

การคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับคานคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรงบางส่วน



นางสาวธัญญาภรณ์ วันเลี้ยง

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

OPTIMAL DESIGN OF PARTIALLY PRESTRESSED CONCRETE CONTINUOUS BEAMS



Miss Thanyaporn Wanlieng

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

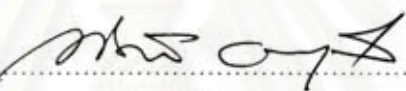
Copyright of Chulalongkorn University

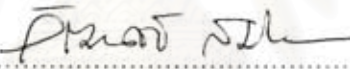
หัวข้อวิทยานิพนธ์	การคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับคานคอนกรีตต่อเนื่อง อัดแรงบางส่วน
โดย	นางสาวชญญากรณ์ วันเลี้ยง
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัฒน์ชัย สมิตชากร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาตรี)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัฒน์ชัย สมิตชากร)

  
..... กรรมการ  
(ดร.ทรงเกียรติ มธุพนธ์)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์ วันเลียง : การคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับคานคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรงบางส่วน.  
(OPTIMAL DESIGN OF PARTIALLY PRESTRESSED CONCRETE CONTINUOUS BEAMS)  
อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. วัฒนชัย สมิตถากร, 76 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับคานคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรงบางส่วน โดยใช้วิธีอัตราส่วนอัดแรง ซึ่งเสนอโดย Naaman และ Siriaksonm ในการออกแบบ อ้างอิงตามมาตรฐาน ACI 318M-02 เพื่อให้สอดคล้องตามข้อกำหนดที่สภาวะถ่ายแรง สภาวะรับน้ำหนักใช้งาน สภาวะรับน้ำหนักประลัย และข้อกำหนดอื่นๆ การคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสม กำหนดให้ราคารวมของคอนกรีต เหล็กเสริมอัดแรง เหล็กเสริมไม่อัดแรง เหล็กเสริมรับแรงเฉือน และไม้แบบ เป็นฟังก์ชันเป้าหมาย เพื่อให้ได้คานคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรงบางส่วนที่เหมาะสมทั้งด้านกำลังและราคา

ผลการศึกษาค้นคว้าพบว่า การคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมในงานวิจัยนี้ จะประหยัดราคาก่อสร้างได้ประมาณ 12% เมื่อเปรียบเทียบกับการออกแบบเป็นคานคอนกรีตอัดแรงแบบปกติ นอกจากนี้ยังพบว่า การเปลี่ยนขนาดความลึกของหน้าตัดคานที่เหมาะสมจะสามารถช่วยลดราคาก่อสร้างได้อีกด้วย

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา  
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา  
ปีการศึกษา 2550

ลายมือชื่อนิสิต..... ศันยาภรณ์ วันเลียง  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... วัฒนชัย

## 4770308621 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: OPTIMAL DESIGN / PARTIALLY PRESTRESSED / CONTINUOUS BEAM

THANYAPORN WANLIENG : OPTIMAL DESIGN OF PARTIALLY PRESTRESSED CONCRETE CONTINUOUS BEAMS. THESIS ADVISOR : ASST.PROF.WATANACHAI SMITTAKORN, Ph.D., 76 pp.

This research presents an optimal design method for partially prestressed concrete continuous beams. The design is based on partial prestressing ratio (PPR) concept proposed by Naaman and Siriaksorn. Following the ACI building code (ACI 318M-02) the structures must satisfy the requirements at prestress transfer, at service, at ultimate and so on. The optimal design appoints the total cost of concrete, prestressing tendons, nonprestressed reinforcement, stirrups, and formwork as the objective function. The solution is sought for the partially prestressed concrete continuous beam with sufficient strengths and optimal cost.

Results from case studies indicated that the optimal design reduce the construction cost by approximately 12% when comparing with the design of conventional prestressed concrete beam. Moreover, it is found that varying the depth of the beam to a more appropriate value can yield some further cost reduction.



Department Civil Engineering  
Field of study Civil Engineering  
Academic year 2007

Student's signature.....  
Advisor's signature.....

Signature of student: Thanyaporn Wanlieng  
Signature of advisor: Asst. Prof. Watanachai Smittakorn

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผศ.ดร.วัฒนชัย สมิตธากร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ยิ่งต่อการวิจัย รวมทั้งช่วยตรวจทาน แก้ไขส่วนที่บกพร่องต่างๆ และติดตามดูแลเอาใจใส่อย่างใกล้ชิด ตั้งแต่เริ่มต้นวิจัย จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จเป็นรูปเล่ม

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาตรี ประธานคณะกรรมการ และ ดร.ทรงเกียรติ มธุพนธ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำชี้แนะที่เป็นประโยชน์เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ท้ายสุดนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณครอบครัว และเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ สนับสนุน และให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้า ด้วยความเต็มใจเสมอมา



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ฎ
บทที่ 1	1
1.1	1
1.2	2
1.3	2
1.4	2
บทที่ 2	4
2.1	4
2.2	6
2.2.1	7
2.2.2	8
2.2.3	9
2.2.4	13
2.2.5	15
2.2.6	19
2.3	20
2.3.1	20
2.3.2	21

	2.3.3	ข้อกำหนดของการเอนตัว .....	23
	2.3.4	ความกว้างรอยแตกร้าวสูงสุด (Maximum crack width).....	23
	2.3.5	ข้อกำหนดเกี่ยวกับแรงเฉือน.....	24
บทที่	3	ขั้นตอนและวิธีการวิจัย.....	27
	3.1	ขั้นตอนการวิจัย.....	27
	3.2	วิธีการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วนโดยใช้ค่าอัตราส่วนการอัดแรง (PPR).....	27
	3.3	สมการเป้าหมาย.....	31
บทที่	4	การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผล.....	33
	4.1	รายงานการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลตัวอย่างที่ 1.....	33
	4.2	รายงานการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลตัวอย่างที่ 2.....	37
	4.3	รายงานการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลตัวอย่างที่ 3.....	41
บทที่	5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	43
	5.1	สรุปผล.....	43
	5.2	ข้อเสนอแนะ.....	43
		รายการอ้างอิง.....	44
		ภาคผนวก.....	46
		รายงานผลการคำนวณออกแบบ ของตัวอย่างที่ 1.....	47
		รายงานผลการคำนวณออกแบบ ของตัวอย่างที่ 2.....	54
		รายงานผลการคำนวณออกแบบ ของตัวอย่างที่ 3.....	65
		ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	75



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	ค่าตัวคูณเพื่อคำนวณการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นในระยะยาว.....19
ตารางที่ 2.2	พิกัดความกว้างรอยแตกร้าวสูงสุดที่ยอมให้..... 23
ตารางที่ 4.1	ผลการวิเคราะห์และออกแบบจากงานวิจัย กับผลจาก Naaman และ Siriaksorn ที่ PPR = 0.72.....36
ตารางที่ 4.2	เปรียบเทียบผลการคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมจากงานวิจัย กับผลการคำนวณออกแบบของ Naaman และ Siriaksorn.....37
ตารางที่ 4.3	ผลการคำนวณออกแบบจากงานวิจัย และจากตัวอย่างของ ดร.นเรศ..... 41
ตารางที่ 4.4	เปรียบเทียบราคาค่าก่อสร้างที่ความลึกของหน้าตัดคานต่างๆกัน..... 42

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1	โมเมนต์หลัก โมเมนต์รอง โมเมนต์สุทธิ และแนวแรงอัดลัพท์เนื่องจากการอัดแรงในคานต่อเนื่อง..... 6
รูปที่ 2.2	แรงพุงและโมเมนต์ที่เกิดจากแนวเหล็กเสริมอัดแรง..... 8
รูปที่ 2.3	หน้าตัดของคานหลังเกิดการแตกร้าว.....11
รูปที่ 2.4	แสดงหน้าตัด หน่วยการยึดหดและแรงกระทำ..... 13
รูปที่ 2.5	โมเมนต์ความเคี้ยวของคานแตกร้าว โมเมนต์ความเคี้ยวประสิทธิผลและความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าการเอนตัวแบบเชิงเส้นคู่.....17
รูปที่ 3.1	แผนภาพ Flow chart แสดงขั้นตอนการออกแบบ.....30
รูปที่ 3.2	แสดงระยะการเสริมเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่หน้าตัดต่างๆ..... 32
รูปที่ 4.1	แสดงหน้าตัดคาน และแนวการวางเหล็กเสริมอัดแรง ตัวอย่างที่ 1 (หน่วย : เมตร).....35
รูปที่ 4.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนการอัดแรงกับราคาค่าก่อสร้าง ตัวอย่างที่ 1.....36
รูปที่ 4.3	แสดงหน้าตัดคาน และแนวการวางเหล็กเสริมอัดแรง ตัวอย่างที่ 2 และ 3 (หน่วย : เมตร).....38
รูปที่ 4.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนการอัดแรงกับราคาค่าก่อสร้าง ตัวอย่างที่ 2..... 40
รูปที่ 4.5	แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความลึกของหน้าตัดคานเปรียบเทียบกับราคา..... 42

## คำอธิบายสัญลักษณ์

$a$	ความลึกของบล็อกหน่วยแรงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเทียบเท่า
$A$	พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของคอนกรีต
$A_b$	พื้นที่หน้าตัดคอนกรีตในส่วนที่รับแรงดึงต่อเหล็กเสริมหนึ่งเส้น
$A_f$	พื้นที่ผิวของไม้แบบ
$A_{pf}$	พื้นที่ของเหล็กเสริมที่ทำให้เกิดหน่วยแรงอัดในตัวแกน
$A_{ps}$	พื้นที่ของเหล็กเสริมอัดแรงในกลุ่มรับแรงดึง
$A_s$	พื้นที่ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงในกลุ่มรับแรงดึง
$A_{s,b}$	ปริมาณเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่หน้าตัดวิกฤตที่กึ่งกลางคาน
$A_{s,t}$	ปริมาณเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่หน้าตัดวิกฤตที่จุดรองรับ
$A'_s$	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่รับแรงอัด
$A_v$	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน
$b$	ความกว้างของคานด้านที่เกิดหน่วยแรงอัด
$b_w$	ความกว้างของเวคาน
$C_c$	ราคาค่าวัสดุและค่าแรงต่อปริมาตรคอนกรีต
$C_f$	ราคาค่าวัสดุและค่าแรงต่อพื้นที่ไม้แบบ
$C_p$	ราคาค่าวัสดุและค่าแรงต่อน้ำหนักเหล็กเสริมอัดแรง
$C_s$	ราคาค่าวัสดุและค่าแรงต่อน้ำหนักเหล็กเสริมไม่อัดแรง
$C_t$	ราคารวมทั้งหมดของคานคอนกรีตต่อเนื้ออัดแรงบางส่วน
$d$	ระยะจากผิวรับแรงอัด (Compressive fiber) ถึงจุดศูนย์กลางของแรงดึงในเหล็กเสริม
$d_c$	ระยะหุ้มคอนกรีตถึงตำแหน่งเหล็กเสริมไม่อัดแรง
$d_p$	ระยะจากผิวรับแรงอัดจนถึงจุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมอัดแรง
$d_s$	ระยะจากผิวรับแรงอัดจนถึงจุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมไม่อัดแรง
$e$	ระยะเยื้องศูนย์กลาง
$E_c$	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต
$E_{ps}$	โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมอัดแรง
$E_s$	โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมไม่อัดแรง
$f'_{ci}$	กำลังอัดประลัยของคอนกรีตขณะถ่ายแรง
$f'_c$	กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่ออายุ 28 วัน

$f_d$	หน่วยแรงคอนกรีตบริเวณผิวที่เกิดการแตกร้าวเนื่องจากน้ำหนักคาน
$f_{pc}$	หน่วยแรงอัดในคอนกรีตบริเวณศูนย์กลางของหน้าตัดเนื่องจากการอัดแรง
$f_{pe}$	หน่วยแรงคอนกรีตบริเวณผิวที่เกิดการแตกร้าวเนื่องจากการอัดแรง
$f_{pi}$	หน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงขณะถ่ายแรง
$f_{ps}$	หน่วยแรงดึงระบุในเหล็กเสริมอัดแรง
$f_{pu}$	กำลังดึงประลัยของเหล็กเสริมอัดแรง
$f_{py}$	กำลังดึงครากของเหล็กเสริมอัดแรง
$f_r$	โมดูลัสของการแตกร้าว
$f_s$	หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริม
$f_{se}$	หน่วยแรงดึงประสิทธิภาพของเหล็กเสริมอัดแรง
$f_t$	หน่วยแรงดึงที่ผิว
$F_{pu}$	กำลังดึงประลัยของเหล็กเสริมอัดแรง
$I$	โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดคาน
$I_{cont.end}$	โมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิภาพที่ปลายคานด้านต่อกับคาน
$I_{cr}$	โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดคานแตกร้าว
$I_e$	โมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิภาพ
$I_{e1}, I_{e2}$	โมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิภาพที่ปลายคานทั้งสองข้าง
$I_g$	โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดคาน
$I_m$	โมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิภาพที่กึ่งกลางคาน
$L$	ความยาวทั้งหมดของคาน
$L_b$	ระยะเสริมเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่หน้าตัดวิกฤตที่กึ่งกลางคาน
$L_{ps}$	ความยาวของเหล็กเสริมอัดแรง
$L_t$	ระยะเสริมเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่หน้าตัดวิกฤตที่จุดรองรับ
$L_v$	ความยาวเหล็กเสริมรับแรงเฉือน 1 ปลาย
$M$	ผลรวมของโมเมนต์รอบจุดศูนย์กลางถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรงเท่ากับ
$M_{cr}$	โมเมนต์ที่เพิ่มจากโมเมนต์ของน้ำหนักคานที่ทำให้เกิดการแตกร้าว เนื่องจากผลของโมเมนต์ที่หน้าตัดที่พิจารณา
$M_g$	โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักของคาน
$M_{max}$	โมเมนต์เพิ่มส่วน (factored moment) ที่มากที่สุด เนื่องจากน้ำหนักบรรทุก ทั้งหมดยกเว้นน้ำหนักคานที่หน้าตัดพิจารณา
$M_{net}$	โมเมนต์ภายในสุทธิ (Net moment)
$M_p$	โมเมนต์คัดจากผลของการอัดแรง

$M_{pri}$	โมเมนต์หลัก (Primary moment)
$M_{sd}$	โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกคงที่เพิ่มเติม
$M_{sec}$	โมเมนต์รอง (Secondary moment)
$M_u$	โมเมนต์คัตประลัย
$M_{ll}$	โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกจร
$N_v$	จำนวนปลอกของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน
$P$	แรงอัด
$P_e$	แรงอัดประสิทธิผล
$S$	ระยะห่างของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน
$V_c$	กำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีต
$V_{ci}$	กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าวเนื่องจากผลรวมกันของโมเมนต์และแรงเฉือน
$V_{cw}$	กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือน
$V_d$	แรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักตัวคานที่หน้าตัดที่พิจารณา
$V_i$	แรงเฉือนเพิ่มส่วน (factored shears) เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกทั้งหมดยกเว้นน้ำหนักคานที่หน้าตัดพิจารณา
$V_{net}$	แรงเฉือนภายในสุทธิ
$V_p$	แรงประกอบย่อยแนวตั้งของแรงอัดในเหล็กเสริมอัดแรงที่หน้าตัดที่พิจารณา
$V_{pri}$	แรงเฉือนหลัก
$V_s$	กำลังต้านทานแรงเฉือนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน
$V_{sec}$	แรงเฉือนรอง
$V_u$	แรงเฉือนเพิ่มส่วนที่ต้องการออกแบบ
$W_{max}$	ความกว้างรอยแตกร้าวสูงสุด
$y_b$	ระยะจากแกนสะเทินไปยังผิวล่างของหน้าตัด
$y_t$	ระยะจากแกนสะเทินไปยังผิวบนของหน้าตัด
$\delta_G$	การแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง
$\delta_{LL}$	การแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกจร
$\delta_P$	การโก่งตัวเนื่องจากการอัดแรง
$\delta_{SD}$	การแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกคงที่เพิ่มส่วน
$\phi$	แนวเหล็กเสริมอัดแรง

$\Delta f_{ps}$	หน่วยแรงในเหล็กเสริมอัดแรงที่เปลี่ยนไป เทียบกับหน่วยแรงในลวดอัดแรงเมื่อความเครียดในคอนกรีตที่ระดับเหล็กเสริมเท่ากับศูนย์ ( $\epsilon_{cs} = 0$ )
$\gamma_p$	ตัวคูณสำหรับเหล็กเสริมอัดแรง
$\beta$	อัตราส่วนระหว่างระยะจากผิวรับแรงดึงถึงแกนสะเทิน และระยะศูนย์ถ่วงเหล็กเสริมถึงแกนสะเทิน
$\omega_s$	หน่วยน้ำหนักของเหล็ก
$\bar{\omega}$	ค่าดัชนีเหล็กเสริมเฉลี่ย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การก่อสร้างในปัจจุบันได้มีการนำระบบคานคอนกรีตอัดแรงมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากคานคอนกรีตอัดแรงมีข้อได้เปรียบเหนือคานคอนกรีตไม่อัดแรง คือสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้นและเกิดการแอ่นตัวน้อยกว่า แม้จะมีขนาดหน้าตัดที่เท่ากัน อย่างไรก็ตามคานคอนกรีตอัดแรงก็ยังมีข้อด้อย คือมีราคาค่าก่อสร้างที่สูงกว่า และปริมาณแรงอัดคานที่มีค่าสูง อาจทำให้เกิดการแตกร้าวที่ปลายคาน และคานอาจเกิดการโก่งตัวขึ้นมากในขณะที่ยังไม่รับแรง

คานคอนกรีตอัดแรงบางส่วน คือคานคอนกรีตที่ประกอบด้วยเหล็กเสริมอัดแรง และเหล็กเสริมไม่อัดแรง ซึ่งหลักการดังกล่าวจะช่วยให้ขนาดของคานคอนกรีตอัดแรง และการแตกร้าวที่ปลายคานลดลง นอกจากนี้ยังทำให้คานมีความเหนียวเพิ่มขึ้นด้วย ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาการออกแบบคานคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรงบางส่วน เนื่องจากคานต่อเนื่องมีข้อดีกว่าคานช่วงเดียวคือความสามารถในการรับแรงกระทำเพิ่มขึ้น ค่าโมเมนต์ และการโก่งตัวจะน้อยลง และความต่อเนื่องของโครงสร้างยังช่วยลดความวิบัติต่อเนื่องได้ กล่าวคือเมื่อเกิดการวิบัติขึ้นที่จุดๆหนึ่งในโครงสร้าง ไม่ได้ทำให้ทั้งโครงสร้างเกิดการวิบัติ แต่จะมีการกระจายของแรงภายในเกิดขึ้น และทำให้โครงสร้างยังมีความเสถียรภาพอยู่ได้

การออกแบบคานคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรงบางส่วนมีความยุ่งยากกว่าการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วนช่วงเดียว เนื่องจากจตุรรองรับภายในของคานคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรงบางส่วนสามารถเกิดแรงปฏิกิริยาขึ้นจากผลของการอัดแรง แม้จะไม่มีน้ำหนักบรรทุกใดๆมากระทำก็ตาม และแรงปฏิกิริยาที่จตุรรองรับนี้ทำให้เกิดโมเมนต์รอง (Secondary moment) ขึ้น อย่างไรก็ตามการออกแบบต้องสอดคล้องทั้งที่สภาวะถ่ายแรง สภาวะรับน้ำหนักใช้งาน และสภาวะรับน้ำหนักประลัย งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นเพื่อใช้ในการคำนวณออกแบบคานคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรงบางส่วน เพื่อให้ได้ราคาค่าก่อสร้างที่ประหยัดที่สุด โดยที่โครงสร้างยังสามารถรับน้ำหนักใช้งานและน้ำหนักประลัยได้อย่างปลอดภัย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาวิธีการออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับคานคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรงบางส่วน
2. พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสม เพื่อความสะดวกและลดความผิดพลาดที่มักเกิดขึ้นในการคำนวณด้วยมือ
3. ศึกษาและเปรียบเทียบผลที่ได้จากการออกแบบกับตัวอย่างในงานวิจัยอื่น

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของการวิจัยและสมมติฐานที่ใช้ในการวิจัยนี้มีดังต่อไปนี้

