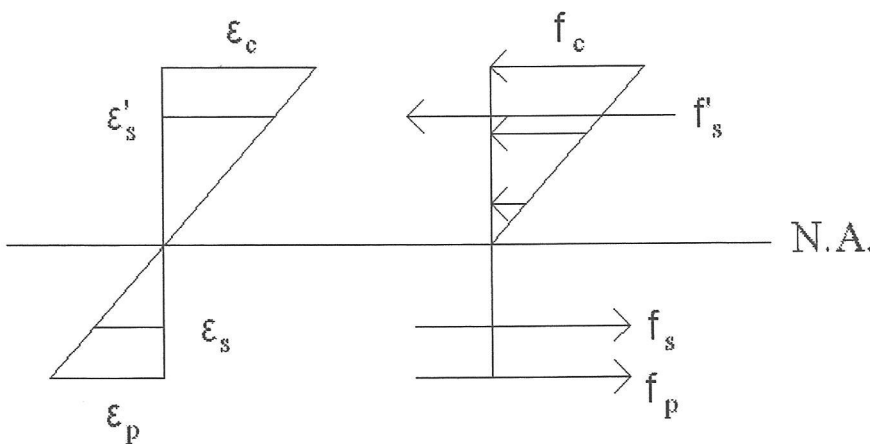
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ในเนื้อคอนกรีตมีค่าเท่ากับ โมดูลัสแตกร้าว รอยแตกร้าวจะเริ่มปรากฏและจะขยายตัวอย่างรวดเร็วส่งผลให้แนวแกนสะเทิน (neutral axis) ขยับตัวสูงขึ้น ลักษณะรอยแตกร้าวที่ดีจะต้องมีขนาดเล็กและไม่เปิดกว้างซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนและสึกกร่อนของเหล็กเสริมได้ดี ซึ่งเป็นลักษณะของรอยแตกร้าวในคานประกอบส่วนใหญ่



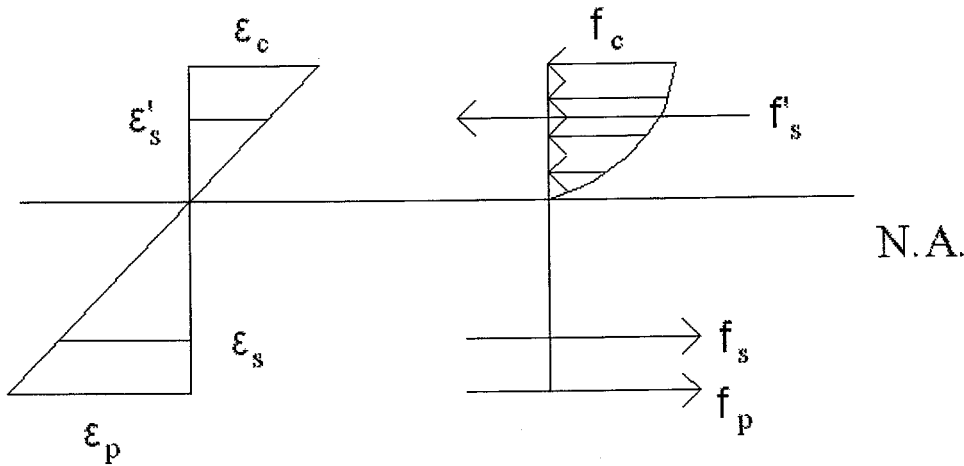
รูปที่ 3.1 แสดงการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดก่อนหน้าตัดเกิดการแตกร้าว

คอนกรีตในส่วนที่แตกร้าวจะไม่สามารถรับแรงดึงได้อีก ทำให้เหล็กเสริมและวัสดุรับแรงดึงต้องทำหน้าที่รับแรงดึงแทน ขณะที่ความเค้นอัดในเนื้อคอนกรีตยังมีค่าไม่เกิน $0.5 f'_c$ พฤติกรรมของคอนกรีตยังคงเป็นยืดหยุ่นแบบเส้นตรงอยู่ การกระจายตัวของความเค้นและความเครียดในช่วงนี้จะเป็นไปตามภาพที่ 3.2



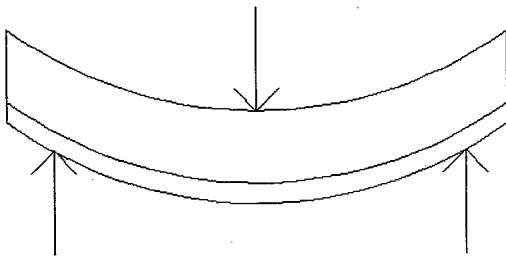
รูปที่ 3.2 แสดงการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดเมื่อหน้าตัดเริ่มแตกร้าว

และเมื่อแรงกระทำภายนอกมีค่าเพิ่มขึ้น จนค่าความเค้นอัดในเนื้อคอนกรีตมีค่าเกิน $0.5f_c'$ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตจะไม่เป็นเส้นตรงอีกต่อไป การกระจายตัวของความเค้นและความเครียดจะเป็นไปตามภาพที่ 3.3

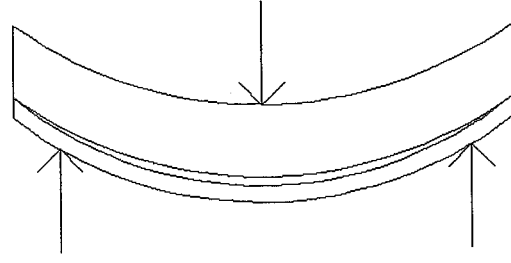


รูปที่ 3.3 แสดงความเค้นและความเครียดของหน้าตัดเมื่อความเค้นอัดของคอนกรีตมีค่าเกิน $0.5f_c'$

ในส่วนของการวิบัติ การวิบัติของคานประกอบจะแตกต่างไปจากคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดาเนื่องจากคานประกอบจะมีการวิบัติเฉพาะที่ (local failure) เพิ่มเข้ามาอีก 1 ลักษณะ นอกเหนือไปจากการวิบัติจากแรงดัด (flexural failure) โดยการวิบัติเฉพาะที่จะมีสาเหตุมาจากแรงเฉือนตามแนวนอน (horizontal shear) เป็นหลักทำให้การวิบัติในลักษณะนี้เป็นการวิบัติแบบเปราะ (brittle failure) โดยแรงเฉือนตามแนวนอนนี้จะก่อให้เกิดการเลื่อนตัว (slip) ของชั้น (layers) ในคานประกอบ ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยอาศัยรูปที่ 3.4 กล่าวคือ คานประกอบจะเกิดจากชั้นของวัสดุหลายๆชั้นมาประกอบเข้าด้วยกัน โดยมีแรงยึดเหนี่ยวของผิวสัมผัสระหว่างชั้นเป็นตัวประสานในชั้นแต่ละชั้นมีพฤติกรรมเสมือนหนึ่งเป็นเนื้อเดียวกันตลอด ซึ่งเมื่อคานประกอบรับแรงภายนอกที่มากระทำ คานประกอบจะเกิดหน่วยแรงต่างๆขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งแรงเฉือนตามแนวนอน ซึ่งถ้าค่าของแรงเฉือนตามแนวนอนมีค่าน้อยกว่าค่าการยึดเหนี่ยวของผิวสัมผัสระหว่างชั้นแล้ว ชั้นส่วนทั้งสองจะมีพฤติกรรมเสมือนเป็นชั้นส่วนเดียวกัน ดังรูปที่ 3.4 (ก) แต่ถ้าค่าของแรงเฉือนตามแนวนอน มีค่ามากกว่าค่าการยึดเหนี่ยวของผิวสัมผัสระหว่างชั้นแล้ว หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือค่าการยึดเหนี่ยวของผิวสัมผัสระหว่างชั้นมีกำลังไม่เพียงพอ ชั้นส่วนทั้งสองจะเกิดการเลื่อนแยกจากกันดังรูปที่ 3.4 (ข)



(ก) แสดงการยึดเหนี่ยวที่สมบูรณ์



(ข) แสดงการยึดเหนี่ยวที่ไม่สมบูรณ์

รูปที่ 3.4 แสดงพฤติกรรมของคานประกอบภายใต้แรงกระทำจากภายนอก

3.3 โมดูลัสยืดหยุ่น

3.3.1 การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

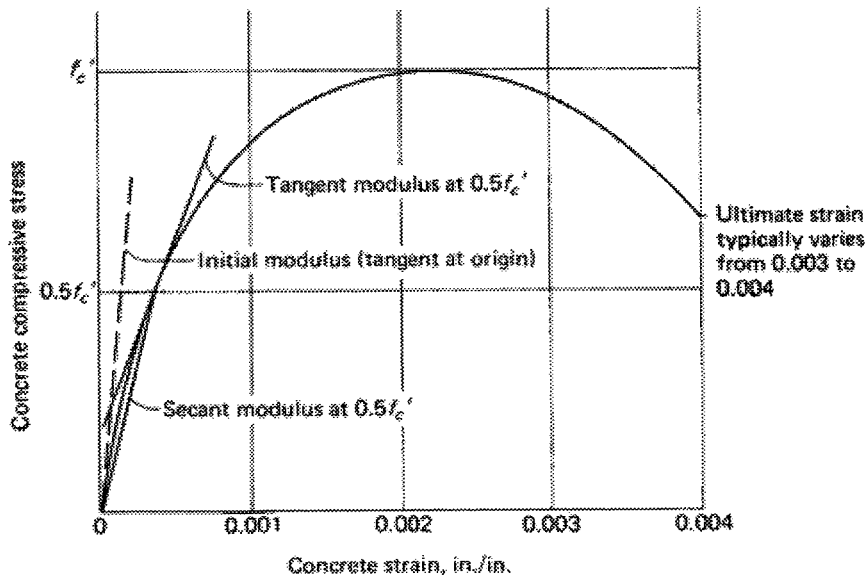
การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตพิจารณาจากความสัมพันธ์ของเส้นโค้ง พาราโบลาตรีโก 2 ระหว่างหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่แสดงใน รูป 3.5 โดยแบ่ง ออกเป็น 3 วิธีดังนี้สำหรับโครงการวิจัยนี้จะใช้การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแบบ Initial Tangent Modulus เนื่องจากจะได้ค่าที่มีค่ามากที่สุด

1. Initial Tangent Modulus คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นสัมผัสซึ่งได้จากการลากเส้นจากจุดเริ่มต้นให้สัมผัสกับเส้นความสัมพันธ์ของหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัว (Stress – Strain Curve) ที่จุดเริ่มต้นนั้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่หาได้โดยวิธีนี้เป็นค่าที่สมมุติว่า คอนกรีตเป็นเสมือนวัสดุยืดหยุ่นเช่นเดียวกับเหล็ก โดยคิดว่าไม่มีการเสียรูปอย่างถาวรเมื่อลดน้ำหนัก หรือเอาแรงกระทำออก

2. Secant Modulus คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นที่ลากจากจุดเริ่มต้น (Origin) ถึงจุดที่พิจารณา คือจุดที่มีหน่วยแรงอัดเท่ากับ 40 % ถึง 50 % ของหน่วยแรงอัดสูงสุด บนเส้น ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัว (Stress – Strain Curve) มาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท. ถือว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่หาได้โดยวิธีนี้เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่แท้จริงของคอนกรีตในช่วงใช้งาน

3. Tangent Modulus คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นที่ลากสัมผัสจุดใดๆ บนเส้น ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัว (Stress – Strain Curve) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่หาได้ โดยวิธีนี้เป็นค่าที่แท้จริงของคอนกรีตทุกระดับของหน่วยแรงอัด

ในทางปฏิบัติถือว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่หาโดยวิธี Secant Modulus เป็นค่าแท้จริงที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีต ซึ่งรับน้ำหนักในช่วงใช้งานเนื่องจากจะพิจารณาถึงหน่วยการหดตัวแบบพลาสติกเข้าไปด้วย จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าสูงขึ้นเมื่อแรงอัดการเพิ่มหน่วยแรงอัด หากทำการทดสอบกำลังต้านแรงอัดโดยวิธีมาตรฐาน พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะขึ้นอยู่กับกำลังต้านทานแรงอัดประลัยของคอนกรีตและหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต



รูปที่ 3.5 แสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (Mehta, 1986)

สมการที่อ้างอิงโดย ACI 209

$$E_c = 4,270w_c^{1.5} \sqrt{f'_c} \quad (3.1)$$

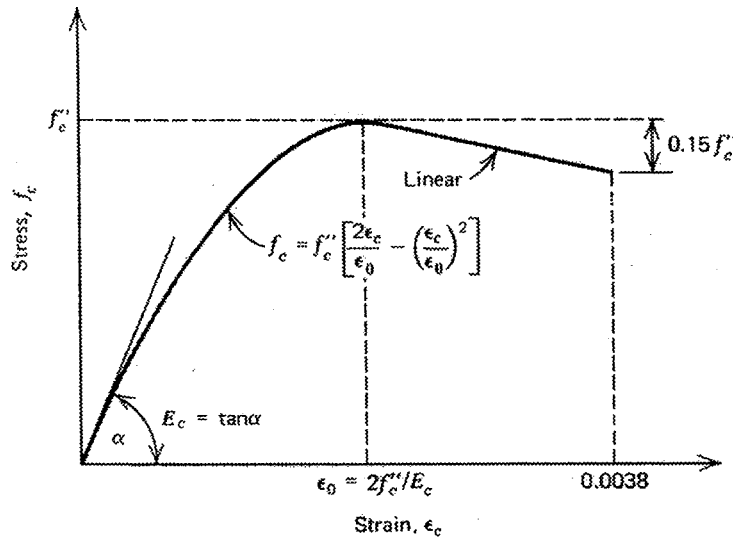
โดยที่ E_c = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (kg/cm^2)

w_c = หน่วยน้ำหนักคอนกรีต (T/m^3)

f'_c = กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต (kg/cm^2)

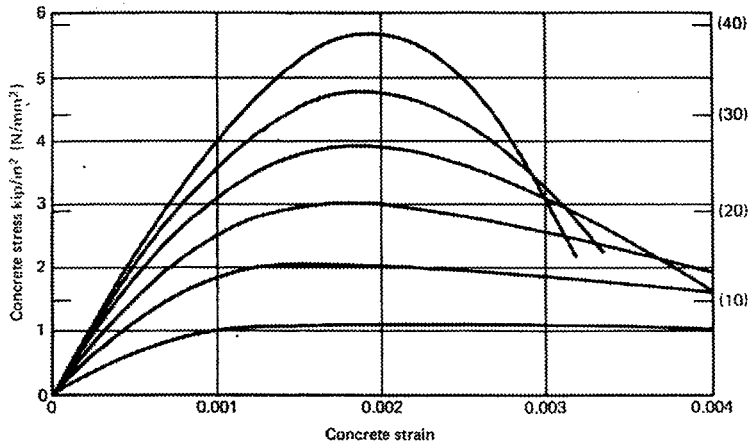
3.4 ความเค้น – ความเครียดของคอนกรีต

สภาวะคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบมีความเค้นในทิศทางเดียวเท่านั้น คือความเค้นมีแกนเดียว เพราะว่าการก่อสร้างเกี่ยวกับโครงสร้างส่วนใหญ่ในคอนกรีตความเค้นมีทิศทางจำนวนมากมาย แต่ทว่าในสมมุติฐานของโครงการวิจัยนี้จะพิจารณาให้คอนกรีตมีสภาวะความเค้นแกนเดียวดังแสดงในรูป 3.6



รูปที่ 3.6 เส้นโค้งความเค้น – ความเครียดในอุดมคติ
สำหรับคอนกรีตรับแรงอัดแกนเดียว

รูปที่ 3.7 แสดงเส้นโค้งความเค้น – ความเครียดของคอนกรีตที่ให้แรงกระทำตามแนวแกน โดยทั่วไปที่ได้จากการทดสอบคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่มีกำลังรับแรงกระทำตามแนวแกนไม่เท่ากัน การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะปฏิบัติอย่างละเอียด เส้นโค้งพาราโบลาดีกรี 2 อย่างกว้างที่ได้เกือบจะเป็นเส้นตรงจนถึงประมาณครึ่งของกำลังรับแรงอัด เส้นโค้งจะค่อยๆ ลดลง ยอดของเส้นโค้งของคอนกรีตกำลังสูงจะค่อนข้างแหลม แต่ถ้าคอนกรีตกำลังต่ำเส้นโค้งที่ได้จะมีลักษณะยอดแบน ความเครียดที่ค่าความเค้นสูงสุดจะอยู่ที่ประมาณ 0.002 หลังจากค่าความเค้นสูงสุดคอนกรีตยังสามารถทนทานอยู่ได้แม้ว่าจะเกิดรอยร้าวขนานกับทิศทางที่แรงกระทำกับคอนกรีตและคอนกรีตจะวิบัติที่ความเครียดประมาณ 0.003 - 0.004 การทดสอบคอนกรีตกับเครื่องทดสอบอาจล้มเหลวหากอัตราการเพิ่มแรงกระทำเร็วเกินไปจนเกิดการระเบิดขึ้นก่อน เพราะคอนกรีตไม่สามารถดูดซับพลังงานความเครียดที่เกิดขึ้นจากเครื่องมือทดสอบได้ทัน เพราะฉะนั้นการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจำเป็นต้องเป็นไปตามมาตรฐานของการทดสอบ



รูปที่ 3.7 เส้นโค้งความเค้น – ความเครียดสำหรับคอนกรีตรูปทรงระบอก
ให้แรงกระทำตามแนวแกนที่มีหน่วยแรงอัดต่างๆกัน

3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีต

Hognestad, E., Hanson, N. W., and McHenry, D. (1955) ได้ทำการทดสอบการกดอัดคอนกรีตตามแนวแกน เพื่อศึกษาการกระจายหน่วยแรงของคอนกรีตที่สภาวะกำลังรับแรงประลัยที่ใช้ในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก จากผลการทดสอบพฤติกรรมทางกลของคอนกรีตโดยเฉลี่ย พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีต มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งสามารถแสดงหน่วยแรงในเทอมของความเครียดได้ดังนี้

$$f_c = f_c' \left[2 \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \quad (3.2)$$

$$\epsilon_0 = \frac{2f_c'}{E_c} \quad (3.3)$$

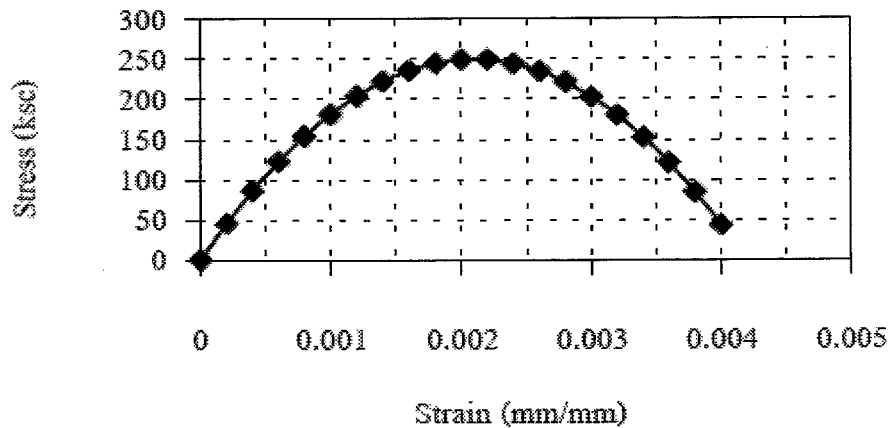
โดยที่ f_c คือหน่วยแรงอัดของคอนกรีต

f_c' คือหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีต

E_c คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

ϵ_0 คือ ความเครียดที่จุดหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่รับแรงกดอัด

ϵ_c คือ ความเครียดของคอนกรีตที่รับแรงกดอัด



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีต

3.6 คานคอนกรีตเสริมเหล็ก

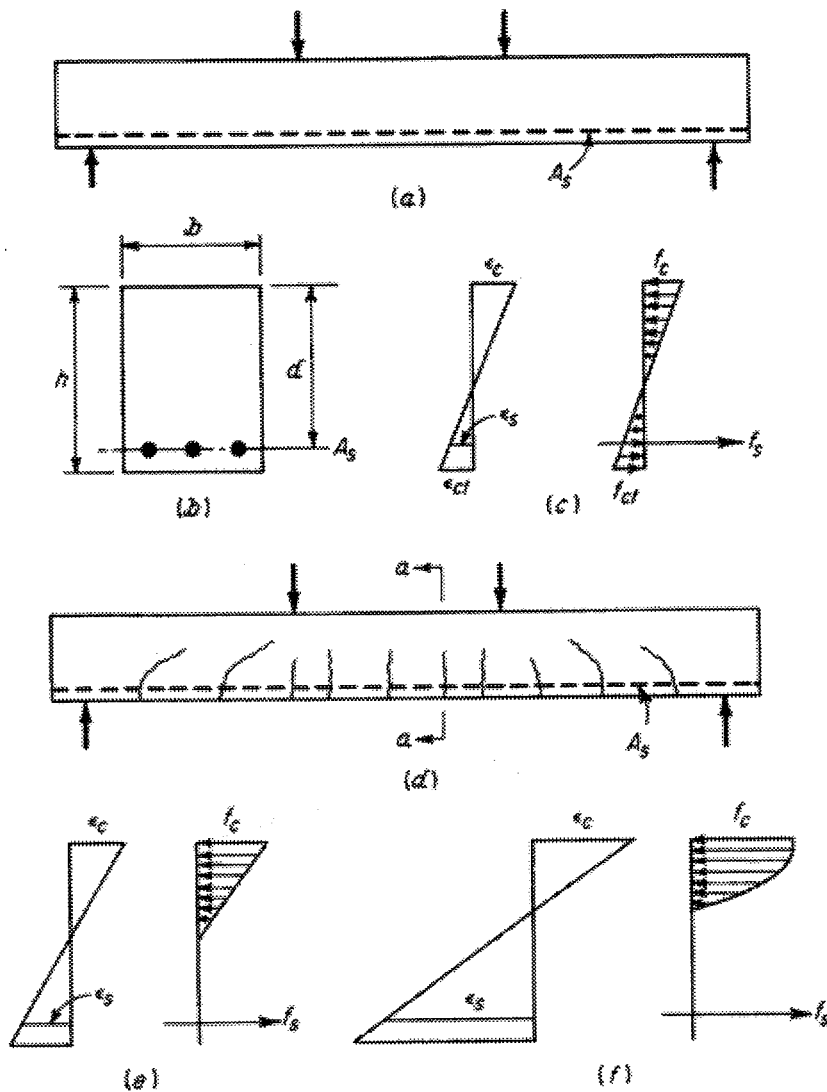
3.6.1 นิยาม

คานคอนกรีตเสริมเหล็กเป็น โครงอาคารที่อยู่ในแนวนอน โดยมีเหล็กเสริมเอก (Main reinforcement)เรียงไปตามแนวความยาวของคานเพื่อไว้รับหรือต้านโมเมนต์ดัดที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่ง เช่น น้ำหนักแผ่จากผนัง กำแพง น้ำหนักแผ่จากพื้นอาคาร หรือน้ำหนักที่กระทำแบบจุด เช่น จากคานชอย เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีเหล็กเสริมทางขวางในตัวคานเพื่อไว้ต้านทานแรงเฉือน ส่วนเกินที่เกินกว่าคอนกรีตเองจะรับได้ ทั้งนี้ เพราะน้ำหนักบรรทุกที่กระทำจะทำให้เกิดโมเมนต์ดัดหรือแรงเฉือนด้วยเสมอ (Shear Center)เป็นผลให้เกิดหน่วยแรงภายในต่างๆ ในตัวคาน คือ หน่วยแรงดัด หน่วยแรงบิด และหน่วยแรงเฉือน ในการคำนวณออกแบบจะต้องเลือกใช้ขนาดรูปตัดของคอนกรีตและปริมาณเหล็กเสริมตลอดจนระยะเรียงเหล็กเสริมให้เหมาะสมเพียงพอให้คานนั้นสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามต้องการ โดยไม่เกิดการแอ่นหรือโก่งตัวมากเกินไปหรือมีรอยร้าวกว้างมากในสถานะที่รับน้ำหนักบรรทุกใช้งานปกติทั่วไปคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีรูปตัดเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยมีความลึกของคานมากกว่าความกว้าง

3.6.2 พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

คานคอนกรีตล้วนไม่มีประสิทธิภาพในการรับแรงดัดเนื่องจากกำลังรับแรงดัดของ คอนกรีตนั้นต่ำกว่ากำลังรับแรงอัดมาก ดังนั้นคานคอนกรีตล้วนจะพังด้วยแรงดัดที่น้ำหนักบรรทุกต่ำมากทำให้กำลัง

รับ แรงอัด ไม่ถูกใช้ อย่างเต็มที่ ด้วยเหตุผลนี้เองจึงมีการใช้เหล็กเสริมกำลังบนด้านรับแรงดึงใกล้กับผิว นอก สุดของด้านรับแรงดึง โดยมีระยะหุ้มเพื่อป้องกันผลกระทบจากไฟไหม้และการกัดกร่อน ดังนั้น แรงดึงส่วนใหญ่ในคานคอนกรีตจึงถูกต้านทานโดยเหล็กเสริม ในขณะที่คอนกรีตจะถูกใช้ให้รับแต่ แรงอัด การทำงานร่วมกันของวัสดุทั้งสองชนิดในลักษณะนี้จะเกิดขึ้น ได้ก็ต่อเมื่อ ไม่ มีการเลื่อน ไถล ระหว่างวัสดุทั้งสอง โดยการใช้เหล็กข้ออ้อยที่ ให้กำลังยึดเหนี่ยวสูง และถ้าจำเป็นก็จะใช้การงอข้อที่ ปลายเหล็กเสริม รูปที่ 3.9 แสดงตัวอย่างของคานหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าภายใต้การรับหนัก



รูปที่ 3.9 พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุก

เมื่อน้ำหนักบรรทุกบนคานค่อยๆเพิ่มขึ้นจากศูนย์ถึงระดับที่ทำให้คานพัง คานจะแสดงพฤติกรรมที่แตกต่างกันไปตามขนาดของน้ำหนักบรรทุก ที่น้ำหนักเบาซึ่งหน่วยแรงดึงในคอนกรีตยังไม่ถึงค่าโมดูลัสแตกหักหน้าตัดทั้งหมดของคอนกรีตจะช่วยกันต้านทานโมเมนต์ ด้านหนึ่งจะรับแรงดึงและอีกด้านหนึ่งของแกนสะเทินจะรับแรงอัด นอกจากนี้เหล็กเสริมซึ่งจะมีหน่วยแรงดึงเท่ากับคอนกรีตที่ห่อหุ้มอยู่ก็จะมีหน่วยแรงดึงด้วย ที่สภาวะนี้หน่วยแรงในคอนกรีตจะมีค่าน้อยและเป็นสัดส่วนกับความเครียด การกระจายของหน่วยแรงและความเครียดในคอนกรีตและในเหล็กเสริมตลอดทั้งความลึกของหน้าตัดเป็นดังแสดงในรูปที่ 3.9c

เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นจนหน่วยแรงดึงเพิ่มถึงกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต ก็จะเกิดการแตกร้าวจากแรงดึงขึ้นและขยายตัวขึ้นด้านบนอย่างรวดเร็วถึงบริเวณแกนสะเทินซึ่งจะขยับขึ้นเนื่องจากรอยร้าวเช่นกัน รูปแบบการกระจายของรอยร้าวถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.9d ในคานที่ได้รับการออกแบบมาอย่างดี ความกว้างของรอยร้าวจะเล็กมาก(ขนาดเส้นผม)จนไม่มีปัญหาของการกัดกร่อนหรือความสวยงาม ในหน้าตัดที่เกิดการแตกร้าวเช่นหน้าตัด $a-a$ ในรูปที่ 3.9d คอนกรีตจะไม่สามารถรับแรงดึงได้เลย ดังนั้นเหล็กจึงรับแรงดึงทั้งหมด ที่น้ำหนักบรรทุกไม่มากนักถ้าหน่วยแรงอัดในคอนกรีตไม่เกิน $f_c/2$ หน่วยแรงและความเครียดจะยังเป็นสัดส่วนกันอยู่ การกระจายหน่วยแรงและความเครียดที่หน้าตัดแตกร้าวจะเป็นดังแสดงในรูปที่ 3.9e เมื่อน้ำหนักยังคงเพิ่มขึ้นอีกหน่วยแรงและความเครียดจะเพิ่มขึ้นอย่างไม่เป็นสัดส่วนกันดังในรูปที่ 3.9f

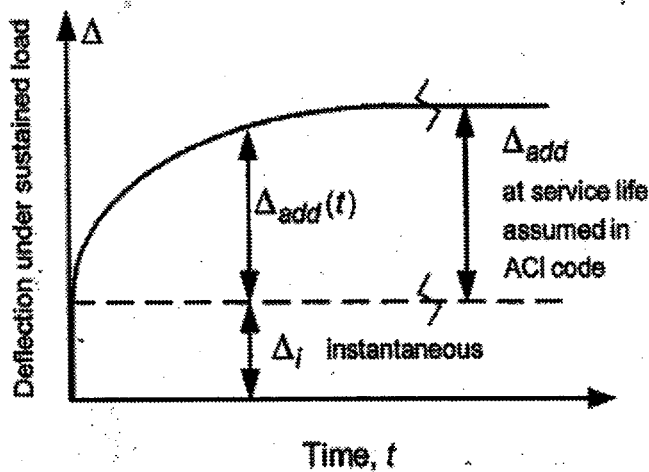
จนในที่สุดเมื่อถึงกำลังของคานการพังทลายจะเป็นในแบบใดแบบหนึ่งในสองแบบดังนี้ หนึ่ง ถ้าใช้เหล็กเสริมในปริมาณน้อยที่น้ำหนักบรรทุกค่าหนึ่งเหล็กจะเกิดการครากซึ่งจะยืดออกเป็นปริมาณมากและรอยร้าวจากแรงดึงในคอนกรีตจะแยกออกจนเห็น ได้อย่างชัดเจนและแผ่ขึ้นด้านบนพร้อมกับมีการแอ่นตัวของคาน เมื่อเกิดเหตุการณ์เช่นนี้ขึ้นความเครียดในบริเวณรับแรงอัดที่เหล็กก็จะเพิ่มขึ้นจนถึงระดับของกำลังบีบอัดในคอนกรีต การพังทลายจากแรงอัดครั้งที่สอง นั้นจะเกิดขึ้นที่น้ำหนักบรรทุกมากกว่าที่ทำให้เหล็กครากเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นการถึงจุดครากของเหล็กจะเป็นตัวกำหนดกำลังของคานที่มีเหล็กปริมาณน้อย การวิบัติจากการครากจะค่อยๆเกิดและถูกสังเกตเห็นได้เช่นการที่รอยร้าวกว้างและยาวขึ้น และการแอ่นตัวมีมากขึ้น

ในทางกลับกันถ้าเหล็กในคานมีปริมาณมากคอนกรีตอาจทนแรงอัดไม่ไหวก่อนที่เหล็กจะเริ่มคราก ทำให้คอนกรีตพังจากการบีบอัดเมื่อความเครียดมากขึ้นจนถึงประมาณ 0.003-0.004 ในหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า การวิบัติจากแรงอัดของคอนกรีตจะเกิดขึ้นทันทีทันใดโดยไม่มี การเตือนล่วงหน้า ด้วย

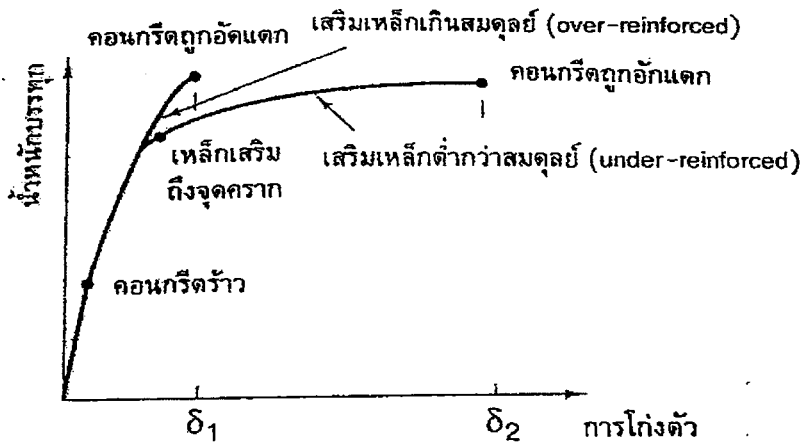
เหตุนี้เองจึงควรกำหนดขนาดของคานเพื่อให้เมื่อต้องรับน้ำหนักเกินแล้ว การวิบัติจะเริ่มโดยการครากในเหล็กเสริม

3.6.3 การแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

การแอ่นตัว หมายถึง การเคลื่อนตัวจากตำแหน่ง หนึ่งในโครงสร้างก่อนการรับแรง/น้ำหนัก ไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งหลังการรับแรง/น้ำหนัก ในคานช่วงเดียวที่มีน้ำหนักแผ่กระจายสม่ำเสมอกระทำ การแอ่นตัวสูงสุดของคานจะเกิดขึ้นที่กึ่งกลางคาน โดยมีทิศทางลงล่าง แต่ถ้าคาน ช่วง เดียวนี้ทำการอัดแรงด้วยลวดอัดแรงจะทำให้เกิดการแอ่นตัวทิศทางขึ้นสวนทางกลับการแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก สัญลักษณ์ที่ใช้ให้เครื่องหมายบวก (+) สำหรับการแอ่นตัวลงและ เครื่องหมายลบ (-) สำหรับการแอ่นตัวขึ้น ที่เวลาใด ๆ (t) การแอ่นตัวสามารถถูกแยก เป็นสองส่วน คือ การแอ่นตัวที่เกิดขึ้นทันทีในระยะสั้น (instantaneous short-term deflection) และการแอ่นตัวที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลา (additional time-dependent deflection) การแอ่นตัวในส่วนที่สองเป็น การแอ่นตัวระยะยาว ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแอ่นตัวกับเวลา



รูปที่ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการโก่งตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

การเอนตัวระยะสั้น หรือทันที จากมาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท ให้พิจารณาหาระยะโก่งตัวทันทีที่มากที่สุดโดยใช้ทฤษฎีอิลาสติก ของการวิเคราะห์โครงสร้างสำหรับส่วน โครงสร้างที่เสริมเหล็กทางเดียวและรับน้ำหนักบรรทุกใช้งานดังนี้

$$\text{ระยะ โกงทันที } \Delta i = \frac{F (\text{น้ำหนัก, ช่วงความยาวคาน, ที่รองรับ})}{E_c I_e} \quad (3.4)$$

ในที่นี้ E_c = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตน้ำหนักธรรมดาปกติ
 $= 15100\sqrt{f_c}$ กก./ซม.²

I_e = โมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผลของรูปตัด, ซม.⁴
 $= (M_{cr}/M_a)^3 I_g + [1 - (M_{cr}/M_a)^3] I_g \leq I_g \quad (3.5)$

M_{cr} = โมเมนต์ตัดแตกร้าว = $f_r I_g / y_t$ กก.-ซม.
(ค่าโมดูลัสแตกร้าว $f_r = 2.0\sqrt{f_c}$ กก./ซม.²)

M_a = โมเมนต์ตัดมากที่สุดที่กระทำอันเนื่องมาจากน้ำหนักบรรทุกใช้งาน
กก.-ซม.

