

การเสริมกำลังโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตด้วยวิธีอัดแรงภายนอก



นายประณต พัวเพิ่มพูลศิริ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

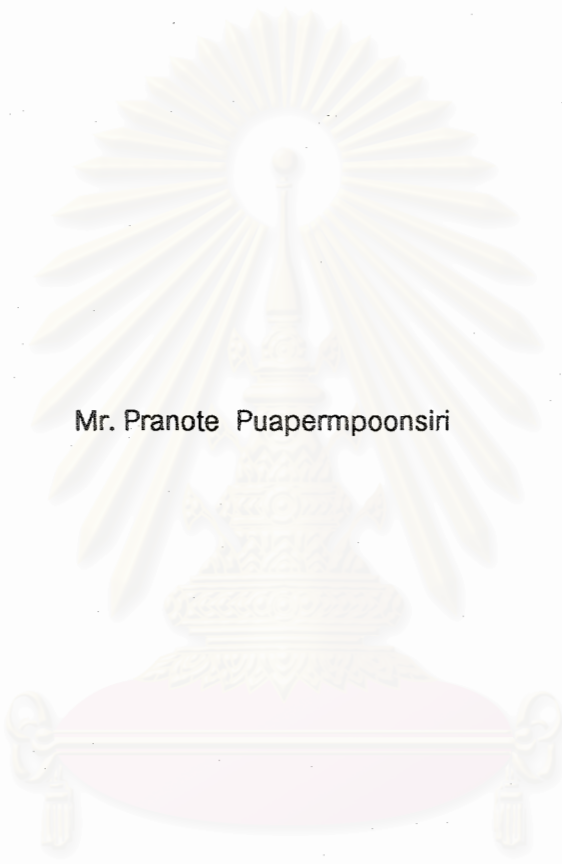
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0917-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FLEXURAL STRENGTHENING OF CONCRETE BEAMS
USING THE EXTERNAL PRESTRESSED METHOD



Mr. Pranote Puapermpoonsiri

สถาบันวิทยบริการ

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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-13-0917-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์

โดย

สาขาวิชา

อาจารย์ที่ปรึกษา

การเสริมกำลังโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตด้วยวิธีอัดแรงภายนอก

นายประณต พัวเพิ่มพูลศิริ

วิศวกรรมโยธา

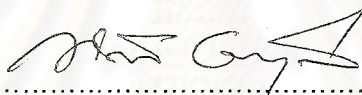
ผศ. ดร. พูลศักดิ์ เพ็ชรสุขสม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



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



..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พูลศักดิ์ เพ็ชรสุขสม)



..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ชัชชาติ สิทธิพันธุ์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประณต พัวเพิ่มพูลศิริ : การเสริมกำลังโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตด้วยวิธีอัดแรงภายนอก. (FLEXURAL STRENGTHENING OF CONCRETE BEAMS USING THE EXTERNAL PRESTRESSED METHOD) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. พูลศักดิ์ เพียรสุดสม, จำนวนหน้า 131 หน้า. ISBN 974-13-0917-1.

วัตถุประสงค์ของการวิจัยเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยวิธีอัดแรงภายนอกโดยวิธีการเชิงเลข ตัวแปรที่นำมาพิจารณาได้แก่ พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรง หน่วยแรงดึง ระยะเยื้องศูนย์กลาง แนวการวางตัวของลวดอัดแรง จำนวนและตำแหน่งของดีวีเอเตอร์ ขอบเขตของการศึกษาครอบคลุมเฉพาะการเสริมกำลังในกรณีที่แนวการวางตัวของลวดอัดแรงอยู่ต่ำกว่าระดับท้องคานไปไม่เกินสองเท่าของความลึกคาน คานที่ใช้ในการศึกษาเป็นรูปแบบของโครงสร้างสะพานได้แก่ RC SLAB, PC PLANK GIRDER, PC BOX GIRDER และ PC I GIRDER

จากการศึกษาการเสริมกำลังโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตด้วยวิธีอัดแรงภายนอกพบว่า เมื่อเพิ่มพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอก คานจะมีกำลังรับโมเมนต์ดัดและสติฟเนสเพิ่มขึ้นแต่ความเหนียวของคานจะลดลง โดยหน่วยแรงดึง (prestressing stress) ที่ใช้ในการดึงลวดอัดแรงภายนอกไม่มีผลต่อกำลังรับโมเมนต์ดัดและความเหนียวของคาน แต่ถ้าเพิ่มแรงดึงที่ใช้ในการดึงลวดอัดแรง จะทำให้คานมีสติฟเนสและน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น การเพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลางทำให้คานมีกำลังรับโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้นแต่ไม่มีผลต่อความเหนียว เมื่อระยะเยื้องศูนย์กลางเพิ่มขึ้นและใช้หน่วยแรงดึงมากคานจะมีสติฟเนสลดลง ในขณะที่เมื่อใช้หน่วยแรงดึงน้อยคานจะมีสติฟเนสเพิ่มขึ้น การลดจำนวนดีวีเอเตอร์จะมีผลน้อยต่อการลดลงของระยะเยื้องศูนย์กลาง เมื่อเสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกมีผลต่อกำลังรับโมเมนต์ดัด สติฟเนส และความเหนียวของคาน โดยในการกำหนดแนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกต้องคำนึงถึงการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงเมื่อมีน้ำหนักกระทำและรูปแบบของน้ำหนักกระทำ แนวการวางตัวของลวดอัดแรงเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูให้กำลังรับโมเมนต์ดัด สติฟเนส และความเหนียวได้ดีกว่าแนวการวางตัวของลวดอัดแรงเป็นรูปตัววี นอกจากนี้พบว่าคานสะพานทุกประเภทที่นำมาศึกษามีพฤติกรรมคล้ายคลึงกันเมื่อเสริมกำลังรับโมเมนต์ดัดด้วยวิธีอัดแรงภายนอก

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2543

ลายมือชื่อนิติ... ประณต พัวเพิ่มพูลศิริ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา... ๒๐/๖ ๒๕๔๓

4170397921 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: STRENGTHENING / EXTERNAL PRESTRESSED

PRANOTE PUAPERMPOONSIRI : FLEXURAL STRENGTHENING OF CONCRETE BEAMS USING THE EXTERNAL PRESTRESSED METHOD. THESIS ADVISOR: ASSIST. PROF. PHOONSAK PHEINSUSOM, Ph.D. , 131 pp. ISBN 974-13-0917-1.

The objective of this study was to investigate, by using numerical analysis, the flexural behavior of concrete beams strengthening by external prestressing. The studied parameters were prestressing steel area, prestressing stress, tendon profile, tendon eccentricity, number and location of deviators. Tendon was placed under a beam and was not placed under the beam more than two times of beam depth. The beams used in this study were the bridge girders, e.g. RC SLAB, PC PLANK GIRDER, PC BOX GIRDER and PC I GIRDER.

Results of this study indicated that an increase in prestressing steel area led to an increase in flexural strength and stiffness of the beams but led to a reduction in ductility of the beams. Prestressing stress level in prestressing steel had no effect on beam's flexural strength; however, an increase in prestressing force level in prestressing steel resulted in an increase in stiffness and cracking load of the beams. An increase in tendon eccentricity led to an increase in beam's flexural strength, but it has no effect on beam's ductility. In beams strengthen with large eccentricity, high level of prestressing stress led to the reduction in the stiffness of the beams, while low level of prestressing stress led to an increase in the stiffness of the beams. A decrease in number of deviators had less effect on the loss of tendon eccentricity. In case of decreasing number of deviators, beams strengthen with large eccentricity led to less decrease in flexural strength than beams with small eccentricity. Tendon profile affects the flexural strength, stiffness and ductility of the strengthen beams. Load patterns on beam and increase in tendon stress are the major parameters in determining the tendon profile. Trapezoidal profile of tendons made beams more stiff, more ductile and higher flexural strength than the draped profile. It was found that behavior of beams strengthening by external prestressing in this study is similar in term of flexural strength, stiffness and ductility.

Department Civil Engineering

Field of study Civil Engineering

Academic year 2000

Student's signature... *ป.ก.น.ต. พัทธวิมล*

Advisor's signature... *พ.อ.ส. พ.อ.ส.*

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือจากหลายท่าน ซึ่งผู้เขียนต้องขอขอบพระคุณท่านเหล่านี้เป็นอย่างสูง

ท่านแรกที่ขาดเสียมิได้คือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พูลศักดิ์ เพียรสุดม ในฐานะอาจารย์ที่ปรึกษา ท่านได้ให้คำแนะนำทางด้านวิชาการ วิธีคิด และวิธีทำงาน ซึ่งเป็นประโยชน์แก่ผู้เขียนอย่างมากในการทำวิทยานิพนธ์

ในฐานะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาติรี และอาจารย์ ดร. ชัชชาติ สิทธิพันธุ์ ได้ให้คำแนะนำและชี้แนะข้อบกพร่องต่าง ๆ ของวิทยานิพนธ์แก่ผู้เขียน

ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง อาจารย์ สายันต์ สิริมนตรี ได้แนะนำเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาของผู้เขียน ช่วยให้ผู้เขียนประหยัดเวลาในการศึกษางานวิจัยที่มีในอดีตเป็นอย่างมาก และต้องขอขอบคุณคุณเอกรัฐ วิฑูเกียรติกร ที่ช่วยหาข้อมูลผลทดสอบคานคอนกรีตอัดแรงภายนอกที่แบบใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมาให้แก่ผู้เขียน

และสุดท้ายผู้เขียนต้องขอขอบพระคุณครอบครัวและญาติ ๆ ของผู้เขียนที่คอยให้กำลังใจผู้เขียนตลอดมา

ประณต พัวเพิ่มพูลศิริ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
ความสำคัญของงานวิจัย.....	2
วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
ขอบเขตของการศึกษา.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
ระบบลวดอัดแรงภายนอก (external prestressed).....	5
การเสริมกำลัง (strengthening).....	8
แนวคิดและทฤษฎี.....	9
การคำนวณหน่วยแรงภายในลวดอัดแรงภายนอก.....	9
การคำนวณระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอก.....	12
แนวทางการแก้ไขปัญหาของระบบลวดอัดแรงภายนอก.....	12
บทที่ 3 การวิเคราะห์พฤติกรรมของคานคองกรีตอัดแรงภายนอกโดยวิธีการเชิงเลข.....	14
สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	15
แบบจำลองคองกรีต.....	16
แบบจำลองเหล็กเสริม.....	16
แบบจำลองลวดอัดแรง.....	17
วิธีการวิเคราะห์.....	17
วงรอบที่ 1 วงรอบเพื่อหาสมดุลของแรง (force equilibrium).....	19
วงรอบที่ 2 วงรอบเพื่อหาสมดุลของโมเมนต์ (moment equilibrium).....	20

วงรอบที่ 3 วงรอบความสอดคล้องของการเสียรูป (compatibility of deformation).....	21
การคำนวณหาระยะแอนตัวของคาน.....	22
การคำนวณหาความยาวลวดอัดแรงภายนอก.....	24
การคำนวณหาระยะทางแกน Y ของลวดอัดแรงภายนอก	25
แบบจำลองวัสดุ	25
แรงเสียดทานระหว่างตีวีเอเตอร์กับลวดอัดแรง	27
บทที่ 4 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบ.....	29
เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของ Songkiat M.....	29
เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของ Kiang-Hwee Tan	35
เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของ Aravinthan.....	39
สรุป	41
บทที่ 5 คานและรูปแบบของน้ำหนักระทำ.....	43
คาน.....	43
รูปแบบของน้ำหนักระทำ.....	43
บทที่ 6 พื้นที่หน้าตัด ระยะเยื้องศูนย์กลาง และหน่วยแรงดึงที่ใช้ดึงลวดอัดแรงภายนอก.....	47
ตัวแปรที่กำหนดให้มีค่าคงที่.....	48
ตัวแปรที่ทำการศึกษา.....	49
ระยะเยื้องศูนย์กลาง.....	49
พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอก และหน่วยแรงดึงที่ใช้ในการดึงลวดอัดแรง	49
การศึกษาส่วนที่ 1.....	49
การเสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร.....	51
การเสริมกำลังแผ่นพื้น PC PLANK ความยาวช่วง 5 เมตร	56
การเสริมกำลังคาน PC BOX GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร	61
การเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร.....	66
การเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 30 เมตร.....	71
สรุปผลการศึกษาส่วนที่ 1	76
การศึกษาส่วนที่ 2.....	77
การเสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร.....	79
การเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร.....	84
สรุปผลการศึกษาส่วนที่ 2	89
การศึกษาส่วนที่ 3.....	92

สรุป.....	95
บทที่ 7 แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอก.....	97
จำนวนและระยะห่างระหว่างดิวีเอเตอร์.....	97
แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอก.....	102
การเพิ่มของหน่วยแรงในลวดอัดแรงภายนอก.....	108
รูปแบบของน้ำหนักระทำได้.....	109
ระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรง.....	115
ระยะห่างระหว่างดิวีเอเตอร์ตัวแรกกับตัวสุดท้าย.....	119
ผลจากมุมเบี่ยงเบน.....	123
โมเมนต์ที่ดิวีเอเตอร์.....	123
แรงเสียดทานระหว่างลวดอัดแรงกับดิวีเอเตอร์.....	123
สรุป.....	125
บทที่ 8 สรุปผลการศึกษา.....	127
รายการอ้างอิง.....	129
ประวัติผู้เขียน.....	131

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบหน่วยการยึดหดในลวดอัดแรงทั้ง 2 แบบ ณ หน้าตัดวิกฤติ	10
รูปที่ 2.2 แสดงการลดลงของระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอก.....	12
รูปที่ 2.3 แสดงแนวการวางตัวของลวดอัดแรงแบบต่าง ๆ (ค่าของตัวคูณลดที่แสดงเป็นกรณีที่ลวดอัดแรงอยู่ภายในระดับความลึกของคาน ^[12] (bonded : $\Omega = 1$)).....	13
รูปที่ 2.4 แสดงการเพิ่มตัวเอนเตอร์เพื่อลดผลกระทบจากการที่ระยะเยื้องศูนย์กลางลดลง.....	13
รูปที่ 3.1 แสดงแบบจำลองวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์	15
รูปที่ 3.2 แสดงแบบจำลองคานที่ใช้ในการวิเคราะห์	17
รูปที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการคำนวณ ณ ที่นำนักกระทำขึ้นใด ๆ	18
รูปที่ 3.4 แสดงหน่วยแรงและหน่วยการยึดหดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคอนกรีต จากการสมมติในวงรอบที่ 1.....	19
รูปที่ 3.5 แสดงการแบ่งหน้าตัดออกเป็นแถบย่อย ๆ เพื่อคำนวณหาแรงที่เกิดขึ้น	20
รูปที่ 3.6 แสดงการรวมแรงเพื่อหาโมเมนต์ด้านทานภายใน.....	21
รูปที่ 3.7 แสดงการหาค่ามุมระหว่างจุด 2 จุด	22
รูปที่ 3.8 แสดงการแปลงพิกัดจาก X'-Y' เป็น X-Y	23
รูปที่ 3.9 แสดงการคำนวณหาความยาวของลวดอัดแรงภายนอก.....	24
รูปที่ 3.10 แสดงการคำนวณหาค่าระยะทางแกน Y ของลวดอัดแรงภายนอก	25
รูปที่ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองคอนกรีตกับพฤติกรรมของคานที่คำนวณได้ ..	26
รูปที่ 3.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองเหล็กเสริมและลวดอัดแรง กับพฤติกรรมของคานที่คำนวณได้	27
รูปที่ 4.1 แสดงคานและนำนักกระทำที่ใช้ในการศึกษาของ Songkiat M.....	30
รูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของคาน A-1	31
รูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของคาน A-2	31
รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของคาน A-3	32
รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของคาน A-4	32
รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของคาน A-5	33
รูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของคาน A-6	33
รูปที่ 4.8 แสดงคานและนำนักกระทำที่ใช้ในการศึกษาของ Kiang-Hwee Tan.....	36
รูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของคาน T-0.....	36
รูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของคาน T-1.....	37

รูปที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของคาน T-1A	37
รูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของคาน T-1B	38
รูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของคาน T-2.....	38
รูปที่ 4.14 แสดงคานและน้ำหนักกระทำที่ใช้ในการศึกษาของ Aravinthan.....	40
รูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของคาน D-1	40
รูปที่ 5.1 แสดงรถบรรทุกชนิดต่าง ๆ.....	44
รูปที่ 5.2 แสดงรูปแบบน้ำหนักสำหรับสะพานความยาวช่วง 5 เมตร.....	44
รูปที่ 5.3 แสดงรูปแบบน้ำหนักสำหรับสะพานความยาวช่วง 20 และ 30 เมตร.....	46
รูปที่ 6.1 แสดงแนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกที่ใช้วิเคราะห์.....	47
รูปที่ 6.2 แสดงผลการเสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร ที่ใช้พื้นที่หน้าตัด ลวดอัดแรงน้อย.....	51
รูปที่ 6.3 แสดงผลการเสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร ที่ใช้พื้นที่หน้าตัด ลวดอัดแรงปานกลาง.....	52
รูปที่ 6.4 แสดงผลการเสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร ที่ใช้พื้นที่หน้าตัด ลวดอัดแรงมาก	52
รูปที่ 6.5 แสดงผลการเสริมกำลังแผ่นพื้น PC PLANK ความยาวช่วง 5 เมตร ที่ใช้พื้นที่หน้าตัด ลวดอัดแรงน้อย.....	56
รูปที่ 6.6 แสดงผลการเสริมกำลังแผ่นพื้น PC PLANK ความยาวช่วง 5 เมตร ที่ใช้พื้นที่หน้าตัด ลวดอัดแรงปานกลาง.....	57
รูปที่ 6.7 แสดงผลการเสริมกำลังแผ่นพื้น PC PLANK ความยาวช่วง 5 เมตร ที่ใช้พื้นที่หน้าตัด ลวดอัดแรงมาก	57
รูปที่ 6.8 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC BOX GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร ที่ใช้พื้นที่ หน้าตัดลวดอัดแรงน้อย.....	61
รูปที่ 6.9 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC BOX GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร ที่ใช้พื้นที่ หน้าตัดลวดอัดแรงปานกลาง	62
รูปที่ 6.10 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC BOX GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร ที่ใช้พื้นที่ หน้าตัดลวดอัดแรงมาก.....	62
รูปที่ 6.11 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร ที่ใช้พื้นที่หน้าตัด ลวดอัดแรงน้อย.....	66
รูปที่ 6.12 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร ที่ใช้พื้นที่หน้าตัด ลวดอัดแรงปานกลาง.....	67

รูปที่ 6.13 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร ที่ใช้พื้นที่หน้าตัด ลวดอัดแรงมาก	67
รูปที่ 6.14 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 30 เมตร ที่ใช้พื้นที่หน้าตัด ลวดอัดแรงน้อย.....	71
รูปที่ 6.15 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 30 เมตร ที่ใช้พื้นที่หน้าตัด ลวดอัดแรงปานกลาง.....	72
รูปที่ 6.16 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 30 เมตร ที่ใช้พื้นที่หน้าตัด ลวดอัดแรงมาก	72
รูปที่ 6.17 แสดงผลของการเสริมกำลังด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงต่าง ๆ กันที่ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย	76
รูปที่ 6.18 แสดงผลของการเสริมกำลังด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงต่าง ๆ กันที่ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก	76
รูปที่ 6.19 แสดงผลการเสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร ที่ใช้หน่วยแรงดึงใน ลวดอัดแรงภายนอกมาก ($0.7f_{pu}$).....	79
รูปที่ 6.20 แสดงผลการเสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร ที่ใช้หน่วยแรงดึงใน ลวดอัดแรงภายนอกปานกลาง ($0.5f_{pu}$)	80
รูปที่ 6.21 แสดงผลการเสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร ที่ใช้หน่วยแรงดึงใน ลวดอัดแรงภายนอกน้อย ($0.3f_{pu}$)	80
รูปที่ 6.22 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร ที่ใช้หน่วยแรงดึง ในลวดอัดแรงภายนอกมาก ($0.7f_{pu}$).....	85
รูปที่ 6.23 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร ที่ใช้หน่วยแรงดึง ในลวดอัดแรงภายนอกปานกลาง ($0.5f_{pu}$)	85
รูปที่ 6.24 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร ที่ใช้หน่วยแรงดึง ในลวดอัดแรงภายนอกน้อย ($0.3f_{pu}$)	86
รูปที่ 6.25 แสดงผลของการเสริมกำลังด้วยหน่วยแรงดึงต่าง ๆ กันที่ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย	90
รูปที่ 6.26 แสดงผลของการเสริมกำลังด้วยหน่วยแรงดึงต่าง ๆ กันที่ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก.....	90
รูปที่ 6.27 แสดงการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงในลวดอัดแรงภายนอกที่เสริมกำลัง โดยใช้ระยะเยื้อง ศูนย์กลางต่าง ๆ กัน เมื่อใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงภายนอกมาก ($0.7f_{pu}$)	91
รูปที่ 6.28 แสดงการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงในลวดอัดแรงภายนอกที่เสริมกำลัง โดยใช้ระยะเยื้อง ศูนย์กลางต่าง ๆ กัน เมื่อใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงภายนอกน้อย ($0.3f_{pu}$).....	92

รูปที่ 6.29 แสดงผลการเสริมกำลังคานเมื่อให้โมเมนต์ดัดที่ใช้ในการเสริมกำลัง และพื้นที่หน้าตัด ลดอัดแรงคงที่	93
รูปที่ 6.30 แสดงแรงดึงในลดอัดแรงภายนอกเมื่อเสริมกำลังคาน โดยให้โมเมนต์ดัดที่ใช้ในการ เสริมกำลังและพื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงคงที่.....	94
รูปที่ 6.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเยื้องศูนย์กลางกับความเหนียว	94
รูปที่ 7.1 แสดงคานที่เสริมกำลังเมื่อใช้ดีวีเอเตอร์จำนวน 2 ตัวและ 5 ตัว.....	98
รูปที่ 7.2 แสดงผลการเสริมกำลังสะพาน RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร ที่ใช้ดีวีเอเตอร์จำนวน 2 ตัว และ 5 ตัว	99
รูปที่ 7.3 แสดงผลการเสริมกำลังสะพาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร ที่ใช้ดีวีเอเตอร์ จำนวน 2 ตัว และ 5 ตัว.....	99
รูปที่ 7.4 แสดงระดับของลดอัดแรงภายนอก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางคาน.....	101
รูปที่ 7.5 แสดงระยะเยื้องศูนย์กลางที่ลดลงคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับระยะเยื้องศูนย์กลางเริ่มแรก	101
รูปที่ 7.6 แสดงแนวการวางตัวของลดอัดแรงภายนอกแบบที่ 1.....	103
รูปที่ 7.7 แสดงแนวการวางตัวของลดอัดแรงภายนอกแบบที่ 2.....	103
รูปที่ 7.8 แสดงแนวการวางตัวของลดอัดแรงภายนอกแบบที่ 3.....	103
รูปที่ 7.9 แสดงผลการเสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร ด้วยพื้นที่หน้าตัดลด อัดแรงภายนอกน้อย โดยใช้แนวการวางตัวแบบต่าง ๆ.....	104
รูปที่ 7.10 แสดงผลการเสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร ด้วยพื้นที่หน้าตัด ลดอัดแรงภายนอกมาก โดยใช้แนวการวางตัวแบบต่าง ๆ.....	104
รูปที่ 7.11 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร ด้วยพื้นที่หน้าตัด ลดอัดแรงภายนอกน้อย โดยใช้แนวการวางตัวแบบต่าง ๆ.....	106
รูปที่ 7.12 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร ด้วยพื้นที่หน้าตัด ลดอัดแรงภายนอกมาก โดยใช้แนวการวางตัวแบบต่าง ๆ.....	106
รูปที่ 7.13 แสดงหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นในลดอัดแรงภายนอกเมื่อมีน้ำหนักกระทำ ของคานที่เสริม กำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลดอัดแรงแบบต่าง ๆ.....	108
รูปที่ 7.14 แสดงแนวการวางตัวของลดอัดแรงแบบที่ 1	110
รูปที่ 7.15 แสดงตำแหน่งที่เหล็กเสริมครากเมื่อใช้แนวการวางตัวแบบที่ 1.....	110
รูปที่ 7.16 แสดงตำแหน่งที่ลดอัดแรงภายใน(bonded)ครากเมื่อใช้แนวการวางตัวแบบที่ 1....	110
รูปที่ 7.17 แสดงแนวการวางตัวของลดอัดแรงแบบที่ 2	111
รูปที่ 7.18 แสดงตำแหน่งที่เหล็กเสริมครากเมื่อใช้แนวการวางตัวแบบที่ 2.....	111
รูปที่ 7.19 แสดงตำแหน่งที่ลดอัดแรงภายใน(bonded)ครากเมื่อใช้แนวการวางตัวแบบที่ 2....	111

รูปที่ 7.20 แสดงแนวการวางตัวของลวดอัดแรงแบบที่ 3	112
รูปที่ 7.21 แสดงตำแหน่งที่เหล็กเสริมครากเมื่อใช้แนวการวางตัวแบบที่ 3.....	112
รูปที่ 7.22 แสดงตำแหน่งที่ลวดอัดแรงภายใน(bonded)ครากเมื่อใช้แนวการวางตัวแบบที่ 3....	112
รูปที่ 7.23 แสดงการวิบัติของคานโดยโมเมนต์ไดอะแกรม.....	115
รูปที่ 7.24 แสดงแนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกเพื่อศึกษา ผลของระยะห่างระหว่าง แป้นยึดลวดอัดแรง (L').....	116
รูปที่ 7.25 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 30 เมตร เมื่อเสริมกำลัง โดย ใช้ระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรงต่าง ๆ กัน ใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 2.0H พื้นที่หน้าตัด ลวดอัดแรงน้อย.....	117
รูปที่ 7.26 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 30 เมตร เมื่อเสริมกำลัง โดย ใช้ระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรงต่าง ๆ กัน โดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 2.0H พื้นที่หน้า ตัดลวดอัดแรงมาก	117
รูปที่ 7.27 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 30 เมตร เมื่อเสริมกำลัง โดย ใช้ระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรงต่าง ๆ กัน โดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 0.2H พื้นที่ หน้าตัดลวดอัดแรงน้อย.....	118
รูปที่ 7.28 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 30 เมตร เมื่อเสริมกำลัง โดย ใช้ระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรงต่าง ๆ กัน โดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 0.2H พื้นที่ หน้าตัดลวดอัดแรงมาก.....	118
รูปที่ 7.29 แสดงแนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกเพื่อศึกษา ระยะห่างระหว่างดีไวเตอร์ ตัวแรกกับตัวสุดท้าย (S_u).....	120
รูปที่ 7.30 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 30 เมตร เมื่อเสริมกำลัง โดย ใช้ระยะห่างระหว่างดีไวเตอร์ตัวแรกกับตัวสุดท้ายต่าง ๆ กัน ใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 2.0H พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงน้อย	121
รูปที่ 7.31 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 30 เมตร เมื่อเสริมกำลัง โดย ใช้ระยะห่างระหว่างดีไวเตอร์ตัวแรกกับตัวสุดท้ายต่าง ๆ กัน ใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 2.0H พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงมาก	121
รูปที่ 7.32 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 30 เมตร เมื่อเสริมกำลัง โดย ใช้ระยะห่างระหว่างดีไวเตอร์ตัวแรกกับตัวสุดท้ายต่าง ๆ กัน ใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 0.2H พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงน้อย	122

- รูปที่ 7.33 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 30 เมตร เมื่อเสริมกำลัง โดยใช้ระยะห่างระหว่างดิวเอเตอร์ตัวแรกกับตัวสุดท้ายต่าง ๆ กัน ใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 0.2H พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงมาก 122
- รูปที่ 7.34 แสดงโมเมนต์ที่ดิวเอเตอร์ 123
- รูปที่ 7.35 แสดงภาพประกอบการคำนวณแรงดึงที่สูญเสียไปเนื่องจากแรงเสียดทาน 124
- รูปที่ 7.36 แสดงการปรับระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรง (L') และปรับระยะห่างระหว่างดิวเอเตอร์ตัวแรกกับตัวสุดท้าย (S_u) 124



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติของเหล็กเสริมที่ใช้ในการศึกษาของ Songkiat M.	29
ตารางที่ 4.2 แสดงคุณสมบัติของลวดอัดแรงที่ใช้ในการศึกษาของ Songkiat M.	30
ตารางที่ 4.3 แสดงรายละเอียดคานที่ใช้ในการศึกษาของ Songkiat M.	30
ตารางที่ 4.4 แสดงรายละเอียดคานที่ใช้ในการศึกษาของ Kiang-Hwee Tan	35
ตารางที่ 4.5 แสดงคุณสมบัติของเหล็กเสริมที่ใช้ในการศึกษาของ Kiang-Hwee Tan	35
ตารางที่ 4.6 แสดงคุณสมบัติลวดอัดแรงที่ใช้ในการศึกษาของ Kiang-Hwee Tan	35
ตารางที่ 4.7 แสดงรายละเอียดคานที่ใช้ในการศึกษาของ Aravinthan	39
ตารางที่ 4.8 แสดงคุณสมบัติลวดอัดแรงที่ใช้ในการศึกษาของ Aravinthan	40
ตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการวางน้ำหนักแบบต่าง ๆ	45
ตารางที่ 6.1 แสดงการเปลี่ยนค่าตัวแปรในการศึกษาส่วนที่ 1	50
ตารางที่ 6.2 แสดงค่าโมเมนต์ดัดที่ใช้ในการเสริมกำลังของคานในการศึกษาส่วนที่ 1	50
ตารางที่ 6.3 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้เสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร	51
ตารางที่ 6.4 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้เสริมกำลังแผ่นพื้น PC PLANK ความยาวช่วง 5 เมตร	56
ตารางที่ 6.5 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้เสริมกำลังคาน PC BOX GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร	61
ตารางที่ 6.6 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้เสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร	66
ตารางที่ 6.7 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้เสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 30 เมตร	71
ตารางที่ 6.8 แสดงการเปลี่ยนค่าตัวแปรในการศึกษาส่วนที่ 2	78
ตารางที่ 6.9 แสดงค่าโมเมนต์ดัดประลัยที่ใช้ในการเสริมคาน	78
ตารางที่ 6.10 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้เสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร	79
ตารางที่ 6.11 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้เสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร	84

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีสะพานคอนกรีตจำนวนมากกระจายอยู่ทุกภูมิภาคของประเทศ ในจำนวนเหล่านั้นมีอยู่หลายสะพานก่อสร้างและใช้งานมาเป็นเวลานาน ในสมัยที่มีการก่อสร้างรถบรรทุกยังบรรทุกน้ำหนักไม่มากประกอบกับการจราจรยังไม่คับคั่ง ดังนั้นวิศวกรจึงออกแบบสะพานให้รับน้ำหนักบรรทุกที่มีค่าไม่สูงนัก แต่ในปัจจุบันรถบรรทุกสามารถบรรทุกน้ำหนักได้มากขึ้น อีกทั้งการจราจรก็หนาแน่นกว่าเดิมและมีแนวโน้มจะมากขึ้นอีกในอนาคต กำลังรับน้ำหนักของสะพานที่มีอยู่จึงอาจจะไม่เพียงพอสำหรับใช้งานต่อไปอย่างปลอดภัย การจะรื้อสะพานเดิมเพื่อสร้างสะพานใหม่ให้รับน้ำหนักได้มากกว่าเดิมนับว่าเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก ดังนั้นหากทำการเสริมกำลังของสะพานที่มีอยู่เดิม ให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามที่ต้องการก็น่าจะเป็นทางออกที่ดีทางหนึ่ง

การเสริมกำลังรับน้ำหนักของสะพานกระทำได้หลายวิธีด้วยกัน แต่วิธีที่ทำให้สะพานรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นได้มากที่สุดคือ วิธีอัดแรงภายนอก (external prestressed) นอกจากจะทำให้สะพานมีกำลังรับน้ำหนักมากขึ้นแล้ว ยังช่วยลดการแอ่นตัวของสะพาน และเพิ่มอายุการใช้งานในส่วนของความล้า (fatigue life) อีกด้วย ทั้งนี้วิธีอัดแรงภายนอกยังสามารถนำมาเสริมกำลังโครงสร้างรับแรงดัดประเภทอื่นได้อีกด้วย

ในอดีตที่ผ่านมา มีงานวิจัยหลายชิ้นที่ทำการศึกษเกี่ยวกับการนำวิธีอัดแรงภายนอกมาใช้เสริมกำลัง หรือในบางกรณีก็ใช้ซ่อมแซมคานคอนกรีตที่ชำรุด แต่ส่วนใหญ่จำกัดขอบเขตการศึกษาอยู่เพียงแค่การใช้ลวดอัดแรงภายนอกแบบที่ระยะเยื้องศูนย์กลางมีค่าไม่มากนัก (แนวการวางตัวของลวดอัดแรงยังอยู่ในระดับความลึกของคาน) ซึ่งถ้าหากต้องการเสริมกำลังเพื่อให้น้ำหนักเพิ่มขึ้นได้มาก ๆ โครงสร้างจากเดิมที่จะวิบัติในแบบเหนียว (ductile) จะกลายเป็นวิบัติในแบบเปราะ (brittle) ที่จะวิบัติอย่างฉับพลันไม่มีการเตือนให้ทราบล่วงหน้า ทั้งนี้มีสาเหตุเนื่องมาจากเมื่อต้องการโมเมนต์ต้านทานมาก ๆ แต่ระยะเยื้องศูนย์กลางถูกจำกัดโดยความลึกของคาน จึงต้องการพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงจำนวนมาก ซึ่งทำให้การวิบัติก็จะเกิดวิบัติที่เนื้อคอนกรีต โดยที่เหล็กเสริมยังไม่คราก (yield) นอกจากนี้ผลการศึกษาของ G. O. Shanafelt and W. B. Horn^[4] พบว่าข้อจำกัดในการเสริมกำลังคานคอนกรีตด้วยวิธีอัดแรงภายนอก คือกำลังของแป้นยึดลวดอัดแรง (jacking corbel) ซึ่งปัญหานี้น่าจะสามารถแก้ไขได้ด้วยการเพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอก เพราะเมื่อแรงดึงที่ใช้ดึงลวดอัดแรงถูกจำกัด การจะเพิ่มโมเมนต์ต้านทานจึงต้องเพิ่มที่ระยะเยื้องศูนย์กลางแทน

จากสาเหตุดังกล่าวจึงมีความสนใจที่จะศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีต ที่เสริมกำลังด้วยวิธีอัดแรงภายนอกแบบที่ระยะเยื้องศูนย์กลางมีค่ามาก (แนวการวางตัวของลวดอัดแรงอยู่ต่ำกว่าระดับความลึกของคาน) โดยมีดีวีเอเตอร์ (deviator) เป็นตัวกำหนดทิศทางของแนวลวดอัดแรง ทั้งนี้คาดว่าจะได้คานที่วิบัติแบบเหนียว เนื่องจากต้องการโมเมนต์ต้านทานเท่าเดิม แต่ใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากขึ้น จึงต้องการพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงน้อยลง ซึ่งจากผลการศึกษาของ Kiang-Hwee Tan และ Chee-Khoo Ng ^[16] พบว่าหากใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากขึ้น และใช้แรงดึงสำหรับดึงลวดอัดแรงน้อยลงจะได้คานที่มีความเหนียวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังคาดว่าเมื่อใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากแล้ว ระยะเยื้องศูนย์กลางที่ลดลง (loss of eccentricity) ขณะรับน้ำหนักกระทำ จะอยู่ในสัดส่วนที่น้อยเมื่อเทียบกับระยะเยื้องศูนย์กลางก่อนรับน้ำหนัก ทำให้การลดลงของระยะเยื้องศูนย์กลางมีผลกระทบต่อกำลังรับน้ำหนักของคานน้อยลง

ความสำคัญของงานวิจัย

ในอดีตที่ผ่านมา มีงานวิจัยหลายชิ้นที่ทำการศึกษเกี่ยวกับคานคอนกรีตอัดแรงภายนอก และการนำเอาวิธีอัดแรงภายนอกมาใช้เสริมกำลังรับโมเมนต์ดัดของโครงสร้าง ซึ่งผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า หากต้องการโครงสร้างที่มีกำลังรับโมเมนต์ดัดสูง ควรมีระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงมาก ๆ มีปริมาณเหล็กเสริม (ที่ไม่ได้อัดแรง) จำนวนมาก ^[19] มีดีวีเอเตอร์ ณ ตำแหน่งที่เกิดการแอ่นตัวสูงสุด มีระยะห่างและรูปแบบการจัดวางดีวีเอเตอร์ที่เหมาะสม ^[17] หากต้องการโครงสร้างที่มีความเหนียว ควรใช้พื้นที่หน้าตัดของลวดอัดแรงน้อย ๆ ใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากขึ้น ^[16] และสุดท้ายคือพฤติกรรมการรับน้ำหนักของคานคอนกรีตอัดแรงภายนอกให้ผลดีกว่าคานคอนกรีตอัดแรงภายนอก แต่หากมีปริมาณเหล็กเสริม (ที่ไม่อัดแรง) มากขึ้น และมีจำนวนดีวีเอเตอร์ที่เพียงพอสามารถปรับปรุงพฤติกรรมของคานคอนกรีตอัดแรงภายนอกให้ใกล้เคียงกับคานคอนกรีตอัดแรงภายในได้ ^[19]

จากที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้เกิดแนวคิดในการนำวิธีอัดแรงภายนอกแนวการวางตัวของลวดอัดแรงอยู่ต่ำกว่าระดับความลึกของคาน มาทำการเสริมกำลังคานคอนกรีต เพราะว่าวิธีนี้สามารถใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางได้มากตามที่ต้องการ จึงสามารถปรับพื้นที่หน้าตัดของลวดอัดแรงและแรงดึงสำหรับดึงลวดอัดแรงได้ตามต้องการ ประกอบกับคานเดิมก่อนเสริมกำลังก็มีปริมาณเหล็กเสริมที่มากพออยู่แล้ว จึงนับเป็นการนำเอาข้อได้เปรียบต่าง ๆ ที่พบจากงานวิจัยในอดีตมารวมเข้าไว้ด้วยกัน

แต่เนื่องจากในปัจจุบันยังไม่ได้มีการนำเรื่องนี้มาทำการศึกษาในรายละเอียด จึงเห็นสมควรที่จะมีการศึกษาในเรื่องนี้ เพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมอย่างแท้จริง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานให้เกิดประโยชน์ได้ในอนาคต

วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีต ที่เสริมกำลังด้วยวิธีอัดแรงภายนอก แบบที่แนวการวางตัวของลวดอัดแรงอยู่ต่ำกว่าระดับท้องคาน
2. สามารถวิเคราะห์และทำนายพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีต ที่เสริมกำลังด้วยวิธีอัดแรงภายนอก โดยใช้คอมพิวเตอร์ ทั้งนี้จะพิจารณาถึงผลของ
 - การเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงในลวดอัดแรง ที่ต้องวิเคราะห์แบบ member-dependent
 - ระยะเยื้องศูนย์กลางที่ลดลงของลวดอัดแรงอันเนื่องมาจาก second-order effect
 - การเสียรูปตามแนวแกนของคาน (axial deformation)
 - พฤติกรรมไร้เชิงเส้นของวัสดุ (material non-linear)
3. เพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมของการเสริมกำลังคาน ด้วยวิธีอัดแรงภายนอก แบบที่แนวการวางตัวของลวดอัดแรงอยู่ต่ำกว่าระดับท้องคาน ปัจจัยที่พิจารณาคือ
 - พื้นที่หน้าตัดของลวดอัดแรงภายนอก
 - หน่วยแรงดึงที่ใช้ในการดึงลวดอัดแรงภายนอก
 - ระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอก
 - จำนวนและตำแหน่งของดีวีเอเตอร์
 - แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอก

ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็ก และคานคอนกรีตอัดแรงแบบช่วงเดียว
2. คานคอนกรีตที่ทำการศึกษาเป็นคานแบบธรรมดา ไม่รวมถึงกรณีของคานค้ำ
3. น้ำหนักกระทำที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นแบบสถิต (static load)
4. ศึกษาเฉพาะการเสริมกำลังกรณีที่แนวการวางตัวของลวดอัดแรงอยู่ต่ำกว่าระดับท้องคาน และอยู่ต่ำกว่าระดับท้องคานลงไปไม่เกิน 2 เท่าของความลึกคาน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กและคานคอนกรีตอัดแรง ที่เสริมกำลังด้วยวิธีอัดแรงภายนอก แบบที่แนวการวางตัวของลวดอัดแรงอยู่ต่ำกว่าระดับท้องคาน
2. สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กและคานคอนกรีตอัดแรงที่เสริมกำลังด้วยวิธีอัดแรงภายนอก

3. ได้แนวทางที่เหมาะสมสำหรับการเสริมกำลังคนคอนกรีต ด้วยวิธีอัดแรงภายนอก แบบที่แนวการวางตัวของลวดอัดแรงอยู่ต่ำกว่าระดับห้องคาน
4. สามารถนำไปประยุกต์ใช้เสริมกำลังสะพาน ในกรณีที่มีการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกของรถบรรทุก



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ระบบลวดอัดแรงภายนอก (external prestressed)

Virlogeux ^[7] ศึกษาพฤติกรรมของคานคองกรีตอัดแรงภายนอก ในช่วงของ สภาวะใช้งาน (service stage) และที่สภาวะประลัย (ultimate stage) ทั้งนี้ได้ทำการศึกษาในกรณีของคานช่วงเดียว และคานต่อเนื่อง Virlogeux อธิบายถึงผลของ second-order effect ที่ทำให้ระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกลดลงเมื่อคานมีน้ำหนักกระทำ ซึ่งทำให้กำลังรับโมเมนต์ดัดของคานลดลง Virlogeux เสนอสมการเพื่อหาค่าการยืดตัวของลวดอัดแรง (tendon elongation) โดยมีสมมติฐานว่าคานยังไม่เกิดรอยร้าว และอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) อยู่ นอกจากนี้ยังได้เสนอแบบจำลอง เพื่อใช้หาค่าการยืดตัวเฉลี่ยของลวดอัดแรงที่สภาวะประลัย โดยอาศัยการอธิบายของ plastic hinge length

EI-Habr ^[10] พัฒนาวิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ เพื่อทำนายพฤติกรรมโมเมนต์-ระยะแอ่นตัว ของสะพานระบบลวดอัดแรงภายนอก ที่ประกอบจากชิ้นส่วนหล่อสำเร็จ (precast segment) โดยได้พิจารณาถึงปัจจัยที่สำคัญหลายอย่างดังนี้ การร้าวของคองกรีต การเกิด joint opening ระหว่างชิ้นส่วนหล่อสำเร็จ นอกจากนี้ยังคิดผลของไร้เชิงเส้น (non-linear) ทั้งในส่วนของวัสดุ และการเกิด joint opening

Muller และ Gauthier ^[9] พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับวิเคราะห์สะพานคองกรีตอัดแรงภายนอกที่ประกอบจากชิ้นส่วนหล่อสำเร็จด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ โปรแกรมสามารถทำนายพฤติกรรมโมเมนต์-ความโค้ง (moment-curvature) ของสะพานได้ทั้งแบบช่วงเดียวและแบบต่อเนื่อง Muller และ Gauthier สรุปโดยอ้างผลจากการวิเคราะห์และจากประสบการณ์ในการทำงานว่า ทั้งในแง่การวิเคราะห์และการออกแบบ ระบบลวดอัดแรงภายนอก กับระบบลวดอัดแรงภายในให้ผลเหมือนกัน

Alkhairi และ Naaman ^[11,12,13] พัฒนาวิธีการวิเคราะห์เชิงเลข สำหรับวิเคราะห์คานคองกรีตอัดแรง ทั้งระบบลวดอัดแรงภายในและระบบลวดอัดแรงภายนอก โดยคิดผลความไร้เชิงเส้นของวัสดุ การเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงในลวดอัดแรงที่ต้องคิดแบบ member-dependent และ

ระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกที่ลดลงอันเนื่องมาจาก second-order effect การวิเคราะห์ใช้วิธีการหาคำตอบโดยวิธีแทนค่าคำนวณซ้ำแบบหลายวงรอบ (multilevel iteration) เพื่อทำการหาสมมูลของแรง ที่ หน้าตัดต่าง ๆ ตลอดความยาวคาน ผลที่ได้จากการวิเคราะห์นั้นสอดคล้องกับผลทดสอบเป็นอย่างดี ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าที่ค่าความยาวต่อความลึก (span-to-depth ratios) น้อยกว่า 24 ระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงจะลดลงน้อยมากแต่การเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือน (shear deformation) จะมีผลต่อการเพิ่มของหน่วยแรงในลวดอัดแรง ในขณะที่ค่าความยาวต่อความลึกมากกว่า 24 จะเริ่มมีผลทำให้ระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่การเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนจะส่งผลต่อการเพิ่มของหน่วยแรงในลวดอัดแรงน้อยมาก

Songkiat M. และ H. Mutsuyoshi ^[21] นำวิธีการวิเคราะห์ที่เสนอโดย Alkhairi และ Naaman มาปรับปรุงให้ง่ายขึ้น และนำผลการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งปรากฏว่าให้ผลสอดคล้องกันเป็นอย่างดี และยังพัฒนาเพื่อให้สามารถวิเคราะห์คานคอนกรีตอัดแรงที่ประกอบจากชิ้นส่วนหล่อสำเร็จ ได้อีกด้วย ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้ก็สอดคล้องกับผลทดสอบ จากผลการวิเคราะห์ได้นำปัจจัย 4 ประการมาสรุปเป็นสมการอย่างง่ายเพื่อใช้ในการออกแบบคานคอนกรีตระบบลวดอัดแรงภายนอก ปัจจัยแรกคือความยาวช่วงต่อระดับความลึกของลวดอัดแรง (span-to-depth ratios : L/d_{ps}) พบว่าหากมีค่าน้อย (คือลวดอัดแรงมีระยะเยื้องศูนย์กลางมาก ๆ) การลดลงของหน่วยแรงในลวดอัดแรง และการลดลงของระยะเยื้องศูนย์กลาง จะน้อยตามไปด้วย ปัจจัยที่สองคือระยะห่างระหว่างคิ่วเตอร์ (S_u/L) พบว่าหากมีค่ามากจะทำให้ระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงลดลงมาก แต่แทบจะไม่มีผลต่อการลดลงของหน่วยแรงในลวดอัดแรง ปัจจัยที่สามคือรูปแบบของน้ำหนักที่กระทำ (load-to-span ratios : L_p/L) น้ำหนักที่มีลักษณะกระจายออกไปยังจุดรองรับของคานจะทำให้เกิด หน่วยแรงในลวดอัดแรงลดลงน้อยกว่า แบบที่เป็นน้ำหนักกระทำอยู่จุดเดียวที่กึ่งกลางคาน ปัจจัยที่สี่คือปริมาณเหล็กเสริม (reinforcement index) พบว่าหากดัชนีปริมาณเหล็กเสริมมีค่ามากขึ้นคานระบบลวดอัดแรงภายนอกก็จะมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับคานระบบอัดลวดแรงภายในมากขึ้น

Teerawut M. และ H. Mutsuyoshi ^[22] นำวิธีการวิเคราะห์ที่เสนอโดย Alkhairi และ Naaman มาปรับปรุงเพื่อวิเคราะห์คานคอนกรีตอัดแรงระบบลวดอัดแรงภายนอกแบบต่อเนื่อง 2 ช่วง และคิดผลเนื่องจากการกระจายซ้ำของโมเมนต์ดัด (moment redistribution) โดยถือว่าที่หน้าตัดวิกฤตินั้นมีความเหนียวเพียงพอ การศึกษาใช้แบบจำลอง 2 แบบ แบบแรกให้โมเมนต์ดัดมีค่าคงที่ ณ หน้าตัดที่เกิดคราก และแบบที่ 2 ให้โมเมนต์ดัดมีค่าเพิ่มขึ้นได้ ณ หน้าตัดที่เกิดคราก

เมื่อนำผลการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกับผลทดสอบพบว่า แบบจำลองแบบที่ 1 และแบบที่ 2 ให้ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับผลทดสอบเฉพาะในช่วงที่คานยังเป็นอีลาสติกเท่านั้น Teerawut M. และ H. Mutsuyoshi สรุปว่าเนื่องมาจากการที่คิดผลในส่วนของการกระจายซ้ำของโมเมนต์ดัดยังไม่ถูกต้อง ผลการวิเคราะห์ที่ได้จึงสอดคล้องกับผลทดสอบเฉพาะในช่วงที่คานยังเป็นอีลาสติกอยู่

Pisani ^[15] เสนอวิธีวิเคราะห์คานคอนกรีตเสริมเหล็กระบบลวดอัดแรงภายนอก โดยใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (finite difference) ซึ่งแบ่งคานออกเป็นหน้าตัดย่อย ๆ โดยถือว่าแรงจากลวดอัดแรงเป็นแรงภายนอก กระทำ ณ จุดที่เป็นแป้นยึดลวดอัดแรง (jacking corbel) และจุดที่เป็นดีวีเอเตอร์ (deviator) ที่หน้าตัดย่อยใด ๆ คำนวณหาค่าโมเมนต์ดัด แรงเฉือน และแรงตามแนวแกนจากแรงภายนอกที่กระทำ เพื่อนำไปคำนวณหาค่ารัศมีความโค้ง ตำแหน่งในแนวราบ และตำแหน่งในแนวตั้งของหน้าตัดนั้น ๆ ซึ่งการวิเคราะห์ทำโดยเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อทำการแทนค่าคำนวณซ้ำ (iteration) เพิ่มขึ้นไปที่ละชั้นของน้ำหนักกระทำ โดยวิธีการวิเคราะห์นี้ได้คำนึงถึงผลของ second-order effect การเปลี่ยนตำแหน่งที่มีค่ามาก (large displacement) การเสียรูปตามแนวแกนของคาน แต่ไม่คิดผลของการเสียรูปโดยแรงเฉือน และไม่คิดแรงเสียดทานระหว่างลวดอัดแรงกับดีวีเอเตอร์

P. Srinivasa Rao และ George Mathew ^[17] นำวิธีวิเคราะห์ที่เสนอโดย Alkhairi และ Naaman มาปรับปรุงให้ง่ายขึ้น และได้เพิ่มการคิดแรงเสียดทานระหว่างลวดอัดแรงกับดีวีเอเตอร์จากการศึกษาพบว่าถ้าหากทำการวิเคราะห์โดยตั้งสมมติฐานให้ไม่มีแรงเสียดทาน (ลวดอัดแรงเลื่อนได้อย่างอิสระ) จะได้ระยะแอนตัวและความกว้างของรอยร้าวมากกว่าความเป็นจริง แต่หากตั้งสมมติฐานให้มีแรงเสียดทานมาก ๆ (จนลวดอัดแรงไม่เกิดการเลื่อน ณ จุดที่มีดีวีเอเตอร์) จะได้ค่ากำลังรับโมเมนต์ดัดสูงสุดมากกว่าความเป็นจริง ทั้งนี้เนื่องจากในความเป็นจริงลวดอัดแรงอาจจะไม่เลื่อนที่สภาวะใช้งานแต่จะเกิดการเคลื่อนขึ้นที่สภาวะใกล้ประลัย นอกจากนี้ยังพบว่าหากมุมเบี่ยงเบนของแนวลวดอัดแรงมีค่ามากกว่า 1 องศา ดีวีเอเตอร์จะทำหน้าที่เสมือนเป็นจุดยึดที่ต้องคิดแรงเสียดทาน ผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถทำนายพฤติกรรมของคานคอนกรีตอัดแรง ระบบลวดอัดแรงภายนอกได้เป็นอย่างดี จากการวิเคราะห์พบว่าค่าโมเมนต์ดัดประลัยจะเพิ่มขึ้น 11 เปอร์เซ็นต์หากเพิ่มดีวีเอเตอร์ที่ตำแหน่งหน้าตัดวิกฤติ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความเหนียวของคาน และถ้าไม่เกิดการเลื่อนค่าโมเมนต์ดัดประลัยก็จะเพิ่มขึ้นอีก 6 เปอร์เซ็นต์

Kiang-Hwee Tan และ Chee-Khoo Ng ^[18] ทำการทดสอบคานคอนกรีตอัดแรงระบบลวดอัดแรงภายนอก 6 คาน เพื่อศึกษาถึงผลของดีวีเอเตอร์และแนวการวางตัวของลวดอัดแรง พร้อม

ทั้งทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลทดสอบโดยใช้ตัวคูณลดหน่วยการยืดหด (strain reduction coefficient : Ω) ที่เสนอโดย Naaman แล้วเพิ่มการคำนวณส่วนของ second-order effect ซึ่งให้ผลการวิเคราะห์สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลทดสอบ จากการศึกษาพบว่าหากเพิ่มตัวเอนเตอร์เข้าไป ณ หน้าตัดวิกฤติ (หน้าตัดที่เกิดการแอ่นตัวมากที่สุด) จะช่วยเพิ่มกำลังรับน้ำหนักของคาน และพฤติกรรมการรับน้ำหนักก็จะดีขึ้นด้วย (ระยะแอ่นตัว, ความกว้างของรอยร้าว) การเพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงแต่ละแรงดึงที่ใช้ดึงลวดอัดแรงลง จะทำให้เกิดการแอ่นตัวมากขึ้น ความกว้างรอยร้าวเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ความเหนียวของคานมากขึ้นด้วย เมื่อใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงเป็นรูปตัววี (draped) ทำให้สติฟเนส (stiffness) ของคานลดลงแต่หน่วยแรงในลวดอัดแรงจะเพิ่มขึ้นและความเหนียวของคานจะเพิ่มขึ้น หากใช้พื้นที่หน้าตัดของลวดอัดแรงมากคานจะมีกำลังรับโมเมนต์ดัดประลัยจะเพิ่มขึ้นแต่ความเหนียวจะลดลง

การเสริมกำลัง (strengthening)

P. Spinelli และ S. Morano ^[19] ทำการศึกษาคาน 3 แบบด้วยกันคือ คานคอนกรีตอัดแรงระบบลวดอัดแรงภายในแบบที่ลวดอัดแรงยึดติดกับเนื้อคอนกรีต (internal bonded) คานคอนกรีตอัดแรงภายนอกที่มีและไม่มี เหล็กเสริมธรรมดา (เหล็กเสริมที่ไม่ได้อัดแรง) พบว่าคานทั้ง 3 แบบมีพฤติกรรมใกล้เคียงกันในช่วงสภาวะใช้งาน แต่ที่สภาวะประลัย คานคอนกรีตอัดแรงภายในมีความเหนียวมากที่สุด และพบว่าในคานคอนกรีตอัดแรงภายนอก ถ้าหากเพิ่มเหล็กเสริมธรรมดาเข้าไปจะมีความเหนียวเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของเหล็กเสริมธรรมดามากขึ้นเรื่อย ๆ พฤติกรรมของคานคอนกรีตอัดแรงภายนอกกับคานคอนกรีตอัดแรงภายในก็จะแตกต่างกันน้อยลง และได้สรุปว่าในคานคอนกรีตเสริมเหล็กและคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วน (partially prestressed) มีปริมาณเหล็กเสริมธรรมดาอยู่มากอยู่แล้ว หากนำวิธีอัดแรงภายนอกมาใช้ในการเสริมกำลังคานเหล่านั้น และมีการใช้ตัวเอนเตอร์ที่เพียงพอ ก็น่าที่จะได้คานที่มีพฤติกรรมใกล้เคียงกับคานคอนกรีตอัดแรงภายใน (internal bonded)

Harajli M. H. ^[14] ทำการทดสอบคานที่ทำการเสริมกำลังด้วยวิธีอัดแรงภายนอก จำนวน 16 คาน ซึ่งคานที่นำมาเสริมกำลังมีทั้งแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก คานคอนกรีตอัดแรง และคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วน โดยก่อนที่จะทำการเสริมกำลัง ได้นำคานมารับน้ำหนักกระทำเป็นวงรอบ (cyclic load) 5,000 – 15,000 รอบ เพื่อทำให้เกิดการเสียรูปด้วยความล้า (fatigue deformation) น้ำหนักที่กระทำอยู่ระหว่าง 30–80 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักประลัย จากนั้นจึงทำการเสริมกำลังด้วยวิธีอัดแรงภายนอก และให้รับน้ำหนักกระทำเพิ่มขึ้นจนคานวิบัติ ซึ่งจากผลทดสอบพบว่า การเสริมกำลังด้วยวิธีอัดแรงภายนอกสามารถเพิ่มกำลังได้ถึง 146 เปอร์เซ็นต์ของคานที่ยังไม่เสริมกำลัง ทั้งนี้ความเหนียวของคานลดลงน้อยมากจนถือได้ว่าไม่มีนัยสำคัญ

สามารถลดความกว้างของรอยร้าว และลดการแอ่นตัวของคานจากการเสียรูปเนื่องจากความล้า ได้ 75 เปอร์เซ็นต์ หลังจากการเสริมกำลัง ระดับหน่วยแรงในเหล็กเสริม (ที่ไม่อัดแรง) ลดลง จึงสามารถช่วยเพิ่มอายุการใช้งานในแง่ของความล้า (fatigue life) ได้ คานทุกตัวไม่เกิดวิบัติด้วยแรงเฉือน และรอยร้าวจากแรงเฉือน ณ จุดวิบัติมีน้อยกว่า รอยร้าวจากแรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักกระทำเป็นรอบตอนที่ยังไม่ได้เสริมกำลังอีกด้วย

Pisani ^[16] ทำการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบกับผลทดสอบของ Harajli ทั้งในช่วงที่รับน้ำหนักกระทำซ้ำ และในช่วงหลังจากที่ทำการเสริมกำลังด้วยระบบลวดอัดแรงภายนอกแล้ว Pisani สรุปว่ากำลังรับน้ำหนักของคานคอนกรีตเสริมเหล็กและคานคอนกรีตอัดแรง จะไม่ลดลงหลังจากรับน้ำหนักกระทำซ้ำเป็นรอบ หากหน่วยแรงที่เกิดในเหล็กเสริมไม่เกินหน่วยแรงคราก และหน่วยแรงที่เกิดในคอนกรีตไม่เกิน stability limit ซึ่งถ้าหากทำการเสริมกำลังคานที่ยังอยู่ในสภาวะดังกล่าว กำลังที่จะได้ จะมากกว่ากำลังรับน้ำหนักของคานเดิมรวมกับน้ำหนักที่จะต้องหักล้างโมเมนต์ลบที่เกิดจากการอัดแรงเสมอ

แนวคิดและทฤษฎี

การศึกษาพฤติกรรมคานคอนกรีตอัดแรงภายนอกนั้น การวิเคราะห์พฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดจะมีขั้นตอนการคำนวณมากกว่าคานคอนกรีตอัดแรงแบบที่ลวดยึดติดกับเนื้อคอนกรีต ขั้นตอนการคำนวณที่เพิ่มขึ้นมาประกอบด้วย 2 ส่วนคือ

1. การคำนวณหน่วยแรงภายในลวดอัดแรงภายนอก
2. การคำนวณระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอก

การคำนวณหาหน่วยแรงและระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอก ไม่สามารถแก้สมการหาคำตอบได้โดยตรง จึงต้องทำการแทนค่าคำนวณซ้ำเพื่อหาคำตอบ

