

การเสริมเหล็กปลอกในคานรับโมเมนต์บิด

STIRRUP REINFORCEMENT IN PURE TORSION BEAMS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมการก่อสร้าง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2536

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีก 033324

STIRRUP REINFORCEMENT IN PURE TORSION BEAMS



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

1993

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ: การเสริมเหล็กปลอกในคานรับโมเมนต์บิด

นักศึกษา	นาย วิศิษฐ์ จุลบุตร	รหัสประจำตัว 33100359
	นาย สุวัฒน์ นัทธ์	รหัสประจำตัว 33100452
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	สาขา วิศวกรรมการก่อสร้าง
	ภาควิชา วิศวกรรมโยธา	
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ สุวัฒน์ กิรเศรษฐ์	

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
อาจารย์ สุวัฒน์ หวังเจริญ
อาจารย์ ศักดิ์ชัย สภาพงษ์
อาจารย์ สุวัฒน์ กิรเศรษฐ์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

.....
(Handwritten signature)

(อาจารย์ สุวัฒน์ หวังเจริญ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าวันที่ ๒๙ เดือน เมษายน พ.ศ. ๒๕๖๗

การเสริมเหล็กปลอกในคานรับโมเมนต์บิด

STIRRUP REINFORCEMENT IN PURE TORSION BEAMS

โดย นาย วิศิษฐ์ จุลบุตร รหัสประจำตัว 33100359

นาย สุรวัฒน์ นิกข์ รหัสประจำตัว 33100452

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ สุวัฒน์ กิระเศรษฐ์

บทคัดย่อ

ตัวอย่างคานคอนกรีตขนาด 6x6x36 นิ้วจำนวน 4 กลุ่ม ๆ ละ 5 คาน ถูกทดสอบให้พังทลายโดยโมเมนต์บิดบริสุทธิ์ จะได้ว่าค่าความต้านทานโมเมนต์บิดของคานกลุ่มที่เสริมด้วยเหล็กปลอกเอียงจะมีค่าใกล้เคียงกับกลุ่มที่เสริมด้วยเหล็กปลอกเกลียว แต่จะสูงกว่ากลุ่มที่เสริมด้วยเหล็กปลอกรัดรอบธรรมดาและจะพบว่าค่าที่ได้จากการทดลองจะต่ำกว่าทฤษฎี นอกจากนี้ถ้าพิจารณาถึงค่าความต้านทานโมเมนต์บิดต่อปริมาตรเหล็กปลอก 1 หน่วย จะมีค่าต่างกันเล็กน้อยโดยเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยดังนี้คือ ปลอกเกลียว ปลอกรัดรอบธรรมดา ปลอกเอียง

ABSTRACT

There are four specimened group and five beams in each group that the size of beams are 6x6x36 in. , were tested in pure torsion to failure. It was observed that ultimate torsional strength of spiral stirrup beams close to incline stirrup beams but greater than vertical stirrup beams . And the ultimate torsional strength of beams from testing are less than theory. Furthermore, the ultimate torsional strength of each group beams per volume of stirrup are presented that maximum value to minimum value are spirral stirrup, vertical stirrup, and incline stirrup

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในห้องปฏิบัติการเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด **respectively.** มิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิจกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา วิชาโครงการพิเศษ อาจารย์ สุวัฒน์
กิตเรขรั ที่ให้ความดูแลเอาใจใส่ อีกทั้งให้คำแนะนำปรึกษาเพื่อแก้ปัญหาต่าง ๆ ให้
ล่วงไปได้ด้วยดี และขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำปรึกษาต่อโครงการนี้
และผลงานวิจัยนี้จะไม่สามารถสำเร็จลงได้ หากขาดอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบคือ เครื่องมือทดสอบโมเมนต์บิด ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก สถาบันเทคโนโลยีแห่ง
เอเชีย จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นอกจากนี้ ก็ต้องขอขอบคุณ เพื่อนๆ น้องๆ และเจ้าหน้าที่ประจำ shop โยธา
ทุกท่านที่ได้ร่วมแรงกายแรงใจในการทำโครงการพิเศษนี้ และที่ขาดเสียไม่ได้คือ บริษัท
กาญจนาคอนกรีต จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์คอนกรีตผสมเสร็จ

ผู้จัดทำโครงการพิเศษ

นาย วิศิษฐ์ จุลบุตร

นาย สุวัฒน์ นัทธ์

สารบัญ

	หน้า
หน้าอนุมัติ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญสัญลักษณ์.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ปัญหาและความสำคัญ.....	1
1.2 จุดประสงค์และขอบเขต.....	2
1.3 ความเป็นมาและทฤษฎี.....	2
1.3.1 ทฤษฎีสำหรับการคำนวณหาความต้านทานโมเมนต์ บิดของคานคอนกรีตล้นหน้าตัดสี่เหลี่ยม.....	2
1.3.2 พฤติกรรมการพังทลายของคานคอนกรีตล้น.....	6
1.3.3 พฤติกรรมการพังทลายของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	8
1.4 ทฤษฎีการใช้งาน.....	12
บทที่ 2 โปรแกรมการทดลอง	
2.1 ตัวอย่างคานทดสอบ.....	17
2.1.1 ลักษณะทั่วไป.....	17
2.1.2 วัสดุ.....	17
2.1.3 รายละเอียดของคานตัวอย่าง.....	18
2.1.4 ขั้นตอนการหล่อคานตัวอย่าง.....	23
2.1.5 หลักการออกแบบคานตัวอย่าง.....	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2 เครื่องมือทดสอบโมเมนต์บิด.....	30
2.3 ขบวนการทดสอบ.....	31
บทที่ 3 ผลการทดลอง.....	39
บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	
4.1 ทฤษฎีความต้านทานโมเมนต์บิดประลัยของคานคอนกรีตล้วน และคานคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	65
บทที่ 5 สรุปเนื้อหาและสรุปผลการทดลอง	
5.1 สรุปเนื้อหาและสรุปผลการทดลอง.....	71
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	74
บรรณานุกรม.....	75

สารบัญสัญลักษณ์

- A = พื้นที่หน้าตัดคาน
- A_1 = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กแกน
- A_v = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอก
- a_s = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอกเกลียว
- a_{sv} = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอกรัศรอบธรรมดา (1 ขา)
- A_{sc} = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กแกนทั้งหมดบนหน้าตัดคาน
- A_{sv} = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอกรัศรอบธรรมดา (2 ขา)
- f_c = ความต้านทานแรงอัดของคอนกรีต
- f_t = ความต้านทานแรงดึงของคอนกรีต
- f_x = ความต้านทานแรงดึงที่จุดศูนย์กลางของเหล็กแกน
- f_y = ความต้านทานแรงดึงที่จุดศูนย์กลางของเหล็กปลอก
- L = ความยาวคานประสิทธิผล
- L_v = ความยาวเหล็กปลอก 1 ปลอก
- m = อัตราส่วนปริมาตรเหล็กแกนต่อเหล็กปลอก
- m_b = อัตราส่วนปริมาตรเหล็กแกนต่อเหล็กปลอกที่ภาวะสมดุล
- p_s = เส้นรอบรูปของหน้าตัดคาน
- p_c = เปอร์เซนต์ปริมาตรเหล็กเสริมต่อปริมาตรคอนกรีต
- p_b = อัตราส่วนเหล็กเสริมต่อพื้นที่หน้าตัดประสิทธิผลของคอนกรีตที่ทำให้เกิดภาวะสมดุล
- p_{max} = อัตราส่วนเหล็กเสริมต่อพื้นที่หน้าตัดประสิทธิผลของคอนกรีตมากที่สุด (มาตรฐาน ACI)
- s = ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก
- T_u = ความต้านทานโมเมนต์บิดเมื่อคานมีพฤติกรรมแบบอีลาสติก
- T_{pb} = ความต้านทานโมเมนต์บิดเมื่อคานมีพฤติกรรมแบบพลาสติก
- T_{uc} = ความต้านทานโมเมนต์บิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กในส่วนของคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารความลับของกรมโยธาธิการและผังเมืองให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญสัญลักษณ์ (ต่อ)

- T_{uu} = ความต้านทานโมเมนต์บิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กในส่วนของเหล็กเสริม
- X = ความกว้างของหน้าตัดคาน
- X_1 = ความกว้างของหน้าตัดคานภายในเหล็กปลอก
- Y = ความลึกของหน้าตัดคาน
- Y_1 = ความลึกของหน้าตัดคานภายในเหล็กปลอก
- V_u = ปริมาณเหล็กปลอกทั้งหมด
- β = ค่าสัมประสิทธิ์จากทฤษฎี Saint-Venant ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า Y/X จากตาราง 1.1
- β_1 = ค่าสัมประสิทธิ์ของ Whitney
- α = ค่าสัมประสิทธิ์จากทฤษฎี Saint-Venant ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า Y/X จากตาราง 1.1
- α_1 = ค่าสัมประสิทธิ์จากทฤษฎี Saint-Venant ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า Y/X จากตาราง 4.1
- e = มุมการเสริมเหล็กปลอก
- e_{uc} = มุมบิดหันทล้ายของคานคอนกรีตล้วน
- e_{uc} = มุมบิดหันทล้ายของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1	ผิวการหึงทลาสของคาน A1 หน้าตัด 10x15 นิ้ว ของการทดสอบ ความต้านทานโมเมนต์บิดที่ห้องทดลอง PCA ในปี ค.ศ. 1962.....	7
รูปที่ 1.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิด-มุมบิดของคาน B1-B6 ของการทดสอบ ความต้านทานโมเมนต์บิดที่ห้องทดลอง PCA ในปี ค.ศ. 1962.....	10
รูปที่ 1.3	ลักษณะการแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อรับโมเมนต์บิดประลัย.	10
รูปที่ 2.1	เครื่องมือทดสอบโมเมนต์บิด.....	32
รูปที่ 2.2	เครื่องมือทดสอบโมเมนต์บิด.....	32
รูปที่ 2.3	แท่งตัวอย่างคานทดสอบ.....	33
รูปที่ 2.4	การหล่อคานตัวอย่าง.....	33
รูปที่ 2.5	การเก็บตัวอย่างแท่งทดสอบแรงอัดของคอนกรีต และการทดสอบค่าการยุบ ตัวของคอนกรีต.....	34
รูปที่ 2.6	การติดตั้งเครื่องมือทดสอบ.....	34
รูปที่ 2.7	ลักษณะลูกบอลเหล็กที่จุดแรงกระทำของไฮดรอลิกต่อแขนยื่นของ เครื่องมือทดสอบโมเมนต์บิด.....	35
รูปที่ 2.8	การเพิ่มแรงกระทำของไฮดรอลิกต่อเครื่องมือทดสอบโมเมนต์บิด.....	35
รูปที่ 2.9	เครื่องมือทดสอบโมเมนต์บิด.....	36
รูปที่ 2.10	ส่วนที่ให้แรงกระทำและ Grip Box.....	37
รูปที่ 2.11	รายละเอียดของคานตัวอย่าง.....	38
รูปที่ 3.1	ค่าโมเมนต์บิดประลัยของคานกลุ่มที่ 1.....	44
รูปที่ 3.2	ค่าโมเมนต์บิดประลัยของคานกลุ่มที่ 2.....	45
รูปที่ 3.3	ค่าโมเมนต์บิดประลัยของคานกลุ่มที่ 3.....	46
รูปที่ 3.4	ค่าโมเมนต์บิดประลัยของคานกลุ่มที่ 4.....	47
รูปที่ 3.5	เปรียบเทียบค่าโมเมนต์บิดประลัยที่ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกต่างๆ ของคานกลุ่มที่ 2, 3 และ 4.....	48

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.6	เปรียบเทียบค่าโม่เมนต์บิดประลัยจากการทดลองและทฤษฎี ของคานากลุ่มที่ 1.....	49
รูปที่ 3.7	เปรียบเทียบค่าโม่เมนต์บิดประลัยจากการทดลองและทฤษฎี ของคานากลุ่มที่ 2.....	50
รูปที่ 3.8	เปรียบเทียบค่าโม่เมนต์บิดประลัยจากการทดลองและทฤษฎี ของคานากลุ่มที่ 3.....	51
รูปที่ 3.9	เปรียบเทียบค่าโม่เมนต์บิดประลัยจากการทดลองและทฤษฎี ของคานากลุ่มที่ 4.....	52
รูปที่ 3.10	ค่าโม่เมนต์บิดประลัยของคานากลุ่มที่ 1.....	53
รูปที่ 3.11	ค่าโม่เมนต์บิดประลัยของคานากลุ่มที่ 2.....	54
รูปที่ 3.12	ค่าโม่เมนต์บิดประลัยของคานากลุ่มที่ 3.....	55
รูปที่ 3.13	ค่าโม่เมนต์บิดประลัยของคานากลุ่มที่ 4.....	56
รูปที่ 3.14	เปรียบเทียบค่าโม่เมนต์บิดประลัยที่ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกต่างๆ ของคานากลุ่มที่ 2, 3 และ 4.....	57
รูปที่ 3.15	เปรียบเทียบค่าโม่เมนต์บิดประลัยจากการทดลองและทฤษฎี ของคานากลุ่มที่ 1.....	58
รูปที่ 3.16	เปรียบเทียบค่าโม่เมนต์บิดประลัยจากการทดลองและทฤษฎี ของคานากลุ่มที่ 2.....	59
รูปที่ 3.17	เปรียบเทียบค่าโม่เมนต์บิดประลัยจากการทดลองและทฤษฎี ของคานากลุ่มที่ 3.....	60
รูปที่ 3.18	เปรียบเทียบค่าโม่เมนต์บิดประลัยจากการทดลองและทฤษฎี ของคานากลุ่มที่ 4.....	61
รูปที่ 3.19	ลักษณะการแตกหักของคานาคอนกรีตล้วน.....	62
รูปที่ 3.20	วอล์กการแตกร้าวของคานาคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกรัดรอบธรรมดา.....	62

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของสำนักงานส่งเสริมเหล็กปลอกรัดรอบธรรมดา...
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.21 รอยการแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกวัดรอบธรรมดา.....	63
รูปที่ 3.22 รอยการแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเอียง.....	63
รูปที่ 3.23 รอยการแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเกลียว.....	64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาและความสำคัญ

ในบางครั้งชิ้นส่วนโครงสร้างอาคารที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก อาจมีความจำเป็นต้องรับโมเมนต์บิด (Torsion) หรือ มีโมเมนต์บิดเกิดขึ้นพร้อม ๆ กับโมเมนต์ดัด (Bending Moment) และแรงเฉือน (Shear) เช่น คานโค้งในแนวราบ หรือ คานรับจั่วหัวทาสอาคารพร้อมทั้งกันสาดและแผงตั้งปลายกันสาดที่ยื่นออกจากตัวอาคาร หรือบันไดขึ้นจากคานที่ฝังในกำแพง บันไดเวียน เป็นต้น

โดยทั่วไปในการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก มักจะให้ความสำคัญกับโมเมนต์ดัด (Bending Moment) และแรงเฉือน (Shear) มากกว่าโมเมนต์บิด (Torsion) หรือบางกรณีในการออกแบบจะไม่พิจารณาถึงเรื่องโมเมนต์บิดเลย

ในปัจจุบันนี้จะพบว่าในการก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนใหญ่มักจะใช้วิธีการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนและโมเมนต์บิดด้วยเหล็กปลอกรัดรอบขรรคมา (Vertical Stirrups) ซึ่งบางครั้งมีบางชิ้นส่วนของโครงสร้างเกิดแรงเฉือนและโมเมนต์บิด ที่มีค่ามาก ๆ จึงมีความจำเป็นต้องเสริมเหล็กปลอกเป็นจำนวนมาก ทำให้ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกน้อย จึงเกิดอุปสรรคในการทำงานในความเป็นจริงแล้วยังมีวิธีการเสริมเหล็กปลอกอีกหลายวิธี นอกเหนือจากเหล็กปลอกรัดรอบขรรคมาที่นำศึกษา เช่น เหล็กปลอกเอียง (Incline Stirrups) , เหล็กปลอกเกลียว (Spiral Stirrups) , เหล็กปลอกรูปตัวยู (U-Stirrups) เป็นต้น

ในการศึกษารั้งนี้จะทำการศึกษาเฉพาะวิธีการในการเสริมเหล็กปลอกในคานที่รับเฉพาะโมเมนต์บิดบริสุทธิ์ (Pure Torsion) ซึ่งการเสริมเหล็กปลอกรับโมเมนต์บิดเป็นการคำนวณเฉพาะโมเมนต์บิดเพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดยผู้จัดทำเอกสารนี้ขอเรียนการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บิดโดยเหล็กปลอกรูปตัวยูไม่เหมาะสมในการออกแบบ เนื่องจากในชิ้นส่วนคานที่รับโมเมนต์บิดจะเกิดความเค้นเฉือน (Shearing Stresses) กระจายเต็มหน้าตัดคานโดยมีค่าเริ่มจากศูนย์ที่จุดศูนย์กลางของหน้าตัดและค่าความเค้นเฉือนจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนมีค่ามากที่สุดที่ขอบนอกของคานหน้าตัดจึงทำให้การเสริมเหล็กปลอก 3 วิธี คือ เหล็กปลอกรัดรอบธรรมดา (Vertical Stirrups) ,เหล็กปลอกเอียง (Incline Stirrups) และเหล็กปลอกเกลียว (Spiral Stirrups)

1.2 จุดประสงค์และขอบเขตของงาน

เป็นการศึกษาถึงพฤติกรรมของคานคอนกรีตล้วน (Plain Concrete Beams) และคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Beams) เมื่อรับโมเมนต์บิดบริสุทธิ์ (Pure Torsion) สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม โดยในแต่ละกลุ่มจะมีปริมาณเหล็กแกนที่มุมทั้งสิ้นเท่ากันทั้ง 3 กลุ่มตัวอย่าง แต่จะมีวิธีการเสริมเหล็กปลอกที่ต่างกันคือ ปลอกรัดรอบธรรมดา (Vertical Stirrups) ,ปลอกเอียง (Incline Stirrups) และปลอกเกลียว (Spiral Stirrups) โดยจะนำผลของความสามารถในการต้านทานโมเมนต์บิดประลัย (Ultimate Torsional Moments) ทั้งคานคอนกรีตล้วน และคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะการเสริมเหล็กปลอกที่แตกต่างกันไปมาเปรียบเทียบ

1.3 ความเป็นมาและทฤษฎี

1.3.1 ทฤษฎีสำหรับการคำนวณหาความต้านทานโมเมนต์บิดของคานคอนกรีตล้วนหน้าตัดสี่เหลี่ยมมี 2 ทฤษฎี คือ

ทฤษฎีอีลาสติก (Elastic Theory) ซึ่งในปี ค.ศ.1853 Saint-Venant ได้ค้นพบว่า ลักษณะการกระจายความเค้นเฉือนในชิ้นส่วนโครงสร้างหน้าตัดสี่เหลี่ยมทั้งในคานคอนกรีตล้วน (Plain concrete Beams) และคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (Rein-

forced Concrete Beams) ใในการนี้ของชิ้นส่วนคอนกรีตล้วนที่รับโมเมนต์บิดประลัย คานกรัด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ถูกสมมุติให้เป็นเนื้อเดียวกัน และจะพังทลาย (Failure) จะเกิดขึ้นทันทีเมื่อความเค้นเฉือนสูงสุด (The Maximum Shear Stress) มีค่ามากกว่าความต้านทานแรงดึงของคอนกรีต ซึ่งค่าโมเมนต์บิดพังทลายของชิ้นส่วนหน้าตัดสี่เหลี่ยมหาได้จาก

$$T_u = \alpha X^2 Y f_c \quad \dots (1.1)$$

เมื่อ T_u = ความต้านทานโมเมนต์บิดเมื่อคอนกรีตมีพฤติกรรมแบบอีลาสติก

α = สัมประสิทธิ์ของทฤษฎี Saint-Venant ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วน Y/X

X = ความกว้างของหน้าตัด

Y = ความลึกของหน้าตัด

f_c = ความสามารถในการต้านทานแรงดึงของคอนกรีต

จากผลการทดลองโดยเฉลี่ยจะพบว่าความต้านทานโมเมนต์บิดของคอนกรีตจะมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากสมการที่ (1.1) ประมาณ 50 % แสดงว่าทฤษฎีนี้ซึ่งไม่ใช่ทฤษฎีที่จะนำมาใช้ประมาณค่าความต้านทานโมเมนต์บิดของคอนกรีตได้ดีพอ ต่อมาในปี ค.ศ. 1934 Turner และ Davies ได้ตั้งทฤษฎีพลาสติก (Plastic Theory) โดยได้สมมุติว่าคอนกรีตมีพฤติกรรมแบบพลาสติก และได้ทำการปรับปรุงสมการที่ (1.1) โดยอาศัยผังความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ของคอนกรีตที่รับแรงอัดทำให้ได้ค่า

$$T_u = [1.2(4AT_u)]/pX \quad \dots (1.2)$$

เมื่อ T_u = ความต้านทานโมเมนต์บิดพังทลายเมื่อคอนกรีตมีพฤติกรรมแบบพลาสติก
(failure torque base on plastic concept of concrete behavior)

