

การศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อรับแรงบิด

A STUDY OF REINFORCED CONCRETE BEAM'S BEHAVIOR IN PURE TORSION



กมลทิพย์ อังสิริกุล  
ณัฐพร จงจู้ตินนท์  
ปรางใจ งามเพชร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อรับแรงบิด

A STUDY OF REINFORCED CONCRETE BEAM'S BEHAVIOR IN PURE TORSION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY OF REINFORCED CONCRETE BEAM'S BEHAVIOR IN PURE TORSION



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

2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองโครงสร้างงานพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อรับแรงบิด

นักศึกษา กมลทิพย์ อังสิริกุล รหัสประจำตัว 53010010

ณัฐพร จงฐิตินนท์ รหัสประจำตัว 53010484

ปรางใจ งามเพชร รหัสประจำตัว 53010937

หลักสูตร วิศวกรรมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.สุวัฒน์ ธีรเศรษฐ์

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
รศ.สุวัฒน์ ธีรเศรษฐ์	
อ.ทรงกลด แซ่เอ็ง	
ดร.อัญญาวิทย์ สุจริตพงศ์	
ดร. อาทิตย์ เพชรศศิธร	

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุพจน์ ศรีนิล)

ประธานสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ : การศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อรับแรงบิด

A STUDY OF REINFORCED CONCRETE BEAM'S BEHAVIOR IN PURE  
TORSION

นักศึกษา : กมลทิพย์ อังสิริกุล รหัสประจำตัว 53010010

ณัฐพร จงจิตินนท์ รหัสประจำตัว 53010484

ปรางใจ งามเพชร รหัสประจำตัว 53010937

อาจารย์ที่ปรึกษา : รศ.สุวัฒน์ ธีรเศรษฐ์

ระดับการศึกษา : วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ภาควิชา : วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

ปีการศึกษา : 2556

บทคัดย่อ

ในการโครงสร้างอาคาร คานเป็นส่วนที่มีโอกาสได้รับแรงบิดมากที่สุด ซึ่งหากไม่ได้คำนึงถึงอาจก่อให้เกิดความเสียหายได้ โครงการงานเล่มนี้เป็นการศึกษาผลจากแรงบิดที่กระทำต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยมีการศึกษาแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อเปรียบเทียบ จำนวนเหล็กแกนนอน, ลักษณะการวางเหล็กแกนนอน, รูปแบบของเหล็กปลอก และ ทิศทางการใส่แรงบิดที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษารูปแบบการวิบัติของคานพฤติกรรมของคาน ในแต่ละรูปแบบ และ หารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดในกรณีที่คำนึงถึงแรงบิดกระทำภายนอก

ในการทดลองใช้แบบจำลองคานขนาด  $5 \times 5 \times 34$  cm ประกอบด้วยคอนกรีต และ ลวดเหล็กในรูปแบบต่างๆ ทำการทดลองโดยใช้เครื่องบิดที่ปรับปรุงแล้ว บันทึกค่าน้ำหนักและมุมบิดที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผล จากการทดลองพบว่าจำนวนเหล็กแกนนอนมีผลต่อกำลังรับแรงบิดเพียงเล็กน้อย, การจัดแบบเป็นรูปวงกลมจะรับแรงบิดได้มากกว่าการจัดรูปแบบสี่เหลี่ยม, การใส่เหล็กปลอกเกลียวจะรับแรงบิดได้มากกว่าปลอกเดี่ยว, และ ทิศทางการใส่แรงบิดมีผลอย่างมากต่อโครงสร้างที่ใช้เหล็กปลอกแบบเกลียว โดยการใส่แรงในทิศทางทำให้เกลียวแน่นขึ้น มีกำลังต้านทานแรงบิดมากที่สุด และ การใส่แรงบิดในทิศทางตรงกันข้าม คานจะรับแรงบิดได้น้อยที่สุด ส่วนรูปแบบการแตกของคอนกรีตส่วนใหญ่จะทำมุม  $45^\circ$  กับแนวแกน โดยเริ่มจากด้านหนึ่งแล้วร้าวไปจนครบสี่ด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title : A STUDY OF REINFORCED CONCRETE BEAM'S  
BEHAVIOR IN PURE TORSION

Name : KAMONTHIP ANGSIRIKUL  
NATTHAPORN JONGTHTITINON  
PRANGJAI NGAMPETCH

Field : CIVIL ENGINEERING

Department : CIVIL ENGINEERING

Faculty : ENGINEERING

Advisor : SUWAT TEERASET, ASSOC.PROF

### Abstract

In the building construction, beam tends to get the effect of torsion which causes damage to the building. The behaviour of reinforced concrete beams with quadrangle cross-section and reinforcement under pure torsion is experimentally investigated. The 7 experimental models differ in amount of longitudinal reinforcement, pattern of longitudinal reinforcement, type of transverse reinforcement, and direction of torsion. The purposes are studying the behavior of reinforced concrete beam and indicating the proper model for beam in pure torsion.

Test results of the study reveal that amount of longitudinal reinforcement has slightly effect on ultimate torsion and circular pattern of longitudinal reinforcement is better than quadrangle. In case of type of transverse reinforcement and direction of torsion, the spiral reinforcement with locking direction give a higher torsional capacity compared to the stirrups and the spiral reinforcement with unlocking. The cracking of the beams began in one side and expanded to the other side until it broke with 45° angle to the axis.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รศ.สุวัฒน์ ธีรเศรษฐ์ อาจารย์ผู้ควบคุม วิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่า ให้ความคิดริเริ่ม ความรู้ คำปรึกษา และแนวทางการ แก้ไขปัญหาต่างๆ มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ดร.อัฐวิทย์ สุจริตพงศ์, อ.ทรงกลด แซ่อึ้ง, ผศ. สมเกียรติ ขวัญพฤษ์, ดร. อาทิตย์ เพชรศศิธร และ อ. ปรีชานันท์ ศรีแก้ว คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำปรึกษา และ คำแนะนำเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ นาย ธีรเดช คำวิไล, นาย อานนท์พร สุวรรณพลาย และ นาย บุญล้อม ศรีทองนวล พี่ ควบคุมและทุกท่าน ที่ช่วยให้การทดสอบเป็นไปได้อย่างขึ้น และให้คำปรึกษาในการแก้ไขปัญหาต่างๆ

ขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ และคุณแม่ ทุกคน ที่ให้กำลังใจ และการสนับสนุนมาโดยตลอด

นางสาวกมลทิพย์ อังสิริกุล

นางสาวณัฐพร จงฐิตินนท์

นางสาวปรางใจ งามเพ็ชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
สารบัญ	II
สารบัญตาราง	V
สารบัญรูป	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญ และ ที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 วิธีการดำเนินโครงการ	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ทฤษฎี	3
2.1.1 แรงบิด (Torsion)	3
2.1.2 คานคอนกรีตเสริมเหล็ก	5
2.1.3 กำลังต้านทานแรงบิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	5
2.1.3.1 กำลังต้านทานแรงบิดอย่างเดียวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ( $T_n$ )	6
2.1.3.2 กำลังต้านทานแรงบิดและแรงเฉือนจากการตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	7
2.1.4 การวัดค่าความเครียด	9
2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
2.2.1 Load capacity and stiffness of angular cross section reinforced concrete beams under torsion by M. KAMI_SKI, W. PAWLAK	10
2.2.2 Experimental investigation of RC beams with rectangular spiral reinforcement in torsion by Constantin E. Chalioris , Chris G. Karayannis	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

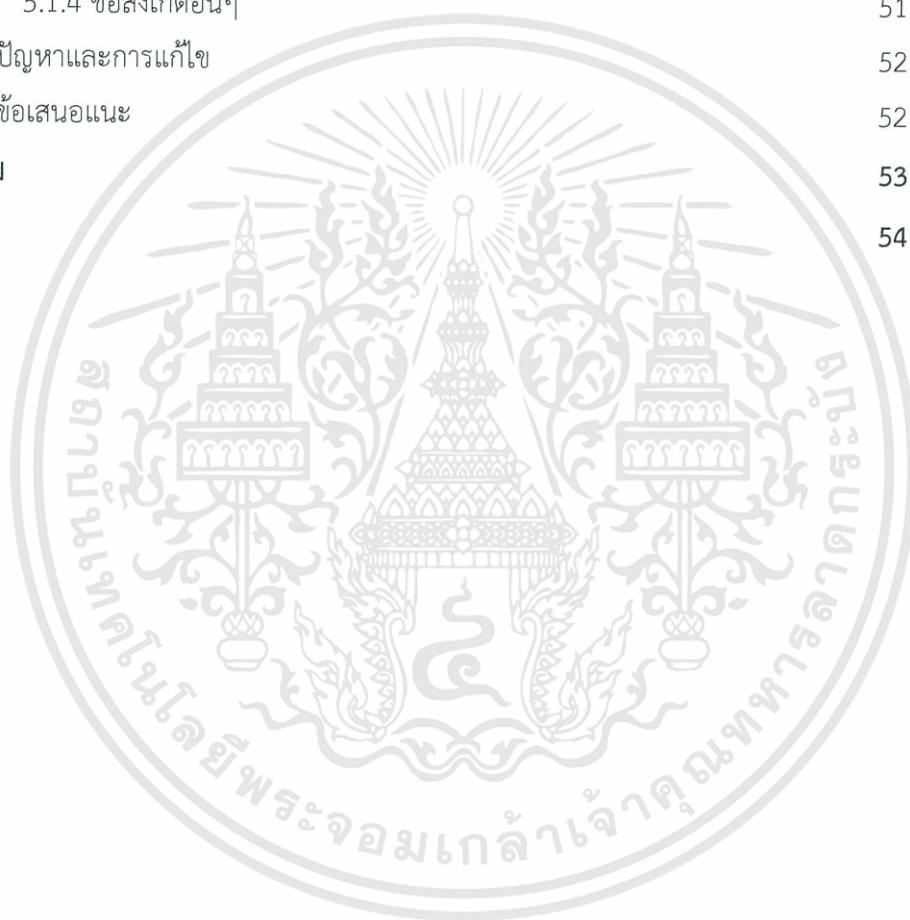
## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 3</b> วิธีการดำเนินงานวิจัย	<b>13</b>
3.1. กล่าวนำ	13
3.2. การทดสอบวัสดุของแบบจำลอง	13
3.2.1. การทดสอบส่วนผสมและคุณสมบัติของคอนกรีตก่อนการนำไปใช้	13
3.2.2. การทดสอบคุณสมบัติของลวดเหล็ก	14
3.3. ขั้นตอนการเตรียมแบบจำลองก่อนทดสอบ	15
3.4. เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	20
3.4.1. เครื่องทดสอบแรงบิด	20
3.4.2. ขาดังเครื่องทดสอบแรงบิด	22
3.5. ขั้นตอนการทดสอบ	22
3.5.1. การทดสอบ	22
3.5.2. วิธีการทดสอบ	23
3.6. ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูล	23
<b>บทที่ 4</b> ผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์	<b>25</b>
4.1. ผลการทดสอบวัสดุ	25
4.1.1. การทดสอบเหล็ก	25
4.1.2. การทดสอบกำลังคอนกรีต	26
4.1.3. การทดสอบคุณสมบัติคอนกรีตโดยติดตั้ง Strain Gauge	28
4.2. ผลการทดสอบแรงบิด	30
4.2.1. การทดสอบแรงบิด	30
4.2.1.1. รูปแบบที่ 1	30
4.2.1.2. รูปแบบที่ 2	33
4.2.1.3. รูปแบบที่ 3	37
4.2.2. การทดสอบแรงบิดโดยติดตั้ง Strain Rosette	39
4.2.2.1. รูปแบบที่ 1	39
4.2.2.2. รูปแบบที่ 2	42
4.2.2.3. รูปแบบที่ 3	46
4.2.3. สรุปรูป	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ	51
5.1 สรุปผลการทดสอบ	51
5.1.1 ชนิดของเหล็กปลอก	51
5.1.2 จำนวนเหล็กแกนแนวนอน	51
5.1.3 รูปแบบการวางเหล็กแกนแนวนอน	51
5.1.4 ข้อสังเกตอื่นๆ	51
5.2 ปัญหาและการแก้ไข	52
5.3 ข้อเสนอแนะ	52
บรรณานุกรม	53
ภาคผนวก	54



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 2.1 สัมประสิทธิ์สำหรับหน้าตัดสี่เหลี่ยมเมื่อมีแรงบิด	4
ตาราง 3.1 ตารางทดสอบกำลังคอนกรีตก่อนผสมจริง	14
ตาราง 4.1 การทดสอบลวกเหล็กขนาด 1.6 mm และ 2.6 mm	26
ตาราง 4.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต	26
ตาราง 4.3 ผลทดสอบคอนกรีตโดยติดตั้ง Strain Gauge	28
ตาราง 4.4 ผลทดสอบแรงบิดระหว่างแรงบิดและมุมหมุนของเหล็กปลอกเดี่ยว เหล็กแกน 4 เส้น (1A)	30
ตาราง 4.5 ผลทดสอบแรงบิดระหว่างแรงบิดและมุมหมุนของเหล็กปลอกเดี่ยว เหล็กแกน 8 เส้น (1B)	31
ตาราง 4.6 ผลทดสอบแรงบิดระหว่างแรงบิดและมุมหมุนของเหล็กปลอกเดี่ยว เหล็กแกนแบบจัดเป็นรูปวงกลม (1C)	32
ตาราง 4.7 ผลทดสอบแรงบิดระหว่างแรงบิดและมุมหมุนของเหล็กปลอกเกลียว เหล็กแกน 4 เส้น (2A)	33
ตาราง 4.8 ผลทดสอบแรงบิดระหว่างแรงบิดและมุมหมุนของเหล็กปลอกเกลียว เหล็กแกน 8 เส้น (2B)	34
ตาราง 4.9 ผลทดสอบแรงบิดระหว่างแรงบิดและมุมหมุนของเหล็กปลอกเกลียว เหล็กแกนแบบจัดเป็นรูปวงกลม (2C)	35
ตาราง 4.10 ผลทดสอบแรงบิดระหว่างแรงบิดและมุมหมุนของเหล็กปลอกเกลียว ใส่แรงบิดคลายเกลียว เหล็กแกน 4 เส้น (D)	37
ตาราง 4.11 ผลทดสอบแรงบิดเมื่อติดตั้ง Strain Rosette ของเหล็กปลอกเดี่ยว เหล็กแกน 4 เส้น (1A)	39
ตาราง 4.12 ผลทดสอบแรงบิดเมื่อติดตั้ง Strain Rosette ของเหล็กปลอกเดี่ยว เหล็กแกน 8 เส้น (1B)	40
ตาราง 4.13 ผลทดสอบแรงบิดเมื่อติดตั้ง Strain Rosette ของเหล็กปลอกเดี่ยว เหล็กแกนแบบจัดเป็นรูปวงกลม (1C)	41
ตาราง 4.14 ผลทดสอบแรงบิดเมื่อติดตั้ง Strain Rosette ของเหล็กปลอกเกลียว เหล็กแกน 4 เส้น (2A)	42
ตาราง 4.15 ผลทดสอบแรงบิดเมื่อติดตั้ง Strain Rosette ของเหล็กปลอกเกลียว เหล็กแกน 8 เส้น (2B)	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตาราง 4.16 ผลทดสอบแรงบิดเมื่อติดตั้ง Strain Rosette ของเหล็กปลอกเกลียว เหล็กแกนแบบจัดเป็นรูปร่างกลม (2C)	44
ตาราง 4.17 ผลทดสอบแรงบิดเมื่อติดตั้ง Strain Rosette ของเหล็กปลอกเกลียว ใส่แรงบิดคลายเกลียว เหล็กแกน 4 เส้น (D)	46
ตาราง 4.18 แสดงค่าเฉลี่ยระหว่างแรงบิดและมุมหมุนของเหล็กชนิดต่างๆ	48
ตาราง 4.19 แสดงผลสรุปแรงบิดสูงสุดของแต่ละตัวอย่าง	49
ตาราง 4.20 แสดงค่า Modulus of rigidity จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Shearing stress และ Shearing strain	50
ตาราง 5.1 ปัญหาที่พบระหว่างการทำงานและวิธีการแก้ไข	52



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ระนาบของหน้าตัดสี่เหลี่ยมเมื่อใส่แรงบิด	3
รูปที่ 2.2 การแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	5
รูปที่ 2.3 แรงบิดในคาน	5
รูปที่ 2.4 กำลังต้านแรงบิดอย่างเดียวกับที่ได้จากคานคอนกรีต	6
รูปที่ 2.5 แรงในเหล็กปลอกที่เกิดขึ้นในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	6
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์แบบโค้งวงกลมระหว่างแรงบิดกับแรงเฉือนของคอนกรีต	8
รูปที่ 2.7 Strain Gauge	9
รูปที่ 2.8 Strain Rosette	10
รูปที่ 2.9 รูปแบบและการจัดเรียงเหล็กเสริมในตัวอย่างการทดลอง	11
รูปที่ 2.10 อิทธิพลของอัตราส่วนเหล็กตามขวางเมื่อตัวอย่างมีแรงบิด	12
รูปที่ 3.1 แสดงการทดสอบแรงดึงกับลวดขนาด 2.6 mm	14
รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างเหล็กขนาด 2.6 mm ที่ถูกดึงขาดจากการทดสอบแรงดึง	14
รูปที่ 3.3 ไม้แบบใช้หล่อแบบจำลองขนาด $5 \times 5 \times 34 \text{ cm}^3$	15
รูปที่ 3.4 โครงสร้างเหล็กก่อนนำไปหล่อกับคอนกรีต	15
รูปที่ 3.5 มุมของเหล็กปลอกเกลียว ซึ่งมีมุมเท่ากับ 80 องศา	16
รูปที่ 3.6 แบบจำลองก่อนเทคอนกรีต	16
รูปที่ 3.7 การทดสอบความอึดตัวผิวแห้งของมวลรวมละเอียด	17
รูปที่ 3.8 การใส่คอนกรีตเข้าไปในโครงสร้างเหล็กและขณะทำการปาดหน้าคอนกรีตให้เรียบ	17
รูปที่ 3.9 โครงสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเมื่อปาดหน้าเรียบเรียบร้อยแล้ว	17
รูปที่ 3.10 การเตรียมแบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอกตามมาตรฐาน ASTM	18
รูปที่ 3.11 แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กก่อนนำไปบ่ม	18
รูปที่ 3.12 การเตรียมทดสอบแรงบิดกับแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	19
รูปที่ 3.13 การทดสอบหากำลังรับแรงของคอนกรีต	19
รูปที่ 3.14 การทดสอบแรงบิด ขณะติด Strain gauge ไปด้วย เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง stress กับ strain	20
รูปที่ 3.15 การทดสอบแรงอัด ขณะติด Strain gauge ไปด้วย เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง stress กับ strain	20'
รูปที่ 3.15 เครื่องทดสอบแรงบิด	21

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.16 หน้าปิดอ่านองศา	21
รูปที่ 3.17 ปากจับแบบจำลอง	21
รูปที่ 3.18 สกรูปรับระยะห่างของชิ้นงาน	22
รูปที่ 3.19 ขาดังเครื่องทดสอบแรงบิด	22
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างกราฟทดสอบแรงดึงเส้นลวดขนาด 1.6 mm	25
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างกราฟทดสอบแรงดึงเส้นลวดขนาด 2.6 mm	25
รูปที่ 4.3 ตัวอย่างกราฟทดสอบคอนกรีตโดยติดตั้ง Strain Gauge	28
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิด(T)และมุมบิด (Angle of twist) ของ 1A	30
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิด(T)และมุมบิด (Angle of twist) ของ 1B	31
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิด(T)และมุมบิด (Angle of twist) ของ 1C	32
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิด(T)และ มุมบิด (Angle of twist) ของ 1A	34
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิด(T)และ มุมบิด (Angle of twist) ของ 2B	35
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิด(T)และ มุมบิด (Angle of twist) ของ 2C	36
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิด(T)และ มุมบิด (Angle of twist) ของ D	37
รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Shearing Stress และ Strain (ซ้าย) สมการเส้นตรง ในช่วงแรก(ขวา) ของ 1A	39
รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Shearing Stress และ Strain (ซ้าย) สมการเส้นตรง ในช่วงแรก (ขวา) ของ 1B	40
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Shearing Stress และ Strain (ซ้าย) สมการเส้นตรง ในช่วงแรก (ขวา) ของ 1C	41
รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Shearing Stress และ Strain (ซ้าย) สมการเส้นตรง ในช่วงแรก (ขวา) ของ 2A	43
รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Shearing Stress และ Strain (ซ้าย) สมการเส้นตรง ในช่วงแรก (ขวา) ของ 2B	44
รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Shearing Stress และ Strain (ซ้าย) สมการเส้นตรง ในช่วงแรก (ขวา) ของ 2C	45
รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Shearing Stress และ Strain (ซ้าย) สมการเส้นตรง ในช่วงแรก (ขวา) ของ D	46
รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบรูปแบบเหล็กปลอก	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.19 กราฟเปรียบเทียบรูปแบบเหล็กแกนนอน	49
รูปที่ 4.20 กราฟเปรียบเทียบจำนวนเหล็กแกนนอน	49