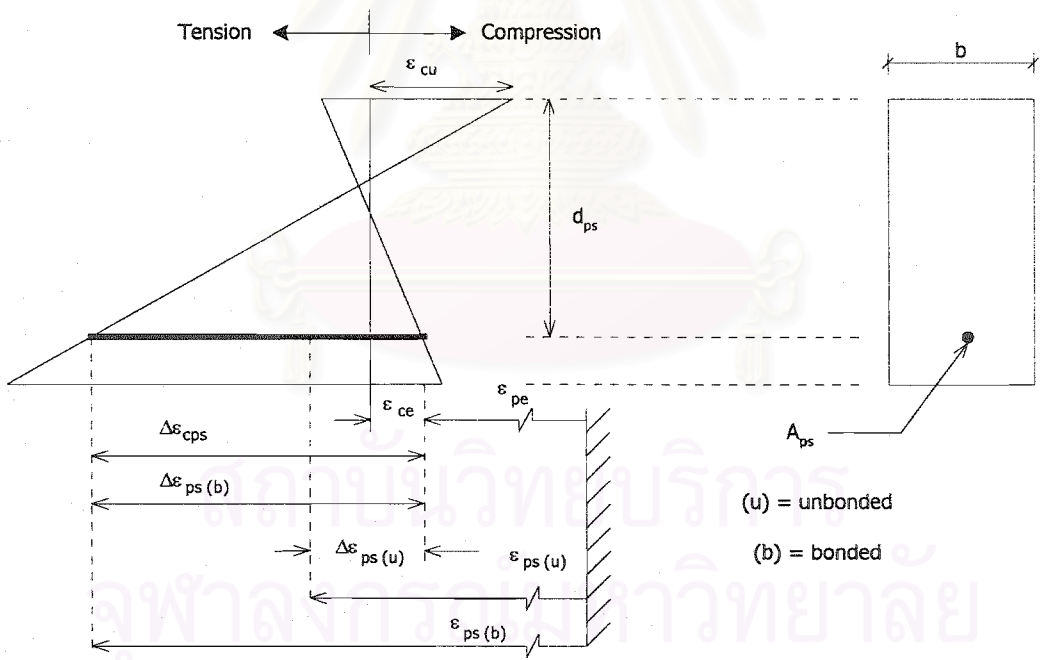
การคำนวณหน่วยแรงภายในลวดอัดแรงภายนอก

ในกรณีที่คานคอนกรีตอัดแรงเป็นแบบ bonded เราถือว่าลวดอัดแรงยึดติดกับคอนกรีตเป็นอย่างดี ดังนั้นในการหาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในลวดอัดแรง เราสามารถใช้วิธี strain compatibility ได้ ปัญหาในกรณีนี้สามารถเลือกคำนวณเฉพาะที่หน้าตัดใด ๆ ได้จึงเป็นปัญหาแบบ section-dependent แต่ในกรณีของ unbonded และกรณีของระบบลวดอัดแรงภายนอก ลวดอัดแรงไม่ได้ยึดติดกับเนื้อคอนกรีต หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในลวดอัดแรงสามารถถ่ายแรงให้เท่ากันตลอดความยาวของลวดอัดแรงได้ ทำให้หน่วยแรงในลวดอัดแรงที่หน้าตัดวิกฤติลดลงดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งจะลดลงมากน้อยแค่ไหนขึ้นอยู่กับ รูปแบบของน้ำหนักที่มากระทำ และรูปแบบ

แนวการวางตัวของลวดอัดแรง เพื่อหาคำตอบในกรณีนี้การคำนวณต้องคำนวณทุกหน้าตัดตลอดความยาวคาน ปัญหาจึงเป็นปัญหาแบบ member-dependent

รูปที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบหน่วยการยึดหดในลวดอัดแรงแบบ bonded กับแบบ unbonded ณ หน้าตัดวิกฤติ เมื่อ

- ϵ_{pe} คือหน่วยการยึดหดของลวดอัดแรงเมื่อถึงลวดเสร็จ
- ϵ_{ce} คือหน่วยการยึดหดของคอนกรีตที่ระดับลวดเมื่อถึงลวดเสร็จ
- $\Delta\epsilon_{cps}$ คือหน่วยการยึดหดที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตที่ระดับลวดอัดแรงหลังจากมีน้ำหนักกระทำ
- $\Delta\epsilon_{ps(b)}$ คือหน่วยการยึดหดที่เพิ่มขึ้นในลวดอัดแรงแบบ bond หลังจากมีน้ำหนักกระทำ
- $\Delta\epsilon_{ps(u)}$ คือหน่วยการยึดหดที่เพิ่มขึ้นในลวดอัดแรงแบบ unbond หลังจากมีน้ำหนักกระทำ
- $\epsilon_{ps(b)}$ คือหน่วยการยึดหดทั้งหมดในลวดอัดแรงแบบ bond หลังจากมีน้ำหนักกระทำ
- $\epsilon_{ps(u)}$ คือหน่วยการยึดหดทั้งหมดในลวดอัดแรงแบบ unbond หลังจากมีน้ำหนักกระทำ



รูปที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบหน่วยการยึดหดในลวดอัดแรงทั้ง 2 แบบ ณ หน้าตัดวิกฤติ

Naaman ^[8,11,12] เสนอตัวคูณลดหน่วยการยึดหด (strain reduction coefficient : Ω) เพื่อใช้คำนวณหน่วยแรงในลวดอัดแรงแบบ unbonded สำหรับคานช่วงเดียวที่มีลักษณะสมมาตรทั้งรูปร่างและน้ำหนักกระทำ ดังแสดงในสมการที่ 2.1 และสมการที่ 2.2 สำหรับกรณีนี้หลังจากที่

คอนกรีตร้าวใช้สมการที่ 2.3 และสมการที่ 2.4 โดยทำการคำนวณหน่วยการยึดหดกรณี bonded ก่อน จากนั้นก็ทำการแปลงเป็นหน่วยการยึดหดแบบ unbonded โดยคูณด้วยตัวคูณลดหน่วยการยึดหด

$$\Omega = \frac{(\Delta\varepsilon_{ps})_m \text{ unbonded}}{(\Delta\varepsilon_{ps})_m \text{ bonded}} = \frac{(\Delta\varepsilon_{cps})_{\text{average}}}{(\Delta\varepsilon_{cps})_{\text{bonded}}} \quad \text{สมการที่ 2.1}$$

$$\Omega = \frac{2}{M_{\max} (e_0)_{\max} l} \int_0^{l/2} M(x) e_0(x) dx \quad \text{สมการที่ 2.2}$$

สำหรับคานาที่เกิดรอยร้าว

$$\Omega_c = \Omega \frac{I_{cr}}{I_g} + \frac{2}{l} \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g}\right) \int_0^{l/2} \frac{M(x) e_0(x)}{M_{\max} (e_0)_{\max}} dx \quad \text{สมการที่ 2.3}$$

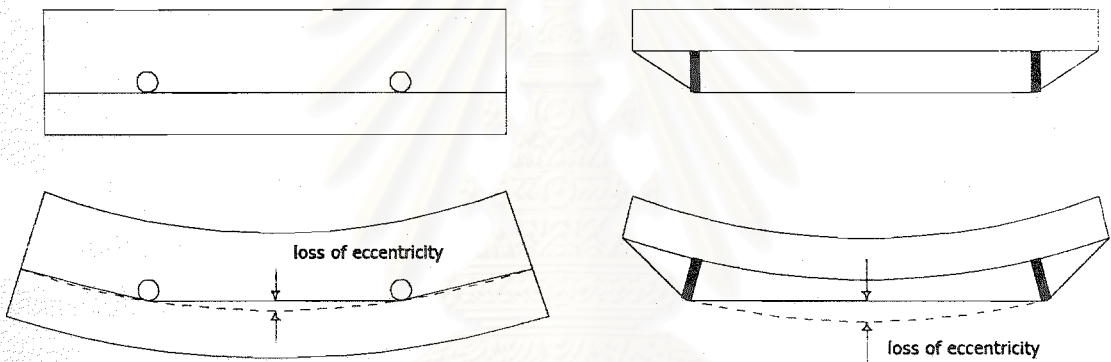
$$\Omega_c \equiv \Omega \frac{I_{cr}}{I_g} \quad \text{สมการที่ 2.4}$$

เมื่อ

- Ω คือตัวคูณลดหน่วยการยึดหด
- $M(x)$ คือฟังก์ชันของโมเมนต์
- M_{\max} คือค่าโมเมนต์ที่กึ่งกลางคาน
- $e_0(x)$ คือฟังก์ชันของระยะเยื้องของลวดอัดแรงศูนย์เมื่อเทียบกับแกนละเทิน
- $(e_0)_{\max}$ คือระยะเยื้องศูนย์ของลวดอัดแรงที่กึ่งกลางคาน
- l คือความยาวช่วง
- I_g คือโมเมนต์ความเฉื่อยของคาน
- I_{cr} คือโมเมนต์ความเฉื่อยของคานสำหรับกรณีที่คอนกรีตร้าว

การคำนวณระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอก

ในกรณีของระบบลวดอัดแรงภายใน การเปลี่ยนตำแหน่งของลวดอัดแรงจะสอดคล้องกับการเปลี่ยนตำแหน่งของคอนกรีต ดังนั้นระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงที่ใช้ในการคำนวณจึงเป็นค่าคงที่ แต่ในกรณีของระบบลวดอัดแรงภายนอก การเปลี่ยนตำแหน่งของลวดอัดแรงจะไม่สอดคล้องกับการเปลี่ยนตำแหน่งของคอนกรีต ยกเว้นตรงจุดที่มีดีวิเอเตอร์ (deviator) และแป้นยึดลวดอัดแรง (jacking corbel) การไม่สอดคล้องกันนี้จึงทำให้เกิดการลดลงของระยะเยื้องศูนย์กลางดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งเรียกว่า loss of eccentricity (second-order effect) เนื่องจากระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อน้ำหนักกระทำมีการเปลี่ยนแปลง การคำนวณหาค่าระยะเยื้องศูนย์กลางจึงมีขั้นตอนมากขึ้น ในการคำนวณระยะเยื้องศูนย์กลางจะต้องทราบระยะแอนตัวของคานเสียก่อน และการที่จะหาระยะแอนตัวของคานได้ก็จะต้องทราบระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรง ดังนั้นในการคำนวณจึงต้องกระทำแบบ trial and error



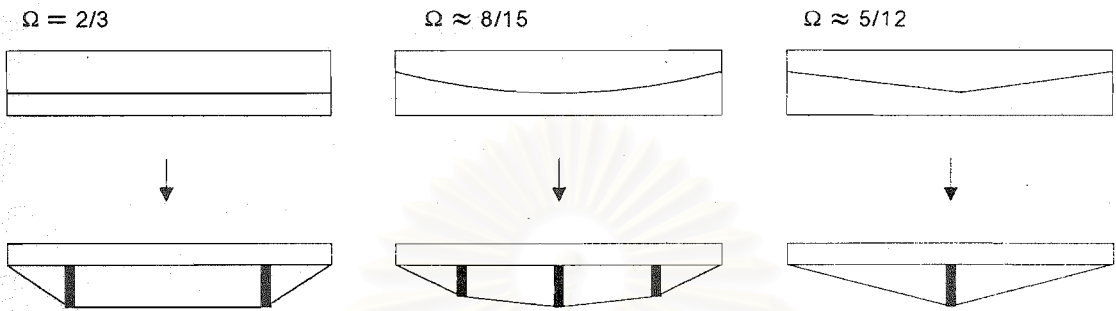
รูปที่ 2.2 แสดงการลดลงของระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอก

แนวทางการแก้ไขปัญหาของระบบลวดอัดแรงภายนอก

การลดลงของหน่วยแรงในลวดอัดแรงภายนอก และการลดลงของระยะเยื้องศูนย์กลาง เป็นสาเหตุทำให้กำลังรับโมเมนต์ดัดของคานลดลง เนื่องจากโมเมนต์ต้านทานภายในของคาน (resisting moment) ประกอบด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วนคือ แรงภายใน (internal force) และแขนของโมเมนต์ การลดลงของหน่วยแรงในลวดอัดแรงทำให้แรงภายในลดลง ส่วนการลดลงของระยะเยื้องศูนย์กลางทำให้แขนของโมเมนต์ลดลง

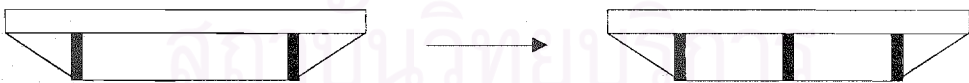
ปัญหาการลดลงของหน่วยแรงในลวดอัดแรงภายนอก เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือ รูปแบบของน้ำหนักกระทำและรูปแบบแนวการวางตัวของลวดอัดแรง การแก้ปัญหาในส่วนของน้ำหนักกระทำนั้นเป็นเรื่องที่ยาก โดยเฉพาะหากคานที่พิจารณาเป็นสะพานที่มีน้ำหนักรถเคลื่อนที่ไปตามความยาวของคาน แต่สามารถจัดการกับรูปแบบ

แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกได้ แนวการวางตัวแบบเส้นตรงจะทำให้หน่วยแรงในลวดอัดแรงภายนอกลดลงน้อยที่สุด รองลงมาคือแบบพาราโบลา และแบบที่หน่วยแรงลดลงมากที่สุดคือแบบรูปตัววี (draped) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงแนวการวางตัวของลวดอัดแรงแบบต่าง ๆ (ค่าของตัวคูณลดที่แสดงเป็นกรณีที่ลวดอัดแรงอยู่ในระดับความลึกของคานา^[12] (bonded : $\Omega = 1$))

ปัญหาการลดลงของระยะเยื้องศูนย์กลางนั้น เป็นที่ทราบอยู่แล้วว่าการเปลี่ยนตำแหน่งของแนวลวดอัดแรง จะสอดคล้องกับการเปลี่ยนตำแหน่งของคอนกรีตเฉพาะตำแหน่งที่มีดิวีเอเตอร์ และแป้นยึดลวดอัดแรง ดังนั้นหากเราเพิ่มจำนวนดิวีเอเตอร์ให้มากขึ้น และมีดิวีเอเตอร์ ณ จุดที่เกิดการแอ่นตัวมากที่สุด ก็จะสามารถลดผลกระทบจากปัญหานี้ลงได้ แต่ในทางปฏิบัติแล้ว การที่มีดิวีเอเตอร์จำนวนมาก ๆ จะทำให้การก่อสร้างทำได้ลำบาก ดังนั้นจึงต้องมีการหาระยะห่างระหว่างดิวีเอเตอร์ว่า ควรเป็นเท่าไรถึงเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการลดลงของระยะเยื้องศูนย์กลางมากเกินไป



รูปที่ 2.4 แสดงการเพิ่มดิวีเอเตอร์เพื่อลดผลกระทบจากการที่ระยะเยื้องศูนย์กลางลดลง

บทที่ 3

การวิเคราะห์พฤติกรรมของคานคอนกรีตอัดแรงภายนอกโดยวิธีการเชิงเลข

การศึกษาค้างนี้จะศึกษาพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตอัดแรงภายนอก ซึ่งจะศึกษาในรูปของน้ำหนักกระทำ-ระยะแอ่นตัว (load-deflection curve) เป็นหลัก ซึ่งมีผู้เสนอวิธีการสำหรับวิเคราะห์คานคอนกรีตอัดแรงภายนอกไว้หลายวิธีด้วยกัน เช่น El-Habr^[10] Muller และ Gauthier^[9] เสนอวิธีการวิเคราะห์โดยใช้ไฟไนท์อีลิเมนต์ Pisani^[15] เสนอวิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนท์ดิฟเฟอเรนซ์ Kiang-Hwee Tan และ Chee-Khoo Ng^[18] เสนอวิธีการวิเคราะห์โดยใช้ตัวคูณลดหน่วยการยืดหดและเพิ่มการคำนวณหาระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอก Alkhairi และ Naaman^[11,12,13] เสนอวิธีการวิเคราะห์โดยใช้วิธี moment-curvature และเพิ่มส่วนที่คำนวณหาแรงและระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอก วิธีการวิเคราะห์แต่ละวิธีมีข้อดีและเสียต่าง ๆ กัน การจะเลือกใช้วิธีไหนขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน

เนื่องจากวิธีการวิเคราะห์ใช้วิธีการแทนค่าคำนวณซ้ำ จึงต้องนำวิธีการวิเคราะห์มาเขียนเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับใช้ในการคำนวณ วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์เป็นวิธีที่เขียนโปรแกรมยากกว่าวิธีอื่น โดยเฉพาะเมื่อใช้แบบจำลองวัสดุที่มีพฤติกรรมไร้เชิงเส้น (material non-linear) ประกอบกับวิธีการวิเคราะห์แบบอื่นสามารถนำมาเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ง่ายกว่าและให้ผลไม่แตกต่างกัน จึงเลือกใช้วิธีอื่นในการวิเคราะห์

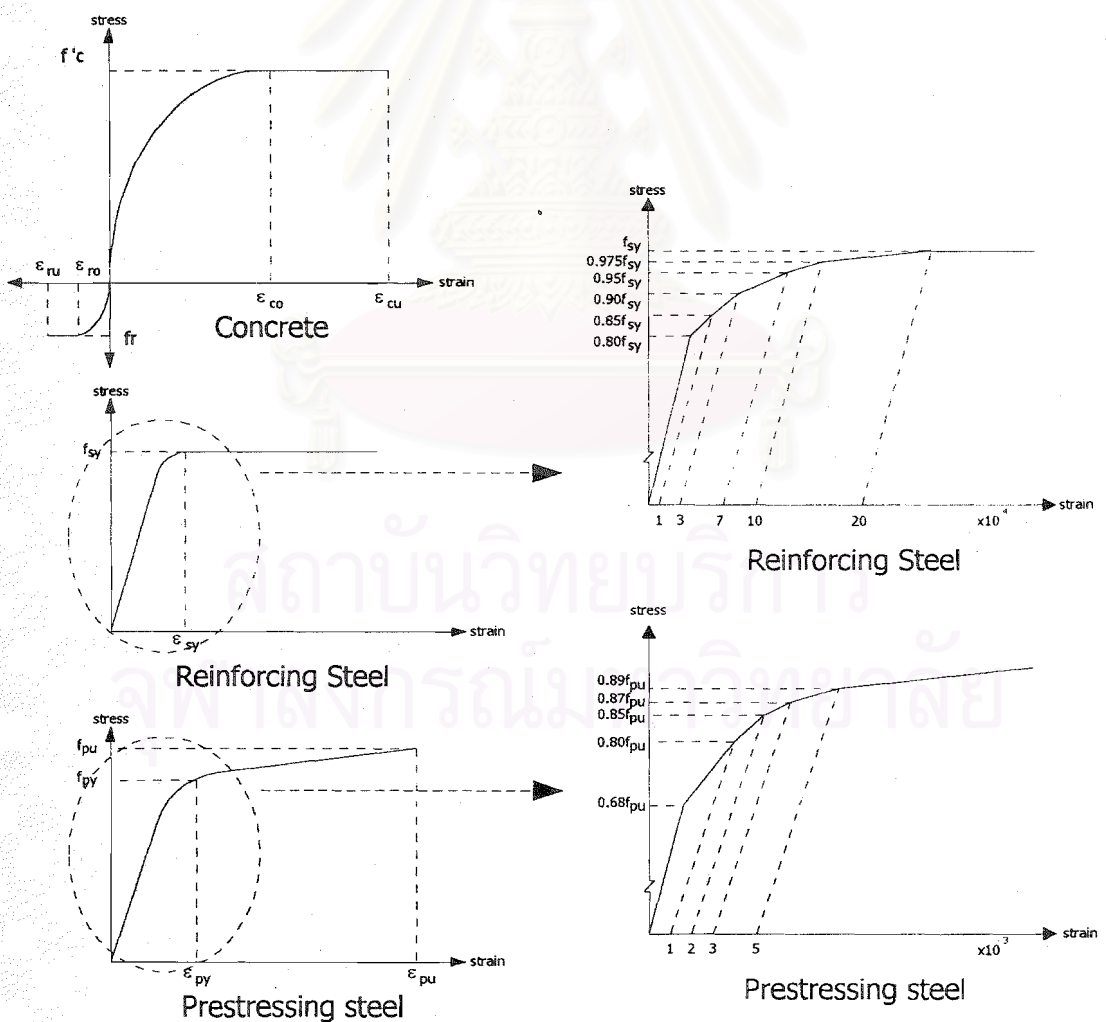
วิธีทางไฟไนท์ดิฟเฟอเรนซ์ที่เสนอโดย Pisani^[15] มีข้อจำกัดอยู่ที่แนวการวางตัวของลวดอัดแรง และรูปแบบของน้ำหนักกระทำต้องเป็นแบบสมมาตรเท่านั้น

วิธีใช้ตัวคูณลดหน่วยการยืดหดมีข้อจำกัดคือ ตัวคูณลดหน่วยการยืดหดสำหรับที่สภาวะประลัยได้มาจากผลทดสอบ ซึ่งรวบรวมผลทดสอบคานคอนกรีตอัดแรงแบบธรรมดาทั่วไป (ระดับของลวดอัดแรงอยู่ในระดับความลึกของคาน) จึงไม่อาจนำมาวิเคราะห์พฤติกรรมคานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยลวดอัดแรงที่มีระยะเยื้องศูนย์กลางต่ำกว่าระดับความลึกของคานได้ นอกจากนี้สามารถวิเคราะห์ได้เฉพาะคานที่มีแนวการวางตัวของลวดอัดแรง และรูปแบบของน้ำหนักกระทำต้องเป็นแบบสมมาตรเท่านั้น

การศึกษานี้ใช้วิธีการวิเคราะห์ตามวิธีที่เสนอโดย Alkhairi และ Naaman^[11,12,13] เป็นหลัก ซึ่งจะมีส่วนที่แตกต่างกันเพียงในรายละเอียดส่วนย่อยเท่านั้น เนื่องจากเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่นำมาเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์สะดวกกว่าวิธีอื่น และให้ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับผลทดสอบเป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่มีงานวิจัยหลาย ๆ ชิ้นเลือกใช้ เช่น P. Srinivasa Rao and George Mathew^[17] Songkiat Matupayont^[21] และ Teerawut Muhamud^[22]

สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. ราบาตัดขวางของคานจะต้องยังคงเป็นราบาอยู่ภายหลังจากถูกแรงกระทำ
2. การวิเคราะห์ที่คิดเฉพาะการเสียรูปเนื่องจากโมเมนต์ดัด (flexural deformation) ไม่คิดผลของการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือน (shear deformation)
3. ถือว่าตัวเอเตอร์ (deviator) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อมีแรงมากกระทำ
4. ถือว่าไม่มีแรงเสียดทานระหว่างลวดอัดแรงกับตัวเอเตอร์ (แรงดึงในลวดอัดแรงภายนอกมีค่าเท่ากับตลอดทั้งเส้น)
5. คานมีการค้ำยันด้านข้างเพียงพอที่จะไม่เกิดการโก่งเดาะด้านข้าง
6. การวิบัติเกิดขึ้นเมื่อคอนกรีต เหล็กเสริม หรือลวดอัดแรงอย่างใดอย่างหนึ่งมีค่าหน่วยการยืดหด ถึงค่าหน่วยการยืดหดประลัย (ultimate strain)
7. แบบจำลองคุณสมบัติวัสดุเป็นแบบไร้เชิงเส้น (non-linear) ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงแบบจำลองวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์

แบบจำลองคอนกรีต

ใช้แบบจำลองคอนกรีตที่เสนอโดย Seri Kiatyuttachat^[20] ในส่วนที่เป็นเส้นโค้ง เป็นไปตามสมการพาราโบลาที่เสนอโดย Hognestad ดังแสดงในสมการที่ 3.1 แต่หลังจากหน่วยการยืดหดมีค่ามากกว่า ϵ_{co} กำหนดให้หน่วยแรงมีค่าคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยที่ f_c' เป็นกำลังของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบชิ้นส่วนทดสอบทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร

$$f_c = f_c' \left[\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_{co}} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad (\text{ksc}) \quad \text{สมการที่ 3.1}$$

โดยที่ค่า ϵ_{co} และ ϵ_{cu} ในสมการที่ 3.1 มีค่าดังต่อไปนี้

$$\epsilon_{co} = \frac{f_c' n}{E_c n - 1} \quad \left[n = 0.80 + \frac{f_c'}{175} \right] \quad \text{สมการที่ 3.2}$$

$$\epsilon_{cu} = 0.0035 \left[\frac{500}{f_c'} \right] \quad f_c' > 500 \quad (\text{ksc}) \quad \text{สมการที่ 3.3}$$

$$\epsilon_{cu} = 0.0035 \quad f_c' \leq 500 \quad (\text{ksc})$$

$$f_r = 0.58(f_c')^{2/3} \quad (\text{ksc}) \quad \text{สมการที่ 3.4}$$

แบบจำลองเหล็กเสริม

ใช้แบบจำลองที่เสนอโดย P. Srinivasa Rao and George Mathew^[17] โดยที่แบบจำลองคล้ายกับแบบ bi-linear แต่มีส่วนโค้งมนตรงจุดที่เหล็กเสริมคราก ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงกับหน่วยการยืดหดในช่วงแรกเป็นเส้นตรง มีความชันเท่ากับค่ายังโมดูลัสของเหล็กเสริม ซึ่งจะเริ่มโค้งมนเมื่อเหล็กเสริมมีหน่วยแรงถึง 80 เปอร์เซ็นต์ของหน่วยแรงคราก ($0.80f_{sy}$) หลังจากหน่วยแรงมีค่าเท่ากับหน่วยแรงคราก หน่วยแรงจะมีค่าคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 3.1

แบบจำลองเหล็กเสริมใช้วิธีระบุหน่วยการยืดหดด้วยวิธี offset และถือว่าเหล็กเสริมครากที่หน่วยการยืดหด offset ไป 0.2 เปอร์เซ็นต์

แบบจำลองลวดอัดแรง

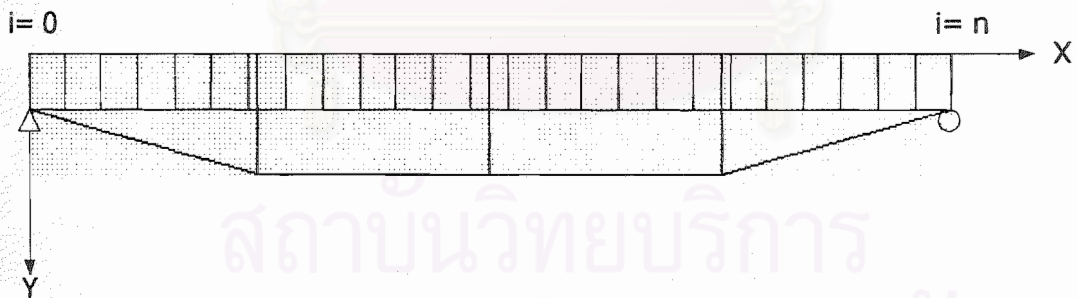
ใช้แบบจำลองที่เสนอโดย P. Srinivasa Rao and George Mathew^[17] ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงกับหน่วยการยืดหดในช่วงแรกเป็นเส้นตรง มีความชันเท่ากับค่ายังโมดูลัสของลวดอัดแรง ซึ่งจะเริ่มโค้งมนเมื่อลวดอัดแรงมีหน่วยแรงถึง 68 เปอร์เซ็นต์ของหน่วยแรงประลัย ($0.68f_{pu}$) หลังจากหน่วยแรงมีค่าเท่ากับ 89 เปอร์เซ็นต์ของหน่วยแรงประลัย ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงกับหน่วยการยืดหดจะเป็นเส้นตรงมีความชันคงที่จนถึงค่าหน่วยแรงประลัย ดังแสดงในรูปที่ 3.1

แบบจำลองลวดอัดแรงใช้วิธีระบุหน่วยการยืดหดด้วยวิธี offset และถือว่าลวดอัดแรงครากที่หน่วยการยืดหด offset ไป 0.2 เปอร์เซ็นต์ หรือที่ประมาณ 85 เปอร์เซ็นต์ของหน่วยแรงคราก ดังแสดงในสมการที่ 3.5

$$f_{py} = 0.85f_{pu} \quad (\text{ksc}) \quad \text{สมการที่ 3.5}$$

วิธีการวิเคราะห์

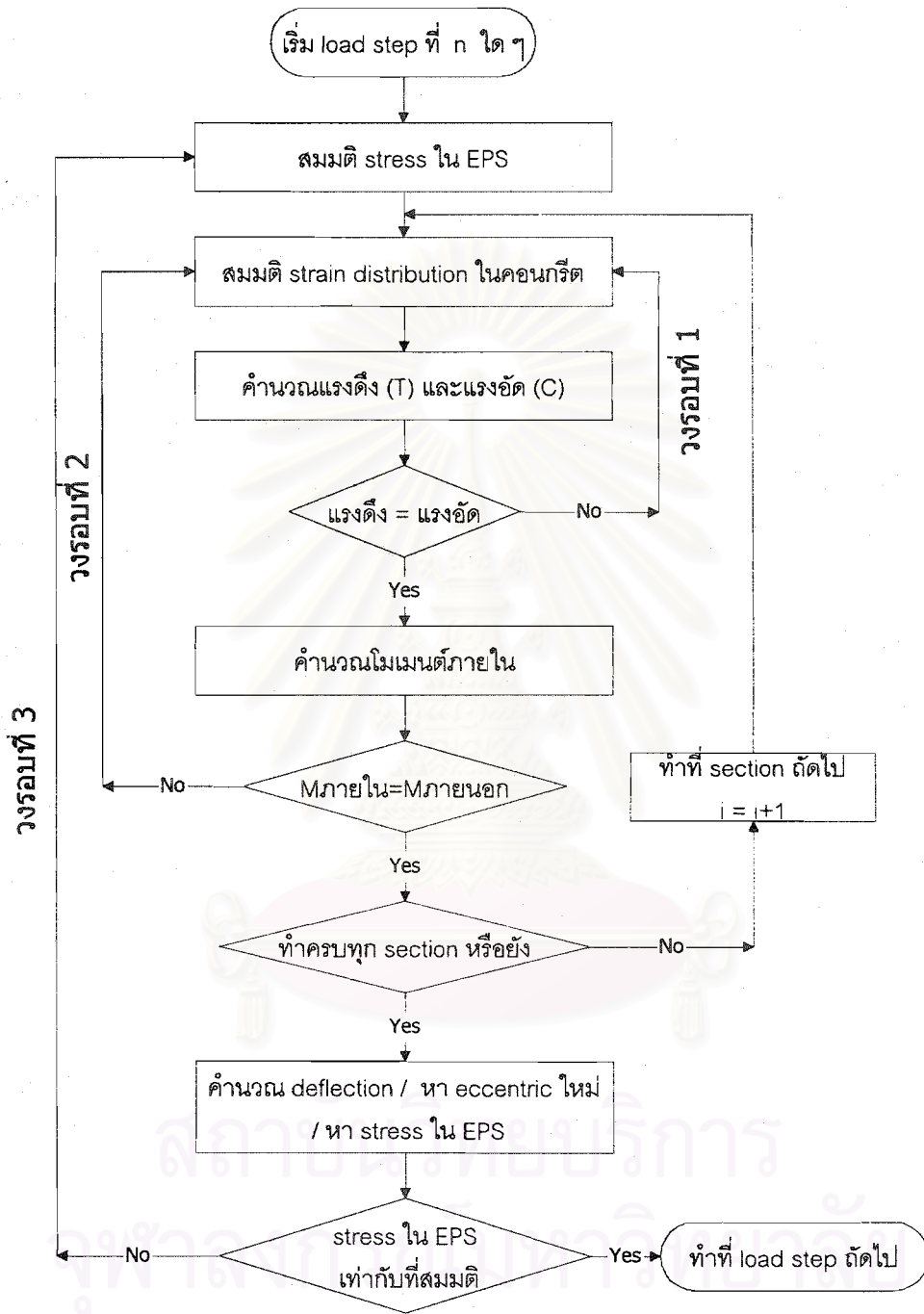
วิธีการวิเคราะห์คล้ายกับวิธีการวิเคราะห์หา moment-curvature ของคานทั่วไปแต่จะต่างกันตรงที่ คานคอนกรีตเสริมเหล็กและคานคอนกรีตอัดแรงแบบที่ลวดอัดแรงยึดติดกับเนื้อคอนกรีต (bonded) สามารถเลือกวิเคราะห์เฉพาะที่หน้าตัดที่สนใจได้ เนื่องจากเป็นปัญหาแบบ section-dependent แต่การวิเคราะห์คานคอนกรีตอัดแรงภายนอกเป็นปัญหาแบบ member-dependent จึงต้องทำการวิเคราะห์ทุกหน้าตัดตลอดทั้งคาน ดังที่อธิบายในบทที่ 2



รูปที่ 3.2 แสดงแบบจำลองคานที่ใช้ในการวิเคราะห์

การวิเคราะห์เริ่มจากแบ่งคานออกเป็นช่วงย่อย ๆ ตลอดความยาวของคานดังแสดงในรูปที่ 3.2 แต่ละหน้าตัด i ใด ๆ ที่แบ่ง เป็นตัวแทนตำแหน่งของรอยร้าว (crack) ที่จะเกิดขึ้น โดยมีสมมติฐานว่าหากหน่วยการยืดหดของคอนกรีตในคานช่วงใดมีค่าถึง ϵ_{cu} ก็จะเกิดรอยร้าวเฉพาะตรงตำแหน่งหน้าตัด i ที่กำหนดไว้ จากการศึกษาของ Alkhairi^[13] พบว่าเมื่อใช้จุดแบ่ง 10-30 จุด

ก็สามารถให้ความถูกต้องได้เพียงพอ การแบ่งหน้าตัดไม่จำเป็นต้องให้ดีวิเอเตอร์ (deviator) อยู่ตรงกับตำแหน่งหน้าตัดที่แบ่ง



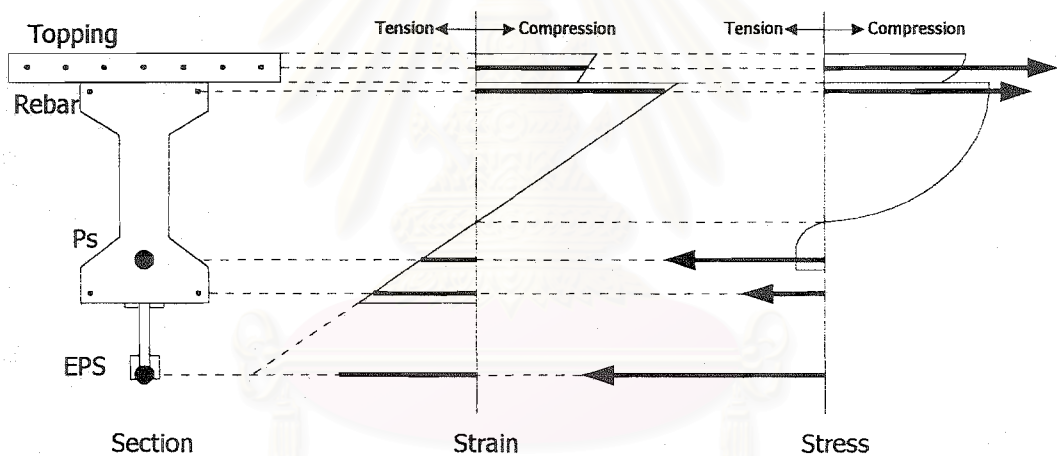
*** EPS = ลวดอัดแรงภายนอก

รูปที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการคำนวณ ณ ที่หน้าหน้ากระทำขั้นใด ๆ

การวิเคราะห์จะแบ่งหน้าหน้ากระทำออกเป็นขั้น ๆ (load step) ซึ่งจะเพิ่มหน้าหน้ากระทำขั้นที่ละน้อย ๆ จนกระทั่งคานเกิดการวิบัติ การวิบัติกำหนดโดยเงื่อนไข 3 ประการคือ คอนกรีตมี

หน่วยการยืดหดถึงหน่วยการประลัย (ϵ_{cu}) เหล็กเสริมมีหน่วยการยืดหดถึงหน่วยการยืดหดประลัย (ϵ_{su}) และลวดอัดแรงมีหน่วยการยืดหดถึงหน่วยการยืดหดประลัย (ϵ_{pu}) จะถือว่าคานเกิดการวิบัติเมื่อมีอย่างน้อย 1 เงื่อนไขเกิดขึ้น การสมมติค่าให้กับตัวแปรที่ยังไม่รู้ค่า ณ ที่หน้าหน้ากระทำขั้นตอนใด ๆ (load step ที่ n ใด ๆ) อาศัยข้อมูลจากหน้าหน้ากระทำขั้นตอนหน้านั้น

แต่ละขั้นของหน้าหน้ากระทำ จะมีการคำนวณแทนค่าซ้ำ (iteration) ซ้อนกันอยู่ 3 วงรอบ (loop) วงรอบเรียงจากวงในสุดไปยังวงนอกสุดคือ วงรอบที่ 1 วงรอบเพื่อหาสมดุลของแรง (force equilibrium) วงรอบที่ 2 วงรอบเพื่อหาสมดุลของโมเมนต์ (moment equilibrium) วงรอบที่ 3 วงรอบความเข้ากันได้ของการเปลี่ยนรูป (compatibility of deformation) วงรอบที่ 1 และวงรอบที่ 2 กระทำในทุก ๆ หน้าตัดที่แบ่งออก เพื่อให้ทุก ๆ หน้าตัดอยู่ในสมดุลของแรงและสมดุลของโมเมนต์ เมื่อทุก ๆ หน้าตัดอยู่ในสมดุลจึงทำการคำนวณวงรอบที่ 3 เพื่อตรวจสอบความสอดคล้องของการเปลี่ยนรูป ทั้งนี้เพื่อให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในลวดอัดแรงภายนอกมีความสัมพันธ์กับระยะที่ลวดอัดแรงยืดออก ขั้นตอนการคำนวณทั้งหมดแสดงในรูปที่ 3.3

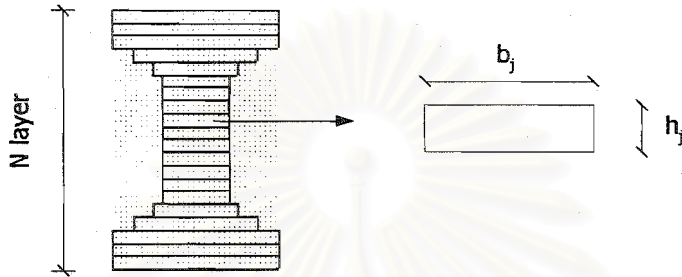


รูปที่ 3.4 แสดงหน่วยแรงและหน่วยการยืดหดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคอนกรีตจากการสมมติในวงรอบที่ 1

วงรอบที่ 1 วงรอบเพื่อหาสมดุลของแรง (force equilibrium)

การหาสมดุลของแรง ณ หน้าตัดที่ i ใด ๆ กระทำโดยสมมติหน่วยการยืดหดของคอนกรีตที่ผิวบนและที่ผิวล่าง การสมมติค่า 2 ค่านี้นี้ทำให้ได้การกระจายตัวหน่วยการยืดหดของคอนกรีตทั้งหน้าตัด 1 รูปแบบ (จากสมมติฐานข้อที่ 1) ในส่วนของวัสดุที่เป็นคอมโพสิต (composite) จะมีการคำนวณเก็บค่าหน่วยการยืดหด ณ หน้าหน้าขั้นตอนที่วัสดุคอมโพสิตจะเริ่มรับแรงเอาไว้ ดังนั้นหน่วยการยืดหดที่เกิดขึ้น จะเกิดจากหน่วยการยืดหดที่ได้จากการสมมติ ลบด้วยหน่วยการยืดหดก่อนที่วัสดุส่วนที่เป็นคอมโพสิตจะเริ่มรับแรง เมื่อทราบหน่วยการยืดหดของคอนกรีต ก็สามารถ

หาหน่วยการยึดหดของเหล็กเสริม และหน่วยการยึดหดของลวดอัดแรงภายใน (แบบ bonded) ได้จากวิธี strain compatibility ส่วนหน่วยการยึดหดของลวดอัดแรงภายนอก ได้จากการสมมติในส่วนของวงรอบที่ 3 เมื่อทราบหน่วยการยึดหดทั้งหมดสามารถนำมาคำนวณเป็นหน่วยแรงได้โดยอาศัยคุณสมบัติของวัสดุตามแบบจำลองของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 นำหน่วยแรงคูณกับพื้นที่หน้าตัดของวัสดุแต่ละชนิดได้แรงที่เกิดขึ้น รูปที่ 3.4 แสดงการสมมติหน่วยการยึดหดและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากการสมมติ



รูปที่ 3.5 แสดงการแบ่งหน้าตัดออกเป็นแถบย่อย ๆ เพื่อคำนวณหาแรงที่เกิดขึ้น

แรงในคอนกรีตได้จากการแบ่งหน้าตัดออกเป็นแถบย่อย ๆ กว้าง b_j สูง h_j ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งเมื่อรวมแรงจากแถบย่อย ๆ เข้าด้วยกันจะได้แรงอัดในคอนกรีตดังแสดงในสมการที่ 3.6

$$\text{แรงอัดในคอนกรีต}(C) = \sum b_j h_j \sigma_j \quad \text{สมการที่ 3.6}$$

แรงดึงจากเหล็กเสริมและลวดอัดแรง

$$\text{แรงดึง}(T) = \sum A_s \sigma_s + \sum A_{ps} \sigma_{ps} + \sum A_{eps} \sigma_{eps} \quad \text{สมการที่ 3.7}$$

จากสมดุลของแรง $\sum F_x = 0$

ได้ว่า $C - T = 0$ หรือ $|C - T| < \text{tolerance of force}$

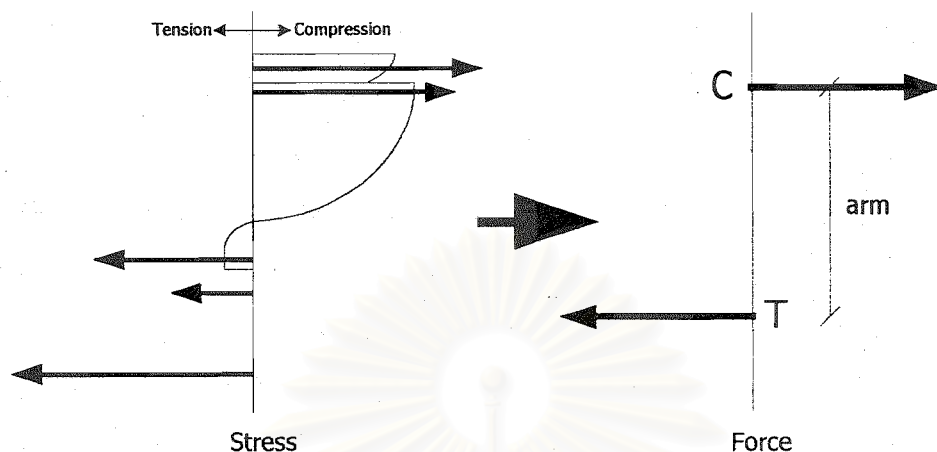
ในการศึกษานี้ใช้ tolerance of force ที่ 1 เปอร์เซ็นต์

เมื่อได้แรงอัด(C) และแรงดึง(T) แล้วพบว่าแรงไม่อยู่ในสมดุล ให้ย้อนกลับไปสมมติหน่วยการยึดหดของคอนกรีตที่ผิวบนและผิวล่างใหม่ จนกว่าจะได้หน่วยการยึดหดที่ทำให้แรงอยู่ในสมดุลจึงถือเป็นการเสร็จวงรอบที่ 1 นี้

วงรอบที่ 2 วงรอบเพื่อหาสมดุลของโมเมนต์ (moment equilibrium)

เมื่อกำหนดวงรอบที่ 1 จนได้สมดุลของแรงแล้ว จึงทำการรวมแรงทั้งหมดโดยอาศัยหลักการรวมแรง เพื่อหาขนาดและตำแหน่งของแรงลัพธ์ 2 แรงคือ แรงอัด(C) และแรงดึง(T) ดังแสดง

ในรูปที่ 3.6 จากนั้นทำการคำนวณหาโมเมนต์ด้านทานภายใน ดังแสดงในสมการที่ 3.8 นำค่าโมเมนต์ด้านทานภายในไปเปรียบเทียบกับโมเมนต์จากแรงกระทำภายนอกที่หน้าหน้ากระทำชั้นที่พิจารณา



รูปที่ 3.6 แสดงการรวมแรงเพื่อหาโมเมนต์ด้านทานภายใน

$$C \times \text{Arm} = T \times \text{Arm} = M_{\text{int}}$$

สมการที่ 3.8

อาศัยหลักสมดุลของโมเมนต์ $\sum M = 0$

ซึ่งจะได้ว่า $M_{\text{int}} - M_{\text{ext}} = 0$ หรือ $|M_{\text{int}} - M_{\text{ext}}| < \text{tolerance of moment}$

ในการศึกษานี้ใช้ tolerance of moment ที่ 1 เปอร์เซ็นต์

หากพบว่าโมเมนต์ที่ได้จากการคำนวณไม่อยู่ในสมดุล ให้ย้อนกลับไปสมมติหน่วยการยึดหดในการทำวงรอบที่ 1 ใหม่ เมื่อได้แรงอยู่ในสมดุลจึงมาทำวงรอบที่ 2 อีกครั้ง กระทำซ้ำเช่นนี้ไปจนกว่าจะได้สมดุลของแรงและโมเมนต์ การวิเคราะห์จะทำซ้ำเช่นนี้จนทุกหน้าตัดของคานอยู่ในสมดุลของแรงและโมเมนต์ จึงไปกระทำต่อที่วงรอบนอกสุดคือวงรอบที่ 3

วงรอบที่ 3 วงรอบความสอดคล้องของการเสียรูป (compatibility of deformation)

หลังจากทำการคำนวณในวงรอบที่ 1 และ 2 จนได้ค่าหน่วยการยึดหดของคอนกรีตทุกหน้าตัดที่ทำให้เกิดสมดุลของแรงและโมเมนต์ จึงนำค่าหน่วยการยึดหดมาคำนวณหาระยะแอนตัวของคานที่จุดต่าง ๆ เพื่อใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งของแป้นยึดลวดอัดแรง (jacking corbel) และดีวิเอเตอร์ (deviator) ทุก ๆ ตัว ตำแหน่งเหล่านี้จะนำไปใช้ในการคำนวณความยาวของลวดอัดแรงภายนอก และระยะเยื้องศูนย์ที่หน้าตัดใด ๆ ความยาวของลวดอัดแรงภายนอกที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับความยาวเริ่มแรกเพื่อหาหน่วยการยึดหดที่เกิดขึ้น

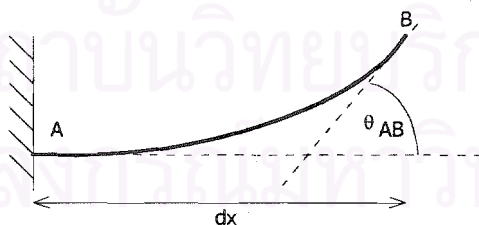
ก่อนการคำนวณ ณ น้ำหนักกระทำขึ้นใด ๆ มีตัวแปรที่ไม่รู้ค่าอยู่ 1 ตัว กับอีก 1 ชุดคือ หน่วยการยืดหดในลวดอัดแรงภายนอก และระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอก ณ น้ำหนักกระทำขึ้นใด ๆ ตัวแปรที่ไม่รู้ค่านี้นี้ต้องทำการสมมติขึ้นก่อน ซึ่งในการสมมติจะใช้ค่าที่คำนวณได้จากน้ำหนักกระทำขึ้นที่แล้ว เมื่อค่าเหล่านี้สามารถคำนวณออกมาได้ จึงนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่สมมติได้ในตอนแรก หากมีค่าเท่ากันนั่นหมายความว่าค่าที่สมมติเป็นค่าที่ถูกต้อง ซึ่งทำให้ระบบอยู่ในสมดุลและมีระยะแอ่นตัวสอดคล้องกับแรงที่เกิดขึ้น หากค่าที่คำนวณได้ไม่เท่ากับค่าที่สมมติไว้ให้นำค่าที่คำนวณได้ใหม่ใช้เป็นค่าในการสมมติรอบต่อไป กระทำซ้ำจนกว่าจะได้ค่าเท่ากันหรือมีค่าต่างกันไม่เกินกว่าค่าที่ยินยอมให้ (tolerance 1 %)

จากการศึกษาพบว่า ในแต่ละรอบของการคำนวณในวงรอบที่ 3 หากสมมติค่าหน่วยการยืดหด และระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงใหม่พร้อม ๆ กัน จะทำให้การคำนวณลู่เข้าสู่คำตอบซ้ำ (เพราะค่าทั้ง 2 นี้มีความสัมพันธ์ในเชิงผกผันกันอยู่) ควรสมมติจนได้ระยะเยื้องศูนย์กลางเสียก่อน จึงค่อยสมมติหน่วยการยืดหดใหม่ เมื่อใช้หน่วยการยืดหดใหม่ระยะเยื้องศูนย์กลางก็จะเปลี่ยนไปอีกครั้ง ต้องสมมติจนได้ระยะเยื้องศูนย์กลางอีกครั้งก่อนจึงค่อยสมมติหน่วยการยืดหดใหม่ได้ วิธีนี้การคำนวณจะลู่เข้าสู่คำตอบได้เร็วกว่า

การคำนวณหาระยะแอ่นตัวของคาน

จากค่าหน่วยการยืดหดที่ผิวบนและผิวล่างของคอนกรีต สามารถนำมาคำนวณหาค่า curvature ของทุก ๆ หน้าตัดได้ ซึ่งค่า curvature นี้นำไปคำนวณหาค่ามุมระหว่างจุดใด ๆ ได้โดยใช้สมการที่ 3.9 ดังแสดงในรูปที่ 3.7

$$\theta_{AB} = \int_A^B \phi dx \quad (d\theta = \phi dx) \quad \text{สมการที่ 3.9}$$

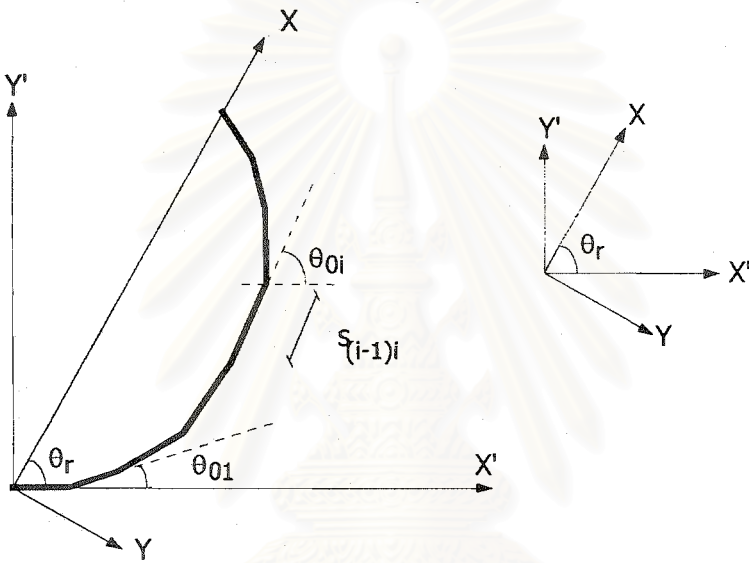


รูปที่ 3.7 แสดงการหาค่ามุมระหว่างจุด 2 จุด

เมื่อหาค่ามุมระหว่างจุด 2 จุดได้ ก็สามารถหาค่าตำแหน่ง X' และ Y' ของคานที่หน้าตัดใด ๆ ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.8

ที่หน้าตัด $i=0$	$X'_0 = 0$	$Y'_0 = 0$
ที่หน้าตัด $i=1$	$X'_1 = X'_0 + S_{01} \cos \theta_{01}$	$Y'_1 = Y'_0 + S_{01} \sin \theta_{01}$
ที่หน้าตัด i ใด ๆ	$X'_i = X'_{i-1} + S_{(i-1)i} \cos \theta_{0i}$	$Y'_i = Y'_{i-1} + S_{(i-1)i} \sin \theta_{0i}$

และเนื่องจากจุดรองรับ (support) ไม่มีการทรุดตัว ระดับในแกน Y ของจุดรองรับด้านซ้ายต้องมีค่าเท่ากับระดับจุดรองรับด้านขวา และมีค่าเท่ากับศูนย์ จากเงื่อนไขดังกล่าว ทำให้สามารถย้ายแกนเพื่อแปลงพิกัดของแกน $X'-Y'$ ให้มาอยู่ในแกน $X-Y$ ซึ่งทำให้พิกัดของคานากลับมาวางตัวในแนวราบโดยใช้สมการที่ 3.10 สมการที่ 3.11 และสมการที่ 3.12



รูปที่ 3.8 แสดงการแปลงพิกัดจาก $X'-Y'$ เป็น $X-Y$

$$X_i = X'_i \cos \theta_r + Y'_i \sin \theta_r \quad \text{สมการที่ 3.10}$$

$$Y_i = X'_i \sin \theta_r - Y'_i \cos \theta_r \quad \text{สมการที่ 3.11}$$

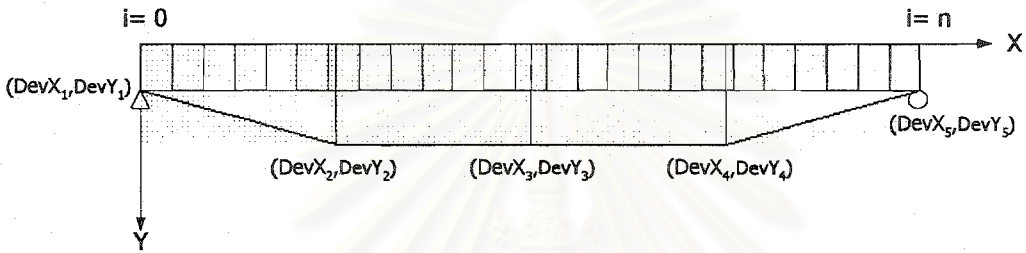
$$\theta_r = \arctan\left(\frac{Y'_n}{X'_n}\right) \quad \text{สมการที่ 3.12}$$

ค่า $S_{(i-1)i}$ คือระยะห่างระหว่างหน้าตัดที่ $(i-1)$ และหน้าตัดที่ i โดยระยะนี้คำนวณจากระยะในตอนแรกสุดท้ายกลับกับการยืดหดตัวของคอนกรีต ณ น้ำหนักชั้นใด ๆ โดยการยืดหดคำนวณจากหน่วยการยืดหด ที่ได้จากการทำวงรอบที่ 1 และ 2 การยืดหดที่เกิดขึ้นเป็นผลรวมจากผลของแรงอัดและโมเมนต์ดัด (elastic shortening)

การคำนวณหาค่าระยะแอ่นของคานด้วยวิธีนี้ ทำให้ได้ระยะทางแกน X และ Y ที่เปลี่ยนไปของทุกหน้าตัด ช่วยให้คำนวณความยาวของลวดอัดแรงภายนอกได้ถูกต้องมากขึ้น หากใช้ระยะทางแกน X ของหน้าตัดก่อนรับน้ำหนักในการคำนวณ จะได้ความยาวลวดอัดแรงมากกว่าความเป็นจริง พฤติกรรมของคานที่วิเคราะห์ได้ก็จะผิดไป

การคำนวณหาความยาวลวดอัดแรงภายนอก

การคำนวณหาความยาวของลวดอัดแรงภายนอก ใช้วิธีคำนวณเดียวกับการหาระยะระหว่างจุด โดยจุดในกรณีนี้คือ ตำแหน่งของแป้นยึดลวดอัดแรงและตำแหน่งปลายของตีไวเอเตอร์



รูปที่ 3.9 แสดงการคำนวณหาความยาวของลวดอัดแรงภายนอก

$$L_{eps} = \sqrt{(DevX_1 - DevX_0)^2 + (DevY_1 - DevY_0)^2} + \dots + \sqrt{(DevX_{i-1} - DevX_i)^2 + (DevY_{i-1} - DevY_i)^2} + \dots + \sqrt{(DevX_{n-1} - DevX_n)^2 + (DevY_{n-1} - DevY_n)^2}$$

สมการที่ 3.13

การคำนวณหาค่าความยาวเริ่มต้นของลวดอัดแรงภายนอก เมื่อไม่มีแรงกระทำ (L_0) คำนวณจากความยาวลวดหลังจากถ่ายแรงเสร็จ (L_{eps}) และหน่วยการยืดหดของลวดอัดแรง ดังสมการที่ 3.14 และในทางกลับกันก็สามารถใช้หาค่าหน่วยการยืดหดของลวดอัดแรงภายนอกที่น้ำหนักกระทำขั้นใด ๆ ได้

$$L_{eps} = L_0 + \Delta L$$

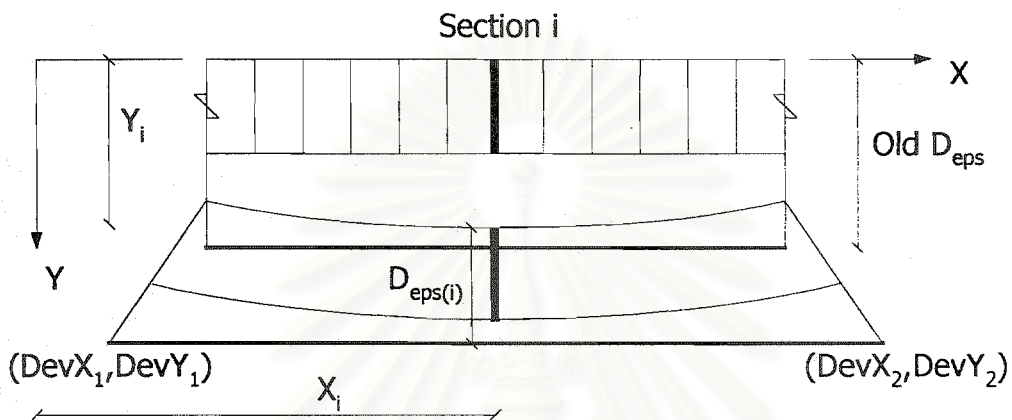
$$\frac{L_{eps}}{L_0} = 1 + \epsilon_{esp}$$

$$L_0 = \frac{L_{eps}}{[1 + \epsilon_{eps}]}$$

สมการที่ 3.14

การคำนวณหาระยะทางแกน Y ของลวดอัดแรงภายนอก

เนื่องจากคานาปกติวัสดุต่าง ๆ จะมีตำแหน่งสัมพัทธ์คงที่ เมื่อเทียบกับตำแหน่งของหน้าตัดคอนกรีต (มีการเปลี่ยนตำแหน่งสอดคล้องกับหน้าตัด) แต่กรณีของลวดอัดแรงภายนอกจะมีตำแหน่งสัมพัทธ์เปลี่ยนไป จึงต้องคำนวณระยะเยื้องศูนย์กลางใหม่ทุกหน้าหน้าชั้นที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.10 และสมการที่ 3.15 ใช้คำนวณหาระดับของลวดอัดแรงภายนอกเมื่อเทียบกับผิวบนของคานาที่หน้าหน้ากระทำชั้นใด ๆ



รูปที่ 3.10 แสดงการคำนวณหาระยะทางแกน Y ของลวดอัดแรงภายนอก

$$D_{eps(i)} = \left[\frac{(X_i - DevX_1)(DevY_1 - DevY_2)}{(DevX_2 - DevX_1)} + DevY_1 \right] - Y_i \quad \text{สมการที่ 3.15}$$

แบบจำลองวัสดุ

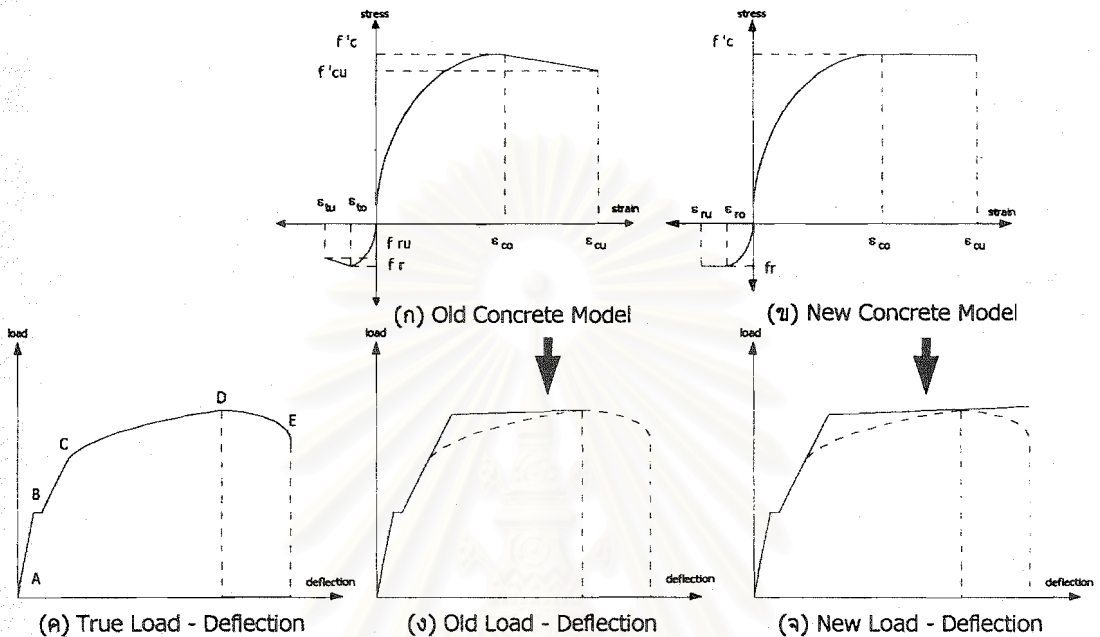
การวิเคราะห์นั้นจะให้ค่าถูกต้องมากน้อยเพียงไรขึ้นอยู่กับแบบจำลองวัสดุ แบบจำลองวัสดุที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น ก็จะทำให้ผลที่มีความถูกต้องมากขึ้น

1. แบบจำลองคอนกรีต

ในความเป็นจริงคานาบางตัวเมื่อรับน้ำหนักกระทำถึงค่าน้ำหนักกระทำสูงสุด ความสามารถในการรับน้ำหนักของคานาจะลดลงดังแสดงด้วยช่วง DE ในรูปที่ 3.11 (ค) เนื่องจากเป็นไปตามพฤติกรรมของคอนกรีต เมื่อคอนกรีตมีหน่วยการยืดหดเกินกว่า ϵ_{∞} ค่าหน่วยแรงในคอนกรีตก็จะลดลง ดังแสดงในรูปที่ 3.11 (ก)

แต่เนื่องจากวิธีการวิเคราะห์ในการศึกษานี้ เป็นการวิเคราะห์แบบที่ค่อย ๆ เพิ่มน้ำหนักกระทำขึ้นทีละขั้น ดังนั้นจึงสามารถทำนายพฤติกรรม น้ำหนักกระทำ-ระยะแอ่น ได้เพียงถึงค่าน้ำหนักสูงสุด เมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำขึ้นอีกก็ไม่สามารถหาคำตอบที่ทำให้คานาอยู่ในสมดุลได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 (ง) ซึ่งหากให้เงื่อนไขว่าเมื่อถึงค่าน้ำหนักสูงสุด น้ำหนักกระทำขั้นต่อไปให้ลด

ลงแทนที่จะเพิ่มขึ้นเพื่อทำนายพฤติกรรมในช่วง DE จะต้องมีการกำหนดเงื่อนไขเพื่อให้ได้คำตอบในส่วนที่เป็นช่วง DE แทนที่จะได้คำตอบวกกลับมาในช่วง CD (ที่น้ำหนักกระทำช่วงนี้มีคำตอบที่เป็นไปได้ 2 คำตอบ) ซึ่งในการศึกษานี้ยังไม่สามารถหาวิธีแก้ปัญหามันได้ ประกอบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องก็ไม่ได้กล่าวถึงประเด็นนี้



รูปที่ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองคอนกรีตกับพฤติกรรมของคานที่คำนวณได้

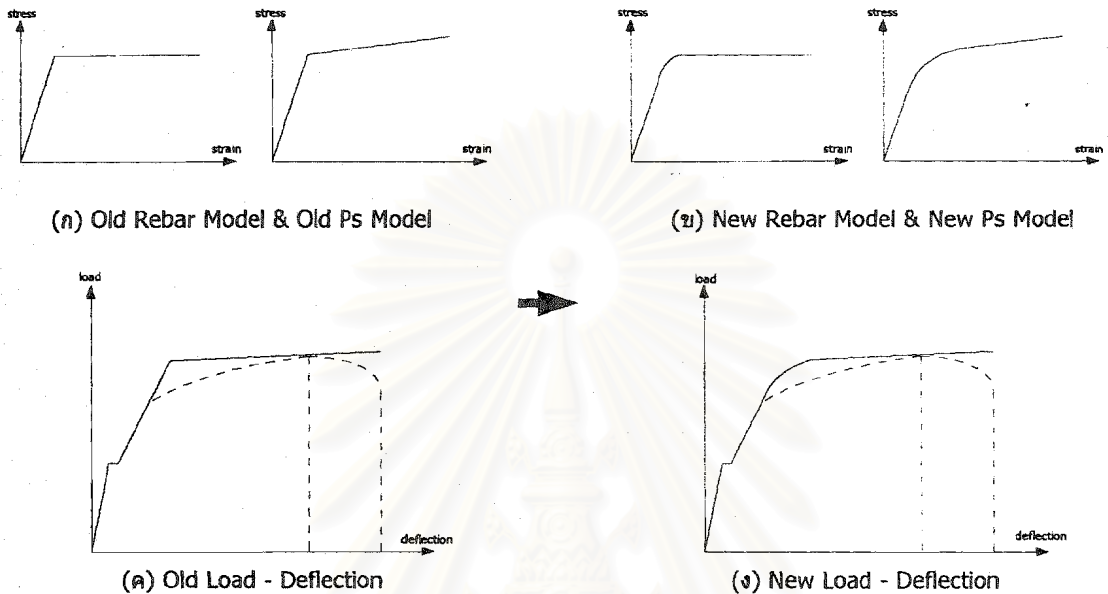
เพื่อสามารถทำนายระยะแอ่นตัวของคานให้มีความถูกต้องมากขึ้น จึงเปลี่ยนแบบจำลองคอนกรีตจากแบบเดิมในรูปที่ 3.11 (ก) เป็นรูปที่ 3.11 (ข) คือหลังจากคอนกรีตมีหน่วยการยืดหดถึงค่า ϵ_{co} ให้หน่วยแรงในคอนกรีตมีค่าคงที่เท่ากับ f'_c จนถึงหน่วยการยืดหดประลัย รูปที่ 3.11 (จ) แสดงพฤติกรรมน้ำหนักกระทำ-ระยะแอ่นตัวของคานหลังจากเปลี่ยนแบบจำลองคอนกรีต ซึ่งสามารถทำนายพฤติกรรมในช่วง DE ได้ แม้ว่าจะไม่สามารถทำนายกำลังรับน้ำหนักส่วนที่ลดลงได้ แต่ก็สามารถทำนายระยะแอ่นได้ถูกต้องมากขึ้น อีกทั้งค่าน้ำหนักสูงสุดที่เพิ่มขึ้นยังเพิ่มจากเดิมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

2. แบบจำลองเหล็กเสริมและลวดอัดแรง

การวิเคราะห์เพื่อหา น้ำหนักกระทำ-ระยะแอ่น ของคานคอนกรีตอัดแรงภายนอก ความสัมพันธ์ที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง 3 ช่วง (tri-linear) มีจุดหัก 2 จุดคือจุดที่คอนกรีตร้าว (crack) และจุดที่เหล็กเสริมคราก (yield) จากรูปที่ 3.12 (ค) จะเห็นได้ว่าจุดที่เหล็กเสริมเริ่มคราก เป็นจุดที่ผลการวิเคราะห์ให้ค่าคลาดเคลื่อนมากที่สุด

เพื่อแก้ปัญหามันจึงทำการปรับปรุงแบบจำลองของเหล็กเสริมและลวดอัดแรง ตรงจุดที่เหล็กเสริมและลวดอัดแรงคราก โดยจากเดิมที่ใช้แบบจำลองเป็น bi-linear ได้ปรับแบบจำลอง

บริเวณที่เหล็กเสริมและลวดอัดแรงครากให้มีความโค้งมนใกล้เคียงกับวัสดุจริงมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.12 (ข) พฤติกรรม น้ำหนักกระทำ-ระยะแอ่น หลังจากแก้ไขแบบจำลองเหล็กเสริมและลวดอัดแรงแสดงในรูปที่ 3.12 (ง) ผลที่ได้ให้ค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น แต่ ณ จุดนี้ยังคงเป็นจุดที่เกิดความคลาดเคลื่อนสูงสุด



รูปที่ 3.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองเหล็กเสริมและลวดอัดแรง
กับพฤติกรรมของคานที่คำนวณได้

แรงเสียดทานระหว่างตีวีเอเตอร์กับลวดอัดแรง

จากการศึกษาของ P. Srinivasa Rao และ George Mathew^[17] พบว่าหากคิดผลของแรงเสียดทานจะได้ค่าโมเมนต์ประลัยเพิ่มขึ้น ถ้าแรงเสียดทานมีมากจนลวดอัดแรงภายนอกไม่เกิดการเลื่อน (slip) จะได้ค่าโมเมนต์ประลัยเพิ่มขึ้นประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์

เนื่องจากการคิดผลของแรงเสียดทานทำให้การวิเคราะห์ยุ่งยากขึ้น ประกอบกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Alkhairi และ Naaman^[11,12,13], Songkiat M. และ H. Mutsuyoshi^[20], Pisani^[15]) พบว่าเมื่อไม่คิดแรงเสียดทานก็ยังให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องเพียงพอ และการไม่คิดแรงเสียดทานก็ยังอยู่ในด้านที่ปลอดภัยอีกด้วย ดังนั้นการศึกษานี้จึงเลือกที่จะไม่คิดผลของแรงเสียดทาน

แรงดึงเริ่มแรกในลวดอัดแรงภายนอกที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นค่าแรงดึงประสิทธิผล (effective prestressing force) ถึงแม้ว่าจะไม่คิดผลของแรงเสียดทานในระหว่างการวิเคราะห์ แต่ในการคำนวณค่าแรงดึงเริ่มแรกต้องคิดผลของแรงดึงที่สูญเสียไป (loss) เนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ รวมไปถึงแรงที่สูญเสียไปเนื่องจากแรงเสียดทานด้วย (friction loss) ยกเว้นแรงดึงที่สูญเสียไป

เนื่องจากการยืดหดตัวของคอนกรีต (elastic shortening) ทั้งจากแรงอัดและจากโมเมนต์ดัด ไม่
ต้องนำมารวมเพราะผลของส่วนนี้รวมอยู่ในการวิเคราะห์ห้อยู่แล้ว



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบ

จากวิธีการวิเคราะห์พฤติกรรมคานคอนกรีตอัดแรงภายนอกที่กล่าวถึงในบทที่ 3 เพื่อให้แน่ใจว่าสามารถทำนายพฤติกรรมของคานคอนกรีตอัดแรงภายนอกโดยมีความถูกต้องเพียงพอ จึงนำคานที่ทดสอบโดย Songkiat M.^[21] Kiang-Hwee Tan^[18] และ Aravinthan^[23] มาทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของน้ำหนักกระทำกับระยะแฉ่นตัวที่กึ่งกลางคาน

คานที่ทดสอบโดย Songkiat M. และ Kiang-Hwee Tan เป็นคานคอนกรีตอัดแรงที่แนวการวางตัวของลวดอัดแรงยังอยู่ภายในระดับความลึกของคาน ซึ่งเป็นคานคอนกรีตอัดแรงแบบดึงลวดที่หลัง Songkiat M. ศึกษาพฤติกรรมเพื่อเปรียบเทียบระหว่างคานคอนกรีตอัดแรงภายในแบบ bond คานคอนกรีตอัดแรงภายในแบบ unbond คานคอนกรีตอัดแรงภายนอก และการใช้ลวดอัดแรงภายนอกร่วมกับคานคอนกรีตอัดแรงแบบ bond รวมทั้งมีการศึกษาผลของระยะห่างระหว่างดีวีเอเตอร์ (deviator) อีกด้วย Kiang-Hwee Tan ศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตอัดแรงภายนอก เมื่อใช้พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรง แรงดึงที่ใช้ดึงลวดอัดแรง จำนวนและตำแหน่งของดีวีเอเตอร์ต่าง ๆ กัน

ส่วนคานที่ทดสอบโดย Aravinthan เป็นคานคอนกรีตหล่อสำเร็จแบบดึงลวดก่อน จากนั้นจึงมาดึงลวดอัดแรงภายนอก โดยแนวการวางตัวของลวดอัดแรงอยู่ต่ำกว่าระดับความลึกของคาน

เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของ Songkiat M.

รายละเอียดคานที่ Songkiat M.^[21] ทำการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.3 ค่า Dev คือจำนวนดีวีเอเตอร์และ Sd คือระยะห่างระหว่างดีวีเอเตอร์ตัวแรกสุดกับตัวสุดท้าย ในกรณีของลวดอัดแรงภายในจะมีแนวการวางตัวเหมือนกับลวดอัดแรงภายนอก โดยระยะใน () คือระยะในส่วนที่ลวดเดินเป็นเส้นตรง คานทุกตัวดึงลวดที่ 270 kN เพื่อให้เกิดหน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงประมาณ $0.55f_{pu}$ คอนกรีตมีกำลังอัด 40 MPa โดยในตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 แสดงคุณสมบัติเหล็กเสริมและลวดอัดแรงที่ใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติของเหล็กเสริมที่ใช้ในการศึกษาของ Songkiat M.

Type/Dia	Area (cm ²)	E _s (Mpa)	Yield (Mpa)
SD345/φ-6mm	0.282	206,000	350
SD345/φ-10mm	0.785	206,000	400

ตารางที่ 4.2 แสดงคุณสมบัติของลวดอัดแรงที่ใช้ในการศึกษาของ Songkiat M.

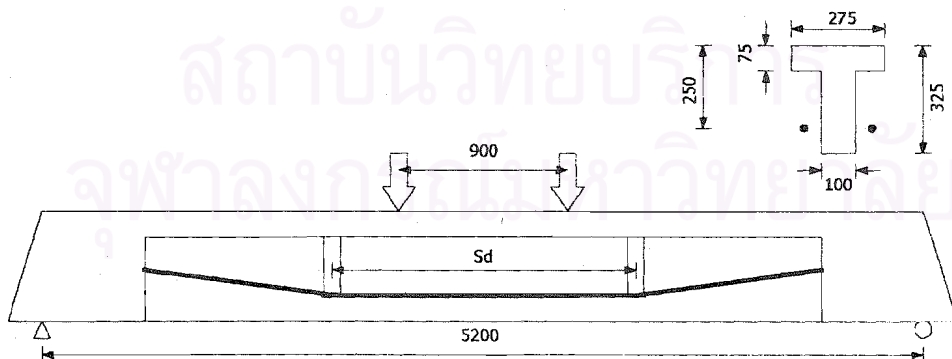
Type of Tendons	Area (cm ²)	Yield Load (kN)	Ultimate Load (kN)
SWPR7A ϕ 12.4 mm	0.929	136	160
SWPR7A ϕ 15.2 mm	1.387	204	240
SWPR7A ϕ 19.3 mm	2.437	387	451

ตารางที่ 4.3 แสดงรายละเอียดคานที่ใช้ในการศึกษาของ Songkiat M.

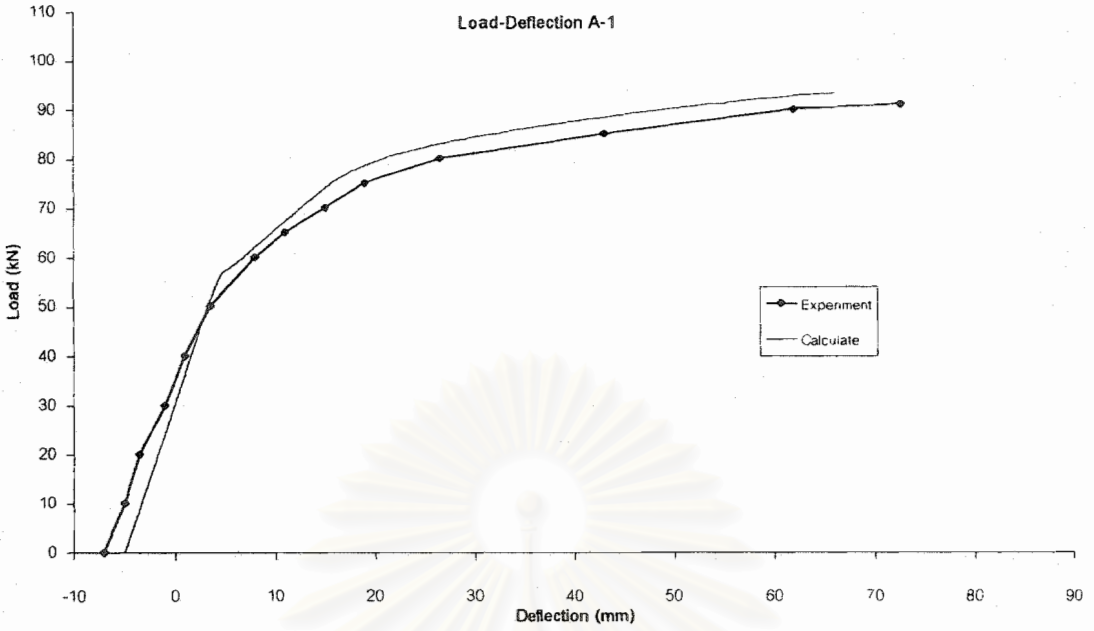
No.	Description of Specimens	Dev	Sd (m)	Type of Tendons	
				External	Internal
A-1	External PC Beam	2	1.80	SWPR7A-2 ϕ 15.2	-
A-2	External PC Beam	2	3.00	SWPR7A-2 ϕ 15.2	-
A-3	External PC Beam	3	1.50	SWPR7A-2 ϕ 15.2	-
A-4	Internal Unbonded PC Beam	-	(3.00)	-	SWPR7A-1 ϕ 19.3
A-5	Internal Bonded PC Beam	-	(3.00)	-	SWPR7A-1 ϕ 19.3
A-6	External PC Beam and Bonded PC Beam	2	3.00	SWPR7A-2 ϕ 12.4	SWPR7A-1 ϕ 12.4

Reinforcement Deformed bar Grade SD345:

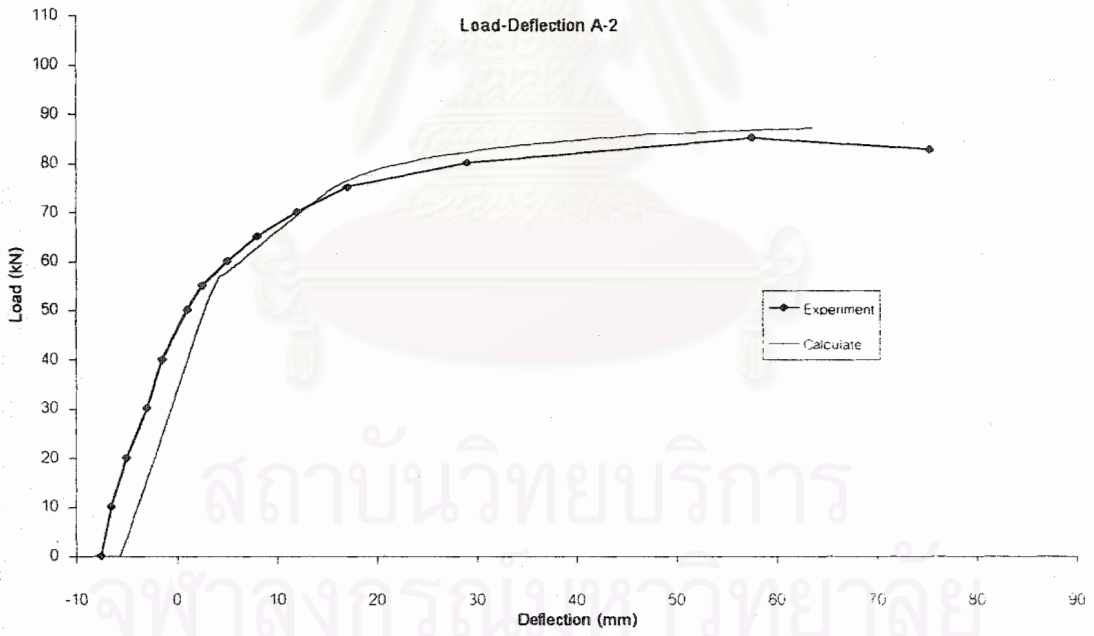
Top:4 ϕ 6 mm ($A_s=1.13\text{cm}^2$) Bottom:3 ϕ 10 mm ($A_s=2.35\text{cm}^2$)



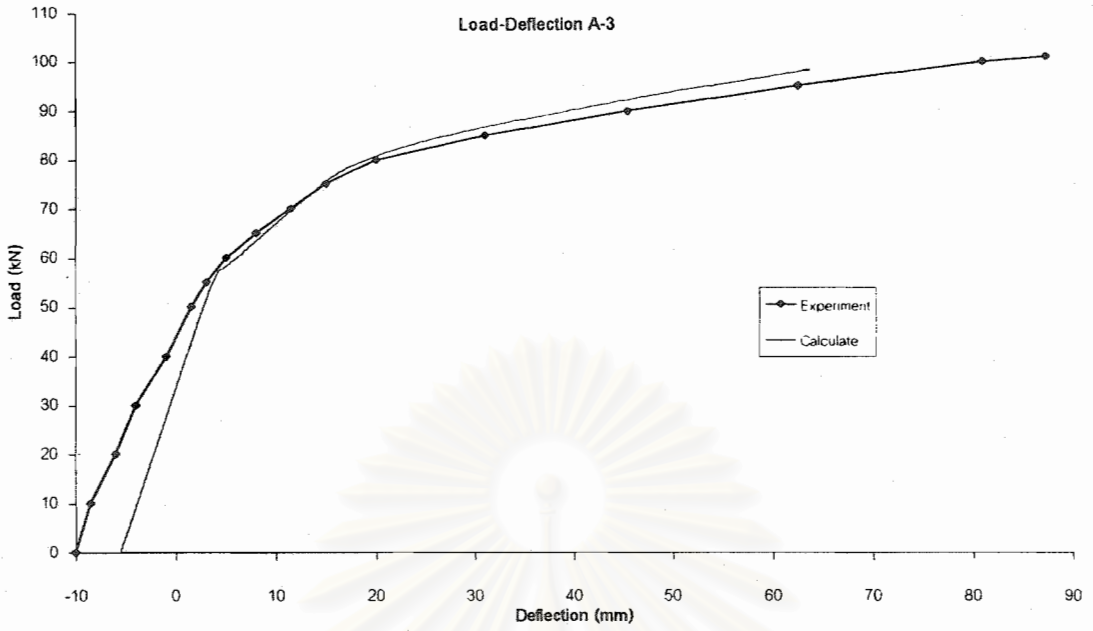
รูปที่ 4.1 แสดงคานและน้ำหนักกระทำที่ใช้ในการศึกษาของ Songkiat M.



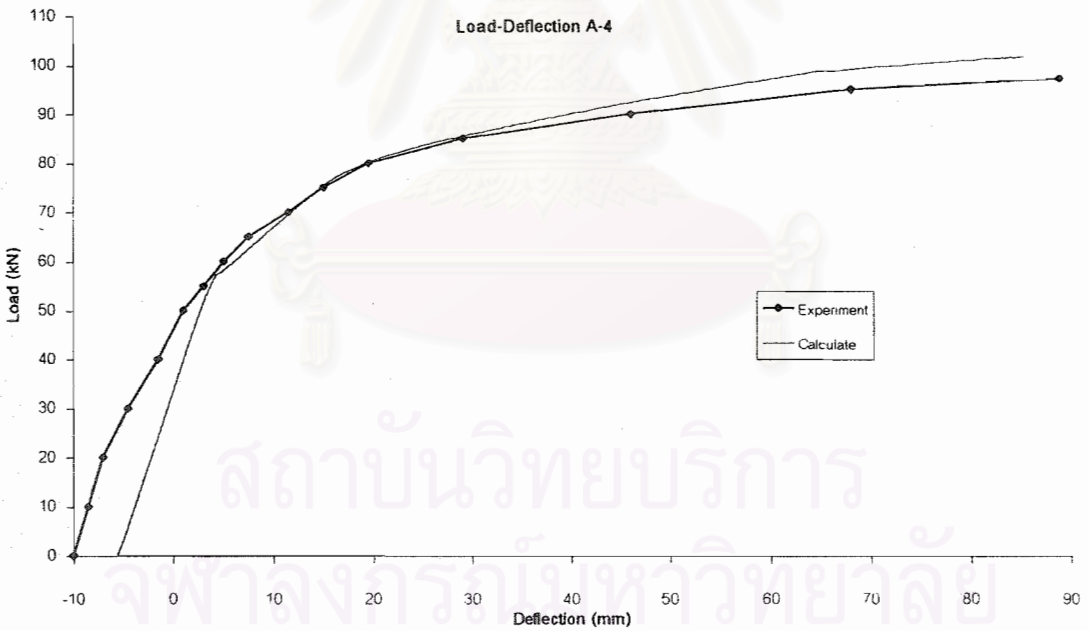
รูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของคาน A-1



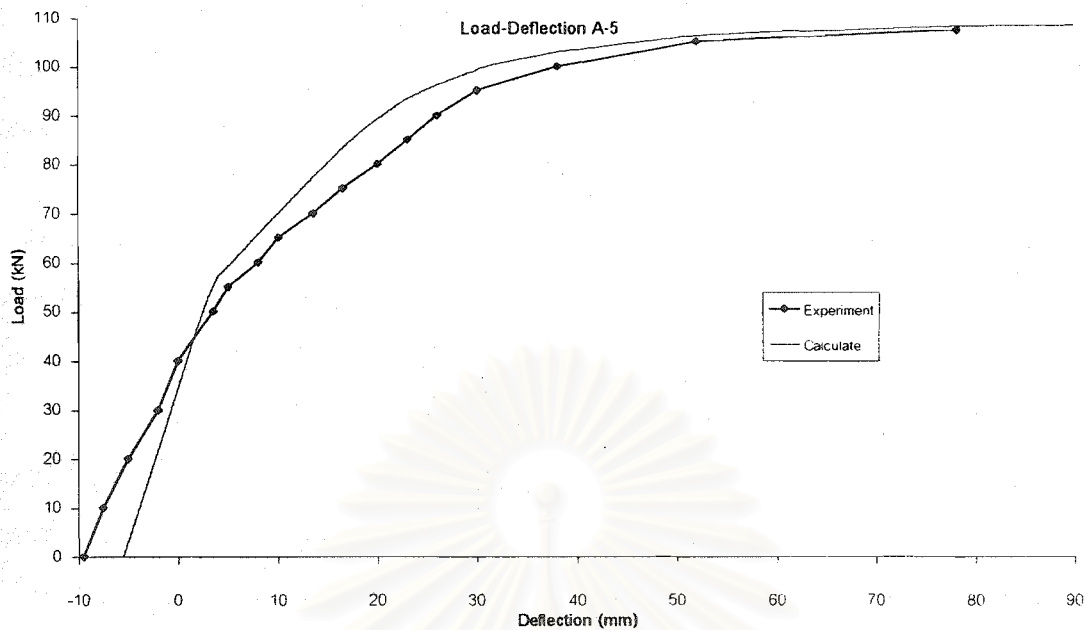
รูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของคาน A-2



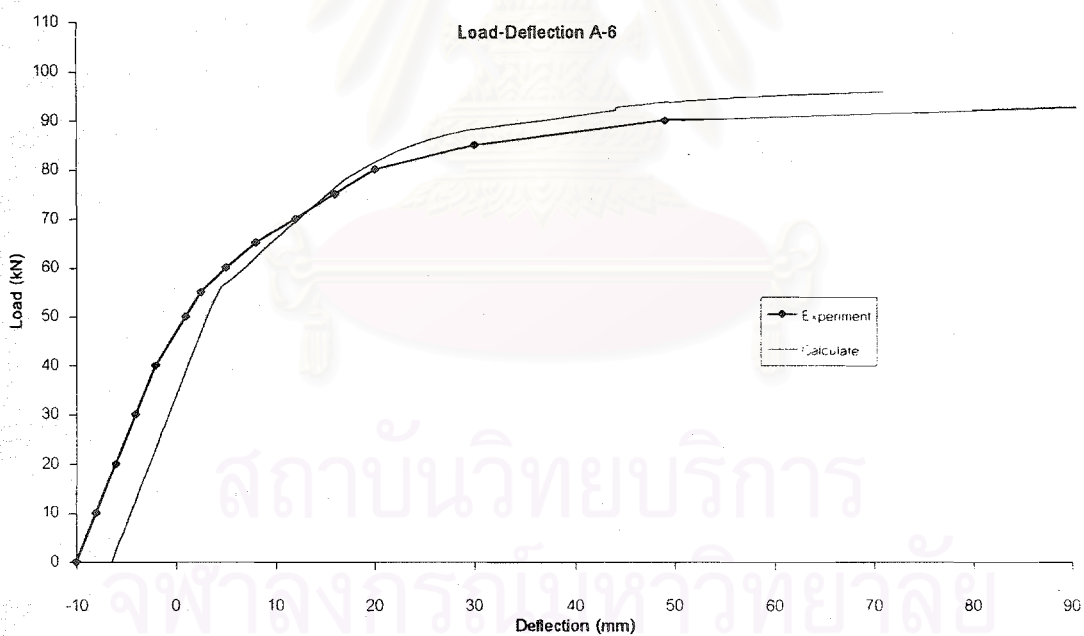
รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของคาน A-3



รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของคาน A-4



รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของคาน A-5



รูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของคาน A-6

รูปที่ 4.2 ถึงรูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษานี้ตั้งที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 กับผลทดสอบคาน A-1, A-2, A-3, A-4, A-5 และ A-6 ตามลำดับ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของน้ำหนักกระทำกับระยะแ่นตัวที่กึ่งกลางคาน

จากรูปดังกล่าวพบว่าผลการวิเคราะห์ให้ค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบ โดยคานที่ทุกตัวมีพฤติกรรมแบ่งออกเป็น 3 ช่วงคือ พฤติกรรมช่วงก่อนคอนกรีตร้าว พฤติกรรมช่วงหลังจากคอนกรีตร้าวแต่เหล็กเสริมยังไม่คราก และพฤติกรรมช่วงหลังจากเหล็กเสริมคราก พฤติกรรมแต่ละช่วงจะสังเกตได้จากค่าสติเฟนส์ที่เปลี่ยนไป (การเปลี่ยนความชันของเส้น)

พฤติกรรมของคานในช่วงก่อนคอนกรีตร้าว จะสังเกตได้ว่าสำหรับคานทุก ๆ ตัว ผลการวิเคราะห์ให้ค่าระยะที่คานโก่งตัวขึ้นเนื่องจากการอัดแรงน้อยกว่าผลทดสอบ โดยคาน A-4 มีความแตกต่างกันมากที่สุดคือประมาณ 4 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อเทียบกับความลึกของคานคือ 325 มิลลิเมตร หรือเทียบกับความยาวของคานคือ 5200 มิลลิเมตร นั่นถือว่ามีค่าความแตกต่างน้อยมาก อีกทั้งกำลังคอนกรีตที่ใช้คำนวณยังได้จากค่าเฉลี่ย และแรงที่ใช้ดึงลดอัดแรงยังเป็นค่าที่กำหนดให้ตั้ง ไม่ใช่ค่าที่วัดได้จริง ณ วันที่ทดสอบ โดยรวมแล้วความผิดพลาดประมาณ 4 มิลลิเมตรถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

เมื่อพิจารณาค่าสติเฟนส์ของคานในช่วงก่อนคอนกรีตร้าวพบว่า คาน A-1, A-2 และ A-6 ผลการวิเคราะห์ให้ค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบ แต่คาน A-3, A-4 และ A-5 ผลการวิเคราะห์ให้ค่าสติเฟนส์มากกว่าผลทดสอบ

พฤติกรรมของคานช่วงหลังจากคอนกรีตร้าวแต่เหล็กเสริมยังไม่คราก คานทุกตัวมีผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับผลทดสอบยกเว้นคาน A-5 ซึ่งเป็นคานคอนกรีตอัดแรงภายในแบบ bonded ที่ผลการวิเคราะห์มีค่าสติเฟนส์มากกว่าผลทดสอบ

พฤติกรรมของคานช่วงหลังจากเหล็กเสริมคราก คาน A-1, A-2 และ A-3 ซึ่งเป็นคานคอนกรีตอัดแรงภายนอก ผลการวิเคราะห์ของคานดังกล่าวได้ระยะแ่นสูงสุดน้อยกว่าผลทดสอบ คาน A-4 ซึ่งเป็นคานคอนกรีตอัดแรงภายในแบบ unbonded ผลการวิเคราะห์ได้ระยะแ่นสูงสุดใกล้เคียงกับผลทดสอบ คาน A-5 ซึ่งเป็นคานคอนกรีตอัดแรงภายในแบบ bonded ผลการวิเคราะห์ได้ระยะแ่นสูงสุดมากกว่าผลทดสอบ ส่วนคาน A-6 ซึ่งเป็นคานคอนกรีตอัดแรงภายในแบบ bonded ร่วมกับอัดแรงภายนอก ผลการวิเคราะห์ได้ระยะแ่นน้อยกว่าผลทดสอบ

จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบดังกล่าวพบว่า วิธีการวิเคราะห์สามารถอธิบายพฤติกรรมคานคอนกรีตที่ทดสอบโดย Songkiat M. ได้ โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะมีค่าสติเฟนส์มากกว่าคานจริง และคานที่ได้จากการวิเคราะห์จะมีระยะแ่นสูงสุดมากหรือน้อยกว่าความจริงขึ้นอยู่กับระบบอัดแรงของคานว่าเป็นแบบใด ซึ่งเป็นสิ่งที่พบเห็นโดยทั่วไปเมื่อมีการเปรียบเทียบระหว่างการวิเคราะห์กับผลทดสอบ (จากผลงานวิจัยอื่น ๆ ^[15,17,21])

เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของ Kiang-Hwee Tan

รายละเอียดคานที่ Kiang-Hwee Tan^[18] ทำการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.4 สำหรับตำแหน่งของดีไวเอเตอร์ (deviator) กรณี 1 ตัว จะวางที่ตำแหน่งกึ่งกลางคาน กรณี 2 ตัวจะวางที่ตำแหน่ง 1 ใน 3 ของความยาวคาน คาน T-0, T-1 และ T-2 ดึงลวดอัดแรงที่ $0.7f_{pu}$ คาน T-1A ดึงลวดอัดแรงที่ $0.2f_{pu}$ และคาน T-1B ดึงลวดอัดแรงที่ $0.4f_{pu}$ คอนกรีตมีกำลังอัด 30 MPa ที่ 28 วัน ส่วนในตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 แสดงคุณสมบัติของเหล็กเสริมและลวดอัดแรงที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 4.4 แสดงรายละเอียดคานที่ใช้ในการศึกษาของ Kiang-Hwee Tan

Beam	Dev	D_{eps} (cm)	f_{pe} (Mpa)	External Tendon
T-0	0	20	1,297	Straight, $\phi = 9.5$ mm
T-1	1	20	1,197	Straight, $\phi = 9.5$ mm
T-1A	1	25	327	Straight, $\phi = 9.5$ mm
T-1B	1	20	750	Straight, $\phi = 12.9$ mm
T-2	2	20	1,182	Straight, $\phi = 9.5$ mm

Reinforcement

Top:R8-4 ϕ 8 mm ($A_s=2.012\text{cm}^2$)

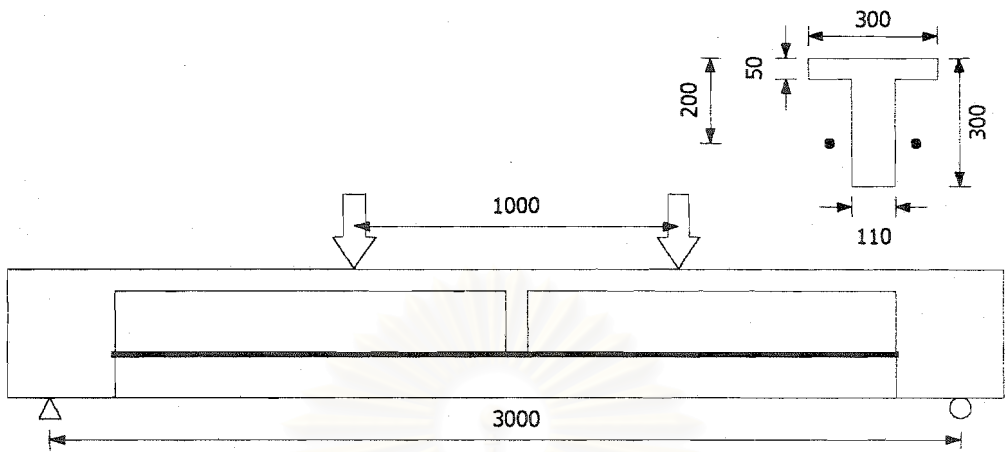
Bottom:T16-2 ϕ 16 mm ($A_s=4.022\text{cm}^2$)

ตารางที่ 4.5 แสดงคุณสมบัติของเหล็กเสริมที่ใช้ในการศึกษาของ Kiang-Hwee Tan

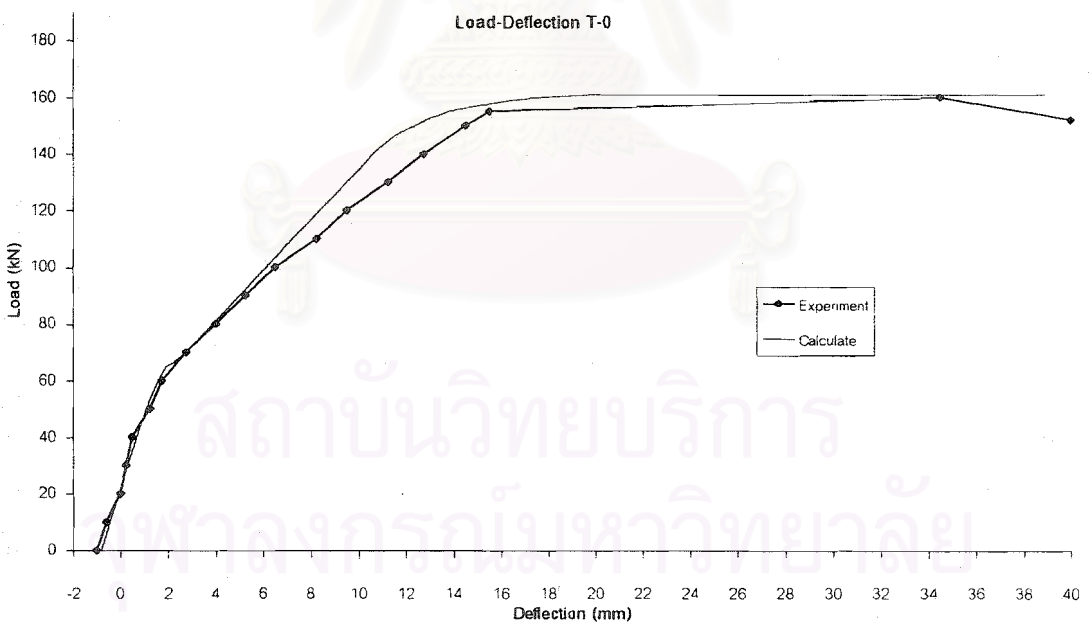
Type/Dia	Area (cm^2)	E_s (MPa)	Yield (MPa)
T16 / ϕ -16 mm	2.011	200,000	530
R8/ ϕ -8 mm	0.503	200,000	338

ตารางที่ 4.6 แสดงคุณสมบัติลวดอัดแรงที่ใช้ในการศึกษาของ Kiang-Hwee Tan

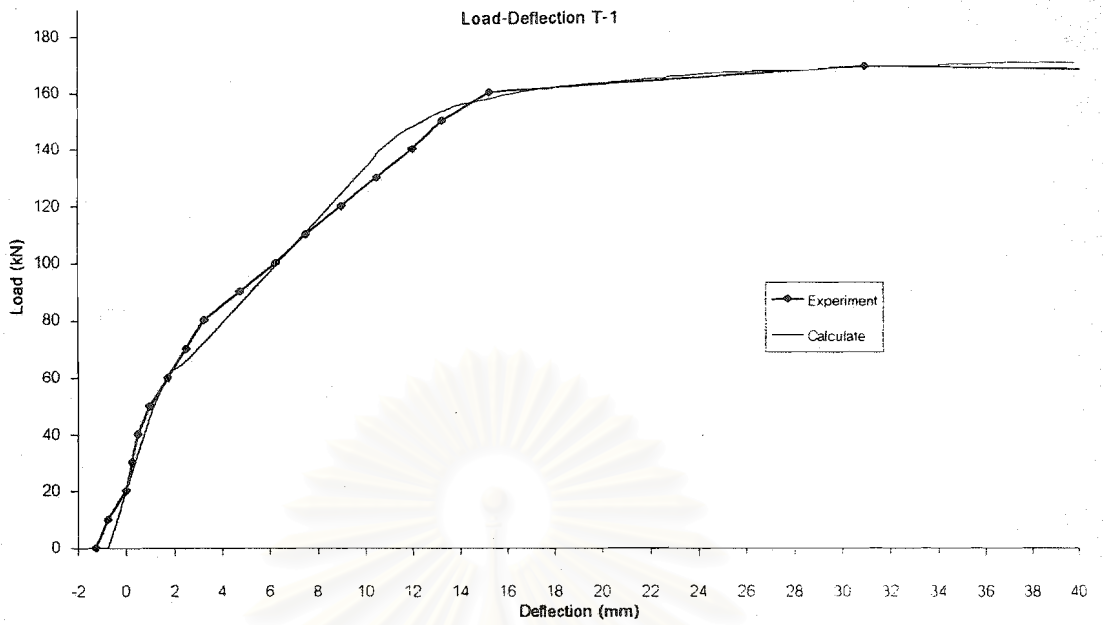
Type of Tendons	Area (cm^2)	E_{ps} (MPa)	f_{pu} (MPa)
ϕ 9.5 mm	0.516	193,000	1,900
ϕ 12.9 mm	0.987	199,000	1,900



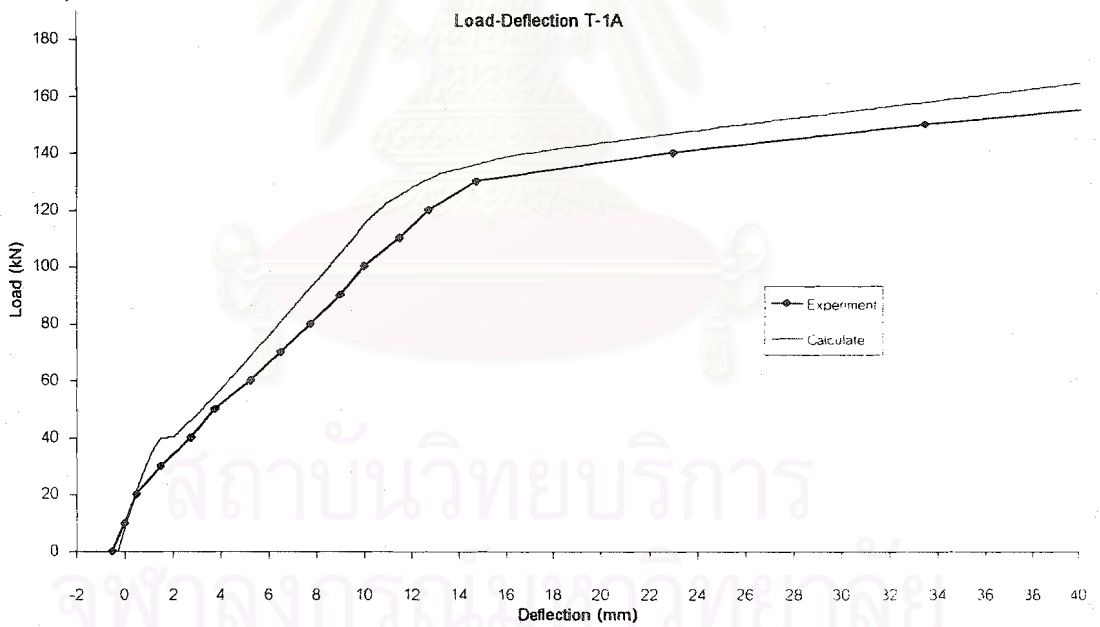
รูปที่ 4.8 แสดงคานและน้ำหนักกระทำที่ใช้ในการศึกษาของ Kiang-Hwee Tan



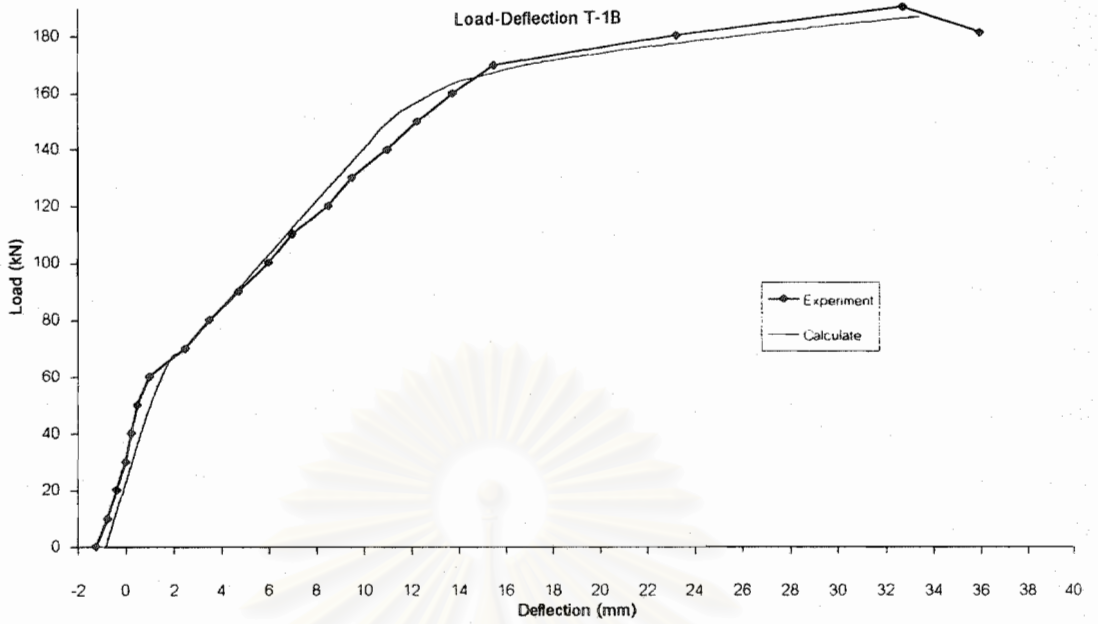
รูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของคาน T-0



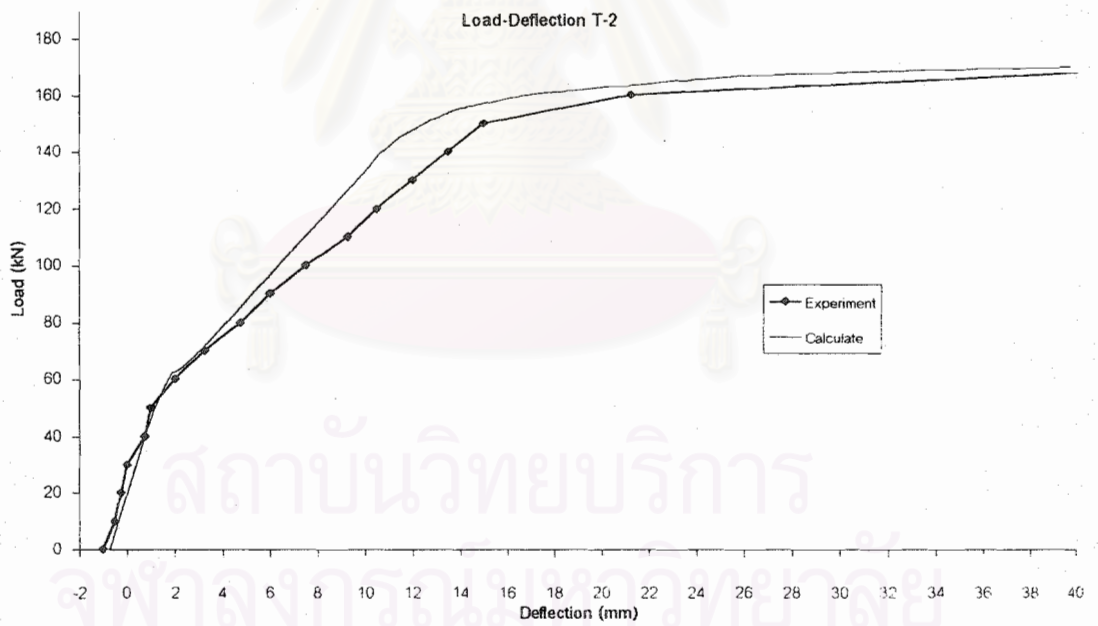
รูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของคาน T-1



รูปที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของคาน T-1A



รูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของคาน T-1B



รูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของคาน T-2

รูปที่ 4.9 ถึงรูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบคาน T-1, T-1A, T-1B และ T-2 ตามลำดับ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปน้ำหนักกระทำกับระยะแอนตัวที่กึ่งกลางคาน ผลการวิเคราะห์ให้ค่าสอดคล้องกับผลทดสอบเป็นอย่างดี

คานทวิเคราะห์ทุกตัวมีพฤติกรรมแบ่งออกเป็น 3 ช่วงคือ พฤติกรรมช่วงก่อนคอนกรีตร้าว พฤติกรรมช่วงหลังจากคอนกรีตร้าวแต่เหล็กเสริมยังไม่คราก และพฤติกรรมช่วงหลังจากเหล็กเสริมคราก พฤติกรรมแต่ละช่วงสังเกตได้จากค่าสติฟเนสที่เปลี่ยนไป (ความชันของเส้น)

พฤติกรรมของคานช่วงก่อนคอนกรีตร้าว จะสังเกตได้ว่าผลการวิเคราะห์คานทุกตัวให้ค่าระยะที่คานโก่งตัวขึ้นเนื่องจากการอัดแรงใกล้เคียงกับผลทดสอบ และผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบยังให้ค่าสติฟเนสสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

พฤติกรรมของคานช่วงหลังจากคอนกรีตร้าวแต่เหล็กเสริมยังไม่คราก คาน T-1 และ T-1B ผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนคาน T-0, T-1A และ T-2 ผลการวิเคราะห์ให้ค่าสติฟเนสสูงกว่าผลทดสอบ

พฤติกรรมของคานช่วงหลังจากเหล็กเสริมคราก ค่าสติฟเนสและระยะแอนตัวของคานทุกตัว ผลการวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบ

โดยรวมแล้ววิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ สามารถอธิบายพฤติกรรมคานคอนกรีตที่ทดสอบโดย Kiang-Hwee Tan ได้เป็นอย่างดี โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะมีค่าสติฟเนสมากกว่าคานจริงเล็กน้อย

เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของ Aravinthan

รายละเอียดคานที่ Aravinthan^[23] ทำการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.7 ในกรณีนี้ใช้ระยะเอียงศูนย์ของลวดอัดแรงแบบที่มีค่ามาก โดยใช้ระยะเอียงศูนย์ 62.5 เซนติเมตร ซึ่งเป็น 4 เท่าของความลึกคาน ดึงลวดอัดแรงที่ $0.20f_{pu}$ ณ วันที่ทดสอบมีแรงดึงในลวดอัดแรง 205.9 kN และคอนกรีตมีกำลังอัด 57.2 MPa

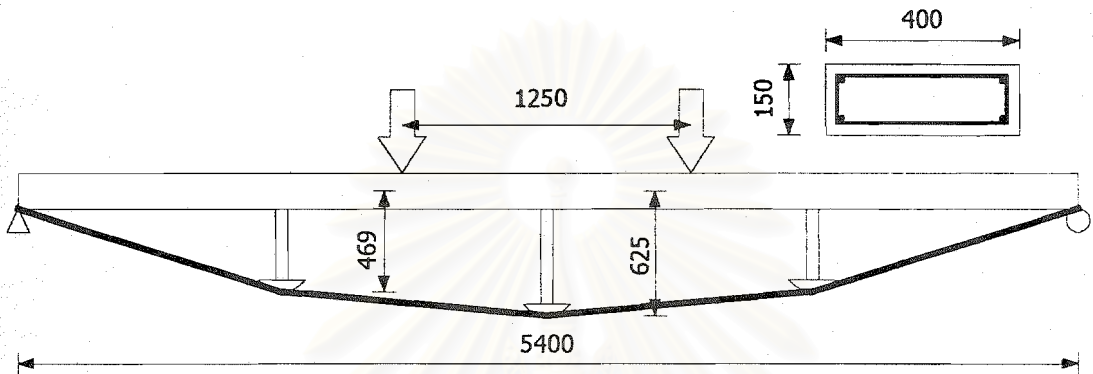
ตารางที่ 4.8 แสดงคุณสมบัติลวดอัดแรงที่ใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงรายละเอียดคานที่ใช้ในการศึกษาของ Aravinthan

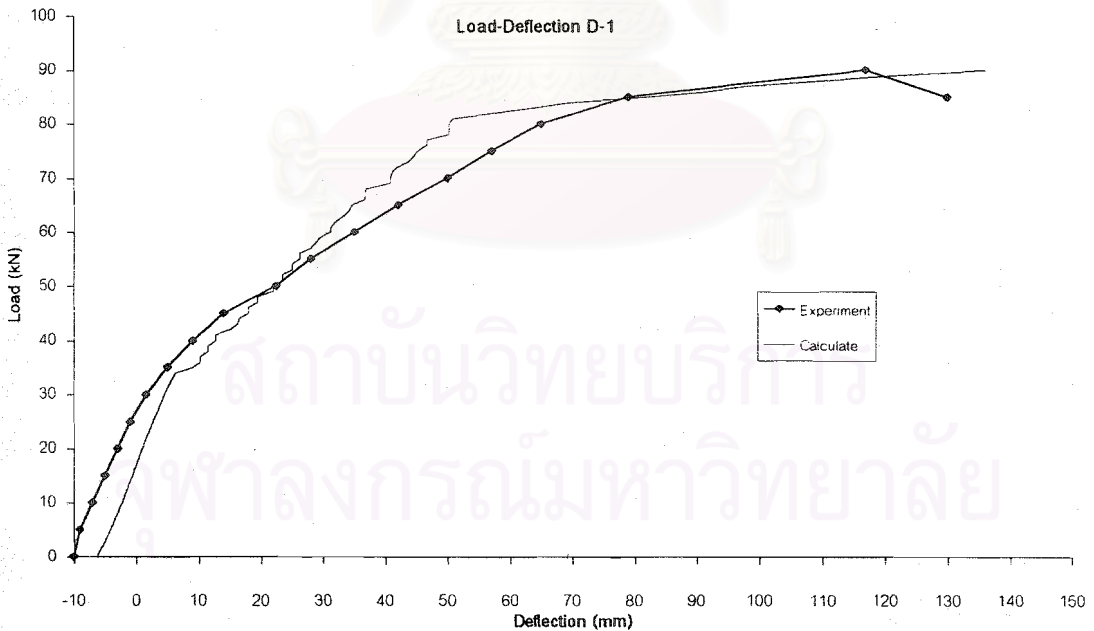
No.	Description of Specimens	e (cm)	Type of Tendons	
			External	Internal
D-1	Single Span Beam with Two Point Load	62.5	SWPR7B-4 ϕ 9.3	SWPR7A-1 ϕ 10.8

ตารางที่ 4.8 แสดงคุณสมบัติลวดอัดแรงที่ใช้ในการศึกษาของ Aravinthan

Type of Tendons	Area (cm ²)	Yield (MPa)	Ultimate (MPa)
SWPR7B ϕ 10.8 mm	0.6968	1,600	1,900
SWPR7A ϕ 9.3 mm	0.5161	1,500	1,750



รูปที่ 4.14 แสดงคานและน้ำหนักกระทำที่ใช้ในการศึกษาของ Aravinthan



รูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของคาน D-1

รูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบของคาน D-1 ซึ่งแสดงอยู่ในรูปน้ำหนักกระทำกับระยะแอนตัวที่กึ่งกลางคาน ผลการวิเคราะห์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบ โดยคานมีพฤติกรรมแบ่งออกเป็น 3 ช่วงคือ พฤติกรรมช่วงก่อนคอนกรีตร้าว พฤติกรรมช่วงหลังจากคอนกรีตร้าวแต่เหล็กเสริมยังไม่คราก และพฤติกรรมช่วงหลังจากเหล็กเสริมคราก พฤติกรรมแต่ละช่วงสังเกตได้จากค่าสติฟเนสที่เปลี่ยนไป (ความชันของเส้น)

พฤติกรรมของคานช่วงก่อนคอนกรีตร้าว จะสังเกตได้ว่าผลการวิเคราะห์ให้ค่าระยะที่คานโก่งตัวขึ้นเนื่องจากการอัดแรงน้อยกว่าผลทดสอบ โดยมีค่าต่างกันประมาณ 4 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อเทียบกับความยาวคาน 5400 มิลลิเมตร ถือว่าน้อยมาก แต่ผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบยังให้ค่าสติฟเนสใกล้เคียงกัน

พฤติกรรมของคานช่วงหลังจากคอนกรีตร้าวแต่เหล็กเสริมยังไม่คราก ผลการวิเคราะห์ให้ค่าสติฟเนสสูงกว่าผลทดสอบ เนื่องจากคานในกรณีนี้มีความลึกลงน้อยมากดังนั้นจึงเกิดปัญหาในการหาสมมูลของโมเมนต์ที่จะไม่ลู่เข้าสู่คำตอบ เพื่อแก้ปัญหานี้จึงเพิ่ม tolerance of moment จาก 1 เปอร์เซ็นต์ขึ้นเป็น 2 เปอร์เซ็นต์ ผลการวิเคราะห์ที่ได้เส้นจึงไม่ราบเรียบเหมือนในกรณีคานอื่น ๆ

พฤติกรรมของคานช่วงหลังจากเหล็กเสริมคราก ค่าสติฟเนสและระยะแอนตัวของคาน ผลการวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบ

โดยรวมแล้ววิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ สามารถอธิบายพฤติกรรมคานคอนกรีตที่ทดสอบโดย Aravinthan ได้ โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะมีค่าสติฟเนสมากกว่าคานจริงเล็กน้อย

สรุป

จากการเปรียบเทียบการวิเคราะห์กับผลทดสอบสามารถสรุปได้ว่า วิธีการวิเคราะห์สามารถทำนายพฤติกรรมคานคอนกรีตอัดแรงภายนอกได้เป็นอย่างดี การวิเคราะห์ให้น้ำหนักกับการแอนตัวเมื่อคอนกรีตร้าว เมื่อลวดอัดแรงครากและเมื่อเหล็กเสริมครากใกล้เคียงกับผลทดสอบ

การวิเคราะห์จะให้ค่าสติฟเนสของคานสูงกว่าผลทดสอบเล็กน้อย เนื่องจากการวิเคราะห์แบ่งคานออกเป็นหน้าตัดย่อย ๆ เพื่อหาสมมูลและนำไปคำนวณหาระยะแอนตัว ไม่ได้คำนวณเป็นฟังก์ชันต่อเนื่อง ผลของการแบ่งหน้าตัดคานออกเป็นส่วนย่อย ๆ ทำให้ค่าที่ได้มีสติฟเนสสูงกว่าความเป็นจริง

