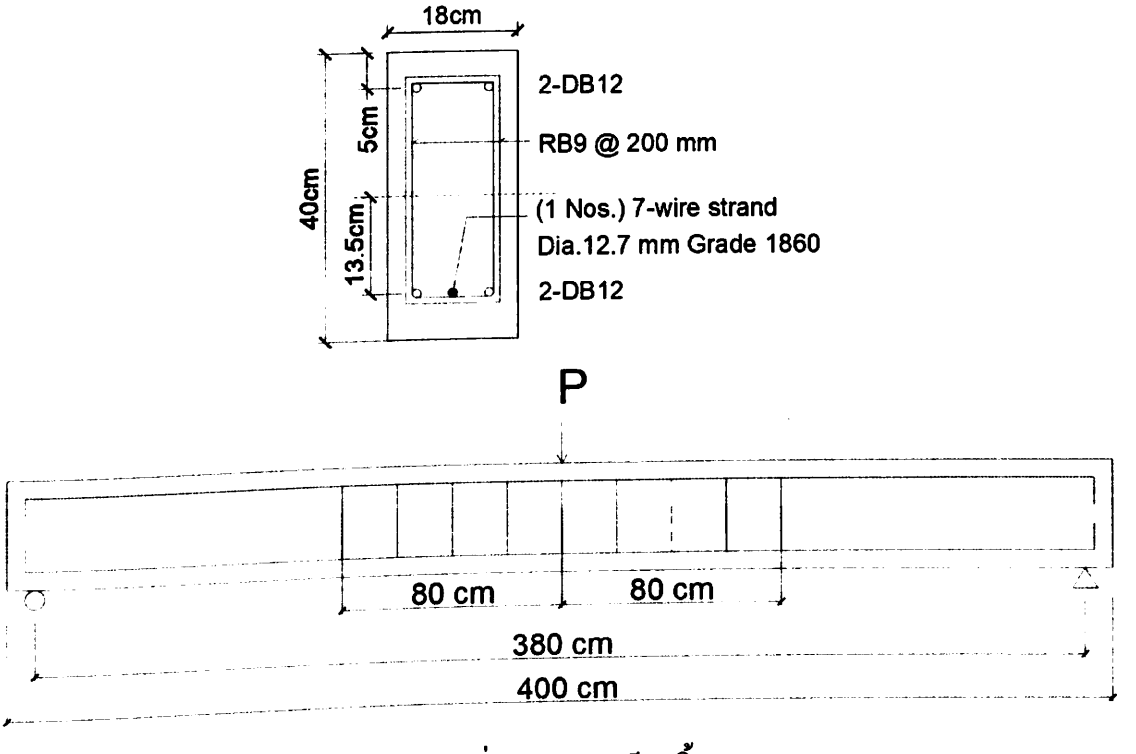
บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

หัวข้อการดำเนินงานวิจัยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ รายละเอียดชิ้นทดสอบ รูปแบบการทดสอบ วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ และขั้นตอนการดำเนินงานทดสอบ

3.1 รายละเอียดชิ้นทดสอบ

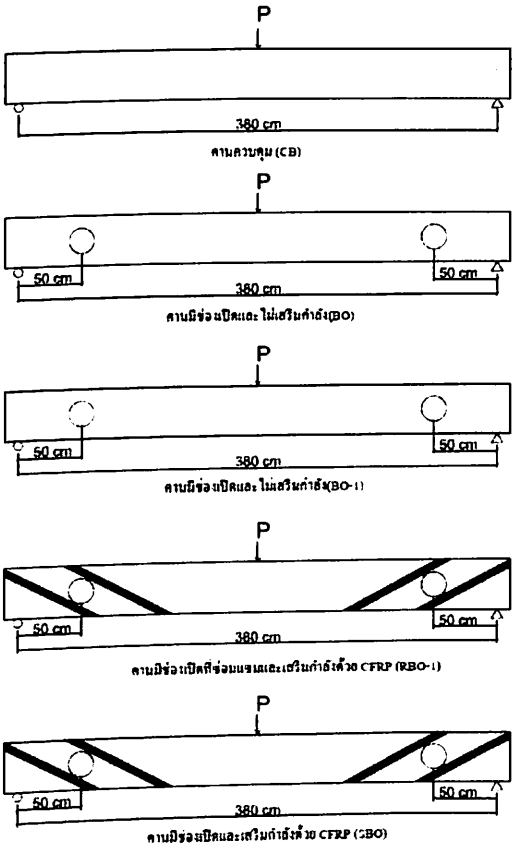
งานวิจัยนี้ใช้คานคอนกรีตอัดแรง (Pretensioned) จำนวน 4 ชิ้นมีขนาดหน้าตัดและปริมาณเหล็กเสริมเท่ากันทุกชิ้น ความกว้างคาน 18 เซนติเมตร ลึก 40 เซนติเมตร ยาว 400 เซนติเมตร เหล็กเสริมตามยาวใช้เหล็กเสริมอัดแรง 7-Wire Strands เกรด1860 (มอก.420-2540) ขนาด 12.7 มม. ระยะเยื้องศูนย์ 13.5 ซม. จำนวน 1 เส้น และเหล็กเสริมไม่อัดแรงเป็นเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. เกรด SD40 เสริมทั้งบนและล่างอย่างละ 2 เส้น เหล็กเสริมตามขวางใช้เหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม.เกรด SR24 ระยะเรียง 20 ซม.ครอบคลุมระยะ 160 ซม.ช่วงกึ่งกลางคาน รายละเอียดขนาดและตำแหน่งการเสริมเหล็กดังแสดงภาพที่ 3.1 สำหรับคานที่มีช่องเปิดจะมีช่องเปิดวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 21.5 ซม. ($d_o/h = 0.54$) ตำแหน่งของช่องเปิดห่างจากฐานรองรับ 50 ซม.



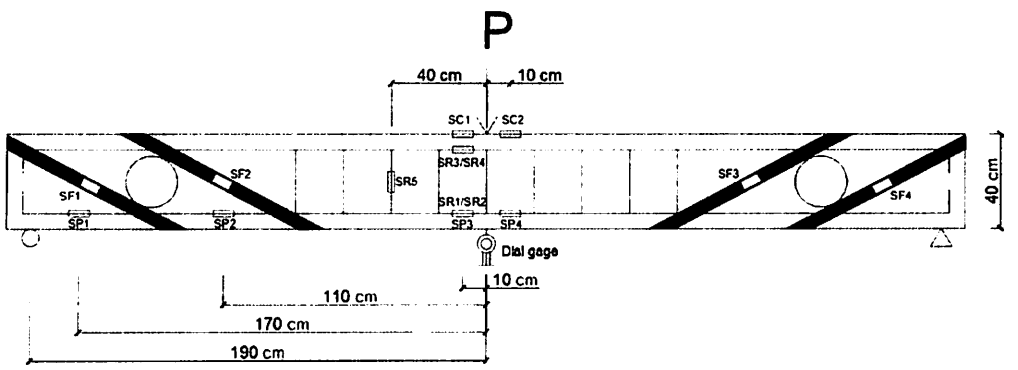
ภาพที่ 3.1 รายละเอียดชิ้นทดสอบ

3.2 รูปแบบการทดสอบและอุปกรณ์การตรวจวัด

ชิ้นทดสอบทั้งหมดของงานวิจัยนี้ประกอบด้วย คานคอนกรีตอัดแรงที่ไม่มีช่องเปิดจำนวน 1 ชิ้น และคานคอนกรีตอัดแรงที่มีช่องเปิดจำนวน 3 ชิ้น ส่วนการทดสอบจะมี 5 แบบ ได้แก่ แบบที่ 1 ชิ้นทดสอบควบคุม CB (Control Beam) เป็นการทดสอบคานที่ไม่มีช่องเปิด แบบที่ 2 ชิ้นทดสอบ BO (Beam with Opening) เป็นการทดสอบคานที่มีช่องเปิดและไม่เสริมกำลัง แบบที่ 3 ชิ้นทดสอบ BO-1 (Beam with Opening -1) เป็นการทดสอบคานที่มีช่องเปิดและไม่เสริมกำลัง แบบที่ 4 ชิ้นทดสอบ RBO-1 (Repair and Strengthened Beam with Opening) เป็นการทดสอบคาน BO-1 ซ้ำหลังจากที่ได้ทำการทดสอบจนคานวิบัติแล้วนำมาซ่อมรอยร้าวและเสริมกำลังด้วย CFRP และแบบที่ 5 ชิ้นทดสอบ SBO (Strengthened Beam with Opening) เป็นการทดสอบคานที่มีช่องเปิดและเสริมกำลังด้วย CFRP การทดสอบทุกชิ้นเป็นการทดสอบแบบ Center Point Loading มีช่วงความยาวคาน 380 ซม. โดยเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทีละ 300 kg พร้อมบันทึกค่าการโก่งตัวของคานและค่า Strain ในเหล็กเสริมอัดแรง เหล็กเสริมไม่อัดแรง CFRP และที่ผิวคอนกรีตจนกระทั่งคานวิบัติ รูปแบบของการเสริมกำลังด้วย CFRP ของคาน RBO-1 และ SBO มีรายละเอียดที่เหมือนกัน และมีมุมเท่ากับ 28 องศา รายละเอียดชิ้นทดสอบแสดงดังภาพที่ 3.2 ส่วนตำแหน่ง Strain Gage และ Dial Gage ที่ติดตั้งในชิ้นทดสอบเพื่อบันทึกผลการยืดตัวของเหล็กเสริม , คอนกรีต และ CFRP ดังแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.2 รูปแบบการทดสอบ



ภาพที่ 3.3 ตำแหน่ง Strain Gage และ Dial Gage ที่ติดตั้งในชิ้นทดสอบ

จากภาพที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าในเหล็กเสริมอัดแรงสัญลักษณ์ SP1, SP2, SP3 และSP4 คือ Strain Gage ที่ติดตั้งที่ผิวเหล็กเสริมอัดแรง ณ ตำแหน่งที่ต่างกันจำนวน 4 จุด โดยที่ตำแหน่ง SP3, SP4 มีระยะติดตั้งจากตำแหน่งกึ่งกลางคานเท่ากับ 10 ซม.ทั้งสองทิศทางจากกึ่งกลางคาน เพื่อวัดการยืดตัวของเหล็กเสริมอัดแรง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของเหล็กเสริมอัดแรง ส่วนตำแหน่ง SP1, SP2 มีระยะติดตั้งจากตำแหน่งกึ่งกลางคานเท่ากับ 170 ซม.และ 110 ซม.ตามลำดับ เพื่อตรวจสอบความแตกต่างของค่าการยืดตัวของเหล็กเสริมอัดแรงที่ตำแหน่งการเยื้องศูนย์เดียวกัน ในเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึง SR1และ SR2 คือ Strain Gage ที่ติดตั้งที่ผิวของเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึงมีระยะติดตั้งจากตำแหน่งกึ่งกลางคานเท่ากับ 10 ซม.เพื่อวัดค่าการยืดตัว ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของเหล็กเสริมรับแรงดึง ที่ CFRP SF1,SF2,SF3 และ SF4 คือ Strain Gage ที่ติดตั้งที่ผิวของ CFRP เพื่อวัดการยืดตัวของ CFRP ที่เสริมกำลังทั้ง 4 ตำแหน่ง มีระยะติดตั้งที่ตำแหน่งกึ่งกลางความยาวของ CFRP ในเหล็กเสริมตามขวาง SR5 คือ Strain Gage ที่ติดตั้งที่ผิวของเหล็กเสริมมีระยะติดตั้งจากตำแหน่งกึ่งกลางคานเท่ากับ 40 ซม. และกึ่งกลางความสูงของเหล็กตามขวาง ในเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงอัด SR3และ SR4 คือ Strain Gage ที่ติดตั้งที่ผิวของเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงอัดมีระยะติดตั้งจากตำแหน่งกึ่งกลางคานเท่ากับ 10 ซม. เพื่อวัดค่าการหดตัว ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของเหล็กเสริมรับแรงอัด และ SC1 และ SC2 คือ Strain Gage ที่ติดตั้งที่ผิวบนคานคอนกรีต มีระยะติดตั้งจากตำแหน่งกึ่งกลางคานเท่ากับ 10 ซม. ทั้งสองทิศทางจากกึ่งกลางคาน เพื่อหาค่าการหดตัวของคอนกรีต ณ ตำแหน่งกึ่งกลางคาน

3.3 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.3.1 คอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้เป็นคอนกรีตผสมเสร็จ CPAC กำลังอัดที่ 28 วันออกแบบไว้เท่ากับ 320 ksc ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 2.5 ซม. ซึ่งในการทดสอบคาน CB และ BO มีค่า f'_c เท่ากับ 313 ksc ขณะที่คาน BO-1, RBO-1 และ SBO มีค่า f'_c เท่ากับ 344 ksc

3.3.2 เหล็กเสริมอัดแรง

ผลการทดสอบคุณสมบัติเหล็กอัดแรงทราบว่า กำลังรับแรงที่จุดครากมีค่าเท่ากับ 17,931 ksc และกำลังประลัยมีค่าเท่ากับ 19,552 ksc นอกจากนี้ค่า f_{pe} ในคาน CB และ BO ในการทดสอบจริงมีค่าเท่ากับ 9,860 ksc ขณะที่ f_{pe} ในคาน BO-1, RBO-1 และSBO มีค่าเท่ากับ 10,790 ksc

3.3.3 เหล็กเสริมไม่อัดแรง

ผลการทดสอบคุณสมบัติเหล็กเสริมไม่อัดแรงทราบว่า เหล็กเสริมตามยาวขนาด 12 มม. มีกำลังรับแรงที่จุดครากเท่ากับ 5,840 ksc และที่จุดประลัยเท่ากับ 6,549 ksc ส่วนเหล็กเสริมตามขวางขนาด 9 มม. มีกำลังรับแรงที่จุดครากเท่ากับ 2,871 ksc และที่จุดกำลังประลัยเท่ากับ 3,145 ksc

3.3.4 CFRP

ชิ้นทดสอบที่มีการเสริมกำลัง จะใช้ CFRP รุ่น SMARTFIBER - SHEET UT70-30 มีค่ากำลังรับแรงดึง 35,000 ksc. โมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 2,350,000 ksc. ความหนาต่อชิ้นเท่ากับ 0.0167 ซม.

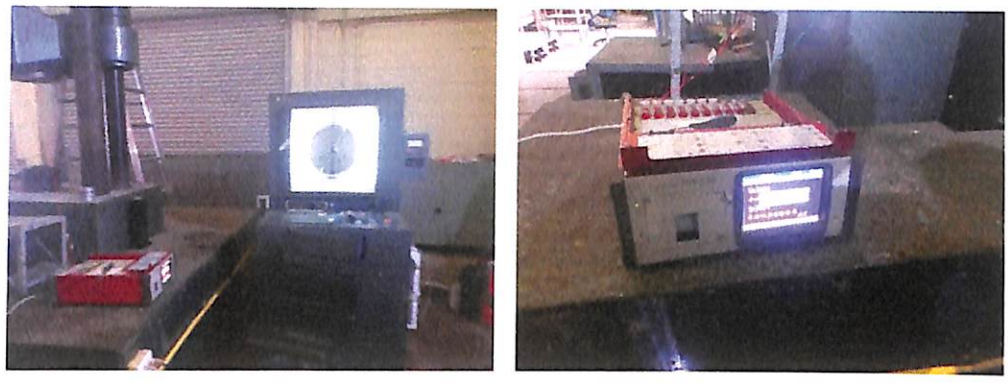
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานทดสอบ

ขั้นตอนการดำเนินงานทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

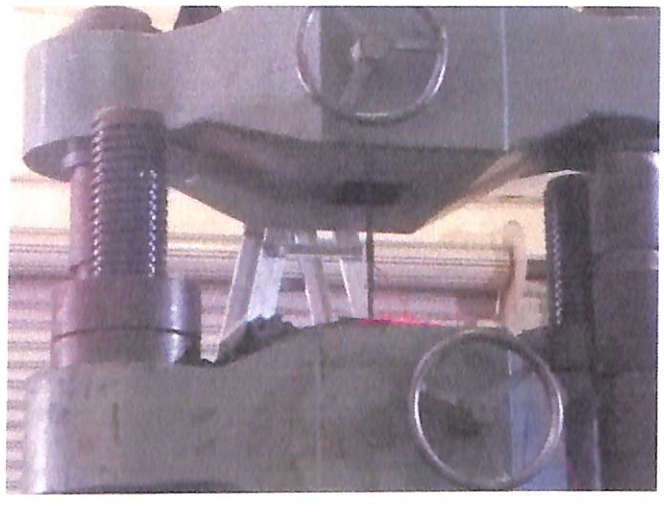
1. ทดสอบคุณสมบัติของเหล็กเสริมอัดแรง (Strand 7 Wire Dia.12.7 mm. Grade 1860) และเหล็กเสริมไม่อัดแรง (DB12 mm. Grade SD40) จำนวนอย่างละ 3 ชิ้นดังภาพที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมและขณะดึงทดสอบแรงดึงของเหล็กเสริมดังแสดงในภาพที่ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ

ภาพที่ 3.4 เหล็กเสริมอัดแรง(Strand 7 wire dia.12.7 mm. Grade 1860)

ภาพที่ 3.5 เหล็กเสริมไม่อัดแรง (DB12 mm. Grade SD40)



ภาพที่ 3.6 อุปกรณ์ทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมไม่อัดแรง



ภาพที่ 3.7 ขณะดึงทดสอบเหล็กเสริม

2. ติดตั้ง Strain Gage กับเหล็กเสริมอัดแรงและทิ้งไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมงจากนั้นนำเหล็กเสริมอัดแรงที่ติด Strain Gage แล้วไปยึดกับแท่นยึดตามตำแหน่งที่ออกแบบไว้ดังภาพที่ 3.8 ส่วน Strain Gage

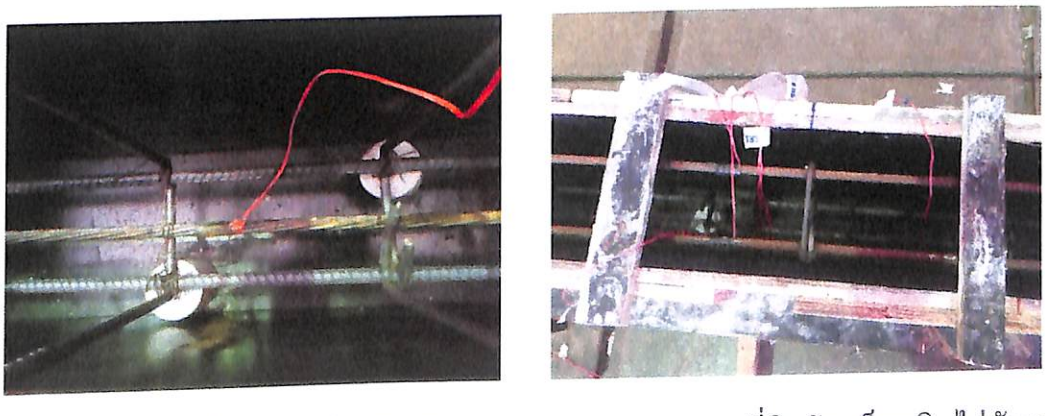
ที่ใช้คือยี่ห้อ Kyowa รุ่น KC-70-120-A1-11 Gage Length 67 mm สำหรับติดที่ผิวคอนกรีตกับ CFRP และรุ่น KFG-5-120-C1-11L5M2R Gage Length 5 mm สำหรับติดที่เหล็กเสริมดังภาพที่ 3.9

ภาพที่ 3.8 การติดตั้งเหล็กเสริมอัดแรงกับแท่นยึด

(a) Strain Gage ที่ใช้ติดกับผิวคอนกรีตและCFRP (b) Strain Gage ที่ใช้ติดกับผิวเหล็กเสริม

ภาพที่ 3.9 ผลิตภัณฑ์ Strain Gage ที่ใช้ในการทดสอบ

3. หลังจากติดตั้งเหล็กเสริมอัดแรงที่ติด Strain Gage แล้วกับแท่นยึด จึงทำการผูกเหล็กเสริมไม่อัดแรงและเหล็กปลอกจากนั้นเข้าแบบและค้ำยันเพื่อเตรียมงานหล่อชิ้นทดสอบ ดังภาพที่ 3.10



(a) strain gage ที่ติดกับเหล็กเสริมอัดแรง (b) strain gage ที่ติดกับหล็กเสริมไม่อัดแรง

(c) เข้าแบบและค้ำยันแบบชิ้นทดสอบ

(d) เข้าแบบและค้ำยันแบบชิ้นทดสอบ

(e) เข้าแบบและค้ำยันแบบชิ้นทดสอบ CB

(f) เข้าแบบและค้ำยันแบบชิ้นทดสอบ BO

ภาพที่ 3.10 เข้าแบบและค้ำยันแบบชิ้นทดสอบ

4. หลังจากเข้าแบบและค้ำยันแบบแล้ว จึงทำการดึงเหล็กเสริมอัดแรงด้วยแรง (P_j) เท่ากับ 15,450 kg ด้วยเครื่องดึงไฮโดรลิค พร้อมกับบันทึกค่า Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงในขณะดึงลวดดังภาพที่ 3.11 และเมื่อดึงเหล็กเสริมอัดแรงจนถึงค่า P_j แล้วจึงล็อคลวดอัดแรงด้วย Gib Lock

(a) เครื่องดึงเหล็กเสริมอัดแรง

(b) ดึงเหล็กเสริมอัดแรง

(c) เครื่องบันทึกค่า Strain ที่เกิดในเหล็กเสริมอัดแรงขณะดึงด้วยแรง P_j

ภาพที่ 3.11 การดึงเหล็กเสริมอัดแรงก่อนหล่อชิ้นทดสอบ

5. หล่อชิ้นทดสอบโดยใช้คอนกรีตผสมเสร็จ ก่อนเททำการตรวจสอบค่าการยุบตัวคอนกรีตที่ใช้ พร้อมทั้งเก็บตัวอย่างลูกปูน จำนวน 9 ก้อน ต่อการเทในแต่ละครั้ง ระหว่างที่เทคอนกรีตทำการบันทึกค่า Strain ที่เกิดขึ้นในเหล็กอัดแรงอย่างต่อเนื่อง โดยบันทึกค่าทุก 1 ชั่วโมงดังภาพที่ 3.12

(a) รถคอนกรีตผสมเสร็จ

(b) ตรวจสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต

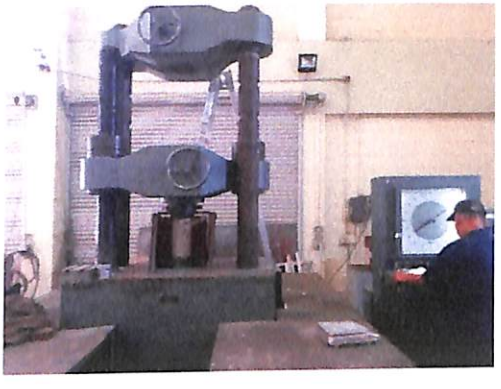
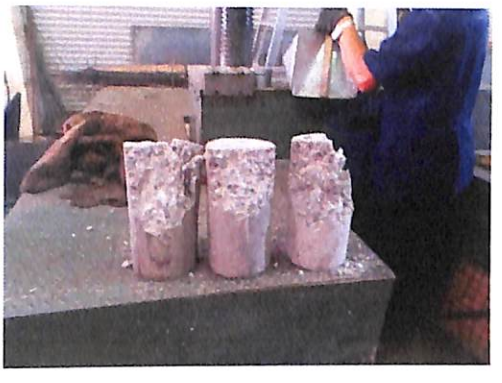
(c) ตรวจสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต

(d) การเก็บตัวอย่างลูกปูน

(e) ขณะเทคอนกรีตชิ้นทดสอบ

ภาพที่ 3.12 การหล่อชิ้นทดสอบ

6. หลังจากเทคอนกรีตและบ่มคอนกรีต จนกระทั่งคอนกรีตมีอายุครบ 7 วัน จึงทำการทดสอบกำลังอัดของลูกปูนเพื่อตรวจเช็คกำลังอัดคอนกรีตถึงค่าที่ออกแบบมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 280 ksc (f'_{ci}) จากนั้นจึงทำการคลายแรงในเหล็กเสริมอัดแรงและตัดเหล็กเสริมอัดแรงจากแท่นยึด และหยุดการบันทึกค่า Stain ดังภาพที่ 3.13

(a) การกดทดสอบลูกปูนที่อายุ 7 วัน (b) ลักษณะการวิบัติของลูกปูน

(c) การตัดเหล็กเสริมอัดแรงชิ้นทดสอบ (d) เหล็กเสริมอัดแรงที่ตัดขาดแล้ว

(e) บันทึกค่า Strain ที่เหลืออยู่ในเหล็กเสริมอัดแรงหลังจากตัดลวดแล้ว

ภาพที่ 3.13 ขั้นตอนการตัดเหล็กเสริมอัดแรงเมื่อคอนกรีตมีค่ากำลังอัดตามที่ออกแบบ

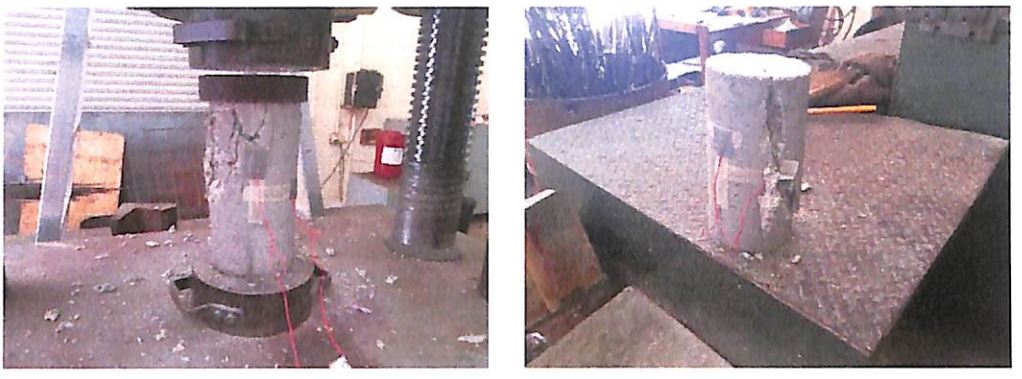
7. หลังจากตัดลวดแล้ว ทำการบ่มคอนกรีตอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งคอนกรีตมีอายุครบ 14 วัน จึงหยุดการบ่มเนื่องจากค่ากำลังอัดของลูกปูนคอนกรีตมีค่าใกล้เคียงกับกำลังอัดที่ออกแบบไว้
8. หลังจากผิวคอนกรีตคานแห้งสนิทจึงทำการติดตั้ง Strain Gage ที่ผิวคอนกรีตหลังจากติดเสร็จจะต้องทิ้งให้กาวที่ใช้ติด Strain Gage แห้งสนิทอย่าง 24 ชั่วโมงก่อนที่จะทำการทดสอบดังภาพที่ 3.14

(a) ติดตั้ง Strain Gage ที่ผิวคอนกรีต

(b) เชื่อมต่อสายของ Strain Gage

รูปที่ 3.14 การติดตั้ง Strain Gage ที่ผิวคอนกรีตคาน

9. หลังจากคอนกรีตมีอายุครบ 28 วันจึงทำการทดสอบกำลังอัดของลูกปูนเพื่อตรวจสอบกำลังอัดคอนกรีตที่ออกแบบไว้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 320 ksc ดังภาพที่3.15(a) จากนั้นจึงนำคานขึ้นติดตั้งเตรียมความพร้อมเพื่อทำการทดสอบดังภาพที่ 3.15(b) และ3.15(c)



(a) กดทดสอบลูกปูนที่อายุ 28 วัน

(b) ติดตั้ง Dial Gage วัดการโก่งตัวคาน

(b) ติดตั้ง Load Cell, Dial Gage และเครื่องมือวัดต่างๆ

ภาพที่ 3.15 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบ เครื่องมือวัดต่างๆและเตรียมความพร้อมก่อนทำการทดสอบ

10. ทำการทดสอบคานที่ไม่เสริมกำลัง (CB , BO และ BO-1) โดยการให้น้ำบรรทุกกระทำต่อคานจะเพิ่มน้ำหนักทีละ 300 kg พร้อมบันทึกค่า การโก่งตัวของคานและค่า Strain ในเหล็กเสริมอัดแรง เหล็กเสริมไม่อัดแรง และคอนกรีต ดังภาพที่ 3.16 ระหว่างที่ให้น้ำหนักบรรทุกจะบันทึกรอยร้าวที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงน้ำหนักที่กระทำ จนกระทั่งคานนั้นวิบัติ

ภาพที่ 3.16 ให้น้ำหนักบรรทุกพร้อมกับบันทึกค่า Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงและไม่อัดแรง

11. ขั้นตอนการซ่อมและเสริมกำลังด้วย CFRP ในคาน RBO-1 และSBO มีรายละเอียดดังนี้

ก) ทำการขัดแต่งผิวคอนกรีตให้เรียบและทำความสะอาดผิวคอนกรีตให้ปราศจากฝุ่นดังภาพที่ 3.17

ภาพที่ 3.17 การขัดผิวคอนกรีตเพื่อเตรียมผิวก่อนติดตั้ง CFRP

ข) หลังจากทำความสะอาดผิวคอนกรีตจึงทาชั้น Primer โดยใช้ SMART CF-Resin ตรงตำแหน่งที่จะทำการติดตั้ง CFRP ดังภาพที่ 3.18

ภาพที่ 3.18 ทาชั้น Primer ด้วย SMART CF-Resin

ค) จากนั้นโป๊วอุดรูโพรงอากาศเพื่อเตรียมผิวให้เรียบก่อนติดแผ่น CFRP โดยการใช้ SMART CF-Resin + Filler และทิ้งให้แห้งสนิทประมาณ 2 ชั่วโมง ดังภาพที่ 3.19

ภาพที่ 3.19 การโป๊วอุดรูเตรียมผิวก่อนติดแผ่น CFRP

ง) นำแผ่น SMARTFIBER - SHEET UT70-30 มาตัดตามขนาดที่ออกแบบไว้ โดยงานทดสอบนี้ใช้ขนาดความกว้างเท่ากับ 5 ซม. ดังภาพที่ 3.20

ภาพที่ 3.20 การตัดแผ่น SMARTFIBER - SHEET UT70-30 ให้ได้ขนาดที่ออกแบบไว้

จ) ก่อนติดแผ่น SMARTFIBER - SHEET UT70-30 จะทาด้วย SMART CF-Resin 1 รอบจากนั้นทำการติดแผ่น SMARTFIBER - SHEET UT70-30 ทันทีและทา SMART CF-Resin ทับอีกครั้ง ทำแบบนี้ต่อเนื่องจนกว่าจะติดตั้ง SMARTFIBER - SHEET UT70-30 ครบตามจำนวนชั้นที่ออกแบบไว้และทิ้งไว้ 7 วันให้จึงสามารถทำการทดสอบได้ ดังภาพที่ 3.21

a) ทา SMART CF-Resin ชั้นที่ 1

b) ติดแผ่น SMARTFIBER - SHEET UT70-30

c) ทา SMART CF-Resin ทับแผ่น CFRP

b) ติดแผ่น SMARTFIBER-SHEET UT70-30 เสร็จ

ภาพที่ 3.21 การติดแผ่น SMARTFIBER - SHEET UT70-30

12. ทำการทดสอบคานที่ซ่อมและเสริมกำลังแล้ว (RBO-1 และ SBO) โดยการให้น้ำบรรทุกกระทำต่อคานจะเพิ่มน้ำหนักทีละ 300 kg พร้อมบันทึกค่า การโก่งตัวของคานและค่า Strain ในเหล็กเสริมอัดแรง, เหล็กเสริมไม่อัดแรง, คอนกรีต และ CFRP ระหว่างที่ให้น้ำหนักบรรทุกจะบันทึกรอยร้าวที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงน้ำหนักที่กระทำ จนกระทั่งคานนั้นวิบัติ