1. พิจารณาระบบอัดแรงภายหลัง (post-tensioned) ทั้งแบบมีและไม่มีแรงยึดเหนี่ยว
2. พิจารณาเฉพาะน้ำหนักบรรทุกทุกแผ่ (uniform load) ที่กระทำในแนวตั้งเท่านั้น
3. พิจารณาเฉพาะแนวเหล็กเสริมอัดแรงเป็นรูปโค้งพาราโบลา และไม่มีการเอียงศูนย์ที่ปลายคาน
4. พิจารณาความลึกประสิทธิภาพของเหล็กเสริมอัดแรงเท่ากันทุกหน้าตัดวิกฤต
5. พิจารณาคานที่มีหน้าตัดคงที่ตลอดความยาวคาน โดยจะพิจารณาหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปตัว T และรูปตัว I
6. พิจารณาออกแบบเฉพาะเหล็กเสริมรับแรงดึง และเหล็กเสริมรับแรงเฉือน
7. ไม่พิจารณาผลของแรงอัดที่บริเวณปลายคาน
8. ไม่พิจารณาผลของการปรับกระจายโมเมนต์

## 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ศึกษาผลงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิธีการออกแบบคานคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรงบางส่วน
2. พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้ในการคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสม



3. เปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมกับตัวอย่างในงานวิจัยอื่น เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม
4. ปรับปรุงแก้ไขโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับคานคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรงบางส่วน ประกอบไปด้วย การศึกษาทฤษฎีของคานคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรง การศึกษาวิธีออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วนโดยใช้ อัตราส่วนของการอัดแรง (Partial prestressing ratio, *PPR*) เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมทั้งด้านกำลังและราคา

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วน สามารถแบ่งออกเป็นส่วนของการออกแบบคาน ส่วนของการศึกษาพฤติกรรมของคาน และส่วนของการหาจุดเหมาะสมด้วยวิธีต่างๆ

ในส่วนของการเสนอวิธีคำนวณออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วน ได้มีการเสนอไว้หลายวิธี โดย Moustafa (1977) ได้เสนอวิธีการออกแบบโดยใช้แผนภาพความสัมพันธ์ (Interactive diagrams) เพื่อให้การวิเคราะห์หน้าตัดที่สภาวะรับน้ำหนักใช้งาน และสภาวะรับน้ำหนักประลัยทำได้ง่ายขึ้น ซึ่งประกอบไปด้วยแผนภาพความสัมพันธ์เพื่อออกแบบกำลังประลัยสำหรับหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยให้สอดคล้องกับหน่วยการยึดหด และแผนภาพความสัมพันธ์สำหรับออกแบบความถี่รอยแตกร้าว และหน่วยแรงในเหล็กเสริมที่น้ำหนักใช้งาน Naaman และ Amnuayporn Siriakson (1979) ได้เสนอวิธีการออกแบบโดยใช้อัตราส่วนการอัดแรง (Partially prestress ratio, *PPR*) ซึ่งเป็นสัดส่วนของการรับแรงระหว่างเหล็กเสริมอัดแรง และเหล็กเสริมไม่อัดแรง เพื่อให้หน้าตัดมีกำลังรับแรงค้ำเพียงพอและสอดคล้องกับคุณสมบัติด้านการใช้งาน ต่อมา Inomata (1982) ได้เสนอวิธีการออกแบบปริมาณเหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมไม่อัดแรง ให้สอดคล้องกับกำลังรับแรงค้ำประลัย และหน่วยแรงที่ยอมให้ในเหล็กเสริมที่สภาวะใช้งานในเวลาเดียวกัน โดยให้หน่วยแรงในเหล็กเสริมที่สภาวะใช้งานเป็นตัวแปรในการควบคุมความกว้างของรอยแตกร้าว กำลังความด้า และการแอ่นตัว และ Rao (1991) ได้เสนอให้ใช้วิธีระดับของแรงอัด (Degree of prestress) โดยกำหนดให้ขนาดหน้าตัดคานเป็นตัวแปร เพื่อลดความยุ่งยากในการออกแบบ โดยหน่วยแรงของคอนกรีตที่สภาวะถ่ายแรงไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้ หน่วยแรงในเหล็กเสริมอัดแรง เหล็กเสริมไม่อัดแรง และคอนกรีตที่สภาวะใช้งานมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ยอมให้

ในส่วนของการศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วน และการวิเคราะห์หาค่าต่างๆที่เกี่ยวข้อง ได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง โดยขอยกตัวอย่างดังนี้ Harajli และ Naaman (1985) ทำการทดลองเพื่อสังเกตพฤติกรรมความล้า (Fatigue) ที่สภาวะต่างๆของคาน Harajli และ Hijazi (1991) เสนอวิธีการหาหน่วยแรงในเหล็กเสริมอัดแรงที่สภาวะประลัยในคานระบบไร้แรงยึดเหนี่ยว ด้วยการวิเคราะห์แบบไร้เชิงเส้น Boczkaj (1994) ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์หน้าตัดคานด้วยการประยุกต์สูตรของคาร์แดน (Cardan's formula) เพื่อหาผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact solution) ของสมการกำลังสาม โดยผลที่ได้เป็นการกระจายของสมการ Sakr และ Lapos (1998) ทำการศึกษาการคืบ การหดตัวของคอนกรีต และหน่วยแรงดึงของคอนกรีต เนื่องจากผลการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในคานประกอบตัวเนื่อง Chouman และ Al-Handasah (2003a, 2003b) ได้ทำการทำนายการเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง การเสื่อมลดของแรงอัดในคอนกรีต และยังทำนายค่าการแอ่นตัวแบบทันทีทันใดและการแอ่นตัวระยะยาว โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่สร้างขึ้นเป็นช่วงเวลา มากกว่าหนึ่งปี Au, Du และ Cheung (2004) ได้ทำการทำนายหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมและในคอนกรีตที่สภาวะใช้งานขององค์อาคารระบบไร้แรงยึดเหนี่ยว

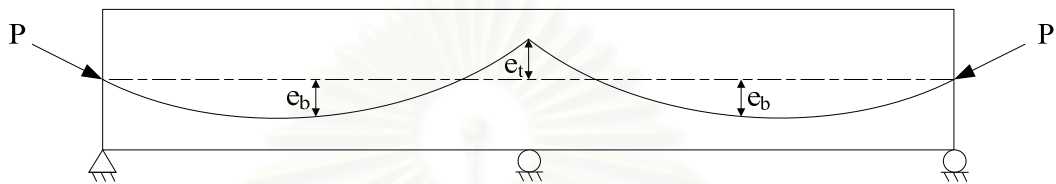
ในส่วนของการหาจุดเหมาะสมของการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วน ได้มีการใช้วิธีต่างๆ โดย Saouma และ Murad (1984) ได้เสนอวิธีเพื่อหาค่าต่ำสุดสำหรับคานช่วงเดียว โดยใช้ Penalty-Function ควบคู่กับวิธี Quasi-Newton unconstrained ในการคำนวณหาค่าต่ำสุดของคานช่วงเดียว Khaleel และ Itani (1993) ใช้วิธี Sequential quadratic ในการคำนวณหาค่าต่ำสุดของคานช่วงเดียวเช่นกัน โดยให้ขนาดหน้าตัด ปริมาณเหล็กเสริมอัดแรง ปริมาณเหล็กเสริมไม่อัดแรง และระยะเรียงของเหล็กรับแรงเฉือนเป็นตัวแปร Al-Gahtani, Al-Saadoun และ Abul-Feilat (1995) ทำการเขียนโปรแกรมเพื่อหาค่าต่ำสุดของคานต่อเนื่อง 2 ช่วง และกนกอร แก้วนิรัตน์ (2001) ใช้วิธี Simplex ในการคำนวณหาค่าต่ำสุดคานช่วงเดียว

สำหรับในงานวิจัยนี้จะทำการคำนวณออกแบบหาปริมาณเหล็กเสริมอัดแรง และปริมาณเหล็กเสริมไม่อัดแรงด้วยวิธีอัตราส่วนการอัดแรง (Partially prestress ratio, PPR) ที่หน้าตัดวิกฤตสูงสุด และออกแบบด้วยโมเมนต์ประลัยที่หน้าตัดวิกฤตอื่นๆ แล้วทำการตรวจสอบตามข้อกำหนด ACI318M-02 จากนั้นทำการคิดราคาก่อสร้าง ซึ่งคิดราคาในส่วนของคอนกรีต เหล็กเสริมอัดแรง เหล็กเสริมไม่อัดแรง เหล็กเสริมรับแรงเฉือน และไม้แบบ โดยจะทำการออกแบบในช่วง PPR ที่กำหนด และช่วงความลึกของหน้าตัดที่กำหนด ผลลัพธ์ที่ได้คือผลการคำนวณที่ได้จาก PPR และความลึกของหน้าตัดคานที่ให้ราคาต่ำสุดและผ่านตามข้อกำหนด

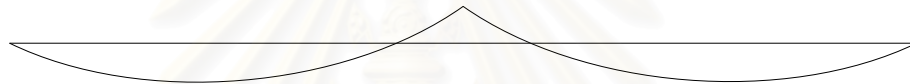
## 2.2 ทฤษฎีของคานาคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรงบางส่วน

ผลของการอัดแรงในคานาคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรง ทำให้เกิดโมเมนต์บนหน้าตัด 2 ส่วน คือ

ก) โมเมนต์หลัก (Primary moment,  $M_{pri}$ ) มีค่าเท่ากับแรงอัด  $P$  คูณกับระยะเยื้องศูนย์กลาง  $e$  โมเมนต์หลักนี้เกิดขึ้นทั้งในคานาคีเทอร์มินิต และคานาอินดีเทอร์มินิต



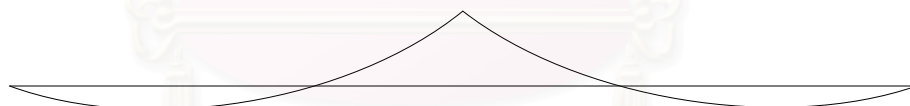
(ก) แนวการวางเหล็กเสริมอัดแรง



(ข) โมเมนต์หลัก



(ค) โมเมนต์รอง



(ง) โมเมนต์สุทธิเนื่องจากการอัดแรง



(จ) แนวแรงอัดหลัก

รูปที่ 2.1 โมเมนต์หลัก โมเมนต์รอง โมเมนต์สุทธิ และแนวแรงอัดหลักเนื่องจากการอัดแรง  
ในคานาต่อเนื่อง

ข) โมเมนต์รอง (Secondary moment,  $M_{sec}$ ) เป็นโมเมนต์ที่เกิดจากแรงปฏิกิริยาเพิ่มเติมที่จุดรองรับเนื่องจากการอัดแรงในคานอินดิเทอร์มินेट แต่ไม่เกิดในคานดิเทอร์มินेट

โมเมนต์ภายในสุทธิ (Net moment,  $M_{net}$ ) ที่หน้าตัดของคานคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรง จะมีค่าเท่ากับผลรวมของโมเมนต์หลัก  $M_{pri}$  และโมเมนต์รอง  $M_{sec}$

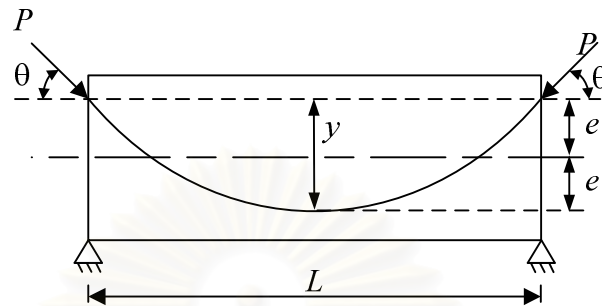
ทำนองเดียวกัน แรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดของคานคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรง เนื่องจากการอัดแรงก็สามารถแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ แรงเฉือนหลัก  $V_{pri}$  และแรงเฉือนรอง  $V_{sec}$  แรงเฉือนหลักในคอนกรีตจะเท่ากับแรงอัด  $P$  คูณกับความลาดชันของแนวเหล็กเสริมอัดแรง  $\phi$  ที่หน้าตัดที่พิจารณา ส่วนแรงเฉือนรองที่หน้าตัดคอนกรีตสามารถคำนวณได้จากแรงปฏิกิริยาเพิ่มเติมที่จุดรองรับเนื่องจากการอัดแรง และแรงเฉือนภายในสุทธิ  $V_{net}$  ที่หน้าตัดคอนกรีตของคานคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรง ก็จะมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงเฉือนหลัก  $V_{pri}$  และแรงเฉือนรอง  $V_{sec}$

จากที่ได้กล่าวมาแล้ว โมเมนต์สุทธิเนื่องจากการอัดแรงมีค่าเท่ากับผลรวมของโมเมนต์หลักและโมเมนต์รอง โดยที่โมเมนต์หลักหาได้จากแรงอัด  $P$  คูณกับระยะเยื้องศูนย์กลาง  $e$  และโมเมนต์รองหาได้จากแรงอัด  $P$  คูณกับระยะขยับ  $a$  ดังนั้น โมเมนต์สุทธิหาได้จาก  $-Pe + Pa$  จากรูปที่ 2.1(จ) จะเห็นว่าระยะห่างระหว่างแนวแรงอัดลัพธ์ของคอนกรีตกับแนวศูนย์กลางของหน้าตัดคาน  $e^*$  มีค่าเท่ากับ  $-e + a$  ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า โมเมนต์สุทธิเนื่องจากการอัดแรงสามารถหาได้จากแรงอัด  $P$  คูณกับระยะระหว่างแนวแรงอัดลัพธ์ของคอนกรีตกับแนวศูนย์กลางของหน้าตัด  $e^*$

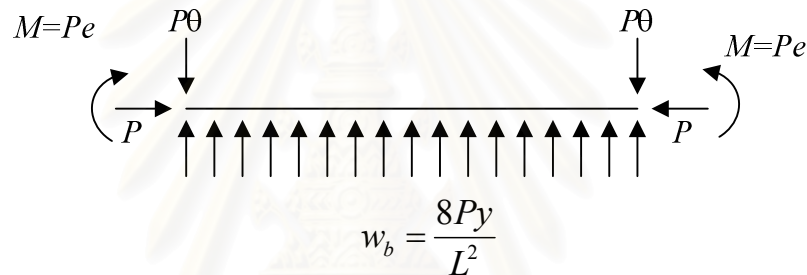
### 2.2.1 การวิเคราะห์ผลของการอัดแรง

การวิเคราะห์ผลของการอัดแรงในคานต่อเนื่อง นิยมใช้วิธีแรงพุง (Load balancing method หรือ load equivalent method) การวิเคราะห์คานคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรงวิธีนี้ จะพิจารณาแรงพุงระหว่างช่วงคานเนื่องจากการอัดแรงและแรงที่ปลายคานทั้งสองข้าง เป็นแรงภายนอกที่กระทำต่อคาน แรงพุงระหว่างช่วงคานที่เกิดจากการอัดแรงเป็นผลมาจากการเปลี่ยนมุมของแนวเหล็กเสริมอัดแรง การเปลี่ยนมุมที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งจุดรองรับภายในไม่ต้องนำมาคำนวณเพราะไม่มีผลต่อค่าของโมเมนต์ แรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนมุมที่จุดรองรับภายในนี้จะถ่ายลงสู่จุดรองรับโดยตรง และโมเมนต์ที่ได้จากการวิเคราะห์เป็น โมเมนต์สุทธิที่เกิดขึ้นเนื่องจากการอัดแรง ซึ่งมีค่าเท่ากับผลรวมของโมเมนต์หลักกับโมเมนต์รอง โมเมนต์หลักเป็น โมเมนต์ที่คำนวณได้โดยตรงจากแนวเหล็กเสริมอัดแรง จากนั้น โมเมนต์รองจึงสามารถคำนวณได้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ โมเมนต์สุทธิหักออกด้วยโมเมนต์หลัก

ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะแนวเหล็กเสริมอัดแรงเป็นรูปโค้งพาราโบลา ทำให้ได้แรงพยุกระหว่างช่วงคานและแรงกระทำที่ปลายคานดังรูปที่ 2.2



(ก) แนวเหล็กเสริมอัดแรง



(ข) แรงพยุกระหว่างช่วงคานและแรงกระทำที่ปลายคาน

รูปที่ 2.2 แรงพยุและ โมเมนต์ที่เกิดจากแนวเหล็กเสริมอัดแรง

## 2.2.2 การคำนวณออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วนโดยใช้อัตราส่วนของการอัดแรง (Partial Prestressing Ratio, PPR)

Naaman และ Amnuayporn Siriakorn (1979) ได้ทำการประยุกต์ใช้สมการวิเคราะห์กำลังดัดประลัย โดยเสนอวิธีการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วน ด้วยวิธีการกำหนดอัตราส่วนของการอัดแรง (Partial prestressing ratio, PPR) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ดัดจากผลของการอัดแรง ( $M_p$ ) และโมเมนต์ดัดประลัย ( $M_u$ )

$$PPR = \frac{M_p}{M_u} \quad (2.1)$$

$$PPR = \frac{A_{ps} f_{ps} \left( d_p - \frac{a}{2} \right)}{A_{ps} f_{ps} \left( d_p - \frac{a}{2} \right) + A_s f_y \left( d_s - \frac{a}{2} \right)} \quad (2.2)$$

และได้เสนอให้ใช้ระยะความลึกประสิทธิภาพ  $d$  แทน  $d_p$  และ  $d_s$  ในการคำนวณออกแบบ

$$d = \frac{A_{ps} f_{ps} d_p + A_s f_y d_s}{A_{ps} f_{ps} + A_s f_y} \quad (2.3)$$

โดยที่  $d$  คือระยะจากผิวรับแรงอัด (compressive fiber) ถึงจุดศูนย์กลางของแรงดึงในเหล็กเสริม ดังนั้นสามารถเขียนสมการของ  $PPR$  ใหม่ได้ดังนี้

$$PPR = \frac{A_{ps} f_{ps}}{A_{ps} f_{ps} + A_s f_y} \quad (2.4)$$

นอกจากนี้ยังได้เสนอสมการหาค่า  $PPR$  สำหรับการเริ่มต้นการออกแบบไว้ด้วย คือ

$$PPR = \frac{1.4M_d}{1.4M_d + 1.7M_{ll}} \quad \text{or} \quad \frac{M_d}{M_d + M_{ll}} \quad (2.5)$$

และค่า  $PPR$  ที่แนะนำสำหรับโครงสร้างคานนั้น อยู่ในช่วง 0.29 ถึง 0.79

### 2.2.3 การวิเคราะห์หน่วยแรงในคอนกรีต เหล็กเสริมไม่อัดแรง และเหล็กเสริมอัดแรง

การวิเคราะห์หน่วยแรงในคอนกรีต แบ่งเป็นการวิเคราะห์ภายใต้หน้าตัดที่ไม่แตกร้าว และภายใต้หน้าตัดที่เกิดการแตกร้าว ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก) หน่วยแรงคดภายใต้หน้าตัดที่ไม่แตกร้าว

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรง สามารถวิเคราะห์หาค่าด้วยการวิเคราะห์คานคอนกรีตช่วงเดียวอัดแรงบางส่วน โดยที่โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักตัวเอง และโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกรวม ต้องคำนวณจากระบบคานต่อเนื่อง และเนื่องจากการอัดแรงในคานต่อเนื่องทำ

ให้เกิดโมเมนต์รองขึ้นนอกเหนือจากโมเมนต์หลัก ดังนั้นการวิเคราะห์ต้องรวมผลของโมเมนต์รองนี้เข้าไปด้วย ในทางปฏิบัติจะรวมผลของโมเมนต์รองเข้าไปกับโมเมนต์หลักเลยเป็นโมเมนต์สุทธิแล้ว จึงใช้โมเมนต์สุทธิในการคำนวณ และเนื่องจากโมเมนต์สุทธิหาได้จากแรง  $P$  คูณกับระยะเยื้องศูนย์กลางของแนวแรงอัดลัพท์  $e^*$  ดังนั้นการวิเคราะห์ในคานต่อเนื่องจึงใช้  $e^*$  แทน  $e$  เพื่อรวมผลของโมเมนต์รองเข้าไปในการคำนวณ ดังนั้นสมการทั่วไปของหน่วยแรงในคานคอนกรีตอัดแรงต่อเนื่องบางส่วน สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\text{ขณะถ่ายแรง} \quad f = \frac{A_{ps} f_{pi}}{A} \pm \frac{A_{ps} f_{pi} e^* y}{I} \mp \frac{M_g y}{I} \quad (2.6)$$

$$\text{ขณะรับน้ำหนักบรรทุกคงที่} \quad f = \frac{A_{ps} f_{se}}{A} \pm \frac{A_{ps} f_{se} e^* y}{I} \mp \frac{(M_g + M_{sd}) y}{I} \quad (2.7)$$

$$\text{ขณะรับน้ำหนักบรรทุกรวม} \quad f = \frac{A_{ps} f_{se}}{A} \pm \frac{A_{ps} f_{se} e^* y}{I} \mp \frac{(M_g + M_{sd} + M_{ll}) y}{I} \quad (2.8)$$