T_u = โมเมนต์พังทลายเมื่อคอนกรีตมีพฤติกรรมแบบอีลาสติก

(failure torque base on plastic concept of concrete behavior)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A = พื้นที่หน้าตัดคาน

p = เส้นรอบรูปของหน้าตัดคาน

X = ความกว้างของหน้าตัดคาน

ต่อมา Turner และ Davies ได้ทำการทดลองศึกษาเพิ่มเติมได้พบว่าสมการที่ (1.2) ยังไม่สมบูรณ์ เขาจึงได้ปรับปรุงสมการใหม่ โดยได้นำตัวคูณปลอดภัย 1.35 คูณสมการ (1.2) จะได้

$$T_p = [1.62(4AT_p)]/pX \quad \dots\dots(1.3)$$

ต่อจากนั้น ได้มีการศึกษาเพิ่มเติมโดยสมมุติว่า คอนกรีตมีคุณสมบัติเป็นแบบพลาสติกที่ไม่มีขอบเขตจำกัด (Infinite Plasticity) ซึ่งเรียกการวิเคราะห์แบบใหม่นี้ว่า "Nadai's Sandheap Analogy" ได้สมการดังนี้ คือ

$$T_p = [1/2 - (1/6)X/Y] X^2 Y f_c \quad \dots\dots(1.4)$$

ทั้ง 3 ทฤษฎีที่กล่าวมานั้นการประมาณค่าความต้านทานโมเมนต์บิดของคอนกรีตก็ยังมีข้อผิดพลาดอยู่ โดยทฤษฎีอีลาสติก (Elastic Theory) จะให้ค่าความต้านทานโมเมนต์บิดของคอนกรีตสำหรับคานหน้าตัดสี่เหลี่ยมต่ำกว่าความเป็นจริงมาก ส่วนทฤษฎีพลาสติกที่จำกัด (Limited Plastic Theory) ก็มีหลายกรณีที่มีการประมาณค่าความต้านทานโมเมนต์บิดเกินความเป็นจริง และทฤษฎี Sand-Heap Analogy ถึงแม้ว่าจะประมาณค่าความต้านทานโมเมนต์บิดได้ดีกว่าสองทฤษฎีแรกแต่ค่าที่ได้ก็ยังไม่ถูกต้องทั้งหมดทีเดียวเนื่องจากตามความเป็นจริงคอนกรีตมีคุณสมบัติเป็นพลาสติกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยเฉพาะเมื่อรับแรงดึงคุณสมบัติความเป็นพลาสติกน้อยมาก

ต่อมาจึงได้ทำการศึกษาทฤษฎีกึ่งพลาสติก (Semi Plastic Theory) เพื่อ

หาความสามารถในการต้านทานโมเมนต์บิดประลัยของคานคอนกรีตล้วนหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ขออนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยได้สมมติให้คอนกรีตเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อคานรับโมเมนต์บิดคานคอนกรีตจะแตกเอียง
ทำมุมประมาณ 45 องศากับแนวแกนสะเทิน ได้ตั้งสมการนี้คือ

$$T_{\text{cup}} = 2Y(X^2+10)(f'_c)^{2/3} \quad \dots\dots(1.5)$$

เมื่อทราบค่าความสามารถในการรับแรงอัดของแท่งทรงกระบอกมาตรฐานของ
คอนกรีต (f'_c) ทำให้ได้ค่า f'_c ดังนี้คือ $f'_c = 5(f'_c)^{1/2}$

แล้วนำค่าที่ได้แทนสมการ (1.5) จะได้

$$T_{\text{cup}} = 6Y(X^2+10)(f'_c)^{1/3} \quad \dots\dots(1.6)$$

และมุมบิดที่ทำให้เกิดการพังทลายหาได้จากสมการ

$$\theta_{\text{cup}} = 0.0038/\beta X (1+10/X^2) \quad \dots\dots(1.7)$$

$$\theta_{\text{cup}} = (28+3.2p_s) \theta_{\text{cup}} \quad \dots\dots(1.8)$$

θ_{cup} = มุมบิดที่ทำให้เกิดการพังทลายของคอนกรีตล้วน (deg/in)

β = ค่าสัมประสิทธิ์จากทฤษฎี Saint-Venant's ขึ้นอยู่กับค่า Y/X

θ_{cup} = มุมบิดที่ทำให้เกิดการพังทลายของคอนกรีตเสริมเหล็ก (deg/in)

p_s = เปอร์เซนต์ปริมาณเหล็กเสริมต่อปริมาณคอนกรีต

ตารางที่ 1.1 แสดงค่า β และ α ตามทฤษฎี Saint Venant's

Y/X	β	α
1.0	0.141	0.208
1.2	0.166	0.219
1.4	0.187	0.227
1.6	0.204	0.234
1.8	0.217	0.240
2.0	0.299	0.246
2.5	0.249	0.258
3.0	0.264	0.267
5.0	0.291	0.292
10.0	0.312	0.312
100.0	0.331	0.331
infinity	0.331	0.333

1.3.2 พฤติกรรมการพังทลายของคานคอนกรีตล้วน

(Failure Behavior of Plain Concrete Beams)

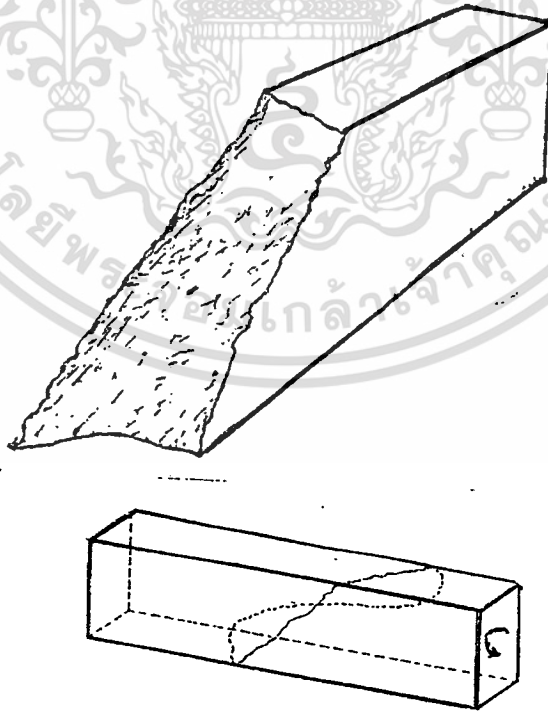
จากการศึกษาในอดีตและการศึกษาของ Saint-Venant พฤติกรรมการพังทลายของคานคอนกรีตล้วนลักษณะการแตกร้าวจะเป็นแบบเกลียว (Spiral Form) แต่หลังจากการศึกษาของ Marshall และ Tembe ได้ทำการศึกษาพบว่าความเชื่อดั้งเดิมที่กล่าวเป็นจริงเพียงบางส่วนเท่านั้น คือการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุมการแตกร้าวที่ผิวด้านล่างจะค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงโดยที่ผิวการแตกร้าวที่ต่อเนื่องจากด้านหลังจะทำมุมประมาณ 45 องศา แล้วค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนทำมุมประมาณ 90 องศา ที่รอยต่อกับผิวการแตกร้าวด้านหน้า

ส่วนการแตกร้าวที่ผิวด้านหน้าจะเอียงทำมุม 45 องศา กับแกนสะเทินเป็นเส้นตรงและที่ผิวด้านบนรอยการแตกร้าวยังรักษารูปแบบการแตกร้าวแบบเกลียว (Spiral Form) อยู่โดยมุมการแตกร้าวบางครั้งก็เกือบเป็นมุมฉาก

และที่ผิวด้านหลังลักษณะการแตกร้าวจะเปลี่ยนแนวจากแบบเกลียว (Spiral Form) ไปในทิศทางตรงข้ามมุมการแตกร้าวจะทำมุม 45 องศา เป็นแนวเส้นตรงไปชนกับรอยการแตกร้าวของผิวด้านล่าง

การพังทลายของคานที่พื้นผิวระนาบเอียงซึ่งทำมุม 45 องศา บริเวณใกล้เคียงของการแตกร้าวที่ผิวด้านหน้าดังรูปที่ 1.1 จะเกิดจากแรงดึง (Tension) ส่วนคอนกรีตบริเวณฝั่งตรงข้ามของระนาบดังกล่าวจะพังทลายเนื่องจากแรงอัด (Compression) ซึ่งบริเวณนี้คอนกรีตจะมีลักษณะขรุขระ จะเห็นได้ว่าลักษณะการพังทลายที่กล่าวมานั้นมีลักษณะเหมือนเกิดการค้ำครอบแกนสะเทินของระนาบเอียง



รูปที่ 1.1 ผิวการพังทลายของคาน A1 หน้าตัด 10x15 นิ้ว ของการทดสอบ

ความต้านทานโมเมนต์บิดที่ห้องทดลอง PCA ในปี ค.ศ. 1962

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.3 พฤติกรรมการนึ่งทลายของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

(Failure Behavior of Reinforced Concrete Beams)

1.3.3.1 พฤติกรรมก่อนการแตกร้าว

(Behavior Before Cracking)

จากการศึกษาพบว่า Cracking Torque (T_{cr}) ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเท่ากับ 1-1.3 เท่าของค่า Cracking Torque (T_{cr}) ของคานคอนกรีตล้วน ซึ่งคำนวณจากสมการที่ 1.5 สำหรับช่วงของแรงกระทำที่ทำให้เกิดโมเมนต์บิดต่ำกว่าค่าความต้านทานโมเมนต์บิดของคานคอนกรีตล้วน (T_{ub}) นั้นความเค้น (Stress) ในเหล็กเสริมยังมีค่าน้อยมาก หรือกล่าวอีกอย่างว่ามีความแข็งแกร่งในการรับโมเมนต์บิด (Torsional Stiffness) และความเคี้ยว (Strains) ของคอนกรีตมีค่าใกล้เคียงกับคานคอนกรีตล้วนของคานนั้น ๆ

เมื่อโมเมนต์บิดที่กระทำ มีค่าเกินกว่าความต้านทานโมเมนต์บิดของคานคอนกรีตล้วน (T_{ub}) ความเค้น (Stress) ในเหล็กเสริมจะเริ่มเพิ่มขึ้น ส่วนความเค้นของคอนกรีตและมุมบิดจะเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด

Cracking Torque

Cracking Torque (T_{cr}) จะสังเกตได้จากเมื่อเริ่มมีรอสร้าวบนผิวคอนกรีตและความเค้นในเหล็กเสริมเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด ซึ่งค่า T_{cr} นี้จะแปรผันตามปริมาณเปอร์เซ็นต์เหล็กเสริมทั้งหมด (Total Volume Percentage of Reinforcement, p_v) ดังสมการ

$$T_{cr} = (1.00 + 0.04p_v) T_{ub} \quad \dots (1.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เมื่อ p_c = ปริมาณเป่ารีไซเคิลที่เสริมทั้งหมด

T_{cr} = ความต้านทานบิดเมื่อเริ่มเกิดฟังกหลายจากสมการที่ 1.6

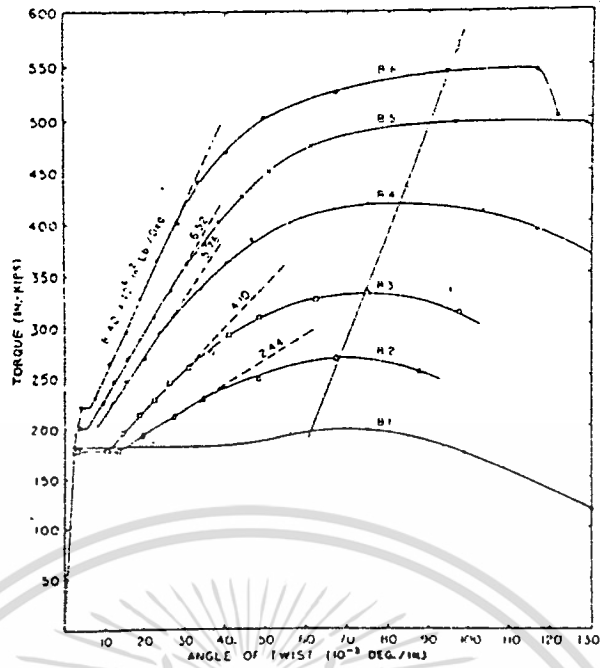
1.3.3.2 พฤติกรรมหลังการแตกร้าว

(Behavior After Cracking)

จากทฤษฎีอีลาสติกของ Saint-Venant สรุปได้ว่าพฤติกรรมก่อนการแตก ร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะเหมือนกับคานคอนกรีตล้วน ต่อมาได้มีผู้ศึกษาและพบว่าทฤษฎีของ Saint-Venant ยังมีข้อบกพร่องอยู่ตัวอย่างเช่น จากเดิมบอกว่าความเค้นในเหล็กแกนที่มุมทั้งสี่ควรจะมีค่าเท่ากับศูนย์ และความเค้นของเหล็กปลอกจะค่อนข้างเปลี่ยนแปลงโดยเริ่มมีค่าเท่ากับศูนย์ที่มุม และเพิ่มขึ้นมากที่สุดที่กึ่งกลางของด้านยาวของหน้าตัดคาน แต่ผลการทดสอบกลับพบว่า ความเค้นจริงจะกระจายแบบสม่ำเสมอไปตามความยาวของเหล็กปลอก และมีค่าความเค้นหลักสูงสุด (The Maximum-Principal Stresses) ที่กึ่งกลางของด้านยาวหน้าตัดคานประมาณ 3 ถึง 4 เท่าของที่คำนวณจากทฤษฎีของ Saint-Venant นอกจากนี้ค่าความเครียดคดอัดหลัก (The Principal Compressive Strains) ก็เกิน 0.004

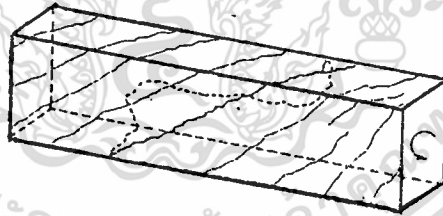
ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าทฤษฎีของ Saint-Venant จะใช้กับคานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังการแตกร้าวไม่ได้เพราะข้อสมมุติพื้นฐานของ Saint-Venant ของการแตก ร้าวได้กำหนดไว้ว่าคอนกรีตมีความต่อเนื่องเป็นเนื้อเดียวกัน

เมื่อคานรับโมเมนต์บิดกระทำจนถึง Cracking Torque (T_{cr}) แล้วมุมบิดของคาน และความเค้นในเหล็กจะเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดในขณะที่โมเมนต์บิดกระทำคงที่ แสดงที่สภาวะนี้คานกำลังปรับสภาวะความสมดุลใหม่ โดยการถ่ายแรงกระทำไปยังเหล็กเสริมจนกระทั่งถึงสภาวะสมดุลสุดท้ายได้ค่าโมเมนต์บิดกระทำที่คงที่ซึ่งหาได้จากรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิด-มุมบิดของคาน B1-B6 ของการทดสอบความต้านทานโมเมนต์บิดที่ห้องทดลอง PCA ในปี ค.ศ.

1962



รูปที่ 1.3 ลักษณะการแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อรับโมเมนต์บิด
ประลัย

จากรูป จะเห็นได้ว่าเมื่อให้โมเมนต์บิดกระทำต่อไปจะพบว่าคานจะสามารถต้านทานโมเมนต์บิดพังทลาย (T_u) ได้เพิ่มขึ้นต่างกันตามแต่ปริมาณเหล็กเสริมและวิธีการเสริมเหล็ก โดยถ้ามีปริมาณเหล็กเสริมมากก็จะทำให้ความสามารถต้านทานโมเมนต์บิดพัง

ทลาย (T_u) ของคานเพิ่มขึ้นกว่าคานที่มีปริมาณเหล็กเสริมน้อยแต่ทั้งนี้และทั้งนั้นถ้ามีการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนเวียนสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาก็เห็นใจเหมือนผู้ดูแลเห็นใจระเบียบขั้นตอนการดำเนินงานไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสริมเหล็กมากเกินไปจนเกินสภาวะสมดุล (Over Reinforcement) ก็ไม่ได้ทำให้คานมีความสามารถต้านทานโมเมนต์บิดพังทลาย (T_u) เพิ่มขึ้น ดังนั้นในการเสริมเหล็กต้านทานโมเมนต์บิดควรจะเสริมแบบต่ำกว่าสภาวะสมดุล (Under Reinforcement) ซึ่งค่าอัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมที่สภาวะสมดุล (The Balanced Reinforcement Ratio, P_b) หาได้จากทฤษฎีการยึดหยุ่น (Flexural Theories)

โดยอัตราส่วนเหล็กเสริมต่อพื้นที่ประสิทธิผลของคอนกรีตซึ่งทำให้เกิดสภาวะสมดุล P_b กำลังประลัย (P_u) ซึ่งมีค่าดังนี้คือ

$$P_b = 0.85\beta_1(f'_c/f_y)[87,000/(87,000+f_y)] \dots (1.10)$$

โดย f'_c = ความต้านทานแรงอัดประลัยของคอนกรีต (psi)

f_y = ความเค้นที่จุดคดงของเหล็กเสริม (psi)

β_1 = ค่าสัมประสิทธิ์ของ Whitney โดยมาตรฐาน ACI ระบุว่า β_1 จะมีค่าเท่ากับ 0.85 เมื่อความต้านทานแรงอัดประลัยของคอนกรีต (f'_c) มีค่า < 4000 psi และ β_1 ลดลงอย่างต่อเนื่องในอัตราส่วน 0.05 สำหรับทุก ๆ ค่าความต้านทานแรงอัดประลัยของคอนกรีต (f'_c) เพิ่มขึ้น 1,000 psi แต่ต้องไม่เกิน 0.65 ซึ่งถ้าดูจากสมการก็จะเห็นความสัมพันธ์ระหว่าง β_1 กับ f'_c ดังนี้คือ

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05[(f'_c - 4,000)/1,000] \dots (1.11)$$

$$\text{และ } 0.65 < \beta_1 < 0.85$$

จะพบว่า ลักษณะที่พฤติกรรมคานมีการเพิ่มมุมบิดไปโดยที่โมเมนต์บิดกระทำยังมีค่าคงที่นั้นแสดงให้เห็นว่าคานมีลักษณะเป็นคานยึดหยุ่น (Flexural Beam) เมื่อการแตก

ร้าวปรากฏขึ้นในคานยึดหยุ่น ค่าความชันของกราฟโมเมนต์บิด-มุมบิด (รูปที่ 1.2) จะลด

ลงทันที และภายหลังสภาวะสมดุลหลังการแตกตัวของความชื้นจะเริ่มเพิ่มขึ้นอีกเป็นเส้นตรง ในช่วงแรกแล้วความชื้นจะเป็นแนวราบ ส่วนในช่วงใกล้จะถึงจุดความต้านทานโมเมนต์ บิดประลัย (T_u) ลักษณะที่กล่าวมาทั้งหมดนี้มีผลเนื่องมาจากการส่งถ่ายแรงกระทำไปยัง เหล็กเสริมคือ เหล็กแกน (Longitudinal Reinforcement) และเหล็กปลอก (Hoop Reinforcement) ซึ่งการพังทลายในส่วนนี้จะขึ้นอยู่กับความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength, f_y) ของเหล็กแกนและเหล็กปลอกโดยเมื่อคานพังทลาย (Failure)

เหล็กแกนจะถึงจุดคลากก่อนเหล็กปลอก เมื่อ $m < m_b$

เหล็กปลอกจะถึงจุดคลากก่อนเหล็กแกน เมื่อ $m > m_b$

เหล็กเสริมทั้งสองจะถึงจุดคลากพร้อมกัน เมื่อ $m = m_b$

$$\text{โดยที่ } m = (A_{s1} \bar{s}) / [A_{sv} (X_1 + Y_1)] \quad \dots (1.12)$$

m = อัตราส่วนปริมาณเหล็กแกนต่อเหล็กปลอก

A_s = พื้นที่หน้าตัดเหล็กแกนทั้งหมด (in^2)

A_{sv} = พื้นที่หน้าตัดเหล็กปลอก 2 ขา (in^2)

1.4 ทฤษฎีการใช้งาน (Theoretical Work)

คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับโมเมนต์บิด ก่อนคานจะแตกตัวของเหล็กที่เสริมจะมี ผลต่อการรับโมเมนต์บิดน้อยมาก แต่ความต้านทานโมเมนต์บิดส่วนใหญ่จะเกิดจากคอนกรีต

ค่าความต้านทานโมเมนต์บิดประลัย (Ultimate Torque) ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดจาก ผลรวมของค่าความต้านทานโมเมนต์บิดประลัยในส่วนของคอนกรีต (T_{uc}) และในส่วนของเหล็กเสริม (T_{us}) จะได้ดังสมการ

ซึ่ง T_{uc} = ความต้านทานโมเมนต์บิดประลัยของคานคองกรีตเสริมเหล็ก

T_{uc} = ความต้านทานโมเมนต์บิดประลัยของคานคองกรีตเสริมเหล็กใน
ส่วนของคองกรีต

T_{uc} = ความต้านทานโมเมนต์บิดประลัยของคานคองกรีตเสริมเหล็กใน
ส่วนของเหล็กเสริม

ในการหาค่าความต้านทานโมเมนต์บิดเนื่องจากคองกรีต จะอาศัยทฤษฎีถึง
พลาสติก (Semi Plastic Theory) โดยได้สมมติให้คองกรีตเป็นเนื้อเดียวกัน จะได้
ดังสมการ

$$T_{uc} = 6Y(X^2 + 10)(f'_c)^{1/3} \dots\dots(1.14)$$

ซึ่ง T_{uc} = ความต้านทานโมเมนต์บิดประลัยเนื่องจากคองกรีตล้วน

X = ความกว้างของหน้าตัด (นิ้ว)

Y = ความลึกของหน้าตัด (นิ้ว)

เมื่อคานคองกรีตเป็นคานคองกรีตเสริมเหล็ก ค่าความต้านทานโมเมนต์บิด
ประลัยของคองกรีต จะมีค่าสูงกว่าค่าความต้านทานโมเมนต์บิดประลัยของคองกรีตล้วนประ
มาณ 1 ถึง 1.3 เท่า ค่าที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากความต้านทานของเหล็กบางส่วน และจะมี
ค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเหล็กที่ใส่เพิ่มจะได้ดังสมการ

$$T_{uc} = T_{cr} = (1 + 0.04p_s) T_{uc} \dots\dots(1.15)$$

ซึ่ง p_s = เปอร์เซนต์ปริมาณเหล็กต่อปริมาณคองกรีต

T_{uc} = ความต้านทานโมเมนต์บิดประลัยเนื่องจากคองกรีตล้วน

T_{uc} = ความต้านทานโมเมนต์บิดประลัยของคานคองกรีตเสริมเหล็กใน

ส่วนของคองกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสมมุติว่าเหล็กเสริมและคอนกรีตเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ในการศึกษาต่อมาของ Tandit (1963) และ Arockiasamy (1964) พบว่าค่าของ T_{uc} ควรเป็นค่าเฉลี่ยระหว่าง T_{uc} ที่ได้จากพื้นที่หน้าตัดคอนกรีตภายในของเหล็กปลอกที่วัดจากจุดศูนย์กลางถึงจุดศูนย์กลางของเหล็กปลอก และ T_{uc} ที่ได้จากพื้นที่หน้าตัดคอนกรีตเต็ม

