

การเปรียบเทียบระหว่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กกับคานคอนกรีตที่ทำ
การอัดแรงแบบภายนอก

Comparison Between Reinforce Concrete Beam and
External Prestressed Beam



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การเปรียบเทียบระหว่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กกับคานคอนกรีตที่ทำ
การอัดแรงแบบภายนอก

Comparison Between Reinforce Concrete Beam and
External Prestressed Beam



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COMPARISON BETWEEN REINFORCE CONCRETE BEAM AND EXTERNAL PRESTRESSED BEAM



Kunburud Tankulrad
Jarukit Por.Janupiboon
Nopparut Kongkitisupchai

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ACADEMIC YEAR 2016

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การเปรียบเทียบระหว่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กกับคานคอนกรีตที่ทำการ
อัดแรงแบบภายนอก

นักศึกษา นายกุลบุรุษ ตันท์กุลรัตน์ รหัสประจำตัว 56010098
นายจารุกิตติ พ.จามุพิบูล รหัสประจำตัว 56010164
นายนพรัตน์ ก้องกิติศัพทชัย รหัสประจำตัว 56010639

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา อ. ทรงกลด แซ่อึ้ง

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. อาทิตย์ เพชรศิธร	
ดร. อำพน จรัสจรวงเกียรติ	
ดร. อัญญาวิทย์ สุจริตพงศ์	
รศ. สุวัฒน์ ธีรเศรษฐ์	
อ. ทรงกลด แซ่อึ้ง	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ วันที่ 18 เมษายน 2560 เวลา 13.00-16.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคารภาควิชาวิศวกรรมโยธา

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว



(รศ.ดร.นันทวัฒน์ จรัสโรจน์รณเดช)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ในวันที่ 12 มิถุนายน 2560

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปรียบเทียบระหว่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กกับคานคอนกรีตที่ ทำการอัดแรงแบบภายนอก

นายกุลบุรุษ ตัณฑกุลรัตน์ รหัสประจำตัว 56010098
นายจารุกิตติ พ.จานุพิบูล รหัสประจำตัว 56010164
นายนพรัตน์ ก้องกิตติศัพท์ชัย รหัสประจำตัว 56010639
อาจารย์ ทรงกลด แซ่อึ้ง
ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีการนำมาใช้ในงานก่อสร้างอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความทนทานและต้องการการซ่อมบำรุงน้อย อย่างไรก็ตามคอนกรีตรับแรงดึงได้ต่ำ แต่สิ่งที่ตามมาอย่างเลี่ยงไม่ได้ก็คือการแตกร้าวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่มากเกินไป ความคืบ ความล้า และปัจจัยอื่นๆ จากภายนอก การอัดแรงในคอนกรีตเสริมเหล็กช่วยให้เกิดการแตกร้าวในคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตเสริมเหล็กแบบทั่วไป ลดการแอ่นตัว เพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้าง โดยทั่วไปการอัดแรงจะกระทำภายใน แต่ในโครงงานนี้จะศึกษาเกี่ยวกับการอัดแรงแบบภายนอก วัตถุประสงค์ของโครงงานนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยและการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการอัดแรงภายนอกเปรียบเทียบกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา และผลของแรงดึงในเส้นลวดอัดแรงที่มีขนาดต่างๆกัน ซึ่งส่งผลต่อแนวโน้มของพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการอัดแรงภายนอก

จากผลการศึกษาพฤติกรรมของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย การแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการอัดแรงภายนอกเปรียบเทียบกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา และผลของแรงดึงในเส้นลวดอัดแรงที่มีขนาดต่างๆกัน โดยแบ่งชุดการทดสอบเป็นสามชุด ได้แก่ คานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา และคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการอัดแรงภายนอกขนาด หนึ่งพันกิโลกรัม และ สองพันกิโลกรัม พบว่าเมื่อทำการอัดแรงที่ขนาดต่างๆกัน ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก มีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของการอัดแรงที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่าลดลงตามขนาดของการอัดแรงที่เพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติที่ศึกษาในโครงงานนี้เป็นคุณสมบัติสำคัญในการปรับปรุงประสิทธิภาพการรับน้ำหนักบรรทุกประลัย และการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการเสริมกำลังของโครงสร้างเดิม หรือซ่อมแซมโครงสร้างเดิมขององค์อาคาร และงานก่อสร้างสะพานและทางยกระดับต่างๆ จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติที่ศึกษาในโครงงานนี้เป็นคุณสมบัติสำคัญในการปรับปรุงประสิทธิภาพการรับน้ำหนักบรรทุกประลัย และการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการเสริมกำลังของโครงสร้างเดิม หรือซ่อมแซมโครงสร้างเดิมขององค์อาคาร และงานก่อสร้างสะพานและทางยกระดับต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Comparison between Reinforce Concrete Beam and External Prestressed Beam

Kunburud Tankulrad 56010098

Jarukit Por.Janupiboon 56010164

Nopparut Kongkitisupchai 56010639

Prof. Songlod Sae-Ueng

Academic Year 2016

ABSTRACT

Presently, reinforced concrete structures are commonly used in many constructions because of their durability and slight maintenance. However reinforced concrete can't resist high tensile stress. Furthermore, creeping, fatiguing, overloading, and other factors may cause cracking as well. Therefore, the prestressed concrete can be used to decreases cracking and deflection more than general reinforced concrete and increase the capacity of load. This project study about the effects of external prestressed concrete. The point of this project is study maximum load, deflection , tension , of external pre-stressed concrete and reinforce concrete. In studying, beams are separated to three set of testing - reinforce concrete beam, external prestressed beam (1000 kg prestressed force), reinforce concrete beam, external prestressed beam (2000 kg prestressed force). This studying show that, when external prestressed force is increased, Which has results of increasing at the beam maximum capacity and decreasing at beam defection

In conclusion the result of this project can be apply to improve durability and stability of existing building and bridge.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ เรื่อง การเปรียบเทียบระหว่างคานคองกรีตเสริมเหล็กกับคานคองกรีตที่ทำการอัดแรงแบบภายนอกสำเร็จล่วงหน้าได้ เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก อาจารย์ ทรงกลด แซ่ อึ้ง อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาช่วยให้คำปรึกษาปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องอีกทั้งยังจัดหาเครื่องมือ อุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนให้ความรู้ เอาใจใส่ ให้คำแนะนำช่วยเหลือในการแก้ปัญหา อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งกับโครงการนี้ ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธาสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ในทุกๆรายวิชาที่ศึกษาเพื่อเป็นพื้นฐาน อันเป็นประโยชน์ยิ่งในการทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่ได้อำนวยความสะดวกด้านสถานที่การทำงาน อีกทั้งให้ความรู้ในการใช้อุปกรณ์เครื่องมือสำหรับการทดสอบ และความช่วยเหลือคำแนะนำในการแก้ปัญหาขณะทำการทดสอบ และขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือในระหว่างการทำโครงการ

สุดท้ายนี้ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณและระลึกอยู่เสมอว่าไม่มีความสำเร็จใดในชีวิตของคณะผู้จัดทำที่จะสำเร็จได้หากปราศจาก ความเข้าใจ และกำลังใจจาก บิดา มารดาอันเป็นที่เคารพภักดีในการสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนของคณะผู้จัดทำมาโดยตลอด ทำให้คณะผู้จัดทำมีวันนี้ได้ คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างสูง

นายกุลบุรุษ
นายจารุกิตต์
นายนพรัตน์

ต้นทักกุลรัตน์
พ.จานุพิบูล
ก้องกิตติศัพท์ชัย
ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	V
สารบัญรูป.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	5
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย.....	23
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	39
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	57
บรรณานุกรม	
ภาคผนวก	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.6 ตารางเวลาและแผนการทำงาน.....	3
ตารางที่ 1.8 ตารางงบประมาณที่ใช้.....	4
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบค่ากำลังของคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอกที่ 7 วัน.....	39
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบค่ากำลังของคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอกที่ 16วัน.....	39
ตารางที่ 4.3 รายละเอียดคานตัวอย่าง.....	40
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบคาน B1.....	41
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบคาน B2.....	42
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบคาน B3.....	45
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบคาน B4.....	47
ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบคาน B5.....	49
ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบคาน B6.....	51
ตารางที่ 4.10 สรุปผลการทดสอบคาน.....	55



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปภาพที่ 2.1 พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับน้ำหนักบรรทุกในช่วงอิลาสติก.....	5
รูปภาพที่ 2.2 หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้การตัด.....	6
รูปภาพที่ 2.3 วิธีการทางกายภาพ.....	7
รูปภาพที่ 2.4 ค่า β_1 ที่กำลังอัดของคอนกรีต f'_c ต่างๆ.....	7
รูปภาพที่ 2.5 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดของคานคอนกรีตอัดแรง.....	10
รูปภาพที่ 2.6 การเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง.....	13
รูปภาพที่ 2.7 การลดลงของระยะเยื้องศูนย์ของลวดอัดแรงภายนอก.....	19
รูปภาพที่ 3.1 ภาพหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กของคานตัวอย่าง.....	23
รูปภาพที่ 3.2 ภาพหน้าตัด ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงภายนอก.....	27
รูปภาพที่ 3.3 การวางแนวของเส้นลวดอัดแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงภายนอก.....	27
รูปภาพที่ 3.4.1 ประกอบแบบหล่อคอนกรีต.....	28
รูปภาพที่ 3.4.2 โครงสร้างเหล็กเสริม.....	29
รูปภาพที่ 3.4.3 นำโครงสร้างเหล็กเสริมมาใส่แบบหล่อคอนกรีตพร้อมกันแบบ.....	29
รูปภาพที่ 3.4.4 ตรวจสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสม.....	30
รูปภาพที่ 3.4.5 เทคอนกรีตลงแบบหล่อ.....	30
รูปภาพที่ 3.4.6 ตัวอย่างคอนกรีตสำหรับทดสอบกำลังของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM จำนวน 6 ลูก กดทดสอบที่ 7 และ 16 วัน.....	31
รูปภาพที่ 3.4.7.1 บ่มคานคอนกรีตตัวอย่าง.....	31
รูปภาพที่ 3.4.7.2 บ่มตัวอย่างคอนกรีตสำหรับทดสอบกำลังของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM.....	32
รูปภาพที่ 3.4.8 คานตัวอย่างที่ทำการติดตั้งลวดเสริมอัดแรงภายนอก.....	32
รูปภาพที่ 3.5.1 ตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา.....	33
รูปภาพที่ 3.5.2 คานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงภายนอก อัดแรงที่ขนาด 1000 kg.....	33
รูปภาพที่ 3.5.3 คานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงภายนอก อัดแรงที่ขนาด 2000 kg.....	34
รูปภาพที่ 3.5.4 เจาะรูสำหรับติดตั้งแผ่นเหล็กที่ปลายคาน.....	34
รูปภาพที่ 3.5.5 ติดตั้งแผ่นเหล็กที่ปลายคาน.....	35
รูปภาพที่ 3.5.6 ดิวไอเตอร์.....	35
รูปภาพที่ 3.5.7 ติดตั้งดิวไอเตอร์ที่บริเวณกึ่งกลางคาน.....	35
รูปภาพที่ 3.5.8 แนวของเส้นลวดอัดแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงภายนอก.....	36
รูปภาพที่ 3.5.9 ติดตั้ง Strain gauge ที่ลวดอัดแรง.....	36
รูปภาพที่ 3.5.10 ติดตั้ง Dial gauge ที่บริเวณกึ่งกลางคาน และที่ระยะ L/4 ของคาน.....	37
รูปภาพที่ 3.5.11 ทำการอัดแรงลวดทั้งสองข้าง ด้วยขนาดแรงที่กำหนดไว้.....	37
รูปภาพที่ 3.5.12 กดทดสอบคาน.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปภาพที่ 3.5.13 ค่าแรงกดและค่าการโก่งตัวของคานขณะที่ทำการกดทดสอบ.....	38
รูปภาพที่ 4.1 แสดงรายละเอียดการติดตั้งชุดทดลอง.....	40
รูปภาพที่ 4.2 ภาพแสดงรอยแตกร้าวของคาน B1.....	42
รูปภาพที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งตัวของคาน B1.....	42
รูปภาพที่ 4.4 ภาพแสดงรอยแตกร้าวของคาน B2.....	44
รูปภาพที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งตัวของคาน B2.....	44
รูปภาพที่ 4.6 ภาพแสดงรอยแตกร้าวของคาน B3.....	46
รูปภาพที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งตัวของคาน B3.....	46
รูปภาพที่ 4.8 ภาพแสดงรอยแตกร้าวของคาน B4.....	48
รูปภาพที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งตัวของคาน B4.....	48
รูปภาพที่ 4.10 ภาพแสดงรอยแตกร้าวของคาน B5.....	50
รูปภาพที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งตัวของคาน B5.....	50
รูปภาพที่ 4.12 ภาพแสดงรอยแตกร้าวของคาน B6.....	52
รูปภาพที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งตัวของคาน B6.....	52
รูปภาพที่ 4.3.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	53
รูปภาพที่ 4.3.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งตัวของคานอัดแรง 1000 Kg.....	54
รูปภาพที่ 4.3.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งตัวของคานอัดแรง 2000 Kg.....	54
รูปภาพที่ 4.3.4 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กคานอัดแรง 1000 kg. และ 2000 kg.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีการนำมาใช้ในงานก่อสร้างอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความทนทานและต้องการการซ่อมบำรุงน้อย อย่างไรก็ตามคอนกรีตรับแรงดึงได้ต่ำ แต่สิ่งที่ตามมาอย่างเลี่ยงไม่ได้ก็คือการแตกร้าวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่มากเกินไป ความคืบ ความล้า และปัจจัยอื่นๆ จากภายนอก การอัดแรงในคอนกรีตเสริมเหล็กช่วยให้เกิดการแตกร้าวในคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตเสริมเหล็กแบบทั่วไป ลดการแอ่นตัว เพิ่มการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้าง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การออกแบบและการก่อสร้างด้วยที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของคอนกรีตอัดแรงได้ ทั่วไปสามารถแบ่งประเภทของการอัดแรงได้ 2 รูปแบบคือ คอนกรีตอัดแรงแบบภายใน และ คอนกรีตอัดแรงแบบภายนอก โดยการอัดแรงแบบภายใน แบ่งออกเป็น คอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อนและคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กทีหลัง ส่วนคอนกรีตอัดแรงแบบภายนอกจะมีเพียงชนิดดึงเหล็กทีหลัง ซึ่งในโครงการพิเศษฉบับนี้จะกล่าวถึงการศึกษาเกี่ยวกับการอัดแรงคอนกรีตแบบภายนอก

1.2 ความเป็นมาและความสำคัญ

แนวคิดเกี่ยวกับคอนกรีตอัดแรงแบบภายนอกถูกนำไปใช้ในงานก่อสร้างสะพานและทางยกระดับต่างๆ เช่น สะพานข้ามแม่น้ำ Shigenobu เป็นสะพานข้ามแม่น้ำที่ใช้การอัดแรงแบบภายนอกในประเทศญี่ปุ่น, สะพาน Trockau เป็นสะพานที่ตั้งอยู่ระหว่างทางแยก Trockau และ Pegnitz และข้ามพื้นที่หุบเขาทางตะวันออกของเมือง Trockau ในประเทศเยอรมันซึ่งเป็นสะพานที่มีการใช้การอัดแรงภายนอกเช่นกัน นอกจากนั้นแนวคิดเกี่ยวกับคอนกรีตอัดแรงแบบภายนอกยังสามารถนำมาใช้ในการซ่อมแซมหรือเสริมกำลังในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพได้ และทำให้ความสามารถทางวิศวกรรมดีขึ้น จากความเป็นมาข้างต้นจึงนำไปสู่การศึกษาและทำโครงการพิเศษนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตอัดแรงแบบภายนอกโดยใช้แรงดึงในเส้นลวดอัดแรงที่ต่างกันเปรียบเทียบกับคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา แต่เพื่อความสะดวกในการทดลองทางผู้ทำการทดลองได้ทำการย่อขนาดของคานลง

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ

1.3.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการอัดแรงภายนอก

เปรียบเทียบกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.2 เพื่อศึกษากำลักรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการอัดแรงภายนอกเปรียบเทียบกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา

1.3.3 เพื่อศึกษาผลของแรงดึงในเส้นลวดอัดแรงที่มีขนาดต่างๆ กัน ซึ่งส่งผลต่อแนวโน้มของพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการอัดแรงภายนอก

1.4 ขอบเขตของการศึกษาโครงการพิเศษ

1.4.1 ศึกษา โดยรูปแบบของคานเป็นคานช่วงเดียว หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 0.15 x 0.25 เมตร ยาว 2 เมตร (เนื่องจากความสะดวกในการทดลอง) โดยออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีกำลัง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกแบบสถิต

1.4.2 ศึกษาคานคอนกรีตอัดแรงแบบอัดแรงภายนอกที่มีน้ำหนักบรรทุกกระทำแบบจุดกระทำที่บริเวณกึ่งกลางคาน

1.4.3 เปลี่ยนการใช้ลวดอัดแรงเป็นเหล็กเส้นไม่อัดแรง RB9 SR 24 เนื่องจากความสะดวกในการทดสอบ

1.4.4 ใช้แรงดึงในเส้นลวดอัดแรงที่ต่างกัน แต่มีการวางแนวของเส้นลวดอัดแรงเหมือนกันและระยะเยื้องศูนย์กลาง 14.5 cm. เท่ากัน ในทุกชุดที่ทำการอัดแรง

1.5 วิธีการศึกษา

1.5.1 ศึกษารวบรวมข้อมูลและเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรง

1.5.2 ศึกษาขั้นตอนเทคนิคที่ใช้ในการก่อสร้าง

1.5.3 ออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบธรรมดาและแบบอัดแรงภายนอก จากนั้นออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

1.5.4 นำแบบที่ได้ออกแบบเข้าปรึกษาอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ

1.5.5 ทำการทดสอบและบันทึกผลการทดสอบตามวัตถุประสงค์

1.5.6 นำผลการทดสอบที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ตารางเวลาและแผนการทำงาน

แผนงาน	ปี พ.ศ.2559					ปี พ.ศ.2560				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
หัวข้อ										
1. ศึกษาหาหัวข้อโครงการ	■									
2. หาข้อมูลและเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการทำโครงการ และปรึกษาอาจารย์ที่ปรึกษา	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
3. ออกแบบคานตัวอย่างและส่วนผสมคอนกรีต สำหรับทำการทดสอบ			■							
4. เตรียมตัวอย่างคานทดสอบ					■	■				
5. ทำการทดสอบ เก็บข้อมูล และวิเคราะห์ผล						■	■	■	■	■
6. จัดทำเอกสาร โครงการ										
6.1 จัดทำเอกสาร โครงการบทที่ 1,2 และ 3			■	■	■					
6.2 จัดทำเอกสาร โครงการบทที่ 4 และ 5						■	■	■	■	■

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ทราบถึงข้อแตกต่างระหว่างพฤติกรรมโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงแบบภายนอกและคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา

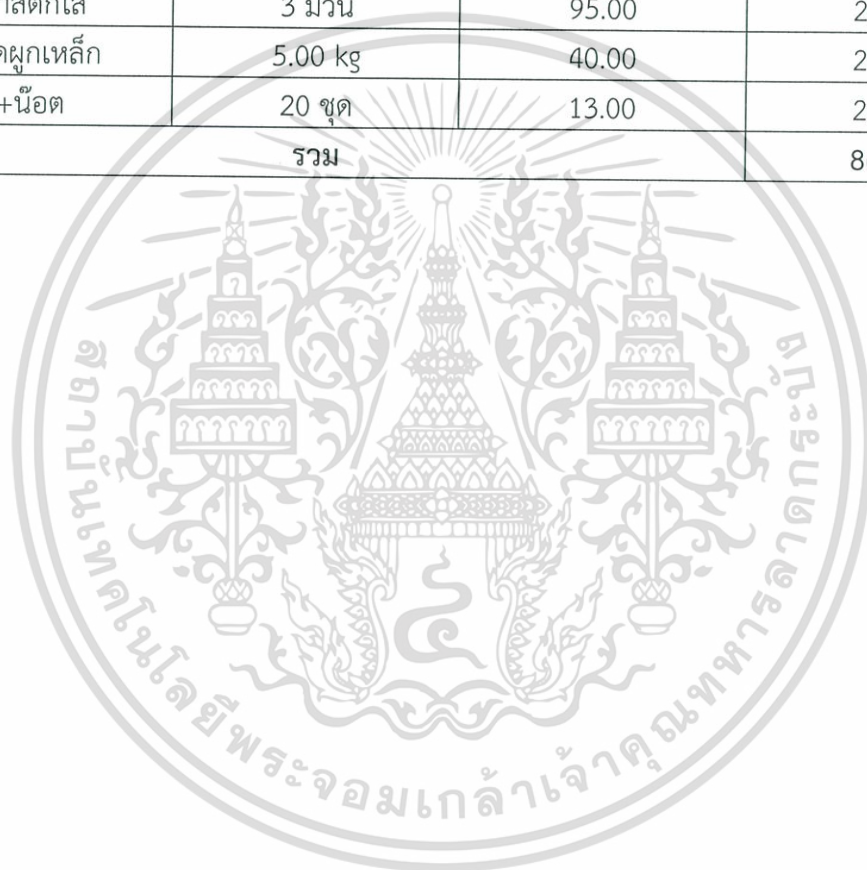
1.7.2 ทราบถึงผลของแรงดึงในเส้นลวดอัดแรงที่ต่างกันต่อพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงแบบภายนอก

1.7.3 เพื่อเป็นแนวทางสำหรับผู้ที่มีสนใจและต้องการศึกษาการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.8 ตารางงบประมาณที่ใช้