ที่สภาวะถ่ายแรงซึ่งหน้าตัดคานยังไม่เกิดการแตกร้าว สามารถเขียนสมการการคำนวณค่าหน่วยแรงในคอนกรีตที่ระดับต่างๆ ได้ดังนี้

$$\text{ที่ระดับผิวบน} \quad f_{ct} = \frac{A_{ps} f_{pi}}{A} - \frac{A_{ps} f_{pi} e^* y_t}{I} + \frac{M_g y_t}{I} \quad (2.9)$$

$$\text{ที่ระดับผิวด้านล่าง} \quad f_{cb} = \frac{A_{ps} f_{pi}}{A} + \frac{A_{ps} f_{pi} e^* y_b}{I} - \frac{M_g y_b}{I} \quad (2.10)$$

$$\text{ที่ระดับเหล็กเสริมอัดแรง} \quad f_p = \frac{A_{ps} f_{pi}}{A} + \frac{A_{ps} f_{pi} e^* e}{I} - \frac{M_g e}{I} \quad (2.11)$$

$$\text{ที่ระดับเหล็กเสริมไม่อัดแรง} \quad f_s = \frac{A_{ps} f_{pi}}{A} + \frac{A_{ps} f_{pi} e^* (d_s - y_t)}{I} - \frac{M_g (d_s - y_t)}{I} \quad (2.12)$$

ที่สภาวะใช้งานซึ่งคานยังไม่เกิดการแตกร้าว สามารถเขียนสมการการคำนวณค่าหน่วยแรงคล้ายกับที่สภาวะถ่ายแรง โดยเปลี่ยน  $f_{pi}$  เป็น  $f_{se}$  และ  $M_g$  เป็น  $M_g + M_{sd}$  เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ และเป็น  $M_g + M_{sd} + M_{ll}$  เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกรวม

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ} \quad f_{pi} &= \text{หน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงขณะถ่ายแรง} \\ f_{se} &= \text{หน่วยแรงดึงประสิทธิภาพผลของเหล็กเสริมอัดแรง} \\ A_{ps} &= \text{พื้นที่ของเหล็กเสริมอัดแรง} \end{aligned}$$



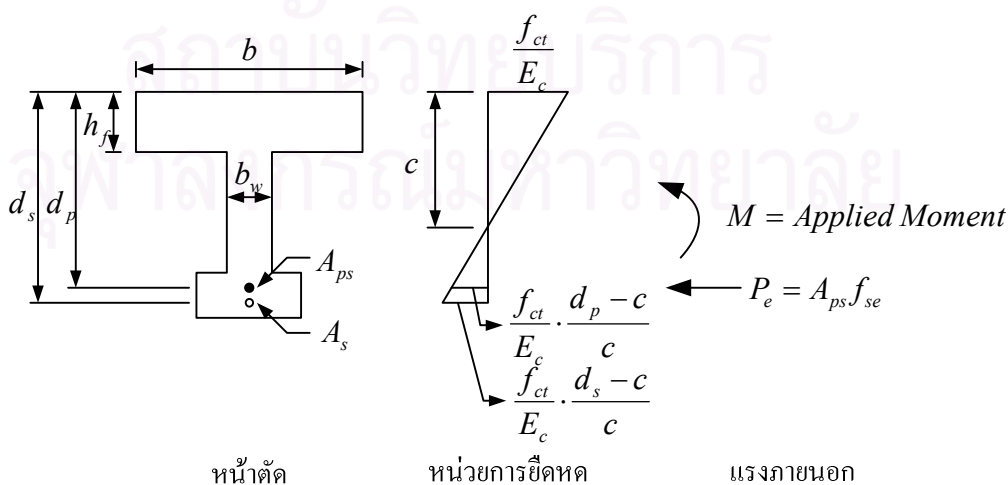
- $A$  = พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของคอนกรีต
- $M_g$  = โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักของคาน
- $M_{sd}$  = โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่เพิ่มเติม
- $M_{ll}$  = โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร
- $I$  = โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดคาน
- $y_t$  = ระยะจากแกนสะเทินไปยังผิวบนของหน้าตัด
- $y_b$  = ระยะจากแกนสะเทินไปยังผิวล่างของหน้าตัด

ข) หน่วยแรงคัดภายใต้หน้าตัดที่แตกร้าว (Inomata, 1982)

การวิเคราะห์หน้าตัดคานคอนกรีตอัดแรงที่สภาวะใช้งาน สามารถพิจารณาจากหน้าตัดที่มีแรงอัดขนาดเท่ากับ แรงภายนอกที่ทำให้หน่วยการยืดหดที่ตำแหน่งเหล็กเสริมอัดแรงมีค่าเท่ากับ ศูนย์ (decompression force) และโมเมนต์มากระทำ แต่เนื่องจากแรงนี้มีค่าแตกต่างกันอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับแรงอัดประสิทธิผล ( $P_e$ ) และอยู่ในด้านเชิงอนุรักษ์ (conservative side) ดังนั้นจึงพิจารณาให้แรงอัดที่กระทำต่อหน้าตัดเท่ากับ  $P_e$

การวิเคราะห์หน่วยแรงของคอนกรีต เหล็กเสริมไม่อัดแรง และเหล็กเสริมอัดแรง ที่สภาวะรับน้ำหนักใช้งาน ใช้หลักการสมดุลของแรง โดยมีข้อสมมติฐานดังนี้

- หน้าตัดของคานสมมาตรรอบระนาบของการคัด
- หน้าตัดก่อนและหลังการคัดยังคงเป็นระนาบ
- ที่สภาวะน้ำหนักใช้งาน ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตและเหล็กเสริมเป็นแบบเชิงเส้น
- ไม่พิจารณากำลังดึงในคอนกรีต



รูปที่ 2.3 หน้าตัดของคานหลังเกิดการแตกร้าว

จากหลักสมมูล ผลรวมของแรงบนหน้าตัดจะเท่ากับ  $P_e$  และผลรวมของโมเมนต์รอบจุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมอัดแรงเท่ากับ  $M$  ดังสมการ

$$\frac{f_{ct}}{2c} \{bc^2 - (b-b_w)(c-h_f)^2\} - n \frac{f_{ct}}{c} \{A_{ps}(d_p - c) + A_s(d_s - c)\} = P_e \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} \frac{f_{ct}}{2c} \{bc^2 - (b-b_w)(c-h_f)^2\} \left\{ (d_p - c) + \frac{2}{3} \cdot \frac{bc^3 - (b-b_w)(c-h_f)^3}{bc^2 - (b-b_w)(c-h_f)^2} \right\} \\ + n \frac{f_{ct}}{c} A_s(d_s - c)(d_s - d_p) = M \quad (2.14) \end{aligned}$$

จากสมการข้างต้น สามารถเขียนใหม่ได้เป็นสมการ

$$\begin{aligned} \left(\frac{c}{d_p}\right)^3 + 3\left(\frac{M}{P_e d_p} - 1\right) \left(\frac{c}{d_p}\right)^2 + 6\left\{\left(\frac{b}{b_w} - 1\right) \left(\frac{h_f}{d_p}\right) \left(\frac{M}{P_e d_p} - 1 + \frac{1}{2} \frac{h_f}{d}\right) + \right. \\ \left. \frac{n_p A_{ps} + n_s A_s}{b_w d_p} \frac{M}{P_e d_p} + \frac{n_s A_s}{b_w d_p} \left(\frac{d_s}{d_p} - 1\right)\right\} \left(\frac{c}{d_p}\right) - 3\left\{\left(\frac{b}{b_w} - 1\right) \left(\frac{h_f}{d_p}\right)^2 \left(\frac{M}{P_e d_p} - 1 + \frac{2}{3} \frac{h_f}{d}\right) \right. \\ \left. + 2\left(\frac{n_p A_{ps}}{b_w d_p} + \frac{n_s A_s}{b_w d_p} \frac{d_s}{d_p}\right) \frac{M}{P_e d_p} + \frac{2n_s A_s}{b_w d_p} \frac{d_s}{d_p} \left(\frac{d_s}{d_p} - 1\right)\right\} = 0 \quad (2.15) \end{aligned}$$

แก้สมการ หาค่า  $c$  แล้วนำไปคำนวณหาค่าหน่วยแรงในเหล็กเสริมไม่อัดแรง เหล็กเสริมอัดแรง และที่ผิวรับแรงอัดของคอนกรีต ดังสมการ

$$f_s = n_s f_{ct} \left(\frac{d_s}{c} - 1\right) \quad (2.16)$$

$$f_p = f_{se} + n_p f_{ct} \left(\frac{d_p}{c} - 1\right) \quad (2.17)$$

$$f_{ct} = \frac{2P_e c}{bc^2 - (b-b_w)(c-h_f)^2 - 2\{n_p A_{ps}(d_p - c) + n_s A_s(d_s - c)\}} \quad (2.18)$$

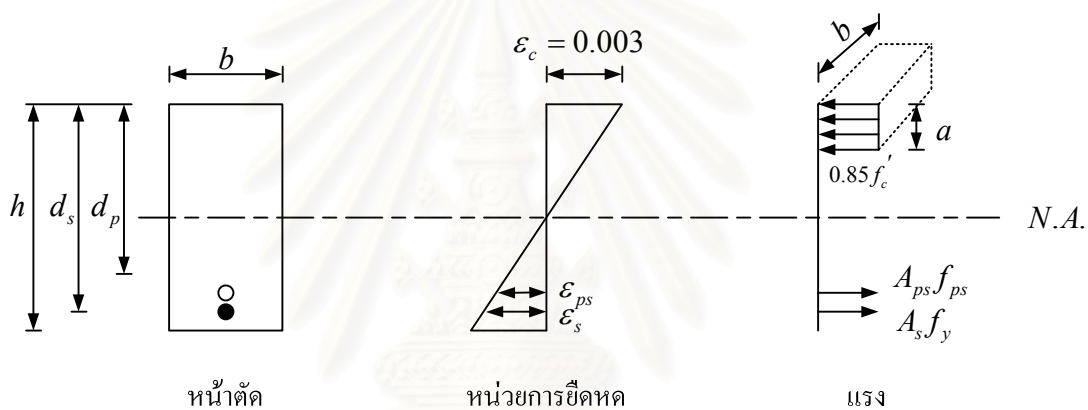
เมื่อ

$$\begin{aligned} n_p &= E_{ps}/E_c \\ n_s &= E_s/E_c \end{aligned}$$

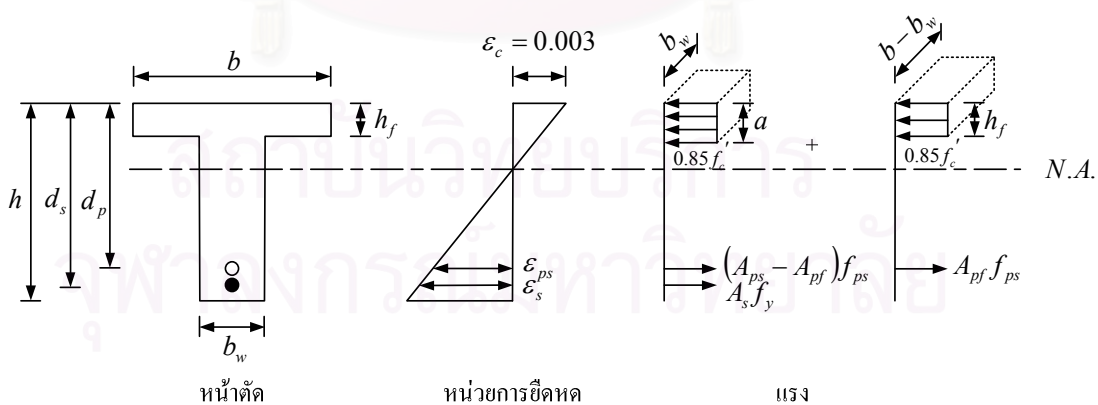
- $E_{ps}$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมอัดแรง  
 $E_s$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมไม่อัดแรง  
 $E_c$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

## 2.2.4 การวิเคราะห์กำลังประลัย

โมเมนต์ระบุนของหน้าตัด ขึ้นอยู่กับลักษณะของหน้าตัดคาน และพฤติกรรมของหน้าตัดขณะรับน้ำหนักประลัย โดยแบ่งเป็น 2 กรณี



(ก) กรณี  $a \leq h_f$



(ข) กรณี  $a > h_f$

รูปที่ 2.4 แสดงหน้าตัด หน่วยการยืดหดและแรงกระทำ

ก) สำหรับหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และหน้าตัดมีปีก ที่มีพฤติกรรมแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ( $a \leq h_f$ )

$$M_n = A_{ps}f_{ps}\left(d_p - \frac{a}{2}\right) + A_s f_y \left(d_s - \frac{a}{2}\right) \quad (2.19)$$

$$a = \frac{A_{ps}f_{ps} + A_s f_y}{0.85f'_c b} \quad (2.20)$$

ข) สำหรับหน้าตัดมีปีก ที่มีพฤติกรรมแบบหน้าตัดรูปตัว T ( $a > h_f$ )

$$M_n = A_{ps}f_{ps}\left(d_p - \frac{h_f}{2}\right) + (A_{ps} - A_{pf})f_{ps}\left(d_p - \frac{a}{2}\right) + A_s f_y \left(d_s - \frac{a}{2}\right) \quad (2.21)$$

$$A_{pf} = \frac{0.85f'_c(b - b_w)h_f}{f_{ps}} \quad (2.22)$$

$$a = \frac{(A_{ps} - A_{pf})f_{ps} + A_s f_y}{0.85f'_c b_w} \quad (2.23)$$

เมื่อ	$A_{ps}$	=	พื้นที่ของเหล็กเสริมอัดแรงในกลุ่มรับแรงดึง
	$A_s$	=	พื้นที่ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงในกลุ่มรับแรงดึง
	$A_{pf}$	=	พื้นที่ของเหล็กเสริมที่ทำให้เกิดหน่วยแรงอัดในตัวแกน
	$d_p$	=	ระยะจากผิวรับแรงอัดจนถึงจุดศูนย์กลางถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรง
	$d_s$	=	ระยะจากผิวรับแรงอัดจนถึงจุดศูนย์กลางถ่วงของเหล็กเสริมไม่อัดแรง
	$f'_c$	=	กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่ออายุ 28 วัน
	$f_{ps}$	=	หน่วยแรงดึงระบุในเหล็กเสริมอัดแรง
	$a$	=	ความลึกของบล็อกหน่วยแรงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเทียบเท่า
	$b$	=	ความกว้างของคานด้านที่เกิดหน่วยแรงอัด
	$b_w$	=	ความกว้างของเอวคาน

## 2.2.5 การวิเคราะห์การแอ่นตัว (Deflection) และการโก่งตัว (Camber)

การโก่งตัวและการแอ่นตัวของคานคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรงบางส่วน ในกรณีที่มีหน้าตัดคานยังไม่เกิดการแตกร้าวสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

การแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง

$$\delta_G = \frac{5W_G L^4}{384E_c I_g} - (M_{G,A} + M_{G,B}) \frac{L^2}{16E_c I_g} \quad (2.24)$$

การแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่เพิ่มส่วน

$$\delta_{SD} = \frac{5W_{SD} L^4}{384E_c I_g} - (M_{SD,A} + M_{SD,B}) \frac{L^2}{16E_c I_g} \quad (2.25)$$

การแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร

$$\delta_{LL} = \frac{5W_{LL} L^4}{384E_c I_g} - (M_{LL,A} + M_{LL,B}) \frac{L^2}{16E_c I_g} \quad (2.26)$$

การโก่งตัวเนื่องจากการอัดแรง

$$\delta_P = -\frac{5P_e e_m L^2}{48E_c I_g} + \frac{P_e L^2}{16E_c I_g} (e_A + e_B) \quad (2.27)$$

เมื่อ	$\delta_G$	=	การแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักคาน
	$\delta_{SD}$	=	การแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่เพิ่มส่วน
	$\delta_{LL}$	=	การแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร
	$\delta_P$	=	การโก่งตัวเนื่องจากการอัดแรง
	$W_G$	=	น้ำหนักบรรทุกทุกเนื่องจากน้ำหนักคาน
	$W_{SD}$	=	น้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่เพิ่มส่วน
	$W_{LL}$	=	น้ำหนักบรรทุกจร

$M_{G,A}, M_{G,B}$	=	โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักของคานที่ปลายคานทั้งสองข้าง
$M_{SD,A}, M_{SD,B}$	=	โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ที่เพิ่มส่วนที่ปลายคานทั้งสองข้าง
$M_{LL,A}, M_{LL,B}$	=	โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรที่ปลายคานทั้งสองข้าง
$e_m, e_A, e_B$	=	ระยะเยื้องศูนย์กลางที่กึ่งกลางคานและปลายคานทั้งสองข้างตามลำดับ

เมื่อเกิดการแตกร้าวขึ้นในหน้าตัด มาตรฐาน ACI กำหนดให้ใช้ความสัมพันธ์ของโมเมนต์และการแอ่นตัวแบบเชิงเส้นคู่ (Bilinear moment deflection relationship) ในการคำนวณการแอ่นตัวแบบทันทีทันใด เมื่อหน่วยแรงดึงที่ผิวนอกสุดที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากับ  $0.7\sqrt{f'_c}$  จะคำนวณโดยใช้โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดคาน ( $I_g$ ) ส่วนโมเมนต์ที่เหลือใช้โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดที่แตกร้าว ( $I_{cr}$ )

สำหรับหน้าตัดคานแตกร้าว ACI อนุญาตให้ใช้โมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิภาพในการคำนวณการแอ่นตัว โดยใช้  $I_e$  แทน  $I_g$  ลงในสูตรคำนวณค่าการแอ่นตัว ซึ่งโมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิภาพนี้เป็นค่าเฉลี่ยที่ใช้ตลอดความยาวคาน

Branson ได้เสนอสมการหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิภาพ สำหรับคานช่วงเดียว ดังนี้

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

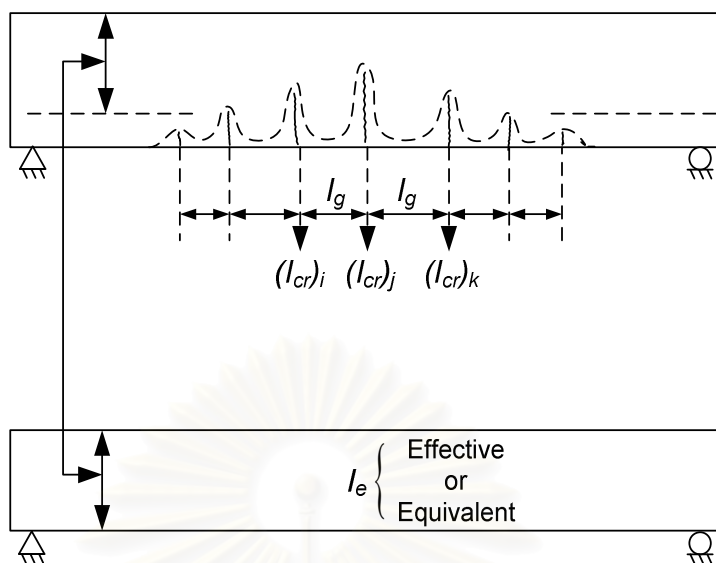
สำหรับคานต่อเนื่อง สามารถคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิภาพได้ โดยการหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิภาพที่จุดต่างๆ ของหน้าตัด แล้วนำมาแทนค่าในสมการ (2.29) และ (2.30) เพื่อหาค่าเฉลี่ยโมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิภาพ ตามกรณีต่างๆ ดังนี้

สำหรับคานต่อเนื่องที่ปลายทั้งสองข้างต่อกับคาน

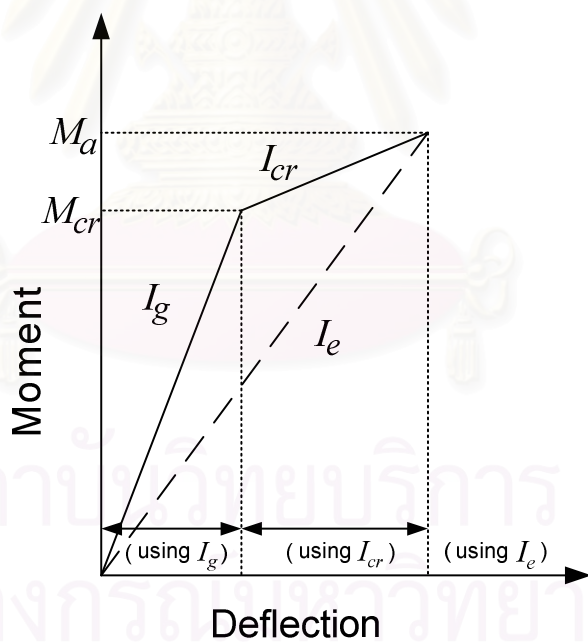
$$Avg. I_e = 0.70I_m + 0.15(I_{e1} + I_{e2}) \quad (2.29)$$

สำหรับคานต่อเนื่องที่ปลายด้านหนึ่งต่อกับคาน

$$Avg. I_e = 0.85I_m + 0.15(I_{cont.end}) \quad (2.30)$$



(ก) โมเมนต์ความเคี้ยวของคานแตกร้าวม และ โมเมนต์ความเคี้ยวประสิทธิผล



(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าการโก่งตัวแบบเชิงเส้นคู่

รูปที่ 2.5 โมเมนต์ความเคี้ยวของคานแตกร้าวม โมเมนต์ความเคี้ยวประสิทธิผล และความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าการแอ่นตัวแบบเชิงเส้นคู่

คู่มือการออกแบบของ PCI เสนอสูตรการคำนวณค่า  $I_{cr}$  ของหน้าตัดคานคอนกรีตอัดแรงไว้ดังนี้

$$I_{cr} = n_p A_{ps} d_p^2 (1 - 1.67 \sqrt{n_p \rho_p}) \quad (2.31)$$

สำหรับหน้าตัดคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วนนั้น สามารถคำนวณค่า  $I_{cr}$  ได้โดยการประยุกต์สมการข้างต้นดังนี้

$$I_{cr} = (n_p A_{ps} d_p^2 + n_s A_s d_s^2) (1 - 1.67 \sqrt{n_p \rho_p + n_s \rho}) \quad (2.32)$$

เมื่อ	$I_e$	=	โมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผล
	$I_g$	=	โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดคาน
	$I_{cr}$	=	โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดคานแตกร้าว
	$I_m$	=	โมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผลที่กึ่งกลางคาน
	$I_{e1}, I_{e2}$	=	โมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผลที่ปลายคานทั้งสองข้าง
	$I_{cont.end}$	=	โมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผลที่ปลายคานด้านต่อกับคาน

สำหรับการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นในระยะยาว เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดที่กระทำต่อคานยกเว้นน้ำหนักบรรทุกจร ทำให้เกิดการคืบในคอนกรีต มีผลทำให้เกิดการแอ่นตัวมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป นอกจากนี้การคลายตัวของเหล็กเสริมอัดแรงทำให้แรงดึงในเหล็กเสริมลดลงด้วย การคำนวณการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นในระยะยาวไม่สามารถทำได้อย่างแม่นยำ เพราะการคืบของคอนกรีตและการคลายตัวของเหล็กเสริมอัดแรงสามารถคำนวณได้ค่าประมาณเท่านั้น

PCI เสนอให้ใช้ค่าตัวคูณซึ่งได้พิจารณาผลการคืบของคอนกรีต การคลายตัวของเหล็กเสริมอัดแรงและอื่นๆ ไว้แล้วที่ระยะเวลายาวช่วงหนึ่ง ดังแสดงในตารางที่ 2.1 การคำนวณจะแยกค่าการแอ่นตัวเนื่องจากแรงต่างๆ ที่กระทำแล้วคูณด้วยค่าตัวคูณ จากนั้นจึงนำค่าทั้งหมดมารวมกัน



ตารางที่ 2.1 ค่าตัวคูณเพื่อคำนวณการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นในระยะยาว

	พื้นไม่หล่อเป็นเนื้อเดียวกับคาน	พื้นหล่อเป็นเนื้อเดียวกับคาน
หลังจากถ่ายแรง		
1. ส่วนการแอ่นตัวลง เนื่องจากน้ำหนักตัวเอง	1.85	1.85
2. ส่วนการโก่งตัวขึ้นเนื่องจากการอัดแรง	1.80	1.80
หลังจากรับน้ำหนักบรรทุก		
3. ส่วนการแอ่นตัวลง เนื่องจากน้ำหนักตัวเอง	2.70	2.40
4. ส่วนการโก่งตัวขึ้นเนื่องจากการอัดแรง	2.45	2.20
5. ส่วนการแอ่นตัวลง เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม	3.00	3.00
6. ส่วนการแอ่นตัวลง เนื่องจากพื้นที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกับคาน	-	2.30

## 2.2.6 การวิเคราะห์ความกว้างรอยแตกร้าว

สมมติฐานของการออกแบบคานคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรงบางส่วน ที่น้ำหนักบรรทุกใช้งานอนุญาตให้เกิดการแตกร้าวได้

มาตรฐาน ACI เสนอให้ใช้สูตรการคำนวณความกว้างรอยแตกร้าวสูงสุด ซึ่งเสนอโดย Gergely และ Lutz และสามารถประยุกต์ใช้กับคอนกรีตอัดแรงบางส่วนได้โดยแทนค่า  $f_s$  ด้วย  $\Delta f_{ps}$

$$W_{\max} = 1.1028 \times 10^{-5} \beta f_s \sqrt{d_c A_b} \quad (2.33)$$

เมื่อ  $W_{\max}$  = ความกว้างรอยแตกร้าวสูงสุด (mm)  
 $f_s$  = หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริม ซึ่งแทนที่ด้วย  $\Delta f_{ps}$  ในกรณีประยุกต์ใช้กับคอนกรีตอัดแรงบางส่วน  
 $\Delta f_{ps}$  = หน่วยแรงในเหล็กเสริมอัดแรงที่เปลี่ยนไป เทียบกับหน่วยแรงในลวดอัดแรงเมื่อความเครียดในคอนกรีตที่ระดับเหล็กเสริมเท่ากับศูนย์ ( $\epsilon_{cs} = 0$ )

$A_b$	=	พื้นที่หน้าตัดคอนกรีตในส่วนที่รับแรงดึงต่อเหล็กเสริมหนึ่งเส้น
$d_c$	=	ระยะหุ้มคอนกรีตถึงตำแหน่งเหล็กเสริมไม่อัดแรง
$\beta$	=	อัตราส่วนระหว่างระยะจากผิวรับแรงดึงถึงแกนสะเทิน และระยะศูนย์ถ่วงเหล็กเสริมถึงแกนสะเทิน

## 2.3 ข้อกำหนดของการออกแบบ

ข้อกำหนดในงานวิจัยนี้เป็นไปตามมาตรฐาน ACI318M-02 ตามสมมติฐานการออกแบบ จำแนกคานคอนกรีตอัดแรงตามพฤติกรรมของคาน เป็น 3 คลาส คือ คลาส U คลาส T และคลาส C โดยจำแนกตามหน่วยแรงดึงที่ผิว  $f_t$  ขณะรับน้ำหนักใช้งานบริเวณคอนกรีตซึ่งถูกอัดแรงก่อน

$$\text{คลาส U} : f_t \geq -0.7\sqrt{f'_c} \quad (2.34)$$

$$\text{คลาส T} : -\sqrt{f'_c} \leq f_t < -0.7\sqrt{f'_c} \quad (2.35)$$

$$\text{คลาส C} : f_t < -\sqrt{f'_c} \quad (2.36)$$

สำหรับคลาส U และคลาส T หน่วยแรงที่น้ำหนักบรรทุกอนุญาตให้หาค่าโดยใช้หน้าตัดที่ไม่แตกร้าวมาคำนวณ สำหรับคลาส C อนุญาตให้ใช้หน้าตัดแตกร้าวมาคำนวณ

### 2.3.1 หน่วยแรงในคอนกรีต

ก) สภาวะถ่ายแรง หน่วยแรงในคอนกรีตก่อนเกิดการเสื่อมลดของแรงดึงอันเนื่องมาจากการหดตัวและการคืบของคอนกรีต และการคลายแรงดึงของลวดอัดแรง ต้องไม่เกินค่าต่อไปนี้

หน่วยแรงอัด	$0.60f'_{ci}$
หน่วยแรงดึง	$0.25\sqrt{f'_{ci}}$

เมื่อ  $f'_{ci}$  = กำลังอัดประลัยของคอนกรีตขณะถ่ายแรง (MPa)

ข) สภาวะใช้งาน สำหรับคลาส U และคลาส T หน่วยแรงอัดในคอนกรีตหลังการเสื่อมลดทั้งหมดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง ต้องไม่เกินค่าต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ขณะรับน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่} & 0.45f'_c \\ \text{ขณะรับน้ำหนักบรรทุกรวมทั้งหมด} & 0.60f'_c \end{aligned}$$

### 2.3.2 ข้อกำหนดของหน่วยแรงในเหล็กเสริมอัดแรง

ก) หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง ต้องไม่เกินค่าต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ขณะดึงด้วยเครื่องดึงเหล็ก} & 0.94f_{py} \text{ แต่ไม่เกิน } 0.80f_{pu} \\ \text{พื้นที่ที่ถ่ายแรงเข้าสู่องค์อาคาร} & 0.70f_{pu} \end{aligned}$$

ข) หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่สถานะประลัย

การออกแบบคานคอนกรีตอัดแรง ซึ่งเป็นโครงสร้างเพื่อรับแรงคด จึงต้องให้เกิดการวิบัติในลักษณะแรงดึงเป็นหลัก โดยปริมาณเหล็กเสริมจะต้องมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์สมมูล มาตรฐาน ACI ได้กำหนดพิสัยของเหล็กเสริมในคอนกรีตอัดแรง เพื่อให้แน่ใจว่าปริมาณเหล็กเสริมน้อยกว่าเกณฑ์สมมูล ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} \omega_p \\ \omega_p + (\omega - \omega') \frac{d_s}{d_p} \\ \omega_{pw} + (\omega_w - \omega'_w) \frac{d_s}{d_p} \end{aligned} \right\} \leq 0.36\beta_1 \quad (2.37)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } \omega &= \rho f_y / f'_c, & \rho &= A_s / bd_s \\ \omega' &= \rho' f_y / f'_c, & \rho' &= A'_s / bd_s \\ \omega_p &= \rho_p f_{ps} / f'_c, & \rho_p &= A_{ps} / bd_p \\ A'_s &= \text{พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่รับแรงอัด} \\ \beta_1 &= 0.85 & \text{เมื่อ } f'_c \leq 30 \text{ MPa} \\ &= 0.85 - 0.05(f'_c - 30)/7 & \text{เมื่อ } f'_c > 30 \text{ MPa} \\ & \text{แต่ไม่น้อยกว่า } 0.65 \end{aligned}$$

สำหรับค่าหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง ( $f_{ps}$ ) สามารถคำนวณโดยใช้พื้นฐานของความสอดคล้องของหน่วยการยึดหดตัว ในกรณีที่หน่วยแรงดึงประสิทธิภาพมีค่าไม่น้อยกว่า  $0.5f_{pu}$  สามารถใช้ค่า  $f_{ps}$  โดยประมาณดังนี้

1. สำหรับคานคอนกรีตอัดแรงชนิดยึดเหนี่ยว (Bonded tendon)

$$f_{ps} = f_{pu} \left\{ 1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \left[ \rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d_s}{d_p} (\omega - \omega') \right] \right\} \quad (2.38)$$

และ  $\left[ \rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d_s}{d_p} (\omega - \omega') \right]$  ต้องไม่น้อยกว่า 0.17

2. สำหรับคานคอนกรีตอัดแรงชนิดไม่ยึดเหนี่ยว (Unbonded tendon) และมีอัตราส่วนความยาวช่วงต่อความลึกไม่เกิน 35

$$\begin{aligned} f_{ps} &= f_{se} + 70 + \frac{f'_c}{100\rho_p} \\ &\leq f_{py} \\ &\leq f_{se} + 420 \quad (MPa) \end{aligned} \quad (2.39)$$

3. สำหรับคานคอนกรีตอัดแรงชนิดไม่ยึดเหนี่ยว และมีอัตราส่วนความยาวช่วงต่อความลึกเกินกว่า 35

$$\begin{aligned} f_{ps} &= f_{se} + 70 + \frac{f'_c}{300\rho_p} \\ &\leq f_{py} \\ &\leq f_{se} + 200 \quad (MPa) \end{aligned} \quad (2.40)$$

เมื่อ	$\gamma_p$	=	ตัวคูณสำหรับเหล็กเสริมอัดแรง
		=	0.55 เมื่อ $f_{py}/f_{pu} \geq 0.80$
		=	0.40 เมื่อ $f_{py}/f_{pu} \geq 0.85$
		=	0.28 เมื่อ $f_{py}/f_{pu} \geq 0.90$

$$\begin{aligned}
 f_{pu} &= \text{กำลังดึงประลัยของเหล็กเสริมอัดแรง} \\
 f_{se} &= \text{หน่วยแรงดึงประสิทธิภาพของเหล็กเสริมอัดแรง} \\
 f_{py} &= \text{กำลังดึงครากของเหล็กเสริมอัดแรง}
 \end{aligned}$$

### 2.3.3 ข้อกำหนดของการแอ่นตัว

การแอ่นตัวของคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วนที่เกิดขึ้นทันทีทันใดหลังจากรับน้ำหนักใช้งาน และในระยะยาว ต้องไม่เกินจากพิกัดที่มาตรฐาน ACI ได้กำหนดไว้ดังนี้

การแอ่นตัวที่เกิดขึ้นทันทีทันใดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร	L/360
การแอ่นตัวที่เกิดขึ้นในระยะยาวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด	L/480

### 2.3.4 ความกว้างรอยแตกร้าวสูงสุด (Maximum crack width)

มาตรฐาน ACI Committee 224 เสนอพิกัดความกว้างรอยแตกร้าวสูงสุดที่ยอมรับให้ ณ สถานะน้ำหนักใช้งานภายใต้สภาวะแวดล้อมต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 พิกัดความกว้างรอยแตกร้าวสูงสุดที่ยอมรับให้

	ความกว้างรอยแตกร้าว (มม.)
พื้นผิวภายในอาคาร	0.41
พื้นผิวภายนอก	0.30
โครงสร้างสัมพัทธสารเคมี	0.18
โครงสร้างสัมพัทธน้ำทะเล	0.15
โครงสร้างกักเก็บน้ำ	0.10

### 2.3.5 ข้อกำหนดเกี่ยวกับแรงเฉือน

ก) กำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีต

กำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีต ( $V_c$ ) จะพิจารณาจากค่าที่น้อยกว่าระหว่างกำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือน ( $V_{cw}$ ) และกำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าวเนื่องจากผลรวมกันของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด ( $V_{ci}$ )

1. กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือน ( $V_{cw}$ )

$$V_{cw} = 0.3(\sqrt{f'_c} + f_{pc})b_w d + V_p \quad (2.41)$$

เมื่อ  $f_{pc}$  = หน่วยแรงอัดในคอนกรีตบริเวณศูนย์กลางของหน้าตัดเนื่องจากการอัดแรง  
 $d$  = ระยะจากผิวที่เกิดหน่วยแรงอัดจนถึงจุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมแต่ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า  $0.8h$   
 $V_p$  = แรงประกอบย่อยแนวตั้งของแรงอัดในเหล็กเสริมอัดแรงที่หน้าตัดที่พิจารณา

2. กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าวเนื่องจากผลรวมกันของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด ( $V_{ci}$ )

$$V_{ci} = \frac{\sqrt{f'_c}}{20} b_w d + V_d + \frac{V_i M_{cr}}{M_{max}} \geq (1/7)\sqrt{f'_c} b_w d \quad (2.42)$$

เมื่อ  $V_d$  = แรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักตัวคานที่หน้าตัดที่พิจารณา  
 $V_i$  = แรงเฉือนเพิ่มส่วน (factored shears) เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด ยกเว้นน้ำหนักคานที่หน้าตัดพิจารณา  
 $M_{max}$  = โมเมนต์เพิ่มส่วน (factored moment) ที่มากที่สุด เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด ยกเว้นน้ำหนักคานที่หน้าตัดพิจารณา

$$\begin{aligned}
 M_{cr} &= \text{โมเมนต์ที่เพิ่มจากโมเมนต์ของน้ำหนักคานที่ทำให้เกิดการแตกร้าว} \\
 &\quad \text{เนื่องจากผลของโมเมนต์ที่หน้าตัดที่พิจารณา} \\
 &= \frac{I}{y_t} \left( \frac{\sqrt{f'_c}}{2} + f_{pe} - f_d \right) \\
 f_r &= \text{โมดูลัสของการแตกร้าวซึ่งใช้ในกรณีนี้เท่ากับ } 0.7\sqrt{f'_c} \quad (MPa) \\
 f_{pe} &= \text{หน่วยแรงคอนกรีตบริเวณผิวที่เกิดการแตกร้าวเนื่องจากการอัดแรง} \\
 f_d &= \text{หน่วยแรงคอนกรีตบริเวณผิวที่เกิดการแตกร้าวเนื่องจากน้ำหนักคาน}
 \end{aligned}$$

ข) กำลังต้านทานแรงเฉือนของเหล็กรับแรงเฉือน

ในกรณีที่กำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตมีค่าไม่เพียงพอที่จะต้านทานแรงเฉือนภายนอก ต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือนเพื่อช่วยในการต้านทานแรงเฉือนภายนอก

$$\begin{aligned}
 \phi(V_c + V_s) &\geq V_u \\
 V_s &\geq \frac{V_u}{\phi} - V_c
 \end{aligned} \quad (2.43)$$

กรณีที่เหล็กเสริมรับแรงเฉือนเป็นหลักปลอกวางตั้งฉากกับแนวแกนของคาน  $V_s$  คำนวณจาก

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{S} \quad (2.44)$$

เมื่อ  $V_c$  = กำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีต  
 $V_s$  = กำลังต้านทานแรงเฉือนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน  
 $V_u$  = แรงเฉือนเพิ่มส่วนที่ต้องการออกแบบ  
 $\phi$  = ตัวคูณลดกำลัง ในที่นี้เท่ากับ 0.85  
 $A_v$  = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน โดยงานวิจัยนี้จะให้เหล็กเสริมรับแรงเฉือนตัดเป็นปลอกสี่เหลี่ยม ทำให้  $A_v$  ของเหล็กปลอกมีค่าเท่ากับ 2 เท่าของพื้นที่หน้าตัดเหล็กที่ใช้  
 $S$  = ระยะห่างของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

ค) ข้อกำหนดสำหรับการออกแบบเหล็กรับแรงเฉือน

1. ระยะห่าง (Spacing) ของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน กรณีวางตั้งฉากกับแนวแกนของคาน  
 - ระยะเรียงของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่วางตั้งฉากกับแนวแกนของคาน จะต้องไม่ห่างเกิน  $0.75h$  หรือ 600 มม.

