



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการเสริมกำลังคานคองกรีตเสริมเหล็กด้วยเฟอโรโรซีเมนต์ตามระดับของความเสียหาย

โดย ดร.ธีระพงษ์ ศุภวิริยะกิจ

กรกฎาคม 2558

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยเฟอร์ไรต์เมนต์ตามระดับของความเสียหาย

ผู้วิจัย

สังกัด

ดร.ธีระพนธ์ สุภาวิริยะกิจ มหาวิทยาลัยพะเยา

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
และ มหาวิทยาลัยพะเยา

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: MRG5380214

ชื่อโครงการ: การเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยเฟอร์ไรซีเมนต์ตามระดับของความเสียหาย

ชื่อนักวิจัย และสถาบัน : ดร.ธีระพจน์ ศุภวิริยะกิจ มหาวิทยาลัยพะเยา

อีเมล: teeraphot@hotmail.com

ระยะเวลาโครงการ: 2 ปี

บทคัดย่อ:

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อเสาะหาวิธีการฟื้นฟูสภาพคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสียหายแล้ว อันเนื่องมาจากการรับน้ำหนักเกินกว่าสภาพการใช้งานที่ระดับความเสียหายต่างกัน คานคอนกรีตเสริมเหล็กถูกออกแบบมาให้เกิดวิบัติใน 2 รูปแบบ คือการวิบัติภายใต้แรงดัด และการวิบัติภายใต้แรงเฉือน แผ่นเฟอร์ไรซีเมนต์ได้ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมกำลังโดยใช้เหล็กเดือยรับแรงเฉือนยึดเป็นอุปกรณ์ยึดระหว่างแผ่นเฟอร์ไรซีเมนต์ให้เข้ากับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยยึดติดด้านท้องคานหากคานวิบัติในรูปแบบแรงดัด หรือยึดติดข้างคานหากคานวิบัติภายใต้แรงเฉือน ขนาดคานที่ใช้ทดสอบคือ 200 x 400 x 2000 มม. ส่วนระดับความเสียหายภายใต้แรงดัดและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นก่อนการซ่อมแซมที่ระดับ 60, 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ผลการวิจัยพบว่า ภายใต้แรงดัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะถูกเสริมด้วยแถบเฟอร์ไรซีเมนต์ด้านรับแรงดึงสามารถรับน้ำหนักได้มากกว่า 16.9 เปอร์เซ็นต์ และรูปแบบการวิบัติยังคงเป็นแบบเหนียวเช่นเดิม ส่วนภายใต้แรงเฉือนคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะถูกเสริมด้วยแถบเฟอร์ไรซีเมนต์ด้านข้างสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้นระหว่าง 32.7 ถึง 39.7 เปอร์เซ็นต์ และสามารถเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติเดิมแบบเปราะให้เป็นแบบเหนียวได้ ดังนั้นโดยภาพรวมแล้ว การวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่าวิธีการซ่อมแซมด้วยแผ่นเฟอร์ไรซีเมนต์ประสบความสำเร็จในการฟื้นคืนสภาพ

คำหลัก : การฟื้นฟูกำลัง แถบเฟอร์ไรซีเมนต์ การวิบัติภายใต้แรงดัด การวิบัติภายใต้แรงเฉือน เหล็กเดือย

Abstract

Project Code : MRG5380214

Project Title : Rehabilitating of Reinforced Concrete Beam using Ferrocement based on Degree of Damages

Investigator : Dr. Teeraphot Supaviriyakit , University of Phayao

E-mail Address : teeraphot@hotmail.com

Project Period : 2 year

Abstract:

This research aims to investigate a method of rehabilitation of the damaged reinforced concrete beams subjected to load over its serviceability at different levels of damages. The concrete beams are designed under two different modes of failure: flexural and shear modes. Ferrocement is used as a reinforcing material using shear dowel to attach between the reinforced concrete beams and the ferrocement laminates that depend on failure modes: the soffit of beams in flexural mode or the side of beams in shear mode. Normal beams of 200 x 400 x 2000 size with the levels of flexural damages of 60, 80 and 100 percent were used in the study. The reinforced concrete beams were strengthened and able to support a load of 16.9 percent higher under the same failure mode after using ferrocement laminates on tension face to reinforce with shear dowel according to shear flow at 250, 185, and 150 mm respectively,. Regarding beams with transverse reinforcement at the levels of shear damages of 60, 80, and 100 percent, the ferrocement laminates were attached on side of the beam at every 130, 100, and 75 mm. respectively. The results show that the beams were able to support a load of 32.7 to 39.7 percent higher. In addition, the procedure changed the failure modes of the beams; that is, they changed from brittle failure to ductile failure. Overall, this procedure of repair was successful.

Keywords : rehabilitation, ferrocement laminates, shear failure, flexural failure, shear dowel

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

โครงสร้างโดยทั่วไปไม่ว่าจะเป็นคาน เสา หรือฐานราก มีโอกาสที่โครงสร้างเหล่านั้นจะเกิดการแตกร้าว และวิบัติได้ภายใต้แรงดัด หรือแรงเฉือน ส่วนสาเหตุมาจากมีได้หลายเหตุดังเช่น (1) การออกแบบที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของประเทศไทย(EIT) หรือข้อกำหนดสากล ACI ซึ่งมักจะพบได้ในงานท้องถิ่นเป็นงานที่ไม่ได้มาตรฐาน หรือ (2) เกิดจากสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เช่น โครงสร้างใกล้พื้นที่น้ำทะเล ซึ่งมีฤทธิ์เป็นด่างทำให้เหล็กเสริมหลักและเหล็กรับแรงเฉือนเป็นสนิม หรือโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ดินที่เป็นกรด(มีแร่ธาตุซัลเฟต)อยู่มาก หรือในโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้สารซัลเฟตเป็นวัตถุดิบ ซึ่งมีผลทำให้คอนกรีตผุกร่อน กะเทาะออกมา สิ่งแวดล้อมเหล่านี้เป็นตัวบ่อนทำลายความแข็งแรงของโครงสร้างประเภทคอนกรีตเสริมเหล็กให้ค่อยๆเสียไป หรือ (3) เกิดจากภัยพิบัติ เช่น เหตุจากอัคคีภัยทำให้โครงสร้างแตกร้าว ทำให้คุณสมบัติของเหล็กโครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลง หรือภัยแผ่นดินไหวซึ่งคานเดิมไม่ได้ออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหว คานจึงมีปริมาณเหล็กเสริมหลักน้อย มีเหล็กปลอกน้อยและห่าง และมีวิธีการผูกเหล็กปลอกไม่เหมาะสมกับสภาพดังกล่าว หรือ (4) เกิดจากการใช้งานที่ไม่เหมาะสม คือการใช้งานผิดประเภทของอาคาร โดยความรู้เท่าไม่ถึงการณ์ของเจ้าของ ดังแสดงในรูปที่ 1



(ก) รอยร้าวในสนิมในเหล็ก

(ข) ความเสียหายจากไฟไหม้

(ค) รอยร้าวจากน้ำหนักเกิน

รูปที่ 1 สภาพความเสียหายในโครงสร้างคอนกรีต

ปัจจัยต่างๆเหล่านี้เป็นเหตุให้ต้องซ่อมแซมโครงสร้างที่มีความเสียหายไม่ว่าในระดับความรุนแรงไหนให้กลับมาใช้งานได้ตามเดิม หรือในบางกรณีเจ้าของอาคารมีความต้องการมากกว่านั้น คือเมื่อซ่อมแซมโครงสร้างที่มีความเสียหายให้มีสภาพดีดังเดิมแล้ว ยังต้องการให้โครงสร้างมีความสามารถรับน้ำหนักได้ดีกว่าเดิม โดยจัดงบประมาณในการซ่อมบำรุงอย่างจำกัด ทำให้ไม่สามารถเลือกใช้วัสดุคุณภาพสูงมาใช้ในการซ่อมบำรุงได้ ปัญหาเช่นนี้ล้วนเป็นงานที่ท้าทายสำหรับวิศวกรที่ต้องทำการวิเคราะห์และออกแบบการเสริมกำลังโครงสร้างให้มีปลอดภัยและประหยัดสูงสุด

สำหรับประเทศที่กำลังพัฒนา เช่น ประเทศไทย แม้ว่าวัสดุในการเสริมกำลังต่างๆไม่ว่าจะเป็น แผ่นเหล็ก (Steel plate) หรือ วัสดุเสริมเส้นใย (Fiber reinforced Polymer - FRP) จะสามารถหาได้ง่ายในท้องตลาดและกำลังเป็นที่นิยมในหมู่วิศวกร แต่ข้อจำกัดของวัสดุเหล่านั้นก็คือ (1) กระบวนการติดตั้งที่ค่อนข้างซับซ้อนซึ่งต้องอาศัยช่างฝีมือที่มีความชำนาญในการทำงาน อีกทั้ง (2) วัสดุพวกนี้มีความสามารถ

ในการต้านทานความร้อนและการทำลายล้างเนื่องจากสารเคมีต่ำ (โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากวัสดุในการเสริมกำลังคือ วัสดุเสริมเส้นใย) และ (3) สำคัญที่สุดคือ ราคาในการซ่อมบำรุงมีมูลค่าสูง ดังนั้นการมองหาวัสดุทางเลือกที่มีประสิทธิภาพ หาง่ายในท้องถิ่นและใช้เทคโนโลยีก่อสร้างต่ำมาใช้ จึงเป็นเงื่อนไขที่ผู้ออกแบบควรให้ความสนใจเรื่องวัสดุและวิธีในการเสริมกำลัง ที่จะต้องให้ความสำคัญเป็นลำดับต้นๆ เพื่อให้บรรลุถึงเป้าหมายทั้งสามประการที่กล่าวมา

วัสดุ เฟอร์โรซีเมนต์ (Ferrocement) เป็นวัสดุซ่อมบำรุงอีกประเภทหนึ่งที่มีความเหมาะสม เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาง่ายในท้องถิ่น มีส่วนประกอบหลัก คือ ปูนซีเมนต์ (Cement Portland) น้ำ (Water) ลวดตาข่าย (Wire meshes) และเหล็กโครง (skeleton steel) ดังแสดงในรูปที่ 2 อีกทั้งขั้นตอนในการเสริมกำลังก็ไม่ยุ่งยาก ช่างฝีมือในท้องถิ่นสามารถประยุกต์ใช้โดยไม่ต้องอาศัยความรู้พิเศษใดๆ โดยนำจุดเด่นของเฟอร์โรซีเมนต์มาประยุกต์ใช้ในงานเสริมกำลังโครงสร้าง ทั้งในแง่ของวิธีการก่อสร้าง และในด้านกำลังและความคงทนดังนี้



(ก) ผสมมอร์ต้า



(ข) เหล็กโครง + ลวดตาข่าย



(ค) ฉาบ

รูปที่ 2 ส่วนประกอบของเฟอร์โรซีเมนต์

ในด้านการก่อสร้าง

- (1) วัสดุดิบที่ใช้ทำเฟอร์โรซีเมนต์อันประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ทราย น้ำ ลวดตาข่ายและเหล็กโครง เป็นวัสดุที่มีอยู่ในประเทศ สามารถหาซื้อได้ทั่วไป
- (2) เนื่องจากหลักการขึ้นรูปของเฟอร์โรซีเมนต์จะใช้การฉาบเป็นหลัก ดังนั้นหากสามารถขึ้นโครงของโครงสร้างจากการดัดเหล็กโครงได้แล้ว เฟอร์โรซีเมนต์ก็สามารถทำเป็นรูปทรงใดๆก็ได้โดยไม่ต้องอาศัยไม้แบบเหมือนในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก
- (3) วิศวกรและช่างทั่วไปสามารถเรียนรู้ทักษะการทำเฟอร์โรซีเมนต์ได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นงานฝีมือทั่วไป ซึ่งแรงงานไทยมีความคุ้นเคยกันเป็นอย่างดี
- (4) การทำเฟอร์โรซีเมนต์ไม่ต้องการเครื่องจักรกลหนักในการทำงาน ใช้เพียงอุปกรณ์อเนกประสงค์ (ปากกา) คีบตัดลวด และอุปกรณ์ฉาบ(เกียง) เท่านั้น

- (5) ในกรณีเกิดความเสียหาย ช่างท้องถิ่นสามารถซ่อมแซมเฟอร์โรซีเมนต์ได้ง่ายและรวดเร็ว โดยการนำปูนทรายไปฉาบทับเข้ากับลวดตาข่ายบนบริเวณที่เกิดความเสียหาย
- (6) ต้องการการบำรุงรักษาต่ำ เนื่องจากทนทานต่อการเน่าเปื่อย เป็นสนิม ความร้อนและความเย็น
- (7) เฟอร์โรซีเมนต์มีราคาถูก โดยค่าก่อสร้างส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับค่าแรงงานเป็นหลัก สำหรับในประเทศไทยถือว่าค่าจ้างนั้นมีราคาถูก ทั้งยังเป็นการส่งเสริมให้เกิดงานในท้องถิ่นอีกด้วย

ในด้านกำลังและความคงทน

- (1) ความแข็งแรง เฟอร์โรซีเมนต์มีกำลังรับแรงดัดและแรงดึงได้ดี เนื่องจากลวดตาข่ายและเหล็กโครงได้ฝังตัวเข้าไปอยู่ในเนื้อมอร์ต้า ซึ่งช่วยเสริมกำลังด้านรับแรงดึงของซีเมนต์ที่มีอยู่ต่ำ
- (2) ความคงทน เฟอร์โรซีเมนต์มีความทนทานสูง คือไม่แตกร้าวง่าย ๆ ไม่เน่า ไม่ผุกร่อน ไม่เป็นสนิม เนื่องจากไม่มีส่วนผสมของหิน ซึ่งมอร์ต้ามีความทึบน้ำสูง อีกทั้งลวดตาข่ายที่ใช้ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำที่จะทำให้เกิดเป็นสนิมอีกด้วย
- (3) ความต้านทานต่อแรงดันต่าง ๆ และแรงกระแทก เนื่องจากเฟอร์โรซีเมนต์มีความยืดหยุ่นตัวสูง ดังนั้นจึงทนต่อแรงกระแทก สั่นสะเทือนและแรงระเบิดได้ดี
- (4) การแตกร้าว เนื่องจากเฟอร์โรซีเมนต์มีลวดตาข่ายกระจายอยู่ทั่วหน้าตัด รอยแตกร้าวต่างๆจึงไม่ค่อยมี หรือหากมีก็จะมีขนาดที่ค่อนข้างเล็ก

อย่างไรก็ดีการใช้งานของเฟอร์โรซีเมนต์เพื่อประโยชน์ในการเสริมกำลังโครงสร้างในประเทศไทยยังไม่แพร่หลายเท่าที่ควร ทั้งนี้อาจจะมีสาเหตุมาจากการวิจัยที่ยืนยันผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการยังมีอยู่อย่างจำกัด และยังเป็นเรื่องใหม่สำหรับที่วิศวกรสนามจะนำไปใช้งาน

ดังนั้นข้อเสนอโครงการนี้ต้องการจะศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยเฟอร์โรซีเมนต์ภายใต้เงื่อนไขที่ว่าคานมีความเสียหายอยู่เดิม โดยรูปแบบการวิบัติจะมุ่งเน้นไปที่คานซึ่งเกิดรอยร้าวจาก การดัด (*Flexural cracks*) และรอยร้าวจาก การเฉือน (*Shear cracks*) ทั้งนี้เทคนิคและวิธีการเลือก จำนวนชั้นของลวดตาข่าย จำนวนเหล็กโครงตามยาว จำนวนเหล็กโครงตามขวาง และจำนวนและขนาดของเหล็กเสริมเดือย (*shear dowel*) ในเฟอร์โรซีเมนต์จะแปรผันตามระดับของความเสียหายที่เกิดขึ้น

2. วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของโครงการมีดังนี้

1. เพื่อหาวิธีการเสริมกำลังในคานาปกติคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่เสียหายภายใต้รูปแบบการวิบัติด้วยแรงดัด และการวิบัติด้วยแรงเฉือน ที่ระดับความรุนแรงต่างๆ กัน
2. ศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการซ่อมแซมและเสริมกำลังในคานาปกติด้วยวิธีเฟอร์โรซีเมนต์ ได้แก่ ปริมาณเหล็กโครงตามยาว(Longitudinal skeletal steel) ปริมาณเหล็กโครงตามขวาง(Transverse skeletal steel) ระยะห่างการเจาะเย็บเหล็กเดือย(Shear dowel spacing) ตามระดับความเสียหายที่เกิดขึ้น
3. เพื่อหาวิธีการเสริมกำลังในคานาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกต่างๆ กัน ภายใต้รูปแบบการวิบัติด้วยแรงอัดร่วมเฉือน และแรงดึงร่วมเฉือน
4. ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการซ่อมแซมและเสริมกำลังคานาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกต่างๆ กันด้วยวิธีเฟอร์โรซีเมนต์ เช่น รูปแบบการจัดเรียงตัวของเหล็กโครงตามยาว(Longitudinal skeletal steel) และปริมาณเหล็กโครงตามยาว(Longitudinal skeletal steel)

3. วิธีการทดลอง

งานวิจัยที่เสนอนี้เป็นการศึกษาหาวิธีการเสริมกำลังในคานปกติคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้ออกแบบตามมาตรฐานซึ่งมักจะพบได้ตามชนบท หรือเป็นวิธีการเสริมกำลังในคานของอาคารทั่วไปเช่นบ้านพักอาศัย เทวี่เฮาส์ อาคารพาณิชย์ อพาร์ทเมนต์ ที่รับน้ำหนักเกินทำให้คานเกิดความเสียหาย หรืออาคารร้างที่ถูกไฟไหม้ที่ระดับความรุนแรงต่างกัน รวมทั้ง เป็นการศึกษาหาวิธีการเสริมกำลังในคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกทุกมากต่างกัน จนอาจทำให้เกิดความเสียหาย เช่นคานถ้อยแรงในอาคารสูง คานหัวเสาในงานก่อสร้างสะพานระบบ Box girder และ ระบบ T-beam รวมทั้งงานฐานราก

การเสริมกำลังของโครงสร้างในการวิจัยนี้จะใช้แผ่นเฟอร์โรซีเมนต์ ซึ่งเป็นวัสดุประกอบที่ชาวบ้านสามารถสร้างได้เอง วัตถุดิบหาได้โดยทั่วไป และมีราคาถูก ซึ่งจะมีลำดับขั้นตอนการวิจัยดังนี้

3.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูล

ปัจจุบันกลุ่มงานวิจัยใหญ่ๆ ที่ศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์เฟอร์โรซีเมนต์ในงานเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในระดับสากล สามารถแบ่งออกเป็น (1) กลุ่มงานวิจัยของ Paramasivam, P. และ Ong, K. C. G. แห่ง University of Singapore (2) กลุ่มงานวิจัยของ Vidivelli, B. แห่ง Annamalai University ประเทศอินเดีย และ (3) กลุ่มงานวิจัยของ Naaman, A. A. แห่ง University of Michigan และ (4) กลุ่มวิจัยของ พิชัย นิมิตรยงสกุล แห่งสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) โดยในกลุ่มสุดท้ายนั้นถือว่าเป็นประโยชน์ต่องานนักวิจัยไทยอย่างมาก เพราะนอกจากสถาบัน AIT จะตั้งอยู่ในประเทศไทยแล้ว สถาบันดังกล่าวยังเป็นที่ตั้งของ ศูนย์สารสนเทศเฟอร์โรซีเมนต์ระดับชาติ (International Ferrocement Information Center: IFIC) ซึ่งทำให้นักวิจัยไทยสามารถเข้าถึง ข้อมูลเกี่ยวกับเฟอร์โรซีเมนต์ในระดับสากลได้เป็นอย่างดี

อย่างไรก็ดีเพื่อให้เห็นภาพรวมของปัญหา ในลำดับถัดไปจะเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ทั้งนี้วัสดุและเทคนิคที่ใช้จะเริ่มตั้งแต่ขั้นปกติจนถึงขั้นสูงที่ใช้เฉพาะในงานวิจัย และในส่วนท้ายของการนำเสนอจะแสดงพัฒนาการของงานวิจัยเกี่ยวกับเฟอร์โรซีเมนต์ในเกี่ยวกับการเสริมกำลังคานทั้งในส่วนองแรงดัดและแรงเฉือน

3.1.1 การเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุและเทคนิคทั่วไป

วัสดุอย่างง่ายที่สามารถหาได้ในท้องตลาดและใช้ในการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็ก คือ แผ่นเหล็ก (Steel plate) ซึ่งโดยทั่วไปกำลังของแผ่นเหล็กจะมีค่าสูงและมีข้อจำกัดอยู่เกี่ยวกับการหาวัสดุเพื่อยึดเกาะระหว่างแผ่นเหล็กและคอนกรีต

โดยในปี ค.ศ.2000 Barnes, R. A. et al. [1] ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่ข้างคานทั้งสองฝั่งเพื่อรับแรงเฉือน โดยผู้วิจัยได้ทำการทดสอบแผ่นเหล็กที่ขนาดความหนาต่างๆโดยใช้เงื่อนไขของการยึดเกาะเป็นตัวแปรของปัญหา นั่นคือ (1) การยึดเกาะด้วยเหล็กยึด (Bolting) ดังแสดงในรูปที่ 3(ก) และ (2) การยึดเกาะด้วยกาว (Epoxy-adhesive, bonding) โดยผลการทดสอบพบว่าการเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นเหล็กทั้งสองแบบสามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักของคานได้ อย่างไรก็ตามการเสริมกำลังด้วยการใช้เหล็กยึด (EP) จะให้ค่ากำลังที่สูงกว่า และทั้งแสดงพฤติกรรมเหนือกว่าใช้กาว (EPG) ซึ่งเกิดการวิบัติโดยเฉียบพลัน ดังแสดงในกราฟระหว่างแรงและการแอ่นตัวของคานตามรูปที่ 3 (ข)

พฤติกรรมการรับน้ำหนักของคานคอนกรีตเสริมเหล็กรูปตัวที ที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กเพื่อรับแรงดัดทั้งในคานดั้งเดิมและคานที่เกิดการร้าวได้รับการศึกษาโดย Sukrawa, M. et al. [2] ในปี 2006 โดยคณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบคานทั้งหมด 3 ตัว โดยตัวแรกเป็นคานควบคุม (BS) คานตัวที่สองและสามเป็นคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่ผิวรับแรงดัดซึ่งยึดเกาะกับคอนกรีตด้วยกาว (Epoxy resin) โดยความแตกต่างระหว่างคานสองตัวหลังคือ คานตัวที่สามจะถูกกดจนเกิดรอยร้าวขึ้นก่อนแล้วจึงทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (BCS) ในขณะที่คานตัวที่สองจะทำการติดตั้งในขณะที่คานมีความสมบูรณ์ (BC) โดยผลการทดสอบพบว่าคานที่เสริมกำลังรับแรงดัดแบบที่ 2 (BC) สามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักมากกว่าคานควบคุมถึงร้อยละ 25 ในขณะที่คานซึ่งซ่อมแซมหลังเกิดรอยร้าว (BCS) ให้กำลังใกล้เคียงกับ BC แต่มีความเหนียวที่ต่ำกว่า (ดังแสดงในรูปที่ 4)

งานวิจัยของ Jumaat, M. Z. และ Alam, M. A. [3] ในปี 2007 ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมเส้นใย (CFRP-C4) และคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กซึ่งยึดด้วยกาว (B4) โดยคานทั้งสองมีเหล็กรูปตัวแอลปิดทับที่ปลายของวัสดุเสริมกำลังเพื่อป้องกันการหลุดร่อนของแผ่นเหล็กและ CFRP (ซึ่งยึดติดกับผิวล่างของคานเดิมด้วย epoxy) อีกทั้งยังมีการเพิ่มเหล็กรูปตัวแอลเรียงเป็นระยะเท่ากันตลอดช่วงแรงเฉือน (ดังแสดงในรูปที่ 5(ก)) โดยผลการทดสอบเปรียบเทียบกับคานควบคุม (A1) ดังแสดงในรูปที่ 5 (ข) ซึ่งการทดลองพบว่าคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก

ให้ค่ากำลังที่มากกว่าแต่มีความเหนียวน้อยกว่าคานที่เสริมกำลังด้วย CFRP ต่อมาอีก 1 ปี คณะผู้วิจัยเดียวกัน [4] ได้ตีพิมพ์ผลงานวิจัยเกี่ยวกับการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่นเหล็กเพื่อรับแรงดัด โดยในครั้งนี้นักศึกษามุ่งตรงไปที่การเปรียบเทียบระหว่างการใช้แผ่นเหล็กรูปตัวแอล (L) และตัวยู (U) ซึ่งใช้เป็นเหล็กยึดรั้งที่ปลายของแผ่นเหล็กรับแรงดัด (ใต้คาน) เพื่อป้องกันการหลุดร่อนของกาวยึด (รูปที่ 5(ค)) โดยใช้ตัวอย่างทั้งหมด 4 ตัวคือ (1) คานควบคุม-A1 (2) คานที่เสริมแผ่นเหล็กรับแรงดัดแต่ไม่เสริมเหล็กยึดกันการร่อนที่ปลาย-B1 (3) เช่นเดียวกันกับคานตัวที่ 2 แต่เสริมแผ่นเหล็กรูปตัว U ที่ปลาย-B2 และ (4) เช่นเดียวกันกับคานตัวที่ 2 แต่เสริมแผ่นเหล็กรูปตัว L ที่ปลาย-B3 โดยผลการทดสอบพบว่าคานที่เสริมเหล็กกันร่อนที่ปลายสามารถเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักได้ดีกว่าคานที่ไม่เสริม (รูปที่ 5(ง)) อย่างไรก็ตามผู้วิจัยได้แนะนำการใช้เหล็กรูปตัว L เนื่องจากมีความเหมาะสมกว่าเหล็กรูปตัว U

นอกจากการใช้แผ่นเหล็กในการเสริมกำลังทั้งแรงดัดและแรงเฉือนในคานคอนกรีตเสริมเหล็กแล้ว วัสดุคอมโพสิตประเภท FRP, SRP และ TRM ก็เป็นที่นิยมสูงในปัจจุบันเนื่องจากมีน้ำหนักเบา ง่ายต่อการติดตั้งและติดตั้งที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับหน่วยน้ำหนักของเหล็ก อย่างไรก็ตามปัญหานี้ในเรื่องของความร้อน และการหลุดร่อนเนื่องจากกาวยึด รวมไปถึงราคาต่อหน่วยที่สูง ก็ยังเป็นปัญหาที่สำคัญของวัสดุประเภทนี้

สำหรับการเสริมกำลังด้วย SRP (Steel Reinforced Polymer) ยังคงมีการศึกษาอยู่ในวงจำกัด อย่างไรก็ตามในปี ค.ศ.2005 Kim, Y. L. et al. [5] ได้ทดสอบความสามารถในการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย SRP ซึ่งผลการทดสอบพบว่าภายหลังจากคานถูกเสริมกำลังแล้วมีกำลังเพิ่มถึงร้อยละ 53

การศึกษาการเสริมกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วย TRM (Textile Reinforced Mortar) ในปี ค.ศ.2005 โดย Triantafillou, T. C. และ Papanicolaou, C. G. [6] พบว่า TRM เป็นวัสดุทางเลือกนอกเหนือจาก FRP และจากผลการทดสอบพบว่า TRM สามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรงเฉือนของคานได้ โดยตัวแปรที่สำคัญก็คือจำนวนชั้นของ TRM ที่ใช้ ซึ่งหากปริมาณที่เสริมมีจำนวนเพียงพอแล้วก็จะสามารถเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติจากแรงเฉือนเป็นแรงดัดได้

วัสดุคอมโพสิตที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือ วัสดุเสริมเส้นใยประเภท FRP (Fiber Reinforced Polymer) ซึ่งมีทั้งเป็น Glass FRP (GFRP) หรือ Carbon FRP (CFRP) ตัวอย่างการวิจัยเกี่ยวกับการใช้ FRP ในการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็ก คือ งานวิจัยของ Sergio, F. B. et al. [7] ในปี ค.ศ.2003 ซึ่งผู้วิจัยพยายามค้นหารูปแบบการติดตั้งแผ่น CFRP เพื่อให้ได้สมรรถนะของคานที่เสริมกำลังเพื่อรับแรงดัดสูงสุด รูปแบบการเสริมกำลังประกอบไปด้วยชุด A ซึ่งติดตั้งแผ่น CFRP ที่ผิวรับแรงดึง และชุด B ซึ่งคล้ายกับชุด A แต่เพิ่มการติดตั้งแผ่น CFRP ในแนวตั้งในบริเวณช่วงเฉือนเป็นระยะ สำหรับชุด C จะติดตั้งแผ่น FRP ที่ผิวข้างคานใกล้บริเวณผิวรับแรงดึง และเช่นกันสำหรับชุด D แต่จะเพิ่มแผ่น FRP ในแนวตั้งตลอดช่วงแรงเฉือน (รูปที่ 6) ผลการทดสอบพบว่าในทุกรูปแบบของการเสริมกำลังจะมีความเหนียวที่ต่ำกว่าคานควบคุม (คานที่ไม่ได้เสริมแผ่น FRP) ในขณะที่คานชุดที่เสริม FRP สามารถพัฒนากำลังได้สูงกว่าคาน

ควบคุม และเมื่อเปรียบเทียบกับชุดคานที่เสริมแผ่น FRP ในชุด A&B และ C&D พบว่าชุดที่มีการเพิ่มแผ่น FRP ในแนวตั้งสามารถเพิ่มความเหนียวอีกทั้งเพิ่มกำลังรับแรงดัดได้

นอกจากที่กล่าวมาการเสริมกำลังโดยใช้วิธีอื่นๆ เช่น การอัดแรงภายนอกก็สามารถพบเห็นได้ทั่วไป ตัวอย่าง เช่น ใน ค.ศ.1999 Harajli, M. et al. [8] ทดสอบและวิเคราะห์ผลจากการอัดแรงภายนอกในคานคอนกรีตเสริมเหล็กรูปตัวที ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยผลการวิเคราะห์พบว่า การอัดแรงภายนอกสามารถเพิ่มกำลังในการรับแรงดัดของคานได้ อย่างไรก็ดีพบว่าความเหนียวของคานมีค่าลดลง สำหรับประโยชน์ในการใช้การอัดแรงภายนอกในกรณีแรงเฉือน สามารถดูได้จากผลการวิจัยของ ณัฐวร ขาวศรี และคณะ [9] ในปี ค.ศ. 2008 ซึ่งได้ทำการอัดแรงในแนวตั้งด้วยเหล็กเสริมกำลังสูงตลอดช่วงแรงเฉือน (รูปที่ 8) โดยคานที่ใช้ในการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม มีช่วงแรงเฉือนต่อความลึกเท่ากับ 2 และ 1.5 ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่า คานที่เสริมกำลังด้วยการอัดแรงในแนวตั้งทั้งหมด มีกำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคานควบคุม นอกจากนี้ยังมีรูปแบบการวิบัติที่เปลี่ยนไปในรูปแบบที่เหนียวขึ้น

3.1.2 การเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยเฟอร์โรซีเมนต์

- การเสริมเพื่อรับแรงดัด (Flexural strengthening) : ตัวอย่างการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยเฟอร์โรซีเมนต์ สามารถรวบรวมได้แต่ยังคงอยู่ในวงจำกัด โดยตัวอย่างที่น่าสนใจได้แก่

การศึกษาของ Ong, K. C. G. et al. [10] ในปี ค.ศ.1992 ซึ่งได้ทดสอบคานที่เสริมเฟอร์โรซีเมนต์ที่ผิวรับแรงดัดทั้งหมด 11 คาน โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ชุด คือ A B และ C

โดยในชุด A ใช้พารามิเตอร์ คือ วัสดุที่ใช้ถ่ายแรงเฉือนระหว่างแผ่นเฟอร์โรซีเมนต์และคานคอนกรีต ซึ่งเลือกใช้ bolts เปรียบเทียบกับ epoxy resin สำหรับชุด B จะเน้นการศึกษาไปที่อิทธิพลเนื่องจากระยะเรียงของ bolts นั่นคือ 100, 150 และ 200 มม. และในชุดสุดท้ายชุด C ผู้วิจัยต้องการศึกษาพฤติกรรมของคานที่เกิดรอยร้าวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกช่วงหน้า ดังนั้นคานทุกตัวในชุดนี้จึงถูกเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจนเกิดรอยร้าวขึ้นก่อน หลังจากนั้นจึงทำการซ่อมแซมด้วยเฟอร์โรซีเมนต์ซึ่งยึดติดกับคานเดิมด้วย Bolts จากผลการวิจัยพบว่าพฤติกรรมของคานที่เสริมกำลังด้วยเฟอร์โรซีเมนต์โดยใช้ bolts เรียงเป็นระยะถี่ๆ จะมีค่ากำลังรับน้ำหนักใกล้เคียงกับการใช้ resin เป็นตัวเชื่อมประสาน

ทั้งนี้ผลลัพธ์จากการทดสอบคานที่เสริมกำลังภายหลังจากที่เกิดรอยร้าวกับคานปกติ พบว่ามีความแตกต่างกันเล็กน้อย ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ให้ข้อพิจารณาว่าผลที่ใกล้เคียงกันนั้นอาจจะเป็นผลมาจากระดับการเกิดรอยร้าวอาจจะมีค่าต่ำ อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อสังเกตเพิ่มเติมเกี่ยวกับการลดลงของปริมาณลวดตาข่ายในเฟอร์โรซีเมนต์จากร้อยละ 3.55 ไปเป็น 2.36 ซึ่งมีผลทำให้กำลังของคานลดลง

อีก 5 ปีต่อมา Fahmy, E. H. et al. [11] ทำการศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังรับแรงดัดด้วยเฟอร์โรซีเมนต์ โดยฉาบเฟอร์โรซีเมนต์ในบริเวณผิวรับแรงดัดและการฉาบตลอดผิวคานจนเป็นรูปตัวยู โดยวัสดุที่ผู้วิจัยเลือกใช้ในการยึดเกาะระหว่างวัสดุทั้งสองชนิดก็คือ epoxy ทั้งนี้พารามิเตอร์

เพิ่มเติมนอกเหนือไปจากลักษณะการฉาบของเฟอร์โรซีเมนต์ก็คือ จำนวนชั้นของลวดตาข่ายและความหนาของเฟอร์โรซีเมนต์ ผลจากการทดสอบพบว่าภายหลังจากการเสริมกำลังคานทุกตัวมีกำลังรับน้ำหนักและความเหนียวที่มากขึ้น และผลเปรียบเทียบระหว่างการซ่อมด้วยการฉาบที่ผิวรับแรงดึงและฉาบเป็นรูปตัวยู พบว่าการฉาบเป็นรูปตัวยูให้ค่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดมากกว่าการฉาบที่ผิวรับแรงดึงปกติ ทั้งนี้ผลการทดสอบยืนยันว่าจำนวนชั้นของลวดตาข่ายและความหนาของเฟอร์โรซีเมนต์มีความสัมพันธ์กับกำลังและความเหนียวที่เพิ่มขึ้น

การศึกษาของ Vidivelli, B. et al. [12] ในปี ค.ศ.2004 จะคล้ายกับการทดสอบของ Ong, K. C. G. et al. [10] รวมกับ Fahmy, E. H. et al. [11] ซึ่งทำการศึกษาการเสริมกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยการฉาบเฟอร์โรซีเมนต์ที่ผิวรับแรงดึงและรอบหน้าตัดเป็นรูปตัวยู ซึ่งใช้กาวepoxy เป็นตัวเชื่อมประสาน โดยการเสริมกำลังคานทั้งสองตัว จะพิจารณาหลังจากคานได้รับน้ำหนักบรรทุกจนคานเกิดความเสียหายก่อนแล้ว ซึ่งผลจากการทดสอบพบว่าคานที่เสริมกำลังด้วยเฟอร์โรซีเมนต์สามารถเพิ่มกำลังรับแรงดัดได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งคานที่เสริมกำลังด้วยการฉาบเป็นรูปตัวยูรอบหน้าตัด จะให้ค่ากำลังสูงขึ้นมากเมื่อเปรียบเทียบกับคานปกติ

Vidivelli, B. และ Jeyasehar, C. A. [13] ในปี ค.ศ.2006 ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเสริมกำลังด้วยเฟอร์โรซีเมนต์เพื่อรับแรงดัด โดยการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้ใช้ตัวแปรหลักคือระดับของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อคานก่อนการเสริมกำลังหรือระดับความเสียหาย (Degree of damage, Dd) โดยเริ่มตั้งแต่ 0.60, 0.70, 0.80 และ 0.90 เท่าของน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย Pu และในแต่ละชุดการทดลองได้แปรผันจำนวนของลวดตาข่ายจากร้อยละ 2, 3 และ 4 ตามลำดับ โดยขึ้นทดสอบทั้งหมดนี้ถูกวิเคราะห์และใช้เพื่อสร้างสมการเพื่อทำนายพฤติกรรมในพารามิเตอร์ต่างๆของคาน เช่น หน่วยแรงในเหล็กเสริมรับแรงดึง หน่วยแรงในเหล็กโครง ฯ ซึ่งสมการดังกล่าวมีค่าขึ้นตรงกับ volume fraction (V_r) specific surface of reinforcement in ferrocement (S_r) และ Degree of damage (Dd) ทั้งนี้โดยผู้วิจัยได้ทำการสรุปว่า (1) ปริมาณของลวดตาข่ายที่ร้อยละ 3 ให้ค่ากำลังที่มีความเหมาะสมเมื่อเปรียบเทียบกับที่ปริมาณร้อยละ 2 และ 4 (2) ความเครียดในเหล็กเสริม การโก่งตัว ความกว้างของรอยร้าว ของคานที่ได้รับการเสริมกำลังมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง

ที่ผ่านมาการศึกษาการเสริมกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยเฟอร์โรซีเมนต์จะเน้นไปที่จำนวนชั้นของลวดตาข่าย ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าแม้ว่าจะเพิ่มจำนวนชั้นมากขึ้นแต่ก็ไม่สามารถเพิ่มกำลังรับแรงดัดได้เท่าที่ควร ดังนั้นการศึกษาของ Jumaat, M. Z. และ Alam, M. A. [14] ในปี ค.ศ.2006 จึงมุ่งเน้นไปที่เสริมลวดตาข่ายร่วมการเสริมเหล็กโครงเพื่อรับแรงดึง ในบริเวณผิวคานด้านที่รับแรงดึง โดยแบ่งขึ้นทดสอบออกเป็น 4 กลุ่ม

กลุ่มแรกเป็นคานควบคุม (A)

สำหรับกลุ่มที่สอง(B) จะใช้bolts เรียงเป็นระยะ300 มม. และ600 มม. และใช้เป็น shear connector โดยคานตัวที่สามในกลุ่มดังกล่าวจะถูกกดให้เกิดรอยร้าวแล้วจึงซ่อมแซมด้วยเฟอร์โรซีเมนต์ภายหลัง (คานตัวนี้มี bolt เรียงเป็นระยะ 300 มม.) (รูปที่ 9 (ก))

สำหรับคานในกลุ่มที่ 3 (C) จะใช้เหล็กรูปตัวแอลเป็นเหล็กเดือยทำหน้าที่เป็น shear connector ร่วมกับการใช้ epoxy (รูปที่ 9 (ข)) โดยระยะเรียงของ dowel คือ 300 มม. และ 600 มม. และเช่นเดียวกับคานตัวสุดท้ายในกลุ่ม B คานที่มีระยะเรียงของ dowel เท่ากับ 300 มม. จะถูกกดให้เกิดรอยร้าวขึ้นก่อน

โดยคานในกลุ่มสุดท้าย (D) จะใช้เฉพาะเหล็ก dowel เป็น shear connector ที่ระยะเรียง 300 มม. ในขณะที่คานอีกตัวที่ไม่เสริมเหล็กโครงเพื่อรับแรงดึง ผลการทดสอบพบว่าคานเสริมกำลังด้วยเฟอร์โรซีเมนต์จะให้ค่ากำลังที่สูงกว่าคานทั่วไป และพบว่าคานที่ใช้ bolts เป็น shear connectors เกิดการหลุดของแผ่นเฟอร์โรซีเมนต์ที่ปลายคาน โดยคานที่มีรอยร้าวอยู่แล้วในกลุ่มB และC (สำหรับระยะเรียงของ shear connectors ที่เท่ากัน) จะให้ค่ากำลังต่ำกว่าคานที่ไม่มีรอยร้าวเล็กน้อย ท้ายสุดสำหรับการเปรียบเทียบในชุด D ซึ่งไม่มีการใช้เหล็กโครงเพื่อรับแรงดัดพบว่าการใช้เหล็กโครงเพื่อช่วยรับแรงดัดสามารถช่วยเพื่อกำลังของโครงสร้างได้เป็นอย่างดี

- การเสริมกำลังเพื่อรับแรงเฉือน (Shear strengthening) : งานวิจัยเกี่ยวกับการเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยเฟอร์โรซีเมนต์ยังคงมีอยู่ในวงจำกัด และบางงานวิจัยก็ยังไม่สามารถแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า เฟอร์โรซีเมนต์มีความสามารถโดดเด่นในเรื่องเสริมกำลังรับแรงเฉือน อย่างไรก็ตามงานวิจัยต่อไปนี้ก็ถือว่าเป็นวิวัฒนาการของการใช้เฟอร์โรซีเมนต์ในงานเสริมกำลังรับแรงเฉือน ซึ่งสามารถใช้อ้างอิงได้ ดังนี้

งานวิจัยเริ่มแรกในการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อรับแรงเฉือนเริ่มต้นที่ National University of Singapore โดย Paramasivam, P. et al. [15] ในปี 1998 โดยในครั้งนั้นผู้วิจัยได้ทดสอบคานรูปตัวที่จำนวน 6 คาน โดยคานตัวที่ถูกเสริมกำลังจะถูกฉาบด้วยเฟอร์โรซีเมนต์เป็นรูปตัวยูตลอดหน้าตัด ทั้งนี้พารามิเตอร์ที่สนใจก็คือ วิธีการในเสริมเหล็กเป็น shear connectors เพื่อยึดเฟอร์โรซีเมนต์และคานคอนกรีตเข้าไว้ด้วยกัน โดยวิธีแรกจะสอดเหล็กเดือย (dowels) ทะลุผ่านเอวของคาน และให้เหล็กดังกล่าวทำหน้าที่เป็นตัวถ่ายแรงเฉือน สำหรับวิธีที่สองจะใช้การคล้องเหล็กรูปตัวยูซึ่งร้อยทะลุเข้าสู่ปีกคาน หลังจากนั้นก็จะดัดปลายทั้งสองจนเหล็กดังกล่าวพันรอบหน้าตัด โดยผลการวิจัยพบว่าคานที่เสริมกำลังด้วยวิธีที่สองมีกำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้น และจากการเปรียบเทียบผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าวิธีแรกที่ผู้วิจัยเสนอเป็นวิธีที่เหมาะสมกว่าวิธีที่สอง

ในปี ค.ศ.2005 Rafeeqi, S. F. A. et al. [16] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยเฟอร์โรซีเมนต์ โดยในงานวิจัยนี้คณะผู้ทดสอบได้ทำการทดสอบคานทั้งหมด 5 ตัว โดยในชุด A เป็น คานควบคุม และ B1, B2 และ C1, C2 คือ คานที่เสริมกำลังด้วยเฟอร์โรซีเมนต์ โดยวิธีในการเสริมกำลังคือการฉาบเฟอร์โรซีเมนต์เป็นระยะๆเรียงเท่าๆกันตลอดช่วงแรงเฉือน โดยมีพารามิเตอร์ที่สนใจเพิ่มคือจำนวนชั้นของการฉาบเฟอร์โรซีเมนต์ ซึ่งใช้เท่ากับ 1 หรือ 2 ชั้น ทั้งนี้คานที่นำมาเสริมกำลังล้วนแล้วแต่เป็นคานที่เกิดรอยร้าวอยู่ก่อนแล้ว โดยในการทดลองให้น้ำหนักแก่คานจนคานเกิดรอยร้าวที่น้ำหนัก

70 kN หลังจากนั้นจึงค่อยทำการเสริมกำลัง โดยในแต่ละชุดของคานที่เสริมกำลังคือ ชุด B และชุด C จะมีวิธีการฉาบเฟอร์โรซีเมนต์ที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ในชุด B จะฉาบเฟอร์โรซีเมนต์เป็นระยะเท่ากันตลอดช่วง แรงเฉือนในขณะที่ชุด C จะฉาบเฟอร์โรซีเมนต์ยาวตลอดช่วงแรงเฉือน ดังแสดงในรูปที่ 10 (ก) ผลการทดสอบพบว่า คานที่เสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยเฟอร์โรซีเมนต์มีความเหนียวเพิ่มขึ้นและการฉาบเฟอร์โรซีเมนต์รอบหน้าตัดให้ผลการทดสอบที่ดีกว่าการฉาบเป็นระยะเท่ากันๆ และแม้ว่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของคานจะไม่เพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัด แต่ขนาดของรอยร้าวและระยะการโก่งตัวมีค่าลดลง

ทำการศึกษาและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมและการเสริมกำลังของคานปกติ คานสั้น และคานลึกลึคคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีต่างๆ ด้วยวิธีหุ้มด้วยเฟอร์โรซีเมนต์(Ferrocement) จากนักวิจัยทั่วโลกโดยจะเน้นการศึกษาของนักวิจัยระดับชั้นนำของโลกและประเทศ รวมทั้งศึกษารูปแบบการวิบัติขององค์อาคารในสภาวะต่างๆ

ในการปรับปรุงความสามารถในการรับแรงของ Deep beam ด้วยการใช้ FRP งานวิจัยในอดีตจึงยังไม่มี หรือมีความใกล้เคียงน้อยมาก โดยนักวิจัยมีบางท่านได้บอกว่า Deep Beam ไม่สามารถปรับปรุงได้ด้วยการใช้ Web reinf. แต่สามารถปรับปรุงได้ด้วยการเพิ่มความลึกของ Deep Beam แต่บางท่านก็บอกว่าการใช้ Web reinf. สามารถปรับปรุงได้ถึง 30%

งานวิจัยของ Islam, M.R. et.al. ได้ทำการศึกษาคานลึกลึคคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยการใช้ใยโพลิเมอร์(FRP) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบการยึดแผ่น FRP ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด เพื่อหาปริมาณของ FRP (size of grid bars) ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด และรูปแบบการจัดวางแผ่น FRP ที่จะให้ประสิทธิภาพมากที่สุด จากการศึกษาพบว่าทุกชิ้นงานวิบัติภายใต้แรงเฉือนซึ่งเกิดจากการหลุดล่อนของแผ่น FRP ในแง่ประเภทของ FRP พบว่าการเสริมกำลังไม่ว่าจะใช้แบบแผ่น(Wrap) หรือเป็นแถบ(Strip) หรือเป็นตาราง(Grid) สามารถจะใช้ให้ประสิทธิภาพขึ้นได้ ในแง่ของทิศทางการจัดวางตาราง FRP grid ไม่ว่า จะวางในลักษณะใดก็เพิ่มกำลังได้ โดยที่ตัวแปรที่จะมีผลมากคือปริมาณของเส้นใย FRP และการยึดติดกับโครงสร้างเดิม

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Zhang et. al. ที่ได้ศึกษาถึงทิศทางการจัดวางแผ่น CFRP (various orientations) และอัตราส่วนระยะเฉือนต่อความลึกของคาน(a/d) ที่อัตราส่วน 1.875 สำหรับน้ำหนักจุดเดียว และแบบสองจุดที่ระยะ $a/d = 1.25$ และประเภทของการใช้ CFRP Laminate กับ CFRP-wrap ซึ่งมีผลต่อการเสริมกำลังรับแรงเฉือนของคานลึกลึค จากการศึกษาพบว่าการใช้แถบ CFRP strip ที่เอียงทำมุม 45° จะรับน้ำหนักในแง่ของการเสริมกำลังรับแรงเฉือนได้มากกว่าการวางแผ่นที่เอียงทำมุม 90° สำหรับการวางในแนวนอน(0°) จะรับน้ำหนักเพิ่มได้อีกเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามทุกชิ้นงานที่ใช้ FRP เป็นแถบจะพบกับการหลุดลอกของใยโพลิเมอร์ก่อนการวิบัติจริง ส่วนการใช้แผ่น CFRP-wrap พันรอบแนวตั้งจะช่วยให้กำลังของโครงสร้างดีขึ้น และจะยิ่งมากหากมีการพันในแนวตั้งและแนวนอน สำหรับน้ำหนักที่กระทำแบบสองจุดที่อัตราส่วนระยะเฉือนต่อความลึกของคาน $a/d = 1.25$ นั้นคานจะรับน้ำหนักได้ดีกว่าที่ $a/d = 1.875$

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอัตราส่วนระยะเฉือนต่อความลึกของคาน(a/d) ของ Zhang et. al. ได้ทำการทดสอบคานที่รับน้ำหนักสองจุด แบบสมมาตรและไม่สมมาตร ทั้งน้ำหนักเท่ากันและไม่เท่ากัน จะพบว่า

กำลังคานที่รับน้ำหนักกระยะเนื่องต่อความลึกของคาน (a/d) สูง จะมีกำลังด้อยกว่าคานที่ค่า a/d น้อยกว่า และคานรับน้ำหนักไม่สมมาตร ฝั่งด้านที่รับแรงมากกว่าจะเป็นด้านที่วิบัติเด่นชัดเจน

3.2 ทำการออกแบบชิ้นทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีตำแหน่งรับน้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ กัน

ผู้วิจัยได้ออกแบบชิ้นทดสอบโดยแบ่งออกเป็น 3 ชุดหลักๆ โดยหน้าตัดคานทุกตัวอย่างมีขนาดเท่ากัน $200 \times 400 \times 2000$ มม. คือให้มีความกว้าง 200 มม. และมีความลึก 400 มม. และความยาว 2400 มม. มีวัตถุประสงค์ดังนี้

ชุดที่ 1 การทดสอบและซ่อมแซมคานปกติ วิบัติภายใต้แรงเฉือน (Shear failure) และแรงดัด (Flexural failure) จำนวน 6 ตัวอย่าง ผู้วิจัยได้ออกแบบชิ้นทดสอบโดยแบ่งออกเป็น 2 ชุดย่อย ชุดย่อยละ 3 ตัวอย่าง ชุดย่อยแรกเป็นการออกแบบการทดสอบให้คานวิบัติภายใต้แรงดัด และ ชุดย่อยที่สองเป็นการออกแบบการทดสอบให้คานวิบัติภายใต้แรงเฉือน ซึ่งถือเป็นรูปแบบที่อันตรายต่อโครงสร้างเป็นอย่างมาก

ชุดที่ 2 การทดสอบและซ่อมแซมคานสั้น วิบัติภายใต้แรงเฉือนร่วมอัด (Shear compression failure) และแรงเฉือนร่วมดัด (Shear tension failure) จำนวน 5 ตัวอย่าง และ

ชุดที่ 3 การทดสอบและซ่อมแซมคานลึก วิบัติภายใต้แรงเฉือนร่วมอัด (Shear compression failure) และแรงเฉือนร่วมดัด (Shear tension failure) จำนวน 5 ตัวอย่าง

ในแต่ละชุดทดสอบจะได้มีการอธิบายตามหลัง

3.3 การเลือกคุณสมบัติของวัสดุ

ในการทดลองนี้ได้ใช้คอนกรีตผสมเสร็จซึ่งมีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 เป็นส่วนผสมหลัก และใช้ขนาดของหิน $\frac{3}{4}$ นิ้ว กำลังประลัยที่ระบุ 210 กก./ซม^2 . และมอร์ตาร์ที่ใช้ในเฟอร์โรซีเมนต์มีอัตราส่วนซีเมนต์:ทราย เท่ากับ 1:2 กำลังประลัยที่ระบุ 450 กก./ซม^2 สำหรับเหล็กเสริม ใช้เหล็กเสริมหลักเป็นเหล็กข้ออ้อย (บ.ล.ส.) เกรด SD40 ส่วนเหล็กปลอก (stirrup) และเหล็กโครงเฟอร์โรซีเมนต์ตามยาวใช้เป็นเหล็กกรรม (บ.ส.ก.) เกรด SR24 โดยวัสดุต่างๆ ได้ถูกนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการในวันที่มีการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 1

ตาราง 1 คุณสมบัติของเหล็กขนาดต่างๆ

ขนาดของเหล็กเสริม	กำลังคลาก (กก./ซม^2)	กำลังประลัย (กก./ซม^2)
RB6 SR24	4,244	5,752
DB12 SD40	4,963	6,160
DB16 SD40	5,167	6,305

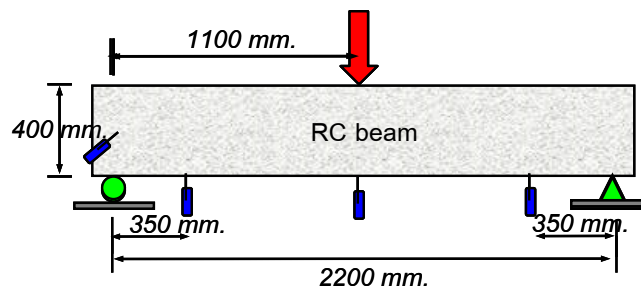
3.4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

หลังจากเทและบ่มคอนกรีตพร้อมติดตั้งอุปกรณ์วัดการยึดหดตัวของเหล็กเสริมแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ การทดสอบในห้องปฏิบัติการของสถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร(SIIT) โดยมีอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานทดสอบและวัดดังนี้

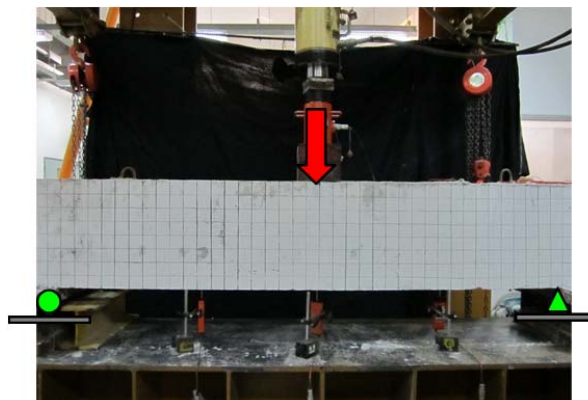
- (1) โครงสร้างเหล็ก(Steel frame) สำหรับติดตั้งเครื่องทดสอบ
- (2) เครื่องกดไฮดรอลิกส์(Hydraulic jack) ขนาด 100ตัน และ Load cell ขนาด 50ตัน ใช้เพื่อกดขึ้นทดสอบ
- (3) เครื่องมือวัดการเคลื่อนที่ (Displacement Transducer: LVDT) ใช้เพื่อวัดแฉกตัวของคานที่จุดต่าง ๆ โดยใน รูปที่xxx แสดงการติดตั้ง Displacement transducers ไว้ 3 ตำแหน่งได้คาน
- (4) เครื่องมือวัดความเครียด (Strain gauges) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดการยึด/หดตัวของเหล็กเสริม โดยเครื่องมือตัวนี้จะถูกติดตั้งบนเหล็ก ณ จุดที่มีความสำคัญ เช่น กลางคาน เหล็กเสริมตามขวาง เหล็กเดือย
- (5) เครื่องวัดขนาดรอยแตกคอนกรีต (Pi-gage) และมีรายละเอียดของการทดสอบมีดังต่อไปนี้

3.5 รูปร่างและลักษณะการทดสอบ

ชิ้นตัวอย่างทดสอบเป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียว ที่มีความยาว 2.40 ม. ชนิดของฐานรองรับ ด้านหนึ่งเป็นฐานหมุน (Hinge support) และอีกด้านหนึ่งเป็นฐานรองรับแบบเลื่อนได้ (Roller support) โดยมีการจัดวางให้กึ่งกลางของชิ้นทดสอบให้อยู่ห่างจากขอบฐานที่รองรับประมาณ 1.10 ม. ดังแสดงในรูปที่ 8-9



รูป 8 รูปร่างและลักษณะการทดสอบ



รูป 9 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบ

3.6 การให้น้ำหนักบรรทุก

ชั้นตัวอย่างคานคอนกรีตในแต่ละชุด แต่ละชั้นจะถูกให้น้ำหนักจนเกิดความเสียหาย(เลยช่วงการใช้งานปกติ) ด้วยขนาดแรง 60%, 80% และ 100% ของน้ำหนักประลัยสูงสุดของรูปแบบการวิบัติใดๆ หลังจากนั้นชั้นตัวอย่างคานแต่ละชั้นจะถูกซ่อมแซมและเสริมกำลังด้วยแผ่นเฟอร์ไรต์เมนต์ แล้วทำการให้น้ำหนักซ้ำอีกครั้งจนคานเกิดการวิบัติ

ลักษณะการให้น้ำหนัก – ในช่วงแรกก่อนเกิดการครากของเหล็กเสริม การให้น้ำหนักบรรทุกจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นทีละ 0.5 ตัน (Load control) จนถึงขนาดแรงที่กำหนดไว้ (60%, 80%, และ 100% ของน้ำหนักประลัยสูงสุด) หลังจากชั้นตัวอย่างเกิดการคราก การให้น้ำหนักจะถูกเปลี่ยนมาควบคุมโดยใช้การแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน (Displacement control) แทน จนกระทั่งคานวิบัติหรือเครื่องมือวัดไม่สามารถวัดค่าน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นได้ จึงหยุดการทดสอบ

4. ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผล

การประเมินสมรรถนะของโครงสร้างที่เสริมกำลังด้วยเฟอร์ไรต์เมนต์สามารถแสดงได้ด้วยรูปแบบการวิบัติ เส้นโค้งความสัมพันธ์ของน้ำหนักทดสอบและระยะแอ่นตัวของคาน รวมถึงความเครียดของเหล็กเสริมหลักและเหล็กปลอก โดยมีคำอธิบายดังนี้

4.1 เส้นโค้งความสัมพันธ์ของแรงและระยะเคลื่อนตัวสูงสุด (Envelope Load-Displacement)

เนื่องจากการทดสอบเป็นแบบกดทางเดียว ดังนั้นค่าแรงและการเคลื่อนที่สูงสุดในแต่ละครั้ง (Steps) จะถูกบันทึกด้วยเครื่อง Data logger เพื่อนำมาวาดเส้นโค้งความสัมพันธ์ของแรงและการเคลื่อนตัว โดยเส้นโค้งดังกล่าวจะอธิบายถึงรูปแบบการวิบัติ การครากของเหล็กเสริม อีกทั้งยังใช้เป็นตัววัดค่า ดัชนีความเหนียว (Ductility Index, μ) ของชั้นทดสอบอีกด้วย

4.2 รูปแบบการวิบัติ (Failure pattern)

จะพิจารณาจากรอยร้าวที่ปรากฏร่วมกับการพิจารณาความสัมพันธ์ของเส้นโค้งระหว่างแรงที่กระทำและการเคลื่อนที่กลางคาน (Load-Displacement relationship) โดยการวิบัติที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นทดสอบจะนำมาเปรียบเทียบกับชั้นทดสอบควบคุมในกลุ่มเดียวกัน

4.3 ความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมหลัก เหล็กปลอก และเหล็กเดือย

ความเครียดที่เกิดขึ้นในเนื้อเหล็กตำแหน่งต่างๆ เป็นดัชนีที่บ่งบอกระดับของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเมื่อโครงสร้างรับแรงกระทำระดับใดๆ ดัชนีนี้ทำให้เราสามารถทราบกลไกในการทำงานของโครงสร้างคอนกรีตได้

ชุดที่ 1 การทดสอบและซ่อมแซมคานปกติ วิบัติภายใต้แรงดัด (Flexural failure) และแรงเฉือน (Shear failure)

ตามกล่าวไว้ในวัตถุประสงค์ของโครงการข้อ 1 และ 2 ดังนี้ 1) เพื่อหาวิธีการเสริมกำลังในคานปกติ คอนกรีตเสริมเหล็ก ที่เสียหายภายใต้รูปแบบการวิบัติด้วยแรงดัด และการวิบัติด้วยแรงเฉือน ที่ระดับความรุนแรงต่างๆ กัน 2) ศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการซ่อมแซมและเสริมกำลังในคานปกติด้วยวิธีเฟอร์โรซีเมนต์ ได้แก่ ปริมาณเหล็กโครงตามยาว(Longitudinal skeletal steel) ปริมาณเหล็กโครงตามขวาง (Transverse skeletal steel) ระยะห่างการเจาะเย็บเหล็กเดือย(Shear dowel spacing) ตามระดับความเสียหายที่เกิดขึ้น

ผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการออกแบบและทดสอบตัวอย่าง ตามวัตถุประสงค์ที่กล่าวข้างต้นในชุดที่ 1 โดยผู้วิจัยได้แบ่งชั้นทดสอบออกเป็น 2 ชุดย่อย ชุดย่อยแรกเป็นการออกแบบการทดสอบให้คานวิบัติภายใต้แรงดัด (Flexural failure) และชุดที่สองเป็นการออกแบบการทดสอบให้คานวิบัติภายใต้แรงเฉือน(Shear failure) ซึ่งถือเป็นรูปแบบที่อันตรายต่อโครงสร้างเป็นอย่างมาก ชุดย่อยละ 3 ตัวอย่าง รวมทั้งสิ้น 6 ตัวอย่าง หน้าตัดคานทุกตัวอย่างมีขนาด 200x400x2400 มม. คือให้มีความกว้าง 200 มม. และมีความลึก 400 มม. และความยาว 2400 มม. โดยมีคุณสมบัติของวัสดุคอนกรีต และมอร์ตาร์ ณ.วันที่ทำการทดสอบดัง ตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางคุณสมบัติของคอนกรีต และมอร์ตาร์

ชั้นตัวอย่าง	กำลังอัดประลัยคอนกรีต (กก./ซม ²)	กำลังอัดประลัยมอร์ตาร์ (กก./ซม ²)
FB (1, 2, 3)	192.3 (22วัน)	
SB (1, 2, 3)	192.3 (22วัน)	
FB (1, 2, 3) F	224.3 (38วัน)	312.5 (5วัน)
SB (1, 2, 3) F	224.3 (38วัน)	312.5 (5วัน)

การสร้างชั้นทดสอบ และการซ่อมแซมชั้นทดสอบหลังเกิดความเสียหาย

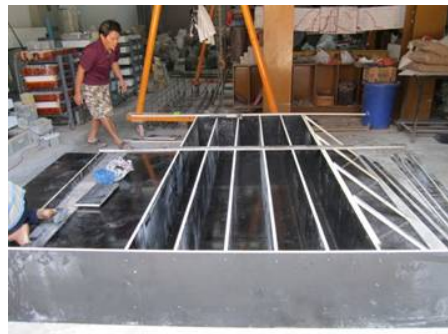
ในการสร้างชั้นตัวอย่างในห้องปฏิบัติการจะให้มีรายละเอียดทางโครงสร้าง และการจัดเรียงเหล็กเสริม ให้ใกล้เคียงกับคานจริงให้มากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 1.0.1 – 1.0.9



รูป 1.0.1 แสดงการจัดวางเหล็กของคานชุดแรกวิบัติภายใต้แรงดัด (FB0, FB1, FB2)



รูป 1.0.2 การจัดวางเหล็กของคานชุดสองวิบัติภายใต้แรงเฉือน (SB0, SB1, SB2)



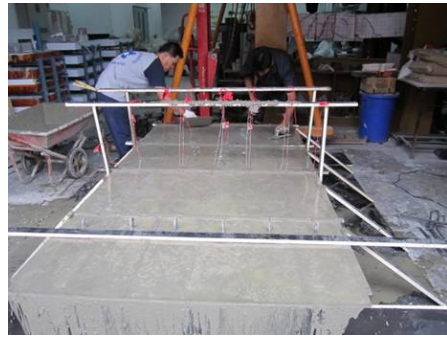
รูป 1.0.3 การเตรียมไม้แบบ(ไม้อัดดำขนาด 20 มม.) ให้ได้ขนาด 200x400x2400 มม.



รูป 1.0.4 ทำการติด Stain Gage ในตำแหน่งที่ต้องการ



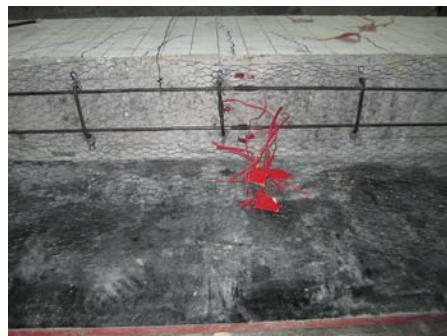
รูป 1.0.5 การเทคอนกรีตลงในแบบ และการตั้งผิวคอนกรีต



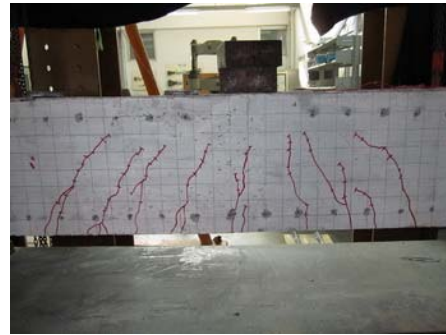
รูป 1.0.6 ทดสอบค่าการยุบตัว และเก็บลูกปูนเพื่อทดสอบ



รูป 1.0.7 การซ่อมแซมคานเมื่อคานวิบัติภายใต้แรงเฉือน โดยการเสริมแผ่นเฟอร์โรซีเมนต์ด้านข้างคาน



รูป 1.0.9 การซ่อมแซมคานเมื่อคานวิบัติภายใต้แรงดัด โดยการเสริมแผ่นเฟอร์โรซีเมนต์ที่ท้องคาน



รูป 1.0.9 การติดตั้งคานคอนกรีต และ อุปกรณ์ทดสอบ

ชุดย่อย 1.1 ศึกษาผลของระยะห่างของตัวยึดประสานภายใต้การวิบัติแรงดัด

คานชุดแรกได้ออกแบบให้จัดวางเหล็กเสริมข้ออ้อยหลังคานขนาด DB12 จำนวน 2 เส้น และวางเหล็กข้ออ้อยท้องคานขนาด DB16 จำนวน 2 เส้น และเสริมเหล็กปลอกขนาด RB6 ทุกระยะ 300 มม. ดังแสดงในรูปที่ 1.1 หลังจากคานรับน้ำหนักที่ระดับความรุนแรงต่างๆแล้ว คานจะถูกนำมาเสริมกำลังโดยใช้เทคนิคเฟอร์โรซีเมนต์

ในการซ่อมแซมเพื่อฟื้นคืนสภาพ การทดลองกลุ่มนี้เพื่อมุ่งต้องการศึกษาระยะห่างตัวยึดประสาน (Shear dowel spacing) ที่มีผลต่อการฟื้นคืนกำลังของคานที่เสียหาย ณ ระดับความรุนแรงต่างๆภายใต้แรงดัด โดยมีตัวแปรผันแปรและตัวแปรคงที่ดังนี้

ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาได้แก่	(1) ระยะห่างของตัวยึดเหนี่ยว(Shear dowel spacing) และ (2) ระดับความเสียหายของคานคอนกรีตเสริมเหล็กปกติ 60%, 80% และ 100%
ตัวแปรคงที่ของการทดลองในชุดนี้คือ	(1) จำนวนเหล็กโครงเฟอร์โรซีเมนต์ตามยาว = 2 เส้น (2) ขนาดเหล็กโครงเฟอร์โรซีเมนต์ = 6 มม. (3) ความหนาของเฟอร์โรซีเมนต์ (t_f) = 2 ซม. (4) จำนวนชั้นของลวดตาข่าย (n_f) = 2 ชั้น

ขนาดและหน้าตัดตัวอย่างชิ้นทดสอบ

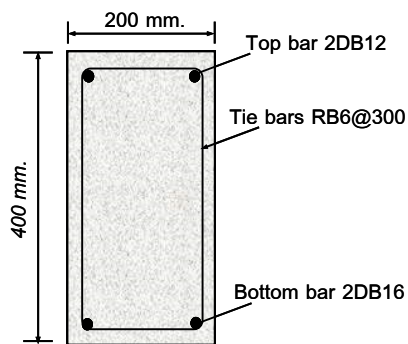
ชิ้นทดสอบ	ความกว้าง b (ซม.)	ความลึก h (ซม.)	ความหนาแผ่นเฟอร์โรซีเมนต์ t_f (ซม.)	พื้นที่หน้าตัด A_c (ซม. ²)	ความลึกประสิทธิภาพ, d (ซม.)
FB(1, 2, 3)	20.0	40.0	-	800	36.7
FB(1F, 2F, 3F)	20.0	40.0	2.0	800	36.7

รายละเอียดการเสริมเหล็กเฟอร์โรซีเมนต์

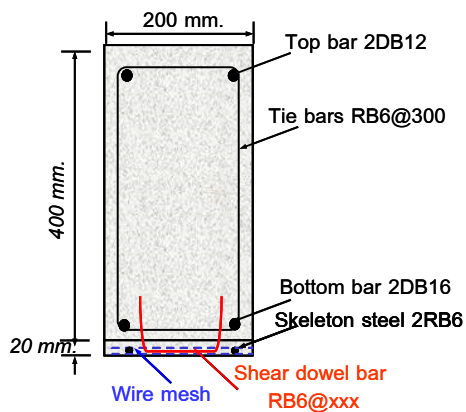
No	RC. specimen	Ferrocement	Mode of failure => Flexural mode
----	--------------	-------------	----------------------------------

	(Degree of damages)	specimen	Layer of wire mesh	Skeleton steel (Longitudinal)	Shear dowel Spacing (mm)
1	FB1 (60%)	FB1F	2	2RB6	RB6@250
2	FB2 (80%)	FB2F	2	2RB6	RB6@185
3	FB3 (100%)	FB3F	2	2RB6	RB6@150

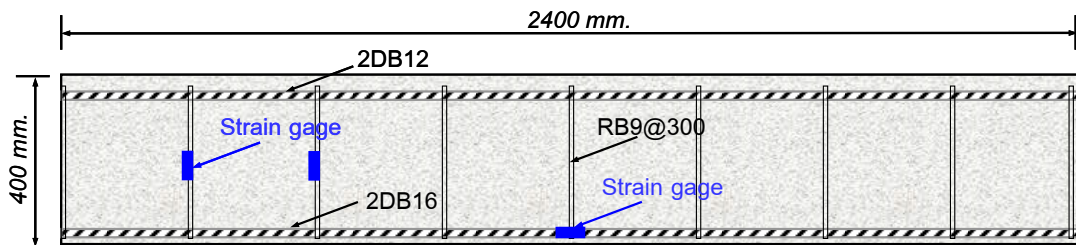
หมายเหตุ ชั้นทดสอบ FB0 ถือว่าเป็นตัวอย่างควบคุม(Control specimen)



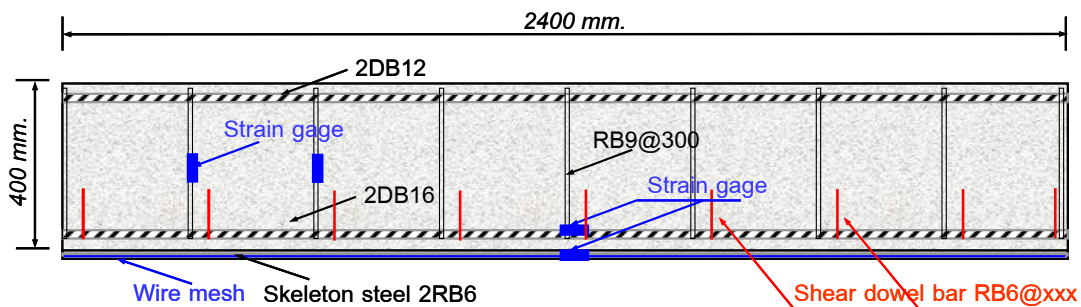
(ก) หน้าตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กชุดแรก
ซึ่งวิบัติภายใต้แรงดัด FB(1, 2, 3)



(ข) หน้าตัดของคานเฟอร์ไรซีเมนต์หลัง
ซ่อมแซม FB(1F, 2F, 3F)



(ค) รายละเอียดการเสริมเหล็กของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก



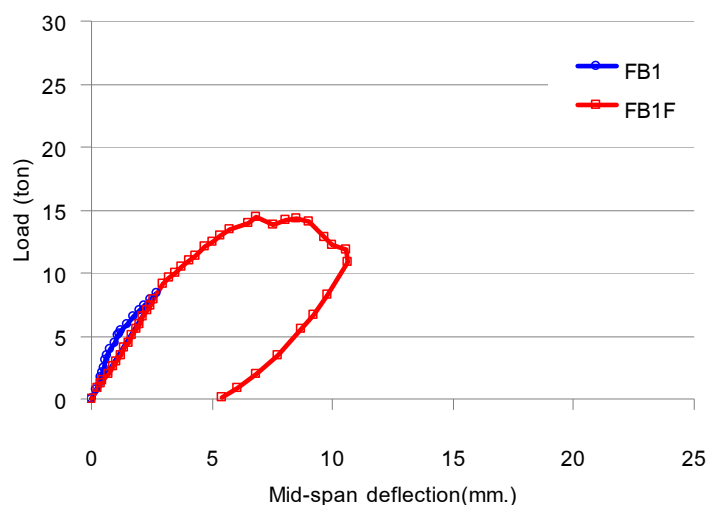
(ง) รายละเอียดการเสริมเหล็กของคานเฟอร์ไรซีเมนต์หลังซ่อมแซม

รูป 1.1 แสดงรายละเอียดการเสริมเหล็กและหน้าตัดคานซึ่งวิบัติภายใต้แรงดัด

ผลการทดสอบคานชุดย่อย 1.1 ซึ่งออกแบบให้เกิดการวิบัติภายใต้แรงดัด

เป็นการศึกษาระยะห่างตัวยึดประสาน(Shear dowel spacing) ที่มีผลต่อการฟื้นคืนกำลังของคานที่เสียหาย ณ ระดับความรุนแรงต่างๆภายใต้แรงดัด

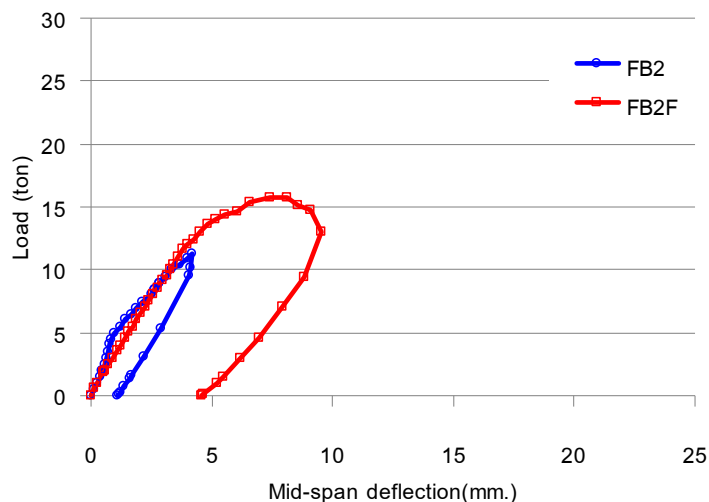
ก) ชั้นทดสอบ FB1F เป็นชั้นทดสอบที่ได้รับการซ่อมแซม หลังจากรับแรงกระทำจนเกิดความเสียหายระดับ 60%ของน้ำหนักสูงสุด (FB1=8.52ตัน) ภายหลังจากการซ่อมแซมโดยวิธีเฟอร์โรซีเมนต์ได้ใช้เหล็กเดือยระยะห่างเหล็กเดือยทุกๆ 250 ซม. ซึ่งเป็นระยะห่างตามการออกแบบตามระดับความเสียหายเหล็กเดือยจะทำหน้าที่ถ่ายเทแรงเฉือนเพื่อให้คานคอนกรีตกับแผ่นเฟอร์โรซีเมนต์สามารถรวมเป็นชิ้นงานเดียวกัน จากรูปที่ 1.1.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานพบว่า ภายหลังจากการซ่อมแซมคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ความแข็งแรงของโครงสร้างไม่ได้แข็งแรงเท่าเดิมดังจะสังเกตได้จากเส้นความชันที่มีค่าน้อยกว่าเดิม แต่กำลังของโครงสร้างนี้สามารถรับได้ 14.4 ตัน ซึ่งใกล้เคียงกับกำลังของโครงสร้างเดิม(14.2 ตัน) แสดงให้เห็นว่าการเสริมแผ่นเฟอร์โรซีเมนต์โดยใช้ระยะห่างเหล็กเดือย 250 มม. อาจจะยังไม่เพียงพอต่อการถ่ายแรงเฉือนเพื่อการเสริมกำลัง นอกจากนั้นพบว่ารูปแบบการวิบัติคานคอนกรีตเฟอร์โรซีเมนต์เป็นการวิบัติผสมระหว่างแรงดัด และแรงเฉือน ซึ่งเป็นผลมาจากคานคอนกรีตได้รับความบอบช้ำจากแตกร้าวในครั้งแรกทำให้กำลังคอนกรีตรับแรงเฉือนลดลง



รูป 1.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน

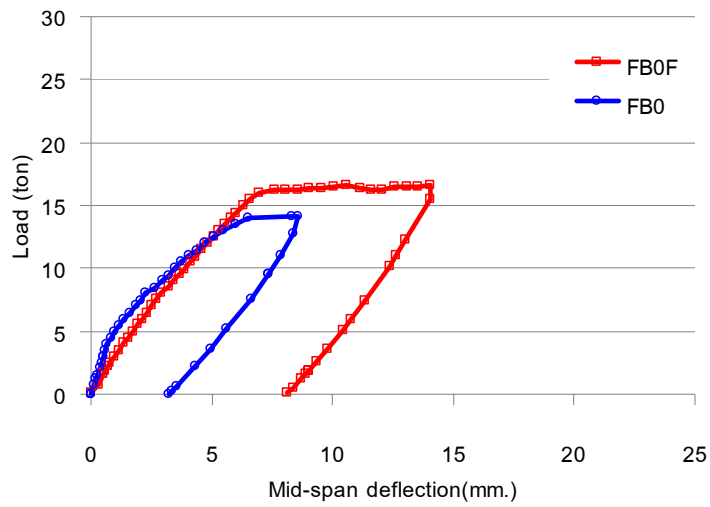
ข) ชั้นทดสอบ FB2F เป็นชั้นทดสอบที่ได้รับการซ่อมแซมหลังจากรับแรงกระทำจนเกิดความเสียหายที่ระดับ 80%ของน้ำหนักสูงสุด(FB2=11.3ตัน) จากนั้นจึงทำการซ่อมแซมโดยวิธีเฟอร์โรซีเมนต์โดยใช้เหล็กเดือยยึดประสานคอนกรีตใหม่กับคอนกรีตเก่า ด้วยระยะห่างเหล็กเดือยทุกๆ 185 มม. กำลังของคานเฟอร์โรซีเมนต์แสดงได้ในรูปที่ 1.1.2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานพบว่า ภายหลังจากการซ่อมแซมคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ความแข็งแรงของโครงสร้างไม่สามารถทำให้กลับมาเท่ากับโครงสร้างเดิม แต่กำลังของโครงสร้างนี้สามารถรับได้ 15.7 ตัน ซึ่งมีค่าสูงกว่ากำลังของ

โครงสร้างเดิมร้อยละ 10 (14.2 ตัน) แสดงให้เห็นว่าการเสริมแผ่นฟอร์โรซีเมนต์โดยใช้ระยะห่างเหล็กเดียว 185 มม.เพียงพอต่อการประสานให้เป็นชิ้นเดียวกัน อย่างไรก็ตามรูปแบบการวิบัติของคานฟอร์โรซีเมนต์นี้ได้เปลี่ยนรูปแบบจากการวิบัติแบบแรงดัดเป็นการวิบัติแบบผสมระหว่างแรงเฉือนกับแรงดัด ซึ่งมีสาเหตุมาจากคานที่แตกร้าเดิมทำให้ กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตลดน้อยลง

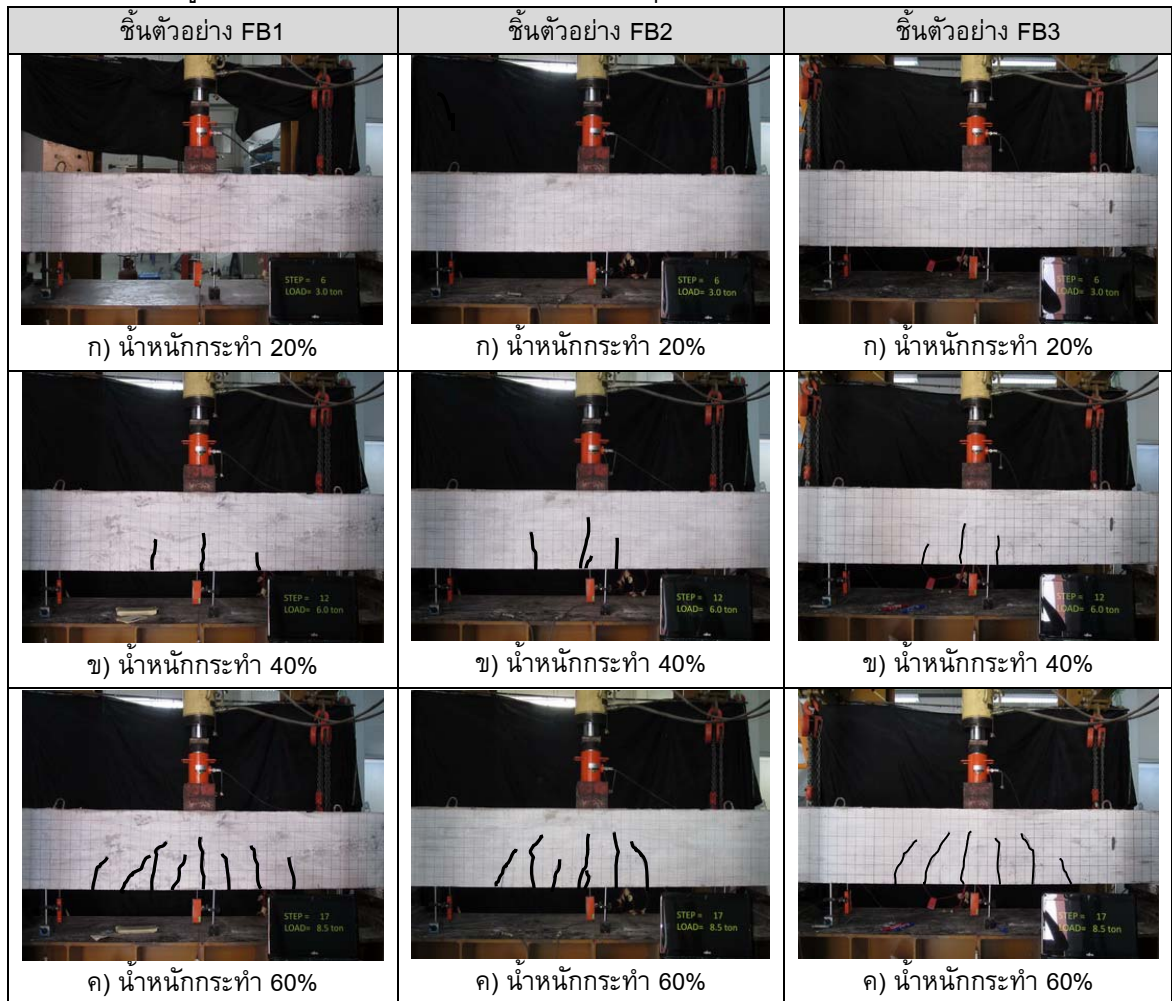


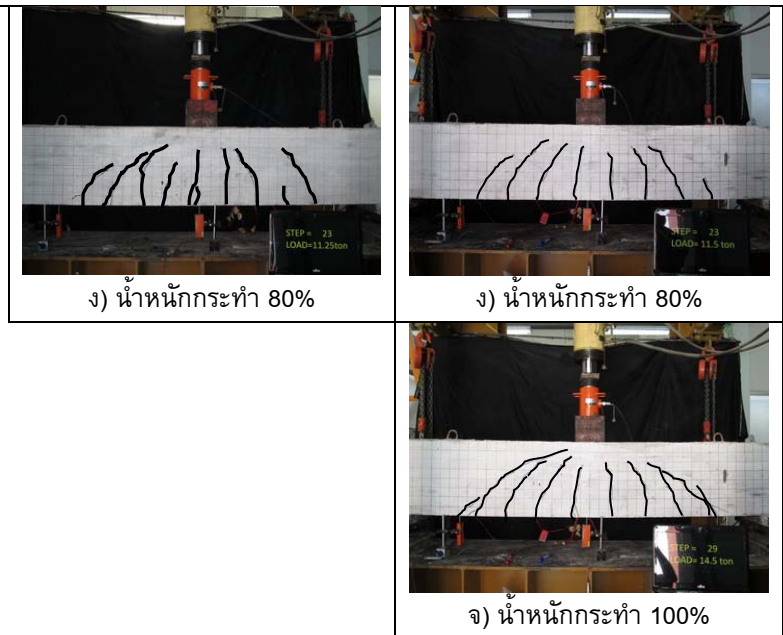
รูป 1.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน

ค) ชี้นทดสอบ FB3F เป็นคานคอนกรีตที่ได้รับการซ่อมแซมหลังจากถูกน้ำหนักกระทำจนเกิดความเสียหายระดับ 100%ของน้ำหนักสูงสุด(คานFB0 ซึ่งถือได้ว่าเป็นชี้นทดสอบควบคุมรับแรงได้ 14.2ตัน) จากนั้นจึงทำการซ่อมแซมโดยวิธีเฟอร์โรซีเมนต์โดยใช้เหล็กเดี่ยวยึดประสานคอนกรีตใหม่กับคอนกรีตเก่า ด้วยระยะห่างเหล็กเดี่ยวยกๆ 150 มม. กำลังของคานเฟอร์โรซีเมนต์แสดงได้ในรูปที่ 1.1.3 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานพบว่า ภายหลังจากการซ่อมแซมแม้ว่าความแข็งแรงของโครงสร้างจะไม่เท่าเดิม แต่กำลังสูงสุดที่รับได้มากขึ้นร้อยละ 17 (16.6 ตัน) ย่อมแสดงให้เห็นว่าการเสริมแผ่นฟอร์โรซีเมนต์โดยใช้ระยะห่างเหล็กเดียวที่เหมาะสมจะสามารถถ่ายแรงเฉือนได้อย่างเพียงพอ นอกจากนี้รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเดิมยังคงเป็นการวิบัติภายใต้แรงดัด เนื่องจากแผ่นฟอร์โรซีเมนต์สามารถสร้างแรงเฉือนต้านทานร่วมกับคานคอนกรีตได้



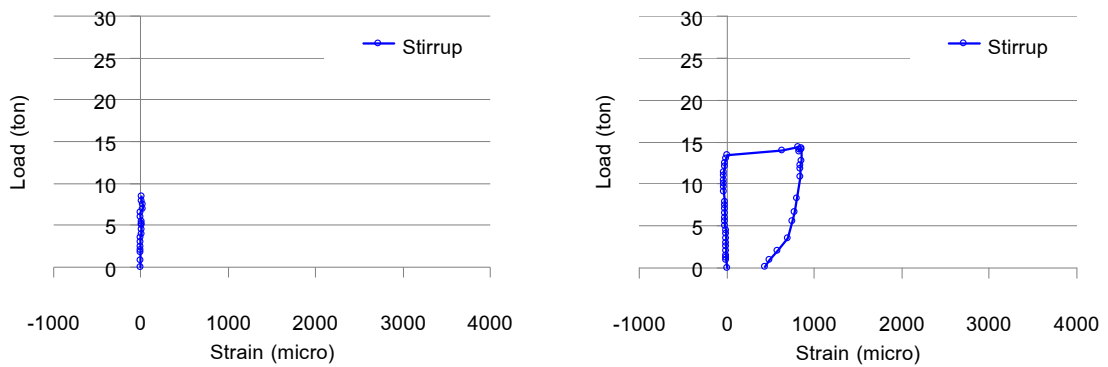
รูป 1.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน





รูป 1.1.4 ลักษณะการแตกร้าวของตัวอย่างชุดแรก FB1, FB2, FB3 ซึ่งวิบัติด้วยแรงดัด ที่ระดับความรุนแรงต่างกัน
 ความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมหลัก เหล็กปลอก และเหล็กเดือย ดัชนีที่บ่งบอกระดับของหน่วย
 แรงที่เกิดขึ้นเมื่อโครงสร้างรับแรงกระทำระดับใดๆ ดัชนีนี้ทำให้เราสามารถทราบกลไกในการทำงาน

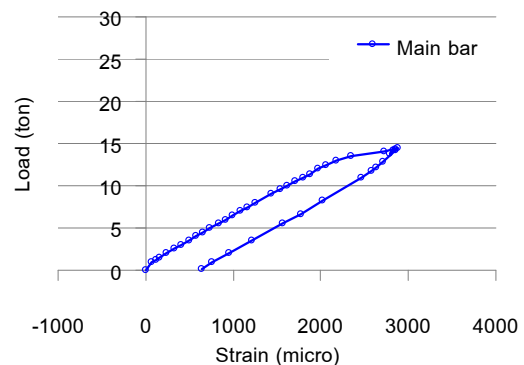
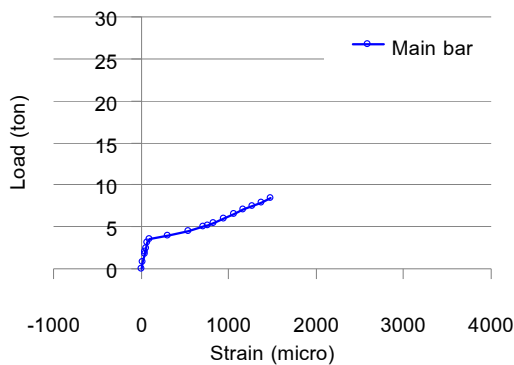
ก) ขั้นตอนทดสอบคานคอนกรีต(FB1) และคานเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(FB1F)



ก) คานคอนกรีตเสริมเหล็ก(FB1)

ข) คานเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(FB1F)

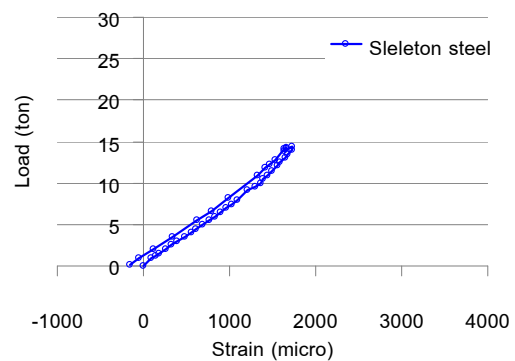
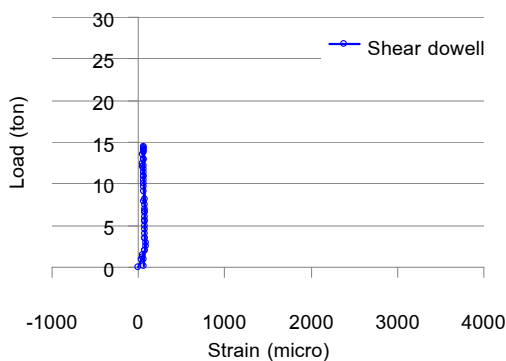
รูป 1.1.5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กปลอก



ก) คานคอนกรีตเสริมเหล็ก(FB1)

ข) คานเสริมกำลังเฟอร์ไรต์เมนต์(FB1F)

รูป 1.1.6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กเสริมหลัก

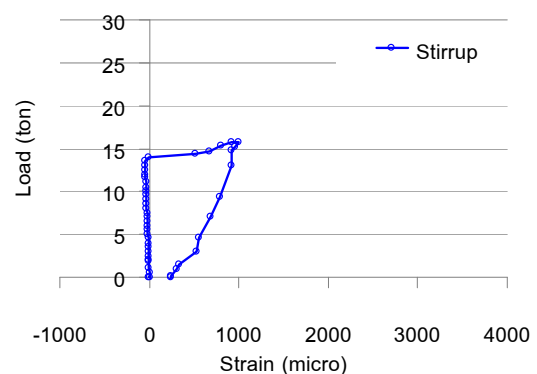
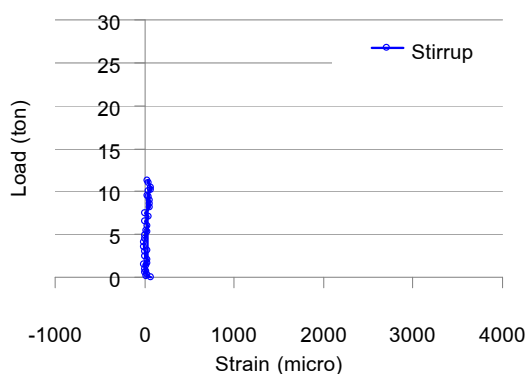


ก) คานเสริมกำลังเฟอร์ไรต์เมนต์(FB1F)

ข) คานเสริมกำลังเฟอร์ไรต์เมนต์(FB1F)

รูป 1.1.7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กยึดประสาน(Shear dowel) (ก) กับ ความเครียดในเหล็กโครงตามยาว(Skeleton steel)(ข)

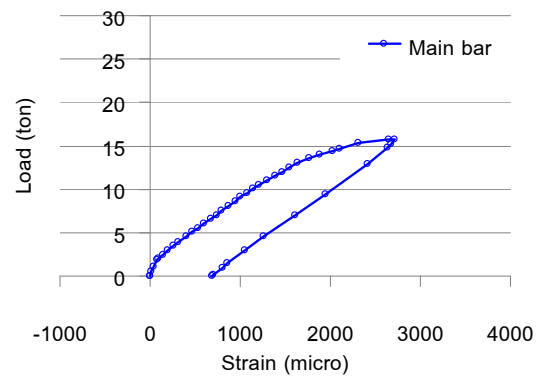
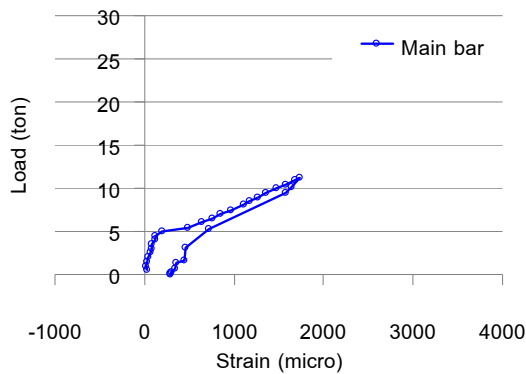
ข) ขั้วทดสอบคานคอนกรีต(FB2) และคานเสริมกำลังเฟอร์ไรต์เมนต์(FB2F)



ก) คานคอนกรีตเสริมเหล็ก(FB2)

ข) คานเสริมกำลังเฟอร์ไรต์เมนต์(FB2F)

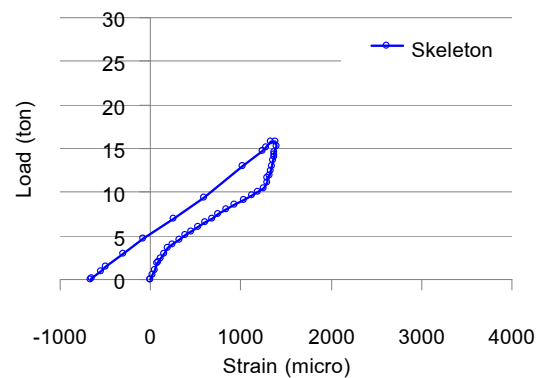
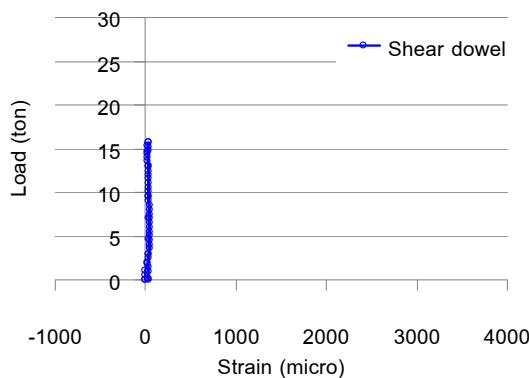
รูป 1.1.8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กปลอก



ก) ชั้นทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก(FB2)

ข) คานเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(FB2F)

รูป 1.1.9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กเสริมหลัก

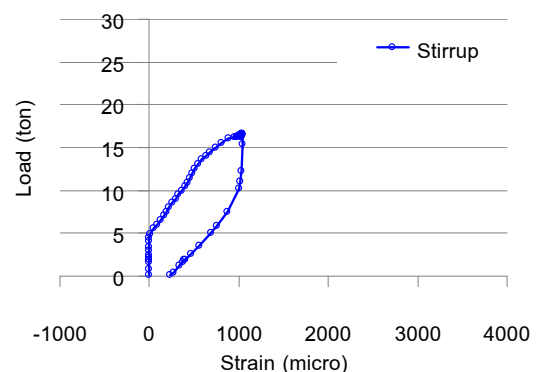
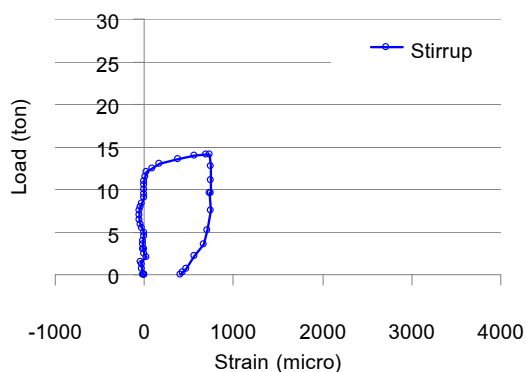


ก) คานคอนกรีตเสริมเหล็ก(FB2F)

ข) คานเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(FB2F)

รูป 1.1.10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กยึดประสาน(Shear dowel) (ก) กับ ความเครียดในเหล็กโครงตามยาว(Skeleton steel)(ข)

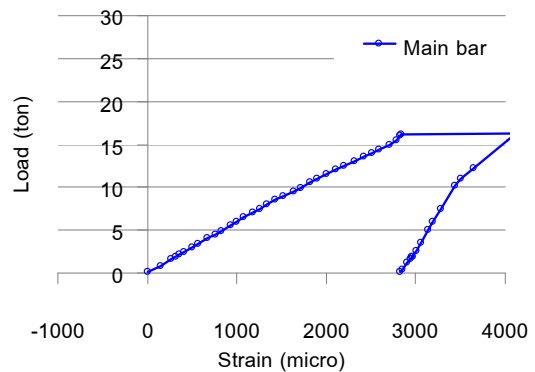
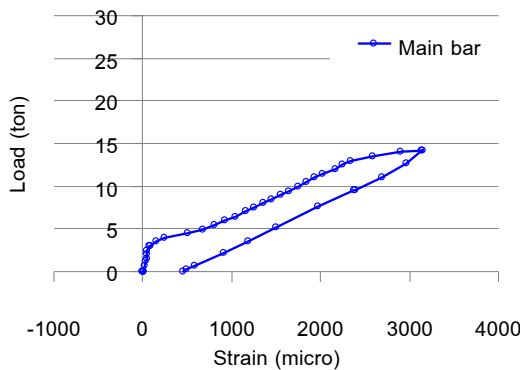
ค) ชั้นทดสอบคานคอนกรีต(FB3) และคานเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(FB3F)



ก) คานคอนกรีตเสริมเหล็ก(FB0)

ข) คานเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(FB0F)

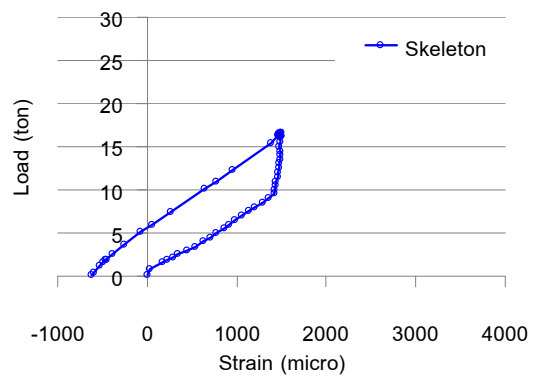
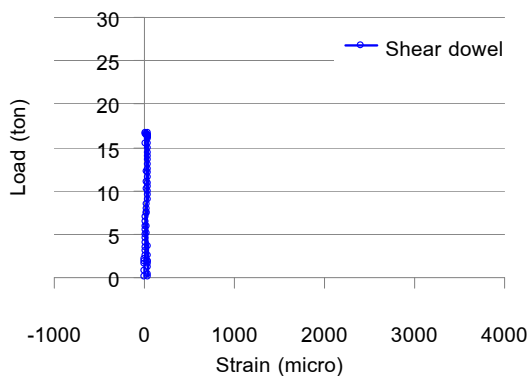
รูป 1.1.11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กปลอก



ก) ชั้นทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก(FB0)

ข) คานเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(FB0F)

รูป 1.1.12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กเสริมหลัก



ก) คานเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(FB0F)

ข) คานเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(FB0F)

รูป 1.1.12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กยึดประสาน(Shear dowel) (ก) กับความเครียดในเหล็กโครงตามยาว(Skeleton steel)(ข)

ชุดย่อยที่ 1.2 ศึกษาผลของระยะห่างของตัวยึดประสานภายใต้การวิบัติด้วยแรงเฉือน

การทดสอบชุดนี้ มีวัตถุประสงค์ศึกษาผลของระยะห่างตัวยึดประสาน(Shear dowel spacing) ที่มีผลต่อการฟื้นคืนกำลังของคานที่เสียหาย ณ ระดับความรุนแรงต่างๆภายใต้แรงเฉือน โดยการยึดประสานกับแถบเฟอโรซีเมนต์ ปัจจัยที่ทำให้คานประกอบประสบความสำเร็จสามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกับวัสดุได้คือการประสานกันของคอนกรีตเข้ากับแถบเฟอโรซีเมนต์บริเวณด้านข้างคานกรณีรับแรงเฉือน

ในคานชุดที่สองได้จัดวางเหล็กคล้ายคลึงกับคานชุดแรกเพียงแต่เพิ่มจำนวนเหล็กข้ออ้อยด้านล่าง DB16 อีกจำนวน 2 เส้นซึ่งคาดว่าจะวิบัติภายใต้แรงเฉือน คือได้จัดวางเหล็กข้ออ้อยด้านบนขนาด DB12 จำนวน 2 เส้น และวางเหล็กข้ออ้อยขนาดด้านล่าง DB16 จำนวน 4 เส้น และจัดเรียงเหล็กปลอกขนาด RB6 ทุกระยะ 300 มม. ดังแสดงในรูปที่ 2 หลังจากคานรับน้ำหนักที่ระดับความรุนแรงต่างๆแล้ว คานจะถูกนำมาเสริมกำลังโดยใช้วิธีเฟอโรซีเมนต์ โดยมีตัวแปรผันแปรและตัวแปรคงที่ดังนี้

ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา (1) ระยะห่างของเหล็กยึดประสาน(Shear dowel spacing) และ

ได้แก่	(2) ระดับความเสียหายของคานคอนกรีตเสริมเหล็กปกติ 60%, 80% และ 100%	
ตัวแปรคงที่ของการทดลองในชุดนี้คือ	(2) ขนาดเหล็กเดือย	= 6 มม.
	(3) ความหนาของเฟอโรโรซีเมนต์ (t_f)	= 2 ซม.
	(4) จำนวนชั้นของลวดตาข่าย (n_f)	= 2 ชั้น

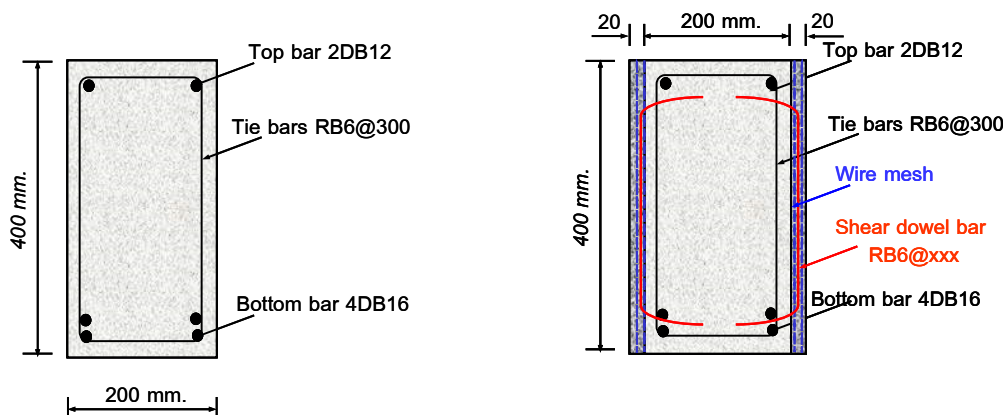
ขนาดและหน้าตัดตัวอย่างชิ้นทดสอบ

ชิ้นทดสอบ	ความกว้าง b (ซม.)	ความลึก h (ซม.)	ความหนาแผ่นเฟอโรโรซีเมนต์ t_f (ซม.)	พื้นที่หน้าตัด A_c (ซม. ²)	ความลึกประสิทธิภาพ d (ซม.)
SB(1, 2, 3)	20.0	40.0	-	800	34.9
SB(1F, 2F, 3F)	20.0	40.0	2.0	800	34.9

รายละเอียดการเสริมเหล็กเฟอโรโรซีเมนต์

No	RC. specimen (Degree of damages)	Ferrocement specimen	Mode of failure => Shear mode	
			Layer of wire mesh	Shear dowel Spacing (mm)
1	SB1 (60%)	SB1F	2	RB6@130
2	SB2 (80%)	SB2F	2	RB6@100
3	SB3 (100%)	SB3F	2	RB6@75

หมายเหตุ ชิ้นทดสอบ SB0 ถือว่าเป็นตัวอย่างควบคุม(Control specimen)

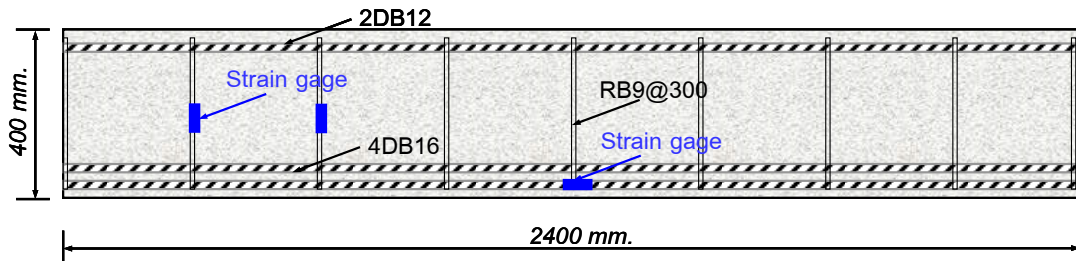


(ก) หน้าตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กชุดสอง

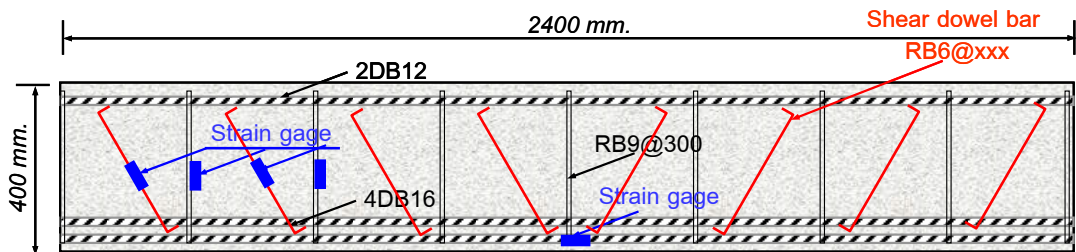
(ข) หน้าตัดของคานเฟอโรโรซีเมนต์หลัง

ซึ่งวิบัติภายใต้แรงเฉือน (SB1, SB2, SB3)

ซ่อมแซม (SB1F, SB2F, SB3F)



(ค) รายละเอียดการเสริมเหล็กของคานคอนกรีต (SB1, SB2, SB3)



(ง) รายละเอียดการเสริมเหล็กของคานเฟอร์ไรต์ซีเมนต์หลังซ่อมแซม (SB1F, SB2F, SB3F)

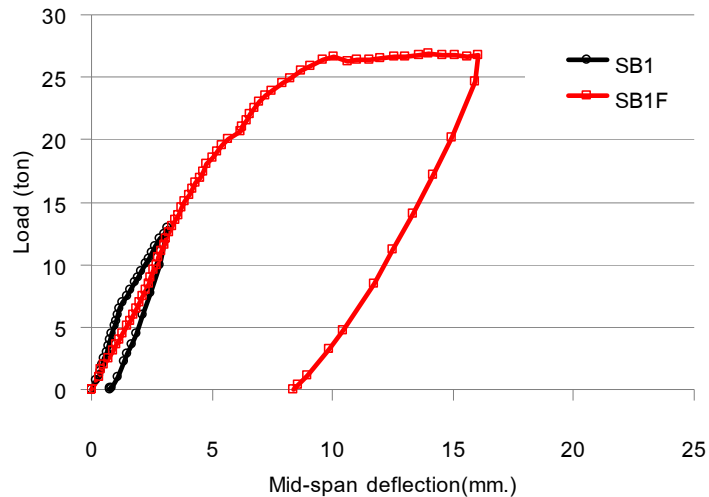
รูป 1.2.1 แสดงรายละเอียดการเสริมเหล็กและหน้าตัดคานคอนกรีตซึ่งวิบัติภายใต้แรงเฉือน

ผลการทดสอบคานชุดย่อยที่ 1.2 ซึ่งออกแบบให้เกิดการวิบัติภายใต้แรงเฉือน

เป็นการศึกษาระยะห่างตัวยึดประสาน (Shear dowel spacing) ที่มีผลต่อการฟื้นคืนกำลังของคานที่เสียหาย ณ ระดับความรุนแรงต่างๆ ภายใต้แรงเฉือน

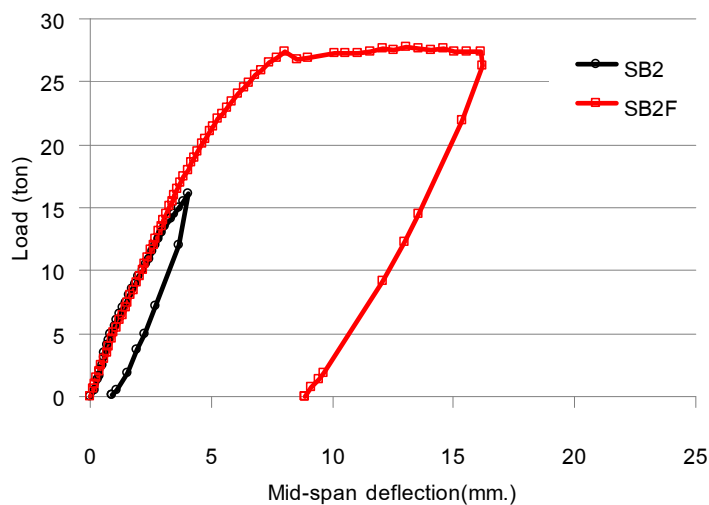
ก) ขั้นตอนทดสอบ SB1F เป็นขั้นตอนทดสอบที่ได้รับการซ่อมแซม หลังจากรับแรงกระทำจนเกิดความเสียหายระดับ 60% ของน้ำหนักสูงสุด (SB1) โดยใช้แผ่นเฟอร์ไรต์ซีเมนต์ประกบด้านข้างทั้งสองซึ่งได้ใช้เหล็กเดือยทำหน้าที่ยึดประสานคานคอนกรีตกับแผ่นเฟอร์ไรต์ซีเมนต์สามารถรวมกันเป็นเนื้อเดียวกัน นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ต้านทานแรงเฉือนโดยตรงอีก ในขั้นตอนนี้ได้ใช้ระยะห่างเหล็กเดือยทุกๆ 130 มม. ซึ่งเป็นการออกแบบตามระดับความเสียหาย จากรูปที่ 1.2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานพบว่า ภายหลังจากการซ่อมแซม ความแข็งแรงของโครงสร้างอาจไม่เท่าเดิมเนื่องจากคอนกรีตเกิดการแตกร้าว แต่กำลังของโครงสร้างนี้สามารถรับได้ถึง 26.7 ตัน ซึ่งมากกว่ากำลังของโครงสร้างเดิม (ที่ 19.9

ต้น)รูปที่ 1.2.2 แสดงให้เห็นว่าการเสริมแผ่นเฟอร์โรซีเมนต์โดยใช้ระยะห่างเหล็กเดียว 130 มม. เพียงพอต่อการต้านทานแรงเฉือนทำให้รูปแบบการวิบัติเปลี่ยนจากแรงเฉือนให้เป็นแรงดัด



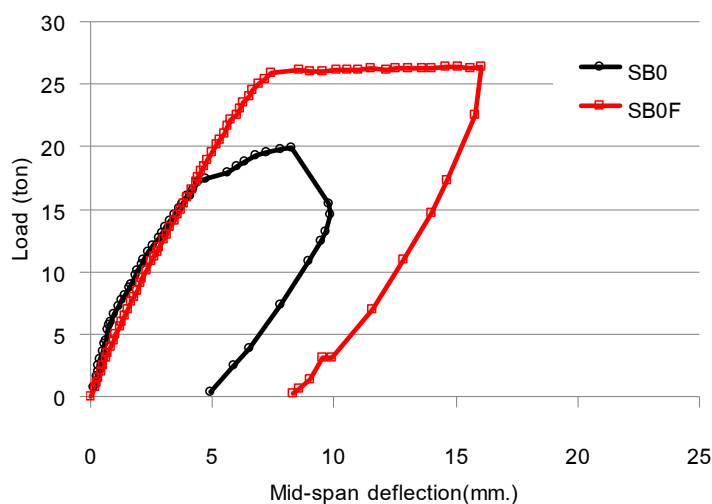
รูป 1.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน SB1

ข) ชิ้นทดสอบ SB2F เป็นชิ้นทดสอบที่ได้รับการซ่อมแซม หลังจากรับแรงกระทำจนเกิดความเสียหายระดับ 80%ของน้ำหนักสูงสุด(SB2) ในชิ้นทดสอบนี้ได้ใช้ระยะห่างเหล็กเดียวทุกๆ 100 มม. ซึ่งเป็นการออกแบบตามระดับความเสียหาย จากรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน(รูปที่ 1.2.3) พบว่ากำลังของโครงสร้างนี้สามารถรับได้ถึง 27.8 ตัน ซึ่งมากกว่ากำลังของโครงสร้างเดิมถึงร้อยละ 40 (ที่ 19.9 ตัน) และโครงสร้างหลังซ่อมแซมเกิดการคลาก แสดงให้เห็นว่าการเสริมแผ่นเฟอร์โรซีเมนต์ที่มีการฝังเหล็กเดียวยึดแน่น(ลึก 100 มม.) และระยะห่างเหล็กเดียวทุกๆ 100 มม.พอที่จะสามารถเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติเปลี่ยนจากแรงเฉือนเป็นแรงดัดได้

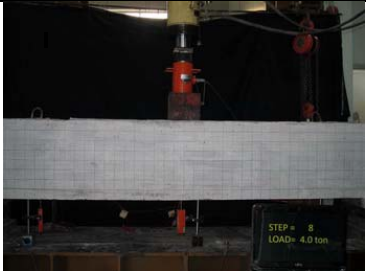
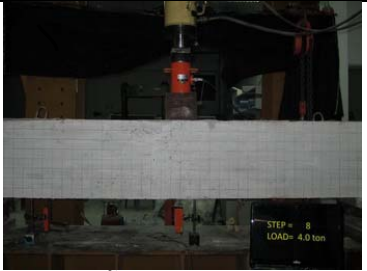
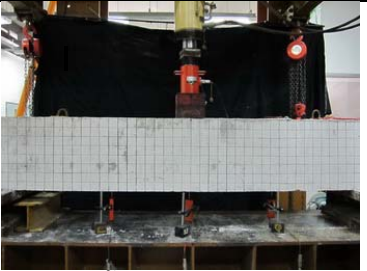


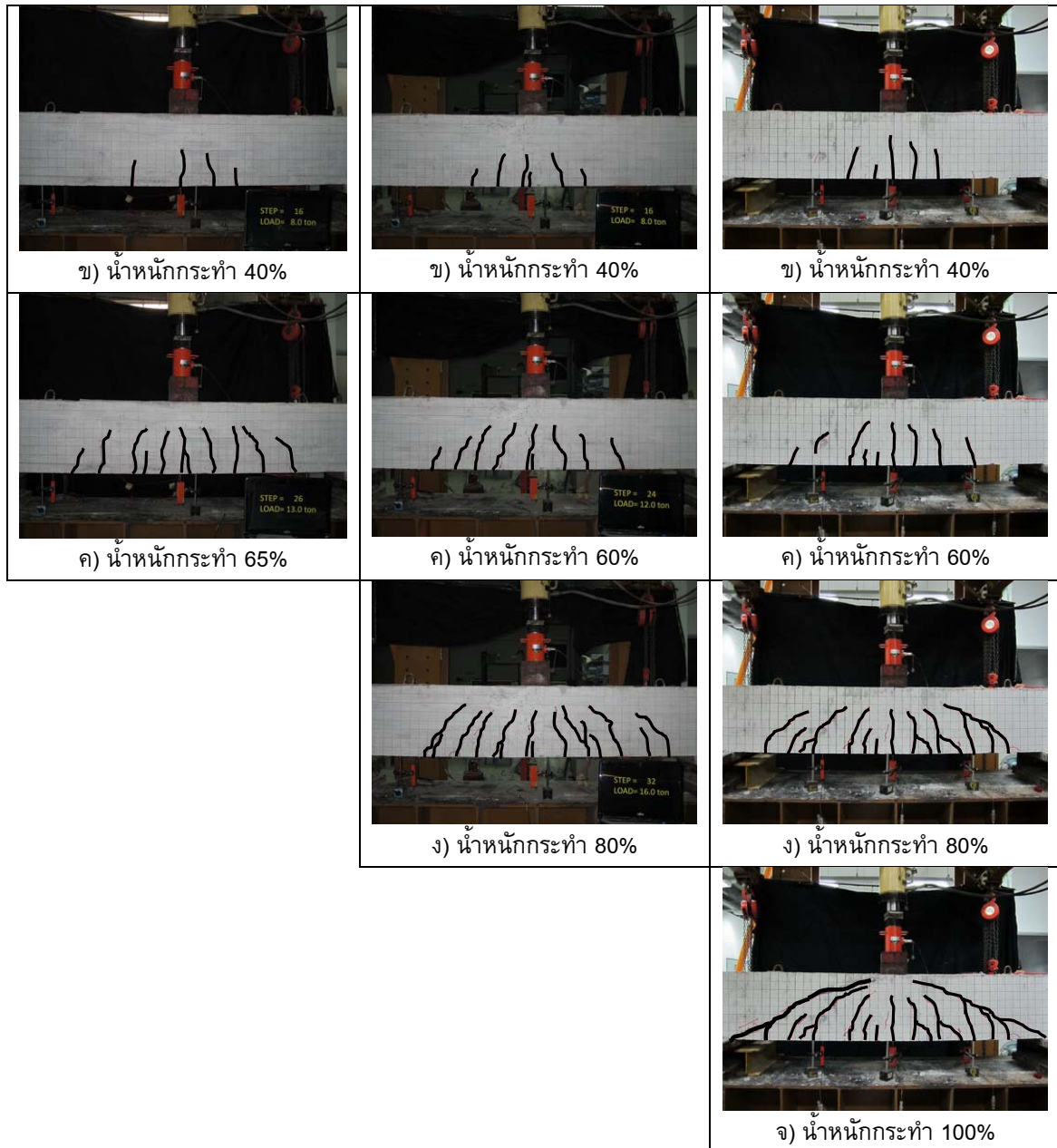
รูป 1.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน SB2

ค) ซันทดสอบ SB3F เป็นซันทดสอบที่ได้รับการซ่อมแซม หลังจากรับแรงกระทำจนเกิดความเสียหายระดับ 100%ของน้ำหนักสูงสุด(SB0) โดยใช้แผ่นเฟอร์ไรซีเมนต์ประกอบด้านข้างทั้งสองซึ่งใช้เหล็กเดียวทำหน้าที่ประสานคานคอนกรีตกับแผ่นเฟอร์ไรซีเมนต์ทุกระยะ 75 มม. ซึ่งเป็นการออกแบบเต็มความเสียหายโดยไม่ถือว่าคอนกรีตช่วยรับแรงเฉือนเลย จากรูปที่ 1.2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานพบว่า ภายหลังการซ่อมแซมโดยใช้ปูน(non-shrink grout) เทหยอดเพื่อปิดรอยร้าวเฉือนที่มีขนาดใหญ่ พบว่าความแข็งแรงของโครงสร้างสามารถกลับมาเท่าของเดิมเนื่องจากสามารถปิดรอยร้าวได้สนิท จึงฟื้นความแข็งแรงได้เหมือนเดิม และกำลังของโครงสร้างนี้สามารถรับได้ถึง 26.4 ตัน เพิ่มขึ้นร้อยละ 32.7 ซึ่งเป็นกำลังที่ทำให้คานเกิดการคลาก โครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงสามารถเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติได้



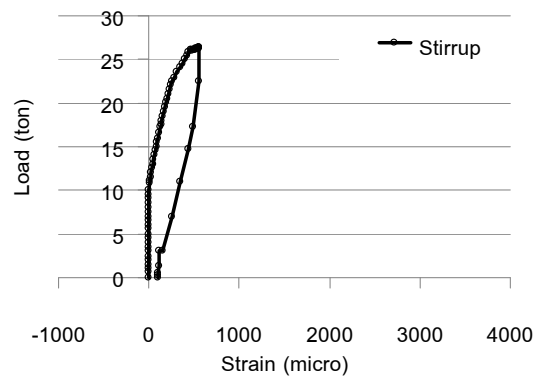
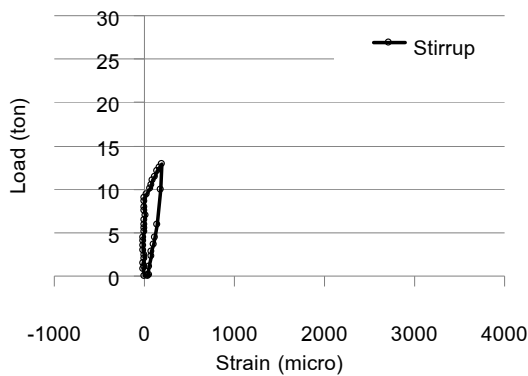
รูป 1.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน SB3

ซันตัวอย่าง SB1	ซันตัวอย่าง SB2	ซันตัวอย่าง SB3
		
ก) น้ำหนักกระทำ 20%	ก) น้ำหนักกระทำ 20%	ก) น้ำหนักกระทำ 20%



รูป 1.2.5 รอยแตกร้าวของตัวอย่าง SB1, SB2, SB3 ซึ่งวิบัติด้วยแรงเฉือนที่ระดับความรุนแรงต่างกัน ความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมหลัก เหล็กปลอก และเหล็กเดือย ดัชนีที่บ่งบอกระดับของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเมื่อโครงสร้างรับแรงกระทำระดับใดๆ

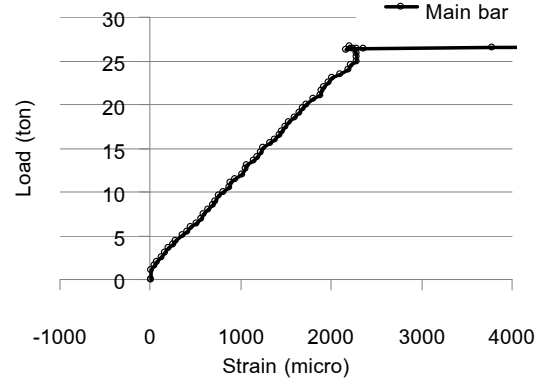
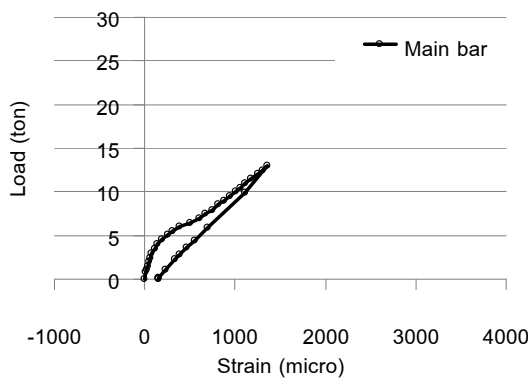
ก) ขัณฑสอบคานคอนกรีต(SB1) และคานเสริมกำลังเฟอร์โรซีเมนต์(SB1F)



ก) คานคอนกรีตเสริมเหล็ก(SB1)

ข) คานเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(SB1F)

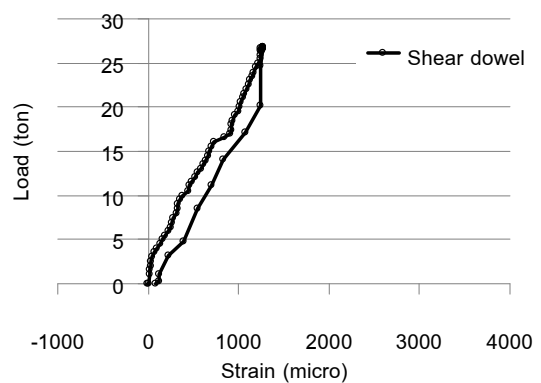
รูป 1.2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กปลอก



ก) ชิ้นทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก(SB1)

ข) คานเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(SB1F)

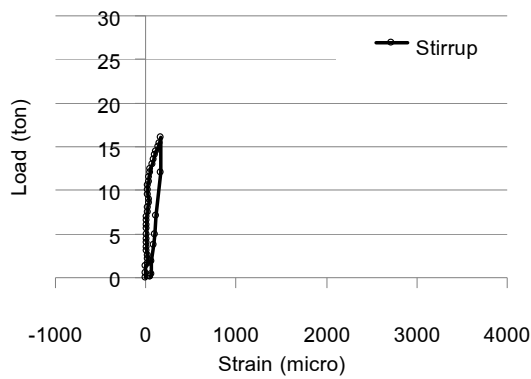
รูป 1.2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กเสริมหลัก



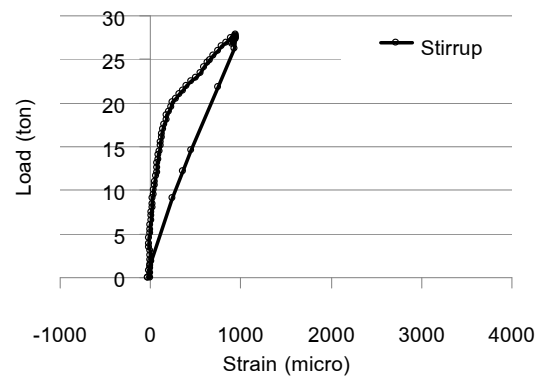
ข) คานเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(SB1F)

รูป 1.2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กเสริมหลัก

ข) ชิ้นทดสอบคานคอนกรีต(SB2) และคานเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(SB2F)

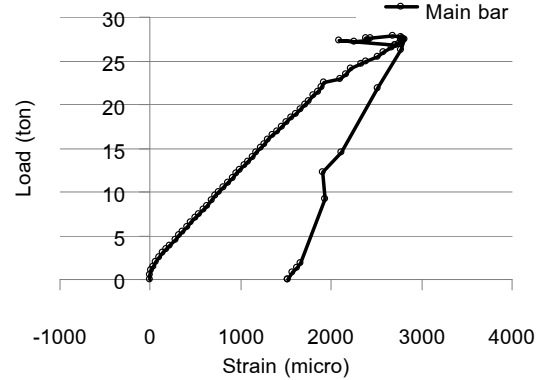
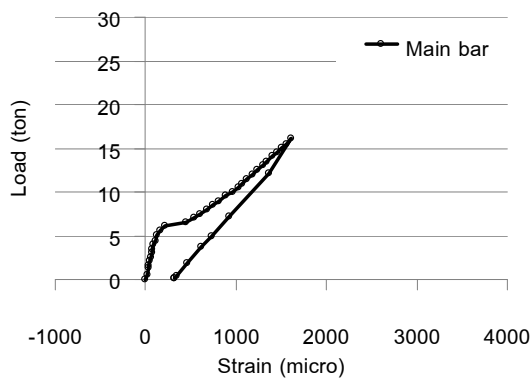


ก) คานคอนกรีตเสริมเหล็ก(SB2)



ข) คานเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(SB2F)

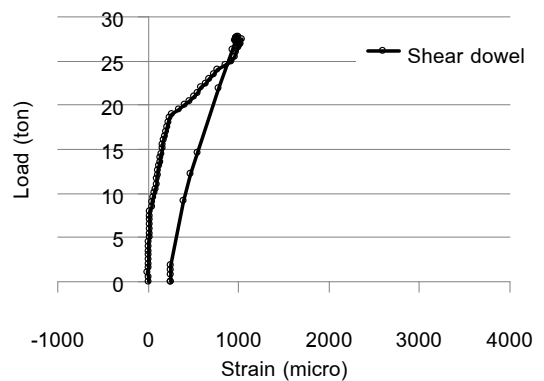
รูป 1.2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กปลอก



ก) ชั้นทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก(SB2)

ข) คานเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(SB2F)

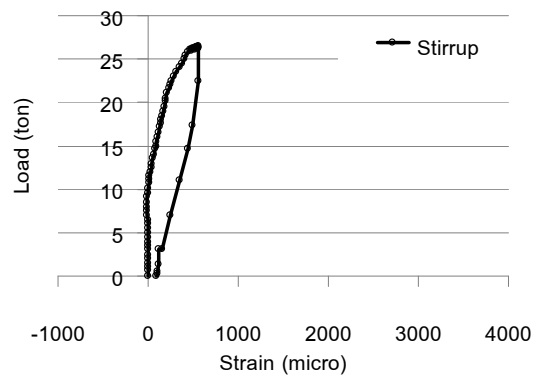
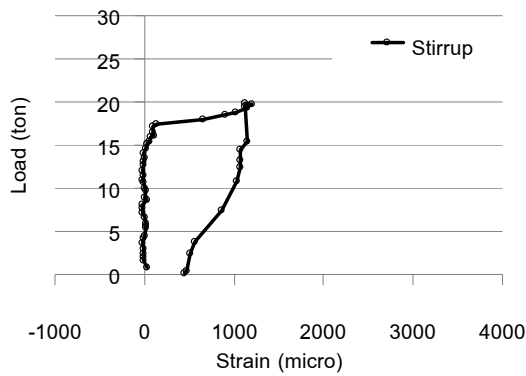
รูป 1.2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กเสริมหลัก



ข) คานเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(SB1F)

รูป 1.2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กเสริมหลัก

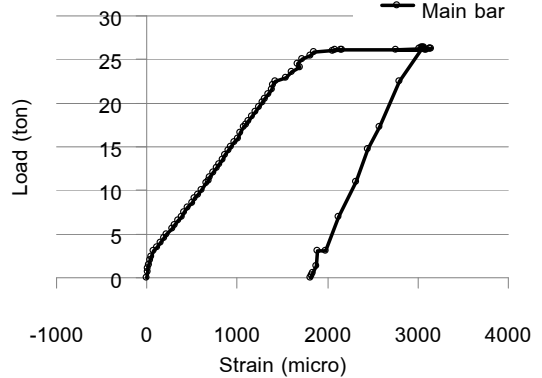
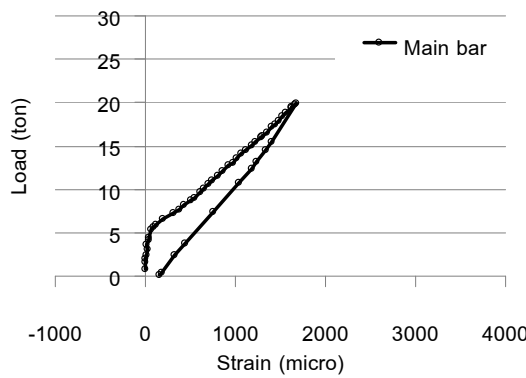
ค) ชั้นทดสอบคานคอนกรีต(SB3) และคานเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(SB3F)



ก) คานคอนกรีตเสริมเหล็ก(SB0)

ข) คานเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(SB0F)

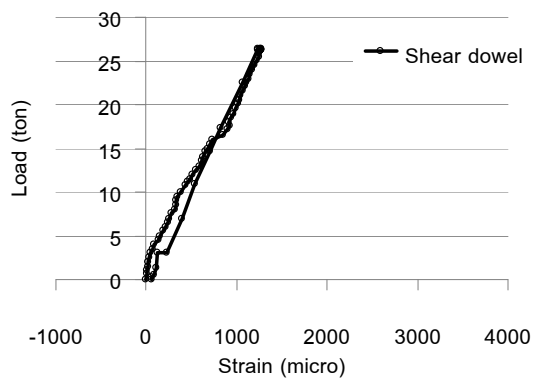
รูป 1.2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กปลอก



ก) ชิ้นทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก(SB0)

ข) คานเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(SB0F)

รูป 1.2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กเสริมหลัก



ข) คานเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(SB0F)

รูป 1.2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กเสริมหลัก

ตาราง 1.1 สรุปน้ำหนักสูงสุดและรูปแบบการวิบัติก่อนและหลังเสริมเฟอโรซีเมนต์

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนักบรรทุกทุก (ตัน) (%ระดับความเสียหาย)	รูปแบบการวิบัติที่ออกแบบ	ขั้นตอนทดสอบ หลังซ่อมแซม	น้ำหนักสูงสุด (ตัน)	รูปแบบการวิบัติ
FB1	8.46 (60%)	ภายใต้แรงดัด	FB1F	14.4	แรงดัด
FB2	11.3 (80%)	ภายใต้แรงดัด	FB2F	15.7	แรงดัด
FB0	14.2 (100%)	ภายใต้แรงดัด	FB0F	16.6	แรงดัด
SB1	13.0 (65%)	ภายใต้แรงเฉือน	SB1F	26.7	แรงดัด
SB2	16.1 (80%)	ภายใต้แรงเฉือน	SB2F	27.8	แรงดัด
SB0	19.9 (100%)	ภายใต้แรงเฉือน	SB0F	26.4	แรงดัด

จากการทดสอบ ชุดชิ้นงานที่ออกแบบวิบัติภายใต้แรงดัด(FB) ซึ่งมีกำลังรับแรงดัด 14.2 ตัน ภายหลังจากการซ่อมแซมพบว่าทุกชิ้นงาน สามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้น และการวิบัติยังเป็นการวิบัติภายใต้แรงดัด

ส่วนชุดชิ้นงานที่ออกแบบให้วิบัติภายใต้แรงเฉือน(SB) โดยมีกำลังรับแรงเฉือน 19.9 ตัน และภายหลังจากการซ่อมแซมสามารถรับกำลังได้มากขึ้น 26.4 ถึง 27.8 ตัน ภายหลังจากการซ่อมแซมพบว่าทุกชิ้นงาน สามารถช่วยให้กำลังของโครงสร้างดีขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติแบบเปราะ(แรงเฉือน) เป็นแบบเหนียว(แรงดัด)

5. สรุปผลการทดสอบและซ่อมแซมคานปกติคอนกรีตเสริมเหล็กวิบัติภายใต้แรงดัด (Flexural failure) และแรงเฉือน (Shear failure)

การทดสอบในครั้งนี้เพื่อฟื้นคืนกำลังของคานที่เสียหาย ณ ระดับความรุนแรงต่างๆ ภายใต้แรงดัดและแรงเฉือน โดยอาศัยเทคนิคการการยึดประสานแผ่นเฟอร์ไรซ์เมนต์ ส่วนปัจจัยที่ทำให้คานซ่อมแซมประสบความสำเร็จในการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกับวัสดุ ได้คือการประสานกันของคอนกรีตเก่ากับแถบเฟอร์ไรซ์เมนต์

การทดสอบของตัวอย่างในชุดที่วิบัติอันเนื่องจากแรงดัด ขั้นตอนทดสอบทั้ง 3 ได้รับแรงกระทำก่อนหน้า ด้วยความรุนแรงระดับ 60%, 80% และ 100% ภายหลังจากการซ่อมแซมด้วยการเสริมแผ่นเฟอร์ไรซ์เมนต์ โดยใช้เหล็กยึดประสานระยะห่างทุกๆ 250, 185 และ 150 มม. พบว่าการเสริมเหล็กยึดประสานตามแรงเฉือน ไหล่ที่เกิดขึ้นจริง จะสามารถรับน้ำหนักได้ไม่น้อยกว่าเดิมและสามารถเพิ่มได้ร้อยละ 16.9 และรูปแบบการวิบัติ ยังคงเป็นการวิบัติภายใต้แรงดัด

การทดสอบของตัวอย่างในชุดที่วิบัติอันเนื่องจากแรงเฉือน ทั้ง 3 ขั้นตอนทดสอบประสบความสำเร็จในการซ่อมแซม ที่ระดับความรุนแรงต่างๆ โดยคานที่ได้รับแรงกระทำก่อนหน้า 60%, 80% และ 100% ใช้เหล็กยึดประสานระยะห่างทุกๆ 130, 100, และ 75 มม. ตามลำดับจะสามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มขึ้นอีกร้อยละประมาณร้อยละ 32.7 ถึง 39.7 และสามารถเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติของโครงสร้างได้ จากการวิบัติแบบเปราะ เป็นการวิบัติแบบเหนียว

ชุดที่ 2 การทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ กัน และคานมีปริมาณเหล็กต่างกัน 2 เทา

ในการพิจารณาการบรรทุกของของในอาคารที่มากมาย เช่น คานย่อยรับน้ำหนักมาฝากกับคานหลัก กำแพง คอนกรีตเสริมเหล็กที่รับน้ำหนักจากด้านบน หรือผนังถึงคอนกรีตเสริมเหล็กและยั้งที่เก็บของเหลวซึ่ง น้ำหนักจะไปรวมกันที่ท้องคานหรือด้านล่างของผนัง องค์อาคารที่มารับน้ำหนักดังกล่าว นั้นจะต้องเป็นองค์อาคารที่มีความลึกมาก ๆ ซึ่งโดยปกติแล้ว หากพิจารณาการออกแบบหน้าตัดของคานคานจะออกแบบให้หน้าตัดคานมีสัดส่วนที่เหมาะสม คือ ความยาวคานต่อความลึกมากกว่า 5 เทา อย่างไรก็ตาม หากคานนั้นต้องนำมารับแรงกระทำภายนอกที่มากเกินไป วิศวกรผู้ออกแบบจำต้องออกแบบใส่เหล็กเสริมรับแรงดัดมากขึ้น นำมาสู่ความเป็นไปได้ที่ปริมาณเหล็กจะทำให้หน้าตัดคานอยู่ในสภาวะวิบัติภายใต้แรงอัดซึ่งไม่เป็นที่ต้องการ เมื่อเป็นเช่นนั้นวิศวกรจำเป็นต้องให้คานมีขนาดหน้าขึ้น หรือลึกขึ้นให้เพียงพอต่อการรับแรงดัดได้ และแรงเฉือนได้มากขึ้น

องค์อาคารโดยเฉพาะคานที่กล่าวมานี้จะมีพฤติกรรมการรับแรงไม่เหมือนคานปกติ กล่าวคือคานที่มีลักษณะลึกมาก ๆ แรงกระทำจากภายนอกจะวิ่งลงสู่จุดรองรับโดยตรง ไม่เหมือนคานปกติที่อาศัยคอนกรีตและเหล็กเสริมเป็นตัวถ่ายแรงมายังจุดรองรับ ซึ่งมีทั้งข้อดีและข้อเสีย กล่าวคือทำให้คานที่ค่อนข้างลึกนั้นรับแรงได้มากขึ้น เป็นผลจากการถ่ายน้ำหนักลงสู่จุดรองรับโดยตรง อย่างไรก็ตามข้อเสียที่ต้องพึงคือการยืดเหนียวที่ปลายของเหล็กเสริม เนื่องจากในความเป็นคานลึก (Deep Beam) แรงดึงในเหล็กล่างตลอดทั้งเส้นจะได้รับเท่ากันตลอดเส้น ตามหลักการของ Strut-and-Tie นอกจากนี้ปริมาณเหล็กปลอกอาจจะมีผลต่อการรับแรงเฉือนไม่เด่นเท่ากับกรณีของคานปกติ เนื่องจากแรงจะอยู่ในรูป Strut-and-Tie

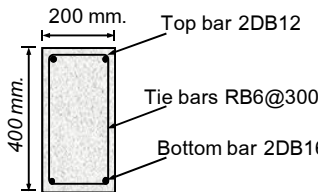
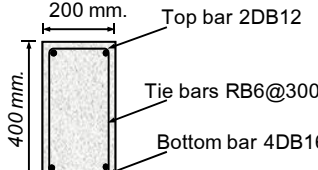
แม้ว่าคานลึกจะสามารถรับแรงได้มากขึ้น แต่วิศวกรอาจได้ความรู้ในเรื่องนี้ไม่มาก และการนำโครงสร้างไปใช้งานผิดประเภทก็ทำให้เกิดการเสียหาย นำมาซึ่งการออกแบบเพื่อแก้ไขและหาวิธีการซ่อมแซม งานวิจัยในอดีตนั้นบางท่านได้สรุปว่าคานที่ค่อนข้างลึกไม่สามารถปรับปรุงได้ด้วยการใช้เหล็กปลอก แต่ให้ปรับปรุงด้วยการเพิ่มความลึกของคานแทน อย่างไรก็ตามบางผู้วิจัยได้ชี้ให้เห็นว่าการใช้ Web reinf. สามารถปรับปรุงกำลังได้ถึง 30% บางงานวิจัยก็ได้ใช้แผ่นใยโพลีเมอร์ FRP มาช่วยในการปรับปรุงความสามารถในการรับแรง ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วัสดุ *เฟอร์โรซีเมนต์ (Ferrocement)* เป็นวัสดุซ่อมแซมที่มีความเหมาะสม เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาง่ายในท้องถิ่น มีส่วนประกอบหลัก คือ ปูนซีเมนต์ (Cement Portland) น้ำ (Water) ลวดตาข่าย (Wire meshes) และเหล็กโครง (skeleton steel) อีกทั้งขั้นตอนในการเสริมกำลังก็ไม่ยุ่งยาก ช่างฝีมือในท้องถิ่นสามารถประยุกต์ใช้โดยไม่ต้องอาศัยความรู้พิเศษใดๆ

อย่างไรก็ดี การเลือกใช้วัสดุเฟอร์โรซีเมนต์กับคานทุกขนาดจำเป็นต้องได้รับการทดสอบ เพื่อจะได้นำไปแนะนำวิศวกรผู้ออกแบบ วิศวกรสนาม และที่ปรึกษาโครงการได้เลือกจัดรูปแบบการเสริมกำลังได้อย่างถูกต้อง เนื่องจากพฤติกรรมการรับน้ำหนักของคานลึก และคานสั้นจะไม่เหมือนคานปกติทั่วไป และเพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงองค์ความรู้รอบด้าน ผู้วิจัยจึงได้นำผลการทดสอบบางชิ้นตัวอย่างในการทดสอบชุดที่ 1 มาร่วมวิเคราะห์ด้วย และได้แยกประเด็นการพิจารณาออกเป็นชุดๆ ดังนี้

ชุดย่อยที่ 2.1 ศึกษาอิทธิพลของระยะห่างแรงเฉือนต่อความลึก (a/d)

ศึกษาผลของระยะห่างแรงเฉือนต่อความลึกของคาน (a/d) ที่มีผลต่อการรับน้ำหนัก ในการทดสอบได้ทดสอบคานโดยทำการเปรียบเทียบอัตราส่วน a/d ที่ 1.5, 2.0 และ 3.14 รูปแบบการวิบัติได้อาศัยตำแหน่งของน้ำหนักที่ใช้ทดสอบเป็นเกณฑ์คาดการณ์รูปแบบการวิบัติ นั่นคือใช้อัตราส่วนระยะห่างแรงเฉือนต่อความลึกคาน (a/d) ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตาราง 2.1 แสดงขนาดและหน้าตัดตัวอย่างชิ้นทดสอบ

รายละเอียดหน้าตัด	คาดการณ์รูปแบบการวิบัติ	ชุดที่ 1 a/d = 3.14	ชุดที่ 2 a/d = 2.0	ชุดที่ 3 a/d = 1.5
	Flexural failure	FB1 FB2 FB3	FS1 FS1	FD1 FD2
	Shear failure	SB1 SB2 SB3	SS1 SS2 SS3	SD1 SD2 SD3

คุณสมบัติของวัสดุ

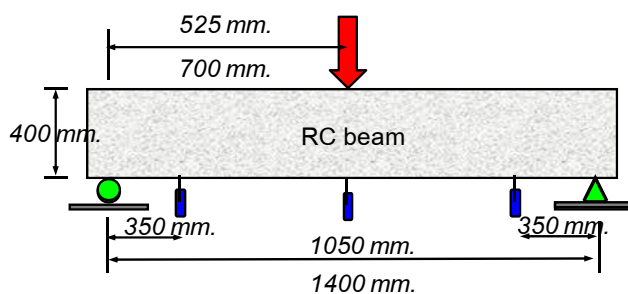
ในการทดลองนี้ได้ใช้คอนกรีตผสมเสร็จซึ่งมีส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 หิน ทราาย และน้ำเช่นเดียวกับการทดสอบในชุดที่ 1 โดยมีกำลังประลัยที่ระบุ 210 กก./ซม². และมอร์ตาร์ที่ใช้ในเฟอรโรซีเมนต์มีอัตราส่วนซีเมนต์:ทราย เท่ากับ 1:2 กำลังประลัยที่ระบุ 450 กก./ซม² สำหรับเหล็กเสริมหลักใช้เหล็กข้ออ้อย(บ.ล.ส.) เกรด SD40 ส่วนเหล็กปลอก (Stirrup) และเหล็กโครงเฟอรโรซีเมนต์ตามยาวใช้เป็นเหล็กกรรม(บ.ส.ก.) เกรด SR24 โดยวัสดุต่างๆได้ถูกนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการในวันที่มีการทดสอบดังแสดงในตารางด้านล่าง

คุณสมบัติของคอนกรีต และมอร์ตาร์

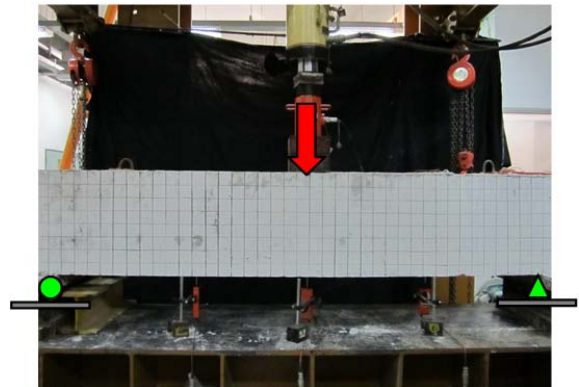
ชุดที่	ชิ้นตัวอย่าง	กำลังอัดประลัยคอนกรีต(กก./ซม ²)
1	FB (1, 2, 3) และ SB (1, 2, 3)	192 (22วัน)
2	FS (1, 2) และ SS (1, 2, 3)	231 (21วัน)
3	FD (1, 2) และ SD (1, 2, 3)	231 (21วัน)

รูปร่างและลักษณะการทดสอบ

ชิ้นตัวอย่างทดสอบเป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียวที่มีความยาว 1.60 และ 2.40 ม. ชนิดของฐานรองรับด้านหนึ่งเป็นฐานหมุน (Hinge support) และอีกด้านหนึ่งเป็นฐานรองรับแบบเลื่อนได้ (Roller support) โดยมีการจัดวางให้กึ่งกลางของชิ้นทดสอบให้อยู่ห่างจากขอบฐานที่รองรับประมาณ 1050, 700 และ 525 มม. สำหรับชุดทดสอบที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.1.1 - 2.1.3



รูป 2.1.1 รูปร่างและลักษณะการทดสอบ



รูป 2.1.2 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบ

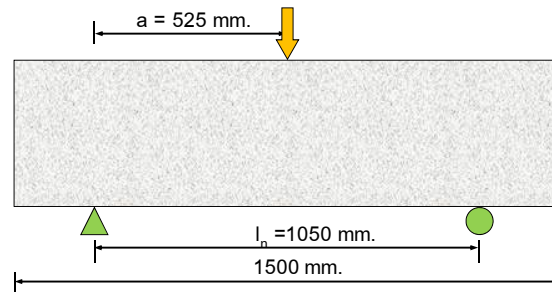
การให้น้ำหนักบรรทุก

ลักษณะการให้น้ำหนัก - ในช่วงแรกก่อนเกิดการครากของเหล็กเสริม การให้น้ำหนักบรรทุกจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นที่ละ 1.0 ตัน (Load control) หลังจากชิ้นตัวอย่างเกิดการคราก การให้น้ำหนักจะถูกเปลี่ยนมาควบคุมโดยใช้การแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานเล็ก (Displacement control) แทน จนกระทั่งคานคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการวิบัติ หรือเครื่องมือวัดไม่สามารถวัดค่าน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นได้ จึงหยุดการทดสอบ

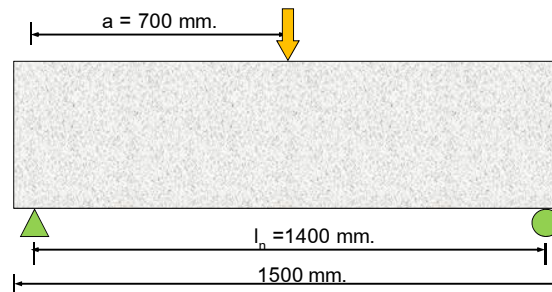
ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

การประเมินสมรรถนะของโครงสร้างที่เสริมกำลังด้วยเฟอโรซีเมนต์สามารถแสดงได้ด้วยรูปแบบการวิบัติ เส้นโค้งความสัมพันธ์ของน้ำหนักทดสอบและระยะแอ่นตัวของคานเล็ก รวมถึงความเครียดของเหล็กเสริมหลัก และเหล็กปลอก ซึ่งจะได้อธิบายโดยละเอียดในลำดับถัดไป

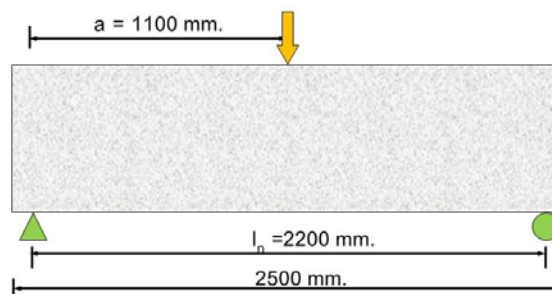
ลักษณะการจัดวางน้ำหนัก ตำแหน่งของแรงที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งจะจัดให้อยู่ในรูปอัตราส่วน ระยะห่างแรงเฉือนต่อความลึกคาน (a/d) ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และรูป 2.1.3



ก) การให้น้ำหนัก $a/d=1.5$ กับคานเล็ก (SD, FD)



ข) การให้น้ำหนัก $a/d=2.0$ กับชุดคานสั้น (SS, FS)



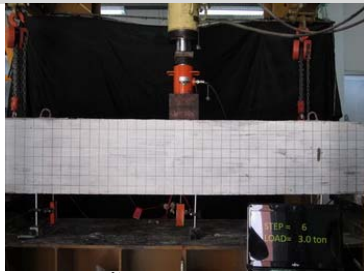
ค) การให้น้ำหนัก $a/d=3.14$ กับชุดคานปกติ (SB, FB)

รูป 3.2.1 การให้น้ำหนักระยะห่างแรงเฉือนต่อความลึก ($a/d = 1.5, 2.0, 3.14$)

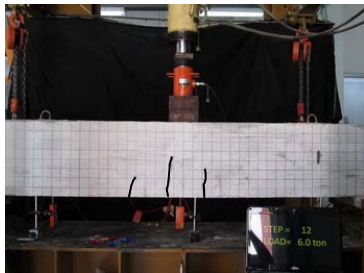
รูปแบบการวิบัติ (Failure pattern)

จะพิจารณาจากรอยร้าวที่ปรากฏร่วมกับการพิจารณาความสัมพันธ์ของเส้นโค้งระหว่างแรงที่กระทำและการเคลื่อนที่กลางคานเล็ก (Load-Displacement relationship) โดยการวิบัติที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนทดสอบจะนำมาเปรียบเทียบกับขั้นตอนทดสอบต่างกลุ่มกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1.4 – 2.1.6

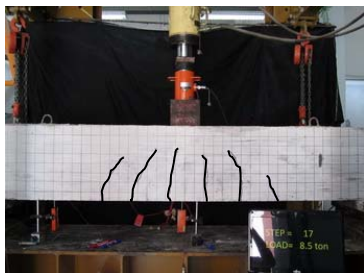
ชิ้นตัวอย่าง FB



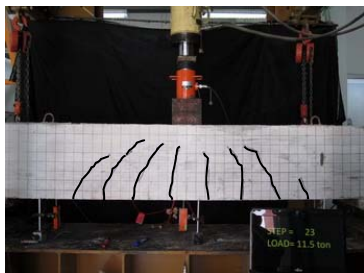
ก) น้ำหนักกระทำ 20%



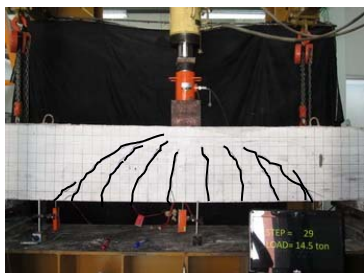
ข) น้ำหนักกระทำ 40%



ค) น้ำหนักกระทำ 60%

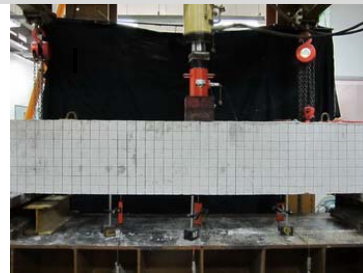


ง) น้ำหนักกระทำ 80%

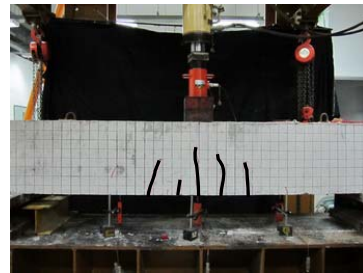


จ) น้ำหนักกระทำ 100%

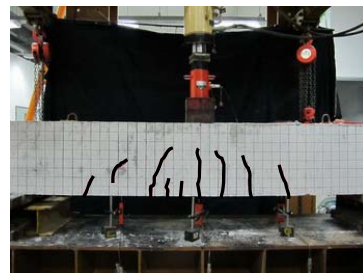
ชิ้นตัวอย่าง SB



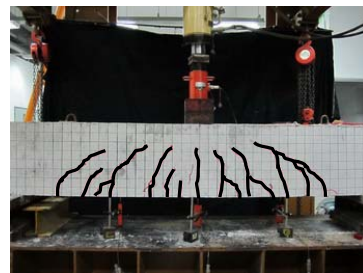
ก) น้ำหนักกระทำ 20%



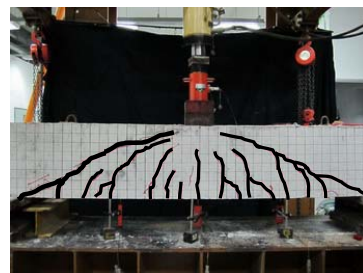
ข) น้ำหนักกระทำ 40%



ค) น้ำหนักกระทำ 60%



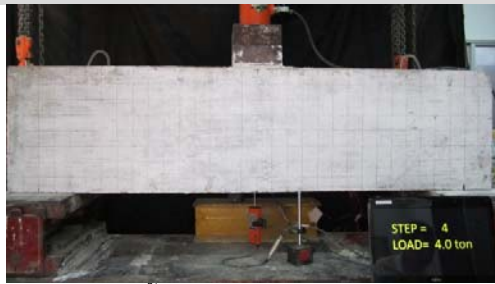
ง) น้ำหนักกระทำ 80%



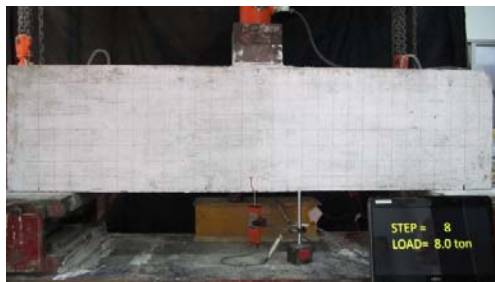
จ) น้ำหนักกระทำ 100%

รูป 2.1.4 ลักษณะการแตกร้าวของตัวอย่างชุดที่ 1 (FB, SB) ที่ระดับความรุนแรงต่างๆกัน

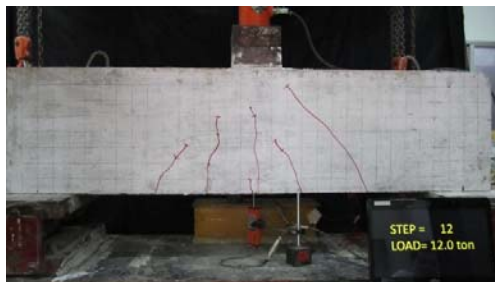
ชั้นตัวอย่าง FS



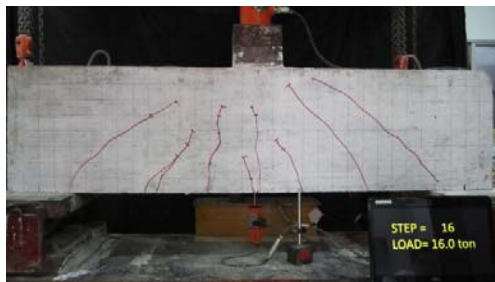
ก) น้ำหนักกระทำ 4ตัน(20%)



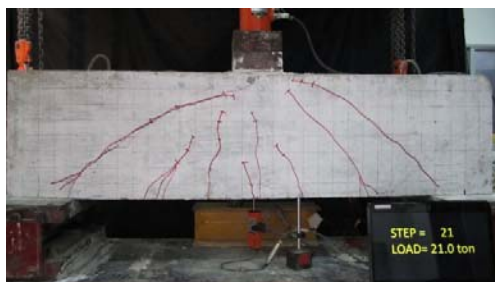
ข) น้ำหนักกระทำ 8ตัน(40%)



ค) น้ำหนักกระทำ 12ตัน(60%)



ง) น้ำหนักกระทำ 16ตัน(80%)

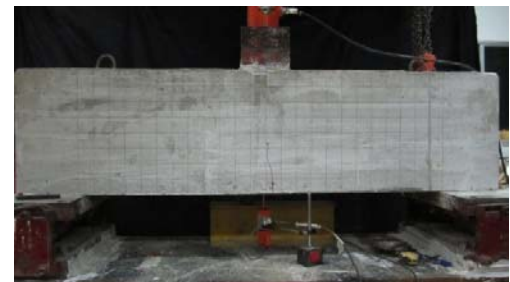


จ) น้ำหนักกระทำ 20ตัน(100%)

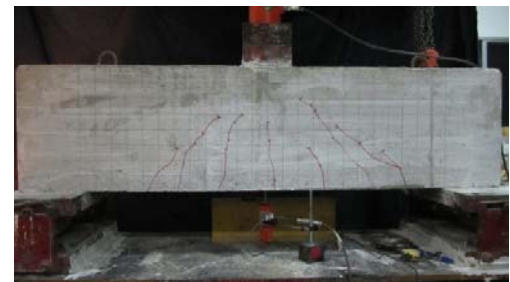
ชั้นตัวอย่าง SS



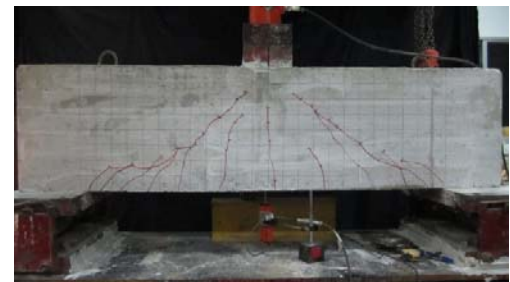
ก) น้ำหนักกระทำ 6ตัน(20%)



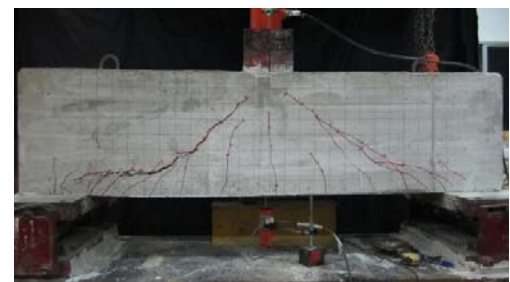
ข) น้ำหนักกระทำ 13ตัน(40%)



ค) น้ำหนักกระทำ 19ตัน(60%)



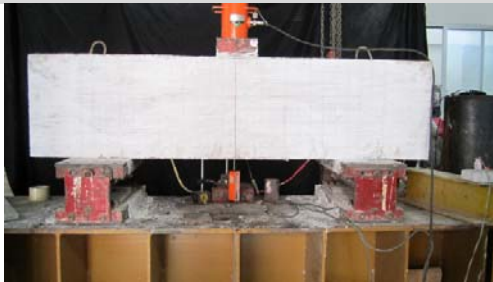
ง) น้ำหนักกระทำ 25ตัน(80%)



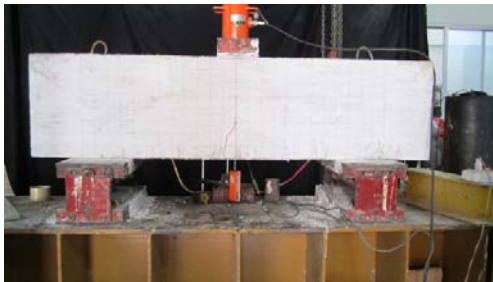
จ) น้ำหนักกระทำ 32ตัน(100%)

รูป 2.1.5 รอยแตกร้าวของตัวอย่างชุดที่ 2 (FS, SS) ที่ระดับความรุนแรงต่างกัน

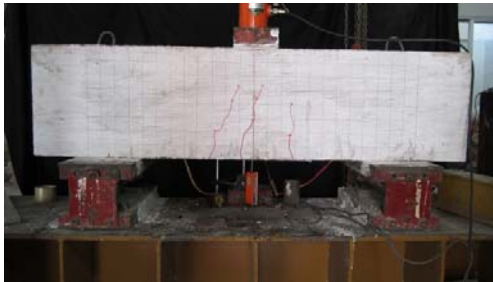
ชั้นตัวอย่าง FD



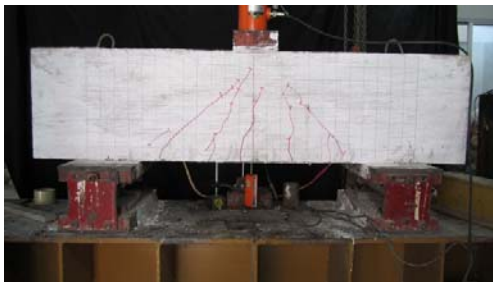
ก) น้ำหนักกระทำ 6ตัน(20%)



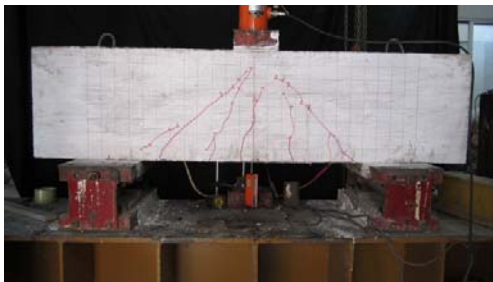
ข) น้ำหนักกระทำ 13ตัน(40%)



ค) น้ำหนักกระทำ 19ตัน(60%)

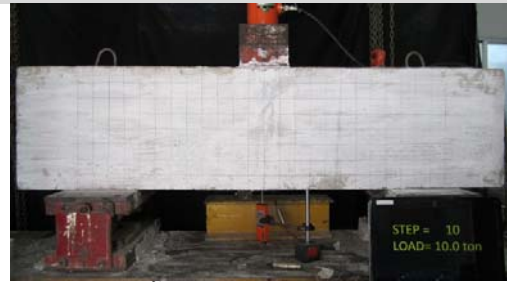


ง) น้ำหนักกระทำ 25ตัน(80%)

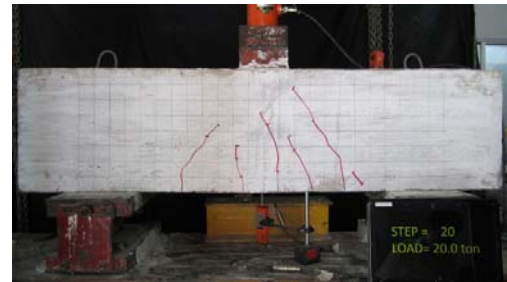


จ) น้ำหนักกระทำ 32ตัน(100%)

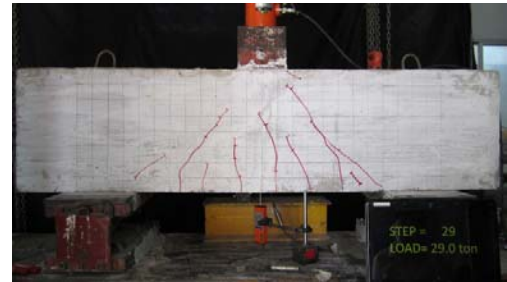
ชั้นตัวอย่าง SD



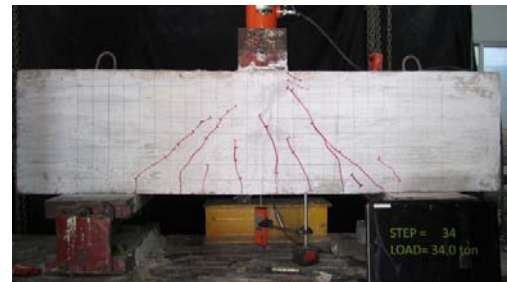
ก) น้ำหนักกระทำ 10ตัน(20%)



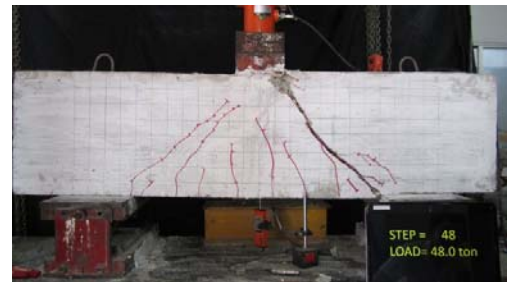
ข) น้ำหนักกระทำ 20ตัน(40%)



ค) น้ำหนักกระทำ 29ตัน(60%)



ง) น้ำหนักกระทำ 38ตัน(80%)



จ) น้ำหนักกระทำ 48ตัน(100%)

รูป 2.1.6 รอยแตกร้าวของตัวอย่างชุดที่ 3 (FD, SD) ที่ระดับความรุนแรงต่างกัน

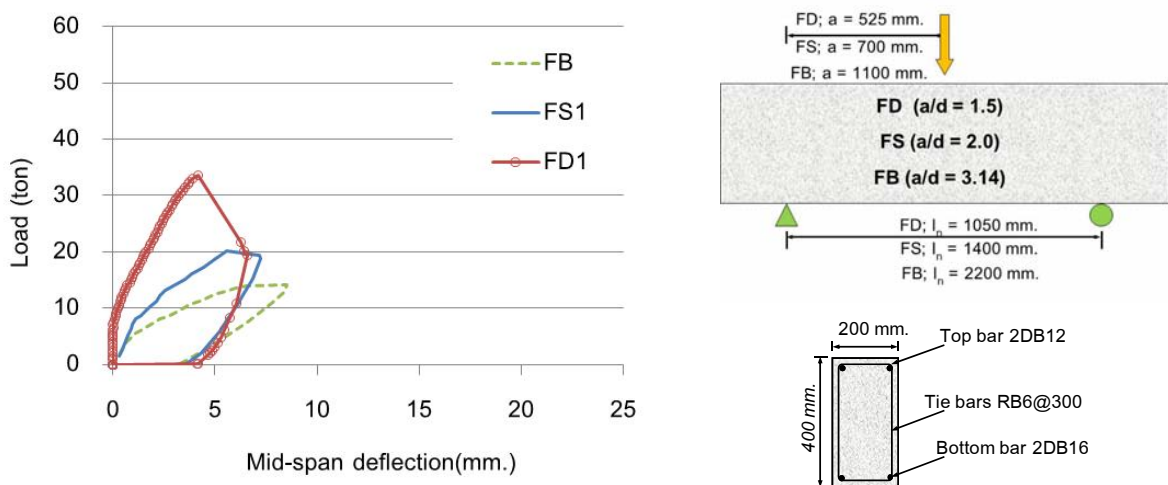
เส้นโค้งความสัมพันธ์ของแรงและระยะเคลื่อนตัวสูงสุด(Envelope Load-Displacement)

เนื่องจากการทดสอบเป็นแบบกวดทางเดียว ดังนั้นค่าแรงและการเคลื่อนที่สูงสุดในแต่ละครั้ง (Steps) จะถูกบันทึกด้วยเครื่อง Data logger เพื่อนำมาวาดเส้นโค้งความสัมพันธ์ของแรงและการเคลื่อนตัว โดยเส้นโค้งดังกล่าวจะอธิบายถึงรูปแบบการวิบัติ การครากของเหล็กเสริม อีกทั้งยังใช้เป็นตัววัดค่าดัชนีความเหนียว (Ductility Index, μ) ของชิ้นทดสอบอีกด้วย

ผลการทดสอบโดยพื้นฐานของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกต่างกัน

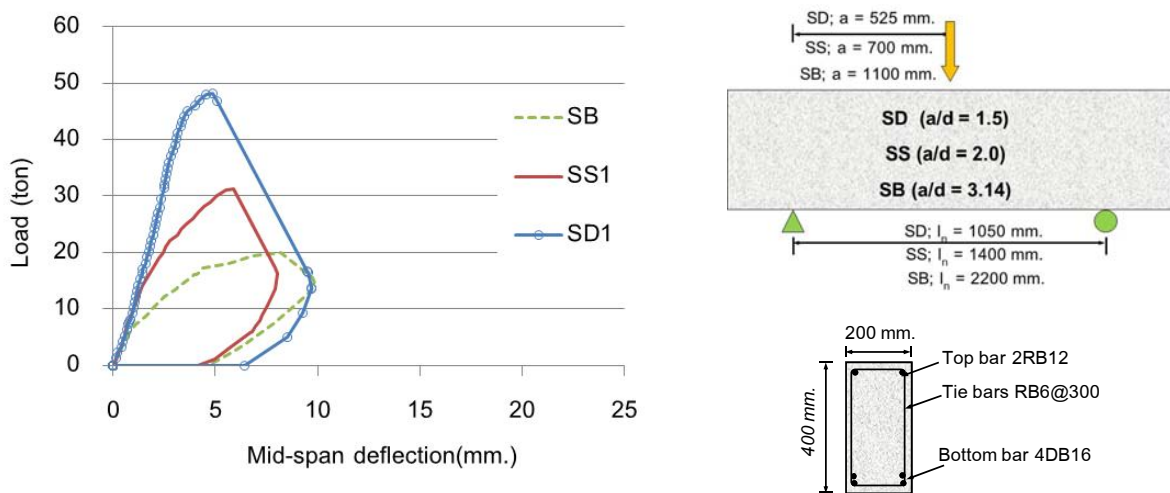
เพื่อศึกษาผลของระยะเงื่อนไขต่อความลึกของคาน (a/d) ที่มีผลต่อการรับน้ำหนัก ในการทดสอบได้ คานทำการเปรียบเทียบอัตราส่วน a/d ที่ 1.5, 2.0 และ 3.14 จำนวน 2 ชุด โดยทั้งสองชุดมีขนาดหน้าตัดเดียวกัน จำนวนเหล็กรับแรงอัด เหล็กปลอก เท่ากัน ต่างกันที่เหล็กล่าง

ชุดย่อยที่ 1 ของการทดสอบนี้ได้แก่กลุ่มชิ้นตัวอย่าง FD กับ FS และ FB ที่มีเหล็กล่าง 2 เส้น (2DB16) โดยชุด FD, FS และ FB มีอัตราส่วน a/d เท่ากับ 1.5, 2.0 และ 3.14 ตามลำดับ ผลการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างสามารถดูได้จากเส้นโค้งความสัมพันธ์น้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนตัว ดังแสดงในรูป 2.1.7 กำลังของกลุ่มตัวอย่าง FB รับน้ำหนักได้ 14.2 ตัน ขณะที่กำลังของกลุ่มตัวอย่าง FS รับน้ำหนักได้มากขึ้นร้อยละ 40 (20.0 ตัน) ส่วนกำลังของกลุ่มตัวอย่าง FD สามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 136 (33.5 ตัน)



รูป 2.1.7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานลิค FD, FS และ FB

ชุดย่อยที่ 2 การทดสอบนี้ได้แก่กลุ่มชิ้นตัวอย่าง SB, SS และ SD ที่มีเหล็กล่าง 4 เส้น(4DB16) โดยชุด SD ชุด SS และชุด SB มีอัตราส่วน $a/d = 1.5, 2.0$ และ 3.14 ตามลำดับ ผลการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างสามารถดูได้จากเส้นโค้งความสัมพันธ์น้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนตัวดังแสดงในรูป 5.2.2 กำลังของกลุ่มตัวอย่าง SB รับน้ำหนักได้ 19.9 ตัน กลุ่ม SS รับน้ำหนักได้ 31.1 ตัน (เพิ่มขึ้นร้อยละ 119) ส่วนกำลังของกลุ่มตัวอย่าง SD สามารถรับน้ำหนักได้มากถึง 48 ตัน (เพิ่มขึ้นร้อยละ 238) ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับชุดทดสอบย่อยที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 2.1.8



รูป 2.1.8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานบางและคานลึก SB, SS & SD

ในการทดสอบกลุ่มนี้สามารถสรุปได้ว่า คานที่รับน้ำหนักบรรทุกโดยมีค่าอัตราส่วนระยะเนื้อต่อความลึกยิ่งน้อย(a/d ต่ำ) จะมีความสามารถรับน้ำหนักได้มากกว่าชิ้นตัวอย่างที่มีค่า a/d ที่มากกว่า

ชุดย่อยที่ 2.2 ศึกษากำลังและรูปแบบการวิบัติของคานปกติ คานสั้น คานลิกคองกรีตเสริมเหล็กที่มีปริมาณเหล็กต่างกัน

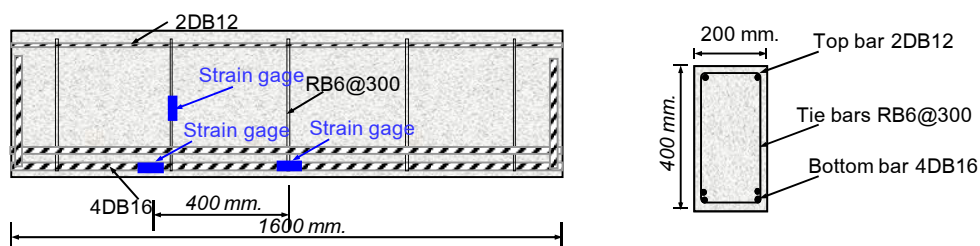
ศึกษาปริมาณเหล็กรับแรงดึงที่มีผลต่อการรับน้ำหนักและรูปแบบการวิบัติที่ตำแหน่งน้ำหนักตามอัตราส่วนระหว่างระยะเนื้อต่อความลึกของคาน (a/d) หนึ่งๆ โดยคานที่ใช้ทดสอบมีขนาดและหน้าตัดเดียวกันคือขนาด 200x400 มม. จำนวนเหล็กบนรับแรงอัด 2BD12 เหล็กปลอก RB6@300 เท่ากัน ต่างกันที่เหล็กล่างรับแรงดึง ในคานกลุ่มย่อย FD, FS และ FB ใช้เหล็กเสริมรับแรงดึงขนาด 2DB16 ในขณะที่กลุ่มย่อย SD, SS และ SB ใช้เหล็กเสริมรับแรงดึงขนาด 4DB16 ดังแสดงในตาราง 2.2 และรูปที่ 2.2.1 และ 2.2.2

ตาราง 2.2 แสดงขนาดหน้าตัด และรายละเอียดเหล็กเสริมของชิ้นทดสอบ

ชิ้นทดสอบ	a/d	b (ซม.)	h (ซม.)	A_c (ซม. ²)	d (ซม.)	Top reinf.	Bottom reinf.	Stirrup
FB (1, 2, 3)	3.14	20.0	40.0	800	35.0	2DB12	2DB16	RB6@300
FS (1, 2)	2.0							
FD (1, 2)	1.5							
SB (1, 2, 3)	3.14	20.0	40.0	800	35.0	2DB12	4DB16	RB6@300
SS (1, 2, 3)	2.0							
SD (1, 2, 3)	1.5							



รูป 2.2.1 รายละเอียดการเสริมเหล็กของชุดคานคอนกรีต (FD, FS และ FB)

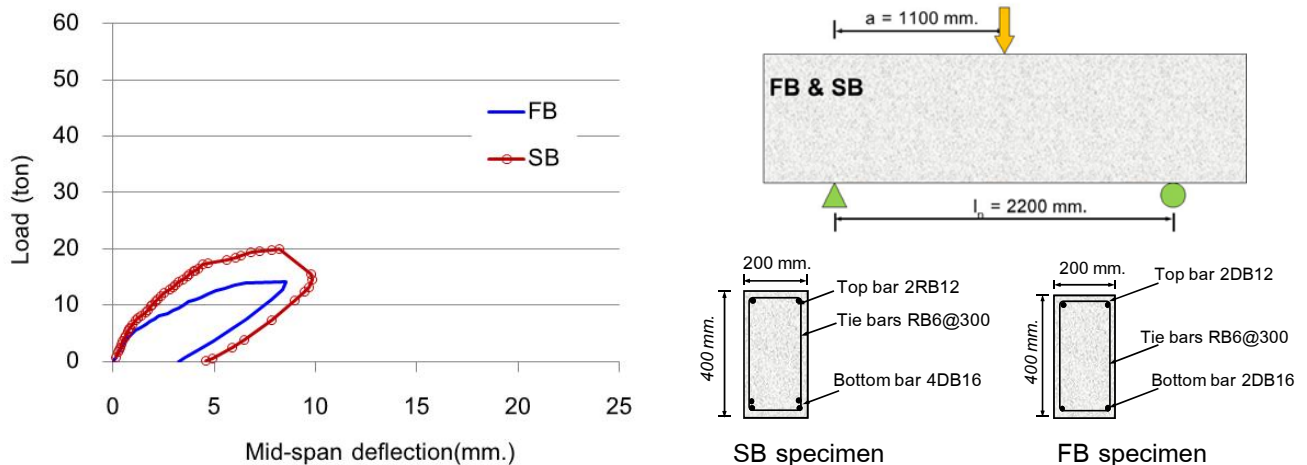


รูป 2.2.2 รายละเอียดการเสริมเหล็กของชุดคานคอนกรีต (SD, SS และ SB)

ผลการทดสอบโดยพื้นฐานของคานลิกคองกริตเสริมเหล็กที่มีปริมาณเหล็กต่างกัน

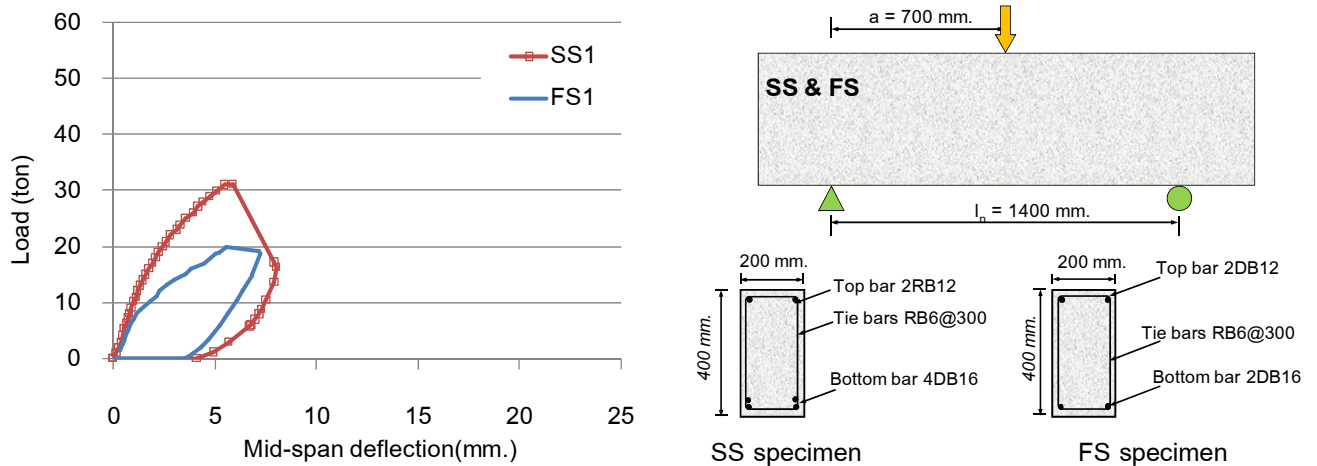
เป็นการศึกษาผลปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงที่ต่างกันใคานแต่ละประเภท ซึ่งเป็นที่รับทราบโดยทั่วไปว่าคานปกติที่วิบัติภายใต้แรงดัดนั้นปริมาณเหล็กรับแรงดึงจะมีผลต่อกำลังของโครงสร้างเป็นอย่างมาก ในทำนองกลับกัน หากคานปกติวิบัติภายใต้แรงเฉือน ปริมาณเหล็กรับแรงดึงจะไม่ค่อยมีผลต่อกำลังของโครงสร้างมากนัก สำหรับคานลิกนั้นโดยปกติ คานจะวิบัติภายใต้การบดอัด หรือเหล็กเสริมเกิดการรูด ดังนั้นปริมาณเหล็กเสริมที่ต่างกันจะมีผลต่อกำลังของโครงสร้างหากวิบัติเหล็กเสริมรูด และไม่มีผลหากวิบัติภายใต้การบดอัดอย่างแท้จริง

ชุดย่อยที่ 1 ของการทดสอบนี้ได้แก่กลุ่มชิ้นตัวอย่าง SB กับ FB ที่มีเหล็กล่าง 4 เส้น (4DB16) และ 2 เส้น (2DB16) ตามลำดับ โดยการทดสอบชุดนี้ให้อัตราส่วนระยะรับแรงเฉือนต่อความลึกคานที่ $a/d = 3.14$ ผลการทดสอบกำลังของโครงสร้างพบว่า กำลังของกลุ่มชิ้นตัวอย่าง SB สามารถรับน้ำหนักได้ 19.9 ตัน ในขณะที่กำลังของกลุ่มชิ้นตัวอย่าง FB สามารถรับน้ำหนักได้เพียง 14.2 ตัน น้อยกว่าร้อยละ 30 ดังแสดงในรูปที่ 2.2.3 จากการสังเกตคานลิกกลุ่ม FB เกิดการวิบัติภายใต้แรงดึง และเมื่อเพิ่มเหล็กรับแรงดึงมากขึ้นดังเช่นคานในกลุ่ม SB คานจะมีกำลังเพิ่มขึ้น และรูปแบบการวิบัติได้เปลี่ยนไปเป็นการวิบัติภายใต้แรงเฉือน



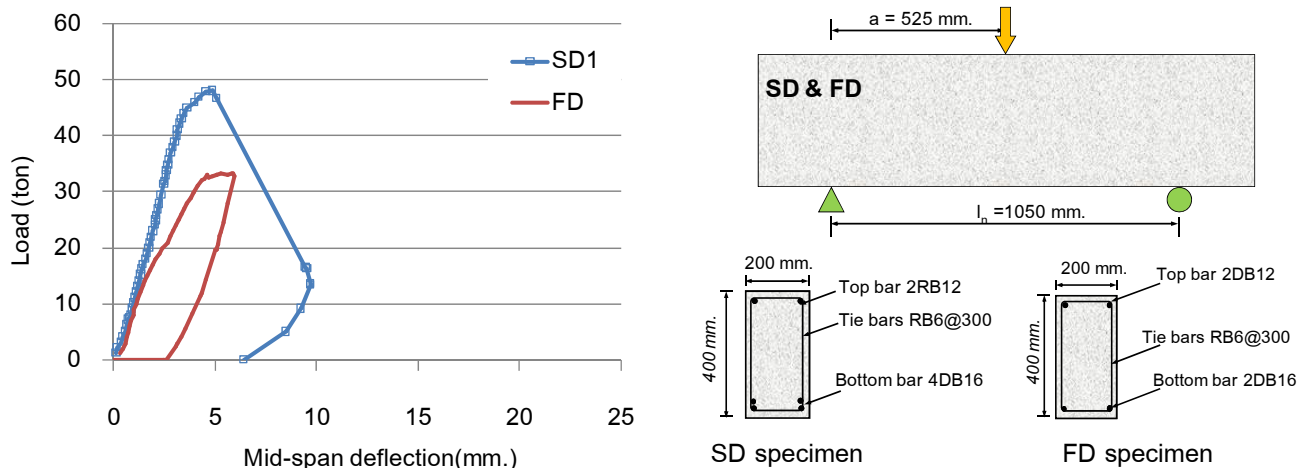
รูป 2.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานลิก SD & FD

ชุดย่อยที่ 2 ของการทดสอบนี้ได้แก่กลุ่มชิ้นตัวอย่าง SS กับ FS ที่มีเหล็กล่าง 4 เส้น (4DB16) และ 2 เส้น (2DB16) ตามลำดับ แต่มีอัตราส่วนระยะรับแรงเฉือนต่อความลึกคานที่ $(a/d) = 2.0$ ผลการทดสอบกำลังของโครงสร้างพบว่า กำลังของกลุ่มชิ้นตัวอย่าง SS สามารถรับน้ำหนักประมาณ 31 ตัน ในขณะที่กำลังของกลุ่มชิ้นตัวอย่าง FS สามารถรับน้ำหนักได้เพียง 20 ตัน ลดลงร้อยละ 35.5 ดังแสดงในรูปที่ 2.2.4 คานสั้นในกลุ่ม FS นี้เป็นการวิบัติแบบเหล็กเสริมคดงอ เนื่องจากปริมาณเหล็กเสริมน้อย และมีระยะการดัดน้อยกว่าในกลุ่มย่อยที่ 1



รูป 2.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานเหล็ก SS & FS

ชุดย่อยที่ 3 ของการทดสอบนี้ได้แก่กลุ่มชิ้นตัวอย่าง SD กับ FD ที่มีเหล็กล่าง 4 เส้น (4DB16) และ 2 เส้น (2DB16) ตามลำดับ โดยการทดสอบชุดนี้ให้อัตราส่วนระยะรับแรงเฉือนต่อความลึกคานที่ $a/d = 1.5$ ผลการทดสอบกำลังของโครงสร้างพบว่า กำลังของกลุ่มชิ้นตัวอย่าง SD สามารถรับน้ำหนักได้ถึง 48 ตัน ในขณะที่กำลังของกลุ่มชิ้นตัวอย่าง FD สามารถรับน้ำหนักได้เพียง 33.5 ตัน ลดลงร้อยละ 30 ดังแสดงในรูปที่ 2.2.5 คานเหล็กกลุ่ม FD ซึ่งมีแนวโน้มจะวิบัติแบบเหล็กเสริมคานเนื่องจากปริมาณเหล็กเสริมน้อย



รูป 2.2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานเหล็ก SD & FD

การทดลองในชุดนี้สามารถอธิบายได้ว่า ในคานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งปกติวิบัติภายใต้แรงกดอัด หรือแรงเฉือนรวมบดอัดนั้น หากปริมาณเหล็กเสริมที่ทำหน้าที่เป็นท่อนเหล็กรับแรงดึง (Tie) ตามโมเดล Strut & Tie มีน้อยเกินไปสามารถเกิดการวิบัติแบบเฉือนได้

ชุดที่ 3 แนวทางการซ่อมแซมคานปกติ คานสั้น และคานลิกคองกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีการจัดเรียงรูปแบบเฟอร์โรซีเมนต์ ต่าง ๆ กัน

เพื่อให้ครอบคลุมในวัตถุประสงค์ของโครงการข้อ 3 และ ข้อ 4 คือ

1. เพื่อหาวิธีการเสริมกำลังในคานสั้น คานลิกคองกรีตเสริมเหล็กที่เสียหาย ภายใต้รูปแบบการวิบัติด้วยแรงอัดร่วมเฉือน และแรงดึงร่วมเฉือน
2. ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการซ่อมแซมและเสริมกำลังคานสั้น คานลิกด้วยวิธีเฟอร์โรซีเมนต์ เช่น รูปแบบการจัดเรียงตัวของเหล็กโครงตามยาว(Longitudinal skeleton steel) และ ปริมาณเหล็กโครงตามยาว(Longitudinal skeleton steel)

การหาแนวทางซ่อมแซมในครั้งนี้ ทุกชิ้นตัวอย่างจะถูกทดสอบจนเกิดความเสียหาย และวิบัติในที่สุด ดังแสดงเป็นชุดทดสอบย่อยลำดับดังนี้

ชุดย่อยที่ 3.1.1 ทดสอบการซ่อมแซมในกลุ่มชิ้นตัวอย่าง FB มีรูปแบบการวิบัติเป็นแบบ Tension failure ซึ่งมีอัตราส่วนระยะรับแรงเฉือนต่อความลึกคานเท่ากับ $(a/d) = 3.14$

การทดสอบในกลุ่มนี้เพื่อศึกษาผลของการเสริมแถบเฟอร์โรซีเมนต์ที่ท้องคานที่มีต่อการวิบัติโดยมีเหล็กเสริมหลักมีปริมาณน้อย ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ก)

ชุดย่อยที่ 3.1.2 ทดสอบการซ่อมแซมในกลุ่มชิ้นตัวอย่าง SB มีรูปแบบการวิบัติเป็นแบบ Shear failure ซึ่งมีอัตราส่วนระยะรับแรงเฉือนต่อความลึกคานเท่ากับ $(a/d) = 3.14$

การทดสอบในกลุ่มนี้เพื่อศึกษาผลของรูปแบบการจัดเรียงแถบเฟอร์โรซีเมนต์ด้านข้าง 3 แบบที่มีต่อการวิบัติโดยมีเหล็กเสริมหลักมีปริมาณน้อย ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ข)

ชุดย่อยที่ 3.2.1 ทดสอบการซ่อมแซมในกลุ่มชิ้นตัวอย่าง FS ที่มีรูปแบบการวิบัติเป็นแบบ Tension failure โดยที่อัตราส่วนระยะรับแรงเฉือนต่อความลึกคานเท่ากับ $(a/d) = 2.0$

การทดสอบในกลุ่มนี้เพื่อศึกษาผลของรูปแบบการจัดเรียงแถบเฟอร์โรซีเมนต์ 2 รูปแบบที่มีต่อการวิบัติ โดยเหล็กเสริมหลักมีปริมาณน้อย ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ค) และ (ง)

ชุดย่อยที่ 3.2.2 ทดสอบการซ่อมแซมในกลุ่มชิ้นตัวอย่าง SS มีรูปแบบการวิบัติเป็นแบบ Shear Compression failure ซึ่งมีอัตราส่วนระยะรับแรงเฉือนต่อความลึกคานเท่ากับ $(a/d) = 2.0$

การทดสอบในกลุ่มนี้เพื่อศึกษาผลของรูปแบบการจัดเรียงแถบเฟอร์โรซีเมนต์ 3 รูปแบบที่มีต่อการวิบัติโดยเหล็กเสริมหลักมีปริมาณมาก ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (จ) (ฉ) และ (ช)

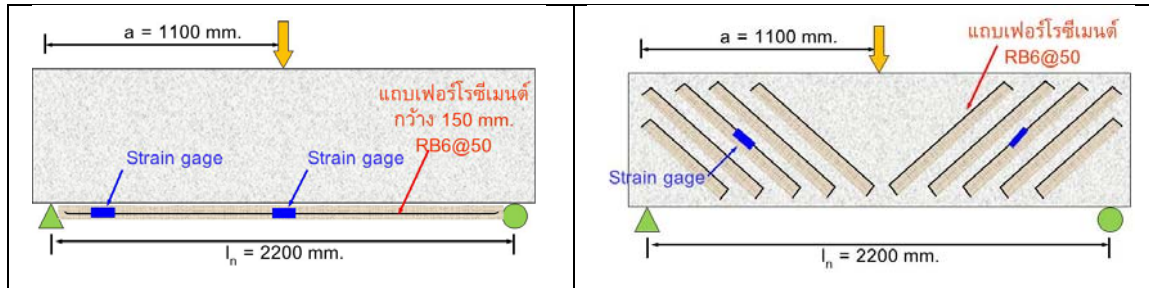
ชุดย่อยที่ 3.3.1 ทดสอบการซ่อมแซมในกลุ่มชิ้นตัวอย่าง FD ที่มีรูปแบบการวิบัติเป็นแบบ Shear-tension failure อัตราส่วนระยะรับแรงเฉือนต่อความลึกคานจะต่ำคือ $(a/d) = 1.5$

การทดสอบในกลุ่มนี้เพื่อศึกษาผลของรูปแบบการจัดเรียงแถบเฟอร์โรซีเมนต์ 2 รูปแบบที่มีต่อการวิบัติโดยเหล็กเสริมหลักมีปริมาณน้อย ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ค) และ (ง)

ชุดย่อยที่ 3.3.2 ทดสอบการซ่อมแซมในกลุ่มชิ้นตัวอย่าง SD มีรูปแบบการวิบัติเป็นแบบ Shear Compression failure ซึ่งมีอัตราส่วนระยะรับแรงเฉือนต่อความลึกคานเท่ากับ $(a/d) = 1.5$

การทดสอบในกลุ่มนี้เพื่อศึกษาผลของรูปแบบการจัดเรียงแถบเฟอร์โรซีเมนต์ 3 รูปแบบที่มีต่อการวิบัติโดยเหล็กเสริมหลักมีปริมาณมาก ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (จ) (ฉ) และ (ช)

แนวทางการซ่อมแซมเสริมกำลังคานปกติ คานสั้น และคานลึก



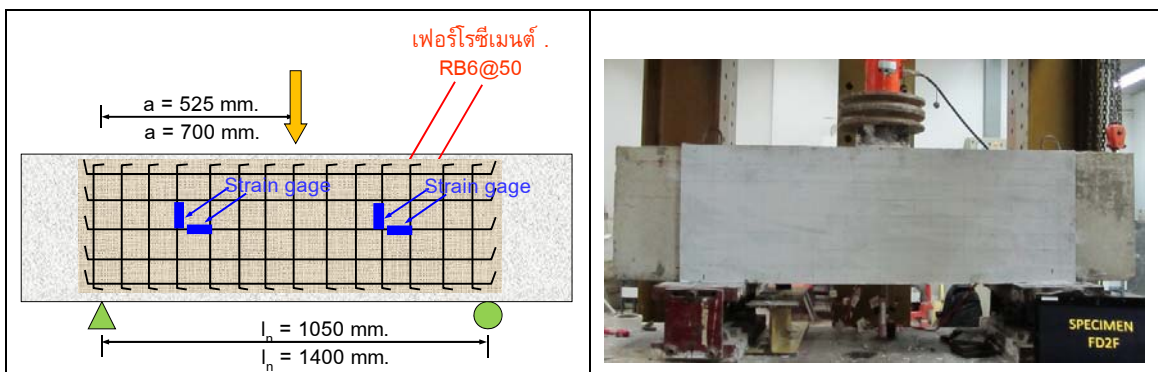
(ก) การซ่อมแซมชิ้นทดสอบ FB โดยการจัดวาง แถบเฟอรโรซีเมนต์แนบท้องคาน

(ข) การซ่อมแซมชิ้นทดสอบ SB โดยการจัดวางแถบเฟอรโรซีเมนต์แนวเอียงแนบข้างคาน

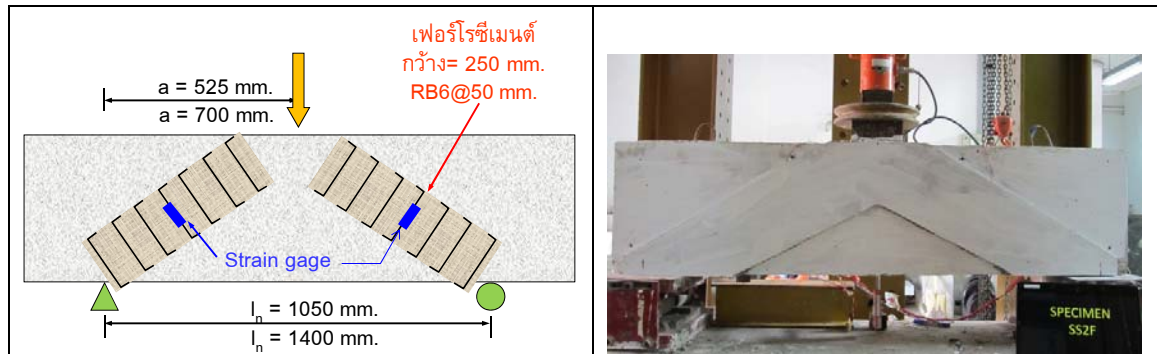
รูป 3.1 รูปแบบการซ่อมแซมการวิบัติของคานปกติ ในกลุ่มชุดที่1(FB, SB) ที่มีค่า $a/d = 3.14$



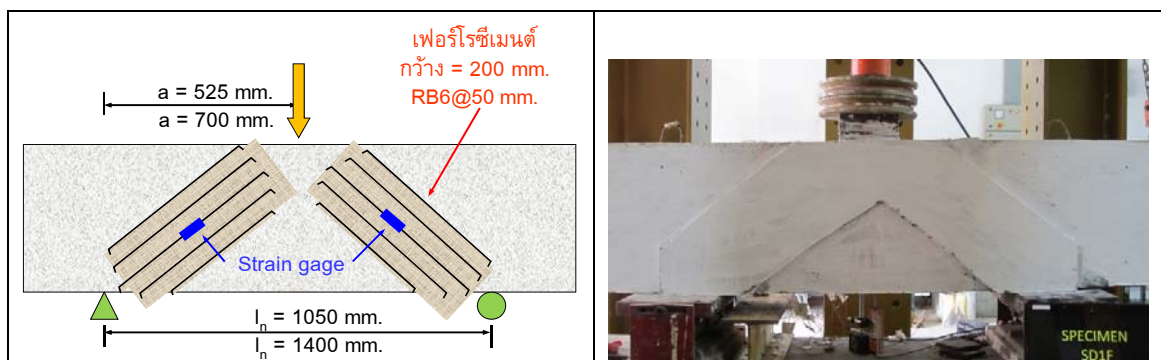
(ค) การซ่อมแซมชิ้นทดสอบ FS1, FD1 โดยการจัดวางแถบเฟอรโรซีเมนต์แนวนอนแนบข้างคาน



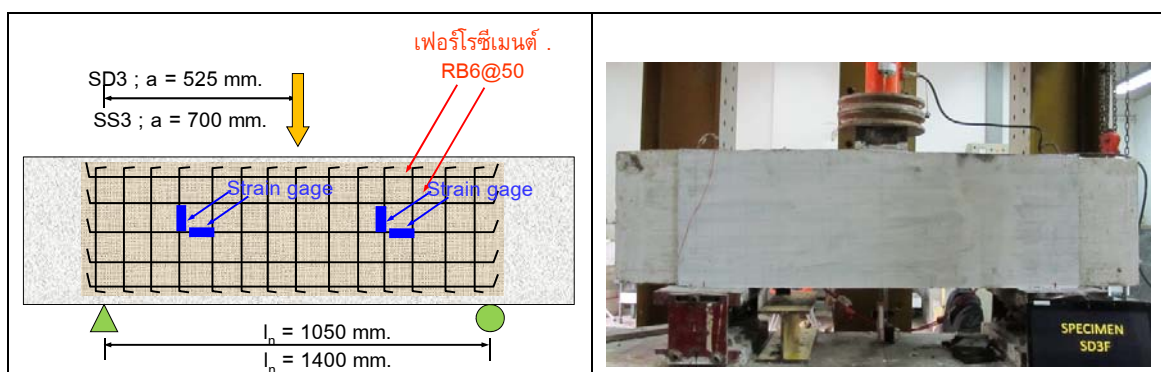
(ง) การซ่อมแซมชิ้นทดสอบ FS2, FD2 โดยการจัดวางแถบเฟอรโรซีเมนต์แนวนอน และแนวตั้งข้างคาน



(จ) การซ่อมแซมชิ้นทดสอบ SS1, SD1 โดยการจัดวางแถบเฟอโรไรซีเมนต์เอียงตั้งฉากกับแนว Strut



(ณ) การซ่อมแซมชิ้นทดสอบ SS2, SD2 โดยการจัดวางแถบเฟอโรไรซีเมนต์แนวทแยงเดียวกับแนว Strut



(ช) การซ่อมแซมชิ้นทดสอบ SS3, SD3 โดยการจัดวางแถบเฟอโรไรซีเมนต์แนวนอน และแนวตั้งแนบข้างคาน

รูป 3.1 รูปแบบการซ่อมแซมการวิบัติของคานสั้นในกลุ่มชุดที่ 2 (FS, SS) ที่มีค่า $a/d = 2.0$ และคานเล็กในชุดที่3 (FD, SD) ที่มีค่า $a/d = 1.5$

การให้น้ำหนักบรรทุก

ขั้นตอนอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กในแต่ละชุดแต่ละชั้นจะถูกให้น้ำหนักค่อยๆเพิ่มขึ้น จนเกิดความเสียหายสิ้นเชิง หลังจากนั้นขั้นตอนอย่างคานเล็กแต่ละชั้นจะถูกซ่อมแซมและเสริมกำลังด้วยแผ่นเฟอโรไรซีเมนต์ แล้วทำการให้น้ำหนักซ้ำอีกครั้งจนคานเล็กเกิดการวิบัติ

คุณสมบัติของวัสดุ

ในการทดลองนี้ได้ใช้วัสดุในการซ่อมแซม คือมอร์ตาร์ที่ใช้ในเฟอร์โรซีเมนต์มีอัตราส่วนซีเมนต์:ทรายเท่ากับ 1:2 กำลังประลัยที่ระบุ 450 กก./ชม² สำหรับเหล็กเสริมหลักใช้เหล็กข้ออ้อย(บ.ล.ส.) เกรด SD40 ส่วนเหล็กปลอก (Stirrup) และเหล็กโครงเฟอร์โรซีเมนต์ตามยาวใช้เป็นเหล็กกรรม(บ.ส.ก.) เกรด SR24 โดยวัสดุต่างๆได้ถูกนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการในวันที่มีการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3.4.1 และ 3.4.2

ตาราง 3.4.1 คุณสมบัติของคอนกรีต และมอร์ตาร์

ชุด ที่	ชั้นตัวอย่าง	กำลังอัดประลัย คอนกรีต(กก./ชม ²) ก่อนซ่อมแซม	กำลังอัดประลัย คอนกรีต(กก./ชม ²) หลังซ่อมแซม	กำลังอัดประลัย มอร์ตาร์ (กก./ชม ²)
1	FB (1, 2, 3) SB (1, 2, 3)	192 (22วัน)	224.3 (38วัน)	312.5 (7วัน)
2	FS (1, 2) SS (1, 2, 3)	231 (21วัน)	254 (48วัน)	411 (7วัน)
3	FD (1, 2) SD (1, 2, 3)	231 (21วัน)	254 (48วัน)	411 (7วัน)

การซ่อมแซมคานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีการจัดเรียงรูปแบบเฟอร์โรซีเมนต์ ต่าง ๆ กัน ภายหลังชั้นทดสอบถูกให้น้ำหนักจนเกิดการวิบัติแล้ว ชั้นทดสอบทุกชั้นจะถูกนำมาซ่อมแซมด้วยวัสดุเฟอร์โรซีเมนต์ การศึกษาในครั้งนี้เพื่อต้องการหารูปแบบการซ่อมแซมคานเหล็กด้วยวัสดุเฟอร์โรซีเมนต์ที่เหมาะสม

สร้างชั้นทดสอบและการซ่อมแซมหลังเกิดความเสียหาย

ในการสร้างชั้นตัวอย่างในห้องปฏิบัติการจะให้มียาวละเอียดทางโครงสร้าง และการจัดเรียงเหล็กเสริมให้ใกล้เคียงกับคานเหล็กจริงให้มากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 3.2 – 3.13



รูป 3.2 การจัดวางเหล็กของคานเหล็กชุดที่ 1 วิทยุภายใต้แรงเฉือนร่วมอัด (SD1, SD2, SD3, SS1, SS2, SS3)



รูป 3.3 การจัดวางเหล็กของคานลิกซูดที่ 2 วิวติภายใต้แรงเฉือนร่วมดิ่ง (FDB1, FD2, FS1, FS2)



รูป 3.4 การเตรียมไม้แบบ(ไม้อัดดำขนาด 20 มม.)
ให้ได้ขนาด 200x400x1600 มม.



รูป 3.5 เก็บลูกปูนเพื่อทดสอบ และ
ทดสอบค่าการยุบตัว



รูป 3.6 ทำการติด Stain Gage ในตำแหน่งที่ต้องการ



รูป 3.7 การเทคอนกรีตลงในแบบ และการแต่งผิวคอนกรีต



รูป 3.8 การซ่อมแซมคานเหล็กโดยการเสริมแผ่นเฟอร์โรซีเมนต์ด้านข้างคานเหล็ก



รูป 3.9 วัสดุอุดประสาน (Sikadur 31)



รูป 3.10 วัสดุที่ใช้ในการซ่อมแซมคานเหล็ก (Non-Shrink Grout)



รูป 3.11 โดยการจัดวางแถบเฟอร์โรซีเมนต์ทั้งแนวนอนและแนวตั้ง SD3F, SS3F



รูป 3.12 การซ่อมแซมคานเหล็กเมื่อคานลึกวิบัติภายใต้แรงเฉือนร่วมอัดโดยการเสริมแผ่นเฟอร์โรซีเมนต์



รูป 3.13 การติดตั้งคานลึกคอนกรีต และอุปกรณ์ทดสอบ

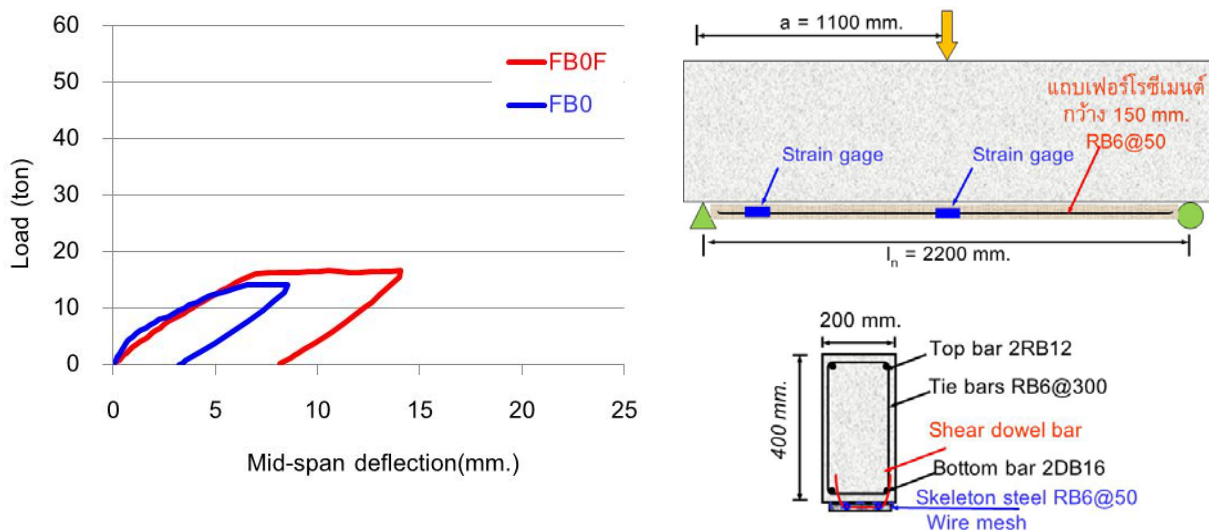
ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

การประเมินสมรรถนะของโครงสร้างที่เสริมกำลังด้วยเฟอโรซีเมนต์สามารถแสดงได้ด้วยรูปแบบการวิบัติ เส้นโค้งความสัมพันธ์ของน้ำหนักทดสอบและระยะแอนตัวของคานเหล็ก รวมถึงความเครียดของเหล็กเสริมหลัก และเหล็กปลอก ซึ่งจะได้อธิบายโดยละเอียดในลำดับถัดไป

ชุดย่อยที่ 3.1.1 การซ่อมแซมในกลุ่มชิ้นตัวอย่าง FB ซึ่งมีอัตราส่วนระยะรับแรงเฉือนต่อความลึกคานเท่ากับ $(a/d) = 3.14$

ชิ้นตัวอย่างในกลุ่ม FB ซึ่งมีรูปแบบการวิบัติเป็นแบบ Tension failure คานคอนกรีต FB3 ถือเป็นชิ้นทดสอบควบคุมซึ่งรับน้ำหนักได้ 14.2 ตัน

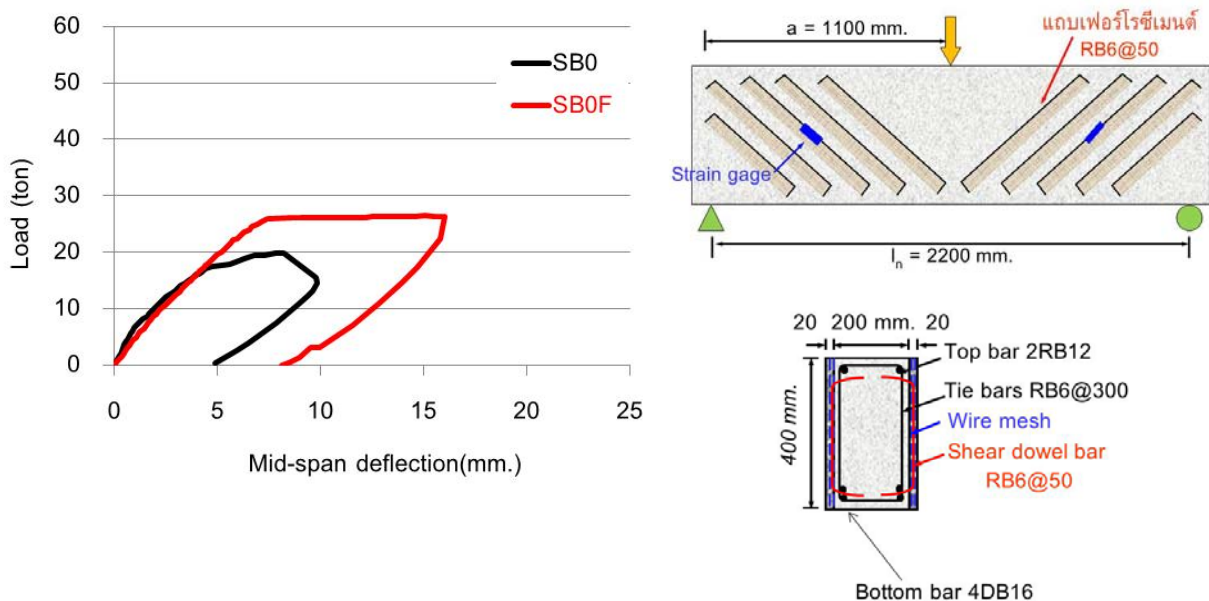
หลังจากชิ้นตัวอย่างควบคุม(FB3) ถูกทดสอบแล้ว จะได้รับการซ่อมแซมหลังจากถูกน้ำหนักกระทำจนเกิดความเสียหายระดับ 100% ของน้ำหนักสูงสุด ชิ้นทดสอบ(FB3F)จะถูกทำการซ่อมแซมโดยวิธีเฟอโรซีเมนต์โดยใช้เหล็กเดือยยึดประสานคอนกรีตใหม่กับคอนกรีตเก่า ด้วยระยะห่างเหล็กเดือยทุกๆ 150 มม. กำลังของคานเฟอโรซีเมนต์แสดงได้ในรูปที่ 3.1.1 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอนตัวที่กึ่งกลางคาน พบว่าภายหลังการซ่อมแซมแม้ว่าความแข็งแรงของโครงสร้างจะไม่เท่าเดิม แต่กำลังสูงสุดที่รับได้มากขึ้นร้อยละ 10.5 (16.6 ตัน) ย่อมแสดงให้เห็นว่าการเสริมแผ่นเฟอโรซีเมนต์โดยใช้ระยะห่างเหล็กเดือยที่เหมาะสมจะสามารถถ่ายแรงเฉือนได้อย่างเพียงพอ นอกจากนี้รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเดิมยังคงเป็นการวิบัติภายใต้แรงดัด เนื่องจากแผ่นเฟอโรซีเมนต์สามารถสร้างแรงเฉือนต้านทานร่วมกันคานคอนกรีตได้



รูป 3.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะการแอนตัวที่กึ่งกลางคาน FB

ชุดย่อยที่ 3.1.2 การซ่อมแซมในกลุ่มชิ้นตัวอย่าง SB ซึ่งมีอัตราส่วนระยะรับแรงเฉือนต่อความลึกคานเท่ากับ $(a/d) = 3.14$

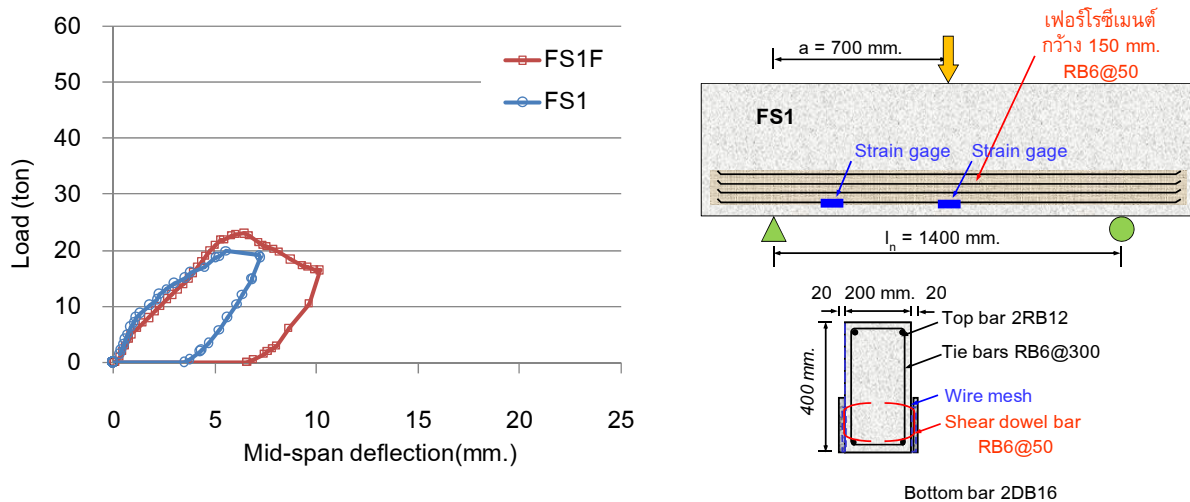
ชิ้นตัวอย่างในกลุ่ม SB จะมีรูปแบบการวิบัติเป็นแบบ Shear failure ชิ้นทดสอบควบคุม (SB3) สามารถรับน้ำหนักได้ 19.9 ตัน โดยชิ้นทดสอบ SB3F เป็นชิ้นทดสอบที่ได้รับการซ่อมแซม หลังจากรับแรงกระทำจนเกิดความเสียหายระดับ 100% ของน้ำหนักสูงสุด (SB0) โดยใช้แผ่นเฟอร์โรซีเมนต์ประกอบด้านข้างทั้งสองซึ่งใช้เหล็กเดือยทำหน้าที่ประสานคานคอนกรีตกับแผ่นเฟอร์โรซีเมนต์ทุกระยะ 75 มม. ซึ่งเป็นการออกแบบเต็มความเสียหายโดยไม่ถือว่าคอนกรีตช่วยรับแรงเฉือนเลย จากรูปที่ 3.1.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานพบว่าภายหลังการซ่อมแซมโดยใช้ปูน (Non-shrink grout) เทหยาตเพื่อปิดรอยร้าวเฉือนที่มีขนาดใหญ่พบว่าความแข็งแรงของโครงสร้างสามารถกลับมาเท่าของเดิมเนื่องจากสามารถปิดรอยร้าวได้สนิท จึงฟื้นความแข็งแรงได้เหมือนเดิม และกำลังของโครงสร้างนี้สามารถรับได้ถึง 26.4 ตัน เพิ่มขึ้นร้อยละ 32.7 (ซึ่งดังแสดงในรูปที่ 5.2.7) เป็นกำลังที่ทำให้คานเกิดการคลาก โครงสร้างสามารถเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติได้



รูป 3.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน SB

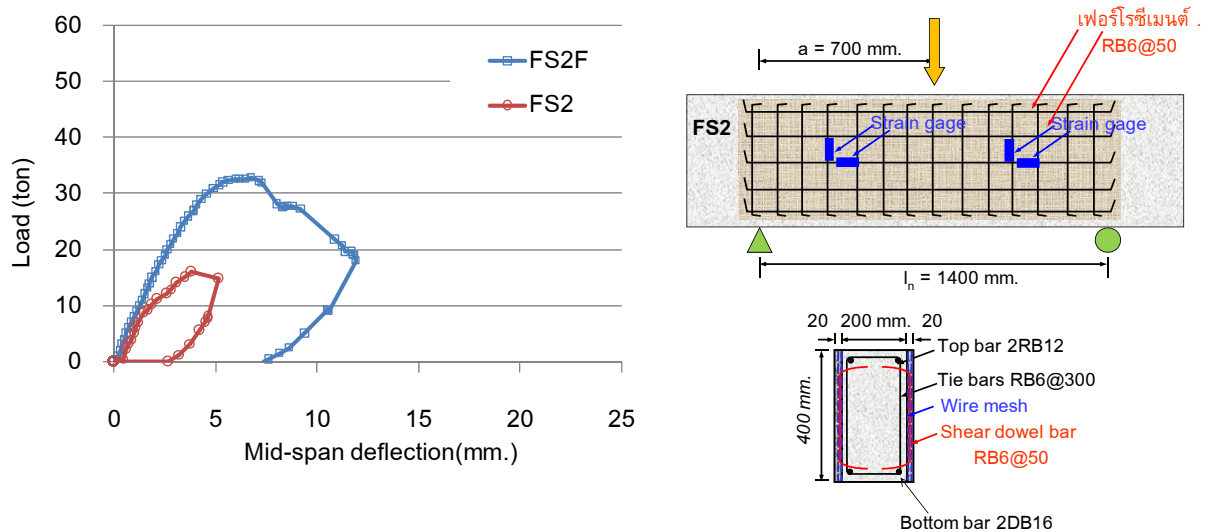
ชุดย่อยที่ 3.2.1 ทดสอบการซ่อมแซมในกลุ่มชิ้นตัวอย่าง FS ที่มีรูปแบบการวิบัติเป็นแบบ Tension failure คือเหล็กล่างถูกดึงจนฉีกขาด โดยที่อัตราส่วนระยะรับแรงเฉือนต่อความลึกคานเท่ากับ $(a/d) = 2.0$

ชิ้นตัวอย่าง **FS1F** ซึ่งได้รับการซ่อมแซมมาจากชิ้นตัวอย่าง FS1 โดยใช้แถบเฟอร์โรซีเมนต์กว้าง 150 มม. และเหล็กโครงขนาด RB6@50 มม. ที่บริเวณผิวข้างคานล่าง ผลการทดสอบปรากฏว่าคานซ่อมแซมจะสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้นเล็กน้อยคือ 22.2 ตัน มากกว่าเดิมร้อยละ 10 ดังแสดงในรูปที่ 3.2.1(a) โดยรูปแบบการวิบัติถูกเปลี่ยนจาก Tension failure มาเป็น Shear tension failure



รูป 3.2.1(a) ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะการแอนตัวที่กึ่งกลางคานเหล็ก FS1

ชิ้นตัวอย่าง **FS2F** ซึ่งได้รับการซ่อมแซมมาจากชิ้นตัวอย่าง FS2 โดยใช้แถบเฟอร์โรซีเมนต์ปิดเต็มด้านข้างคานคือลึก 400 มม. และใช้เหล็กโครงขนาด RB6@50# มม. ทั้งแนวตั้งและแนวนอนทั้งสอง ผลการทดสอบปรากฏว่าคานซ่อมแซมจะสามารถรับน้ำหนักได้มากถึง 33.0 ตัน มากกว่าเดิมถึงร้อยละ 206 ดังแสดงในรูปที่ 3.2.1(b) การที่โครงสร้างมีความแข็งแรงมากขึ้นมากเนื่องมาจากการทำงานของเหล็กนอนและเหล็กตั้ง ทำให้รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างจากเดิมเป็นแบบ Tension failure มาเป็นแบบ Shear tension failure



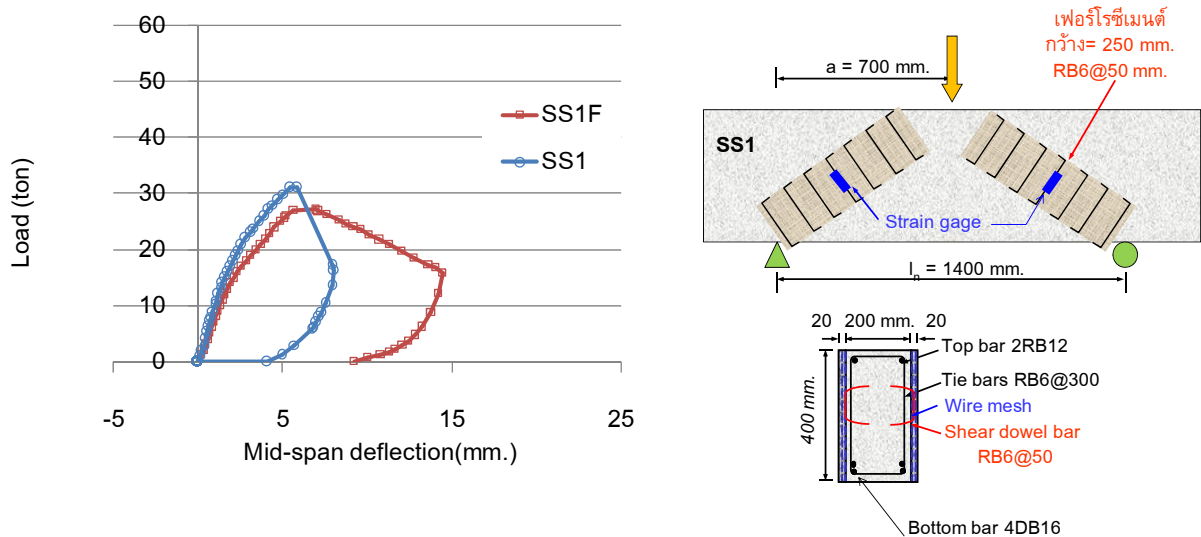
รูป 3.2.1(b) ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานเล็ก FS2

ชุดย่อยที่ 2.2 การซ่อมแซมในกลุ่มชิ้นตัวอย่าง SS ซึ่งมีอัตราส่วนระยะรับแรงเฉือนต่อความลึกคานเท่ากับ $(a/d) = 2.0$

ชิ้นตัวอย่างในกลุ่ม SS จะมีรูปแบบการวิบัติเป็นแบบ Shear compression failure หรือ Shear tension failure คือคอนกรีตถูกอัด หรือถูกฉีกออกแนวทางการซ่อมแซมที่กำหนดไว้มี 3 แนวทางดังนี้

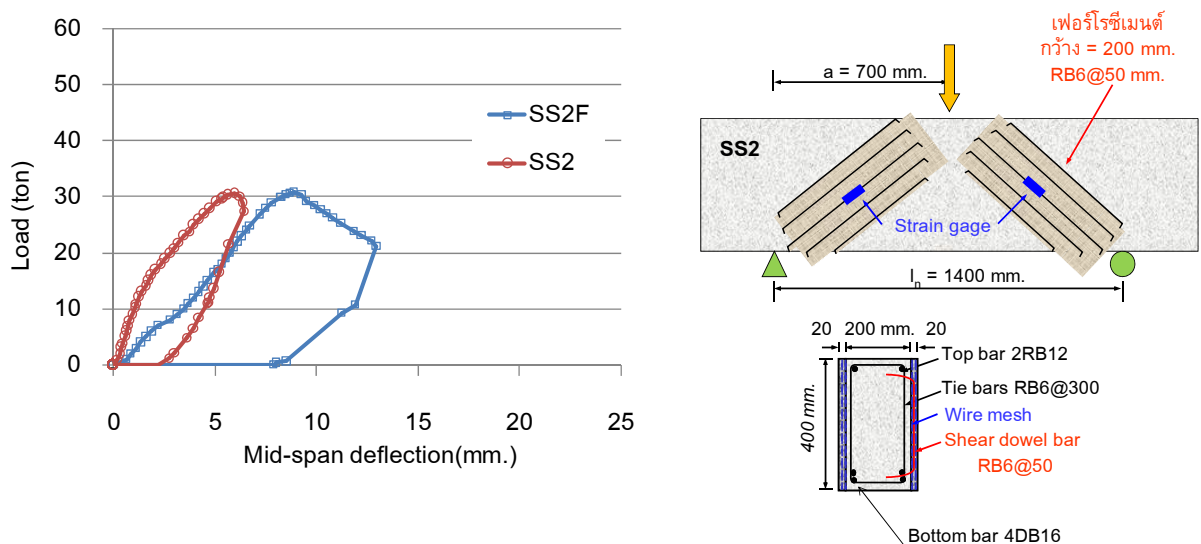
1. ใช้ลวดเหล็กเย็บคร่อมท่อนคอนกรีต(Strut)
2. ใช้แถบเฟอรโรซีเมนต์ทแยงโดยให้เหล็กโครงทแยงตามทิศทางท่อนคอนกรีตรับแรงอัด
3. ใช้แถบเฟอรโรซีเมนต์ประกบด้านข้างคาน

ชิ้นตัวอย่าง SS1F ซึ่งได้รับการซ่อมแซมมาจากชิ้นตัวอย่าง SS1 ซึ่งถูกฉีกและบดอัดจนล้าท่อนคอนกรีต(Strut) เกิดการวิบัติแบบ Shear tension failure โดยใช้แถบเฟอรโรซีเมนต์กว้าง 250 มม. และลวดเหล็กเย็บทแยงขนาด RB6@50 มม. ที่บริเวณผิวข้างคานทั้งสอง ผลการทดสอบปรากฏว่าคานเล็กที่ถูกซ่อมแซมไม่สามารถช่วยให้คานรับน้ำหนักได้มากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.2.2(a) แต่สิ่งที่ได้มาคือการค่อยๆ ลดลงของน้ำหนักกระทำ แสดงให้เห็นว่าท่อนคอนกรีตสามารถถูกเย็บเข้าไว้ด้วยกันเป็นกลุ่มก่อนได้



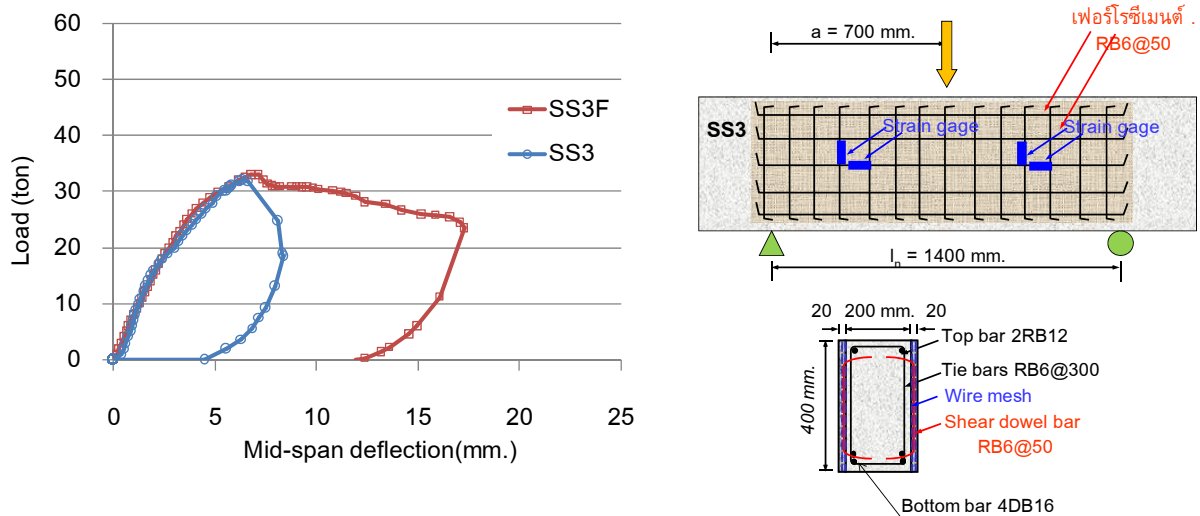
รูป 3.2.2(a) ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานลึ้ก SS1 และ SS1F

ขั้นตอนอย่าง **SS2F** ซึ่งได้รับการซ่อมแซมมาจากขั้นตอนอย่าง **SS2** ซึ่งมีลักษณะการวิบัติเช่นเดียวกับชิ้นงานในกลุ่ม **SS** การซ่อมแซมโดยใช้แถบเฟอโรซีเมนต์กว้าง 200 มม. และเหล็กโครงวางตัวแนวทแยงขนาด **RB6@50** มม. ที่บริเวณผิวข้างคานทั้งสอง ผลการทดสอบพบว่าการซ่อมแซมไม่สามารถช่วยให้คานรับน้ำหนักได้มากขึ้น แต่สิ่งที่ได้มาคือความเหนียวของโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 3.2.2(b)



รูป 3.2.2(b) ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานลึ้ก SS2

ขั้นตอนตัวอย่าง **SS3F** ซึ่งได้รับการซ่อมแซมมาจากขั้นตอนตัวอย่าง SS3 ในกลุ่มนี้จะมีลักษณะการวิบัติเช่นเดียวกัน ส่วนชิ้นงานนี้ถูกซ่อมแซมโดยใช้แถบเฟอร์โรซีเมนต์กว้างเท่ากับความลึกของคานทั้งสองข้างคานคือ 400 มม.หนา 20 มม. และใช้เหล็กโครงเจาะยึดในแนวตั้งและแนวนอนขนาด RB6@50# มม. เพื่อทดสอบสมมุติฐานการวิบัติอาจเป็นแบบแรงเฉือน ผลการทดสอบปรากฏว่าคานเล็กที่ถูกซ่อมแซมไม่สามารถช่วยให้กำลังเพิ่มขึ้นได้ รับกำลังได้ใกล้เคียงกับคานเดิมคือ 33.0 ตัน (รูปที่ 3.2.2(c)) ที่เป็นเช่นนี้เป็นเพราะคานเล็กที่ถูกบดอัดจนมากเกินไป อย่างไรก็ตามจะพบว่าโครงสร้างมีความเหนียวมากขึ้นมากจากการซ่อมแซม

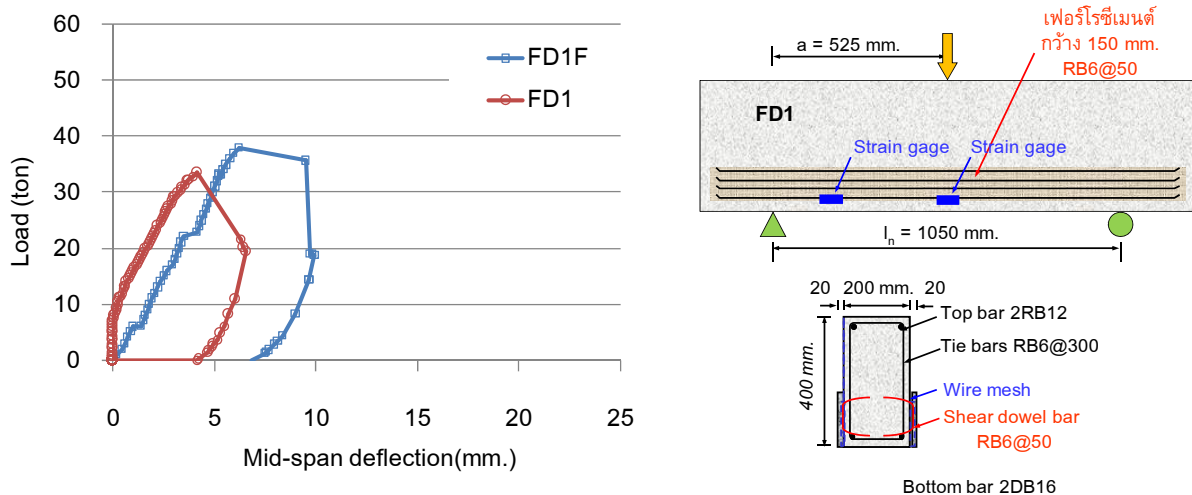


รูป 3.2.2(c) ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานเล็ก SS3

สรุปคานเล็กในกลุ่ม SS ที่มีระยะรับแรงเฉือนสั้น $a/d=2.0$ โดยคานมีปริมาณเหล็กล่างรับแรงดึงมาก การซ่อมแซมแบบใช้ลวดเย็บล้า Strut หรือการใช้เหล็ก Skeleton steel รวมทั้งการใช้เหล็กโครงในแนวนอน และแนวตั้ง ทำให้โครงสร้างมีความเหนียวมากขึ้น แต่ไม่สามารถช่วยให้โครงสร้างมีกำลังเพิ่มขึ้นได้

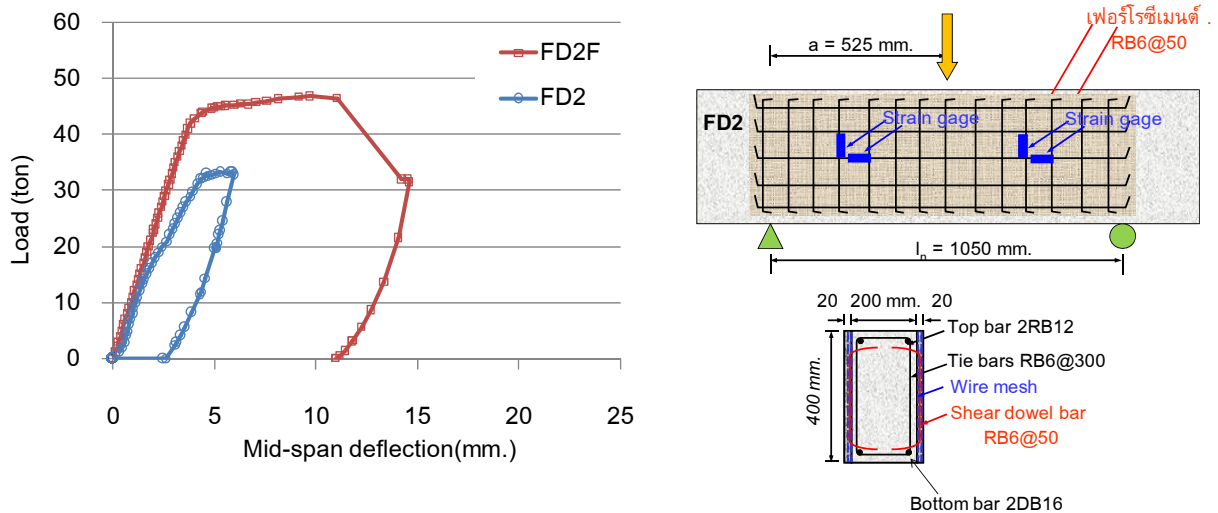
ชุดย่อยที่ 3.1 ทดสอบการซ่อมแซมในกลุ่มชิ้นตัวอย่าง FD ที่มีรูปแบบการวิบัติเป็นแบบ Shear-tension failure คือเหล็กล่างถูกดึงจนคลาก แม้ว่าอัตราส่วนระยะรับแรงเฉือนต่อความลึกคานจะต่ำ คือ $(a/d) = 1.5$

ชิ้นตัวอย่าง FD1F ซึ่งได้รับการซ่อมแซมมาจากชิ้นตัวอย่าง FD1 โดยใช้แถบเฟอร์โรซีเมนต์กว้าง 150 มม. และเหล็กโครงขนาด RB6@50 มม. ที่บริเวณผิวข้างคานล่าง ผลการทดสอบปรากฏว่าคานซ่อมแซมจะสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้นเป็น 37.9 ตัน มากกว่าเดิมร้อยละ 13.1 ดังแสดงในรูปที่ 3.3.1(a) รูปแบบการวิบัติยังไม่เปลี่ยนแปลงคือเป็นแบบ Shear tension failure



รูป 3.3.1(a) ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานเหล็ก FD1F และ FD1

ชิ้นตัวอย่าง FD2F ซึ่งได้รับการซ่อมแซมมาจากชิ้นตัวอย่าง FD2 โดยใช้แถบเฟอร์โรซีเมนต์ปิดเต็มด้านข้างคานคือกว้าง 400 มม. และใช้เหล็กโครงขนาด RB6@50 มม. ทั้งแนวตั้งและแนวนอนทั้งสองฝั่งคาน ผลการทดสอบปรากฏว่าคานซ่อมแซมจะสามารถรับน้ำหนักได้มากถึง 46.9 ตัน มากกว่าเดิมถึงร้อยละ 42.1 ดังแสดงในรูปที่ 3.3.1(b) เหตุที่เป็นเช่นนั้นเนื่องมาจากเหล็กโครงแนวตั้งช่วยต้านแรงเฉือนได้มากขึ้น ส่วนเหล็กโครงแนวนอนช่วยให้โครงสร้างรับแรงดัดได้มากขึ้นโดยเฉพาะแถบล่างข้างคาน รูปแบบการวิบัติแสดงถึงโครงสร้างมีความเหนียวมากขึ้น



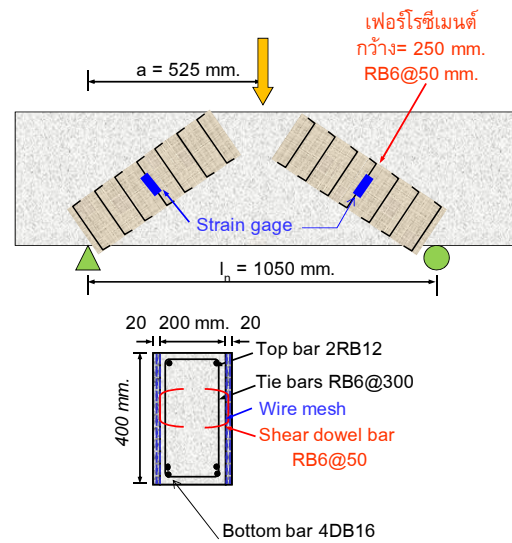
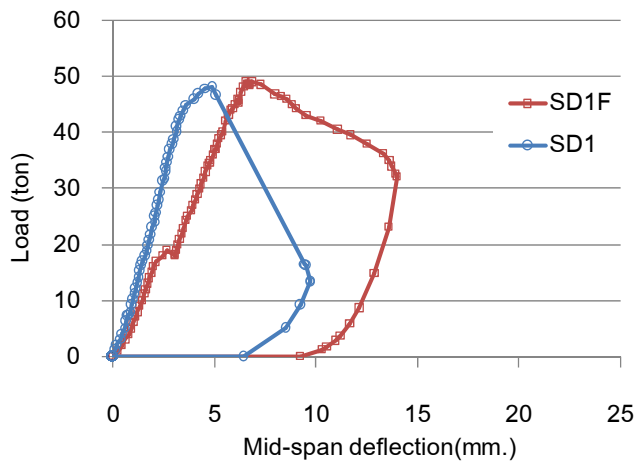
รูป 3.3.1(b) ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานเล็ก FD2 และ FD2

ชุดย่อยที่ 3.2 การซ่อมแซมในกลุ่มชิ้นตัวอย่าง SD ซึ่งมีอัตราส่วนระยะรับแรงเฉือนต่อความลึกคานเท่ากับ $(a/d) = 1.5$

ชิ้นตัวอย่างในกลุ่ม SD จะมีรูปแบบการวิบัติเป็นแบบ Shear Compression failure คือท่อนคอนกรีตถูกบดอัด แนวทางการซ่อมแซมที่กำหนดไว้มี 3 แนวทาง เช่นเดียวกับการซ่อมแซมชิ้นงานกลุ่ม SS ที่มีอัตราส่วน a/d สั้นกว่าคือ

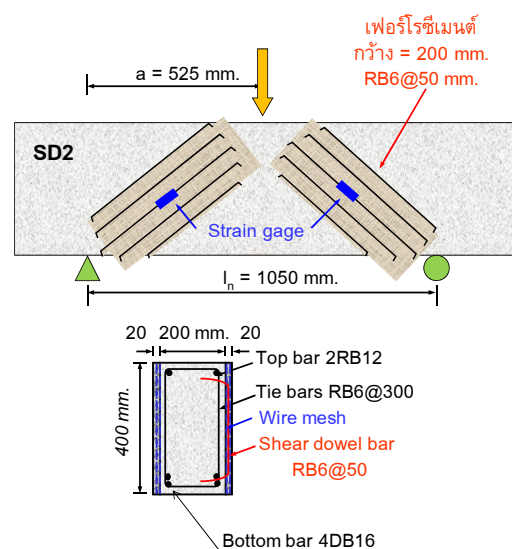
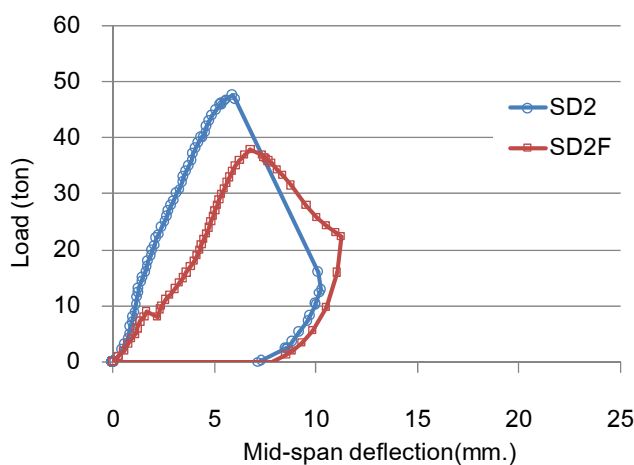
1. ใช้ลวดเหล็กเย็บคร่อมท่อนคอนกรีต(Strut)
2. ใช้แถบเฟอร์ไรซีเมนต์ทแยงโดยให้เหล็กโครงทแยงตามทิศทางท่อนคอนกรีตรับแรงอัด
3. ใช้แถบเฟอร์ไรซีเมนต์ประกบด้านข้างคาน

ชิ้นตัวอย่าง SD1F ซึ่งได้รับการซ่อมแซมมาจากชิ้นตัวอย่าง SD1 ซึ่งถูกบดอัดจนเป็นลำท่อน Strut โดยใช้แถบเฟอร์ไรซีเมนต์กว้าง 250 มม. และลวดเหล็กเย็บทแยงขนาด RB6@50 มม. ที่บริเวณผิวข้างคาน ผลการทดสอบปรากฏว่าคานเล็กที่ถูกซ่อมแซมไม่สามารถช่วยให้คานเดิมรับน้ำหนักได้มากขึ้นแต่อย่างใด (รูปที่ 3.3.2(a)) แต่สิ่งที่ได้มาคือการวิบัติที่ไม่จับปลิ้นเช่นก่อนการซ่อมแซม (Shear compression failure) แสดงให้เห็นว่าท่อนคอนกรีตยังถูกเย็บเป็นกลุ่มก่อน



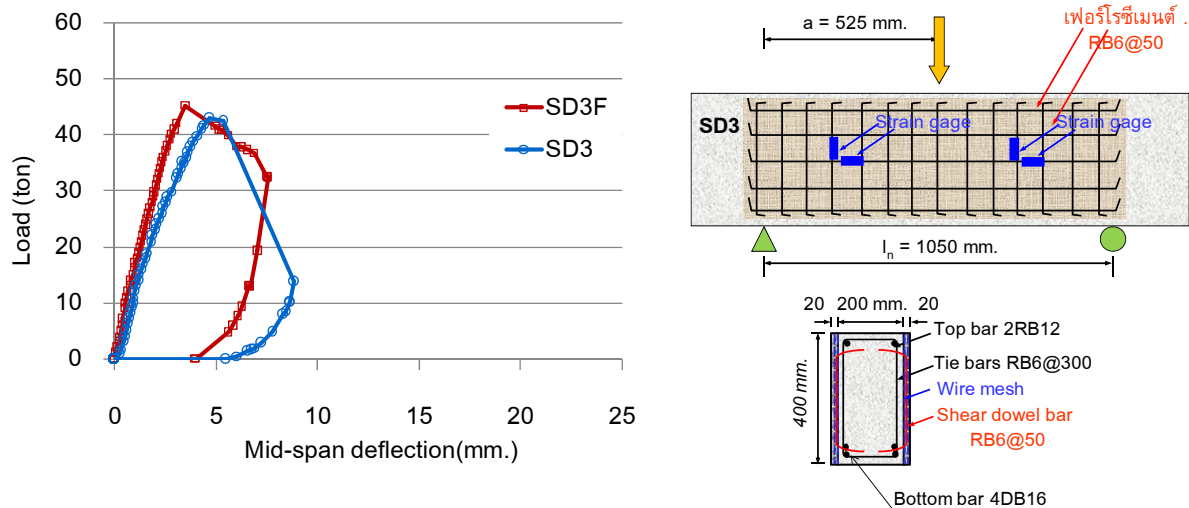
รูป 3.3.2(a) ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานลึก SD1 และ SD1F

ชิ้นตัวอย่าง **SD2F** ซึ่งได้รับการซ่อมแซมมาจากชิ้นตัวอย่าง SD2 ซึ่งถูกบดอัดจนลำหอน Strut เกิดการวิบัติ(Strut) ถูกซ่อมแซมโดยใช้แถบเฟอโรซีเมนต์กว้าง 200 มม. และเหล็กโครงเจาะยึดขนาด RB6@50 มม. เพื่อทำหน้าที่เป็นเหล็ก Strut อีกประเภทหนึ่ง ที่บริเวณผิวสองข้างคาน ผลการทดสอบปรากฏว่าคานลึกที่ถูกซ่อมแซมสามารถต้านทานกำลังได้เพียง 38.0 ตัน ไม่สามารถฟื้นกำลังให้กับคานเดิมที่รับน้ำหนักได้ 47.6 ตัน ดังแสดงในรูปที่ 3.3.2(b) ที่เป็นเช่นนั้นพอจะวิเคราะห์ได้ว่าเหล็กโครง(Skeleton) ไม่สามารถรับแรงอัดได้เนื่องจากเหล็กโครงจะเกิดการโก่งเดาะ ทำให้ไม่ได้ช่วยทอนคอนกรีตรับแรงอัด และที่กำลังน้อยกว่าเดิมก็เนื่องมาจากคานที่ถูกบดอัดมาก จะเสียหายมากจนการซ่อมแซมทำได้ไม่ดีพอ



รูป 3.3.2(b) ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานลึก SD2, SD2F

ชิ้นตัวอย่าง **SD3F** ซึ่งได้รับการซ่อมแซมมาจากชิ้นตัวอย่าง SD3 ซึ่งถูกบดอัดจนลำท่อน Strut เกิดการวิบัติ(Crushing) ถูกซ่อมแซมโดยใช้แถบเฟอร์ไรซีเมนต์กว้างเท่ากับความลึกของคานทั้งสองข้างคานคือ 400 มม. และใช้เหล็กโครงเจาะยึดในแนวตั้งและแนวนอนขนาด RB6@50[#] มม. เพื่อทดสอบสมมุติฐานการวิบัติอาจเป็นแบบแรงเฉือน ผลการทดสอบปรากฏว่าคานเหล็กที่ถูกซ่อมแซมไม่สามารถช่วยให้กำลังเพิ่มขึ้นได้ รับกำลังได้ใกล้เคียงกับคานเดิมคือ 46.0 ตัน ดังแสดงในรูปที่ 3.3.2(c) ที่เป็นเช่นนี้เป็นเพราะคานเหล็กที่ถูกบดอัดจนชำรุด การซ่อมแซมเพื่อให้กำลังสูงขึ้นนั้นอาจทำได้ยาก อย่างไรก็ตามจะพบว่า การฟื้นกำลังให้กลับมาได้เท่าเดิมนั้น การซ่อมแซมด้วยซีเมนต์กัการที่ช่วยประสานในคอนกรีตรวมตัวกัน และเหล็กโครงแนวตั้งและแนวนอนมีส่วนในการช่วยรับแรงด้วย



รูป 3.3.2(c) ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานเหล็ก SD3, SD3F

สรุป คานในกลุ่ม SD ที่มีระยะรับแรงเฉือนสั้นมาก $a/d=1.5$ และคานมีการใช้เหล็กเสริมรับแรงดึงมาก การซ่อมแซมทำได้ไม่ดีนัก กำลังไม่สามารถรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นได้ เนื่องจากการเสริมด้วยแผ่นเฟอร์ไรซีเมนต์นั้นเกิดการโก่งเดาะด้านข้าง ทำให้เหล็กโครงไม่ได้ทำงาน

จากผลการทดสอบชิ้นตัวอย่างทั้งหมด สามารถสรุปเป็นตารางที่ 3.2 และ 3.3 ได้ดังนี้

ตาราง 3.2 สรุปน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของกลุ่มคาน FB, FS และ FD (วิบัติภายใต้แรงดัด) และรูปแบบการวิบัติก่อนและหลังเสริมเฟอร์โรซีเมนต์

ชนิดทดสอบ	น้ำหนักประลัย (ตัน)	รูปแบบการวิบัติ	ชนิดทดสอบ หลังซ่อมแซม	น้ำหนักประลัย (ตัน)	รูปแบบการวิบัติ หลังซ่อมแซม
FB3	14.2	แรงดัด	FB3F	16.6	แรงดัด
FS1	20.0	แรงดัด	FS1F	22.0	แรงเฉือนร่วมดัด
FS2	16.0	แรงดัด	FS2F	33.0	แรงเฉือนร่วมดัด
FD1	33.5	แรงเฉือนร่วมดัด	FD1F	37.9	แรงเฉือนร่วมดัด
FD2	33.0	แรงเฉือนร่วมดัด	FD2F	46.9	แรงเฉือนร่วมดัด

ตาราง 3.3 สรุปน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของกลุ่มคาน SB, SS และ SD (วิบัติภายใต้แรงเฉือน) และรูปแบบการวิบัติก่อนและหลังเสริมเฟอร์โรซีเมนต์

ชนิดทดสอบ	น้ำหนักประลัย (ตัน)	รูปแบบการวิบัติ	ชนิดทดสอบ หลังซ่อมแซม	น้ำหนักประลัย (ตัน)	รูปแบบการวิบัติ หลังซ่อมแซม
SB3	19.9	แรงเฉือน	SB3F	26.4	แรงดัด
SS1	31.1	แรงเฉือนร่วมอัด	SS1F	27.2	แรงเฉือนร่วมอัด
SS2	30.7	แรงเฉือนร่วมอัด	SS2F	31.0	แรงเฉือนร่วมอัด
SS3	32.0	แรงเฉือนร่วมอัด	SS3F	33.0	แรงเฉือนร่วมอัด
SD1	48.0	แรงเฉือนร่วมอัด	SD1F	49.0	แรงเฉือนร่วมอัด
SD2	47.6	แรงเฉือนร่วมอัด	SD2F	38.0	แรงเฉือนร่วมอัด
SD3	43.0	แรงเฉือนร่วมอัด	SD3F	46.0	แรงเฉือนร่วมอัด

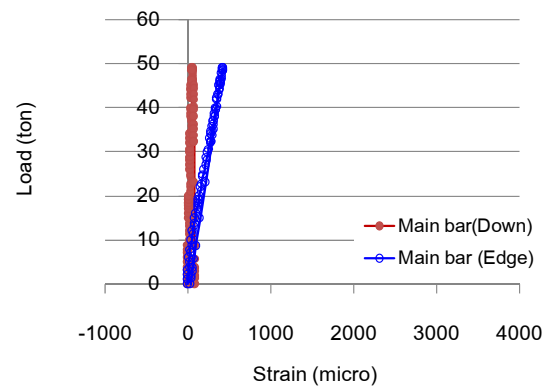
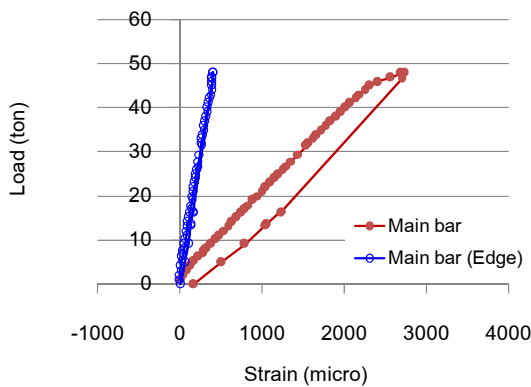
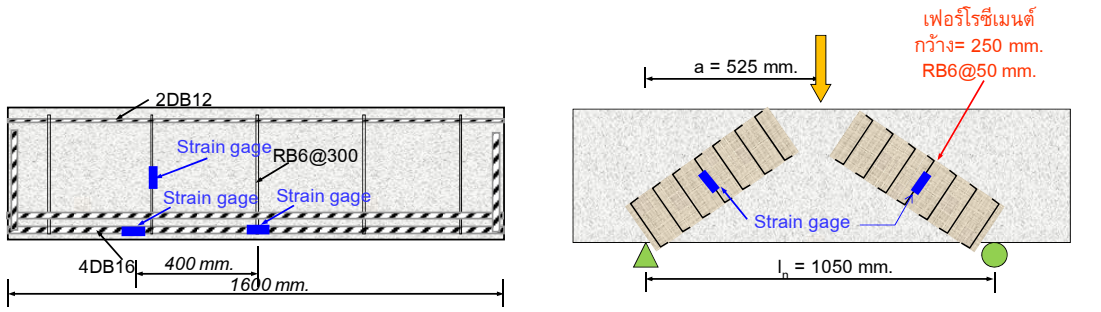
ความเครียดที่เกิดกับเหล็กเสริมหลัก เหล็กปลอก และเหล็กเดือย

ความเครียดที่เกิดขึ้นในเนื้อเหล็กตำแหน่งต่างๆเป็นดัชนีที่บ่งบอกระดับของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเมื่อโครงสร้างรับแรงกระทำระดับใดๆ ดัชนีนี้ทำให้เราสามารถทราบกลไกในการทำงานของโครงสร้างคอนกรีตได้

ผลการทดสอบคานเหล็กที่มีตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกต่างกัน ก่อนและหลังซ่อมแซม

เป็นการศึกษาพฤติกรรมของเหล็กเสริมเมื่อตำแหน่งของการบรรทุกเปลี่ยนแปลง

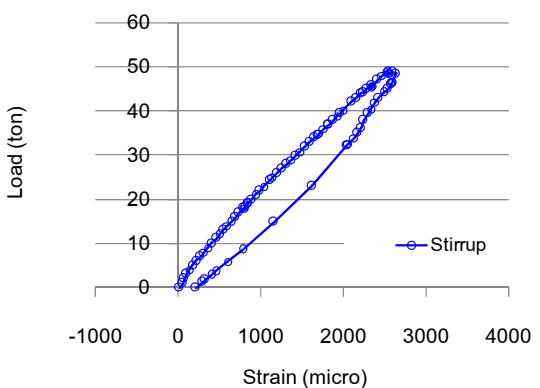
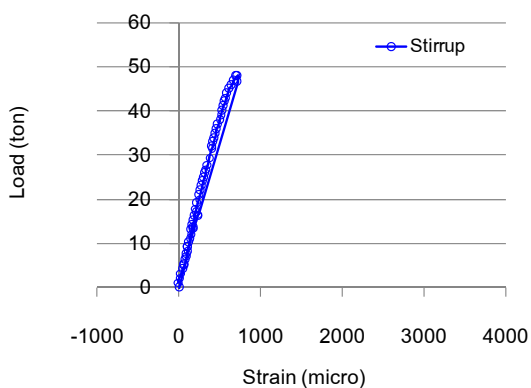
ก) ชั้นทดสอบคานเหล็กคอนกรีต(SD1) และคานเหล็กเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์ (SD1F)



ก) คานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็ก(SD1)

ข) คานเหล็กเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(SD1F)

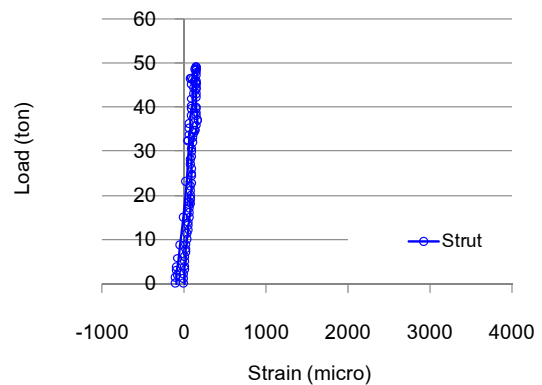
รูป 3.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กเสริมหลัก



ก) คานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็ก(SD1)

ข) คานเหล็กเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(SD1F)

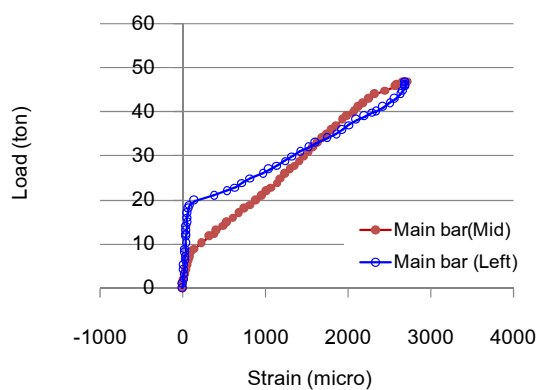
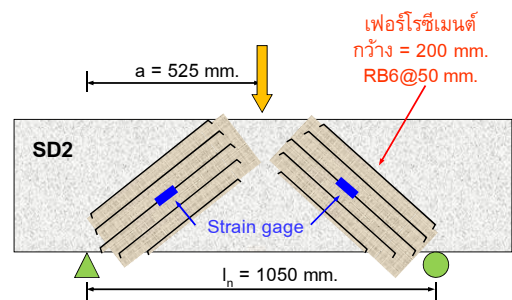
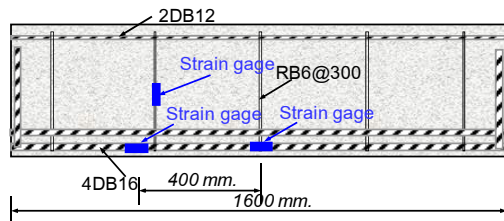
รูป 3.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กปลอก



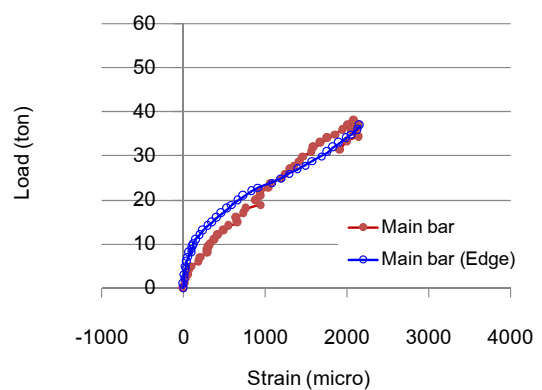
ข) คานเหล็กเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(SD1F)

รูป 3.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กยึดประสาน(Shear dowel)

ข) ขั้นตอนทดสอบคานเหล็กคอนกรีต(SD2) และคานเหล็กเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์ (SD2F)

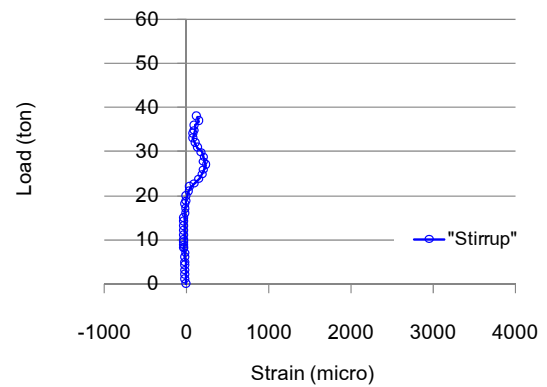
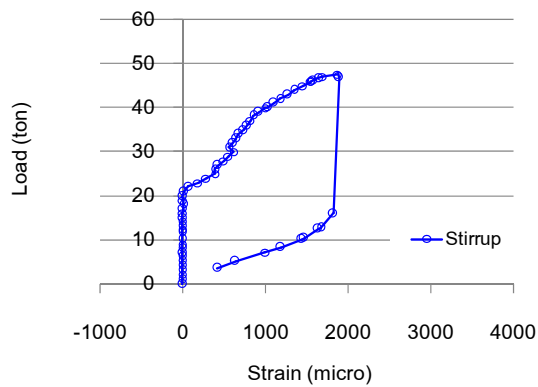


ก) ขั้นตอนทดสอบคานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็ก(SD2)



ข) คานเหล็กเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(SD2F)

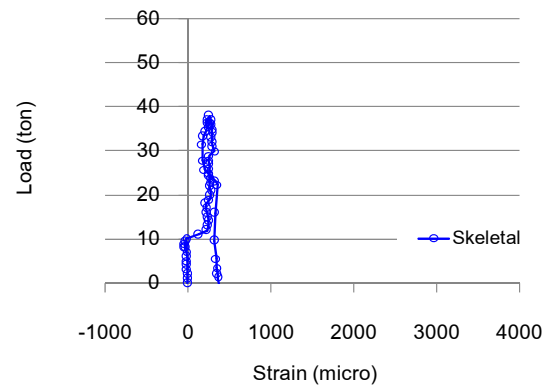
รูป 3.4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กเสริมหลัก



ก) คานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็ก(SD2)

ข) คานเหล็กเสริมกำลังเฟอร์ไรต์เมนต์(SD2F)

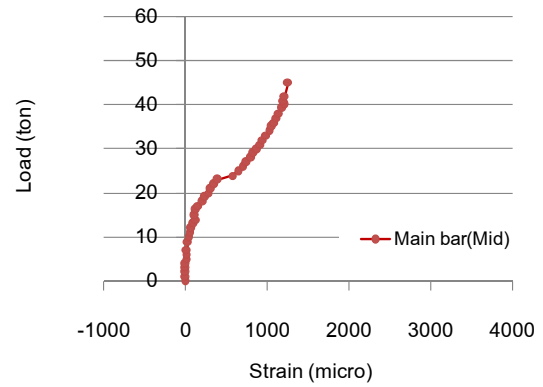
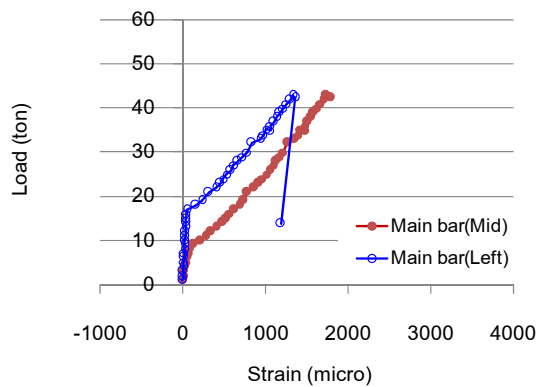
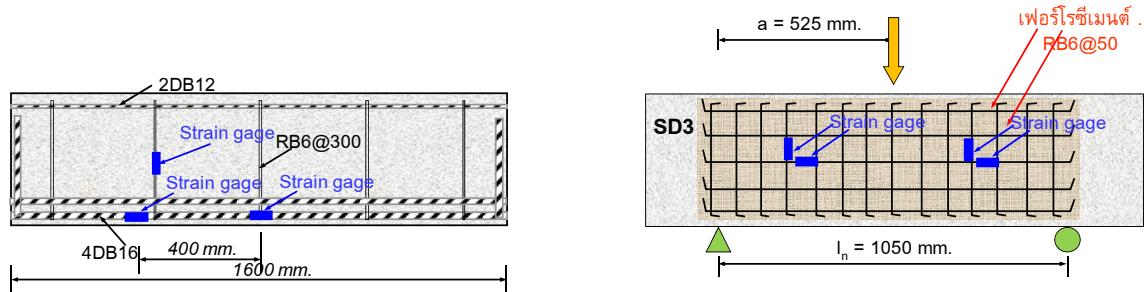
รูป 3.4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กปลอก



ข) คานเหล็กเสริมกำลังเฟอร์ไรต์เมนต์(SD2F)

รูป 3.4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กโครงทแยง(Skeleton steel)

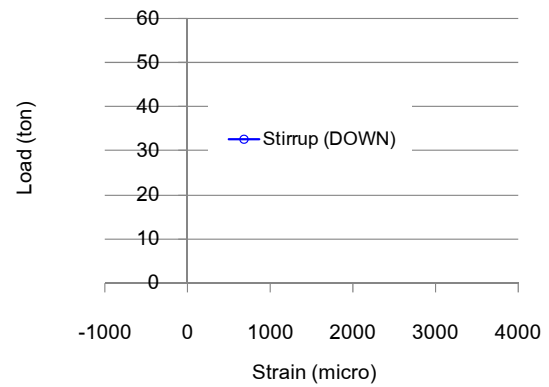
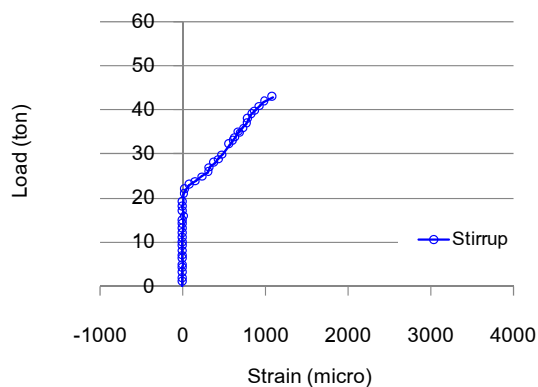
ค) ขั้นตอนทดสอบคานเหล็กคอนกรีต(SD3) และคานเหล็กเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์ (SD3F)



ก) ขั้นตอนทดสอบคานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็ก(SD3)

ข) คานเหล็กเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(SD3F)

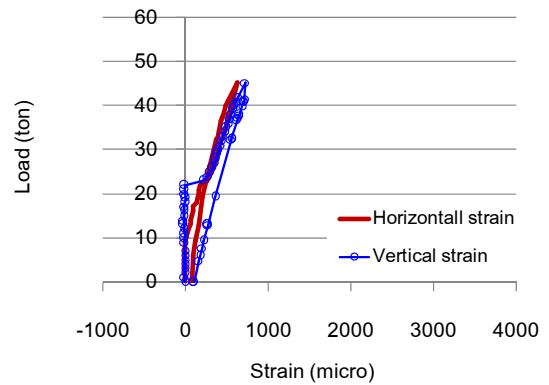
รูป 3.4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กเสริมหลัก



ก) คานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็ก(SD3)

ข) คานเหล็กเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(SD3F)

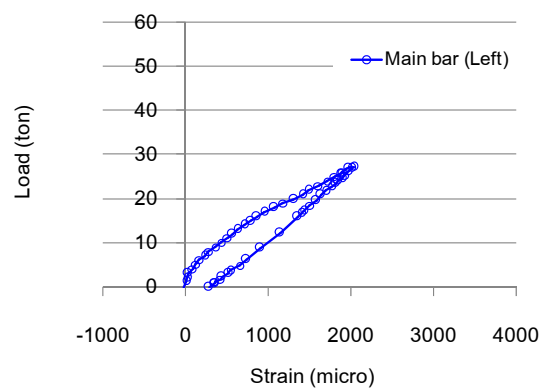
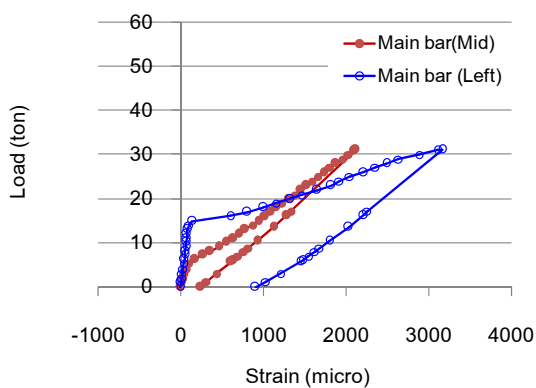
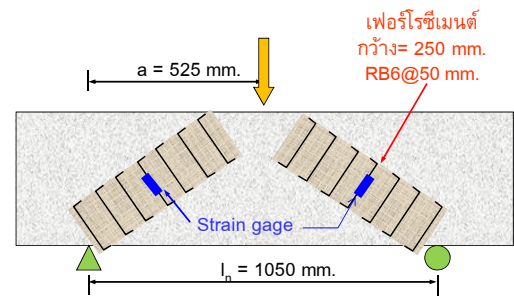
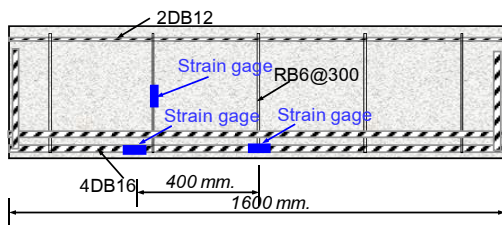
รูป 3.4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กปลอก



ข) คานเหล็กเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(SD3F)

รูป 3.4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กโครงทแยง(Skeleton steel)

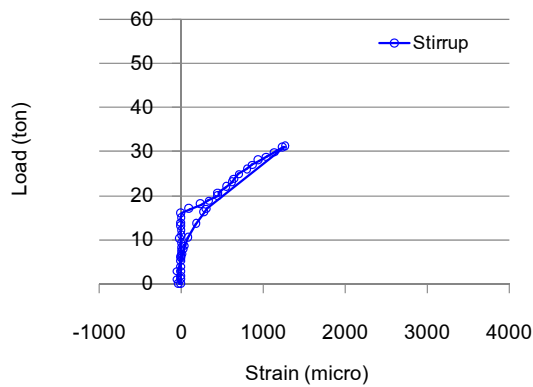
ง) ชั้นทดสอบคานเหล็กคอนกรีต(SS1) และคานเหล็กเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์ (SS1F)



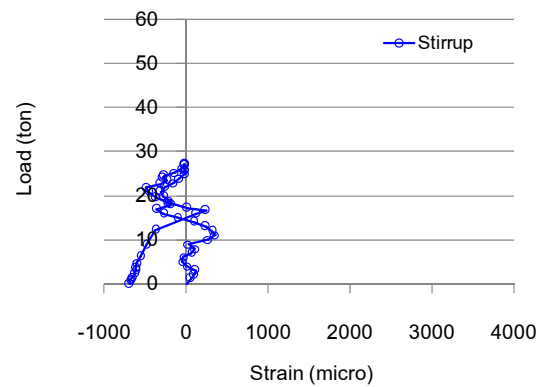
ก) ชั้นทดสอบคานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็ก(SS1)

ข) คานเหล็กเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(SS1F)

รูป 3.4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กเสริมหลัก

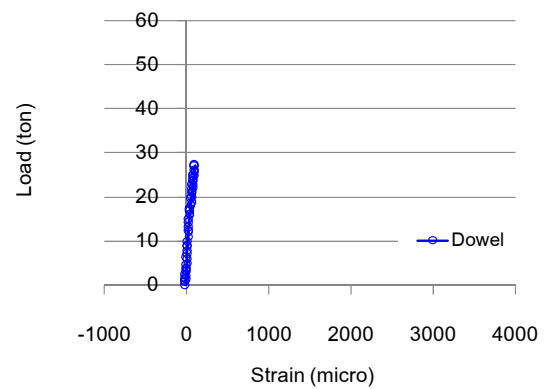


ก) คานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็ก(SS1)



ข) คานเหล็กเสริมกำลังเฟอร์โรซีเมนต์(SS1F)

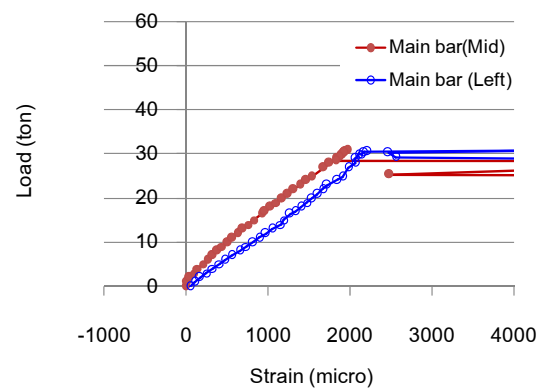
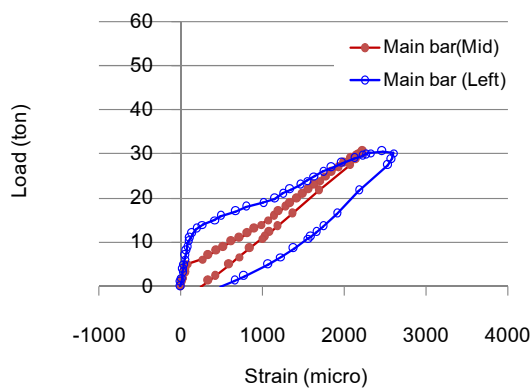
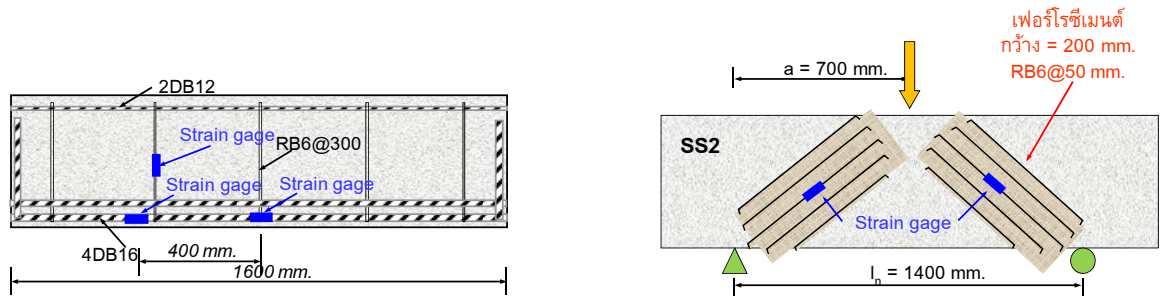
รูป 3.4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กปลอก



ข) คานเหล็กเสริมกำลังเฟอร์โรซีเมนต์(SS1F)

รูป 3.4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในลวดเย็บ(Shear dowel)

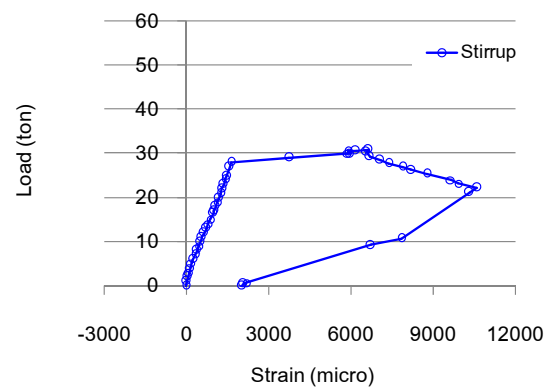
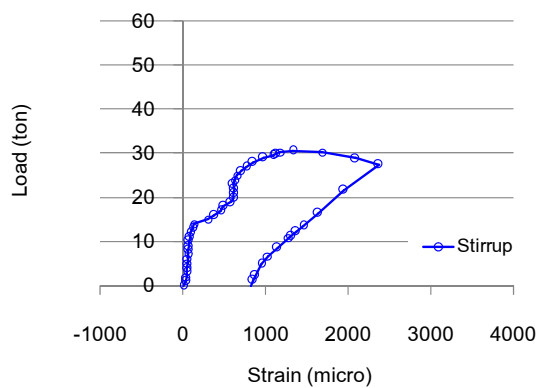
จ) ชั้นทดสอบคานเหล็กคอนกรีต(SS2) และคานเหล็กเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์ (SS2F)



ก) ชั้นทดสอบคานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็ก(SS2)

ข) คานเหล็กเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(SS2F)

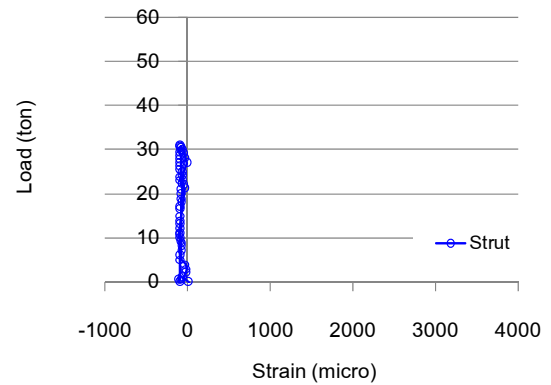
รูป 3.4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กเสริมหลัก



ก) คานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็ก(SS2)

ข) คานเหล็กเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(SS2F)

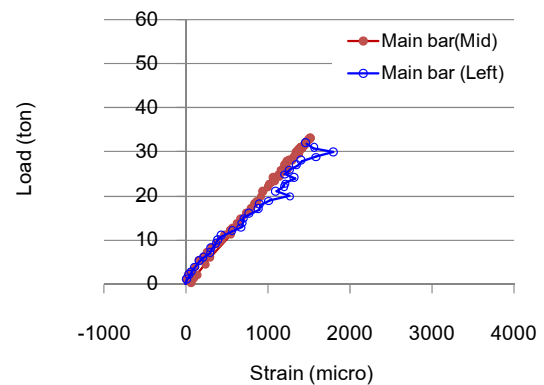
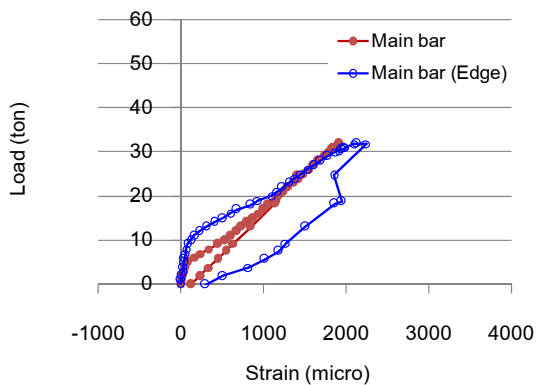
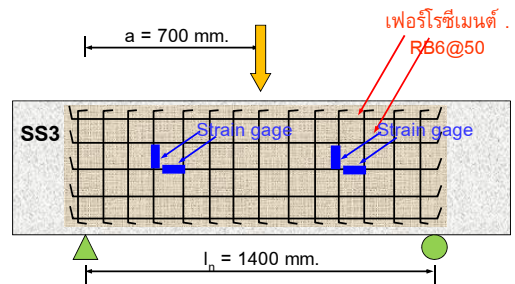
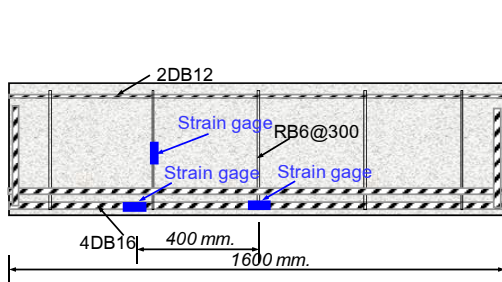
รูป 3.4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กปลอก



ข) คานเหล็กเสริมกำลังเฟอร์โรซีเมนต์(SS2F)

รูป 3.4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กโครงทแยง(Skeleton steel)

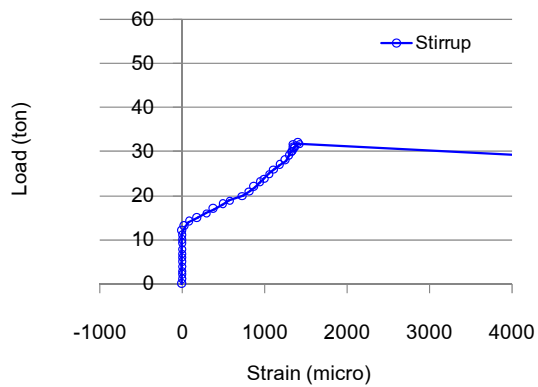
ฉ) ชั้นทดสอบคานเหล็กคอนกรีต(SS3) และคานเหล็กเสริมกำลังเฟอร์โรซีเมนต์ (SS3F)



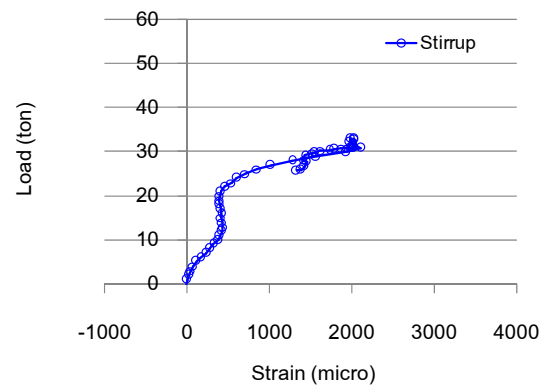
ก) ชั้นทดสอบคานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็ก(SS3)

ข) คานเหล็กเสริมกำลังเฟอร์โรซีเมนต์(SS3F)

รูป 3.4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กเสริมหลัก

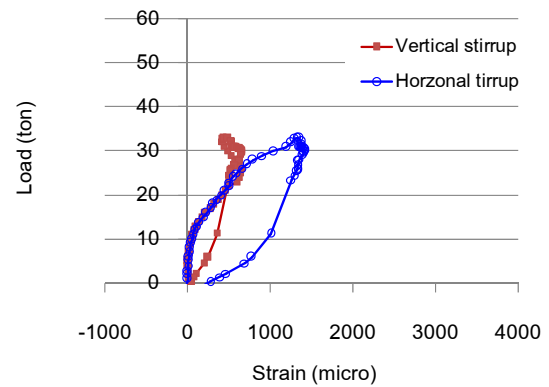


ก) คานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็ก(SS3)



ข) คานเหล็กเสริมกำลังเฟอร์ไรต์ซีเมนต์(SS3F)

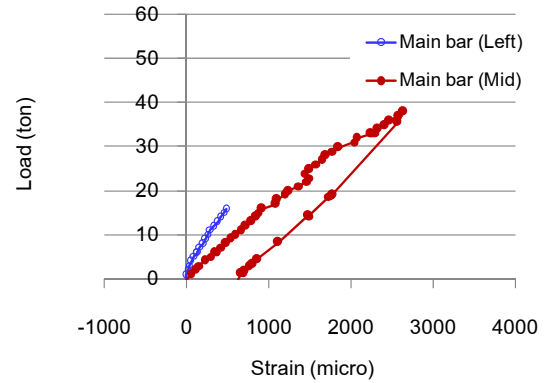
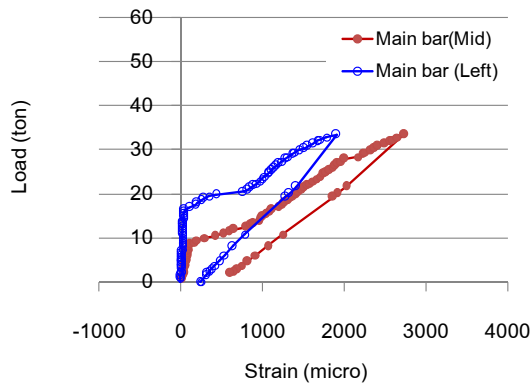
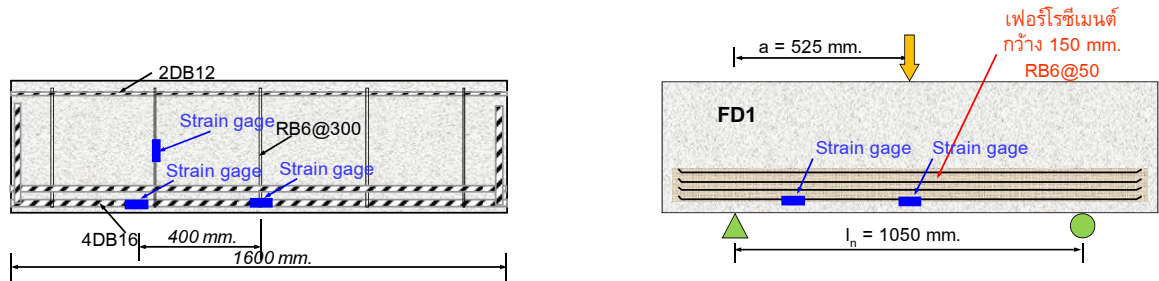
รูป 3.4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กปลอก



ข) คานเหล็กเสริมกำลังเฟอร์ไรต์ซีเมนต์(3F)

รูป 3.4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กโครงทแยง(Skeleton steel)

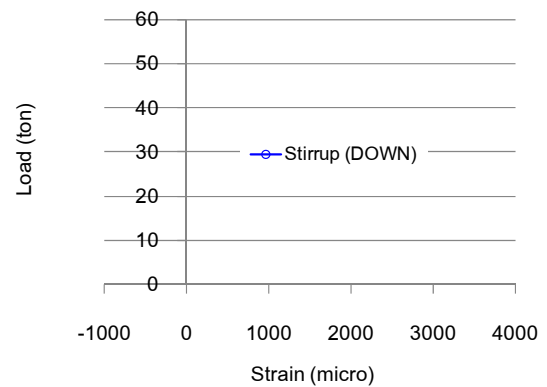
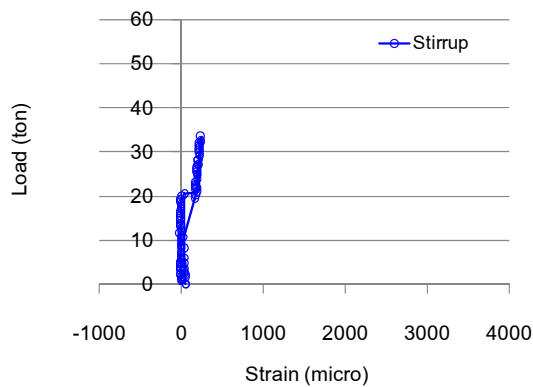
ข) ชั้นทดสอบคานเหล็กคอนกรีต(FD1) และคานเหล็กเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์ (FD1F)



ก) ชั้นทดสอบคานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็ก(FD1)

ข) คานเหล็กเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(FD1F)

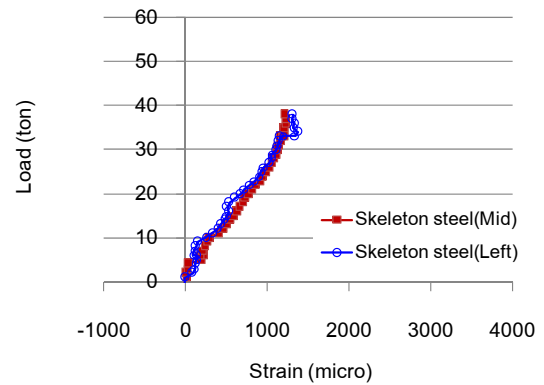
รูป 3.4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กเสริมหลัก



ก) คานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็ก(FD1)

ข) คานเหล็กเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(FD1F)

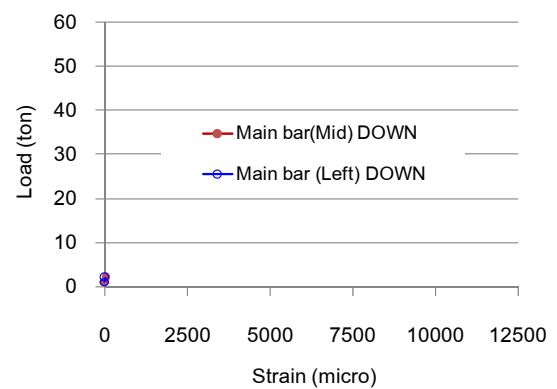
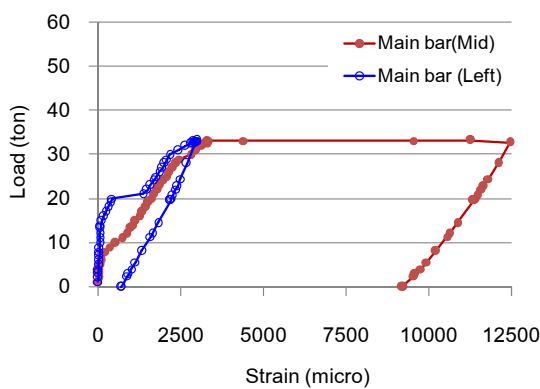
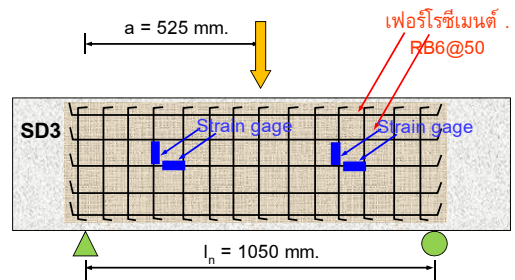
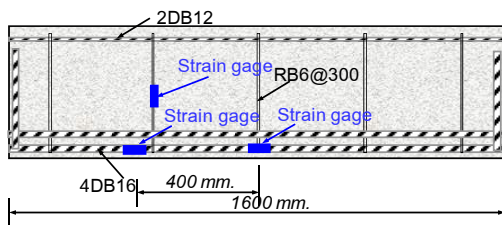
รูป 3.4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กปลอก



ข) คานเหล็กเสริมกำลังเฟอร์โรซีเมนต์(FD1F)

รูป 3.4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กโครงทแยง(Skeleton steel)

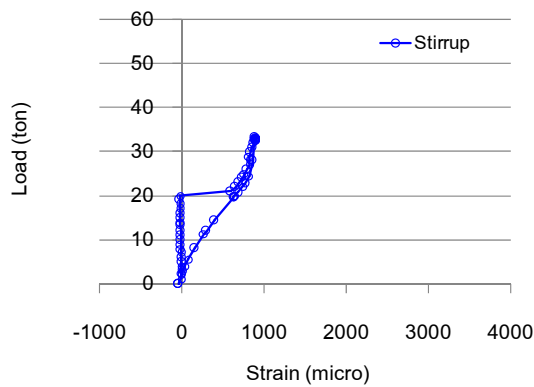
ช) ชั้นทดสอบคานเหล็กคอนกรีต(FD2) และคานเหล็กเสริมกำลังเฟอร์โรซีเมนต์ (FD2F)



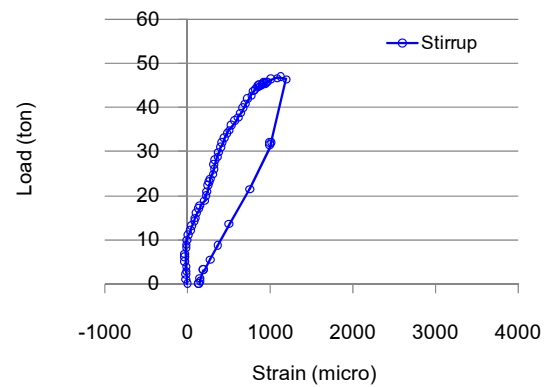
ก) ชั้นทดสอบคานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็ก(FD2)

ข) คานเหล็กเสริมกำลังเฟอร์โรซีเมนต์(FD2F)

รูป 3.4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กเสริมหลัก

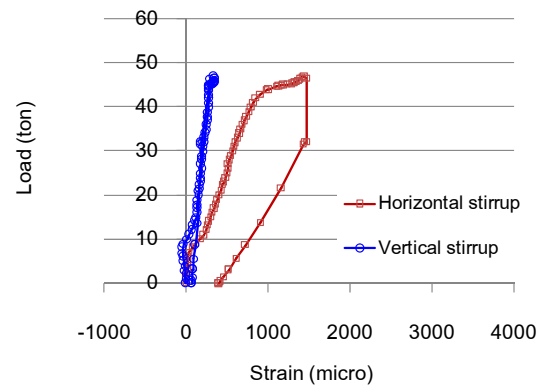


ก) คานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็ก(FD2)



ข) คานเหล็กเสริมกำลังเฟอร์โรซีเมนต์(FD2F)

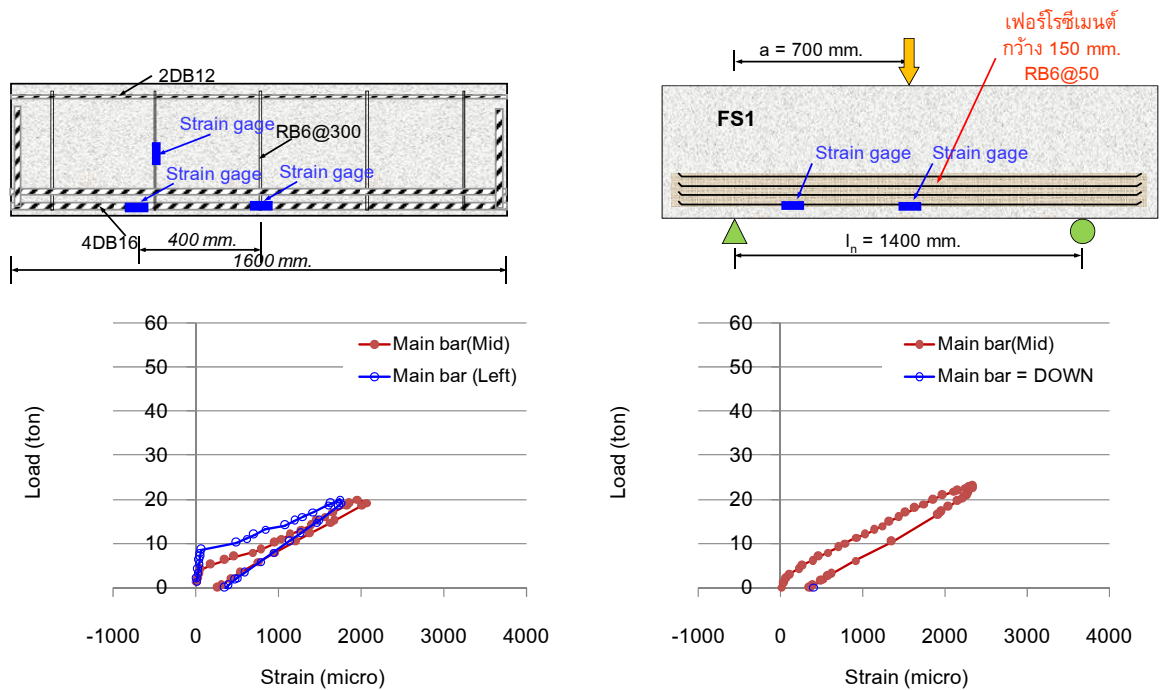
รูป 3.4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กปลอก



ข) คานเหล็กเสริมกำลังเฟอร์โรซีเมนต์(FD2F)

รูป 3.4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กโครงแนวนอน และตั้ง

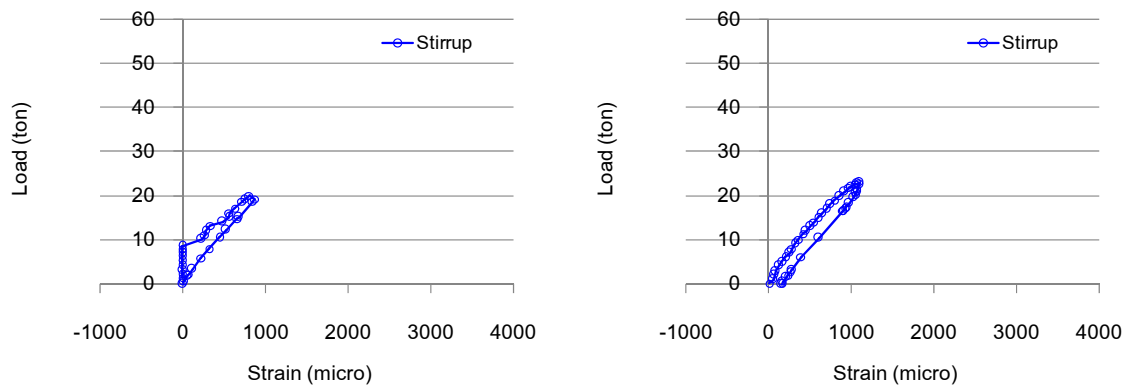
ณ) ชั้นทดสอบคานเหล็กคอนกรีต(FS1) และคานเหล็กเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์ (FS1F)



ก) ชั้นทดสอบคานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็ก(FS1)

ข) คานเหล็กเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(FS1F)

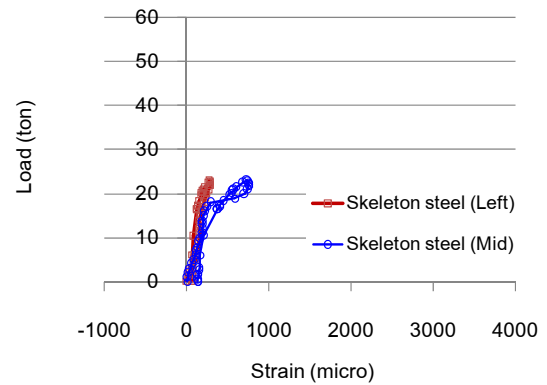
รูป 3.4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กเสริมหลัก



ก) คานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็ก(FS1)

ข) คานเหล็กเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(FS1F)

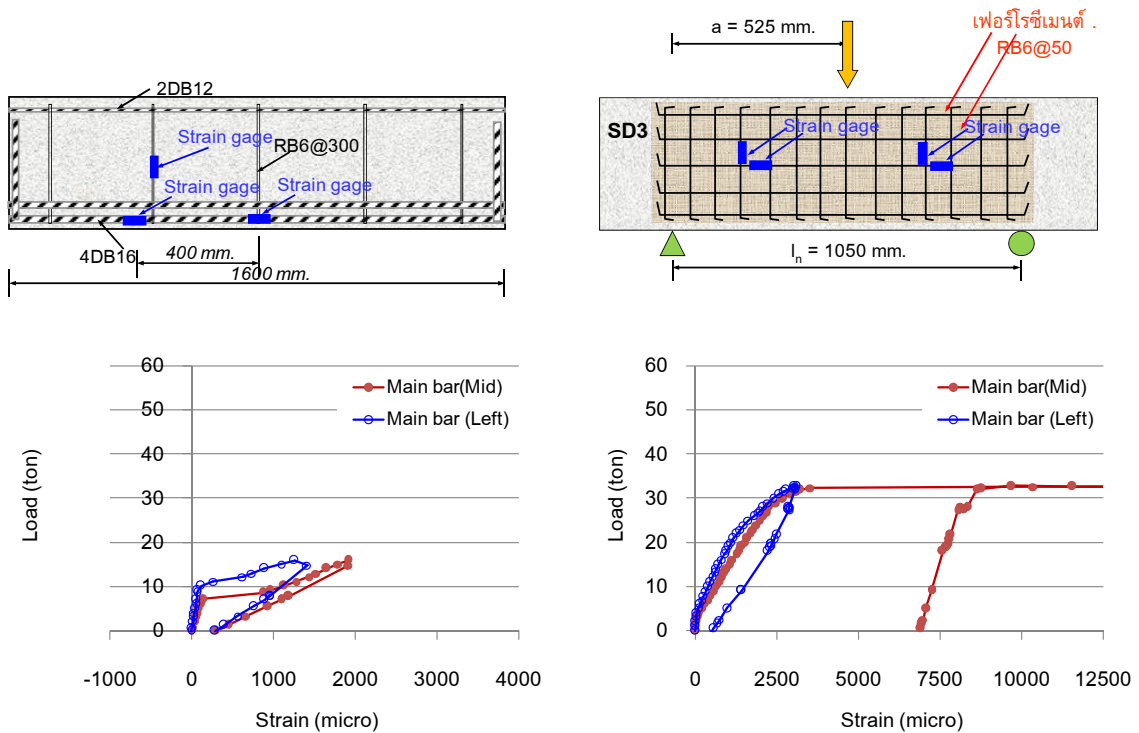
รูป 3.4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กปลอก



ข) คานเหล็กเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(FS1F)

รูป 3.4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กโครงนอน(Skeleton steel)

ญ) ชั้นทดสอบคานเหล็กคอนกรีต(FS2) และคานเหล็กเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์ (FS2F)

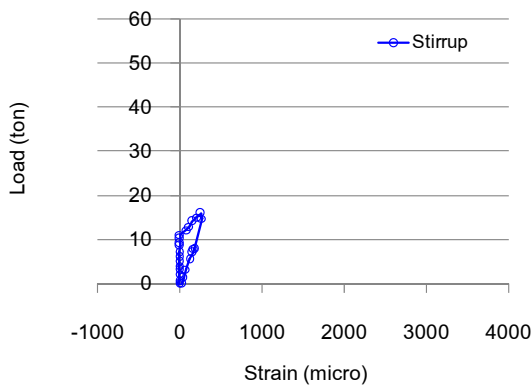


ก) ชั้นทดสอบคานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็ก(FS2)

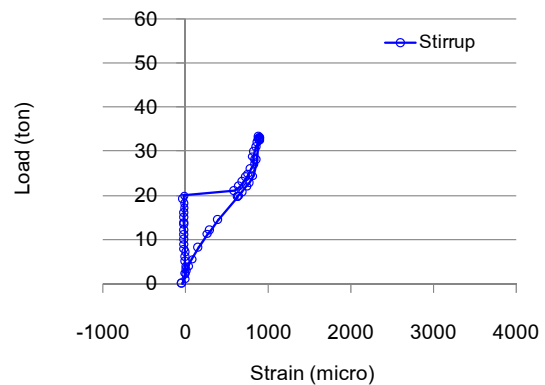
ข) คานเหล็กเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(FS2F)

รูป 3.4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กเสริมหลัก

ก)

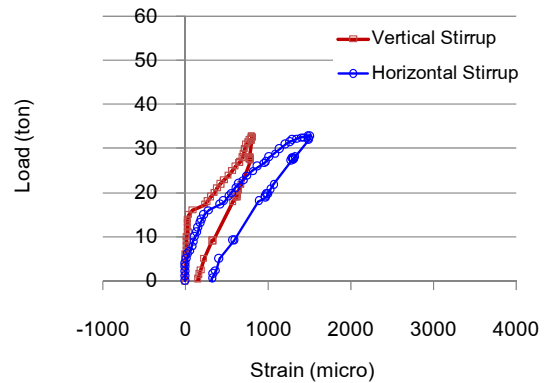


ก) คานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็ก(FS2)



ข) คานเหล็กเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(FS2F)

รูป 3.4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กปลอก



ข) คานเหล็กเสริมกำลังเฟอโรซีเมนต์(FS2F)

รูป 3.4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และความเครียดในเหล็กโครงแนวนอน และแนวตั้ง

6. สรุปผลการทดสอบ

การทดสอบในครั้งนี้เพื่อพินิจกำลังของคานเหล็กที่เสียหาย ณ ระดับความรุนแรงต่างๆ ภายใต้แรงดัดและแรงเฉือน โดยอาศัยเทคนิคการการยัดประสานแผ่นเฟอโรซีเมนต์ ปัจจัยที่ทำให้คานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็กประสบความสำเร็จในการพินิจกำลัง คือการยัดประสานของเนื้อคอนกรีตเก่าที่วิบัติเข้าด้วยกัน ส่วนปัจจัยที่ทำให้คานเหล็กมีความสามารถในการรับน้ำหนักได้มากขึ้นสามารถจำแนกตามลักษณะการรับน้ำหนักได้ดังนี้

1 คานเหล็กและคานสั้นที่มีรูปแบบการวิบัติอันเนื่องมาจากแรงอัด(Strut-compression) และแรงเฉือนร่วมอัด(Shear-compression) การซ่อมแซมด้วยเทคนิค Ferro-cement ไม่ว่าจะจัดเรียงในรูปแบบใดทำได้ไม่ดีนัก กำลังไม่สามารถรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นได้ เนื่องจากการเสริมด้วยแผ่นเฟอโรซีเมนต์นั้นเกิดการโก่งเดาะด้านข้าง ทำให้เหล็กโครงทำงานไม่ได้

2 คานเล็กและคานสั้นที่มีรูปแบบการวิบัติอันเนื่องมาจากแรงเฉือนร่วมดึง(Shear-tension) และแรงดึง (Tension) การซ่อมแซมโดยใช้แถบเฟอร์โรซีเมนต์ประกบด้านข้างคานทั้งสองด้าน จะทำให้ความสามารถของ โครงสร้างดีขึ้น และดีกว่าวิธีการทำแถบเฟอร์โรซีเมนต์ด้านล่างข้าง

3 คานปกติที่มีรูปแบบการวิบัติแบบแรงเฉือน(Shear) การซ่อมแซมโดยใช้แถบเฟอร์โรซีเมนต์ประกบ ด้านข้างโดยใช้เหล็กโครงเอียงทแยงรับแรงดึง จะให้ผลดีที่สุดโดยสามารถให้กำลังสูงขึ้นมาก และเปลี่ยน รูปแบบการวิบัติจากแรงเฉือนเป็นแรงดึงได้

4 คานปกติที่มีรูปแบบการวิบัติแบบแรงดึง(Tension) การซ่อมแซมโดยใช้แถบเฟอร์โรซีเมนต์ประกบ ท้องคานจะให้ผลค่อนข้างดี กำลังเพิ่มขึ้นได้ตามปริมาณเหล็กโครงที่ใช้

7. ผลลัพธ์จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

7.1 ผลงานตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ

การศึกษานี้อยู่ระหว่างการนำไปสู่การตีพิมพ์ในระดับวารสารวิชาการนานาชาติ Magazine of Concrete Research, Materials and Structures

7.2 การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

- เชิงพาณิชย์ : การวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อ วิศวกร และนายช่าง คนงาน เนื่องจากสร้างความมั่นใจ ในการนำไปใช้แก่ผู้ที่เกี่ยวข้องสามารถแก้ปัญหาหน้างานได้ทันทีที่เกิดการจ้างงานตามชนบทเนื่องจากวัสดุ เฟอร์โรซีเมนต์หาได้ง่าย วิธีการก่อสร้างไม่ซับซ้อน

- เชิงนโยบาย : ทำให้ทราบวิธีแต่ละวิธีในการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อเกิดความเสียหาย ไม่เท่ากัน และรูปแบบการวิบัติแตกต่างกัน เช่นในรูปแบบภายใต้แรงดัด ในรูปแบบภายใต้แรงเฉือน

- เชิงสาธารณะ : การวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อ วิศวกร และนายช่าง คนงาน เนื่องจากสร้างความมั่นใจ ในการนำไปใช้แก่ผู้ที่เกี่ยวข้องสามารถแก้ปัญหาหน้างานได้ทันที เกิดการจ้างงานตามชนบทเนื่องจากวัสดุ เฟอร์โร

- เชิงวิชาการ : 1. ทำให้ทราบถึงตัวแปรหลักที่ใช้เสริมกำลังในคานเฟอร์โรซีเมนต์ เช่น ปริมาณลวดตา ข่าย อัตราส่วนเหล็กโครงตามยาว อัตราส่วนเหล็กโครงตามยาว จำนวนตัวยึดประสาน ที่จะส่งผลต่อการ เสริมกำลังในคานที่วิบัติในแต่ละรูปแบบอย่างไร

2. ทราบรูปแบบการซ่อมแซม และการเสริมกำลังคานเล็กคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อเกิด ความเสียหายไม่เท่ากัน และรูปแบบการวิบัติแตกต่างกัน เช่นในรูปแบบภายใต้แรงเฉือนร่วมอัด แรงเฉือนร่วม ดัด

3. ทำให้ทราบถึงตัวแปรหลักที่ใช้เสริมกำลังในคานเล็กเฟอร์โรซีเมนต์ เช่น อัตราส่วน เหล็กโครงตามยาว จำนวนตัวยึดประสาน ที่จะส่งผลต่อการเสริมกำลังในคานเล็กที่วิบัติในแต่ละรูปแบบ อย่างไร

7.3 อื่นๆ การนำเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการ

วีรพงษ์ สะสม วีระพจน์ ศุภวริยะกิจ “การเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยเฟอร์โรซีเมนต์ตาม ระดับของความเสียหาย” การประชุมทางวิชาการพะเยาวิจัย 2558 วันที่ 29-30 มกราคม 2558 ณ อาคาร เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยพะเยา อ.เมือง จ.พะเยา