รายการ	จำนวน	ราคา / หน่วย (บาท)	ค่าใช้จ่าย (บาท)
1. ค่าเหล็กเส้น DB12	53.28 kg	15.10	804.53
2. ค่าเหล็กเส้น RB9	9.98 kg	15.60	155.69
3. ค่าเหล็กเส้น RB6	19.98 kg	16.10	321.68
4. ค่าเพลทเหล็ก	50.00 kg	30.00	1500.00
5. ค่าก๊องเหล็กเส้น	15 เส้น	100.00	1500.00
6. ค่า Strain gauge	3 ก๊อง	1200.00	3600.00
7. ค่าพลาสติกใส	3 ม้วน	95.00	285.00
8. ค่าลวดผูกเหล็ก	5.00 kg	40.00	200.00
9. ค่าฟูก+น็อต	20 ชุด	13.00	260.00
รวม			8626.9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

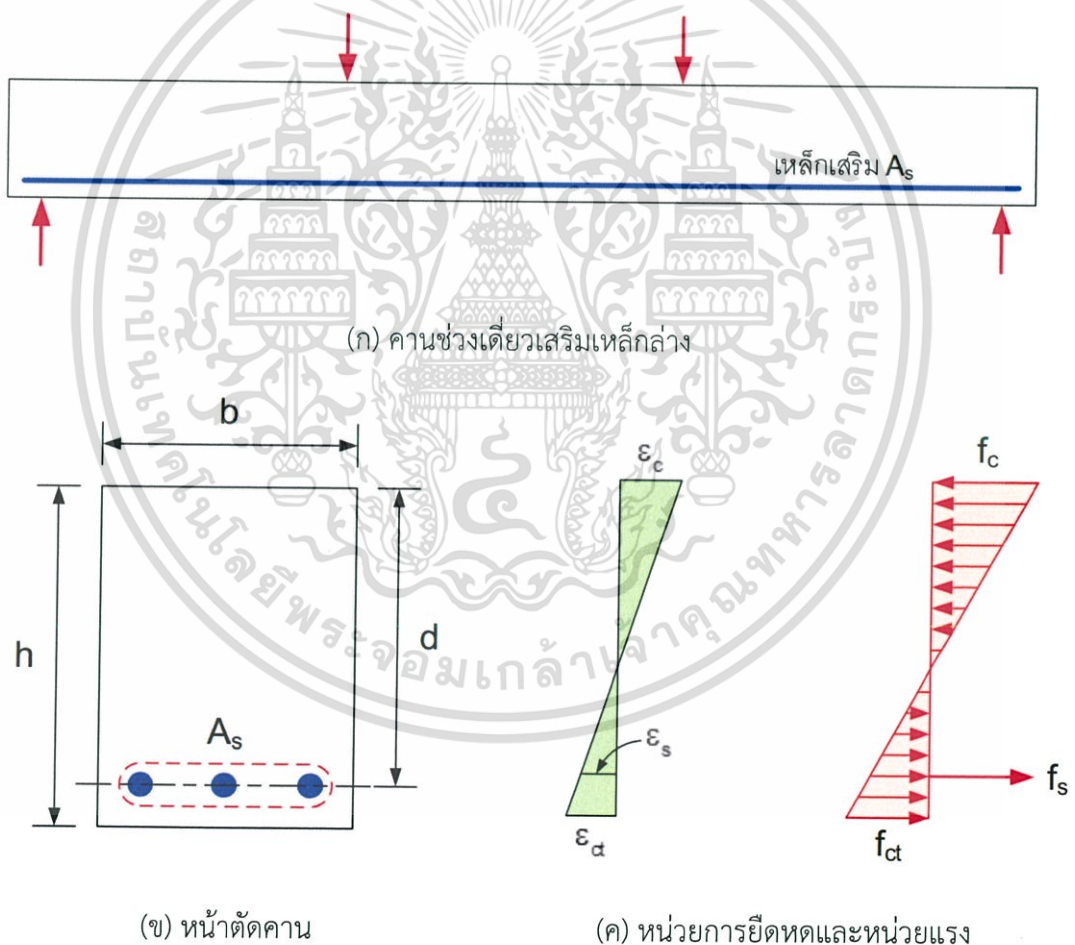
บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีกำลัง [ผศ.ดร.มงคล จิรวัชรเดช, (5)]

2.1.1 พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในคานซึ่งรับการดัดนั้นต้องการความต้านทานทั้งการรับแรงอัดและแรงดึง แต่ กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตนั้นต่ำกว่ากำลังรับแรงอัดมาก ดังนั้นจึงมีการใช้เหล็กเสริม ช่วยรับแรงดึง ในกรณีของคานช่วงเดียวดังในรูปที่ 2.1(ก) เหล็กเสริมจะถูกใช้บริเวณด้านล่างของหน้าตัดคานดังในรูปที่ 2.1(ข)



รูปที่ 2.1 พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับน้ำหนักบรรทุกในช่วงอิลาสติก [ผศ.ดร.มงคล จิรวัชรเดช, (5)]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 กำลังรับโมเมนต์ดัด [ผศ.ดร.มงคล จิรวรรณเดช, (5)]

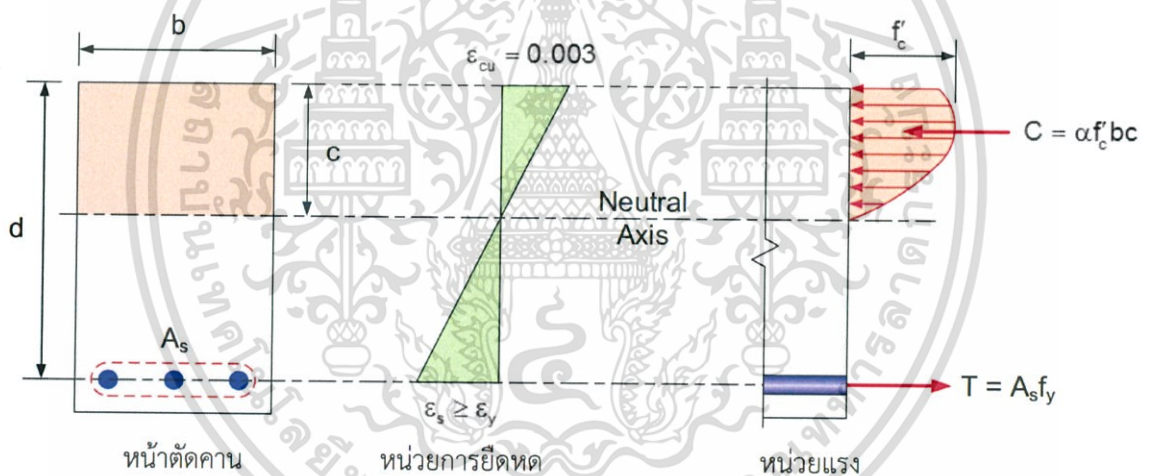
สมการพื้นฐานในการคำนวณออกแบบสำหรับการดัดคือ

$$\text{กำลังดัดต้านทาน} \geq \text{กำลังดัดที่ต้องการ}$$

หรือ
$$\phi M_n \geq M_u \quad (2.1)$$

เมื่อ M_u คือโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักคูณเพิ่มค่า, M_n คือกำลังรับโมเมนต์ที่คำนวณได้ทางทฤษฎี (Nominal moment capacity) และ ϕ คือตัวคูณลดกำลังสำหรับการดัด ACI กำหนดให้เท่ากับ 0.90

ในการคำนวณกำลังรับโมเมนต์ดัด M_n นั้นจะคำนวณจากแรงคู่ควบที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคาน คือแรงอัดบนคอนกรีต C และแรงดึงในเหล็กเสริม T คูณด้วยระยะห่างระหว่างแรงทั้งสอง แต่เนื่องจากหน่วยแรงอัดบนคอนกรีตมีการกระจายไม่เป็นเส้นตรงดังในรูปที่ 2.2 ทำให้การคำนวณค่อนข้างยุ่งยาก



รูปที่ 2.2 หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้การดัด [ผศ.ดร.มงคล จิรวรรณเดช, (5)]

C.S. Whitney ได้เสนอวิธี การคำนวณที่ให้ผลเทียบเท่ากันซึ่งได้รับการตรวจสอบและยอมรับนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยใช้ การกระจายหน่วยแรงรูปสี่เหลี่ยมเทียบเท่า หน่วยแรงในคอนกรีตจะมีค่าเท่ากับ $0.85 f'_c$ คงที่จากผิวด้านรับแรงอัดเข้ามาถึงความลึก $a = \beta_1 c$ ดังในรูปที่ 2.3

จากสมดุลของแรง $C = T$ จะได้

$$0.85f'_c a b = A_s f_y$$

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85f'_c} = \frac{\rho f_y d}{0.85f'_c} \quad (2.4)$$

เมื่อ $\rho = A_s/bd$ คืออัตราส่วนเหล็กเสริมรับแรงดึง กำลังต้านทานโมเมนต์ของหน้าตัดจะเท่ากับ

$$M_n = (C \text{ or } T) \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.5)$$

ตัวคูณความต้านทานการดัด (Flexural resistance factor) R_u หาได้โดยการหารสมการ (2.6) ด้วย bd^2

$$R_u = \frac{M_n}{bd^2} = \rho f_y \left(1 - \frac{\rho f_y}{1.7f'_c} \right) = \rho f_y \left(1 - \frac{1}{2} \rho m \right) \quad (2.6)$$

เมื่อ $m = f_y / 0.85f'_c$ คืออัตราส่วนระหว่างกำลังของเหล็กต่อคอนกรีต

$$\rho = \frac{0.85f'_c}{f_y} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2R_u}{0.85f'_c}} \right) = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2mR_u}{f_y}} \right) \quad (2.7)$$

$$\rho_b = \frac{0.85f'_c}{f_y} \beta_1 \left(\frac{6,120}{6,120 + f_y} \right)$$

$$\rho_{\max} = 0.75 \rho_b$$

$$\rho_{\min} = \frac{14}{f_y}$$

โดยที่ $\rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ประวัติความเป็นมาของคอนกรีตอัดแรง [ดร.นเรศ พันธราธร, (1)]

แต่เดิมเมื่อหลายร้อยปีก่อน การสร้างอาคารหรือสิ่งก่อสร้างใหญ่ๆ ต้องใช้งานคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นหลัก ซึ่งจะมีข้อจำกัดหลายข้อที่ทำให้ไม่สามารถทำให้ประสิทธิภาพของชิ้นงานนั้นๆ มีคุณภาพสูงขึ้น จนกระทั่งราวๆ ปี 1886 P.H. Jackson วิศวกรชาวสหรัฐอเมริกา ได้ทำการจดทะเบียนรูปแบบการก่อสร้างแผ่นคอนกรีตโดยใช้วิธีการชั้นเหล็กเพื่อยึดให้พื้นคอนกรีตเชื่อมต่อกัน ต่อมาก็ได้มีการพัฒนาคิดค้นกันต่อไปเรื่อยๆ เพื่อให้สามารถเรียกประสิทธิภาพของคอนกรีตและเหล็กให้มากขึ้น รองรับน้ำหนักบรรทุกได้มากขึ้น

ในเวลาไล่เลี่ยกัน คือในปี ค.ศ.1888 C.E.W. Doehring ชาวเยอรมัน ได้จดลิขสิทธิ์การก่อสร้างแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงด้วยลวดเหล็ก แต่วิธีการนี้ในสมัยนั้นยังไม่ประสบความสำเร็จ เนื่องจากลวดเหล็กในสมัยนั้นมีกำลังรับแรงดึงต่ำ แรงดึงที่ให้แก่ลวดจะสูญเสียไปมาก เนื่องจากผลของการหดตัว (Shrinkage) และการคืบ (Creep) ของคอนกรีต

การพัฒนาคอนกรีตอัดแรงได้มีลักษณะของการพัฒนาได้ใกล้เคียงความจริงมากขึ้นเมื่อ ปี 1908 CHARLES R. STEINER ได้จดทะเบียนเกี่ยวกับ Reinforced concrete construction โดยวิธีการที่ใช้คือ เมื่อคอนกรีตเริ่มมีการหดตัวลง ก็จะมีการช่นนืดเพื่อดึงเหล็กในคอนกรีตให้ตึง เพื่อป้องกันการหดตัวของคอนกรีต แต่การทำคอนกรีตอัดแรงด้วยวิธีนี้นั้น ไม่ได้รับความนิยมมากนัก เพราะทำให้ค่าใช้จ่ายสูงขึ้นมาก

หลังจากนั้นอีกราว 17 ปี R.E. Dill ได้เสนอวิธีการสร้างคอนกรีตอัดแรงด้วยวิธีการใหม่ คือ นำสารป้องกันการยึดเหนี่ยวเคลือบเหล็กก่อนการเทคอนกรีต ซึ่งเมื่อคอนกรีตเริ่มแข็งตัวก็จะทำการดึงเหล็กอีกครั้งหนึ่ง แต่ก็ยังไม่ได้รับความนิยมอีกเช่นกัน ด้วยเหตุผลเดิมคือ ทำให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสูงขึ้น

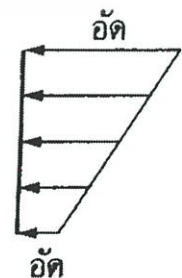
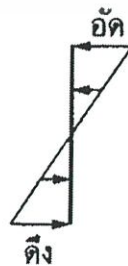
คอนกรีตอัดแรงตามแบบปัจจุบันนี้มีต้นกำเนิดมาตั้งแต่ในปี ค.ศ.1928 จากวิศวกรชาวฝรั่งเศส นามว่า E.Freyssinet ซึ่งวิธีการที่เขานำมาใช้ในครั้งนั้นคือ การดึงลวดให้ตึงเสียก่อนที่จะมีการเทคอนกรีตลงไป ซึ่งเมื่อคอนกรีตหดตัวและดึงเหล็กกลับมาก็จะทำให้เกิดแรงดึงมาชดเชย-หักล้างกับแรงดึงที่เกิดขึ้นในตอนแรก ซึ่งหลังจากนั้นก็ได้มีการพัฒนาระบบดึงลวดไปตามลำดับ จนเรียกได้ว่าเป็นต้นกำเนิดของ Pre-tensioned concrete นั่นเอง

2.3 คอนกรีตอัดแรง [ดร.นเรศ พันธราธร, (1)]

การอัดแรง หมายถึง การให้ความเค้นแก่องค์อาคารแม้ขณะที่องค์อาคารนั้นยังไม่มีน้ำหนักบรรทุกกระทำ ข้อแตกต่างระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็กและคอนกรีตอัดแรงคือ คอนกรีตเสริมเหล็กจะประกอบด้วยคอนกรีตและเหล็กเสริม แต่ในคอนกรีตอัดแรงเหล็กเสริมกับคอนกรีตจะอยู่ในสภาพความเค้นตั้งแต่แรก ทั้งๆที่ยังไม่ได้รับแรงกระทำจากภายนอก โดยเหล็กจะถูกดึงค้างไว้ในคอนกรีต ทำให้คอนกรีตอยู่ในสภาพความเค้นอัด ส่วนเหล็กอยู่ในสภาพความเค้นดึง ทำให้พฤติกรรมของเหล็กและคอนกรีตในการใช้งานดีขึ้น เหล็กจะสามารถใช้งานได้ในช่วงแรงดึงสูงๆ และคอนกรีตซึ่งรับแรงอัดได้ดีแต่รับแรงดึงได้ต่ำ เมื่อให้แรงอัดไว้ก่อนก็เท่ากับเป็นการปรับปรุงความสามารถในการรับแรงดึงของคอนกรีต พิจารณาคานคอนกรีตจากรูปที่ 2.5 สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกกระทำดังรูป (ก) ผลของโมเมนต์จะก่อให้เกิดหน่วยแรงอัดที่ผิวบนและหน่วยแรงดึงที่ผิวล่าง ดังรูป (ค) แต่สำหรับคานคอนกรีตอัดแรง หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคอนกรีตจะเป็นผลรวมของหน่วยแรงเนื่องจากการอัดแรงในรูป (ข) และหน่วยแรงเนื่องจากโมเมนต์ภายนอกในรูป (ค) ซึ่งผลรวมของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคอนกรีตทั้งผิวบนและผิวล่างแสดงไว้ในรูป (ง) จะเห็นว่าผลของโมเมนต์ภายนอกก่อให้เกิดหน่วยแรงดึงที่ผิวล่างของคอนกรีตแต่เนื่องจากคานคอนกรีตอัดแรงได้รับหน่วยแรงอัดไว้ก่อนแล้วเมื่อรับโมเมนต์จากภายนอกหน่วยแรงดึงที่ผิวล่างของคอนกรีตจะหักล้างกับหน่วยแรงอัดที่ได้จากการอัดแรง หน้าตัดคานคอนกรีตอัดแรงหลังจากได้รับโมเมนต์จากภายนอกจะไม่มีส่วนใดเกิดหน่วยแรงดึง ดังนั้นการอัดแรงจะเป็นการช่วยในพฤติกรรมการรับแรงดึงในคอนกรีต



(ก) คานคอนกรีตอัดแรง



(ข) หน่วยแรงเนื่องจากการอัดแรง

(ค) หน่วยแรงเนื่องจากโมเมนต์ภายนอก

(ง) ผลรวมหน่วยแรง

รูปที่ 2.5 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดของคานคอนกรีตอัดแรง [ดร.นเรศ พันธราธร, (1)]
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต [ดร.นเรศ พันธราธร, (1)]

การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต เป็นการวิเคราะห์คอนกรีตอัดแรงในสถานการณ์ใช้งาน (service state) โดยมีสมมติฐานว่าคอนกรีตเป็นวัสดุยืดหยุ่นในสถานการณ์ใช้งาน ดังนั้นทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือทฤษฎีอีลาสติก สำหรับคอนกรีตอัดแรงนี้หลักการที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตในสถานการณ์ใช้งานคือหลักการรวมแรง หน่วยแรงในคอนกรีต σ_c ณ ตำแหน่งใดๆ ที่เกิดขึ้นจากการอัดแรง P มีค่าระยะเยื้องศูนย์กลาง e และโมเมนต์ภายนอก M หาได้จากสมการที่ 2.8

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \pm \frac{Pey}{I} \pm \frac{My}{I} \quad (2.8)$$

โดยที่	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดคอนกรีต
	I	คือ	โมเมนต์อินเนอร์เชียร์ของหน้าตัดคอนกรีต
	Y	คือ	ระยะระหว่างตำแหน่งบนหน้าตัดคอนกรีตที่พิจารณากับแนวแกนสะเทิน

สำหรับเครื่องหมายที่ใช้ในการคำนวณหน่วยแรงในคอนกรีตนี้เนื่องจากคอนกรีตมีคุณสมบัติรับแรงอัดได้ดีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตมักจะพิจารณาความสามารถในการรับแรงอัดเป็นหลัก ดังนั้นในการคำนวณจะใช้เครื่องหมาย (+) สำหรับหน่วยแรงอัดในคอนกรีต และใช้เครื่องหมาย (-) สำหรับหน่วยแรงดึงในคอนกรีต

การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตในสถานการณ์ใช้งานสามารถแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขณะถ่ายแรง (transfer stage) และขณะรับน้ำหนักบรรทุก (working stage)

2.4.1 การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขณะถ่ายแรง

การวิเคราะห์จะพิจารณาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตทันทีที่ถ่ายแรงจากเหล็กเสริมอัดแรงสู่คอนกรีต ซึ่งแรงอัดที่ใช้คำนวณในขั้นตอนนี้ จะเป็นแรงที่หักลบการสูญเสียแรงดึงเหล็กเสริมที่เกิดขึ้นทันทีทันใด P_i ส่วนโมเมนต์ที่นำมาคำนวณเป็นโมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักตัวเองเท่านั้น M_G เพราะขณะที่ทำการถ่ายแรงยังไม่มีน้ำหนักบรรทุกภายนอกกระทำ ดังสมการที่ 2.9 [ดร.นเรศ พันธราธร, (1)]

$$\sigma_c = \frac{P_i}{A} \pm \frac{P_i ey}{I} \pm \frac{M_G y}{I} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขณะรับน้ำหนักบรรทุก

ขั้นตอนนี้จะพิจารณาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขณะมีน้ำหนักบรรทุกภายนอกกระทำ แรงอัดที่ใช้ในการคำนวณจึงเป็นแรงที่หักลบการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทั้งหมด P_e เรียกว่าแรงอัดประสิทธิผล (effective prestressing force) และโมเมนต์ที่นำมาคำนวณเกิดจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดรวมน้ำหนักตัวเองด้วย M_T ดังสมการที่ 2.10

$$\sigma_c = \frac{P_e}{A} \pm \frac{P_e e y}{I} \pm \frac{M_{TY}}{I} \quad (2.10)$$

2.5 ค่าโมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้าว [ดร.นเรศ พันธราช, (1)]

การแตกร้าวในคอนกรีตจะเกิดขึ้นเมื่อหน่วยแรงที่ผิวบนสุดหรือล่างสุดเกิดหน่วยแรงดึงขึ้นจนเกินค่าที่คอนกรีตสามารถรับได้ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นกับโมเมนต์ที่กระทำต่อคาน ค่าโมเมนต์ภายนอกที่ทำให้คอนกรีตอัดแรงเริ่มแตกร้าว คือค่าโมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตมีหน่วยแรงดึงเกิดขึ้นเท่ากับโมดูลัสของการแตกหักดังสมการ 2.11

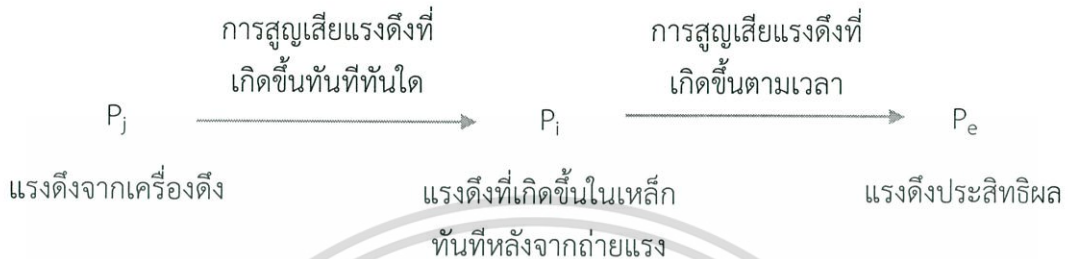
$$M_{cr} = P_e + \frac{PI}{Ac_b} + \frac{f_r I}{c_b} \quad (2.11)$$

โดยที่ M_{cr} คือ โมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้าว

f_r คือ โมดูลัสของการแตกหักของคอนกรีต $\cong 2.0\sqrt{f'_c}$ (ksc)

2.6 การเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง [ดร.นเรศ พันธราธร, (1)]

ในการอัดแรงจะมีการสูญเสียแรงดึงเกิดขึ้นในเหล็กเสริมอัดแรง ซึ่งการสูญเสียแรงดึงนี้มทั้งการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใดหลังจากถ่ายแรง (immediate loss) และการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลา (time dependent loss)



รูปที่ 2.6 การเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง [ดร.นเรศ พันธราธร, (1)]

ก) การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใดหลังจากถ่ายแรง

การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใดนี้มีสาเหตุมาจากหลายประการด้วยกัน แต่ที่มักจะนำมาพิจารณาในการออกแบบ ได้แก่ การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดที่เกิดขึ้นบนเหล็กเสริมอัดแรง (friction loss) การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต (elastic shortening loss) และการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึด (anchorage loss) นอกจากนี้การสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงอาจมีสาเหตุอื่นๆ เช่น การหดตัวของไม้แบบในชั้นส่วนที่เป็นคอนกรีตอัดแรงชนิดตั้งเหล็กก่อน การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ฯลฯ การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใดได้จากผลต่างของค่าแรงดึงที่วัดได้ขณะดึงด้วยเครื่องดึงไฮดรอลิก P_j กับแรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กทันทีหลังจากถ่ายแรง P_i

$$\text{การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใด} = P_j - P_i$$

ข) การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลา

การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลา มีสาเหตุหลักๆมาจาก การหดตัวของคอนกรีตจากการสูญเสียความชื้น (shrinkage loss) การคืบ (creep loss) และการคายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรง (steel relaxation loss) ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้นการสูญเสียแรงดึงนี้จะเพิ่มขึ้นตามเวลา โดยที่อัตราการสูญเสียแรงดึงจะเร็วในช่วงแรกๆ และค่อยๆลดลง เมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้น ถ้าให้ P_e คือแรงดึงที่เหลือในเหล็กเสริมอัดแรงหลังจากการสูญเสียแรงดึงจากสาเหตุทั้งหมดได้เกิดขึ้นแล้ว การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลาจึงหาได้จาก

$$\text{การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลา} = P_i - P_e$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดที่เกิดขึ้นบนเหล็กเสริมอัดแรง (friction loss)

การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดเกิดขึ้นในขั้นตอนการดึงเหล็กของคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กที่หลัง ความฝืดระหว่างเหล็กเสริมอัดแรงกับท่อที่ใช้ร้อยเหล็กเสริมอัดแรง (hollow duct) จะทำให้แรงดึงในเหล็กค่อยๆ ลดลงตามระยะที่ห่างออกไปจากปลายเหล็กเสริมที่ทำการดึง ค่าการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืด ขึ้นอยู่กับค่ามูรวมของความโค้ง ระยะห่างจากปลายเหล็กเสริมที่ทำการดึง ชนิดของเหล็กเสริมอัดแรง และชนิดท่อที่ใช้ร้อยเหล็กเสริมอัดแรง การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดจะพิจารณาในคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กที่หลังเท่านั้น ส่วนในคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อนขณะที่ดึงจะไม่ใช้ท่อร้อยและไม่มีความฝืดเกิดขึ้นขณะดึงจึงไม่ต้องนำมาพิจารณา

ในมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ได้กำหนดสมการสำหรับการคำนวณการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืด ดังสมการที่ 2.12

$$P_x = P_j e^{-(kx + \mu\alpha)} \quad (2.12)$$

โดยที่	P_x	คือ	แรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่ระยะ x จากสมอยึด, kg.
	P_j	คือ	แรงดึงที่ปลายที่ทำการดึงลวด, kg.
	e	คือ	ค่าคงที่ เท่ากับ 2.71828
	k	คือ	สัมประสิทธิ์ของความคด (wobble coefficient), m^{-1}
	μ	คือ	สัมประสิทธิ์ความฝืด (friction coefficient), rad^{-1}
	X	คือ	ระยะตามแนวราบที่วัดจากปลายเหล็กเสริมอัดแรงที่ทำการดึงถึงตำแหน่งที่พิจารณา, m
	α	คือ	ผลรวมทั้งหมดของมุมที่เปลี่ยนไปจากปลายเหล็กเสริมอัดแรงที่ทำการดึงถึงตำแหน่งที่พิจารณา, rad

2.6.2 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต (elastic shortening loss)

ก) กรณีของคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน

ในคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน เหล็กเสริมอัดแรงจะถูกดึงค้างไว้ก่อนการเทคอนกรีตและเมื่อทำการถ่ายแรงจากเหล็กเสริมอัดแรงเข้าสู่คอนกรีต คอนกรีตจะหดตัวเนื่องจากแรงอัดตามทฤษฎีอีลาสติก ในขณะที่เดียวกันเหล็กเสริมอัดแรงก็จะสั้นลงตาม ดังนั้นการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงจึงเกิดขึ้น โดยที่การสูญเสียหน่วยการยืดตัวในเหล็กเสริมอัดแรงเท่ากับการหดตัวของคอนกรีตที่เกิดขึ้น ถ้าพิจารณาคอนกรีตอัดแรงที่มีแนวเหล็กเสริมอัดแรงกระทำที่ศูนย์กลางหน้าตัดของคอนกรีต ในกรณีนี้ไม่มีผลของโมเมนต์ดัดเข้ามาเกี่ยวข้อง มีแต่ผลของแรงตามแนวแกน ดังนั้น ค่าการสูญเสียหน่วยแรงดึงจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต ES หาได้จากสมการ 2.13

$$ES = n f_{cir} = (E_s / E_{ci}) f_{cir} \quad (2.13)$$

โดยที่ f_{cir} คือ หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นที่คอนกรีต ณ ตำแหน่งศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรง

E_s คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมอัดแรง

E_{ci} คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตขณะถ่ายแรง หาได้จาก

$$E_{ci} = 15200 \sqrt{f'_{ci}}$$

หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นที่คอนกรีต ณ ตำแหน่งศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรง ($y=e$)

คือ

$$f_{cir} = \frac{P_0}{A} + \frac{P_0 e^2}{I} - \frac{M_{Ge}}{I}$$

(2.14)

โดยที่ P_0 คือ แรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงหลังจากถ่ายแรงสู่คอนกรีตแล้ว

ข) กรณีของคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กที่หลัง

การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีตในคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กที่หลังต่างไปจากคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน ถ้ามีเหล็กเสริมอัดแรงเพียง 1 เส้นในคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กที่หลัง การหดตัวของคอนกรีตจะเกิดขึ้นขณะทำการอัดแรงเนื่องจากแรงในเหล็กเสริมอัดแรงที่วัดจากเครื่องอัดแรงเป็นค่าหลังจากการหดตัวของคอนกรีตได้เกิดขึ้นแล้ว ดังนั้นจึงไม่มีการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต

ถ้ามีเหล็กเสริมอัดแรงมากกว่า 1 เส้น และการอัดแรงกระทำที่ละเส้นจะพบว่าขณะที่ทำการอัดแรงในเหล็กเส้นแรกไม่มีการสูญเสียแรงดึงในเหล็ก เมื่อทำการอัดแรงเหล็กเส้นที่สองการหดตัวของคอนกรีตจะเกิดขึ้นต่อไปทำให้เกิดการสูญเสียแรงดึงบนเหล็กเส้นแรกเนื่องจากการหดตัวนี้ ส่วนเหล็กเส้นที่สองไม่มีการสูญเสียแรงดึง จะพบว่าเหล็กเส้นแรกที่ทำกรอัดแรงมีการสูญเสียแรงดึงมากที่สุด เหล็กเส้นถัดมาที่มีการสูญเสียแรงดึงลดลง จนกระทั่งเส้นสุดท้ายจะไม่มีการสูญเสียแรงดึงเลย สามารถคำนวณหาค่าการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกสำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กที่หลังได้ดังนี้

$$ES = 0.5(E_s / E_{ci})f_{cr} \quad (2.15)$$

2.6.2 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึด (anchorage loss)

ในคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กที่หลัง การถ่ายแรงจากเครื่องดึงจะกระทำผ่านสมอยึดซึ่งอยู่ที่ปลายเหล็กเสริมอัดแรง สมอยึดจะมีการขยับตัวเพื่อเข้าที่ขณะที่ทำการถ่ายแรงจากเครื่องดึงเหล็กเข้าสู่สมอยึด การขยับตัวของสมอยัดนี้ทำให้เกิดการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงเพราะเหล็กเสริมอัดแรงจะขยับตัวตาม ดังนั้นแรงดึงที่สูญเสียเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึดที่ปลายคาน ΔP_{anc} จากสมการ

2.16

$$\Delta P_{anc} = \theta_{anc} L_{anc} \quad (2.16)$$

$$L_{anc} = \sqrt{\frac{2A_s E_s \Delta a}{\theta_{anc}}} \quad (2.17)$$

- โดยที่ Δ_a คือ ระยะการขยับตัวเข้าที่ของสมอยึด k
- A_s คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมอัดแรง
- θ_{anc} คือ ค่าความลาดชันที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึด มีค่าเท่ากับสองเท่าของความชันของการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความผิด

L_{anc} คือ ระยะจากปลายสมอยึดจนถึงจุดที่ไม่มีการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.4 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต (shrinkage loss)

การสูญเสียแรงดึงในกรณีนี้มีสาเหตุจากการหดตัวของคอนกรีตเนื่องจากการสูญเสียความชื้นในคอนกรีต สามารถหาได้ดังนี้

$$\text{สำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน SH} = 1200 + 11RH \quad (2.18)$$

$$\text{สำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน SH} = 0.8(1200 - 11RH) \quad (2.19)$$

โดยที่ SH คือ หน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต, k_{sc}

RH คือ ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศตลอดปี, %

2.6.5 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการคืบของคอนกรีต (creep loss)

การคืบที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขึ้นกับเวลาและค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนคอนกรีต การคืบจะทำให้เกิดการสูญเสียแรงในเหล็กเสริมอัดแรง สำหรับการคำนวณหาค่าหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่สูญเสียเนื่องจากการคืบของคอนกรีต สามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$CR = 12f_{cir} - f_{c_{ds}} \quad (2.20)$$

โดยที่ CR คือ หน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากการคืบของคอนกรีต, k_{sc} .

$F_{c_{ds}}$ คือ หน่วยแรงดึงในคอนกรีตที่จุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากน้ำหนักคงที่ทั้งหมดยกเว้นน้ำหนักคงที่ที่มีอยู่แล้วในขณะอัดแรง, k_{sc}

2.6.6 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการคายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรง (steel relaxation loss)

การสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงกรณีนี้เกิดจากการคายแรงดึงในตัวเหล็กเสริมเองขนาดของแรงดึงที่ลดลงขึ้นกับค่าของหน่วยแรงดึงแรกเริ่ม เวลาที่ผ่านไปหลังจากดึงเหล็กเสริมอัดแรงและชนิดของเหล็กเสริมอัดแรง สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

สำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน

ก) ลวดเกลียวอัดแรงเกรด 1725 และ 1860 (มอก. 420-2525)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์(2.21)ค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข) ลวดอัดแรง (มอก. 95-2525)

$$RE = 1270 - 0.4ES - 0.2(SH+CR) \quad (2.22)$$

สำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กที่หลัง

ก) ลวดเกลียวอัดแรงเกรด 1725 และ 1860 (มอก. 420-2525)

$$RE = 1410 - 0.3FR - 0.4ES - 0.2(SH+CR) \quad (2.23)$$

ข) ลวดอัดแรง (มอก 95-2525)

$$RE = 1270 - 0.3FR - 0.4ES - 0.2(SH+CR) \quad (2.24)$$

ค) เหล็กเส้นอัดแรง

$$RE = 210 \quad (2.25)$$

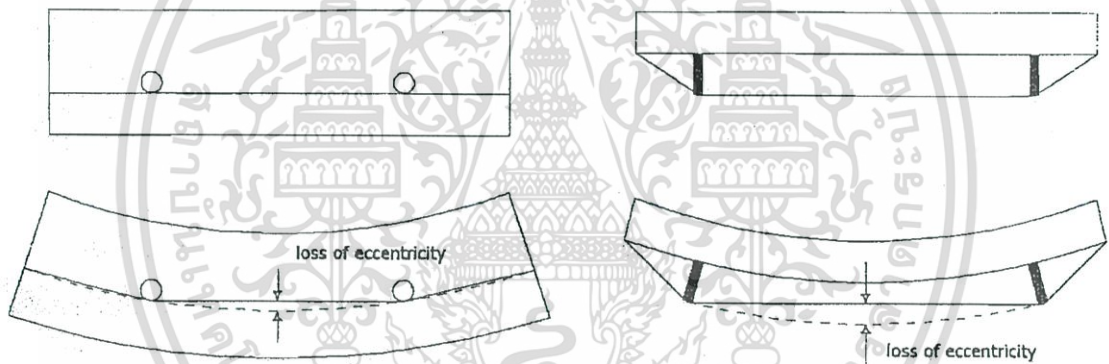
โดยที่ RE คือ หน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากการคายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงเอง, ksc



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอก [คณิศร ปิยะตระกูล, (3)]

ในกรณีของระบบลวดอัดแรงภายใน การเปลี่ยนตำแหน่งของลวดอัดแรงจะสอดคล้องกับการเปลี่ยนตำแหน่งของคอนกรีต ดังนั้นระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงที่ใช้ในการคำนวณจึงเป็นค่าคงที่ แต่ในกรณีของระบบลวดอัดแรงภายนอก การเปลี่ยนตำแหน่งของลวดอัดแรงจะไม่สอดคล้องกับการเปลี่ยนตำแหน่งของคอนกรีต ยกเว้นจุดที่มีดีวิเอเตอร์ (deviator) และแป้นยึดลวดอัดแรง (jacking corbel) การไม่สอดคล้องกันนี้จึงทำให้เกิดการลดลงของระยะเยื้องศูนย์กลางดังแสดงใน รูปที่ 2.6 ซึ่งเรียกว่า loss of eccentricity (second-order effect) เนื่องจากระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อน้ำหนักกระทำมีการเปลี่ยนแปลง การคำนวณหาค่าระยะเยื้องศูนย์กลางจึงมีขั้นตอนมากขึ้น ในการคำนวณหาระยะเยื้องศูนย์กลางจะต้องทราบระยะแอนตัวของคานเสียก่อน และการที่จะหาระยะแอนตัวของคานได้ก็จะต้องทราบระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรง ดังนั้นการคำนวณจึงต้องทำแบบ trial and error



รูปที่ 2.7 การลดลงของระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอก [คณิศร ปิยะตระกูล, (3)]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมอัดแรง [ดร.นเรศ พันธราธร, (1)]

การวัดหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมอัดแรงในคอนกรีตอัดแรง กระทำขณะทำการดึงเหล็กเสริมอัดแรงและหลังจากนั้นจะมีการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมเนื่องจากสาเหตุต่างๆตามที่ได้กล่าวมาแล้ว และเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกมากกระทำเพิ่มเติมหน่วยแรงในเหล็กเสริมอัดแรงก็จะมีเปลี่ยนแปลงอีกเล็กน้อยเนื่องจากการโก่งตัวขององค์อาคารนั้นๆ ในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงในเหล็กเสริมอัดแรงที่เกิดจากการโก่งตัวของคานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติมในช่วงสถานะการใช้งานโดยที่คอนกรีตยังไม่เกิดการแตกร้าว

ก) สำหรับคอนกรีตอัดแรงระบบมีการยึดเหนี่ยว

ในคอนกรีตอัดแรงระบบมีการยึดเหนี่ยวเหล็กเสริมอัดแรงและคอนกรีตที่อยู่โดยรอบ จะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวเกิดขึ้นทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงหน่วยการยึดหดตัวที่เกิดขึ้นบนเหล็กเสริมอัดแรง $\Delta\epsilon_s$ และค่าการเปลี่ยนแปลงหน่วยการยึดหดตัวของคอนกรีต $\Delta\epsilon_c$ ที่อยู่โดยรอบเท่ากัน การคำนวณหน่วยแรงที่เปลี่ยนไปของเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากการโก่งตัวสามารถคำนวณได้จากทฤษฎีอัสติค ดังนี้

$$\Delta\epsilon_s = \Delta\epsilon_c$$

$$\Delta\sigma_s = n \frac{My}{I}$$

(2.26)

โดยที่ $\Delta\sigma_s$ คือ หน่วยแรงที่เปลี่ยนไปของเหล็กเสริมอัดแรง
 M คือ โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติม
 n คือ อัตราส่วนโมดูลัส
 I คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัด
 y คือ ระยะเยื้องศูนย์กลาง หรือ เท่ากับ e

ข) สำหรับคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยว

การเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงของคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยวแตกต่างจากของระบบมีการยึดเหนี่ยว เหล็กเสริมอัดแรงจะมีการขยับตัวสัมพันธ์กับคอนกรีตที่อยู่โดยรอบเนื่องจากไม่มีการยึดเหนี่ยวระหว่างผิวทั้งสอง เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกหน้าตัดคอนกรีตที่กึ่งกลางช่วงคานจะมีโมเมนต์เกิดขึ้นสูงสุด หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงของคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยวที่กึ่งกลางช่วงคานจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ช้ากว่าของคอนกรีตอัดแรงระบบมีการยึดเหนี่ยว ที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อมีการเพิ่มหน่วยการยึดตัวในเหล็กเสริมอัดแรงเกิดขึ้น หน่วยการยึดตัวในเหล็กเสริมอัดแรงชนิดไร้การยึดเหนี่ยวนี้ก็จะกระจายไปตลอดคาน เนื่องจากเหล็กเสริมอัดแรงมีอิสระในการเคลื่อนตัวสัมพันธ์กับคอนกรีตที่อยู่โดยรอบ ดังนั้นการคำนวณจึงเริ่มต้นด้วยการคำนวณหาความยาวที่เพิ่มขึ้นของเหล็กเสริมอัดแรง ค่าที่ได้จากการอินทิเกรตหน่วยการยึดตัวของคอนกรีตที่ตำแหน่งเดียวกับเหล็กเสริมอัดแรงตลอดความยาวคาน ดังสมการ 2.27

$$\Delta\sigma_s = \frac{n}{L} \int_0^L \frac{My}{I} dx \quad (2.26)$$

2.9 สูตรคำนวณหาค่าระยะโก่งทันทันที่มากที่สุด [ดร.วินิต ช่อวิเชียร, (4)]

สมการคำนวณหาค่าระยะโก่งทันทันที่มากที่สุด

$$\Delta = K \left(\frac{5ML^2}{48E_c I_e} \right) \quad (2.27)$$

โดยที่ K คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการโก่งตัว มีค่าเท่ากับ 1 สำหรับคานช่วงเดียว
 I_e คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผลของรูปตัด, cm^4

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left(1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right) I_{cr} \leq I_g \quad (2.28)$$

M_{cr} คือ โมเมนต์ดัดแตกกร้าว = $f_r I_g / Y_t$, kg-cm

M_a คือ โมเมนต์ดัดมากที่สุดที่กระทำจากน้ำหนักบรรทุกใช้งาน, kg-cm

I_g คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดทั้งหมด, cm^4

I_{cr} คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดแตกกร้าว, cm^4

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [คณิศร ปิยะตระกูล, (3)]

จากวิทยานิพนธ์ เรื่อง ผลของระดับความเสียหายและการอัดแรงภายนอกต่อความแข็งแรงเชิงดัดและความถี่ธรรมชาติของคานคอนกรีตอัดแรงแบบดิ่งภายหลัง โดย คณิศร ปิยะตระกูล มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ได้ทำการทดสอบแบ่งเป็น 2 ชุดการทดสอบคือ ชุดที่ 1 ทำการศึกษาคานคอนกรีตอัดแรงแบบดิ่งภายหลังภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบกระทำซ้ำจนกระทั่งคานเกิดการวิบัติ ในแต่ละระดับของน้ำหนักบรรทุกและความเสียหายจะทำการวัดค่าการเสียรูป ซึ่งประกอบด้วย การแอ่นตัว และความเครียด รวมถึงค่าความถี่ธรรมชาติของคาน จากการศึกษาพบว่าระดับการแตกกร้าวเสียหายเนื่องจากการบรรทุกน้ำหนักเกินพิกัดส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรงเชิงดัดและความถี่ธรรมชาติของคานคอนกรีตอัดแรง ความสัมพันธ์ดังกล่าวช่วยในการตรวจวินิจฉัยระดับความเสียหายของโครงสร้างสะพานเบื้องต้น ส่วนชุดที่ 2 จะศึกษาผลของการอัดแรงภายนอกที่มีผลต่อพฤติกรรมเชิงดัดของคานคอนกรีตอัดแรงที่ได้รับความเสียหายจากการรับน้ำหนักบรรทุกเกินพิกัด โดยใช้คานทั้ง 2 ชุดที่มีขนาดและรายละเอียดการเสริมเหล็กแบบเดียวกัน

จากวิทยานิพนธ์ข้างต้นในส่วนของการศึกษาผลของการอัดแรงภายนอกที่มีผลต่อพฤติกรรมเชิงดัดของคานคอนกรีตอัดแรงที่ได้รับความเสียหายจากการรับน้ำหนักบรรทุกเกินพิกัด นำไปสู่หัวข้อการศึกษาในโครงการ การเปรียบเทียบระหว่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กกับคานที่มีการอัดแรงภายนอก โดยศึกษาถึงความสัมพันธ์ของขนาดของแรงที่ใส่ในคานคอนกรีตอัดแรงว่าจะส่งผลต่อการรับน้ำหนักและการโก่งตัวของคานคอนกรีตอย่างไร เปรียบเทียบกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้มีการอัดแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการปฏิบัติงาน

3.1 กล่าวนำ

การทดสอบครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษา พฤติกรรมการแอ่นตัว กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการอัดแรงแบบภายนอกเปรียบเทียบกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา และผลของแรงดึงในเส้นลวดอัดแรงที่มีขนาดต่างๆ กัน ซึ่งส่งผลต่อแนวโน้มของพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการอัดแรงภายนอก โดยแบ่งชุดการทดสอบออกเป็น 3 ชุด ได้แก่

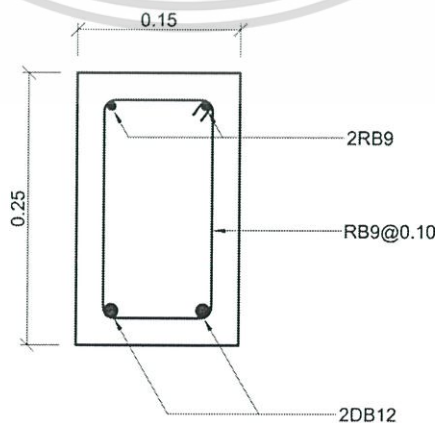
1. คานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา จำนวน 2 คาน
2. คานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงภายนอกใช้แรงดึง 1000 kg. จำนวน 2 คาน
3. คานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงภายนอกใช้แรงดึง 2000 kg. จำนวน 2 คาน

โดยชุดการทดสอบทั้ง 3 ชุดใช้คานขนาด 0.15 x 0.25 เมตร ยาว 2 เมตร เท่ากันทุกชุด ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนทั้งหมดในการปฏิบัติงาน

3.2 รายการออกแบบ

ก) การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีกำลัง (Reinforced Concrete Design)

วิเคราะห์หาโมเมนต์ที่คานขนาดหน้าตัด 0.15 x 0.25 เมตร ยาว 2 เมตร รับได้ โดยที่คอนกรีตมี $f'_c = 240$ ksc. เหล็กเสริม $f_y = 3000$ ksc. เหล็กเสริมรับแรงดึง DB12 2 เส้น



รูปที่ 3.1 ภาพหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กของคานตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำนวณ

$$\text{ที่ } f'_c = 240 \text{ ksc. } \beta_1 = 0.85$$

$$\text{หา } \rho_b = 0.85\beta_1 \left(\frac{f'_c}{f_y} \right) \left(\frac{6120}{6120 + f_y} \right)$$

$$\rho_b = 0.85(0.85) \left(\frac{240}{3000} \right) \left(\frac{6120}{6120 + 3000} \right)$$

$$\rho_b = 0.0388$$

$$\text{หา } \rho_{max} = 0.75\rho_b = 0.75(0.0388) = 0.0291$$

$$\text{หา } \rho_{min} = \frac{14}{f_y} = \frac{14}{3000} = 0.0047$$

$$\text{ตรวจสอบ } \rho \text{ ที่ใช้ } \rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{2 \times 1.13}{15 \times 22.5} = 0.0067$$

$$\text{หา } a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{2.26 \times 3000}{0.85 \times 240 \times 15} = 2.215 \text{ cm.}$$

$$\text{หาโมเมนต์ที่คานรับได้ } M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$M_n = 2.26 \times 3000 \times \left(22.5 - \frac{2.215}{2} \right) \times \frac{1}{100}$$

$$M_n = 1450.41 \text{ kg}\cdot\text{m.}$$

หาน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (กรณี Two-point load)

$$\frac{PL}{6} + \frac{\omega_{คาน} L^2}{8} = M_n$$

$$\frac{P \times 2}{6} + \frac{(2400 \times 0.15 \times 0.25) \times 2^2}{8} = 1450.4$$

$$P = 4215 \text{ kg.}$$

หาค่าการโก่งตัวสูงสุดที่บริเวณกึ่งกลางคาน

$$\text{จาก } \Delta = \frac{5ML^2}{48E_c I_e}$$

$$\text{โมเมนต์อินเนอร์เซียทั้งหมด } I_g = \frac{15 \times 25^3}{12} = 19531.25 \text{ cm}^4$$

$$\text{โมเมนต์ดัดเมื่อคานเริ่มร้าว } M_{cr} = \frac{2\sqrt{240} \times 19531.25}{\frac{25}{2} \times 1000} = 484.12 \text{ kg}\cdot\text{m.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งแนวแกนสะเทินเมื่อคานร้าว

$$\text{จาก } k = \sqrt{2\rho n + (\rho n)^2} - \rho n$$

$$\rho n = \frac{2 \times 1.131}{15 \times 22} \times \frac{2 \times 10^6}{15200 \sqrt{240}}$$

$$k = 0.296$$

ตำแหน่งแนวแกนสะเทิน $kd = 0.296 \times 22 = 6.51 \text{ cm.}$

โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดแตกร้าว

$$I_{cr} = \frac{15 \times 6.51^3}{3} + (9.05 \times 2.262 \times (22 - 6.51)^2)$$

$$I_{cr} = 6291.31 \text{ cm.}^4$$

โมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผล

$$I_e = \left(\frac{484.12}{1450} \right)^3 \times 19531.25 + \left(1 - \left(\frac{484.12}{1450} \right)^3 \right) \times 6291.31$$

$$I_e = 6805 \text{ cm.}^4$$

ระยะโก่งตัว $\Delta = \frac{5 \times 1430 \times 100 \times 200^2}{48 \times 15200 \times \sqrt{240} \times 6805} = 0.372 \text{ cm.}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข) การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต (Mixed design)

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ Portland Type I

กำลังคอนกรีตที่ใช้ 240 ksc. ค่าการยุบตัว 10 cm. ขนาดมวลรวมโตสุด 40 mm.

กำลังคอนกรีต 240 ksc. ได้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) 0.636

ที่ค่าการยุบตัว 10 cm. มวล ขนาดมวลรวมโตสุด 40 mm. ใช้ปริมาณน้ำ 175 kg./m^3 .

ซีเมนต์ที่ใช้ $175/0.636 = 275.16 \text{ kg./m}^3$.

ค่า Fineness Modulus (F.M.) 2.46 ได้ค่าปริมาตรหินต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคอนกรีต 0.748

คิดเป็นน้ำหนักมวลรวมหยาบ $= 0.748 \times 1750 = 1309 \text{ kg./m}^3$.

ได้น้ำหนักมวลรวมละเอียด $= 2420 - 1309 - 175 - 276.16 = 659.84 \text{ kg./m}^3$.

ดังนั้นจะได้ปริมาณส่วนผสมที่ใช้สำหรับปริมาตรต่อ 1 m^3 .

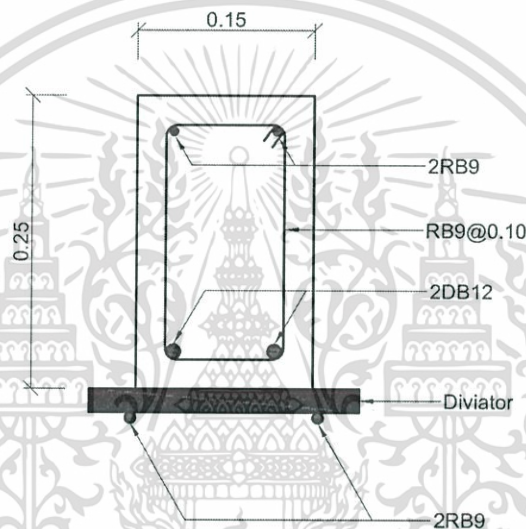
- ปูน 289.74 kg.
- น้ำ 190 lit.
- ทราย 808.67 kg.
- หิน 1080 kg.

ค) รายละเอียดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการอัดแรงภายนอก

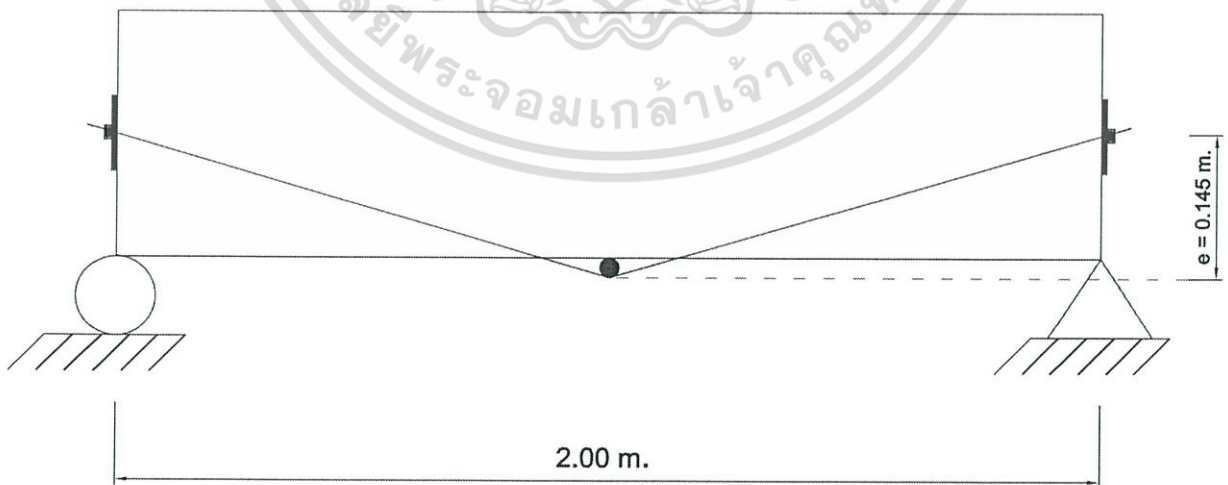
คานตัวอย่างที่นำมาติดตั้งการอัดแรงแบบภายนอกมี 2 ชุดด้วยกันคือ

- คานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงภายนอกใช้แรงดึง 1000 kg. จำนวน 2 คาน
- คานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงภายนอกใช้แรงดึง 2000 kg. จำนวน 2 คาน

คานทั้งสองชุดมีลักษณะการวางแนวของเส้นลวดอัดแรง และติดตั้ง ดิวไอเตอร์ให้ได้ระยะเยื้องศูนย์กลางที่กึ่งกลางคานเท่ากับ 14.5 cm. เหมือนกันทั้ง 2 ชุด ดังรูปที่ 3.3 เปลี่ยนการใช้ลวดอัดแรงเป็นเหล็กเส้นไม่อัดแรง RB 9 SR24 เนื่องจากความสะดวกในการทดสอบ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ภาพหน้าตัด ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงภายนอก



รูปที่ 3.3 การวางแนวของเส้นลวดอัดแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับทำการทดสอบ

- 1) วัสดุคอนกรีตตาม Mixed design
- 2) เครื่องไม่ผสมคอนกรีต
- 3) ชุดทดสอบค่าการยุบตัว
- 4) เหล็ก DB12 SD30 ยาว 2.25 เมตร จำนวน 12 เส้น
- 5) เหล็ก RB9 SR24 ยาว 2.25 เมตร จำนวน 12 เส้น
- 6) เหล็กปลอก RB6 SR24
- 7) เหล็กเส้น RB9 SR24 สำหรับใช้แทนลวดอัดแรง
- 8) แบบหล่อคานสำหรับขนาดคาน 0.15 x 0.25 เมตร ยาว 2 เมตร
- 9) อุปกรณ์สำหรับติดตั้งลวดอัดแรงภายนอก
- 10) พลาสติก สำหรับบ่มคาน
- 11) เพรทเหล็กทดสอบคาน
- 12) Load cell
- 13) เครื่องอ่านค่าน้ำหนักแบบดิจิตอล
- 14) Hydraulic Jack
- 15) Strain gauge
- 16) Data logger
- 17) Dial gauge

3.4 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

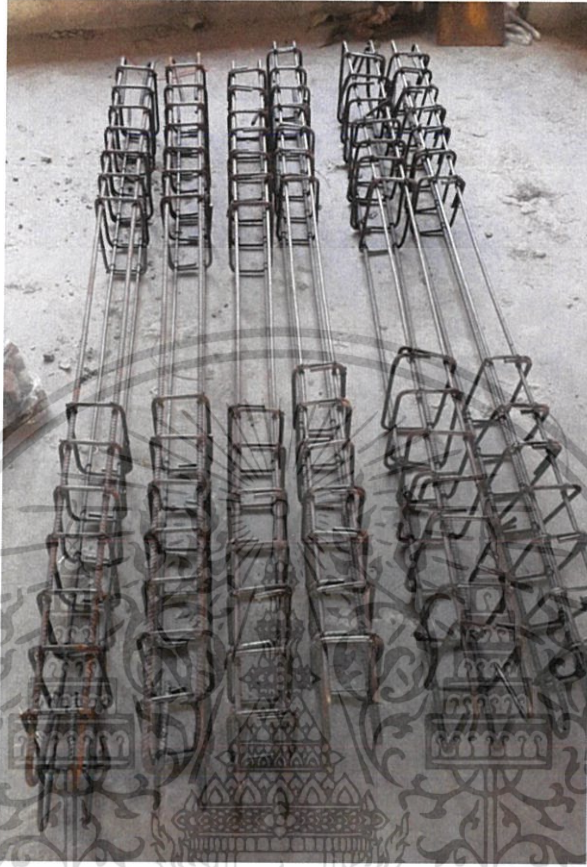
- 1) เตรียมแบบหล่อคอนกรีต



รูปที่ 3.4.1 ประกอบแบบหล่อคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) เตรียมโครงสร้างเหล็กเสริม ประกอบด้วย เหล็กแกน DB12 2 เส้น RB9 2 เส้น และเหล็กปลอก RB6 @ 10 cm



รูปที่ 3.4.2 โครงสร้างเหล็กเสริม

- 3) นำโครงสร้างเหล็กเสริมมาใส่แบบหล่อคอนกรีต



รูปที่ 3.4.3 นำโครงสร้างเหล็กเสริมมาใส่แบบหล่อคอนกรีตพร้อมกันแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่สัญญาหรือเงื่อนไขใดๆ ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) เตรียมส่วนผสมคอนกรีต แล้วทำการผสมส่วนผสมทั้งหมดตาม Mixed design และทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต ซึ่งต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 10 ± 2.5 cm



รูปที่ 3.4.4 ตรวจสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสม

- 5) เทคอนกรีตลงแบบหล่อ



รูปที่ 3.4.5 เทคอนกรีตลงแบบหล่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 6) เก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบกำลังของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM จำนวน 6 ลูก กดทดสอบที่ 7 และ 16 วัน



รูปที่ 3.4.6 ตัวอย่างคอนกรีตสำหรับทดสอบกำลังของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM จำนวน 6 ลูก กดทดสอบที่ 7 และ 16 วัน

- 7) ทำการบ่มตัวอย่างคานคอนกรีตในแบบหล่อ



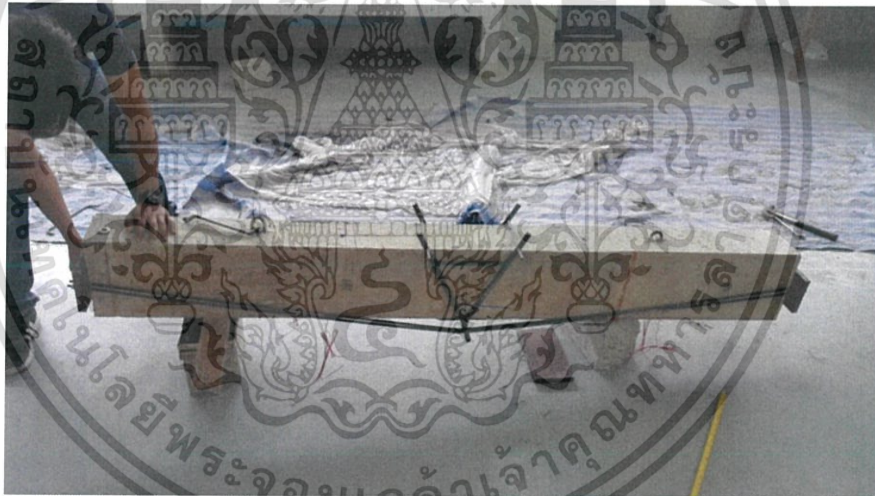
รูปที่ 3.4.7.1 บ่มคานคอนกรีตตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4.7.2 บ่มตัวอย่างคอนกรีตสำหรับทดสอบกำลังของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM

- 8) เมื่อทำการบ่มคานคอนกรีตเสริมเหล็กครบ 16 วัน นำคานมาติดตั้งลวดเสริมอัดแรงภายนอก



รูปที่ 3.4.8 คานตัวอย่างที่ทำการติดตั้งลวดเสริมอัดแรงภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ขั้นตอนทำการทดสอบ

1) แบ่งชุดการทดสอบออกเป็น 3 ชุด ได้แก่

- คานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา จำนวน 2 คาน
- คานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงภายนอก อัดแรงที่ขนาด 1000 kg. จำนวน 2 คาน
- คานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงภายนอก อัดแรงที่ขนาด 2000 kg. จำนวน 2 คาน



รูปที่ 3.5.1 ตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา



รูปที่ 3.5.2 คานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงภายนอก อัดแรงที่ขนาด 1000 kg.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5.3 คานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงภายนอก อัดแรงที่ขนาด 2000 kg.

2) ติดตั้งการอัดแรงภายนอก

- ติดตั้งแผ่นเหล็กที่ปลายคานทั้ง 2 ด้านสำหรับยึดรั้งลวดที่จะทำการอัดแรง



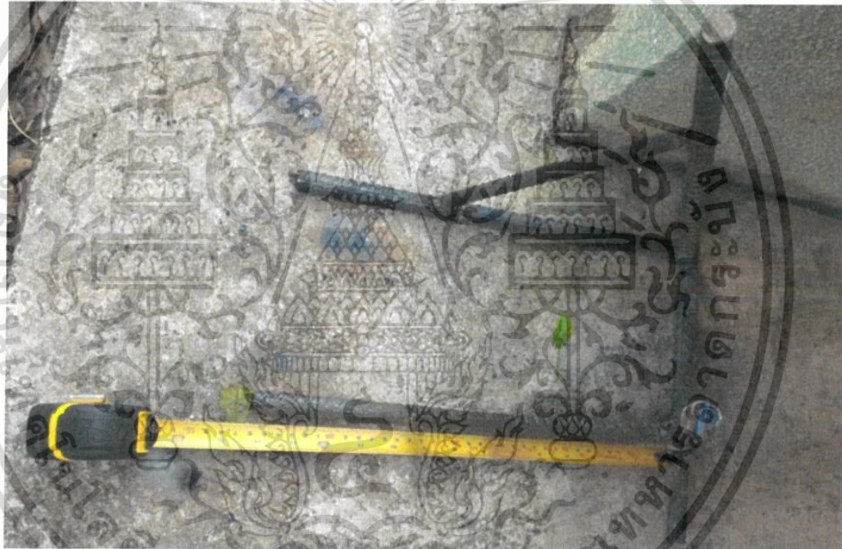
รูปที่ 3.5.4 เจาะรูสำหรับติดตั้งแผ่นเหล็กที่ปลายคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5.5 ติดตั้งแผ่นเหล็กที่ปลายคาน

- ติดตั้ง ดิวเอดอร์ (deviator) ที่บริเวณกึ่งกลางคาน

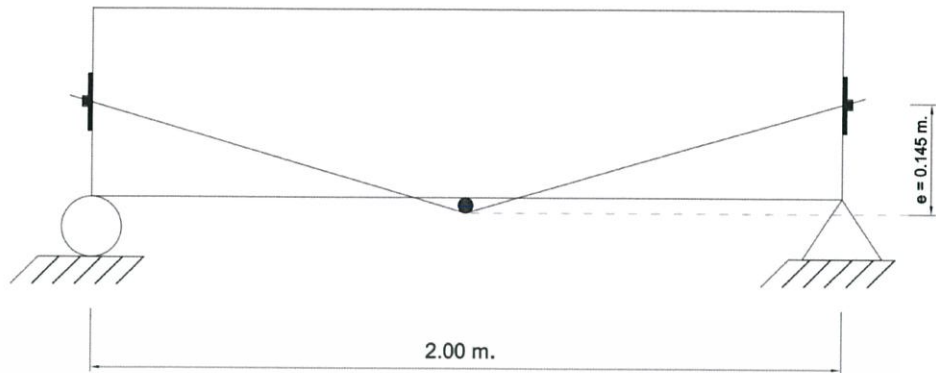


รูปที่ 3.5.6 ติดตั้งแผ่นเหล็กที่ปลายคาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการรูปที่ 3.5.7 ติดตั้งแผ่นเหล็กที่ปลายคาน ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ติดตั้งลวดอัดแรงตามแนวโปรไฟล์ที่กำหนดไว้



รูปที่ 3.5.8 แนวของเส้นลวดอัดแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงภายนอก

- ติดตั้ง Strain gauge ที่ลวดอัดแรงสำหรับวัดค่าการยืดตัวของลวดอัดแรง



รูปที่ 3.5.9 ติดตั้ง Strain gauge ที่ลวดอัดแรง

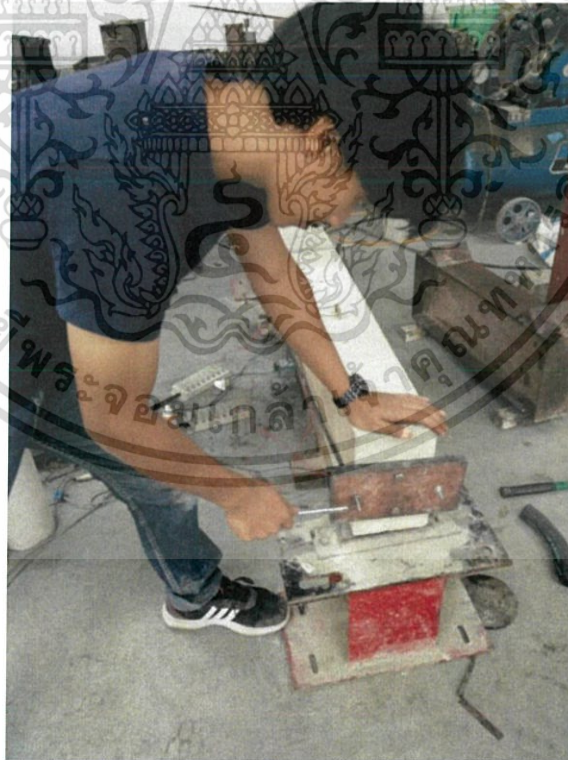
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ติดตั้ง Dial gauge ที่บริเวณกึ่งกลางคาน และที่ระยะ $L/4$ ของคานสำหรับวัดค่าการโก่งตัวของคาน



รูปที่ 3.5.10 ติดตั้ง Dial gauge ที่บริเวณกึ่งกลางคาน และที่ระยะ $L/4$ ของคาน

- ทำการอัดแรงลวดทั้งสองข้าง ด้วยขนาดแรงที่กำหนดไว้



รูปที่ 3.5.11 ทำการอัดแรงลวดทั้งสองข้าง ด้วยขนาดแรงที่กำหนดไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) กดทดสอบคานทั้ง 3 ชุด จนกว่าคานจะวิบัติ แล้วบันทึกผลค่าแรงกด



รูปที่ 3.5.12 กดทดสอบคาน

- 4) วัดค่าการโก่งตัวของคานในขณะที่ทำการกดทดสอบคาน



รูปที่ 3.5.13 ค่าแรงกดและค่าการโก่งตัวของคานขณะที่ทำการกดทดสอบ

- 5) นำค่าที่ได้มาวิเคราะห์ผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

4.1 กล่าวนำ

จากการทดสอบคานตัวอย่างทั้ง 6 คาน ได้ทำการบันทึกค่าน้ำหนักบรรทุก ค่าการโก่งตัว และค่ากำลังของคอนกรีตตัวอย่างที่ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM จำนวน 6 ลูก ได้ผลการทดสอบดังนี้

4.2 ผลการทดสอบค่ากำลังของคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอก

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบค่ากำลังของคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอกที่ 7 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	กำลังอัด (kN)	หน่วย แรงอัด (ksc)
	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)			
1	15.00	29.80	176.71	333.61	192.44
2	14.98	30.00	176.24	342.32	197.99
3	15.10	29.80	179.08	316.62	180.23
เฉลี่ย	15.03	29.87	177.35	330.85	190.22

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบค่ากำลังของคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอกที่ 16 วัน

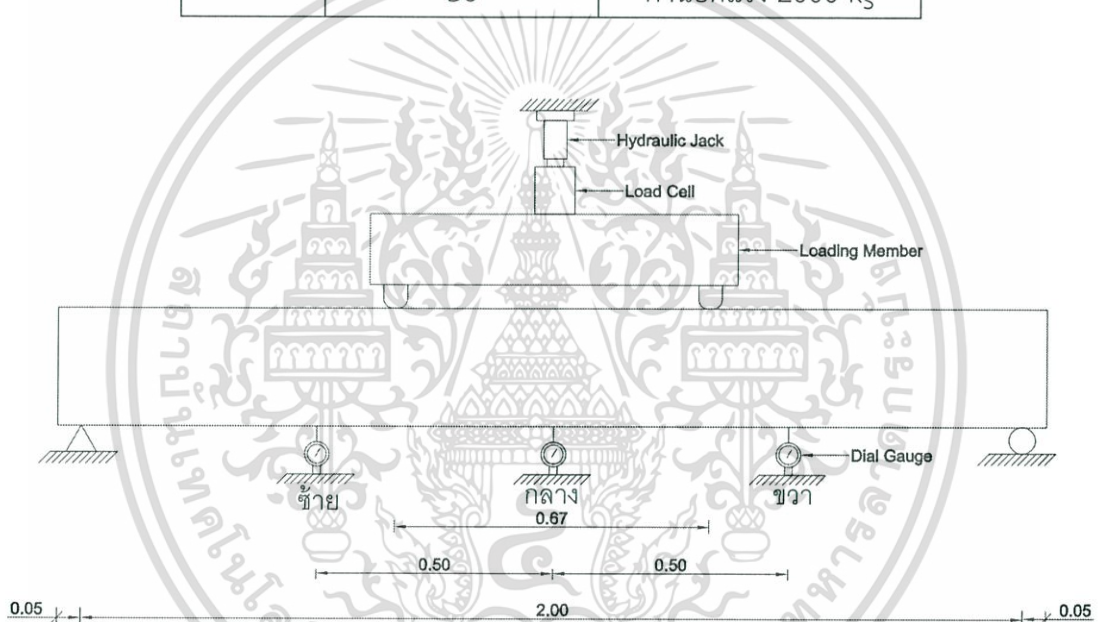
No.	ขนาด		พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	กำลังอัด (kN)	หน่วย แรงอัด (ksc)
	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)			
1	14.98	29.60	176.24	430.92	249.24
2	15.00	29.80	176.71	429.36	247.67
3	14.96	30.00	175.77	331.37	192.17
เฉลี่ย	14.98	29.80	176.24	397.22	229.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดสอบคาน

ตารางที่ 4.3 รายละเอียดคานตัวอย่าง

ประเภท	คาน	รายละเอียด
1	B1	คานคอนกรีตเสริมเหล็ก
	B4	คานคอนกรีตเสริมเหล็ก
2	B2	คานอัดแรง 1000 kg
	B5	คานอัดแรง 1000 kg
3	B3	คานอัดแรง 2000 kg
	B6	คานอัดแรง 2000 kg



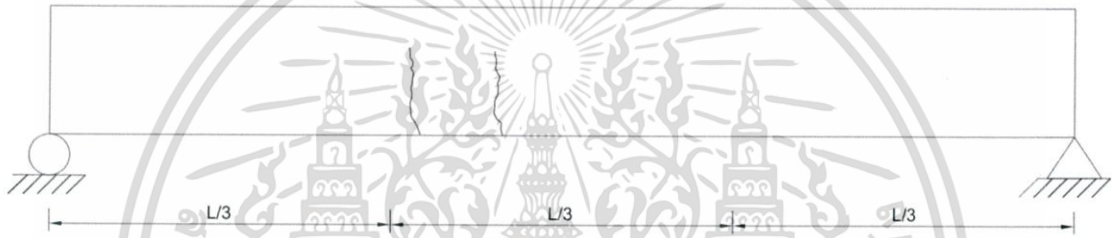
รูปที่ 4.1 แสดงรายละเอียดการติดตั้งชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบคาน B1

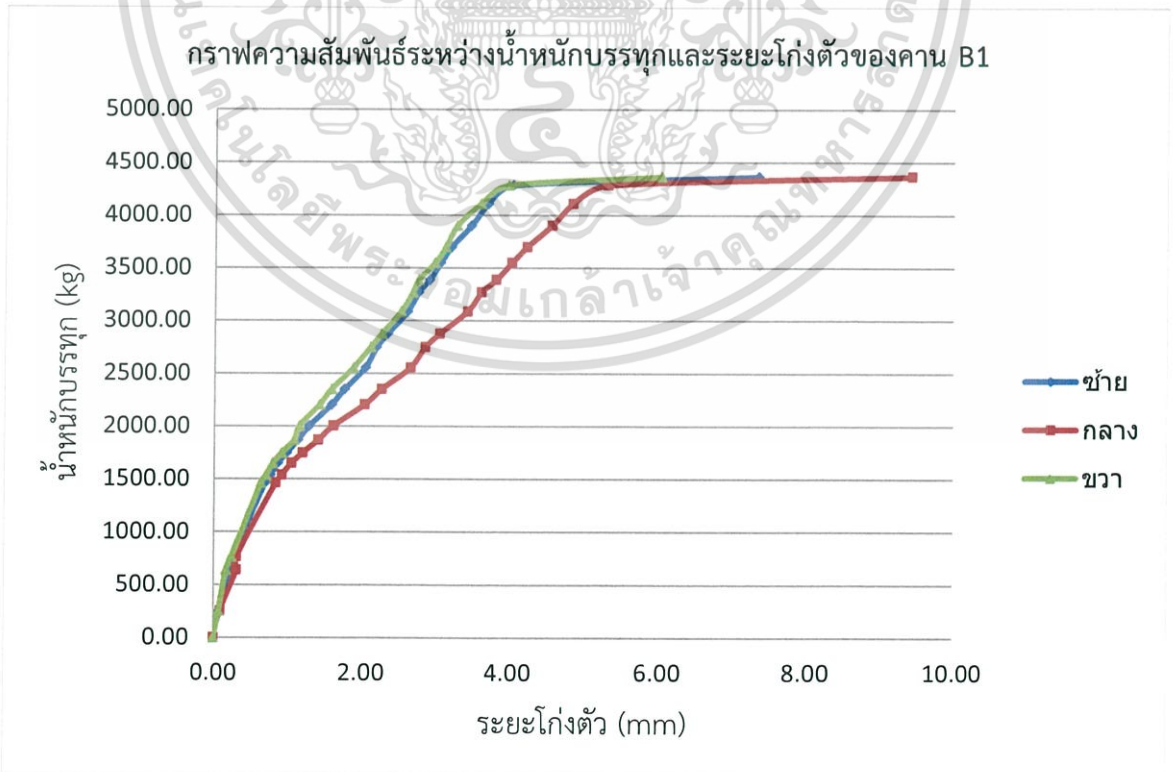
น้ำหนักบรรทุก (kN)	น้ำหนักบรรทุก (kg)	ระยะโก่งตัว (mm)		
		ซ้าย	กลาง	ขวา
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.50	254.84	0.08	0.09	0.07
6.27	639.14	0.26	0.31	0.17
7.51	765.55	0.27	0.31	0.24
14.38	1465.85	0.70	0.84	0.64
15.10	1539.25	0.77	0.92	0.71
16.19	1650.36	0.87	1.05	0.80
17.16	1749.24	0.99	1.20	0.92
18.35	1870.54	1.14	1.41	1.09
19.66	2004.08	1.29	1.61	1.16
21.64	2205.91	1.59	2.03	1.43
23.07	2351.68	1.76	2.26	1.59
25.07	2555.56	2.04	2.65	1.88
26.98	2750.25	2.19	2.85	2.11
28.24	2878.70	2.34	3.05	2.26
30.30	3088.69	2.61	3.43	2.52
32.09	3271.15	2.76	3.62	2.68
33.24	3388.38	2.91	3.82	2.76
34.82	3549.44	3.06	4.03	2.98
36.30	3700.31	3.21	4.24	3.13
38.30	3904.18	3.48	4.57	3.29
40.33	4111.11	3.71	4.85	3.61
42.04	4285.42	4.05	5.31	3.99
42.85	4367.99	7.35	9.42	6.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ภาพแสดงรอยแตกร้าวของคาน B1

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งตัวของคาน B1



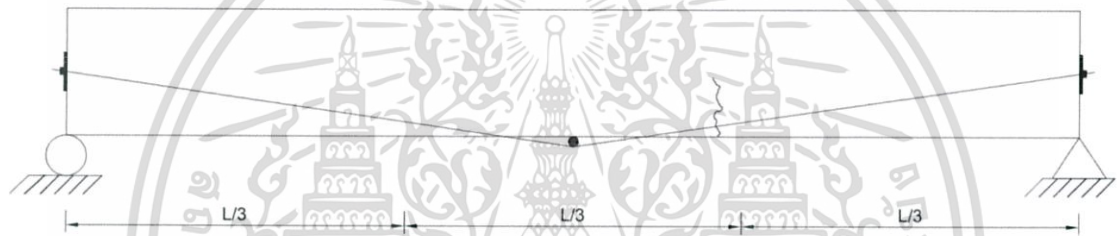
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งตัวของคาน B1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

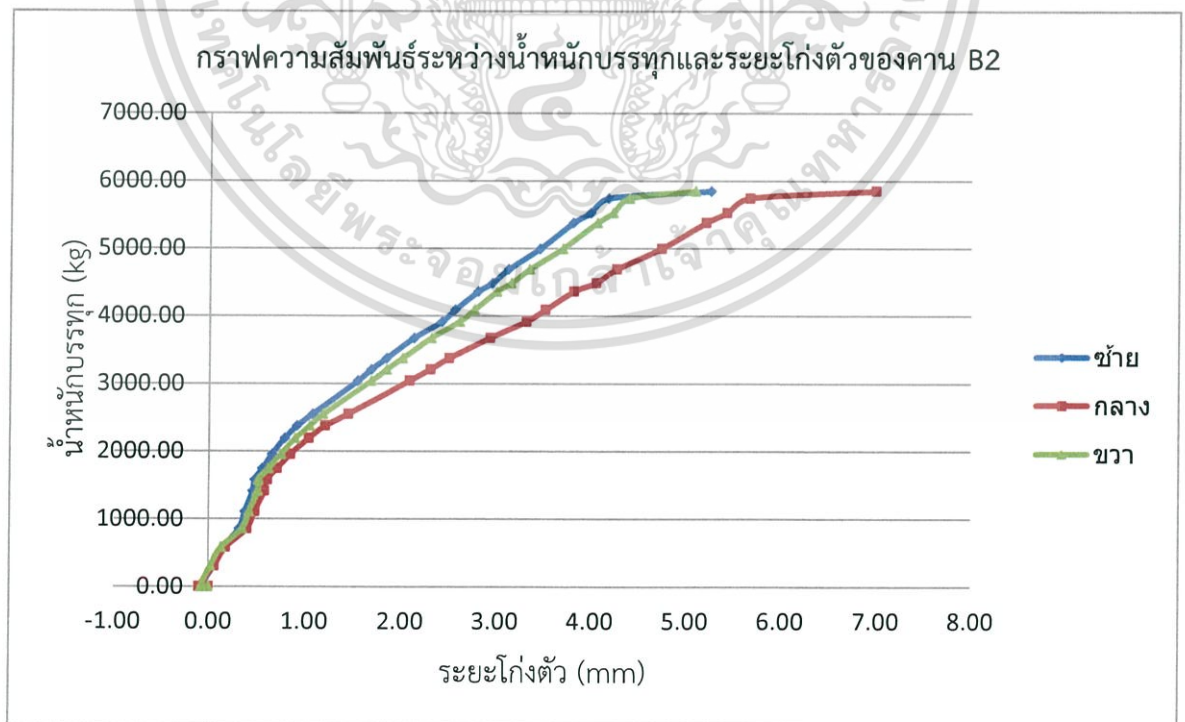
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบคาน B2

น้ำหนักบรรทุก (kN)	น้ำหนักบรรทุก (kg)	ระยะโก่งตัว (mm)		
		ซ้าย	กลาง	ขวา
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	-0.08	-0.10	-0.08
2.97	302.75	0.06	0.06	0.02
5.67	577.98	0.15	0.18	0.13
8.39	855.25	0.32	0.40	0.35
10.89	1110.09	0.38	0.48	0.42
13.84	1410.81	0.46	0.58	0.51
15.51	1581.04	0.48	0.61	0.52
17.11	1744.14	0.56	0.71	0.62
19.19	1956.17	0.66	0.85	0.75
21.50	2191.64	0.79	1.04	0.90
23.31	2376.15	0.92	1.21	1.05
25.01	2549.44	1.08	1.45	1.19
29.83	3040.77	1.55	2.09	1.69
31.49	3209.99	1.69	2.31	1.85
33.14	3378.19	1.85	2.51	2.02
36.06	3675.84	2.14	2.94	2.32
38.44	3918.45	2.43	3.32	2.62
40.15	4092.76	2.57	3.52	2.77
42.80	4362.90	2.81	3.82	3.01
44.05	4490.32	2.96	4.05	3.16
46.02	4691.13	3.13	4.27	3.35
49.03	4997.96	3.46	4.74	3.70
52.78	5380.22	3.81	5.21	4.06
54.24	5529.05	3.99	5.43	4.23
56.35	5744.14	4.18	5.67	4.40
57.40	5851.17	5.26	6.99	5.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ภาพแสดงรอยแตกร้าวของคาน B2



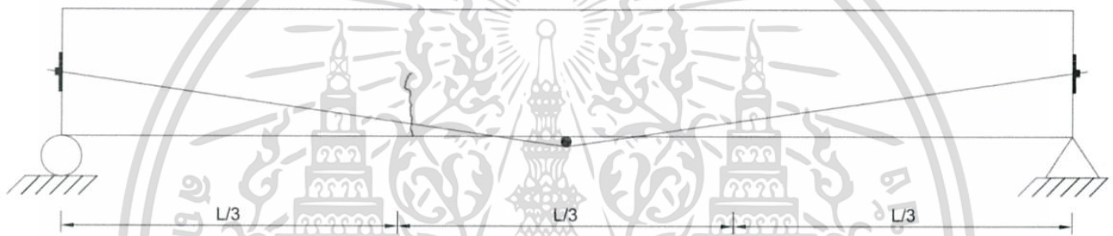
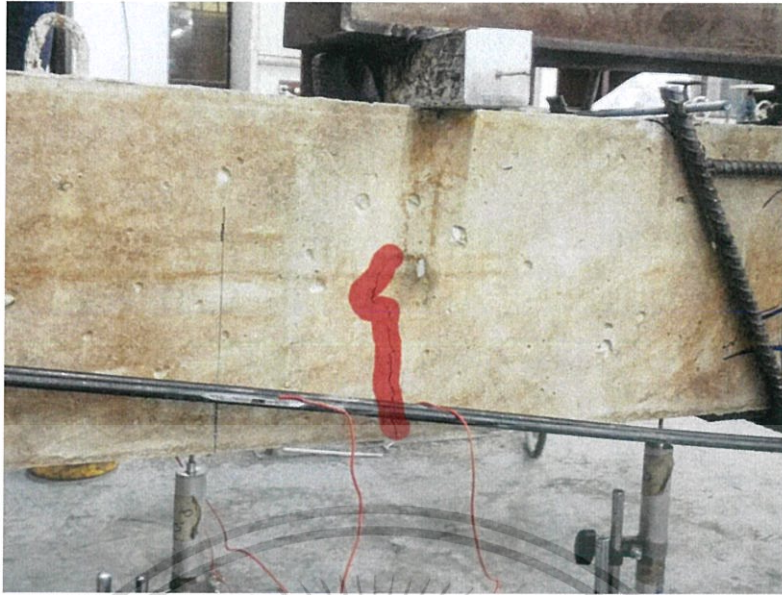
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งตัวของคาน B2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

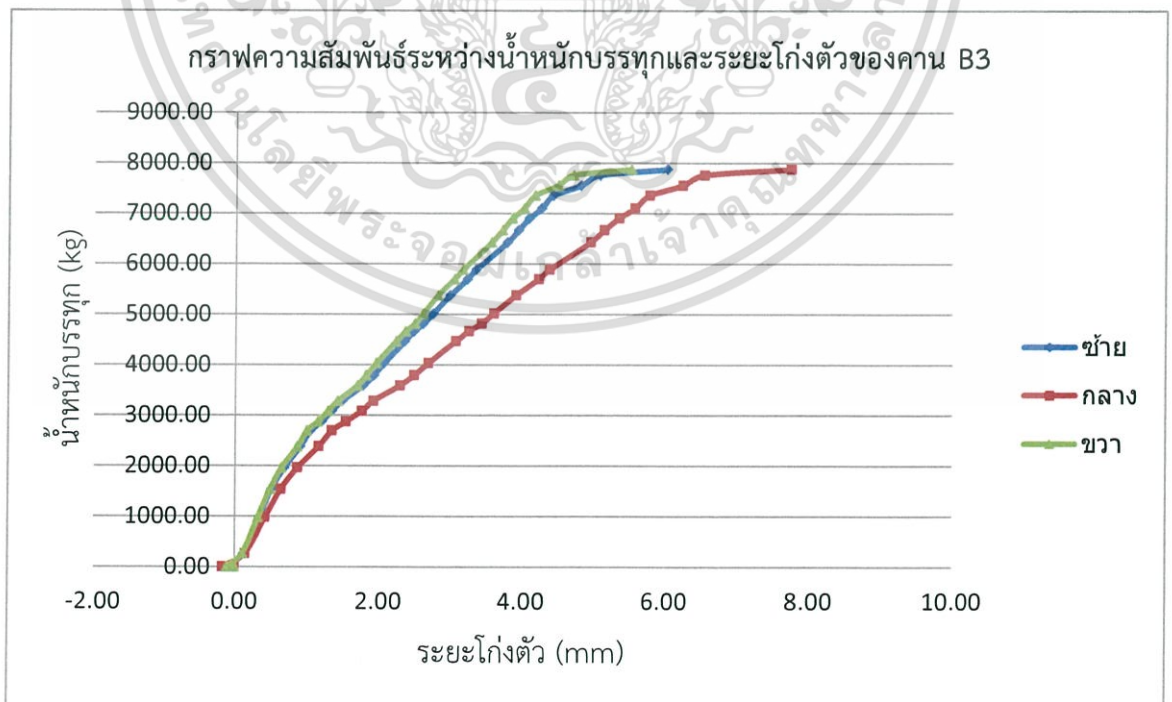
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบคาน B3

น้ำหนักบรรทุก (kN)	น้ำหนักบรรทุก (kg)	ระยะโก่งตัว (mm)		
		ซ้าย	กลาง	ขวา
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	-0.11	-0.17	-0.11
2.57	261.98	0.13	0.15	0.11
9.61	979.61	0.35	0.43	0.33
15.07	1536.19	0.52	0.65	0.50
19.24	1961.26	0.70	0.88	0.66
23.36	2381.24	0.92	1.17	0.88
26.44	2695.21	1.06	1.35	1.01
28.17	2871.56	1.21	1.54	1.16
30.25	3083.59	1.35	1.76	1.30
32.20	3282.36	1.49	1.92	1.43
35.20	3588.18	1.78	2.29	1.70
37.18	3790.01	1.93	2.49	1.82
39.57	4033.64	2.07	2.69	1.96
43.83	4467.89	2.36	3.08	2.24
45.77	4665.65	2.49	3.26	2.37
47.26	4817.53	2.62	3.44	2.50
49.23	5018.35	2.76	3.61	2.62
52.77	5379.20	3.00	3.92	2.83
55.91	5699.29	3.24	4.23	3.06
57.74	5885.83	3.36	4.38	3.18
63.10	6432.21	3.80	4.95	3.58
65.45	6671.76	3.95	5.14	3.73
67.79	6910.30	4.10	5.35	3.87
69.71	7106.01	4.27	5.57	4.03
72.21	7360.86	4.43	5.78	4.18
74.15	7558.61	4.81	6.25	4.50
76.17	7764.53	5.08	6.55	4.71
77.31	7880.73	6.03	7.75	5.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ภาพแสดงรอยแตกร้าวของคาน B3



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งตัวของคาน B3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

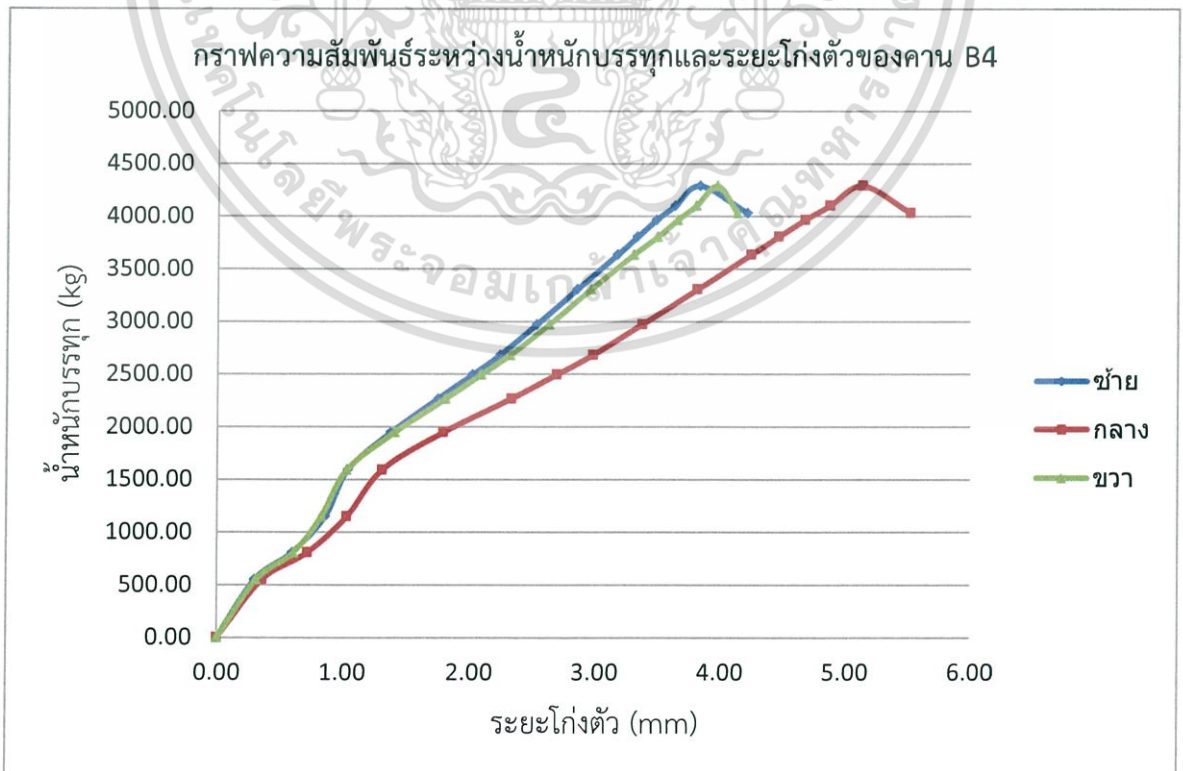
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบคาน B4

น้ำหนักบรรทุก (kN)	น้ำหนักบรรทุก (kg)	ระยะโก่งตัว (mm)		
		ซ้าย	กลาง	ขวา
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.40	550.46	0.30	0.36	0.31
7.92	807.34	0.60	0.72	0.61
11.27	1148.83	0.86	1.03	0.83
15.61	1591.23	1.04	1.31	1.03
19.12	1949.03	1.38	1.79	1.41
22.26	2269.11	1.75	2.33	1.81
24.49	2496.43	2.02	2.69	2.09
26.33	2684.00	2.24	2.98	2.32
29.17	2973.50	2.53	3.37	2.63
32.43	3305.81	2.85	3.81	2.96
35.66	3635.07	3.17	4.24	3.30
37.34	3806.32	3.33	4.46	3.49
38.91	3966.36	3.48	4.67	3.65
40.25	4102.96	3.63	4.87	3.80
42.11	4292.56	3.83	5.13	3.97
39.58	4034.66	4.21	5.51	4.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ภาพแสดงรอยแตกร้าวของคาน B4

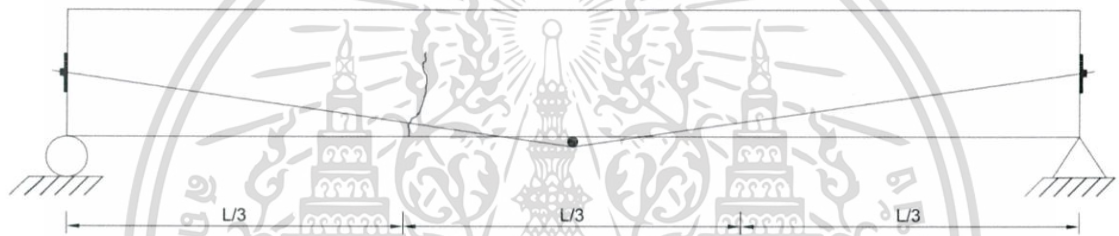
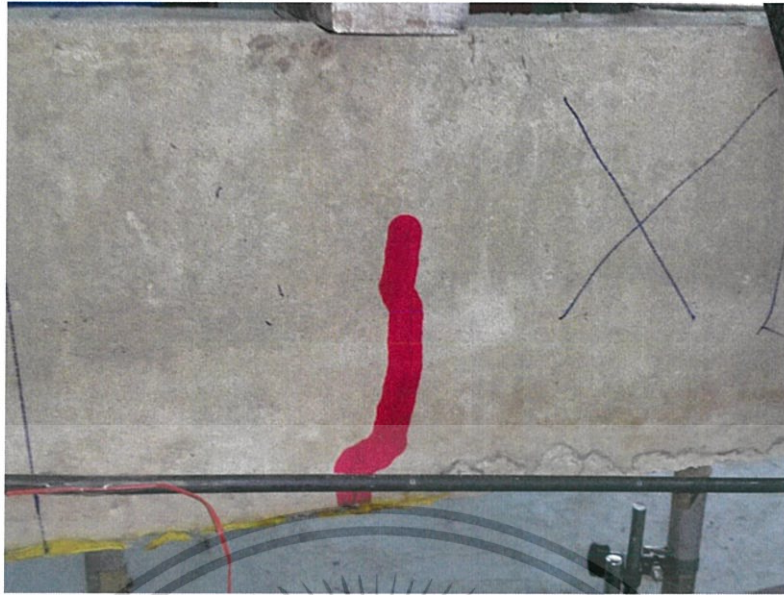


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งตัวของคาน B4 ซึ่งเป็นการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

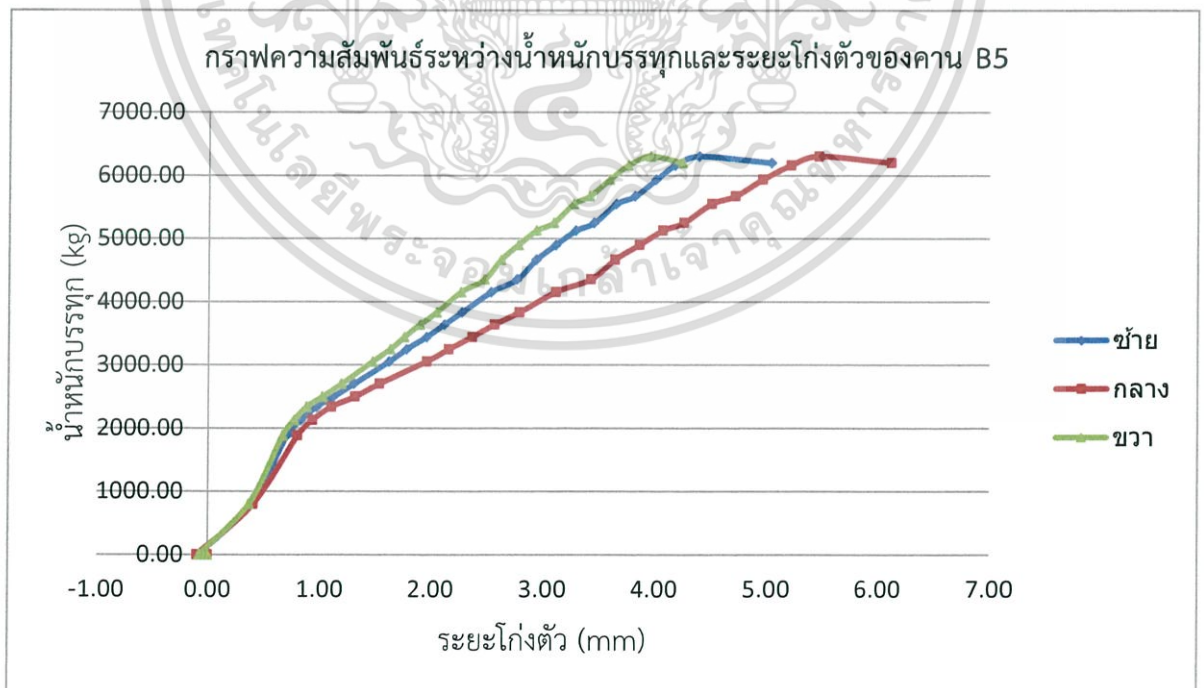
ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบคาน B5

น้ำหนักบรรทุก (kN)	น้ำหนักบรรทุก (kg)	ระยะโก่งตัว (mm)		
		ซ้าย	กลาง	ขวา
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	-0.08	-0.10	-0.08
7.87	802.24	0.39	0.41	0.37
18.50	1885.83	0.71	0.80	0.67
20.89	2129.46	0.83	0.93	0.77
22.94	2338.43	0.97	1.10	0.88
24.52	2499.49	1.12	1.31	1.02
26.51	2702.34	1.30	1.53	1.19
29.97	3055.05	1.62	1.96	1.47
31.89	3250.76	1.78	2.16	1.63
33.78	3443.43	1.96	2.37	1.76
35.71	3640.16	2.12	2.57	1.90
37.61	3833.84	2.28	2.79	2.05
40.75	4153.92	2.54	3.11	2.27
42.73	4355.76	2.77	3.42	2.48
45.80	4668.71	2.94	3.64	2.63
48.10	4903.16	3.11	3.86	2.78
50.32	5129.46	3.29	4.07	2.94
51.52	5251.78	3.45	4.26	3.09
54.47	5552.50	3.65	4.51	3.27
55.67	5674.82	3.82	4.72	3.41
58.26	5938.84	4.01	4.96	3.59
60.49	6166.16	4.18	5.21	3.76
61.87	6306.83	4.40	5.46	3.96
60.87	6204.89	5.04	6.12	4.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ภาพแสดงรอยแตกร้าวของคาน B5



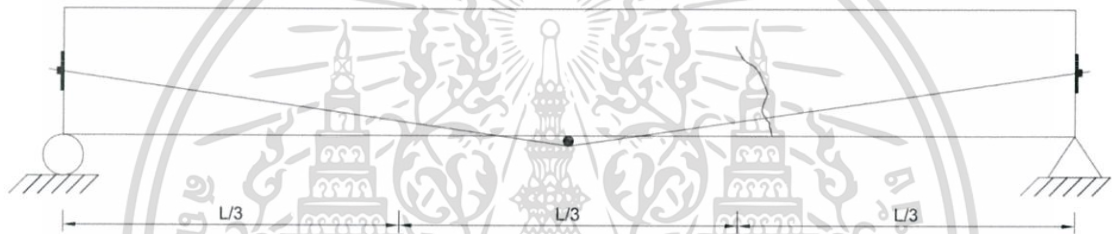
รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งตัวของคาน B5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

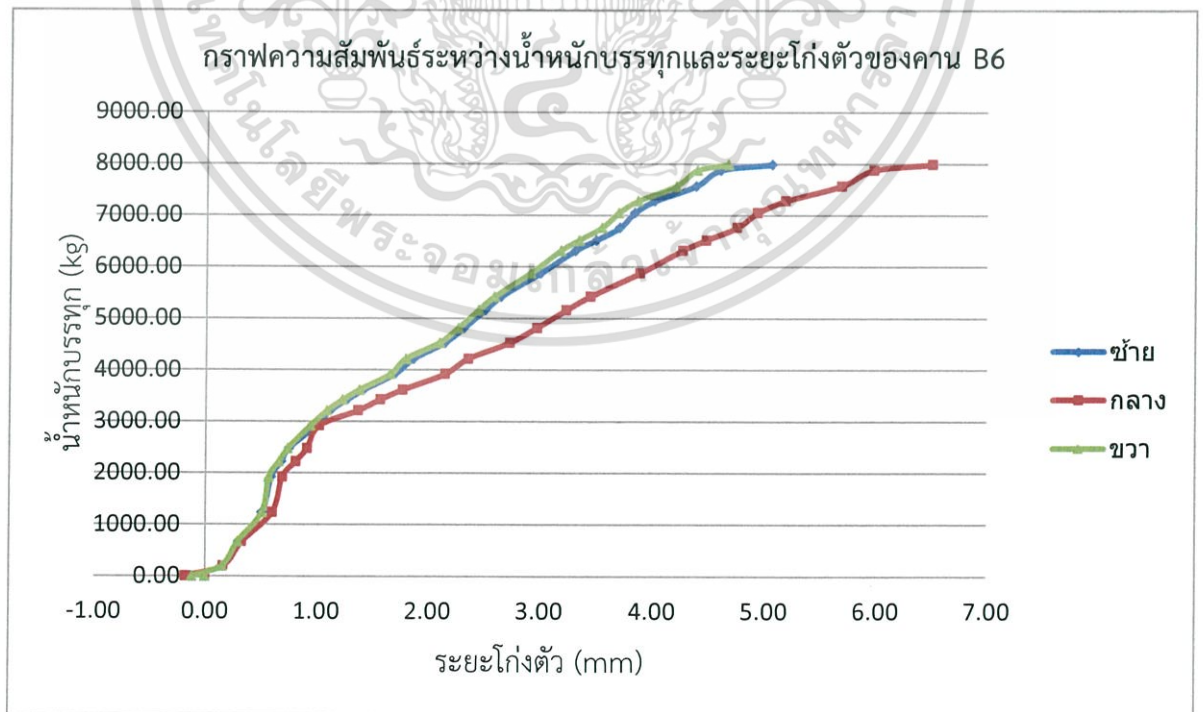
ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบคาน B6

น้ำหนักบรรทุก (kN)	น้ำหนักบรรทุก (kg)	ระยะโก่งตัว (mm)		
		ซ้าย	กลาง	ขวา
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	-0.13	-0.18	-0.12
1.93	196.74	0.15	0.16	0.15
6.54	666.67	0.30	0.33	0.29
12.15	1238.53	0.51	0.60	0.51
18.86	1922.53	0.59	0.69	0.57
21.80	2222.22	0.68	0.81	0.66
24.32	2479.10	0.75	0.91	0.74
28.63	2918.45	0.99	1.02	0.94
31.51	3212.03	1.12	1.37	1.09
33.58	3423.04	1.27	1.57	1.23
35.44	3612.64	1.42	1.77	1.38
38.47	3921.51	1.70	2.15	1.66
41.38	4218.14	1.87	2.36	1.80
44.42	4528.03	2.15	2.73	2.10
47.26	4817.53	2.32	2.97	2.27
50.64	5162.08	2.51	3.23	2.45
53.22	5425.08	2.65	3.44	2.59
57.67	5878.70	3.00	3.88	2.91
61.98	6318.04	3.31	4.26	3.18
63.95	6518.86	3.49	4.47	3.34
66.36	6764.53	3.70	4.75	3.54
69.16	7049.95	3.83	4.93	3.69
71.43	7281.35	4.01	5.18	3.86
74.27	7570.85	4.38	5.68	4.20
77.31	7880.73	4.60	5.97	4.39
78.42	7993.88	5.06	6.50	4.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ภาพแสดงรอยแตกร้าวของคาน B6



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งตัวของคาน B6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

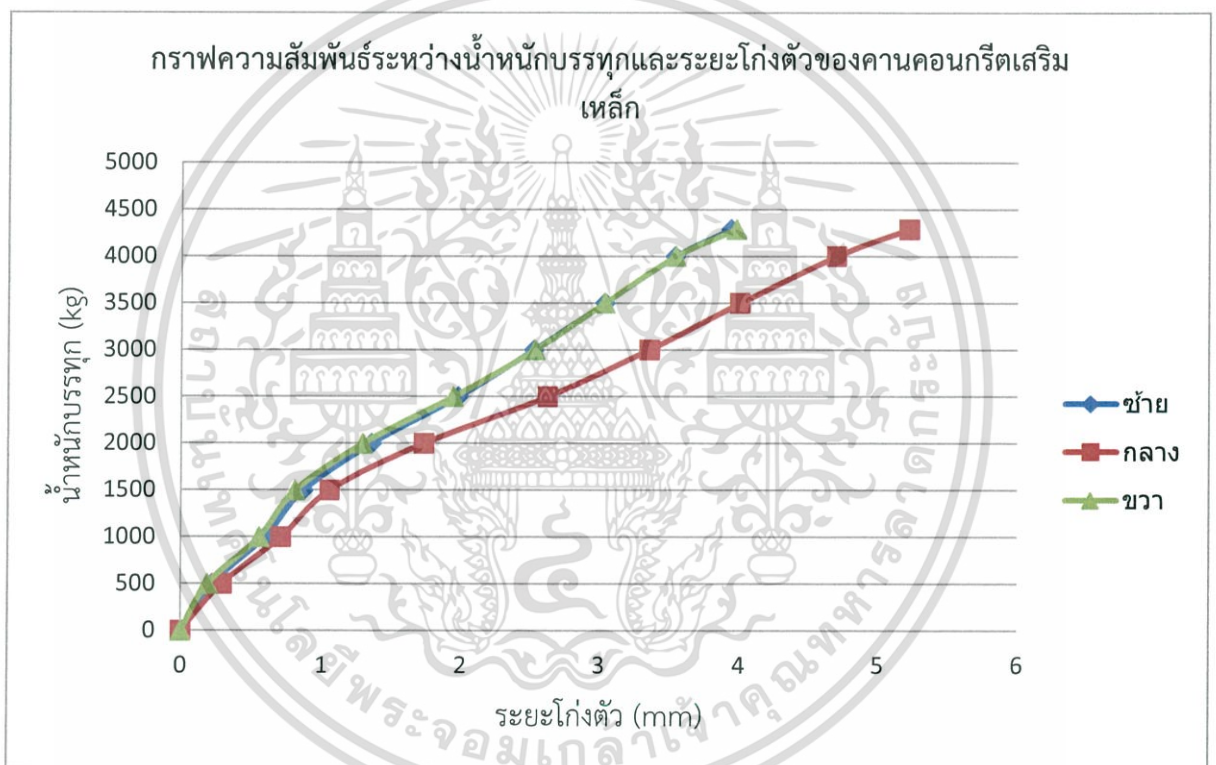
4.3 การวิเคราะห์ผล

จากการทดสอบคานทั้ง 6 ตัวอย่างนำมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งตัวเฉลี่ย ของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก คานที่อัดแรงภายนอก 1000 kg. และ 2000 kg. ได้ดังรูปที่ 4.3.1, 4.3.2 และ 4.3.3

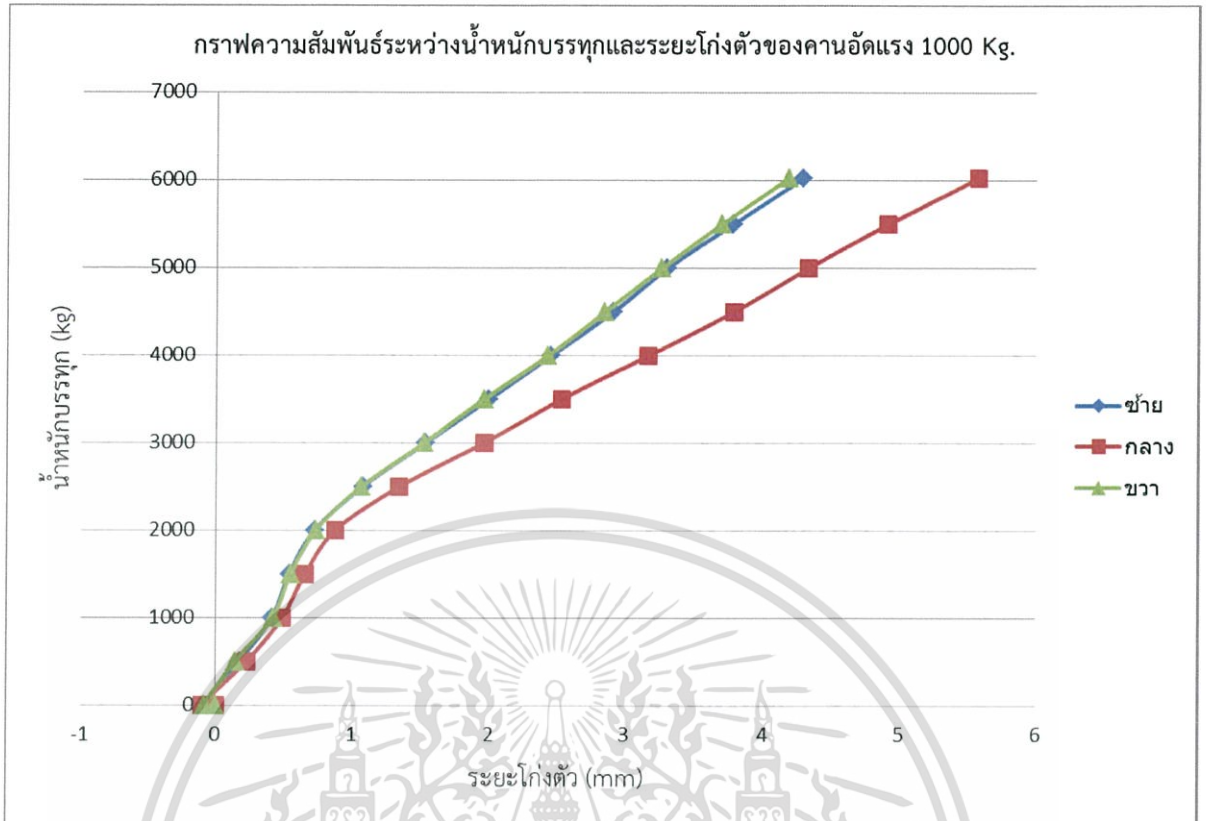
โดย รูปที่ 4.3.1 เป็นค่าเฉลี่ยผลการทดสอบของคาน B1 กับ B4

รูปที่ 4.3.2 เป็นค่าเฉลี่ยผลการทดสอบของคาน B2 กับ B5

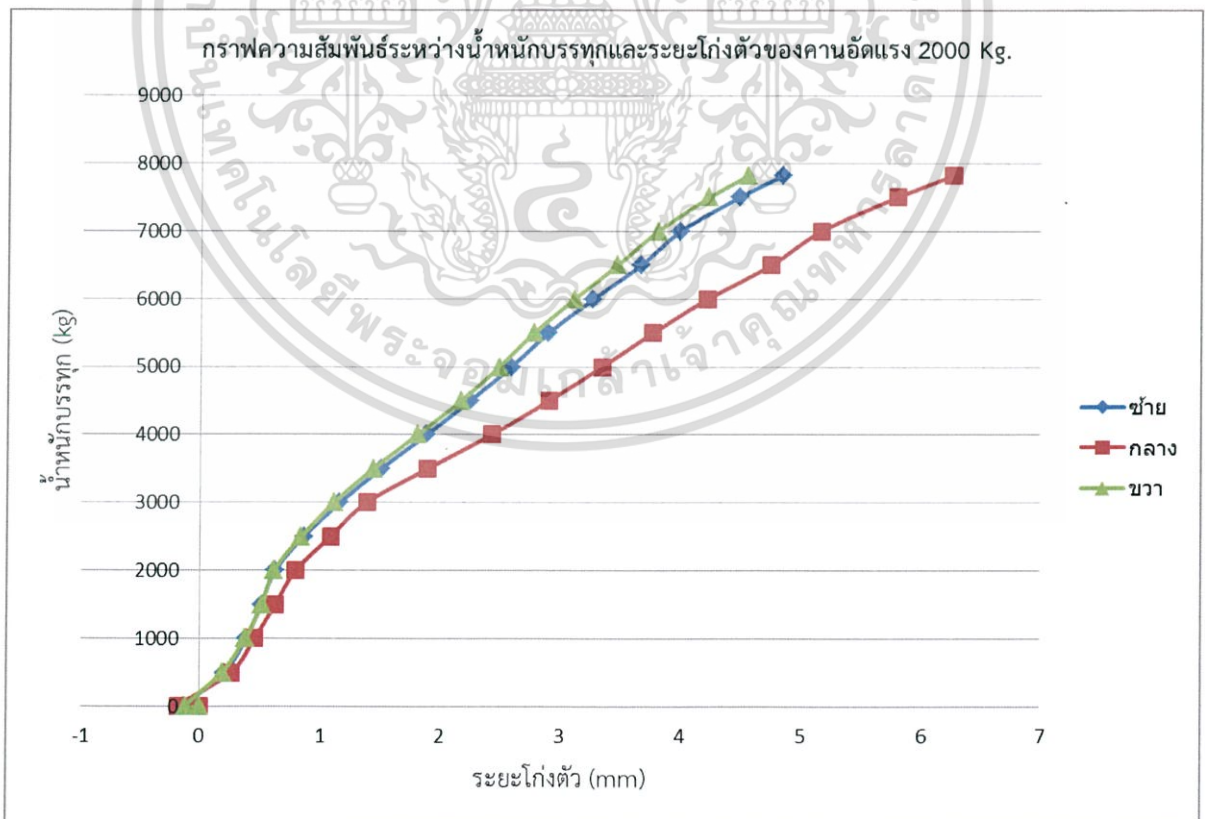
รูปที่ 4.3.3 เป็นค่าเฉลี่ยผลการทดสอบของคาน B3 กับ B6



รูปที่ 4.3.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก



รูปที่ 4.3.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งตัวของคานอัดแรง 1000 Kg.

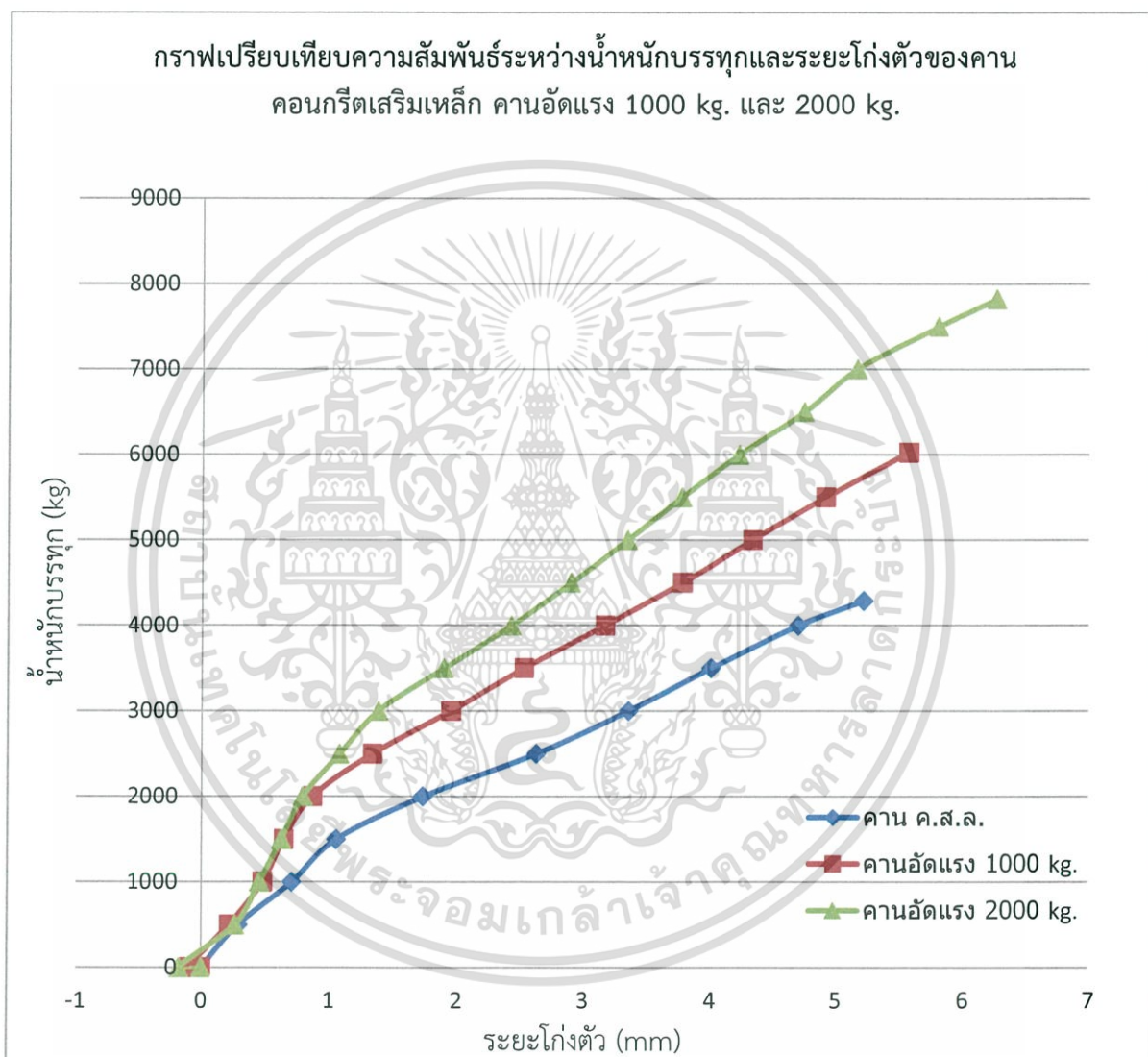


รูป 4.3.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งตัวของคานอัดแรง 2000 Kg.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 สรุปผลการทดสอบคาน

ประเภทคาน	น้ำหนักบรรทุกสูงสุด(kg)	ระยะโก่งตัว(mm) กลางคาน
คานคอนกรีตเสริมเหล็ก	4288.99	5.22
คานอัดแรง 1000 Kg.	6025.49	5.57
คานอัดแรง 2000 kg	7822.27	6.26



รูป 4.3.4 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก คานอัดแรง 1000 kg. และ 2000 kg.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่าเฉลี่ยผลการทดสอบคานทั้ง 3 ชุด ได้แก่ คานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา คานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงแบบภายนอก 1000 กิโลกรัม และ คานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงแบบภายนอก 2000 กิโลกรัม พบว่าค่าเฉลี่ยกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดมีค่าเท่ากับ 4288.99 , 6025.49 และ 7822.27 กิโลกรัมตามลำดับ และค่าการโก่งตัวสูงสุดโดยเฉลี่ยที่กึ่งกลางคานมีค่าเท่ากับ 5.22 , 5.57 และ 6.26 มิลลิเมตรตามลำดับ

จากผลการทดสอบเฉลี่ยของคาน B1 และ B4 โดยเป็นคานในชุดคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดโดยเฉลี่ย และค่าการโก่งตัวสูงสุดโดยเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบกับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎีคือ 4215 กิโลกรัม และ 3.75 มิลลิเมตร ตามลำดับ พบว่าค่าจากการทดสอบมีความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎี อาจมีสาเหตุจากค่าผลคูณระหว่างอิลาสติกโมดูลัสและโมเมนต์อินเนอร์เซียของคานทดสอบมีค่าลดลงเนื่องจากการแตกร้าวของหน้าตัดคาน ส่งผลให้ค่าการโก่งตัวสูงสุดมีค่ามากกว่าค่าทางทฤษฎี และเมื่อเทียบผลการทดสอบเฉลี่ยของคาน B2 และ B5 โดยเป็นคานในชุดคานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงแบบภายนอก 1000 กิโลกรัม และคาน B3 และ B6 โดยเป็นคานในชุดคานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงแบบภายนอก 2000 กิโลกรัม พบว่าค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดโดยเฉลี่ยของคานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงแบบภายนอกทั้งสองชุดมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุเปราะรับแรงอัดได้ดีแต่รับแรงดึงได้ต่ำ ถ้าให้แรงอัดไว้ก่อนแล้วเมื่อรับโมเมนต์จากภายนอก หน่วยแรงดึงที่ผิวล่างของคานคอนกรีตจะหักล้างกับหน่วยแรงอัดที่ได้จากการอัดแรง หน้าตัดคานคอนกรีตอัดแรงหลังจากรับโมเมนต์จากภายนอกจะไม่มีส่วนใดเกิดหน่วยแรงดึงหรือเกิดน้อยมาก จึงเป็นการช่วยปรับปรุงพฤติกรรมในการรับแรงของคานคอนกรีต ส่วนค่าการโก่งตัวสูงสุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงแบบภายนอกเมื่อเทียบกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดาที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากันพบว่ามีค่าการโก่งตัวน้อยกว่าเนื่องจากการหักล้างของค่าการโก่งตัวขึ้นจากอิทธิพลของแรงพุงจากการอัดแรง

เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดโดยเฉลี่ยระหว่างคานในชุดคานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงแบบภายนอก 1000 กิโลกรัม และ 2000 กิโลกรัม พบว่าค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานที่อัดแรง 2000 กิโลกรัม มีค่ามากกว่าคานที่อัดแรง 1000 กิโลกรัม เนื่องจากให้ค่าแรงอัดที่มากกว่าทำให้การหักล้างระหว่างหน่วยแรงดึงที่ผิวล่างของคานคอนกรีตกับหน่วยแรงอัดที่ได้จากการอัดแรงเกิดมากขึ้น เช่นเดียวกันกับค่าการโก่งตัวเนื่องจากให้ค่าแรงอัดที่มากกว่า ส่งผลให้การหักล้างของค่าการโก่งตัวขึ้นจากอิทธิพลของแรงพุงจากการอัดแรงมีมากขึ้น ทำให้คานที่อัดแรง 2000 กิโลกรัมมีค่าการโก่งตัวที่น้อยกว่าคานที่อัดแรง 1000 กิโลกรัม ที่น้ำหนักบรรทุกเดียวกัน

รอยร้าวที่เกิดขึ้นในคานทดสอบพบว่า จาก 5 ใน 6 ของตัวอย่างทดสอบเกิดขึ้นในบริเวณ middle third แสดงว่าคานตัวอย่างเกิดการวิบัติในช่วงค่าโมเมนต์สูงสุด แต่คานตัวอย่าง B6 เกิดรอยแตกร้าวนอกช่วง middle third ซึ่งจากลักษณะรอยร้าวที่เกิดขึ้นเป็นการแตกร้าวเนื่องจากโมเมนต์ผสมกับแรงเฉือน อาจมีสาเหตุจากบริเวณที่เกิดรอยร้าวมีระยะเหล็กปลอกน้อยเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบคานทั้งสามชุดพบว่าค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานคอนกรีตอัดแรงภายนอกมีค่ามากกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีการอัดแรง โดยคิดเป็น 40.49 % สำหรับคานที่มีค่าการอัดแรง 1000 กิโลกรัม และ 82.38 % สำหรับคานที่มีค่าการอัดแรง 2000 กิโลกรัม และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างคานที่ทำการอัดแรงภายนอกที่แรงขนาด 1000 กิโลกรัม และ 2000 กิโลกรัม พบว่าค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานที่อัดแรงขนาด 2000 กิโลกรัม มีค่ามากกว่า 1000 กิโลกรัม

ในส่วนของค่าการโก่งตัวสูงสุดบริเวณกึ่งกลางคานพบว่า ที่กำลังรับน้ำหนักบรรทุกเดียวกันคานคอนกรีตอัดแรงภายนอกมีค่ามากกว่าการโก่งตัวน้อยกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีการอัดแรง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างคานที่ทำการอัดแรงภายนอกที่แรงขนาด 1000 กิโลกรัม และ 2000 กิโลกรัม พบว่าค่าการโก่งตัวสูงสุดของคานที่อัดแรงขนาด 2000 กิโลกรัม มีค่าน้อยกว่า 1000 กิโลกรัมที่กำลังรับน้ำหนักบรรทุกเดียวกัน ซึ่งมีลักษณะเป็นไปตามรูปที่ 4.3.4 และผลตามตารางที่ 4.10

5.2 วิจารณ์และเสนอแนะ

วิจารณ์ผลการทดสอบ

1. จากผลการทดสอบค่าการโก่งตัวที่ได้มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากทฤษฎี ซึ่งอาจมีสาเหตุจากค่าอิลาสติคโมดูลัสหรือค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียของคานทดสอบมีค่าลดลง
2. ในการทดสอบครั้งนี้ค่าแรงดึงในลวดอัดแรงมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากทำการอัดแรงโดยการเร่งเกลียว หากต้องการลดความคลาดเคลื่อนควรใช้ hydraulic jack ในการอัดแรงในเส้นลวด

จากการทดสอบครั้งนี้ สามารถสรุปข้อเสนอแนะได้ดังนี้

1. ในการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมองค์อาคารเดิมด้วยวิธีการอัดแรงภายนอก ต้องพิจารณาถึงสภาพและกำลังขององค์อาคารเดิมอย่างระมัดระวัง
2. ในการทำการทดสอบอาจเปลี่ยนมาใช้เส้นลวดอัดแรง แทนการใช้เหล็กเส้นกลม RB9 เพื่อให้การทดสอบมีความใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริง หรือเพิ่มค่าแรงดึงในเส้นลวดอัดแรง
3. ในขณะที่ทำการทดสอบไม่ได้วัดค่าอิลาสติคโมดูลัสของคอนกรีต ทำให้ไม่สามารถระบุได้ว่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น เกิดจากค่าอิลาสติคโมดูลัสหรือค่าโมเมนต์อินเนอร์เซีย ดังนั้นเพื่อหาสาเหตุที่ค่าการโก่งตัวจากการทดสอบมีค่ามากกว่าค่าทางทฤษฎีจึงควรเก็บค่าอิลาสติคโมดูลัสจากการทดสอบลูกปูนด้วย
4. อาจศึกษาความสัมพันธ์ของความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกกับจำนวนดิวิเอเตอร์ หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] ดร.นเรศ พันธราธร. การออกแบบคอนกรีตอัดแรง. กรุงเทพฯ : Library Nine, 2540.
- [2] ประณต พัวเพิ่มพูนศิริ. การเสริมกำลังโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตด้วยวิธีอัดแรงภายนอก. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- [3] คณิศร ปิยะตระกูล. ผลของระดับความเสียหายและการอัดแรงภายนอกต่อความแกร่งเชิงดัดและความถี่ธรรมชาติของคานคอนกรีตอัดแรงแบบดิ่งภายหลัง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2554.
- [4] ดร.วินิต ช่อวิเชียร. พิมพ์ครั้งที่ 5. การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง. กรุงเทพฯ : วรนิติ ช่อวิเชียร, 2554.
- [5] ผศ.ดร.มงคล จิรวชิรเดช. พิมพ์ครั้งที่ 1. การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก, 2557.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางคุณสมบัติของเหล็กเส้น
เหล็กเส้นกลม SR-24

ชื่อขนาด Designation	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.) Designation Diameter (mm.)	มวลระบุ (กก./ม.) Unit Weight (kg/m.)	พื้นที่หน้าตัด (ตร.มม.) Cross Section Area (sq.mm.)
RB6	6	0.222	28.3
RB8	8	0.395	50.3
RB9	9	0.499	63.3
RB10	10	0.616	78.5
RB12	12	0.888	113.1
RB15	15	1.387	176.7
RB19	19	2.226	283.5
RB22	22	2.984	380.1
RB25	25	3.853	490.9

เหล็กข้ออ้อย

ชื่อขนาด Designation	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.) Designation Diameter (mm.)	มวลระบุ (กก./ม.) Unit Weight (kg/m.)	พื้นที่หน้าตัด (ตร.มม.) Cross Section Area (sq.mm.)
DB6	6	0.222	28.3
DB8	8	0.395	50.3
DB10	10	0.616	78.5
DB12	12	0.888	113.1
DB16	16	1.578	201.1
DB20	20	2.466	314.2
DB22	22	2.984	380.1
DB25	25	3.853	490.9
DB28	28	4.843	615.8
DB32	32	6.313	804.2
DB36	36	7.990	1,017.9
DB40	40	9.865	1,256.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางกล Mechanical Properties

ชั้น คุณภาพ Grade	ความยืดไม่น้อยกว่า (ร้อยละ)	ความต้านแรงดึงที่จุดครากไม่น้อยกว่าเมกะปาสกาล (กิโลกรัมแรง/ตร.มม.)	ความต้านแรงดึงไม่น้อยกว่าเมกะปาสกาล (กิโลกรัมแรง/ตร.มม.)	การทดสอบโดยการดัดโค้งเย็น	
	Elongation % Not Less Than	Yield Strength MPa (kgf/mm ²)	Tensile Strength MPa (kgf/mm ²)	Cold Bend Test	
				มุมดัดโค้งเย็น (องศา) Angle of Bend (Degree)	เส้นผ่านศูนย์กลางหัวกดขึ้นทดสอบ Diameter of Mandrel
SD30 ขนาดไม่เกิน 16 มม.	17	295 (30.0816)	480 (48.9464)	180	3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางระบุง
SD 30 ขนาดเกิน 16 มม.	15	295 (30.0816)	480 (48.9464)	180	4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางระบุง
SD 40	15	390 (39.7689)	560 (57.1041)	180	5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางระบุง
SD 50 ขนาดไม่เกิน 25 มม.	13	490 (49.9661)	620 (63.2224)	90	5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง
SD 50 ขนาดเกิน 25 มม.	13	490 (49.9661)	620 (63.2224)	90	6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางคุณสมบัติของลวดอัดแรง

ชนิด ¹⁾	เส้นผ่านศูนย์กลาง ระบุ ¹⁾ มิลลิเมตร	ความทนแรงดึง ระบุ ¹⁾ นิวตันต่อ ตาราง มิลลิเมตร	พื้นที่หน้าตัด ระบุ ²⁾ ตาราง มิลลิเมตร	มวลต่อเมตร		ค่าลักษณะเฉพาะ ²⁾ ต่ำสุด			
				ค่าระบุ กรัม	เกณฑ์ความ คลาดเคลื่อน ร้อยละ	แรงดึง สูงสุด ²⁾³⁾⁴⁾ กิโลนิวตัน	แรงดึง พิสูจน์ ³⁾⁴⁾⁵⁾ ร้อยละ 0.1 กิโลนิวตัน	แรงดึง พิสูจน์ ⁴⁾⁵⁾ ร้อยละ 0.2 กิโลนิวตัน	
2 เส้น 2x2.90	5.8	1 910	13.2	104		25.2	21.4	22.3	
	3 เส้น 3x2.40	1 770	13.6	107		24.0	20.4	21.1	
		1 960				26.7	22.7	23.5	
	3x2.90	1 910	19.8	155		37.8	32.1	33.2	
3x3.50	7.5	1 770	29.0	228		51.2	43.5	45.0	
	1 860					54.0	45.9	47.0	
7 เส้น	9.3	1 720	51.6	405		88.8	72.8	75.4	
	9.5	1 860	54.8	432	+4	102	83.6	86.6	
	10.8	1 720	69.7	546	-2	120	98.4	102	
	11.1	1 860	74.2	580		138	113	117	
	12.4	1 720	92.9	729		160	131	136	
	12.7	1 860	98.7	774		184	151	156	
	15.2	1 720	139	1 101		239	196	203	
	15.2	1 860	139	1 101		259	212	220	
7 เส้น อัดแน่น	12.7	1 860	112	890		209	178	184	
	15.2	1 820	165	1 295		300	255	264	
	18.0	1 700	223	1 750		380	323	334	
19 เส้น	17.8	1 860	208	1 652		387	317	329	
	19.3	1 860	244	1 931		454	372	386	
	20.3	1 810	271	2 149		491	403	417	
	21.8	1 810	313	2 482		567	465	482	

หมายเหตุ 1) ชนิด เส้นผ่านศูนย์กลางระบุ และความทนแรงดึงระบุใช้สำหรับเรียกชื่อก่อน

2) ความทนแรงดึงระบุ ได้จากการคำนวณพื้นที่หน้าตัดระบุกับค่าลักษณะเฉพาะแรงดึงสูงสุด (ดูหมายเหตุ 5)

3) ผลทดสอบแต่ละค่าต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของค่าลักษณะเฉพาะ

4) กำหนดให้ค่าลักษณะเฉพาะแรงดึงแทนความทนแรงดึงระบุ เนื่องจากเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของมวลต่อเมตรมีค่าน้อย

5) แรงดึงพิสูจน์ร้อยละ 0.1 เป็นค่าที่กำหนดให้ใช้ทดสอบ ส่วนแรงดึงพิสูจน์ร้อยละ 0.2 ให้ใช้เพื่อนำเสนอเท่านั้น ยกเว้นเมื่อมีการตกลงเป็นอย่างอื่น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบอัตราส่วนผสมคอนกรีต (Mix Design)

ตารางสำหรับการคำนวณ

FOR CONDITION F.M. 2.75 W/C = 0.65 Slump 3"			
Max Size (in)	% Air	% Sand of total Aggregate by Solid Volume	Water Content
3/8	3.0	61	209
1/2	2.5	53	199
3/4	2.0	45	187
1	1.5	41	178
1 1/2	1.0	36	166
2	0.5	33	155
3	0.3	31	144
6	0.2	28	125

ADJUSTMENT OF VALUES FOR OTHER CONDITION		
	% Water Content	% Sand
F.M. Sand (+ or -) 0.1	(+ or -) 0.5	(+ or -) 0.5
Slump (+ or -) 1"	(+ or -) 3	
W/C (+ or -) 0.05	(+ or -) 1	(+ or -) 1
Air (+ or -) 1.0 %	(- or +) 3	(- or +) 0.5-1.0
Angular Coarse Aggregate	(+ 7 to +10)	+ 5 (3/8-3/4),+6(1),+7(1 1/2 -2),+8(2 1/2 -3)
Hot Zone	+ 5	-

Note การปรับค่าทรายถ้าได้ค่าเป็นจุดทศนิยม ถ้าต้องลดให้ปัดค่าไปทางน้อย ถ้าต้องเพิ่มให้ปัดค่าไปทางมาก

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{กำลังอัด} = 10^{(3.0885 - 1.1283 \text{ W/C})}$$

กำลังอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน หล่อด้วย Cylinder 6 "x 12 "

$$M = V s d$$

โดย M = มวล, V = ปริมาตร, s = ความถ่วงจำเพาะวัสดุ, d = ความหนาแน่นของน้ำ (1 ก.ก./ลิตร)

ตัวอย่าง

งานกำแพงปีก คสล. ใช้ Max size 1" ต้องการกำลังอัด = 180 กก/ซม² F.M ทราย = 1.9

ต้องการ Slump 5" (ก.พ. ปูน 3.15 ก.พ.ทราย 2.6 ก.พ. หิน 2.75)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับโครงการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ผู้อื่นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีออกแบบ

จากกำลังอัด 180 กก/ซม^2 ไปหาความสัมพันธ์เพื่อจะทราบค่า W/C
 จากสูตร กำลังอัด = $10^{(3.0885 - 1.1283 \text{ W/C})}$

แทนค่ากำลังอัดที่ 180 กก/ซม^3 หาค่า W/C ได้โดย
 $180 = 10^{(3.0885 - 1.1283 \text{ W/C})}$

$$\log 180 = 3.0885 - 1.1283 \times \text{W/C}$$

$$\begin{aligned} \text{W/C} &= (3.0885 - \log 180) / 1.1283 \\ &= (3.0885 - 2.255) / 1.1283 \\ &= 0.7387 \end{aligned}$$

ดังนั้น W/C ในการคำนวณออกแบบใช้ค่า = 0.73

จากตารางที่ 1

เมื่อใช้ Max size 1" ใช้เปอร์เซ็นต์ทราย 41% และใช้น้ำ 178 กก/ม^3 เปอร์เซ็นต์ air 1.5%

จากตารางที่ 2

ปรับค่าเนื่องจาก F.M.

เนื่องจาก F.M. ทรายน้อยลงจากตาราง = $2.75 - 1.90 = 0.85$

จากตาราง Adjustment F.M. ลดลง 0.1 % ต้องลดเปอร์เซ็นต์ทรายลง 0.5% ดังนั้นเมื่อต้องการ F.M. = 1.9 จะต้องลดเปอร์เซ็นต์ทรายลง = $0.5 \times 0.85 / 0.1 = -4.25\%$ จะต้องลดเปอร์เซ็นต์น้ำลง = -4.25%

ปรับค่าเนื่องจาก Slump

เนื่องจาก Slump เพิ่มขึ้นจากตาราง = $5 - 3 = 2$ นิ้ว

จากตาราง Slump เพิ่มขึ้น 1 นิ้ว จะต้องเพิ่มน้ำ 3% ดังนั้นเมื่อต้องการ Slump = 5 นิ้ว จะต้องเพิ่มน้ำขึ้น = $2 \times 3 = 6\%$ (+ 6%)

ปรับค่าเนื่องจาก W/C

เนื่องจาก W/C เพิ่มขึ้นจากตาราง = $0.73 - 0.65 = .08$

จากตาราง W/C เพิ่มขึ้น 0.05 จะต้องเพิ่มเปอร์เซ็นต์ทราย 1.0% ดังนั้นเมื่อต้องการ W/C = 0.73 จะต้องเพิ่มเปอร์เซ็นต์ทราย = $1 \times .08 / .05 = +1.6$ จะต้องเพิ่มเปอร์เซ็นต์น้ำ = $+1.6\%$

ปรับค่าเนื่องจากใช้หินผสมคอนกรีต

จากตาราง การใช้หินต้องเพิ่มเปอร์เซ็นต์ทราย = $+6\%$ และเพิ่มเปอร์เซ็นต์น้ำ = $+10\%$

ปรับค่าเนื่องจาก Hot Zone (เนื่องจากเป็นเมืองร้อน)

จากตาราง เพิ่มเปอร์เซ็นต์น้ำ = $+5\%$

ค่าเปอร์เซ็นต์ทรายที่ปรับทั้งหมด = $-4.25 + 1.6 + 6 = +3.35$ ประมาณ $+4\%$

ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำที่ปรับทั้งหมด = $-4.25 + 6 + 1.6 + 10 + 5 = 18.35\%$

เปอร์เซ็นต์ทรายที่ใช้ออกแบบ = $41 + 4 = 45\%$

เปอร์เซ็นต์น้ำที่ใช้ออกแบบ = $178 \times 1.1835 = 210.66$ ประมาณ 211 กก/ม^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณโดยวิธี Absolute Volume

เนื่องจากใช้ W/C = 0.73 ใช้น้ำ = 211 กก/ม³ ใช้ซีเมนต์ = 211 / 0.73 = 289.04 กก/ม³

	นน.(กก/ม ³)	Absolute Volume (ลิตร /ม ³)	
ซีเมนต์	289.04	289.04 / 3.15 =	91.76
น้ำ	211	211 / 1	= 211
air		1.5 × 1000 / 100	= 15
Cement paste	=	91.76 + 211 + 15	= 317.76 ลิตร /ม ³

ปริมาตรของทราย + หิน = 1000 - 317.76 = 682.24 ลิตร /ม³

เนื่องจากเราใช้เปอร์เซ็นต์ทรายในการออกแบบ = 45 %

ดังนั้น ปริมาตรของทราย = 682.24 × 45/ 100 = 307.01

ลิตร /ม³

ปริมาตรของหิน = 682.24 - 307.01 = 375.23 ลิตร /ม³

คำนวณน้ำหนักวัสดุที่ใช้ดังนี้

น้ำหนักของทรายที่ใช้ = 307.01 × 2.6 = 798.23 กก/ม³

น้ำหนักของหินที่ใช้ = 375.23 × 2.75 = 1031.88 กก/ม³

น้ำหนักรวม = 289.04 + 798.23 + 1031.88 + 211 = 2330.15

กก/ม³

ดังนั้นอัตราส่วนโดยน้ำหนัก = 289.04 : 798.3 : 1031.88 W/C = 211/289.04 = 0.73

= 1 : 2.76 : 3.57 W/C = 0.73

ผสมคอนกรีตโดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนัก

จากอัตราส่วนผสมคอนกรีต 1 : 2.76 : 3.57 W/C = 0.73 โดยน้ำหนัก

ต้องการผสมครั้งหนึ่งใช้ซีเมนต์ 1 ถุง

คำนวณหาปริมาณวัสดุที่ใช้

ใช้ปูนซีเมนต์ = 50 กก. (ถุง)

ใช้ทรายที่สภาพอิ่มตัวผิวหน้าแห้ง = 2.76 × 50 = 138.00 กก.

ใช้หินที่สภาพอิ่มตัวผิวหน้าแห้ง = 3.57 × 50 = 178.50 กก.

ใช้น้ำ = 0.73 × 50 = 36.5 กก.

จะเห็นได้ว่าถ้า หิน , ทรายอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวหน้าแห้งเราสามารถนำไปผสมคอนกรีตได้เลย แต่ความเป็นจริงโอกาสที่หิน , ทรายจะอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวหน้าแห้งนั้นน้อยมาก ดังนั้นเราจะต้องหานน.ของน้ำที่เกินหรือขาดจากจุดอิ่มตัวผิวหน้าแห้งมาใช้ในการคำนวณหาปริมาณวัสดุที่แท้จริง วิธีหาปริมาณน้ำในวัสดุทำได้ โดยการหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของวัสดุ (Moisture Content) และหาเปอร์เซ็นต์ Absorption ของวัสดุ นำค่าที่ได้มาหาความสัมพันธ์จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F = ((M - A) / (A + 100)) \times 100$$

โดย F = % Free Moisture
M = % Moisture Content
A = % Absorption

ตัวอย่างเช่น % Absorption ของทราย = 1% , % Absorption ของหิน = 0.3% ,
Moisture ของทรายที่จะผสม 3.8% , Moisture ของหินที่จะผสม 0.8%

$$\% \text{ Moisture ของทราย} = 3.8\% \text{ คิดเป็น } \% \text{ Free Moisture} = (3.8 - 1) \times 100 / (1 + 100) = 2.77$$

$$\% \text{ Moisture ของหิน} = 0.8\% \text{ คิดเป็น } \% \text{ Free Moisture} = (0.8 - 1) \times 100 / (1 + 100) = 0.499 = 0.5$$

จากอัตราส่วนต้องใช้ทรายสภาพอิ่มตัวผิวหน้าแห้ง = 138.00 ก.ก. แต่ทรายมี Free
Moisture = 2.77%

$$\text{น้ำที่อยู่ในทราย เกินจุดอิ่มตัวผิวหน้าแห้ง} = (138.00 \times 2.77) / 100 = 3.820 \text{ ก.ก}$$

$$\text{ต้องชั่งทรายหนัก} = 138.00 + 3.82 = 141.82 \text{ ก.ก}$$

จากอัตราส่วนต้องใช้หินสภาพอิ่มตัวผิวหน้าแห้ง = 178.5 ก.ก. แต่หินมี Free Moisture
= 0.5%

$$\text{น้ำที่อยู่ในหิน เกินจุดอิ่มตัวผิวหน้าแห้ง} = 178.5 \times 0.005 = 0.89 \text{ ก.ก.}$$

$$\text{ต้องชั่งหินหนัก} = 178.5 + 0.89 = 179.39 \text{ ก.ก.}$$

จากอัตราส่วนต้องใช้น้ำ = 36.5 ก.ก. แต่มีน้ำในทราย = 3.79 ก.ก. , มีน้ำในหิน 0.89 ก.ก.

$$\text{ต้องชั่งน้ำหนัก} = 36.5 - 3.82 - 0.89 = 31.79 \text{ ก.ก.}$$

ดังนั้นวัสดุที่ใช้ในการผสมครั้งนี้คือ

$$\text{ปูนซีเมนต์} = 50 \text{ ก.ก. (1 ถุง)}$$

$$\text{ทราย} = 141.82 \text{ ก.ก.}$$

$$\text{หิน} = 179.39 \text{ ก.ก.}$$

$$\text{น้ำ} = 31.79 \text{ ก.ก.}$$

นำอัตราส่วนนี้ไปผสมแล้วทำ slump ว่าได้ค่า 5 นิ้ว ตามที่ต้องการหรือไม่ ถ้าไม่ได้ก็ให้ใช้
ข้อกำหนดที่ว่า slump มากหรือน้อยกว่า 1 นิ้ว จะต้องเพิ่มหรือลดน้ำลง 3 % จากน้ำเดิม จะ
ได้ปริมาณน้ำใหม่ นำไปออกแบบใหม่ก็จะได้อัตราส่วนใหม่สำหรับกำลังอัด 180 กก/ซม²
slump 5 นิ้ว

การแปลงอัตราส่วนโดยน้ำหนักเป็นอัตราส่วนโดยปริมาตร

ขั้นตอนในการแปลง

1. จะต้องหาค่า Loose unit weight ของทรายที่สภาพอิมตัวผิวหน้าแห้ง โดยหา % absorption ทราย ก่อน จากนั้นใช้ทรายแห้งเติมน้ำให้ได้ตาม % absorption คลุกให้ทั่วแล้วหมักทิ้งไว้อย่างน้อย 16 -24 ชม. แล้วทำการหา loose unit weight (สมมุติ = 1368.7 กก/ม^3 , % absorption ทราย =1)
2. จะต้องหาค่า Loose unit weight ของหินที่สภาพ oven dry สมมุติ = 1400 กก/ม^3 absorption ของหิน = 0.3%

Loose unit weight ของหินที่สภาพ SSD จะเท่ากับ $(1400 \times (1 + 0.3))/100 = 1404.2 \text{ กก/ม}^3$

3. ให้ใช้ Loose unit weight ของซีเมนต์มีค่าเท่ากับ 1250 กก/ม^3 ของน้ำมีค่าเท่ากับ 1000 กก/ม^3
4. นำค่า Loose unit weight ของซีเมนต์คูณทุกค่าของอัตราส่วน โดยน้ำหนัก
 นำค่า Loose unit weight ของซีเมนต์ไปหารส่วนของซีเมนต์
 นำค่า Loose unit weight ของทรายไปหารส่วนของทราย
 นำค่า Loose unit weight ของหินไปหารส่วนของหิน
 นำค่า Loose unit weight ของน้ำไปหารส่วนของ W/C
 จากอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1 : 2.76 : 3.57 W/C = 0.73

$$\begin{array}{r} 1 \times 1250 : 2.76 \times 1250 : 3.57 \times 1250 \quad \text{W/C} = 0.73 \times 1250 \\ \hline (1 \times 1250) : 2.76 \times 1250 : 3.57 \times 1250 \quad \text{W/C} = \frac{0.73 \times 1250}{1250} \\ \hline 1250 \quad 1368.7 \quad 1404.2 \quad 1000 \\ 1 \quad : \quad 2.52 \quad : \quad 3.18 \quad \text{W/C} = 0.9125 \end{array}$$

ค่าที่ได้คืออัตราส่วนโดยปริมาตร

ในการผสมถ้าใช้ซีเมนต์ 1 ถุง = 40 ลิตร

$$\begin{array}{l} \text{ทรายสภาพอิมตัวผิวหน้าแห้ง} = 2.52 \times 40 = 100.8 \text{ ลิตร} \\ \text{หินที่สภาพอิมตัวผิวหน้าแห้ง} = 3.18 \times 40 = 127.2 \text{ ลิตร} \\ \text{น้ำ} = 0.9125 \times 40 = 36.5 \text{ ลิตร} \end{array}$$

แต่จะเห็นได้ว่าถ้าหิน , ทรายอยู่ในสภาพอิมตัวผิวหน้าแห้ง เราสามารถนำไปผสมคอนกรีตได้เลย แต่ความเป็นจริงโอกาสที่หิน , ทรายจะอยู่ในสภาพอิมตัวผิวหน้าแห้งน้อยมาก ดังนั้นเราจะต้องหาเปอร์เซ็นต์การฟองตัวของวัสดุและปริมาณน้ำในวัสดุมาใช้ในการคำนวณหาปริมาณวัสดุที่แท้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การผสมคอนกรีตใช้อัตราส่วนโดยปริมาตร

สมมติ ตวงทรายที่สภาพใช้งานได้ loose unit weight = 1323.00 กก/ม^3 หา moisture ทรายได้ 3.8% ทรายมี Absorption = 1.0 % หา moisture ของหินได้ = 0.8 % (โดยทรายมีค่า Absorption เท่ากับ 1% loose Unit Weight ของทรายสภาพอิมตัวผิวหน้าแห้ง = 1368.7 กก/ม^3 และหินมี Absorption = 0.3 % , loose unit weight ของหินสภาพอิมตัวผิวหน้าแห้ง = 1404.2 กก/ม^3)

จากอัตราส่วนโดยปริมาตร 1 : 2.52 : 3.18 W/C = 0.9125

จะต้องหาการพองตัวของทราย ปริมาณน้ำอยู่ในทรายเกินจุดอิมตัวผิวหน้าแห้ง ปริมาณน้ำที่อยู่ในหินเกินจุดอิมตัวผิวหน้าแห้ง

$$\text{การพองตัวของทราย} = \frac{\text{loose unit weight ของทรายสภาพอิมตัวผิวหน้าแห้ง}}{\text{loose unit weight ของทรายชั้นแต่ฐานสภาพอิมตัวผิวหน้าแห้ง}}$$

$$\text{เปลี่ยนความชื้นทราย 3.8 \% เป็น \% Free Moisture} = (3.8 - 1) \times 100 / (1 + 100) = 2.77 \%$$

$$\begin{aligned} \text{loose unit weight ของทรายชั้นฐานสภาพอิมตัวผิวหน้าแห้ง} &= \frac{\text{loose unit weight ของทรายชั้น}}{1 + \frac{\% \text{ Free Moisture}}{100}} \\ &= \frac{1323}{1 + \frac{2.77}{100}} \\ &= 1287.34 \text{ กก/ม}^3 \end{aligned}$$

$$\text{ทรายชั้น 3.8 \% จะพองตัว} = \frac{1368.7}{1287.34} = 1.0632 \text{ เท่า}$$

$$\text{ใน } 1 \text{ ม}^3 \text{ ของทรายชั้นจะมีน้ำเกินจุดอิมตัวผิวหน้าแห้งอยู่} = 1323 - 1287.34 = 35.66$$

ลิตร

$$\text{การพองตัวของหิน} = \frac{\text{loose unit weight ของหินสภาพอิมตัวผิวหน้าแห้ง}}{\text{loose unit weight ของหินชั้นแต่ฐานสภาพอิมตัวผิวหน้าแห้ง}}$$

$$\text{เปลี่ยนความชื้นหิน 0.8 \% เป็น \% Free Moisture} = \frac{(0.8 - 0.3) \times 100}{0.3 + 100} = 0.5$$

$$\begin{aligned} \text{loose unit weight ของหินชั้นฐานสภาพอิมตัวผิวหน้าแห้ง} &= \frac{\text{loose unit weight ของหินชั้น}}{1 + \frac{\% \text{ Free Moisture}}{100}} \\ &= \frac{1400 \times 1.008}{1 + \frac{0.5}{100}} = \frac{1411.2}{1.005} = 1404.2 \text{ กก/ม}^3 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{หินชั้น } 0.8 \% \text{ จะพองตัว} = \frac{1404.2}{1404.2} = 1.0 \text{ (ไม่มีการพองตัว)}$$

ใน 1 m^3 ของหินชั้นจะมีน้ำเกินจุดอิ่มตัวผิวหน้าแห้งอยู่ = $1411.2 - 1404.2 = 7$ ลิตร

จากอัตราส่วนโดยปริมาตร $1 : 2.52 : 3.18 \text{ W/C} = 0.9125$

เนื่องจากการพองตัวของทรายและหิน อัตราส่วนจึงเปลี่ยนเป็น

$$1 : 2.52 \times 1.0632 : 3.18 \times 1 \quad \text{W/C} = 0.9125$$

$$1 : 2.68 : 3.18 \quad \text{W/C} = 0.9125$$

ใช้ซีเมนต์ 1 ถุง (40 ลิตร)

ใช้ซีเมนต์ = 40 ลิตร (1 ถุง)

ใช้ทราย = $2.68 \times 40 = 107.2$ ลิตร จะมีน้ำเกินจุดอิ่มตัวผิวหน้าแห้ง = $(35.66 \times 107.2)/1000 = 3.82$ ลิตร

ใช้หิน = $3.18 \times 40 = 127.2$ ลิตรจะมีน้ำเกินจุดอิ่มตัวผิวหน้าแห้ง = $(7 \times 127.2)/1000 = 0.89$ ลิตร

ใช้น้ำ = $0.9125 \times 40 = 36.5 - 3.82 - 0.89 = 31.79$ ลิตร

เมื่อผสมโดยปริมาตรใช้ซีเมนต์ 1 ถุง จะต้องใช้วัสดุดังนี้

ซีเมนต์ = 1 ถุง = 40 ลิตร

ทราย = 107.2 ลิตร

หิน = 127.2 ลิตร

น้ำ = 31.79 ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้