- ถ้า  $V_s$  มีค่าเกิน  $(1/3)\sqrt{f'_c} b_w d$  ระยะเรียงจะต้องลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง

2. ปริมาณการเสริมเหล็กรับแรงเฉือน

- ค่า  $V_s$  จะต้องไม่ค่าไม่มากกว่า  $(2/3)\sqrt{f'_c} b_w d$  ถ้ามากกว่าให้ออกแบบขนาดหน้าตัดคานให้ใหญ่ขึ้น

- ถ้า  $V_u \leq \frac{\phi V_c}{2}$  ไม่จำเป็นต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือน

- ถ้า  $V_u > \frac{\phi V_c}{2}$  ให้เสริมเหล็กรับแรงเฉือนไม่น้อยกว่าปริมาณต่ำสุดของการเสริมเหล็กรับแรงเฉือน  $(A_v)_{\min}$  ซึ่งหาจาก

$$(A_v)_{\min} = \frac{1}{16} \sqrt{f'_c} \frac{b_w S}{f_y} \geq \frac{0.33 b_w S}{f_y} \quad (2.45)$$

ในกรณีที่แรงอัดประสิทธิผลในเหล็กเสริมอัดแรง  $P_e$  ไม่น้อยกว่า 40% ของกำลังดึงประลัยของเหล็กเสริมอัดแรง  $F_{pu}$  ปริมาณต่ำสุดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนให้ใช้ค่าที่น้อยกว่าระหว่างสมการ (2.45) และ (2.46)

$$(A_v)_{\min} = \frac{A_{ps} f_{pu} S}{80 f_y d} \sqrt{\frac{d}{b_w}} \quad (2.46)$$



## บทที่ 3

### ขั้นตอนและวิธีการวิจัย

#### 3.1 ขั้นตอนการวิจัย

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายที่จะพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับออกแบบคานคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรงบางส่วน เพื่อให้ได้โครงสร้างที่เหมาะสมทั้งด้านกำลังและราคา ซึ่งมีขั้นตอนของการวิจัยดังนี้

1. ศึกษาผลงานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิธีการออกแบบคานคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรงบางส่วน
2. ศึกษาวิธีการออกแบบคานคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรงบางส่วน เพื่อให้สอดคล้องตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ACI318M-02
3. พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์จากการศึกษาข้างต้น
4. เปรียบเทียบผลการออกแบบที่ได้จากโปรแกรม เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม
5. ปรับปรุงแก้ไขโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องเหมาะสม

#### 3.2 วิธีการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วนโดยใช้ค่าอัตราส่วนการอัดแรง (PPR)

การออกแบบโดยใช้ค่า PPR จะออกแบบที่หน้าตัดวิกฤตสูงสุด และที่หน้าตัดวิกฤตอื่นๆ จะทำการคำนวณหาเหล็กเสริมไม่อัดแรงเพิ่มเติมโดยใช้โมเมนต์ดัดประลัยในการออกแบบ การออกแบบดังกล่าวจะทำการออกแบบในช่วงของ PPR ที่กำหนด และในช่วงความลึกหน้าตัดคานที่กำหนดขึ้น โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการออกแบบดังนี้

1. กำหนดคุณสมบัติต่างๆของวัสดุที่ใช้ คุณสมบัติหน้าตัด และน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ
2. วิเคราะห์โครงสร้างของคาน
3. กำหนดค่า PPR เริ่มต้น
4. ประมาณระยะ  $d_p$  และ  $d_s$  ด้วยระยะความลึกประสิทธิผล ( $d$ )

$$d = PPR \cdot d_p + (1 - PPR)d_s \quad (3.1)$$

5. คำนวณค่าดัชนีเหล็กเสริมเฉลี่ย  $\bar{\omega}$  ซึ่งต้องมีค่าน้อยกว่า 0.30 เพื่อให้แน่ใจว่าเป็นดัชนีเหล็กเสริมน้อยกว่าเกณฑ์สมดุล

$$\bar{\omega}(1 - 0.59\bar{\omega}) = \frac{M_u}{\phi b d^2 f'_c} \quad (3.2)$$

6. เปรียบเทียบค่า  $a = 1.18\bar{\omega}d$  กับ ความหนาของปีก  $h_f$

ก) ถ้า  $a \leq h_f$

คำนวณหาค่าแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง

$$F_{pu} = \bar{\omega} b d f'_c PPR \quad (3.3)$$

ข) ถ้า  $a > h_f$

คำนวณหาโมเมนต์ในส่วนเอวของหน้าตัด

$$M_{uw} = M_u - 0.85\phi f'_c (b - b_w) h_f \left( d - \frac{h_f}{2} \right) \quad (3.4)$$

คำนวณค่าดัชนีเหล็กเสริมเฉลี่ยในส่วนเอวของหน้าตัด

$$\bar{\omega}_w (1 - 0.59\bar{\omega}_w) = \frac{M_{uw}}{\phi b_w d^2 f'_c} \quad (3.5)$$

คำนวณหาค่าแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง

$$F_{pu} = PPR f'_c [0.85\phi (b - b_w) h_f + \bar{\omega}_w b_w d] \quad (3.6)$$

7. คำนวณหาเหล็กเสริมไม่อัดแรง

$$A_s = \left( \frac{1 - PPR}{PPR} \right) \frac{F_{pu}}{f_y} \quad (3.7)$$

## 8. คำนวณหาเหล็กเสริมอัดแรง จาก

$$A_{ps} = \frac{F_{pu}}{f_{ps}} \quad (3.8)$$

โดยตรวจสอบระบบของเหล็กเสริมอัดแรง

ก) ถ้าเป็นระบบมีแรงยึดเหนี่ยว (Bonded system) ใช้  $f_{ps}$  จากสมการ (2.38)

ข) ถ้าเป็นระบบมีแรงไร้ยึดเหนี่ยว (Unbonded system)

- เมื่อมีอัตราส่วนความยาวช่วงต่อความลึกไม่เกิน 35 ใช้  $f_{ps}$  จากสมการ (2.39)

- เมื่อมีอัตราส่วนความยาวช่วงต่อความลึกเกิน 35 ใช้  $f_{ps}$  จากสมการ (2.40)

หาปริมาณเหล็กเสริมอัดแรงได้โดยการที่แทนค่า  $f_{ps}$  ที่ได้ลงในสมการ 3.8 แล้วทำการแก้สมการ

9. คำนวณค่า  $M_{sec}$  จากวิธีแรงพุง

10. นำ  $M_{sec}$  ที่ได้รวมกับ  $M_u$  แล้วทำการคำนวณหาเหล็กเสริมในข้อ 4 – 7 ทำซ้ำจนผลที่ได้จากการคำนวณด้วย  $M_u$  และการคำนวณด้วย  $M_u + M_{sec}$  มีค่าเท่ากัน

11. คำนวณปริมาณเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่หน้าตัดอื่นๆ โดยใช้วิธีโมเมนต์ประลัย

12. ออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือน โดยคำนวณระยะการวางเหล็ก (spacing) จาก  $V_s$  สูงสุดที่เกิดขึ้นในช่วงคานนั้นๆ

13. ตรวจสอบตามข้อกำหนดต่างๆ ตามมาตรฐาน ACI318M-02 ถ้าไม่ผ่านให้กลับไปเปลี่ยนค่า PPR ใหม่

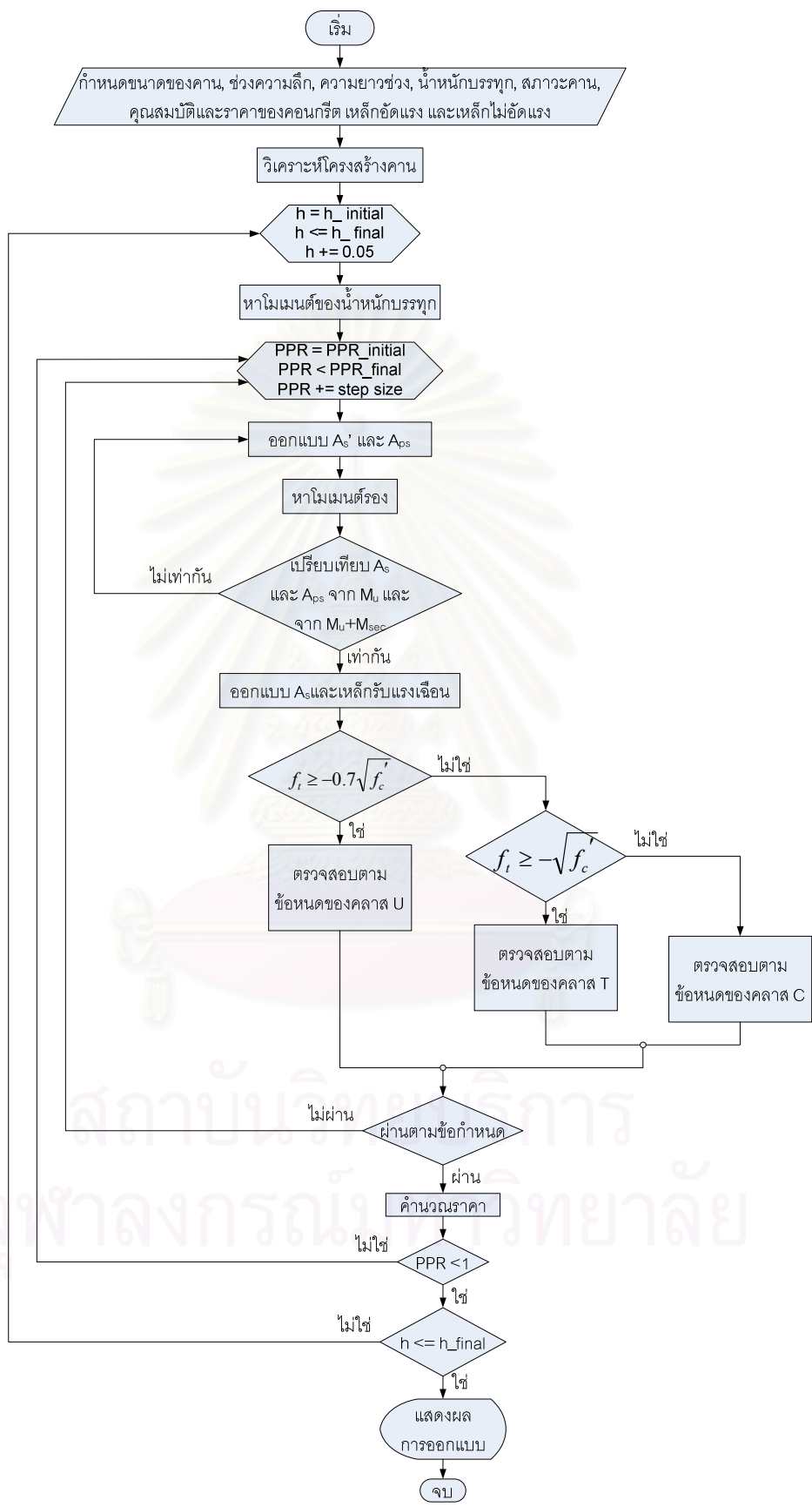
14. คำนวณราคาค่าก่อสร้างของคานดังกล่าว

15. เปลี่ยนค่าความลึกของหน้าตัด แล้วทำตามขั้นตอนทั้งหมดใหม่

16. เปรียบเทียบหาราคาที่ต่ำที่สุดที่ได้

ขั้นตอนการออกแบบดังกล่าว สามารถแสดงได้เป็นแผนภาพ Flow chart ดังแสดงในรูปที่

3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพ Flow chart แสดงขั้นตอนการออกแบบ

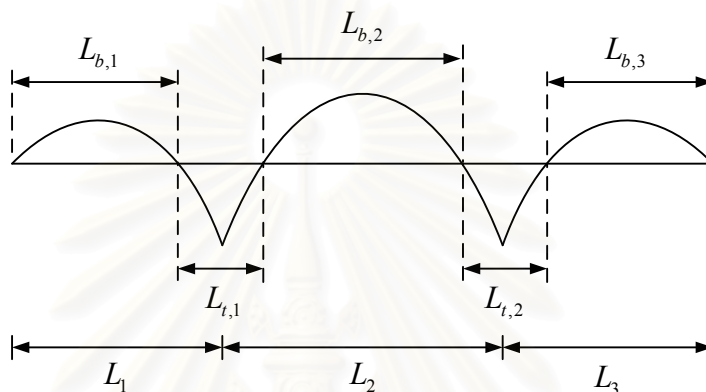
### 3.3 สมการเป้าหมาย

สมการเป้าหมายจะพิจารณาในส่วนราคาของคอนกรีต เหล็กเสริมอัดแรง เหล็กเสริมไม่อัดแรง เหล็กรับแรงเฉือน และ ไม้แบบ ดังแสดงในสมการ

$$C_t = C_c AL + C_p \omega_s A_{ps} L_{ps} + C_s \omega_s \{ \Sigma(A_{s,t} L_t) + \Sigma(A_{s,b} L_b) \} + C_s \omega_s A_v \Sigma(N_v L_v) + C_f A_f \quad (3.9)$$

เมื่อ	$C_t$	=	ราคารวมทั้งหมดของคานคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรงบางส่วน
	$C_c$	=	ราคาค่าวัสดุและค่าแรงงานต่อปริมาตรคอนกรีต
	$C_p$	=	ราคาค่าวัสดุและค่าแรงงานต่อน้ำหนักเหล็กเสริมอัดแรง
	$C_s$	=	ราคาค่าวัสดุและค่าแรงงานต่อน้ำหนักเหล็กเสริมไม่อัดแรง
	$C_f$	=	ราคาค่าวัสดุและค่าแรงงานต่อพื้นที่ไม้แบบ
	$A$	=	พื้นที่หน้าตัดของคาน
	$L$	=	ความยาวทั้งหมดของคาน
	$\omega_s$	=	หน่วยน้ำหนักของเหล็ก
	$A_{ps}$	=	ปริมาณเหล็กเสริมอัดแรง
	$L_{ps}$	=	ความยาวของเหล็กเสริมอัดแรง
	$A_{s,t}$	=	ปริมาณเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่หน้าตัดวิกฤตที่จุดรองรับ
	$A_{s,b}$	=	ปริมาณเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่หน้าตัดวิกฤตที่กึ่งกลางคาน
	$L_t$	=	ระยะเสริมเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่หน้าตัดวิกฤตที่จุดรองรับ
	$L_b$	=	ระยะเสริมเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่หน้าตัดวิกฤตที่กึ่งกลางคาน
	$A_v$	=	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน
	$N_v$	=	จำนวนปลอกของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน
	$L_v$	=	ความยาวเหล็กเสริมรับแรงเฉือน 1 ปลอก
	$A_f$	=	พื้นที่ผิวของไม้แบบ

ส่วนของการคิดราคาเหล็กเสริมไม่อัดแรง เนื่องจากในงานวิจัยนี้ทำการคำนวณออกแบบสำหรับคานต่อเนื่อง และออกแบบเฉพาะเหล็กรับแรงดึง ดังนั้นการคิดปริมาตรของเหล็กเสริมไม่อัดแรง ทำได้โดยนำปริมาณเหล็กเสริมไม่อัดแรงคูณด้วยระยะหยุดเหล็กที่หน้าตัดนั้นๆ โดยที่ระยะหยุดเหล็กคิดจากจุดตัดแกนของแผนภาพโมเมนต์ดัด (bending moment diagram) ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงระยะการเสริมเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่หน้าตัดต่างๆ



$$A = 0.3548 \quad m^2$$

$$I = 0.0343 \quad m^4$$

น้ำหนักบรรทุก

$$W_{SD} = 583.76 \quad N/m$$

$$W_L = 5837.60 \quad N/m$$

คุณสมบัติของคอนกรีต

$$f'_{ci} = 27.58 \quad MPa$$

$$f'_c = 34.50 \quad MPa$$

$$w_c = 23000 \quad N/m^3$$

คุณสมบัติของเหล็กเสริมอัดแรง : Seven-wire strand Grade 270

ระบบ มีแรงยึดเหนี่ยว (Bonded System)

$$A = 98.71 \times 10^{-6} \quad m^2$$

$$f_{pu} = 1674.60 \quad MPa$$

$$f_{py} = 1861.00 \quad MPa$$

$$E = 186000 \quad MPa$$

คุณสมบัติของเหล็กเสริมไม่อัดแรง

$$D = 0.022 \quad m$$

$$A = 3.871 \times 10^{-4} \quad m^2$$

$$f_y = 413.55 \quad MPa$$

$$E = 200000 \quad MPa$$

คุณสมบัติของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

$$D = 0.009 \quad m$$

$$A = 6.36 \times 10^{-5} \quad m^2$$

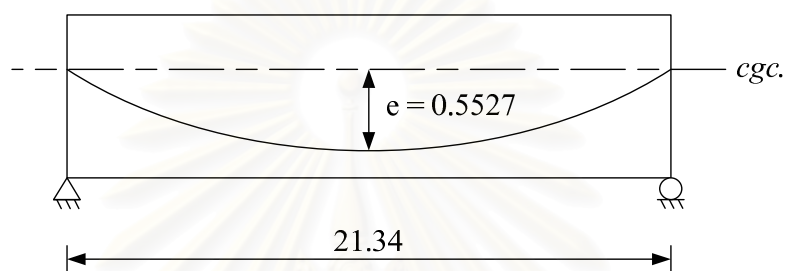
$$f_y = 235.36 \quad MPa$$

$$E = 200000 \quad MPa$$

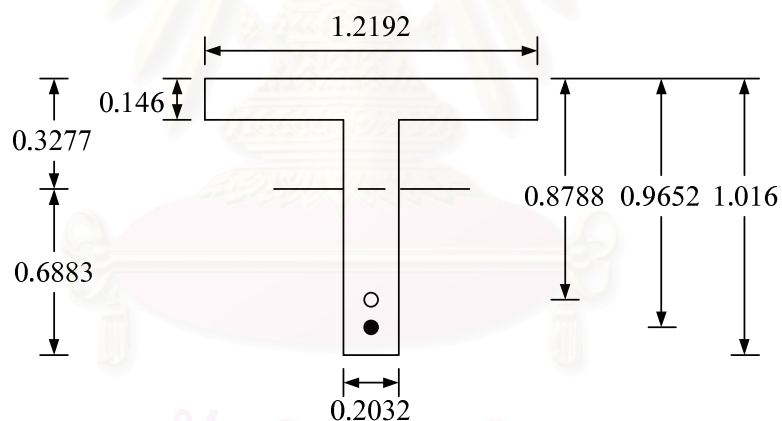


ราคาค่าวัสดุและค่าแรงงาน

$C_c$	=	3000.00	Baht/m <sup>3</sup>
$C_p$	=	120.00	Baht/kg
$C_s$	=	25.00	Baht/kg
$C_f$	=	300.00	Baht/m <sup>2</sup>



(ก) แนวการวางเหล็กเสริมอัดแรง



(ข) หน้าตัดคาน

รูปที่ 4.1 แสดงหน้าตัดคาน และแนวการวางเหล็กเสริมอัดแรง ตัวอย่างที่ 1 (หน่วย : เมตร)

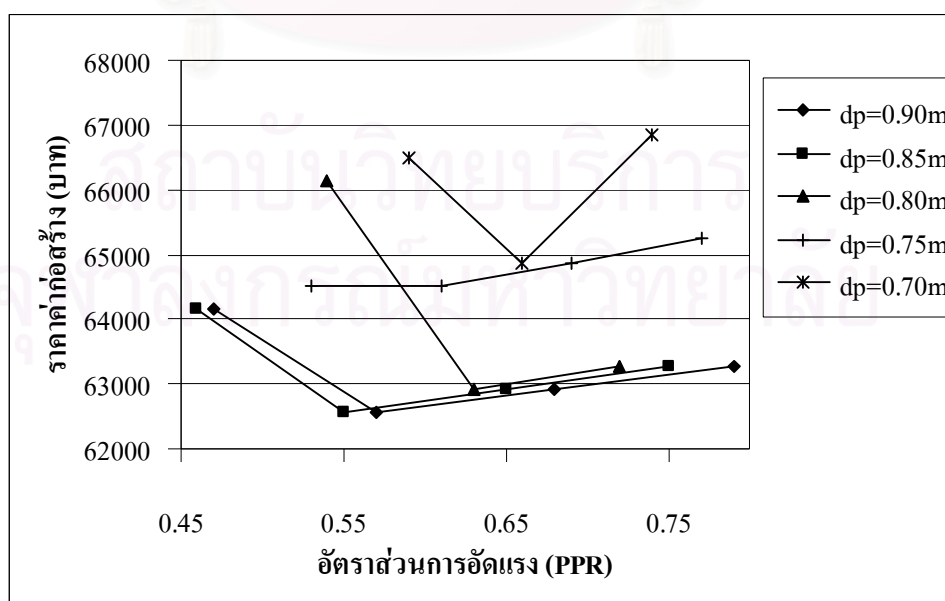
จากรายงานผลการคำนวณออกแบบของตัวอย่างที่ 1 ทำการออกแบบด้วยค่าอัตราส่วนการอัดแรง (PPR) เท่ากับ 0.720 ซึ่งผลการคำนวณออกแบบที่ได้จากงานวิจัย กับของ Naaman และ Siriaksorn สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์และออกแบบจากงานวิจัย กับผลจาก Naaman และ Siriaksorn  
ที่ PPR = 0.72

ผลการวิเคราะห์และออกแบบ	Naaman และ Siriaksorn	งานวิจัย
ปริมาณเหล็กเสริมอัดแรง ( $mm^2$ )	690.97	690.97
ปริมาณเหล็กเสริมไม่อัดแรง ( $mm^2$ )	1161.29	1161.30
ระยะเรียงเหล็กรับแรงเฉือน ( $mm$ )	609.6	600.0
กำลังต้านทานโมเมนต์ ( $N \cdot m$ )	1378752.10	1364151.00
หน่วยแรงอัดในคอนกรีต ( $Pa$ )		
- ขณะรับน้ำหนักบรรทุกคงที่	3116540.00	2851525.33
- ขณะรับน้ำหนักบรรทุกรวม	8177470.00	7812164.52

จากตารางที่ 4.1 พบว่าผลการวิเคราะห์และออกแบบที่ได้จากงานวิจัย กับผลจาก Naaman และ Siriaksorn มีค่าใกล้เคียงกัน

สำหรับผลการคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมจากงานวิจัย ทำโดยการเปรียบเทียบผลการคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมที่ได้จากความลึกประสิทธิภาพของเหล็กเสริมอัดแรง ( $d_p$ ) ที่ค่าต่าง ๆ กัน เพื่อให้ได้ผลการคำนวณออกแบบที่เหมาะสมยิ่งขึ้น และได้นำมาเขียนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความลึกประสิทธิภาพของเหล็กเสริมอัดแรงกับราคาค่าก่อสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนการอัดแรงกับราคาค่าก่อสร้าง ตัวอย่างที่ 1

จากรูปที่ 4.2 พบว่าความลึกประสิทธิผลของเหล็กเสริมอัดแรงที่ทำให้ราคาค่าก่อสร้างต่ำสุดคือที่  $d_p$  เท่ากับ 0.850 เมตร นำผลการคำนวณออกแบบดังกล่าวเปรียบเทียบกับผลจาก Naaman และ Siriaksorn ดังแสดงในตารางที่ 4.2

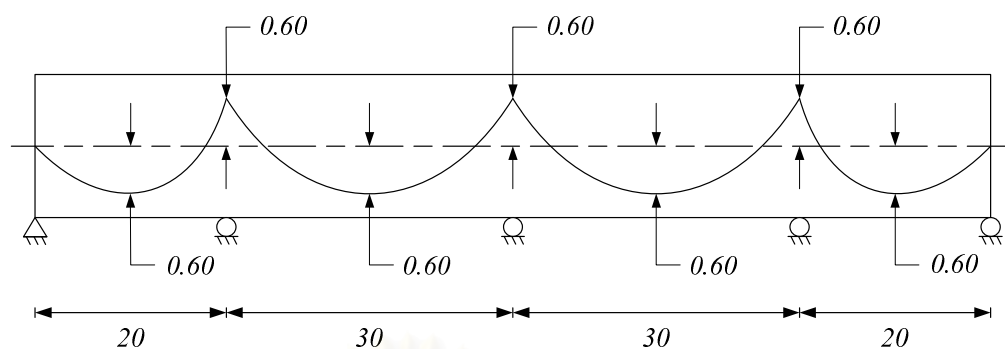
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบผลการคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมจากงานวิจัย กับผลการคำนวณออกแบบของ Naaman และ Siriaksorn

ผลการวิเคราะห์และออกแบบ	Naaman และ Siriaksorn	งานวิจัย
อัตราส่วนการอัดแรง ( $PPR$ )	0.720	0.500
ความลึกประสิทธิผลของเหล็กเสริมอัดแรง ( $m$ )	0.8788	0.850
ปริมาตรเหล็กเสริมอัดแรง ( $m^3$ )	0.01477	0.01055
ปริมาตรเหล็กเสริมไม่อัดแรง ( $m^3$ )	0.02478	0.04130
ปริมาตรเหล็กเสริมรับแรงเฉือน ( $m^3$ )	0.00558	0.00558
ราคารวม (บาท)	63278.28	62547.89

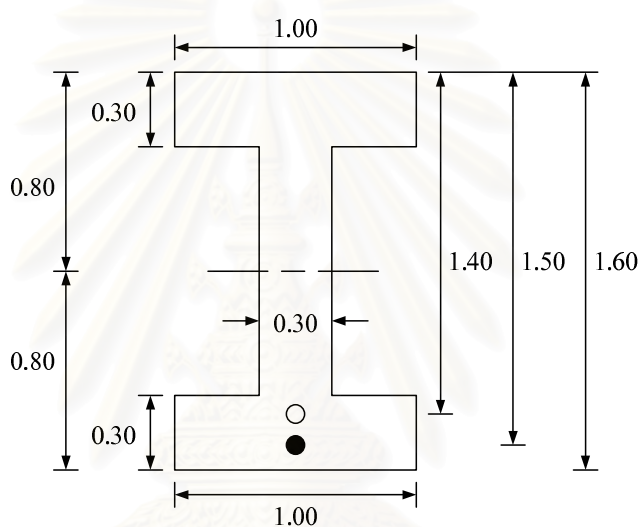
จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าผลการออกแบบอย่างเหมาะสมจากงานวิจัยสามารถลดราคาค่าก่อสร้างลงได้ 1.15%

#### 4.2 รายงานการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลตัวอย่างที่ 2

ตัวอย่างที่ 2 เป็นตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการคำนวณออกแบบคานคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรงบางส่วนอย่างเหมาะสมจากงานวิจัย กับผลการคำนวณออกแบบคานคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรงจากตัวอย่างของ ดร.นเรศ พันธราช (2540) โดยมีแนวการวางเหล็กเสริมอัดแรงที่แตกต่างกันบริเวณกลางคานช่วงที่ 1 และ 4 ในตัวอย่างของ ดร.นเรศ มีค่าเชิงศูนย์กลางของเหล็กเสริมอัดแรงเท่ากับ 0.1971 เมตร



(ก) แนวการวางเหล็กเสริมอัดแรง



(ข) หน้าตัดคาน

รูปที่ 4.3 แสดงหน้าตัดคาน และแนวการวางเหล็กเสริมอัดแรง ตัวอย่างที่ 2 และ 3 (หน่วย : เมตร)

ความยาวคาน

ช่วงที่ 1	20	<i>m</i>
ช่วงที่ 2	30	<i>m</i>
ช่วงที่ 3	30	<i>m</i>
ช่วงที่ 4	20	<i>m</i>

คุณสมบัติของหน้าตัด

$b$	=	1.0000	<i>m</i>
$b_w$	=	0.3000	<i>m</i>

$$\begin{aligned}
 h_f &= 0.3000 & m \\
 h &= 1.6000 & m \\
 y_t &= 0.8000 & m \\
 y_b &= 0.8000 & m \\
 d_s &= 1.5000 & m \\
 d_p &= 1.4000 & m \\
 e &= 0.6000 & m \\
 A &= 0.9000 & m^2 \\
 I &= 0.2830 & m^4
 \end{aligned}$$

น้ำหนักบรรทุก

$$\begin{aligned}
 W_{SD} &= 13781.52 & N/m \\
 W_L &= 11643.56 & N/m
 \end{aligned}$$

คุณสมบัติของคอนกรีต

$$\begin{aligned}
 f'_{ci} &= 29.42 & MPa \\
 f'_c &= 34.5 & MPa \\
 w_c &= 23000 & N/m^3
 \end{aligned}$$

คุณสมบัติของเหล็กเสริมอัดแรง : Seven-wire strand Grade 270

ระบบ มีแรงยึดเหนี่ยว (Bonded System)

$$\begin{aligned}
 A &= 98.71 \times 10^{-6} & m^2 \\
 f_{pu} &= 1674.6 & MPa \\
 f_{py} &= 1861.0 & MPa \\
 E &= 200000 & MPa
 \end{aligned}$$

คุณสมบัติของเหล็กเสริมไม่อัดแรง : DB 25

$$\begin{aligned}
 A &= 490.87 \times 10^{-6} & m^2 \\
 f_y &= 392.4 & MPa \\
 E &= 200000 & MPa
 \end{aligned}$$

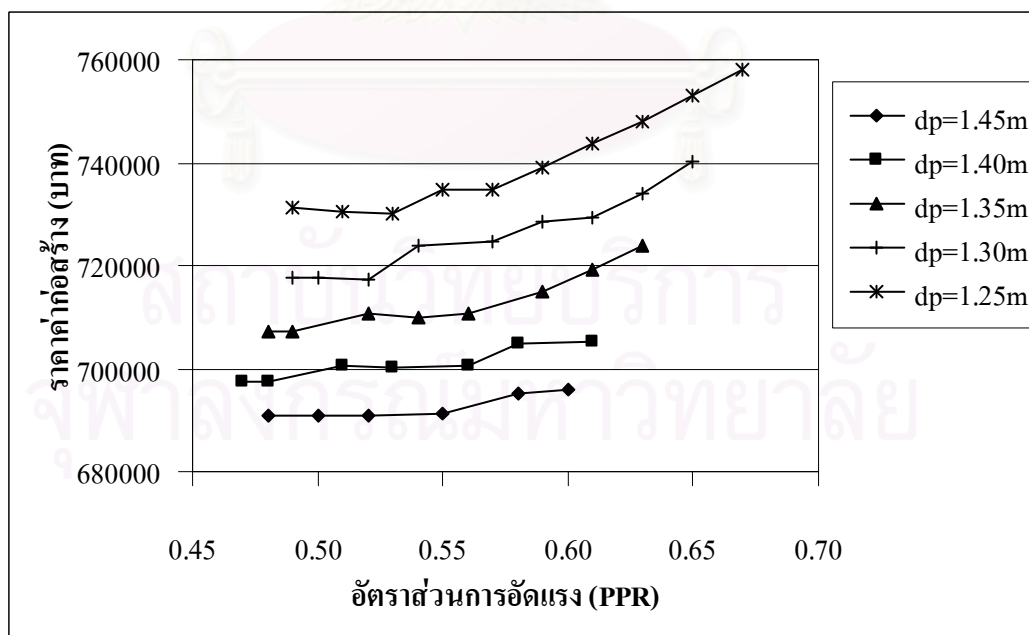
คุณสมบัติของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน : RB 9

$$\begin{aligned} A &= 6.36 \times 10^{-5} \quad m^2 \\ f_y &= 235.36 \quad MPa \\ E &= 200000 \quad MPa \end{aligned}$$

ราคาค่าวัสดุและค่าแรงงาน

$$\begin{aligned} C_c &= 3000.00 \quad Baht/m^3 \\ C_p &= 120.00 \quad Baht/kg \\ C_s &= 25.00 \quad Baht/kg \\ C_f &= 300.00 \quad Baht/m^2 \end{aligned}$$

ผลการคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมในตัวอย่างนี้ หาได้โดยการเปรียบเทียบผลการคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมที่ได้จากการเปลี่ยนความลึกประสิทธิภาพของเหล็กเสริมอัดร่งนำมาเขียนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความลึกประสิทธิภาพของเหล็กเสริมอัดร่งกับราคาค่าก่อสร้างได้ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และความลึกประสิทธิภาพของเหล็กเสริมอัดร่งที่ทำให้ราคาค่าก่อสร้างต่ำสุดคือ 1.450 เมตร



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนการอัดแรงกับราคาค่าก่อสร้าง ตัวอย่างที่ 2

เปรียบเทียบผลการคำนวณออกแบบจากงานวิจัย และจากตัวอย่างของ ดร.นเรศ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณออกแบบจากงานวิจัย และจากตัวอย่างของ ดร.นเรศ

ผลการวิเคราะห์และออกแบบ	ดร.นเรศ	งานวิจัย
อัตราส่วนการอัดแรง ( <i>PPR</i> )	-	0.510
ปริมาตรเหล็กเสริมอัดแรง ( $m^3$ )	0.3571	0.2085
ปริมาตรเหล็กเสริมไม่อัดแรง ( $m^3$ )	-	0.0351
ปริมาตรเหล็กเสริมรับแรงเฉือน ( $m^3$ )	-	0.0672
ราคารวม* (บาท)	772235.37	677532.72

\* ไม่รวมราคาจากเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

เนื่องจากผลการคำนวณออกแบบจากตัวอย่างของ ดร.นเรศ ไม่ได้ทำการคำนวณออกแบบในส่วนของการเสริมเหล็กรับแรงเฉือน ดังนั้นการเปรียบเทียบผลจะไม่นำราคาเหล็กเสริมรับแรงเฉือนมารวมในการเปรียบเทียบด้วย

จากตารางที่ 4.3 เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมจากงานวิจัย กับการคำนวณออกแบบจากตัวอย่างของ ดร.นเรศ จะเห็นว่าการออกแบบอย่างเหมาะสมสามารถลดราคาค่าก่อสร้างลงได้ประมาณ 12%

#### 4.3 รายงานการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลตัวอย่างที่ 3

ตัวอย่างที่ 3 เป็นตัวอย่างนำโครงสร้างในตัวอย่างที่ 2 มาเปรียบเทียบผลการคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมที่ความลึกของหน้าตัดคานต่างๆกัน โดยกำหนดให้ความลึกของหน้าตัดคานมีค่าระหว่าง 1.500 เมตรและ 1.750 เมตร โดยให้ความลึกของหน้าตัดคานเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.05 เมตร และกำหนดระยะหุ้มคอนกรีตถึงตำแหน่งเหล็กเสริมอัดแรงที่ใช้ในตัวอย่างนี้ เท่ากับระยะหุ้มคอนกรีตถึงตำแหน่งเหล็กเสริมอัดแรงที่ได้จากผลการคำนวณออกแบบที่เหมาะสมในตัวอย่างที่ 2 คือเท่ากับ 0.15 เมตร ในทุกกรณี

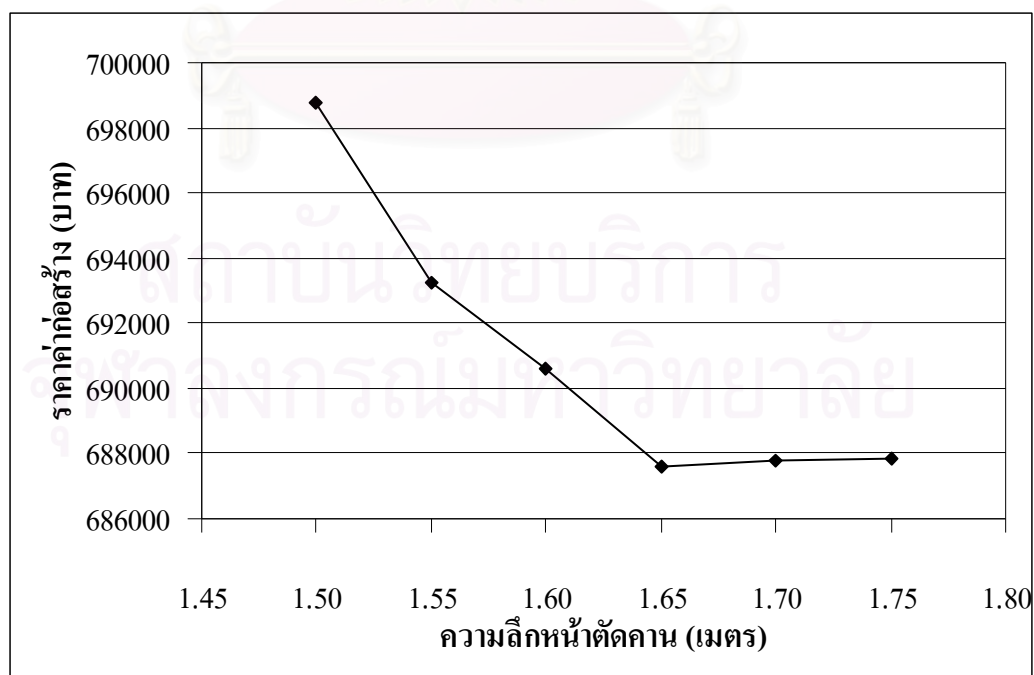
เปรียบเทียบราคาในส่วนต่างๆ ที่ความลึกของหน้าตัดต่างๆกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบราคาค่าก่อสร้างที่ความลึกของหน้าตัดคานต่างๆกัน

ความลึก หน้าตัด ( <i>m</i> )	อัตราส่วน การอัดแรง ( <i>PPR</i> )	ราคา (บาท)					รวม
		คอนกรีต	เหล็กเสริม อัดแรง	เหล็กเสริม ไม่อัดแรง	เหล็กรับ แรงเฉือน	ไม้แบบ	
1.500	0.470	261000	194971	56181	24645	162000	698797
1.550	0.450	265500	176474	61869	24412	165000	693256
1.600	0.510	270000	195134	44399	13101	168000	690634
1.650	0.500	274500	185924	44399	11753	171000	687576
1.700	0.540	279000	186010	39580	9177	174000	687767
1.750	0.560	283500	186098	32616	8644	177000	687858

จากผลการคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมของแต่ละขนาดความลึกของหน้าตัดคาน พบว่าที่ความลึกเท่ากับ 1.650 เมตร ราคาค่าที่ต่ำที่สุด

เพื่อแสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างผลการคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสม ของแต่ละขนาดความลึกของหน้าตัดคาน ได้นำความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความลึกของหน้าตัดกับราคา ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความลึกของหน้าตัดคานเปรียบเทียบกับราคา



## บทที่ 5

### สรุปผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้เสนอแนวคิดในการออกแบบคานคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรงบางส่วน ให้มีความเหมาะสมทั้งด้านราคาและกำลังของโครงสร้าง โดยใช้อัตราส่วนของการอัดแรง และใช้ข้อกำหนดตามมาตรฐาน ACI318M-02 และทำการพัฒนาโปรแกรมขึ้นเพื่อความสะดวกในการคำนวณ โดยโปรแกรมจะทำการแสดงผลของปริมาณเหล็กเสริมอัดแรง เหล็กเสริมไม่อัดแรง เหล็กเสริมรับแรงเฉือน ราคาของโครงสร้าง และเปรียบเทียบผลการออกแบบดังกล่าวที่ความลึกต่างๆ

ในตัวอย่างที่ 1 ได้ทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วนที่ได้จากงานวิจัย กับผลที่ได้จาก Naaman และ Siriaksorn พบว่าการคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมในงานวิจัยนี้สามารถลดราคาค่าก่อสร้างลงได้ 1.15% และในตัวอย่างที่ 2 ได้ทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับคานคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรงบางส่วนจากงานวิจัย กับผลการคำนวณออกแบบสำหรับคานคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรงที่ได้จาก ดร.นเรศ พันธธธร พบว่าการคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมในงานวิจัยนี้สามารถลดราคาค่าก่อสร้างลงได้ประมาณ 12%

ส่วนในตัวอย่างที่ 3 เป็นการเปรียบเทียบผลการคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับคานคอนกรีตต่อเนื่องอัดแรงบางส่วนที่ขนาดความลึกของหน้าตัดต่างๆกัน พบว่าการเพิ่มหรือลดขนาดความลึกของหน้าตัดนั้นสามารถช่วยลดราคาค่าก่อสร้างลงได้ด้วย

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาโปรแกรมขึ้นในเบื้องต้น และยังมีข้อจำกัด จึงเป็นผลดีสำหรับการพัฒนาโปรแกรมต่อไป โดยแนวทางเพิ่มเติมทางผู้วิจัยขอเสนอ ดังนี้

1. พิจารณาให้ระยะเยื้องศูนย์กลางของเหล็กเสริมอัดแรงเป็นตัวแปร
2. พิจารณาเพิ่มเติมในส่วนของหน้าตัดเชิงประกอบ (Composite beam)
3. พิจารณาเพิ่มเติมในส่วนของการรับแรงบิด

## รายการอ้างอิง

- ACI-ASCE Committee 423. State-of-the-art report on partially prestressed concrete. 1999.
- ACI Committee 318. Building code requirements for structural concrete and commentary. 2002.
- Al-Gahtani, A. S., Al-Saadoun, S. S., and Abul-Feilat, E. A.. Design optimization of continuous of partially prestressed concrete beams. Computers and structures 55, 2 (1995): 365-370.
- Au, F. T. K., Du, J. S., and Cheung, Y. K.. Service load analysis of unbonded partially prestressed concrete members. Magazine of concrete research 57, 4 (2004): 199-209.
- Boczkaj, B. K.. Section partially prestressed – an exact solution. PCI journal 39, 6 (Nov-Dec 1994): 99-106.
- Dole, R., Ronghe, G. N., and Gupta, L. M.. Optimum design of reinforced concrete beams using polynomial optimization technigue. Advances in Structural Engineering 3,1 (2000): 67-79.
- Harajli, M. H., and Hijazi, S. A.. Evaluation of the ultimate in partially prestressed concrete members. PCI journal (Jan-Feb 1991): 62-82.
- Harajli, M. H., and Naaman, A. E.. Static and fatigue tests on partially prestressed beams. Journal of structural engineering 111, 7 (July 1985): 1602-1618.
- Inomata, S.. A design procedure for partially prestressed concrete beams based on strength and serviceability. PCI journal 27, 5 (Sep-Oct 1982): 100-116.
- Khaleel, M. A., and Itani, R. Y.. Optimization of partially prestressed concrete girders under multiple strength and serviceability criteria. Computers and Structures 49, 3 (Nov 1993): 427-438.
- Lin, T. Y., and Burns, N. H.. Design of prestressed concrete structures. 3<sup>rd</sup> ed. New York: John Wiley & Sons, 1982.
- Moustafa, E. S.. Design of partially prestressed concrete flexural members. PCI journal 22, 3 (May-Jun 1977): 12-29.
- Naaman, A. E., and Siriaksorn, A.. Serviceability based design of partially prestressed beams, Part 1: Analytic Formulation. PCI journal 24, 2 (Mar-Apr 1979): 64-89.
- Naaman, A. E., and Siriaksorn, A.. Serviceability based design of partially prestressed beams, Part 2: Computerized design and evaluation of major parameters. PCI journal 24, 2 (Mar-Apr 1979): 64-89.
- Naaman, A. E.. Prestressed concrete analysis and design. New York: McGraw-Hill, 1982.
- Nawy, E. G.. Prestressed concrete. New Jersey: Prentice-Hall, 1989.

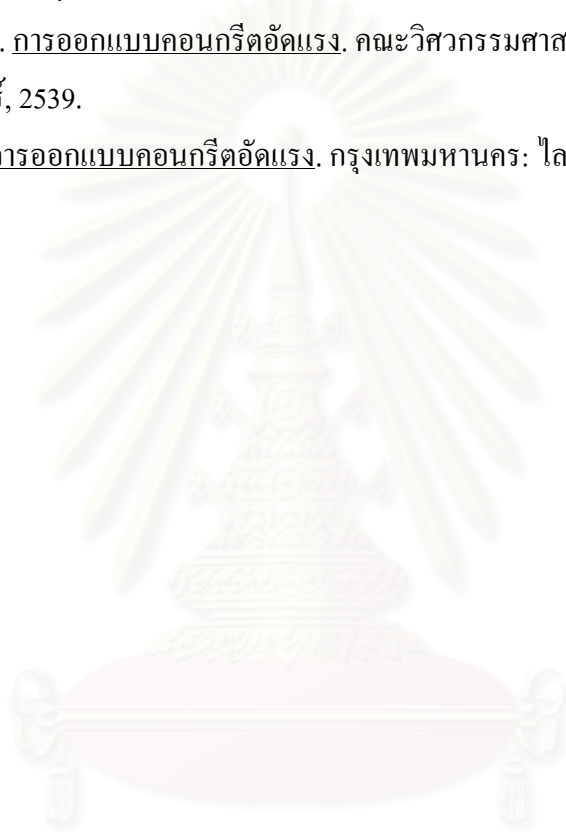
Prasada Rao, A. S.. Selection and design of partially prestressed concrete sections for strength and serviceability. ACI structural journal 88, 3 (May-Jun 1991): 330-339.

Saouma, V. E., and Murad, R. S.. Partially prestressed concrete beam optimization. Journal of structural engineering 110, 3 (March 1984): 589-604.

กนกอร แก้วนิรัตน์. การคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วน ด้วยวิธีซิมเพล็กซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

ต่อกุล กาญจนาลัย. การออกแบบคานคอนกรีตอัดแรง. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2539.

นเรศ พันธราทร. การออกแบบคานคอนกรีตอัดแรง. กรุงเทพมหานคร: ไลบรารีนาเย, 2540.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รายงานผลการคำนวณออกแบบ ของตัวอย่างที่ 1

- รายงานผลการคำนวณออกแบบ ที่ PPR = 0.72
- รายงานผลการคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

-----  
OPTIMAL DESIGN  
OF  
PARTIALLY PRESTRESSED CONCRETE CONTINUOUS BEAMS  
-----

----DESIGN RESULT AT PPR = 0.7200 ----

Prestressing Steel		
Aps	(m <sup>2</sup> )	0.00069097(7)
Nonprestressing Steel		
Midspan Section		
Span 1	(m <sup>2</sup> )	0.00116130(3)
Spacing of Stirrup		
Nv		36
Span 1	(m)	0.6000

----FLEXURAL ANALYSIS AT PPR = 0.7200 ----

Classified as (Pa)		
Class U, $ft \geq -0.7\sqrt{fc'}$	-4111569.044	
Class T, $ft \geq -\sqrt{fc'}$	-5873670.062	
Class U, $ft < -\sqrt{fc'}$		
ft at		
Midspan 1	-5930916.745	Class C
Compressive Stress At Transfer Stage (Pa)		
$fc \leq 0.6fci'$	16548000.000	
fc at		
Midspan 1	3198533.488	pass
Tensile Stress At Transfer Stage (Pa)		
$ft \geq -0.25\sqrt{fci'}$	-1312916.601	
ft at		
Midspan 1	2223902.094	pass
Compressive Stress At Service Stage, Sustained Load (Pa)		
$fc \leq 0.45fc'$	15525000.000	
fc at		
Midspan 1	2851525.327	pass
Compressive Stress At Service Stage, Total Load (Pa)		
$fc \leq 0.6fc'$	20700000.000	
fc at		
Midspan 1	7812164.524	pass

Crack Width (mm)			
Maximum Crack Width	0.410		
Crack Width at Midspan 1	0.128545	pass	
Resistance Moment (N.m)			
0.9Mn >= Mu			
Mu at Midspan 1	1261842.439		
0.9Mn at Midspan 1	1364151.001	pass	
Cracking Moment (N.m)			
0.9Mn >= 1.2Mcr			
1.2Mcr at Midspan 1	887403.607		
0.9Mn at Midspan 1	1364151.001	pass	
Reinforcement Index, RI			
RI <= 0.36beta1	0.294429		
RI at Midspan 1	0.046660	pass	
Short-Term Deflection (m)			
delta <= L/360			
L/360 at	0.059278		
delta at Midspan 1	0.044144	pass	
Long-Term Deflection (m)			
delta <= L/480			
L/480 at	0.044458		
delta at Midspan 1	0.015465	pass	
Shear Strength Provided By Shear Reinforcement (N)			
Vs <= (2/3) sqrt(fc')bw*d	718521.464		
Vs at Midspan 1	45057.4148	pass	

-----  
 OPTIMAL DESIGN  
 OF  
 PARTIALLY PRESTRESSED CONCRETE CONTINUOUS BEAMS  
 -----

----- DATA -----

No.of Span 1  
 Span Length 1 (m) 21.3400

Section Properties

```

+-----b-----+
+ *****+ + + +
hf1 * * | | |
+ **** * h ds dp
* * | | |
* + * | | +
* + * | +
***** +
+--bw--+

```

Section Type T

b	(m)	1.2192
bw	(m)	0.2032
hf1	(m)	0.1460
h	(m)	1.0160
ds	(m)	0.9652
dp	(m)	0.8500
yt	(m)	0.3261
yb	(m)	0.6899
A	(m <sup>2</sup> )	0.3548
I	(m <sup>4</sup> )	0.0344

Material Properties

Concrete

Ec	(Pa)	27606249292.5062
fci'	(Pa)	27580000.0000
fc'	(Pa)	34500000.0000
Unit Weight	(N/m <sup>2</sup> )	23000.0000
beta1		0.8179

Prestress Steel

System		bonded
Diameter	(m)	0.0127
Each Area	(m <sup>2</sup> )	0.0009871
Ep	(Pa)	18600000000.0000
fpu	(Pa)	186100000.0000
fpv	(Pa)	167460000.0000
fpj	(Pa)	148880000.0000
fpi	(Pa)	130270000.0000
fse	(Pa)	111660000.0000
vp		0.5500

Nonprestress Steel

Diameter	(m)	0.0220
Each Area	(m <sup>2</sup> )	0.00038710
Es	(Pa)	20000000000.0000



fy	(Pa)	413550000.0000
Stirrup Steel		
Diameter	(m)	0.0090
Each Area	(m <sup>2</sup> )	0.00006360
fy	(Pa)	235360000.0000

Exposure Condition  
Dry air or protective membrane

Material Cost		
Concrete	(Baht/m <sup>3</sup> )	3000.0000
Prestress Steel	(Baht/kg)	120.0000
Nonprestress Steel	(Baht/kg)	25.0000
Formwork	(Baht/m <sup>2</sup> )	300.0000

Loading		
Uniform Load	(N/m)	
Self Weight Load		8161.2740
Superimposed Dead Load		583.7600
Live Load		5837.6000

----- MOMENT AT EACH SECTION -----

Self Weight	(N.m)	
Midspan Section		
Span 1		464576.0337
Superimposed Deadload	(N.m)	
Midspan Section		
Span 1		33230.2169
Live load	(N.m)	
Midspan Section		
Span 1		332302.1693
Total Load	(N.m)	
Midspan Section		
Span 1		830108.4200
Ultimate Load	(N.m)	
Midspan Section		
Span 1		1261842.4388

----- ALLOWABLE LIMIT -----

Minimum Bonded Reinforcement (Unbonded System)		
0.004A	(m <sup>2</sup> )	0.00141935
Stress at Transfer Stage	(Pa)	
Compressive Stress, 0.60fci'		16548000.0000
Tensile Stress, -0.25sqrt(fci')		-1312916.6006
Stress at Service Load	(Pa)	
Compressive Stress		
Sustained Load, 0.45fc'		15525000.0000

Total Load, $0.60fc'$	20700000.0000
Limits for Reinforcement, $0.36\beta_1$	0.29442857
Permissible Deflection (m)	
Short-Term Deflection, $L/360$	
Span 1	0.05927778
Long-Term Deflection, $L/480$	
Span 1	0.04445833
Maximum Crack Width (mm)	0.410

----- FLEXURAL ANALYSIS RESULT -----

Classified as	
Midspan Section	
Span 1	Class C
Stress at Transfer Stage (Pa)	
Compressive Stress	
Midspan Section	
Span 1	3024342.7693
Tensile Stress	
Midspan Section	
Span 1	-752992.8199
Stress at Service Load (Pa)	
Compressive Stress	
Sustained Load	
Midspan Section	
Span 1	3537617.3349
Total Load	
Midspan Section	
Span 1	8524616.9202
Crack Width (mm)	
Midspan Section	
Span 1	0.14475779
Resistance Moment, $0.9M_n$ (N.m)	
Midspan Section	
Span 1	1339331.1405
Cracking Moment, $M_{cr}$ (N.m)	
Midspan Section	
Span 1	570825.7482
Reinforcement Index	
Midspan Section	
Span 1	0.04724706
Short-Term Deflection (m)	
Midspan Section	
Span 1	0.03701703
Long-Term Deflection (m)	
Midspan Section	
Span 1	0.03234284

Shear Strength Provided By Shear Reinforcement (N)  
 Midspan Section  
 Span 1 45285.9000

----- DESIGN RESULT -----

PPR		0.5000
Concrete		
Cost	(Baht)	22716.7288
Prestressing Steel		
Number		5
Area	(m <sup>2</sup> )	0.00049355
Length	(m)	21.3742
Cost	(Baht)	9874.1077
Nonprestressing Steel		
At Midspan Section		
Number		
Span 1		5
Area	(m <sup>2</sup> )	
Span 1		0.00193550
Length	(m)	
Span 1		21.3400
Cost	(Baht)	8054.1962
Stirrup Steel		
Number		
Span 1		36
Spacing	(m)	
Span 1		0.6000
Cost	(Baht)	1088.6773
Formwork		
Cost	(Baht)	20814.1824
Total Cost	(Baht)	62547.8923

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รายงานผลการคำนวณออกแบบ ของตัวอย่างที่ 2

- รายงานผลการคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

-----  
 OPTIMAL DESIGN  
 OF  
 PARTIALLY PRESTRESSED CONCRETE CONTINUOUS BEAMS  
 -----

----- DATA -----

No.of Span		4
Span Length 1	(m)	20.0000
Span Length 2	(m)	30.0000
Span Length 3	(m)	30.0000
Span Length 4	(m)	20.0000

Section Properties

```

+-----b-----+
+ *****+ + +
hf1 * * | | |
+ **** * h ds dp
* bw * | | |
* * | | |
+ **** + **** | | +
hf2 * + * | +
+ *****+
+-----b1-----+

```

Section Type I

b	(m)	1.0000
bw	(m)	0.3000
b1	(m)	1.0000
hf1	(m)	0.3000
hf2	(m)	0.3000
h	(m)	1.6000
ds	(m)	1.5000
dp	(m)	1.4500
yt	(m)	0.8000
yb	(m)	0.8000
A	(m <sup>2</sup> )	0.9000
I	(m <sup>4</sup> )	0.2830

Material Properties

Concrete

Ec	(Pa)	29437912629.8044
fci'	(Pa)	29420000.0000
fc'	(Pa)	39230000.0000
Unit Weight	(N/m <sup>2</sup> )	23000.0000
beta1		0.7841

Prestress Steel

System		bonded
Diameter	(m)	0.0127
Each Area	(m <sup>2</sup> )	0.00009871
Ep	(Pa)	200000000000.0000
fpu	(Pa)	1861000000.0000
fpv	(Pa)	1674600000.0000
fpj	(Pa)	1488800000.0000
fpi	(Pa)	1302700000.0000
fse	(Pa)	1116600000.0000
vp		0.5500

Nonprestress Steel

Diameter	(m)	0.0250
Each Area	(m <sup>2</sup> )	0.00049100
Es	(Pa)	200000000000.0000
fy	(Pa)	392400000.0000
Stirrup Steel		
Diameter	(m)	0.0090
Each Area	(m <sup>2</sup> )	0.00006360
fy	(Pa)	235360000.0000

Exposure Condition  
Dry air or protective membrane

Material Cost		
Concrete	(Baht/m <sup>3</sup> )	3000.0000
Prestress Steel	(Baht/kg)	120.0000
Nonprestress Steel	(Baht/kg)	25.0000
Formwork	(Baht/m <sup>2</sup> )	300.0000

Loading		
Uniform Load	(N/m)	
Self Weight Load		20700.0000
Superimposed Dead Load		20000.0000
Live Load		30000.0000

----- MOMENT AT EACH SECTION -----

Self Weight	(N.m)	
Midspan Section		
Span 1		476708.8235
Span 2		837132.3529
Span 3		837132.3529
Span 4		476708.8235
Inner Support Section		
Support 1		-1308970.5882
Support 2		-1674264.7059
Support 3		-1308970.5882

Superimposed Deadload	(N.m)	
Midspan Section		
Span 1		460588.2353
Span 2		808823.5294
Span 3		808823.5294
Span 4		460588.2353
Inner Support Section		
Support 1		-1264705.8824
Support 2		-1617647.0588
Support 3		-1264705.8824

Live load	(N.m)	
Midspan Section		
Span 1		690882.3529
Span 2		1213235.2941
Span 3		1213235.2941
Span 4		690882.3529
Inner Support Section		
Support 1		-1897058.8235
Support 2		-2426470.5882
Support 3		-1897058.8235

Total Load	(N.m)	
------------	-------	--

Midspan Section		
Span 1		1948253.8478
Span 2		3773689.5650
Span 3		3773689.5650
Span 4		1948253.8478
Inner Support Section		
Support 1		-3403820.5075
Support 2		-4956300.3625
Support 3		-3403820.5075
Ultimate Load	(N.m)	
Midspan Section		
Span 1		2806790.3183
Span 2		5281336.6238
Span 3		5281336.6238
Span 4		2806790.3183
Inner Support Section		
Support 1		-5761232.2722
Support 2		-7971594.4801
Support 3		-5761232.2722

----- ALLOWABLE LIMIT -----

Minimum Bonded Reinforcement (Unbonded System)		
0.004A	(m <sup>2</sup> )	0.00360000
Stress at Transfer Stage (Pa)		
Compressive Stress, 0.60fci'		17652000.0000
Tensile Stress, -0.25sqrt(fci')		-1356005.1622
Stress at Service Load (Pa)		
Compressive Stress		
Sustained Load, 0.45fc'		17653500.0000
Total Load, 0.60fc'		23538000.0000
Limits for Reinforcement, 0.36beta1		0.28226571
Permissible Deflection (m)		
Short-Term Deflection, L/360		
Span 1		0.05555556
Span 2		0.08333333
Span 3		0.08333333
Span 4		0.05555556
Long-Term Deflection, L/480		
Span 1		0.04166667
Span 2		0.06250000
Span 3		0.06250000
Span 4		0.04166667
Maximum Crack Width	(mm)	0.410

----- FLEXURAL ANALYSIS RESULT -----

Classified as		
Midspan Section		
Span 1		Class U
Span 2		Class T
Span 3		Class T
Span 4		Class U

Inner Support Section	
Support 1	Class U
Support 2	Class C
Support 3	Class U
Stress at Transfer Stage (Pa)	
Compressive Stress	
Midspan Section	
Span 1	5803259.0649
Span 2	3844565.2315
Span 3	3844565.2315
Span 4	5803259.0649
Inner Support Section	
Support 1	6305086.5022
Support 2	4688708.3997
Support 3	6305086.5022
Tensile Stress	
Midspan Section	
Span 1	197585.0618
Span 2	2156278.8952
Span 3	2156278.8952
Span 4	197585.0618
Inner Support Section	
Support 1	-304242.3755
Support 2	1312135.7270
Support 3	-304242.3755
Stress at Service Load (Pa)	
Compressive Stress	
Sustained Load	
Midspan Section	
Span 1	1663887.2344
Span 2	4472730.5457
Span 3	4472730.5457
Span 4	1663887.2344
Inner Support Section	
Support 1	3842971.1550
Support 2	6373670.7514
Support 3	3842971.1550
Total Load	
Midspan Section	
Span 1	4229843.3358
Span 2	9653604.6164
Span 3	9653604.6164
Span 4	4229843.3358
Inner Support Section	
Support 1	7162575.6698
Support 2	16632375.0972
Support 3	7162575.6698
Crack Width (mm)	
Midspan Section	
Span 1	0.00000000
Span 2	0.00000000
Span 3	0.00000000
Span 4	0.00000000
Inner Support Section	
Support 1	0.21983306
Support 2	0.21698377
Support 3	0.21698377
Resistance Moment, 0.9Mn (N.m)	



Midspan Section		
Span 1		4612613.9316
Span 2		5070684.2301
Span 3		5070684.2301
Span 4		4612613.9316
Inner Support Section		
Support 1		6199955.1476
Support 2		8390333.4305
Support 3		6199955.1476
Cracking Moment, $M_{cr}$	(N.m)	
Midspan Section		
Span 1		3719209.4907
Span 2		3434239.9929
Span 3		3434239.9929
Span 4		3719209.4907
Inner Support Section		
Support 1		4584737.9656
Support 2		4407738.2775
Support 3		4584737.9656
Reinforcement Index		
Midspan Section		
Span 1		0.06459113
Span 2		0.07104301
Span 3		0.07104301
Span 4		0.06459113
Inner Support Section		
Support 1		0.08717272
Support 2		0.11943214
Support 3		0.08717272
Short-Term Deflection	(m)	
Midspan Section		
Span 1		0.00180935
Span 2		0.03683795
Span 3		0.03683795
Span 4		0.00180935
Long-Term Deflection	(m)	
Midspan Section		
Span 1		-0.00038466
Span 2		0.04224190
Span 3		0.04224190
Span 4		-0.00038466
Shear Strength Provided By Shear Reinforcement (N)		
Midspan Section		
Span 1		67585.9421
Span 2		154485.6671
Span 3		154485.6671
Span 4		67585.9421

----- DESIGN RESULT -----

PPR		0.5100
Concrete Cost	(Baht)	270000.0000

## Prestressing Steel

Number		21
Area	(m <sup>2</sup> )	0.00207291
Length	(m)	100.5719
Cost	(Baht)	195134.0160

## Nonprestressing Steel

## At Midspan Section

Number		
Span 1		0
Span 2		2
Span 3		2
Span 4		0
Area	(m <sup>2</sup> )	
Span 1		0.00000000
Span 2		0.00098200
Span 3		0.00098200
Span 4		0.00000000
Length	(m)	
Span 1		13.6325
Span 2		17.8664
Span 3		17.8664
Span 4		13.6325

## At Inner Support Section

Number		
Span 2		7
Span 3		17
Span 4		7
Area	(m <sup>2</sup> )	
Support 1		0.00343700
Support 2		0.00834700
Support 3		0.00343700
Length	(m)	
Span 1		11.8394
Span 2		13.3236
Span 3		11.8394
Cost	(Baht)	44398.7020

## Stirrup Steel

Number		
Span 1		34
Span 2		105
Span 3		105
Span 4		34
Spacing	(m)	
Span 1		0.6000
Span 2		0.2857
Span 3		0.2857
Span 4		0.6000
Cost	(Baht)	13101.4728

## Formwork

Cost	(Baht)	168000.0000
------	--------	-------------

Total Cost	(Baht)	690634.1908
------------	--------	-------------

-----  
 OPTIMAL DESIGN  
 OF  
 PARTIALLY PRESTRESSED CONCRETE CONTINUOUS BEAMS  
 -----

----DESIGN RESULT AT PPR = 0.5100 ----

Prestressing Steel		
Aps	(m <sup>2</sup> )	0.00207291 (21)
Nonprestressing Steel		
Midspan Section		
Span 1	(m <sup>2</sup> )	0.00000000 (0)
Span 2	(m <sup>2</sup> )	0.00098200 (2)
Span 3	(m <sup>2</sup> )	0.00098200 (2)
Span 4	(m <sup>2</sup> )	0.00000000 (0)
Inner Support Section		
Support 1	(m <sup>2</sup> )	0.00343700 (7)
Support 2	(m <sup>2</sup> )	0.00834700 (17)
Support 3	(m <sup>2</sup> )	0.00343700 (7)
Spacing of Stirrup		
Nv		34
Span 1	(m)	0.6000
Nv		105
Span 2	(m)	0.2857
Nv		105
Span 3	(m)	0.2857
Nv		34
Span 4	(m)	0.6000