I_g = โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดทั้งหมด ซม.⁴

I_{cr} = โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดแปลงร้าว ซม.⁴

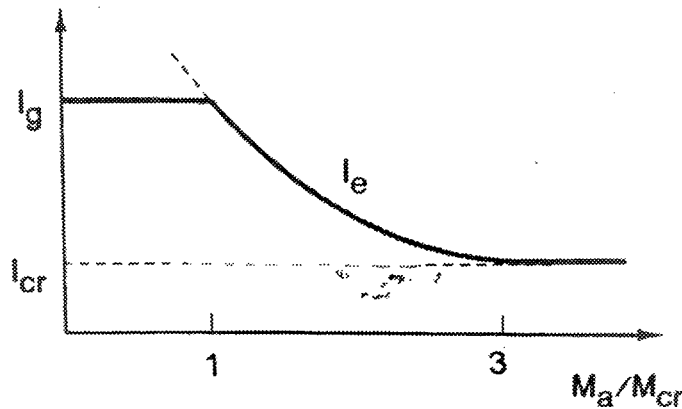
จากสมการ (3.4) จะเห็นว่าต้องทราบสูตรการคำนวณหาค่าระยะ โกงทันทีที่มากที่สุดสำหรับ คานยื่น คานช่วงเดียวธรรมดา และคานต่อเนื่อง (สำหรับคานต่อเนื่อง มักถือว่าระยะ โกงที่กึ่งกลางคาน เป็นค่าระยะ โกงที่มากที่สุด) ดังนั้น ถ้าให้ M เป็นโมเมนต์คัตที่ขอบรองรับของคานยื่น หรือเป็น โมเมนต์ที่กึ่งกลางคานของคานช่วงเดียวธรรมดา และคานต่อเนื่อง โดยที่ L เป็นระยะช่วงความยาวของ คาน หากคานเหล่านี้รับน้ำหนักบรรทุกทุกแผ่สม่ำเสมอ w ตลอดความยาวคาน จะเขียนสมการ (3.4) ให้เป็น สมการทั่วไปเพื่อหาค่าระยะ โกงที่มากที่สุดได้คือ

$$\Delta i = K \frac{(5ML^2)}{(48E_c I_c)} \quad (3.6)$$

โดยที่ K เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการ โกงตัวที่มากที่สุด มีค่าต่างๆดังนี้

- = 1 สำหรับคานช่วงเดียวธรรมดา
- = 2.40 สำหรับคานยื่น
- = 0.60 สำหรับคานช่วงเดียวที่มีปลายยึดแน่นทั้งสองข้าง
- = 0.74 สำหรับคานช่วงเดียวที่มีปลายยึดแน่นข้างหนึ่งและยึดหมุนข้างหนึ่ง
- = $1.20 - 0.20 \frac{M_0}{M_a}$ สำหรับคานต่อเนื่อง เมื่อ M_0 เป็นโมเมนต์คัตบวกมากที่สุดของคานช่วงเดียวธรรมดา และ M_a เป็นโมเมนต์คัตบวกมากที่สุดของคานต่อเนื่องที่มีช่วงความยาวเดียวกัน

จากสมการ (3.5) จะเห็นว่าโมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผลของรูปคัต $I_g = (Mcr/Ma)^3 I_g + [1 - (Mcr/Ma)^3] I_g \leq I_g$ ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าคัตทั้งหมด I_g โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าคัตแปลงร้าว I_{cr} และค่า $(Mcr/Ma)^3$ ดังความสัมพันธ์ที่แสดงในรูปที่ 3.12 ซึ่งสังเกตว่า เมื่ออัตราส่วน Ma/Mcr มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง (หรือ เมื่ออัตราส่วน Mcr/Ma มีค่าเกินกว่าหนึ่ง) ค่าค่าของ โมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิ I_e จะเท่ากับ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าคัตทั้งหมด I_g และเมื่ออัตราส่วน Ma/Mcr มีค่ามาก (ประมาณเท่ากับสาม) ค่าของ โมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผล I_e จะเท่ากับ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าคัตแปลงร้าว I_{cr}



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า I_e กับค่า M_a/M_{cr}

การหาค่าโมเมนต์อินเนอร์เซีย I_g และ I_{cr} ตรงหน้าตัดที่รับโมเมนต์คด M_a ซึ่งอาจเป็นโมเมนต์บวกหรือโมเมนต์ลบสูงสุด พิจารณาดังนี้ ให้หาค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดทั้งหมด I_g โดยประมาณว่าตรงหน้าตัดนั้นไม่มีเหล็กเสริมเลย ส่วนค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดแปลงร้าว I_{cr} ให้พิจารณาที่แนวแกน สะเทิน k_d ของหน้าตัดที่ได้จากการแปลงเนื้อที่หน้าตัดของเหล็กเสริมให้เป็นเนื้อที่หน้าตัดของคอนกรีตด้วยอัตราส่วน โมดูลัส $n = E_s/E_c$

สำหรับค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผลของคานต่อเนื่อง ปกติพิจารณาใช้ค่าเฉลี่ยของโมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผลตรงหน้าตัดที่รับโมเมนต์บวกและโมเมนต์ลบวิกฤต นั่นคือ

$$I_e = 0.50I_{em} + 0.25(I_{e1} + I_{e2}) \quad (3.7)$$

โดยที่ I_{em} เป็นโมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผลที่กึ่งกลางคาน และ I_{e1} และ I_{e2} เป็นโมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผลที่ปลายแต่ละข้างตรงหน้าตัดที่รับโมเมนต์ลบ

อนึ่ง สำหรับคานต่อเนื่องที่มีหน้าตัดคงที่ตลอด (prismatic members) อาจพิจารณาใช้ค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผลที่กึ่งกลางคานเพียงอย่างเดียว หรืออาจเลือกใช้ค่าเฉลี่ยของโมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผลต่อไปนี้ ซึ่งให้ค่าที่ถูกต้องมากขึ้น คือ

ก. เมื่อต่อเนื่องสองด้าน: $I_e = 0.70I_{em} + 0.15(I_{e1} + I_{e2}) \quad (3.8)$

ข. เมื่อต่อเนื่องด้านเดียว: $I_e = 0.85I_{em} + 0.15I_{e1} \quad (3.9)$

โดยที่ I_{e1} เป็นโมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผลของด้านที่ต่อเนื่อง

การแอ่นตัวระยะยาว หรือเพิ่มขึ้นตามกาลเวลาที่เพิ่มขึ้นอันเป็นผลมาจากการหดตัว และการคืบเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเนื่อง(คงค้าง) $\Delta_{(cp + sh)}$ หาได้จากการคูณการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นในทันทีทันใดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงค้าง (Δ_i)_{sus} ด้วยตัวประกอบ

$$\Delta_{(cp + sh)} = \lambda (\Delta_i)_{sus} \quad (3.10)$$

โดยที่

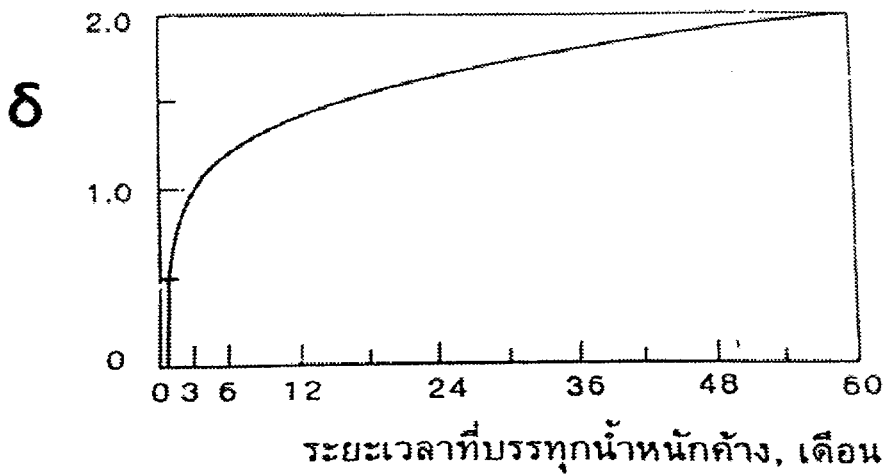
- λ = ตัวคูณประกอบเนื่องจากการล่า = $\frac{\delta}{1+50\rho'}$
- ρ' = อัตราส่วน As'/bd โดยพิจารณาที่กึ่งกลางคานสำหรับคานช่วงเดียวหรือคานต่อเนื่อง และที่ฐานรองรับสำหรับคานอื่น
- As' = เนื้อที่ของเหล็กเสริมรับแรงอัดที่มีในคาน (อาจเป็นเหล็กที่นำไปใช้เพื่อช่วยยึดเหล็กดัด)
- δ = ตัวประกอบตามกาลเวลาที่มีน้ำหนักบรรทุกคงค้างซึ่งมีค่าดังนี้

ระยยะเวลาน้ำหนักคงค้าง	δ
5 ปี และมากกว่า	2.0
12 เดือน	1.4
6 เดือน	1.2
3 เดือน	1.0

ตารางที่ 3.1 ตัวประกอบที่ขึ้นกับเวลา

ที่มา : หนังสือคอนกรีตเสริมเหล็ก (ศรียกริช หิรัญมาศ, 2544)

ถ้าระยะเวลาของการบรรทุกน้ำหนักค้างไม่ตรงตามที่กำหนดให้ ให้หาค่าตัวประกอบ δ โดยใช้ การเทียบส่วนแบบเชิงเส้น



รูปที่ 3.13 การเปลี่ยนแปลงของค่าตัวประกอบตามกาลเวลา

การแ่นตัวที่เกิดขึ้นจะต้องนำมาเปรียบเทียบกับการแ่นตัวที่ยอมให้ในตารางที่ 3.2 ในมาตรฐาน วสท. 1008-38 คำบรรยายให้ข้อมูลสำหรับปรับแต่งขีดจำกัดแล้วแต่กรณี รวมทั้งการพิจารณาการแ่นตัวที่เกิดขึ้นก่อนการติดตั้งผนัง

ชนิดขององค์อาคาร	ระยะแ่นที่พิจารณา	พิกัดระยะแ่น
หลังคาราบซึ่งไม่รองรับหรือไม่ยึดติดกับชั้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างซึ่งคาดว่าจะเกิดความเสียหายเนื่องจากการแ่นตัวมาก	ระยะแ่นที่เกิดขึ้นทันทีเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร L	$\frac{L}{180}$ *
พื้นซึ่งไม่รองรับหรือไม่ยึดติดกับชั้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างซึ่งคาดว่าจะเกิดความเสียหายเนื่องจากการแ่นตัวมาก	ระยะแ่นที่เกิดขึ้นทันทีเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร L	$\frac{L}{360}$
หลังคาหรือพื้นซึ่งไม่รองรับหรือไม่ยึดติดกับชั้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างซึ่งคาดว่าจะเกิดความเสียหายเนื่องจากการแ่นตัวมาก	ระยะแ่นทั้งหมดที่เกิดขึ้นหลังจากติดตั้งชั้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง(เป็นผลรวมของระยะแ่นที่เพิ่มขึ้นตามเวลา เนื่องจาก	$\frac{L}{480}$ **

<p>หลังคาหรือพื้นซึ่งไม่รองรับหรือไม่ยึดติดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างซึ่งคาดว่าจะไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากการแอ่นตัวมาก</p>	<p>น้ำหนักบรรทุกทุกค้างทั้งหมด และระยะแอ่นตัวที่เกิดขึ้นทันทีเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรที่เพิ่มขึ้น)***</p>	<p>$\frac{L}{240}$ ***</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------

ตารางที่ 3.2 ค่าสูงสุดที่ยอมให้ของระยะแอ่นตัวที่คำนวณ

ที่มา : หนังสือคอนกรีตเสริมเหล็ก (ศรีกริช หิรัญมาศ, 2544)

* พิกัดนี้ไม่ได้คำนึงถึงผลของการเกิดแอ่นน้ำเนื่องจากการแอ่นตัว ดังนั้นจึงควรตรวจสอบตรวจสอบการเกิดแอ่นน้ำเนื่องจากการแอ่นตัวด้วยวิธีการคำนวณที่เหมาะสม โดยให้รวมระยะแอ่นที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำในแอ่ง ผลของน้ำหนักบรรทุกทุกค้าง ระยะยกตัว รวมถึงความคลาดเคลื่อนในการก่อสร้างและข้อกำหนดสำหรับการระบายน้ำ

**พิกัดนี้อาจยอมให้เกินได้ ถ้ามีมาตรการป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนที่ยึดติดหรือรองรับโดยโครงสร้าง

***จะต้องหาระยะแอ่นที่เพิ่มขึ้นตามเวลาตามข้อกำหนดใน วสท. 4205(ข) 5 แต่อาจจะลดลงได้ด้วยระยะแอ่นตัวที่เกิดขึ้นก่อนการติดตั้ง ชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ซึ่งค่านี้จะต้องคำนวณบนพื้นฐานของข้อมูลทางวิศวกรรมที่ยอมรับ ซึ่งสัมพันธ์กับคุณลักษณะของการแอ่นตัวตามเวลาขององค์อาคารที่คล้ายคลึงกับองค์อาคารที่พิจารณา

****ต้องไม่มากกว่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้สำหรับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง พิกัดนี้ยอมให้เกินได้ถ้ามีการเผื่อระยะยกตัว ทำให้ระยะแอ่นตัวทั้งหมดลบด้วยระยะยกตัวแล้วต้องไม่เกินค่าพิกัดในตาราง

3.7 คอนกรีตมวลเบา

การทดสอบเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเสริมเหล็กต้องใช้ระยะเวลาหลายปีจึงจะได้ผลการทดสอบที่สามารถสรุปถึงการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจึงมีการคิดค้นจะทำให้คอนกรีตมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่เปลี่ยนแปลงไปจากคอนกรีตปกติด้วย

เหตุผลดังกล่าวจึงนำเอาคอนกรีตที่เรียกว่า “คอนกรีตมวลเบา” มาใช้ในการทดสอบ แต่คอนกรีตมวลเบาก็มีข้อจำกัดในด้านการผลิตที่จะทำให้น้ำหนักเบาลงกว่าคอนกรีตธรรมดา

คอนกรีตมวลเบา คือ คอนกรีตที่มีความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนักน้อยกว่าคอนกรีต โดยทั่วไป หากจำแนกคอนกรีตมวลเบาตามหน่วยน้ำหนักสามารถแบ่ง ดังนี้

ลักษณะการใช้งาน	น้ำหนัก	ระยะเวลาบ่ม	กำลังต้านทานแรงอัด
งานโครงสร้าง	1,400 ถึง 1,800	28 วัน	ไม่ต่ำกว่า 170
งานกำแพงกันรั่วและใช้เป็นวัสดุทนไฟ	1,800 ถึง 2,050	28 วัน	ไม่ต่ำกว่า 120
งานฉนวนกันความร้อน	315 ถึง 1,100	28 วัน	7 ถึง 70

ตารางที่ 3.3 ลักษณะการใช้งานกับหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบา

ที่มา : ปรินญานิพนธ์ พ.ศ. 2550

อย่างไรก็ตาม ถ้าจะแบ่งคอนกรีตมวลเบาออกเป็นประเภท ตามวัสดุที่ใช้ในการผลิต ก็สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ คอนกรีตที่ใช้มวลรวมเบา คอนกรีตพูนหรือโฟมคอนกรีต คอนกรีตไม่มีมวลรวมละเอียด สำหรับโครงการวิจัยนี้จะกล่าวเฉพาะ “คอนกรีตพูนหรือโฟมคอนกรีต”

คอนกรีตพูนหรือโฟมคอนกรีต เป็นคอนกรีตเบาอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งทำให้น้ำหนักเบาด้วยวิธีทำให้เกิดฟองอากาศในเนื้อคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตประเภทนี้เป็นคอนกรีตที่ได้จากการทำให้เกิดฟองอากาศหรือที่เรียกว่า “ โฟม” ขนาด 0.1 ถึง 1.0 mm. ในเนื้อคอนกรีต เนื่องจากคอนกรีตพูนมีรูพูนจากฟองอากาศและมีมวลแตกต่างจากคอนกรีตธรรมดา คือไม่ใช้มวลรวมหยาบในการผลิต บางครั้งจึงเรียกว่า Aerated Mortar ซึ่งเป็นการเรียกตามลักษณะของคอนกรีต ใช้กันในอังกฤษและอเมริกาแต่ในประเทศไทยในทวีปยุโรปจะเรียกตามกรรมวิธีการผลิต โดยจะเรียกว่า Form Concrete โดยทั่วไปองค์ประกอบของคอนกรีตพูนนี้ผลิตโดยใช้ Autoclave Aerated Concrete

วิธีการผลิตคอนกรีตพูนหรือโฟมคอนกรีตมี 2 วิธี

วิธีแรกเป็นวิธีทางเคมีโดยใช้ผลของการทำปฏิกิริยาเคมี-ทำให้เกิดฟองก๊าซในเนื้อคอนกรีต ในขณะที่ยังมีสภาพ Plastic และ

วิธีที่สองเป็นการทำให้เกิดฟองอากาศ (Foaming Agent) แล้วผสมลงในส่วนผสมคอนกรีต ให้ฟองอากาศกระจายในส่วนผสมของซีเมนต์และทรายละเอียดที่ยังอยู่ในสภาพ Plastic จากนั้นก็ปล่อยให้

แข็งตัวเนื่องจากคอนกรีตพูนมีโพรงที่เกิดจากการแทรกตัวของฟองอากาศอยู่ภายในเนื้อคอนกรีต ซึ่งทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลง มีน้ำหนักเบาหน่วยน้ำหนักประมาณ 200 ถึง 300 kg/m³

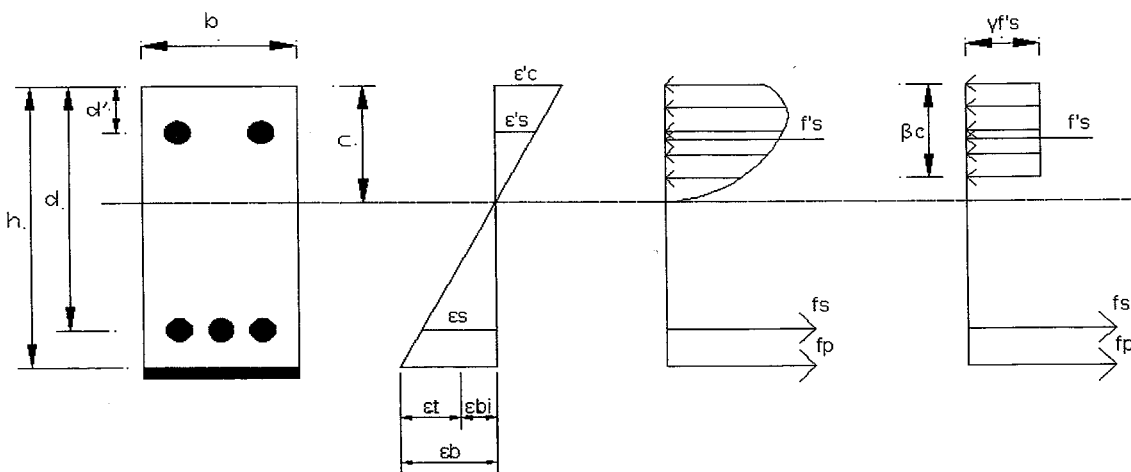
ข้อแตกต่างระหว่างคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบากับคอนกรีตธรรมดา

1. คอนกรีตเบาดูดซึมน้ำได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดาเนื่องจากมีรูพูนมากกว่า
2. คอนกรีตมวลเบาหดตัวมากกว่าคอนกรีตธรรมดาประมาณ 5-40 %
3. คอนกรีตมวลเบาอาจล้ามากกว่าคอนกรีตธรรมดา
4. ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะมีค่าประมาณ 1/2 ถึง 3/4 เท่าของคอนกรีตธรรมดา เมื่อมีค่ากำลังต้านทานแรงอัดประลัยเท่ากัน
5. สัมประสิทธิ์การขยายตัวของคอนกรีตมวลเบาประมาณ 7×10^{-6} ถึง 14×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียสซึ่งน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา

3.8 Glass fiber rein-forced polymer

โดยทั่วไปวัสดุ FRP จะมีคุณสมบัติด้านรับแรงดึงได้สูงกว่าเหล็กมาก แต่คุณสมบัติด้านการรับแรงอัดจะต่ำกว่าหลายเท่า การใช้วัสดุ FRP ในการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตจึงมักจะใช้ในการเพิ่มส่วนรับแรงดึงเท่านั้น ซึ่งสามารถเพิ่ม flexural capacity และ shear capacity ให้กับโครงสร้างคอนกรีตได้โดยตรง แต่การพันรอบเพื่อเพิ่ม confinement ก็สามารถเพิ่ม compressive strength และ ductility ให้กับโครงสร้างเสาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในโครงสร้างคานและพื้น เหล็กเสริมจะทำหน้าที่รับแรงดึงในขณะที่คอนกรีตรับแรงอัด วัสดุ FRP จะใช้เพื่อเสริมกำลังในด้านรับแรงดึงเช่นเดียวกับเหล็กเสริมดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แสดง stress และ strain ใน โครงสร้างรับแรงดัด

การออกแบบจะต้องคำนึงถึง stress และ strain ในคอนกรีตและเหล็กเสริมเดิมเนื่องจากน้ำหนักเดิมที่มีอยู่ซึ่งต่างกับการออกแบบใหม่ ทั้งยังต้องตรวจสอบ mode of failure ไม่ให้เกิดขึ้นใน compression zone และ ductility ของโครงสร้างที่เปลี่ยนไป

การคำนวณหา Nominal moment capacity ของคานซึ่งเสริมกำลังด้วย FRP จากมาตรฐาน ACI Committee 440 มีสมการเบื้องต้นดังนี้

$$M_n = A_s f_s \left(d - \beta_1 c / 2 \right) + A'_s f'_s \left(\beta_1 c / 2 - d \right) + \phi A_f f_f \left(h - \beta_1 c / 2 \right) \quad (3.11)$$

การใช้ค่า f_s และค่า f'_s เนื่องจากการเพิ่ม FRP เข้าไปอาจทำให้เกิด over-reinforcement เหล็กเสริมอาจยังไม่ถึงจุด yield ค่า factor ϕ เป็นค่าที่ใช้ปรับลดแรงที่ได้จากค่ากำลังประลัยของ fiber ซึ่งมักใช้ที่ประมาณ 0.85 ซึ่งค่านี้อาจเปลี่ยนแปลงตามความเหมาะสมและดุลพินิจของวิศวกรผู้ออกแบบ ในการออกแบบจะต้องคำนึงถึง mode of failure ที่จะเกิดขึ้นในส่วนรับแรงอัด โดยสามารถตรวจสอบจากค่าของ strain ดังนี้

$$\text{ถ้า } \epsilon_{fu} + \epsilon_{bi} > \epsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right) \text{ จะถูกควบคุมโดย concrete crushing} \quad (3.12)$$

$$\text{ถ้า } \epsilon_{fu} + \epsilon_{bi} < \epsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right) \text{ จะถูกควบคุมโดย fiber rupture} \quad (3.13)$$

3.9 กระบวนการทดสอบ

3.9.1 การทำคอนกรีต

1. อัตราส่วนผสมวัสดุ เมื่อใช้มวลรวมอย่างเดียวกัน คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนผสม ต่างกัน จะให้กำลังของคอนกรีตต่างกัน ซึ่งจะเห็นได้ชัดในกรณีที่ใช้ปริมาณน้ำผสม เพื่อเพิ่มความสามารถเทได้ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ยิ่งมาก กำลังของคอนกรีตยิ่งลดลง ยึดหดตัวมากและมีรูโพรงมากขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ มีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตโดยตรง
2. การซั้งหรือดวงส่วนผสม หากใช้การดวงโดยปริมาตรจะมีโอกาสผิดพลาดมากกว่า การซั้งส่วนผสมโดยน้ำหนัก ซึ่งหากอัตราส่วนผสมคอนกรีตผิดไปจะทำให้คุณสมบัติ ของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงได้
3. การผสมคอนกรีต จะต้องผสมวัสดุทำคอนกรีตให้รวมเป็นเนื้อเดียวกันให้มากที่สุดเพื่อให้มีน้ำมีโอกาสทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ได้อย่างทั่วถึง และเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์ กระจายแทรกตัวอยู่ใน

ช่องว่างระหว่างมวลรวมได้เต็มที่ ดังนั้น การผสมคอนกรีตหาก กระทำอย่างไม่ทั่วถึง จะมีผลทำให้ กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่คงที่ได้

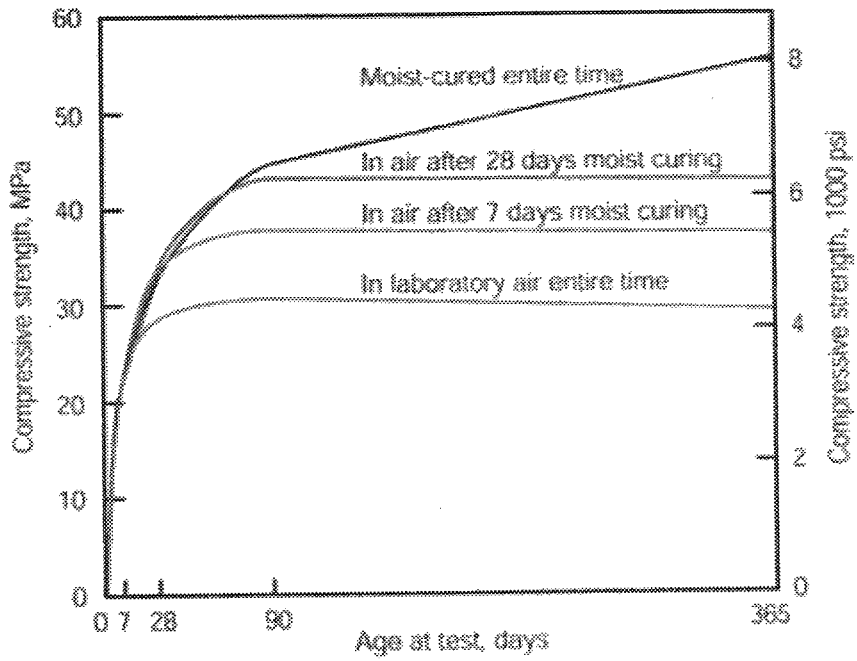
4. การเทคอนกรีตเข้าแบบหล่อและการอัดแน่น จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีต เพราะหากคอนกรีตเกิดการแยกตัวในขณะลำเลียงหรือเท จะมีผลทำให้กำลังของ คอนกรีตมีค่าไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ การทำให้คอนกรีตแน่นตัวหากทำได้ไม่เต็มที่ก็จะทำให้เกิดรูโพรงขึ้นในเนื้อคอนกรีต มีผลทำให้ กำลังของคอนกรีตมีค่าลดลงได้ หรือหากใช้วิธีทำให้คอนกรีตแน่นตัวที่ไม่เหมาะสม ก็สามารถทำให้เกิดการแยกตัวขึ้นในเนื้อคอนกรีตได้ ส่งผลให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่สม่ำเสมอ
5. การใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในการผสมคอนกรีตมวลเบาจะต้องใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมโดยไม่ เหลวเกินและไม่เหนียวเกินไป ซึ่งอัตราส่วนจะส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต อัตราส่วนที่เหมาะสม คือ $w/c = 0.5$
6. การผสมโฟมเพื่อทำคอนกรีตมวลเบาจะต้องผสมให้โฟมเข้ากับเนื้อคอนกรีตให้ดีและจะต้องใส่โฟม ที่มีเม็ดละเอียดจริงเพื่อจะได้กำลังอัดที่ดีที่สุด

3.9.2 การบ่ม (Curing)

การบ่ม (Curing) คือ การรักษาความชื้นและอุณหภูมิของคอนกรีตในช่วงที่คอนกรีตยังมีอายุ ในช่วงเริ่มต้น เพื่อให้คอนกรีตมีโอกาสพัฒนาคุณสมบัติต่างๆ ที่ต้องการ เช่น กำลังความคงทน ความทึบ น้ำ ความต้านต่อการสึกกร่อน ปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลง เป็นต้น คอนกรีตควรได้รับการบ่มทันทีหลังจาก เทและตกแต่งผิวคอนกรีตเสร็จ

การบ่มคอนกรีตที่เพียงพอและเหมาะสมจะทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรง มีความทึบน้ำ มีความต้านทานต่อความเค้นและการสึกกร่อนมากขึ้น การพัฒนากำลังอัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกถ้า ได้รับการบ่มที่ดีหลังจากนั้นกำลังคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ดังรูปที่ 3.15 แสดงกำลังที่เพิ่มขึ้นสำหรับ คอนกรีตที่มีช่วงเวลาการบ่มขึ้นที่ต่างกัน

กรรมวิธีการบ่มขึ้นอยู่กับสภาพคอนกรีตและสภาพแวดล้อมสำหรับงานต่างๆ ไปใช้การบ่มแบบ ธรรมดาที่เพียงพอแต่ในกรณีอากาศร้อนหรือเย็นต้อง ใช้กรรมวิธีการบ่มด้วยวิธีพิเศษ หากขาดความชื้น กำลังของคอนกรีตจะยังคงเพิ่มขึ้นอีกระยะหนึ่งเพราะคอนกรีตยังคงมีความชื้นเหลืออยู่ภายในเนื้อ คอนกรีตหลังจากนั้นความชื้นสัมพัทธ์ของคอนกรีตตกลงมาเหลือ 80 เปอร์เซ็นต์ กำลังคอนกรีตจะไม่ เพิ่มขึ้นอีกดังนั้นเราจึงควรบ่มคอนกรีตให้นานที่สุดจนกว่าคอนกรีตมีคุณสมบัติตามต้องการ



รูปที่ 3.15 แสดงผลกระทบของระยะเวลาในการบ่มซึ่งมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต

บทที่ 4

วิธีการดำเนินการวิจัย

4.1 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

4.1.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดสอบ

1. ส่วนผสมสำหรับ หล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. กำลังอัดประลัย (f'_c) 240 ksc. จำนวน 5 ตัวอย่าง ทำการบ่ม และทดสอบที่ 28 วัน
2. ส่วนผสมสำหรับ หล่อตัวอย่างคอนกรีตผสมโพลีเมอร์ซีเมนต์ (ไม่ผสมมวลรวมหยาบ) รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 15 ซม. สูง 30 ซม. จำนวน 15 ตัวอย่างของแต่ละหน่วยน้ำหนักรวม 45 ตัวอย่าง โดยมีหน่วยน้ำหนักที่ 1,600 1,700 1,800 1,900 และ 2,000 2,100 kg/m^3 โดยประมาณ ทำการบ่ม และทดสอบที่ 28 วัน
** ค่าหน่วยน้ำหนักที่นำมาทดสอบนั้น ได้จากค่าแวนโน้มของแต่ละชนิดน้ำยาผสมโพลีเมอร์ โดยให้มีค่ากำลังอัดประลัย (f'_c) 240 ksc. โดยประมาณ
3. เครื่องมือวัดการหดตัวของคอนกรีต (Strain gage, Dial gauge)
4. เครื่อง UTM
5. แบบเหล็กรูปทรงกระบอก
6. เครื่องผสมคอนกรีต
7. เครื่องใส่โพลีเมอร์

4.1.2 วิธีการทดสอบ

1. คำนวณส่วนผสมคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดประลัย $f'_c=240$ ksc. แล้วทำการหล่อแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอก ทำการบ่มที่ 28 วัน จำนวน 5 ตัวอย่าง
2. นำ (Strain gage, Dial gauge) ติดที่แท่งทรงกระบอกคอนกรีต ขณะทำการกดอัดเพื่อหาค่าการหดตัว แล้วนำไปคำนวณหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (E_c) รวมทั้งเปรียบเทียบค่ากำลังอัดประลัยที่ได้จากการทดสอบ กับที่ได้ออกแบบไว้

3. ศึกษาและเปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_c) กับระยะเวลา ตามที่ทดสอบ กับทฤษฎี แล้วทำการหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ที่ระยะเวลา 1 ปี โดย
- ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นค่าแรก (E_1) เป็นค่าที่ได้จากการค้ำแรงกระทำไว้ที่ 25% ของ น้ำหนักบรรทุกประลัย
 - ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นค่าที่สอง (E_2) เป็นค่าที่ได้จากการค้ำแรงกระทำไว้ที่ 50 % ของ น้ำหนักบรรทุกประลัย
- จากนั้น เปรียบเทียบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_1, E_2) ที่ระยะเวลา 1 ปี
4. หล่อแท่งคอนกรีตผสมโพลีเมอร์ (ไม่ผสมมวลรวมหยาบ) รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 15 ซม. สูง 30 ซม. จำนวน หน่วยน้ำหนักละ 15 ตัวอย่าง โดยมีหน่วยน้ำหนักที่ 1,600 1,700 1,800 1,900 และ 2,000 kg/m³ โดยประมาณ ทำการบ่ม และทดสอบที่ 3, 7, 28 วัน
5. นำแท่งคอนกรีตผสมโพลีเมอร์ที่ได้ทำการบ่มไว้แล้วข้างต้น มาทำการทดสอบการกดอัด เพื่อหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นและค่ากำลังอัดประลัย ของคอนกรีตผสมโพลีเมอร์ในแต่ละหน่วยน้ำหนัก โดยนำ Strain gage มาทำการติดที่แท่งคอนกรีตผสมโพลีเมอร์ และเชื่อมต่อกับเครื่องอ่านค่าการหดตัว จากนั้นจึงทำการกดอัด แล้วบันทึกค่าการหดตัวเป็นระยะๆ
6. นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาวิเคราะห์โดยทำการเขียนกราฟระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นกับค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตโพลีเมอร์ ซึ่งจะนำค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่ระยะเวลา 1 ปี (E_1, E_2) มาทำการหาค่าหน่วยน้ำหนักที่เหมาะสม โดยจะต้องให้ค่ากำลังอัดประลัย f_c มีค่าประมาณ 240 ksc. จะได้ 2 หน่วยน้ำหนัก เพื่อนำไปเป็นส่วนผสมของคานคอนกรีตผสมโพลีเมอร์ต่อไป

4.1.3 ผลการทดลอง

อายุตัวอย่าง 28 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่ หน้าตัด (cm ²)	น้ำหนัก (kg.)	กำลังอัด (kg.)	หน่วย แรงอัด (ksc)	Modulus of elasticity (Ec) (ksc)	หน่วย น้ำหนัก (kg/m ³)
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)						
1	15.00	29.50	176.71	12.594	44342.508	250.927	236717.00	2415.772
2	14.98	29.80	176.24	12.612	41794.088	237.138	228023.00	2425.813
3	15.00	29.80	176.71	12.514	43832.824	248.043	206697.00	2400.427
4	15.00	30.00	176.27	12.564	42813.456	242.275	288414.00	2410.018
5	15.00	29.60	176.77	12.453	42303.772	239.390	178645.00	2388.726
		เฉลี่ย	176.62	12.547	43017.330	243.555	227699.20	2408.151

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบรับแรงกดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอก

อายุตัวอย่าง 28 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่ หน้าตัด (cm ²)	น้ำหนัก (kg.)	กำลังอัด (kg.)	หน่วย แรงอัด (ksc)	Modulus of elasticity (Ec) (ksc)	หน่วย น้ำหนัก (kg/m ³)
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)						
1	15.00	30.00	176.71	9.810	43657.054	247.048	95524.913	1850.441
2	15.02	30.05	177.19	9.850	42757.779	241.316	96254.065	1849.959
3	15.00	30.00	176.71	9.820	43062.245	243.682	95324.681	1852.328
4	14.95	30.02	175.54	9.740	43127.011	245.684	96204.315	1848.315
5	15.03	30.00	177.42	9.860	43330.363	244.222	95249.462	1852.456
		เฉลี่ย	176.72	9.816	43186.890	244.390	95711.487	1850.700

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแท่งคอนกรีตโพมรูปทรงกระบอก หน่วยน้ำหนัก 1850 kg/m³

อายุตัวอย่าง 28 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่ หน้าตัด (cm ²)	น้ำหนัก (kg.)	กำลังอัด (kg.)	หน่วย แรงอัด (ksc)	Modulus of elasticity (Ec) (ksc)	หน่วย น้ำหนัก (kg/m ³)
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)						
1	15.02	30.00	177.19	10.358	45269.548	255.491	159485.228	1948.610
2	15.05	30.00	177.89	10.422	45257.050	254.404	161532.483	1952.841
3	15.00	30.00	176.71	10.346	45225.672	255.925	157906.354	1951.546
4	15.00	30.00	176.71	10.334	45768.514	258.997	158786.598	1949.283
5	14.98	30.05	176.24	10.324	45246.284	256.726	160854.672	1949.351
		เฉลี่ย	176.95	10.357	45353.414	256.309	159713.067	1950.326

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแท่งคอนกรีตโพมรูปทรงกระบอก หน่วยน้ำหนัก 1950 kg/m³

4.2 การเตรียมตัวอย่างคานทดสอบ

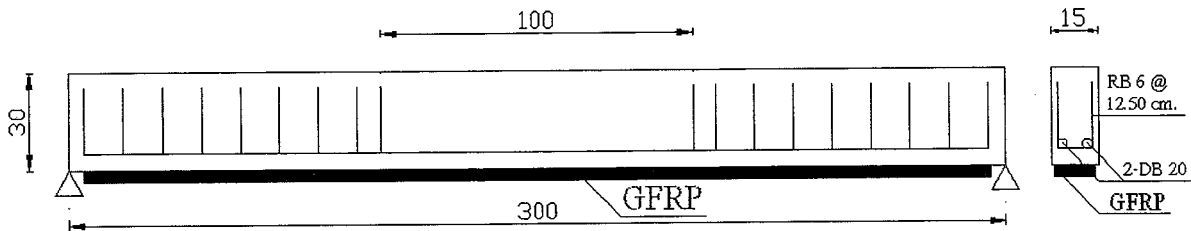
ในการทดสอบแบ่งคานออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 คานลูกผสม 3 ชั้น โดยชั้นล่างสุดของคานเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก ชั้นถัดมาเป็นโฟมซีเมนต์ที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก 1,950 kg/cm³ และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E ที่มีน้ำหนักคงค้างที่ 25 %) 169,000 kg/cm² ชั้นบนสุดเป็นโฟมซีเมนต์ที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก 1,850 kg/cm³ และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E ที่มีน้ำหนักคงค้างที่ 50 %) 95,220 kg/cm² โดยคานชนิดนี้เปรียบเสมือนคานเก่าที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 1 ปี โดยคานมีน้ำหนักกระทำมาแล้ว 60 % ของน้ำหนักประลัยจำนวน 3 ตัวอย่าง

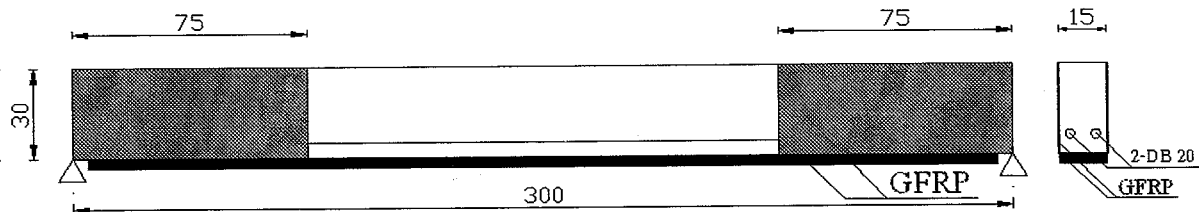
กลุ่มที่ 2 คานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา ขนาดหน้าตัด 15 x 30 เซนติเมตร ยาว 3 เมตร กำลังอัดประลัย (f_c) 240 ksc. มีขนาดเหล็กเสริม 2-DB 12 และเหล็กปลอก RB 6 @ 12.50 cm. จำนวน 3 ตัวอย่าง ทดสอบที่อายุ 28 วัน แบ่งเป็นคานควบคุม 2 ตัวอย่าง โดยตัวอย่างหนึ่งให้รับน้ำหนักบรรทุกที่เดียวจนวิบัติ ส่วนอีกตัวอย่างให้น้ำหนักบรรทุก 60 % ของน้ำหนักประลัยก่อน แล้วหยุดให้น้ำหนักบรรทุก จากนั้นค่อยทดสอบจนวิบัติ คานอีก 1 ตัวอย่างจะเสริมวัสดุพลาสติกเสริมใยแก้วที่ท้องคานหลังจากคานรับน้ำหนักบรรทุกมาแล้ว 60 % ของน้ำหนักประลัย

ตัวอย่างคาน	หน้าตัด (ซม.)	ความยาว (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

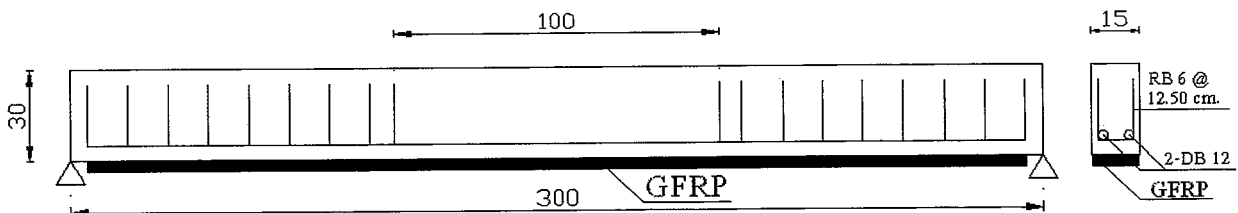
ตารางที่ 4.4 ข้อมูลของคาน 6 ตัวอย่างที่ใช้ทำการทดสอบ



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะการติดตั้งแถบพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วของคาน B2



รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะการติดตั้งแถบพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วของคาน B3



รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะการติดตั้งแถบพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วของคาน B5

4.2.1 คุณสมบัติของวัสดุ

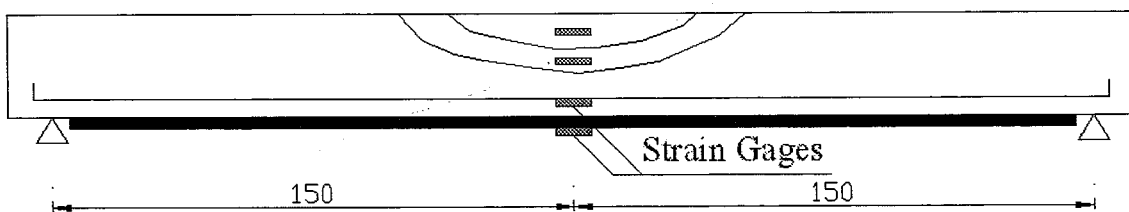
วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย GFRP ที่ใช้ในการศึกษาทดลองครั้งนี้ เป็นแผ่นใยแก้วชนิดแผ่นเส้นใย (Fiber Sheet) มีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 4.5

ความหนา (mm)	0.353
ความกว้าง (mm)	150
พื้นที่หน้าตัด (mm^2)	52.95
กำลังรับแรงดึง (ksc)	17,000
ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (ksc)	2.35×10^6
Tensile Elongation (Ultimate)	2.0%

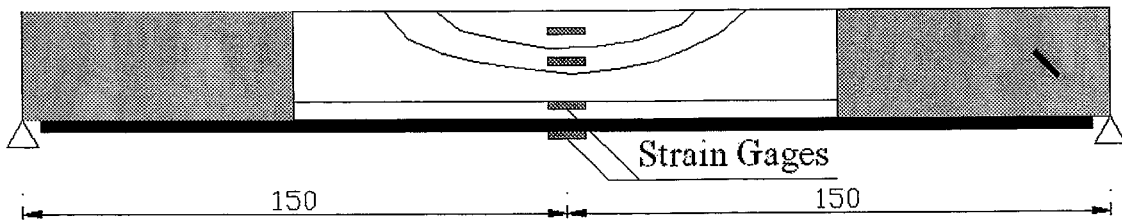
ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติของวัสดุแผ่น GFRP

4.2.2 การติดตั้งวัดความเครียด

คานตัวอย่างทั้งหมดจะติดตั้งมาตรวัดความเครียด (strain gage) เพื่อวัดความเครียดในตำแหน่งต่างๆของคานตัวอย่างที่จะเกิดขึ้น โดยมาตรวัดความเครียดจะถูกติดตั้งที่คอนกรีต คอนกรีต โฟม เหล็กเสริม และ พลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว บริเวณกึ่งกลางคานทั้ง 6 คาน ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงตำแหน่งการติดตั้งมาตรวัดความเครียด (strain gage) ของคาน B2,B5



รูปที่ 4.5 แสดงตำแหน่งการติดตั้งมาตรวัดความเครียด (strain gage) ของคาน B3

4.2.3 การติดตั้งพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว

1. ทำการขัดผิวคานให้เรียบ และทำการลบมุมคาน B3 เนื่องจากต้องแปะหุ้ม 3 ด้าน ทั้งนี้เพื่อประสิทธิภาพของการถ่ายแรงของแผ่น Fiber
2. เนื่องจากคานผ่านการรับแรงมาแล้วจึงมีรอยแตกร้าวเกิดขึ้น ต้องทำการ Epoxy Injection เข้าไปในรอยร้าว เพื่อประสานเนื้อคอนกรีตให้เป็นเนื้อเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.6 การ Epoxy Injection ในรอยแตกร้าวคาน

3. ผสมน้ำยา Epoxy Primer ส่วน A และ B แล้วทาลงบนคานในส่วนที่จะแปะแผ่น Fiber ปล่อยให้แห้งไว้ครึ่งชั่วโมง



รูปที่ 4.7 การผสมน้ำยา Epoxy

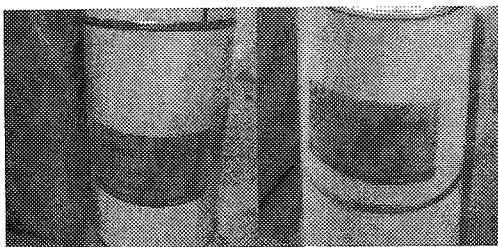


รูปที่ 4.8 แสดงการทาวาสคูประสานชั้นแรก

4. ผสมน้ำยา Epoxy ส่วนที่ 2 แล้วทาทับลงไปบนน้ำยาชั้นแรก ทิ้งไว้ครึ่งชั่วโมง



รูปที่ 4.9 แสดงการทำวัสดุประสานชั้นที่สอง



ก.) Hydrapox Primer (A และ B)



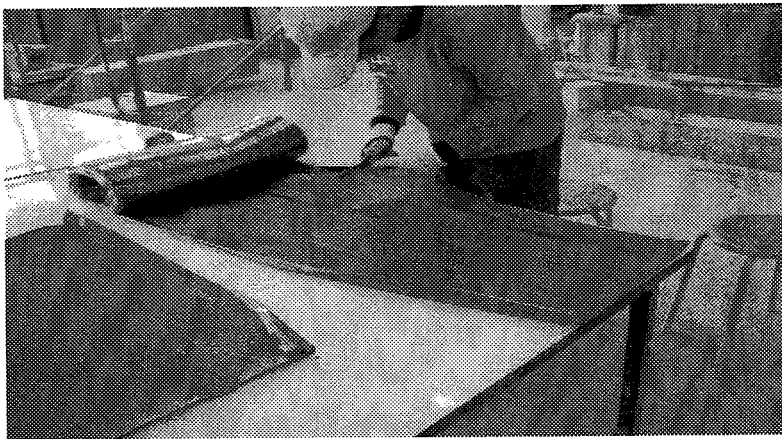
ข.) Hydrapox CF (A และ B)

รูปที่ 4.10 วัสดุประสานชั้นแรกและชั้นสอง

5. ทาน้ำยาประสานชั้นที่สองอีกครั้ง แล้วทำการติดตั้งแผ่น Fiber ตามแนวที่กำหนดไว้ เมื่อติดตั้งเสร็จเรียบร้อยแล้ว ต้องปล่อยให้แห้งประมาณ 24 ชั่วโมงก่อนทำการทดสอบเพื่อประสิทธิภาพของวัสดุประสานระหว่างคอนกรีตกับแผ่น FRP



รูปที่ 4.11 การติดตั้งแผ่น Fiber



รูปที่ 4.12 แสดงการตัดแผ่น Fiber



รูปที่ 4.13 แสดงรูปแบบการติดตั้งของคาน B3

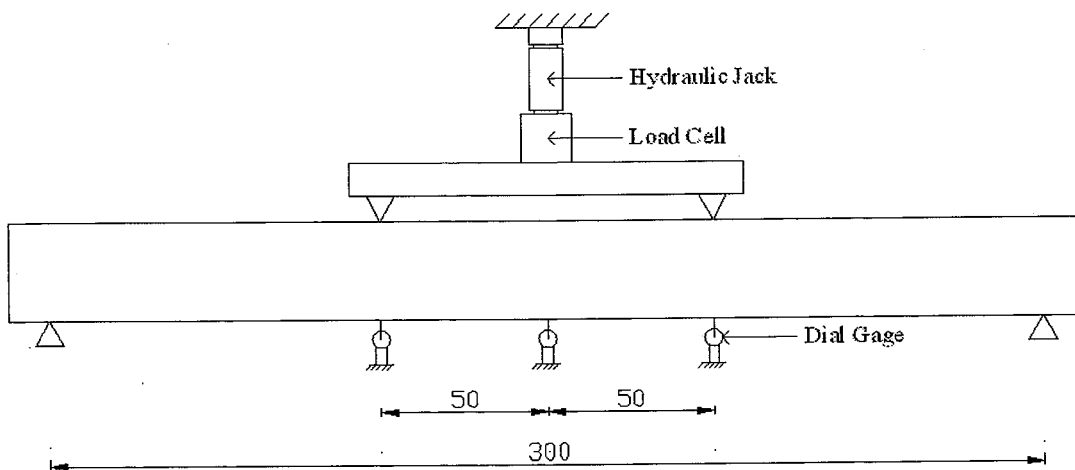
4.3 การทดสอบคานและการเก็บข้อมูล

4.3.1 อุปกรณ์ในการทดสอบ

1. เครื่องมือวัดการหดตัว (Strain gage) และเครื่องอ่าน
2. เครื่องมือวัดการแอ่นตัวของคอนกรีต (Dial gauge) จำนวน 3 ตัว
3. เฟรมเหล็กทดสอบคาน
4. Load Cell
5. เครื่องอ่านค่าน้ำหนักแบบดิจิตอล
6. คานถ่ายแรง (Transfer Beam)
7. Hydraulic Jack
8. โตะล้อเลื่อน และรอกผ่อนแรง

4.3.2 วิธีการทดสอบ

เมื่อติดตั้งพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วเสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงนำคานเข้าเครื่องทดสอบ โดยจะทำการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ ได้แก่ เครื่องวัดการโก่งตัว(Dial Gage) ,Load Cell ,Hydraulic Jack ดังแสดงในรูป



รูปที่ 4.14 ลักษณะการติดตั้งเครื่องมือทดสอบ

หลังจากติดตั้งเครื่องมือทดสอบเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว จึงเริ่มทำการให้น้ำหนักกระทำ (load) กับตัวคานทดสอบ โดยช่วงแรกจะทำการให้กำลังที่ละ 300 KG จนกระทั่งน้ำหนักกระทำที่ทดสอบมีค่าอยู่ที่ 60 % ของน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (Ultimate load) ที่ได้ทำการทดสอบมาแล้ว หลังจากนั้นจะทำการเปลี่ยนน้ำหนักที่กระทำเป็น 500 kg. ทำการทดสอบจนกระทั่งคานเกิดการวิบัติ โดยการวิบัติของคาน ที่ทำการติดแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วจะนิยามเมื่อแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วหลุดออกจากตัวคาน ในกรณีที่คานเกิดการวิบัติแบบเฉพาะที่ (local failure) และในกรณีที่คานเกิดการวิบัติจากแรงคัด (flexural failure) จะนิยามเมื่อแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วขาดออกจากกัน หรือคอนกรีตส่วนรับแรงอัดถูกอัดแตก

ทำการทดสอบคานทั้ง 5 ตัวอย่าง จนกระทั่งคานวิบัติดูค่าการโก่งตัว ความเครียดที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางคาน และน้ำหนักบรรทุก ทำการประมวลผลในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยกับค่าการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (Load - Deflection Relationship) และในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยกับความเครียดที่วัดได้ที่ตำแหน่งต่างๆของคาน (Load - Strain Relationship) และวิเคราะห์ผลโดยเปรียบเทียบคานที่เสริมกำลังด้วย GFRP กับคานที่ไม่เสริมกำลังในด้านของกำลังรับแรงคัด และการโก่งตัว

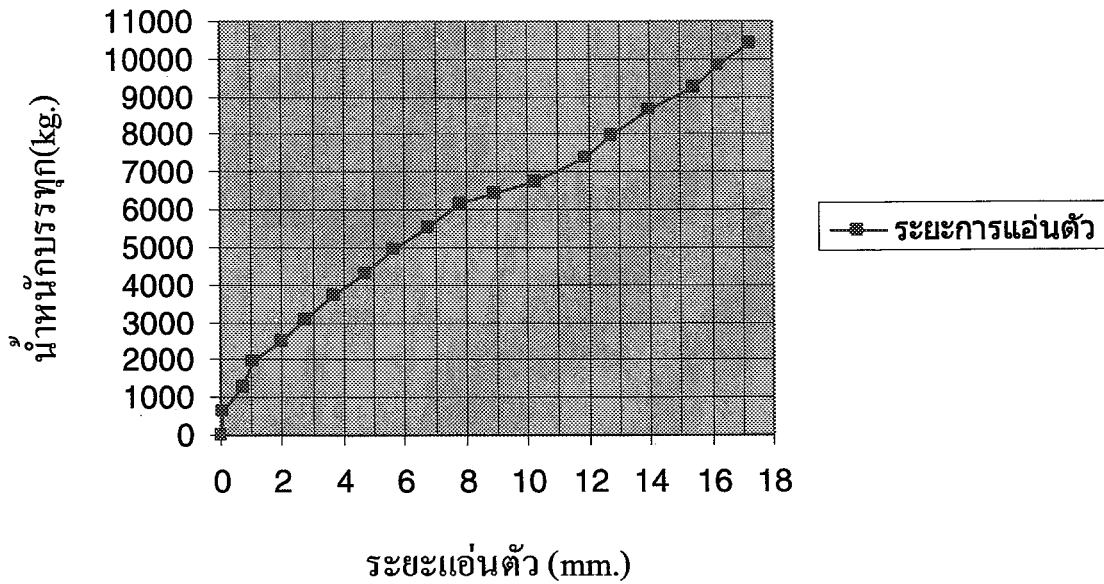
4.3.3 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง 5 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบคาน B1

น้ำหนัก บรรทุก (kg)	ระยะแอนตัว (mm)			ความเครียด (E50)	ความเครียด (E25)	ความเค้น (E50)	ความเค้น (E25)
	ซ้าย	กลาง	ขวา				
0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
661	0.05	0.059	0.048	0.00038	0.00019	36.66	30.82
1258	0.034	0.754	0.036	0.00034	0.00025	32.92	39.93
1846	0.46	1.05	0.54	0.00045	0.0003	42.78	48.55
2484	0.89	1.94	0.94	0.00052	0.00035	49.96	55.10
3083	1.56	2.78	1.62	0.00059	0.00039	56.66	61.49
3695	2.34	3.65	2.45	0.00065	0.00042	61.83	67.56
4318	3.24	4.71	3.32	0.00076	0.00047	72.65	74.27
4916	4.65	5.64	4.58	0.00085	0.00052	80.97	83.69
5533	5.48	6.77	5.23	0.00092	0.00056	88.34	89.44
6151	6.48	7.84	6.71	0.00152	0.0006	145.00	96.31
6407	7.24	8.93	7.19	0.00107	0.00062	102.03	98.38
6748	8.45	10.25	8.86	0.00112	0.00064	106.72	102.38
7386	10.24	11.86	10.35	0.00121	0.00065	115.33	104.29
7996	11.64	12.75	11.54	0.00131	0.00075	125.67	118.99
8645	12.43	13.98	12.72	0.00141	0.00079	134.86	125.69
9224	13.58	15.46	13.67	0.00149	0.00081	142.32	129.69
9819	15.24	16.25	15.62	0.00165	0.0009	157.64	144.22
10441	16.34	17.3	16.42	0.00177	0.00096	169.70	153.32

ตารางที่ 4.6 แสดงการแอนตัวของคาน B1

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุก
 คาน3ชั้น มีปลอก

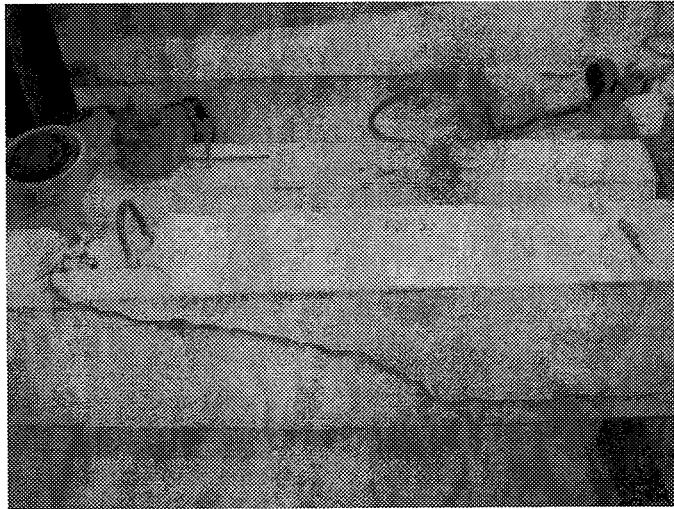


รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกของคานB1

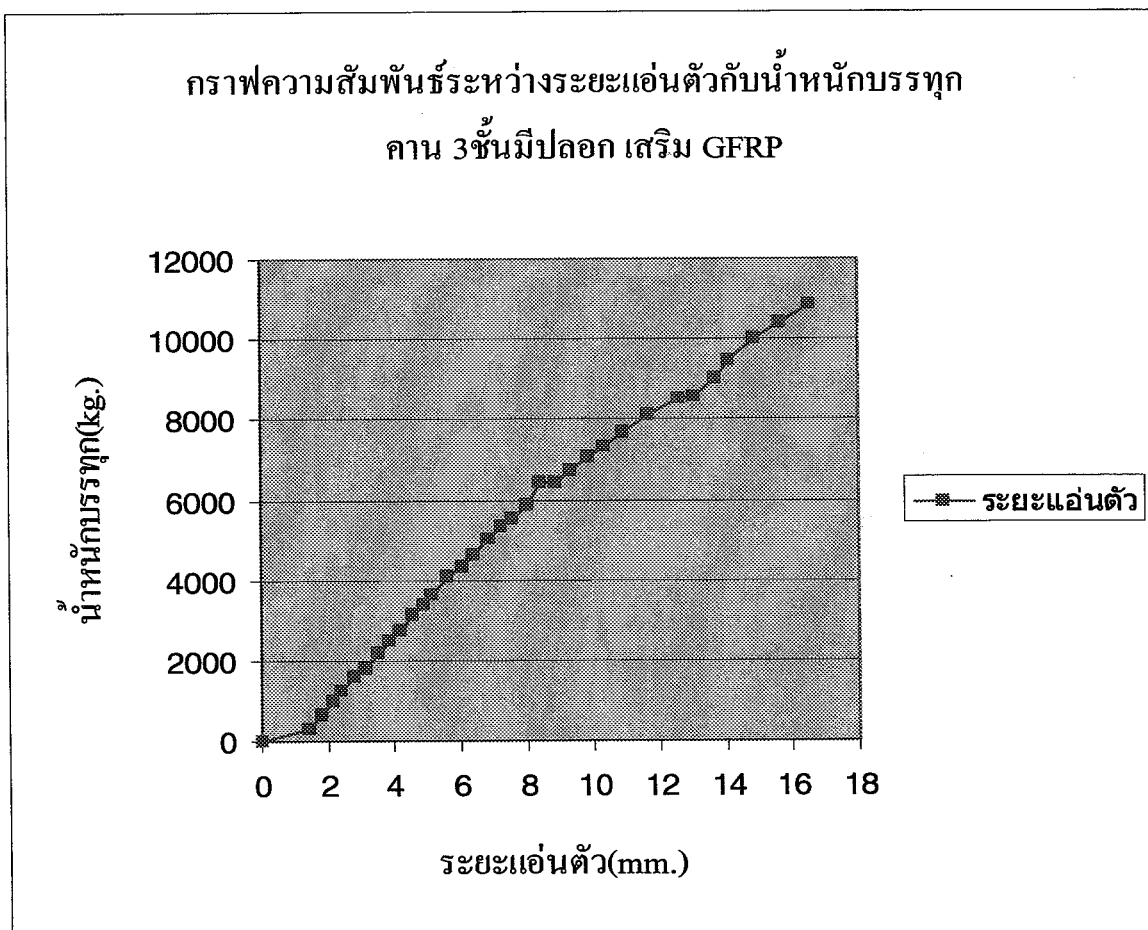
ผลการทดสอบคาน B2

น้ำหนัก บรรทุก	ระยะแอนตัว			ความเครียด	ความเครียด	ความเค้น	ความเค้น
	ซ้าย	กลาง	ขวา	เหล็ก	GFRP	เหล็ก	GFRP
0	0	0	0	0	0	0	0
300	2.33	1.43	2.32	0.000074	0.000168	150.96	394.8
662	2.67	1.81	2.65	0.000177	0.000225	361.08	528.75
972	2.99	2.17	2.96	0.000197	0.000275	401.88	646.25
1225	3.23	2.44	3.21	0.000172	0.00032	350.88	752
1595	3.59	2.83	3.56	0.000217	0.00041	442.68	963.5
1802	3.83	3.16	3.8	0.000225	0.000475	459	1116.25
2187	4.2	3.51	4.14	0.000362	0.000573	738.48	1346.55
2481	4.51	3.87	4.52	0.000519	0.000675	1058.76	1586.25
2737	4.78	4.16	4.72	0.000462	0.000732	942.48	1720.2
3134	5.16	4.58	5.11	0.000477	0.000806	973.08	1894.1
3376	5.42	4.88	5.36	0.000457	0.00087	932.28	2044.5
3625	5.67	5.17	5.64	0.000508	0.000924	1036.32	2171.4
4085	6.1	5.63	6.09	0.000582	0.001015	1187.28	2385.25
4353	6.45	6.04	6.4	0.000637	0.001045	1299.48	2455.75
4652	6.78	6.4	6.72	0.000697	0.001095	1421.88	2573.25
5040	7.16	6.82	7.09	0.000813	0.00114	1658.52	2679
5317	7.52	7.23	7.47	0.000777	0.001207	1585.08	2836.45
5521	7.8	7.54	7.73	0.000857	0.0013	1748.28	3055
5878	8.21	8.02	8.11	0.001032	0.00133	2105.28	3125.5
6427	8.57	8.41	8.5	0.001061	0.001385	2164.44	3254.75
6427	8.99	8.9	8.93	0.000987	0.001445	2013.48	3395.75
6700	9.35	9.31	9.3	0.000992	0.0015	2023.68	3525
7048	9.84	9.85	9.78	0.001097	0.00158	2237.88	3713
7304	10.22	10.28	10.15	0.001043	0.00165	2127.72	3877.5
7656	10.77	10.9	10.71	0.001152	0.001677	2350.08	3940.95
8095	11.48	11.68	11.41	0.001257	0.001748	2564.28	4107.8
8504	11.95	12.59	11.98	0.001359	0.001802	2772.36	4234.7
8545	12.54	13.05	12.57	0.001462	0.001866	2982.48	4385.1
9012	13.12	13.68	13.14	0.001558	0.001923	3178.32	4519.05
9438	13.65	14.11	13.7	0.001664	0.00198	3394.56	4653
9985	14.24	14.88	14.29	0.001769	0.002052	3608.76	4822.2
10394	14.96	15.65	15.02	0.001874	0.002113	3822.96	4965.55
10835	15.83	16.54	15.88	0.001985	0.002195	4049.4	5158.25

ตารางที่ 4.7 แสดงการแอนตัวของคาน B2



รูปที่ 4.16 ลักษณะการวิบัติของคาน B2



รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุกของคานB2

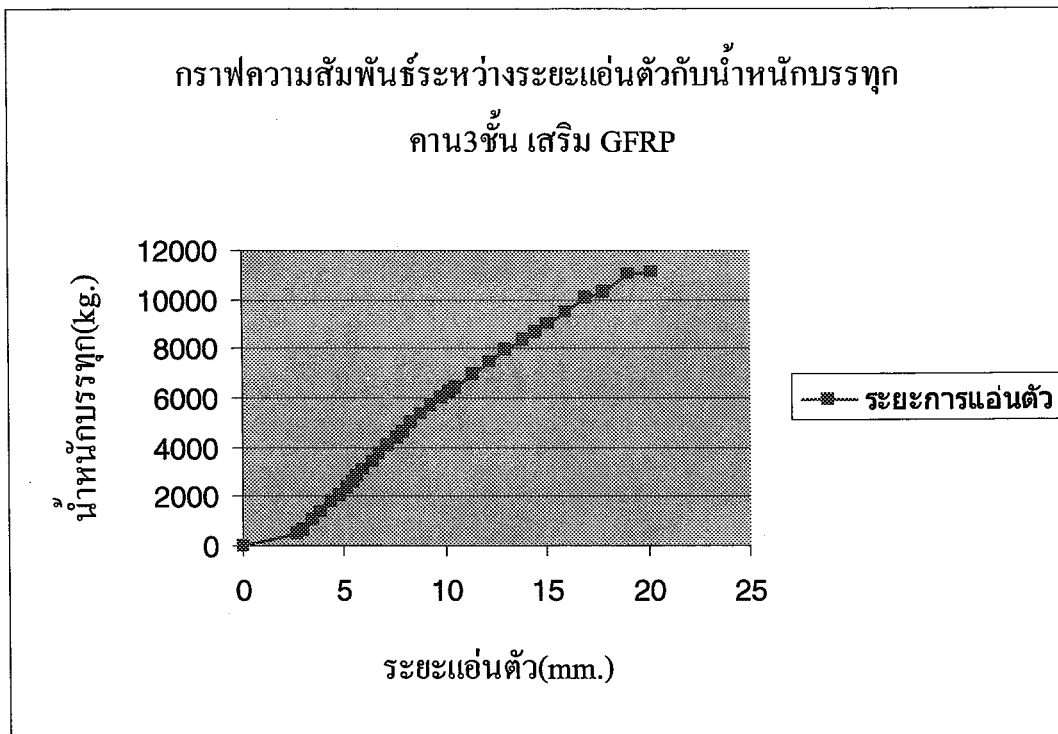
ผลการทดสอบคาน B3

น้ำหนัก บรรทุก (kg)	ระยะแอนตัว (mm)			ความเครียด เหล็ก	ความเครียด GFRP	ความเครียดFiber ด้านข้าง	ความเค้น เหล็ก	ความเค้น GFRP
	ซ้าย	กลาง	ขวา					
0	0	0	0	0	0	0	0	0
477	2.35	2.69	2.6	0.000074	0.000168	-0.000055	150.96	394.8
684	2.59	2.98	2.86	0.000177	0.000225	0.000025	361.08	528.75
1037	2.98	3.43	3.24	0.000197	0.000275	-0.000075	401.88	646.25
1373	3.34	3.84	3.61	0.000172	0.00032	-0.000122	350.88	752
1754	3.75	4.35	4.08	0.000217	0.00041	0.001125	442.68	963.5
2035	4.12	4.74	4.43	0.000225	0.000475	0.000041	459	1116.25
2352	4.45	5.12	4.76	0.000362	0.000573	0.000025	738.48	1346.55
2586	4.68	5.41	5	0.000519	0.000675	0.000023	1058.76	1586.25
2816	4.94	5.7	5.27	0.000462	0.000732	0.000039	942.48	1720.2
3045	5.15	5.98	5.52	0.000477	0.000806	0.0002	973.08	1894.1
3440	5.58	6.43	5.92	0.000457	0.00087	-0.000105	932.28	2044.5
3690	5.83	6.71	6.17	0.000508	0.000924	0.000031	1036.32	2171.4
4036	6.23	7.17	6.58	0.000582	0.001015	-0.000094	1187.28	2385.25
4372	6.62	7.63	6.97	0.000637	0.001045	0.000026	1299.48	2455.75
4655	6.88	7.91	7.24	0.000697	0.001095	-0.000209	1421.88	2573.25
5013	7.26	8.35	7.61	0.000813	0.00114	0.00002	1658.52	2679
5377	7.68	8.85	8.03	0.000777	0.001207	0.000085	1585.08	2836.45
5668	8.14	9.34	8.47	0.000857	0.0013	0.000057	1748.28	3055
5986	8.53	9.78	8.85	0.001032	0.00133	-0.000032	2105.28	3125.5
6267	8.98	10.26	9.26	0.001061	0.001385	0.00019	2164.44	3254.75
6400	9.24	10.55	9.51	0.000987	0.001445	-0.000185	2013.48	3395.75
6950	10	11.44	10.28	0.000992	0.0015	0.000195	2023.68	3525
7447	10.68	12.18	10.9	0.001097	0.00158	0.000425	2237.88	3713
7933	11.45	13.03	11.63	0.001043	0.00165	0.000122	2127.72	3877.5
8370	12.21	13.89	12.37	0.001152	0.001677	0.000566	2350.08	3940.95
8652	12.73	14.47	12.87	0.001257	0.001748	0.000205	2564.28	4107.8
9032	13.24	15.08	13.41	0.001356	0.00179	0.000082	2766.24	4206.5
9513	14.14	16	14.22	0.001459	0.00184	0.000165	2976.36	4324
10015	15.01	16.94	14.98	0.001506	0.00189	0.00022	3072.24	4441.5
13320	15.89	17.86	15.77	0.001547	0.00194	0.000137	3155.88	4559
11002	17	19.08	16.8	0.001597	0.00199	0.000437	3257.88	4676.5
11100	18.92	20.26	17.35	0.001627	0.00204	0.000305	3319.08	4794
11832	19.95	21.42	18.4	0.001682	0.00225	0.000137	3431.28	5287.5

ตารางที่ 4.8 แสดงการแอนตัวของคาน B3



รูปที่ 4.18 ลักษณะการวิบัติของคาน B3



รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุกของคาน B3

ผลการทดสอบคาน B4

ผลการให้น้ำหนักบรรทุก 60%ของน้ำหนักประลัย

น้ำหนักบรรทุก (kg)	ระยะแอนตัว (mm)		
	ซ้าย	กลาง	ขวา
0	0	0	0
627	0.09	0.55	0.21
1290	1.55	2.18	1.64
1647	3.66	3.48	3.82
2455	4.93	4.91	4.16
3017	5.11	6.32	5.35

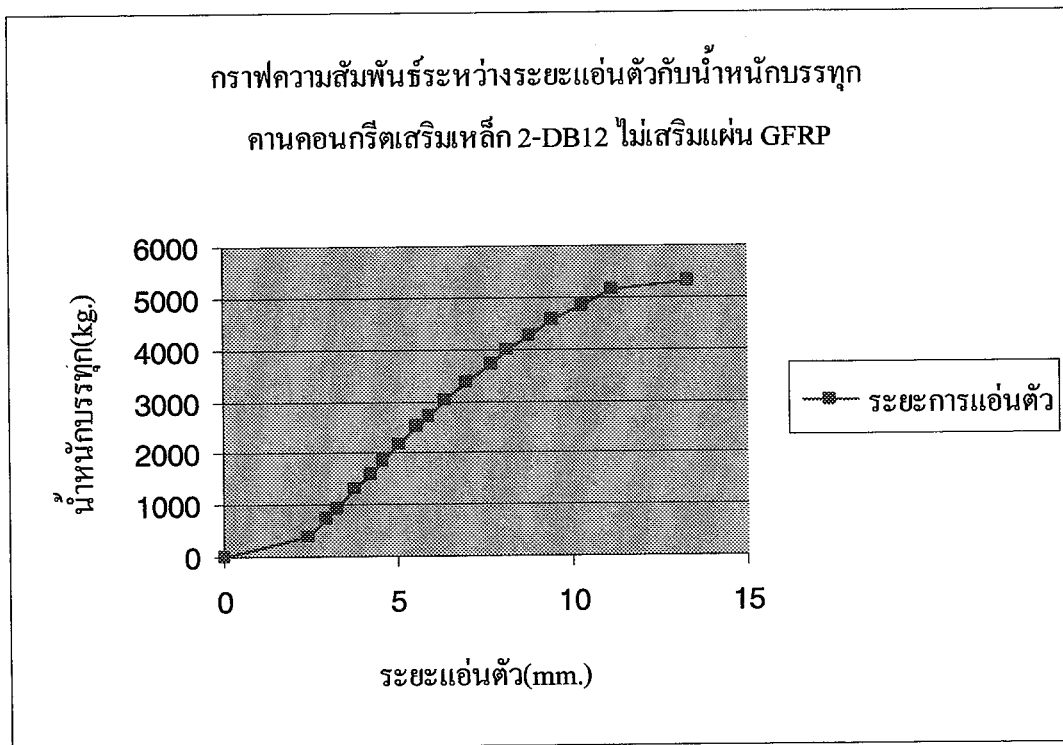
ตารางที่ 4.9 แสดงการแอนตัวของคาน B4 ขณะให้น้ำหนักบรรทุก 60%

ผลการทดสอบจนวิบัติ

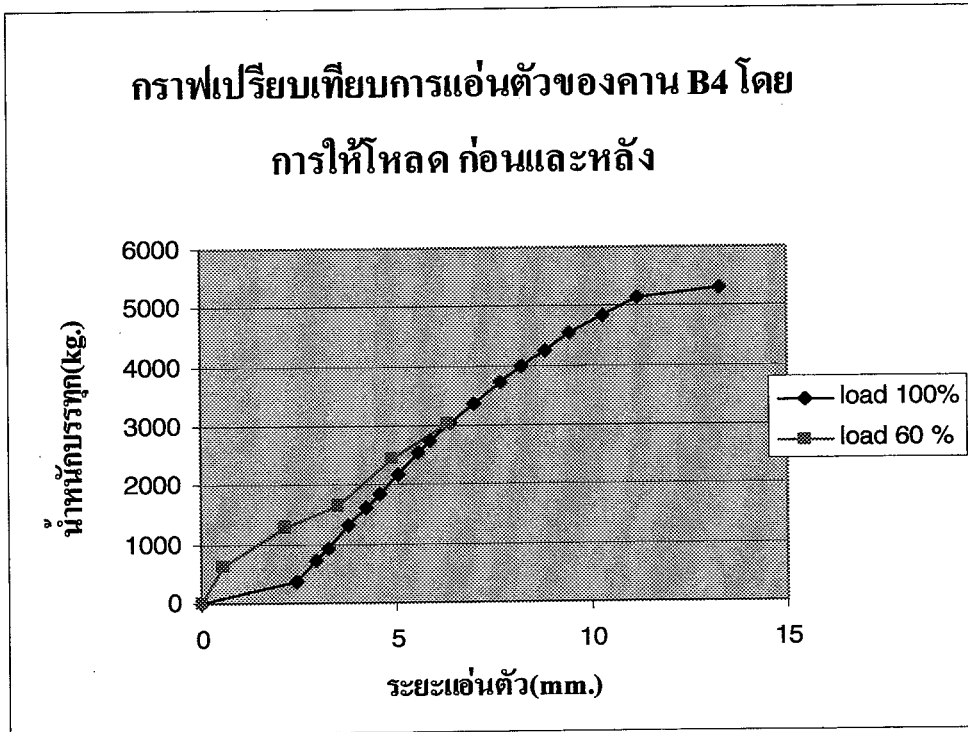
น้ำหนัก บรรทุก (kg)	ระยะแอนตัว (mm)			ความเครียด คอนกรีต 1	ความเครียด คอนกรีต 2	ความเครียด เหล็ก	ความ เค้น คอนกรีต 1	ความ เค้น คอนกรีต 2	ความเค้น เหล็ก
	ซ้าย	กลาง	ขวา						
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
377	2.1	2.42	2.15	-0.000096	0.000215	0.000547	22	50	1115.9
728	2.6	2.96	2.56	-0.00124	-0.001949	0.000525	290	-456	1071
934	2.84	3.25	2.81	-0.00129	-0.000851	0.000483	301	-199	985.32
1305	3.28	3.77	3.3	-0.00093	-0.000163	0.000791	217	-38	1613.6
1601	3.67	4.21	3.67	-0.00156	-0.000033	0.000745	366	-8	1519.8
1860	4	4.6	4.03	-0.00195	-0.000287	0.000955	456	-67	1948.2
2181	4.38	5.04	4.42	-0.00152	-0.000127	0.000982	356	-30	2003.3
2528	4.84	5.58	4.9	-0.00203	0.000153	0.001175	475	36	2397

2726	5.1	5.89	5.18	-0.00179	0.000034	0.001252	418	8	2554.1
3026	5.54	6.39	5.62	-0.0019	0.00015	0.001256	444	35	2562.2
3363	6.08	7.02	6.2	-0.00191	0.000175	0.00139	447	41	2835.6
3720	6.62	7.68	6.77	-0.0025	0.000271	0.00165	585	63	3366
3975	7.08	8.18	7.27	-0.00173	0.000091	0.00168	404	21	3427.2
4268	7.65	8.83	7.83	-0.00218	0.000277	0.001704	510	65	3476.2
4554	8.23	9.44	8.47	-0.00195	0.000179	0.001807	456	42	3686.3
4855	8.94	10.3	9.17	-0.00205	0.000206	0.001895	478	48	3865.8
5138	9.74	11.2	9.99	-0.00189	0.000191	0.001939	441	45	3955.6
5303	11.32	13.3	12.3	-0.00213	0.00018	0.002018	497	42	4116.7

ตารางที่ 4.10 แสดงการแอ่นตัวของคาน B4 ขณะให้น้ำหนักจนคานวิบัติ



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุก
คานคอนกรีตเสริมเหล็ก 2-DB12 ไม่เสริมแผ่น GFRP



รูปที่ 4.21 กราฟเปรียบเทียบการแอ่นตัวของคาน B4 ที่โหลด 60 % ของน้ำหนักประลัย และที่วิบัติ

ผลการทดสอบคาน B5

ผลการให้น้ำหนักบรรทุก 60%ของน้ำหนักประลัย

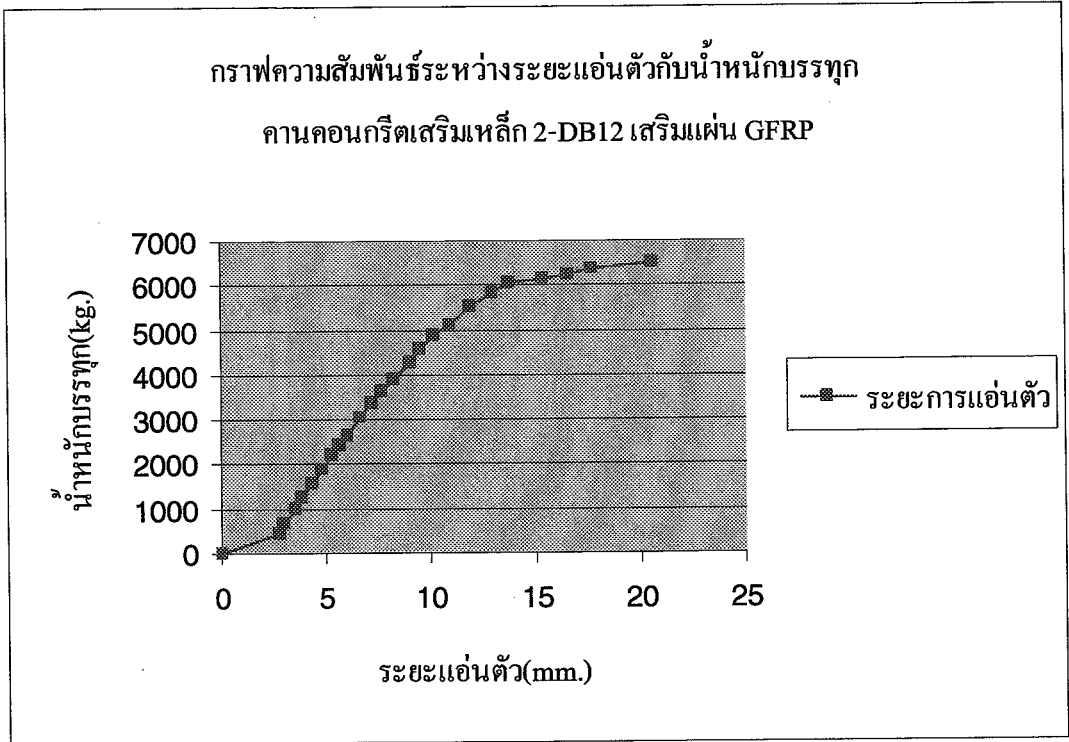
น้ำหนักบรรทุก (kg)	ระยะแอ่นตัว (mm)		
	ซ้าย	กลาง	ขวา
0	0	0	0
605	0.55	0.64	0.57
1210	1.76	2.05	1.78
1805	2	3.43	2
2405	4.13	4.76	4.15
3083	5.6	6.39	5.61

ตารางที่ 4.11 แสดงการแอ่นตัวของคาน B5 ขณะให้น้ำหนักบรรทุก 60%

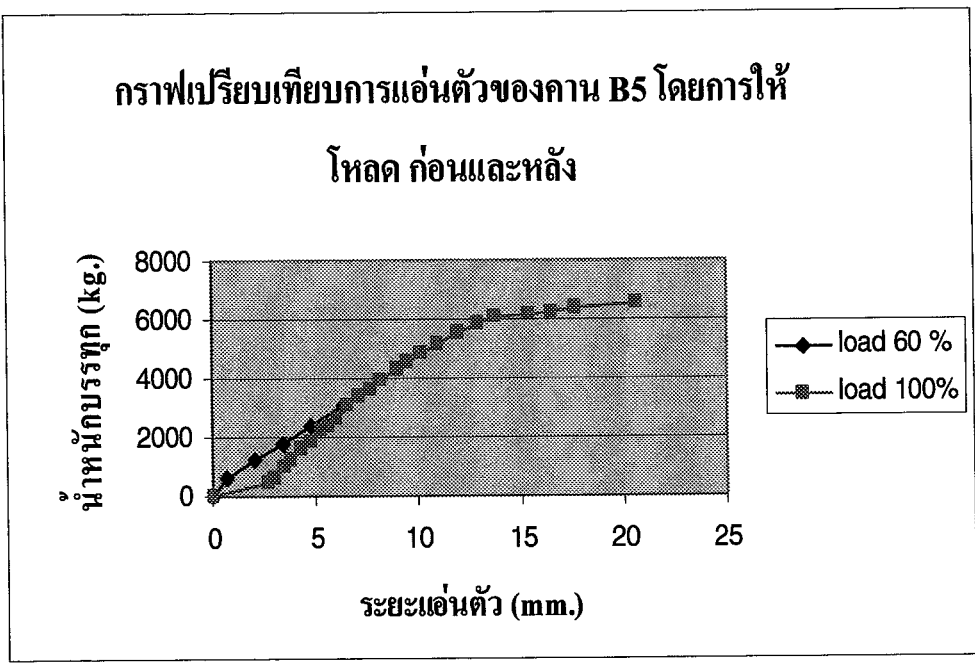
ผลการทดสอบจนวนิบัติ (หลังเสริมแผ่น GFRP)

น้ำหนักบรรทุก (kg)	ระยะแอนตัว (mm)			ความเครียดคอนกรีต 1	ความเครียดคอนกรีต 2	ความเครียดเหล็ก	ความเครียด GFRP	ความเค้นคอนกรีต 1	ความเค้นคอนกรีต 2	ความเค้นเหล็ก	ความเค้น GFRP
	ซ้าย	กลาง	ขวา								
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
466	2.51	2.78	2.5	-0.00012	0.000001	0.000625	0.000844	-29	0	1275	1983
652	2.75	3	2.73	-0.00014	-0.000039	0.00067	0.000933	-32	-9	1366.8	2193
999	3.2	3.51	3.18	-0.00016	-0.000014	0.000832	0.00112	-38	-3	1697.3	2632
1259	3.54	3.82	3.52	-0.00018	-0.00002	0.000929	0.001194	-42	-5	1895.2	2806
1580	3.95	4.3	3.93	-0.0002	-0.000011	0.00098	0.001277	-46	-3	1999.2	3001
1871	4.37	4.83	4.36	-0.00022	-0.000001	0.001151	0.001407	-51	0	2348	3306
2200	4.79	5.31	4.77	-0.00024	-0.000009	0.001254	0.001506	-56	-2	2558.2	3539
2411	5.12	5.68	5.1	-0.00026	-0.000011	0.001193	0.001596	-60	-3	2433.7	3751
2647	5.44	6.03	5.42	-0.00028	0.000001	0.001392	0.001693	-64	0	2839.7	3979
3042	5.94	6.61	5.91	-0.0003	-0.000006	0.001546	0.001742	-70	-1	3153.8	4094
3350	6.49	7.19	6.43	-0.00032	-0.000002	0.001652	0.001855	-75	0	3370.1	4359
3627	6.97	7.71	6.88	-0.00035	-0.000008	0.001798	0.001901	-81	-2	3667.9	4467
3907	7.44	8.24	7.33	-0.00038	-0.00002	0.001904	0.002005	-90	-5	3884.2	4712
4279	8.15	9	8	-0.00039	-0.000062	0.002049	0.002095	-92	-15	4180	4923
4576	8.74	9.54	8.57	-0.00041	0.000012	0.002101	0.00219	-96	3	4286	5147
4880	9.29	10.24	9.11	-0.00043	0.000013	0.002267	0.00229	-100	3	4624.7	5382
5129	9.88	10.95	9.73	-0.00044	-0.000038	0.002349	0.002368	-104	-9	4792	5565
5505	10.79	11.95	10.62	-0.00046	-0.000015	0.002456	0.002443	-108	-4	5010.2	5741
5840	11.71	12.96	11.53	-0.00048	0.000072	0.002506	0.002577	-112	17	5112.2	6056
6043	12.34	13.72	12.1	-0.00047	0.000102	0.002392	0.002548	-110	24	4879.7	5988
6135	13.71	15.35	13.39	-0.00048	0.000204	0.010754	0.003001	-113	48	21938	7052
6250	14.71	16.5	14.5	-0.0005	0.000251	0.010967	0.00329	-116	59	22373	7732
6352	15.71	17.66	16.25	-0.00051	0.000217	0.011102	0.003626	-118	51	22648	8521
6506	17.38	20.62	17.92	-0.00052	0.000275	0.011848	0.009223	-122	64	24170	21674

ตารางที่ 4.12 แสดงการแอนตัวของคาน B5 ขณะให้น้ำหนักจนวนิบัติ



รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุก
คานคอนกรีตเสริมเหล็ก 2-DB12 เสริมแผ่น GFRP

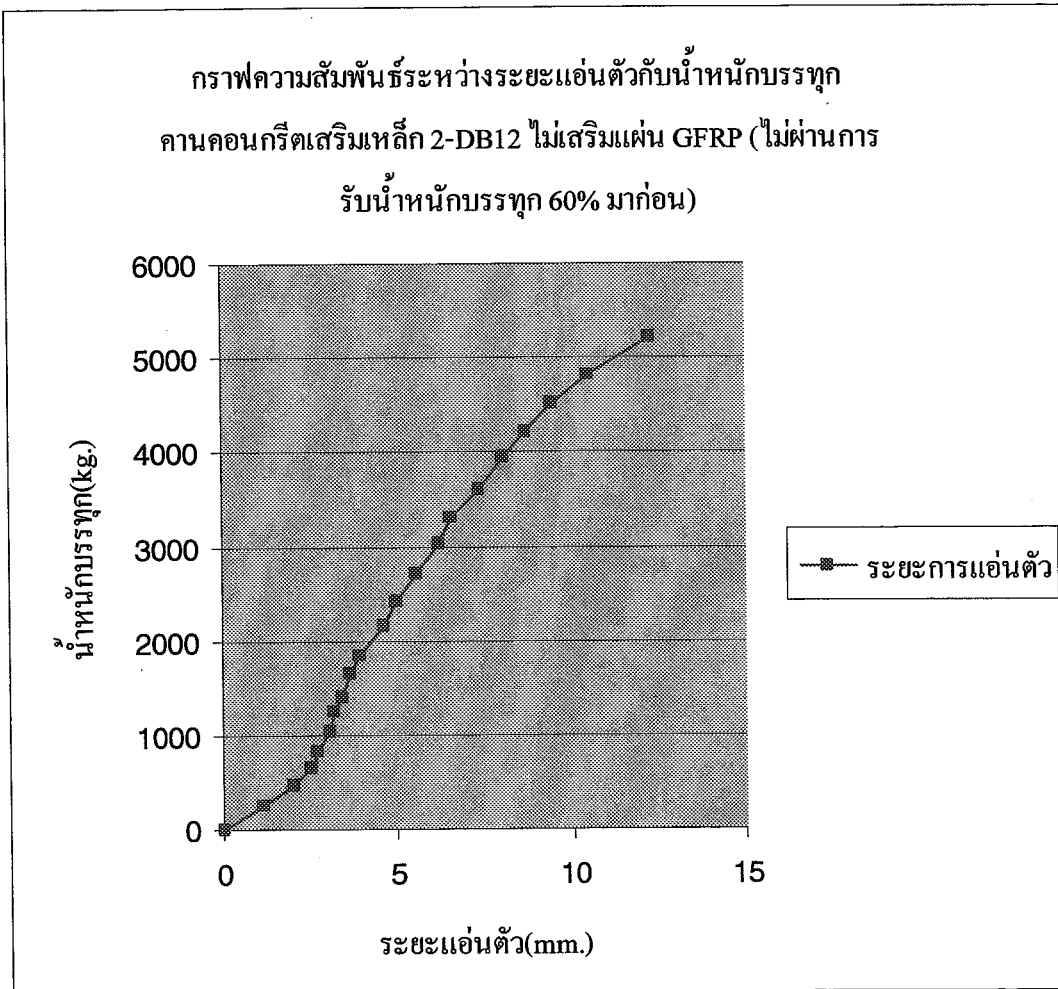


รูปที่ 4.23 กราฟเปรียบเทียบการแอนตัวของคาน B5 ที่โหลด 60 % ของน้ำหนักประลัย และที่วิบัติ

ผลการทดสอบคาน B6

น้ำหนักบรรทุก (kg)	ระยะแอนตัว (mm)		
	ซ้าย	กลาง	ขวา
0	0	0	0
246	1.3	1.18	1.91
457	2.24	2.03	2.13
658	2.41	2.52	2.3
817	2.59	2.72	2.47
1029	2.89	3.09	2.78
1254	3	3.21	2.89
1408	3.2	3.44	3.08
1663	3.39	3.67	3.28
1835	3.63	3.95	3.51
2154	4.31	4.64	4.34
2408	4.95	4.96	4.93
2716	5.14	5.54	5.15
3032	5.98	6.17	5.97
3314	6.43	6.54	6.46
3602	7.14	7.35	7.16
3949	7.86	8.04	7.85
4209	8.5	8.67	9.46
4507	9.23	9.45	10.24
4821	10.03	10.49	11.08
5218	12.07	12.26	12.05

ตารางที่ 4.13 แสดงการแอนตัวของคาน B6 ขณะให้น้ำหนักจนคานวิบัติ



รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุก
คานคอนกรีตเสริมเหล็ก 2-DB12 ไม่เสริมแผ่น GFRP (คาน B6)

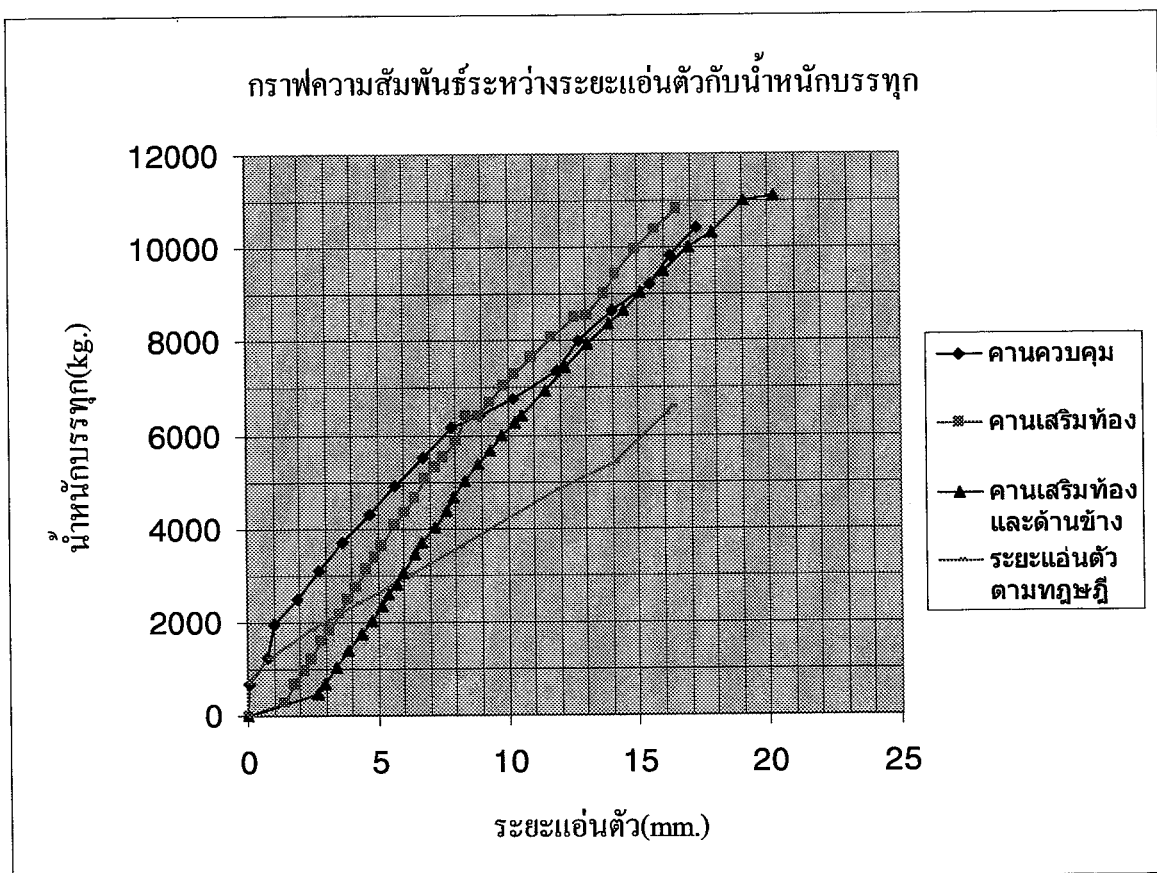
บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

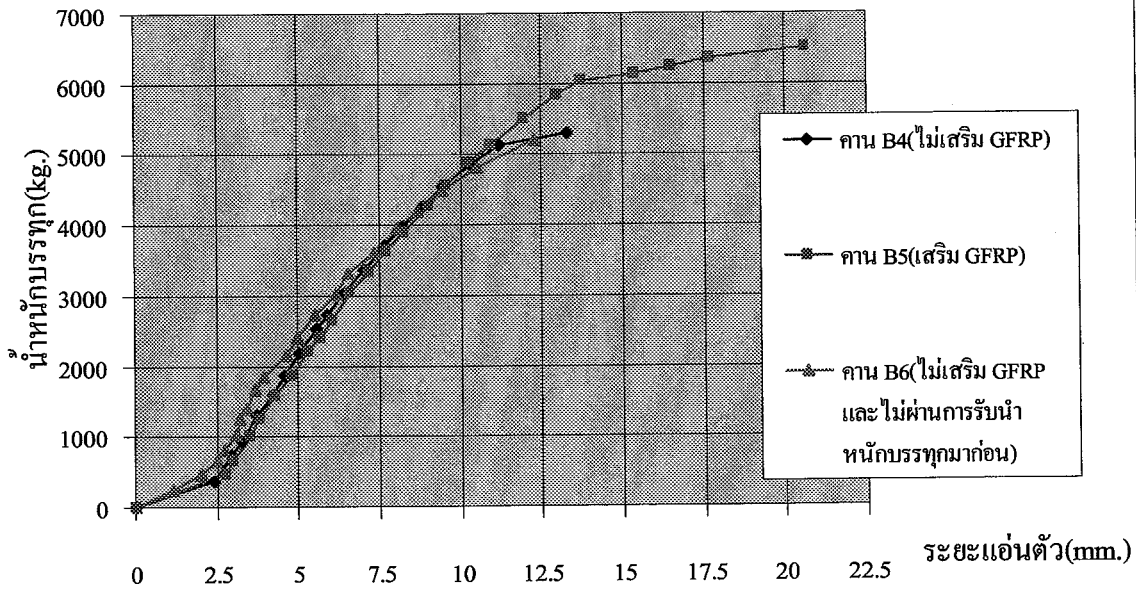
5.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการโก่งตัว

จากการทดสอบคานทั้ง 6 ตัวอย่างนำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคานที่มีและไม่มีเสริมกำลัง ได้ดังรูปที่ 5.1 และ 5.2



รูปที่ 5.1 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างระยะแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุกของคานกลุ่มที่ 1

กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างระยะแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุก
คานคอนกรีตเสริมเหล็ก 2-DB12 ไม่เสริมแผ่น GFRP และเสริมแผ่น GFRP



รูปที่ 5.2 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างระยะแอนตัวกับน้ำหนักบรรทุก
ของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก 2-DB12 (กลุ่มที่ 2) ไม่เสริมแผ่น GFRP และเสริมแผ่น GFRP

คานทดสอบ	น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (kg)	ระยะโก่งตัว (mm)
B1	10,441	17.3
B2	10,835	16.54
B3	11,832	21.42
B4	5,303	13.3
B5	6,506	20.62
B6	5,218	12.26