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญ และ ที่มาของปัญหา

ปัจจุบันการก่อสร้างอาคารมากมายรวมถึงการก่อสร้างสะพาน มักมีประเด็นเรื่องแรงบิดเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งมีผลต่อการออกแบบและความแข็งแรงของโครงสร้าง โดยแรงบิดจะเกิดจากการที่จุดศูนย์กลางของน้ำหนักบรรทุก ไม่ผ่านจุดศูนย์กลางแรงเฉือน (Shear Center) จึงทำให้โครงสร้างนั้นรับทั้งแรงบิด (Torsion) และแรงดัด (Bending) เมื่อมีแรงไม่สม่ำเสมอมากกระทำ หรือ มีแรงมากกระทำ โดยแรงนั้นไม่ผ่านจุดศูนย์กลางแรงเฉือน (Shear Center) จะทำให้เกิดโมเมนต์บิดขึ้น และ ส่งผลกระทบต่อคาน ทำให้คานเกิดการวิบัติ หรือ ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก (Load) น้อยลง เป็นเหตุให้กลุ่มโครงงานพิเศษนี้ต้องการศึกษาพฤติกรรมการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กในแต่ละรูปแบบ เมื่อมีโมเมนต์บิดมากกระทำ

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

- ศึกษาพฤติกรรมการกระจายแรงบิดภายนอกที่กระทำต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กในรูปแบบต่างๆ
- ศึกษารูปแบบการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กแต่ละแบบเมื่อรับแรงบิด
- ศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีจำนวนและรูปแบบการจัดเรียงเหล็กที่ต่างกันเมื่อรับแรงบิดภายนอก
- ศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการใส่ปลอกเดี่ยวและปลอกเกลียวที่เมื่อรับแรงบิดภายนอก

#### 1.3 ขอบเขตของโครงงาน

- ทดสอบแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวขนาด  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  จำนวน 5 ตัวอย่าง โดยแบ่งเป็น
  1. เหล็กแกนแนวนอน 4 เส้น
  2. เหล็กแกนแนวนอน 8 เส้น
  3. เหล็กแกนแนวนอน แบบจัดเป็นรูปวงกลม
- ทดสอบแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเกลียวขนาด  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  เมื่อใส่แรงบิดทิศทางทำให้เกลียวแน่นขึ้น จำนวน 5 ตัวอย่าง โดยแบ่งเป็น
  1. เหล็กแกนแนวนอน 4 เส้น
  2. เหล็กแกนแนวนอน 8 เส้น

### 3. เหล็กแกนแนวนอน แบบจัดเป็นรูปวงกลม

- ทดสอบแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเกลียวขนาด  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  เมื่อใส่แรงบิดทิศทางทำให้เกิดเกลียวคลายลง จำนวน 5 ตัวอย่าง ใช้เหล็กแกนแนวนอน 4 เส้น
- วิเคราะห์ และ เปรียบเทียบกำลังต้านทานแรงบิด และมุมบิดของคานรูปแบบต่างๆที่เกิดขึ้น

## 1.4 วิธีการดำเนินโครงการงาน

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับการกระจายแรงในคานเมื่อถูกแรงบิดกระทำภายนอก
2. ศึกษาการออกแบบเพื่อทำแบบจำลองโครงสร้างคานคอนกรีต และ ลวดเหล็ก
3. ศึกษาหลักเครื่องทดสอบแรงบิด เรียนรู้และปรับปรุงการใช้
4. จำลองโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั้ง 7 รูปแบบ
5. ทดสอบแรงบิดแบบจำลองโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กแต่ละรูปแบบ เพื่อศึกษาพฤติกรรมกรรมการวิบัติ
6. วิเคราะห์พฤติกรรมกรรมการวิบัติ จากผลจากการทดสอบ และทฤษฎีประกอบ
7. สรุปผลที่ได้จากโครงการงานนี้

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจถึงการวิเคราะห์ปัญหา และผลกระทบที่เกิดขึ้นของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ทั้ง 7 รูปแบบ จากแรงบิด
2. เป็นแนวทางในการทำนายพฤติกรรมกรรมการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก
3. สามารถให้ความรู้ ความเข้าใจ กับผู้ที่สนใจเกี่ยวกับพฤติกรรมกรรมการวิบัติของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎี

##### 2.1.1 แรงบิด (Torsion)

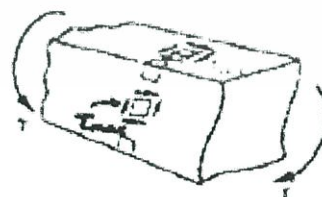
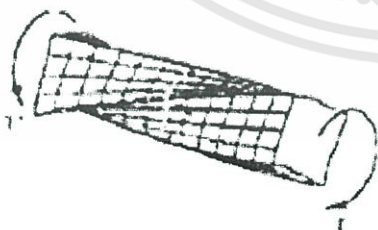
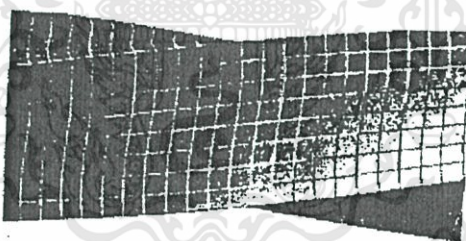
แรงบิด (Torsion) หมายถึง การที่ส่วนของโครงสร้างหรือท่อนวัสดุ รับโมเมนต์บิด (twisting moment) หรือ ทอร์ก (torque) ที่ปลายทั้งสองข้าง โดยที่โมเมนต์บิดนั้นอยู่ในระนาบที่ตั้งฉากกับแนวแกนของท่อนวัสดุ

ผลกระทบของแรงบิดที่มีต่อวัสดุ

- ทำให้เกิดแรงภายในด้านหรือโมเมนต์ต้านการบิด (resisting moment) ในรูปของแรงเค้นเฉือนบนหน้าตัดใดๆของท่อนวัสดุที่ตั้งฉากกับแนวแกน
- ทำให้เกิดการหมุน (rotation) หรือการเปลี่ยนรูปเชิงมุม (angular displacement) ของปลายข้างหนึ่งของท่อนวัสดุ นั่นคือการทำให้เกิดความเครียดเฉือน

แรงบิดในท่อนวัสดุรูปหน้าตัดอื่นๆ (Torsion of Non-Circular Membrane)

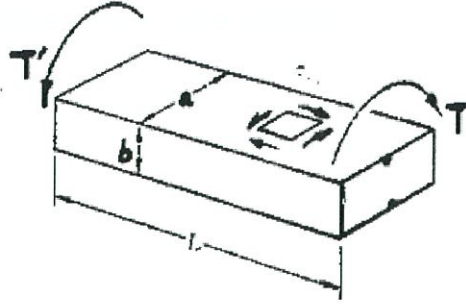
สำหรับท่อนวัสดุที่มีรูปหน้าตัดอื่นๆที่ไม่เป็นวงกลม สมมติฐานที่ว่าระนาบของหน้าตัดก่อนและหลังรับแรงบิดคงเดิม ดังท่อนวัสดุในรูป นั้นไม่เป็นความจริงอีกต่อไป เนื่องจากหน้าตัดจะบิดเบี้ยวจากเดิมมาก (Warping) ตัวอย่างเช่น ท่อนวัสดุที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส เป็นต้น



รูปที่ 2.1 ระนาบของหน้าตัดสี่เหลี่ยมเมื่อใส่แรงบิด

การคำนวณแรงเค้นและมุมบิดในท่อนวัสดุที่มีหน้าตัดที่ไม่เป็นวงกลมต้องอาศัยวิธีการทางคณิตศาสตร์ โดยสูตรการคำนวณค่าแรงเค้นและมุมบิดในท่อนวัสดุที่มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจากในรูปดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตาราง 2.1 สัมประสิทธิ์สำหรับหน้าตัดสี่เหลี่ยมเมื่อมีแรงบิด

a/b	$C_1$	$C_2$
1.0	0.208	0.1406
1.2	0.219	0.1661
1.5	0.231	0.1958
2.0	0.246	0.229
2.5	0.258	0.249
3.0	0.267	0.263
4.0	0.282	0.281
5.0	0.291	0.291
10.0	0.312	0.312
$\infty$	0.333	0.333

$$\tau_{\max} = \frac{T}{C_1 ab^2}$$

$$\phi = \frac{TL}{C_2 ab^3 G}$$

สำหรับ  
โดย

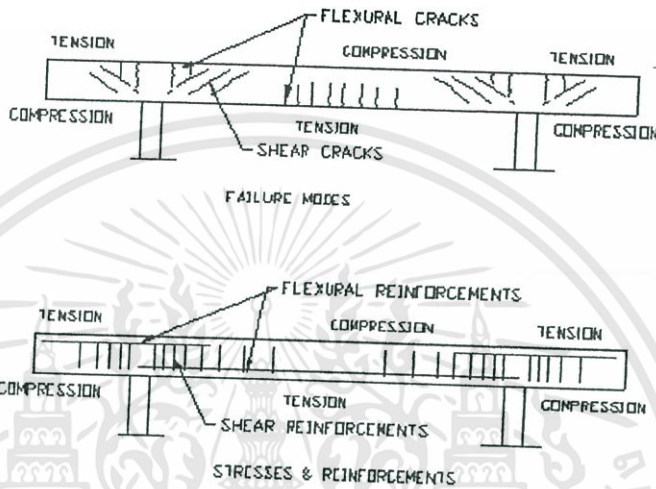
$$\frac{a}{b} \geq 5, C_1 = C_2 = \frac{1}{3} \left( 1 - \frac{0.630b}{a} \right)$$

- $\tau$  คือ แรงคั้นเฉือน
- $T$  คือ โมเมนต์บิดภายนอก
- $C_1, C_2$  คือ สัมประสิทธิ์หรือค่าคงที่ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของด้านยาว  $a$  และด้านกว้าง  $b$  ของหน้าตัด
- $L$  คือ ความยาวของท่อนวัสดุ
- $\phi$  คือ มุมบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 คานคอนกรีตเสริมเหล็ก

คานเป็นองค์อาคารที่มีหน้าที่รับน้ำหนักมาจากพื้น ผนัง กำแพง หรือคานด้วยกันแล้วถ่ายต่อไปยังเสาที่รองรับ มักจะมีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือตัวที นิยมใช้วัสดุเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก คานคอนกรีตเสริมเหล็กประกอบด้วยคอนกรีตซึ่งรับแรงอัดเป็นหลัก และเหล็กเสริม ซึ่งใช้ในการรับแรงดึงโดยมีระยะหุ้มเพื่อป้องกันผลกระทบจากไฟไหม้และการกัดกร่อน



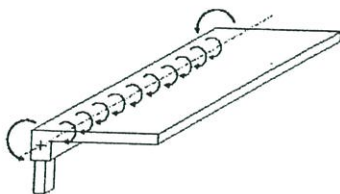
รูปที่ 2.2 การแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.1.3 กำลังต้านทานแรงบิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

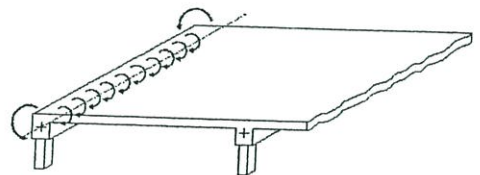
เมื่อน้ำหนักบรรทุกหรือแรงกระทำบนคานไม่ผ่านจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัด (Shear center) จะเกิดแรงบิดขึ้น ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

Primary Torsion หรือ Equilibrium Torsion เกิดในโครงสร้างตีเทอร์มิเนท ซึ่งหากไม่นำมาพิจารณาจะทำให้โครงสร้างพังเสียหาย เนื่องจากความไม่สมดุล

Secondary Torsion หรือ Compatibility Torsion เกิดในโครงสร้างอินดีเทอร์มิเนท เช่น คานขอบนอกที่รองรับพื้น ซึ่งหากไม่นำมาพิจารณาจะทำให้เกิดรอยร้าวแต่ยังไม่พังในทันที โดยทั่วไปแรงบิดในโครงสร้างมักเกิดขึ้นพร้อมกับแรงดัดและแรงเฉือน



(ก) Primary Torsion



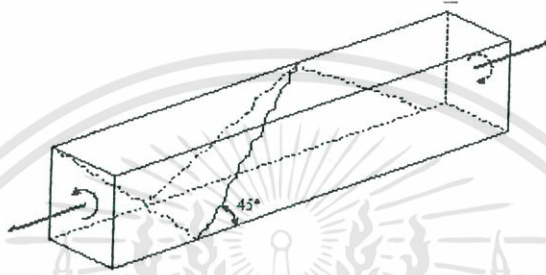
(ข) Secondary Torsion

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ รูปที่ 2.3 แรงบิดในคาน ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3.1 กำลังต้านทานแรงบิดอย่างเดียวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ( $T_n$ )

คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ประกอบด้วยเหล็กตามยาว และ เหล็กตามขวาง ซึ่งอาจจะเป็นเหล็กปลอก หรือเหล็กปลอกเกลียวที่มีระยะเหมาะสม จะทำให้กำลังต้านทานแรงบิดอย่างเดียว (Pure torsion) สูงขึ้น ซึ่งกำลังต้านทานแรงบิดอย่างเดียวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กประกอบด้วย กำลังต้านแรงบิดที่ได้จากคอนกรีต ( $T_0$ ) และกำลังต้านทานแรงบิดที่ได้จากเหล็กเสริมตามขวาง ( $T_s$ )

- กำลังต้านแรงบิดอย่างเดียวที่ได้จากคอนกรีต ( $T_0$ )



รูปที่ 2.4 กำลังต้านแรงบิดอย่างเดียวที่ได้จากคานคอนกรีตคอนกรีตจะเริ่มแตกร้าวเมื่อแรงบิดมีค่าอย่างน้อย :

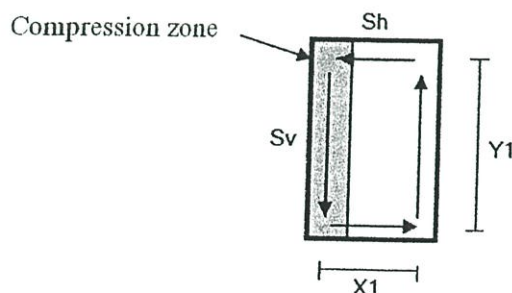
$$T_{cr} = 1.6\sqrt{f'_c} \frac{x^2y}{3} \quad \text{kg}\cdot\text{cm}$$

มีลักษณะรอยร้าวเอียงทำมุม  $45^\circ$  กับแนวคาน แต่รอบร้าวที่ปรากฏจริงมีหลายๆรอย เมื่อคอนกรีตร้าวทางด้านหน้าแล้ว จะแผ่ไปยังด้านบนและด้านล่างของคานโดยทำมุมเอียง  $\theta$  ประมาณ  $45^\circ - 90^\circ$  กับแนวคาน แต่ยังคงเหลือบางส่วนของคอนกรีตบนผิวเอียงที่ยังไม่แตกร้าวเนื่องจากรับแรงอัด (Compression zone) อันเนื่องมาจากแรงบิด พบว่า กำลังต้านแรงบิดที่ได้จากคอนกรีตส่วนนี้มีค่าครึ่งหนึ่งของกำลังต้านแรงบิดของคานเมื่อยังไม่แตกร้าว แต่เพื่อความปลอดภัยคิดว่าส่วนนี้มีกำลังต้านแรงบิด 80%

$$T_0 = 0.80(0.5T_{cr}) \approx 0.63\sqrt{f'_c} \frac{x^2y}{3} \quad \text{kg}\cdot\text{cm}$$

- กำลังต้านทานแรงบิดอย่างเดียวที่ได้จากเหล็กเสริมตามขวาง ( $T_s$ )

เมื่อคานเกิดการร้าว เหล็กเสริมตามขวางจะเริ่มช่วยต้านแรงบิดจนกว่าจะถึงจุดคราก คานจึงจะพังโดยคอนกรีตด้าน Compression zone ถูกอัดแตก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้ง

การหาค่ากำลังต้านแรงบิดของเหล็กเสริมตามขวาง ได้จาก ผลรวมของกำลังต้านแรงบิดของขา ที่อยู่ในแนวนอนและแนวตั้ง

$$T_s = T_h + T_v$$

$$T_s = \alpha_t \frac{x_1 y_1}{s} A_t f_y$$

โดย 
$$\alpha_t = 0.66 + 0.33 \frac{x_1}{y_1} \leq 1.5$$

ดังนั้น กำลังต้านทานแรงบิดอย่างเดียวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีค่า

$$T_n = T_0 + T_s$$

$$T_n = 0.63 \sqrt{f_c} \frac{x^2 y}{3} + \alpha_t \frac{x_1 y_1}{s} A_t f_y \quad \text{kg}\cdot\text{cm}$$

โดย 
$$A_t \leq 2 A_t \frac{x_1 y_1}{s}$$

### 2.1.3.2 กำลังต้านทานแรงบิดและแรงเฉือนจากการตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

เมื่อส่วนโครงสร้างอาคารอย่างเช่น คาน , เสา เป็นต้น ต้องรับแรงบิดนอกเหนือจากแรงดัด และแรงเฉือนตามปกติ ผลของแรงบิดที่กระทำ คือทำให้ด้านหนึ่งของคานต้องรับแรงเฉือนเพิ่มมากขึ้น และยังเป็นผลให้คานด้านนั้นแตกร้าวกว่าอีกด้านหนึ่ง นั่นคือ ตัวคอนกรีตจะสามารถรับแรงหรือต้านทานแรงเฉือนได้น้อยลงกว่าเดิม เพราะฉะนั้นจึงต้องหาค่ากำลังต้านทานของคอนกรีตเมื่อรับแรงบิดร่วมกับแรงเฉือนจากการดัด ( $T_c$ ) และ หาค่ากำลังต้านทานแรงบิดของเหล็กเสริมตามขวาง ( $T_s$ )

เมื่อคานคอนกรีตล้วนรับแรงบิดร่วมกับแรงเฉือนที่เกิดจากการดัด กำลังต้านทานของคอนกรีตต่อแรงเฉือน ( $V_c$ ) และต่อแรงบิด ( $T_c$ ) สามารถพิจารณาได้จากสมการ ดังนี้

$$\left(\frac{V_c}{V_0}\right)^2 + \left(\frac{T_c}{T_0}\right)^2 = 1.0$$

เมื่อ  $V_0$  = กำลังต้านทานสูงสุดของคอนกรีตเมื่อรับแรงเฉือนเพียงอย่างเดียว

$$= 0.53 \sqrt{f_c} b_w d \quad \text{kg.}$$

$T_0$  = กำลังต้านทานสูงสุดของคอนกรีตเมื่อรับแรงบิดเพียงอย่างเดียว

$$= 0.63 \sqrt{f_c} \frac{x^2 y}{3} \quad \text{kg}\cdot\text{cm}$$

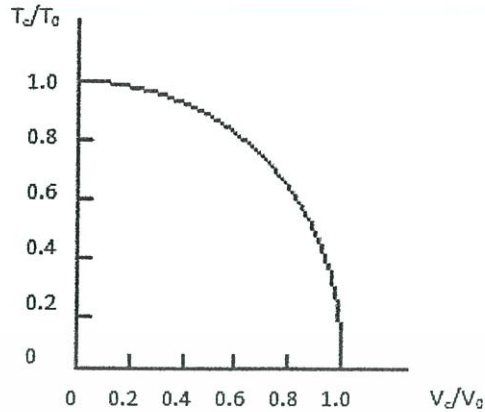
$V_c$  = กำลังต้านทานแรงเฉือนสูงสุดของคอนกรีตเมื่อต้องรับแรงร่วมกัน kg.

