

พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมแรงแบบภายนอกที่มีระยะเยื้องศูนย์กลาง
แตกต่างกัน

BEHAVIOR OF EXTERNAL PRESTRESSED WITH VARIOUS
ECCENTRICITY



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมแรงแบบภายนอกที่มีระยะเยื้องศูนย์กลาง
แตกต่างกัน

BEHAVIOR OF EXTERNAL PRESTRESSED WITH VARIOUS
ECCENTRICITY



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร

บัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BEHAVIOR OF EXTERNAL PRESTRESSED WITH VARIOUS ECCENTRICITY



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
ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ พฤติกรรมของคอนกรีตเสริมแรงแบบภายนอกที่มีระยะเยื้องศูนย์กลางต่างกัน
BEHAVIOR OF EXTERNAL PRESTRESSED WITH VARIOUS
ECCENTRICITY

นักศึกษา นายปณิธาน โจ้วเจริญ รหัสประจำตัว 57010729
นายราชศักดิ์ บวขสันเทียะ รหัสประจำตัว 57011067
นายวัชระ ชาลีกร รหัสประจำตัว 57011151

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา อ. ทรงกลด แซ่อึ้ง

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ		ลายมือชื่อ
รศ.สุวัฒน์	ถิรเศรษฐ์	
อ.ทรงกลด	แซ่อึ้ง	
ผศ.สมเกียรติ	ขวัญฤกษ์	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว



(ผศ.ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่..... ๕/๖/๖๑.....

พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมแรงแบบภายนอกที่มีระยะเยื้องศูนย์กลางแตกต่างกัน

นายปณิธาน	โจวจเจริญ	รหัสประจำตัว	57010729
นายราชศักดิ์	บวขสันเทียะ	รหัสประจำตัว	57011067
นายวัชระ	ชาลีกร	รหัสประจำตัว	57011151

อาจารย์ที่ปรึกษา อ. ทรงกลด แซ่อึ้ง
ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการก่อสร้างด้วยโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย แต่อย่างไรก็ดีโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นจะรับแรงดึงได้ต่ำและอาจเกิดการแตกร้าวได้ง่าย เนื่องจากการรับน้ำหนักบรรทุกที่มากเกินไป ความคืบ ความล่า และปัจจัยอื่นๆ ดังนั้นการเสริมแรงจะช่วยให้คอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงได้มากขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดการแอ่นตัว โดยการอัดแรงแบบดึง ลวดอัดแรงภายหลัง(Post-tensioned Concrete) แบ่งได้ 2 แบบ คือ คอนกรีตเสริมแรงแบบ ภายใน และ คอนกรีตเสริมแรงแบบภายนอก โดยการเสริมแรงแบบภายนอกจะนิยมใช้ในการเสริมแรงกับโครงสร้างที่ก่อสร้างมานานมากกว่าการก่อสร้างทั่วไป ซึ่งโครงการพิเศษฉบับนี้จะกล่าวถึงการศึกษาคอนกรีตอัดแรงแบบภายนอก

จุดประสงค์ของโครงการพิเศษนี้คือศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของคอนกรีตและการแอ่นตัวของคาน โดยทดสอบเปรียบเทียบคาน 4 รูปแบบคือ คานคอนกรีตเสริมเหล็ก คานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงแบบภายนอก(เสริมแรง 1000 kg) โดยแต่ละชุดทดสอบมีแนวการวางลวดคล้ายรูปสี่เหลี่ยมคางหมูแต่มีระยะเยื้องศูนย์กลาง(e)จากกึ่งกลางคานที่แตกต่างกันคือ 5 ,9 และ 12.5 cm ตามลำดับ จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเสริมแรงแบบภายนอกกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กส่งผลให้กำลังรับน้ำหนักสูงสุดเพิ่มขึ้นและการแอ่นตัวลดลง และระยะเยื้องศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นและการแอ่นตัวลดลงเช่นกัน

Behavior of external prestressed with various eccentricity

Mr. Panithan Jowcharoen Student ID. 57010729
Mr. Ratchasak Buadsunthea Student ID. 57011067
Mr. Watchara Chaleekorn Student ID. 57011151

Advisor: Mr. Songklod Sae-Ueng
Academic Year 2017

ABSTRACT

At present, reinforced concrete structures are popular. However, the reinforced concrete structures have low tensile strengths and can easily be cracked by overload, creep, fatigue and other factors. So reinforcement help reinforce reinforced concrete and also reduces the deflection. Post-tensioned concrete can be divided into two types: internal reinforcement and external reinforcement. External reinforcement is often applied to old structures. This special project will discuss the study of external prestressed concrete.

The purpose of this special project is to study the relationship between the maximum strength of concrete and deflection. The study compares 4 types of the concrete beam, simple beam, 1000 kg external prestressed beam with 5, 9, 12.5 centimeters eccentricity (e) respectively. The tests show that external reinforcement beams enhance maximum capacity

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก อ.ทรงกลด แซ่อึ้ง ที่กรุณาให้คำปรึกษาปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง คอยแนะนำช่วยเหลือในการแก้ไข ปัญหา คอยให้ความรู้ เอาใจใส่ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือจนสำเร็จได้ด้วยดี พวกเราผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ในทุก ๆ รายวิชาที่ศึกษาเพื่อเป็นพื้นฐาน โดยคณาจารย์ท่านต่าง ๆ ได้ถ่ายทอดความรู้ทั้งทางด้านวิชาการ ความรู้ทั่วไป และประสบการณ์ต่าง ๆ จนสามารถนำมาใช้ในการทำงานและการดำเนินชีวิตได้อย่างดีเยี่ยม ตลอดจนขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ร่วมเป็นกรรมการในการทดสอบ

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่คอยให้คำแนะนำ ช่วยเหลือซึ่งกันและกันในการทำโครงการ รวมถึงตลอดระยะเวลาที่ได้เรียนรู้ศึกษาในภาควิชาโยธาจนได้สำเร็จ

ขอขอบคุณผู้ตอบแบบสอบถามทุกท่านที่ได้กรุณาให้ข้อมูลโดยการตอบแบบสอบถามตามความเป็นจริงและครบถ้วน

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดาอันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้ความรักและกำลังใจในการสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนของคณะผู้จัดทำมาโดยตลอด ทำให้คณะผู้จัดทำมีวันนี้ได้ คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างสูง

ปณิธาน ไจวจริณ
ราชศักดิ์ บวชสันเทียะ
วัชระ ชาลีกร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.3 วัตถุประสงค์โครงการพิเศษ.....	2
1.4 ขอบเขตการศึกษาโครงการพิเศษ.....	2
1.5 วิธีการศึกษา.....	2
1.6 ตารางเวลาการทำงาน.....	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.8 ตารางงบประมาณที่ใช้.....	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	5
2.1 การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีกำลัง.....	5
2.1.1 พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	5
2.1.2 กำลังรับโมเมนต์ดัด.....	6
2.2 ประวัติความเป็นมาของคอนกรีตอัดแรง.....	9
2.3 คอนกรีตอัดแรง.....	10
2.4 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต.....	11
2.4.1 การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขณะถ่ายแรง.....	11
2.4.2 การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขณะรับน้ำหนัก บรรทุก.....	12
2.5 ค่าโมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้าว.....	12
2.6 กำลังประลัยของคอนกรีตอัดแรง.....	13
2.6.1 สมมุติฐานการวิเคราะห์โมเมนต์ดัดประลัย.....	13
2.6.2 การกระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตเทียบเท่าเป็นรูป สี่เหลี่ยม.....	14
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำภายนอกและการแอ่นตัวของคาน.....	15
2.8 การเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง.....	16
2.9 ระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอก.....	17
2.10 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมอัดแรง.....	17
2.11 สูตรคำนวณหาค่าระยะโก่งทันทีที่มากที่สุด.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
บทที่ 3 ขั้นตอนการปฏิบัติงาน.....	21
3.1 กล่าวนำ.....	21
3.2 รายละเอียดการออกแบบ.....	21
3.2.1 การออกแบบคานโดยวิธีกำลัง.....	21
3.2.2 การออกแบบคอนกรีต.....	23
3.2.3 เหล็กเสริมอัดแรงภายนอก.....	23
3.3 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ.....	24
3.4 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างการทดสอบ.....	25
3.5 ขั้นตอนทำการทดสอบ.....	28
บทที่ 4 ผลการทดสอบ.....	33
4.1 กล่าวนำ.....	33
4.2 ผลการทดสอบคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอก.....	33
4.3 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง.....	34
4.4 วิเคราะห์ผล.....	63
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	67
5.1 สรุปผลการทดสอบ.....	67
5.2 วิจัยและข้อเสนอแนะ.....	67
บรรณานุกรม.....	69
ภาคผนวก.....	70

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	ผลการทดสอบค่ากำลังของคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอกที่ 59 วัน.....	33
4.2	ผลการทดสอบค่ากำลังของคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอกที่ 52 วัน.....	33
4.3	แสดงรายละเอียดคานตัวอย่าง.....	34
4.4	ผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา G1.....	35
4.5	ผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา G2.....	38
4.6	ผลการทดสอบคานคอนกรีตอัดแรง 1,000 kg ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 5 cm G3.....	41
4.7	ผลการทดสอบคานคอนกรีตอัดแรง 1,000 kg ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 5 cm G4.....	44
4.8	ผลการทดสอบคานคอนกรีตอัดแรง 1,000 kg ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 9 cm G5.....	47
4.9	ผลการทดสอบคานคอนกรีตอัดแรง 1,000 kg ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 5 cm G6.....	51
4.10	ผลการทดสอบคานคอนกรีตอัดแรง 1,000 kg ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 12.5 cm G7.....	55
4.11	ผลการทดสอบคานคอนกรีตอัดแรง 1,000 kg ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 12.5 cm G8.....	59
4.12	สรุปกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดและการโก่งตัว ณ กึ่งกลางคานเฉลี่ย.....	65



สารบัญญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับน้ำหนักบรรทุกในช่วงอิลาสติก.....	5
2.2	หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้การดัด.....	6
2.3	การกระจายหน่วยแรงบนหน้าตัดคาน.....	7
2.4	ค่า P_i ที่กำลังอัดของคอนกรีต f_c' ต่างๆ.....	7
2.5	หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดของคานคอนกรีตอัดแรง.....	10
2.6	การกระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีต.....	14
2.7	กราฟความสัมพันธ์ของแรงภายนอกกับค่าการแอ่นตัวของคานคอนกรีตอัดแรง....	15
2.8	การเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง.....	16
2.9	การลดลงของระยะเยื้องศูนย์ของลวดอัดแรงภายนอก.....	17
3.1	ประกอบแบบหล่อคอนกรีต.....	25
3.2	การผูกเหล็กเสริม.....	25
3.3	เหล็กเสริมเมื่อนำมาใส่แบบหล่อคอนกรีตแล้ว.....	26
3.4	วัดค่าการยุบตัวของคอนกรีตขณะผสม.....	26
3.5	เทคอนกรีตลงแบบหล่อ.....	27
3.6	การบ่มคานคอนกรีตตัวอย่างโดยการใช้พลาสติก.....	27
3.7	คานตัวอย่างเตรียมที่จะทดสอบ.....	28
3.8	เจาะรูสำหรับติดตั้งแผ่นเหล็กที่ปลายคาน.....	29
3.9	ติดตั้ง deviator.....	29
3.10	การติดตั้ง Strain gauge ที่ลวดอัดแรง.....	30
3.11	ตำแหน่ง dial gauge.....	30
3.12	การอัดแรงโดยการขันเกลียว.....	31
3.13	การกดทดสอบคานตัวอย่าง.....	31
3.14	มอนิเตอร์แสดงค่าน้ำหนักบรรทุกและค่าการโก่งตัว.....	32
4.1	แสดง Model การ set up ในการทดสอบคานตัวอย่าง.....	35
4.2	รอยร้าวของคาน G1.....	37
4.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคาน G1.....	38
4.4	รอยร้าวของคาน G2.....	40
4.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคาน G2.....	41
4.6	รอยร้าวของคาน G3.....	43
4.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคาน G3.....	44
4.8	รอยร้าวของคาน G4.....	46
4.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคาน G4.....	47
4.10	รอยร้าวของคาน G5.....	50
4.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคาน G5.....	50
4.12	รอยร้าวของคาน G6.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่		หน้า
4.13	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคาน G6.....	54
4.14	รอยร้าวของคาน G7.....	58
4.15	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคาน G7.....	58
4.16	รอยร้าวของคาน G8.....	62
4.17	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคาน G8.....	62
4.18	กราฟค่าเฉลี่ยระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคานของคาน G1 และ G2.....	63
4.19	กราฟค่าเฉลี่ยระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคานของคาน G3 และ G4.....	63
4.20	กราฟค่าเฉลี่ยระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคานของคาน G5 และ G6.....	64
4.21	กราฟค่าเฉลี่ยระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคานของคาน G7 และ G8.....	64
4.22	กราฟเปรียบเทียบค่าการโก่งตัว ณ กึ่งกลางคานของคานตัวอย่างที่ทดสอบ.....	65
4.23	กราฟเปรียบเทียบผลลัพธ์การใช้ deviator 1 และ 2 ตัว.....	66



บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันการก่อสร้างด้วยโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายเป็นที่นิยมกว่าโครงสร้างชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีความทนทานสูง ต้องการการบำรุงรักษาน้อยและมีราคาต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ อย่างไรก็ตามโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นจะรับแรงดึงได้ต่ำและอาจเกิดการแตกร้าวได้ จากการรับน้ำหนักบรรทุกที่มากเกินไป ความคืบ ความล้า และปัจจัยอื่นๆ ดังนั้นการอัดแรงนั้นจะช่วยให้คอนกรีตเสริมเหล็กนั้นรับแรงได้มากขึ้นทำให้สามารถลดปัญหาการแตกร้าวเมื่อเทียบกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป อีกทั้งยังช่วยลดการแอ่นตัว โดยการเสริมแรงนั้นแบ่งได้ 2 แบบ ตามตำแหน่งที่วางลวดอัด คือ คอนกรีตเสริมแรงแบบภายใน และ คอนกรีตเสริมแรงแบบภายนอก ซึ่งโครงการพิเศษฉบับนี้จะกล่าวถึงการศึกษาคอนกรีตเสริมแรงแบบภายนอก

1.2 ความเป็นมาและความสำคัญ

การอัดแรงแบบภายนอกเป็นการอัดแรงแบบดึงเหล็กที่หลัง โดยวางลวดอัดแรงไว้ภายนอกโครงสร้าง ถูกนำไปใช้ในงานก่อสร้างสะพาน และทางยกระดับต่างๆ สะพานแห่งแรกที่น่าแนวคิดเรื่องการอัดแรงอัดแรงแบบภายนอกไปใช้คือสะพานข้ามแม่น้ำในเมือง Aue Saxony ประเทศเยอรมัน และการอัดแรงแบบภายนอกนี้ได้นำไปใช้กับการสะพานอีกหลายแห่ง เช่นสะพานข้ามแม่น้ำ Shigenobu เป็นสะพานข้ามแม่น้ำที่ใช้การอัดแรงแบบภายนอกเข้ามาช่วยในการก่อสร้างประเทศญี่ปุ่น สะพาน Trockua ประเทศเยอรมัน นอกจากนี้จะช่วยในการก่อสร้างแล้ว แนวคิดการอัดแรงแบบภายนอกยังถูกนำมาใช้ในการซ่อมแซมหรือเสริมกำลังในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพแล้วหรือมีแนวโน้มจะเสื่อมสภาพ และทำให้ความสามารถในด้านต่างๆมีมากขึ้นเช่นการรับแรง และอื่นๆ จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงนำไปสู่การศึกษาและทำโครงการพิเศษนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตอัดแรงแบบภายนอกโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางที่ต่าง ๆ มาเปรียบเทียบกับกัน แต่เพื่อความสะดวกในการทดลองทางผู้ทดลองได้ทำการย่อขนาดของคานลง

1.3 วัตถุประสงค์โครงการพิเศษ

- 1.3.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการอัดแรงแบบภายนอกที่มีระยะเยื้องศูนย์กลางต่างกัน
- 1.3.2 เพื่อศึกษากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการอัดแรงแบบภายนอกที่มีระยะเยื้องศูนย์กลางต่างกัน
- 1.3.3 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวเมื่อเพิ่มจำนวน deviator

1.4 ขอบเขตการศึกษาโครงการพิเศษ

- 1.4.1 ศึกษาโดยใช้คานช่วงเดียว ใช้ขนาดหน้าตัด 0.15×0.25 m ยาว 2.00 m ใช้วิธีกำลังในการออกแบบ โดยใช้น้ำหนักบรรทุกแบบสถิต
- 1.4.2 ลวดอัดแรงใช้เหล็กเส้นกลม SR24 ขนาด 9 mm
- 1.4.3 ศึกษาคานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงแบบภายนอกโดยใช้น้ำหนักบรรทุกแบบ 2 point load
- 1.4.4 ใช้ deviator 2 ตัว วางห่างจากปลายคาน 60 cm ทั้งสองด้าน โดยระยะเยื้องศูนย์กลางต่างกัน
- 1.4.5 อัดแรงขนาด 1,000 kg เท่ากัน ทุกตัวอย่างที่ต้องอัดแรง

1.5 วิธีการศึกษา

- 1.5.1 ศึกษาหาความรู้ที่เกี่ยวกับข้อบกพร่องคอนกรีตอัดแรง
- 1.5.2 ออกแบบเหล็กเสริมคอนกรีต ลวดอัดแรง และส่วนผสมคอนกรีต
- 1.5.3 ศึกษาขั้นตอน วิธีการลงมือปฏิบัติการก่อสร้าง
- 1.5.4 ปรึกษาอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ
- 1.5.6 ลงมือปฏิบัติและบันทึกผลการปฏิบัติตามวัตถุประสงค์
- 1.5.7 นำผลการปฏิบัติมาวิเคราะห์และสรุป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ตารางเวลาการทำงาน

แผนงาน	พ.ศ.2560					พ.ศ.2561				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.ศึกษาหัวข้อโครงการ	■	■								
2.ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องและปรึกษาอาจารย์ที่ปรึกษา	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
3.ออกแบบเหล็กเสริมคอนกรีต ลวดอัดแรง และส่วนผสมคอนกรีต			■	■						
4.เตรียมตัวอย่างทดสอบ						■	■			
5.ทำการทดสอบเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผล								■	■	
6.จัดทำเอกสารโครงการ										
6.1จัดทำเอกสารโครงการบทที่1,2และ3			■	■	■					
6.2จัดทำเอกสารโครงการบทที่4และ5									■	■

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ทราบถึงพฤติกรรมการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการอัดแรงแบบภายนอกที่มีระยะเยื้องศูนย์กลางต่างกัน

1.7.2 ทราบถึงกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของของคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการอัดแรงแบบภายนอกที่มีระยะเยื้องศูนย์กลางต่างกัน

1.7.3 ทราบถึงพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวเมื่อเพิ่มจำนวน deviator

1.7.4 เป็นแนวทางสำหรับผู้ที่สนใจและศึกษาการออกแบบคอนกรีตอัดแรงแบบภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.8 ตารางงบประมาณที่ใช้

รายการ	จำนวน	ราคา/หน่วย(บาท)	ค่าใช้จ่าย(บาท)
1. ค่าเหล็กเส้นDB12	5 เส้น	170.00	850.00
2. ค่าเหล็กเส้นRB9	15 เส้น	100.00	1500.00
3. ค่ากึ่งเหล็กเส้น	12 เส้น	100.00	1200.00
4. ค่าstain gauge	3 กล่อง	1000.00	3000.00
5. ค่าเฟลทเหล็ก	5 kg	30.00	150.00
6. ค่าพลาสติกใส	1 ม้วน	150.00	150.00
7. ค่าพุกและน็อต	20 ชุด	13.00	260.00
8. ค่าลวดผูกเหล็ก	5.00 kg	40.00	200.00
รวม			7310.00



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

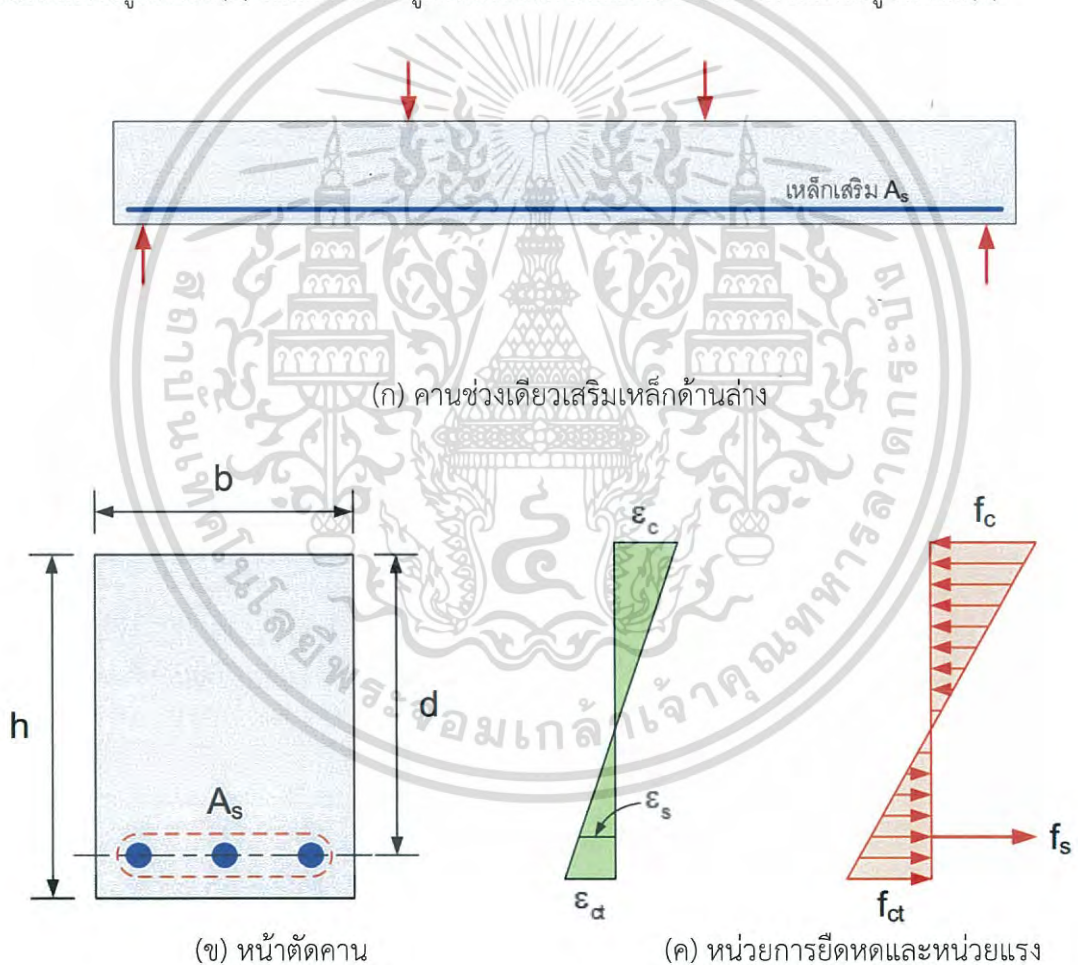
บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

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

2.1.1 พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในคานซึ่งรับการดัดนั้นต้องการความต้านทานทั้งการรับแรงอัดและแรงดึง แต่กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตนั้นต่ำกว่ากำลังรับแรงอัดมาก ดังนั้นจึงมีการใช้เหล็กเสริมช่วยรับแรงดึง ในกรณีของคานช่วงเดียวดังในรูปที่ 2.1(ก) เหล็กเสริมจะถูกใช้บริเวณด้านล่างของหน้าตัดคานดังในรูปที่ 2.1(ข)



รูปที่ 2.1 พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับน้ำหนักบรรทุกทุกในช่วงอิลาสติก

[ผศ.ดร.มงคล จิวิจรเดช, (5)]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

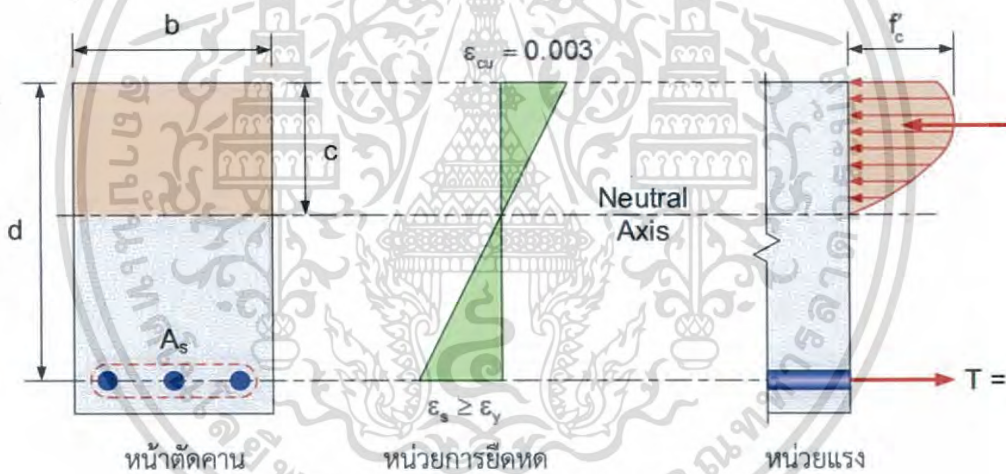
สมการพื้นฐานในการคำนวณออกแบบสำหรับการดัดคือ

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

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

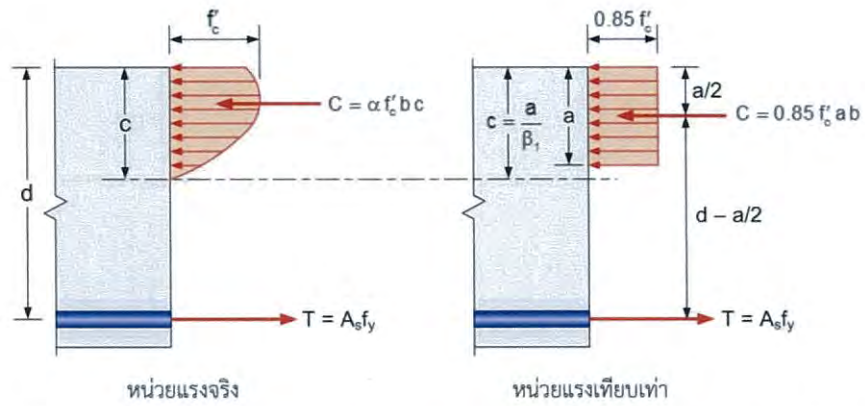
เมื่อ M_u คือโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักคูณเพิ่มค่า; M_n คือกำลังรับโมเมนต์ที่คำนวณได้ทางทฤษฎี (Nominal moment capacity) และ ϕ คือตัวคูณลดกำลังสำหรับการดัด ACI กำหนดให้เท่ากับ 0.90

ในการคำนวณกำลังรับโมเมนต์ดัด M_n นั้นจะคำนวณจากแรงคู่ควบที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคาน คือ แรงอัดบนคอนกรีต C และแรงดึงในเหล็กเสริม T คูณด้วยระยะห่างระหว่างแรงทั้งสอง แต่เนื่องจากหน่วยแรงอัดบนคอนกรีตมีการกระจายไม่เป็นเส้นตรงดังในรูปที่ 2.2 ทำให้การคำนวณค่อนข้างยุ่งยาก



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

C.S. Whitney ได้เสนอวิธีการคำนวณที่ให้ผลเทียบเท่ากันซึ่งได้รับการตรวจสอบและยอมรับนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยใช้การกระจายหน่วยแรงรูปสี่เหลี่ยมเทียบเท่าหน่วยแรงในคอนกรีตจะมีค่าเท่ากับ $0.85 f'_c$ คงที่จากผิวด้านรับแรงอัดเข้ามาถึงความลึก $a = \beta_1 c$ ดังในรูปที่ 2.3

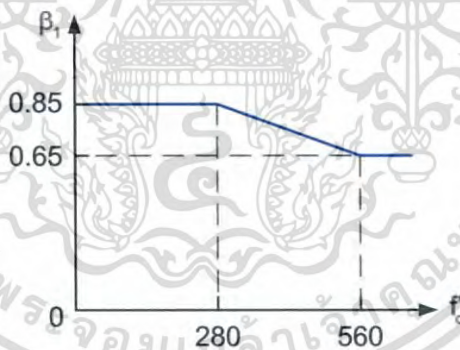


รูปที่ 2.3 การกระจายหน่วยแรงบนหน้าตัดคาน [ผศ.ดร.มงคล จิรวัชรเดช, (5)]

สำหรับคอนกรีต $f'_c < 280$ ksc. $\beta_1 = 0.85$

สำหรับคอนกรีต $280 \text{ ksc.} < f'_c < 560 \text{ ksc.}$ $\beta_1 = 0.85 - 0.05 \left(\frac{f'_c - 280}{70} \right)$

สำหรับคอนกรีต $f'_c > 560$ ksc. $\beta_1 = 0.65$



รูปที่ 2.4 ค่า β_1 ที่กำลังอัดของคอนกรีต f'_c ต่างๆ [ผศ.ดร.มงคล จิรวัชรเดช (5)]

กำลังรับแรงดัด M_n สามารถหาได้จากหน่วยแรงสี่เหลี่ยมเทียบเท่าได้ดังนี้

$$\text{แรงอัดจากคอนกรีต: } c = 0.85 f'_c ab \quad (2.2)$$

$$\text{แรงดึงจากเหล็กเสริม: } T = A_s f_y \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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 $\rho_{\min} < \rho < \rho_{\max}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ในเวลาไล่เลี่ยกัน คือในปี ค.ศ.1888 C.E.W. Doehring ชาวเยอรมันได้จดลิขสิทธิ์การก่อสร้างแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงด้วยลวดเหล็ก แต่วิธีการนี้ในสมัยนั้นยังไม่ประสบความสำเร็จ เนื่องจากลวดเหล็กในสมัยนั้นมีกำลังรับแรงดึงต่ำ แรงดึงที่ให้แก่ลวดจะสูญเสียไปมากเนื่องจากผลของการหดตัว (Shrinkage) และการคืบ (Creep) ของคอนกรีต

การพัฒนาคอนกรีตอัดแรงได้มีลักษณะของการพัฒนาได้ใกล้เคียงความจริงมากขึ้นเมื่อปี 1908 CHARLES R. STEINER ได้จดทะเบียนเกี่ยวกับ Reinforced concrete construction โดยวิธีการที่ใช้คือ เมื่อคอนกรีตเริ่มมีการหดตัวลง ก็จะมีการขึ้นน็อตเพื่อดึงเหล็กในคอนกรีตให้ตึง เพื่อป้องกันการหดตัวของคอนกรีต แต่การทำคอนกรีตอัดแรงด้วยวิธีนี้นั้น ไม่ได้ได้รับความนิยมมากนัก เพราะทำให้ค่าใช้จ่ายสูงขึ้นมาก

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

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

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

การอัดแรง หมายถึง การให้ความเค้นแก่องค์อาคารแม้ขณะที่องค์อาคารนั้นยังไม่มีน้ำหนักบรรทุกกระทำ ข้อแตกต่างระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็กและคอนกรีตอัดแรงคือ คอนกรีตเสริมเหล็กจะประกอบด้วยคอนกรีตและเหล็กเสริม แต่ในคอนกรีตอัดแรงเหล็กเสริมกับคอนกรีตจะอยู่ในสภาพความเค้นตั้งแต่แรก ทั้งๆที่ยังไม่ได้รับแรงกระทำจากภายนอก โดยเหล็กจะถูกดึงค้างไว้ในคอนกรีต ทำให้ คอนกรีตอยู่ในสภาพความเค้นอัด ส่วนเหล็กอยู่ในสภาพความเค้นดึง ทำให้พฤติกรรมของเหล็กและคอนกรีตในการใช้งานดีขึ้น เหล็กจะสามารถใช้งานได้ในช่วงแรงดึงสูงๆ และคอนกรีตซึ่งรับแรงอัดได้ดี แต่รับแรงดึงได้ต่ำ เมื่อให้แรงอัดไว้ก่อนก็เท่ากับเป็นการปรับปรุงความสามารถในการรับแรงดึงของคอนกรีต พิจารณาคานคอนกรีตจากรูปที่ 2.5 สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกกระทำดังรูป (ก) ผลของโมเมนต์จะก่อให้เกิดหน่วยแรงอัดที่ผิวบนและหน่วยแรงดึงที่ผิวล่าง ดังรูป (ค) แต่สำหรับคานคอนกรีตอัดแรง หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคอนกรีตจะเป็นผลรวมของหน่วยแรงเนื่องจากการอัดแรงในรูป (ข) และหน่วยแรงเนื่องจากโมเมนต์ภายนอกในรูป (ค) ซึ่งผลรวมของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคอนกรีตทั้งผิวบนและผิวล่างแสดงไว้ในรูป (ง) จะเห็นว่าผลของโมเมนต์ภายนอกก่อให้เกิดหน่วยแรงดึงที่ผิวล่างของคอนกรีต แต่เนื่องจากคานคอนกรีตอัดแรงได้รับหน่วยแรงอัดไว้ก่อนแล้วเมื่อรับโมเมนต์จากภายนอกหน่วยแรงดึงที่ผิวล่างของคอนกรีตจะหักล้างกับหน่วยแรงอัดที่ได้ จากการอัดแรง หน้าตัดคานคอนกรีตอัดแรงหลังจากได้รับโมเมนต์จากภายนอกจะไม่มีส่วนใดเกิดหน่วยแรงดึง ดังนั้นการอัดแรงจะเป็นการช่วยในพฤติกรรมมารับแรงดึงในคอนกรีต



(ก)คานคอนกรีตอัดแรง



(ข)หน่วยแรงเนื่องจากการอัด (ค)หน่วยแรงเนื่องจากโมเมนต์ภายนอก (ง)ผลรวมหน่วยแรง

รูปที่ 2.5 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดของคานคอนกรีตอัดแรง [ดร.นเรศ พันธราธร, (1)]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต เป็นการวิเคราะห์คอนกรีตอัดแรงในสถานการณ์ใช้งาน (service state) โดยมีสมมติฐานว่าคอนกรีตเป็นวัสดุยืดหยุ่นในสถานการณ์ใช้งาน ดังนั้น ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์คือทฤษฎีอีลาสติก สำหรับคอนกรีตอัดแรงนี้หลักการที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตในสถานการณ์การใช้งานคือหลักการรวมแรง หน่วยแรงในคอนกรีต σ_c ณ ตำแหน่ง ใดๆ 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)]

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

2.4.2 การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขณะรับน้ำหนักบรรทุก

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

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

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

การแตกร้าวในคอนกรีตจะเกิดขึ้นเมื่อหน่วยแรงที่ผิวบนสุดหรือล่างสุดเกิดหน่วยแรงดึงขึ้น จนเกินค่าที่คอนกรีตสามารถรับได้ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นกับโมเมนต์ที่กระทำต่อคาน ค่าโมเมนต์ภายนอกที่ทำให้คอนกรีตอัดแรงเริ่มแตกร้าว คือค่าโมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตมีหน่วยแรงดึงเกิดขึ้นเท่ากับโมดูลัสของการแตกหักดังสมการ 2.11

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

โดยที่ M_{cr} คือ โมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้าว

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

2.6 กำลังประลัยของคอนกรีตอัดแรง

การออกแบบให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและในเหล็กเสริมน้อยกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ที่กำหนดไว้สถานะการใช้งานก็ไม่ได้หมายถึง ความปลอดภัยอย่างเพียงพอที่แท้จริงของโครงสร้างต่อการรับกำลัง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องตรวจสอบกำลังที่สถานะประลัย เพื่อให้แน่ใจว่าโครงสร้างมีความสามารถในการรับกำลังได้อย่างเหมาะสม

2.6.1 สมมุติฐานการวิเคราะห์โมเมนต์ดัดประลัย

สมมุติฐานที่ใช้ในการคำนวณหาโมเมนต์ดัดประลัยขององค์อาคารที่ใช้อยู่ทั่วไปมีดังนี้

ก) การกระจายของหน่วยการยึดหดตัวในคอนกรีตและเหล็กเสริมเป็นเส้นตรง กล่าวคือ หน่วยการยึดหดตัวในคอนกรีตและเหล็กเสริม เป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางจาก แนวแกนสะเทิน

ข) คอนกรีตไม่รับแรงดึงหรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งก็คือ กำลังในการรับแรงดึงของคอนกรีตไม่ถูกนำมาพิจารณาในการคำนวณ

ค) ที่สถานะประลัย หน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ผิวด้านรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 0.003 พฤติกรรมของคอนกรีตอัดแรงที่สถานะประลัยคล้ายกับคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป หลักการที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์กำลังประลัยของคาน คือ หลักการแรงคู่ควบภายใน ในช่วงสถานการณ์ใช้งานก่อนที่คอนกรีตเกิดการแตกร้าว คอนกรีตอัดแรงจะแตกต่างจาก คอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปตรงที่ในคอนกรีตอัดแรง แรงคู่ควบ C-T จะมีค่าคงที่แม้ว่าโมเมนต์ภายนอกเพิ่มขึ้น แต่แกนของโมเมนต์คู่ควบมีค่ามากขึ้นตามโมเมนต์ภายนอกที่เพิ่มขึ้น เมื่อคานรับน้ำหนักภายนอกเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนเลยช่วงสถานการณ์ใช้งาน การแตกร้าวของคอนกรีตจะเกิดขึ้น ตอนนี้แกนของโมเมนต์คู่ควบมีค่าค่อนข้างคงที่เหมือนคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป ดังนั้น เมื่อโมเมนต์ภายนอกเพิ่มขึ้นต่อไป แรงคู่ควบ C-T จะมีค่าเพิ่มขึ้นหมายความว่า หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงจะเริ่มเพิ่มขึ้นและหน่วยแรงอัดในคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นจนความสัมพันธ์ของหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัวของคอนกรีตไม่เป็นเส้นตรงอีกต่อไป จนกระทั่งเมื่อโมเมนต์ภายนอกมีค่าเท่ากับโมเมนต์ดัดประลัยคานก็ถึงจุดวิบัติ

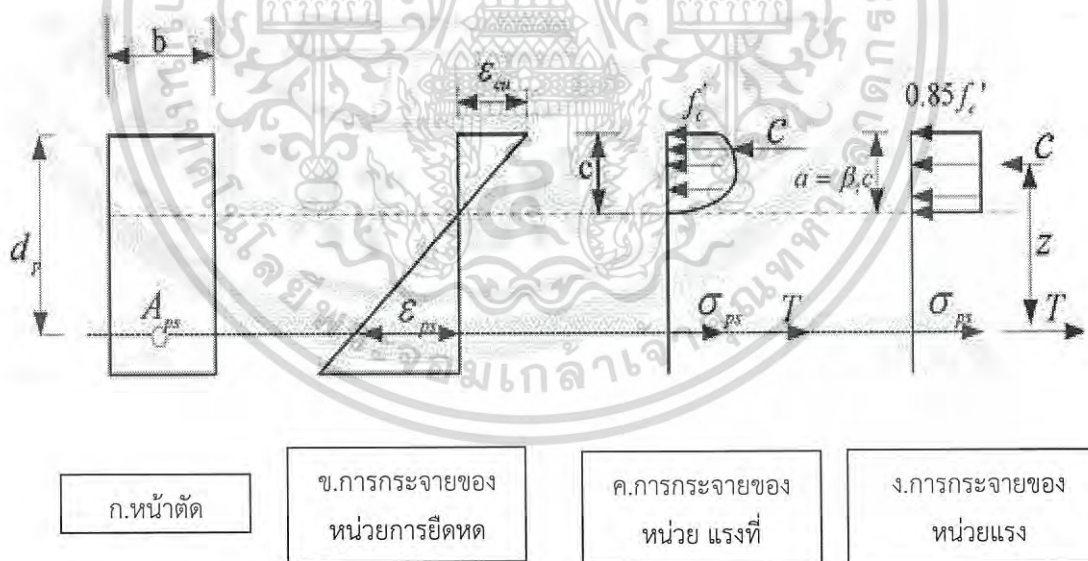
การวิบัติจะเกิดขึ้นเมื่อคอนกรีตเกิดการอัดระเบิด (Crushing) มาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. ได้กำหนดหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ผิวด้านรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 0.003 ที่สถานะประลัยการวิบัติขององค์อาคารแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลัก (Tension Failure) และการวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลัก (Compression Failure) การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลักเริ่มต้นโดยการยึดตัวของเหล็กเสริมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก (การครากของเหล็กเกิดขึ้น) และวิบัติในที่สุดเมื่อคอนกรีตอัดระเบิด ($\epsilon_c = 0.003$) การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลักนี้เกิดขึ้นเมื่อปริมาณเหล็กเสริมน้อยกว่าเกณฑ์สมดุล (Under Reinforcement) ส่วนการวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลักคอนกรีตจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราเบิด ($\epsilon_c = 0.003$) ขณะที่เหล็กเสริมยังไม่ถึงจุดคราก ดังนั้น การวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลัก นี้ องค์อาคารจะวิบัติขณะที่การโก่งตัวยังมีน้อยเพราะเหล็กเสริมก็ยังยึดไม่มาก การวิบัติชนิดนี้จึงมีลักษณะเปราะ (Brittle) และเกิดขึ้นเมื่อปริมาณเหล็กเสริมมากกว่าเกณฑ์สมดุล (Over Reinforcement)

2.6.2 การกระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตเทียบเท่าเป็นรูปสี่เหลี่ยม (Equivalent Rectangular Concrete Stress Distribution)

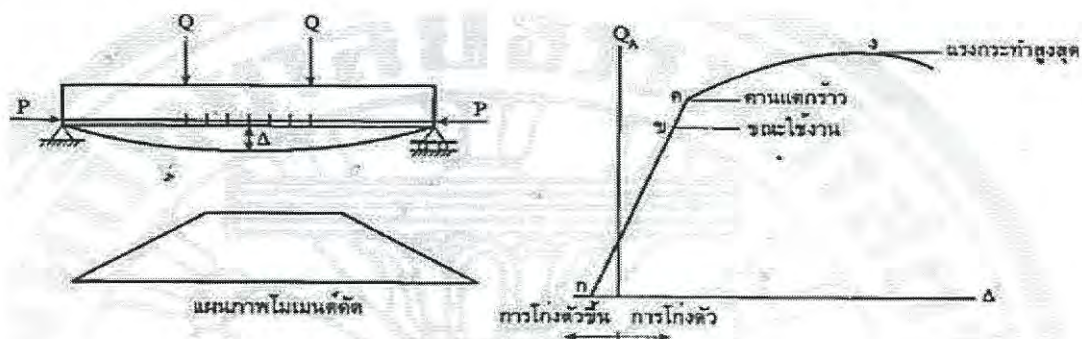
การกระจายของหน่วยการยืดหดตัวและหน่วยแรงที่สถานะประลัยแสดงไว้ใน ภาพที่ 2.6 ที่สถานะประลัยความสัมพันธ์ของหน่วยแรงกับหน่วยการยืดหดตัวไม่เป็นเส้นตรง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าใน ขณะที่การกระจายของหน่วยการยืดหดตัวเป็นเส้นตรงและเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางจาก แนวแกนสะเทินดังภาพที่ 2.6 (ข) การกระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตที่อยู่เหนือแนวแกนสะเทิน จะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งดังภาพที่ 2.6 (ค) เพื่อให้การคำนวณกระทำได้ง่ายขึ้น การกระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งจึงถูกแทนที่โดย การกระจายของหน่วยแรงอัดเทียบเท่าเป็นรูปสี่เหลี่ยมดังภาพที่ 2.6 (ง) รูปสี่เหลี่ยมที่เทียบเท่านี้ใช้หลักการของการที่แรงอัดลัพธ์ C ในคอนกรีต จะต้องมีค่าเท่าเดิมและตำแหน่งของแรงอัดลัพธ์ c จะต้องอยู่ในตำแหน่งเดิม



รูปที่ 2.6 การกระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีต

ดังนั้นพื้นที่ภายใต้รูปสี่เหลี่ยมของ ภาพที่ 2.6 (ง) จึงต้องมีพื้นที่เท่ากับ พื้นที่ภายในรูปโค้งของภาพที่ 2.6 (ค) และตำแหน่งของเส้นทรอยด์ของพื้นที่ทั้งสองต้องอยู่ที่ระดับเดียวกัน

2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำภายนอกและการแอ่นตัวของคาน



รูปที่ 2.7 กราฟความสัมพันธ์ของแรงภายนอกกับค่าการแอ่นตัวของคานคอนกรีตอัดแรง
(ต่อกุล กาญจนาลัย , 2539)

พิจารณาคานช่วงเดียวธรรมดาในภาพที่ 2.7 (ก) มีแรงภายนอก Q กระทำนอกเหนือจากน้ำหนักคานในภาพที่ 2.7 (ข) แสดงกราฟความสัมพันธ์ของแรงภายนอกกับค่าการแอ่นตัวของคาน เมื่อแรง Q เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ของแรง Q และการแอ่นตัวจะเป็นเส้นตรงจนถึง จุด (ค) ซึ่งเป็นจุดที่คานเริ่มเกิดการแตกร้าวบริเวณด้านล่างของช่วงที่โมเมนต์ตัดมีค่าคงที่ที่สุด (ข) แรง Q มีค่าเต็มที่ที่ใช้ ออกแบบคาน หลังจากคานเกิดแตกร้าวความสัมพันธ์ของแรงกระทำและการแอ่นตัวไม่เป็นเส้นตรง อัตราการเพิ่มของแรงจะน้อยกว่าอัตราการเพิ่มการแอ่นตัว คานจะรองรับแรงสูงสุดที่จุด (ง) และแรงกระทำจะลดลงขณะที่การแอ่นตัวเพิ่มขึ้น ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัวของคาน จะต้องทราบความสัมพันธ์ของโมเมนต์ตัดและความโค้งหน้าตัดใดๆ ของคาน ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือคุณสมบัติของคอนกรีตและเหล็กเสริมในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียด

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

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



รูปที่ 2.8 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 การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใดหาได้จากผลต่างของค่าแรงดึงที่วัดได้ขณะดึงด้วยเครื่องดึงไฮดรอลิก P_j กับแรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กทันทีทันใดหลังจากถ่ายแรง P_i

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

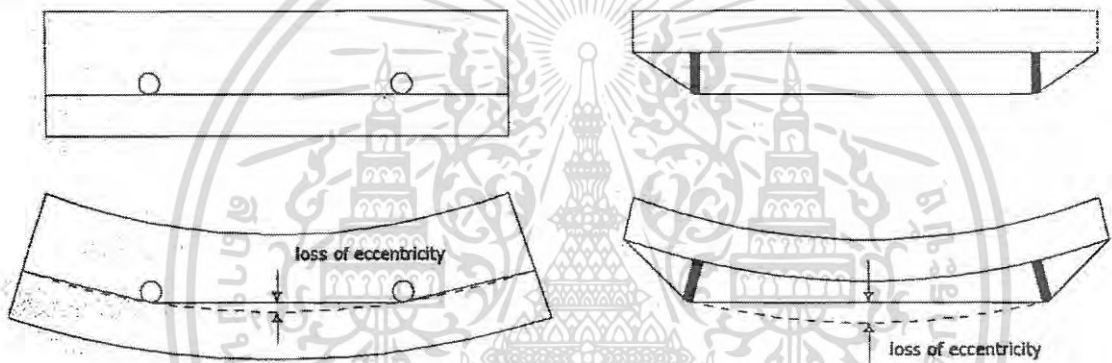
ข) การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลา

การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลา มีสาเหตุหลักๆ มาจากการหดตัวของคอนกรีตจากการสูญเสียความชื้น (shrinkage loss) การคืบ (creep loss) และการคลายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรง (steel relaxation loss) ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้นการสูญเสียแรงดึงนี้จะเพิ่มขึ้นตามเวลา โดยที่อัตราการสูญเสียแรงดึงจะเร็วในช่วงแรกๆ และค่อยๆ ลดลง เมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้น ถ้าให้ P_e คือแรงดึงที่เหลือในเหล็กเสริมอัดแรงหลังจากการสูญเสียแรงดึงจากสาเหตุทั้งหมดได้เกิดขึ้นแล้ว การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลาจึงหาได้จาก

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

2.9 ระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอก [คณิตกร จยะตระกูล, (3)]

ในกรณีของระบบลวดอัดแรงภายใน การเปลี่ยนตำแหน่งของลวดอัดแรงจะสอดคล้องกับการเปลี่ยนตำแหน่งของคอนกรีต ดังนั้นระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงที่ใช้ในการคำนวณจึงเป็นค่าคงที่ แต่ในกรณีของระบบลวดอัดแรงภายนอกการเปลี่ยนตำแหน่งของลวดอัดแรงจะไม่สอดคล้องกับการเปลี่ยนตำแหน่งของคอนกรีต ยกเว้นจุดที่มีดีวิเอเตอร์ (deviator) และแป้นยึดลวดอัดแรง (jacking corbel) การไม่สอดคล้องกันนี้จึงทำให้เกิดการลดลงของระยะเยื้องศูนย์กลางดังแสดงใน รูปที่ 2.9 ซึ่งเรียกว่า loss of eccentricity (second-order effect) เนื่องจากระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อน้ำหนักกระทำมีการเปลี่ยนแปลง การคำนวณหาค่าระยะเยื้องศูนย์กลางจึงมีขั้นตอนมากขึ้น ในการคำนวณหาระยะเยื้องศูนย์กลางจะต้องทราบระยะแอนตัวของคานเสียก่อน และการที่จะหาระยะแอนตัวของคานได้ก็จะต้องทราบระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรง ดังนั้นการคำนวณจึงต้องทำแบบ trial and error



รูปที่ 2.9 การลดลงของระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอก [คณิตกร ปิยะตระกูล, (3)]

2.10 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมอัดแรง [ดร.นเรศ พันธธาร, (1)]

การวัดหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมอัดแรงในคอนกรีตอัดแรงกระทำขณะทำการดึงเหล็ก เสริมอัดแรงและหลังจากนั้นจะมีการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมเนื่องจากสาเหตุต่างๆตามที่ได้กล่าว มาแล้ว และเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกมากขึ้นจะทำให้เพิ่มเติมหน่วยแรงในเหล็กเสริมอัดแรงก็จะมีเปลี่ยนแปลง อีกเล็กน้อยเนื่องจากการโก่งตัวขององค์อาคารนั้นๆ ในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรง ในเหล็กเสริมอัดแรงที่เกิดจากการโก่งตัวของคานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติมในช่วงสถานการณ์ใช้งาน โดยที่คอนกรีตยังไม่เกิดการแตกร้าว

ก) สำหรับคอนกรีตอัดแรงระบบมีการยึดเหนี่ยว

ในคอนกรีตอัดแรงระบบมีการยึดเหนี่ยวเหล็กเสริมอัดแรงและคอนกรีตที่อยู่โดยรอบ จะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวเกิดขึ้นทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงหน่วยการยึดหดตัวที่เกิดขึ้นบนเหล็กเสริมอัดแรง AS_s และค่าการเปลี่ยนแปลงหน่วยการยึดหดตัวของคอนกรีต AS_c ที่อยู่โดยรอบเท่ากัน การคำนวณหน่วยแรงที่เปลี่ยนไปของเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากการโก่งตัว สามารถคำนวณได้จากทฤษฎีอีลาสติค ดังนี้

$$\Delta \varepsilon_s = \Delta \varepsilon_c$$

$$\Delta \sigma_s = n \frac{My}{I} \quad (2.26)$$

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

ข) สำหรับคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยว

การเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงของคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยวแตกต่างจากของระบบมีการยึดเหนี่ยว เหล็กเสริมอัดแรงจะมีการขยับตัวสัมพันธ์กับคอนกรีตที่อยู่โดยรอบเนื่องจากไม่มีการยึดเหนี่ยวระหว่างผิวทั้งสอง เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุก หน้าตัดคอนกรีตที่กึ่งกลางช่วงคานจะมีโมเมนต์เกิดขึ้นสูงสุด หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงของคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยวที่กึ่งกลางช่วงคานจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ช้ากว่าของคอนกรีตอัดแรงระบบมีการยึดเหนี่ยว ที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อมีการเพิ่มหน่วยการยึดตัวในเหล็กเสริมอัดแรงเกิดขึ้น หน่วยการยึดตัวในเหล็กเสริมอัดแรงชนิดไร้การยึดเหนี่ยวนี้จะกระจายไปตลอดคาน เนื่องจากเหล็กเสริมอัดแรงมีอิสระในการเคลื่อนตัวสัมพันธ์กับคอนกรีตที่อยู่โดยรอบ ดังนั้นการคำนวณจึงเริ่มต้นด้วยการคำนวณหาความยาวที่เพิ่มขึ้นของเหล็กเสริมอัดแรง ค่าที่ได้จากการอินทิเกรตหน่วยการยึดตัวของคอนกรีตที่ตำแหน่งเดียวกับเหล็กเสริมอัดแรงตลอดความยาวคาน ดังสมการ 2.27

$$\Delta \sigma_s = \frac{n}{L} \int_0^L \frac{My}{I} dx \quad (2.27)$$

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

สมการคำนวณหาค่าระยะโก่งทันทันที่มากที่สุด

$$\Delta = K \left(\frac{5ML^2}{48E_c I_e} \right) \quad (2.28)$$

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

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left(1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right) I_{cr} \leq I_g \quad (2.29)$$

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

M_a คือ โมเมนต์ตัดมากที่สุดที่กระทำจากน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน, kg-cm

I_g คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดทั้งหมด, cm^4

I_{cr} คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดแตกร้าว, cm^4

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.12.1 (สายัณต์ ศิริมนตรี, 2002)

ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมทางโครงสร้างอันได้แก่ ความแกร่งเชิงตัด การเสีรูปร่าง กำลังและความเหนียวของคานที่ได้รับความเสียหายและเสื่อมสภาพจากการบรรทุกน้ำหนักเกิน แล้วทำการเสริมกำลังด้วยการอัดแรงภายนอกโดยมีการแปรเปลี่ยนขนาดของแรงอัด ในการวิจัยได้กล่าวได้ทำการทดสอบคานสะพานคอนกรีตอัดแรงขนาดเท่าของจริงโดยคานที่ใช้เป็นคานรูปตัว I มีขนาดเทียบเท่ากับหน้าตัดมาตรฐาน Type III ของ AASHTO มีความยาวช่วงทดสอบ 12 เมตร มีความลึกของคาน 1.10 เมตร ก่อนทำการทดสอบได้หล่อแผ่นพื้นสะพานความหนา 0.20 เมตร กว้าง 1.60 เมตร เท่ากับที่ใช้จริงในทางปฏิบัติ ดังลวดเกลียวอัดแรงที่ใช้เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.70 มิลลิเมตร จำนวน 14 เส้น ที่กึ่งกลางช่วงคาน เพื่อให้มีการวิบัติเป็นแบบการตัดเป็นหลัก น้ำหนักบรรทุกทุกเป็นจุดที่กระทำต่อคานจะถูกเลือกให้กระทำที่ช่วงการเลื่อน 5.00 เมตร จากจุดรองรับ การบรรทุกน้ำหนักใช้แม่แรงขนาด 100 ตัน 2 ตัว วัดการตอบสนองของคานภายใต้น้ำหนักบรรทุกด้วยเกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้าติดที่ผิวบนของพื้นและตามแนวด้านข้างของคาน การอ่านตัวที่กลางช่วงคานและตามแนวแรงกระทำ ใช้ Displacement Transducer ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเก็บข้อมูลตลอดการทดลองและส่งข้อมูลมายัง Data logger และบันทึกผลด้วย คอมพิวเตอร์การ ทดสอบจะกระทำจนกระทั่งการแอนตัวของคานประมาณ 4 เท่าของการแอนตัวที่จุดครากที่คาดการณ์จาก การวิเคราะห์โดยวิธีความเครียดสอดคล้อง (Strain Compatibility Method) จากนั้นทำการลดน้ำหนัก และบันทึกค่าการคืบตัวและการเสียรูปถาวรเมื่อลดน้ำหนัก จนกระทั่งเป็นศูนย์จากนั้นจะทำการทดสอบซ้ำ เพื่อดูพฤติกรรมที่เปลี่ยนไปหลังจากคานได้ แตกร้าวไปแล้ว โดยทำการทดสอบจนการแอนตัวประมาณ เท่ากับที่หยุดการทดสอบในครั้งแรก เทียบกับจุดเริ่มต้นทดสอบในครั้งที่สอง ก่อนการทดสอบครั้งที่ 3-5 จะทำการเสริมลวดอัดแรงดั่ง โดยแปรเปลี่ยนขนาดแรงอัด 3 ขนาดได้แก่ 72 ตัน, 144 ตัน และ 216 ตัน ตามลำดับ ระหว่างการทดสอบจะทำการตรวจวัดการเสียรูปด้วยเกจวัดความเครียด ไฟฟ้า และ Displacement Transducer ผลการทดสอบสามารถสรุปให้เห็นภาพรวม ส่วนรูปแบบการแตกร้าวของ คานแสดงให้เห็นได้ว่าคานมีการเสื่อมสภาพเนื่องจากการบรรทุกน้ำหนักเกินพิกัดโดยความถี่ของแรงดึงที่ถี่ซึ่งถี่ วัต โดยความชันของเส้นกราฟจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ตลอดจนมีการเสียรูปถาวรเพิ่มขึ้นในการทดสอบ แต่ละครั้ง เมื่อสังเกตจากการทดสอบครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ในขณะที่แนวโน้มของน้ำหนักบรรทุกประลัย ยังคงไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เนื่องจากเนื้อที่หน้าตัดของเหล็กเสริมอัดแรงภายในคานมีค่าคงเดิม ในการ ทดสอบครั้งที่ 3 ครั้งที่ 4 และครั้งที่ 5 ได้ทำการเสริมลวดอัดแรงภายนอกโดยแปรเปลี่ยนขนาดของแรงอัด ภายนอก ซึ่งในการเสริมกำลังแต่ละครั้งจะมีการยกตัวหรือมีการคืบตัวของคานการเสียรูปถาวร นอกจากนั้น ขนาดความกว้างของรอยร้าวจะลดลงขึ้นกับขนาดของแรงอัดภายนอก ปัจจัยดังกล่าวเป็นผลให้ความถี่ของแรงดึงที่ถี่และน้ำหนักบรรทุกประลัยของคานเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

2.12.2 (Kunburud Tankulrad, Jarukit Por, Janupiboon, Nopparut Kongkitisupchai, 2016)

ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการแอนตัวและน้ำหนักบรรทุกประลัยของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เปรียบเทียบกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบเสริมแรงแบบภายนอกโดยแบ่งตัวอย่างของคานเป็น 3 ตัวอย่างตัวอย่างละ 2 ชิ้น โดยตัวอย่างที่ 1 เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ตัวอย่างที่ 2 และ 3 เป็นคาน คอนกรีตเสริมเหล็กแบบเสริมแรงแบบภายนอก โดยขนาดของแรงเป็น 1,000 kg และ 2,000 kg ตามลำดับ

จากวิทยานิพนธ์ข้างต้นในส่วนของตัวอย่างที่ 2 และ 3 ได้ทำการเสริมลวดอัดแรงภายนอกโดย เปลี่ยนขนาดของแรงอัดภายนอกเป็น 1,000 kg และ 2,000 kg ตามลำดับ พบว่าขนาดของแรงอัดที่ ต่างกัน ทำให้น้ำหนักบรรทุกประลัยและพฤติกรรมแอนตัวของคานเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน ทำให้เรา เปลี่ยนไปวิเคราะห์ระยะเยื้องศูนย์ ระยะห่างของ deviator และจำนวนของ deviator ที่ต่างกันแทน

บทที่ 3

ขั้นตอนการปฏิบัติงาน

3.1 กล่าวนำ

โครงการนี้มีจุดประสงค์คือ ศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกประลัยและการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา, คานคอนกรีตอัดแรงภายนอกโดยมีระยะเยื้องศูนย์กลางต่างกัน และคานอัดแรงที่ใช้จำนวน deviator ที่ต่างกัน โดยแบ่งการทดสอบเป็น 4 ชุด ได้แก่

- | | |
|---|------------|
| 1.คานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา | 2 ตัวอย่าง |
| 2.คานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงภายนอก 1000 kg ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 5 cm | 2 ตัวอย่าง |
| 3.คานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงภายนอก 1000 kg ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 9 cm | 2 ตัวอย่าง |
| 4.คานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงภายนอก 1000 kg ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 12.5 cm | 2 ตัวอย่าง |

โดยคานทดสอบทั้ง 4 ชุดใช้คานขนาด 0.15 x 0.25 m ยาว 2.00 m และคานอันแรงจะวาง deviator ห่างจากปลายคานทั้งสองด้านเป็นระยะ 60 cm

การทดสอบจะเป็นการทดสอบแบบ two point ที่ระยะ 70 cm จากปลายคาน

3.2 รายละเอียดการออกแบบ

3.2.1 การออกแบบคานโดยวิธีกำลัง

จากหน้าตัด 0.15 x 0.25 m ยาว 2.00 m เลือกใช้คอนกรีต $f'_c = 240$ ksc และใช้เหล็กรับแรงดึง $f_y = 3,000$ ksc 2DB12 เหล็กปลอกใช้ RB9 SR24 ทุก ๆ ระยะ 10 cm ระยะ covering คือ 2.5 cm จะได้

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{2 \times 1.13}{15 \times 22} = 0.00685$$

ตรวจสอบอัตราส่วนเหล็กเสริม

เนื่องจากเหล็กรับแรงดึงใช้ $f_y = 3,000$ ksc, $\beta_1 = 0.85$

$$\rho_{min} = \frac{14}{f_y} = \frac{14}{3,000} = 0.00467$$

$$\begin{aligned} \rho_{max} &= 0.75\beta_1 \frac{0.85f'_c}{f_y} \left(\frac{6120}{6120+f_y} \right) \\ &= 0.75 \times 0.85 \frac{0.85 \times 240}{3,000} \left(\frac{6,120}{6,120+3,000} \right) \\ &= 0.0291 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ว่า

$$\rho_{min} = 0.00467 < \rho = 0.00685 < \rho_{max} = 0.0291$$

ดังนั้นคานจะวิบัติแบบรับแรงดึงเป็นหลัก

โมเมนต์ที่คานรับได้

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{2 \times 1.13 \times 3,000}{0.85 \times 240 \times 15} = 2.216 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned} M_n &= A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \\ &= 2 \times 1.13 \times 3,000 \left(22 - \frac{2.216}{2} \right) \times \frac{1}{100} \\ &= 1,416 \text{ kg-m} \end{aligned}$$

น้ำหนักบรรทุกที่คานรับได้

$$\begin{aligned} M_n &= \frac{PL}{6} + \frac{\omega L^2}{8} \\ 1,416 &= \frac{P \times 2}{6} + \frac{2,400 \times 0.15 \times 0.25 \times 2^2}{8} \\ P &= 4,113 \text{ kg} \end{aligned}$$

ดังนั้นคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดารับน้ำหนักบรรทุกได้ 4,113 kg

เหล็กปลอก

เนื่องจากเราสนใจความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดเป็นหลัก ดังนั้น จึงใช้ปริมาณเหล็กเสริมทางขวาง อย่างน้อยเป็นเกณฑ์

$$A_{vmin} = \frac{3.5bs}{f_y} = \frac{3.5 \times 15 \times 10}{3,000} = 0.218 \text{ cm}^2$$

จากกำหนดใช้เหล็ก RB9 $A_v = 2 \times 0.636 = 1.252 \text{ cm}^2$ ดังนั้น $f_y = 2,400 \text{ ksc}$ และระยะห่างเหล็กปลอกใช้ $s = 10 \text{ cm}$

จะได้ว่า

$$A_v = 1.252 \text{ cm}^2 > A_{vmin} = 0.218 \text{ cm}^2$$

ดังนั้นใช้เหล็กปลอก RB9@0.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การออกแบบคอนกรีต

ปูนซีเมนต์ใช้ Portland ประเภทที่ 1 กำลังคอนกรีตที่ต้องการ 240 ksc. ค่าการยุบตัว 10 ± 2.5 cm. ขนาดมวลรวมโตสุด 40 mm.

จะได้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) คือ 0.636

ใช้ปริมาณน้ำ 175 kg./m^3

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

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

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

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

ดังนั้นจะได้ปริมาณส่วนผสมที่ใช้สำหรับปริมาตรต่อ 1 m^3 ดังนี้

-ปูนซีเมนต์	289.74 kg
-ทราย	808.67 kg
-หิน	1,080.00 kg
-น้ำ	190.00 kg

3.2.3 เหล็กเสริมอัดแรงภายนอก

เหล็กเสริมอัดแรงใช้เหล็ก SR24 RB9 กับคานตัวอย่างที่ใช้อัดแรง คานละ 2 เส้น ทุกตัวอย่างจะอัดแรง 1,000 kg คำนวณค่า strain ได้ดังนี้

$$f_s = \frac{P_a}{A_s} = \frac{1,000}{2 \times 0.636} = 786.16 \text{ ksc}$$

E_s เหล็กใช้ 2.04×10^6 kcs จะได้

$$\varepsilon = \frac{f_s}{E_s} = \frac{786.16}{2 \times 10^6} = 385.37 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$$

ดังนั้นจะต้องอัดแรงจน strain gauge อ่านค่าได้ $385.37 \mu\text{m/m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับทำการทดสอบ

- 1) วัสดุผสมคอนกรีตตาม Mixed design
- 2) เครื่องมือผสมคอนกรีต
- 3) ชุดทดสอบค่าการยุบตัว
- 4) เหล็ก DB12 SD30 ยาว 2.10 เมตร จำนวน 16 เส้น
- 5) เหล็ก RB9 SR24 ยาว 2.10 เมตร จำนวน 16 เส้น
- 6) เหล็กปลอก RB9 SR24
- 7) เหล็กเส้น RB9 SR24 สำหรับใช้แทนลวดอัดแรง
- 8) แบบหล่อคานสำหรับขนาดคาน 0.15 X 0.25 เมตร ยาว 2 เมตร
- 9) อุปกรณ์สำหรับติดตั้งลวดอัดแรงภายนอก
- 10) พลาสติก สำหรับบ่มคาน
- 11) เพรมเหล็กทดสอบคาน
- 12) Load cell
- 13) เครื่องอ่านค่าน้ำหนักแบบดิจิตอล
- 14) Hydraulic Jack
- 15) Strain gauge
- 16) Data logger
- 17) Dial gauge



3.4 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

1. เตรียมแบบหล่อคอนกรีต



รูปที่ 3.1 ประกอบแบบหล่อคอนกรีต

2. เตรียมเหล็กเสริม ประกอบด้วย เหล็กแกน DB12 2 เส้น RB9 2 เส้น และเหล็กปลอก RB9

@0.10



รูปที่ 3.2 การผูกเหล็กเสริม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำเหล็กเสริมมาใส่แบบหล่อคอนกรีต



รูปที่ 3.3 เหล็กเสริมเมื่อนำมาใส่แบบหล่อคอนกรีตแล้ว

4. เตรียมส่วนผสมคอนกรีต แล้วทำการผสมส่วนผสมทั้งหมดตาม Mixed design และทำการวัดค่า การยุบตัวของคอนกรีต ซึ่งต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 10 ± 2.5 cm



รูปที่ 3.4 วัดค่าการยุบตัวของคอนกรีตขณะผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เทคอนกรีตลงแบบหล่อที่เตรียมไว้ แล้วใช้เครื่องจี้คอนกรีตเพื่อไม่ให้เกิดช่องว่างหรือโพรงเมื่อคอนกรีตแข็งตัว



รูปที่ 3.5 เทคอนกรีตลงแบบหล่อ

6. ทำการบ่มตัวอย่างคานคอนกรีตโดยใช้พลาสติกพันหุ้มรอบ



รูปที่ 3.6 การบ่มคานคอนกรีตตัวอย่างโดยการใชพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เมื่อทำการบ่มคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้ครบตามกำหนดแล้ว จึงนำคานมาทดสอบ



รูปที่ 3.7 คานตัวอย่างเตรียมที่จะทดสอบ

3.5 ขั้นตอนทำการทดสอบ

1) แบ่งชุดการทดสอบออกเป็น 4 ชุด ได้แก่

- คานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา จำนวน 2 คาน
- คานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงภายนอก ระยะเยื้องศูนย์กลาง 5 cm อัดแรง 1,000 kg. จำนวน 2 คาน
- คานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงภายนอก ระยะเยื้องศูนย์กลาง 9 cm อัดแรง 1,000 kg. จำนวน 2 คาน
- คานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงภายนอก ระยะเยื้องศูนย์กลาง 12.5 cm อัดแรง 1,000 kg. จำนวน 2 คาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ติดตั้งการอัดแรงภายนอก

1. ติดตั้งแผ่นเหล็กที่ปลายคานทั้ง 2 ด้านสำหรับยึดตั้งลวดที่จะทำการอัดแรง



รูปที่ 3.8 เจาะรูสำหรับติดตั้งแผ่นเหล็กที่ปลายคาน

2. ติดตั้ง deviator 2 จุด ที่ระยะ 60 cm จากปลายคาน



รูปที่ 3.9 ติดตั้ง deviator

3. ติดตั้งลวดอัดแรงตามแนวระยะเยื้องศูนย์ที่กำหนดไว้

4. ติดตั้ง Strain gauge ที่ลวดอัดแรงสำหรับวัดค่าการยืดตัวของลวดอัดแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 การติดตั้ง Strain gauge ที่ลวดอัดแรง

5. ติดตั้ง Dial gauge ที่บริเวณกึ่งกลางคาน และที่ระยะ 60 cm จากปลายคาน เพื่อวัดค่าการโก่งตัวของคาน



รูปที่ 3.11 ตำแหน่ง dial gauge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ทำการอัดแรงลวดทั้งสองข้างโดยการขันเกลียวให้ได้ขนาดแรงที่กำหนด



รูปที่ 3.12 การอัดแรงโดยการขันเกลียว

7. ทำการกดทดสอบคานทั้ง 4 ชุด จนคานวิบัติ แล้วบันทึกผล



รูปที่ 3.13 การกดทดสอบคานตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. บันทึกค่าน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำและค่าการโก่งตัว



รูปที่ 3.14 มอนิเตอร์แสดงค่าน้ำหนักบรรทุกทุกและค่าการโก่งตัว

9. นำค่าที่ได้มาวิเคราะห์ผล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

4.1 กล่าวนำ

จากการทดสอบคานตัวอย่างทั้ง 8 คาน ได้บันทึกค่าน้ำหนักบรรทุกกระทำ ค่าการแอ่นตัว และค่ากำลังของคอนกรีตที่ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM จำนวน 6 ลูก

4.2 ผลการทดสอบคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอก

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบค่ากำลังของคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอกที่ 59 วัน

No.	D (cm)	H (cm)	A (cm ²)	F (KN)	f' _c (ksc)
1	15.02	30.02	177.10	382.56	220.20
2	15.08	29.80	178.51	353.75	202.00
3	15.04	29.88	177.57	406.22	233.20
average	15.05	29.90	177.73	380.84	218.47

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบค่ากำลังของคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอกที่ 52 วัน

No.	D (cm)	H (cm)	A (cm ²)	F (KN)	f' _c (ksc)
1	14.96	30.02	175.86	383.66	222.61
2	15.10	29.86	178.99	392.69	223.64
3	14.98	29.89	176.15	190.09	110.00
average	15.01	29.92	176.94	322.15	185.42

หมายเหตุ : เนื่องจากปัญหาจากความล่าช้าของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบชิ้นตัวอย่างคาน ผู้ทำการทดสอบจึงทดสอบคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอกได้ล่าช้า (ทำการทดสอบตัวอย่างทรงกระบอกในวันเดียวกับตัวอย่างคาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

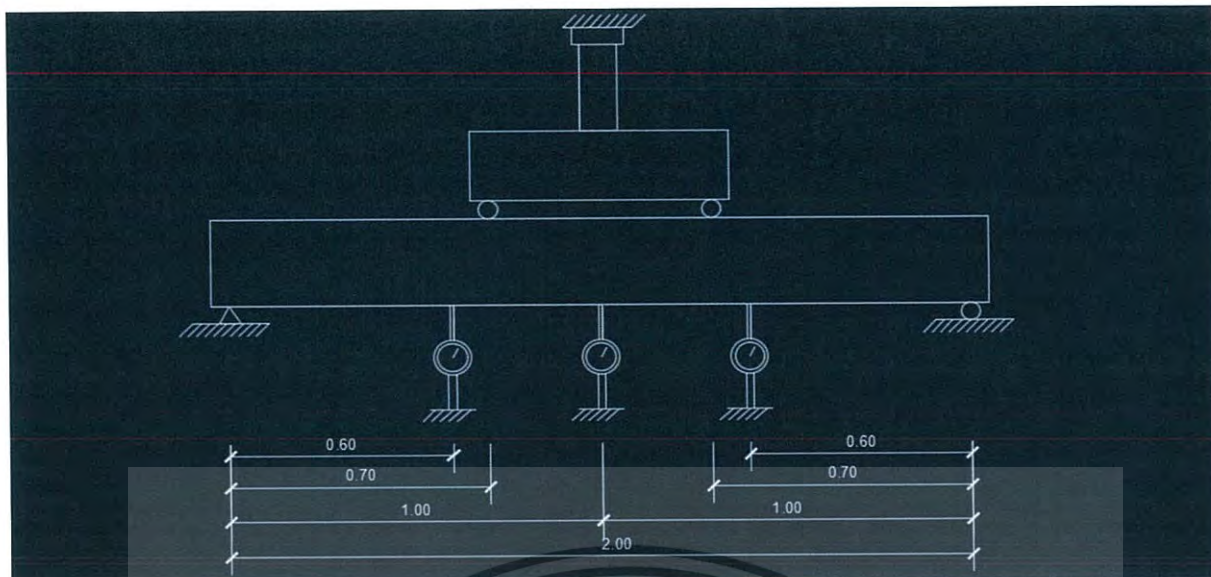
4.3 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง

ต่อไปนี้เป็นรายละเอียดและผลการทดสอบคานตัวอย่างทั้งหมด

ตารางที่ 4.3 แสดงรายละเอียดคานตัวอย่าง

Set	Beam	detail
1	G1	คานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา
	G2	คานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา
2	G3	คานอัดแรง 1,000 kg เยื้องศูนย์ 5 cm
	G4	คานอัดแรง 1,000 kg เยื้องศูนย์ 5 cm
3	G5	คานอัดแรง 1,000 kg เยื้องศูนย์ 9 cm
	G6	คานอัดแรง 1,000 kg เยื้องศูนย์ 9 cm
4	G7	คานอัดแรง 1,000 kg เยื้องศูนย์ 12.5 cm
	G8	คานอัดแรง 1,000 kg เยื้องศูนย์ 12.5 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แสดง Model การ set up ในการทดสอบคานตัวอย่าง

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กกรรมตา G1

Load		Deflection (mm)		
KN	kg	left	mid	right
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.48	457	0.17	0.22	0.17
6.85	698	0.18	0.31	0.19
8.06	822	0.37	0.48	0.35
10.88	1109	0.49	0.64	0.47
12.00	1223	0.69	0.93	0.69
14.02	1429	0.87	1.18	0.86
16.06	1637	1.06	1.49	1.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18.16	1851	1.27	1.84	1.25
20.17	2056	1.51	2.15	1.52
22.17	2260	1.71	2.42	1.69
24.14	2461	1.87	2.71	1.84
25.91	2641	2.19	3.01	2.15
28.03	2857	2.25	3.25	2.26
30.05	3063	2.53	3.55	2.50
32.61	3324	2.93	3.85	2.87
34.01	3467	3.06	4.06	2.96
36.05	3675	3.32	4.34	3.28
38.05	3879	3.56	4.64	3.55
40.09	4087	3.75	4.88	3.72
42.12	4294	3.97	5.13	3.93
44.10	4495	4.18	5.41	4.14
46.41	4731	4.43	5.78	4.39
48.02	4895	4.59	5.98	4.54
50.01	5098	4.77	6.24	4.75

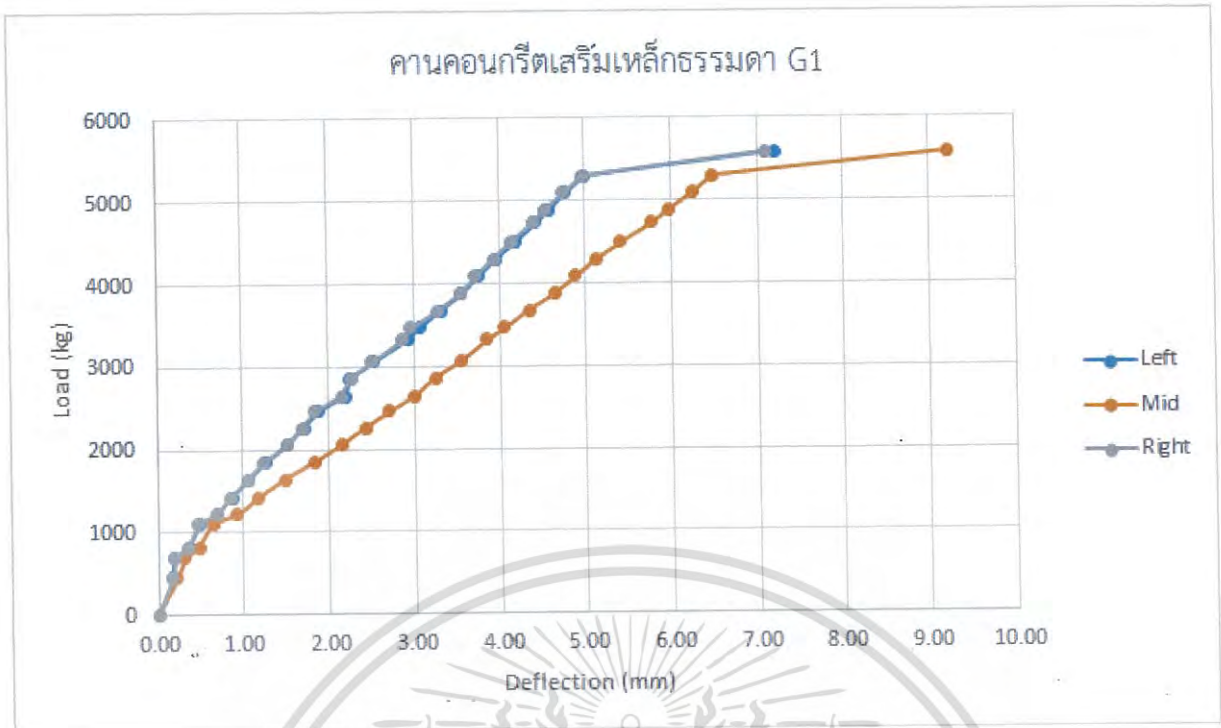
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

51.98	5299	5.00	6.48	4.98
54.78	5584	7.20	9.23	7.10



รูปที่ 4.2 รอยร้าวของคาน G1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคาน G1

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา G2

Load		Deflection (mm)		
KN	kg	left	mid	right
0.00	0	0.00	0.00	0.00
2.47	252	0.38	0.32	0.36
4.73	482	0.49	0.44	0.46
6.63	676	0.58	0.54	0.54
8.01	817	0.68	0.68	0.62
10.26	1046	0.80	0.84	0.71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12.05	1228	1.05	1.14	0.97
14.05	1432	1.29	1.43	1.21
16.00	1631	1.52	1.74	1.46
18.03	1838	1.75	2.12	1.69
20.05	2044	1.99	2.42	1.93
22.21	2264	2.27	2.79	2.23
24.10	2457	2.46	3.08	2.41
26.05	2655	2.78	3.44	2.68
28.13	2867	3.21	3.96	3.04
30.05	3063	3.37	4.29	3.23
32.06	3268	3.62	4.62	3.50
34.07	3473	3.87	4.93	3.76
36.13	3683	4.02	5.22	3.93
38.18	3892	4.23	5.51	4.15
40.08	4086	4.44	5.79	4.38
42.54	4336	4.61	6.08	4.65
44.46	4532	4.76	6.34	4.73

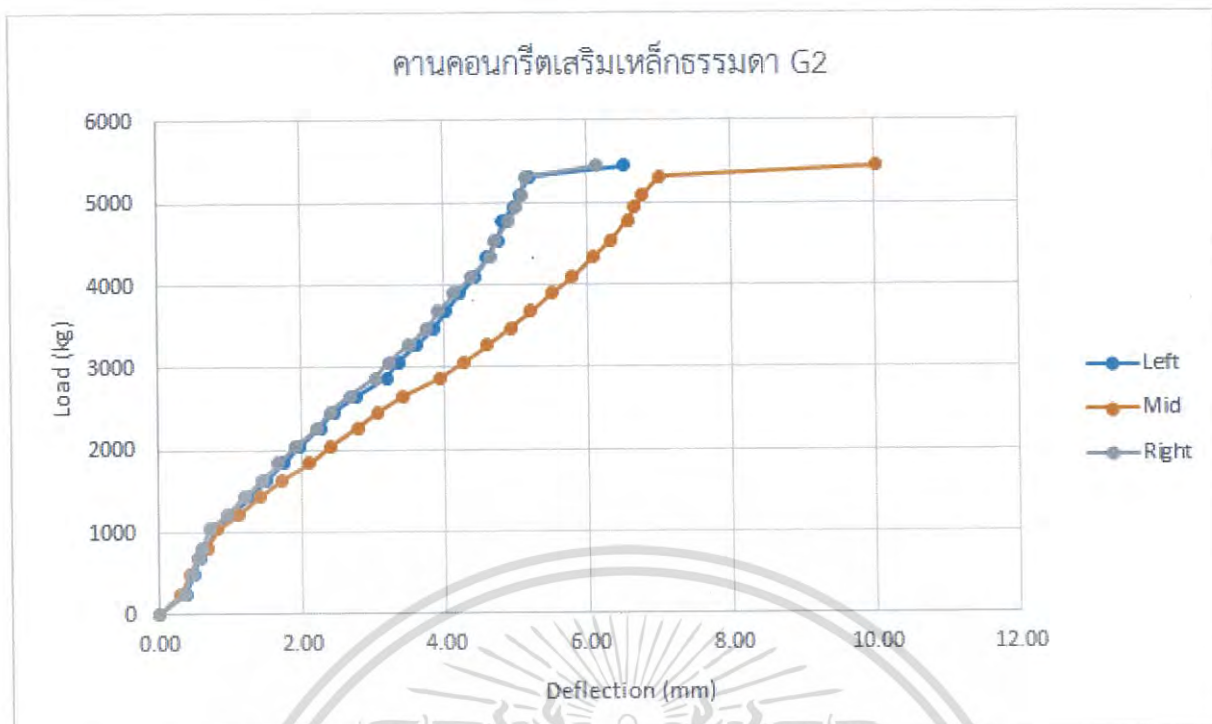
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

46.83	4774	4.83	6.57	4.91
48.44	4938	4.99	6.67	5.02
49.98	5095	5.06	6.78	5.09
52.11	5312	5.22	7.02	5.15
53.44	5448	6.53	10.02	6.14



รูปที่ 4.4 รอยร้าวของคาน G2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคาน G2

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบคานคอนกรีตอัดแรง 1,000 kg ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 5 cm G3

Load		Deflection (mm)		
KN	kg	left	mid	right
0.00	0	-0.06	-0.09	-0.06
2.45	250	0.06	0.08	0.06
3.80	387	0.09	0.12	0.09
7.62	777	0.19	0.33	0.18
8.45	861	0.23	0.40	0.20
10.02	1021	0.29	0.50	0.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12.45	1269	0.35	0.59	0.35
14.01	1428	0.49	0.79	0.45
15.59	1589	0.60	0.94	0.61
17.99	1834	0.76	1.16	0.73
20.13	2052	0.91	1.40	0.88
22.07	2250	1.10	1.69	0.99
24.05	2452	1.27	1.97	1.23
28.04	2858	1.62	2.50	1.55
29.87	3045	1.78	2.76	1.74
32.16	3278	1.99	3.04	1.96
34.08	3474	2.16	3.29	2.10
36.03	3673	2.34	3.54	2.30
37.95	3869	2.50	3.80	2.47
40.01	4078	2.70	4.12	2.66
42.11	4293	2.86	4.36	2.84
46.50	4740	3.21	4.95	3.15
50.04	5101	3.57	5.49	3.51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

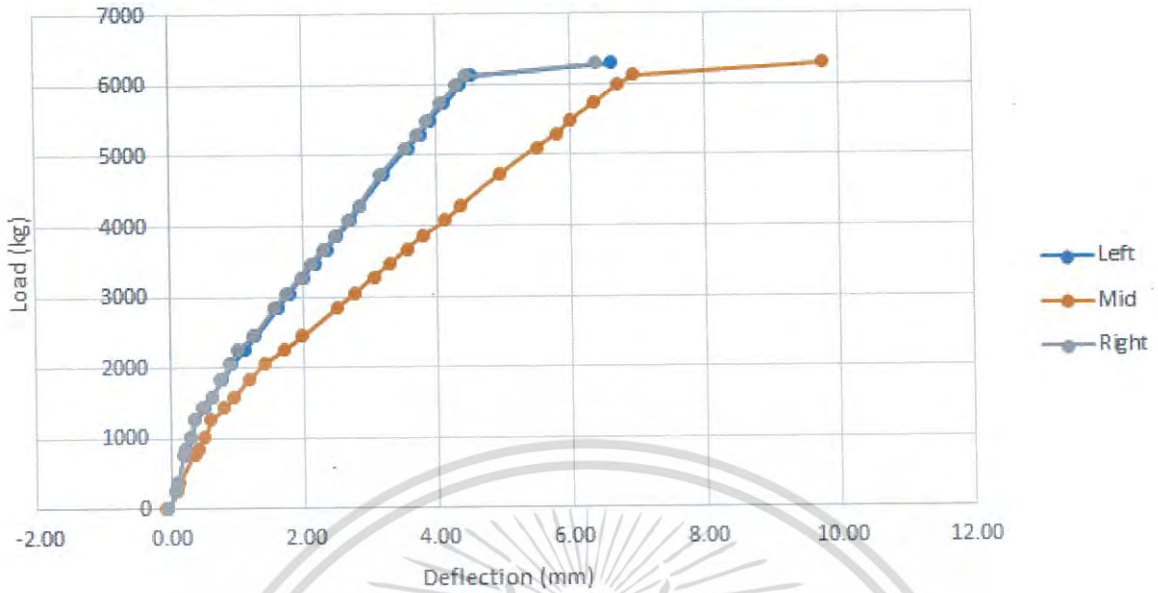
51.93	5294	3.77	5.79	3.70
53.94	5498	3.90	6.00	3.85
56.31	5740	4.12	6.34	4.04
58.69	5983	4.35	6.69	4.30
60.11	6127	4.51	6.95	4.44
61.78	6298	6.62	9.76	6.38



รูปที่ 4.6 รอยร้าวของคาน G3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คานคอนกรีตอัดแรง 1000 kg ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 5 cm G3



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคาน G3

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบคานคอนกรีตอัดแรง 1,000 kg ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 5 cm G4

Load		Deflection (mm)		
KN	kg	left	mid	right
0.00	0	-0.05	-0.03	-0.02
2.21	225	0.10	0.15	0.15
8.09	825	0.27	0.36	0.32
10.36	1056	0.37	0.47	0.42
14.14	1441	0.50	0.62	0.55
15.91	1622	0.58	0.71	0.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17.92	1827	0.64	0.79	0.71
20.31	2070	0.79	0.97	0.84
22.44	2287	0.92	1.10	0.93
23.84	2430	1.07	1.27	1.03
26.00	2650	1.18	1.42	1.14
28.34	2889	1.39	1.68	1.31
30.39	3098	1.52	1.82	1.41
32.10	3272	1.74	2.15	1.61
34.31	3497	1.97	2.45	1.82
36.03	3673	2.13	2.66	1.97
38.53	3928	2.30	2.87	2.12
40.33	4111	2.45	3.08	2.27
44.47	4533	2.80	3.52	2.58
46.49	4739	2.99	3.75	2.75
48.30	4924	3.16	3.94	2.88
50.17	5114	3.33	4.13	3.01
52.24	5325	3.46	4.35	3.18

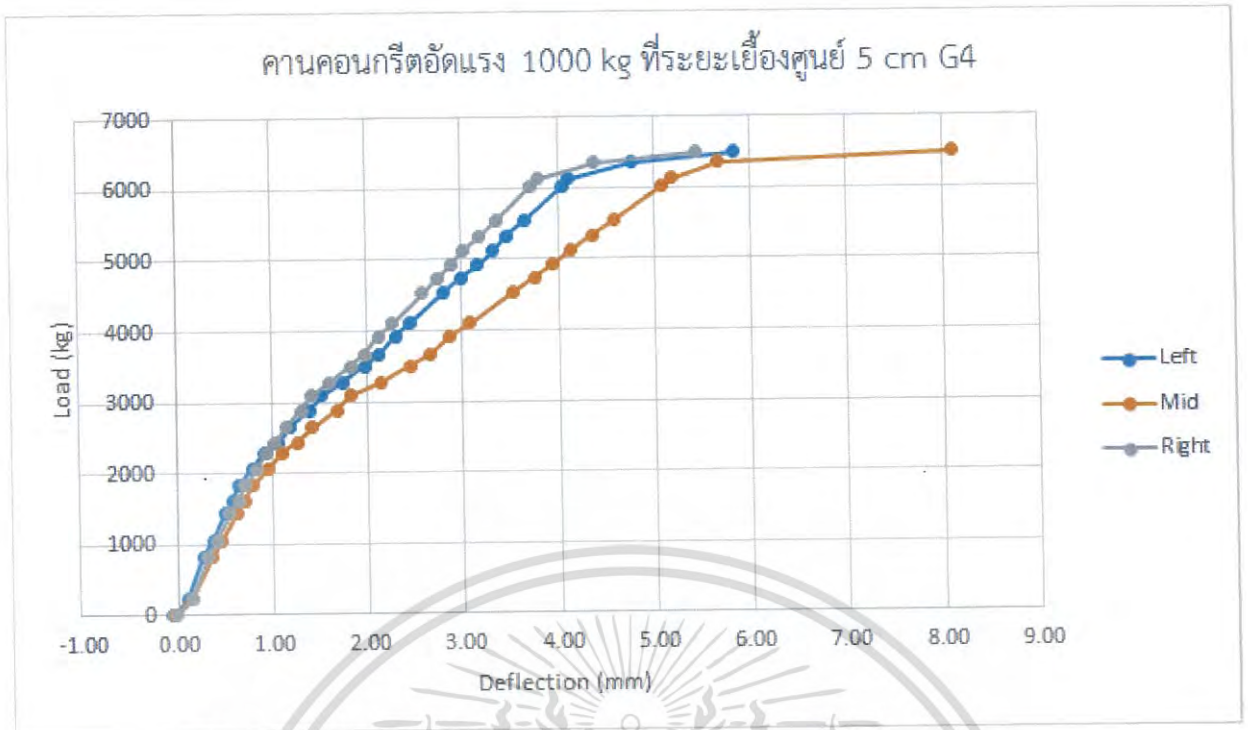
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

54.34	5539	3.65	4.58	3.36
59.08	6022	4.04	5.08	3.71
60.18	6135	4.11	5.19	3.79
62.38	6359	4.77	5.67	4.38
63.77	6501	5.84	8.11	5.43



รูปที่ 4.8 รอยร้าวของคาน G4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคาน G4

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบคานคอนกรีตอัดแรง 1,000 kg ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 9 cm G5

Load		Deflection (mm)		
KN	kg	left	mid	right
0.00	0	-0.05	-0.03	-0.05
2.34	239	0.05	0.09	0.06
4.68	477	0.15	0.21	0.15
7.03	717	0.18	0.24	0.18
8.63	880	0.25	0.32	0.24
9.37	955	0.30	0.37	0.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12.06	1229	0.39	0.48	0.40
13.95	1422	0.45	0.55	0.47
16.10	1641	0.53	0.64	0.53
18.22	1857	0.65	0.77	0.64
20.06	2045	0.75	0.90	0.74
22.10	2253	0.93	1.10	0.90
24.37	2484	1.10	1.29	1.03
26.05	2655	1.27	1.51	1.20
28.21	2876	1.41	1.71	1.36
28.97	2953	1.58	1.93	1.53
32.14	3276	1.71	2.10	1.67
34.20	3486	1.87	2.29	1.83
35.96	3666	2.02	2.48	1.98
38.12	3886	2.18	2.66	2.13
40.11	4089	2.35	2.87	2.31
44.21	4507	2.64	3.24	2.60
46.05	4694	2.77	3.44	2.75

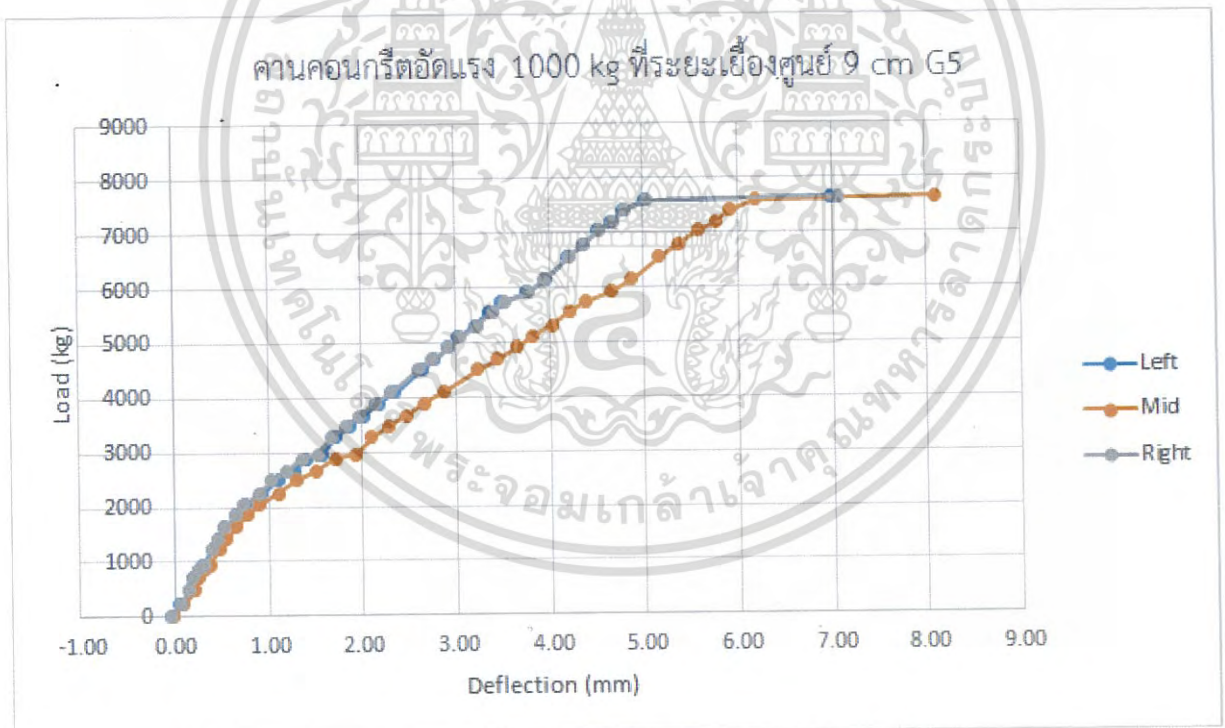
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

48.11	4904	2.92	3.64	2.92
50.05	5102	3.03	3.81	3.05
52.00	5301	3.20	4.02	3.23
54.61	5567	3.36	4.22	3.39
56.19	5728	3.49	4.38	3.52
58.05	5917	3.76	4.65	3.78
60.22	6139	3.96	4.87	3.95
64.24	6548	4.20	5.17	4.21
66.60	6789	4.37	5.38	4.37
68.89	7022	4.52	5.57	4.53
70.39	7175	4.66	5.76	4.67
72.58	7399	4.78	5.91	4.80
74.36	7580	5.01	6.19	5.03
75.00	7645	6.99	8.09	7.06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 รอยร้าวของคาน G5



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคาน G5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบคานคอนกรีตอัดแรง 1,000 kg ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 5 cm G6

Load		Deflection (mm)		
KN	kg	left	mid	right
0.00	0	-0.04	-0.04	-0.04
2.65	270	0.08	0.12	0.08
4.03	411	0.14	0.18	0.14
6.37	649	0.23	0.30	0.24
8.23	839	0.34	0.41	0.34
11.05	1126	0.56	0.69	0.56
12.33	1257	0.63	0.77	0.63
14.61	1489	0.88	1.07	0.86
16.35	1667	1.05	1.27	1.01
18.05	1840	1.25	1.49	1.18
20.45	2085	1.50	1.78	1.41
22.27	2270	1.72	2.04	1.63
23.82	2428	1.88	2.23	1.78
26.86	2738	2.12	2.51	2.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

28.13	2867	2.33	2.75	2.10
30.95	3155	2.66	3.07	2.34
33.13	3377	2.87	3.32	2.52
34.43	3510	3.01	3.48	2.64
36.69	3740	3.20	3.71	2.82
38.18	3892	3.38	3.91	2.97
40.27	4105	3.55	4.11	3.10
42.38	4320	3.84	4.44	3.34
44.62	4548	4.06	4.71	3.53
46.21	4710	4.14	4.80	3.60
48.23	4916	4.30	4.99	3.74
50.40	5138	4.52	5.24	3.94
52.54	5356	4.73	5.51	4.15
54.15	5520	4.89	5.70	4.30
56.61	5771	5.16	6.03	4.57
58.19	5932	5.36	6.27	4.75
60.24	6141	5.49	6.42	4.87

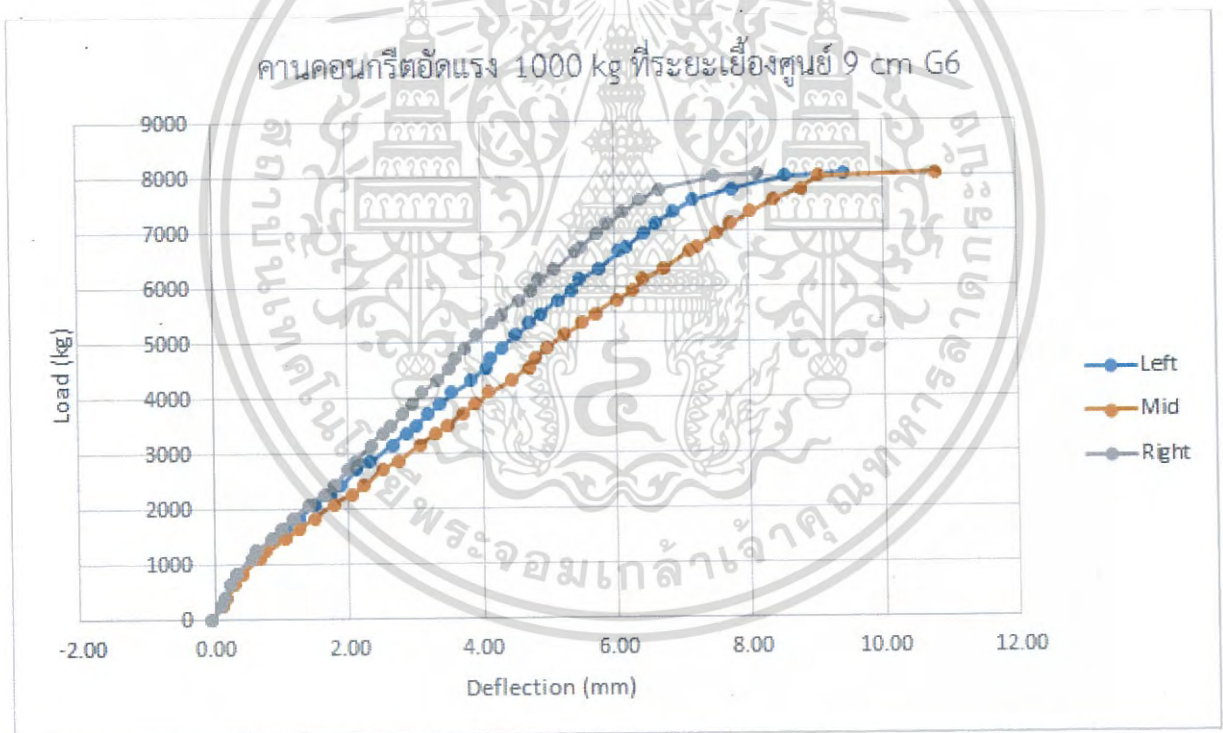
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

61.98	6318	5.76	6.73	5.11
65.11	6637	6.07	7.11	5.41
66.01	6729	6.19	7.24	5.51
68.27	6959	6.44	7.53	5.74
70.01	7137	6.61	7.74	5.90
72.21	7361	6.88	8.03	6.13
74.34	7578	7.16	8.36	6.38
76.22	7770	7.77	8.77	6.68
78.56	8008	8.56	9.05	7.5
79.05	8058	9.44	10.80	8.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 รอยร้าวของคาน G6



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคาน G6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบคานคอนกรีตอัดแรง 1,000 kg ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 12.5 cm G7

Load		Deflection (mm)		
KN	kg	left	mid	right
0.00	0	-0.09	-0.10	-0.08
2.04	208	0.13	0.19	0.14
6.00	612	0.37	0.45	0.39
10.64	1085	0.52	0.64	0.56
13.76	1403	0.64	0.79	0.68
14.24	1452	0.67	0.83	0.71
16.16	1647	0.79	0.99	0.84
18.01	1836	0.91	1.15	0.97
20.04	2043	1.10	1.41	1.16
22.45	2288	1.30	1.67	1.36
24.31	2478	1.48	1.94	1.57
26.03	2653	1.69	2.17	1.76
28.15	2870	1.91	2.47	2.01
30.23	3082	2.09	2.72	2.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

32.41	3304	2.38	2.99	2.43
34.01	3467	2.54	3.20	2.59
36.07	3677	2.73	3.48	2.81
38.30	3904	2.91	3.72	3.00
40.26	4104	3.10	3.96	3.20
42.21	4303	3.29	4.21	3.39
44.16	4502	3.49	4.44	3.57
46.82	4773	3.67	4.69	3.76
48.23	4916	3.85	4.93	3.95
50.06	5103	4.01	5.15	4.12
52.45	5347	4.24	5.46	4.35
54.08	5513	4.36	5.62	4.48
56.32	5741	4.56	5.88	4.68
58.55	5968	4.71	6.09	4.84
60.04	6120	4.86	6.31	5.01
62.16	6336	5.04	6.56	5.21
64.24	6548	5.23	6.81	5.42

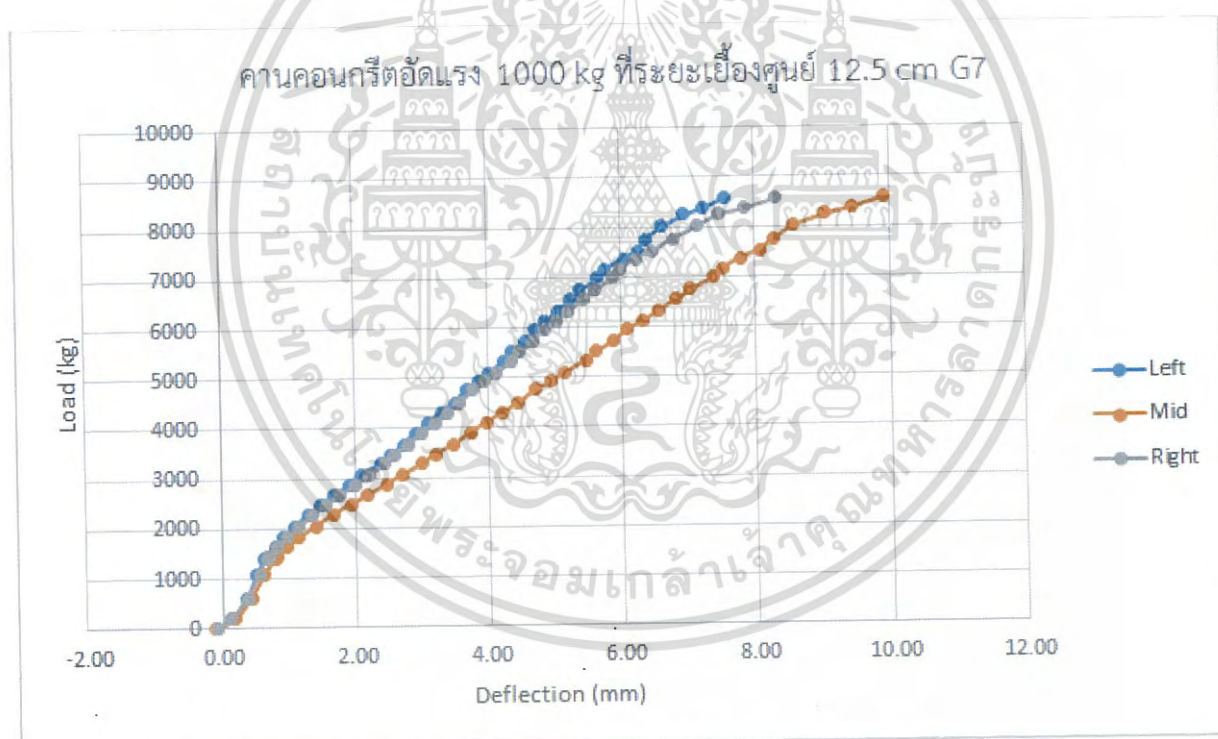
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

66.28	6756	5.39	7.03	5.60
68.55	6988	5.65	7.36	5.87
70.19	7155	5.76	7.51	6.00
72.15	7355	6.04	7.77	6.22
73.80	7523	6.25	8.07	6.47
76.03	7750	6.36	8.28	6.78
78.57	8009	6.61	8.56	7.13
80.89	8246	6.93	9.05	7.45
82.23	8382	7.22	9.44	7.85
84.12	8575	7.54	9.92	8.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 รอยร้าวของคาน G7



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคาน G7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบคานคอนกรีตอัดแรง 1,000 kg ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 12.5 cm G8

Load		Deflection (mm)		
KN	kg	left	mid	right
0.00	0	-0.03	-0.03	-0.03
2.40	245	0.09	0.11	0.10
6.54	667	0.25	0.29	0.24
11.82	1205	0.43	0.48	0.41
14.14	1441	0.57	0.62	0.53
15.96	1627	0.69	0.76	0.65
18.05	1840	0.80	0.91	0.77
18.49	1885	0.82	0.93	0.79
20.19	2058	0.95	1.11	0.94
22.46	2290	1.11	1.31	1.10
24.10	2457	1.36	1.63	1.32
26.14	2665	1.50	1.92	1.54
28.11	2865	1.64	2.10	1.68
30.03	3061	1.89	2.43	1.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

32.77	3340	2.06	2.62	2.07
33.94	3460	2.15	2.76	2.18
36.58	3729	2.50	3.15	2.45
38.08	3882	2.71	3.39	2.62
40.94	4173	2.92	3.66	2.83
42.11	4293	3.02	3.79	2.92
44.86	4573	3.24	4.07	3.15
46.87	4778	3.42	4.28	3.32
48.26	4919	3.56	4.46	3.46
49.87	5084	3.70	4.73	3.68
52.50	5352	3.98	4.98	3.88
55.28	5635	4.18	5.25	4.09
56.75	5785	4.37	5.48	4.27
58.28	5941	4.72	5.61	4.37
60.44	6161	4.95	5.90	4.59
62.58	6379	5.09	6.04	4.71
64.28	6552	5.28	6.23	4.87

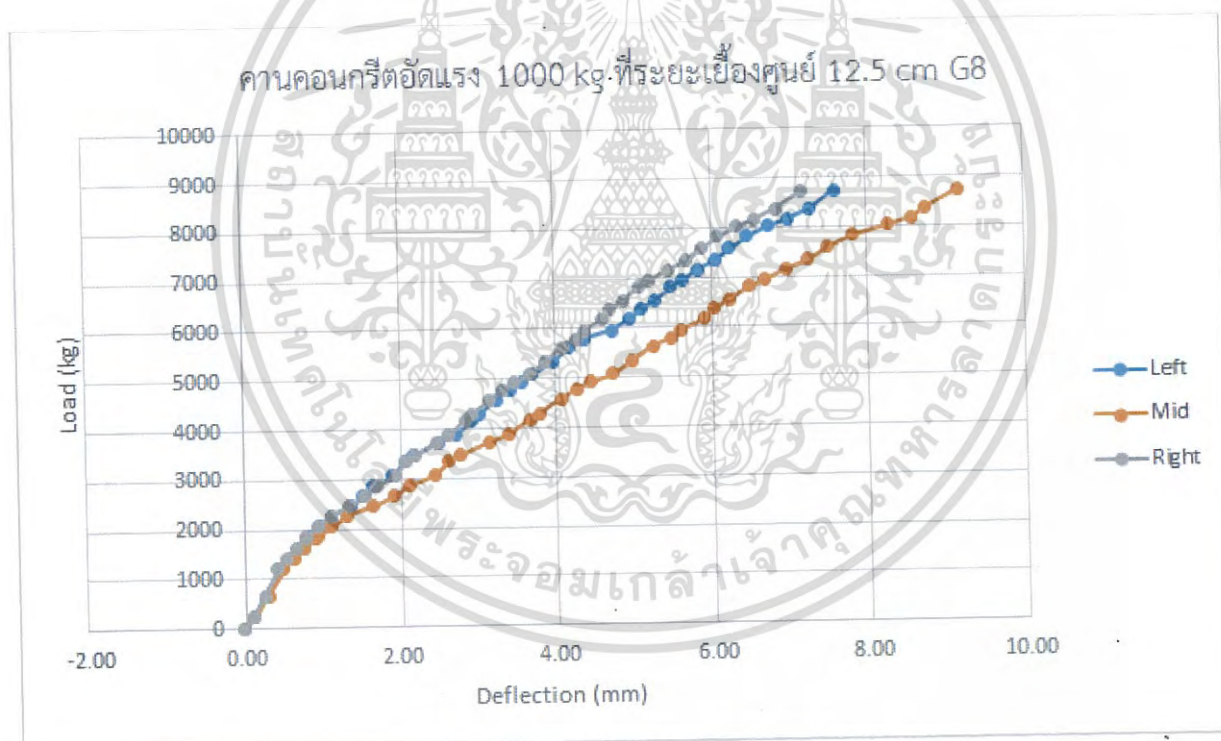
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

66.80	6809	5.49	6.49	5.07
68.02	6934	5.62	6.68	5.19
70.21	7157	5.83	6.97	5.45
72.01	7340	6.05	7.25	5.68
74.44	7588	6.24	7.48	5.87
76.78	7827	6.46	7.81	6.09
78.82	8035	6.73	8.26	6.34
80.21	8176	6.99	8.57	6.57
82.19	8378	7.27	8.75	6.83
85.69	8735	7.58	9.18	7.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 รอยร้าวของคาน G8

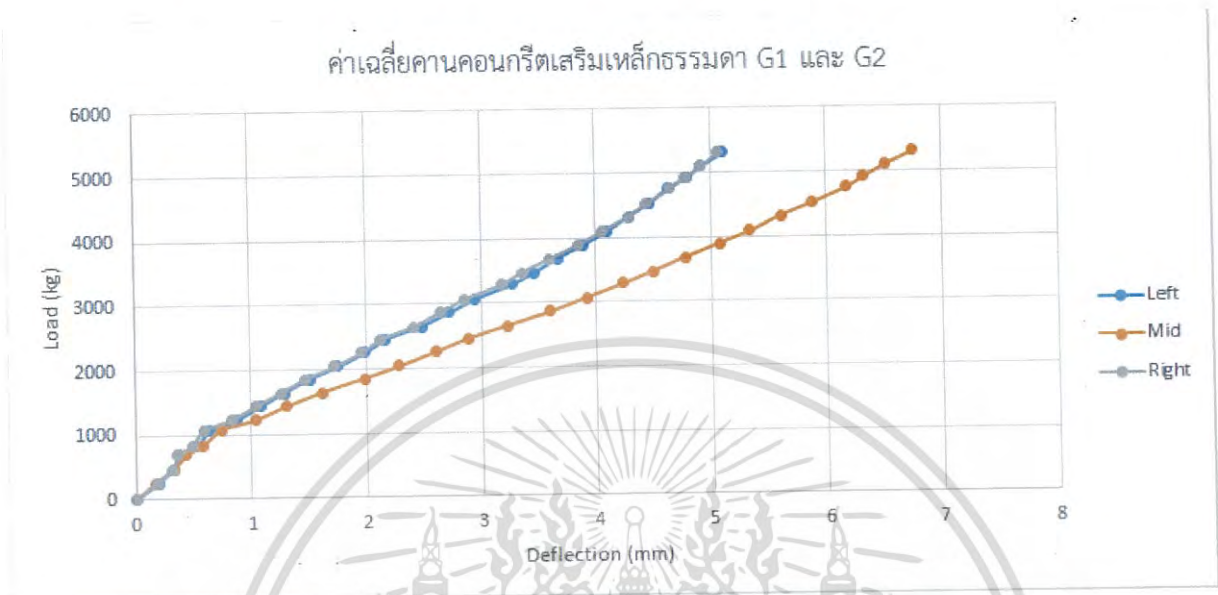


รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคาน G8

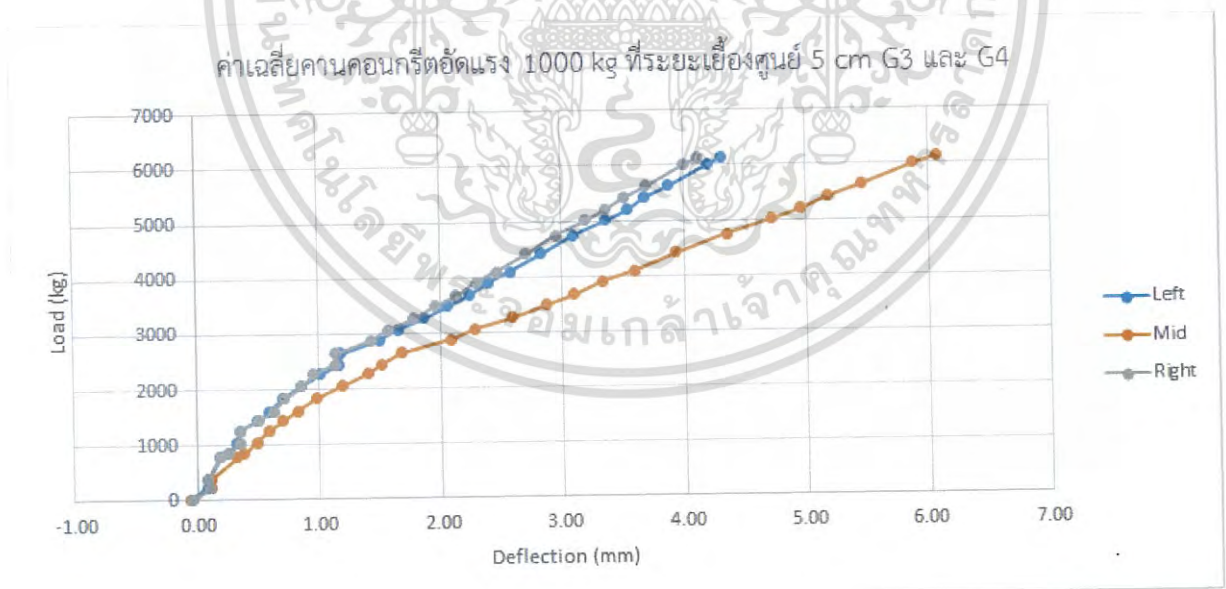
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 วิเคราะห์ผล

นำผลการทดสอบแต่ละตัวอย่างมาหาค่าเฉลี่ยแล้วนำไปสร้างกราฟจะได้ดังนี้

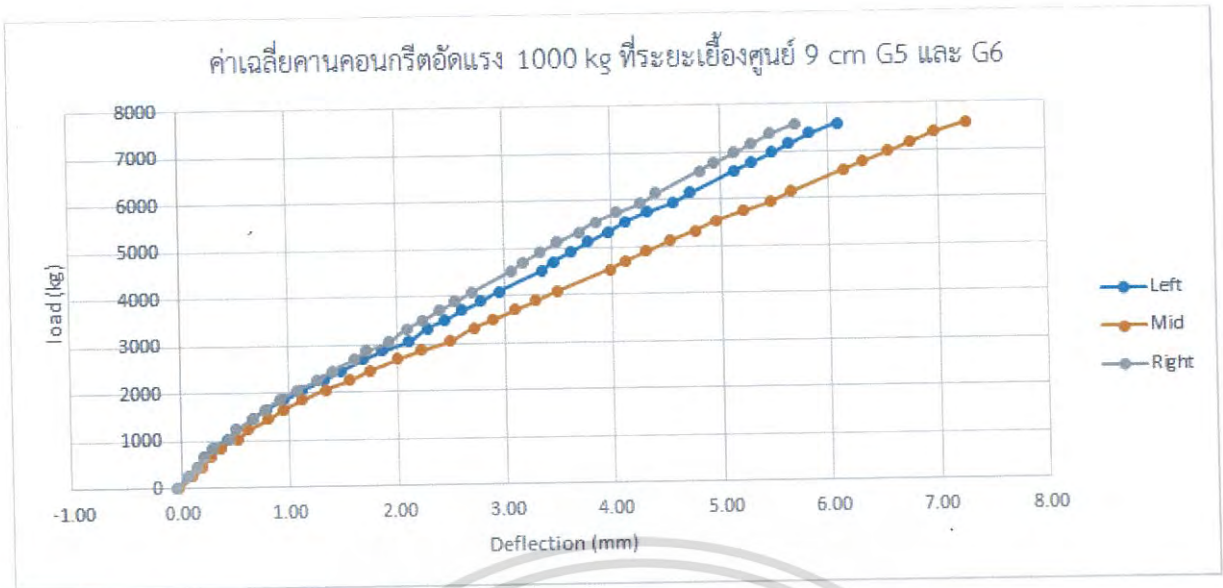


รูปที่ 4.18 กราฟค่าเฉลี่ยระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวคานของคาน G1 และ G2

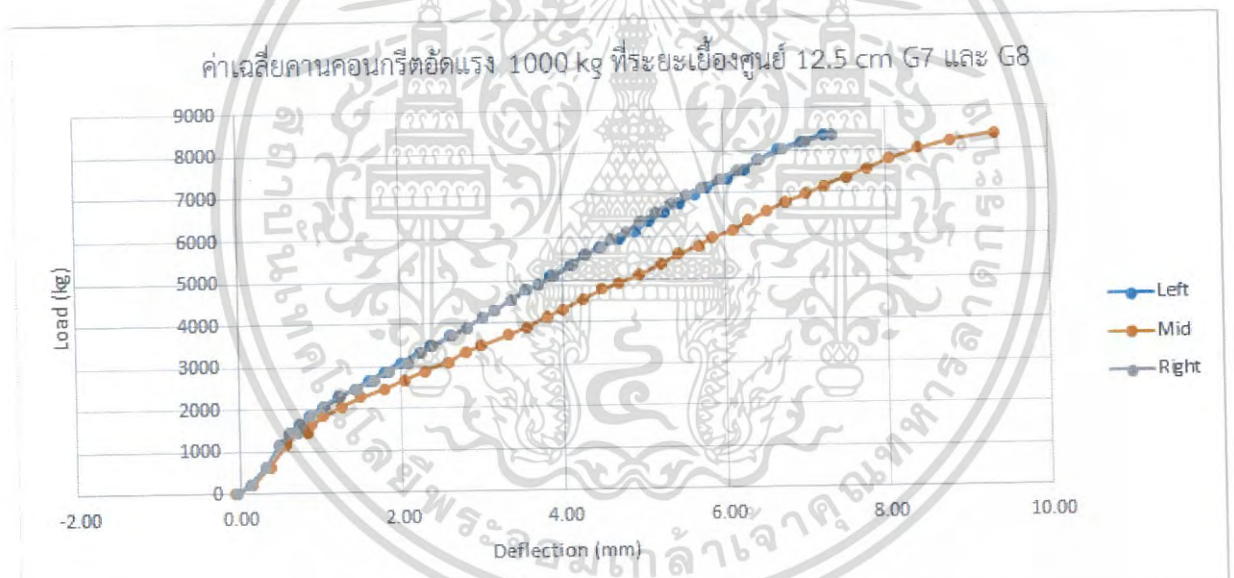


รูปที่ 4.19 กราฟค่าเฉลี่ยระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวคานของคาน G3 และ G4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 กราฟค่าเฉลี่ยระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวคานของคาน G5 และ G6



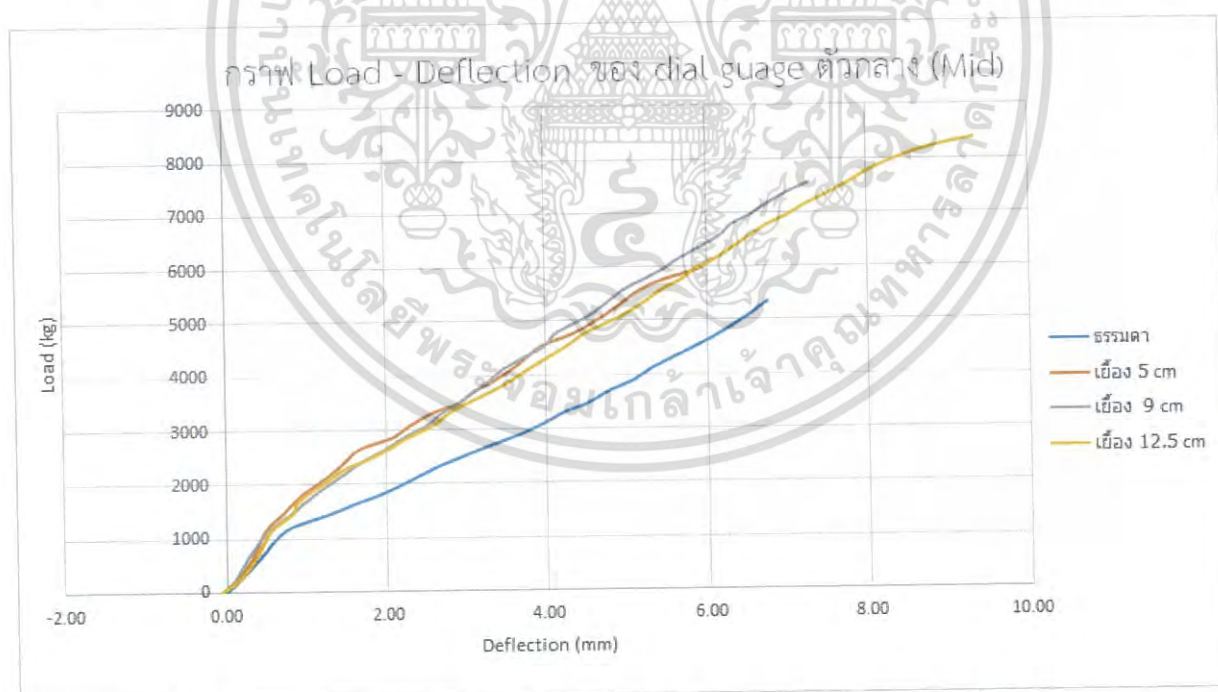
รูปที่ 4.21 กราฟค่าเฉลี่ยระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวคานของคาน G7 และ G8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 สรุปกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดและการโก่งตัว ณ กึ่งกลางคานเฉลี่ย

ชนิดคาน	กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (kg)	ค่าการโก่งตัว ณ กึ่งกลางคานที่พิกัดน้ำหนักบรรทุก 5,350 kg (mm) (ค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา)
G1,G2	5,305	6.75
G3,G4	6,131	4.96
G5,G6	7,579	4.77
G7,G8	8,380	5.22

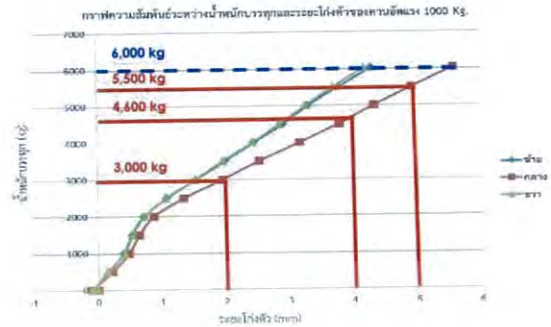
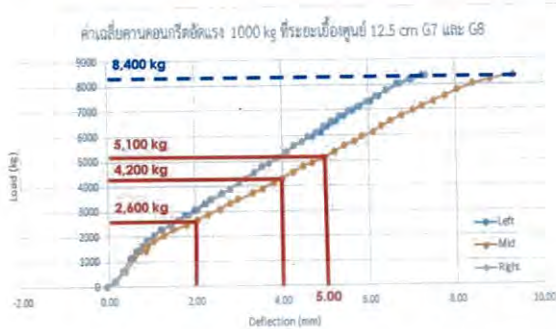
เมื่อนำค่าน้ำหนักบรรทุกและค่าการโก่งตัว ณ จุดกึ่งกลาง (Mid) เฉลี่ยมาเปรียบเทียบกันจะได้กราฟดังนี้



รูปที่ 4.22 กราฟเปรียบเทียบค่าการโก่งตัว ณ กึ่งกลางคานของคานตัวอย่างที่ทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Comparison between 1 and 2 deviators 1,000 kg prestressed at 12.5 cm eccentricity



2 deviators

1 deviator

รูปที่ 4.23 กราฟเปรียบเทียบผลลัพธ์การใช้ deviator 1 และ 2 ตัว

จากรูปที่ 4.18 - 4.21 และ ตารางที่ 4.12 นั้นพบว่าการอัดแรงช่วยให้คานรับน้ำหนักบรรทุกทุกได้เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลางขึ้นก็ช่วยเพิ่มกำลังน้ำหนักบรรทุกได้มากขึ้นเช่นกัน เมื่อพิจารณาค่าการโก่งตัว ณ กึ่งกลางคานพบว่าเมื่อเพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลางก็ช่วยลดการโก่งเช่นเดียวกัน

แต่จะเห็นได้ว่าจากตารางที่ 4.12 ที่คานอัดแรงที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 12.5 cm (G7,G8) ถึงแม้ว่าจะช่วยลดการโก่งตัวแต่ก็ช่วยได้น้อยกว่าคานอัดแรงที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 5 และ 9 cm และจากรูปที่ 4.22 แสดงให้ว่าคานอัดแรงที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 12.5 cm แม้จะช่วยให้รับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้มากขึ้นแต่ก็ยังรับน้ำหนักได้ต่ำกว่าคานอัดแรงที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 5 และ 9 cm ตลอดช่วงการรับน้ำหนัก ทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากการอัดแรง ที่ทำได้ยากขึ้นและอาจเกิดการยึดตัวไม่เท่ากันของเหล็กอัดแรง เนื่องจาก deviator ที่แม้ว่าจะติดตั้งลูกล้อเพื่อช่วยให้เกิดการยึดตัวอย่างสม่ำเสมอแล้วก็ตามแต่ก็อาจช่วยได้ไม่มากพอ

รูปที่ 4.23 เป็นการเปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกและค่าการโก่งตัวของคานอัดแรง 1,000 kg ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 12.5 cm โดยใช้ deviator 1 และ 2 ตัว จากกราฟทั้งสองเมื่อเทียบกันจะเห็นได้ว่า คานอัดแรงที่ใช้ 2 deviator ไม่ได้ช่วยให้ลดการโก่งตัว ณ กึ่งกลางคาน แต่สามารถช่วยเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้มากขึ้นได้

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบ ค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดเฉลี่ยของคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา มีค่า 5,305 kg ค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดเฉลี่ยของคานคอนกรีตเสริมแรงภายนอก 1,000 kg ที่มีระยะเยื้องศูนย์กลางจากกึ่งกลางคาน 5, 9, 12.5 cm มีค่า 6,131, 7,579 และ 8,380 kg ตามลำดับ และระยะแอนตัวเฉลี่ยที่กึ่งกลางของคานขณะที่มีกำลังรับน้ำหนักสูงสุดประมาณ 5,350 kg คานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา มีระยะแอนตัว 6.75 mm คานคอนกรีตเสริมแรงภายนอก 1,000 kg ที่มีระยะเยื้องศูนย์กลางจากกึ่งกลางคาน 5, 9, 12.5 cm มีระยะแอนตัว 4.96, 4.77 และ 5.22 mm ตามลำดับ เมื่อเทียบกับที่พิกัดกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประมาณ 5,350 kg ซึ่งเป็นจุดวิกฤติของคานคอนกรีตธรรมดา

จากผลการทดสอบ ระยะเยื้องศูนย์กลาง 5, 9, 12.5 cm ช่วยเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเมื่อเทียบกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดาประมาณ 15%, 41% และ 57% ตามลำดับ และช่วยลดการโก่งตัว ณ กึ่งกลางคานลง 26%, 29%, 23% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 12.5 cm ช่วยลดการโก่งตัวได้ลดลง เนื่องจากขณะอัดแรงอาจเกิดการยึดตัวไม่เท่ากันของเหล็กอัดแรงขณะอัดแรงและการอัดแรงที่ทำให้ยากขึ้นเมื่อมีระยะเยื้องศูนย์กลางมากขึ้น จึงทำให้ช่วยลดการโก่งตัวได้ลดลง แต่ก็ยังช่วยเพิ่มกำลังรับน้ำหนักสูงสุดได้

จากผลการเปรียบเทียบคานอัดแรง 1,000 kg ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 12.5 cm ที่ใช้ 1 และ 2 deviator พบว่าการเพิ่มจำนวน deviator ไม่ช่วยลดการโก่งตัวแต่สามารถช่วยเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้ประมาณ

จึงสรุปได้ว่าการเพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลางสามารถช่วยเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้และช่วยลดการโก่งตัวเมื่อเทียบกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา และเพิ่มจำนวน deviator ก็สามารช่วยเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้เช่นกัน

5.2 วิจารณ์และข้อแนะนำ

ข้อวิจารณ์

1. เมื่อเพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลางมากขึ้น การอัดแรงโดยการขันเกลียวก็จะทำได้ยากขึ้น ซึ่งอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบได้
2. การอัดแรงอาจทำให้เกิดการยึดตัวไม่เท่ากันของเหล็กอัดแรง ซึ่งอาจทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น
3. Deviator อาจเป็นตัวขัดขวางการยึดตัวอย่างสม่ำเสมอ แม้ว่าใส่ลูกล้อให้ deviator แล้วก็อาจไม่ช่วยให้เกิดการยึดตัวอย่างสม่ำเสมอได้ให้กับเหล็กอัดแรงได้

ข้อเสนอแนะ

1. การอัดแรงควรใช้ hydraulic jack ช่วยในการอัดแรง ซึ่งจะช่วยให้การอัดแรงทำได้ง่ายขึ้นและช่วยให้ได้ผลการทดสอบที่แม่นยำมากขึ้น
2. ควรออกแบบ deviator ให้ช่วยเกิดการยึดตัวอย่างสม่ำเสมอมากกว่านี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางคุณสมบัติเหล็กเส้น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ 40 ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา
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	
				มุมดัดโค้ง เย็น (องศา) Angle of Bend (Degree)	เส้นผ่านศูนย์กลาง หัวกดชั้น ทดสอบ Diameter of Mandrel
SD30 ขนาดไม่ เกิน 16 มม.	17	295 (30.0816)	480 (48.9464)	180	3 เท่าของเส้นผ่าน ศูนย์กลางระบู่
รอ 30 ขนาดเกิน 16 มม.	15	295 (30.0816)	480 (48.9464)	180	4 เท่าของเส้นผ่าน ศูนย์กลางระบู่
รอ 40	15	390 (39.7689)	560 (57.1041)	180	5 เท่าของเส้นผ่าน ศูนย์กลางระบู่
รอ 50 ขนาดไม่ เกิน 25 มม.	13	490 (49.9661)	620 (63.2224)	90	5 เท่าของเส้นผ่าน ศูนย์กลาง
รอ 50 ขนาดเกิน 25 มม.	13	490 (49.9661)	620 (63.2224)	90	6 เท่าของเส้นผ่าน ศูนย์กลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิด ¹⁾	เส้นผ่านศูนย์กลาง ¹⁾ มิลลิเมตร	ความทนแรงดึง ¹⁾ นิวตันต่อตาราง มิลลิเมตร	พื้นที่หน้าตัด ²⁾ ระนาบ ³⁾ ตาราง มิลลิเมตร	มวลต่อเมตร		ค่าลักษณะเฉพาะ ³⁾ ค่าสุด		
				คำนวณ กรัม	เกณฑ์ความ ถ่วงถ่วง ร้อยละ	แรงดึง สูงสุด ³⁾ กิโลนิวตัน	แรงดึง พิสูจน์ ³⁾ ร้อยละ 0.1 กิโลนิวตัน	แรงดึง พิสูจน์ ³⁾ 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	1 770	29.0	228		51.2	43.5	45.0	
7 เส้น	9.3	1 720	51.6	405		88.8	73.8	75.4
	9.5	1 860	54.8	432	-4	102	83.6	86.6
	10.8	1 720	68.7	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	96.7	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 ยึดแน่น	12.7	1 860	112	890		209	176	184
	15.2	1 820	185	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	405	417
	21.5	1 810	313	2 482		567	465	482

- หมายเหตุ 1) ชนิด เส้นผ่านศูนย์กลางระบุ และความทนแรงดึงระบุใช้สำหรับเรียกชื่อเท่านั้น
- 2) ความทนแรงดึงระบุ ได้จากการคำนวณพื้นที่หน้าตัดระบุกับค่าลักษณะเฉพาะแรงดึงสูงสุด (ดูหมายเหตุ 5)
- 3) ผลทดสอบแต่ละค่าต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของค่าลักษณะเฉพาะ
- 4) กำหนดให้ค่าลักษณะเฉพาะแรงดึงแทนความทนแรงดึงระบุ เนื่องจากเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของมวลต่อเมตรมีค่าน้อย
- 5) แรงดึงพิสูจน์ร้อยละ 0.1 เป็นค่าที่กำหนดให้ใช้ทดสอบ ส่วนแรงดึงพิสูจน์ร้อยละ 0.2 ให้ไว้ เพื่อแนะนำเท่านั้น ยกเว้นเมื่อมีการตกลงเป็นอย่างอื่นการออกแบบอัตราส่วนผสมคอนกรีต (Mix Design)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบอัตราส่วนผสมคอนกรีต (Mixed 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
V2	2.5	53	199
3/	2.0	45	187
1	1.5	41	178
1 y 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			
	% WaterContent	% 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 13/8-3/4,+6(1),+7(1.5-2),+8(2.5 -3)	
Hot Zone	+ 5	-	

Noteการปรับค่าทรายถ้าได้ค่าเป็นจุดทศนิยมถ้าต้องลดให้ปัดค่าไปทางน้อยถ้าต้องเพิ่มให้ปัดค่าไปทางมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

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

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" (ถ.พ. ปูน 3.15 ถ.พ. ทราย 2.6 ถ.พ. หิน 2.75)

วิธีออกแบบ

จากกำลังอัด 180 กก/ซม² ไปหาความสัมพันธ์เพื่อจะทราบค่า W/C

$$(3.0885 - 1.1283 W/C)$$

จากสูตร กำลังอัด = 10

แทนค่ากำลังอัดที่ 180 กก/ซม² หาค่า W/C ได้โดย

$$180 = 10(3.0885 - 1.1283w/c)$$

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

$$w/c = (3.0885 - \text{log} 180) / 1.1283$$

$$= (3.0885 - 2.255) / 1.1283$$

$$= 0.7387$$

ดังนั้น W/C ในการคำนวณออกแบบใช้ค่า = 0.73

จากตารางที่ 1

เมื่อใช้ Max size 1" ใช้เปอร์เซ็นต์ทราย 41% และใช้น้ำ 178 กก/ม³ 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% ดังนั้นเมื่อ

ต้องการ F.M. = 1.9 จะต้องลดเปอร์เซ็นต์ทรายลง = 0.5 X 0.85 / 0.1 = - 4.25% จะต้องลด

เปอร์เซ็นต์น้ำลง = - 4.25%

ปรับค่าเนื่องจาก Slump

เนื่องจาก Slump เพิ่มขึ้นจากตาราง = 5-3 = 2 นิ้ว

จากตาราง Slump เพิ่มขึ้น 1 นิ้ว จะต้องเพิ่มน้ำ 3% ดังนั้นเมื่อต้องการ Slump = 5 นิ้ว จะต้อง

เพิ่มน้ำขึ้น = 2 x 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W/C = 0.73 จะต้องเพิ่มเปอร์เซ็นต์ทราย = $1 \times .08 / .05 = + 1.6$ จะต้องเพิ่มเปอร์เซ็นต์น้ำ
= + 1.6% ปรับค่าเนื่องจากใช้หินผสมคอนกรีต

จากตาราง การใช้หินต้องเพิ่มเปอร์เซ็นต์ทราย = + 6 % และ เพิ่มเปอร์เซ็นต์น้ำ = +10% ปรับ
ค่าเนื่องจาก 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/ม³

คำนวณโดยวิธี Absolute Volume

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

Cement paste	Absolute Volume (ลิตร /ม ³)
	$289.04/3.15 = 91.76$
	$211 / 1 = 211.15$
	$1.5 \times 1000 / 100 = 15$
	$91.76 + 211 + 15 = 317.76$ ลิตร/ม ³

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

เนื่องจากเราใช้เปอร์เซ็นต์ทรายในการออกแบบ = 45 %

ปริมาตรของทราย = $682.24 \times 45 / 100 = 307.01$ ลิตร/ม³

ปริมาตรของหิน = $682.24 - 307.01 = 375.23$ ลิตร /ม³

คำนวณน้ำหนักวัสดุที่ใช้ดังนี้

น้ำหนักของทรายที่ใช้ = $307.01 \times 2.6 = 798.23$ กก/ม³

น้ำหนักของหินที่ใช้ = $375.23 \times 2.75 = 1031.88$ กก/ม³

น้ำหนักรวม = $289.04 + 798.23 + 1031.88 + 211 = 2330.15$

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

= 1 : 2.76 : 3.57

W/C = 0.73

ใช้ปูนซีเมนต์ 50 กก. (ถุง)

ใช้ทรายที่สภาพถมตัวผิวหน้าแห้ง = $2.76 \times 50 = 138.00$ กก.

ใช้หินที่สภาพถมตัวผิวหน้าแห้ง = $3.57 \times 50 = 178.50$ กก.

ใช้น้ำ $0.73 \times 50 = 36.5$ กก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผสมคอนกรีตโดยอัตราส่วนโดยน้ำหนัก

จากอัตราส่วนผสมคอนกรีต 1 : 2.76 : 3.57 W/C = 0.73

โดยน้ำหนัก

ต้องการผสมครั้งหนึ่งใช้ซีเมนต์ 1 ถุง

คำนวณหาปริมาณวัสดุที่ใช้

จะเห็นได้ว่าถ้า หิน , ทรายอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวหน้าแห้งเราสามารถนำไปผสมคอนกรีตได้เลย

แต่ความเป็นจริงโอกาสที่หิน , ทรายจะอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวหน้าแห้งนั้นน้อยมาก ดังนั้นเรา

จะต้องหา น.น. ของน้ำที่เกินหรือขาดจากจุดอิ่มตัวผิวหน้าแห้งมาใช้ในการคำนวณหาปริมาณ

วัสดุ ที่แท้จริง วิธีหาปริมาณน้ำในวัสดุทำได้ โดยการหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของวัสดุ

(Moisture Content) และหาเปอร์เซ็นต์ Absorption ของวัสดุนำค่าที่ได้มาหาความสัมพันธ์

จากสมการ

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

โดย F = % Free Moisture

$$M = \% \text{ Moisture Content}$$

$$A = \% \text{ Absorption}$$

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

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

$$\% \text{ Moisture ของหิน} = 0.8\% \text{ คิดเป็น \% Free Moisture} = (0.8 - 0.3) \times 100 / (1 + 100) = 0.499 = 0.5$$

จากอัตราส่วนต้องใช้ทรายสภาพอิ่มตัวผิวหน้าแห้ง = 138.00 กก. แต่ทรายมี Free Moisture = 2.77%

$$\text{น้ำที่อยู่ในทราย เกินจุดอิ่มตัวผิวหน้าแห้ง} = (138.00 \times 2.77) / 100 = 3.820 \text{ กก. ต้องชั่งทรายหนัก} = 138.00 + 3.82 = 141.82 \text{ กก.}$$

จากอัตราส่วนต้องใช้หินสภาพอิ่มตัวผิวหน้าแห้ง = 178.5 กก. แต่หินมี Free Moisture = 0.5%

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

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

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

ดังนั้นวัสดุที่ใช้ในการผสมครั้งนี้คือ

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

$$\text{ทราย} = 141.82 \text{ ก.ก.}$$

$$\text{หิน} = 179.39 \text{ ก.ก.}$$

$$\text{น้ำ} = 31.79 \text{ ก.ก.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องชั่งน้ำหนัก = $36.5 - 3.82 - 0.89 = 31.79$ กก.

นำอัตราส่วนนี้ไปผสมแล้วทำ slump ว่าได้ค่า 5 นิ้ว ตามที่ต้องการหรือไม่ ถ้าไม่ได้ก็ให้ใช้ข้อกำหนดที่ว่า slump มากหรือน้อยกว่า 1 นิ้ว จะต้องเพิ่มหรือลดน้ำลง 3 % จากน้ำเดิม จะได้ปริมาณน้ำใหม่ นำไปออกแบบใหม่ก็จะได้อัตราส่วนใหม่สำหรับกำลังอัด 180 กก/ซม^2 slump 5 นิ้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแปลงอัตราส่วนโดยน้ำหนักเป็นอัตราส่วนโดยปริมาตร

ขั้นตอนในการแปลง

จะต้องหาค่า Loose unit weight ของทรายที่สภาพอิมตัวผิวหน้าแห้ง โดยหา % absorption ทราย ก่อน จากนั้นใช้ทรายแห้งเติมไว้ให้ได้ตาม % absorption คลุกให้ ทัวแล้วหมักทิ้งไว้อย่างน้อย 16 -24 ชม. แล้วทำการหา loose unit weight (สมมุติ = 1368.7 กก/ม³ , % absorption ทราย =1)

1. จะต้องหาค่า Loose unit weight ของหินที่สภาพ oven dry สมมุติ = 1400 กก/ม³
absorption ของหิน = 0.3%

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

2. ให้ใช้ Loose unit weight ของซีเมนต์มีค่าเท่ากับ 1250 กก/ม³ ของน้ำมีค่าเท่ากับ 1000 กก/ม³
3. นำค่า Loose unit weight ของซีเมนต์คูณทุกค่าของอัตราส่วน โดยน้ำหนักนำค่า Loose unit weight ของซีเมนต์ไปหารส่วนของซีเมนต์

นำค่า Loose unit weight ของทรายไปหารส่วนของทราย

นำค่า Loose unit weight ของหินไปหารส่วนของหิน นำ

ค่า Loose unit weight ของน้ำไปหารส่วนของw/c จาก

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1 : 2.76 : 3.57 W/C = 0.73

$$1 \times 1250 : 2.76 \times 1250 : 3.57 \times 1250 \quad \text{W/C} = 0.73 \times 1250$$

$$(1 \times 1250) : 2.76 \times 1250 : 3.57 \times 1250 \quad \text{W/C} = 0.73 \times 1250$$

$$1250 \quad 1368.7 \quad 1404.2 \quad 1000$$

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

ค่าที่ได้คืออัตราส่วนโดยปริมาตร ใน

การผสมถ้าใช้ซีเมนต์ 1 ถุง = 40 ลิตร

ทรายสภาพอิมตัวผิวหน้าแห้ง = $2.52 \times 40 = 100.8$ ลิตร

หินที่สภาพอิมตัวผิวหน้าแห้ง = $3.18 \times 40 = 127.2$ ลิตร

น้ำ = $0.9125 \times 40 = 36.5$ ลิตร

แต่จะเห็นได้ว่าถ้าหิน , ทรายอยู่ในสภาพอิมตัวผิวหน้าแห้ง เราสามารถนำไปผสมคอนกรีตได้เลย แต่ความเป็นจริงโอกาสที่หิน , ทรายจะอยู่ในสภาพอิมตัวผิวหน้าแห้งน้อยมาก ดังนั้นเราจะต้องหาเปอร์เซ็นต์การพองตัวของวัสดุและปริมาณน้ำในวัสดุมาใช้ในการคำนวณหาปริมาณวัสดุที่แท้จริง

การผสมคอนกรีตใช้อัตราส่วนโดยปริมาตร

สมมติ ทรายที่สภาพใช้งานได้ loose unit weight = 1323.00 กก/ม³ ทราย
ได้ 3.8% ทรายมี Absorption = 1.0 % ทรายที่ความชื้นได้ = 0.8 % (โดยทรายมีค่า Absorption
เท่ากับ 1% loose Unit Weight ของทรายสภาพอิมตัว ผิวหน้าแห้ง = 1368.7 กก/ม³ และหินมี
Absorption = 0.3 % , loose unit weight ของหินสภาพอิมตัวผิวหน้าแห้ง = 1404.2 กก/ม³)

จากอัตราส่วนโดยปริมาตร 1 : 2.52 : 3.18 W/C = 0.9125 จะต้องการฟองตัวของทราย
ปริมาณน้ำอยู่ในทรายเกินจุดอิมตัวผิวหน้าแห้ง ปริมาณน้ำที่อยู่ในหินเกินจุดอิมตัวผิวหน้าแห้ง

การฟองตัวของทราย = $\frac{\text{loose unit weight ของทรายสภาพอิมตัวผิวหน้าแห้ง}}$

$\text{loose unit weight ของทรายชั้นแต่ฐานสภาพอิมตัวผิวหน้าแห้ง}$

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

loose unit weight ของทรายชั้นฐานสภาพอิมตัวผิวหน้าแห้ง = $\frac{\text{loose unit weight ของทรายชั้น}$

$\frac{1 + \% \text{ Free Moisture}}$

100

$$= \frac{1323}{1 + \frac{2.77}{100}} = 1287.34 \text{ กก/ม}^3$$

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

ใน 1 ม³ ของทรายชั้นจะมีน้ำเกินจุดอิมตัวผิวหน้าแห้งอยู่ = 1323 - 1287.34 = 35.66 ลิตร

การฟองตัวของหิน = $\frac{\text{loose unit weight ของหินสภาพอิมตัวผิวหน้าแห้ง}}$

$\text{loose unit weight ของหินชั้นแต่ฐานสภาพอิมตัวผิวหน้าแห้ง}$

เปลี่ยนความชื้นหิน 0.8 % เป็น % Free Moisture = $(0.8 - 0.3) \times 100 = 0.5$

$\frac{0.3 + 100}$

loose unit weight ของหินชั้นฐานสภาพอิมตัวผิวหน้าแห้ง

= $\frac{\text{loose unit weight ของหินชั้น}}$

$\frac{1 + \% \text{ Free Moisture}}$

$$= \frac{1400 \times 1.008}{1 + \frac{0.5}{100}} = \frac{1411.2}{1.005} = 1404.2 \text{ กก/ม}^3$$

$$\frac{1400 \times 1.008}{1 + \frac{0.5}{100}} = \frac{1411.2}{1.005}$$

100

$$\text{หินชั้น 0.8\% จะฟองตัว} = \frac{1404.2}{1404.2} = 1.0 \text{ (ไม่มีการฟองตัว)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใน 1 ม³ ของหินขึ้นจะมีน้ำเกินจุดอิ่มตัวผิวหน้าแห้งอยู่ = 1411.2 - 1404.2 = 7 ลิตร จากอัตราส่วน
โดยปริมาตร 1 : 2.52 : 3.18 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 (1ถุง)

ใช้ทราย = 2.68 × 40 = 107.2 ลิตร จะมีน้ำเกินจุดอิ่มตัวผิวหน้าแห้ง = (35.66 × 107.2)/1000 = 3.82 ลิตร

ใช้หิน = 3.18 × 40 = 127.2 ลิตรจะมีน้ำเกินจุดอิ่มตัวผิวหน้าแห้ง = (7 × 127.2)/1000 = 0.89 ลิตร ใช้
น้ำ = 0.9125 × 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