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบคาน

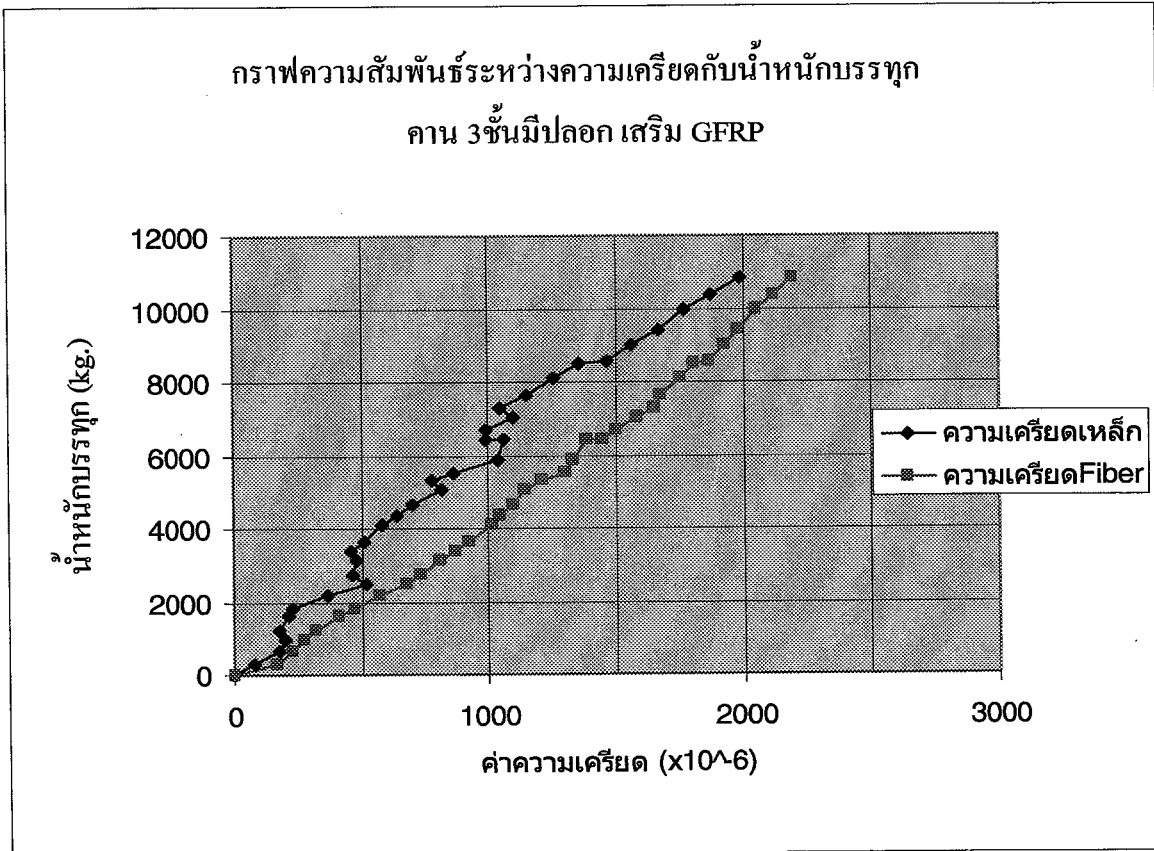
จากรูปที่ 5.1 คานที่เสริม GFRP มีผลของการรับน้ำหนักบรรทุกได้สูงกว่าคานควบคุม เมื่อพิจารณาที่จุดกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดคานทดสอบ B2 และ B3 มีกำลังสูงกว่าคานควบคุม B1 เท่ากับ 3.77 % และ 13.32 % ตามลำดับ ส่วนในรูปที่ 5.2 เป็นผลการทดลองของคาน B4,B5 และ B6 ซึ่งใช้เหล็กเสริมที่มีขนาดเล็กกว่าคาน B1,B2 และ B3 จากการทดลองนั้นคาน B4,B5 และ B6 วิบัติที่ผิวด้านรับแรงดึงซึ่งทำให้สามารถดึงความสามารถด้านการรับแรงดึงของ Fiber มาใช้ได้อย่างเต็มที่ เนื่องจากพอเหล็กรับแรงถึงจุดครากแล้ว Fiber จะช่วยทำหน้าที่รับแรงดึงแทนเหล็ก ซึ่งจากการทดลองคานที่เสริม GFRP ก็สามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มขึ้นถึง 22.69 % ของคานควบคุม

พิจารณาจากรูปที่ 5.1 การโก่งตัวของคานในช่วงแรกถึงน้ำหนักบรรทุก ประมาณ 6000 kg คานที่เสริม GFRP จะมีการโก่งตัวมากกว่าคานควบคุมเนื่องจากคานได้ผ่านการรับน้ำหนักมาแล้ว 60 % ของน้ำหนักประลัย หรือที่ประมาณ 6000 kg แต่หลังจาก 6000 kg ขึ้นไปคานที่เสริม GFRP จะมีระยะแอนตัวที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับน้ำหนักบรรทุกเท่ากัน เช่น เปรียบเทียบที่น้ำหนักบรรทุก 8000 kg คานควบคุมที่ไม่เสริมมีการโก่งตัวเท่ากับ 12.75 มิลลิเมตร และคานที่มีการเสริมกำลัง B2 มีระยะโก่งตัวเท่ากับ 11.5 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าการใช้วัสดุ GFRP เสริมกำลังที่ท้องคานทำให้มีระยะโก่งตัวลดลง 10.89 % ส่วนคานกลุ่มที่ 2 พิจารณาจากรูปที่ 5.2 คานทั้งสองผ่านการรับน้ำหนักมาแล้ว 60 % ของน้ำหนักประลัย ประมาณ 3,000 kg. ทำให้เมื่อให้น้ำหนักบรรทุกเริ่มต้นที่ประมาณ 300 kg. คานก็แอนตัวไปถึง 2.5 mm. เมื่อให้น้ำหนักบรรทุกไปเรื่อยๆคานที่เสริมและไม่เสริม GFRP มีระยะโก่งตัวเท่าๆกัน แสดงว่าการเสริมแผ่น GFRP ไม่ได้ช่วยในการลดค่าการโก่งตัวมากนัก แต่จะช่วยให้คานรับน้ำหนักบรรทุก และโมเมนต์คด ได้มากขึ้น ทำให้คานวิบัติที่ค่าการโก่งตัวที่มากขึ้นกว่าคานที่ไม่ได้เสริมแผ่น GFRP

คาน B3 มีการใช้วัสดุ GFRP เสริมที่ด้านข้างแทนเหล็กปลอกซึ่งสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มากกว่าคาน B2 และไม่วิบัติด้วยแรงเฉือนเหมือนคาน B2 แสดงว่าการแปะ GFRP สามารถเสริมกำลังเพื่อรับแรงเฉือนได้แทนเหล็กปลอก

5.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและหน่วยการยืดหดตัว

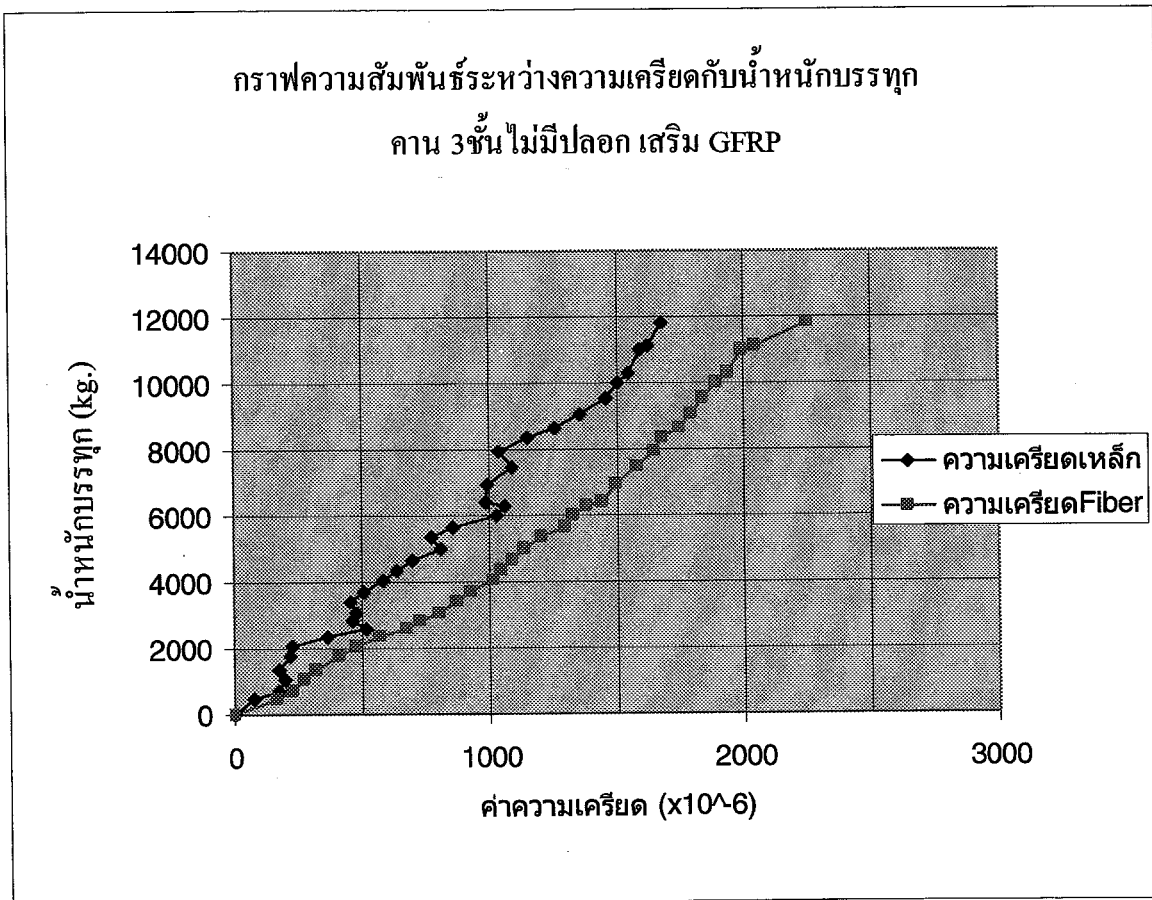
ผลการทดลองคาน B2



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเหล็กและไฟเบอร์
กับน้ำหนักบรรทุกของคาน B2

จากรูปที่ 5.3 ความเครียดที่เกิดขึ้นเมื่อคานวิบัติของเหล็กเสริมล่างเท่ากับ $19.85(10^{-4}$ ม./ม.) ค่าแรงความเค้นของเหล็กเสริมล่างได้ 4,049 ksc ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความเค้นครากของเหล็กเสริม (4,000 ksc) ส่วน fiber นั้นมีความเครียดเกิดขึ้นมากกว่าเหล็กเมื่อเทียบกับที่รับน้ำหนักบรรทุกเท่าๆกัน โดยที่คานวิบัติ fiber มีค่าความเครียดเท่ากับ $21.95(10^{-4}$ ม./ม.) ค่าแรงความเค้นของ fiber ได้ 5,158 ksc

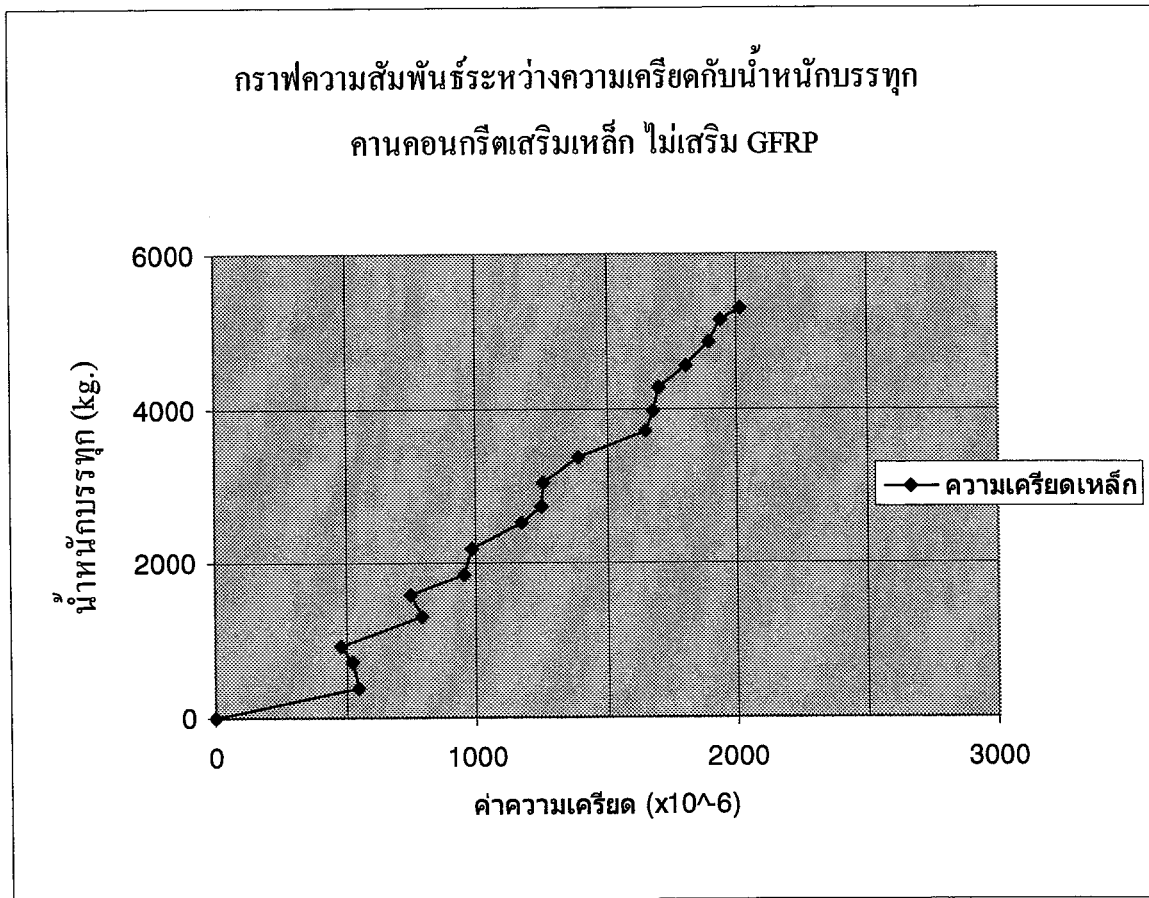
ผลการทดลองคาน B3



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเหล็กและไฟเบอร์
กับน้ำหนักบรรทุกของคาน B3

จากรูปที่ 5.4 ความเครียดที่เกิดขึ้นเมื่อคานวิบัติของเหล็กเสริมล่างเท่ากับ $16.82(10^{-4}$ ม./ม.)
คำนวณความเค้นของเหล็กเสริมล่างได้ 3,431 ksc ซึ่งมีค่ายังไม่ถึงความเค้นครากของเหล็กเสริม (4,000
ksc) เนื่องจากคานนั้นวิบัติตรง support ทำให้ผลการทดลองมีข้อผิดพลาดเนื่องจากคานไม่ได้วิบัติ
เนื่องจากโมเมนต์ดัด หรือ แรงเฉือน ส่วนfiber นั้นมีความเครียดเกิดขึ้นมากกว่าเหล็กเมื่อเทียบกันที่รับ
น้ำหนักบรรทุกเท่าๆกัน โดยเมื่อคานวิบัติ fiber มีค่าความเครียดเท่ากับ $22.5(10^{-4}$ ม./ม.) คำนวณความ
เค้นของ fiber ได้ 5,287 ksc

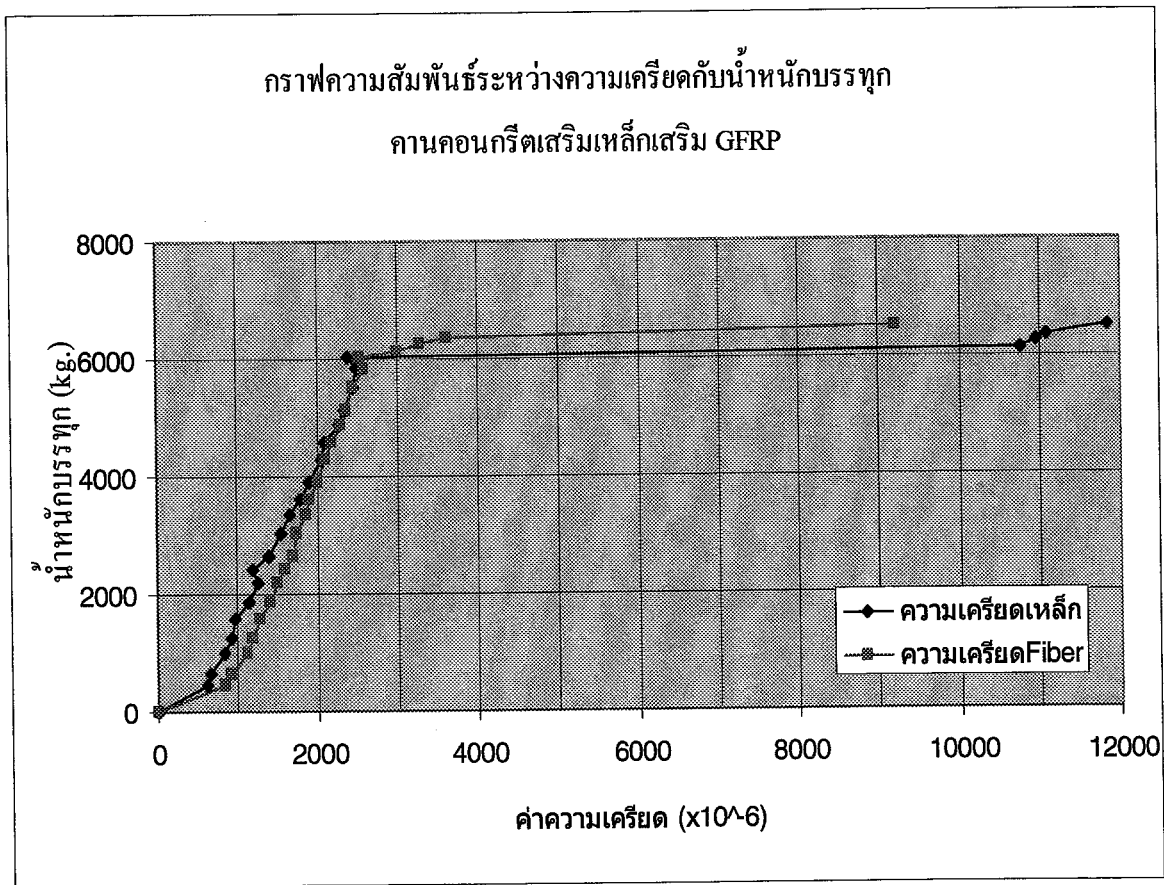
ผลการทดลองคาน B4



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเหล็กกับน้ำหนักบรรทุกของคาน B4

จากรูปที่ 5.5 เมื่อคานวิบัติมาตรวัดความเครียดอ่านค่าความเครียดของเหล็กเสริมล่างได้ $20.18(10^{-4}$ ม./ม.) คำนวณความเค้นของเหล็กได้ 4,116 ksc ประมาณ 102.9 % ของค่าความเค้นครากของเหล็กที่ใช้ทดสอบ (4,000 ksc)

ผลการทดลองคาน B5



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเหล็กและไฟเบอร์กับน้ำหนักบรรทุกของคาน B5

จากรูปที่ 5.6 พบว่าเหล็กเสริมรับแรงดึงเกิดการครากที่น้ำหนัก 6,000 kg. สังเกตได้จากเส้นความสัมพันธ์ที่เปลี่ยนไปอยู่แนวนอน และค่าความเครียดที่วัดได้ ณ จุดเปลี่ยนค่าความชันมีค่าประมาณ 2,400 ไมโคร คำนวณความเค้นได้ประมาณ 4,900 ksc คิดเป็น 122.5 % ของค่าความเค้นครากของเหล็กที่ใช้ทดสอบ (4,000 ksc) ซึ่งเมื่อเหล็กครากแล้ว fiber จึงต้องทำหน้าที่รับแรงดึงแทนเหล็ก ทำให้ fiber มีค่าความเครียดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและวิบัติที่ $92.23(10^{-4}$ ม./ม.) คำนวณค่าความเค้นของ fiber ได้ 21,674 ksc

5.1.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับทฤษฎีการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ความสามารถการเสริมกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของคานคอนกรีตเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย โดยวิเคราะห์หาค่าลึงค์ดัดจากสมการที่ (3.11) ได้ดังตาราง (ดูรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ก.)

คานทดสอบ	โมเมนต์ดัดจากผลการทดสอบ	โมเมนต์ดัดจากทฤษฎีการวิเคราะห์	ผลการทดสอบ/ทฤษฎี
B1	5328.695	5497.04	0.97
B2	5525.5	6982.198	0.79
B3	6024	6982.198	0.86
B4	2759.5	2216.47	1.25
B5	3361	4152.26	0.81
B6	2717	2216.47	1.23

ตารางที่ 5.2 การวิเคราะห์ทฤษฎีเปรียบเทียบการทดสอบ

5.2 สรุปผลการทดลอง

ผลของการใช้แผ่น GFRP เสริมกำลังด้านรับแรงดิ่งในคานคอนกรีต จากการศึกษาทดลองเปรียบเทียบกับคานคอนกรีตที่ไม่มีการเสริมกำลัง สามารถสรุปเป็นข้อพิจารณาในการใช้งานวัสดุ GFRP ดังนี้

- การใช้วัสดุ GFRP เสริมกำลังส่วนรับแรงดิ่งทำให้คานมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคานที่ไม่ได้มีการเสริมกำลัง
- ผลของการเสริมวัสดุ GFRP ไม่มีผลช่วยในเรื่องการ โกงตัวมากนัก นอกจากนั้นเมื่อเหล็กถึงจุดครากแล้ว จากผลการทดลองช่วงที่Fiber รับน้ำหนักแทน คานจะมีการ โกงตัวเพิ่มขึ้นค่อนข้างสูง
- การปะแผ่น GFRP ที่ด้านข้างของคานสามารถช่วยในด้านกำลังรับแรงเฉือนได้

5.2.1 การใช้ GFRP เสริมกำลังเพื่อเพิ่ม Live load ให้กับโครงสร้างบ้านพักอาศัย

น้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างบ้านพักอาศัยทั้งหมดโดยประมาณ

น้ำหนักบรรทุกคงที่(Dead Loads)

พื้น 240 กก/ม²

คาน 100 กก/ม²

เสา 50 กก/ม²

ผนัง 200 กก/ม²

อื่นๆ 120 กก/ม²

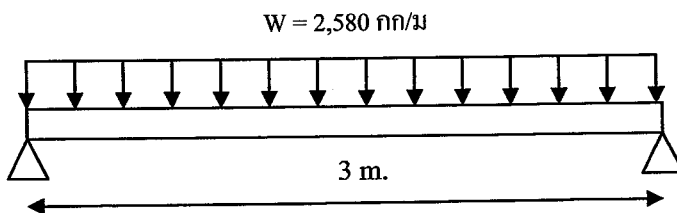
รวม 710 กก/ม²

น้ำหนักบรรทุกจร(Live Loads)

ที่พักอาศัย 150 กก/ม²

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น น้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างโดยประมาณ} &= W_D + W_L \\ &= 710 + 150 \\ &= 860 \text{ กก/ม}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักที่กระทำบนคานทดสอบยาว 3 ม.} &= 860 \times 3 \\ &= 2,580 \text{ กก/ม} \end{aligned}$$



$$M = \frac{WL^2}{8}$$

$$M = \frac{2580 \times 3^2}{8}$$

$$M = 2902.5 \text{ กก-ม.}$$

จากการทดสอบ พบว่าคานที่เสริม GFRP รับโมเมนต์ได้เพิ่มขึ้น ประมาณ 22% คิดเป็น 1.22M ของคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง ดังนั้นคานที่เสริมกำลังรับโมเมนต์ได้เท่ากับ

$$M_{GFRP} = 1.22 \times 2902.5$$

$$M_{GFRP} = 3,541.05 \text{ กก-ม.}$$

น้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้นบนคานที่เสริม GFRP

$$M_{GFRP} = \frac{WL^2}{8}$$

$$3541.05 = \frac{W \times 3^2}{8}$$

$$W = 3,147.6 \text{ กก/ม.}$$

$$W = \frac{3,147.6}{3}$$

$$W \approx 1,050 \text{ กก/ม}^2$$

โครงสร้างรับ live loads ได้เท่ากับ

$$W_L = W - W_D$$

$$= 1050 - 710$$

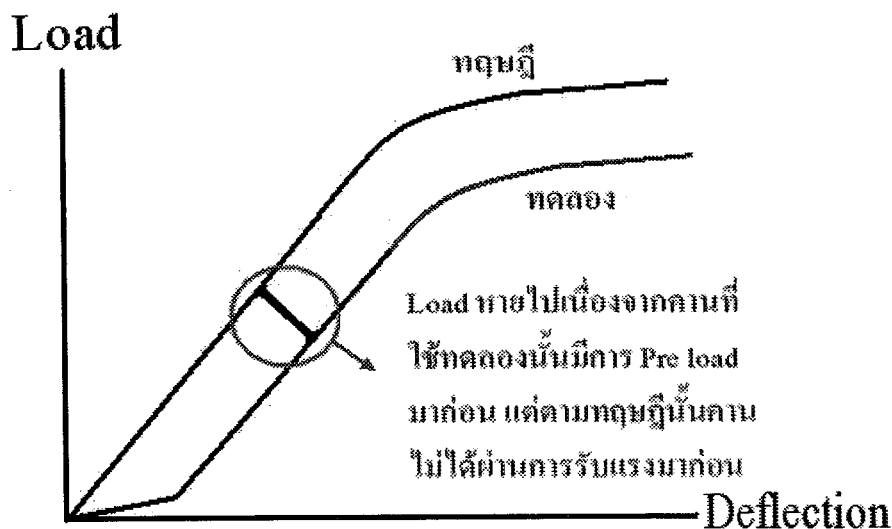
$$= 340 \text{ กก/ม}^2$$

ดังนั้นโครงสร้างที่เสริม GFRP สามารถรับ live loads ได้เพิ่มขึ้น 190 กก/ม² คิดเป็น 127% ของ live loads ของโครงสร้างที่ไม่ได้เสริม GFRP

5.3 วิจัยและเสนอแนะ

จากการทดสอบครั้งนี้ สามารถสรุปข้อเสนอแนะได้ดังนี้

1. ในการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมองค์อาคาร ควรพิจารณาถึงสภาพและกำลังขององค์อาคารเดิมด้วยความระมัดระวังก่อนทำการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมองค์อาคารนั้น
2. การเสริมกำลังหรือซ่อมแซมองค์อาคารรับแรงดัดด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยควรพึงระวังเป็นอย่างมากในเรื่องค่าความเหนียวขององค์อาคารที่ลดลง เนื่องจากการวิบัติขององค์อาคารจะเป็นการวิบัติแบบเปราะ ทำให้ไม่สามารถเห็นการโค้งตัวก่อนการวิบัติได้ชัดเจน
3. จากผลการทดสอบคานรับโมเมนต์ได้น้อยกว่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี เนื่องจากคานที่นำมาทดสอบได้ผ่านการรับแรงมาแล้วซึ่งจำลองให้เหมือนสภาวะการใช้งานจริง แต่ทฤษฎีนั้นคิดจากคานที่ไม่ผ่านการรับแรงมาเลย ดังนั้นการนำวัสดุ Fiber ไปใช้งานจริงควรต้องมีการคำนวณโดยเผื่อกำลังเอาไว้ด้วย



รูปที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Deflection

เปรียบเทียบผลการทดลองกับทางทฤษฎี

4. คานที่นำมาทดสอบควรออกแบบให้วิบัติที่ผิวรับแรงดึงเพื่อให้ Fiber ที่นำมาเสริมได้รับกำลังเต็มที่ก่อนคานวิบัติ ซึ่งจะช่วยให้คานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้เพิ่มขึ้นอีก
5. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการใช้วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยในด้านของการเสริมกำลังรับแรงเฉือน

6. ในการเสริมกำลังองค์อาคารด้วย GFRP ต้องระวังในเรื่องการติดตั้งโดยเฉพาะการใช้วัสดุประสาน ควรติดตั้งโดยผู้ชำนาญการเพราะวัสดุมีราคาแพงมากและโอกาสผิดพลาดมาก

บรรณานุกรม

- ศรีกริช หิรัญมาศ, 2544. คอนกรีตเสริมเหล็ก.
- ศิริวัฒน์ ไชยชนะ , 2549. วิเคราะห์โครงสร้าง. พิมพ์ครั้งที่ 3 : สำนักพิมพ์ เอส.เอส.บุ๊คเฮ้าส์ จำกัด
- ศิริวัฒน์ ไชยชนะ, 2542. คอนกรีตเสริมเหล็ก ทฤษฎีกำลัง. พิมพ์ครั้งที่ 4 : สำนักพิมพ์ บริษัท เอส.เอส.บุ๊คเฮ้าส์ จำกัด
- วินิต ช่อวิเชียร, 2544. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 9 : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- INSEE Concrete Handbook. พิมพ์ครั้งที่ 2
- Arduini, M., and Nanni A. ,1997. Behavior of precracked RC beams strengthened with carbon FRP sheets. J. Compos. Constr., 1(2), 63-70.
- Malek, A. M., Saadatmanesh, H., and Ehsani, M. R. (1998). Prediction of failure loads of R/C beams strengthened with FRP plate due to stress concentration at plate end. ACI Struct. J., 95(1), 142-152.
- Swamy, R. N., and Mukhopadhyaya, P. ,1999. Debonding of carbon fibre-reinforced polymer plate from concrete beams. Proc., Inst. Civil Eng. Struct. Build., 134, 301-317.
- Sebastian, W. M. ,2003. Prediction of Interface Shear Stresses in Elastoplastic Moment-Varying Zones of Advanced Composite Material-Strengthened Concrete Members. Lecturer, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Bristol.
- Sing-Ping Chiew,M, Qin Sun,and Yiyu (2007).”flexural strength of rc beams with GFRP laminate “ ASCE composite for sturct.,1090-2068
- Hedong Niu.,Zhishen Wu.,(2006) “ Effect of FRP-concrete interface bond properties on the performance of RC beams Strengthen in flexural with Externally bonded FRP cheets “ASCE composite for sturct.,0899-1561
- V.nagaraj.,and V.S.Ganggarao,(1997) “ Static behavior of pultruded GFRP beams “ ASCE composite for sturct.,

ภาคผนวก ก.

ก. วิธีการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต

กำหนดกำลังอัดประลัยเฉลี่ย (fc') ของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 240 กก./ตร.ซม.

● มาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบ

- กำหนดให้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งมีความถ่วงจำเพาะ 3.15
- มวลรวมหยาบขนาดโตสุด 20 มม. (3/4") มีความถ่วงจำเพาะ 2.70 ค่าการดูดซึมน้ำ 0.5%
 - มวลรวมละเอียดความถ่วงจำเพาะ 2.65 ค่าการดูดซึมน้ำ 0.7% ค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.80
 - แนวทางปฏิบัติทั่วไป เห็นว่าควรใช้ค่าความยุบตัว 8-10 ซม.
 - กำหนดให้ใช้ขนาดโตสุดของวัสดุผสมหยาบเป็น 20 มม.

● การออกแบบ

ขั้นตอนที่ (1)

ในการออกแบบจะต้องออกแบบคอนกรีตให้มีกำลังอัดมากกว่ากำลังอัดของงานที่กำหนดไว้ ดังสมการ

$$f_{cr} = fc' + ks \quad (\text{ผก 1})$$

โดยที่ fc' = กำลังอัดที่กำหนดไว้ในแบบ
 ks = ส่วนเผื่อซึ่งประกอบด้วย
 k = ค่าคงที่
 s = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังอัด จากก้อนตัวอย่าง 30 ค่า หรือมากกว่า หรือ ส่วนเผื่อเมื่อไม่มีผลทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ ผก.1. แสดงค่าส่วนเพื่อกำลังอัด

ค่ากำลังอัดที่กำหนด (f_c')	กำลังอัดที่ต้องเพิ่ม
น้อยกว่า 210	70
210-350	85
350 หรือมากกว่า	100

$$\text{คั่งนั้นกำลังที่ต้องผลิต (fcr) = 240 + 85 = 325 กก./ตร.ซม}$$

ขั้นตอนที่ (2) ปริมาณน้ำที่ใช้และน้ำหนักซีเมนต์

- ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบเป็น 20 มม. ค่าความยุบตัว 8-10 ซม. ไม่ต้องใช้สารกักกระจายฟองอากาศจะได้ปริมาณน้ำที่ต้องใช้ = 200 ลิตร/ลบ.เมตร ของคอนกรีต
- คอนกรีตที่ต้องการกำลัง 325 กก./ตร.ซม. และคอนกรีตไม่กระจายกักฟองอากาศ จะได้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนัก ที่ต้องใช้ = 0.52
- น้ำหนักซีเมนต์ที่ต้องการ = $200/0.52 = 385$ กก.

ขั้นตอนที่ (3) หาปริมาตรซีเมนต์

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

ขั้นตอนที่ (4) หาปริมาตรทราย

$$\begin{aligned} \text{โดยทั่วไปจะใช้ปริมาตรปูน+ปริมาตรทราย} &= 40\% \text{ โดยปริมาตร หรือ } 400 \text{ ลิตร} \\ \text{ปริมาตรทราย} &= 400-123 \\ &= 277 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ (5) หาน้ำหนักทราย

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

ขั้นตอนที่ (6) หาปริมาตรหิน

$$\begin{aligned}\text{ปริมาตรหิน} &= 1000 - \text{ปริมาตรซีเมนต์} - \text{ปริมาตรน้ำ} - \text{ปริมาตรทราย} \\ &= 1000 - 123 - 200 - 277 \\ &= 400 \text{ ลิตร}\end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ (7) หาน้ำหนักของหิน

$$\begin{aligned}\text{น้ำหนักหิน} &= \text{ปริมาตรหิน} \times \text{ความถ่วงจำเพาะของหิน} \\ &= 400 \times 2.70 \\ &= 1080 \text{ กก.}\end{aligned}$$

สรุป ส่วนผสมใน 1 ลบ.ม. คอนกรีตเป็นดังนี้

ซีเมนต์	385	กก.
น้ำ	200	ลิตร
ทราย	735	กก.
หิน	1080	กก.
รวม	2390	กก.

- การออกแบบส่วนผสมโดยปริมาตร 1:2:4

คือ ใช้ ปูนซีเมนต์ 1 ส่วน ทราย 2 ส่วน หิน 4 ส่วน โดยปริมาตร ซึ่งสามารถแปลงเป็น
ส่วนผสม โดยน้ำหนักได้ดังนี้

กำหนดให้	หน่วยน้ำหนักของปูนซีเมนต์	= 1400 กก./ลบ.ม.
	หน่วยน้ำหนักของทราย	= 1450 กก./ลบ.ม.
	หน่วยน้ำหนักของหิน	= 1500 กก./ลบ.ม.

การคำนวณ

$$\begin{aligned}\text{ปูน 1 ถุง 50 กก. มีปริมาตร} &= 50/1400 = 0.036 \text{ ลบ.ม.} \\ \text{ทราย 2 ส่วน มีปริมาตร} &= 0.036 \times 2 = 0.072 \text{ ลบ.ม.} \\ \text{น.น. ทราย} &= 0.072 \times 1450 = 104 \text{ กก.}\end{aligned}$$

หิน 4 ส่วน มีปริมาตร = $0.036 \times 4 = 0.144$ ลบ.ม.
 น.น. หิน = $0.144 \times 1500 = 216$ กก.
 ปริมาณน้ำสำหรับปูน 1 ถุง เพื่อให้ยุบตัว 10 ซม. = 35 ลิตร ($f'c = 240$ ksc.)
 น้ำหนักส่วนผสมเมื่อใช้ปูน 1 ถุง = $50 + 104 + 216 + 35$ กก. = 405 กก.
 หน่วยน้ำหนักคอนกรีต = 2400 กก./ลบ.ม.
 ต้องใช้ปริมาณปูน = $2400/405 = 6.0$ ถุง = 300 กก./ลบ.ม.

สรุป ส่วนผสมใน 1 ลบ.ม.

ปูนซีเมนต์ = 300 กก./ลบ.ม.
 ทราย = 624 กก./ลบ.ม.
 หิน = 1296 กก./ลบ.ม.
 น้ำ = 210 กก./ลบ.ม.
 ค่ายุบตัวประมาณ 8 ± 10 ซม.

ข. ส่วนผสมคอนกรีตมวลเบา

หน่วยน้ำหนักออกแบบ $1,600 \text{ kg/m}^3$, $1,700 \text{ kg/m}^3$, $1,800 \text{ kg/m}^3$,
 $1,900 \text{ kg/m}^3$, $2,000 \text{ kg/m}^3$

- อัตราส่วนผสม ปูนซีเมนต์ต่อทรายละเอียด = 1 : 1
- อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) = 0.3
- น้ำยาสำหรับทำให้เกิดโฟมที่ใช้ผสมในคอนกรีตมวลเบา 2 % โดยปริมาณน้ำ

ค. การคำนวณ Moment จากทฤษฎีและการทดลอง

ถาน B1

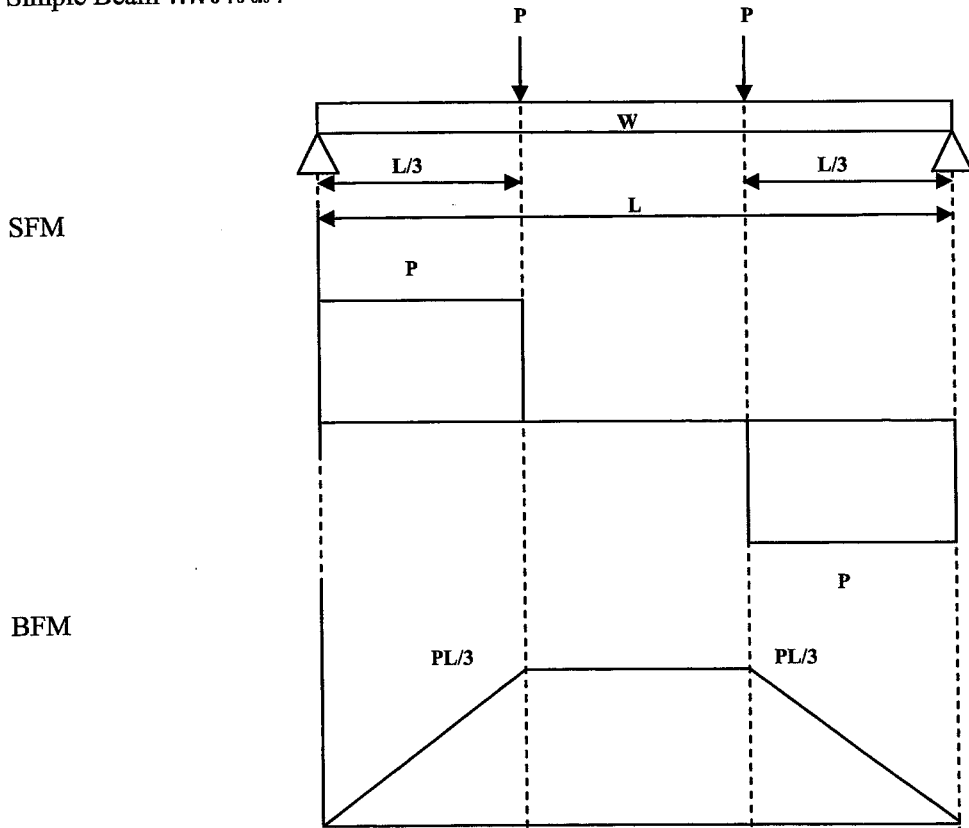
ทฤษฎี
$$M_n = A_s f_y \left(d - 0.59 \frac{A_s f_y}{f'_c b} \right) \quad (\text{ผก 2})$$

$$= 628 \times 4000 \left(260 - 0.59 \frac{628 \times 4000}{240 \times 150} \right) \times \frac{1}{10^6}$$

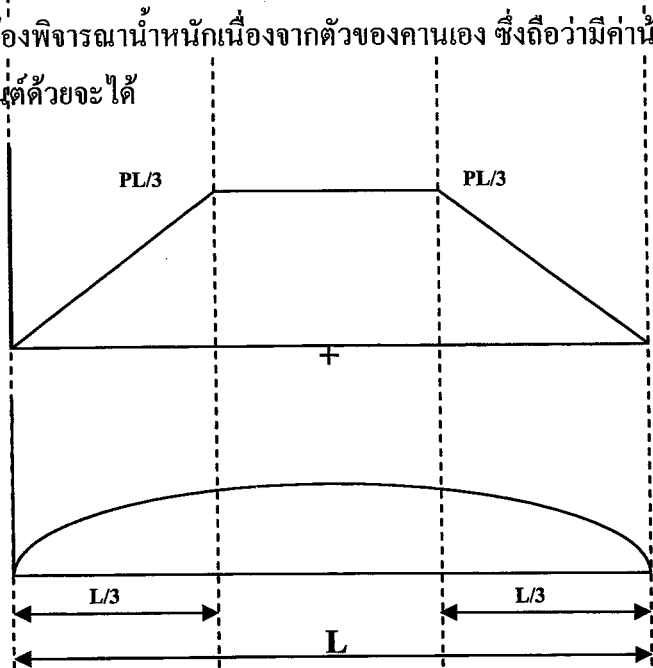
$$= 5,497.04 \text{ kg-m}$$

ทดสอบ

Simple Beam ที่พิจารณา



แต่โมเมนต์ที่พิจารณานั้นต้องพิจารณาน้ำหนักเนื่องจากตัวของคานเอง ซึ่งถือว่ามีย่าน้อยมากเราจะนำมาพิจารณาเฉพาะหาค่าโมเมนต์ด้วยจะได้



รูปที่ ผก1 แสดง Shear force Diagrams และ Bending Moment Diagrams

$$\begin{aligned}
 M &= \frac{PL}{3} + \left(\frac{WL}{2}\right)\left(\frac{L}{3}\right) - \left(\frac{WL}{3}\right)\left(\frac{L}{3}\right)\left(\frac{1}{2}\right) \\
 &= \frac{PL}{3} + \left(\frac{WL^2}{6}\right) - \left(\frac{WL^2}{18}\right) \\
 &= \frac{PL}{3} + \left(\frac{WL^2}{9}\right)
 \end{aligned}$$

(ผก 3)

แทนค่าลงในสมการ (ผก 3)

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

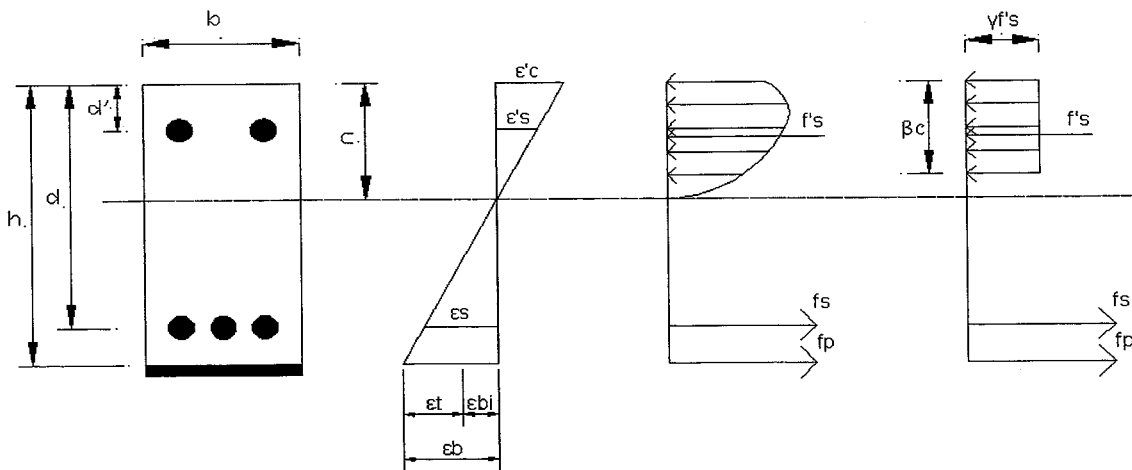
และจากการทดสอบคาน B1 รับน้ำหนักได้ 10,441.39 kg

$$\begin{aligned}
 P &= 10,441.39/2 \\
 &= 5,220.695 \text{ kg.}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M &= 5220.695 + 108 \\
 &= 5,328.695 \text{ kg-m}
 \end{aligned}$$

คาน B2 และ B3

ทฤษฎี



รูปที่ ผก2 ภาพแสดง stress และ strain ในคาน

$$M_n = A_s f_s \left(d - \beta_1 c / 2 \right) + \phi A_f f_f \left(h - \beta_1 c / 2 \right) \quad (\text{ผก 4})$$

จาก $C = T$

$$0.85 f'_c a b = A_s f_y + A_f f_f$$

$$a = \frac{A_s f_y + A_f f_f}{0.85 f'_c b}$$

แทนลงในสมการที่ (ผก 4)

$$\begin{aligned} M_n &= A_s f_y \left(d - 0.59 \frac{A_s f_y + A_f f_f}{f'_c b} \right) + \phi A_f f_f \left(h - 0.59 \frac{A_s f_y + A_f f_f}{f'_c b} \right) \quad (\text{ผก 5}) \\ &= 628 \times 4000 \left(260 - 0.59 \frac{628 \times 4000 + 52.95 \times 17000}{240 \times 150} \right) \times \frac{1}{10^6} \\ &\quad + 0.85 \times 52.95 \times 17000 \left(300 - 0.59 \frac{628 \times 4000 + 52.95 \times 17000}{240 \times 150} \right) \times \frac{1}{10^6} \\ &= 5129.605 + 1852.593 \\ &= \mathbf{6,982.198 \text{ kg-m}} \end{aligned}$$

ทดสอบ

$$M = P + 108$$

B2

$$P = 10835/2$$

$$= \mathbf{5,417.5 \text{ kg.}}$$

$$M = 5417.5 + 108$$

$$= \mathbf{5,525.5 \text{ kg-m}}$$

B3

$$P = 11832/2$$

$$= \mathbf{5,916 \text{ kg.}}$$

$$M = 5916 + 108$$

$$= \mathbf{6,024 \text{ kg-m}}$$

ถาม B4

ทฤษฎี

$$\begin{aligned} M_n &= A_s f_y \left(d - 0.59 \frac{A_s f_y}{f'_c b} \right) \\ &= 226 \times 4000 \left(260 - 0.59 \frac{226 \times 4000}{240 \times 150} \right) \times \frac{1}{10^6} \\ &= \mathbf{2,216.47 \text{ kg-m}} \end{aligned}$$

ทดสอบ

$$M = P + 108$$

$$P = 5303/2$$

$$= 2,651.5 \text{ kg.}$$

$$M = 2651.5 + 108$$

$$= 2,759.5 \text{ kg-m}$$

ถาม B5

ทฤษฎี

$$\begin{aligned} M_n &= A_s f_y \left(d - 0.59 \frac{A_s f_y + A_f f_f}{f'_c b} \right) + \phi A_f f_f \left(h - 0.59 \frac{A_s f_y + A_f f_f}{f'_c b} \right) \\ &= 226 \times 4000 \left(260 - 0.59 \frac{226 \times 4000 + 52.95 \times 17000}{240 \times 150} \right) \times \frac{1}{10^6} \\ &\quad + 0.85 \times 52.95 \times 17000 \left(300 - 0.59 \frac{226 \times 4000 + 52.95 \times 17000}{240 \times 150} \right) \times \frac{1}{10^6} \\ &= 2083.105 + 2069.15 \\ &= 4,152.26 \text{ kg-m} \end{aligned}$$

ทดสอบ

$$M = P + 108$$

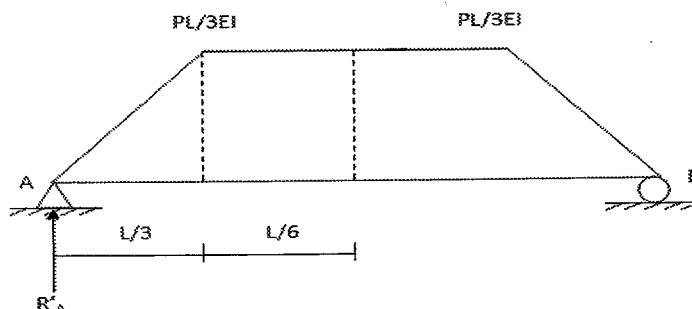
$$P = 6506/2$$

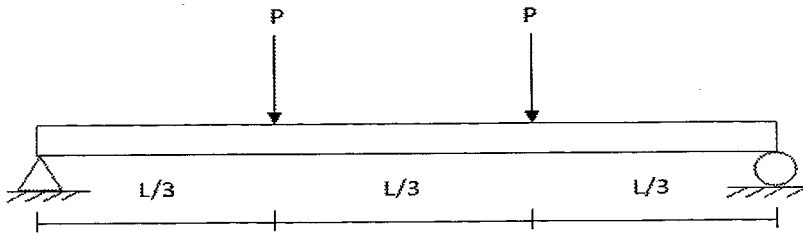
$$= 3,253 \text{ kg.}$$

$$M = 3253 + 108$$

$$= 3,361 \text{ kg-m}$$

ง. การคำนวณหาระยะแอนตัวของคาน



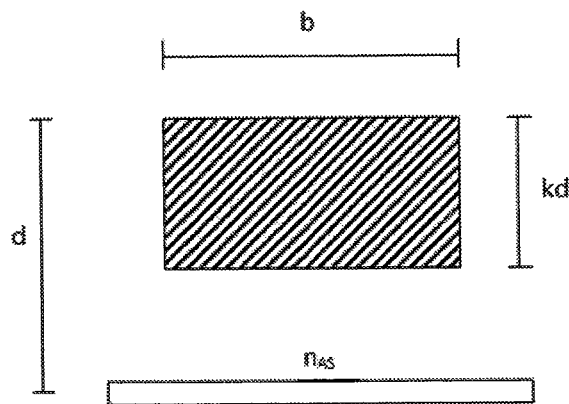


รูปที่ ผก3 แสดงระยะลง Load และ Bending Moment Diagrams

$$R_A' = \frac{PL}{3EI} \cdot \frac{L}{3} \cdot \frac{1}{2} + \frac{PL}{3EI} \cdot \frac{L}{6} = \frac{PL^2}{9EI} \quad (\text{ผก 6})$$

$$\begin{aligned} \Delta_i &= \frac{PL^2}{9EI} \left(\frac{L}{2} \right) - \frac{PL^2}{18EI} \cdot \frac{5L}{18} - \frac{PL^2}{18EI} \cdot \frac{L}{12} \\ &= \frac{PL^3}{18EI} - \frac{5PL^3}{324EI} - \frac{PL^3}{216EI} \end{aligned} \quad (\text{ผก 7})$$

$$\Delta_i = \frac{23PL^3}{648EI} \quad (\text{ผก 8})$$



รูปที่ ผก4 ภาพโครงสร้างประกอบของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

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

$$k = \frac{10.71}{26} = 0.41$$

$$I_{cr} = \frac{bk^3d^3}{3} + nA_s(d - kd)^2 \quad (\text{ผก 9})$$

$$= \frac{15(0.41)^3(26)^3}{3} + 56.27(26 - 10.71)^2$$

$$= 19211.81 \text{ cm}^4$$

$$I_g = \frac{1}{12}bh^3 \quad (\text{ผก 10})$$

$$= \frac{1}{12}(15)(30)^3 = 33,750 \text{ cm}^4$$

$$f_r = 2\sqrt{f_c'} \quad (\text{ผก 11})$$

$$= 2\sqrt{240} = 30.98 \text{ ksc.}$$

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} = \frac{30.98(33,750)}{10.74} = 973.54 \text{ kg-m.} \quad (\text{ผก 12})$$

หาระยะแอ่นตัวของคานารูปผสม 3 ชั้น ตามวิธี ACI

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \cdot I_g + \left[\left(1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right) \cdot I_{cr} \right] \leq I_g \quad (\text{ผก 13})$$

$$I_e = \left(\frac{97354}{306000} \right)^3 \cdot 33750 + \left[\left(1 - \left(\frac{97354}{306000} \right)^3 \right) \cdot 19211.81 \right] \leq 33750$$

$$= 19680 \text{ cm}^4 \leq 33750 \text{ cm}^4$$

$$\Delta_i = K \left(\frac{23PL^3}{648 E_c I_e} \right) + K \left(\frac{5WL^4}{384 E_c I_e} \right) \quad (\text{ผก 14})$$

$K = 1$ (สำหรับคานช่วงเดียวธรรมดา)

$$\Delta_i = 1 \left(\frac{23(3060)(300)^3}{648(227700)(19680)} \right) + 1 \left(\frac{5(108)(300)^4}{384(227700)(19680)} \right)$$
$$= 0.65 + 0.007 = 0.657 \text{ cm}$$

$$\lambda = \frac{\delta}{1 + 50p'} \quad p' = \frac{A_s'}{bd} \quad (\text{ผก 15})$$

$\delta = 1.4$ สำหรับบรรทุกน้ำหนักค้างนาน 12 เดือน

$$\lambda = 1.4$$

$$\Delta_a = \lambda \Delta_i \quad (\text{ผก 16})$$

$$= (0.14)(0.657) = 0.92$$

$$\Delta_T = \Delta_i + \Delta_a = 0.657 + 0.92 = 1.577 \text{ cm} \quad (\text{ผก 17})$$

ภาคผนวก ข.

ก. ข้อมูลการทดสอบตัวอย่างทรงกระบอก

- คอนกรีตธรรมดา $f_c' \sim 240$ ksc.

ตารางที่ ผข 1 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน

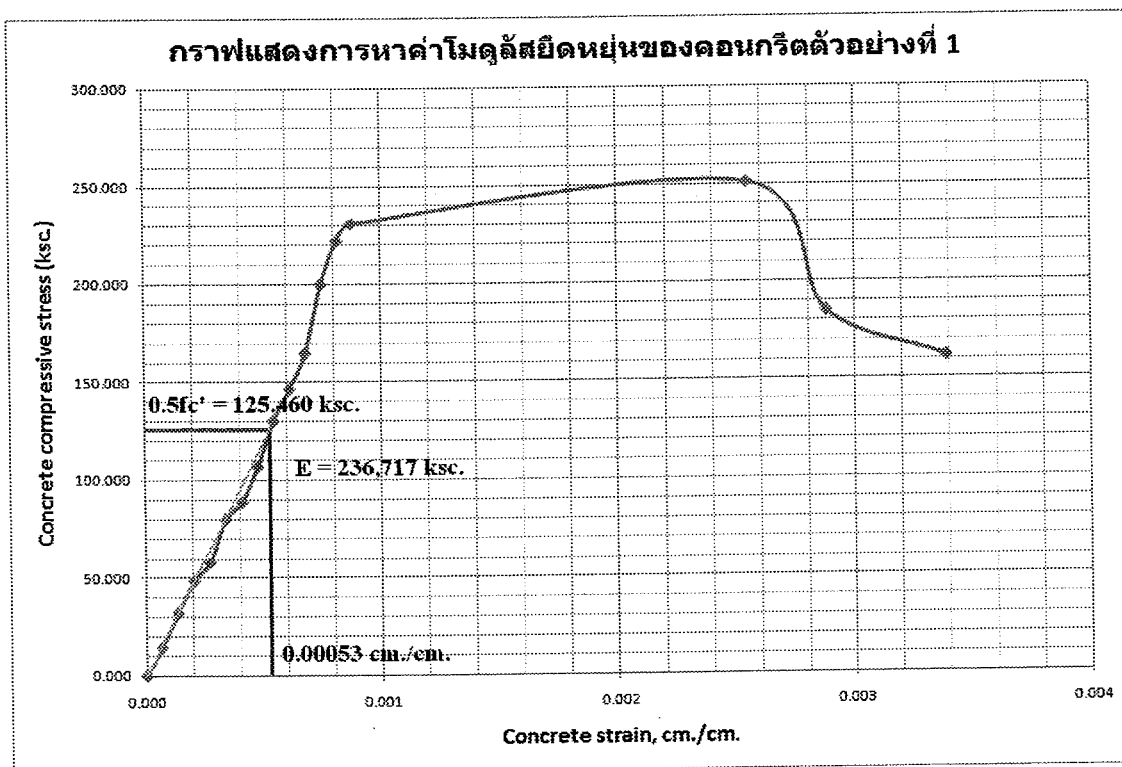
No.	ขนาด		พื้นที่ หน้าตัด (cm^2)	น้ำหนัก (kg.)	กำลังอัด (kg.)	หน่วย แรงอัด (ksc)	Modulus of elasticity (E_c) (ksc)	หน่วย น้ำหนัก (kg/m^3)
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)						
1	15.00	29.50	176.71	12.594	44342.508	250.927	236717.000	2415.846
2	14.96	29.30	175.77	12.612	41794.088	237.773	228023.000	2448.856
3	14.98	29.80	176.24	12.514	43832.824	248.706	206697.000	2382.684
4	15.00	30.00	176.71	12.564	42813.456	242.275	288414.000	2369.923
5	14.90	29.60	174.37	12.453	42303.772	242.614	178645.000	2412.792
	เฉลี่ย		175.96	12.547	43017.330	244.459	227699.200	2408.151

ตัวอย่างที่ 1 กำลังอัดเฉลี่ย (f_c') 250.927 ksc

ตารางที่ ผข 2 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 1

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm^2)	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	176.71	0.00	0.0000
25.00	2548.42	176.71	14.42	0.0001
55.00	5606.52	176.71	31.73	0.0001
84.00	8562.69	176.71	48.46	0.0002
100.00	10193.68	176.71	57.69	0.0003
138.00	14067.28	176.71	79.61	0.0003
154.00	15698.27	176.71	88.84	0.0004

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm ²)	Stress(ksc)	Strain
185.00	18858.31	176.71	106.72	0.0005
225.00	22935.78	176.71	129.79	0.0005
254.00	25891.95	176.71	146.52	0.0006
285.00	29051.99	176.71	164.40	0.0007
346.00	35270.13	176.71	199.59	0.0007
385.00	39245.67	176.71	222.09	0.0008
400.00	40774.72	176.71	230.74	0.0009
435.00	44342.51	176.71	250.93	0.0025
230.00	23445.46	176.71	132.68	0.0034



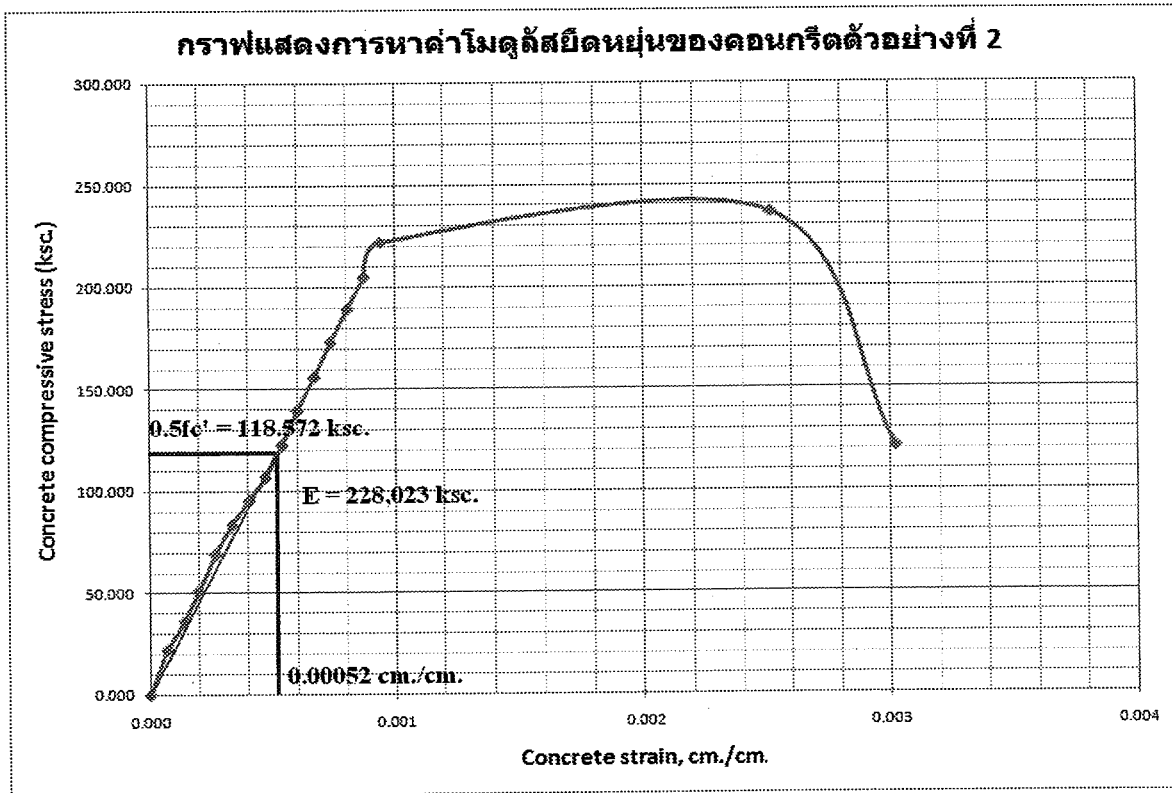
รูปที่ ผข 1 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 1

Initial Tangent Modulus Elastic = 236,717 ksc.

ตัวอย่างที่2 กำลังอัดประลัย (f_c') 237.773 ksc

ตารางที่ ผข 3 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่2

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm^2)	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	175.77	0.00	0.0000
38.00	3873.60	175.77	22.04	0.0001
62.00	6320.08	175.77	35.96	0.0001
88.00	8970.44	175.77	51.04	0.0002
120.00	12232.42	175.77	69.59	0.0003
145.00	14780.84	175.77	84.09	0.0003
165.00	16819.57	175.77	95.69	0.0004
185.00	18858.31	175.77	107.29	0.0005
212.00	21610.60	175.77	122.95	0.0005
242.00	24668.71	175.77	140.35	0.0006
270.00	27522.94	175.77	156.58	0.0007
300.00	30581.04	175.77	173.98	0.0007
328.00	33435.27	175.77	190.22	0.0008
355.00	36187.56	175.77	205.88	0.0009
385.00	39245.67	175.77	223.28	0.0009
410.00	41794.09	175.77	237.78	0.0025
210.00	21406.73	175.77	121.79	0.0030



รูปที่ ผข 2 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 2

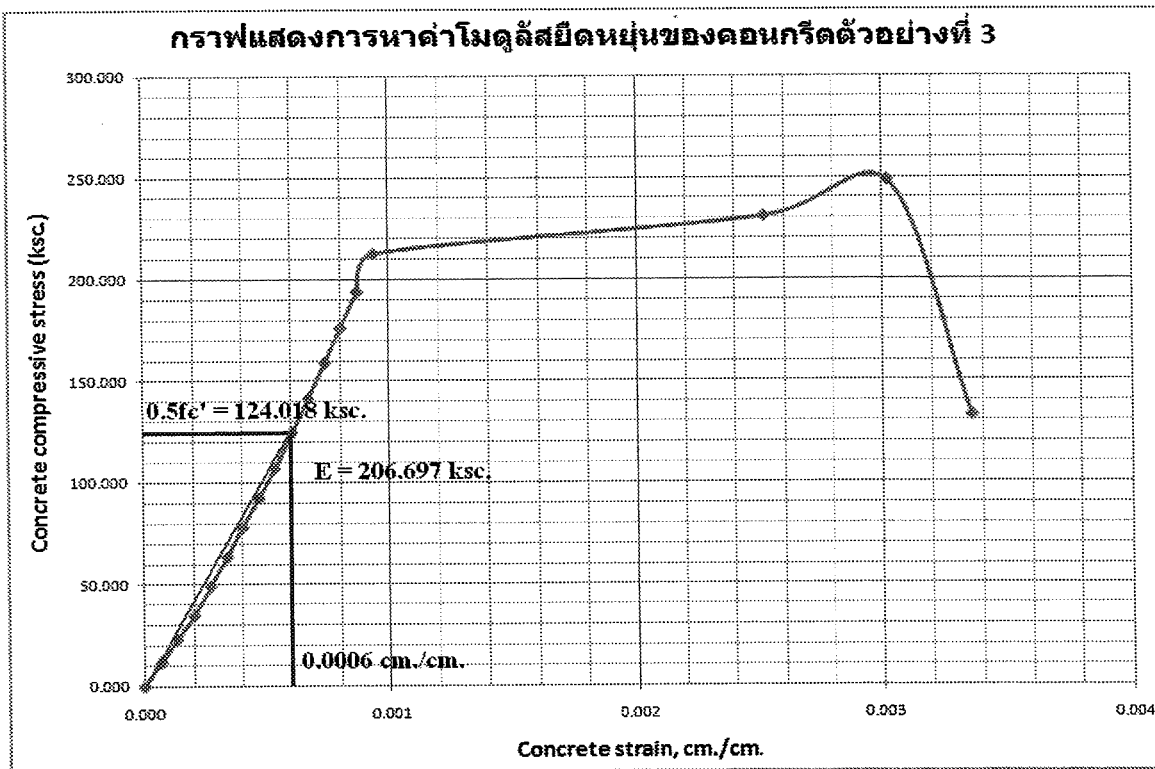
Initial Tangent Modulus Elastic = 228,023 ksc.

ตัวอย่างที่ 3 กำลังอัดประลัย (f_c') 248.706 ksc

ตารางที่ ผข 4 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 3

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm ²)	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	176.24	0.00	0.0000
20.00	2038.74	176.24	11.57	0.0001
40.00	4077.47	176.24	23.14	0.0001
60.00	6116.21	176.24	34.70	0.0002
85.00	8664.63	176.24	49.16	0.0003
110.00	11213.05	176.24	63.62	0.0003
135.00	13761.47	176.24	78.08	0.0004

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm ²)	Stress(ksc)	Strain
160.00	16309.89	176.24	92.54	0.0005
185.00	18858.31	176.24	107.00	0.0005
215.00	21916.41	176.24	124.36	0.0006
245.00	24974.52	176.24	141.71	0.0007
275.00	28032.62	176.24	159.06	0.0007
305.00	31090.72	176.24	176.41	0.0008
335.00	34148.83	176.24	193.76	0.0009
368.00	37512.74	176.24	212.85	0.0009
400.00	40774.72	176.24	231.36	0.0025
430.00	43832.82	176.24	248.71	0.0030
230.00	23445.46	176.24	133.03	0.0034



รูปที่ ผข 3 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 3

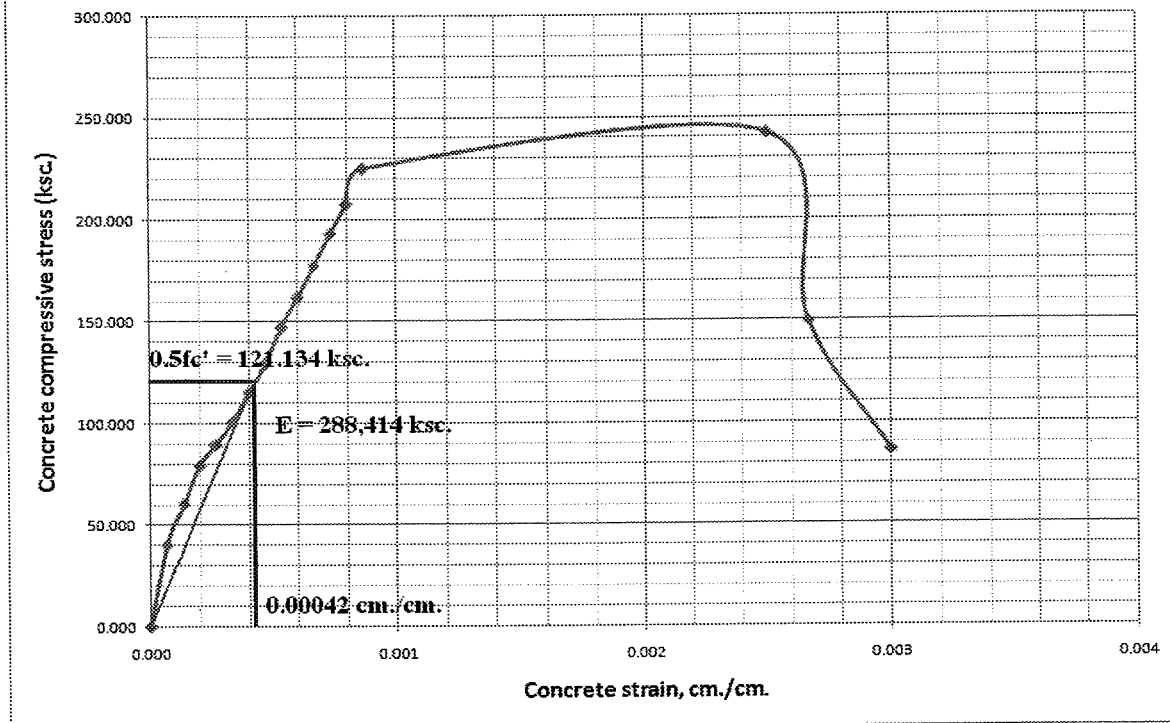
Initial Tangent Modulus Elastic = 206,697 ksc.

ตัวอย่างที่4 กำลังอัดประลัย (f_c') 242.275 ksc

ตารางที่ ผข 5 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่4

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm ²)	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	176.71	0.00	0.0000
70.00	7135.58	176.71	40.38	0.0001
105.00	10703.36	176.71	60.57	0.0001
138.00	14067.28	176.71	79.61	0.0002
155.00	15800.20	176.71	89.41	0.0003
175.00	17838.94	176.71	100.95	0.0003
200.00	20387.36	176.71	115.37	0.0004
225.00	22935.78	176.71	129.79	0.0005
255.00	25993.88	176.71	147.10	0.0005
280.00	28542.30	176.71	161.52	0.0006
308.00	31396.53	176.71	177.67	0.0007
335.00	34148.83	176.71	193.25	0.0007
360.00	36697.25	176.71	207.67	0.0008
390.00	39755.35	176.71	224.98	0.0009
420.00	42813.46	176.71	242.28	0.0025
260.00	26503.57	176.71	149.98	0.0027

กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตตัวอย่างที่ 4



รูปที่ ผข 4 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 4

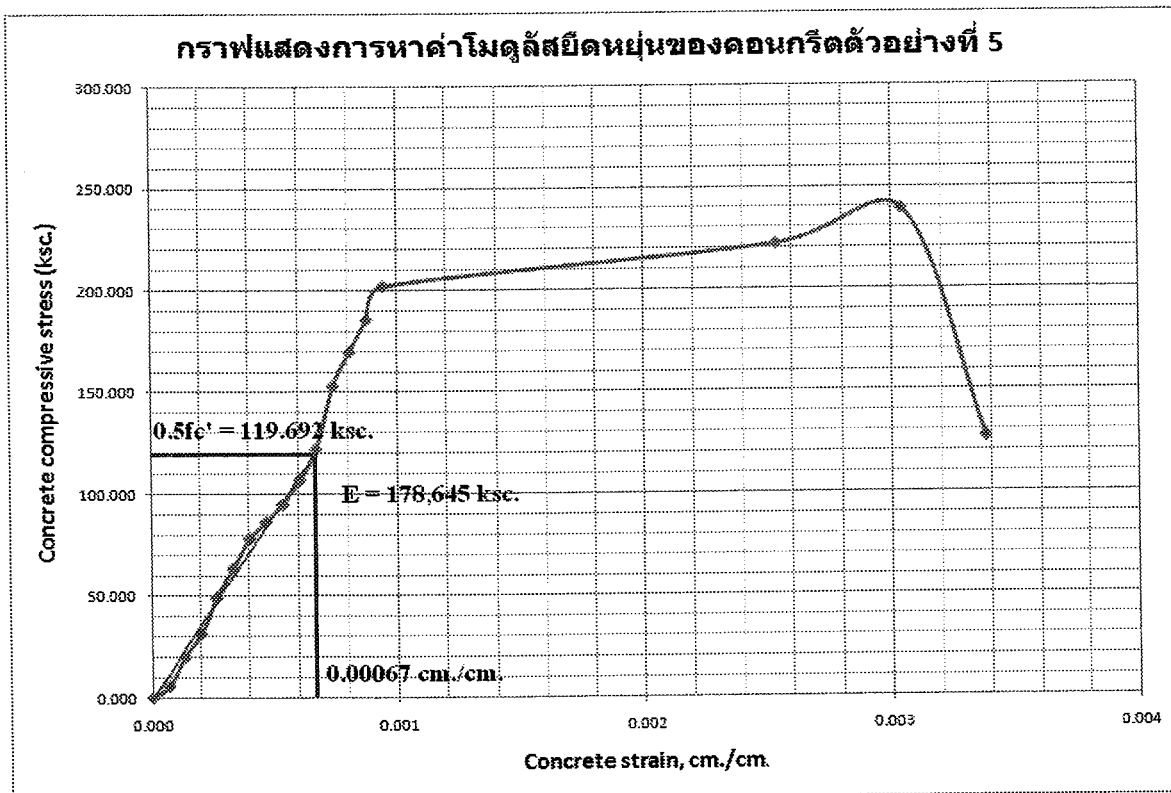
Initial Tangent Modulus Elastic = 288,414 ksc.

ตัวอย่างที่ 5 กำลังอัดประลัย (f_c') 160.302 ksc

ตารางที่ ผข 6 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 5

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm ²)	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	174.37	0.00	0.0000
10.00	1019.37	174.37	5.85	0.0001
35.00	3567.79	174.37	20.46	0.0001
55.00	5606.52	174.37	32.15	0.0002
85.00	8664.63	174.37	49.69	0.0003
110.00	11213.05	174.37	64.31	0.0003
135.00	13761.47	174.37	78.92	0.0004

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm ²)	Stress(ksc)	Strain
150.00	15290.52	174.37	87.69	0.0005
165.00	16819.57	174.37	96.46	0.0005
185.00	18858.31	174.37	108.15	0.0006
212.00	21610.60	174.37	123.94	0.0007
265.00	27013.25	174.37	154.92	0.0007
295.00	30071.36	174.37	172.46	0.0008
322.00	32823.65	174.37	188.24	0.0009
350.00	35677.88	174.37	204.61	0.0009
385.00	39245.67	174.37	225.07	0.0025
415.00	42303.77	174.37	242.61	0.0030
220.00	22426.10	174.37	128.61	0.0034



รูปที่ ผข 5 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 5

Initial Tangent Modulus Elastic = 178,645 ksc.

● คอนกรีตผสมโพลีเมอร์ซีเมนต์

a. หน้วยน้ำหน้ก 1,850 kg/m³

อายุตัวอย่าง 28 วัน

ตารางที่ ผข 7 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพลีเมอร์ซีเมนต์ หน้วยน้ำหน้ก 1,850 kg/m³ ทรงกระบอก

อายุ 28 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่ หน้าตัด (cm ²)	น้ำหน้ก (kg.)	กำลังอัด (kg.)	หน้วย แรงอัด (ksc)	Modulus of elasticity (Ec) (ksc)	หน้วย น้ำหน้ก (kg/m ³)
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)						
1	15.00	30.00	176.71	9.810	43657.054	247.048	95524.913	1850.441
2	15.02	30.05	177.19	9.850	42757.779	241.316	96254.065	1849.959
3	15.00	30.00	176.71	9.820	43062.245	243.682	95324.681	1852.328
4	14.95	30.02	175.54	9.740	43127.011	245.684	96204.315	1848.315
5	15.03	30.00	177.42	9.860	43330.363	244.222	95249.462	1852.456
		เฉลี่ย	176.72	9.816	43186.890	244.390	95711.487	1850.700

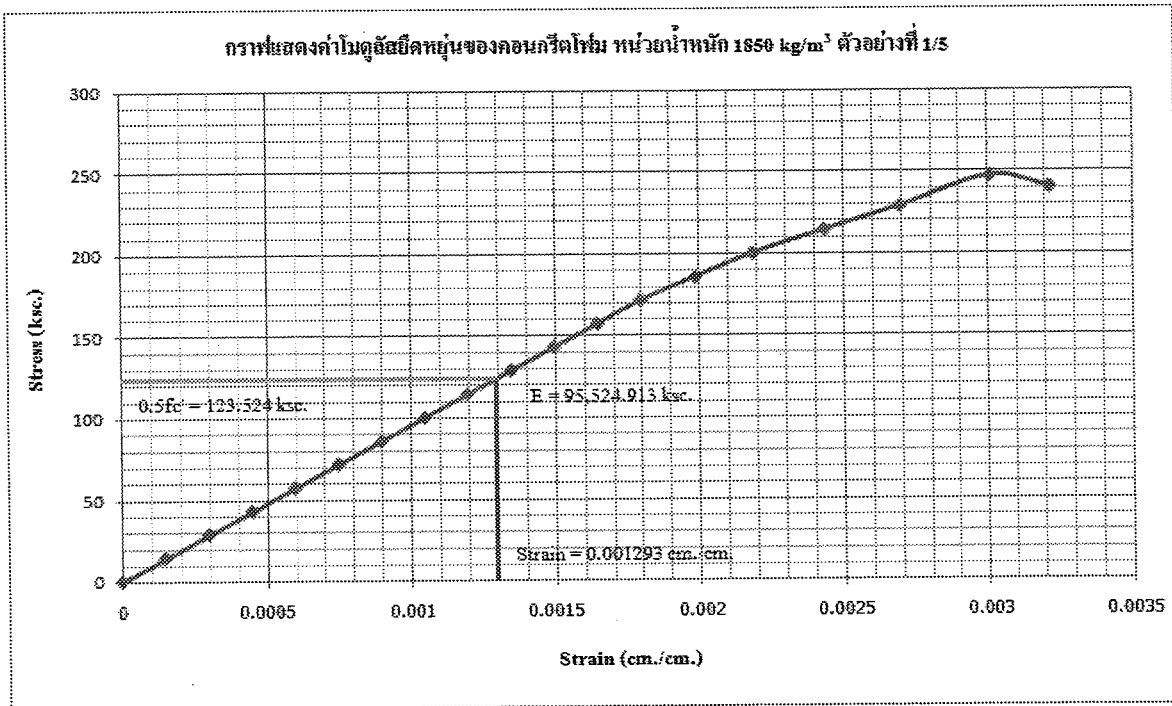
ตัวอย่างที่ 1 กำลังอัดประลัย (fc') 247.048 ksc

ตารางที่ ผข 8 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์ซีเมนต์ หน้วยน้ำหน้ก 1,850 kg/m³ ทรงกระบอก

อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 1

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm ²)	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	176.71	0.00	0.0000
24.77	2524.73	176.71	14.29	0.0001
49.54	5049.46	176.71	28.57	0.0003

74.30	7574.19	176.71	42.86	0.0004
99.07	10098.93	176.71	57.15	0.0006
123.84	12623.66	176.71	71.44	0.0007
148.61	15148.39	176.71	85.72	0.0009
173.37	17673.12	176.71	100.01	0.0010
198.14	20197.85	176.71	114.30	0.0012
222.91	22722.58	176.71	128.59	0.0013
247.68	25247.31	176.71	142.87	0.0015
272.44	27772.05	176.71	157.16	0.0016
297.21	30296.78	176.71	171.45	0.0018
321.98	32821.51	176.71	185.74	0.0020
346.75	35346.24	176.71	200.02	0.0022
371.51	37870.97	176.71	214.31	0.0024
396.28	40395.70	176.71	228.60	0.0027
421.05	42920.43	176.71	242.89	0.0030
445.82	45445.17	176.71	257.17	0.0032



รูปที่ ผข 6 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโพร้มหน่วยน้ำหนัก 1,850 kg/m³ ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 1

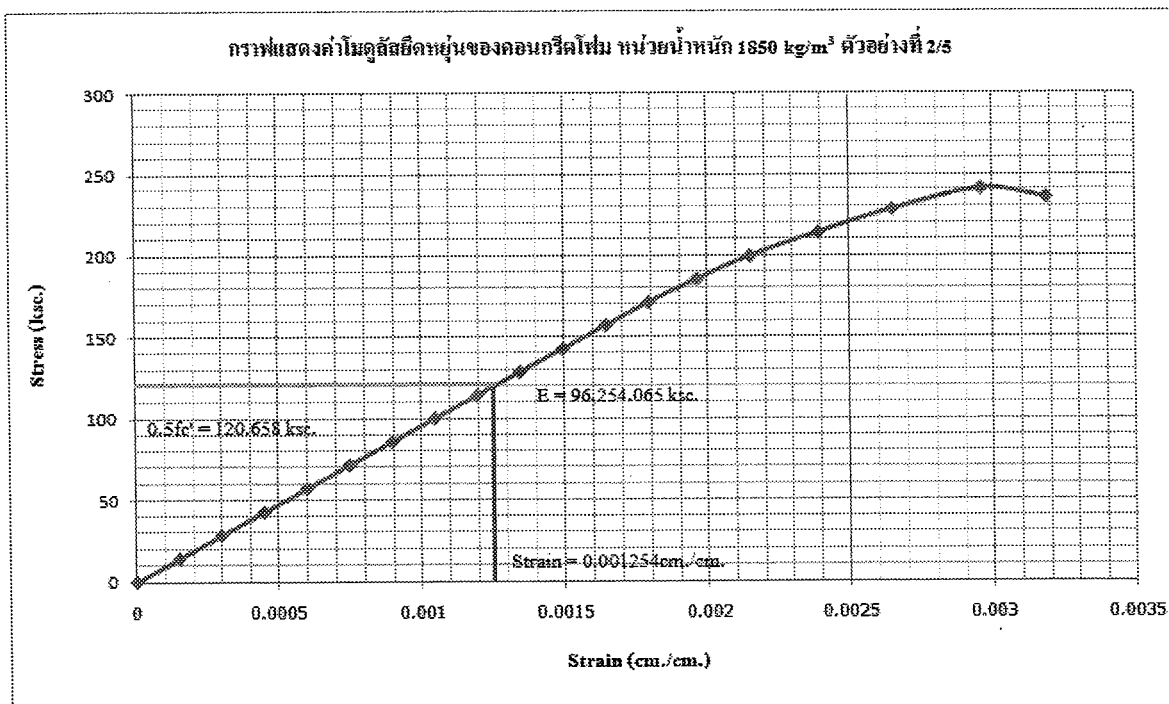
Initial Tangent Modulus Elastic = 95,524.913 ksc.

ตัวอย่างที่ 2 กำลังอัดประลัย (fc') 241.316 ksc

ตารางที่ ผข 9 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพร้มหน่วยน้ำหนัก 1,850 kg/m³ ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 2

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm ²)	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	177.19	0.00	0.0000
24.83	2531.59	177.19	14.29	0.0001
49.67	5063.18	177.19	28.57	0.0003
74.50	7594.77	177.19	42.86	0.0004
99.34	10126.36	177.19	57.15	0.0006
124.17	12657.95	177.19	71.44	0.0007

149.01	15189.54	177.19	85.72	0.0009
173.84	17721.13	177.19	100.01	0.0010
198.68	20252.72	177.19	114.30	0.0012
223.51	22784.30	177.19	128.59	0.0013
248.35	25315.89	177.19	142.87	0.0015
273.18	27847.48	177.19	157.16	0.0016
298.02	30379.07	177.19	171.45	0.0018
322.85	32910.66	177.19	185.74	0.0020
347.69	35442.25	177.19	200.02	0.0022
372.52	37973.84	177.19	214.31	0.0024
397.36	40505.43	177.19	228.60	0.0026
422.19	43037.02	177.19	242.89	0.0030
447.03	45568.61	177.19	257.17	0.0032



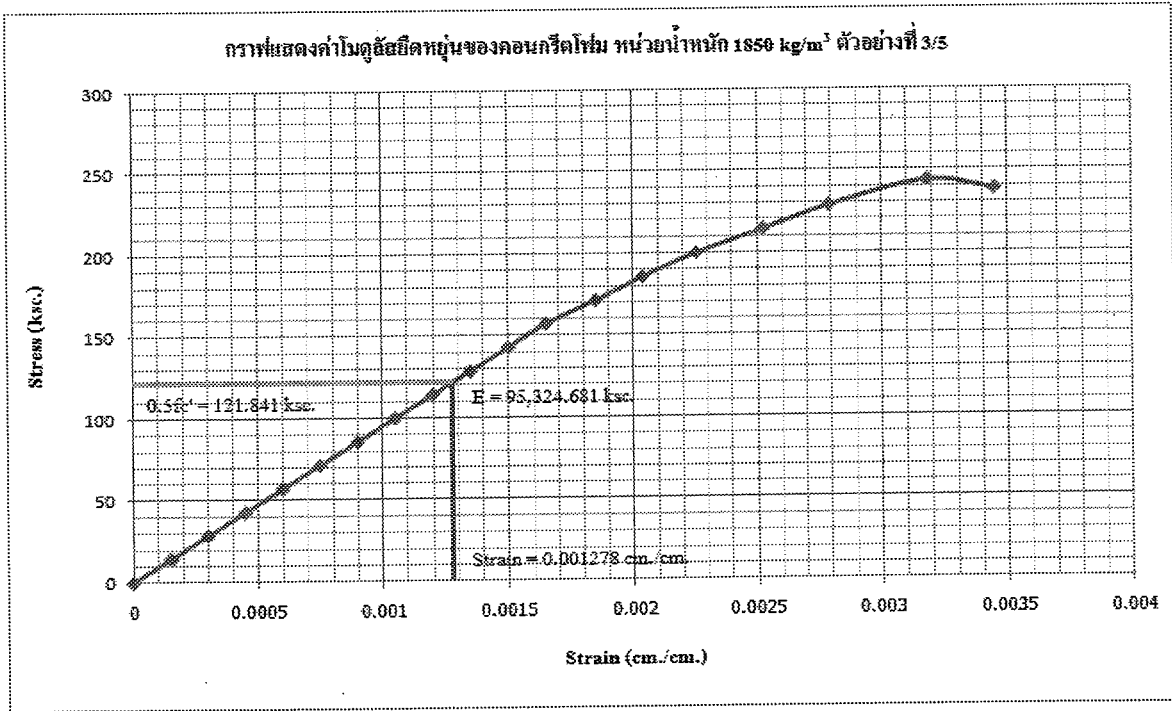
รูปที่ ผช 7 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโฟมหน่วยน้ำหนัก 1,850 kg/m³
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 2

Initial Tangent Modulus Elastic = 96254.065 ksc.

ตัวอย่างที่ 3 กำลังอัดประลัย (f_c') 243.682 ksc

ตารางที่ ผข 10 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์น้ำหนัก 1,850 kg/m³ ทรงกระบอก
อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 3

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm ²)	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	176.71	0.00	0.0000
24.77	2524.73	176.71	14.29	0.0002
49.54	5049.46	176.71	28.57	0.0003
74.30	7574.19	176.71	42.86	0.0005
99.07	10098.93	176.71	57.15	0.0006
123.84	12623.66	176.71	71.44	0.0008
148.61	15148.39	176.71	85.72	0.0009
173.37	17673.12	176.71	100.01	0.0011
198.14	20197.85	176.71	114.30	0.0012
222.91	22722.58	176.71	128.59	0.0014
247.68	25247.31	176.71	142.87	0.0015
272.44	27772.05	176.71	157.16	0.0017
297.21	30296.78	176.71	171.45	0.0019
321.98	32821.51	176.71	185.74	0.0020
346.75	35346.24	176.71	200.02	0.0023
371.51	37870.97	176.71	214.31	0.0025
396.28	40395.70	176.71	228.60	0.0028
421.05	42920.43	176.71	242.89	0.0032
445.82	45445.17	176.71	257.17	0.0035
470.58	47969.90	176.71	271.46	0.0031



รูปที่ ผข 8 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโพนหน่วยน้ำหนัก 1,850 kg/m³ ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 3

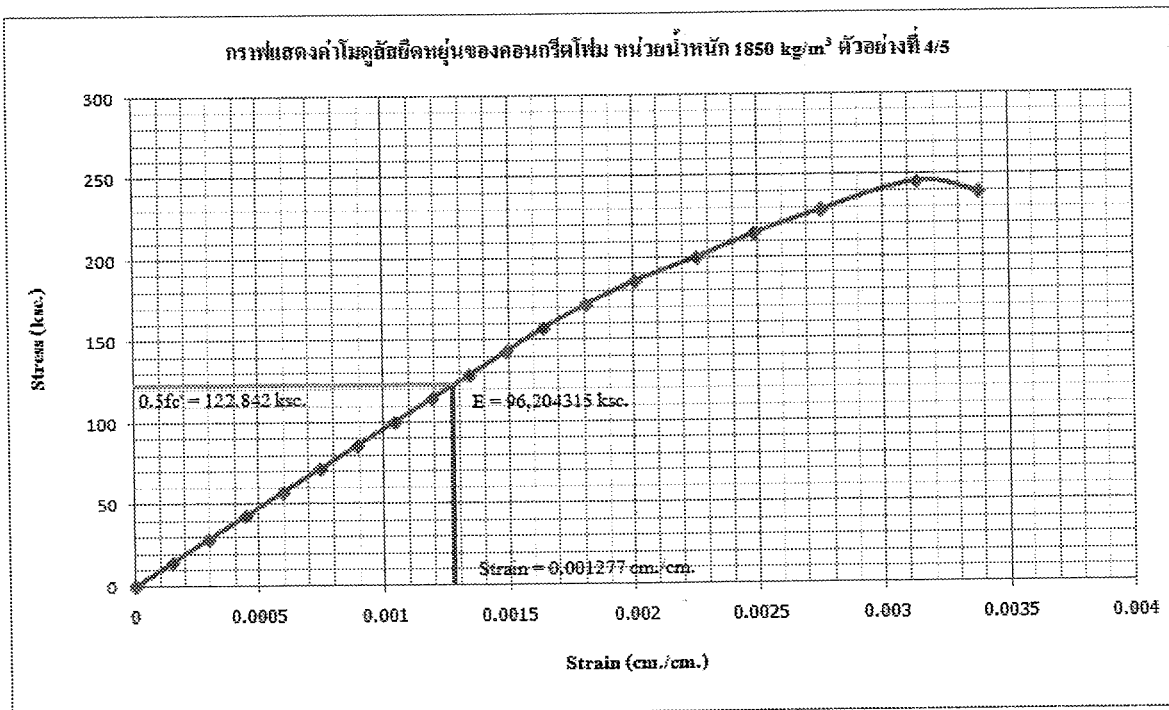
Initial Tangent Modulus Elastic = 95324.681 ksc.

ตัวอย่างที่ 4 กำลังอัดประลัย (f_c') 245.684 ksc

ตารางที่ ผข 11 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพนหน่วยน้ำหนัก 1,850 kg/m³ ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 4

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm ²)	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	175.54	0.00	0.0000
24.60	2508.02	175.54	14.29	0.0001
49.21	5016.03	175.54	28.57	0.0003
73.81	7524.05	175.54	42.86	0.0004
98.41	10032.06	175.54	57.15	0.0006
123.02	12540.08	175.54	71.44	0.0007

147.62	15048.09	175.54	85.72	0.0009
172.23	17556.11	175.54	100.01	0.0010
196.83	20064.12	175.54	114.30	0.0012
221.43	22572.14	175.54	128.59	0.0013
246.04	25080.15	175.54	142.87	0.0015
270.64	27588.17	175.54	157.16	0.0016
295.24	30096.18	175.54	171.45	0.0018
319.85	32604.20	175.54	185.74	0.0020
344.45	35112.21	175.54	200.02	0.0023
369.05	37620.23	175.54	214.31	0.0025
393.66	40128.24	175.54	228.60	0.0028
418.26	42636.26	175.54	242.89	0.0031
442.87	45144.27	175.54	257.17	0.0034



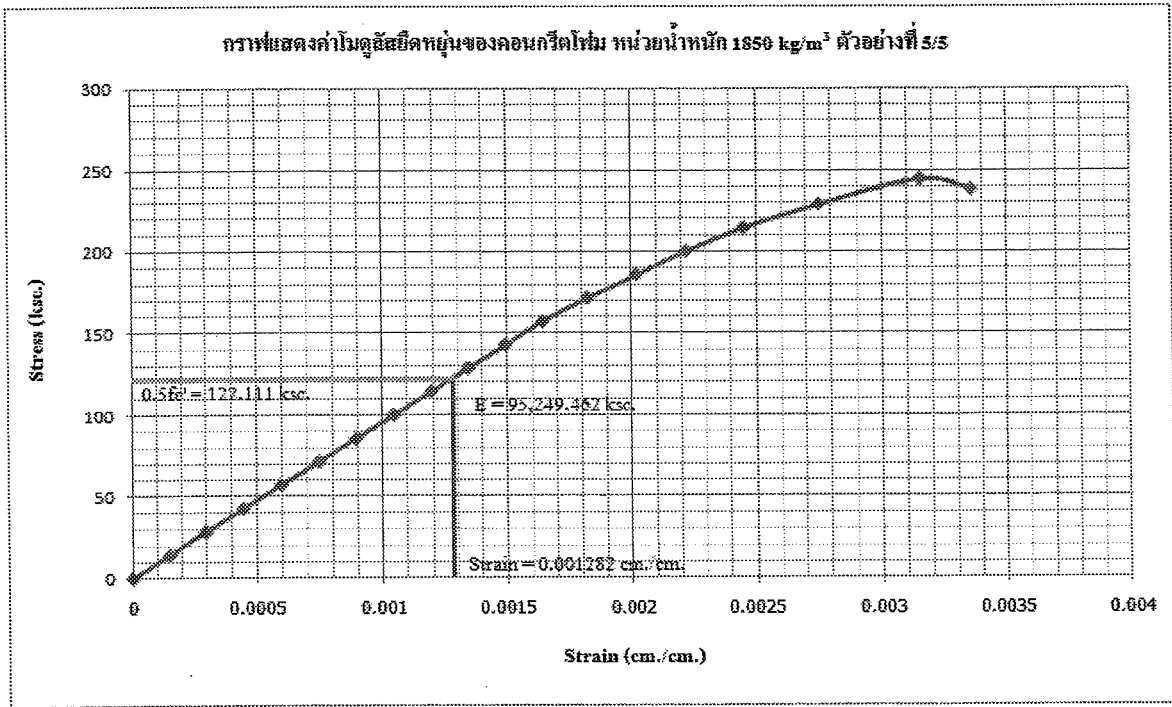
รูปที่ ผข 9 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โยมน้ำหนัก 1,850 kg/m³
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 4

Initial Tangent Modulus Elastic = 96204.315 ksc.

ตัวอย่างที่ 5 กำลังอัดประลัย (f_c') 244.222 ksc

ตารางที่ ผข 12 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์น้ำหนัก 1,850 kg/m³ ทรงกระบอก
อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 5

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm ²)	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	177.42	0.00	0.0000
24.87	2534.88	177.42	14.29	0.0001
49.73	5069.75	177.42	28.57	0.0003
74.60	7604.63	177.42	42.86	0.0004
99.47	10139.50	177.42	57.15	0.0006
124.34	12674.38	177.42	71.44	0.0007
149.20	15209.25	177.42	85.72	0.0009
174.07	17744.13	177.42	100.01	0.0010
198.94	20279.00	177.42	114.30	0.0012
223.80	22813.88	177.42	128.59	0.0013
248.67	25348.75	177.42	142.87	0.0015
273.54	27883.63	177.42	157.16	0.0016
298.41	30418.51	177.42	171.45	0.0018
323.27	32953.38	177.42	185.74	0.0020
348.14	35488.26	177.42	200.02	0.0022
373.01	38023.13	177.42	214.31	0.0025
397.87	40558.01	177.42	228.60	0.0028
422.74	43092.88	177.42	242.89	0.0032
447.61	45627.76	177.42	257.17	0.0034



รูปที่ ผข 10 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโพลีเมอร์น้ำหนัก 1,850 kg/m³ ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 5

Initial Tangent Modulus Elastic = 95249.462 ksc.

b. หน่วยน้ำหนัก 1,950 kg/m³

ตารางที่ ผข 13 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพลีเมอร์น้ำหนัก 1,950 kg/m³ ทรงกระบอก อายุ 28 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	น้ำหนัก (kg.)	กำลังอัด (kg.)	หน่วยแรงอัด (ksc)	Modulus of elasticity (Ec) (ksc)	หน่วยน้ำหนัก (kg/m ³)
	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)						
1	15.02	30.00	177.19	10.358	45269.548	255.491	159485.228	1948.610
2	15.05	30.00	177.89	10.422	45257.050	254.404	161532.483	1952.841
3	15.00	30.00	176.71	10.346	45225.672	255.925	157906.354	1951.546

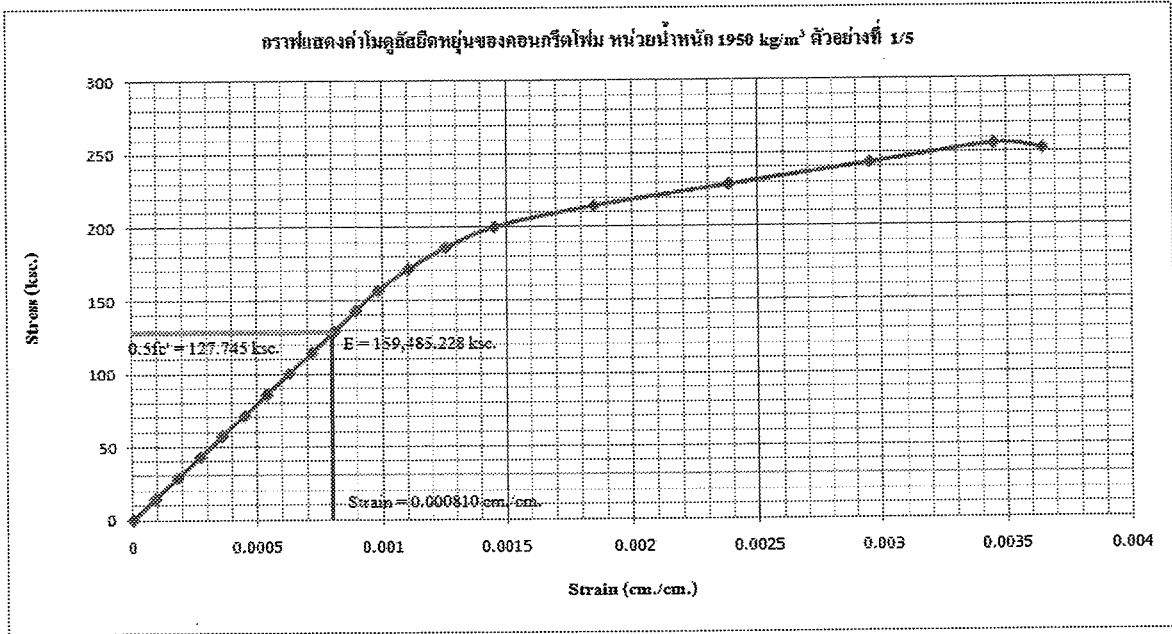
4	15.00	30.00	176.71	10.334	45768.514	258.997	158786.598	1949.283
5	14.98	30.05	176.24	10.324	45246.284	256.726	160854.672	1949.351
		เฉลี่ย	176.95	10.357	45353.414	256.309	159713.067	1950.326

ตัวอย่างที่ 1 กำลังอัดประลัย (f_c') 255.491 ksc

ตารางที่ ผข 14 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโฟมหน่วยน้ำหนัก 1,950 kg/m³ ทรงกระบอก

อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 1

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm ²)	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	177.19	0.00	0.0015
24.83	2531.59	177.19	14.29	0.0001
49.67	5063.18	177.19	28.57	0.0002
74.50	7594.77	177.19	42.86	0.0003
99.34	10126.36	177.19	57.15	0.0004
124.17	12657.95	177.19	71.44	0.0004
149.01	15189.54	177.19	85.72	0.0005
173.84	17721.13	177.19	100.01	0.0006
198.68	20252.72	177.19	114.30	0.0007
223.51	22784.30	177.19	128.59	0.0008
248.35	25315.89	177.19	142.87	0.0009
273.18	27847.48	177.19	157.16	0.0010
298.02	30379.07	177.19	171.45	0.0011
322.85	32910.66	177.19	185.74	0.0013
347.69	35442.25	177.19	200.02	0.0015
372.52	37973.84	177.19	214.31	0.0018
397.36	40505.43	177.19	228.60	0.0024
422.19	43037.02	177.19	242.89	0.0030
447.03	45568.61	177.19	257.17	0.0035
471.86	48100.20	177.19	271.46	0.0037



รูปที่ ผข 11 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,950 kg/m³ ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 1

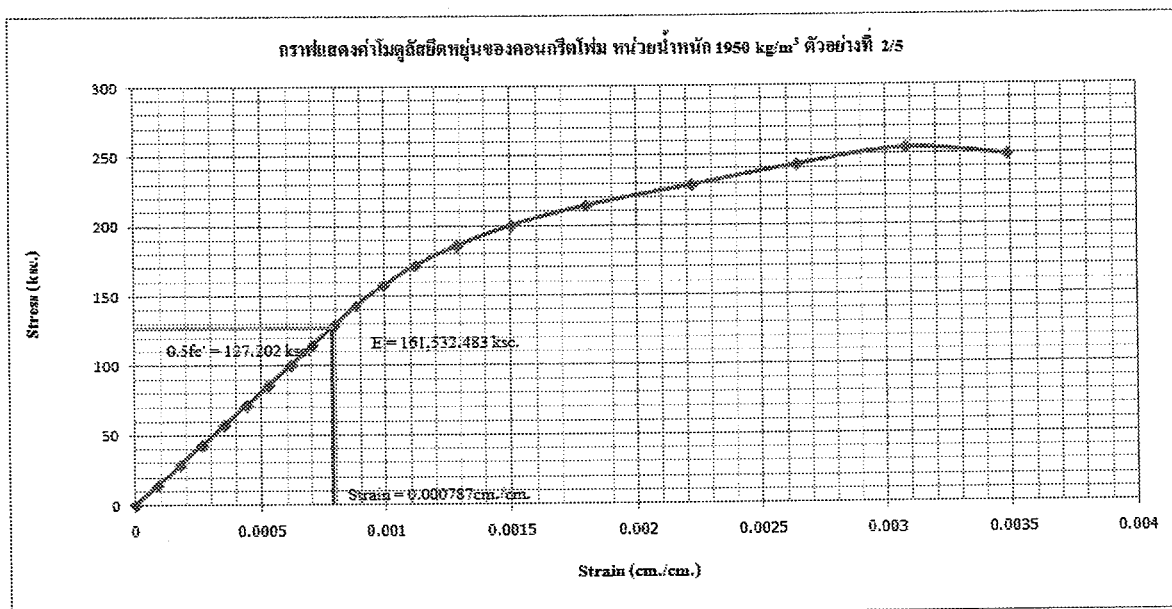
Initial Tangent Modulus Elastic = 159485.228 ksc.

ตัวอย่างที่ 2 กำลังอัดประลัย (fc') 254.404 ksc

ตารางที่ ผข 15 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโฟมหน่วยน้ำหนัก 1,950 kg/m³ ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 2

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm ²)	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	177.89	0.00	0.0000
24.93	2541.59	177.89	14.29	0.0001
49.87	5083.18	177.89	28.57	0.0002
74.80	7624.77	177.89	42.86	0.0003
99.73	10166.36	177.89	57.15	0.0004
124.67	12707.95	177.89	71.44	0.0004

149.60	15249.54	177.89	85.72	0.0005
174.53	17791.13	177.89	100.01	0.0006
199.46	20332.72	177.89	114.30	0.0007
224.40	22874.32	177.89	128.59	0.0008
249.33	25415.91	177.89	142.87	0.0009
274.26	27957.50	177.89	157.16	0.0010
299.20	30499.09	177.89	171.45	0.0011
324.13	33040.68	177.89	185.74	0.0013
349.06	35582.27	177.89	200.02	0.0015
374.00	38123.86	177.89	214.31	0.0018
398.93	40665.45	177.89	228.60	0.0022
423.86	43207.04	177.89	242.89	0.0026
448.79	45748.63	177.89	257.17	0.0031
473.73	48290.22	177.89	271.46	0.0035



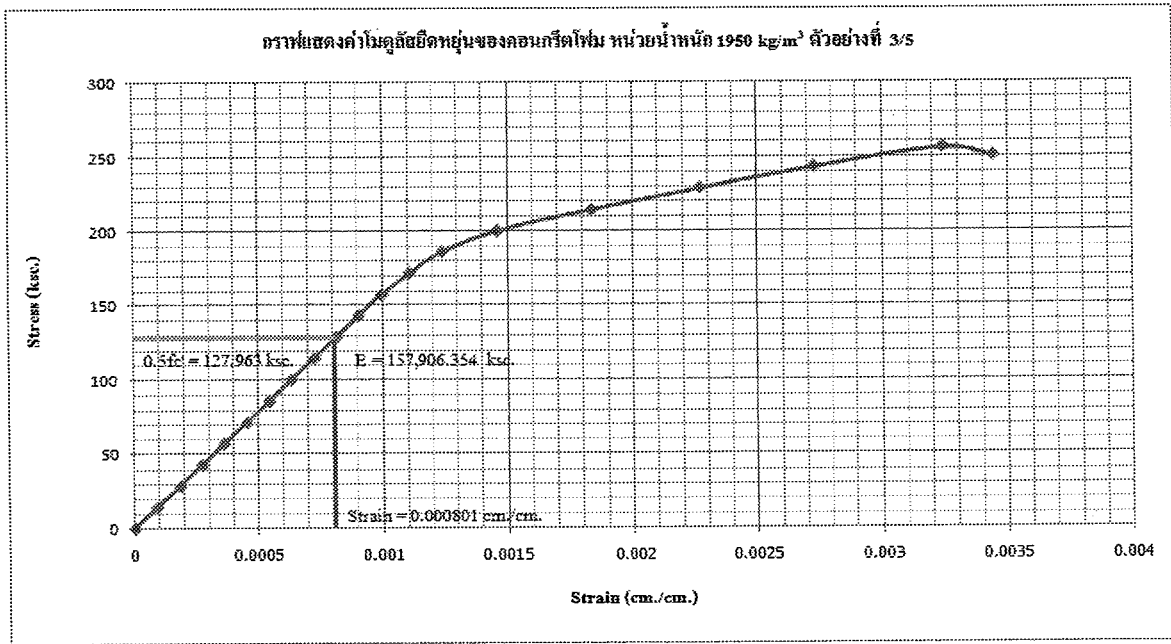
รูปที่ ผข 12 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโฟมหน่วยน้ำหนัก 1,950 kg/m³
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 2

Initial Tangent Modulus Elastic = 161532.483 ksc.

ตัวอย่างที่ 3 กำลังอัดประลัย (fc') 255.925 ksc

ตารางที่ ผข 16 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์น้ำหนัก 1,950 kg/m³ ทรงกระบอก
อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 3

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm ²)	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	176.71	0.00	0.0000
24.77	2524.73	176.71	14.29	0.0001
49.54	5049.46	176.71	28.57	0.0002
74.30	7574.19	176.71	42.86	0.0003
99.07	10098.93	176.71	57.15	0.0004
123.84	12623.66	176.71	71.44	0.0005
148.61	15148.39	176.71	85.72	0.0005
173.37	17673.12	176.71	100.01	0.0006
198.14	20197.85	176.71	114.30	0.0007
222.91	22722.58	176.71	128.59	0.0008
247.68	25247.31	176.71	142.87	0.0009
272.44	27772.05	176.71	157.16	0.0010
297.21	30296.78	176.71	171.45	0.0011
321.98	32821.51	176.71	185.74	0.0012
346.75	35346.24	176.71	200.02	0.0015
371.51	37870.97	176.71	214.31	0.0018
396.28	40395.70	176.71	228.60	0.0023
421.05	42920.43	176.71	242.89	0.0027
445.82	45445.17	176.71	257.17	0.0032
470.58	47969.90	176.71	271.46	0.0034



รูปที่ ผข 13 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,950 kg/m³ ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 3

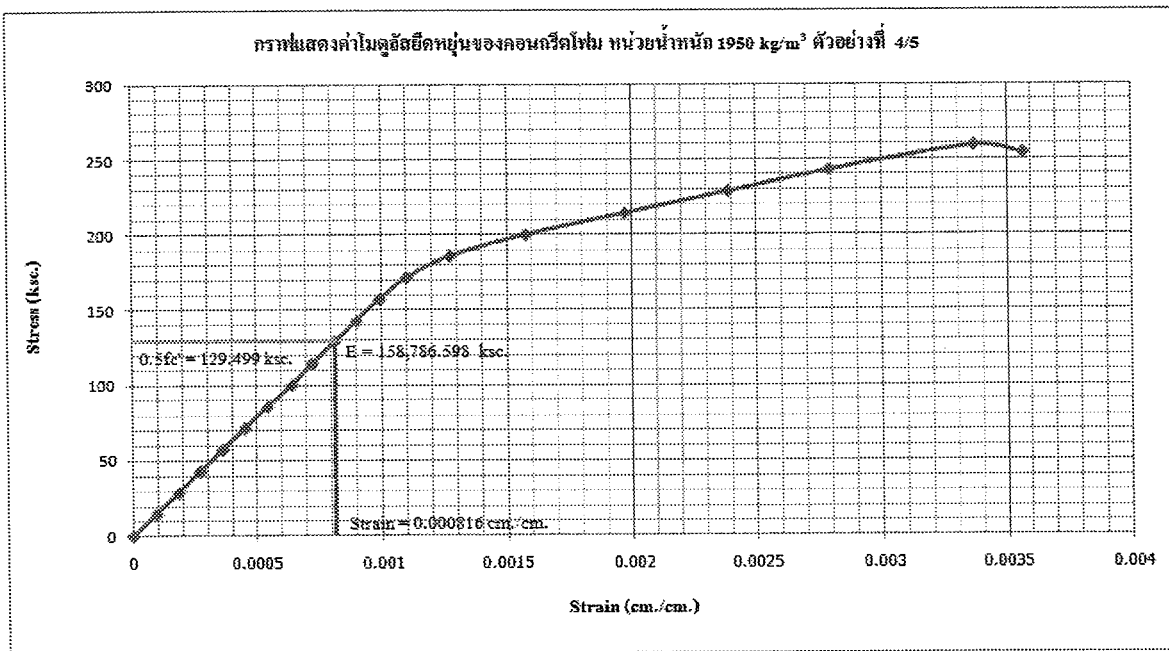
Initial Tangent Modulus Elastic = 157906.354 ksc.

ตัวอย่างที่ 4 กำลังอัดประลัย (fc') 258.997 ksc

ตารางที่ ผข 17 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,950 kg/m³ ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 4

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm ²)	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	176.71	0.00	0.0000
24.77	2524.73	176.71	14.29	0.0001
49.54	5049.46	176.71	28.57	0.0002
74.30	7574.19	176.71	42.86	0.0003
99.07	10098.93	176.71	57.15	0.0004
123.84	12623.66	176.71	71.44	0.0004
148.61	15148.39	176.71	85.72	0.0005

173.37	17673.12	176.71	100.01	0.0006
198.14	20197.85	176.71	114.30	0.0007
222.91	22722.58	176.71	128.59	0.0008
247.68	25247.31	176.71	142.87	0.0009
272.44	27772.05	176.71	157.16	0.0010
297.21	30296.78	176.71	171.45	0.0011
321.98	32821.51	176.71	185.74	0.0013
346.75	35346.24	176.71	200.02	0.0016
371.51	37870.97	176.71	214.31	0.0020
396.28	40395.70	176.71	228.60	0.0024
421.05	42920.43	176.71	242.89	0.0028
445.82	45445.17	176.71	257.17	0.0034
470.58	47969.90	176.71	271.46	0.0036



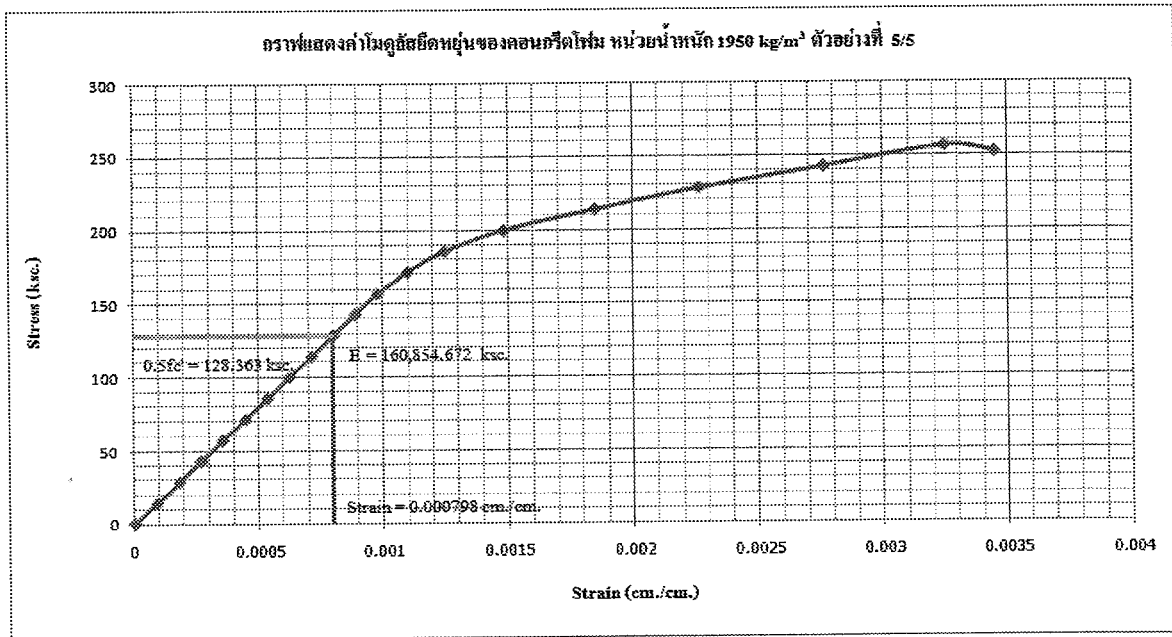
รูปที่ ผข 14 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโฟมหน่วยน้ำหนัก 1,950 kg/m³
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 4

Initial Tangent Modulus Elastic = 158786.598 ksc.

ตัวอย่างที่ 5 กำลังอัดประลัย (f_c') 256.726 ksc

ตารางที่ ผข 18 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโฟมหน่วยน้ำหนัก $1,950 \text{ kg/m}^3$ ทรงกระบอก
อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 5

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm^2)	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	176.24	0.00	0.0000
24.70	2518.02	176.24	14.29	0.0001
49.40	5036.03	176.24	28.57	0.0002
74.11	7554.05	176.24	42.86	0.0003
98.81	10072.07	176.24	57.15	0.0004
123.51	12590.08	176.24	71.44	0.0004
148.21	15108.10	176.24	85.72	0.0005
172.91	17626.11	176.24	100.01	0.0006
197.61	20144.13	176.24	114.30	0.0007
222.32	22662.15	176.24	128.59	0.0008
247.02	25180.16	176.24	142.87	0.0009
271.72	27698.18	176.24	157.16	0.0010
296.42	30216.20	176.24	171.45	0.0011
321.12	32734.21	176.24	185.74	0.0012
345.82	35252.23	176.24	200.02	0.0015
370.53	37770.24	176.24	214.31	0.0018
395.23	40288.26	176.24	228.60	0.0023
419.93	42806.28	176.24	242.89	0.0028
444.63	45324.29	176.24	257.17	0.0032
469.33	47842.31	176.24	271.46	0.0035



รูปที่ ผช 15 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,950 kg/m³ ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 5

Initial Tangent Modulus Elastic = 160854.672 ksc.

ข. ข้อมูลการทดสอบคาน

- การทดสอบคานตัวอย่าง 5 ตัวอย่าง

คาน B1 คานลูกผสม 3 ชั้นเสริมเหล็ก 2-DB 20 โดยชั้นล่างสุดของคานเป็นคอนกรีตกำลังอัดประลัย (F_c) 240 ksc. และชั้นถัดมาเป็น โฟมซีเมนต์ที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก $1,950 \text{ kg/m}^3$ และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E ที่มีน้ำหนักคงค้างที่ 25 %) $169,000 \text{ kg/cm}^2$ ชั้นบนสุดเป็น โฟมซีเมนต์ที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก $1,850 \text{ kg/m}^3$ และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E ที่มีน้ำหนักคงค้างที่ 50 %) $95,220 \text{ kg/cm}^2$ เสริมเหล็กปลอก RB 6 @ 12.50 cm. เว้นระยะ L/3 ช่วงกึ่งกลางคาน

น้ำหนักบรรทุก (kg)	ระยะแอนตัว (mm)			ความเครียด (E50)	ความเครียด (E25)	ความเค้น (E50)	ความเค้น (E25)
	ซ้าย	กลาง	ขวา				
0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
661	0.05	0.059	0.048	0.00038	0.00019	36.66	30.82
1258	0.034	0.754	0.036	0.00034	0.00025	32.92	39.93
1846	0.46	1.05	0.54	0.00045	0.0003	42.78	48.55
2484	0.89	1.94	0.94	0.00052	0.00035	49.96	55.10
3083	1.56	2.78	1.62	0.00059	0.00039	56.66	61.49
3695	2.34	3.65	2.45	0.00065	0.00042	61.83	67.56
4318	3.24	4.71	3.32	0.00076	0.00047	72.65	74.27
4916	4.65	5.64	4.58	0.00085	0.00052	80.97	83.69
5533	5.48	6.77	5.23	0.00092	0.00056	88.34	89.44
6151	6.48	7.84	6.71	0.00152	0.0006	145.00	96.31
6407	7.24	8.93	7.19	0.00107	0.00062	102.03	98.38
6748	8.45	10.25	8.86	0.00112	0.00064	106.72	102.38
7386	10.24	11.86	10.35	0.00121	0.00065	115.33	104.29
7996	11.64	12.75	11.54	0.00131	0.00075	125.67	118.99

8645	12.43	13.98	12.72	0.00141	0.00079	134.86	125.69
9224	13.58	15.46	13.67	0.00149	0.00081	142.32	129.69
9819	15.24	16.25	15.62	0.00165	0.0009	157.64	144.22
10441	16.34	17.3	16.42	0.00177	0.00096	169.70	153.32

ตารางที่ ผข 19 แสดงการแอ่นตัวของคานลูกผสม 3 ชั้น ไม่เสริมแผ่น GFRP

คาน B2 คานลูกผสม 3 ชั้นเสริมเหล็ก 2-DB 20 โดยชั้นล่างสุดของคานเป็นคอนกรีตกำลังอัดประลัย (f_c) 240 ksc. และชั้นถัดมาเป็นโพลีเมอร์ที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก $1,950 \text{ kg/m}^3$ และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E ที่มีน้ำหนักคงค้างที่ 25 %) $169,000 \text{ kg/cm}^2$ ชั้นบนสุดเป็นโพลีเมอร์ที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก $1,850 \text{ kg/m}^3$ และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E ที่มีน้ำหนักคงค้างที่ 50 %) $95,220 \text{ kg/cm}^2$ เสริมเหล็กปลอก RB 6 @ 12.50 cm. เว้นระยะ L/3 ช่วงกึ่งกลางคาน ติดตั้งแผ่น GFRP ที่ห้องคานตลอดความยาวคาน

น้ำหนัก บรรทุก	ระยะแอ่นตัว			ความเครียด เหล็ก	ความเครียด GFRP	ความเค้น เหล็ก	ความเค้น GFRP
	ซ้าย	กลาง	ขวา				
0	0	0	0	0	0	0	0
300	2.33	1.43	2.32	0.000074	0.000168	150.96	394.8
662	2.67	1.81	2.65	0.000177	0.000225	361.08	528.75
972	2.99	2.17	2.96	0.000197	0.000275	401.88	646.25
1225	3.23	2.44	3.21	0.000172	0.00032	350.88	752
1595	3.59	2.83	3.56	0.000217	0.00041	442.68	963.5
1802	3.83	3.16	3.8	0.000225	0.000475	459	1116.25
2187	4.2	3.51	4.14	0.000362	0.000573	738.48	1346.55
2481	4.51	3.87	4.52	0.000519	0.000675	1058.76	1586.25
2737	4.78	4.16	4.72	0.000462	0.000732	942.48	1720.2
3134	5.16	4.58	5.11	0.000477	0.000806	973.08	1894.1
3376	5.42	4.88	5.36	0.000457	0.00087	932.28	2044.5
3625	5.67	5.17	5.64	0.000508	0.000924	1036.32	2171.4
4085	6.1	5.63	6.09	0.000582	0.001015	1187.28	2385.25
4353	6.45	6.04	6.4	0.000637	0.001045	1299.48	2455.75
4652	6.78	6.4	6.72	0.000697	0.001095	1421.88	2573.25
5040	7.16	6.82	7.09	0.000813	0.00114	1658.52	2679
5317	7.52	7.23	7.47	0.000777	0.001207	1585.08	2836.45
5521	7.8	7.54	7.73	0.000857	0.0013	1748.28	3055
5878	8.21	8.02	8.11	0.001032	0.00133	2105.28	3125.5
6427	8.57	8.41	8.5	0.001061	0.001385	2164.44	3254.75
6427	8.99	8.9	8.93	0.000987	0.001445	2013.48	3395.75

6700	9.35	9.31	9.3	0.000992	0.0015	2023.68	3525
7048	9.84	9.85	9.78	0.001097	0.00158	2237.88	3713
7304	10.22	10.28	10.15	0.001043	0.00165	2127.72	3877.5
7656	10.77	10.9	10.71	0.001152	0.001677	2350.08	3940.95
8095	11.48	11.68	11.41	0.001257	0.001748	2564.28	4107.8
8504	11.95	12.59	11.98	0.001359	0.001802	2772.36	4234.7
8545	12.54	13.05	12.57	0.001462	0.001866	2982.48	4385.1
9012	13.12	13.68	13.14	0.001558	0.001923	3178.32	4519.05
9438	13.65	14.11	13.7	0.001664	0.00198	3394.56	4653
9985	14.24	14.88	14.29	0.001769	0.002052	3608.76	4822.2
10394	14.96	15.65	15.02	0.001874	0.002113	3822.96	4965.55
10835	15.83	16.54	15.88	0.001985	0.002195	4049.4	5158.25

ตารางที่ ผข 20 แสดงการแ่่นตัวของคานลูกผสม 3 ชั้นเสริมแผ่น GFRP ที่ห้องคาน

คาน B3 คานลูกผสม 3 ชั้นเสริมเหล็ก 2-DB 20 โดยชั้นล่างสุดของคานเป็นคอนกรีตกำลังอัด
 ประลัย (f_c) 240 ksc. และชั้นถัดมาเป็น โฟมซีเมนต์ที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก $1,950 \text{ kg/m}^3$
 และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E ที่มีน้ำหนักคงค้างที่ 25 %) $169,000 \text{ kg/cm}^2$ ชั้นบนสุดเป็น
 โฟมซีเมนต์ที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก $1,850 \text{ kg/m}^3$ และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E ที่มีน้ำหนัก
 คงค้างที่ 50 %) $95,220 \text{ kg/cm}^2$ ไม่เสริมเหล็กปลอก ติดตั้งแผ่น GFRP ที่ห้องคาน
 ตลอดความยาวคาน และแปะที่ด้านข้างคานเพื่อรับแรงเฉือนแทนเหล็กปลอก

น้ำหนัก บรรทุก (kg)	ระยะแ่่นตัว (mm)			ความเครียด เหล็ก	ความเครียด GFRP	ความเครียดFiber ด้านข้าง	ความเค้น เหล็ก	ความเค้น GFRP
	ซ้าย	กลาง	ขวา					
0	0	0	0	0	0	0	0	0
477	2.35	2.69	2.6	0.000074	0.000168	-0.000055	150.96	394.8
684	2.59	2.98	2.86	0.000177	0.000225	0.000025	361.08	528.75
1037	2.98	3.43	3.24	0.000197	0.000275	-0.000075	401.88	646.25
1373	3.34	3.84	3.61	0.000172	0.00032	-0.000122	350.88	752
1754	3.75	4.35	4.08	0.000217	0.00041	0.001125	442.68	963.5
2035	4.12	4.74	4.43	0.000225	0.000475	0.000041	459	1116.25
2352	4.45	5.12	4.76	0.000362	0.000573	0.000025	738.48	1346.55
2586	4.68	5.41	5	0.000519	0.000675	0.000023	1058.76	1586.25
2816	4.94	5.7	5.27	0.000462	0.000732	0.000039	942.48	1720.2
3045	5.15	5.98	5.52	0.000477	0.000806	0.0002	973.08	1894.1
3440	5.58	6.43	5.92	0.000457	0.00087	-0.000105	932.28	2044.5
3690	5.83	6.71	6.17	0.000508	0.000924	0.000031	1036.32	2171.4
4036	6.23	7.17	6.58	0.000582	0.001015	-0.000094	1187.28	2385.25
4372	6.62	7.63	6.97	0.000637	0.001045	0.000026	1299.48	2455.75
4655	6.88	7.91	7.24	0.000697	0.001095	-0.000209	1421.88	2573.25
5013	7.26	8.35	7.61	0.000813	0.00114	0.00002	1658.52	2679

5377	7.68	8.85	8.03	0.000777	0.001207	0.000085	1585.08	2836.45
5668	8.14	9.34	8.47	0.000857	0.0013	0.000057	1748.28	3055
5986	8.53	9.78	8.85	0.001032	0.00133	-0.000032	2105.28	3125.5
6267	8.98	10.26	9.26	0.001061	0.001385	0.00019	2164.44	3254.75
6400	9.24	10.55	9.51	0.000987	0.001445	-0.000185	2013.48	3395.75
6950	10	11.44	10.28	0.000992	0.0015	0.000195	2023.68	3525
7447	10.68	12.18	10.9	0.001097	0.00158	0.000425	2237.88	3713
7933	11.45	13.03	11.63	0.001043	0.00165	0.000122	2127.72	3877.5
8370	12.21	13.89	12.37	0.001152	0.001677	0.000566	2350.08	3940.95
8652	12.73	14.47	12.87	0.001257	0.001748	0.000205	2564.28	4107.8
9032	13.24	15.08	13.41	0.001356	0.00179	0.000082	2766.24	4206.5
9513	14.14	16	14.22	0.001459	0.00184	0.000165	2976.36	4324
10015	15.01	16.94	14.98	0.001506	0.00189	0.00022	3072.24	4441.5
13320	15.89	17.86	15.77	0.001547	0.00194	0.000137	3155.88	4559
11002	17	19.08	16.8	0.001597	0.00199	0.000437	3257.88	4676.5
11100	18.92	20.26	17.35	0.001627	0.00204	0.000305	3319.08	4794
11832	19.95	21.42	18.4	0.001682	0.00225	0.000137	3431.28	5287.5

ตารางที่ ผข 21 แสดงการแอ่นตัวของคานลูกผสม 3 ชั้นไม่มีเหล็กปลอก เสริมแผ่น GFRP ที่ห้องคาน
และด้านข้างคาน

คาน B4 คานคอนกรีตเสริมเหล็ก 2-DB 12 ไม่เสริมแผ่น GFRP

น้ำหนัก บรรทุก (kg)	ระยะแอนตัว (mm)			ความเครียด คอนกรีต 1	ความเครียด คอนกรีต 2	ความเครียด เหล็ก	ความ เค้น คอนกรีต 1	ความ เค้น คอนกรีต 2	ความเค้น เหล็ก
	ซ้าย	กลาง	ขวา						
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
377	2.1	2.42	2.15	-0.000096	0.000215	0.000547	22	50	1115.9
728	2.6	2.96	2.56	-0.00124	-0.001949	0.000525	290	-456	1071
934	2.84	3.25	2.81	-0.00129	-0.000851	0.000483	301	-199	985.32
1305	3.28	3.77	3.3	-0.00093	-0.000163	0.000791	217	-38	1613.6
1601	3.67	4.21	3.67	-0.00156	-0.000033	0.000745	366	-8	1519.8
1860	4	4.6	4.03	-0.00195	-0.000287	0.000955	456	-67	1948.2
2181	4.38	5.04	4.42	-0.00152	-0.000127	0.000982	356	-30	2003.3
2528	4.84	5.58	4.9	-0.00203	0.000153	0.001175	475	36	2397
2726	5.1	5.89	5.18	-0.00179	0.000034	0.001252	418	8	2554.1
3026	5.54	6.39	5.62	-0.0019	0.00015	0.001256	444	35	2562.2
3363	6.08	7.02	6.2	-0.00191	0.000175	0.00139	447	41	2835.6
3720	6.62	7.68	6.77	-0.0025	0.000271	0.00165	585	63	3366
3975	7.08	8.18	7.27	-0.00173	0.000091	0.00168	404	21	3427.2
4268	7.65	8.83	7.83	-0.00218	0.000277	0.001704	510	65	3476.2
4554	8.23	9.44	8.47	-0.00195	0.000179	0.001807	456	42	3686.3
4855	8.94	10.3	9.17	-0.00205	0.000206	0.001895	478	48	3865.8
5138	9.74	11.2	9.99	-0.00189	0.000191	0.001939	441	45	3955.6
5303	11.32	13.3	12.3	-0.00213	0.00018	0.002018	497	42	4116.7

ตารางที่ ผข 22 แสดงการแอนตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก 2-DB 12 ไม่เสริมแผ่น GFRP

คาน B5 คานคอนกรีตเสริมเหล็ก 2-DB 12 เสริมแผ่น GFRP ที่ห้องคาน

น้ำหนักบรรทุก (kg)	ระยะแอนตัว (mm)			ความเครียดคอนกรีต 1	ความเครียดคอนกรีต 2	ความเครียดเหล็ก	ความเครียด GFRP	ความเค้นคอนกรีต 1	ความเค้นคอนกรีต 2	ความเค้นเหล็ก	ความเค้น GFRP
	ซ้าย	กลาง	ขวา								
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
466	2.51	2.78	2.5	-0.00012	0.000001	0.000625	0.000844	-29	0	1275	1983
652	2.75	3	2.73	-0.00014	-0.000039	0.00067	0.000933	-32	-9	1366.8	2193
999	3.2	3.51	3.18	-0.00016	-0.000014	0.000832	0.00112	-38	-3	1697.3	2632
1259	3.54	3.82	3.52	-0.00018	-0.00002	0.000929	0.001194	-42	-5	1895.2	2806
1580	3.95	4.3	3.93	-0.0002	-0.000011	0.00098	0.001277	-46	-3	1999.2	3001
1871	4.37	4.83	4.36	-0.00022	-0.000001	0.001151	0.001407	-51	0	2348	3306
2200	4.79	5.31	4.77	-0.00024	-0.000009	0.001254	0.001506	-56	-2	2558.2	3539
2411	5.12	5.68	5.1	-0.00026	-0.000011	0.001193	0.001596	-60	-3	2433.7	3751
2647	5.44	6.03	5.42	-0.00028	0.000001	0.001392	0.001693	-64	0	2839.7	3979
3042	5.94	6.61	5.91	-0.0003	-0.000006	0.001546	0.001742	-70	-1	3153.8	4094
3350	6.49	7.19	6.43	-0.00032	-0.000002	0.001652	0.001855	-75	0	3370.1	4359
3627	6.97	7.71	6.88	-0.00035	-0.000008	0.001798	0.001901	-81	-2	3667.9	4467
3907	7.44	8.24	7.33	-0.00038	-0.00002	0.001904	0.002005	-90	-5	3884.2	4712
4279	8.15	9	8	-0.00039	-0.000062	0.002049	0.002095	-92	-15	4180	4923
4576	8.74	9.54	8.57	-0.00041	0.000012	0.002101	0.00219	-96	3	4286	5147
4880	9.29	10.24	9.11	-0.00043	0.000013	0.002267	0.00229	-100	3	4624.7	5382
5129	9.88	10.95	9.73	-0.00044	-0.000038	0.002349	0.002368	-104	-9	4792	5565
5505	10.79	11.95	10.62	-0.00046	-0.000015	0.002456	0.002443	-108	-4	5010.2	5741
5840	11.71	12.96	11.53	-0.00048	0.000072	0.002506	0.002577	-112	17	5112.2	6056
6043	12.34	13.72	12.1	-0.00047	0.000102	0.002392	0.002548	-110	24	4879.7	5988
6135	13.71	15.35	13.39	-0.00048	0.000204	0.010754	0.003001	-113	48	21938	7052
6250	14.71	16.5	14.5	-0.0005	0.000251	0.010967	0.00329	-116	59	22373	7732
6352	15.71	17.66	16.25	-0.00051	0.000217	0.011102	0.003626	-118	51	22648	8521
6506	17.38	20.62	17.92	-0.00052	0.000275	0.011848	0.009223	-122	64	24170	21674

ตารางที่ ผข 23 แสดงการแอนตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก 2-DB 12 เสริมแผ่น GFRP ที่ห้องคาน

คาน B6 คานคอนกรีตเสริมเหล็ก 2-DB 12 ไม่เสริมแผ่น GFRP และไม่ผ่านการรับน้ำหนัก
บรรทุกมาก่อน

น้ำหนักบรรทุก (kg)	ระยะแอนตัว (mm)		
	ซ้าย	กลาง	ขวา
0	0	0	0
246	1.3	1.18	1.91
457	2.24	2.03	2.13
658	2.41	2.52	2.3
817	2.59	2.72	2.47
1029	2.89	3.09	2.78
1254	3	3.21	2.89
1408	3.2	3.44	3.08
1663	3.39	3.67	3.28
1835	3.63	3.95	3.51
2154	4.31	4.64	4.34
2408	4.95	4.96	4.93
2716	5.14	5.54	5.15
3032	5.98	6.17	5.97
3314	6.43	6.54	6.46
3602	7.14	7.35	7.16
3949	7.86	8.04	7.85
4209	8.5	8.67	9.46
4507	9.23	9.45	10.24
4821	10.03	10.49	11.08
5218	12.07	12.26	12.05

ตารางที่ ผข 24 แสดงการแอนตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก 2-DB 12 ไม่เสริมแผ่น GFRP
และไม่ผ่านการรับน้ำหนักบรรทุกมาก่อน