----FLEXURAL ANALYSIS AT PPR = 0.5100 ----

Classified as (Pa)		
Class U, $ft \geq -0.7\sqrt{fc'}$	-4384369.966	
Class T, $ft \geq -\sqrt{fc'}$	-6263385.666	
Class U, $ft < -\sqrt{fc'}$		
ft at		
Midspan 1	913737.344	Class U
Midspan 2	-4510023.936	Class T
Midspan 3	-4510023.936	Class T
Midspan 4	913737.344	Class U
Support 1	-2018994.990	Class U
Support 2	-6630009.500	Class C
Support 3	-2018994.990	Class U

Compressive Stress At Transfer Stage (Pa)	
$fc \leq 0.6fci'$	17652000.000

fc at	
Midspan 1	5803259.065 pass

Midspan 2	3844565.231	pass
Midspan 3	3844565.231	pass
Midspan 4	5803259.065	pass
Support 1	6305086.502	pass
Support 2	4688708.400	pass
Support 3	6305086.502	pass

## Tensile Stress At Transfer Stage (Pa)

ft >= -0.25sqrt(fci') -1356005.162

## ft at

Midspan 1	197585.062	pass
Midspan 2	2156278.895	pass
Midspan 3	2156278.895	pass
Midspan 4	197585.062	pass
Support 1	-304242.376	pass
Support 2	1312135.727	pass
Support 3	-304242.376	pass

## Compressive Stress At Service Stage, Sustained Load (Pa)

fc <= 0.45fc' 17653500.000

## fc at

Midspan 1	1663887.234	pass
Midspan 2	4472730.546	pass
Midspan 3	4472730.546	pass
Midspan 4	1663887.234	pass
Support 1	3842971.155	pass
Support 2	6373670.751	pass
Support 3	3842971.155	pass

## Compressive Stress At Service Stage, Total Load (Pa)

fc <= 0.6fc' 23538000.000

## fc at

Midspan 1	4229843.336	pass
Midspan 2	9653604.616	pass
Midspan 3	9653604.616	pass
Midspan 4	4229843.336	pass
Support 1	7162575.670	pass
Support 2	16632375.097	pass
Support 3	7162575.670	pass

## Crack Width (mm)

Maximum Crack Width 0.410

## Crack Width at

Midspan 1	0.000000	null
Midspan 2	0.000000	null
Midspan 3	0.000000	null
Midspan 4	0.000000	null
Support 1	0.219833	null
Support 2	0.216984	pass
Support 3	0.216984	null

## Resistance Moment (N.m)

0.9Mn>=Mu

Mu at		
Midspan 1	2703540.500	
Midspan 2	4986337.144	
Midspan 3	4986337.144	
Midspan 4	2703540.500	
Support 1	6105398.332	
Support 2	8217427.380	
Support 3	6105398.332	

0.9Mn at		
Midspan 1	4612613.932	pass
Midspan 2	5070684.230	pass
Midspan 3	5070684.230	pass
Midspan 4	4612613.932	pass
Support 1	6199955.148	pass
Support 2	8390333.431	pass
Support 3	6199955.148	pass

Cracking Moment (N.m)

0.9Mn>=1.2Mcr

1.2Mcr at		
Midspan 1	4463051.389	
Midspan 2	4121087.991	
Midspan 3	4121087.991	
Midspan 4	4463051.389	
Support 1	5501685.559	
Support 2	5289285.933	
Support 3	5501685.559	

0.9Mn at		
Midspan 1	4612613.932	pass
Midspan 2	5070684.230	pass
Midspan 3	5070684.230	pass
Midspan 4	4612613.932	pass
Support 1	6199955.148	pass
Support 2	8390333.431	pass
Support 3	6199955.148	pass

Reinforcement Index, RI

RI<=0.36beta1 0.282266

RI at		
Midspan 1	0.064591	pass
Midspan 2	0.071043	pass
Midspan 3	0.071043	pass
Midspan 4	0.064591	pass
Support 1	0.087173	pass
Support 2	0.119432	pass
Support 3	0.087173	pass

Short-Term Deflection (m)

delta <= L/360

L/360 at	0.055556
L/360 at	0.083333
L/360 at	0.083333

L/360 at	0.055556	
delta at		
Midspan 1	0.001809	pass
Midspan 2	0.036838	pass
Midspan 3	0.036838	pass
Midspan 4	0.001809	pass

Long-Term Deflection (m)

delta <= L/480		
L/480 at	0.041667	
L/480 at	0.062500	
L/480 at	0.062500	
L/480 at	0.041667	
delta at		
Midspan 1	-0.000385	pass
Midspan 2	0.042242	pass
Midspan 3	0.042242	pass
Midspan 4	-0.000385	pass

Shear Strength Provided By Shear Reinforcement (N)

Vs <= (2/3) sqrt(fc')bw*d	1847072.433	
Vs at		
Midspan 1	67585.9421	pass
Midspan 2	154485.6671	pass
Midspan 3	154485.6671	pass
Midspan 4	67585.9421	pass

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รายงานผลการคำนวณออกแบบ ของตัวอย่างที่ 3

- รายงานผลการคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

-----  
 OPTIMAL DESIGN  
 OF  
 PARTIALLY PRESTRESSED CONCRETE CONTINUOUS BEAMS  
 -----

----- DATA -----

No.of Span		4
Span Length 1	(m)	20.0000
Span Length 2	(m)	30.0000
Span Length 3	(m)	30.0000
Span Length 4	(m)	20.0000

Section Properties

```

+-----b-----+
+ *****+ + +
hf1 * * | | |
+ **** * h ds dp
* bw * | | |
* * | | |
+ **** + **** | | +
hf2 * + * | +
+ *****+
+-----b1-----+

```

Section Type I

b	(m)	1.0000
bw	(m)	0.3000
b1	(m)	1.0000
hf1	(m)	0.3000
hf2	(m)	0.3000
h	(m)	1.6500
ds	(m)	1.5500
dp	(m)	1.5000
yt	(m)	0.8250
yb	(m)	0.8250
A	(m <sup>2</sup> )	0.9150
I	(m <sup>4</sup> )	0.3068

Material Properties

Concrete

Ec	(Pa)	29437912629.8044
fci'	(Pa)	29420000.0000
fc'	(Pa)	39230000.0000
Unit Weight	(N/m <sup>2</sup> )	23000.0000
beta1		0.7841

Prestress Steel

System		bonded
Diameter	(m)	0.0127
Each Area	(m <sup>2</sup> )	0.00009871
Ep	(Pa)	200000000000.0000
fpu	(Pa)	1861000000.0000
fpv	(Pa)	1674600000.0000
fpj	(Pa)	1488800000.0000
fpi	(Pa)	1302700000.0000
fse	(Pa)	1116600000.0000
vp		0.5500

Nonprestress Steel



Diameter	(m)	0.0250
Each Area	(m <sup>2</sup> )	0.00049100
Es	(Pa)	200000000000.0000
fy	(Pa)	392400000.0000
Stirrup Steel		
Diameter	(m)	0.0090
Each Area	(m <sup>2</sup> )	0.00006360
fy	(Pa)	235360000.0000

Exposure Condition  
Dry air or protective membrane

Material Cost		
Concrete	(Baht/m <sup>3</sup> )	3000.0000
Prestress Steel	(Baht/kg)	120.0000
Nonprestress Steel	(Baht/kg)	25.0000
Formwork	(Baht/m <sup>2</sup> )	300.0000

Loading		
Uniform Load	(N/m)	
Self Weight Load		21045.0000
Superimposed Dead Load		20000.0000
Live Load		30000.0000

----- MOMENT AT EACH SECTION -----

Self Weight	(N.m)	
Midspan Section		
Span 1		484653.9706
Span 2		851084.5588
Span 3		851084.5588
Span 4		484653.9706
Inner Support Section		
Support 1		-1330786.7647
Support 2		-1702169.1176
Support 3		-1330786.7647

Superimposed Deadload	(N.m)	
Midspan Section		
Span 1		460588.2353
Span 2		808823.5294
Span 3		808823.5294
Span 4		460588.2353
Inner Support Section		
Support 1		-1264705.8824
Support 2		-1617647.0588
Support 3		-1264705.8824

Live load	(N.m)	
Midspan Section		
Span 1		690882.3529
Span 2		1213235.2941
Span 3		1213235.2941
Span 4		690882.3529
Inner Support Section		
Support 1		-1897058.8235
Support 2		-2426470.5882
Support 3		-1897058.8235

Total Load	(N.m)	
------------	-------	--

Midspan Section		
Span 1		1957787.4536
Span 2		3792180.2244
Span 3		3792180.2244
Span 4		1957787.4536
Inner Support Section		
Support 1		-3420341.8215
Support 2		-4980422.7296
Support 3		-3420341.8215
Ultimate Load	(N.m)	
Midspan Section		
Span 1		2819501.9830
Span 2		5305408.1656
Span 3		5305408.1656
Span 4		2819501.9830
Inner Support Section		
Support 1		-5786480.0568
Support 2		-8006878.6120
Support 3		-5786480.0568

----- ALLOWABLE LIMIT -----

Minimum Bonded Reinforcement (Unbonded System)		
0.004A	(m <sup>2</sup> )	0.00366000
Stress at Transfer Stage (Pa)		
Compressive Stress, 0.60fci'		17652000.0000
Tensile Stress, -0.25sqrt(fci')		-1356005.1622
Stress at Service Load (Pa)		
Compressive Stress		
Sustained Load, 0.45fc'		17653500.0000
Total Load, 0.60fc'		23538000.0000
Limits for Reinforcement, 0.36beta1		0.28226571
Permissible Deflection (m)		
Short-Term Deflection, L/360		
Span 1		0.05555556
Span 2		0.08333333
Span 3		0.08333333
Span 4		0.05555556
Long-Term Deflection, L/480		
Span 1		0.04166667
Span 2		0.06250000
Span 3		0.06250000
Span 4		0.04166667
Maximum Crack Width	(mm)	0.410

----- FLEXURAL ANALYSIS RESULT -----

Classified as		
Midspan Section		
Span 1		Class U
Span 2		Class U
Span 3		Class U
Span 4		Class U

Inner Support Section	
Support 1	Class U
Support 2	Class C
Support 3	Class U
Stress at Transfer Stage (Pa)	
Compressive Stress	
Midspan Section	
Span 1	5412017.7923
Span 2	3542574.9420
Span 3	3542574.9420
Span 4	5412017.7923
Inner Support Section	
Support 1	5822221.7178
Support 2	4274450.0589
Support 3	5822221.7178
Tensile Stress	
Midspan Section	
Span 1	209381.8579
Span 2	2078824.7082
Span 3	2078824.7082
Span 4	209381.8579
Inner Support Section	
Support 1	-200822.0676
Support 2	1346949.5914
Support 3	-200822.0676
Stress at Service Load (Pa)	
Compressive Stress	
Sustained Load	
Midspan Section	
Span 1	1604121.2924
Span 2	4283631.7442
Span 3	4283631.7442
Span 4	1604121.2924
Inner Support Section	
Support 1	3739744.0994
Support 2	6158092.2098
Support 3	3739744.0994
Total Load	
Midspan Section	
Span 1	4038457.9832
Span 2	9193386.1963
Span 3	9193386.1963
Span 4	4038457.9832
Inner Support Section	
Support 1	6918715.9083
Support 2	16004332.8668
Support 3	6918715.9083
Crack Width (mm)	
Midspan Section	
Span 1	0.00000000
Span 2	0.00000000
Span 3	0.00000000
Span 4	0.00000000
Inner Support Section	
Support 1	0.21922277
Support 2	0.21627882
Support 3	0.21627882
Resistance Moment, 0.9Mn (N.m)	

Midspan Section		
Span 1		4576105.5352
Span 2		5054098.4249
Span 3		5054098.4249
Span 4		4576105.5352
Inner Support Section		
Support 1		6233049.4736
Support 2		8522246.5335
Support 3		6233049.4736
Cracking Moment, $M_{cr}$	(N.m)	
Midspan Section		
Span 1		3771141.0152
Span 2		3489303.0503
Span 3		3489303.0503
Span 4		3771141.0152
Inner Support Section		
Support 1		4627158.1881
Support 2		4452103.5516
Support 3		4627158.1881
Reinforcement Index		
Midspan Section		
Span 1		0.05970057
Span 2		0.06596212
Span 3		0.06596212
Span 4		0.05970057
Inner Support Section		
Support 1		0.08161598
Support 2		0.11292370
Support 3		0.08161598
Short-Term Deflection	(m)	
Midspan Section		
Span 1		0.00166890
Span 2		0.00810536
Span 3		0.00810536
Span 4		0.00166890
Long-Term Deflection	(m)	
Midspan Section		
Span 1		-0.00022824
Span 2		0.03913058
Span 3		0.03913058
Span 4		-0.00022824
Shear Strength Provided By Shear Reinforcement (N)		
Midspan Section		
Span 1		44003.8572
Span 2		138241.4552
Span 3		127500.0042
Span 4		44003.8572

----- DESIGN RESULT -----

PPR		0.5000
Concrete Cost	(Baht)	274500.0000

## Prestressing Steel

Number		20
Area	(m <sup>2</sup> )	0.00197420
Length	(m)	100.6165
Cost	(Baht)	185924.2891

## Nonprestressing Steel

## At Midspan Section

Number		
Span 1		0
Span 2		2
Span 3		2
Span 4		0
Area	(m <sup>2</sup> )	
Span 1		0.00000000
Span 2		0.00098200
Span 3		0.00098200
Span 4		0.00000000
Length	(m)	
Span 1		13.6325
Span 2		17.8664
Span 3		17.8664
Span 4		13.6325

## At Inner Support Section

Number		
Span 2		7
Span 3		17
Span 4		7
Area	(m <sup>2</sup> )	
Support 1		0.00343700
Support 2		0.00834700
Support 3		0.00343700
Length	(m)	
Span 1		11.8394
Span 2		13.3236
Span 3		11.8394
Cost	(Baht)	44398.7020

## Stirrup Steel

Number		
Span 1		34
Span 2		91
Span 3		84
Span 4		34
Spacing	(m)	
Span 1		0.6000
Span 2		0.3303
Span 3		0.3581
Span 4		0.6000
Cost	(Baht)	11753.3754

## Formwork

Cost	(Baht)	171000.0000
------	--------	-------------

Total Cost	(Baht)	687576.3665
------------	--------	-------------

-----  
 OPTIMAL DESIGN  
 OF  
 PARTIALLY PRESTRESSED CONCRETE CONTINUOUS BEAMS  
 -----

----DESIGN RESULT AT PPR = 0.5000 ----

Prestressing Steel		
Aps	(m <sup>2</sup> )	0.00197420 (20)
Nonprestressing Steel		
Midspan Section		
Span 1	(m <sup>2</sup> )	0.00000000 (0)
Span 2	(m <sup>2</sup> )	0.00098200 (2)
Span 3	(m <sup>2</sup> )	0.00098200 (2)
Span 4	(m <sup>2</sup> )	0.00000000 (0)
Inner Support Section		
Support 1	(m <sup>2</sup> )	0.00343700 (7)
Support 2	(m <sup>2</sup> )	0.00834700 (17)
Support 3	(m <sup>2</sup> )	0.00343700 (7)
Spacing of Stirrup		
Nv		34
Span 1	(m)	0.6000
Nv		91
Span 2	(m)	0.3303
Nv		84
Span 3	(m)	0.3581
Nv		34
Span 4	(m)	0.6000

----FLEXURAL ANALYSIS AT PPR = 0.5000 ----

Classified as (Pa)		
Class U, $ft \geq -0.7\sqrt{fc'}$	-4384369.966	
Class T, $ft \geq -\sqrt{fc'}$	-6263385.666	
Class U, $ft < -\sqrt{fc'}$		
ft at		
Midspan 1	779884.574	Class U
Midspan 2	-4375043.639	Class U
Midspan 3	-4375043.639	Class U
Midspan 4	779884.574	Class U
Support 1	-2100373.351	Class U
Support 2	-6491420.191	Class C
Support 3	-2100373.351	Class U

Compressive Stress At Transfer Stage (Pa)	
$fc \leq 0.6fci'$	17652000.000

fc at		
Midspan 1	5412017.792	pass

Midspan 2	3542574.942	pass
Midspan 3	3542574.942	pass
Midspan 4	5412017.792	pass
Support 1	5822221.718	pass
Support 2	4274450.059	pass
Support 3	5822221.718	pass

## Tensile Stress At Transfer Stage (Pa)

ft >= -0.25sqrt(fci') -1356005.162

## ft at

Midspan 1	209381.858	pass
Midspan 2	2078824.708	pass
Midspan 3	2078824.708	pass
Midspan 4	209381.858	pass
Support 1	-200822.068	pass
Support 2	1346949.591	pass
Support 3	-200822.068	pass

## Compressive Stress At Service Stage, Sustained Load (Pa)

fc <= 0.45fc' 17653500.000

## fc at

Midspan 1	1604121.292	pass
Midspan 2	4283631.744	pass
Midspan 3	4283631.744	pass
Midspan 4	1604121.292	pass
Support 1	3739744.099	pass
Support 2	6158092.210	pass
Support 3	3739744.099	pass

## Compressive Stress At Service Stage, Total Load (Pa)

fc <= 0.6fc' 23538000.000

## fc at

Midspan 1	4038457.983	pass
Midspan 2	9193386.196	pass
Midspan 3	9193386.196	pass
Midspan 4	4038457.983	pass
Support 1	6918715.908	pass
Support 2	16004332.867	pass
Support 3	6918715.908	pass

## Crack Width (mm)

Maximum Crack Width 0.410

## Crack Width at

Midspan 1	0.000000	null
Midspan 2	0.000000	null
Midspan 3	0.000000	null
Midspan 4	0.000000	null
Support 1	0.219223	null
Support 2	0.216279	pass
Support 3	0.216279	null

## Resistance Moment (N.m)

0.9Mn>=Mu

Mu at		
Midspan 1	2712281.018	
Midspan 2	4999062.552	
Midspan 3	4999062.552	
Midspan 4	2712281.018	
Support 1	6143883.273	
Support 2	8262166.624	
Support 3	6143883.273	

0.9Mn at		
Midspan 1	4576105.535	pass
Midspan 2	5054098.425	pass
Midspan 3	5054098.425	pass
Midspan 4	4576105.535	pass
Support 1	6233049.474	pass
Support 2	8522246.533	pass
Support 3	6233049.474	pass

Cracking Moment (N.m)

0.9Mn>=1.2Mcr

1.2Mcr at		
Midspan 1	4525369.218	
Midspan 2	4187163.660	
Midspan 3	4187163.660	
Midspan 4	4525369.218	
Support 1	5552589.826	
Support 2	5342524.262	
Support 3	5552589.826	

0.9Mn at		
Midspan 1	4576105.535	pass
Midspan 2	5054098.425	pass
Midspan 3	5054098.425	pass
Midspan 4	4576105.535	pass
Support 1	6233049.474	pass
Support 2	8522246.533	pass
Support 3	6233049.474	pass

Reinforcement Index, RI

RI<=0.36beta1 0.282266

RI at		
Midspan 1	0.059701	pass
Midspan 2	0.065962	pass
Midspan 3	0.065962	pass
Midspan 4	0.059701	pass
Support 1	0.081616	pass
Support 2	0.112924	pass
Support 3	0.081616	pass

Short-Term Deflection (m)

delta <= L/360

L/360 at	0.055556
L/360 at	0.083333
L/360 at	0.083333



L/360 at	0.055556	
delta at		
Midspan 1	0.001669	pass
Midspan 2	0.008105	pass
Midspan 3	0.008105	pass
Midspan 4	0.001669	pass

Long-Term Deflection (m)

delta <= L/480		
L/480 at	0.041667	
L/480 at	0.062500	
L/480 at	0.062500	
L/480 at	0.041667	
delta at		
Midspan 1	-0.000228	pass
Midspan 2	0.039131	pass
Midspan 3	0.039131	pass
Midspan 4	-0.000228	pass

Shear Strength Provided By Shear Reinforcement (N)

Vs <= (2/3) sqrt(fc')bw*d	1910332.628	
Vs at		
Midspan 1	44003.8572	pass
Midspan 2	138241.4552	pass
Midspan 3	127500.0042	pass
Midspan 4	44003.8572	pass

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชญานาภรณ์ วันเลี้ยง เกิดเมื่อวันที่ 6 มิถุนายน พ.ศ. 2525 ที่จังหวัดยะลา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิตจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เมื่อปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย