

การศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตเสริมด้วยเหล็กกล้าละมุน
คอบคอกัดแครงเหล็กกรีดเย็น

THE STUDY ON BEHAVIOR OF CONCRETE BEAM REINFORCED BY
MILD STEEL AND WELDED STEEL WIRE MESH



โดย
นายอภิชาติ บัวกล้า
นายอรรครัฐ ขุนวิทยา
นายอำพน จรัสรุ่งเกียรติ

วัน เดือน ปี 16.คค.2541
เลขทะเบียน 039014
เลขเรียกหนังสือ T.40205.02520.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมการก่อสร้าง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มี **039014**

การศึกษาพฤติกรรมของคานเสริมด้วยเหล็กกล้าอะมุน

ควบคู่กับตะแกรงเหล็กรีดเย็น



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมการก่อสร้าง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY ON BEHAVIOR OF CONCRETE BEAM REINFORCED BY
MILD STEEL AND WELDED STEEL WIRE MESH



MR.APICHAT BUAKLA Code 37014557
MR.ARKALRAT KUNVITAYA Code 37014568
MR.AMPHON JRUSJRUNGKIAT Code 37014589

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

1997

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาพฤติกรรมของคานเสริมด้วยเหล็กกล้าและมุนควบคู่กับ
ตะแกรงเหล็กรีดเย็น

THE STUDY ON BEHAVIOR OF CONCRETE BEAM
REINFORCED BY MILD STEEL AND WELDED STEEL WIRE
MESH

นักศึกษา 1. นายอภิชาติ บัวกล้า รหัสประจำตัว 37014557
2. นายอรรถรัฐ ชุนวิทยา รหัสประจำตัว 37014568
3. นายอำพน จรัสจรวงเกียรติ รหัสประจำตัว 37014589

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมการก่อสร้าง
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ คมสัน มาลีสี

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ		ลายมือชื่อ
1. อาจารย์สุพจน์ ศรีนิล		
2. อาจารย์สุวัฒน์ ติรเศรษฐ์		
3. อาจารย์อุษะ ศิริแก้ว		คณ: ส.ก.ก.

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา รับรองแล้ว

(นายอำนาจ พานิชกุลพงศ์)
หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้นั้นมิได้เกิดจากผู้เขียนเพียงลำพัง จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณบุคคลผู้มีส่วนในรายงานฉบับนี้บรรลุลผลสำเร็จดังนี้

อ.คมสัน มาลีสี อาจารย์ที่ปรึกษาและให้คำแนะนำ

อ.อุษะ ศิริแก้ว และคณะกรรมการสอบโครงการพิเศษทุกท่านที่ให้ความกรุณาแก้ไขจนรายงานฉบับนี้สมบูรณ์

เจ้าหน้าที่ปฏิบัติการคอนกรีตห้องปฏิบัติการคอนกรีต สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

ผศ.ดร. บุรฉัตร ฉัตรวีระ และเจ้าหน้าที่ปฏิบัติการห้องปฏิบัติการคอนกรีต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

อาจารย์ และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระ-

จอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

อาจารย์ และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระ-

จอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

บริษัท ไทยออสเนอร์ จำกัด ที่ให้การสนับสนุนด้าน ข้อมูล และให้การอนุเคราะห์เรื่องวัสดุอุปกรณ์ รวมทั้งทุนการศึกษาโครงการพิเศษนี้

บริษัท นำเสงคอนกรีต (1992) จำกัด ที่ให้การอนุเคราะห์คอนกรีตที่ใช้ทำคานตัวอย่างในโครงการพิเศษนี้

เพื่อนๆ ,น้องๆ ในภาคและลุงชะฮ้อนที่ให้ความช่วยเหลือในการเทคอนกรีต และงานอื่นๆ ตลอดจนให้คำปรึกษาด้านต่างๆ รวมถึงเพื่อนๆ ต่างภาคที่มีส่วนช่วยเหลือในการทำโครงการนี้

พ่อ แม่ พี่ น้องและญาติมิตรของผู้จัดทำที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดมา ตลอดจนบุคคลอื่นๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในโครงการนี้ที่ยังมิได้กล่าวถึงทุกท่าน

จึงขอขอบพระคุณบุคคลเหล่านี้อีกครั้ง และจะระลึกถึงตลอดไป

นายอภิชาติ บัวกล้า

นายอรรถรัฐ ขุนวิทยา

นายอำพน จรัสรุ่งเกียรติ

การศึกษาพฤติกรรมของคานเสริมด้วยเหล็กกล้าและมุงควบคู่กับตะแกรงเหล็กรีดเย็น
THE STUDY ON BEHAVIOR OF CONCRETE BEAM REINFORCED BY
WELDED STEEL WIRE MESH COMBINE MILD STEEL

โดย	นายอภิชาติ	บัวกล้า	37014557
	นายอรรครัฐ	ขุนวิทยา	37014557
	นายอำพน	จรัสจรวงเกียรติ	37014589
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์คมสัน มาลีสี		

บทคัดย่อ

คานคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นองค์อาคารสำคัญใช้รับ โมเมนต์ดัดและแรงเฉือน เสริมกำลังในลักษณะให้คอนกรีตรับแรงอัดและเหล็กรับแรงดึง การนำตะแกรงลวดเหล็กรีดเย็นมา เสริมแทนเหล็กกล้าละมุนที่ใช้กันทั่วไปนับเป็นทางเลือกใหม่ จากรายงานเก่าพบว่า การแอ่นตัวของคานเสริมตะแกรงเหล็กรีดเย็นล้วนมีค่าสูง โครงการพิเศษจึงนำเหล็กกล้าละมุนมาเสริมพิเศษในคานที่เสริมตะแกรงเหล็กรีดเย็นล้วน เพื่อศึกษาแนวโน้มการลดการแอ่นตัว ผลการศึกษาแสดงถึงพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัด ลักษณะของรอยร้าว รูปแบบการพังทลาย แนวโน้มหน่วยการยึดตัวของคอนกรีต ณ ตำแหน่งเหล็กกลางของคานเสริมด้วยเหล็กกล้าละมุนควบคู่กับตะแกรงเหล็กรีดเย็น เปรียบเทียบกับคานที่เสริมด้วยเหล็กกล้าละมุนล้วน และคานที่เสริมด้วยตะแกรงเหล็กรีดเย็นล้วน

ABSTRACT

Reinforced concrete beam is an important structure for resisting bending moment and shear. In fact, concrete resists compression whereas steel resists tension. Generally, the concrete beams are reinforced by mild steel. Alternatively, those can be reinforced by welded steel wire mesh. The previous studies had been shown high value of deflection in the concrete beams reinforced by welded steel wire mesh. This study aims at reducing the deflection by mean of combination the deformed bar in those beams. Behavior of the concrete beam reinforced by mild steel and welded steel wire mesh, i.e. bending moment, crack, failure and strain value was studied. The result of the study is compared to the behavior of the concrete beams reinforced by mild steel and of those reinforced by welded wire mesh.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ	(i)
บทคัดย่อ	(ii)
สารบัญ	(iii)
สารบัญรูป	(v)
สารบัญตาราง	(vii)
บทที่ 1 บทนำ	1-2
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ	1
1.4 วิธีที่ใช้ในการดำเนินโครงการพิเศษ	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ	3-22
2.1 การออกแบบโดยวิธีกำลังประลัย	3
2.2 พฤติกรรมการตัดและการโค้งตัว	11
2.3 รูปแบบการแตกร้าว	19
2.4 ผลการศึกษาที่ผ่านมา	20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการศึกษา	23-33
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา	23
3.2 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์	24
3.3 การเตรียมคานตัวอย่าง	25
3.4 การเตรียมการก่อนทดสอบ	29
3.5 วิธีการทดสอบ	31
3.6 ขั้นตอนแสดงผลการทดสอบ	32
บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล	34-47
4.1 ผลการทดสอบ	34
4.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับทฤษฎีคำนวณการแอ่นตัวตาม ACI Code	.44
4.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับทฤษฎีคำนวณการแอ่นตัว โดยวิธีประมาณ จากความสัมพันธ์โมเมนต์คัต - ความโค้ง	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	48-49
5.1 สรุปผลการศึกษา	48
5.2 ข้อเสนอแนะ	49
บรรณานุกรม	50-51
ภาคผนวก	52-82
ภาคผนวก ก. สัญลักษณ์	52
ภาคผนวก ข. ตัวอย่างการคำนวณ	54
ภาคผนวก ค. ผลทดสอบกำลังวัสดุที่ใช้ห่อคานทดสอบ	67
ภาคผนวก ง. รูปถ่ายประกอบการดำเนินการศึกษา	71
ภาคผนวก จ. รูปแสดงรูปแบบการพังทลายของคานทดสอบ	79
ภาคผนวก ฉ. ข้อมูลอื่นๆ ในแผ่น Diskette	82



สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	การสมมูลย์แรงของหน้าตัด	5
รูปที่ 2.2	แรงเฉือนและโมเมนต์คดในคานพาดช่วงเดียว	7
รูปที่ 2.3	ความเค้นเฉือนของหน้าตัด	7
รูปที่ 2.4	กำลังต้านแรงเฉือนภายในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	8
รูปที่ 2.5	ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือน	9
รูปที่ 2.6	แสดงกราฟระหว่าง โมเมนต์คดและความโค้งของพื้นที่หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม	11
รูปที่ 2.7	กราฟแสดง $M-\phi$ โดยวิธีประมาณ	12
รูปที่ 2.8	กราฟของไดอะแกรมของโมเมนต์คดและไดอะแกรมของโมเมนต์โค้งที่จุดคราก	13
รูปที่ 2.9	กราฟของไดอะแกรมของโมเมนต์คดและไดอะแกรมของโมเมนต์ที่จุดประลัย	14
รูปที่ 2.10	การกระจายโมเมนต์คดและการกระจายความโค้งที่สภาวะต่าง ๆ	16
รูปที่ 2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า I_c กับ M_u/M_{cr}	18
รูปที่ 2.12	ลักษณะการแตกร้าวในคาน	19
รูปที่ 2.13	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับระยะการแอ่นตัวที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน	20
รูปที่ 2.14	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดดึงของคอนกรีตตำแหน่งที่มีน้ำหนักกระทำ	21
รูปที่ 2.15	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับระยะการแอ่นตัวตำแหน่งที่มีน้ำหนักกระทำ	21
รูปที่ 3.1	สรุปขั้นตอนการดำเนินการศึกษา	23
รูปที่ 3.2	แบบสำหรับหล่อคาน	25
รูปที่ 3.3	ลักษณะการเสริมเหล็กในคานที่จะทำการทดสอบ	28
รูปที่ 3.4	Digital Strain Indicator	30
รูปที่ 3.5	ลักษณะการให้น้ำหนักบรรทุกแบบ Third Point Methode	31
รูปที่ 4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก - ระยะการแอ่นตัว (DB)	34
รูปที่ 4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก - ระยะการแอ่นตัว (CDD)	34
รูปที่ 4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก - ระยะการแอ่นตัว (COM)	35
รูปที่ 4.4	กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก - ระยะการแอ่นตัวของคานทั้ง 3 ประเภท	35
รูปที่ 4.5	กราฟเปรียบเทียบระหว่าง Deflection - เปอร์เซนต์น้ำหนัก/น้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากการทดสอบของคานทั้ง 3 ประเภท	36
รูปที่ 4.6	แผนภูมิเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกที่สภาวะต่างๆ ของคานทั้ง 3 ประเภท	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.7	แผนภูมิเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์น้ำหนักบรรทุกจากการทดสอบ/น้ำหนักบรรทุกจาก ทฤษฎีกำลังประลัย	39
รูปที่ 4.8	กราฟเปรียบเทียบ Deflection - เปอร์เซ็นต์น้ำหนักบรรทุก/น้ำหนักบรรทุกสูงสุด ตามทฤษฎีกำลังประลัย	39
รูปที่ 4.9	กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์น้ำหนักบรรทุก/น้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากการทดสอบ	40
รูปที่ 4.10	กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์น้ำหนักบรรทุก/น้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากการทดสอบ ที่ Deflection ต่างๆ กัน	40
รูปที่ 4.11	กราฟแสดงน้ำหนักบรรทุก - ความเครียดของคอนกรีตตำแหน่งเหล็กเสริมล่าง (DB)	41
รูปที่ 4.12	กราฟแสดงน้ำหนักบรรทุก - ความเครียดของคอนกรีตตำแหน่งเหล็กเสริมล่าง (CDD)	41
รูปที่ 4.13	กราฟแสดงน้ำหนักบรรทุก - ความเครียดของคอนกรีตตำแหน่งเหล็กเสริมล่าง (COM)	42
รูปที่ 4.14	กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุก - ความเครียดของคอนกรีตตำแหน่งเหล็กเสริมล่าง ของคานทั้ง 3 ชนิด	42
รูปที่ 4.15	กราฟเปรียบเทียบความเครียด - เปอร์เซ็นต์น้ำหนักบรรทุก/น้ำหนักบรรทุกสูงสุดจาก การทดสอบ	43
รูปที่ 4.16	กราฟน้ำหนักบรรทุก-ระยะแอนตัวตาม ACI Code เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ (DB)	44
รูปที่ 4.17	กราฟน้ำหนักบรรทุก-ระยะแอนตัวตาม ACI Code เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ (CDD)	44
รูปที่ 4.18	กราฟน้ำหนักบรรทุก-ระยะแอนตัวตาม ACI Code เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ (COM)	45
รูปที่ 4.19	กราฟน้ำหนักบรรทุก-ระยะแอนตัวตามทฤษฎีโมเมนต์คด-ความโค้ง	45
รูปที่ 4.20	กราฟน้ำหนักบรรทุก - ระยะแอนตัวตามทฤษฎี เปรียบเทียบผลการทดสอบ (DB)	46
รูปที่ 4.21	กราฟน้ำหนักบรรทุก - ระยะแอนตัวตามทฤษฎี เปรียบเทียบผลการทดสอบ (CDD)	46
รูปที่ 4.22	กราฟน้ำหนักบรรทุก - ระยะแอนตัวตามทฤษฎี เปรียบเทียบผลการทดสอบ (COM)	47
รูปที่ 4.23	กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุก - ระยะแอนตัวตามทฤษฎีกับผลการทดสอบ	47

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าสูงสุดที่ยอมให้ของระยะโก่งที่คำนวณได้	18
ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบวัสดุที่ใช้หล่อคานทดสอบ	26
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของคานแต่ละประเภท	27
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบ	36
ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบ น้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากการทดสอบเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎีกำลังประลัย	38
ตารางที่ 4.3 แสดงเปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบ น้ำหนักบรรทุกที่ Deflection ต่างๆ จากการทดสอบกับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่คำนวณจากทฤษฎีกำลังประลัย	38
ตารางที่ 4.4 แสดงเปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบ น้ำหนักบรรทุกที่ Deflection ต่างๆ กับค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากการทดสอบ	38



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เนื่องด้วยในปัจจุบันนี้ในการก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ในส่วนโครงสร้างที่เป็นเสา คาน และพื้น การเสริมเหล็กที่ในปัจจุบันนี้นิยมใช้เหล็กกล้าละมุน ซึ่งเป็นเหล็กกรีดร้อนที่ได้จากโรงงาน การติดตั้งจำเป็นต้องใช้แรงงานและช่างฝีมือ ในการตัด ดัด และผูกรวมเข้าด้วยกัน สำหรับเสริมในโครงสร้างเสา คาน และพื้น ในแง่ของเวลาและค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างนับเป็นงานที่ใช้ระยะเวลาและค่าใช้จ่ายมากพอสมควร

ในต่างประเทศ ปัญหาดังกล่าวนี้อุบัติขึ้นจากการใช้ตะแกรงเหล็กกรีดเย็นสำเร็จรูป (Prefabricate Steel Welded Wire Mesh) ที่ทำการขึ้นรูปและเชื่อมติดมาจากโรงงาน และขนส่งเข้ามาติดตั้งในหน่วยงานก่อสร้าง ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดเวลา แรงงาน และวัสดุ เพื่อให้การก่อสร้างมีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้น ข้อจำกัดประการหนึ่งของคานที่เสริมด้วยตะแกรงเหล็กกรีดเย็น จะมีการแอ่นตัวในปริมาณที่สูง การนำเหล็กกล้าละมุนเข้ามาเสริมควบคู่กับตะแกรงเหล็กกรีดเย็นจึงน่าจะเป็นทางออกของข้อจำกัดดังกล่าว

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ

- 1) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของคานที่เสริมด้วยเหล็กกล้าละมุนควบคู่กับตะแกรงเหล็กกรีดเย็น เปรียบเทียบกับคานที่เสริมด้วยเหล็กกล้าละมุนเพียงอย่างเดียว และเสริมด้วยตะแกรงเหล็กกรีดเย็น เพียงอย่างเดียว
- 2) เพื่อศึกษาเปรียบเทียบความเหมาะสมของการนำตะแกรงเหล็กกรีดเย็น ควบคู่กับเหล็กกล้าละมุนในงานโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก
- 3) เพื่อแสดงถึงผลการทดสอบที่ละเอียดมากยิ่งขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการนำผลการทดสอบยืนยันว่า ตะแกรงเหล็กกรีดเย็น สามารถใช้ทดแทนเหล็กเสริมได้จริง

1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

- 1) ศึกษาทฤษฎีการออกแบบคาน โดยใช้ทฤษฎีกำลังประลัย (Ultimate Strength Design)
- 2) ออกแบบคานที่จะใช้ทดสอบ ด้วยวิธี Ultimate Strength Design โดยเสริมด้วย
 - ตะแกรงเหล็กกรีดเย็น (Steel Welded Wire Mesh)
 - เหล็กกล้าละมุน
 - ตะแกรงเหล็กกรีดเย็น ควบคู่กับเหล็กกล้าละมุน
- 3) ทำการทดสอบคานที่ออกแบบไว้ ขนาดหน้าตัด 15 เซนติเมตร x 32.5 เซนติเมตร ยาว 2.40 เมตร ระยะจากจุดรองรับ 2 เมตร จำนวน 9 ตัวอย่างโดยการให้น้ำหนักกับคานดังกล่าว จน เกิดการวิบัติ
- 4) การทดสอบจะบันทึก
 - น้ำหนักกดสูงสุดที่กระทำจนคานเกิดการวิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ระยะเวลาแอนตัวของคานที่กึ่งกลางคาน
- แนวโน้มการบิดตัวของคอนกรีตที่ตำแหน่งเหล็กด่าง
- ลักษณะการแตกร้าว

ในการทดสอบ เพื่อต้องการเปรียบเทียบพฤติกรรมดังนี้

4.1) เปรียบเทียบระยะเวลาแอนตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางคาน ของคานที่เสริมด้วยตะแกรงเหล็กรีดเอ็นควบคู่เหล็กกล้าละมุน กับ เหล็กกล้าละมุนเพียงอย่างเดียว และตะแกรงเหล็กรีดเอ็นเพียงอย่างเดียว

4.2) เปรียบเทียบแนวโน้มการบิดตัวของคอนกรีตที่ตำแหน่งเหล็กด่าง ของคานที่เสริมด้วยเหล็กกล้าละมุนควบคู่ตะแกรงเหล็กรีดเอ็น กับ เหล็กกล้าละมุนเพียงอย่างเดียว และตะแกรงเหล็กรีดเอ็นเพียงอย่างเดียว

5) สรุปผลการทดลองและเปรียบเทียบความเหมาะสมของการเสริม โครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยตะแกรงเหล็กรีดเอ็น ควบคู่กับเหล็กกล้าละมุน

1.4 วิธีที่ใช้ในการดำเนินโครงการพิเศษ

- 1) ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้อัน ได้แก่ เหล็กกล้าละมุน ตะแกรงเหล็กรีดเอ็น คอนกรีต เพื่อนำผลการทดสอบมาใช้ในการออกแบบ
- 2) เก็บรวบรวมข้อมูล โดยการทดสอบจากตัวอย่างคานที่ทำขึ้น และจากคำปรึกษาของผู้เชี่ยวชาญ
- 3) วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากผลการทดสอบตัวอย่าง
- 4) สรุปผลการทดสอบที่ได้ ถึงความเหมาะสมและความเป็นไปได้ ของการเสริมโครงสร้างคานด้วยตะแกรงเหล็กรีดเอ็น ควบคู่กับเหล็กกล้าละมุน

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถออกแบบคาน โดยทฤษฎีกำลังประลัย (Ultimate strength design) โดยการเสริมด้วยตะแกรงเหล็กรีดเอ็น ควบคู่กับเหล็กกล้าละมุน
- 2) สามารถนำตะแกรงเหล็กรีดเอ็น ควบคู่กับเหล็กกล้าละมุนมาใช้เสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ทดแทนการเสริมด้วยเหล็กกล้าละมุนล้วน ได้จริง
- 3) พฤติกรรมของคานที่เสริมด้วยเหล็กกล้าละมุน ควบคู่ตะแกรงเหล็กรีดเอ็นจะสามารถช่วยลดการแอนตัวของคาน ได้ดีกว่าคานที่เสริมด้วยตะแกรงเหล็กรีดเอ็นล้วน และมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับคานที่เสริมด้วยเหล็กกล้าละมุนล้วนตามที่สมมุติฐานไว้
- 4) เป็นทางเลือกใหม่สำหรับการก่อสร้าง เพื่อลดระยะเวลาการก่อสร้าง และค่าแรงงาน

บทที่ 2

ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ

2.1 การออกแบบโดยวิธีกำลังประลัย

2.1.1 ทั่วไป

การออกแบบโดยใช้ทฤษฎีกำลังประลัยเป็นวิธีการสำหรับหาขนาดของโครงสร้าง ในอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยอาศัยกำลังของวัสดุเป็นหลัก การใช้ทฤษฎีกำลังประลัยแตกต่างไปจากทฤษฎี Elasticity คือ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กและคอนกรีตมีค่ามากกว่าขีดยืดหยุ่น โดยเฉพาะค่าของหน่วยแรงในคอนกรีตจะไม่ใช่สัดส่วนโดยตรงกับหน่วยการยืดหดตัวที่เกิดขึ้น อีกทั้งในการคำนวณโดยอาศัยทฤษฎีกำลังประลัย น้ำหนักที่ใช้ออกแบบจะเป็นน้ำหนักประลัยซึ่งได้จากการคูณน้ำหนักใช้งานด้วยตัวคูณน้ำหนักส่วนปลอดภัยรายละเอียดของเนื้อหา อ้างอิงจาก ศ.ดร. วินิต ช่อวิเชียร (2537) [1]

เหตุผลของการใช้ทฤษฎีกำลังประลัยในการออกแบบ มีดังนี้

- 1) ทฤษฎีกำลังให้ค่าคาดหมายได้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมความเป็นจริงของวัสดุ เนื่องจากคำนึงถึงความไม่เป็นสัดส่วนกันของหน่วยแรงกับหน่วยการยืดหดตัวของวัสดุเมื่อน้ำหนักกระทำมีค่าสูง ๆ
- 2) เนื่องจากสามารถทราบค่าของน้ำหนักบรรทุกคงที่ได้แน่นอนกว่าน้ำหนักจร ดังนั้นจึงไม่ควรใช้ตัวคูณปลอดภัย (Factor of Safety) ตัวเดียวกันทั้งน้ำหนักบรรทุกคงที่ และน้ำหนักบรรทุกจรตามทฤษฎี Elasticity ซึ่งทฤษฎีกำลังประลัยจะแยกตัวคูณส่วน ปลอดภัยไว้อีกส่วน
- 3) การใช้ทฤษฎี Elasticity ในการคำนวณออกแบบเสา เป็นการดัดแปลงมาจากทฤษฎีกำลังประลัยซึ่งทฤษฎี Elasticity ไม่ได้ให้พฤติกรรมตามความเป็นจริง
- 4) การใช้ทฤษฎีกำลังประลัยคำนวณหาค่ารับน้ำหนักของเสา ให้ผลหรือค่าที่ถูกต้องกว่าการใช้ทฤษฎี Elasticity
- 5) การคำนวณหาค่ากำลังประลัยในคอนกรีตอัดแรง ต้องใช้ทฤษฎีกำลังประลัย สมมุติฐานการคำนวณ โดยทฤษฎีกำลังประลัยมีดังนี้
 - 1) ระบายของหน้าตัดก่อนและหลังที่มีการดัดยังคงเหมือนเดิม
 - 2) ณ กำลังประลัย หน่วยแรงและหน่วยการยืดหดตัวไม่เป็นสัดส่วนกัน
 - 3) หน่วยการยืดหดตัวที่เกิดขึ้นในคอนกรีตเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะจากแกนสะเทิน และหน่วยการยืดตัวในเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับหน่วยการยืดตัวของคอนกรีต ณ ตำแหน่งเดียวกัน
 - 4) ไม่คำนวณออกแบบให้คอนกรีตรับแรงดึง
 - 5) หน่วยการหดตัวสูงสุดของคอนกรีตที่ขอบรับแรงอัด ณ กำลังประลัยมีค่าเท่ากับ 0.003
 - 6) โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity E) ของเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับ 2.04×10^6 กิโลกรัมต่อ

ตารางเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) หน่วยแรงอัดที่มากที่สุดใ้คอนกรีตมีค่าเท่ากับ 0.85 ของกำลังอัดคอนกรีต (Compressive Strength f_c)

8) หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมมีค่ามากที่สุดเท่ากับกำลังจุดคราก (Yield Strength f_y) ถึงแม้ว่าหน่วยการยึดตัวจะให้ค่าสูงกว่าค่าที่ให้กำลังครากก็ตาม

การจัดนำหน้าบรรทุก

น้ำหนักประลัยใช้งาน (U) ที่จะใช้ในการออกแบบเพื่อหาขนาดของส่วนโครงสร้างและปริมาณเหล็กเสริม ได้จากการคูณน้ำหนักบรรทุกใช้งานที่กระทำ ด้วยตัวคูณน้ำหนัก (Load Factor) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำหนักบรรทุกนั้น ๆ ทั้งนี้เพื่อให้ส่วนโครงสร้างมีกำลังต้านทานต่อแรงหรือน้ำหนักที่กระทำ

เมื่อกำหนดให้

U = น้ำหนักประลัยที่ใช้ออกแบบ

D = น้ำหนักบรรทุกใช้งานแบบคงที่

L = น้ำหนักบรรทุกใช้งานแบบจรที่กำหนด บวกด้วยแรงกระแทก (ถ้ามี)

W = แรงลม

E = แรงจากแผ่นดินไหว

มาตรฐานของสมาคมวิศวกรรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.) ได้กำหนดให้ใช้น้ำหนักประลัย (U) ดังนี้

1) สำหรับอาคารที่ไม่ได้คิดแรงลมหรือแรงจากแผ่นดินไหว ค่า U หาได้จากสมการ (2.1)

$$U = 1.4D + 1.7L \quad \text{-----}(2.1)$$

2) สำหรับอาคารคิดรับแรงลมด้วย ค่า U หาได้จากสมการ (2.2) หรือ สมการ (2.3)

$$U = 0.75 (1.4D + 1.7L + 1.7W) \quad \text{-----}(2.2)$$

$$\text{หรือ } U = 0.9D + 1.3W \quad \text{-----}(2.3)$$

โดยให้ใช้ค่า U ที่ให้ค่าสูงสุด แต่ต้องไม่น้อยกว่าค่า U จากสมการ (2.1)

3) สำหรับอาคารที่คิดรับแรงจากแผ่นดินไหว ค่า U หาได้จากสมการ (2.4) หรือ สมการ (2.5)

ให้แทนค่าของ W ในข้อ 2) ด้วยค่า $1.1E$ ได้ผลดังนี้

$$U = 1.05D + 1.28L + 1.40E \quad \text{-----}(2.4)$$

$$\text{หรือ } U = 0.9D + 1.43E \quad \text{-----}(2.5)$$

ตัวคูณลดค่ากำลังประลัย (Strength Reduction Factor ϕ)

สำหรับกำลังประลัยที่คำนวณได้จริงในอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก จะต้องลดค่าลงทั้งนี้เพราะในการก่อสร้างอาจมีคุณภาพของงานแตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อความปลอดภัย มาตรฐาน ว.ส.ท.จึงใช้ตัวคูณลดค่ากำลังประลัย ϕ คูณเข้ากับกำลังประลัยที่คำนวณได้จริง ซึ่งจะได้กำลังประลัยที่ใช้งาน กล่าวคือ ถ้า M_u เป็นแรงดัดประลัยของส่วนอาคารที่คำนวณได้จริงและ M_u เป็นแรงดัดประลัยใช้งาน ดังนั้น $M_u = \phi M$ มาตรฐาน ว.ส.ท.

กำหนดค่าของตัวคูณลดค่ากำลังประลัย ϕ (Strength Reduction Factor) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\phi = 0.90$ สำหรับการตัด (ไม่มีแรงตามแนวแกนกระทำ)

$\phi = 0.90$ สำหรับแรงดึงตามแนวแกน หรือ แรงดึงตามแนวแกนร่วมกับการตัด

$\phi = 0.85$ สำหรับแรงเฉือน แรงบิด และแรงยึดเหนี่ยว

$\phi = 0.75$ สำหรับแรงอัด หรือ แรงอัดร่วมกับแรงดัด ที่เสริมด้วยเหล็กปลอกเกลียว

$\phi = 0.70$ สำหรับแรงอัด หรือ แรงอัดร่วมกับแรงดัด ที่เสริมด้วยเหล็กปลอกเดี่ยว

$\phi = 0.70$ สำหรับแรงกดบนคอนกรีต

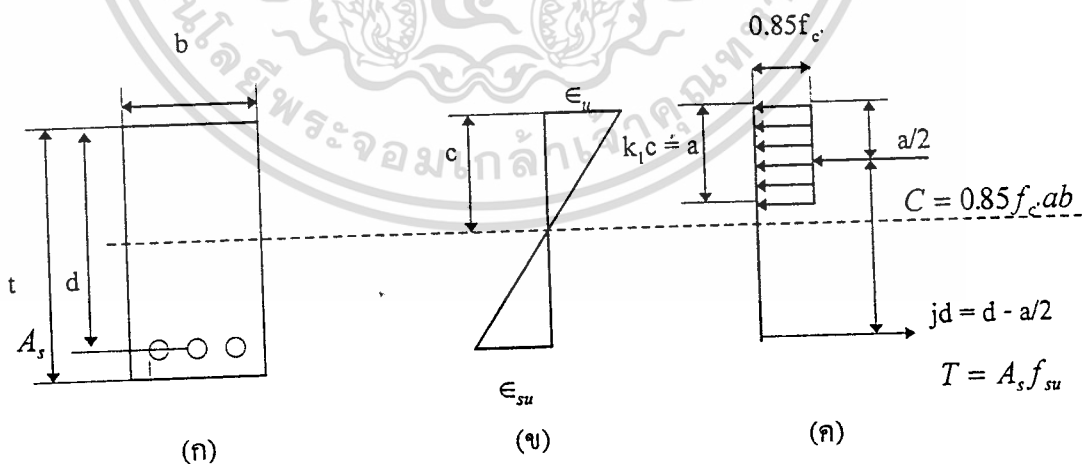
$\phi = 0.65$ สำหรับการตัด ในคอนกรีตล้วน

2.1.2 ความต้านทานต่อแรงดัด

หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งมีเหล็กเสริมรับแรงดึงอย่างเดียว จะพิจารณาโครงสร้าง(คาน) ซึ่งมีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด b และ t ตามรูป มีเหล็กเสริมรับแรงดึง A_s เพียงอย่างเดียว วางเรียงโดยมีความลึกประสิทธิภาพ d เมื่อคานนี้รับน้ำหนักจนถึงน้ำหนักประลัย หน่วยการยึดและหัดตัวและหน่วยแรงจะแผ่กระจายตามรูปที่ 2.1 โดยที่ ϵ_u เป็นหน่วยการหัดตัวสูงสุดที่ขอบบนของคอนกรีต ณ จุดประลัยมีค่าประมาณ $0.003 \epsilon_{su}$ เป็นหน่วยการยึดตัวสูงสุดที่ขอบบนของคอนกรีต ณ จุดประลัย ขนาดของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตมีค่าเท่ากับ $0.85 f'_c$ และแผ่ลงมาเสมอบนเนื้อที่รับแรงอัดสมดุทธ์ ab ตามสมมุติฐานของการคำนวณ (รูปที่ 2.1 (ค)) และดังสมการ (2.6) และสมการ (2.7) กำลังอัดของคอนกรีต (Compression, C) มีค่าเท่ากับ $0.85 f'_c ab$ แรงดึงในเหล็กเสริม (Tension, T) มีค่าเท่ากับ $A_s f_{su}$ โดยที่ f_{su} เป็นหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริม มีค่าเท่ากับ $\epsilon_u E_s$ จากการสมดุทธ์ของแรงบนหน้าตัด เมื่อกำหนดค่าแรงอัด (C) เท่ากับแรงดึงในเหล็กเสริม (T)

$$\text{หรือ} \quad 0.85 f'_c ab = A_s f_{su} \quad \text{-----(2.6)}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \text{ระยะ } a = \frac{A_s f_{su}}{0.85 f'_c b} \quad \text{-----(2.7)}$$



การกระจายของหน่วย ความเครียด ณ.สถานะประลัย การกระจายของหน่วยแรง ณ.สถานะประลัย

รูปที่ 2.1 การสมดุทธ์แรงของหน้าตัด (ดัดแปลงจาก [1])

เมื่อคานรับน้ำหนักถึงน้ำหนักประลัยคานจะเริ่มชำรุด การพังของคานจะเกิดได้สองแบบ คือ การพังแบบแรงดึงเป็นหลัก (Tension Failure) และการพังแบบแรงอัดเป็นหลัก (Compression Failure) การพังแบบแรงดึงเป็นหลักเกิดเมื่อเหล็กเสริมในคานมีจำนวนพอควร เหล็กเสริมจะรับแรงถึงจุดครากก่อนคานพัง ส่วนการพังแบบแรงอัดเป็นหลักเกิดเมื่อเหล็กเสริมมีจำนวนมากหรือมีกำลังจุดครากสูงมาก ในลักษณะนี้คอนกรีตจะถูกอัดถึงกำลังประลัย โดยมีหน่วยการหดตัวสูงเท่ากับ 0.003 ก่อนที่เหล็กเสริมจะเริ่มคราก

กรณีแรงดึงเป็นหลัก เหล็กจะถูกดึงถึงจุดครากก่อน ดังนั้น f_{su} เท่ากับ f_y ตำแหน่งแกนสะเทินซึ่งห่างจากขอบบนของคาน แสดงในสมการ (2.8)

$$\text{โมเมนต์ดัดประลัย} \quad M_n = A_s f_y d (1 - 0.59 \rho \frac{f_y}{f_c}) \quad \text{-----}(2.8)$$

กรณีแรงอัดเป็นหลัก คอนกรีตจะถูกอัดจนกระทั่งมีหน่วยการหดตัวสูงสุดเท่ากับ $\epsilon_u = 0.003$ หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริม f_{su} อาจจะยังไม่ถึงจุดคราก ซึ่งยังคงเป็นสัดส่วนกับหน่วยการหดตัว ϵ_{su} นั่นคือ

$$\epsilon_{su} = \frac{f_{su}}{E_c}$$

อาศัยทฤษฎีของสามเหลี่ยมคล้าย ในรูปการกระจายหน่วยการหดและยึดตัว (รูปที่ 2.1 (ข)) แสดงในสมการ (2.9)

$$c = \frac{\epsilon_u}{\epsilon_{su} + \epsilon_u} = \frac{0.003}{\frac{f_{su}}{E_c} + 0.003} \quad \text{-----}(2.9)$$

จากลักษณะการพังของโครงสร้างที่กล่าวถึงข้างต้น พบว่าปริมาณของเหล็กเสริมในคอนกรีตมีส่วนทำให้คานพังแบบไหนก็ได้ ปริมาณของเหล็กเสริมที่พอดีที่จะทำให้คอนกรีตถึงกำลังอัดประลัยพร้อม ๆ กับเหล็กเสริมถึงจุดคราก เรียกว่า ปริมาณเหล็กเสริมที่สภาวะสมดุล อัตราส่วนของเนื้อที่หน้าตัดของเหล็กเสริมต่อพื้นที่หน้าตัดประลัยผลของคอนกรีต สภาวะนี้เรียกว่า ρ_b ดังนั้นถ้าอัตราส่วน ρ มีค่าน้อยกว่าอัตราส่วน ρ_b คานจะชำรุดแบบแรงดึงเป็นหลัก แต่ถ้าอัตราส่วน ρ มากกว่าอัตราส่วน ρ_b คานจะชำรุดแบบแรงอัดเป็นหลัก

ณ สภาวะสมดุล หน่วยการหดตัวสูงสุดของคอนกรีต ϵ_u มีค่าเท่ากับ 0.003 และเหล็กเสริมถึงกำลังจุดคราก f_y และถ้าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม E_s มีค่าเท่ากับ 2.04×10^6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จะแสดงค่า ρ_b ได้ตามสมการ (2.10)

$$\rho_b = 0.85 k_1 \frac{f_c'}{f_y} \frac{6117}{6117 + f_y} \quad \text{-----}(2.10)$$

ในการคำนวณและออกแบบตามมาตรฐานของ ว.ส.ท. ค่าอัตราส่วน ρ ให้ใช้ได้ไม่เกิน 0.75 ของอัตราส่วน ρ_b ทั้งนี้เพื่อให้การชำรุดของคานเป็นไปในแบบแรงดึงเป็นหลักอย่างเดียว ตามสมการ (2.11)

$$\rho_{\max} = 0.75 \rho_b \quad \text{-----}(2.11)$$

นอกจากนี้มาตรฐาน ว.ส.ท. กำหนด ρ_{\min} ตามสมการ (2.12)

$$\rho_{\min} = \frac{14}{f_y} \quad \text{-----(2.12)}$$

ฉะนั้นเมื่อต้องออกแบบหน้าตัดตามมาตรฐานนี้ ค่าหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริม f_{su} จะเท่ากับ f_y ที่จุด
 ประลัย ได้โมเมนต์ค้ดประลัยที่ใช้ออกแบบ ตามสมการ (2.13) สมการ (2.14) และสมการ (2.15)

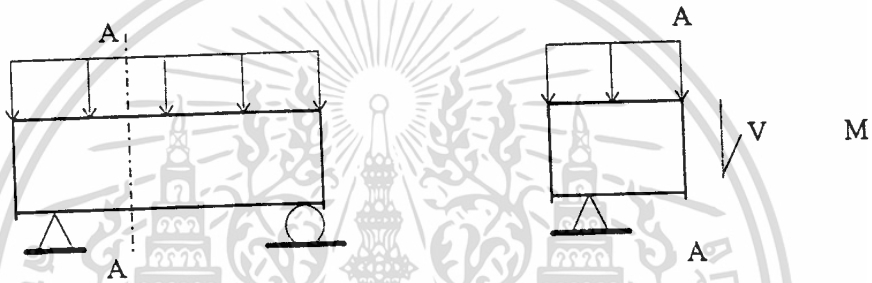
$$M_u = \phi M_u' = \phi A_s f_y \left(d - \frac{a}{2}\right) \quad \text{-----(2.13)}$$

$$\text{ถ้าให้ } q = \rho \frac{f_y}{f_c} q \quad = \phi \left\{ b d^2 f_c' q (1 - 0.59q) \right\} \quad \text{-----(2.14)}$$

$$\text{ถ้าให้ } R_u = f_c' q (1 - 0.59q) \quad M_u = \phi R_u b d^2 \quad \text{-----(2.15)}$$

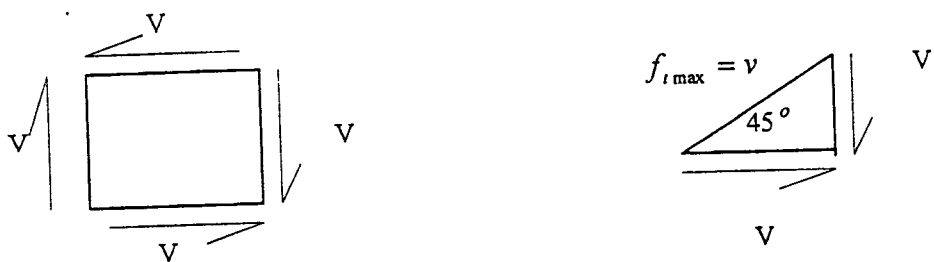
2.1.3 แรงเฉือนและแรงดิ่งทแยง

ต่อกลุ่ กายงานาลัย (2538) [2] กล่าวถึง คานที่มีโมเมนต์ค้ด M กระทำคงที่ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แรงเฉือนและโมเมนต์ค้ดในคานพาดช่วงเดียว (ค้ดแปลงจาก [2])

โมเมนต์ค้ดดังกล่าวเป็นเหตุให้ เกิดหน่วยแรงอัดในคอนกรีตที่อยู่เหนือแกนสะเทินและเกิดหน่วย
 แรงดึงในเหล็กเสริม และในคอนกรีตส่วนที่อยู่ใต้แกนสะเทินเมื่อยังไม่มีกรแตกร้าว จากสภาพของความ
 สมดุล โดยทั่วไปหน้าตัดดังกล่าวผลรวมของหน่วยแรงเฉือนแนวตั้ง ซึ่งจะเท่ากับค่าของแรงเฉือน V แต่ที่
 ตำแหน่งอื่น ๆ ที่อยู่ใต้แกนสะเทินพบว่าสภาวะของแรงที่กระทำในตำแหน่งนั้น ๆ จะเข้าใกล้สภาวะของแรง
 เฉือนสุทธิ (Pure Shear) จะปรากฏค่าหน่วยแรงดึงเท่ากับ V ขึ้นบนระนาบเอียง 45° กับแนวราบ ซึ่งแสดงใน
 รูปที่ 2.3 แรงดิ่งที่เกิดในแนวทแยงนี้เองที่เป็นเหตุสำคัญทำให้เกิดรอยแตกร้าวในแนวทแยงดังนั้นการเกิดพัง
 ทะลายในคานทั่วไปหรือที่เรียกกันว่า Shear Failures นั่นก็คือการพังทะลายที่เกิดจากแรงดิ่งทแยง

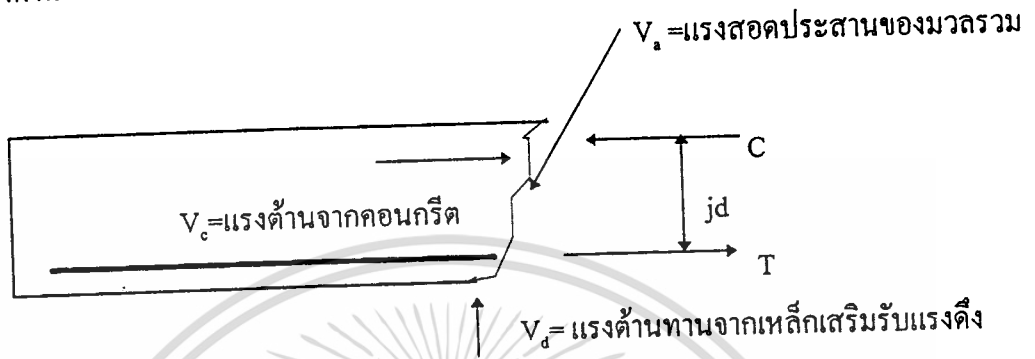


รูปที่ 2.3 ความเค้นเฉือนของหน้าตัด (ค้ดแปลงจาก [2])

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองพบว่า การถ่ายเทกำลังด้านแรงเฉือนภายในทั้งส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดขึ้นจากการผสมผสานกันของแรงต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.4

- 1) แรงด้านจากคอนกรีตในช่วงเกิดแรงอัด (V_c)
- 2) แรงที่เกิดจากการสอดประสานตัวกันของมวลรวมหยาบในคอนกรีต (V_s)
- 3) แรงเฉือนด้านในเหล็กเสริมรับแรงดึงที่เสริมตามแนวยาว (V_d)
- 4) แรงด้านจากเหล็กเสริมรับแรงเฉือน (V_v) ที่เสริมทั้งในแนวตั้งและเฉียง



รูปที่ 2.4 กำลังด้านแรงเฉือนภายในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (ดัดแปลงจาก [2])

เหล็กเสริมกับแรงเฉือน

เหล็กเสริมรับแรงเฉือนทำหน้าที่ดังนี้

- 1) ช่วยรับแรงเฉือนบางส่วน (V_s)
- 2) จำกัดการขยายรอยแตกกว้างแนวทแยงไม่ให้เพิ่มขึ้นหลังจากที่มีการเกิดรอยแตกกว้างบ้าง แล้วและยังคงช่วยให้แรงสอดประสานของมวลรวมหยาบยังคงมีอยู่ตามเดิม
- 3) ช่วยยึดเหล็กเสริมตามแนวยาวให้อยู่ในตำแหน่งเดิมซึ่งเป็นการเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของเหล็กเสริมความยาวนั้นด้วย (V_d)

กำลังรับแรงเฉือนของคานที่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

การพิจารณากำลังรับแรงเฉือนของคานประกอบด้วยสองส่วน ดังสมการ (2.16)

$$V_n = V_c + V_s \quad \text{-----(2.16)}$$

โดยที่ V_c = กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต

V_s = กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน, V_s จะหาได้จากการพิจารณารูปที่ 2.5 กำหนดให้รอยร้าวในแนวทแยงมุม 45° กับแนวราบ และทอดเป็นแนวตัดกับเหล็กเสริมรับแรงเฉือนจำนวน N แถว ดังนั้นกำลังรับแรงดึงในแนวตั้งของเหล็กเสริมสามารถหาได้จากสมการ (2.17)

$$V_s = N A_v f_y \sin \alpha \quad \text{-----(2.17)}$$

ซึ่ง A_v = เนื้อที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

f_y = ความเค้นดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

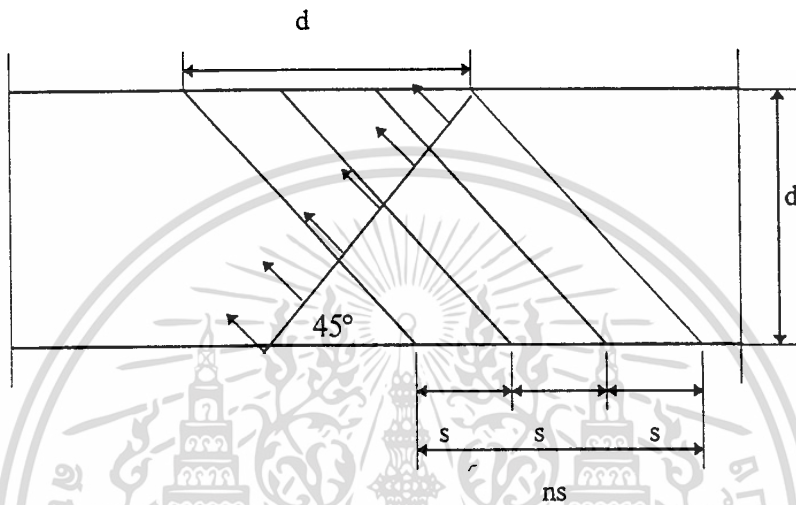
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้อง 8 ไปถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ระยะเรียงของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน = S

และถ้า $\alpha = 90^\circ$ จะได้กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กปลอก และเนื้อที่หน้าตัดเหล็กปลอกที่ต้องการ ดังสมการ (2.18) และสมการ (2.19) ตามลำดับ

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{S} \quad \text{-----(2.18)}$$

หรือ $A_v = \frac{V_s S}{f_y d} \quad \text{-----(2.19)}$



รูปที่ 2.5 ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

ปริมาณ เหล็กเสริมรับแรงเฉือนในสมการ (2.19) นั้นในทางปฏิบัติไม่ควรเสริมด้วยจำนวนที่ต่ำหรือ สูงเกินไปเพราะหากมีปริมาณต่ำเหล็กเสริมจะรับแรงดึงจุดครากทันที ซึ่งจะเกิดรอยแตกกว้างในแนวทแยงจน เป็นเหตุให้คานพังในที่สุด ในทางตรงกันข้ามหากเสริมเหล็กรับแรงเฉือนด้วยปริมาณที่สูงเกินไปคานอาจ เกิดการพังทลายแบบ Shear - Compression Failure ก่อนที่เหล็กเสริมจะถึงจุดครากได้

มาตรฐาน ACI กำหนดค่า A_v น้อยที่สุด ไว้ดังสมการ (2.20)

$$A_v \text{ น้อยที่สุด} = \frac{3.52 b_w d}{f_y} \quad \text{-----(2.20)}$$

ซึ่งจะได้ $V_s = 3.52$ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

และเพื่อป้องกันมิให้เสริมเหล็กรับแรงเฉือนสูงเกินไป ค่าสูงสุดจะถูกกำหนดว่า

$$V_s = 2.12 \sqrt{f'_c}$$

สำหรับกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต

$$V_c = \phi \left[0.504 \sqrt{f'_c} + 176 \frac{PV_n}{M_n} \right] b_w d \leq 0.93 \phi b_w d \sqrt{f'_c} \quad \text{-----(2.21)}$$

รายละเอียดเนื้อหาข้างต้น อ้างอิงจาก ดร. ต่อกุล กาญจนาลัย (2538) [2]

2.1.4 แรงยึดเหนี่ยว

หน้าตัดวิกฤติสำหรับการพิจารณาหาหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมในคานเนื่อง จากโมเมนต์ดัด จะอยู่ตรงหน้าตัดที่มีอัตราการเปลี่ยนโมเมนต์ดัดมากที่สุดและจำนวนเส้นรอบรูปของเหล็ก เสริมทั้งหมดน้อยที่สุด หน่วยแรงยึดเหนี่ยวจะเกิดขึ้นทั้งที่ผิวของเหล็กเสริมรับแรงดึงและเหล็กเสริมรับแรง อัด แต่โดยปกติส่วนที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของเหล็กเสริมรับแรงอัดมีค่าน้อยมาก ดังนั้นการคำนวณออกแบบ คานจึงพิจารณาเฉพาะหน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่ผิวของเหล็กเสริมรับแรงดึง โดยให้หน่วยแรงยึดเหนี่ยวประลัยที่ เกิดขึ้นจริงมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับหน่วยแรงยึดเหนี่ยวประลัยที่ยอมให้ตามมาตรฐานกำหนด

ถ้าให้ u_u = หน่วยแรงยึดเหนี่ยวประลัย, กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

v_u = แรงเฉือนประลัยตรงหน้าตัดวิกฤติ, กิโลกรัม

Σo = ผลรวมของเส้นรอบรูปของเหล็กเสริมทั้งหมด เซนติเมตร

jd = ระยะระหว่างศูนย์กลางของแรงอัดกับศูนย์กลางของแรงดึง เซนติเมตร

d = ระยะความลึกประสิทธิภาพของคาน เซนติเมตร

l_d = ความยาวยึดรั้งหรือระยะฝังเหล็กเสริมในคอนกรีต. เซนติเมตร

b_b, A_b = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและเนื้อที่หน้าตัดของเหล็กเสริม ตามลำดับ

f_{su} = หน่วยแรงในเหล็กเสริม ณ จุดประลัย กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ϕ = ตัวคูณลดค่ากำลังประลัย เมื่อมาตรฐาน ว.ส.ท. กำหนดค่าเป็น 0.85

หน่วยแรงยึดเหนี่ยวประลัยที่เกิดขึ้นในคานอันเกิดจากโมเมนต์ดัด จะหาได้จากสมการ (2.22)

$$u_u = v_u / \phi \Sigma o jd \quad \text{-----}(2.22)$$

หน่วยแรงยึดเหนี่ยวประลัยที่เกิดขึ้นจากระยะฝังเหล็กเสริมในคอนกรีต จะหาได้จากสมการ (2.23)

$$u_u = A_b f_{su} / l_d \Sigma o = d_b f_{su} / 4 l_d \quad \text{-----}(2.23)$$

จากสมการ (2.23) ถ้าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวประลัยที่เกิดขึ้น u_u มีค่าเท่ากับหน่วยแรงยึดเหนี่ยวประลัย ที่ยอมให้ จะได้ระยะอย่างน้อยที่ต้องฝังเหล็กเสริมในคอนกรีตซึ่งจะทำให้เกิดหน่วยแรงในเหล็กเสริมนั้น ตามต้องการ $l_d = d_b f_{su} / 4 u_u$

หน่วยแรงยึดเหนี่ยวประลัยที่ยอมให้

มาตรฐาน ว.ส.ท. กำหนดหน่วยแรงยึดเหนี่ยวประลัยที่ยอมให้ u_u สำหรับเหล็กข้ออ้อยที่มีขนาดเส้น ผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 35 มิลลิเมตร ดังต่อไปนี้ โดยที่ f_c เป็นกำลังอัดประลัยของแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอก เมื่ออายุ 28 วัน และ d_b เป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริม เมื่อรับแรงดึง มีผลดังนี้

$$\text{เหล็กบน} \quad u_u = \frac{4.51\sqrt{f_c}}{d_b} < 39.4 \text{ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร}$$

$$\text{เหล็กอื่นๆ นอกจากเหล็กบน} \quad u_u = \frac{6.39\sqrt{f_c}}{d_b} < 56.2 \text{ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร}$$

$$\text{เมื่อรับแรงอัด: เหล็กบนและเหล็กอื่นๆ} \quad u_u = 3.44\sqrt{f_c} < 56.2 \text{ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร}$$

เมื่อเหล็กบนหมายถึงเหล็กเสริมตามแนวราบที่มีคอนกรีตหล่ออยู่ได้เหล็กเสริมนั้นน้อยกว่า 30 เซนติเมตร ขึ้นไป สำหรับเหล็กกลมผิวเรียบ ให้ใช้ค่าเพียงครึ่งหนึ่งของค่าที่ให้ไว้ข้างต้น แต่ต้องไม่เกินกว่า 17.6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

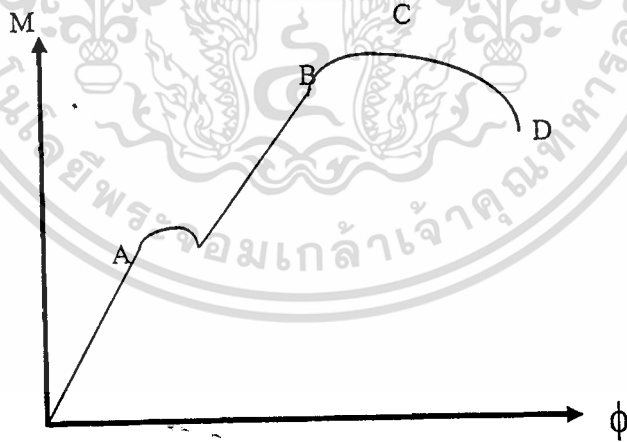
2.2 พฤติกรรมการตัดและการโค้งตัว

สามารถอธิบายพฤติกรรมการตัดและการโค้งตัวของคานเมื่อได้รับแรงดัด เป็นข้อย่อได้ดังนี้

2.2.1 พฤติกรรมการตัด

สำหรับพฤติกรรมการตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีแรงกระทำตามขวาง ต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการแอ่นตัวของคาน ตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนถึงแรงสูงสุดของคาน และช่วงที่คานสามารถรับแรงลดลง ก่อนที่จะวิเคราะห์พฤติกรรมการตัด จำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดต้านทานกับ ความโค้งซึ่งเป็นคุณสมบัติของพื้นที่หน้าตัดของคานทุก ๆ หน้าตัด ดังแสดงในรูปที่ 2.6

จากหลักการกลศาสตร์ของวัสดุ โมเมนต์ดัดต้านทานเกิดจากผลของโมเมนต์คู่ควบของแรงอัดในคอนกรีตและแรงดึงในเหล็กเสริม ส่วนความโค้งคือค่าความชันของเส้นความเครียดในหน้าตัดของคาน จะเห็นว่ากราฟประกอบด้วย 3 ช่วง OA เป็นช่วงที่ยังไม่เกิดรอยร้าวในคอนกรีตที่จุด A เริ่มเกิดรอยร้าวที่ผิวล่างของคาน (First Cracking) และเมื่อโมเมนต์ดัดมีค่ามากขึ้น รอยร้าวจะเคลื่อนตัวสูงขึ้นด้วยในช่วง AB จุด B เรียกว่า ระดับที่หน่วยแรงในเหล็กพอดีถึงจุดคราก (First Yielding) จากจุด O ถึงจุด B กราฟอนุโลมเป็นเส้นตรง จากจุด B เป็นต้นไป อัตราการเพิ่มของโมเมนต์ดัดน้อยลงมาก ขณะที่ความโค้งมีค่าเพิ่มขึ้นที่จุด C โมเมนต์ดัดของหน้าตัดมีค่ามากที่สุด และหน้าตัดมีความสามารถรับโมเมนต์ดัดน้อยลงในช่วง CD



รูปที่ 2.6 แสดงกราฟระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งของพื้นที่หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม (ดัดแปลงจาก [2])

ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์ดัดและความโค้งมีข้อสมมุติทั่วไป 4 ประการ คือ

- 1) พื้นที่หน้าตัดก่อนการคัดเป็นระนาบเมื่อเกิดการคัดแล้วยังคงเป็นระนาบ
- 2) ต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงตามแนวแกนและความเครียดของเหล็กเสริม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงตามแนวแกนและความเครียดของคอนกรีต

4) กำลังดึงในคอนกรีตมีค่าน้อยมาก ไม่นำมาคิดในการคำนวณ

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ค้ดและความโค้งโดยวิธีประมาณและไม่คำนึงถึงจุดที่เริ่มการแตกร้าว โดยการคำนวณความสัมพันธ์ที่จุดเริ่มต้นของการครากในเหล็กและที่จุดประลัยของหน้าตัด แล้ว

ทำการเชื่อมกราฟเป็นเส้นตรง ตามสมการ (2.24) ถึงสมการ (2.29)

ที่จุดเริ่มต้นการคราก $M_y = A_s f_y (d - \frac{kd}{3}) \leq M_u$ -----(2.24)

$$\phi_y = \frac{\epsilon_y}{(1-k)d} \text{ -----(2.25)}$$

โดยที่ $\epsilon_y = \frac{f_y}{E}$ -----(2.26)

โดยที่กำลังประลัย $M_u = A_s f_y d (1 - \frac{0.59 \rho f_y}{f_c'})$ -----(2.27)

$$\phi_u = \frac{0.003}{K_u d} \text{ -----(2.28)}$$

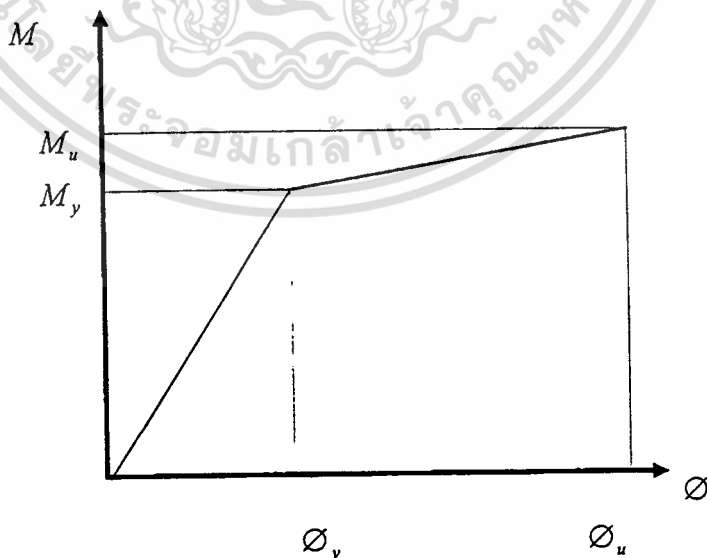
โดยที่ $K_u = \frac{\rho f_y}{K_1 K_3 f_c'}$ -----(2.29)

ตามมาตรฐาน ACI กำหนดให้ $K_3 = 0.85$

$$K_1 = 0.85 \text{ เมื่อ } f_c' \leq 280$$

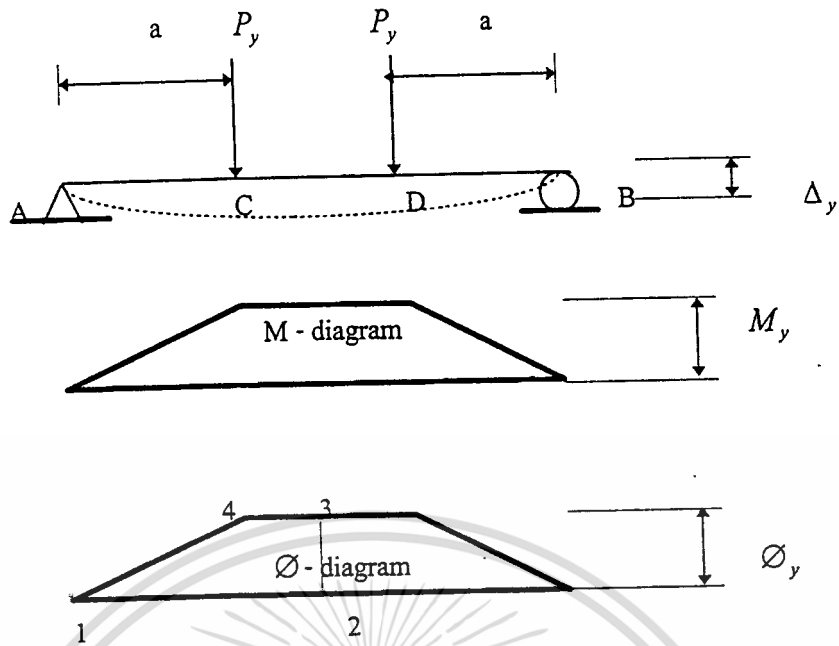
$$K_1 = 0.85 - 0.05 \frac{(f_c' - 280)}{70} \leq 0.65 \text{ เมื่อ } f_c' > 280$$

นำค่าจากการแทนค่าสมการข้างต้นมาเขียนกราฟ M - ϕ และลากเส้นตรงเชื่อมจุดได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กราฟแสดง M - ϕ โดยวิธีประมาณจากความสัมพันธ์โมเมนต์ค้ดกับความโค้ง (คัดแปลงจาก [2])

จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการแอ่นตัวของคานที่จุดเริ่มต้นของการครากในเหล็ก



รูปที่ 2.8 กราฟของไดอะแกรมของโมเมนต์คัตและไดอะแกรมของโมเมนต์โค้งที่จุดคราก (ดัดแปลงจาก[2])

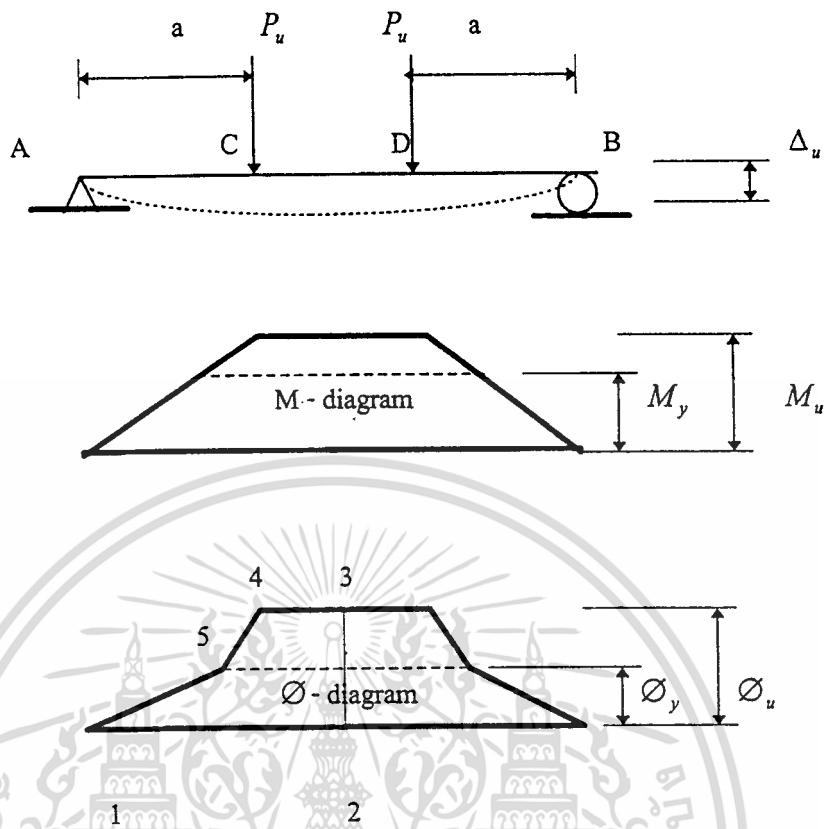
เมื่อแรง P เพิ่มจากศูนย์ ถึง P_y โมเมนต์คัตระหว่าง C และ D เป็น M_y จากกราฟ $M - \phi$ ของหน้าตัดคานไดอะแกรมของความโค้งมีค่าเท่ากับ ϕ_y ในช่วง CD และลดลงเป็นศูนย์ที่จุดรองรับของคานเนื่องจากสมมาตรให้เส้นสัมผัสที่ E ซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางคานเป็นเส้นสัมผัสอ้างอิง จากการวิเคราะห์การแอ่นตัวของคานโดยวิธีพื้นที่โมเมนต์คัตเปรียบเทียบกับวิธีพื้นที่ความโค้งซึ่งเป็นวิธีที่กราฟฟิคจะได้ว่า

$\Delta_y = t_{A/B} =$ โมเมนต์ของพื้นที่ 1234 ของไดอะแกรมของความโค้งคิดรอบจุด 1 จากไดอะแกรมของโมเมนต์คัต สามารถหาแรงกระทำได้ดังสมการ (2.30)

$$P_y x a = M_y$$

จะได้
$$P_y = \frac{M_y}{a} \quad \text{-----(2.30)}$$

ที่กำลังประลัย



รูปที่ 2.9 กราฟของไดอะแกรมของโมเมนต์คัตและไดอะแกรมของโมเมนต์โค้งที่จุดประลัย (ตัดแปลงจาก[2])

ที่กำลังประลัยของคาน ไดอะแกรมของความโค้งเป็น ϕ_u ระหว่างหน้าคัต CD ตรงกับค่าโมเมนต์คัต M_u ที่จุด 5 โมเมนต์คัตเท่ากับ M_y และค่าความโค้งเป็น ϕ_y

$\Delta_u =$ โมเมนต์ของพื้นที่ 12345 ของไดอะแกรมของความโค้งคิดรอบจุด 1

จากไดอะแกรมของโมเมนต์คัต สามารถหาน้ำหนักที่กระทำได้ดังสมการ (2.31)

$$P_u = \frac{M_u}{a} \quad \text{----- (2.31)}$$

จากนั้นก็นำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำและระยะการแอ่นตัวต่อไป

2.2.2 การโค้งตัวของคานเมื่อได้รับแรงคัต

การโค้งตัวของส่วนโครงสร้าง มีทั้งการโค้งตัวที่เกิดขึ้นทันที (Immediate หรือ Short-Term Deflection) เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำ และการโค้งตัวตามกาลเวลา (Long-Term Deflection) เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกทุกค้าง (Sustained Load) กระทำเป็นเวลานาน ในการศึกษาครั้งนี้ จะทำการพิจารณาเฉพาะการโค้งตัวที่เกิดขึ้นทันที เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำเท่านั้น

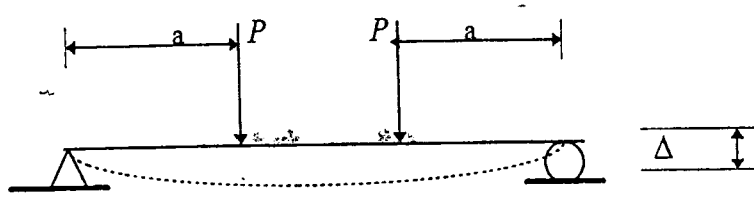
การโค้งตัวทันที

ระยะโค้งตัวทันทีเมื่อส่วนโครงสร้างรับน้ำหนักบรรทุกที่สภาวะต่างๆ อาจคำนวณหาได้จากพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดของส่วนโครงสร้างที่เสริมเหล็กทางเดียว (One-Way Reinforcement) เช่น คานหรือแผ่นพื้นทางเดียว ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้ง (Moment-Curvature Relationship) ของส่วนโครงสร้างนั้น

แต่เนื่องจากความโค้ง $\phi = M / EI$ โดยที่ EI เป็นค่า Stiffness หรือความแกร่งของส่วนโครงสร้าง ซึ่งจะหาได้จากความชันของเส้นสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้ง ฉะนั้นค่า EI จะแปรตามค่าของโมเมนต์ดัดที่กระทำ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้ง จะทำให้สามารถคำนวณหาระยะโค้งที่เกิดขึ้นทันทีที่ตำแหน่งต่างๆ ของส่วนโครงสร้าง หรือค่าระยะโค้งที่มากที่สุดได้โดยใช้ทฤษฎี Elasticity ของการวิเคราะห์โครงสร้าง เช่น วิธี Moment-Area วิธี Conjugate-Beam เป็นต้น

พิจารณาคานช่วงเดี่ยวยรับน้ำหนักกระทำแบบจุดสองจุด ดังแสดงในรูปที่ 2.10(ก) เมื่อน้ำหนักที่กระทำทำให้ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดเริ่มมีค่าโมเมนต์ดัดแตกกร้าว จะเขียนรูปการกระจายของโมเมนต์ดัดได้ดังรูปที่ 2.10 (ข) โดยค่าความโค้งสูงสุดที่สภาวะดังกล่าวคือ ϕ_{cr} (Cracking Curvature) เมื่อใช้วิธี Moment-Area วิธี Conjugate-Beam จะหาค่าโค้งตัวของคานในสภาวะนี้ได้ในทำนองเดียวกัน จะหาค่าโค้งที่สภาวะอื่นได้จากรูปการกระจายความโค้งที่แสดง ซึ่งจะต้องพิจารณาจากค่าโมเมนต์ดัดที่กระทำด้วยเช่น ในรูปที่ 2.10 (ค) ต้องหาค่าตำแหน่งที่โมเมนต์ดัดมีค่าเท่า M_{cr} ก่อน จึงจะได้รูปของการกระจายความโค้งจริง ซึ่งประกอบด้วยความโค้ง ϕ_{cr} และ ϕ ทั้งนี้สมมุติให้การแปรเปลี่ยนระหว่างความโค้ง ϕ_{cr} กับ ϕ เป็นแบบเส้นตรง สังเกตว่าคานจะยังไม่ร้าวในบริเวณที่ค่าโมเมนต์ดัดเท่ากับ หรือน้อยกว่าโมเมนต์ดัดแตกกร้าว

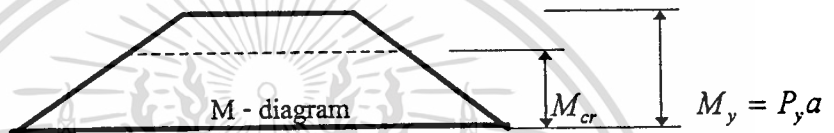
(ก)



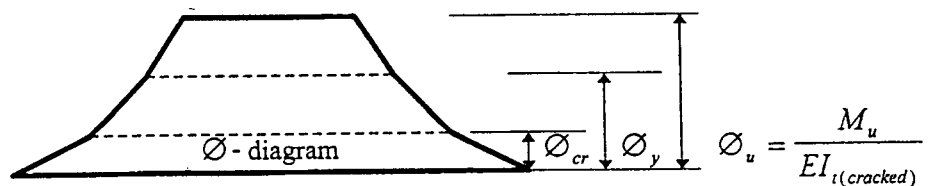
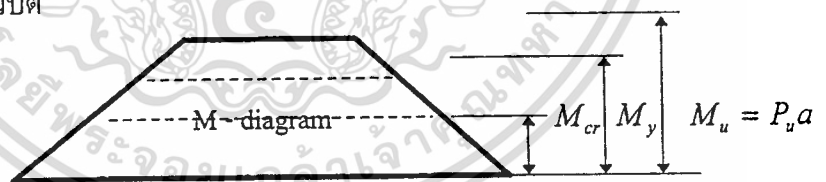
(ข) คานเริ่มร้าว



(ค) เหล็กเสริมเริ่มคราก



(ง) สภาวะก่อนการวิบัติ



รูปที่ 2:10 การกระจายโมเมนต์คัตและการกระจายความโค้งที่สถานะต่าง ๆ (คัดแปลงจาก[3])

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และตัด 16 อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่การวิเคราะห์ข้างต้นค่อนข้างเสียเวลา ไม่สะดวกในทางปฏิบัติ เพราะต้องเขียนรูปการกระจายของโมเมนต์ดัดและรูปการกระจายของความโค้งที่สัมพันธ์กับค่าโมเมนต์ดัด อย่างไรก็ตามก็ได้ค่าที่ละเอียดและถูกต้อง ในทางปฏิบัติจะพิจารณาอย่างประมาณเนื่องจากพบว่าระยะโค้งที่วิเคราะห์ โดยทฤษฎี Elasticity สำหรับวัสดุที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นขึ้นกับรูปแบบของน้ำหนักที่กระทำ ความยาวของช่วงคาน ลักษณะของที่รองรับ ตลอดจนค่า Stiffness ของคาน EI ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ (2.32)

$$\text{ระยะโค้งตัว } \Delta = \frac{F(\text{น้ำหนัก ช่วงความยาวคาน ที่รองรับ})}{EI} \quad \text{-----}(2.32)$$

ตัวอย่างเช่น คานช่วงเดียวยาว L รับน้ำหนักบรรทุกแบบแผ่สม่ำเสมอ w จะได้

$$\text{ระยะโค้งตัว } \Delta = \frac{5wL^2}{48EI} \quad \text{หรือ} \quad = \frac{5M_{\max}L^2}{48EI} \quad \text{ในเมื่อ} \quad M_{\max} = \frac{wL^2}{8}$$

การวิเคราะห์การโก่งตัวทันทีของส่วนโครงสร้างตามมาตรฐานกำหนด

ตามมาตรฐาน ACI และมาตรฐาน ว.ส.ท. กำหนดให้พิจารณาหาระยะโก่งทันทีตามทฤษฎี Elasticity ของการวิเคราะห์โครงสร้างสำหรับส่วนโครงสร้างที่เสริมเหล็กทางเดียวและรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน ดังสมการ (2.33)

$$\text{ระยะโก่งทันที } \Delta_i = \frac{F(\text{น้ำหนัก ช่วงความยาวคาน ที่รองรับ})}{E_c I_c} \quad \text{-----}(2.33)$$

เมื่อ $E_c =$ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต $= 15100 \sqrt{f'_c}$ kg.

$I_c =$ โมเมนต์อินเนอร์เซียของรูปตัด cm.⁴

$$= (M_{cr}/M_u)^3 I_g + [1 - (M_{cr}/M_u)^3] I_{cr} < I_g$$

โดยที่ $M_{cr} =$ โมเมนต์แตกร้าว $= f_t I_g / y_t$ (โมดูลัสแตกร้าว $f_t = 2.0 \sqrt{f'_c}$ kg.)

$M_u =$ โมเมนต์ดัดมากที่สุดที่กระทำที่หน้าตัดที่พิจารณา kg./cm.

$I_g =$ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดทั้งหมด (อาจพิจารณาว่าไม่มีเหล็กเสริม)

$I_{cr} =$ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดแปลงร้าว (พิจารณาแปลงรูปตัดด้วยอัตราส่วน

โมดูลัส $n = E_s / E_c$ หาค่าแห่งของแนวแกนสะเทินก่อน แล้วจึงหาค่า I_{cr})

สำหรับส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว :

$$k = \sqrt{2\rho n + (\rho n)^2} - \rho n \quad \text{และ} \quad I_{cr} = b(kd)^3 / 3 + nA_s(d - kd)^2$$

สำหรับส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าเสริมเหล็กรับแรงดึง

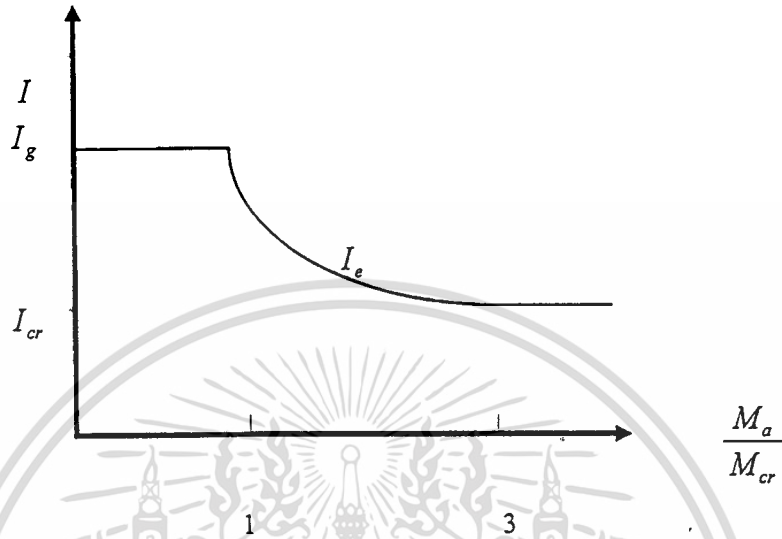
และแรงอัด :

$$k = \sqrt{2n(\rho + \frac{2\rho'd'}{d}) + n^2(\rho + 2\rho')^2} - n(\rho + 2\rho')$$

$$I_{cr} = b(kd)^3 / 3 + nA_s(d - kd)^2 + (n - 1)A_s'(kd - d')^2$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า I_c กับค่า M_u/M_{cr} แสดงดังรูปที่ 2.11 พบว่าเมื่อค่า M_u/M_{cr} น้อยกว่าหนึ่ง ค่าของ I_c จะเท่ากับ I_g และเมื่อค่า M_u/M_{cr} มาก (ประมาณเท่ากับสาม) ค่าของ I_c จะเท่ากับ I_{cr}

ค่าสูงสุดที่ยอมให้เกิดระยะ โคงที่คำนวณได้ จาก ACI Code ขึ้นกับการพิจารณาระยะ โคงแบบระยะ โคงทันทีเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร หรือระยะ โคงทั้งหมดที่เกิดขึ้น โดยแยกออกตามลักษณะ ชนิดของ โครงสร้าง ดังแสดงในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า I_c กับค่า M_u/M_{cr} (คัดแปลงจาก[3])

ตารางที่ 2.1 ค่าสูงสุดที่ยอมให้ของระยะ โคงที่คำนวณได้

ระยะ โคงที่ต้องพิจารณา	ชนิดของส่วน โครงสร้าง	พิกัดระยะ โคง
1. ระยะ โคงทันทีเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร	ก. หลังคา ซึ่งไม่รองรับหรือไม่ยึดติดกับส่วนที่มีใช้โครงสร้างแต่คาดว่าจะเกิดความเสียหายเมื่อ โคงตัวมากเกินไป	1 ' 180
	ข. พื้น ซึ่งไม่รองรับหรือยึดติดกับส่วนที่มีใช้โครงสร้างแต่คาดว่าจะเกิดความเสียหายเมื่อ โคงตัวมากเกินไป	1 / 360
2. ระยะ โคงทั้งหมดหลังการยึดติดกับส่วนที่มีใช้โครงสร้าง(ผลรวมของระยะ โคงตามกาลเวลาเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงค้างทั้งหมด กับระยะ โคงทันทีเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรที่เพิ่มขึ้น)	ก. หลังคาหรือพื้น ซึ่งรองรับหรือยึดติดกับส่วนที่มี ใช้โครงสร้างและคาดว่าจะเกิดความเสียหายเมื่อ โคงตัวมากเกินไป	1 / 480
	ข. หลังคาหรือพื้น ซึ่งรองรับหรือยึดติดกับส่วนที่มีใช้โครงสร้างและคาดว่าจะไม่เกิดความเสียหายเมื่อ โคงตัวมากเกินไป	1 / 240

2.3 รูปแบบการแตกร้าว



รูปแบบการแตกร้าว สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนและโมเมนต์คด (Flexural-Shear Cracking) และการแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนในตัวแกน (Web-Shear Cracking) รายละเอียด อ้างอิงจาก ดร.นเรศ พันธราช (2540) [4] ซึ่งสามารถอธิบายเป็นข้อย่อได้ดังนี้

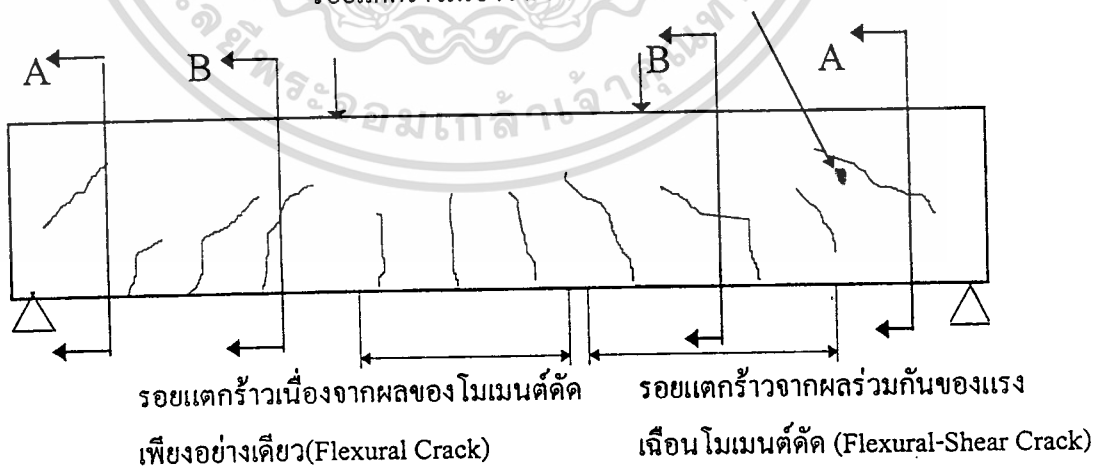
2.3.1 การแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนและโมเมนต์คด (Flexural-Shear Cracking)

การแตกร้าวชนิดนี้เป็นการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในบริเวณที่โมเมนต์คดและแรงเฉือนที่กระทำต่อคานมีค่ามากที่สุด การแตกร้าวลักษณะนี้เริ่มจากการแตกร้าวเนื่องจากผลของโมเมนต์คดก่อน (Flexural Cracking) โดยรอยแตกร้าวจะเริ่มที่ผิวล่างสุดของคานและรอยแตกร้าวอยู่ในแนวตั้งฉากกับแนวแกนในช่วงแรก เมื่อผนวกกับผลของแรงเฉือน รอยแตกร้าวก็จะแตกเฉียงต่อไปในแนวทแยง (บริเวณหน้าตัด A-A ในรูปที่ 2.12) ถ้าไม่ได้ออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือนให้เพียงพอ รอยแตกร้าวนี้จะแตกลึกเข้าไปในส่วนของคอนกรีตที่รับแรงอัด (Compression Zone) พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตที่รับแรงอัดบริเวณปลายบนของรอยแตกร้าวจึงลดลง ทำให้หน้าตัดคานบริเวณนี้ไม่สามารถรับแรงอัดในคอนกรีตอันเกิดมาจากผลของโมเมนต์ได้อย่างเพียงพอการวิบัติจึงเกิดขึ้น การวิบัติชนิดนี้เรียกว่า การวิบัติเนื่องจากผลของแรงเฉือนและแรงอัด (Shear-Compression Failure)

2.3.2 การแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนในตัวแกน (Web-Shear Cracking)

การแตกร้าวชนิดนี้เป็นการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในบริเวณที่แรงเฉือนมีค่าสูงมากและโมเมนต์มีค่าน้อย การแตกร้าวชนิดนี้มักจะพบบริเวณใกล้ ๆ กับที่รองรับบริเวณปลายคาน เนื่องจากแรงเฉือนมีค่ามาก และผลของแรงเฉือนนี้ก่อให้เกิดรอยแตกตามแนวทแยงในบริเวณตัวแกนของคาน การแตกร้าวชนิดนี้พบมากในคานที่มีหน้าตัดรูปตัว T หรือ I ซึ่งมีความกว้างของแกนน้อย การแตกร้าวชนิดนี้จะเห็นเป็นรอยแตกทแยงตั้งแสดงในรูปที่ 2.12 (บริเวณหน้าตัด B-B)

รอยแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนใน ตัวแกน(Web-Shear Crack)



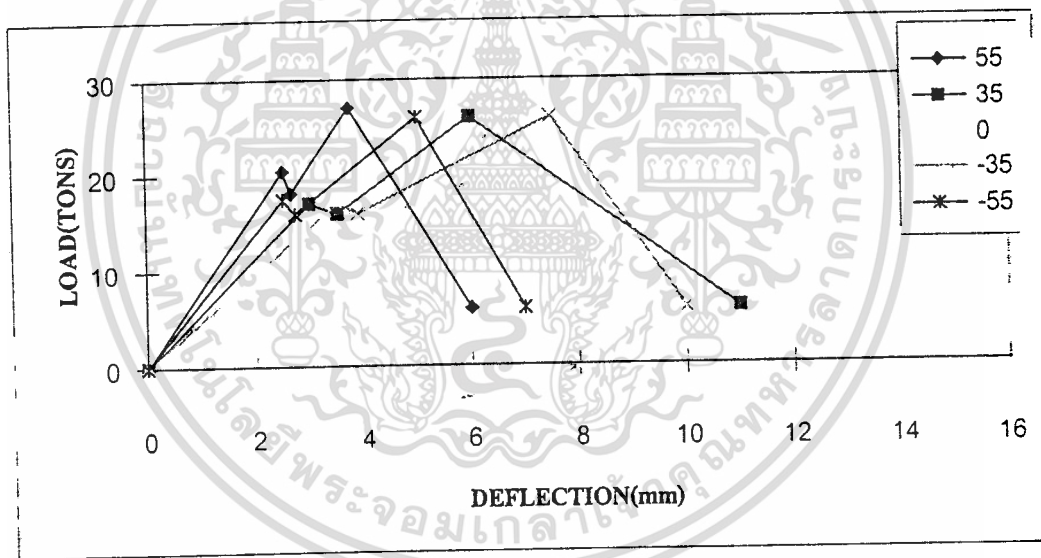
รูปที่ 2.12 ลักษณะการแตกร้าวในคาน (ดัดแปลงจาก[4])

2.3 ผลการศึกษาที่ผ่านมา

นายปัญญา ชูพานิช (2539) ได้ทำการศึกษาเรื่อง “กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีเหล็กปลอก” มีรายละเอียดตามเอกสารอ้างอิงหมายเลข [5] สามารถสรุปได้ดังนี้

ลักษณะของเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำและการโก่งตัวของทุกหน้าตัดจะเหมือนกัน และจะมีความชันเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงจนกระทั่งเกิด Flexural Crack หลังจากนั้นความชันของเส้นโค้งจะเปลี่ยนไปเล็กน้อย และความชันของเส้นโค้งจะเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้นอีกครั้งจนกระทั่ง Flexural Crack เริ่มเอียงออกจากแนวตั้ง จากนั้นความชันของเส้นโค้งจะลดลงอีกเล็กน้อย และจะเพิ่มเป็นเส้นตรงจนกระทั่งเกิดการวิบัติ

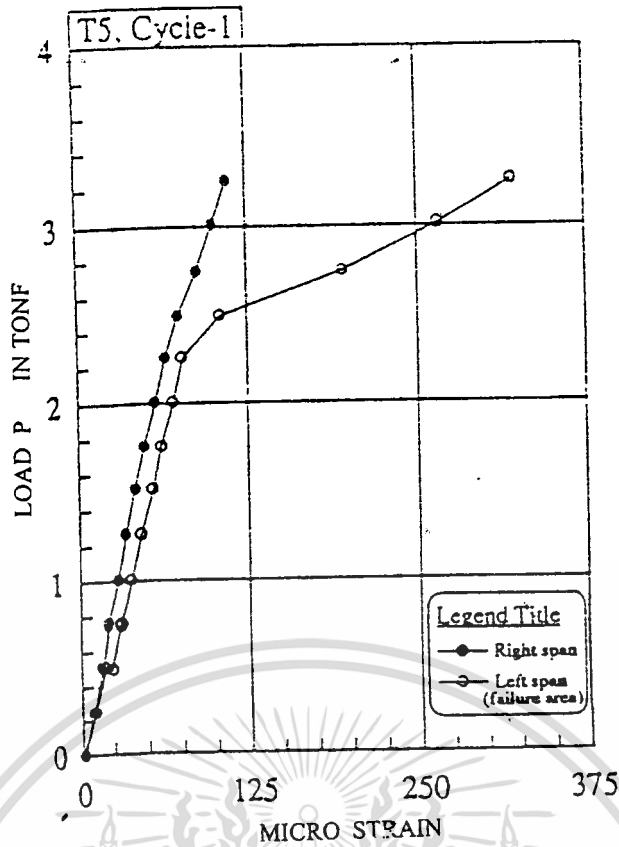
สำหรับเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำและการบิดตัวของเหล็กเสริมที่กลางคาน จะมีลักษณะคล้ายกับเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำและการโก่งตัว ความชันของเส้นโค้งจะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงจนกระทั่งคอนกรีตไม่สามารถรับความเค้นดึงได้ เหล็กเสริมก็จะเริ่มรับความเค้นดึงนี้แทน เป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความชันในเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำและการบิดตัวของเหล็กเสริม



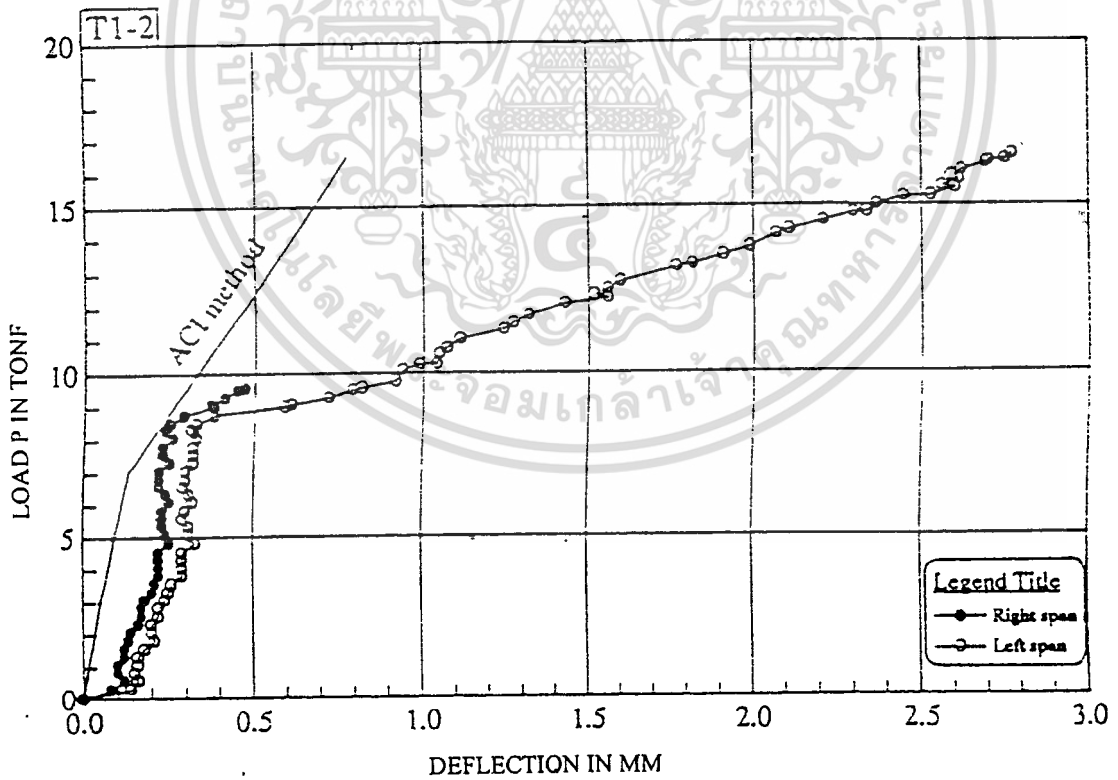
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับระยะการแอ่นตัวที่ตำแหน่งต่างๆ กัน (คัดแปลงจาก[5])

ส่วนการวัดผลความเค้น และความเครียด ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของเหล็กและคอนกรีต และทำการเปรียบเทียบระยะการโก่งตัวที่ได้จากการทดสอบและ ACI Code สามารถสรุปได้ดังนี้

พิจารณาเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำและการโก่งตัวที่ได้จากการทดลอง จะพบว่าเส้นโค้งจะขนานไปกับเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำและการโก่งตัวที่ได้จาก ACI Code จนถึงจุดที่เกิด Shear Crack ก็จะเริ่มแยกออกจากกัน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.14 และรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดดึงของคอนกรีตตำแหน่งที่มีน้ำหนักกระทำ [5]



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับระยะการแอ่นตัวตำแหน่งที่มีน้ำหนักกระทำ [5]

นายระวิน เจริญสุข และคณะ (2540) [6] ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบ “ พฤติกรรมของคานคอนกรีตที่เสริมด้วยตะแกรงลวดเหล็กกล้า กับคานที่เสริมด้วยเหล็กกล้าละมุน ” พบว่า คานที่เสริมด้วยเหล็กกล้าละมุนจะมีการแอ่นตัวมาก หมายถึง เมื่อเหล็กกล้ารับแรงดึงจะมีการยืดตัวมาเมื่อเปรียบเทียบกับคานที่เสริมด้วยตะแกรงลวดเหล็กกล้า การพังของคานที่เสริมด้วยเหล็กกล้าละมุนจะพังด้วยแรงเฉือนและเหล็กกล้าไม่ขาด สำหรับคานที่เสริมลวดเหล็กกล้าดิ่งเข็นและตะแกรงลวดเหล็กกล้าเชื่อมตักจะมีลักษณะการพังด้วยการขาดของเหล็กกล้าแบบทันทีทันใดเนื่องจากเหล็กมีความยืดน้อยมากทำให้ไม่สามารถทนต่อการแอ่นตัวของคานได้ การออกแบบคานที่เสริมด้วยตะแกรงลวดเหล็กกล้า เมื่อทำการเลือกหน้าตัดและปริมาณเหล็กเสริมแล้ว ต้องตรวจสอบการแอ่นตัว ในบางครั้งจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมเพื่อที่จะให้การแอ่นตัวไม่เกินค่าที่ยอมรับได้และจะทำให้ค่าการรับกำลังที่ประลัยเพิ่มขึ้นอีกด้วย

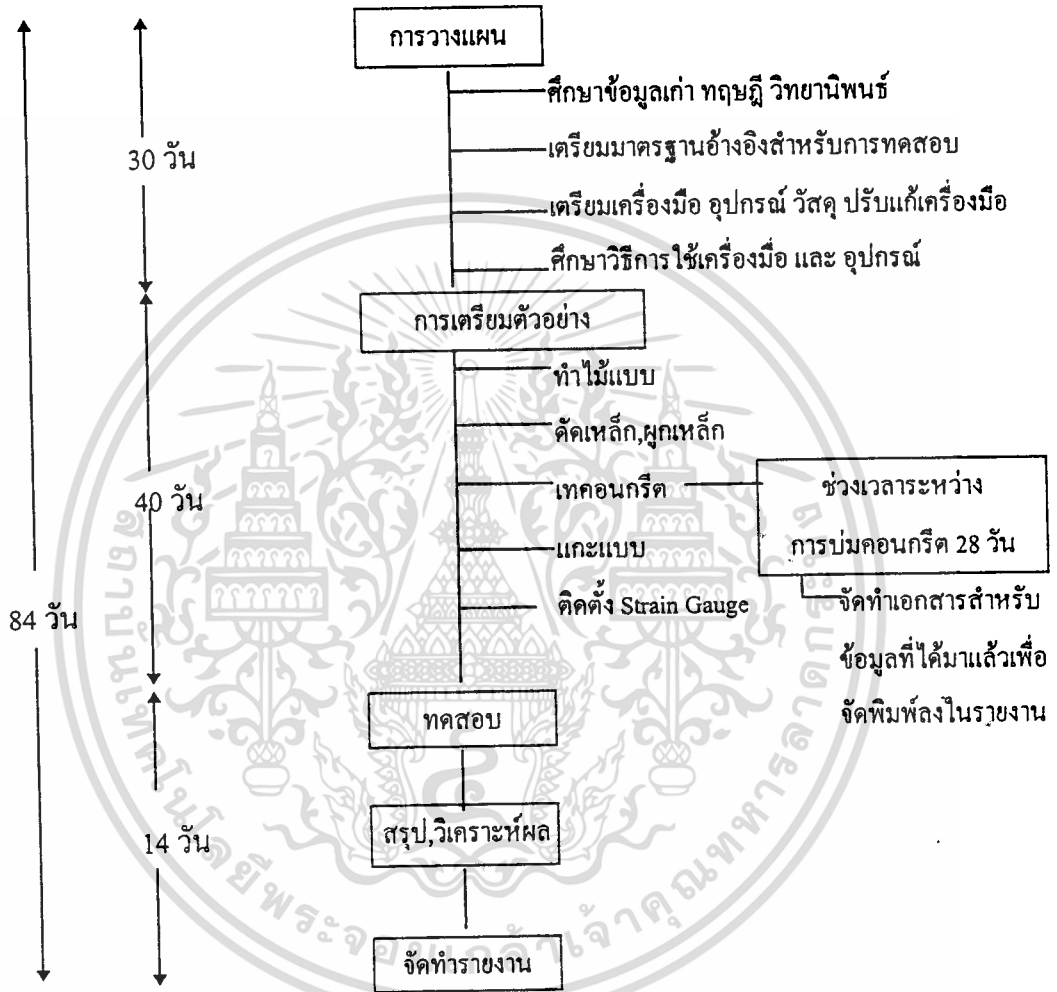


บทที่ 3

วิธีการดำเนินการศึกษา

3.1 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา

ขั้นตอนการดำเนินการศึกษาประกอบด้วย การวางแผน การเตรียมตัวอย่าง การทดสอบการสรูปและวิเคราะห์ผล การจัดทำรายงาน ดังนี้ขั้นตอนการดำเนินงานแสดงในรูปที่ 3.1



หมายเหตุ ช่วงเวลาดังกล่าวตั้งแต่เริ่มการวางแผนจนถึงการเตรียมตัวอย่างใช้เวลา 30 วัน

ช่วงเวลาดังกล่าวตั้งแต่เริ่มการเตรียมตัวอย่างจนถึงการทดสอบใช้เวลา 40 วัน

ช่วงเวลาดังกล่าวตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนถึงสิ้นสุดการจัดทำรายงานใช้เวลา 14 วัน

รวมเวลาการดำเนินงานสุทธิ 84 วัน

รูปที่ 3.1 สรุปขั้นตอนการดำเนินการศึกษา

3.2 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์

1) วัสดุ ประกอบด้วย

- คอนกรีต ใช้คอนกรีตผสมเสร็จปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมมาจากโรงงานผสมขนส่ง โดยรถผสมคอนกรีตที่สม่ำเสมอ มีค่า กำลังอัดของแท่งคอนกรีต ทรงกระบอก 0.15 เมตร x 0.30 เมตร 1 ชุด จำนวน 3 ตัวอย่างที่อายุ 28 วันเท่ากับ 210 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีค่าความยุบตัวเท่ากับ 7.5 เซนติเมตร ใช้ระยะเวลาของการก่อตัวเท่ากับ 2 ชั่วโมง

- เหล็กเสริมคอนกรีต ประกอบด้วย เหล็กเส้นกลมเป็น เหล็กเส้นผิวเรียบ ผ่านกรรมวิธีรีดร้อน ชั้นคุณภาพ SR24 ขนาด 9 มิลลิเมตร และเหล็กเส้น ข้อย้อยเป็น เหล็กเส้นผิวมีริบขี้ผึ้ง ผ่านกรรมวิธีรีดร้อน ชั้นคุณภาพ SD30 ขนาด 12 มิลลิเมตร และ 16 มิลลิเมตร

- ลวดเหล็กดัดเย็นเสริมคอนกรีต ขนาดที่ใช้เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร เป็นเหล็กแกนขนาด 6 มิลลิเมตรเป็นเหล็กปลอก ลวดเหล็กผ่านกรรมวิธีรีดเย็น (Cold Drawn) เหล็กลวดคาร์บอนต่ำ SWRM 15 เพื่อลดหน้าตัดมีผลทำให้เกิดความเครียดสะสมในเนื้อเหล็กและจะมีการสะสมพลังงานไว้ จากขบวนการดัดกล่าวส่งผลให้ลวดเหล็กกล้าดัดเย็นมีความเหนียวเพิ่มขึ้น สามารถรับความเค้นมากขึ้น มีจุดครากสูงขึ้น

- ตะแกรงลวดเหล็กกล้าเชื่อมติดดัดขึ้นรูป (Steel Welded Wire Fabric, Deform for Concrete Reinforcement) ตะแกรงเป็นพื้นที่นำลวดเหล็กรีดเย็นมาทำการเชื่อมแบบความต้านทานไฟฟ้า ติดกันเป็นตะแกรง โดยที่ตาตะแกรงเป็นรูปสี่เหลี่ยม

- แบบหล่อคอนกรีต ใช้แบบไม้อัดขนาด 10 มิลลิเมตร ตัดแต่งเป็นแบบ แล้วใช้ปากการัดชิ้นงานมารัดกันแบบ

2) เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- เครื่อง Universal Testing Machine (Instron 8505)

- แท่นรองรับคานตัวอย่าง Wide Flange

- ส่วนควบคุมและประมวลผลของเครื่องทดสอบ

- Dial Gauge แบบ Analog

- Digital Strain Indicator รุ่น SMD-10A

- Strain Gauge ของ KYOWA TYPE KFG-5-120-C1-11L1M2R

- กาวที่ใช้สำหรับติด Strain Gauge โดยเฉพาะ ของ KYOWA รุ่น CC-3A

- รถยกคาน

3.3 การเตรียมคานตัวอย่าง

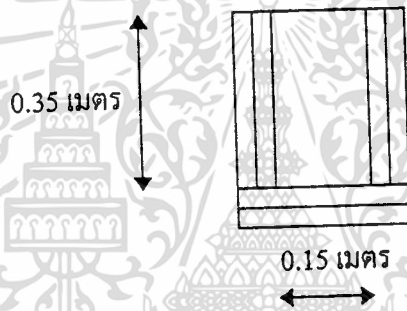
เป็นคานคอนกรีตขนาด 0.15 เมตร x 0.325 เมตร x 2.40 เมตร เสริมด้วยเหล็กปลอกและเหล็กแกน มีการงอข้อที่ปลายเหล็กแกน ระยะห่างระหว่างจุกรองรับ 2.00 เมตร จำนวนทั้งสิ้น 9 ตัวอย่าง การเตรียมคานตัวอย่างมีขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1) การเตรียมไม้แบบและเหล็กเสริม

- การเตรียมไม้แบบ สำหรับ 1 คาน

- ตัดไม้อัดขนาด 0.35 เมตร x 2.40 เมตร จำนวน 2 แผ่น
- ตัดไม้อัดขนาด 0.35 เมตร x 0.20 เมตร จำนวน 2 แผ่น
- ตัดไม้ขนาด 0.20 เมตร x 2.40 เมตร จำนวน 1 แผ่น
- ตัดไม้ขนาด $1\frac{1}{2}$ นิ้ว x 3 นิ้ว x 0.50 เมตร จำนวน 10 ท่อน
- ตัดไม้ขนาด $1\frac{1}{2}$ นิ้ว x 3 นิ้ว x 0.25 เมตร จำนวน 5 ท่อน

รูปแสดงแบบสำหรับหล่อคานคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบหล่อคานทดสอบ

2) การเสริมเหล็ก มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- คานเสริมเหล็กกล้าละมุนล้วน (Mild Steel) จำนวน 3 ตัวอย่าง มีองค์ประกอบดังนี้
 - เหล็กแกน เป็นเหล็กกล้าเสริมคอนกรีตข้ออ้อย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 และเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ชั้นคุณภาพ SD 40
 - เหล็กปลอก เป็นเหล็กกล้าละมุนเสริมคอนกรีตเส้นกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร ชั้นคุณภาพ SR 24
- คานเสริมตะแกรงเหล็ก (Steel Welded Wire Mesh) จำนวน 3 ตัวอย่าง มีองค์ประกอบ

ดังนี้

- เหล็กแกน เป็นลวดเหล็กรีดเย็น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร
- เหล็กปลอก เป็นลวดเหล็กรีดเย็น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร เชื่อมติดกับเหล็กแกนโดยการเชื่อมไฟฟ้า ลักษณะวงปิด ดัดขึ้นรูปเป็นกล่องสี่เหลี่ยม ด้วยเครื่องดัด ตะแกรง

- กานเสริมตะแกรงเหล็กค้ำขึ้นรูปร่วมกับเหล็กกล้าละมุน จำนวน 3 ตัวอย่าง มีองค์ประกอบดังต่อไปนี้

- เหล็กแกน เป็นลวดเหล็กรีดเย็น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร
- เหล็กเสริมพิเศษ เหล็กกล้าละมุนเสริมคอนกรีต ข้อ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ชั้นคุณภาพ SD 30

- เหล็กปลอก เป็นลวดเหล็กรีดเย็น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร เชื่อมติดกับเหล็กแกนโดยการเชื่อมไฟฟ้า ลักษณะวงปิด ค้ำขึ้นรูปเป็นรูปกล่องสี่เหลี่ยมด้วยเครื่องตัดตะแกรง

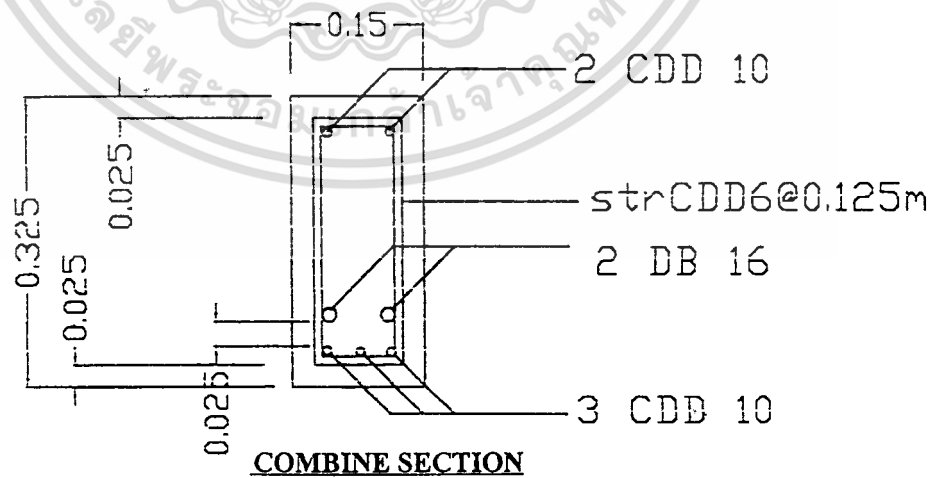
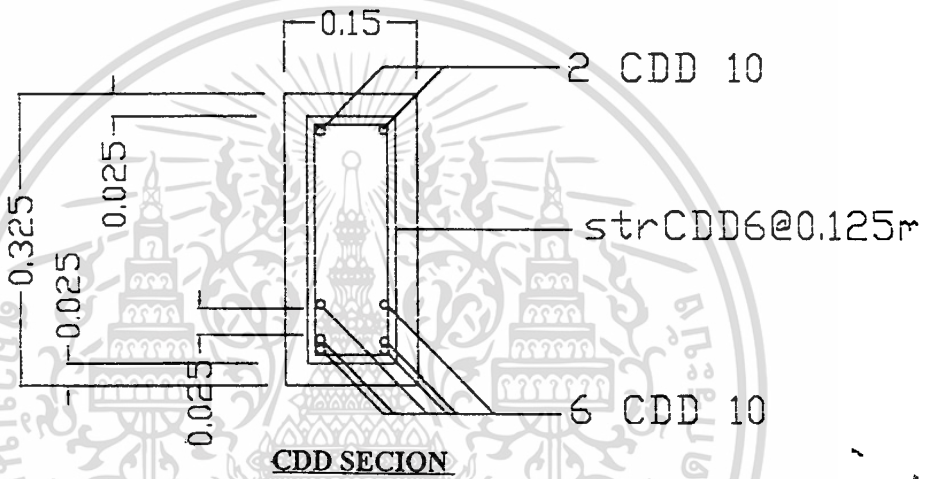
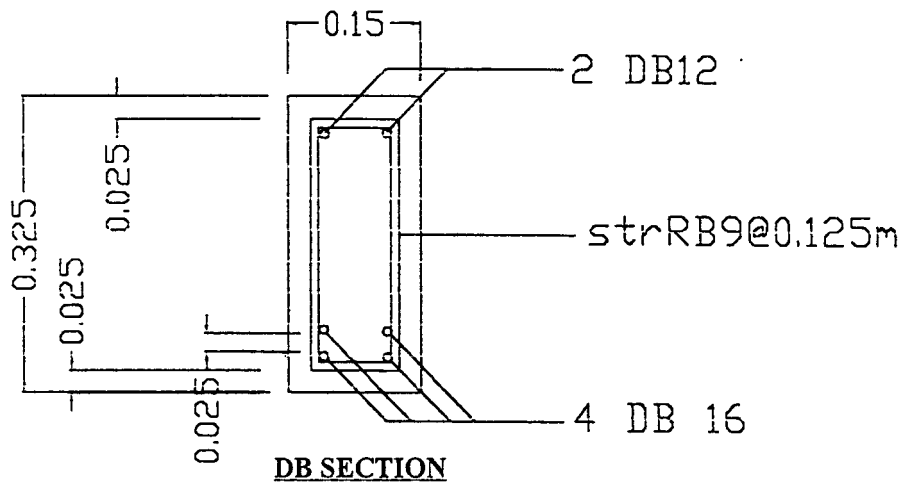
ผลทดสอบกำลังวัสดุของกานอันได้แก่ กำลังอัดของคอนกรีต กำลังครากของเหล็กเสริมบน(f_y) กำลังครากของเหล็กเสริมล่าง(f_y) แสดงในตารางที่ 3.1 สำหรับรายละเอียดของกานแต่ละประเภท อันได้แก่ สัญลักษณ์ มิติ ความลึก และน้ำหนักสูงสุดที่กานสามารถรับได้ แสดงในตารางที่ 3.2 ซึ่งลักษณะการเสริมเหล็กในกานที่จะทำการทดสอบแสดงในรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบกำลังวัสดุที่ใช้กานคอนกรีต

ตัวอย่างทดสอบ	กำลังอัดของคอนกรีต f_c' (กก./ตร.ซม)	กำลังครากของเหล็กเสริมบน (f_y)	กำลังครากของเหล็กเสริมล่าง (f_y)
เสริมเหล็กกล้าละมุน	231.9	3019	2950
เสริมเหล็กกล้าดิ่งเย็น	231.9	5218	5218
เสริมเหล็กกล้าดิ่งเย็น	231.9	5218	2950 (DB), 5218 (CDD)
ผสมเหล็กกล้าละมุน			

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของคานแต่ละประเภท

ชนิด	สัญลักษณ์	ขนาด (เมตร)	เหล็กบน	เหล็กล่าง	น้ำหนักสูงสุดที่คาน รับได้(กิโลกรัม)	อัตราส่วนของเหล็ก เสริมรับแรงดึง(p)	ความลึกประสิทธิภาพ d(ซม.)
คานคอนกรีตเสริมเหล็กกล้าละมุน	DB	0.15x0.325x2.40	2 DB 12	4 DB 16	7713	0.0204	26.25
คานคอนกรีตเสริมลวดเหล็กดิ่งเยื่อ	CDD	0.15x0.325x2.40	2 CDD 10	6 CDD 10	9350	0.0117	26.57
คานคอนกรีตเสริมลวดเหล็กดิ่ง เยื่อผสมเหล็กกล้าละมุน	COMBINE	0.15x0.325x2.40	2 CDD 10 3 CDD 10	2 DB 16 + 3 CDD 10	8813	0.0158	26.9



รูปที่ 3.3 ลักษณะการเสริมเหล็กในคานที่จะทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ขั้นตอนการหล่อคานตัวอย่าง

- เตรียมไม้แบบตามแบบที่จะใช้เป็นตัวอย่าง
- เตรียมเหล็กเสริมตามแบบที่จะใช้ เป็นตัวอย่าง
- นำเหล็กเสริมจัดเข้าแบบหลุมลูกปูน ให้ได้ระยะหุ้มคอนกรีตประมาณ 2.5

เซนติเมตร

- หล่อคอนกรีตโดยแบ่งเท 3 ชั้น กระทุ้งชั้นละ 100 ครั้ง ในพื้นที่ 0.15x0.50 ตาราง

เมตร

- เก็บตัวอย่างลูกปูนทรงกระบอก จำนวน 3 ตัวอย่าง
- บ่มคอนกรีตด้วยการคลุมกระสอบแล้วรดน้ำ 28 วันต่อเนื่อง
- ถอดแบบแล้วทาสีขาวเพื่อให้เห็นรอยแตกร้าวได้ชัดเจน
- นำคานตัวอย่างเข้าทดสอบตามที่ออกแบบไว้

3.4 การเตรียมการก่อนทดสอบ

หลังจากนำคานมาทำการทาสีขาวและปล่อยให้แห้งแล้ว ทำการติดตั้ง Strain Gauge เข้าที่ผิวคอนกรีตข้างคานตรงตำแหน่งของเหล็กเสริมล่างบริเวณกลางคาน เพื่อทำการวัด Strain ของจุดดังกล่าว

1) การติด Strain Gauge มีขั้นตอนการปฏิบัติดังนี้

- กำหนดตำแหน่งการติด Strain Gauge ให้ชัดเจน แล้วขีดผิวบริเวณที่จะติดตั้งให้ เรียบด้วย กระดาษทราย แล้วตรวจสอบค่าความต้านทานของ Strain Gauge ว่ามีความต้านทานอยู่ในช่วงที่ทางผู้ผลิตได้กำหนดไว้หรือไม่ (ดูที่กล่อง Strain Gauge) ถ้าไม่อยู่ในช่วงที่ผู้ผลิตได้กำหนดไว้แสดงว่าไม่สามารถใช้งาน Strain Gauge ตัวนั้นได้

- ทำความสะอาดบริเวณที่ขีดผิวแล้ว โดยการใช้อะซิโตนชุบสำลีเช็ดบริเวณที่จะติด Strain gauge (ถ้าไม่สามารถหาอะซิโตนได้ ก็สามารถใช้อัลกอฮอล์ใส่แอลเช็ดได้ แต่ความสะอาดจะไม่เท่ากับใช้อะซิโตนเช็ด ซึ่งอาจส่งผลให้ค่าที่ได้คลาดเคลื่อน)

- ใช้กาวที่ใช้ติด Strain Gauge หยดลงไปทีบริเวณที่จะติด Strain Gauge ประมาณ 1 หยด จากนั้นแปะ Strain Gauge ลงไปที่ด้านที่มีลายวงจรรอยู่ด้านบน

- ใช้เทปกาวปิดทับตัว Strain Gauge แล้วประรองได้ลวดทองแดงที่ต่อจากตัว Strain Gauge เพื่อป้องกันการขาดของลวดทองแดงเนื่องจากการเสียดสีกับผิวคอนกรีต จากนั้นใช้เทปกาวปิดบริเวณสายไฟที่ต่อจากลวดทองแดงเพื่อล๊อคสายไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่

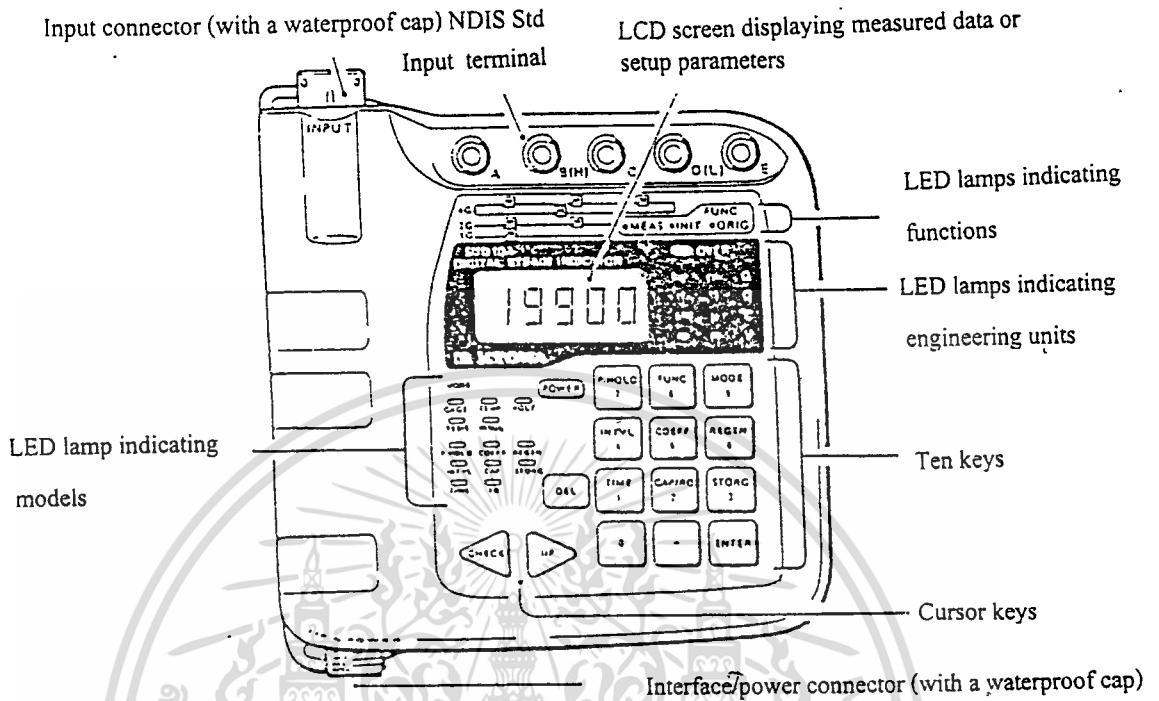
- ใช้โอห์มมิเตอร์เช็คค่าความต้านทานของ Strain Gauge อีกครั้ง

- ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบเพื่อให้กาวที่ติด Strain Gauge ยึดตัว Strain Gauge กับคอนกรีตได้อย่างเป็นเนื้อเดียวกัน

- ก่อนการทดสอบควรมีการเช็คค่าความต้านทานของ Strain Gauge อีกครั้งหนึ่ง

2) การใช้งาน Digital Strain Indicator

Digital Strain Indicator ที่ใช้ในการทดลองเป็นรุ่น SMD 10A ของ KYOWA มีลักษณะ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 Digital Strain Indicator

ขั้นตอนการใช้เครื่อง Digital Strain Indicator เพื่อการวัดค่า Strain มีดังนี้

- ต่อ Strain gauge เข้ากับเครื่อง Digital Strain Indicator
- กดปุ่ม Power รอจนเครื่องแสดง Mode การวัดค่า Strain
- กดปุ่มฟังก์ชันเพื่อเลือกใช้ฟังก์ชันในการวัด ใน Mode ฟังก์ชันประกอบด้วย
- Init (Initial value measure) จะแสดงค่า Strain เริ่มต้นของชิ้นทดสอบนั้นที่มีอยู่ก่อน

การทดสอบแล้ว

- Meas (Measure) จะแสดงค่า Strain ที่เพิ่มขึ้นจากค่า Init หลังการทดสอบ
- Orig (Original) จะแสดงค่า Strain ที่รวมค่า Init กับ Meas เข้าไว้ด้วยกัน

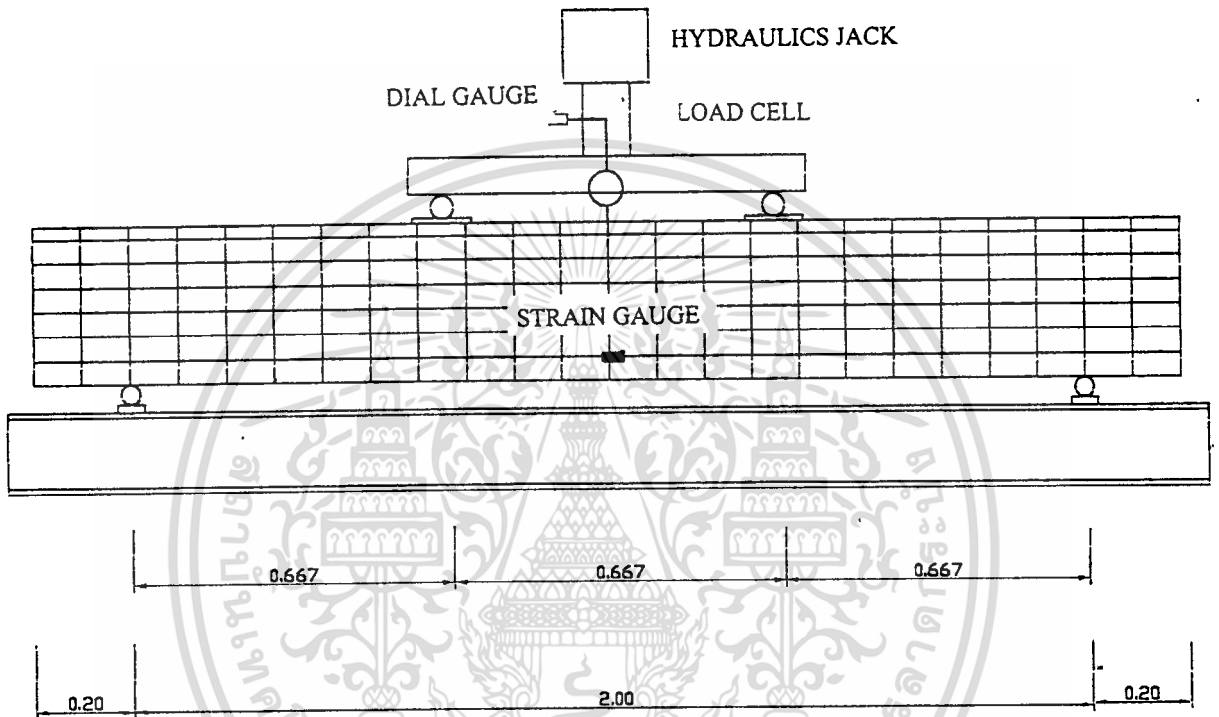
ทั้ง 3 Mode มีความสัมพันธ์ตามสมการ (3.1)

$$\text{Orig} = \text{Init} + \text{Meas} \quad \text{-----}(3.1)$$

ชุดฐานรองรับคานทดสอบจะประกอบไปด้วย เหล็ก Wide Flange และ Bolt ทำการติดตั้งชุดรองรับบนฐานเครื่อง Universal Testing Machine ให้ได้สมดุล แล้วยกคานขึ้นวางบนชุดฐานรองรับ โดยมีระยะระหว่าง Support 2.00 เมตร เหล็กระยะที่ปลายทั้งสองข้างด้านละ 0.20 เมตร

3.5 วิธีการทดสอบ

- ทำการจัดสมดุลย์ของคานทดสอบที่วางอยู่บนชุดฐานรองรับ ให้วางอยู่ในแนวกึ่งกลางของแท่นเครื่องพอดี และจัดให้หัวกดที่ตกลงมาอยู่ที่ตำแหน่ง 1/3 ของระยะ Support พอดี
- แบ่งคานออกเป็น 3 ส่วนเท่ากัน ส่วนละ 2/3 เมตร จัดให้ตำแหน่งของหัว Support และหัวกดอยู่ในตำแหน่งตามแบบเหลี่ยมระยะเกิน Support ที่ปลายทั้งสองข้างด้านละ 0.20 เมตร ลักษณะการให้น้ำหนักบรรทุกดังกล่าวเรียกว่า การให้น้ำหนักบรรทุกแบบ Third-Point Method แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ลักษณะการให้น้ำหนักบรรทุกแบบ Third-point Method

- ติดตั้ง Dial Gauge ที่ตำแหน่งกึ่งกลางคาน เพื่อวัดระยะการแอ่นตัวของตำแหน่งดังกล่าว และจะสามารถวัดระยะการแอ่นตัวอีก 2 ตำแหน่งที่หัวกดทั้งสอง
- กำหนดโปรแกรมการทดสอบให้เครื่องให้น้ำหนักตกลงมาด้วยอัตราคงที่ 2 มิลลิเมตรต่อนาที จนกระทั่ง Deflection มีค่าถึง 25 มิลลิเมตร จึงเปลี่ยนอัตราการให้น้ำหนักเป็น 20 มิลลิเมตร ต่อนาที
- เริ่มทำการทดสอบตามที่ออกแบบไว้ จนกระทั่งคานทดสอบวิบัติ ซึ่งจะถือเอาจากการที่คานไม่สามารถรับน้ำหนักเพิ่มได้อีกต่อไป หรือมีการแอ่นตัวที่มากขึ้นเรื่อยๆ โดยที่ไม่มีการเพิ่ม น้ำหนักบรรทุกแต่อย่างใด

- บันทึกผลการทดสอบ ประกอบด้วยข้อมูล ดังนี้

- น้ำหนักบรรทุกสูงสุด
- น้ำหนักบรรทุกที่กระทำ เมื่อค่า Deflection กึ่งกลางคาน เพิ่มขึ้นทุกๆ 0.5 มิลลิเมตร
- ค่า Strain ของผิวล่างตรงตำแหน่งเหล็กเสริมของคานทดสอบบริเวณกึ่งกลางคานเมื่อน้ำหนักที่กระทำแปรเปลี่ยนไปทุก ๆ 500 กิโลกรัม
- ถ่ายรูปและระบุลำดับการเกิดรอยร้าวที่เกิดขึ้น บันทึกรูปแบบการแตกร้าว

3.6 ขั้นตอนแสดงผลการทดสอบ

1) การแสดงผล Load - Deflection

- บันทึกผล Load - Deflection ของทุกคาน แล้วนำมาเขียนกราฟ
- นำกราฟของแต่ละชนิดของคาน ชนิดละ 3 ตัวอย่าง มาเฉลี่ย
- นำผลที่เฉลี่ยของแต่ละชนิดคานมาเขียนกราฟระหว่าง Load - Deflection เปรียบเทียบกับที่คำนวณโดยทฤษฎีประมาณจาก โมเมนต์ดัด - ความโค้ง
- เขียนกราฟเปรียบเทียบ Load - Deflection ของคานแต่ละประเภท เปรียบเทียบกับ ACI Code
- เขียนกราฟเปรียบเทียบแต่ละชนิดคานบนแกนเดียวกัน กับ ที่คำนวณจากทฤษฎีการประมาณ
- เขียนกราฟเปรียบเทียบ Deflection - เปอร์เซนต์น้ำหนักบรรทุก/น้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่คานรับได้
- หาน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ ที่การแอนตัวต่างๆกัน
- เขียนกราฟแห่งเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุก ที่การแอนตัว L/720 L/360 L/180 Ultimate เปรียบเทียบกับน้ำหนักบรรทุกประลัยที่คำนวณจากทฤษฎีกำลังประลัย
- สังเกตลักษณะการแตกร้าว บันทึกลำดับการแตกร้าว พร้อมเขียนรูปลักษณะของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น

2) การวิเคราะห์ผล Load - Deflection

- อาศัยกราฟความสัมพันธ์ Load - Deflection สามารถอธิบายพฤติกรรมได้กล่าว คือ
 - พฤติกรรมการแอนตัวของแต่ละชนิดคานเป็นไปตามทฤษฎีที่คำนวณหรือไม่
 - ความชันของกราฟจะบอกถึงอัตราการแอนตัวของคานเมื่อน้ำหนักบรรทุกมีค่ามากขึ้นถ้าความชันมากกว่าแสดงว่าภายใต้ น้ำหนักบรรทุกที่เท่ากัน จะมีการแอนตัวน้อยกว่า
 - เปรียบเทียบกำลัง เปอร์เซนต์การรับน้ำหนักบรรทุกของคานแต่ละประเภท กับน้ำหนักบรรทุกประลัยที่คำนวณจากทฤษฎีกำลัง

- เปรียบเทียบ Deflection กับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักบรรทุกค่อน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่คานรับได้ของคานแต่ละประเภท

- อาศัยรูปแบบการพังทลายและลำดับการแตกร้าว

- วิเคราะห์ว่าคานเกิดการแตกร้าวจากอิทธิพลของสิ่งใดเป็นสำคัญ

- วิเคราะห์รูปแบบการพังทลายเปรียบเทียบกันของคานแต่ละชนิด

จากหลักดังกล่าวข้างต้นนำมาวิเคราะห์คานตัวอย่างได้ดังนี้

- เปรียบเทียบกำลังที่ได้จากการทดสอบของคานแต่ละประเภท เพื่อแสดงว่าทฤษฎีกำลังสามารถนำมาใช้ออกแบบคานที่เสริมด้วยตะแกรงลวดเหล็กได้หรือไม่

- เปรียบเทียบกำลัง พฤติกรรมการแอ่นตัวของคานที่เสริมด้วย

- เหล็กกล้าละมุนล้วน

- ตะแกรงเหล็กล้วน

- ตะแกรงเหล็กควบคู่กับเหล็กกล้าละมุน

- พิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการแอ่นตัวของคานทั้ง 3 ประเภท

- รูปแบบการพังทลายและลำดับการแตกร้าวของคานเพื่อวิเคราะห์ว่า การพังทลายของคานแต่ละชนิดแตกต่างกันอย่างไร มีรอยแตกร้าวมากน้อยต่างกันเพียงไร

3) การแสดงผล Load - Strain

- บันทึกผล Load - Strain ของคอนกรีตที่ตำแหน่งเหล็กเสริมล่างสุด แล้วนำมาเขียน

กราฟ Load - Strain

- นำกราฟ Load - Strain ของคานแต่ละชนิดชนิดละ 3 ตัวอย่าง ในช่วงที่ Strain ยังไม่กลับขึ้นลง มาหาค่าเฉลี่ยเขียนกราฟ Load - Strain ของคานแต่ละชนิด

- นำกราฟ Load - Strain ของคานแต่ละชนิดมาเปรียบเทียบบนแกนเดียวกันกับ Load Deflection

- เขียนกราฟ Strain - เปอร์เซ็นต์น้ำหนักบรรทุกค่อน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่คานรับได้

4) การวิเคราะห์ผล Load Strain

- เปรียบเทียบ Strain ของแต่ละชนิดคานว่า ภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่เท่ากันคานแต่ละชนิดมี Strain แตกต่างกันเพียงใด

- ดูแนวโน้มของคานแต่ละชนิดว่าเมื่อเสริมเหล็กแต่ละชนิดแล้วส่งผลให้ Strain ของคอนกรีต ณ ตำแหน่งเหล็กล่างสุดเป็นอย่างไร

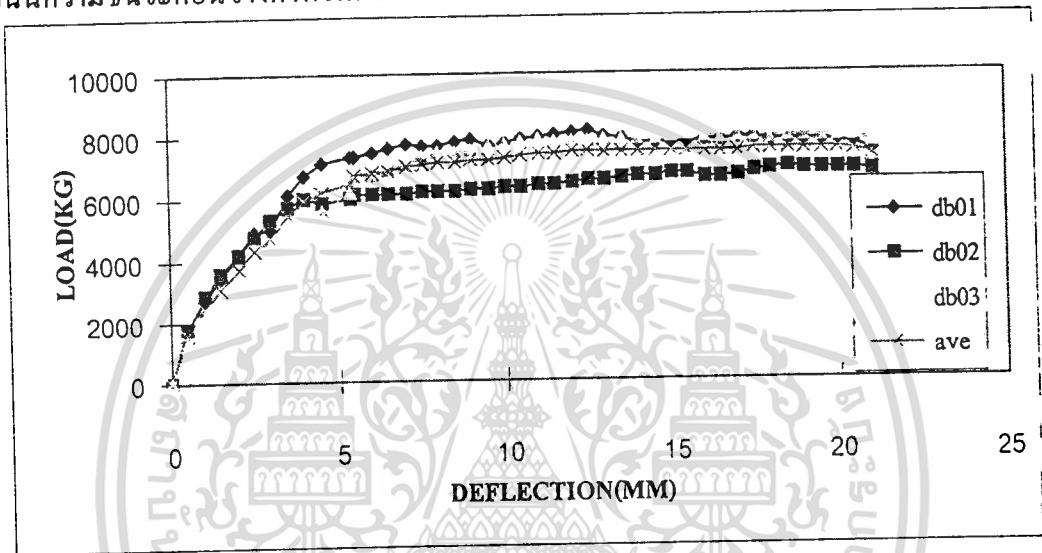
- หาความสัมพันธ์ของ Load - Strain กับ Load - Deflection

บทที่ 4

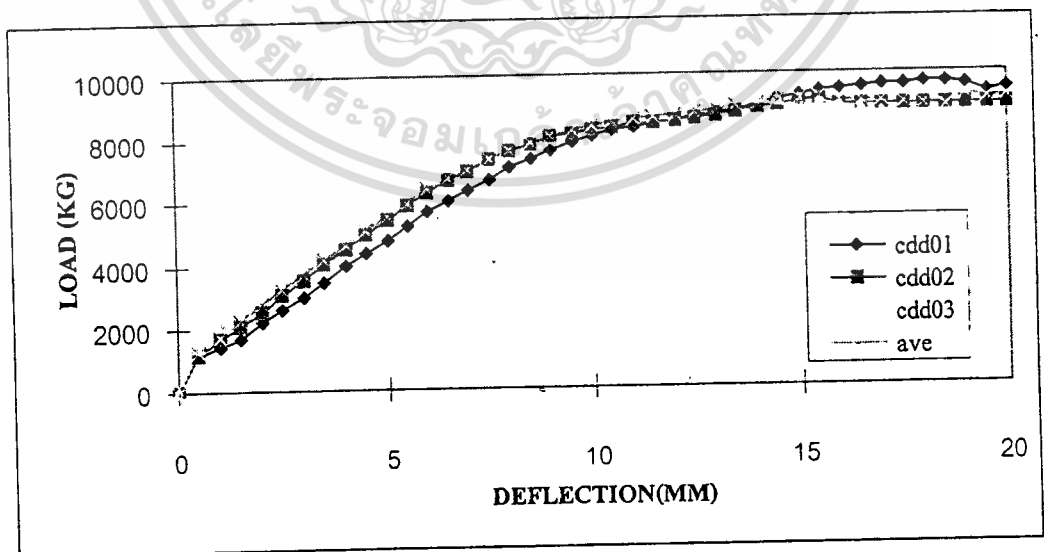
ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการทดสอบ

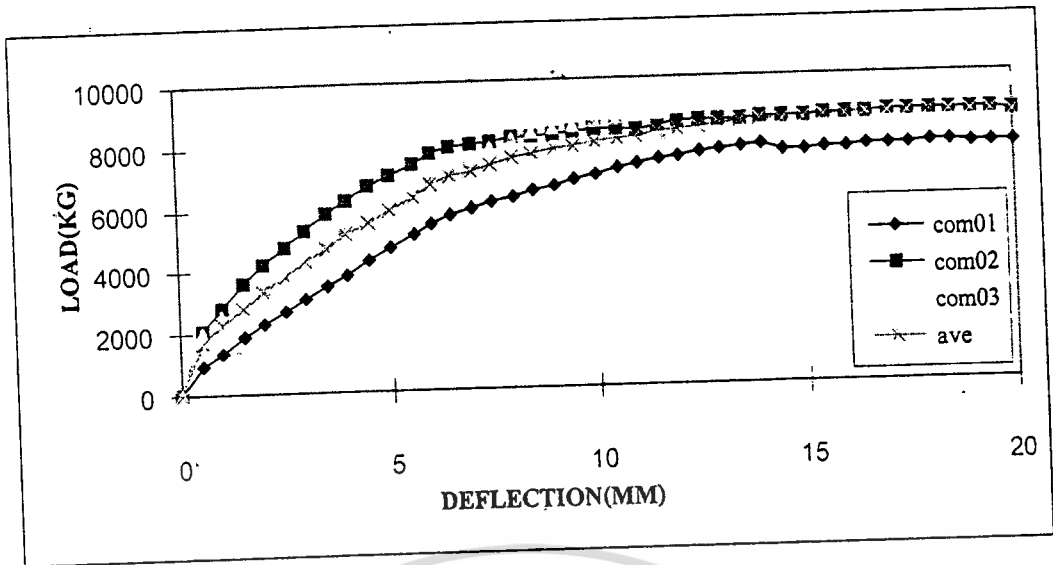
1) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Deflection ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุก กราฟจะเพิ่มเป็นเส้นตรงในช่วงแรก จนกระทั่งเกิด First Flexural Crack ความชันของกราฟจะลดลงเล็กน้อย หลังจากนั้นความชันของกราฟค่อนข้างคงที่จนกระทั่ง Flexural Crack เริ่มเบนออกจากแนวตั้ง อันเป็นผลจากอิทธิพลของแรงเฉือนควบคู่กับโมเมนต์คด ความชันของกราฟจะลดลงอีกครั้ง หลังจากนั้นความชันจะค่อนข้างคงที่จนกระทั่งคานพังทลาย



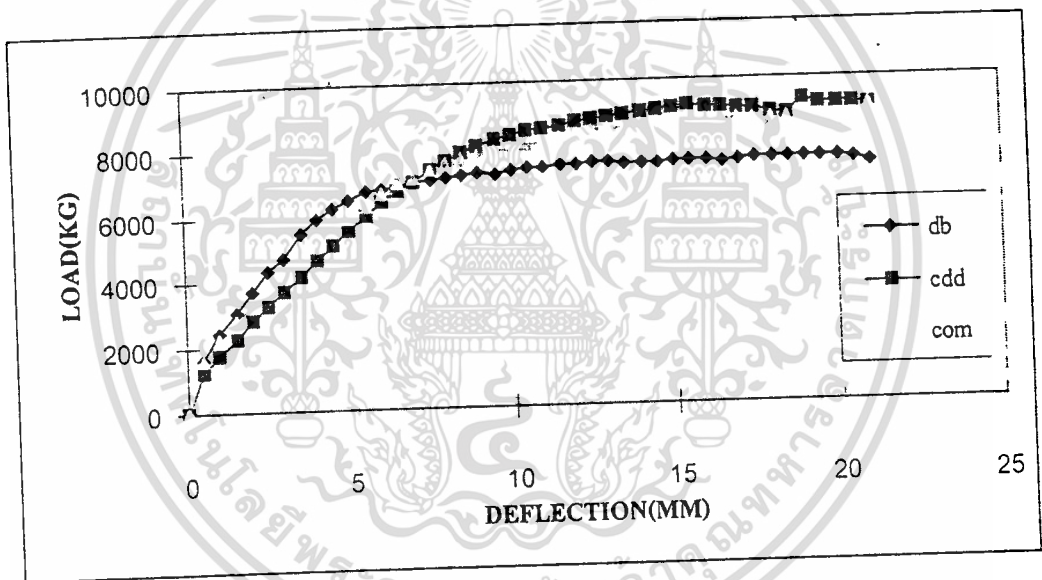
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุก - ระยะแอ่นตัวของคาน (DB)



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุก - ระยะแอ่นตัวของคาน (CDD)



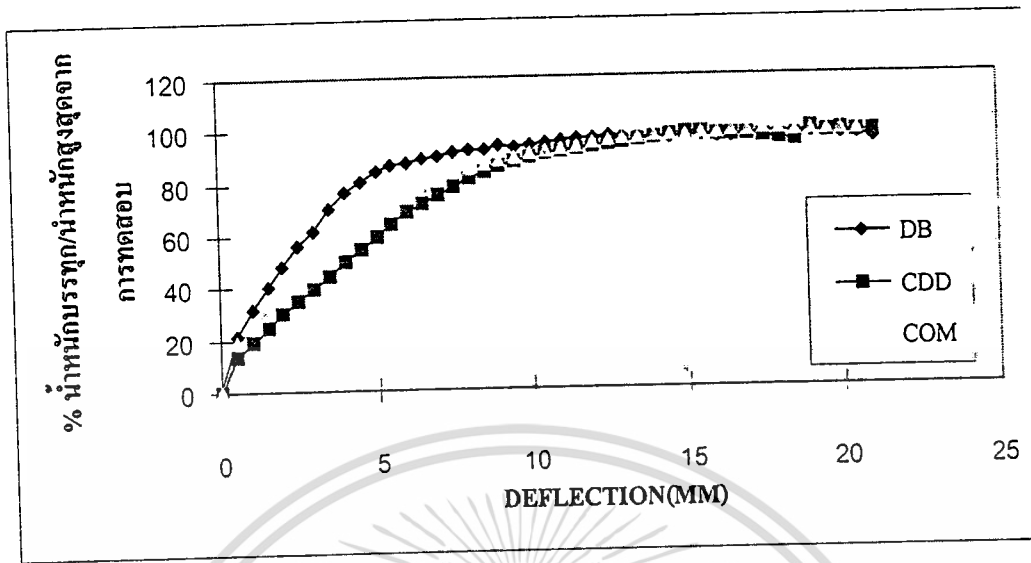
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุก - ระยะแอ่นตัวของคาน (COM)



รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก - ระยะแอ่นตัวของคานทั้ง 3 ประเภท

2) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection กับ เปอร์เซ็นต์น้ำหนักบรรทุกต่อน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่คานรับได้ของคานทั้ง 3 ประเภทซึ่งแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าคานที่เสริมด้วยเหล็กกล้าละมุนล้วนเส้นกราฟจะมีความชันมากที่สุด รองลงมาคือคานที่เสริมด้วยตะแกรงลวดควมคู่กับเหล็กกล้าละมุน และคานที่เสริมด้วยตะแกรงลวดล้วนจะมีความชันน้อยที่สุด ซึ่งให้เห็นว่าเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกเท่ากันคานที่เสริมด้วยเหล็กกล้าละมุนล้วนจะมีการแอ่นตัวน้อยที่สุด รองลงมาคือคานที่เสริมด้วยตะแกรงลวดควมคู่เหล็กกล้าละมุน และคานที่เสริมด้วยตะแกรงลวดล้วนจะมีค่าการแอ่นตัวมากที่สุด แสดงว่าเหล็กกล้าละมุนที่เสริม

พิเศษในคานคอนกรีตเสริมตะแกรงลวดจะช่วยให้อัตราการทรุดตัวของคานเข้าใกล้พฤติกรรมของคานที่เสริมเหล็กกล้าละมุนลื่น



รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง DEFLECTION - เปอร์เซนต์น้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากการทดสอบของคานทั้ง 3 ประเภท

3) จากรูปที่ 4.5 ที่ตำแหน่ง Deflection Control ($L/360$) 5.5 มิลลิเมตร พบว่าเปอร์เซนต์น้ำหนักบรรทุกเทียบกับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่คานรับได้ สำหรับคานที่เสริมด้วยเหล็กกล้าละมุนลื่นมีค่าสูงสุด รองลงมาคือคานที่เสริมด้วยตะแกรงลวดควบคุมกับเหล็กกล้าละมุน และคานที่เสริมด้วยตะแกรงลวดเหล็กกล้าลื่นมีค่าน้อยที่สุด

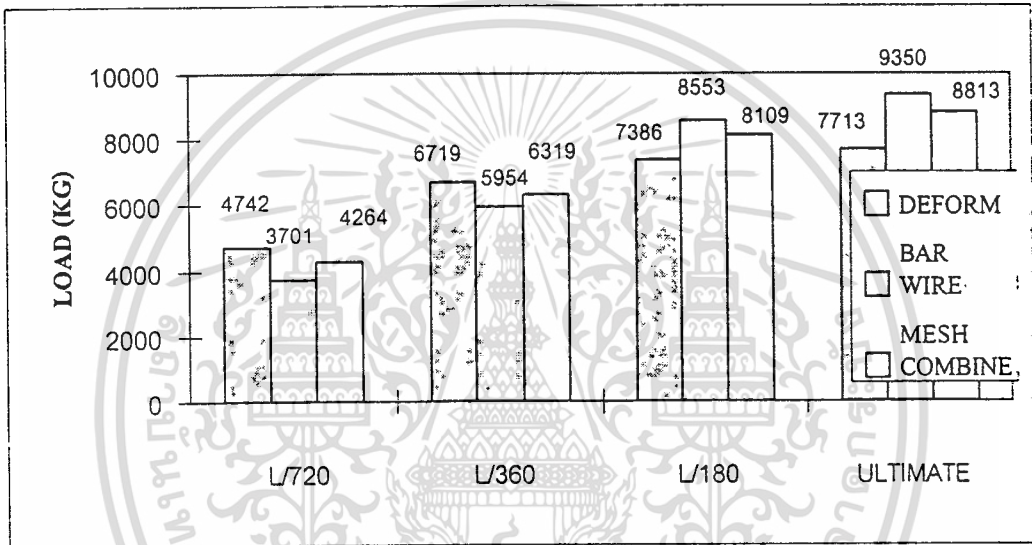
4) การเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักบรรทุกประลัยของคานชนิดต่างๆดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.6 พบว่าคานที่เสริมตะแกรงลวดลื่นน้ำหนักบรรทุกประลัยมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือคานที่เสริมควบคุมคานเสริมเหล็กกล้าละมุนลื่นต่ำสุด

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบ

ITEM	TYPE OF REINFORCEMENT		
	DEFORM BAR	WIRE MESH	COMBINE
LOAD (kg) P			
L/720	4741.5	3700.5	4264.3
L/360	6718.50	5953.50	6319.00
L/180	7385.50	8553.00	8108.50
ULTIMATE	7713.00	9350.00	8813.00

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบ (ต่อ)

MOMENT (kg - m)			
AT DEFLECTION L/360	4479.00	3969.00	4212.67
AT DEFLECTION L/180	4923.67	5702.00	5405.67
AT ULTIMATE	5142.00	6233.33	5875.33
DEFLECTION(mm.)			
L/360	5.5	5.5	5.5
END OF DIAL GAUGE	18.5	19.0	21.0



รูปที่ 4.6 แผนภูมิเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกที่สถานะต่างๆของคานทั้ง 3 ประเภท

5) เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักบรรทุกประลัยจริงกับที่คำนวณจากทฤษฎีกำลังดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.8 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของคานเสริมตะแกรงลวดล้วนมีค่าสูงสุดประมาณร้อยละ +12.92 ของค่าที่คำนวณจากทฤษฎีกำลัง ประลัย ค่าดังกล่าวของคานเสริมแบบควมคุมมีค่าร้อยละ +6.92 ของค่าที่คำนวณจากทฤษฎีกำลัง ประลัย เมื่อคานเสริมเหล็กกล้าละมุนล้วนมีค่าดังกล่าวประมาณร้อยละ -2.48 ของค่าที่คำนวณจากทฤษฎีกำลัง ประลัย พิจารณาว่าเป็นผลจากความเค้นครากจริงของตะแกรงลวดมีค่าสูงกว่าความเค้นครากพิสูจน์ที่ใช้ในการออกแบบ ทำให้น้ำหนักบรรทุกประลัยของคานที่เสริมด้วยตะแกรงลวดเหล็กมีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณจากทฤษฎีกำลัง ประลัยที่ใช้ความเค้นครากพิสูจน์ในการคำนวณ สาเหตุที่น้ำหนักบรรทุกประลัยของคานเสริมเหล็กกล้าละมุนล้วนมีค่าต่ำกว่าที่คำนวณ อาจเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนของการผูกเหล็ก

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบ น้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากการทดสอบเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎีกำลัง
ประลัย

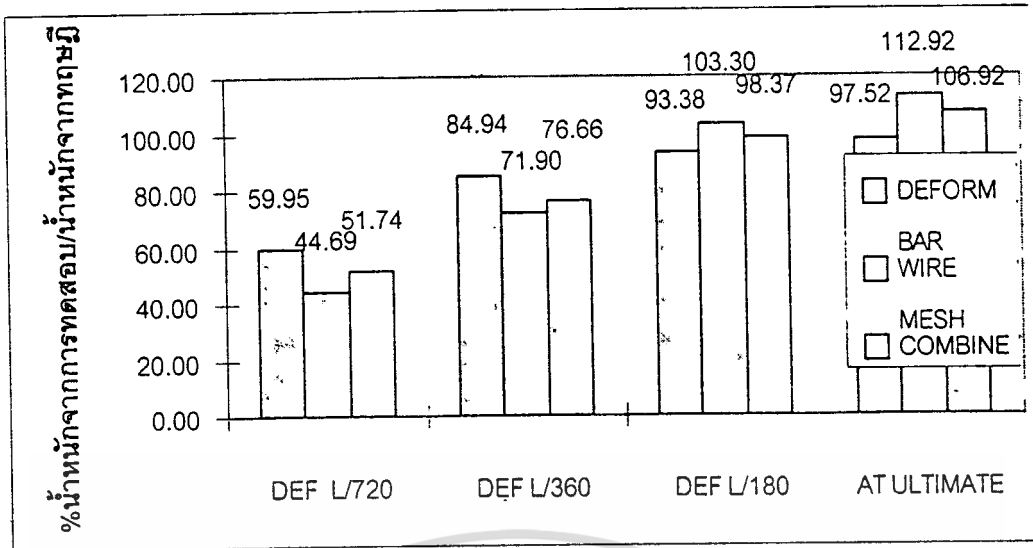
TYPE OF BEAM REINFORCEMENT	P(CAL)(kg)	P(EXP)(kg)	Pexp/Pcal (%)	%ERROR
DEFORM BAR	7909.50	7713.00	97.52	-2.48
WIRE MESH	8280.00	9350.00	112.92	12.92
COMBINE	8242.50	8813.00	106.92	6.92

ตารางที่ 4.3 แสดงเปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบ น้ำหนักที่ DEFLECTION ต่างๆจากการทดสอบ กับน้ำหนัก
บรรทุกสูงสุดที่ได้จากทฤษฎีกำลังประลัย

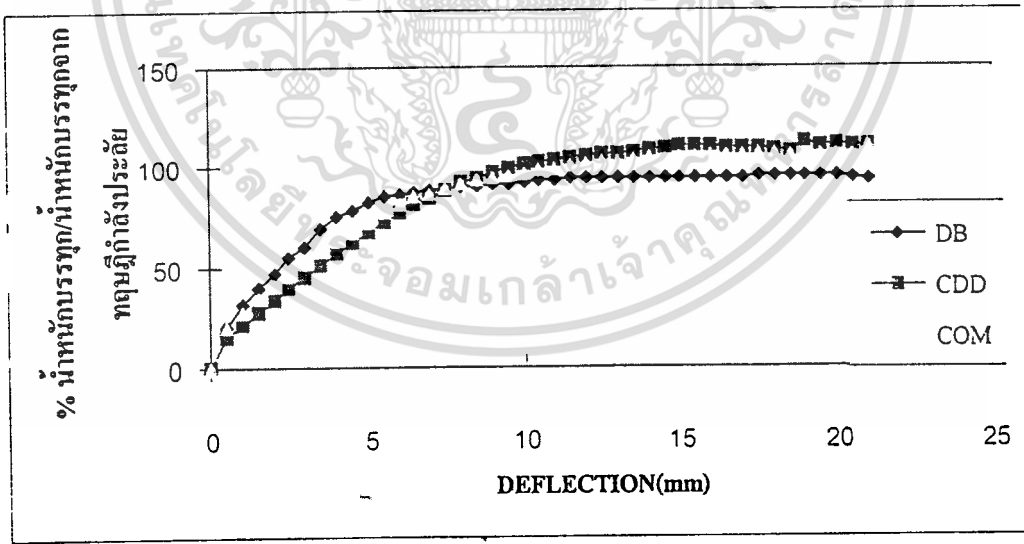
TYPE OF BEAM REINFORCEMENT	DEF L/720	DEF L/360	DEF L/180	AT ULTIMATE
DEFORM BAR	59.95	84.94	93.38	97.52
WIRE MESH	44.69	71.90	103.30	112.92
COMBINE	51.74	76.66	98.37	106.92

ตารางที่ 4.4 แสดงเปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกที่ DEFLECTION ต่างๆ กับค่าน้ำหนักบรรทุก
สูงสุดจากการทดสอบ

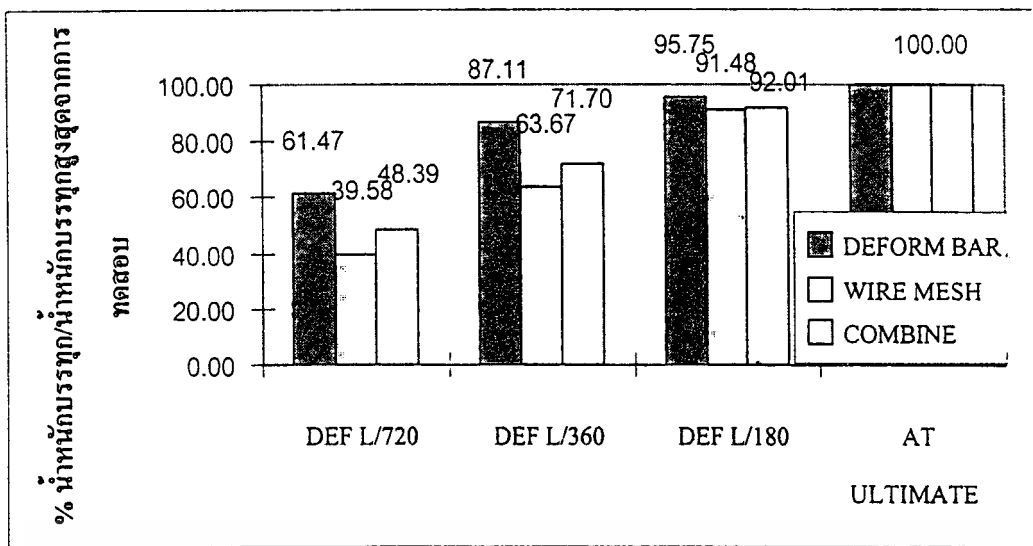
TYPE OF BEAM REINFORCEMENT	DEF L/720	DEF L/360	DEF L/180	AT ULTIMATE
DEFORM BAR	61.47	87.11	95.75	100.00
WIRE MESH	39.58	63.67	91.48	100.00
COMBINE	48.39	71.70	92.01	100.00



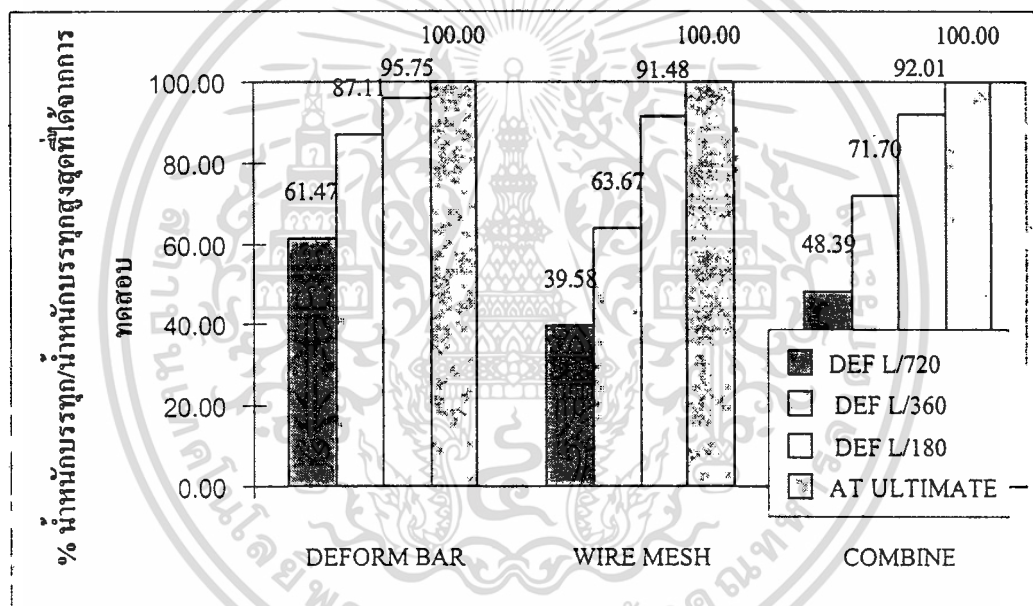
รูปที่ 4.7 แผนภูมิเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์น้ำหนักบรรทุกจากการทดสอบ/น้ำหนักบรรทุกจากทฤษฎีกำลังประลัย



รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบ DEFLECTION - เปอร์เซนต์น้ำหนักบรรทุก/น้ำหนักบรรทุกสูงสุดตามทฤษฎีกำลังประลัย



รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบ เปอร์เซนต์น้ำหนักบรรทุก/น้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากการทดสอบ



รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซนต์น้ำหนักบรรทุก/น้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากการทดสอบ ที่ DEFLECTION ต่างๆกัน

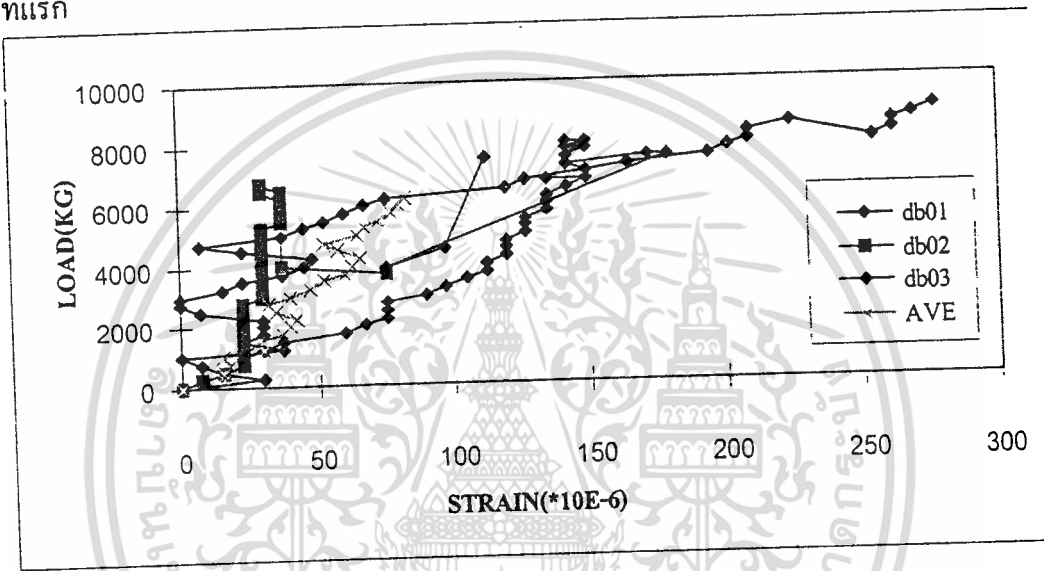
6) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain คอนกรีตที่ตำแหน่งเหล็กกลาง กับ เปอร์เซนต์น้ำหนักบรรทุกค่อน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่คานรับได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 พบว่าคล้ายคลึงกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection กับ เปอร์เซนต์น้ำหนักบรรทุกค่อน้ำหนักบรรทุกสูงสุด กล่าวคือในช่วงก่อนเกิดการแตกร้าวของคอนกรีต (ประมาณ 15 เปอร์เซนต์ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุด) เหล็กยังไม่ช่วยรับแรงดึงอย่างเต็มที่ เพราะฉะนั้นแรงดึงส่วนใหญ่จะรับโดยคอนกรีตได้แกนสะเทิน ฉะนั้นค่า Strain ของคอนกรีตตรงตำแหน่งเหล็กเสริมล่างขึ้นกับการยึดตัวของคอนกรีตเป็นหลัก Strain ของคานทั้ง 3 ชนิดจึงมีค่าใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และ 40 อย่งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

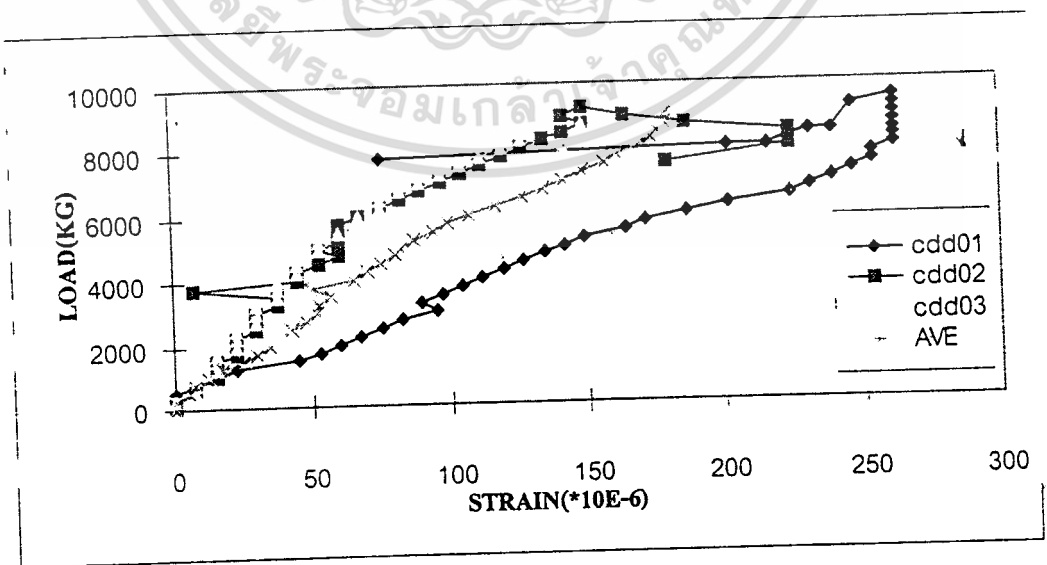
ช่วงหลังจากที่เกิดรอยแตกร้าว คอนกรีตส่วนที่แตกร้าวจะไม่รับแรงดึงอีกต่อไป เหล็กเสริมรับแรงดึงอย่างเต็มที่ Strain ของคอนกรีต ณ ตำแหน่งของเหล็กเสริมล่างจะขึ้นกับพฤติกรรมการยึดตัวของเหล็กเสริมเป็นหลัก สังเกตจากหลังจากเริ่มเกิดรอยร้าว Strain Curve จะแยกตัวออกจากกันอย่างชัดเจน และสัมพันธ์กับ กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection กับ เปอร์เซนต์น้ำหนักรรทุกดังนี้คือ

- ที่เปอร์เซนต์น้ำหนักรรทุกเท่ากันคานที่เสริมด้วยเหล็กกล้าละมุนล้วนจะมี Deflection น้อย ที่สุด แสดงว่าเหล็กเสริมล่างจะมีการยึดตัวออกน้อยที่สุด สังเกตค่า Strain จะมีค่ามากที่สุด
- คานที่เสริมด้วยตะแกรงลวดล้วนมีค่าการแอ่นตัวมากที่สุด เหล็กล่างยึดตัวมากที่สุด Strain มีค่ามากที่สุด
- คานที่เสริมด้วยตะแกรงลวดควบคู่เหล็กกล้าละมุนมี Deflection และ Strain อยู่ระหว่างค่าของคาน

2 ประเภทแรก

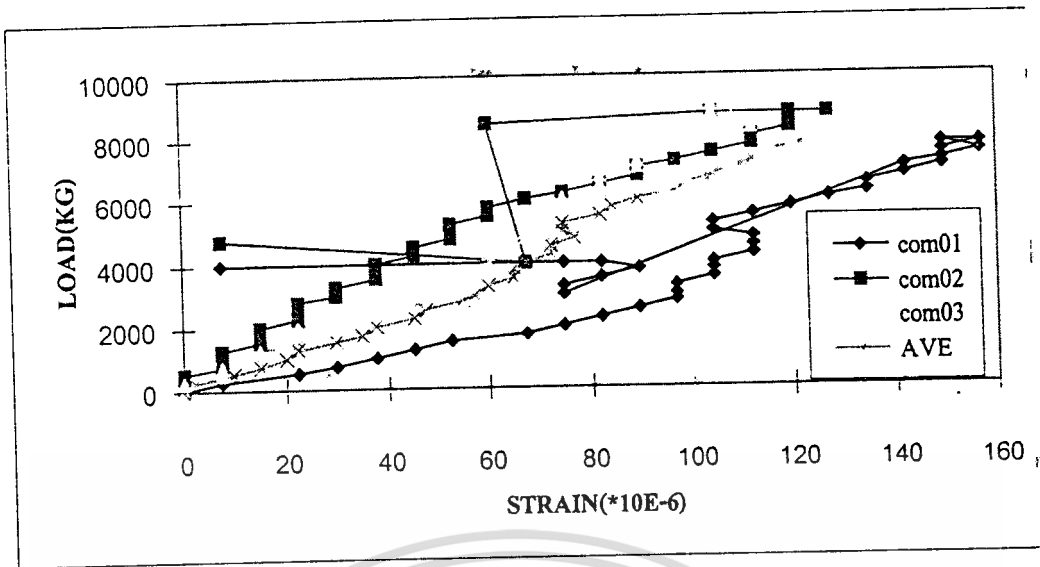


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงน้ำหนักบรรทุก - ความเครียดของคอนกรีตตำแหน่งเหล็กเสริมล่าง (DB)

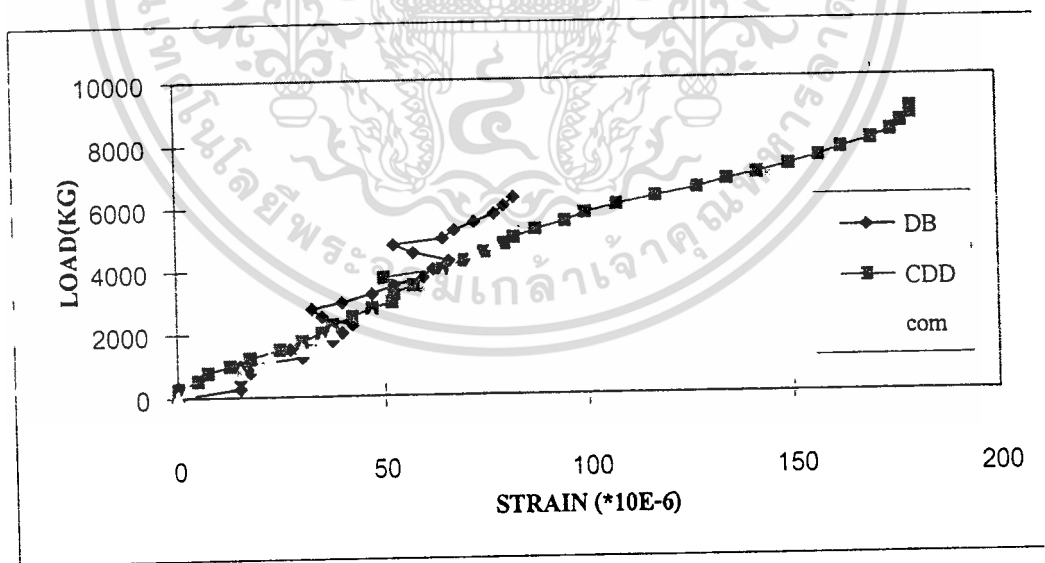


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงน้ำหนักบรรทุก - ความเครียดของคอนกรีตตำแหน่งเหล็กเสริมล่าง (CDD)

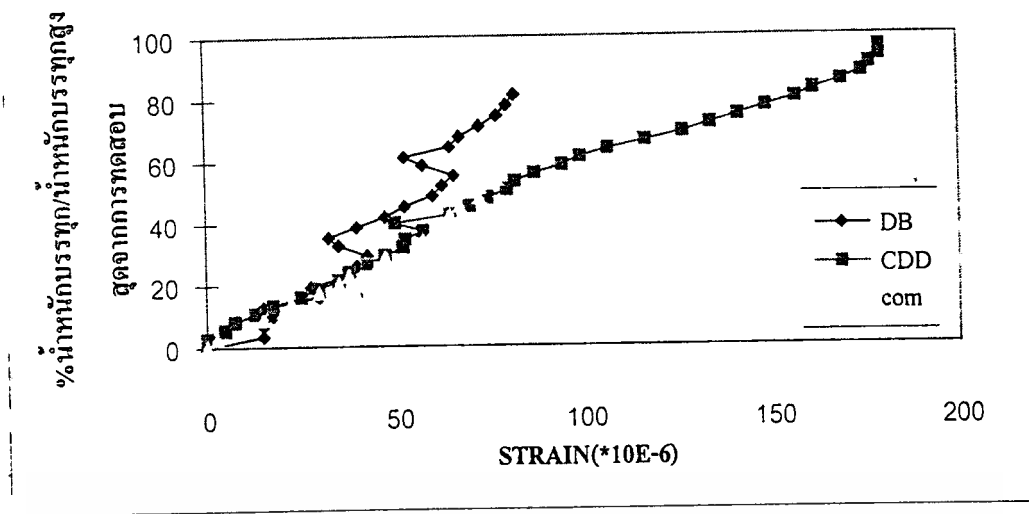
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงน้ำหนักบรรทุก - ความเครียดของคอนกรีตตำแหน่งเหล็กเสริมล่าง (COM)



รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุก - ความเครียดของคอนกรีต ตำแหน่งเหล็กเสริมล่างของคานทั้ง 3 ประเภท



รูปที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบ ความเครียด - เปอร์เซนต์น้ำหนักบรรทุก/น้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากทดสอบ

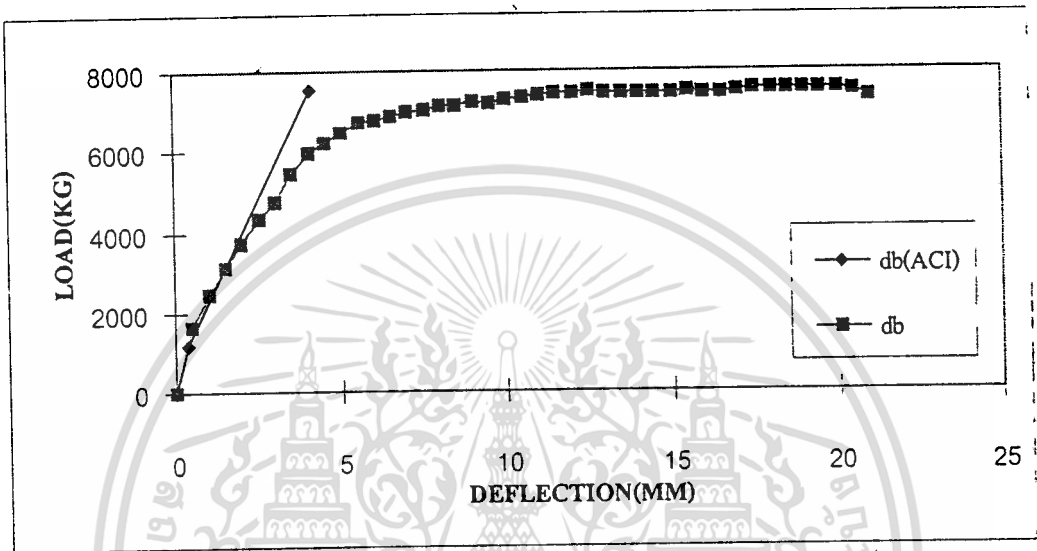
7) ทุกๆคานมีรูปแบบการแตกร้าวแบบ Flexural Shear Cracking ดังแสดงในภาคผนวก จ. โดยเริ่มแตกร้าวจากผลของโมเมนต์ดัด รอยแตกร้าววางตัวในแนวตั้งเริ่มที่ผิวล่างของคานในช่วงกลางคานที่มีโมเมนต์ดัดมากที่สุด เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มมากขึ้นรอยแตกร้าวจะเลื่อนตัวสูงขึ้น และรอยแตกร้าวเริ่มกระจายเข้าไปในช่วงการเฉือน (Shear Span) เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มถึงระดับหนึ่งรอยแตกร้าวจากโมเมนต์ดัด ที่อยู่ในช่วงการเฉือนจะเบนเข้าหาตำแหน่งที่น้ำหนักบรรทุกกระทำโดยทำมุมประมาณ 45 องศาับแนวระดับอันเป็นผลมาจากแรงเฉือน แล้วรอยแตกร้าวทั้งหมดจะลามเข้าสู่คอนกรีตส่วนที่รับแรงอัดทำให้หน้าตัดคอนกรีตส่วนที่รับแรงอัดลดลง จนไม่เพียงพอที่รับแรงอัดในที่สุดคอนกรีตก็จะถูกอัดจนระเบิด

8) รายละเอียดการพังทลายของคานแต่ละประเภทสามารถอธิบายพฤติกรรมของคานแต่ละประเภทได้ดังนี้

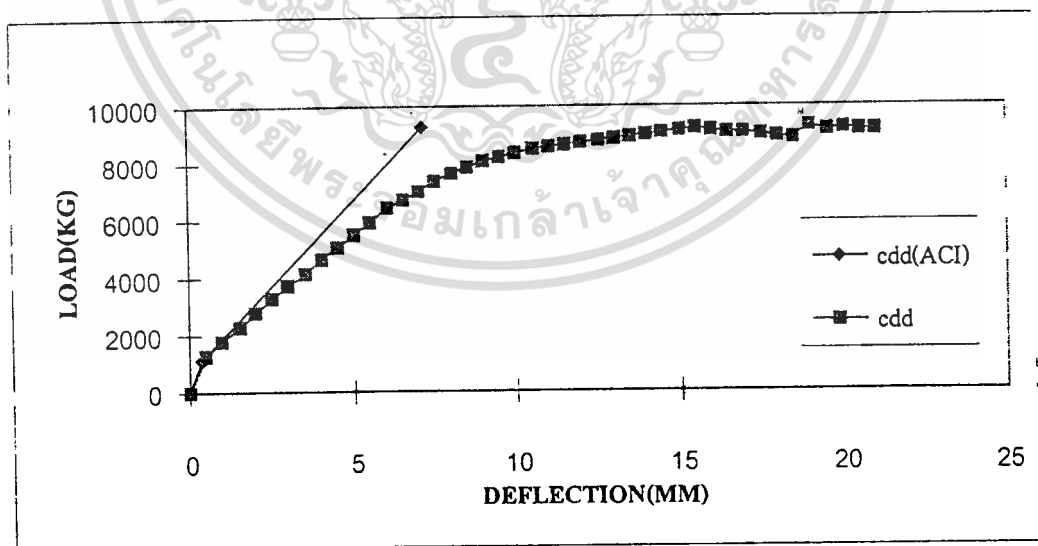
- คานที่เสริมด้วยเหล็กกล้าละมุนล้วนเมื่อน้ำหนักบรรทุกที่กระทำมีค่าสูงสุด การแอ่นตัวจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ โดยน้ำหนักที่บรรทุกที่กระทำไม่เพิ่มขึ้น เป็นการแสดงถึงความเหนียวของคานที่เสริมด้วยเหล็กกล้าละมุนล้วน รอยแตกร้าวกระจายไปทั่วคาน คานสามารถแอ่นตัวได้มากก่อนจะพังทลาย เมื่อคอนกรีตถูกอัดจนระเบิดคานจะไม่หักขาดจากกันโดยทันที เหล็กเสริมจะไม่ขาด
- คานที่เสริมด้วยตะแกรงลวดล้วน เมื่อน้ำหนักบรรทุกมีค่าเพิ่มขึ้นถึงน้ำหนักบรรทุกประลัย ลวดตะแกรงจะขาดออกจากกันทันที พร้อมกับอัดให้คอนกรีตด้านรับแรงอัดระเบิด คานจึงหักและขาดออกจากกันทันที โดยแสดงพฤติกรรมของความเหนียวในช่วงสั้นๆก่อนคานจะพังทลาย
- คานที่เสริมด้วยตะแกรงลวดควบคู่กับเหล็กกล้าละมุน เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นถึงค่าสูงสุดลวดตะแกรงจะขาด แต่คานยังไม่หักขาดจากกันทันที เพราะเหล็กกล้าละมุนช่วยพยุงเอาไว้ โดยก่อนคานจะพังทลายจะแสดงช่วงความเหนียวในช่วงยาวกว่าคานเสริมตะแกรงลวดล้วน แต่สั้นกว่าของคานเสริมเหล็กกล้าละมุนล้วน

4.2 เปรียบผลการทดสอบกับทฤษฎีคำนวณการแอ่นตัวตามACI-Code

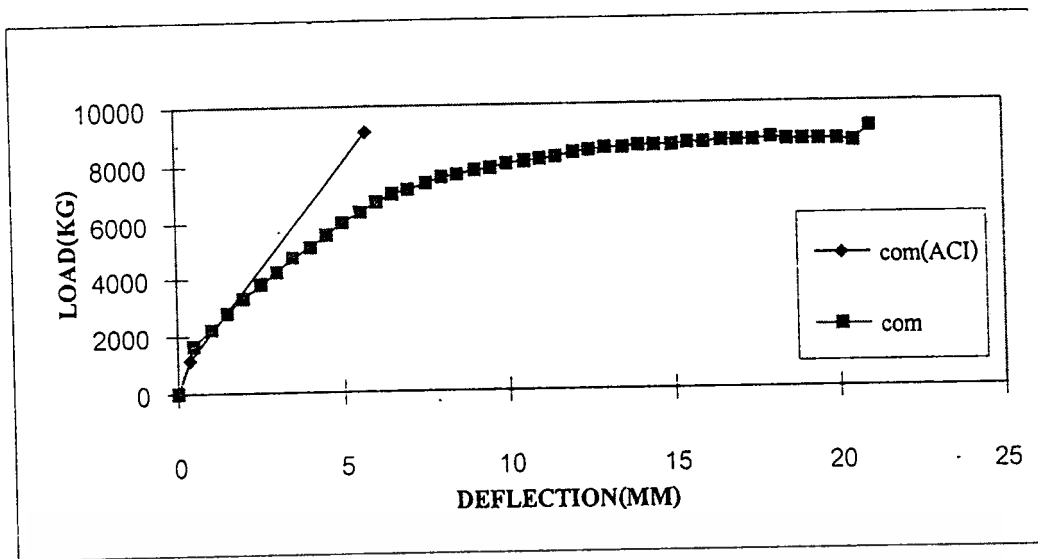
เปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Deflection ที่ได้จากการทดสอบค่า ของความสัมพันธ์ดังกล่าวจาก ACI-Code ดังแสดงในรูปที่4.16 ถึงรูปที่ 4.18 พบว่าในช่วงแรกของการรับน้ำหนักบรรทุก Load - Deflection Curve จากการทดลอง จะขนานไปกับ ACI-Code จนกระทั่งเริ่มเกิด รอยแตกร้าวจากแรงเฉือน Load - Deflection Curve จะเบนออกจาก ACI-Code มากเพราะว่า ACI-Code ไม่ได้ครอบคลุมถึงผลของ Shear Crack



รูปที่ 4.16 กราฟน้ำหนักบรรทุก - ระยะแอ่นตัวตาม ACI - Code เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ (DB)



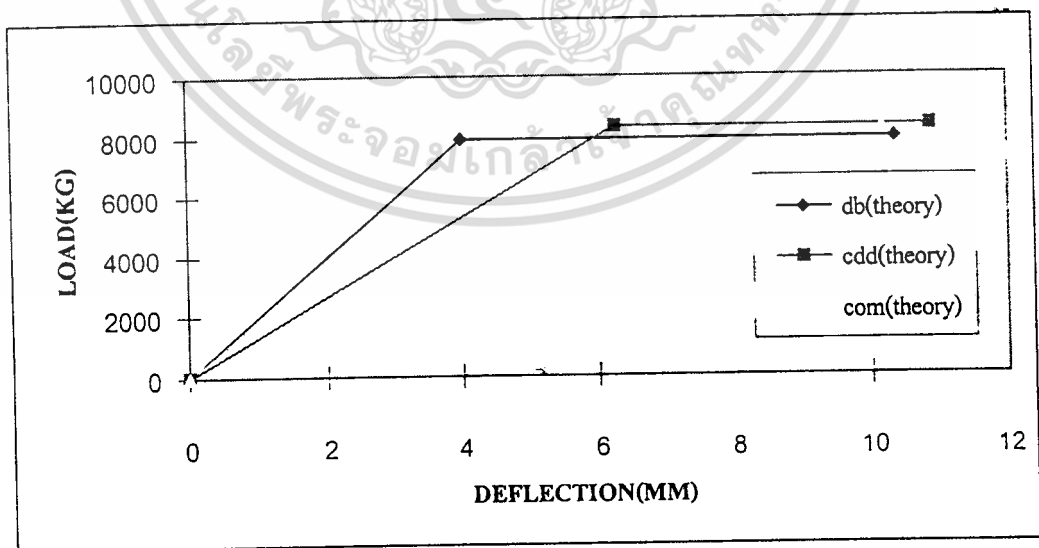
รูปที่ 4.17 กราฟน้ำหนักบรรทุก - ระยะแอ่นตัวตาม ACI - Code เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ (CDD)



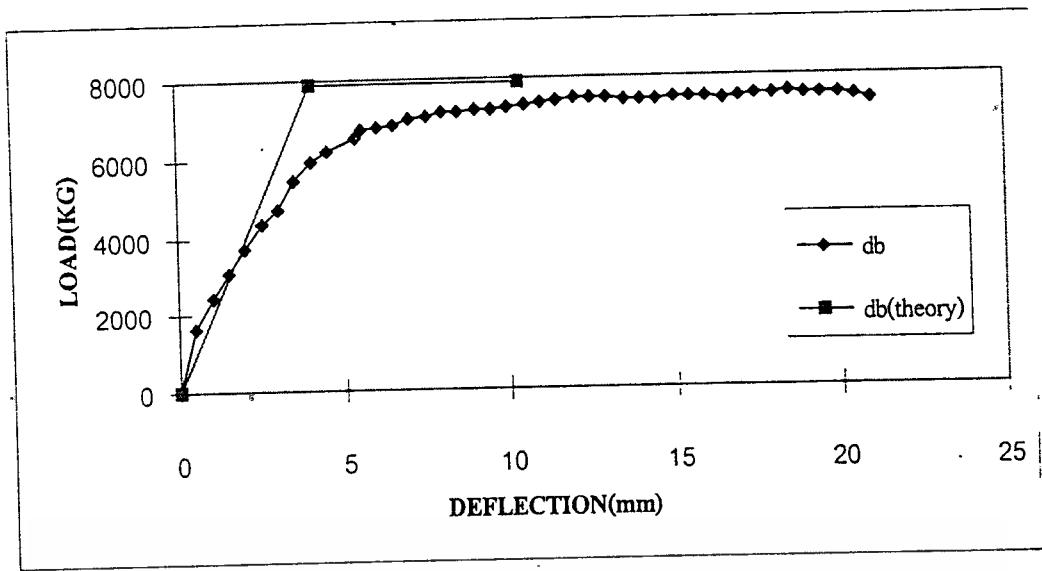
รูปที่ 4.18 กราฟน้ำหนักบรรทุก - ระยะแอ่นตัวตาม ACI - Code เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ (COM)

4.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับทฤษฎีคำนวณ การแอ่นตัวโดยวิธีประมาณจากความสัมพันธ์โมเมนต์ดัด - ความโค้ง

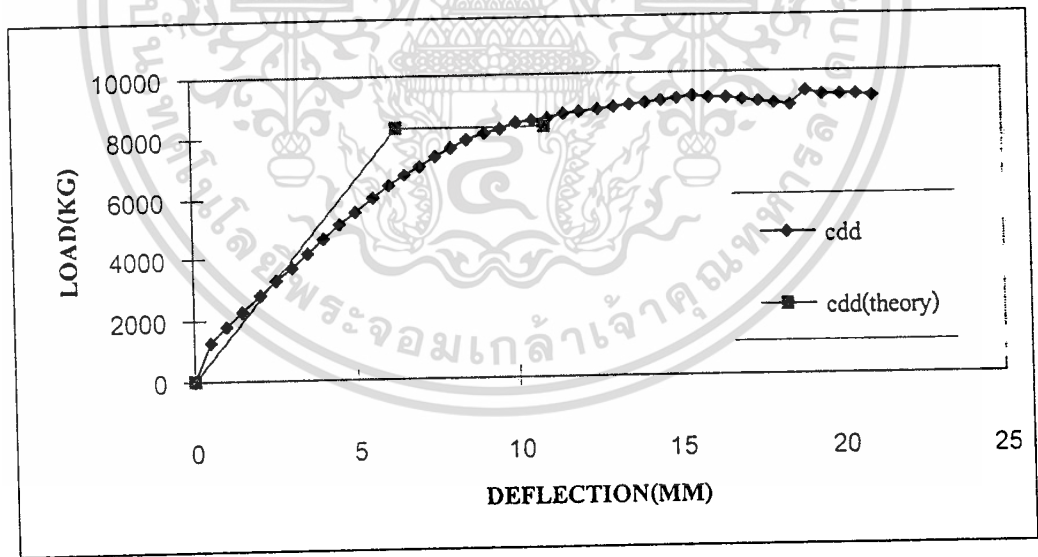
กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Deflection ของการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.19 ถึงรูปที่ 4.23 มีค่าใกล้เคียงกับค่าของความสัมพันธ์ดังกล่าวจากผลการคำนวณ โดยวิธีประมาณจากความสัมพันธ์โมเมนต์ดัด - ความโค้ง เฉพาะในช่วงก่อนเกิด Shear Crack แสดงว่าพฤติกรรมการแอ่นตัวของคานที่เสริมด้วยตะแกรงลวดเหล็กถ่วงและคานที่เสริมด้วยตะแกรงลวดเหล็กควบคู่กับเหล็กกล้าละมุนสามารถคำนวณโดยวิธีประมาณจากความสัมพันธ์โมเมนต์ดัด - ความโค้งได้เฉพาะช่วงก่อนเกิด Shear Crack



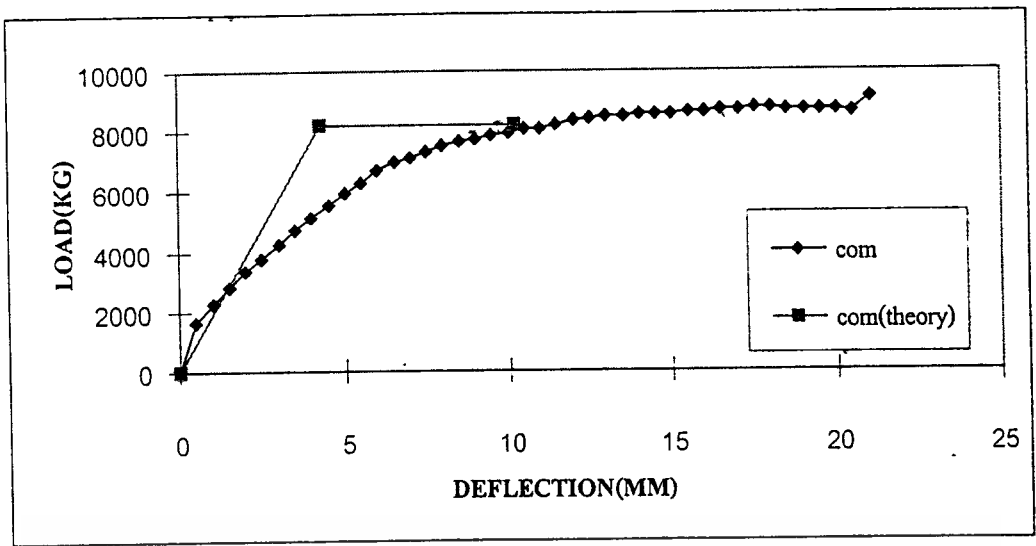
รูปที่ 4.19 กราฟน้ำหนักบรรทุก - ระยะแอ่นตัว ตามทฤษฎีโมเมนต์ดัด- ความโค้ง



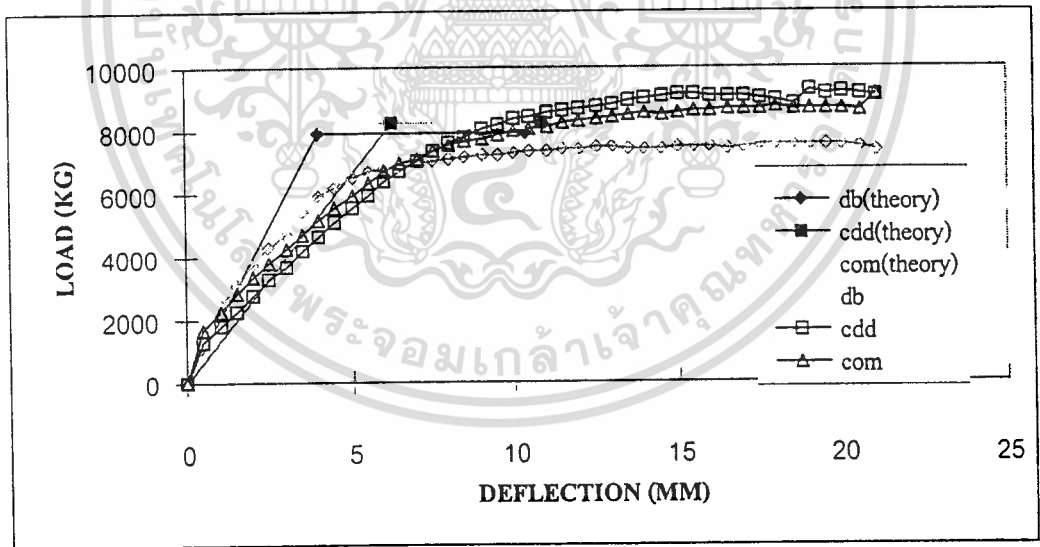
รูปที่ 4.20 กราฟน้ำหนักบรรทุก - ระยะแอ่นตัวตามทฤษฎี เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ (DB)



รูปที่ 4.21 กราฟน้ำหนักบรรทุก - ระยะแอ่นตัวตามทฤษฎี เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ (CDD)



รูปที่ 4.22 กราฟน้ำหนักบรรทุก - ระยะแอ่นตัวตามทฤษฎี เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ (COM)



รูปที่ 4.23 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุก - ระยะแอ่นตัวตามทฤษฎีกับผลการทดสอบ

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1) คานที่เสริมด้วยตะแกรงลวดเหล็กแล้วมีการเสริมเหล็กกล้าละมุน จะช่วยเพิ่มความเหนียวให้คาน โดยช่วยให้พฤติกรรมของคานเข้าใกล้พฤติกรรมของคานที่เสริมเหล็กกล้าละมุนล้วน คือเมื่อเปอร์เซ็นต์ น้ำหนักบรทุกเท่ากันคานที่เสริมตะแกรงลวดเหล็กควบคู่กับเหล็กกล้าละมุนจะมีการแอ่นตัวและการยืดตัว ต่ำกว่าคานที่เสริมด้วยตะแกรงลวดเหล็กล้วน แต่สูงกว่าของคานที่เสริมด้วยเหล็กกล้าละมุนล้วน เช่น จาก กราฟรูปที่ 4.5 ที่เปอร์เซ็นต์น้ำหนักบรทุก 60 เปอร์เซ็นต์ ค่าการแอ่นตัวของคานที่เสริมด้วยเหล็กกล้าละมุน ล้วนเท่ากับ 3 มิลลิเมตร คานที่เสริมควบคู่มีการแอ่นตัวเท่ากับ 4.5 มิลลิเมตร คานที่เสริมด้วยตะแกรงลวด ล้วนมีค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 5.5 มิลลิเมตร และในสภาวะก่อนการพังทลาย เหล็กกล้าละมุนที่เสริมเข้าไปจะ ช่วยให้คานมีความเหนียวสูงขึ้นทำให้คานมีการแอ่นตัวได้มากกว่าก่อนที่จะขาดออกจากกัน ซึ่งต่างจาก พฤติกรรมการพังทลายของคานที่เสริมด้วยตะแกรงลวดล้วนที่ขาดทันทีทันใด

2) รูปแบบการพังทลายของคานที่เสริมด้วยตะแกรงเหล็กควบคู่กับเหล็กกล้าละมุนจะไม่หัก ขาดจาก กันทันทีต่างจากการพังทลายของคานที่เสริมตะแกรงเหล็กล้วน แต่การพังทลายจะเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไป คือ เมื่อลวดเหล็กตะแกรงขาด เหล็กกล้าละมุนยังพอช่วยพยุงคานไม่ให้คานหัก ขาดจากกันทันทีแต่ใน สภาวะนี้ไม่เหมาะจะรับน้ำหนักบรทุกอีกต่อไป เพียงแต่ช่วยประวิงเวลาไม่ให้เกิดการพังทลายในทันที

3) การเสริมเหล็กกล้าละมุนควบคู่ในคานที่เสริมด้วยตะแกรงลวดล้วน ช่วยเพิ่มความปลอดภัยต่อ การนำมาใช้งานจากเหตุผลต่างๆดังนี้

- ช่วยให้พฤติกรรมการแอ่นตัวใกล้เคียงกับคานที่เสริมด้วยเหล็กกล้าละมุนล้วน
- เพิ่มความปลอดภัยขณะพังทลายดีกว่าคานที่เสริมตะแกรงเหล็กล้วน
- การประกอบจากโรงงานทำให้มีมิติต่างที่ต้องการมีความถูกต้องสูง

4) ทฤษฎีกำลังประลัยสามารถนำมาใช้คำนวณออกแบบ คานที่เสริมตะแกรงลวดเหล็กควบคู่กับ เหล็กกล้าละมุนได้โดยมีความคลาดเคลื่อนประมาณร้อยละ +7 ของน้ำหนักบรทุกประลัยที่คำนวณโดย ทฤษฎีกำลัง ซึ่งยอมรับได้และปลอดภัยเพียงพอ

5) ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Deflection ที่คำนวณโดย ACI Code สามารถใช้คาดคะเน พฤติกรรมจริงได้ถูกต้องเฉพาะในช่วงก่อนเกิด Shear Crack เท่านั้นซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ ปัญญา ชูพานิช , 2539 [5]

6) ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Deflection ที่คำนวณโดยวิธีประมาณจากความสัมพันธ์โมเมนต์ ดัด - ความโค้ง จะสอดคล้องกับพฤติกรรมจริง เฉพาะช่วงก่อนเกิด Shear Crack

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาโครงการพิเศษมีข้อเสนอแนะดังนี้

- 1) ในการทดสอบครั้งนี้ไม่มีผู้ที่เชี่ยวชาญด้านการใช้ Strain อย่างแท้จริงผลการทดสอบจึงคลาดเคลื่อนไป
- 2) เครื่อง UTM ที่ใช้ทดสอบ ไม่มีผู้ชำนาญในการใช้งานอย่างแท้จริง ขาดการเผยแพร่ความรู้ใช้งานเครื่องให้เกิดประโยชน์สูงสุด
- 3) วิธีการออกแบบในส่วนของตะแกรงเหล็กควบคู่กับเหล็กกล้าตะมุนใช้วิธีการแปลงเนื้อที่หน้าตัดเหล็กเช่นเดียวกับวิธีที่ใช้ในงานถนน ซึ่งผู้เขียนคาดว่า ทำให้การคาดคะเนพฤติกรรมไม่ถูกต้องมากนัก หากมีการศึกษาต่อไปควรอ้างอิงมาตรฐานการออกแบบที่คาดคะเนพฤติกรรมที่ถูกต้องตามชนิดของโครงสร้าง
- 4) การศึกษาข้างต้น ได้ทำการเสริมเหล็กกล้าตะมุนควบคู่กับตะแกรงลวดโดยนำเอาเหล็กตะแกรงลวดไว้ด้านล่าง เหล็กกล้าตะมุน จึงทำให้ลวดตะแกรงเหล็กขาดก่อน หากจะมีการศึกษาต่อไป ควรศึกษาถึงการนำเหล็กกล้าตะมุนไว้ด้านล่างของตะแกรงลวดเหล็กกล้าด้วยซึ่งคาดว่าจะทำให้เหล็กทั้งสองชนิดร่วมกันรับน้ำหนักบรรทุกได้ดียิ่งขึ้น



บรรณานุกรม

- [1] ศ.สนั่น เจริญเผ่า และ ศ.ดร.วินิต ช่อวิเชียร. 2537. คอนกรีตเสริมเหล็ก. หจก. ป. สัมพันธ์พาณิชย์. กรุงเทพฯ. 423น.
- [2] ดร.ต่อกลุ่ กาญจนาลัย. 2538. พฤติกรรมของคอนกรีตเสริมเหล็ก. ฟิสิกส์เอ็นเตอร์การพิมพ์. กรุงเทพฯ. 222น.
- [3] ศ.ดร.วินิต ช่อวิเชียร. 2540. การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีกำลังประลัย. หจก. ป.สัมพันธ์การพิมพ์. กรุงเทพฯ. 551น.
- [4] ดร. นเรศ พันธราทร. 2540. การออกแบบคอนกรีตอัดแรง. บริษัท ลิบริารี-นาย-พับบลิชชิง จำกัด. กรุงเทพฯ. 438น.
- [5] Panya Chupanit. (1996), Shear Strength of High-Strength Reinforced Concrete Beams Without Stirrups, Structural Division, Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand
- [6] ภัทธีรา รุจิโกไศย รวิน เจริญสุข และ วรณา พิมพ์สัมฤทธิ์. 2539. การศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมของคานที่เสริมตะแกรงลวดเหล็กกล้ากับคานที่เสริมเหล็กกล้าละมุน. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ.
- [7] ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. 2537. Concrete Technology. กรุงเทพฯ. 166น.
- [8] ข้อมูลและเอกสารเกี่ยวกับคุณสมบัติของเหล็กกล้าดิ่งเป็นและตะแกรงลวดเหล็กกล้าเชื่อมติดเสริมคอนกรีต ของบริษัท ไทยออสเนอร์ จำกัด
- [9] ดร. ศรีกรีช หิรัญมาศ. 2540. เอกสารประกอบการสอนวิชา Reinforced Concrete Design II. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ.
- [10] ผศ. ศิริวัฒน์ ไชยชนะ. 2539. คอนกรีตเสริมเหล็กทฤษฎีกำลังประลัย. บริษัท เอส. เอส. บู้คส์เฮาส์ จำกัด. กรุงเทพฯ. 419น.
- [11] Chu - Kia Wang, Charles G. Salmon. (1991), Reinforced Concrete Mechanic & Design, Intext Education Publishers, Newyork, 934p.
- [12] R.Park, T. Pauley. (1975), Reinforced Concrete Structures. John Wiley and Sons. Inc, Singapore, 769p.
- [13] Arthur H. Nilson, George Winter. (1991), Design of Concrete Structure. McGraw-Hill. Inc, Singapore, 904p.

- [14] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2531. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ลวดเหล็กกล้าดิ่งเย็นเสริมคอนกรีต มอก. 747-2531. กรุงเทพฯ. 7น.
- [15] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2530. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ตะแกรงลวดเหล็กกล้าเชื่อมติดเสริมคอนกรีต มอก. 737-2530. กรุงเทพฯ. 18น.
- [16] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2533. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ลวดเหล็กกล้าข้ออ้อยดิ่งเย็นเสริมคอนกรีต มอก. 943-2533. กรุงเทพฯ. 7น.
- [17] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2533. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ตะแกรงลวดเหล็กกล้าข้ออ้อยเชื่อมติดเสริมคอนกรีต มอก. 926-2533. กรุงเทพฯ. 12น.



ภาคผนวก ก.

สัญลักษณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

สัญลักษณ์

- a = ความลึกของบล็อกหน่วยแรงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเทียบเท่า , มีค่า = $k_1 c$
 $= \frac{A_s f_{su}}{0.85 f'_c b}$
- A_s = เนื้อที่ของเหล็กเสริมรับแรงดึง
- A'_s = เนื้อที่ของเหล็กเสริมรับแรงอัด
- α = มุมเอียงระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือน และแกนตามยาวของอาคาร
- b = ความกว้างของผิวหน้าซึ่งรับแรงอัดของโครงสร้างรับแรงอัด
- c = ระยะจากขอบผิว ซึ่งเกิดแรงอัดสูงสุดไปยังแกนสะเทินที่กำลังประลัย
- d = ระยะจากผิวบนสุดซึ่งรับแรงอัดจนถึงศูนย์กลางของเหล็กเสริมรับแรงดึง
- d' = ระยะจากผิวบนสุดซึ่งรับแรงอัดจนถึงศูนย์กลางของเหล็กเสริมรับแรงอัด
- d_b = เส้นผ่าศูนย์กลางระบุของเหล็กเส้น
- Δ = ระยะโค้งสูงสุดของโครงสร้างซึ่งเกิดจากการทรุดลงน้ำหนัก โดยเทียบกับปลายสุดของช่วง หรือเป็นระยะโค้งสูงสุดของคอนกรีต ณ จุดประลัย
- ϵ_u = หน่วยการหดตัวสูงสุดของคอนกรีต ณ จุดประลัย
- ϵ_{su} = หน่วยการยืดตัวที่ตำแหน่งของเหล็กเสริม ณ จุดประลัย
- ϵ_c = หน่วยการหดตัวของคอนกรีต
- E_c = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต
- E_s = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมเท่ากับ 2,040,000 กก./ซม.²
- f'_c = กำลังอัดประลัยของคอนกรีต รูปทรงกระบอกเมื่ออายุ 28 วัน
- f_s = หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริม
- f_{su} = หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมที่จุดรับแรงประลัย
- f_y = กำลังคลากของเหล็กเสริม
- I = โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดร่วมแปลง โดยไม่คิดเนื้อที่ของคอนกรีตส่วนที่รับแรงอัด
- I_{cr} = โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดแตกร้าว
- I_e = โมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผล ในการคำนวณหาระยะโค้งตัว
- L = ช่วงความยาวของพื้นหรือคาน
- M = โมเมนต์ดัด

- M_{cr} = โมเมนต์คัตที่ทำให้เกิดรอยแตกในคอนกรีต
 M_u = โมเมนต์คัตประลัยใช้งาน
 M_n = โมเมนต์คัตประลัย
 n = อัตราส่วนของโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กต่อคอนกรีต
 ρ = อัตราส่วนของเนื้อที่เหล็กเสริมรับแรงดึงต่อเนื้อที่ประสิทธิภาพของคอนกรีตใน
 กานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือในตัวคานซึ่งมีปีก $= \frac{A_s}{bd}$
 ρ' = อัตราส่วนของเนื้อที่เหล็กเสริมรับแรงอัดต่อเนื้อที่ประสิทธิภาพของคอนกรีต
 $= \frac{A'_s}{bd}$
 ρ_b = อัตราส่วนของเหล็กเสริมรับซึ่งทำให้เกิดภาวะสมดุลย์ ณ กำลังประลัย
 s = ระยะห่างของเหล็กถูกตั้งหรือเหล็กปลอกเกลียวหรือเหล็กค่อม ในทิศทาง
 ขนานกับเหล็กเสริมตามยาว
 t = ความลึกทั้งหมดของหน้าตัด
 T = แรงดึงในเหล็กเสริม
 v = หน่วยแรงเฉือน
 v_c = หน่วยแรงเฉือนซึ่งคอนกรีตสามารถรับได้
 v_u = หน่วยแรงเฉือนประลัยระบุซึ่งใช้เป็นตัววัดแรงดึงทแยง
 V = แรงเฉือนทั้งหมด
 w = น้ำหนักต่อหน่วยความยาวของคาน หรือต่อหน่วยเนื้อที่ ของพื้น
 Σ = ผลรวม
 ΣO = ผลรวมของเส้นรอบรูปของเหล็กเสริมทั้งหมดที่ประสิทธิภาพและมีขนาดเท่ากัน
 ตลอด ซึ่งผ่านข้ามหน้าตัดบนด้านที่รับแรงดึง ถ้าขนาดเหล็กไม่เท่ากันให้แทน
 ค่าด้วย $\frac{4A_s}{D}$ โดยที่ A_s หมายถึงเนื้อที่เหล็กทั้งหมด และ D คือเส้นผ่าศูนย์กลาง
 กลางของเหล็กเส้นที่ใหญ่ที่สุด สำหรับเหล็กที่มีครวมเป็นกำให้ใช้ผลรวมของ
 เส้นรอบรูปส่วนที่มองเห็นทั้งหมด
 ϕ = ตัวคูณลดค่ากำลังประลัย

ภาคผนวก ข.

ตัวอย่างการคำนวณ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ตัวอย่างการคำนวณ

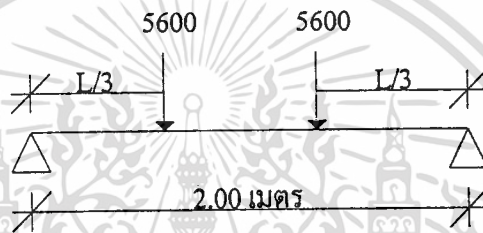
ตัวอย่างการออกแบบคานทดสอบที่เสริมด้วยตะแกรงเหล็กรีดเย็น

กำหนด - คานขนาด 0.15×0.325 ซม.² ช่วงความยาว 2 เมตร

- น้ำหนักกระทำเป็นจุดที่ระยะ $L/3$ เท่ากับ 5600 กก.

- กำลังอัดของคอนกรีต 231.9 กก./ซม.²

- กำลังคลากของลวดเหล็กรีดเย็น 5218 กก./ซม.²



รูปที่ ข.1 แสดงน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการออกแบบคานเสริมตะแกรงลวดล้วน

1) $P_u = 5600 \text{ kg}$

2) $M_u = 3733 \text{ kg.m}$

3) $\rho = 0.75 \rho_b$

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

$$\beta_1 = 0.85$$

$$\rho_b = 0.85 \left(\frac{0.85(231.9)}{5218} \right) \left(\frac{6120}{6120 + 5218} \right) = 0.01733$$

$$\rho = 0.013$$

4) $R_u = \rho f_y \left(1 - \frac{0.59 \rho f_y}{f'_c} \right)$

$$\rho f_y = 0.013(5218) = 67.834$$

$$R_u = 67.834 \left(1 - \frac{0.59(67.834)}{231.9} \right) = 56.127$$

5) $d = \sqrt{\frac{M_u}{\phi R_u b}}$

$$= \sqrt{\frac{3733(100)}{0.9(56.127)(15)}}$$

$$d = 22.196$$

$$\text{USE } 15 \times 32.5 \text{ cm.} \quad d = 26.57$$

$$\begin{aligned} 6) \quad P_u &= \frac{M_u}{\phi b d^2} \\ &= \frac{3733(100)}{0.9(15)(26.57^2)} = 39.17 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 7) \quad \rho &= \frac{0.85 f'_c}{f_y} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2R_u}{0.85 f'_c}} \right) \\ &= \frac{0.85(231.9)}{5218} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2(39.17)}{0.85(231.9)}} \right) \end{aligned}$$

$$\rho = 0.00845$$

$$8) \quad A_s = \rho b d = 0.00845(15)(26.57) = 3.3687 \text{ cm}^2$$

$$A_{s \min} = 1.05 \text{ cm}^2$$

$$A_s f_y = A_m f_y$$

$$8.04(2950) = A_m (5218)$$

$$A_m = 4.545 \text{ cm}^2$$

$$\text{เลือก } 6\text{CDD10} \quad (4.68 \text{ cm}^2)$$

$$\begin{aligned} 9) \quad \bar{y} A &= \int y dA \\ (4.68) \bar{y} &= (2.5 + 0.6 + 1) + (2.5 + 0.6 + 1 + 5)(1.56) \\ \bar{y} &= \frac{26.988}{4.65} = 5.77 \end{aligned}$$

$$10) \quad d = 32.5 - 5.77 = 26.73$$

$$\begin{aligned} 11) \quad \rho &= \frac{A_s}{b d} \\ &= \frac{4.68}{15(26.73)} = 0.01174 \end{aligned}$$

$$0.0028 \leq 0.01174 \leq 0.01253$$

\therefore yielding failure

$$\begin{aligned} 12) \quad a &= \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} \\ &= \frac{4.68(5218)}{0.85(231.9)(15)} = 8.26 \end{aligned}$$

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

$$= 4.68(5218) \left(26.73 - \frac{8.26}{2} \right) = 5,520 \text{ kg.m}$$

Check shear

$$f_y = 5218 \quad (\text{ต้อง} < 4200)$$

$$1) \quad V_u = 5600 \text{ kg}$$

$$2) \quad V_c = 0.53 \sqrt{f'_c} b_w d$$

$$= 0.53 \sqrt{231.9} (15)(26.57) = 3,217$$

$$3) \quad \phi V_c < V_u$$

∴ เสริมเหล็กปลอกช่วยรับแรงเฉือน

$$4) \quad V_u - \phi V_c \leq 2.1 \phi \sqrt{f'_c} b_w d$$

$$5600 - 0.85(3217) \leq 2.1(0.85) \sqrt{231.9} (15)(26.57)$$

$$2865 \leq 10834$$

∴ section O.K.

$$5) \quad V_u - \phi V_c \leq 1.1 \phi \sqrt{f'_c} b_w d$$

$$2865 \leq 1.1(0.85) \sqrt{231.9} (15)(26.57)$$

$$2865 \leq 5675$$

$$6) \quad S = \frac{\phi A_v f_y d}{V_u - \phi V_c}$$

เลือกใช้เหล็กปลอก $\phi 6 \quad A_v = 0.566 \text{ cm}^2$

$$S = \frac{0.85(0.566)(4200)(26.57)}{2865} = 18.74$$

$$S \leq \frac{d}{2} = 13.285$$

$$\leq 60$$

$$\leq \frac{A_v f_y}{3.5 b_w} = \frac{0.566(4200)}{3.5(15)} = 45.28$$

∴ เลือกใช้เหล็กปลอก CDR 6 @ 0.125

ตัวอย่างการออกแบบคานทดสอบที่เสริมด้วยตะแกรงเหล็กรีดเย็น

ควบคู่กับเหล็กกล้าละมุน

กำหนด - คานขนาด 0.15×0.325 ซม.² ช่วงความยาว 2 เมตร

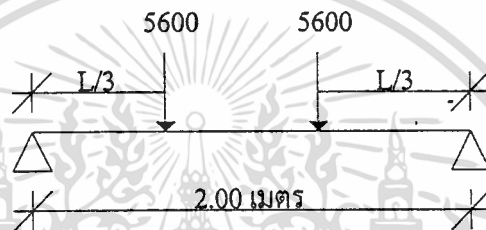
- น้ำหนักกระทำเป็นจุดที่ระยะ $L/3$ เท่ากับ 5600 กก.

- กำลังอัดของคอนกรีต 231.9 กก./ซม.²

- กำลังคลากของเหล็กเสริม 2950 กก./ซม.²

- กำลังคลากของลวดเหล็กรีดเย็น 5218 กก./ซม.²

ดังแสดงในรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.2 แสดงการให้น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการออกแบบคานเสริมควบคู่

1) $P_u = 5600 \text{ kg}$

2) $M_u = 3733 \text{ kg.m}$

3) $\rho = 0.75 \rho_b$

USE 8.04 cm^2

เลือกใช้ 2DB16 $A_s = 4.02$

เหล็กอีก $= 8.04 - 4.02$

$= 2.27 \text{ cm}^2$

$A_s(2950) = A_m(5218)$

$4.02(2950) = A_m(5218)$

$A_m = 2.27 \text{ cm}^2$

USE 3CDD10 $= 2.34 \text{ cm}^2$

4) $A_s = 4.02 + 2.34 \left(\frac{5218}{2950} \right)$

$= 8.159 \text{ cm}^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{y}A = \int ydA$$

$$= 41.39(3.6) + 7.65(4.02) = 45.653$$

$$\bar{y} = \frac{45.653}{8.159} = 5.60$$

$$5) \quad d = 32.5 - 5.60 = 26.9$$

$$6) \quad \rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{8.159}{15(26.9)} = 0.020$$

$$\frac{14}{f_y} \leq \rho \leq 0.75\rho_b$$

$$0.00475 \leq 0.020 \leq 0.02874$$

\therefore yielding failure

$$7) \quad a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b}$$

$$= \frac{8.159(2950)}{0.85(231.9)(15)} = 8.14 \text{ cm.}$$

$$8) \quad M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$= 8.159(2950) \left(26.9 - \frac{8.14}{2} \right) = 5495 \text{ kg.m}$$

Check shear เหมือนกับคานเสริมตะแกรงลวดรีดเย็น

เลือกใช้เหล็กปลอก CDR 6 @ 0.125

Deflection

คานทดสอบที่เสริมด้วยตะแกรงเหล็กรีดเย็น

$$d = 26.73 \text{ cm.} \quad A_s = 4.68$$

$$f'_c = 231.9 \text{ ksc}$$

$$f_y = 5218 \text{ kg}$$

$$M_y = A_s f_y \left(d - \frac{k}{3} \right) \leq M_u$$

$$\phi_y = \frac{\epsilon_y}{(1-k)d}$$

$$M_u = A_s f_y d \left[1 - \frac{0.59 \rho f_y}{f_c'} \right]$$

$$\phi_u = \frac{0.003}{C}$$

$$\rho = 0.01174$$

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

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2.04 \times 10^6}{15100 \sqrt{231.9}} = 8.872$$

$$\rho n = 0.01174(8.872) = 0.10416$$

$$k = \sqrt{(0.10446)^2 + 2(0.10446)} - 0.10446 = 0.364$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 0.8787$$

$$M_y = A_s f_y \left(d - \frac{k}{3} \right) \leq M_u$$

$$= 4.68(5218) \left(26.73 - \frac{0.364(26.73)}{3} \right) \leq M_u$$

$$M_y = 5701.4 \text{ kg.cm} \leq 5520 \text{ kg.cm}$$

$$\phi_y = \frac{\epsilon_y}{(1-k)d}$$

$$= \frac{0.00256}{(1-0.364)(26.73)} = 0.000151$$

$$M_u = A_s f_y d \left(1 - \frac{0.59 \rho f_y}{f_c'} \right)$$

$$= 4.68(5218)(26.73) \left(1 - \frac{0.59(0.01174)(5218)}{231.9} \right) = 5520 \text{ kg.m}$$

$$\phi_u = \frac{0.003}{C}$$

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f_c' b}$$

$$= \frac{4.68(5218)}{0.85(231.9)(15)} = 8.26$$

$$C = \frac{a}{\beta_1}$$

$$= \frac{8.26}{0.85} = 9.717$$

$$\phi_u = \frac{0.003}{9.717} = 0.000309$$

$$\text{ที่สถานะคราก } A_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{200}{3} \right) (0.000154) = 0.00513$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

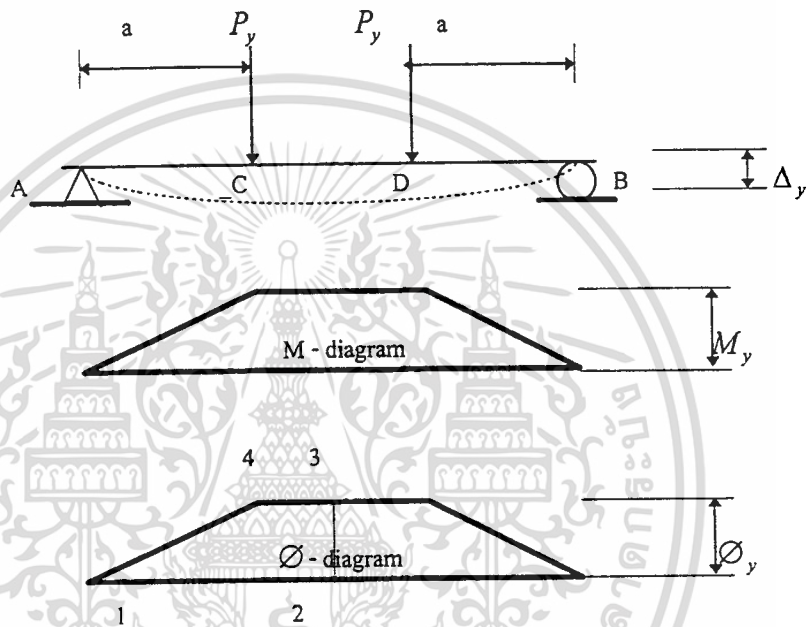
$$P_{\frac{A}{B}} = MA_{(A_1)} + MA_{(A_2)}$$

$$MA_{(A_1)} = 0.00513 \left(\frac{2}{3} \right) \left(\frac{200}{3} \right) = 0.2228$$

$$A_2 = \frac{100}{3} (0.000154) = 0.00513$$

$$MA_{(A_2)} = 0.00513 \left(\frac{200}{3} + \frac{1}{2} \left(\frac{100}{3} \right) \right) = 0.4275$$

$$\left(\Delta_{\frac{L}{2}} \right)_{yield} = 0.6255$$



รูปที่ ข.3 กราฟไดอะแกรมของโมเมนต์ตัดและความโค้งที่สถานะคราก

ที่สถานะประลัย

$$M_u = M_y = 5520$$

$$Pu = Py = Mu(3/2) = 5520(3/2) = 8280 \text{ kg}$$

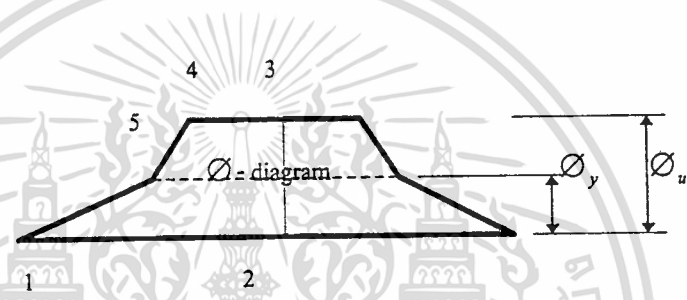
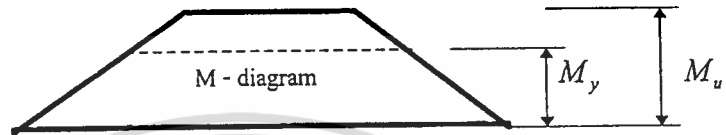
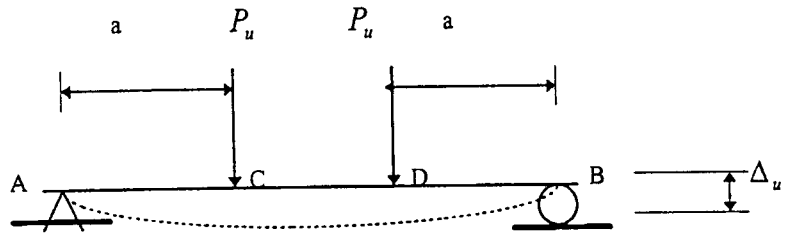
$$A_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{200}{3} \right) (0.000154) = 0.00513$$

$$A_2 = 0.000309 \left(\frac{100}{3} \right) = 0.0103$$

$$P_{\frac{A}{B}} = MA_{(A_1)} + MA_{(A_2)}$$

$$= 0.0051 \left(\frac{2}{3} \right) \left(\frac{200}{3} \right) + 0.0103 \left[\frac{100}{3} \left(\frac{1}{2} \right) + \frac{200}{3} \right] = 1.0863 \text{ cm.}$$

ที่สถานะประลัย



รูปที่ ข.4 กราฟโคเคแกรมของโมเมนต์คัด และความโค้งที่สถานะประลัย

Deflection

กานทดสอบที่เสริมด้วยตะแกรงเหล็กรีดเย็น ควบคุมเหล็กกล้าละมุน

$$A_s = 8.16 \text{ cm}^2$$

$$d = 26.9$$

$$\rho = 0.020$$

$$M_y = A_s f_y d \left(1 - \frac{k}{3}\right) \leq M_u$$

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

$$\rho n = 0.020(8.872) = 0.17744$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = 8.872$$

$$k = \sqrt{(0.1774)^2 + 2(0.1774)} - 0.1774 = 0.4441$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 0.852$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M_y = A_s f_y j d \leq M_u$$

$$= 8.16(2950)(0.852)(26.90) = 5517 \text{ kg.m} \leq M_u$$

$$\phi_y = \frac{\epsilon_y}{(1-k)d} = 0.0000962$$

$$M_u = A_s f_y d \left(1 - \frac{0.59 \rho f_y}{f_c'}\right)$$

$$\frac{\rho f_y}{f_c'} = \frac{0.020(2950)}{231.9} = 0.2544$$

$$M_u = 8.16(2950)(26.90) \left[1 - 0.59(0.2544)\right] = 5495 \text{ kg.m}$$

$$\phi_u = \frac{0.003}{C}$$

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f_c' b}$$

$$= \frac{7.2(2950)}{0.85(231.9)(15)} = 8.1414$$

$$C = \frac{a}{\beta_1} = 9.578$$

$$\phi_u = \frac{0.003}{9.578} = 0.000313$$

$$M_u \leq M_y$$

ที่สถานะคราก $\therefore M_y = M_u = 5495 \text{ kg.m}$

$$P_y = P_u = M_u \left(\frac{3}{2}\right)$$

$$= 8242.5 \text{ kg}$$

$$A_1 = \frac{1}{2} (0.0001) \left(\frac{200}{3}\right) = 0.003333333$$

$$A_2 = \frac{100}{3} (0.0001) = 0.003333333$$

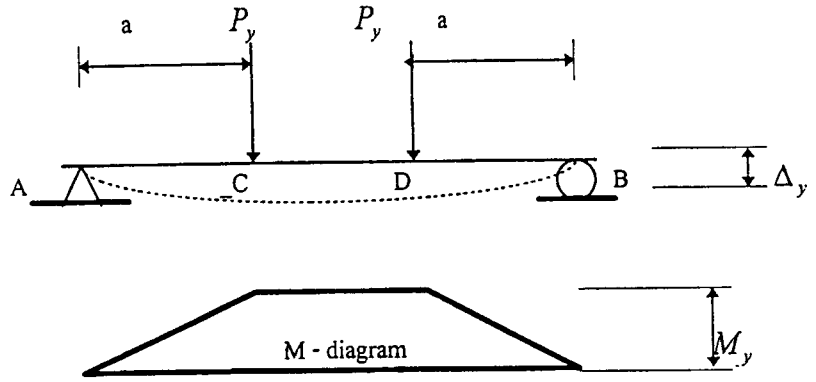
$$t_{\frac{A}{B}} = MA_{(A_1)} + MA_{(A_2)}$$

$$= 0.0033333 \left(\frac{2}{3}\right) \left(\frac{200}{3}\right) + 0.0033333 \left[\frac{200}{3} + \frac{1}{2} \left(\frac{100}{3}\right)\right]$$

$$= 0.148 + 0.278 = 0.426 \text{ cm}$$

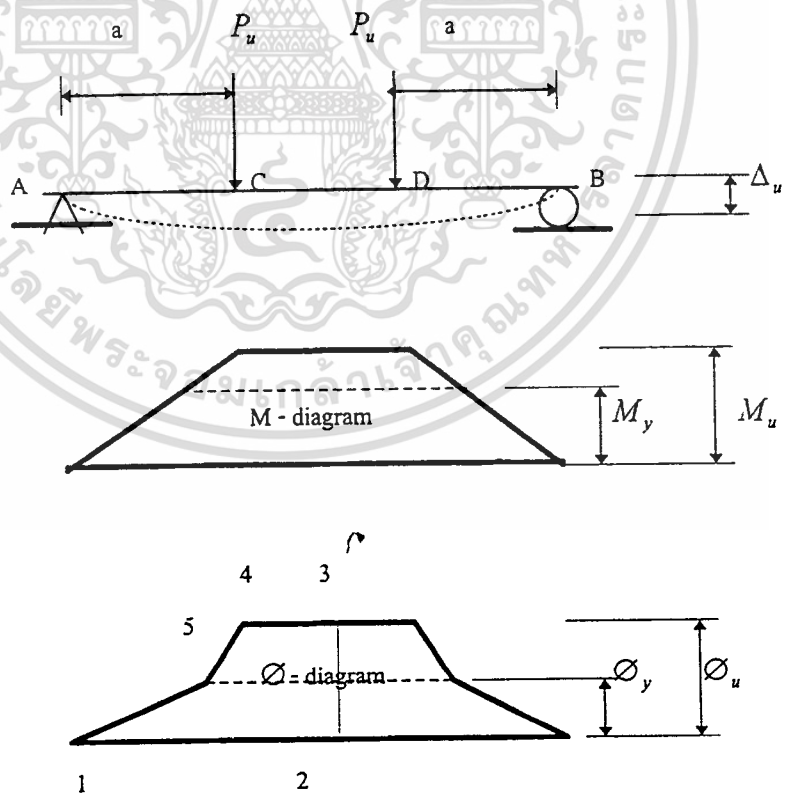
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สถานะคราก



รูปที่ ข.5 กราฟไดอะแกรมของโมเมนต์คัต และความโค้งที่สถานะคราก

ที่สถานะประลัย



รูปที่ ข.6 กราฟไดอะแกรมของโมเมนต์คัต และความโค้งที่สถานะประลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_1 = \frac{1}{2}(0.001)\left(\frac{200}{3}\right) = 0.00333333$$

$$A_2 = \frac{100}{3}(0.000313) = 0.01043$$

$$t_{\frac{A}{B}} = MA_{(A_1)} + MA_{(A_2)}$$

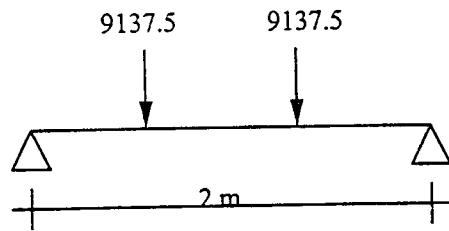
$$= 0.00333333\left(\frac{2}{3}\right)\left(\frac{200}{3}\right) + 0.010433\left[\frac{200}{3} + \frac{1}{2}\left(\frac{100}{3}\right)\right]$$

$$= 0.14815 + 0.8694 = 1.01755 \text{ cm}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการหาระยะการแอ่นตัว โดยวิธี ACI-CODE
 กานทดสอบที่เสริมด้วยตะแกรงเหล็กรีดเย็น ควบคุมเหล็กกล้าละมุน



รูปที่ ข.7 แสดงน้ำหนักบรรทุกที่ใช้คำนวณระยะแอ่นตัว

$$I_g = \frac{bh^3}{12} = \frac{(15)(32.5)^3}{12} = 42190 \text{ cm}^4$$

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} = \frac{(2\sqrt{210})(42910)}{16.25} = 76532 \text{ kg.cm}$$

หาค่าน้ำหนักที่ทำให้เกิด โมเมนต์แตกร้าว

$$\text{จาก } M_{cr} = \frac{PL}{3}$$

$$P_{cr} = \frac{3M_{cr}}{L} = \frac{3(76532)}{2} = 1148 \text{ kg}$$

$$\Delta_{cr} = \frac{23wl^3}{648E_c I_g} = \frac{23(1148)(200)^3}{648(218820)(42910)} = 0.0347 \text{ cm.}$$

$$\text{จาก } M_{cr} = \frac{PL}{3} \text{ เพราะฉะนั้น } M_a = \frac{(9137.5)(200)}{3} = 609167 \text{ kg.cm}$$

$$\frac{M_a}{M_{cr}} = \frac{609167}{76532} = 7.9 > 3$$

$$\text{ใช้ } I_e = I_{cr}$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2.04 \times 6}{15100\sqrt{210}} = \frac{2.04 \times 6}{218820} = 9.32$$

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{4.02 + 2.34}{(15)(26.9)} = 0.0158$$

$$\rho_n = 0.0158 \times 9.32 = 0.147$$

$$k = -\rho n + \sqrt{(\rho n)^2 + 2\rho n} = -0.147 + \sqrt{0.147^2 + 2(0.147)} = 0.415$$

$$y = kd = 0.415(26.9) = 11.163 \text{ cm}$$

$$I_{cr} = \frac{by^3}{3} + nA_s(d-y)^2$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{(15)(11.163)^3}{3} + 9.32(6.36)(26.9 - 11.163)^2 \\
&= 6955.25 + 14679.69 = 21634.94 \text{ cm}^4 \\
\Delta &= \frac{23wl^3}{648E_c I_e} \\
I_e &= I_{cr} \\
\therefore \Delta &= \frac{23(9137.5)(200)^3}{648(218820)(21634.94)} = 0.548 \text{ cm}
\end{aligned}$$



ภาคผนวก ก.

ผลการทดสอบกำลังวัสดุที่ใช้หล่อคานทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตรูปทรงกระบอก

KING MONGKUT INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG										
CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTH TEST										
SPECIMEN NO.	DIMENSION (cm)		WEIGHT (kg)	SLUMP (cm)	DATE OF TESTED	AGES DAYS	ULTIMATE LOAD (kg)	COMPRESSIVE STRENGTH ksc	WEIGHT PER VOLUME kg/cubic.m	REMARK
	CROSS SECTION	HEIGHT								
1	176.7	31	12.75	7.5	25/12/40	30	43020	243.5	2405.2	
2	176.7	30	12.61	7.5	25/12/40	30	34500	195.2	2378.6	
3	176.7	30	12.65	7.5	25/12/40	30	45420	257	2386.3	
AVERAGE	176.7	30.33	12.67	7.5			40980	231.9	2390.0	

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของเหล็กกล้าอะมุน

KING MONGKUT INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG																	
ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของเหล็กกล้าอะมุน																	
Specimen no.	Type of steel		Trade mark	Length (cm)	weight (kg)	Diameter mm.	Error of diameter(mm.)	Cross section area (square cm.)		Load (kg)		Tensile Stress (ksc)		Gauge length (cm)	Elongation (%)		Remark
	R.B.	D.B.						yield	ultimate	yield	ultimate	(cm)	(%)				
1	9		U.M	78.7	321	8.4	0.6	0.55	1361.25	2046	2475	3720	4.2	0.51	12.1	SR24	
2	9		U.M	78.4	321	8.27	0.73	0.54	1352.7	2017	2505	3735	4.14	0.85	20.6	SR24	
3	9		U.M	78.9	322	7.73	1.27	0.47	1198.5	1755	2550	3735	3.9	0.73	18.9	SR24	
average																	
1		12	C.I.S	79.2	670	11.7	1.7	1.07	3120	4500	2915.89	4205.6	5.85	2.29	39.1	SD30	
2		12	C.I.S	80.1	670	11.6	1.6	1.06	3225	4800	3042.45	4528.3	5.8	2.57	44.3	SD30	
3		12	C.I.S	79.1	665	11.7	1.7	1.07	3315	4800	3098.13	4486	5.85	3.3	56.4	SD30	
average																	
1		16	C.I.S	79.8	1071	14.7	1.3	1.71	5055	6870	2956.14	4017.5	7.35	2.83	38.5	SD30	
2		16	C.I.S	73.8	993	14.8	1.2	1.71	5025	6915	2938.6	4043.9	7.4	2.36	31.9	SD30	
3		16	C.I.S	79.4	1064	14.7	1.3	1.71	5055	6885	2956.14	4026.3	7.35	2.09	28.4	SD30	
average																	

ตารางที่ ด.3 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของลวดเหล็กรีดเย็น

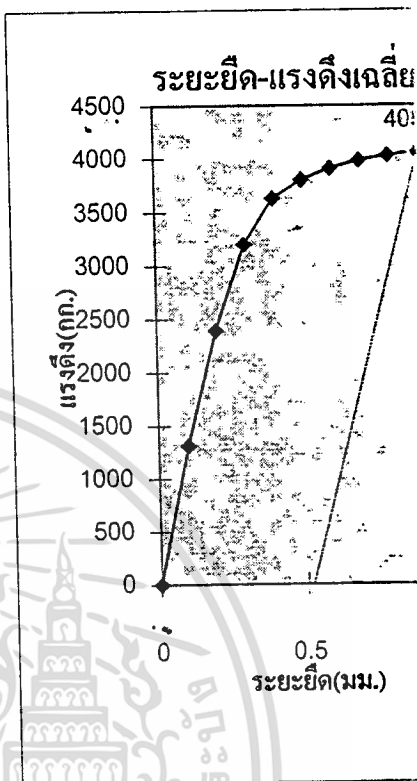
เลขที่รีด ทดสอบ	ลักษณะ ของการ ทดสอบ	ชนิดและขนาด ของเหล็ก(mm.)		GRADE น้ำหนัก ของเหล็ก (kg/m.)	ขนาด จำนวน (mm.)	พื้นที่หน้าตัด จำนวน (mm.xmm.)	ผลการทดสอบแรง				ความต้านแรง		ความยาว พีกัดเดิมใน การวัด(mm.)	ความยืด		ลักษณะเหล็ก ที่จุดสุดท้าย ของการทดสอบ	
		CDD	CDR				yield	ultimate	yield	ultimate	ยืดไป (mm.)	%					
														kg.	N		kg
		kg.	N				kg	N	(N/sqr.mm)	(N/sqr.mm)							
10-001	แรงดึง	10		m15	0.582	9.71	74.14	3890	38122	4225	41405	514	558	50	7	14%	ปากกลาม
10-002	แรงดึง	10		m15	0.584	9.73	74.39	3800	37240	4285	41993	501	564	50	7	14%	ปากกลาม
10-003	แรงดึง	10		m15	0.583	9.72	74.26	3935	38563	4265	41797	519	563	50	7	14%	ปากกลาม
								3875									
6-001	แรงดึง		6	m15	0.226	6.05	28.8	1645	1471	1765	17120	559	601	50	6	12%	ปากถั่ว
6-002	แรงดึง		6	m15	0.224	6.02	28.54	1700	1666	1885	18473	583	647	50	6	12%	ปากถั่ว
6-002	แรงดึง		6	m15	0.225	6.03	28.66	1675	16415	1785	17493	572	610	50	6	12%	ปากถั่ว
								1673									

สรุป fy,ave CDDIC 5218 ksc

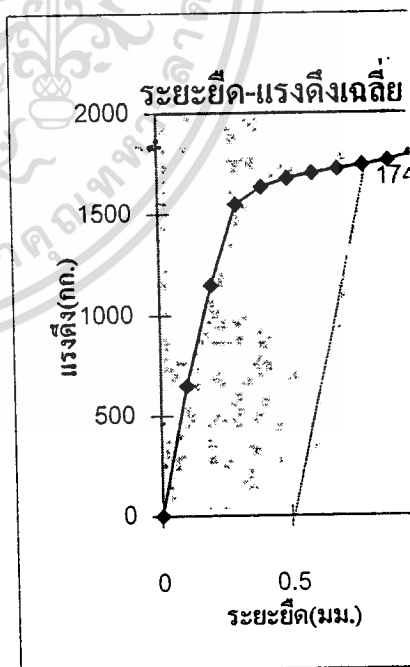
fy,ave CDR6 : 5835 ksc

ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบความเค้นพิสูจน์ที่ร้อยละ 0.5

CDD10				
ระยะความยืด (มม.)	แรงดึง(กก.)			
	ตัวอย่างที่1	ตัวอย่างที่2	ตัวอย่างที่3	เฉลี่ย
0	0	0	0	0
0.1	1150	1300	1500	1316.67
0.2	2260	2400	2525	2395.00
0.3	3200	2900	3500	3200.00
0.4	3600	3500	3790	3630.00
0.5	3735	3750	3925	3803.33
0.6	3890	3850	3980	3906.67
0.7	3950	3975	4020	3981.67
0.8	4000	4025	4050	4025.00
0.9	4030	4065	4075	4056.67
1	4070	4125	4095	4096.67



CDR6				
ระยะความยืด (มม.)	แรงดึง(กก.)			
	ตัวอย่างที่1	ตัวอย่างที่2	ตัวอย่างที่3	เฉลี่ย
0	0	0	0	0
0.1	597	800	550	649.00
0.2	1095	1300	1050	1148.33
0.3	1522	1600	1520	1547.33
0.4	1585	1682	1627	1631.33
0.5	1635	1725	1662	1674.00
0.6	1662	1750	1685	1699.00
0.7	1680	1775	1705	1720.00
0.8	1700	1800	1720	1740.00
0.9	1725	1825	1732	1760.67

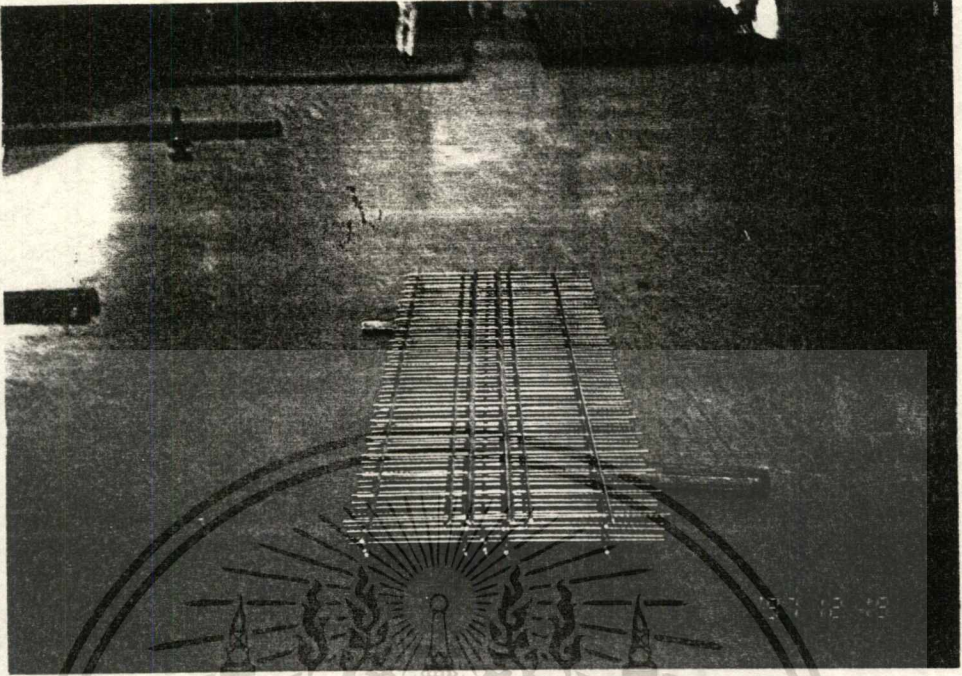


ภาคผนวก ง.

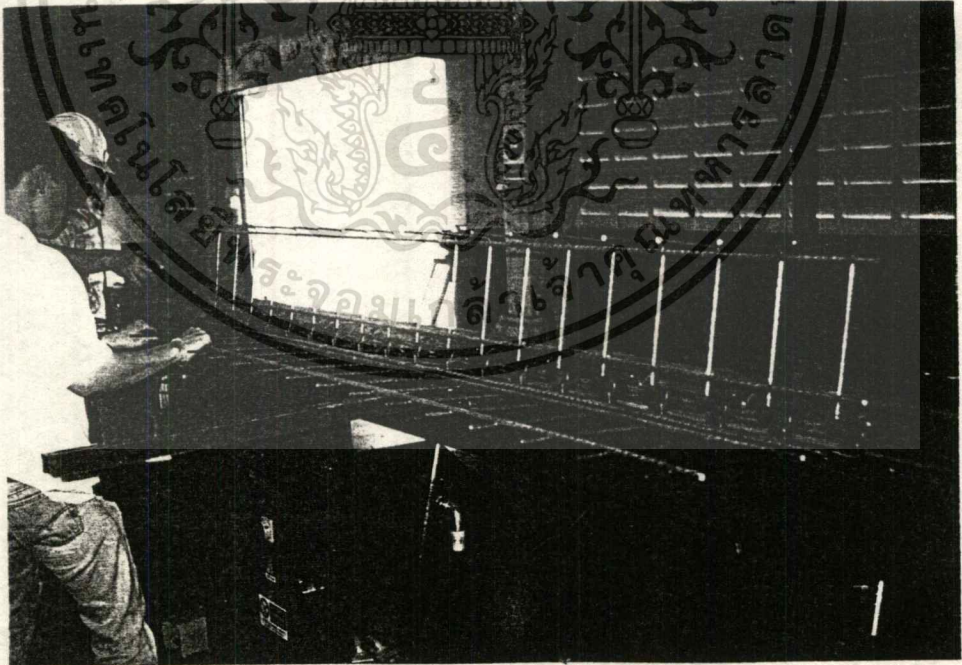
รูปถ่ายประกอบการดำเนินการศึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

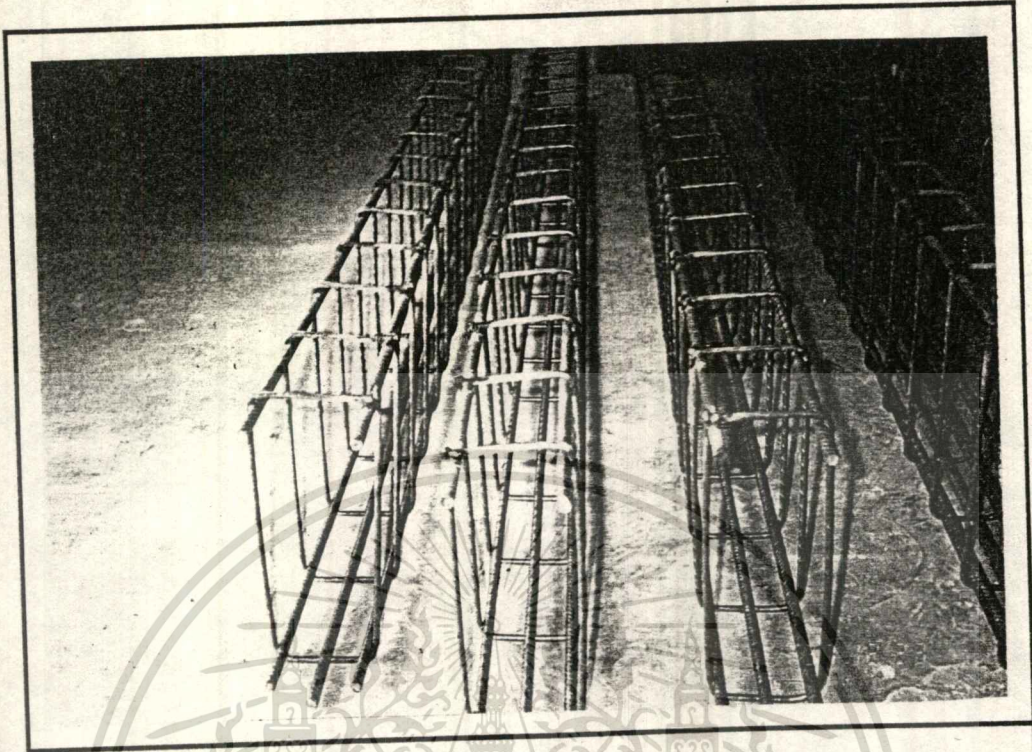


รูปที่ ง.1 Steel Welded Wire Mesh ก่อนขึ้นรูป

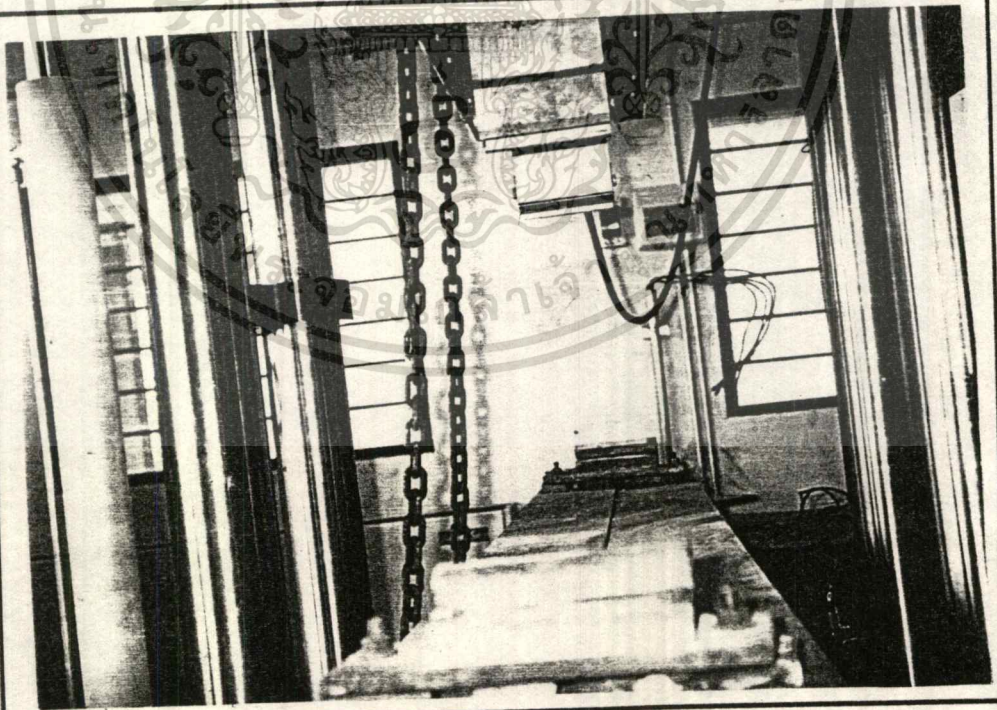


รูปที่ ง.2 แสดงการขึ้นรูป Steel Welded Wire Mesh โดยเครื่องตัดเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงมติให้สถาบันบริหารงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตเห็นว่าไปเผยแพร่ขงนด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

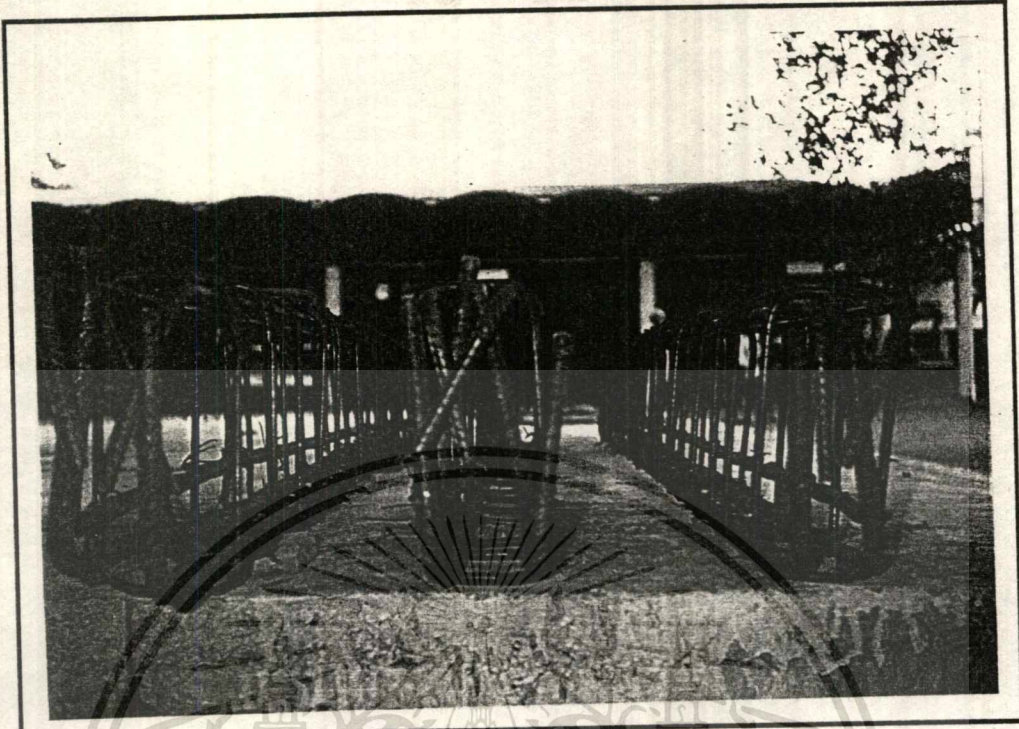


รูปที่ ๓.3 Steel Welded Wire Mesh ที่ขึ้นรูปแล้ว

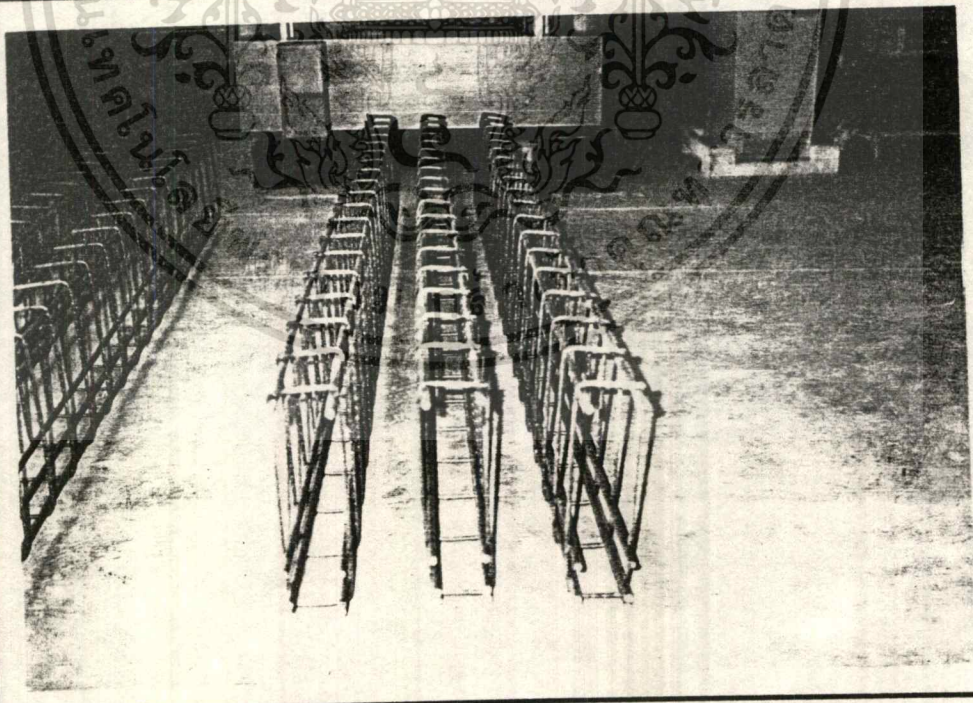


รูปที่ ๓.4 การเตรียมแท่นทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ใดๆ หากมีค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.5 เหล็กกล้าระมอนดัวนที่เสริมในคานทดสอบ



รูปที่ ง.6 ตะแกรงลวดดัวนใช้เสริมในคานทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

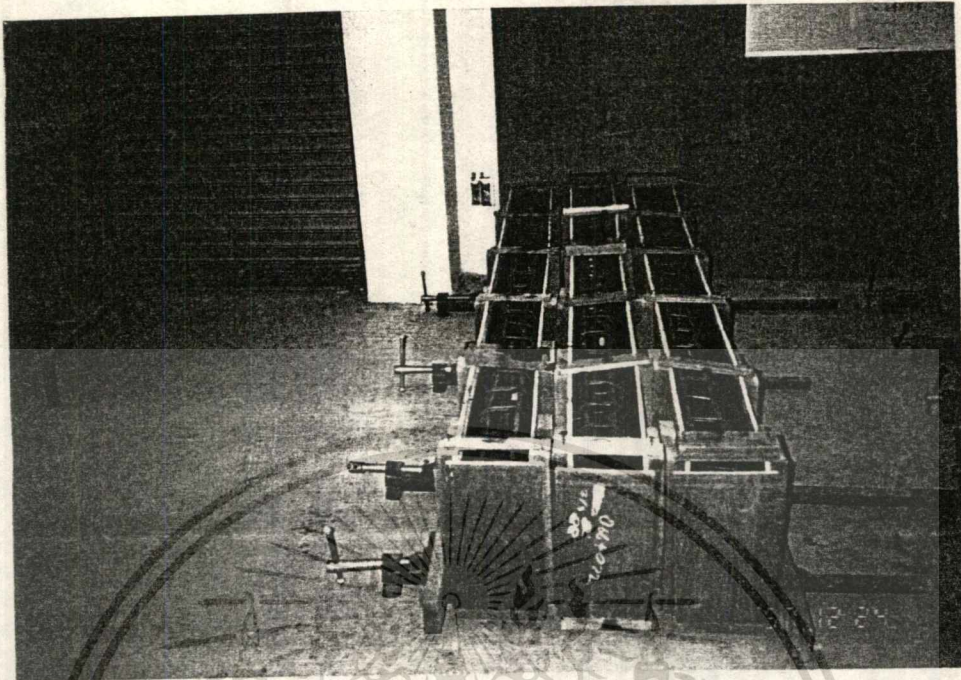


รูปที่ ง.7 การผูกเหล็กกล้าสะพานเข้ากับตะแกรงวัดใช้เสริมในคานทดสอบ

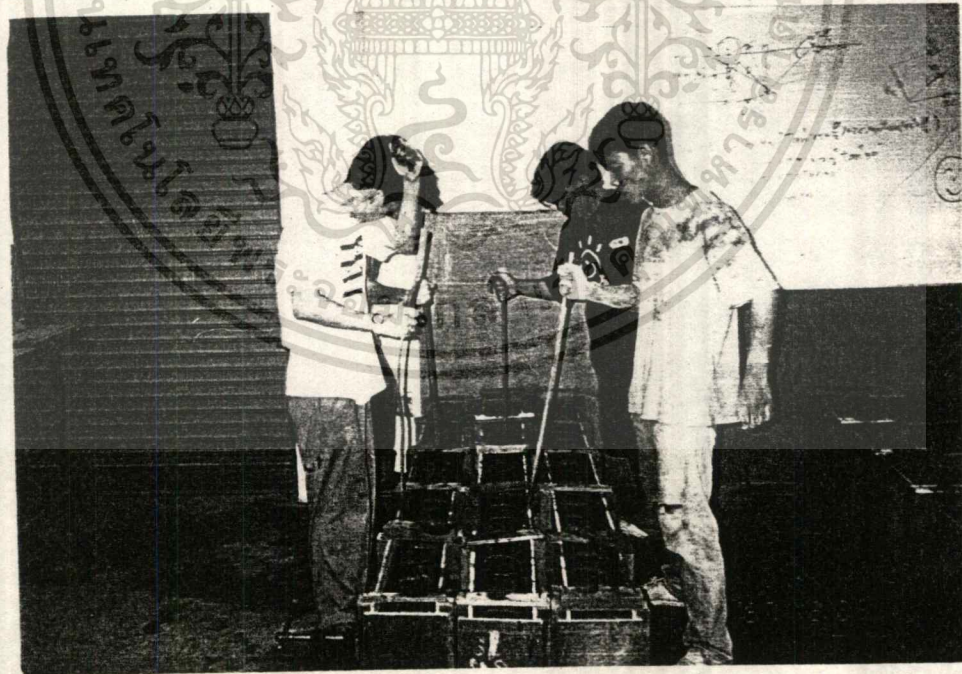


รูปที่ ง.8 Digital Strain Indicator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการใช้งานที่เกินกว่าที่อนุญาตไว้ ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

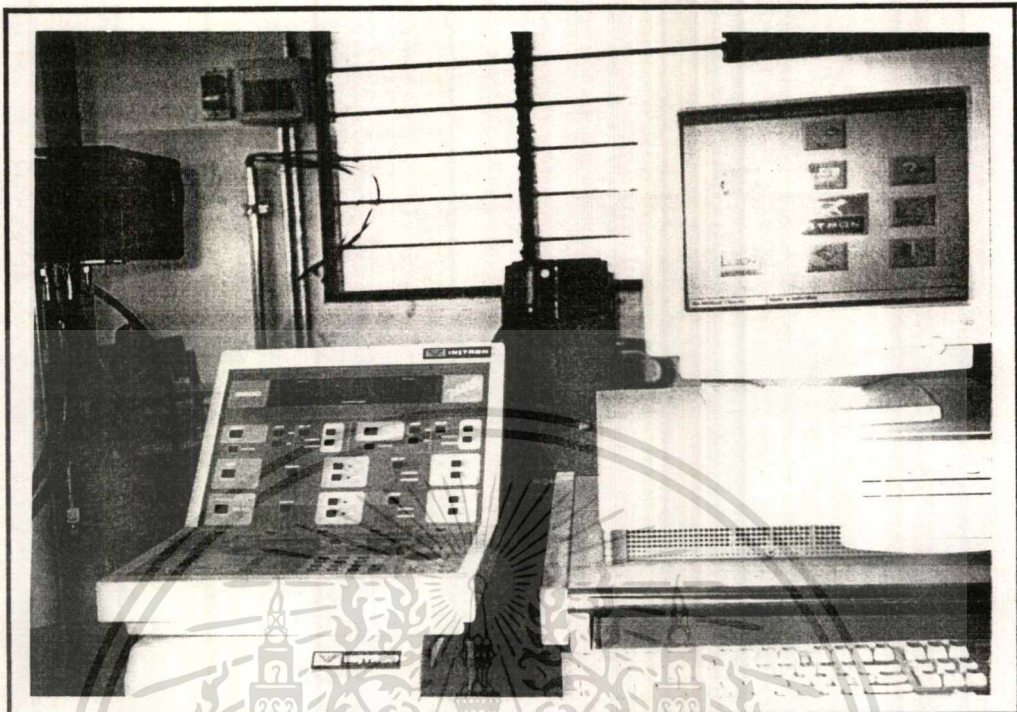


รูปที่ ๙.๑ แสดงการประกอบเหล็กเสริมลงไปแบบหล่อและใช้ปากคาร์ดแบบหล่อไว้

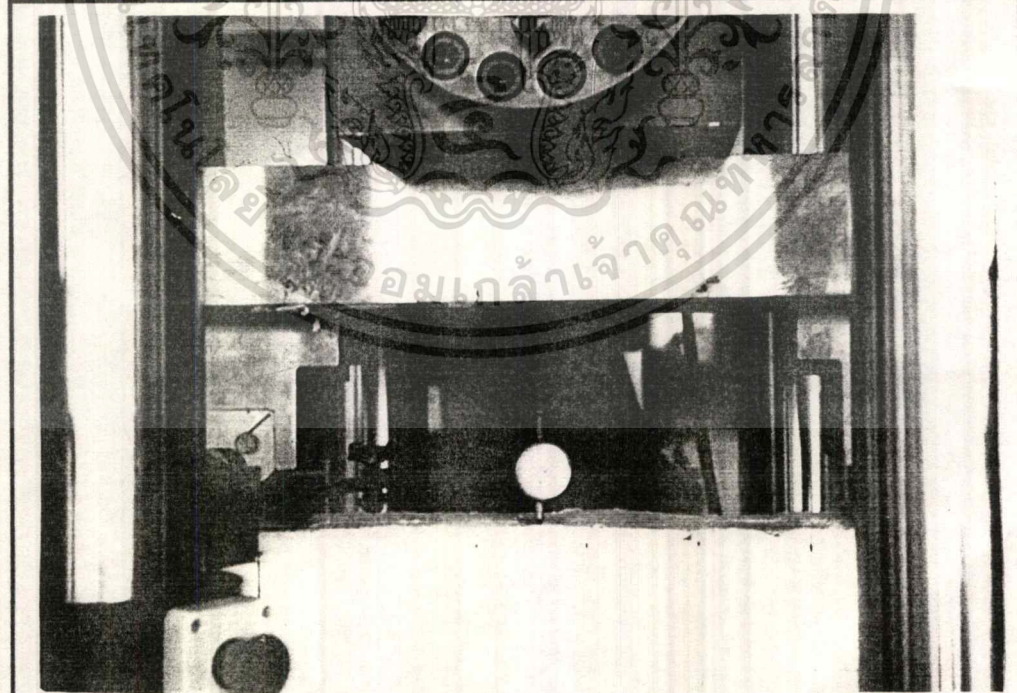


รูปที่ ๙.๑๐ แสดงการเทและกระทุ้งคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

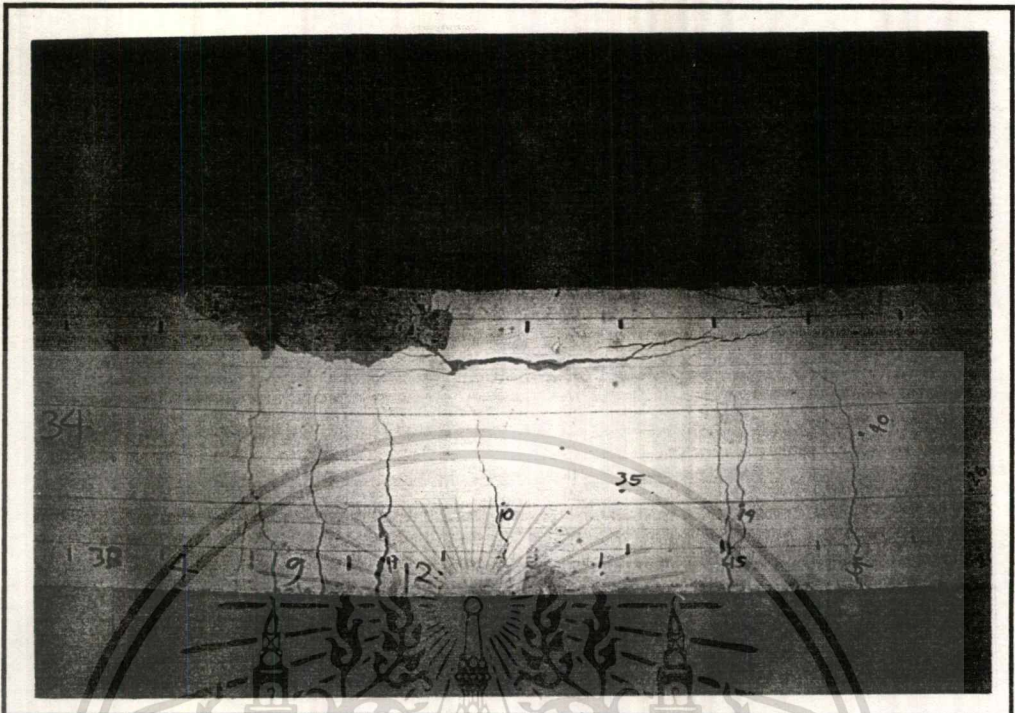


รูปที่ ง.11 หน่วยควบคุมและประมวลผลเครื่อง UTM



รูปที่ ง.12 แสดงการติดตั้งเครื่องมือก่อนการทดสอบ โมเมนต์ตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

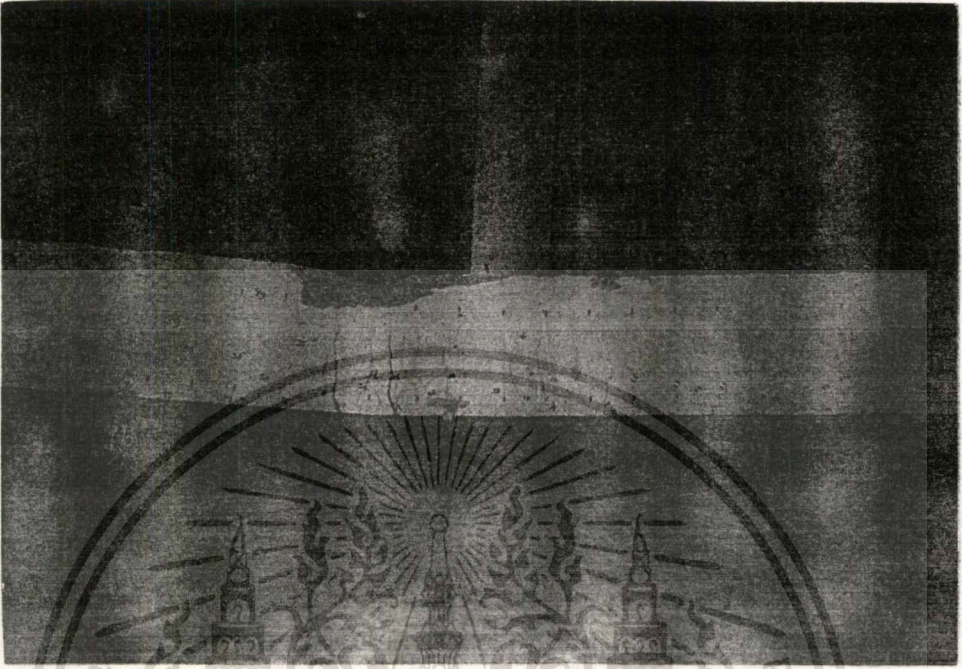


รูปที่ ง.13 แสดงการแตกร้าวและการพังทลายของคานเสริมเหล็กกล้ามะนวล้วน



รูปที่ ง.14 แสดงการแตกร้าวและการพังทลายของคานเสริมตะแกรงลวดถั่ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.15 การแตกร้าวและพังทลายของคานเสริมเหล็กกล้ามะนควคู้ตะแกรงลาว



รูปที่ ง.16 รอยแตกเนื่องจากคอนกรีตถูกอัดระเบิด สังเกตว่าเหล็กเสริมจะถูกอัดจนโค้งตัว

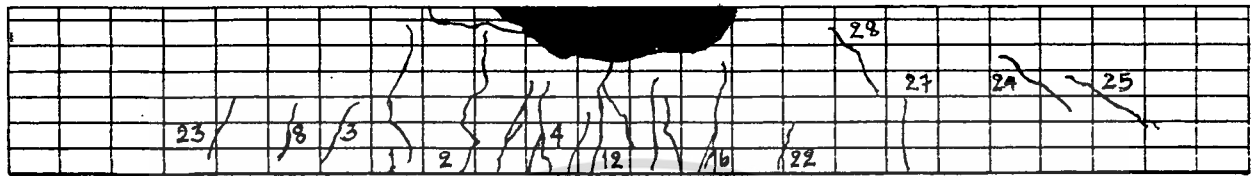
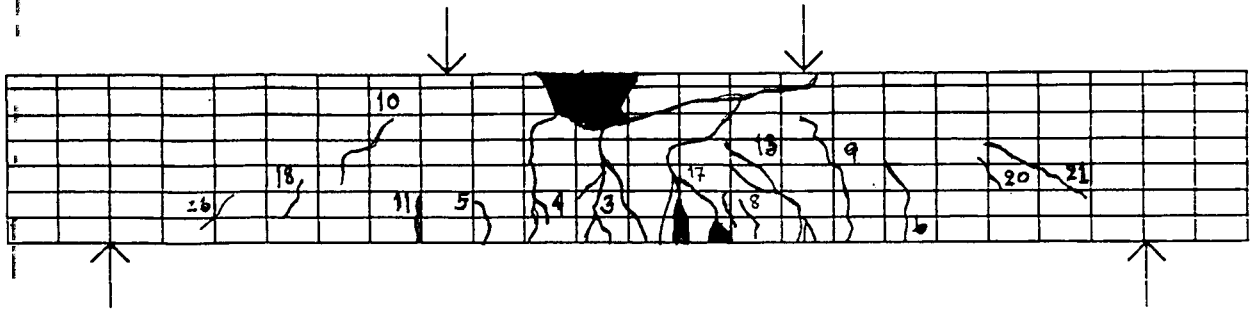
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.

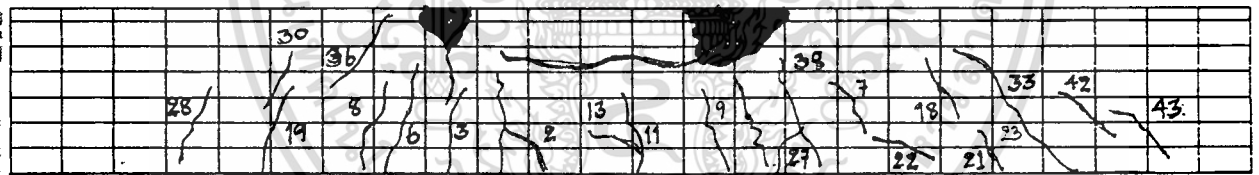
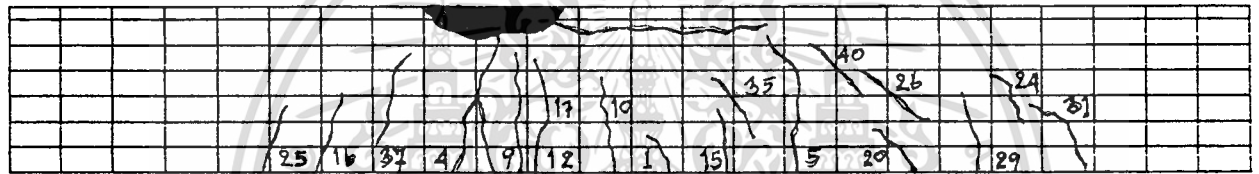
รูปแสดงรูปแบบการฟังทลายของคานทสอบ



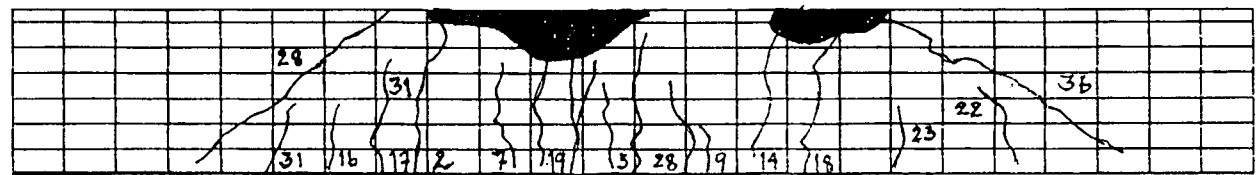
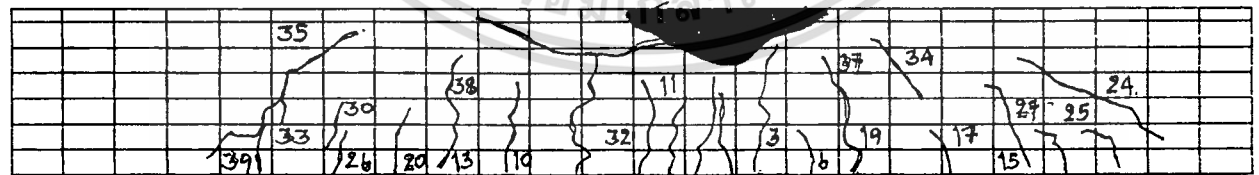
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DB01

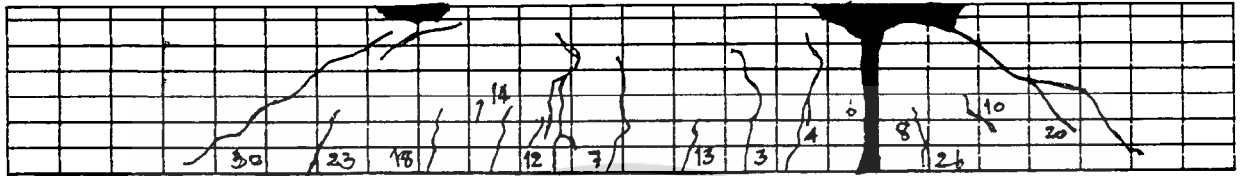
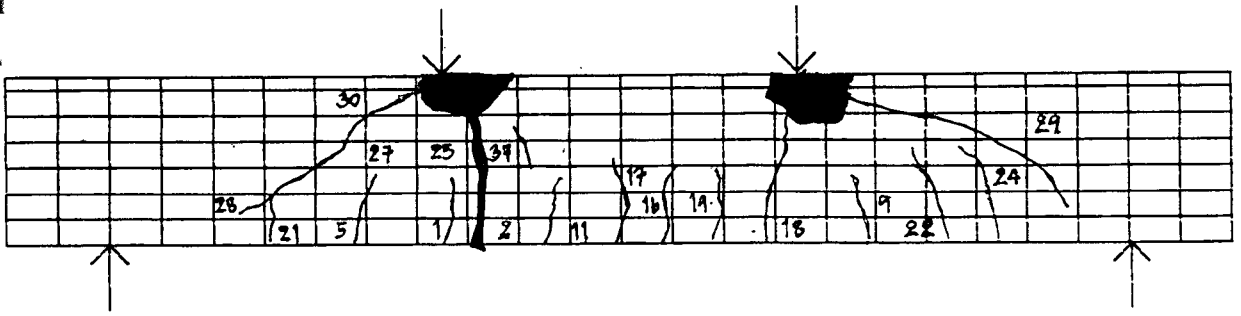


DB02

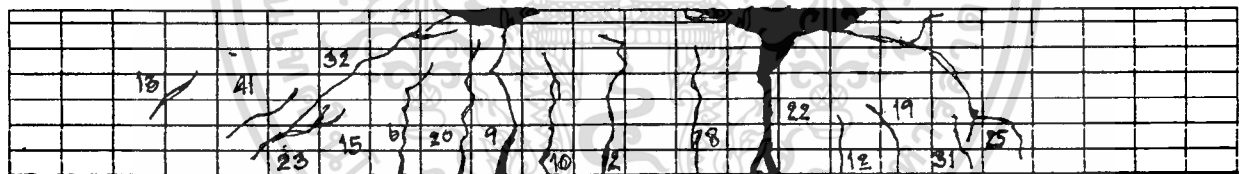
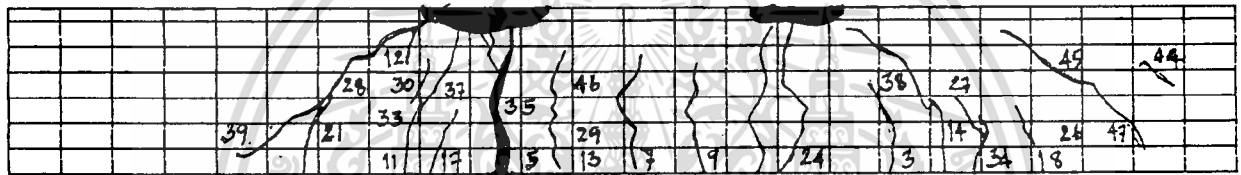


DB03

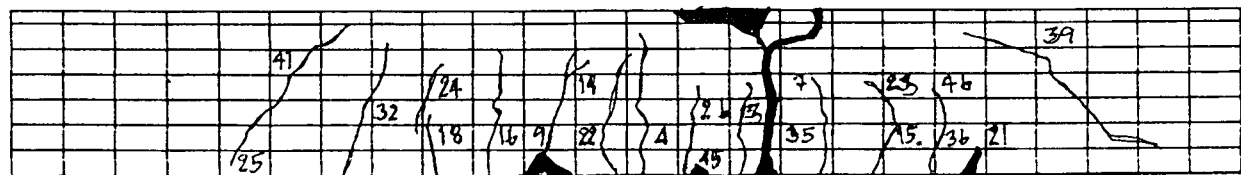
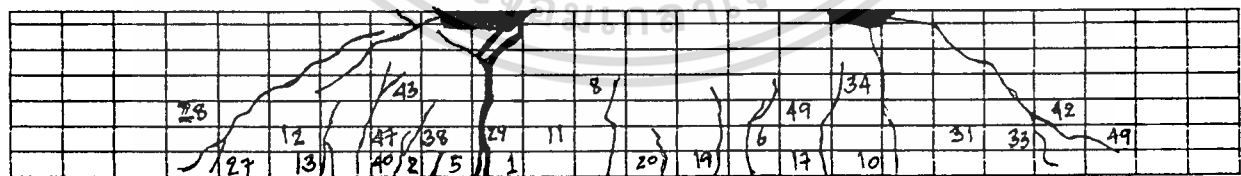
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



CDD01

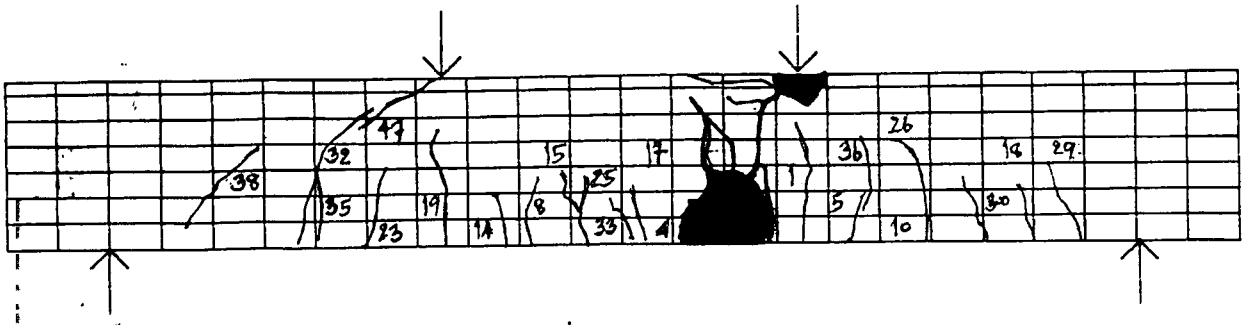


CDD02

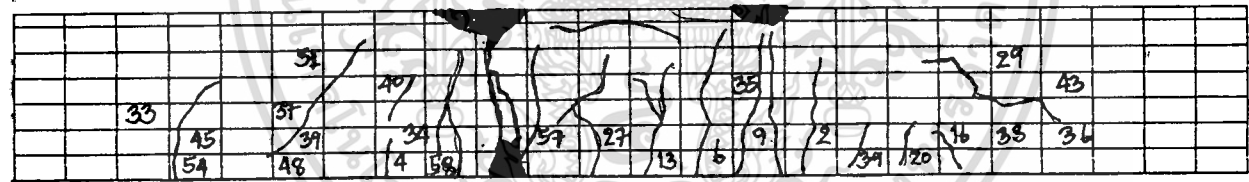
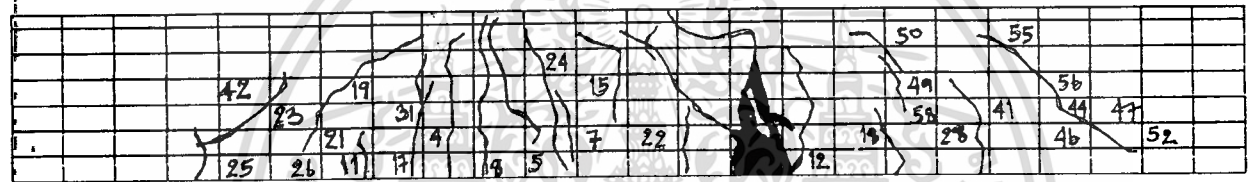


CDD03

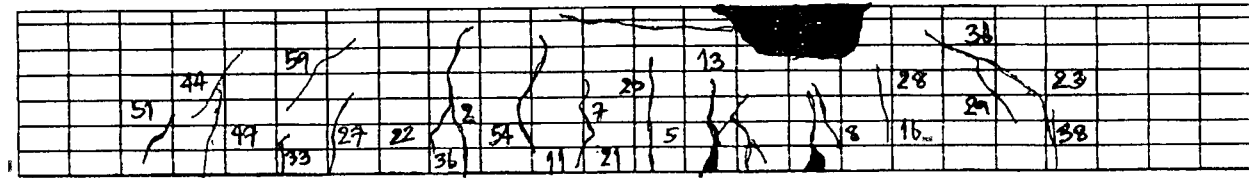
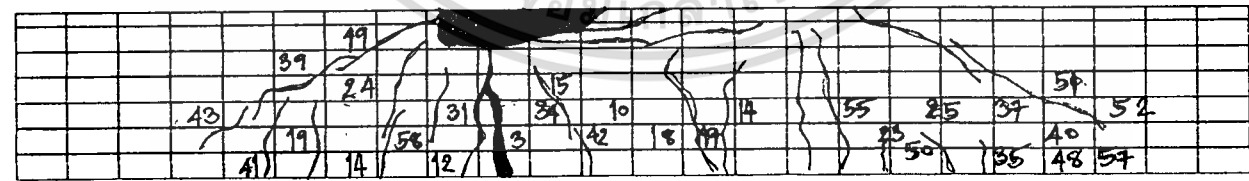
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COM01



COM02



COM03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ.

(บันทึกในแผ่น Diskette)

ผลการทดสอบคาน

- Load Deflection

- Load Strain

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม สำหรับการทดสอบกำลังอัด
ของแท่งคอนกรีตทรงกระบอก

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม สำหรับการทดสอบความ
ต้านทานแรงดึงของเหล็กกล้าละมุน และ ลวดตะแกรง

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม สำหรับลวดตะแกรง