



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประเมินกำลังรับแรงดัดและความเหนียวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหล็กเสริมเกิดสนิม

Evaluation of Flexural Strength and Ductility of
Corroded Reinforced Concrete Beams

ผศ. ดร. อานนท์ วงษ์แก้ว

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 2558A10802416

สัญญาเลขที่ ๑๑๗/๒๕๕๘

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประเมินกำลังรับแรงดัดและความเหนียวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหล็กเสริมเกิดสนิม

Evaluation of Flexural Strength and Ductility of
Corroded Reinforced Concrete Beams

ผศ. ดร. อานนท์ วงษ์แก้ว

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา

ตุลาคม ๒๕๖๐

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร (Executive Summary)

ข้าพเจ้า ผศ.ดร.อานนท์ วงษ์แก้ว ได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัย จากมหาวิทยาลัยบูรพา ประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) มหาวิทยาลัยบูรพา โครงการวิจัยเรื่อง การประเมินกำลังรับแรงดัดและความเหนียวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหล็กเสริมเกิดสนิม

Evaluation of Flexural Strength and Ductility of Corroded Reinforced Concrete Beams รหัสโครงการ 2558A10802416 สัญญาเลขที่ ๑๑๗/๒๕๕๘ ได้รับงบประมาณรวมทั้งสิ้น ๔๘๔,๐๐๐ บาท (สี่แสนแปดหมื่นสี่พันบาท) ระยะเวลาการดำเนินงาน ๑ ปี (ต.ค.๒๕๕๘-ก.ย.๒๕๕๙)

บทคัดย่อ

This study presents the results of laboratory investigation into the effect of corrosion on the behavior of reinforced concrete (RC) beams. Four RC beams of the cross section of 20x40 cm with the span length of 240 cm were constructed. Three beam were corroded by impressed current to three levels of corrosion set as 15%, 30%, and 50% of steel reinforcement weights tested alongside with the control beam. The corroded beams were repaired using the conventional method by replacing of cover with non-shrink cement but no replacement of steel reinforcement. All beams were tested by four-point bending test and the corresponding loads and deflections were recorded.

The results from this experiment clearly indicated a dramatic shift in the nature of the failure of corroded RC beams. It was observed that as corrosion increased the failure of the beams shifted from predictable ductile flexural failures at mid-span to rather brittle failures near the support. Other behaviors of the beam specimens tested conforms to that reported by other researchers, with reductions in the ultimate load, deflection capacity, and stiffness upon increasing corrosion. It can be concluded that the corrosion can change the failure mode of regular reinforced beams from the ductile flexural failure at mid-span to more brittle failure near the supports.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัย เรื่อง การประเมินกำลังรับแรงดัดและความเหนียวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหล็กเสริมเกิดสนิม ได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2558 จาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ. ที่นี้

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปสำหรับผู้บริหาร	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
บทที่ 1 บทนำ	
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	20
บทที่ 4 การเร่งปฏิกิริยาสนิมในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	26
บทที่ 5 การทดสอบคาน	40
บทที่ 6 วิเคราะห์ผลการทดสอบ	62
บทที่ 7 สรุปผลการศึกษา	67
เอกสารอ้างอิง	68

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและแรงจูงใจในการทำงานวิจัย

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างหลักที่ใช้ในการก่อสร้างสิ่งปลูกสร้างแทบทุกประเภท จากอดีตจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่มีความคงทนแข็งแรง สามารถรับน้ำหนักได้สูง อีกทั้งยังมีอายุการใช้งานที่ยาวนานจึงเป็นที่นิยมใช้งานอย่างแพร่หลาย แม้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีความคงทนแข็งแรงสูง ก็สามารถเกิดการเสื่อมสภาพได้ ปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กคือเมื่อใช้งานเป็นระยะเวลาอันนานมักพบการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก จากการเกิดสนิมในเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ปัญหาการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นปัญหาซึ่งมีผลกระทบต่อความแข็งแรงของโครงสร้างอาคาร ทำให้ความสามารถในการรับกำลังของคอนกรีตเสริมเหล็กลดต่ำลง เมื่อเหล็กเสริมของคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดสนิมจะสามารถสังเกตเห็นได้เนื่องจาก คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวหรือเกิดการปริแตกที่ผิวของคอนกรีต ดังนั้นการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดสนิมเหล่านี้ให้สามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สิน จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่ง ในการซ่อมแซมคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นสามารถทำได้หลายวิธีการ และแต่ละวิธีการจะให้ประสิทธิภาพที่แตกต่างกันไป ซึ่งหนึ่งในวิธีการซ่อมแซมเหล่านี้คือ การซ่อมแซมโดยการใช้แผ่นไฟเบอร์ ซึ่งเป็นวิธีการที่น่าสนใจเมื่อพิจารณาจากข้อดีของวิธีการนี้ เช่น สามารถทำงานได้ในบริเวณที่มีพื้นที่จำกัด ไม่เกิดปัญหาจากรูปร่างของโครงสร้าง มีน้ำหนักเบา มีความสามารถในการรับแรงดึงได้สูง จึงนับว่าเป็นสิ่งที่ควรนำมาศึกษาอย่างยิ่ง

ปัญหาสำคัญอันหนึ่งของการสูญเสียความสามารถในการรับกำลังของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กคือ การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างคอนกรีต กับไอทะเลซึ่งมีทั้งสารประกอบซัลเฟตและสารประกอบคลอไรด์ เป็นสาเหตุให้คอนกรีตเสื่อมสภาพ และทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดสนิม เมื่อเหล็กเสริมเกิดสนิมจะเกิดอาการบวมและดันให้คอนกรีตที่ผิวเกิดการหลุดร่อน ปัญหาดังกล่าวนี้เป็นปัญหาหลักของโครงสร้างคอนกรีตที่สร้างอยู่ในน้ำทะเลหรือสร้างใกล้กับทะเล ซึ่งจะต้องเผชิญกับไอทะเล สารประกอบซัลเฟต และสารประกอบคลอไรด์ เป็นระยะเวลาอันยาวนานและต่อเนื่อง ยกตัวอย่างเช่น ตอหม้อ เสา คาน พื้น กำแพงกันของสะพาน อาคารจอดรถ หรือแม้แต่อาคารสูงที่ก่อสร้างในบริเวณหาดบางแสนก็ประสบกับปัญหานี้ ปัญหาการหลุดร่อนของผิวคอนกรีตนี้ทำให้เกิดคำถามอื่นๆตามมาเช่น ความปลอดภัยของโครงสร้าง ความสามารถในการใช้งานของโครงสร้างต่อไป รวมไปถึงวิธีการซ่อมแซมโครงสร้างเหล่านี้ให้สามารถใช้งานได้ด้วยความปลอดภัยและใช้งบประมาณในการซ่อมบำรุงรักษาเป็นไปอย่างประหยัดและเกิดประโยชน์สูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับกำลังตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดต่างๆกันเมื่อเหล็กเสริมหลักและเหล็กปลอกเกิดสนิม
- 2) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการพังและความเหนียวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดต่างๆกันเมื่อเหล็กเสริมหลักและเหล็กปลอกเกิดสนิม
- 3) เพื่อศึกษาผลของขนาดหน้าตัด ที่มีต่อพฤติกรรมการรับกำลังตัด ความเหนียว และพฤติกรรมการพัง ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อเหล็กเสริมหลักและเหล็กปลอกเกิดสนิม

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะถูกนำเสนอโดยใช้ดัชนีวัดคือ กำลังรับแรงตัด, ความเหนียว (Ductility) และลักษณะการพังของชิ้นงาน
- 2) ผลกระทบของขนาดหน้าตัดคานที่มีต่อพฤติกรรมการรับกำลังตัด ความเหนียว และพฤติกรรมการพังของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อเหล็กเสริมหลักและเหล็กปลอกเกิดสนิม
- 3) นำเสนอพฤติกรรมการรับแรงของคานที่เหล็กเสริมหลักเกิดสนิมในระดับความเสียหายต่างๆ กัน คือ ระดับต่ำ ระดับกลาง และระดับรุนแรง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เพื่อนำเสนอพฤติกรรมการรับกำลังตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดต่างๆกันเมื่อเหล็กเสริมหลักและเหล็กปลอกเกิดสนิม
- 2) เพื่อนำเสนอพฤติกรรมการพังและความเหนียวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดต่างๆกันเมื่อเหล็กเสริมหลักและเหล็กปลอกเกิดสนิม
- 3) เพื่อนำเสนอผลของขนาดหน้าตัด ที่มีต่อพฤติกรรมการรับกำลังตัด ความเหนียว และพฤติกรรมการพังของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อเหล็กเสริมหลักและเหล็กปลอกเกิดสนิม

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเสื่อมสภาพของคอนกรีต

การเสื่อมสภาพของคอนกรีตสามารถจำแนกได้เป็น 5 ชนิด ตามสาเหตุของการเสื่อมสภาพดังนี้

- 1) โดยสาเหตุทางกายภาพ ได้แก่ การหดตัวแบบแห้ง การทรุดตัว การหดตัว
- 2) โดยสาเหตุทางเคมี ได้แก่ คาร์บอนेशन การกัดกร่อนโดยกรด โดยซัลเฟตปฏิกิริยาระหว่างต่างกับมวลรวม
- 3) โดยสาเหตุทางกล ได้แก่ การเสื่อมสภาพโดย ตะไคร่ รา รากพืช หรือ แบคทีเรีย
- 4) โดยสาเหตุทางกล ได้แก่ การขีดสี การชะล้างด้วยกระแสน้ำและกรวดทราย และการแตกตัวของฟองอากาศในน้ำ
- 5) โดยสาเหตุรวม ได้แก่ การเกิดสนิมในเหล็ก เป็นต้น

ปัญหาของความคงทนในคอนกรีตส่วนใหญ่มักเกิดกับคอนกรีตหลังจากสภาวะแข็งตัวแต่อย่างไรก็ดี ปัญหาอย่างที่เกิดขึ้นกับคอนกรีตในสภาวะก่อนหน้านี้อาจสามารถนำไปสู่ปัญหาในระยะยาวได้ สำหรับการศึกษาคอร์งานครั้งนี้ได้มุ่งเน้นเกี่ยวกับการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอันเนื่องจากการเกิดสนิมในเหล็กเสริม และการหลุดกะเทาะออกของเนื้อคอนกรีตเท่านั้น

2.2 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

โดยปกติแล้วเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตจะถูกปกป้องไม่ให้เกิดสนิมด้วยความเป็นด่างที่สูงของคอนกรีต ทั้งนี้เนื่องจากในสภาวะความเป็นด่างที่สูง เหล็กจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic process) ได้นั้นคือเหล็กจะไม่สามารถแตกตัวเป็นไอออนของเหล็ก (Fe^{2+}) และอิเล็กตรอน ($2e^-$) ได้เลย ความเป็นด่างในคอนกรีตโดยปกติมักจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 12.5 ถึง 13.5 ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ผสม และส่วนผสมของคอนกรีต คุณภาพของคอนกรีตหุ้มเหล็กก็เป็นปัจจัย สำคัญของการควบคุมความเป็นสนิมของเหล็กเสริมด้วย เหล็กเสริมในคอนกรีตจะเป็นสนิมได้ ก็ต่อเมื่อ เงื่อนไขทั้ง 3 ประการนี้ต้องเกิดขึ้น

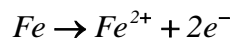
1. ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงจนถึงปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic process) สามารถเกิดได้ ซึ่งความเป็นด่างในระดับที่จะทำให้ปฏิกิริยาอะโนดิกเกิดขึ้นได้นั้น จะมีค่าของ pH ต่ำกว่าระดับ 9 ถึง 10 และมักจะเรียกว่าระดับวิกฤต (Critical level) ของความเป็นด่าง ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงได้ด้วยสาเหตุต่างๆดังต่อไปนี้ คือ คาร์บอนेशन (Carbonation) การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต หรือ

แม้แต่การชะล้างของน้ำฝนในกรณีที่คอนกรีตมีความพรุนมาก ซึ่งกลไกการทำให้ความเป็นต่างลดลงโดยแต่ละสาเหตุจะได้แยกอธิบายเป็นหัวข้อต่างหากต่อไป

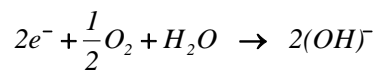
2. มีความชื้นเพียงพอที่จะทำให้ อีออนของเหล็ก (Fe^{2+}) เข้าสู่สภาวะสารละลาย และพอเพียงที่จะทำปฏิกิริยาในการเกิดสนิม ซึ่งโดยปกติความชื้นมักจะเพียงพออยู่ในบริเวณคอนกรีตที่หุ้มรอบๆเหล็กเสริมอยู่แล้ว

3. มีปริมาณออกซิเจนเพียงพอในการทำปฏิกิริยาเพื่อการเกิดสนิม ซึ่งปกติแล้วออกซิเจนในปริมาณที่เพียงพอในการเกิดสนิมมักจะแพร่เข้าสู่คอนกรีตบริเวณเหล็กเสริมโดยผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated pores) นั่นคือแพร่ผ่านอากาศในช่องว่างแต่การแพร่ของออกซิเจนผ่านทางช่องว่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated pores) จะเป็นไปได้ยาก เนื่องจากออกซิเจนละลายน้ำได้น้อยมาก ดังนั้น คอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำอยู่ตลอดเวลาจะไม่เกิดสนิมในเหล็ก

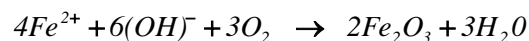
กลไกของการเกิดสนิมของเหล็กเสริม (รูปที่ 2.1) ในคอนกรีตจะเริ่มต้นด้วยการที่ความเป็นต่างในบริเวณที่หุ้มรอบๆเหล็กเสริมอยู่ มีค่าความเป็นต่างลดลงจนถึงระดับวิกฤต และบริเวณรอบๆเหล็กเสริมมีความชื้นเพียงพอ ทำให้เหล็กเกิดปฏิกิริยา Electrolysis ขึ้นดังสมการต่อไปนี้



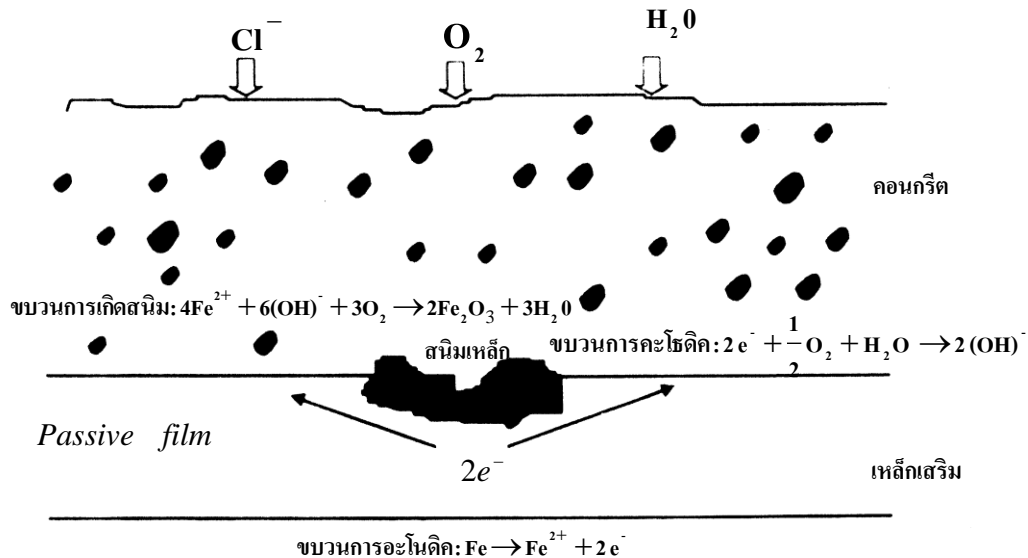
โดยเหล็กจะแตกตัวเป็นอีออน (Fe^{2+}) เข้าสู่สภาวะสารละลาย และอิเล็กตรอนจะวิ่งไปตามเหล็ก ปฏิกิริยานี้เรียกว่า กระบวนการอะโนดิก (Anodic process) ต่อจากนั้น $2e^{-}$ ที่เกิดจากปฏิกิริยาอะโนดิกจะไปรวมตัวกับน้ำและออกซิเจนที่บริเวณเดียวกัน หรือบริเวณใกล้เคียงกับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาอะโนดิก ทำให้เกิดเป็นไฮดรอกซิลอีออน ($(OH)^{-}$) ดังสมการต่อไปนี้



ซึ่งปฏิกิริยานี้เรียกว่า กระบวนการแคโทดิก (Cathodic process) หลังจากนั้นปฏิกิริยาการเกิดสนิมก็จะเกิดขึ้นดังสมการต่อไปนี้



โดยที่ Fe_2O_3 ก็คือเฟอริกออกไซด์ หรือ สนิมนั่นเอง ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดต่างบริเวณกับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาอะโนดิกก็ได้ซึ่งหมายความว่าสนิมอาจจะเกิดคนละบริเวณกับบริเวณที่สูญเสียเนื้อเหล็กก็ได้



รูปที่ 2.1 กลไกการเกิดสนิมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.3 ผลกระทบของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

สาเหตุหลักที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตสูญเสียกำลังรับแรงจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมมีอยู่ 2 ประการคือ

- 1) ขนาดของเหล็กบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาอะโนดิก (เหล็กสูญเสียอิเล็กตรอน) จะเล็กลงเนื่องจากเนื้อเหล็กบางส่วนกลายเป็นสารละลาย (Fe^{2+}) และอิเล็กตรอน ทำให้พื้นที่หน้าตัดในการรับแรงในบริเวณดังกล่าวลดลงตามขนาดของเหล็กที่ลดขนาดลง
- 2) การเกิดสนิมจะทำให้เกิดแรงดันต่อคอนกรีตบริเวณรอบๆเหล็กเสริม เนื่องจากสนิมเหล็กจะมีปริมาณมากกว่าเหล็กเดิมที่สลายตัวเข้าสู่สารละลาย ดังนั้นจะทำให้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมแตกร้าวตามแนวเหล็กเสริมได้ ดังนั้นผลกระทบโดยรวมจากสาเหตุข้างต้นนี้คือ กำลังรับแรงของโครงสร้างลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Fatigue Strength และความสามารถในการแอ่นตัวหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโครงสร้างก็ลดลงด้วย นอกจากนี้ ความยืดหยุ่นก็จะลดลง การเกิดรอยแตกร้าวยังเป็นการเร่งให้น้ำและออกซิเจนเข้าไปถึงบริเวณเหล็กเสริมได้เร็ว และมากยิ่งขึ้น ทำให้เร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมให้เร็วและรุนแรงยิ่งขึ้นด้วย

2.4 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยคลอไรด์

คลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ โดยไอออนของคลอไรด์ (Chloride ions) เป็นตัวการที่ทำให้เกิดความเป็นต่างของคอนกรีตที่ป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิมลดลง และหลังถึงจุดวิกฤตแล้ว ถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอ ก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิมได้

คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น มีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หิน ทราย (โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทรายจากแหล่งใกล้ทะเล) หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ที่มักมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว อย่างไรก็ตาม ได้มีการกำหนดมาตรฐานไว้สำหรับปริมาณคลอไรด์ที่ยอมรับได้ในคอนกรีตสด (วสท. 1014 - 40) แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของคอนกรีตนั้น ส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงใช้งาน เช่น จากน้ำทะเล จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้สารละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว (De-icing salt) ซึ่งคลอไรด์อาจเข้าสู่คอนกรีตได้โดยวิธีดังต่อไปนี้

- 1) การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งของน้ำที่มีคลอไรด์ (Capillary suction)
- 2) การแพร่ของไอออนของคลอไรด์ (Chloride ions) จากภายนอกที่มีความเข้มข้นขอบคลอไรด์

สูงกว่าภายในของคอนกรีต

- 3) การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์ โดยแรงดันของน้ำ

โดยทั่วไปแล้วแหล่งของคลอไรด์ ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น ถึงแม้คลอไรด์สามารถซึมแพร่ผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจน การเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ จึงไม่เป็นปัญหานัก

ความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากที่สุด มักพบในบริเวณคลื่นและละอองน้ำ (Splash zone) รองลงมาเป็นบริเวณบรรยากาศทะเล (Atmospheric zone) และบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged zone) จะมีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเหล็กเสริม น้อยมาก

ในบริเวณใต้น้ำทะเลความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมมีน้อย เนื่องจากความเข้มข้นของออกซิเจนน้อย และอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตต่ำมาก เนื่องจากช่องว่างภายในคอนกรีต เป็นช่องว่างอิมมิดด้วยน้ำ ซึ่งออกซิเจนละลายน้ำได้น้อยมาก ทำให้อัตราการแพร่เกิดขึ้นน้อย

ถึงแม้ว่าปริมาณออกซิเจนมาก ในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง แต่การเกิดสนิมก็ถูกจำกัด โดยอัตราการแพร่ที่ต่ำของออกซิเจน ผ่านช่องว่างที่อิมมิดด้วยน้ำของคอนกรีตในช่วงที่คอนกรีตเปียก

ในกรณีของสภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดย Absorption หรือ Capillary suction จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพอิมมิด (Saturated) เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตก็จะระเหยออกไป ทิ้งไว้แต่คราบเกลือ เมื่ออยู่ในสภาพเปียกอีก ความเข้มข้นของ

คลอไรด์ที่ใกล้ผิวก็จะสูงขึ้น ดังนั้นไอออนของคลอไรด์ (Chloride ions) ซึ่งมีความเข้มข้นสูง ที่บริเวณผิว จะซึมเข้าสู่ภายในโดยการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกและการแห้ง จะทำให้คลอไรด์บริเวณใกล้ผิว มีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ และจะเข้าไปสู่ภายในคอนกรีตและสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้ว คอนกรีตจะเปียก (Saturated) ได้เร็ว แต่จะแห้งได้ช้ากว่ามาก และภายในของคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำ ทะเลตลอดเวลาจึงช้ากว่าการเข้าไปของคลอไรด์โดยการเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเล

การเคลื่อนตัวของไอออนของคลอไรด์ไปในคอนกรีตนั้นจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกและแห้ง ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานที่และสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และการใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น ทำให้ในโครงสร้างเดียวกัน แต่ละส่วนอาจ ประสบกับสภาวะเปียกและแห้งได้ไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียก มักจะเร่งให้อิออนของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้ง (ช่วงแห้ง นาน) จะมีโอกาสเกิดปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริม มากกว่าคอนกรีตที่ประสบกับสภาวะช่วงแห้งสั้น การกัดกร่อนจะเริ่มขึ้นก็ต่อเมื่อ ปริมาณไอออนของคลอไรด์ (Chloride ions) มีมากพอที่ผิวของเหล็กเสริม (Threshold content of chloride ions) ซึ่งให้ค่าความเป็นต่างของคอนกรีตลดลงจนถึงระดับวิกฤต

คลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตนั้น จะมีคลอไรด์บางส่วนที่ถูกจับยึด (Fixed chloride) โดยกลไกต่อไปนี้

1) Chemical Binding คลอไรด์บางส่วนจะถูกจับโดยผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น ผลผลิตของ C_3A และ C_4AF ในรูปของ $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (Fridel's salt) หรือ $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (Calcium chloroferrite) หรือแม้แตอยู่ในโครงสร้างของผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2) Physical Binding คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดได้ด้วยแรงทางกายภาพ (Surface Force) ได้บนผิวของผลผลิตไฮเดรชัน เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยา เช่น มวลรวม หรือ ผงฝุ่นหินได้ด้วย ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมากก็ตาม

คลอไรด์ส่วนที่ไม่ถูกจับยึดเรียกว่า คลอไรด์อิสระ (Free chloride) ซึ่งจะมีสภาพเป็นสารละลาย อยู่ในน้ำที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีต (Pore solution) คลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า และเป็นส่วนที่ทำให้ความเป็นต่างในคอนกรีตลดลง ดังนั้นถ้าสามารถจับยึดคลอไรด์ไว้เป็นจำนวนมาก ก็จะสามารถยืดเวลาการเกิดสนิมในเหล็กเสริมออกไปได้ การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณใกล้ผิวที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์

ความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณผิวของคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ เช่น ทะเลเป็นเวลานาน จะมีความเข้มข้นของคลอไรด์ในสารละลายที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีตสูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมได้ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Chloride condensation ซึ่งเกิดได้ใน 2 ลักษณะดังนี้

1) ในกรณีของสภาวะเปียกสลับแห้งด้วยน้ำทะเล ในขณะที่บริเวณผิวของคอนกรีตแห้ง คอนกรีตจะสูญเสียเฉพาะน้ำซึ่งจะระเหยออกจากผิวคอนกรีต ทั้งเกลือไว้ในบริเวณผิวคอนกรีตที่แห้ง แต่พอคอนกรีตเข้าสู่สภาวะแวดล้อมเปียก น้ำเกลือจะซึมเข้าไปในคอนกรีตอย่างรวดเร็ว เมื่อสภาวะเปียกสลับแห้งดำเนินไปหลายรอบ ก็จะทำให้ความเข้มข้นของคลอไรด์ในบริเวณผิวของคอนกรีตสูงกว่าในสิ่งแวดล้อมได้

2) ในกรณีที่สภาวะเปียกตลอดเวลาในน้ำทะเลหรือน้ำใต้ดินที่มีเกลือ ในกรณีนี้คลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมสามารถถูกดึงเข้าไปในช่องว่างของคอนกรีตได้ด้วยแรงทางประจุไฟฟ้า เนื่องจากผิวของช่องว่างในคอนกรีตซึ่งมักจะเป็นผลผลิตทางไฮเดรชัน เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) จะมีคุณสมบัติทางศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกซึ่งสามารถดึงคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมซึ่งมีประจุเป็นลบเข้าไปได้ อย่งไรก็ดีในสภาพของสิ่งแวดล้อมที่เปียกตลอดเวลา ถึงแม้คลอไรด์จะเข้าไปในคอนกรีตได้มากนั้นก็มักไม่เป็นอันตรายต่อเหล็กเสริม เนื่องจากไม่มีออกซิเจนเพียงพอในการเกิดสนิม ยกเว้นแต่ในบริเวณกับคอนกรีตจะมีส่วนที่มีสภาวะแห้งได้ด้วย เช่น บริเวณผิวดิน ซึ่งคลอไรด์ที่เข้าไปอาจแพร่เข้าไปสู่บริเวณที่สามารถแห้งได้ ทำให้ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตบริเวณผิวดินมีมากขึ้น และในบริเวณผิวดินซึ่งมีออกซิเจนมากเพียงพอ จึงอาจนำพาให้โครงสร้างบริเวณผิวดินเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้

การป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์

การป้องกันการเกิดสนิมโดยการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตและเหล็กเสริม

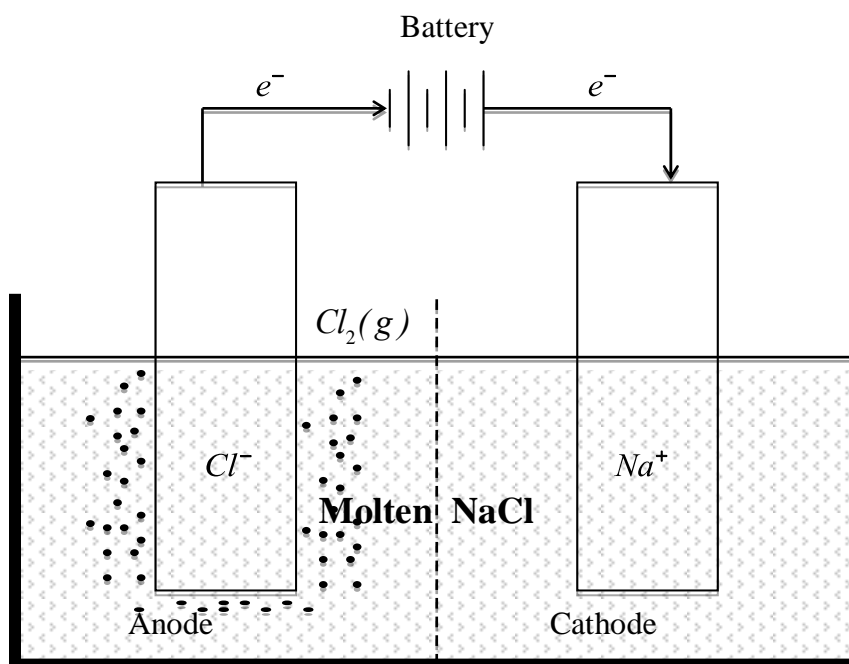
1) ออกแบบและใช้คอนกรีตที่มีความชื้นน้ำต่ำมากๆ คอนกรีตที่มีความชื้นน้ำต่ำจะทำให้คลอไรด์แพร่เข้าไปในคอนกรีตได้ยาก เนื่องจากความสามารถในการแพร่จะน้อยลง ซึ่งจะกระทำได้โดย การใช้ปริมาณน้ำในคอนกรีตน้อย การลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ การใช้สารประเภท Filler เพื่อเพิ่มความทึบน้ำ เช่น ซิลิกาฟูม การใช้สารปอซโซลานในปริมาณที่เหมาะสม

2) ใช้สารเคลือบผิวคอนกรีต เช่น Epoxy เป็นต้น แต่มักมีราคาแพง

3) ใช้สารผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น Calcium หรือ Sodium nitrite ที่สามารถช่วยทำให้ปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic) นั้นเกิดยากขึ้น

4) ใช้เหล็กเสริมที่ไม่เป็นสนิม หรือเคลือบผิวเหล็กเสริม แต่เป็นวิธีที่มีราคาแพงข้อเสนอนี้ประการหนึ่งคือ ต้องออกแบบคอนกรีตไม่ให้แตกร้าว เพราะรอยแตกร้าวจะเป็นบริเวณที่คลอไรด์สามารถเข้าไปในคอนกรีตได้ง่ายที่สุด ไม่ว่าจะเป็นการแตกร้าวจากการรับแรงหรือจากปัญหาอื่นๆ เช่นการหดตัวหรือถ้าหลีกเลี่ยงไม่ได้ก็ต้องควบคุมความกว้างของรอยแตกร้าวให้เล็กที่สุดเท่าที่ทำได้

2.5 การเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมในเหล็กเสริม



รูปที่ 2.2 การเกิดกระบวนการ Electrolysis of Molten (NaCl)

เนื่องจากโครงการวิจัยครั้งนี้มีขอบเขตในการศึกษาเกี่ยวกับการเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีสาเหตุจากการเกิดสนิมในเหล็กเสริม จึงต้องมีการสร้างสภาพความเสียหายให้เกิดขึ้นกับแท่งคอนกรีตเสริมเหล็กที่จะใช้ทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลด้วยวิธีการที่ใช้ระยะเวลาสั้น และให้ผลถูกต้องแม่นยำ ดังนั้นการผ่านกระแสไฟฟ้าลงในเหล็กเพื่อให้ไอออนหลุดจากเหล็กจนทำให้เกิดสนิม (Electrolytic cells) จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมในการนำมาใช้ โดยมีหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.5.1 เซลล์ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Cells)

เซลล์ไฟฟ้าเคมี คือ เซลล์ที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าจากปฏิกิริยาทางเคมี โดยสามารถแบ่งประเภทเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่เกิดปฏิกิริยา Oxidation และ Reduction ออกเป็น 2 ประเภท คือประเภทที่สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้เองตามธรรมชาติ (Galvanic Cells) และประเภทที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีได้เองตามธรรมชาติ (Voltaic Cells) สำหรับการศึกษาโครงการวิจัยครั้งนี้ได้นำหลักการของเซลล์ไฟฟ้าเคมีประเภทที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีได้เองตามธรรมชาติ แบบ Electrolytic Cells มาใช้ในขั้นตอนการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมในเหล็กเสริม ซึ่ง Electrolytic Cells คือ หน่วย

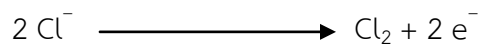
เซลล์ซึ่งทำงานด้วยปฏิกิริยาเคมี และใช้กระแสไฟฟ้าเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาเคมี (ปฏิกิริยา Oxidation และปฏิกิริยา Reduction) อย่างต่อเนื่อง โดย Electrolytic Cells มีหลักการทำงานดังนี้

จากหลักการของการแยกส่วนประกอบของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (The Electrolysis of Molten NaCl) เมื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าบวกและลบซึ่งจุ่มอยู่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) จะทำให้อะตอมของ Na^+ วิ่งเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าลบ และอะตอมของ Cl^- จะวิ่งเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าบวก โดยเส้นประบริเวณกลางรูปใช้แทนวัสดุที่สามารถป้องกันการปะปนกันของ ก๊าซคลอรีนที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วบวกและโลหะโซเดียมที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วลบโดยยอมให้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ซึมผ่านได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2

จากรูปที่ 2.2 เมื่ออะตอมของ Na^+ ชนกับขั้วไฟฟ้าลบซึ่งต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟที่มีค่าความต่างศักย์มากเพียงพอ อะตอมของ Na^+ จะเกิดปฏิกิริยา Reduction จนเปลี่ยนสภาพเป็น Sodium metal (Na) ดังสมการ



และเมื่ออะตอมของ Cl^- ชนกับขั้วไฟฟ้าบวกจะเกิดปฏิกิริยา Oxidation จนเปลี่ยนเป็นก๊าซคลอรีน ซึ่งก็คือฟองอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วบวกดังสมการ



โดยค่าความต่างศักย์ที่ต้องการในการทำให้ Cl^- เกิดปฏิกิริยา Oxidation กลายเป็น Cl_2 เท่ากับ -1.36 V และค่าความต่างศักย์ที่ต้องการในการทำให้ Na^+ เกิดปฏิกิริยา Reduction กลายเป็น Na เท่ากับ -2.71 V

จากรูปที่ 2.2 จะพบว่าขณะเกิดกระบวนการ Electrolysis ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ขั้วไฟฟ้าบวกจะเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับขั้วไฟฟ้าลบ ดังนั้นเมื่อต่อขั้วไฟฟ้าบวกของระบบนี้เข้ากับเหล็กเสริมของแท่งคอนกรีตจะทำให้เหล็กเสริมมีหน้าที่เปรียบเสมือนขั้วไฟฟ้าบวกด้วยจึงทำให้เหล็กเสริมเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับวัสดุที่ต่อเข้ากับขั้วลบซึ่งในกรณีนี้ใช้เหล็กประเภทเดียวกับเหล็กเสริมแต่ได้รับการเคลือบด้วยสารป้องกันการผุกร่อน (Epoxy และสีป้องกันสนิม) โดยทั้งนี้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมจะทำหน้าที่เป็นวัสดุป้องกันการปะปนกันของก๊าซคลอรีนที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วบวกและโลหะโซเดียมที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วลบ ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมาได้สอดคล้องกับเงื่อนไขในการเกิดสนิมของเหล็กโดย

ทั้งนี้ปริมาณในการเกิดสนิมจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้รับโดยปริมาณเหล็กเสริมที่หายไปสามารถคำนวณได้จากสมการฟาราเดย์

$$\Delta W = \frac{I \cdot t \cdot A_m}{Z \cdot F} \dots\dots\dots (1)$$

- เมื่อ ΔW = น้ำหนักเหล็กที่หายไป (กรัม)
 I = ค่ากระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
 t = ระยะเวลาเมื่อเหล็กเริ่มเกิดสนิม (วินาที)
 A_m = ค่าคงที่มวลอะตอมของโลหะ (=55.85 กรัม สำหรับเหล็ก)
 F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมป์)
 Z = 2

การตรวจสอบด้วยวิธีนี้ ต้องเก็บข้อมูลค่ากระแสไฟฟ้าตามช่วงเวลาที่กำหนดนำค่ามาคำนวณตามสมการและเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการชั่งน้ำหนักจริงของเหล็กเสริมที่เหลืออยู่

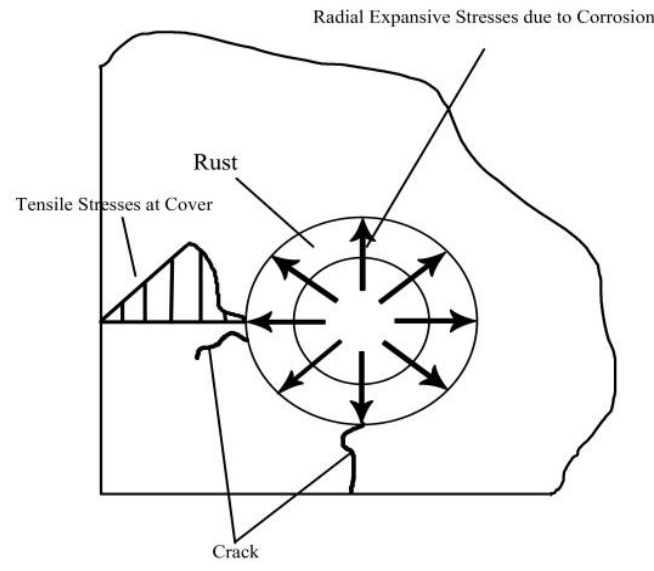
2.6 การวิบัติของคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อเหล็กเสริมเกิดสนิม

การขยายปริมาตรของคอนกรีตเป็นปัจจัยที่ทำให้วิบัติ เนื่องจากการยึดเกาะกันของคอนกรีตลดลง ดังนั้นหากจำกัดไม่ให้ออกแรงขยายปริมาตร ก็ช่วยยืดระยะเวลาการวิบัติของคอนกรีตได้วัสดุที่ใช้ในการจำกัดการขยายปริมาตรต้องมีความแข็งแรงทนต่อแรงดึงได้ดีกว่าคอนกรีต แต่ไม่จำเป็นต้องทนต่อแรงกดอัดได้ดีเท่ากับคอนกรีต เนื่องจากในคานคอนกรีตเมื่อถูกแรงกดอัดมีผลทำให้ส่วนผสมภายในเกิดการถ่ายเทแรงให้กันจนเกิดกำลังต้านแรงอัดภายใน จนแรงอัดที่ถูกส่งผ่านจากด้านบนเปลี่ยนเป็นแรงดึงที่ผิวด้านข้างทำให้ความสามารถในการยึดเกาะกันของคอนกรีตลดลง แผ่นไฟเบอร์ใยแก้วเสริมกำลัง (GFRP) ที่สามารถทนแรงดึงและต้านทานสภาวะที่ถูกกัดกร่อนได้ดี จึงได้มีการนำมาพันห่อหุ้มภายนอกองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อช่วยเพิ่มกำลังของคอนกรีต โดยจำกัดการขยายปริมาตรของคอนกรีต (Confinement theory) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังสามารถช่วยเพิ่มกำลังอัดและกำลังดัดของชิ้นส่วนคอนกรีตได้เป็นอย่างดี

ปกติเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตถูกปกป้องไม่ให้เกิดสนิมด้วยความเป็นต่างที่สูงของคอนกรีต ซึ่งเหล็กไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาอะโนดิก คือเหล็กไม่แตกตัวออกเป็นไอออน (Fe^{2+}) และ อิเล็กตรอน

($2e^-$) ความเป็นต่างในคอนกรีตมักอยู่ในช่วง 12.5 จนถึง 13.5 ขึ้นกับวัสดุ และส่วนผสมคุณภาพของคอนกรีต หุ้มเหล็กเสริมก็เป็นปัจจัยสำคัญของการควบคุมการเป็นสนิมของเหล็กเสริมด้วยเหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นสนิมได้ก็ต่อเมื่อได้เกิดเงื่อนไขทั้ง 3 ประการคือ 1) ความเป็นต่างในคอนกรีตลดลงจนเกิดปฏิกิริยาอะโนดิกได้ ในระดับ pH ไม่เกิน 9 ถึง 10 เรียกว่าระดับวิกฤติของความเป็นต่างความเป็นต่างในคอนกรีตลดลงได้ด้วยกระบวนการคาร์บอนชั่น การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต น้ำหรือความชื้นในกรณีคอนกรีตพรุนมาก 2) มีความชื้นพอที่ทำให้ไอออนของเหล็ก (Fe^{2+}) เข้าสู่สารละลาย และเพียงพออยู่ในบริเวณที่คอนกรีตที่หุ้มรอบๆ เหล็กเสริมอยู่ 3) มีออกซิเจนเพียงพอในการทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดสนิม ซึ่งปกติออกซิเจนมักแพร่เข้าสู่เหล็กเสริมโดยผ่านช่องว่างที่ไม่อึดตัวด้วยน้ำคือแพร่ผ่านอากาศในช่องว่าง แต่การแพร่ของออกซิเจนผ่านช่องว่างที่อึดตัวด้วยน้ำอยู่ตลอดเวลา มักไม่เกิดสนิมในเหล็ก

ผลกระทบของสนิมในเหล็กเสริมต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กคือ 1) ขนาดของเหล็กบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาอะโนดิก ทำให้พื้นที่หน้าตัดขวางลดลง 2) เหล็กเสริมที่เกิดสนิมขยายปริมาตรเกิดแรงดันทำให้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมแตกร้าว ดังรูปที่ 2.3 ผลกระทบโดยรวมจากสาเหตุข้างต้นนี้คือ กำลังรับแรงขององค์อาคารลดลง และความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างขององค์อาคารลดลงด้วยความยืดหยุ่นลดลง องค์อาคารเกิดรอยแตกร้าวทำให้น้ำและออกซิเจนเข้าไปถึงบริเวณเหล็กเสริมได้เร็ว และมากขึ้น เร่งการเกิดสนิมมากขึ้นด้วย



รูปที่ 2.3 แสดงภาพถ่ายการเกิดรอยแตกร้าวของคาน ค.ส.ล. ที่เกิดขึ้นเนื่องจากเหล็กเสริมเกิดสนิม

2.7 กระบวนการของการแตกร้าวเนื่องจากการเกิดสนิมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

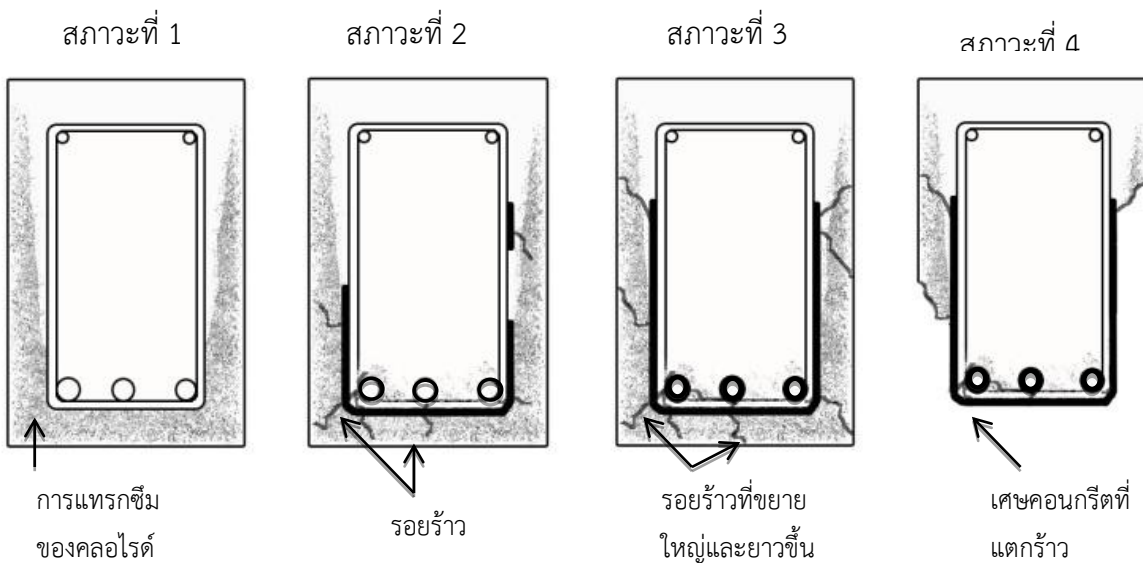
กระบวนการเกิดการแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 สถานะดังรูปที่ 2.4

สถานะที่ 1 - เกิดการซึมผ่านของคลอไรด์เริ่มการกัดกร่อนที่บริเวณรอบๆเหล็กเสริม

สถานะที่ 2 - เกิดการแผ่และขยายการกัดกร่อนของสนิมส่งผลให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว

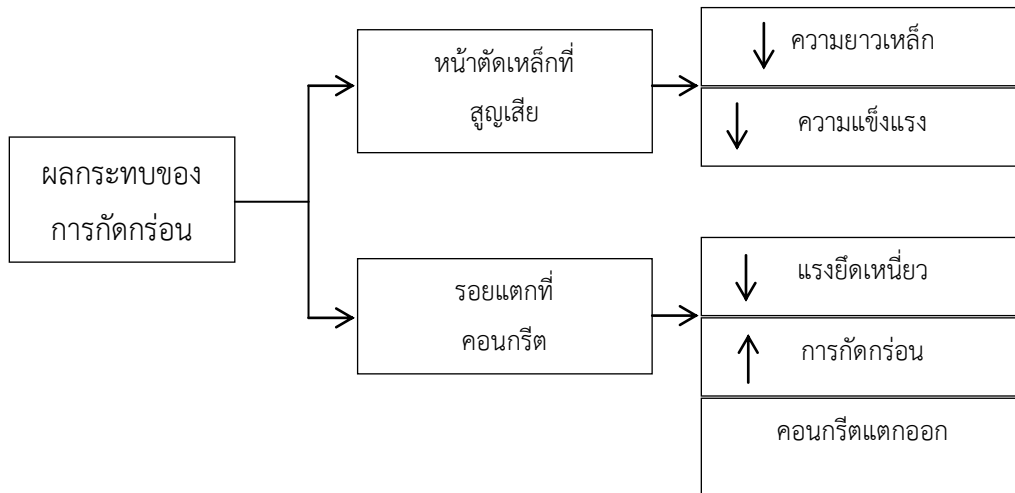
สถานะที่ 3 - เกิดการแตกร้าวมากขึ้นและมีการกัดกร่อนที่รุนแรงในส่วนที่มีความชื้นเหมาะสม

สถานะที่ 4 - ผิวคอนกรีตที่บริเวณเหล็กที่มีการเกิดสนิมเกิดการหลุดล่อนออกจนเห็นเนื้อเหล็กที่เป็นสนิม



รูปที่ 2.4 ภาพแสดงการเสื่อมสภาพ 4 สถานะที่เหล็กเสริมเกิดสนิม (Higgins et al., 2003)

ผลกระทบโครงสร้างที่ถูการกัดกร่อนเหล็กเสริม เช่นทำให้เนื้อที่เหล็กหายไปคอนกรีตที่หุ้มเหล็กบริเวณนั้นเมื่อเหล็กเกิดการรับแรงดึง ส่งผลทำให้เกิดการหลุดล่อนได้ง่ายเพราะสนิมเข้าไปทำให้การยึดเกาะระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมไม่มีการยึดเหนี่ยวกันเหล็กจึงเกิดการเคลื่อนที่ได้ง่ายและคานแอ่นตัวได้ง่ายเช่นกัน จากภาพเป็นการแสดงการที่คอนกรีตเริ่มมีการถูกกัดกร่อนจนกระทั่งมีการเสื่อมสภาพอย่างรุนแรง



รูปที่ 2.5 ผลการเกิดการกัดกร่อนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

จากรูปที่ 2.5 เป็นการแสดงผลที่เกิดการสูญเสียสภาพทำให้เกิดรอยร้าว และการเกิดการเสื่อมสภาพอย่างรุนแรง (Bertolini et Ai, 2004)

ผลกระทบเหล่านี้ที่เกิดขึ้นจากการกัดกร่อนในที่สุดส่งผลทำให้โครงสร้างเกิดการวิบัติและทำให้สถานที่ต่างๆ ได้รับผลกระทบแก่สถานที่ต่าง ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายที่สูงในการซ่อมแซมและเสียเวลาในการเปิดให้ใช้บริการสำหรับโครงสร้างที่เป็นสถานบริการต่างๆ รวมไปถึงโครงสร้างที่เกิดการวิบัติในกรณีที่มีผู้ใช้บริการอยู่ ก็อาจทำให้ผู้คนเสียชีวิตได้ (MacGregor and Bartlett, 2000).

เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการเกิดวิบัติ วิศวกรต้องสามารถตรวจสอบการเสื่อมสภาพของโครงสร้างได้ โดยต้องมี การปรับปรุง แก้ไข และซ่อมแซม เพื่อทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงโดยการใช่วิสดูในการเสริมแรงให้แก่โครงสร้างที่มีความแข็งแรงลดลงและเสียคุณสมบัติเชิงกล

ในขณะนี้ยังไม่มีวิธีใหม่ๆที่เหมาะสมที่นำมาใช้ในการประเมินการเสื่อมสภาพของโครงสร้างที่มีการเกิดสนิมในเหล็ก ดังนั้นควรหาวิธีการใหม่ๆมาพิจารณาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างต่างๆ นอกจากการตรวจสอบในกรณีที่เกิดการวิบัติไป

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Uomoto และ Misra (1988)

ศึกษาอิทธิพลของการเกิดแตกตามยาวบนคานและเสา คอนกรีตเสริมกำลังที่ได้รับการกัดกร่อน โดยการเพิ่มคลอไรด์ในส่วนผสมคอนกรีตและมีระดับความเข้มข้นอยู่ที่ $280-380 \text{ mA/cm}^2$ ในช่วง 7-14 วัน คานทดสอบมีขนาด $200 \times 100 \times 2100$ มม. เสริมเหล็กบนขนาด 6 มม. 2 เส้น และเหล็กล่างขนาด 16 มม. 2 เส้น

เมื่อคอนกรีตเสริมเหล็กวิบัติจากการรับแรงอัดและเหล็กบนเกิดการโก่งคาะ โดย Uomoto และ Misra พบว่าการสูญเสียน้ำหนักเหล็กเสริมรับแรงดึง 1-2.4% ความแข็งแรงของคอนกรีตลดลง 4-17% (Uomoto และ Misra, 1988)

Al-Sulaimani et al (1990)

การทดสอบเพื่อศึกษาลักษณะของรอยแตกร้าวและพฤติกรรมของเหล็กเสริมที่เกิดสึกกร่อน สำหรับการศึกษาคั้งนี้ทดสอบการดึงคานตัวอย่าง 24 ตัวอย่าง มีขนาด $150 \times 150 \times 1000$ มม. และเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มม.

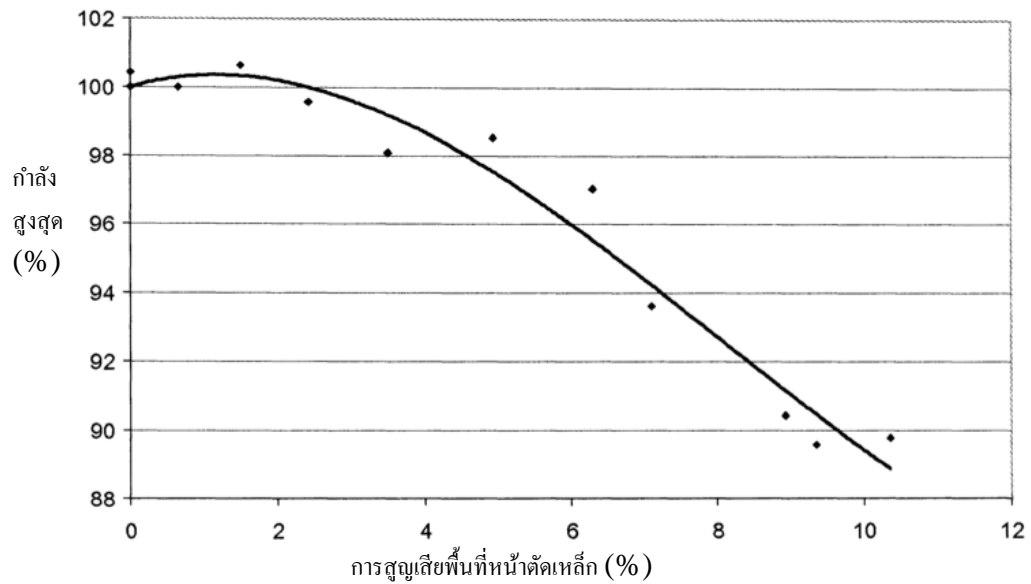
โดยศึกษาพฤติกรรมของคานที่ถูกกัดกร่อน 4 ระดับ คือ ไม่เกิดการกัดกร่อน, ก่อนเกิดรอยแตกร้าวขณะกัดกร่อน, รอยแตกร้าวที่มองเห็นเป็นครั้งแรก และรอยแตกร้าวระหว่างการกัดกร่อน (Al-Sulaimani et al, 1990.)

คานนี้ถูกออกแบบมาให้วิบัติด้วยแรงดัดเพื่อนำไปพัฒนาความยาวของคานและเหล็กปลอกเพื่อป้องกันการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน น้ำหนักวิกฤติเท่ากับ 47 กิโลนิวตัน ที่การกัดกร่อน 0% และ 47.2 กิโลนิวตัน สรุปผลการวิจัยของ Al-Sulaimani et al การสูญเสียพื้นที่หน้าตัดเหล็กมีผลกระทบต่อ น้ำหนักวิกฤติที่สามารถรับได้ (Al-Sulaimani et al, 1990.)

ตารางที่ 2.1 ผลการทดสอบคาน (ชุดที่ 4) (Al-Su1airnani et al, 1990.)

คาน	สูญเสียหน้าตัด (%)	น้ำหนักสูงสุด (kN)
1	0.00	47.0
2	0.00	47.2
3	0.65	47.0
4	1.50	47.3
5	2.43	46.8
6	3.50	46.1
7	4.94	46.3
8	6.30	45.6
9	7.10	44.0
10	9.35	42.1
11	8.93	42.5
12	19.36	42.2

คานนี้ออกแบบให้วิบัติด้วยแรงดัด (ชุดที่ 4) เพื่อพัฒนาความยาวคานและเหล็กปลอก เพื่อป้องกันการวิบัติเนื่องแรงเฉือน ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2.1 กำลังสูงสุดที่การกักกร่อน 0% เท่ากับ 47 และ 47.2 กิโลนิวตัน รูปที่ 2.6 สรุปผลการวิจัยของ Al-et Sulaimani Ai, 1990 กราฟแสดงกำลังสูงสุดกับการสูญเสียพื้นที่หน้าตัดเหล็ก



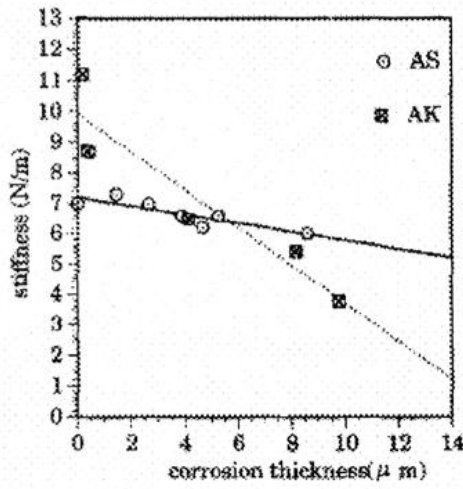
รูปที่ 2.6 กำลังสูงสุดที่ลดลงกับการสูญเสียพื้นที่หน้าตัดเหล็ก (Al-Su1airmani et al, 1990.)

Cabrera และ Ghoddoussi ศึกษาวิจัยผลกระทบจากการกัดกร่อนของคานขนาด 160x125x1000 มม. ที่มีเหล็กเสริมบนขนาด 10 มม. 2 เส้น และเหล็กเสริมล่างขนาด 12 มม. 2 เส้น และเหล็กปลอกขนาด 8 มม. เหล็กเสริมรับแรงดึงถูกกัดกร่อนโดยใช้กระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นไม่แน่นอน การลดลงของพื้นที่หน้าตัดเหล็กสูงสุดเป็น 9% ซึ่งลดลงเป็น 20% ของโมเมนต์ดัดสูงสุด และเพิ่มขึ้น 40% ของการแอ่นตัวของคานเมื่อรับน้ำหนักใช้งาน

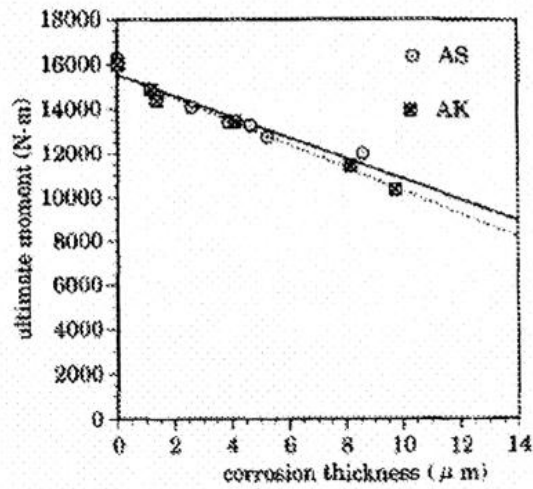
Huang และ Yang

Huang และ Yang (1997) ได้ทดสอบให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างการกัดกร่อนกับความสามารถในการรับกำลังของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก คานขนาดหน้าตัด 150 x 150 x 500 มม. เหล็กเสริมล่างขนาด 6 มม. 2 เส้น คานถูกแช่ในน้ำทะเลประมาณ 5 A/cm² มีตัวอย่าง 2 ชนิด ชนิดแรกเป็นคานที่ไม่มีรอยแตก (ชนิด S) ชนิดที่สองคานมีรอยแตกร้าวที่กึ่งกลางคาน (ชนิด K) และส่วนผสมคอนกรีต 2 แบบ คือแบบ A และแบบ B อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.4 และ 0.3 ตามลำดับ

W/C = 0.4



(a)

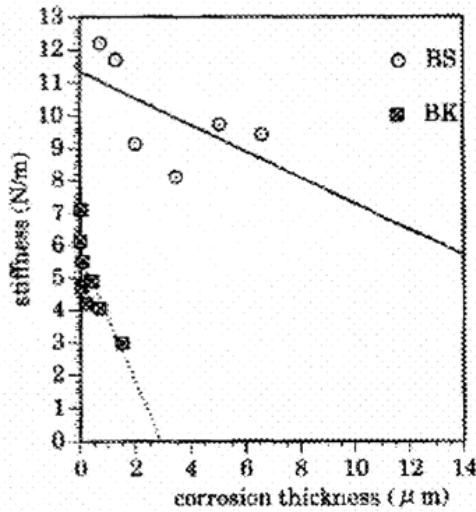


(b)

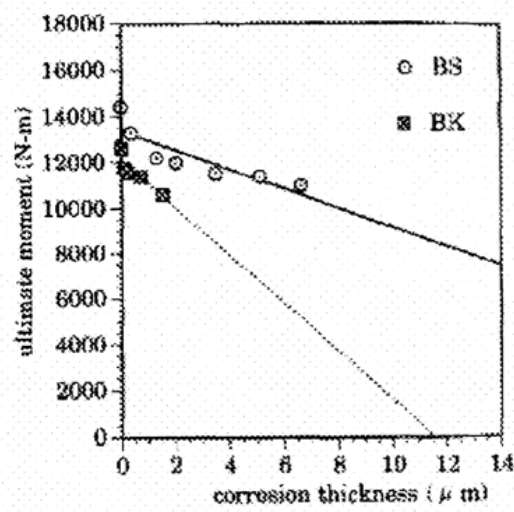
รูปที่ 2.7 (a) ความแข็งเนื่องจากผลกระทบจากการกัดกร่อน (b) โมเมนต์สูงสุดเนื่องจากผลกระทบของการกัดกร่อน (AS-คานที่ไม่มีรอยแตกร้าว AK-คานที่เกิดรอยแตกร้าวที่กึ่งกลางคาน)

(Huang และ Yang (1997))

W/C = 0.3



(a)



(b)

รูปที่ 2.8 (a) ความแข็งเนื่องจากผลกระทบจากการกัดกร่อน (b) โมเมนต์สูงสุดเนื่องจากผลกระทบของการกัดกร่อน (BS-คานที่ไม่มีรอยแตกร้าว BK-คานที่เกิดรอยแตกร้าวที่กึ่งกลางคาน)

(Huang และ Yang (1997))

รูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกัดกร่อนกับความแข็งแรง และโมเมนต์สุดท้ายของส่วนผสมคอนกรีตชนิด A และ B ความสามารถในการแบกรับน้ำหนักที่ลดลงเช่น ความหนาที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อคานที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ (w/c) หรือมีรอยแตกร้าว (ส่วนผสมชนิด B และชนิด K)

Huang และ Yang ได้ข้อสรุปว่าพฤติกรรมนี้เป็นผลมาจากคลอไรด์ไอออนที่เข้าถึงเหล็กเสริมได้ง่ายในคานที่แตกร้าว (Huang และ Yang (1997))

ความจริงที่ว่าคานที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ (ซึ่งทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรงสูงกว่า) ผลที่แสดงออกพบว่าค่าที่ได้กลับไม่เป็นไปตามทฤษฎี ผู้เขียนอธิบายพฤติกรรมนี้ว่า "อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำทำให้คอนกรีตเกิดรูขนาดเล็ก ทำให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานลดลง" และหลังจากเกิดรอยแตกร้าว คานคอนกรีตที่มีความแข็งแรงสูงเกิดการวิบัติก่อนคานที่มีความแข็งแรงต่ำกว่า

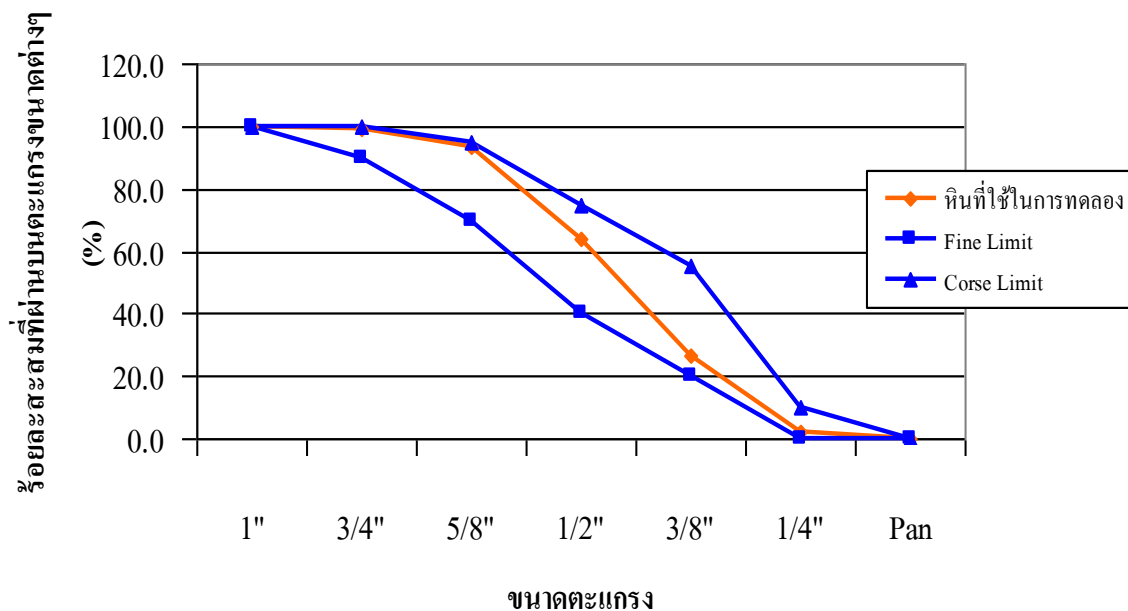
บทที่ 3
วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ปูนซีเมนต์ (Cement) ที่ใช้ในการทดสอบเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ตราช้าง)
- 2) หิน (Coarse Aggregate) ที่ใช้ในการทดสอบเป็นหินปูน โดยมีขนาดคละดังแสดงในตารางที่ 3.1 และจากรูปที่ 3.1 เป็นกราฟแสดงร้อยละสะสมที่ผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ ของหินเทียบกับมาตรฐาน จะเห็นว่าหินที่นำมาทดสอบมีขนาดคละอยู่ในช่วงมาตรฐาน ASTM C33

ตารางที่ 3.1 ขนาดคละของหิน

ขนาด ตะแกรง	ขนาด ตะแกรง	ปริมาณ ที่ค้ำบน ตะแกรง	ร้อยละ ที่ค้ำบน ตะแกรง	ร้อยละ สะสมที่ค้ำ บนตะแกรง ขนาดต่างๆ	ร้อยละ สะสมที่ผ่าน ตะแกรง ขนาดต่างๆ	ร้อยละสะสมที่ ผ่านบนตะแกรง ขนาดต่างๆ (ASTM) (%)	
						Fine Limit	Coarse Limit
(ins)	(mm.)	(kg.)	(%)	(%)	(%)		
1"	25.000	0	0.0	0.0	100.0	100	100
3/4"	19.000	45.7	0.9	0.9	99.1	90	100
5/8"	15.875	280.1	5.6	6.5	93.5	N/A	N/A
1/2"	12.500	1483	29.7	36.2	63.8	N/A	N/A
3/8"	9.500	1870.2	37.4	73.6	26.4	20	55
1/4"	4.750	1196.9	23.9	97.5	2.5	0	10
Pan	-	123.7	2.5	100.0	0.0	-	-
รวม		4999.6	100.0	-	-	-	-



รูปที่ 3.1 ร้อยละสะสมที่ผ่านบนตะแกรงขนาดต่างๆ ของหินเทียบกับขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33

3) ททราย (Fine Aggregate) ที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดคละดังแสดงในตารางที่ 3.2 และจากรูปที่ 3.2 เป็นกราฟแสดงร้อยละสะสมที่ผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ ของทรายเทียบกับมาตรฐาน จะเห็นว่าทรายที่นำมาทดสอบมีขนาดคละอยู่ในช่วงมาตรฐาน ASTM C33

4) น้ำ (Water) น้ำเป็นส่วนประกอบสำคัญที่ใช้ในการผสมคอนกรีต โดยที่น้ำจะทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดการก่อตัวของคอนกรีต ทำให้มีความชื้นเหลือในการเทคอนกรีตลงแบบหล่อได้ สำหรับน้ำที่ใช้ในการทดสอบเป็นน้ำประปา ในห้องปฏิบัติการคอนกรีตภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

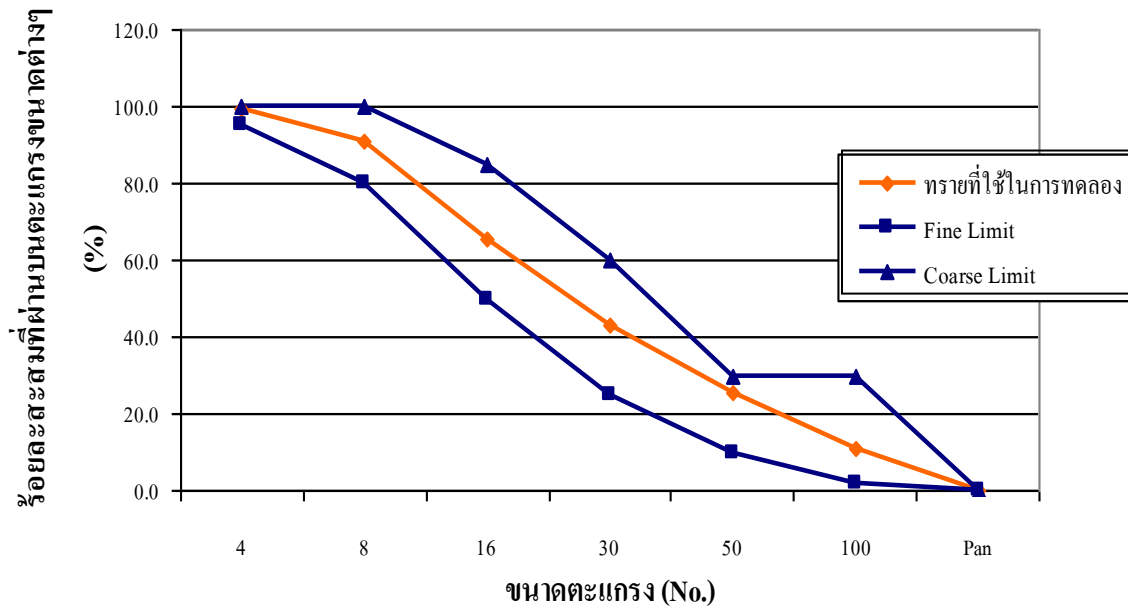
5) เหล็กกลมผิวเรียบ (Round bar) เป็นเหล็กเส้นที่มีหน้าตัดกลม มีผิวเรียบตลอดความยาวของเหล็กตามมาตรฐาน มอก.20 กำหนดให้เหล็กกลมผิวเรียบมีชั้นคุณภาพเดียว คือ SR24 ซึ่งหมายถึงมีกำลังต้านทานแรงดึงสูงสุดที่จุดครากของเหล็กไม่น้อยกว่า 2400 กก./ตร.ซม.

6) เหล็กข้ออ้อย (Deformed bar) เป็นเหล็กเส้นที่มีหน้าตัดกลม แต่ที่ผิวตามความยาวของเหล็กมีลักษณะเป็นบั้งหรือป่องหรือครีบเกลียว ตามมาตรฐาน มอก.24 โดยชั้นคุณภาพของเหล็ก คือ SD30

หมายถึง มีกำลังต้านทานแรงดึงสูงสุดที่จุดครากของเหล็กไม่น้อยกว่า 3000 กก./ตร.ซม. โดยขนาดหน้าตัดของเหล็กที่ใช้ คือ ใช้เหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 12 มม. 16 มม. 20 มม. และ 25 มม.

ตารางที่ 3.2 ขนาดคละของทราย

ขนาด ตะแกรง (No.)	ขนาด ตะแกรง (mm.)	ปริมาณ ที่ค้ำบน ตะแกรง (kg.)	ร้อยละ ที่ค้ำบน ตะแกรง (%)	ร้อยละ สะสมที่ค้ำ บนตะแกรง ขนาดต่างๆ (%)	ร้อยละ สะสมที่ผ่าน ตะแกรง ขนาดต่างๆ (%)	ร้อยละสะสมที่ผ่าน บนตะแกรงขนาด ต่างๆ (ASTM) (%)	
						Fine Limit	Coarse Limit
4	0.6350	8.6	0.9	0.9	99.1	95	100
8	0.3175	79.3	7.9	8.8	91.2	80	100
16	0.1588	257.5	25.8	34.5	65.5	50	85
30	0.0847	222.3	22.2	56.8	43.2	25	60
50	0.0508	180.1	18.0	74.8	25.2	10	30
100	0.0254	143.5	14.4	89.1	10.9	2	30
Pan	-	108.4	10.8	100.0	0.0	-	-
รวม	-	999.7	100.0	-	-	-	-



รูปที่ 3.2 ร้อยละสะสมที่ผ่านบนตะแกรงขนาดต่าง ๆ ของทราย เทียบกับขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) แบบหล่อขึ้นตัวอย่างทรงกระบอกผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตรสูง 20 เซนติเมตร
- 2) เครื่องผสมคอนกรีต (Concrete Mixing Machine) ใช้สำหรับผสมหิน ทราย ปูนซีเมนต์ และน้ำคลุกเคล้าให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียวกัน
- 3) ชุดอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ทำการเร่งปฏิกิริยาประกอบไปด้วย เครื่องควบคุมกระแสไฟฟ้า และเครื่องกระจายกระแสไฟฟ้า ภาพซ้ายเป็นเครื่องควบคุมกระแสไฟฟ้า และภาพขวาเป็นเครื่องกระจายกระแสไฟฟ้า ในการทำการเร่งปฏิกิริยาสนิมมีการทดสอบหลายชุด จึงใช้เครื่องกระจายกระแสไฟฟ้าทำให้สามารถเร่งปฏิกิริยาสนิมได้จำนวนมาก
- 4) อุปกรณ์วัดค่ากระแสไฟฟ้าในการเร่งปฏิกิริยา การเกิดสนิมของเหล็กเสริมให้เป็นไปตามทฤษฎี ต้องมีการวัดค่ากระแสไฟฟ้า ที่ไหลผ่านเหล็กเสริมทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสนิม โดยการวัดจะวัดที่เวลาห่างกัน 2 ชั่วโมง ตลอดการทำการทดลอง
- 5) เครื่องทดสอบแรงอัด (Compression Testing Machine) ใช้สำหรับทดสอบกำลังอัดของก้อนคอนกรีตตัวอย่าง

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

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

8) ซีเมนต์พิเศษให้กำลังอัดสูงและไม่หดตัวใช้ ซีเมนต์พิเศษให้กำลังอัดสูงและไม่หดตัว SikaGrout -212-11 คุณสมบัติของวัสดุใช้ตามข้อกำหนดของบริษัทผู้ผลิต [www.sika.com]

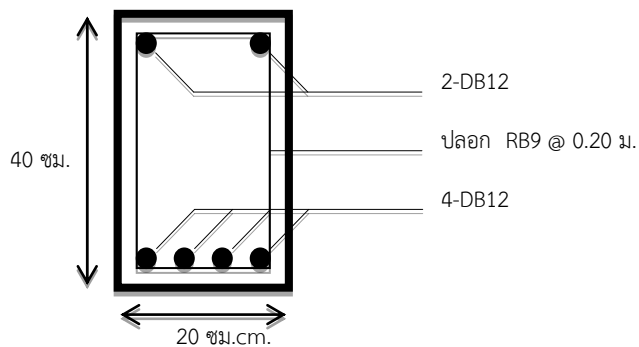
9) แบบหล่อตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (คาน ค.ส.ล.) ที่ใช้ในการทดสอบขนาด 0.20X0.40 ยาว 2.40 เมตร

10) เครื่องทดสอบยูนิเวอร์ซัลขนาด 150 ตัน (Universal testing machine) ใช้สำหรับทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานช่วงเดียว

11) อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัว (Displacement transducer) ใช้วัดการเคลื่อนตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กขณะทดสอบ

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

3.3 การเตรียมตัวอย่างคาน ค.ส.ล. ที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 3.3 แสดงหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้เป็นคานควบคุม

ตารางที่ 3.3 แสดงรายละเอียดตัวอย่างคาน ค.ส.ล. ที่ใช้ในการศึกษานี้ คาน B0 จะเป็นคานต้นแบบ ส่วนคาน BE15 BE30 BE50 เป็นคานที่มีรายละเอียดการเสริมเหล็ก เหมือนคาน B0 และผ่านกระบวนการเร่งสนิม โดยมีระดับความเสียหาย 3 ระดับคือ ระดับต่ำ ระดับปานกลาง และระดับรุนแรง 0

ตารางที่ 3.3 แสดงจำนวนตัวอย่างคาน ค.ส.ล. ที่ใช้ในการศึกษา

รายละเอียดคาน ค.ส.ล.	ชื่อตัวอย่างคาน ค.ส.ล.	
	คาน	จำนวน
1) คาน ค.ส.ล. ต้นแบบ	B0	1
2) คาน ค.ส.ล. เร่งการเกิดสนิม		
- ระดับต่ำ	BE15	1
- ระดับปานกลาง	BE30	1
- ระดับรุนแรง	BE50	1

บทที่ 4 การเร่งปฏิกิริยาสนิมในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

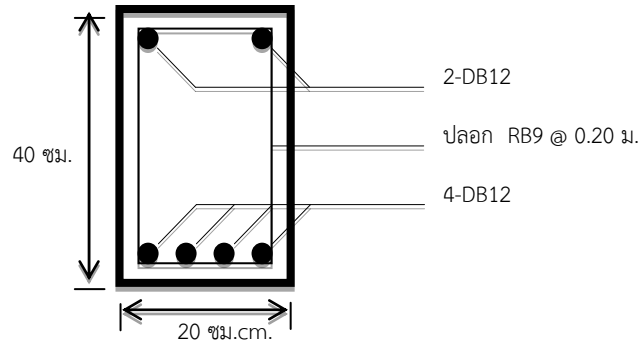
ในบทนี้ทำการเร่งปฏิกิริยาสนิมเหล็กเสริมในคานคอนกรีต คาน 1 ตัว ใช้เป็นคานควบคุมที่ไม่ต้องผ่านการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิม และให้คาน 3 ตัว เป็นคานที่ผ่านการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมเหล็ก โดยกำหนดให้เหล็กเสริมในคานคอนกรีตเกิดการสูญเสีย 3 ระดับ ระดับการสูญเสียมีดังนี้ ระดับต่ำ (15%) ใช้ชื่อว่า B15 มี 1 ตัว ระดับปานกลาง (30%) ใช้ชื่อว่า B30 มี 1 ตัว และระดับรุนแรง (50%) ใช้ชื่อว่า B50 มี 1 ตัว และคานควบคุมเป็นคานที่ไม่เกิดการสูญเสียน้ำหนักเหล็กเสริมใช้ชื่อว่า B0 แสดงดังตารางที่ 4.1

ในการคำนวณหาน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียไป โดยใช้สมการพาราเดย์ในการคำนวณหาการสูญเสีย น้ำหนักเหล็กเสริม ในส่วนของบทที่ 2 นี้ได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของสมการพาราเดย์แล้ว พบว่ามีความถูกต้องในระดับหนึ่ง

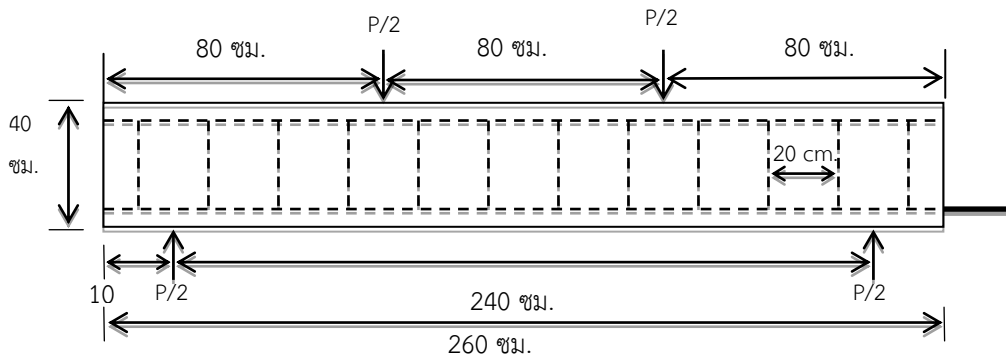
ตารางที่ 4.1 สัญลักษณ์ต่างๆ และคำอธิบาย

ชื่อคาน	เปอร์เซ็นต์การสูญเสีย น้ำหนักเหล็กที่ต้องการ	จำนวนคาน	คำอธิบาย
B0	0	1	คานควบคุม
B15	15	2	คานที่มีการสูญเสียน้ำหนักเหล็ก 15%
B30	30	2	คานที่มีการสูญเสียน้ำหนักเหล็ก 30%
B50	50	2	คานที่มีการสูญเสียน้ำหนักเหล็ก 50%

คานที่นำมาทดสอบมีขนาดหน้าตัด 20 x 40 เซนติเมตร ยาว 260 เซนติเมตร เหล็กบนเป็นเหล็กข้ออ้อยขนาด 12 มิลลิเมตร 2 เส้น เหล็กล่างเป็นเหล็กข้ออ้อยขนาด 12 มิลลิเมตร 3 เส้น และมีเหล็กปลอกขนาด 9 มิลลิเมตร วางระยะห่าง 20 เซนติเมตรดังรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก



รูปที่ 4.2 ภาพตัดตามขวางของคานและแสดงตำแหน่งการวางเหล็กเสริมและเหล็กปลอก

4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาสนิม

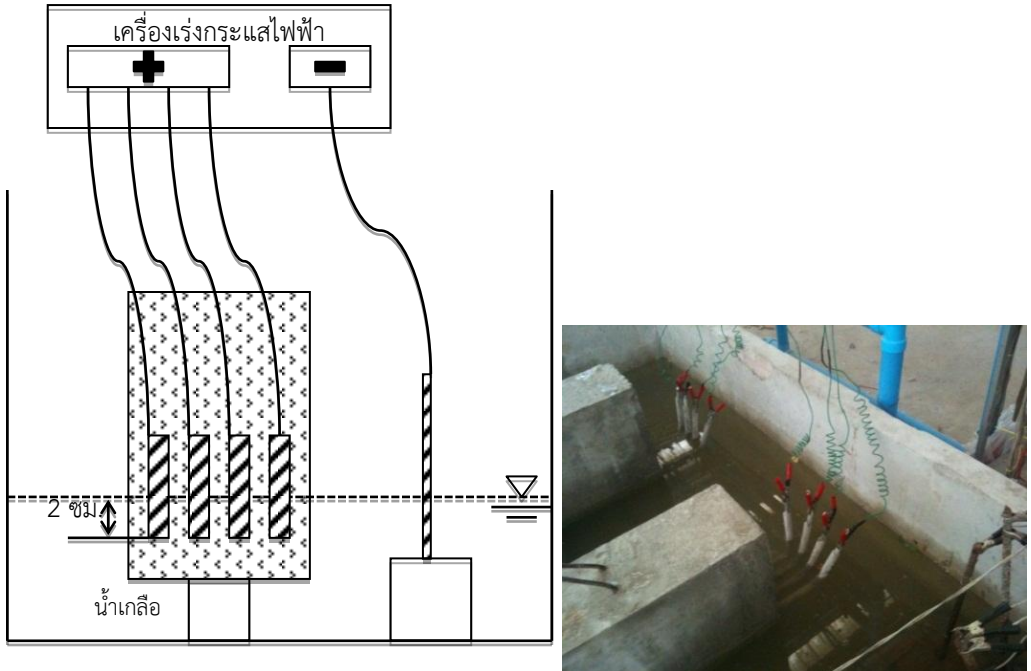
ในการทดลองนี้หากให้เหล็กเสริมในคานตัวอย่างเกิดสนิมขึ้นเองตามธรรมชาติ ต้องใช้เวลานานเกินไป เพื่อให้ได้การสูญเสียน้ำหนักเหล็กตามที่กำหนดไว้ให้รวดเร็วยิ่งขึ้น จึงต้องทำการเร่งปฏิกิริยาสนิมเหล็ก มีอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

1. ชุดอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิม (รูปในบทที่ 3)
2. เครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้า รุ่น UT200 Series

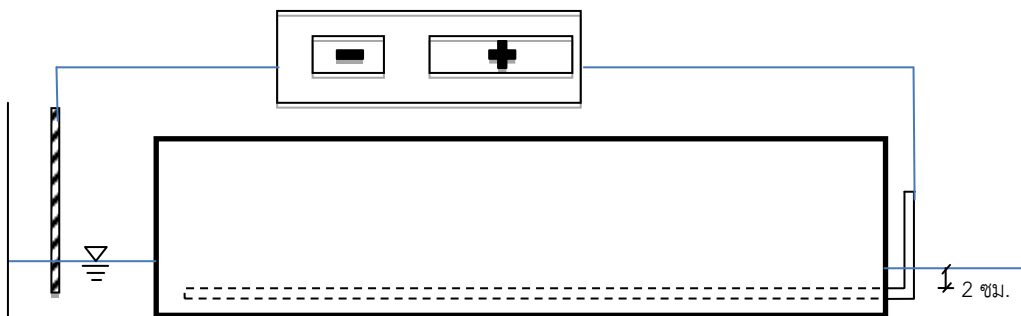
4.2 ขั้นตอนการเร่งปฏิกิริยาสนิมเหล็กเสริมในคานคอนกรีต

ในการเร่งปฏิกิริยาสนิมเหล็กในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ต้องทำการเตรียมบ่อสำหรับนำคานลงแช่ในน้ำ ซึ่งเป็นน้ำที่ผสมเกลืออยู่ 5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำ เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมเหล็ก นำคานลงแช่ในบ่อ ให้ระดับน้ำสูงกว่าเหล็กเสริมล่างประมาณ 2 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4

การเร่งปฏิกิริยาสนิมได้แบ่งระดับการสูญเสียออกเป็น 3 ระดับ คือ การสูญเสียที่ 15% , 30% , และ 50% โดย 1 ค่าการสูญเสียจะมีคานตัวอย่าง 2 ตัว โดย 1 ตัว สำหรับนำไปเชื่อมแซมด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้วอีก 1 ตัว ไม่มีการเชื่อมแซมใดๆ ทำการปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า 50 แอมป์ แปลงจากกระแสสลับมาเป็นกระแสตรง ผ่านมายังเครื่องกระจายกระแสไฟฟ้าเหมือนกับการทดลองในบทที่ 3 โดยขั้วบวกไปจับกับเหล็กเสริมและขั้วลบไปจับกับเหล็กที่จุ่มลงไปในน้ำ เพื่อให้ครบวงจรไฟฟ้าเคมี



รูปที่ 4.3 ภาพแสดงการนำคานไปแช่ในบ่อและการ clamp ที่เหล็ก



รูปที่ 4.4 ภาพตัดด้านขวางของคานในการเร่งปฏิกิริยาสนิมในเหล็กเสริม

ขั้นตอนการเร่งปฏิกิริยาสนิมเหล็กมีดังนี้

1. ใส่น้ำพร้อมผสมเกลือ 5 เปอร์เซ็นต์และนำคานลงในบ่อ
2. จ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่เหล็กเสริมและทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าวันละ 4 ครั้ง (เช้า, บ่าย, เย็น, ค่ำ)
3. นำค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ไปคำนวณการสูญเสียน้ำหนักเหล็กจากสมการพาราเดย์

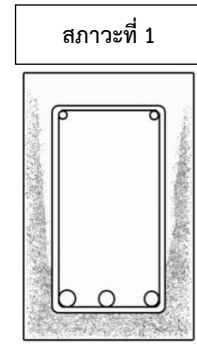
$$\Delta W = \frac{ItA_m}{ZF}$$

4. เมื่อค่าการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมล่างถึงค่าการสูญเสียตามที่กำหนด นำคานขึ้นในเช้าของวันรุ่งขึ้น

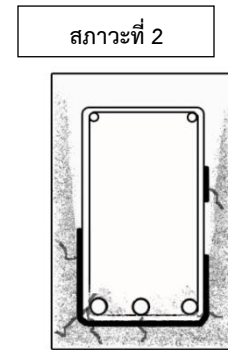
ขั้นตอนในการทำการเร่งปฏิกิริยาสนิมเหล็กเพื่อทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักเหล็กของเหล็กเสริมขั้นตอนดังกล่าวเหมือนกับบทที่ 3 สามารถไปดูขั้นตอนอย่างละเอียดได้

4.3 ผลที่ได้จากการเร่งปฏิกิริยาสนิมเหล็กเสริมในคานคอนกรีต

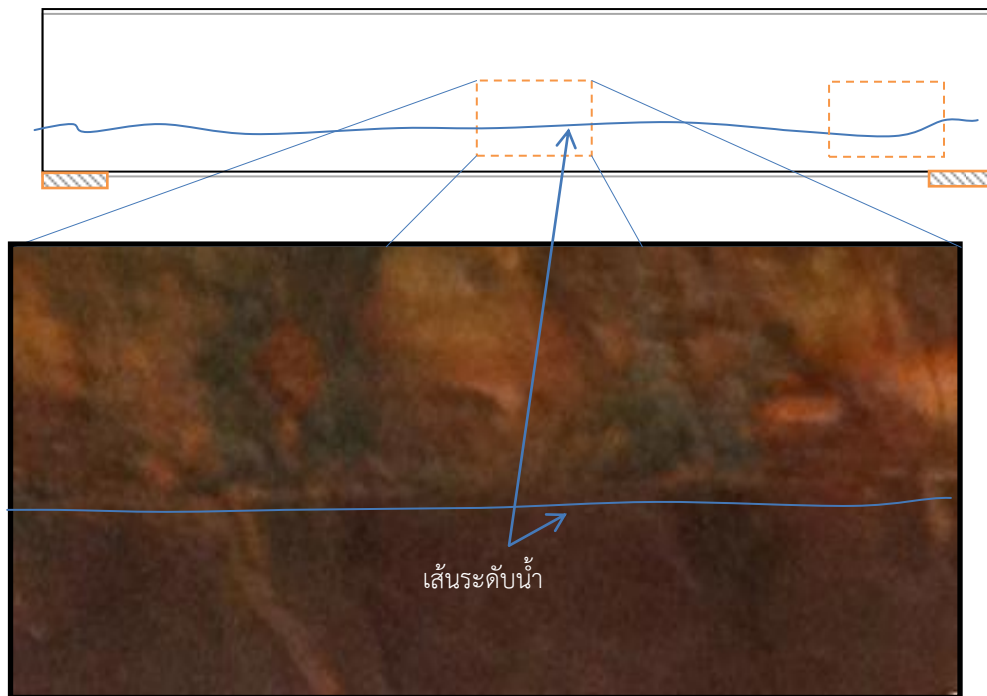
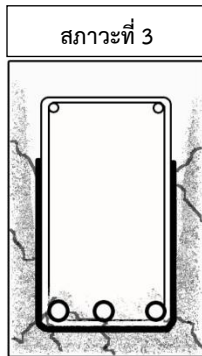
ผลที่ได้จากการนำคานทั้ง 6 ตัว ไปทำการเร่งปฏิกิริยาสนิมเหล็กในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ผลที่ได้คือ คานมีการเปลี่ยนแปลงเป็นไปตามทฤษฎี 4 สภาวะการแตกร้าวเนื่องจากการเกิดสนิมเหล็กในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 คานที่กำหนดให้เกิดการสูญเสียระดับต่ำ (15%) อยู่ในช่วงสภาวะที่ 1 เกิดการซึมผ่านของคลอไรด์และเริ่มกัดกร่อนที่รอบๆบริเวณเหล็กเสริม คาน B15 จากสภาพภายนอกของคานมีคราบสนิมเกาะอยู่เฉพาะคานช่วงล่างที่สัมผัสกับน้ำ ดังรูปที่ 4.5 คานที่กำหนดให้เกิดการสูญเสียระดับกลาง (30%) อยู่ในสภาวะที่ 2 เกิดการแผ่และขยายการกัดกร่อนของสนิมส่งผลให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว ที่ปลายคานใต้เหล็กเสริมล่างเนื้อคอนกรีตมีการหลุดออก ดังรูปที่ 4.6 และคานที่กำหนดให้การสูญเสียระดับสูง (50%) อยู่ในสภาวะที่ 3 เกิดการแตกร้าวมากขึ้นและมีการกัดกร่อนที่รุนแรงในส่วนที่มีความชื้นเหมาะสม คาน B50 ผิวคานบริเวณเหล็กปลอกมีการหลุดออกและคราบสนิมซึมขึ้นจนถึงผิวคานด้านบน ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.5 คาน B15 ที่ผิวคานมีคราบสนิมเกาะอยู่เล็กน้อย คานอยู่ในสถานะที่ 1



รูปที่ 4.6 คาน B30 ที่ปลายคานใต้เหล็กเสริมล่างเนื้อคอนกรีตมีการหลุดออก คานอยู่ในสถานะที่ 2



รูปที่ 4.7 แสดงคาน B50 มีคราบสนิมและเกิดการแตกร้าวหลุดกร่อน คานอยู่ในสถานะที่ 3

รูปที่ 4.7 เป็นภาพตัวอย่างของคานที่มีระดับการสูญเสียรุนแรง(B50) คานมีคราบสนิมเกาะที่ผิวเยอะมาก และคราบสนิมยังซึมขึ้นไปด้านบนสูงกว่าเส้นระดับน้ำ ดังนั้นเป็นไปตามทฤษฎีที่คราบเกิดขึ้นในระดับรุนแรง และที่ผิวคอนกรีตเกิดรอยแตกร้าว

ผลที่ได้จากการเร่งปฏิกิริยาสนิมเหล็ก จากนั้นใช้โปรแกรม Graphical Analysis คำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟ ดังตารางที่ 4.2 นำค่าพื้นที่ใต้กราฟไปคำนวณหาการสูญเสียน้ำหนักเหล็กจากสมการพาราเบลา ค่าที่ได้แสดงในตารางที่ 4.3 หลังจากที่ทำกรเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมเหล็กในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ การสูญเสีย 15% 30% 50% อย่างละสองตัว เพื่อทำการเปรียบเทียบกำลังได้ทำการช่อมคานด้วยไฟเบอร์ใยแก้วและไม่ช่อมแซมมีกำลังแตกต่างกันอย่างไร

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงข้อมูลพื้นที่ใต้กราฟจากโปรแกรม Graphical Analysis ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกน y กระแสไฟ(แอมแปร์) กับ แกน x เวลา(วินาที)

ชื่อคาน	คานตัวที่	ข้อมูลแสดงผลการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟจากโปรแกรม Graphical Analysis ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกน y กระแสไฟกับแกน (แอมแปร์) x เวลา(วินาที)					
		เหล็กเสริม 1	เหล็กเสริม 2	เหล็กเสริม 3	เหล็กเสริม 4	ผลรวม	หมายเหตุ
B0	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-
B15	1	2.30E+06	1.14E+06	0.34E+06	2.24E+06	6.024E+06	ค่ากระแสไฟค่อนข้างคงที่
	2	0.91E+06	1.72E+06	0.99E+06	2.30E+06	5.927E+06	ค่ากระแสไฟค่อนข้างคงที่
B30	1	2.60E+06	3.30E+06	3.40E+07	2.73E+06	12.03E+06	ค่ากระแสไฟค่อนข้างคงที่
	2	0.42E+06	2.40E+06	4.26E+06	3.06E+06	15.35E+06	ค่ากระแสไฟค่อนข้างคงที่
B50	1	3.97E+06	6.40E+06	3.37E+06	5.74E+06	19.48E+06	ค่ากระแสไฟไม่ค่อยคงที่
	2	12.81E+06	3.97E+06	2.32E+06	7.01E+06	26.10E+06	ค่ากระแสไฟค่อนข้างคงที่

ตารางที่ 4.3 น้ำหนักและเปอร์เซ็นต์ของเหล็กที่หายไป

ชื่อคาน	คานตัวที่	น้ำหนักเหล็กเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักเหล็กที่หายไป (กรัม)	เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักเหล็กเสริม(%)
B0	-	9413	0	0.00
B15	1	9413	1743.21	18.52
	2	9413	1715.14	18.22
B30	1	9413	3480.35	36.97
	2	9413	4443.11	47.20
B50	1	9413	5635.64	59.87
	2	9413	7553.35	80.24

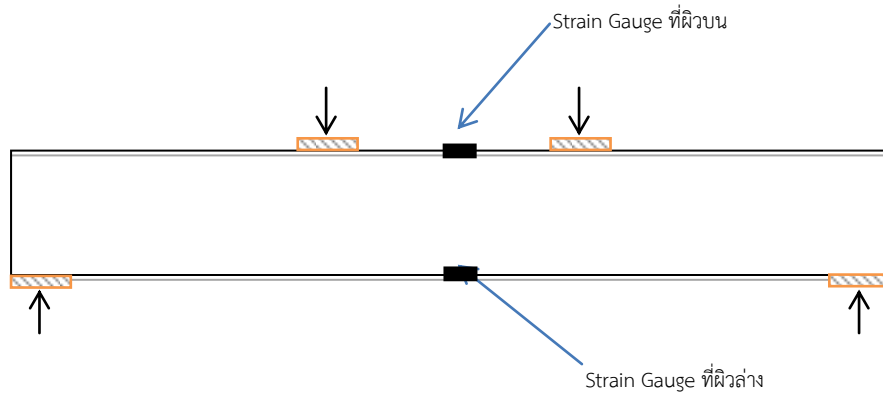
ตารางที่ 4.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ของการสูญเสียน้ำหนักเหล็กที่คำนวณได้จากสมการพาราโบล่า พบว่า คาน B50 ตัวที่ 2 มีการสูญเสียถึง 80.24 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงที่ทำการวัดกระแสไฟฟ้า เหล็กเส้นที่ 1 ของ คาน B50 ตัวที่ 2 ได้ค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงมาก เมื่อคานตัวนี้ได้ถูกนำขึ้นพร้อมกันกับคาน B50 ตัวที่ 1 โดย ช่วงที่คานน้ำหนักการสูญเสียไม่นำค่าของเส้นที่ 1 ของคาน B50 ตัวที่ 2 เมื่อคานถูกนำขึ้นมาจากบ่อ ก็ได้ นำคาน B50 ตัวที่ 2 ทำการซ่อมแซมคานโดยสกัดผิวท่อนคานออกจนถึงเหล็กกลางพบว่า เหล็กถูกกัดกร่อน จนเหล็กมีขนาดเล็กลงอย่างเห็นได้ชัด และเหล็กบางเส้นขาดออกจากกัน เหล็กปลอกไม่เหลืออยู่เลย ดัง แสดงในรูปที่ 4.7 แสดงว่าค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการพาราโบล่า มีค่าใกล้เคียงกับการสูญเสียที่เกิดขึ้นจริง



รูปที่ 4.8 คานที่ได้ทำการสกัดผิวคอนกรีตจึงถึงเหล็กกลาง

4.4 ตำแหน่งการติดตั้ง Strain Gauge ที่ผิวคอนกรีต

ก่อนทำการซ่อมคานด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้วต้องมีการติดตั้ง Strain Gauge เพื่อใช้วัดการยืดหด ตัวที่ผิวบนและผิวล่างของคานคอนกรีต โดยมีลักษณะการติดตั้ง Strain Gauge ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.9 แสดงตำแหน่งการติด Strain Gauge ที่ผิวบนและผิวล่างที่คาน B0 B15 B30 B50

ตารางที่ 5.3 พื้นที่ใต้กราฟคำนวณจากโปรแกรม Graphical Analysis ($f'_c = 350 \text{ ksc.}$)

กำลังอัดประลัย (ksc)	หมายเลขเหล็ก	ขนาดเหล็ก	เปอร์เซ็นต์การสูญเสีย (%)	พื้นที่ใต้กราฟ (It)	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ ใต้กราฟ (It)
350	1	RB9	20	60050	60760
	2			63070	
	3			59160	
	4		40	123100	150933
	5			120200	
	6			209500	
	7		60	190500	205633
	8			227700	
	9			198700	
	10	DB12	20	121400	141000
	11			159000	
	12			142600	
	13		40	162400	195567
	14			226400	
	15			197900	
	16		60	303300	318833
	17			329200	
	18			324000	
	19	DB16	20	220500	213633
	20			221200	
	21			199200	
	22		40	434600	470567
	23			473000	
	24			504100	
	25		60	662700	680700
	26			704600	
	27			674800	

ตารางที่ 5.3 พื้นที่ใต้กราฟคำนวณจากโปรแกรม Graphical Analysis ($f'_c = 350 \text{ ksc.}$) (ต่อ)

กำลังอัดประลัย (ksc)	หมายเลขเหล็ก	ขนาดเหล็ก	เปอร์เซ็นต์การสูญเสีย (%)	พื้นที่ใต้กราฟ (It)	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ใต้กราฟ (It)
350	28	DB20	20	296800	365600
	29			321800	
	30			478200	
	31		40	713200	671333
	32			658400	
	33			642400	
	34		60	1031000	1011333
	35			966000	
	36			1037000	
	37	DB25	20	540000	567933
	38			552500	
	39			611300	
	40		40	953900	1023633
	41			1045000	
	42			1072000	
	43		60	1496000	1492000
	44			1465000	
	45			1515000	

การซ่อมถูกแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือแบบที่ 1 แบบไม่ต้องสกัดท้องคานเพราะคานยังไม่ปรากฏรอยแตกร้าวที่ผิวให้เห็น เป็นการซ่อมคานที่มีระดับการสูญเสียต่ำกว่าปานกลาง และในแบบที่ 2 แบบที่ต้องทำการสกัดผิวคาน ใช้ซ่อมคานที่มีระดับการสูญเสียแบบรุนแรงที่ผิวคอนกรีตมีคราบสนิมและการแตกร้าว การหลุดร่อนของผิวคอนกรีต

แบบที่ 1 แบบไม่ต้องสกัดท้องคาน

ทำความสะอาด ผิวติดตั้ง Electrical Strain Gauge ที่กึ่งกลางคาน เพื่อใช้วัดการยึดตัวของผิวคานคอนกรีตที่ผิวล่าง พร้อมติดแผ่นป้องกัน Strain Gauge เพื่อไม่ให้เครื่องมือที่ใช้ซ่อมแซมหรือขัดผิวคานคอนกรีตไปสัมผัสที่ตัว Strain Gauge ขณะทำการซ่อมแซม เพราะอาจทำให้เกิดความเสียหายได้ รูปที่

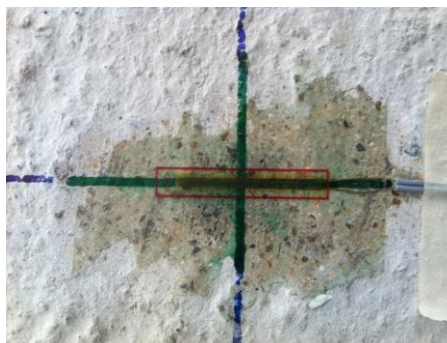
4.18 แสดงภาพที่ติดแผ่นป้องกันเรียบร้อย ในการติดตั้ง Strain Gauge เพื่อให้อยู่ในตำแหน่งกลางคาน ต้องวัดระยะและทำเครื่องหมายเป็นเป็นรูป + ดังรูปที่ 4.19 จากนั้นให้นำ Strain Gauge มาติดให้อยู่ใน ตำแหน่งกึ่งกลางคาน ดังรูปที่ 4.20 การติด Strain Gauge เมื่อทากาวแห้งสนิทแล้วก็สามารถติดแผ่น ป้องกัน Strain Gauge ได้ทันที



รูปที่ 4.18 การติดตั้ง Electrical Strain Gauge



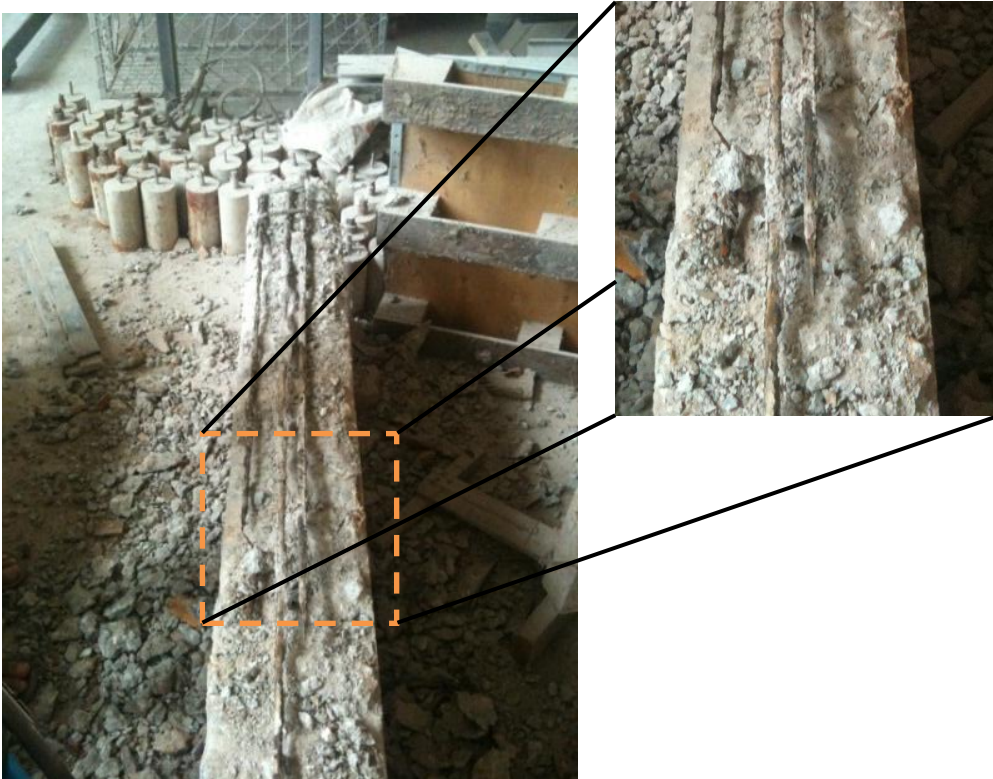
รูปที่ 4.19 ภาพแสดงการทำเครื่องหมายสำหรับติดตั้ง Strain Gauge ที่ตำแหน่งกลางคาน



รูปที่ 4.20 ภาพแสดง Strain Gauge ที่ติดตำแหน่งกึ่งกลาง

แบบที่ 2 แบบที่ต้องสกัดคานออกเนื่องจากคานมีการสูญเสียในระดับรุนแรง

1. ในส่วนของคานที่เกิดการแตกร้าวต้องทำการสกัดคอนกรีตที่แตกร้าวออกจนถึงเหล็กเสริม ดังรูปที่ 4.23 พบว่าเหล็กของคาน B50 ถูกกัดกร่อนไปมากโดยเฉพาะเหล็กปลอกไม่มีเหลืออยู่เลย เหล็กเสริมหลักขาดออกจากกัน ดังนั้นจึงได้นำเหล็กเสริมล่างออกทั้งหมด



รูปที่ 4.23 คานคอนกรีตที่ถูกสกัดออกจนถึงเหล็ก

จากรูปที่ 4.23 เป็นคานที่ทำการสกัดผิวล่างออกให้อยู่เหนือผิวบนเหล็กล่าง 2 เซนติเมตร พบว่าเหล็กเสริมของคานอยู่ในระดับการสูญเสียที่รุนแรง เหล็กบางเส้นขาดออกจากกัน เหล็กปลอกถูกกัดกร่อนไปจนหมด จึงนำเอาเหล็กเสริมล่างออกไปทั้งหมด

2. ติดตั้งแบบหล่อคอนกรีตและท่อน้ำยาเชื่อมประสานระหว่างคอนกรีตเก่ากับคอนกรีตใหม่ รูปที่ 4.24 แสดงการเข้าแบบคานและท่อน้ำยาประสานระหว่างปูนเก่าและปูนใหม่ ปล่อยให้ตั้งให้น้ำยามีความหนืดประมาณ 30 นาที



รูปที่ 4.24 ติดตั้งแบบหล่อคอนกรีตและท่อน้ำยาเชื่อมประสาน

3. ผสมและเทคอนกรีต คอนกรีตที่ใช้มีคุณสมบัติในการพัฒนากำลังเร็ว โดยใช้ Sika Micro SCC แทนคอนกรีตทั่วไป รูปที่ 4.25 แสดงการผสมคอนกรีต Sika Micro SCC หลังจากท่อน้ำยาประสานมีความหนืดพอสมควร เริ่มทำการเทคอนกรีตลงในแบบหล่อจนเต็มแบบ ในขณะที่เทคอนกรีตต้องทำการกระทุ้งไปด้วยเพื่อให้เนื้อคอนกรีตเต็มแบบและไม่ทำให้เกิดฟองอากาศ

4. เมื่อคอนกรีตใหม่ครบอายุทำความสะอาดผิวและติด Strain Gauges ที่ผิว

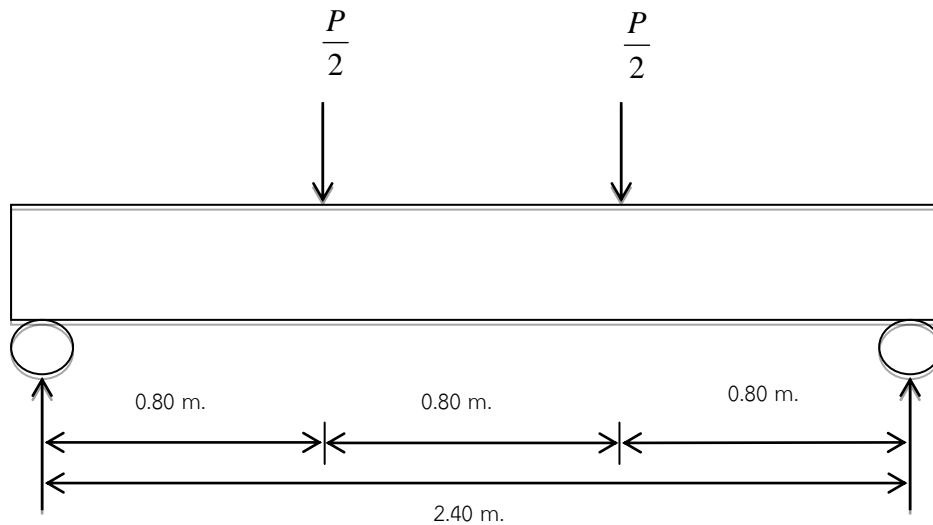


รูปที่ 4.25 การผสม Sika Micro SCC และการเทลงในแบบหล่อ

บทที่ 5 การทดสอบคาน

ในบทนี้เป็นการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเคมีและซ่อมด้วยแผ่นไฟเบอร์ไยแก้ว โดยคานมีทั้งหมด 4 ตัว ได้แก่ คาน B0 , B15 , B30 , B50 นำมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) การทดสอบนี้ทำการกดด้วยแบบ Third-Point Loading รูปที่ 5.1 แสดงตัวอย่างการกดน้ำหนัก โดยมีระยะห่างระหว่างจุดกดน้ำหนักเท่ากับ $L/3$ หรือเท่ากับ 0.80 เมตร และระยะห่างระหว่างจุดรองรับเท่ากับ 2.40 เมตร

การทดสอบนี้เพื่อศึกษาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานที่ผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเคมีหลักในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ว่ามีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกเหลืออยู่เท่าใด และเมื่อทำการซ่อมด้วยแผ่นไฟเบอร์ไยแก้วแล้วความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นเท่าไร โดยการทดสอบมีการเก็บข้อมูลในลักษณะกราฟเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (Load) และระยะการโก่งตัวของท้องคานในแนวตั้ง (Deflection) ที่กึ่งกลางคาน สำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นนำมาศึกษาลักษณะพฤติกรรมในการรับน้ำหนักของคาน และลักษณะพฤติกรรมการวิบัติ ลักษณะการฉีกขาดของแผ่นไฟเบอร์ไยแก้ว

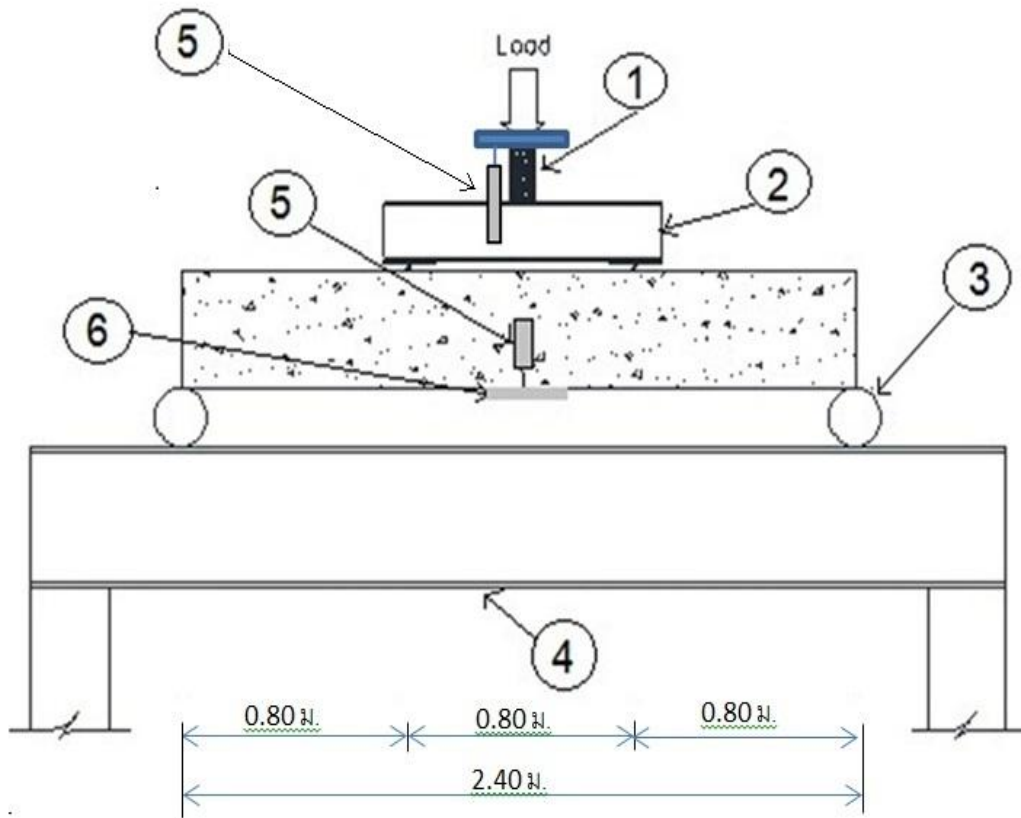


รูปที่ 5.1 แสดงตัวอย่างการกดน้ำหนัก

5.1 ตำแหน่งและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

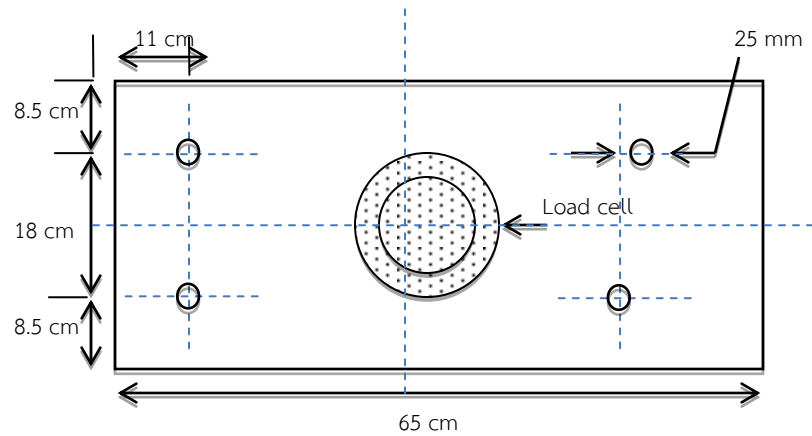
การทำการทดสอบคานต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ให้พร้อมก่อนทำการทดสอบ เพราะในการทดสอบเป็นแบบต่อเนื่อง ไม่มีการหยุดจนกว่าคานที่นำมาทดสอบเกิดการวิบัติ หรือตามเห็นควรของผู้ควบคุม

รูปที่ 5.2 แสดงตำแหน่งของการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ โดยที่อุปกรณ์ทุกชิ้นต้องวางในตำแหน่งที่ถูกต้อง เพื่อให้การทดสอบถูกต้องแม่นยำ



รูปที่ 5.2 ภาพแสดงตำแหน่งอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดสอบการก้น้ำหนักคาน

1. Load Cell และแผ่นยึด Load Cell รูปที่ 5.3 แสดงขนาดของแผ่นเหล็กที่ใช้สำหรับยึด Load Cell เข้ากับส่วนหัวของเครื่องทดสอบ แผ่นเหล็กมีความกว้าง 35 เซนติเมตร ยาว 65 เซนติเมตรหนา 2 เซนติเมตร โดยแผ่นเหล็กถูกยึดเข้ากับเครื่องทดสอบด้วยนอตขนาด 20 มิลลิเมตร ทั้งหมด 4 ตัว รูปที่ 5.4 แสดงการติดตั้ง Load cell เข้ากับส่วนหัวของเครื่องทดสอบ สำหรับการติดตั้งตัว Load Cell เข้ากับส่วนหัวของเครื่องทดสอบ เพื่อความสะดวกรวดเร็วขณะนำคานและอุปกรณ์เข้าติดตั้งในตำแหน่งต่างๆ โดยที่ไม่ต้องถอด Load Cell ออก ขณะที่เคลื่อนส่วนหัวของเครื่องทดสอบขึ้น เพื่อทำการติดตั้งคานและอุปกรณ์ เนื่องจากส่วนหัวของเครื่องทดสอบไม่สามารถยึดติดกับ Load Cell ได้โดยตรง



รูปที่ 5.3 ขนาดของแผ่นยึด Load Cell



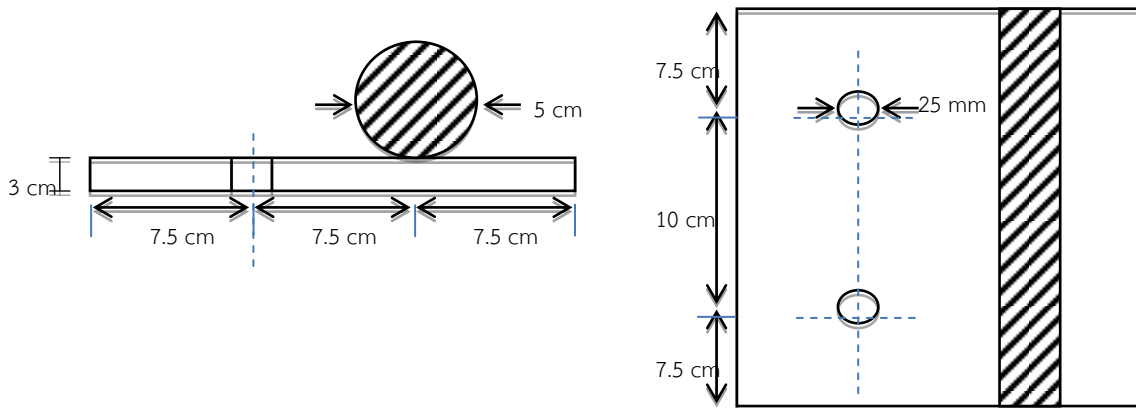
รูปที่ 5.4 แสดงการยึดติดแผ่น Load cell ไปที่ UTM

2. คานเหล็กที่ใช้เป็นแท่นสำหรับการถ่ายน้ำหนักจากเครื่องทดสอบลงสู่คานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยคานเหล็กมีจุดรองรับอย่างง่าย วางบนหลังคานคอนกรีต โดยคานเหล็กถูกออกแบบให้สามารถรับน้ำหนักได้สูงกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เชื่อมด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้ว เพื่อให้ไม่ให้เกิดวิบัติก่อนคานคอนกรีตที่นำมาทดสอบ ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 คานเหล็กใช้กดแบบ 2 จุด

3. จุดรองรับคาน รูปที่ 5.6 แสดงภาพที่ประกอบไปด้วยแผ่นเหล็ก กว้าง 25 เซนติเมตร ยาว 22.5 เซนติเมตรหนา 3 เซนติเมตร และท่อนเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร โดยนำมาเชื่อมติดกันเป็นชิ้นเดียว ใช้รองรับที่ปลายคานทั้งสองด้าน โดยมีระยะห่างระหว่างจุดรองรับ 2.40 เมตร จุดรองรับนี้ได้ถูกทำขึ้นมาใหม่ให้ เนื่องจากส่วนหัวของเครื่องทดสอบสามารถเคลื่อนตัวขึ้นได้เพียง 120 เซนติเมตร เท่านั้น จุดรองรับมีความสูงอยู่ที่ 8 เซนติเมตร ทำให้มีช่องว่างในการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มขึ้น 10 เซนติเมตร รูปที่ 5.7 แสดงจุดรองรับที่เชื่อมแล้วพร้อมใช้งาน โดยการเชื่อมใช้ลวดเชื่อม L55 ขนาด 4 มิลลิเมตร เชื่อมทั้งหมด 2 ชั้น เพื่อความแข็งแรง

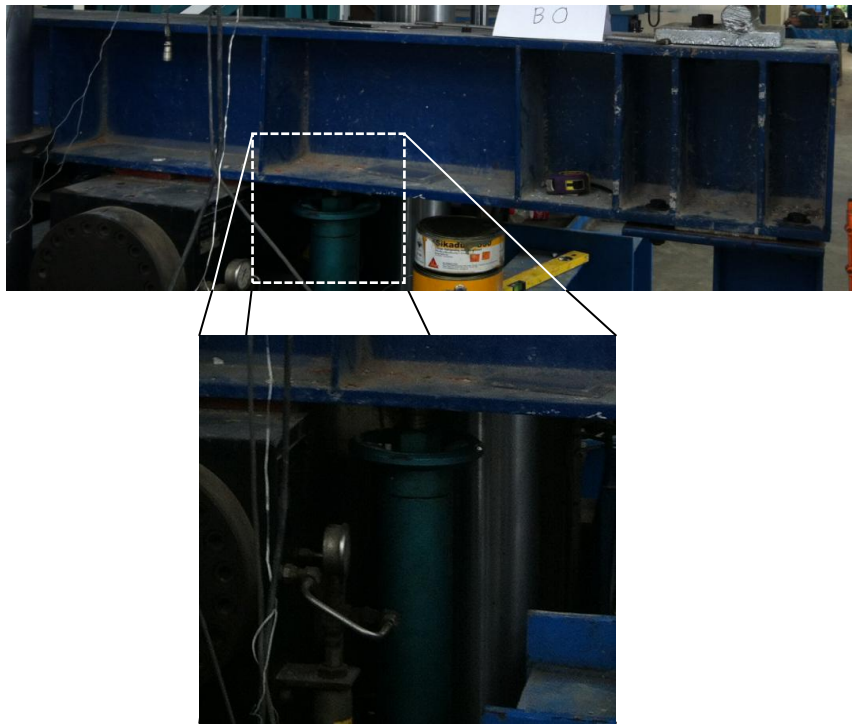


รูปที่ 5.6 ขนาดของจุดรองรับ



รูปที่ 5.7 ภาพแสดงจุดรองรับ

4. คานเหล็กขนาดใหญ่ใช้สำหรับเป็นฐานวางจตุรรองรับ รูปที่ 5.8 คานเหล็กขนาดใหญ่มีค้ำยัน 2 ตัว เพื่อป้องกันการแอ่นตัวของคานเหล็ก(ดังรูปเล็ก)



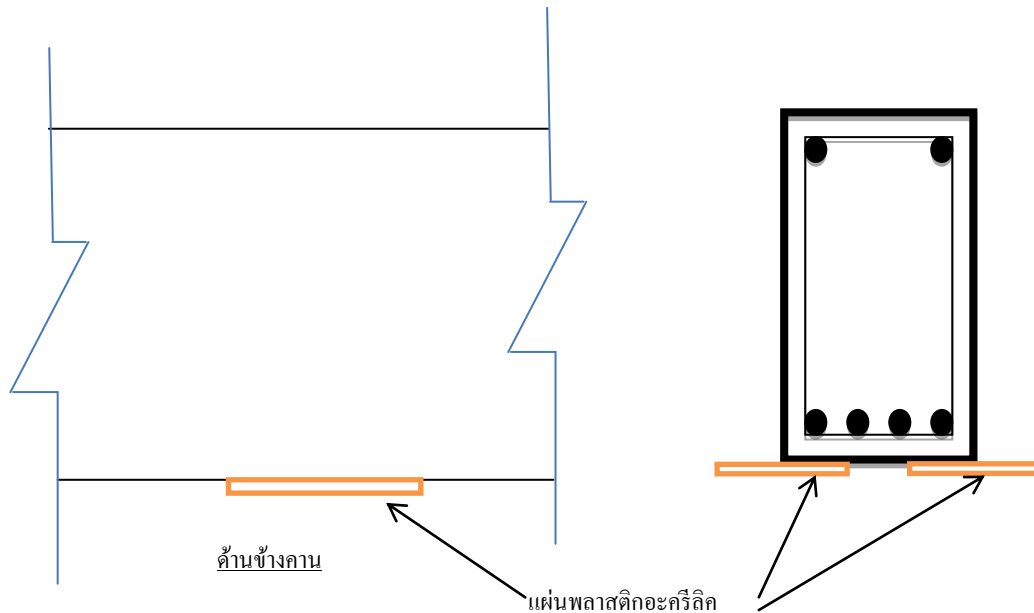
รูปที่ 5.8 คานรองรับรับใช้เป็นฐานในการทดสอบคาน

5. LVDT เครื่องมือวัดระยะการโก่งตัวของท้องคาน และวัดการเคลื่อนตัวของเครื่องทดสอบ รูปที่ 5.9 ด้านซ้ายแสดง LVDT ขนาดเล็ก สามารถวัดระยะได้ 50 มิลลิเมตร ใช้สำหรับวัดการโก่งตัวของคานทดสอบ รูปที่ 5.9 ด้านขวาแสดง LVDT ขนาดใหญ่ สามารถวัดระยะได้ 80 มิลลิเมตร ใช้สำหรับวัดการเคลื่อนตัวส่วนหัวเครื่องทดสอบ



รูปที่ 5.9 เครื่องมือวัดการโก่งตัวของท้องคาน และ การเคลื่อนตัวลงของแท่นทดสอบ UTM

6. แผ่นพลาสติกอะครีลิก ติดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของห้องคาน ดังรูปที่ 5.10 โดยติดตั้งให้แผ่นอะครีลิกยื่นออกมาจากตัวคานทดสอบอย่างน้อยข้างละ 5 เซนติเมตร เพื่อให้เข็มของเครื่อง LVDT สัมผัสกับแผ่นอะครีลิกเพื่อวัดการโก่งตัวของคานที่ตำแหน่งห้องคาน เนื่องจากระยะใต้ห้องคานไม่เพียงพอสำหรับติดตั้ง LVDT และเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับเครื่อง LVDT เมื่อคานเกิดวิบัติ



รูปที่ 5.10 ภาพแสดงลักษณะการติดตั้งแผ่นพลาสติกอะครีลิกที่ตำแหน่งใต้ห้องตรงกลางคาน

7. เครื่อง Data Logger เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับบันทึกข้อมูลอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบเช่น Load Cell ,LVDT และ Strain Gauge โดยต่อสายจากอุปกรณ์ต่างๆ เข้ากับเครื่อง Data Logger เพื่อเก็บข้อมูลต่างๆ นำไปวิเคราะห์ผล ดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 เครื่องบันทึกค่าน้ำหนักบรรทุก การโก่งตัวของห้องคาน การเคลื่อนตัวของส่วนหัวของเครื่องทดสอบ

5.2 ขั้นตอนในการติดตั้งอุปกรณ์และการทดสอบ

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

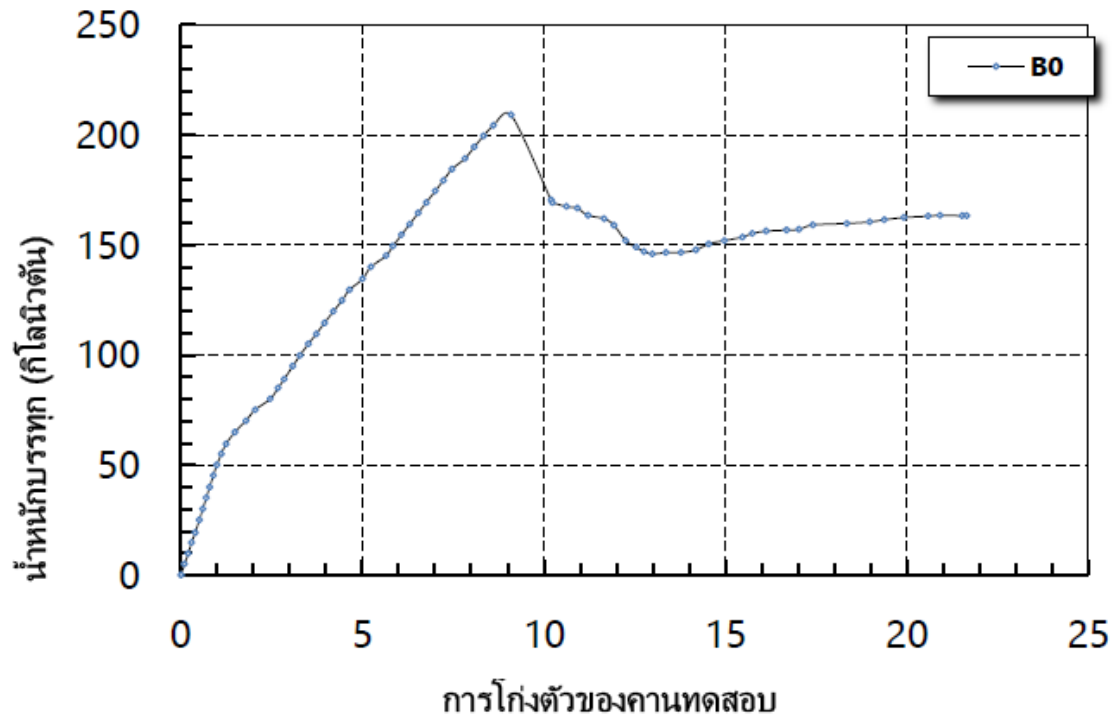
1. ทำการติดตั้งคานเหล็กขนาดใหญ่ที่ใช้เป็นฐานสำหรับติดตั้งจตุรรองรับ ตรวจสอบให้คานอยู่ในระนาบไม่เอียงไปข้างใดข้างหนึ่ง
2. ติดตั้งจตุรรองรับบนคานเหล็ก และนำ Load Cell ติดเข้ากับแผ่นเหล็ก แล้วนำไปติดกับส่วนหัวของเครื่องทดสอบ Universal testing machine
3. วางคานทดสอบลงบนจตุรรองรับ
4. นำแท่นเหล็กสำหรับการกดแบบสองจุดที่มีระยะห่าง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

5.3 ผลที่ได้จากการทดสอบคาน

นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบคานทั้ง 7 ตัว มาเขียนกราฟเชิงเส้น แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุก (Load) เป็นแกน Y และระยะการโก่งตัวของคานในแนวตั้ง (Deflection) ที่กึ่งกลางคาน เป็นแกน X เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลต่อไป อีกทั้งกราฟยังสามารถบอกถึงพฤติกรรมของคาน หรือรอย

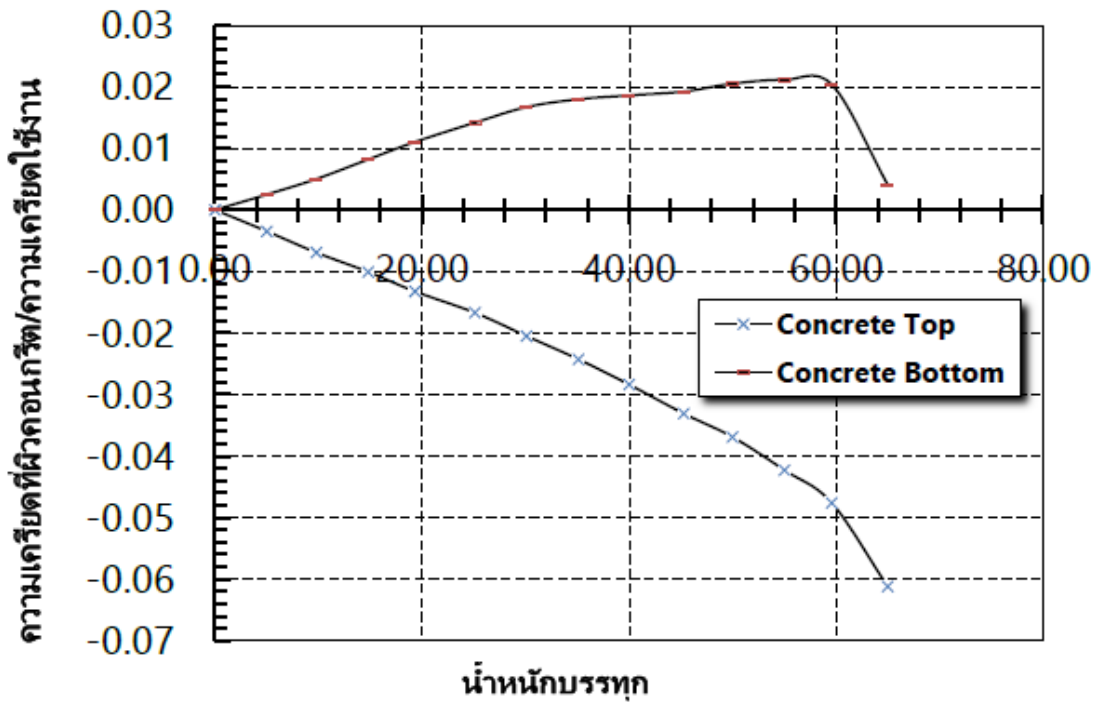
แต่กร้าวขนาดกลางถึงใหญ่ที่เกิดขึ้น ว่าเกิดขึ้นเมื่อได้รับน้ำหนักกดที่เท่าไร เพื่อนำมาเทียบกับค่าที่เขียนไว้บนคานเพื่อตรวจสอบความถูกต้องอีกทางหนึ่ง

5.3.1 ผลการทดสอบคาน B0



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกน Y น้ำหนักบรรทุก (กิโลนิวตัน) กับแกน X การโก่งตัวของคานทดสอบ (มิลลิเมตร) ของคาน B0

รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุกกับการโก่งตัวของคานทดสอบ B0 เส้นกราฟช่วงแรกมีความชันตรงขึ้นไปเรื่อยๆ กระทั่งน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 65 กิโลนิวตัน เกิดการโก่งตัวของคาน 1.1 มิลลิเมตร คานเกิดรอยร้าวเริ่มต้น สังเกตจากเส้นกราฟมีการเปลี่ยนแปลงความชัน จนกระทั่งน้ำหนักบรรทุกมีค่าสูงสุด 209 กิโลนิวตัน คานเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน มีรอยแตกกว้างเอียงทำมุม 45 องศา จากจุดรองรับยาวไปจนถึงจุดกดน้ำหนัก เมื่อคานเกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือนส่งผลให้การรับน้ำหนักบรรทุกลดลงอย่างรวดเร็ว จากนั้นทำการทดสอบต่อเรื่อยๆ ค่าน้ำหนักบรรทุกไม่สามารถเพิ่มขึ้นไปอีก ช่วงนี้เหล็กเสริมทำหน้าที่รับน้ำหนักเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 5.13 กราฟแสดงสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่ผิวคอนกรีต/ความเครียดใช้งานของคอนกรีตกับน้ำหนักบรรทุก ที่ผิวบนและผิวล่างคานคอนกรีต

รูปที่ 5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเครียดที่ผิวคอนกรีต/ความเครียดใช้งานของคอนกรีตกับน้ำหนักบรรทุกบนคาน พบว่าเมื่อน้ำหนักบรรทุกประมาณ 60 กิโลนิวตัน เป็นตำแหน่งที่คานเกิดรอยร้าวพอดี กราฟในช่วงที่มีค่าเป็นบวกคือ ค่าความเครียดของคอนกรีตผิวล่าง และ กราฟในช่วงที่มีค่าเป็นลบคือ ค่าความเครียดของคอนกรีตผิวบน เส้นกราฟมีลักษณะเอียงเป็นเส้นตรง ความชันเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามน้ำหนักบรรทุกทั้งกราฟของคอนกรีตผิวบนและคอนกรีตผิวล่าง แสดงว่าคอนกรีตเกิดการยืดตัวและหดตัวตามน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น เมื่อมาถึงตำแหน่งที่เริ่มเกิดการแตกร้าว ทิศทางของเส้นกราฟมีการเปลี่ยนแปลงซึ่งมีความสอดคล้องกับกราฟในรูปที่ 5.12 ด้วย



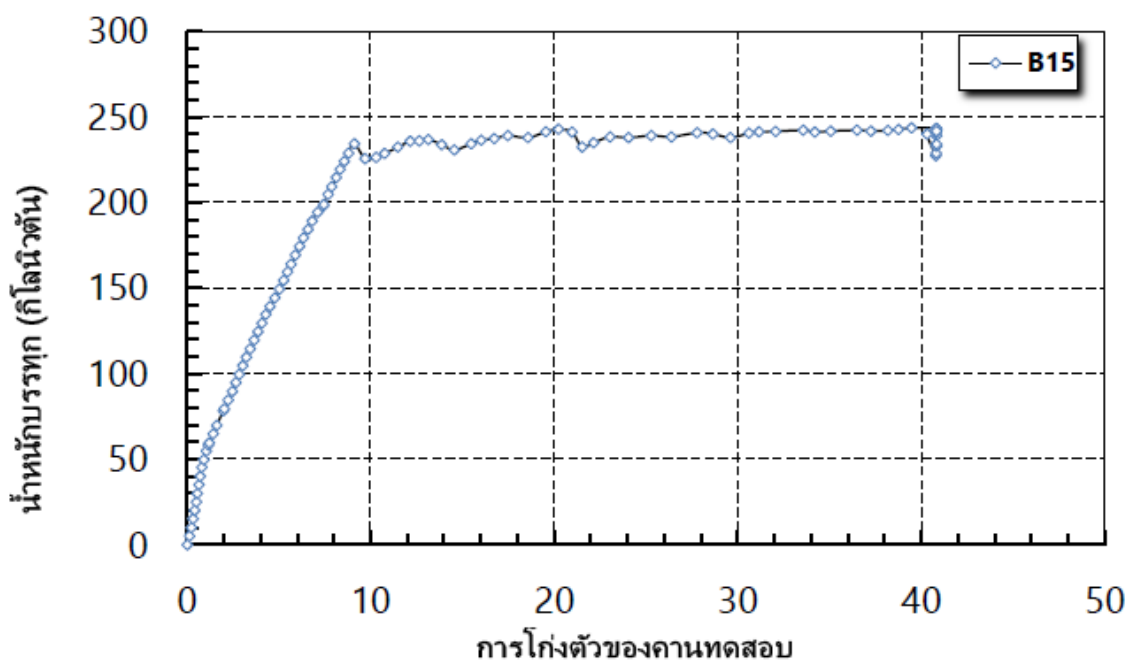
รูปที่ 5.14 ภาพก่อนทำการทดสอบคาน B0



รูปที่ 5.15 ภาพหลังทำการทดสอบคาน B0

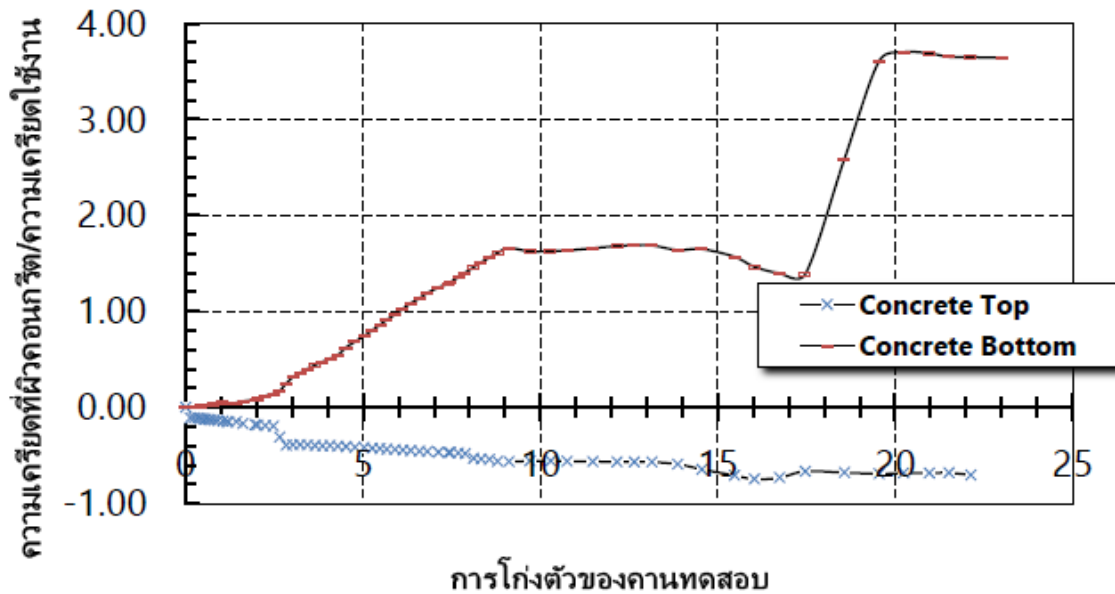
รูปที่ 5.14 เป็นรูปคานที่มีการติดตั้งพร้อมเริ่มทำการทดสอบ เมื่อทำการกดน้ำหนักบรรทุกไปจนกระทั่งคานเกิดการวิบัติ ดังรูปที่ 5.15 คานการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน มีรอยร้าวเกิดขึ้น ยาวเอียงทำมุม 45 องศา จากจุดรองรับถึงตำแหน่งจุดคาน้ำหนัก จากนั้นรอยร้าวขยายใหญ่ขึ้นแยกตัวออกจากกัน คานก็ไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้อีก

5.3.2 ผลการทดสอบคาน B15



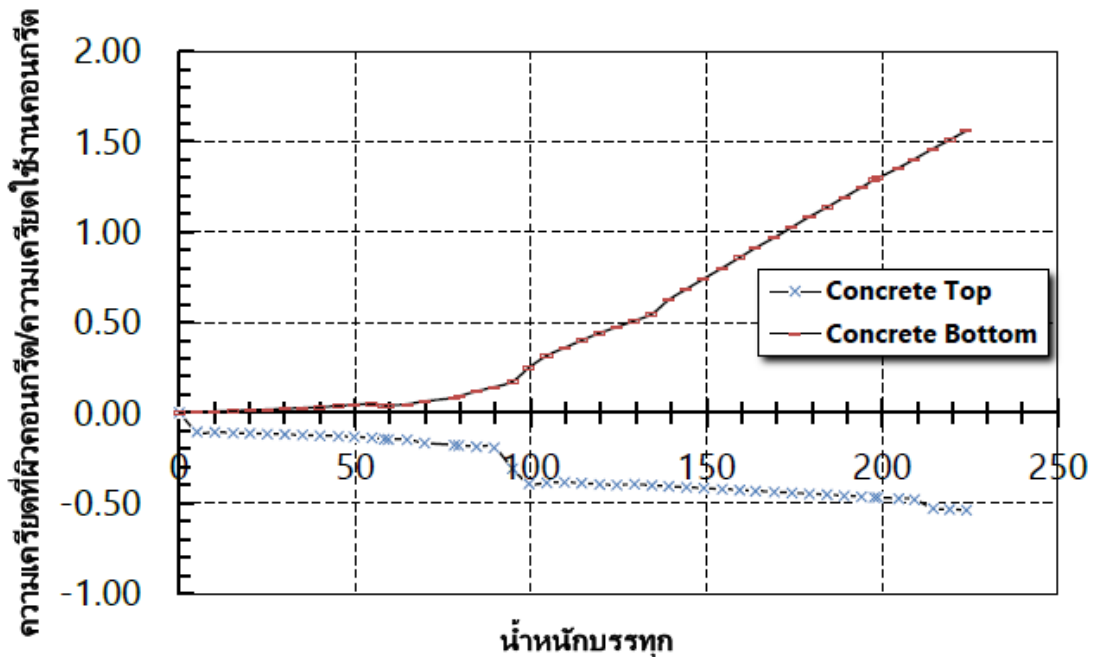
รูปที่ 5.16 กราฟกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกน Y น้ำหนักบรรทุก (กิโลนิวตัน) กับแกน X การโก่งตัวของคานทดสอบ (มิลลิเมตร) ของคาน B15

รูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุกกับการโก่งตัวของคานทดสอบ B15 ที่มีความเสียหายเนื่องจากการเร่งปฏิกิริยาเคมีเท่ากับ 17.21 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้ว เส้นกราฟช่วงแรกมีความชันไปจนกระทั่งน้ำหนักบรรทุกประมาณ 55 กิโลนิวตัน เส้นกราฟมีการเปลี่ยนแปลงความชัน แสดงว่าคานเกิดรอยร้าวเริ่มต้น ดำเนินการทดสอบต่อ ที่น้ำหนักบรรทุกประมาณ 224 กิโลนิวตัน ท้องคานโก่งตัว 8.8 มิลลิเมตร คอนกรีตที่ผิวล่างไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้แล้ว สังเกตจากเส้นกราฟที่มีความชันน้อยลงจนเกือบอยู่ในแนวราบ จากจุดนี้ น้ำหนักบรรทุกมีค่าที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งเหล็กเสริมทำหน้าที่รับน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด คานสามารถรับกำลังสูงสุดที่ 243 กิโลนิวตัน คานเกิดการโก่งประมาณ 20 มิลลิเมตร จากนั้นกำลังของคานค่อยๆ ลดลง แสดงว่าเหล็กเสริมถึงจุดครากแล้วไม่สามารถรับน้ำหนักได้อีก คาน B15 เกิดการวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ดัด



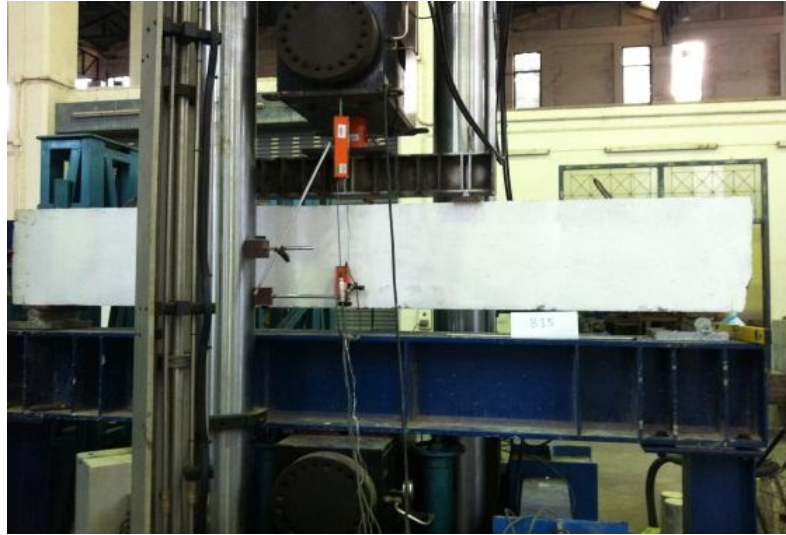
รูปที่ 5.17 กราฟแสดงสัมพันธ์ระหว่างแกน Y ความเครียดที่ผิวคอนกรีต/ความเครียดใช้งานของคานคอนกรีตกับแกน X การโก่งตัวของคานทดสอบ (มิลลิเมตร) B15

กราฟรูปที่ 5.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่ผิวคอนกรีต/ความเครียดใช้งานของคอนกรีตกับการโก่งตัวของคาน B15 ที่มีความเสียหายเนื่องจากการแรงปฏิกิริยาสนิมเท่ากับ 17.21 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้ว กราฟในช่วงที่มีค่าเป็นบวกเป็นค่าการยึดตัวของคาน และช่วงที่มีค่าลบเป็นค่าการหดตัวผิวบนของคานคอนกรีต คานด้านบนเกิดการหดตัวและมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามค่าน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น ส่วนคานด้านล่างเกิดการยึดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ สังเกตได้จากเส้นกราฟมีความชันที่ค่อนข้างมาก จนกระทั่งความเครียดที่ผิวคอนกรีต/ความเครียดใช้งานของคอนกรีตมีค่าประมาณ 1.56 จากนั้นเส้นกราฟมีการเปลี่ยนแปลงความชันและอยู่ในแนวราบแสดงว่าผิวล่างของคานมีการยึดตัวน้อยลง เนื่องจากคานคอนกรีตเกิดรอยแตกกว้างที่คานและคอนกรีตบางส่วนมีการหดตัวกลับ หรืออาจเนื่องมาจาก Strain Gauge เกิดความเสียหาย



รูปที่ 5.18 กราฟแสดงสัมพันธ์ระหว่างแกน Y ความเครียดที่ผิวคอนกรีต/ความเครียดใช้งานของคานคอนกรีตกับแกน X น้ำหนักบรรทุกบนคาน B15

รูปที่ 5.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเครียดที่ผิวคอนกรีต/ความเครียดใช้งานของคานคอนกรีตกับน้ำหนักบรรทุกคาน B15 ที่มีความเสียหายเนื่องจากการเร่งปฏิกิริยาสนิมเท่ากับ 17.21 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้ว กราฟในช่วงที่มีค่าเป็นบวกเป็นค่าการยืดตัวของคาน และช่วงที่มีค่าลบเป็นค่าการหดตัวผิวบนของคานคอนกรีต ผิวคานด้านบนเกิดการหดตัวและมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามน้ำหนักบรรทุก โดยสังเกตจากกราฟที่มีความชันน้อยและในช่วงน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 90 กิโลนิวตัน กราฟมีการเปลี่ยนความชันค่อนข้างมาก อาจเนื่องมาจากคานด้านบนเกิดรอยแตกร้าว จากนั้นกราฟมีความชันเหมือนกับในช่วงแรกอีกครั้ง ในส่วนของท้องคานกราฟค่อยๆ เพิ่มความชันและในช่วงน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 90 กิโลนิวตัน กราฟมีความชันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเพิ่มขึ้นต่อไปเรื่อยๆ อาจเนื่องมาจากท้องคานเกิดรอยแตกร้าวขึ้นอย่างต่อเนื่อง



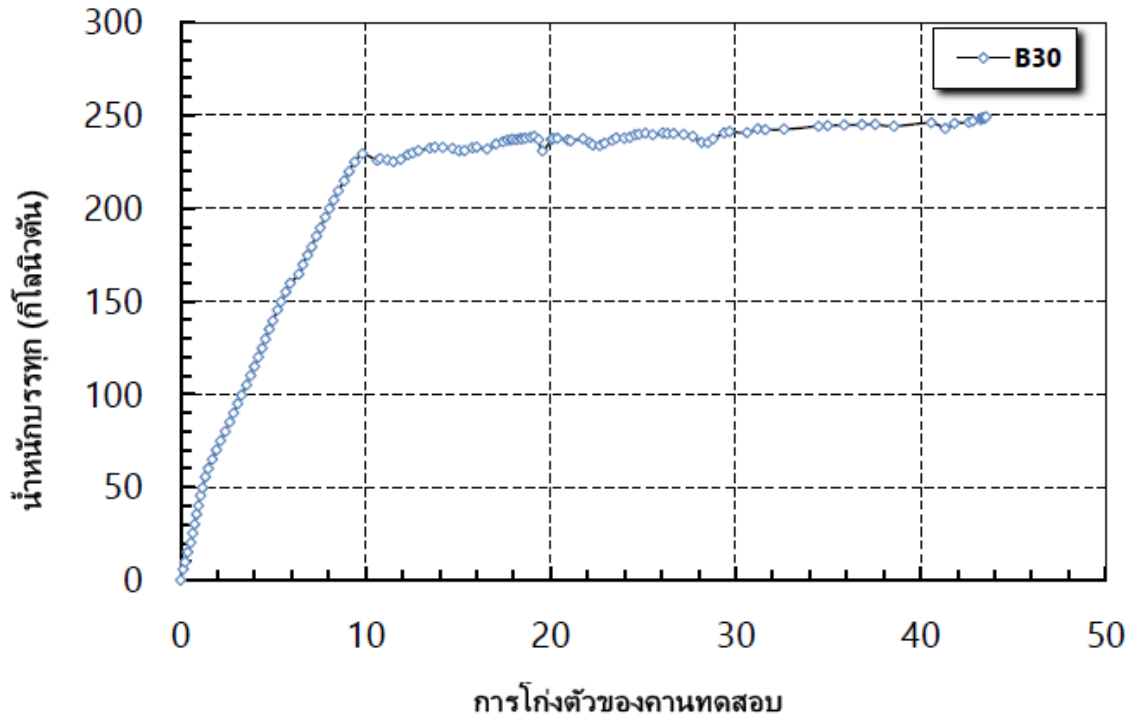
รูปที่ 5.19 ภาพก่อนทำการทดสอบคาน B15



รูปที่ 5.20 ภาพหลังทำการทดสอบคาน B15

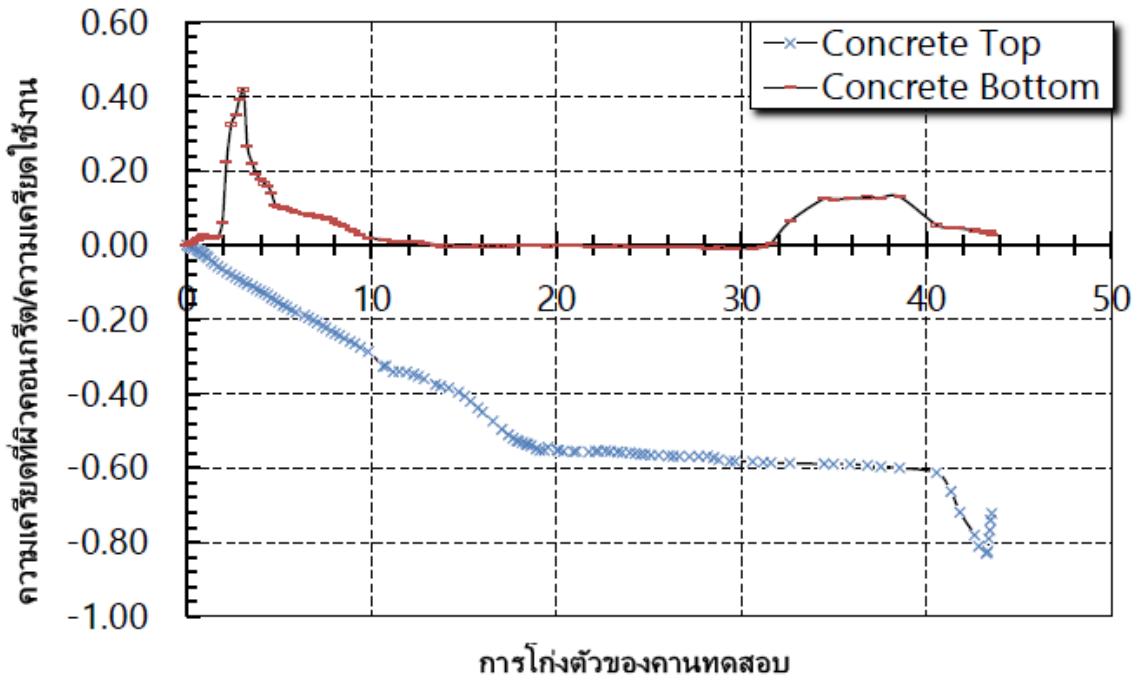
รูปที่ 5.19 แสดงรูปคานที่ติดตั้งพร้อมทำการทดสอบ เมื่อทำการกดน้ำหนักบรรทุกทุกไปจนกระทั่งคานเกิดการวิบัติได้ ดังรูปที่ 5.20 คานวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ดัด สันเกตจากการเกิดรอยร้าวจากท้องคานยาวตรงขึ้นมาในแนวตั้ง ลักษณะเส้นค่อนข้างเอียงไปหาจุดคานน้ำหนักรอยร้าวเริ่มต้นที่ผิวด้านข้างบริเวณกลางคาน

5.3.3 ผลการทดสอบคาน B30



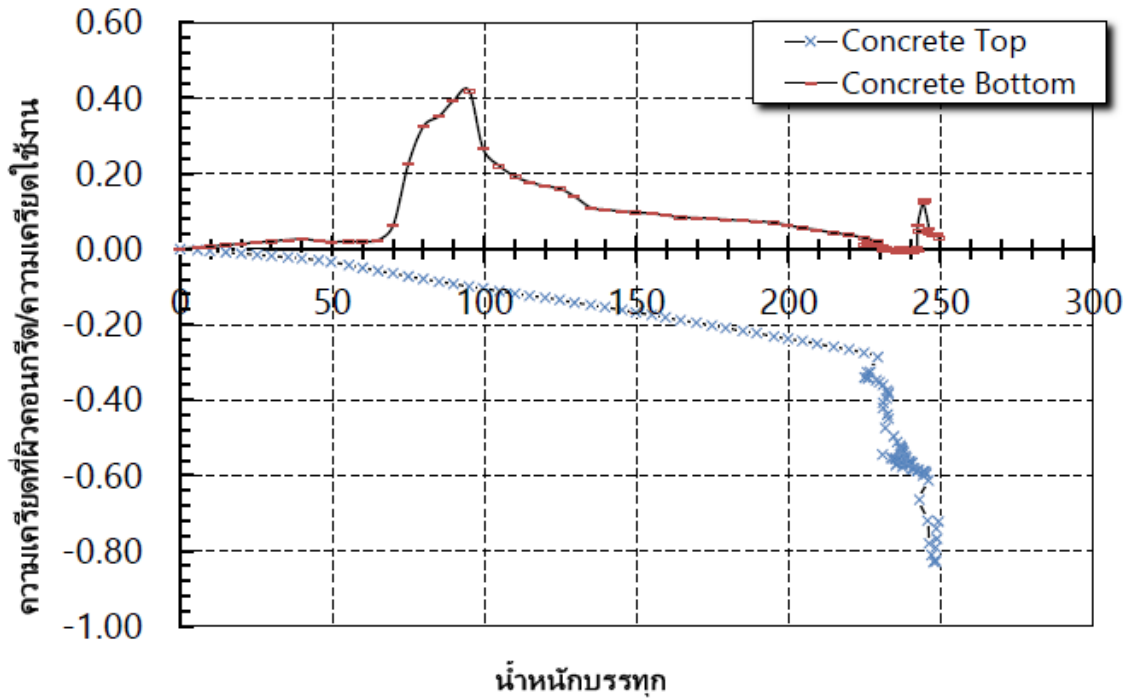
รูปที่ 5.21 กราฟกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกน Y แรงกด (กิโลนิวตัน) กับแกน X การโก่งตัวของคานทดสอบ (มิลลิเมตร) B30

รูปที่ 5.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุกกับการโก่งตัวของคานทดสอบ B30 ที่มีความเสียหาย 32.51 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้ว เกิดรอยร้าวเริ่มต้นที่ น้ำหนักบรรทุกประมาณ 55 กิโลนิวตัน มีการโก่งตัวของท้องคาน 1 มิลลิเมตร สังเกตจากเส้นกราฟมีการเปลี่ยนแปลงความชัน ความชันเพิ่มขึ้นคงที่จนกระทั่งรับน้ำหนักบรรทุก 224 กิโลนิวตัน ท้องคานโก่งตัว 9.5 มิลลิเมตร ความชันของกราฟมีการเปลี่ยนแปลงอีกครั้งซึ่งอยู่ในช่วงพลาสติก คือคอนกรีตไม่สามารถหดตัวกลับรูปเดิมได้อีก ความชันลดลงเกือบเป็นเส้นตรง คานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ 243 กิโลนิวตัน คานเกิดการโก่งตัวถึง 43 มิลลิเมตร จากนั้นกำลังของคานค่อยๆลดลง นั้นหมายความว่าคานเกิดการวิบัติ คานวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ดัด



รูปที่ 5.22 แสดงสัมพันธ์ระหว่างแกน Y ความเครียดที่ผิวคอนกรีต/ความเครียดใช้งานของคานคอนกรีตกับแกน x ระยะการเคลื่อนที่ของท้องคาน (มิลลิเมตร) ของคาน B30

รูปที่ 5.22 แสดงสัมพันธ์ระหว่าง ความเครียดที่ผิวคอนกรีต/ความเครียดใช้งานของคานคอนกรีตกับระยะการเคลื่อนที่ของท้องคาน B30 ที่มีความเสียหาย 32.51 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้ว กราฟในช่วงที่มีค่าเป็นบวกเป็นค่าการยึดตัวของท้องคาน และช่วงที่มีค่าลบเป็นค่าการหดตัวผิวบนของคานคอนกรีต จากกราฟพบว่าที่การโก่งตัว 2 มิลลิเมตร กราฟมีการเปลี่ยนแปลงความชันอย่างกะทันหันขึ้นสูงสุดที่ 0.44 และลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว อาจเนื่องมาจากคานเกิดรอยแตกกว้างขึ้นและ Strain Gauge อาจเกิดความเสียหาย หรืออาจเกิดจากผิวล่างของคานเกิดการหดตัวกลับ แต่ความเป็นไปได้ค่อนข้างน้อย เพราะขณะนั้นยังทำการทดสอบอยู่ ซึ่งน้ำหนักบรรทุกทุกจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ นอกเสียจากคอนกรีตสูญเสียแรงยึดเกาะระหว่างเหล็กไป ทำให้เหล็กที่เกิดการแตกร้าวหดตัวกลับ ในส่วนของผิวคานด้านบนความชันของกราฟค่อยเพิ่มขึ้นตามค่าน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น จนถึงในช่วงการโก่งตัวประมาณ 19-20 มิลลิเมตร กราฟมีการเปลี่ยนแปลงความชัน เนื่องจากคานเกิดรอยแตกกว้างขึ้น



รูปที่ 5.23 แสดงสัมพันธ์ระหว่างแกน Y ความเครียดที่ผิวคอนกรีต/ความเครียดใช้งานของคานคอนกรีต กับ แกน x น้ำหนักบรรทุก (มิลลิเมตร) ของคาน B30

รูปที่ 5.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเครียดที่ผิวคอนกรีต/ความเครียดใช้งานของคานคอนกรีตกับน้ำหนักบรรทุก คานมีความเสียหายเนื่องจากการเร่งปฏิกิริยาสนิม 32.51 เปอร์เซ็นต์ ทำการทดสอบโดยไม่มีการซ่อมแซมคานด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้ว กราฟในช่วงที่มีค่าเป็นบวกเป็นค่าการยึดตัวของท้องคาน และช่วงที่มีค่าลบเป็นค่าการหดตัวผิวบนของคานคอนกรีต กราฟมีลักษณะคล้ายกับรูปที่ 5.22 เมื่อน้ำหนักบรรทุกประมาณ 70 กิโลนิวตัน กราฟมีการเปลี่ยนแปลงความชันอย่างกะทันหันและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.44 และลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน อาจเนื่องมาจากคานเกิดรอยแตกร้าวขึ้น เมื่อสังเกตจากกราฟ พบว่าค่าน้ำหนักบรรทุกยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่ค่าความเครียดที่ผิวคอนกรีต/ความเครียดใช้งานของคานคอนกรีตกลับลดลงอย่างเห็นได้ชัด อาจเป็นผลมาจาก Strain Gauge เกิดความเสียหายเกิดขึ้น ในส่วนผิวบนของคาน ความชันของกราฟค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามน้ำหนักบรรทุกที่มากขึ้น



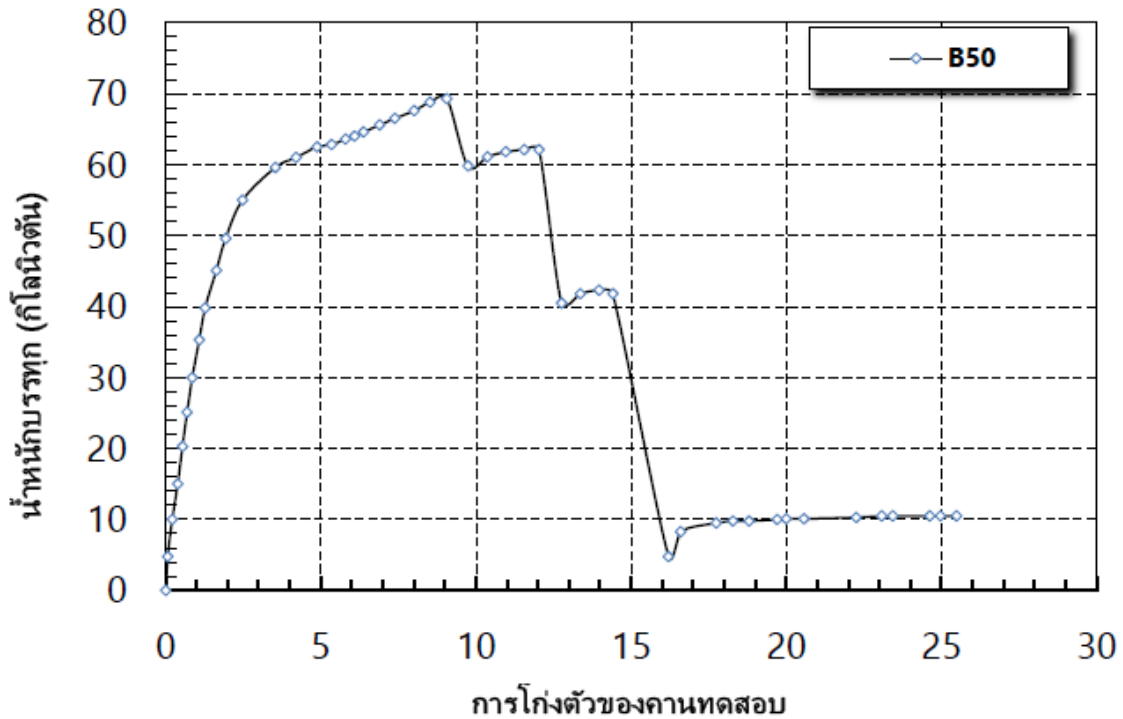
รูปที่ 5.24 ภาพก่อนทำการทดสอบคาน B 30



รูปที่ 5.25 ภาพหลังทำการทดสอบคาน B30

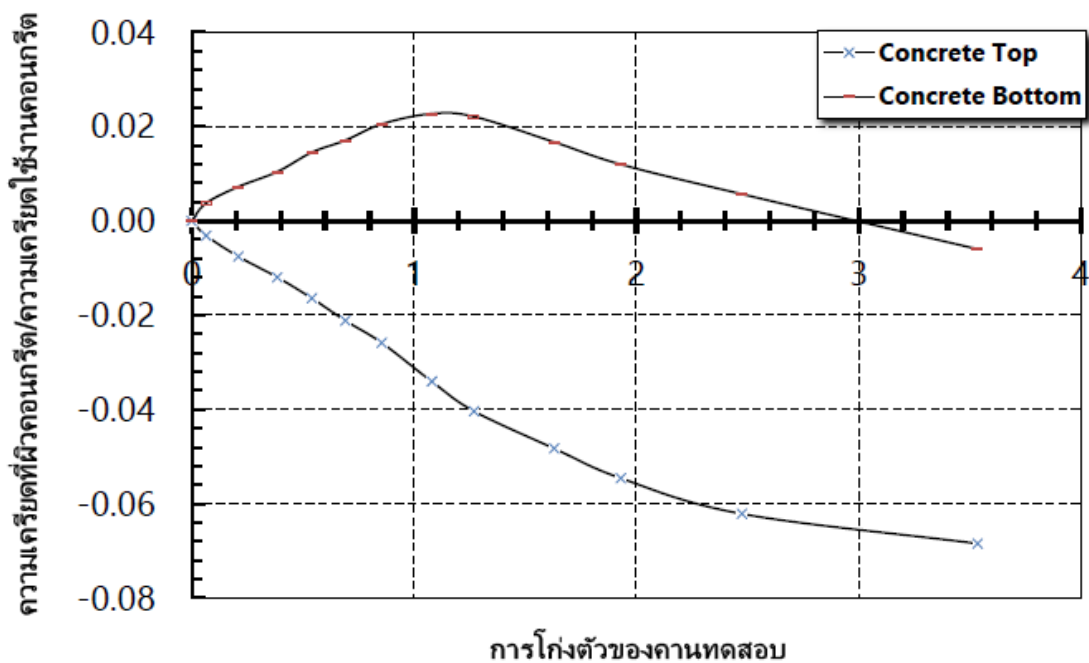
รูปที่ 5.24 เป็นรูปคานที่มีการติดตั้งเรียบร้อยแล้วพร้อมเริ่มทำการทดสอบเมื่อทำการกดน้ำหนักบรรทุกไปจนกระทั่งคานเกิดการวิบัติ ดังรูปที่ 5.25 คานวิบัติเนื่องจากเป็นโมเมนต์ดัด สังเกตจากรอยร้าวจากท้องคานยาวตรงขึ้นมาในแนวตั้ง มีเส้นข้างเอียงร้าวไปหาจุดกดน้ำหนัก

5.3.4 ผลการทดสอบคาน B50



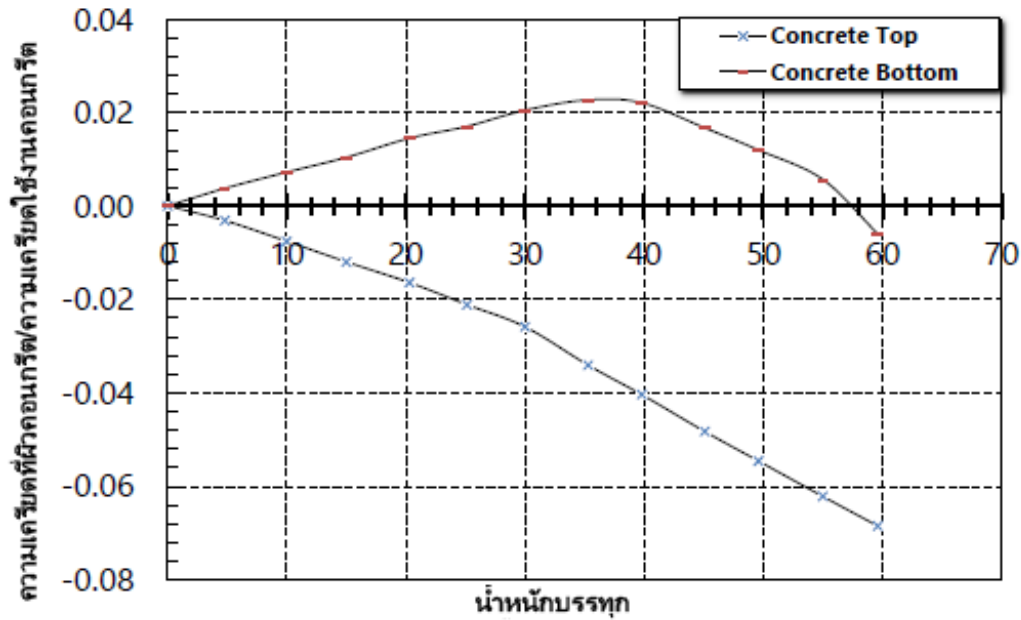
รูปที่ 5.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกน Y แรงกด (กิโลนิวตัน) กับ แกน X การโก่งตัวของคานทดสอบ (มิลลิเมตร) B50

รูปที่ 5.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุกกับการโก่งตัวของคานทดสอบ B50 ที่มีความเสียหายเนื่องจากแรงปฏิกิริยาสนิม 54.1 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่มีการซ่อมแซมตัวคานด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้ว กราฟมีการเปลี่ยนแปลงความชันที่น้ำหนักบรรทุกประมาณ 10 กิโลนิวตัน คานโก่งตัว 0.3-0.5 มิลลิเมตร เนื่องจากคานเกิดรอยแตกกว้างขึ้น และเกิดการเปลี่ยนแปลงความชันอีกครั้งที่น้ำหนักบรรทุกประมาณ 40 กิโลนิวตัน ซึ่งคอนกรีตอยู่ในช่วงพลาสติก คานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดประมาณ 68 กิโลนิวตัน ระยะการโก่งตัวที่ 9 มิลลิเมตร คานวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน คานมีความสามารถในการรับน้ำหนักที่น้อยมาก เนื่องจากคอนกรีตได้รับความเสียหายจากการแรงปฏิกิริยาสนิมมาก มีรูพรุนเกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีต ทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักลดน้อยลงอย่างมาก



รูปที่ 5.27 กราฟแสดงสัมพันธ์ระหว่างแกน Y ความเครียดที่ผิวคอนกรีต/ความเครียดใช้งานของคอนกรีต กับแกน X การโก่งตัวของคานทดสอบ (มิลลิเมตร) B50

รูปที่ 5.27 กราฟแสดงสัมพันธ์ระหว่าง ความเครียดที่ผิวคอนกรีต/ความเครียดใช้งานของคอนกรีตกับการโก่งตัวของคานทดสอบ B50 ที่มีความเสียหายเนื่องจากแรงปฏิกิริยาสนิม 54.1 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่มีการซ่อมแซมตัวคานด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้ว กราฟในช่วงที่มีค่าเป็นบวกเป็นค่าการยืดตัวของท้องคาน และช่วงที่มีค่าลบเป็นค่าการหดตัวผิวบนของคานคอนกรีต คานด้านบนเกิดการหดตัวและมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น ส่วนคานด้านล่างเกิดการยืดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ สังเกตได้จากเส้นกราฟมีความชันเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามน้ำหนักบรรทุก จนกระทั่งความเครียดที่ผิวคอนกรีต/ความเครียดใช้งานของคอนกรีตมีค่าประมาณ 0.02-0.03 จากนั้นเส้นกราฟมีการเปลี่ยนแปลงความชันและความชันของกราฟลดต่ำลงเรื่อยๆ จนค่าติดลบ อาจเนื่องมาจาก Strain Gauge เกิดความเสียหาย

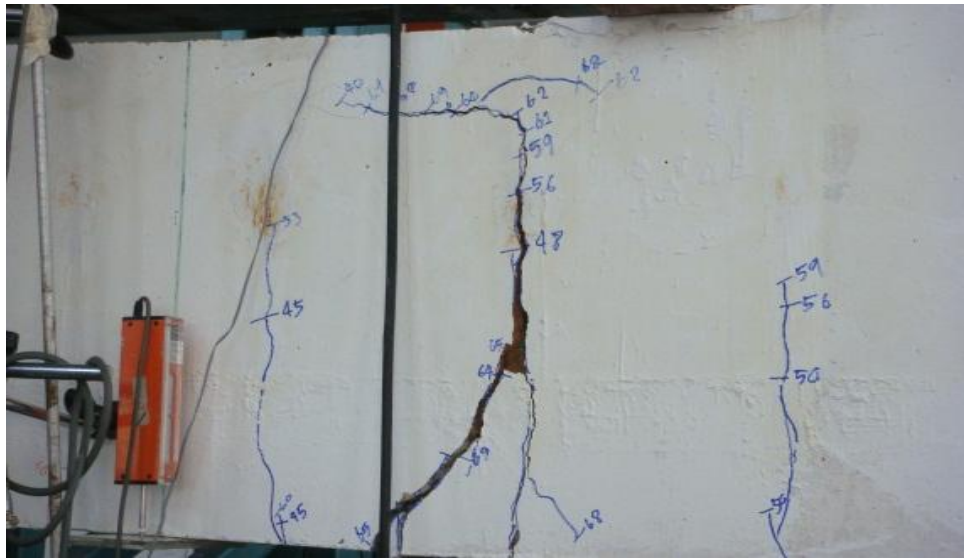


รูปที่ 5.28 กราฟแสดงสัมพันธ์ระหว่างแกน Y ความเครียดที่ผิวคอนกรีต/ความเครียดใช้งานของคอนกรีต กับแกน X น้ำหนักบรรทุก (กิโลนิวตัน) B50

รูปที่ 5.28 กราฟแสดงสัมพันธ์ระหว่าง ความเครียดที่ผิวคอนกรีต/ความเครียดใช้งานของคอนกรีตกับน้ำหนักบรรทุก คานมีความเสียหายเนื่องจากการเร่งปฏิกิริยาสนิม 54.10 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่มีการซ่อมแซมคานด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้ว กราฟในช่วงที่มีค่าเป็นบวกเป็นค่าการยึดตัวของท้องคาน และช่วงที่มีค่าลบเป็นค่าการหดตัวผิวบนของคานคอนกรีต คานด้านบนเกิดการหดตัวและมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น ส่วนคานด้านล่างเกิดการยึดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ สังเกตได้จากเส้นกราฟมีความชันเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามน้ำหนักบรรทุก จนกระทั่งค่าน้ำหนักบรรทุกประมาณ 35-40 กิโลนิวตัน กราฟมีการเปลี่ยนแปลงความชัน โดยค่าน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นแต่ค่าความเครียดที่ผิวคอนกรีต/ความเครียดใช้งานของคอนกรีตลดลงจนมีค่าติดลบ อาจเนื่องมาจากการเกิดรอยแตกร้าวที่ท้องคานจน Strain Gauge เกิดความเสียหาย หรือคอนกรีตแตกร้าวจนไม่สามารถยึดเกาะกับเหล็กเสริมได้ คอนกรีตจึงเกิดการหดตัวกลับ



รูปที่ 5.29 ภาพก่อนทำการทดสอบคาน B50



รูปที่ 5.30 ภาพหลังทำการทดสอบคาน B50

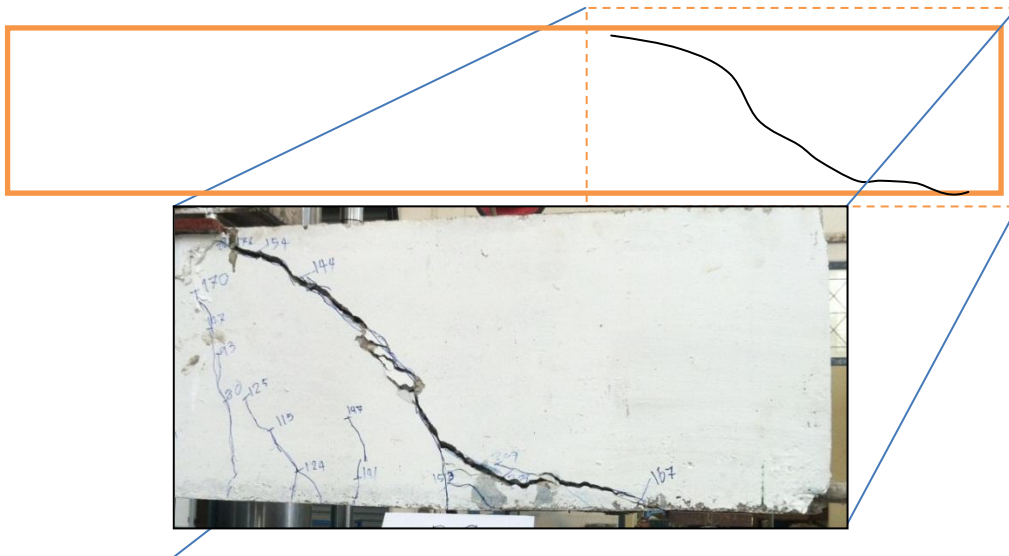
รูปที่ 5.29 แสดงการติดตั้งคานก่อนทำการทดสอบ โดยทำการทดสอบด้วยการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกขึ้นเรื่อยๆ จนคานเกิดวิบัติ ดังรูปที่ 5.30 คานวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ดัด สังเกตจากรอยร้าวจากท้องคานยาวตรงขึ้นมาในแนวตั้ง มีเส้นข้างเอียงร้าวไปหาจุดก้นน้ำหนัก

บทที่ 6 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

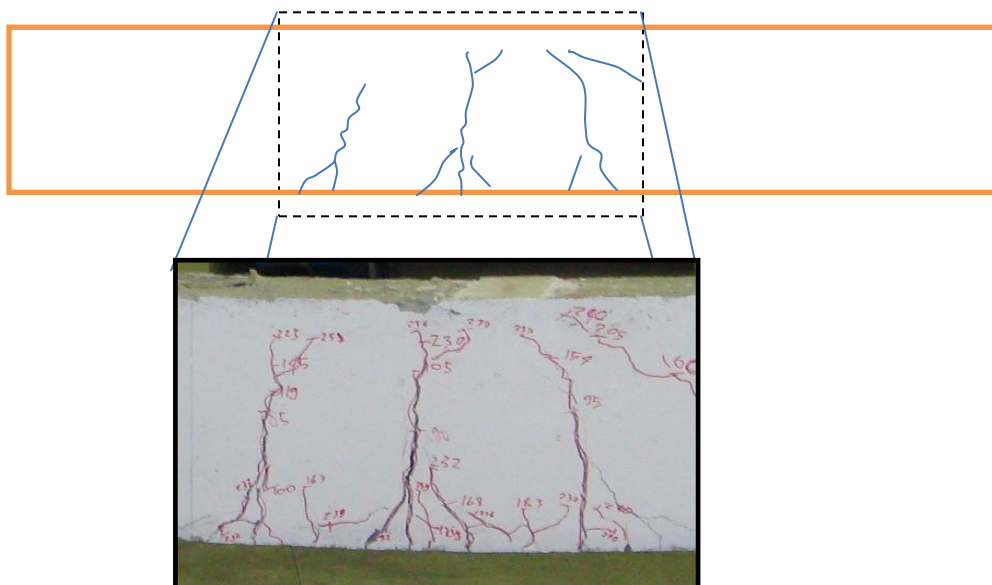
ในบทนี้ นำผลการทดสอบการกดันน้ำหนักคาน มาวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่าง คานที่ไม่ทำการซ่อมแซมด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้วกับคานที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้ว โดยคานมีการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิม มีระดับการสูญเสียทั้งหมด 3 ระดับ ระดับต่ำ ระดับปานกลาง ระดับสูง เพื่อหาว่าคานที่ได้รับการซ่อมแซมด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้วมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเท่าไร หรือคานมีความเหนียวเพิ่มขึ้นเท่าไร จากการทดสอบคานพบว่าคานมีลักษณะการวิบัติ 2 แบบ คือ วิบัติเนื่องจากแรงเฉือนและวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ดัด การวิบัติเนื่องจากเฉือนนั้น คานมีรอยร้าวเริ่มต้นที่จุดรองรับ (Support) ยาวเอียงทำมุม 45 องศา ขึ้นไปถึงจุดที่กดน้ำหนัก ส่งผลทำให้คานสามารถรับกำลังน้อยไม่เป็นไปตามทฤษฎี และการวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ดัดเป็นการเกิดรอยร้าวบริเวณกลางคานยาวเป็นแนวตั้งจากผิวด้านล่างยาวขึ้นมาที่ด้านบน

6.1 วิเคราะห์การเกิดวิบัติของคาน

คานที่ได้ทำการทดสอบจนเกิดการวิบัติเกิดขึ้น การวิบัติ 2 ลักษณะคือ การวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ดัด และการวิบัติวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน ซึ่งในการทดสอบเกิดการวิบัติทั้ง 2 แบบ การวิบัติด้วยแรงเฉือนส่งผลทำให้คานมีการรับน้ำหนักบรรทุกได้น้อยลงและไม่เป็นไปตามทฤษฎี รูปที่ 6.1 คานควบคุม B0 เกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน สามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้ 209 กิโลนิวตัน ซึ่งสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้น้อยกว่าคาน B15 ที่มีการสูญเสียน้ำหนักเหล็กจากการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมเหล็กที่ 15 เปอร์เซ็นต์ รูปที่ 6.2 เกิดการวิบัติด้วยโมเมนต์ดัด สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ 243 กิโลนิวตัน สาเหตุอาจเป็นเพราะคาน B0 ที่นำมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ มีจุดรองรับข้างใดข้างหนึ่งเอียง เพื่อให้หน้าตัดคานได้ระดับ จึงต้องมีการเอียงจุดรองรับ ดังนั้นหน้าตัดของคาน B0 จึงมีการบิดเอียง ส่งผลทำให้หน้าตัดคานรับน้ำหนักไม่ได้เต็มที่ คานจึงเกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือน



รูปที่ 6.1 การแตกร้าวแบบเส้นมีรอยแตกเอียงทำมุมประมาณ 45 องศา



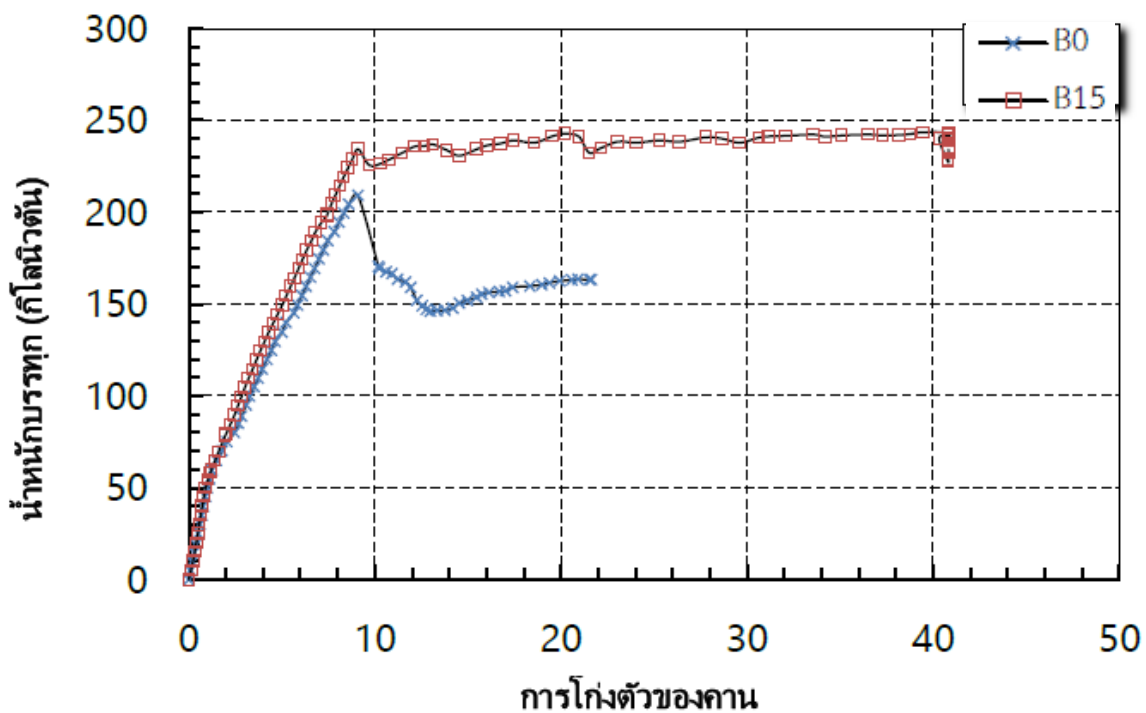
รูปที่ 6.2 การแตกร้าวแบบโค้งตัดคานมีกานแตกร้าวจากท้องคานร้าวขึ้นไปด้านบนในแนวตั้ง

6.2 วิเคราะห์และเปรียบเทียบคานคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อมีเกิดสนิม

เมื่อทดสอบคานทั้ง 4 ตัว เรียบร้อยแล้วนำผลของการทดสอบมาเปรียบเทียบการโก่งตัวของคาน กับความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคาน โดยให้คาน B0 เป็นคานควบคุม แต่เนื่องจากคาน B0 เกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนละมีพฤติกรรมในการรับน้ำหนักบรรทุกที่ค่อนข้างต่ำ จึงไม่สามารถนำมา เป็นตัวเปรียบเทียบกับคานตัวอื่นๆ ได้ แต่สามารถใช้เปรียบเทียบคานที่มีลักษณะการวิบัติเนื่องจากแรง เฉือนเหมือนกันได้ เกี่ยวกับการติดตั้งคานเพื่อทำการทดสอบว่ามีผลต่อการวิบัติของคานหรือไม่

6.2.1 เปรียบเทียบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการสูญเสียเหล็กเสริมต่ำ

6.2.1.1 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและระยะการเคลื่อนที่ท้องคานของคาน B0 , B15

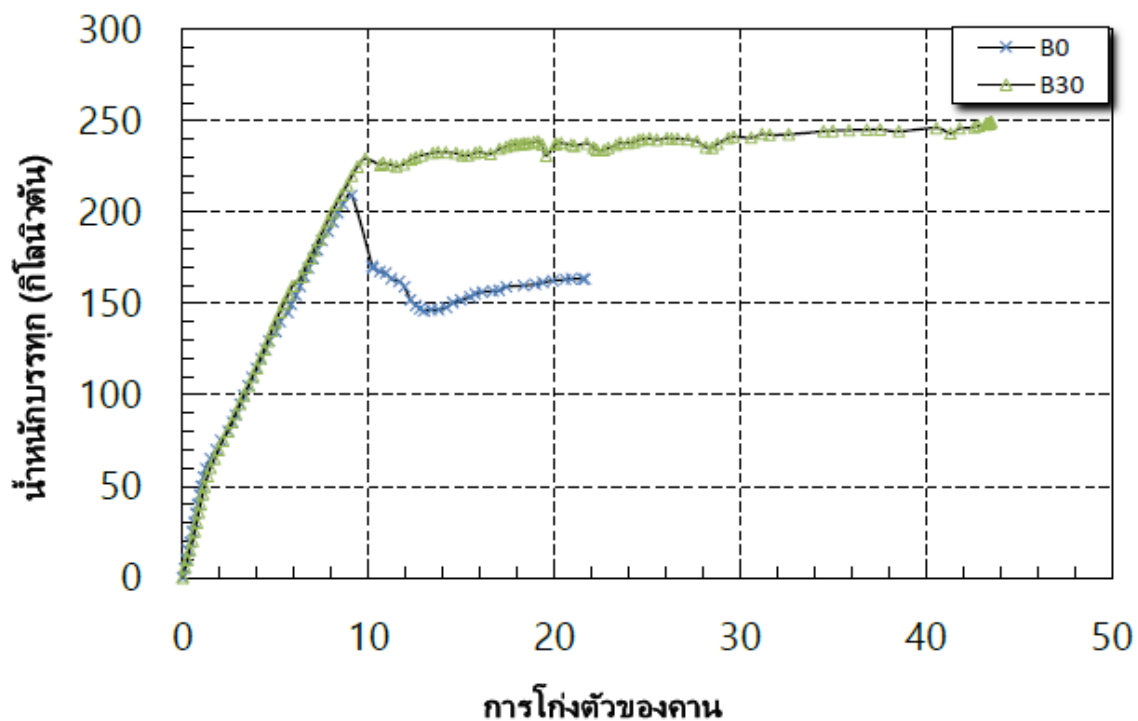


รูปที่ 6.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแกน Y น้ำหนักบรรทุก (กิโลนิวตัน) กับ แกน X การโก่งตัวของคานทดสอบ (มิลลิเมตร) ของคาน B0 และ B15

กราฟรูปที่ 6.3 เปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักรรทุกกับการโก่งตัวของคานทดสอบ เป็นการเปรียบเทียบระหว่างคานควบคุมกับคานที่ทำการเร่งปฏิกิริยาสนิม B15 จากกราฟพบว่า การรับแรงของคาน B15 สามารถรับแรงสูงสุดได้ 243 กิโลนิวตัน ซึ่งมากกว่าคาน B0 โดยคาน B0 สามารถรับแรงสูงสุดได้ 204 กิโลนิวตัน เนื่องจากคาน B0 หน้าตัดบิดเอียงอาจทำให้ความสามารถในการรับแรงก้นน้อยกว่าคานที่มีการสูญเสียน้ำหนักเหล็ก 15 เปอร์เซ็นต์

6.2.2 เปรียบเทียบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการสูญเสียเหล็กเสริมปานกลาง (30%)

6.2.2.1 เปรียบเทียบน้ำหนักรรทุกและระยะการเคลื่อนที่ของท้องคาน B0 , B30

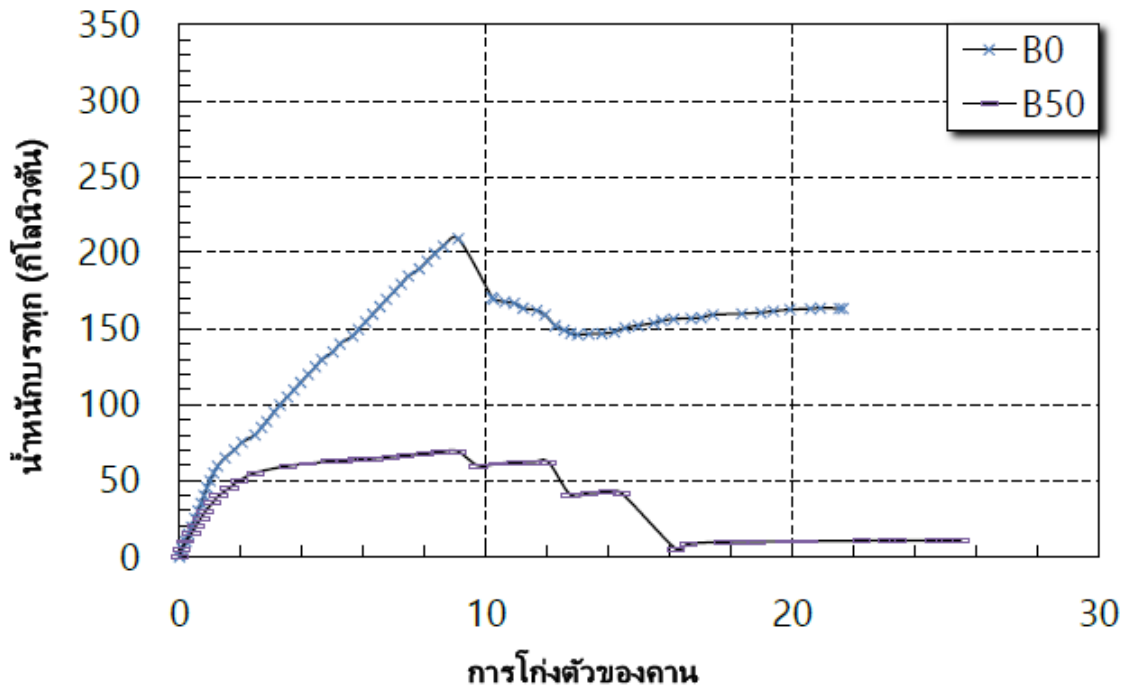


รูปที่ 6.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแกน Y น้ำหนักรรทุก (กิโลนิวตัน) กับ แกน X การโก่งตัวของคานทดสอบ (มิลลิเมตร) ของคาน B0 และ B30

รูปที่ 6.4 เปรียบเทียบน้ำหนักรรทุกกับการโก่งตัวของคานทดสอบ เป็นการเปรียบเทียบระหว่างคานควบคุม กับคานที่ทำการเร่งปฏิกิริยาสนิม B30 จากกราฟพบว่า การรับน้ำหนักรรทุกของคาน B30 สามารถรับน้ำหนักรรทุกสูงสุด 247 กิโลนิวตัน ซึ่งมากกว่าคาน B0 ที่ไม่ได้รับความเสียหาย เนื่องจากหน้าตัดคาน B0 หน้าตัดบิดเอียงอาจทำให้ความสามารถในการรับแรงก้นน้อยกว่า

6.2.3 เปรียบเทียบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการสูญเสียเหล็กเสริมรุนแรง (50

6.2.3.1 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและระยะการเคลื่อนที่ของท้องคาน B0 , B50



รูปที่ 6.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกน Y น้ำหนักบรรทุก (กิโลนิวตัน) กับ แกน X ระยะการโก่งตัวของคาน (มิลลิเมตร) ของคาน B0 , B50 เปรียบเทียบกัน

กราฟรูปที่ 6.5 เปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกกับการโก่งตัวของคานทดสอบ เป็นการเปรียบเทียบระหว่าง B0 กับคาน B50 จากกราฟพบว่า การรับแรงของคาน B50 สามารถรับแรงสูงสุดได้ 68 กิโลนิวตัน สามารถรับแรงกุดได้น้อยกว่าคาน B0 เนื่องจากคาน B50 ได้รับการเร่งปฏิกิริยาสนิมที่ระดับการสูญเสียเท่ากับ 50% ทำให้เนื้อคอนกรีตไม่สามารถรับกำลังได้ และเหล็กเสริมก็ได้รับความเสียหายมาก

บทที่ 6 สรุปผลการศึกษา

6.1 ผลการทดสอบการเร่งปฏิกิริยาสนิมในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่นำมาทดสอบทั้ง 4 ตัว ได้แบ่งคานออกเป็น 3 ชุดๆละ 1 ตัว และ 1 ตัว ใช้เป็นคานควบคุม คานทั้ง 3 ชุดนำไปทำการเร่งปฏิกิริยาสนิมโดยให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักเหล็กที่แตกต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ระดับต่ำ(15%) ระดับกลาง(30%) ระดับสูง(50%) ผลคือ คานที่เกิดการสูญเสียในระดับต่ำเมื่อนำคานไปทำการเปิดผิวหลังทำการทดสอบเสร็จแล้ว พบว่าเหล็กเสริมมีสนิมเกาะเล็กน้อยเป็นการเกิดสนิมสภาวะที่ 1 คานที่เกิดการสูญเสียระดับกลางเมื่อนำคานไปทำการเปิดผิวหลังทำการทดสอบเสร็จแล้ว พบว่าเหล็กเสริมมีสนิมเกาะรอบผิวและเหล็กปลอกโดยกร่อนไปด้านบนเป็นการเกิดสภาวะที่ 2 คานที่เกิดการสูญเสียระดับสูงเมื่อนำคานไปทำการเปิดผิวหลังทำการทดสอบเสร็จแล้ว พบว่าเหล็กเสริมถูกกร่อนลึก มีบางเส้นโดนกร่อนจนขาด และเหล็กปลอกถูกกร่อนจนเหล็กปลอกไม่เหลืออยู่เลยเป็นสภาวะที่ 3 แสดงว่าคานทั้ง 3 ชุดที่กำหนดให้เกิดการสูญเสียทั้ง 3 ระดับ ได้ผลเป็นไปตามทฤษฎีของ 4 สภาวะการเกิดสนิมในเหล็กเสริม

6.2 ผลที่ได้จากการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ตารางที่ 6.1 สรุปกำลังรับแรงกดประลัยของคานที่มีการสูญเสียจากการเร่งปฏิกิริยาสนิมและคานที่ทำการซ่อมแซมด้วยแผ่นไฟเบอร์

คาน	รอยแตกร้าวเริ่มต้น		ค่าการโก่งตัวสูงสุด (มิลลิเมตร)	ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (กิโลนิวตัน)
	ค่าการโก่งตัว (มิลลิเมตร)	ค่าน้ำหนักบรรทุก (กิโลนิวตัน)		
B0	1.1	65	9	209
B15	1	55	40	243
B30	1	50	43	247.7
B50	0.3-0.5	10	26	68

เอกสารอ้างอิง

- 1) ACI 440.2R-02., “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures.”
- 2) Roger W. Smith., “The effects of corrosion on the performance of reinforced concrete beams” Ryerson University.
- 3) Jin Xia, Wei-liang Jin, Long-yuan Li., “Shear performance of reinforced concrete beams with corroded stirrups in chloride environment”, School of Civil Engineering, University of Birmingham, Birmingham B15 2TT, UK.
- 4) Goitseone Malumbela, Mark Alexander, Pilate Moyo., “Variation of steel loss and its effect on the ultimate flexural capacity of RC beams corroded and repaired under load”, Dept. of Civil Eng., Univ. of Cape Town, Private Bag X3, Rondebosch 7700, South Africa.
- 5) Y. Ballim, J.C. Reid., “Reinforcement corrosion and the deflection of RC beams-an experimental critique of current test methods”, School of Civil and Environmental Engineering, University of the Witwatersrand, Private Bag 3, WITS, 2050 Johannesburg, South Africa.
- 6) Dr J Rodriguez, L M Ortega, J Casal, “LOAD CARRYING CAPACITY OF CONCRETE STRUCTURES WITH CORRODED REINFORCEMENT” GEOCISA (Dragados Group), Madrid, Spain.
- 7) NOBUHIRO OKUDE, MINORU KUNIEDA, TOMOKI SHIOTANI and HIKARU NAKAMURA., “FLEXURAL FAILURE BEHAVIOR OF RC BEAMS WITH REBAR CORROSION AND DAMAGE EVALUATION BY ACOUSTIC EMISSION”, Tokai Technology Center, Inokoshi, Meito ,Nagoya 465-0021, Japan; Dept. of Civil Engineering, Nagoya University, Furo, Chikusa, Nagoya 464-8603, Japan.
- 8) Huy Pham, Riadh Al-Mahaidi., “Experimental investigation into flexural retrofitting of reinforced concrete bridge beams using FRP composites”, Department of Civil Engineering, Monash University, Melbourne 3800, Australia Available online 31 July 2004.

- 9) Abdullah A. Almusallam., “Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars”, *Department of Civil Engineering, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran 31261, Saudi Arabia* Received 15 February 2000; received in revised form 10 November 2000; accepted 5 January 2001.
- 10) การเสริมกำลังโครงสร้างโดยใช้วัสดุคอมโพสิต (FRP Composites Strengthening) , <http://www.balance-structure.com/Strenghtening.html>
- 11) อานนท์ วงษ์แก้ว, “พฤติกรรมของคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้ว”, วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยบูรพา
- 12) บุญไชย สถิตมั่นในธรรม, พฤติกรรมการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมด้วยเส้นใยคาร์บอน, เอกสารประกอบการอบรมเรื่องการซ่อมแซมบูรณะโครงสร้างโดยใช้เทคโนโลยีวัสดุ FRP ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย
- 13) บุญไชย สถิตมั่นในธรรม, พฤติกรรมส่วนของโครงสร้างรับแรงดัดและแรงอัดเมื่อซ่อมแซมหรือเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์, วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ๒๕๔๓, หน้า ๓๑-๓๖, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย
- 14) วินิต ช่อวิเชียร. “การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง” ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย
- 15) ทวีชัย สำราญวานิช “เทคโนโลยีคอนกรีต” มหาวิทยาลัยบูรพา
- 16) <http://www.sika.com>
- 17) ทวีชัย สำราญวานิช “[การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก](#)” มหาวิทยาลัยบูรพา
- 18) วิเชียร ชาลี “[การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก](#)” มหาวิทยาลัยบูรพา