ในการศึกษา พฤติกรรมการกระจายของหน่วยแรงในคานคอนกรีตสำหรับทฤษฎีของ Saint-Venant ได้พบว่าค่าหน่วยแรงจะมีค่าสูงสุดที่กึ่งกลางของด้านยาวของหน้าตัดคาน และจะมีค่าเป็นศูนย์ที่มุมของคาน แต่การศึกษาต่อมาของ E.Rausch พบว่าทฤษฎีของ Saint-Venant ยังไม่ถูกต้องสำหรับคานคอนกรีตที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (คือเมื่อคานมีการเสริมเหล็ก) โดย E.Rausch ได้เสนอว่าการกระจายของหน่วยแรงจะมีค่าต่ำสุดที่กึ่งกลางของหน้าตัดด้านยาว และจะมีค่าสูงสุดที่มุมของหน้าตัด

แต่ต่อมาในปี ค.ศ.1937 Andersen ได้เสนอว่าการกระจายของหน่วยแรงเมื่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับโมเมนต์บิด หน่วยแรงจะมีลักษณะการกระจายเป็นรูปพาราโบลา (parabolic) ที่หน้าตัดคาน คือ ค่าหน่วยแรงจะมีค่าสูงสุดที่มุมและที่กึ่งกลางด้านยาวของหน้าตัด

และต่อมาในปี ค.ศ.1950 Cowan ได้ใช้สมการพลังงานความเครียดเพื่อช่วยในการศึกษาหาพื้นที่เหล็กปลอกเกลียวสำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยม เมื่อมีโมเมนต์บิดกระทำได้สมการดังนี้

$$a_u = T_{uc}(2)^{1/2} s / [4\alpha_1 f'_v X_1 Y_1] \quad \dots (1.16)$$

ซึ่ง a_u = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอกเกลียว (นิ้ว)

X_1 = ความกว้างหน้าตัดคานภายในเหล็กปลอก (นิ้ว)

Y_1 = ความลึกหน้าตัดคานภายในเหล็กปลอก (นิ้ว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับระหว่างพลเรือน (นิ้ว) นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T_{us} = ความต้านทานโมเมนต์บิดประลัยในส่วนของเหล็กเสริม

α_1 = ค่าที่ได้จากตารางที่ 4.1 ขึ้นอยู่กับอัตราส่วน Y_1/X_1

f'_v = จุดคลากเหล็กปลอก (ปอนด์/นิ้ว)

แต่ในทางปฏิบัติเหล็กปลอกเกลียวไม่นิยมนำมาใช้งาน เพราะมีความยุ่งยากในการปฏิบัติงาน การเสริมเหล็กคานรับโมเมนต์บิดด้วยเหล็กปลอกรัดรอบขรรคมา (Vertical Stirrups) และเหล็กแกน เป็นการเสริมเหล็กที่สะดวกและรวดเร็วกว่าเหล็กปลอกเกลียว ในคานคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อมีโมเมนต์บิดมากกระทำจะเกิดแรงดึงทแยงในเนื้อคอนกรีต โดยเหล็กปลอกและเหล็กแกนจะเป็นตัวต้านทานแรงดึงทแยงที่เกิดขึ้นแต่สำหรับแรงอัดที่เกิดขึ้นจะถูกต้านทานด้วยคอนกรีต จากการศึกษาพบว่า พื้นที่หน้าตัดที่ต้องการสำหรับเหล็กปลอกที่เสริมรับโมเมนต์บิดได้ดังสมการ

$$a_{sv} = a_v (2)^{1/2} = T_{us} s / [2\alpha_1 f'_v X_1 Y_1] \dots (1.17)$$

ค่าแรงเฉือนทแยงที่เกิดขึ้นในหน้าตัดจะกระทำกับเหล็กปลอกบนพื้นที่หน้าตัด 2 ขา จะได้สมการดังนี้

$$A_{sv} = 2a_{sv} = T_{us} s / [\alpha_1 f'_v X_1 Y_1] \dots (1.18)$$

ค่า α_1 จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ Y_1/X_1 แสดงในตาราง 4.1

A_{sv} = พื้นที่หน้าตัด 2 ขาของเหล็กปลอกรัดรอบขรรคมา (นิ้ว)

s = ระยะห่างระหว่างปลอก (นิ้ว)

X_1 = ความกว้างหน้าตัดคานภายในเหล็กปลอก (นิ้ว)

Y_1 = ความลึกหน้าตัดคานภายในเหล็กปลอก (นิ้ว)

f'_v = จุดคลากเหล็กปลอก (ปอนด์/ตารางนิ้ว)

T_{us} = ความต้านทานโมเมนต์บิดประลัยเนื่องจากเหล็กเสริม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อมาในปี ค.ศ.1968 จากการทดลองของ PCA และทฤษฎี Skew-Bending ได้พิสูจน์ให้เห็นว่า ค่าความต้านทานโมเมนต์บิดประลัยในส่วนของเหล็กเสริมตามทฤษฎี Rausch และ Cowan เกิดจากทั้งเหล็กแกนและเหล็กปลอก โดยเหล็กแกนจะมีผลน้อยมาก คือจะมีผลต่อค่า α_1 แต่ทั้งนี้และทั้งนั้นเหล็กแกนก็ยังคงมีความจำเป็นต้องเสริมเข้าไปเพื่อยึดเหล็กปลอก ดังนั้นปริมาณเหล็กแกนน้อยที่สุดที่ต้องเสริมในคานรับโมเมนต์บิดคือ

$$A_{s1} = A_{sv} [(X_1 + Y_1) / s] \quad \dots (1.19)$$

ซึ่ง A_{s1} = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กแกนทั้งหมด (นิ้ว²)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

โปรแกรมการทดลอง

2.1 ตัวอย่างคานทดสอบ

2.1.1 ลักษณะทั่วไป

คานตัวอย่าง 20 คาน โดยแต่ละคานมีขนาด 6x6x36 นิ้ว (15x15x90 ซม.) ถูกทดสอบโดยโมเมนต์บิดบริสุทธิ์ (Pure Torsion) คานตัวอย่างเป็นคานคอนกรีตล้วน (Plain Concrete) 5 คาน และอีก 15 คาน เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมทั้งเหล็กแกนที่มุมทั้งสี่ และเหล็กปลอกชนิดต่างๆ 3 ชนิด คือ ปลอกรัดรอบธรรมดา (Vertical Stirrups) , ปลอกเอียง (Incline Stirrups) และปลอกเกลียว (Spiral Stirrups) โดยได้แบ่งคานตัวอย่างทั้งหมดออกเป็น 4 กลุ่ม และคอนกรีตที่ใช้หล่อคานตัวอย่างมาจากการผสมครั้งเดียวกัน

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องคือ ความแข็งแรงของคอนกรีต (Concrete Strength) และปริมาณเปอร์เซ็นต์ของเหล็กแกนและเหล็กปลอก

2.1.2 วัสดุ

เหล็กเสริมที่ใช้เป็นเหล็กแกนเป็นเหล็กข้ออ้อย (Deformed Bar) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/2 นิ้ว (No.4 ϕ 12 mm.) และเหล็กปลอกเป็นเหล็กเส้นกลม (Round Bar) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/4 นิ้ว (No.2 ϕ 6 mm.) เหล็กที่ใช้ผลิตโดยบริษัทกรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด ซึ่งมีความยาวเส้นละ 10 เมตร ตัวอย่างการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ของเหล็กแต่ละขนาดจะมีขนาดละ 3 ตัวอย่าง โดยตัดจากเหล็กที่ไม่ใช่เส้นเดียวกันค่าในการทดสอบแสดงในลักษณะของฝั่งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain) ดังแสดงในตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอนกรีตที่ใช้เป็นคอนกรีตผสมเสร็จที่ผลิตโดย บริษัท กาญจนาคอนกรีต จำกัด ซึ่งมีค่าการยุบตัวของคอนกรีต (Slump) เท่ากับ 3.86 นิ้ว (9.8 ซม.) ค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงอัดของคอนกรีต (Compressive Strength, f'_c) ในแท่งทรงกระบอกมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 4,584.51 psi (323 ksc) ถึง 4,683.86 psi (330 ksc) และในการคำนวณค่าความต้านทานแรงอัดของคอนกรีตในแต่ละกลุ่มคาน หาได้จากค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานแรงอัดของคอนกรีตในแท่งทรงกระบอกมาตรฐาน 3 แท่ง ซึ่งผลการทดสอบสำหรับแต่ละกลุ่มคานแสดงในตารางที่ 2.2

2.1.3 รายละเอียดของคานตัวอย่าง

ตัวอย่างที่ใช้ทดลองเป็นคานคอนกรีตล้วน และคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งมีหน้าตัดขนาด 6x6 นิ้ว (15x15 ซม.) และยาว 36 นิ้ว (90 ซม.) ในคานคอนกรีตเสริมเหล็กประกอบด้วยเหล็กแกนใกล้ ๆ มุมทั้งสี่ และเหล็กปลอกแบบต่าง ๆ (เหล็กปลอกรัดรอบขั้วคาน เหล็กปลอกเอียง และเหล็กปลอกเกลียว) ที่ปลายเหล็กแกนจะไม่งอและที่ระยะห่างจากปลายของเหล็กแกนทั้งสองข้าง 6 นิ้ว (15 ซม.) ในช่วงระยะดังกล่าวจะเสริมเหล็กปลอกให้ เพื่อป้องกันการแตกร้าว (ตำแหน่งยึดคานกับเครื่องทดสอบ) ที่เกิดจากโมเมนต์บิดและแรงอัดเนื่องจากเครื่องทดสอบ ตัวอย่างคานทดสอบจะแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม แต่ละกลุ่มมี 5 คาน ดังนี้

กลุ่มที่ 1 คานคอนกรีตล้วน 5 คาน

กลุ่มที่ 2 คานคอนกรีตเสริมเหล็กแกน และเหล็กปลอกรัดรอบขั้วคานโดยให้แต่ละคานมีระยะห่างระหว่างปลอกเท่ากับ 1.57, 1.97, 2.36, 2.76 และ 2.95 นิ้ว (4, 5, 6, 7 และ 7.5 ซม.) ตามลำดับ

กลุ่มที่ 3 คานคอนกรีตเสริมเหล็กแกน และเหล็กปลอกเอียงโดยให้แต่ละคานมีระยะห่างระหว่างปลอกเท่ากับ 1.57, 1.97, 2.36, 2.76 และ 2.95 นิ้ว (4, 5, 6, 7 และ 7.5 ซม.) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลุ่มที่ 4 คานคอนกรีตเสริมเหล็กแกนและเหล็กปลอกเกลียวโดยให้แต่ละคาน มีระยะห่างระหว่างปลอกเท่ากับ 1.57, 1.97, 2.36, 2.76 และ 2.95 นิ้ว (4,5,6 ,7 และ 7.5 ซม.) ตามลำดับ

รายละเอียดต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.3 และ 2.4 โดยคอนกรีตที่ใช้จะผสม ในครั้งเดียวกัน ซึ่งในกลุ่มคานแต่ละกลุ่มจะเก็บแท่งตัวอย่างคอนกรีตมาตรฐานรูปทรงกระบอกไว้ทดสอบกำลังรับแรงอัด 3 แท่ง ต่อ 1 กลุ่ม

กลุ่มคาน	f_c psi.(ksc)	f_c (Average) psi.(ksc)
กลุ่มที่ 1	4541.93.(320)	4598.70.(324)
	4641.28.(327)	
	4612.89.(325)	
กลุ่มที่ 2	4527.73.(319)	4584.51.(323)
	4627.08.(326)	
	4598.70.(324)	
กลุ่มที่ 3	4556.12.(321)	4641.28.(327)
	4683.86.(330)	
	4683.86.(330)	
กลุ่มที่ 4	4556.12.(321)	4683.86.(330)
	4669.67.(329)	
	4825.79.(340)	

ตารางที่ 2.1 ค่าความต้านทานแรงอัดของแท่งคอนกรีตมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีสืบค้นของแต่ละกลุ่ม (f'_c) นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Spec. No.	Type & Dia. of Steel		Grade of Steel	Length (m.)	Weight (kg.)	Error of Weight (%)	Dia. (mm.)	Error Dia. (mm.)	Cross Section Area (sq.cm.)	* Load		Tensile Stress		Elongation		
	D.B	R.B								Yield (kg.)	Ultimate (kg.)	Yield (kg.)	Ultimate (Kg.)	Length (cm.)	(cm.)	(%)
1		6	SR24	0.841	0.175	-6	5.90	-0.10	0.273	840	1110	3077	4066	3.00	1.20	40.00
2		6	SR24	0.840	0.170	-9	5.85	-0.15	0.269	825	1005	3069	3739	3.00	1.30	43.33
3		6	SR24	0.839	0.169	-9	5.85	-0.15	0.269	825	1080	3067	4018	3.00	1.30	43.33
4	12		SD30	0.839	0.723	-3	11.8	-0.18	1.098	3345	4665	3046	4250	6.00	2.30	38.33
5	12		SD30	0.840	0.723	-3	11.8	-0.19	1.096	3330	4680	3038	4268	6.00	2.40	40.00
6	12		SD30	0.840	0.712	-5	11.7	-0.28	1.080	3300	4690	3056	4344	6.00	2.30	38.33

ตารางที่ 2.2 การทดสอบความต้านทานแรงดึงของเหล็กเสริม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข	การเสริมเหล็กปลาย			การเสริมเหล็กแกน			f'c (psi)	pt (%)
	รายละเอียด	p' (%)	f'y (psi)	รายละเอียด	p (%)	f'y (psi)		
B1-1	Plain	-	-	Plain	-	-	4589.70	-
B1-2	Plain	-	-	Plain	-	-	4589.70	-
B1-3	Plain	-	-	Plain	-	-	4589.70	-
B1-4	Plain	-	-	Plain	-	-	4589.70	-
B1-5	Plain	-	-	Plain	-	-	4589.70	-
B2-1	No.2 Vertical @ 1.57" c/c	1.245	43587.89	4-No.4 Corner Bars	1.880	43245.40	4641.28	3.125
B2-2	No.2 Vertical @ 1.97" c/c	0.996	43587.89	4-No.4 Corner Bars	1.880	43245.40	4641.28	2.876
B2-3	No.2 Vertical @ 2.36" c/c	0.829	43587.89	4-No.4 Corner Bars	1.880	43245.40	4641.28	2.709
B2-4	No.2 Vertical @ 2.76" c/c	0.708	43587.89	4-No.4 Corner Bars	1.880	43245.40	4641.28	2.588
B2-5	No.2 Vertical @ 2.95" c/c	0.663	43587.89	4-No.4 Corner Bars	1.880	43245.40	4641.28	2.543

ตารางที่ 2.3 รายละเอียดของคานกลุ่มที่ 1 และ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข คาน	การเสริมเหล็กปลอก			การเสริมเหล็กแกน			f'c (psi)	pt (%)
	รายละเอียด	p' (%)	f' y (psi)	รายละเอียด	p (%)	f y (psi)		
B3-1	No.2 Incline @ 1.57" c/c	1.503	43587.89	4-No.4 Corner Bars	1.880	43245.40	4584.51	3.383
B3-2	No.2 Incline @ 1.97" c/c	1.198	43587.89	4-No.4 Corner Bars	1.880	43245.40	4584.51	3.078
B3-3	No.2 Incline @ 2.36" c/c	1.000	43587.89	4-No.4 Corner Bars	1.880	43245.40	4584.51	2.880
B3-4	No.2 Incline @ 2.76" c/c	0.855	43587.89	4-No.4 Corner Bars	1.880	43245.40	4584.51	2.735
B3-5	No.2 Incline @ 2.95" c/c	0.800	43587.89	4-No.4 Corner Bars	1.880	43245.40	4584.51	2.680
B4-1	No.2 Spiral @ 1.57" c/c	1.503	43587.89	4-No.4 Corner Bars	1.880	43245.40	4683.86	3.383
B4-2	No.2 Spiral @ 1.97" c/c	1.198	43587.89	4-No.4 Corner Bars	1.880	43245.40	4683.86	3.078
B3-3	No.2 Spiral @ 2.36" c/c	1.000	43587.89	4-No.4 Corner Bars	1.880	43245.40	4683.86	2.880
B4-4	No.2 Spiral @ 2.76" c/c	0.855	43587.89	4-No.4 Corner Bars	1.880	43245.40	4683.86	2.735
B4-5	No.2 Spiral @ 2.95" c/c	0.800	43587.89	4-No.4 Corner Bars	1.880	43245.40	4683.86	2.680

ตารางที่ 2.4 รายละเอียดของคานกลุ่มที่ 3 และ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 ขั้นตอนการหล่อคานตัวอย่าง

เริ่มต้นจากการประกอบแบบหล่อซึ่งทำด้วยไม้ แล้วทำการบุผิวด้านในแบบหล่อด้วยพลาสติก ต่อจากนั้นก็นำเหล็กเสริมที่ได้เตรียมไว้แล้วมาวางในแบบหล่อ โดยใช้ลูกปูนหนุนเหล็กเสริมให้มีระยะหุ้มคอนกรีตตามค่าต้องการ จากนั้นนำคอนกรีตซึ่งเป็นคอนกรีตผสมเสร็จมาเทลงในแบบหล่อ และกระทุ้งให้เนื้อคอนกรีตสม่ำเสมอแล้วตกแต่งผิวหน้าให้เรียบทั้งใว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบ จากนั้นนำแท่งคานตัวอย่างและแท่งตัวอย่างทรงกระบอกมาตรฐานที่ใช้ทดสอบความต้านทานแรงอัดของคอนกรีตไปบ่มในบ่อน้ำจนได้อายุคอนกรีต 28 วัน

2.1.5 หลักการออกแบบคานตัวอย่าง

1. อัตราส่วนการสมดุลของเหล็กเสริม (Balanced Steel Ratio)

อัตราส่วนเหล็กเสริมต่อพื้นที่ประสิทธิผลของคอนกรีต ซึ่งทำให้เกิดสภาวะสมดุลกำลังประลัย (P_b) หาได้จากสูตร

$$P_b = 0.85\beta_1 (f'_c / f_y) [87,000 / (87,000 + f_y)] \dots (1.10)$$

จากข้อกำหนดมาตรฐาน ACI ให้ใส่เหล็กไม่มากกว่า 75% ของจำนวนที่ต้องการ ดังนั้น

$$P_{max} < 0.75 P_b$$

ซึ่งการเสริมเหล็กลักษณะนี้ จะเป็นการเสริมเหล็กต่ำกว่าสมดุลย์ (Under Reinforcement)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. จากข้อ 1 ถ้า $P < P_{max}$ จะเป็นจุดที่ทำให้เหล็กเสริมถึงจุดคลาก (Yield Point) จุดแตกหักคอนกรีต ณ จุดนี้เราจะทราบค่าอัตราส่วนปริมาตรเหล็กแกนต่อเหล็กปลอกที่จุดสมดุล (m_b)

3. ค่าอัตราส่วนปริมาตรเหล็กแกนต่อเหล็กปลอกที่จุดสมดุล (m_b) ค่านี้จะใช้เป็นตัววัดการถึงจุดคลาก (Yield Point) ของเหล็กแกนหรือเหล็กปลอกโดยถ้า

$m < m_b$ จะทำให้เหล็กแกนถึงจุดคลากก่อนเหล็กปลอก

$m > m_b$ จะทำให้เหล็กปลอกถึงจุดคลากก่อนเหล็กแกน

$m = m_b$ จะทำให้เหล็กแกนและเหล็กปลอกถึงจุดคลากพร้อมกัน

ตัวอย่างการคำนวณของค่านกลุ่มที่ 2

1. หาค่าอัตราส่วนเหล็กเสริม ต่อพื้นที่ประสิทธิผลของคอนกรีต ซึ่งทำให้เกิดสภาวะสมดุล ณ กำลังประลัย (P_b) จาก

$$\text{เหล็กแกน No.4 } (\phi 12 \text{ มม.}) f_y = 43,245.40 \text{ psi } (3,046.84 \text{ ksc})$$

$$\text{เหล็กปลอก No.2 } (\phi 6 \text{ มม.}) f_y = 43,587.89 \text{ psi } (3,070.97 \text{ ksc})$$

$$\text{คอนกรีต } f'_c = 4,641.28 \text{ psi } (327.00 \text{ ksc})$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05 [(f'_c - 4,000) / 1,000]$$

$$= 0.85 - 0.05 [(4,641.28 - 4,000) / 1,000]$$

$$= 0.82$$

$$P_b = 0.85 \beta_1 (f'_c / f_y) [87,000 / (87,000 + f_y)]$$

$$= 0.85 \times 0.82 \times 4,641.28 \times 87,000$$

$$= \frac{\quad}{\quad}$$

$$43,245.40 (87,000 + 43,245.40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 P_{max} &< 0.75 P_b \\
 &< 0.75 \times 0.05 \\
 &< 0.038
 \end{aligned}$$

จากข้อกำหนด ACI ค่า P ไม่ควรเกิน 0.038 จะทำให้ทราบค่าปริมาณเหล็ก
 ปลอกที่จะใส่ในคานมากที่สุด

$$\begin{aligned}
 P_{max} &= [A_s/XY] + [V_u/XYL] \\
 0.038 &= [0.677/(6 \times 6)] + [V_u/(6 \times 6 \times 24)] \\
 V_u &= 16.584 \text{ in}^3
 \end{aligned}$$

จากค่าปริมาณเหล็กปลอกที่ได้ ทำให้ทราบค่าความยาวของเหล็กปลอกทั้งหมด
 (L_v) มากที่สุด

$$\begin{aligned}
 V_u &= A_v L_v \\
 16.584 &= 0.042 \times L_v \\
 L_v &= 16.584/0.042 \\
 &= 394.86 \text{ in.}
 \end{aligned}$$

จากค่าความยาวเหล็กปลอกมากที่สุด นำมาหาจำนวนเหล็กปลอกที่จะเสริมใน
 คานมากที่สุดโดย ในปลอกรัตรอบธรรมดา 1 ปลอกจะมีความยาว = $4.2 \times 4 = 16.8 \text{ in}$
 จำนวนเหล็กปลอกที่ต้องใช้มากที่สุด = $394.86/16.8$
 = 23.5 ปลอก

ดังนั้นระยะห่างเหล็กปลอกน้อยที่สุดที่ทำให้การเสริมเหล็กต่ำกว่าสมดุล
 (Under Reinforcement) มีค่า = $24/23.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในการเสริมเหล็กปลอกรัศรอบธรรมดา จะทำให้เหล็กปลอกถึงจุด
คลากก่อนเหล็กแกน ค่า μ จะต้องมากกว่า μ_b ซึ่ง

$$\begin{aligned}\mu_b &= 16.248/16.584 \\ &= 0.98\end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นคานตัวอย่างกลุ่มที่ 2 กำหนดให้ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกรัศ
รอบธรรมดาเป็น 1.57, 1.97, 2.36, 2.76 และ 2.95 นิ้ว ตามลำดับ (4,5,6,7
และ 7.5 ซม. ตามลำดับ) ซึ่งมีค่า μ มากกว่า μ_b

ตัวอย่างการคำนวณของคานกลุ่มที่ 3

1. หาค่าอัตราส่วนเหล็กเสริม ต่อพื้นที่ประสิทธิผลของคอนกรีต ซึ่งทำให้เกิด
สภาวะสมดุล ณ กำลังประลัย (P_b) จาก

$$\text{เหล็กแกน No.4 } (\phi 12 \text{ มม.}) \quad f'_v = 43,245.40 \text{ psi } (3,046.84 \text{ ksc})$$

$$\text{เหล็กปลอก No.2 } (\phi 6 \text{ มม.}) \quad f'_v = 43,587.89 \text{ psi } (3,070.97 \text{ ksc})$$

$$\text{คอนกรีต} \quad f'_c = 4,584.51 \text{ psi } (323.00 \text{ ksc})$$

$$\begin{aligned}\beta_1 &= 0.85 - 0.05 [(f'_c - 4,000)/1,000] \\ &= 0.85 - 0.05 [(4,584.51 - 4,000)/1,000] \\ &= 0.82\end{aligned}$$

$$P_b = 0.85\beta_1 (f'_c / f'_v) [87,000 / (87,000 + f'_v)]$$

$$= 0.85 \times 0.82 \times 4,584.51 \times 87,000$$

$$= \frac{33,584,510}{43,245.40 (87,000 + 43,245.40)}$$

$$= 0.049$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 P_{max} &< 0.75 P_b \\
 &< 0.75 \times 0.049 \\
 &< 0.036
 \end{aligned}$$

จากข้อกำหนด ACI ค่า P ไม่ควรเกิน 0.036 จะทำให้ทราบค่าปริมาณเหล็ก
 ปลอกที่จะใส่ในคานมากที่สุด

$$\begin{aligned}
 P_{max} &= [A_s/XY] + [V_u/XYL] \\
 0.038 &= [0.677/(6 \times 6)] + [V_u/(6 \times 6 \times 24)]
 \end{aligned}$$

$$V_u = 14.856 \text{ in}^3$$

จากค่าปริมาณเหล็กปลอกที่ได้ ทำให้ทราบค่าความยาวของเหล็กปลอกทั้งหมด
 (L_v) มากที่สุด

$$\begin{aligned}
 V_u &= A_v L_v \\
 14.856 &= 0.042 \times L_v \\
 L_v &= 14.856/0.042 \\
 &= 353.71 \text{ in.}
 \end{aligned}$$

จากค่าความยาวเหล็กปลอกมากที่สุด นำมาหาจำนวนเหล็กปลอกที่จะเสริมใน
 คานมากที่สุดโดยในปลอกเอียง 1 ปลอกจะมีความยาว = $(5.94 \times 2) + (4.2 \times 2)$
 $= 20.28 \text{ in.}$

$$\begin{aligned}
 \text{จำนวนเหล็กปลอกที่ต้องใช้มากที่สุด} &= 353.71/20.28 \\
 &= 17.44 \text{ ปลอก}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นระยะห่างเหล็กปลอกน้อยที่สุดที่ทำให้การเสริมเหล็กต่ำกว่าสมดุล (Under
 Reinforcement) มีค่า = $24/17.44$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในการเสริมเหล็กปลอกเอียง ซึ่งจะทำให้เหล็กปลอกถึงจุดคลากก่อน เหล็กแกน ค่า m จะต้องมากกว่า m_b ซึ่ง

$$m_b = 16.248/14.856 \\ = 1.09$$

เพราะฉะนั้นคานตัวอย่างกลุ่มที่ 3 กำหนดให้ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกเอียงเป็น 1.57, 1.97, 2.36, 2.76 และ 2.95 นิ้ว ตามลำดับ (4,5,6,7 และ 7.5 ซม. ตามลำดับ) ซึ่งมีค่า m มากกว่า m_b

ตัวอย่างการคำนวณของคานกลุ่มที่ 4

1. หาค่าอัตราส่วนเหล็กเสริมต่อพื้นที่ประสิทธิผลของคอนกรีต ซึ่งทำให้เกิดสภาวะสมดุล ณ กำลังประลัย (P_b) จาก

$$\text{เหล็กแกน No.4 } (\phi 12 \text{ mm.}) f_y = 43,245.40 \text{ psi } (3,046.84 \text{ ksc})$$

$$\text{เหล็กปลอก No.2 } (\phi 6 \text{ mm.}) f_y = 43,587.89 \text{ psi } (3,070.97 \text{ ksc})$$

$$\text{คอนกรีต } f_c = 4,683.86 \text{ psi } (330.00 \text{ ksc})$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05 [(f_c' - 4,000)/1,000]$$

$$= 0.85 - 0.05 [(4,682.86 - 4,000)/1,000]$$

$$= 0.82$$

$$P_b = 0.85 \beta_1 (f_c' / f_y) [87,000 / (87,000 + f_y)]$$

$$0.85 \times 0.82 \times 4,641.28 \times 87,000$$

$$= \frac{\quad}{\quad}$$

$$43,245.40 (87,000 + 43,245.40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 P_{max} &< 0.75 P_b \\
 &< 0.75 \times 0.05 \\
 &< 0.038
 \end{aligned}$$

จากข้อกำหนด ACI ค่า P ไม่ควรเกิน 0.038 จะทำให้ทราบค่าปริมาตรเหล็ก
 ปลอกที่จะใส่ในคานมากที่สุด

$$\begin{aligned}
 P_{max} &= [A_v/XY] + [V_u/XYL] \\
 0.038 &= [0.677/(6 \times 6)] + [V_u/(6 \times 6 \times 24)] \\
 V_u &= 16.584 \text{ in}^3
 \end{aligned}$$

จากค่าปริมาตรเหล็กปลอกที่ได้ ทำให้ทราบค่าความยาวของเหล็กปลอกทั้งหมด
 (L_v) มากที่สุด

$$\begin{aligned}
 V_u &= A_v L_v \\
 16.584 &= 0.042 \times L_v \\
 L_v &= 16.584/0.042 \\
 &= 394.86 \text{ in.}
 \end{aligned}$$

จากค่าความยาวเหล็กปลอกมากที่สุด นำมาหาจำนวนเหล็กปลอกที่จะเสริมใน
 คานมากที่สุดโดย ในปลอกเกลียว 1 ปลอก จะมีความยาวประมาณ 20.28 in

$$\begin{aligned}
 \text{จำนวนเหล็กปลอกที่ต้องใช้มากที่สุด} &= 394.86/20.28 \\
 &= 19.47 \text{ รอบ}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นระยะห่างเหล็กปลอกน้อยที่สุดที่ทำให้การเสริมเหล็กต่ำกว่าสมดุล (Under
 Reinforcement) มีค่า = $24/19.47$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ = 1.23 in. การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในการเสริมเหล็กปลอกเกลียว ซึ่งจะทำให้เหล็กปลอกถึงจุดคานาก่อนเหล็กแกน ค่า η จะต้องมากกว่า η_b ซึ่ง

$$\begin{aligned}\eta_b &= 16.248/16.584 \\ &= 0.98\end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นคานตัวอย่างกลุ่มที่ 4 กำหนดให้ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกเกลียวเป็น 1.57, 1.97, 2.36, 2.76 และ 2.95 นิ้ว ตามลำดับ (4, 5, 6, 7 และ 7.5 ซม. ตามลำดับ) ซึ่งมีค่า η มากกว่า η_b

2.2 เครื่องมือทดสอบโมเมนต์บิด

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบโมเมนต์บิดนี้ ได้ออกแบบไว้ให้สามารถรับโมเมนต์บิดได้สูงสุด 300 kip-in (3,463.64 kg-m) มีส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ เป็นส่วนที่ยึดแน่น (Fix Position) และส่วนที่ให้แรงกระทำ (load applying part)

ส่วนที่ให้แรงกระทำ ประกอบไปด้วยส่วนยึดจับคานซึ่งต่อเข้ากับเพลากลมในตำแหน่งที่รองรับเพลากลมจะมีลูกปืนช่วยลดความเสียดทานดังแสดงในรูป 2.2 และ 2.6 แขนยื่นที่ต่อเชื่อมเข้ากับเพลากลมที่จะให้แรงกระทำ ทำมาจากเหล็กรูปพรรณหน้าตัดรูปตัวไอ การเพิ่มโมเมนต์บิดกระทำโดยการเพิ่มแรงด้วยไฮดรอลิกแจ็ก ที่ปลายแขนยื่นแล้วจะส่งผ่านแรงไปยังปลายเพลาก็มีแผ่นเหล็กวงกลมซึ่งยึดติดกับตัวยึดปลายคานด้วยนอต ราชละเอียดยของตัวยึดปลายคานที่ปลายคานตัวอย่างทั้งสองด้านได้แสดงดังรูปที่ 2.10

ฐานของเครื่องมือทดสอบแรงบิดทั้งในส่วนยึดแน่น และส่วนที่ให้แรงกระทำจะเจาะรูไว้สำหรับใส่เนื้อตัวยึดกับพื้นเพื่อจะได้ทำให้สามารถปรับเลื่อนเครื่องมือได้ตามความยาวของคานตัวอย่างที่เปลี่ยนไป

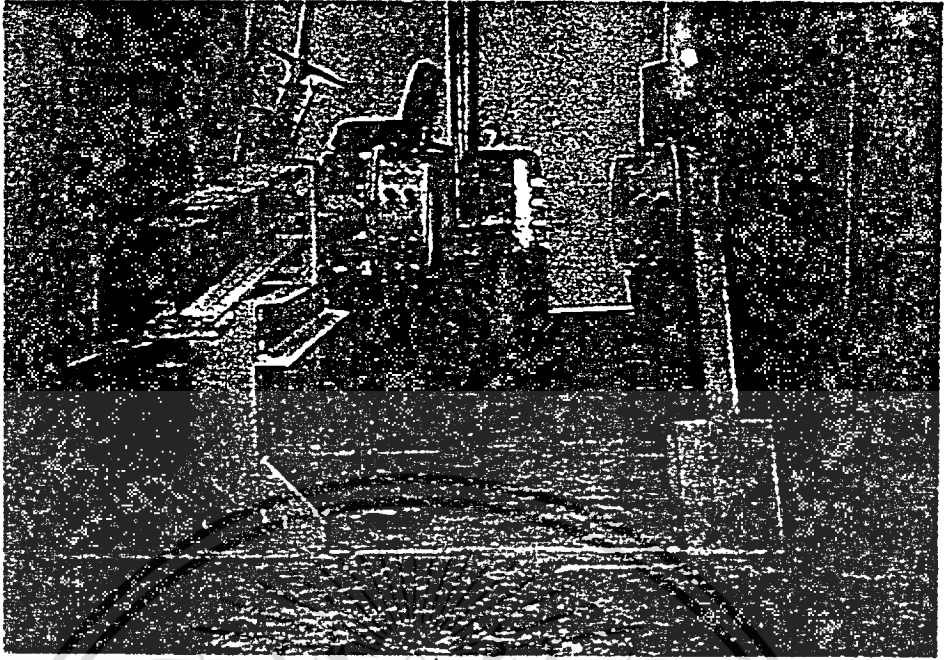
นอกจากนี้ เครื่องมือนี้ยังใช้กับการทดสอบชิ้นส่วนที่รับโมเมนต์บิดบริสุทธิ์ในคาน และพื้นที่ทดสอบตัวอย่างที่รับการตัดกับโมเมนต์บิดผสม หรือตัวอย่างที่รับแรงเฉือนกับโมเมนต์บิดผสมได้อีกด้วย

การเพิ่มโมเมนต์บิดในคาน ด้วยแรงในแนวตั้งจากไฮดรอลิกแจ๊คที่สามารถเพิ่มแรงได้ถึง 5,000 lb (2,272.73 kg) ระยะในแนวราบจากไฮดรอลิกแจ๊คไปยังจุดศูนย์กลางการหมุนของเพล่าจะมีการอ่านค่าไว้ในแต่ละค่าของแรงที่กระทำ

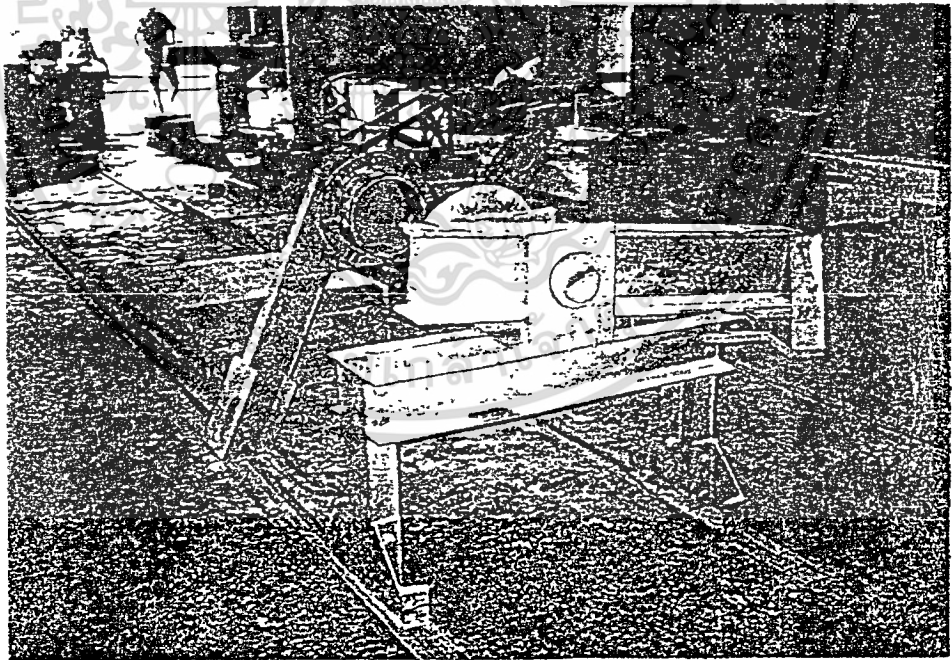
ดังนั้น โมเมนต์บิดที่กระทำมีค่าเท่ากับผลคูณของแรงจากไฮดรอลิกแจ๊คกับระยะในแนวราบของแขนยื่นถึงเพล่าจะเห็นว่าไฮดรอลิกแจ๊คตั้งอยู่แผ่นเหล็กที่มีล้อเลื่อน ส่วนช่วงต่อระหว่าง Load Capsule กับปลายแขนยื่นจะมีแผ่นเหล็กอยู่บนลูกเหล็กทรงกลม

2.3 ขบวนการทดสอบ

ทุกคานตัวอย่างจะถูกทดสอบด้วยโมเมนต์บิดบริสุทธิ์ที่อายุ 28 วัน ขบวนการทดสอบเริ่มจากการติดตั้งคานตัวอย่างให้อยู่ใน grip boxes ทั้ง 2 ปลาย ค่าโมเมนต์บิดจะอ่านได้จากแรงเนื่องจากไฮดรอลิกแจ๊คคูณด้วยระยะในแนวราบของแขนยื่น (วัดถึงศูนย์กลางคาน) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 30 นิ้ว (76.2 ซม.) ส่วนค่ามุมบิดที่เปลี่ยนไปนั้นก็อ่านได้จาก dial gages แรงกระทำเนื่องจากไฮดรอลิกแจ๊คจะให้แรงค่อส ๆ เพิ่มครั้งละ 22 lb (10 kg) อย่างต่อเนื่องจนกระทั่งคานเกิดการพังทลาย



รูปที่ 2.1 เครื่องมือทดสอบโม่เมนต์บิด

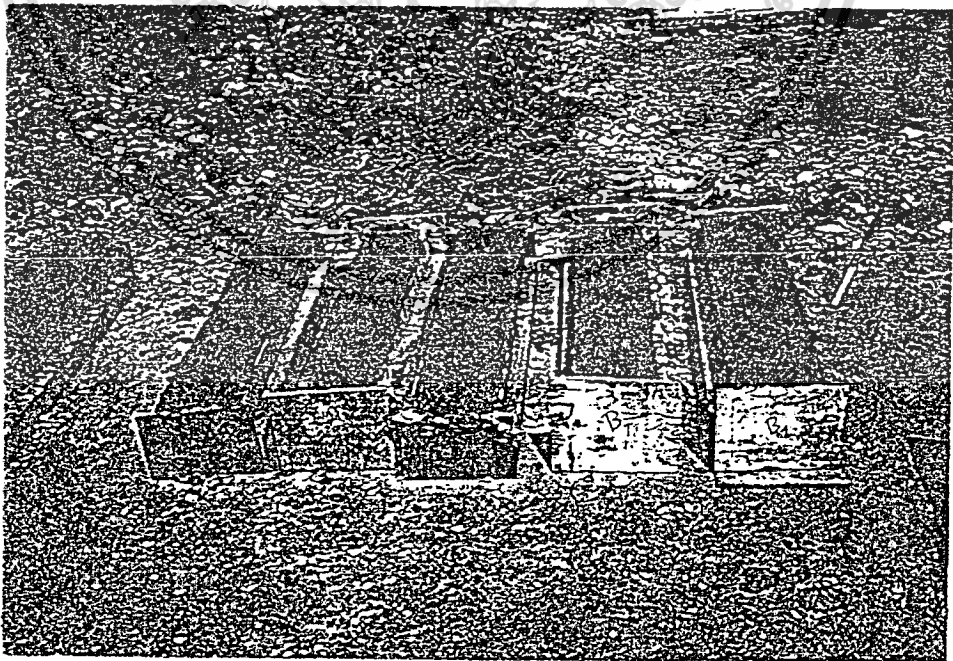


รูปที่ 2.2 เครื่องมือทดสอบโม่เมนต์บิด

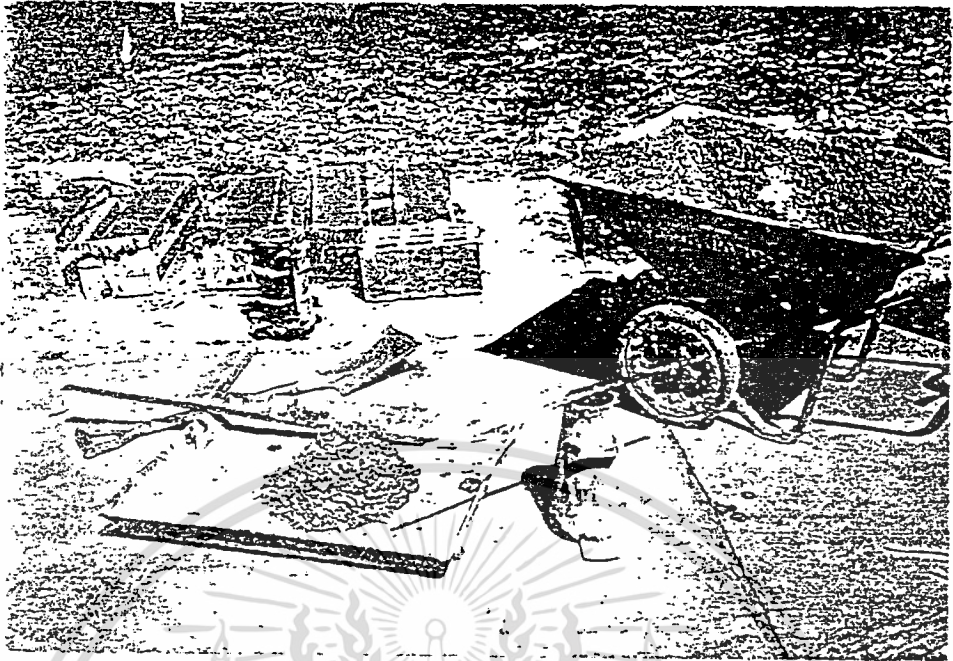
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