เมื่อพิจารณาระยะแอนตัวสูงสุด ในกรณีคานคอนกรีตอัดแรงภายนอกผลการวิเคราะห์จะได้ค่าน้อยกว่าผลทดสอบ แต่กรณีคานคอนกรีตอัดแรงภายในแบบ bonded ผลการวิเคราะห์จะได้ค่ามากกว่าผลทดสอบ ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ผลทดสอบที่นำมาเปรียบเทียบ มีการทดสอบเพื่อหาค่า f_c' ของคอนกรีตเพียงค่าเดียว แต่ในการวิเคราะห์ต้องใช้ค่า f_r , ϵ_{co} , ϵ_{cu} , ϵ_{po} , และ ϵ_{pu} ถ้าไม่มีการทดสอบหาค่าเหล่านี้ สามารถคำนวณได้จากค่า f_c' แต่อย่างไรก็ตามถ้าหากทราบค่าดังกล่าวจากการทดสอบก็จะทำให้ผลการวิเคราะห์มีค่าถูกต้องยิ่งขึ้น

การวิเคราะห์คานคอนกรีตอัดแรงภายนอก ด้วยวิธี moment-curvature โดยเพิ่มส่วนที่คำนวณหาแรงดึงและระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอก สามารถทำนายพฤติกรรมของคานคอนกรีตอัดแรงภายนอกได้เป็นอย่างดี ซึ่งจะนำวิธีการวิเคราะห์นี้ไปใช้ในการศึกษาส่วนต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คาน

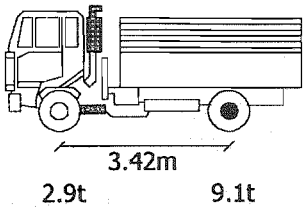
การเสริมกำลังโมเมนต์ดัดด้วยวิธีอัดแรงภายนอก ปกติใช้สำหรับการเสริมกำลังโครงสร้างสะพานเป็นหลัก ดังนั้นคานในการศึกษานี้จะอยู่ในรูปแบบของสะพาน ซึ่งจะทำการศึกษาสะพานตามแบบมาตรฐานสะพานในเขตชุมชนในภูมิภาค^[1] ของสำนักวิศวกรรมทางหลวงชนบท กรมโยธาธิการ กระทรวงมหาดไทย ซึ่งสะพานที่นำมาศึกษาได้แก่ แผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร แผ่นพื้น PC PLANK GIRDER ความยาวช่วง 5 เมตร คาน PC BOX GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร คาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 และ 30 เมตร

การวิเคราะห์จะแยกวิเคราะห์ต่อคาน 1 ตัว รวมไปถึงส่วนของคอนกรีตทับหน้าซึ่งทำให้น้ำหนักดัดเป็นคอมโพสิต ยกเว้นในกรณีของแผ่นพื้น RC SLAB จะวิเคราะห์ต่อความกว้าง 1 เมตร

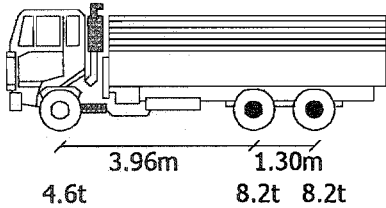
ในขั้นแรกจะศึกษาพฤติกรรมของสะพานทั้ง 4 ประเภทที่เลือกมา ทั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบความเหมือนและความแตกต่างของพฤติกรรมการรับน้ำหนัก หลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีอัดแรงภายนอก จากนั้นจึงนำมาเลือกและจำกัดขอบเขตของการศึกษาให้แคบลงต่อไป

รูปแบบของน้ำหนักระทำ

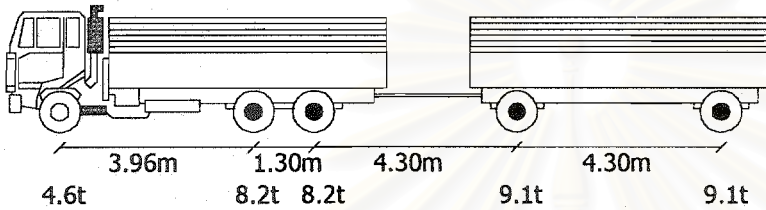
รูปแบบของน้ำหนักระทำมีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักของคานคอนกรีตอัดแรงภายนอก โดยจะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงในลวดอัดแรงภายนอก จากการศึกษาของ Naaman^[8,11,12] และ Songkiat M.^[20] พบว่ารูปแบบน้ำหนักระทำที่มีการกระจายตัวออกไปยังจุดรองรับของคาน จะทำให้แรงดึงในลวดอัดแรงภายนอกที่หน้าตัดวิกฤติถ่ายแรงไปยังหน้าตัดอื่น ๆ น้อย อันเป็นผลให้คานสามารถรับน้ำหนักได้มาก แต่หากน้ำหนักรวมตัวกันอยู่ที่กึ่งกลางคาน จะทำให้แรงดึงในลวดอัดแรงภายนอกที่หน้าตัดวิกฤติถ่ายแรงไปยังหน้าตัดอื่น ๆ มาก อันเป็นผลให้คานสามารถรับน้ำหนักได้น้อย ดังนั้นเพื่อให้ผลการศึกษามีความใกล้เคียงกับความเป็นจริง จึงสมควรใช้รูปแบบน้ำหนักระทำที่จะเกิดขึ้นจริงกับคานนั้น ๆ



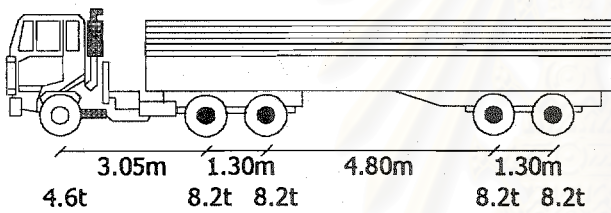
รถบรรทุก 6 ล้อ



รถบรรทุก 10 ล้อ



รถบรรทุก 18 ล้อ พ่วง

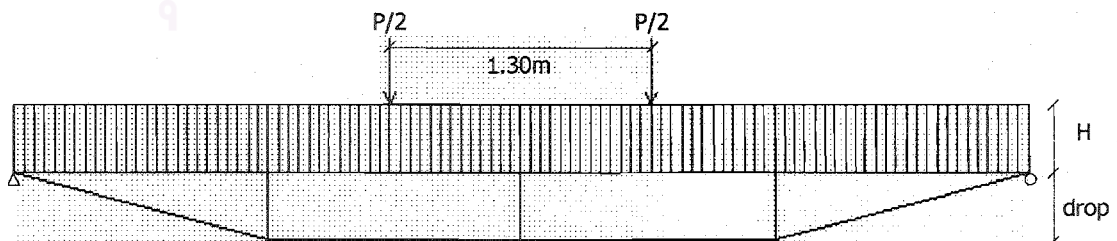


รถบรรทุก 18 ล้อ กึ่งพ่วง

รูปที่ 5.1 แสดงรถบรรทุกชนิดต่าง ๆ

เนื่องจากการศึกษาเลือกศึกษาเสริมกำลังสะพาน ดังนั้นรูปแบบน้ำหนักกระทำจึงเป็นรูปแบบของน้ำหนักล้อรถบรรทุก ซึ่งพอแบ่งอย่างคร่าว ๆ ได้ 4 ประเภทด้วยกันคือ รถบรรทุก 6 ล้อ รถบรรทุก 10 ล้อ รถบรรทุก 18 ล้อพ่วง และรถบรรทุก 18 ล้อกึ่งพ่วง ดังแสดงในรูปที่ 5.1 โดยสะพานที่นำมาศึกษามีความยาวช่วงคือ คือ 5, 20 และ 30 เมตร

พบว่าที่ความยาวช่วง 5 เมตร รูปแบบน้ำหนักกระทำที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดคือให้ล้อคู่ที่ห่างกัน 1.30 เมตร (ล้อที่ 2 และล้อที่ 3 ของรถบรรทุก 10 ล้อ รถบรรทุก 18 ล้อพ่วง และรถบรรทุก 18 ล้อกึ่งพ่วง) วางอยู่ที่กึ่งกลางสะพานดังแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แสดงรูปแบบน้ำหนักสำหรับสะพานความยาวช่วง 5 เมตร

ที่ความยาวช่วง 20 และ 30 เมตร รูปแบบน้ำหนักที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดคือ รูปแบบน้ำหนักของรถบรรทุก 18 ล้อกึ่งพ่วง โดยที่ล้อที่ 3 อยู่ที่กึ่งกลางสะพาน แต่เนื่องจากความไม่สมมาตรของน้ำหนัก ทำให้เสียเวลาในการคำนวณมากกว่าแบบที่น้ำหนักสมมาตร 1 เท้าตัว อีกทั้งยังเป็นสะพานช่วงยาวที่ต้องใช้เวลาในการคำนวณมากอยู่แล้ว จึงทำการปรับเปลี่ยนรูปแบบของน้ำหนักกระทำดังตารางที่ 5.1

แบบที่ 1 คือ แบบที่ให้ค่าน้ำหนักสูงสุดตามความเป็นจริง ของรถบรรทุก 18 ล้อกึ่งพ่วง

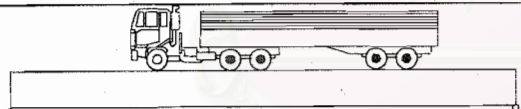
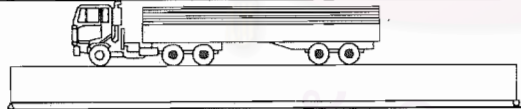


แบบที่ 2 เลื่อนให้ล้อที่ 3 และล้อที่ 4 ของรถบรรทุก 18 ล้อกึ่งพ่วงห่างจากตรงกลางสะพานเท่า ๆ กัน

แบบที่ 3 เหมือนกับแบบที่ 2 แต่ตัดล้อที่ 1 ออก

แบบที่ 4 คล้ายกับแบบที่ 3 คือตัดล้อที่ 1 ออก รวมล้อที่ 2 กับล้อที่ 3 และล้อที่ 4 กับล้อที่ 5 ให้เป็นล้อเดียว

โดยการปรับเปลี่ยนทุกแบบจะรักษาอัตราส่วนน้ำหนักของแต่ละล้อตามน้ำหนักจริงของรถเดิม

ตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการวางน้ำหนักแบบต่าง ๆ

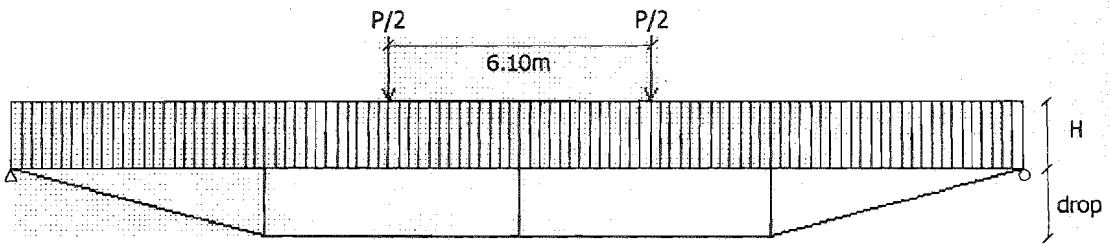
แบบที่	ภาพแสดงการวางน้ำหนัก	Span 20 m		Span 30 m	
		Ultimate Load (t)	%	Ultimate Load (t)	%
1.		267.14	100.00	308.40	100.00
2.		277.93	104.04	312.29	101.26
3.		262.43	98.23	305.17	98.95
4.		262.76	98.36	305.15	98.94

หมายเหตุ : ใช้สะพาน PC IGIRDER ความยาวช่วง 20 และ 30 เมตร $f_{pe} = 0.5f_{pu}$ มี 3 deviator

ใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางที่ 1.0H ดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่บทที่ 6 การศึกษาส่วนที่ 1

จากการวิเคราะห์ในตารางที่ 5.1 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงรูปแบบน้ำหนักทั้ง 4 แบบนั้นให้ผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากล้อหน้ามีน้ำหนักเพียง 12 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักรถจึงสามารถตัดออกได้ และระยะห่างระหว่างล้อคู่ที่ห่างกัน 1.30 เมตร เมื่อเทียบกับ

ความยาวช่วง 20 เมตร นั้นถือว่าน้อยมากสามารถรวมเป็นล้อเดียวได้ ซึ่งพบว่ารูปแบบน้ำหนักระทำแบบที่ 4 ให้ผลใกล้เคียงกับรูปแบบน้ำหนักระทำจริง



รูปที่ 5.3 แสดงรูปแบบน้ำหนักสำหรับสะพานความยาวช่วง 20 และ 30 เมตร

ดังนั้นในการศึกษาสะพานความยาวช่วง 5 เมตร จะใช้รูปแบบของน้ำหนักกระทำตามที่แสดงในรูปที่ 5.2 ส่วนสะพานที่มีความยาวช่วง 20 และ 30 เมตร จะใช้รูปแบบน้ำหนักตามแบบที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 5.3

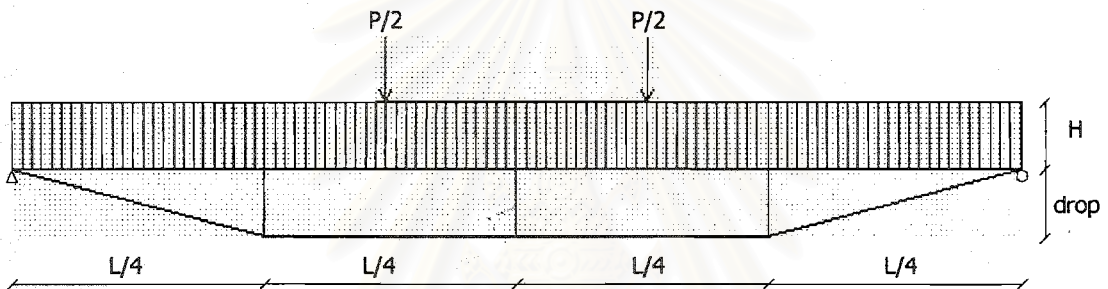
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

พื้นที่หน้าตัด ระยะเยื้องศูนย์กลาง และหน่วยแรงดิ่งที่ใช้ดิ่งลวดอัดแรงภายนอก

บทนี้กล่าวถึง การศึกษาผลของพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรง ระยะเยื้องศูนย์กลาง และหน่วยแรงดิ่งที่ใช้ดิ่งลวดอัดแรง สำหรับการเสริมกำลังคานคอนกรีตด้วยวิธีอัดแรงภายนอก

การศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ ส่วนที่ 1 ศึกษาผลของพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกต่อพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดเมื่อเสริมกำลังคานโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางต่าง ๆ กัน ส่วนที่ 2 ศึกษาผลของหน่วยแรงดิ่งที่ใช้ในการดิ่งลวดอัดแรงภายนอกต่อพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดเมื่อเสริมกำลังคานโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางต่าง ๆ กัน และในกรณีที่การศึกษาส่วนที่ 1 และ 2 ไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมได้ชัดเจน ก็จะทำการศึกษาเพิ่มเติมในการศึกษาส่วนที่ 3



รูปที่ 6.1 แสดงแนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกที่ใช้วิเคราะห์

การศึกษาในบทนี้ใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูดังแสดงในรูปที่ 6.1 เนื่องจากเป็นรูปแบบที่ใช้เสริมกำลังแล้วได้กำลังรับโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้นมากกว่ารูปแบบอื่น ๆ การที่ได้กำลังรับโมเมนต์ดัดมาก ๆ น่าที่จะสามารถเปรียบเทียบผลของตัวแปรต่าง ๆ ได้ดีกว่าการที่เสริมกำลังแล้วได้กำลังรับโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

เพื่อให้ได้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู จะต้องใช้ดีวีเอเตอร์ (deviator) อย่างน้อย 2 ตัว แต่การศึกษาในบทนี้ใช้ดีวีเอเตอร์จำนวน 3 ตัวเนื่องจากในกรณีที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย ท้องคานจะแอ่นตัวมาชนกับลวดอัดแรงภายนอก ซึ่งปัญหานี้ต้องใช้การวิเคราะห์แบบที่มีการสัมผัส (touch problem) ซึ่งการศึกษานี้ไม่ได้ศึกษาในส่วนดังกล่าวจึงใช้ดีวีเอเตอร์จำนวน 3 ตัวเพื่อไม่ให้เกิดปัญหา

การศึกษาพฤติกรรมการเสริมกำลังคานคอนกรีตด้วยวิธีอัดแรงภายนอก มีตัวแปรหลายตัวด้วยกัน ซึ่งการกำหนดค่าตัวแปรตัวหนึ่งจะมีผลต่อการกำหนดค่าของตัวแปรอีกตัวหนึ่งเสมอ ทำให้ไม่อาจศึกษาโดยวิธีเปลี่ยนค่าตัวแปรเพียงตัวเดียวและให้ตัวแปรที่เหลือคงที่ได้ ด้วยเหตุผล

ดังที่ได้กล่าวมา จึงเลือกใช้วิธีการกำหนดให้ตัวแปรหนึ่งคงที่แล้วให้ตัวแปรที่เหลือเปลี่ยนค่าเพื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบแทน

ตัวแปรที่กำหนดให้มีค่าคงที่

ในการเสริมกำลัง หากต้องการเสริมกำลังเพียงแค่นี้ให้มีกำลังรับโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยสามารถทำได้หลายรูปแบบและมีข้อจำกัดต่าง ๆ น้อย แต่หากต้องการเสริมกำลังให้สามารถรับโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้นมากที่สุดย่อมมีข้อจำกัดหลายประการ หนึ่งในข้อจำกัดนั้นคือค่าโมเมนต์ดัดที่ใช้ในการเสริมกำลัง หากใช้โมเมนต์ดัดเสริมกำลังมากเกินไปคอนกรีตผิวบนของคานจะเกิดรอยร้าว (crack) เนื่องจากโมเมนต์ดัดที่ใช้เสริมกำลังเป็นโมเมนต์ลบเพื่อไปหักล้างกับโมเมนต์ดัดซึ่งเกิดจากน้ำหนักกระทำตายตัว หากโมเมนต์ดัดที่เสริมกำลังเข้าไปมีค่ามากกว่าโมเมนต์ดัดจากน้ำหนักกระทำตายตัว คอนกรีตที่ผิวบนของคานจะเกิดหน่วยแรงดึงขึ้น และหากหน่วยแรงดึงมีค่ามากกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต คอนกรีตที่ผิวบนก็จะร้าว รอยร้าวเป็นสาเหตุทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมเพราะความชื้นสามารถผ่านเข้ามาสัมผัสกับเหล็กเสริมได้

ดังนั้นในบทนี้จะศึกษาพฤติกรรมการเสริมกำลัง โดยให้ค่าโมเมนต์ดัดจากการเสริมกำลังเป็นค่าคงที่ คานแต่ตัวจะมีค่าโมเมนต์ดัดสำหรับเสริมกำลังหนึ่งค่า ซึ่งเป็นค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ทำให้ เมื่อเปลี่ยนค่าตัวแปรอื่น ๆ แล้ว จะไม่เกิดรอยร้าวที่คอนกรีตผิวบนของคานตัวนั้น

การศึกษาในส่วนของ 1 และส่วนของ 2 ใช้ค่าคงที่ต่างกันคือ ส่วนที่ 1 ให้โมเมนต์ดัด ณ ขณะที่ย้ายแรงเข้าไปเป็นค่าคงที่ ดังแสดงในสมการที่ 6.1 และส่วนของ 2 ให้โมเมนต์ดัด ณ จุดประลัย (ultimate) มีค่าคงที่ ดังแสดงในสมการที่ 6.2

$$M_2 = P_e \times e = A_{eps} \times f_{pe} \times e = \text{ค่าคงที่} \quad \text{สมการที่ 6.1}$$

$$M_{2_{uit}} = P_{pu} \times e = A_{eps} \times f_{pu} \times e = \text{ค่าคงที่} \quad \text{สมการที่ 6.2}$$

โดยที่

A_{eps} คือพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอก

e คือระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอก

P_e, P_{pu} คือแรงดึงประสิทธิผลและแรงดึงประลัยของลวดอัดแรง

f_{pe}, f_{pu} คือหน่วยแรงดึงประสิทธิผลและหน่วยแรงดึงประลัย

ตัวแปรที่ทำการศึกษา

ระยะเยื้องศูนย์กลาง

เนื่องจากคานสะพานที่ทำการศึกษามีความลึก (H) และความยาวช่วงไม่เท่ากัน การเปรียบเทียบการเสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางต่าง ๆ กันด้วยตัวเลขคงที่จะไม่เหมาะสม จึงทำการเปรียบเทียบการเสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางเป็นอัตราส่วนกับความลึกของคาน โดยจะให้ลวดอัดแรงภายนอกอยู่ต่ำกว่าระดับท้องคาน (drop) เป็นระยะ 0.2H, 0.5H, 1.0H, 1.5H และ 2.0H ระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกที่ใช้ในบางกรณีเช่น 2.0H อาจไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานจริง แต่ทั้งนี้เพื่อทำการเปรียบเทียบให้เห็นภาพของพฤติกรรมที่แตกต่างกันชัดเจนยิ่งขึ้น วิธีวัดระยะ drop แสดงในรูปที่ 6.1

เมื่อค่าระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอก (e) มีค่าต่าง ๆ กัน ค่าแรงดึงที่ใช้ดึงลวดอัดแรง (P) จึงต้องมีค่าต่าง ๆ กันตามไปด้วย เพื่อให้ค่าโมเมนต์ดัดในการเสริมกำลังเป็นค่าคงที่ตามสมการที่ 6.1 และสมการที่ 6.2

พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอก และหน่วยแรงดึงที่ใช้ในการดึงลวดอัดแรง

การศึกษาส่วนที่ 1 ศึกษาพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกที่ใช้ในการเสริมกำลัง 3 ระดับด้วยกันคือ พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงที่ทำให้มีหน่วยแรงดึงในลวดอัดแรง (f_{pe}) เท่ากับ 0.7 เท่าของหน่วยแรงดึงประลัย (พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงน้อย), 0.5 เท่าของหน่วยแรงดึงประลัย (พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงปานกลาง) และ 0.3 เท่าของหน่วยแรงดึงประลัย (พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงมาก) โดยใช้แรงดึงลวดอัดแรงคงที่ ทั้งนี้เพื่อให้ค่าโมเมนต์ดัดที่ใช้เสริมกำลัง (M_2) มีค่าคงที่ หรืออีกนัยหนึ่งคือที่ระยะเยื้องศูนย์กลางเดียวกันจะเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงแต่ใช้แรงดึงลวดอัดแรงเท่าเดิม

การศึกษาส่วนที่ 2 ศึกษาหน่วยแรงดึงที่ใช้ในการดึงลวดอัดแรงภายนอก 3 ระดับด้วยกันคือ 0.7 เท่าของหน่วยแรงดึงประลัย (หน่วยแรงดึงมาก), 0.5 เท่าของหน่วยแรงดึงประลัย (หน่วยแรงดึงปานกลาง) และ 0.3 เท่าของหน่วยแรงดึงประลัย (หน่วยแรงดึงน้อย) โดยให้พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงมีค่าคงที่ ทั้งนี้เพื่อให้ค่าโมเมนต์ดัดประลัยที่ใช้เสริมกำลัง (M_{2u}) มีค่าคงที่ หรืออีกนัยหนึ่งคือที่ระยะเยื้องศูนย์กลางเดียวกันจะเปลี่ยนปริมาณแรงดึงที่ใช้ดึงลวดอัดแรงแต่ใช้พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงเท่าเดิม

การศึกษาส่วนที่ 1

ศึกษาผลของพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกต่อพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัด ที่ใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางในการเสริมกำลังต่าง ๆ กัน การศึกษาทำโดยเสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร แผ่นพื้น PC PLANK ความยาวช่วง 5 เมตร คาน PC BOX GIRDER ความยาวช่วง

20 เมตร คาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 และ 30 เมตร คานแต่ละแบบเสริมกำลังโดยใช้พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรง 3 ค่า ในพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงแต่ละค่าใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงที่ต่างกัน 5 ระดับ ซึ่งตัวแปรใดจะมีค่าคงที่หรือมีค่าเปลี่ยนแปลงสรุปไว้ในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 แสดงการเปลี่ยนค่าตัวแปรในการศึกษาส่วนที่ 1

Variable	ที่พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรง 1 ค่า (เปลี่ยนระยะเยื้องศูนย์กลาง)	ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 1 ค่า (เปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรง)
M2	คงที่	คงที่
P_e	เปลี่ยน	คงที่
f_{pe}	คงที่	เปลี่ยน
A_{eps}	เปลี่ยน	เปลี่ยน

ตารางที่ 6.2 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการเสริมกำลัง โดยที่ค่า $M1_{ult}$ คือค่าโมเมนต์ดัดประลัยของคานก่อนการเสริมกำลัง ส่วนค่า M2 เป็นค่าโมเมนต์ดัดที่เสริมกำลังเข้าไป ค่าความลึกของคานได้รวมความหนาของคอนกรีตทับหน้าไว้ด้วย

จากตารางที่ 6.2 จะเห็นได้ว่า คานที่สามารถเสริมกำลังเข้าไปได้มากที่สุดคือ RC SLAB สามารถเสริมโมเมนต์ดัดเข้าไปได้ถึง 45.41 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากหน่วยแรงในผิวบนของคอนกรีตเดิมเป็นแรงอัดอยู่ก่อน แต่ในกรณีของคานชนิดอื่นที่มีการเทคอนกรีตทับหน้า หน่วยแรงในคอนกรีตทับหน้าไม่มีเพราะค่าน้ำหนักกระทำตายตัว (dead load) ตัวคานเป็นผู้รับน้ำหนักส่วนนี้ไป ตารางที่ 6.3 ถึงตารางที่ 6.7 แสดงค่าแรงดึงในลวดอัดแรง พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอก และระดับความลึกของลวดอัดแรงที่ใช้ในการเสริมกำลัง

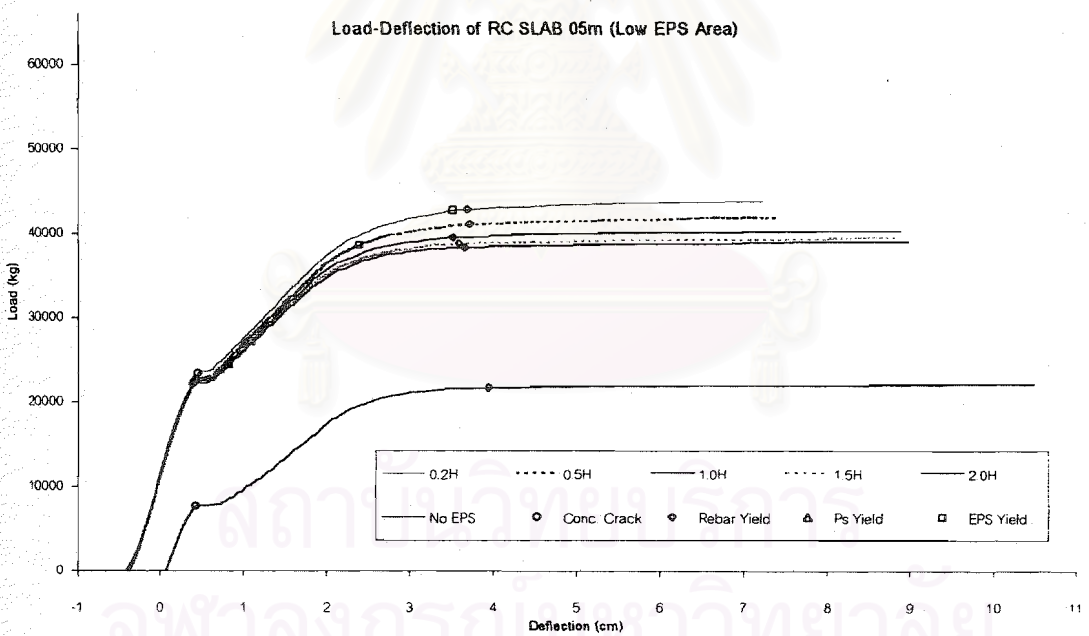
ตารางที่ 6.2 แสดงค่าโมเมนต์ดัดที่ใช้ในการเสริมกำลังของคานในการศึกษาส่วนที่ 1

ข้อมูลคาน			ข้อมูลเสริมกำลัง		
Type	Span (m)	Depth (cm)	$M1_{ult}$ (kg-cm)	M2 (max)	$(M2/M1_{ult}) * 100$
RC SLAB	5.00	32	2,275,000	1,033,000	45.41
PC PLANK	5.00	26	2,901,939	516,000	17.78
PC BOXGIRDER	20.00	80	23,626,400	7,409,000	31.36
PC I GIRDER	20.00	144	72,002,000	19,460,000	27.03
	30.00	194	133,907,200	37,071,000	27.68

การเสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร

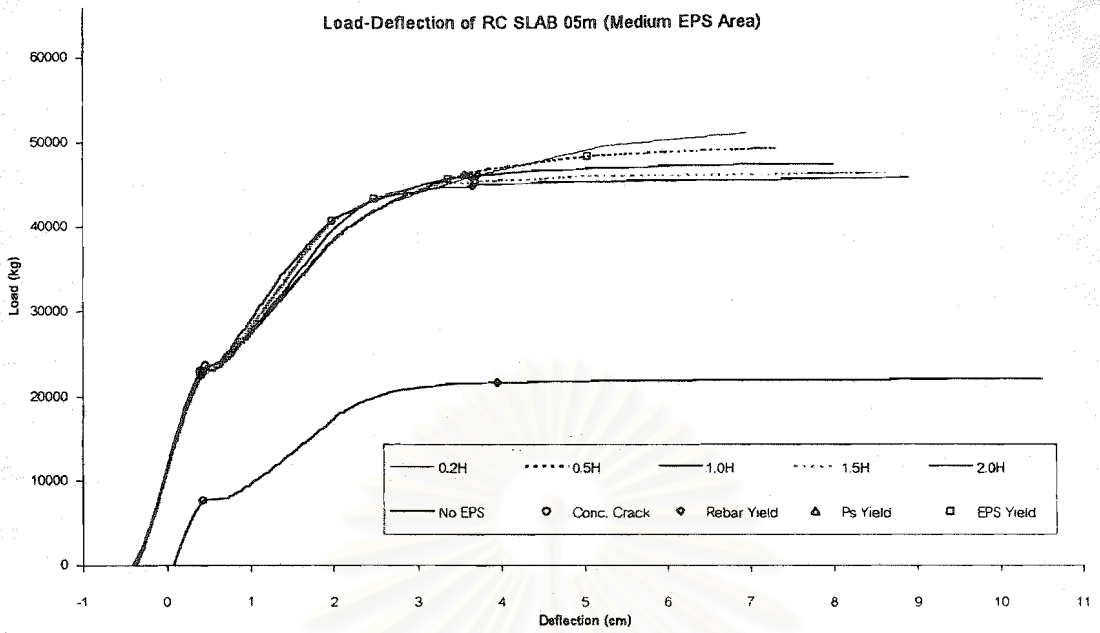
ตารางที่ 6.3 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้เสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร

Variable	0.2H	0.5H	1.0H	1.5H	2.0H
drop (cm)	6.4	16.0	32.0	48.0	64.0
P_o (kg)	47,126	32,773	21,738	16,263	12,990
พื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงน้อย, $A_{eps}(cm^2)$	3.620	2.517	1.670	1.249	0.998
พื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงปานกลาง, $A_{eps}(cm^2)$	5.067	3.524	2.337	1.749	1.397
พื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงมาก, $A_{eps}(cm^2)$	8.446	5.873	3.896	2.914	2.328

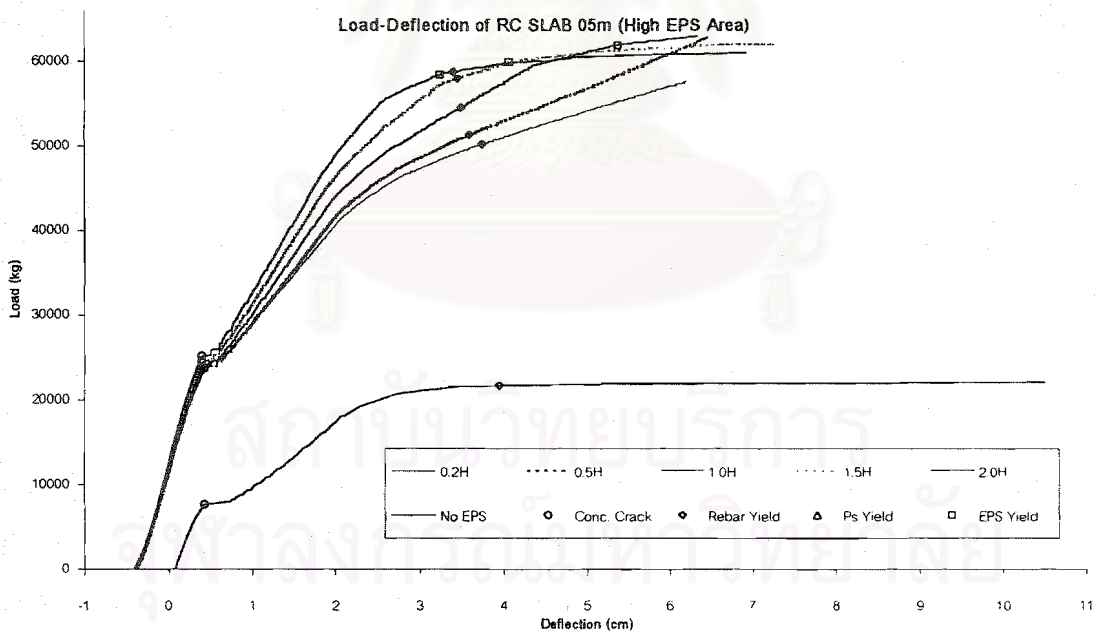


รูปที่ 6.2 แสดงผลการเสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร

ที่ใช้พื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงน้อย



รูปที่ 6.3 แสดงผลการเสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร
ที่ใช้พื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงปานกลาง



รูปที่ 6.4 แสดงผลการเสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร
ที่ใช้พื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงมาก

ผลการเสริมกำลังโมเมนต์ดัดของแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร

รูปที่ 6.2 รูปที่ 6.3 และรูปที่ 6.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับระยะแอนตัวที่กึ่งกลางช่วง เปรียบเทียบระหว่างแผ่นพื้น RC SLAB ที่เสริมกำลังด้วยระยะเยื้องศูนย์กลาง 5 ระดับ กับแผ่นพื้น RC SLAB ที่ไม่ได้เสริมกำลัง รูปที่ 6.2 เสริมกำลังแผ่นพื้นด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงน้อย โดยใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงเท่ากับ 0.7 เท่าของหน่วยแรงดึงประลัย รูปที่ 6.3 เสริมกำลังแผ่นพื้นด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงปานกลาง โดยใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงเท่ากับ 0.5 เท่าของหน่วยแรงดึงประลัย และรูปที่ 6.4 เสริมกำลังแผ่นพื้นด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงมาก โดยใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงเท่ากับ 0.3 เท่าของหน่วยแรงดึงประลัย สาเหตุที่ใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงดังกล่าวเพื่อให้ได้ค่าโมเมนต์ดัดในการเสริมกำลัง (M2) มีค่าเท่ากับทั้ง 3 กรณี

จากรูปที่ 6.2 พบว่าหลังจากเสริมกำลัง แผ่นพื้นมีการแอนตัวลดลงจนเกิดการโก่งตัว (camber) ขึ้น เนื่องจากโมเมนต์ดัดที่ใช้ในการเสริมกำลังมีค่าเป็นลบ และมีค่ามากกว่าโมเมนต์ดัดจากน้ำหนักของแผ่นพื้น

พฤติกรรมการรับน้ำหนักกระทำของแผ่นพื้นในช่วงก่อนคอนกรีตร้าว พบว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังมีค่าสติเฟนสค่อนข้างคงที่ และใกล้เคียงกับแผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมกำลังในช่วงเดียวกัน

แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัวเกิดการร้าว (crack) ใกล้เคียงกัน โดยแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยจะร้าวที่น้ำหนักกระทำสูงกว่า แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัวร้าวที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับจุดที่แผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมกำลังเกิดการร้าว หลังจากแผ่นพื้นร้าว แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีสติเฟนสสูงกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางเล็กน้อย

แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัว เหล็กเสริมในแผ่นพื้นครากที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกับแผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมกำลัง แต่จุดครากของลวดอัดแรงภายนอกของแผ่นพื้นที่เสริมกำลังมีตำแหน่งต่างกัน แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำน้อย แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำมากเรียงกันตามลำดับ ทั้งนี้แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัว ลวดอัดแรงภายนอกจะครากก่อนที่เหล็กเสริมคราก

จากรูปจะเห็นได้ว่า แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีความเหนียว (ductility) มากกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย เนื่องจากแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกน้อยกว่า แต่แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีกำลังประลัยสูงกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง

มาก ซึ่งเนื่องมาจากแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกมากกว่า

โดยภาพรวมของแผ่นพื้น RC SLAB ที่เสริมกำลังด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงน้อย เมื่อใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกต่าง ๆ กันมีพฤติกรรมคล้ายคลึงกัน

จากรูปที่ 6.3 พบว่าหลังจากเสริมกำลังแผ่นพื้นมีการโก่งตัวขึ้น พฤติกรรมการรับน้ำหนักกระทำของแผ่นพื้นในช่วงก่อนคอนกรีตร้าว พบว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังมีค่าสติเฟนส์ค่อนข้างคงที่และใกล้เคียงกับแผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมกำลังในช่วงเดียวกัน

แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัวเกิดการร้าว (crack) ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัวร้าวที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับจุดที่แผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมกำลังเกิดการร้าว หลังจากแผ่นพื้นร้าว แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีสติเฟนส์สูงกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางเล็กน้อย

แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัว เหล็กเสริมในแผ่นพื้นครากที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกับแผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมกำลัง แต่จุดครากของลวดอัดแรงภายนอกของแผ่นพื้นที่เสริมกำลังมีตำแหน่งต่างกัน แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำน้อย แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำมากเรียงกันตามลำดับ ทั้งนี้แผ่นพื้นที่เสริมกำลังส่วนใหญ่ ลวดอัดแรงภายนอกจะครากก่อนที่เหล็กเสริมคราก ยกเว้นในแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 0.5H ลวดอัดแรงภายนอกครากหลังเหล็กเสริม และแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 0.2H ลวดอัดแรงไม่เกิดการคราก

จากรูปจะเห็นได้ว่า แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีความเหนียว (ductility) มากกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย เนื่องมาจากแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกน้อยกว่า แต่แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีกำลังประลัยสูงกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก ซึ่งเนื่องมาจากแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกมากกว่า

โดยภาพรวมของแผ่นพื้น RC SLAB ที่เสริมกำลังด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงปานกลาง เมื่อใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกต่าง ๆ กันมีพฤติกรรมแตกต่างกันเล็กน้อย ที่ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย ๆ (0.2H) แผ่นพื้นเริ่มมีพฤติกรรมการวิบัติโดยที่ลวดอัดแรงภายนอกยังไม่คราก

จากรูปที่ 6.4 พบว่าหลังจากเสริมกำลังแผ่นพื้นมีการโก่งตัวขึ้น พฤติกรรมการรับน้ำหนักกระทำของแผ่นพื้นในช่วงก่อนคอนกรีตร้าว พบว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังมีค่าสติเฟนสก่อนข้างคงที่และใกล้เคียงกับแผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมกำลัง แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีค่าสติเฟนสมากกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยเล็กน้อย

แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัวเกิดการร้าว (crack) ใกล้เคียงกัน แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากจะร้าวที่น้ำหนักกระทำสูงกว่า แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัวร้าวที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับจุดที่แผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมกำลังเกิดการร้าว หลังจากแผ่นพื้นร้าว แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีสติเฟนสสูงกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยอย่างเห็นได้ชัด

แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัว เหล็กเสริมในแผ่นพื้นครากที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกับแผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมกำลัง แต่จุดครากของลวดอัดแรงภายนอกของแผ่นพื้นที่เสริมกำลังมีตำแหน่งต่างกัน แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำน้อย แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำมากเรียงกันตามลำดับ ทั้งนี้แผ่นพื้นที่เสริมกำลังส่วนใหญ่ ลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่หลังเหล็กเสริมเกิดการคราก ยกเว้นในแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 0.2H และ 0.5H ลวดอัดแรงไม่เกิดการคราก

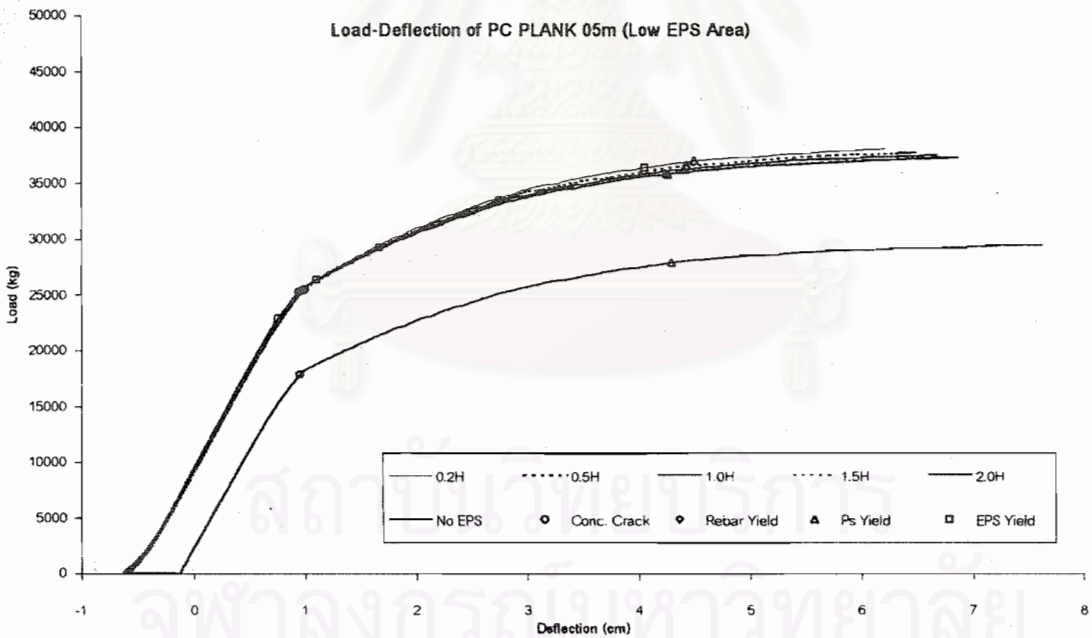
จากรูปจะเห็นได้ว่า แผ่นพื้น RC SLAB ที่เสริมกำลังด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงมากมีความเหนียวลดลงอย่างมาก เนื่องจากใช้พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกมากเกินไป ทำให้แผ่นพื้นบางตัววิบัติโดยที่ลวดอัดแรงภายนอกยังไม่คราก ซึ่งถือว่าเป็นการวิบัติแบบเปราะ ในกรณีนี้แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย เช่น 0.2H ควรมีกำลังประลัยมากกว่าแผ่นพื้นตัวอื่น ๆ เนื่องจากมีพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกมากที่สุด แต่กลับมีกำลังรับน้ำหนักประลัยน้อยกว่าแผ่นพื้นตัวอื่น ๆ เนื่องจากคอนกรีตถูกอัดแตก (crush) เสียก่อน

เมื่อเปรียบเทียบผลการเสริมกำลังจากรูปที่ 6.2 รูปที่ 6.3 และรูปที่ 6.4 สามารถสรุปได้ว่า การเสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB เพื่อเพิ่มกำลังรับโมเมนต์ดัด เมื่อเพิ่มพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกจะได้กำลังประลัยและสติเฟนสของแผ่นพื้นเพิ่มขึ้น แต่ความเหนียวของแผ่นพื้นจะลดลง พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อน้ำหนักแตกร้าว (cracking load) น้อยมาก ผลของปริมาณพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกจะแสดงพฤติกรรมอย่างเห็นได้ชัดหลังคอนกรีตร้าว ผลของระยะเยื้องศูนย์กลางที่มีต่อกำลังและสติเฟนสของแผ่นพื้นจะขึ้นอยู่กับหน่วยแรงดิ่งที่ใช้ในการดิ่งลวดอัดแรงภายนอกเป็นหลัก ซึ่งจะกล่าวถึงในการศึกษาส่วนที่ 2 และผลของระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกต่อความเหนียวจะกล่าวถึงในการศึกษาส่วนที่ 3

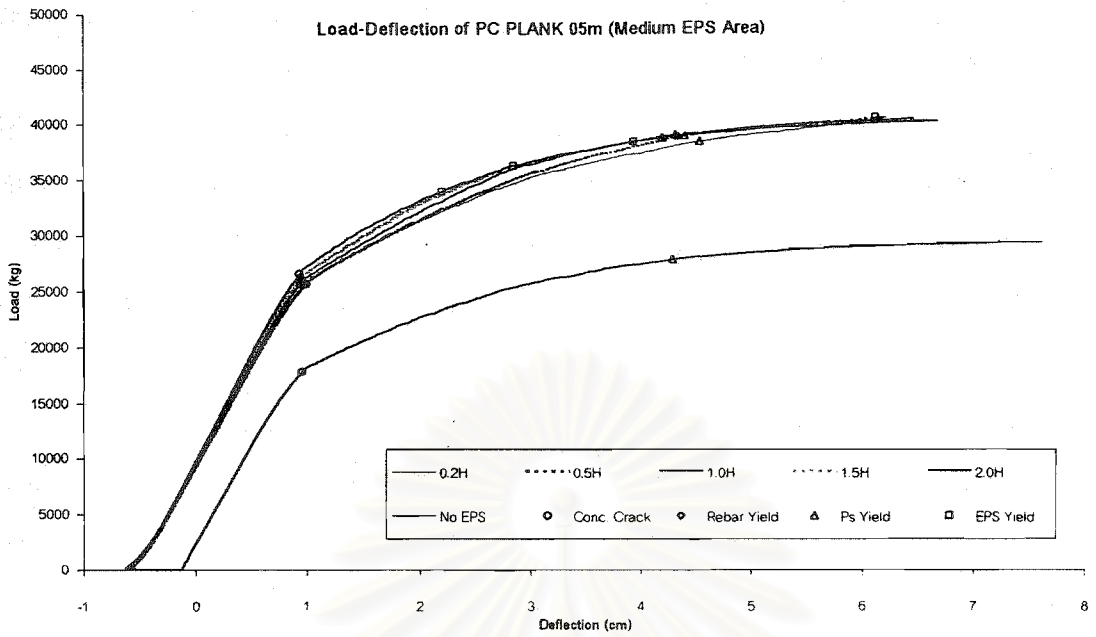
การเสริมกำลังแผ่นพื้น PC PLANK ความยาวช่วง 5 เมตร

ตารางที่ 6.4 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้เสริมกำลังแผ่นพื้น PC PLANK ความยาวช่วง 5 เมตร

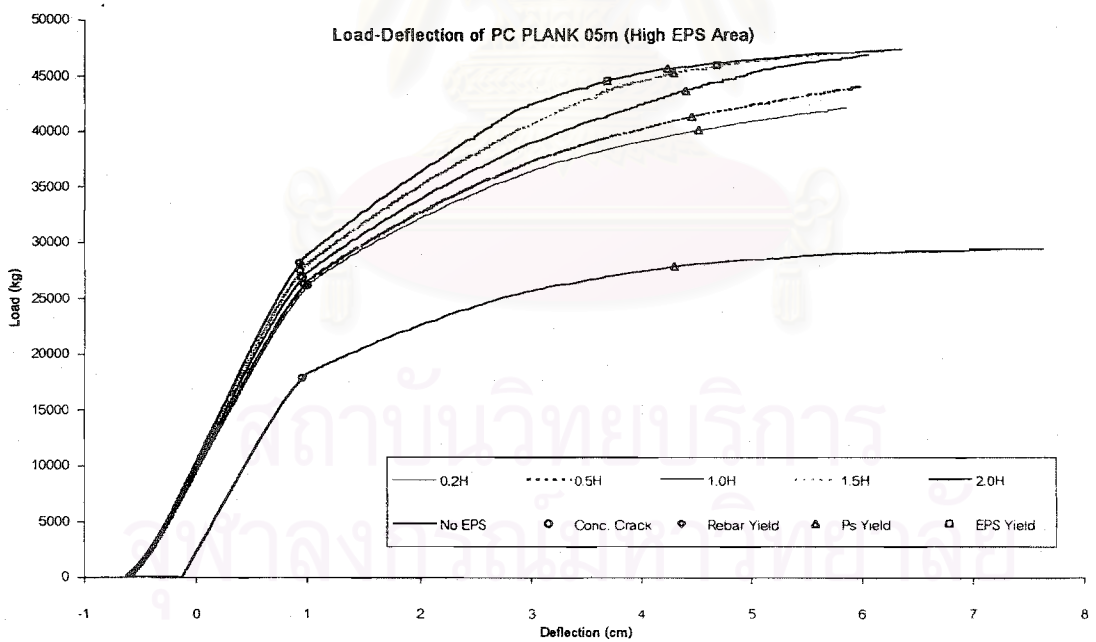
Variable	0.2H	0.5H	1.0H	1.5H	2.0H
drop (cm)	5.2	13.0	26.0	39.0	52.0
P_o (kg)	29,285	20,299	13,431	10,035	8,010
พื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงน้อย, A_{eps} (cm ²)	2.249	1.559	1.032	0.771	0.615
พื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงปานกลาง, A_{eps} (cm ²)	3.149	2.183	1.444	1.079	0.861
พื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงมาก, A_{eps} (cm ²)	5.248	3.638	2.407	1.798	1.435



รูปที่ 6.5 แสดงผลการเสริมกำลังแผ่นพื้น PC PLANK ความยาวช่วง 5 เมตร
ที่ใช้พื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงน้อย



รูปที่ 6.6 แสดงผลการเสริมกำลังแผ่นพื้น PC PLANK ความยาวช่วง 5 เมตร
ที่ใช้พื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงปานกลาง



รูปที่ 6.7 แสดงผลการเสริมกำลังแผ่นพื้น PC PLANK ความยาวช่วง 5 เมตร
ที่ใช้พื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงมาก

ผลการเสริมกำลังรับโมเมนต์ดัดของแผ่นพื้น PC PLANK ความยาวช่วง 5 เมตร

รูปที่ 6.5 รูปที่ 6.6 และรูปที่ 6.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับระยะแฉ่นตัวที่กึ่งกลางช่วง เปรียบเทียบระหว่างแผ่นพื้น PC PLANK ที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 5 ระดับ กับแผ่นพื้น PC PLANK ที่ไม่ได้เสริมกำลัง รูปที่ 6.5 เสริมกำลังแผ่นพื้นด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงน้อย โดยใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงเท่ากับ 0.7 เท่าของหน่วยแรงดึงประลัย รูปที่ 6.6 เสริมกำลังแผ่นพื้นด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงปานกลาง โดยใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงเท่ากับ 0.5 เท่าของหน่วยแรงดึงประลัย และรูปที่ 6.7 เสริมกำลังแผ่นพื้นด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงมาก โดยใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงเท่ากับ 0.3 เท่าของหน่วยแรงดึงประลัย สาเหตุที่ใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงดังกล่าวเพื่อให้ได้ค่าโมเมนต์ดัดในการเสริมกำลัง (M2) มีค่าเท่ากันทั้ง 3 กรณี

จากรูปที่ 6.5 พบว่าหลังจากเสริมกำลัง แผ่นพื้นมีการโก่งตัว (camber) เพิ่มขึ้น พฤติกรรมการรับน้ำหนักกระทำของแผ่นพื้นในช่วงก่อนคอนกรีตร้าว พบว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังมีค่าสติเฟนสค่อนข้างคงที่ และใกล้เคียงกับแผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมกำลังในช่วงเดียวกัน

แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัวเกิดการร้าว (crack) ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัวร้าวที่ระยะแฉ่นตัวใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับจุดที่แผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมกำลังเกิดการร้าว หลังจากแผ่นพื้นร้าว แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีสติเฟนสสูงกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังด้วยระยะเยื้องศูนย์กลางมากเล็กน้อย

แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัว ลวดอัดแรงในแผ่นพื้นครากที่ระยะแฉ่นตัวใกล้เคียงกัน และที่ระยะแฉ่นตัวใกล้เคียงกับแผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมกำลัง แต่จุดครากของลวดอัดแรงภายนอกของแผ่นพื้นที่เสริมกำลังมีตำแหน่งต่างกัน แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำน้อย แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำมากเรียงกันตามลำดับ ทั้งนี้แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัว ลวดอัดแรงภายนอกจะครากก่อนที่ลวดอัดแรงในแผ่นพื้นคราก

จากรูปจะเห็นได้ว่า แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีความเหนียว (ductility) มากกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย เนื่องจากแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกน้อยกว่า แต่แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีกำลังประลัยสูงกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังด้วยระยะเยื้องศูนย์กลางมาก ซึ่งเนื่องจากแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกมากกว่า

โดยภาพรวมของแผ่นพื้น PC PLANK ที่เสริมกำลังด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกน้อย เมื่อใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกต่าง ๆ กัน มีพฤติกรรมคล้ายคลึงกัน

จากรูปที่ 6.6 พบว่าหลังจากเสริมกำลังแผ่นพื้นมีการโก่งตัว (camber) เพิ่มขึ้น พฤติกรรมการรับน้ำหนักกระทำของแผ่นพื้นในช่วงก่อนคอนกรีตร้าว พบว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังมีค่าสติเฟนสค่อนข้างคงที่ และใกล้เคียงกับแผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมกำลังในช่วงเดียวกัน โดยแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีสติเฟนสมากกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยเล็กน้อย

แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัวเกิดการร้าว (crack) ใกล้เคียงกัน โดยแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยจะร้าวที่น้ำหนักกระทำสูงกว่า แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัวร้าวที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกับจุดที่แผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมกำลังเกิดการร้าว หลังจากแผ่นพื้นร้าว แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีสติเฟนสสูงกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยเล็กน้อย

แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัว ลวดอัดแรงในแผ่นพื้นร้าวที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับแผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมกำลัง แต่จุดร้าวของลวดอัดแรงภายนอกของแผ่นพื้นที่เสริมกำลังมีตำแหน่งต่างกัน แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากลวดอัดแรงภายนอกจะร้าวที่น้ำหนักกระทำน้อย แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยลวดอัดแรงภายนอกจะร้าวที่น้ำหนักกระทำมากเรียงกันตามลำดับ ทั้งนี้แผ่นพื้นที่เสริมกำลังส่วนใหญ่ ลวดอัดแรงภายนอกจะร้าวก่อนที่ลวดอัดแรงในแผ่นพื้นร้าว ยกเว้นในแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 0.5H ลวดอัดแรงภายนอกร้าวหลังลวดอัดแรงในแผ่นพื้น และแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 0.2H ลวดอัดแรงภายนอกไม่เกิดการร้าว

จากรูปจะเห็นได้ว่า แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัวมีความเหนียวต่างกันน้อยมาก แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีความเหนียว (ductility) มากกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย เนื่องจากแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกน้อยกว่า

โดยภาพรวมของแผ่นพื้น PC PLANK ที่เสริมกำลังด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงปานกลาง เมื่อใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกต่าง ๆ กัน มีพฤติกรรมแตกต่างกันเล็กน้อยในส่วนของสติเฟนสหลังจากที่คอนกรีตร้าว แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีสติเฟนสดีกว่า

จากรูปที่ 6.7 พบว่าหลังจากเสริมกำลังแผ่นพื้นมีการโก่งตัว (camber) เพิ่มขึ้นขึ้น พฤติกรรมการรับน้ำหนักกระทำของแผ่นพื้นในช่วงก่อนคอนกรีตรั่ว พบว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังมีค่าสตีเฟนสค่อนข้างคงที่ โดยแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีค่าสตีเฟนสมากกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย

แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัวเกิดการร้าว (crack) ใกล้เคียงกัน โดยแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากจะร้าวที่น้ำหนักกระทำสูงกว่า แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัวร้าวที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกับจุดที่แผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมกำลังเกิดการร้าว หลังจากแผ่นพื้นร้าว แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมีสตีเฟนสมากกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยอย่างเห็นได้ชัด

แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัว ลวดอัดแรงในแผ่นพื้นคืบครากที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับแผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมกำลัง แต่จุดครากของลวดอัดแรงภายนอกของแผ่นพื้นที่เสริมกำลังมีตำแหน่งต่างกัน โดยส่วนใหญ่ลวดอัดแรงภายนอกจะไม่คืบคราก ยกเว้นแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 1.5H และ 2.0H

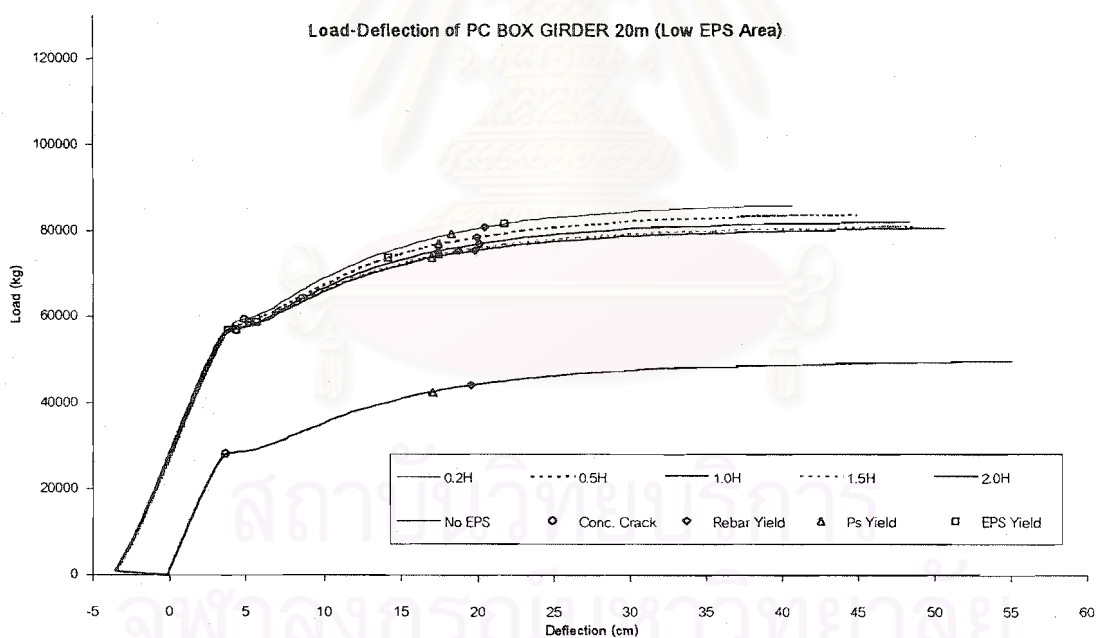
จากรูปจะเห็นได้ว่า แผ่นพื้น PC PLANK ที่เสริมกำลังด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงมากมีความเหนียวลดลง พื้นที่ส่วนใหญ่วิบัติโดยที่ลวดอัดแรงภายนอกยังไม่คืบคราก ซึ่งถือว่าเป็นการวิบัติแบบเปราะ ในกรณีนี้แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย เช่น 0.2H ควรมีกำลังประลัยมากกว่าแผ่นพื้นตัวอื่น ๆ เนื่องจากมีพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกมากที่สุด แต่กลับมีกำลังรับน้ำหนักประลัยน้อยกว่าแผ่นพื้นตัวอื่น ๆ เนื่องจากคอนกรีตถูกอัดแตก (crush) เสียก่อน

เมื่อเปรียบเทียบผลการเสริมกำลังจากรูปที่ 6.5 รูปที่ 6.6 และรูปที่ 6.7 สามารถสรุปได้ว่าการเสริมกำลังแผ่นพื้น PC PLANK เพื่อเพิ่มกำลังรับโมเมนต์ดัด เมื่อเพิ่มพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกจะได้กำลังประลัยและสตีเฟนสของแผ่นพื้นเพิ่มขึ้น แต่ความเหนียวของแผ่นพื้นจะลดลง พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อน้ำหนักแตกร้าว (cracking load) น้อย ผลของพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงจะแสดงพฤติกรรมอย่างเห็นได้ชัดหลังจากแผ่นพื้นร้าวเมื่อใช้พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกน้อย และแสดงพฤติกรรมก่อนแผ่นพื้นร้าวเมื่อใช้พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกมาก ผลของระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกที่มีต่อกำลังและสตีเฟนสของแผ่นพื้นจะขึ้นอยู่กับหน่วยแรงดิ่งที่ใช้ในการดิ่งลวดเป็นหลัก ซึ่งจะกล่าวถึงในการศึกษาส่วนที่ 2 และผลของระยะเยื้องศูนย์กลางต่อความเหนียวจะกล่าวถึงในการศึกษาส่วนที่ 3

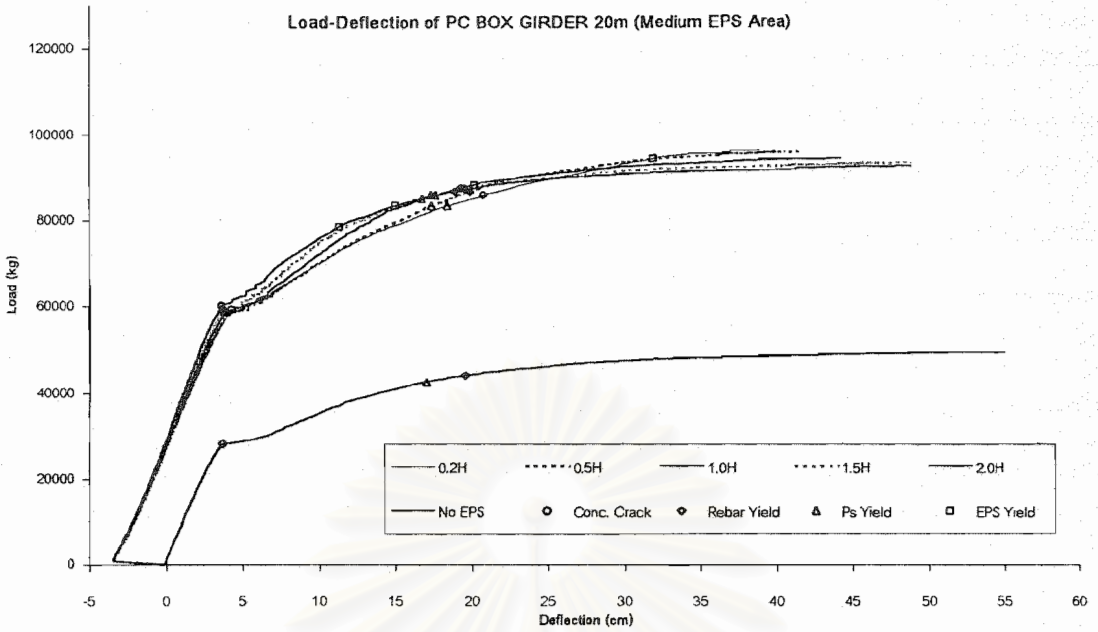
การเสริมกำลังคาน PC BOX GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร

ตารางที่ 6.5 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้เสริมกำลังคาน PC BOX GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร

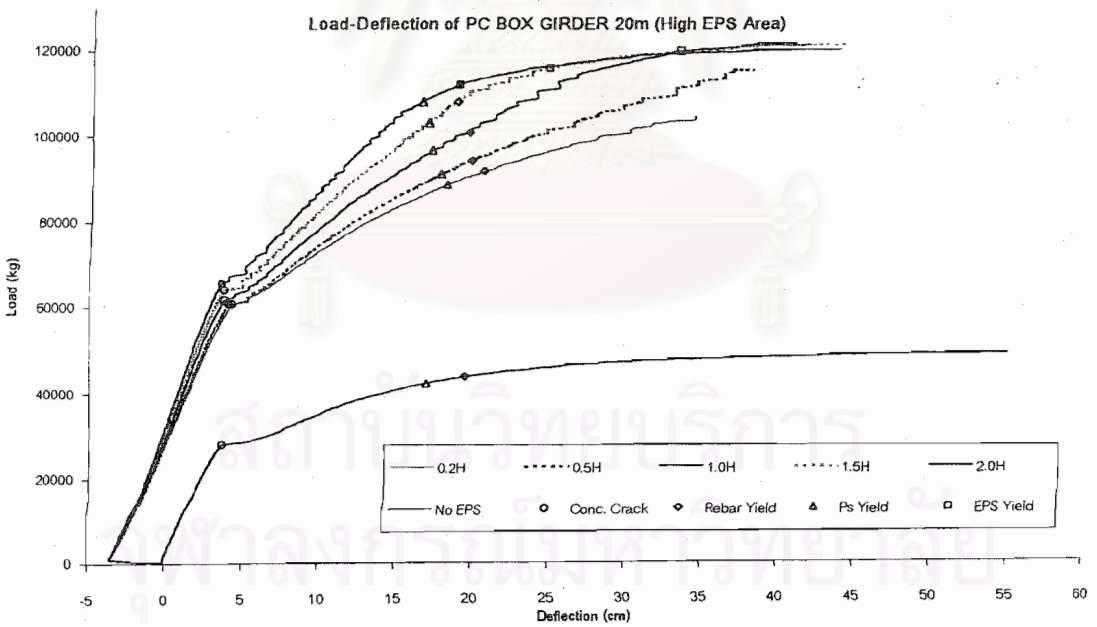
Variable	0.2H	0.5H	1.0H	1.5H	2.0H
drop (cm)	16.0	40.0	80.0	120.0	160.0
P_e (kg)	131,716	92,324	61,613	46,234	36,999
พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงน้อย, A_{eps} (cm ²)	10.116	7.091	4.732	3.551	2.842
พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงปานกลาง, A_{eps} (cm ²)	14.163	9.927	6.625	4.971	3.978
พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงมาก, A_{eps} (cm ²)	23.605	16.546	11.042	8.286	6.631



รูปที่ 6.8 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC BOX GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร
ที่ใช้พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงน้อย



รูปที่ 6.9 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC BOX GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร
ที่ใช้พื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงปานกลาง



รูปที่ 6.10 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC BOX GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร
ที่ใช้พื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงมาก

ผลการเสริมกำลังรับโมเมนต์ดัดของคาน PC BOX GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร

รูปที่ 6.8 รูปที่ 6.9 และรูปที่ 6.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับระยะแอนตัวที่กึ่งกลางคาน เปรียบเทียบระหว่างคาน PC BOX GIRDER ที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 5 ระดับ กับคาน PC BOX GIRDER ที่ไม่ได้เสริมกำลัง รูปที่ 6.8 เสริมกำลังคานด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงน้อย โดยใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงเท่ากับ 0.7 เท่าของหน่วยแรงดึงประลัย รูปที่ 6.9 เสริมกำลังคานด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงปานกลาง โดยใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงเท่ากับ 0.5 เท่าของหน่วยแรงดึงประลัย และรูปที่ 6.10 เสริมกำลังคานด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงมาก โดยใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงเท่ากับ 0.3 เท่าของหน่วยแรงดึงประลัย สาเหตุที่ใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงดังกล่าวเพื่อให้ได้ค่าโมเมนต์ดัดในการเสริมกำลัง (M2) มีค่าเท่ากันทั้ง 3 กรณี

จากรูปที่ 6.8 พบว่าหลังจากเสริมกำลัง คานมีการโก่งตัว (camber) ขึ้น พฤติกรรมการรับน้ำหนักกระทำของคานในช่วงก่อนคอนกรีตรั่ว พบว่าคานที่เสริมกำลังมีค่าสติฟเนสค่อนข้างคงที่ และใกล้เคียงกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลังในช่วงเดียวกัน

คานที่เสริมกำลังทุกตัวเกิดการร้าว (crack) ใกล้เคียงกัน โดยคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยจะร้าวที่น้ำหนักกระทำสูงกว่าเล็กน้อย คานที่เสริมกำลังทุกตัวร้าวที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกับจุดที่คานซึ่งไม่ได้เสริมกำลังเกิดการร้าว หลังจากคานร้าว คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีสติฟเนสสูงกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางเล็กน้อย

คานเสริมกำลังทุกตัว เหล็กเสริมและลวดอัดแรงในคานครากที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง แต่จุดครากของลวดอัดแรงภายนอกของคานที่เสริมกำลังมีตำแหน่งต่างกัน คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำน้อย คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำมากเรียงกันตามลำดับ ทั้งนี้คานที่เสริมกำลังส่วนใหญ่ ลวดอัดแรงภายนอกจะครากก่อนที่เหล็กเสริมคราก ยกเว้นคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง $0.2H$ ลวดอัดแรงภายนอกครากหลังเหล็กเสริม

จากรูปจะเห็นได้ว่า คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีความเหนียว (ductility) มากกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย เนื่องจากคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกน้อยกว่า แต่คานที่เสริมโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีกำลังประลัยสูงกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก ซึ่งเนื่องจากคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกมากกว่า

โดยภาพรวมของคาน PC BOX GIRDER ที่เสริมกำลังด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงน้อย เมื่อใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกต่าง ๆ กันมีพฤติกรรมคล้ายคลึงกัน

จากรูปที่ 6.9 พบว่าหลังจากเสริมกำลังคานมีการโก่งตัว (camber) ขึ้น พฤติกรรมการรับน้ำหนักกระทำของคานในช่วงก่อนคอนกรีตรั่ว พบว่าคานที่เสริมกำลังมีค่าสตีเฟนสคอนข้างคงที่ และใกล้เคียงกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลังในช่วงเดียวกัน โดยคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีสตีเฟนสมากกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยเล็กน้อย

คานที่เสริมกำลังทุกตัวเกิดการร้าว (crack) ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้คานที่เสริมกำลังทุกตัวร้าวที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และที่ระยะเยื้องศูนย์กลางใกล้เคียงกับจุดที่คานซึ่งไม่ได้เสริมกำลังเกิดการร้าว หลังจากคานร้าว คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีสตีเฟนสสูงกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยเล็กน้อย

คานที่เสริมกำลังทุกตัว เหล็กเสริมและลวดอัดแรงในคานครากที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง แต่จุดครากของลวดอัดแรงภายนอกของคานที่เสริมกำลังมีตำแหน่งต่างกัน คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำน้อย คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำมากเรียงกันตามลำดับ โดยคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 2.0H และ 1.5H ลวดอัดแรงภายนอกจะครากก่อนที่เหล็กเสริมคราก คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 0.2H และ 0.5H ลวดอัดแรงภายนอกครากหลังเหล็กเสริม

จากรูปจะเห็นได้ว่า คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีความเหนียว (ductility) มากกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย เนื่องจากคานที่เสริมกำลังด้วยระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกน้อยกว่า แต่คานที่เสริมโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีกำลังประลัยสูงกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก ซึ่งเนื่องจากคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกมากกว่า

โดยภาพรวมของคาน PC BOX GIRDER ที่เสริมกำลังด้วยลวดอัดแรงพื้นที่หน้าตัดปานกลาง เมื่อใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกต่าง ๆ กันมีพฤติกรรมแตกต่างกันเล็กน้อย คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีสตีเฟนสมากกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยเล็กน้อย

จากรูปที่ 6.10 พบว่าหลังจากเสริมกำลังคานมีการโก่งตัว (camber) ขึ้น พฤติกรรมการรับน้ำหนักกระทำของคานในช่วงก่อนคอนกรีตรั่ว พบว่าคานที่เสริมกำลังมีค่าสตีเฟนสคอนข้าง

คงที่ และใกล้เคียงกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลังในช่วงเดียวกัน โดยคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีค่าสติเฟนสมากกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยเล็กน้อย

คานที่เสริมกำลังทุกตัวเกิดการร้าว (crack) ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน โดยคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากจะร้าวที่น้ำหนักระทำสูงกว่า คานที่เสริมกำลังทุกตัวร้าวที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกับจุดที่คานซึ่งไม่ได้เสริมกำลังเกิดการร้าว หลังจากคานร้าว คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีสติเฟนสูงกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยอย่างเห็นได้ชัด

คานที่เสริมกำลังทุกตัว เหล็กเสริมและลวดอัดแรงในคานครากที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง แต่จุดครากของลวดอัดแรงภายนอกของคานที่เสริมกำลังมีตำแหน่งต่างกัน คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักระทำน้อย คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักระทำมากเรียงกันตามลำดับ ทั้งนี้คานที่เสริมกำลังส่วนใหญ่ ลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่หลังเหล็กเสริมเกิดการคราก ยกเว้นในคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 0.2H และ 0.5H ลวดอัดแรงภายนอกไม่เกิดการคราก

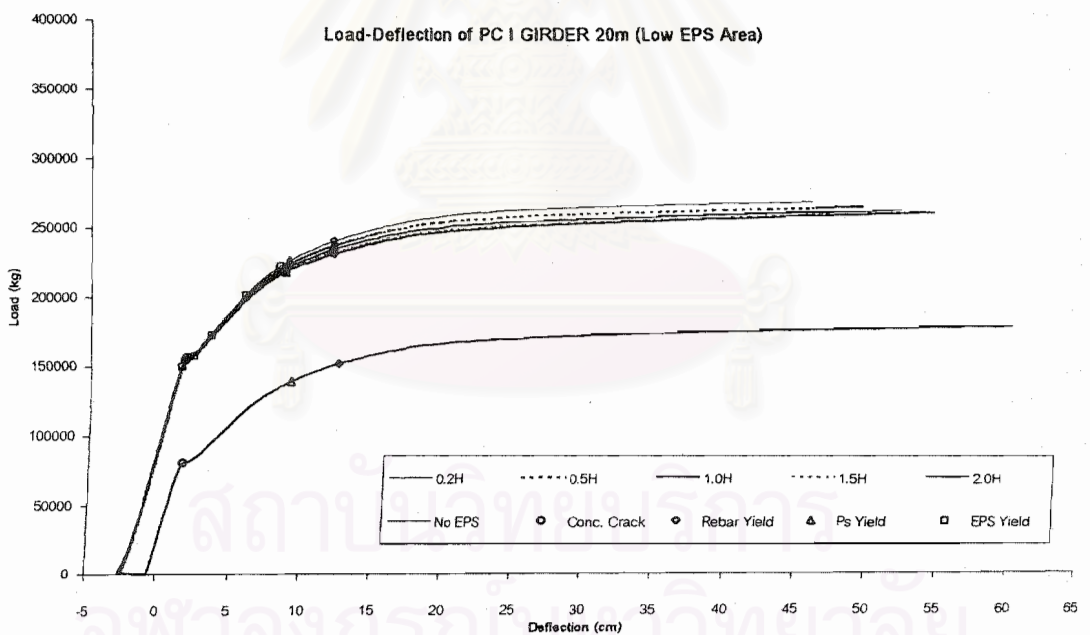
จากรูปจะเห็นได้ว่า คาน PC BOX GIRDER ที่เสริมกำลังด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงมากมีความเหนียวลดลง เนื่องจากใช้พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกมาก คานบางตัววิบัติโดยที่ลวดอัดแรงภายนอกยังไม่คราก ซึ่งถือว่าเป็นการวิบัติแบบเปราะ ในกรณีนี้คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย เช่น 0.2H ควรมีกำลังประลัยมากกว่าคานตัวอื่น ๆ เนื่องจากมีพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมมากที่สุด แต่กลับมีกำลังรับน้ำหนักประลัยน้อยกว่าคานตัวอื่น ๆ เนื่องจากคอนกรีตถูกอัดแตก (crush) เสียก่อน

เมื่อเปรียบเทียบผลการเสริมกำลังจากรูปที่ 6.8 รูปที่ 6.9 และรูปที่ 6.10 สามารถสรุปได้ว่า การเสริมกำลังคาน PC BOX GIRDER เพื่อเพิ่มกำลังรับโมเมนต์ดัด เมื่อเพิ่มพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกจะได้กำลังประลัยและสติเฟนของคานเพิ่มขึ้น แต่ความเหนียวของคานจะลดลง พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อน้ำหนักแตกร้าว (cracking load) น้อยมาก ผลของพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงจะแสดงพฤติกรรมอย่างเห็นได้ชัดหลังจากคอนกรีตร้าว ผลของระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกที่มีต่อกำลังและสติเฟนของคานจะขึ้นอยู่กับหน่วยแรงดิ่งที่ใช้ในการดิ่งลวดเป็นหลัก ซึ่งจะกล่าวถึงในการศึกษาส่วนที่ 2 และผลของระยะเยื้องศูนย์กลางต่อความเหนียวจะกล่าวถึงในการศึกษาส่วนที่ 3

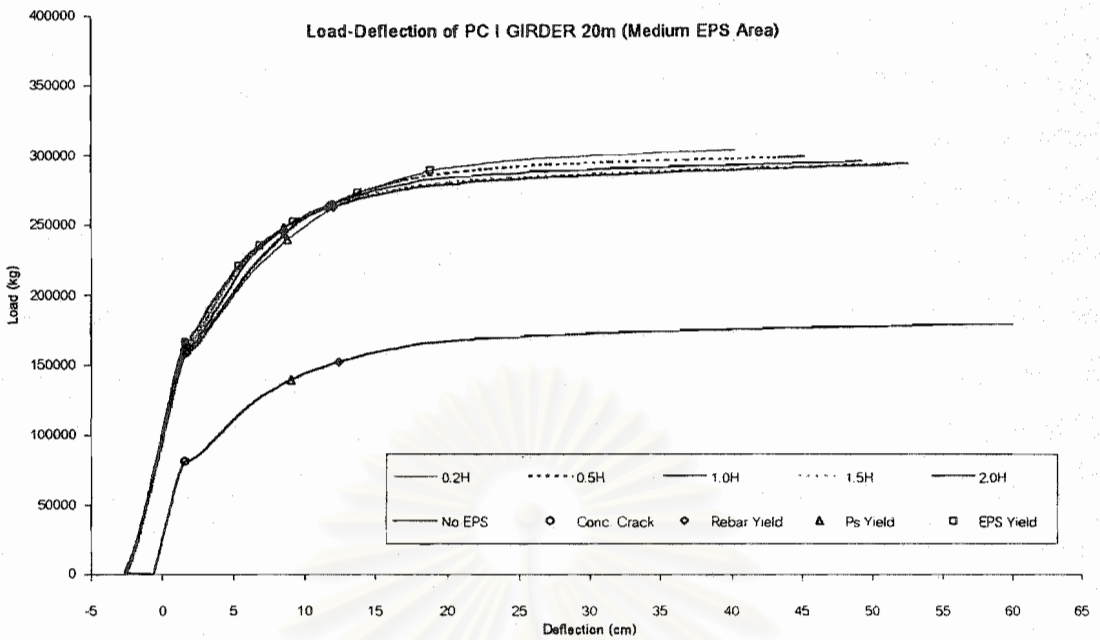
การเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร

ตารางที่ 6.6 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้เสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร

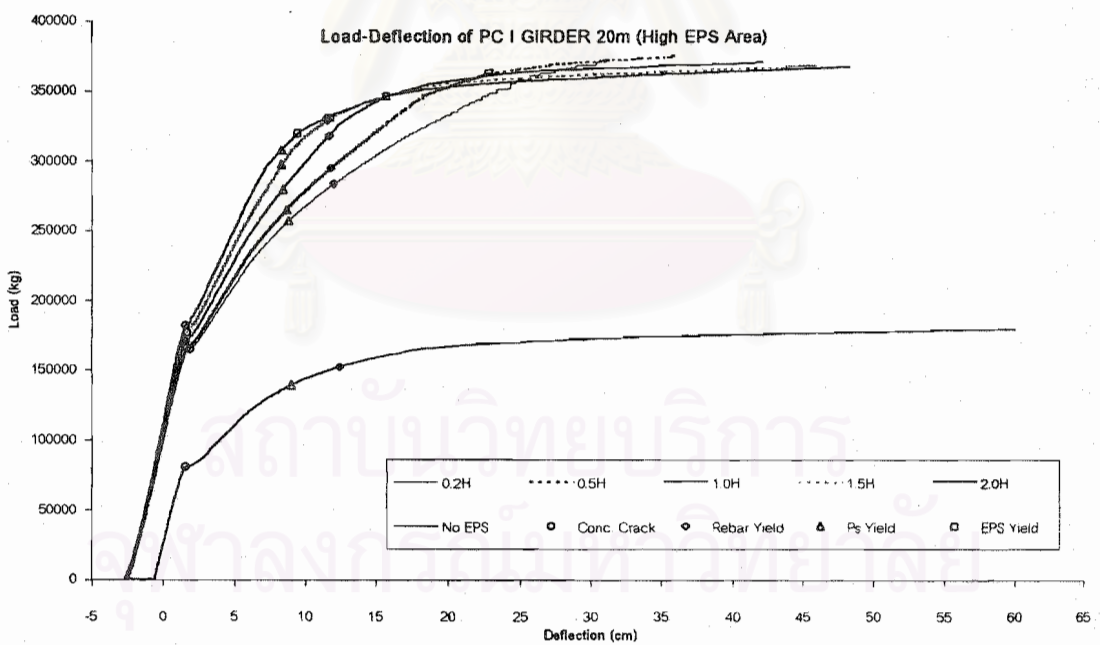
Variable	0.2H	0.5H	1.0H	1.5H	2.0H
drop (cm)	28.8	72.0	144.0	216.0	288.0
P_o (kg)	159,039	117,540	81,916	62,863	51,001
พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงน้อย, $A_{eps}(cm^2)$	12.215	9.028	6.292	4.828	3.917
พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงปานกลาง, $A_{eps}(cm^2)$	17.101	12.639	8.808	6.760	5.484
พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงมาก, $A_{eps}(cm^2)$	28.502	21.065	14.680	11.266	9.140



รูปที่ 6.11 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร
ที่ใช้พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงน้อย



รูปที่ 6.12 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร
ที่ใช้พื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงปานกลาง



รูปที่ 6.13 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร
ที่ใช้พื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงมาก

ผลการเสริมกำลังรับโมเมนต์ดัดของคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร

รูปที่ 6.11 รูปที่ 6.12 และรูปที่ 6.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับระยะแอนตัวที่กึ่งกลางคาน เปรียบเทียบระหว่างคาน PC I GIRDER ที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 5 ระดับ กับคาน PC I GIRDER ที่ไม่ได้เสริมกำลัง รูปที่ 6.11 เสริมกำลังคานด้วยพื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงน้อย โดยใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงเท่ากับ 0.7 เท่าของหน่วยแรงดึงประลัย รูปที่ 6.12 เสริมกำลังคานด้วยพื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงปานกลาง โดยใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงเท่ากับ 0.5 เท่าของหน่วยแรงดึงประลัย และรูปที่ 6.13 เสริมกำลังคานด้วยพื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงมาก โดยใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงเท่ากับ 0.3 เท่าของหน่วยแรงดึงประลัย สาเหตุที่ใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงดังกล่าวเพื่อให้ได้ค่าโมเมนต์ดัดในการเสริมกำลัง (M2) มีค่าเท่ากันทั้ง 3 กรณี

จากรูปที่ 6.11 พบว่าหลังจากเสริมกำลัง คานมีการโก่งตัว (camber) ขึ้น พฤติกรรมการรับน้ำหนักกระทำของคานในช่วงก่อนคอนกรีตร้าว พบว่าคานที่เสริมกำลังมีค่าสติเฟนสค่อนข้างคงที่ และใกล้เคียงกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลังในช่วงเดียวกัน

คานที่เสริมกำลังทุกตัวเกิดการร้าว (crack) ใกล้เคียงกัน โดยคานที่เสริมกำลังทุกตัวร้าวที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกับจุดที่คานซึ่งไม่ได้เสริมกำลังเกิดการร้าวหลังจากคานร้าว คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีสติเฟนสสูงกว่าคานที่เสริมกำลังด้วยระยะเยื้องศูนย์กลางมากเล็กน้อย

คานเสริมกำลังทุกตัว เหล็กเสริมและลวดอัดแรงในคานครากที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง แต่จุดครากของลวดอัดแรงภายนอกของคานที่เสริมกำลังมีตำแหน่งต่างกัน คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากลดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำน้อย คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยลดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำมากเรียงกันตามลำดับ โดยคานที่เสริมกำลังทุกตัว ลวดอัดแรงภายนอกจะครากก่อนที่เหล็กเสริมคราก

จากรูปจะเห็นได้ว่า คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีความเหนียว (ductility) มากกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย เนื่องจากคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีพื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงภายนอกน้อยกว่า แต่คานที่เสริมโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีกำลังประลัยสูงกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก ซึ่งเนื่องจากคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีพื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงภายนอกมากกว่า

โดยภาพรวมของคาน PC I GIRDER ที่เสริมกำลังด้วยพื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงน้อย เมื่อใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกต่าง ๆ กันมีพฤติกรรมคล้ายคลึงกัน

จากรูปที่ 6.12 พบว่าหลังจากเสริมกำลังคานมีการโก่งตัว (camber) ขึ้น พฤติกรรมการรับน้ำหนักกระทำของคานในช่วงก่อนคอนกรีตร้าว พบว่าคานที่เสริมกำลังมีค่าสติเฟนสค่อนข้างคงที่ และใกล้เคียงกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลังในช่วงเดียวกัน

คานที่เสริมกำลังทุกตัวเกิดการร้าว (crack) ใกล้เคียงกัน คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะแอ่นตัวใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับจุดที่คานซึ่งไม่ได้เสริมกำลังเกิดการร้าว หลังจากคานร้าว คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมีสติเฟนสสูงกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย

คานที่เสริมกำลังทุกตัว เหล็กเสริมและลวดอัดแรงในคานครากที่ระยะแอ่นตัวใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง แต่จุดครากของลวดอัดแรงภายนอกของคานที่เสริมกำลังมีตำแหน่งต่างกัน คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำน้อย คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำมากเรียงกันตามลำดับ ทั้งนี้คานที่เสริมกำลังส่วนใหญ่ ลวดอัดแรงภายนอกจะครากก่อนที่เหล็กเสริมคราก ยกเว้นคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 0.2H และ 0.5H ลวดอัดแรงภายนอกครากหลังเหล็กเสริม

จากรูปจะเห็นได้ว่า คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีความเหนียว (ductility) มากกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย เนื่องจากคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมีพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกน้อยกว่า แต่คานที่เสริมโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีกำลังประลัยสูงกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก ซึ่งเนื่องจากคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกมากกว่า

โดยภาพรวมของคาน PC I GIRDER ที่เสริมกำลังด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงปานกลาง เมื่อใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกต่าง ๆ กันมีพฤติกรรมแตกต่างกันเล็กน้อย คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมีสติเฟนสมากกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางเล็กน้อย

จากรูปที่ 6.13 พบว่าหลังจากเสริมกำลังคานมีการโก่งตัว (camber) ขึ้น พฤติกรรมการรับน้ำหนักกระทำของคานในช่วงก่อนคอนกรีตร้าว พบว่าคานที่เสริมกำลังมีค่าสติเฟนสค่อนข้างคงที่ และใกล้เคียงกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลังในช่วงเดียวกัน โดยคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมีค่าสติเฟนสมากกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยเล็กน้อย

คานที่เสริมกำลังทุกตัวเกิดการร้าว (crack) ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากจะร้าวที่น้ำหนักกระทำสูงกว่า คานที่เสริมกำลังทุกตัวร้าวที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับจุดที่คานซึ่งไม่ได้เสริมกำลังเกิดการร้าว หลังจากคานร้าว คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีสติฟเนสสูงกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยอย่างเห็นได้ชัด

คานที่เสริมกำลังทุกตัว เหล็กเสริมและลวดอัดแรงในคานครากที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง แต่จุดครากของลวดอัดแรงภายนอกของคานที่เสริมกำลังมีตำแหน่งต่างกัน คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำน้อย คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำมากเรียงกันตามลำดับ ทั้งนี้คานที่เสริมกำลังส่วนใหญ่ ลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่หลังเหล็กเสริมเกิดการคราก ยกเว้นในคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง $0.2H$ ลวดอัดแรงภายนอกไม่เกิดการคราก

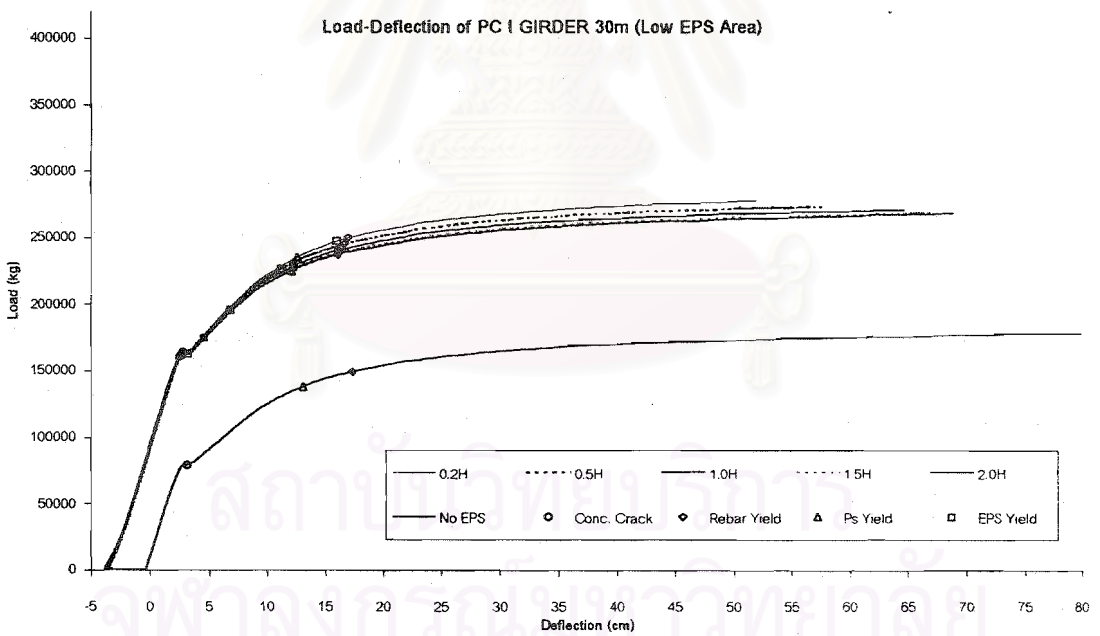
จากรูปจะเห็นได้ว่า คาน PC I GIRDER ที่เสริมกำลังด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงมากมีความเหนียวลดลง โดยเฉพาะคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก เนื่องจากใช้พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกมาก คานบางตัววิบัติโดยที่ลวดอัดแรงภายนอกยังไม่คราก ซึ่งถือว่าเป็นการวิบัติแบบเปราะ

เมื่อเปรียบเทียบผลการเสริมกำลังจากรูปที่ 6.11 รูปที่ 6.12 และรูปที่ 6.13 สามารถสรุปได้ว่า การเสริมกำลังคาน PC I GIRDER เพื่อเพิ่มกำลังรับโมเมนต์ดัด เมื่อเพิ่มพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกจะได้กำลังประลัยและสติฟเนสของคานเพิ่มขึ้น แต่ความเหนียวของคานจะลดลง พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อน้ำหนักแตกร้าว (cracking load) น้อยมาก ผลของพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงจะแสดงพฤติกรรมอย่างเห็นได้ชัดหลังจากคานร้าว ผลของระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกที่มีต่อกำลังและสติฟเนสของคานจะขึ้นอยู่กับหน่วยแรงดึงที่ใช้ในการดึงลวดเป็นหลัก ซึ่งจะกล่าวถึงในการศึกษาส่วนที่ 2 และผลของระยะเยื้องศูนย์กลางต่อความเหนียวจะกล่าวถึงในการศึกษาส่วนที่ 3

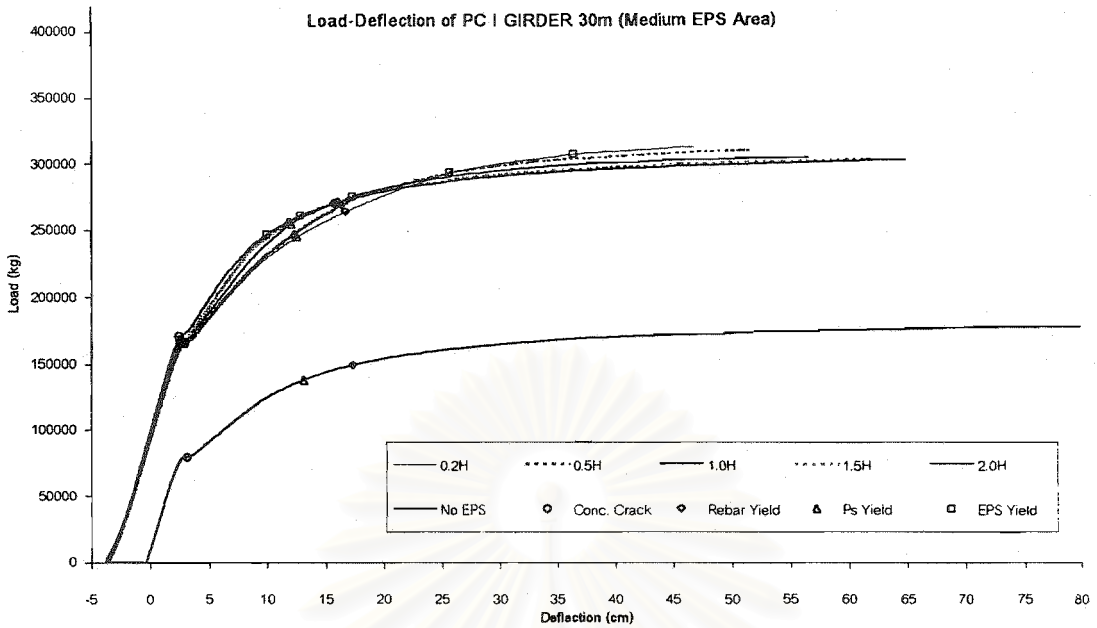
การเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 30 เมตร

ตารางที่ 6.7 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้เสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 30 เมตร

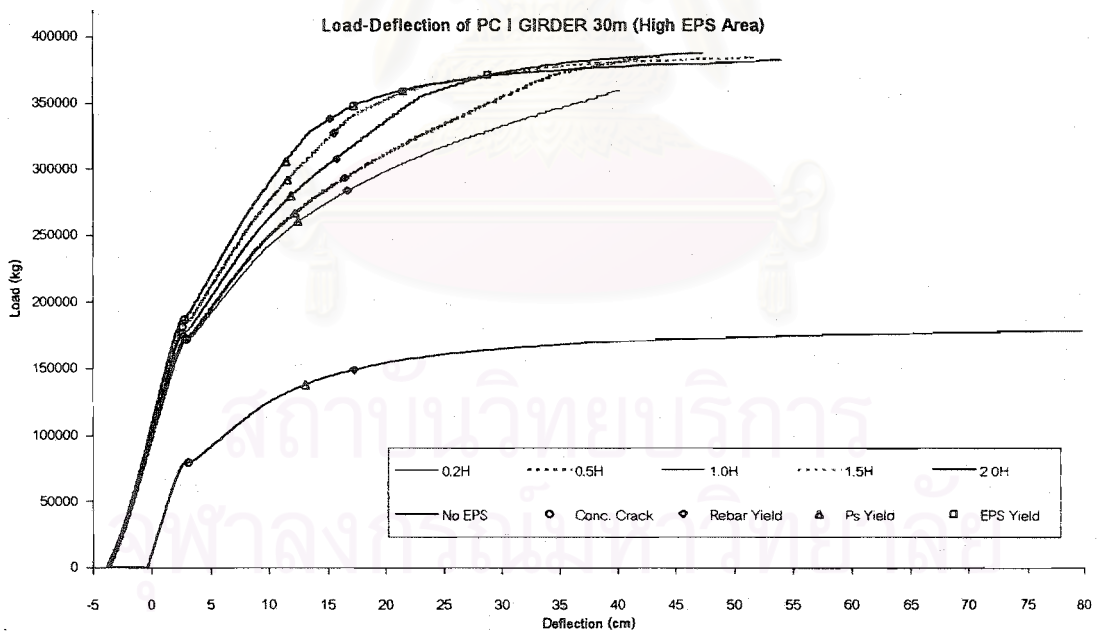
Variable	0.2H	0.5H	1.0H	1.5H	2.0H
drop (cm)	38.8	97.0	194.0	291.0	388.0
P_e (kg)	233,695	170,968	118,124	90,234	72,999
พื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงน้อย, $A_{eps}(cm^2)$	17.949	13.131	9.073	6.930	5.607
พื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงปานกลาง, $A_{eps}(cm^2)$	25.128	18.384	12.702	9.703	7.849
พื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงมาก, $A_{eps}(cm^2)$	41.881	30.639	21.169	16.171	13.082



รูปที่ 6.14 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 30 เมตร
ที่ใช้พื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงน้อย



รูปที่ 6.15 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC | GIRDER ความยาวช่วง 30 เมตร
ที่ใช้พื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงปานกลาง



รูปที่ 6.16 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC | GIRDER ความยาวช่วง 30 เมตร
ที่ใช้พื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงมาก

ผลการเสริมกำลังรับโมเมนต์ดัดของคาน PC | GIRDER ความยาวช่วง 30 เมตร

รูปที่ 6.14 รูปที่ 6.15 และรูปที่ 6.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับระยะแฉ่นตัวที่กึ่งกลางคาน เปรียบเทียบระหว่างคาน PC | GIRDER ที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 5 ระดับ กับคาน PC | GIRDER ที่ไม่ได้เสริมกำลัง รูปที่ 6.14 เสริมกำลังคานด้วยพื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงน้อย โดยใช้หน่วยแรงดึงในลดอัดแรงเท่ากับ 0.7 เท่าของหน่วยแรงดึงประลัย รูปที่ 6.15 เสริมกำลังคานด้วยพื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงปานกลาง โดยใช้หน่วยแรงดึงในลดอัดแรงเท่ากับ 0.5 เท่าของหน่วยแรงดึงประลัย และรูปที่ 6.16 เสริมกำลังคานด้วยพื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงมาก โดยใช้หน่วยแรงดึงในลดอัดแรงเท่ากับ 0.3 เท่าของหน่วยแรงดึงประลัย สาเหตุที่ใช้หน่วยแรงดึงในลดอัดแรงดังกล่าวเพื่อให้ได้ค่าโมเมนต์ดัดในการเสริมกำลัง (M2) มีค่าเท่ากันทั้ง 3 กรณี

จากรูปที่ 6.14 พบว่าหลังจากเสริมกำลัง คานมีการโก่งตัว (camber) ขึ้น พฤติกรรมการรับน้ำหนักกระทำของคานในช่วงก่อนคอนกรีตร้าว พบว่าคานที่เสริมกำลังมีค่าสติฟเนสค่อนข้างคงที่ และใกล้เคียงกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลังในช่วงเดียวกัน

คานที่เสริมกำลังทุกตัวเกิดการร้าว (crack) ใกล้เคียงกัน โดยคานที่เสริมกำลังทุกตัวร้าวที่ระยะแฉ่นตัวใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับจุดที่คานซึ่งไม่ได้เสริมกำลังเกิดการร้าว หลังจากคานร้าว คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีสติฟเนสสูงกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากเล็กน้อย

คานเสริมกำลังทุกตัว เหล็กเสริมและลดอัดแรงในคานครากที่ระยะแฉ่นตัวใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง แต่จุดครากของลดอัดแรงภายนอกของคานที่เสริมกำลังมีตำแหน่งต่างกัน คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากลดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำน้อย คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยลดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำมากเรียงกันตามลำดับ ทั้งนี้คานที่เสริมกำลังทุกตัว ลดอัดแรงภายนอกจะครากก่อนที่เหล็กเสริมคราก

จากรูปจะเห็นได้ว่า คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีความเหนียว (ductility) มากกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย เนื่องจากคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีพื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงภายนอกน้อยกว่า แต่คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีกำลังประลัยสูงกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก ซึ่งเนื่องจากคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีพื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงภายนอกมากกว่า

โดยภาพรวมของคาน PC | GIRDER ที่เสริมกำลังด้วยพื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงน้อย เมื่อใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางของลดอัดแรงภายนอกต่าง ๆ กันมีพฤติกรรมคล้ายคลึงกัน

จากรูปที่ 6.15 พบว่าหลังจากเสริมกำลังคานมีการโก่งตัว (camber) ขึ้น พฤติกรรมการรับน้ำหนักกระทำของคานในช่วงก่อนคอนกรีตร้าว พบว่าคานที่เสริมกำลังมีค่าสติฟเนสค่อนข้างคงที่ และใกล้เคียงกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลังในช่วงเดียวกัน

คานที่เสริมกำลังทุกตัวเกิดการร้าว (crack) ใกล้เคียงกัน โดยคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากกว่าเล็กน้อย คานที่เสริมกำลังทุกตัวร้าวที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับจุดที่คานซึ่งไม่ได้เสริมกำลังเกิดการร้าว หลังจากคานร้าว คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมีสติฟเนสสูงกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางเล็กน้อย

คานที่เสริมกำลังทุกตัว เหล็กเสริมและลวดอัดแรงในคานครากที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง แต่จุดครากของลวดอัดแรงภายนอกของคานที่เสริมกำลังมีตำแหน่งต่างกัน คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำน้อย คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำมากเรียงกันตามลำดับ ทั้งนี้คานที่เสริมกำลังส่วนใหญ่ ลวดอัดแรงภายนอกจะครากหลังจากเหล็กเสริมคราก ยกเว้นคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 2.0H และ 1.5H ลวดอัดแรงภายนอกครากก่อนเหล็กเสริม

จากรูปจะเห็นได้ว่า คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีความเหนียว (ductility) มากกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย เนื่องจากคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกน้อยกว่า แต่คานที่เสริมโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีกำลังประลัยสูงกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก ซึ่งเนื่องจากคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกมากกว่า

โดยภาพรวมของคาน PC I GIRDER ที่เสริมกำลังด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงปานกลาง เมื่อใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกต่าง ๆ กันมีพฤติกรรมแตกต่างกันเล็กน้อย คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีสติฟเนสมากกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางเล็กน้อย

จากรูปที่ 6.13 พบว่าหลังจากเสริมกำลังคานมีการโก่งตัว (camber) ขึ้น พฤติกรรมการรับน้ำหนักกระทำของคานในช่วงก่อนคอนกรีตร้าว พบว่าคานที่เสริมกำลังมีค่าสติฟเนสค่อนข้างคงที่ และใกล้เคียงกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง โดยคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีค่าสติฟเนสมากกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางเล็กน้อย

คานที่เสริมกำลังทุกตัวเกิดการร้าว (crack) ใกล้เคียงกัน โดยคานที่เสริมกำลังโดยใช้ ระยะเวลาเยื้องศูนย์มากจะร้าวที่น้ำหนักกระทำสูงกว่า คานที่เสริมกำลังทุกตัวร้าวที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับจุดที่คานซึ่งไม่ได้เสริมกำลังเกิดการร้าว หลังจากคานร้าว คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเวลาเยื้องศูนย์มากมีสติเฟนสูงกว่คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเวลาเยื้องศูนย์น้อยอย่างเห็นได้ชัด

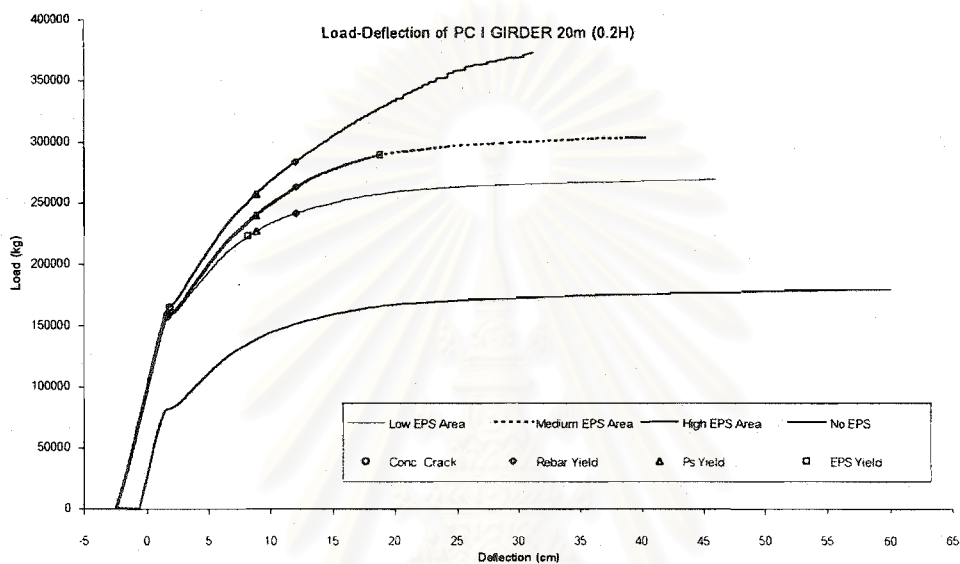
คานที่เสริมกำลังทุกตัว เหล็กเสริมและลวดอัดแรงในคานครากที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง แต่จุดครากของลวดอัดแรงภายนอกของคานที่เสริมกำลังมีตำแหน่งต่างกัน คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเวลาเยื้องศูนย์มากลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำน้อย คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเวลาเยื้องศูนย์น้อยลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำมากเรียงกันตามลำดับ ทั้งนี้คานที่เสริมกำลังส่วนใหญ่ ลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่หลังเหล็กเสริมเกิดการคราก ยกเว้นในคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเวลาเยื้องศูนย์ 0.2H และ 0.5H ลวดอัดแรงภายนอกไม่เกิดการคราก

จากรูปจะเห็นได้ว่า คาน PC I GIRDER ที่เสริมกำลังด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงมากมีความเหนียวลดลง โดยเฉพาะคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเวลาเยื้องศูนย์มาก เนื่องจากใช้พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกมาก คานบางตัววิบัติโดยที่ลวดอัดแรงภายนอกยังไม่คราก ซึ่งถือว่าเป็นการวิบัติแบบเปราะ

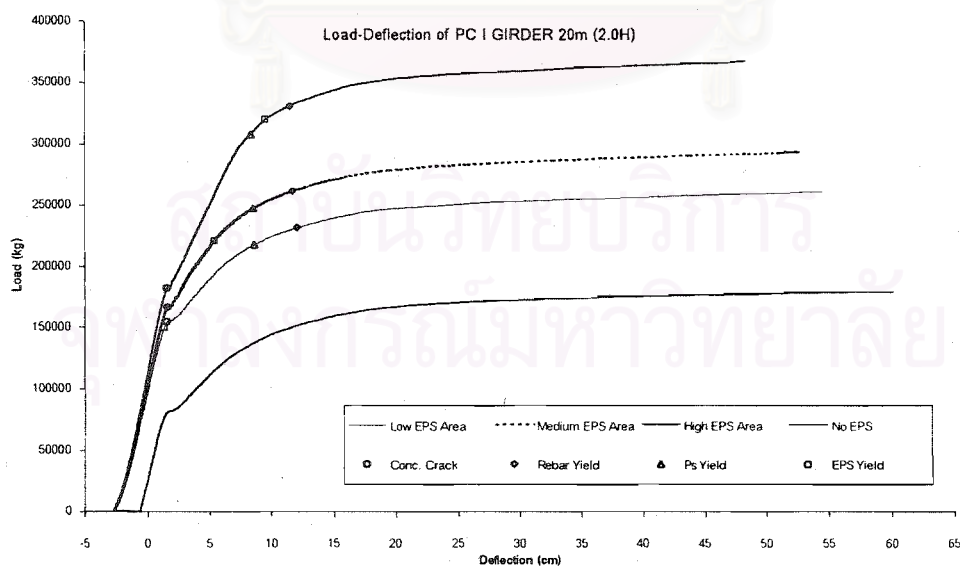
เมื่อเปรียบเทียบผลการเสริมกำลังจากรูปที่ 6.14 รูปที่ 6.15 และรูปที่ 6.16 สามารถสรุปได้ว่า การเสริมกำลังคาน PC I GIRDER เพื่อเพิ่มกำลังรับโมเมนต์ดัด เมื่อเพิ่มพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกจะได้กำลังประลัยและสติเฟนของคานเพิ่มขึ้น แต่ความเหนียวของคานจะลดลง พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อน้ำหนักแตกร้าว (cracking load) น้อยมาก ผลของพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงจะแสดงพฤติกรรมอย่างเห็นได้ชัดหลังจากคอนกรีตร้าว ผลของระยะเวลาเยื้องศูนย์ของลวดอัดแรงภายนอกที่มีต่อกำลังและสติเฟนของคานจะขึ้นอยู่กับหน่วยแรงดึงที่ใช้ในการดึงลวดเป็นหลัก ซึ่งจะกล่าวถึงในการศึกษาส่วนที่ 2 และผลของระยะเวลาเยื้องศูนย์ต่อความเหนียวจะกล่าวถึงในการศึกษาส่วนที่ 3

สรุปผลการศึกษาร่วมที่ 1

พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกมีผลต่อพฤติกรรมการเสริมกำลังรับโมเมนต์ดัดของคานอย่างเห็นได้ชัด เมื่อพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงเพิ่มขึ้นจะได้กำลังประลัยและสติฟเนสเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเหนียวจะลดลง ซึ่งผลของพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงเหมือนกันทั้งในกรณีที่เสริมกำลังคานโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากและเสริมกำลังคานโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย ดังแสดงในรูปที่ 6.17 และรูปที่ 6.18 ซึ่งได้จากการนำรูปที่ 6.11 รูปที่ 6.12 และรูปที่ 6.14 มาเรียบเรียงใหม่



รูปที่ 6.17 แสดงผลของการเสริมกำลังด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงต่าง ๆ กันที่ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย



รูปที่ 6.18 แสดงผลของการเสริมกำลังด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงต่าง ๆ กันที่ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก

ผลของระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกต่อกำลังรับโมเมนต์ดัดและสติฟเนสของคาน ในการศึกษาคานที่ 1 ยังไม่สามารถสรุปได้แน่ชัด เนื่องจากเมื่อเสริมกำลังด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงน้อย ใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางเพิ่มขึ้นทำให้ได้คานมีสติฟเนสลดลง แต่เมื่อเสริมกำลังด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงมาก ใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางเพิ่มขึ้นกลับให้ผลในทางตรงกันข้าม คือทำให้ได้ค่าสติฟเนสของคานมากขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เป็นผลเนื่องมาจากหน่วยแรงดึงที่ใช้ในการดึงลวดอัดแรง ซึ่งจะกล่าวต่อไปในการศึกษาคานที่ 2

ผลของระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกที่มีต่อความเหนียวของคาน ในการศึกษาคานที่ 1 พบว่าเมื่อเสริมกำลังคานโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางเพิ่มขึ้นทำให้คานมีความเหนียวเพิ่มขึ้น แต่ทั้งนี้อาจเป็นผลจากพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกที่ลดลง ดังนั้นผลของระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกที่มีต่อความเหนียวของคานจะกล่าวต่อไปในการศึกษาคานที่ 3

คานทั้ง 4 แบบเมื่อเสริมกำลังรับโมเมนต์ดัดด้วยวิธีอัดแรงภายนอก มีพฤติกรรมในการรับน้ำหนักคล้ายคลึงกัน โดยในกรณีของแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร เมื่อเสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางที่ต่างกัน 5 ระดับ พฤติกรรมการรับน้ำหนักของแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางแต่ละระดับ จะแตกต่างกันชัดเจนกว่าในกรณีการเสริมกำลังคานแบบอื่น ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณโมเมนต์ดัดที่ใช้ในการเสริมกำลังต่อกำลังเดิมของหน้าตัด ($M_2/M_{1,u}$) ของแผ่นพื้น RC SLAB มีสัดส่วนมากกว่าปริมาณโมเมนต์ดัดที่ใช้ในการเสริมกำลังต่อกำลังเดิมของหน้าตัดของคานแบบอื่น ดังแสดงในตารางที่ 6.2 และด้วยสาเหตุเดียวกันจึงทำให้คาน RC SLAB เมื่อเสริมกำลังด้วยวิธีอัดแรงภายนอก มีกำลังรับโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนที่สูงกว่าในกรณีเสริมกำลังคานแบบอื่น

การศึกษาคานที่ 2

ศึกษาผลของหน่วยแรงดึงที่ใช้ในการดึงลวดอัดแรงภายนอกต่อพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัด เมื่อใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกต่าง ๆ กัน การศึกษาในคานที่ 2 มีรูปแบบเหมือนกับการศึกษาในคานที่ 1 จะต่างกันเพียงตัวแปรที่กำหนดให้มีค่าคงที่และตัวแปรที่จะทำการศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 6.8

การกำหนดให้โมเมนต์ดัดประลัยที่ใช้ในการเสริมกำลัง ($M_{2,u}$) มีค่าคงที่ ทำให้การเสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางแต่ละค่ามีพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรง (A_{ps}) คงที่ แต่แรงดึงที่ใช้ดึงลวดอัดแรงไม่เท่ากัน โดยการศึกษาส่วนที่ 2 ศึกษาหน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงภายนอก 3 ระดับด้วยกันคือ 0.7 เท่าของหน่วยแรงดึงประลัย (หน่วยแรงดึงมาก), 0.5 เท่าของหน่วยแรงดึงประลัย (หน่วยแรงดึงปานกลาง) และ 0.3 เท่าของหน่วยแรงดึงประลัย (หน่วยแรงดึงน้อย)

การศึกษาส่วนที่ 2 ศึกษาการเสริมกำลังคานด้วยวิธีอัดแรงภายนอก โดยพิจารณาโมเมนต์ดัดที่ใช้เสริมกำลังในรูปของโมเมนต์ดัดประลัย ($M2_{ult}$) ดังนั้นกำลังของคานหลังจากที่เสริมกำลัง ควรมีค่าใกล้เคียงกับ ค่าโมเมนต์ดัดประลัยเดิมของคาน ($M1_{ult}$) บวกกับค่าโมเมนต์ดัดประลัยที่ใช้ในการเสริมกำลัง ($M2_{ult}$)

ตารางที่ 6.8 แสดงการเปลี่ยนค่าตัวแปรในการศึกษาส่วนที่ 2

Variable	ที่ปริมาณแรงดึง 1 ค่า (เปลี่ยนระยะเยื้องศูนย์กลาง)	ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 1 ค่า (เปลี่ยนปริมาณแรงดึง)
$M2_{ult}$	คงที่	คงที่
P_e	เปลี่ยน	เปลี่ยน
f_{pe}	คงที่	เปลี่ยน
A_{eps}	เปลี่ยน	คงที่

จากการศึกษาในส่วนที่ 1 พบว่าคานทุก ๆ แบบที่ทำการศึกษา มีพฤติกรรมคล้ายคลึงกัน ดังนั้นเพื่อเป็นการประหยัดเวลา ในการศึกษาส่วนที่ 2 จึงเลือกศึกษาคานเพียง 2 แบบคือ แผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร เพื่อเป็นตัวแทนคานคอนกรีตเสริมเหล็ก และคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร เพื่อเป็นตัวแทนคานคอนกรีตอัดแรง ตารางที่ 6.9 แสดงค่าโมเมนต์ดัดประลัยที่ใช้ในการเสริมกำลัง

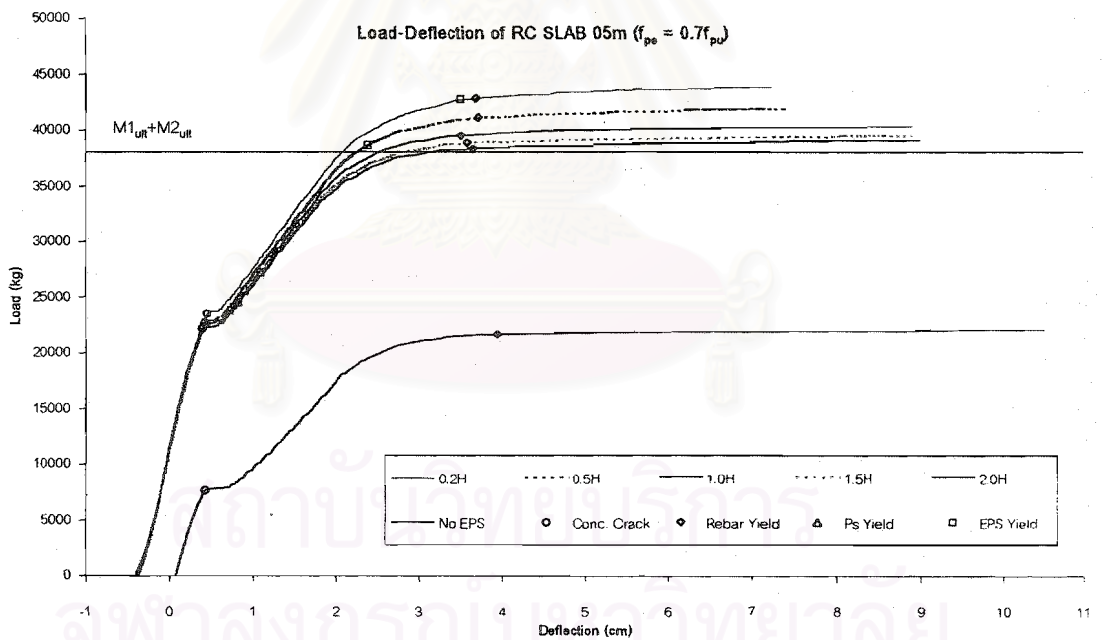
ตารางที่ 6.9 แสดงค่าโมเมนต์ดัดประลัยที่ใช้ในการเสริมคาน

ข้อมูลคาน				ข้อมูลเสริมกำลัง	
Type	Span (m)	Depth (cm)	$M1_{ult}$ (kg-cm)	$M2_{ult}$	$M1_{ult}+M2_{ult}$
RC SLAB	5.00	32	2,040,087	1,475,714	3,518,001
PC I GIRDER	20.00	144	72,002,000	27,800,000	99,802,000

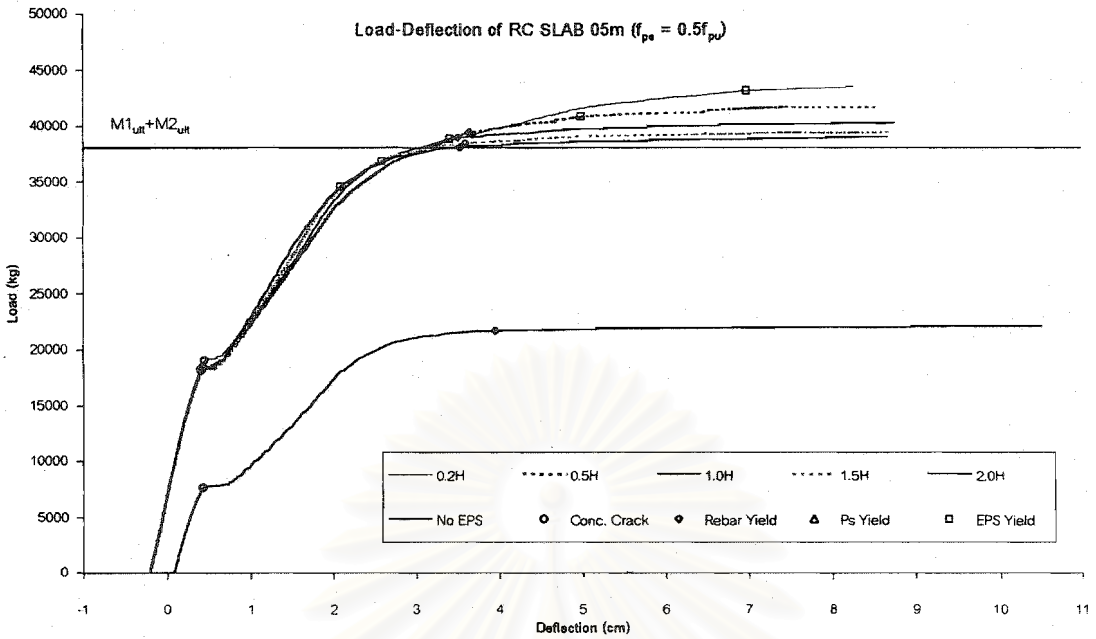
การเสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร

ตารางที่ 6.10 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้เสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร

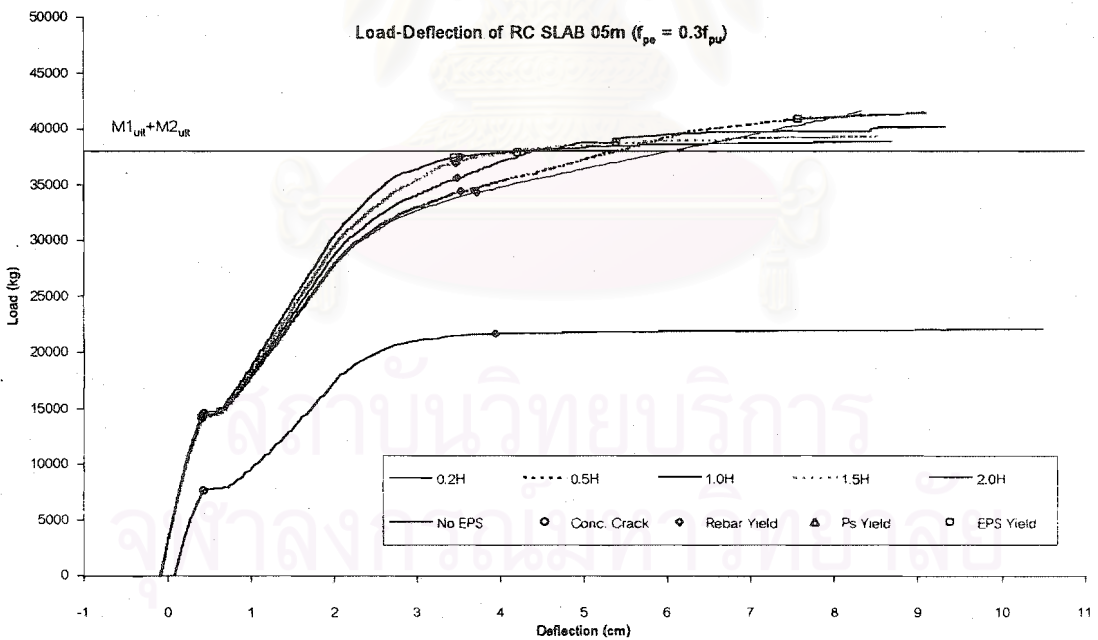
Variable	0.2H	0.5H	1.0H	1.5H	2.0H
drop (cm)	6.40	16.00	32.00	48.00	64.00
A_{eps} (cm ²)	3.620	2.517	1.670	1.249	0.998
หน่วยแรงดึงมาก, P_o (kg)	47,126	32,773	21,738	16,263	12,990
หน่วยแรงดึงปานกลาง, P_o (kg)	33,661	23,409	15,527	11,616	9,279
หน่วยแรงดึงน้อย, P_o (kg)	20197	14046	9316	6970	5567



รูปที่ 6.19 แสดงผลการเสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร
ที่ใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงภายนอกมาก ($0.7f_{pu}$)



รูปที่ 6.20 แสดงผลการเสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร
ที่ใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงภายนอกปานกลาง ($0.5f_{pu}$)



รูปที่ 6.21 แสดงผลการเสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร
ที่ใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงภายนอกน้อย ($0.3f_{pu}$)

ผลการเสริมกำลังรับโมเมนต์ดัดของแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร

รูปที่ 6.19 รูปที่ 6.20 และรูปที่ 6.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับระยะแอนตัวที่กลาวช่วง เปรียบเทียบระหว่างแผ่นพื้น RC SLAB ที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 5 ระดับ กับแผ่นพื้น RC SLAB ที่ไม่ได้เสริมกำลัง รูปที่ 6.19 เสริมกำลังแผ่นพื้นโดยใช้หน่วยแรงดึงมาก โดยใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงเท่ากับ 0.7 เท่าของหน่วยแรงดึงประลัย รูปที่ 6.20 เสริมกำลังแผ่นพื้นโดยใช้หน่วยแรงดึงปานกลาง โดยใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงเท่ากับ 0.5 เท่าของหน่วยแรงดึงประลัย และรูปที่ 6.21 เสริมกำลังแผ่นพื้นโดยใช้หน่วยแรงดึงน้อย โดยใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงเท่ากับ 0.3 เท่าของหน่วยแรงดึงประลัย ที่แต่ละระดับของหน่วยแรงดึงใช้พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกเท่ากัน เพื่อให้ได้ค่าโมเมนต์ดัดในการเสริมกำลังประลัย (M_{2_u}) มีค่าเท่ากันทั้ง 3 กรณี

เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดประลัยของแผ่นพื้นหลังจากการเสริมกำลัง กับค่าโมเมนต์ดัดประลัยของแผ่นพื้นเดิม (M_{1_u}) บวกกับค่าโมเมนต์ดัดประลัยที่ใช้ในการเสริมกำลัง (M_{2_u}) ได้ในรูปเดียวกัน จึงนำค่าโมเมนต์ดัดประลัยของแผ่นพื้นเดิมบวกกับโมเมนต์ดัดประลัยที่ใช้เสริมกำลัง มาแปลงให้อยู่ในรูปของน้ำหนักกระทำและแสดงด้วยเส้นตรงในแนวราบ

จากรูปที่ 6.19 พบว่าหลังจากเสริมกำลัง แผ่นพื้นมีการแอนตัวลดลงจนเกิดการโก่งตัว (camber) ขึ้น เนื่องจากโมเมนต์ดัดที่ใช้ในการเสริมกำลังมีค่าเป็นลบ และมีค่ามากกว่าโมเมนต์ดัดจากน้ำหนักของแผ่นพื้น

พฤติกรรมการรับน้ำหนักกระทำของแผ่นพื้นในช่วงก่อนคอนกรีตร้าว พบว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังมีค่าสตีฟเนสค่อนข้างคงที่ และใกล้เคียงกับแผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมกำลังในช่วงเดียวกัน

แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัวเกิดการร้าว (crack) ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน โดยแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยจะร้าวที่น้ำหนักกระทำสูงกว่า แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัวร้าวที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับจุดที่แผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมกำลังเกิดการร้าว หลังจากแผ่นพื้นร้าว แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีสตีฟเนสสูงกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก

แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัว เหล็กเสริมในแผ่นพื้นครากที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับแผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมกำลัง แต่จุดครากของลวดอัดแรงภายนอกของแผ่นพื้นที่เสริมกำลังมีตำแหน่งต่างกัน แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำน้อย แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำมากเรียงกันตามลำดับ ทั้งนี้แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัว ลวดอัดแรงภายนอกจะครากก่อนที่เหล็กเสริมคราก

จากรูปจะเห็นได้ว่า แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีความเหนียว (ductility) มากกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย เนื่องจากแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกน้อยกว่า แต่แผ่นพื้นที่เสริมโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีกำลังประลัยสูงกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก ซึ่งเนื่องจากแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกมากกว่า

โดยภาพรวมของแผ่นพื้น RC SLAB ที่เสริมกำลังโดยใช้หน่วยแรงดึงลวดมาก เมื่อใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกต่าง ๆ กันมีพฤติกรรมคล้ายคลึงกัน แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัวมีโมเมนต์ดัดประลัยมากกว่า โมเมนต์ดัดประลัยของแผ่นพื้นเดิม ($M1_{ult}$) บวกกับโมเมนต์ดัดประลัยที่ใช้ในการเสริมกำลัง ($M2_{ult}$)

จากรูปที่ 6.20 พบว่าหลังจากเสริมกำลังแผ่นพื้นมีการโก่งตัวขึ้น พฤติกรรมการรับน้ำหนักกระทำของแผ่นพื้นในช่วงก่อนคอนกรีตร้าว พบว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังมีค่าสติเฟนสค่อนข้างคงที่และใกล้เคียงกับแผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมกำลัง

แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัวเกิดการร้าว (crack) ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน นอกจากนี้แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัวร้าวที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับจุดที่แผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมกำลังเกิดการร้าว หลังจากแผ่นพื้นร้าว แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีสติเฟนสสูงกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางเล็กน้อย

แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัว เหล็กเสริมในแผ่นพื้นครากที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับแผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมกำลัง แต่จุดครากของลวดอัดแรงภายนอกของแผ่นพื้นที่เสริมกำลังมีตำแหน่งต่างกัน แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำน้อย แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำมากเรียงกันตามลำดับ ทั้งนี้แผ่นพื้นที่เสริมกำลังส่วนใหญ่ ลวดอัดแรงภายนอกจะครากก่อนที่เหล็กเสริมคราก ยกเว้นในแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 0.5H และ 0.2H ลวดอัดแรงภายนอกครากหลังเหล็กเสริม

จากรูปจะเห็นได้ว่า แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีความเหนียว (ductility) มากกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย เนื่องจากแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกน้อยกว่า แต่แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีกำลังประลัยสูงกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก ซึ่งเนื่องจากแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกมากกว่า

โดยภาพรวมของแผ่นพื้น RC SLAB ที่เสริมกำลังโดยใช้หน่วยดิ่งลดปานกลาง เมื่อใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกต่าง ๆ กันมีพฤติกรรมแตกต่างกันเล็กน้อย โดยหลังจากที่คอนกรีตร้าว แผ่นพื้นที่เสริมกำลังด้วยระยะเยื้องศูนย์กลางมาก มีสติเฟเนสมากกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังด้วยระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยเล็กน้อย แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัวมีโมเมนต์ดัดประลัยมากกว่าโมเมนต์ดัดประลัยของแผ่นพื้นเดิม ($M1_{ult}$) บวกกับโมเมนต์ดัดประลัยที่ใช้ในการเสริมกำลัง ($M2_{ult}$)

จากรูปที่ 6.21 พบว่าหลังจากเสริมกำลังแผ่นพื้นมีการโก่งตัวขึ้น พฤติกรรมการรับน้ำหนักกระทำของแผ่นพื้นในช่วงก่อนคอนกรีตร้าว พบว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังมีค่าสติเฟเนสค่อนข้างคงที่และใกล้เคียงกับแผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมกำลัง

แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัวเกิดการร้าว (crack) ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน โดยแผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัวร้าวที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับจุดที่แผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมกำลังเกิดการร้าว หลังจากแผ่นพื้นร้าว แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีสติเฟเนสสูงกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยอย่างเห็นได้ชัด

แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัว เหล็กเสริมในแผ่นพื้นครากที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับแผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมกำลัง แต่จุดครากของลวดอัดแรงภายนอกของแผ่นพื้นที่เสริมกำลังมีตำแหน่งต่างกัน แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำน้อย แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำมากเรียงกันตามลำดับ ทั้งนี้แผ่นพื้นที่เสริมกำลังส่วนใหญ่ ลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่หลังเหล็กเสริมเกิดการคราก ยกเว้นในแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 0.2H ลวดอัดแรงไม่เกิดการคราก

จากรูปจะเห็นได้ว่า แผ่นพื้นที่เสริมโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีกำลังประลัยสูงกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก ซึ่งเนื่องมาจากแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกมากกว่า

โดยภาพรวมของแผ่นพื้น RC SLAB ที่เสริมกำลังโดยใช้หน่วยแรงดิ่งลดน้อย เมื่อใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกต่าง ๆ กันมีพฤติกรรมแตกต่างกันในช่วงหลังจากคอนกรีตร้าว แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก มีสติเฟเนสมากกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยอย่างเห็นได้ชัด แผ่นพื้นที่เสริมกำลังทุกตัวมีโมเมนต์ดัดประลัยมากกว่าโมเมนต์ดัดประลัยของแผ่นพื้นเดิม ($M1_{ult}$) บวกกับโมเมนต์ดัดประลัยที่ใช้ในการเสริมกำลัง ($M2_{ult}$)

เมื่อเปรียบเทียบผลการเสริมกำลังจากรูปที่ 6.19 รูปที่ 6.20 และรูปที่ 6.21 สามารถสรุปได้ว่า การเสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB เพื่อเพิ่มกำลังรับโมเมนต์ดัด เมื่อเพิ่มแรงดิ่งที่ใช้ใน

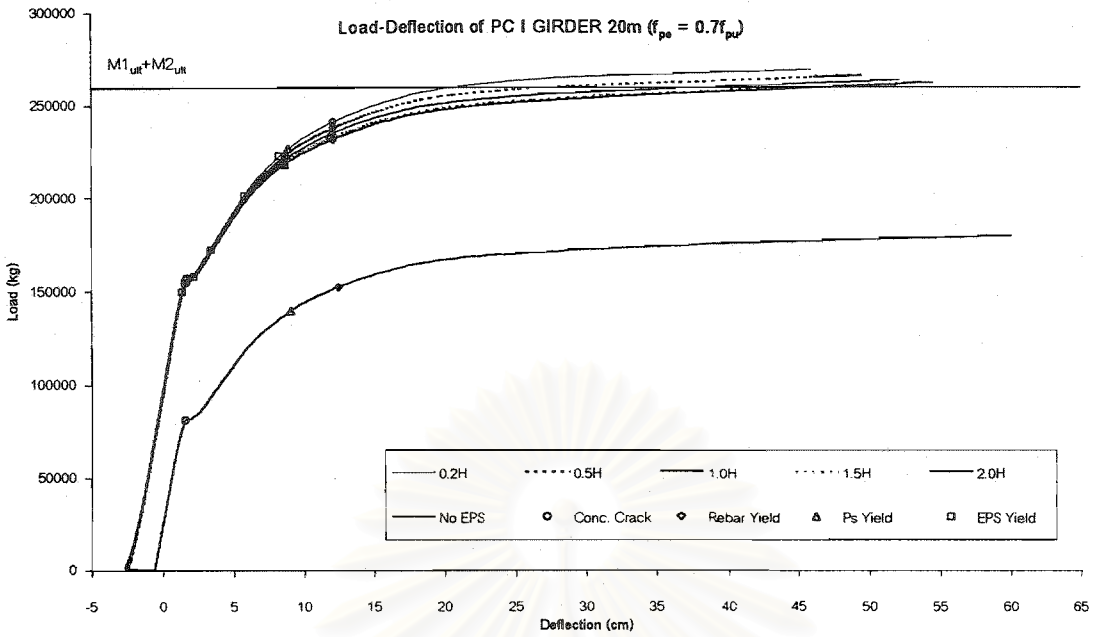
การดึงลวดอัดแรงภายนอกจะทำให้ระยะโก่งตัวเริ่มแรก (camber) และสติฟเนสของแผ่นพื้นเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อกำลังประลัยและความเหนียวของคาน ปริมาณแรงดึงที่เพิ่มขึ้นยังช่วยเพิ่มค่าน้ำหนักแตกร้าว (cracking load) อีกด้วย เมื่อใช้หน่วยแรงดึงมากแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีสติฟเนสดีกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก แต่เมื่อใช้หน่วยแรงดึงน้อยแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากกลับมีสติฟเนสดีกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย

การเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร

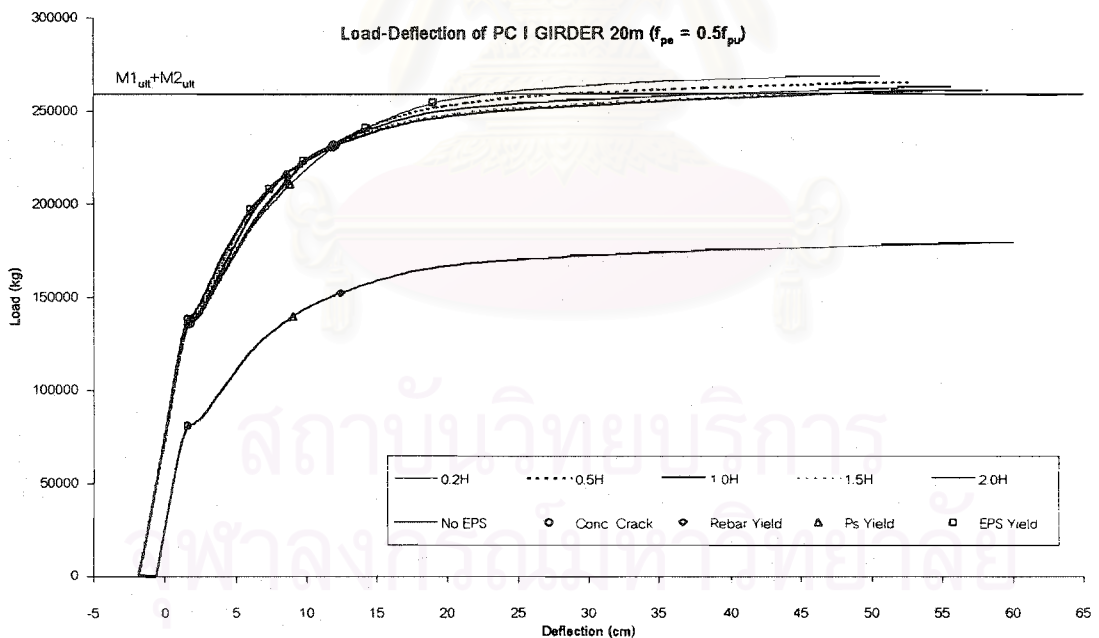
ตารางที่ 6.11 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้เสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร

Variable	0.2H	0.5H	1.0H	1.5H	2.0H
drop (cm)	28.8	72.0	144.0	216.0	288.0
A_{eps} (cm ²)	12.215	9.028	6.292	4.828	3.917
หน่วยแรงดึงมาก, P_o (kg)	159,039	117,540	81,916	62,863	51,001
หน่วยแรงดึงปานกลาง, P_o (kg)	113,599	83,957	58,512	44,902	36,429
หน่วยแรงดึงน้อย, P_o (kg)	68,160	50,374	35,107	26,941	21,858

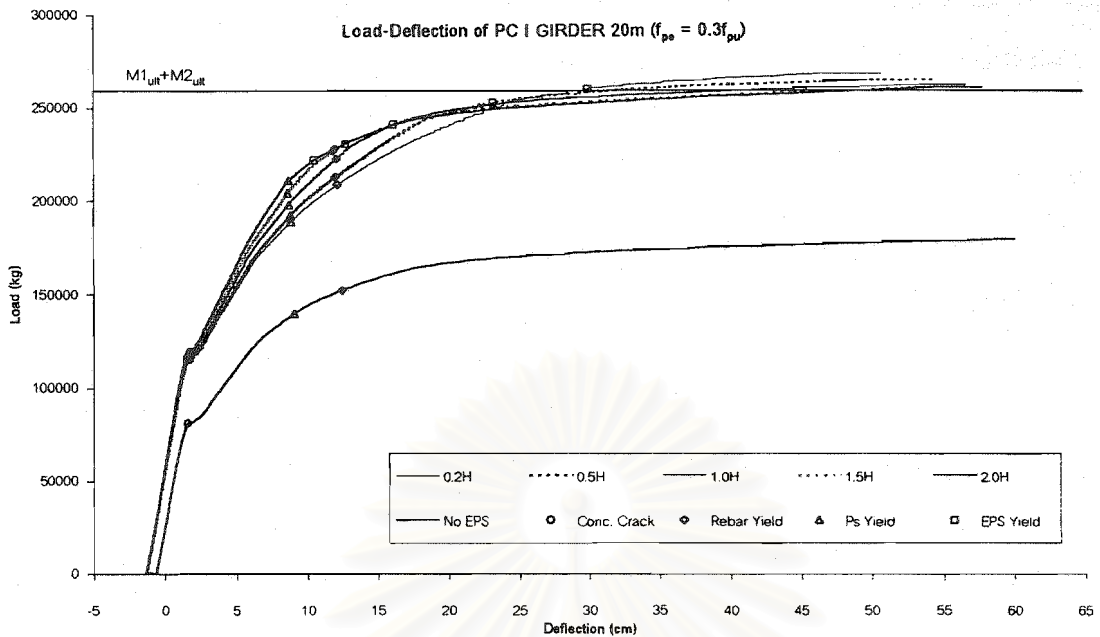
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.22 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร
ที่ใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงภายนอกมาก ($0.7f_{pu}$)



รูปที่ 6.23 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร
ที่ใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงภายนอกปานกลาง ($0.5f_{pu}$)



รูปที่ 6.24 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร
ที่ใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงภายนอกน้อย ($0.3f_{pu}$)

ผลการเสริมกำลังรับโมเมนต์ดัดของคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร

รูปที่ 6.22 รูปที่ 6.23 และรูปที่ 6.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับระยะ
แฉ่นตัวที่กึ่งกลางคาน เปรียบเทียบระหว่างคาน PC I GIRDER ที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง
5 ระดับ กับคาน PC I GIRDER ที่ไม่ได้เสริมกำลัง รูปที่ 6.22 เสริมกำลังคานโดยใช้หน่วยแรง
ดึงมาก โดยใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงเท่ากับ 0.7 เท่าของหน่วยแรงดึงประลัย รูปที่ 6.23 เสริม
กำลังคานโดยใช้หน่วยแรงดึงปานกลาง โดยใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงเท่ากับ 0.5 เท่าของ
หน่วยแรงดึงประลัย และรูปที่ 6.24 เสริมกำลังคานโดยใช้หน่วยแรงดึงน้อย โดยใช้หน่วยแรงดึงใน
ลวดอัดแรงเท่ากับ 0.3 เท่าของหน่วยแรงดึงประลัย ที่แต่ละระดับของหน่วยแรงดึงใช้พื้นที่หน้าตัด
ลวดอัดแรงภายนอกเท่ากัน เพื่อให้ได้ค่าโมเมนต์ดัดในการเสริมกำลังประลัย ($M2_{ult}$) มีค่าเท่ากัน
ทั้ง 3 กรณี

เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดประลัยของคานหลังจากการเสริมกำลัง กับค่า
โมเมนต์ดัดประลัยของคานเดิม ($M1_{ult}$) บวกกับค่าโมเมนต์ดัดประลัยที่ใช้ในการเสริมกำลัง ($M2_{ult}$)
ได้ในรูปเดียวกัน จึงนำค่าโมเมนต์ดัดประลัยของคานเดิมบวกกับโมเมนต์ดัดประลัยที่ใช้เสริม
กำลัง มาแปลงให้อยู่ในรูปของน้ำหนักกระทำและแสดงด้วยเส้นตรงในแนวราบ

จากรูปที่ 6.22 พบว่าหลังจากเสริมกำลัง คานมีการโก่งตัว (camber) ขึ้น พฤติกรรมการรับน้ำหนักกระทำของคานในช่วงก่อนคอนกรีตร้าว พบว่าคานที่เสริมกำลังมีค่าสตีเฟนส์ค่อนข้างคงที่ และใกล้เคียงกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง

คานที่เสริมกำลังทุกตัวเกิดการร้าว (crack) ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน โดยคานที่เสริมกำลังทุกตัวร้าวที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับจุดที่คานซึ่งไม่ได้เสริมกำลังเกิดการร้าวหลังจากคานร้าว คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีสตีเฟนส์สูงกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางเล็กน้อย

คานเสริมกำลังทุกตัว เหล็กเสริมและลวดอัดแรงในคานครากที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง แต่จุดครากของลวดอัดแรงภายนอกของคานที่เสริมกำลังมีตำแหน่งต่างกัน คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำน้อย คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่น้ำหนักกระทำมากเรียงกันตามลำดับ ทั้งนี้คานที่เสริมกำลังทุกตัว ลวดอัดแรงภายนอกจะครากก่อนที่เหล็กเสริมคราก

จากรูปจะเห็นได้ว่า คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีความเหนียว (ductility) มากกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย เนื่องจากคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกน้อยกว่า แต่คานที่เสริมโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีกำลังประลัยสูงกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก ซึ่งเนื่องจากคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกมากกว่า

โดยภาพรวมของคาน PC I GIRDER ที่เสริมกำลังโดยใช้หน่วยแรงดึงลวดมาก เมื่อใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกต่าง ๆ กันมีพฤติกรรมคล้ายคลึงกัน คานที่เสริมกำลังทุกตัวมีโมเมนต์ดัดประลัยมากกว่า โมเมนต์ดัดประลัยของคานเดิม ($M_{1,ult}$) บวกกับโมเมนต์ดัดประลัยที่ใช้ในการเสริมกำลัง ($M_{2,ult}$)

จากรูปที่ 6.23 พบว่าหลังจากเสริมกำลังคานมีการโก่งตัว (camber) ขึ้น พฤติกรรมการรับน้ำหนักกระทำของคานในช่วงก่อนคอนกรีตร้าว พบว่าคานที่เสริมกำลังมีค่าสตีเฟนส์ค่อนข้างคงที่ และใกล้เคียงกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง

คานที่เสริมกำลังทุกตัวเกิดการร้าว (crack) ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน โดยคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากร้าวที่น้ำหนักกระทำสูงกว่าเล็กน้อย คานที่เสริมกำลังทุกตัวร้าวที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับจุดที่คานซึ่งไม่ได้เสริมกำลังเกิดการร้าว หลังจากคานร้าว คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีสตีเฟนส์สูงกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางเล็กน้อย

คานที่เสริมกำลังทุกตัว เหล็กเสริมและลวดอัดแรงในคานครากที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง แต่จุดครากของลวดอัดแรงภายนอกของคานที่เสริมกำลัง มีตำแหน่งต่างกัน คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่ น้ำหนักกระทำน้อย คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่ น้ำหนักกระทำมากเรียงกันตามลำดับ ทั้งนี้คานที่เสริมกำลังส่วนใหญ่ ลวดอัดแรงภายนอกจะ ครากก่อนที่เหล็กเสริมคราก ยกเว้นคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 0.2H และ 0.5H ลวด อัดแรงภายนอกครากหลังเหล็กเสริม

จากรูปจะเห็นได้ว่า คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีความเหนียว (ductility) มากกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย เนื่องจากคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะ เยื้องศูนย์กลางมากมีพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกน้อยกว่า แต่คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้อง ศูนย์กลางน้อยมีกำลังประลัยสูงกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก ซึ่งเนื่องจากคานที่ เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกมากกว่า

โดยภาพรวมของคาน PC I GIRDER ที่เสริมกำลังโดยใช้หน่วยแรงดึงลวดปานกลาง เมื่อ ใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกต่าง ๆ กันมีพฤติกรรมแตกต่างกันเล็กน้อย คานที่เสริม กำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีสติเฟนสมากกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย เล็กน้อย คานที่เสริมกำลังทุกตัวมีโมเมนต์ดัดประลัยมากกว่า โมเมนต์ดัดประลัยของคานเดิม (M_{1u}) บวกกับโมเมนต์ดัดประลัยที่ใช้ในการเสริมกำลัง (M_{2u})

จากรูปที่ 6.24 พบว่าหลังจากเสริมกำลังคานมีการโก่งตัว (camber) ขึ้น พฤติกรรมการ รับน้ำหนักกระทำของคานในช่วงก่อนคอนกรีตร้าว พบว่าคานที่เสริมกำลังมีค่าสติเฟนสค่อนข้าง คงที่ และใกล้เคียงกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีค่าสติเฟ นสมากกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางเล็กน้อย

คานที่เสริมกำลังทุกตัวเกิดการร้าว (crack) ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน โดยคานที่เสริมกำลัง ด้วยระยะเยื้องศูนย์กลางมากจะร้าวที่น้ำหนักกระทำสูงกว่าเล็กน้อย คานที่เสริมกำลังทุกตัวร้าวที่ระยะ แอนตัวใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับจุดที่คานซึ่งไม่ได้เสริมกำลังเกิดการร้าว หลังจากคานร้าว คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีสติเฟนสสูงกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้อง ศูนย์กลางน้อยอย่างเห็นได้ชัด

คานที่เสริมกำลังทุกตัว เหล็กเสริมและลวดอัดแรงในคานครากที่ระยะแอนตัวใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง แต่จุดครากของลวดอัดแรงภายนอกของคานที่เสริมกำลัง มีตำแหน่งต่างกัน คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่ น้ำหนักกระทำน้อย คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่

น้ำหนักกระทำมากเรียงกันตามลำดับ ทั้งนี้คานที่เสริมกำลังส่วนใหญ่ ลวดอัดแรงภายนอกจะครากที่หลังเหล็กเสริมเกิดการคราก ยกเว้นในคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 2.0H ลวดอัดแรงภายนอกครากก่อนเหล็กเสริม

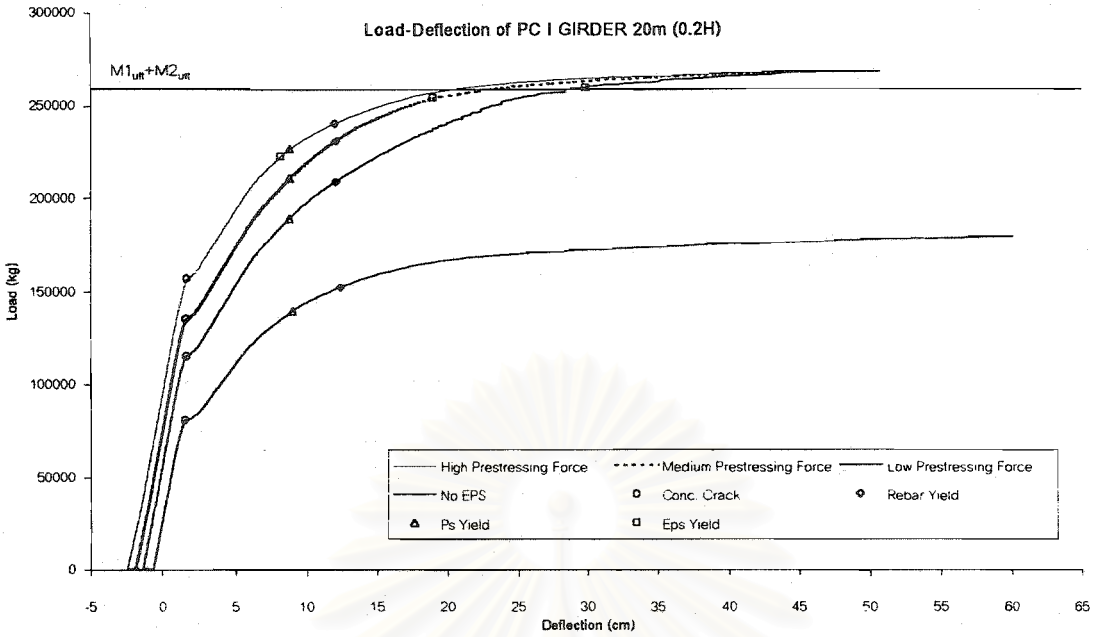
จากรูปจะเห็นได้ว่า คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีความเหนียว (ductility) มากกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย เนื่องจากคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกน้อยกว่า แต่คานที่เสริมโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีกำลังประลัยสูงกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก ซึ่งเนื่องจากคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกมากกว่า

โดยภาพรวมของคาน PC I GIRDER ที่เสริมกำลังโดยใช้หน่วยแรงดึงลวดน้อย เมื่อใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกต่าง ๆ กัน มีพฤติกรรมแตกต่างกันในช่วงหลังจากคอนกรีตร้าว คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีสติฟเนสมากกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย คานที่เสริมกำลังทุกตัวมีโมเมนต์ดัดประลัยมากกว่า โมเมนต์ดัดประลัยของคานเดิม (M_{1UH}) บวกกับโมเมนต์ดัดประลัยที่ใช้ในการเสริมกำลัง (M_{2UH})

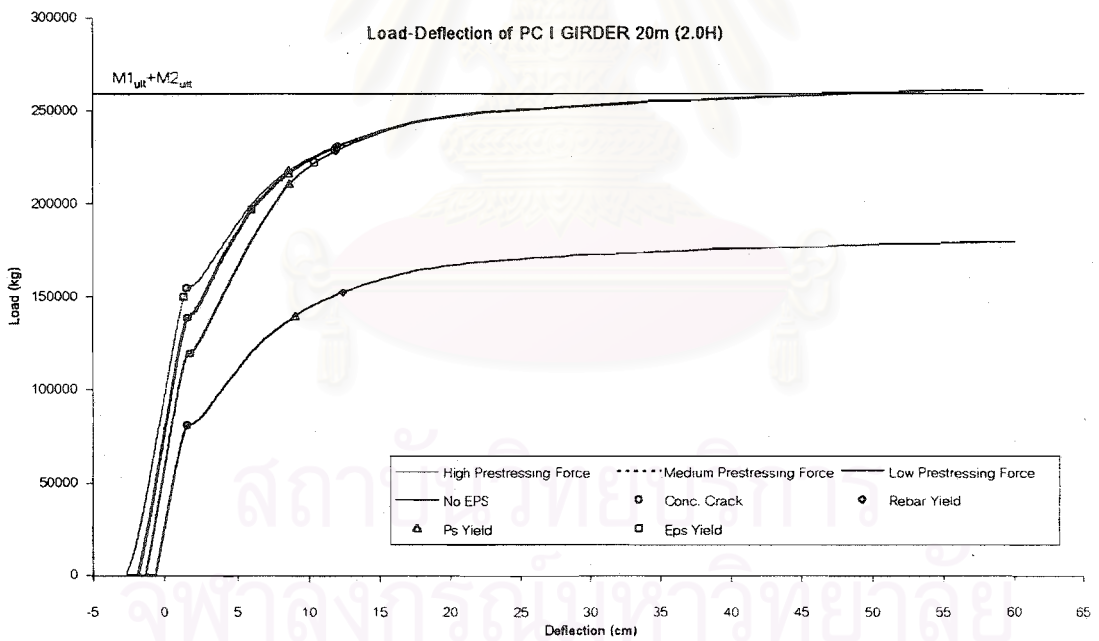
เมื่อเปรียบเทียบผลการเสริมกำลังจากรูปที่ 6.22 รูปที่ 6.23 และรูปที่ 6.24 สามารถสรุปได้ว่า การเสริมกำลังคาน PC I GIRDER เพื่อเพิ่มกำลังรับโมเมนต์ดัด เมื่อเพิ่มปริมาณแรงดึงในลวดอัดแรงภายนอกจะทำให้ระยะโก่งตัวเริ่มแรก (camber) และสติฟเนสของคานเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อกำลังประลัยและความเหนียวของคาน ปริมาณแรงดึงที่เพิ่มขึ้นยังช่วยเพิ่มค่าน้ำหนักแตกร้าว (cracking load) อีกด้วย เมื่อใช้หน่วยแรงดึงมากคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีสติฟเนสดีกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก แต่เมื่อใช้ปริมาณแรงดึงน้อยคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากกลับมีสติฟเนสดีกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย

สรุปผลการศึกษาส่วนที่ 2

การเสริมกำลังคานด้วยวิธีอัดแรงภายนอกเพื่อเพิ่มกำลังรับโมเมนต์ดัด เมื่อเพิ่มปริมาณแรงดึงในลวดอัดแรงภายนอกจะทำให้ระยะโก่งตัวเริ่มแรก (camber) และสติฟเนสของคานเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อกำลังประลัยและความเหนียวของคาน ปริมาณแรงดึงที่เพิ่มขึ้นยังช่วยเพิ่มค่าน้ำหนักแตกร้าว (cracking load) อีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 6.25 และรูปที่ 6.26 ซึ่งได้จากการนำรูปที่ 6.22 รูปที่ 6.23 และรูปที่ 6.24 มาเรียบเรียงใหม่



รูปที่ 6.25 แสดงผลของการเสริมกำลังด้วยหน่วยแรงดึงต่าง ๆ กันที่ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย



รูปที่ 6.26 แสดงผลของการเสริมกำลังด้วยหน่วยแรงดึงต่าง ๆ กันที่ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก

กำลังรับโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตที่ได้จากการเสริมกำลัง เป็นไปตามสมการที่ 6.3 ทั้งนี้เนื่องมาจาก ค่าระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอก (e) ที่ใช้คำนวณหา $M2_{ult}$ เป็นค่าขณะที่คานยังไม่ได้รับน้ำหนักกระทำภายนอก ในความเป็นจริงเมื่อคานรับน้ำหนักกระทำเพิ่มขึ้น

ตำแหน่งของแกนสะเทินจะเลื่อนสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อลวดอัดแรงภายนอกมีระยะเยื้องศูนย์กลางเพิ่มขึ้น ทำให้กำลังรับโมเมนต์ดัดเพิ่มมากขึ้น

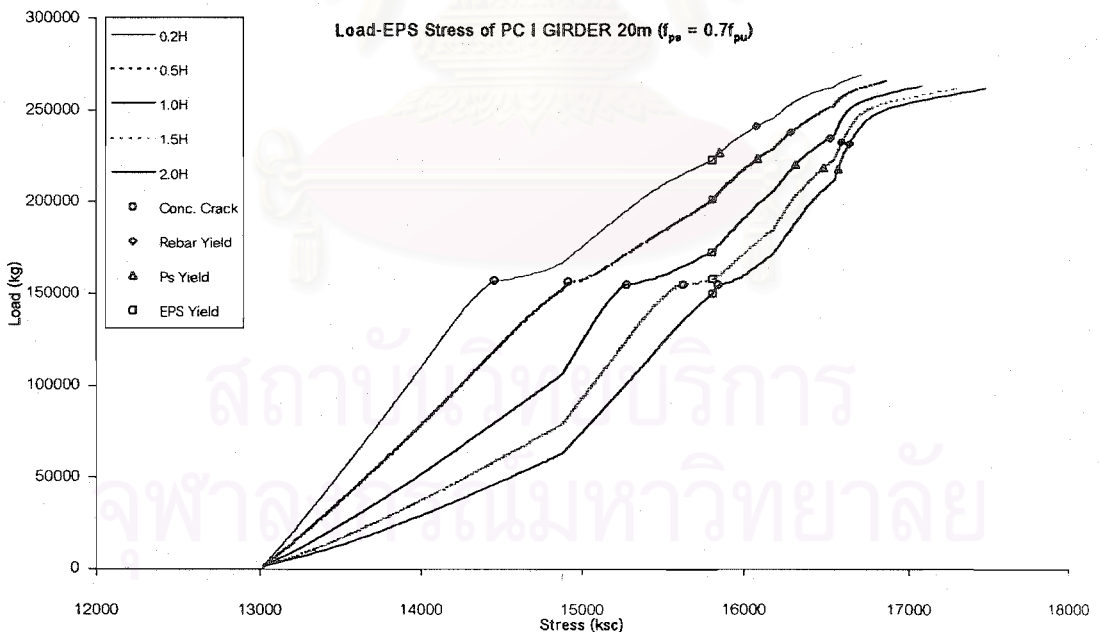
$$M_n > M1_{ult} + M2_{ult}$$

สมการที่ 6.3

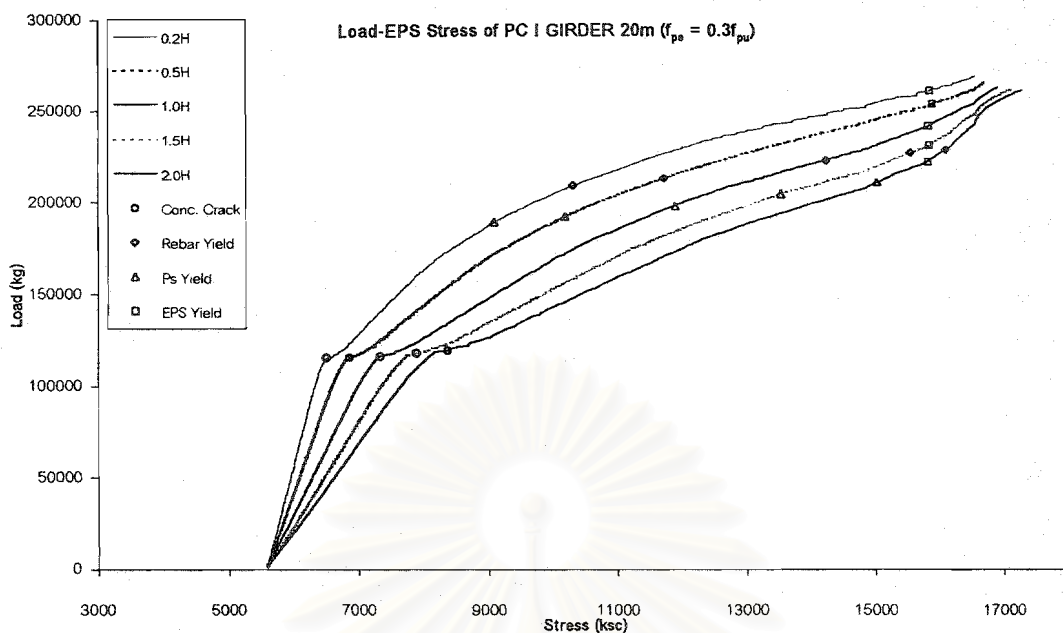
สมการที่ 6.3 สามารถทำนายกำลังประลัยอย่างคร่าว ๆ ได้ โดยมีเงื่อนไขคือ

- 1) ณ หน้าตัดที่พิจารณาต้องไม่มีการลดลงของระยะเยื้องศูนย์กลาง (มี deviator)
- 2) ลวดอัดแรงภายนอกต้องเกิดการครากคราก
- 3) คานต้องเกิดวิบัติที่หน้าตัดที่พิจารณา

เมื่อใช้หน่วยแรงดึงมากคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยมีสติฟเนสดีกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก แต่เมื่อใช้หน่วยแรงดึงน้อยคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากกลับมีสติฟเนสดีกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงในลวดอัดแรงภายนอกหลังจากคานรับน้ำหนักกระทำ คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก หน่วยแรงในลวดอัดแรงภายนอกจะเพิ่มขึ้นเร็วกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย ดังแสดงในรูปที่ 6.27 และรูปที่ 6.28



รูปที่ 6.27 แสดงการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงในลวดอัดแรงภายนอกที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางต่าง ๆ กัน เมื่อใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงภายนอกมาก ($0.7f_{pu}$)



รูปที่ 6.28 แสดงการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงในลวดอัดแรงภายนอกที่เสริมกำลัง โดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางต่าง ๆ กัน เมื่อใช้หน่วยแรงถึงในลวดอัดแรงภายนอกน้อย ($0.3f_{pu}$)

จากรูปที่ 6.27 พบว่าในกรณีที่ใช้แรงดึงมาก คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก ลวดอัดแรงภายนอกมีหน่วยแรงเพิ่มขึ้นเร็วกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย ทำให้ลวดอัดแรงภายนอกของคานที่เสริมกำลังด้วยระยะเยื้องศูนย์กลางมากครากก่อนคานตัวอื่น เมื่อลวดอัดแรงครากค่ายังไม่คูล์สของลวดอัดแรงจะลดลง คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากจึงมีสติเฟนน้อยกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย

รูปที่ 6.28 พบว่าในกรณีที่ใช้หน่วยแรงดึงน้อย คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก ลวดอัดแรงภายนอกมีหน่วยแรงเพิ่มขึ้นเร็วกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย แต่ด้วยแรงดึงเริ่มแรกที่มีค่าน้อยลวดอัดแรงจึงครากช้า และการที่คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก ลวดอัดแรงภายนอกมีหน่วยแรงเพิ่มขึ้นเร็วกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย ทำให้ในช่วงหลังจากคอนกรีตรั่ว คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีสติเฟนมากกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย

การศึกษาส่วนที่ 3

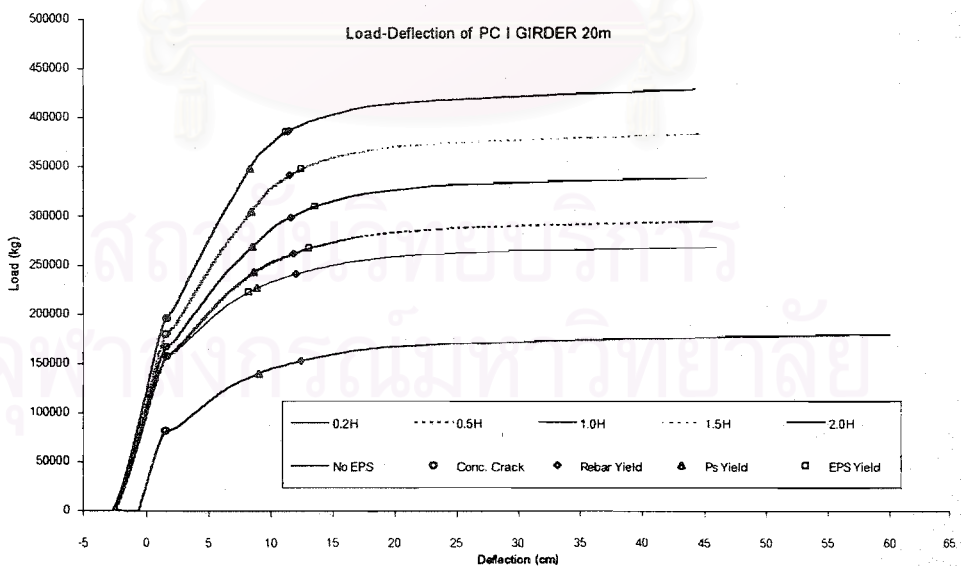
จากการศึกษาในส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 ทำให้เกิดประเด็นปัญหาว่า เมื่อเพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลางที่ใช้ในการเสริมกำลังทำให้คานมีความเหนียวเพิ่มขึ้น หรือเป็นเพราะระยะเยื้องศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้นทำให้สามารถใช้พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงน้อยลงจึงเป็นเหตุให้คานมีความเหนียวเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุ

นี้จึงศึกษาการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร โดยให้โมเมนต์ดัดที่ใช้เสริมกำลัง (M2) และพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกคงที่ แต่ใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางต่างกัน 5 ระดับ ดังแสดงในรูปที่ 6.29 และรูปที่ 6.30

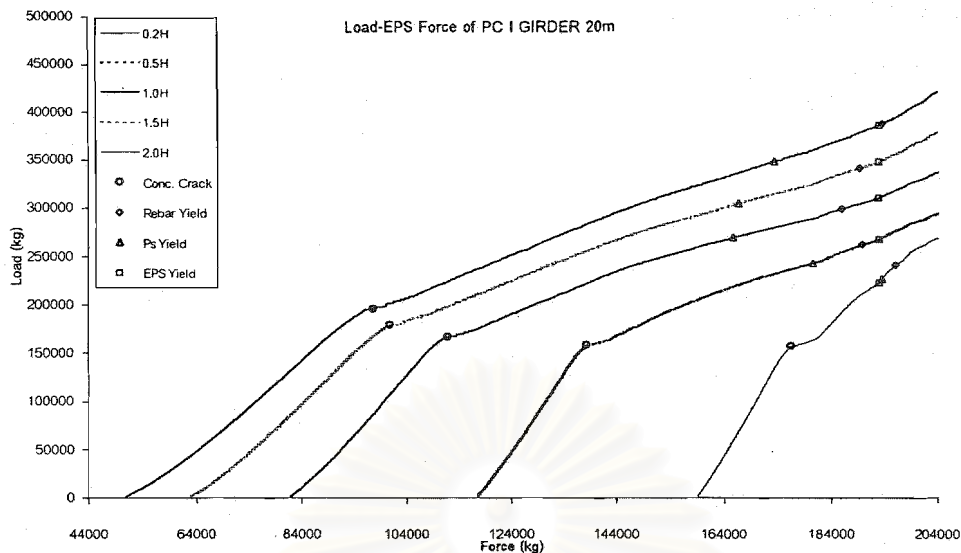
รูปที่ 6.29 แสดงให้เห็นว่าระยะเยื้องศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ทำให้คานมีความเหนียวเพิ่มขึ้น ดังนั้นในการศึกษาส่วนที่ 1 และ 2 ความเหนียวที่เพิ่มขึ้นเป็นผลจากพื้นที่หน้าตัดของลวดอัดแรงเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางที่มากขึ้นทำให้คานมีกำลังประลัยเพิ่มขึ้นแม้ว่าจะใช้พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกเท่าเดิม

ในกรณีที่ต้องการเสริมกำลังรับโมเมนต์ดัดของคานให้มีกำลังเพิ่มขึ้นมาก ๆ กำลังรับโมเมนต์ดัดประลัยของคานจะถูกจำกัดด้วยกำลังรับแรงดึงของแป้นยึดลวดอัดแรง (jacking corbel)^[4] เมื่อต้องการเสริมกำลังให้คานมีกำลังประลัยมาก ๆ สามารถทำได้โดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางให้มากขึ้นและลดแรงดึงในลวดอัดแรงภายนอกให้น้อยลง เมื่อใช้แรงดึงน้อยทำให้สามารถแก้ปัญหาในเรื่องกำลังรับแรงดึงของแป้นยึดลวดอัดแรงได้

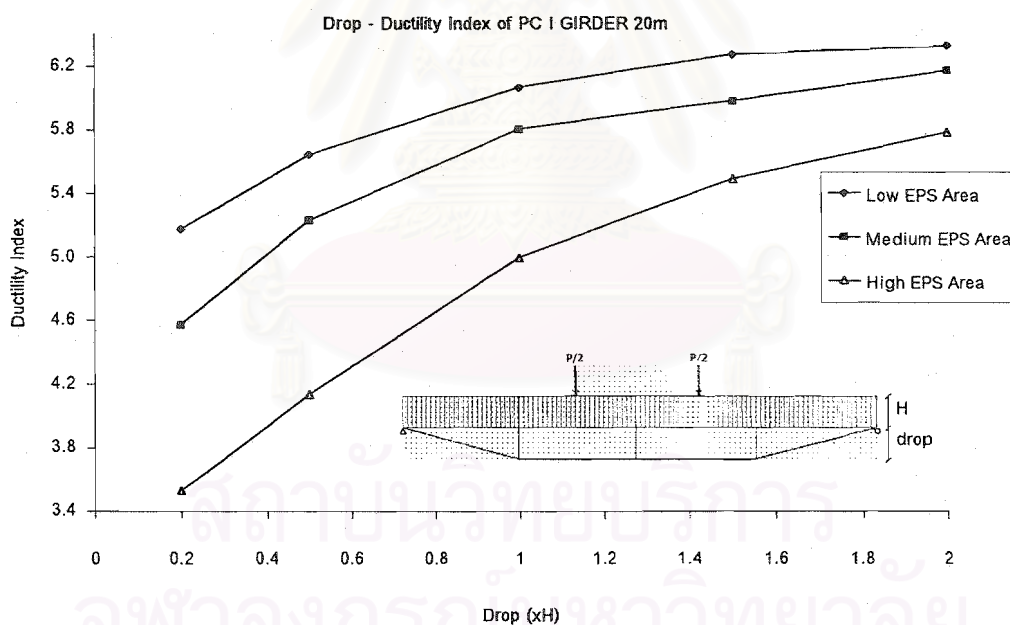
รูปที่ 6.30 แสดงให้เห็นว่า ถึงแม้ว่าการเสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก จะทำให้แรงดึงในลวดอัดแรงภายนอกเพิ่มขึ้นเร็วกว่าการเสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย แต่เนื่องจากคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก มีแรงดึงเริ่มต้นในลวดอัดแรงภายนอกน้อยกว่า ดังนั้นที่น้ำหนักกระทำเท่ากัน คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากจะเกิดแรงดึงในลวดอัดแรงน้อยกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย จึงช่วยให้แป้นยึดลวดอัดแรงรับแรงน้อย



รูปที่ 6.29 แสดงผลการเสริมกำลังคานเมื่อให้โมเมนต์ดัดที่ใช้ในการเสริมกำลัง และพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงคงที่



รูปที่ 6.30 แสดงแรงดึงในลวดอัดแรงภายนอกเมื่อเสริมกำลังคาน โดยให้โมเมนต์ดัดที่ใช้ในการเสริมกำลังและพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงคงที่



รูปที่ 6.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเยื้องศูนย์กลางกับความเหนียว

เมื่อนำผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร จากการศึกษาส่วนที่ 1 มาเขียนความสัมพันธ์ ระหว่างระยะเยื้องศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้น (เพื่อลดพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงโดยยังให้ค่าโมเมนต์ดัดในการเสริมกำลังเท่าเดิม) กับความเหนียวที่ได้ (ductility index) ดังแสดงในรูปที่ 6.31

จากรูปที่ 6.31 เห็นได้ว่าการเพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกในช่วงค่าน้อย ๆ ทำให้ได้ความเหนียวเพิ่มขึ้นมาก และค่อย ๆ ลดลงเมื่อระยะเยื้องศูนย์กลางมากขึ้น และสามารถเพิ่มได้ถึงค่าจำกัดที่ค่าหนึ่ง ไม่สามารถเพิ่มมากไปกว่านี้ได้

สรุป

การเสริมกำลังคานคอนกรีตด้วยวิธีอัดแรงภายนอก เมื่อนำไปเสริมกำลังสะพานใน แบบมาตรฐานสะพานในเขตชุมชนในภูมิภาค^[1] ของสำนักวิศวกรรมทางหลวงชนบท กรมโยธาธิการ กระทรวงมหาดไทย ได้พบพฤติกรรมคล้ายคลึงกันไม่ว่าจะเป็นสะพานแบบใด

พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอกที่ใช้เสริมกำลัง มีผลโดยตรงกับกำลังประลัย สติฟเนส และความเหนียวของคาน พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงที่เพิ่มขึ้นทำให้ได้กำลังและสติฟเนสของคานเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเหนียวของคานลดลง

เมื่อเพิ่มปริมาณแรงดึงในลวดอัดแรงภายนอกจะทำให้ระยะโก่งตัวเริ่มแรก (camber) และ สติฟเนสของคานเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อกำลังประลัยและความเหนียวของคาน ปริมาณแรงดึงที่เพิ่มขึ้นยังช่วยเพิ่มค่าน้ำหนักแตกร้าว (cracking load) ได้อีกด้วย

คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกเพิ่มขึ้น มีกำลังประลัยเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลางก็คือการเพิ่มโมเมนต์ดัดที่ใช้ในการเสริมกำลัง ในกรณีที่ใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงภายนอกมากระยะเยื้องศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้นทำให้สติฟเนสของคานลดลง แต่กรณีที่ใช้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงภายนอกน้อยระยะเยื้องศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้นกลับทำให้สติฟเนสของคานเพิ่มขึ้น ระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกไม่มีผลต่อความเหนียวของคาน แต่การเพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลางทำให้สามารถลดพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงลงได้ จึงมีผลทางอ้อมในการเพิ่มความเหนียวของคาน

การเสริมกำลังรับโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตด้วยวิธีอัดแรงภายนอก แรงดึง (prestressing force) ที่ใช้ดึงลวดอัดแรงภายนอกจะถูกจำกัดด้วยกำลังของแป้นยึดลวดอัดแรง (jacking corble) ดังนั้นความสามารถในการเพิ่มกำลังรับโมเมนต์ดัดของคานจึงถูกจำกัดไปด้วยการศึกษาพบว่าหากต้องการเพิ่มกำลังรับโมเมนต์ดัดให้มากขึ้นกว่าเดิม จำเป็นจะต้องเพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกให้มากขึ้น ถึงแม้ใช้แรงดึงได้เท่าเดิมแต่เมื่อเพิ่มระยะเยื้อง

ศูนย์ของลวดอัดแรงภายนอกให้มากขึ้น ก็ทำให้สามารถเพิ่มโมเมนต์ดัดในการเสริมกำลังได้มากขึ้น

การเสริมกำลังคานคอนกรีตด้วยวิธีอัดแรงภายนอกเพื่อให้คานมีกำลัง สติฟเนส และความเหนียวตามต้องการ สามารถปรับใช้พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอก ระยะเยื้องศูนย์ของลวดอัดแรงภายนอก และหน่วยแรงดึงที่ใช้ในการดึงลวดให้เหมาะสม เพื่อให้บรรลุเป้าหมายที่ต้องการได้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอก

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงแนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอก ที่มีผลต่อพฤติกรรม การเสริมกำลังรับโมเมนต์ดัดด้วยวิธีอัดแรงภายนอก ปัจจัยที่นำมาศึกษาคือ จำนวนและระยะห่างระหว่างตีเอดอร์ (deviator) แนวการวางตัวของลวดอัดแรง ระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรง (jacking corbel) และระยะห่างระหว่างตีเอดอร์ตัวแรกกับตัวสุดท้าย

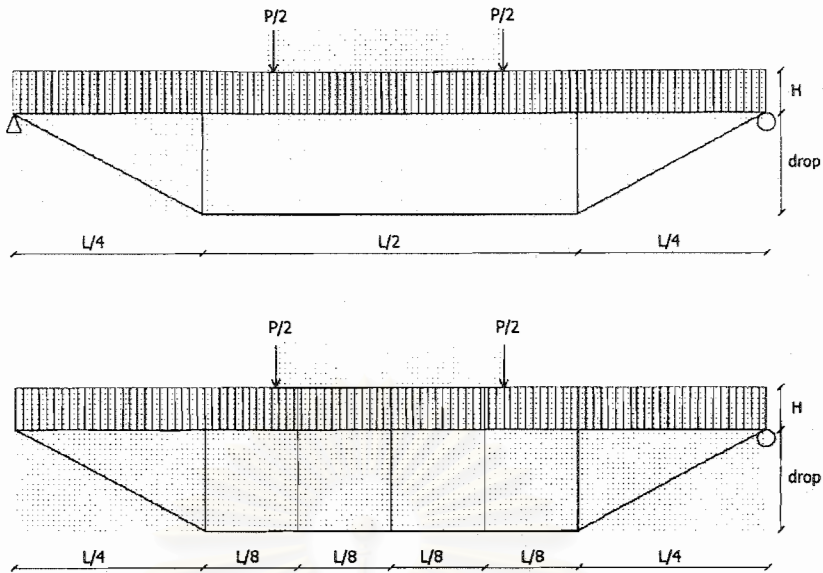
จากการศึกษาในบทที่ 6 พบว่าคานทุก ๆ แบบที่ทำการศึกษามีพฤติกรรมคล้ายคลึงกัน ดังนั้นเพื่อเป็นการประหยัดเวลา จึงเลือกศึกษาคานเพียง 2 แบบคือแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร เพื่อเป็นตัวแทนคานคอนกรีตเสริมเหล็ก และคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร เพื่อเป็นตัวแทนคานคอนกรีตอัดแรง และยังพบว่าเสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง ๆ กันพฤติกรรมที่ได้จะเรียงกันตามระยะเยื้องศูนย์กลางที่เปลี่ยนไป ดังนั้นจึงเลือกนำมาศึกษาเฉพาะค่าน้อยสุด (0.2H) และค่ามากที่สุด (2.0H) เพื่อให้เป็นตัวกรอบ เพราะเมื่อใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางอื่น ๆ จะมีพฤติกรรมอยู่ระหว่าง 2 ค่านี้ พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงก็เช่นเดียวกัน ทำการศึกษาเฉพาะพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงน้อยกับพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงมาก

จำนวนและระยะห่างระหว่างตีเอดอร์

ระยะห่างระหว่างตีเอดอร์เป็นปัจจัยโดยตรงที่มีผลต่อการลดลงของระยะเยื้องศูนย์กลาง (loss of eccentricity) แต่จากการศึกษาของ P. Spinelli และ S. Morano ^[19] พบว่าคานคอนกรีตอัดแรงภายนอกที่มีปริมาณเหล็กเสริม (ที่ไม่ได้อัดแรง) มาก มีพฤติกรรมใกล้เคียงกับคานคอนกรีตอัดแรงภายในแบบ bonded ดังนั้นในการเสริมกำลังคานคอนกรีตเดิมที่มีอยู่แล้ว ซึ่งถือว่ามีปริมาณเหล็กเสริมเดิมมาก ผลของระยะห่างระหว่างตีเอดอร์ต่อกำลังรับโมเมนต์ดัดน่าจะมีย่อย

การศึกษาในส่วนนี้เพื่อยืนยันว่าการเสริมกำลังด้วยวิธีอัดแรงภายนอกแบบที่มีระยะเยื้องศูนย์กลางมาก ยังให้พฤติกรรมแบบเดียวกันกับการศึกษาของ P. Spinelli และ S. Morano อีกทั้งยังศึกษาอีกด้วยว่า คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก ผลของระยะห่างระหว่างตีเอดอร์ต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักจะน้อยกว่าที่คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยหรือไม่

แนวการวางตัวของลวดอัดแรงที่ใช้ในการศึกษาเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู โดยใช้ตีเอดอร์จำนวน 2 ตัว และ 5 ตัว เพื่อเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างตีเอดอร์ดังแสดงในรูปที่ 7.1

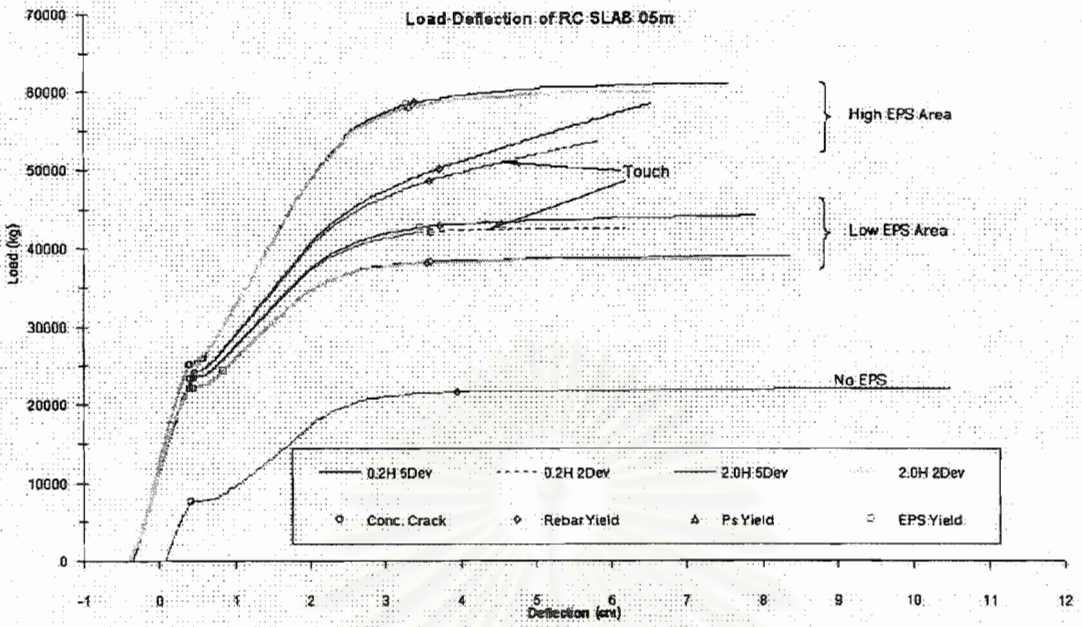


รูปที่ 7.1 แสดงคานที่เสริมกำลังเมื่อใช้ตีไวเอเตอร์จำนวน 2 ตัวและ 5 ตัว

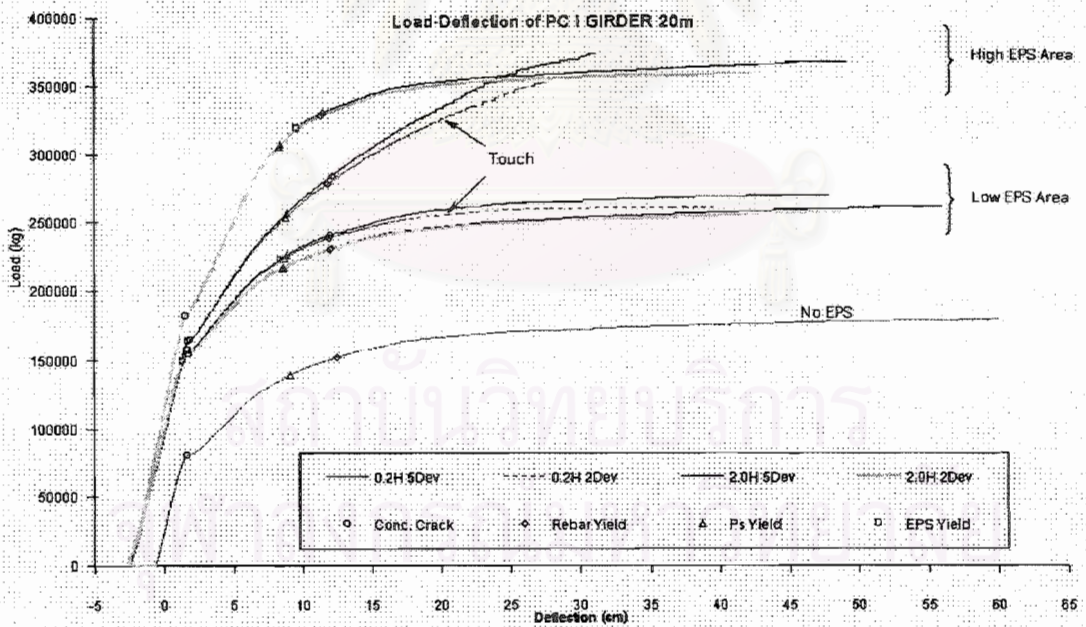
รูปที่ 7.2 และรูปที่ 7.3 แสดงพฤติกรรมการรับน้ำหนักของคานที่เสริมกำลังเมื่อใช้จำนวนตีไวเอเตอร์ต่างกัน เปรียบเทียบกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง เส้นกลุ่มบนคือพฤติกรรมของคานที่เสริมกำลังด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงมาก เส้นกลุ่มตรงกลางเป็นพฤติกรรมของคานที่เสริมกำลังด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงน้อย และเส้นล่างสุดคือพฤติกรรมของคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง คานที่เสริมกำลังทั้ง 2 กลุ่ม แต่ละกลุ่มประกอบไปด้วยคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก และคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย ซึ่งจะใช้ตีไวเอเตอร์จำนวน 2 ตัว และ 5 ตัว ดังนั้นในแต่ละกลุ่มจะมีคานที่เสริมกำลัง 4 ตัว

คานทุกตัวที่ทำการศึกษาใช้โมเมนต์ดัดในการเสริมกำลังเท่ากันหมด ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการเสริมกำลังเหมือนกับในบทที่ 6 การศึกษาส่วนที่ 1 สิ่งที่แตกต่างกันมีเพียงจำนวนและตำแหน่งของตีไวเอเตอร์เท่านั้น

สำหรับคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย ($0.2H$) และใช้ตีไวเอเตอร์จำนวน 2 ตัว ท้องคานจะแอ่นมาชนกับลวดอัดแรงภายนอก ซึ่งเป็นปัญหาแบบที่มีการสัมผัส (touch problem) วิธีวิเคราะห์ในการศึกษานี้ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ ค่าที่แสดงหลังจากจุดซึ่งมีการสัมผัสจึงเป็นค่าที่ไม่ถูกต้อง เพราะคิดเสมือนกับว่าแนวลวดอัดแรงภายนอกทะลุผ่านตัวคานไป (หรือเหมือนกับแนวลวดอัดแรงวางตัวอยู่ทางด้านข้างคาน)



รูปที่ 7.2 แสดงผลการเสริมกำลังสะพาน RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร
ที่ใช้ตีเวเตอร์จำนวน 2 ตัว และ 5 ตัว



รูปที่ 7.3 แสดงผลการเสริมกำลังสะพาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร
ที่ใช้ตีเวเตอร์จำนวน 2 ตัว และ 5 ตัว

รูปที่ 7.2 แสดงผลการเสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร ซึ่งพบว่าไม่ว่าจะเสริมกำลังแผ่นพื้นโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก / ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย หรือเสริมกำลังด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงมาก / พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงน้อย หากเสริมกำลังโดยใช้ดิวีเอเตอร์จำนวน 5 ตัว จะได้แผ่นพื้นที่มีกำลังและความเหนียวมากกว่า การเสริมกำลังโดยใช้ดิวีเอเตอร์จำนวน 2 ตัว ทั้งนี้พฤติกรรมจะเริ่มแตกต่างกันหลังจากที่เหล็กเสริมภายในแผ่นพื้นคราก

เมื่อลดจำนวนดิวีเอเตอร์ กำลังประลัยของแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก จะลดลงน้อยกว่า กำลังประลัยของแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย

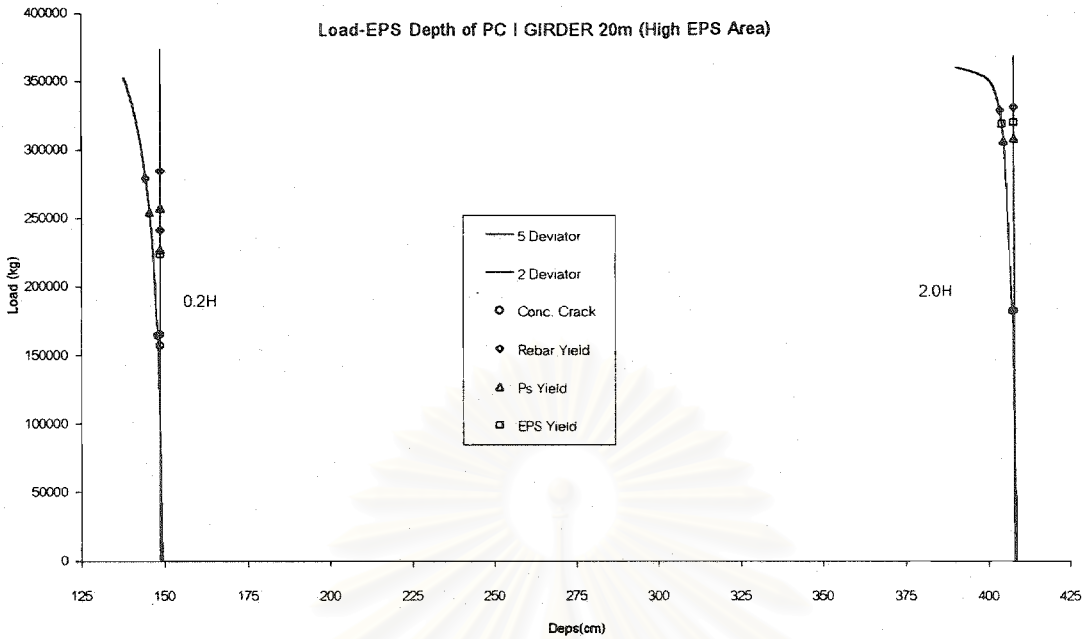
โดยภาพรวมในการเสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB เมื่อลดจำนวนดิวีเอเตอร์กำลังประลัยและความเหนียวของแผ่นพื้นจะลดลงไม่มาก แต่เมื่อเทียบกับแผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมกำลัง การเสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยและใช้ดิวีเอเตอร์เพียง 2 ตัว ความเหนียวของแผ่นพื้นจะลดลงจากเดิมมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 7.3 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร ซึ่งพบว่าไม่ว่าจะเสริมกำลังคานโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก / ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย หรือเสริมกำลังด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงมาก / พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงน้อย หากเสริมกำลังโดยใช้ดิวีเอเตอร์จำนวน 5 ตัว จะได้คานที่มีกำลังและความเหนียวมากกว่า การเสริมกำลังโดยใช้ดิวีเอเตอร์จำนวน 2 ตัว ทั้งนี้พฤติกรรมจะเริ่มแตกต่างกันหลังจากที่เหล็กเสริมภายในคานคราก

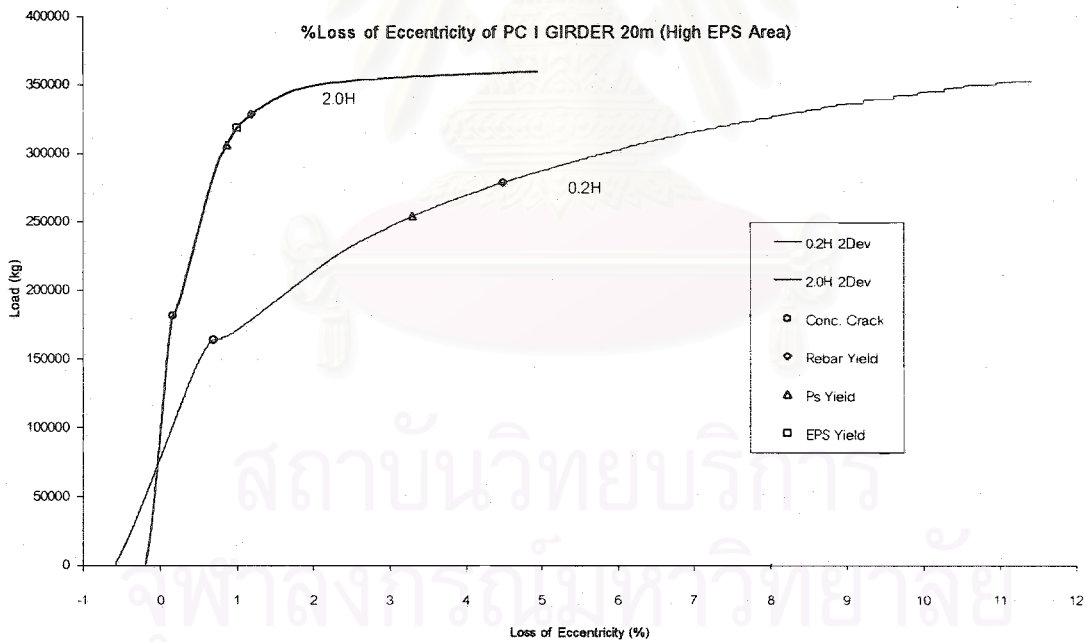
เมื่อลดจำนวนดิวีเอเตอร์ กำลังประลัยของคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก จะลดลงน้อยกว่า กำลังประลัยของคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย

โดยภาพรวมในการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER เมื่อลดจำนวนดิวีเอเตอร์กำลังประลัยและความเหนียวของคานจะลดลงไม่มาก แต่เมื่อเทียบกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง การเสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยและใช้ดิวีเอเตอร์เพียง 2 ตัว ความเหนียวของคานจะลดลงจากเดิมมาก

เพื่ออธิบายสาเหตุที่ทำให้เมื่อลดจำนวนดิวีเอเตอร์ลง คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากมีกำลังประลัยลดลงน้อยกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย จึงนำระดับของลวดอัดแรงภายนอกที่เปลี่ยนไปเมื่อมีน้ำหนักกระทำของทั้ง 2 กรณี มาเปรียบเทียบกันดังแสดงในรูปที่ 7.4 และนำระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกที่ลดลง มาเปรียบเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ของระยะเยื้องศูนย์กลางเริ่มต้นของทั้ง 2 กรณี ดังแสดงในรูปที่ 7.5 โดยระดับของลวดอัดแรงภายนอกที่น้ำหนักกระทำใด ๆ วัดเทียบจากผิวบนของคานที่แอนตัว ไม่ได้เทียบจากระนาบก่อนคานแอนตัว



รูปที่ 7.4 แสดงระดับของลวดอัดแรงภายนอก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางคาน



รูปที่ 7.5 แสดงระยะเยื้องศูนย์กลางที่ลดลงคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับระยะเยื้องศูนย์กลางเริ่มแรก

รูปที่ 7.4 แสดงระดับของลวดอัดแรงภายนอกที่กึ่งกลางคาน คานที่เสริมกำลังโดยใช้ดิวเเตอร์จำนวน 5 ตัว ที่กึ่งกลางคานมีดิวเเตอร์อยู่จึงทำให้ระยะเยื้องศูนย์กลางมีค่าคงที่ คานที่เสริมกำลังโดยใช้ดิวเเตอร์จำนวน 2 ตัว เมื่อเสริมกำลังโดยใช้ให้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยระยะเยื้องศูนย์กลางของ

ลวดอัดแรงภายนอกจะลดลงเร็วกว่าเมื่อเสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก ทั้ง 2 กรณีระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกลดลงช้าในช่วงแรก และเริ่มลดลงเร็วขึ้นเมื่อลวดอัดแรงภายในเริ่มคราก

เมื่อพิจารณารูปที่ 7.4 จะเห็นว่าที่น้ำหนักประลัย คานที่เสริมกำลังโดยใช้ตีวีเอเตอร์จำนวน 5 ตัว กับคานที่เสริมกำลังโดยใช้ตีวีเอเตอร์จำนวน 2 ตัว ระยะเยื้องศูนย์กลางลดลงต่างกันไม่มาก แต่หากพิจารณาเทียบเป็นสัดส่วนกับระยะเยื้องศูนย์กลางเริ่มแรกดังแสดงในรูปที่ 7.5 จะพบว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ตีวีเอเตอร์จำนวน 2 ตัว มีระยะเยื้องศูนย์กลางลดลงในสัดส่วนที่มากกว่า

เมื่อเสริมกำลังคานโดยใช้ตีวีเอเตอร์จำนวน 5 ตัว และ 2 ตัว แผ่นพื้น RC SLAB มีพฤติกรรมคล้ายคลึงกับคาน PC I GIRDER

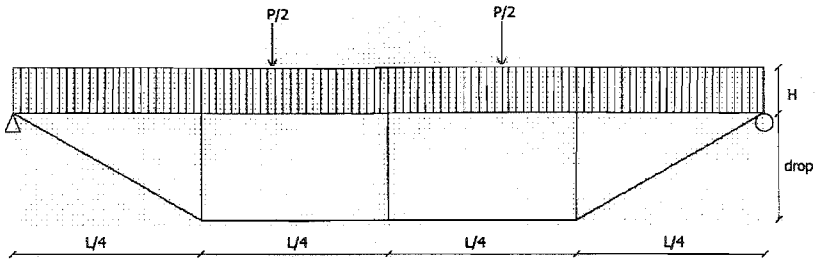
จากผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่าการเสริมกำลังคาน เมื่อลดจำนวนตีวีเอเตอร์ลง ทำให้กำลังประลัยและความเหนียวของคานลดลง แต่ไม่มีผลต่อสติฟเนสในช่วงก่อนที่ลวดอัดแรงภายในจะคราก เมื่อลดจำนวนตีวีเอเตอร์กำลังประลัยของคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก จะลดลงน้อยกว่ากำลังประลัยของคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย เนื่องจากคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก ระยะเยื้องศูนย์กลางที่ลดลงนั้นถือเป็นสัดส่วนที่น้อยเมื่อเทียบกับระยะเยื้องศูนย์กลางที่มีอยู่ ระยะเยื้องศูนย์กลางจะเริ่มลดลงจนเห็นได้ชัดหลังจากเหล็กเสริมภายในคานครากไปแล้ว

การเสริมกำลังคานเดิมซึ่งถือว่าปริมาณเหล็กเสริมมากอยู่แล้ว เสริมกำลังโดยใช้ตีวีเอเตอร์จำนวน 2 ตัวก็เพียงพอ แต่ในกรณีที่ใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย ๆ ควรมีตีวีเอเตอร์ 3 ตัว เพื่อป้องกันไม่ให้คานแอ่นตัวมาชนกับแนวลวดอัดแรงภายนอก

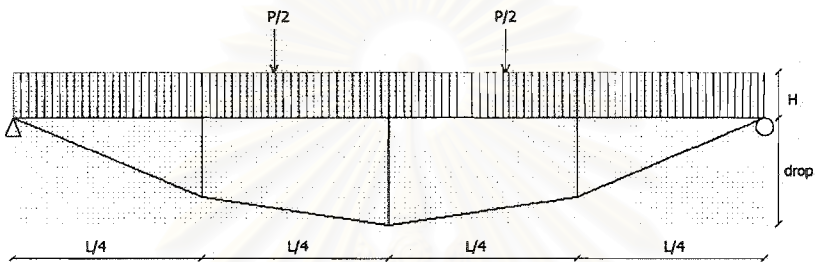
แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอก

ทำการศึกษาผลกระทบจากแนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอก เพื่อหาแนวการวางตัวที่เหมาะสม แนวการวางตัวที่ศึกษามี 3 แบบดังแสดงในรูปที่ 7.6 รูปที่ 7.7 และรูปที่ 7.8 แบบที่ 1 เป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู แบบที่ 3 เป็นรูปตัววี ส่วนแบบที่ 2 อยู่ระหว่างแบบที่ 1 กับแบบที่ 3 โดยระดับความลึกของตีวีเอเตอร์ตัวริมเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างความลึกของตีวีเอเตอร์ตัวริมของแบบที่ 1 กับแบบที่ 3

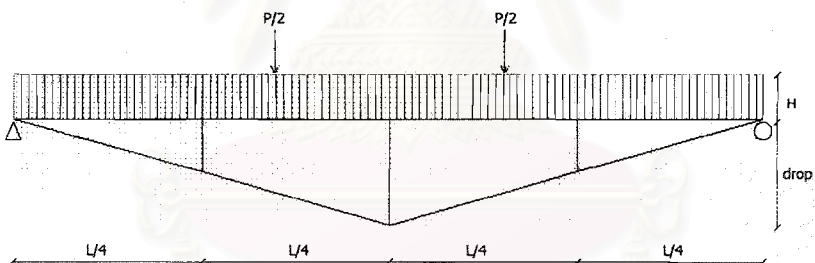
แนวการวางตัวของลวดอัดแรงทั้ง 3 แบบ ใช้ระยะห่างระหว่างตีวีเอเตอร์ จำนวนตีวีเอเตอร์ และตำแหน่งของตีวีเอเตอร์เหมือนกันหมด เพื่อให้ผลการเสริมกำลังมีความแตกต่างจากผลของแนวการวางตัวเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 7.6 แสดงแนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกแบบที่ 1

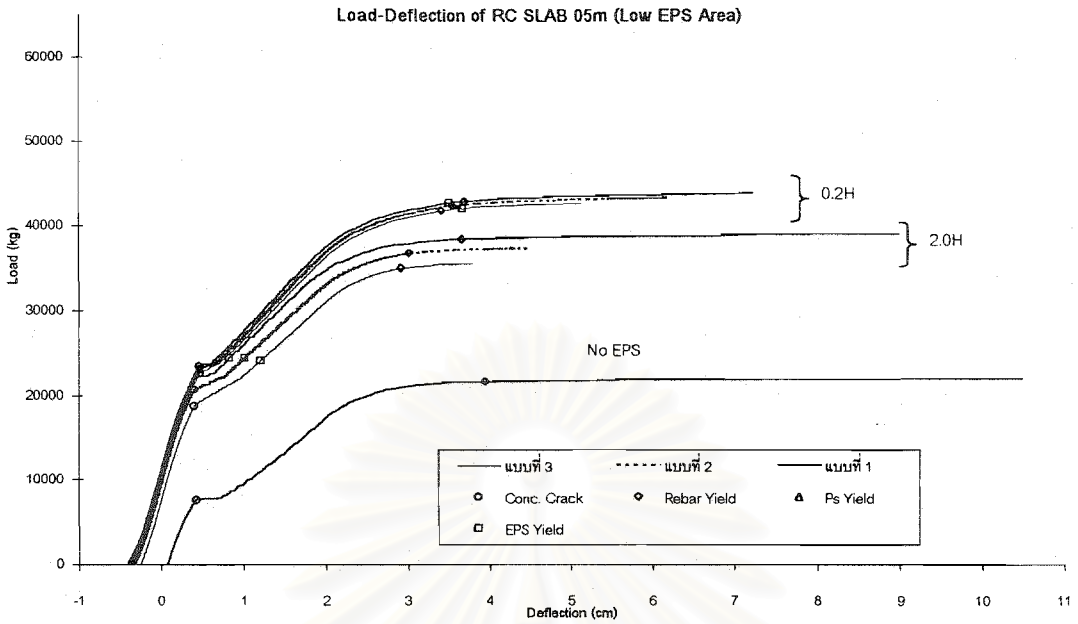


รูปที่ 7.7 แสดงแนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกแบบที่ 2

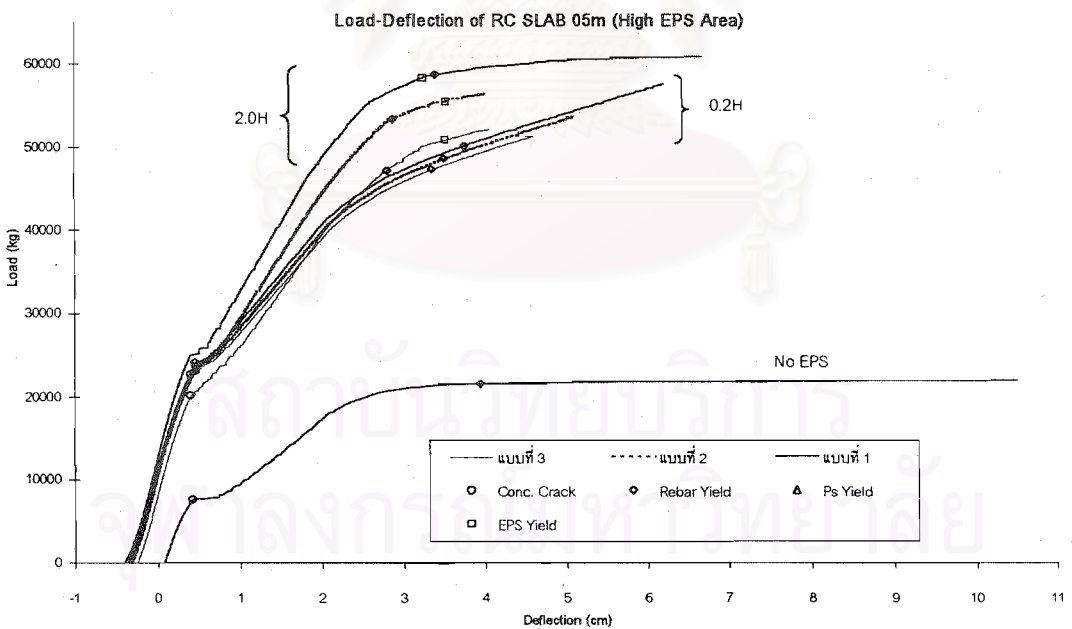


รูปที่ 7.8 แสดงแนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกแบบที่ 3

รูปที่ 7.9 ถึงรูปที่ 7.12 แสดงพฤติกรรมกรรมการรับน้ำหนักของคานที่เสริมกำลังด้วยแนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกที่ต่างกัน เปรียบเทียบกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง ตัวเลขที่กำกับอยู่ต่อจากเส้นคือระยะเยื้องศูนย์กลางที่ใช้ แต่ระยะเยื้องศูนย์กลางจะประกอบไปด้วยแนวการวางตัวที่ต่างกัน 3 แบบ และเส้นล่างสุดคือพฤติกรรมของคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง



รูปที่ 7.9 แสดงผลการเสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร ด้วยพื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงภายนอกน้อย โดยใช้แนวการวางตัวแบบต่าง ๆ



รูปที่ 7.10 แสดงผลการเสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร ด้วยพื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงภายนอกมาก โดยใช้แนวการวางตัวแบบต่าง ๆ

รูปที่ 7.9 แสดงผลการเสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร ด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงน้อย ซึ่งพบว่าไม่ว่าจะเสริมกำลังแผ่นพื้นโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากหรือระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย หากเสริมกำลังด้วยแนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกแบบที่ 1 จะได้แผ่นพื้นที่มีกำลังประลัย สติฟเนส และความเหนียวมากที่สุด รองลงมาคือแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ตามลำดับ

แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก เมื่อใช้รูปแบบแนวการวางตัวต่างกันจะให้ค่ากำลังประลัย และสติฟเนสต่างกันมากกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย และเป็นที่น่าสังเกตว่า แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกแบบที่ 2 และแบบที่ 3 เมื่อเพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลางแทนที่จะได้ความเหนียวเพิ่มขึ้นกลับได้ความเหนียวลดลง

รูปที่ 7.10 แสดงผลการเสริมกำลังแผ่นพื้น RC SLAB ความยาวช่วง 5 เมตร ด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงมาก ซึ่งพบว่าไม่ว่าจะเสริมกำลังแผ่นพื้นโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากหรือระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย หากเสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกแบบที่ 1 จะได้แผ่นพื้นที่มีกำลังประลัย สติฟเนส และความเหนียวมากที่สุด รองลงมาคือแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ตามลำดับ

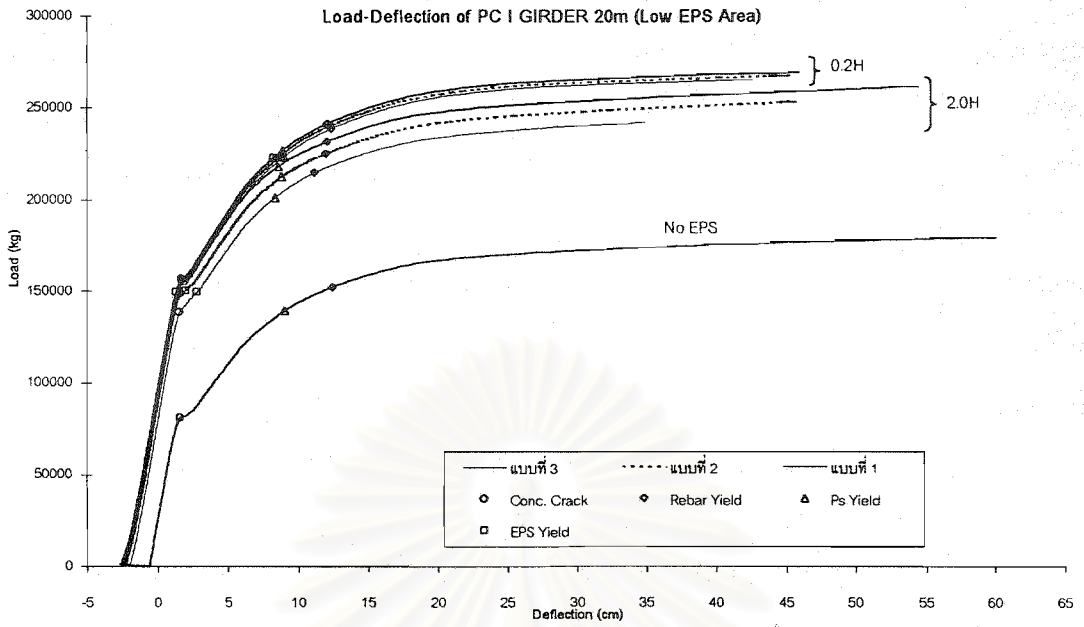
แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก เมื่อใช้รูปแบบแนวการวางตัวต่างกันจะให้ค่ากำลังประลัย และสติฟเนสต่างกันมากกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย และเป็นที่น่าสังเกตว่า แผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกแบบที่ 2 และรูปแบบที่ 3 เมื่อเพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลางแทนที่จะได้ความเหนียวเพิ่มขึ้นกลับได้ความเหนียวลดลง

โดยภาพรวมแล้ว แผ่นพื้น RC SLAB ที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกแบบที่ 1 จะได้แผ่นพื้นที่มีกำลังประลัย สติฟเนส และความเหนียวมากที่สุด

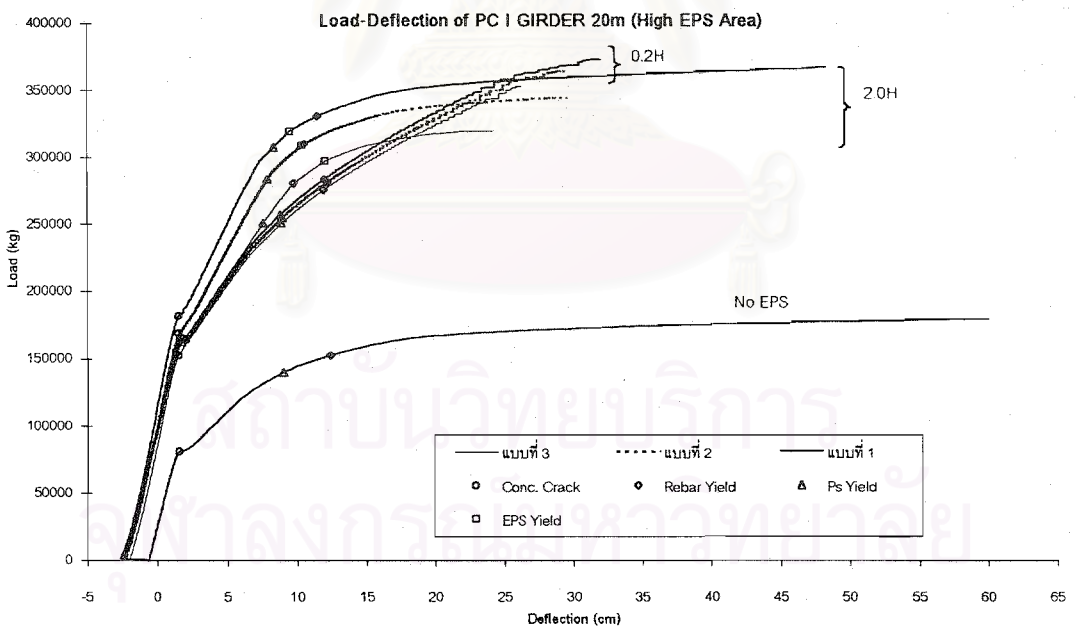
พฤติกรรมการรับน้ำหนักของแผ่นพื้นที่เสริมกำลังด้วยแนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกทั้ง 3 แบบ ให้ผลที่ต่างกันเนื่องจากสาเหตุ 2 ประการคือ

1. การเพิ่มของหน่วยแรงในลวดอัดแรงภายนอก
2. รูปแบบของน้ำหนักกระทำ

โดยสาเหตุ 2 ประการนี้จะกล่าวถึงในภายหลัง



รูปที่ 7.11 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร ด้วยพื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงภายนอกน้อย โดยใช้แนวการวางตัวแบบต่างๆ



รูปที่ 7.12 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร ด้วยพื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงภายนอกมาก โดยใช้แนวการวางตัวแบบต่างๆ

รูปที่ 7.11 แสดงการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร ด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงน้อย ซึ่งพบว่าไม่ว่าจะเสริมกำลังแผ่นพื้นโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากหรือระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย หากเสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกแบบที่ 1 จะได้คานที่มีกำลังประลัย สติฟเนส และความเหนียวมากที่สุด รองลงมาคือแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ตามลำดับ

คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก เมื่อใช้รูปแบบแนวการวางตัวต่างกันจะให้ค่ากำลังประลัยและสติฟเนส ต่างกันมากกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย และเป็นที่น่าสังเกตว่า คานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกแบบที่ 2 และแบบที่ 3 เมื่อเพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลางแทนที่จะได้ความเหนียวเพิ่มขึ้นกลับได้ความเหนียวลดลง

รูปที่ 7.12 แสดงการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร ด้วยพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงมาก ซึ่งพบว่าไม่ว่าจะเสริมกำลังแผ่นพื้นโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากหรือระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย หากเสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกแบบที่ 1 จะได้คานที่มีกำลังประลัย สติฟเนส และความเหนียวมากที่สุด รองลงมาคือแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ตามลำดับ

คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก เมื่อใช้รูปแบบแนวการวางตัวต่างกันจะให้ค่ากำลังประลัย และสติฟเนสต่างกันมากกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย และเป็นที่น่าสังเกตว่า คานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกแบบที่ 2 และแบบที่ 3 เมื่อเพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลางแทนที่จะได้ความเหนียวเพิ่มขึ้นกลับได้ความเหนียวลดลง

โดยภาพรวมแล้ว คาน PC I GIRDER ที่เสริมกำลังด้วยแนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกแบบที่ 1 จะได้คานที่มีกำลังประลัย สติฟเนส และความเหนียวมากที่สุด

พฤติกรรมการรับน้ำหนักของคานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกทั้ง 3 แบบ ให้ผลที่ต่างกันเนื่องมาจากสาเหตุ 2 ประการคือ

1. การเพิ่มของหน่วยแรงในลวดอัดแรงภายนอก
2. รูปแบบของน้ำหนักกระทำ

โดยสาเหตุ 2 ประการนี้จะกล่าวถึงในภายหลัง

เมื่อเสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงทั้ง 3 รูปแบบ แผ่นพื้น RC SLAB มีพฤติกรรมคล้ายคลึงกับคาน PC I GIRDER

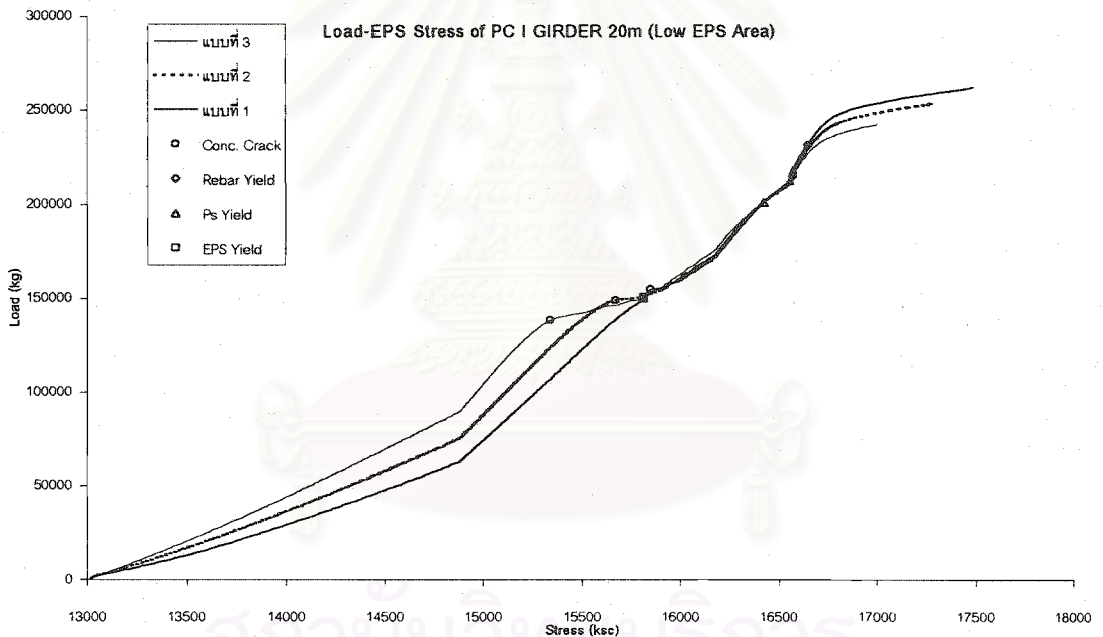
พฤติกรรมการรับน้ำหนักของคานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกทั้ง 3 แบบ ให้ผลที่ต่างกันเนื่องมาจากสาเหตุ 2 ประการคือ

1. การเพิ่มของหน่วยแรงในลวดอัดแรงภายนอก
2. รูปแบบของน้ำหนักกระทำ

ด้วยสาเหตุทั้ง 2 อย่างที่กล่าวข้างต้น จึงทำการศึกษาในรายละเอียดดังต่อไปนี้

การเพิ่มของหน่วยแรงในลวดอัดแรงภายนอก

จากการศึกษาในบทที่ 6 พบว่าหน่วยแรงดึงที่ใช้ในการดึงลวดอัดแรงภายนอกมีผลต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักของคาน ถึงแม้ว่าในกรณีนี้หน่วยแรงดึงที่ใช้ในการดึงลวดลวดอัดแรงภายนอกจะเท่ากัน แต่เนื่องจากแนวการวางตัวของลวดอัดแรงไม่เหมือนกัน ดังนั้นจึงมีผลทำให้การเพิ่มของหน่วยแรงในลวดอัดแรงภายนอกไม่เท่ากัน ซึ่งทำให้พฤติกรรมการรับน้ำหนักของคานแตกต่างกัน



รูปที่ 7.13 แสดงหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นในลวดอัดแรงภายนอกเมื่อมีน้ำหนักกระทำของคานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงแบบต่าง ๆ

รูปที่ 7.13 แสดงหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นในลวดอัดแรงภายนอกเมื่อรับน้ำหนักกระทำ ของคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร ที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงแบบต่าง ๆ ซึ่งพบว่าในช่วงก่อนที่ลวดอัดแรงภายนอกจะร้าวคานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงแบบที่ 1 หน่วยแรงในลวดอัดแรงภายนอกเพิ่มขึ้นเร็วที่สุด ทำให้ที่น้ำหนักกระทำเท่ากันคานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวแบบที่ 1 มีแรงดึงในลวดอัดแรงสูงกว่าคานที่เสริม

กำลังโดยใช้แนวการวางตัวแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ด้วยสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้คานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกแบบที่ 1 มีน้ำหนักแตกร้าว (cracking load) มากกว่าคานที่เสริมกำลังด้วยแนวการวางตัวแบบที่ 2 และแบบที่ 3

นอกจากนี้รูปที่ 7.13 ยังแสดงให้เห็นว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวแบบที่ 1 มีหน่วยแรงดึง ณ จุดที่คานวิบัติมากกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวแบบอื่น จึงทำให้คานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกแบบที่ 1 มีกำลังประลัยสูงกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวแบบที่ 2 และแบบที่ 3

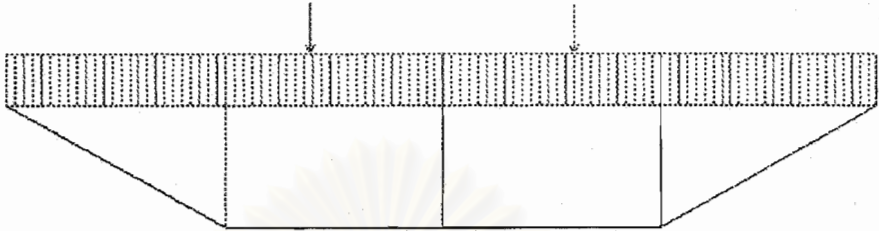
รูปแบบของน้ำหนักกระทำ

คานจะรับน้ำหนักกระทำภายนอกได้มากน้อยเพียงไรขึ้นอยู่กับตำแหน่งของน้ำหนักที่กระทำลงบนคาน นอกจากนี้ตำแหน่งของน้ำหนักกระทำยังมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงในลวดอัดแรงภายนอกอีกด้วย ดังนั้นเมื่อทำการศึกษาลักษณะการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอก จึงจำเป็นต้องพิจารณาผลจากรูปแบบของน้ำหนักกระทำด้วย

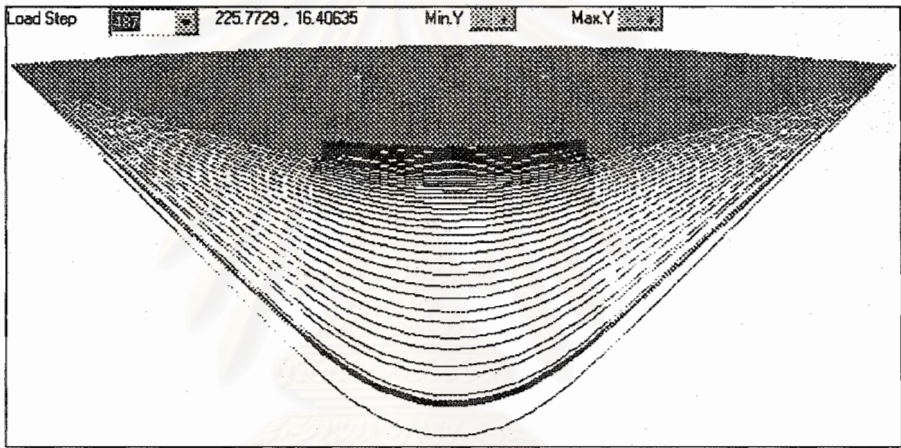
น้ำหนักกระทำที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำหนักกระทำเป็นจุด (point load) กระทำ 2 จุด ดังแสดงในรูปที่ 7.6 รูปที่ 7.7 และรูปที่ 7.8 โมเมนต์ดัดที่เกิดจากน้ำหนักกระทำ 2 จุดนี้ เมื่อนำมาเขียนเป็นโมเมนต์ไดอะแกรมจะได้เป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ซึ่งสอดคล้องกับแนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกแบบที่ 1 เพราะว่าแนวการวางตัวแบบที่ 1 เป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู โมเมนต์ดัดที่เกิดจากแรงดึงลวดจึงเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูเช่นเดียวกัน

จากผลการวิเคราะห์คาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 20 เมตร ที่เสริมกำลังด้วยแนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกทั้ง 3 แบบ นำตำแหน่งที่เหล็กเสริมและลวดอัดแรงภายในคานแบบ bonded คราก มาแสดงในรูปที่ 7.14 ถึงรูปที่ 7.22

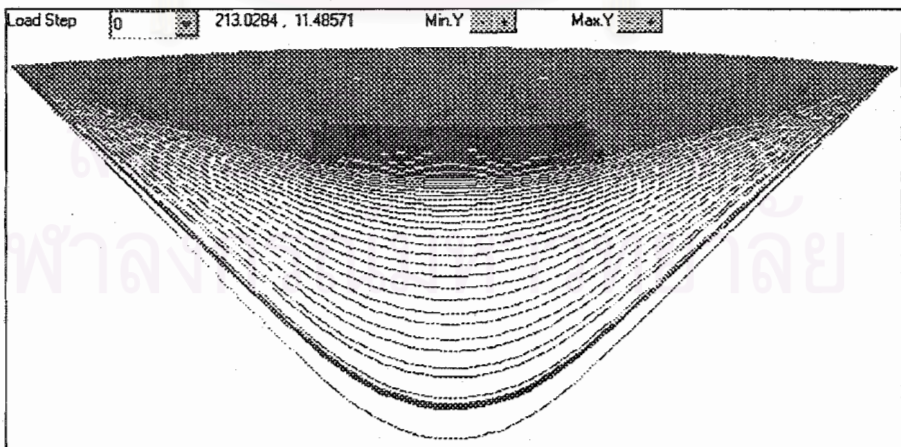
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



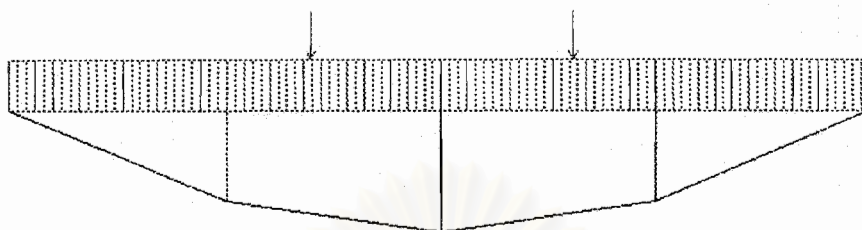
รูปที่ 7.14 แสดงแนวการวางตัวของลวดอัดแรงแบบที่ 1



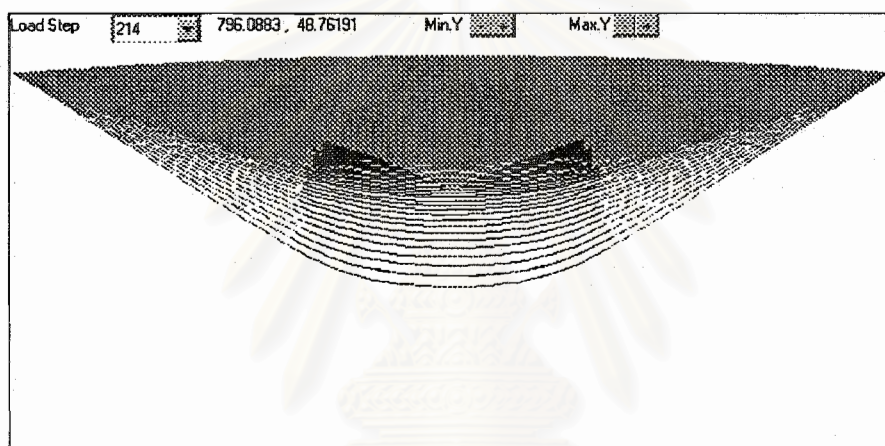
รูปที่ 7.15 แสดงตำแหน่งที่เหล็กเสริมคกรากเมื่อใช้แนวการวางตัวแบบที่ 1



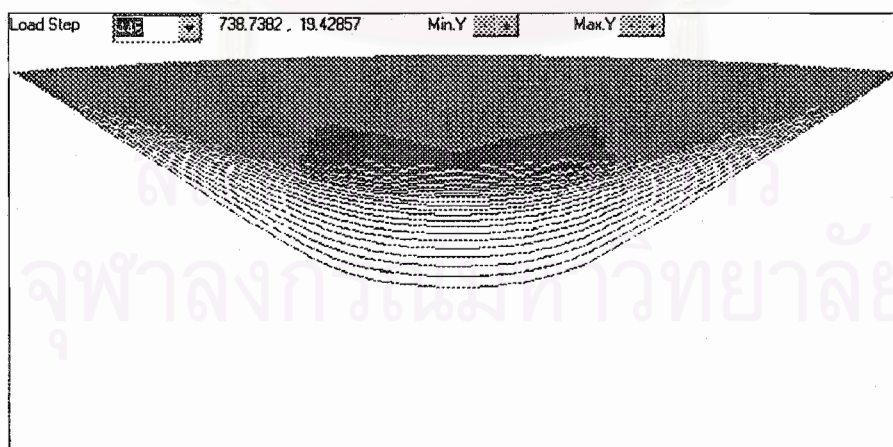
รูปที่ 7.16 แสดงตำแหน่งที่ลวดอัดแรงภายใน(bonded)คกรากเมื่อใช้แนวการวางตัวแบบที่ 1



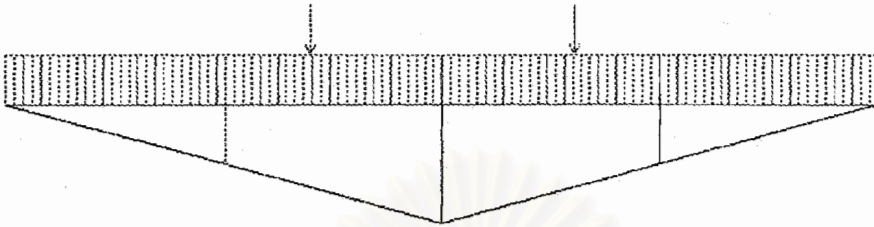
รูปที่ 7.17 แสดงแนวการวางตัวของลวดอัดแรงแบบที่ 2



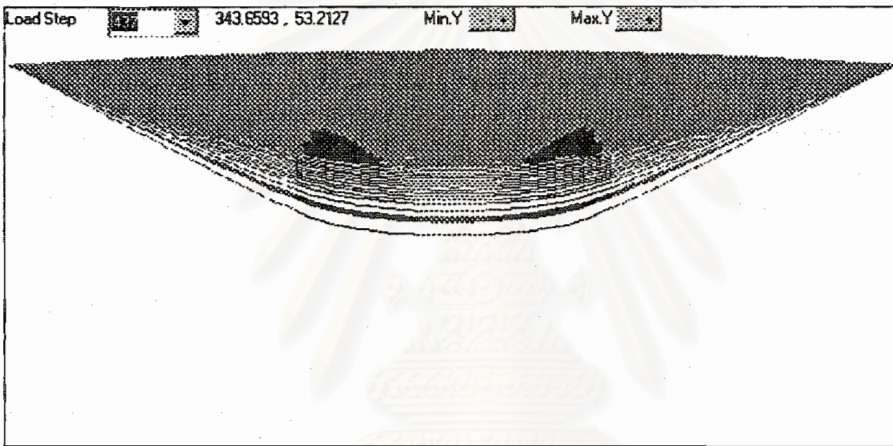
รูปที่ 7.18 แสดงตำแหน่งที่เหล็กเสริมครากเมื่อใช้แนวการวางตัวแบบที่ 2



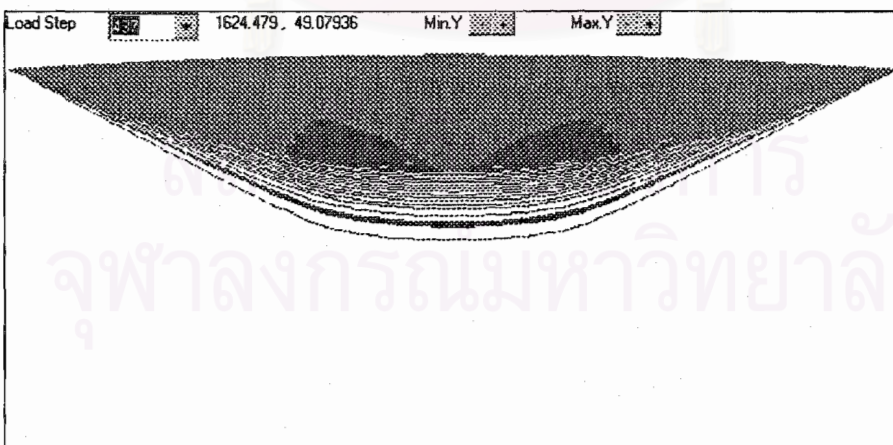
รูปที่ 7.19 แสดงตำแหน่งที่ลวดอัดแรงภายใน(bonded)ครากเมื่อใช้แนวการวางตัวแบบที่ 2



รูปที่ 7.20 แสดงแนวการวางตัวของลวดอัดแรงแบบที่ 3



รูปที่ 7.21 แสดงตำแหน่งที่เหล็กเสริมคานเมื่อใช้แนวการวางตัวแบบที่ 3



รูปที่ 7.22 แสดงตำแหน่งที่ลวดอัดแรงภายใน(bonded)คานเมื่อใช้แนวการวางตัวแบบที่ 3

คานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกแบบที่ 1

รูปที่ 7.15 แสดงการครากของเหล็กเสริมภายในหน้าตัดคานเมื่อรับน้ำหนักกระทำ โดยบริเวณสีเข้มคือบริเวณที่เหล็กเสริมคราก และเส้นที่แสดงเป็นแนวการแอ่นตัวของคาน พบว่าเหล็กเสริมจะมีการครากตลอดช่วงระหว่างจุดที่มีน้ำหนักกระทำ ซึ่งหมายความว่าหน้าตัดตลอดช่วงนี้ช่วยกันรับแรง เมื่อมีบริเวณที่ช่วยกันรับแรงกว้างทำให้คานมีกำลังประลัย สติฟเนส และความเหนียวมาก

รูปที่ 7.16 แสดงการครากของลวดอัดแรงภายในแบบ bonded ในหน้าตัดคานเมื่อรับน้ำหนักกระทำ โดยบริเวณสีเข้มคือบริเวณที่ลวดอัดแรงคราก และเส้นที่แสดงเป็นแนวการแอ่นตัวของคาน พบว่าลวดอัดแรงจะมีการครากตลอดช่วงระหว่างจุดที่มีน้ำหนักกระทำ ซึ่งหมายความว่าหน้าตัดตลอดช่วงนี้ช่วยกันรับแรง เมื่อมีบริเวณที่ช่วยกันรับแรงกว้างทำให้คานมีกำลังประลัย สติฟเนส และความเหนียวมาก

การเสริมกำลังคานโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกแบบที่ 1 สอดคล้องกับน้ำหนักกระทำแบบ 2 จุด ทำให้บริเวณที่คานช่วยกันรับแรงมีมาก คานจึงมีกำลังประลัย สติฟเนส และความเหนียวมาก

คานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกแบบที่ 2

รูปที่ 7.18 แสดงการครากของเหล็กเสริมภายในหน้าตัดคานเมื่อรับน้ำหนักกระทำ พบว่าเหล็กเสริมจะเริ่มครากตรงตำแหน่งที่มีน้ำหนักกระทำ เมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มขึ้นบริเวณที่เหล็กเสริมครากจะขยายตัวเข้าไปทางด้านกึ่งกลางคานจนกระทั่งเหล็กเสริมครากตลอดช่วงระหว่างจุดที่มีน้ำหนักกระทำ ซึ่งหมายความว่าหน้าตัดตรงตำแหน่งที่มีน้ำหนักกระทำ ต้องรับแรงมากกว่าหน้าตัดอื่น เมื่อมีบริเวณที่ช่วยกันรับแรงน้อยทำให้คานมีกำลังประลัย สติฟเนส และความเหนียวน้อย

รูปที่ 7.19 แสดงการครากของลวดอัดแรงภายในแบบ bonded ในหน้าตัดคานเมื่อรับน้ำหนักกระทำ พบว่าลวดอัดแรงจะเริ่มครากตรงตำแหน่งที่มีน้ำหนักกระทำ เมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มขึ้นบริเวณที่ลวดอัดแรงครากจะขยายตัวเข้าไปทางด้านกึ่งกลางคานจนกระทั่งลวดอัดแรงครากตลอดช่วงระหว่างจุดที่มีน้ำหนักกระทำ ซึ่งหมายความว่าหน้าตัดตรงตำแหน่งที่มีน้ำหนักกระทำ ต้องรับแรงมากกว่าหน้าตัดอื่น เมื่อมีบริเวณที่ช่วยกันรับแรงน้อยทำให้คานมีกำลังประลัย สติฟเนส และความเหนียวน้อย

การเสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกแบบที่ 2 ไม่สอดคล้องกับน้ำหนักกระทำแบบ 2 จุด ทำให้บริเวณที่คานช่วยกันรับแรงมีน้อย คานจึงมีกำลังประลัย สติฟเนส

และความเหนียวต่ำ คานวิบัติตรงตำแหน่งที่มีน้ำหนักกระทำ ไม่ใช่ตรงกึ่งกลางคานที่มีระยะเยื้องศูนย์กลางที่สุด ทำให้คานมีความเหนียวน้อยกว่าที่ควรจะเป็นมาก

คานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกแบบที่ 3

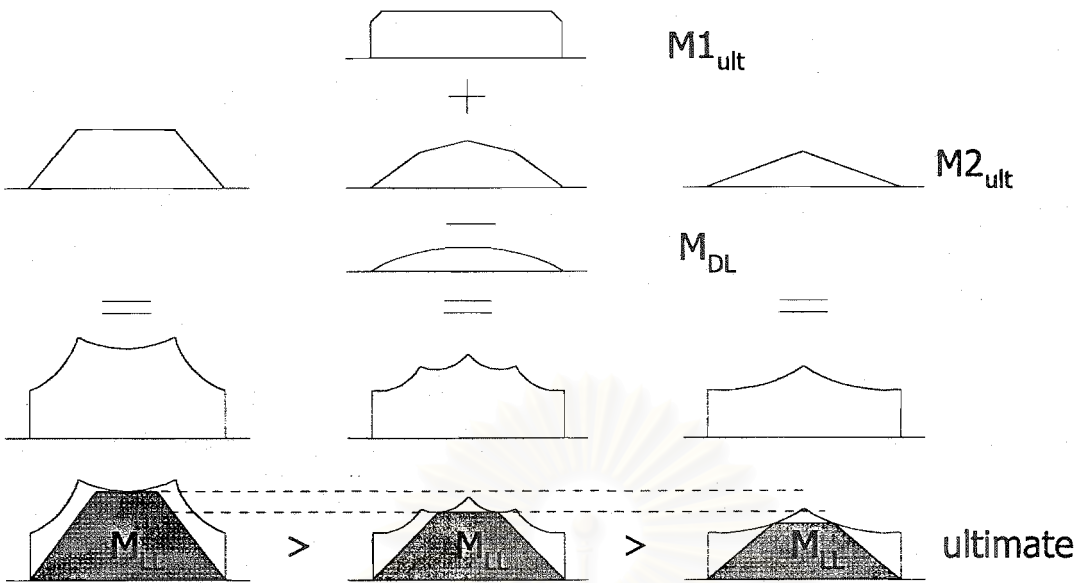
รูปที่ 7.21 แสดงการครากของเหล็กเสริมภายในหน้าตัดคานเมื่อรับน้ำหนักกระทำ พบว่าเหล็กเสริมจะเริ่มครากตรงตำแหน่งที่มีน้ำหนักระกระทำ เมื่อน้ำหนักระกระทำเพิ่มขึ้นบริเวณที่เหล็กเสริมครากจะขยายตัวเข้าไปทางด้านกึ่งกลาง แต่ที่น้ำหนักระกระทำเพียงเหล็กเสริมที่กึ่งกลางคานยังไม่เกิดการคราก ซึ่งหมายความว่าหน้าตัดตรงตำแหน่งที่มีน้ำหนักระกระทำ ต้องรับแรงมากกว่าหน้าตัดอื่นมาก เมื่อมีบริเวณที่ช่วยกันรับแรงน้อยทำให้คานมีกำลังประลัย สติฟเนส และความเหนียวน้อย

รูปที่ 7.22 แสดงการครากของลวดอัดแรงภายนอกแบบ bonded ในหน้าตัดคานเมื่อรับน้ำหนักกระทำ พบว่าลวดอัดแรงจะเริ่มครากตรงตำแหน่งที่มีน้ำหนักระกระทำ เมื่อน้ำหนักระกระทำเพิ่มขึ้นบริเวณที่ลวดอัดแรงครากจะขยายตัวเข้าไปทางด้านกึ่งกลางคานจนกระทั่งลวดอัดแรงครากตลอดช่วงระหว่างจุดที่มีน้ำหนักระกระทำ ซึ่งหมายความว่าหน้าตัดตรงตำแหน่งที่มีน้ำหนักระกระทำ ต้องรับแรงมากกว่าหน้าตัดอื่น เมื่อมีบริเวณที่ช่วยกันรับแรงน้อยทำให้คานมีกำลังประลัย สติฟเนส และความเหนียวน้อย

การเสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกแบบที่ 3 ไม่สอดคล้องกับน้ำหนักกระทำแบบ 2 จุด ทำให้บริเวณที่คานช่วยกันรับแรงมีน้อย คานจึงมีกำลังประลัย สติฟเนส และความเหนียวต่ำ คานวิบัติตรงตำแหน่งที่มีน้ำหนักระกระทำ ไม่ใช่ตรงกึ่งกลางคานที่มีระยะเยื้องศูนย์กลางที่สุด ทำให้คานมีความเหนียวน้อยกว่าที่ควรจะเป็นมาก

คานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกแบบที่ 1 วิบัติที่กึ่งกลางคาน ซึ่งมีระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกมาก ในขณะที่คานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวแบบที่ 2 และแบบที่ 3 วิบัติตรงตำแหน่งที่มีน้ำหนักระกระทำ ซึ่งมีระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยกว่าตรงกึ่งกลางคาน อีกทั้งบริเวณที่คานช่วยกันรับแรงก็ไม่เท่ากัน จึงทำให้คานที่เสริมกำลังด้วยแนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกแบบที่ 1 มีกำลังประลัย สติฟเนส และความเหนียวสูงกว่า

สาเหตุที่ทำให้การเสริมกำลังด้วยแนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกแบบที่ 2 และ 3 มีกำลังประลัยน้อยกว่าแบบที่ 1 สามารถแสดงด้วยโมเมนต์ไดอะแกรมในรูปที่ 7.23 ซึ่งเห็นได้ว่าคานไม่ได้วิบัติในตำแหน่งที่ออกแบบให้รับโมเมนต์ดัดได้สูงสุด (กึ่งกลางคาน) จึงทำให้มีกำลังรับโมเมนต์ดัดน้อยกว่าที่ควรจะเป็น



รูปที่ 7.23 แสดงการวิบัติของคานโดยโมเมนต์ไดอะแกรม

เมื่อพิจารณารูปที่ 7.23 พบว่า โมเมนต์ไดอะแกรมของคานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวแบบที่ 1 มีค่ามากกว่าแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ทุก ๆ จุดตลอดความยาวของคาน และการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงในลวดอัดแรงภายนอกของคานที่ใช้แนวการวางตัวแบบที่ 1 ยังมากกว่าแบบที่ 2 และแบบที่ 3 อีกด้วย ดังนั้นไม่ว่าจะใช้น้ำหนักกระทำรูปแบบใด แนวการวางตัวของลวดอัดแรงแบบที่ 1 ยังคงให้กำลังประลัย สติเฟนสและความเหนียวมากกว่าแบบที่ 2 และแบบที่ 3

ในกรณีที่น้ำหนักกระทำเป็นแบบจุดเดียวที่กึ่งกลางคาน กำลังประลัยและความเหนียวของคานจะไม่แตกต่างกันมากเท่าในกรณีที่เป็นน้ำหนักกระทำ 2 จุด เนื่องจากคานที่เสริมกำลังด้วยแนวการวางตัวของลวดอัดแรงแบบที่ 2 และแบบที่ 3 จะเปลี่ยนไปวิบัติที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานซึ่งมีระยะเยื้องศูนย์กลางมาก

การกำหนดแนวการวางตัวของลวดอัดแรงให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ต้องคำนึงถึงระยะเยื้องศูนย์กลางที่ใช้ การเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงในลวดอัดแรงภายนอก และรูปแบบของน้ำหนักกระทำ

ระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรง

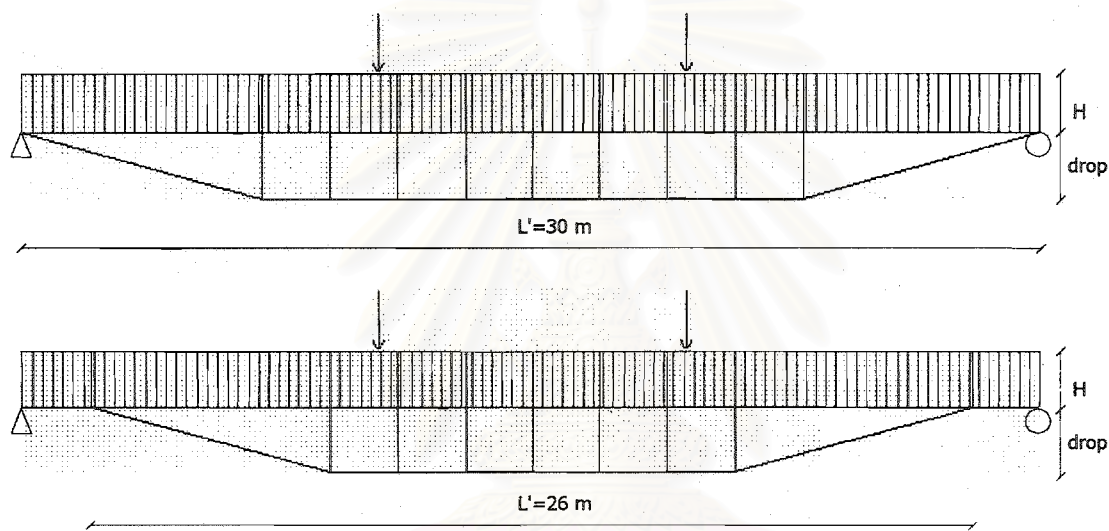
จากรูปที่ 7.23 เห็นได้ว่าคานในส่วนที่ใกล้กับจุดรองรับไม่จำเป็นต้องเสริมกำลัง เนื่องจากคานเดิมมีกำลังรับโมเมนต์ดัดเพียงพอ หากลดระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรง (jacking corble) ลง นั้นหมายถึงความยาวของลวดอัดแรงภายนอกจะลดลงไปด้วย จากสมการที่ 7.1 ทำให้เกิดแนวคิดที่ว่าเมื่อ L_0 ลดลง หน่วยแรงในลวดอัดแรงภายนอกน่าจะเพิ่มได้เร็วขึ้น

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

สมการที่ 7.1

จากข้อสังเกตดังกล่าวจึงทำการศึกษาระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรง (L') ว่ามีผลต่อพฤติกรรมรับโมเมนต์ดัดของคานมากน้อยเพียงไร คานที่ศึกษาคือ PC I GIRDER ความยาวช่วง 30 เมตร ระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรงที่ศึกษาคือ 18, 22, 26 และ 30 เมตร ตำแหน่งของดีไวเอเตอร์ (deviator) ตัวแรกและตัวสุดท้ายอยู่ห่างจากแป้นยึดลวดอัดแรง 7 เมตร และมีระยะห่างระหว่างดีไวเอเตอร์แต่ละตัว 2 เมตร การศึกษาในส่วนนี้ใช้ระยะระหว่างดีไวเอเตอร์น้อยเพื่อป้องกันผลกระทบจากการลดลงของระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอก

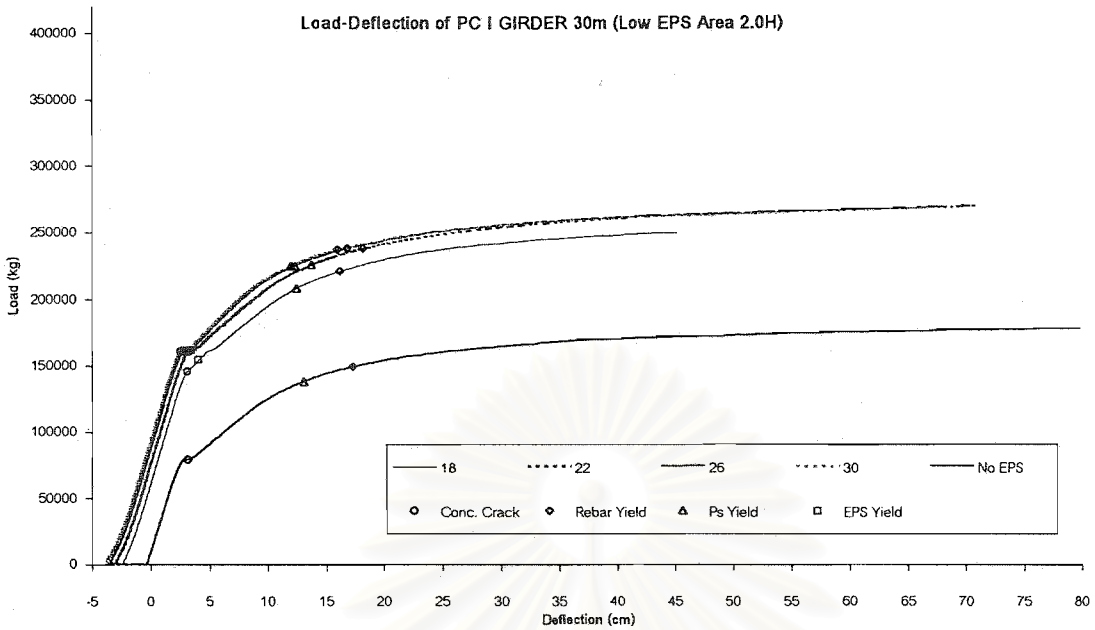
ระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรงเริ่มจาก 18 เมตร เมื่อระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรงเพิ่มขึ้น 1 ค่า จะเพิ่มดีไวเอเตอร์ตัวริมขึ้นมาข้างละ 1 ตัว และจะรักษามุมเบี่ยงเบนให้มีค่าคงที่ รูปที่ 7.24 แสดงระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรง 30 และ 26 เมตร



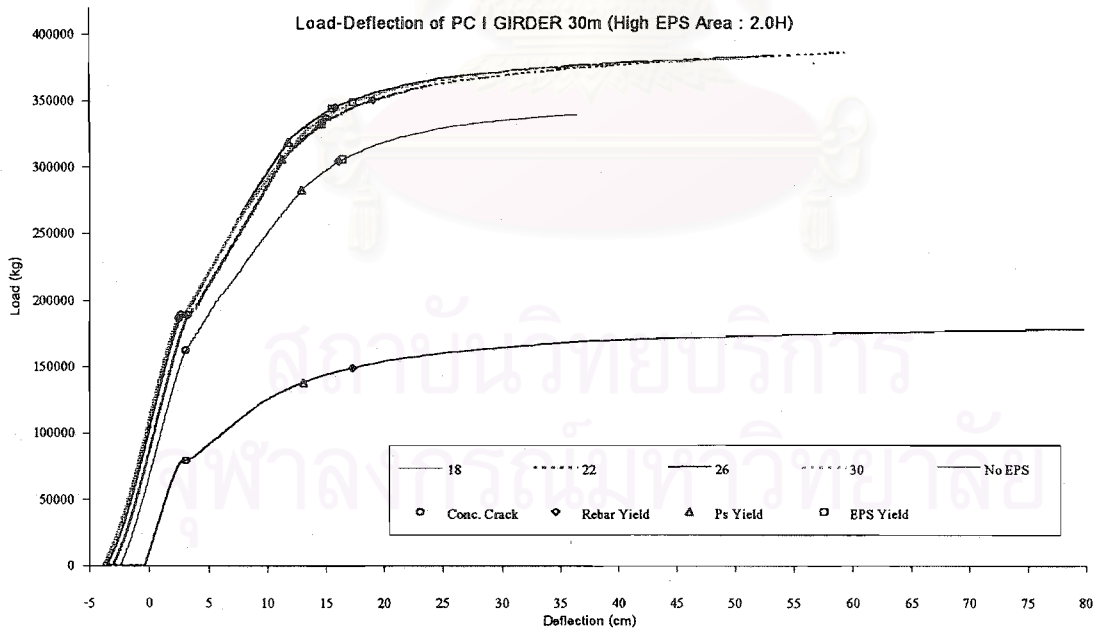
รูปที่ 7.24 แสดงแนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกเพื่อศึกษาผลของระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรง (L')

รูปที่ 7.25 และรูปที่ 7.26 แสดงผลการเสริมกำลังคานเมื่อใช้ระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรงต่าง ๆ กัน ในกรณีที่มีระยะเยื้องศูนย์กลางมาก ($2.0H$) โดยใช้พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงน้อย และใช้พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงมากตามลำดับ

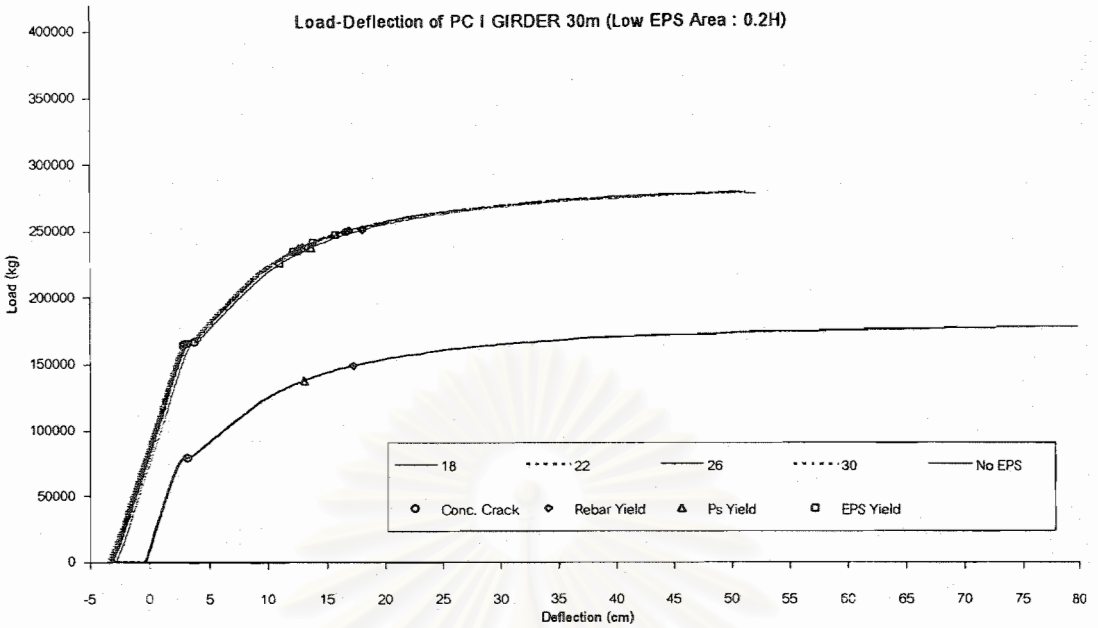
พบว่าเมื่อเสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก ระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรงไม่มีผลต่อพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัด เนื่องจากความยาวของลวดอัดแรงที่ลดลงไปเป็นสัดส่วนน้อยเมื่อเทียบกับความยาวลวดอัดแรงทั้งหมด แต่มีข้อยกเว้นในกรณีที่เสริมกำลังคานโดยใช้ระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรง 18 เมตร มีกำลังประลัย สติฟเนส และความเหนียวน้อยกว่าคานตัวอื่น ทั้งนี้เนื่องมาจากระยะระหว่างดีไวเอเตอร์ตัวแรกกับตัวสุดท้ายมีค่า 4 เมตร น้อยกว่า 6.1 เมตร ซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างหน้าหน้ากระทำ คานจึงวิบัติตรงตำแหน่งที่มีหน้าหน้ากระทำแทนที่จะเป็นตรงที่กึ่งกลางคาน



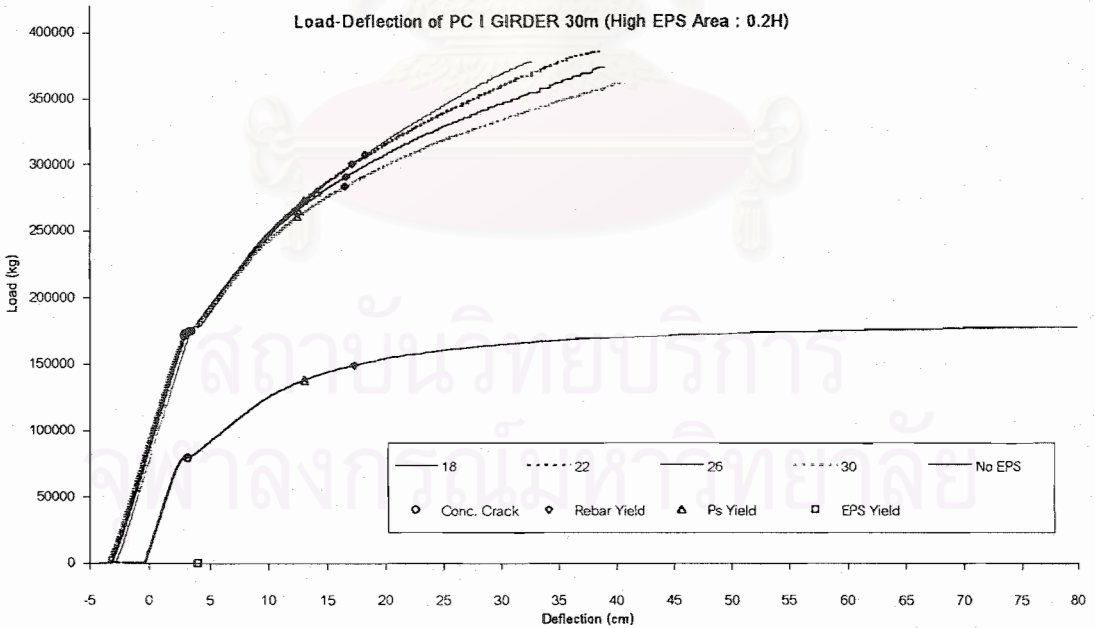
รูปที่ 7.25 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 30 เมตร เมื่อเสริมกำลัง โดยใช้ระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรงต่าง ๆ กัน ใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 2.0H พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงน้อย



รูปที่ 7.26 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 30 เมตร เมื่อเสริมกำลัง โดยใช้ระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรงต่าง ๆ กัน โดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 2.0H พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงมาก



รูปที่ 7.27 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 30 เมตร เมื่อเสริมกำลังโดยใช้ระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรงต่าง ๆ กัน โดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 0.2H พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงน้อย



รูปที่ 7.28 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 30 เมตร เมื่อเสริมกำลังโดยใช้ระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรงต่าง ๆ กัน โดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 0.2H พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงมาก

รูปที่ 7.27 แสดงผลการเสริมกำลังคานเมื่อใช้ระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรงต่าง ๆ กัน ในกรณีที่มีระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย ($0.2H$) โดยใช้พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงน้อย พบว่าระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรงไม่มีผลต่อพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัด เนื่องจากลวดอัดแรงภายนอกครากก่อนที่เหล็กเสริมในคานจะคราก เมื่อลวดอัดแรงภายนอกครากค่ายังโมดูลัสของลวดอัดแรงจะลดลง ทำให้ค่าสติฟเนสของคานไม่เพิ่มขึ้น

รูปที่ 7.28 แสดงผลการเสริมกำลังคานเมื่อใช้ระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรงต่าง ๆ กัน ในกรณีที่มีระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย ($0.2H$) โดยใช้พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงมาก พบว่าเมื่อลดระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรง สามารถเพิ่มสติฟเนสของคานได้ โดยสติฟเนสจะเพิ่มขึ้นหลังจากเหล็กเสริมในคานคราก เพราะเมื่อเหล็กเสริมในคานคราก จะเหลือเพียงลวดอัดแรงภายนอกที่ทำหน้าที่รับแรงดึง ทำให้หน่วยแรงในลวดอัดแรงภายนอกเพิ่มขึ้นมาก(เนื่องจากใช้ความยาวลวดอัดแรงน้อย) ส่งผลให้คานมีสติฟเนสเพิ่มขึ้น

คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก การลดระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรงไม่มีผลต่อพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดของคาน เนื่องจากความยาวของลวดอัดแรงที่ลดลงไปเป็นสัดส่วนน้อยเมื่อเทียบกับความยาวลวดอัดแรงทั้งหมด

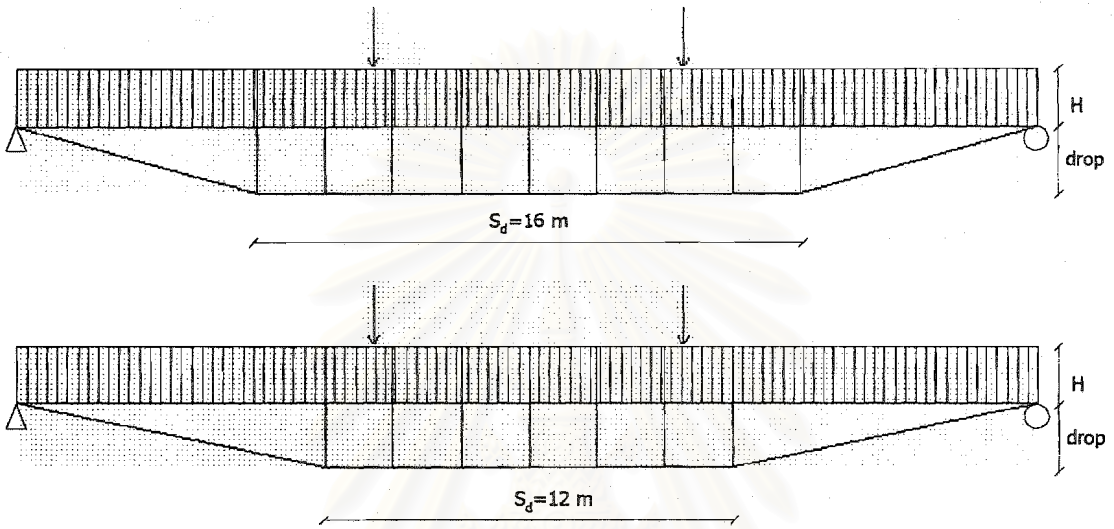
คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย ใช้พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงน้อย การลดระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรงไม่มีผลต่อพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัด เนื่องจากลวดอัดแรงภายนอกครากก่อนที่เหล็กเสริมในคานจะคราก เมื่อลวดอัดแรงภายนอกครากค่ายังโมดูลัสของลวดอัดแรงจะลดลง ทำให้ค่าสติฟเนสของคานไม่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อใช้พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงมาก พบว่าการลดระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรง สามารถเพิ่มสติฟเนสของคานได้ โดยสติฟเนสจะเพิ่มขึ้นหลังจากเหล็กเสริมในคานคราก เพราะเมื่อเหล็กเสริมในคานคราก จะเหลือเพียงลวดอัดแรงภายนอกที่ทำหน้าที่รับแรงดึง ทำให้หน่วยแรงในลวดอัดแรงภายนอกเพิ่มขึ้นมาก(เนื่องจากใช้ความยาวลวดน้อย) ส่งผลให้คานมีสติฟเนสเพิ่มขึ้น

ระยะห่างระหว่างตีเวเตอร์ตัวแรกกับตัวสุดท้าย

จากรูปที่ 7.23 พบว่าการกำหนดแนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอก ต้องคำนึงถึงโมเมนต์ไดอะแกรมที่เกิดจากน้ำหนักกระทำ ตำแหน่งของตีเวเตอร์ตัวแรกและตัวสุดท้ายเป็นปัจจัยสำคัญในการปรับรูปร่างแนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอก เพื่อปรับโมเมนต์ไดอะแกรมที่เกิดจากการเสริมกำลัง

ดังนั้นจึงทำการศึกษามวลของระยะห่างระหว่างดีวีเอเตอร์ตัวแรกกับตัวสุดท้าย เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงวางแนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอก

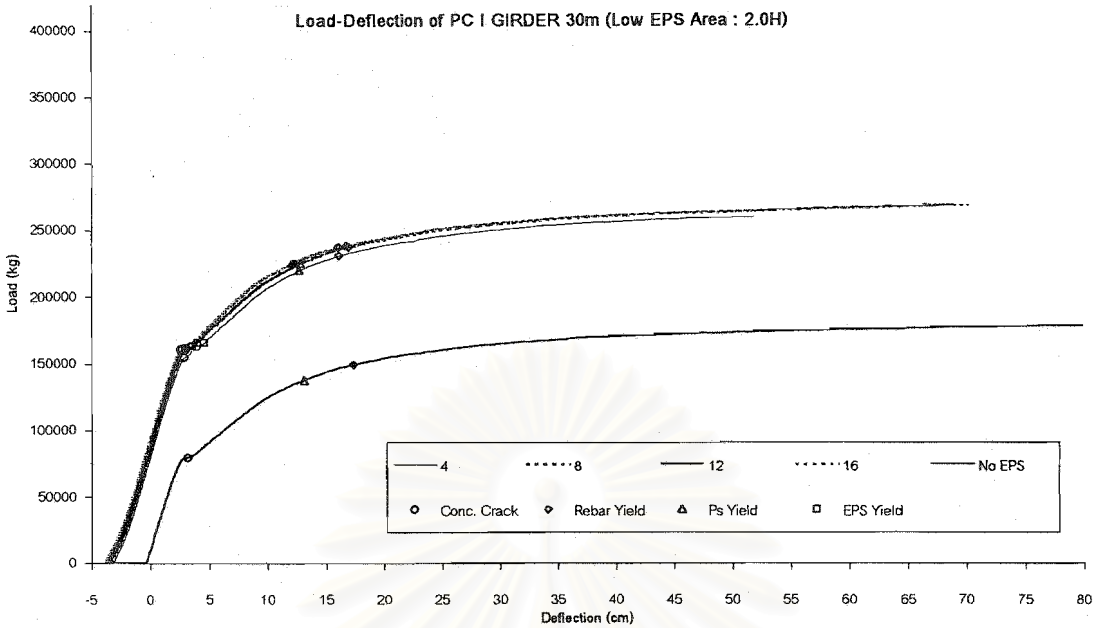
รูปแบบแนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกที่ทำการศึกษา คล้ายกับในกรณีที่ศึกษา ระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรง ต่างกันตรงที่กำหนดให้ตำแหน่งของแป้นยึดลวดอัดแรงอยู่ที่ปลายคานตลอด ระยะห่างระหว่างดีวีเอเตอร์ตัวแรกกับตัวสุดท้าย (S_d) ที่ทำการศึกษาคือ 4, 8, 12 และ 16 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 7.29



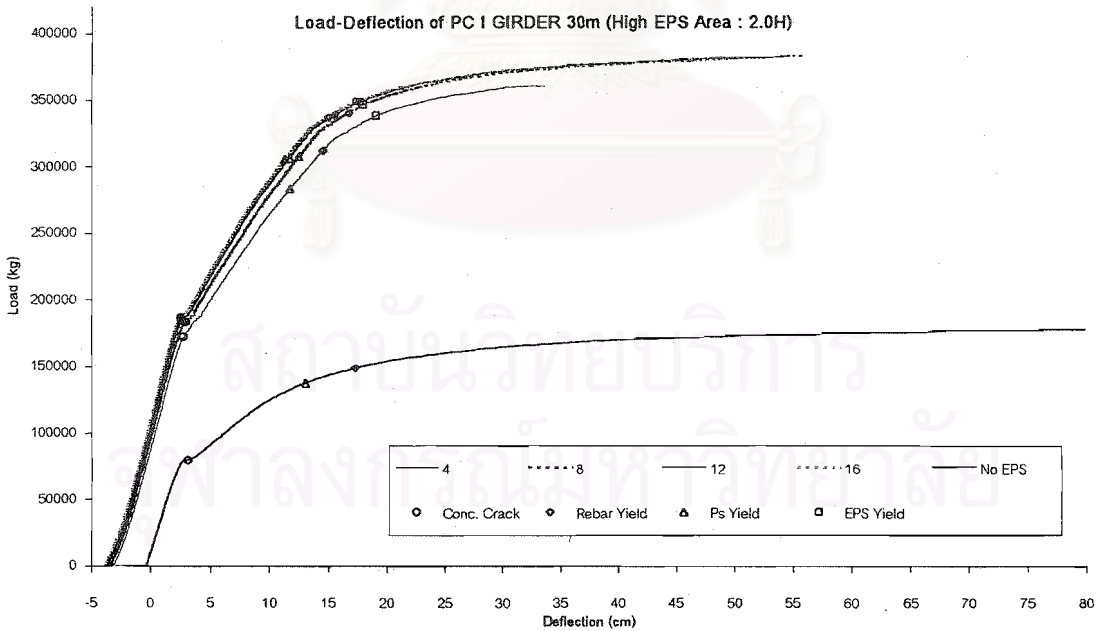
รูปที่ 7.29 แสดงแนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกเพื่อศึกษา ระยะห่างระหว่างดีวีเอเตอร์ตัวแรกกับตัวสุดท้าย (S_d)

รูปที่ 7.30 และรูปที่ 7.31 แสดงผลการเสริมกำลังเมื่อใช้ระยะห่างระหว่างดีวีเอเตอร์ตัวแรกกับตัวสุดท้ายต่าง ๆ กัน ในกรณีที่มีระยะเยื้องศูนย์กลางมาก ($2.0H$) โดยใช้พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงน้อย และใช้พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงมากตามลำดับ พบว่าเมื่อเสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก ระยะห่างระหว่างดีวีเอเตอร์ตัวแรกกับตัวสุดท้ายไม่มีผลต่อพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัด ยกเว้นในกรณีเสริมกำลังเมื่อใช้ระยะห่างระหว่างดีวีเอเตอร์ตัวแรกกับตัวสุดท้าย 4 เมตร ที่มีกำลังประลัย สติฟเนส และความเหนียวน้อยกว่าคานตัวอื่น ทั้งนี้เนื่องมาจากระยะระหว่างดีวีเอเตอร์ตัวแรกกับตัวสุดท้ายมีค่าน้อยกว่า 6.1 เมตร ซึ่งเป็นระยะระหว่างน้ำหนักกระทำ คานจึงวิบัติตรงตำแหน่งที่มีน้ำหนักกระทำแทนที่จะเป็นตรงที่กึ่งกลางคาน

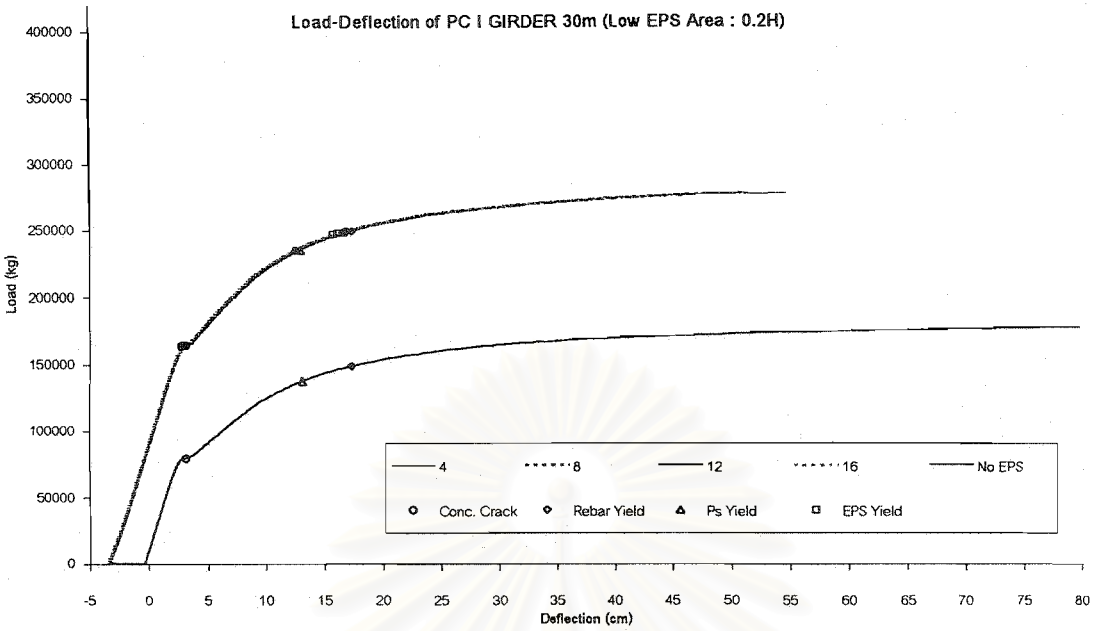
รูปที่ 7.32 และรูปที่ 7.33 แสดงผลการเสริมกำลังเมื่อใช้ระยะห่างระหว่างดีวีเอเตอร์ตัวแรกกับตัวสุดท้ายต่าง ๆ กัน ในกรณีที่มีระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย ($0.2H$) โดยใช้พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงน้อย และใช้พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงมากตามลำดับ พบว่าเมื่อเสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย ระยะห่างระหว่างดีวีเอเตอร์ตัวแรกกับตัวสุดท้ายไม่มีผลต่อพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัด



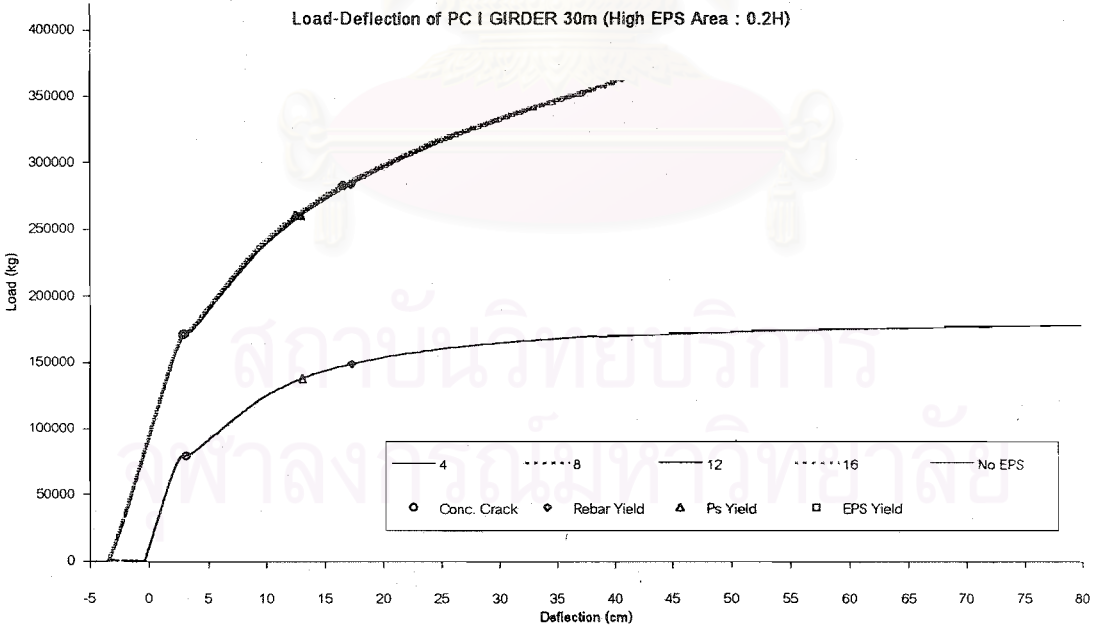
รูปที่ 7.30 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 30 เมตร เมื่อเสริมกำลัง โดยใช้ระยะห่างระหว่างตีเอนเตอร์ตัวแรกกับตัวสุดท้ายต่าง ๆ กัน ใช้ระยะเยื้องศูนย์ 2.0H พื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงน้อย



รูปที่ 7.31 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 30 เมตร เมื่อเสริมกำลัง โดยใช้ระยะห่างระหว่างตีเอนเตอร์ตัวแรกกับตัวสุดท้ายต่าง ๆ กัน ใช้ระยะเยื้องศูนย์ 2.0H พื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงมาก



รูปที่ 7.32 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 30 เมตร เมื่อเสริมกำลัง โดยใช้ระยะห่างระหว่างตีเอดอร์ตัวแรกกับตัวสุดท้ายต่าง ๆ กัน ใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 0.2H พื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงน้อย



รูปที่ 7.33 แสดงผลการเสริมกำลังคาน PC I GIRDER ความยาวช่วง 30 เมตร เมื่อเสริมกำลัง โดยใช้ระยะห่างระหว่างตีเอดอร์ตัวแรกกับตัวสุดท้ายต่าง ๆ กัน ใช้ระยะเยื้องศูนย์กลาง 0.2H พื้นที่หน้าตัดลดอัดแรงมาก

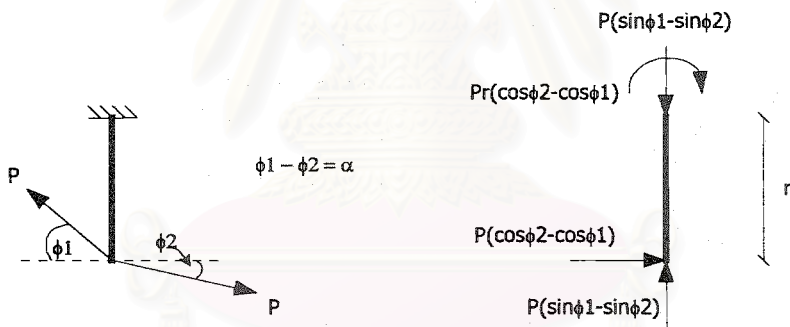
จากรูปที่รูปที่ 7.30 ถึงรูปที่ 7.33 สามารถสรุปได้ว่า หากเสริมกำลังคานโดยที่โมเมนต์ไดอะแกรมที่ได้จากการเสริมกำลังคานมีค่ามากกว่าโมเมนต์ไดอะแกรมที่ได้จากน้ำหนักกระทำทุก ๆ หน้าตัดคาน ระยะห่างระหว่างตัวเอนเตอร์ตัวแรกกับตัวสุดท้ายไม่มีผลต่อพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดของคาน

ผลจากมุมเบี่ยงเบน

เมื่อพิจารณาการเสริมกำลังด้วยวิธีลวดอัดแรงภายนอกที่ใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย ๆ จะไม่เกิดปัญหาเนื่องจากมุมเบี่ยงเบน (α) แต่เมื่อเสริมกำลังคานโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากขึ้นปัญหาจากมุมเบี่ยงเบนจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ปัญหาจากมุมเบี่ยงเบน (α) มี 2 เรื่องคือ โมเมนต์ที่ตัวเอนเตอร์ และแรงเสียดทานระหว่างลวดอัดแรงภายนอกกับตัวเอนเตอร์

โมเมนต์ที่ตัวเอนเตอร์

เมื่อพิจารณารูปที่ 7.34 พบว่าเมื่อมุมเบี่ยงเบน (α) มีค่ามากตัวเอนเตอร์จะต้องรับโมเมนต์ดัดมาก ดังนั้นหากเสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกที่ทำให้เกิดมุมเบี่ยงเบนมาก จะต้องออกแบบตัวเอนเตอร์ให้รับโมเมนต์ดัดมากขึ้นตามไปด้วย



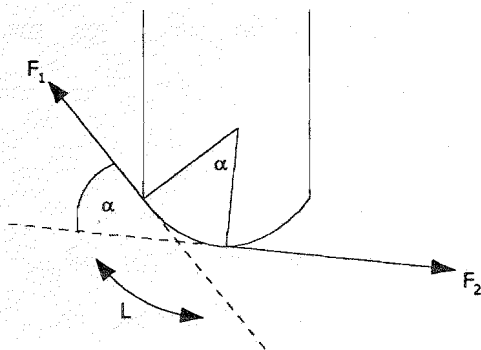
รูปที่ 7.34 แสดงโมเมนต์ที่ตัวเอนเตอร์

แรงเสียดทานระหว่างลวดอัดแรงกับตัวเอนเตอร์

จากการศึกษาของ P. Srinivasa Rao และ George Mathew^[17] พบว่าการที่มีแรงเสียดทานระหว่างลวดอัดแรงกับตัวเอนเตอร์ทำให้กำลังรับน้ำหนักประลัยของคานเพิ่มขึ้น แต่ขณะทำการดึงลวด แรงเสียดทานทำให้แรงดึงสูญเสียไป (friction loss) ดังแสดงในรูปที่ 7.35 และเมื่อพิจารณาสมการที่ 7.2 จะพบว่ายิ่งแนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกมีมุมเบี่ยงเบนมาก ก็จะทำให้สูญเสียแรงดึงมาก

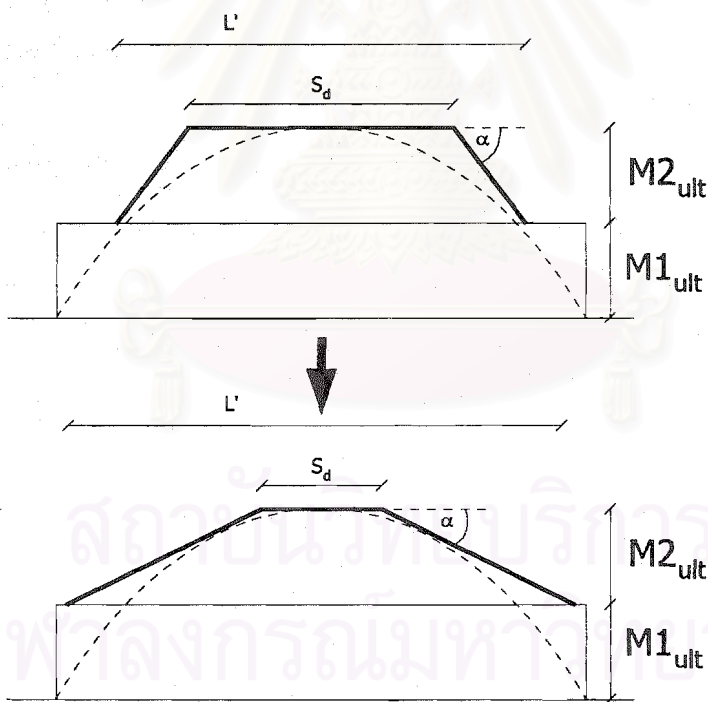
$$F_2 - F_1 = -F_1(KL + \mu\alpha)$$

สมการที่ 7.2



รูปที่ 7.35 แสดงภาพประกอบการคำนวณแรงดึงที่สูงเกินไปเนื่องจากแรงเสียดทาน

เนื่องจากแนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกแบบที่ 1 ให้กำลังประลัย สติฟเนส และความเหนียวดีที่สุดใน การดึงลวดจะมีปัญหามากที่สุดเนื่องจากมุมเบี่ยงเบนมีค่ามาก โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก ๆ ในทางปฏิบัติปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการปรับระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรง (jacking corbel) และปรับระยะห่างระหว่างตีโหนดครั้งแรกกับตัวสุดท้าย เพื่อลดมุมเบี่ยงเบนของแนวลวดอัดแรง ดังแสดงในรูปที่ 7.36



รูปที่ 7.36 แสดงการปรับระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรง (L') และปรับระยะห่างระหว่างตีโหนดครั้งแรกกับตัวสุดท้าย (S_d)

ในการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรง และการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างตีโหนดครั้งแรกกับตัวสุดท้าย หากโมเมนต์ไดอะแกรมที่ได้จากการเสริมกำลังยังคงครอบคลุม

โมเมนต์ไดอะแกรมจากน้ำหนักกระทำ ก็จะไม่ทำให้กำลังรับโมเมนต์ดัด สติฟเนส และความเหนียวที่ต้องการเปลี่ยนไป

สรุป

การลดจำนวนดีวีเอเตอร์จะมีผลน้อยต่อการลดลงของระยะเยื้องศูนย์กลาง คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก การลดจำนวนดีวีเอเตอร์จะทำให้กำลังรับโมเมนต์ดัดลดลงน้อยกว่า คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย ในการเสริมกำลังคานคอนกรีตเดิม เมื่อเสริมกำลังคานโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากใช้ดีวีเอเตอร์จำนวน 2 ตัวก็เพียงพอ แต่เมื่อเสริมกำลังคานโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยควรใช้ดีวีเอเตอร์จำนวน 3 ตัว เพื่อป้องกันคานแอ่นตัวมาชนกับแนวลวดอัดแรงภายนอก

แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกมีผลต่อกำลังรับโมเมนต์ดัด สติฟเนสและความเหนียวของคาน เมื่อเสริมกำลังคานโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยผลของแนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกจะมีน้อย เมื่อเสริมกำลังคานโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากขึ้นผลของแนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกจะมีมากขึ้นตามไปด้วย

สำหรับคานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู เมื่อน้ำหนักกระทำหน่วยแรงตั้งในลวดอัดแรงภายนอกจะเพิ่มขึ้นได้มากกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงเป็นรูปตัววี ทำให้คานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู มีกำลังรับโมเมนต์ดัด สติฟเนส และน้ำหนักแตกร้า (cracking load) มากกว่า

คานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกที่สอดคล้องกับรูปแบบของน้ำหนักกระทำโดยการจัดวางดีวีเอเตอร์ในตำแหน่งที่เหมาะสม บริเวณที่คานช่วยกันรับแรงจะกระจายออกเป็นบริเวณกว้าง ทำให้คานมีกำลังรับโมเมนต์ดัดและความเหนียวมากกว่า คานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกไม่สอดคล้องกับรูปแบบของน้ำหนักกระทำ

คานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู มีกำลังรับโมเมนต์ดัด สติฟเนส และความเหนียว ดีกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงแบบอื่น แต่ในทางปฏิบัติ แนวการวางตัวของลวดอัดแรงรูปสี่เหลี่ยมคางหมูทำให้

ดีวีเอเตอร์ต้องรับโมเมนต์ดัดมาก และมีแรงเสียดทานระหว่างดีวีเอเตอร์กับลวดอัดแรงมากกว่า
แนวการวางตัวของลวดอัดแรงแบบอื่น ทั้งนี้เนื่องมาจากแนวของลวดอัดแรงเบนไปเป็นมุมมาก
กว่า ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการปรับระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรง (jacking corbel)
และปรับระยะห่างระหว่างดีวีเอเตอร์ตัวแรกกับตัวสุดท้าย เพื่อลดมุมเบี่ยงเบนของแนวลวดอัดแรง

ในการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรง และการเปลี่ยนระยะห่างระหว่าง
ดีวีเอเตอร์ตัวแรกกับตัวสุดท้าย หากโมเมนต์ไดอะแกรมที่ได้จากการเสริมกำลังยังคงครอบคลุม
โมเมนต์ไดอะแกรมจากน้ำหนักกระทำ ก็จะไม่ทำให้กำลังรับโมเมนต์ดัด สติฟเนส และความ
เหนียวที่ต้องการเปลี่ยนไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 8

สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาพบว่า การเสริมกำลังโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตด้วยวิธีอัดแรงภายนอก สามารถนำมาใช้กับคานคอนกรีตเสริมเหล็กและคานคอนกรีตอัดแรงได้เป็นอย่างดี โดยคานของสะพานทุกประเภทที่นำมาศึกษามีพฤติกรรมคล้ายคลึงกันและสามารถสรุปได้ดังนี้

เมื่อเพิ่มพื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรงภายนอก คานจะมีกำลังรับโมเมนต์ดัดและสติฟเนสเพิ่มขึ้น แต่ความเหนียวของคานจะลดลง โดยหน่วยแรงดึง (prestressing stress) ที่ใช้ในการดึงลวดอัดแรงภายนอกไม่มีผลต่อกำลังรับโมเมนต์ดัดและความเหนียวของคาน แต่ถ้าเพิ่มแรงดึงที่ใช้ในการดึงลวดจะทำให้คานมีสติฟเนสและน้ำหนักแตกร้าวเพิ่มขึ้น การเพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลางทำให้คานมีกำลังรับโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้นแต่ไม่มีผลต่อความเหนียว เมื่อระยะเยื้องศูนย์กลางเพิ่มขึ้นและใช้หน่วยแรงดึงมากคานจะมีสติฟเนสลดลง ในขณะที่เมื่อใช้หน่วยแรงดึงน้อยคานจะมีสติฟเนสเพิ่มขึ้น

การลดจำนวนดิวีเอเตอร์จะมีผลน้อยต่อการลดลงของระยะเยื้องศูนย์กลาง คานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมาก การลดจำนวนดิวีเอเตอร์จะทำให้กำลังรับโมเมนต์ดัดลดลงน้อยกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อย ในการเสริมกำลังคานคอนกรีตเดิม เมื่อเสริมกำลังคานโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากใช้ดิวีเอเตอร์จำนวน 2 ตัวก็เพียงพอ แต่เมื่อเสริมกำลังคานโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยควรใช้ดิวีเอเตอร์จำนวน 3 ตัว เพื่อป้องกันคานแอ่นตัวมาชนกับแนวลวดอัดแรงภายนอก

แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกมีผลต่อกำลังรับโมเมนต์ดัด สติฟเนสและความเหนียวของคาน เมื่อเสริมกำลังคานโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยผลของแนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกจะมีน้อย เมื่อเสริมกำลังคานโดยใช้ระยะเยื้องศูนย์กลางมากขึ้นผลของแนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกจะมีมากขึ้นตามไปด้วย

สำหรับคานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู เมื่อน้ำหนักกระทำหน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงภายนอกจะเพิ่มขึ้นได้มากกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงเป็นรูปตัววี ทำให้คานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู มีกำลังรับโมเมนต์ดัด สติฟเนส และน้ำหนักแตกร้าว (cracking load) มากกว่า

คานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกที่สอดคล้องกับรูปแบบของน้ำหนักกระทำโดยการจัดวางตีวีเอเตอร์ในตำแหน่งที่เหมาะสม บริเวณที่คานช่วยกันรับแรงจะกระจายออกเป็นบริเวณกว้าง ทำให้คานมีกำลังรับโมเมนต์ดัดและความเหนียวมากกว่า คานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกไม่สอดคล้องกับรูปแบบของน้ำหนักกระทำ

คานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงภายนอกเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู มีกำลังรับโมเมนต์ดัด สติฟเนส และความเหนียว ดีกว่าคานที่เสริมกำลังโดยใช้แนวการวางตัวของลวดอัดแรงแบบอื่น แต่ในทางปฏิบัติ แนวการวางตัวของลวดอัดแรงรูปสี่เหลี่ยมคางหมูทำให้ตีวีเอเตอร์ต้องรับโมเมนต์ดัดมาก และมีแรงเสียดทานระหว่างตีวีเอเตอร์กับลวดอัดแรงมากกว่า แนวการวางตัวของลวดอัดแรงแบบอื่น ทั้งนี้เนื่องมาจากแนวของลวดอัดแรงเบนไปเป็นมุมมากกว่า ปัญหาสามารถแก้ไขได้โดยการปรับระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรง (jacking corbel) และปรับระยะห่างระหว่างตีวีเอเตอร์ตัวแรกกับตัวสุดท้าย เพื่อลดมุมเบี่ยงเบนของแนวลวดอัดแรง

ในการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างแป้นยึดลวดอัดแรง และการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างตีวีเอเตอร์ตัวแรกกับตัวสุดท้าย หากโมเมนต์ไออะแกรมที่ได้จากการเสริมกำลังยังคงครอบคลุมโมเมนต์ไออะแกรมจากน้ำหนักกระทำ ก็จะไม่ทำให้กำลังรับโมเมนต์ดัด สติฟเนส และความเหนียวที่ต้องการเปลี่ยนไป

การเสริมกำลังรับโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตด้วยวิธีอัดแรงภายนอก แรงดึง (prestressing force) ที่ใช้ดึงลวดอัดแรงภายนอกจะถูกจำกัดด้วยกำลังของแป้นยึดลวดอัดแรง (jacking corble) ดังนั้นความสามารถในการเพิ่มกำลังรับโมเมนต์ดัดของคานจึงถูกจำกัดไป ด้วยจากการศึกษาพบว่าหากต้องการเพิ่มกำลังรับโมเมนต์ดัดให้มากขึ้นกว่าเดิม จำเป็นจะต้องเพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกให้มากขึ้น ถึงแม้ใช้แรงดึงได้เท่าเดิมแต่เมื่อเพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกให้มากขึ้น ก็ทำให้สามารถเพิ่มโมเมนต์ดัดในการเสริมกำลังได้มากขึ้น

การเสริมกำลังคานคอนกรีตด้วยวิธีอัดแรงภายนอก เพื่อให้คานมีกำลังรับโมเมนต์ดัด สติฟเนส และความเหนียวตามที่ต้องการ สามารถนำผลการศึกษาไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบได้

รายการอ้างอิง

1. กรมโยธาธิการ กระทรวงมหาดไทย. แบบมาตรฐานสะพานในเขตชุมชนในภูมิภาค. กรุงเทพฯ , 2542.
2. T.Y. Lin and Ned H.Burns. Design of Prestressed Concrete Structures. 3rd Edition SI version. Singapore : John Wiley & Sons, 1982.
3. R. Park and T. Paulay. Reinforced Concrete Structures. New Zealand : John Wiley & Sons, 1975.
4. G. O. Shanafelt and W. B. Horn. Guidelines for Evaluation and Repair of Prestressed Concrete Bridge Members. (NCHRP Report 280). Washington, D.C.(U.S.A.) : Transportation Research Board, 1985.
5. Petros P. Xanthakos. Bridge Strengthening and Rehabilitation. New Jersey(U.S.A.) : Prentice Hall PTR, 1996.
6. Antoine E. Naaman and John Breen External Prestressing in Bridges. U.S.A. : ACI SP120, 1991.
7. Virlogeux M.P. 1988. "Non-linear Analysis of Externally Prestressed Structures", Federation International De La Precontrainte Symposium, Israel : FIP.
8. Antoine E. Naaman. 1991. "A New Methodology for the Analysis of Beams Prestressed with External or Unbonded Tendons.", External Prestressing in Bridges, pp.339-354. U.S.A. : ACI SP 120-16.
9. Muller J. and Gauthier Y. 1991. "Ultimate Behavior of Precast Segmental Box Girders with External Tendons.", External Prestressing in Bridges, pp.353-373. U.S.A. : ACI SP 120-17.
10. M. E. Kreger, G. L. Fenves, and K. C. El-Habr. 1991. "Finite Element Analysis of Externally Post-Tension Segmental Box Girder Construction.", External Prestressing in Bridges, pp.389-396. U.S.A. : ACI SP 120-19.
11. Antoine E. Naaman and Fadi M. Alkhairi. "Stress at Ultimate in Unbonded Post-Tensioning Tendons Part 1 : Evaluation of the state-of-the-art.", ACI Structural Journal Vol. 88, No. 5, Sep.-Oct. 1991 : pp.641-651.
12. Antoine E. Naaman and Fadi M. Alkhairi. "Stress at Ultimate in Unbonded Post-Tensioning Tendons Part 2 : Proposed methodology.", ACI Structural Journal , Vol. 88, No. 6, Nov.-Dec. 1991 : pp.683-692.

13. Antoine E. Naaman and Fadi M. Alkhairi. "Analysis of Beams Prestressed with Unbonded Internal or External Tendons.", Journal of Structural Engineering Vol. 119, No. 9, Sep. 1993 : pp.2680-2700.
14. Mohamed H. Harajli. "Strengthening of Concrete Beams by External Prestressing", PCI Journal Vol. 38, No. 6, Nov.-Dec. 1993 : pp. 76-88.
15. M. A. Pisani. "A Numerical Model for Externally Prestressed Beams", Structural Engineering and Mechanics Vol. 4, No. 2 : pp.177-190.
16. M. A. Pisani. "Strengthening by Means of External Prestressing", Journal of Bridge Engineering Vol. 4, No. 2, May. 1999 : pp.131-135.
17. P. Srinivasa Rao and George Mathew. "Behavior of Externally Prestressed Concrete Beams with Multiple Deviators", ACI Structural Journal Vol. 93, No. 4, Jul.-Aug. 1996 : pp.387-396.
18. Kiang-Hwee Tan and Chee-Khoo Ng. , "Effective of Deviators and Tendon Configuration on Behavior of Externally Prestressed Beams", ACI Structural Journal , Vol. 94, No. 1, Jan.-Feb. 1997 : pp.13-22.
19. P. Spinelli and S. Morano. "External Prestressing : An Aid for The Protection and Repairing of Reinforced Concrete Structures", 1989 : pp.803-818.
20. Seri Kiatyuttachai. 1994. A Study to Propose Design Guide for High-Strength Concrete Members. M.Eng. thesis, Department of Civil Engineering, Chulalongkorn University.
21. Songkiat Matupayont. 1995. Flexural Behavior of Externally Prestressed Concrete Beams. PhD. dissertation, Department of Civil Engineering, Saitama University.
22. Teerawut Muhummud. 1995. , Flexural Behavior of Two-Span Continuous Externally Prestressed Concrete Beams. M.Eng. thesis, School of Civil Engineering, Asian Institute of Technology.
23. Thirugnanasunthatan Aravinthan. 1999. Behavior of Continuous Beams with External Prestressing Having Large Eccentricities. PhD. dissertation, Department of Civil Engineering, Saitama University.

ประวัติผู้เขียน

นายประณต พัวเพิ่มพูลศิริ เกิดเมื่อวันอังคารที่ 19 ตุลาคม พ.ศ. 2519 ที่อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา จาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย