



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

พฤติกรรมคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ลามิเนต:  
การทดสอบและการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ประเภทแสดงรายละเอียด

Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Fiber Reinforced  
Laminates: Experiment and Analysis by Detailed Finite Element Models

ผศ. ดร. อานนท์ วงษ์แก้ว

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๘

มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 2558A10802354

สัญญาเลขที่ ๑๑๘/๒๕๕๘

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

พฤติกรรมคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ลามิเนต:  
การทดสอบและการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ประเภทแสดงรายละเอียด

Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Fiber Reinforced  
Laminates: Experiment and Analysis by Detailed Finite Element Models

ผศ. ดร. อานนท์ วงษ์แก้ว

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา

ตุลาคม ๒๕๖๐

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัย เรื่อง พฤติกรรมคานคองกริตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ลามิเนต: การทดสอบและการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ประเภทแสดงรายละเอียด ได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2558 จาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ. ที่นี้

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
สารบัญ	ข
บทที่ 1 บทนำ	
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	31
บทที่ 4 การเตรียมอุปกรณ์และตัวอย่างคานทดสอบ	35
บทที่ 5 ผลการทดสอบคานเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์	44
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษา	53
เอกสารอ้างอิง	54

## บทสรุปสำหรับผู้บริหาร (Executive Summary)

ข้าพเจ้า ผศ.ดร.อานนท์ วงษ์แก้ว ได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัย จากมหาวิทยาลัยบูรพา ประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) มหาวิทยาลัยบูรพา โครงการวิจัยเรื่อง พฤติกรรมคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ลามิเนต: การทดสอบและการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ประเภทแสดงรายละเอียด Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Fiber Reinforced Laminates: Experiment and Analysis by Detailed Finite Element Models รหัสโครงการ 2558A10802354 สัญญาเลขที่ ๑๑๙/๒๕๕๘ ได้รับงบประมาณรวมทั้งสิ้น ๖๕๒,๐๐๐ บาท (หกแสนห้าหมื่นสองพันบาท) ระยะเวลาการดำเนินงาน ๑ ปี (ค.ศ.๒๕๕๘-ก.ย.๒๕๕๙)

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสามารถ และศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัด แรงเฉือน ความเหนียว และลักษณะการพังของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก และของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ลามิเนตด้วยการทดสอบตัวอย่างคานขนาดเล็ก ( $150 \times 250 \times 1400 \text{ mm}^3$ ) จำนวน 3 ตัว (B1, B1F, B11F) คานขนาดกลาง ( $150 \times 300 \times 1400 \text{ mm}^3$ ) จำนวน 4 ตัว (B2, B2F, B22, B22F) คานขนาดใหญ่ ( $200 \times 400 \times 2600 \text{ mm}^3$ ) จำนวน 3 ตัว (B3, B3F, B33F) และ ( $250 \times 500 \times 2600 \text{ mm}^3$ ) จำนวน 3 ตัว (B4, B4F, B44F) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า 1) การใช้แผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็ก สามารถทำให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงได้เพิ่มสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระยะการโก่งตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ถูกเสริมกำลัง และคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ พบว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์มีการโก่งตัวได้น้อยกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้ถูกเสริมกำลัง 2) การใช้แผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กในปริมาณที่มากขึ้นจะส่งผลทำให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กมีลักษณะเปราะ เมื่อเกิดการวิบัติ คานคอนกรีตเสริมเหล็กจะเกิดขึ้นในทันทีและเกิดอย่างรุนแรง 3) การวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ จะเกิดขึ้นในลักษณะแผ่นไฟเบอร์หลุดลอกออกทางด้านข้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ทำให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กไม่สามารถถ่ายแรงไปยังแผ่นไฟเบอร์เพื่อรับแรงได้อีก คานคอนกรีตเสริมเหล็กจึงรับแรงกระทำได้ลดลง 4) เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้แผ่นไฟเบอร์กับขนาดหน้าตัดพบว่าเมื่อหน้าตัดใหญ่ขึ้นประสิทธิภาพการเพิ่มกำลังของแผ่นไฟเบอร์จะลดลง

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและแรงจูงใจในการทำงานวิจัย

เนื่องจากงานโครงสร้างทางวิศวกรรมศาสตร์ มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการรับแรงประเภทต่างๆ เช่น แรงดึง แรงอัด แรงเฉือน และแรงอื่นๆ โดยผู้ออกแบบในส่วนของโครงสร้างนั้นๆ ได้พิจารณาการออกแบบโครงสร้างให้สามารถรับแรงได้ตามหลักการวิเคราะห์โครงสร้าง และมาตรฐานที่มีอยู่ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาผ่านไป จุดประสงค์ในการใช้งานของโครงสร้างนั้นๆ อาจเปลี่ยนไป เช่น ต้องการให้มีความสามารถในการรับกำลังเพิ่มขึ้น เพื่อรองรับการใช้งานที่เพิ่มขึ้นของโครงสร้าง จึงต้องทำการเสริมกำลัง (Strengthening) แทนการทำลายทิ้งแล้วสร้างใหม่ทั้งหมด หรือเมื่อเวลาผ่านไปความแข็งแรง ความคงทน ตลอดจนความสามารถในการรับน้ำหนักของวัสดุที่ใช้ก่อสร้างโครงสร้างนั้นลดลง จึงต้องมีการปรับปรุงกำลังของโครงสร้างนั้นๆ ให้มีความสามารถในการรับแรงประเภทต่างๆ ได้ สำหรับการเสริมกำลังของโครงสร้าง คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete) มีหลายวิธีด้วยกัน เช่น 1) การเสริมภายนอกด้วยคอนกรีตกำลังสูง ซึ่งจะทำให้น้ำหนักรวมและพื้นที่หน้าตัดของโครงสร้างเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การใช้ประโยชน์พื้นที่ใช้สอยลดลง 2) การเสริมเหล็กรูปพรรณภายนอกองค์อาคาร 3) การเสริมภายนอกด้วยการติดวัสดุเสริมกำลัง เช่น แผ่นไฟเบอร์ การเสริมกำลังโดยวิธีนี้จะไม่ทำให้น้ำหนักของโครงสร้างเดิมเพิ่มขึ้น และไม่ต้องยุ่งยากซับซ้อน

ในปัจจุบันมีการนำ แผ่นไฟเบอร์ (FRP) มาใช้ในงานเสริมกำลังของโครงสร้างกันอย่างกว้างขวางมากขึ้น แต่วิธีการออกแบบแผ่นไฟเบอร์นั้น ยังไม่มีวิธีมาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับโดยทั่วกัน ซึ่งการออกแบบแผ่นไฟเบอร์นั้น ไม่สามารถพิจารณาแผ่นไฟเบอร์ให้เป็นเหล็กเสริม แล้วออกแบบตามทฤษฎีคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไปได้ นอกจากนี้ องค์อาคารที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ยังมีรูปแบบการวิบัติ อีกหลายรูปแบบที่ไม่พบในองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป

โครงการวิศวกรรมนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมของคานและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้วเสริมกำลัง อีกทั้งยังนำเสนอวิธีการคำนวณหาค่ากำลังรับแรงดัดของคานและกำลังรับแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้วเสริมกำลังโดยใช้วิธีการออกแบบของ ACI 440.2R-02 และ ผศ.ดร.อมร พิมานมาศ ในการทำนายผล เพื่อประโยชน์ในการพัฒนาการทำนายผลของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้วเสริมกำลังต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาพฤติกรรมคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (ค.ส.ล.) ที่ถูกเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้วยการทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ
- 2) เพื่อศึกษาศักยภาพแผ่นไฟเบอร์ลามิเนตในการเพิ่มความสามารถในการรับกำลังดัดของคาน ค.ส.ล.ด้วยการทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ
- 3) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดของคาน ค.ส.ล.ที่เพิ่มขึ้นกับปริมาณแผ่นไฟเบอร์ที่ใช้ด้วยการทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ มุ่งเน้นที่การประเมินพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก และลักษณะการพังของคาน ค.ส.ล.และคาน ค.ส.ล.เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ ด้วยการทดสอบตัวอย่างขนาดใหญ่ในห้องปฏิบัติการ และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบโครงสร้างดังก้าวในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ดัชนีวัดคือ กำลัง, การยืดหยุ่น (Ductility) และลักษณะการพังของชิ้นงาน นอกจากนี้จะทำการศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆที่สำคัญต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก และลักษณะการพังของคาน ค.ส.ล.และคาน ค.ส.ล.เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ เช่น ขนาดหน้าตัด กำลังอัดคอนกรีต รายละเอียดเหล็กเสริม จำนวนชั้นของแผ่นไฟเบอร์ และลักษณะการติดแผ่นไฟเบอร์

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบถึงพฤติกรรมของเสาและคานคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์
- 2) สามารถทำการวิเคราะห์หาสูตรที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการคำนวณการหาโมเมนต์ดัดสูงสุดของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมกำลังและหากำลังอัดสูงสุดของโครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมกำลังแผ่นไฟเบอร์
- 3) ทราบถึงปัญหาของการใช้แผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังในการเสริมกำลังของคานคอนกรีตเสริมเหล็กตลอดจนวิธีการแก้ไข
- 4) สามารถนำเอาความรู้ที่ได้จากการศึกษาไปประยุกต์ใช้ในงานโครงสร้างคอนกรีตในงานของวิศวกรรมโยธา

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 บทนำ

วัสดุไฟเบอร์เสริมกำลังประกอบด้วย ไฟเบอร์ซึ่งแทรกอยู่ใน โพลีเมอร์เมทริกซ์แสดงคุณสมบัติหลายอย่างซึ่งสามารถนำมาใช้ในการเสริมกำลังให้กับวัสดุโครงสร้างได้เป็นอย่างดี วัสดุไฟเบอร์เสริมกำลังสามารถรับแรงดึงได้สูงในทิศทางการเรียงตัวของไฟเบอร์ อย่างไรก็ตามวัสดุไฟเบอร์เสริมกำลังไม่แสดงจุดคราก แต่แสดงคุณสมบัติยืดหยุ่นจนกระทั่งฉีกขาด วัสดุไฟเบอร์เสริมกำลังได้รับการพิสูจน์ว่าสามารถทนการกัดกร่อนได้ดีเยี่ยม ดังนั้นเมื่อนำมาใช้กับงานก่อสร้างที่ต้องทนต่อสภาพอากาศที่รุนแรงและเปลี่ยนแปลงสม่ำเสมอ สามารถทนทานต่อสภาวะอากาศนั้นได้ดีซึ่งสามารถยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างคอนกรีต จากการศึกษาเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่า คอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยแผ่นไฟเบอร์มีอัตราการเกิดสนิมช้ากว่าคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ถูกห่อหุ้มด้วยแผ่นไฟเบอร์เป็นอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามแผ่นไฟเบอร์ไม่สามารถยับยั้งการเกิดสนิมได้ ในกรณีที่เมื่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นเกิดสนิมอยู่ก่อน ค่อยมีการรัดด้วยแผ่นไฟเบอร์ ถึงอย่างนั้นก็ตาม แผ่นไฟเบอร์ในกรณีหลังนี้สามารถช่วยให้โครงสร้างรักษาความสามารถในการรับกำลังได้ถึง 95% ของโครงสร้างเดิม

คุณสมบัติของโพลีเมอร์เมทริกซ์มีด้วยกัน 2 ประการคือ ช่วยถ่ายแรงระหว่างไฟเบอร์และช่วยป้องกันไฟเบอร์จากการกัดกร่อนของสภาพแวดล้อม เมื่อแผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังถูกนำมาใช้ติดบริเวณภายนอกของคอนกรีต สามารถเพิ่มคุณสมบัติการยึดเกาะของคอนกรีตได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งทำให้คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างไรก็ตามการเพิ่มคุณสมบัติการยึดเกาะของคอนกรีตนี้ยังขึ้นอยู่กับความสามารถในการประสานระหว่างแผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังกับเนื้อคอนกรีต ทั้งนี้การประสานระหว่างแผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังกับเนื้อคอนกรีตจำเป็นต้องใช้น้ำยาเชื่อมประสานชนิดพิเศษเมื่อคุณสมบัติการยึดเกาะของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ทำให้คอนกรีตสามารถรับกำลังอัดได้เพิ่มขึ้นดังนั้นเห็นว่าแผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังนอกจากช่วยในด้านการป้องกันคอนกรีตจากการกัดกร่อนของธรรมชาติ ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะของคอนกรีตซึ่งทำให้ความสามารถในการรับกำลังของคอนกรีตสูงขึ้นตามไปด้วย

การตอบสนองของวัสดุไฟเบอร์เสริมกำลังต่อแรงดึงในแนวแกนนั้นเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นกับความเครียดในแนวแกน



การตอบสนองของวัสดุไฟเบอร์เสริมกำลังต่อแรงอัดในแนวแกนขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของปริมาตรของไฟเบอร์, คุณสมบัติของไฟเบอร์หรือเรซินที่ใช้, และกำลังของพันธะภายในระหว่างไฟเบอร์การวิบัติของวัสดุไฟเบอร์เสริมกำลังภายใต้แรงอัด เกิดขึ้นเมื่อไฟเบอร์ถูกทำให้เคลื่อนที่ไปทางด้านข้างซึ่งปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า การโก่งของไฟเบอร์

การตอบสนองของวัสดุไฟเบอร์เสริมกำลังต่อแรงที่ตั้งฉากกับแรงดึงนั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของไฟเบอร์และเมทริกซ์, แรกกะทำระหว่างไฟเบอร์และเมทริกซ์, และกำลังของพันธะระหว่างไฟเบอร์และเมทริกซ์ โดยทั่วไปความสามารถในการต้านทานแรงที่ตั้งฉากกับแรงดึงนี้นั้น มีค่าน้อยส่วนความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนของวัสดุไฟเบอร์เสริมกำลังนั้น ไม่สามารถวัดได้โดยตรงโดยส่วนมากการวิบัติด้วยแรงเฉือนของวัสดุไฟเบอร์เสริมกำลังเกิดขึ้นเมื่อวัสดุเมทริกซ์เกิดการเคลื่อนที่ขนานกับไฟเบอร์

จากคุณสมบัติทางกลและเคมีของแผ่นไฟเบอร์เสริมกำลัง และโพลีเมอร์เมทริกซ์เบื้องต้นเห็นว่าวัสดุชนิดนี้สามารถประยุกต์ใช้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อเสริมกำลังและเพิ่มความยืดหยุ่น รวมทั้งยังสามารถใช้เพื่อทำการซ่อมแซมและบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตให้มีอายุการใช้งานมากขึ้น ก่อนเกิดสภาวะการเสื่อมสภาพของคอนกรีต ทั้งยังสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ด้วย เมื่อโครงสร้างคอนกรีตเหล่านั้นต้องอยู่ในสภาวะทางกายภาพที่รุนแรงเช่น โครงสร้างคอนกรีตที่แช่น้ำทะเล หรืออยู่ใกล้ทะเล เป็นต้น

## 2.2 ไฟเบอร์ใยแก้วเสริมกำลัง

ไฟเบอร์กลาส F.R.P. (Fiber glass Reinforced Plastic ) คือ ใยแก้วชนิดพิเศษ ให้ความสามารถในการรับแรงดึง (Tensile Strength) ได้สูงเมื่อนำมาประสานเข้ากับสารสังเคราะห์พลาสติกชนิด Polyester Resin หรือ Epoxy Resin ได้วัสดุที่มีความแข็งแรงสูง มีคุณสมบัติ เฉพาะตัวมีความแข็งแรงยืดหยุ่นได้ น้ำหนักเบา บาง ทนทานการผุกร่อนต่อฤทธิ์สารเคมี กรด ด่าง ทนทานต่อสภาพอากาศไม่เป็นสนิม อายุการใช้งานยาวนานกว่าวัสดุชนิดอื่น ใช้เป็นภาชนะบรรจุของเหลว, เคมี, อาหาร, ยา, ใช้เคลือบผิวโลหะ, ปูนซีเมนต์และไม้ สามารถทำรูปร่างซับซ้อน ขนาดใหญ่ ซ่อมแซม และดัดแปลงได้ มีมาตรฐานการควบคุมและการระบุใช้ที่แน่นอน

การเสริมกำลังโดยใช้วัสดุ FRP (Fiber Reinforced Polymer)สามารถทำได้โดยไม่ทำให้พื้นที่ใช้สอยเดิมถูกเปลี่ยนแปลงและไม่จำเป็นต้อง เพิ่มเสา FRP composite เป็นวัสดุที่มีกำลังสูงกว่าเหล็กหรือคอนกรีตเมื่อเปรียบเทียบในปริมาณน้ำหนักเท่าๆกัน FRP Composite ประกอบด้วยสองส่วนคือ เส้นใย (ที่ใช้อยู่ทั่วไปมี 3 ชนิด คือ Carbon Fiber, Glass Fiber และ Aramid Fiber) และ กาว (ที่ใช้อยู่ทั่วไปมี 3 ชนิด Epoxy, Vinylster and Polyester) โดยทั่วไปแผ่น FRP Composite มีความหนาตั้งแต่ 0.1 mm. จนถึง 10 mm. ขึ้นอยู่กับจำนวนชั้นของ Fiber ที่ใช้

การเสริมกำลังโครงสร้างโดยใช้ FRP Composites คือ การนำแผ่น FRP ไปยึดติดกับส่วนต่างๆ ของโครงสร้างที่ต้องการเพิ่มกำลังโดยใช้กาวพิเศษในการ ยึดติดแผ่น FRP ก่อนการเสริมกำลังโครงสร้าง เดิมต้องได้รับการวิเคราะห์โดยวิศวกรผู้เชี่ยวชาญก่อน เพื่อที่เลือกชนิดของ Fiber, ชนิดของ Resin, ทิศทางของ Fiber, ความยาวของแผ่น FRP, จำนวนชั้นของแผ่น FRP ที่ต้องยึดติดซ้อนกัน รวมถึง ตำแหน่งโครงสร้างที่ยึดติดแผ่น FRP ให้เหมาะสม

## 2.3 การคำนวณหาโมเมนต์ดัด

### 2.3.1 การคำนวณกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุด ( $M_u$ ) คานคอนกรีตเสริมเหล็ก

พิจารณารูปหน้าตัดคานจากรูปที่ 1 สมมติให้การกระจายของหน่วยการยึดหดตัวที่สภาวะก่อน การเกิดการวิบัติดังรูปที่ 2 โดยค่า  $c$  เป็นระยะจากขอบของคานถึงแนวแกนสะเทิน  $\epsilon_u$  เป็นหน่วยการยึดหดของคอนกรีต  $\epsilon'_s$  เป็นหน่วยการยึดหดของเหล็กเสริมรับแรงอัด  $\epsilon_s$  เป็นหน่วยการยึดหดของเหล็กเสริมรับแรงดึง ถ้าให้คานเกิดการวิบัติที่ด้านรับแรงดึงก่อนคือเหล็กเสริมรับแรงดึง  $A_s$  ถูกดึงถึงจุดครากก่อน ( $f_s \geq f_y$ ) คอนกรีตถูกอัดแตกตามมาด้วยหน่วยการยึดหดสูงสุด  $\epsilon_u$  เท่ากับ 0.003 (ตามมาตรฐานกำหนด) ดังนั้นการกระจายตัวของหน่วยแรงภายในเป็นดังรูปที่ 3 โดยหน่วยแรงอัดสูงสุดเทียบเท่ากับคอนกรีตมีค่าเท่ากับ  $0.85f'_c$  และหน่วยแรงดึงสูงสุดในเหล็กเสริมรับแรงดึง ( $T = A_s f_y$ ) แรงอัดในคอนกรีต ( $C_c = 0.85f'_c ba$ ) และแรงอัดในเหล็กเสริมรับแรงอัด ( $C_s = A'_s f'_s$ ) เมื่อไม่คิดเนื้อที่ของคอนกรีตซึ่งถูกแทนที่ด้วยเนื้อที่ของเหล็กเสริมรับแรงอัด  $A'_s$

#### 2.3.1.1 การออกแบบการเสริมเหล็กแบบสมดุล (Balance design)

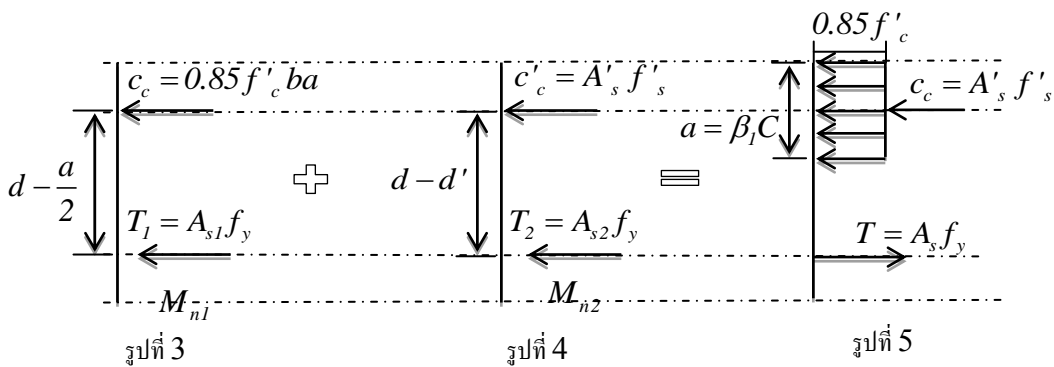
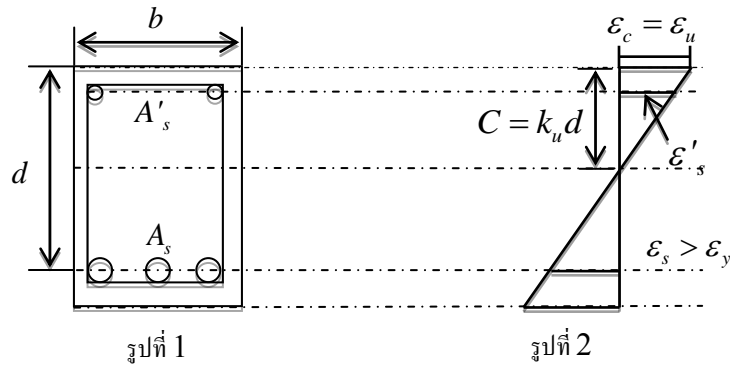
$M_c = M_s$  คานนี้เรียกว่า เป็นคานที่มีการออกแบบสมดุล (Balance design) หรือมีการเสริมเหล็กสมดุล ซึ่งหมายความว่าคานมีปริมาณเหล็กเสริมพอเหมาะที่ทำให้เกิดหน่วยแรงอัดในคอนกรีตและหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับหน่วยแรงที่ยอมให้ทั้งสองชนิด ในขณะที่รับโมเมนต์ (โดยที่  $M = M_c = M_s$ )

#### 2.3.1.2 การออกแบบการเสริมเหล็กเกินสมดุล (Over reinforced)

$M_c < M_s$  คานนี้เรียกว่า เป็นคานที่มีการเสริมเหล็กเกินสมดุล (Over reinforced) ซึ่งหมายความว่า เมื่อคานรับโมเมนต์  $M$  (โดยที่  $M = M_c$ ) กระทำต่อคาน ค่าหน่วยแรงอัดที่เกิดในคอนกรีตจะมีค่าถึงหน่วยแรงที่ยอมให้ แต่ค่าหน่วยแรงที่เกิดในเหล็กเสริม ยังไม่ถึงค่าหน่วยแรงที่ยอมให้

### 2.3.1.3 การออกแบบการเสริมเหล็กต่ำกว่าสมดุลง (Under reinforced)

$M_c > M_s$  คานนี้เรียกว่า เป็นคานที่มีการเสริมเหล็กต่ำกว่าสมดุลง (Under reinforced) ซึ่งหมายความว่า เมื่อคานรับโมเมนต์  $M$  (โดยที่  $M = M_s$ ) กระทำต่อคาน ค่าหน่วยแรงดึงที่เกิดในเหล็กเสริม จะมีค่าเท่ากับหน่วยแรงที่ยอมให้แต่ค่าหน่วยแรงอัดที่เกิดในคอนกรีตยังไม่ถึงค่าหน่วยแรงที่ยอมให้



กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุด ( $M_n$ ) พิจารณาจาก 2 ส่วน คือ  $M_{n1}$  และ  $M_{n2}$  โดยที่  $M_{n1}$  เป็นกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานที่มีรูปตัดเปรียบเสมือนเป็นคานที่มีแต่เหล็กเสริมรับแรงดึงอย่างเดียว ดังรูปที่ 4 นั่นคือกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดพิจารณาได้จากแรงอัดในส่วนของคอนกรีตหรือจากแรงดึงในเหล็กเสริมรับแรงดึงที่มีเนื้อที่หน้าตัดเท่ากับ  $A_{s1}$  ส่วนกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุด  $M_{n2}$  เป็นกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดที่ได้จากแรงอัดในเหล็กเสริมรับแรงอัดที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ  $A'_s$  หรือจากแรงดึงในเหล็กเสริมรับแรงดึงที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ  $A_{s2}$  ดังรูปที่ 5 สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$M_{n1} = 0.85 f'_c b a \left( d - \frac{a}{2} \right)$$

$$M_{n2} = A'_s f'_s (d - d')$$

ดังนั้น กำลังต้านทานโมเมนต์ตัดสูงสุด  $M_n = M_{n1} + M_{n2}$

นั่นคือ  $M_n = 0.85 f'_c b a (d - \frac{a}{2}) + A'_s f'_s (d - d')$

และโมเมนต์ตัดที่ใช้ออกแบบคือ  $F M_n$  โดยที่ตัวคูณลดกำลัง  $F$  เท่ากับ 0.9

### 2.3.2 การคำนวณหาโมเมนต์ตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วย FRP ตามสมการของ รศ.ดร.อมร พิมานมาศ

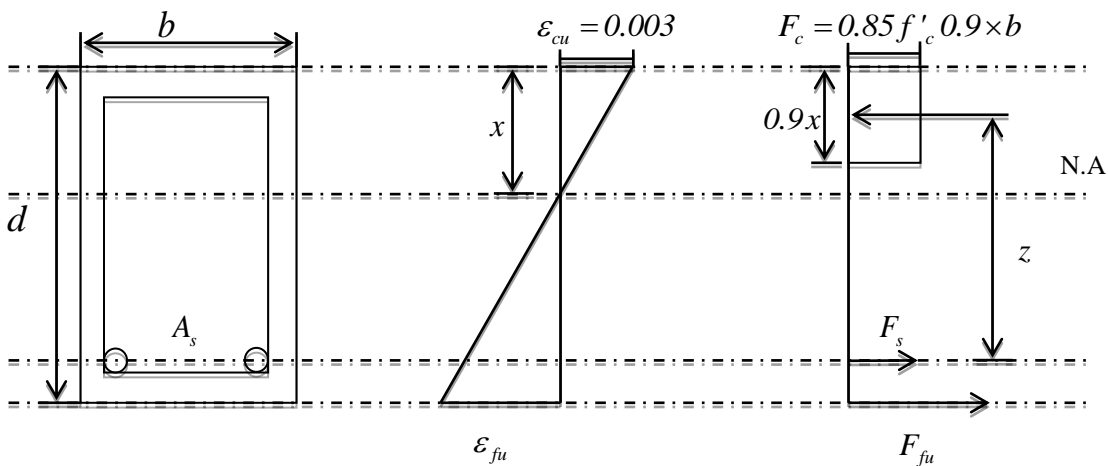
รศ.ดร.อมร พิมานมาศ สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ได้เสนอและจัดทำเอกสารประกอบการบรรยาย หลักการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วย FRP ดังนี้การเสริมกำลังคานเพื่อให้สามารถต้านทานโมเมนต์ดัดนั้นสามารถทำได้โดยการติด FRP ดังแสดงในรูปที่ 2 นั่นคือติด FRP ใต้ท้องคานเพื่อเสริมกำลังต้านทานโมเมนต์บวก และติดบนหลังคานเพื่อเพิ่มโมเมนต์ลบ การออกแบบหาปริมาณ FRP ที่ดีที่สุดคือการใช้หลักการ Strain compatibility ต้องอาศัย Iteration เพื่อหาตำแหน่งแกนสะเทิน อาศัยหลักการสมดุลของแรง เพื่อคำนวณหา กำลังต้านทานโมเมนต์ดัด และคำนวณการออกแบบหาปริมาณ FRP

รูปแบบการวิบัติที่ต้องการคือ 1. การบดอัดของคอนกรีต หรือ 2. การขาดของ FRP โดยให้การวิบัติเกิดขึ้นหลังจากที่เหล็กเสริมคราก โดยรูปแบบการวิบัติเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

ถ้า  $M_u < \phi M_{r,b}$  การวิบัติแบบ FRP ขาดก่อนที่คอนกรีตบดอัด

ถ้า  $M_u > \phi M_{r,b}$  การวิบัติเป็นแบบคอนกรีตบดอัดก่อนที่ FRP ขาด

โดยที่  $M_u$  เป็นโมเมนต์ประลัยและ  $M_{r,b}$  เป็นกำลังต้านโมเมนต์ที่จุดสมดุล นั่นคือเป็นโมเมนต์ที่ทำให้ความเครียดของคอนกรีตมีค่าเท่ากับความเครียดประลัยดังรูปที่ 2.5 พร้อมกับกับความเครียดใน FRP มีค่าเท่ากับความเครียดแตกหัก



รูปที่ 2.5 ความเครียดและแรงบนหน้าตัดคาน ค.ส.ล. เสริมกำลังด้วย FRP

การคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัด  $M_{r,b}$

กรณีที่ 1 ถ้า  $M_u < \phi M_{r,b}$  การวิบัติแบบ FRP ชัดก่อนที่คอนกรีตบดอัด

1. หน้าตัดคานที่มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว

สมมติว่าให้การกระจายความเครียดและหน่วยแรงบนหน้าตัดเป็นไปตามรูปที่ 2.5 สมการสำหรับคำนวณ  $M_{r,b}$  สามารถคำนวณได้จากการรวมโมเมนต์ของทุกแรงรอบผิวล่างสุดของคาน

$$M_{r,b} = 0.85 f'_c b (0.9x) [z + (h-d)] - A_s f_s (h-d) \quad (2.1)$$

โดยที่

$$X = h / \left[ \frac{\epsilon_{fu}}{\epsilon_{cu} + 1} \right] = \left[ \frac{0.003}{0.003 + \epsilon_{fu}} \right] h \quad (2.2)$$

X = ความลึกของแกนสะเทินเมื่อเสริมกำลัง

$\epsilon_{cu}$  = ความเครียดประลัยของคอนกรีต = 0.003

$\epsilon_{fu}$  = ความเครียดดึงประลัยของ FRP

h = ความลึกทั้งหมดของหน้าตัดคาน

ความยาวแกนโมเมนต์ z ซึ่งสามารถใช้ค่าความยาวแกนโมเมนต์ของหน้าตัดที่ไม่สามารถเสริมกำลังได้

$$z = d - 0.9x / 2 \quad (2.3)$$

โดยที่

z = ความยาวแกนโมเมนต์ซึ่งสามารถใช้ค่าความยาวแกนโมเมนต์ของหน้าตัดที่ไม่สามารถเสริมกำลังได้

d = ความลึกประสิทธิภาพ

สมการการคำนวณหาหน่วยแรงดึงในเหล็ก

โดยที่

$$f_s = E_s \epsilon_s = E_s \left( 0.003 \left[ d - \frac{x}{x} \right] \right) \leq f_y \quad (2.4)$$

$f_s$  = หน่วยแรงดึงในเหล็ก =  $f_y$  หากเหล็กคราก

2. หน้าตัดที่มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงและเหล็กรับแรงดัด

ในกรณีหน้าตัดที่มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงและเหล็กรับแรงดัด สามารถคำนวณ  $M_{r,b}$

ได้ดังนี้

$$M_{r,b} = 0.85 f'_c b (0.9x) [z + (h-d)] - A_s f_s (h-d) + f'_s (h-d') \quad (2.5)$$

สมการการคำนวณหาหน่วยแรงดึงในเหล็กรับแรงอัด

$$f'_s = E_s \varepsilon'_s = E_s (0.003 \left[ x - \frac{d'}{x} \right]) \leq f_y \quad (2.6)$$

โดยที่

$f'_s$  = หน่วยแรงดึงในหน่วยรับแรงอัด

$A'_s$  = พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงอัด

$d'$  = ระยะจากผิวนอกสุดด้านรับแรงอัดไปยังจุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมรับแรงอัด

กรณีที่ 2 ถ้า  $M_u > \phi M_{r,b}$  คอนกรีตบดอัดก่อนที่ FRP ขาด

ในกรณีนี้การออกแบบมีความยุ่งยากมากกว่ากรณีที่ 1 กำลังต้านทานโมเมนต์ของหน้าตัดที่เสริมกำลังสามารถคำนวณได้ดังนี้

แทนค่า  $z = d - (0.9x/2)$  จากสมการ 2.3 ลงในสมการ 2.1 และ 2.5 กำลังต้านทานโมเมนต์ของหน้าตัดที่เสริมกำลังดังนี้

1. สำหรับหน้าตัดเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว

$$M_r = 0.85 f'_c b (0.9x) [h - 0.45x] - A_s f_s (h-d) \quad (2.7)$$

สมการการคำนวณหาหน่วยแรงดึงในเหล็ก

$$F_s = E_s \varepsilon_s = E_s \left[ 0.003 \left( d - \frac{x}{x} \right) \right] \leq f_y \quad (2.8)$$

2. สำหรับหน้าตัดเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด

$$M_r = 0.85 f'_c b (0.9x) [h - 0.45x] - A_s f_s (h-d) + A'_s f'_s (h-d') \quad (2.9)$$

สมการการคำนวณหาหน่วยแรงดึงในเหล็ก

$$f_s = E_s \varepsilon_s = E_s (0.003 \left[ d - \frac{x}{x} \right]) \leq f_y \quad (2.10)$$

สมการการคำนวณหาหน่วยแรงดึงในเหล็กรับแรงดึง

$$f'_s = E_s \varepsilon'_s = E_s (0.003 \left[ x - \frac{d'}{x} \right]) \leq f_y \quad (2.11)$$

ความลึกของแกนสะเทิน  $x$  สามารถคำนวณโดยการให้  $M_u = \phi M_r$  แก้สมการหา  $x$  เมื่อได้  $x$  คำนวณหาความเครียดของคอนกรีตที่ผิวล่างของคานดังนี้

$$\varepsilon_b = \left[ \frac{h-x}{x} \right] (0.003) \quad (2.12)$$

โดยที่

$\varepsilon_b$  = ความเครียดของคอนกรีตที่ผิวล่างของคอนกรีต

ความเครียดใน FRP สามารถคำนวณได้จาก

$$\varepsilon_r = \varepsilon_b - \varepsilon_{cit} \quad (2.13)$$

โดยที่  $\varepsilon_{cit}$  เป็นความเครียดดึงที่ผิวล่างของคอนกรีตก่อนที่เสริมกำลังและสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\varepsilon_{cit} = M_s X_o / E_c I_{ce} \quad (2.14)$$

การคำนวณหาความเครียดอัดที่ผิวบนของคอนกรีตดังรูปที่ 2.6 ก่อนที่เสริมกำลัง  $\varepsilon_{cit}$  หาได้จาก

$$\varepsilon_{cit} = \varepsilon_{cit} \left[ \frac{h-x_o}{x_o} \right] \quad (2.15)$$

โดยที่

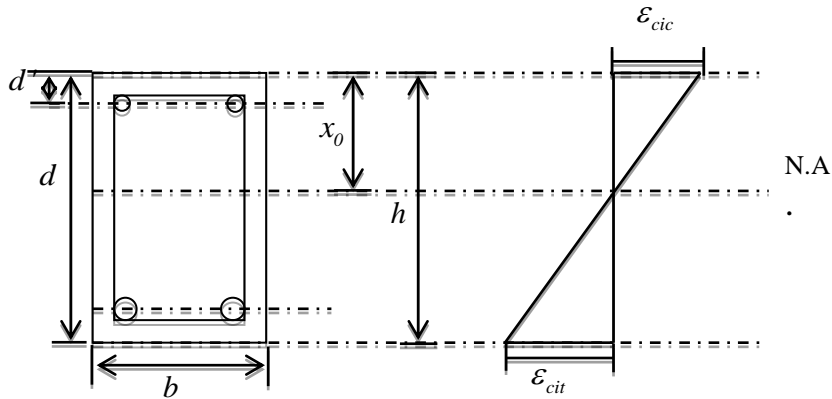
$\epsilon_{cit}$  = ความเครียดอัดที่ผิวบนของคอนกรีตก่อนที่เสริมกำลัง

$M_s$  = โมเมนต์ใช้งานคำนวณจากน้ำหนักบรรทุกทุกถาวรใช้งาน

$X_0$  = ความลึกของแกนสะเทินของหน้าตัดก่อนเสริมกำลัง

$E_c$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

$I_{ce}$  = โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแตกร้าวก่อนเสริมกำลัง



รูปที่ 2.6 ความเครียดที่ผิวบนและผิวล่างของหน้าตัดก่อนการเสริมกำลัง

หน่วยแรงดึง FRP สามารถคำนวณได้จาก

$$f_f = 0.9E_f\epsilon_r \quad (2.16)$$

กำลังต้านทานโมเมนต์ของหน้าตัดที่เสริมกำลัง สามารถคำนวณได้โดยการรวมโมเมนต์รอบแนวแรงอัดดังนี้

สำหรับหน้าตัดเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว

$$M_r = F_s z + F_r [z + (h - d)] \quad (2.17)$$

สำหรับหน้าตัดเสริมทั้งเหล็กรับแรงดึงและเหล็กรับแรงอัด

$$M_r = F_s z + F_r [z + (h - d)] + F'_s (0.45x - d') \quad (2.18)$$



โดยที่

$M_r$  = กำลังต้านทานโมเมนต์ของหน้าตัดที่เสริมกำลัง

$F_s$  = แรงดึงในเหล็กรับแรงดึง =  $A_s f_s$  (2.19)

$F'_s$  = แรงอัดในเหล็กรับแรงอัด =  $A_s f_s$  (2.20)

$F_f$  = แรงดึงใน FRP

แรงดึงใน FRP ( $F_f$ ) ที่ต้องการเพื่อให้หน้าตัดที่เสริมกำลัง สามารถต้านทาน  $M_u$  สามารถคำนวณแก่สมการ  $M_u = \phi M_r$

มาตรฐานการป้องกันการหลุดออกและการออกแบบเพื่อป้องกันการหลุดออกของแผ่นไฟเบอร์

1. ทำการยึดแผ่น FRP โดยใช้นอตยึด หรือใช้ FRP sheet พันที่ปลายเป็นรูปตัว U
2. การใช้กาวอีพอกซีที่มีความยึดหยุ่นตัวสูง
3. การกำหนดอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาแผ่น FRP ให้สูงเกิน 50 ขึ้นไป
4. ปลายแผ่น FRP ควรหยุดใกล้ปลายคานให้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้
5. การออกแบบเพื่อป้องกันการหลุดลอกของแผ่น FRP

การหลุดลอกของแผ่น FRP เกิดจากหน่วยแรงดึงและเฉือนในแผ่น FRP ที่ตำแหน่งรอยร้าว การป้องกันการวิบัติสามารถทำได้โดยการออกแบบให้ความเครียดที่เกิดขึ้นในแผ่น FRP มีค่าไม่เกิน 0.008 เมื่อน้ำหนักที่บรรทุกที่กระทำต่อองค์อาคารเป็นน้ำหนักแผ่นละ 0.006 เมื่อน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อองค์อาคารเป็นน้ำหนักบรรทุกแบบจุด ซึ่งเป็นค่าที่แนะนำโดย Concrete Society ของอังกฤษ

### 2.3.3 การออกแบบสมการต้านโมเมนต์ดัดของคอนกรีตเสริมกำลังด้วย FRP ตามสมการ ACI 440.2R-02

ในปี ค.ศ. 2002 ACI (American Concrete Institute) ได้จัดทำ “ACI 440.2R-02 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures.” ซึ่งนับว่าเป็นความก้าวหน้าครั้งสำคัญที่ทำให้วัสดุ FRP ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในอนาคต โดยเนื้อหาเกี่ยวกับการเสริมกำลังด้วย FRP

ตารางที่ 2.1 Environmental-reduction factor for various FRP systems and exposure condition

Exposure condition	Fiber and resin type	Environmental-reduction factor, $C_E$
Interior exposure	Carbon/epoxy	0.95
	Grass/epoxy	0.75
	Aramid/epoxy	0.85
Exterior exposure(Bridges, Piers, and unenclosed parking garages)	Carbon/epoxy	0.85
	Grass/epoxy	0.65
	Aramid/epoxy	0.75
Aggressive environment (Chemical plants and waste Water treatment plants)	Carbon/epoxy	0.85
	Grass/epoxy	0.50
	Aramid/epoxy	0.70

### 1. สมการที่ใช้ในการออกแบบ

คุณสมบัติของแรงดึงสามารถใช้ได้ทุกสมการในการออกแบบ การออกแบบแรงดึงสูงสุดอาจกำหนดให้ใช้ตาม Environmental-reduction factor ที่ให้ไว้ในตาราง 2.1 เพื่อเลือกประเภทของไฟเบอร์ให้เหมาะสม

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (2.21)$$

ในการทำงานเดียวกันการออกแบบสำหรับความเครียดสามารถหาได้ตาม Environmental-reduction factor เช่นเดียวกัน

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{frp} \quad (2.22)$$

เนื่องจากวัสดุ FRP เป็นวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบ Linearly elastic until failure ทำให้ความเหนียวลดลง การออกแบบโมดูลัสยืดหยุ่นสามารถที่หาได้จาก Hook's law ดังสมการ

$$E_f = \frac{f_{fu}}{\varepsilon_{fu}} \quad (2.23)$$

ส่วนประกอบของวัสดุไฟเบอร์และกาวยึดของระบบ FRP มีผลกระทบต่อความทนทานและแรงต้านต่อสภาพแวดล้อม Environmental reduction factor ที่อยู่ในตารางที่ 2.1 สามารถช่วยลดและป้องกัน ซึ่งอยู่บนความสัมพันธ์กับความทนทานของประเภทของไฟเบอร์ มีการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาให้สามารถใช้ประโยชน์ได้โดยวิธีการใช้ค่าตัวคูณ โดยที่

$f_{fu}$  = ค่าแรงดึงสูงสุดของ FRP จากคู่มือผู้ผลิต

$f_{fu}^*$  = ค่าแรงดึงสูงสุดของ FRP ที่ใช้ออกแบบ

$C_E$  = ค่า Environmental reduction factor

$\varepsilon_{frp}$  = ความเครียดประลัยของ FRP

$\varepsilon_{fu}$  = ความเครียดประลัยที่จุดวิบัติ

$E_f$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของ FRP

## 2 กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุด

การออกแบบกำลังให้ใกล้เคียงกับความต้องการ นั้นคือการออกแบบกำลังรับแรงดัดของชิ้นส่วนเกินกว่ากำลังโมเมนต์ โดยสมการ 2.24 การออกแบบกำลังรับแรงดัด  $\phi M_n$  เป็นกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดของชิ้นส่วน โดยค่าตัวคูณลดกำลัง  $F$  และกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุด  $M_n$  เป็นการคำนวณผลกระทบของน้ำหนักแนะนำให้ใช้กำลังโมเมนต์ระบุของหน้าตัดคำนวณโดยใช้ค่า Load factor ของ ACI 318-99 นอกจากนั้น ยังแนะนำให้ใช้ค่าตัวคูณลดกำลัง  $F$  ที่ต้องการ

$$\phi M_n \geq M_u \quad (2.24)$$

โดยที่

$M_n$  = กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุด

$M_u$  = โมเมนต์ดัดประลัย

$F$  = ตัวคูณลดกำลัง

ลักษณะการวิบัติ

กำลังรับแรงดัดของหน้าตัดขึ้นอยู่กับ การควบคุมลักษณะการวิบัติ การวิบัติด้วยแรงอัด

ตรวจสอบความแข็งแรงของหน้าตัดของ FRP โดย Ganga Rao และ Vijad 1998

- การแตกของคอนกรีตด้านที่รับแรงอัด ก่อนการ Yielding ของเหล็กเสริม
- Yielding ของเหล็กในการดึงโดยการฉีกขาดของ FRP
- Yielding ของเหล็กในการดึงโดยการแตกของคอนกรีต
- การหลุดร่อนของ FRP ออกจากคอนกรีต

การแตกของคอนกรีตเป็นการคิดว่าเกิดอะไรขึ้นถ้ามีแรงอัดมากกระทำ ความเครียดในคอนกรีตจนถึงความเครียดที่ใช้งานได้สูงสุด ( $\epsilon_f = \epsilon_{fu}$ ) ก่อนคอนกรีตจนถึงความเครียดที่ใช้งานได้สูงสุด

$$k_m = \begin{cases} \frac{1}{60\epsilon_{fu}} \left( 1 - \frac{nE_f t_f}{2,000,000} \right) \leq 0.90 \text{ for } \rightarrow nE_f t_f \leq 1,000,000 \\ \frac{1}{60\epsilon_{fu}} \left( \frac{90,000}{nE_f t_f} \right) \leq 0.90 \text{ for } \rightarrow nE_f t_f > 1,000,000 \end{cases}$$

ระบบ U.S (2.25)

$$k_m = \begin{cases} \frac{1}{60\epsilon_{fu}} \left( 1 - \frac{nE_f t_f}{360,000} \right) \leq 0.90 \text{ for } \rightarrow nE_f t_f \leq 180,000 \\ \frac{1}{60\epsilon_{fu}} \left( \frac{90,000}{nE_f t_f} \right) \leq 0.90 \text{ for } \rightarrow nE_f t_f > 180,000 \end{cases}$$

ระบบ S.I. (2.26)

โดยที่

$n$  = จำนวนชั้นของการเสริม FRP

$t_f$  = ความหนาของแผ่น FRP

$k_m$  = ตัวคูณลดกำลัง

$E_f$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของ FRP

$\epsilon_{cu}$  = ความเครียดสูงสุดในคอนกรีต

สำหรับการติดตั้งบริเวณภายนอกของ FRP เพื่อรับแรงดัดที่อาจทำให้ความเหนียวของชิ้นส่วนนั้นลดลง ซึ่งในกรณีนั้นเกิดการสูญเสียความเหนียวเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ตามควรมีสิ่งห่อหุ้มไว้ด้วยเพื่อคงสภาพความเหนียวเอาไว้ ระดับความเครียดในเหล็กที่จุดรับกำลังสูงสุดควรมีการตรวจเช็คด้วย หากความเครียดในเหล็ก ณ จุดที่ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวหรือเกิดการพังทลายของ FRP รวมทั้งการแตกออกหรือการหลุดร่อนด้วย มีวิธีการทำโดยในแนวทางนี้ขึ้นอยู่กับหลักการของ ACI 318-99 เมื่อ

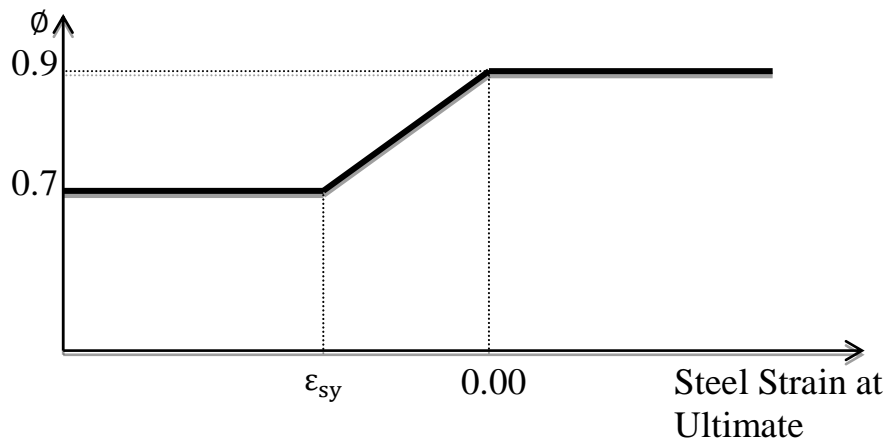
หน้าตัดมีความเหนียวน้อยควรที่มีการทดแทนด้วยกำลังที่สูงกว่า คือ ประยุกต์ตัวคูณลดกำลังเท่ากับ 0.70 ถึง 0.90 เพราะฉะนั้น ตัวคูณลดกำลังกำหนดโดยสมการ 2.27 โดย  $\epsilon_s$  คือความเครียดในเหล็กที่จุดรับกำลังสูงสุด ดังรูปที่ 2.7

$$\phi = \begin{cases} 0.90 \rightarrow \text{for } \epsilon_s \geq 0.005 \\ 0.70 + \frac{0.20(\epsilon_s - \epsilon_{sy})}{0.005 - \epsilon_{sy}} \rightarrow \text{for } \epsilon_{sy} < \epsilon_s < 0.005 \\ 0.70 \rightarrow \text{for } \epsilon_s \leq \epsilon_{sy} \end{cases} \quad (2.27)$$

โดยที่

$\epsilon_s$  = ความเครียดในเหล็กที่จุดรับกำลังสูงสุด

$\epsilon_{sy}$  = ความเครียดในเหล็กที่จุดคราก



รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวคูณลดกำลัง ( $F$ ) กับค่าความเครียดของเหล็กเสริม

### 3. การนำไปเสริมกับหน้าตัดสี่เหลี่ยม

ขั้นตอนการคำนวณถึงกำลังสูงสุดอาจทดแทนความเค้น และแรงสมดุลงและอาจพิจารณาครอบคลุมไปถึงการวิบัติอีก ขั้นตอนการคำนวณสามารถหายไปทดแทนปัจจัยเหล่านี้ได้ ขั้นตอนการกระจายในกรณีนี้ใช้วิธี Trial and Error Method

ขั้นตอนของการ Trial and Error Method คือการเลือกหรือสมมติ ค่าความยาวแกนขึ้นมา  $c$  คำนวณหาความเครียดและความเค้นในวัสดุ และตรวจสอบแรงภายในสมดุลง หากแรงภายในที่ตรวจสอบนั้นไม่สมดุลง ต้องทำการแก้ไขขนาดของค่าความยาวแกนจนกว่าสมดุลง

$$c = 0.2d \quad (2.28)$$

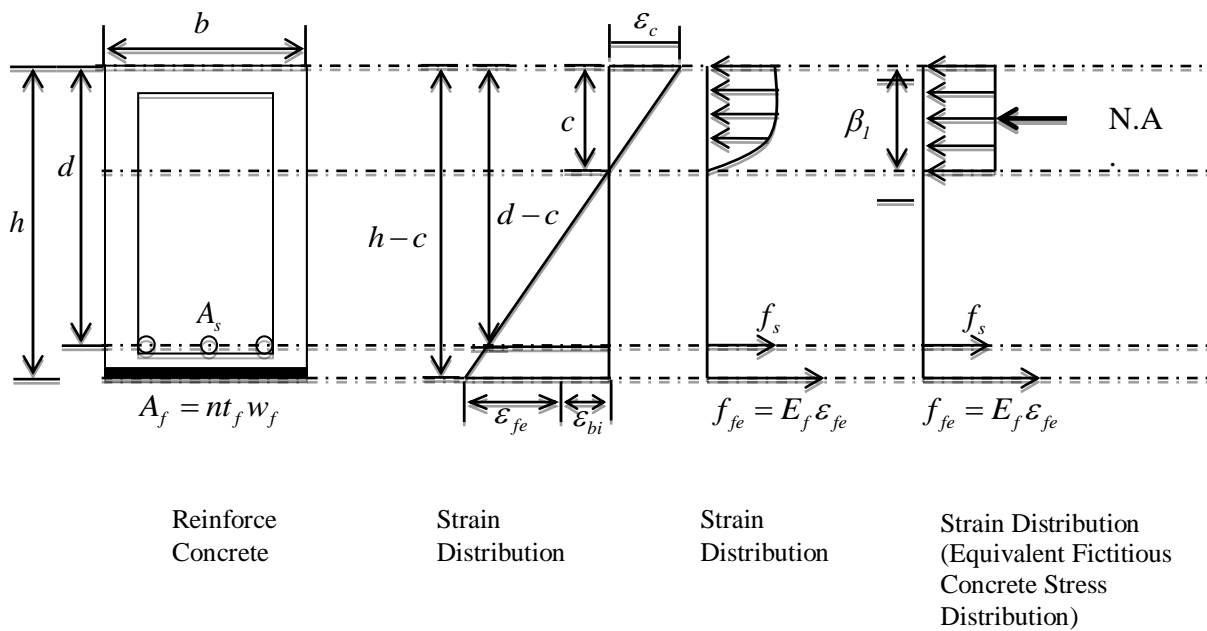
โดยที่

$c$  = ความลึกของแกนสะเทินเมื่อเสริมกำลัง

$d$  = ความลึกประสิทธิภาพของเหล็กเสริมแรงอัด

สำหรับการสมมติค่าความยาวแกน  $c$  ความเครียดใน FRP ที่นำมาเสริมกำลังสามารถหาได้จากสมการ 2.28 สมการนี้พิจารณาจากลักษณะการวิบัติสำหรับการสมมติค่าความยาวแกนนั้น เทอมแรกในสมการเป็นการควบคุมการแตกออกในการวิบัติด้วยแรงดัดของหน้าตัด

เทอมที่ควบคุมการวิบัติด้วยแรงของ FRP (แตกออกหรือหลุดออก) ของหน้าตัด พิจารณาสมการต่างๆ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงการกระจายตัวของค่าความเค้นและค่าความเครียดของคานหน้าตัดสี่เหลี่ยม เมื่อรับแรงดัด

การหาหน่วยแรงดัดประลัยของแผ่น FRP ที่ใช้เสริมกำลัง สามารถหาได้จากสมการ

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left( \frac{h-c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq k_m \varepsilon_{fu} \quad (2.29)$$

การหาหน่วยแรงดัดประลัยของ FRP ที่ใช้เสริมกำลังนั้น สามารถหาได้จากความเครียดใน FRP โดยสมมติเป็นพฤติกรรมแบบอิลาสติก

$$F_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (2.30)$$

ความเครียดที่เกิดขึ้นของแผ่น FRP ที่ใช้เสริมกำลัง สามารถหาได้จากสมการ

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{d-c}{h-c} \right) \quad (2.31)$$

โดยที่

$c$  = ความลึกของแกนสะเทินเมื่อเสริมกำลัง

$\varepsilon_{cu}$  = ความเครียดสูงสุดในคอนกรีต

$k_m$  = ตัวคูณลดกำลัง

$\varepsilon_{fu}$  = ความเครียดประลัยที่จุดวิบัติ

$h$  = ความลึกของหน้าตัด

$\varepsilon_{bi}$  = ความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการเสริม FRP

การหาหน่วยแรงดึงในเหล็ก หาได้จากสมการ 2.32 โดยสมมติให้เป็นแบบอิลาสติกพลาสติก

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \quad (2.32)$$

โดยที่

$\varepsilon_s$  = ความเครียดในเหล็กที่จุดรับกำลังสูงสุด

$f_s$  = หน่วยแรงดึงในเหล็ก

$f_y$  = หน่วยแรงดึงในเหล็กที่จุดคราก

$E_c$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก

ค่าความยาวแนวแกน  $c$  หาได้โดย

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\gamma f'_c \beta_1 b} \quad (2.33)$$

โดยที่

$c$  = ความลึกของแกนสะเทินเมื่อเสริมกำลัง

$\gamma$  = เป็นตัวแปรระบุของความเค้นในคอนกรีต = 0.85

$\beta_1$  = เป็นตัวแปรระบุของความเค้นในคอนกรีต

$A_f$  = พื้นที่หน้าตัดของ FRP

$A_s$  = พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงดึง

$b$  = ความกว้างของหน้าตัด

$f'_c$  = ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน

ค่า  $\gamma$  และ  $\beta_1$  เป็นตัวแปรระบุของความเค้นในคอนกรีตเท่ากับการกระจายของความเค้นหากคอนกรีตมีการแตก(ก่อนหรือหลัง Yielding ของเหล็ก)  $\gamma$  และ  $\beta_1$  ( $\gamma = 0.85$  และ  $\beta_1$  จาก ACI318-99)

$$\beta_1 \begin{cases} 0.85, f'_c \leq 280 \text{ ksc} \\ 0.85 - 0.05 \left( \frac{f'_c - 280}{70} \right), 280 \text{ ksc} < f'_c \leq 560 \text{ ksc} \\ 0.65, f'_c > 560 \text{ ksc} \end{cases} \quad (2.34)$$

$$E_c = 5700 \sqrt{f'_c} \quad (2.35)$$

โดยที่

$E_c$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

เมื่อเราได้ความยาวแนวแกน  $c$  จากสมการ 2.35 จากนั้นนำค่าที่ได้ไปแทนลงในสมการ 2.29, 2.30, 2.31 และ 2.32 อีกครั้ง ทำการแก้สมการข้างต้นได้ค่าความยาวแนวแกน  $c$  สุดท้ายเท่ากันหรือใกล้เคียง

การหาลำดับระบุของหน้าตัดที่เสริมกำลังด้วย FRP สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.36 ค่าตัวคูณลดกำลังที่เพิ่มขึ้นคือ  $\psi_f$  เป็นการประยุกต์ของกำลังของ FRP ที่ใช้เสริมกำลังโดย  $\psi_f = 0.85$

$$M_n = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left( h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (2.36)$$

$$\phi M_n = \phi \left[ A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left( h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \right] \quad (2.37)$$



โดยที่

$M_n$  = กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุด

$f$  = ตัวคูณลดกำลัง

$c$  = ความลึกของแกนสะเทินเมื่อเสริมกำลัง

$\beta_1$  = เป็นตัวแปรของค่าความเค้นในคอนกรีต

$A_f$  = พื้นที่หน้าตัดของ FRP

$A_s$  = พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงดึง

$h$  = ความลึกของหน้าตัด

$f_s$  = หน่วยแรงดึงในเหล็ก

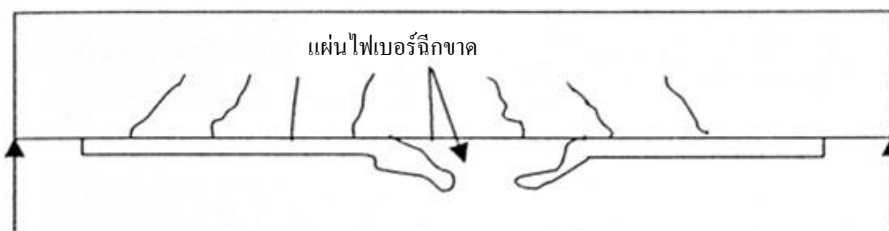
$d$  = ความลึกประสิทธิภาพของเหล็กเสริมแรงดึง

$\psi_f$  = เป็นการประยุกต์ของกำลังของ FRP ที่ใช้เสริมกำลัง = 0.85

## 2.10 การวิบัติและพฤติกรรมการวิบัติของคานที่ถูกเสริมกำลังด้วยแผ่น FRP

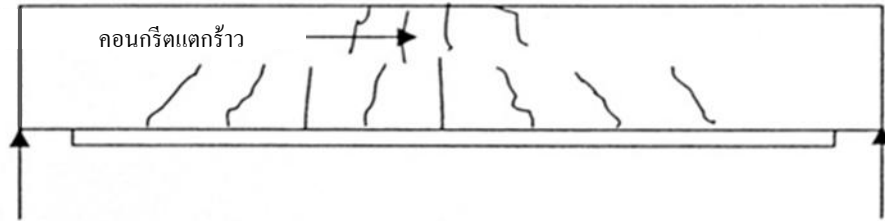
รูปแบบการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเสริมกำลังด้วยแผ่น FRP มีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบ โดยสามารถแบ่งการวิบัติได้เป็น 7 รูปแบบ คือ

1. การวิบัติจากการขาดของแผ่น FRP เป็นการวิบัติที่เกิดจาก FRP ขาด เกิดจากการที่คอนกรีตเสริมเหล็กมีกำลังรับน้ำหนัก มากกว่ากำลังรับแรงดึงของ FRP จึงทำให้แผ่น FRP เกิดการขาดก่อน ดังรูปที่ 2.9



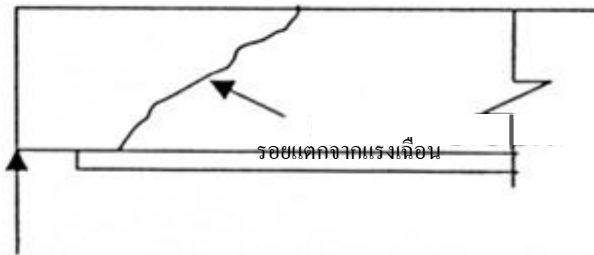
รูปที่ 2.9 การวิบัติจากการขาดของแผ่น FRP

2. การวิบัติจากการบดอัดแตกของคอนกรีต เป็นการวิบัติที่เกิดจากการบดอัดของคอนกรีตด้านที่รับแรงอัด เกิดจากการที่คอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงอัดไม่สามารถรับแรง เนื่องจากน้ำหนักที่กระทำกับคอนกรีตได้ จึงทำให้คอนกรีตเกิดการวิบัติ ดังรูปที่ 2.10



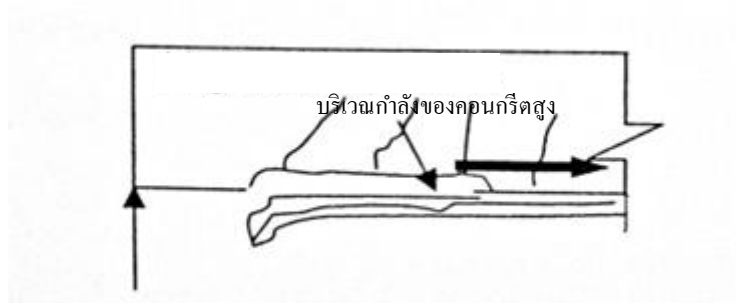
รูปที่ 2.10 การวิบัติจากการบดอัดแตกของคอนกรีต

3. การวิบัติจากแรงเฉือน แสดงการวิบัติที่เกิดจากแรงเฉือน เกิดจากการที่คอนกรีตเสริมเหล็กไม่สามารถรับแรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักที่กระทำกับคอนกรีตได้จึงทำให้คอนกรีตเกิดการวิบัติ ดังรูปที่ 2.11



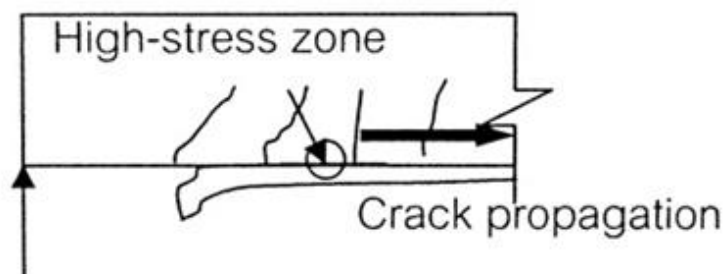
รูปที่ 2.11 การวิบัติจากแรงเฉือน

4. การวิบัติจากการหลุดลอกของคอนกรีตหุ้ม เป็นการวิบัติที่เกิดจากการหลุดของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กที่ปลายแผ่นไฟเบอร์เมื่อให้น้ำหนักที่กระทำกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กจากนั้นคานเกิดการวิบัติที่ตำแหน่งบริเวณส่วนที่คอนกรีตห่อหุ้มเหล็ก ทำให้ความสามารถในการรับกำลังลดลง ดังรูปที่ 2.12



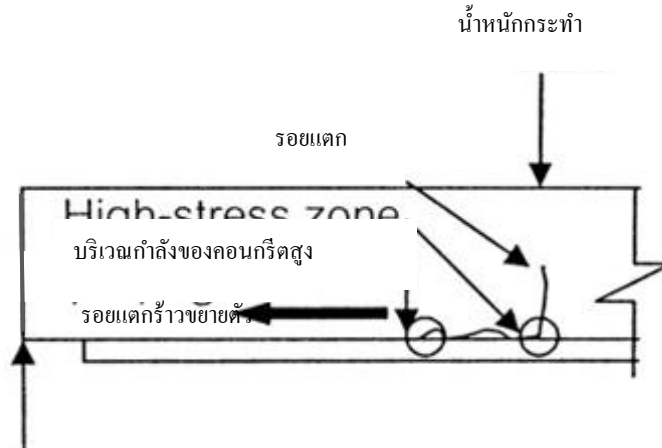
รูปที่ 2.12 การวิบัติจากการหลุดลอกของคอนกรีตหุ้ม

5. การวิบัติจากแผ่นเสริมกำลังที่ปลายคาน เป็นการวิบัติที่เกิดจากการหลุดของแผ่น FRP เมื่อให้น้ำหนักที่กระทำกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กจากนั้นแผ่น FRP ที่ติดอยู่กับคานเกิดการหลุดลอกออกโดยสาเหตุอาจเกิดจากสารที่ใช้ประสานระหว่างแผ่น FRP กับคอนกรีตไม่ดีพอหรืออาจเกิดจากวิธีการติดไม่ถูกต้อง เป็นการหลุดลอกของแผ่นไฟเบอร์ทั้งแผ่น ดังรูปที่ 2.13



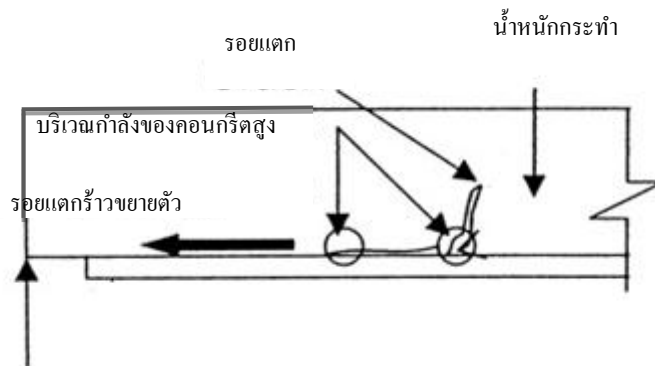
รูปที่ 2.13 การวิบัติจากแผ่นเสริมกำลังที่ปลายคาน

6. การวิบัติจากรอยร้าวระหว่างแผ่นเสริมกำลังกับตัวคานที่มาจากแรงดัด เป็นการหลุดของ FRP ที่รอยร้าวตัด เมื่อให้น้ำหนักที่กระทำกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กจากนั้นคอนกรีตเกิดการร้าวจึงทำให้แผ่น FRP ที่ติดอยู่เกิดการหลุดลอกออกตรงตำแหน่งที่เกิดรอยร้าว ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การวิบัติจากรอยร้าวระหว่างแผ่นเสริมกำลังกับตัวคานที่มาจากแรงดัด

7. การวิบัติจากรอยร้าวระหว่างแผ่นเสริมกำลังกับตัวคานที่มาจากแรงดัดและแรงเฉือน เป็นการหลุดของรอยร้าวทแยง ซึ่งก็เป็นสาเหตุหนึ่งอีกเช่นกันที่อาจเกิดการวิบัติได้ ดังรูปที่ 2.15

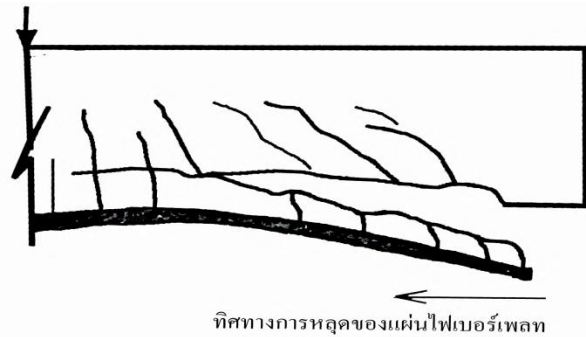


รูปที่ 2.15 การวิบัติจากรอยร้าวระหว่างแผ่นเสริมกำลังกับตัวคานที่มาจากแรงดัดและแรงเฉือน

การที่แผ่น FRP หลุดลอกออกนั้น เป็นรูปแบบการวิบัติที่ไม่เป็นที่พึงปรารถนาเป็นอย่างยิ่ง เพราะเป็นการวิบัติแบบเปราะ และสามารถเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบ ซึ่งทำให้ไม่สามารถใช้กำลังของ FRP ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพในการนำไปใช้งาน การวิบัติเนื่องจากการหลุดลอกของแผ่น FRP มี 2 ลักษณะ

### 1. การหลุดลอกของคอนกรีตหุ้ม

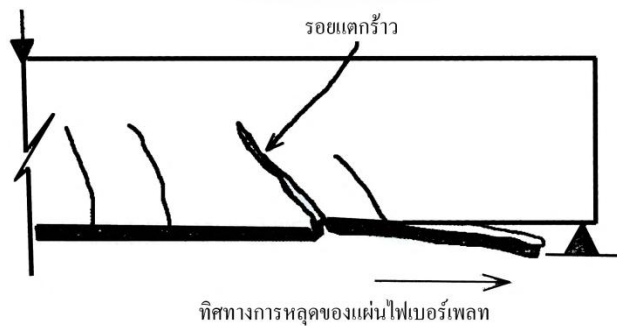
เกิดจากหน่วยแรงเฉือนตามแนวแกน และหน่วยแรงดึงที่ปลายแผ่น FRP ดึงให้คอนกรีตส่วนหุ้ม เหล็กหลุดออกมา ดังแสดงในรูปที่ 2.16 การหลุดลอกเริ่มเกิดขึ้นที่ปลายแผ่นก่อน และค่อยๆ ลามเข้ามา ตรงกลางชิ้นส่วน



รูปที่ 2.16 การหลุดลอกของคอนกรีตหุ้ม

### 2. การหลุดลอกของแผ่น FRP

เนื่องจากหน่วยแรงเฉือนและหรือ หน่วยแรงดึงในแผ่น FRP ตรงตำแหน่งรอยร้าว (รอยร้าวตัด และรอยร้าวเฉือน) การหลุดลอกเริ่มเกิดขึ้นที่ฐานรอยร้าวก่อน และลามไปปลายแผ่น FRP ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การหลุดลอกของแผ่น FRP

## 2.11 ตัวอย่างการนำไปใช้งานจริง

การเสริมกำลังพื้น โดยยึดติดแผ่น CFRP ในบริเวณท้องพื้น เพื่อรับ Positive Moment ในทิศทางตามแนวยาวของการติดแผ่น CFRP การเสริมกำลังในลักษณะนี้สามารถนำไปใช้ ในกรณีที่ต้องการเสริมกำลังของ พื้น One Way Slab หรือ แผ่นพื้นสำเร็จรูป ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การเสริมกำลังพื้นเพื่อรับ Positive Moment

การเสริมกำลังพื้น โดยยึดติดแผ่น CFRP ในบริเวณท้องพื้น เพื่อรับ Positive Moment ในรูปนี้สังเกตเห็นว่าทิศทางของ CFRP นั้นมีสองทิศทางยึดติดในลักษณะตั้งฉากกัน (คล้ายตารางหมากรุก) เพื่อเสริมกำลังของพื้นในสองทิศทางที่ตั้งฉากกัน การเสริมกำลังลักษณะนี้ถูกใช้ในกรณีของพื้นแบบ Two Way Slab on Beam, Flat Plate และ Flat Slab ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การเสริมกำลังพื้นเพื่อรับ Positive Moment

การเสริมกำลังรับแรงเฉือน(Shear) ของคานสะพาน คานสะพานในรูปแบบ Simple Beam คานแบบ Simple Beam มีแรงเฉือนเกิดขึ้นสูงบริเวณปลายคาน การยึดติดแผ่น CFRP เพื่อ

เพิ่ม Shear Capacity จึงยึดติดในตำแหน่งปลายคานโดยพัน(Wrap) แผ่น CFRP รอบคาน คือด้านข้างของคาน(สองด้าน) และ ด้านท้องคาน ลักษณะคล้ายตัวอักษร U เรียกว่า U-Wrap เปรียบเสมือนการเพิ่มเหล็กปลอกในคาน(เพิ่ม Shear) ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การเสริมกำลังรับแรงเฉือน(Shear)

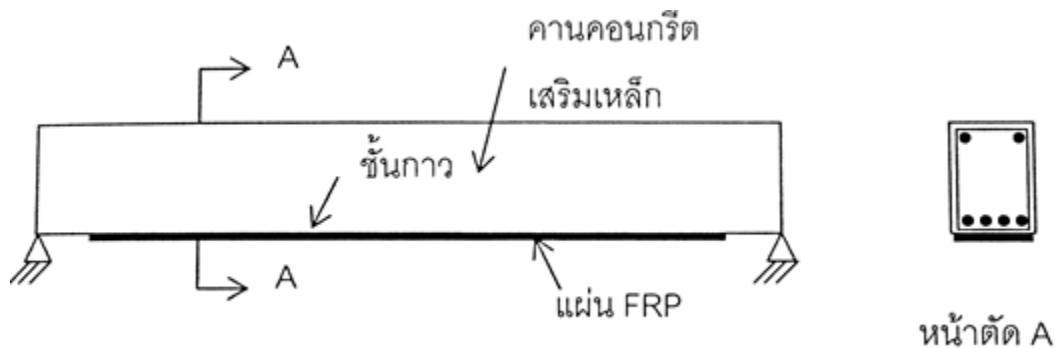
การเสริมกำลังเสาโดยการพัน (Wrap) รอบเสาด้วยแผ่น CFRP แผ่น CFRP ที่ใช้ต้องมี Carbon Fiber 2 ทิศทาง คือ ทิศทางตามเส้นรอบวงกลม(Perimeter Direction) ของเสาและทิศทางตามแนวความสูง(Longitudinal Direction) ของเสา Carbon Fiber ในแต่ละทิศทางทำหน้าที่เสริมกำลังที่แตกต่างกัน Carbon Fiber ในทิศเส้นรอบวงกลมของเสามีหน้าที่เพิ่ม Confinement ของเสาทำให้กำลังรับแรงอัด(Compressive Strength) ของเสาเพิ่มขึ้นและยังทำหน้าที่เหมือนเหล็กปลอกในตัวเสาทำให้กำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength) ของเสาเพิ่มขึ้นด้วย ส่วน Carbon Fiber ในทิศทางตามแนวความสูงของเสาทำหน้าที่เพิ่มกำลังรับแรงดัด(Flexural Rigidity) ของเสา ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 การเสริมกำลังเสาโดยการพัน (Wrap)

## 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิธีการดั้งเดิมที่ใช้ในการเสริมกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีทั้งการติดแผ่นเหล็กและการวิธีการอัดแรงจากภายนอกคาน โดยวิธีการเหล่านี้มีข้อเสียอยู่ว่าควบคุมสภาพได้ยากปัจจุบันได้มีการเสริมกำลังแบบใหม่โดยการใช้แผ่น FRP และการหุ้มด้วยเส้นใยของ FRP ซึ่งได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก ความจริงการเสริมกำลังดังกล่าวมีตั้งแต่กลางช่วงปี 1980 ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่น FRP

พฤติกรรมของส่วนของโครงสร้างรับแรงดัดและแรงอัดเมื่อซ่อมแซมหรือเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เอกซาร์นี้ศึกษาการใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ซ่อมแซมและเสริมกำลังของโครงสร้างที่รับแรงอัดและแรงดัด โดยศึกษาถึงความแตกต่างและความเหมาะสมของจำนวนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่นำมาใช้เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพและคุ้มค่ามากที่สุด ซึ่งพบว่าการนำไฟเบอร์มาเสริมกำลังทำให้คานและเสามีความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งดูได้จากคานมีระยะโก่งตัวลดลงและเสามีค่าหน่วยการยึดตัวน้อยลง แต่กำลังที่เพิ่มขึ้นไม่เป็นปฏิกิริยา โดยตรงกับจำนวนคาร์บอนไฟเบอร์ที่เพิ่มขึ้น แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใช้ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่คานและเสาที่ทำการเสริมกำลังได้มากกว่าคานและเสาที่ทำการซ่อมแซมการใช้เส้นใยแก้วสังเคราะห์ในการเพิ่มกำลังของส่วนรับแรงอัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

งานศึกษานี้มุ่งในการทดสอบหาการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดของคานในส่วนของ Compression Zone เมื่อทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นวัสดุเส้นใยแก้วสังเคราะห์ โดยทำการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีลักษณะแบบเหล็กเสริมเกินสภาวะสมดุล (over reinforcement) ซึ่งทำการหล่อคานคอนกรีตขึ้นมาสองกลุ่ม กลุ่มแรกเป็นคานแม่แบบซึ่งไม่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นวัสดุประกอบเส้นใยแก้วสังเคราะห์และกลุ่มที่สองเป็นคานที่เสริมกำลังด้วยวัสดุประกอบเส้นใยแก้วสังเคราะห์ และนำคานทั้งสองกลุ่มไปทำการทดสอบ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของคาน จนคานวิบัติ นำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ตามทฤษฎี ผลการทดสอบดังกล่าวพบว่าคานทดสอบที่เสริมกำลังด้วยแผ่นวัสดุประกอบเส้นใยแก้วสังเคราะห์เกิดการวิบัติสองลักษณะคือ การวิบัติเนื่องจากการหลุดของแผ่นเส้นใย และการวิบัติ



เนื่องจากการแตกออกของคอนกรีตใต้ท้องคานซึ่งการวิบัติทั้งสองลักษณะนั้นเป็นการวิบัติที่แผ่นวัสดุประกอบเส้นใยแก้วสังเคราะห์ยังไม่ได้รับแรงจนถึงจุดประลัยการซ่อมแซม บำบัด และเสริมกำลังของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

งานศึกษานี้เสนอข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการซ่อมแซมหรือการเสริมกำลังของโครงสร้าง ได้ทำการจัดทำรูปแบบโดยแบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็นสามขั้นตอนสำคัญ คือ

1. การตรวจสอบสภาพความเสียหายของโครงสร้าง และหาสาเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหายขึ้นในโครงสร้าง
2. การประเมินความรุนแรงของความเสียหายที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างว่าจัดเป็นการวิบัติหรือไม่ ทั้งทางด้านกำลังและการบริการ เพื่อพิจารณาความจำเป็นในการซ่อมแซม บำบัด เสริมกำลัง
3. วิธีการบำบัด ซ่อมแซม และเสริมกำลัง ที่เหมาะสมตามลักษณะของการวิบัติและ วัตถุประสงค์ในการซ่อมแซม

### 2.12.1 การใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ในการเพิ่มกำลังของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

งานศึกษานี้ทำการทดสอบหาการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงดัด และแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ โดยทำการหล่อคานขึ้นมาสองกลุ่ม กลุ่มแรกออกแบบให้เกิดการวิบัติเนื่องจากแรงดัดและกลุ่มที่สองออกแบบให้เกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน จากนั้นนำคานทั้งสองกลุ่มมาทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ทำการทดสอบคานดังกล่าวเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักคานที่เปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์ตามทฤษฎีและตามมาตรฐาน ACI พฤติกรรมการหลุดลอกของแผ่นไฟเบอร์ของคาน ค.ส.ล.

งานศึกษานี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์อาจวิบัติได้จากการหลุดลอกของเนื้อคอนกรีตหุ้มลอกจากคานคอนกรีตเสริมเหล็กก่อนที่กำลังของโครงสร้างถึงค่าประลัย ซึ่งการวิบัติในลักษณะนี้ไม่ต้องการ เนื่องจากว่าเป็นการวิบัติแบบเปราะ และยากที่ทำนายกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างได้อย่างถูกต้อง ซึ่งการวิจัยนี้ได้เสนองานทดลองที่ศึกษาถึงผลของระยะยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นไฟเบอร์กับคาน, การยึดรั้งของแผ่นไฟเบอร์ในแนวตั้งต่อพฤติกรรมการหลุดลอกของคานที่เสริมกำลังด้วยไฟเบอร์ การทดลองจากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าลักษณะการหลุดลอกของแผ่นไฟเบอร์นั้นขึ้นอยู่กับระยะยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นไฟเบอร์กับคานและสถานะการยึดรั้งที่ปลายของแผ่นไฟเบอร์ซึ่งในการพยายามที่ป้องกันการหลุดลอกที่ปลายของแผ่นไฟเบอร์โดยการยึดรั้งปลายของแผ่นไฟเบอร์ในแนวตั้งนั้นการหลุดลอกแผ่นไฟเบอร์ที่ฐานรอยร้าวเอียงก็อาจเกิดขึ้นแทนได้ โดยการยึดรั้งที่ปลายของแผ่นไฟเบอร์นี้ทำได้โดยการพันแผ่นไฟเบอร์ซีทรอบปลายแผ่นไฟเบอร์เพลท เดิมให้เส้นใยของ

ไฟเบอร์ตั้งฉากกับแกนของคานซึ่งการพันในลักษณะนี้คล้ายกับการพันเป็นตัวอักษร U จึงเรียกการยึดรั้งในลักษณะนี้ว่า U-wrap แต่จากการทดลองชี้ให้เห็นว่าการยึดรั้งนี้เป็นการยึดรั้งที่ไม่สม่ำเสมอตลอดความกว้างของแผ่นไฟเบอร์เฟลทซึ่งควรคำนึงถึงเมื่อต้องการออกแบบการเสริมกำลังคานที่มีความกว้างมาก

### 2.12.2 การศึกษาการเกิดความเข้มของหน่วยแรงในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่เสริมกำลังหรือซ่อมแซมด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์(A study on stress concentration in RC beams strengthen or repaired with CFRP) โดย ผศ. ปิยะ รัตนวุฒิสุวรรณ 2545 ภาควิชาวิศวกรรมโยธาจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศึกษาพฤติกรรมและค่าความเข้มของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีต ของคานที่เสริมกำลังหรือซ่อมแซมด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน โดยมรคานตัวอย่างทั้งหมด 13 ตัวอย่าง แบ่งออกเป็นคานควบคุม 2 ตัวอย่าง คานซ่อมแซม 2 ตัวอย่าง และคานเสริมกำลัง 9 ตัวอย่าง ซึ่งมีรูปแบบของการเสริมกำลังและการซ่อมแซมต่างกันไปตามตัวแปรที่กำหนดไว้ คือ ความกว้าง และความยาวของพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ระยะการยึดปลาย ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึง ความหนาของชั้นกาวยาหรือซ่อมแซมรอยแตกกร้าวด้วยวัสดุประสาน(Epoxy) ซึ่งคานทั้งหมดเป็นคานแบบ Simple beam ความยาวช่วงคาน 200 ซม. ใช้น้ำหนักกระทำแบบ 4 จุด(4-Point Load) และมี Strain gage ติดตั้งอยู่ที่ผิวเหล็กเสริม 3-5 จุดในแต่ละตัวอย่าง จากผลการทดสอบพบว่าคานที่เสริมกำลังหรือซ่อมแซมด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนมีกำลังสูงขึ้น 41%-166% เมื่อเปรียบเทียบกับคานควบคุม และมีค่าโก่งตัวสูงสุดที่กึ่งกลางคานลดลง ซึ่งคิดเป็น 9%-25% ของคานควบคุม ในขณะที่รอยแตกกร้าวที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็ก และกระจายตัวสูงกว่าคานควบคุม ในส่วนของค่าดัชนีความเหนียว(Ductility index) ของคานเสริมกำลังมีค่าน้อยกว่าคานควบคุมอย่างชัดเจน และการวิบัติของคานเสริมกำลังเป็นลักษณะการวิบัติแบบเปราะ(Brittle failure) ซึ่งเกิดขึ้น 2 ลักษณะคือ คอนกรีตส่วนหุ้มเหล็กเสริมรับแรงดึงฉีกตัวออก และพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนหลุดออก โดยการวิบัติของคานเสริมกำลังทั้งหมด เริ่มจากปลายพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนและสอดคล้องกับค่าความเครียดที่วัดได้จากเหล็กเสริมรับแรงดึง บริเวณปลายพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน ในส่วนของค่าความเข้มของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีต บริเวณปลายพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนพบว่าเกี่ยวข้องกับรูปแบบการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมอย่างชัดเจน โดยรูปแบบการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมที่ให้ค่าความเข้มของหน่วยแรงน้อยที่สุดในการศึกษาคั้งนี้คือ การใช้แถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนกว้าง 10 ซม. ยาว 190 ซม. และมีระยะการยึดปลาย 75 ซม.

### 2.12.3 พฤติกรรมการหลุดลอกของแผ่นไฟเบอร์ใยสังเคราะห์ที่ใช้เสริมกำลังรับแรงดัดของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดย ไพโรจน์ เริงสุทธิ และ ผศ.ดร.พิสนธ์ อุดมวรรตน์ 2545 ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการศึกษาความต้านทานการหลุดลอกของแผ่นใยสังเคราะห์ที่ใช้เสริมกำลังรับแรงดัดของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยประยุกต์ใช้ทฤษฎีกลศาสตร์การแตกร้าวของวัสดุเชิงประกอบ (Interfacial fracture mechanics) ซึ่งผลทดสอบและวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาพิจารณาร่วมกัน โดยทำการทดสอบตัวอย่างคานประกอบ เหล็ก-ไฟเบอร์-คอนกรีต โดยวิธีการตัดสี่จุด เพื่อคำนวณหาอัตราการปลดปล่อยพลังงานความเครียด และค่าการต้านทานการหลุดลอก พร้อมทั้งใช้ซอฟต์แวร์ ABAQUS วิเคราะห์เปรียบเทียบและหาค่าพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการแยกองค์ประกอบของความต้านทานการหลุดลอก ซึ่งดำเนินการตามวิธีการขจัดของผิวหน้ารอยแตกพบว่า ตัวอย่างทดสอบมีความต้านทานการหลุดลอกประมาณ  $2.108 \text{ MPA} \sqrt{M}$  และมีค่ามุมความต้านทานรวมเฉลี่ย 35 องศา

### 2.12.4 พฤติกรรมของเสาและคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้วเสริมกำลัง โดย อ.อานนท์ วงษ์แก้ว 2547 ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา

การศึกษาเสนอผลการทดสอบประกอบด้วย เสาและคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลัง โดยเสากลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1500 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร เสารูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดหน้าตัด  $200 \times 200$  มิลลิเมตร สูง 400 มิลลิเมตร และคานช่วงเดียวขนาดหน้าตัด  $150 \times 250$  มิลลิเมตร ช่วงยาว 1200 มิลลิเมตร และตัวอย่างเสาถูกเสริมโดยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้วเสริมกำลังถูกติดหรือพันไว้ที่ผิวด้านนอกของเสา ส่วนคานถูกติดไว้ที่ผิวท้องคาน ผลการทดสอบแสดงว่า กำลังรับแรงอัดของเสาเพิ่มขึ้นระหว่างร้อยละ 20-60 เปรียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมกำลัง ส่วนกำลังรับแรงดัดของคานเพิ่มขึ้นระหว่างร้อยละ 20-40 เมื่อเสริมด้วยวัสดุแผ่นไฟเบอร์ใยแก้วเสริมกำลัง 1 ชั้น ความเหนียวของเสาและคานเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมกำลัง

### บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ปูนซีเมนต์ (Cement) ที่ใช้ในการทดสอบเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ตราช้าง)
- 2) หิน (Coarse Aggregate) ที่ใช้ในการทดสอบเป็นหินปูน โดยมีขนาดละเอียดอยู่ในช่วงมาตรฐาน ASTM C33
- 3) ทราย (Fine Aggregate) ที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดละเอียดอยู่ในช่วงมาตรฐาน ASTM C33
- 4) น้ำ (Water) น้ำเป็นส่วนประกอบสำคัญที่ใช้ในการผสมคอนกรีต โดยที่น้ำจะทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดการก่อตัวของคอนกรีต ทำให้มีความชื้นเหลือในการเทคอนกรีตลงแบบหล่อได้ สำหรับน้ำที่ใช้ในการทดสอบเป็นน้ำประปา ในห้องปฏิบัติการคอนกรีตภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
- 5) เหล็กกลมผิวเรียบ (Round bar) เป็นเหล็กเส้นที่มีหน้าตัดกลม มีผิวเรียบตลอดความยาวของเหล็กตามมาตรฐาน มอก.20 กำหนดให้เหล็กกลมผิวเรียบมีชั้นคุณภาพเดียว คือ SR24 ซึ่งหมายถึงมีกำลังต้านทานแรงดึงสูงสุดที่จุดครากของเหล็กไม่น้อยกว่า 2400 กก./ตร.ซม.
- 6) เหล็กข้ออ้อย (Deformed bar) เป็นเหล็กเส้นที่มีหน้าตัดกลม แต่ที่ผิวตามความยาวของเหล็กมีลักษณะเป็นขี้หรือป่องหรือครีบกี้ตามมาตรฐาน มอก.24 โดยชั้นคุณภาพของเหล็ก คือ SD30 หมายถึง มีกำลังต้านทานแรงดึงสูงสุดที่จุดครากของเหล็กไม่น้อยกว่า 3000 กก./ตร.ซม. โดยขนาดหน้าตัดของเหล็กที่ใช้ คือ ใช้เหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 12 มม. 16 มม. 20 มม. และ 25 มม.

#### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) แบบหล่อขึ้นตัวอย่างทรงกระบอกผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตรสูง 20 เซนติเมตร
- 2) เครื่องผสมคอนกรีต (Concrete Mixing Machine) ใช้สำหรับผสมหิน ทราย ปูนซีเมนต์ และน้ำคลุกเคล้าให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียวกัน
- 3) ชุดอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ทำการเร่งปฏิกิริยาประกอบไปด้วย เครื่องควบคุมกระแสไฟฟ้า และเครื่องกระจายกระแสไฟฟ้า ภาพซ้ายเป็นเครื่องควบคุมกระแสไฟฟ้า และภาพขวาเป็นเครื่องกระจาย

กระแสไฟฟ้า ในการทำการเร่งปฏิกิริยาสนิมมีการทดสอบหลายชุด จึงใช้เครื่องกระจายกระแสไฟฟ้าทำให้สามารถเร่งปฏิกิริยาสนิมได้จำนวนมาก

4) อุปกรณ์วัดค่ากระแสไฟฟ้าในการเร่งปฏิกิริยา การเกิดสนิมของเหล็กเสริมให้เป็นไปตามทฤษฎี ต้องมีการวัดค่ากระแสไฟฟ้า ที่ไหลผ่านเหล็กเสริมทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสนิม โดยการวัดจะวัดที่เวลาห่างกัน 2 ชั่วโมง ตลอดการทำการทดลอง

5) เครื่องทดสอบแรงอัด (Compression Testing Machine) ใช้สำหรับทดสอบกำลังอัดของก้อนคอนกรีตตัวอย่าง

6) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล (Digital Balance) ใช้สำหรับหาปริมาณน้ำหนักของวัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต เช่น หิน ทราย ปูนซีเมนต์

7) อุปกรณ์วัดระยะยืด-หดตัวอิเล็กทรอนิกส์ (Electrical Strain Gauge) ใช้สำหรับติดตั้งเพื่อใช้วัดหน่วยการยืดหดของชิ้นงานในขณะทดสอบเช่น เหล็กเสริม คอนกรีต

8) ซีเมนต์พิเศษให้กำลังอัดสูงและไม่หดตัวใช้ ซีเมนต์พิเศษให้กำลังอัดสูงและไม่หดตัว SikaGrout -212-11 คุณสมบัติของวัสดุใช้ตามข้อกำหนดของบริษัทผู้ผลิต [[www.sika.com](http://www.sika.com)]

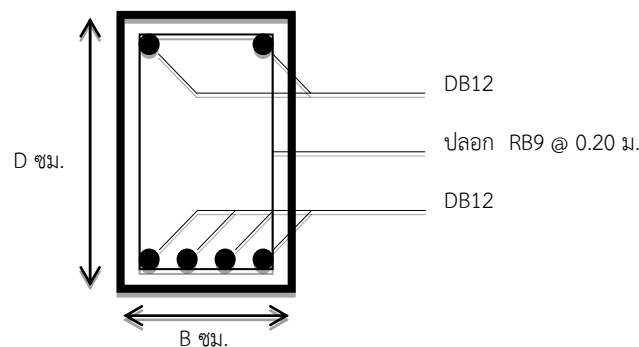
9) แบบหล่อตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

10) เครื่องทดสอบยูนิเวอร์ซัลขนาด 150 ตัน (Universal testing machine) ใช้สำหรับทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานช่วงเดี่ยว

11) อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัว (Displacement transducer) ใช้วัดการเคลื่อนตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กขณะทดสอบ

12) เครื่องบันทึกข้อมูล “Portable data logger รุ่น TDS-303” ใช้สำหรับบันทึกข้อมูลการโก่งตัวของพื้น หน่วยการยืดหดตัวของคอนกรีตและเหล็กเสริม

### 3.3 การเตรียมตัวอย่างคาน ค.ส.ล. ที่ใช้ในการศึกษา



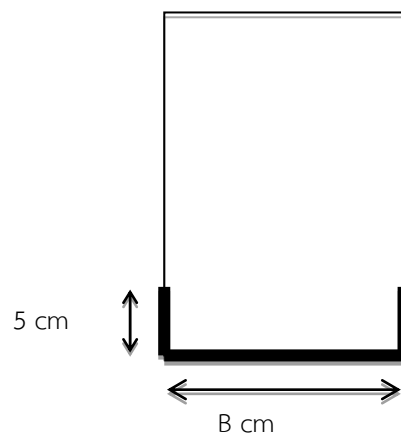
รูปที่ 3.1 แสดงหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการศึกษา

รูปที่ 3.1 แสดงขนาดหน้าตัดและรายละเอียดเหล็กเสริมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (ค.ส.ล.) ที่ใช้ในการศึกษา ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดตัวอย่างคาน ค.ส.ล. ที่ใช้ในการศึกษานี้ โดยแบ่งคานออกเป็น 4 ชุด ตามขนาดหน้าตัด

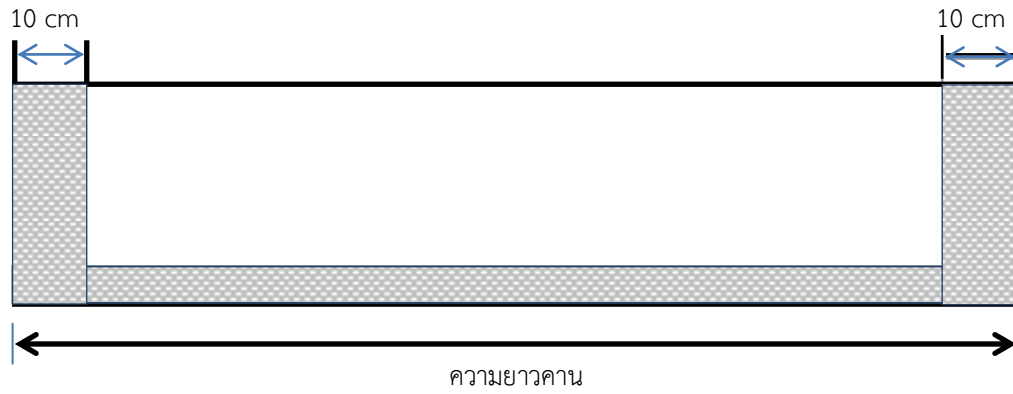
ตารางที่ 3.1 แสดงจำนวนตัวอย่างคาน ค.ส.ล. ที่ใช้ในการศึกษา

ชั้นงาน	คานคอนกรีตเสริมเหล็ก $f'_c = 25-28 \text{ MPa, SD24}$				
	BXD (มม. <sup>2</sup> )	ยาว (มม.)	เหล็กบน	เหล็กล่าง	แผ่นไฟเบอร์ (ชั้น)
1) คาน1	150x250	140	2	2	1
2) คาน2	150x300	140	2	3	1
3) คาน3	200x400	240	2	4	2
4) คาน4	250x500	240	2	4	2

รการติดแผ่นไฟเบอร์ใยแก้วที่ผิวล่างแล้วต้องติดแผ่นไฟเบอร์ใยแก้ว กว้าง 10 เซนติเมตร พันรอบคานที่ปลายทั้งสองข้าง เพื่อเป็นป้องกันการหลุดร่อนของแผ่นไฟเบอร์ที่ปลายคาน ในขณะที่ทำการทดสอบ ลักษณะของการติดตั้งแผ่นไฟเบอร์ใยแก้วดังรูปที่ 3.2 และ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงการติดไฟเบอร์ใยแก้วที่ท้องคานและปิดด้านข้างคานข้างละ 5 เซนติเมตร



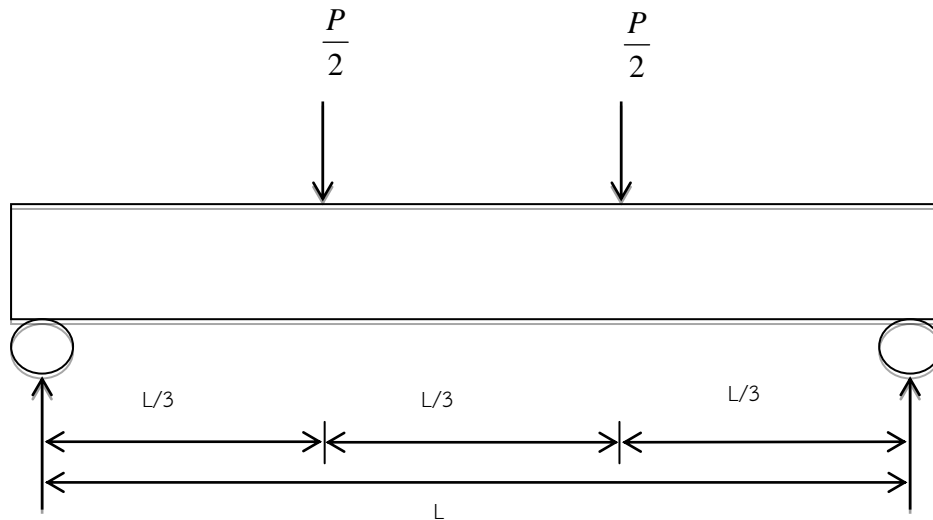
รูปที่ 3.3 ภาพด้านขวางแสดงการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้วรอบปลายคานทั้งสองข้าง



รูปที่ 3.4 การติดตั้งแผ่นไฟเบอร์ใยแก้ว

## บทที่ 4 การเตรียมอุปกรณ์และตัวอย่างคานทดสอบ

ในบทนี้เป็นการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้ว นำมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) การทดสอบนี้ทำการกดด้วยแบบ Third-Point Loading รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างการกดน้ำหนัก โดยมีระยะห่างระหว่างจุดกดน้ำหนักเท่ากับ  $L/3$



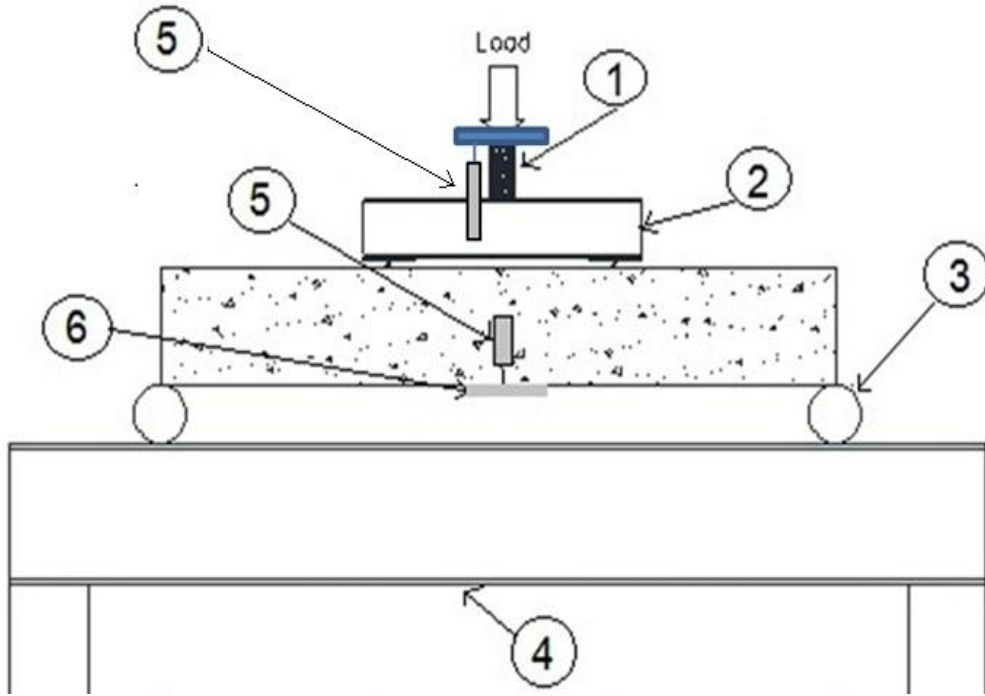
รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างการกดน้ำหนัก

### 4.1 ตำแหน่งและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

การทำการทดสอบคานต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ให้พร้อมก่อนทำการทดสอบ เพราะในการทดสอบเป็นแบบต่อเนื่อง ไม่มีการหยุดจนกว่าคานที่นำมาทดสอบเกิดการวิบัติ หรือตามเห็นควรของผู้ควบคุม

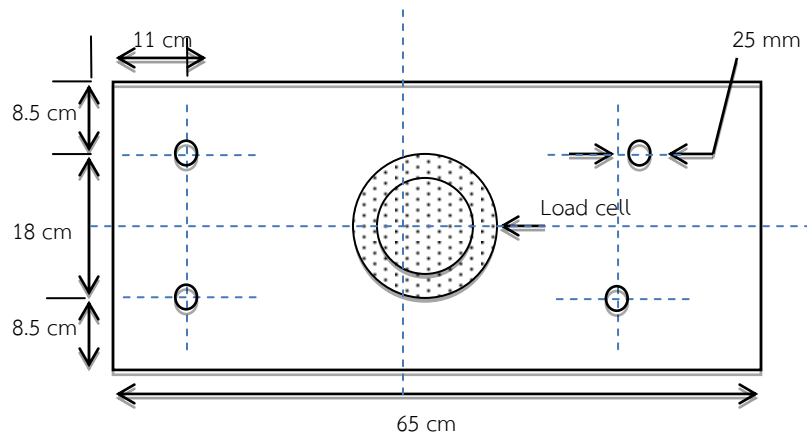
รูปที่ 4.2 แสดงตำแหน่งของการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ โดยที่อุปกรณ์ทุกชิ้นต้องวางในตำแหน่งที่ถูกต้อง เพื่อให้การทดสอบถูกต้องแม่นยำ





รูปที่ 4.2 ภาพแสดงตำแหน่งอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดสอบการก่น้ำหนักคาน

1. Load Cell และแผ่นยึด Load Cell รูปที่ 4.3 แสดงขนาดของแผ่นเหล็กที่ใช้สำหรับยึด Load Cell เข้ากับส่วนหัวของเครื่องทดสอบ แผ่นเหล็กมีความกว้าง 35 เซนติเมตร ยาว 65 เซนติเมตรหนา 2 เซนติเมตร โดยแผ่นเหล็กถูกยึดเข้ากับเครื่องทดสอบด้วยขนาด 20 มิลลิเมตร ทั้งหมด 4 ตัว รูปที่ 4.4 แสดงการติดตั้ง Load cell เข้ากับส่วนหัวของเครื่องทดสอบ สำหรับการติดตั้งตัว Load Cell เข้ากับส่วนหัวของเครื่องทดสอบ เพื่อความสะดวกรวดเร็วขณะนำคานและอุปกรณ์เข้าติดตั้งในตำแหน่งต่างๆ โดยที่ไม่ต้องถอด Load Cell ออก ขณะที่เคลื่อนส่วนหัวของเครื่องทดสอบขึ้น เพื่อทำการติดตั้งคานและอุปกรณ์ เนื่องจากส่วนหัวของเครื่องทดสอบไม่สามารถยึดติดกับ Load Cell ได้โดยตรง



รูปที่ 4.3 ขนาดของแผ่นยึด Load Cell



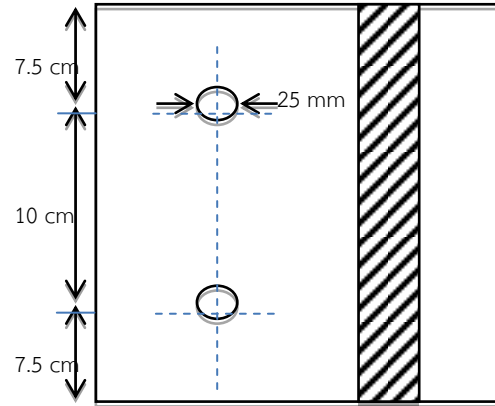
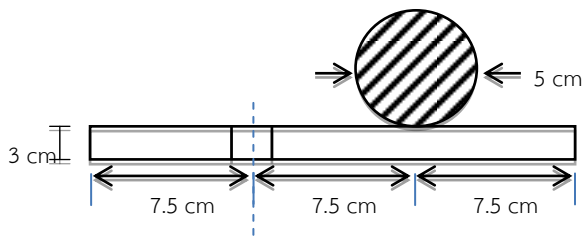
รูปที่ 4.4 แสดงการยึดติดแผ่น Load cell ไปที่ UTM

2. คานเหล็กที่ใช้เป็นแท่นสำหรับการถ่ายน้ำหนักจากเครื่องทดสอบลงสู่คานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยคานเหล็กมีจุดรองรับอย่างง่าย วางบนหลังคานคอนกรีต โดยคานเหล็กถูกออกแบบให้สามารถรับน้ำหนักได้สูงกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เชื่อมด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้ว เพื่อให้คานเหล็กเกิดวิบัติก่อนคานคอนกรีตที่นำมาทดสอบ ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 คานเหล็กใช้กดแบบ 2 จุด

3. จุดรองรับคาน รูปที่ 4.6 แสดงภาพที่ประกอบไปด้วยแผ่นเหล็ก กว้าง 25 เซนติเมตร ยาว 22.5 เซนติเมตร หนา 3 เซนติเมตร และท่อนเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร โดยนำมาเชื่อมติดกันเป็นชิ้นเดียว ใช้รองรับที่ปลายคานทั้งสองด้าน โดยมีระยะห่างระหว่างจุดรองรับ 2.40 เมตร จุดรองรับนี้ได้ถูกทำขึ้นมาใหม่ให้ เนื่องจากส่วนหัวของเครื่องทดสอบสามารถเคลื่อนตัวขึ้นได้เพียง 120 เซนติเมตร เท่านั้น จุดรองรับมีความสูงอยู่ที่ 8 เซนติเมตร ทำให้มีช่องว่างในการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มขึ้น 10 เซนติเมตร รูปที่ 4.7 แสดงจุดรองรับที่เชื่อมแล้วพร้อมใช้งาน โดยการเชื่อมใช้ลวดเชื่อม L55 ขนาด 4 มิลลิเมตร เชื่อมทั้งหมด 2 ชั้น เพื่อความแข็งแรง

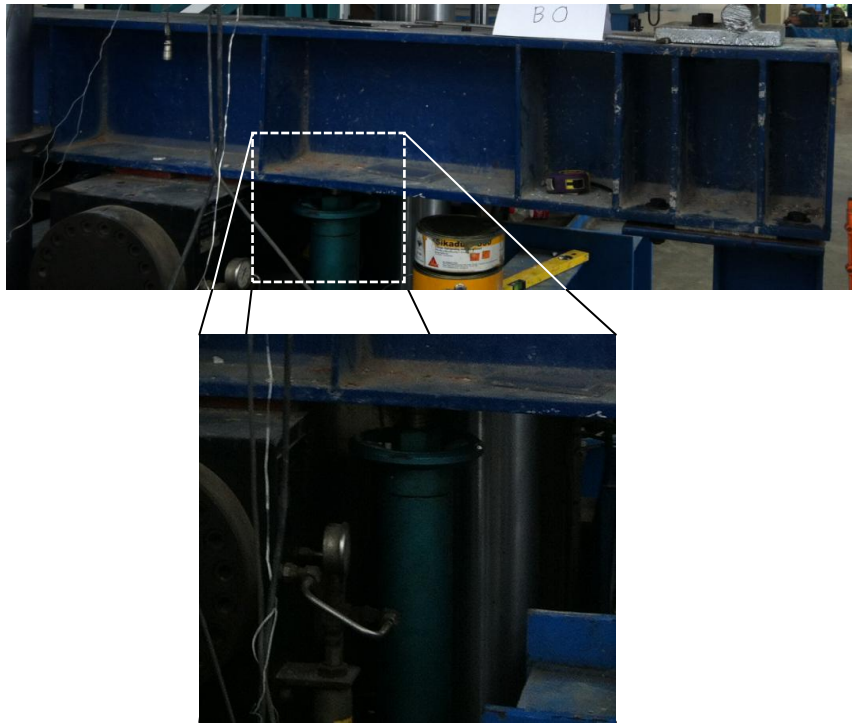


รูปที่ 4.6 ขนาดของจูดรองรับ



รูปที่ 4.7 ภาพแสดงจูดรองรับ

4. คานเหล็กขนาดใหญ่ใช้สำหรับเป็นฐานวางจูดรองรับ รูปที่ 4.8 คานเหล็กขนาดใหญ่มีค้ำยัน 2 ตัว เพื่อป้องกันการแอ่นตัวของคานเหล็ก (ดังรูปเล็ก)



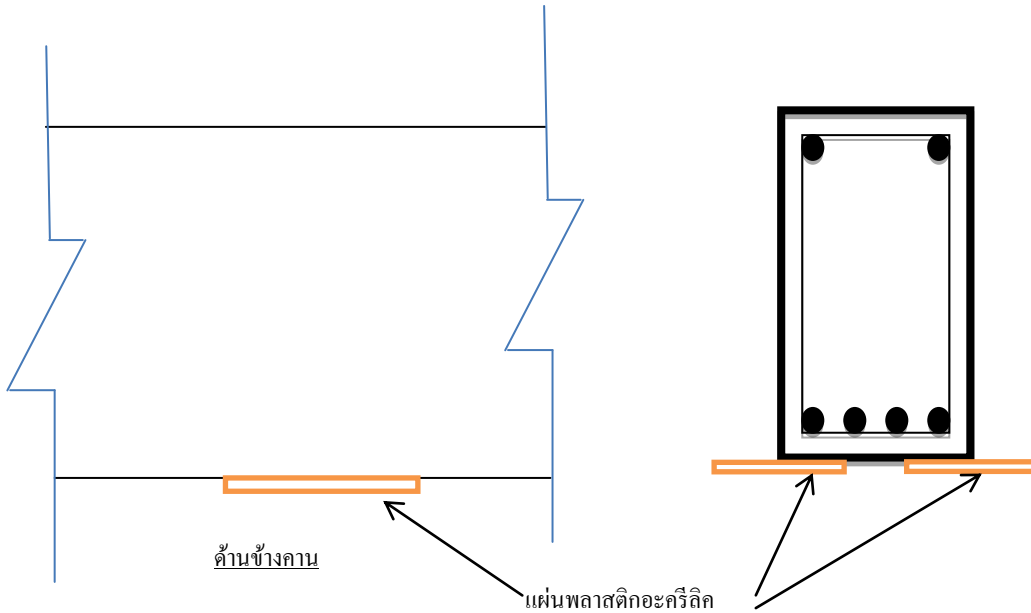
รูปที่ 4.8 คานรองรับรับใช้เป็นฐานในการทดสอบคาน

5. LVDT เครื่องมือวัดระยะการโก่งตัวของท้องคาน และวัดการเคลื่อนตัวของเครื่องทดสอบ รูปที่ 4.9 ด้านซ้ายแสดง LVDT ขนาดเล็ก สามารถวัดระยะได้ 50 มิลลิเมตร ใช้สำหรับวัดการโก่งตัวที่ท้องคานทดสอบ รูปที่ 4.9 ด้านขวาแสดง LVDT ขนาดใหญ่ สามารถวัดระยะได้ 80 มิลลิเมตร ใช้สำหรับวัดการเคลื่อนตัวส่วนหัวเครื่องทดสอบ



รูปที่ 4.9 เครื่องมือวัดการโก่งตัวของท้องคาน และ การเคลื่อนตัวลงของแท่นทดสอบ UTM

6. แผ่นพลาสติกอะคริลิก ติดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของห้องคาน ดังรูปที่ 4.10 โดยติดตั้งให้แผ่นอะคริลิกยื่นออกมาจากตัวคานทดสอบอย่างน้อยข้างละ 5 เซนติเมตร เพื่อให้เข็มของเครื่อง LVDT สัมผัสกับแผ่นอะคริลิกเพื่อวัดการโก่งตัวของคานที่ตำแหน่งห้องคาน เนื่องจากระยะใต้ห้องคานไม่เพียงพอสำหรับติดตั้ง LVDT และเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับเครื่อง LVDT เมื่อคานเกิดวิบัติ



รูปที่ 4.10 ภาพแสดงลักษณะการติดตั้งแผ่นพลาสติกอะคริลิกที่ตำแหน่งใต้ห้องตรงกลางคาน

7. เครื่อง Data Logger เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับบันทึกข้อมูลอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบเช่น Load Cell ,LVDT และ Strain Gauge โดยต่อสายจากอุปกรณ์ต่างๆ เข้ากับเครื่อง Data Logger เพื่อเก็บข้อมูลต่างๆ นำไปวิเคราะห์ผล ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 เครื่องบันทึกค่าน้ำหนักบรรทุก การโก่งตัวของห้องคาน การเคลื่อนตัวลงของส่วนหัวของเครื่องทดสอบ

## 4.2 ขั้นตอนในการติดตั้งอุปกรณ์และการทดสอบ

เป็นการทดสอบแบบ Third-Point Loading ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine โดยเพิ่มน้ำหนักกดขึ้นเรื่อยๆ และทำการบันทึกค่าน้ำหนักทุกๆ 5 กิโลนิวตัน จนกระทั่งเกิดการวิบัติ หรือมีกำลังที่ลดต่ำลง โดยใช้เครื่องบันทึกค่า Data Logger เชื่อมต่อเข้ากับ Load Cell เพื่อบันทึกค่าน้ำหนักกด โดยมีขั้นตอนการติดตั้งดังนี้

1. ทำการติดตั้งคานเหล็กขนาดใหญ่ที่ใช้เป็นฐานสำหรับติดตั้งจตุรรองรับ ตรวจสอบให้คานอยู่ในระนาบไม่เอียงไปข้างใดข้างหนึ่ง
2. ติดตั้งจตุรรองรับบนคานเหล็ก และนำ Load Cell ติดเข้ากับแผ่นเหล็ก แล้วนำไปติดกับส่วนหัวของเครื่องทดสอบ Universal testing machine
3. วางคานทดสอบลงบนจตุรรองรับ
4. นำแท่นเหล็กสำหรับการกดแบบสองจุดที่มีระยะห่าง 80 เซนติเมตร มาวางที่ตำแหน่งกึ่งกลางคาน
5. ติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ (Displacement transducer) ของห้องคาน และส่วนหัวของเครื่องทดสอบ
6. ต่อสาย Strain Gauge จากด้านบนและใต้ห้องคานเข้ากับเครื่อง Data logger
7. ค่อยๆ เคลื่อนส่วนหัวของเครื่องทดสอบที่มี Load Cell ติดอยู่ ให้ปลายของ Load Cell ชนกับแท่นเหล็กกดน้ำแบบสองจุดพอดี แล้วทำการตั้งค่าที่เครื่องบันทึกผลให้เป็น 0
8. เริ่มการทดสอบ ในขณะที่ทำการทดสอบหากคานเกิดการรอยแตกร้าวให้ใช้ปากกา Marker ลากเส้นตามรอยร้าว พร้อมทั้งเขียนน้ำหนักกดที่ทำให้เกิดรอยร้าวบนคานทดสอบด้วย และทำการกดบันทึกค่าน้ำหนักที่เครื่อง Data Logger ทุกๆ 5 กิโลนิวตัน จนกระทั่งเกิดการวิบัติ
9. นำคานที่ทดสอบจนเกิดการวิบัติออก นำคานตัวต่อไปขึ้นทดสอบ ทำตามข้อ 3-9 จนครบทั้ง 7 ตัว นำผลไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุก(Load) และระยะการโก่งตัวของคานในแนวดิ่ง (Deflection)

## 4.3 ผลที่ได้จากการทดสอบคาน

นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบคานทั้ง 4 ชุด มาเขียนกราฟเชิงเส้น แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุก (Load) เป็นแกน Y และระยะการโก่งตัวของคานในแนวดิ่ง (Deflection) ที่กึ่งกลางคาน เป็นแกน X เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลต่อไป อีกทั้งกราฟยังสามารถบอกถึงพฤติกรรมของคาน หรือรอย

แตกร้าวขนาดกลางถึงใหญ่ที่เกิดขึ้น ว่าเกิดขึ้นเมื่อได้รับน้ำหนักกดที่เท่าไร เพื่อนำมาเทียบกับค่าที่เขียนไว้บนคานเพื่อตรวจสอบความถูกต้องอีกทางหนึ่ง

#### 4.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

จากการทดสอบหาลำรับแรงอัดของคอนกรีต โดยใช้คอนกรีตทั้งหมด 3 ส่วนผสม ซึ่งหล่อในแบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. ความสูง 30 ซม. ซึ่งจากการทดลองจะทำให้ทราบผลของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตดังตารางที่ 4.1 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีต

Mix. Concrete No.	d (cm)	น้ำหนัก (kg)	พื้นที่หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	Load (KN)	กำลังรับแรงอัด (kg/cm <sup>2</sup> )	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )
Mix.1	15	12.6	176.625	520.2	295.5	300.76
	15	12.6	176.625	537.9	304.5	
	15	12.4	176.625	534.0	302.3	
Mix.2	15	12.6	176.625	514.7	291.0	286.33
	15	12.8	176.625	505.0	286.0	
	15	12.6	176.625	498.0	282.0	
Mix.3	15	12.4	176.625	569.0	322.2	328.78
	15	12.6	176.625	598.0	338.6	
	15	12.6	176.625	575.0	325.6	

#### 4.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ

การทดลองรับแรงดึงของเหล็กเสริม โดยการใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ยึดให้แน่นและกำหนดมีระยะระหว่างหัวยึดประมาณ 55 ซม. จากนั้นปรับเครื่องให้มีแรงดึง บันทึกค่าการทดสอบจากเครื่อง Data logger และเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) จนกระทั่งเหล็กเสริมเกิดการวิบัติ นำเอาผลการทดสอบที่ได้ไปเขียนกราฟและคำนวณค่าหน่วยการยืดตัว (Tensile Strain) และหน่วยแรงดึง (Tensile Stress) และคำนวณหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเนื่องจากแรงดึง

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบหาค่าการยืดตัวสูงสุดของเหล็ก

ชนิดของ ชิ้นงาน	ชิ้น งาน	ความยาว เหล็กก่อน ทดสอบ $L_0$ (ซม.)	ความยาว เหล็กหลัง ทดสอบ $L_1$ (ซม.)	ระยะยืด ของเหล็ก $\Delta L$ (ซม.)	ค่าการยืด ตัวสูงสุด $\frac{L_1 - L_0}{L_0}$	ค่าการยืด ตัวเฉลี่ย สูงสุด
RB6 mm.	RB6_1	68.1	78.4	10.3	0.151	0.158
	RB6_2	68	79.3	11.3	0.166	
RB9 mm.	RB9_1	68.4	83.1	14.7	0.215	0.215
DB12 mm.	DB12	68.4	78.5	10.1	0.147	0.153
	DB12_st	67.6	77.9	10.8	0.160	
DB16 mm.	DB16	68.2	75.8	7.6	0.111	0.112
	DB16_st	67.9	75.6	7.7	0.113	

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็ก

ชนิดของวัสดุ	ค่าโมดูลัสความ ยืดหยุ่น ( E ) (kg/cm <sup>2</sup> )	กำลังรับแรงดึงที่ จุดคราก ( $f_y$ ) (kg/cm <sup>2</sup> )	ค่าความเครียดที่ จุดคราก ( $\epsilon_y$ )	ค่าความเครียด สูงสุด ( $\epsilon$ )
RB6 mm.	1,920,049	3,650	0.0026	0.158
RB9 mm.	1,664,976	3,280	0.0022	0.215
DB12 mm.	1,812,500	4,000	0.0032	0.153
DB16 mm.	1,818,182	5,200	0.0038	0.112



## บทที่ 5

### ผลการทดสอบคานเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์

#### 5.1 ผลการทดสอบคานชุดที่ 1 (150x250x140 มม.)

คานคอนกรีตเสริมเหล็ก B1 เป็นคานตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ ซึ่งได้กำหนดให้เป็นคานควบคุมเพื่อใช้เปรียบเทียบกับคานตัวอย่าง B1F และ B11F ที่ทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ จากรูปพบว่าคานที่เสริมแผ่นไฟเบอร์สามารถรับแรงได้เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณา รูปที่ 5.1 พบว่าในช่วงแรกของการใส่แรงที่คานตัวอย่างคานจะเริ่มแตกร้าวเมื่อแรงกดมีค่าเท่ากับ 2.06 ตัน โดยลักษณะรอยร้าวที่เกิดขึ้นเป็นแบบเส้นตรงบริเวณกึ่งกลางคานซึ่งเป็นผลมาจากแรงดัดจากการกดที่กึ่งกลางคาน เมื่อเพิ่มแรงกดขึ้นจนถึง 8.33 ตัน เหล็กกลางจะคราก (Yielding) ในช่วงนี้เองรอยร้าวที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและจำนวนรอยร้าวที่เกิดขึ้นจะเพิ่มปริมาณขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะเกิดจากทั้งแรงดัดและแรงเฉือน โดยสังเกตจากรอยร้าวที่มีลักษณะเฉียง แต่เมื่อเพิ่มแรงกดไปเรื่อย ๆ เหล็กเสริมกลางของคาน B1 จะรับแรงได้คงที่ ซึ่งกราฟที่แสดงผลจะมีความชันน้อยลง รอยร้าวก็จะเพิ่มขึ้นไม่มากนัก และเมื่อแรงกดที่กระทำกับคานมีค่าเท่ากับ 10.59 ตัน คานก็จะเกิดการวิบัติ นั้นแสดงว่าเหล็กกลางรับแรงได้สูงสุดแล้วซึ่งจุดนี้เรียกว่า จุดรับน้ำหนักประลัยของคาน B1 หลังจากนี้เหล็กกลางรับแรงสูงสุดแล้วรอยร้าวจะวิ่งขึ้นจนถึงหลังคาน ซึ่งขณะนี้เองคอนกรีตด้านบนจะเริ่มบดอัดจนแตกพร้อมกับเหล็กบนรับแรงอัดเช่นเดียวกัน

จากรูปที่ 5.2 และ 5.3 พบว่าอัตราส่วนระหว่าง  $\epsilon / \epsilon_y$  ของเหล็กเสริมกลางมีค่าเกิน 1.00 แสดงว่าในขณะที่เหล็กเสริมกลางมีกำลังถึงจุดคราก เหล็กเสริมบนของคาน B1 ยังไม่ถึงจุดคราก เป็นไปตามทฤษฎีที่กล่าวว่าการวิบัติของคานที่มีปริมาณเหล็กเสริมที่ต่ำกว่าสภาวะสมดุลนั้น จะเกิดจากการวิบัติของเหล็กเสริมกลางภายในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยความเค้นภายในเหล็กเสริมกลางนี้จะต้องมีกำลังถึงจุดคราก (Yield Point) ทำให้ลักษณะการวิบัติของคาน B1 เกิดในลักษณะที่เหล็กกลางรับแรงถึงจุดครากแล้วคอนกรีตบดอัดแตกตามมา ซึ่งเป็นลักษณะการวิบัติที่ต้องการ

จากรูปที่ 5.4 เมื่อพิจารณาการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B1 เกิดในลักษณะที่เหล็กเสริมกลางครากก่อนแล้วคอนกรีตด้านบนจึงบดอัดแตก หลังการวิบัติของคานจะพบว่ารอยร้าวที่เกิดขึ้นด้านข้างตัวคานมีปริมาณมากและอยู่กระจายระหว่างจุดรองรับและจะมีรอยร้าวที่มีขนาดใหญ่อยู่บริเวณด้านล่างของคานอีกด้วย

คานคอนกรีตเสริมเหล็ก B1F เป็นคานที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ โดยการติดแผ่นไฟเบอร์ใต้ท้องคานและด้านข้างคานตัวอย่างความยาว 7.5 เซนติเมตรทั้งสองข้างตลอดความยาวคาน จากรูปที่ 5.1 ในช่วงแรกของการใส่แรงกดที่คานตัวอย่างคานจะเริ่มแตกร้าวเมื่อแรงกดมีค่าเท่ากับ 0.18 ตัน

รูปแบบการรับแรงของเหล็กกลางและแผ่นไฟเบอร์จะเป็นลักษณะช่วยกันรับแรงเช่นเดียวกันคาน B1 ทำให้แรงที่เหล็กเสริมล่างรับได้จะมีค่าลดลง ส่วนรอยร้าวที่เกิดขึ้นเป็นแบบเส้นตรงบริเวณด้านข้างของตัวคาน แต่รอยร้าวยังไม่เกิดที่แผ่นไฟเบอร์ เพราะแรงที่เกิดขึ้นในช่วงนี้เหล็กเสริมล่างจะรับมากกว่า แต่เมื่อเพิ่มแรงกดขึ้นจนถึง 11.53 ตัน เหล็กกลางจะคราก (Yielding) หลังจากทีเหล็กเสริมล่างครากแล้วจะรับแรงได้น้อยลงและคงที่ และเมื่อแรงกดมีค่าเท่ากับ 13.50 ตัน แผ่นไฟเบอร์ก็เริ่มมีลักษณะตรงบริเวณกึ่งกลางคานด้านล่างและด้านข้าง ซึ่งแผ่นไฟเบอร์จะเกิดการหลุดลอกออกเป็นทางยาว โดยจะหลุดลอกออกจากบริเวณตรงกลางคานก่อนลอกออกปลายคานทั้งสองข้าง ในขณะที่รอยร้าวที่เกิดขึ้นกับคอนกรีตจะกว้างขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและจำนวนรอยร้าวที่เกิดขึ้นจะเพิ่มปริมาณขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเพิ่มแรงกดไปเรื่อย ๆ เหล็กเสริมล่างของคาน B1F จะรับแรงได้คงที่ ซึ่งกราฟที่แสดงผลจะมีความชันน้อยลง ลักษณะรอยร้าวก็จะเพิ่มขึ้นไม่มากนัก และเมื่อแรงกดที่กระทำกับคานมีค่าเท่ากับ 15.30 ตัน คานก็เกิดการวิบัติ นั่นแสดงว่าเหล็กเสริมล่างรับแรงได้สูงสุดแล้วซึ่งจุดนี้เรียกว่า จุดรับน้ำหนักประลัยของคาน B1F หลังจากทีเหล็กเสริมล่างรับแรงสูงสุดแล้วรอยร้าวจะวิ่งขึ้นจนถึงหลังคาน ซึ่งขณะนี้เองคอนกรีตด้านบนจะเริ่มบดอัดจนแตกพร้อมกับเหล็กบนรับแรงอัดเช่นเดียวกัน

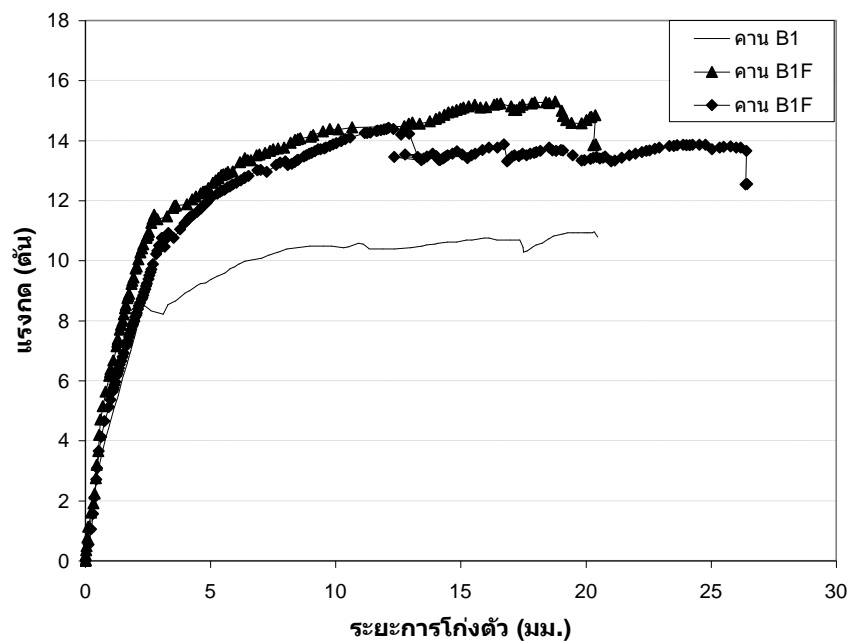
จากรูปที่ 5.2 พบว่าอัตราส่วนระหว่าง  $\epsilon / \epsilon_y$  ของเหล็กเสริมล่างมีค่าเกิน 1.00 แสดงว่าในขณะที่เหล็กเสริมล่างมีกำลังถึงจุดคราก เหล็กเสริมบนของคาน B1F ยังไม่ถึงจุดคราก เป็นไปตามทฤษฎีที่กล่าวว่าการวิบัติของคานที่มีปริมาณเหล็กเสริมที่ต่ำกว่าสภาวะสมดุลนั้น จะเกิดจากการวิบัติของเหล็กเสริมล่างภายในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่หลังจากทีเหล็กเสริมล่างครากแล้วนั้นจะเห็นว่าเหล็กเสริมล่างยังคงรับแรงต่อไปได้อีกและเพิ่มสูงขึ้นจนค่า  $\epsilon / \epsilon_y$  มีค่า 3.26 การรับแรงของเหล็กเสริมล่างจึงตกลง และจุดเดียวกันนี้เหล็กเสริมบนและไฟเบอร์จะเริ่มรับแรงเพิ่มขึ้น หลังจากทีเหล็กล่างรับแรงจนมีค่าสูงสุดแล้วจะค่อย ๆ รับแรงลดลงเรื่อย ๆ จนแรงมีค่าคงที่ แต่แผ่นไฟเบอร์และเหล็กเสริมบนยังคงรับแรงที่เพิ่มขึ้นต่อไปเรื่อย ๆ จนคาน B1F วิบัติ คอนกรีตด้านบนบดอัดแตก

เมื่อพิจารณาการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B1F ที่ถูกเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์เพื่อรับแรงดัด การวิบัติจะเกิดในลักษณะที่แผ่นไฟเบอร์ที่เสริมกำลังด้านข้างหลุดลอกออกก่อนทีเหล็กเสริมล่างจะถึงจุดคราก ซึ่งทำให้ตัวแผ่นไฟเบอร์ช่วยรับแรงดัดทีเกิดขึ้นกับคาน B1F ไม่เต็มประสิทธิภาพตามที่ต้องการ ภายหลังกการวิบัติของคาน B1F จะพบว่ารอยร้าวทีเกิดขึ้นด้านข้างตัวคานมีปริมาณลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B1 เนื่องจากแผ่นไฟเบอร์ไปจำกัดการเกิดรอยร้าวและจำนวนรอยร้าวทีจะเกิดขึ้นนั่นเอง จากการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B1F หากเปรียบเทียบกับคาน B1 แล้วจะเกิดขึ้นรุนแรงกว่า

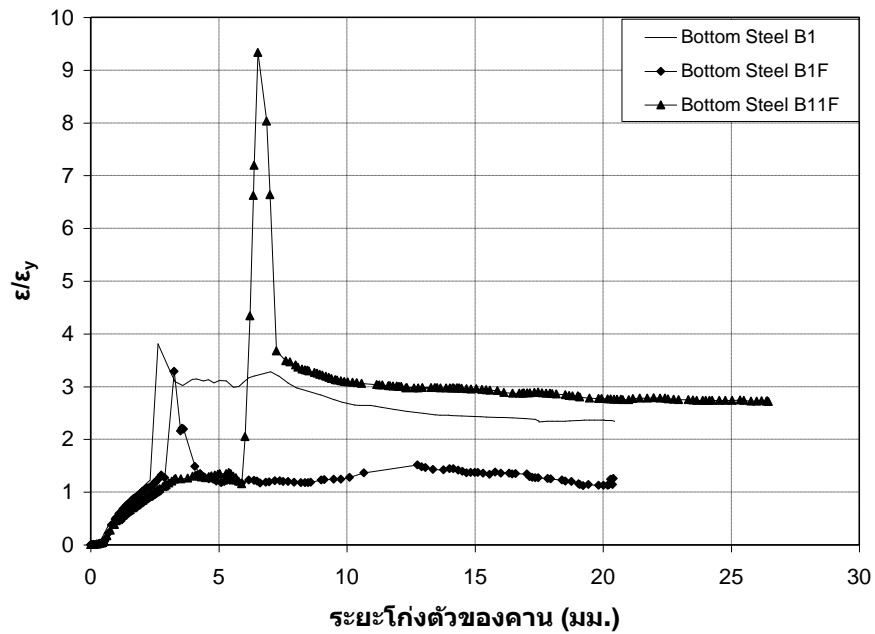
หากนำผลการทดสอบของคาน B1F กับ B1 มาเปรียบเทียบกับกันจะเห็นว่าทีจุดเหล็กเสริมล่างครากของคาน B1F การรับแรงดัดจะลดลง ดังทีได้กล่าวไว้แล้วว่แผ่นไฟเบอร์จะเข้ามาช่วยรับแรง ทำให้

แรงกดที่เหล็กเสริมล่างลดลงอย่างเห็นได้ชัด และการโก่งตัวของคาน B1F ก็โก่งตัวได้มากกว่า เพราะแผ่นไฟเบอร์จะเปลี่ยนพฤติกรรมของคานจากวัสดุเปราะเป็นยืดหยุ่นได้ ดังนั้นจึงทำให้คาน B1F โก่งตัวได้มากกว่า ที่จุดรับน้ำหนักประลัยของคานทั้งสองตัวนี้ จะเห็นว่าคาน B1F จะมีค่าสูงกว่าคาน B1 เล็กน้อย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า คานที่ทำการเสริมกำลังโดยแผ่นไฟเบอร์สามารถเพิ่มคุณสมบัติในการรับแรงของคานได้สูงขึ้น และหากเปรียบเทียบรอยร้าวที่เกิดขึ้นกับคาน B1F พบว่ามีรอยร้าวที่จำนวนน้อยกว่าคาน B1 ซึ่งรอยร้าวที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กและสั้น โดยเกิดอยู่ทั่วไปตามตัวคาน เหตุผลที่รอยร้าวลดน้อยลงก็เพราะถูกจำกัดไว้โดยแผ่นไฟเบอร์ที่ถูกติดเข้ากับตัวคาน แต่การวิบัติของคาน B1F จะเกิดขึ้นรุนแรงมากกว่าคาน B1 เพราะแผ่นไฟเบอร์ จะไปทำให้คานมีคุณสมบัติต้านทานแรงดัดได้สูงขึ้น จนเมื่อถึงจุดวิบัติคาน B1F นี้ก็จะเกิดการวิบัติรุนแรงขึ้นตามไปด้วย

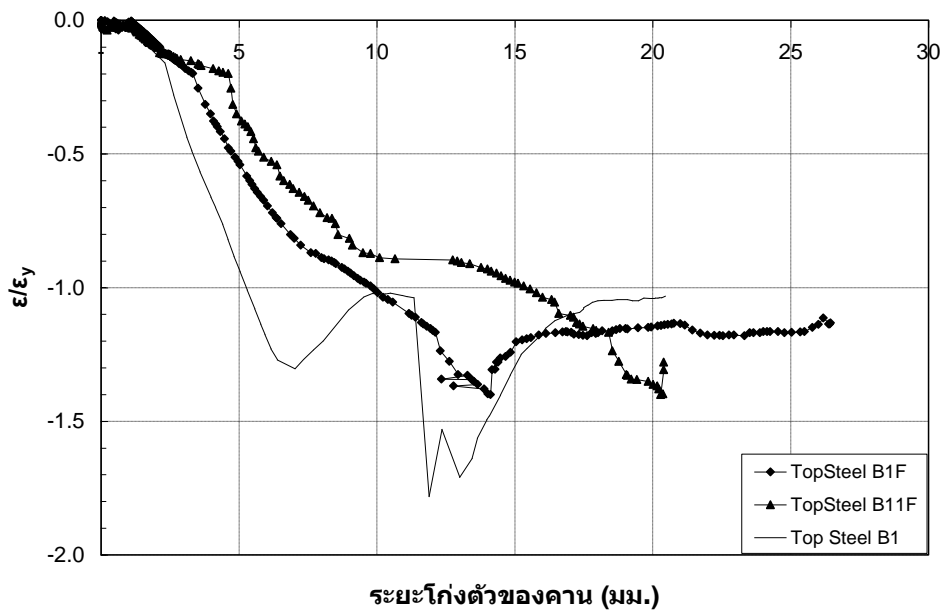
คานคอนกรีตเสริมเหล็ก B11F เป็นคานที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ โดยการติดแผ่นไฟเบอร์ใต้ท้องคานและด้านข้างคานตัวอย่างความยาว 7.5 เซนติเมตรทั้งสองข้างตลอดความยาวคานเช่นเดียวกันกับคาน B1F ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า B1F และ B11F มีพฤติกรรมใกล้เคียงกันทั้งในด้านการรับแรงและการพัง



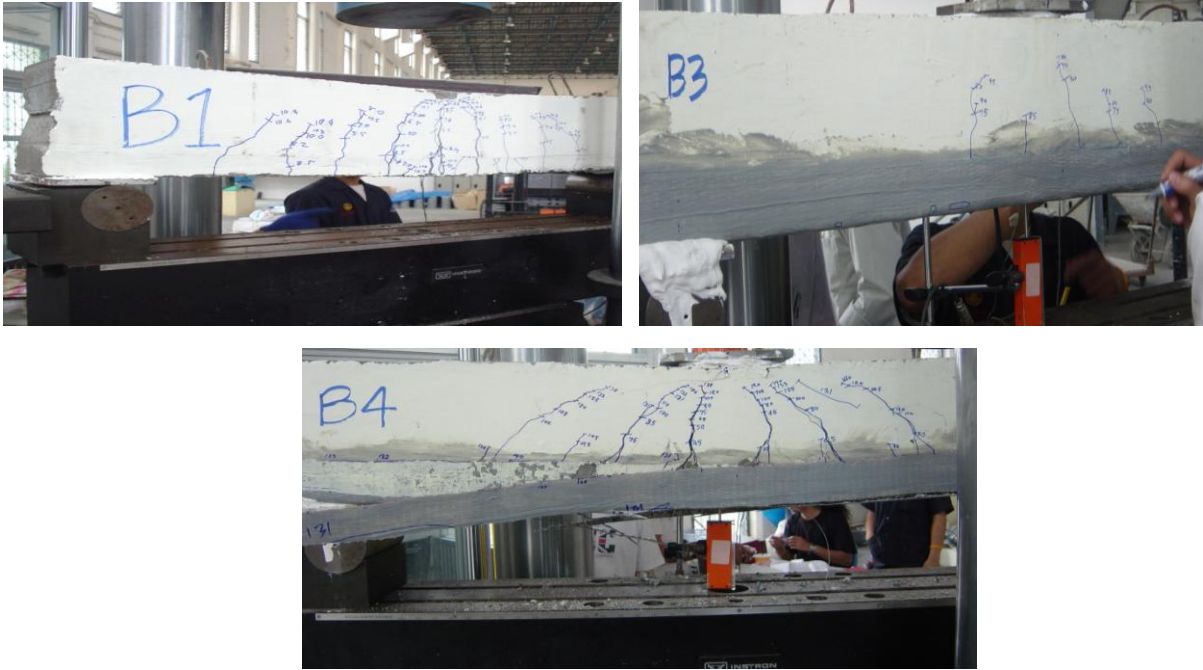
รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุก (กิโลนิวตัน) และการโก่งตัวของคานทดสอบ (มิลลิเมตร) ของคาน B1 B1F และ B11F



รูปที่ 5.2 แสดงสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเหล็กเสริมล่างต่อด้วยความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริม และระยะโก่งตัวของคานของคาน B1 B1F และ B11F

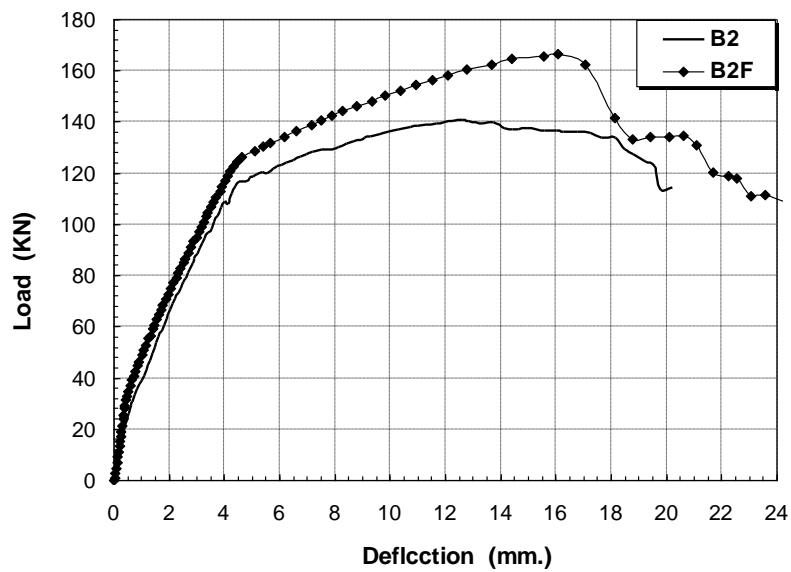


รูปที่ 5.3 แสดงสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเหล็กเสริมบนต่อด้วยความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริม และระยะโก่งตัวของคานของคาน B1 B1F และ B11F

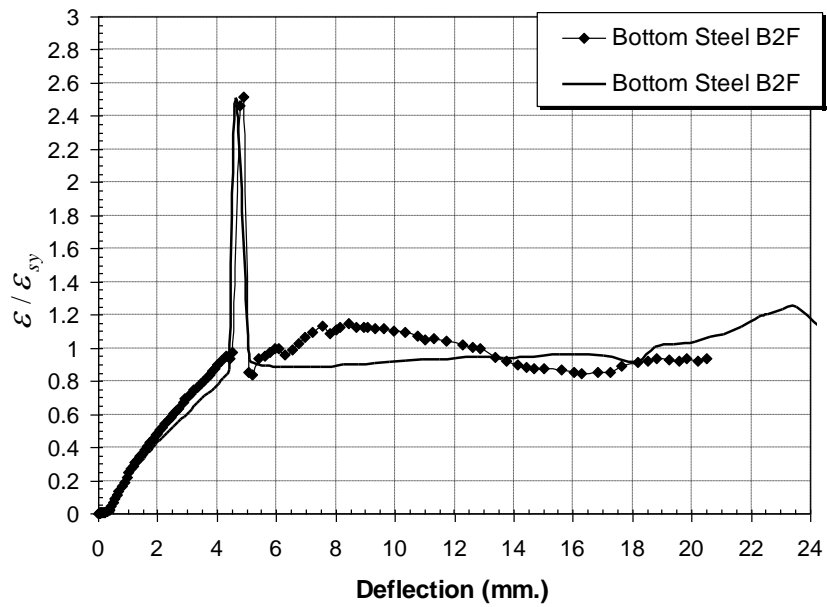


รูปที่ 5.4 การทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B1 B1F B11F

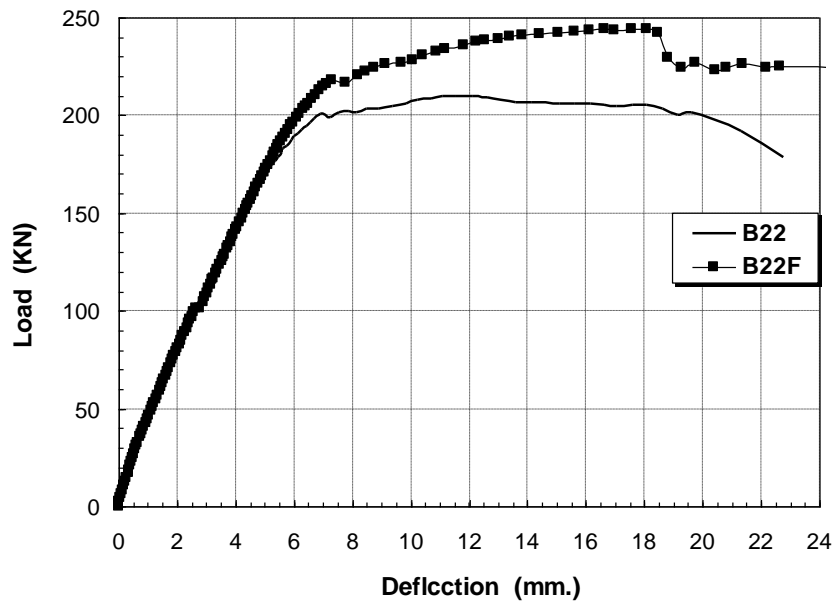
5.2 ผลการทดสอบคานชุดที่ 2 (150x300x140 มม.)



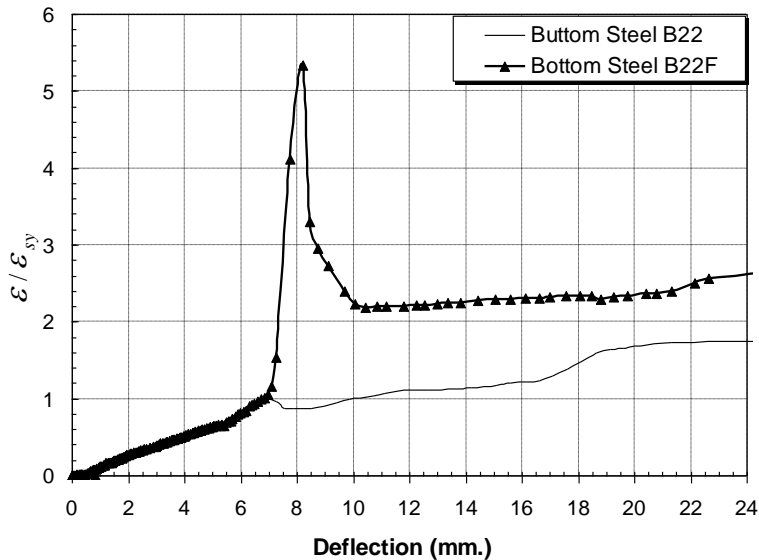
รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุก (กิโลนิวตัน) และการโก่งตัวของคานทดสอบ (มิลลิเมตร) ของคาน B2 และ B2F



รูปที่ 5.6 แสดงสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเหล็กเสริมล่างต่อด้วยความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริม และระยะโก่งตัวของคานของคาน B2 และ B2F



รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุก (กิโลนิวตัน) และการโก่งตัวของคานทดสอบ (มิลลิเมตร) ของคาน B22 และ B22F



รูปที่ 5.8 แสดงสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเหล็กเสริมล่างต่อด้วยความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริม และระยะโก่งตัวของคานของคาน B22 และB22F

จากรูปที่ 5.5 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของตัวอย่างคาน B2 และ คาน B2F เพื่อเปรียบเทียบลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นบนคานทั้งสอง โดยผลการทดสอบ พบว่า ลักษณะโดยรวมของกราฟนั้นเหมือนกัน คือ กราฟจะมีความชันมากและเป็นเส้นตรง จนเมื่อถึงแรงที่ทำให้เหล็กเกิดการเสียรูปความชันของกราฟก็จะลดลง จนกระทั่งคานเกิดการวิบัติแรงที่กระทำก็ลดลง ซึ่งจะมีความแตกต่างก็เพียงแต่แรงที่กระทำเท่านั้น โดยคาน B2F จะรับแรงได้ดีกว่าคาน B2

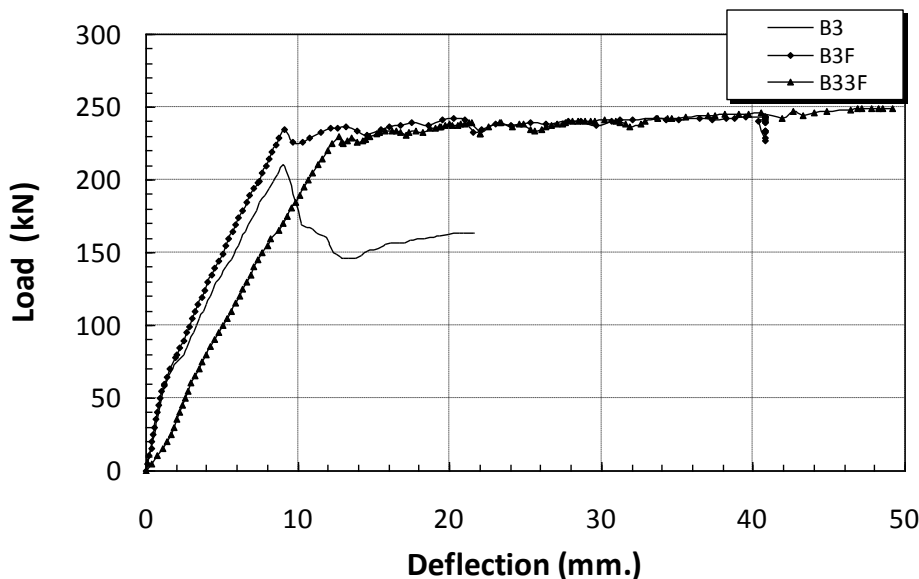
จากรูปที่ 5.6 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความเครียดในเหล็กเสริมต่อความเครียดที่จุดครากขอเหล็กเสริมนั้นกับระยะการโก่งตัวของคาน B2 และคาน B2F เมื่อนำกราฟทั้งสองมาเปรียบเทียบ พบว่า ลักษณะของเหล็กเสริมจะมีพฤติกรรมที่คล้ายกัน โดยเหล็กเสริมล่างจะทำหน้าที่รับแรงดึง ซึ่งเกิดการยืดตัวและมีกำลังถึงจุดครากที่ระยะโก่งประมาณ 4.5 มิลลิเมตร จากนั้นเหล็กเสริมก็จะยืดตัวออกเรื่อยๆ ในขณะที่ค่า Strain ก็ค่อนข้างที่จะคงที่ ซึ่งเป็นช่วงที่เหล็กเสริมนั้นได้เสียรูปร่างไปแล้ว

จากรูปที่ 5.7 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของตัวอย่างคาน B22 และ คาน B22F เพื่อเปรียบเทียบลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นบนคานทั้งสอง โดยผลการทดสอบ พบว่า ลักษณะโดยรวมของกราฟนั้นเหมือนกัน คือ กราฟจะมีความชันมากและเป็นเส้นตรง จนเมื่อถึงแรงที่ทำ

ให้เหล็กเกิดการเสียรูปความชันของกราฟก็จะลดลง จนกระทั่งคานเกิดการวิบัติแรงที่กระทำก็ลดลง ซึ่งจะมี ความแตกต่างก็เพียงแต่แรงที่กระทำเท่านั้น โดยคาน B22F จะรับแรงได้ดีกว่าคาน B22

จากรูปที่ 5.8 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความเครียดในเหล็กเสริมต่อ ความเครียดที่จุดครากขอเหล็กเสริมนั้นและของแผ่นไฟเบอร์กับระยะการโก่งตัวของคาน B22 และคาน B22F เมื่อนำกราฟทั้งสองมาเปรียบเทียบ พบว่า ลักษณะของเหล็กเสริมจะมีพฤติกรรมที่คล้ายกัน โดย เหล็กเสริมล่างจะทำหน้าที่รับแรงดึง ซึ่งเกิดการยืดตัวและมีกำลังถึงจุดครากที่ระยะโก่งประมาณ 7 มิลลิเมตร จากนั้นเหล็กเสริมก็จะยืดตัวออกเรื่อยๆ ซึ่งเป็นช่วงที่เหล็กเสริมนั้นได้เสียรูปร่างไปแล้ว

### 5.3 ผลการทดสอบคานชุดที่ 3 (200x400x240 มม.)

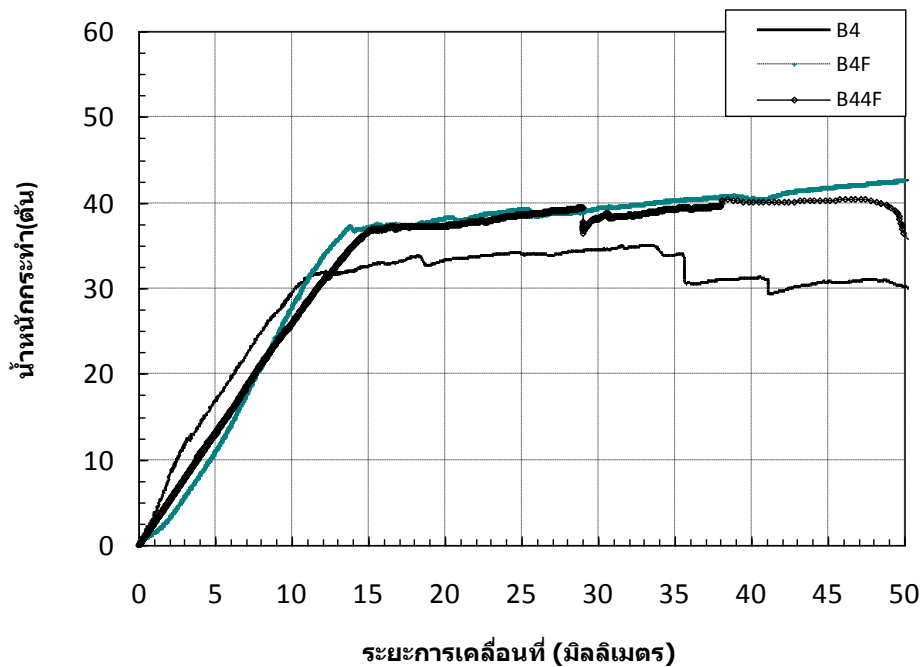


รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (กิโลนิวตัน) และการโก่งตัวของคานทดสอบ (มิลลิเมตร) ของคาน B3 B3F และ B33F

รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการโก่งตัวของคานทดสอบ เป็นการ เปรียบเทียบระหว่างคานควบคุมกับคาน B3 B3F และ B33F จากกราฟพบว่าการรับแรงของคาน B3F และ B33F มีค่าใกล้เคียงกัน สามารถรับแรงสูงสุดได้ 243 กิโลนิวตัน ซึ่งมากกว่าคาน B3 โดยคาน B3 สามารถรับแรงสูงสุดได้ 204 กิโลนิวตัน แต่เนื่องจากคาน B3 มีหน้าตัดบิดเอียงอาจทำให้ความสามารถ ในการรับแรงก่น้อยกว่าคานที่มีการสูญเสียน้ำหนักเหล็ก 15 เปอร์เซ็นต์



### 5.3.1 ผลการทดสอบคานชุดที่ 4 (250x500x240 มม.)



รูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (กิโลนิวตัน) และการโก่งตัวของคานทดสอบ (มิลลิเมตร) ของคาน B4 B4F และ B44F

รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการโก่งตัวของคานทดสอบ เป็นการเปรียบเทียบระหว่างคานควบคุมกับคาน B4 B4F และ B44F จากกราฟพบว่าการรับแรงของคาน B4F และ B44F มีค่าใกล้เคียงกัน สามารถรับแรงสูงสุดได้ 40 ตัน ซึ่งมากกว่าคาน B4 โดยคาน B4 สามารถรับแรงสูงสุดได้ 34 ตัน

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า คานที่เสริมแผ่นไฟเบอร์สามารถรับกำลังได้มากขึ้น ประมาณ 10%-20% โดยแผ่นไฟเบอร์จะมีประสิทธิภาพที่ดีกับหน้าตัดขนาดเล็ก และเมื่อหน้าตัดใหญ่ขึ้น ประสิทธิภาพการเพิ่มกำลังของแผ่นไฟเบอร์จะลดลง

## บทที่ 6

### สรุปผลการศึกษา

1) การใช้แผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็ก สามารถทำให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงได้เพิ่มสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาการโก่งตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ถูกเสริมกำลังและคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ พบว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์มีการโก่งตัวได้น้อยกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้ถูกเสริมกำลัง

2) การใช้แผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กในปริมาณที่มากขึ้นจะส่งผลทำให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กมีลักษณะเปราะ เมื่อเกิดการวิบัติคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะเกิดขึ้นในทันทีและเกิดอย่างรุนแรง

3) การวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ จะเกิดขึ้นในลักษณะแผ่นไฟเบอร์หลุดลอกออกทางด้านข้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ทำให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กไม่สามารถถ่ายแรงไปยังแผ่นไฟเบอร์เพื่อรับแรงได้อีก คานคอนกรีตเสริมเหล็กจึงรับแรงกระทำได้ลดลง

4) เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้แผ่นไฟเบอร์กับขนาดหน้าตัดพบว่าเมื่อหน้าตัดใหญ่ขึ้น ประสิทธิภาพการเพิ่มกำลังของแผ่นไฟเบอร์จะลดลง

## เอกสารอ้างอิง

- 1) American Concrete Institute Committee 318 (1999), Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318), American Concrete Institute (ACI), Farmington Hills, Michigan, USA.
- 2) ACI Committee 2005, Building Code requirements for structural concrete (ACI 318-05) American Concrete Institute, Farmington Hills, MI 48331.
- 3) ACI 440.2R-02, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures.", 2002.
- 4) Huyse, L., Hemmaty, Y., and Vandewalle, L., "Finite Element Modeling of Fiber Reinforced Concrete Beams," Proceedings of the ANSYS Conference, Vol.2, Pittsburgh, Pennsylvania, May 1994.
- 5) Jame G. MacGregor, and James K. Wight, "Reinforced Concrete Mechanics & Design", 4th Edition, Prentice Hall, New Jersey, 2005
- 6) Kachlakev, D.I. and Miller, T., "Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Laminates, Final Report, SP316, Oregon Department of Transportation, Salem, Oregon, May 2001.
- 7) Kaspar W., and Tada-aki T., "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures", SP-205, ACI, 2001.
- 8) Mirmiran, A., and Shahawy M., "Behavior of concrete columns confined by fiber composites.", J. of structural Engineering, 1997, May, pp 583-590.
- 9) Nilson, A. H., "Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete by the Finite Element Method," Journal of the American Concrete Institute, 65(9), pp. 757-766, 1968.
- 10) Samaan, M., Mirmiran, A., and Shahawy M., "Model of concrete confined by fiber composites.", J. of Structural Engineering, ASCE, 1998, 124(9), pp 1025-1031.
- 11) Shahawy M., and Mirmiran, A., "Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns.", Composites Part B: Engineering, 2000, pp 471-480.
- 12) บุญไชย สถิตมั่นในธรรม และ คณะ, "พฤติกรรมการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน", การสัมมนาการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก, 2545

- 13) สิทธิยา โชติสุขรัตน์และคณะ, “พฤติกรรมของส่วนของโครงสร้างรับแรงดัดและแรงอัด เมื่อซ่อมแซมหรือเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์”, โครงการงานทางวิศวกรรมโยธา, 2543, หน้า 31-36, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 14) อานนท์ วงษ์แก้ว, “การศึกษาเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟโนอีลิเมนต์”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, เล่มที่ 1, หน้า STR 366-373, 2556.