การเสริมกำลังรับแรงบิดขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

นายศิวกร สร้อยศักดิ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Torsional Strengthening of Reinforced Concrete Members with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Sheets

Mr. Siwakorn Soysak

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2019
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเสริมกำลังรับแรงบิดขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน
โดย	นายศิวกร สร้อยศักดิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.อัครวัชร เล่นวารี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

-- คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

-- ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาตรี)

-- อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.อัครวัชร เล่นวารี)

-- กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัฒนชัย สมิทธากร)

-- กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.สายันต์ ศิริมนตรี)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ศิวกร สร้อยศักดิ์ : การเสริมกำลังรับแรงบิดขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน. (Torsional Strengthening of Reinforced Concrete Members with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Sheets) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.อัครวัชร เล่นวารี

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงบิดขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังโดยการพันรอบด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) ในการทดสอบประกอบด้วยองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 12 ตัวอย่าง ประกอบด้วยตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการเสริมกำลังจำนวน 6 ตัวอย่าง และที่มีการพันรอบด้วยแผ่น CFRP จำนวน 6 ตัวอย่าง โดยตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย ระยะเรียงเหล็กปลอก (75 และ 150 mm) ประเภทมุมของอมาตรฐานของเหล็กปลอก (135 และ 90 องศา) และแรงอัดตามแนวแกน(0 ตัน และ 27 ตัน) ผลการทดสอบที่ศึกษาในงานวิจัยประกอบด้วย รูปแบบการวิบัติ ระยะเรียงรอยร้าว มุมของรอยร้าว ความเครียดที่เหล็กเสริมและแผ่น CFRP และความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับมุมบิดของตัวอย่างทดสอบ

ผลจากการทดสอบพบว่า การเสริมกำลังด้วย CFRP สามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดของคานและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กได้อย่างน้อย 190% การเพิ่มมุมงอขอของเหล็กปลอกในคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP และเสาคอนกรีตเสริมเหล็กไม่มีผลต่อการเพิ่มกำลังรับแรงบิด และการเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมไม่มีผลต่อการเพิ่มกำลังรับแรงบิดในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กและเสาที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP เปรียบเทียบกำลังรับแรงบิดจากการทดสอบกับสมการทำนาย สมการที่เหมาะสมกับการทำนายกำลังรับแรงบิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก คานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP และเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP คือ มาตรฐาน ACI318-14, Rahal และคณะ (2013), มาตรฐาน fib Bulletin 14 (2001) และ He และคณะ (2014) ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา	ลายมือชื่อนิสิต	....
ปีการศึกษา	2562	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	....

6070324521 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Torsion behavior, CFRP sheets, Strengthening, Reinforced concrete member, compression

Siwakorn Soysak : Torsional Strengthening of Reinforced Concrete Members with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Sheets. Advisor: Assoc. Prof. Akhrawat Lenwari, Ph.D.

This research presents an experimental investigation on torsional behavior of reinforced concrete (RC) members strengthened with carbon fiber-reinforced polymer sheets (CFRP). In the experiment, total of 12 specimens are tested. Six specimens are fully wrapped with CFRP sheets, while other six specimens are not strengthened. The test variables include the stirrup spacing (75 and 150mm), angle of standard hook type stirrups (135 and 90 deg.) and axial load (0 and 27 t). The failure modes, crack spacing, steel and CFRP strains, torsion-angle of twist relationships are studied.

The test results show that CFRP sheets can increase the maximum torsional moment of RC members capacities by at least 190%. The effect of angle of standard hook type stirrups on the torsional moment capacities is not significant for CFRP strengthened beams and unstrengthen columns. The effect stirrups spacing on the torsional moment capacities is not significant for unstrengthen and strengthened columns with CFRP. A comparison of the torsional moment from the tests with the prediction equations. The equations provide good prediction for (RC) beams, (RC) columns, (RC) beams and (RC) columns strengthened with CFRP sheets are ACI318-14, Rahal et al. (2013), fib Bulletin 14 (2001) and He et al. (2014) respectively.

Field of Study: Civil Engineering		Student's Signature ....
Academic Year: 2019		Advisor's Signature ....

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้านายศิวกร สร้อยศักดิ์ ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.อัครวัชร เล่นวารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาให้คำปรึกษา ให้ความรู้และทุนค่าใช้จ่ายและวัสดุในทดสอบทำการวิจัยนี้ จนข้าพเจ้าจัดทำวิทยานิพนธ์ได้สำเร็จด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาตรี ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัฒนชัย สมิทธากร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตร์จารย์ ดร.สายันต์ ศิริมนตรี กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำที่ดีในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์แบบมากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบริษัทซิก้า (ประเทศไทย) จำกัด สำหรับการสนับสนุนแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน และบริษัท รีโทรฟิท สตรัคเจอร์ สเปเชียลลิสต์ จำกัด สำหรับการติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและสนับสนุนแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่ และรุ่นน้องในสาขาวิศวกรรมโครงสร้างสำหรับคำแนะนำและกำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอกราบพระคุณนายทัน สร้อยศักดิ์ และนางกนกวลัย สร้อยศักดิ์ ผู้เป็นบิดาและมารดารวมถึงครอบครัวของข้าพเจ้าที่ได้กรุณาส่งเสียให้ข้าพเจ้าได้มีโอกาสทางการศึกษาและอบรมสั่งสอนตลอดจนเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าตลอดมา ท้ายที่สุดนี้ด้วยความช่วยเหลือจากทุกท่านเหล่านี้ ข้าพเจ้าจะจดจำตลอดไป และหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลที่มีแระโยชน์ต่อผู้ที่สนในศึกษา จุดประกายทางความคิด และเป็นรากฐานของงานวิจัยอื่นเพื่อประโยชน์ต่อประเทศชาติต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ศิวกร สร้อยศักดิ์

สารบัญ

หน้า

.... ค

บทคัดย่อภาษาไทย .... ค

.... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... ง

กิตติกรรมประกาศ .... จ

สารบัญ .... ฉ

สารบัญภาพ .... ก

สารบัญตาราง .... จ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา 1

1.2. วัตถุประสงค์ 2

1.3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา 3

1.4. ขอบเขตการศึกษา 3

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1. กำลังรับแรงบิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก 4

2.2. การเสริมกำลังรับแรงบิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วย FRP 6

2.3. กำลังรับแรงบิดร่วมกับแรงอัดตามแนวแกนขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 16

2.4. การเสริมกำลังรับแรงบิดร่วมกับแรงอัดขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วย FRP 19

บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย 21

3.1. ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับแรงบิด 21

3.1.1 หน่วยแรงเฉือนเนื่องจากแรงบิด 22

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.1.2 ทฤษฎีผนังบาง 24

3.1.3 กำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าว 26

3.1.4 กำลังรับแรงบิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธี Space Truss Analogy 27

3.1.5 ข้อกำหนดขอมมาตรฐาน ACI318-14 ในการออกแบบองค์อาคารรับแรงบิด 34

3.2 พฤติกรรมกำลังรับแรงบิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก 36

3.2.1 รูปแบบรอยแตกร้าวและหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเมื่อคานรับแรงบิด 36

3.2.2 รูปแบบรอยแตกร้าวและหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเมื่อคานรับแรงบิดและแรงเฉือน 37

3.2.3 การเสริมเหล็กเส้นรับแรงบิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก 37

3.2.3 พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงบิด 38

3.2.4 กำลังรับแรงบิดของคอนกรีตหน้าตัดกลวงและหน้าตัดเต็ม 39

3.3. พฤติกรรมกำลังรับแรงบิดพร้อมกับแรงอัดตามแนวแกนขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 40

3.4. สมการทำนายกำลังรับแรงบิดขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย FRP 42

3.3.1 fib Bulletin 14 (2001) 42

3.3.2 NCHRP report 655 (2010) 43

3.3.3 He และคณะ (2013) [18] 44

บทที่ 4 ระเบียบวิธีการวิจัย 46

4.1. รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ 46

4.1.1. ตัวอย่างทดสอบ 46

4.1.2. รหัสของตัวอย่างทดสอบ 46

4.2. คุณสมบัติวัสดุ 49

4.2.1. คอนกรีต 49

4.2.2. เหล็กเสริม 49

4.2.3. วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย 49

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2. ขั้นตอนการทดสอบ 50
4.2.1. การเตรียมตัวอย่างทดสอบ 50
4.2.2. การติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน 51
4.2.3. การให้แรงอัดตามแนวแกน 54
4.2.4. การทดสอบกำลังรับแรงบิด 56
4.2.5. การทดสอบกำลังรับแรงบิดร่วมกับแรงอัดตามแนวแกน 57
4.3 การบันทึกผลการทดสอบ 58
4.4 การแปลงข้อมูล 59
4.4.1 กำลังรับแรงบิด 59
4.4.2 มุมบิดของตัวอย่างทดสอบรับแรงบิด 60
4.4.3 สติฟเนสของตัวอย่างทดสอบภายใต้แรงบิด 62
4.4.4 ดัชนีดัชนีความเหนียวของตัวอย่างทดสอบรับแรงบิด 63
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ 64
5.1. กำลังรับแรงบิดและรูปแบบการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ 64
5.2. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมบิดของตัวอย่างทดสอบ 67
5.3. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเครียดของเหล็กเสริม กับ CFRP 71
5.4. สติฟเนสและดัชนีดัชนีความเหนียวของการทดสอบกำลังรับแรงบิด 76
5.5. ประสิทธิภาพการรับแรงดึงของ CFRP 76
5.6. ผลกระทบของตัวแปรทดสอบ 77
5.6.1. เปรียบเทียบประเภทมุมของอมาตรฐานของเหล็กปลอก 77
5.6.2. เปรียบเทียบปริมาณการเสริมเหล็กปลอก (ระยะเรียงเหล็กปลอก) 82
5.6.3. เปรียบเทียบการเสริมกำลังด้วย CFRP และแรงอัดตามแนวแกน 86
5.7. เปรียบเทียบผลการทดสอบและสมการทำนายกำลังรับแรงบิด 95
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย 100

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6.1. สรุปผลการวิจัย 100

6.2. ข้อเสนอแนะ 101

ภาคผนวก ก รายการคำนวณ 102

ภาคผนวก ข ผลการทดสอบวัสดุ 108

บรรณานุกรม 113

รายการสัญลักษณ์ 116

ประวัติผู้เขียน 119

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1.1 ตัวอย่างการเกิดแรงบิดในองค์อาคารทั่วไป [2, 3] 2
ภาพที่ 2.1 ตัวอย่างการทดสอบที่เกิดการหลุดล่อนบริเวณมุมหน้าตัด [4] 4
ภาพที่ 2.2 ตัวอย่างการทดสอบที่เกิดการอ้าตัวออกของเหล็กปลอกบริเวณมุมหน้าตัด [5] 4
ภาพที่ 2.3 การติดตั้งการทดสอบรับแรงบิดของงานวิจัย Chalioris และ Karayannis [7] 5
ภาพที่ 2.4 เปรียบเทียบรูปแบบการเสริมเหล็กปลอก [7] 6
ภาพที่ 2.5 ผลการทดสอบของ Chaliorisและ Karayannis [7] 6
ภาพที่ 2.6 คานตัวอย่างทดสอบและการเสริมกำลังด้วย FRP รับแรงบิด [8] 7
ภาพที่ 2.7 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมบิดของคาน TB3 [9] 8
ภาพที่ 2.8 ผลการทดสอบตัอย่างรับแรงบิดของ Hii และ Al-Mahaidi [10] 10
ภาพที่ 2.9 ตัวอย่างทดสอบและผลการวิจัยของ Ameli และคณะ [11] 11
ภาพที่ 2.10 รายละเอียดตัวอย่างคานทดสอบของ Chalioris [12] 12
ภาพที่ 2.11 ตัวอย่างทดสอบที่เสริมกำลังด้วย FRP [13] 13
ภาพที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมบิดของคานทดสอบ [13] 14
ภาพที่ 2.13 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบและการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียด[14] 15
ภาพที่ 2.14 รายละเอียดการเสริมกำลังด้วย FRP [14] 15
ภาพที่ 2.15 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ Degwy และ McMullen [15] 16
ภาพที่ 2.16 ตัวอย่างผลการทดสอบ Degwy และ McMullen [15] 17
ภาพที่ 2.17 รายละเอียดตัวอย่างการทดสอบ [16] 18
ภาพที่ 2.18 ตัวอย่างการทดสอบ [16] 18
ภาพที่ 2.19 ตัวอย่างการติดตั้งเครื่องมือทอสอบ [17] 19
ภาพที่ 2.20 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมบิดของเสาทดสอบ [17] 20

Chulalongkorn University

ภาพที่ 3.1 ภาพตัวอย่างองค์อาคารรับแรงบิด [18] 21

ภาพที่ 3.2 ภาพตัวอย่างประเภทองค์อาคารรับแรงบิด [18] 22

ภาพที่ 3.3 ภาพตัวอย่างการกระจายหน่วยแรงเฉือนของคอนกรีตล้วน [18].................................... 22

ภาพที่ 3.4 ภาพตัวอย่างการกระจายหน่วยแรงเฉือนด้วย soap-film analogy [18]....................... 23

ภาพที่ 3.5 รายละเอียดภาพตัดขวางของชิ้นส่วนหน้าตัดกลวง [18] 24

ภาพที่ 3.6 ตัวอย่างแสดงการไหลของแรงเฉือนต่อหน่วยความยาว [18]... 24

ภาพที่ 3.7 รายละเอียดแรงที่เกิดขึ้นในหน้าตัดผนังบางรับแรงบิด [18] 28

ภาพที่ 3.8 ละเอียดการเกิดรอยร้าวของผนังบางรับแรงบิด [18] 29

ภาพที่ 3.9 รายละเอียดแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วน [18].. 30

ภาพที่ 3.10 รายละเอียดตัวอย่างของพื้นที่วงปิดที่ล้อมรอบด้วยเหล็กปลอก [18]............................ 31

ภาพที่ 3.11 รายละเอียดคอนกรีตรับแรงอัดจากแรงบิด [18]... 31

ภาพที่ 3.12 รายละเอียดเหล็กปลอกรับแรงบิด 34

ภาพที่ 3.13 รายละเอียดมุมงอเหล็กปลอกรับแรงบิด 34

ภาพที่ 3.14 ขั้นตอนการเกิดรอยร้าวจากแรงบิด [18] 36

ภาพที่ 3.15 ขั้นตอนการเกิดรอยร้าวจากแรงบิดรอยร้าวรับแรงบิดพร้อมกับแรงเฉือน [18]............. 37

ภาพที่ 3.16 แสดงความสัมพันธ์แรงบิดและมุมบิดของคานทดสอบ [18] 38

ภาพที่ 3.17 กำลังรับแรงบิดของคอนกรีตหน้าตัดเต็มและหน้าตัดกลวง [18].................................... 39

ภาพที่ 3.18 การวิเคราะห์กำลังรับแรงบิดของหน้าตัดกลวง.. 40

ภาพที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับมุมบิดของคานคอนกรีตอัดแรง................................... 41

ภาพที่ 3.20 รูปแบบรอยร้าวที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก [19] 42

ภาพที่ 3.21 แรงในแผ่น FRP ต้านทานแรงบิด [19] 42

ภาพที่ 4.1 ตัวอย่างรหัสของตัวอย่างทดสอบ 46

ภาพที่ 4.2 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ 48

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 4.3 รายละเอียดการพันรอบหน้าตัดด้วย CFRP 51
ภาพที่ 4.4 รายละเอียดตำแหน่งติดตั้ง Strain Gage ที่ผิวของ CFRP 52
ภาพที่ 4.5 รายละเอียดการอัดแรงในแนวแกน 54
ภาพที่ 4.6 รายละเอียดการติดตั้งเครื่องมือและทดสอบคานรับแรงบิด 56
ภาพที่ 4.7 รายละเอียดกำลังรับแรงบิดของตัวอย่างทดสอบ 59
ภาพที่ 4.8 รายละเอียดการหาแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวของตัวอย่าง B-90-75 59
ภาพที่ 4.9 รายละเอียดการหาแรงบิดครากของตัวอย่าง B-90-75 60
ภาพที่ 4.10 รายละเอียดการหาแรงบิดสูงสุดของตัวอย่าง B-90-75 60
ภาพที่ 4.11 รายละเอียดการหามุมบิดขององค์อาคาร 61
ภาพที่ 4.12 รายละเอียดการติดตั้ง LVDT 61
ภาพที่ 4.13 รายละเอียดการหามุมบิดแตกร้าวของตัวอย่าง B-90-75 62
ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมบิดขององค์อาคารทดสอบ 63
ภาพที่ **5.1** แผนภูมิแท่งกำลังรับแรงบิดของทุกตัวอย่างทดสอบ 67
ภาพที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมบิดของคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการเสริม CFRP . 68
ภาพที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมบิดของคานตัวอย่างทดสอบที่มีการเสริม CFRP 69
ภาพที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมบิดของเสาตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการเสริม CFRP... 70
ภาพที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมบิดของเสาตัวอย่างทดสอบที่มีการเสริม CFRP....... 71
ภาพที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเครียดของเหล็กเสริมของ คานตัวอย่างที่ไม่เสริม CFRP 72
ภาพที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเครียดของเหล็กเสริมและCFRP ของคานตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วย CFRP 73
ภาพที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเครียดของเหล็กเสริมของ เสาตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วย CFRP 74
ภาพที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเครียดของเหล็กเสริมของ เสาตัวอย่างทดสอบที่มีการเสริมกำลังด้วย CFRP 75

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 5.10 กำลังรับแรงบิดของตัวอย่างที่เพิ่มมุมของอเหล็กปลอก.......... 78

ภาพที่ 5.11 เปรียบเทียบมุมบิดของตัวอย่างที่เพิ่มมุมของอเหล็กปลอก.......... 79

ภาพที่ 5.12 สติฟเนสของตัวอย่างที่เพิ่มมุมของอเหล็กปลอกจาก.......... 80

ภาพที่ 5.13 ดัชนีความเหนียวของตัวอย่างที่เพิ่มมุมของอเหล็กปลอกจาก.......... 81

ภาพที่ 5.14 กำลังรับแรงบิดของตัวอย่างทดสอบที่เพิ่มปริมาณเหล็กปลอก.......... 82

ภาพที่ 5.15 มุมบิดของตัวอย่างทดสอบที่เพิ่มปริมาณเหล็กปลอก.......... 83

ภาพที่ 5.16 สติฟเนสของตัวอย่างทดสอบที่เพิ่มปริมาณเหล็กปลอก.......... 84

ภาพที่ 5.17 ดัชนีความเหนียวของตัวอย่างทดสอบที่เพิ่มปริมาณเหล็กปลอก.......... 85

ภาพที่ 5.18 กำลังรับแรงบิดของตัวอย่างที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 150 mm และมุมของอ 90°..... 86

ภาพที่ 5.19 มุมบิดของตัวอย่างที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 150 mm และมุมของอ 90°.......... 87

ภาพที่ 5.20 สติฟเนสของตัวอย่างที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 150 mm และมุมของอ 90°.......... 88

ภาพที่ 5.21 ดัชนีความเหนียวของตัวอย่างที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 150 mm และมุมของอ 90°. 88

ภาพที่ 5.22 กำลังรับแรงบิดของตัวอย่างที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 75 mm และมุมของอ 90°....... 89

ภาพที่ 5.23 มุมบิดของตัวอย่างที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 75 mm และมุมของอ 90°.......... 90

ภาพที่ 5.24 มุมบิดของตัวอย่างที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 75 mm และมุมของอ 90°.......... 91

ภาพที่ 5.25 ดัชนีความเหนียวของตัวอย่างที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 75 mm และมุมของอ 90°... 91

ภาพที่ 5.26 กำลังรับแรงบิดของตัวอย่างที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 75 mm และมุมของอ 135°..... 92

ภาพที่ 5.27 มุมบิดของตัวอย่างที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 75 mm และมุมของอ 135°.......... 93

ภาพที่ 5.28 สติฟเนสของตัวอย่างที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 75 mm และมุมของอ 135°.......... 94

ภาพที่ 5.29 ดัชนีความเหนียวของตัวอย่างที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 75 mm และมุมของอ 135° 94

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงบิดของ Panchacharam และ Belarbi [8] 7

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างคานทดสอบและผลการทดสอบของ Salom และคณะ [9] 8

ตารางที่ 2.3 รายละเอียดตัวอย่างคานทดสอบรับแรงบิดของ Hii และ Al-Mahaidi [10] 9

ตารางที่ 2.4 ผลการทดสอบตัวอย่างรับแรงบิดของ Chalioris [12] 12

ตารางที่ 2.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงบิดและรูปแบบการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ [14] 15

ตารางที่ 2.6 ผลการทดสอบของ He และคณะ [17] 20

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติวัสดุ 49

ตารางที่ 4.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ 50

ตารางที่ 4.3(ต่อ) การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ 51

ตารางที่ **5.1** ผลการทดสอบกำลังรับแรงบิดของตัวอย่างทดสอบ 64

ตารางที่ 5.2 ตัวอย่างรูปแบบการวิบัติ 65

ตารางที่ 5.3 ตัวอย่างรูปแบบรอยร้าว 66

ตารางที่ 5.4 สติฟเนสและดัชนีดัชนีความเหนียวของการทดสอบกำลังรับแรงบิด 76

ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบความเครียดยืดตัวแตกหัก CFRP ของตัวอย่างทดสอบกับ ASTM D3039 77

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงบิดและสมการทำนายกำลังรับแรงบิด 98

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1

บทนำ

1.1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

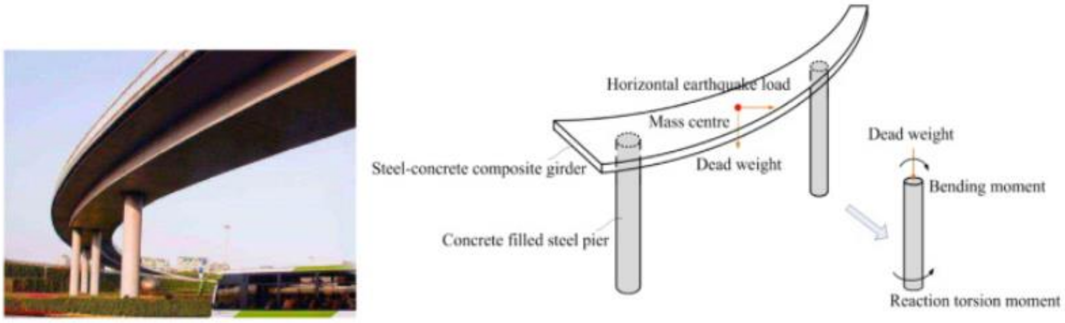
โครงสร้างพื้นฐานด้านวิศวกรรมโยธาในปัจจุบันมีการปรับปรุงรูปแบบของโครงสร้างมากมาย ตั้งแต่อาคารสูงไปจนถึงสะพานต่าง ๆ เพื่อเพิ่มกำลังให้เป็นที่น่าพอใจของระบบโครงสร้างดังที่กล่าวมาในข้างต้น ดังนั้นวิศวกรจึงต้องมีการบำรุงรักษาและการเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เช่น การเพิ่มน้ำหนักบรรทุกการใช้งาน การเปลี่ยนแปลงหรือดัดแปลงโครงสร้างเดิม หรือแม้กระทั่งกำลังรับความเสียหายจากภัยธรรมชาติ เป็นต้น

ช่วงระยะเวลาหนึ่งทศวรรษที่ผ่านมา มีการซ่อมบำรุงและเสริมกำลังให้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทำให้โครงสร้างมีกำลังรับแรงเพิ่มขึ้น โดยส่วนมากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะเน้นในการออกแบบรับแรงดัดและแรงเฉือน แต่ในบางสภาวะการใช้งานของโครงสร้างจำเป็นต้องรับแรงบิดซึ่งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้โครงสร้างมีการกำลังรับแรงลดลงและการรูปแบบการวิบัติของแรงบิดเป็นการวิบัติแบบทันทีทันใดซึ่งเป็นอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สินอย่างมาก อีกทั้งบางโครงสร้างที่จำเป็นต้องมีการซ่อมแซมและการปรับปรุงคุณภาพการใช้งาน เนื่องจากการเสื่อมสภาพหรือมีความจำเป็นที่ต้องเพิ่มกำลังในการใช้งานจึงต้องมีการเสริมกำลังให้กับโครงสร้างดังกล่าว

วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (fiber-reinforced polymer หรือ fiber-reinforced plastic) ที่เรียกชื่อย่อว่า FRP จัดเป็นวัสดุผสม (composite materials) ชนิดหนึ่งซึ่งประกอบด้วยเส้นใย (fiber) ที่ทำหน้าที่รับแรงและวัสดุประสาน (adhesive) ทำหน้าที่ยึดเส้นใยให้รับแรงร่วมกัน โดยสามารถใช้เป็นทางเลือกหนึ่งในการทดแทนการเสริมกำลังโครงสร้างด้วยแผ่นเหล็กเนื่องจากวัสดุ FRP มีน้ำหนักเบา มีกำลังและมอดุลัสยืดหยุ่นสูง ไม่เกิดสนิม ทำให้สะดวกต่อการติดตั้งและไม่กระทบต่อโครงสร้างเดิม [1] จึงทำให้มีการนำ FRP มาใช้เสริมกำลังและซ่อมแซมให้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นที่แพร่หลายมากยิ่งขึ้น

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เห็นความสำคัญของปัญหาในกำลังรับแรงบิดของโครงสร้างที่กล่าวมาข้างต้น จึงได้ทำการศึกษาการเสริมกำลังรับแรงบิดพร้อมกับแรงอัดขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยในงานวิจัยนี้จะใช้พอลิเมอร์เสริมชนิดเส้นใยคาร์บอน (CFRP) นำมาศึกษา เนื่องจากมีความต้านทานคืบ (creep) ภายใต้แรงกระทำคงค้างและความล้า (fatigue) ที่สูงกว่าชนิดอื่น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาพที่ 1.1 ตัวอย่างการเกิดแรงบิดในองค์อาคารทั่วไป [2, 3]

(a) การเสริมกำลังรับแรงเฉือนของคาน (b) การเสริมกำลังรับแรงเฉือนของเสา

ภาพที่ 1.2 ตัวอย่างการเสริมกำลังด้วย CFRP [4]

1.2. วัตถุประสงค์

1.2.1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมภายใต้แรงบิดขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ได้แก่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

-รูปแบบการวิบัติ (mode of failure)

-ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับมุมหมุนขององค์อาคาร

-ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเครียดในเหล็กเสริมและแผ่น CFRP

-ระยะเรียงรอยแตกร้าว (crack spacing)

-มุมของรอยแตกร้าว (crack angle)

1.2.2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการเสริมกำลังรับแรงบิดของแผ่น CFRP

1.2.3. ศึกษาความเหมาะสมของสมการทำนายกำลังรับแรงบิดขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ในการประยุกต์ใช้ทำนายกำลังรับแรงบิดภายหลังการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP

1.3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา

1.3.1. เพื่อเข้าใจพฤติกรรมรับแรงบิดขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP

1.3.2. เพื่อเข้าใจผลกระทบของปริมาณเหล็กปลอก มุมงอขอมาตรฐานของเหล็กปลอก และแรงอัดตามแนวแกน ในการรับแรงบิดขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

1.3.2. เพื่อทราบความเหมาะสมของสมการออกแบบกำลังรับแรงบิดองค์อาคารที่เสริมด้วย CFRP ของงานวิจัยในอดีตและมาตรฐานการออกแบบ (ACI318-14 และ fib14)

1.4. ขอบเขตการศึกษา

1.4.1. ตัวแปรควบคุม

-คุณสมบัติวัสดุของคอนกรีตเสริมเหล็ก

-ขนาดหน้าตัดและความยาวของตัวอย่างทดสอบ

1.4.2. ตัวแปรที่ศึกษา

-การเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP แบบเต็มหน้าตัดตลอดช่วงคาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

-ปริมาณการเสริมเหล็กปลอก

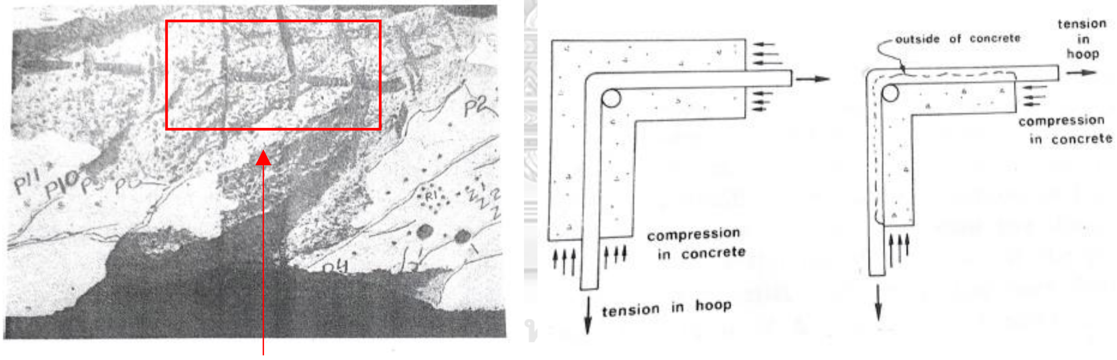
- ประเภทมุมของอมาตรฐาน

-ปริมาณแรงอัดแนวแกนขององค์อาคาร

บทที่ 2
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

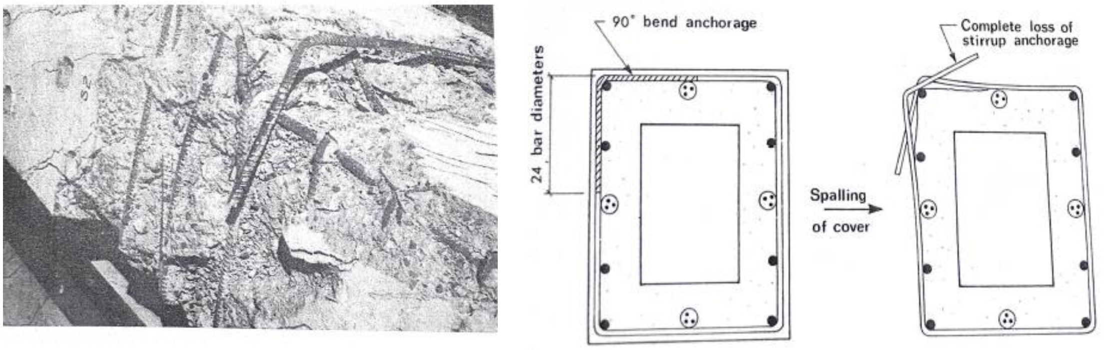
2.1. กำลังรับแรงบิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในปี ค.ศ. 1976 Mitchell และ Collins [5] ได้เริ่มศึกษารายละเอียดการออกแบบของเหล็กปลอกรับแรงบิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กในรูปแบบต่าง ๆ โดยได้ผลสรุปของการทดสอบและได้เสนอรูปแบบการเสริมเหล็กปลอก คือ การเสริมเหล็กปลอกเป็นวงรอบปิดและประเภทมุมของอมาตรฐานเป็น 135 องศา จึงสามารถรับแรงบิดได้มากที่สุด โดยการเสริมเหล็กปลอกดังกล่าวจะทำให้เมื่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงบิดจนกระทั่งเกิดคอนกรีตหลุดร่อนบริเวณมุมของหน้าตัด (spalling of concrete cover) ประเภทมุมของอมาตรฐานเป็น 135 องศาจะช่วยลดลดการเลื่อนตัวออกของเหล็กปลอกบริเวณมุมของคอนกรีต (lapped-spliced stirrup)



spalling of the concrete cover unspalled spalled

ภาพที่ 2.1 ตัวอย่างการทดสอบที่เกิดการหลุดล่อนบริเวณมุมหน้าตัด [4]



Lapped-spliced stirrup

ภาพที่ 2.2 ตัวอย่างการทดสอบที่เกิดการอ้าตัวออกของเหล็กปลอกบริเวณมุมหน้าตัด [5]

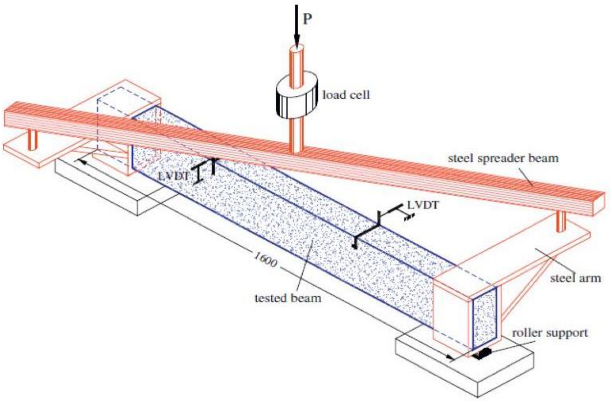
ในปี ค.ศ. 2013 Rahal [6] ได้ศึกษากำลังรับกำลังแรงบิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กของคอนกรีตที่กำลังอัดประลัยแบบปกติและแบบกำลังสูง โดยการพิจรณาเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับข้อกำหนดตามมาตรฐานของ ACI และ CSA จากผลการรวบรมผลการทดสอบทั้งหมด 152 ตัวอย่าง พร้อมทั้งการสร้างแบบจำลองสำหรับกำลังรับแรงบิดของคอนกรีตกำลังสูงและแบบปกติ สามารถหาสมการ 2.1 ได้ดังนี้

$$T_{n,Rahal} = 0.33\left(f_c^{'}\right)^{0.16} A_{cp}\left(A_l f_{yl} \frac{A_t f_{yt}}{s}\right)^{0.35} \leq 2.5\left(f_c^{'}\right)^{0.3}\left(\frac{A_{cp}}{\rho_{cp}}\right) \quad (2.1)$$

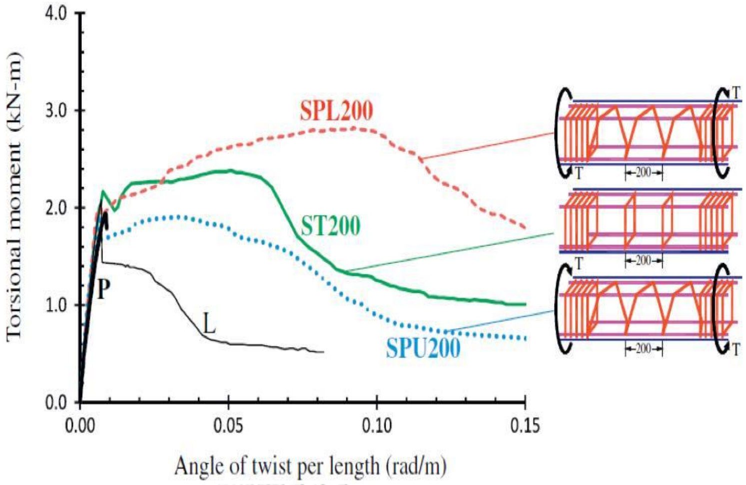
<u>หมายเหตุ</u> ข้อกำหนดของ ACI และ CSA จะคิดเฉพาะพื้นที่รอบเหล็กปลอก $\mathbf{A_{cp}}$ แต่จากสมการคิดพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด $\mathbf{A_c}$ โดยจากกราทดสอบดังกล่าวทั้ง 152 ตัวอย่าง ได้ผลการทดสอบใกล้เคียงกัน

ในปี ค.ศ. 2013 Chalioris และ Karayannis [7] ได้ทำการทดสอบวิจัยคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงบิดด้วยเหล็กปลอกหน้าตัดสี่เหลี่ยมแบบเกลียว การศึกษาพฤติกรรมของคานที่มีการเสริมแรงแบบเป็นเกลียวสี่เหลี่ยม เป็นการเสริมแรงแบบแนวขวางภายใต้แรงบิด โดยทำการทดสอบทั้งหมด 11 ตัวอย่าง โดยมีตัวแปรคือ การเสริมเหล็กปลอก (tie and spiral) ระยะเรียงเหล็กปลอก (100 mm 150 mm และ 200 mm) และทิศทางของแรงบิดที่ใช้ (ทิศทางเดียวกันและทิศทางตรงกันข้ามเหล็กปลอกเกลียว) จากผลการทดสอบพบว่า

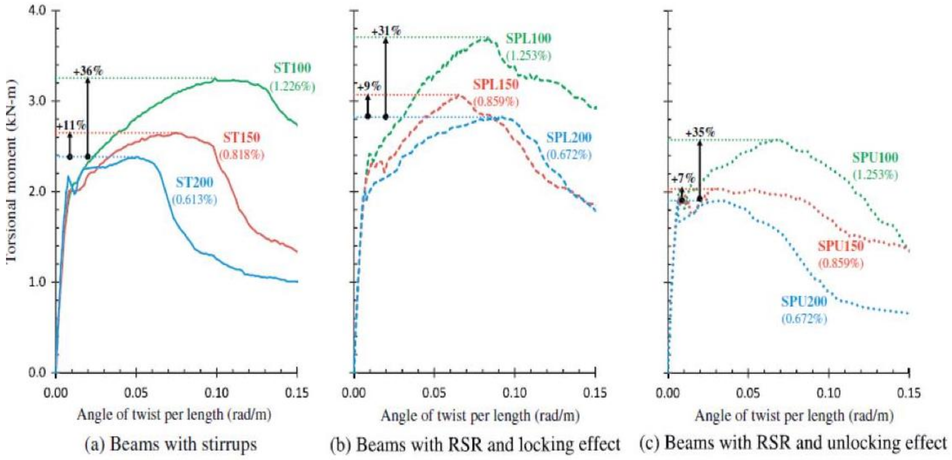
1. การเสริมเหล็กในทิศทางเดียวกับแรงบิดมีค่ามากกว่าทิศทางตรงกันข้าม
2. ระยะเรียงเหล็กปลอกน้อยมีค่ากำลังรับแรงบิดสูงกว่าระห่างระหว่างเหล็กปลอกมาก
3. การเสริมเหล็กปลอกแบบเกลียวในทิศทางเดียวกับแรงบิดสามารถรับแรงบิดสูงกว่าแบบปกติ (ตามขวาง) สำหรับตัวอย่างทดสอบระยะเรียงเหล็กปลอกเท่ากัน



ภาพที่ 2.3 การติดตั้งการทดสอบรับแรงบิดของงานวิจัย Chalioris และ Karayannis [7]



ภาพที่ 2.4 เปรียบเทียบรูปแบบการเสริมเหล็กปลอก [7]



ภาพที่ 2.5 ผลการทดสอบของ Chaliorisและ Karayannis [7]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2. การเสริมกำลังรับแรงบิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วย FRP

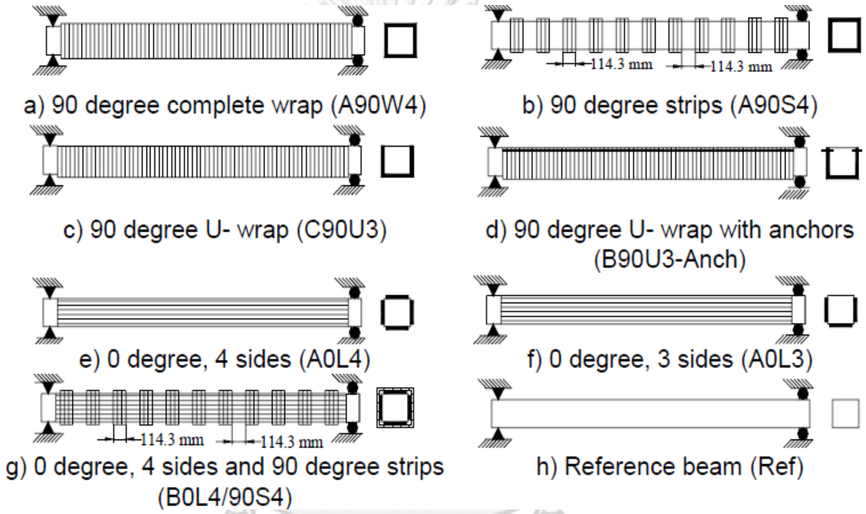
ในปี ค.ศ. 2002 Panchacharam และคณะ [8] ศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสเสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) ทำการทดสอบคานรับแรงบิดทั้งหมด 8 ตัวอย่าง แบ่งเป็นคานควบคุม 1 ตัวอย่าง และคานทดสอบปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงบิด 7 ตัวอย่าง ได้แก่ การเสริมกำลังพัน GFRP แนวตั้ง 90 องศา (เต็มตลอดช่วงคานทดสอบ, แบบแถบ, U-wrapped, และ U-wrapped ฝังหมุดยึด) การเสริมกำลังพัน FRP แนวนอน (3 ด้าน และ 4 ด้าน) ดังภาพที่ 2.9 ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 2.1 จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเสริมกำลังด้วยแผ่น GFRP สามารถเพิ่มกำลังกำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าว แรงบิดสูงสุด และมุมบิดของแรงบิดสูงสุด

2. การเสริมกำลังด้วยแผ่น GFRP แบบต่อเนื่องลักษณะแนวตั้ง (90-degree complete wrap) สามารถเพิ่ทกำลังรับแรงบิดมากที่สุด

3. การเสริมกำลังแบบ U-wrap ควรมีหมุดยึด (anchors) เพื่อป้องกการหลุดร่อนของแผ่น FRP

4. การเสริมกำลังแบบผสมกันของแนวนอนและแนวตั้ง ส่งผลให้สามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดและเพิ่มดัชนีความเหนียว (ductility) ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้



ภาพที่ 2.6 คานตัวอย่างทดสอบและการเสริมกำลังด้วย FRP รับแรงบิด [8]

ตารางที่ 2.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงบิดของ Panchacharam และ Belarbi [8]

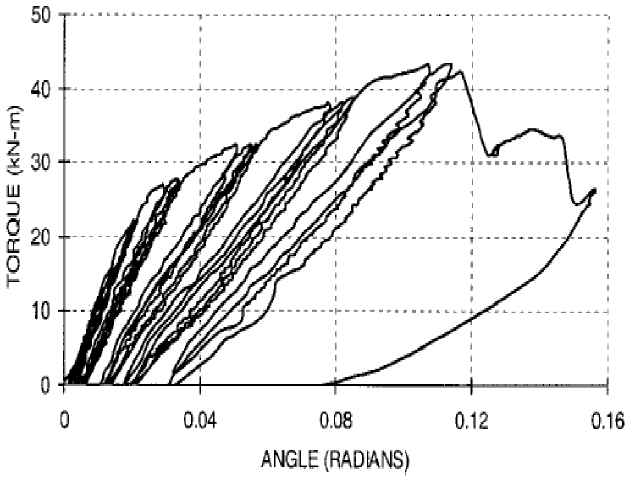
Test-Beam	Cracking torque (kN-m)	% of increase cracking torque	Ultimate torque (kN-m)	% of increase ultimate torque
A90W4	22	29	45	149
A90S4	21	35	34	90
C90U3	26	53	29	62
B90U3-Anch	25	47	26	43
A0L4	22	29	35	96
A0L3	21	24	25	39
BoL4/90S4	20	20	24	35
Ref	17	-	18	-

ในปี ค.ศ. 2004 Salom และคณะ [9] ทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัด L-shaped เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนชนิดแผ่นสำเร็จรูป (CFRP laminates) เพื่อทำการหากำลังรับแรงบิดของคานทดสอบทั้งหมด 6 ตัวอย่าง เริ่มทำการให้แรงบิดสูงสุดแก่ทุกคานทดสอบ จากนั้นทำการซ่อมแซมและเสริมกำลังจำนวณ 4 ตัวอย่าง โดยทำการศึกษาปัจจัยการเสริมกำลัง คือ รูปแบบการติดตั้ง FRP (0 องศา 45 องศาและ 90 องศา) และการใช้ตัวยึดปลายเชิงกล (mechanical end anchorage) แล้วนำมาทดสอบกำลังรับกำลังรับแรงบิดต่อ โดยกำหนดให้มี 2 คานที่ไม่ได้มาซ่อมแซมและเสริมกำลัง กำหนดให้เป็นคานควบคุม เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพหลังจากการเสริมกำลัง ได้ผลทดสอบดังนี้

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างคานทดสอบและผลการทดสอบของ Salom และคณะ [9]

Specimen	Composite laminate	Anchors used	Maximum torque (kN-m)	Increase in torsional strength	
				(kN-m)	(%)
TB1	Baseline	-	20.3	-	-
TB2	[0/90]	No	33.0	8.6	35
TB3	[±45]	Yes	43.4	19.0	77
TB4	[0/90]	Yes	37.3	12.9	53
TB5	[90]	Yes	35.7	11.3	46
TB6	Baseline	-	24.4	-	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 2.7 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมบิดของคาน TB3 [9]

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเสริมกำลังหลังจากคานรับแรงบิดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยชนิดแผ่นสำเร็จรูป สามารถเพิ่มกำลังได้ 77% เมื่อเทียบกับคานควบคุมที่ไม่ได้เสริมกำลัง

2. การเสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยชนิดแผ่นสำเร็จรูป โดยใช้ตัวยึดปลายเชิงกลสามารถเพิ่มกำลังได้ 50%

3. การติดตั้ง FRP เป็นมุม ±45 องศากับแกนนอนจะมีประสิทธิภาพกำลังรับแรงบิดสูงสุด

ในปี ค.ศ. 2006 Hii และ Al-Mahaidi [10] ศึกษาแรงยึดเหนี่ยวของแผ่น CFRP ในกำลังรับแรงบิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมและหน้าตัดกลวง ทั้งหมด 6 ตัวอย่าง ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังรับกำลังรับแรงบิดในการศึกษา คือ หน้าตัดคอนกรีต (หน้าตัดสี่เหลี่ยม และหน้าตัดกลวง) ระยะเรียงแถบ CFRP (0.50D และ 0.75D) จำนวณชั้นการพันรอบเสริม CFRP (1 และ 2 รอบ) ดังตารางที่ 2.3 พร้อมใช้การรังวัดด้วยภาพดิจิทัล (Digital photogrammetry) ในการวัดการเคลื่อนตัวของคานทดสอบ ดังภาพที่ 2.8 จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ของคานหน้าตัดสี่เหลี่ยมและหน้าตัดกลวง สามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวและแรงบิดสูงสุดเท่ากับ 40% และ 78% ตามลำดับ

2. ระยะเรียงแถบและจำนวณรอบที่พันของ CFRP มีการเพิ่มกำลังรับแรงบิดใกล้เคียงกัน

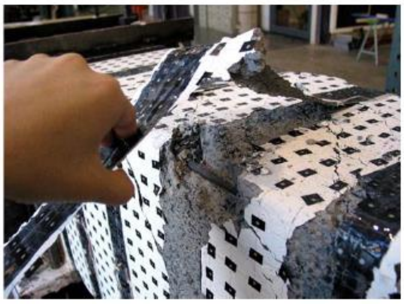
3. แรงบิดคอนกรีตแตกร้าวของคานหน้าตัดสี่เหลี่ยมสูงกว่าหน้าตัดกลวง แต่แรงบิดสูงสุดคานทั้ง 2 หน้าตัดใกล้เคียงกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

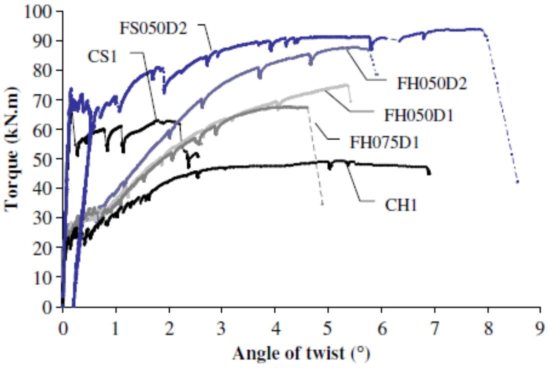
ตารางที่ 2.3 รายละเอียดตัวอย่างคานทดสอบรับแรงบิดของ Hii และ Al-Mahaidi [10]

No.	Beam designation	CFRP strengthening scheme			Fc′ (MPa)
		Layout scheme/section type	Number of layers	Strip spacing (D=full beam depth)	
1	CS1	Control beam (solid)	None	None	52.5
2	FS050D2	Full strips (solid)	2	0.50D	56.4
3	CH1	Control beam (box)	None	None	48.9
4	FH075D1	Full strips (box)	1	0.75D	48.9
5	FH050D1	Full strips (box)	1	0.50D	56.4
6	FH050D2	Full strips (box)	1	0.50D	52.8

(ก) ตัวอย่างการติดตั้ง



(ข) ตัวอย่างการวิบัติของ FH050D1



(ค) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมบิดของตัวอย่างทดสอบรับแรงบิด [10]

ภาพที่ 2.8 ผลการทดสอบตัวอย่างรับแรงบิดของ Hii และ Al-Mahaidi [10]

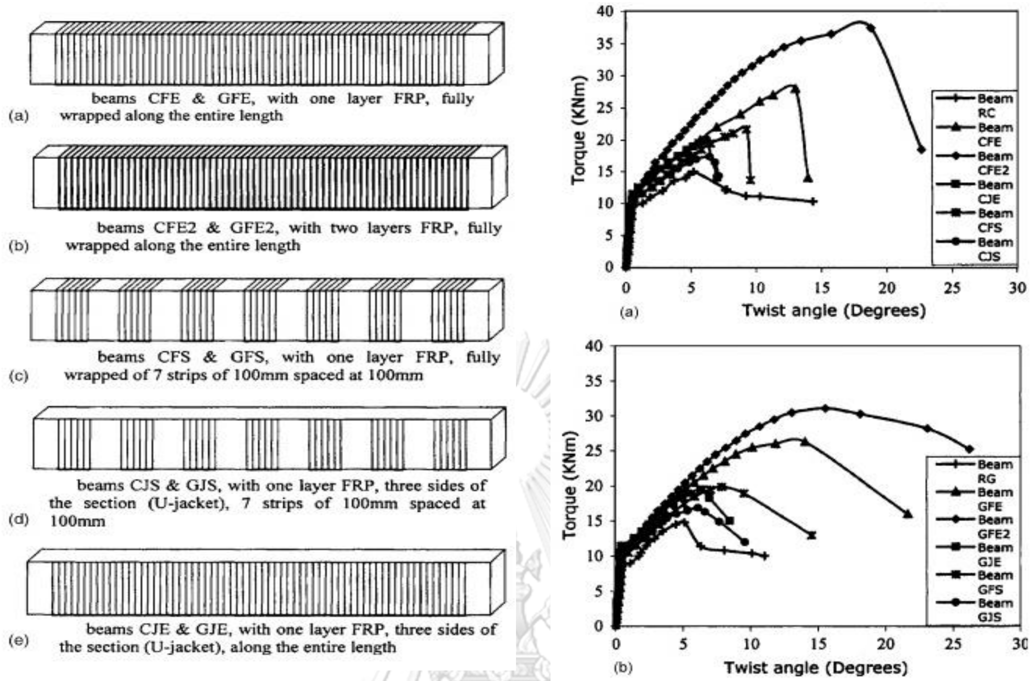
ในปี ค.ศ. 2007 Ameli และคณะ [11] ศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วย FRP ภายใต้แรงบิดทำการศึกษารูปแบบการเสริมกำลังและชนิด FRP ได้แก่ CFRP และ GFRP ทดสอบทั้งหมด 12 ตังอย่าง ในการพิจรณาหากำลังรับแรงบิดสูงสุด รูปแบบการวิบัติ รูปแบบรอยร้าว และดัชนีความเหนียวแต่ละชนิดของ FRP พร้อมทั้งทำศึกษาระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ANSYS มาเปรียบเทียบกับผลทดทอง ซึ่งผลที่ได้ทั้ง 2 มีความสอดคล้องกัน จากผลการทำสอบพบว่า

1. CFRP เพิ่มสติฟเนสแรงบิดมากกว่า GFRP แต่ทั้ง 2 มีดัชนีความเหนียวใกล้เคียงกัน

2. CFRP จะวิบัติแบบทันทีทันใด เมื่อถึงค่าแรงบิดสูงสุด แต่ในวัสดุ GFRP ไม่พังแบบทันทีทันใดหลังจากถึงค่าแรงบิดสูงสุดและมีเวลาหน่วงพอสมควรถึงจะวิบัติ แสดงให้เห็นว่า GFRP อาจเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับสถานการณ์การเสริมกำลังสำหรับรับแรงแผ่นดินไหว

3. รูปแบบการเสริม FRP แบบต่อเนื่องช่วงคาน สามารถรับแรงบิดได้มากที่สุด

4. รูปแบบของรอยร้าวคอนกรีตในคานที่เสริมกำลังมีการแพร่กระจายที่กว้างขึ้นตามความยาว เมื่อเทียบกับแต่ละรอยที่เกิดขึ้นในคานที่ไม่เสริมกำลัง



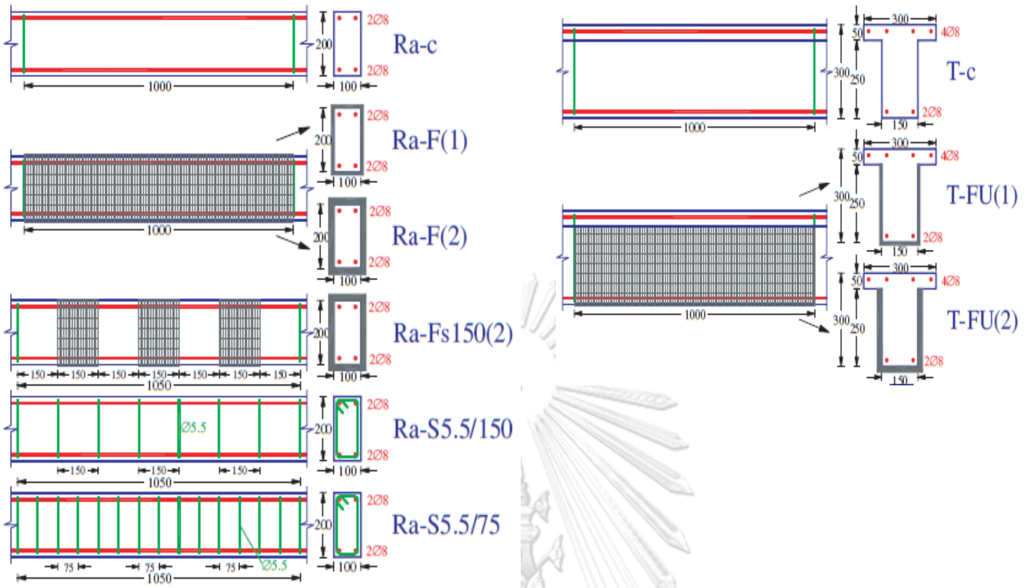
ภาพที่ 2.9 ตัวอย่างทดสอบและผลการวิจัยของ Ameli และคณะ [11]

ในปี ค.ศ. 2008 Chalioris [12] ทดสอบกำลังรับแรงบิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมและหน้าตัดรูปตัวที ทั้งหมด 14 ตัวอย่าง โดยทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงบิด ได้แก่ การปริมาณการเสริมเหล็กภายในคอนกรีต (ระยะเรียงเหล็กปลอก) การเสริมกำลังด้วย CFRP (ระยะเรียงแถบ CFRP และแบบต่อเนื่อง) ดังภาพที่ 2.12 ศึกษากำลังรับแรงบิดที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนได้ผลการทดสอบ ดังตารางที่ 2.4 จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเสริมกำลังด้วย CFRP สามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้ โดยต้องติดตั้งแผ่นตามแนวขวางของคาน

2. การเสริมกำลังด้วย CFRP แบบตลอดช่วงคาน (full wrap) มีประสิทธิภาพในกำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวและแรงบิดสูงสุดมากกว่าแบบแถบ (strip)

3. สำหรับคานรูปตัวทีที่เสริมกำลังด้วย CFRP การยึดเหนี่ยวระหว่างกาวอีพ็อคซีกับคอนกรีตมีการลดลงจนกระทั้งไม่สามารถรับแรงบิดได้ ดังนั้นควรใส่หมุดยึด (anchor) เพื่อให้ CFRP สามารถรับแรงบิดได้จนกระทั้งเกิดการฉีกขาด (rupture) จึงจะสามารถรับแรงบิดอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด



ภาพที่ 2.10 รายละเอียดตัวอย่างคานทดสอบของ Chalioris [12]

ตารางที่ 2.4 ผลการทดสอบตัวอย่างรับแรงบิดของ Chalioris [12]

ตัวอย่าง	แรงบิดคอนกรีตแตกร้าว (kN.m)	แรงบิดสูงสุด (kN.m)	แรงบิดจาก FRP (kN.m)
Ra-c	2.389	2.389	-
Ra-F(1)	2.800	4.868	2.479
Ra-F(2)	2.830	6.650	4.261
Ra-Fs150(2)	2.219	3.018	0.629
Ra-S5.5/150	2.300	2.300	-
Ra-S5.5/75	2.250	3.156	-
Rb-c	6.951	6.951	-
Rb-F(1)	8.794	10.050	3.099
Rb-Fs200(1)	6.728	9.315	2.364
Rb-Fs300(1)	6.960	7.520	0.569
Rb-S5.5/160	6.924	6.924	-
T-c	8.8481	8.481	-
T-FU(1)	8.994	8.994	0.513
T-FU(2)	8.775	9.450	0.969

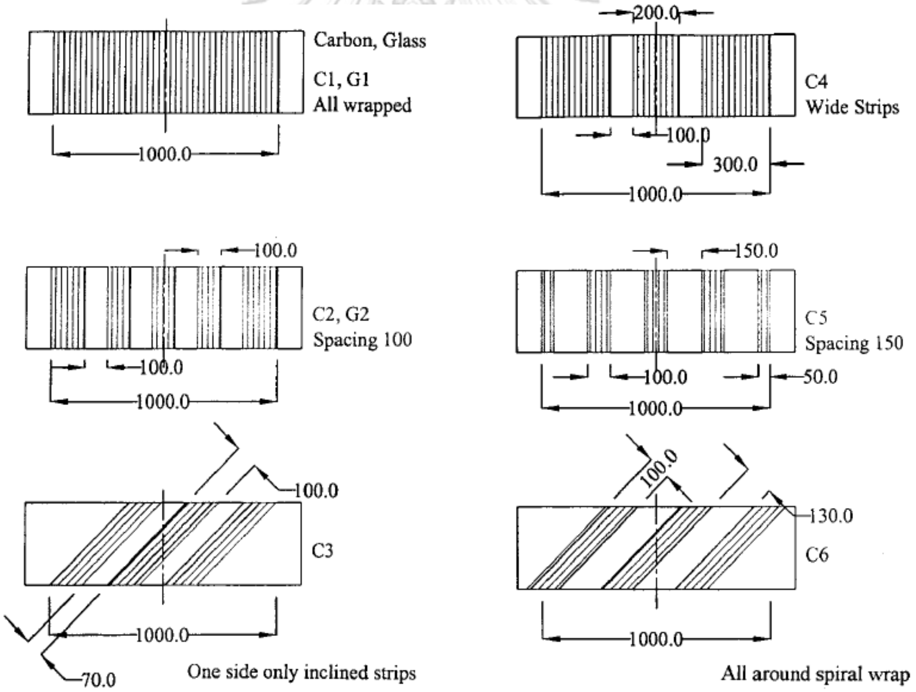
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ในปี ค.ศ. 2010 Deifalla และคณะ [13] ศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP และแผ่น GFRP ทั้งหมด 11 คานตัวอย่าง แบ่งเป็น คานควบคุม 3 ตัวอย่าง โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ การเสริมกำลังด้วย CFRP และ GFRP รูปแบบการเสริมพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ได้แก่ ระยะเรียงแถบติดตั้ง (100 mm และ 150 mm) มุมของการติดตั้งแผ่น FRP (90 องศา และ 45 องศา) ดังรูป (2.7) และได้ผลการทดสอบกำลังรับแรงบิด ดังรูป (2.8) จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

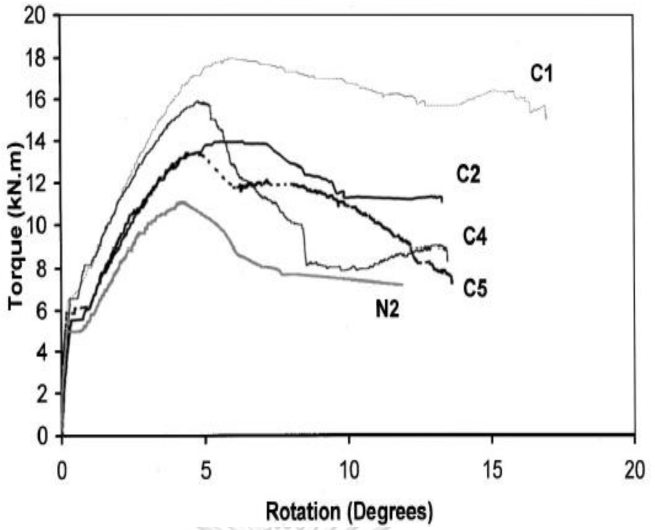
1. การเสริมกำลังแบบต่อเนื่องมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบแถบ (strips)

2. การติดตั้ง FRP แบบแถบที่มุม 45 องศา มีประสิทธิภาพรับแรงบิดมากกว่าแบบ 90 องศา

3. การติดตั้ง FRP แบบแถบเป็นมุม 90 องศาด้วย CFRP และ GFRP มีพฤติกรรมต่างกันเพียงเล็กน้อย สำหรับหลังจากจุดแรงบิดคอนกรีตแตกร้าว (post cracking)



ภาพที่ 2.11 ตัวอย่างทดสอบที่เสริมกำลังด้วย FRP [13]



ภาพที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมบิดของคานทดสอบ [13]

Deifalla , Awad และ Elgarhy (2012) [14] การศึกษาประสิทธิภาพของแถบ CFRP ที่เสริมกำลังพันรอบคานหน้าตัดตัว T ภายใต้แรงบิด ผู้ทำการวิจัยได้ศึกษา L-shaped beams และ T-shaped beams โดยศึกษารูปแบบการติดตั้งแผ่น CFRP ได้แก่ พันทั้งหมดตลอดคาน พันแบบแถบและพันแบบทแยง นอกจากนี้ยังทำการศึกษาการฝังหมุดยึด (Anchored U-jacket) ใน FRP เพื่อหาพฤติกรรมของแรงบิด ความเครียดของเหล็กปลอกในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก และรูปแบบการวิบัติ จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

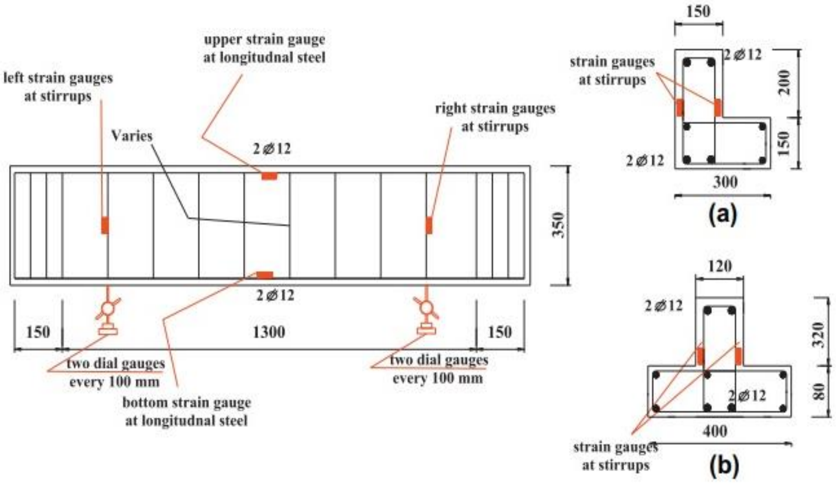
1. แบบ anchored inclined U-jacket strip และ inclined fully wrapped strip มีค่าแรงบิดประลัยและดัชนีความเหนียวใกล้เคียงกัน
2. มีการแบ่งรูปแบบวิบัติเป็น 3 รูปแบบ

Mode I เหล็กปลอกครากก่อน ในการวิบัติในระนาบเฉือนเนื่องจากคอนกรีตบดจากแรงอัดหรือการแตกแยกในแนวทแยงมากเกินไป

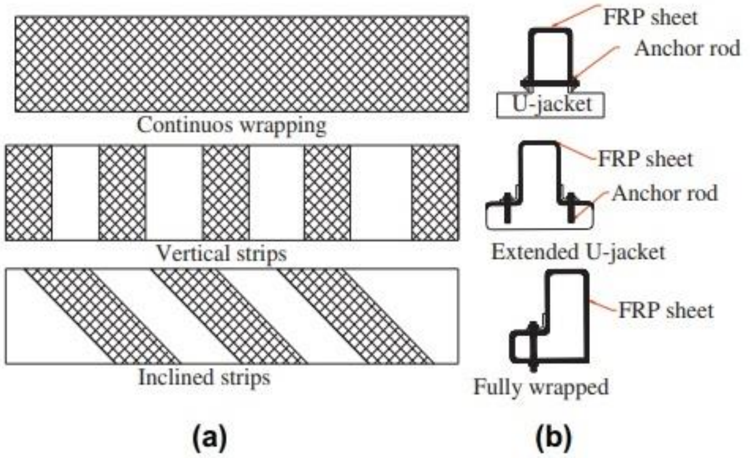
Mode II แผ่น FRP เกิดการหลุดล่อนบริเวณปลาย

Mode III แผ่น FRP เกิดการฉีกขาด เนื่องจากมีการเพิ่มรอยร้าวของคานบริเวณจุดกลางแผ่น FRP

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาพที่ 2.13 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบและการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียด[14]



ภาพที่ 2.14 รายละเอียดการเสริมกำลังด้วย FRP [14]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

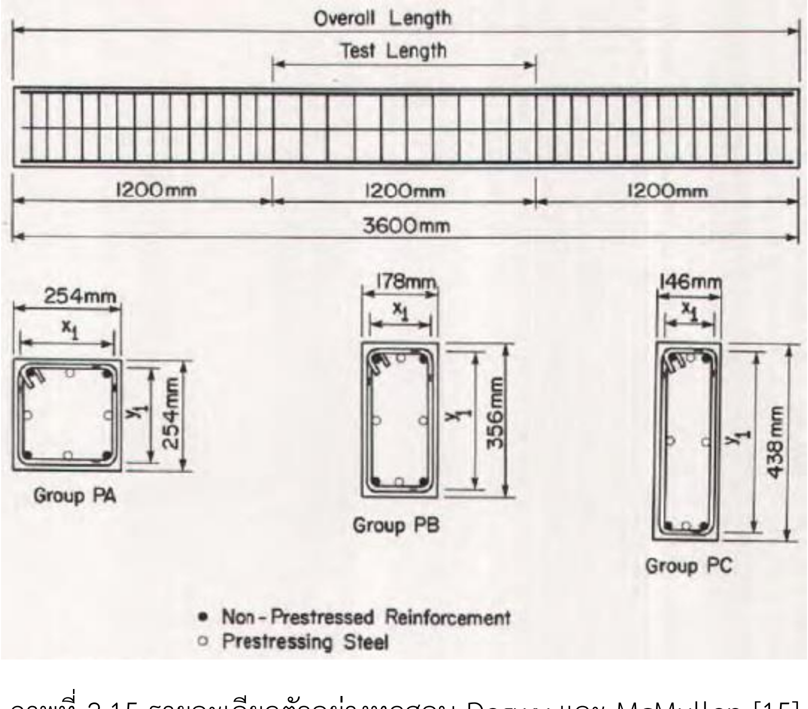
ตารางที่ 2.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงบิดและรูปแบบการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ [14]

Beam	GK (kN m²)	GK_{cr} (kN m²)	T_{cr} (kN m)	ψ_{cr} (°/m)	T_u kN m	ψ_u (°/m)	θ (°)	ε_t (%)	Failure mode
RB1	417	134	1.60	0.22	6.7	2.81	44	0.23	Mode I
RB1ER6-50	400	175	1.75	0.25	7.84	3.55	49	0.27	Mode III
RB1ER6-100	441	175	2.89	0.38	8.98	3.7	53	0.30	
LB1	520	168	2.10	0.24	8.16	3.13	29	0.20	Mode I
LB1ER2	640	304	2.72	0.32	11.56	4.09	39	0.36	Mode I
LB1ER3	530	170	3.40	0.38	10.20	3.91	36	0.39	Mode II
LB1ER4	650	170	4.08	0.50	12.92	4.38	44	0.42	Mode I
LB1ER7	692	190	4.76	0.78	14.96	5.09	52	0.48	Mode I
TB1	470	233	3.10	0.38	11.7	3.44	43	0.30	Mode I
TB1ER1	554	228	5.25	0.53	15.23	4.69	47	0.29	Mode II
TB1ER5	575	197	6.71	0.75	19.2	5.10	52	0.31	Mode II

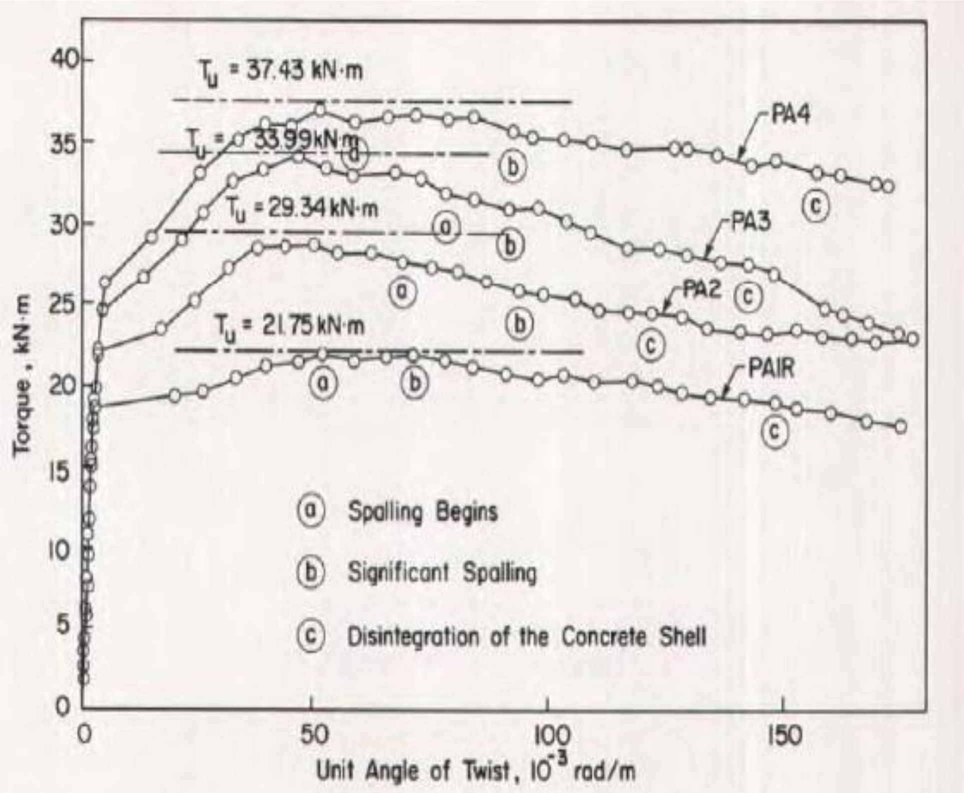
2.3. กำลังรับแรงบิดร่วมกับแรงอัดตามแนวแกนขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

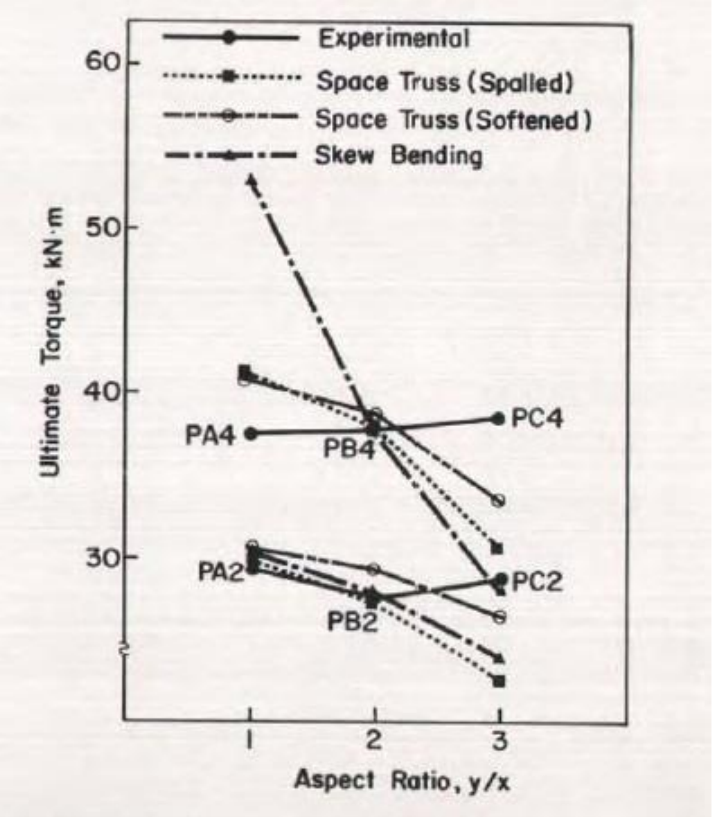
ในปี ค.ศ. 1985 Degwy McMullen [15] ได้ศึกษาพฤติกรรมกำลังรับแรงบิดของคานคอนกรีตคอนกรีตอัดแรง (prestressed concrete) และความแตกต่างอัตราส่วน y/x โดย x คือด้านสั้นของหน้าตัดตัวอย่าง และ y คือ ด้านยาวของหน้าตัดของหน้าตัดตัวอย่างทดสอบ โดยทำการทดสอบเป็นจำนวณ 13 ตัวอย่าง เพื่อทำการเปรียบเทียบแรงบิดคอนกรีตแตกร้าว แรงบิดสูงสุด สติฟเนสแรงบิด (Torsional stiffness) และความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับมุมบิดของตัวอย่างทดสอบ จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การหลุดร่อนของคอนกรีตสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งก่อนหรือหลังของจุดแรงบิดสูงสุด
2. ช่วงก่อนรอยแตกร้าวสำหรับปริมาณการเสริมเหล็กในตัวอย่างทดสอบของความแข็งแรงของตัวอย่างทดสอบไม่มีนัยสำคัญมาก
3. หลังจากช่วงรอยแตกร้าวปริมาณการเสริมเหล็กปลอกสามารถเพิ่มความแข็งแรงของตัวอย่างทดสอบมากขึ้น
4. เมื่ออัตราส่วน y/x มีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้กำลังรับแรงบิดเพิ่มขึ้น
5. เมื่อปริมาณการเสริมเหล็กในคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้อัตรส่วนระหว่างแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวกับแรงบิดสูงสุดลงลง



ภาพที่ 2.15 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ Degwy และ McMullen [15]



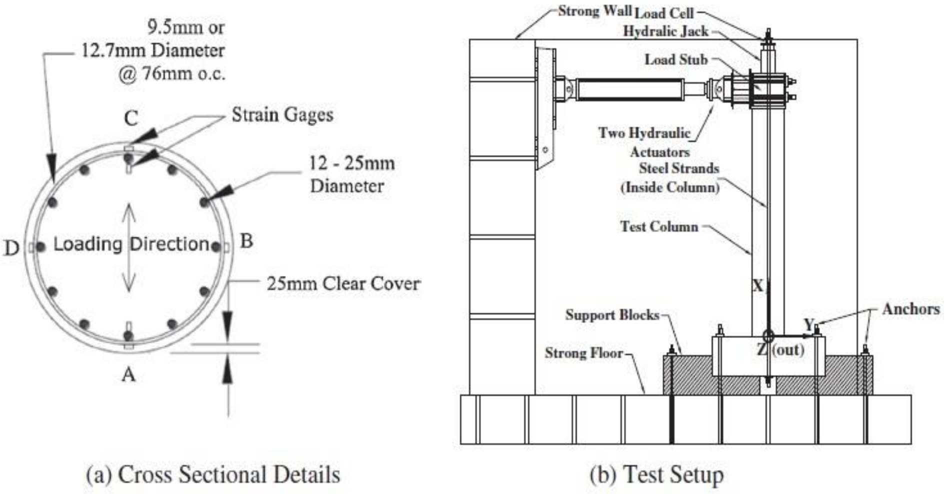


ภาพที่ 2.16 ตัวอย่างผลการทดสอบ Degwy และ McMullen [15]

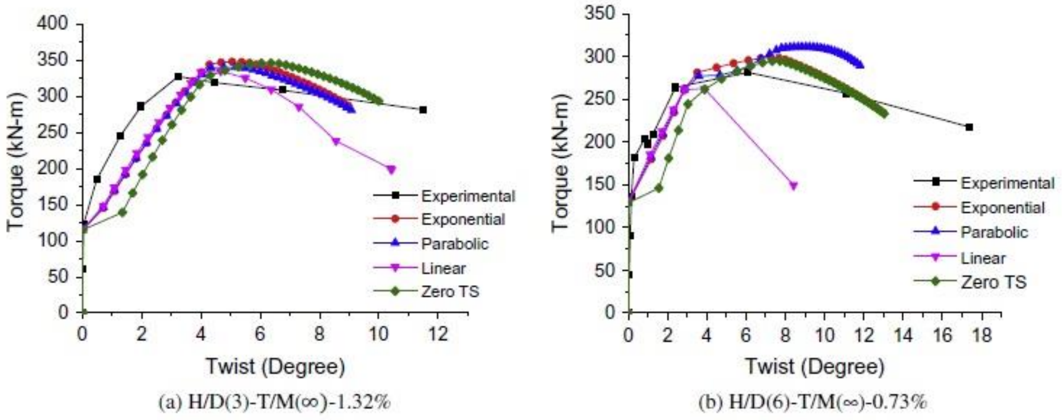
ในปี ค.ศ. 2015 Mondal [16] ทำการศึกษาเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดกลมต้านทานแรงบิด โดยการทดสอบเสาจำนวณ 2 ตัวอย่าง และวิธี Softened Truss Model (STM) เพื่อหาค่าแรงบิดคอนกรีตแตกร้าว แรงบิดสูงสุด และพฤติกรรมในกำลังรับแรงบิดของเสาหน้าตัดกลมสำหรับการหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับมุมบิดของตัวอย่างทดสอบ ได้ข้อสรุปดังนี้

1. วิธี STM สามารถทำนายความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับมุมบิดของเสารับแรงบิดและแรงอัดตามแนวแกนได้

2. วิธี Tension stiffening Softened Truss Model (TS-STM) สามารถทำนายการวิบัติของจากแรงบิดคอนกรีตแตกร้าว, เหล็กเสริมคราก และการอัดแตก (crushing) ของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ใกล้เคียงกับผลการทดสอบเสารับแรงบิดทั้ง 2 ตัวอย่าง



ภาพที่ 2.17 รายละเอียดตัวอย่างการทดสอบ [16]



ภาพที่ 2.18 ตัวอย่างการทดสอบ [16]

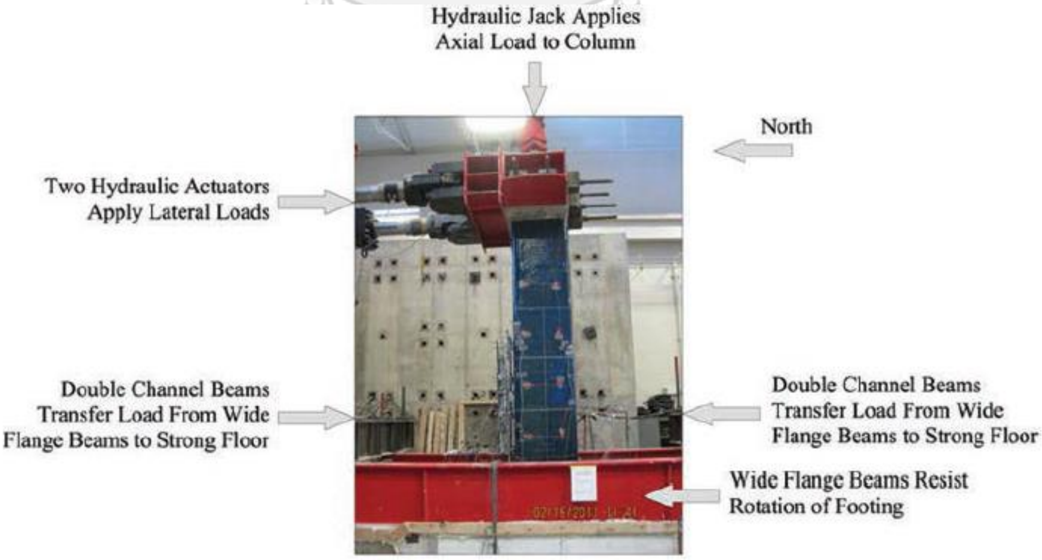
2.4. การเสริมกำลังรับแรงบิดร่วมกับแรงอัดขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วย FRP

ในปี ค.ศ. 2014 He และคณะ [17] ทำการศึกษาการรับแรงบิดหลังจากซ่อมแซมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับกำลังแรงบิดจากผลกระทบของแผ่นดินไหวด้วยการเสริมกำลังด้วยด้วยแผ่น CFRP จากนั้นทำการทดสอบเสารับแรงบิดอันเนื่องมาจากแรงแผ่นดินไหว โดยกำหนดให้เสาตัวอย่างทดสอบรับแรงอัดตามแนวแกน (axial load) และแรงบิด(cyclic torsional) ดังภาพที่ 2.1 ผลการทดสอบดังตารางที่ 2.9 และตัวอย่างความสัมพันธ์แรงบิดและมุมบิดของเสาทดสอบดังรูป 2.22 จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ ดังนี้

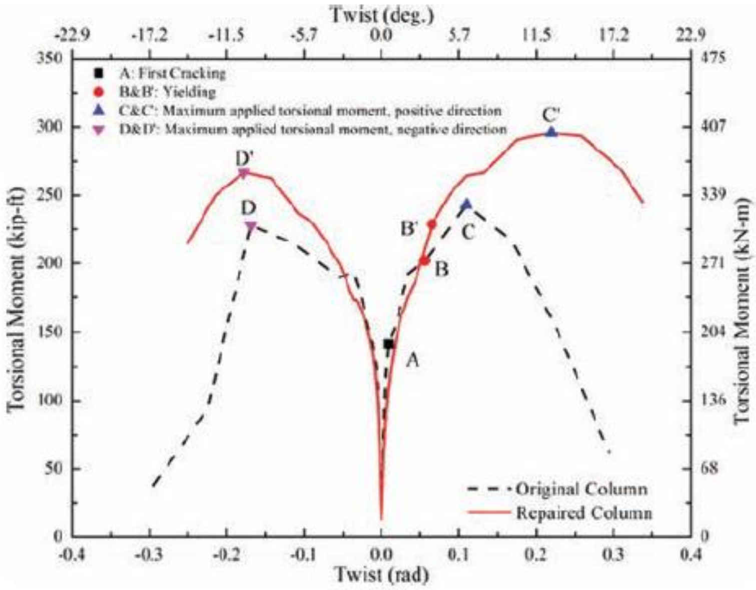
1. รูปแบบการวิบัติเป็นแบบการฉีกขาดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่ง CFRP ทำการโอบรัดเสาป้องกันการเพิ่มของรอยแตกร้าวของเสา และส่งผลให้เพิ่มกำลังรับกำลังรับแรงบิด

2. การเสริมกำลังด้วย CFRP ส่งผลให้มุมบิดและดัชนีความเหนียวภายใต้แรงบิดของเสาตัวอย่างทดสอบเพิ่มขึ้น

3. จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับมุมบิด เสาตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP ช่วงก่อนถึงจุดแรงบิดสูงสุดจะมีความชันสูงกว่าเสาที่เสริมกำลังด้วย CFRP จึงทำให้เกิดการพังแบบทันทีแต่การเสริมกำลังด้วย CFRP สามารถลดความชันเนื่องจากโอบรัดเสาและดูดซับพลังงานไว้ได้



ภาพที่ 2.19 ตัวอย่างการติดตั้งเครื่องมือทอสอบ [17]



ภาพที่ 2.20 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมบิดของเสาทดสอบ [17]

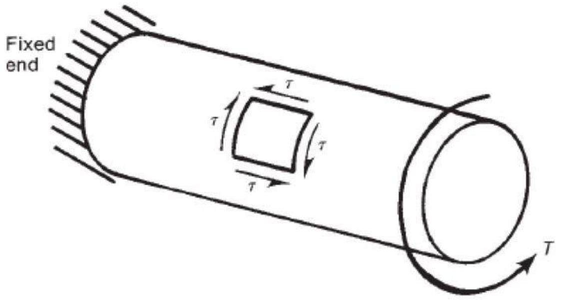
ตารางที่ 2.6 ผลการทดสอบของ He และคณะ [17]

		Original column	Repaired column
Cracking	T_{cr}, kip-ft (kN-m)	141.6 (192.0)	—
	θ_{cr}, degrees	0.52	—
Yielding	T_y, kip-ft (kN-m)	203.2 (275.5)	226.7 (307.4)
	θ_y, degrees	3.21	3.72
Maximum	T_{max}, kip-ft (kN-m)	244.4 (331.4)	295.6 (400.7)
	θ_{max}, degrees	6.47	12.49
Torsional ductility	$\mu\theta$ (θ_{max}/θ_y)	2.02	3.36

บทที่ 3
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

3.1. ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับแรงบิด

แรงบิดหรือโมเมนต์บิด คือ โมเมนต์ที่กระทำกับแกนตามยาวขององค์อาคาร เมื่อแรงบิดกระทำกับองค์อาคารจะเกิดหน่วยแรงเฉือนบริเวณผิว ดังแสดงในภาพที่ 3.1 แรงบิดส่วนใหญ่มักเกิดจากการกระทำของน้ำหนักหรือแรง ที่ไม่ผ่านจุดศูนย์ถ่วงของแรงเฉือน (shear center)ของรูปหน้าตัด

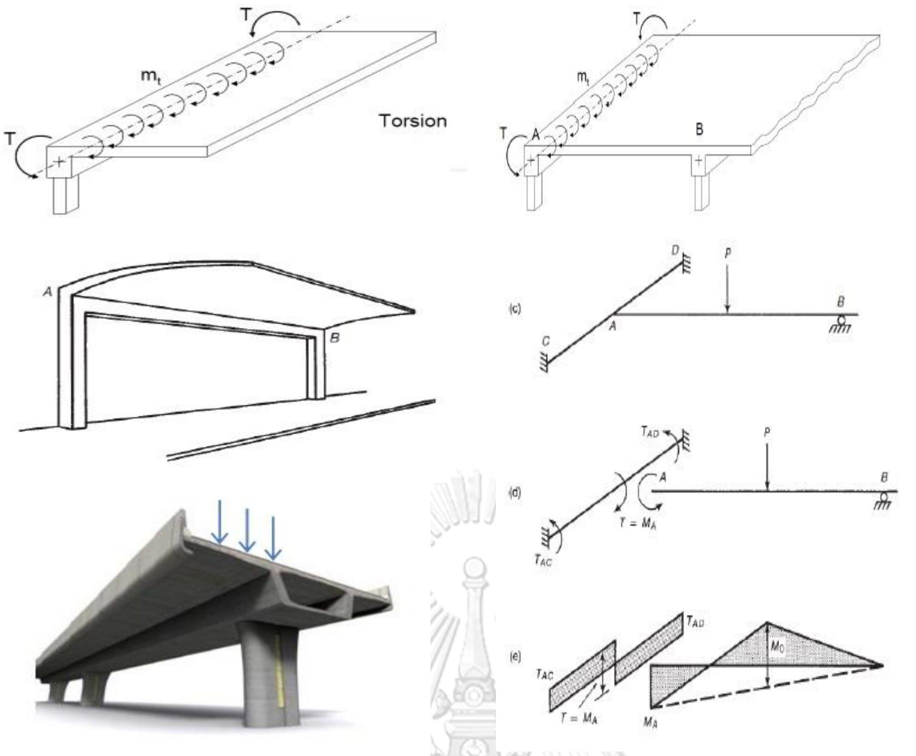


ภาพที่ 3.1 ภาพตัวอย่างองค์อาคารรับแรงบิด [18]

แรงบิดที่กระทำต่อส่วนของโครงสร้างสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

1. โมเมนต์บิดสมดุล (equilibrium torsion) เป็นแรงบิดที่เกิดขึ้นในองค์อาคารซึ่งคำนวณได้ด้วยหลักสมดุลของแรง (static equilibrium equation) เพียงอย่างเดียวได้ หากไม่นำแรงบิดที่เกิดขึ้นมานี้มาพิจรณา โครงสร้างจะวิบัติลงมาทันทีเนื่องจากเกิดความไม่สมดุลของโครงสร้าง ดังภาพ 3.2(ก) แรงบิดที่เกิดขึ้นจากการถ่ายโมเมนต์ไปยังคาน $T = M_t$

2. โมเมนต์บิดสอดคล้อง (compatibility torsion) เป็นแรงบิดที่เกิดในองค์อาคารซึ่งต้องอาศัยทั้งหลักสมดุลของแรงและหลักความสอดคล้องของการเปลี่ยนรูปหรือการเสียรูปของโครงสร้างซึ่งเกิดขึ้นในโครงสร้างแบบอินดีเทอร์มิเนท เช่น คานขอบนอก (edge beam) ที่รองรับแผ่นพื้น ดังภาพที่ 3.2(ข) เมื่อมีแรง P มากระทำตรงกึ่งกลางระหว่างช่วง AB จะทำให้เกิดโมเมนต์ขึ้น แล้วเกิดการส่งถ่ายโมเมนต์ไปยังขอบคานที่จุด A (M_A) จากนั้นจะส่งถ่ายโมเมนต์ไปยังคานขอบนอก ซึ่งจะทำให้เกิดแรงบิดเกิดขึ้น ดังภาพ 3.2 (ข-d) จะได้ $T = M_A$ โดย $T = T_{AC} + T_{AD}$ อย่างไรก็ดี หากไม่นำแรงบิดนี้มาพิจารณา โครงสร้างก็จะยังไม่พังลงมาทันที แต่จะปรากฏรอยร้าวให้เห็นเป็นจำนวณมาก



(ก) โมเมนต์บิดสมดุล (ข) โมเมนต์บิดสอดคล้อง

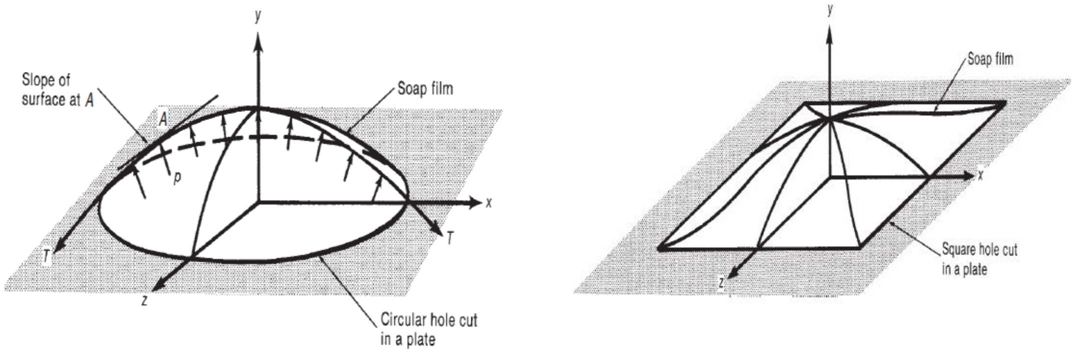
ภาพที่ 3.2 ภาพตัวอย่างประเภททองค์อาคารรับแรงบิด [18]

3.1.1 หน่วยแรงเฉือนเนื่องจากแรงบิด

แรงบิดทำให้เกิดหน่วยแรงเฉือน (shearing stress) โดยหน่วยแรงเฉือนเท่ากับศูนย์ตรงจุดแกนของหน้าตัด และจะเพิ่มขึ้นเป็นเส้ยตรงเชิงเส้นเป็นหน่วยแรงเฉือนสูงสุดตรงขอบด้านนอก ดังแสดงในภาพที่ 3.3 เมื่อแรงบิดมีขนาดน้อยลงจะส่งผลให้หน่วยแรงเฉือนจะมีขนาดน้อยลงตามแรงบิด และหน่วยแรงดึงหลัก (principal tensile stress) หลักที่ถูกเปลี่ยนจากแรงเฉือนเหล่านี้ก็มีขนาดลดลงเช่นกัน ในสภาวะนี้เป็นสภาวะคอนกรีตไม่ได้ร้าวและประพฤติตัวเป็นวัตถุยืดหยุ่น

(ก) หน้าตัดวงกลม (ข) หน้าตัดสี่เหลี่ยม

ภาพที่ 3.3 ภาพตัวอย่างการกระจายหน่วยแรงเฉือนของคอนกรีตล้วน [18]



(ก) หน้าตัดวงกลม (ข) หน้าตัดสี่เหลี่ยม

ภาพที่ 3.4 ภาพตัวอย่างการกระจายหน่วยแรงเฉือนด้วย soap-film analogy [18]

หน่วยแรงเฉือนสูงสุดของหน้าตัดวงกลม มีค่า

$$\tau_{\max} = \frac{Tr}{J} \tag{3.1}$$

เมื่อ $\tau_{\max}$	คือ	หน่วยแรงเฉือนสูงสุดของหน้าตัดวงกลม	(psi)
T	คือ	แรงบิด	(lb.-in)
r	คือ	รัศมีหน้าตัดวงกลม	(in)
J	คือ	โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้ว = $\pi r^4 / 2$	(in^4)

หน่วยแรงเฉือนสูงสุดของหน้าตัดสี่เหลี่ยม มีค่า

$$\tau_{\max} = \frac{T}{\alpha x^2 y} \tag{3.2}$$

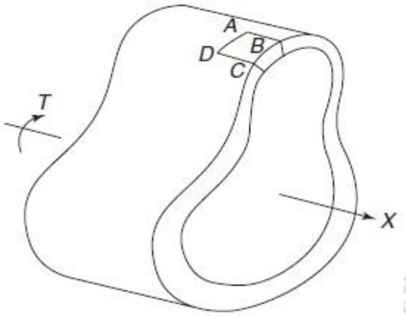
เมื่อ x คือ ความยาวด้านสั้นของหน้าตัดสี่เหลี่ยม, y คือความยาวด้านยาวของหน้าตัดสี่เหลี่ยม และ มีค่าเริ่มจากจาก 0.208 สำหรับ $y/x = 1.0$ (หน้าตัดสี่เหลี่ยม) ถึง 0.333 สำหรับ $y/x = \infty$ (หน้าตัดกว้างมาก) สามารถหาค่าประมาณ α ดังจากสมการ

$$\alpha = \frac{1}{3 + 1.8x/y} \tag{3.3}$$

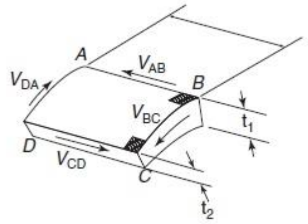
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.1.2 ทฤษฎีผนังบาง

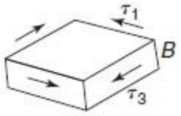
ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือน (τ) กับแรงบิด (T) โดยใช้ทฤษฎีผนังบาง ดังภาพที่ 3.5 แสดงภาพตัดขวางของชิ้นส่วนหน้าตัดกลวง (hollow section)



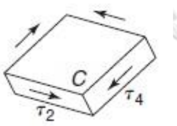
(ก)



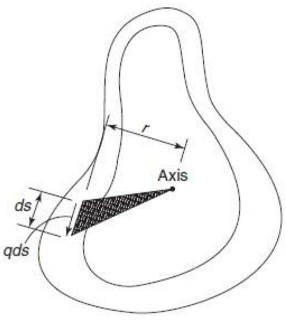
(ข)



(ค)

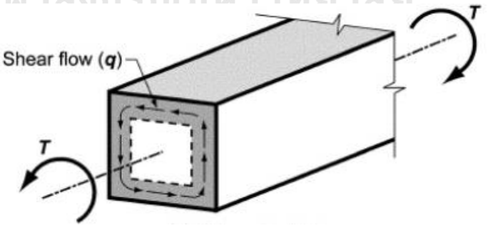


(ง)

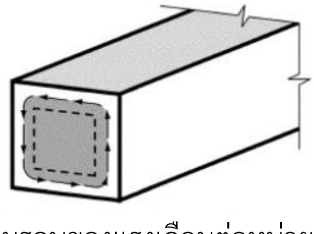


(จ)

ภาพที่ 3.5 รายละเอียดภาพตัดขวางของชิ้นส่วนหน้าตัดกลวง [18]



(ก) การไหลของแรงเฉือนต่อหน่วยความยาวภายใต้แรงบิด



(ข) พื้นที่ล้อมรอบของแรงเฉือนต่อหน่วยความยาว

ภาพที่ 3.6 ตัวอย่างแสดงการไหลของแรงเฉือนต่อหน่วยความยาว [18]

ทำการวิเคราะห์ชิ้นส่วนเล็กๆ ของ ABCD ที่นำมาจากภาพที่ตัดขวาง ดังรูป (ข) โดยจะได้แรงเฉือนเป็น $V_{AB}, V_{BC}, V_{CD}, V_{DA}$ จากที่คำนวณมาจากหน่วยแรงเฉือน ดังนี้

$$V_{AB} = \tau_1 t_1 dx \tag{3.1}$$

$$V_{CD} = \tau_2 t_2 dx \tag{3.2}$$

โดย t_1 และ t_2 คือ ความหนาของผนัง

จากสมการ $\sum F_x = 0$ จะได้

$$V_{AB} = V_{CD} \tag{3.3}$$

นำสมการ (1) และ (2) ไปแทนใน (3) จะได้

$$\tau_1 t_1 = \tau_2 t_2 \tag{3.4}$$

จากสมการ (4) กำหนดให้การไหลของแรงเฉือนต่อหนึ่งหน่วยความยาวของผนังบาง

$$q = \tau t \tag{3.5}$$

จากการพิจรณารูป (c) และ (d) พบว่า $\tau_1 t_1 = \tau_3 t_3$ และ $\tau_2 t_2 = \tau_4 t_4$ ดังนั้น

$$\tau_1 t_1 = \tau_2 t_2 = q = \tau_3 t_3 = \tau_4 t_4 \tag{3.6}$$

แสดงว่า q เป็นค่าคงที่รอบเส้นรอบรูปของผนังบางที่ทำให้เกิดแรงบิด

จากภาพที่ (จ) จะได้แรงบิดจากหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในผนังบาง $= qds$ โดยที่ ds คือ ความยาวของเส้นศูนย์กลางถึงกึ่งกลางหน้าตัดผนังบาง (มีค่าน้อยมาก)

$$Moment = r \times qds \tag{3.7}$$

โดย r คือ ระยะห่างของเส้นศูนย์กลางถึงจุดที่ทำให้เกิดหน่วยแรงเฉือน

เมื่อนำโมเมนต์ที่เกิดขึ้นมาอินทิเกรตผ่านเส้นรอบรูปทั้งหมด จะได้แรงบิดทั้งหมดที่เกิดขึ้นในผนังบาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

$$T = q\int_{p} rds \tag{3.8}$$

จากภาพที่ 3.5(จ) พื้นที่ส่วนที่แรงเงา $=(r \times ds)/2$, ดังนั้น $\int_{p} rds = 2$ เท่าของพื้นที่ที่ล้อมรอบแรงเฉือนต่อหน่วยความยาว, A_0 จะได้

$$T = 2qA_0 \tag{3.9}$$

นำ $q = \tau t$ แทนลงในสมการ (9) จะได้หน่วยกำลังรับแรงบิดของหน้าตัดกลวงดังนี้

$$\tau = \frac{T}{2A_0 t} \tag{3.10}$$

3.1.3 กำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าว

คอนกรีตจะเริ่มเกิดรอยแตกร้าวก็ต่อเมื่อความเค้นดึงจากแรงบิด (τ_c) เท่ากับความเค้นดึงประลัยของคอนกรีต (f_t) เมื่อคอนกรีตรับทั้งแรงดึงและแรงดัด (biaxial)

จากสูตร $$f_t = 0.33\sqrt{f_c'} \tag{3.11}$$
จะได้ $$\tau_c = f_t = 0.33\sqrt{f_c'} \tag{3.12}$$

เมื่อนำสมการ (3.12) แทนลงในสมการ (3.10) จะได้

$$T_{cr} = 0.33\sqrt{f_c'}\,2A_0 t \tag{3.13}$$

เมื่อ A_0 คือ พื้นที่ที่ล้อมรอบด้วยเส้นแรงเฉือนต่อหน่วยความยาวจากแรงบิด

t คือ ความหนาของผนังบาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สำหรับคานหน้าตัดสี่เหลี่ยม สามารถคำนวณ A_0 และ t ได้สมการดังนี้

$$A_0 = \frac{2A_{cp}}{3} \tag{3.14}$$

$$t = \frac{0.75A_{cp}}{P_{cp}} \tag{3.15}$$

นำสมการ (3.14) และ (3.15) แทนลงในสมการ (3.13) จะได้แรงบิดคอนกรีตแตกร้าว ดังสมการ

$$T_{cr} = 0.33\sqrt{f_c'}\left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}}\right) \tag{3.16}$$

เมื่อ	f_c'	คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต	(MPa)
	A_{cp}	คือ พื้นที่ล้อมด้วยเส้นรอบวงภายนอกของหน้าตัดคาน	(mm²)
	P_{cp}	คือ ความยาวเส้นรอบวงภายนอกของหน้าตัดคาน	(mm)

สำหรับองค์อาคารรับแรงบิดพร้อมกับแรงอัดตามแนวแกน เมื่อนำใช้วิธี Mohr's Circle การหาความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณที่ผิวสามารถคำนวณแรงบิดคอนกรีตแตกร้าว ดังสมการ (3.17)

$$T_{cr} = 0.33\sqrt{f_c'}\left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}}\right)\sqrt{1+\frac{N_u}{0.33A_g\sqrt{f_c'}}} \tag{3.17}$$

เมื่อ	f_c'	คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต	(MPa)
	A_{cp}	คือ พื้นที่ล้อมด้วยเส้นรอบวงภายนอกของหน้าตัดคาน	(mm²)
	P_{cp}	คือ ความยาวเส้นรอบวงภายนอกของหน้าตัดคาน	(mm)
	N_u	คือ แรงอัดตามแนวแกนขององค์อาคาร	(N)
	A_g	คือ พื้นที่ทั้งหมดของหน้าตัดองค์อาคาร	(mm²)

3.1.4 กำลังรับแรงบิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธี Space Truss Analogy

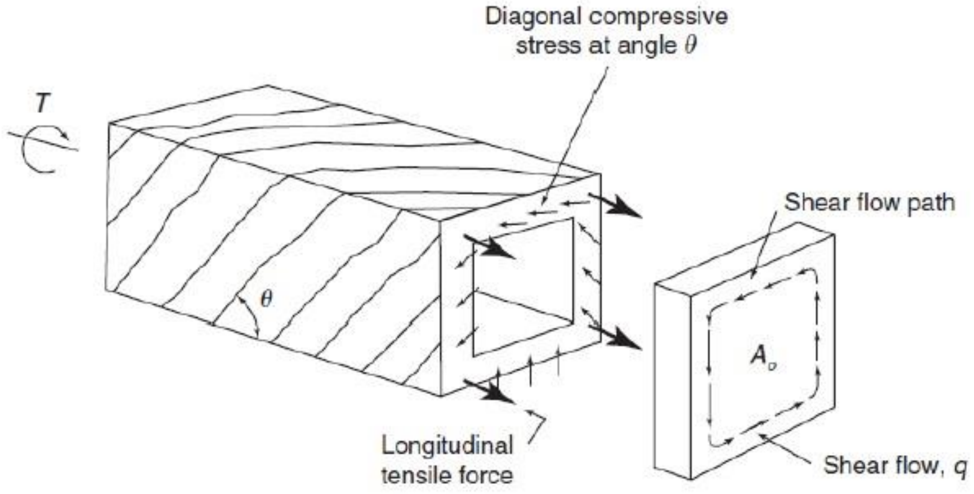
วิธี Space Truss Analogy (STA) เป็นการสร้างแบบจำลองสำหรับการหาค่ากำลังรับแรงบิดขององค์อาคาร ได้ถูกการนำเสนอโดย Lampert และ Thurlimann (1971) และ Lampert และ Collins (1972) โดยทฤษฎีนี้ได้ถูกนำไปใช้ใน ACI European และ Japanese Codes

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย Chulalongkorn University

วิธี STA เป็นคำนวณในรูปแบบ 3 มิติ โดยการรวมกับวิธีโครงถัก (truss analogy) ในการคำนวณแรงเฉือนในระนาบ 2 มิติ สำหรับคานหน้าตัดกลวงและหน้าตัดเต็มในการวิเคราะห์แบบ STA สามารถวิเคราะห์เป็นแบบท่อได้ เนื่องจากเมื่อเกิดรอยร้าวจากแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวนั้นมีผลกระทบกับกำลังรับแรงบิดของคอนกรีตเสริมเหล็กเพียงเล็กน้อยและสามารถละเลยได้

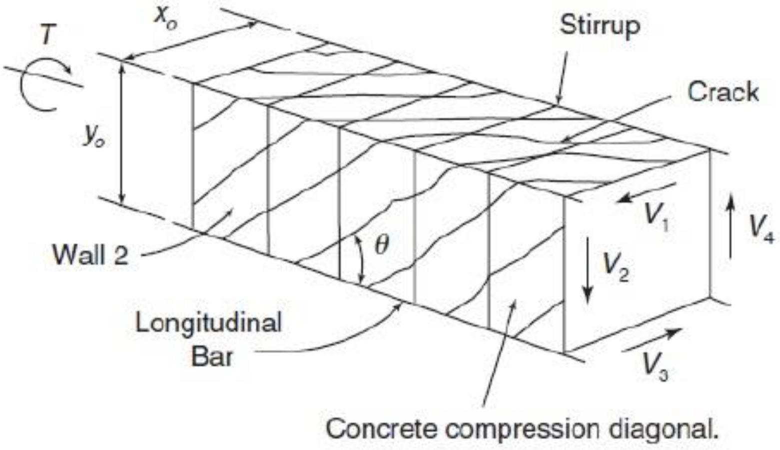
จากการนำหน้าตัดของคานหน้าตัดเต็มที่เกิดจากกำลังรับแรงบิด มาแปลงเป็นแบบผนังบางในภาพที่ 3.7 โดยกำหนดให้การไหลแรงเฉือนต่อหน่วยความยาว (shear flow, q) ต้านทานแรงบิดที่เกิดขึ้นเป็นเส้นรอบวงภายในหน้าตัดและจะได้ A_0 คือ พื้นที่ปิดของแรงเฉือนต่อหน่วยความยาว

ภายหลังจากเกิดรอยแตกร้าว คอนกรีตที่ต้านทานแรงบิดจะเป็นคอนกรีตส่วนที่อยู่ภายในเส้นรอบวงของเหล็กปลอกเท่านั้น เนื่องจากกำหนดให้คอนกรีตไม่สามารถรับแรงดึงหลังจากช่วงหลังคอนกรีตแตกร้าว



ภาพที่ 3.7 รายละเอียดแรงที่เกิดขึ้นในหน้าตัดผนังบางรับแรงบิด [18]

โครงถักจะสมมติให้เป็นโครงถักกลวง โดยมีเส้นวงรอบปิดเท่ากับเหล็กปลอกและมีเหล็กตามยาวตรงมุมของเหล็กปลอก จากนั้นคอนกรีตจะทำหน้าที่รับแรงอัดที่เกิดขึ้นระหว่างรอยร้าว ดังภาพที่ (3.8) กำหนดให้ความสูงและความกว้างของโครงถักคือ x_0 และ y_0 โดยปกติแล้วมุมรอยร้าวคอนกรีตอัดแตกกับแนวแกนตามยาว $(\theta) = 45$ องศา



ภาพที่ 3.8 ละเอียดการเกิดรอยร้าวของผนังบางรับแรงบิด [18]

3.1.4.1 กำลังรับแรงบิดจากเหล็กปลอก

กำลังรับแรงบิดสูงสุดที่คำนวณจากเหล็กปลอกสามารถพิจรณาจากหน้าตัดดังภาพที่ 3.8 โดยกำหนดให้เหล็กปลอกรับแรงดึงถึงจุดครากและแรงเฉือนต่อหน่วยความยาวจากแรงบิด ดังสมการ

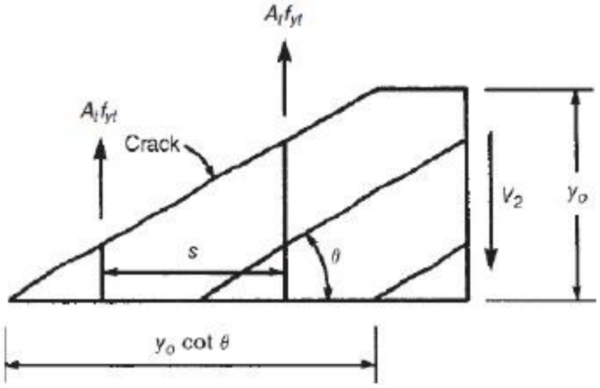
$$q = \frac{T}{2A_0} \tag{3.18}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จาก free body diagram ของภาพที่ 3.9 จะได้แรงเฉือน ดังนี้

$$V_1 = V_3 = \frac{T}{2A_0} x_0 \tag{3.19}$$

$$V_2 = V_4 = \frac{T}{2A_0} y_0 \tag{3.201}$$



ภาพที่ 3.9 รายละเอียดแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วน [18]

จากภาพที่ 3.9 จะได้จำนวณเหล็กปลอกที่เส้นรอยร้าวผ่าน คือ

$$n_2 = \frac{y_0 \cot\theta}{s} \tag{3.21}$$

จะได้ แรงที่เกิดขึ้นในเหล็กปลอก, $V_2 = A_t f_{yt} \times n_2$

ดังนั้น

$$V_2 = \frac{A_t f_{yt} y_0}{s} \cot\theta \tag{3.22}$$

นำสมการ (22) แทนในสมการ (20) จะได้,

$$V_2 = \frac{A_t f_{yt} y_0}{s} \cot\theta = \frac{T}{2A_0} y_0 \tag{3.23}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จะได้กำลังรับแรงบิดของเหล็กปลอก คือ

$$T_{\max} = \frac{2A_0 A_t f_{yt}}{s} \cot\theta \tag{3.24}$$

เมื่อ A_0	คือ	พื้นที่ปิดของแรงเฉือนต่อหน่วยความยาว	(mm²)
A_t	คือ	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอก (เส้นเดียว)	(mm²)
f_{yt}	คือ	กำลังครากของเหล็กเสริมทางขวาง	(MPa)
s	คือ	ระยะเรียงตัวของเหล็กปลอก	(mm)
θ	คือ	มุมรอยร้าวคอนกรีตอัดแตกกับแนวแกนตามยาว	(deg.)

สำหรับ θ จะมีค่าอยู่ระหว่าง 30 องศา ถึง 60 องศา และคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีแรงอัดตามแนวแกน มาตรฐาน ACI ได้แนะนำให้ใช้ เท่ากับ 45 องศา

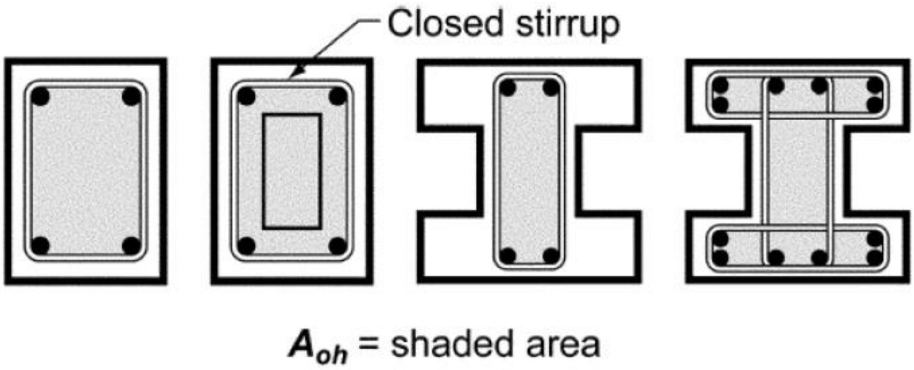
สำหรับ A_0 เป็นตัวแปรที่หาได้ยาก เนื่องจากไม่รู้ตำแหน่งรอยแตกร้าวภายในหน้าตัดคอนกรีตที่แน่นอน ดังนั้นมาตรฐาน ACI [19] ได้แนะนำวิธีการคำนวณ ดังสมการ

$$A_0 = 0.85A_{oh} \tag{3.25}$$

$$A_{oh} = x_0 y_0 \tag{3.26}$$

เมื่อ x_0 คือ ระยะกึ่งกลางระหว่างเหล็กปลอกด้านสั้น (mm)

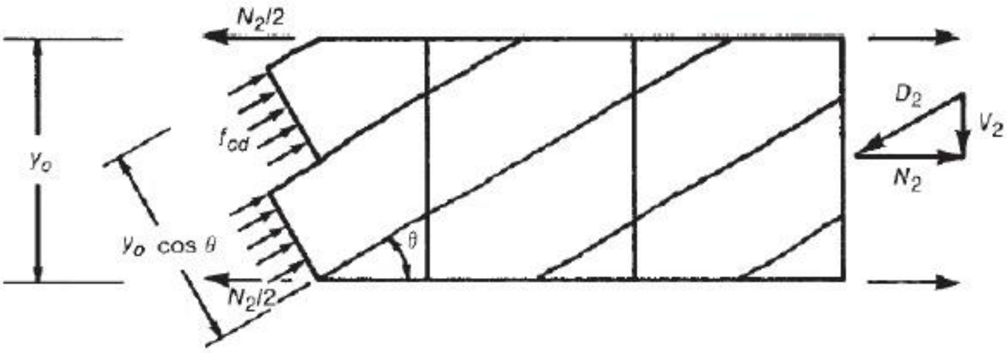
y_0 คือ ระยะกึ่งกลางระหว่างเหล็กปลอกด้านยาว (mm)



ภาพที่ 3.10 รายละเอียดตัวอย่างของพื้นที่วงปิดที่ล้อมรอบด้วยเหล็กปลอก [18]

3.1.4.2. กำลังรับแรงบิดของเหล็กตามยาว

กำลังรับแรงบิดของเหล็กตามยาวสามารถวิเคราะห์ได้จากการอินทิเกรตของ free body diagram บริเวณผิวด้านข้างของพื้นที่ ดังภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 รายละเอียดคอนกรีตรับแรงอัดจากแรงบิด [18]

จากการพิจรณา ภาพที่ 3.11 แรงเฉือน V_2 สามารถหาจากแรงอัดทแยงที่เกิดขึ้นจากแรงบิด (D_2) และแรงดึงของเหล็กตามยาว (N_2)

$$D_2 = \frac{V_2}{\sin\theta} \tag{3.27}$$

$$N_2 = V_2 \cot\theta \tag{3.28}$$

จากสมการ (20) จะได้

$$V_2 = \frac{A_t f_{yt} y_0}{s}\cot\theta = \frac{T}{2A_0} y_0 \cot\theta \tag{3.29}$$

จากภาพที่ 3.11 ด้านตรงข้ามของหน้าตัดมีพฤติกรรมเช่นเดียวกัน

$$N_1 = V_1 \cot\theta = \frac{T}{2A_0} x_0 \cot\theta \tag{3.30}$$

ครึ่งหนึ่งของ N_2 สามารถรับแรงดึงในแต่ละมุม ดังนั้นแรงดึงของเหล็กตามยาวที่เกิดขึ้นทั้งหมด คือ

$$N = 2(N_1 + N_2) \tag{3.31}$$

นำสมการ (3.29) และ (3.30) แทนลงในสมการ (3.31) จะได้

$$N = \frac{T_n}{2A_0} 2(x_0 + y_0)\cot\theta \tag{3.32}$$

จาก $2(x_0 + y_0) =$ ความยาวเส้นรอบรูปของเหล็กปลอก (p_h)

จะได้

$$N = \frac{T_n}{2A_0} p_h \cot\theta \tag{3.33}$$

กำหนดให้เหล็กตามยาวรับแรงดึงถึงจุดคราก (f_{yl}) และพื้นที่หน้าตัดเหล็กตามยาวของเหล็กปลอกรับแรงดึงทั่งหมด (A_l) ดังนั้นจะได้แรงดึงที่เกิดขึ้น คือ

$$N = A_l f_{yl} \tag{3.34}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากสมการ (3.33) จะได้ $$N = A_l f_{yl} = \frac{T_n}{2A_0} p_h \cot\theta \qquad (3.35)$$

ดังนั้น กำลังรับแรงบิดของเหล็กตามยาวคือ

$$T_{\max} = \frac{2A_0 A_l f_{yl}}{p_h}\cot\theta \qquad (3.36)$$

เมื่อ A_0	คือ	พื้นที่ปิดของแรงเฉือนต่อหน่วยความยาว	(mm²)
A_l	คือ	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กตามยาวทั้งหมด	(mm²)
f_{yl}	คือ	กำลังครากของเหล็กเสริมตามยาว	(MPa)
p_h	คือ	ความยาวเส้นรอบวงเหล็กปลอก	(mm)
θ	คือ	มุมรอยร้าวคอนกรีตอัดแตกกับแนวแกนตามยาว	(deg.)

3.1.4.2. กำลังรับแรงบิดของหน้าตัดคอนกรีต

จากภาพที่ 3.11 สามารถหากำลังรับแรงบิดของหน้าตัดคอนกรีต โดยกำหนดให้คอนกรีตมีรูปแบบการวิบัติแบบอัดแตก (crushing) จะได้สมการดังนี้ และกำหนดให้ค่ามากสุดของ $\sqrt{f_c^{'}}$ เท่ากับ 8.3 MPa

$$T_{\max} = 0.83\sqrt{f_c^{'}}\left(\frac{1.7A_{oh}^{\ 2}}{\rho_h}\right) \qquad (3.37)$$

เมื่อ A_{oh}	คือ	พื้นที่ปิดของเหล็กปลอก	(mm²)
$f_c^{'}$	คือ	กำลังครากของเหล็กเสริมตามยาว	(MPa)
p_h	คือ	ความยาวเส้นรอบวงเหล็กปลอก	(mm)

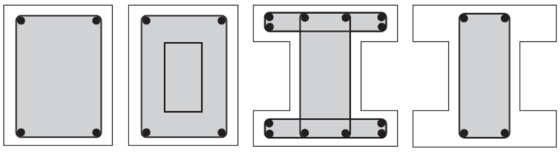
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.1.5 ข้อกำหนดขอมมาตรฐาน ACI318-14 ในการออกแบบองค์อาคารรับแรงบิด

การเสริมเหล็กปลอก

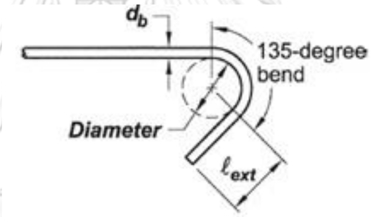
กำหนดระยะเรียงเหล็กปลอกต้องไม่เกิน $p_h/8$ และเป็นวงรอบปิดโดย ดังภาพที่ 3.12

p_h คือ ความยาวเส้นรอบวงของเหล็กปลอก (mm)



ภาพที่ 3.12 รายละเอียดเหล็กปลอกรับแรงบิด

ประเภทมุมของอมาตราฐานของเหล็กปลอกเป็น 135 องศา และ $l_{ext} = 6d_b$ ดังภาพที่ 3.13 โดย l_{ext} คือความยาวของส่วยปลายที่ของงอเหล็กปลอก (mm), d_b คือเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กปลอก (mm)



ภาพที่ 3.13 รายละเอียดมุมงอเหล็กปลอกรับแรงบิด

ปริมาณการเสริมเหล็กปลอกขั้นต่ำในการรับแรงบิด

$$\left(A_v + 2A_t\right)_{\min} \geq 0.062\sqrt{f_c'}\frac{b_w s}{f_{yt}} \tag{3.38}$$

$$\left(A_v + 2A_t\right)_{\min} \geq 0.35\frac{b_w s}{f_{yt}} \tag{3.39}$$

เมื่อ A_v	คือ	พื้นที่ของเหล็กปลอกรับแรงเฉือน (2เส้น)	(mm²)
A_t	คือ	พื้นที่ของเหล็กปลอกรับแรงบิด (1เส้น)	(mm²)
b_w	คือ	ความกว้างหน้าตัดองค์อาคาร	(mm)
f_c'	คือ	กำลังครากของเหล็กเสริมตามยาว	(MPa)
f_{yt}	คือ	กำลังครากของเหล็กเสริมทางขวาง	(MPa)
s	คือ	ระยะเรียงตัวของเหล็กปลอก	(mm)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การเสริมเหล็กตามยาว

กำหนดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริมตามยาวต้องไม่เกิน 1/24 เท่าของระยะเรียงเหล็กปลอก และต้องไม่น้อยกว่า 9 mm

ปริมาณการเสริมเหล็กตามยาวขั้นต่ำในการรับแรงบิด

$$A_{l,\min} \le \frac{0.42\sqrt{f_c'}A_{cp}}{f_{yl}} - \left(\frac{A_t}{s}\right)\rho_h \frac{f_{yt}}{f_{yl}} \tag{3.38}$$

$$A_{l,\min} \le \frac{0.42\sqrt{f_c'}A_{cp}}{f_{yl}} - \left(\frac{0.175b_w}{f_{yt}}\right)\rho_h \frac{f_{yt}}{f_{yl}} \tag{3.39}$$

เมื่อ $A_{l,\min}$ คือ พื้นที่ของเหล็กตามยาว (mm²)
A_t คือ พื้นที่ของเหล็กปลอกรับแรงบิด (1เส้น) (mm²)
b_w คือ ความกว้างหน้าตัดองค์อาคาร (mm)
f_{yl} คือ กำลังครากของเหล็กเสริมตามยาว (MPa)
ρ_h คือ ความยาวเส้นรอบวงของเหล็กปลอก (mm)

3.1.5.1 ข้อกำหนดการคำนวณกำลังรับแรงบิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

สำหรับมาตรฐาน ACI318-14 ได้กำหนดกำลังรับแรงบิดสูงสุดจากคานคอนกรีตเสริมเหล็กมาจากการเทียบกำลังรับแรงบิดเหล็กปลอกและเหล็กเสริมตามยาว โดยทั่วไปแล้วกำลังรับแรงบิดจากเหล็กปลอกจะน้อยกว่าเหล็กตามยาว จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงบิดของหน้าตัดคอนกรีต จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$T_{\max,ACI} = 2A_0 \frac{A_t f_{yt}}{s}\cot\theta \le 0.83\sqrt{f_c'}\left(\frac{1.7A_{oh}^{\ 2}}{\rho_h}\right) \tag{3.38}$$

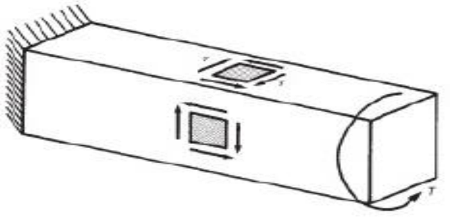
เมื่ A_0 คือ พื้นที่ปิดของแรงเฉือนต่อหน่วยความยาว (mm²)
A_t คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอก (เส้นเดียว) (mm²)
A_{oh} คือ พื้นที่ปิดของเหล็กปลอก (mm²)
f_c' คือ กำลังครากของเหล็กเสริมตามยาว (MPa)
f_{yt} คือ กำลังครากของเหล็กเสริมทางขวาง (MPa)
s คือ ระยะเรียงตัวของเหล็กปลอก (mm)
θ คือ มุมรอยร้าวคอนกรีตอัดแตกกับแนวแกนตามยาว (deg.)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

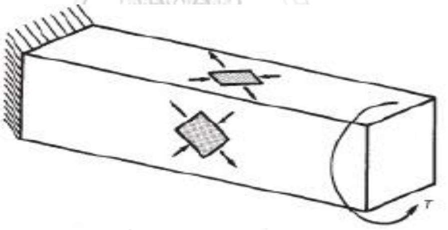
3.2 พฤติกรรมกำลังรับแรงบิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

3.2.1 รูปแบบรอยแตกร้าวและหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเมื่อคานรับแรงบิด

เมื่อคานเริ่มรับแรงบิดจะส่งผลให้บริเวณที่ผิวคานเริ่มมีการกระจายหน่วยแรงเฉือนเพิ่มมากขึ้น และจะมีค่ามากที่สุดที่กึ่งกลางของผิวคาน ดังภาพที่ 3.12(ก) จากนั้นทำการแปลงหน่วยแรงเฉือนเป็นหน่วยแรงดึงหลัก (principal tensile stress) ดังภาพ 3.12(ข) จะสังเกตว่าเมื่อเพิ่มแรงบิดมากขึ้นเรื่อยๆ จะส่งผลให้เกิดหน่วยแรงดึงหลักตรงกึ่งกลางคานเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งหน่วยแรงดึงหลักที่เกิดขึ้นจากแรงบิดเท่ากับหน่วยแรงดึงของคอนกรีตทำให้เริ่มเกิดรอยร้าวจากแรงบิด โดยปกติแล้วรอยร้าวจะทำมุม 45 องศากับแนวแกนนอนและมีลักษณะเป็นรอยร้าวแบบเกลียวรอบคาน (spiral cracking) ดังภาพ 3.12 (ค)

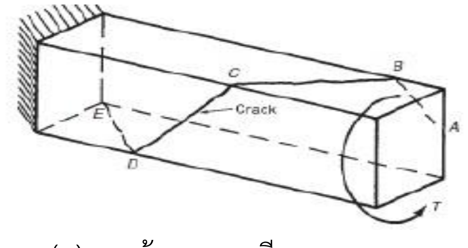


(ก) หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางหน้าตัดคาน



(ข) หน่วยแรงดึงหลักที่เกิดจากแรงบิด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

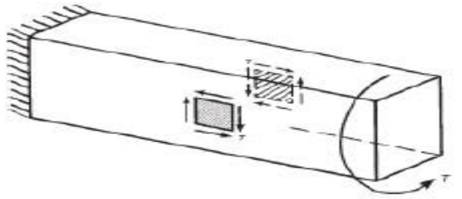


(ค) รอยร้าวแบบเกลียวรอบคาน

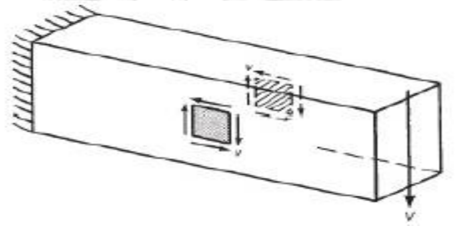
ภาพที่ 3.14 ขั้นตอนการเกิดรอยร้าวจากแรงบิด [18]

3.2.2 รูปแบบรอยแตกร้าวและหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเมื่อคานรับแรงบิดและแรงเฉือน

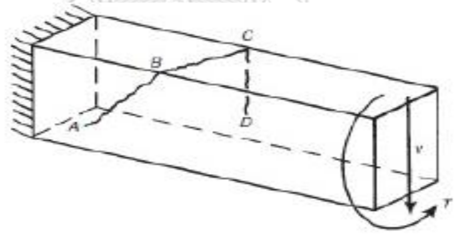
เมื่อคานเริ่มรับแรงบิดและแรงเฉือนพร้อมกันจะส่งผลให้บริเวณที่ผิวคานเริ่มมีกำลังรับกระจายหน่วยแรงเฉือนที่เกิดจากแรงบิดและแรงเฉือนสะสมเพิ่มมากขึ้น ดังภาพที่ 3.13(ก) และ 3.13(ข) โดยรอยร้าวจะเริ่มเกิดบริเวณกึ่งกลางผิวทำมุมเอียงขึ้นไปเรื่อย ๆ จนถึง ณ ตำแหน่งที่หน่วยแรงเฉือนของแรงบิดและแรงเฉือนรวมกันส่งผลให้รอยร้าวเปลี่ยนไป ดังภาพที่ 3.13(ค)



(ก) หน่วยแรงเฉือนจากแรงบิด



(ข) หน่วยแรงเฉือนจากแรงเฉือน



(ค) รูปแบบรอยร้าว

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 3.15 ขั้นตอนการเกิดรอยร้าวจากแรงบิดรอยร้าวรับแรงบิดพร้อมกับแรงเฉือน [18]

3.2.3 การเสริมเหล็กเส้นรับแรงบิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

หากไม่ได้มีการเสริมเหล็กภายในคอนกรีตรับแรงบิด เมื่อคานรับแรงจนถึงแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวจะเกิดการวิบัติแบบทันที ดังนั้นจึงต้องมีการเสริมเหล็กดังต่อไปนี้

1. เหล็กเสริมตามยาว

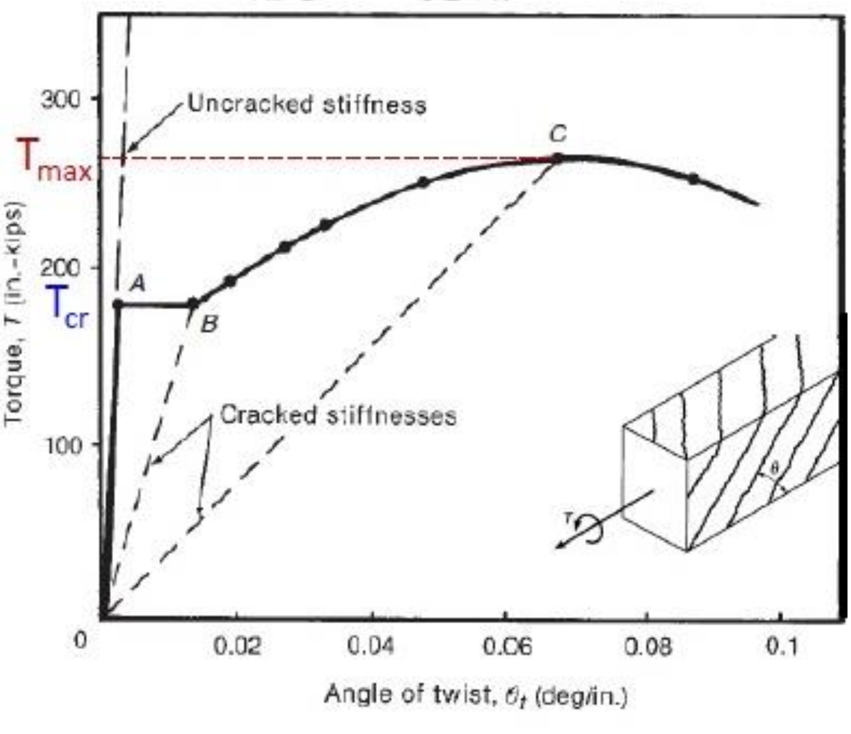
การเสริมเหล็กเสริมตามยาวจะทำหน้าที่รับแรงดึงตามแกนจากแรงดึงทแยง (diagonal tension forces) ที่เกิดจากแรงบิด แต่ว่าการเสริมเหล็กตามยาวเพียงอย่างเดียวไม่สามารถต้านทานแรงบิดที่เกิดขึ้นได้ ควรเสริมเหล็กปลอกในกำลังรับแรงดังกล่าวด้วย

2. เหล็กปลอก

การเสริมเหล็กปลอกจะทำหน้าที่รับแรงดึงตามขวางจากแรงดึงทแยงที่เกิดจากแรงบิด และการเสริมเหล็กปลอกควรเสรอมแบบวงรอบปิดจึงจะมีประสิทธิภาพในกำลังรับแรงบิด

3.2.3 พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงบิด

เมื่อเสริมคานคอนกรีตเสริมเหล็กล้วยด้วยเหล็กตามขวางและเหล็กตามยาวจำนวณหนึ่ง โดยใช้เหล็กเส้นตามขวางเป็นลูกตั้งแนววงปิด (closed stirrups) ที่พันรอบเหล็กเสริมตามแนวยาวของคานและทำข้องอตามมาตรฐาน เพื่อให้มีกำลังรับแรงได้ถึงจุดคราก รอยร้าวที่เกิดจากแรงบิดจะขึ้นอยู่กับปริมาณการเสริมเหล็ก



ภาพที่ 3.16 แสดงความสัมพันธ์แรงบิดและมุมบิดของคานทดสอบ [18]

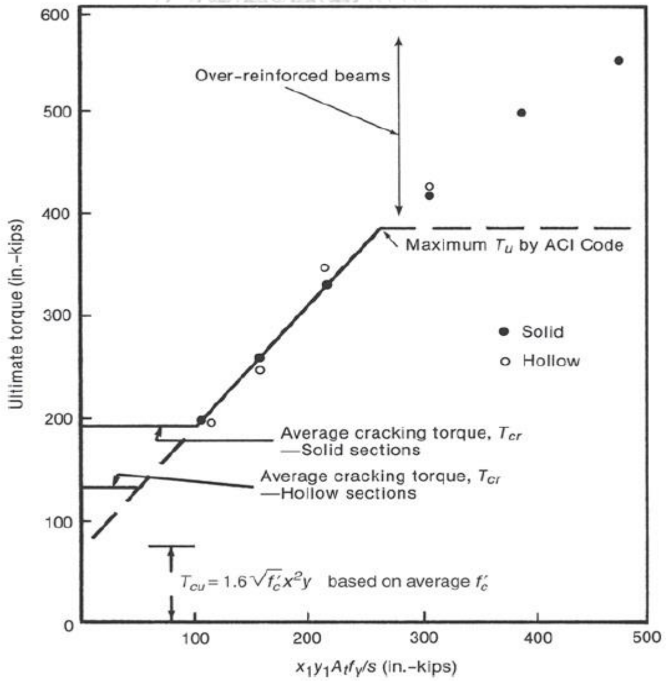
จากกราฟจะสังเกตว่าเมื่อเพิ่มแรงบิดอย่างคงที่จนถึงจุด T_{cr} คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวไม่สามารถรับแรงบิดได้ ทำให้แรงภายในคอนกรีตส่งถ่ายให้แก่เหล็กเสริม จากนั้นเมื่อเพิ่มมุมบิดไปเรื่อยๆ จะส่งผลให้สติฟเนสของตัวอย่างทดสอบของคานลดลง จนในที่สุดเกิดการวิบัติแบบบดอัดทำให้คอนกรีตไม่สามารถรับแรงบิดต่อไปได้ โดยการวิบัติจะเกิดขึ้น 2 รูปแบบ คือ

รูปแบบที่ 1 เหล็กปลอกครากหรือเหล็กเสริมตามยาวคราก หรือเหล็กทั้ง 2 ชนิดครากพร้อมกันก่อนถึงจุดกำลังรับแรงบิดสูงสุด

รูปแบบที่ 2 สำหรับคานที่มีการเสริมเหล็กมากเกินไปคอนกรีตจะอัดแตก โดยหน่วยแรงอัดหลักจากแรงบิด ก่อนที่เหล็กเสริมภายในคายคอนกรีตจะคราก เป็นการวิบัติแบบทันทีทันใดและอันตรายกว่าแบบที่ 1

3.2.4 กำลังรับแรงบิดของคอนกรีตหน้าตัดกลวงและหน้าตัดเต็ม

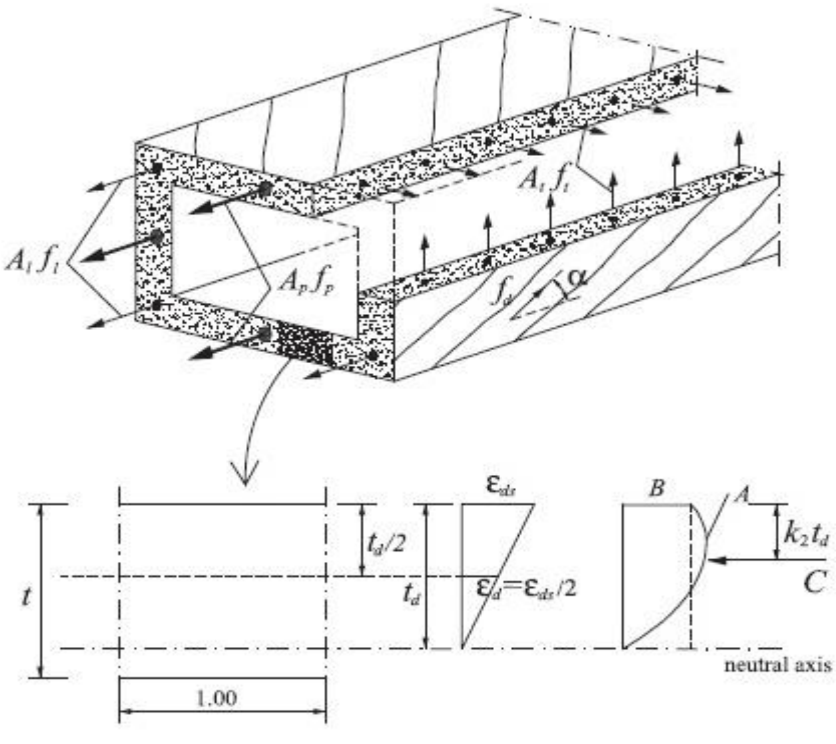
จากภาพที่ที่ 3.15 แสดงการเปรียบเทียบกำลังรับแรงบิดของคอนกรีตหน้าตัดเต็มและหน้าตัดกลวง กำหนดให้กำลังรับแรงบิดสูงสุด (y-axis) กับปริมาณเหล็กเสริม (x-axis) ในคานคอนกรีตเสริมเหล็กของคานหน้าตัดกลวงและหน้าตัดเต็ม โดยกำหนดให้ความกว้างและความสูงของหน้าตัดคานทดสอบมีขนาดเท่ากัน จากการทดสอบสรุปได้ว่ากำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวของหน้าตัดเต็มจะมีค่าสูงกว่าแบบหน้าตัดกลวง แต่กำลังรับแรงบิดสูงสุดของหน้าตัดเต็มมีขนาดใกล้เคียงกับแบบหน้าตัดกลวง เมื่อเทียบกับปริมาณการเสริมเหล็กเท่ากัน



ภาพที่ 3.17 กำลังรับแรงบิดของคอนกรีตหน้าตัดเต็มและหน้าตัดกลวง [18]

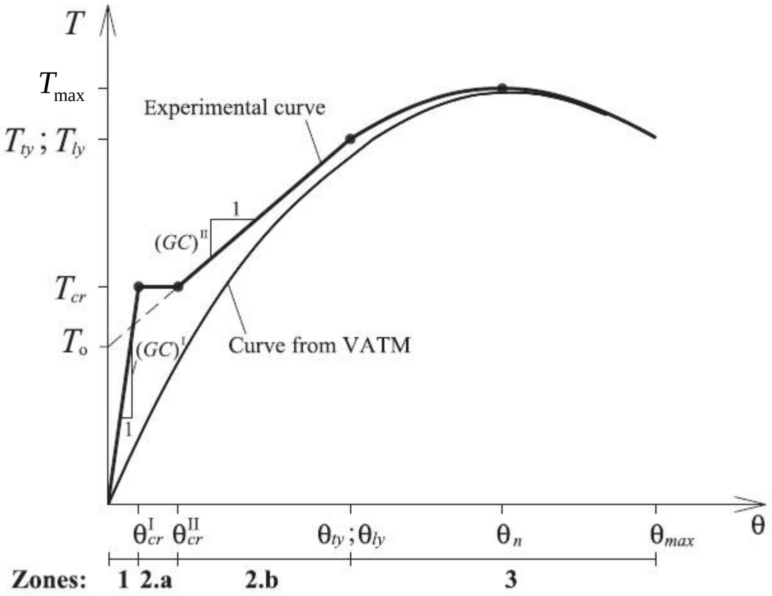
3.3. พฤติกรรมกำลังรับแรงบิดพร้อมกับแรงอัดตามแนวแกนขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

จากงานวิจัยของ Bernardo และ Teixeira ในปี ค.ศ. 2018 ทำการศึกษาและทำนายพฤติกรรมกำลังรับแรงบิดของคอนกรีตอัดแรงในช่วงก่อนและหลังของการเกิดรอยร้าว โดยการใช้ทฤษฎี Modified Variable Angle Truss-Model (MVATM) ดังภาพ (3.15) เป็นการวิเคราะห์ชิ้นส่วนภายในคอนกรีต (concrete struts) ซึ่งเป็นการใช้วิธี softened stress-strain แทนการใช้ conventional stress-strain เปรียบเทียบกับผลการทดสอบของงานวิจัยก่อนหน้าและได้ผลการทดสอบใกล้เคียงกัน ดังภาพที่ 3.20



(ก) หน้าตัดคานกลวง (ข) ความเครียด (ค) การกระจายแรงในคอนกรีตแบบไม่เชิงเส้น

ภาพที่ 3.18 การวิเคราะห์กำลังรับแรงบิดของหน้าตัดกลวง



ภาพที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับมุมบิดของคานคอนกรีตอัดแรง

เมื่อ T_{cr} คือ กำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าว

θ_{cr}^{I} คือ มุมบิดแตกร้าว (ช่วงที่ยังไม่เกิดรอยร้าว)

θ_{cr}^{II} คือ มุมบิดแตกร้าว (ช่วงที่เกิดรอยร้าว)

T_o คือ แรงบิดจากการลากเส้นตรงขนานกับส่วนโค้งในช่วงแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวเริ่มรับแรงจนถึงแรงบิดคราก ไปยังแกน Y

T_{ly} คือ กำลังรับแรงบิดที่ทำให้เหล็กตามแนวแกนคราก

θ_{ly} คือ มุมบิดที่ทำให้เหล็กตามแนวแกนคราก

T_{ty} คือ กำลังรับแรงบิดที่ทำให้เหล็กปลอกคราก

$T_{\max}$ คือ กำลังรับแรงบิดสูงสุด

θ_{ty} คือ มุมบิดที่ทำให้เหล็กตามแนวแกนคราก

θ_n คือ มุมบิดของกำลังรับแรงบิดสูงสุด

$\theta_{\max}$ คือ มุมบิดสูงสุดที่เกิดจากแรงบิด

$(GC)^I = K_t^I$ คือ สติฟเนสของตัวอย่างทดสอบของแรงบิดในช่วงก่อนเกิดรอยร้าว

$(GC)^I = K_t^{II}$ คือ สติฟเนสของตัวอย่างทดสอบของแรงบิดในช่วงหลังเกิดรอยร้าว

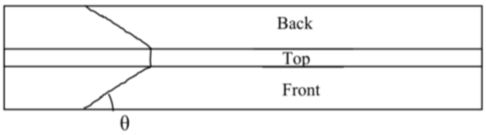
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.4. สมการทำนายกำลังรับแรงบิดขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย FRP

3.3.1 fib Bulletin 14 (2001)

การทำนายกำลังรับแรงบิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลัด้วย FRP มาตรฐาน fib Bulletin 14 (2001) [19] ได้นำหลักการเสริมกำลังรับแรงเฉือนมาประยุกต์ใช้สำหรับการเสริมกำลังรับแรงบิด ดังแสดงในภาพที่ 3.20

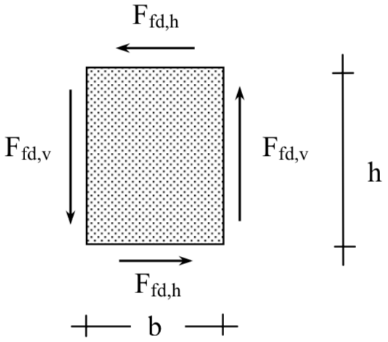
(ก) รอยร้าวจากแรงบิด



(ข) รอยร้าวจากแรงเฉือน

ภาพที่ 3.20 รูปแบบรอยร้าวที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก [19]

สำหรับหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ทำการติดตั้ง FRP ด้วยการพันรอบหน้าตัดทั้งหมดและทำมุม 90 องศากับแนวขององค์อาคาร หากสมมติให้รอยร้าวเอียงจากแรงบิดทำมุม θ กับแนวองค์อาคาร จะได้แรงดึงของแผ่น FRP ในแนวดิ่ง ($F_{f,v}$) มีค่า



ภาพที่ 3.21 แรงในแผ่น FRP ต้านทานแรงบิด [19]

$$F_{f,v} = \varepsilon_{fd,e} E_f \frac{t_f w_f}{s_f} h \cot\theta \tag{3.37}$$

และแรงดึงของแผ่น FRP ในแนวนอน

$$F_{f,h} = \varepsilon_{fd,e} E_f \frac{t_f b_f}{s_f} b \cot\theta \tag{3.38}$$

เมื่อ $\varepsilon_{fd,e}$ คือ ความเครียดประสิทธิผลในการออกแบบ

b คือ ความกว้างของหน้าตัด (mm)

b_f คือ ความกว้างของแผ่น FRP (mm)

s_f คือ ระยะเรียงระหว่างกึ่งกลางแถบ (mm)

h คือ ความลึกของหน้าตัด (mm)

จากสมการ 3.37 และ 3.38 จะคำนวณกำลังรับแรงบิดจากแผ่น FRP (T_f) ได้ดังนี้

$$T_f = F_{f,v} b + F_{f,h} h = 2\varepsilon_{fd,e} E_f \frac{t_f b_f}{s_f} bh \cot\theta \tag{3.39}$$

โดยความเครียดประสิทธิผลในการออกแบบ ในสมการ 3.39 กำหนดให้เท่ากับ

$$\varepsilon_{fd,e} = 0.8\varepsilon_{fe} / \gamma_f \tag{3.40}$$

เมื่อ γ_f คือ ค่าความปลอดภัย (safety factor) เท่ากับ 1.30 และความเครียดประสิทธิผล (ε_{fe}) ขึ้นอยู่กับประเภทของเส้นใย ดังต่อไปนี้

$$\varepsilon_{fe} = 0.17\left(\frac{f_c^{'2/3}}{E_f \rho_f}\right)^{0.30} \varepsilon_{fu} \quad \text{สำหรับ CFRP}$$

$$\varepsilon_{fe} = 0.048\left(\frac{f_c^{'2/3}}{E_f \rho_f}\right)^{0.47} \varepsilon_{fu} \quad \text{สำหรับ GFRP} \tag{3.41}$$

เมื่อ $f_c^{'}$ คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (MPa)

E_f คือ มอดุลัสยืดหยุ่นของแผ่น FRP (MPa)

ρ_f คือ ปริมาณของแผ่น FRP

$= 2t_f / b$ กรณี FRP แบบต่อเนื่อง

$= (2t_f / b)(b_f / s_f)$ กรณี FRP แบบเป็นแถบ

3.3.2 NCHRP report 655 (2010)

จากมาตรฐาน NCHRP report 655 [20] (Recommended Guide Specification for the Design of Externally Bonded FRP Systems for Repair and Strengthening of Concrete Bridge Elements) สามารถทำนายกำลังรับแรงบิดทั้งหมดของคานคอนกรีตสริมเหล็กที่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

เสริมกำลังด้วย FRP (T_u) โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ กำลังรับแรงบิดจากคอนกรีตเสริมเหล็ก (T_{RC}) และกำลังรับแรงบิดจาก FRP (T_{frp}) ดังสมการ

$$T_n = \phi T_{RC} + \phi_{frp} T_{frp} \tag{3.42}$$

ในการติดตั้งแผ่น FRP สามารถติดตั้งการพันรอบหน้าตัดทั้งหมด (completely wrapped) ได้ 2 ประเภทคือ การเสริมกำลังโดยแบ่งระยะห่างเป็นแถบ (intermittent FRP) ดังสมการ (3.43) และการเสริมกำลังตลอดช่วงความยาวคาน (continuous FRP) ดังสมการ (3.44)

$$T_{frp} = \frac{N^e_{frp} d_{frp} \alpha_t x_1 y_1}{s} \tag{3.43}$$

$$T_{frp} = N^e_{frp} d_{frp} \alpha_t x_1 y_1 \tag{3.44}$$

$$\alpha_t = 0.66 + 0.33(y_1 / x_1) \le 1.5 \tag{3.45}$$

เมื่อ	N^e_{frp}	คือ	แรงดึงประสิทธิผลของ FRP	(kN)
	d_{frp}	คือ	ความลึกประสิทธิผลของ FRP รับแรงเฉือน	(mm)
	s	คือ	ระยะเรียงกึ่งกลางแถบติดตั้ง FRP	(mm)
	x_1	คือ	ด้านสั้นของหน้าตัดคาน	(mm)
	y_1	คือ	ด้านยาวของหน้าตัดคาน	(mm)
	α_t	คือ	สัมประสิทธ์หน้าตัดรับแรงบิด	

โดยหน่วยแรงดึงประสิทธิผลของ FRP ในการออกแบบ กำหนดให้เท่ากับ

$$N^e_{frp} = N_s + \frac{1}{2}[N_{frp,w} - N_s] \tag{3.46}$$

เมื่อ N_s คือ แรงดึงของแผ่น FRP ต่อความกว้าง 1 นิ้ว ที่ความเครียดเท่ากับ 0.004

$N_{frp,w}$ คือ แรงดึงสูงสุดของ FRP

3.3.3 He และคณะ (2013) [18]

จากงานวิจัยของ He และคณะ ทำการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วย CFRP รับแรงบิดและทำการประยุกต์สมการทำนายกำลังรับแรงบิดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP จากมาตรฐาน fib Bulletin 14 (2001) และ NCHRP report 655 ได้เป็นสมการดังต่อไปนี้

$$T_{\max,He} = T_{RC} + T_f \tag{3.47}$$

เมื่อ $T_{n,He}$ คือ ผลรวมกำลังรับแรงบิดขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กกับ CFRP

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

T_{RC} คือ กำลังรับแรงบิดขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

T_f คือ กำลังรับแรงบิดของแผ่น CFRP

สำหรับกำลังรับแรงบิดขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

$$T_{RC} = \frac{2A_0 A_t f_{yt}}{s} \cot\theta \tag{3.47}$$

เมื่อ T_{RC}	คือ	กำลังรับแรงบิดขององค์อาคารที่ไม่เสริมลังด้วย CFRP	(kN-m)
A_0	คือ	พื้นที่ปิดของแรงเฉือนต่อหน่วยความยาว	(mm²)
A_t	คือ	พื้นที่หน้าตัดเหล็กปลอก (1 เส้น)	(mm²)
f_{yt}	คือ	หน่วยแรงดึงครากของเหล็กปลอก	(MPa)
s	คือ	ระยะเรียงตัวของเหล็กปลอก	(mm)
θ	คือ	มุมรอยร้าวคอนกรีตอัดแตกกับแนวแกนตามยาว	(deg.)

สำหรับกำลังรับแรงบิดของ CFRP

$$T_f = \frac{2A_0 A_f f_{fe}}{s_f} \tag{3.48}$$

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \tag{3.49}$$

$$\varepsilon_{fe} = 0.004 + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}\varepsilon_{fu} - 0.004\right) \tag{3.50}$$

เมื่อ T_f	คือ	กำลังรับแรงบิดของ CFRP	(kN-m)
A_0	คือ	พื้นที่ปิดของแรงเฉือนต่อหน่วยความยาว	(mm²)
A_f	คือ	พื้นที่ของแผ่น FRP	(mm²)
f_{fe}	คือ	หน่วยแรงดึงประสิทธิผลของ FRP	(MPa)
s_f	คือ	ระยะเรียงระหว่างกึ่งกลางแถบ FRP	(mm)
ε_{fe}	คือ	ความเครียดประสิทธิผลของ FRP	(m/m)
ε_{fu}	คือ	ความเครียดดึงขาดออกแบบ	(m/m)
E_f	คือ	มอดุลัสยืดหยุ่นของแผ่น FRP	(MPa)

บทที่ 4
ระเบียบวิธีการวิจัย

4.1. รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ

4.1.1. ตัวอย่างทดสอบ

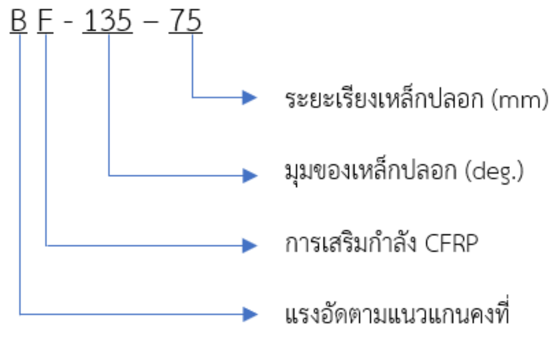
ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวณ 12 ตัวอย่าง เป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมความกว้างเท่ากับ 150 mm ความสูงเท่ากับ 300 mm และความยาวเท่ากับ 2100 mm (ดูภาพที่ 4.1 ประกอบ) ตัวอย่างทดสอบใช้เหล็กเสริมตามยาวคือ เหล็กข้ออ้อย SD40 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm และเหล็กเสริมตามขวางคือ เหล็กกลม SD24 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm มีระยะคอนกรีตหุ้มผิวเหล็กของคานทดสอบเท่ากับ 25 mm โดยกำหนดระยะเรียงเหล็กปลอก คือ 75 mm หรือ 150 mm และประเภทของอมาตรฐานของเหล็กปลอกคือ 135 องศา หรือ 90 องศา

งานวิจัยนี้ทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน จำนวณ 6 ตัวอย่าง และไม่เสริมกำลังจำนวณ 6 ตัวอย่าง ดังตารางที่ 1 อีกทั้งเหล็กปลอกและเหล็กเสริมตามยาวได้ติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดดังภาพที่ 1 เพื่อวัดความเครียดของเหล็กเส้นในระหว่างการทดสอบกำลังรับแรงบิด

4.1.2. รหัสของตัวอย่างทดสอบ

เนื่องจากในการศึกษานี้มีตัวแปรที่ทำการศึกษาตัวอย่างทดสอบ 4 ตัวแปร จึงกำหนดรหัสชิ้นตัวอย่างเพื่อความสะดวกในการจัดการข้อมูล โดยรหัสดังกล่าวประกอบด้วย การเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน แรงอัดตามแนวแกน ประเภทมุมของอมาตรฐานของเหล็กปลอกและระยะเรียงเหล็กปลอก ภาพที่ 4.1 แสดงตัวอย่างรหัสชิ้นตัวอย่างทดสอบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาพที่ 4.1 ตัวอย่างรหัสของตัวอย่างทดสอบ

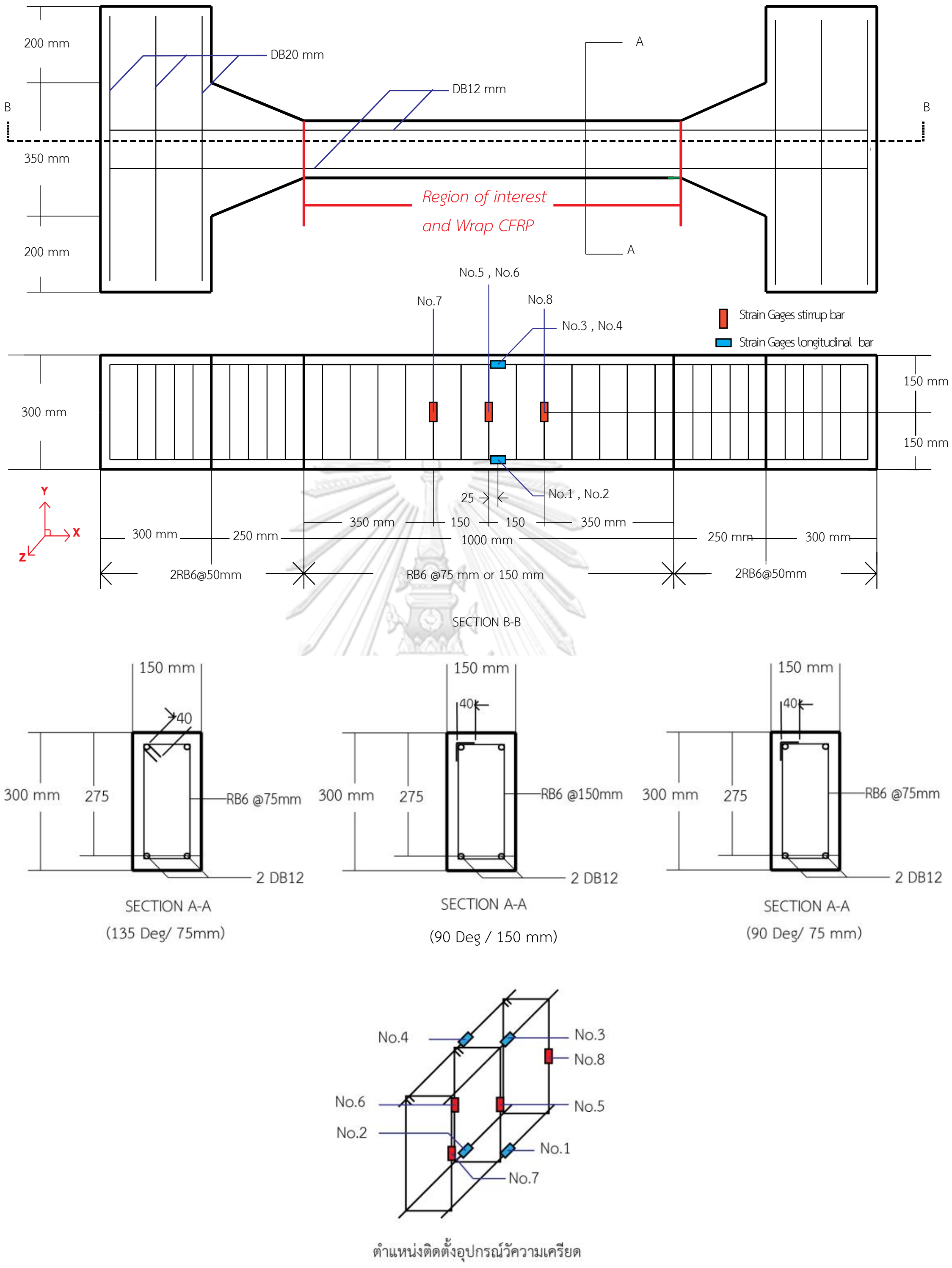
รหัสชิ้นตัวอย่างทดสอบแต่ละตำแหน่งแสดงความหมายตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

- แรงอัดตามแนวแกน
  - B หมายถึงตัวอย่างทดสอบที่เป็นคาน
  - C หมายถึงตัวอย่างทดสอบที่เป็นเสา (มีแรงอัดตามแนวแกน)
- การเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP)
  - - หมายถึงตัวอย่างทดสอบที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP
  - F หมายถึงตัวอย่างทดสอบที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP
- ของอมาตารฐานของเหล็กปลอกที่ใช้ในการทดสอบ
  - 135° หมายถึงประเภทมุมของอมาตรฐานของเหล็กปลอก 135 องศา
  - 90° หมายถึงประเภทมุมของอมาตรฐานของเหล็กปลอก 90 องศา
- ระยะเรียงเหล็กปลอกที่ใช้ในการทดสอบ
  - 75 หมายถึงระยะเรียงเหล็กปลอกเท่ากับ 75 mm
  - 150 หมายถึงระยะเรียงเหล็กปลอกเท่ากับ 150 mm

ตารางที่ 4.1. ตัวอย่างการทดสอบ

ตัวอย่าง	การติดตั้ง CFRP (N/Y)	แรงอัดแนวแกน (ตัน)	มุมของอมาตรฐานของเหล็กปลอก (องศา)	ระยะเรียงเหล็กปลอก (mm)
C-90°-150	N	27	90	150
C-90°-75	N	27	90	75
C-135°-75	N	27	135	75
B-90°-150	N	-	90	150
B-90°-75	N	-	90	75
B135°-75	N	-	135	75
CF-90°-150	Y	27	90	150
CF-90°-150	Y	27	90	75
CF-90°-150	Y	27	135	75
BF-90°-150	Y	-	90	150
BF-90°-75	Y	-	90	75
BF-135°-75	Y	-	135	75

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 4.2 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ

4.2. คุณสมบัติวัสดุ

4.2.1. คอนกรีต

งานวิจัยนี้ใช้คอนกรีตสำเร็จภาพที่มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 28.5 MPa ที่เวลา 28 วัน จากค่าเฉลี่ยของการทดสอบคอนกรีตทรงกระบอกมาตรฐานขนาด 150x300 mm จำนวณ 3 ตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM C39

4.2.2. เหล็กเสริม

การทดสอบแรงดึงเหล็กตามมาตรฐาน ASTM A615 ของเหล็กเสริม 2 ชนิดคือเหล็กปลอก (RB6) และเหล็กตามยาว (DB12) ชนิดละ 2 ตัวอย่าง พบว่ากำลังที่จุดครากเฉลี่ยเท่ากับ 283 MPa และ 518 MPa และกำลังรับแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 483 MPa และ 777 MPa ตามลำดับ

4.2.3. วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

งานวิจัยนี้ได้ให้เส้นใยแบบผืน SikaWrap®-230C โดยมีความหนาเท่ากับ 0.129 mm จากการทดสอบรับแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D3039 พบว่า CFRP มีกำลังรับแรงดึงของเส้นใย มอดูลัสยืดหยุ่นและการยืดตัวเมื่อแตกหักเฉลี่ยเท่ากับ 4,279 MPa 276,075 MPa และ 1.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติวัสดุ

ประเภทวัสดุ	มาตรฐาน	กำลังรับแรงดึงคราก (MPa)	กำลังรับแรงอัดประลัย (MPa)	มอดูลัสยืดหยุ่น (MPa)	ความเครียดที่จุดคราก (m/m)
คอนกรีต	มอก. 15	-	28.5	26.1	-
เหล็กกลม RB6	มอก. 20-2543	283	-	219,672	0.0014
เหล็กข้ออ้อย DB12	มอก. 24-2548	518	-	194,557	0.0023
CFRP	SikaWrap®-230C	3493	-	276,075	0.0155

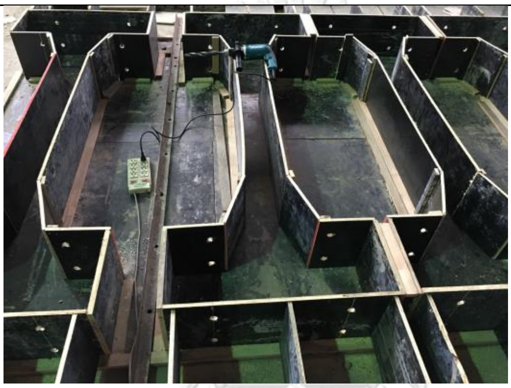
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2. ขั้นตอนการทดสอบ

4.2.1. การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

งานวิจัยนี้ทำการหล่อองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับการทดสอบเป็นจำนวณ 12 ตัวอย่าง พร้อมบ่มตัวอย่างระยะเวลาอย่างน้อย 28 วัน ด้วยแผ่นพลาสติกสำหรับบ่มคอนกรีต หลังจากนั้นทำการลบมุมคอนกรีตให้ได้รัศมี 25 mm

ตารางที่ 4.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

ขั้นตอนที่	ภาพประกอบ	คำอธิบายภาพประกอบ
1		เตรียมไม้แบบสำหรับการหล่อคอนกรีต พร้อมเจาะรูสำหรับตัวอย่างที่ต้องรอยลวดอัดแรง
2		ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดภายในเหล็กเสริมของตัวอย่างทดสอบ จำนวณ 8 ชิ้นต่อตัวอย่างทดสอบ โดยทิศทางขนานกับเหล็กเสริม
3		ทำความสะอาด เตรียมพร้อมในการหล่อคอนกรีต และใส่ท่อ PVC สำหรับตัวอย่างทดสอบอัดแรง

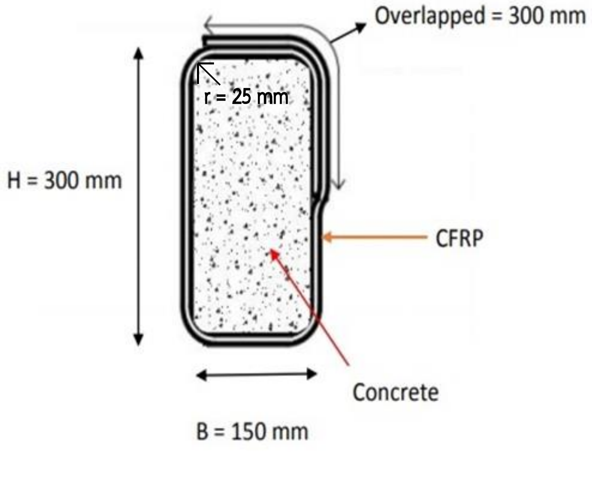
ตารางที่ 4.3(ต่อ) การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

ขั้นตอนที่	ภาพประกอบ	คำอธิบายภาพประกอบ
4		หล่อคอนกรีตและปรับผิวให้เรียบ จากนั้นทิ้งไว้ 1 วัน ทำการแกะไม้แบบแล้วบ่มคอนกรีตด้วยแผ่นพลาสติกเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 28 วัน

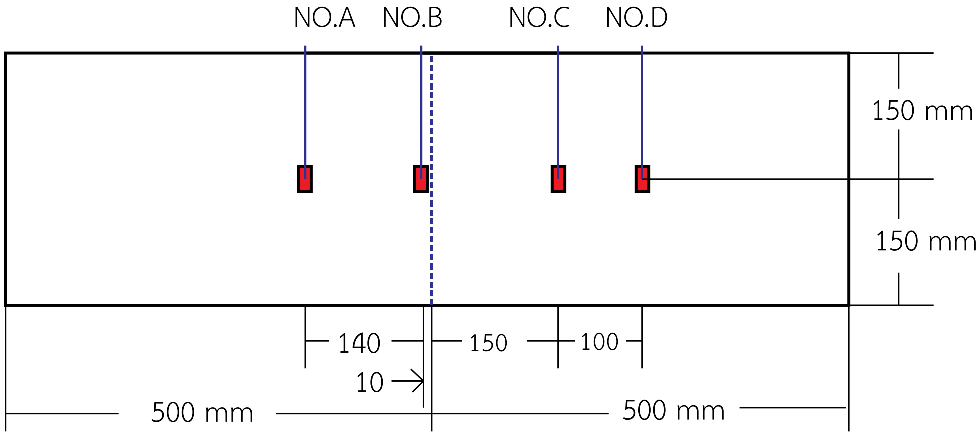
4.2.2. การติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

หลังจากการบ่มคอนกรีตเป็นเวลาอย่างน้อย 28 วัน และตรวจสอบกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตได้ตามค่าที่กำหนดไว้ นำตัวอย่างทดสอบไปลบมุมหน้าตัดองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กให้ได้รัศมีเท่ากับ 25 mm พร้อมทำความสะอาดผิวและทำการปรับผิวให้เรียบโดยใช้ Sikadur®-741 จากนั้นทำการทำการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP SikaWrap®-230C และกาวอีพ็อกซียึดติดหุ้มเคลือบ Sikadur®-330 ให้เกิดการซ้อนทับกัน 300 mm ดังภาพที่ 4.3 และติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดที่ผิวของแผ่น CFRP โดยมีทิศขนานกับเส้นใยคาร์บอน ดังภาพที่ 4.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.3 รายละเอียดการพันรอบหน้าตัดด้วย CFRP



ภาพที่ 4.4 รายละเอียดตำแหน่งติดตั้ง Strain Gage ที่ผิวของ CFRP

ตารางที่ 4.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

ขั้นตอนที่	ภาพประกอบ	คำอธิบายภาพประกอบ
1		นำตัวอย่างทดสอบไปทำการลบมุมหน้าตัดองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กให้ได้รัศมี เท่ากับ 25 mm
2		ทำการปรับผิวให้เรียบและเสมอกันไม่ให้มีหลุม โดยใช้ปูนมอร์ต้า Sikadur®-741

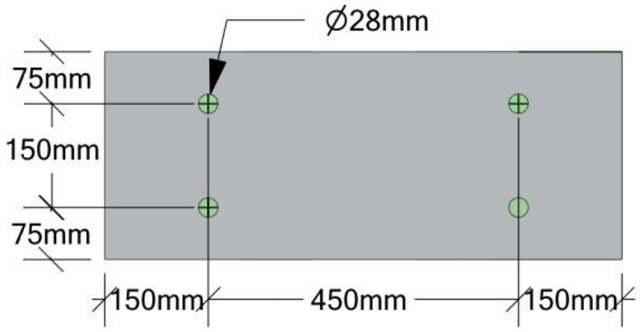
ตารางที่ 4.2 (ต่อ) การเตรียมตัวอย่างสำหรับการเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

ขั้นตอนที่	ภาพประกอบ	คำอธิบายภาพประกอบ
3		ก่อนการเสริมกำลังด้วย CFRP ทากาวอีพ็อกซียึดติดหุ้มเคลือบ Sikadur®-330 จากนั้นนำแผ่น CFRP SikaWrap®-230C ไปพันรอบตัวอย่าง
4		ทิ้งไว้เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 14 วัน จากนั้นจึงสามารถนำไปทดสอบ

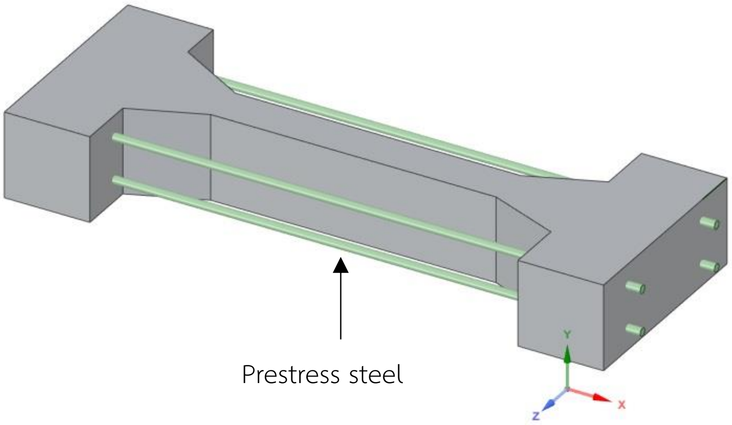
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2.3. การให้แรงอัดตามแนวแกน

สำหรับตัวอย่างทดสอบที่ต้องทำการอัดแรงในแนวแกน ก่อนเทคอนกรีตนำท่อ PVC ขนาด 28 mm ใส่ในตำแหน่งดังรูป เมื่อคอนกรีตได้มีกำลังตามที่ต้องการให้ทำการใส่แรงอัดในแนวแกนจาก Hydraulic jack จำนวณ 27 ตัน โดยนำเหล็กอัดแรงที่สามารถรับแรงดึงได้ตามที่ต้องการมาใส่ใน คอนกรีต จากนั้นทำการกดคอนกรีตให้ได้กำลังรับแรงอัดตามที่กำหนดไว้ในการวิจัย สุดท้ายทำการยึด ลวดอัดแรงกับตัวอย่างการทดสอบ จากนั้นติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดในลวดอัดแรง เพื่อคอยตรวจ ระยะยืดเกินที่กำหนดหรือไม่ เมื่อครบระยะเวลา 7 วัน ให้นำตัวอย่างไปทดสอบรับแรงบิด



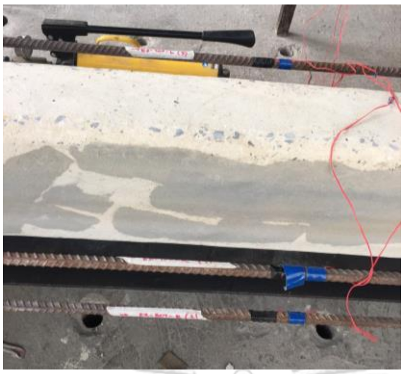
(ก) ตำแหน่งการวางเหล็กอัดแรง



(ข) ตำแหน่งเหล็กอัดแรงตามความยาวตัวอย่าง

ภาพที่ 4.5 รายละเอียดการอัดแรงในแนวแกน

ตารางที่ 4.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการอัดแรงตามแนวแกน

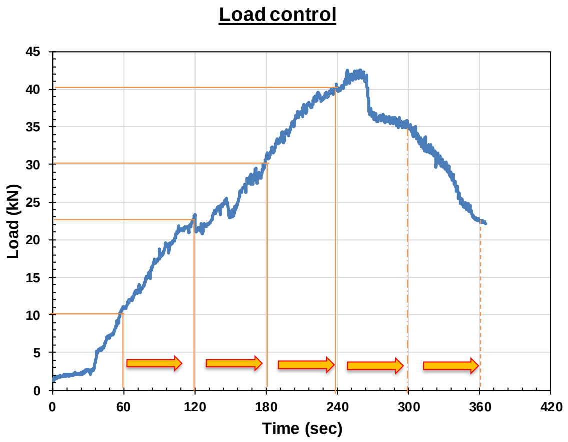
ขั้นตอนที่	ภาพประกอบ	คำอธิบายภาพประกอบ
1		เมื่อคอนกรีตมีอายุ 28 วัน และได้กำลังอัดประลัยตามที่ต้องการแล้ว นำลวดอัดแรงมาใส่ในตัวอย่างทดสอบ พร้อมทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดที่ลวดอัดแรง
2		ทำการอัดแรงโดยใช้ Hydraulic jack อัดแรงตามแนวแกน จำนวณ 27 ตัน จากนั้นทำการยึดลวดอัดแรงกับแผ่นเหล็ก
3		ภาพตัวอย่างการเก็บข้อมูลของ Strain gage ในเหล็กเสริมคอนกรีต-ลวดอัดแรงและแรงอัดตามแนวแกนจาก Load cell
4		สำหรับตัวอย่างที่ต้องเสริมกำลังด้วย CFRP อัดแรงค้างไว้ 2 วัน แล้วค่อยนำไปเสริมกำลัง CFRP

4.2.4. การทดสอบกำลังรับแรงบิด

งานวิจัยนี้จะทดสอบการให้แรงบิดเหมือนกับงานวิจัยในอดีต Chalioris และ Karayannis [7] ให้แรงคู่ควบจากคานเหล็กที่มีความยาวของแขนโมเมนต์เท่ากับ 300 mm เพื่อให้เกิดแรงบิดกระทำกับตัวอย่างทดสอบ จากการกดแรงของ Hydraulic jack ขนาด 50 ตัน ที่กึ่งกลางของคานเหล็กหน้าตัดตัวไอขนาด 150x150x2350 mm กำหนดอัตราการให้แรงกดของ hydraulic jack เป็น 10 kN/min ดังรูป 4.6(ข) และใช้ LVDT จำนวณ 7 ตัว ติดตั้งบริเวณด้านหน้า,ด้านหลังและกึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบ ซึ่งระยะเรียง LVDT ของทั้ง 2 ตัวมีระยะเท่ากับ 1000 mm ดังรูป 4.6(ก)

(ก) ตัวอย่างการให้แรงบิด BF-135-75

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ข) ตัวอย่างการให้แรงกดจาก Hydraulic jack ของตัวอย่าง B-90-150

ภาพที่ 4.6 รายละเอียดการติดตั้งเครื่องมือและทดสอบคานรับแรงบิด

4.2.5. การทดสอบกำลังรับแรงบิดร่วมกับแรงอัดตามแนวแกน

นำตัวอย่างที่ทำการอัดแรงในแนวแกนไว้มาปลดลวดอัดแรง โดยนำ Hydraulic jack ขนาด 27 ตัน อัดแรงในแนวแกนให้ได้แรงอัดตามที่กำหนด จากนั้นทำการปลดลวดอัดแรงออก พร้อมกับบันทึกค่า strain gage ของในเหล็กเสริมคอนกรีตและลวดอัดแรง เมื่อตรวจสอบการให้แรงอัดตามแนวแกนและการติดตั้ง LVDT เรียบร้อยแล้ว ให้ทำการทดสอบกำลังรับแรงบิดของตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ 4.3. การทดสอบกำลังรับแรงบิดและแรงอัดตามแนวแกน

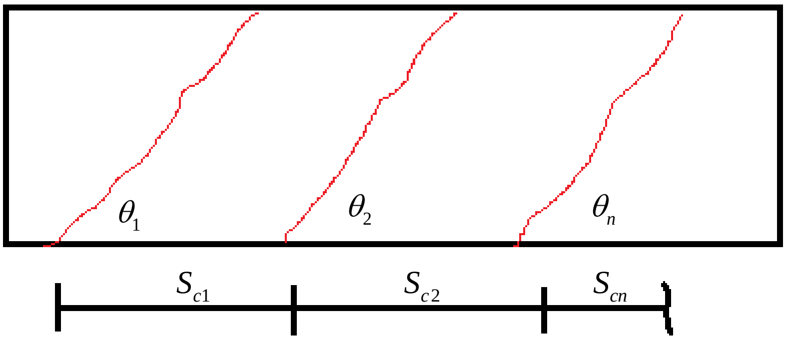
ขั้นตอนที่	ภาพประกอบ	คำอธิบายภาพประกอบ
1		อัดแรงจาก Hydraulic jack เป็นจำนวณ 27 ตัน พร้อมกับตรวจสอบค่าความเครียดในเหล็กเสริมคอนกรีต และลวดอัดแรง
2		ปลดลวดอัดแรงออก และตรวจสอบแรงอัดจาก Hydraulic jack แนวแกนให้ได้แรงตามที่กำหนด
3		ติดตั้งอุปกรณ์ LVDT และตรวจสอบความพร้อมก่อนการทดสอบ

ตารางที่ 4.2(ต่อ) การทดสอบกำลังรับแรงบิดและแรงอัดตามแนวแกน

ขั้นตอนที่	ภาพประกอบ	คำอธิบายภาพประกอบ
4		ทดสอบกำลังรับแรงบิด โดยกำหนดอัตราการให้แรงกดของ hydraulic jack เป็น 10 kN/min และแรงอัดคงที่ เท่ากับ 24 ตัน

4.3 การบันทึกผลการทดสอบ

ในการทดสอบกำลังรับแรงบิดของตัวอย่างทั้งหมดจะสังเกตและบันทึกค่าผลการทดสอบ คือ กำลังรับแรงบิดสูงสุด กำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าว กำลังรับแรงบิดที่ทำให้เหล็กปลอกหรือเหล็กตามยาวคราก มุมบิดของแรงบิดสูงสุด มุมบิดแรงบิดคอนกรีตแตกร้าว มุมบิดแรงบิดที่ทำให้เหล็กปลอกหรือเหล็กตามยาวคราก รูปแบบการวิบัติ รูปแบบรอยร้าว ระยะเรียงรอยร้าว และรอยร้าวเอียงจากแรงบิด



<u>กำหนดให้</u>

ระยะเรียงรอยร้าว $= \dfrac{S_{c1}+S_{c2}+...+S_{cn}}{n}$

รอยร้าวเอียงจากแรงบิด $= \dfrac{\theta_1+\theta_2+...+\theta_n}{n}$

4.4 การแปลงข้อมูล

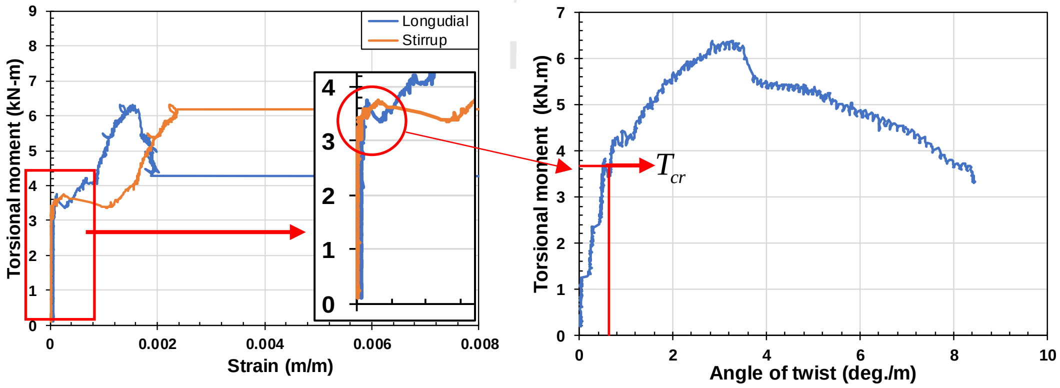
4.4.1 กำลังรับแรงบิด

ในการทดสอบกำลังรับแรงบิดเกิดจากการให้แรงคู่ควบจากการกด hydraulic jack แก่คานเหล็กรูปตัว H ดังภาพที่ 4.5 โดยกำหนดอัตรการให้แรงกดจาก hydraulic jack เท่ากับ 10 kN/min ซึ่งจะได้แรงบิดเท่ากับ 1.5 kN-m/min

ภาพที่ 4.7 รายละเอียดกำลังรับแรงบิดของตัวอย่างทดสอบ

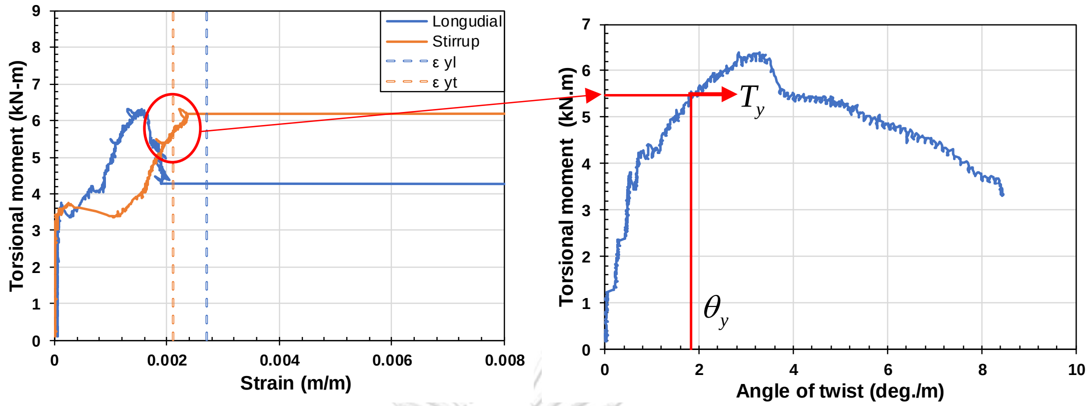
ในการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงบิดขององค์อาคาร ผู้ทำการวิจัยได้นิยามแรงบิดที่นำมาวิเคราะห์ดังต่อไป

<u>แรงบิดคอนกรีตแตกร้าว</u> คือ แรงบิดที่ทำให้บริเวณผิวคอนกรีตเริ่มแตกร้าวและเหล็กเสริมภายในคอนกรีตเริ่มทำกำลังรับแรงบิด สังเกตได้จากอุปกรณ์วัดความเครียดที่ติดตั้งที่ผิวของเหล็กเสริมเริ่มเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4.6



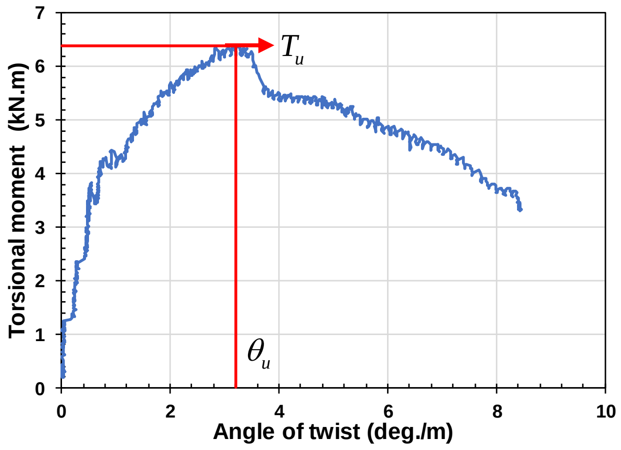
ภาพที่ 4.8 รายละเอียดการหาแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวของตัวอย่าง B-90-75

<u>แรงบิดคราก</u> คือ แรงบิดที่ทำให้เหล็กเสริมภายในคอนกรีต (เหล็กปลอก หรือเหล็กเสริมตามยาว หรือทั้ง 2 ชนิด) รับแรงบิดถึงจากคราก ดังภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.9 รายละเอียดการหาแรงบิดครากของตัวอย่าง B-90-75

<u>แรงบิดสูงสุด</u> คือ แรงบิดสูงสุดที่องค์อาคารสามารถรับได้ ดังภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.10 รายละเอียดการหาแรงบิดสูงสุดของตัวอย่าง B-90-75

4.4.2 มุมบิดของตัวอย่างทดสอบรับแรงบิด

การทดสอบตัวอย่างได้ทำการติดตั้ง LVDT ทั้งหมด 3 หน้าตัด จำนวณทั้งหมด 7 ตำแหน่ง เพื่อวัดการเคลื่อนตัวของหน้าตัดตัวอย่างทดสอบ ดังภาพที่ 4.11 เพื่อจะได้นำระยะการเคลื่อนตัวหน้าตัดดังกล่าวมาแปลงเป็นมุมบิดของตัวอย่างทดสอบ ดังสมการ

$$\theta_i = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta}{L}\right) \tag{4.1}$$

เมื่อ θ_i คือ การแปลงมุมบิดจาก LVDT ของแต่ละหน้าตัด (Deg.)

L คือ ระยะเรียงกึ่งกลางหน้าตัดถึงจุดที่วัด LVDT (mm)

Δ คือ การเคลื่อนตัวของ LVDT (mm)

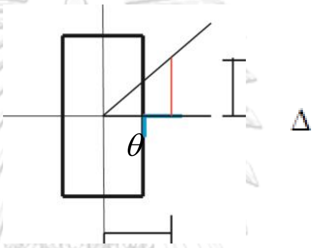
จากนั้นนำมุมบิดที่วัดได้จาก LVDT ทั้ง 3 หน้าตัดมารวมเป็นมุมบิดที่เกิดขึ้นทั้งหมด ดังสมการ

$$\theta = \theta_A + \theta_C \tag{4.2}$$

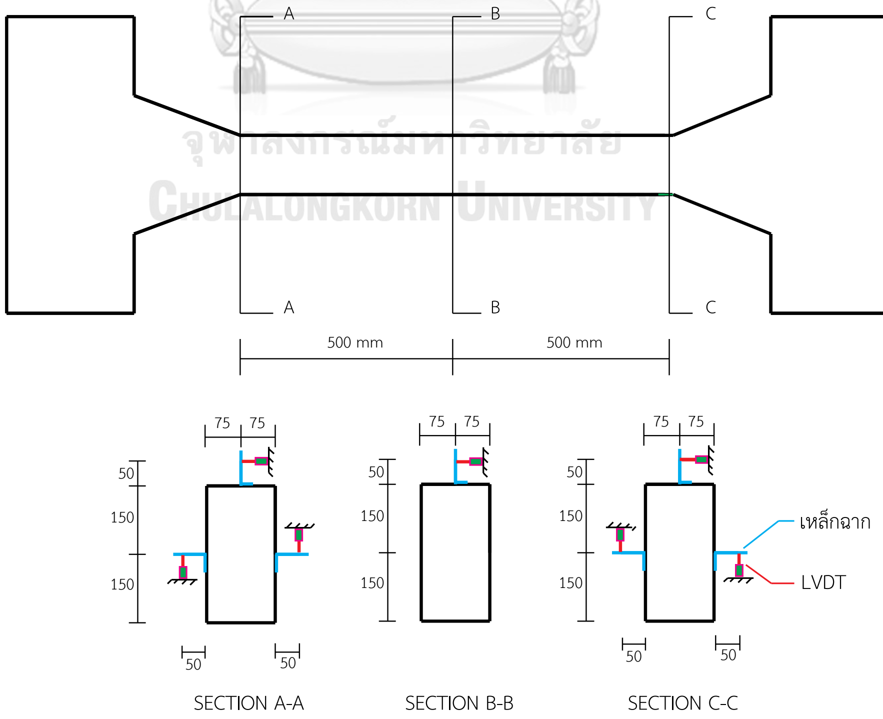
เมื่อ θ คือ มุมบิดของตัวอย่างทดสอบ (Deg.)

θ_A คือ มุมบิดของหน้าตัด A-A (Deg.)

θ_C คือ มุมบิดของหน้าตัด B-B (Deg.)



ภาพที่ 4.11 รายละเอียดการหามุมบิดขององค์อาคาร

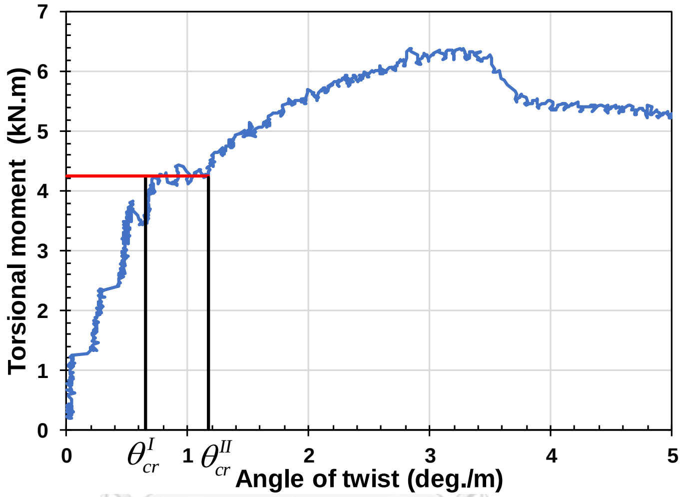


ภาพที่ 4.12 รายละเอียดการติดตั้ง LVDT

ในการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงบิดขององค์อาคาร ผู้ทำการวิจัยได้นิยามมุมบิดเกิดขึ้นจากแรงบิดขององค์อาคารที่นำมาวิเคราะห์ดังต่อไป

มุมบิดแตกร้าว (θ^{I}_{cr}) คือ มุมบิดของตัวอย่างรับแรงบิดที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้าว (ช่วงยังไม่มีรอยร้าว) ดังภาพที่ 4.11

มุมบิดแตกร้าว (θ^{II}_{cr}) คือ มุมบิดของตัวอย่างรับแรงบิดที่ทำให้คอนกรีตแตกร้าว (ช่วงมีรอยร้าว) โดยแรงบิดจะคงที่ระยะหนึ่ง ดังภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.13 รายละเอียดการหามุมบิดแตกร้าวของตัวอย่าง B-90-75

มุมบิดคราก (θ_y) คือ มุมบิดของตัวอย่างทดสอบที่เกิดจากแรงบิดคราก ดังภาพ 4.7

มุมบิดสูงสุด (θ_u) คือ มุมบิดของตัวอย่างทดสอบที่เกิดจากแรงบิดสูงสุด ดังภาพ 4.8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.4.3 สติฟเนสของตัวอย่างทดสอบภายใต้แรงบิด

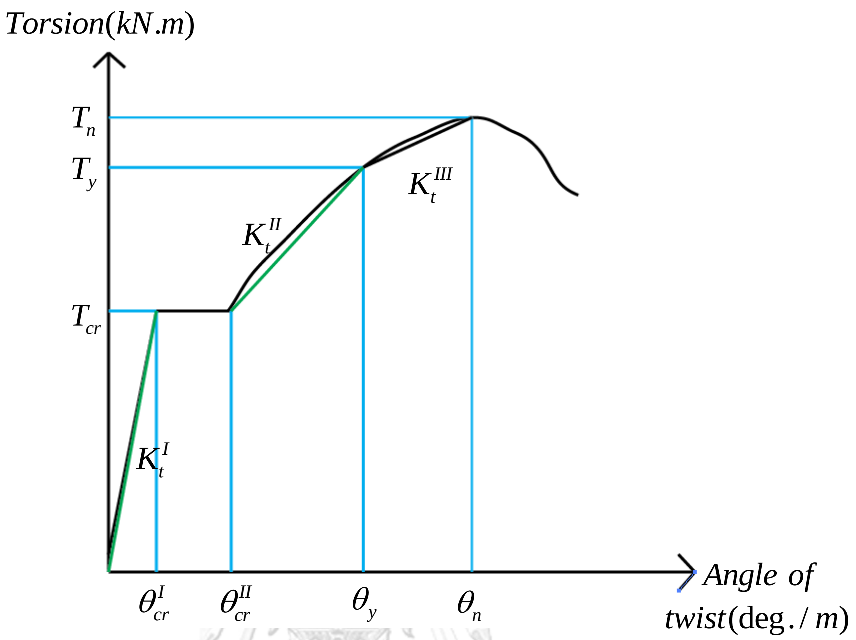
ในการวิเคราะห์ข้อมูลกำลังรับกำลังรับแรงบิดจะแบ่งค่าสติฟเนสของตัวอย่างทดสอบเป็น 3 ช่วงของกำลังรับแรงบิดได้แก่ ช่วงก่อนการเกิดรอยร้าว ช่วงหลังเกิดรอยร้าวถึงเหล็กเสริมภายในคราก และช่วงหลังเหล็กเสริมครากจนถึงกำลังรับแรงบิดสูงสุด ดังภาพที่ 4.12 แสดงการหาค่าความเข็งแรงที่ใช่ในการวิเคราะห์ ณ จุดต่างๆของความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมบิดขององค์อาคารทดสอบ ค่าสติฟเนสของตัวอย่างการทดสอบสามารถหาได้จากสมการ

$$K_t = T / \theta \tag{4.3}$$

เมื่อ K_t คือ สติฟเนสของตัวอย่างทดสอบรับแรงบิด (t-m²/deg.)

T คือ กำลังรับแรงบิด (t-m)

θ คือ มุมบิดของตัวอย่างทดสอบ (deg./m)



ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมบิดขององค์อาคารทดสอบ

4.4.4 ดัชนีดัชนีความเหนียวของตัวอย่างทดสอบรับแรงบิด

ในการวิเคราะห์ข้อมูลกำลังรับกำลังรับแรงบิดของตัวอย่างทดสอบ ผู้ทำการวิจัยได้นำดัชนีดัชนีความเหนียวมาทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกำลังรับกำลังแรงบิด สามารถหาดัชนีความเหียวได้ดังสมการ

$$\text{ดัชนีดัชนีความเหนียว (ductility index)} = \frac{\theta_u}{\theta_y} \tag{4.4}$$

เมื่อ θ_u คือ มุมบิดจากแรงบิดสูงสุด (deg./m)

θ_y คือ มุมบิดจากแรงบิดคราก (deg./m)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 5
การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

5.1. กำลังรับแรงบิดและรูปแบบการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงบิดสูงสุด กำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าว กำลังรับแรงบิดคราก มุมบิดสูงสุด มุมบิดแตกร้าว มุมบิดทำให้เหล็กปลอกหรือเหล็กตามยาวคราก สติฟเนสแรงบิด (torsional stiffness) และดัชนีความเหนียวของกำลังรับแรงบิดตัวอย่างทดสอบ (ductility index) โดยตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ การเสริมกำลังและไม่เสริมกำลังด้วย CFRP แรงอัดตามแนวแกนคงที่ ระยะเรียงของเหล็กปลอก และประเภทมุมของอมาตารฐานของเหล็กปลอก

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงบิดของตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่าง	กำลังรับแรงบิด (kN.m)			มุมบิดของตัวอย่างทดสอบ (deg.)				รูปแบบ	รูปแบบ	ระยะเรียง	มุมรอยร้าว
	$T_{\exp,cr}$	$T_{\exp,y}$	$T_{\exp,\max}$	θ_{cr}^{I}	θ_{cr}^{II}	θ_y	θ_n	การวิบัติ	รอยร้าว	รอยร้าว (mm)	(deg.)
B-90-150	3.17	4.49	5.64	0.61	0.78	1.27	2.09	I	Spiral	324	45
B-90-75	4.33	5.76	6.39	0.72	1.17	1.89	3.2	I	Spiral	271	44
B-135-75	5.52	8.19	8.74	0.55	0.79	3.022	4.24	II*	Spiral	275	45
BF-90-150	8.28	14.22	16.34	0.36	0.75	7.72	11.09	III	-	-	-
BF-90-75	8.31	14.27	17.6	0.45	0.98	5.37	8.76	III	-	-	-
BF-135-75	12.06	14.3	17.28	0.55	1.6	7.94	11.22	III	-	-	-
C-90-150	4.89	10.1	11.89	0.64	0.64	1.34	1.51	I	Spiral+Crush	-	40
C-90-75	4.92	10.51	11.42	0.86	0.86	1.85	3.04	I	Spiral+Crush	-	40
C-135-75	5.56	10.27	11.08	0.49	0.49	1.55	2.53	I	Spiral+Crush	256	38
CF-90-150	13.42	14.93	23.05	1.15	1.78	3.37	15.04	III	-	-	-
CF-90-75	11.92	16.52	23.19	0.78	0.78	2.23	9.67	III	-	-	-
CF-135-75	13.29	17.61	25.7	1.11	1.52	3.42	11.38	III	-	-	-

เมื่อ $T_{\exp,\max}$ คือ กำลังรับแรงบิดสูงสุด (kN-m)

$T_{\exp,y}$ คือ กำลังรับแรงบิดที่ทำให้เหล็กเสริมคราก (kN-m)

$T_{\exp,cr}$ คือ กำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าว (kN-m)

$\theta_{\max}$ คือ มุมบิดของแรงบิดสูงสุด (deg./m)

θ_y คือ มุมบิดของกำลังรับแรงบิดคราก (deg./m)

θ_{cr}^{I} คือ มุมบิดแตกร้าว (ช่วงก่อนเกิดรอยร้าว) (deg./m)

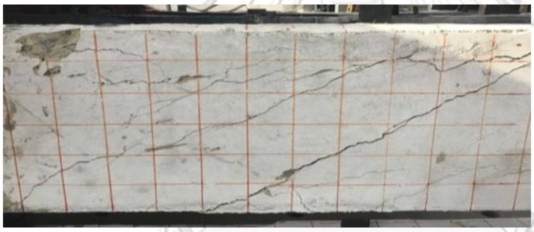
θ_{cr}^{II} คือ มุมบิดแตกร้าว (ช่วงหลังเกิดรอยร้าว) (deg./m)

<u>หมายเหตุ</u> รูปแบบการวิบัติ

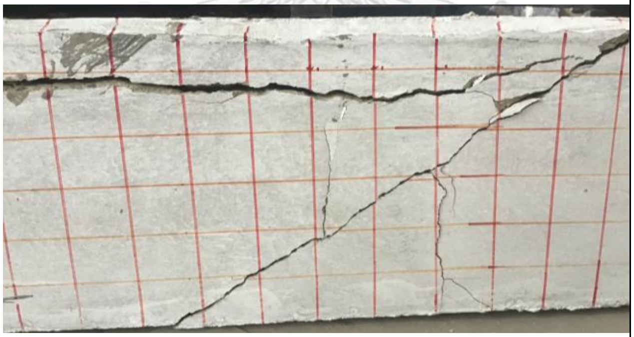
I ตัวอย่างทดสอบสามารถรับแรงบิดจนกระทั่งเหล็กปลอกหรือเหล็กตามแนวแกน เกิดการครากก่อนถึงกำลังรับแรงบิดสูงสุด

II ตัวอย่างทดสอบที่เสริมกำลังด้วย CFRP สามารถรับแรงบิดจนกระทั่ง CFRP เกิดการฉีกขาด และเหล็กเสริมภายในเกิดการครากก่อนกำลังตานทานแรงบิดสูงสุด

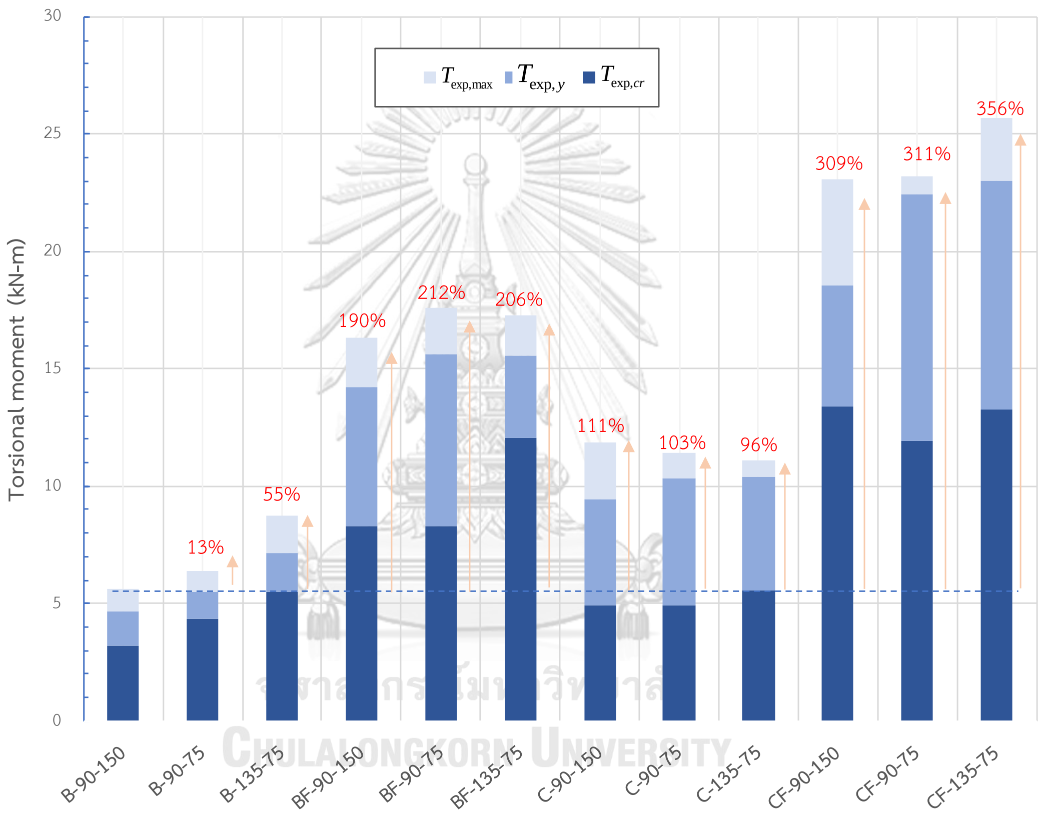
ตารางที่ 5.2 ตัวอย่างรูปแบบการวิบัติ

Mode	รูปตัวอย่าง	คำอธิบาย
I	ตัวอย่าง B-90-75  ตัวอย่าง B-135-75	1. เหล็กเสริมภายในคราก สามารถสังเกตุได้จากการวัดค่าความเรียดของเหล็กเสริมภายในคอนกรีต 2. รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นเรียงตัวกันเป็นมุมทแยง 3. คอนกรีตเดการหลุดร่อนบริเวณมุมของคอนกรีต 4. ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด
II	ตัวอย่าง BF-90-75	1. CFRP เกิดการฉีกขาด บริเวณมุมของหน้าตัดคอนกรีต 2. ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด

ตารางที่ 5.3 ตัวอย่างรูปแบบรอยร้าว

รูปแบบ	รูปตัวอย่าง	คำอธิบาย
Spiral	 Side view ของตัวอย่าง B-90-75 Top view ขอตัวอย่าง B-135-75	1. รอยร้าวเป็นแบบเกลียววงรอบตัวอย่างทดสอบ 2. มีระยะเรียงรอยร้าวเท่าๆกัน 3. รอยร้าวเริ่มเกิดจากกึ่งกลางหน้าตัด จากนั้นค่อยๆเพิ่มจนวนรอบเต็มตัวอย่าง 4. รอยร้าวทำมุมประมาณ 45 องศากับแนวราบ
Spiral+ Crush	 Side view ของตัวอย่าง C-90-75 Top view ของตัวอย่าง C-90-75	1. รอยร้าวจะผสมระหว่างแบบเกลียวและแบบบดอัดของคอนกรีต 2. มุมรอยร้าวที่เกิดขึ้นประมาณ 40 องศากับแนวราบ

จากภาพที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบกำลังรับแรงบิดของทุกตัวอย่างทดสอบโดยนำมาเปรียบเทียบกับตัวอย่าง B-90-150 คือ ตัวที่กำลังรับแรงบิดน้อยที่สุด โดยจะได้เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงบิดสูงสุดของคานและเสาตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วย CFRP อย่างน้อย 190% และ 309% ตามลำดับ และเมื่อนำมาให้แรงบิดตามแนวแกน (เสา) สามารถพิ่มกำลังรับแรงบิดสูงสุดได้อย่างน้อย 96%



ภาพที่ 5.1 แผนภูมิแท่งกำลังรับแรงบิดของทุกตัวอย่างทดสอบ

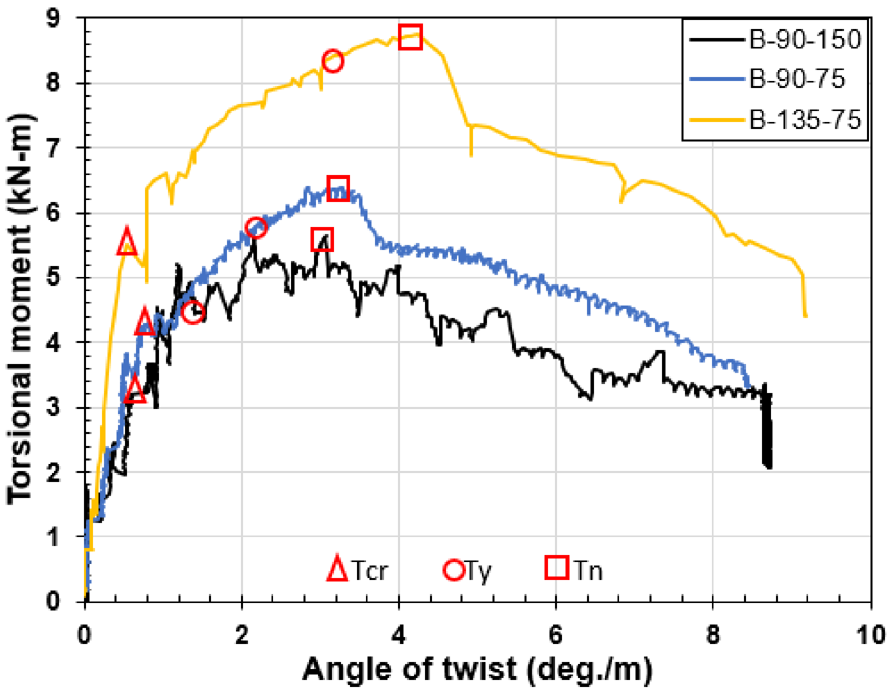
5.2. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมบิดของตัวอย่างทดสอบ

สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีการเสริมแผ่น CFRP จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมบิดของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในภาพที่ 5.1 โดยทำการพิจรณาแรงบิดคอนกรีตแตกร้าว แรงบิดคราก และแรงบิดสูงสุด จะสังเกตว่า

1. เมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กปลอก สามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าว แรงบิดคราก และแรงบิดสูงสุดได้ แต่ความชั้นของกราฟในช่วงก่อนเกิดรอยร้าวและมุมบิดสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกัน จากตัวอย่าง B-90-150 กับ B-90-75

2. เมื่อเปรียบเทียบการเพิ่มมุมของอมาตรฐานจาก 90 องศาเป็น 135 องศา สามารถเพิ่มความชั้นในช่วงก่อนเกิดรอยร้าวได้และสามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดได้เช่นเดียวกัน จากตัวอย่าง B-90-75 กับ B-135-75

3. สำหรับตัวอย่างที่มุมของอเหล็กปลอกเป็น 135 องศา เมื่อถึงจุดรับแรงบิดสูงสุดแล้วกำลังจะลดลงเร็วกว่าประเภทมุมของอเหล็กปลอกเป็น 90 องศา

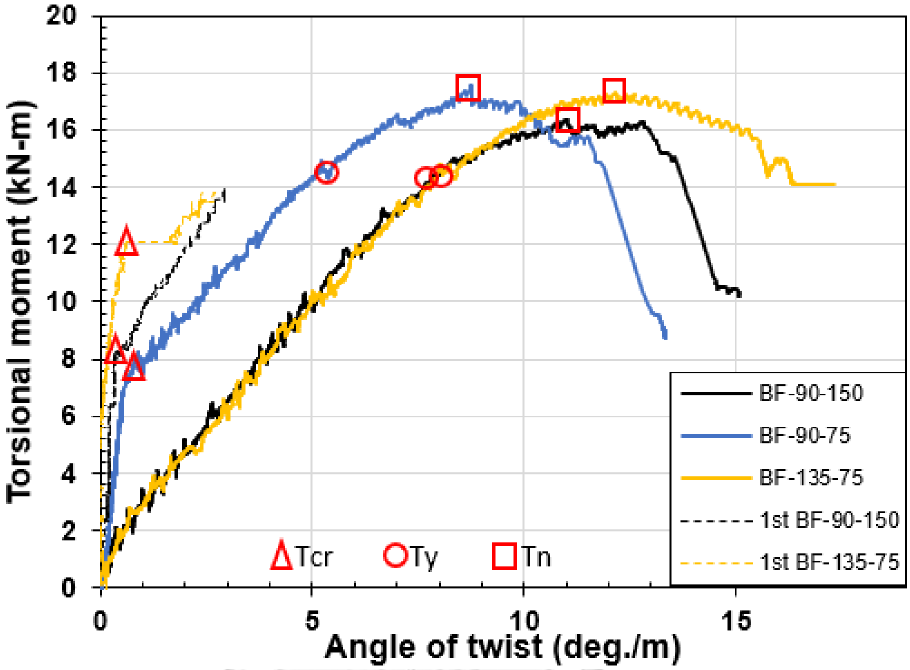


ภาพที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมบิดของคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการเสริม CFRP

สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมบิดของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในภาพที่ 5.3 จะสังเกตว่า

1. เมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กปลอก กำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าว แรงบิดครากและความชันในช่วงก่อนเกิดรอยร้าวมีค่าใกล้เคียงกัน แต่กำลังรับแรงบิดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จากตัวอย่าง BF-90-150 กับ BF-90-75

2. เมื่อเพิ่มมุมของอมาตรฐานจาก 90 องศาเป็น 135 องศา ในช่วงก่อนถึงจุดแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวความชันของกราฟมีค่าใกล้เคียงกัน แต่แรงบิดคอนกรีตแตกร้าวจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และช่วงหลังจากจุดแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวจนถึงจุดแรงบิดสูงสุดความชันและแรงบิดสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกันเช่นเดียวกัน จากตัวอย่าง BF-90-75 กับ BF-135-75



ภาพที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมบิดของคานตัวอย่างทดสอบที่มีการเสริม CFRP

<u>หมายเหตุ</u>

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

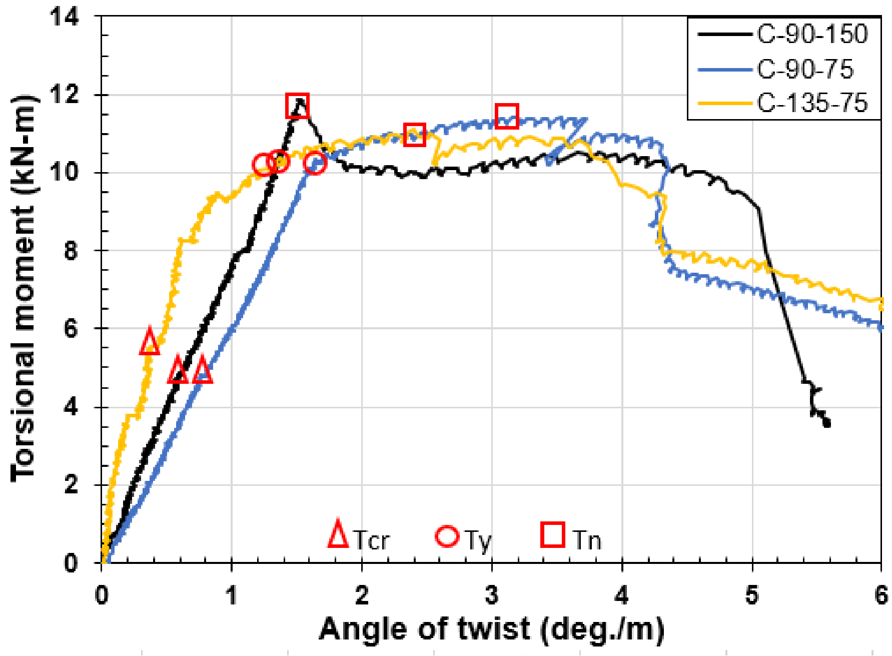
ตัวอย่าง BF-90-150 กับ BF-135-75 ทำการทดสอบ 2 โดยครั้งแรกทดสอบรับแรงบิดจนกระทั้งก่อนจุดแรงบิดคราก (14 kN.m) เนื่องจากตัวอย่างทดสอบมีรอยร้าวนอกบริเวณทดสอบจึงหยุดการทดสอบ จากนั้นทดสอบกำลังรับแรงบิดใหม่ ซึ่งจะทำให้มุมบิดครากและมุมบิดสูงสุดเพิ่มมากขึ้น

สำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมบิดของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในภาพที่ 5.4 จะสังเกตว่า

1. เมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กปลอก ในช่วงก่อนถึงจุดแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวความชันของกราฟและแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวมีค่าใกล้เคียงกัน และช่วงหลังจากจุดแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวจนถึงจุดแรงบิดสูงสุดความชันและแรงบิดสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกันเช่นเดียวกัน แต่ว่าแรงบิดสูงสุดของระยะเรียงเหล็กปลอก 150 mm มีค่ามากกว่า 75 mm จากตัวอย่าง C-90-150 กับ C-90-75

2. เมื่อเปรียบเทียบประเภทของอมาตรฐานจาก 90 องศาเป็น 135 องศา องศา (C-90-75 กับ C-135-75) ในช่วงก่อนถึงจุดแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวความชันของกราฟมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่แรงบิดคอนกรีตแตกร้าวมีค่าใกล้เคียงกัน และช่วงหลังจากจุดแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวจนถึงจุดแรงบิดสูงสุดความชันและแรงบิดสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกันเช่นเดียวกัน

3. การให้แรงอัดตามแนวแกนแก่ตัวอย่างทดสอบสามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดได้มากขึ้น และลดการเกิดรอยร้าวได้



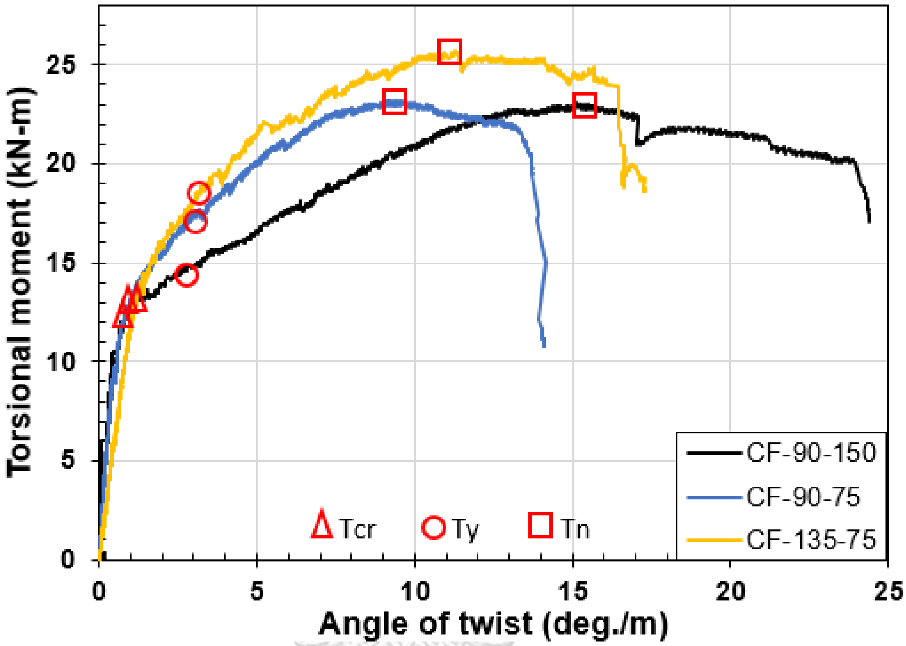
ภาพที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมบิดของเสาตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการเสริม CFRP

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สำหรับเสาตัวอย่างทดสอบที่มีการเสริม CFRP จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมบิดของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในภาพที่ 5.4 จะสังเกตว่า

1. เมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กปลอก ในช่วงก่อนถึงจุดแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวความชันของกราฟและแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวมีค่าใกล้เคียงกัน และช่วงหลังจากจุดแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวจนถึงจุดแรงบิดสูงสุดความชันกราฟของระยะเรียงเหล็กปลอก 75 mm มีค่ามากกว่า 150 mm แต่แรงบิดสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกัน จากตัวอย่าง CF-90-150 กับ CF-90-75

2. เมื่อเปรียบเทียบประเภทของอมาตรฐานจาก 90 องศาเป็น 135 ในช่วงก่อนถึงจุดแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวความชันของกราฟและแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวมีค่าใกล้เคียงกัน และช่วงหลังจากจุดแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวจนถึงจุดแรงบิดสูงสุดความชันกราฟมีค่าใกล้เคียงกันเช่นเดียวกัน แต่แรงบิดสูงสุดของประเภทของอ 135 องศามีค่ามากกว่า จากตัวอย่าง CF-90-75 กับ CF-135-75



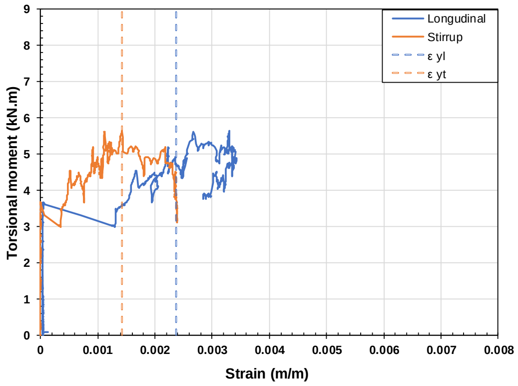
ภาพที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมบิดของเสาตัวอย่างทดสอบที่มีการเสริม CFRP

5.3. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเครียดของเหล็กเสริม กับ CFRP

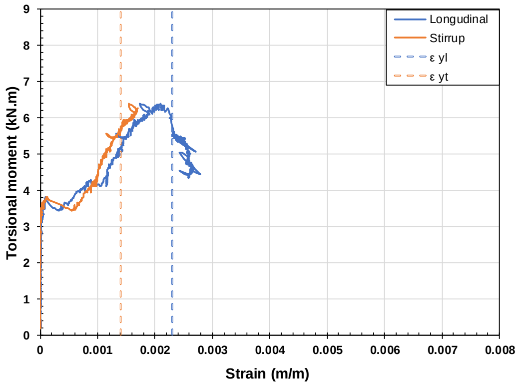
สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเครียดของเหล็กเสริมของตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 5.6 จะสังเกตว่า

1. เมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กปลอก ในช่วงก่อนเกิดรอยร้าวความเครียดในเหล็กเสริมจะไม่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งหลังจากตัวอย่างรับแรงบิดถึงจุดแรงบิดคอนกรีตแตกร้าว และความเครียดในเหล็กปลอกจะเกิดการครากก่อนถึงจุดแรงบิดสูงสุด แต่ว่าความเครียดในเหล็กตามแนวแกนจะเกิดการครากหลังจากตัวอย่างรับแรงบิดหลังจุดแรงบิดสูงสุดไปแล้ว จากตัวอย่าง B-90-150 กับ B-90-75

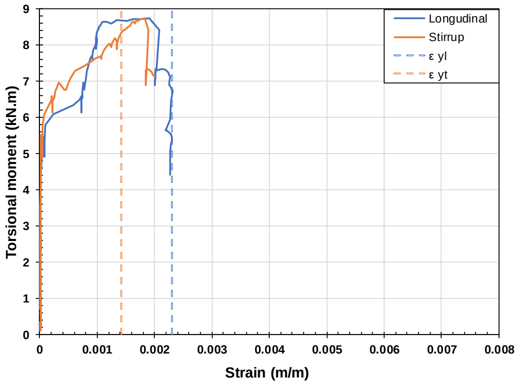
2. เมื่อเพิ่ทมุมของอมาตรฐานจาก 90 องศาเป็น 135 องศา จะส่งผลให้แรงบิดครากและแรงบิดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้น จากตัวอย่าง B-90-75 และ B-135-75



(ก) B-90-150



(ข) B-90-75



(ค) B-135-75

ภาพที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเครียดของเหล็กเสริมของคานตัวอย่างที่ไม่เสริม CFRP

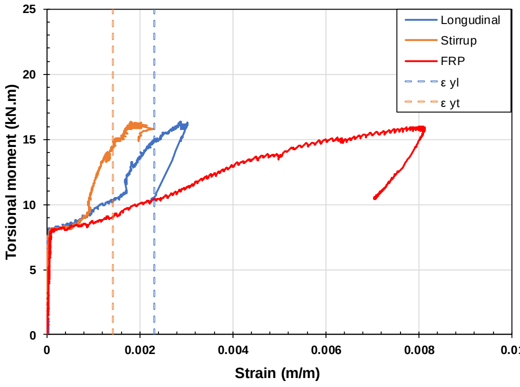
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สำหรับคานตัวอย่างที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเครียดของเหล็กเสริมและ CFRP ของตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 5.6 จะสังเกตว่า

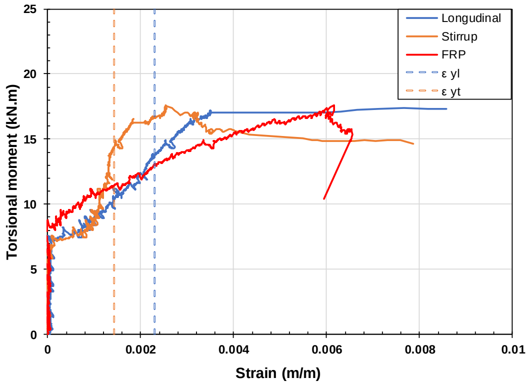
1. เมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กปลอก (BF-90-150 กับ BF-90-75) ความเครียดในเหล็กปลอกและเหล็กตามยาวจะเกิดการครากก่อนถึงจุดแรงบิดสูงสุด โดยตัวอย่าง BF-90-150 เหล็กปลอกจะเกิดการครากก่อนเหล็กเสริมตามยาว จากนั้นความเครียดในแผ่น CFRP จะเพิ่มขึ้นมากขึ้นหลังจากช่วงเหล็กเสริมภายในเกิดกาคราก

2. ประเภทของอมาตรฐาน 90 องศา กับ 135 องศา จะมีพฤติกรรมเช่นเดียวกัน

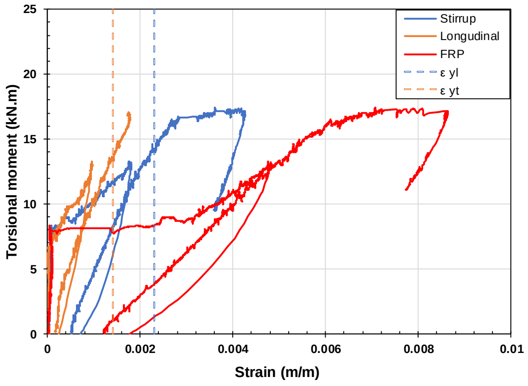
3. ความเครียดใน CFRP จะเริ่มเพิ่มขึ้นหรือทำการรับแรงบิด ก็ต่อเมื่อตัวอย่างทดสอบเกิดรอยร้าว



(ก) BF-90-150



(ข) BF-90-75



(ค) BF-135-75

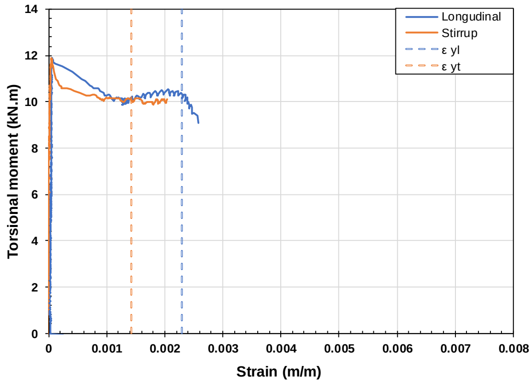
ภาพที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเครียดของเหล็กเสริมและCFRP ของคานตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วย CFRP

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

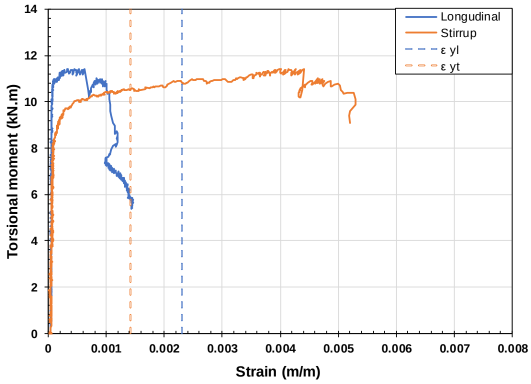
สำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วย CFRP จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเครียดของเหล็กเสริมของตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 5.7 จะสังเกตว่า

1. เมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กปลอก (C-90-150 กับ C-90-75) ในช่วงก่อนเกิดรอยร้าวความเครียดในเหล็กเสริมจะไม่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งหลังจากตัวอย่างรับแรงบิดถึงจุดแรงบิดคอนกรีตแตกร้าว และเหล็กปลอกครากก่อนถึงจุดแรงบิดสูงสุด แต่ตัวอย่าง C-90-150 เหล็กเสริมภายในคอนกรีตทั้ง 2 ชนิดจะเกิดการครากหลังจุดแรงบิดสูงสุด

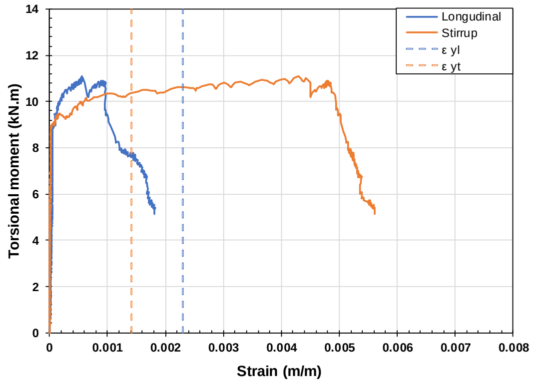
2. เมื่อเปรียบเทียบประเภทของอมาตรฐานจาก 90 องศาเป็น 135 องศา หลังจากรับแรงบิดสูงสุดกำลังรับแรงบิดจะลดลงอย่าวรวดเร็ว



(ก) C-90-150



(ข) C-90-75



(ค) C-135-75

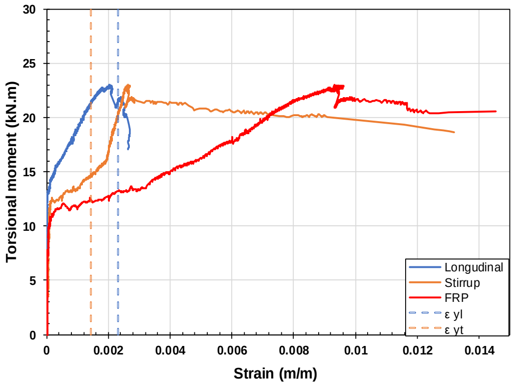
ภาพที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเครียดของเหล็กเสริมของ
เสาตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วย CFRP

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

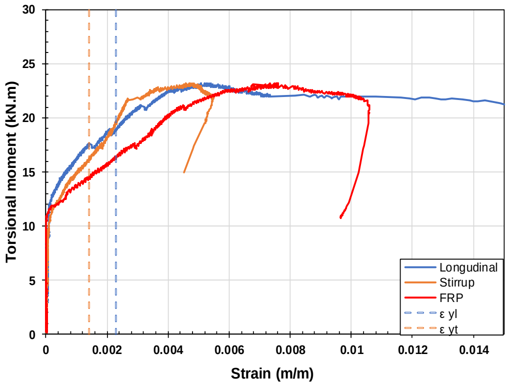
สำหรับเสาตัวอย่างที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเครียดของเหล็กเสริมและ CFRP ของตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 5.7 จะสังเกตว่า

1. เมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กปลอกจากระยะเรียงเหล็กปลอก ช่วงก่อนเกิดรอยร้าวความเครียดในเหล็กเสริมจะไม่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งหลังจากตัวอย่างรับแรงบิดถึงจุดแรงบิดคอนกรีตแตกร้าว และจะเกิดการครากของเหล็กเสริมทั้ง 2 ชนิดก่อนถึงแรงบิดสูงสุด จากนั้นความเครียดในแผ่น CFRP จะเพิ่มขึ้นหลังจากเหล็กเสริมภายในเกิดการคราก จากตัวอย่าง CF-90-150 กับ CF-90-75

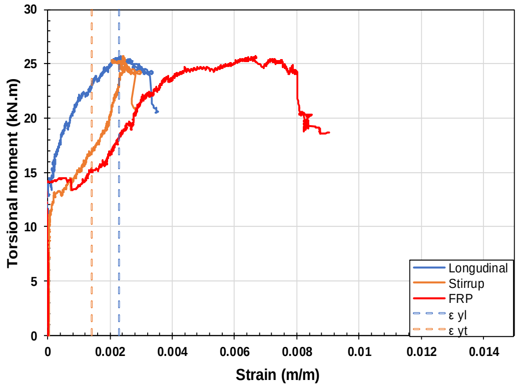
2. เมื่อเปรียบเทียบประเภทของอมาตรฐานจาก 90 องศาเป็น 135 องศา เหล็กเสริมตามแนวแกนจะเกิดการครากหลังจุดรับแรงบิดสูงสุด



(10) CF-90-150



(11) CF-90-75



(12) CF-135-75

ภาพที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเครียดของเหล็กเสริมของเสาตัวอย่างทดสอบที่มีการเสริมกำลังด้วย CFRP

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.4. สติฟเนสและดัชนีดัชนีความเหนียวของการทดสอบกำลังรับแรงบิด

ตารางที่ 5.4 สติฟเนสและดัชนีดัชนีความเหนียวของการทดสอบกำลังรับแรงบิด

ตัวอย่าง	Stiffness (kN.m²/deg.)			Ductility
	K_t^I	K_t^{II}	K_t^{III}	index
B-90-150	5.20	7.76	1.40	1.65
B-90-75	6.01	3.18	0.48	1.69
B-135-75	10.04	11.13	0.45	1.40
BF-90-150	23.00	15.23	0.63	1.44
BF-90-75	18.47	11.25	0.98	1.63
BF-135-75	21.93	2.13	0.91	1.41
C-90-150	7.64	8.14	0.00	1.13
C-90-75	5.72	6.50	0.76	1.64
C-135-75	11.35	9.61	0.83	1.63
CF-90-150	11.67	2.40	0.70	4.46
CF-90-75	15.28	5.90	0.90	4.34
CF-135-75	11.97	10.54	1.02	3.33

เมื่อ K_t^I คือ กำลังรับแรงบิดสูงสุด (kN.m²/deg.)

K_t^{II} คือ กำลังรับแรงบิดที่ทำให้เหล็กเสริมคราก (kN.m²/deg.)

K_t^{III} คือ กำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าว (kN.m²/deg.)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.5. ประสิทธิภาพการรับแรงดึงของ CFRP

การทดสอบวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน จากการทดสอบรับแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D3039 ได้ผลการทดสอบการยืดตัวเมื่อแตกหักเฉลี่ย 0.00155 m/m

ในการทดสอบกำลังรับแรงบิดได้ติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดที่ผิว CFRP ของตัวอย่างทดสอบ จากนั้นนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการรับแรงบิดของ CRRP ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบความเครียดยืดตัวแตกหัก CFRP ของตัวอย่างทดสอบกับ ASTM D3039

ตัวอย่าง	ความเครียดยืดตัวแตกหัก (m/m)		$\text{efficiency} = \frac{\varepsilon_{\exp}}{\varepsilon_{D3039}} \times 100\%$
	ASTM D3039	ทดสอบรับแรงบิด	
BF-90-150	0.00147	0.00081	55
BF-90-75	0.00147	0.00067	46
BF-135-75	0.00147	0.00097	66
CF-90-150	0.00147	0.00145	99
CF-90-75	0.00147	0.00105	71
CF-135-75	0.00147	0.00092	63

จากตารางเปรียบเทียบความเครียดยืดตัวแตกหัก CFRP ของตัวอย่างทดสอบกับ ASTM D3039 ของตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีและมีแรงอัดคงที่ตามแนวแกน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. เมื่อเพิ่มแรงอัดตามแนวแกนคงที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของ CFRP ได้ และจะเพิ่มดีที่สุดสำหรับตัวอย่างที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 150 mm มุมของอเหล็กปลอกเป็น 90° โดยเพิ่มขึ้นจาก 55% เป็น 99%

2. สำหรับตัวอย่างที่มีระยะเรียงเหล็กปลอกเป็น 75 mm ประสิทธิภาพของ CFRP จะอยู่ในช่วงประมาณ 46% ถึง 71% ของคานและเสาตัวอย่างทดสอบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3. การรับแรงดึงของแผ่น CFRP จะลดลงเมื่อนำไปรับแรงบิดขององค์อาคาร

5.6. ผลกระทบของตัวแปรทดสอบ

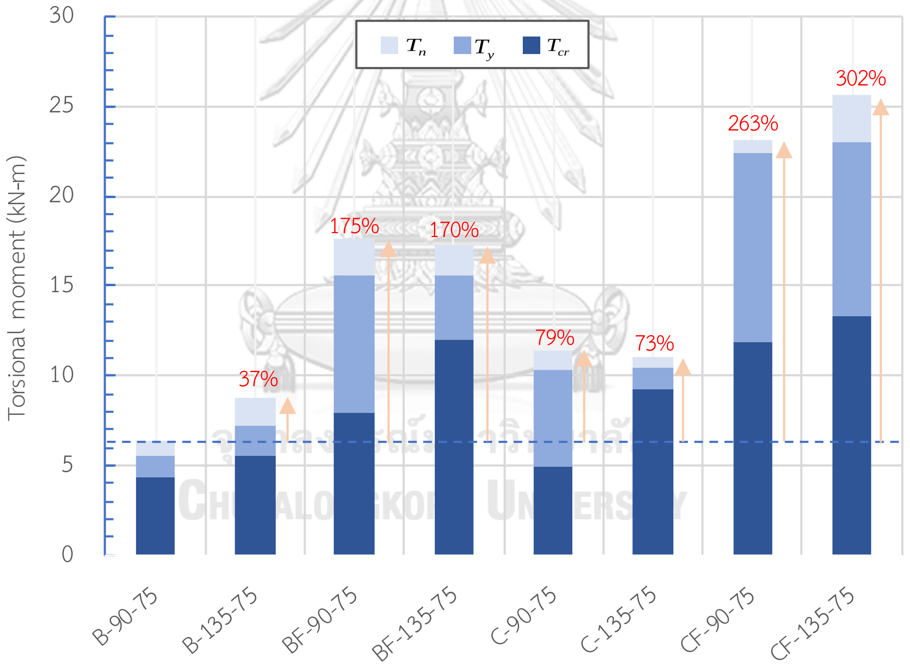
5.6.1. เปรียบเทียบประเภทมุมของอมาตารฐานของเหล็กปลอก

งานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบประเภทมุมของอมาตารฐานของเหล็กปลอก 2 ประเภทคือ 90 องศา และ 135 องศา โดยมีปริมาณการเสริมเหล็กที่เท่ากันคือ ระยะเรียงเหล็กปลอกเท่ากับ 75 mm โดยทำการเปรียบเทียบกำลังรับแรงบิด มุมบิดของกำลังรับแรงบิด สติฟเนสของตัวอย่างทดสอบของตัวอย่างทดสอบต้านทานแรงบิด และดัชนีความเหนียวของตัวอย่างทดสอบ

<u>กำลังรับแรงบิด</u>

จากภาพที่ 5.10 เป็นการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงบิดสูงสุดโดยเทียบจากตัวอย่าง B-90-150 จะสังเกตว่าเมื่อเพิ่มมุมจาก 90 องศาเป็น 135 องศามีผลดังนี้

1. สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดสูงสุดได้ 37%
2. สำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่เสริมกำลังมีกำลังรับแรงบิดสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกัน
3. สำหรับคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP กำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวเพิ่มขึ้น แต่ว่ากำลังรับแรงบิดสูงสุดมีขนาดใกล้เคียงกัน
4. สำหรับเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP เพิ่มกำลังรับแรงบิดสูงสุดได้ 29%



ภาพที่ 5.10 กำลังรับแรงบิดของตัวอย่างที่เพิ่มมุมของเหล็กปลอกจาก 90° เป็น 135°

<u>มุมบิดภายใต้แรงบิดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ</u>

จากภาพที่ 5.10 เป็นการหาเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของมุมบิดเมื่อตัวอย่างทดสอบรับแรงบิดสูงสุด โดยทำการเทียบจากตัวอย่าง B-90-150 จะสังเกตว่าเมื่อเพิ่มมุมจาก 90 องศาเป็น 135 องศามีผลดังนี้

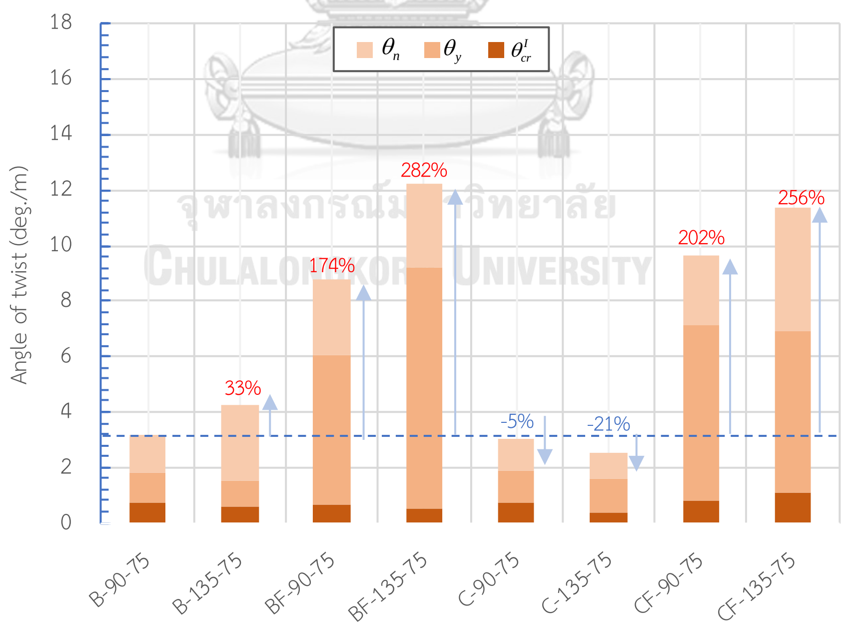
1. สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถเพิ่มมุมบิดสูงสุดที่ตัวอย่างสามารถรับได้ 33% แต่มุมบิดแตกร้าวและมุมบิดเหล็กเสริมครากมีค่าใกล้เคียงกัน

2. สำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่เสริมกำลัง มุมบิดที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง 16% และมุมบิดแตกร้าวและมุมบิดเหล็กเสริมครากมีค่าใกล้เคียงกัน

3. สำหรับคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP สามารถเพิ่มมุมบิดสูงสุดที่ตัวอย่างสามารถรับได้ 18% และมุมบิดเหล็กเสริมครากที่ค่าเพิ่มขึ้น แต่มุมบิดแตกร้าวมีค่าใกล้เคียงกัน

4. สำหรับเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP สามารถเพิ่มมุมบิดสูงสุดได้ 54 % และมุมบิดแตกร้าวและมุมบิดเหล็กเสริมครากมีค่าใกล้เคียงกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาพที่ 5.11 เปรียบเทียบมุมบิดของตัวอย่างที่เพิ่มมุมของอเหล็กปลอกจาก 90° เป็น 135°

<u>สติฟเนสของตัวอย่างทดสอบรับแรงบิด</u>

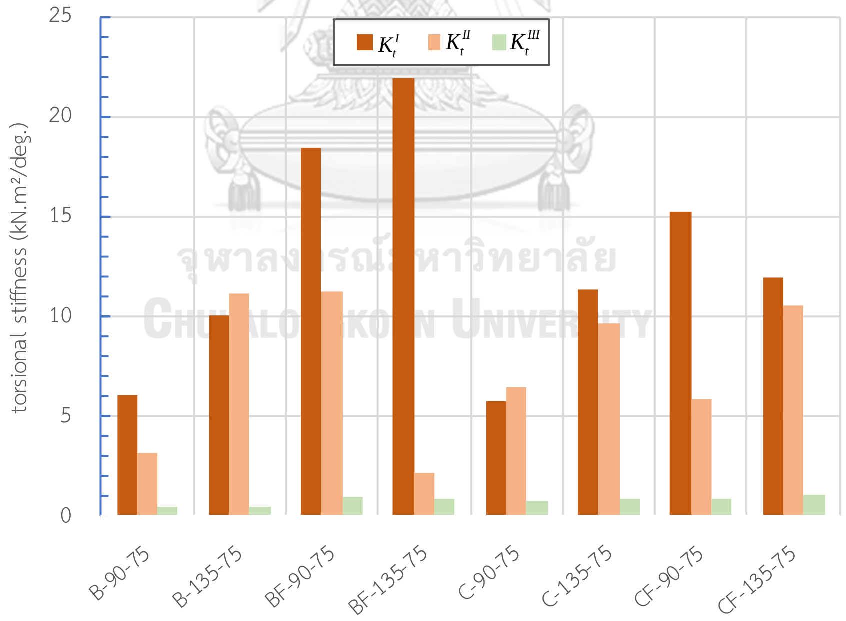
จากภาพที่ 5.12 เป็นการเปรียบเทียบสติฟเนสขององค์อาคารตัวอย่างการทดสอบโดยทำการเทียบจากตัวอย่าง B-90-150 จะสังเกตว่าเมื่อเพิ่มมุมจาก 90 องศาเป็น 135 องศามีผลดังนี้

1. สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถเพิ่มสติฟเนสก่อนการเกิดรอยร้าวได้ 16% และหลังจากการเกิดรอยร้าวและเหล็กเสริมคราก สติฟเนสมีค่าใกล้เคียงกัน

2. สำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่เสริมกำลังสามารถเพิ่มสติฟเนสของตัวอย่างทดสอบก่อนการเกิดรอยร้าวได้ 43% แต่หลังจากการเกิดรอยร้าวมีค่าลดลงและเหล็กเสริมครากสติฟเนสของตัวอย่างทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน

3. สำหรับคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP สามารถเพิ่มสติฟเนสก่อนการเกิดรอยร้าวได้ 22% แต่หลังจากการเกิดรอยร้าวมีค่าลดลง

4. สำหรับเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP สติฟเนสของตัวอย่างทดสอบมีค่าลดลง



ภาพที่ 5.12 สติฟเนสของตัวอย่างที่เพิ่มมุมของอเหล็อกปลอกจาก 90° เป็น 135°

<u>ดัชนีความเหนียวของตัวอย่างทดสอบ</u>

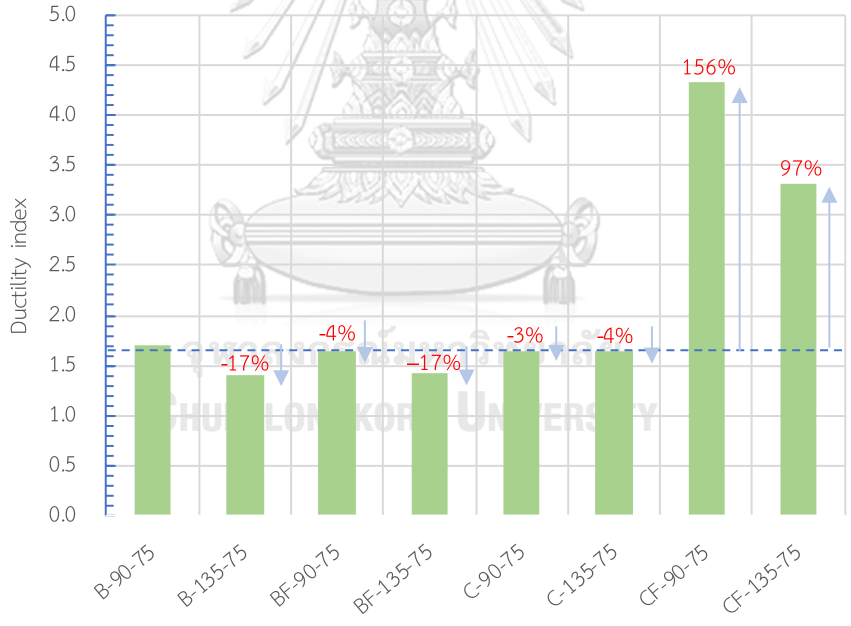
จากภาพที่ 5.13 เป็นการเปรียบเทียบดัชนีความเหนียวขององค์อาคารตัวอย่างการทดสอบโดยทำการเทียบจากตัวอย่าง B-90-150 จะสังเกตว่าเมื่อเพิ่มมุมจาก 90 องศาเป็น 135 องศามีผลดังนี้

1. สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ดัชนีความเหนียวหลังจากรับแรงบิดถึงจุดเหล็กเสริมครากมีค่าลดลง 17%

2. สำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่เสริมกำลังดัชนีความเหนียวหลังจากรับแรงบิดถึงจุดเหล็กเสริมครากมีค่าใกล้เคียงกัน

3. สำหรับคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ดัชนีความเหนียวมีค่าลดลง 13%

4. สำหรับเสาที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ดัชนีความเหนียวหลังจากรับแรงบิดถึงจุดเหล็กเสริมครากลดลง 59%



ภาพที่ 5.13 ดัชนีความเหนียวของตัวอย่างที่เพิ่มมุมของอเหล็กปลอกจาก 90° เป็น 135°

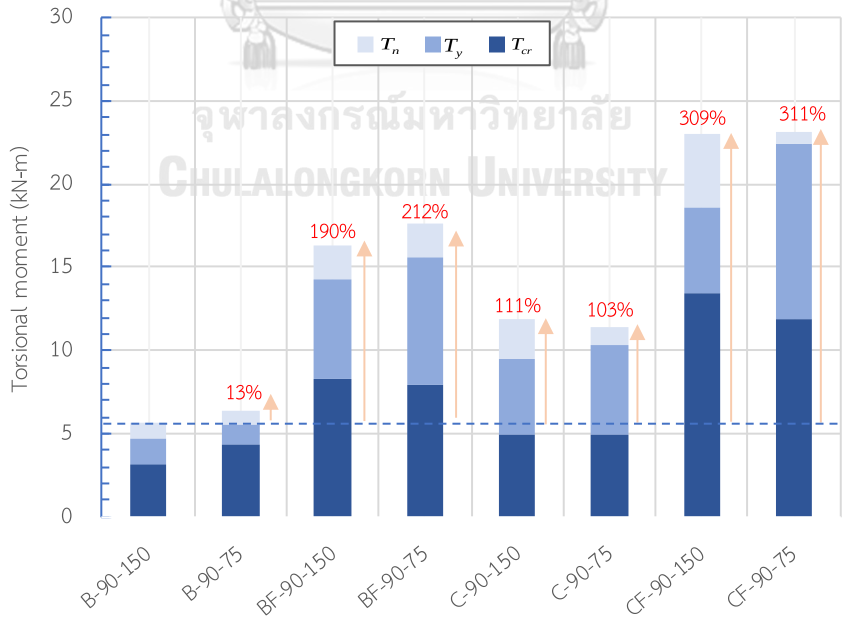
5.6.2. เปรียบเทียบปริมาณการเสริมเหล็กปลอก (ระยะเรียงเหล็กปลอก)

งานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบปริมาณการเสริมเหล็กปลอก 2 ประเภทคือ ระยะเรียงเหล็กปลอกเท่ากับ 75 mm 150 mm โดยเปรียบเทียบตัวแปรดังต่อไปนี้

กำลังรับแรงบิด

จากภาพที่ 5.14 เป็นการหาเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงบิดสูงสุดโดยทำการเทียบจากตัวอย่าง B-90-150 จะสังเกตว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณเหล็กปลอกจากระยะเรียง 150 mm เป็น 75 mm มีผลดังนี้

1. สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดสูงสุดได้ 13%
2. สำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่เสริมกำลัง แรงบิดสูงสุดและแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวมีค่าใกล้เคียงกัน แต่กำลังรับแรงบิดครากมีค่าสูงขึ้น
3. สำหรับคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP สามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดสูงสุดได้ 10%
4. สำหรับเสาที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP กำลังรับแรงบิดสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกัน แต่แรงบิดคอนกรีตแตกร้าวกำลังรับและแรงบิดครากมีค่าสูงขึ้น



ภาพที่ 5.14 กำลังรับแรงบิดของตัวอย่างทดสอบที่เพิ่มปริมาณเหล็กปลอก
(ระยะเรียงจาก 150 mm เป็น 75 mm)

มุมบิดภายใต้แรงบิดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ

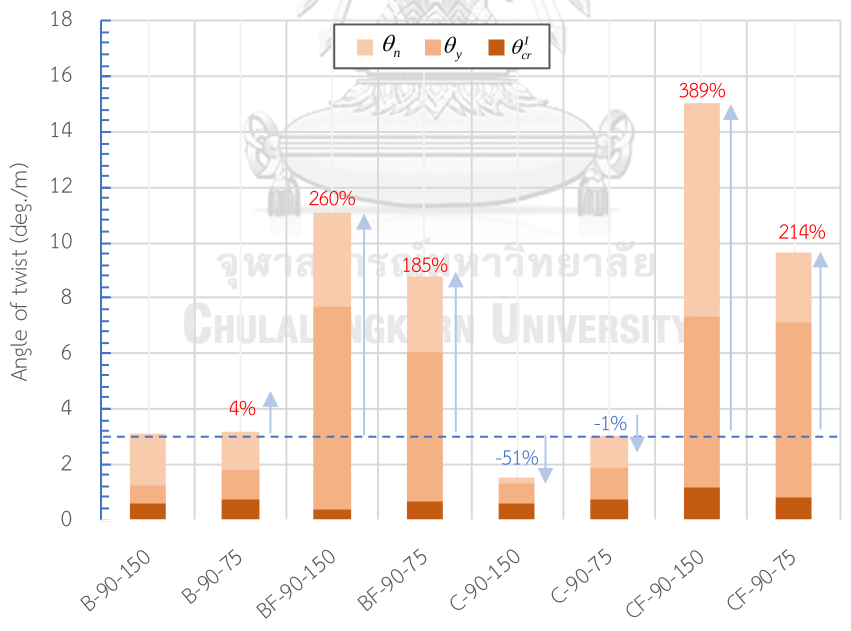
จากภาพที่ 5.15 เป็นการหาเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของมุมบิดที่เกิดจากแรงบิดของตัวอย่างทดสอบโดยทำการเทียบจากตัวอย่าง B-90-150 จะสังเกตว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณเหล็กปลอกจากระยะเรียง 150 mm เป็น 75 mm มีผลดังนี้

1. สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะได้มุมบิดสูงสุด, มุมบิดแตกร้าวและมุมบิดเหล็กเสริมครากมีค่าใกล้เคียงกัน

2. สำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่เสริมกำลังจะสามารถเพิ่มได้มุมบิดสูงสุดได้ 50% แต่มุมบิดแตกร้าวมีค่าใกล้เคียงกัน

3. สำหรับคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRPจะได้มุมบิดที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง

4. สำหรับเสาที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP จะได้มุมบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง แต่มุมบิดแตกร้าวและมุมบิดครากมีค่าใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 5.15 มุมบิดของตัวอย่างทดสอบที่เพิ่มปริมาณเหล็กปลอก
(ระยะเรียงจาก 150 mm เป็น 75 mm)

สติฟเนสของตัวอย่างทดสอบ

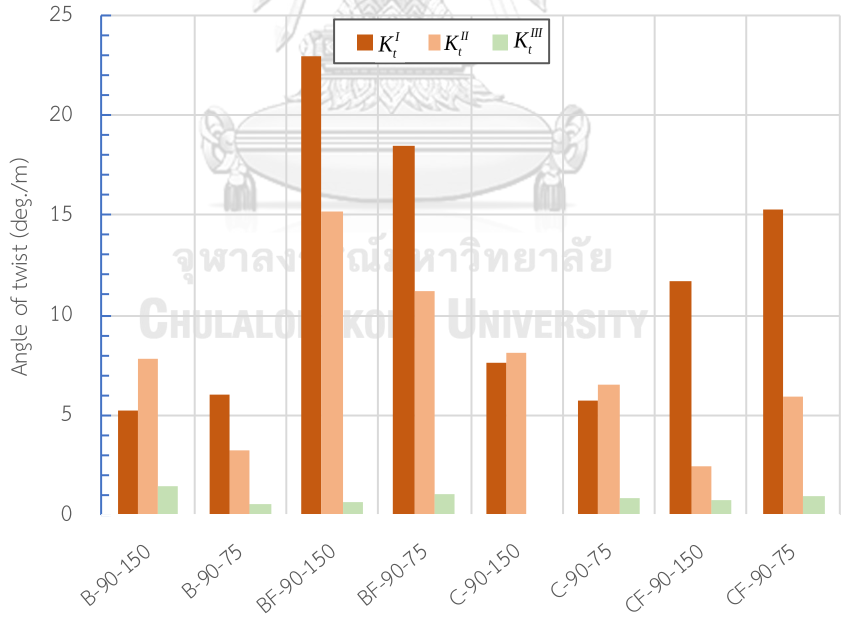
จากภาพที่ 5.16 เป็นการหาเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของสติฟเนสของตัวอย่างทดสอบของตัวอย่างทดสอบที่เกิดจากแรงบิดของตัวอย่างทดสอบโดยทำการเทียบจากตัวอย่าง B-90-150 จะสังเกตว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณเหล็กปลอกจากระยะเรียง 150 mm เป็น 75 mm มีผลดังนี้

1. สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กสติฟเนสของตัวอย่างทดสอบมีค่าลดลง

2. สำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่เสริมกำลังสติฟเนสของตัวอย่างทดสอบมีค่าลดลง

3. สำหรับคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRPสติฟเนสของตัวอย่างทดสอบก่อนเกิดรอยร้าวมีค่าลดลง แต่หลังจากเหล็กเสริมครากและรับแรงบิดสูงสุดจะได้สติฟเนสของตัวอย่างทดสอบใกล้เคียงกัน

4. สำหรับเสาที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRPจะได้สติฟเนสของตัวอย่างทดสอบก่อนเกิดรอยร้าวและหลังจากเหล็กเสริมครากมีค่าเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 5.16 สติฟเนสของตัวอย่างทดสอบที่เพิ่มปริมาณเหล็กปลอก
(ระยะเรียงจาก 150 mm เป็น 75 mm)

<u>ดัชนีความเหนียวของตัวอย่างทดสอบ</u>

จากภาพที่ 5.17 เป็นการหาเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของดัชนีความเหนียวของตัวอย่างทดสอบโดยเทียบจากตัวอย่าง B-90-150 จะสังเกตว่าเมื่อมีการเปลียนประเภทมุมจาก 90 องศาเป็น 135 องศามีผลดังนี้

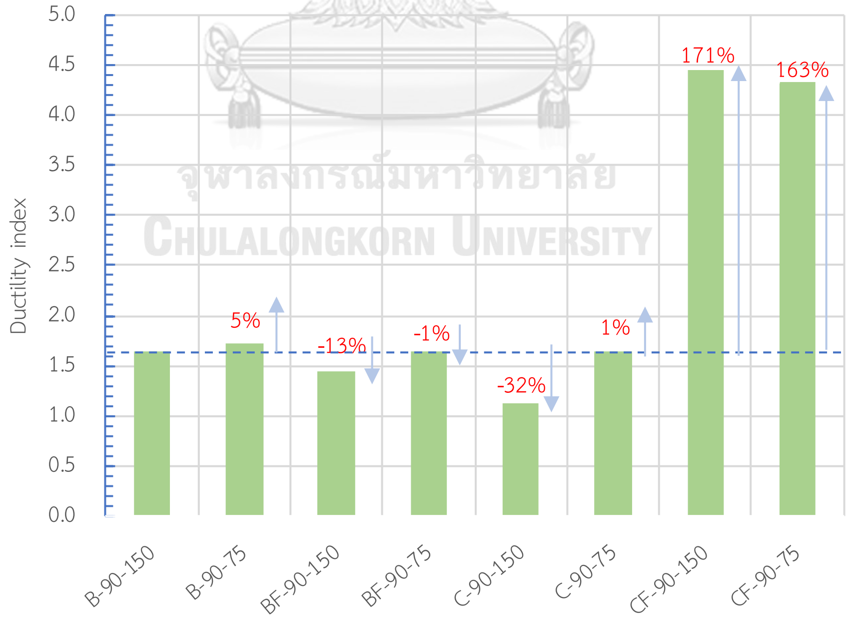
1. สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กดัชนีความเหนียวหลังจากรับแรงบิดถึงจุดเหล็กเสริมครากมีค่าเพิ่มขึ้น 5%

2. สำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่เสริมกำลังดัชนีความเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้น 33%

3. สำหรับคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ดัชนีความเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้น 12%

4. สำหรับเสาที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ดัชนีความเหนียวหลังจากรับแรงบิดถึงจุดเหล็กเสริมครากมีค่าลดลง 8%

5. การเสริมกำลังด้วย CFRP และแรงอัดตามแนวแกนคงที่สามารถเพิ่มดัชนีความเหนียวได้อย่างน้อย 163%



ภาพที่ 5.17 ดัชนีความเหนียวของตัวอย่างทดสอบที่เพิ่มปริมาณเหล็กปลอก
(ระยะเรียงจาก 150 mm เป็น 75 mm)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.6.3. เปรียบเทียบการเสริมกำลังด้วย CFRP และแรงอัดตามแนวแกน

กำหนดให้ตัวอย่างทดสอบมีหน้าตัดและปริมาณการเสริมเหล็กที่เท่ากัน จากนั้นทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพกำลังรับแรงบิดเมื่อทำการเสริมกำลังด้วย CFRP และมีแรงอัดตามแนวแกนโดยเปรียบเทียบตัวแปร ดังต่อไปนี้

5.6.3.1. สำหรับตัวอย่างที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 150 mm และ ประเภทมุมของอมาตรฐานของเหล็กปลอกเท่ากับ 90 องศา

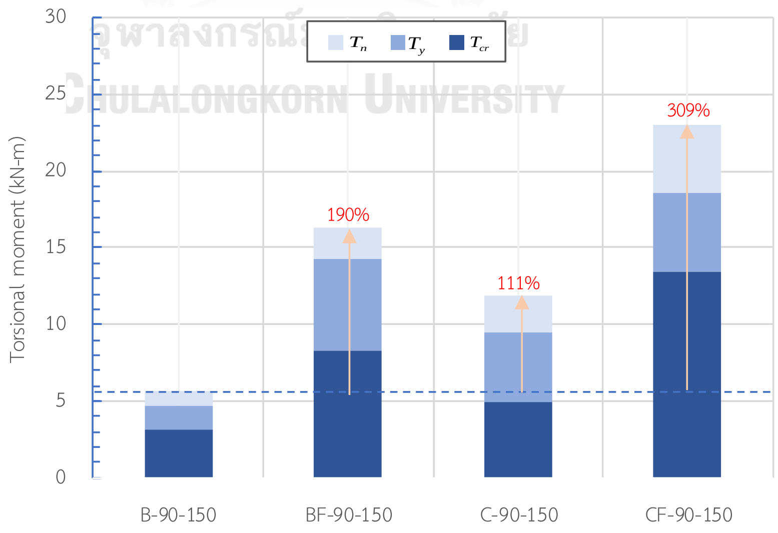
<u>กำลังรับแรงบิด</u>

จากภาพที่ 5.17 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงบิดสูงสุดของตัวอย่างการทดสอบ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเสริมกำลังด้วย CFRP ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดสูงสุดได้ 190% และสามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวกับแรงบิดคราก

2. การเสริมกำลังด้วย CFRP ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจะสามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดสูงสุดได้ 198%

3. การเพิ่มแรงอัดตามแนวแกนสามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดสูงสุดได้ 111% และสามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวกับแรงบิดคราก



ภาพที่ 5.18 กำลังรับแรงบิดของตัวอย่างที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 150 mm และมุมของอ 90°

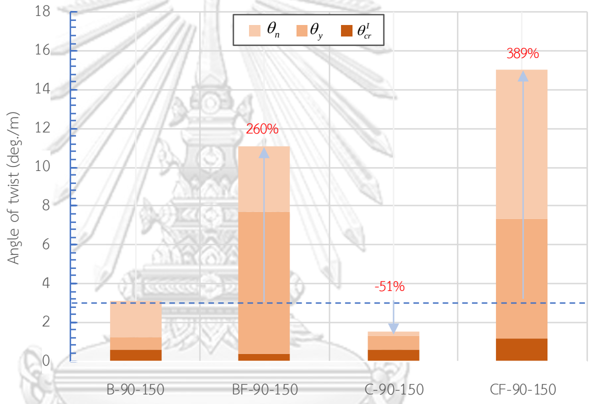
<u>มุมบิดภายใต้แรงบิดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ</u>

จากภาพที่ 5.17 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงบิดสูงสุดของตัวอย่างการทดสอบ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเสริมกำลังด้วย CFRP ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถเพิ่มมุมบิดสูงสุดได้ 260% และสามารถเพิ่มมุมบิดแตกร้าวกับมุมบิดคราก

2. การเสริมกำลังด้วย CFRP ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจะสามารถเพิ่มมุมบิดสูงสุดได้ 440%

3. การเพิ่มแรงอัดตามแนวแกนจะส่งผลให้มุมบิดสูงสุดลดลง 51%



ภาพที่ 5.19 มุมบิดของตัวอย่างที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 150 mm และมุมของอ 90°

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

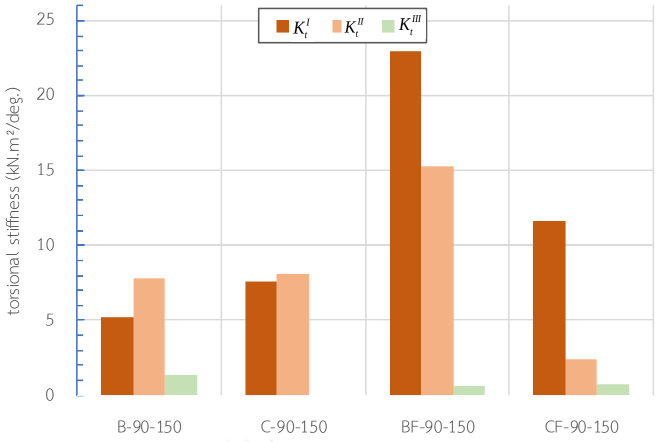
<u>สติฟเนสของตัวอย่างทดสอบ</u>

จากภาพที่ 5.19 แสดงการเปรียบเทียบสติฟเนสของตัวอย่างทดสอบของตัวอย่างการทดสอบ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเสริมกำลังด้วย CFRP ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถเพิ่มสติฟเนสก่อนการแตกร้าวได้ 341%

2. การเสริมกำลังด้วย CFRP ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจะสามารถเพิ่มสติฟเนสก่อนการแตกร้าวได้ 77%

3. การเพิ่มแรงอัดตามแนวแกนจะสามารถเพิ่มสติฟเนสก่อนการแตกร้าวได้ 13%



ภาพที่ 5.20 สติฟเนสของตัวอย่างที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 150 mm และมุมของอ 90°

ดัชนีความเหนียวของตัวอย่างทดสอบ

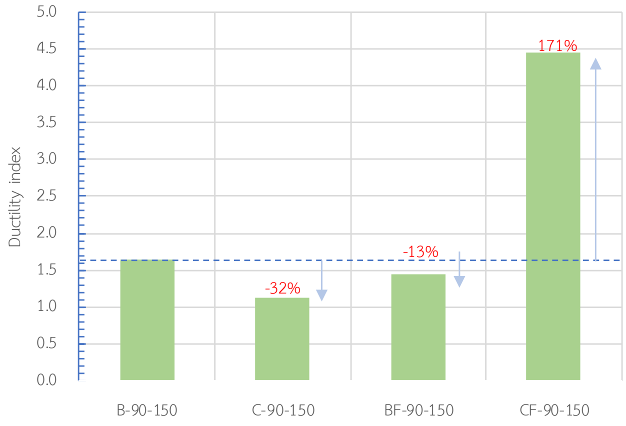
จากภาพที่ 5.18 แสดงการเปรียบเทียบดัชนีความเหนียวของตัวอย่างทดสอบของตัวอย่างการทดสอบ B-90-150 สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเสริมกำลังด้วย CFRP ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กดัชนีความเหนียวลดลง 29%

2. การเสริมกำลังด้วย CFRP ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจะสามารถเพิ่มดัชนีความเหนียว 8%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3. การเพิ่มแรงอัดตามแนวแกนดัชนีความเหนียวลดลง 53%



ภาพที่ 5.21 ดัชนีความเหนียวของตัวอย่างที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 150 mm และมุมของอ 90°

5.6.3.2. สำหรับตัวอย่างที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 75 mm และ ประเภทมุมของอมาตรฐานของเหล็กปลอกเท่ากับ 90 องศา โดยทำการเปรียบเทียบกำลังรับแรงบิด มุมบิดของกำลังรับแรงบิด สติฟเนสของตัวอย่างทดสอบของตัวอย่างทดสอบต้านทานแรงบิด และดัชนีความเหนียวของตัวอย่างทดสอบ

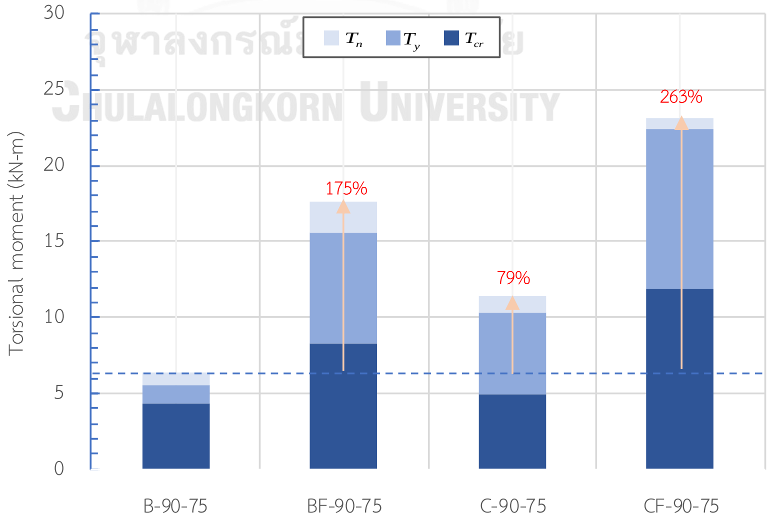
<u>กำลังรับแรงบิด</u>

จากภาพที่ 5.21 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงบิดสูงสุดของตัวอย่างการทดสอบที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 75 mm และ ประเภทมุมของอมาตรฐานของเหล็กปลอกเท่ากับ 90 องศา สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเสริมกำลังด้วย CFRP ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดสูงสุดได้ 175% และสามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวกับแรงบิดคราก

2. การเสริมกำลังด้วย CFRP ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจะสามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดสูงสุดได้ 88%

3. การเพิ่มแรงอัดตามแนวแกนสามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดสูงสุดได้ 79% และสามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวกับแรงบิดคราก



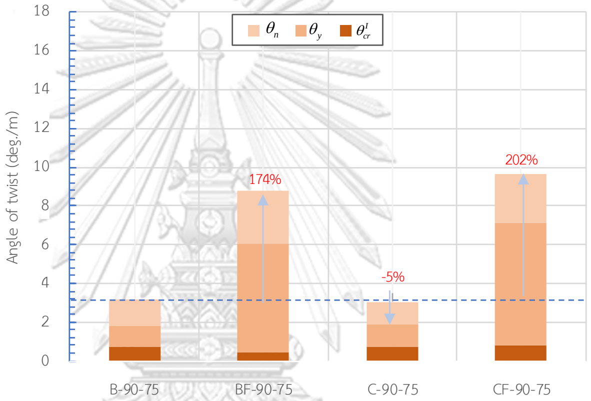
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 5.22 กำลังรับแรงบิดของตัวอย่างที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 75 mm และมุมของอ 90°

<u>มุมบิดภายใต้แรงบิดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ</u>

จากภาพที่ 5.22 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงบิดสูงสุดของตัวอย่างการทดสอบ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเสริมกำลังด้วย CFRP ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถเพิ่มมุมบิดสูงสุดได้ 174% และสามารถเพิ่มมุมบิดแตกร้าวกับมุมบิดคราก
2. การเสริมกำลังด้วย CFRP ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถเพิ่มมุมบิดสูงสุดได้ 28%
3. การเพิ่มแรงอัดตามแนวแกนจะส่งผลให้มุมบิดสูงสุดลดลง 5%



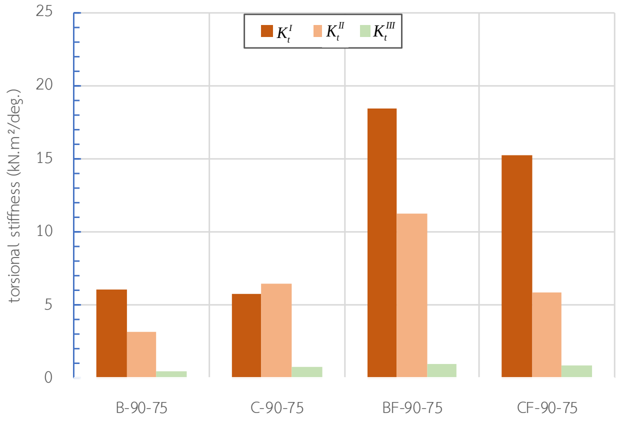
ภาพที่ 5.23 มุมบิดของตัวอย่างที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 75 mm และมุมของอ 90°

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

<u>สติฟเนสของตัวอย่างทดสอบ</u>

จากภาพที่ 5.23 แสดงการเปรียบเทียบสติฟเนสของตัวอย่างทดสอบของตัวอย่างการทดสอบ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเสริมกำลังด้วย CFRP ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถเพิ่มสติฟเนสก่อนการแตกร้าวได้ 203%
2. การเสริมกำลังด้วย CFRP ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ค่าสติฟเนสก่อนการแตกร้าวจะลดลง 51%
3. การเพิ่มแรงอัดตามแนวแกนสามารถเพิ่มสติฟเนสก่อนการแตกร้าวได้ 10%



ภาพที่ 5.24 มุมบิดของตัวอย่างที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 75 mm และมุมของอ 90°

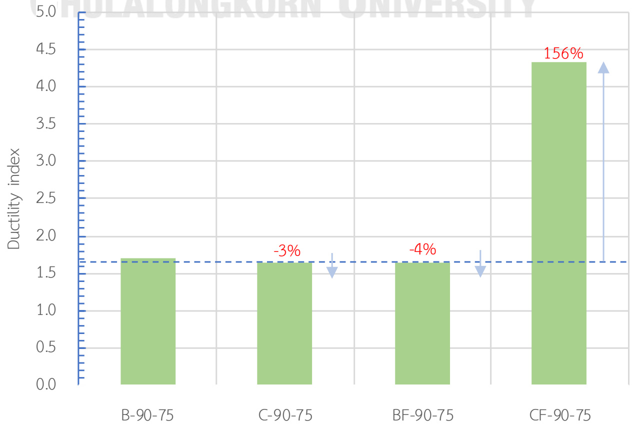
<u>ดัชนีความเหนียวของตัวอย่างทดสอบ</u>

จากภาพที่ 5.18 แสดงการเปรียบเทียบดัชนีความเหนียวของตัวอย่างทดสอบของตัวอย่างการทดสอบ B-90-150 สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเสริมกำลังด้วย CFRP ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กดัชนีความเหนียวลดลง 41%

2. การเสริมกำลังด้วย CFRP ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจะไม่ส่งผลต่อการเพิ่มดัชนีความเหนียว

3. การเพิ่มแรงอัดตามแนวแกนดัชนีความเหนียวลดลง 34%



ภาพที่ 5.25 ดัชนีความเหนียวของตัวอย่างที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 75 mm และมุมของอ 90°

5.6.3.3. สำหรับตัวอย่างที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 75 mm และ ประเภทมุมของอมาตรฐานของเหล็กปลอกเท่ากับ 135 องศา โดยทำการเปรียบเทียบกำลังรับแรงบิด มุมบิดของกำลังรับแรงบิด สติฟเนสของตัวอย่างทดสอบของตัวอย่างทดสอบต้านทานแรงบิด และดัชนีความเหนียวของตัวอย่างทดสอบ

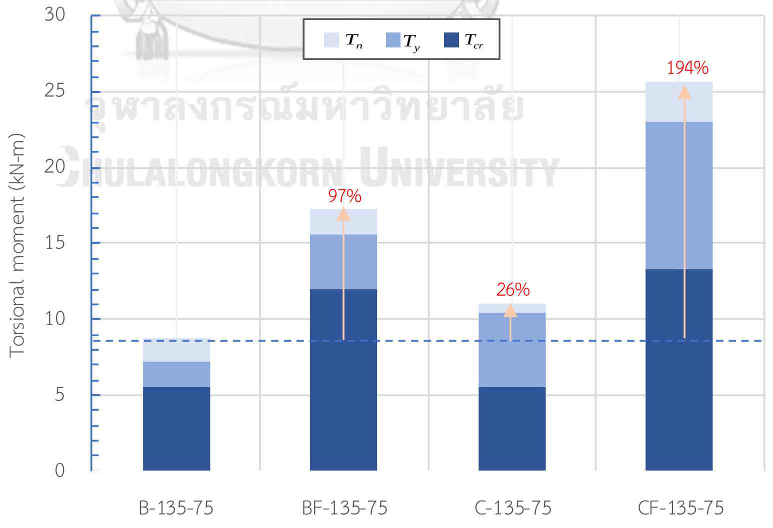
<u>กำลังรับแรงบิด</u>

จากภาพที่ 5.25 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงบิดสูงสุดของตัวอย่างการทดสอบที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 75 mm และ ประเภทมุมของอมาตรฐานของเหล็กปลอกเท่ากับ 135 องศา สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเสริมกำลังด้วย CFRP ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดสูงสุดได้ 97% และสามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวกับแรงบิดคราก

2. การเสริมกำลังด้วย CFRP ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดสูงสุดได้ 37%

3. การเพิ่มแรงอัดตามแนวแกนสามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดสูงสุดได้ 26% และสามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวกับแรงบิดคราก



ภาพที่ 5.26 กำลังรับแรงบิดของตัวอย่างที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 75 mm และมุมของอ 135°

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

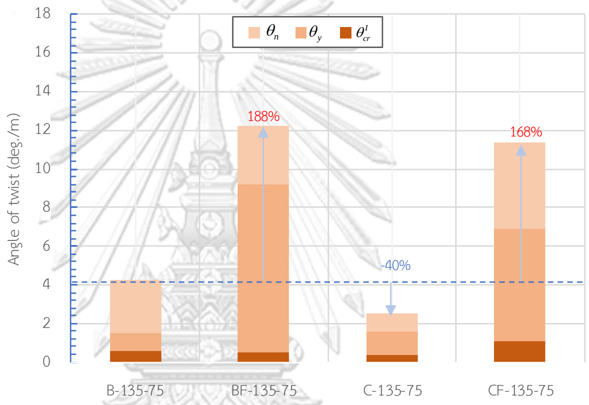
<u>มุมบิดภายใต้แรงบิดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ</u>

จากภาพที่ 5.26 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงบิดสูงสุดของตัวอย่างการทดสอบ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเสริมกำลังด้วย CFRP ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถเพิ่มมุมบิดสูงสุดได้ 188% และสามารถเพิ่มมุมบิดแตกร้าวกับมุมบิดคราก

2. การเสริมกำลังด้วย CFRP ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก มุมบิดสูงสุดจะลดลง 12%

3. การเพิ่มแรงอัดตามแนวแกนจะส่งผลให้มุมบิดสูงสุดลดลง 40%



ภาพที่ 5.27 มุมบิดของตัวอย่างที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 75 mm และมุมของอ 135°

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

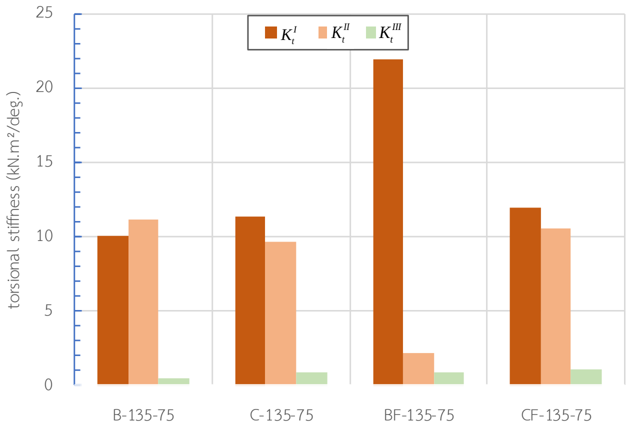
<u>สติฟเนสของตัวอย่างทดสอบ</u>

จากภาพที่ 5.27 แสดงการเปรียบเทียบสติฟเนสของตัวอย่างทดสอบของตัวอย่างการทดสอบ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเสริมกำลังด้วย CFRP ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถเพิ่มสติฟเนสก่อนการแตกร้าวได้ 121%

2. การเสริมกำลังด้วย CFRP ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ค่าสติฟเนสก่อนการแตกร้าวลดลง 100%

3. การเพิ่มแรงอัดตามแนวแกนสามารถเพิ่มสติฟเนสก่อนการแตกร้าวได้ 21%

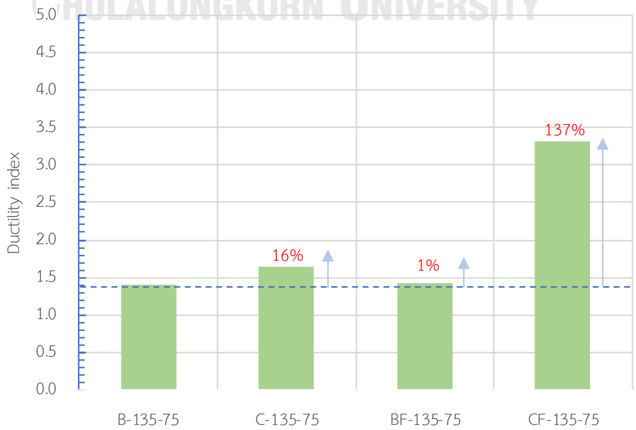


ภาพที่ 5.28 สติฟเนสของตัวอย่างที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 75 mm และมุมของอ 135°

<u>ดัชนีความเหนียวของตัวอย่างทดสอบ</u>

จากภาพที่ 5.18 แสดงการเปรียบเทียบดัชนีความเหนียวของตัวอย่างทดสอบของตัวอย่างการทดสอบ B-90-150 สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเสริมกำลังด้วย CFRP ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กดัชนีความเหนียวลดลง 41%
2. การเสริมกำลังด้วย CFRP ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจะไม่ส่งผลต่อการเพิ่มดัชนีความเหนียว
3. การเพิ่มแรงอัดตามแนวแกนดัชนีความเหนียวลดลง 34%



ภาพที่ 5.29 ดัชนีความเหนียวของตัวอย่างที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 75 mm และมุมของอ 135°

5.7. เปรียบเทียบผลการทดสอบและสมการทำนายกำลังรับแรงบิด

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมการทำนายกำลังรับแรงบิดที่เสริมกำลังด้วย CFRP ของ Ruili He, Lesley H. Sneed และ Abdeldjelil Belarbi ซึ่งทำการประยุกต์จากมาตรฐาน fib Bulletin 14 (2001) และ NCHRP report 655 และสมการทำนายกำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวจากามาตรฐาน ACI318-14 ดังนี้

ACI318-14

กำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าว

สำหรับองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กไม่มีแรงอัดตามแนวแกน

$$T_{cr,ACI} = 0.33\sqrt{f_c'}\left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}}\right) \tag{5.1}$$

เมื่อ f_c' คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (MPa)

A_{cp} คือ พื้นที่ล้อมด้วยเส้นรอบวงภายนอกของหน้าตัดคาน (mm²)

P_{cp} คือ ความยาวเส้นรอบวงภายนอกของหน้าตัดคาน (mm)

สำหรับองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมีแรงอัดตามแนวแกน

$$T_{cr,ACI} = 0.33\sqrt{f_c'}\left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}}\right)\sqrt{1+\frac{N_u}{0.33A_g\sqrt{f_c'}}} \tag{5.2}$$

เมื่อ N_u คือ แรงอัดตามแนวแกนขององค์อาคาร (kN)

A_g คือ พื้นที่คอนกรีตทั้งหมดของหน้าตัดองค์อาคาร (mm²)

กำลังรับแรงบิดสูงสุด

$$T_{\max,ACI} = 2A_0\frac{A_t f_{yt}}{s}\cot\theta \le 0.83\sqrt{f_c'}\left(\frac{1.7A_{oh}^{\ 2}}{\rho_h}\right) \tag{5.3}$$

เมื่อ A_0 คือ พื้นที่ปิดของแรงเฉือนต่อหน่วยความยาว (mm²)

A_t คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอก (เส้นเดียว) (mm²)

A_{oh} คือ พื้นที่ปิดของเหล็กปลอก (mm²)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

$f_c^{'}$	คือ	กำลังครากของเหล็กเสริมตามยาว	(MPa)
p_h	คือ	ความยาวเส้นรอบวงเหล็กปลอก	(mm)
f_{yt}	คือ	กำลังครากของเหล็กเสริมทางขวาง	(MPa)
s	คือ	ระยะเรียงตัวของเหล็กปลอก	(mm)
θ	คือ	มุมแนวรอยแตกของการบีบอัดของคอนกรีต	(deg.)

Rahal (2013)

กำลังรับแรงบิดสูงสุด

$$T_{\max,Rahal} = 0.33\left(f_c^{'}\right)^{0.16} A_{cp}\left(A_l f_{yl}\frac{A_t f_{yt}}{s}\right)^{0.35} \leq 2.5\left(f_c^{'}\right)^{0.3}\left(\frac{A_{cp}}{\rho_{cp}}\right) \qquad (5.4)$$

เมื่อ A_{cp}	คือ	พื้นที่ล้อมด้วยเส้นรอบวงภายนอกของหน้าตัดคาน	(mm²)
A_l	คือ	พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กตามยาว	(mm²)
A_t	คือ	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอก (เส้นเดียว)	(mm²)
$f_c^{'}$	คือ	กำลังอัดประลัยของคอนกรีต	(MPa)
f_{yl}	คือ	กำลังครากของเหล็กเสริมตามยาว	(MPa)
f_{yt}	คือ	กำลังครากของเหล็กเสริมทางขวาง	(MPa)
p_h	คือ	ความยาวเส้นรอบวงเหล็กปลอก	(mm)
s	คือ	ระยะเรียงตัวของเหล็กปลอก	(mm)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

fib bulletin 14

กำลังรับแรงบิดสูงสุด

$$T_{\max,fib} = 2\varepsilon_{fd,e}E_f\frac{t_f b_f}{s_f}bh\cot\theta \qquad (5.5)$$

$$\varepsilon_{fe} = 0.17\left(\frac{f_c^{'2/3}}{E_f\rho_f}\right)^{0.30}\varepsilon_{fu} \qquad (5.6)$$

$$\varepsilon_{fd,e} = 0.8\varepsilon_{fe}/\gamma_f \qquad (5.7)$$

$\gamma_f = 1$ เนื่องจากทำการทดสอบจริง

เมื่อ $\varepsilon_{fd,e}$ คือ ความเครียดประสิทธิผลในการออกแบบ

b คือ ความกว้างของหน้าตัด (mm)

b_f คือ ความกว้างของแผ่น FRP (mm)

s_f คือ ระยะเรียงระหว่างกึ่งกลางแถบ (mm)

h คือ ความลึกของหน้าตัด (mm)

$f_c^{'}$ คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (MPa)

E_f คือ มอดุลัสยืดหยุ่นของแผ่น FRP (MPa)

ρ_f คือ ปริมาณของแผ่น FRP

He และคณะ (2014)

กำลังรับแรงบิดสูงสุด

$$T_{\max,He} = T_{RC} + T_f \tag{5.8}$$

$$T_{RC} = \frac{2A_0 A_t f_{yt}}{s}\cot\theta \tag{5.9}$$

$$T_f = \frac{2A_0 A_f f_{fe}}{s_f} \tag{5.10}$$

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \tag{5.11}$$

$$\varepsilon_{fe} = 0.004 + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}\varepsilon_{fu} - 0.004\right) \tag{5.12}$$

เมื่อ T_{RC} คือ กำลังรับแรงบิดขององค์อาคารที่ไม่เสริมลังด้วย CFRP (kN-m)

T_f คือ กำลังรับแรงบิดของ CFRP (kN-m)

A_0 คือ พื้นที่ปิดของแรงเฉือนต่อหน่วยความยาว (mm²)

A_t คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กปลอก (1 เส้น) (mm²)

f_{fe} คือ หน่วยแรงดึงประสิทธิผลของ FRP (MPa)

f_{yt} คือ หน่วยแรงดึงครากของเหล็กปลอก (MPa)

s คือ ระยะเรียงตัวของเหล็กปลอก (mm)

s_f คือ ระยะเรียงระหว่างกึ่งกลางแถบ FRP (mm)

θ คือ มุมรอยแตกร้าวเอียงกับแนวนอนขององค์อาคาร (deg.)

ε_{fe} คือ ความเครียดประสิทธิผลของ FRP

ε_{fu} คือ ความเครียดดึงขาดออกแบบ

E_f คือ มอดุลัสยืดหยุ่นของแผ่น FRP (MPa)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงบิดและสมการทำนายกำลังรับแรงบิด

ตัวอย่าง	กำลังรับแรงบิด (kN.m)						
	การทดสอบ		สมการทำนาย				
	$T_{\exp,cr}$	$T_{\exp,\max}$	ACI 318-2R		Rahal	fib	He และคณะ
			$T_{cr,ACI}$	$T_{\max,ACI}$	$T_{\max,Rahal}$	$T_{\max,fib}$	$T_{\max,He}$
B-90-150	3.17	5.64	3.98 (26)	6.75 (20)	7.74 (37)	-	-
B-90-75	4.33	6.39	3.98 (-8)	6.75 (6)	9.85 (54)	-	-
B-135-75	5.52	8.74	3.98 (-28)	6.75 (-23)	9.85 (13)	-	-
BF-90-150	8.28	16.34	-	-	-	15.48 (-5)	18.12 (11)
BF-90-75	8.31	17.6	-	-	-	15.48 (-12)	18.12 (3)
BF-135-75	12.06	17.28	-	-	-	15.48 (-10)	18.12 (5)
C-90-150	4.89	11.89	4.53 (-7)	6.75 (-43)	7.74 (-35)	-	-
C-90-75	4.92	11.42	4.53 (-8)	6.75 (-41)	9.85 (-14)	-	-
C-135-75	5.56	11.08	4.53 (-19)	6.75 (-39)	9.85 (-11)	-	-
CF-90-150	13.42	23.05	-	-	-	15.48 (-33)	18.12 (-21)
CF-90-75	11.92	23.19	-	-	-	15.48 (-33)	18.12 (-22)
CF-135-75	13.29	25.7	-	-	-	15.48 (-40)	18.12 (-29)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

<u>หมายเหตุ</u>

$$(error) = \frac{T_{predict} - T_{\exp}}{T_{\exp}} \times 100\%$$

จากตารางเปรียบผลการทดสอบกำลังรับแรงบิดและสมการทำนายกำลังรับแรงบิดสามารถสรุปได้ดังนี้

1. สมการทำนายกำลังรับแรงบิดของ ACI318-14 สามารถทำนายกำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวของตัวอย่างทดสอบที่มีแรงอัดใกล้เคียงกับผลทดสอบอยู่ระหว่าง 7 ถึง 19 เปอร์เซ็นต์ แต่สำหรับตัวอย่างที่ไม่มีแรงอัดมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง อยู่ระหว่าง 8 ถึง 28 เปอร์เซ็นต์

2. สมการทำนายกำลังรับแรงบิดของ ACI318-14 สามารถทำนายกำลังรับแรงบิดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีแรงอัดมีความคลาดเคลื่อกับผลทดสอบอยู่ระหว่าง 6 ถึง 23 เปอร์เซ็นต์ แต่สำหรับตัวอย่างที่มีแรงอัดมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง อยู่ระหว่าง 39 ถึง 43 เปอร์เซ็นต์

3. สมการทำนายกำลังรับแรงบิดของ Rahal (2013) สามารถทำนายกำลังรับแรงบิดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีแรงอัดมีความคลาดเคลื่อกับผลทดสอบอยู่ระหว่าง 13 ถึง 54 เปอร์เซ็นต์ แต่สำหรับตัวอย่างที่มีแรงอัดมีความคลาดเคลื่อน อยู่ระหว่าง 11 ถึง 35 เปอร์เซ็นต์

4. สมการทำนายกำลังรับแรงบิดของ fib (2001) สามารถทำนายกำลังรับแรงบิดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบที่เสริมกำลังด้วย CFRP ไม่มีแรงอัดมีความคลาดเคลื่อกับผลทดสอบอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ แต่สำหรับตัวอย่างที่มีแรงอัดมีความคลาดเคลื่อน อยู่ระหว่าง 33 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์

5. สมการทำนายกำลังรับแรงบิดของ He (2014) สามารถทำนายกำลังรับแรงบิดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบที่เสริมกำลังด้วย CFRP ไม่มีแรงอัดมีความคลาดเคลื่อกับผลทดสอบอยู่ระหว่าง 3 ถึง 11 เปอร์เซ็นต์ แต่สำหรับตัวอย่างที่มีแรงอัดมีความคลาดเคลื่อน อยู่ระหว่าง 21 ถึง 29 เปอร์เซ็นต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 6
สรุปผลการวิจัย

6.1. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีการทดสอบกำลังรับแรงบิดขององค์อาคารทั้งหมด 12 ตัวอย่าง โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ การเสริมกำลังด้วย CFRP ปริมาณการเสริมเหล็กปลอก(ระยะเรียงเหล็กปลอก) ประเภทของมุมของอมาตรฐานของเหล็กปลอก(90 องศา และ 135 องศา) และการให้แรงอัดตามแนวแกนคงที่ 27 ตัน เพื่อใช้ศึกษาการรับกำลังแรงบิดและพฤติกรรมการับแรงบิดของตัวอย่างทดสอบ พร้อมกับเปรียบเทียบผลการทดสอบและสมการทำนายกำลังรับแรงบิด สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเสริมกำลังด้วย CFRP สามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (BF-90-150) และเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (CF-90-150) ได้อย่างน้อย 190% และ 309% ตามลำดับ
2. การเพิ่มแรงอัดตามแกนแก่องค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 27 ตัน สามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดสูงสุดได้อย่างน้อย 26%
3. การเพิ่มมุมงอขอของเหล็กปลอกของคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP สามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าว แต่ไม่มีผลต่อการเพิ่มกำลังรับแรงบิดสูงสุด เนื่องจากการพันรอบของแผ่น CFRP ทำการโอบรัดองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กลดการอ้าออกของเหล็กปลอก
4. การเพิ่มมุมงอขอของเหล็กปลอกของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่เสริมและเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ไม่มีผลต่อการเพิ่มกำลังรับแรงบิดสูงสุด
5. การการเพิ่มปริมาณการเสริมเหล็กปลอกของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP สามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดครากได้อย่างน้อย 10%
6. การเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่เสริมและเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ไม่มีผลต่อการเพิ่มกำลังรับแรงบิดสูงสุด
7. การเพิ่มปริมาณการเสริมเหล็กปลอกของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP สามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวและแรงบิดครากได้อย่างน้อย 18% และ 15% ตามลำดับ
8. การเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่น CFRP สามารถเพิ่มสติฟช่วงก่อนเกิดแรงบิดคอนกรีตแตกร้าว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

9. การให้แรงอัดตามแนวแกนแก่องค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP สามารถเพิ่มความเครียดประสิทธิผลของรับแรงดึงแผ่น CFRP
10. สมการทำนายกำลังรับแรงบิดของ ACI318-14 (2014) สามารถทำนายกำลังรับแรงบิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้ใกล้เคียงกว่า Rahal และคณะ (2013)
11. สมการทำนายกำลังรับแรงบิดของ Rahal (2013) สามารถทำนายกำลังรับแรงบิดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กได้ใกล้เคียงกว่า ACI318-14 (2014) โดยมีช่วงความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง 11% ถึง 35%
12. สมการทำนายกำลังรับแรงบิดของ fib14 (2001) สามารถทำนายกำลังรับแรงบิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ได้ใกล้เคียงกว่า He และคณะ (2014) โดยมีช่วงความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง 5% ถึง 10%
13. สมการทำนายกำลังรับแรงบิดของ He และคณะ (2014) สามารถทำนายกำลังรับแรงบิดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ได้ใกล้เคียงกว่า fib (2001) โดยมีช่วงความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง 21% ถึง 29%

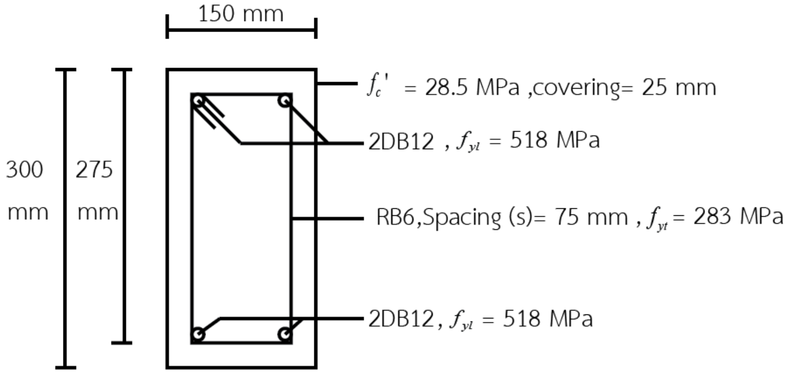
6.2. ข้อเสนอแนะ

1. ในอนาคตสามารถศึกษากำลังต้านทานแรงบิดชนิดแรงแบบ cyclic load เพื่อทดสอบกำลังรับแรงบิดจากแรงแผ่นดินไหว
2. ควรเพิ่มระดับการให้แรงอัดตามแนวแกนในปริมาณที่ต่างกัน
3. ควรเพิ่มโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนพร้อมกับรับแรงบิดในระหว่างการทดสอบ
4. ควรมีการผสมของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยชนิดเช่น CFRP และ GFRP ในการรับแรงบิดขององค์อาคาร
5. ควรมีการให้แรงทดสอบเป็นแบบ Displacement control ซึ่งอาจวัดจากมุมบิดของตัวอย่างทดสอบที่เกิดขึ้น เช่น 1 deg./min

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก รายการคำนวณ

1. กำลังรับแรงอัดขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก



$$P_{n,\max} = \left[0.85 f_c^{'}(A_g - A_{sl}) + f_y A_{st}\right]$$

$f_y = 518$ MPa

$A_g = 300 \times 150 = 45,000$ mm²

$A_{sl} = 4 \times \pi(12^2 / 4) = 452.3$ mm²

$A_{st} = \pi(6^2 / 4) = 28.3$ mm²

$f_c^{'} = 28.5$ MPa

$f_y = 518$ MPa

$A_g = 300 \times 150 = 45,000$ mm²

$A_{sl} = 4 \times \pi(12^2 / 4) = 452.3$ mm²

$A_{st} = \pi(6^2 / 4) = 28.3$ mm²

$$P_{n,\max} = \left[0.85 \times 28.5(45,000 - 452.3) + 518 \times 28.3\right]$$

$P_{n,\max} = 1,093$ KN

$P_{n,\max} = 109$ ton

ใช้แรงอัดในการทดสอบเป็น 25% ของ $P_{n,\max}$ จะไดแรงอัดในการทดสอบเท่ากับ 27 ton

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2. กำลังรับแรงบิด

2.1 กำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าว

2.1.1 ตัวอย่างที่ไม่มีแรงอัดตามแนวแกน (คาน)

$$T_{cr} = 0.33\lambda\sqrt{f_c^{'}}\left(\frac{A_{cp}{}^{2}}{P_{cp}}\right)$$

$$A_{cp} = (300)\times(150) = 45,000 \quad \text{mm}^2$$

$$P_{cp} = 2\times(300+150) = 900 \quad \text{mm}$$

$$T_{cr} = 0.33\times(1)\times\sqrt{28.5}\left(\frac{45000^2}{900}\right)$$

$$T_{cr} = 3,977,749 \quad \text{N-mm}$$

$$T_{cr} = 3.97 \quad \text{kN-m}$$

ดังนั้น กำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเท่ากับ 3.97 kN-m

2.1.2 ตัวอย่างที่ไม่มีแรงอัดตามแนวแกน (เสา)

$$T_{cr} = 0.33\sqrt{f_c'}\left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}}\right)\sqrt{1+\frac{N_u}{0.33A_g\sqrt{f_c'}}}$$

$$A_g = 300\times150 = 45,000 \quad \text{mm}^2$$

$$N_u = 27,000 \quad \text{N}$$

$$T_{cr} = 0.33\sqrt{28.7}\left(\frac{45,000^2}{900}\right)\sqrt{1+\frac{27,000}{0.33\times45,000\sqrt{28.7}}}$$

$$T_{cr} = 4,603,525 \quad \text{N-mm}$$

$$T_{cr} = 4.60 \quad \text{kN-m}$$

ดังนั้น กำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเท่ากับ 4.60 kN-m

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2 กำลังรับแรงบิดสูงสุดของ ACI318-14

2.2.1 กำลังรับแรงบิดสูงสุดจากเหล็กปลอก

$$T_{RC} = \frac{2A_0 A_t f_{yt}}{s} \cot\theta$$

$A_0 = 0.85 \times (300-50) \times (150-50) = 21250$ mm²

$A_t = \pi \times 6^2 / 4 = 28.3$ mm²

$s = 75$ mm

$$T_{RC} = \frac{2 \times 21,250 \times 28.3 \times 283}{75} \cot 45°$$

$T_{RC} = 7,040,096$ N-mm

$T_{RC} = 7.04$ kN-m

จะได้ กำลังรับแรงบิดสูงสุดของเหล็กปลอกเท่ากับ 7.04 kN-m

2.2.2 กำลังรับแรงบิดสูงสุดจากเหล็กตามยาว

$$T_{RC} = \frac{2A_0 A_l f_{yl}}{p_h} \cot\theta$$

$A_l = 4 \times \pi (12^2 / 4) = 452$ mm²

$p_h = 2 \times (x_0 + y_0) = 2 \times (250 + 100) = 700$ mm²

$\theta = 45°$ Deg.

$$T_{RC} = \frac{2 \times 21,250 \times 452 \times 518}{700} \cot 45°$$

$T_{RC} = 14,215,400$ N-mm

$T_{RC} = 14.22$ kN-m

จะได้ กำลังรับแรงบิดสูงสุดของเหล็กตามยาวเท่ากับ 14.22 kN-m

2.2.3 กำลังรับแรงบิดสูงสุดจากหน้าตัดคอนกรีต

$$T_{nA} = 0.83\sqrt{f_c^{'}}\left(\frac{1.7A_{oh}^{\;2}}{\rho_h}\right)$$

$A_{oh} = (300-50) \times (150-50) = 25,000$ mm²

$p_h = 2 \times (x_0 + y_0) = 2 \times (250 + 100) = 700$ mm²

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

$$T_{n,ACI} = 0.83\sqrt{28.5}\left(\frac{1.7\times 25,000^2}{700}\right)$$

$T_{n,ACI} = 6,752,606$ N-mm

$T_{n,ACI} = 6.75$ kN-m

จะได้ กำลังรับแรงบิดสูงสุดจากหน้าตัดคอนกรีตเท่ากับ 6.75 kN-m

พิจรณาเปรียบเทียบกำลังรับแรงบิดของเหล็กปลอก เหล็กตามยาวและหน้าตัดคอนกรีต

ดังนั้น กำลังรับแรงบิดสูงสุดขององค์อาคารเท่ากับ 6.75 kN-m

2.3 กำลังรับแรงบิดสูงสุดของ Rahal (2013)

2.3.1 องค์อาคารที่มีระยะเรียงเหล็กปลอกเท่ากับ 75 mm

$$T_{n,Rahal} = 0.33\left(f_c^{'}\right)^{0.16} A_{cp}\left(A_l f_{yl}\frac{A_t f_{yt}}{s}\right)^{0.35}$$

$A_{cp} = (300)\times(150) = 45,000$ mm²

$A_l = 4\times\pi(12^2/4) = 452$ mm²

$A_t = \pi\times 6^2/4 = 28.3$ mm²

$s = 75$ mm

$$T_{n,Rahal} = 0.33\left(28.5\right)^{0.16}\times 45,000\left(452\times 518\times\frac{28.3\times 283}{75}\right)^{0.35}$$

$T_{n,Rahal} = 9,853,130$ N-mm

$T_{n,Rahal} = 9.85$ kN-m

จะได้ กำลังรับแรงบิดสูงสุดองค์อาคารที่มีระยะเรียงเหล็กปลอกเป็น 75 mm เท่ากับ 9.85 kN-m

2.3.1 องค์อาคารที่มีระยะเรียงเหล็กปลอกเท่ากับ 150 mm

$$T_{n,Rahal} = 0.33\left(f_c^{'}\right)^{0.16} A_{cp}\left(A_l f_{yl}\frac{A_t f_{yt}}{s}\right)^{0.35}$$

$A_{cp} = (300)\times(150) = 45,000$ mm²

$A_l = 4\times\pi(12^2/4) = 452$ mm²

$A_t = \pi\times 6^2/4 = 28.3$ mm²

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$s = 150$ mm

$$T_{n,Rahal} = 0.33(28.5)^{0.16} \times 45,000\left(452 \times 518 \times \frac{28.3 \times 283}{150}\right)^{0.35}$$

$T_{n,Rahal} = 7,743,532$ N-mm

$T_{n,Rahal} = 7.74$ kN-m

จะได้ กำลังรับแรงบิดสูงสุดองค์อาคารที่มีระยะเรียงเหล็กปลอกเป็น 150 mm เท่ากับ 7.74 kN-m

2.4 กำลังรับแรงบิดสูงสุดของ fib Bulletin 14 (2001)

$$T_f = 2\varepsilon_{fd,e} E_f \frac{t_f b_f}{s_f} bh \cot\theta$$

$$\varepsilon_{fe} = 0.17\left(\frac{f_c^{'2/3}}{E_f \rho_f}\right)^{0.30} \varepsilon_{fu}$$

$$\rho_f = (2t_f / b)(b_f / s_f) = (2 \times 0.165/150)(500/500)$$

$\rho_f = 0.0022$

$\varepsilon_{fu} = 0.0155$

$E_f = 276$ GPa

$f_c^{'} = 28.5$ MPa

$$\varepsilon_{fe} = 0.17\left(\frac{28.5^{2/3}}{276 \times 0.0022}\right)^{0.30} \times 0.0155 = 0.00598$$

$$\varepsilon_{fe} = 0.17\left(\frac{f_c^{'2/3}}{E_f \rho_f}\right)^{0.30} \varepsilon_{fu}$$

$$\varepsilon_{fd,e} = \varepsilon_{fe} / \gamma_f = 0.00598/1.00 = 0.00598$$

$\gamma_f = 1$

$$T_f = 2 \times 0.00368 \times 276 \times \frac{0.165 \times 500}{500} \times 150 \times 300 \cot 45°$$

$T_f = 15,484$ N-mm

$T_f = 15.48$ KN-mm

จะได้ กำลังรับแรงบิดสูงสุดองค์อาคารที่เสริม CFRP เท่ากับ 15.48 kN-m

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.5 กำลังรับแรงบิดสูงสุดของ He และคณะ (2014)

$$T_{n,He} = T_{RC} + T_f$$

$$T_{RC} = \frac{2A_0 A_t f_{yt}}{s} \cot\theta$$ kN-m

$$T_{RC} = 7.04$$ kN-m

$$T_f = \frac{2A_0 A_f f_{fe}}{s_f}$$ kN-m

$$\varepsilon_{fe} = 0.004 + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}\varepsilon_{fu} - 0.004\right)$$

$$\varepsilon_{fe} = 0.004 + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{2} \times 0.0155 - 0.004\right) = 0.00588$$

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} = 276,075 \times 0.00588 = 1587$$ MPa

$$T_f = \frac{2A_0 A_f f_{fe}}{s_f} = \frac{2 \times 21250 \times (0.165 \times 500) \times 1587}{500}$$

$$T_f = 11,081,837$$ N-mm

$$T_f = 11.08$$ kN-m

$$T_{n,He} = T_{RC} + T_f = 7.04 + 11.08$$ kN-m

$$T_{n,He} = 18.12$$ kN-m

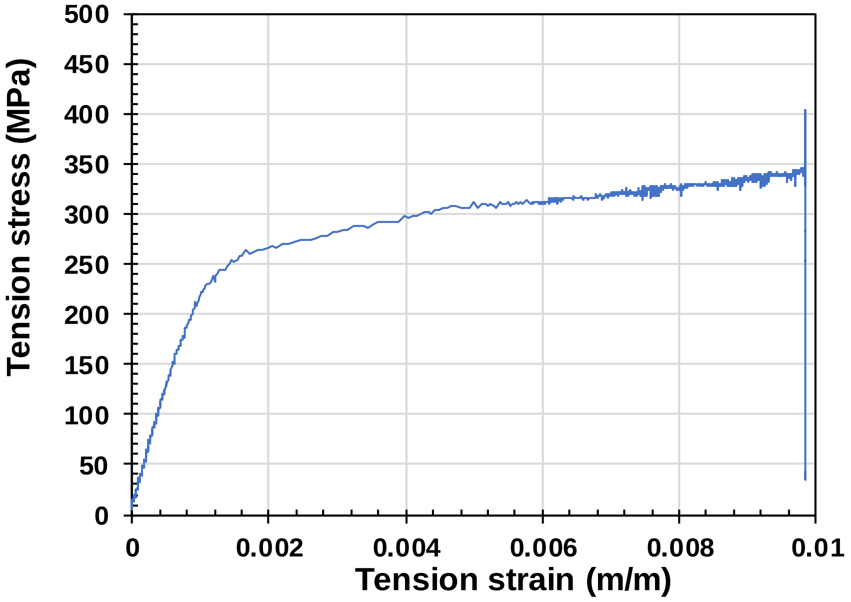
จะได้ กำลังรับแรงบิดสูงสุดองค์อาคารที่เสริม CFRP เท่ากับ 18.12 kN-m

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

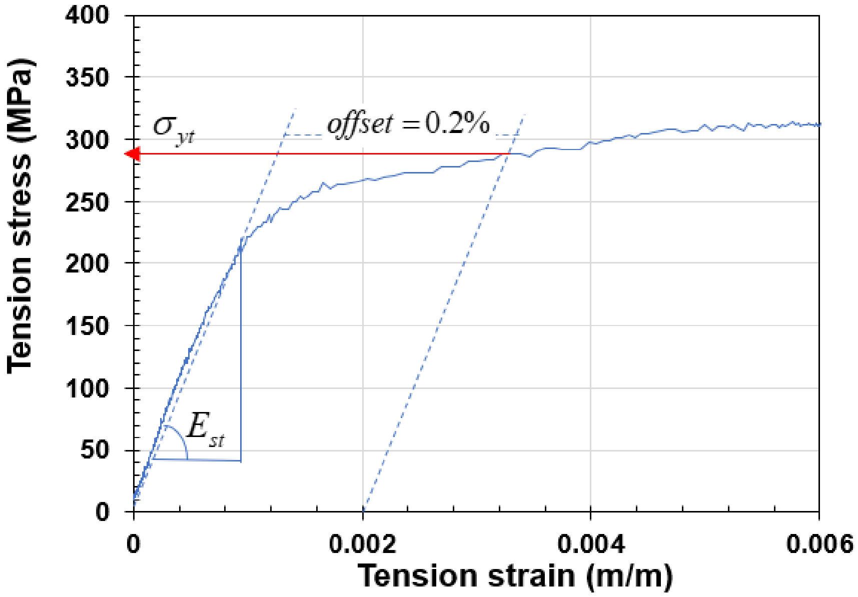
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบวัสดุ

การทดสอบแรงดึงของเหล็กเส้น โดย ASTM A615

1. เหล็กกลม (RB6) มอก. 20-2543



(ก) ผลการทดสอบการรับแรงดึงของเหล็กปลอก



(ข) การหา σ_{yt} และ E_{st} โดยวิธี offset

จากกราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของเหล็กปลอกจะได้

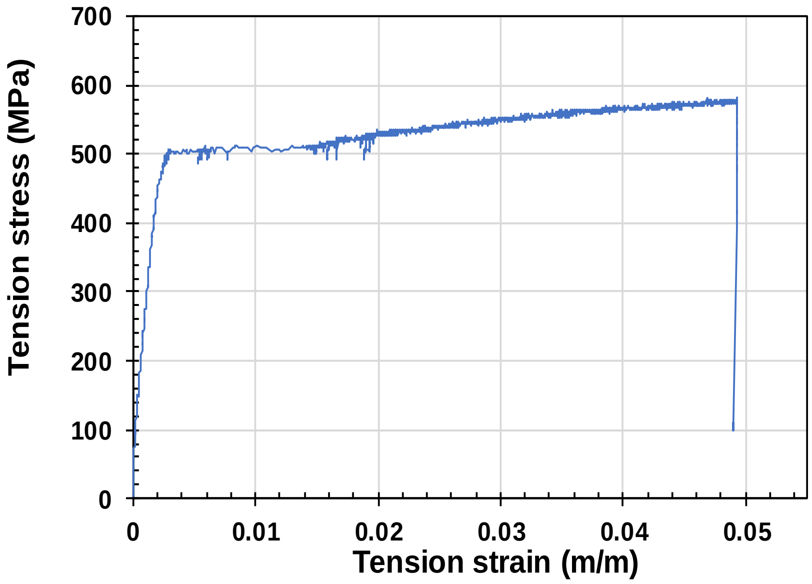
กำลังรับแรงดึงคราก (σ_{yt}) = 283 MPa ความเครียดที่จุดคราก (ε_{yt}) = 0.0014

กำลังรับแรงดึงสูงสุด ($\sigma_{ult,RB6}$) = 438 MPa

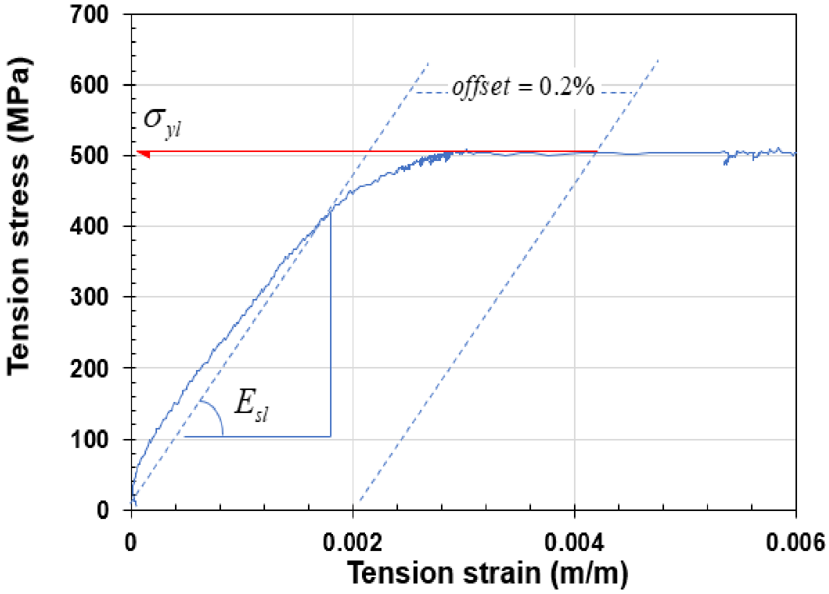
และมอดุลัสยืดหยุ่นของเหล็กปลอก (E_{st})= 219,672 MPa

ความยืดของเหล็กปลอก = 13.85%

2. เหล็กเสริมตามยาว (DB12)



(ก) ผลการทดสอบการรับแรงดึงของเหล็กข้ออ้อย



(ข) การหา σ_{yl} และ E_{sl} โดยวิธี offset

จากกราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของเหล็กข้ออ้อยจะได้

กำลังรับแรงดึงคราก (σ_{yl}) = 518 MPa ความเครียดที่จุดคราก (ε_{yl}) = 0.0023

กำลังรับแรงดึงสูงสุด ($\sigma_{ult,RB6}$) = 582 MPa

และมอดุลัสยืดหยุ่นของเหล็กข้ออ้อย (E_{sl})= 194,557 MPa

ความยืดของเหล็กข้ออ้อย = 14.38%

ภาพตัวอย่างการทดสอบแรงดึงของเหล็กเส้น โดยมาตรฐาน ASTM A615 ของ DB12

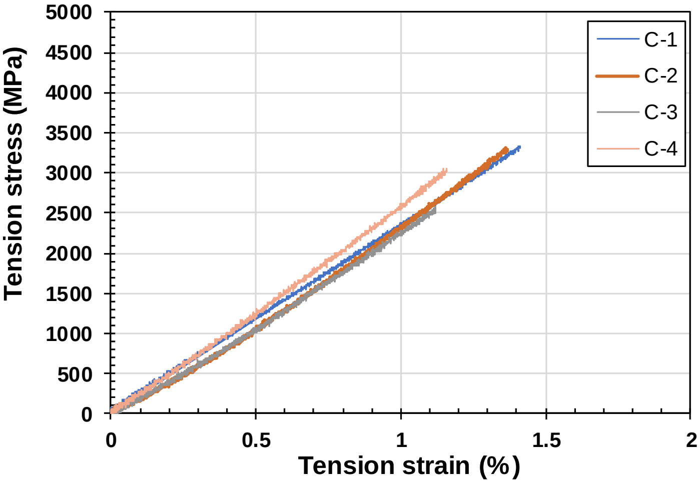
(ก) วัดการยืดตัวของ RB6

(ข) วัดการยืดตัวของ DB12

การทดสอบแรงดึงของ CFRP โดย ASTM D3039 ทั้งหมด 4 ตัวอย่าง

ภาพตัวอย่างการติดตั้งการทดสอบแรงดึงแผ่น CFRP (ตัวอย่าง C-1)

ภาพตัวอย่างการฉีกขาดของแผ่น CFRP



ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ของ CFRP (ตัวอย่าง C-1)

จากผลการทดสอบสามารถหาคุณสมบัติวัสดุของแผ่น CFRP ได้แก่

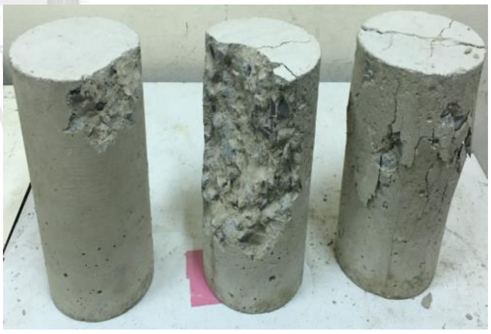
มอดุลัสยืดหยุ่นของเส้นใยเท่ากับ 276,075 MPa การยืดตัวเมื่อแตกหักเท่ากับ 1.47%

และกำลังรับแรงดึงของเส้นใยเท่ากับ 3,493 MPa

การทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีต โดย ASTM C39

ตัวอย่างการวัดขนาดของคอนกรีตทรงกระบอกที่ใช้ทดสอบ

ตัวอย่างการทดสอบรับแรงอัดของตัวอย่าง



ภาพการวิบัติของตัวอย่าง

จากการทดสอบกำลังแรงอัดประลัยของคอนกรีตทรงกระบอกจำนวณ 3 ตัวอย่าง คือ 28.5 MPa

บรรณานุกรม

[1] L. Van Den Einde, L. Zhao, and F. Seible, "Use of FRP composites in civil structural applications," *Construction and building materials,* vol. 17, no. 6-7, pp. 389-403, 2003.

[2] J.-g. Nie, Y.-h. Wang, and J.-s. J. J. o. C. S. R. Fan, "Experimental study on seismic behavior of concrete filled steel tube columns under pure torsion and compression–torsion cyclic load," vol. 79, pp. 115-126, 2012.

[3] Y.-H. Wang, Y.-F. Guo, J.-P. Liu, and X.-H. Zhou, "Experimental study on torsion behavior of concrete filled steel tube columns subjected to eccentric compression," *Journal of Constructional Steel Research,* vol. 129, pp. 119-128, 2017.

[4] T. Triantafillou, S. Matthys, and L. Taerwe, "Design of concrete members strengthened with externally bonded FRP reinforcement," in *FRPRCS-5: Fibre-reinforced plastics for reinforced concrete structures Volume 1: Proceedings of the fifth international conference on fibre-reinforced plastics for reinforced concrete structures, Cambridge, UK, 16–18 July 2001*, 2001: Thomas Telford Publishing, pp. 157-166.

[5] D. Mitchell and M. P. Collins, "Detailing for torsion," in *Journal Proceedings*, 1976, vol. 73, no. 9, pp. 506-511.

[6] K. N. Rahal, "Torsional strength of normal and high strength reinforced concrete beams," *Engineering Structures,* vol. 56, pp. 2206-2216, 2013.

[7] C. E. Chalioris and C. G. Karayannis, "Experimental investigation of RC beams with rectangular spiral reinforcement in torsion," *Engineering Structures,* vol. 56, pp. 286-297, 2013.

[8] S. Panchacharam and A. Belarbi, "Torsional behavior of reinforced concrete beams strengthened with FRP composites," in *First FIB Congress, Osaka, Japan*, 2002, vol. 1, pp. 01-110.

[9] P. R. Salom, J. Gergely, and D. T. Young, "Torsional strengthening of spandrel beams with fiber-reinforced polymer laminates," *Journal of Composites for*

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Construction, vol. 8, no. 2, pp. 157-162, 2004.

[10] A. K. Hii and R. Al-Mahaidi, "Experimental investigation on torsional behavior of solid and box-section RC beams strengthened with CFRP using photogrammetry," *Journal of Composites for Construction,* vol. 10, no. 4, pp. 321-329, 2006.

[11] M. Ameli, H. R. Ronagh, and P. F. Dux, "Behavior of FRP strengthened reinforced concrete beams under torsion," *Journal of Composites for Construction,* vol. 11, no. 2, pp. 192-200, 2007.

[12] C. E. Chalioris, "Torsional strengthening of rectangular and flanged beams using carbon fibre-reinforced-polymers–Experimental study," *Construction and Building Materials,* vol. 22, no. 1, pp. 21-29, 2008.

[13] A. Deifalla and A. Ghobarah, "Full torsional behavior of RC beams wrapped with FRP: analytical model," *Journal of Composites for Construction,* vol. 14, no. 3, pp. 289-300, 2010.

[14] A. Deifalla, A. Awad, and M. Elgarhy, "Effectiveness of externally bonded CFRP strips for strengthening flanged beams under torsion: An experimental study," *Engineering Structures,* vol. 56, pp. 2065-2075, 2013.

[15] A. E. McMullen and W. El-Degwy, "Prestressed concrete tests compared with torsion theories," *PCI journal,* vol. 30, no. 5, pp. 96-127, 1985.

[16] T. G. Mondal and S. S. Prakash, "Effect of tension stiffening on the behaviour of reinforced concrete circular columns under torsion," *Engineering Structures,* vol. 92, pp. 186-195, 2015.

[17] R. He, L. H. Sneed, and A. Belarbi, "Torsional repair of severely damaged column using carbon fiber-reinforced polymer," *ACI Structural Journal,* vol. 111, no. 3, p. 705, 2014.

[18] J. G. MacGregor, J. K. Wight, S. Teng, and P. Irawan, *Reinforced concrete: Mechanics and design*. Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, 1997.

[19] A. C. Institute, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14): Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-14): an ACI Report*. American Concrete Institute. ACI, 2014.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการสัญลักษณ์

A_0 = พื้นที่ที่ล้อมรอบด้วยเส้นแรงเฉือนต่อหน่วยความยาวจากแรงบิด

A_{cp} = พื้นที่ล้อมด้วยเส้นรอบวงภายนอกของหน้าตัดคาน

A_f = พื้นที่หน้าตัดของแผ่น FRP

A_g = พื้นที่หน้าตัดรวม

A_l = พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมตามยาวทั้งหมด

A_{oh} = พื้นที่วงปิดที่ล้อมรอบด้วยเหล็กปลอก

A_t = พื้นที่หน้าตัดเหล็กปลอก (1 เส้น)

b_w =ความกว้างของหน้าตัดคอนกรีต

d_{frp} = ความลึกประสิทธิผลของ FRP รับแรงเฉือน

E_f = มอดุลัสยืดหยุ่นของแผ่น FRP

E_{sl} = มอดุลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมตามยาว

E_{st} = มอดุลัสยืดหยุ่นของเหล็กปลอก

f_c' = กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

f_{fe} = หน่วยแรงดึงประสิทธิผลของ FRP

f_{yl} = หน่วยแรงดึงครากของเหล็กเสริมตามยาว

f_{yt} = หน่วยแรงดึงครากของเหล็กปลอก

J = โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้ว

K_t = สติฟเนสของตัวอย่างทดสอบรับแรงบิด

K_t^{I} = สติฟเนสของตัวอย่างทดสอบก่อนเกิดรอยร้าว

K_t^{II} = สติฟเนสของตัวอย่างทดสอบหลังเกิดรอยร้าว

K_t^{III} = สติฟเนสของตัวอย่างทดสอบหลังเหล็กเสริมคราก

L = ระยะเรียงกึ่งกลางหน้าตัดถึงจุดที่วัด LVDT

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

N_{frp}^{e} = แรงดึงประสิทธิผลของ FRP

$N_{frp,w}$ = แรงดึงสูงสุดของ FRP

N_s = แรงดึงของแผ่น FRP ต่อความกว้าง 1 นิ้ว ≤ 0.004

P_{cp} = ความยาวเส้นรอบวงภายนอกของหน้าตัดคาน

q = แรงเฉือนต่อหน่วยความยาว

r = รัศมีหน้าตัดวงกลม

T_{cr} = กำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าว

$T_{cr,ACI}$ = กำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวจากมาตรฐาน ACI318-14

$T_{\exp,cr}$ = กำลังรับแรงบิดคอนกรีตแตกร้าวจากการทดสอบ

$T_{\exp,y}$ = กำลังรับครากจากการทดสอบ

$T_{\exp,\max}$ = กำลังรับแรงบิดสูงสุดแตกร้าวจากการทดสอบ

T_f = กำลังรับแรงบิดของ CFRP

$T_{\max}$ = กำลังรับแรงบิดสูงสุด

$T_{\max,ACI}$ = กำลังรับแรงบิดสูงสุดจากมาตรฐาน ACI318-14

$T_{\max,Rahal}$ = กำลังรับแรงบิดสูงสุดจาก Rahal (2013)

$T_{\max,fib}$ = กำลังรับแรงบิดสูงสุดจาก fib Bulletin 14 (2001)

$T_{\max,He}$ = กำลังรับแรงบิดสูงสุดจาก He และคณะ (2014)

s = ระยะเรียงตัวของเหล็กปลอก

s_f = ระยะเรียงระหว่างกึ่งกลางแถบ FRP

x = ความยาวด้านสั้นของหน้าตัดสี่เหลี่ยม

y = ความยาวด้านยาวของหน้าตัดสี่เหลี่ยม

ε_{fe} = ความเครียดประสิทธิผลของ FRP

ε_{fu} = ความเครียดดึงขาดออกแบบ

θ = มุมบิดของตัวอย่างทดสอบรับแรงบิด

θ_{cr}^{I} = มุมบิดแตกร้าว (ช่วงก่อนเกิดรอยร้าว)

θ_{cr}^{II} = มุมบิดแตกร้าว (ช่วงหลังเกิดรอยร้าว)

$\theta_{\max}$ = มุมบิดของแรงบิดสูงสุด

θ_{y} = มุมบิดของกำลังรับแรงบิดคราก

τ = หน่วยแรงเฉือน

$\tau_{\max}$ = หน่วยแรงเฉือนสูงสุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายศิวกร สร้อยศักดิ์
วัน เดือน ปี เกิด	8 กันยายน 2537
สถานที่เกิด	อุตรดิตถ์
วุฒิการศึกษา	ปี 2555
	มัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนอุตรดิตถ์ดรุณี
	ปี 2559
	ปริญญาตรี (วศ.บ) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ที่อยู่ปัจจุบัน	592/147 ม.เดอะแกรนปิ่นเกล้า ถนนบรมราชชนี ตำบลศาลาธรรมสนพ์ เขตทวีวัฒนา กทม 10170

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY