

การวิเคราะห์การหลุดล่อนสำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลัง  
ด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยวิธีการปลดปล่อยพลังงาน

นายปิยะลักษณ์ วันทนาศิริ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2554  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

DEBONDING ANALYSIS FOR REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED  
WITH FIBER-REINFORCED POLYMER PLATES BY ENERGY RELEASE METHOD

Mr. Peelak Wantanasiri

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์การหลุดล่อนสำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่  
เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยวิธีการ  
ปลดปล่อยพลังงาน

โดย

นาย ปิยะลักษณ์ วันทนาศิริ

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร. อัศววัชร เล่นวารี

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศศิริวงษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาติ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร. อัศววัชร เล่นวารี)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุชาติ ลิ้มกัตัญญ)

ปีย์ลักษณ์ วันทนาศิริ : การวิเคราะห์การหลุดล่อนสำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยวิธีการปลดปล่อยพลังงาน. (DEBONDING ANALYSIS FOR REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED WITH FIBER-REINFORCED POLYMER PLATES BY ENERGY RELEASE METHOD)  
 อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ.ดร. อัครวัชร เล่นวาริ, 96 หน้า.

การศึกษานี้นำเสนอการวิเคราะห์การหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ปรากฏขึ้นที่ช่วงภายในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย เนื่องจากรอยร้าวจากแรงดัดหรือรอยร้าวจากแรงดัดและแรงเฉือนด้วยวิธีการปลดปล่อยพลังงานของกลศาสตร์การแตกหัก โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างการยืดเหนียวและการไหลจากการทดสอบแรงเฉือนของรอยต่อยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตในการคำนวณพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสร่วมกับการวิเคราะห์หน้าตัดซึ่งคำนึงถึงการต้านทานแรงดึงของคอนกรีตในการทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลัง จากการเปรียบเทียบผลการทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการวิบัติจากแบบจำลองในการศึกษากับผลการทดสอบของชิ้นตัวอย่างคานจำนวน 28 ชิ้น ตัวอย่าง พบว่าแบบจำลองนี้ให้ผลการทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการวิบัติแบบหลุดล่อนที่ดี โดยอัตราส่วนระหว่างผลการทำนายต่อผลการทดสอบมีช่วงระหว่าง 0.80 ถึง 1.19 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.01 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.09 และสัมประสิทธิ์ของการแปรผันเท่ากับร้อยละ 9 และจากการศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยด้วยแบบจำลอง พบว่าการเพิ่มกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต ปริมาณของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และปริมาณของเหล็กเสริมส่งผลให้ความต้านทานต่อการหลุดล่อนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้จากการศึกษาพบว่าข้อเสนอแนะในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยสถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกา (ACI 440.2R-08) ทำนายแรงกระทำที่คานสามารถต้านทานได้โดยมีแนวโน้มต่ำกว่าผลการทดสอบในกรณีการวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา..... ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2554.....

# # 5270620121 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS : FIBER-REINFORCED POLYMERS / FRACTURE MECHANICS / BOND-SLIP RELATIONSHIP / INTERMEDIATE CRACK-INDUCED DEBONDING

PEELAK WANTANASIRI : DEBONDING ANALYSIS FOR REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED WITH FIBER-REINFORCED POLYMER PLATES BY ENERGY RELEASE METHOD. ADVISOR : AKHRAWAT LENWARI, Ph.D., 96 pp.

This study proposes the analysis of plate debonding in reinforced concrete beams strengthened with fiber-reinforced polymer (FRP) plates caused by intermediate flexural cracks or flexural shear cracks. By using energy release method of fracture mechanics, The interfacial fracture energy is calculated from the bond-slip relationship obtained from shear test of FRP-to-concrete bonded joint and the section analysis which considers the effect of concrete's tension stiffening are used for predicting intermediate crack-induced debonding failure load. The predicted failure loads are compared to 28 experimental data in literature. It is found that the proposed model gives a good prediction of the intermediate crack-induced debonding load. The prediction-to-test data ratio ranges from 0.80 to 1.19, with a mean value of 1.01, standard deviation of 0.09 and coefficient of variation of 9%. From the parametric study using the proposed model, increasing the concrete compressive strength, FRP reinforcement ratio, FRP elastic modulus and steel reinforcement ratio will increase the intermediate crack-induced debonding failure load. In addition, recommendations from American Concrete Institute (ACI 440.2R-08) give a predicted load which is conservative for the intermediate crack-induced debonding failure in reinforced concrete beams strengthened with FRP plates.

Department : .....Civil Engineering..... Student's Signature .....

Field of Study : .....Civil Engineering..... Advisor's Signature .....

Academic Year : .....2011.....

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. อัครวัชร เล่นวาริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความกรุณา อุตสาหะกำลังกาย กำลังใจ ตลอดจนสละเวลาอันมีค่ามาให้ความรู้ และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ด้วยความเมตตา ทั้งยังเสนอแนะแนวทางแก้ไขปัญหา และข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์อันประกอบด้วย ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาติรี ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร. สุชาติ ลิ้มกัตถัญญ และ รองศาสตราจารย์ ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความกรุณา ให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะต่างๆ ด้วยดีเสมอมา

ขอกราบขอบพระคุณ Paththini Marakkala Mithila Achintha แห่งมหาวิทยาลัย Oxford ประเทศ England สำหรับคำแนะนำในการสร้างแบบจำลองโมเมนต์ดัดและความโค้งของคานคองกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ท้ายที่สุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้ความอุปการะ และเป็นกำลังใจแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด

## สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....   | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....  | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....   | ฉ    |
| สารบัญ.....  | ช    |
| สารบัญตาราง.....   | ญ    |
| สารบัญภาพ.....   | ฎ    |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และตัวย่อ.....  | ฏ    |
| <br>   |      |
| บทที่ 1 บทนำ.....  | 1    |
| 3.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....  | 1    |
| 3.2 ทบทวนวรรณกรรม.....   | 3    |
| 3.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....   | 15   |
| 3.4 ขอบเขตการวิจัย.....  | 15   |
| 3.5 แนวทางดำเนินการวิจัย.....  | 16   |
| บทที่ 2 แบบจำลองโมเมนต์ดัดและความโค้งของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลัง<br>ภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย..... | 17   |
| 2.1 พฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก.....   | 17   |
| 2.2 แบบจำลองโมเมนต์ดัดและความโค้งของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก.....  | 19   |
| 2.3 แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่น<br>พอลิเมอร์เสริมเส้นใย.....                             | 22   |
| 2.4 คุณสมบัติของวัสดุ.....   | 24   |
| 2.5 แกนเซนทรอยด์ แกนสะเทิน และแกนกึ่งกลางความลึก.....  | 26   |
| 2.6 การปรับปรุงสัมประสิทธิ์การประมาณค่า.....   | 27   |
| 2.7 การวิเคราะห์หน้าตัดไม้แตรกร้าวและหน้าตัดแตรกร้าวอย่างสมบูรณ์.....  | 28   |
| 2.8 จุดเซนทรอยด์เทียบเท่าสำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก.....   | 29   |
| 2.9 โมเมนต์ดัดกระทำรอบแกนเซนทรอยด์เทียบเท่า.....   | 32   |

|   | หน้า |
|---|------|
| 2.10 การปรับปรุงแบบจำลองของแบนรอนส์ในการวิเคราะห์หน้าตัดแตกกร้าว<br>บางส่วน.....  | 32   |
| 2.11 แบบจำลองโมเมนต์ตัดและความโค้งของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริม<br>กำลังภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย.....                         | 35   |
| 2.12 การเปรียบเทียบผลการทำนายของแบบจำลองกับผลการทดสอบ.....  | 39   |
| <b>บทที่ 3</b> แบบจำลองหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไหลของรอยต่อยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่น<br>พอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต.....                   | 45   |
| 3.1 สมการควบคุม.....  | 45   |
| 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไหลเฉพาะแห่ง.....  | 47   |
| 3.3 การวิเคราะห์กระบวนการหลุดล่อน.....  | 48   |
| 3.4 คุณลักษณะของจุดต่างๆ ในเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการ<br>เคลื่อนที่.....   | 51   |
| 3.5 แรงกระทำสูงสุดที่สามารถส่งผ่านของรอยต่อยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่น<br>พอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต.....                                   | 52   |
| 3.6 แบบจำลองหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไหลเฉพาะแห่งของ Nakaba และ<br>คณะ.....  | 54   |
| <b>บทที่ 4</b> การวิเคราะห์การหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในคานคอนกรีตเสริม<br>เหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย..... | 56   |
| 4.1 แบบจำลองทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่น<br>พอลิเมอร์เสริมเส้นใย.....  | 56   |
| 4.2 การประยุกต์ใช้แบบจำลองของ Niu และ Wu เพื่อทำนายแรงกระทำที่ทำให้<br>เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย.....        | 61   |
| 4.3 ข้อเสนอแนะในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังภายนอกด้วย<br>แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยสถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกา.....          | 63   |
| <b>บทที่ 5</b> การตรวจสอบแบบจำลองกับผลการทดสอบและการศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบ<br>ต่อการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย.....             | 68   |
| 5.1 ผลการทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิ<br>เมอร์เสริมเส้นใย.....   | 68   |



|  | หน้า |
|--|------|
| 5.2 ความเหมาะสมของข้อเสนอแนะในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริม<br>กำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยสถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกา..... | 75   |
| 5.3 การศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของ<br>แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย.....                                    | 77   |
| บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย.....  | 83   |
| 6.1 สรุปผลการวิจัย.....  | 83   |
| 6.2 ข้อเสนอแนะ.....  | 85   |
| รายการอ้างอิง.....   | 86   |
| ภาคผนวก.....   | 90   |
| ภาคผนวก ก.....   | 91   |
| ภาคผนวก ข.....   | 94   |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....  | 96   |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่ |  | หน้า |
|----------|--|------|
| 2.1      | เรขาคณิตและคุณสมบัติของวัสดุของคานในงานวิจัยที่ผ่านมา.....   | 40   |
| 5.1      | ข้อมูลเรขาคณิตและคุณสมบัติของวัสดุของคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่น<br>พอลิเมอร์เสริมเส้นใยในงานวิจัยที่ผ่านมา.....                              | 70   |
| 5.2      | การเปรียบเทียบระหว่างผลการทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่<br>ช่วงภายในของแผ่นกับแรงกระทำวิบัติหลุดล่อน.....                        | 73   |
| 5.3      | การเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์แรงกระทำสูงสุดโดย ACI ที่คาน<br>คอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังสามารถต้านทานกับแรงกระทำวิบัติหลุดล่อน... | 74   |

## สารบัญภาพ

| ภาพที่ |  | หน้า |
|--------|--|------|
| 1.1    | คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย.....   | 1    |
| 1.2    | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการโก่งตัวของคานที่ไม่เสริม<br>กำลังและคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย..... | 4    |
| 1.3    | การวิบัติแบบหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย.....   | 5    |
| 1.4    | การวิบัติแบบหลุดล่อนที่ปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย.....   | 6    |
| 1.5    | การวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย.....   | 7    |
| 1.6    | การวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากการ<br>ทดสอบขึ้นตัวอย่างคาน.....                                 | 7    |
| 2.1    | การกระจายของความเค้นของหน้าตัดที่รอยรั่วขนาดต่างๆ.....   | 18   |
| 2.2    | พฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก.....  | 18   |
| 2.3    | การกระจายของความเค้น และความเครียดของหน้าตัด.....  | 20   |
| 2.4    | แรงและโมเมนต์ดัดกระทำบนชิ้นส่วนหน้าตัดคาน คสล.ที่เสริมกำลังด้วยแผ่น<br>พอลิเมอร์เสริมเส้นใย.....                               | 22   |
| 2.5    | โมเมนต์ดัดที่กระทำเฉพาะบนหน้าตัดของชิ้นส่วนคาน คสล.....  | 23   |
| 2.6    | เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีต.....  | 24   |
| 2.7    | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็ก.....  | 25   |
| 2.8    | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแผ่นพอลิเมอร์เสริม<br>เส้นใย .....  | 26   |
| 2.9    | แกนต่างๆ บนหน้าตัดคาน.....   | 27   |
| 2.10   | การกระจายของความเครียดเนื่องจากโมเมนต์ดัดและแรงตามแนวแกน.....  | 29   |
| 2.11   | หน้าตัดแปลงเทียบเท่า (สำหรับหน้าตัดไม่แตกร้า).....   | 30   |
| 2.12   | แผนผังการคำนวณโมเมนต์ดัดและความโค้งของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริม<br>เหล็กที่เสริมกำลังที่ตำแหน่ง $i^{th}$ ใดๆ.....                 | 38   |
| 2.13   | เรขาคณิตและแรงกระทำบนคานภายใต้การทดสอบการดัดสี่จุด.....  | 39   |
| 2.14   | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งของชิ้นตัวอย่างคาน<br>A3.1.....  | 41   |

| ภาพที่ |   | หน้า |
|--------|---|------|
| 2.15   | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและความเครียดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่กึ่งกลางคานของขึ้นตัวอย่างคาน F4.....         | 41   |
| 2.16   | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานของขึ้นตัวอย่างคาน A0.....                                    | 42   |
| 2.17   | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานของขึ้นตัวอย่างคาน S2PF7M.....                                | 43   |
| 2.18   | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานของขึ้นตัวอย่างคาน C3.....                                    | 43   |
| 3.1    | การทดสอบแรงเฉือนของรอยต่อยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต.....                                       | 45   |
| 3.2    | การเสียรูปและสมมูลในรอยต่อยึดเหนี่ยว.....   | 46   |
| 3.3    | ความสัมพันธ์ระหว่างการยึดเหนี่ยวและการไหลเฉพาะแห่ง.....   | 48   |
| 3.4    | การกระจายของความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัส และการขยายตัวของมวลหลุดล่อน..   | 49   |
| 3.5    | เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเคลื่อนที่.....  | 50   |
| 3.6    | รอยต่อระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและการเคลื่อนที่ภายใต้แรงกระทำ P..... | 53   |
| 4.1    | ความสัมพันธ์ระหว่างการยึดเหนี่ยวและการไหลรูปแบบต่างๆ.....   | 57   |
| 4.2    | การกระจายตัวของความเค้นในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยกรณีรอยร้าวตัดจำนวนมาก.....  | 59   |
| 4.3    | การทำนายการวิบัติแบบหลุดล่อนสำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลัง..   | 60   |
| 4.4    | ตำแหน่งสิ้นสุดปลายแผ่น กรณีเสริมพอลิเมอร์เสริมเส้นใย 3 ชั้น.....  | 64   |
| 4.5    | การกระจายของความเค้นและความเครียดของหน้าตัดคานภายใต้โมเมนต์ดัดกระทำ.....  | 64   |
| 5.1    | เรขาคณิตและแรงกระทำบนคานทดสอบในงานวิจัยต่างๆ.....   | 68   |
| 5.2    | กราฟระหว่างผลการทำนายกับผลการทดสอบ.....   | 72   |
| 5.3    | กราฟระหว่างผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบ.....   | 75   |
| 5.4    | ความสัมพันธ์ระหว่าง $P_{pred} / P_{control}$ และกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต.....                                 | 78   |

| ภาพที่  | หน้า |
|---|------|
| 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $P_{pred} / P_{control}$ และอัตราส่วนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย.....       | 79   |
| 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $P_{pred} / P_{control}$ และโมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย..... | 80   |
| 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $P_{pred} / P_{control}$ และอัตราส่วนของเหล็กเสริม.....                     | 81   |

## คำอธิบายสัญลักษณ์และตัวย่อ

|              |   |
|--------------|---|
| $A_p$        | พื้นที่หน้าตัดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย                   |
| $A_s$        | พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงดึง                        |
| $A_{sc}$     | พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงอัด                        |
| $b$          | ความกว้างของหน้าตัดคาน                                      |
| $b_p$        | ความกว้างของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย                        |
| $B$          | สติฟเนสยืดหยุ่นเทียบเท่า                                    |
| $B_{uc}$     | สติฟเนสยืดหยุ่นเทียบเท่าของหน้าตัดไม้แตกร้าว                |
| $B_{fc}$     | สติฟเนสยืดหยุ่นเทียบเท่าของหน้าตัดแตกร้าวอย่างสมบูรณ์       |
| $B_{eff}$    | สติฟเนสยืดหยุ่นเทียบเท่าประสิทธิภาพของหน้าตัดแตกร้าวบางส่วน |
| $C$          | สัมประสิทธิ์การประมาณค่าในแบบจำลองของแบรนสัน                |
| $C_K$        | สัมประสิทธิ์การประมาณค่าของสติฟเนสเทียบเท่า                 |
| $C_\alpha$   | สัมประสิทธิ์การประมาณค่าของแกนเซนทรอยด์                     |
| $d$          | ความลึกประสิทธิภาพของเหล็กเสริมรับแรงดึง                    |
| $d_c$        | ความลึกประสิทธิภาพของเหล็กเสริมรับแรงอัด                    |
| $E_c$        | โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต                                   |
| $E_{c0}$     | ซีแคนท์โมดูลัสเริ่มต้นของคอนกรีต                            |
| $E_p$        | โมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย                  |
| $E_s$        | โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม                                |
| $f'_c$       | กำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต                          |
| $f_{y-s}$    | ความเค้นครากของเหล็กเสริม                                   |
| $f_r$        | กำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต                                |
| $F_p$        | แรงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย                               |
| $F_{p-ana}$  | แรงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากการคำนวณ                    |
| $F_{p-assu}$ | แรงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากการสมมติ                    |
| $G_f$        | พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส                         |
| $h$          | ความลึกของหน้าตัดคาน  |
| $I_g$        | โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดทั้งหมด                        |
| $I_{cr}$     | โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดแปลงแตกร้าว                    |

|                     |  |
|---------------------|--|
| $I_{eff}$           | โมเมนต์อินเนอร์เชียประสิทธิภาพ                                 |
| $l_{span}$          | ความยาวช่วงคาน   |
| $l_{shear}$         | ความยาวช่วงแรงเฉือน  |
| $l_{FRP}$           | ความยาวของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย                             |
| $L_e$               | ระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพของรอยต่อยึดเหนี่ยว                   |
| $L'_e$              | ระยะส่งผ่านเทียบเท่าในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก                     |
| $M_{cr}$            | โมเมนต์ดัดแตกกร้าว   |
| $M_y$               | โมเมนต์ดัดที่เหล็กเสริมรับแรงดึงเริ่มคราก                      |
| $M_{ult}$           | โมเมนต์ดัดประลัย   |
| $M_{app}$           | โมเมนต์ดัดกระทำ  |
| $M_{cr\_mid}$       | โมเมนต์ดัดแตกกร้าวรอบแกนกึ่งกลางความลึก                        |
| $M_{y\_mid}$        | โมเมนต์ดัดที่เหล็กเสริมรับแรงดึงเริ่มครากรอบแกนกึ่งกลางความลึก |
| $M_{app\_mid}$      | โมเมนต์ดัดกระทำรอบแกนกึ่งกลางความลึก                           |
| $P_{max}$           | แรงกระทำสูงสุดที่สามารถส่งผ่าน หรือแรงกระทำประลัย              |
| $t_a$               | ความหนาของชั้นวัสดุประสาน                                      |
| $t_p$               | ความหนาของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย                             |
| $x$                 | ความลึกของแกนสะเทิน  |
| $x_{uc}$            | ความลึกของแกนสะเทินของหน้าตัดไม้แตกกร้าว                       |
| $x_{fc}$            | ความลึกของแกนสะเทินของหน้าตัดแตกกร้าวอย่างสมบูรณ์              |
| $x_{eff}$           | ความลึกของแกนสะเทินประสิทธิภาพของหน้าตัดแตกกร้าวบางส่วน        |
| $K$                 | ความโค้งของหน้าตัด   |
| $\sigma_c$          | ความเค้นของคอนกรีตที่จุดใดๆ                                    |
| $\tau_f$            | กำลังยึดเหนี่ยวเฉพาะแห่งของรอยต่อยึดเหนี่ยว                    |
| $\varepsilon_c$     | ความเครียดของคอนกรีตที่จุดใดๆ                                  |
| $\varepsilon_{max}$ | ความเครียดที่ความเค้นสูงสุดของคอนกรีต                          |
| $\varepsilon_r$     | ความเครียดที่กำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต                      |
| $\varepsilon_{bi}$  | ความเครียดในเนื้อคอนกรีตขณะติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย     |
| $\varepsilon_{fu}$  | ความเครียดฉีกขาดในการออกแบบของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย         |
| $\varepsilon_{fd}$  | ความเครียดที่ถูกจำกัดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย               |
| $\varepsilon_{fe}$  | ความเครียดประสิทธิภาพในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย                |

|                 |  |
|-----------------|--|
| $\epsilon_{cu}$ | ความเครียดประลัยของคอนกรีต                                   |
| $\alpha_{uc}$   | ความลึกของแกนเซนทรอยด์เทียบเท่าของหน้าตัดไม้แตรกั่ว          |
| $\alpha_{fc}$   | ความลึกของแกนเซนทรอยด์เทียบเท่าของหน้าตัดแตรกั่วอย่างสมบูรณ์ |
| $\alpha_{eff}$  | ความลึกของแกนเซนทรอยด์ประสิทธิผลของหน้าตัดแตรกั่วบางส่วน     |

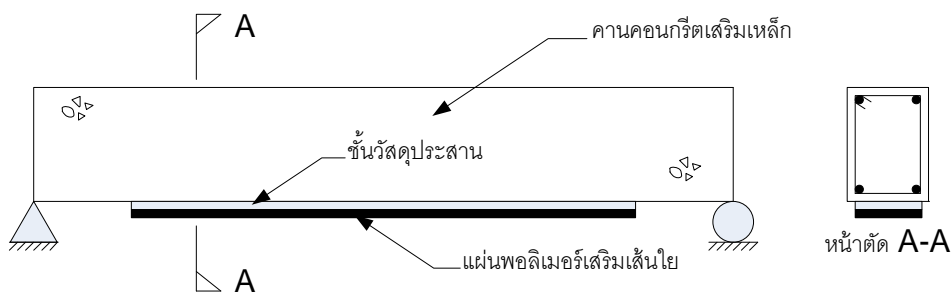


# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตั้งแต่อดีตจวบจนถึงปัจจุบันอาคารที่อยู่อาศัยและโครงสร้างพื้นฐานต่างๆ ส่วนใหญ่จะเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนี้จะเกิดการเสื่อมลงตามกาลเวลาและสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงการใช้งานของโครงสร้างเดิมให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น ล้วนแล้วแต่เป็นสาเหตุให้ต้องสร้างส่วนของโครงสร้างใหม่ขึ้นมาแทนที่ส่วนของโครงสร้างที่เสียหายซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ทำได้โดยยากและเสียค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นการซ่อมแซมหรือเสริมกำลังให้กับส่วนของโครงสร้างที่เสียหายจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด โดยในปัจจุบันนี้การเสริมกำลังภายนอกให้ส่วนของโครงสร้างด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (fibre - reinforced polymer, FRP) เป็นที่แพร่หลายเนื่องจากมีข้อดี คือ น้ำหนักเบา มีกำลังรับแรงดึงสูง ต้านทานต่อการกัดกร่อน และง่ายต่อการติดตั้ง เป็นต้น ซึ่งการเสริมกำลังภายนอกโดยใช้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยสามารถประยุกต์ใช้กับส่วนของโครงสร้างต่างๆ เช่น คาน เสา พื้น และคานขนาดใหญ่ของโครงสร้างสะพาน เป็นต้น โดยรูปแบบการติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจะแตกต่างกันในแต่ละส่วนของโครงสร้าง หรือในส่วนของโครงสร้างชนิดเดียวกันก็จะมีรูปแบบการติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยหลายรูปแบบ ทั้งนี้รูปแบบการติดตั้งที่ต่างกันจะส่งผลให้ส่วนของโครงสร้างมีคุณสมบัติเพิ่มขึ้นในด้านที่ต่างกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะพิจารณาการเสริมกำลังรับโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีฐานรองรับแบบธรรมดา (simply supported beam) จากคุณสมบัติของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่มีกำลังรับแรงดึงสูง จึงติดแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยตามยาวขนานกับท้องคานซึ่งเป็นด้านที่รับแรงดึง ดังแสดงในภาพที่ 1.1 ซึ่งการติดแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยลักษณะดังกล่าวนี้เป็นรูปแบบที่ง่ายที่สุดและมีประสิทธิภาพมากจึงใช้กันอย่างแพร่หลาย



ภาพที่ 1.1 คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของวิศวกร ออกแบบโดยใช้หลักการให้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยช่วยรับแรงดึงที่เกิดจากโมเมนต์ดัดที่คานต้องต้านทาน ซึ่งคานที่เสริมกำลังจะมีประสิทธิภาพสูงสุด ก็ต่อเมื่อออกแบบไว้ให้สามารถต้านทานน้ำหนักบรรทุกก่อนที่จะเกิดการวิบัติแบบการฉีกขาดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (FRP rupture) แต่ในทางปฏิบัติปรากฏว่าคานไม่สามารถต้านทานได้ถึงน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการออกแบบ เนื่องจากคานที่เสริมกำลังเกิดการวิบัติแบบหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (plate debonding) ซึ่งเป็นลักษณะการวิบัติที่สามารถเกิดขึ้นก่อนการวิบัติแบบการฉีกขาดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาเพียงการวิบัติแบบหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (intermediate crack-induced debonding) ซึ่งเป็นลักษณะการวิบัติที่พบได้มากในกรณีที่ยึดแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยใกล้กับฐานรองรับ ทั้งนี้วิศวกรผู้ออกแบบต้องคำนึงถึงการวิบัติแบบเฉือนด้วย เนื่องจากการติดแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยขนานกับท้องคานนั้น ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดของคานเพียงอย่างเดียว แต่ไม่ได้ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงเฉือนของคานจึงมีโอกาสเกิดการวิบัติแบบเฉือนได้ คานคอนกรีตเสริมเหล็กปกตินั้นได้ถูกออกแบบเพื่อให้คานวิบัติโดยโมเมนต์ดัดแทนที่จะเป็นแรงเฉือนซึ่งเป็นพฤติกรรมแบบเปราะ ซึ่งการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยนี้นี้ยังคงใช้หลักการเดียวกันกับการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กปกติ

จากปัญหาที่กล่าวข้างต้น จึงมีการเสนอแบบจำลองในการวิเคราะห์การหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเพื่อป้องกันการวิบัติดังกล่าว ซึ่งวิธีที่ใช้ในวิเคราะห์แบ่งได้เป็น 2 วิธีหลัก คือ วิธีกำลัง (strength approach) และวิธีกลศาสตร์การแตกหัก (fracture mechanics approach) โดยในต่างประเทศได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเป็นจำนวนมาก ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่จะเป็นการวิเคราะห์เพื่อป้องกันการหลุดล่อนที่ปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (plate end debonding) ตรงกันข้ามกับการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยซึ่งยังคงมีงานวิจัยอยู่น้อย ทั้งนี้อาจใช้ข้อแนะนำในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของสถาบันคอนกรีตของอเมริกา (American Concrete Institute [ACI 440.2R-08], 2008) ซึ่งออกแบบโดยวิธีภาวะสุดขีด (limit-states design) เพื่อที่จะป้องกันการหลุดล่อนข้อแนะนำดังกล่าวจึงใช้วิธีจำกัดค่าความเครียดที่แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในการคำนวณกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดของหน้าตัดคานที่เสริมกำลัง

ดังนั้นการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต้องออกแบบให้ป้องกันการวิบัติแบบหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งเป็นพฤติกรรม

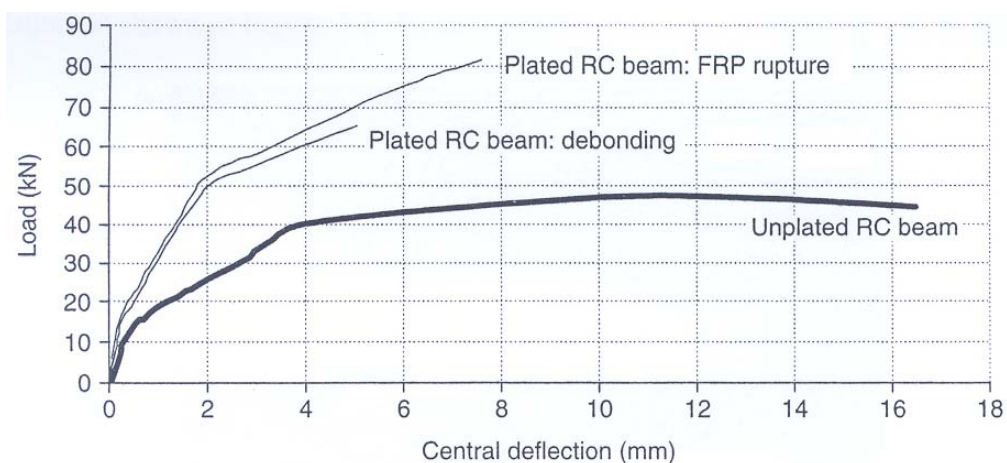
แบบเปราะและเป็นการวิบัติที่เกิดขึ้นก่อนเวลาที่จะเป็น ถ้าผู้ออกแบบไม่มีความรู้ความเข้าใจถึงลักษณะการวิบัติดังกล่าวจะส่งผลให้คานที่ออกแบบมีประสิทธิภาพลดลงแล้ว ยิ่งก่อให้เกิดอันตรายต่อพฤติกรรมโครงสร้างและความปลอดภัยเนื่องจากความเหนียวมีค่าลดลง ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างการยืดเหนียวและการไหลจากการทดสอบแรงเฉือนของรอยต่อยึดเหนียวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตในการคำนวณพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส (interfacial fracture energy) ซึ่งเป็นตัวแปรทางกลศาสตร์การแตกหักร่วมกับการวิเคราะห์หน้าตัด (section analysis) ซึ่งรวมผลของการต้านทานแรงดึง (tension stiffening) ของคอนกรีตเพื่อทำนายว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยสามารถรับแรงกระทำสูงสุดได้เท่าใดในกรณีการวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และประยุกต์ใช้วิธีการดังกล่าวในการศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อแรงกระทำซึ่งทำให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเกิดการวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

## 1.2 ทบทวนวรรณกรรม

การทบทวนวรรณกรรมในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อเสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและลักษณะการวิบัติต่างๆ ที่สามารถเกิดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการวิบัติแบบหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย จากนั้นจึงเป็นการวิเคราะห์เพื่อแก้ปัญหาการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยจะเป็น 2 วิธีหลัก คือ การวิเคราะห์โดยวิธีกำลัง (strength approach) และการวิเคราะห์โดยวิธีกลศาสตร์การแตกหัก (fracture mechanics approach)

### 1.2.1 พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ความสามารถในการรับแรงกระทำของคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย จะมีค่าเพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กปกติที่ความโค้งตัวที่เท่ากัน เนื่องจากแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยนี้จะทำหน้าที่ช่วยรับแรงดึงที่เกิดจากโมเมนต์ดัด เมื่อแรงกระทำเพิ่มมากขึ้นจนเหล็กรับแรงดึงเกิดการครากแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยนี้ยังทำหน้าที่รับแรงดึงส่วนเกินนี้ต่อจนกระทั่งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเกิดการฉีกขาด แต่จะพบว่าคานที่เสริมกำลังนี้จะมีความเหนียวที่ลดลง นั่นคือรูปแบบของการวิบัติเนื่องจากแรงดัดของชิ้นส่วนจะเปลี่ยนจากพฤติกรรมที่มีความเหนียวเป็นแบบเปราะ (Arduini, 1997) ดังแสดงในภาพที่ 1.2



ภาพที่ 1.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการโก่งตัวของคานที่ไม่เสริมกำลังและคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Hua, 1999)

### 1.2.2 ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ความสามารถในการรับน้ำหนักของคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ขึ้นอยู่กับลักษณะการวิบัติที่อาจจะเกิดขึ้นได้ จากงานวิจัยต่างๆพบว่า การวิบัติเนื่องจากแรงดัด (ACI 440.2R-08) (Büyüköztürk และ Hearing, 1998) แบ่งออกเป็น

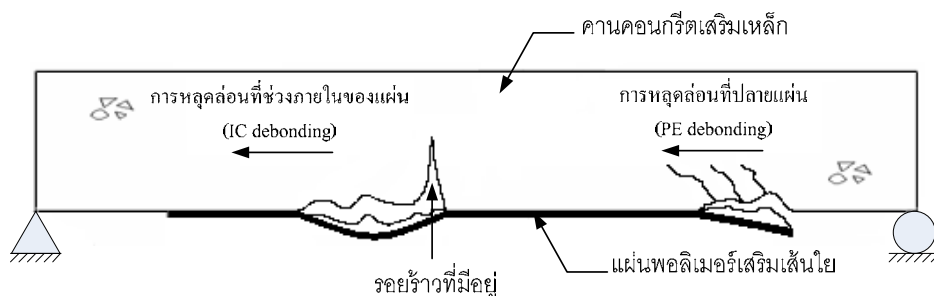
- คอนกรีตถูกบีบอัดจนแตกก่อนการครากของเหล็กเสริม
- เกิดการครากของเหล็กเสริมรับแรงดึงตามด้วยการฉีกขาดของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใย
- เกิดการครากของเหล็กเสริมรับแรงดึงตามด้วยคอนกรีตถูกบีบอัดจนแตก
- การแยกออกของคอนกรีตหุ้ม (cover delamination)
- การหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (FRP debonding)

ทั้งนี้การวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนก็เกิดขึ้นได้ถ้าความสามารถในการรับแรงเฉือนของคานไม่เหมาะสมกับการเพิ่มขึ้นของความสามารถในการรับแรงดัด

### 1.2.3 การวิบัติแบบหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (FRP debonding)

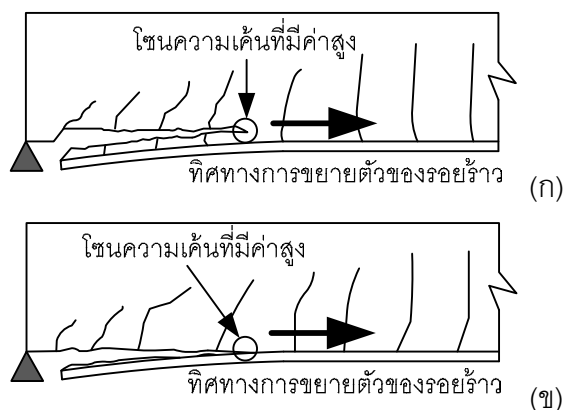
การวิบัติแบบหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Leung, 2001) แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ การวิบัติแบบหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (plate-end debonding, PE debonding) ซึ่งมีทิศทางการหลุดล่อนเคลื่อนที่จากปลายแผ่นเข้าสู่กลางแผ่น และการวิบัติแบบหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (intermediate crack-induced debonding, IC debonding) ซึ่งมีทิศทางการหลุดล่อนเคลื่อนที่จากภายในไปสู่ปลายแผ่น ดังแสดงในภาพที่ 1.3



ภาพที่ 1.3 การวิบัติแบบหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

การวิบัติแบบหลุดล่อนที่ปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Teng และคณะ, 2002) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ 1. การแยกออกของคอนกรีตหุ้ม (concrete cover separation) เกิดจากความเค้นที่ผิวสัมผัส (interfacial stress) ระหว่างคอนกรีตและชั้นวัสดุประสานซึ่งมีค่าสูงมาก อันเนื่องมาจากการขาดตอนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยอย่างกะทันหัน นำไปสู่การเกิดรอยร้าวที่บริเวณปลายแผ่น และเมื่อได้รับแรงกระทำเพิ่มขึ้น รอยร้าวนี้จะขยายตัวขึ้นไปในระดับของเหล็กเสริมรับแรงดึง หลังจากนั้น รอยร้าวก็จะขยายตัวขนานกับระดับของเหล็กเสริมนี้ 2. การหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตและชั้นวัสดุประสานบริเวณปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (plate end interfacial debonding) เกิดจากความเค้นที่ผิวสัมผัส (interfacial stress) ระหว่างคอนกรีตและชั้นวัสดุประสานมีค่าสูงที่บริเวณปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งเมื่อความเค้นนี้มีค่าเกินกว่ากำลังของวัสดุที่อ่อนแอกว่าก็จะเกิดการหลุดล่อนที่วัสดุนั้น โดยทั่วไปจะเกิดการหลุดล่อนที่คอนกรีต การวิบัติลักษณะนี้จะสังเกตได้จากแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่หลุดล่อนออก จะมีชิ้นบางๆของคอนกรีตติดออกมาด้วยดังแสดงในภาพที่ 1.4

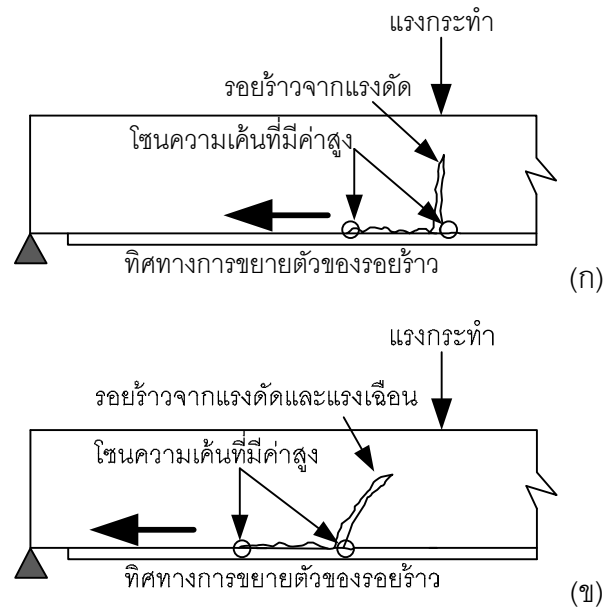


ภาพที่ 1.4 การวิบัติแบบหลุดล่อนที่ปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

(ก) การแยกออกของคอนกรีตหุ้ม

(ข) การหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตและชั้นวัสดุประสาน  
บริเวณปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

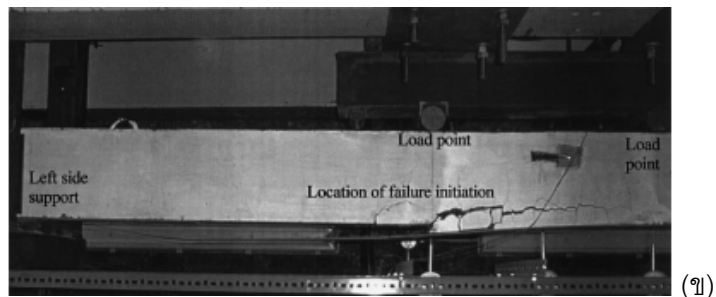
การวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Teng และ คณะ, 2002) แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ 1. การหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเนื่องจากรอยร้าวจากแรงดัด (intermediate flexural crack-induced interfacial debonding) เมื่อรอยร้าวหลักเกิดขึ้นในคอนกรีต ความเค้นดึง (tensile stress) จะถูกปลดปล่อยจากรอยร้าวของคอนกรีตและส่งผ่านไปยังแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ส่งผลให้ที่บริเวณรอยร้าวมีค่าความเค้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตที่สูง โดยเมื่อความเค้นถึงค่าวิกฤติการหลุดล่อนก็จะเริ่มขึ้นที่รอยร้าวและขยายตัวไปทางปลายแผ่นที่ใกล้ 2. การหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเนื่องจากรอยร้าวจากแรงดัดและแรงเฉือน (intermediate flexural shear crack-induced interfacial debonding) มีกลไกการวิบัติแตกต่างกับการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นเนื่องจากรอยร้าวจากแรงดัด โดยความกว้างของรอยร้าวที่กว้างขึ้นเป็นแรงขับเคลื่อนให้เกิดการขยายตัวของการหลุดล่อน แต่สำหรับการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นเนื่องจากรอยร้าวจากแรงดัดและแรงเฉือน การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ในแนวตั้งระหว่างผิวทั้งสองของรอยร้าวทำให้เกิดความเค้นลอกแนวตั้งจากกับผิวสัมผัส (peeling stress) บนผิวสัมผัสระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตจะเป็นแรงขับเคลื่อนให้เกิดการหลุดล่อนและขยายตัว ดังแสดงในภาพที่ 1.5 และภาพที่ 1.6 แสดงการวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากการทดสอบชิ้นตัวอย่างคานของ Fanning และ Kelly (2001) และ Gunes และคณะ (2009)



ภาพที่ 1.5 การวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

(ก) การหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย  
เนื่องจากรอยร้าวจากแรงดัด

(ข) การหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย  
เนื่องจากรอยร้าวจากแรงดัดและแรงเฉือน



ภาพที่ 1.6 การวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจาก  
การทดสอบขึ้นตัวอย่างคาน (ก) ภาพจากงานวิจัยของ Gunes และคณะ (2009)  
(ข) ภาพจากงานวิจัยของ Fanning และ Kelly (2001)

#### 1.2.4 การวิเคราะห์การหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยวิธีกำลัง (strength approach)

Björn Täljsten (1997) ได้เสนอสมการวิเคราะห์ความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉากที่ชั้นของวัสดุประสานในคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเสริมกำลัง ภายใต้แรงกระทำใดๆ แบบจุด โดยมีสมมติฐานว่าค่าสติฟเนสการดัดของคานที่ถูกเสริมกำลังมีค่ามากกว่าสติฟเนสของแผ่นเสริมกำลังมากๆ จึงไม่คิดผลของสติฟเนสของแผ่นเสริมกำลัง และความเค้นในชั้นวัสดุประสานไม่เปลี่ยนแปลงตลอดความหนา โดยใช้ทฤษฎีความยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic theory) รวมทั้งพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตและความโค้งของคาน พบว่าระดับความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉากที่ปลายแผ่นเสริมกำลังขึ้นกับระยะห่างระหว่างฐานรองรับกับปลายสุดของแผ่นเสริมกำลัง โดยระยะห่างนี้ยังมีค่ามากกว่าความเค้นก็จะมีค่าสูง ซึ่งค่าความเค้นเหล่านั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเคลื่อนที่ไปที่กลางคาน อีกทั้งการเพิ่มสติฟเนสของวัสดุประสาน ความหนาของแผ่นเสริมกำลังโมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นเสริมกำลัง หรือลดความหนาของชั้นวัสดุประสาน จะส่งผลให้ค่าความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉากมีค่าเพิ่มมากขึ้น การเปรียบเทียบค่าความเค้นจากวิธีนี้สอดคล้องกับผลจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Malek และคณะ (1998) ได้เสนอแบบจำลองในการคำนวณความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉากที่ผิวสัมผัสของคอนกรีตและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยมีสมมติฐานว่าพฤติกรรมของวัสดุทุกชนิดเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นและไม่ขึ้นกับทิศทาง (isotropic) ไม่เกิดการไถล (slip) ระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยกับคอนกรีต และการกระจายตัวของความเครียดของหน้าตัดเป็นเส้นตรง อีกทั้งยังศึกษาผลกระทบจากรอยร้าวดัด (flexural crack) ขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้น ซึ่งแบบจำลองนี้สามารถคำนวณหาความเค้นเฉือนที่บริเวณรอยร้าวนี้ได้ และได้เสนอสมการอย่างง่ายในการคำนวณค่าความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉากสูงสุด โดยการออกแบบคานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการวิบัติแบบเฉพาะแห่ง หรือการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ต้องพิจารณาทั้งความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉากที่บริเวณปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และที่รอยร้าวดัดซึ่งปรากฏอยู่ตลอดทั้งคาน การเปรียบเทียบค่าความเค้นที่คำนวณจากแบบจำลองนี้ให้ค่าที่สอดคล้องทั้งจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และผลการทดสอบ



Rabinovich และ Frostif (2000) ได้เสนอแบบจำลองเพื่อคำนวณผลเฉลยเชิงวิเคราะห์อันดับสูง (closed-form high-order, CFHO) ในการวิเคราะห์คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งใช้หลักการแปรผันของงานเสมือน (variational principle of virtual work) ความสอดคล้องกันของการเสียรูป และเงื่อนไขขอบเขต ในการสร้างสมการควบคุม (governing equation) โดยมีสมมติฐานว่า ระนาบของหน้าตัดยังคงรักษาระนาบ (plane section remains plane) วิธีการวิเคราะห์อันดับสูงแบบปิด (CFHO) นี้ให้ความเค้นเฉือนที่มีค่าเป็นศูนย์ที่ปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และการกระจายของความเค้นอย่างไม่สม่ำเสมอที่ชั้นวัสดุประสาน เนื่องจากสมมติฐานที่ว่าความเค้นของชั้นวัสดุประสานไม่เปลี่ยนแปลงตลอดความหนาซึ่งเป็นสมมติฐานของแบบจำลองความยืดหยุ่นพื้นฐานส่วนใหญ่ โดยจะส่งผลให้ได้ผลลัพธ์ที่เป็นการประมาณค่าอย่างหยาบ งานวิจัยนี้พบว่าความเค้นที่มีค่าสูงจะแผ่กระจายบริเวณปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเป็นระยะประมาณ 0.8 เท่าของความหนาของชั้นวัสดุประสาน และหายไปเกือบหมดที่ระยะประมาณ 3 - 4 เท่าของความหนาของชั้นวัสดุประสาน การเพิ่มความหนาของชั้นวัสดุประสาน และลดความหนาของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยทำให้ความเค้นที่ปลายลดลงอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งการขยายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยให้ใกล้กับจุดรองรับมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ จะลดค่าความเค้นที่ปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย การเปรียบเทียบความเค้นตั้งฉากของแบบจำลองนี้สอดคล้องกับแบบจำลองความยืดหยุ่นพื้นฐานอื่นๆ และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ให้ความสัมพันธ์ที่ดีที่ระยะจากปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยประมาณ 1 เท่าของความหนาของวัสดุประสาน แต่ที่ระยะจากปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยถึงจุดนี้ความเค้นตั้งฉากจากวิธีวิเคราะห์อันดับสูงและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะให้ค่าทำนายที่สูงกว่าวิธีความยืดหยุ่นพื้นฐาน

Smith และ Teng (2001) ได้ทำการทบทวนงานวิจัยการประมาณผลเฉลยของความเค้นที่ผิวสัมผัส โดยเปรียบเทียบข้อสมมติฐาน และข้อจำกัดของงานวิจัย แล้วทำการเสนอผลเฉลยแบบใหม่ที่มีความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น โดยใช้วิธีในการแก้ปัญหาจากการพิจารณาเงื่อนไขความสอดคล้องกันของการเสียรูป (deformation compatibility condition) ซึ่งมีสมมติฐานว่าคานและแผ่นเสริมกำลังที่เป็นวัสดุประเภทใดก็ได้ ที่มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นรวมถึงวัสดุประสานด้วย การเสียรูปของคานและแผ่นเสริมกำลังเนื่องจากโมเมนต์ดัด แรงตามแนวแกน และแรงเฉือน ความเค้นของชั้นวัสดุประสาน

ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดความหนา ความโค้งของคานและแผ่นเสริมกำลังมีค่าเท่ากันในกรณีหาค่าความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัส จากสมมติฐานดังกล่าวคณะวิจัยได้สร้างสมการในการวิเคราะห์ค่าความเค้นเฉือน และความเค้นตั้งฉากที่ผิวสัมผัสของคานที่เสริมกำลังที่มีฐานรองรับแบบธรรมดา แต่ผลเฉลยจะสมมติว่าไม่เกิดการเสียรูปจากแรงเฉือน อีกทั้งประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตของน้ำหนักกระทำใน 3 กรณี คือ น้ำหนักกระทำแบบคงที่สม่ำเสมอ น้ำหนักกระทำแบบหนึ่งจุดที่ระยะใดๆ และน้ำหนักกระทำแบบสองจุดที่ตำแหน่งสมมาตร ซึ่งจากการเปรียบเทียบค่าความเค้นจากการทำนายด้วยสมการของคณะวิจัยต่างๆ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยการเสียรูปของคานจากแรงดัดและแผ่นเสริมกำลังจากแรงตามแนวแกนมีอิทธิพลอย่างมากต่อค่าความเค้นที่ผิวสัมผัสของคานที่เสริมกำลัง ค่าความเค้นที่ต่างกันนี้เนื่องมาจากการตั้งสมมติฐานที่ต่างกัน ซึ่งการเสียรูปแบบดัดของแผ่นเสริมกำลังเนื่องมาจากความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัสมีความสำคัญมากสำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก วิธีแก้ปัญหาแบบใหม่นี้ได้รวมถึงผลกระทบของการเสียรูปทั้งหมด ยกเว้นการเสียรูปแบบเฉือนซึ่งจะทำให้สมการมีความซับซ้อนหาคำตอบได้ยากจึงสามารถวิเคราะห์ให้ไม่เพียงแต่คานที่เป็นคอนกรีตเท่านั้นแต่เป็นวัสดุประเภทใดก็ได้ที่ยึดเหนี่ยวกับแผ่นเสริมกำลังบาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งแผ่นเสริมกำลังที่ค่อนข้างแข็งแรง

Rahimi และ Hutchinson (2001) ได้ศึกษาและทดสอบการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กยาว 2.3 เมตร ที่เสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมกำลังชนิดต่างๆ โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติแบบไร้เชิงเส้นร่วมกับแบบจำลองความเสียหาย (damage model) ของวัสดุคอนกรีต ในการทำนายแรงปฏิกิริยาของคานที่เสริมกำลัง จากการศึกษาพบว่าค่าสตีเฟนส์และกำลังรับแรงของคานที่เสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมกำลังจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งค่าที่เพิ่มขึ้นนี้ขึ้นอยู่กับค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และจำนวนชั้นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยค่าความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉากที่ปลายแผ่นจะสูงขึ้นตามความหนา และค่าโมดูลัสของวัสดุเสริมกำลังที่เพิ่มขึ้น การวิบัติแบบหลุดล่อนขึ้นกับค่าความเค้นหลัก (principal stress) ที่พื้นผิวสัมผัสของคอนกรีตและวัสดุเสริมกำลังซึ่งตำแหน่งที่แน่นอนที่เกิดการหลุดล่อนขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างรวมทั้งความหนาของวัสดุเสริมกำลัง จากการใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติแบบไร้เชิงเส้นร่วมกับแบบจำลองความเสียหายในการทำนายแรงปฏิกิริยาให้ผลที่สอดคล้องที่ดีกับผลการทดลอง แต่ยังให้ค่าที่คลาดเคลื่อนมากสำหรับกรณีที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก

### 1.2.5 การวิเคราะห์การหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยวิธีกลศาสตร์การแตกหัก (fracture mechanics approach)

Teng และคณะ (2003) ได้ศึกษากลไกการวิบัติแบบหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในคานและแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก อันเนื่องมาจากรอยร้าวจากแรงดัดหรือรอยร้าวจากแรงดัดและแรงเฉือน พบว่ามีความคล้ายคลึงกับการวิบัติแบบหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากการทดสอบแรงเฉือนของรอยต่อยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต (shear test of FRP-to-concrete bonded joint) ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าลึงยึดเหนี่ยวประลัย (ultimate bond strength) โดยทำการปรับปรุงแบบจำลองค่าลึงยึดเหนี่ยว (bond strength model) ของ Chen และ Teng (2001) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่รวมเข้ากับการวิเคราะห์หน้าตัด (section analysis) เพื่อทำนายค่าลึงของคานและแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กในรูปสมการความเค้นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย สำหรับการวิบัติแบบหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย จากพฤติกรรมการหลุดล่อนที่มีความคล้ายคลึงกันแต่ก็มีความแตกต่างที่สำคัญของกรณีทั้งสอง เช่น การเสียรูปเนื่องจากแรงดัด และการเสริมเหล็กเสริมซึ่งปรากฏอยู่ในคานแต่ไม่ปรากฏในรอยต่อยึดเหนี่ยวจากการทดสอบแรงเฉือน และการสมมติระนาบของหน้าตัดยังคงรักษาระนาบในการวิเคราะห์หน้าตัดซึ่งในความเป็นจริงแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยบริเวณรอยร้าวดัดหลักได้หลุดล่อนออกจากคอนกรีตแล้ว โดยพฤติกรรมที่แตกต่างทั้งหมดจะสมมติให้แสดงด้วยสัมประสิทธิ์  $\alpha$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.48 ในการทำนายความเค้นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยพร้อมทั้งเสนอขั้นตอนการออกแบบคานที่เสริมกำลังรับแรงดัดด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเพื่อป้องกันการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

Leung และ Yang (2006) ได้เสนอแบบจำลองในการวิเคราะห์การหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ปลอกคอนกรีตโดยวิธีพลังงาน (energy-based approach) ซึ่งการหลุดล่อนถูกจำลองว่าเป็นการขยายตัวของรอยร้าวตามผิวสัมผัสของคอนกรีตหรือวัสดุเชื่อมประสาน โดยการขยายตัวของรอยร้าวจะเกิดขึ้นเมื่อการปลดปล่อยพลังงานสุทธิ (net energy release) ของระบบเท่ากับพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส (interfacial fracture energy) แบบจำลองอย่างง่ายพิจารณาจากปลอกคอนกรีตซึ่งติดแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ท้อง ภายใต้แรงดัดกระทำที่ปลายด้านใดด้านหนึ่งของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยสมมติว่าคอนกรีตและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยรับความเค้นโดยตรง (direct stress) เท่านั้น ส่วนวัสดุประสานรับเฉพาะแรงเฉือน ความเค้นและการเคลื่อนที่มีความสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดของชิ้นส่วนคอนกรีตและความหนาของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และไม่พิจารณาผลของแรงดัดในคอนกรีต ลักษณะแบบจำลองอย่างง่ายนี้ คล้ายคลึงกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยซึ่งเกิดรอยร้าวภายใต้แรงดัด โดยวิเคราะห์ทั้งในกรณีที่พิจารณาและไม่พิจารณาผลของการอ่อนลงที่ผิวสัมผัส (interfacial softening) พบว่าการวิเคราะห์โดยวิธีพลังงานมีความสอดคล้องกันโดยตรงกับการวิเคราะห์โดยวิธีกำลังสำหรับพฤติกรรมการอ่อนลงใดๆ (arbitrary softening) ตามผิวสัมผัส การกำหนดกำลังรับแรงเฉือนประสิทธิผลที่ผิวสัมผัส (effective interfacial shear strength) อย่างเหมาะสมทำให้การวิเคราะห์โดยวิธีกำลังให้ผลลัพธ์เช่นเดียวกับการวิเคราะห์โดยวิธีพลังงาน อีกทั้งใช้เกณฑ์การพิจารณาการหลุดล่อนโดยวิธีพลังงาน อธิบายค่าความเค้นเฉือนจากการทดลองที่มีค่าสูงโดยสูงกว่ากำลังรับแรงเฉือน (shear strength) ของคอนกรีต สามารถบอกเป็นนัยว่าการวิบัติแบบหลุดล่อนน่าจะเกี่ยวข้องกับพลังงานมากกว่ากำลัง ซึ่งเกณฑ์การพิจารณาการหลุดล่อนโดยวิธีกำลัง การหลุดล่อนจะเกิดขึ้นเมื่อความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัสมากกว่ากำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต

Lu และคณะ (2007) ได้เสนอแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้วิธี smeared crack สำหรับรอยร้าวในคอนกรีต เพื่อจำลองกระบวนการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ร่วมกับแบบจำลองการยึดเหนี่ยวและการไถล (bond-slip model) ที่ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต โดยกำหนดชิ้นส่วนผิวสัมผัส (interface element) ซึ่งอยู่ระหว่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเพื่อจำลองพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวและการไถลของผิวสัมผัส แบบจำลองการยึดเหนี่ยวและการไถลสองแบบที่แตกต่างกันถูกใช้สำหรับบริเวณรอยร้าวดัดหลักและบริเวณที่เหลือของคาน โดยการหลุดล่อนเกิดขึ้นเมื่อการไถลภายในชิ้นส่วนผิวสัมผัสระหว่างผิวทั้งสองของรอยร้าวดัดหรือก็คือความกว้างของรอยร้าวดัดมีค่าเกินกว่าสองเท่าของการไถลที่ความเค้นเฉือนสูงสุดที่ผิวสัมผัส ทั้งนี้ยังได้เสนอแบบจำลองทางกำลัง (strength model) โดยอาศัยการกระจายของความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัสจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการสร้างสมการทำนายความเครียดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่หน้าตัดวิกฤติซึ่งทำให้เกิดการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้น

ใยที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยการทำนายการวิบัติแบบหลุดล่อนจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และแบบจำลองทางกำลังให้ผลสอดคล้องที่ดีกับผลการทดลอง

Niu และ Wu (2007) ได้เสนอระเบียบวิธีวิเคราะห์เพื่อทำนายการวิบัติแบบหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ช่วงภายในสำหรับคานคองกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังรับแรงดัดด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยใช้แนวคิดทางกลศาสตร์การแตกหักและการวิเคราะห์หน้าตัด กลไกการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเริ่มต้นจากปลายรอยร้าวตัดใกล้กับบริเวณที่มีค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดซึ่งมีพฤติกรรมคล้ายกับการแตกหักที่ผิวสัมผัสในชั้นของคองกรีตแบบโหมดเฉือนในระนาบหรือโหมดที่ 2 ซึ่งคุณสมบัติการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคองกรีตสามารถหาจากการทดสอบแรงเฉือนของรอยต่อยึดเหนี่ยว อย่างไรก็ตามผลกระทบจากโมเมนต์ดัด การกระจายรอยร้าวและเงื่อนไขขอบเขตที่แตกต่างของโครงสร้างรับแรงดัด ทำให้การส่งผ่านความเค้นระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคองกรีตอาจจะแตกต่างจากการทดสอบแรงเฉือน แต่จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยวิธี discrete crack กรณีรอยร้าวเดี่ยว (unique localized crack) ในคาน พบว่าการกระจายของความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัสมีลักษณะเหมือนกันในคานที่เสริมกำลังและชั้นตัวอย่างที่ทดสอบแรงเฉือน โดยกระบวนการหลุดล่อนในกรณีรอยร้าวเดี่ยวหรือรอยร้าวจำนวนมาก (multiple cracks) ที่มีระยะห่างมากจะคล้ายคลึงกับการทดสอบแรงเฉือน ในขณะที่รอยร้าวที่มีระยะห่างน้อยการขยายตัวของรอยร้าวจะถูกต้านทานโดยรอยร้าวที่อยู่ใกล้เคียงทำให้ความเค้นดึงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีค่าสูงขึ้น ซึ่งในความเป็นจริงรอยร้าวจำนวนมากในคองกรีตจะเกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นจากแบบจำลองในการวิเคราะห์จึงสมมติให้รอยร้าวกระจายไปทั่วทั้งคานอย่างสม่ำเสมอ (smeared crack) โดยการวิบัติแบบหลุดล่อนเกิดขึ้นเมื่อผลต่างของแรงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยระหว่างรอยร้าวตัดสองรอยที่ห่างกันเท่ากับระยะส่งผ่านเทียบเท่า (equivalent transfer length) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับแรงกระทำประลัย (ultimate load) จากการทดสอบแรงเฉือน ซึ่งเสนอระยะส่งผ่านเทียบเท่าที่มีค่าเป็นสองเท่าของระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพ (effective bond length) จากการทดสอบแรงเฉือน จากวิธีวิเคราะห์เพื่อทำนายแรงกระทำวิบัติของคานที่เสริมกำลังรับแรงดัดด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยซึ่งให้ผลสอดคล้องที่ดีกับผลการทดสอบจากงานวิจัยในอดีต

Achintha และ Burgoyne (2008) ได้เสนอแบบจำลองในการทำนายแรงกระทำที่จะทำให้เกิดการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่คานคอนกรีตเสริมเหล็ก อีกทั้งพิจารณาถึงผลกระทบของตำแหน่งลึกลงปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อลักษณะการวิบัติแบบหลุดล่อน สำหรับคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่เฉพาะต้องคานเท่านั้น โดยใช้หลักการสมดุลพลังงานโดยรวมซึ่งเป็นพื้นฐานของกลศาสตร์การแตกหัก ในการตอบคำถามที่ว่า “รอยแตกร้าวนี้จะขยายตัวเมื่อใด” ซึ่งหาค่าอัตราการปลดปล่อยพลังงาน (energy release rate) จากความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ตัดและความโค้งของหน้าตัดคานที่เสริมกำลัง โดยไม่พิจารณาว่าแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยนั้นเป็นเหล็กเสริมชั้นหนึ่งของคอนกรีตแต่พิจารณาว่าแรงดึงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยนั้นเป็นแรงอัดที่กระทำกับคอนกรีต อีกทั้งยังพิจารณาผลการต้านทานแรงดึง (tension stiffening) ของคอนกรีต โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองของแบรนสัน (Branson's model) ในการวิเคราะห์หน้าตัดคานคอนกรีตในช่วงที่แตกร้าวเป็นบางส่วน รอยร้าวจะเกิดการขยายตัวก็ต่อเมื่อพลังงานที่พร้อมจะนำมาใช้มากกว่าพลังงานที่ต้องการในการก่อตัวของรอยร้าวแห่งใหม่ที่ผิว นั่นก็คืออัตราการปลดปล่อยพลังงานมากกว่าพลังงานต้านทานการแตกหัก (fracture toughness energy) โดยสมมติว่าการเสียรูปที่ปลายรอยร้าวเกิดจากโหมดเปิดหรือโหมดที่ 1 เท่านั้น

Gunes, Buyukozturk และ Karaca (2009) ได้พัฒนาแบบจำลองทางกลศาสตร์การแตกหักแบบใหม่ที่ใช้หลักการสมดุลพลังงานโดยรวมของระบบ ในการทำนายแรงที่ทำให้เกิดการวิบัติแบบหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยพิจารณาการกระจายพลังงาน (energy dissipation) ระหว่างที่เกิดการหลุดล่อนซึ่งเป็นคุณสมบัติที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อพลังงานโดยรวมของระบบ แบบจำลองนี้สามารถใช้วิเคราะห์คานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่มีการเสริมกำลังทั้งแรงเฉือนและ/หรือแรงดัดที่มีการยึดรั้ง (bond anchorage) ป้องกันการหลุดล่อน ค่าการสลายพลังงานโดยรวมขณะที่เกิดการหลุดล่อนประกอบด้วยค่าการสลายพลังงานจากขบวนการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่พื้นผิวรอยร้าว และค่าการสลายพลังงานแบบพลาสติกเนื่องจากการครากของเหล็กเสริมกำลัง โดยหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะโก่งตัวของคาน ซึ่งสมมติว่ามีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรงคู่ (bilinear) วัสดุเป็นแบบเนื้อเดียว (homogeneous material) และยึดหยุ่นเชิงเส้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าคงที่ และค่าสตีเฟนส์ในขณะที่ลดแรงลง (unloading) มีค่าเท่ากับค่าสตีฟ-

เนสช่วงก่อนถึงเหล็กคานาในขณะที่ยังให้แรง ซึ่งค่าการสลายพลังงานโดยรวมนี้จะเท่ากันกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ระหว่างเกิดการหลุดล่อน ในกรณีที่คุณควบคุมระยะเคลื่อนตัว (displacement control) จากการที่คานาที่เสริมกำลังได้มีการยึดรั้งป้องกันการหลุดล่อนอย่างเพียงพอ การเสียรูปที่ปลายรอยร้าวจึงสมมติว่าเกิดจากโหมดเฉือนในระนาบหรือโหมดที่ 2 เท่านั้น อีกทั้งยังได้เสนอขั้นตอนการออกแบบคานาที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย เพื่อป้องกันการหลุดล่อนโดยพิจารณาถึงผลกระทบของการเสริมกำลังรับแรงเฉือน และการยึดรั้งที่ปลายแผ่นซึ่งพัฒนามาจากแบบจำลองดังกล่าว

### 1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

- 1.3.1 เพื่อศึกษาลักษณะการวิบัติแบบหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในคานาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
- 1.3.2 เพื่อศึกษากระบวนการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในรอยต่อยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคานาคอนกรีต
- 1.3.3 เพื่อศึกษาหลักการกลศาสตร์การแตกหักสำหรับทำนายการวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
- 1.3.4 เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
- 1.3.5 เพื่อศึกษาความเหมาะสมของข้อเสนอแนะโดยสถาบันคอนกรีตของอเมริกา (ACI 440.2R-08) ในการออกแบบเพื่อป้องกันการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

### 1.4 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตการศึกษาของการวิจัยนี้ได้แก่

- 1.4.1 ศึกษาเฉพาะคานาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า และมีฐานรองรับแบบธรรมดา (simply supported beam) รูปแบบแรงกระทำประกอบด้วยน้ำหนักกระทำแบบหนึ่งจุดที่กึ่งกลางคานา และน้ำหนักกระทำแบบสองจุดที่ตำแหน่งสมมาตร

- 1.4.2 พิจารณาเฉพาะการวิบัติแบบหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (intermediate crack-induced debonding)
- 1.4.3 พิจารณาเฉพาะการให้แรงกระทำในระยะเวลาคู่สั้น (short term loading)
- 1.4.4 พิจารณาเฉพาะแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ไม่ถูกอัดแรง และไม่มี การติดตั้งตัวยึดทางกล (mechanical fasteners) เพื่อช่วยเพิ่มการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
- 1.4.5 พิจารณาเฉพาะคานคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งไม่มีความเครียดเริ่มต้นในเนื้อคอนกรีต (initial strain) และไม่มีรอยร้าวเกิดขึ้น (existing crack) ก่อนการติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

## 1.5 แนวทางดำเนินการวิจัย

แนวทางในการดำเนินการวิจัยทำโดย

- 1.5.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.2 ศึกษากระบวนการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในรอยต่อยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต
- 1.5.3 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้งของหน้าตัดคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
- 1.5.4 คำนวณพลังงานต้านทานการแตกหักและแรงกระทำสูงสุดที่สามารถส่งผ่านของรอยต่อยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต (maximum transferable load) โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างการยึดเหนี่ยวและการไหลเฉพาะแห่ง
- 1.5.5 ทำนายแรงกระทำที่ทำให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเกิดการวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
- 1.5.6 เปรียบเทียบความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองกับผลการทดสอบในวรรณกรรม
- 1.5.7 ศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
- 1.5.8 สรุปผลการศึกษาวิจัย



## บทที่ 2

### แบบจำลองโมเมนต์ดัดและความโค้งของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดและความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งเหมือนกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีการเสริมกำลัง ดังนั้นพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดและการวิเคราะห์โมเมนต์ดัดและความโค้งของคานคอนกรีตเสริมเหล็กจึงถูกศึกษาก่อนเป็นอันดับแรก หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์หน้าตัดเพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยมีสมมติฐาน คือ 1. การกระจายของความเครียดบนหน้าตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นแบบเชิงเส้น 2. ไม่เกิดการไถลระหว่างเหล็กเสริมและคานคอนกรีต 3. ไม่เกิดการไถลระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคานคอนกรีต และ 4. ไม่พิจารณากำลังรับแรงดึงของวัสดุเชื่อมประสาน

#### 2.1 พฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

พิจารณาคาน คสล. ที่มีฐานรองรับแบบธรรมดา เมื่อกานเริ่มรับน้ำหนักบรรทุกที่มีค่าน้อย คานจะเกิดการโก่งตัวโดยที่หลังคานถูกอัดและที่ท้องคานถูกดึง ภายใต้การสมมติว่าคานคอนกรีตและเหล็กเสริมมีการยึดเหนี่ยวสมบูรณ์ ความเครียดที่คานคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ตำแหน่งเดียวกันจึงมีค่าเท่ากัน ซึ่งถ้าเพิ่มน้ำหนักบรรทุกลงไปเรื่อยๆจนกระทั่งความเค้นที่ปลายสุดของท้องคานมีค่าเท่ากับกำลังต้านทานแรงดึงของคานคอนกรีต (modulus of rupture,  $f_r$ ) ซึ่งค่าโมเมนต์ที่ทำให้ความเค้นที่ปลายสุดของท้องคานมีค่าเท่ากับกำลังต้านทานแรงดึงของคานคอนกรีต เป็นสาเหตุให้เกิดการแตกร้าวครั้งแรกจึงเรียกโมเมนต์นี้ว่าโมเมนต์ดัดแตกร้าว ( $M_{cr}$ ) ดังนั้นหน้าตัดของคานจะไม่แตกร้าว (uncracked section) เมื่อโมเมนต์ดัดกระทำ (applied moment,  $M_{app}$ ) มีค่าต่ำกว่าโมเมนต์ดัดแตกร้าว จากนั้นเพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไปอีกหน้าตัดก็จะเกิดการแตกร้าวเพิ่มขึ้นส่งผลให้สติฟเนสของคานลดลง อย่างไรก็ตามยังคงต้องพิจารณาถึงผลของแรงดึงในคานคกริต (tension stiffening) เนื่องจากการกระจายของความเค้น (stress distribution) ของหน้าตัดจะเห็นว่ายังมีคานคกริตบางส่วนที่ต้านทานแรงดึงดังแสดงในภาพที่ 2.1 จนกระทั่งหน้าตัดไม่มีคานคกริตใดที่ต้านทานแรงดึง ส่งผลให้แรงดึงทั้งหมดรับโดยเหล็กเสริมเท่านั้น เมื่อเหล็กเสริมเกิดการครากจะสมมติว่าหน้าตัดเกิดการแตกร้าวอย่างสมบูรณ์ (fully-cracked section) โดยจะเรียกโมเมนต์นี้ว่าโมเมนต์ดัดที่เหล็กเสริมรับแรงดึงเริ่มคราก ( $M_y$ ) ซึ่งหลังจากนี้คานยังรับโมเมนต์ดัดได้อีกเล็กน้อย



## 2.2 แบบจำลองโมเมนต์ดัดและความโค้งของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

จากพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถวิเคราะห์หน้าตัดตามระดับการแตกร้าวโดยแบ่งเป็น หน้าตัดยังไม่แตกร้าว (uncracked section) หน้าตัดแตกร้าวบางส่วน (partially-cracked section) และหน้าตัดแตกร้าวอย่างสมบูรณ์ (fully-cracked section)

### 2.2.1. หน้าตัดยังไม่แตกร้าว และหน้าตัดแตกร้าวอย่างสมบูรณ์

จากข้อสมมติฐานระนาบของหน้าตัดยังคงรักษาระนาบ และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ การวิเคราะห์สมมูลของแรงในหน้าตัดยังไม่แตกร้าวและแตกร้าวอย่างสมบูรณ์ ทำได้โดยเริ่มจากพิจารณาการกระจายของความเครียดของหน้าตัดซึ่งเป็นเส้นตรง เนื่องจากระนาบของหน้าตัดยังคงรักษาระนาบซึ่งจะมีตัวแปรที่ไม่รู้ค่าสองตัว คือ ความเครียดที่ผิวของท้องคานและหลังคาน จากนั้นใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ เปลี่ยนการกระจายของความเครียดเป็นการกระจายของความเค้น ซึ่งจากความเค้นดังกล่าวก็จะสามารถคำนวณหาแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและเหล็กเสริม โดยเนื้อแกนสะเทินจะเป็นส่วนที่รับแรงอัด และได้แกนสะเทินเป็นส่วนที่รับแรงดึงของหน้าตัด ทำการปรับค่าความเครียดที่ผิวของท้องคานและ/หรือหลังคานจะกระทำแรงภายในหน้าตัดอยู่ในสมมูล ซึ่งในที่นี้พิจารณากรณีหน้าตัดคาน คสล. ทั่วไปจึงไม่มีแรงตามแนวแกน ดังนั้นเมื่อแรงภายในหน้าตัดอยู่ในสมมูลก็จะสามารถหาความโค้งจากการกระจายของความเครียด และโมเมนต์ดัดที่ทำให้เกิดความโค้งดังกล่าวจากแรงภายในหน้าตัด หลักการวิเคราะห์หน้าตัดทั้งสองแบบจะเหมือนกันแต่จะต่างกันที่การกระจายของความเค้นของหน้าตัดแตกร้าวอย่างสมบูรณ์ จะไม่มีผลของแรงดึงในคอนกรีต ดังแสดงในภาพที่ 2.3 ซึ่งโมเมนต์ดัดที่เหล็กเสริมรับแรงดึงเริ่มคราก ( $M_y$ ) จะทำการกำหนดความเครียดที่เหล็กเสริมรับแรงดึงให้เท่ากับความเครียดครากของเหล็กเสริม ส่วนในกรณีโมเมนต์ดัดแตกร้าว ( $M_{cr}$ ) จะทำการกำหนดความเครียดที่ผิวของท้องคานให้เท่ากับ ความเครียดของกำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต ( $\epsilon_r = f_r / E_c$ ) ซึ่งจะทำให้ตัวแปรที่ไม่รู้ค่าเหลือเพียงตัวเดียวคือ ความเครียดที่ผิวของหลังคาน โดยการวิเคราะห์หน้าตัดยังไม่แตกร้าวจะใช้กับหน้าตัดที่มีโมเมนต์ดัดกระทำ ( $M_{app}$ ) มีค่าต่ำกว่าโมเมนต์ดัดแตกร้าว ( $M_{cr}$ ) และการวิเคราะห์หน้าตัดแตกร้าวอย่างสมบูรณ์จะใช้กับหน้าตัดที่มีโมเมนต์ดัดกระทำซึ่งมีค่ามากกว่าโมเมนต์ดัดที่เหล็กเสริมรับแรงดึงเริ่มคราก



การกระจายความโค้งตลอดความยาวของคานาขึ้นกับข้อมูลการโก่งตัว (deflection) ซึ่งเดิมที่แนวคิดการปรับปรุงค่าสติฟเนสนั้น ใช้กับการประมาณค่าการโก่งตัวของคานาคอนกรีตที่เกิดการแตกร้าว โดยในที่นี้จะเรียกสติฟเนสของหน้าตัดแตกร้าวบางส่วนที่ถูกปรับปรุงว่าสติฟเนสประสิทธิผล (effective stiffness) ซึ่งการหาค่าดังกล่าวจะประยุกต์ใช้แบบจำลองโมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผลของแบรนสัน (Branson's effective moment of inertia model) (Branson, 1968) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใช้หาค่าการโก่งตัวของคานาที่ได้รับการยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลาย

### 2.2.3. แบบจำลองโมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผลของแบรนสัน

จากข้อมูลผลทดสอบจำนวนมาก แบรนสันพบว่าโมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผล (effective of inertia,  $I_{eff}$ ) ของหน้าตัดแตกร้าวบางส่วนของคานาคอนกรีตสามารถหาจากการประมาณค่าในช่วง (interpolation) ระหว่างสองขอบเขต คือ หน้าตัดยังไม่แตกร้าว และหน้าตัดแตกร้าวอย่างสมบูรณ์ ซึ่งการประมาณค่าในช่วงนี้ขึ้นอยู่กับความขยายตัวของรอยร้าวในหน้าตัดแสดงโดยสัมประสิทธิ์การประมาณค่า ( $C$ )

$$I_{eff} = CI_g + (1 - C)I_{cr} \quad \text{เมื่อ } M_{app} > M_{cr} \quad (2.1)$$

$$C = \left( \frac{M_{cr}}{M_{app}} \right)^4 \quad (2.2)$$

โดย  $M_{cr}$  และ  $M_{app}$  คือ โมเมนต์ดัดแตกร้าว และโมเมนต์ดัดที่กระทำ ตามลำดับ  $I_g$  และ  $I_{cr}$  คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดทั้งหมด และหน้าตัดแปลงแตกร้าว ตามลำดับ

วิธีของแบรนสันทั้ง  $I_g$  และ  $M_{cr}$  ตั้งอยู่บนพื้นฐานของการวิเคราะห์แบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear-elastic analysis) ขณะที่การวิเคราะห์แบบยืดหยุ่นแตกร้าว (cracked-elastic analysis) ใช้ในการคำนวณ  $I_{cr}$  ทั้งนี้ค่า  $I_g$  และ  $I_{cr}$  เป็นค่าคงที่สำหรับหน้าตัดคานาใดๆ

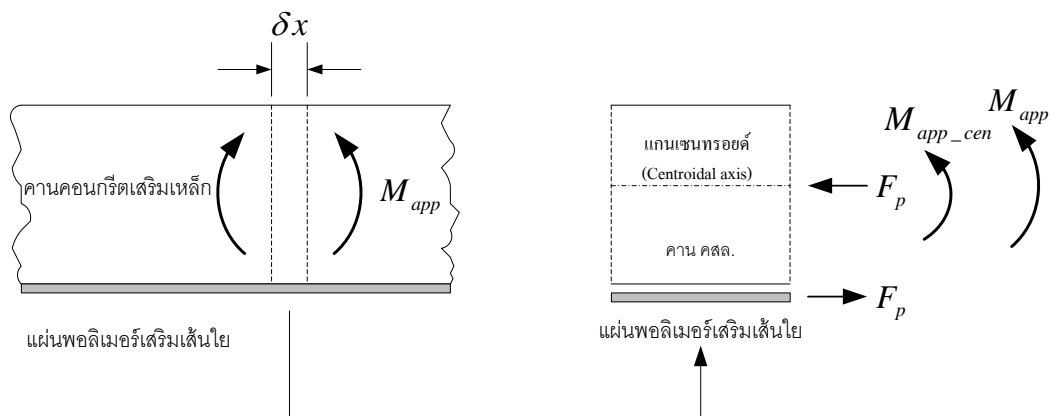
จากสมการที่ (2.1) ความโค้งของหน้าตัดแตกร้าวบางส่วนคำนวณโดย

$$\kappa = \frac{M_{app}}{E_c I_{eff}} \quad (2.3)$$

โดย  $E_c$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

## 2.3 แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

เนื่องจากการพิจารณาแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเป็นเหล็กเสริมชั้นที่สองในแบบจำลองของแบรินสันนั้นไม่ถูกต้อง ยิ่งไปกว่านั้นกลไกการส่งผ่านความเค้นจากคอนกรีตไปยังแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแตกต่างจากคอนกรีตไปยังเหล็กเสริม อีกทั้งไม่น่าจะมีผลของการต้านทานแรงดึงของคอนกรีต ดังนั้นจึงพิจารณาแรงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเป็นแรงอัดภายนอก และโมเมนต์ดัดที่ต้องถูกต้านทานโดยหน้าตัดคานคอนกรีตเสริม ดังแสดงในภาพที่ 2.4 จากหลักการดังกล่าวทำให้การแก้ปัญหาง่ายขึ้น โดยพิจารณาหน้าตัดของคานเป็นหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กเท่านั้นโดยที่ไม่มีแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งแรงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจะไปกระทำที่หน้าตัดเหมือนกับกรณีคอนกรีตอัดแรง (prestressed concrete)



$F_p$  = แรงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

$M_{app}$  = โมเมนต์ดัดภายนอก (external moment) ที่กระทำบนหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

$M_{app\_cen}$  = โมเมนต์ดัดที่กระทำบนหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กรอบแกนเซนทรอยด์

ภาพที่ 2.4 แรงและโมเมนต์ดัดกระทำบนชิ้นส่วนหน้าตัดคาน คสล. ที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

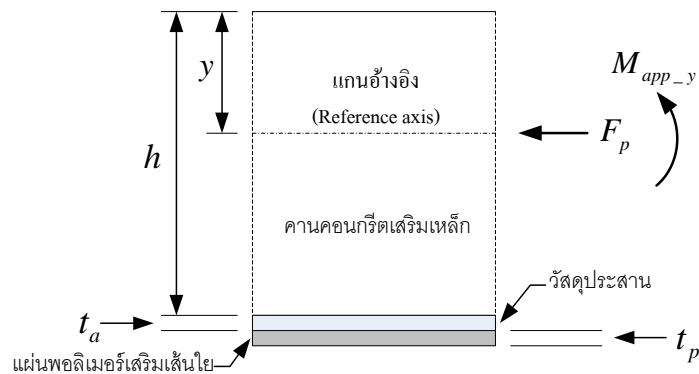
### 2.3.1 โมเมนต์ดัดที่กระทำเฉพาะบนหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กปกติ จะมีเพียงโมเมนต์ดัดกระทำเท่านั้นซึ่งสามารถพิจารณาเป็นแรงคู่ควมธรรมดา จึงไม่จำเป็นต้องระบุแกนที่โมเมนต์กระทำ แต่ในที่นี้เป็นกรณีวิเคราะห์หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้โมเมนต์ดัด และแรงตามแนวแกนซึ่งความสัมพันธ์ข้างต้นจะไม่เป็นจริง โดยโมเมนต์ดัดภายนอกที่กระทำบน

หน้าตัด ( $M_{app}$ ) คือโมเมนต์ซึ่งถูกต้านทานโดยการรวมกันของคาน คสล. และแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย แต่โมเมนต์ที่กระทำเฉพาะบนหน้าตัดคาน คสล. ขึ้นกับการกำหนดแกนอ้างอิงที่โมเมนต์กระทำ ซึ่งถ้ากำหนดแกนเป็นระยะ  $y$  จากหลังคาน จะได้โมเมนต์ที่กระทำรอบแกน  $y$  ( $M_{app-y}$ ) ดังแสดงในภาพที่ 2.5 และแสดงเป็นสมการโดย

$$M_{app-y} = M_{app} - F_p \times (h + t_a + t_p / 2 - y) \quad (2.4)$$

โดย  $h$ ,  $t_a$  และ  $t_p$  คือ ความลึกของหน้าตัดคานคอนกรีต ความหนาของชั้นวัสดุประสาน และความหนาของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ตามลำดับ



ภาพที่ 2.5 โมเมนต์ดัดที่กระทำเฉพาะบนหน้าตัดของชิ้นส่วนคาน คสล.

### 2.3.2 แรงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

เนื่องจากสมมติฐานที่ว่าไม่เกิดการไถลระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตหรือก็คือแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นความสอดคล้องของความเครียดระหว่างคานคอนกรีตและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์หน้าตัด โดยความเครียดและความโค้งจะขึ้นอยู่กับแรงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยซึ่งจะเป็นตัวแปรหลักที่ถูกปรับค่าจนกระทั่งเงื่อนไขความสอดคล้องของความเครียดเป็นจริง สมการที่ใช้ในการคำนวณจะกล่าวหลังจากนี้โดยจะใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการแก้ปัญหา ซึ่งเมื่อได้แรงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ถูกต้องก็จะสามารถคำนวณหาความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

## 2.4 คุณสมบัติของวัสดุ

### 2.4.1 คอนกรีต (Concrete)

จากภาพที่ 2.6 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีต เมื่อรับแรงกดอัดตามแนวแกน (uniaxial compression) โดยความสัมพันธ์เกือบจะเป็นเส้นตรง จากจุดเริ่มต้นที่รับน้ำหนักจนถึงระดับของความเค้น ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุด ( $f'_c$ ) ซึ่งในงานวิจัยนี้กำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตคำนวณจากแห่งทดสอบทรงกระบอกมาตรฐาน หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มความเค้นมากขึ้นความสัมพันธ์จะกลายเป็นไร้เชิงเส้น (non-linear) เพราะว่าเกิดการเติบโตของรอยร้าวขนาดไมโคร การวิเคราะห์จะใช้เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่พัฒนาโดย Hognestard (Park และ Paulay, 1975) ซึ่งในช่วงจากจุดเริ่มต้นถึงกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุด แสดงโดยสมการเป็น

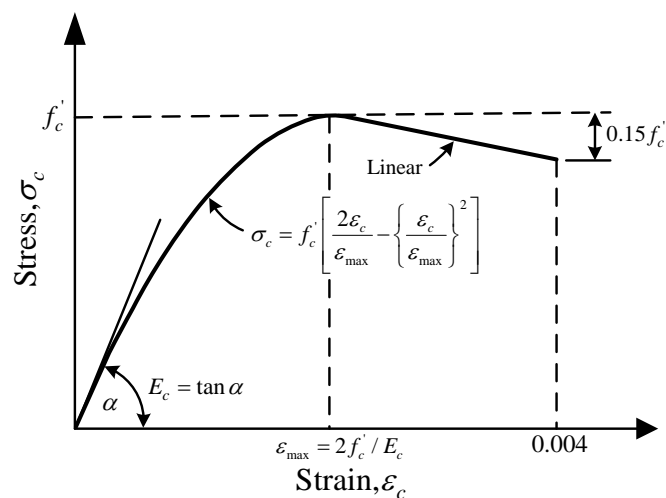
$$\sigma_c = f'_c \left[ \frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{\max}} - \left\{ \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{\max}} \right\}^2 \right] \quad \text{เมื่อ } \varepsilon_c \leq \varepsilon_{\max} \quad (2.5)$$

$$\sigma_c = f'_c \left[ 1 - \frac{0.15}{0.004 - \varepsilon_{\max}} (\varepsilon_c - \varepsilon_{\max}) \right] \quad \text{เมื่อ } \varepsilon_{\max} < \varepsilon_c \leq 0.004 \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_{\max} = \frac{2f'_c}{E_c} \quad (2.7)$$

โดย  $\sigma_c$  และ  $\varepsilon_c$  คือ ความเค้นและความเครียดที่จุดใดๆ ตามลำดับ

$\varepsilon_{\max}$  คือ ความเครียดที่ความเค้นสูงสุด ( $f'_c$ )



ภาพที่ 2.6 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีต ( $\sigma - \varepsilon$  relationships of concrete)



เนื่องจากงานวิจัยนี้สนใจวิเคราะห์การหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งเป็นการวิบัติก่อนกำหนด โดยจะเกิดก่อนที่คอนกรีตถูกบีบอัดจนแตก ดังนั้นเส้นโค้งความสัมพันธ์ที่ลาดลงหลังจากจุดซึ่งคอนกรีตมีกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดจึงไม่จำเป็นต้องพิจารณา ทั้งนี้คอนกรีตในส่วนที่รับแรงดึงจะถูกสมมติว่ามีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น โดยกำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต (modulus of rupture,  $f_r$ ) และโมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elastic,  $E_c$ ) โดยปกติจะใช้ซีแคนท์โมดูลัส (secant modulus) คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นตรงที่ลากจากจุดเริ่มต้นกับจุดใดๆ ที่ต้องการซึ่งในที่นี้ใช้ค่า 0.45 เท่าของกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตอ้างอิงตามสถาบันคอนกรีตของอเมริกา

$$f_r = 0.62\sqrt{f'_c} \quad (2.8)$$

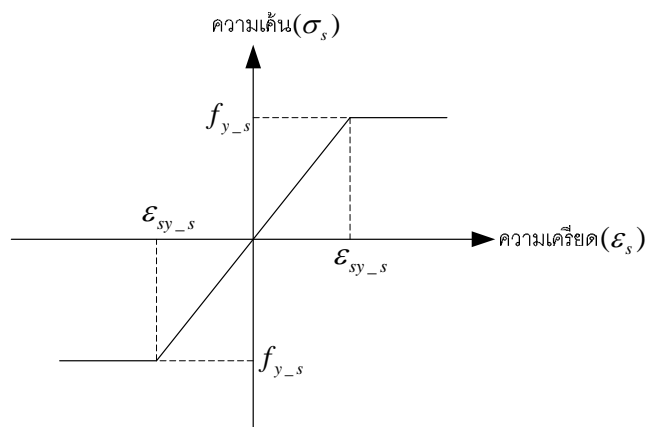
$$E_c = 4733\sqrt{f'_c} \quad (2.9)$$

โดย  $f'_c$  คือ กำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต (จากแท่งตัวอย่างทรงกระบอก)

(หน่วย นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)

#### 2.4.2 เหล็ก (Steel)

ภาพที่ 2.7 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กเมื่อรับแรงดึงหรือแรงอัดตามแนวแกน โดยเหล็กจะถูกสมมติว่ามีพฤติกรรมแบบพลาสติกยืดหยุ่นอย่างสมบูรณ์ (elastic-perfectly plastic behavior) ซึ่ง  $f_{y-s}$  คือ กำลังคราก (yield stress) และ  $E_s$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่น ในกรณีรับแรงดึงและแรงอัด

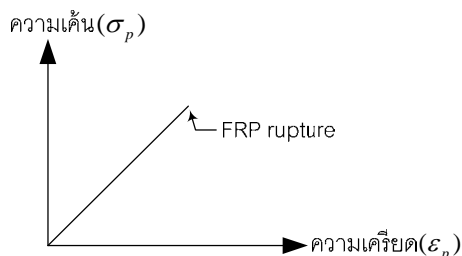


ภาพที่ 2.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็ก

( $\sigma - \epsilon$  relationships of steel)

### 2.4.3 แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (FRP)

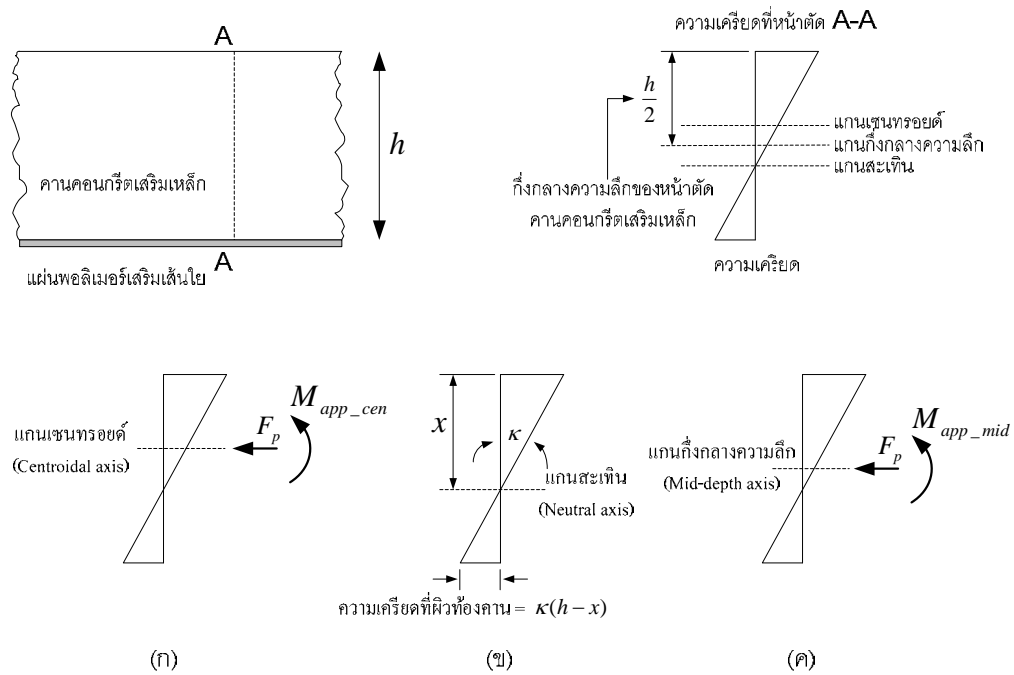
ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยชนิดต่างๆ เมื่อรับแรงดึงเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นจนกระทั่งฉีกขาด (rupture) ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ( $\sigma - \epsilon$  relationships of FRP)

### 2.5 แกนเซนทรอยด์ แกนสะเทิน และแกนกึ่งกลางความลึก (Centroidal / Neutral and Mid-depth axis)

สำหรับคานทั่วไปไม่จำเป็นที่ต้องระบุแกนสำหรับคำนวณโมเมนต์ดัด เพราะว่าแรงดึงและแรงอัดเป็นแรงคู่ขนานทำให้เกิดโมเมนต์คู่ควบ อย่างไรก็ตามในกรณีที่มีแรงตามแนวแกน การระบุแกนอ้างอิงสำหรับโมเมนต์ดัดจึงมีความจำเป็น จากสมมติฐานที่ว่าระนาบของหน้าตัดยังคงรักษารูปแบบทำให้การกระจายของความเครียดเปลี่ยนแปลงในลักษณะเส้นตรง ผลกระทบของแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดสามารถถูกแยกโดยการเลือกแกนเซนทรอยด์ ( $\int ydA = 0$ , โดย  $A$  คือพื้นที่หน้าตัด) สำหรับหน้าตัดตามขวางของวัสดุที่มีโมดูลัสยืดหยุ่นต่างกัน จุดเซนทรอยด์สามารถระบุโดยใช้วิธีหน้าตัดแปลง (transformed-section method) ซึ่งวิธีนี้สามารถใช้กับหน้าตัดแต่กร้าวได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามสำหรับวัสดุไร้เชิงเส้นที่โมดูลัสเปลี่ยนแปลงตามความเค้น ดังนั้นตำแหน่งจุดเซนทรอยด์จะไม่คงที่เนื่องจากโมเมนต์ดัดที่กระทำมีค่าต่างกัน ส่งผลให้ไม่มีตำแหน่งจุดเซนทรอยด์ที่เจาะจงซึ่งเป็นคุณสมบัติของหน้าตัดที่สามารถใช้เป็นแกนอ้างอิงสำหรับระบุโมเมนต์ดัดได้อย่างเหมาะสม เพื่อเอาชนะปัญหานี้แกนอ้างอิงที่เจาะจงสำหรับโมเมนต์ดัด จึงถูกเลือกโดยใช้จุดกึ่งกลางความลึกเป็นแกนของหน้าตัดคานและโมเมนต์ดัดจะถูกคำนวณรอบจุดนี้ (ระบุโดยตัวห้อย mid) แกนทั้งสามแสดงดังภาพที่ 2.9 ระยะของแกนสะเทินซึ่งเป็นตำแหน่งที่ความเครียดมีค่าเป็นศูนย์ จำเป็นต้องรู้ค่าเนื่องจากความเครียดที่ผิวของท้องคาน (extreme tensile fibre) และระยะของแกนสะเทินใช้ในการคำนวณความโค้ง ( $\kappa$ ) ดังแสดงในภาพที่ 2.9(ข)



ภาพที่ 2.9 แกนต่างๆ บนหน้าตัดคาน (ก) แกนเซนทรอยด์ (ข) แกนสะเทิน (ค) แกนกึ่งกลางความลึก

### 2.6 การปรับปรุงสัมประสิทธิ์การประมาณค่า (Modified interpolation coefficient)

เมื่อนำหน้าตัดคาน คสล. แตรกร้าวเพิ่มขึ้น ความสามารถในการรับแรงดึงของคอนกรีตก็จะลดลงจนกระทั่งไม่สามารถรับแรงดึงได้ จากแบบจำลองของแบรนสันซึ่งการประมาณค่าในช่วงของสติฟเนส (stiffness interpolation) ขึ้นกับระดับการแตกกร้าวของหน้าตัดหรือก็คือสัดส่วนระหว่างโมเมนต์ดัดแตกกร้าว ( $M_{cr}$ ) และโมเมนต์ดัดที่กระทำ ( $M_{app}$ ) ซึ่งเส้นตรงสติฟเนสของหน้าตัดจะพุ่งเข้าหาจุดที่เป็นสภาวะแตกกร้าวอย่างสมบูรณ์ แต่ไม่ตัดผ่านจุดนี้ เนื่องจากแบบจำลองนี้แสดงถึงหน้าตัดภายใต้แรงในสภาวะใช้งานจริง ซึ่งมีค่าต่ำกว่าจะทำให้เหล็กเสริมเกิดการคราก แต่สำหรับกรณีคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย เหล็กเสริมรับแรงดึงจะเกิดการครากและแรงส่วนเกินจะรับโดยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ส่งผลให้เส้นตรงสติฟเนสจะต้องตัดผ่านจุดที่เป็นสภาวะแตกกร้าวอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงสัมประสิทธิ์การประมาณค่า ให้เป็นฟังก์ชันของโมเมนต์ดัดที่กระทำ ( $M_{app}$ ) โมเมนต์ดัดแตกกร้าว ( $M_{cr}$ ) และโมเมนต์ดัดที่เหล็กเสริมรับแรงดึงเริ่มคราก ( $M_y$ ) แต่จากหัวข้อที่ 2.5 เนื่องจากพฤติกรรมไร้เชิงเส้นของหน้าตัดทำให้การเลือกแกนเซนทรอยด์ หรือแกนสะเทินเป็นแกนอ้างอิงในการเปรียบเทียบโมเมนต์ดัดที่กระทำจากแรงกระทำค่าต่างๆนั้นไม่ถูกต้อง จึงใช้ระยะกึ่งกลางความลึกเป็นแกนอ้างอิง ซึ่งสัมประสิทธิ์การประมาณค่าที่ถูกปรับปรุง ( $C_K$ ) โดย Achintha และ Burgoyne (2008) เขียนได้เป็น

$$C_K = \left( \frac{M_{cr\_mid}}{M_{app\_mid}} \right)^4 \left\{ 1 - \left( \frac{M_{app\_mid} - M_{cr\_mid}}{M_{y\_mid} - M_{cr\_mid}} \right)^4 \right\} \quad (2.10)$$

โดย  $M_{cr\_mid}$ ,  $M_{app\_mid}$  และ  $M_{y\_mid}$  คือ โมเมนต์ดัดแตกร้าวม โมเมนต์ที่กระทำ และโมเมนต์ที่เหล็กเสริมรับแรงดึงเริ่มครากรอบแกนกึ่งกลางความลึก ตามลำดับ

เมื่ออัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ดัดที่เหล็กเสริมรับแรงดึงเริ่มคราก ต่อโมเมนต์ดัดแตกร้าวม รอบแกนกึ่งกลางความลึก ( $M_{y\_mid} : M_{cr\_mid}$ ) มีค่ามากกว่า 3 ซึ่งเป็นกรณีสำหรับคาน คสล. ใช้งานจริงส่วนใหญ่ ความแตกต่างระหว่างสมการที่ (2.2) กับสมการที่ (2.10) สามารถละทิ้งได้ การวิเคราะห์ห้หน้าตัดไม่แตกร้าวมทำโดยกำหนดให้ความเครียดที่ผิวของท้องคานมีค่าเท่ากับ ความเครียดที่กำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต ( $\epsilon_r$ ) เพื่อใช้ในการคำนวณหาโมเมนต์ดัดแตกร้าวม รอบแกนกึ่งกลางความลึก ( $M_{cr\_mid}$ ) ขณะที่การวิเคราะห์ห้หน้าตัดแตกร้าวมอย่างสมบูรณ์ ทำโดย กำหนดให้เหล็กเสริมรับแรงดึงมีความเครียดที่จุดคราก เพื่อใช้ในการคำนวณหาโมเมนต์ดัดที่เหล็กเสริมรับแรงดึงเริ่มครากรอบแกนกึ่งกลางความลึก ( $M_{y\_mid}$ )

## 2.7 การวิเคราะห์ห้หน้าตัดไม่แตกร้าวมและหน้าตัดแตกร้าวมอย่างสมบูรณ์

การวิเคราะห์ห้หน้าตัดไม่แตกร้าวม และหน้าตัดแตกร้าวมอย่างสมบูรณ์ของคานที่เสริมกำลัง ภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจะคล้ายคลึงกับคานปกติทั่วไป แต่จะคำนึงถึงแรงอัดตาม แนวแกนที่เพิ่มเติมขึ้นมา ซึ่งก็คือแรงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากการสมมติ ( $F_{p\_assu}$ ) โดย จากโมเมนต์ดัดที่กระทำและแรงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่สมมติ จะสามารถคำนวณหา ความเครียดของคอนกรีตที่ระดับเดียวกับแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยได้ ในบริเวณที่แผ่นพอลิ- เมอร์เสริมเส้นใยยึดเหนี่ยวอย่างสมบูรณ์ สามารถนำความโค้งมาแปลงเป็นแรงในแผ่นพอลิเมอร์ เสริมเส้นใยได้ทันที โดยจะเรียกว่าแรงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากการคำนวณ ( $F_{p\_ana}$ ) แสดงโดย

$$F_{p\_ana} = E_p A_p \kappa (h + t_a + t_p / 2 - x) \quad (2.11)$$

โดย  $x$ ,  $A_p$  และ  $E_p$  คือ ความลึกของแกนสะเทิน พื้นที่หน้าตัดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และ โมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ตามลำดับ

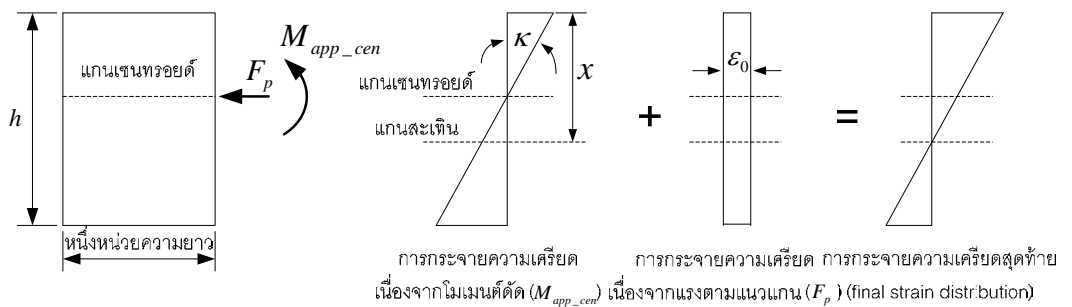
ซึ่งระบบจะอยู่ในสมดุลเมื่อแรงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากการสมมติ และแรงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากการคำนวณมีค่าเท่ากัน โดยวิธีนี้ไม่เพียงสามารถใช้กับหน้าตัดไม้แตกร้าและหน้าตัดแตกร้าอย่างสมบูรณ์ แต่ยังสามารถประยุกต์ใช้กับหน้าตัดแตกร้าบางส่วน

**2.8 จุดเซนทรอยด์เทียบเท่าสำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (Equivalent centroid for RC beam)**

สำหรับคานยึดหยุ่นเชิงเส้นผลกระทบของแรงตามแนวแกน และโมเมนต์ดัดสามารถแยกออกจากกันโดยการเลือกแกนเซนทรอยด์ (centroidal axis) แต่สำหรับหน้าตัดคาน คสล. ซึ่งวัสดุไม่ยึดหยุ่นเชิงเส้นหลักการของจุดเซนทรอยด์จะไม่มี ความหมาย เนื่องจากวัสดุไร้เชิงเส้นตำแหน่งจุดเซนทรอยด์ที่แท้จริงนั้นไม่มีอยู่ จึงต้องกำหนดจุดเซนทรอยด์เทียบเท่า (equivalent centroid) เพื่อใช้ในการประเมินพลังงานให้ถูกต้องแม่นยำ โดยจุดเซนทรอยด์เทียบเท่าของหน้าตัดไม้แตกร้าและหน้าตัดแตกร้าอย่างสมบูรณ์จะใช้วิธีหน้าตัดแปลง (transformed section) ส่วนหน้าตัดแตกร้าบางส่วนจะคำนวณโดยการประมาณค่าในช่วงระหว่างหน้าตัดไม้แตกร้า และหน้าตัดแตกร้าอย่างสมบูรณ์

**2.8.1 หน้าตัดไม้แตกร้า (Uncracked section)**

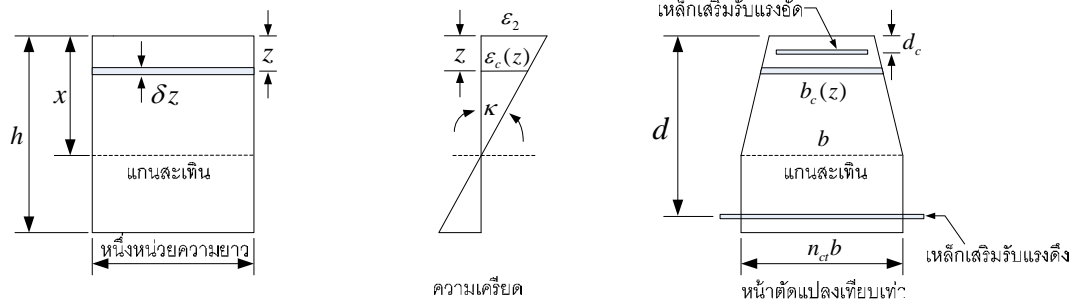
การวิเคราะห์จะสมมติการกระจายของความเครียดดังแสดงในภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 การกระจายของความเครียดเนื่องจากโมเมนต์ดัดและแรงตามแนวแกน

**2.8.1.1 ความกว้างเทียบเท่าของคอนกรีตบริเวณรับแรงอัด**

ซีแกนที่โมดูลัสที่ความลึก  $z$  วัดจากหลังคาน ( $E_c(z)$ ) จะต้องรู้ก่อนเพื่อใช้คำนวณความกว้างแปลงเทียบเท่า ( $b_c(z)$ ) ที่สอดคล้องกัน โดยจะเทียบกับโมดูลัสอ้างอิง ( $E_{c0}$ ) หรือก็คือซีแกนที่โมดูลัสเริ่มต้น ดังแสดงในภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 หน้าตัดแปลงเทียบเท่า (สำหรับหน้าตัดไม้แตรกร้าว)

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีต สมการที่ (2.5)

$$\sigma_c = f'_c \left[ \frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{\max}} - \left\{ \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{\max}} \right\}^2 \right] \quad \text{เมื่อ } \varepsilon_c \leq \varepsilon_{\max}$$

ให้  $\sigma_c(z)$  และ  $\varepsilon_c(z)$  แทน ความเค้นและความเครียดที่ความลึก  $z$  จะได้

$$E_c(z) = \frac{\sigma_c(z)}{\varepsilon_c(z)} = f'_c \left[ \frac{2}{\varepsilon_{\max}} - \frac{\varepsilon_c(z)}{\varepsilon_{\max}^2} \right] \quad (2.12)$$

โมดูลัสอ้างอิง ( $E_{c0}$ ) แสดงโดย

$$E_{c0} = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} \Big|_{\varepsilon_c=0} = \frac{2f'_c}{\varepsilon_{\max}} \quad (2.13)$$

ความกว้างแปลงเทียบเท่าที่ความลึก  $z$  ( $b_c(z)$ ) แสดงโดย (ดังภาพที่ 2.11)

$$b_c(z) = \frac{E_c(z)}{E_{c0}} b \quad (2.14)$$

แทนสมการที่ (2.12) และ (2.13) ในสมการที่ (2.14) จะได้

$$b_c(z) = \left( 1 - \frac{\varepsilon_c(z)}{2\varepsilon_{\max}} \right) b \quad (2.15)$$

โดย  $\varepsilon_c(z)$  คำนวณจากความโค้ง ( $\kappa$ ) ความเครียดที่ผิวของหลังคาน ( $\varepsilon_2$ ) และความลึก  $z$  จะได้ (ดังภาพที่ 2.10)

$$\varepsilon_c(z) = \varepsilon_2 \left( 1 - \frac{z}{x} \right) \quad (2.16)$$

ดังนั้นแทนสมการที่ (2.16) ในสมการที่ (2.15) จะได้

$$b_c(z) = \left( 1 - \frac{\varepsilon_2 \left( 1 - \frac{z}{x} \right)}{2\varepsilon_{\max}} \right) b \quad (2.17)$$

### 2.8.1.2 ความกว้างเทียบเท่าของคอนกรีตบริเวณรับแรงดึงและพื้นที่เทียบเท่าของเหล็กเสริม

การรับแรงดึงของคอนกรีตจะถูกสมมติว่าเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นที่ไม่มีดูลัสเท่ากับซีคอนที่มีดูลัสที่ 0.45 เท่าของกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต ส่วนเหล็กเสริมทั้งในส่วนที่รับแรงดึง และแรงอัดจะสมมติว่าเป็นพลาสติกยืดหยุ่นอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นด้วยวิธีหน้าตัดแปลงจะแปลงเนื้อที่หน้าตัดของเหล็กเสริมให้เป็นเนื้อที่หน้าตัดของคอนกรีตตามอัตราส่วนโมดูลัส (modular ratio)

ให้  $n_{ct}$  และ  $n_s$  คือ อัตราส่วนโมดูลัสของคอนกรีตที่รับแรงดึง และเหล็กเสริมตามลำดับ

$$n_{ct} = \frac{E_c}{E_{c0}} \quad \text{และ} \quad n_s = \frac{\bar{E}_s}{E_{c0}} \quad (2.18)$$

โดย  $\bar{E}_s$  คือ ซีคอนที่มีดูลัสของเหล็กเสริม

$$\begin{aligned} \text{ถ้า } \varepsilon_s < \varepsilon_{sy\_s} & \quad \bar{E}_s = E_s \\ \text{มิฉะนั้น} & \quad \bar{E}_s = \frac{f_{y\_s}}{\varepsilon_s} \end{aligned} \quad (2.19)$$

โดย  $f_{y\_s}$  และ  $\varepsilon_s$  คือ ความเค้นคราก และความเครียดของเหล็กเสริมตามลำดับ

ระยะจุดเซนทรอยด์เทียบเท่าของหน้าตัดไม้แตกร้าวน ( $\alpha_{uc}$ ) ซึ่งวัดจากหลังคาน แสดงเป็นสมการโดย

$$\alpha_{uc} = \frac{n_s A_s d + n_s A_{sc} d_c + n_{ct} b(h-x) \left( h - \frac{1}{2}(h-x) \right) + \int_0^x b_c(z) z dz}{n_s A_s + n_s A_{sc} + n_{ct} b(h-x) + \int_0^x b_c(z) dz} \quad (2.20)$$

โดย  $A_s$  และ  $A_{sc}$  คือ พื้นที่ของเหล็กเสริมรับแรงดึงและแรงอัด ตามลำดับ  
 $x$  คือ ความลึกของแกนสะเทิน

## 2.8.2 หน้าตัดแตกร้าวนอย่างสมบูรณ์ (Fully-cracked section)

การคำนวณระยะจุดเซนทรอยด์เทียบเท่าของหน้าตัดแตกร้าวนอย่างสมบูรณ์ ( $\alpha_{fc}$ ) ทำในลักษณะเดียวกันกับกรณีหน้าตัดไม้แตกร้าวนแต่จะไม่พิจารณาผลของคอนกรีตรับแรงดึงจากสมการที่ (2.30) จะได้

$$\alpha_{fc} = \frac{n_s A_s d + n_s A_{sc} d_c + \int_0^x b_c(z) z dz}{n_s A_s + n_s A_{sc} + \int_0^x b_c(z) dz} \quad (2.21)$$

## 2.9 โมเมนต์ดัดกระทำรอบแกนเซนทรอยด์เทียบเท่า

เมื่อรู้ค่าโมเมนต์ดัดกระทำเนื่องจากแรงภายนอกบนหน้าตัด ( $M_{app}$ ) และตำแหน่งแกนเซนทรอยด์ ( $\alpha$ ) ไม่ว่าจะที่สภาวะแตกร้าวนใดๆ ของหน้าตัด โมเมนต์ดัดกระทำรอบแกนเซนทรอยด์เทียบเท่า ( $M_{app\_cen}$ ) แสดงเป็นสมการโดย

$$M_{app\_cen} = M_{app} - F_p \times (h + t_a + t_p / 2 - \alpha) \quad (2.22)$$

## 2.10 การปรับปรุงแบบจำลองของแบรินสันในการวิเคราะห์หน้าตัดแตกร้าวนบางส่วน

จากหัวข้อที่ 2.8 สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กปกติ หน้าตัดแตกร้าวนบางส่วนจะใช้แบบจำลองของแบรินสันในการวิเคราะห์ แต่ในงานวิจัยนี้เป็นคาน คสล. ที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจึงต้องทำการปรับปรุงสัมประสิทธิ์การประมาณค่า ( $C$ ) ก่อนนำมาประยุกต์ใช้เพื่อการวิเคราะห์



### 2.10.1. แกนเซนทรอยด์ประสิทธิผล (Effective centroidal axis)

จากแบบจำลองของ Sakai และ Kakuta (1980) ซึ่งคำนวณหาตำแหน่งแกนเซนทรอยด์ สำหรับคาน คสล. ปกติภายใต้โมเมนต์ดัดและแรงตามแนวแกน โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองของแบรนสัน และพบว่าตำแหน่งเซนทรอยด์ของหน้าตัดแตกร้าบางส่วนสามารถระบุจากการประมาณค่าในช่วงระหว่างหน้าตัดไม่แตกร้า และหน้าตัดแตกร้าอย่างสมบูรณ์ได้เช่นกันแสดงเป็นสมการโดย

$$\alpha_{eff} = C_{\alpha_{SK}} \alpha_{uc} + (1 - C_{\alpha_{SK}}) \alpha_{fc} \quad (2.23)$$

$$C_{\alpha_{SK}} = \left( \frac{M_{cr}}{M_{app}} \right)^{m'} \quad (2.24)$$

โดย  $\alpha_{eff}$  คือ ความลึกของแกนเซนทรอยด์ประสิทธิผลของหน้าตัดแตกร้าบางส่วน

กำลังของ  $m'$  ในสัมประสิทธิ์การประมาณค่าพบว่าเป็นตัวเลขระหว่าง  $m-1$  กับ  $m$  โดย  $m$  คือ กำลังที่ใช้ในแบบจำลองของแบรนสันนั่นก็คือ 4 สำหรับกรณีความโค้งเฉพาะแห่ง และ 3 สำหรับกรณีการโก่งตัวโดยรวม

Achintha และ Burgoyne (2008) ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองของ Sakai และ Kakuta สำหรับคำนวณหาระยะจุดเซนทรอยด์ประสิทธิผลของหน้าตัดแตกร้าบางส่วน แต่สัมประสิทธิ์การประมาณค่าใช้เลขยกกำลังเท่ากับ 3.5 แสดงโดยสมการ

$$\alpha_{eff} = C_{\alpha} \alpha_{uc} + (1 - C_{\alpha}) \alpha_{fc} \quad (2.25)$$

$$C_{\alpha} = \left( \frac{M_{cr\_mid}}{M_{app\_mid}} \right)^{3.5} \left\{ 1 - \left( \frac{M_{app\_mid} - M_{cr\_mid}}{M_{y\_mid} - M_{cr\_mid}} \right)^{3.5} \right\} \quad (2.26)$$

### 2.10.2. แกนสะเทินประสิทธิผล (Effective neutral axis)

ตำแหน่งแกนสะเทินสำหรับหน้าตัดไม่แตกร้าและหน้าตัดแตกร้าอย่างสมบูรณ์ ( $x_{uc}$  และ  $x_{fc}$ ) สามารถคำนวณได้จากกรวิเคราะห์หน้าตัด ส่วนหน้าตัดแตกร้าบางส่วน แกนสะเทินประสิทธิผล ( $x_{eff}$ ) คำนวณจากการประมาณค่าในช่วงระหว่างหน้าตัดไม่แตกร้า และหน้าตัดแตกร้าอย่างสมบูรณ์ในลักษณะเดียวกับการหาจุดเซนทรอยด์ประสิทธิผลดังสมการ

$$x_{eff} = C_{\alpha} x_{uc} + (1 - C_{\alpha}) x_{fc} \quad (2.27)$$

โดย  $C_{\alpha}$  คือสัมประสิทธิ์การประมาณค่าตามสมการที่ (2.26)

### 2.10.3. สติฟเนสยืดหยุ่นเทียบเท่า (Equivalent elastic stiffness)

ความโค้งของชิ้นส่วนคานสำหรับหน้าตัดไม้แตกร้าและหน้าตัดแตกร้าอย่างสมบูรณ์ ( $\kappa_{uc}$  และ  $\kappa_{fc}$ ) สามารถคำนวณจากการวิเคราะห์หน้าตัดโดยตรง สำหรับหน้าตัดคานยืดหยุ่นเชิงเส้นความโค้งของหน้าตัดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.9) คืออัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ดัด ( $M$ ) กับสติฟเนส ( $EI$ )

$$\kappa = \frac{M}{EI}$$

ดังนั้นสำหรับหน้าตัดแตกร้าบางส่วน เมื่อทราบค่าโมเมนต์ดัดกระทำรอบแกนเซนทรอยด์เทียบเท่า ( $M_{app\_cen}$ ) และสติฟเนสของหน้าตัดก็จะสามารถคำนวณความโค้งได้ แต่เนื่องจากเป็นหน้าตัดไรเชิงเส้น (non-linear section) ความสัมพันธ์แบบเทียบเท่าสามารถเขียนเป็นสมการได้โดย

$$\kappa = \frac{M_{app\_cen}}{B} \quad (2.28)$$

โดย  $B$  คือ สติฟเนสยืดหยุ่นเทียบเท่าซึ่งเปลี่ยนแปลงตามแรงกระทำ

สำหรับโมเมนต์ดัดกระทำรอบแกนเซนทรอยด์เทียบเท่าและความโค้ง ทั้งกรณีหน้าตัดไม้แตกร้าและหน้าตัดแตกร้าอย่างสมบูรณ์ สามารถหาได้ทันทีจากการวิเคราะห์หน้าตัดดังนั้นสติฟเนสยืดหยุ่นเทียบเท่าคำนวณจากสมการดังนี้

$$B_{uc} = \frac{M_{app\_cen\_uc}}{\kappa_{uc}} \quad \text{และ} \quad B_{fc} = \frac{M_{app\_cen\_fc}}{\kappa_{fc}} \quad (2.29)$$

โดย  $B_{uc}$  และ  $B_{fc}$  คือ สติฟเนสยืดหยุ่นเทียบเท่าของหน้าตัดไม้แตกร้าและหน้าตัดแตกร้าอย่างสมบูรณ์ ตามลำดับ

สติฟเนสยืดหยุ่นเทียบเท่าประสิทธิผล ( $B_{eff}$ ) สำหรับหน้าตัดแตกร้าบางส่วน คำนวณจากการประมาณค่าในช่วงระหว่างหน้าตัดไม่แตกร้า และหน้าตัดแตกร้าอย่าง สมบูรณ์แสดงเป็นสมการโดย

$$B_{eff} = C_K B_{uc} + (1 - C_K) B_{fc} \quad (2.30)$$

โดย  $C_K$  คือสัมประสิทธิ์การประมาณค่าตามสมการที่ (2.10)

ดังนั้นความโค้งของหน้าตัดแตกร้าบางส่วน คือ

$$\kappa = \frac{M_{app\_cen}}{B_{eff}} \quad (2.31)$$

#### 2.10.4. แรงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

จากหัวข้อที่ 2.7 แสดงวิธีการคำนวณหาแรงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยสำหรับ หน้าตัดไม่แตกร้า และหน้าตัดแตกร้าอย่างสมบูรณ์สำหรับทั้งกรณีแผ่นพอลิ- เมอร์เสริมเส้นใยยึดเหนี่ยวอย่างสมบูรณ์ และแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยหลุดล่อน ซึ่งแรงในแผ่น พอลิเมอร์เสริมเส้นใยของหน้าตัดแตกร้าบางส่วน คำนวณด้วยวิธีการเดียวกันกับที่แสดง ในหัวข้อที่กล่าวมา

### 2.11 แบบจำลองโมเมนต์ดัดและความโค้งของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลัง ภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

การวิเคราะห์จะเริ่มจากโมเมนต์ดัดกระทำ ( $M_{app}$ ) ซึ่งรู้ค่า และแรงในแผ่นพอลิเมอร์เสริม เส้นใยจากการสมมติ ( $F_{p\_assu}$ ) ทั้งนี้แบบจำลองนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้กับคานที่ติดแผ่นพอลิ- เมอร์เสริมเส้นใยหลายชั้นได้ จากหัวข้อทั้งหมดที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถอธิบายขั้นตอนในการ คำนวณโมเมนต์ดัด และความโค้งของหน้าตัดคานคกรตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่น พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแสดงเป็นแผนผังดังภาพที่ 2.12 โดยจะแบ่งตามสภาวะการแตกร้า แต่ก่อนอื่นจะต้องจำแนกสภาวะการแตกร้า จากหัวข้อ 2.5 ที่อธิบายถึงความสำคัญของแกนอ้างอิงซึ่งจะ ทำการเปรียบเทียบโมเมนต์ดัดรอบแกนกึ่งกลางความลึก นั่นก็คือถ้าโมเมนต์ดัดกระทำมีค่าน้อย กว่าโมเมนต์ดัดแตกร้าโดยโมเมนต์ดัดทั้งสองค่ากระทำรอบแกนกึ่งกลางความลึก (Mid-depth axis) จะเป็นหน้าตัดไม่แตกร้า ( $M_{app\_mid} < M_{cr\_mid}$ ) โมเมนต์ดัดกระทำมีค่าระหว่างโมเมนต์ ดัดแตกร้าและโมเมนต์ดัดที่เหล็กเสริมรับแรงดึงเริ่มครากรอบแกนกึ่งกลางความลึก จะเป็นหน้า

ตัดแตกบางส่วน ( $M_{cr\_mid} < M_{app\_mid} < M_{y\_mid}$ ) หรือโมเมนต์ดัดกระทำมีค่ามากกว่าโมเมนต์ดัดที่เหล็กเสริมรับแรงดึงเริ่มครากรอบแกนกึ่งกลางความลึก จะเป็นหน้าตัดแตกกว้างอย่างสมบูรณ์ ( $M_{app\_mid} > M_{y\_mid}$ ) แต่ในงานวิจัยนี้จะจำแนกสภาวะการแตกกว้างโดยการพิจารณาโมเมนต์ดัดของทั้งหน้าตัดซึ่งรวมแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ( $M_{cr}$ ,  $M_y$  และ  $M_{app}$ ) แล้วจึงเปรียบเทียบในลักษณะเดียวกัน

### 2.11.1. หน้าตัดไม่แตกกว้าง (Uncracked section)

เนื่องจากเป็นช่วงที่วัสดุยังคงแสดงพฤติกรรมเชิงเส้น จึงใช้การประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (linear interpolation) บนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง ที่จุดซึ่งโมเมนต์ดัดเริ่มต้น (มีค่าเท่ากับศูนย์) กับโมเมนต์ดัดแตกกว้าง ( $M_{cr}$ ) ในการคำนวณค่าความโค้ง ( $\kappa$ ) ของโมเมนต์ดัดกระทำ

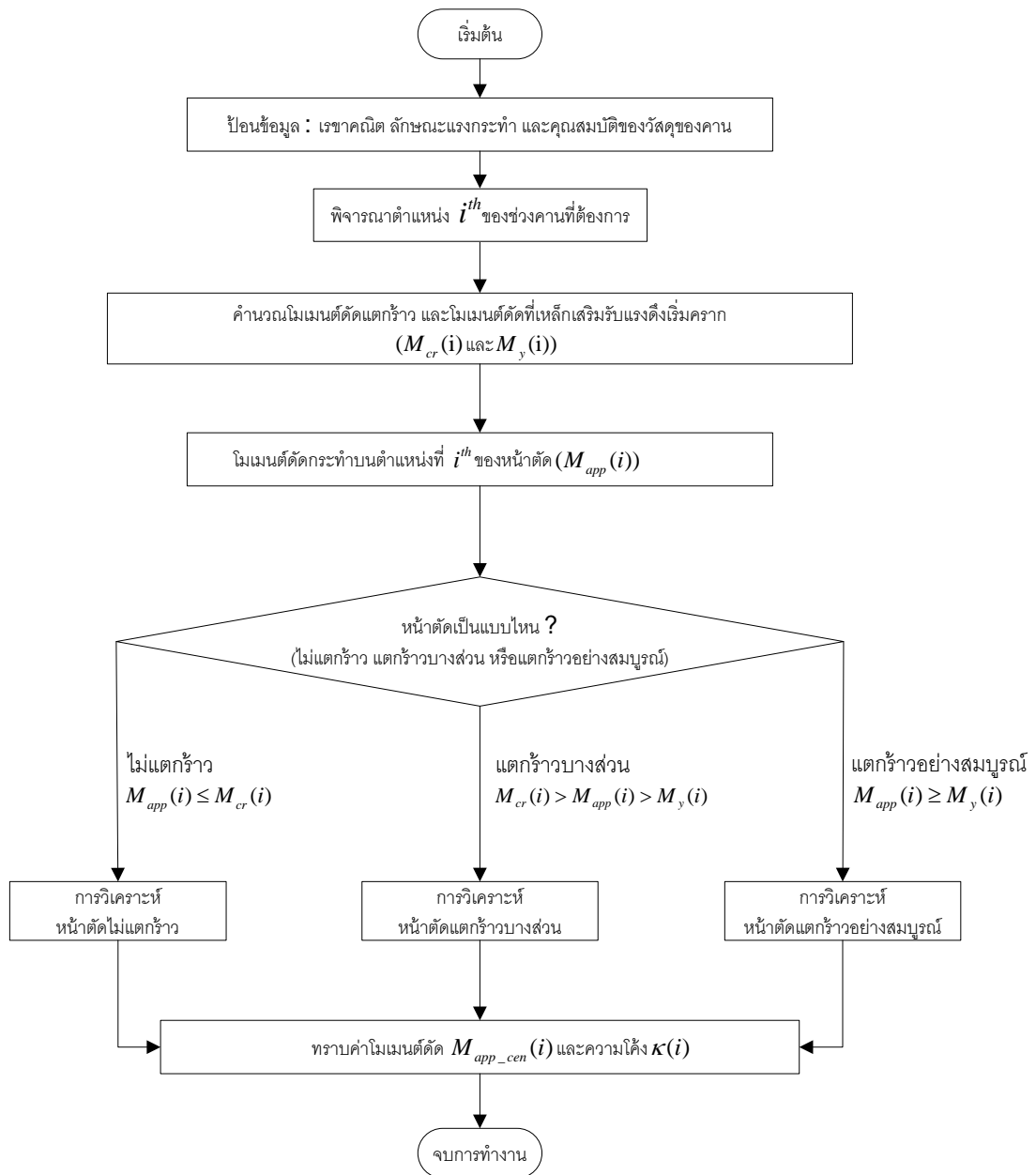
### 2.11.2. หน้าตัดแตกกว้างบางส่วน (Partially-cracked section)

ขั้นตอนการคำนวณหาความโค้งของหน้าตัดแตกกว้างบางส่วนแสดงดังนี้

1. สมมติแรงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ( $F_{p\_assu}$ )
2. คำนวณโมเมนต์ดัดกระทำรอบแกนกึ่งกลางความลึก ( $M_{app\_mid}$ )
3. คำนวณสติฟเนสประสิทธิภาพ ( $B_{eff}$ )
4. คำนวณระยะของแกนเซนทรอยด์ประสิทธิภาพ ( $\alpha_{eff}$ )
5. คำนวณระยะของแกนสะเทินประสิทธิภาพ ( $x_{eff}$ )
6. คำนวณโมเมนต์ดัดกระทำรอบแกนเซนทรอยด์ประสิทธิภาพ ( $M_{app\_cen}$ )
7. คำนวณความโค้ง ( $\kappa$ )
8. คำนวณแรงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากการคำนวณ ( $F_{p\_ana}$ )
9. ตรวจสอบความสอดคล้องกันของความเครียด โดยตรวจสอบแรงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากการสมมติให้มีค่าเท่ากับแรงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากการคำนวณ ถ้าเป็นจริงจะสิ้นสุดขั้นตอนการคำนวณ แต่ถ้าไม่เป็นจริงกลับไปขั้นตอนที่ 1. โดยสมมติแรงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยด้วยค่าอื่น

### 2.11.3. หน้าตัดแตกร้าวอย่างสมบูรณ์ (Fully-cracked section)

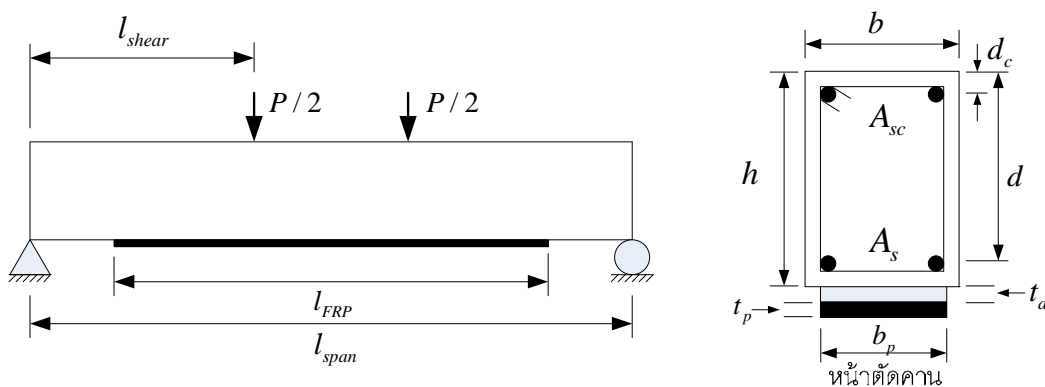
ใช้การประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (linear interpolation) เช่นเดียวกับกรณีหน้าตัดไม่แตกร้าว ระหว่างโมเมนต์ดัดที่เหล็กเสริมรับแรงดึงเริ่มร้าว ( $M_y$ ) กับโมเมนต์ดัดประลัย ( $M_{ult}$ ) ทั้งนี้เนื่องจากเป็นช่วงที่มีพฤติกรรมไร้อิทธิพลเชิงเส้น เพื่อความแม่นยำจึงสมมติค่าความเครียดที่ผิวของหลังคาน ภายในช่วงดังกล่าวหลายๆค่า แล้วทำการคำนวณโมเมนต์ดัดของความเครียดที่ผิวของหลังคานนั้นๆ จากนั้นจึงใช้การประมาณค่าในช่วงเชิงเส้นหาค่าความโค้ง ( $\kappa$ ) ของโมเมนต์ดัดกระทำ



ภาพที่ 2.12 แผนผังการคำนวณโมเมนต์ดัดและความโค้งของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังที่ตำแหน่ง  $i^{th}$  ใดๆ

## 2.12 การเปรียบเทียบผลการทำนายของแบบจำลองกับผลการทดสอบ

จากการประยุกต์ใช้แบบจำลองโมเมนต์ดัดและความโค้งของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการวิเคราะห์ซึ่งใช้ข้อมูลผลการทดสอบจากงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อเปรียบเทียบผลการทำนายของแบบจำลองกับผลการทดสอบใน 3 ลักษณะ คือ 1. ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง 2. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและความเครียดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่กึ่งกลางคาน 3. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของคาน โดยเป็นการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่มีฐานรองรับแบบธรรมดา (simply supported beam) ภายใต้การดัดสี่จุด (four-point bending) ซึ่งมีเรขาคณิตและแรงกระทำดังแสดงในภาพที่ 2.13 ทั้งนี้เพื่อประกอบการพิจารณาจึงทำการเปรียบเทียบร่วมกับผลการทำนายโมเมนต์ดัดและความโค้งของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังซึ่งใช้วิเคราะห์อย่างง่ายโดยมีสมมติฐานเช่นเดียวกับแบบจำลองในการศึกษา ซึ่งพิจารณาชั้นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเป็นชั้นของเหล็กเสริมชั้นหนึ่งบนหน้าตัด แต่ไม่คิดผลของการต้านทานแรงดึงของคอนกรีต และการกระจายตัวของความเค้นอัดในคอนกรีตเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเทียบเท่า (equivalent rectangular stress distribution) โดยการวิเคราะห์อย่างง่ายนี้จะทำการตรวจสอบสมดุลของแรงภายใน เมื่อสมดุลของแรงภายในเป็นจริงจึงทำการคำนวณหาโมเมนต์ดัดและความโค้งของหน้าตัด



ภาพที่ 2.13 เรขาคณิตและแรงกระทำบนคานภายใต้การทดสอบการดัดสี่จุด

ข้อมูลเรขาคณิตและคุณสมบัติของวัสดุของคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแสดงดังตารางที่ 2.1 โดย  $l_{span}$ ,  $l_{shear}$ ,  $l_{FRP}$ ,  $b$ ,  $h$ ,  $d$ ,  $d_c$ ,  $A_s$ ,  $A_{sc}$ ,  $f_{y_s}$ ,  $E_s$ ,  $f_c'$ ,  $b_p$ ,  $t_p$ ,  $t_a$  และ  $E_p$  คือ ความยาวช่วงคาน ความยาวช่วงแรงเฉือน ความยาวของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ความกว้างของหน้าตัดคาน ความลึกของหน้าตัดคาน ความลึกประสิทธิภาพของเหล็กเสริมรับแรงดึง ความลึกประสิทธิภาพของเหล็กเสริมรับแรงอัด พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงดึง พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงอัด ความเค้นครากของเหล็กเสริม โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม กำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต (จากแท่งตัวอย่างทรงกระบอก) ความกว้างของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ความหนาของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ความหนาของวัสดุประสาน และโมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 เรขาคณิตและคุณสมบัติของวัสดุของคานในงานวิจัยที่ผ่านมา

| ชิ้นตัวอย่าง<br>คาน | $l_{span}$<br>mm | $l_{shear}$<br>mm | $l_{FRP}$<br>mm | $b$<br>mm | $h$<br>mm | $d$<br>mm | $d_c$<br>mm | $A_s$<br>mm <sup>2</sup> | $A_{sc}$<br>mm <sup>2</sup> | $f_{y_s}$<br>N/mm <sup>2</sup> | $E_s$<br>kN/mm <sup>2</sup> | $f_c'$<br>N/mm <sup>2</sup> | $b_p$<br>mm | $t_p$<br>mm | $t_a$<br>mm | $E_p$<br>kN/mm <sup>2</sup> |
|---------------------|------------------|-------------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------------|
| A3.1 <sup>a</sup>   | 4800             | 1800              | 4700            | 140       | 300       | 263       | 37          | 402                      | 402                         | 435                            | 200                         | 24.00                       | 80          | 1.20        | 2           | 152                         |
| F4 <sup>b</sup>     | 2800             | 1100              | 2800            | 155       | 240       | 203       | 37          | 339                      | 226                         | 532                            | 204                         | 80.00                       | 120         | 1.20        | 3           | 155                         |
| A0 <sup>c</sup>     | 1500             | 500               | 1200            | 150       | 200       | 162       | 27          | 157                      | 101                         | 531                            | 200                         | 35.70                       | 75          | 0.22        | 2           | 235                         |
| S2PF7M <sup>d</sup> | 1350             | 450               | 1270            | 150       | 180       | 150       | 30          | 392                      | 142                         | 440                            | 200                         | 41.40                       | 38.1        | 1.20        | 2           | 165                         |
| C3 <sup>e</sup>     | 2100             | 750               | 1930            | 200       | 150       | 120       | 30          | 402                      | 101                         | 575                            | 210                         | 40.00                       | 150         | 0.40        | 2           | 127                         |

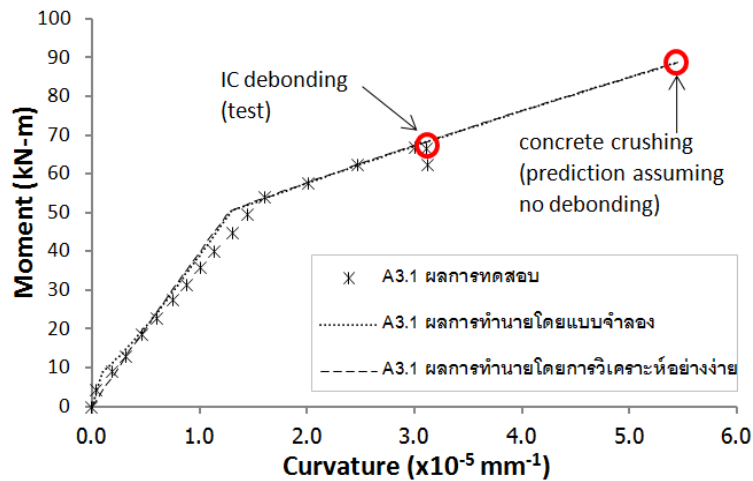
หมายเหตุ: \*ค่าที่ถูกสมมติ

อ้างอิง: a - งานวิจัยของ Spadea และคณะ (1998) ซึ่งคานวิบัติแบบหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย  
b - งานวิจัยของ Fanning และ Kelly (2001) ซึ่งคานวิบัติแบบหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย  
c - งานวิจัยของ Gao และคณะ (2004) ซึ่งคานวิบัติแบบหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย  
d - งานวิจัยของ Gunes และคณะ (2009) ซึ่งคานวิบัติแบบหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย  
e - งานวิจัยของ Rahimi และ Hutchinson (2001) ซึ่งคานวิบัติแบบคอนกรีตถูกบีบอัดจนแตก

### 2.12.1 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง

จากชิ้นตัวอย่างคาน A3.1 ซึ่งเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) พบว่าผลการทำนายโมเมนต์ดัดและความโค้งมีความสอดคล้องที่ดีกับผลการทดสอบ โดยแบบจำลองสามารถทำนายได้จนถึงจุดซึ่งเกิดการครากของเหล็กเสริมรับแรงดึงตามด้วยคอนกรีตถูกบีบอัดจนแตกซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับการทำนายโดยการวิเคราะห์อย่างง่าย แต่เนื่องจากการวิเคราะห์อย่างง่ายไม่ได้พิจารณาผลของการต้านทานแรงดึงของคอนกรีต ส่งผลให้สถิติเฟสของแรงดัดมีค่าคงที่จนกระทั่งถึงจุดซึ่งเหล็กเสริมรับแรงดึงเริ่มคราก แสดงดังภาพที่ 2.14

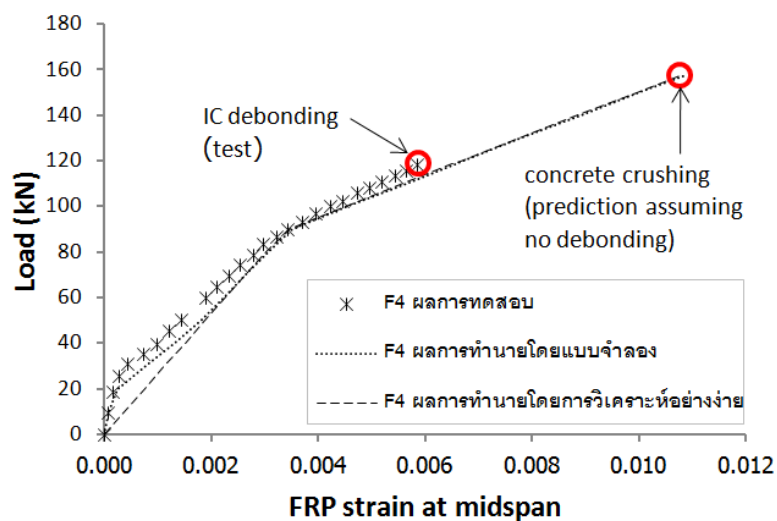




ภาพที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งของชิ้นตัวอย่างคาน A3.1

2.12.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและความเครียดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่กึ่งกลางคาน

จากภาพที่ 2.15 แสดงการเปรียบเทียบแรงกระทำกับความเครียดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่กึ่งกลางคานของผลการทำนายกับผลการทดสอบของชิ้นตัวอย่างคาน F4 ซึ่งเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) โดยแบบจำลองสามารถทำนายได้จนถึงจุดซึ่งเกิดการครากของเหล็กเสริมรับแรงดึงตามด้วยคอนกรีตถูกบีบอัดจนแตก ซึ่งจากการเปรียบเทียบผลการทำนายกับผลการทดสอบพบว่ามีความสอดคล้องกันที่



ภาพที่ 2.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและความเครียดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่กึ่งกลางคานของชิ้นตัวอย่างคาน F4

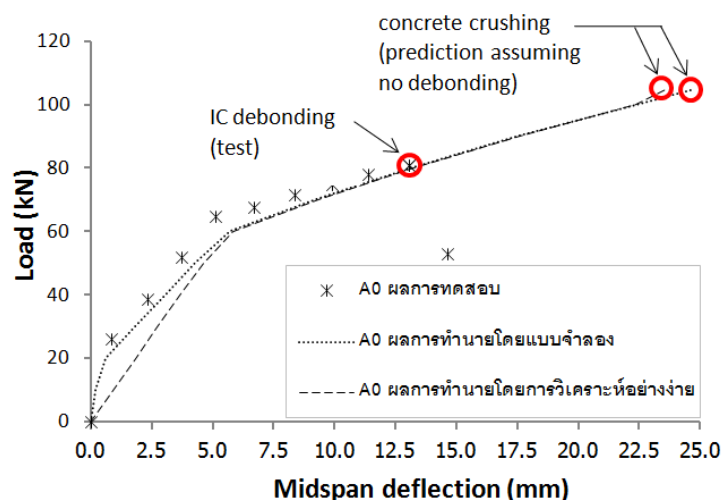
### 2.12.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน

ความสามารถในการทำนายของแบบจำลองสามารถพิจารณาจากการโก่งตัวซึ่งคำนวณโดยใช้หลักการของงานสมมติ (principle of virtual work) กล่าวคือเป็นการอินทิเกรตผลคูณของโมเมนต์ดัดเนื่องจากแรงสมมติหนึ่งหน่วยกับความโค้งของหน้าตัดเนื่องจากแรงกระทำจริงตลอดความยาวคานดังแสดงในสมการที่ 2.32 โดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal rule) ซึ่งแบ่งระยะห่างของหน้าตัดออกเป็นช่วงละ 1 มิลลิเมตร โดยจากการศึกษาการลู่เข้าของการโก่งตัวพบว่าระยะห่างดังกล่าวมีความเหมาะสม

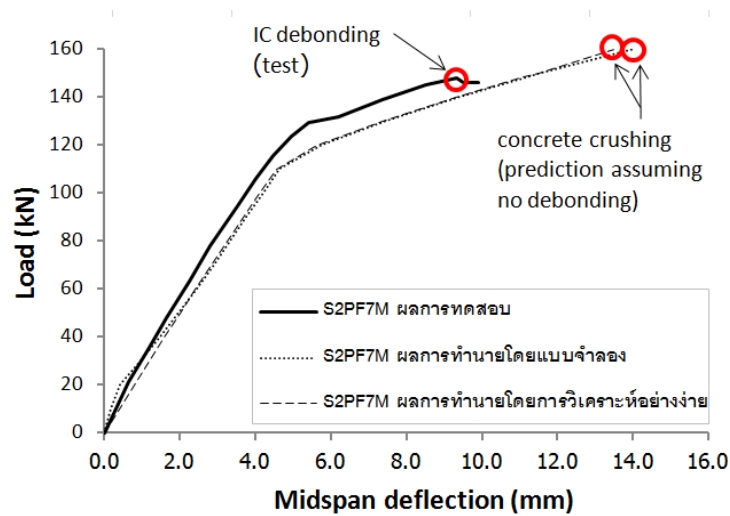
$$1 \cdot \Delta = \int_0^l \delta M_v \kappa ds \quad (2.32)$$

โดย  $\Delta$ ,  $\delta M_v$ ,  $\kappa$  และ  $l$  คือ การโก่งตัว โมเมนต์ดัดเนื่องจากแรงสมมติหนึ่งหน่วย ความโค้งของหน้าตัดเนื่องจากแรงกระทำจริง และความยาวช่วงคาน ตามลำดับ

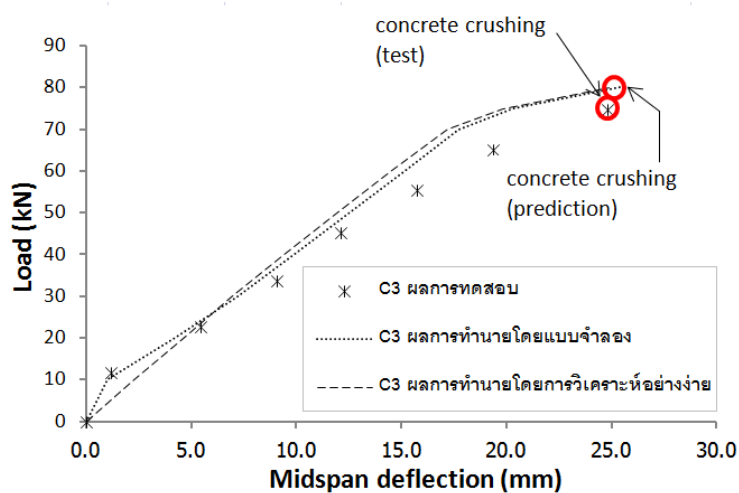
จากชิ้นตัวอย่างคาน A0, S2PF7M และ C3 ซึ่งเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) โดยแบบจำลองสามารถทำนายได้จนถึงจุดซึ่งเกิดการครากของเหล็กเสริมรับแรงดึงตามด้วยคอนกรีตถูกบีบอัดจนแตก โดยผลการเปรียบเทียบพบว่ามีความสอดคล้องที่ดีระหว่างผลการทำนายกับผลการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 2.16 ถึงภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานของชิ้นตัวอย่างคาน A0



ภาพที่ 2.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานของชิ้นตัวอย่างคาน S2PF7M



ภาพที่ 2.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานของชิ้นตัวอย่างคาน C3

จากผลการเปรียบเทียบดังแสดงข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์หน้าตัดโดยใช้แบบจำลองนี้สามารถทำนายโมเมนต์ดัดและความโค้งของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยได้อย่างถูกต้องแม่นยำเพียงพอสำหรับใช้เพื่อทำนายแรงกระทำที่ทำให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเกิดการวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างผลการทำนายและผลการทดสอบที่ตำแหน่งซึ่งเกิดการวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (ชิ้นตัวอย่างคาน A3.1, G0, F4 และ S2PF7M) หรือเกิดการวิบัติแบบเหล็กเสริม

รับแรงดึงครากตามด้วยคอนกรีตถูกบีบอัดจนแตก (ชิ้นตัวอย่างคาน C3) ของชิ้นตัวอย่างคานที่ศึกษา พบว่าจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของโมเมนต์ดัดเท่ากับ 2.57% และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและความเครียดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่กึ่งกลางคาน และแรงกระทำและการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของแรงกระทำเป็น 5.51% และ 6.44% ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบผลการทำนายจากแบบจำลองกับผลการทำนายจากการวิเคราะห์ห้อย่างง่ายซึ่งไม่พิจารณาถึงผลของการต้านทานแรงดึงของคอนกรีต จากการวิเคราะห์ห้อย่างง่ายพบว่าสถิติในสของแรงดัดมีค่าคงที่จนกระทั่งถึงจุดซึ่งเหล็กเสริมรับแรงดึงเริ่มคราก ส่งผลให้ในช่วงต้นของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง ผลการทำนายความโค้งจากการวิเคราะห์ห้อย่างง่ายมีค่าสูงกว่าผลการทำนายจากแบบจำลองเมื่อพิจารณาที่โมเมนต์ดัดเท่ากัน ดังนั้นความเครียดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานในช่วงต้นจากการวิเคราะห์ห้อย่างง่ายจึงให้ค่าที่สูงกว่าเช่นเดียวกันเมื่อพิจารณาที่แรงกระทำเท่ากัน

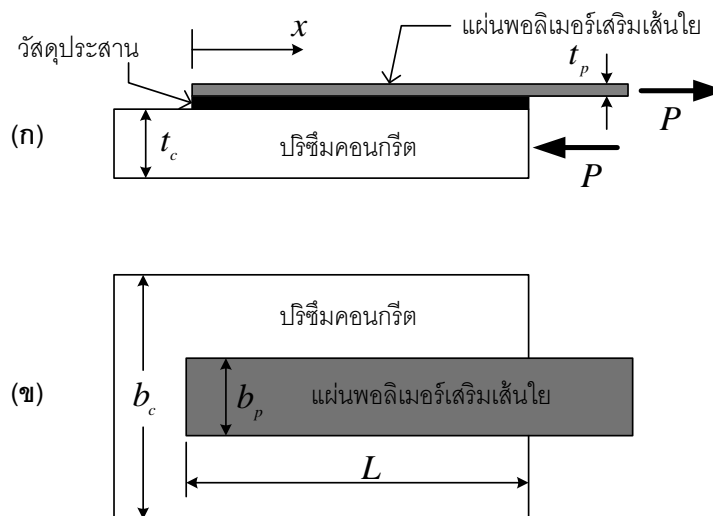
### บทที่ 3

## แบบจำลองหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไหลของรอยต่อยึดเหนี่ยว ระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต

การส่งผ่านความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อพฤติกรรมกรรมการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลัง ซึ่งสามารถศึกษาจากการทดสอบแรงเฉือนของรอยต่อยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต (shear test of a FRP-to-concrete bonded joint)

### 3.1 สมการควบคุม (Governing equation)

ภาพที่ 3.1 แสดงการทดสอบแรงเฉือนโดยการดึงและผลัก (pull-push shear test) ของรอยต่อยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตซึ่งติดแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยด้านเดียว (single-lap FRP-to-concrete bonded joint) ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย วัสดุประสาน และปริซึมคอนกรีตซึ่งมีความกว้างและความหนาคงที่ตลอดความยาว โดยมี  $b_p, t_p$  และ  $E_p$  คือ ความกว้าง ความหนา และโมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ตามลำดับ และกำหนดให้  $b_c, t_c$  และ  $E_c$  คือ ความกว้าง ความหนา และโมดูลัสยืดหยุ่นของปริซึมคอนกรีต ตามลำดับ ซึ่งระยะใดๆ จากตำแหน่งสิ้นสุดปลายแผ่น และระยะยึดเหนี่ยวของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแสดงโดย  $x$  และ  $L$  ตามลำดับ



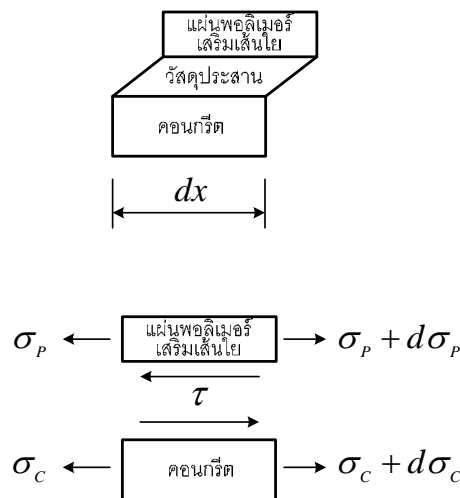
ภาพที่ 3.1 การทดสอบแรงเฉือนของรอยต่อยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต (ก) รูปด้านข้าง (ข) รูปด้านบน

แบบจำลองกลไกอย่างง่ายสำหรับสำหรับรอยต่อสามารถทำโดยสมมติให้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและปริซึมคอนกรีตเสียรูปเนื่องจากแรงตามแนวแกนเท่านั้น โดยความเค้นตามแนวแกนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและปราศจากผลกระทบจากการดัด ในขณะที่ชั้นวัสดุประสานสมมติให้เสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนเท่านั้น โดยการกระจายตัวของความเค้นเฉือนคงที่ตลอดความหนาของชั้นวัสดุประสาน (Yuan และคณะ, 2004) ซึ่งชั้นวัสดุประสานนี้ไม่เพียงแสดงการเสียรูปที่เกิดขึ้นจริงแต่ยังแสดงถึงผิวสัมผัสของวัสดุที่อยู่ติดกัน จากสมมติฐานดังกล่าวสมการควบคุมสามารถพิจารณาจากสมดุลในรอยต่อยึดเหนี่ยวดังแสดงในภาพที่ 3.2 เขียนได้เป็น

$$\frac{d\sigma_p}{dx} - \frac{\tau}{t_p} = 0 \quad (3.1)$$

$$\sigma_p t_p b_p + \sigma_c t_c b_c = 0 \quad (3.2)$$

โดย  $\tau$ ,  $\sigma_p$  และ  $\sigma_c$  คือ ความเค้นเฉือนในชั้นวัสดุประสาน ความเค้นตามแนวแกนในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และความเค้นตามแนวแกนในปริซึมคอนกรีต ตามลำดับ



ภาพที่ 3.2 การเสียรูปและสมดุลในรอยต่อยึดเหนี่ยว

จากสมการคอนสติติวทีฟ (constitutive equation) สำหรับชั้นวัสดุประสาน, แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และปริซึมคอนกรีต ซึ่งความเค้นเฉือนในชั้นวัสดุประสานเป็นฟังก์ชันขึ้นกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและปริซึมคอนกรีต หรือการไถล ( $\delta$ ) สามารถแสดงเป็นสมการโดย

$$\tau = f(\delta) \quad (3.3)$$

$$\sigma_p = E_p \frac{du_p}{dx} \quad (3.4)$$

$$\sigma_c = E_c \frac{du_c}{dx} \quad (3.5)$$

$$\delta = u_p - u_c \quad (3.6)$$

แทนสมการที่ (3.2) ถึงสมการที่ (3.6) ในสมการที่ (3.1) จะได้

$$\frac{d^2\delta}{dx^2} - \frac{2G_f}{\tau_f^2} \lambda^2 f(\delta) = 0 \quad (3.7)$$

$$\sigma_p = \frac{\tau_f^2}{2G_f t_p \lambda^2} \frac{d\delta}{dx} \quad (3.8)$$

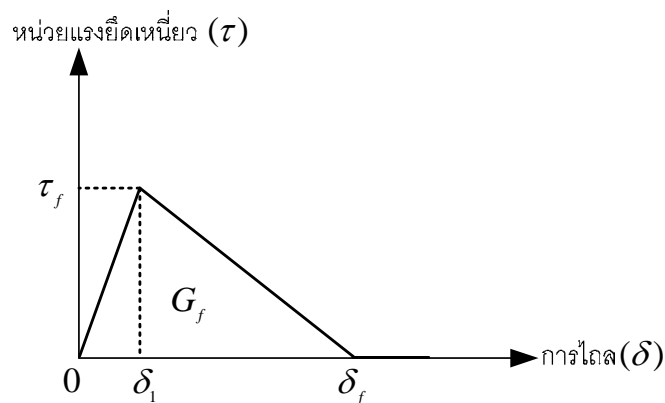
$$\lambda^2 = \frac{\tau_f^2}{2G_f} \left( \frac{1}{E_p t_p} + \frac{b_p}{b_c E_c t_c} \right) \quad (3.9)$$

โดย  $\tau_f$  และ  $G_f$  คือ กำลังยึดเหนี่ยวเฉพาะแห่ง และพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสตามลำดับ

สมการที่ (3.7) คือ สมการควบคุมเชิงอนุพันธ์ (governing differential equation) ของรอยต่อยึดเหนี่ยวดังแสดงในภาพที่ 3.1 ซึ่งสามารถนำมาใช้แก้ปัญหาได้ก็ต่อเมื่อทราบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไถลเฉพาะแห่ง (local bond-slip relationship) หรือก็คือความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัสกับการไถลเนื่องจากแรงเฉือน ( $f(\delta)$ )

### 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไถลเฉพาะแห่ง

แบบจำลองในการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไถลเฉพาะแห่งในลักษณะต่างๆ ได้ถูกเสนอมามากมายแต่แบบจำลองเชิงเส้นคู่ซึ่งประกอบด้วยส่วนของเส้นตรงสองส่วนที่ลาดขึ้นแล้วจึงลาดลงดังแสดงในภาพที่ 3.3 พบว่าเป็นการประมาณที่ใกล้เคียงพฤติกรรมจริง (Nakaba และคณะ, 2001) โดยความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัสจะเพิ่มขึ้นเชิงเส้นไปพร้อมๆ กับการไถลจนกระทั่งความเค้นถึงจุดสูงสุดที่  $\tau_f$  ซึ่งมีการไถลเท่ากับ  $\delta_1$  หลังจากนั้นการอ่อนตัวลงที่ผิวสัมผัส (interfacial softening) จึงเริ่มต้นขึ้นด้วยความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัสที่ลดลงแบบเชิงเส้นพร้อมกับการไถล ซึ่งความเค้นเฉือนนี้จะลดลงมีค่าเป็นศูนย์ก็ต่อเมื่อการไถลเกินกว่าการไถลประลัย ( $\delta_f$ ) โดยพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส ( $G_f$ ) คือพื้นที่ใต้เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัสกับการไถล



ภาพที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไถลเฉพาะแห่ง

การแตกหักของการเชื่อมหรือการหลุดล่อนของชิ้นส่วนยึดเหนี่ยวเฉพาะแห่งมีความสำคัญ โดยสมมติว่าปราศจากกำลังเชื่อมตกค้าง (residual shear strength) หลังจากการหลุดล่อน หรือก็คือไม่พิจารณาแรงเสียดทาน และการขัดกันของมวลรวม (aggregate interlock) ตลอดความยาวหลุดล่อนของรอยต่อ จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไถลเฉพาะแห่งที่แสดงดังภาพที่ 3.3 สามารถเขียนเป็นสมการโดย

$$f(\delta) = \frac{\tau_f}{\delta_1} \delta \quad \text{เมื่อ } 0 \leq \delta \leq \delta_1 \quad (3.10)$$

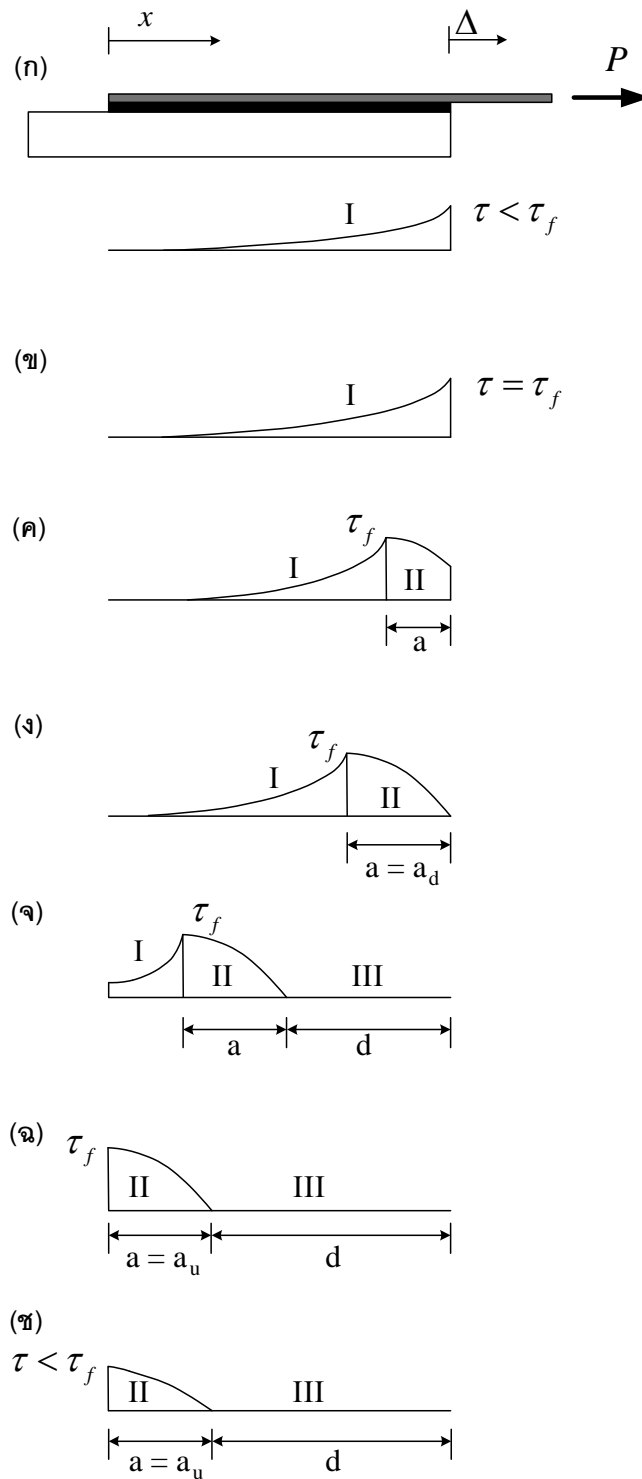
$$f(\delta) = \frac{\tau_f}{\delta_f - \delta_1} (\delta_f - \delta) \quad \text{เมื่อ } \delta_1 < \delta \leq \delta_f \quad (3.11)$$

$$f(\delta) = 0 \quad \text{เมื่อ } \delta > \delta_f \quad (3.12)$$

### 3.3 การวิเคราะห์กระบวนการหลุดล่อน

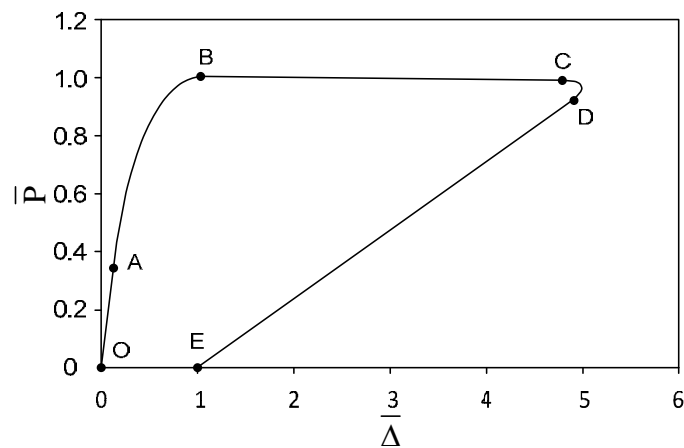
เมื่อทำการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไถลเฉพาะแห่งซึ่งกล่าวในหัวข้อ 3.2 ร่วมกับสมการควบคุมเชิงอนุพันธ์ (สมการที่ 3.7) จึงสามารถใช้เพื่อคำนวณหาการกระจายตัวของความเค้นเชื่อมตามผิวสัมผัส และการตอบสนองของแรงกระทำและการเคลื่อนที่ของรอยต่อยึดเหนี่ยว โดยการวิเคราะห์กระบวนการหลุดล่อนสามารถอธิบายให้เข้าใจด้วยลักษณะการกระจายของความเค้นเชื่อมที่ผิวสัมผัส (interfacial shear stress distribution) ร่วมกับเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเคลื่อนที่ (load – displacement curve,  $\bar{P}$ - $\bar{\Delta}$  curve) ดังแสดงในภาพที่ 3.4 และภาพที่ 3.5 ตามลำดับ ( $\bar{P}$  และ  $\bar{\Delta}$  คือตัวแปรที่ถูกลอกริมัลไลซ์) ซึ่งจะถูกต้องในกรณีที่ยึดเหนี่ยวมีระยะยึดเหนี่ยว (bond length) มากกว่าอย่างมากเมื่อเทียบกับระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผล (effective bond length)





ภาพที่ 3.4 การกระจายของความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัส และการขยายตัวของการหลุดล่อน

- (ก) สภาวะความเค้นยืดหยุ่น      (ข) การเริ่มต้นของการอ่อนตัวที่  $x = L$  (จุด A ในภาพที่ 3.5)
- (ค) การขยายตัวของโซนการอ่อนตัว    (ง) การเริ่มต้นของการหลุดล่อนที่  $x = L$  (จุด B ในภาพที่ 3.5)
- (จ) การขยายตัวของการหลุดล่อน    (ฉ) ความเค้นเฉือนสูงสุดที่  $x = 0$  (จุด D ในภาพที่ 3.5)
- (ช) การลดแรงกระทำ (unloading)



ภาพที่ 3.5 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเคลื่อนที่

### 3.3.1. สภาวะยึดหยุ่น

เมื่อแรงกระทำมีค่าน้อยจะไม่เกิดการอ่อนตัวที่ผิวสัมผัส หรือการหลุดล่อนตลอด ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต ดังนั้นตลอดทั้งความยาวของ ผิวสัมผัสความเค้นจะอยู่ในสภาวะยึดหยุ่น (สภาวะที่ **I**) ซึ่งจะเป็นจริงตราบเท่าที่ความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัสที่  $x = L$  มีค่าน้อยกว่ากำลังยึดเหนี่ยวเฉพาะแห่ง ( $\tau_f$ ) แสดงดังภาพที่ 3.4(ก) และกำหนดให้การไหลที่ปลายสุดของแรงกระทำ ( $\delta$  ที่  $x = L$ ) คือ การเคลื่อนที่ของรอยต่อยึดเหนี่ยว ( $\Delta$ ) เมื่อพิจารณาสภาวะยึดหยุ่นของแรงกระทำจากเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเคลื่อนที่ซึ่งก็คือ ช่วง OA ในภาพที่ 3.5 ซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงเส้น สภาวะยึดหยุ่นของการเสียรูปของรอยต่อยึดเหนี่ยวจะสิ้นสุดลง เมื่อความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัสมีค่าเท่ากับกำลังยึดเหนี่ยวเฉพาะแห่ง ( $\tau_f$ ) ที่  $x = L$

### 3.3.2. สภาวะยึดหยุ่น-การอ่อนตัว

ทันทีที่ความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัสมีค่าเท่ากับ  $\tau_f$  ที่  $x = L$  ( $\Delta = \delta_1$ ) การอ่อนตัวได้เริ่มต้นขึ้นที่ปลายสุดของแรงกระทำ โดยส่วนหนึ่งของผิวสัมผัสระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตเข้าสู่สภาวะการอ่อนตัว (สภาวะที่ **II**) ขณะที่ส่วนที่เหลือยังคงอยู่ในสภาวะยึดหยุ่น (สภาวะที่ **I**) ดังแสดงในภาพที่ 3.4(ค) เมื่อเพิ่มแรงกระทำ ( $P$ ) ขึ้นอย่างต่อเนื่อง ระยะของการอ่อนตัว (ไซน  $a$ ) ก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน เมื่อพิจารณาช่วงสภาวะยึดหยุ่น-การอ่อนตัวจากเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเคลื่อนที่ซึ่งแสดงโดยช่วง AB ในภาพที่ 3.5 พบว่ารอยต่ออ่อนตัวลงในระหว่างสภาวะและที่จุดสิ้นสุดของสภาวะนี้จะเป็นแรงกระทำประลัย ( $P_{\max}$ )

### 3.3.3. สภาวะยืดหยุ่น-การอ่อนตัว-การหลุดล่อน

การหลุดล่อนหรือการแตกหักจะเริ่มต้นและขยายตัวตามผิวสัมผัสในระหว่างที่ให้แรงกระทำ โดยการหลุดล่อนจะเริ่มขึ้นเมื่อ  $\Delta = \delta_f$  ที่  $x = L$  ซึ่งระยะของการอ่อนตัวแทนด้วยโซน  $a_d$  ซึ่งลักษณะการกระจายตัวของความเค้นเฉือนตามผิวสัมผัสเมื่อการหลุดล่อนเริ่มต้นขึ้นแสดงโดยภาพที่ 3.4(ง) ขณะที่การหลุดล่อนเกิดการขยายตัว ความเค้นเฉือนสูงสุด  $\tau_f$  จะเคลื่อนที่ไปทางตำแหน่งสิ้นสุดปลายแผ่น ( $x = 0$ ) ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวความเค้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตสามารถเป็นสภาวะใดสภาวะหนึ่งในสามสภาวะ คือ สภาวะยืดหยุ่น (สภาวะที่ I) สภาวะการอ่อนตัว (สภาวะที่ II) และสภาวะการหลุดล่อน (สภาวะที่ III) แสดงดังภาพที่ 3.4(จ) โดยสมมติว่า  $d$  คือ ระยะการหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสซึ่งเริ่มต้นจากปลายสุดของแรงกระทำ สภาวะนี้แสดงด้วยช่วง BCD ในภาพที่ 3.5 โดยจุด C สอดคล้องกับสภาวะการเสียรูปซึ่งแรงกระทำที่สามารถส่งผ่านได้เริ่มที่จะลดลง เนื่องจากแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยได้หลุดล่อนไปแล้วที่ปลายแผ่นจึงมีลักษณะเป็นปลายอิสระ (free end) จึงไม่มีผลของการกระจายตัวของความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัส โดยจุด D คือจุดสิ้นสุดของสภาวะนี้และมีการกระจายตัวของความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัสแสดงดังภาพที่ 3.4(ข) ซึ่งสภาวะการอ่อนตัว-การหลุดล่อนเริ่มต้นเมื่อ  $L - d = a_u$  โดยโซน  $a_u$  คือ ระยะของการอ่อนตัว

### 3.3.4. สภาวะการอ่อนตัว-การหลุดล่อน

ความเค้นเฉือนสูงสุดที่ผิวสัมผัสที่  $x = 0$  มีค่าลดลงตามการลดแรงกระทำ (unloading) แสดงดังภาพที่ 3.4(ข) และจากเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเคลื่อนที่ซึ่งลดลงแบบเชิงเส้นแสดงโดยช่วง DE ในภาพที่ 3.5 โดยระยะของการอ่อนตัว ( $a_u$ ) จะมีขนาดคงที่ตลอดสภาวะนี้

## 3.4 คุณลักษณะของจุดต่างๆในเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเคลื่อนที่

การวิเคราะห์กระบวนการหลุดล่อนที่กล่าวในหัวข้อที่ 3.3 สามารถสรุปความสำคัญของจุดต่างๆ ในเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเคลื่อนที่ดังแสดงในภาพที่ 3.5 ซึ่งประกอบด้วยช่วงต่างๆ ที่แยกกันอย่างชัดเจนสอดคล้องกับสภาวะของแรงกระทำต่างๆ ประกอบด้วย จุด A ซึ่งการอ่อนตัวลงที่ผิวสัมผัสได้เริ่มต้นขึ้น จุด B ซึ่งการหลุดล่อนได้เริ่มต้นขึ้น จุด C ซึ่งสิ้นสุดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเนื่องจากกระบวนการหลุดล่อน จุด D ซึ่งความเค้นเฉือนมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งสิ้นสุดปลายแผ่น และจุด E ซึ่งเกิดการวิบัติแบบหลุดล่อนอย่างสมบูรณ์

### 3.5 แรงกระทำสูงสุดที่สามารถส่งผ่านของรอยต่อยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต

จากการวิเคราะห์กระบวนการหลุดล่อนพบว่าแรงกระทำประลัยหรือแรงกระทำสูงสุดที่สามารถส่งผ่านของรอยต่อยึดเหนี่ยว (maximum transferable load,  $P_{\max}$ ) เกิดขึ้นที่จุดสิ้นสุดของสภาวะยึดหยุ่น-การอ่อนตัวหรือก็คือจุด B ซึ่งการหลุดล่อนได้เริ่มต้นขึ้น โดยอาศัยสมการควบคุมและสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไหลเฉพาะแห่งร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ซึ่งพิสูจน์โดย Yuan และคณะ (2004) สำหรับกรณีระยะยึดเหนี่ยวอนันต์ แรงกระทำจะเข้าสู่แรงกระทำสูงสุดที่สามารถส่งผ่านเมื่อ  $\tau = 0$  ที่  $x = L$  ดังแสดงในภาพที่ 3.4(ง) เขียนเป็นสมการโดย

$$P_{\max} = \frac{\tau_f b_p}{\lambda} \quad (3.13)$$

โดยสมมติว่าสติเฟนสของแรงตามแนวแกนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีค่าน้อยกว่าอย่างมากเมื่อเทียบกับคอนกรีต ( $(EA)_p / (EA)_c \approx 0$ ) ดังนั้นจากสมการที่ (3.9) จะได้

$$\lambda = \frac{\tau_f}{\sqrt{2G_f}} \left( \sqrt{\frac{1}{E_p t_p}} \right) \quad (3.14)$$

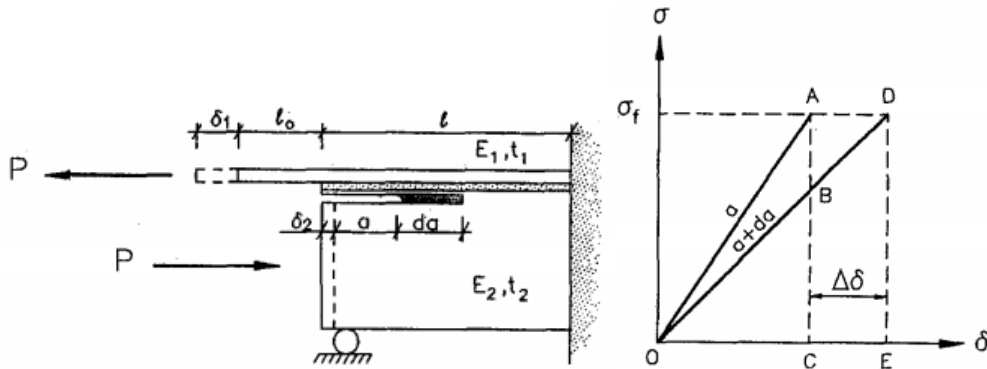
แทนสมการที่ (3.14) ในสมการที่ (3.13) จะได้แรงกระทำสูงสุดที่สามารถส่งผ่านของรอยต่อยึดเหนี่ยวแสดงโดยสมการเป็น

$$P_{\max} = b_p \sqrt{2G_f E_p t_p} \quad (3.15)$$

ทั้งนี้แรงกระทำสูงสุดที่สามารถส่งผ่านสามารถพิสูจน์ด้วยกลศาสตร์การแตกหักซึ่งเป็นวิธีทางพลังงาน (Täljsten, 1996) โดยจากกฎอนุรักษ์พลังงานสำหรับกรณีวัตถุซึ่งมีรอยร้าวพลังงานเนื่องจากแรงภายนอก ( $F$ ) จะไม่เท่ากับงานภายในระบบ ( $U_e$ ) แต่เกิดการสูญเสียพลังงานเพื่อใช้ในการสร้างพื้นผิวใหม่ ( $W$ ) โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงเทียบกับพื้นที่รอยร้าวเริ่มต้น ( $A$ ) เขียนเป็นสมการโดย

$$\frac{d}{dA}(F - U_e) \geq \frac{dW}{dA} \tag{3.16}$$

โดยจะเรียกเทอมทางซ้ายมือว่าอัตราการปลดปล่อยพลังงาน (energy release rate,  $G_R$ ) และเทอมทางขวามือว่าความต้านทานการเติบโตของรอยร้าว (crack growth resistance) หรือพลังงานต้านทานการแตกหัก ( $G_F$ )



ภาพที่ 3.6 รอยต่อระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและการเคลื่อนที่ภายใต้แรงกระทำ  $P$  (Täljsten, 1996)

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและการเคลื่อนที่ภายใต้แรงกระทำ  $P$  กรณีรอยร้าวของวัตถุขยายตัว  $da$  ดังแสดงในภาพที่ 3.6 ซึ่งพลังงานเนื่องจากแรงภายนอก และงานภายในระบบสามารถคำนวณจากสมการที่ (3.17) และสมการที่ (3.18) โดย  $C$  คือ คอมพลายแอนซ์หรือก็คืออินเวอร์สของสติฟเนส ( $\delta = PC$ )

$$F = P\delta \tag{3.17}$$

$$U_e = \frac{1}{2}P\delta = \frac{1}{2}P^2C \tag{3.18}$$

โดย  $P$  และ  $\delta$  คือ แรงกระทำ และการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงกระทำ ตามลำดับ

แทนสมการที่ (3.17) และสมการที่ (3.18) ลงในสมการที่ (3.16) จะได้อัตราการปลดปล่อยพลังงานแสดงเป็น

$$G = \frac{P^2}{2b} \frac{\partial C}{\partial a} \quad \text{จัดรูปใหม่ในเทอมของแรงกระทำ } P = \sqrt{2bG / \frac{\partial C}{\partial a}} \tag{3.19}$$

โดย  $b$  และ  $a$  คือ ความกว้างของรอยร้าว และความยาวของรอยร้าวเริ่มต้น ตามลำดับ

จากภาพที่ 3.6 แสดงรอยต่อระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต โดยสมมติว่าการเสียรูปของวัสดุมีค่าน้อย ไม่พิจารณาผลกระทบของโมเมนต์ดัดและไม่คิดการเสียรูปของชั้นวัสดุประสาน คอมพลาไยแอนซ์สามารถแสดงเป็นสมการโดย

$$C = \frac{l_0 + a}{E_1 A_1} + \frac{a}{E_2 A_2} \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial C}{\partial a} = \frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} \quad (3.21)$$

โดย  $l_0$ ,  $E_1 A_1$  และ  $E_2 A_2$  คือ ระยะยื่นของปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย สติฟเนสของแรงตามแนวแกนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และคอนกรีต ตามลำดับ

จากสมการที่ (3.21) แทนลงในสมการที่ (3.19) โดยใช้สมมติฐานที่ว่าสติฟเนสของแรงตามแนวแกนของคอนกรีตมีค่าอย่างมากเมื่อเทียบกับแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ดังนั้นสามารถละเทอม  $1/E_2 A_2$  ได้ โดย  $A_1$  คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งจะได้แรงกระทำสูงสุดที่สามารถส่งผ่าน ( $P_{max}$ ) แสดงเป็นสมการโดย

$$P_{max} = b_1 \sqrt{2G_f E_1 t_1} \quad (3.22)$$

โดย  $G_f$ ,  $b_1$ ,  $E_1$  และ  $t_1$  คือ พลังงานต้านทานการแตกหัก ความกว้าง โมดูลัสยืดหยุ่น และความหนาของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ตามลำดับ

### 3.6 แบบจำลองหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไหลเฉพาะแห่งของ Nakaba และคณะ (2001)

Nakaba และคณะ (2001) ได้เสนอแบบจำลองเพื่อทำนายความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไหลเฉพาะแห่ง จากการทดสอบแรงเฉือนซึ่งติดแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยสองด้าน (double-face shear test) พบว่ากำลังยึดเหนี่ยวเฉพาะแห่งและรูปร่างการกระจายตัวของความเค้นขึ้นกับสติฟเนสของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยไม่ขึ้นกับชนิดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยซึ่งกำลังยึดเหนี่ยวเฉพาะแห่งหรือความเค้นเฉือนสูงสุดที่ผิวสัมผัส ( $\tau_f$ ) แปรผันตามกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตจากการทดสอบแท่งตัวอย่างทรงกระบอก ( $f'_c$ ) โดยความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัสและกำลังยึดเหนี่ยวเฉพาะแห่งแสดงเป็นสมการโดย

$$\tau = \tau_f \left[ \frac{\delta}{\delta_1} \cdot \frac{n}{(n-1) + \left(\frac{\delta}{\delta_1}\right)^n} \right] \quad (3.23)$$

$$\tau_f = 3.50 f_c^{0.19} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (3.24)$$

โดย  $\tau$ ,  $\tau_f$ ,  $\delta$ ,  $\delta_1$  และ  $n$  คือ ความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัส กำลังยึดเหนี่ยวเฉพาะแห่ง การไถล การไถลที่กำลังยึดเหนี่ยวเฉพาะแห่งซึ่งมีค่า 0.065 มิลลิเมตร และค่าคงที่ซึ่งมีค่าเป็น 3 ตามลำดับ

พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส ( $G_f$ ) คือพื้นที่ใต้เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างการยึดเหนี่ยวและการไถลเฉพาะแห่งแสดงเป็นสมการโดย

$$G_f = \int_0^{\infty} \tau d\delta = \int_0^{\infty} \tau_f \left[ \frac{\delta}{\delta_1} \cdot \frac{n}{(n-1) + \left(\frac{\delta}{\delta_1}\right)^n} \right] d\delta \quad (3.25)$$

$$\approx 0.184 \tau_f = 0.644 f_c^{0.19} \text{ (N/mm)}$$

ระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพ ( $L_e$ ) คือระยะที่ต้องการในการส่งผ่านแรงกระทำไปสู่แรงกระทำสูงสุดที่สามารถส่งผ่าน เกณฑ์สำคัญของพฤติกรรมของรอยต่อยึดเหนี่ยว คือ เมื่อยึดระยะยึดเหนี่ยวให้เกินกว่าระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพ แรงกระทำสูงสุดที่สามารถส่งผ่านหรือแรงกระทำประลัย ( $P_{\max}$ ) จะไม่สามารถเพิ่มขึ้น โดยหลักการพื้นฐานนี้แตกต่างกับกรณีการเสริมเหล็กเสริมภายในคอนกรีตซึ่งพบว่าระยะฝังลึก (anchorage length) จะมีความยาวเพียงพอเพื่อให้เหล็กเสริมมีกำลังรับแรงดึงอย่างสมบูรณ์ ซึ่งระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพสามารถประมาณจากสมการที่ (3.26)

$$L_e \approx \frac{P_{\max}}{\left(\frac{b_p \tau_f}{2}\right)} = \frac{2b_p \sqrt{2G_f E_p t_p}}{b_p \tau_f} \quad (3.26)$$

$$= \frac{0.649 \sqrt{E_p t_p}}{f_c^{0.095}}$$

## บทที่ 4

### การวิเคราะห์การหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในคาน คอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

การหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเป็นลักษณะการวิบัติที่อันตรายและเกิดขึ้นก่อนเวลาที่เหมาะสม ดังนั้นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจึงต้องถูกออกแบบเพื่อป้องกันการวิบัติลักษณะดังกล่าว จากงานวิจัยของ Niu และ Wu (2007) ซึ่งวิเคราะห์การหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลัง โดยใช้แนวคิดทางกลศาสตร์การแตกหักร่วมกับการวิเคราะห์หน้าตัดในการสร้างแบบจำลองทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ทั้งนี้สามารถปฏิบัติตามข้อแนะนำในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยสถาบันคอนกรีตของอเมริกา (ACI 440.2R-08) ซึ่งใช้วิธีจำกัดความเครียดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเพื่อป้องกันการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยวิเคราะห์กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดของหน้าตัดคานที่เสริมกำลัง

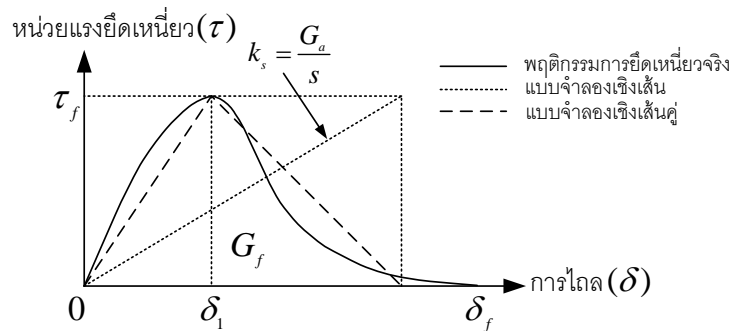
#### 4.1 แบบจำลองทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่น พอลิเมอร์เสริมเส้นใย

Niu และ Wu (2007) ได้เสนอแบบจำลองทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยสำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลัง ซึ่งการหลุดล่อนจะเริ่มต้นจากรอยร้าวดัดใกล้กับตำแหน่งโมเมนต์ดัดที่มีค่าสูงสุด โดยกระบวนการหลุดล่อนนี้ถูกขับเคลื่อนด้วยการส่งผ่านความเค้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งพบว่ามีความคล้ายคลึงกับกระบวนการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากการทดสอบแรงเฉือนของรอยต่อยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต โดยสมมติให้การแตกหักที่ผิวสัมผัสในชั้นของคอนกรีตเนื่องจากการหลุดล่อนเป็นแบบโหมดเฉือนบนระนาบหรือโหมดที่ 2

จากการทดสอบแรงเฉือนซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไหลเฉพาะแห่งของพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวจริงระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต ประกอบด้วยเส้นโค้งซึ่งลาดขึ้นก่อนถึงค่ากำลังยึดเหนี่ยวเฉพาะแห่ง ( $\tau_f$ ) ตามด้วยพฤติกรรมการอ่อนตัวจนถึงการไหลประลัย ( $\delta_f$ ) ซึ่งอาจทำให้ง่ายขึ้นโดยใช้แบบจำลองเชิงเส้นคู่เพื่อแสดงความสัมพันธ์



ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไถลเฉพาะแห่งโดยมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 4.1 (ลักษณะเช่นเดียวกับภาพที่ 3.3)



ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไถลรูปแบบต่างๆ

และยังพบว่า การยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตจะปรากฏระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผล (effective bond length) ซึ่งความเค้นสามารถส่งผ่านระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต แต่เมื่อระยะยึดเหนี่ยว (bond length) ยาวเกินกว่าระยะดังกล่าวจะไม่มี ความเค้นที่สามารถส่งผ่านเพิ่มเติม สมการการวิเคราะห์รูปแบบปิดสำหรับคำนวณแรงกระทำ ประลัยหรือแรงกระทำสูงสุดที่สามารถส่งผ่าน ( $P_{max}$ ) สามารถพิสูจน์จากแนวคิดกลศาสตร์การ แยกหักซึ่งขึ้นกับพลังงานด้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส ( $G_f$ ) ที่ใช้ในการหลุดล่อน โดยแรง กระทำสูงสุดที่สามารถส่งผ่านสำหรับกรณีระยะยึดเหนี่ยวยาวเกินกว่าระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผล เขียนเป็นสมการโดย

$$P_{max} = b_p \sqrt{2G_f E_p t_p} \quad (4.1)$$

โดย  $b_p$ ,  $E_p$  และ  $t_p$  คือ ความกว้าง โมดูลัสยืดหยุ่น และความหนาของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใย ตามลำดับ

รอยร้าวตัดบริเวณโซนโมเมนต์ดัดสูงสุดเป็นสาเหตุทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายใน ของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลัง ดังนั้น การส่งผ่านความเค้น เชื้อนและตั้งฉากที่ผิวสัมผัสเนื่องจากรอยร้าวตัดจึงมีความสำคัญ จากงานวิจัยของ Niu และ Wu (2000) ซึ่งใช้ทฤษฎียึดหยุ่นเชิงเส้นในการวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาความเค้นในชั้นวัสดุประสาน หรือความเค้นที่ผิวสัมผัสเนื่องจากรอยร้าวตัดในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่น พอลิเมอร์เสริมเส้นใย สำหรับกรณีนี้ นักกระทำให้แบบคงที่สม่ำเสมอ น้ำหนักกระทำแบบหนึ่งจุดที่

ระยะใดๆ และน้ำหนักกระทำแบบสองจุดที่ตำแหน่งสมมาตร พบว่าความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัสที่รอยร้าวตัดมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับความเค้นตั้งฉากที่ผิวสัมผัส จึงทำให้สมมติฐานที่ว่า การแตกหักที่ผิวสัมผัสหรือการหลุดล่อนเป็นแบบโหมดที่ 2 มีความเหมาะสม โดยความเค้นเฉือนสูงสุดที่ผิวสัมผัส ( $\tau_{\max}$ ) บริเวณรอยร้าวตัดสำหรับกรณีน้ำหนักกระทำทั้งสามแบบโดยไม่พิจารณาเทอมที่ไม่สำคัญสามารถแสดงดังสมการ

$$\tau_{\max} = \frac{f}{b_p} \sqrt{\frac{k_s}{E_p t_p}} \quad (4.2)$$

โดย  $k_s$ ,  $f$ ,  $b_p$ ,  $E_p$  และ  $t_p$  คือ สติฟเนสแรงเฉือนที่ผิวสัมผัส แรงตามแนวแกนที่รอยร้าว ความกว้าง โมดูลัสยืดหยุ่น และความหนาของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ตามลำดับ

จากงานวิจัยของ Björn Täljsten (1996) ซึ่งใช้แนวคิดทางกลศาสตร์การแตกหักในการวิเคราะห์รอยต่อระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไหลเฉพาะแห่งแบบเชิงเส้นดังแสดงในภาพที่ 4.1 ซึ่งสติฟเนสแรงเฉือนที่ผิวสัมผัส ( $k_s$ ) และพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส ( $G_f$ ) เขียนเป็นสมการโดย

$$k_s = \frac{G_a}{s} \quad (4.3)$$

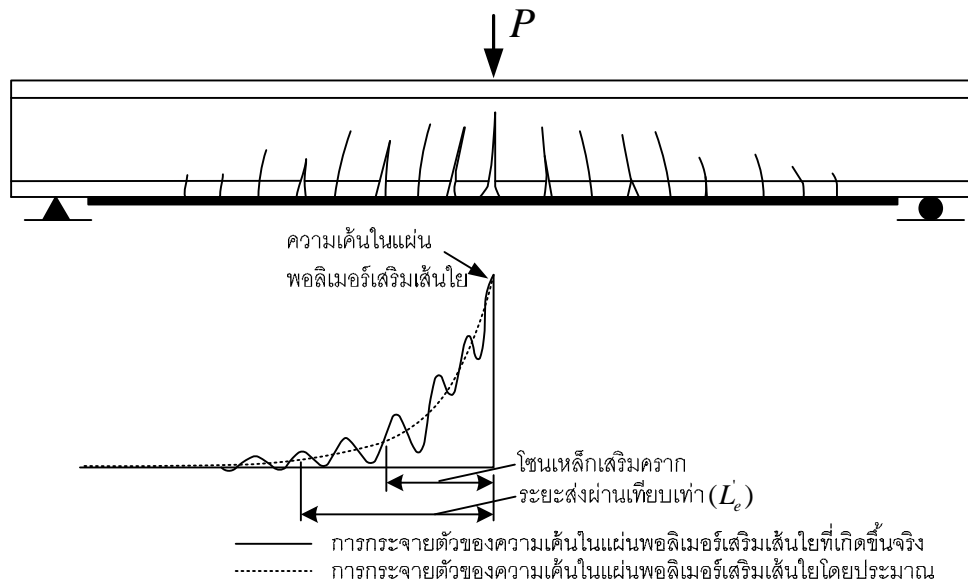
$$G_f = \frac{s\tau_f^2}{2G_a} \quad (4.4)$$

โดย  $G_a$  และ  $s$  คือ โมดูลัสเฉือนของวัสดุประสาน และความหนาของชั้นวัสดุประสาน ตามลำดับ

แทนสมการที่ (4.3) และสมการที่ (4.4) ในสมการที่ (4.2) จะได้สมการใหม่ซึ่งเป็นสมการเดียวกันกับสมการที่ (4.1) ดังนั้น การส่งผ่านความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตของรอยต่อยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตกับบริเวณรอยร้าวตัดในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจึงคล้ายคลึงกัน

Niu และ Wu (2007) อาศัยความคล้ายคลึงของการส่งผ่านความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัส ในการวิเคราะห์เพื่อทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ทั้งนี้ในการวิเคราะห์ความเค้นที่ผิวสัมผัสในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังได้พิจารณาเฉพาะกรณีรอย

ร้าวเดี่ยว (unique localized crack) ที่กึ่งกลางคาน ซึ่งในความเป็นจริงจะเกิดรอยร้าวมากมายขึ้นในคาน จึงทำการศึกษาผลกระทบของรูปแบบการกระจายตัวของรอยร้าว โดยวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยวิธี discrete crack พบว่าการกระจายตัวของความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัสในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังในกรณีรอยร้าวเดี่ยวหรือรอยร้าวจำนวนมาก (multiple cracks) มีความคล้ายคลึงกับการทดสอบแรงเฉือน แต่ในกรณีรอยร้าวจำนวนมากที่รอยร้าวการกระจายตัวใกล้เคียงกันการขยายตัวของการหลุดล่อนจะถูกต้านทานด้วยรอยร้าวที่อยู่ใกล้เคียงทำให้ความเค้นดึงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้ระยะการส่งผ่านหรือระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีรอยร้าวเดี่ยว เรียกความยาวนี้ว่าระยะส่งผ่านเทียบเท่า (equivalent transfer length) ดังแสดงในภาพที่ 4.2 โดยเส้นทึบแสดงการกระจายตัวของความเค้นในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่เกิดขึ้นจริง และเส้นประแสดงการกระจายตัวของความเค้นในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยประมาณ



ภาพที่ 4.2 การกระจายตัวของความเค้นในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยกรณีรอยร้าวตัดจำนวนมาก

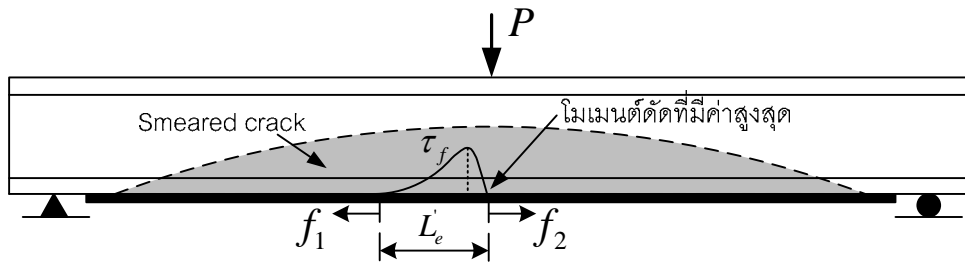
จากความคล้ายคลึงของการกระจายตัวของความเค้นในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยระหว่างการทดสอบแรงเฉือนและคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังซึ่งรอยร้าวกระจายตัวใกล้เคียงกัน Niu และ Wu จึงเสนอแนวทางสำหรับทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยภายใต้แนวคิดรอยร้าวกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ (smeared crack) ซึ่งกำหนดเกณฑ์การพิจารณาการหลุดล่อนโดยสมมติว่าเมื่อคานอยู่ในสภาวะประลัย รอยร้าวได้กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งคาน ซึ่งแรงกระทำบนคาน ( $P$ ) จะเป็นแรงกระทำที่ทำให้เกิดการวิบัติ

แบบหลุดล่อน ( $P_{deb}$ ) ก็ต่อเมื่อผลต่างระหว่างแรงดึงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ( $f$ ) ที่ตำแหน่งโมเมนต์ดัดกระทำสูงสุดกับตำแหน่งถัดไปที่ระยะส่งผ่านเทียบเท่า ( $L'_e$ ) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับแรงกระทำสูงสุดที่สามารถส่งผ่าน ( $P_{max}$ ) จากการทดสอบแรงเฉือน (สมการที่ 4.1) ดังแสดงดังภาพที่ 4.3 ซึ่งแรงดึงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ตำแหน่งต่างๆ สามารถคำนวณโดยใช้การวิเคราะห์ห้หน้าตัด และเกณฑ์การหลุดล่อนสามารถเขียนเป็นสมการโดย

$$P_{deb} = P \quad \text{ก็ต่อเมื่อ} \quad f_2 - f_1 \geq b_p \sqrt{2G_f E_p t_p} \quad (4.5)$$

โดย  $f_1$  และ  $f_2$  คือ แรงดึงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

$L'_e$  และ  $G_f$  คือ ระยะส่งผ่านเทียบเท่า และพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส ตามลำดับ



ภาพที่ 4.3 การทำนายการวิบัติแบบหลุดล่อนสำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลัง

ระยะส่งผ่านเทียบเท่า ( $L'_e$ ) อาจมีช่วงระยะเท่ากับหรือมากกว่าของระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพจากการทดสอบแรงเฉือนแสดงเป็นสมการโดย

$$L'_e = \alpha L_e \quad (4.6)$$

โดย  $\alpha$  คือ ตัวประกอบบ่งบอกถึงผลกระทบของรอยร้าวต่อระยะการยึดเหนี่ยว

จากภาพที่ 4.3 เมื่อพิจารณาระยะส่งผ่านเทียบเท่าที่มีระยะยาวจะพบว่าการทำนายการหลุดล่อนจะให้ค่าแรงกระทำที่ทำให้เกิดการวิบัติต่ำกว่าความเป็นจริง เนื่องจากขณะที่แรงกระทำบนคานมีค่าต่ำจะให้ผลต่างระหว่างแรงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่มีค่ามาก ส่งผลให้สอดคล้องกับเกณฑ์การหลุดล่อนเมื่อแรงกระทำบนคานมีค่าต่ำ โดย Niu และ Wu ได้สมมติระยะส่งผ่านเทียบเท่ามีค่าเป็นสองเท่าของระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพจากการทดสอบแรงเฉือน ( $\alpha = 2$ ) ทั้งนี้จากแบบจำลองข้างต้นซึ่งประยุกต์จากการทดสอบแรงเฉือนโดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างรอยร้าวในคอนกรีตและการขยายตัวของ การหลุดล่อน แต่ไม่ได้พิจารณา

ผลกระทบของเหล็กเสริมภายในคาน ซึ่งในทางปฏิบัติแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยอาจหลุดล่อนง่าย ขึ้นถ้าบริเวณที่เหล็กเสริมครากตามความยาวช่วงคานมีบริเวณกว้าง ซึ่งพบในกรณีของอัตราส่วนของเหล็กเสริม (steel reinforcement ratio) มีค่าน้อยหรืออัตราส่วนของความยาวช่วงเฉือน (shear-span ratio) มีค่ามาก โดยระยะส่งผ่านเทียบเท่าอาจมีความยาวน้อยกว่าระยะไซนเหล็กเสริมครากดังแสดงในภาพที่ 4.2 ซึ่งส่งผลให้การคำนวณแรงกระทำที่ทำให้เกิดการวิบัติแบบหลุดล่อนมีค่าสูงเกินความเป็นจริง ดังนั้นการวิบัติแบบหลุดล่อนจึงคำนวณจากผลต่างของแรงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยระหว่างตำแหน่งโมเมนต์ตัดกระทำสูงสุด ( $f_2$ ) กับตำแหน่งที่เหล็กเสริมเริ่มคราก ( $f_1$ ) ถ้าระยะส่งผ่านเทียบเท่ามีความยาวอยู่ในช่วงไซนเหล็กเสริมคราก

#### 4.2 การประยุกต์ใช้แบบจำลองของ Niu และ Wu เพื่อทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้แบบจำลองของ Niu และ Wu โดยคำนวณแรงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากการวิเคราะห์หน้าตัดซึ่งพิจารณาถึงผลการต้านทานแรงดึงของคอนกรีต ตามแบบจำลองโมเมนต์ตัดและความโค้งของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยดังแสดงในบทที่ 2 ร่วมกับแบบจำลองหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไหลเฉพาะแห่งของ Nakaba และคณะ ในการคำนวณแรงกระทำสูงสุดที่สามารถส่งผ่านของรอยต่อยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตดังแสดงในบทที่ 3 ซึ่งขั้นตอนการทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยสามารถแสดงดังนี้

1. ค่าแรงพลังงานต้านทานการแตกหัก ( $G_f$ )

$$G_f = 0.644 f_c'^{0.19}$$

โดย  $f_c'$  คือ กำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต (จากแท่งตัวอย่างทรงกระบอก)

2. ค่าแรงกระทำสูงสุดที่สามารถส่งผ่าน ( $P_{\max}$ )

$$P_{\max} = b_p \sqrt{2G_f E_p t_p}$$

โดย  $b_p$ ,  $E_p$  และ  $t_p$  คือ ความกว้าง โมดูลัสยืดหยุ่น และความหนาของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ตามลำดับ

3. คำนวณระยะยืดเหนียวประสิทธิผล ( $L_e$ )

$$L_e = \frac{0.649\sqrt{E_p t_p}}{f_c^{0.095}}$$

4. คำนวณระยะส่งผ่านเทียบเท่า ( $L'_e$ )

$$L'_e = 2L_e = \frac{1.3\sqrt{E_p t_p}}{f_c^{0.095}}$$

5. สมมติแรงกระทำบนคาน ( $P$ )

6. คำนวณแรงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ตำแหน่งโมเมนต์ดัดกระทำสูงสุด ( $f_2$ ) และที่ตำแหน่งถัดเข้าไปทางฐานรองรับเป็นระยะส่งผ่านเทียบเท่า ( $f_1$ ) เนื่องจากแรงกระทำบนคานที่ถูกสมมติจากขั้นตอนที่ 5 ด้วยวิธีวิเคราะห์หน้าตัด

7. เปรียบเทียบผลต่างของแรงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยกับแรงกระทำสูงสุดที่สามารถส่งผ่าน และตรวจสอบการวิบัติแบบหลุดล่อน โดยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเกิดการหลุดล่อนก็ต่อเมื่อผลต่างของแรงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับแรงกระทำสูงสุดที่สามารถส่งผ่าน

$$(f_2 - f_1) \geq P_{\max}$$

8. ถ้าขั้นตอนที่ 7 ไม่เป็นจริง กลับไปทำขั้นตอนที่ 5

9. แรงกระทำที่ทำให้เกิดการวิบัติแบบหลุดล่อน ( $P_{deb}$ ) ก็คือแรงกระทำบนคานที่ถูกสมมติในขั้นตอนที่ 5

$$P_{deb} = P$$

10. ถ้าขั้นตอนที่ 8 ไม่เป็นจริงแสดงว่าไม่เกิดการวิบัติแบบหลุดล่อน แต่จะเป็นการวิบัติแบบแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยฉีกขาด หรือเหล็กเสริมรับแรงดึงครากตามด้วยคอนกรีตถูกบีบอัดจนแตก

#### 4.3 ข้อเสนอแนะในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยสถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกา

สถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกาได้เสนอข้อแนะนำในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (ACI 440.2R-08) เพื่อป้องกันการวิบัติแบบหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยทั้งการหลุดล่อนที่ปลายแผ่นและที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยใช้วิธีจำกัดค่าความเครียดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งกำหนดให้ ความเครียดประสิทธิผลในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ( $\epsilon_{fe}$ ) ที่สภาวะประลัยมีค่าไม่เกิน ความเครียดที่ถูกจำกัดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ( $\epsilon_{fd}$ ) แสดงดังสมการที่ (4.7) ซึ่งสมการที่ใช้คำนวณความเครียดที่ถูกจำกัดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยปรับปรุงมาจากสมการทำนายความเครียดหลุดล่อนของ Teng และคณะ (2003,2004) โดยอาศัยข้อมูลผลการทดสอบชิ้นตัวอย่างคานที่เสริมกำลังจำนวนมากซึ่งเกิดการวิบัติแบบหลุดล่อนและแบบฉีกขาดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ในการหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมของการจำกัดค่าความเครียดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่แสดงถึงพฤติกรรมการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

$$\epsilon_{fe} = \epsilon_{cu} \left( \frac{h-c}{c} \right) - \epsilon_{bi} \leq \epsilon_{fd} \quad (4.7)$$

โดย  $\epsilon_{fu}$ ,  $\epsilon_{fe}$ ,  $\epsilon_{cu}$  และ  $\epsilon_{fd}$  คือ ความเครียดฉีกขาดในการออกแบบของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ความเครียดประสิทธิผลในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ความเครียดประลัยของคอนกรีต และ ความเครียดที่ถูกจำกัดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ตามลำดับ

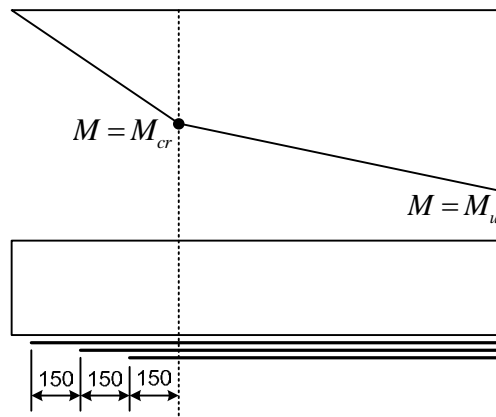
$\epsilon_{bi}$ ,  $h$  และ  $c$  คือ ความเครียดในเนื้อคอนกรีตขณะติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ความสูงของหน้าตัดคาน และความลึกของแกนสะเทิน ตามลำดับ

$$\epsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0.9\epsilon_{fu} \quad (4.8)$$

โดย  $n$ ,  $t_f$  และ  $E_f$  คือ จำนวนชั้นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ความหนาของแต่ละชั้น และ โมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ตามลำดับ

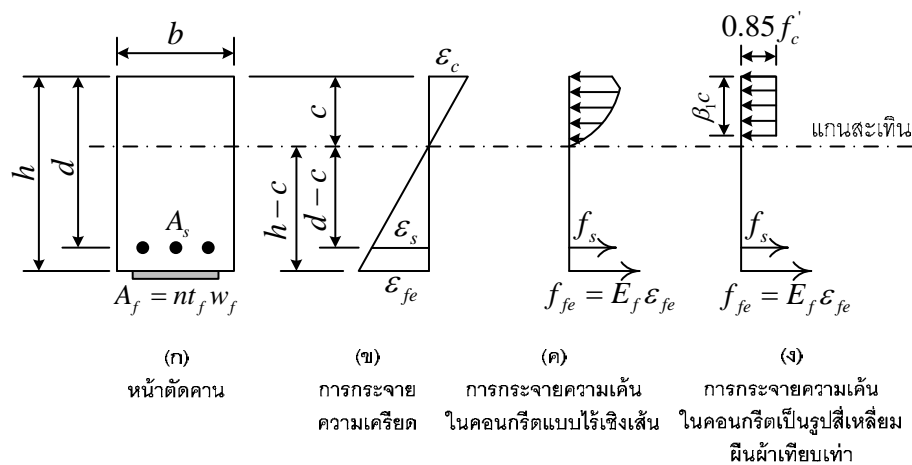
ตำแหน่งสิ้นสุดปลายแผ่นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากข้อแนะนำโดยสถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกา ได้กำหนดให้ตำแหน่งสิ้นสุดปลายแผ่นอยู่ที่ระยะซึ่งยาวเพิ่มอีกอย่างน้อย

150 มิลลิเมตรเข้าหาฐานรองรับจากตำแหน่งของคานซึ่งโมเมนต์ดัดกระทำมีค่าเท่ากับโมเมนต์ดัดแต่กร้าว ( $M_{cr}$ ) ในกรณีคานที่มีฐานรองรับแบบธรรมดา และสำหรับกรณีที่เสริมแผ่นพลาสติกเสริมเส้นในหลายชั้นตำแหน่งสิ้นสุดปลายแผ่นของชั้นถัดไปจะเพิ่มขึ้นอีก 150 มิลลิเมตรของชั้นก่อนหน้า ดังแสดงในภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 ตำแหน่งสิ้นสุดปลายแผ่น กรณีเสริมพอลิเมอร์เสริมเส้นใย 3 ชั้น

ข้อแนะนำโดยสถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกานี้ออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยด้วยวิธีภาวะสุดขีด (limit-states design) โดยกำหนดระดับความปลอดภัยที่สามารถยอมรับได้ให้สามารถต้านทานกับแรงกระทำในสภาวะใช้งาน (serviceability) และสภาวะประลัย (ultimate state) ในการประเมินกำลังต้านทานสูงสุดของส่วนของโครงสร้าง (nominal strength) ซึ่งการคำนวณออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังนี้ใช้ข้อสมมติฐานการกระจายของความเค้นและความเครียดของหน้าตัดคานแสดงดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 การกระจายของความเค้นและความเครียดของหน้าตัดคานภายใต้โมเมนต์ดัดกระทำ



จากข้อแนะนำในการออกแบบโดยสถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกาดังที่กล่าวข้างต้น โดยสมมติว่าไม่มีความเครียดในเนื้อคอนกรีตเกิดขึ้นขณะติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ( $\varepsilon_{bi} = 0$ ) สำหรับกรณีคานคอนกรีตเสริมเหล็กกับแรงดึงอย่างเดียวที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย สามารถแสดงขั้นตอนในคำนวณกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดของหน้าตัดได้ดังนี้

1. คำนวณความเค้นดึงประลัย ( $f_{fu}$ ) และความเครียดฉีกขาด ( $\varepsilon_{fu}$ ) ในการออกแบบของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในการออกแบบ

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^*$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^*$$

โดย  $f_{fu}^*$ ,  $\varepsilon_{fu}^*$  และ  $C_E$  คือ ความเครียดฉีกขาด ความเค้นดึงประลัยของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และตัวคูณลดสภาพแวดล้อม

2. การคำนวณคุณสมบัติของวัสดุขั้นต้น

ตัวคูณประกอบสำหรับความลึกของบล็อกการกระจายของความเค้นเทียบเท่า ( $\beta_1$ )

$$\beta_1 = \begin{cases} 0.85 & f_c' \leq 28 \text{ N/mm}^2 \\ 1.05 - 0.007 f_c' & \text{เมื่อ } 28 < f_c' \leq 56 \text{ N/mm}^2 \\ 0.65 & f_c' > 56 \text{ N/mm}^2 \end{cases}$$

โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ( $E_c$ )

$$E_c = 4733 \sqrt{f_c'} \quad (\text{N/mm}^2)$$

โดย  $f_c'$  คือ กำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต (จากแท่งตัวอย่างทรงกระบอก)

อัตราส่วนของเหล็กเสริม ( $\rho_s$ )

$$\rho_s = \frac{A_s}{bd}$$

โดย  $A_s$ ,  $b$  และ  $d$  คือ พื้นที่เหล็กเสริมรับแรงดึง ความกว้าง และความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัดคาน ตามลำดับ

พื้นที่ของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ( $A_f$ )

$$A_f = nt_f w_f$$

โดย  $n$ ,  $t_f$  และ  $w_f$  คือ จำนวนชั้น ความหนาของแต่ละชั้น และความกว้างของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ตามลำดับ

อัตราส่วนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ( $\rho_f$ )

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd}$$

3. คำนวณความเครียดที่ถูกจำกัดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ( $\varepsilon_{fd}$ )

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f_c'}{nE_f t_f}} \leq 0.9\varepsilon_{fu}$$

โดย  $E_f$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

4. สมมติความลึกของแกนสะเทิน ( $c$ )

5. คำนวณความเครียดประสิทธิผลในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ( $\varepsilon_{fe}$ )

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left( \frac{h-c}{c} \right)$$

โดย  $h$  และ  $\varepsilon_{cu}$  คือ ความลึกของหน้าตัดคาน และความเครียดประลัยของคอนกรีต (กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.003) ตามลำดับ

6. คำนวณความเครียดในเหล็กเสริม ( $\varepsilon_s$ )

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{fe} \left( \frac{d-c}{h-c} \right)$$

7. คำนวณความเค้นในเหล็กเสริม ( $f_s$ ) และความเค้นในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ( $f_{fe}$ )

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y$$

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

โดย  $f_y$  และ  $E_s$  คือ ความเค้นคราก และโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม ตามลำดับ

8. คำนวณและตรวจสอบสมมูลของแรงภายใน โดยเปรียบเทียบความลึกของแกน สะเทินกับความลึกของแกนสะเทินที่ถูกลมมิติ

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{0.85 f_c' \beta_1 b}$$

9. ถ้าขั้นตอนที่ 8 ไม่เป็นจริง กลับไปทำขั้นตอนที่ 4 จนกระทั่งสมมูลของแรงภายในเป็นจริง

10. ตรวจสอบความเครียดประสิทธิผลในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยให้ไม่ความเครียดที่ถูกจำกัดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

$$\varepsilon_{fe} \leq \varepsilon_{fd}$$

11. ถ้าขั้นตอนที่ 10 ไม่เป็นจริง แสดงว่าความเครียดที่ถูกจำกัดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเป็นค่าที่ควบคุมในการออกแบบ กลับไปทำขั้นตอนที่ 5 โดยกำหนดความเครียดประสิทธิผลในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยให้มีค่าเท่ากับความเครียดที่ถูกจำกัดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

12. คำนวณกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดของหน้าตัด ( $M_n$ )

$$M_n = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left( h - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

โดย  $\psi_f$  คือ ตัวคูณลดกำลังเพิ่มเติมของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย มีค่าเท่ากับ 0.85

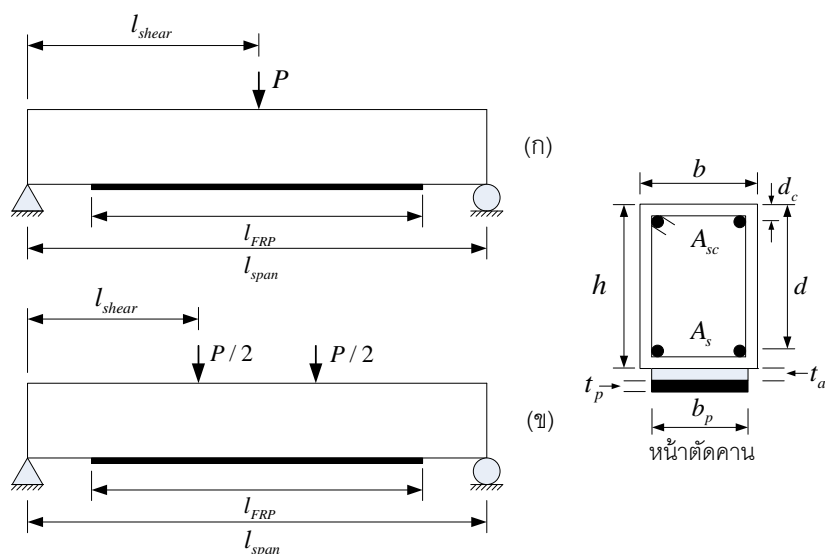
## บทที่ 5

### การตรวจสอบแบบจำลองกับผลการทดสอบและการศึกษาตัวแปรที่มี ผลกระทบต่อการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

จากการวิเคราะห์การหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในคานาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยในบทที่ 4 ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลของคานาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังซึ่งวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย จะถูกศึกษาใน 3 หัวข้อ คือ ผลการทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ความเหมาะสมของข้อแนะนำในการออกแบบคานาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยสถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกา และการศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

#### 5.1 ผลการทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

จากงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งทำการทดสอบคานาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยภายใต้การทดสอบการดัดสามจุดหรือสี่จุด โดยมีเรขาคณิตและแรงกระทำแสดงดังภาพที่ 5.1 ถูกใช้ในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลระหว่างแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นจากการทำนายด้วยแบบจำลองกับแรงกระทำสูงสุดที่ทำให้เกิดการวิบัติจริงจากการทดสอบ



ภาพที่ 5.1 เรขาคณิตและแรงกระทำบนคานทดสอบในงานวิจัยต่างๆ

(ก) การทดสอบการดัดสามจุด (ข) การทดสอบการดัดสี่จุด

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาชิ้นตัวอย่างคาน 28 ชิ้นตัวอย่าง จากงานวิจัยแหล่งต่างๆ 11 งานวิจัย ซึ่งเสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ไม่ถูกอัดแรง และไม่มี การติดตั้งตัวยึดทางกลเพื่อช่วยเพิ่มการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยทั้งหมด เกิดการวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งมีขอบเขตของข้อมูลดังนี้ รูปแบบของแรงกระทำเป็นการทดสอบการดัดสามจุดและการทดสอบการดัดสี่จุด ชนิดของวัสดุเสริมเส้นใยประกอบด้วย แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยอะรามิด (AFRP) และแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นระหว่าง 36 ถึง 235 กิโลนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ความยาวช่วงคานมีช่วงระหว่าง 1350 ถึง 4800 มิลลิเมตร ความยาวช่วงแรงเฉือนมีช่วงระหว่าง 450 ถึง 1982.5 มิลลิเมตร อัตราส่วนของเหล็กเสริมมีช่วงระหว่าง 0.58 ถึง 2.11 % อัตราส่วนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีช่วงระหว่าง 0.06 ถึง 1.13 % กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตมีช่วงระหว่าง 24 ถึง 80 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร และขนาดหน้าตัดคานเล็กสุดและใหญ่สุด คือ 115x146 มิลลิเมตร และ 368x467 มิลลิเมตร ตามลำดับ ข้อมูลเรขาคณิตและคุณสมบัติของวัสดุของคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแสดง ดังตารางที่ 5.1 โดย  $l_{span}$ ,  $l_{shear}$ ,  $l_{FRP}$ ,  $b$ ,  $h$ ,  $d$ ,  $d_c$ ,  $A_s$ ,  $A_{sc}$ ,  $f_{y-s}$ ,  $E_s$ ,  $f'_c$ ,  $b_p$ ,  $t_p$ ,  $t_a$ ,  $f_{pu}$  และ  $E_p$  คือ ความยาวช่วงคาน ความยาวช่วงแรงเฉือน ความยาวของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ความกว้างของหน้าตัดคาน ความลึกของหน้าตัดคาน ความลึกประสิทธิภาพผลของเหล็กเสริมรับแรงดึง ความลึกประสิทธิภาพผลของเหล็กเสริมรับแรงอัด พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงดึง พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงอัด ความเค้นครากของเหล็กเสริม โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม กำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต (จากแท่งตัวอย่างทรงกระบอก) ความกว้างของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ความหนาของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ความหนาของวัสดุประสาน กำลังดึงประลัยของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และโมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลเรขาคณิตและคุณสมบัติของวัสดุของคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในงานวิจัยที่ผ่านมา

| อ้างอิง                        | ชั้นตัวอย่าง<br>คาน | ข้อมูลเรขาคณิต |             |           |      |      |      |       | เหล็กเสริม         |                    |                      |                       | คอนกรีต              | แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย |       |       |                      |                       |
|--------------------------------|---------------------|----------------|-------------|-----------|------|------|------|-------|--------------------|--------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------|-------|-------|----------------------|-----------------------|
|                                |                     | $l_{span}$     | $l_{shear}$ | $l_{FRP}$ | $b$  | $h$  | $d$  | $d_c$ | $A_s$              | $A_{sc}$           | $f_{y_s}$            | $E_s$                 | $f_c'$               | $b_p$                    | $t_p$ | $t_a$ | $f_{pu}$             | $E_p$                 |
|                                |                     | (mm)           | (mm)        | (mm)      | (mm) | (mm) | (mm) | (mm)  | (mm <sup>2</sup> ) | (mm <sup>2</sup> ) | (N/mm <sup>2</sup> ) | (kN/mm <sup>2</sup> ) | (N/mm <sup>2</sup> ) | (mm)                     | (mm)  | (mm)  | (N/mm <sup>2</sup> ) | (kN/mm <sup>2</sup> ) |
| Saadatmanesh และ Ehsani (1991) | B                   | 4575           | 1982.5      | 4265      | 205  | 455  | 400  | 55    | 1013.4             | 253.4              | 456                  | 200                   | 35.00                | 152                      | 6.00  | 1.5   | 400                  | 37.2                  |
| Kishi และคณะ (1998)            | A200-1              | 2600           | 1050        | 2500      | 150  | 250  | 210  | 40    | 402.1              | 402.1              | 378.2                | 205.8                 | 24.81                | 130                      | 0.138 | 0.636 | 2480                 | 126.5                 |
|                                | A415-1              | 2600           | 1050        | 2500      | 150  | 250  | 210  | 40    | 402.1              | 402.1              | 378.2                | 205.8                 | 24.81                | 130                      | 0.286 | 0.636 | 2480                 | 126.5                 |
|                                | A623-1              | 2600           | 1050        | 2500      | 150  | 250  | 210  | 40    | 402.1              | 402.1              | 378.2                | 205.8                 | 24.81                | 130                      | 0.429 | 0.636 | 2480                 | 126.5                 |
|                                | C300-1              | 2600           | 1050        | 2500      | 150  | 250  | 210  | 40    | 402.1              | 402.1              | 378.2                | 205.8                 | 24.81                | 130                      | 0.167 | 0.636 | 4070                 | 230.5                 |
|                                | C445-1              | 2600           | 1050        | 2500      | 150  | 250  | 210  | 40    | 402.1              | 402.1              | 378.2                | 205.8                 | 24.81                | 130                      | 0.248 | 0.636 | 4070                 | 230.5                 |
| Spadea และคณะ (1998)           | A3.1                | 4800           | 1800        | 4700      | 140  | 300  | 263  | 37    | 402.1              | 402.1              | 435                  | 200                   | 24.00                | 80                       | 1.20  | 2     | 2300                 | 152                   |
| Baber และคณะ (1999)            | VR5                 | 2349           | 783         | 2199      | 120  | 250  | 214  | 34    | 157.1              | 56.5               | 565                  | 200                   | 33.58                | 120                      | 0.44  | 2     | 3400                 | 230                   |
|                                | VR7                 | 2349           | 783         | 2199      | 120  | 250  | 214  | 34    | 157.1              | 56.5               | 565                  | 200                   | 33.58                | 120                      | 0.77  | 2     | 3400                 | 230                   |
|                                | VR9                 | 2349           | 783         | 2199      | 120  | 250  | 214  | 34    | 157.1              | 56.5               | 565                  | 200                   | 33.58                | 120                      | 1.10  | 2     | 3400                 | 230                   |
| Tumialan และคณะ (1999)         | A1                  | 2130           | 1065        | 2130      | 150  | 300  | 250  | -     | 792                | -                  | 427                  | 207                   | 51.70                | 150                      | 0.165 | 0.636 | 3400                 | 230                   |
|                                | A2                  | 2130           | 1065        | 2130      | 150  | 300  | 250  | -     | 792                | -                  | 427                  | 207                   | 51.70                | 150                      | 0.330 | 0.636 | 3400                 | 230                   |
|                                | A7                  | 2130           | 1065        | 2130      | 150  | 300  | 250  | -     | 792                | -                  | 427                  | 207                   | 51.70                | 75                       | 0.330 | 0.636 | 3400                 | 230                   |
|                                | C1                  | 2130           | 1065        | 2130      | 150  | 300  | 250  | -     | 792                | -                  | 427                  | 207                   | 51.70                | 150                      | 0.165 | 0.636 | 3400                 | 230                   |
| Chan และคณะ (2001)             | B2                  | 4600           | 1600        | 4500      | 250  | 470  | 430  | 40    | 628.3              | 402.1              | 505                  | 200                   | 42.40                | 150                      | 1.20  | 2     | 3180                 | 181                   |
|                                | B3                  | 4600           | 1600        | 4500      | 250  | 470  | 430  | 40    | 942.5              | 402.1              | 505                  | 200                   | 42.40                | 150                      | 1.20  | 2     | 3180                 | 181                   |
|                                | B6                  | 4600           | 1600        | 3700      | 250  | 470  | 430  | 40    | 628.3              | 402.1              | 505                  | 200                   | 42.40                | 150                      | 1.20  | 2     | 3180                 | 181                   |
|                                | B8                  | 4600           | 1600        | 3700      | 250  | 470  | 430  | 40    | 1256.6             | 402.1              | 505                  | 200                   | 42.40                | 150                      | 1.20  | 2     | 3180                 | 181                   |

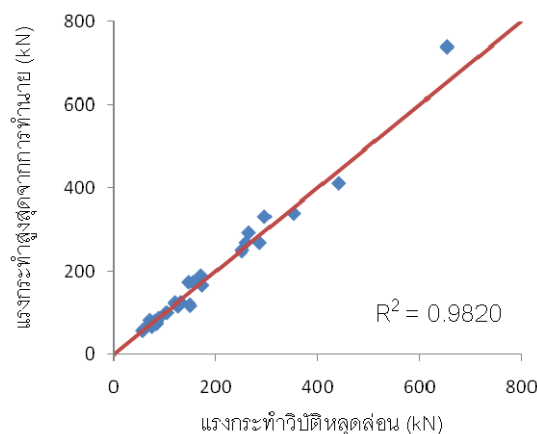
หมายเหตุ: \*ค่าที่ถูกลมมติ

| อ้างอิง                      | ชนิดตัวอย่าง | ข้อมูลเรขาคณิต |             |           |      |      |      |       | เหล็กเสริม         |                    |                      |                       | คอนกรีต              | แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย |       |       |                      |                       |
|------------------------------|--------------|----------------|-------------|-----------|------|------|------|-------|--------------------|--------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------|-------|-------|----------------------|-----------------------|
|                              |              | $l_{span}$     | $l_{shear}$ | $l_{FRP}$ | $b$  | $h$  | $d$  | $d_c$ | $A_s$              | $A_{sc}$           | $f_{y-s}$            | $E_s$                 | $f_c'$               | $b_p$                    | $t_p$ | $t_a$ | $f_{pu}$             | $E_p$                 |
|                              |              | คาน            | (mm)        | (mm)      | (mm) | (mm) | (mm) | (mm)  | (mm <sup>2</sup> ) | (mm <sup>2</sup> ) | (N/mm <sup>2</sup> ) | (kN/mm <sup>2</sup> ) | (N/mm <sup>2</sup> ) | (mm)                     | (mm)  | (mm)  | (N/mm <sup>2</sup> ) | (kN/mm <sup>2</sup> ) |
| Fanning และ Kelly (2001)     | F4           | 2800           | 1100        | 2800      | 155  | 240  | 203  | 37    | 339                | 226                | 532                  | 204                   | 80.00                | 120                      | 1.20  | 3     | 2400                 | 155                   |
| Rahimi และ Hutchinson (2001) | B3           | 2100           | 750         | 1930      | 200  | 150  | 120  | 30    | 157.1              | 100.5              | 575                  | 210                   | 40.00                | 150                      | 0.40  | 2     | 1532                 | 127                   |
|                              | B5           | 2100           | 750         | 1930      | 200  | 150  | 120  | 30    | 157.1              | 100.5              | 575                  | 210                   | 40.00                | 150                      | 1.20  | 2     | 1532                 | 127                   |
|                              | B7           | 2100           | 750         | 1930      | 200  | 150  | 120  | 30    | 157.1              | 100.5              | 575                  | 210                   | 40.00                | 150                      | 1.80  | 2     | 1074                 | 36                    |
| Gao และคณะ (2004)            | A0           | 1500           | 500         | 1200      | 150  | 200  | 162  | 27    | 157.1              | 100.5              | 531                  | 200                   | 35.70                | 75                       | 0.22  | 2     | 4200                 | 235                   |
| Maalej และ Leong (2005)      | A5           | 1500           | 500         | 1450      | 115  | 146  | 120  | 26    | 235.6              | 157.1              | 547                  | 180                   | 42.80                | 107.8                    | 0.33  | 0.636 | 3550                 | 235                   |
|                              | B3           | 3000           | 1000        | 2900      | 230  | 292  | 240  | 52    | 942.5              | 628.3              | 544                  | 183                   | 42.80                | 215.6                    | 0.33  | 0.636 | 3550                 | 235                   |
|                              | B5           | 3000           | 1000        | 2900      | 230  | 292  | 240  | 52    | 942.5              | 628.3              | 544                  | 183                   | 42.80                | 215.6                    | 0.66  | 0.636 | 3550                 | 235                   |
|                              | C3           | 4800           | 1600        | 4640      | 368  | 467  | 384  | 83    | 2412.7             | 1608.5             | 552                  | 181                   | 42.80                | 368                      | 0.495 | 0.636 | 3550                 | 235                   |
| Buyukozturk และคณะ (2009)    | S2PF7M       | 1350           | 450         | 1270      | 150  | 180  | 150  | 30    | 392                | 142                | 440                  | 200                   | 41.40                | 38.1                     | 1.20  | 2     | 2800                 | 165                   |

หมายเหตุ: \*ค่าที่ถูกลมมติ

การวิเคราะห์การหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยด้วยแบบจำลองทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (หัวข้อที่ 4.2) ให้ผลการทำนายแรงกระทำแสดงดังตารางที่ 5.2 โดย  $P_{exp}$ ,  $P_{pred}$  และ  $P_{pred}/P_{exp}$  คือ แรงกระทำวิบัติหลุดล่อนจากการทดสอบ แรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นจากการทำนายด้วยแบบจำลอง และอัตราส่วนระหว่างผลการทำนายแรงกระทำต่อผลการทดสอบตามลำดับ

จากตารางที่ 5.2 พบว่าผลการทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของชิ้นตัวอย่างคานทั้งหมดสามารถทำนายได้ถึงลักษณะการวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (IC debonding) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบโดยเกิดขึ้นก่อนการวิบัติแบบเหล็กเสริมรับแรงดึงครากตามด้วยคอนกรีตถูกบีบอัดจนแตก (ความเครียดประลัยของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 0.004) หรือเหล็กเสริมรับแรงดึงครากตามด้วยการฉีกขาดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย การเปรียบเทียบระหว่างผลการทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนกับผลการทดลองสามารถแสดงด้วย  $P_{pred}/P_{exp}$  ซึ่งจากข้อมูลชิ้นตัวอย่างคานที่ศึกษาพบว่า  $P_{pred}/P_{exp}$  มีช่วงระหว่าง 0.80 ถึง 1.19 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.01 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.09 และสัมประสิทธิ์ของการแปรผันเท่ากับ 9% ดังนั้นจะเห็นว่าแบบจำลองนี้ให้ผลการทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ดี ทั้งนี้ความสามารถในการทำนายของแบบจำลองยืนยันได้จากกราฟระหว่างผลการทำนายกับผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 5.2 พบว่ามีการกระจายตัวน้อยเมื่อเทียบกับเส้นตรง  $45^\circ$  ซึ่งแสดงความสอดคล้องกันอย่างสมบูรณ์ของผลการทำนายกับผลการทดสอบ โดยมีสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจหรือ  $R^2$  เท่ากับ 0.9820



ภาพที่ 5.2 กราฟระหว่างผลการทำนายกับผลการทดสอบ



ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนในช่วง  
ภายในของแผ่นกับแรงกระทำวิบัติหลุดล่อน

| อ้างอิง                        | ชนิดตัวอย่าง | ชนิดของ FRP | ลักษณะการทดสอบ      | ผลการทดสอบ     |                                 | $P_{pred} / P_{exp}$ |
|--------------------------------|--------------|-------------|---------------------|----------------|---------------------------------|----------------------|
|                                |              |             |                     | $P_{exp}$ (kN) | ลักษณะการวิบัติ $P_{pred}$ (kN) |                      |
| Saadatmanesh และ Ehsani (1991) | B            | GFRP        | Four point bending  | 250            | IC debonding 249.8              | 1.00                 |
| Kishi และคณะ (1998)            | A200-1       | AFRP        | Four point bending  | 74             | IC debonding 67.3               | 0.91                 |
|                                | A415-1       | AFRP        | Four point bending  | 83.4           | IC debonding 74.3               | 0.89                 |
|                                | A623-1       | AFRP        | Four point bending  | 79             | IC debonding 80                 | 1.01                 |
|                                | C300-1       | CFRP        | Four point bending  | 79.2           | IC debonding 75                 | 0.95                 |
|                                | C445-1       | CFRP        | Four point bending  | 84             | IC debonding 80.8               | 0.96                 |
| Spadea และคณะ (1998)           | A3.1         | CFRP        | Four point bending  | 74.8           | IC debonding 72.5               | 0.97                 |
| Baber และคณะ (1999)            | VR5          | CFRP        | Four point bending  | 102.2          | IC debonding 101.3              | 0.99                 |
|                                | VR7          | CFRP        | Four point bending  | 124.2          | IC debonding 117                | 0.94                 |
|                                | VR9          | CFRP        | Four point bending  | 129.6          | IC debonding 124.3              | 0.96                 |
| Tumialan และคณะ (1999)         | A1           | CFRP        | Three point bending | 145.6          | IC debonding 173.5              | 1.19                 |
|                                | A2           | CFRP        | Three point bending | 169.8          | IC debonding 189.6              | 1.12                 |
|                                | A7           | CFRP        | Three point bending | 172.2          | IC debonding 166.35             | 0.97                 |
|                                | C1           | CFRP        | Three point bending | 154.4          | IC debonding 173.5              | 1.12                 |
| Chan และคณะ (2001)             | B2           | CFRP        | Four point bending  | 285            | IC debonding 268                | 0.94                 |
|                                | B3           | CFRP        | Four point bending  | 352            | IC debonding 339.6              | 0.96                 |
|                                | B6           | CFRP        | Four point bending  | 258            | IC debonding 268                | 1.04                 |
|                                | B8           | CFRP        | Four point bending  | 440            | IC debonding 411.3              | 0.93                 |
| Fanning และ Kelly (2001)       | F4           | CFRP        | Four point bending  | 118.5          | IC debonding 124                | 1.05                 |
| Rahimi และ Hutchinson (2001)   | B3           | CFRP        | Four point bending  | 55.2           | IC debonding 57.1               | 1.03                 |
|                                | B5           | CFRP        | Four point bending  | 69.7           | IC debonding 82.9               | 1.19                 |
|                                | B7           | GFRP        | Four point bending  | 59.1           | IC debonding 62.5               | 1.06                 |
| Gao และคณะ (2004)              | A0           | CFRP        | Four point bending  | 80.7           | IC debonding 77.2               | 0.96                 |
| Maalej และ Leong (2005)        | A5           | CFRP        | Four point bending  | 87.4           | IC debonding 87.9               | 1.01                 |
|                                | B3           | CFRP        | Four point bending  | 263.5          | IC debonding 292.7              | 1.11                 |
|                                | B5           | CFRP        | Four point bending  | 294.7          | IC debonding 331.8              | 1.13                 |
|                                | C3           | CFRP        | Four point bending  | 652.9          | IC debonding 739.6              | 1.13                 |
| Buyukozturk และคณะ (2009)      | S2PF7M       | CFRP        | Four point bending  | 148.3          | IC debonding 118.5              | 0.80                 |
|                                |              |             |                     |                | ค่าเฉลี่ย                       | 1.01                 |
|                                |              |             |                     |                | ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน            | 0.09                 |
|                                |              |             |                     |                | สัมประสิทธิ์ของการแปรผัน (%)    | 9                    |
|                                |              |             |                     |                | ค่าสูงสุด                       | 1.19                 |
|                                |              |             |                     |                | ค่าต่ำสุด                       | 0.80                 |

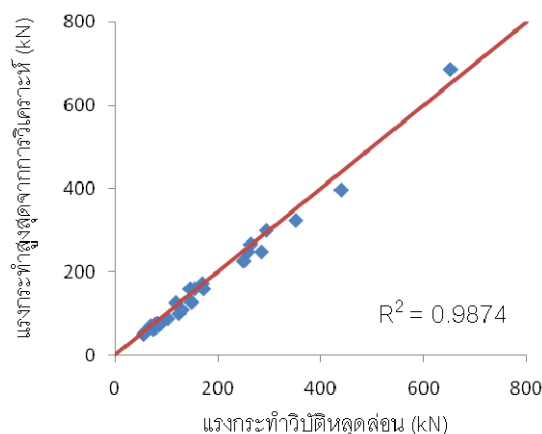
ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์แรงกระทำสูงสุดโดย ACI ที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังสามารถต้านทานกับแรงกระทำวิบัติหูลดก่อน

| อ้างอิง                        | ชนิดตัวอย่าง | ชนิดของ FRP | ลักษณะการทดสอบ      | ผลการทดสอบ     |                              | ผลการวิเคราะห์โดย ACI |                     |
|--------------------------------|--------------|-------------|---------------------|----------------|------------------------------|-----------------------|---------------------|
|                                |              |             |                     | $P_{exp}$ (kN) | ลักษณะการวิบัติ              | $P_{ACI}$ (kN)        | $P_{ACI} / P_{exp}$ |
| Saadatmanesh และ Ehsani (1991) | B            | GFRP        | Four point bending  | 250            | debonding                    | 225.6                 | 0.90                |
| Kishi และคณะ (1998)            | A200-1       | AFRP        | Four point bending  | 74             | concrete crushing            | 63.4                  | 0.86                |
|                                | A415-1       | AFRP        | Four point bending  | 83.4           | debonding                    | 70.9                  | 0.85                |
|                                | A623-1       | AFRP        | Four point bending  | 79             | debonding                    | 74.7                  | 0.95                |
|                                | C300-1       | CFRP        | Four point bending  | 79.2           | debonding                    | 71.4                  | 0.90                |
|                                | C445-1       | CFRP        | Four point bending  | 84             | debonding                    | 75.2                  | 0.90                |
| Spadea และคณะ (1998)           | A3.1         | CFRP        | Four point bending  | 74.8           | debonding                    | 62.7                  | 0.84                |
| Baber และคณะ (1999)            | VR5          | CFRP        | Four point bending  | 102.2          | debonding                    | 87.2                  | 0.85                |
|                                | VR7          | CFRP        | Four point bending  | 124.2          | debonding                    | 99.8                  | 0.80                |
|                                | VR9          | CFRP        | Four point bending  | 129.6          | debonding                    | 109.5                 | 0.84                |
| Tumialan และคณะ (1999)         | A1           | CFRP        | Three point bending | 145.6          | concrete crushing            | 159.1                 | 1.09                |
|                                | A2           | CFRP        | Three point bending | 169.8          | concrete crushing            | 171.9                 | 1.01                |
|                                | A7           | CFRP        | Three point bending | 172.2          | concrete crushing            | 159.1                 | 0.92                |
|                                | C1           | CFRP        | Three point bending | 154.4          | concrete crushing            | 159.1                 | 1.03                |
| Chan และคณะ (2001)             | B2           | CFRP        | Four point bending  | 285            | debonding                    | 248.1                 | 0.87                |
|                                | B3           | CFRP        | Four point bending  | 352            | debonding                    | 323.7                 | 0.92                |
|                                | B6           | CFRP        | Four point bending  | 258            | debonding                    | 248.1                 | 0.96                |
|                                | B8           | CFRP        | Four point bending  | 440            | debonding                    | 396.7                 | 0.90                |
| Fanning และ Kelly (2001)       | F4           | CFRP        | Four point bending  | 118.5          | debonding                    | 125.8                 | 1.06                |
| Rahimi และ Hutchinson (2001)   | B3           | CFRP        | Four point bending  | 55.2           | debonding                    | 50.4                  | 0.91                |
|                                | B5           | CFRP        | Four point bending  | 69.7           | debonding                    | 70.2                  | 1.01                |
|                                | B7           | GFRP        | Four point bending  | 59.1           | debonding                    | 56                    | 0.95                |
| Gao และคณะ (2004)              | A0           | CFRP        | Four point bending  | 80.7           | debonding                    | 75.9                  | 0.94                |
| Maalej และ Leong (2005)        | A5           | CFRP        | Four point bending  | 87.4           | concrete crushing            | 75.1                  | 0.86                |
|                                | B3           | CFRP        | Four point bending  | 263.5          | concrete crushing            | 266.2                 | 1.01                |
|                                | B5           | CFRP        | Four point bending  | 294.7          | concrete crushing            | 299.5                 | 1.02                |
|                                | C3           | CFRP        | Four point bending  | 652.9          | concrete crushing            | 686.1                 | 1.05                |
| Buyukozturk และคณะ (2009)      | S2PF7M       | CFRP        | Four point bending  | 148.3          | debonding                    | 127.2                 | 0.86                |
|                                |              |             |                     |                | ค่าเฉลี่ย                    | 0.93                  |                     |
|                                |              |             |                     |                | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน          | 0.08                  |                     |
|                                |              |             |                     |                | สัมประสิทธิ์ของการแปรผัน (%) | 8                     |                     |
|                                |              |             |                     |                | ค่าสูงสุด                    | 1.09                  |                     |
|                                |              |             |                     |                | ค่าต่ำสุด                    | 0.80                  |                     |

## 5.2 ความเหมาะสมของข้อเสนอในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยสถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกา

แรงกระทำบนคานที่ทำให้โมเมนต์ดัดสูงสุดมีค่าเท่ากับกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยซึ่งคำนวณตามข้อเสนอแนะในการออกแบบโดยสถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกาเพื่อป้องกันการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (เห็นข้อที่ 4.3) ให้ผลการวิเคราะห์แรงกระทำสูงสุดแสดงดังตารางที่ 5.3 โดย  $P_{exp}$ ,  $P_{ACI}$  และ  $P_{ACI}/P_{exp}$  คือ แรงกระทำวิบัติหลุดล่อนจากการทดสอบ แรงกระทำสูงสุดที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังสามารถต้านทานจากข้อเสนอแนะในการออกแบบโดยสถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกา และอัตราส่วนระหว่างผลการวิเคราะห์แรงกระทำสูงสุดโดย ACI ต่อผลการทดสอบตามลำดับ

จากตารางที่ 5.3 พบว่าผลการวิเคราะห์แรงกระทำสูงสุดของชิ้นตัวอย่างคานสามารถวิเคราะห์ได้ถึงลักษณะการวิบัติแบบหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (debonding) จำนวน 19 ชิ้นตัวอย่าง และการวิบัติแบบเหล็กเสริมรับแรงดึงครากตามด้วยคอนกรีตถูกบีบอัดจนแตก (concrete crushing) จำนวน 9 ชิ้นตัวอย่าง การเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์แรงกระทำสูงสุดโดย ACI กับผลการทดลองสามารถแสดงด้วย  $P_{ACI}/P_{exp}$  ซึ่งจากข้อมูลชิ้นตัวอย่างคานที่ศึกษา พบว่าข้อเสนอแนะในการออกแบบนี้ให้ผลการวิเคราะห์แรงกระทำสูงสุดที่มีแนวโน้มให้ค่าต่ำกว่าผลการทดสอบ (conservative) โดย  $P_{ACI}/P_{exp}$  มีช่วงระหว่าง 0.80 ถึง 1.09 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.93 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.08 และสัมประสิทธิ์ของการแปรผันเท่ากับ 8 % จากภาพที่ 5.3 แสดงการกระจายตัวของผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบ ซึ่งมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9874



ภาพที่ 5.3 กราฟระหว่างผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบ

การเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนระหว่างผลการวิเคราะห์แรงกระทำสูงสุดโดย ACI ต่อผลการทดสอบ ( $P_{ACI}/P_{exp}$ ) กับอัตราส่วนระหว่างผลการทำนายแรงกระทำต่อผลการทดสอบ ( $P_{pred}/P_{exp}$ ) พบว่าแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองให้ค่าที่แม่นยำกว่าแรงกระทำสูงสุดที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังสามารถต้านทานได้ซึ่งคำนวณจากข้อแนะนำในการออกแบบโดยสถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกา เปรียบเทียบจากค่าเฉลี่ยของ  $P_{pred}/P_{exp}$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่าค่าเฉลี่ยของ  $P_{ACI}/P_{exp}$  แต่ผลการทำนายแรงกระทำมีการกระจายตัวมากกว่าผลการวิเคราะห์แรงกระทำสูงสุดเล็กน้อย พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรผันของ  $P_{pred}/P_{exp}$  ซึ่งมีค่ามากกว่าสัมประสิทธิ์ของการแปรผันของ  $P_{ACI}/P_{exp}$

จากอัตราส่วนระหว่างผลการวิเคราะห์แรงกระทำสูงสุดโดย ACI ต่อผลการทดสอบ ( $P_{ACI}/P_{exp}$ ) ของชิ้นตัวอย่างคานที่ศึกษา พบว่าชิ้นตัวอย่างคาน 20 ชิ้นตัวอย่างมีค่า  $P_{ACI}/P_{exp}$  น้อยกว่า 1 หรือก็คือประมาณ 71% ของผลการวิเคราะห์นั้นให้ค่าแรงกระทำสูงสุดที่ปลอดภัย ดังนั้น ข้อแนะนำในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยสถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกามีแนวโน้มให้ผลการวิเคราะห์แรงกระทำสูงสุดที่ต่ำกว่าผลการทดสอบสำหรับกรณีการวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย อย่างไรก็ตาม ส่วนหนึ่งของผลการวิเคราะห์พบว่ากรณีการวิบัติเกิดขึ้นโดยเหล็กเสริมรับแรงดึงครากตามด้วยคอนกรีตถูกบีบอัดจนแตก (concrete crushing) ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลการทดสอบ เนื่องจากข้อแนะนำในการออกแบบโดยสถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกาเป็นแบบจำลองที่ได้จากการทดสอบ (empirical model) และอาศัยประสบการณ์ที่ผ่านมาของวิศวกร ประกอบกับสมการที่ใช้คำนวณความเครียดที่ถูกจำกัดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ( $\epsilon_{fd}$ ) เป็นตัวแปรที่ใช้ในการจำกัดความเครียดสูงสุดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่สามารถใช้ได้ ซึ่งไม่ได้พิจารณาถึงผลกระทบของเหล็กเสริมภายในคาน และคุณสมบัติของชั้นวัสดุประสาน และอัตราส่วนระหว่างความกว้างของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อความกว้างของหน้าตัดคาน เป็นต้น

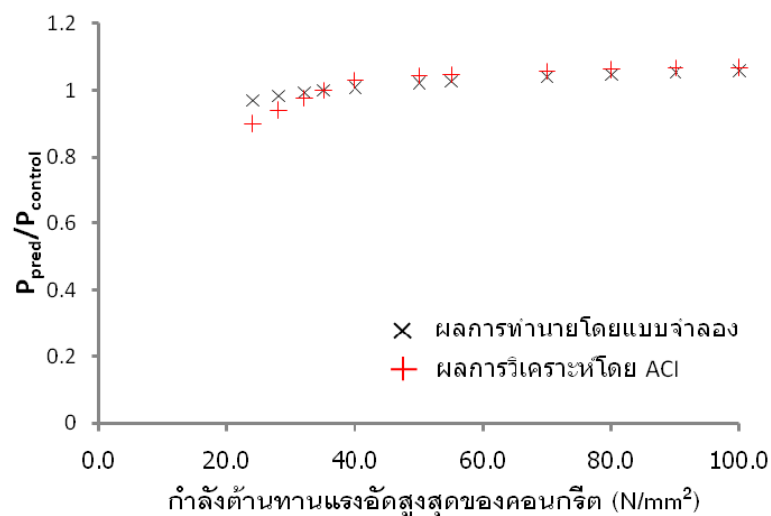
### 5.3 การศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

การวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรที่มีต่อการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยทำโดยใช้แบบจำลองในการศึกษาเพื่อทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการหลุดล่อนพิจารณาจากเกณฑ์การวิบัติหลุดล่อนของแบบจำลองและการวิเคราะห์หน้าตัด พบว่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต ( $f'_c$ ) อัตราส่วนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ( $\rho_f$ ) อัตราส่วนของเหล็กเสริม ( $\rho_s$ ) และโมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ( $E_p$ ) เป็นตัวแปรหลักซึ่งส่งผลกระทบต่อแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในแผ่น ( $P_{pred}$ ) จึงทำการแปรผันค่าของตัวแปรดังกล่าว เพื่อศึกษาผลกระทบที่มีต่อการวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย กำหนดให้ขึ้นตัวอย่างคานควบคุม (control beam) เสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวและเสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยยาวตลอดช่วงคานภายใต้การทดสอบการดัดสี่จุด และสมมติว่าเสริมกำลังรับแรงเฉือนเพียงพอเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการวิบัติแบบเฉือน ซึ่งช่วงของค่าตัวแปรที่ศึกษาพิจารณาเฉพาะช่วงที่การวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (IC debonding) เกิดขึ้นก่อนการวิบัติลักษณะอื่น (concrete crushing หรือ FRP rupture) โดยมีข้อมูลเรขาคณิตและคุณสมบัติของวัสดุแสดงดังนี้  $l_{span} = 2000$  มิลลิเมตร  $l_{shear} = 775$  มิลลิเมตร  $b = 150$  มิลลิเมตร  $h = 300$  มิลลิเมตร  $d = 255$  มิลลิเมตร  $A_s = 226$  ตารางมิลลิเมตร  $f_{y_s} = 400$  นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร  $E_s = 200$  กิโลนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร  $f'_c = 35$  นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร  $b_p = 150$  มิลลิเมตร  $t_p = 0.165$  มิลลิเมตร  $t_a = 0.636$  มิลลิเมตร  $f_{pu} = 3550$  นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร และ  $E_p = 235$  กิโลนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร จากการคำนวณแรงกระทำที่ทำให้เกิดการวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของขึ้นตัวอย่างคานควบคุม ( $P_{control}$ ) มีค่าเท่ากับ 100.3 กิโลนิวตัน โดยมี  $\rho_f$  เท่ากับ 0.065%,  $\rho_{balance}$  เท่ากับ 3.57% และ  $\rho_s$  เท่ากับ 0.591% เพื่อประกอบการพิจารณาจึงทำการเปรียบเทียบร่วมกับผลการวิเคราะห์แรงกระทำสูงสุดที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังสามารถต้านทานได้ซึ่งคำนวณจากข้อแนะนำในการออกแบบโดยสถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกา ( $P_{control}$  มีค่าเท่ากับ 99.5 กิโลนิวตัน) ซึ่งข้อมูลจากการวิเคราะห์ที่ได้แสดงในภาคผนวก ข

#### 5.3.1 กำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต

กำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต ( $f'_c$ ) จากแบบจำลองในการคำนวณแรงกระทำสูงสุดที่สามารถส่งผ่านของรอยต่อยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยควรมีช่วงระหว่าง 24 ถึง 58 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (Nakaba และคณะ,

2001) ซึ่งแรงกระทำสูงสุดที่สามารถส่งผ่าน ( $P_{max}$ ) ถูกใช้เป็นเกณฑ์ในการวิเคราะห์การหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยสำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลัง ผลกระทบเนื่องจากกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต พิจารณาจากอัตราส่วนระหว่างแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของชิ้นตัวอย่างคานควบคุมซึ่งทำการแปรผันกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตต่อแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของชิ้นตัวอย่างคานควบคุมซึ่งมีกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตเท่ากับ 35 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ( $P_{pred}/P_{control}$ ) พบว่าการเพิ่มกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตให้มีค่าสูงขึ้นส่งผลให้ค่า  $P_{pred}/P_{control}$  เพิ่มขึ้นเล็กน้อยแสดงดังภาพที่ 5.4 ดังนั้นกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตจึงมีผลกระทบต่อการวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ผลการวิเคราะห์แรงกระทำสูงสุดโดย ACI พบว่ามีความสอดคล้องกับผลการทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยแบบจำลอง

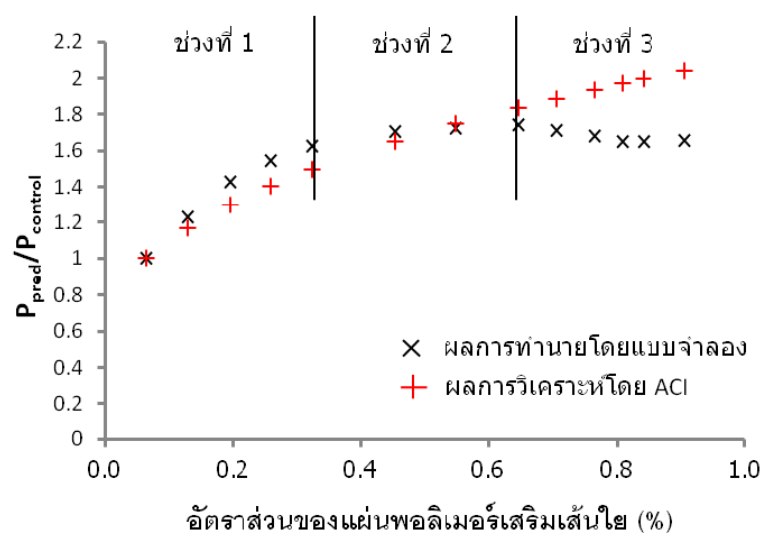


ภาพที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $P_{pred}/P_{control}$  และกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต

### 5.3.2 อัตราส่วนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

จากภาพที่ 5.5 แสดงผลกระทบเนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ( $\rho_f$ ) โดยเพิ่มความหนาของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย พบว่าจากแบบจำลองในการทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $P_{pred}/P_{control}$  และอัตราส่วนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยซึ่งประกอบด้วย 3 ช่วง

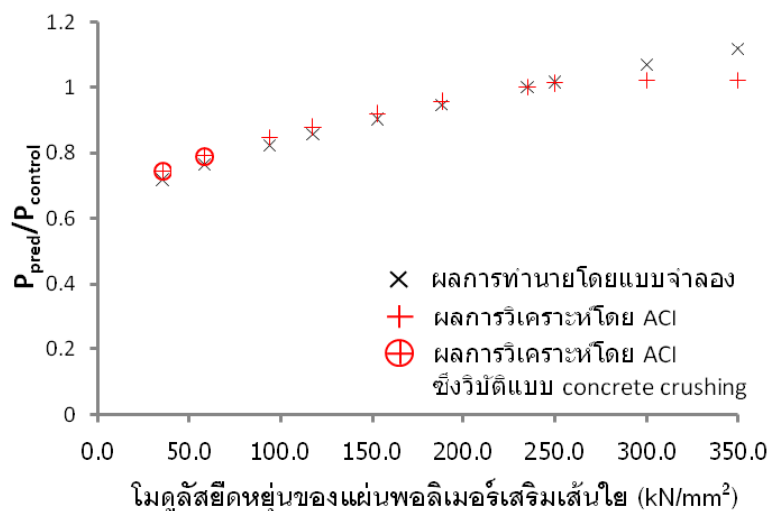
คือ ในช่วงแรก (ช่วงที่ 1) เมื่อเพิ่มค่า  $\rho_f$  ให้สูงขึ้นค่า  $P_{pred}/P_{control}$  จะเพิ่มขึ้นอย่างมาก จนกระทั่งถึง  $\rho_f$  ค่าหนึ่งซึ่งเมื่อเพิ่มความหนาของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเกินกว่าค่าดังกล่าว ค่า  $P_{pred}/P_{control}$  จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (ช่วงที่ 2) หลังจากนั้นการเพิ่มค่า  $\rho_f$  จะไม่ทำให้ค่า  $P_{pred}/P_{control}$  เพิ่มขึ้นแต่จะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนดังกล่าวลดน้อยลง (ช่วงที่ 3) จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมายังไม่พบงานวิจัยใดที่เมื่อเพิ่มความหนาของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแล้วทำให้กำลังต้านทานแรงกระทำสูงสุดของคานที่เสริมกำลังมีค่าลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกระยะส่งผ่านเทียบเท่าซึ่งสมมติว่ามีค่าเป็นสองเท่าของกระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพจากแบบจำลองมีความไม่เหมาะสม โดยสามารถทำนายถึงจุดซึ่งแกนสะเทินอยู่ต่ำกว่าระดับเหล็กเสริมรับแรงดึงทำให้เหล็กเสริมดังกล่าวทำหน้าที่เป็นเหล็กเสริมรับแรงอัดซึ่งไม่เป็นที่ต้องการสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ผลการทำนายสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tumialan และคณะ (1999) จากชิ้นตัวอย่างคาน A1 และ A2 ซึ่งมีความหนาของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเป็น 0.165 และ 0.330 มิลลิเมตร ตามลำดับ พบว่าชิ้นตัวอย่างคานที่เสริมแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่หนาสามารถต้านทานแรงกระทำได้สูงกว่าชิ้นตัวอย่างคานที่เสริมแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่บาง โดยจากชิ้นตัวอย่างคานดังกล่าวเมื่อเพิ่มความหนาขึ้นสองเท่าส่งผลให้แรงกระทำวิบัติหลุดล่อนเพิ่มขึ้น 16.62 % ผลการวิเคราะห์แรงกระทำสูงสุดโดย ACI พบว่ามีความไม่สอดคล้องกับผลการทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยแบบจำลอง เนื่องจากผลการวิเคราะห์โดย ACI ให้ค่าแรงกระทำสูงสุดเพิ่มขึ้นแปรผันตามอัตราส่วนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่สูงขึ้น



ภาพที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $P_{pred}/P_{control}$  และอัตราส่วนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

### 5.3.3 โมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ( $E_p$ ) ขึ้นกับชนิดของวัสดุเสริมเส้นใยประกอบด้วย แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยอะรามิต (AFRP) และแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) ซึ่งมีโมดูลัสยืดหยุ่นใช้งานระหว่าง 20 ถึง 250 กิโลนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (Teng และคณะ, 2002) ผลกระทบเนื่องจากโมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแสดงดังภาพที่ 5.6 จากแบบจำลองสามารถทำนายถึงลักษณะการวิบัติแบบหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแต่ถ้าเพิ่มค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยให้สูงขึ้นเกินกว่าช่วงดังกล่าวลักษณะการวิบัติจะเปลี่ยนเป็นการวิบัติแบบเหล็กเสริมรับแรงดึงครากตามด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยฉีกขาด (FRP rupture) โดยเมื่อลดค่า  $E_p$  ให้น้อยลงจะส่งผลให้ค่า  $P_{pred}/P_{control}$  ลดลงตาม ดังนั้นโมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจึงมีผลกระทบต่อการวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายใน ผลการวิเคราะห์แรงกระทำสูงสุดโดย ACI พบว่ามีความสอดคล้องกับผลการทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยแบบจำลอง แต่เมื่อโมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีค่าต่ำ พบว่าการวิเคราะห์โดย ACI เกิดการวิบัติแบบเหล็กเสริมรับแรงดึงครากตามด้วยคอนกรีตถูกบีบอัดจนแตก (concrete crushing)

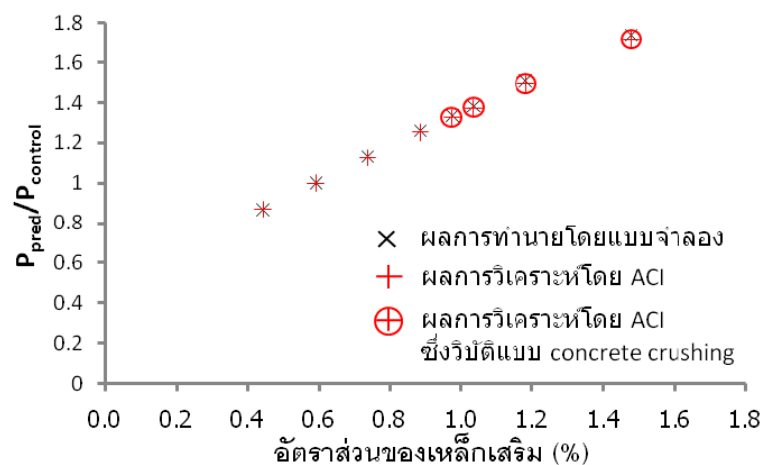


ภาพที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $P_{pred}/P_{control}$  และโมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย



### 5.3.4 อัตราส่วนของเหล็กเสริม

จากภาพที่ 5.7 แสดงผลกระทบเนื่องจากอัตราส่วนของเหล็กเสริม ( $\rho_s$ ) โดยพิจารณาช่วงอัตราส่วนของเหล็กเสริมระหว่าง 0.353 ถึง 1.458 % ซึ่งเป็นค่าที่มากกว่าอัตราส่วนของเหล็กเสริมที่น้อยที่สุดสำหรับส่วนของโครงสร้างรับแรงดัด ( $\rho_{\min} = 0.35\%$ ) และมีค่าไม่เกินกว่า 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราส่วนของเหล็กเสริมที่สภาวะสมดุล ( $0.75\rho_b = 2.678\%$ ) จากผลการทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของช่วงอัตราส่วนของเหล็กเสริมดังกล่าวพบว่าสามารถทำนายถึงลักษณะการวิบัติแบบหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย แต่ถ้าเพิ่มพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมให้สูงขึ้นเกินกว่าช่วงดังกล่าว ลักษณะการวิบัติจะเปลี่ยนเป็นการวิบัติแบบเหล็กเสริมรับแรงดึงครากตามด้วยคอนกรีตถูกบีบอัดจนแตก (concrete crushing) โดยเมื่อเพิ่มค่า  $\rho_s$  ให้สูงขึ้นค่า  $P_{pred}/P_{control}$  ก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chan และคณะ (2001) จากชิ้นตัวอย่าง B6 และ B8 ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม 628.3 และ 1256.6 ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ พบว่าชิ้นตัวอย่างคานที่มีพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมมากจะสามารถต้านทานแรงกระทำได้สูงกว่าชิ้นตัวอย่างคานที่มีพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมน้อย โดยจากชิ้นตัวอย่างคานดังกล่าวเมื่อเพิ่มพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมขึ้นสองเท่าส่งผลให้แรงกระทำวิบัติหลุดล่อนเพิ่มขึ้น 70.54 % ผลการวิเคราะห์แรงกระทำสูงสุดโดย ACI พบว่ามีความสอดคล้องกับผลการทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยแบบจำลอง แต่เมื่ออัตราส่วนของเหล็กเสริมมีค่ามาก พบว่าการวิเคราะห์โดย ACI เกิดการวิบัติแบบเหล็กเสริมรับแรงดึงครากตามด้วยคอนกรีตถูกบีบอัดจนแตก



ภาพที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $P_{pred}/P_{control}$  และอัตราส่วนของเหล็กเสริม

จากการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่อการวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยสำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งประกอบด้วยกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต ( $f_c'$ ) อัตราส่วนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ( $\rho_f$ ) อัตราส่วนของเหล็กเสริม ( $\rho_s$ ) และโมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ( $E_p$ ) พบว่าการเพิ่มปริมาณของตัวแปรต่างๆ ดังกล่าวให้สูงขึ้นจะส่งผลให้แรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่น ( $P_{pred}$ ) เพิ่มขึ้น ยกเว้นกรณีอัตราส่วนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยซึ่งเมื่อเพิ่ม  $\rho_f$  มากเกินไปจะเป็นการลด  $P_{pred}$  การเปรียบเทียบผลกระทบของตัวแปรทำโดยเพิ่มปริมาณของตัวแปรต่างๆ เป็นสองเท่าจากของเดิมแล้วทำการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของการเปลี่ยนแปลงของผลการทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ทั้งนี้เนื่องจากกรณีการเพิ่มอัตราส่วนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยซึ่งกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $P_{pred} / P_{control}$  และ  $\rho_f$  จะประกอบด้วย 3 ช่วง แสดงดังภาพที่ 5.5 พบว่าอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นเรียงจากมากไปน้อยสำหรับกรณีการเพิ่มอัตราส่วนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในช่วงที่ 1 คือ  $\rho_s$ ,  $\rho_f$ ,  $E_p$  และ  $f_c'$  โดยแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในแผ่นจะเพิ่มขึ้น 48.89 %, 28.96 %, 17.94 % และ 2.67 % ตามลำดับ ส่วนกรณีการเพิ่มอัตราส่วนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในช่วงที่ 2 ผลกระทบของตัวแปรเรียงจากมากไปน้อย คือ  $\rho_s$ ,  $E_p$ ,  $\rho_f$  และ  $f_c'$  โดยแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในแผ่นจะเพิ่มขึ้น 48.89 %, 17.94 %, 13.02 % และ 2.67 % ตามลำดับ

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัย

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

แบบจำลองในการศึกษานี้ใช้ทำนายการวิบัติแบบหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย เนื่องจากรอยร้าวจากแรงดัดบริเวณช่วงภายใน (intermediate flexural cracks) ในคานคองกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธีทางกลศาสตร์การแตกหัก โดยอาศัยความคล้ายคลึงกันระหว่างกระบวนการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ในรอยต่อยึดเหนี่ยวจากการทดสอบแรงเฉือนกับการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในคานคองกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลัง ความสัมพันธ์ระหว่างการยึดเหนี่ยวและการไหลจากการทดสอบแรงเฉือนของรอยต่อยึดเหนี่ยวถูกใช้ในการคำนวณพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสร่วมกับการวิเคราะห์หน้าตัด (section analysis) ซึ่งรวมผลของการต้านทานแรงดึง (tension stiffening) ของคองกรีตเพื่อทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในแผ่น โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลชิ้นตัวอย่างคานจำนวน 28 ชิ้นตัวอย่าง จากงานวิจัยแหล่งต่างๆ 11 งานวิจัย ภายใต้การทดสอบการดัดสามจุดและการทดสอบการดัดสี่จุด โดยเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมเส้นใยประเภทต่างๆ ประกอบด้วย แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยอะรามิด (AFRP) และแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) ซึ่งมีค่าโมดูลัสยึดหยุ่นระหว่าง 36 ถึง 235 กิโลนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ความยาวช่วงคานมีช่วงระหว่าง 1350 ถึง 4800 มิลลิเมตร ความยาวช่วงแรงเฉือนมีช่วงระหว่าง 450 ถึง 1982.5 มิลลิเมตร อัตราส่วนของเหล็กเสริมมีช่วงระหว่าง 0.58 ถึง 2.11 % อัตราส่วนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีช่วงระหว่าง 0.06 ถึง 1.13 % กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคองกรีตมีช่วงระหว่าง 24 ถึง 80 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร และขนาดหน้าตัดคานเล็กสุดและใหญ่สุด คือ 115x146 มิลลิเมตร และ 368x467 มิลลิเมตร ตามลำดับ งานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการวิบัติแบบหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และศึกษาความเหมาะสมของข้อแนะนำในการออกแบบคานคองกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยสถาบันคองกรีตแห่งอเมริกา (ACI 440.2R-08) เพื่อป้องกันการวิบัติแบบหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- 6.1.1 แบบจำลองในการศึกษาสามารถใช้ทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยซึ่งให้ผลการทำนายที่ดี พบว่าอัตราส่วนระหว่างผลการทำนายแรงกระทำสูงสุดต่อผลการทดสอบ ( $P_{pred} / P_{exp}$ ) มีค่าเฉลี่ย

เท่ากับ 1.01 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.09 และสัมประสิทธิ์ของการแปรผันเท่ากับ 9 %

- 6.1.2 แบบจำลองในการศึกษาให้ผลการทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในแผ่นที่แม่นยำกว่าผลการวิเคราะห์แรงกระทำสูงสุดด้วยข้อเสนอแนะในการออกแบบโดยสถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกา
- 6.1.3 การเพิ่มกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต ( $f_c'$ ) อัตราส่วนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ( $\rho_f$ ) โมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ( $E_p$ ) และอัตราส่วนของเหล็กเสริม ( $\rho_s$ ) ส่งผลให้แรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีค่าสูงขึ้น
- 6.1.4 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเรียงจากมากไปหาน้อย คือ อัตราส่วนของเหล็กเสริม ( $\rho_s$ ) อัตราส่วนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ( $\rho_f$ ) โมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ( $E_p$ ) และกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต ( $f_c'$ ) ตามลำดับ
- 6.1.5 การเพิ่มอัตราส่วนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ( $\rho_f$ ) สำหรับกรณีแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเดิมซึ่งบางการเพิ่มความหนาให้มากขึ้นจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมากกว่ากรณีแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเดิมซึ่งหนา
- 6.1.6 ผลการวิเคราะห์จากข้อเสนอแนะในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยสถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกา ให้ค่าแรงกระทำสูงสุดที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังสามารถต้านทานได้มีแนวโน้มต่ำกว่าผลการทดสอบสำหรับการป้องกันการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย แต่อย่างไรก็ตามพบว่าขึ้นตัวอย่างคานจำนวน 9 ชิ้นตัวอย่างหรือประมาณ 32 % ของข้อมูลขึ้นตัวอย่างคานที่ศึกษา ให้ผลการวิเคราะห์ซึ่งเกิดการวิบัติแบบเหล็กเสริมรับแรงดึงครากตามด้วยคอนกรีตถูกบีบอัดจนแตก ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลการทดสอบจริงที่เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

- 6.2.1 แบบจำลองในการศึกษานี้สามารถประยุกต์ใช้เพื่อคำนวณพลังงานด้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส (interfacial fracture energy) ซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้ในการขยายตัวของรอยร้าว
- 6.2.2 การปรับปรุงระยะส่งผ่านให้เหมาะสมยิ่งขึ้นจะทำให้ผลการทำนายแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นมีค่าแม่นยำขึ้น
- 6.2.3 แบบจำลองในการศึกษานี้สามารถประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบเพื่อป้องกันการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
- 6.2.4 การปรับปรุงแบบจำลองในการศึกษานี้ให้รวมผลของตัวแปรอื่นที่สำคัญ เช่น คุณสมบัติของชั้นวัสดุประสาน เป็นต้น จะทำให้ผลการทำนายมีค่าแม่นยำขึ้น
- 6.2.5 การปรับปรุงสมการความเครียดที่ถูกจำกัดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากข้อเสนอแนะในการออกแบบโดยสถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกาให้รวมผลของตัวแปรอื่นที่สำคัญ เช่น ปริมาณเหล็กเสริมภายในคาน คุณสมบัติของชั้นวัสดุประสาน และอัตราส่วนระหว่างความกว้างของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อความกว้างของหน้าตัดคาน เป็นต้น จะทำให้ผลการวิเคราะห์มีค่าแม่นยำขึ้น

## รายการอ้างอิง

- ACI Committee 440. Guide for Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-08). Michigan : American Concrete Institute, 2008.
- Achinta, P.M.M. and Burgoyne, C.J. Fracture mechanics of plate debonding. Journal of Composites for Construction 12 (August 2008) : 396–404.
- Arduini, M., Di Tommaso, A. and Nanni, A. Brittle Failure in FRP plate and Sheet Bonded Beams. ACI Structural Journal 94 (July-August 1997) : 363-370.
- Baber, A.J., Campos Filho, A. and Campagnolo, J.L. Flexural Strengthening of R/C Beams with CFRP Sheets. Proceedings of 8<sup>th</sup> International Structural Faults and Repair Conference, London, 1999.
- Branson, D.E. Design Procedures for Computing Deflections. ACI Journal Proceedings 65 (1968) : 730 – 742.
- Büyüköztürk, O. and Hearing, B. Failure Behaviour of Precracked Concrete Beams Retrofitted with FRP. Journal of Composites for Construction 2 (August 1998) : 138-144.
- Chan, T.K., Cheong, H.K. and Nguyen, D.M. Experimental Investigation on Delamination Failure of CFRP Strengthened Beams. Proceedings of ICCMC/IBST 2001 International Conference on Advanced Technologies in Design, Construction and Maintenance of Concrete Structures, Hanoi, 2001.
- Chen, J.F. and Teng, J.G. Anchorage Strength Models for FRP and Steel Plates Bonded to Concrete. Journal of Structural Engineering 127 (July 2001) : 784-791.
- Fanning, P.J. and Kelly, O. Ultimate Response of RC Beams Strengthened with CFRP Plates. Journal of Composites for Construction 5 (May 2001) : 122-127.
- Gao, B., Kim, J.K. and Leung, C.Y.K. Experimental Study on RC Beams with FRP Strips Bonded with Rubber Modified Resins. Composites Science and Technology 64 (2004) : 2557–2564.
- Gunes, O., Buyukozturk, O., and Karaca, E. A Fracture-based Model for FRP Debonding in Strengthened Beams. Engineering Fracture Mechanics 76 (2009) : 1897-1909.

- Hua, K. M. Experiments on Concrete Beams Strengthened by Bonding Fibre Reinforced Plastic Sheets. Master's Thesis Department of Civil and Structural Engineering The Hong Kong Polytechnic University, 1999.
- Kishi, N., Mikami, H., Sata, M. and Matsaka, K. Flexural Bond Behavior of RC Beams Externally Bonded with FRP Sheets. Proceedings of the Japan Concrete Institute 20 (1998) : 515-520.
- Leung, C.K.Y. Delamination Failure in Concrete Beams Retrofitted with a Bonded Plate. Journal of Materials in Civil Engineering 13 (2001) : 106-113.
- Leung, C.Y.K. and Yang, Y. Energy-based Modeling Approach for Debonding of FRP Plate from Concrete Substrate. Journal of Engineering Mechanics 132 (June 2006) : 583-593.
- Lu, X.Z., Teng, J.G., Ye, L.P. and Jiang, J.J. Intermediate Crack Debonding in FRP-Strengthened RC Beams: FE Analysis and Strength Model. Journal of Composites for Construction 11 (April 2007) : 161-174.
- Malek, A.M., Saadatmanesh, H. and Eshani, M.R. Prediction of Failure Load of R/C Beams Strengthened with FRP Plate due to Stress Concentration at the Plate End. ACI Structural Journal 95 (March-April 1998) : 142-152.
- Maalej, M. and Leong, K.S. Effect of Beam Size and FRP Thickness on Interfacial Shear Stress Concentration and Failure Mode of FRP-Strengthened Beams. Composites Science and Technology 65 (2005) : 1148-1158.
- Nakaba, K., Kanakubo, T., Furuta, T. and Yoshizawa, H. Bond Behavior between Fiber-Reinforced Polymer Laminates and Concrete. ACI Structural Journal 98 (May-June 2001) : 359-367.
- Niu, H.D. and Wu, Z.S. Shear Transfer Along FRP-Concrete Interface in Flexural Members. Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements 662 (November 2000) : 231-245.
- Niu, H.D. and Wu, Z.S. Prediction of Crack-induced Debonding Failure in R/C Structures Flexurally Strengthened with Externally Bonded FRP Composites. Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements 63 (2007) : 620-639.

- Park, R. and Paulay, T. Reinforced concrete structures. 1<sup>st</sup> ed. New York : John Wiley & Sons, 1975.
- Rabinovitch, O. and Frostig, Y. Closed-form High-order Analysis of RC Beams Strengthened with FRP Strips. Journal of Composites for Construction 4 (May 2000) : 65-74.
- Rahimi, H. and Hutchinson, A. Concrete Beams with Externally Bonded FRP Plates. Journal of Composites for Construction 5 (February 2001) : 44-56.
- Sakai, K. and Kakuta, Y. Moment-Curvature Relationships of Reinforced Concrete Members Subjected to Combined Bending and Axial Force. ACI Journal Proceedings 77 (May-June 1980) : 189-194.
- Saadatmanesh, H. and Ehsani, M.R. RC Beams Strengthened with GFRP Plates **I**: Experimental Study. Journal of Structural Engineering 117 (1991) : 3417-3433.
- Smith, S.T. and Teng, J.G. Interfacial Stresses in Plated Beams. Engineering Structures 23 (2001) : 857-871.
- Spadea, G., Bencardino, F. and Swamy, R.N. Structural Behaviour of Composite RC beams with Externally Bonded CFRP. Journal of Composites for Construction 2 (August 1998) : 132-137.
- Täljsten, B. Strengthening of Concrete Prisms Using the Plate-Bonding Technique. International Journal of Fracture 82 (1996) : 253-266.
- Täljsten, B. Strengthening of Beams by Plate Bonding. Journal of Materials in Civil Engineering 9 (November 1997) : 206-212.
- Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T. and Lam, L. FRP Strengthened RC Structures. West Sussex : John Wiley & Sons, 2002.
- Teng, J.G., Smith, S.T., Yao, J. and Chen, J.F. Intermediate Crack-induced Debonding in RC Beams and Slabs. Construction and Building Materials 17 (2003) : 447-462.



- Teng, J. G., Lu, X. Z., Ye, L. P. and Jiang, J. J. Recent Research on Intermediate Crack Induced Debonding in FRP Strengthened Beams. Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Advanced Composite Materials for Bridges and Structures, Calgary, 2004.
- Tumialan, G., Serra, P., Nanni, A. and Belarbi, A. Concrete Cover Delamination in Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets. In Dolan, C.W., Rizkalla, S.H. and Nanni, A. (eds.), Proceedings of the Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-4), Baltimore, 1999.
- Yuan, H., Teng, J.G., Seracino, R., Wu, Z.S. and Yao, J. Full-Range Behavior of FRP-to-Concrete Bonded Joints. Engineering Structures 26 (2004) : 553-565.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

### ขั้นตอนการคำนวณโมเมนต์ตัดแตกตัวของหน้าตัด

1. สมมติแรงในแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใย ( $F_{p\_assu}$ )
2. กำหนดค่าความเครียดที่ผิวของท้องคานมีค่าเท่ากับความเครียดที่กำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต
3. สมมติตำแหน่งแกนสะเทิน ( $c$ ) วัดจากผิวบนของหน้าตัด
4. สมมติการกระจายความเครียดของหน้าตัดโดยทฤษฎีสามเหลี่ยมคล้าย
5. คำนวณแรงดึงจากผลรวมของแรงดึงของคอนกรีต ( $T_c$ ) และแรงดึงของเหล็กเสริม ( $T_s$ )

$$T = T_c + T_s$$

$$T_c = \frac{1}{2}[h-c]\varepsilon_{tm}E_c b$$

โดย  $h$  และ  $\varepsilon_{tm}$  คือ ความลึกของหน้าตัดคาน และความเครียดที่ผิวของท้องคาน ตามลำดับ

$$T_s = e_{st}E_{st}A_{st}$$

โดย  $e_{st}$ ,  $E_{st}$  และ  $A_{st}$  คือ ความเครียดที่เหล็กเสริมรับแรงดึง โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมรับแรงดึง และหน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงดึง ตามลำดับ

6. คำนวณแรงอัดจากผลรวมของแรงอัดของคอนกรีต ( $C_c$ ) และแรงอัดของเหล็กเสริม ( $C_s$ )

$$C = C_c + C_s$$

$$C_c = bf_c' \frac{\kappa}{\varepsilon_{max}} c^2 \left[ 1 - \frac{\kappa c}{3\varepsilon_{max}} \right]$$

โดย  $b, c$  และ  $\varepsilon_{max}$  คือ ความกว้างของหน้าตัดคาน ระยะของแกนสะเทินวัดจากหลังคาน และความเครียดที่กำลังต้านทานแรงอัดสูงสุด ตามลำดับ

$$C_s = e_{sc}E_{sc}A_{sc}$$

โดย  $e_{sc}$ ,  $E_{sc}$  และ  $A_{sc}$  คือ ความเครียดที่เหล็กเสริมรับแรงอัด โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมรับแรงอัด และหน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงอัด ตามลำดับ

7. ตรวจสอบสมดุลของแรงโดยแรงภายในเท่ากับแรงภายนอก (กำหนดให้แรงอัดเป็นลบ และแรงดึงเป็นบวก)

$$-C + T = -F_{p\_assu}$$

8. ตรวจสอบความสอดคล้องกันของความเครียด โดยตรวจสอบว่าแรงในแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยจากการสมมติ ( $F_{p\_assu}$ ) กับแรงในแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยจากการคำนวณ ( $F_{p\_ana}$ )

$$F_{p\_ana} = E_p A_p \kappa (h + t_a + t_p / 2 - c)$$

โดย  $E_p, A_p, t_a$  และ  $t_p$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใย พื้นที่หน้าตัดของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใย ความหนาของวัสดุเชื่อมประสาน และความหนาของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใย ตามลำดับ

9. ถ้าขั้นตอนที่ 7. และ 8. ไม่เป็นจริง กลับไปทำขั้นตอนที่ 2.

10. ถ้าขั้นตอนที่ 9. ไม่เป็นจริงกลับไปทำขั้นตอนที่ 1.

11. คำนวณระยะของแกนเซนทรอยด์เทียบเท่าของหน้าตัดไม้แตกร้า ( $\alpha_{uc}$ )

$$\alpha_{uc} = \frac{n_s A_s d + n_s A_{sc} d_c + n_{cr} b (h - x) \left( h - \frac{1}{2} (h - x) \right) + \int_0^x b_c(z) z dz}{n_s A_s + n_s A_{sc} + n_{cr} b (h - x) + \int_0^x b_c(z) dz}$$

โดย  $A_s$  และ  $A_{sc}$  คือ พื้นที่ของเหล็กเสริมรับแรงดึงและแรงอัด ตามลำดับ

$d_c, d$  และ  $x$  คือ ความลึกของเหล็กเสริมรับแรงอัด ความลึกของเหล็กเสริมรับแรงดึง โดยวัดจากผิวบนของหน้าตัด และความลึกของแกนสะเทิน ตามลำดับ

12. คำนวณระยะเฉลี่ยที่แรงอัดของคอนกรีตกระทำบนหน้าตัดคานโดยวัดจากแกนสะเทิน

$$\bar{x}_c = c \left[ \frac{8\varepsilon_{\max} - 3\kappa c}{12\varepsilon_{\max} - 4\kappa c} \right]$$

13. คำนวณระยะเฉลี่ยที่แรงดึงของคอนกรีตกระทำบนหน้าตัดคานโดยวัดจากแกนสะเทิน

$$\bar{x}_t = \frac{2}{3} (h - c)$$

14. คำนวณโมเมนต์ดัดแตกร้าของหน้าตัด (โมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกาเป็นบวก)

$$M_{cr} = -C_c (\bar{x}_c - (c - \alpha_{cr})) - C_s (\alpha_{cr} - d_c) + T_c (\bar{x}_t + (c - \alpha_{cr})) + T_s (d - \alpha_{cr})$$

ทั้งนี้การคำนวณโมเมนต์ดัดที่เหล็กเสริมรับแรงดึงเริ่มคราก สามารถใช้ขั้นตอนเดียวกัน แต่กำหนดค่าความเครียดที่เหล็กเสริมรับแรงดึงมีค่าเท่ากับความเครียดครากของเหล็กเสริม และยังสามารถประยุกต์ใช้ขั้นตอนนี้ ในการคำนวณหาโมเมนต์ดัดเมื่อกำหนดค่าความเครียดใดๆ ตามที่ต้องการ เช่น โมเมนต์ดัดที่กำลังต้านทานแรงอัดสูงสุด โดยกำหนดค่าความเครียดที่ผิวของหลังคานมีค่าเท่ากับความเครียดที่กำลังต้านทานแรงอัดสูงสุด

ภาคผนวก ข

ตารางที่ 1 ข้อมูลผลการวิเคราะห์จากการแปรผันกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต

|                                |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )    | 24    | 28    | 32    | 35    | 40    | 50    | 55    | 70    | 80    | 90    | 100   |
| $P_{pred}/P_{control}$ (model) | 0.970 | 0.984 | 0.994 | 1.000 | 1.008 | 1.022 | 1.027 | 1.040 | 1.047 | 1.053 | 1.059 |
| $P_{pred}/P_{control}$ (ACI)   | 0.901 | 0.941 | 0.976 | 1.000 | 1.030 | 1.043 | 1.047 | 1.057 | 1.062 | 1.066 | 1.068 |

ตารางที่ 2 ข้อมูลผลการวิเคราะห์จากการแปรผันอัตราส่วนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

|                                |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\rho_f$ (%)                   | 0.06  | 0.13  | 0.19  | 0.26  | 0.32  | 0.45  | 0.55  | 0.65  | 0.71  | 0.76  | 0.81  | 0.84  | 0.91  |
| $P_{pred}/P_{control}$ (model) | 1.000 | 1.229 | 1.426 | 1.541 | 1.622 | 1.707 | 1.721 | 1.744 | 1.709 | 1.682 | 1.647 | 1.651 | 1.656 |
| $P_{pred}/P_{control}$ (ACI)   | 1.000 | 1.17  | 1.296 | 1.401 | 1.492 | 1.647 | 1.746 | 1.835 | 1.885 | 1.934 | 1.968 | 1.992 | 2.039 |

ตารางที่ 3 ข้อมูลผลการวิเคราะห์จากการแปรผันโมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

|                                |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |
|--------------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $E_p$ (kN/mm <sup>2</sup> )    | 35.25 | 58.75 | 94.00 | 117.50 | 152.75 | 188.00 | 235.00 | 250.00 | 300.00 | 350.00 |
| $P_{pred}/P_{control}$ (model) | 0.718 | 0.765 | 0.823 | 0.856  | 0.903  | 0.946  | 1.000  | 1.016  | 1.069  | 1.118  |
| $P_{pred}/P_{control}$ (ACI)   | 0.743 | 0.791 | 0.846 | 0.878  | 0.920  | 0.957  | 1.000  | 1.013  | 1.020  | 1.020  |

ตารางที่ 4 ข้อมูลผลการวิเคราะห์จากการแปรผันอัตราส่วนของเหล็กเสริม

|                                |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\rho_s$ (%)                   | 0.44  | 0.59  | 0.74  | 0.89  | 0.97  | 1.03  | 1.18  | 1.48  | 1.62  |
| $P_{pred}/P_{control}$ (model) | 0.867 | 1.000 | 1.131 | 1.259 | 1.336 | 1.385 | 1.508 | 1.740 | 1.849 |
| $P_{pred}/P_{control}$ (ACI)   | 0.870 | 1.000 | 1.128 | 1.252 | 1.326 | 1.374 | 1.492 | 1.721 | 1.830 |

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายปีย์ลักษณ์ วันทนาศิริ เกิดเมื่อวันที่ 20 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2529 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร เข้ารับการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2550 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานที่ บริษัท เมตริก วิศวกรที่ปรึกษาและสถาปนิก จำกัด เป็นระยะเวลา 1 ปี จากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในระดับ ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2552 จบจนปัจจุบัน