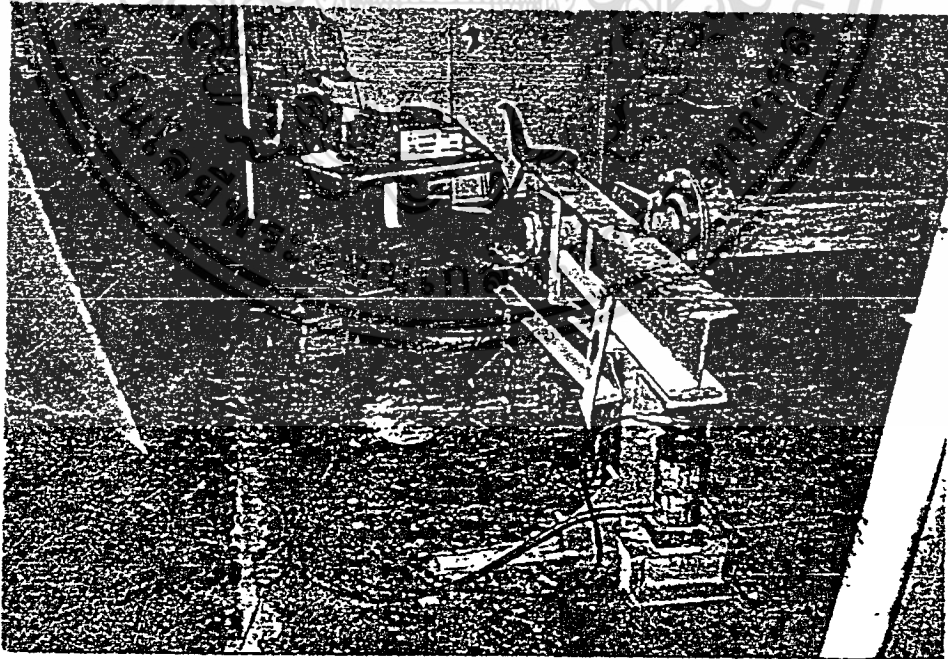
รูปที่ 2.3 แท่งตัวอย่างคานทดสอบ



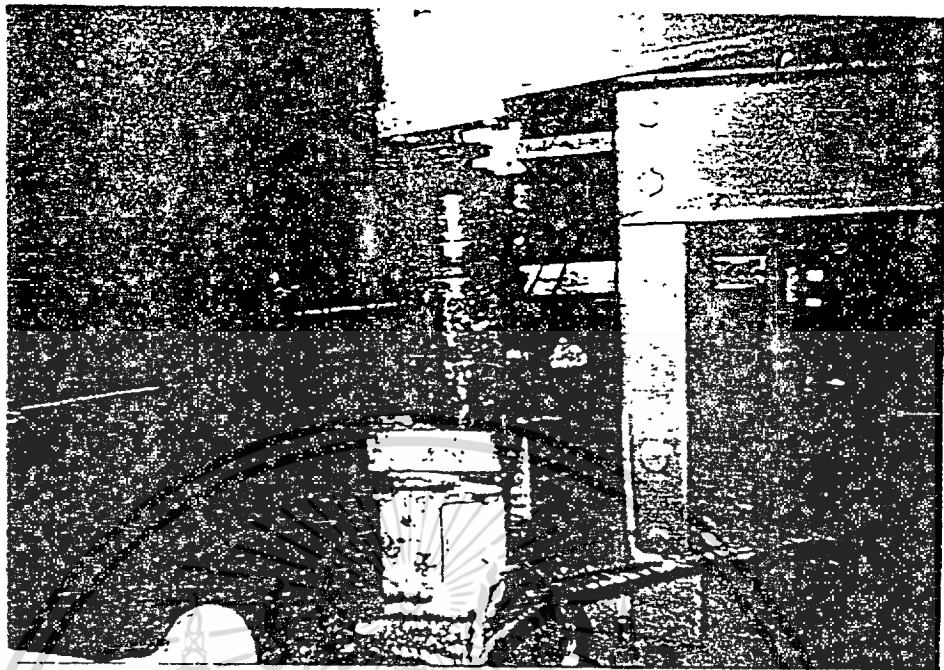
เอกสารนี้เป็นเอกสาร **รูปที่ 2.4** การหล่อคานตัวอย่าง ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



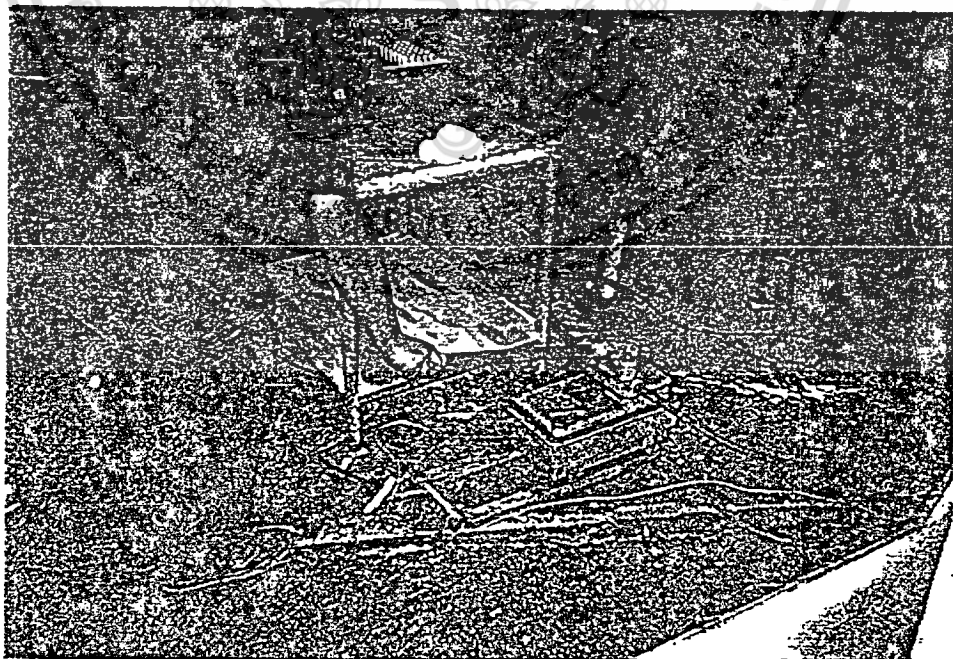
รูปที่ 2.5 การเก็บตัวอย่างแห้งทดสอบแรงอัดของคอนกรีต และการทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต



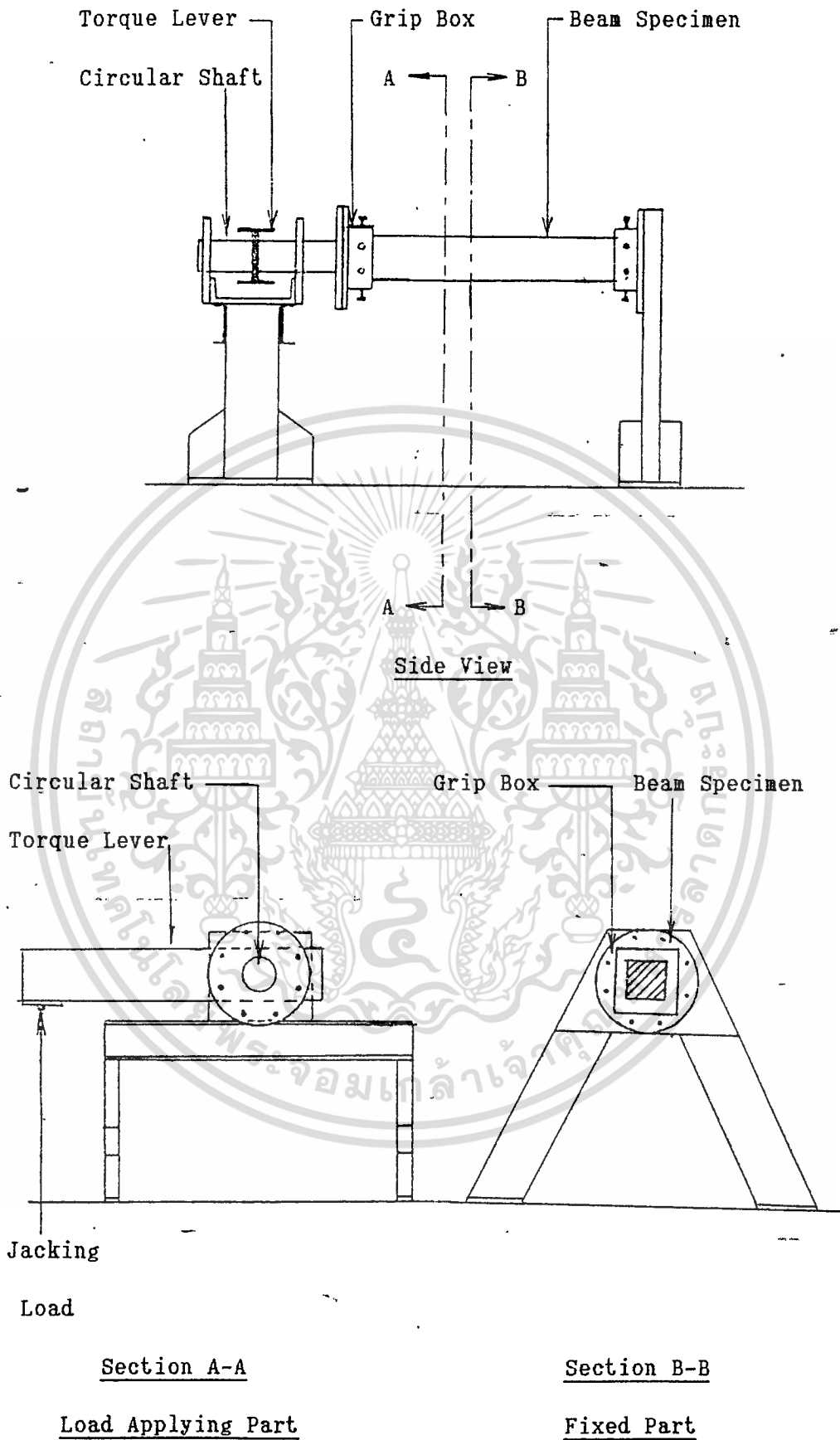
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 2.6 การติดตั้งเครื่องทดสอบโม่เมนต์บิดไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



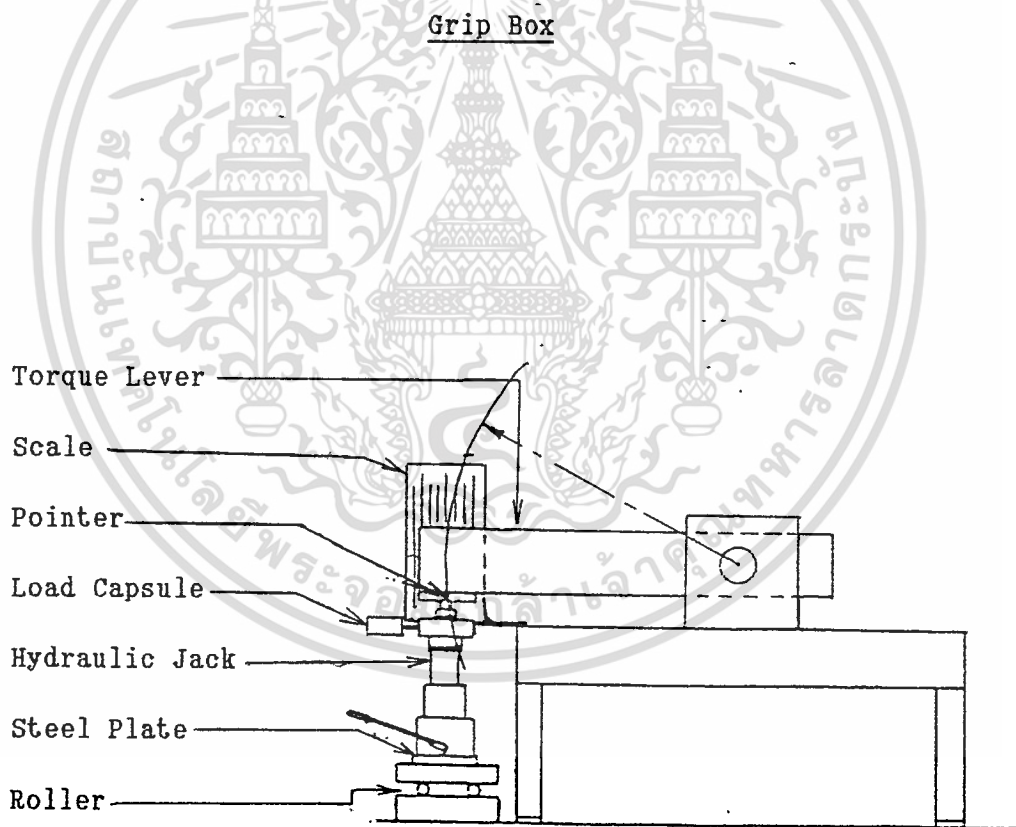
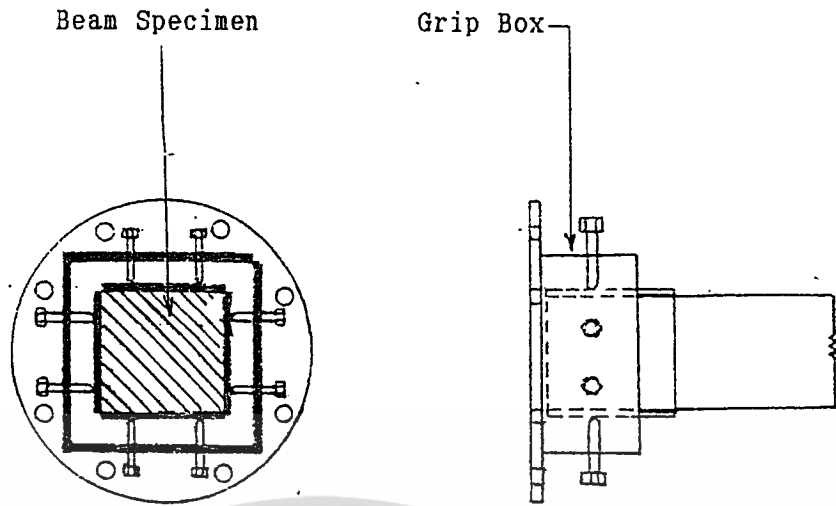
รูปที่ 2.7 ลักษณะลูกบอลเหล็กที่จุดแรงกระทำของไฮดรอลิกต่อแขนยื่นของ
เครื่องมือทดสอบโมเมนต์บิด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 2.8 การเพิ่มแรงกระทำของไฮดรอลิกต่อเครื่องมือทดสอบโมเมนต์บิดด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

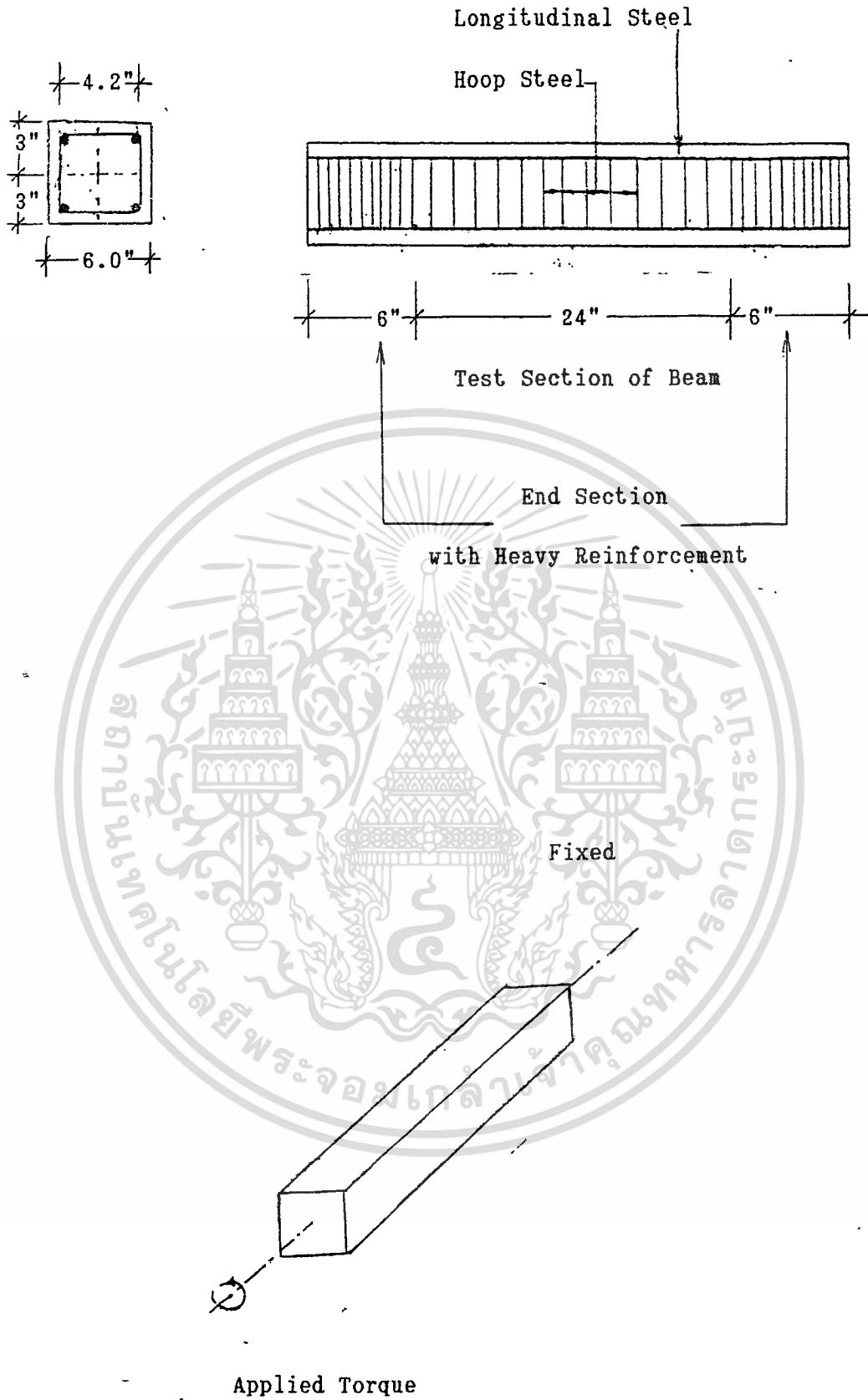


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่สามารถให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.9 เครื่องมือทดสอบโมเมนต์บิด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Load Applying Part

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.10 ส่วนที่ให้แรงกระทำและ Grip Box นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.11 รายละเอียดคานตัวอย่าง
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ผลการทดลอง

ความสามารถต้านทานโมเมนต์บิดประลัยจากการทดลอง และจากทฤษฎีของแต่ละคานตัวอย่างกลุ่มต่างๆ และค่าความสัมพันธ์ของระยะช่องว่างการเสริมเหล็กปลอกที่มีผลต่อค่าความต้านทานโมเมนต์บิดประลัยของการเสริมเหล็กปลอกแบบต่างๆ ของคานตัวอย่างกลุ่มที่ 2, 3 และ 4 ได้แสดงดังในรูปที่ 3.1 ถึง 3.9 ส่วนรายละเอียดการเสริมเหล็กและคุณสมบัติของคานตัวอย่างกลุ่มต่างๆ ได้แสดงในตารางที่ 2.3 และ 2.4 รวมทั้งการเปรียบเทียบค่า T_u สำหรับการเสริมเหล็กปลอกที่ต่างกันของคานทั้ง 3 กลุ่มดังตารางที่ 3.3

พฤติกรรมการพังทลายของคานคอนกรีตล้วนจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด และรอยร้าวที่เกิดขึ้นจะท่อมประมาณ 45 องศากับแกนระนาบของคาน รอยร้าวจะเกิดไปรอบๆ หน้าตัดคาน ดังรูปที่ 3.19 ส่วนคานคอนกรีตที่มีการเสริมเหล็กแกน และเหล็กปลอกนั้น พฤติกรรมการแตกร้าวจะต่างจากคานคอนกรีตล้วน คือ เมื่อเกิดรอยร้าวขึ้นคานจะไม่พังทลายโดยทันทีแต่จะมีลักษณะค่อยเป็นค่อยไป เพราะจะมีความต้านทานส่วนหนึ่งจากเหล็กเสริม ลักษณะการแตกร้าวแสดงดังรูปที่ 3.20 ถึง 3.23

หมายเลข คาน	Tuc(lb-in)			Tus (lb-in)	Tu จากทฤษฎี Tu = Tuc + Tus (lb-in)	Tu จากการทดลอง (lb-in)	Tu จากการทดลอง Tu จากทฤษฎี
	ภายใต้ หน้าตัดเต็ม	ภายใต้ หน้าตัดภายใน เหล็กปลอก	เฉลี่ย				
B1-1	27538.40	-	27538.40	-	27538.40	27044.64	0.982
B1-2	27538.40	-	27538.40	-	27538.40	25731.76	0.934
B1-3	27538.40	-	27538.40	-	27538.40	26392.98	0.958
B1-4	27538.40	-	27538.40	-	27538.40	29019.40	1.054
B1-5	27538.40	-	27538.40	-	27538.40	24415.02	0.887
B2-1	31076.02	13070.85	22073.43	34350.30	56423.73	51983.50	0.921
B2-2	30800.89	12955.12	21878.00	27375.62	49253.62	49355.98	1.000
B2-3	30616.37	12877.51	21746.94	22851.68	44598.62	39507.86	0.886
B2-4	30482.67	12877.51	21680.09	19539.84	41219.93	40169.37	0.975
B2-5	30432.95	12800.37	21616.65	18281.35	39898.00	36915.32	0.925

ตารางที่ 3.1 ค่าของ Tuc, Tus, Tu ที่ได้จากทฤษฎีและการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข คาน	Tuc (lb-in)		Tus (lb-in)	Tu จากทฤษฎี Tu = Tuc + Tus (lb-in)	Tu จากการทดลอง (lb-in)	Tu จากการทดลอง Tu จากทฤษฎี
	ภายใต้ หน้าตัดเต็ม	ภายใต้ หน้าตัดภายใน เหล็กปลอก				
B3-1	31232.71	13136.74	22184.73	70763.39	55949.76	0.791
B3-2	30897.08	12995.58	21946.33	60661.30	55291.54	0.912
B3-3	30679.21	12903.93	21791.57	54188.73	50703.93	0.936
B3-4	30519.64	12836.82	21678.23	49311.74	50019.37	1.014
B3-5	30459.13	12811.36	21635.25	47488.98	46762.56	0.985
B4-1	31456.71	13230.96	22343.84	70922.50	57908.35	0.816
B4-2	31118.68	13088.78	22103.72	60818.70	53326.74	0.877
B4-3	30899.24	12996.48	21947.86	54265.02	50685.74	0.934
B4-4	30738.53	12928.89	21833.71	49467.22	48722.77	0.984
B4-5	30677.58	12903.25	21790.42	47644.15	49375.19	1.036

ตารางที่ 3.2 Tuc, Tus, Tu ที่ได้จากทฤษฎีและการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะห่างระหว่าง เหล็กปลอก in(cm.)	Tu1 สำหรับการเสริมเหล็ก ปลอกแบบรัดขอบธรรมดา (lb-in)	Tu1 สำหรับการเสริมเหล็ก ปลอกแบบปลอกเฉียง (lb-in)	Tu1 สำหรับการเสริมเหล็ก ปลอกแบบปลอกเกลียว (lb-in)	Iu2 Tu1 (เท่า)	Iu3 Tu1 (เท่า)	Iu3 Tu2 (เท่า)
	1.57(4)	51938.50	55949.76	57908.35	1.077	1.115
1.97(5)	49355.98	55291.54	53326.27	1.120	1.080	0.964
2.36(6)	39507.86	50703.93	50685.74	1.283	1.283	0.999
2.76(7)	40169.37	50019.37	48722.77	1.245	1.213	0.974
2.95(7.5)	36915.32	46762.56	49375.19	1.267	1.338	1.056
	เฉลี่ย			1.198	1.206	1.006

หมายเหตุ Tu1, Tu2, Tu3 คือ ความสามารถด้านทานโมเมนต์บิดประลัยในกรณีของเหล็กเสริมแบบ
ปลอกรัดขอบธรรมดา ปลอกเฉียง และปลอกเกลียว ตามลำดับ

ตารางที่ 3.3 แสดงการเปรียบเทียบค่า Tu สำหรับการเสริมเหล็กปลอกที่ต่างกัน

หมายเลข คาน	ช่องว่าง ระหว่าง	ปริมาตรของ เหล็กปลอก	Tu ที่ได้จาก การทดลอง	Tu ที่ได้จากการทดลอง
	เหล็กปลอก			ปริมาตรของเหล็กปลอก
B2-1	1.57"	10.757	51983.50	4832.53
B3-1	(4 cm.)	12.986	55949.76	4308.47
B4-1		12.986	57908.35	4459.29
B2-2	1.97"	8.605	49355.98	5735.73
B3-2	(5 cm.)	10.351	55291.54	5341.66
B4-2		10.351	53326.74	5151.84
B2-3	2.36"	7.163	39507.86	5515.55
B3-3	(6 cm.)	8.640	50703.93	5888.51
B4-3		8.640	50685.74	5866.41
B2-4	2.76"	6.117	40169.37	6566.84
B3-4	(7 cm.)	7.387	50019.37	6771.27
B4-4		7.387	48722.77	6595.75
B2-5	2.95"	5.728	36915.32	6444.71
B3-5	(7.5 cm.)	6.912	46762.56	6765.42
B4-5		6.912	49375.19	7143.40

ตารางที่ 3.4 ค่าความต้านทานโมเมนต์บิดประลัยที่ได้จากการทดลอง
ต่อปริมาตรเหล็กปลอก

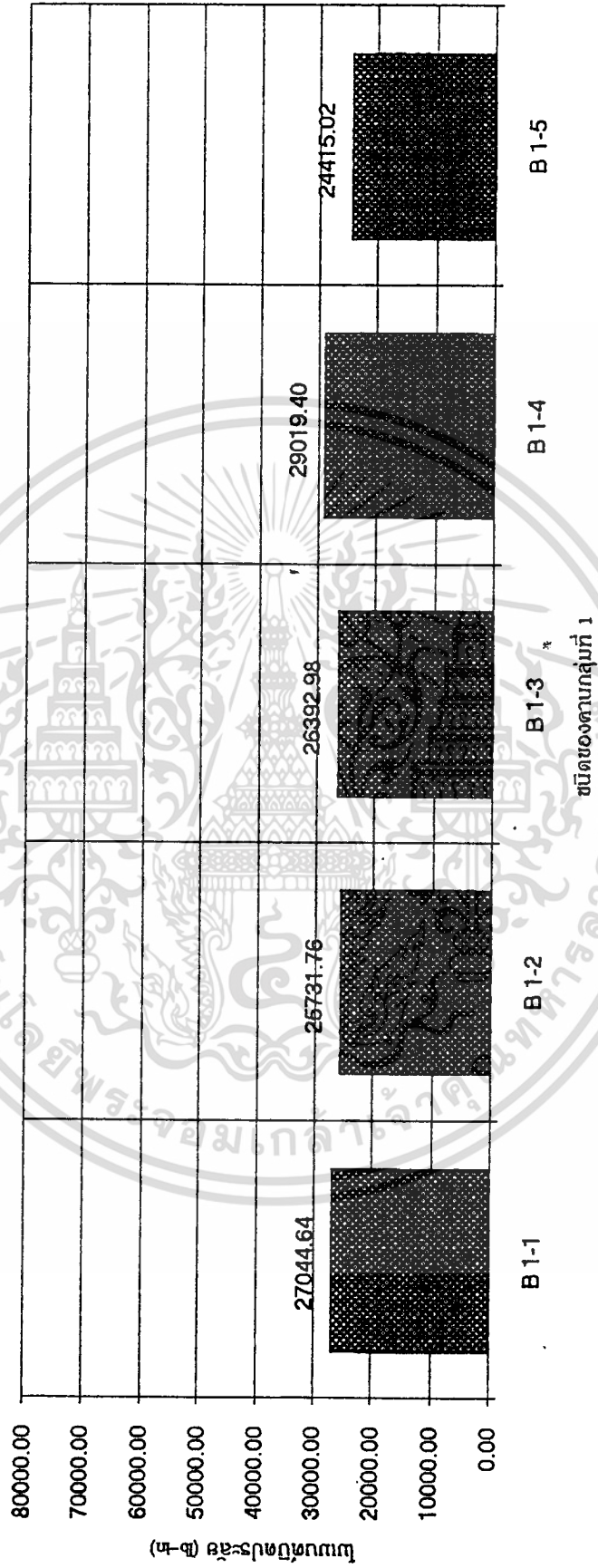
คานกลุ่มที่	Tu ที่ได้จากการทดลอง	การเปรียบเทียบ
	ปริมาตรของเหล็กปลอก เฉลี่ย (lb-in)	
2	5819.07	1.0000
3	5811.07	0.9986
4	5843.34	1.0042

ตารางที่ 3.5 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานโมเมนต์บิดประลัยที่ได้จากการทดลอง

ต่อปริมาตรเหล็กปลอกของแต่ละกลุ่มคาน

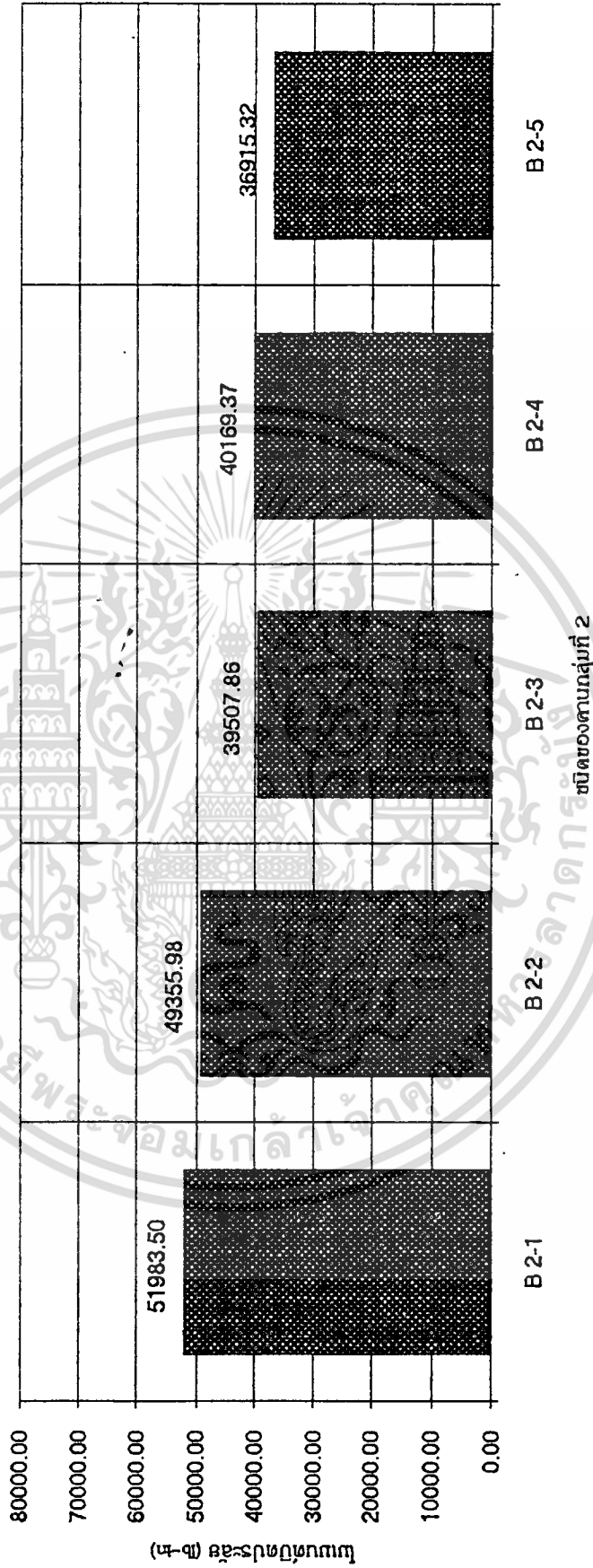
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.1 โยมนต์ปิดประลัยของदानกลุ่มที่ 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

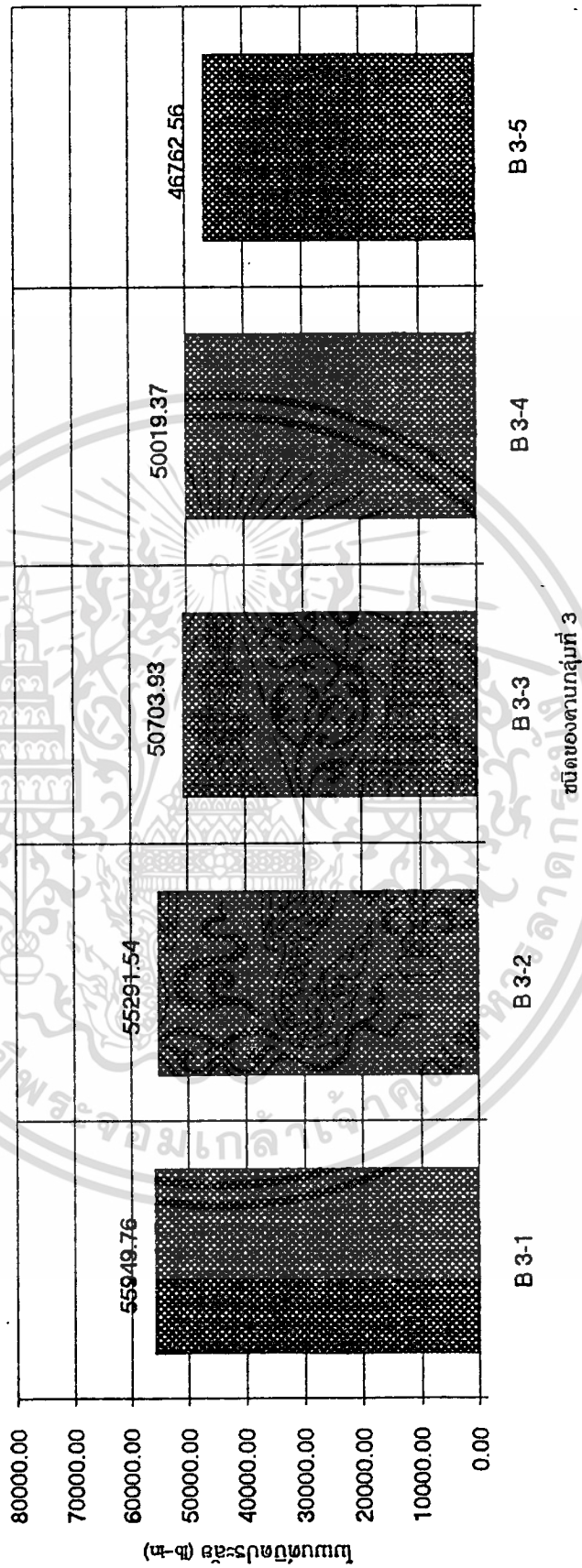
รูปที่ 3.2 โบนัสปรับประลัยของตามกลุ่มที่ 2



(๙-๑) สรรพคุณภท

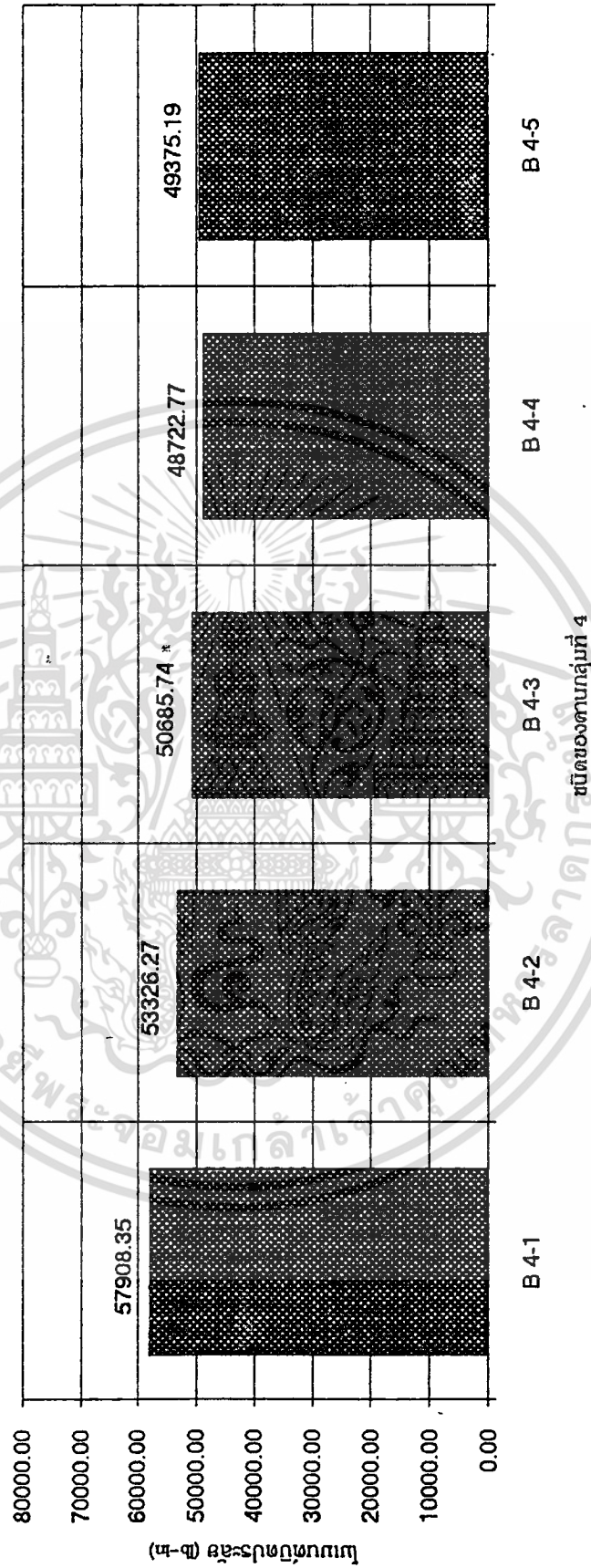
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.3 โบนัสเบ็ดเสร็จของตามกลุ่มที่ 3



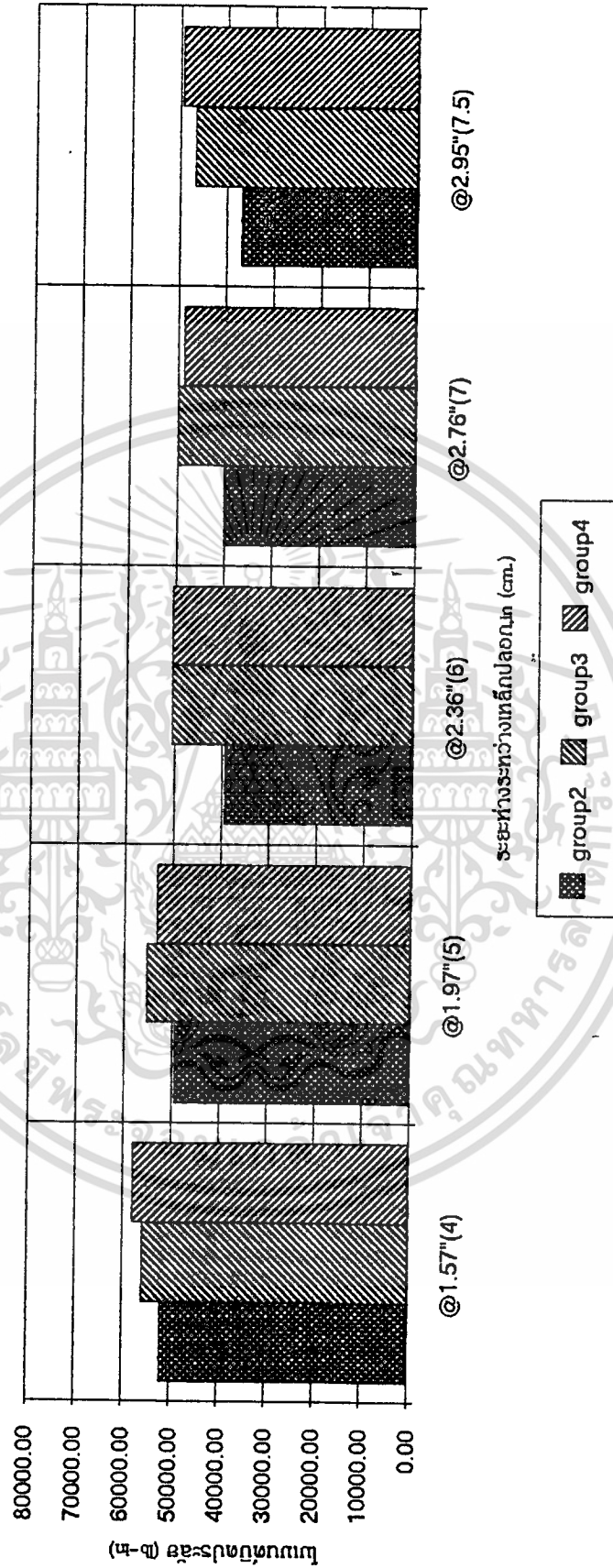
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.4 โยมนต์ปิดประลักษ์ของदानกลุ่มที่ 4



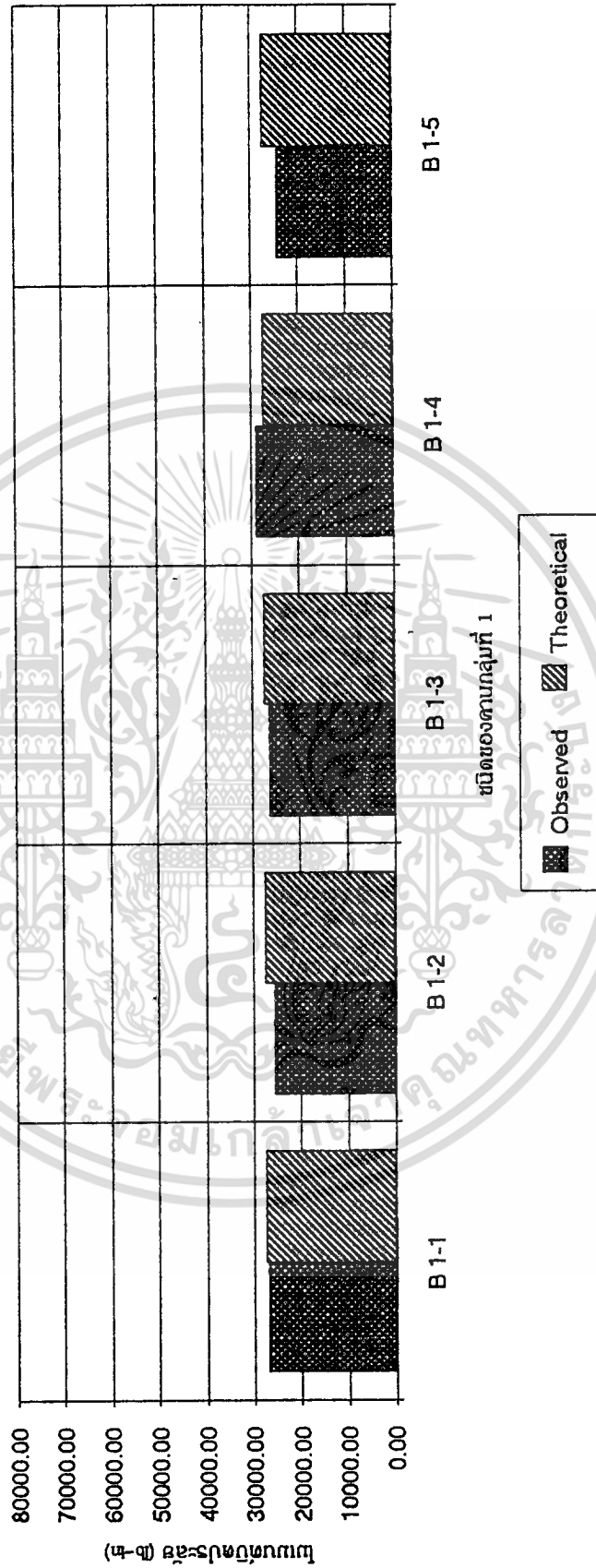
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.5 โยมนต์ปิดประลัยของตานกลุ่มที่ 2,3 และ 4



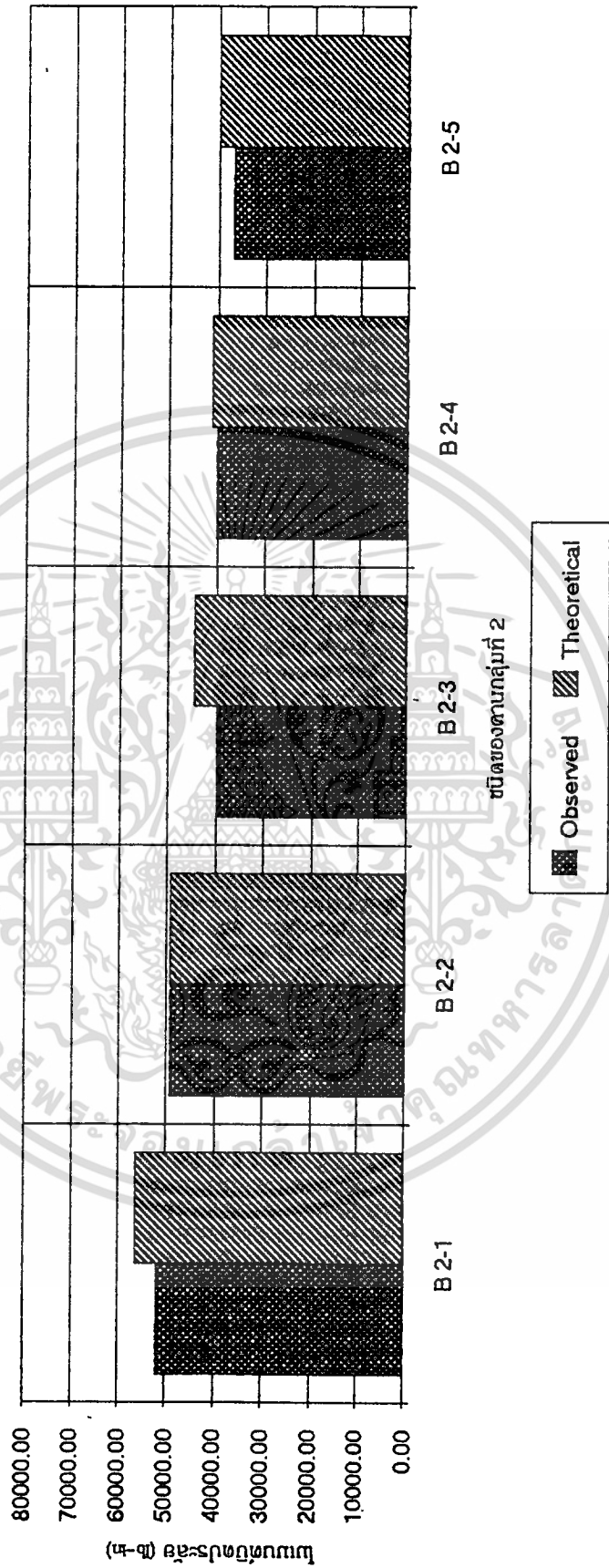
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.6 โบนัสเปิดประลัยของดาวกลุ่มที่ 1



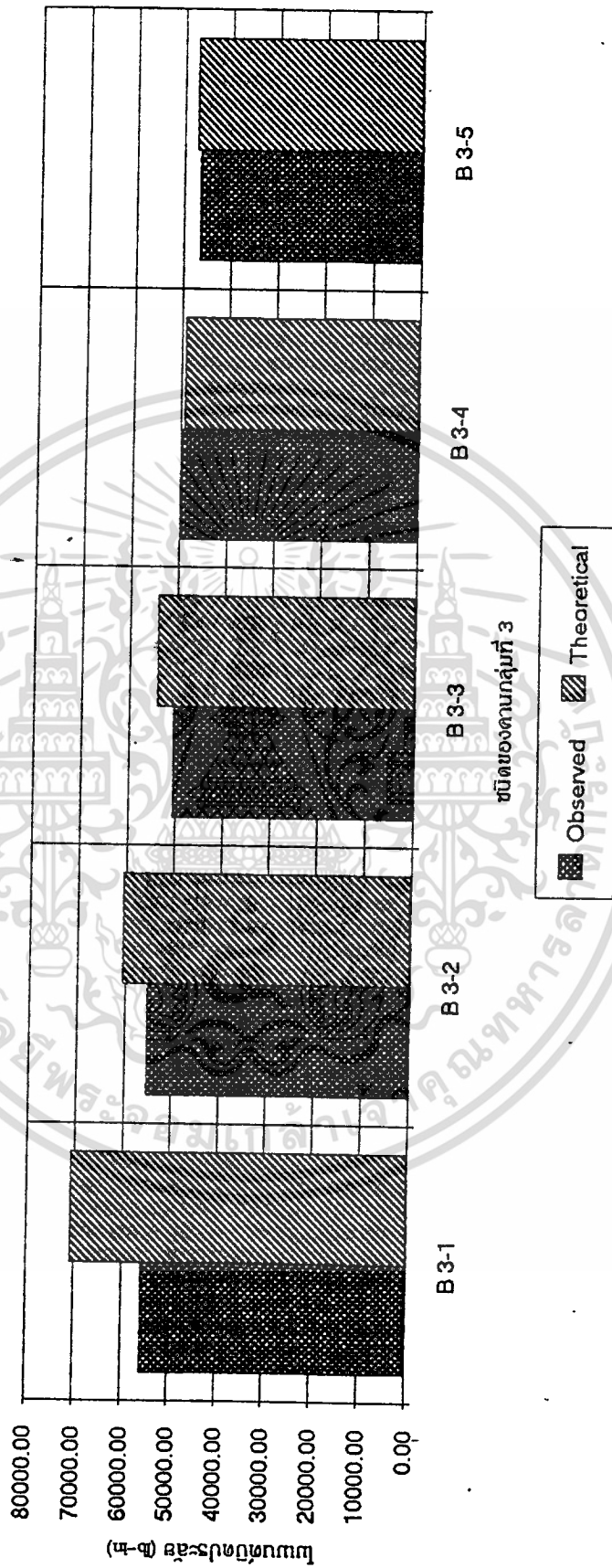
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.7 โหมดเปิดประลัยของตามกลุ่มที่ 2



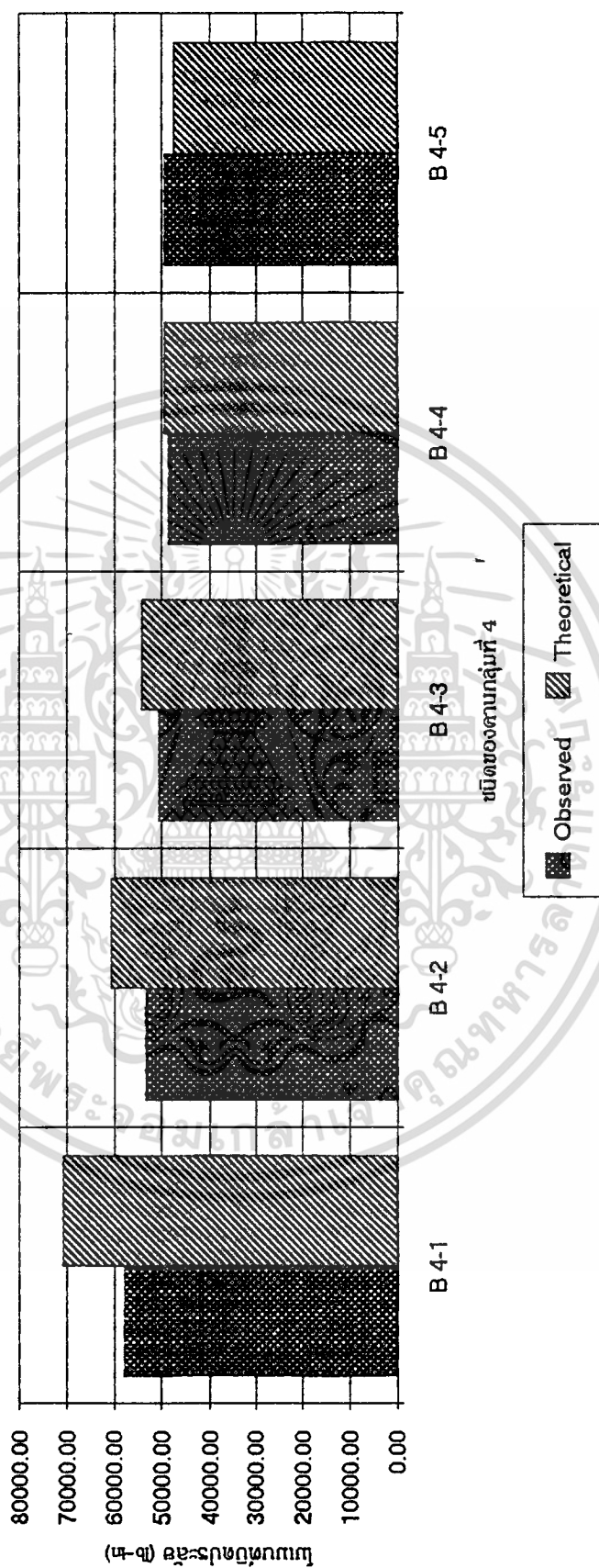
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.8 ไบโอมบัติตประสิทธิภาพของตามกลุ่มที่ 3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.9 โบนัสปิดประลัยของตามกลุ่มที่ 4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.10 โหมเมนต์เปลี่ยนแปลงตามกลุ่มที่ 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.12 โยมนต์ปิดประลักษ์ของदानกลุ่มที่ 3



ชนิดของदानกลุ่มที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.13 โยมนต์บิตประลัยของตามกลุ่มที่ 4

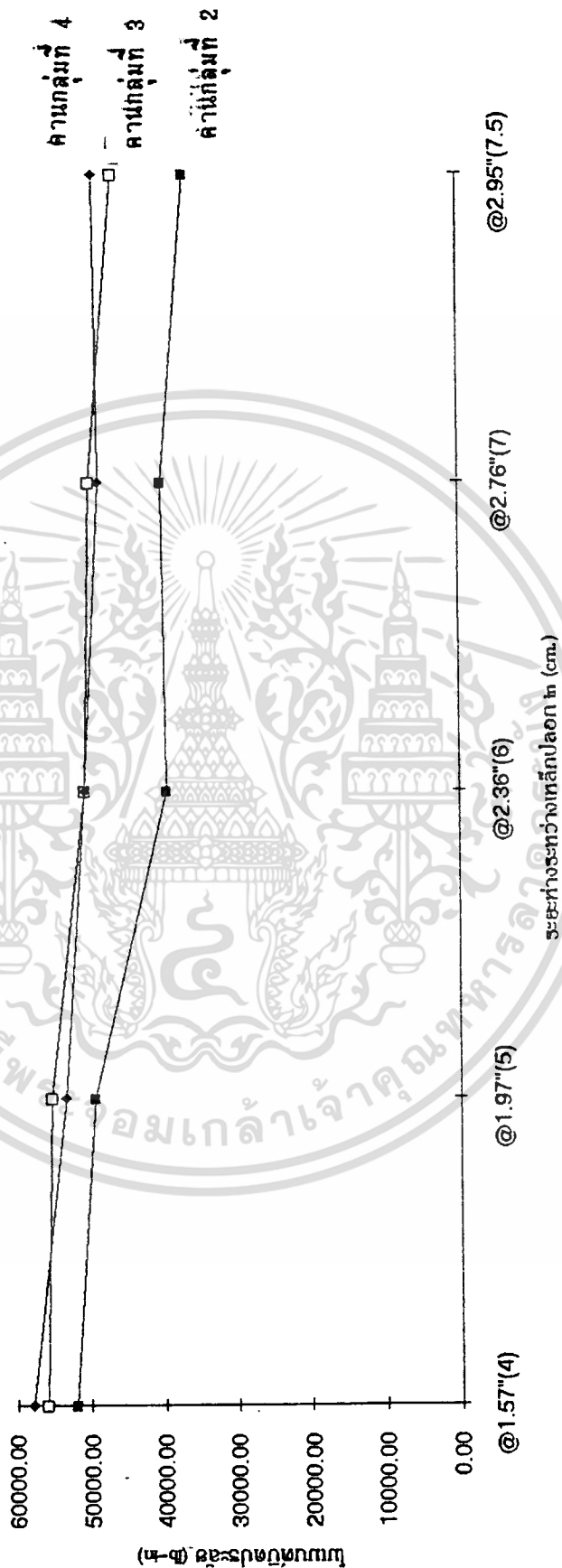


ชนิดของตามกลุ่มที่ 4

(๓-๗) อธิบายทุกข้อมติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.14 เปรียบเทียบค่าโบนัสมัดปิดระยะห่างเทลิโพลอดต่าง ๆ ของคานกลุ่มที่ 2,3 และ 4



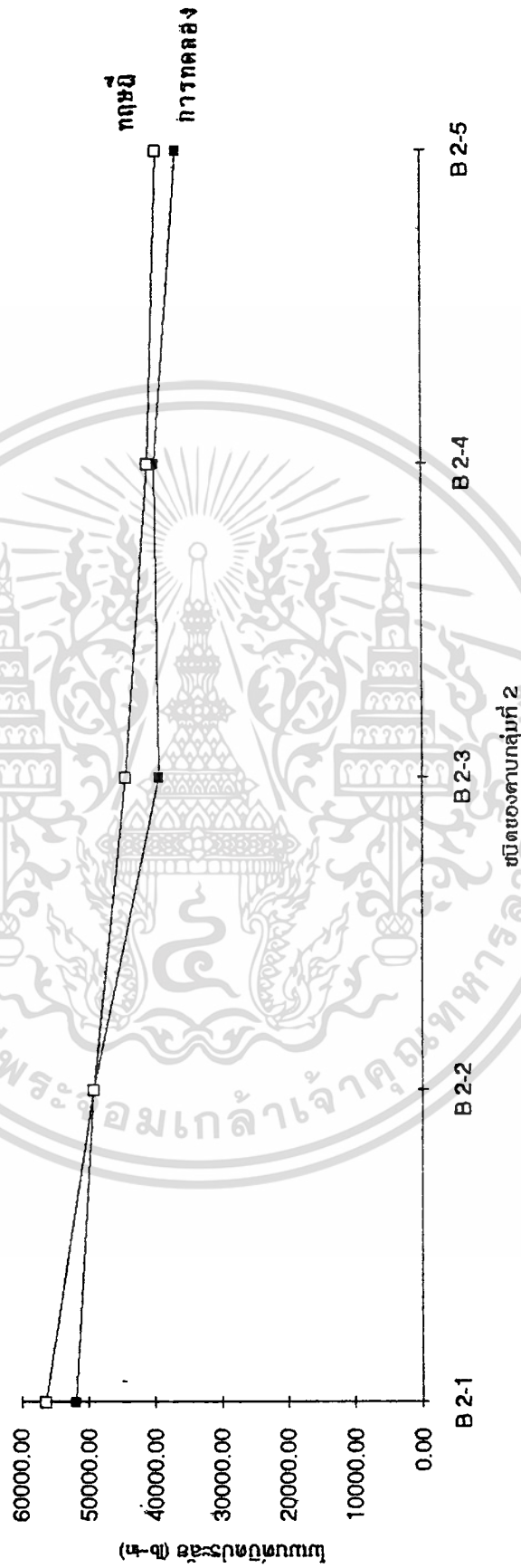
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.15 เปรียบเทียบค่าโบนัสดำเนินการทดลองและทฤษฎีของตามกลุ่มที่ 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.16 เปรียบเทียบค่าโหมบเปิดประลียงการทดลองและทฤษฎีของดาบกลุ่มที่ 2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.17 เปรียบเทียบค่าโบนัสนับเปิดประวัติการทดลองและทฤษฎีของตาบกลุ่มที่ 3



ชนิดของตาบกลุ่มที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

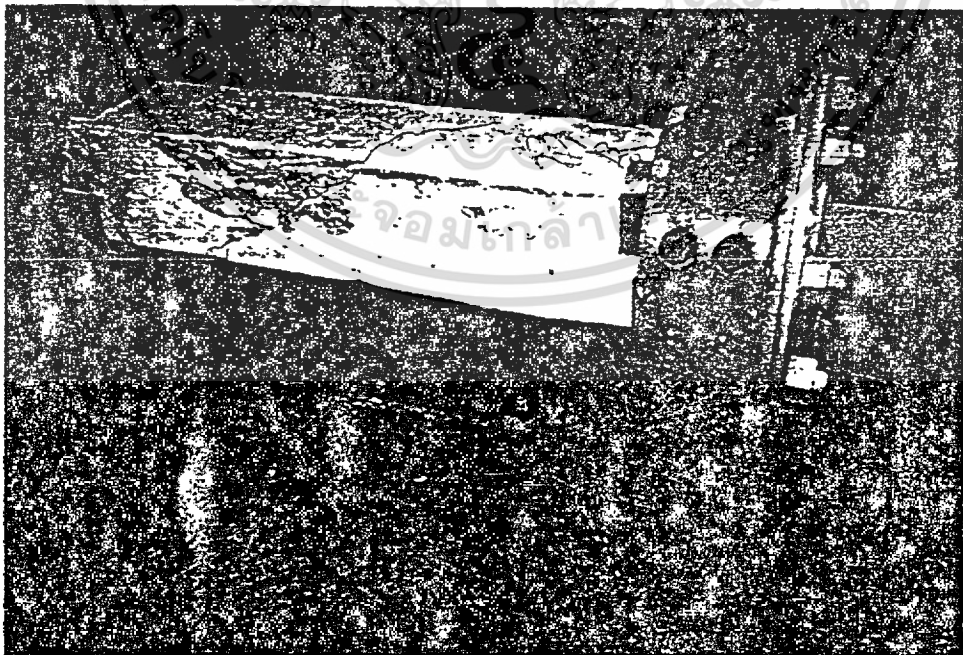
รูปที่ 3.18 เปรียบเทียบค่าโมเมนต์บิดประลัยจากการทดลองและทฤษฎีของตามกลุ่มที่ 4



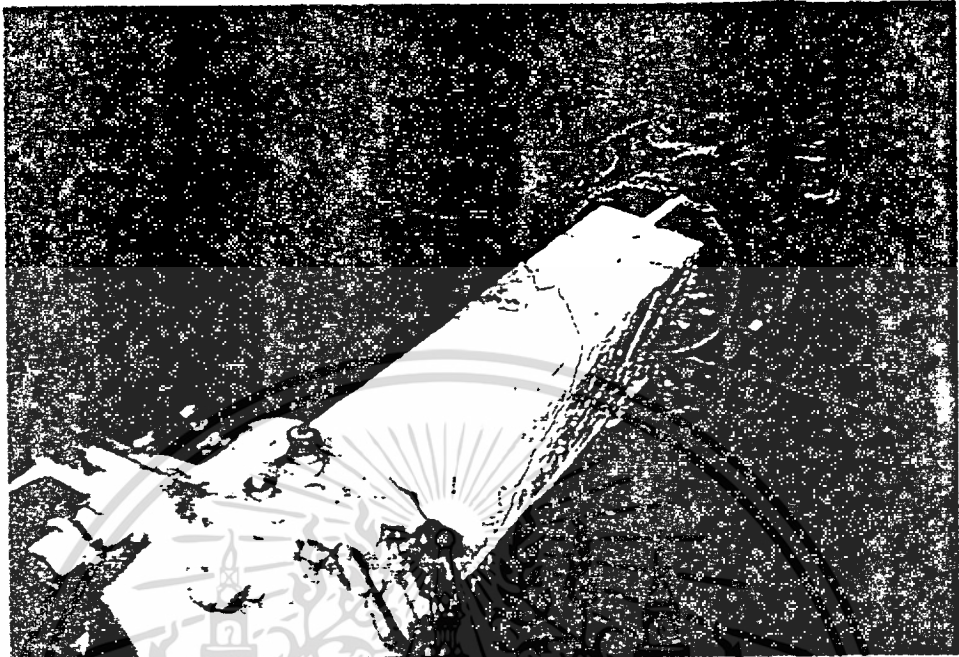
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



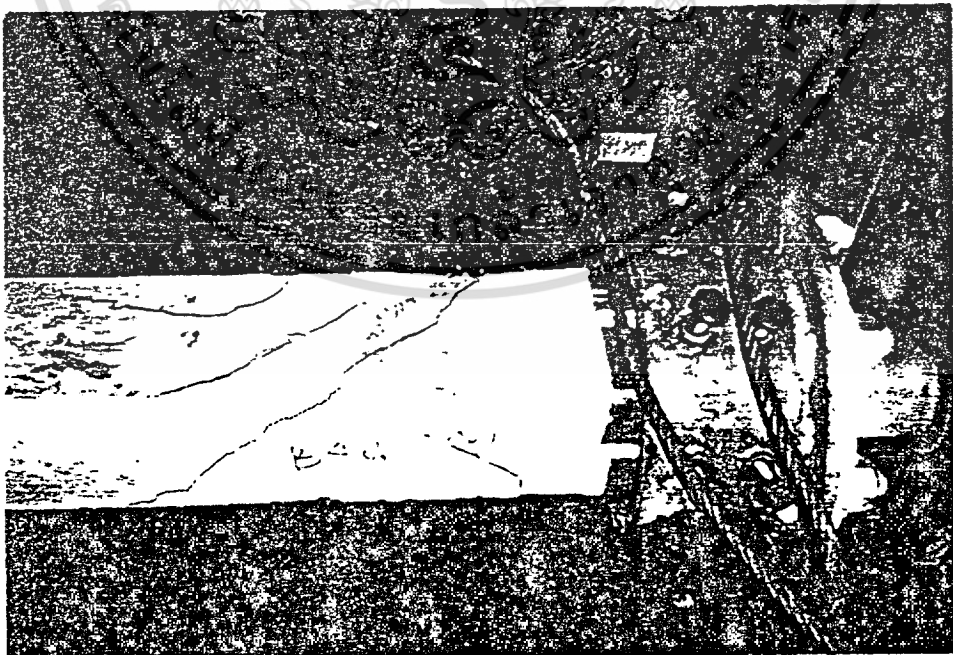
รูปที่ 3.19 ลักษณะการแตกหักของคานคอนกรีตล้าวน



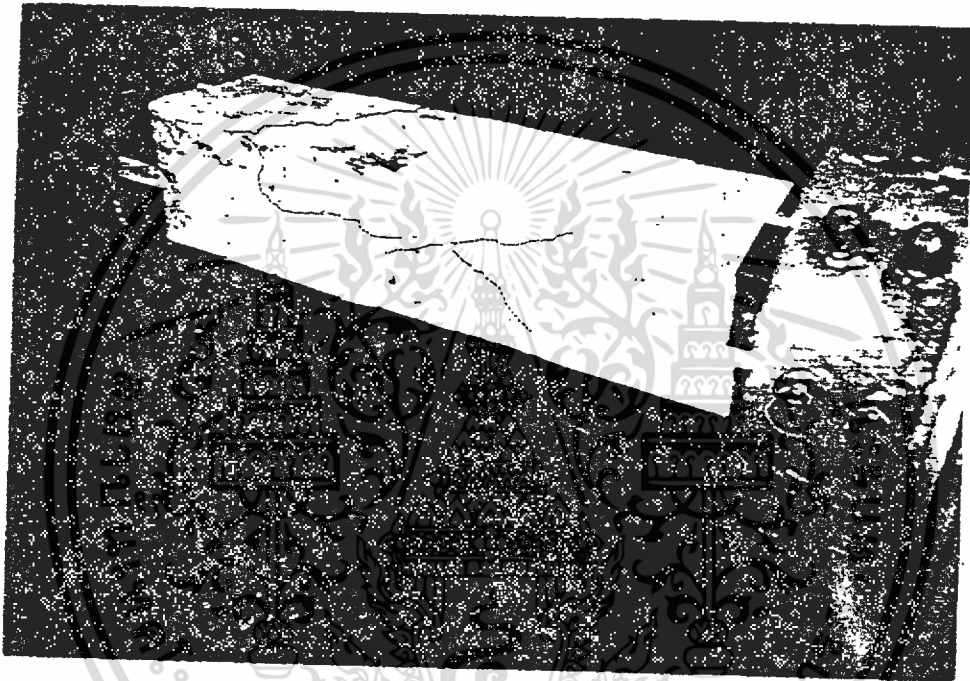
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 3.20 รอยแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกจัดร้อยขั้วกรรมคานด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 รอยแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกรัดรอบขรรมดา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 3.22 รอยแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเอียงซึ่งประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 รอยแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเกลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการต้านทานโมเมนต์บิดประลัย (Ultimate Torsional Moment) แบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ความต้านทานโมเมนต์บิดประลัยในส่วนคอนกรีต (T_{uc}) และความต้านทานโมเมนต์บิดประลัยในส่วนเหล็กเสริม (T_{us}) ซึ่งการศึกษา และวิเคราะห์ข้อมูลโดยอาศัยสูตรและมาตรฐานของ ACI ในการคำนวณหาค่าความต้านทานโมเมนต์บิดประลัย (Ultimate Torsional Moment) เมื่อคานคอนกรีตถูกกระทำโดยโมเมนต์บิดบริสุทธิ์ (Pure Torsion) แล้วนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับความสามารถในการต้านทานโมเมนต์บิดประลัย (Ultimate Torsional Moment) ของคานคอนกรีตที่เสริมเหล็กปลอกตามวิธีต่าง ๆ

4.1 ทฤษฎีความต้านทานโมเมนต์บิดประลัยของคานคอนกรีตล้วน และคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (Theoretical Ultimate Torsional Strength of Plain and Reinforced Concrete Beams)

ในการศึกษา เพื่อหาความสามารถในการต้านทานโมเมนต์บิดประลัยของคานคอนกรีตล้วนหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม โดยได้สมมติให้คอนกรีตเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อคานรับโมเมนต์บิดคานคอนกรีตจะแตกในลักษณะเอียงเป็นมุมประมาณ 45 องศา กับแนวแกนสะเทินได้ ดังสมการดังนี้คือ

$$T_{uc} = 2Y(X^2 + 10)(f_c')^{2/3} \quad \dots\dots (4.1)$$

เมื่อเราทราบค่าความสามารถในการรับแรงอัดของแท่งทรงกระบอกมาตรฐานของคอนกรีต (f_c') ทำให้ได้ค่า f_c โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f'_c = 5(f'_c)^{1/2} \quad \dots\dots(4.2)$$

แล้วนำสมการ 4.2 แทนค่าลงในสมการ 4.4 จะได้

$$T_{ub} = 6Y(X^2+10)(f'_c)^{1/3} \quad \dots\dots(4.3)$$

$$T_{uc} = (1+0.04p_c)T_{ub} \quad \dots\dots(4.4)$$

สำหรับคานาคอนกรีตล้วน จะเพิ่มความสามารถในการต้านทานโมเมนต์บิดของคานาได้โดยการเสริมเหล็กเพิ่มความต้านทาน (T_{us}) จะได้ดังสมการ

$$T_u = T_{uc} + T_{us} \quad \dots\dots(4.5)$$

จากการทดลองของ PCA และทฤษฎี Skew-Bending

ได้พิสูจน์ให้เห็นว่า ค่าความต้านทานโมเมนต์บิดประลักษ์ในส่วนของเหล็กเสริมตามทฤษฎี Rausch และ Cowan เกิดจากทั้งเหล็กแกนและเหล็กปลอก โดยเหล็กแกนจะมีผลน้อยมาก คือจะมีผลต่อค่า α_1 แต่ทั้งนี้และทั้งนั้นเหล็กแกนก็ยังมีค่าจำเป็นต้องเสริมเข้าไปเพื่อยึดเหล็กปลอก ดังนั้นปริมาณเหล็กแกนน้อยที่สุดที่ต้องเสริมในคานารับโมเมนต์บิดคือ

$$A_{s1} = A_{sv} [(X_1+Y_1)/s] \quad \dots\dots(4.6)$$

ซึ่ง A_{s1} = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กแกนทั้งหมด (นิ้ว²)

- เมื่อเสริมเหล็กปลอกรัดรอบขรรคคานา

$$T_{us} = \frac{\alpha_1 A_{sv} f'_c X_1 Y_1}{S} \quad \dots\dots(4.7)$$

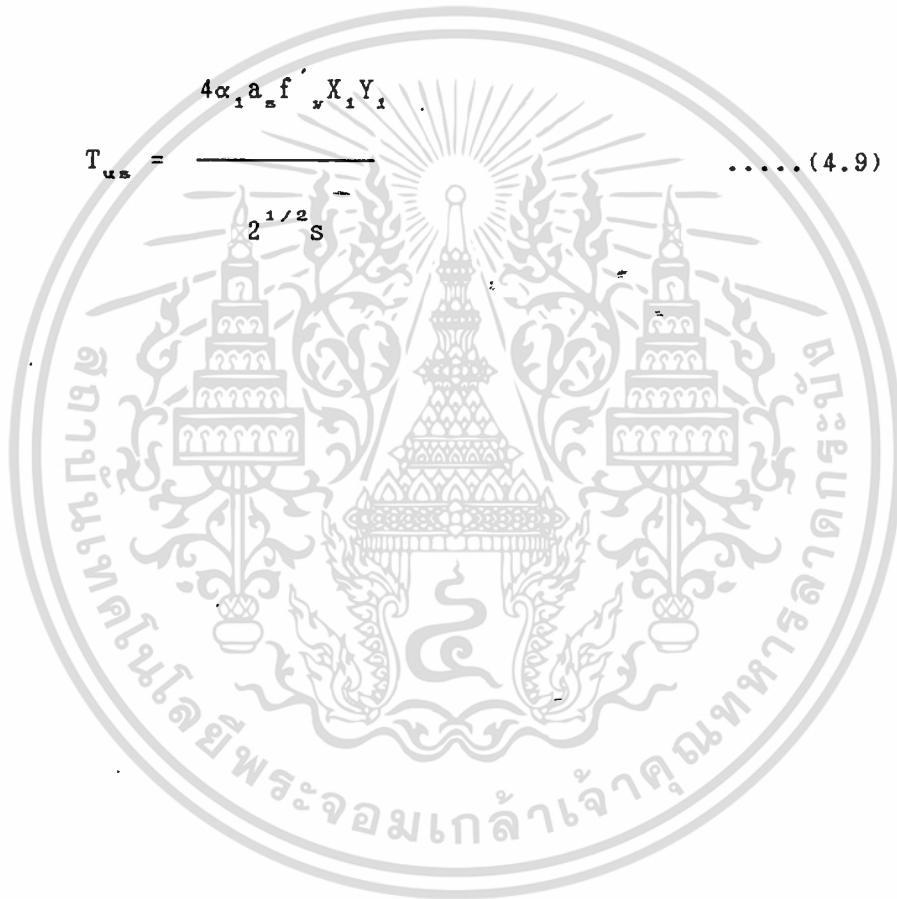
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-เมื่อเสริมเหล็กปดกเอียง

$$T_{us} = \frac{\alpha_1 A_{sv} f'_v X_1 Y_1}{s} (\cos\theta + \sin\theta) \quad \dots\dots(4.8)$$

-เมื่อเสริมเหล็กปดกเกลียว

$$T_{us} = \frac{4\alpha_1 a_s f'_v X_1 Y_1}{2^{1/2} s} \quad \dots\dots(4.9)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.1 ค่า α_1 ของทฤษฎีอีลาสติกของโมเมนต์บิดในคานหน้าตัดสี่เหลี่ยม (α_1 of the Elastic Theory of Torsion for Rectangular Section)

Y/X หรือ Y_1/X_1	α_1
1.0	0.835
1.2	0.812
1.4	0.801
1.6	0.799
1.8	0.802
2.0	0.807
2.5	0.827
3.0	0.845
5.0	Not Computed
10.0	Not Computed
100.0	Not Computed
infinity	Not Computed

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความต้านโมเมนต์บิดของคาน B2-1

เหล็กปลอกรัดรอบธรรมดา (Vertical Reinforcement) No.2 Vertical @ 1.57 in. (4 cm.) c/c , $f'_v = 43,587.89$ psi (3,070.97 ksc)

เหล็กแกน (Longitudinal Reinforcement) 4-No.4 corner bars

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รวบรวมไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{คอนกรีต } f'_c = 4,641.28 \text{ psi (327.00 ksc)}$$

$$X = y = 6 \text{ in. (15 cm.)}$$

$$X_1 = Y_1 = 4.2 \text{ in. (10.67 cm.)}$$

ในการหาความต้านทานโมเมนต์บิดประลัย (Ultimate Torsion Moment) ของคอนกรีตในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก Tandit (1963) และ Arockiasamy (1964) แนะนำว่าค่าของ T_{uc} ควรเป็นค่าเฉลี่ยสำหรับพื้นที่หน้าตัดเต็มกับพื้นที่หน้าตัดภายในของ เหล็กปลอกที่วัดจากจุดศูนย์กลางถึงจุดศูนย์กลางของเหล็กปลอก

สำหรับหน้าตัดเต็ม

$$\begin{aligned} T_{uc} &= 6Y(X^2+10)(f'_c)^{1/3} && \text{(จากสมการ 4.3)} \\ &= 6 \times 6 \times (6^2+10) \times (4,641.28)^{1/3} \\ &= 27,623.13 \text{ lb-in} \end{aligned}$$

สำหรับหน้าตัดภายในเหล็กปลอก

$$\begin{aligned} T_{uc} &= 6Y_1(X_1^2+10)(f'_c)^{1/3} && \text{(จากสมการ 4.3)} \\ &= 6 \times 4.2 \times (4.2^2+10) \times (4,641.28)^{1/3} \\ &= 11,618.53 \text{ lb-in} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } T_{uc \text{ average}} &= 0.5 \times (27,623.13 + 11,618.53) \\ &= 19,620.83 \text{ lb-in} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{uc} &= (1+0.04p_c)T_{uc} && \text{(จากสมการ 4.4)} \\ &= (1+(0.04 \times 3.125)) \times 19,620.83 \\ &= 22,073.43 \text{ lb-in} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณความสามารถต้านทานโมเมนต์ของเหล็กเสริมควรวิจารณาทั้งเหล็ก
ปลอกและเหล็กแกน

กรณีเหล็กปลอกรัศรอบธรรมดา

$$T_{us} = \frac{\alpha_1 A_{sv} f'_v X_1 Y_1}{s} \quad (\text{จากสมการ 4.7})$$

$$= \frac{0.835 \times 0.084 \times 43,587.89 \times 4.2 \times 4.2}{1.57}$$

$$= 34,350.30 \text{ lb-in}$$

$$T_u = T_{uc} + T_{us} \quad (\text{จากสมการ 4.5})$$

$$= 22,073.43 + 34,350.30$$

$$= 56,423.73 \text{ lb-in}$$

สำหรับค่าความต้านโมเมนต์ของคานตัวอย่างอื่น ๆ สามารถดูได้จากตารางที่

3.1 และ 3.2

บทที่ 5

สรุปเนื้อหาและสรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปเนื้อหาและสรุปผลการทดลอง

การศึกษานี้ ได้ศึกษาถึงพฤติกรรมคานคอนกรีตล้วน (Plain Concrete Beams) และคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Beams) เมื่อรับโมเมนต์บิดบริสุทธิ์ (Pure Torsion) สำหรับค่าความต้านทานโมเมนต์บิดประลัย (T_u) ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก และวิธีการเสริมเหล็กปลอกที่ต่างกันนั้นจะขึ้นกับ ความสามารถในการต้านทานโมเมนต์บิดประลัยในส่วนของคอนกรีต (T_{uc}) และเหล็กเสริม (T_{us}) โดย $T_u = T_{uc} + T_{us}$

ค่าความต้านทานโมเมนต์บิดประลัยในคานคอนกรีตล้วน (T_{uc}) จะหาได้จากสูตรของทฤษฎีกึ่งพลาสติก (Semi Plastic Theory) ส่วนสูตรสำหรับหาความต้านทานโมเมนต์บิดประลัยในคานคอนกรีตเสริมเหล็กหาได้จากสูตร E.Rausch ,P.Andersen และ Cowan สำหรับคานหน้าตัดสี่เหลี่ยมดังนี้คือ

$$T_u = T_{uc} + T_{us} \quad (\text{จากสมการ 1.13})$$

$$T_{uc} = 6Y(X^2 + 10)(f'_c)^{1/3} \quad (\text{จากสมการ 1.14})$$

$$T_{uc} = (1 + 0.04p_s)T_{uc} \quad (\text{จากสมการ 1.15})$$

ส่วนค่าความต้านทานโมเมนต์บิดประลัยในส่วนเหล็กเสริม (T_{us}) ที่จะนำมารวมกับค่าความต้านทานโมเมนต์บิดประลัยในส่วนของคอนกรีต (T_{uc}) โดยจะต้องเสริมเหล็กแกนเพื่อยึดเหล็กปลอกอย่างน้อย

-เมื่อแรงกระทำต่อเหล็กปลอกรัตรอบขรรคมดา

$$T_{us} = \frac{\alpha_1 A_{sv} f'_v X_1 Y_1}{s} \quad (\text{จากสมการ 4.7})$$

-เมื่อแรงกระทำต่อเหล็กปลอกเอียง

$$T_{us} = \frac{\alpha_1 A_{sv} f'_v X_1 Y_1}{s} (\cos\theta + \sin\theta) \quad (\text{จากสมการ 4.8})$$

-เมื่อแรงกระทำต่อเหล็กปลอกเกลียว

$$T_{us} = \frac{4\alpha_1 a_s f'_v X_1 Y_1}{(2)^{1/2} s} \quad (\text{จากสมการ 4.9})$$

จากผลการทดลอง จะพบว่าค่าความต้านทานโมเมนต์บิดประลัยของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ออกแบบโดยทฤษฎีกำลังประลัย ค่าความต้านทานโมเมนต์บิดประลัยในส่วนของเหล็กเสริมจะขึ้นอยู่กับเหล็กปลอก เมื่ออัตราส่วนปริมาณเหล็กแกนต่อเหล็กปลอกสูงกว่าที่สภาวะสมดุล ซึ่งจากการศึกษา และทดลองเมื่อใช้วิธีการเสริมเหล็กปลอก 3 วิธีคือ เหล็กปลอกรัตรอบขรรคมดา เหล็กปลอกเอียง และเหล็กปลอกเกลียว จะพบว่า

1. การเสริมเหล็กปลอกแบบปลอกเอียงและปลอกเกลียว จะให้ค่าความต้านทานโมเมนต์บิดประลัยใกล้เคียงกัน แต่จะมีค่าสูงกว่าการเสริมด้วยเหล็กปลอกรัตรอบขรรคมดา

เอกสารนี้ประมาณ 1.2 เท่า สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ค่าความต้านทานโมเมนต์บิดประลัษจะแปรผกผันกับระยะห่างของเหล็กปลอก

3. ค่าความต้านทานโมเมนต์บิดประลัษ โดยเฉลี่ยจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณจากทฤษฎีดังนี้คือ

- ค่าความต้านทานโมเมนต์บิดประลัษ ของคานคองกรีตล้วนโดยเฉลี่ยจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณจากทฤษฎีประมาณ 3.70 เปอร์เซ็นต์
- ค่าความต้านทานโมเมนต์บิดประลัษ ของการเสริมเหล็กปลอกแบบปลอกรัดรอบขรรคมา โดยเฉลี่ยจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณจากทฤษฎีประมาณ 5.86 เปอร์เซ็นต์
- ค่าความต้านทานโมเมนต์บิดประลัษ ของการเสริมเหล็กปลอกแบบปลอกเอียง โดยเฉลี่ยจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณจากทฤษฎีประมาณ 7.24 เปอร์เซ็นต์
- ค่าความต้านทานโมเมนต์บิดประลัษของการเสริมเหล็กปลอกแบบปลอกเกลียว โดยเฉลี่ยจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณจากทฤษฎีประมาณ 7.06 เปอร์เซ็นต์

4. ค่าความต้านทานโมเมนต์บิดประลัษต่อปริมาตรเหล็กปลอก 1 หน่วย มีค่าต่างกันเล็กน้อย โดยเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยดังนี้คือ ปลอกเกลียว ปลอกรัดรอบขรรคมาและปลอกเอียง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการศึกษาและทดลองนี้ เป็นการศึกษาเฉพาะในส่วนของโครงสร้างที่รับโมเมนต์บิดบริสุทธิ์ (Pure Torsion) เท่านั้น แต่ในสภาพความเป็นจริงแล้วโครงสร้างที่รับเฉพาะโมเมนต์บิดบริสุทธิ์จะพบน้อยมาก ส่วนใหญ่จะพบโครงสร้างที่รับโมเมนต์บิดร่วมกับโมเมนต์ดัด (Bending Moment) และแรงเฉือน (Shear Force) ฉะนั้นถ้าจะนำข้อมูลไปใช้ให้เกิดประโยชน์ ในการทำงานจริงควรจะทำการศึกษาถึงพฤติกรรมและความสามารถในการรับโมเมนต์บิดร่วมกับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือน

2. ผลจากการศึกษาและทดลองนี้ จะพบว่าค่าความต้านทานโมเมนต์บิดประลัยของคานตัวอย่างจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณจากทฤษฎี ซึ่งในแง่ปฏิบัติจริงควรจะได้มีการศึกษาถึงค่าความปลอดภัยที่เหมาะสมในการออกแบบ

3. การศึกษาและทดลองนี้มีข้อกำหนดให้เสริมเหล็กแกนในปริมาณคงที่ ส่วนเหล็กปลอกให้เสริมเปลี่ยนแปลงไปตามระยะต่างๆ โดยให้อยู่ภายใต้สภาวะการเสริมเหล็กต่ำกว่าสมดุล (Under Reinforcement) และให้เหล็กปลอกถึงจุดคลากก่อนเหล็กแกน ดังนั้นควรจะศึกษาถึงพฤติกรรมการเสริมเหล็กปลอก ที่ทำให้เกิดสภาวะการเสริมเหล็กสูงกว่าสมดุล (Over Reinforcement) ว่าจะมีผลต่อความสามารถในการรับโมเมนต์บิดอย่างไร

บรรณานุกรม

- 1.) Henry J.Cowan, (1965), Reinforce and Prestress Concrete Torsion, University of Sydney,138.
- 2.) Paul Zia ,Thomas T.C.HSU,(1983),Torsion of Structural Concrete , University Microfilms International , Ann Arbor, Michigan,U.S.A.
- 3.) James G. Macgregor,Reinforce Concrete Mechanics and Design (Second Edition).
- 4.) Ernst,G.C.(1957), Ultimate Torsional Properties of Rectangular Reinforced Concrete Beams ,Journal ,institute of the american ,54,4.
- 5.) S.K.Mallick , A.P.Gupta,(1982),Reinforced Concrete, Indian Institute of Technology, Kharagpur.
- 6.) Thomas T.C.Hsu , (1933) , Torsion of Reinforced Concrete, University of Houston.
- 7.) Henry J.Cowan, (1950), An Elastic Theory for the Torsional Strength of rectangular Reinforced Concrete Beams,Magazine of Concrete Research, 2, 4, 3-8.
- 8.) Henry J.Cowan, (1951), Test of the Torsional Strength and Deformation of rectangular Reinforced Concrete Beams, Concrete and Constructional Engineering, 46, 2, 51-59.
- 9.) Marshall, W.T. and Tembe, N.R.(1941), Experiments on Plain and Reinforced concrete in Torsion, Concrete and Constructional Engineering, 46, 2.
- 10.) Rausch, E.(1929), Design of Reinforced Concrete in Torsion,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ Julius Springer, Berlin, pp. 50.มัน ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 11.) Pandit, G.S. (1963), Ultimate Torsion Strength of Concrete Section, Journal, Institution of Engineers (India), 43, 7, Part CI 4, 330-337.
- 12.) Saint-Venant, (1856), Memoir on Torsion of Prisms, Journal, Institute Imperial de France, 14.
- 13.) Turner, L. and Davies, V.C. (1934), Plain and Reinforced Concrete in Torsion, with Particular Reference to Reinforced Concrete Beams, Selected Engineering Papers No. 165, Institution of Civil Engineers, London.
- 14.) ผศ.ศิริวัฒน์ ไชยชนะ ,คอนกรีตเสริมเหล็ก ทฤษฎีกำลังประลัย ,ภาควิชาเทคโนโลยีการก่อสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พฤษภาคม 2531
- 15.) สมศักดิ์ คำปลิว ,การออกแบบอาคารอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก,
- 16.) สนั่น เจริญเผ่า และ วินิต ช่อวิเชียร ,คอนกรีตเสริมเหล็ก ,พิมพ์ครั้งที่ 7, กรุงเทพฯ 2530
- 17.) Structure design guide to the ACI building code

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้