$T_c$  = กำลังต้านทานแรงบิดสูงสุดของคอนกรีตเมื่อต้องรับแรงร่วมกัน kg-cm

จากสมการจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับแรงเฉือนที่เกิดจากการดัด เป็นลักษณะของ

โค้งวงกลม (circular-interaction equation) ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์แบบโค้งวงกลมระหว่างแรงบิดกับแรงเฉือนของคอนกรีต

โดยจากรูปจะพบว่าเมื่อคานรับแรงบิด จะทำให้คอนกรีตมีกำลังต้านทานแรงเฉือนลดลง จากมาตรฐาน ว.ส.ท. หรือ ACI ได้กำหนดว่า ถ้าหากแรงบิดมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $\frac{5}{8}T_0$  หรือ  $0.13\sqrt{f_c}x^2y$  kg-cm ให้ถือว่าไม่พิจารณาผลของแรงบิด

การพิจารณากำลังต้านทานแรงเฉือนสูงสุด ( $V_c$ ) และกำลังต้านทานแรงบิดสูงสุด ( $T_c$ ) ของคอนกรีตเมื่อต้องรับแรงบิดร่วมกับแรงเฉือนที่เกิดจากการตัด เมื่อคานคอนกรีตรับแรงเฉือน ( $V_u$ ) จากการตัด และแรงบิด ( $T_u$ ) จะได้กำลังต้านทานแรงเฉือนสูงสุด ( $V_c$ ) และกำลังต้านทานแรงบิดสูงสุด ( $T_c$ ) ของคอนกรีต ดังนี้

$$V_c = \frac{0.53\sqrt{f_c}b_wd}{\sqrt{1+(2.5C_t\frac{T_u}{V_u})^2}} \quad \text{kg.}$$

$$T_c = \frac{0.21\sqrt{f_c}x^2y}{\sqrt{1+(\frac{0.4V_u}{C_tT_u})^2}} \quad \text{kg.cm}$$

แต่ การพิจารณากำลังต้านทานแรงบิดร่วมกับแรงเฉือนจากการตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก อาศัยหลักการ 2 ข้อต่อไปนี้

1. ให้กำลังต้านแรงบิดของคานคอนกรีตในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่เสริมเหล็กทางขวางแบบวงปิด มีค่าเท่ากับกำลังต้านทานแรงบิดของคอนกรีตที่พิจารณาได้จากสมการ

$$T_c = \frac{0.21\sqrt{f_c}x^2y}{\sqrt{1+(\frac{0.4V_u}{C_tT_u})^2}} \quad \text{kg.cm}$$

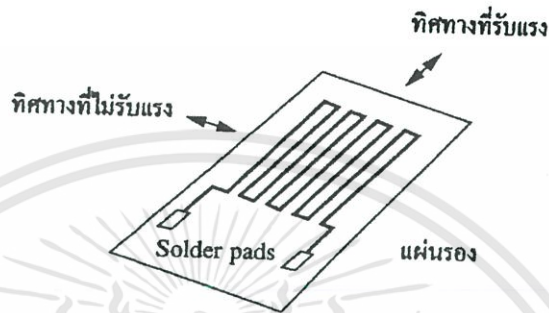
2. ให้เหล็กเสริมทางขวางแบบวงปิดรับแรงบิดส่วนที่เกินกำลังต้านทานแรงบิดของคอนกรีต

ดังนั้น จะได้กำลังต้านทานแรงบิดของคอนกรีตที่เสริมเหล็กตามยาว และตามขวางเมื่อรับแรงเฉือนจากการตัดด้วย ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_n = T_c + T_s = \frac{0.21\sqrt{f_c x^2 y}}{\sqrt{1 + \left(\frac{0.4V_u}{c_t T_u}\right)^2}} + \alpha_t \frac{x_1 y_1}{s} A_t f_y \quad \text{kg.cm}$$

#### 2.1.4 การวัดค่าความเครียด



รูปที่ 2.7 Strain Gauge

สเตรนเกจ (Strain Gauge) คือเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดแรงดึงเครียด (Strain) ของวัสดุ ส่วนใหญ่สเตรนเกจ จะทำจากเส้นลวดโลหะขนาดเล็กขดเป็นรูปร่างต่างๆ อยู่บนแผ่นฉนวน

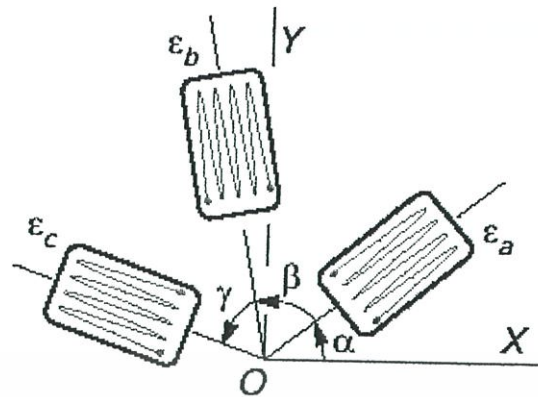
หลักการของสเตรนเกจ คือ เมื่อสเตรนเกจถูกแรงกระทำ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไป (ยืด หด บิด งอ) ทำให้ความต้านทานของวัสดุนั้นเปลี่ยนไปตามแรงที่กระทำ การนำไปใช้จะใช้การต่อวงจร Wheatstone bridge เพื่อหาความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าเมื่อความต้านทานเปลี่ยนแปลงไป โดยจะมีโปรแกรมประมวลผลออกมาเป็นค่า การยืดหดในแนวแกนของวัตถุที่นำไปติดซึ่งจะได้ความเครียด

$$\epsilon_{AB} = \frac{\delta}{L}$$

การวัดค่า  $\epsilon_x$  และ  $\epsilon_y$  สามารถหาได้โดยการติด Strain gauge ในแนวแกน x และแนวแกน y ที่ลากผ่านจุดที่ต้องการวัดตามปกติ และ strain gauge ตัวที่สามจะตั้งวางทำมุมกับแกน x และแนวแกน y เรียกการติดสเตรนเกจในลักษณะนี้ว่า สเตรนโรเซต (Strain Rosette) เพื่อจะหาค่า  $\gamma_{xy}$  ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\begin{aligned}\epsilon_1 &= \epsilon_x \cos^2 \theta_1 + \epsilon_y \sin^2 \theta_1 + \gamma_{xy} \sin \theta_1 \cos \theta_1 \\ \epsilon_2 &= \epsilon_x \cos^2 \theta_2 + \epsilon_y \sin^2 \theta_2 + \gamma_{xy} \sin \theta_2 \cos \theta_2 \\ \epsilon_3 &= \epsilon_x \cos^2 \theta_3 + \epsilon_y \sin^2 \theta_3 + \gamma_{xy} \sin \theta_3 \cos \theta_3\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 Strain Rosette

## 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 Load capacity and stiffness of angular cross section reinforced concrete beams under torsion by M. KAMI\_SKI, W. PAWLAK

งานวิจัยเน้นเรื่องความสามารถในการรับน้ำหนักและ Stiffness ของชิ้นส่วนของคานารูปตัว L และรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยแบ่ง การทดลองเป็น 2 ชุด คือ 1 ใส่แรงบิดอย่างเดียว และ 2 ใส่แรงบิด , แรงเฉือน, และแรงดัด

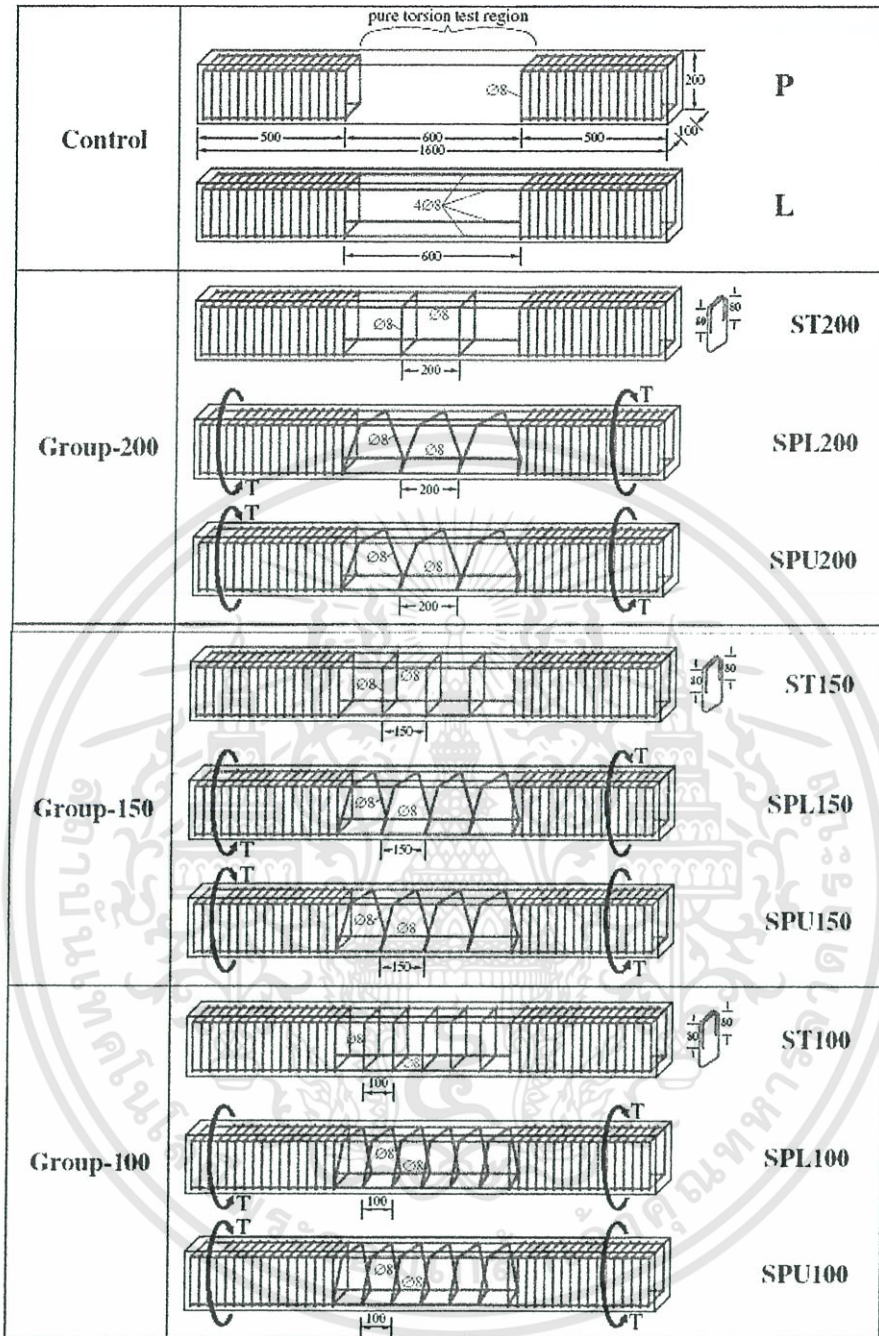
ในการทดลองคานาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใส่แรงบิดเพียงอย่างเดียวใช้ตัวอย่างขนาดหน้าตัด 300x250 mm ยาว 3500 mm โดยเก็บข้อมูลเป็น แรงบิด และ มุมบิด ได้ผลสรุปดังนี้

- หน้าตัดตัว L มีค่ามุมบิดน้อยกว่ารูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แม้ว่าโมเมนต์บิดของตัว L จะมีค่ามากกว่าก็ตาม
- ในกรณีแรงบิดอย่างเดียว หน้าตัดตัว L มีค่าโมเมนต์บิดมากกว่าหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า เล็กน้อย
- ในกรณีแรงบิดแรงเฉือน และแรงดัด หน้าตัดตัว L มีค่าโมเมนต์บิดน้อยกว่าหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าเนื่องจากผลของแรงดัด ในกรณีที่ความสูงของหน้าตัดมีความสำคัญมาก
- ในกรณีแรงบิดและแรงดัด การลดลงของ stiffness มากกว่าการใส่แรงบิดอย่างเดียว

2.2.2 Experimental investigation of RC beams with rectangular spiral reinforcement in torsion by Constantin E. Chalioris , Chris G. Karayannis

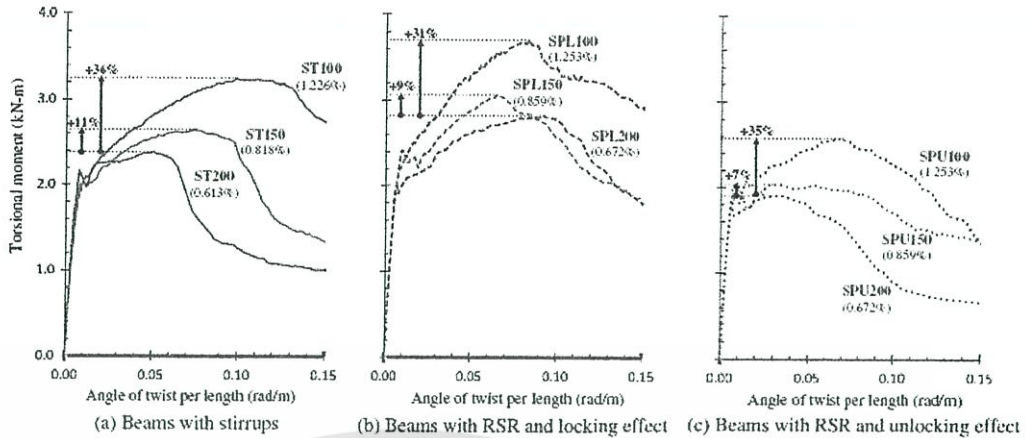
การวิจัยทดลองเกี่ยวกับการเสริมเหล็กปลอกเกลียวที่ระยะห่างต่างๆกันโดยเปรียบเทียบกับเหล็กปลอกเดี่ยวและไม่มีเหล็กปลอก ทั้งยังเปรียบเทียบเมื่อใส่แรงบิดในทิศทางคลายเกลียวและทิศที่ทำให้เกลียวแน่นขึ้นไปพร้อมๆกัน ตัวอย่างการทดลองเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัด 100x200 mm ยาว 1600 mm เหล็กแกนนอนเป็นเหล็กข้ออ้อย 4Ø8 mm เหล็กปลอกเป็นเหล็กกล้าละมุน Ø8 mm โดยเก็บผลเป็นค่าแรงบิดและมุมบิด มีผลสรุปดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนมัธยมศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 รูปแบบและการจัดเรียงเหล็กเสริมในตัวอย่างการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 อิทธิพลของอัตราส่วนเหล็กตามขวางเมื่อตัวอย่างมีแรงบิด

- การใส่แรงบิดในทิศทางคลายเกลียว หรือ ทิศที่ทำให้เกลียวแน่นขึ้นมีผลอย่างมากต่อพฤติกรรมโดยรวมเมื่อคานรับแรงบิด โดยการบิดในทิศที่ทำให้เกลียวแน่นขึ้นจะเพิ่มความสามารถรับแรงบิด และเพิ่มจุดสูงสุดภายหลัง (post peak performance) เมื่อเทียบกับเหล็กปลอกเดี่ยวธรรมดาที่มีปริมาณเท่ากัน และเหล็กปลอกเกลียวในทิศทางคลายเกลียว ทำให้แรงบิดเพิ่มขึ้น 14-18%
- ในกรณีที่ใช้แรงบิดในทิศทางคลายเกลียวของเหล็กปลอกเกลียว ความสามารถในการรับแรงบิดลดลง 19-23% และมีเศษแตกหักของคอนกรีตมากกว่าแบบเหล็กปลอกเดี่ยวธรรมดา เนื่องจากการเลื่อนของมุมแตกหักที่เพิ่มขึ้นในกรณีเหล็กปลอกเกลียวที่มีแรงบิดในทิศคลายเกลียว ประสิทธิภาพของเหล็กปลอกเกลียวจะลดลงเพราะว่าในกรณีนี้ การเอียงของรอยแตกเนื่องจากแรงบิดและทิศทางของเกลียว อยู่ห่างกันจากระยะปกติ
- การเพิ่มของปริมาณเหล็กปลอกทั้ง 3 แบบ (ปลอกเดี่ยว ปลอกเกลียวแบบบิดตามเกลียว และบิดคลายเกลียว) ทำให้ความสามารถรับแรงบิดเพิ่มขึ้น
- จากการสังเกตการณ์เปรียบเทียบจากผลการทดลองพบว่ามีความเหมือนกันระหว่างพฤติกรรมรับแรงบิดหรือ แรงบิดพิบัติของคานที่ทดสอบแบบใส่เหล็กปลอกเกลียวแบบบิดคลายเกลียว และคานแบบใส่เหล็กปลอกเดี่ยวที่มีจำนวนน้อยกว่า

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1. กล่าวนำ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาพฤติกรรมของคานเมื่อรับแรงบิด โดยจะทำการศึกษาพฤติกรรมการแตก การรับแรงบิดในแบบจำลองโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยทำการเปรียบเทียบ ลักษณะการพัง จาก น้ำหนักที่ใส่ไป กับค่ามุมที่เปลี่ยนไป นอกจากนี้ยังทำการศึกษาแรงที่เกิดขึ้นภายใน จากการติด Strain gauge เพื่อนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์ แล้วนำไปใช้ทำนายการพังของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแต่ละลักษณะได้ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึง ขั้นตอนทั้งหมดในการดำเนินการวิจัย

#### 3.2 การทดสอบวัสดุของแบบจำลอง

จากการที่เครื่องทดสอบที่มีอยู่แล้วนำมาปรับปรุง มีหัวจับหน้าตัดขนาด  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  หน้าตัดของแบบจำลองจึงมีหน้าตัดขนาด  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  ทำให้ต้องมีการเลือกวัสดุที่เหมาะสมกับขนาดของแบบจำลอง โดยมีส่วนประกอบดังนี้

1. คอนกรีต ใช้คอนกรีตที่มีขนาดมวลรวมขนาดโตสุดไม่เกิน 7 mm
2. เหล็กแกนแนวนอน ใช้ลวดเหล็กขนาด 2.6 mm
3. เหล็กปลอก ใช้ลวดเหล็ก ขนาด 1.6 mm

##### 3.2.1 การทดสอบส่วนผสมและคุณสมบัติของคอนกรีตก่อนการนำไปใช้

1.) การทดสอบส่วนผสมคอนกรีตโดยการคำนวณตามวิธี Mixed design เพื่อให้ได้กำลัง  $150 \text{ kg/cm}^2$  ซึ่งได้ส่วนผสมดังนี้

Cement	230.00 $\text{kg/m}^3$
Water	287.50 $\text{kg/m}^3$
Coarse Aggregate	450.00 $\text{kg/m}^3$
Fine Aggregate	1302.05 $\text{kg/m}^3$

2.) ลองผสมอัตราส่วนที่ได้และนำไปบ่มที่ 28 วัน แล้วนำไปทดสอบกำลังคอนกรีต

ตาราง 3.1 ตารางทดสอบกำลังคอนกรีตก่อนผสมจริง

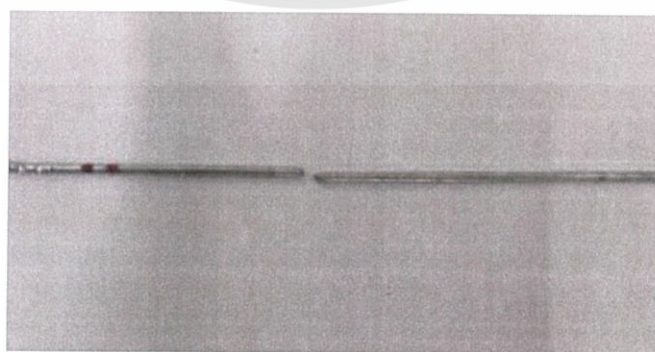
No	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (kg)	Ultimate Load (kN)	Area (cm <sup>2</sup> )	Compression Strength (kg/cm <sup>2</sup> )
1	15.15	30.50	11.96	257.20	180.27	145.44
2	15.14	30.00	11.95	282.40	180.03	159.90
3	15.15	30.3	11.96	271.50	180.27	153.53
Average						152.96

## 3.2.2 การทดสอบคุณสมบัติของลวดเหล็ก

นำเหล็กที่จะใช้ทำแบบจำลองโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กไปทดสอบหาคุณสมบัติซึ่งใช้ลวดเหล็กขนาด 1.6 และ 2.6 mm



รูปที่ 3.1 แสดงการทดสอบแรงดึงกับลวดขนาด 2.6 mm

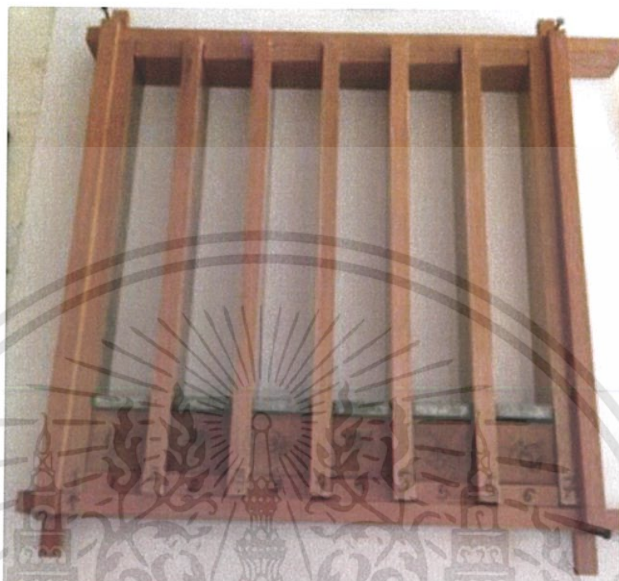


รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างลวดเหล็กขนาด 2.6 mm ที่ถูกดึงขาดจากการทดสอบแรงดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3. ขั้นตอนการเตรียมแบบจำลองก่อนทดสอบ

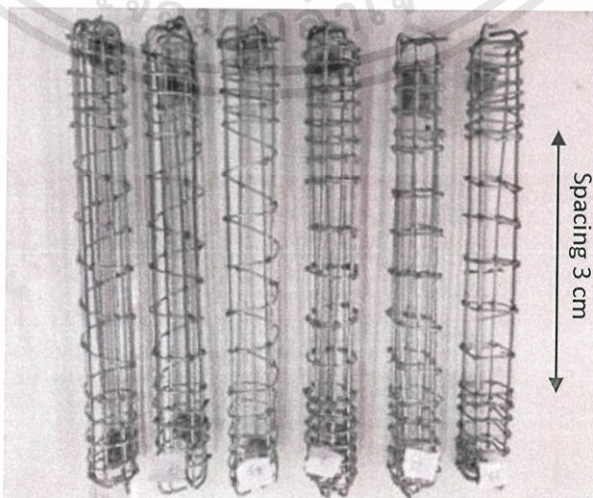
#### 1. ทำแบบหล่อคอนกรีต



รูปที่ 3.3 ไม้แบบใช้หล่อแบบจำลองขนาด  $5 \times 5 \times 34 \text{ cm}^3$

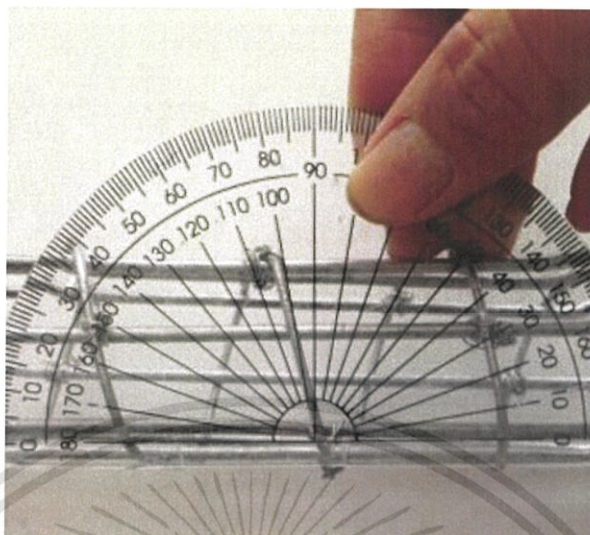
#### 2. ทำแบบโครงสร้างเหล็ก ประกอบด้วย

- ปลอกเดี่ยว มีเหล็กแกน 4 เส้น , 8 เส้น และ 8 เส้นเรียงกันเป็นรูปวงกลม
  - ปลอกเกลียวตามเข็มนาฬิกา มีเหล็กแกน 4 เส้น , 8 เส้น และ 8 เส้นเรียงกันเป็นรูปวงกลม
  - ปลอกเกลียวทวนเข็มนาฬิกา มีเหล็กแกน 4 เส้น
- โดยการทำโครงสร้างเหล็กจะทำ Spacing 3 cm ตรงส่วนกลาง และ บริเวณปลายจะทำ Spacing 1 cm เพื่อกำหนดให้ช่วงบริเวณกลางเป็นช่วงแสดงการแตกร้า



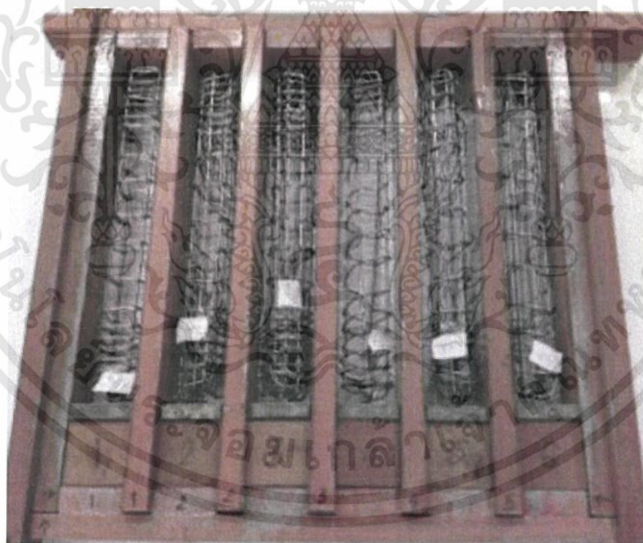
รูปที่ 3.4 โครงสร้างเหล็กก่อนนำไปหล่อกับคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 มุมของเหล็กปลูกเกลียว ซึ่งมีมุมเท่ากับ 80 องศา

3. เมื่อเตรียมโครงสร้างเหล็กเรียบร้อยแล้ว ก็จะนำมาหล่อทับคอนกรีตเป็นแบบจำลอง โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังรูป



รูปที่ 3.6 แบบจำลองก่อนเทคอนกรีต

4. เตรียมมวลรวม โดยแบ่งเป็น

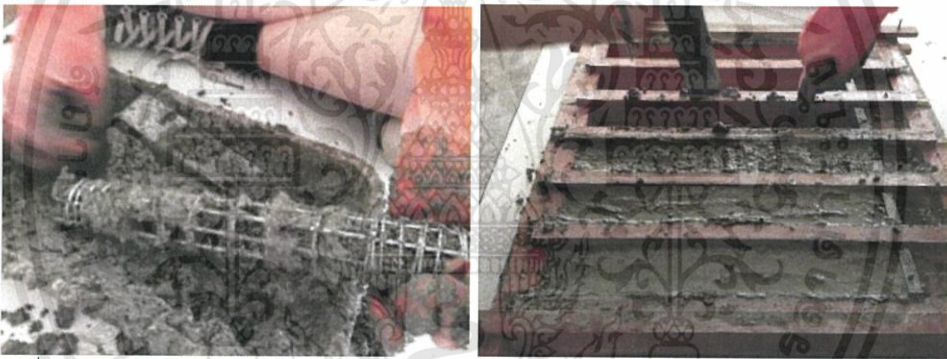
- มวลรวมหยาบ ใช้หินเกร็ดที่ผ่านตะแกรงเบอร์  $\frac{1}{4}$ " และค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 นำไปล้าง ฝุ่นให้สะอาด และใช้ผ้าแห้งซับทำให้หินอยู่ในลักษณะอิมตัวผิวแห้ง
- มวลรวมละเอียด ที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 นำไปอบให้แห้ง และทำให้ทรายอยู่ในลักษณะ อิมตัวผิวแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

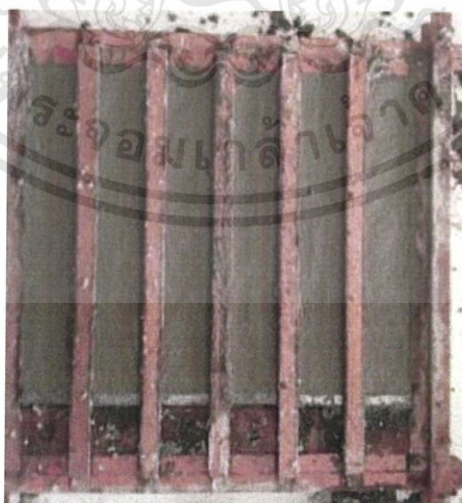


รูปที่ 3.7 การทดสอบความอึดตัวของมวลรวมละเอียด

5. นำส่วนผสมที่เตรียมไว้ไปผสมตามขั้นตอนการผสมคอนกรีต เทคอนกรีตลงแบบหล่อ โดยก่อนเทลงแบบ ก็จะใช้คอนกรีตเข้าไปในแบบโครงสร้างเหล็กให้ทั่วก่อน เพื่อเป็นการเป็นรูโพรงในโครงสร้างเหล็ก ขณะเทคอนกรีตก็จะทำการจี้คอนกรีตรอบข้างไปด้วยเพื่อไม่ให้มีรูในแบบจำลอง จากนั้นก็จะปาดหน้าคอนกรีตเพื่อให้หน้าคอนกรีตเรียบ ดังรูป



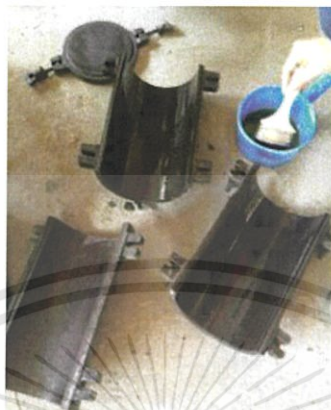
รูปที่ 3.8 การใส่คอนกรีตเข้าไปในโครงสร้างเหล็กและขณะทำการปาดหน้าคอนกรีตให้เรียบ



รูปที่ 3.9 โครงสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเมื่อปาดหน้าเรียบเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ในขณะที่คอนกรีตลงแบบจำลองคาน ก็จะทำคอนกรีตลงแบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอก ตามมาตรฐาน ASTM ไปพร้อมกันด้วย เนื่องจากจะได้นำคอนกรีตรูปทรงกระบอกไปทดสอบหาค่ากำลังของคอนกรีตได้ ดังรูป



รูปที่ 3.10 การเตรียมแบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอกตามมาตรฐาน ASTM



รูปที่ 3.11 แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กก่อนนำไปบ่ม

7. ทิ้งคอนกรีตที่ผสมแล้วไว้ 1 วันก่อนจะถอดแบบ
8. นำแบบจำลองโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กและคอนกรีตรูปทรงกระบอกไปบ่มในบ่อบ่ม
9. เมื่อบ่มได้ตามที่กำหนดที่ 28 วัน ก็จะนำมาทดสอบกับแรงบิด และวิเคราะห์ลักษณะการพัง การรับแรง ในแต่ละโครงสร้างต่างๆ ส่วน คอนกรีตรูปทรงกระบอกก็จะนำไปทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 การเตรียมทดสอบแรงบิดกับแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็ก



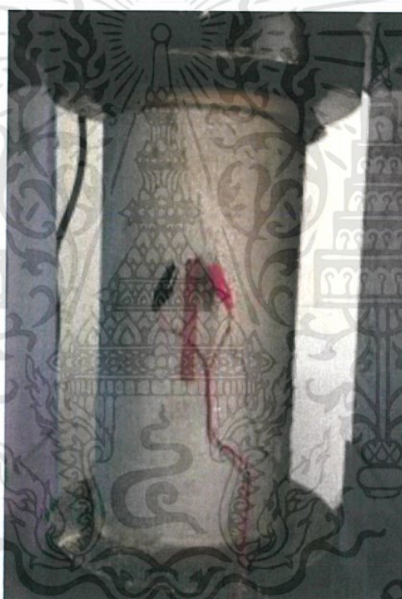
รูปที่ 3.13 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงของคอนกรีต

10. ทำการทดสอบ strain gauge เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ ของกราฟ stress กับ strain และนำมาวิเคราะห์ต่อ เพื่อทำนายการพังโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กในรูปแบบอื่นๆได้ โดยการติด strain gauge ที่แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็ก จะเป็นการติด 3 แกน ส่วนที่ คอนกรีตรูปทรงกระบอก จะเป็นการติดแบบแกนเดียว ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 การทดสอบแรงบิด ขณะติด Strain gauge ไปด้วย เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง stress กับ strain

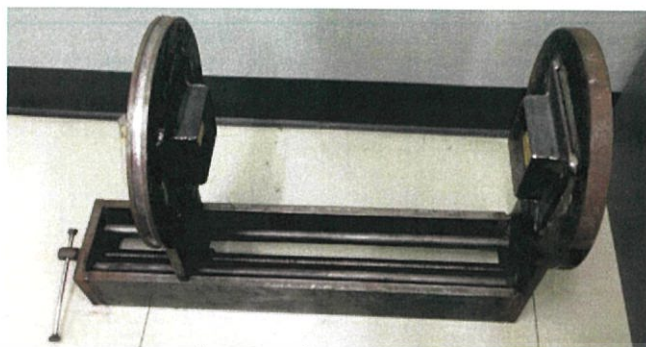


รูปที่ 3.15 การทดสอบแรงอัด ขณะติด Strain gauge ไปด้วย เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง stress กับ strain

### 3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

#### 3.4.1. เครื่องทดสอบแรงบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 เครื่องทดสอบแรงบิด

## 1). หลักการทำงานของเครื่องทดสอบแรงบิด

เครื่องทดสอบแรงบิดเป็นเครื่องมือที่ใช้สร้างแรงบิดให้กับแบบจำลองของคาน โดยปลายด้านหนึ่งของคานถูกยึดให้เข้ากับปากจับด้านยึดแน่น ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งถูกสอดเข้าไปในปากจับด้านหมุน โดยปากจับด้านหมุนถูกออกแบบให้มีลักษณะคล้ายรอก มีเชือกคล้องรอกผูกติดกับตะกร้าเพื่อแขวนน้ำหนักถ่วง โดยรัศมีของจานหมุนและน้ำหนักถ่วงจะก่อให้เกิดโมเมนต์บิดตามหลักการของโมเมนต์ กล่าวคือ โมเมนต์บิด (kg-cm.) = รัศมีของจานหมุน (cm.) x น้ำหนักถ่วง (kg.) ซึ่งก่อให้เกิดแรงบิดที่กระทำต่อแบบจำลอง

## 2). เครื่องทดสอบแรงบิดประกอบด้วยส่วนประกอบดังนี้

## 1. หน้าปัดอ่านองศา



รูปที่ 3.16 หน้าปัดอ่านองศา

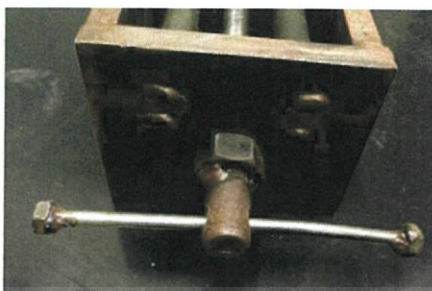
## 2. ปากจับแบบจำลอง



รูปที่ 3.17 ปากจับแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. สกรูปรับระยะห่างของชิ้นงาน



รูปที่ 3.18 สกรูปรับระยะห่างของชิ้นงาน

#### 3.4.2. ขาดังเครื่องทดสอบแรงบิดที่ปรับปรุงแล้ว



รูปที่ 3.19 ขาดังเครื่องทดสอบแรงบิด

### 3.5. ขั้นตอนการทดสอบ

#### 3.5.1. การทดสอบ

ในการวิจัยนี้แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ชุด ดังนี้

##### 1). การทดสอบชุดที่ 1

ทดสอบกำลังต้านทานแรงบิดและสังเกตพฤติกรรมแบบจำลองของคานคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวขนาด  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  โดยมีจำนวน 3 รูปแบบ คือ

1. เหล็กแกนนอน 4 เส้น จำนวน 5 ตัวอย่าง ( 1A )
2. เหล็กแกนนอน 8 เส้น จำนวน 5 ตัวอย่าง ( 1B )
3. เหล็กแกนนอนแบบจัดเป็นรูปวงกลม จำนวน 5 ตัวอย่าง ( 1C )

##### 2). การทดสอบชุดที่ 2

ทดสอบกำลังต้านทานแรงบิดและสังเกตพฤติกรรมของแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเกลียวขนาด  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  และใส่แรงบิดในทิศทำให้เกลียวแน่นขึ้น โดยมีจำนวน 3 รูปแบบ คือ

1. เหล็กแกนนอน 4 เส้น จำนวน 5 ตัวอย่าง ( 2A )
2. เหล็กแกนนอน 8 เส้น จำนวน 5 ตัวอย่าง ( 2B )
3. เหล็กแกนนอนแบบจัดเป็นรูปวงกลม จำนวน 5 ตัวอย่าง ( 2C )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3) การทดสอบชุดที่ 3

ทดสอบกำลังต้านทานแรงบิดและสังเกตพฤติกรรมแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน โดยใช้เหล็กปลอกเกลียวขนาด  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  และใส่แรงบิดในทิศทำให้เกลียวคลายลง โดยใช้เหล็กเสริม 4 เส้น จำนวน 5 ตัวอย่าง ( D )

#### 3.5.2. วิธีการทดสอบ

การวิจัยมีวิธีการทดสอบดังนี้

1. นำแบบจำลองโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่นำไปบ่มตามกำหนด มาใส่ในเครื่องรับแรงบิด โดยพยายามไม่ให้บริเวณปากจับหัวคอนกรีตมีช่องว่าง
2. ทดสอบการรับแรงบิดของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบไม่ติด Strain gauge โดยเริ่มใส่น้ำหนักทีละ 10 kg , 5 kg , 2 kg และดูค่ามุมที่บิดไปทุกครั้ง ก่อนใส่น้ำหนักครั้งต่อไป พร้อมบันทึกค่าที่ได้ลงสมุดเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป
3. ทดสอบลูกปูนคอนกรีตรูปทรงกระบอกตามมาตรฐาน ASTM ที่บ่มได้ตามกำหนด โดยทดสอบการรับแรงอัด เพื่อหาค่ากำลังของคอนกรีต เพื่อนำค่าไปวิเคราะห์กับกำลังของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก
4. ทดสอบการรับแรงบิดของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบติด Strain gauge แบบ 3 แกน โดยเริ่มใส่น้ำหนักทีละ 10 kg , 5 kg , 2 kg ดูค่ามุมที่บิดไปทุกครั้งก่อนใส่น้ำหนักครั้งต่อไป และบันทึกค่าที่ได้จากการอ่านค่า Strain gauge พร้อมบันทึกค่าที่ได้ลงสมุดเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อ โดยติดตั้ง Strain gauge ทั้งหมด 7 ตัวอย่าง ชนิดละ 1 ตัวอย่าง
5. ทดสอบ กำลังรับแรงอัดของลูกปูนคอนกรีตรูปทรงกระบอกขณะโดยติด Strain gauge จำนวน 3 ตัวอย่าง เพื่อเปรียบเทียบ

### 3.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูล

ศึกษาทฤษฎีและตั้งสมมุติฐานถึงพฤติกรรมการรับแรงและการพังของคานคอนกรีต ศึกษา กำลังของวัสดุที่นำใช้ทดแทน ทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. จัดบันทึกลักษณะของแบบจำลองที่เปลี่ยนไป และค่ามุมที่เปลี่ยนไปจากการใส่น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ขณะทดสอบการรับแรงบิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งแบบติด Strain gauge และแบบที่ไม่ติด Strain gauge
2. นำผลจากการทดสอบมาวิเคราะห์ และเปรียบเทียบความต่างเนื่องจากโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต่างกัน โดยจะนำค่าเปรียบเทียบแรงบิดแตกหักของแต่ละตัวอย่าง มาหาค่าเฉลี่ยและเปรียบเทียบกัน
3. นำค่าโมเมนต์บิดและมุมที่เปลี่ยนไปมาสร้างกราฟความสัมพันธ์เพื่อดูพฤติกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นำค่าที่ได้จากการอ่านค่า Strain gauge มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Shearing stress และ Shearing strain และ หาค่า Modulus of rigidity,  $G$  ของวัสดุ



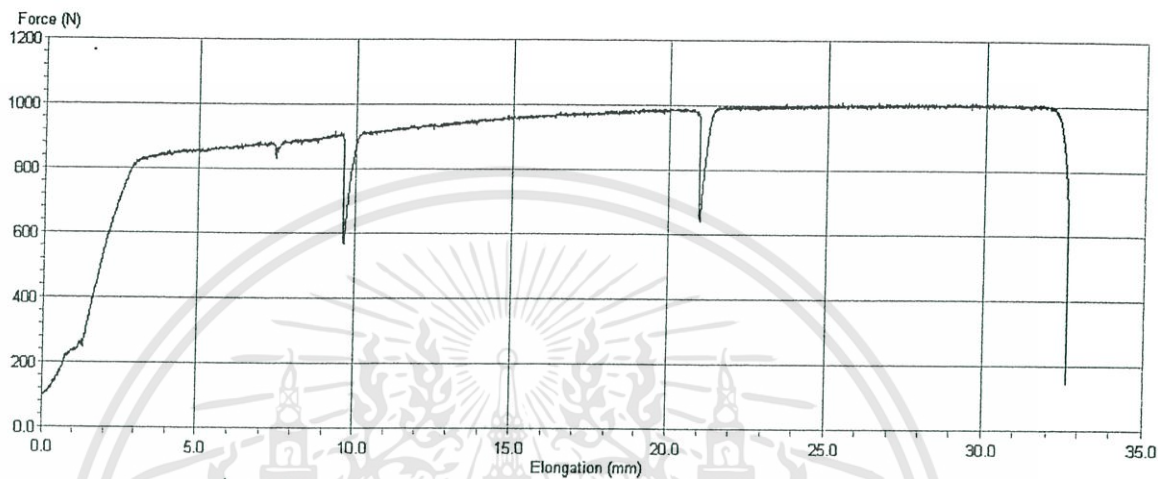
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

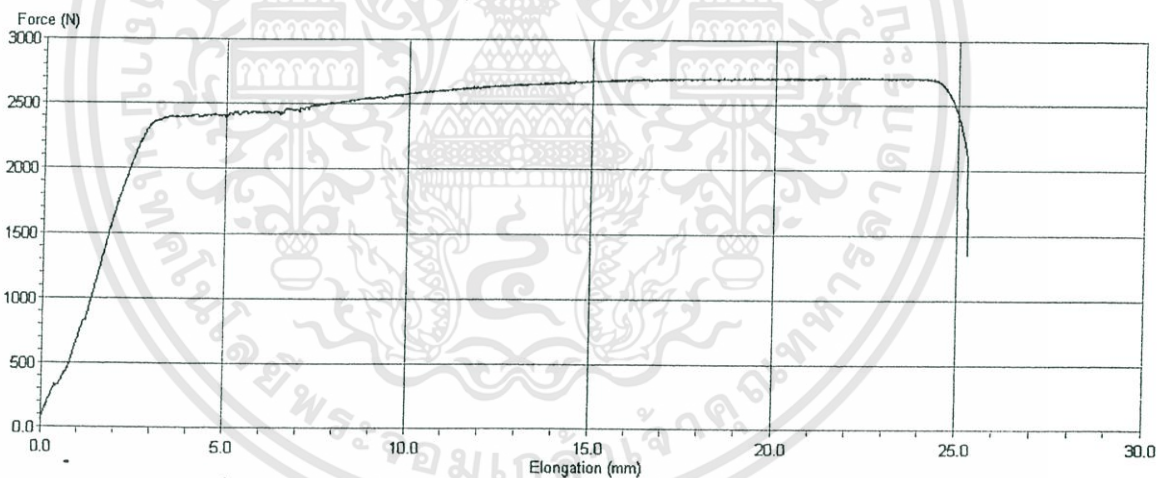
### ผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์

#### 4.1 ผลการทดสอบวัสดุ

##### 4.1.1 การทดสอบเหล็ก



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างกราฟทดสอบแรงดึงเส้นลวดขนาด 1.6 mm



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างกราฟทดสอบแรงดึงเส้นลวดขนาด 2.6 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.1 การทดสอบลวกเหล็กขนาด 1.6 mm และ 2.6 mm

Test No.	Stress @ Peak (MPa)	Elong. @ Peak (mm)	Elong. @ Yield (mm)	Stress @ L.O.P. (kN/mm)	Force @ Yield (kN)	$f_y$ (ksc)	Average $f_y$ (ksc)	E (ksc)
1.6-1	504.32	30.18	0.70	0.41	0.22	3650.34		304195.23
1.6-2	521.73	27.43	1.02	0.30	0.33	3853.14	3582.74	304195.23
1.6-3	476.97	26.95	0.90	0.12	0.24	3244.75		304195.23
2.6-1	521.54	23.34	5.60	0.28	2.40	4415.93		271995.73
2.6-2.1	491.40	28.82	9.10	0.13	2.21	4127.94	4332.73	239996.23
2.6-3	512.31	22.51	1.15	0.16	0.84	4454.33		287995.48

## 4.1.2 การทดสอบกำลังคอนกรีต

ตาราง 4.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (kg)	Ultimate Load (kN)	Area (cm <sup>2</sup> )	Compression Strength (ksc)	$E_c$ (ksc)
1.1	14.90	30.00	11.68	255.49	174.37	149.36	174048.60
1.2	15.20	30.30	11.69	250.17	181.46	140.54	156892.88
2.1	15.00	30.10	11.79	284.66	176.71	164.20	180656.56
2.2	15.10	30.40	11.87	301.52	179.08	171.63	180106.58
3.1	14.95	30.20	11.73	294.08	175.54	170.77	183591.07
3.2	15.24	30.30	11.79	299.92	182.41	167.60	172241.77
4.1	15.15	30.00	11.68	278.38	180.27	157.42	170067.08
4.2	15.01	30.00	11.76	308.67	176.95	177.82	187792.36
5.1	15.06	30.05	11.61	278.07	178.13	159.13	171990.34
5.2	15.02	29.95	11.64	293.38	177.19	168.78	180142.19
D1	15.00	30.20	11.68	283.32	176.71	163.43	176765.22
D2	15.05	30.00	11.67	284.47	177.89	163.01	176373.57
Average						165.68	177370.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### วิธีการคำนวณ

การหาโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต วิธี Secant Modulus คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นที่ลากจากจุดเริ่มต้นกับจุดใด ๆ ที่ต้องการหา ซึ่งมักพิจารณาที่จุดซึ่งมีหน่วยแรงอัดเท่ากับ 45% ของหน่วยแรงอัดสูงสุด ( $0.45 f_c'$ ) บนเส้นสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดโดยถือว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่หาโดยวิธีกานี้เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่แท้จริงของคอนกรีต ในช่วงใช้งาน มาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. กำหนดสูตรสำหรับหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต โดยให้ขึ้นกับกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดและหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ดังสมการ

$$E = 4270w_c^{1.5}\sqrt{f_c'}$$

$$E = 4270w_c^{1.5}\sqrt{165.68}$$

$$E = 177370.45 \text{ ksc}$$

จากสูตร

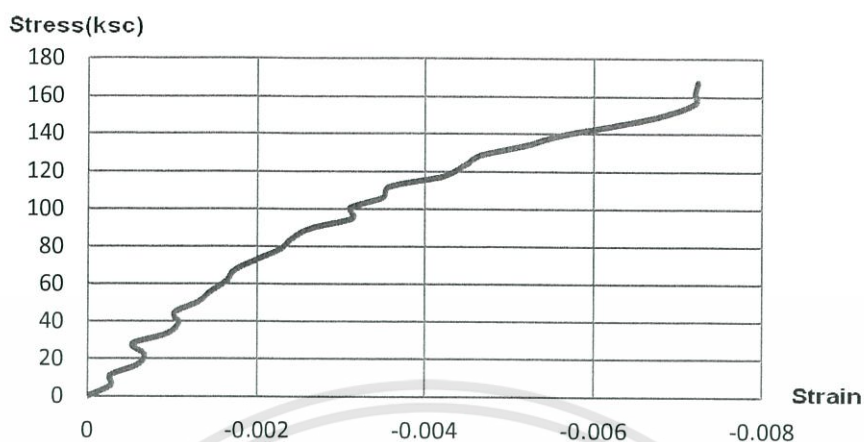
$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

$$G = \frac{177370.45}{2(1 + 0.20)}$$

$$G = 73904.354 \text{ ksc}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.3 การทดสอบคุณสมบัติคอนกรีตโดยติดตั้ง Strain Gauge



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างกราฟทดสอบคอนกรีตโดยติดตั้ง Strain Gauge

ตาราง 4.3 ผลทดสอบคอนกรีตโดยติดตั้ง Strain Gauge

Load (kN)	Strain gauge ( $\times 10^{-6}$ m )	Stress (ksc)	Strain	Load (kN)	Strain gauge ( $\times 10^{-6}$ m )	Stress (ksc)	Strain
0	0	0	0				
10	-82	5.59	-0.00027	160	-796	89.41	-0.00263
20	-83	11.18	-0.00027	170	-951	95.00	-0.00314
30	-178	16.76	-0.00059	180	-944	100.59	-0.00312
40	-202	22.35	-0.00067	190	-1064	106.18	-0.00351
50	-161	27.94	-0.00053	200	-1083	111.76	-0.00357
60	-284	33.53	-0.00094	210	-1274	117.35	-0.0042
70	-322	39.12	-0.00106	220	-1354	122.94	-0.00447
80	-308	44.71	-0.00102	230	-1412	128.53	-0.00466
90	-390	50.29	-0.00129	240	-1581	134.12	-0.00522
100	-437	55.88	-0.00144	250	-1713	139.70	-0.00565
110	-493	61.47	-0.00163	260	-1925	145.29	-0.00635
120	-521	67.06	-0.00172	270	-2085	150.88	-0.00688
130	-597	72.65	-0.00197	280	-2181	156.47	-0.0072
140	-687	78.23	-0.00227	290	-2181	162.06	-0.0072
150	-729	83.82	-0.00241	299.92	-2190	167.60	-0.00723

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### วิธีการคำนวณ

สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C469-94 สามารถหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตได้จากสมการ

$$E_s = \frac{\sigma_e - \sigma_0}{\varepsilon_e - 0.000050}$$

เมื่อ  $\sigma_0$  คือ หน่วยแรงที่ตัวอย่างทดสอบเกิดความเครียดกดอัดเท่ากับ  $50 \times 10^{-6}$  mm/mm

$\sigma_e$  คือ หน่วยแรงที่มีค่าประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ของหน่วยแรงกดอัดสูงสุด ( $\sigma_u$ )

$\varepsilon_e$  คือ ความเครียดกดอัดที่เกิดจากหน่วยแรง  $\sigma_e$

เมื่อ ตัวอย่างมี ความยาว 0.303 m และมีพื้นที่หน้าตัด  $182.41 \text{ cm}^2$

จาก  $\sigma_u = 167.6 \text{ ksc}$

$$\sigma_e = 40\%(\sigma_u)$$

$$\sigma_e = 0.40 \times 167.6$$

$$\sigma_e = 67.04 \text{ ksc}$$

$$\sigma_0 = -1.07 \text{ ksc}$$

จาก

$$E_s = \frac{\sigma_e - \sigma_0}{\varepsilon_e - 0.000050}$$

$$E_s = \frac{67.04 - (-1.07)}{0.001719 - 0.000050}$$

$$E_s = 40806.57 \text{ ksc}$$

จะพบว่าค่า Modulus of elastic (E) ที่ได้มีความคลาดเคลื่อน เมื่อเทียบกับวิธีการคิด ค่า E จาก วิธีแรก ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการแคปหัวที่ไม่ดี ผิดของการติดตั้ง Strain Gauge ไม่เรียบเพียงพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการทดสอบแรงบิด

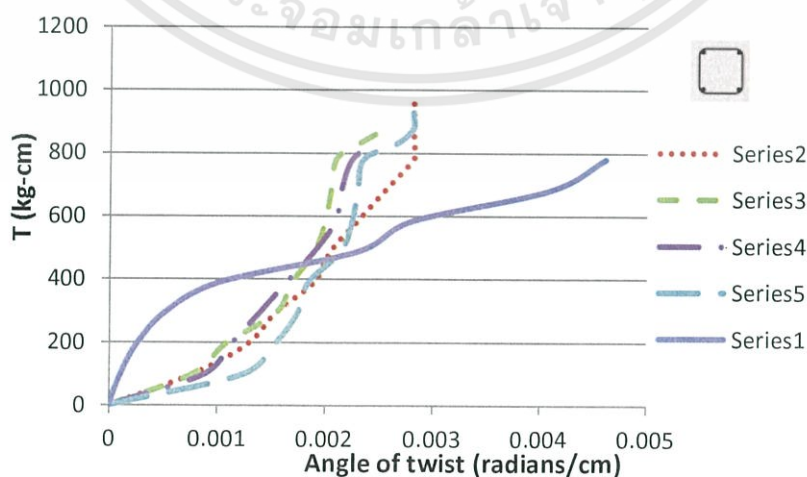
### 4.2.1 การทดสอบแรงบิด

#### 4.2.1.1 รูปแบบที่ 1

##### 1). เหล็กเสริม 4 เส้น (1A)

ตาราง 4.4 ผลทดสอบแรงบิดระหว่างแรงบิดและมุมหมุนของเหล็กปลอกเดี่ยว เหล็กแกน 4 เส้น (1A)

Weight (kg)	T (kg-cm)	Angle of twist (radians/cm)				
		1	2	3	4	5
0	0	0	0	0	0	0
10	97.50	0.000103	0.00077	0.00077	0.000873	0.001232
20	195.00	0.000257	0.00128333	0.001078	0.001129	0.00154
30	292.50	0.000513	0.00154	0.00154	0.001386	0.001745
40	390.00	0.001027	0.00189933	0.001694	0.001643	0.001848
50	487.50	0.00231	0.00205333	0.001899	0.001899	0.002156
60	585.00	0.002823	0.00230999	0.002002	0.002105	0.002259
70	682.50	0.004107	0.00256666	0.002053	0.002156	0.00231
80	780.00	0.00462	0.00282333	0.002105	0.002259	0.002361
90	828.75	**	0.00282333	0.00231	0.002464	0.002669
95	877.50		0.00282333	0.002567	*	0.002823
100	926.25		0.00282333	*		0.002823
105	975.00		0.00282333			0.002875
110	1023.75		*			*



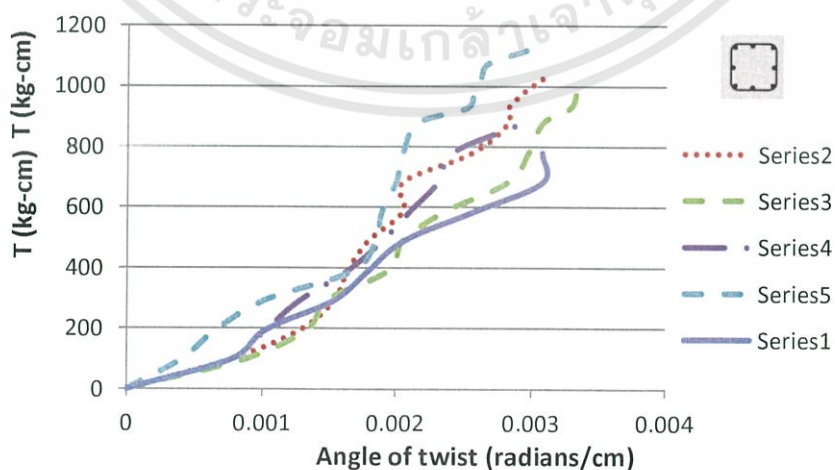
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิด (T) และ มุมบิด (Angle of twist) ของ 1A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) เหล็กเสริม 8 เส้น (1B)

ตาราง 4.4 ผลทดสอบแรงบิดระหว่างแรงบิดและมุมหมุนของเหล็กปลอกเดี่ยว เหล็กแกน 8 เส้น (1B)

Weight (kg)	T (kg-cm)	Angle of twist (radians/cm)				
		1	2	3	4	5
0	0	0	0	0	0	0
10	97.50	0.00077	0.00077	0.000873	0.00077	0.000411
20	195.00	0.0010267	0.001283	0.001335	0.001027	0.000667
30	292.50	0.00154	0.00154	0.001489	0.001283	0.001027
40	390.00	0.0017967	0.001643	0.001951	0.001643	0.001694
50	487.50	0.0020533	0.001797	0.002053	0.001899	0.001848
60	585.00	0.0025667	0.002053	0.002361	0.002105	0.001899
70	682.50	0.00308	0.002053	0.002823	0.00231	0.002002
80	780.00	0.00308	0.002567	0.002977	0.002413	0.002053
90	877.50	*	0.002823	0.00308	0.002926	0.002156
95	926.25		0.002823	0.003285	**	0.002515
100	975.00		0.002926	0.003337		0.002567
105	1023.75		0.00308	0.003388		0.002618
110	1072.50		**	**		0.002669
115	1121.25					0.002977
120						*



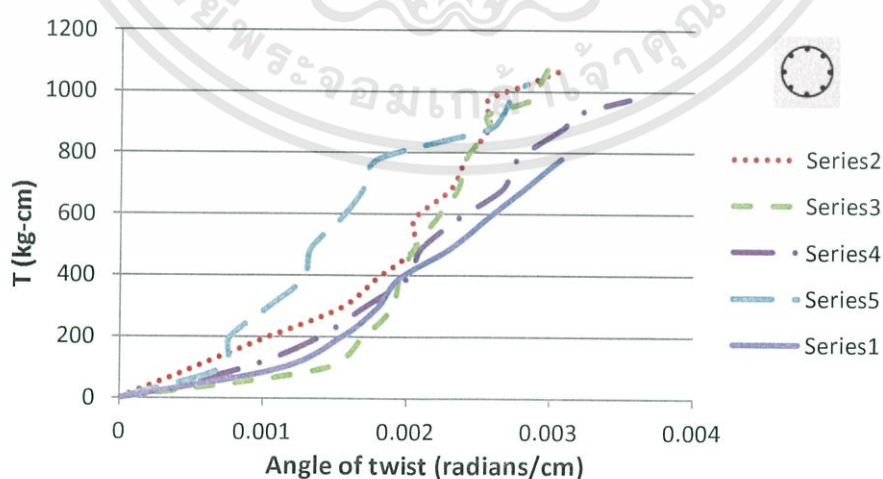
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิด (T) และ มุมบิด (Angle of twist) ของ 1B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3) เหล็กเสริมแบบจัดเป็นรูปวงกลม (1C)

ตาราง 4.6 ผลทดสอบแรงบิดระหว่างแรงบิดและมุมหมุนของเหล็กปลอกเดี่ยว เหล็กแกนแบบจัดเป็นรูปวงกลม (1C)

Weight (kg)	T (kg-cm)	Angle of twist (radians/cm)				
		1	2	3	4	5
0	0	0	0	0	0	0
10	97.50	0.001129	0.000513	0.001437	0.0008727	0.0007187
20	195.00	0.00154	0.001027	0.001694	0.001386	0.00077
30	292.50	0.001797	0.00154	0.001899	0.001694	0.0010267
40	390.00	0.001951	0.001797	0.001951	0.002002	0.0012833
50	487.50	0.00231	0.002053	0.002053	0.0021047	0.0013347
60	585.00	0.002567	0.002053	0.002207	0.0023613	0.00154
70	682.50	0.002823	0.00231	0.002361	0.0026693	0.001694
80	780.00	0.00308	0.002413	0.002413	0.002772	0.0017967
90	877.50	**	0.002567	0.002567	0.00308	0.0025667
95	926.25		0.002567	0.002567	0.0031827	0.0026693
105	1023.75		0.002823	0.002926	**	0.0028233
110	1072.50		0.00308	0.002977		*
115	1121.25		*	*		
120						



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิด (T) และ มุมบิด (Angle of twist) ของ 1C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

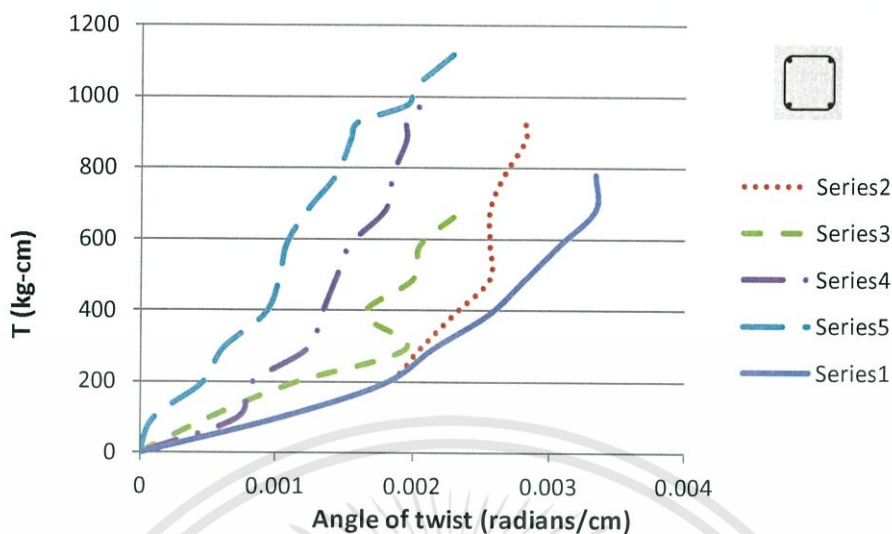
## 4.2.1.2 รูปแบบที่ 2

## 1). เหล็กเสริม 4 เส้น (2A)

ตาราง 4.7 ผลทดสอบแรงบิดระหว่างแรงบิดและมุมหมุนของเหล็กปลอกเกลียวเหล็กแกน 4 เส้น(2A)

Weight (kg)	T (kg-cm)	Angle of twist (radians/cm)				
		1	2	3	4	5
0	0	0	0	0	0	0
10	97.50	0.001027	0.00102666	0.000513	0.000719	0.000103
20	195.00	0.001797	0.00179666	0.001129	0.000821	0.000462
30	292.50	0.002156	0.00205333	0.001951	0.001232	0.000616
40	390.00	0.002567	0.00230999	0.001643	0.001335	0.000924
50	487.50	0.002823	0.00256666	0.002002	0.001437	0.001027
60	585.00	0.00308	0.00256666	0.002053	0.00154	0.001078
70	682.50	0.003337	0.00256666	0.002361	0.001797	0.001232
80	780.00	0.003337	0.00266933	**	0.001848	0.001437
90	877.50	*	0.00282333		0.001951	0.00154
95	926.25		0.00282333		0.001951	0.001591
100	975.00		**		0.002053	0.001951
105	1023.75				* 102	0.002002
110	1072.50					0.002156
115	1121.25					0.00231
120						*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



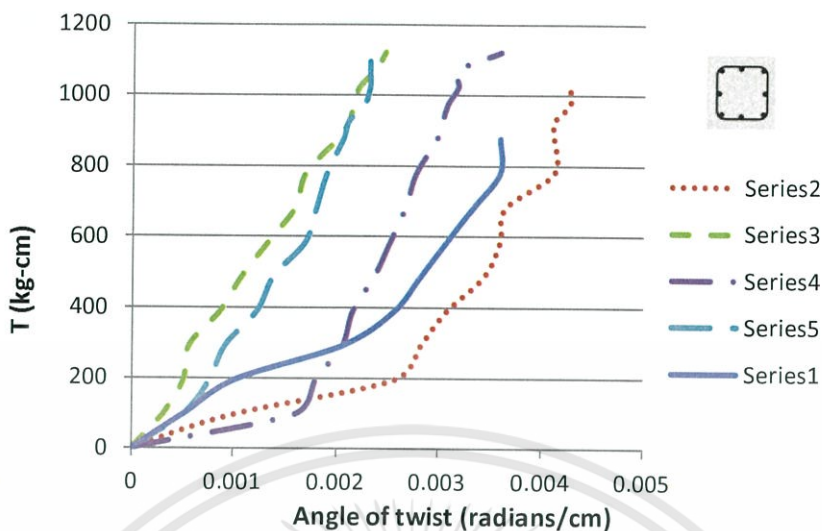
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิด (T) และ มุมบิด (Angle of twist) ของ 2A

## 2). เหล็กเสริม 8 เส้น (2B)

ตาราง 4.8 ผลทดสอบแรงบิดระหว่างแรงบิดและมุมหมุนของเหล็กปลอกเกลียวเหล็กแกน 8 เส้น(2B)

Weight (kg)	T (kg-cm)	Angle of twist (radians /cm)				
		1	2	3	4	5
0	0	0	0	0	0	0
10	97.50	0.0005133	0.001027	0.000308	0.001591	0.000513
20	195.00	0.0010267	0.002567	0.000513	0.001797	0.00077
30	292.50	0.0020533	0.002823	0.000565	0.002053	0.000924
40	390.00	0.0025667	0.00308	0.000873	0.002156	0.001232
50	487.50	0.0028233	0.003439	0.001078	0.002361	0.001386
60	585.00	0.00308	0.003593	0.001335	0.002515	0.001694
70	682.50	0.0033367	0.003645	0.001591	0.002669	0.001797
80	780.00	0.0035933	0.004107	0.001694	0.002772	0.001899
90	877.50	0.0035933	0.004107	0.002002	0.002977	0.002053
95	926.25	*	0.004107	0.002105	0.003029	0.002105
100	975.00		0.004261	0.002156	0.00308	0.002259
105	1023.75		0.004261	0.002207	0.003183	0.00231
110	1072.50		**	0.002361	0.003183	0.00231
115	1121.25			0.002464	0.003593	0.00231
120				*	*	*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิด (T) และ มุมบิด (Angle of twist) ของ 2B

### 3). เหล็กเสริมแบบจัดเป็นรูปวงกลม (2C)

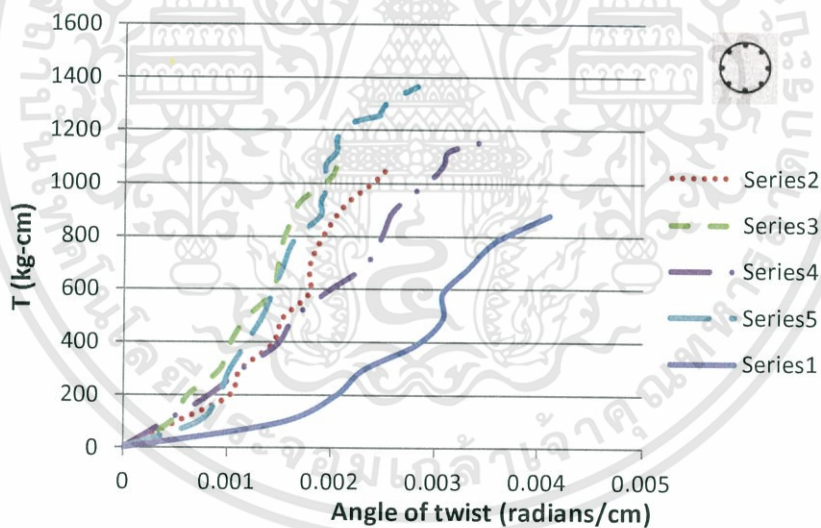
ตาราง 4.9 ผลทดสอบแรงบิดระหว่างแรงบิดและมุมหมุนของเหล็กปลอกเกลียว เหล็กแกนแบบจัดเป็นรูปวงกลม (2C)

Weight (kg)	T (kg-cm)	Angle of twist (radians/cm)				
		1	2	3	4	5
0	0	0	0	0	0	0
10	97.50	0.00154	0.000513	0.000462	0.0004107	0.0007187
20	195.00	0.002053	0.001027	0.000616	0.0008213	0.000924
30	292.50	0.00231	0.001129	0.000924	0.0011293	0.0010267
40	390.00	0.002823	0.001437	0.001027	0.0014887	0.0011807
50	487.50	0.00308	0.00154	0.001181	0.0016427	0.0013347
60	585.00	0.00308	0.001797	0.001437	0.0019507	0.0014373
70	682.50	0.003337	0.001797	0.001489	0.00231	0.00154
80	780.00	0.003593	0.001899	0.00154	0.002464	0.0016427
90	877.50	0.004107	0.002053	0.001643	0.0025667	0.0018993
95	926.25	*	0.002156	0.001694	0.0026693	0.0018993
100	975.00		0.00231	0.001848	0.0028233	0.0019507
105	1023.75		0.002464	0.002002	0.0029773	0.0019507

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.9 (ต่อ)

Weight (kg)	T (kg-cm)	Angle of twist (radians/cm)				
		1	2	3	4	5
110	1072.50		0.002567	0.002053	0.00308	0.0019507
115	1121.25		**	0.002053	0.0031313	0.0020533
120	1170.00			0.002053	0.0035933	0.0020533
125	1218.75			** 122	**	0.002156
127	1238.25					0.0022587
129	1257.75					0.002464
130	1267.50					0.002464
135	1316.25					0.0025667
140	1365.00					0.0028233
145						*



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิด (T) และ มุมบิด (Angle of twist) ของ 2C

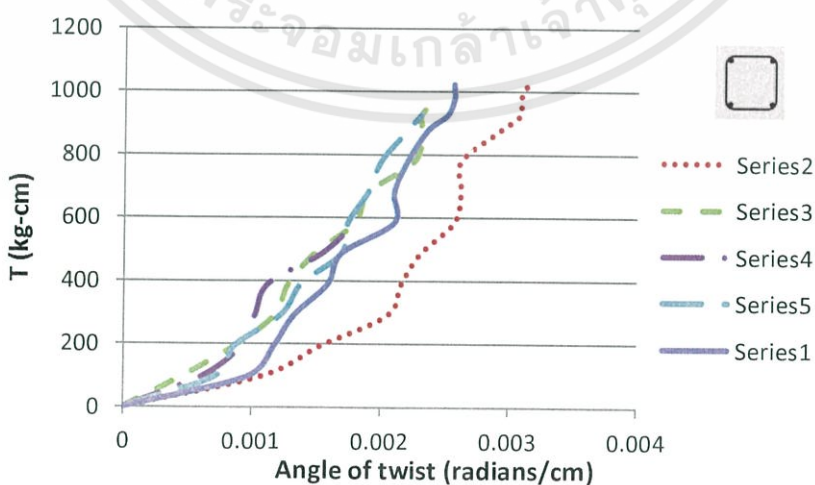
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2.1.3 รูปแบบที่ 3

## 1) เหล็กเสริม 4 เส้น (D)

ตาราง 4.10 ผลทดสอบแรงบิดระหว่างแรงบิดและมุมหมุนของเหล็กปลอกเกลียวใส่แรงบิดคลายเกลียว เหล็กแกน 4 เส้น (D)

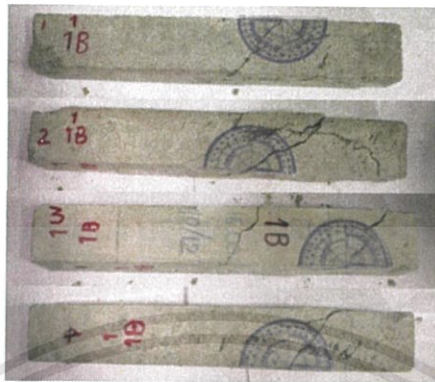
Weight (kg)	T (kg-cm)	Angle of twist (radians/cm)				
		1	2	3	4	5
0	0	0	0	0	0	0
10	97.50	0.000975	0.001078	0.000462	0.000616	0.000719
20	195.00	0.001181	0.00154	0.000873	0.000924	0.000873
30	292.50	0.001335	0.00205333	0.001181	0.001027	0.001232
40	390.00	0.001591	0.00215599	0.001283	0.001129	0.001386
50	487.50	0.001694	0.00230999	0.001489	0.00154	0.001694
60	585.00	0.002105	0.00256666	0.001797	0.001797	0.001745
70	682.50	0.002105	0.00261799	0.001899	***	0.001899
80	780.00	0.002207	0.00261799	0.002259		0.002002
90	877.50	0.002361	0.00292599	0.00231		0.002207
95	926.25	0.002515	0.00307999	0.00231		0.00231
100	975.00	0.002567	0.00307999	0.002413		*
105	1023.75	0.002567	0.00313133	* 102		
107	1043.25	**	0.00313133			
110			*			



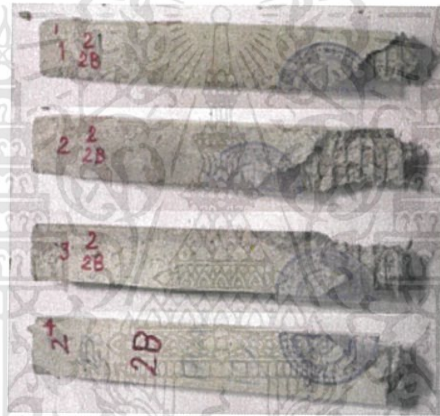
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิด (T) และ มุมบิด (Angle of twist) ของ D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ \* รอยแตกอยู่บริเวณช่วงกลางของแท่งทดสอบ



\*\* รอยแตกอยู่บริเวณช่วงหัวของแท่งทดสอบ



\*\*\* แท่งทดสอบแตกเนื่องจากคอนกรีตส่วนปลายแตก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2.2 การทดสอบแรงบิดโดยติดตั้ง Strain Rosette

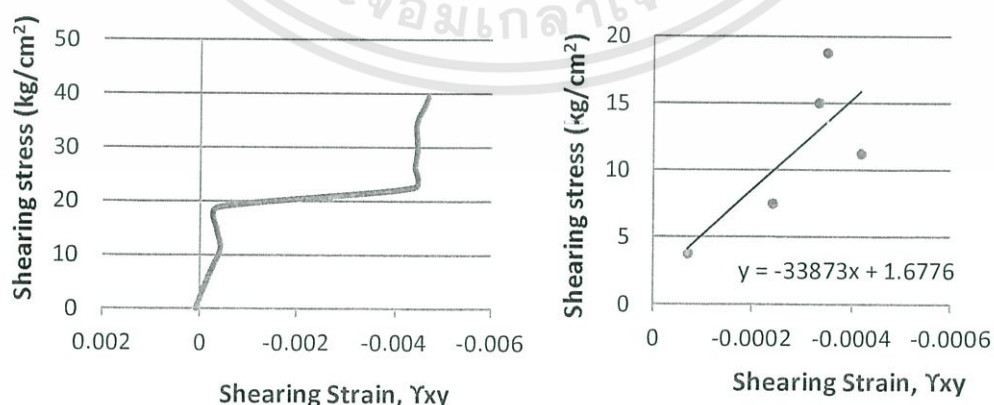
### 4.2.2.1 รูปแบบที่ 1

#### 1). เหล็กเสริม 4 เส้น (1A)

ตาราง 4.11 ผลทดสอบแรงบิดเมื่อติดตั้ง Strain Rosette ของเหล็กปลอกเดี่ยวเหล็กแกน 4 เส้น(1A)

Weight (kg)	Strain Gauge ( $10^{-6}$ )			$\epsilon_x$	$\epsilon_y$	$\gamma_{xy}$	T (kg-cm)	Shearing stress (kg/cm <sup>2</sup> )
	0°	135°	90°					
0	0	-40	0	0	0	0.00008	0	0
10	-7	30	-4	-0.000007	-0.000004	-0.000071	97.50	3.75
20	-29	104	-5	-0.000029	-0.000005	-0.000242	195.00	7.50
30	-40	188	-2	-0.00004	-0.000002	-0.000418	292.50	11.25
40	-60	140	8	-0.00006	0.000008	-0.000332	390.00	15.00
50	-90	137	14	-0.00009	0.000014	-0.00035	487.50	18.75
60	-128	2140	17	-0.000128	0.000017	-0.004391	585.00	22.50
70	-170	2140	30	-0.00017	0.00003	-0.00442	682.50	26.25
80	-240	2140	45	-0.00024	0.000045	-0.004475	780.00	30.00
90	-300	2140	128	-0.0003	0.000128	-0.004452	877.50	33.75
95	-370	2140	154	-0.00037	0.000154	-0.004496	926.25	35.63
100	-475	2140	140	-0.000475	0.00014	-0.004615	975.00	37.50
105	-534	2140	120	-0.000534	0.00012	-0.004694	1023.75	39.38
110	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ ที่น้ำหนัก 60 kg Strain Gauge ขึ้นไปถึง 2140 ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของ Strain Gauge



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Shearing Stress และ Strain (ซ้าย) สมการเส้นตรง

ในช่วงแรก (ขวา) ของ 1A

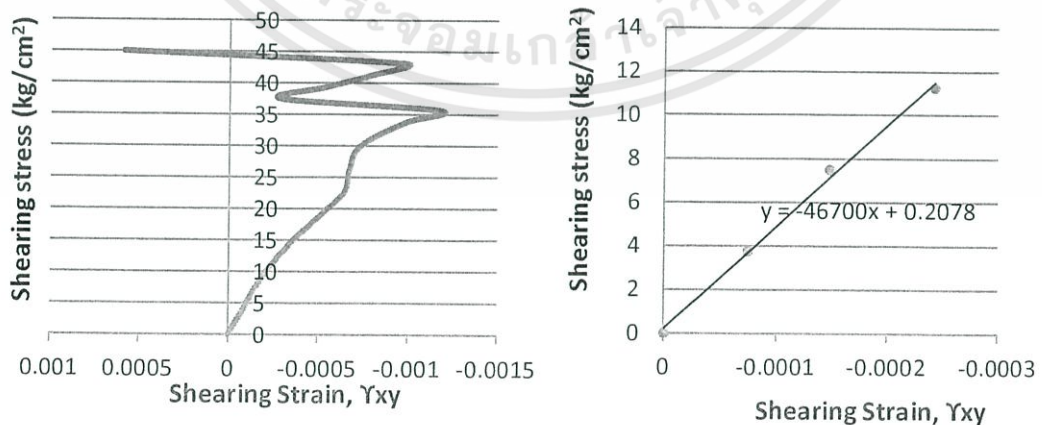
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2). เหล็กเสริม 8 เส้น (1B)

ตาราง 4.12 ผลทดสอบแรงบิดเมื่อติดตั้ง Strain Rosette ของเหล็กปลอกเดี่ยวเหล็กแกน 8 เส้น(1B)

Weight (kg)	Strain Gauge ( $10^{-6}$ )			$\epsilon_x$	$\epsilon_y$	$\gamma_{xy}$	T (kg-cm)	Shearing stress ( $\text{kg/cm}^2$ )
	$0^\circ$	$135^\circ$	$90^\circ$					
0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	-23	24	-3	-0.000023	-0.000003	-0.000074	97.50	3.75
20	-60	44	0	-0.00006	0	-0.000148	195.00	7.50
30	-100	65	-12	-0.0001	-0.000012	-0.000242	292.50	11.25
40	-100	113	-35	-0.0001	-0.000035	-0.000361	390.00	15.00
50	-191	134	-42	-0.000191	-0.000042	-0.000501	487.50	18.75
60	-290	149	-53	-0.00029	-0.000053	-0.000641	585.00	22.50
70	-270	168	-68	-0.00027	-0.000068	-0.000674	682.50	26.25
80	-263	185	-100	-0.000263	-0.0001	-0.000733	780.00	30.00
90	-260	177	-370	-0.00026	-0.00037	-0.000984	877.50	33.75
95	-340	176	-490	-0.00034	-0.00049	-0.001182	926.25	35.63
100	650	178	-580	0.00065	-0.00058	-0.000286	975.00	37.50
105	476	172	-684	0.000476	-0.000684	-0.000552	1023.75	39.38
110	374	165	-840	0.000374	-0.00084	-0.000796	1072.50	41.25
115	340	164	-1000	0.00034	-0.001	-0.000988	1121.25	43.13
120	2140	175	-1200	0.00214	-0.0012	0.00059	1170.00	45.00
125	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ ที่น้ำหนัก 100 kg Strain Gauge ขึ้นไปถึง 2140 ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของ Strain Gauge



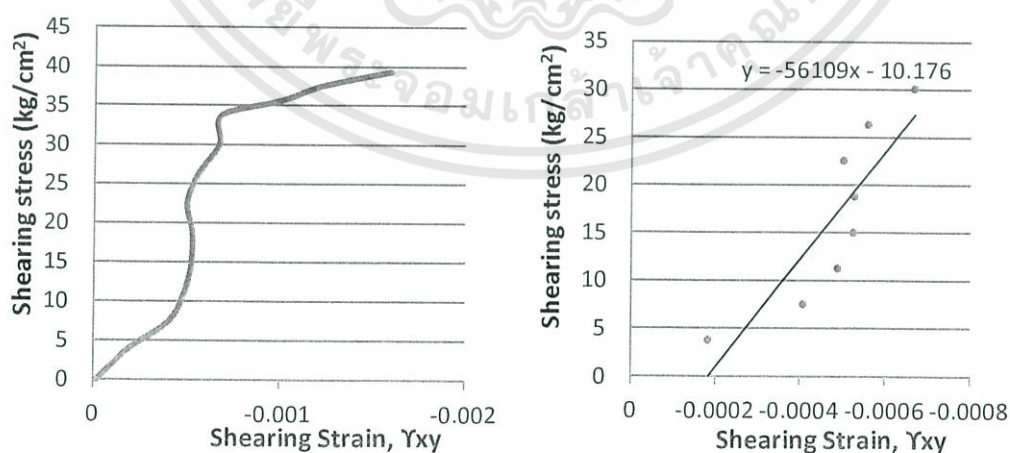
รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Shearing Stress และ Strain (ซ้าย) สมการเส้นตรงในช่วงแรก (ขวา) ของ 1B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3). เหล็กเสริมแบบจัดเป็นรูปวงกลม (1C)

ตาราง 4.13 ผลทดสอบแรงบิดเมื่อติดตั้ง Strain Rosette ของเหล็กปลอกเดี่ยว เหล็กแกนแบบจัดเป็นรูปวงกลม (1C)

Weight (kg)	Strain Gauge ( $10^{-6}$ )			$\epsilon_x$	$\epsilon_y$	$\gamma_{xy}$	T (kg-cm)	Shearing stress ( $\text{kg/cm}^2$ )
	$0^\circ$	$135^\circ$	$90^\circ$					
0	0	0	-20	0	-0.00002	-0.00002	0	0
10	-20	31	-100	-0.00002	-0.0001	-0.000182	97.50	3.75
20	-12	58	-280	-0.000012	-0.00028	-0.000408	195.00	7.50
30	126	87	-440	0.000126	-0.00044	-0.000488	292.50	11.25
40	111	118	-400	0.000111	-0.0004	-0.000525	390.00	15.00
50	83	144	-322	0.000083	-0.000322	-0.000527	487.50	18.75
60	77	161	-256	0.000077	-0.000256	-0.000501	585.00	22.50
70	15	135	-303	0.000015	-0.000303	-0.000558	682.50	26.25
80	-100	96	-376	-0.0001	-0.000376	-0.000668	780.00	30.00
90	-172	71	-368	-0.000172	-0.000368	-0.000682	877.50	33.75
95	-224	60	-661	-0.000224	-0.000661	-0.001005	926.25	35.63
100	-227	60	-881	-0.000227	-0.000881	-0.001228	975.00	37.50
105	-331	50	-1164	-0.000331	-0.001164	-0.001595	1023.75	39.38
110	-	-	-	-	-	-	-	-



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Shearing Stress และ Strain (ซ้าย) สมการเส้นตรงในช่วงแรก (ขวา) ของ 1C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

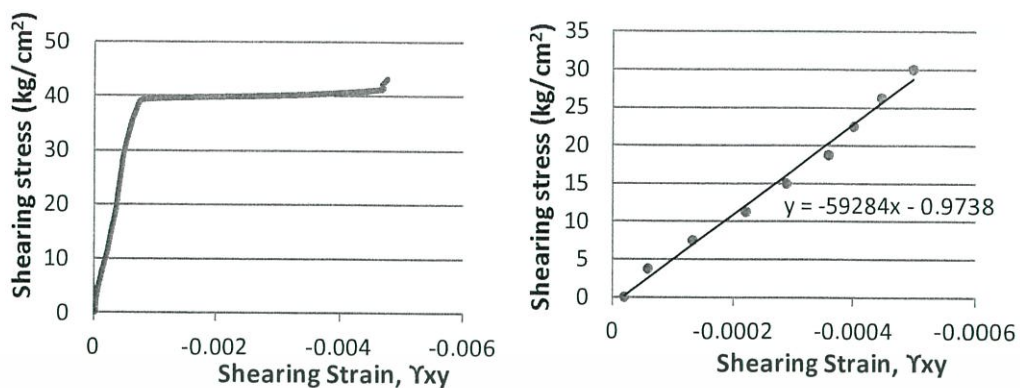
## 4.2.2.2 รูปแบบที่ 2

## 1). เหล็กเสริม 4 เส้น (2A)

ตาราง 4.14 ผลทดสอบแรงบิดเมื่อติดตั้ง Strain Rosette ของเหล็กปลอกเกลียวเหล็กแกน 4 เส้น (2A)

Weight (kg)	Strain Gauge ( $10^{-6}$ )			$\epsilon_x$	$\epsilon_y$	$\gamma_{xy}$	T (kg-cm)	Shearing stress (kg/cm <sup>2</sup> )
	0°	135°	90°					
0	-28	-17	-26	-0.000028	-0.000026	-0.00002	0	0
10	-26	5	-23	-0.000026	-0.000023	-0.000059	97.50	3.75
20	-50	28	-27	-0.00005	-0.000027	-0.000133	195.00	7.50
30	-80	50	-40	-0.00008	-0.00004	-0.00022	292.50	11.25
40	-110	70	-37	-0.00011	-0.000037	-0.000287	390.00	15.00
50	-116	103	-36	-0.000116	-0.000036	-0.000358	487.50	18.75
60	-111	135	-20	-0.000111	-0.00002	-0.000401	585.00	22.50
70	-115	162	-8	-0.000115	-0.000008	-0.000447	682.50	26.25
80	-119	186	-9	-0.000119	-0.000009	-0.0005	780.00	30.00
90	-94	235	-25	-0.000094	-0.000025	-0.000589	877.50	33.75
95	-78	260	-35	-0.000078	-0.000035	-0.000633	926.25	35.63
100	-66	290	-51	-0.000066	-0.000051	-0.000697	975.00	37.50
105	-74	337	-73	-0.000074	-0.000073	-0.000821	1023.75	39.38
107	-157	1446	-180	-0.000157	-0.00018	-0.003229	1043.25	40.13
110	-238	2140	-178	-0.000238	-0.000178	-0.004696	1072.50	41.25
112	-252	2140	-150	-0.000252	-0.00015	-0.004682	1092.00	42.00
115	-267	2140	-219	-0.000267	-0.000219	-0.004766	1121.25	43.13
120	-	-	-	-	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



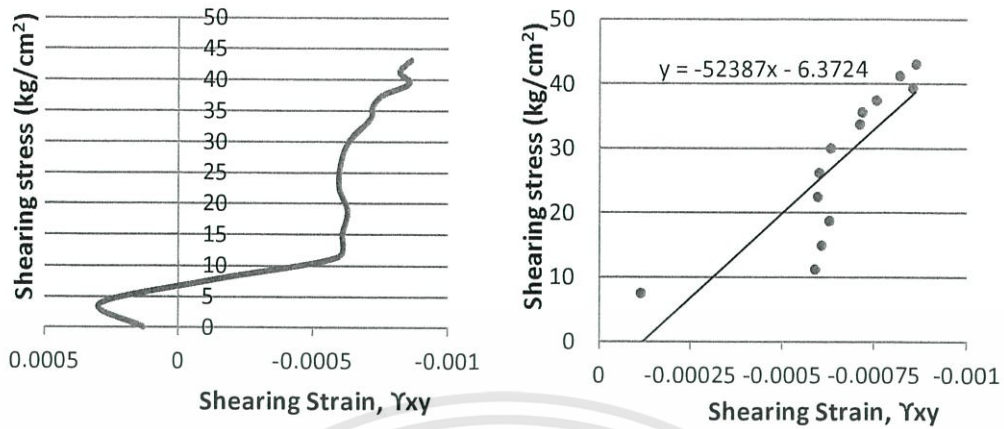
รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Shearing Stress และ Strain (ซ้าย) สมการเส้นตรง ในช่วงแรก (ขวา) ของ 2A

## 2). เหล็กเสริม 8 เส้น (2B)

ตาราง 4.15 ผลทดสอบแรงบิดเมื่อติดตั้ง Strain Rosette ของเหล็กปลอกเกลียวเหล็กแกน 8 เส้น (2B)

Weight (kg)	Strain Gauge ( $10^{-6}$ )			$\epsilon_x$	$\epsilon_y$	$\gamma_{xy}$	T (kg-cm)	Shearing stress (kg/cm <sup>2</sup> )
	0°	135°	90°					
0	-45	-87	-1	-0.000045	-0.000001	0.000128	0	0
10	-62	-180	-8	-0.000062	-0.000008	0.00029	97.50	3.75
20	-70	20	-3	-0.00007	-0.000003	-0.000113	195.00	7.50
30	-35	290	25	-0.000035	0.000025	-0.00059	292.50	11.25
40	-65	280	17	-0.000065	0.000017	-0.000608	390.00	15.00
50	-30	310	22	-0.00003	0.000022	-0.000628	487.50	18.75
60	-21	296	15	-0.000021	0.000015	-0.000598	585.00	22.50
70	-15	293	0	-0.000015	0	-0.000601	682.50	26.25
80	-11	290	-41	-0.000011	-0.000041	-0.000632	780.00	30.00
90	-24	308	-70	-0.000024	-0.00007	-0.00071	877.50	33.75
95	-45	289	-95	-0.000045	-0.000095	-0.000718	926.25	35.63
100	-110	244	-158	-0.00011	-0.000158	-0.000756	975.00	37.50
105	-112	281	-180	-0.000112	-0.00018	-0.000854	1023.75	39.38
110	-119	242	-216	-0.000119	-0.000216	-0.000819	1072.50	41.25
115	-120	244	-254	-0.00012	-0.000254	-0.000862	1121.25	43.13
120	-	-	-	-	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Shearing Stress และ Strain (ซ้าย) สมการเส้นตรง ในช่วงแรก (ขวา) ของ 2B

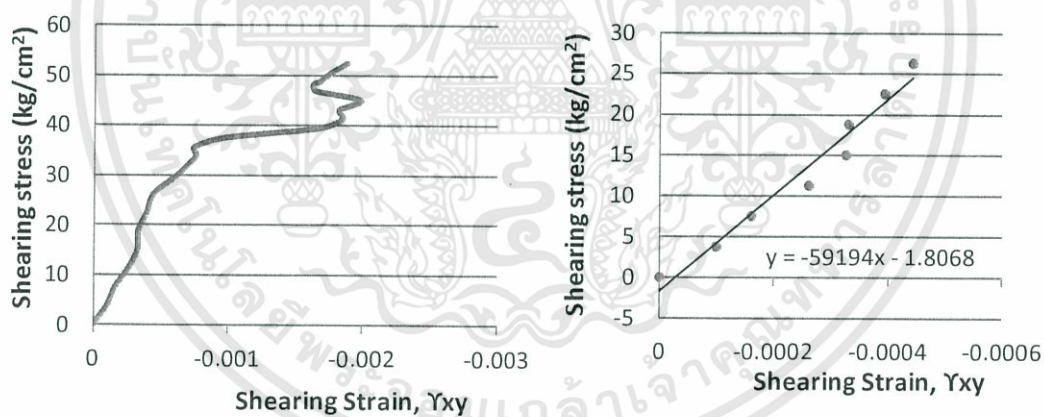
3). เหล็กเสริมแบบจัดเป็นรูปวงกลม (2C)

ตาราง 4.16 ผลทดสอบแรงบิดเมื่อติดตั้ง Strain Rosette ของเหล็กปลอกเกลียว เหล็กแกนแบบ จัดเป็นรูปวงกลม (2C)

Weight (kg)	Strain Gauge (10 <sup>-6</sup> )			$\epsilon_x$	$\epsilon_y$	$\gamma_{xy}$	T (kg-cm)	Shearing stress (kg/cm <sup>2</sup> )
	0°	135°	90°					
0	-1	0	0	-0.000001	0	-0.000001	0	0
10	-6	30	-34	-0.000006	-0.000034	-0.0001	97.50	3.75
20	-14	51	-46	-0.000014	-0.000046	-0.000162	195.00	7.50
30	-30	87	-57	-0.00003	-0.000057	-0.000261	292.50	11.25
40	-28	114	-70	-0.000028	-0.00007	-0.000326	390.00	15.00
50	14	131	-83	0.000014	-0.000083	-0.000331	487.50	18.75
60	13	157	-92	0.000013	-0.000092	-0.000393	585.00	22.50
70	-5	169	-101	-0.000005	-0.000101	-0.000444	682.50	26.25
80	-43	233	-110	-0.000043	-0.00011	-0.000619	780.00	30.00
90	-76	248	-184	-0.000076	-0.000184	-0.000756	877.50	33.75
95	-23	249	-226	-0.000023	-0.000226	-0.000747	926.25	35.63
100	-158	284	-252	-0.000158	-0.000252	-0.000978	975.00	37.50

ตาราง 4.16 (ต่อ)

Weight (kg)	Strain Gauge ( $10^{-6}$ )			$\epsilon_x$	$\epsilon_y$	$\gamma_{xy}$	T (kg-cm)	Shearing stress (kg/cm <sup>2</sup> )
	0°	135°	90°					
105	-256	560	-290	-0.000256	-0.00029	-0.001666	1023.75	39.38
110	-244	656	-290	-0.000244	-0.00029	-0.001846	1072.50	41.25
115	-284	613	-313	-0.000284	-0.000313	-0.001823	1121.25	43.13
120	-366	605	-404	-0.000366	-0.000404	-0.00198	1170.00	45.00
125	-385	368	-535	-0.000385	-0.000535	-0.001656	1218.75	46.88
127	-470	300	-558	-0.00047	-0.000558	-0.001628	1238.25	47.63
129	-512	280	-566	-0.000512	-0.000566	-0.001638	1257.75	48.38
130	-600	250	-576	-0.0006	-0.000576	-0.001676	1267.50	48.75
135	-700	253	-560	-0.0007	-0.00056	-0.001766	1316.25	50.63
140	-800	240	-600	-0.0008	-0.0006	-0.00188	1365.00	52.50
145	-	-	-	-	-	-	-	-



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Shearing Stress และ Strain (ซ้าย) สมการเส้นตรง ในช่วงแรก (ขวา) ของ 2C

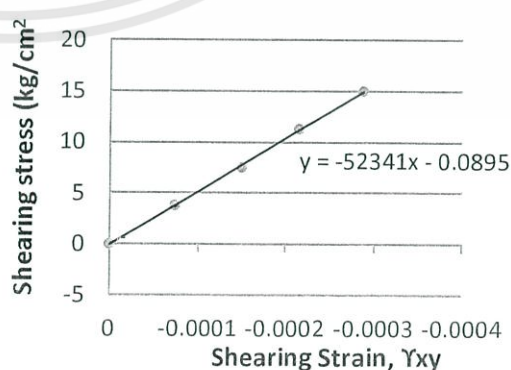
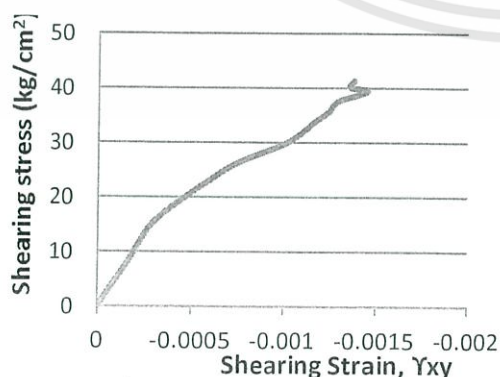
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2.2.3 รูปแบบที่ 3

## 1). เหล็กเสริม 4 เส้น (D)

ตาราง 4.17 ผลทดสอบแรงบิดเมื่อติดตั้ง Strain Rosette ของเหล็กปลอกเกลียวใส่แรงบิดคลายเกลียว เหล็กแกน 4 เส้น (D)

Weight (kg)	Strain Gauge ( $10^{-6}$ )			$\epsilon_x$	$\epsilon_y$	$\gamma_{xy}$	T (kg-cm)	Shearing stress ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )
	$0^\circ$	$135^\circ$	$90^\circ$					
0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	-7	29	-8	-0.000007	-0.000008	-0.000073	97.50	3.75
20	-13	61	-15	-0.000013	-0.000015	-0.00015	195.00	7.50
30	-4	93	-25	-0.000004	-0.000025	-0.000215	292.50	11.25
40	0	130	-27	0	-0.000027	-0.000287	390.00	15.00
50	-4	188	-35	-0.000004	-0.000035	-0.000415	487.50	18.75
60	-10	260	-42	-0.00001	-0.000042	-0.000572	585.00	22.50
70	-26	339	-44	-0.000026	-0.000044	-0.000748	682.50	26.25
80	-48	455	-64	-0.000048	-0.000064	-0.001022	780.00	30.00
90	-56	524	-71	-0.000056	-0.000071	-0.001175	877.50	33.75
95	-49	555	-90	-0.000049	-0.00009	-0.001249	926.25	35.625
100	-54	567	-110	-0.000054	-0.00011	-0.001298	975.00	37.50
105	-157	560	-180	-0.000157	-0.00018	-0.001457	1023.75	39.375
107	-170	481	-230	-0.00017	-0.00023	-0.001362	1043.25	40.125
110	-185	470	-259	-0.000185	-0.000259	-0.001384	1072.50	41.25
112	-	-	-	-	-	-	-	-



รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Shearing Stress และ Strain (ซ้าย) สมการเส้นตรง

ในช่วงแรก (ขวา) ของ D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วิธีการคำนวณ

จากสมการ

$$\epsilon_1 = \epsilon_x \cos^2 \theta_1 + \epsilon_y \sin^2 \theta_1 + \gamma_{xy} \sin \theta_1 \cos \theta_1$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_x \cos^2 \theta_2 + \epsilon_y \sin^2 \theta_2 + \gamma_{xy} \sin \theta_2 \cos \theta_2$$

$$\epsilon_3 = \epsilon_x \cos^2 \theta_3 + \epsilon_y \sin^2 \theta_3 + \gamma_{xy} \sin \theta_3 \cos \theta_3$$

เมื่อแทนค่า  $\theta_1 = 0^\circ$

$$\epsilon_{0^\circ} = \epsilon_x \cos^2 0^\circ + \epsilon_y \sin^2 0^\circ + \gamma_{xy} \sin 0^\circ \cos 0^\circ$$

$$\epsilon_{0^\circ} = \epsilon_x$$

เมื่อแทนค่า  $\theta_2 = 90^\circ$ ,

$$\epsilon_{90^\circ} = \epsilon_x \cos^2 90^\circ + \epsilon_y \sin^2 90^\circ + \gamma_{xy} \sin 90^\circ \cos 90^\circ$$

$$\epsilon_{90^\circ} = \epsilon_y$$

เมื่อแทนค่า  $\theta_3 = 135^\circ$

$$\epsilon_{135^\circ} = \epsilon_x \cos^2 135^\circ + \epsilon_y \sin^2 135^\circ + \gamma_{xy} \sin 135^\circ \cos 135^\circ$$

$$\gamma_{xy} = 2\epsilon_{135^\circ} - \epsilon_x - \epsilon_y$$

ตัวอย่างการคำนวณ

ที่ Weight = 10 kg;

$$\epsilon_{0^\circ} = -7 \times 10^{-6} = \epsilon_x$$

$$\epsilon_{90^\circ} = -8 \times 10^{-6} = \epsilon_y$$

$$\epsilon_{135^\circ} = 29 \times 10^{-6}$$

$$\gamma_{xy} = 2\epsilon_{135^\circ} - \epsilon_x - \epsilon_y$$

$$\gamma_{xy} = 2(29 \times 10^{-6}) - (-7 \times 10^{-6}) - (-8 \times 10^{-6})$$

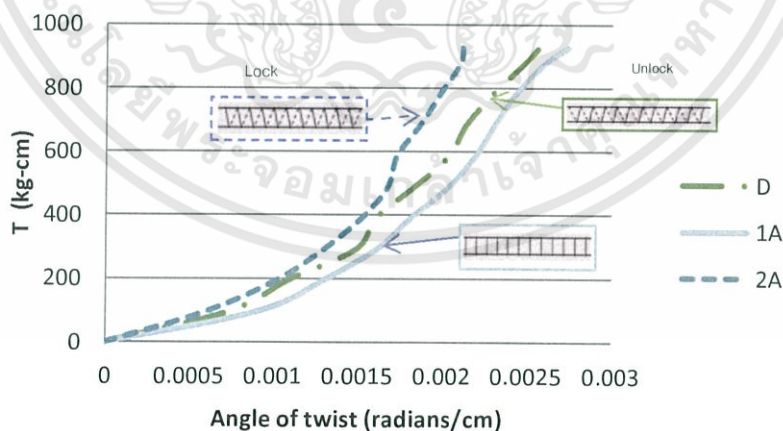
$$\gamma_{xy} = -0.000073$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2.3 สรุป

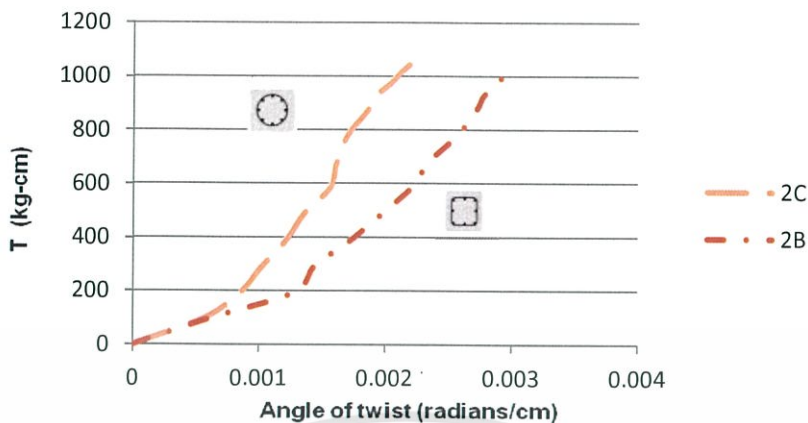
ตาราง 4.18 แสดงค่าเฉลี่ยระหว่างแรงบิดและมุมหมุนของเกลีกรชนิดต่างๆ

T (kg-cm)	Angle of twist (radians/cm)						
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	D
0	0	0	0	0	0	0	0
97.50	0.000924	0.00068444	0.00089	0.000616	0.000616	0.000565	0.000753
195.00	0.00130044	0.00109511	0.001164	0.00102666	0.001283	0.000856	0.001095
292.50	0.00160844	0.00135177	0.001489	0.00130044	0.001437	0.001027	0.001489
390.00	0.00181377	0.00176244	0.001677	0.00152289	0.001728	0.001215	0.001608
487.50	0.00203622	0.00189933	0.001814	0.00167688	0.001968	0.001352	0.001831
585.00	0.00219022	0.00210466	0.001934	0.00172822	0.002207	0.001557	0.002036
682.50	0.00230999	0.00229288	0.002122	0.00186511	0.002344	0.001608	0.002139
780.00	0.00242977	0.00253244	0.002207	0.00198488	0.002567	0.001694	0.002293
877.50	0.00260088	0.00268644	0.002567	0.00210466	0.002721	0.001865	0.002481
926.25	0.00273777	0.00287466	0.002601	0.00212177	0.002772	0.001916	0.002567
975.00			0.002601		0.002892	0.002036	
1023.75					0.002926	0.002139	
1043.25						0.00219	

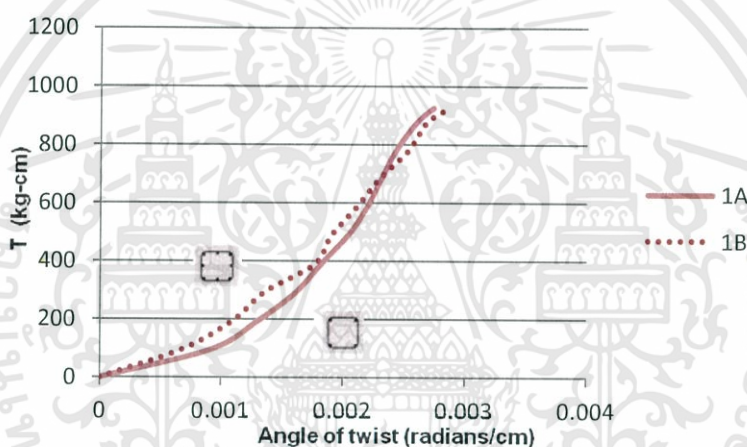


รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบรูปแบบเกลีกร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 กราฟเปรียบเทียบรูปแบบเหล็กแกนนอน



รูปที่ 4.20 กราฟเปรียบเทียบจำนวนเหล็กแกนนอน

ตาราง 4.19 แสดงผลสรุปแรงบิดสูงสุดของแต่ละตัวอย่าง

No.	$T_u$ (kg-cm)						
	1-A	1-B	1-C	2-A	2-B	2-C	D
1	877.50	877.50	877.50	877.50	926.25	926.25	1043.25
2	1072.50	1072.50	1121.25	975.00	1072.50	1121.25	1072.50
3	975.00	1072.50	1121.25	780.00	1170.00	1189.50	994.50
4	926.25	926.25	1023.75	994.50	1170.00	1218.75	682.50
5	1072.50	1170.00	1072.50	1170.00	1170.00	1413.75	1014.00
Average	1023.75	1056.25	1072.50	1046.50	1137.50	1251.25	1017.25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบกับค่าคำนวณจากสูตร

$$T_n = 0.63\sqrt{f_c} \frac{x^2 y}{3} + \alpha_t \frac{x_1 y_1}{s} A_t f_y$$

จะได้  $T_n = 1127.42 \text{ ksc}$

ตาราง 4.20 แสดงค่า Modulus of rigidity จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Shearing stress และ Shearing strain

Modulus of rigidity, G (kg/cm <sup>2</sup> )						
1A	1B	1C	2A	2B	2C	D
33873	46700	56109	59284	52387	59194	52341



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดสอบ

#### 5.1 สรุปผลการทดสอบ

##### 5.1.1 ชนิดของเหล็กปลอก

จากการเปรียบเทียบแบบจำลองคานคอนกรีตระหว่างเสริมเหล็กปลอกเกลียวและเหล็กปลอกเดี่ยวพบว่าโดยรวมแล้วการใส่เหล็กปลอกเกลียวโดยมีทิศทางการบิดแบบทำให้แน่นขึ้นมีความต้านทานแรงบิดแตกหักมากที่สุด และการใส่เหล็กปลอกเดี่ยวมีความต้านทานแรงบิดแตกหักมากกว่าการใส่เหล็กปลอกเกลียวโดยมีทิศทางการบิดแบบทำให้หลวม

##### 5.1.2 จำนวนเหล็กแกนแนวนอน

จากการเปรียบเทียบแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวในแง่ของปริมาณเหล็กแกนแนวนอน ระหว่างเหล็กเสริม 4 เส้นและเหล็กเสริม 8 เส้น แล้ว พบว่าไม่มีความแตกต่างมากนัก

##### 5.1.3 รูปแบบการวางเหล็กแกนแนวนอน

จากการเปรียบเทียบแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กในด้านการจัดเรียงเหล็กแกนแนวนอน โดยมีจำนวนเหล็กเท่ากัน ระหว่างเหล็กเสริมจัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมและเหล็กเสริมแบบจัดเป็นรูปวงกลม แล้ว พบว่าการจัดเหล็กเสริมแบบวงกลมมีความต้านทานแรงบิดแตกหักมากกว่าการจัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม

##### 5.1.4 ข้อสังเกตอื่นๆ

- รอยแตกที่เกิดขึ้นแบ่งเป็น 2 รูปแบบคือ แตกบริเวณส่วนกลางและบริเวณปลาย ซึ่งการแตกทั้ง 2 แบบ รอยแตกจะทำมุม  $45^\circ$  โดยจะเริ่มจากด้านหนึ่งแล้วร้าวไปยังด้านข้างจนครบทั้ง 4 ด้าน
- การแตกหักของคานทดสอบเป็นการแตกหักแบบเปราะ
- จากข้อมูลของน้ำหนักและมุมที่อ่านค่าได้ พฤติกรรมของคานระหว่างการรับน้ำหนักไม่สามารถสรุปได้ เนื่องจากมุมที่อ่านได้มีค่าคลาดเคลื่อนมาก ซึ่งเกิดจากการที่หัวจับคานทดสอบไม่แน่นเพียงพอ ทำให้มุมที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากช่องว่างระหว่างคานและหัวจับคาน
- จากข้อมูลเมื่อติดตั้ง Strain gauge กับคานทดสอบ เมื่อนำไปเขียนกราฟระหว่าง Shearing Stress และ Shearing Strain จะได้ค่า Modulus of rigidity,  $G$  เฉลี่ย  $53346 \text{ kg/cm}^2$  และการคำนวณจากค่า Modulus of elastic,  $E$  มีค่า  $G = 73904.354 \text{ kg/cm}^2$

## 5.2 ปัญหาและการแก้ไข

ตาราง 5.1 ปัญหาที่พบระหว่างการดำเนินงานและวิธีการแก้ไข

ปัญหา	วิธีแก้ปัญหา
1. ขนาดของแบบใหญ่กว่าแบบทดสอบ	1. เอาเหล็กมากขึ้น และทำล็อกดันเหล็กไว้
2. แบบทดสอบมีรู หลังจากผสมแล้ว	2. ไม่ได้อยู่ในช่วงทดสอบ สามารถยอมรับได้
3. เวลาเทคอนกรีตในแบบไม่สามารถเทตรงๆ ได้	3. ต้องนำคอนกรีตใส่แบบเหล็กเสริมก่อน แล้วถึงทยอยเทด้านข้างเหล็กเสริม
4. ตะกร้าถ่วงน้ำหนักไม่สามารถรับน้ำหนักมากๆ ได้	4. ใช้แท่งเหล็กแทน
5. โตะขาตั้งเครื่องทดสอบ ไม่สามารถรับน้ำหนักเกิน 100 กิโลกรัมได้	5. เปลี่ยนโตะขาตั้งทดสอบ โดยใช้เครื่องทดสอบยึดกับโตะเหล็ก ทำการขันน็อตและสกรู
6. ไม่มีตุ้มน้ำหนักแบบชนิดกรัม	6. ใช้แบบกิโลกรัมแทน ใช้ในจำนวน 2,5,10 กิโลกรัม
7. โตะที่ทดสอบ บางทีให้เวลาทดสอบมีเสียง ส่งผลให้ strain rosette คลาดเคลื่อน	7. นำลูกตุ้มมาถ่วงน้ำหนัก ไม่ให้แผ่นเหล็กกระดก
8. ขนาดหัวคอนกรีตไม่พอดีกับแบบเครื่องทดสอบ	8. ทำการ cap หัวคอนกรีต
9. เมื่อ cap หัวคอนกรีตไม่ดี คอนกรีตจะแตกตรงหัว แทนที่จะแตกตรงกลาง	9. cap หัวคอนกรีตให้แน่น

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

- การทดสอบแรงอัดคอนกรีตที่ติดตั้ง Strain Gauge มีความคลาดเคลื่อน อาจเนื่องจากหลายปัจจัย เช่น การแคปหัวลูกปูน การติดตั้ง Strain Gauge บนลูกปูน เป็นต้น
- หากต้องการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงบิด ควรจะหาขาตั้งที่มีความมั่นคง ไม่ล้มเมื่อใส่น้ำหนักถ่วง
- หากต้องการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงบิด ที่ต้องการความละเอียดสูงควรปรับปรุงเครื่องมือ วัสดุให้มีมีความละเอียดมากกว่านี้
- ปากจับแบบจำลองควรปรับปรุงให้เหมาะสมกับแบบทดสอบ โดยควรจะมีลักษณะจับแบบทดลองได้แน่นหนาเพียงพอ มิฉะนั้นจะเกิดความคลาดเคลื่อนได้มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

Constantin E. Chalioris , Chris G. (2013). *Karayannis. Experimental investigation of RC beams with rectangular spiral reinforcement in torsion. Engineering Structures 56*, pp.286–297

Ferdinand P. Beer, E. Russell Johnston, Jr., John T. Dewolf. (2006). *Mechanics of materials*(4th ed. in SI units). Boston : McGraw-Hill

Harris, Harry G. (1999). *Structural modeling and experimental techniques* (2nd ed). Boca Raton: CRC Press.

Hsu, Thomas T.C. (2010). *Unified theory of concrete structures*. Chichester : John Wiley

Mississippi State University. Bagley College of Engineering. Aerospace Engineering. *PURE TORSION* (Online). Available: [http://ae.msstate.edu/~masoud/Teaching/SA2/chA6.5\\_text.html](http://ae.msstate.edu/~masoud/Teaching/SA2/chA6.5_text.html) [2013, June 26].

Nawy, Edward G. (2009). *Reinforced concrete : a fundamental approach* (6th ed.). Upper Saddle River, NJ : Pearson Prentice Hall.

*Torsion unsymmetric bending and shear center*. (Online). Available: <http://www.docstoc.com/docs/120444313/TORSION-UNSYMMETRIC-BENDING> [2013, July 2].

วินิต ช่อวิเชียร, และวรนิติ ช่อวิเชียร. (2550). *การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง* (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพฯ : ป.สัมพันธ์พาณิชย์.

ศิริวัฒน์ ไชยชนะ. (2542). *ปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี* (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ : เอส.เอส.บุ๊คเฮ้าส์.

## ภาคผนวก

### 1. การทำทรายอิมตัวผิวแห้ง (SATURATED SURFACE-DRY)

ทรายอิมตัวผิวแห้ง คือภาวะที่รูพรุนเต็มไปด้วยน้ำแต่มีผิวหน้าแห้ง การทำทรายอิมตัวผิวแห้งมีวัตถุประสงค์เพื่อไม่ให้ทรายที่แห้งเกินไปคุดน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต ซึ่งทำให้อัตราส่วนผสมผิดไปจากที่คำนวณ และทรายที่มีความชื้นอิสระจะทำให้ส่วนผสมมีน้ำมากเกินไปจนเกินกว่าที่คำนวณไว้

วิธีใช้รูดทราย วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด มีวิธีการทดสอบโดยการกรอกตัวอย่างทรายลงในแบบโลหะรูปรูกรวดหัวตัดจนเต็มกรวย กระทั่งเบาๆ ด้วยเหล็กกระทุ้ง (Tampor) โดยถือเหล็กกระทุ้งให้สูงจากตัวอย่างดินประมาณ 5 มิลลิเมตร ปล่อยให้ตกลงด้วยน้ำหนักของเหล็กกระทุ้งเองจำนวน 25 ครั้ง เมื่อกระทุ้งครบ 25 ครั้งแล้ว ให้ยกเอาแบบโลหะออกในแนวตั้ง

ถ้ายังมีความชื้นอิสระอยู่ทรายจะรักษารูปรูกรวดไว้ ให้ใช้เครื่องเป่าลมร้อน (Dryer) เป่าต่อไปให้ทั่วกองทราย ซึ่งจะต้องนำทรายที่ทดสอบในกรวยนำมารวมกันในกองทั้งหมดก่อนแล้วจึงเป่าลมร้อนลงไป แล้วจึงทำการทดลองแบบกรวยต่อไป

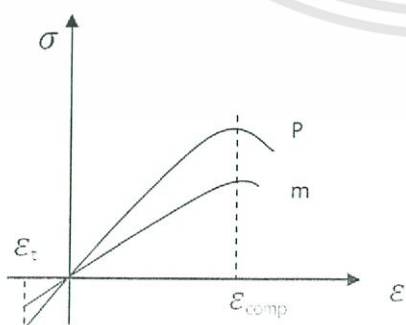
ถ้าทรายยังแห้งเกินไป ทรายจะหลยลงมาไม่เป็นรูปรูกรวด ให้เพิ่มปริมาณน้ำลงไป ผสมให้เข้ากันแล้วจึงทดสอบอีกครั้ง

ถ้าทรายไหลแผ่ออกเป็นบริเวณรอบๆ กองกรวยทราย ซึ่งเป็นลักษณะที่ทรายจะหลยเฉพาะรอบๆ ผิวรูด แล้วไหลมากองที่ฐาน ที่จุดนี้คือจุดที่ทรายอยู่ในสภาพอิมตัวผิวแห้ง

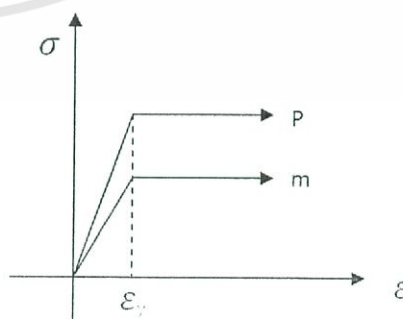
### 2. แบบจำลองคอนกรีตเสริมเหล็ก

วัสดุคอนกรีตเป็นวัสดุไม่ยืดหยุ่น (Inelastic) ซึ่งโดยส่วนมากจะรับความเค้นดึง และความเค้นอัด การแปลงขนาดจากต้นแบบของจริงให้มีขนาดเล็กลงมาเป็นโมเดล หลักการแปลงคือโมเดลต้องมีเกณฑ์การพังที่เหมือนกับต้นแบบ โดย

- กราฟ stress - strain ของโมเดลกับของต้นแบบ จะต้องเป็นสัดส่วนกัน
- ค่า strain ของโมเดลกับต้นแบบที่จุดวิบัติจะต้องเท่ากัน



(a) Concrete

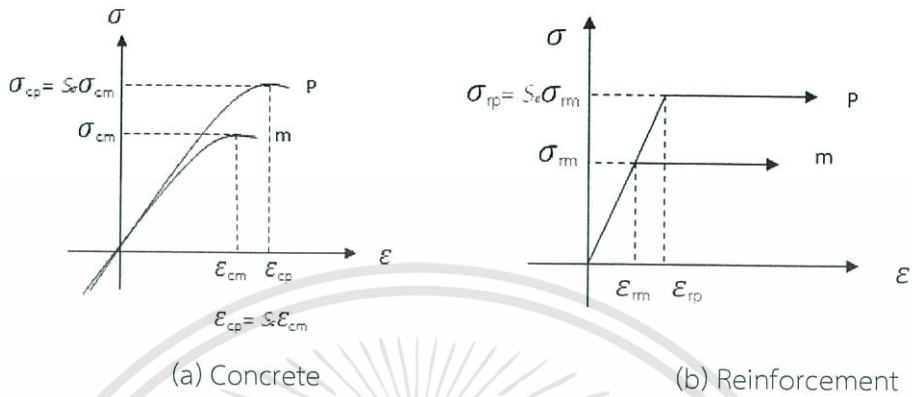


(b) Reinforcement

แสดงความสัมพันธ์ของ Stress และ Strain ของคอนกรีตและเหล็กเสริม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

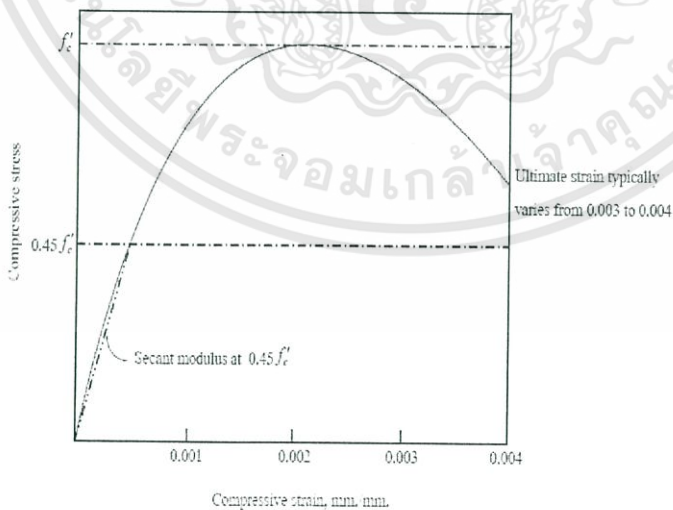
แต่ในความเป็นจริง มีความเป็นไปได้เล็กน้อยที่จะทำให้ ค่า Strain ของโมเดลกับต้นแบบที่จุดวิบัติมีค่าเท่ากัน เพราะฉะนั้นจะได้ว่า ให้ค่า  $s$  เป็นค่าคงที่ที่สำคัญ ซึ่งจะทำให้ค่าความเค้น และความเครียดของต้นแบบกับของโมเดล มีค่าเท่ากัน ดังรูป



แสดงความสัมพันธ์ของ Stress และ Strain ของคอนกรีตและเหล็กเสริมเมื่อปรับค่า สำหรับ โมเดลเหล็กจะต้องมีค่า Strength ที่จุด yield เพียงพอสำหรับความต้องการ ( $\sigma_{rp} = S_e \sigma_{rm}$ ) จากสมการจะได้ความสัมพันธ์ของขนาดแรงในเหล็กของโมเดล และต้นแบบเป็น ( $F_p = S_\sigma S_l^2 F_m$ ) เพราะฉะนั้น จาก  $Stress = \frac{Force}{Area}$  จะได้

$$\frac{A_p}{A_m} = S_A = \frac{S_\sigma S_l^2}{S_\epsilon}$$

### 3. โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (Modulus of elasticity)



โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (Modulus of elasticity),  $E_c$  เป็นตัวแสดงถึงความต้านทานต่อการเสียรูป (Deformation) ของคอนกรีตเมื่อมีแรงกดอัดมากกระทำ จากการทดสอบจะพบว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าแปรเปลี่ยนตามกำลังของคอนกรีต หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ตลอดจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดและระยะเวลาที่รับน้ำหนักบรรทุก เมื่อคอนกรีตรับน้ำหนักบรรทุกอยู่ในช่วงใช้งานและกระทำในช่วงเวลาสั้น ๆ

ซึ่งอาจจะสมมติให้คอนกรีตเป็นวัสดุยืดหยุ่น (Elastic materials) ได้โดยมีความเครียด (Elastic strain) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับหน่วยแรงอัดที่กระทำ แต่เมื่อคอนกรีตรับน้ำหนักบรรทุกคงค้างเป็นเวลานาน ๆ (long-term loading) ต้องพิจารณารวมความเครียดแบบพลาสติก (plastic strain) ด้วยเพราะโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจะลดลงทำให้คอนกรีตเกิดการเสียรูปมากขึ้น

โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต หาได้จากอัตราส่วนของหน่วยแรงอัดต่อความเครียดหากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต โดยทั่วไปความสัมพันธ์นี้มีลักษณะเป็นรูปโค้งพาราโบลาซึ่งการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตนั้น มาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. ใช้วิธี Secant Modulus ซึ่งคำนวณจากความลาดเอียงของเส้นที่ลากจากจุดเริ่มต้นกับจุดใด ๆ ที่ต้องการหา ซึ่งมักพิจารณาที่จุดซึ่งมีหน่วยแรงอัดเท่ากับ 45% ของหน่วยแรงอัดสูงสุด ( $0.45 f_c'$ ) บนเส้นสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดโดยถือว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่หาโดยวิธีนี้เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่แท้จริงของคอนกรีตในช่วงใช้งาน เนื่องจากได้พิจารณารวมถึงความเครียดแบบพลาสติกเข้าไปด้วยมาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. กำหนดสูตรสำหรับหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต โดยให้ขึ้นกับกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดและหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ดังสมการ

$$E = 4270w_c^{1.5}\sqrt{f_c'} \quad \text{kg/cm}^2$$

สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีต สามารถหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตได้จากอัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงกดอัดกับความเครียดกดอัดบนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและความเครียดกดอัดของคอนกรีต ในช่วงที่คอนกรีตมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) ซึ่งมาตรฐาน ASTM C469-94 ได้กำหนดสมการในการคำนวณหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตไว้ดังสมการ

$$E_s = \frac{\sigma_e - \sigma_0}{\epsilon_e - 0.000050}$$

เมื่อ  $\sigma_0$  คือ หน่วยแรงที่ตัวอย่างทดสอบเกิดความเครียดกดอัดเท่ากับ  $50 \times 10^{-6}$  mm/mm

$\sigma_e$  คือ หน่วยแรงที่มีค่าประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ของหน่วยแรงกดอัดสูงสุด ( $\sigma_u$ )

$\epsilon_e$  คือ ความเครียดกดอัดที่เกิดจากหน่วยแรง  $\sigma_e$

#### 4. Poisson's Ratio

Poisson's Ratio คือ อัตราส่วนของ หน่วยการหดตัวด้านข้าง (Lateral Strain) ต่อหน่วยการหดตัวในแนวแกนที่รับน้ำหนัก (Axial Strain) เมื่อมีการให้น้ำหนัก คอนกรีตปกติจะมีค่า 0.15-0.20 คอนกรีตที่มีค่าความแข็งแรงสูงจะมีค่า Poisson's Ratio ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้