

# การตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของโครงข้อแข็งคอนกรีตอัดแรงภายนอก

## Investigation of Load Carrying Capacity of Externally Prestressed Concrete Frame

ลิกขพันธ์ วรปฏิสัมพันธ์<sup>1</sup> สุรวุฒิ กิตติไควล์<sup>2</sup> และ วัฒนชัย สมิตถากร<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันคอนกรีตอัดแรง ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการก่อสร้างต่างๆ เช่น อาคาร โครงสร้างใต้ดิน โครงสร้างนอกชายฝั่ง โรงไฟฟ้า และสะพาน สำหรับงานอาคารมีการใช้คอนกรีตอัดแรง ในชั้นส่วนโครงสร้าง เช่น คาน พื้น หรือแม้กระทั่งโครงข้อหมุน บางครั้งก็ถูกออกแบบเป็นคอนกรีตอัดแรงเช่นกัน แต่โครงสร้างโครงข้อแข็งกลับยังไม่ค่อยพบว่ามีกรออกแบบให้เป็นคอนกรีตอัดแรงมากนัก เนื่องจากมีความยุ่งยากและซับซ้อนทั้งในขั้นตอนการคำนวณออกแบบและการก่อสร้าง โครงงานนี้ศึกษาถึงพฤติกรรมของโครงสร้างโครงข้อแข็งคอนกรีตอัดแรง และความปลอดภัยของการใช้งานโครงสร้างดังกล่าว ซึ่งได้ทำการศึกษาโครงสร้างตัวอย่างกรณีศึกษา โดยสร้างแบบจำลองในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง SAP2000 และวิเคราะห์ผลในสถานะหาแรงในลวด สภาวะถ่ายแรง สภาวะใช้งาน และสภาวะประลัย พบว่าค่าแรงดึงประสิทธิผลในลวดอัดแรงที่สอดคล้องกับครึ่งหนึ่งของน้ำหนักบรรทุกจรคือ 1124 MPa ( $0.60f_{pu}$ ) ทั้งนี้เมื่อตรวจสอบสภาวะถ่ายแรงและสภาวะใช้งาน พบว่าเกิดแรงดึงขึ้นที่ผิวคอนกรีตบางจุด จึงต้องใช้เหล็กเสริมธรรมดาช่วยรับแรงดึงดังกล่าว

คำสำคัญ: คอนกรีตอัดแรงภายนอก, โครงข้อแข็งคอนกรีตอัดแรง, การตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุก

### Abstract

Prestressed concrete is a widely used in various construction projects such as buildings, underground structures, offshore structures, power plants, and bridges. The use of prestressed concrete as building components comprises prestressed concrete beams, slabs, and even truss structures. The application of prestressed concrete in frame structures is not well-known due to complexity and difficulties in design and construction. This study investigates the use of prestressed

concrete in a frame structure on its behavior and determines whether its safety remains within acceptable limits. A case study is used as an example and modeled using the structural analysis program SAP2000. Results are analyzed at several stages: Load balancing, transfer, service, and ultimate stages. In order to balance half of given live load, effective prestressing in tendons should be 1124 MPa ( $0.60f_{pu}$ ). However, tensile stresses occur in some parts of concrete at transfer and service stages. Therefore, rebars are needed to resist these tensions.

Keywords: externally prestressed concrete, prestressed concrete frame, investigation of load carrying capacity

### 1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่สามารถรับแรงอัดได้ดีแต่รับแรงดึงได้น้อย กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมีค่าประมาณ 8-14 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดเท่านั้น โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจึงมักเกิดรอยร้าวขึ้นเมื่อต้องรับแรงดึงหรือแรงดัด และเพื่อที่จะลดรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น คอนกรีตอัดแรงจึงได้ถูกคิดค้นขึ้นโดยอาศัยหลักการของการอัดแรงเข้าไปในทิศทางตามยาวของชิ้นส่วนโครงสร้าง แรงอัดดังกล่าวนี้ป้องกันการเกิดรอยร้าวได้ด้วยการเข้าไปช่วยลดหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดวิกฤตบริเวณกึ่งกลางหรือบริเวณที่รองรับในสภาวะการใช้งานทำให้ความสามารถในการรับแรงดึง แรงเฉือน และแรงบิดของโครงสร้างเพิ่มขึ้น มีพฤติกรรมที่ยืดหยุ่น และได้ใช้ความสามารถในการรับแรงอัดของหน้าตัดตลอดทั้งความลึกของคอนกรีตอย่างเต็มประสิทธิภาพ อีกทั้งยังเป็นการใช้ประโยชน์จากวัสดุคอนกรีตและเหล็กเสริมที่มีกำลังสูงได้อย่างเต็มกำลังความสามารถ [1-2]

ในปัจจุบัน คอนกรีตอัดแรงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในสิ่งก่อสร้างต่างๆ ทั้งอาคาร โครงสร้างใต้ดิน โครงสร้างนอกชายฝั่ง โรงไฟฟ้า และสะพานชนิดต่างๆ โดยในงานอาคารคอนกรีตอัดแรงได้ถูกออกแบบเป็นโครงสร้างต่างๆ เช่น คาน พื้น หรือแม้กระทั่งโครงข้อหมุนก็ได้มี

การออกแบบเป็นคอนกรีตอัดแรง [3] แต่ในโครงสร้างเฟรมยังไม่ค่อยพบ การออกแบบเป็นคอนกรีตอัดแรงมากนัก เนื่องจากมีความยุ่งยากและ ซับซ้อน ทำให้การตรวจสอบความปลอดภัยของโครงสร้างมีความซับซ้อน ตามไปด้วย

โครงการนี้ทำการศึกษาว่าหากประยุกต์ใช้คอนกรีตอัดแรงในโครงสร้าง เฟรมแล้ว จะส่งผลต่อความปลอดภัยของโครงสร้างโครงสร้างข้อแข็งคอนกรีตอัด แรงอย่างไร และความปลอดภัยของโครงสร้างยังอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ หรือไม่

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 Load-Balancing Method

Load-Balancing Method เป็นวิธีการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรง ถูกพัฒนาขึ้นโดย T.Y. Lin ด้วยหลักการนี้ทำให้กระบวนการออกแบบง่าย ขึ้นมาก โดยเฉพาะในโครงสร้างที่ต่อเนื่อง โดยอาศัยหลักการสมดุลกัน ระหว่างแรงในแนวตั้งจากลวดอัดแรงเช่น Harped หรือ Draped prestressing tendon กับ Gravity load ที่คานนั้นรองรับ [1-2]

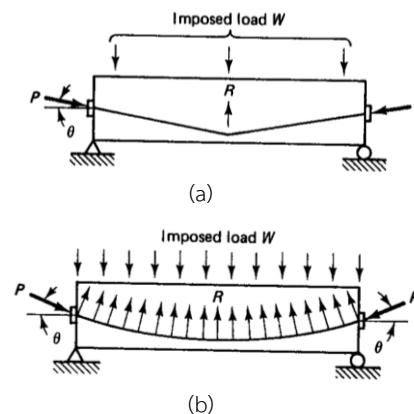
การสมดุลกันระหว่างแรงจากลวดและน้ำหนักภายนอกที่กดทับ (Load-balancing forces) สำหรับ Harped tendon และ Draped tendon แสดงดังรูปที่ 1 แรงในแนวตั้งจากลวด (Load balancing reaction,  $R$ ) มีค่าเท่ากับองค์ประกอบในแนวตั้งของแรงในลวดอัดแรง (Prestressing force,  $P$ )

### 2.2 การตรวจสอบความปลอดภัยของโครงสร้าง

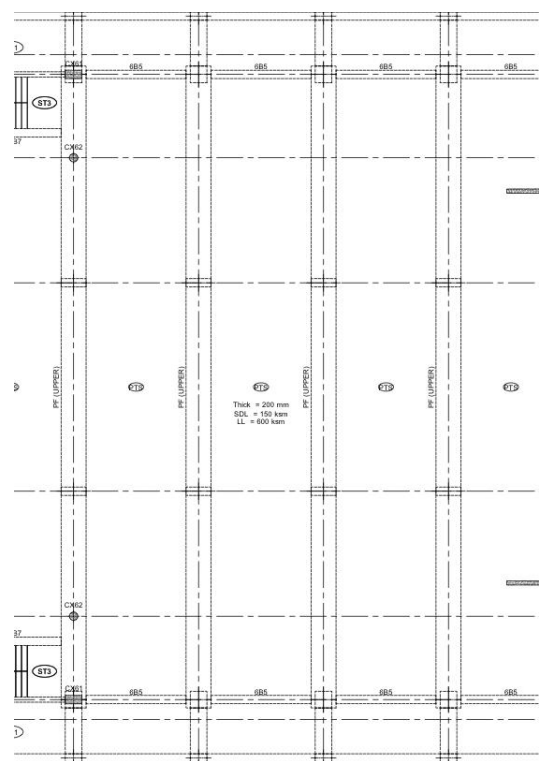
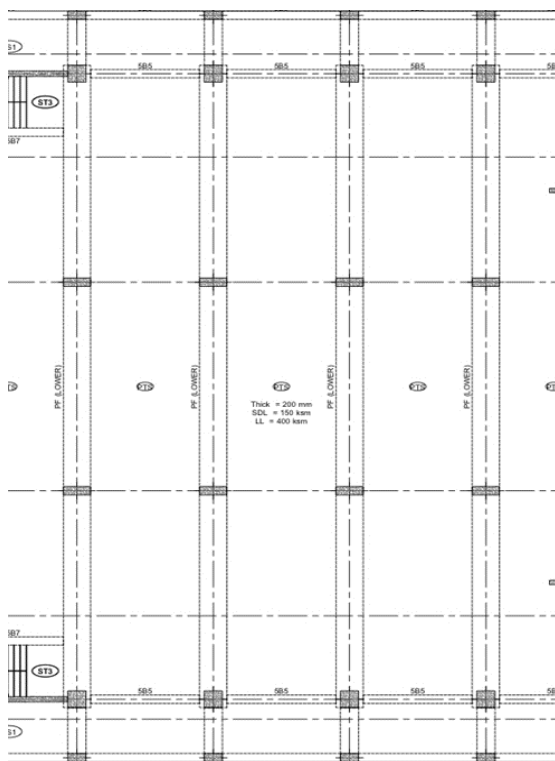
การตรวจสอบความปลอดภัยของโครงสร้างในสถานะต่างๆ ตาม มาตรฐาน ACI 318-08 [4] เป็นดังนี้

#### 2.2.1 สภาวะถ่ายแรง (Transfer stage)

ที่สภาวะถ่ายแรงนี้ มาตรฐาน ACI 318-08 ได้กำหนดหน่วยแรงที่ยอม ให้เกิดในคอนกรีตไว้ โดยหน่วยแรงอัดที่ปลายของชิ้นส่วนที่มีจุดรองรับ อย่างง่าย (Simply supported members) ยอมให้ไม่เกิน  $0.70f'_{ci}$  และ ในกรณีอื่นนอกจากนี้หน่วยแรงอัดยอมให้ไม่เกิน  $0.60f'_{ci}$  และได้กำหนด หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ที่ปลายของชิ้นส่วนที่มีจุดรองรับอย่างง่าย ยอมให้ไม่ เกิน  $0.50vf'_{ci}$  และในกรณีอื่นนอกจากนี้หน่วยแรงดึงยอมให้ไม่เกิน  $0.25vf'_{ci}$  โดยที่  $f'_{ci}$  คือกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่สภาวะเริ่มแรกใน หน่วย MPa



รูปที่ 1 การสมดุลกันระหว่างแรงจากลวดและน้ำหนักภายนอกที่กดทับ (a) Harped tendon. (b) Draped tendons. [1]



รูปที่ 2 แบบจากโครงการอาคารเรียนสาธิตจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยฝ่ายมัธยม แปลนชั้น 5A (ซ้าย) แปลนชั้น 6 (ขวา)

### 2.2.2 สภาวะใช้งาน (Service stage)

ที่สภาวะใช้งานมาตรฐาน ACI 318 ได้กำหนดหน่วยแรงที่ยอมให้เกิดในคอนกรีตไว้ โดยสำหรับพฤติกรรมที่เป็น Class U (Uncracked) และ Class T (Transition between uncracked and cracked) หน่วยแรงอัดที่หน้าตัดของชิ้นส่วนภายใต้น้ำหนักบรรทุกจรที่ส่วนมากคงอยู่แค่ชั่วคราวยอมให้ไม่เกิน  $0.60f'_c$  ในทางกลับกันหากอยู่ภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่กระทำคงค้างเป็นเวลานาน หน่วยแรงอัดที่หน้าตัดของชิ้นส่วนยอมให้ไม่เกิน  $0.45f'_c$  นอกจากนี้มาตรฐานยังได้กำหนดหน่วยแรงดึงที่ยอมให้สำหรับพฤติกรรมที่เป็น Class U และ Class T ยอมให้ไม่เกิน  $0.62\sqrt{f'_c}$  และ  $1.0\sqrt{f'_c}$  ตามลำดับ โดยที่  $f'_c$  คือกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในหน่วย MPa

### 2.2.3 สภาวะประลัย (Ultimate stage)

ที่สภาวะประลัยได้กำหนดใช้ Factored load แทน Service load ในการตรวจสอบความปลอดภัย โดยมาตรฐาน ACI 318-08 ได้กำหนด Factored load ระหว่างน้ำหนักบรรทุกคงที่ ( $D$ ) และน้ำหนักบรรทุกจร ( $L$ ) ไว้เท่ากับ  $1.2D + 1.6L$  โดยจะตรวจสอบว่ากำลังที่ต้องการ (Required Strength) ต้องไม่มากกว่ากำลังที่มีอยู่ (Available Strength) ของทั้งโมเมนต์ ( $M_u \leq \phi M_n$ ) และแรงเฉือน ( $V_u \leq \phi V_n$ )

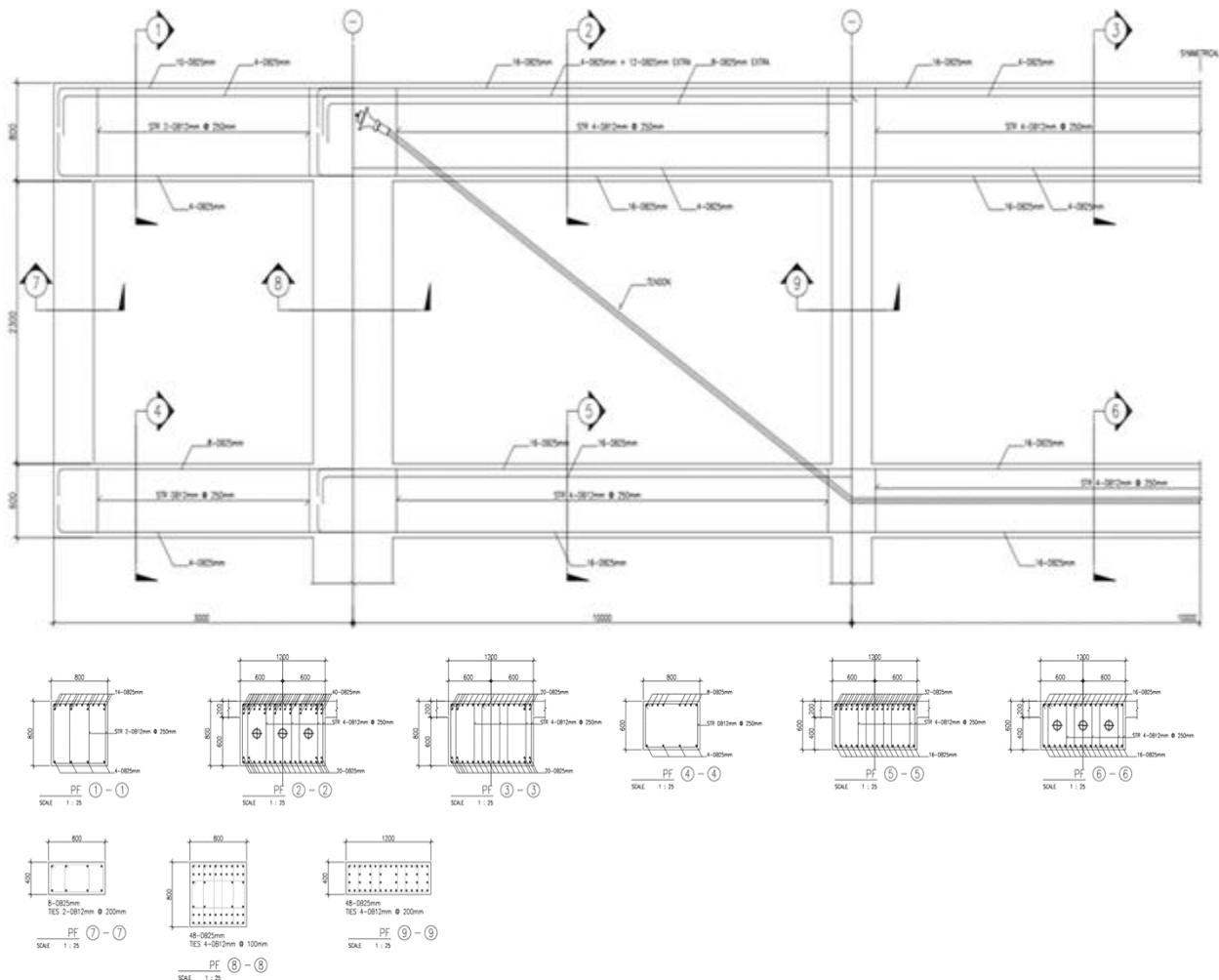
## 3. แบบจำลองโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง

### 3.1 แบบโครงสร้าง

ศึกษาโครงข้อแข็งคอนกรีตอัดแรงจากแบบโครงสร้างของโครงการอาคารเรียนสาธิตจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยฝ่ายมัธยม โดยที่โครงสร้างดังกล่าวเป็นโครงสร้างหลังคาคลุมห้องประชุมอยู่ระหว่างชั้น 5A และชั้น 6 ซึ่งเป็นสนามหญ้ากลางแจ้ง มีความยาวช่วง 36 เมตร และมีลักษณะที่สมมาตรซ้าย-ขวา โดยโครงข้อแข็งดังกล่าวประกอบไปด้วยกันทั้งหมด 9 ชิ้นส่วนตามชื่อหน้าตัดคือ PF1-1 มีความยาวช่วง 3 เมตร, PF2-2 มีความยาวช่วง 10 เมตร, PF3-3 มีความยาวช่วง 10 เมตร, PF4-4 มีความยาวช่วง 3 เมตร, PF5-5 มีความยาวช่วง 10 เมตร, PF6-6 มีความยาวช่วง 10 เมตร, PF7-7 มีความยาวช่วง 3 เมตร, PF8-8 มีความยาวช่วง 3 เมตร และ PF9-9 มีความยาวช่วง 3 เมตร ดังที่แสดงในรูปที่ 2 และ 3

### 3.2 สร้างแบบจำลองในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง

สร้างแบบจำลองของโครงข้อแข็งคอนกรีตอัดแรงดัง รูปที่ 4 จากแบบรายละเอียดโครงสร้างในรูปที่ 3 ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง SAP2000 โดยใช้ Frame Element และ Tendons modeled as loads โดยมีรายละเอียดดังนี้ [5]



รูปที่ 3 แบบรายละเอียดโครงข้อแข็งคอนกรีตอัดแรง PF

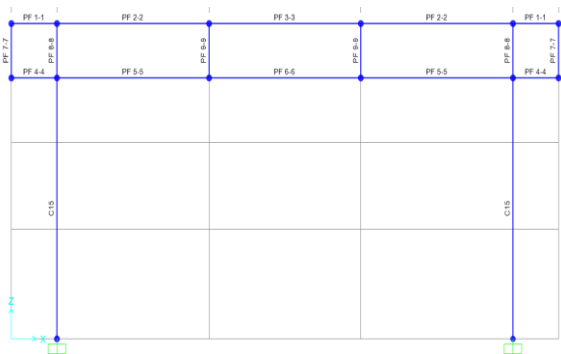
### 3.2.1 การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ

ตารางที่ 1 รายละเอียดคุณสมบัติวัสดุ

วัสดุ	คุณสมบัติ
คอนกรีต (Concrete)	กำลังอัดโดยทั่วไป 350 ksc โดยใช้แท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาด $\varnothing 150 \times 300$ มม.
เหล็กกลม (Round Bar)	ชั้นคุณภาพ RB24, กำลังรับแรงที่จุดครากต่ำสุด 235 MPa, กำลังรับแรงดึงต่ำสุด 385 MPa
เหล็กข้อย้อย (Deformed Bar)	ชั้นคุณภาพ SD40, กำลังรับแรงที่จุดครากต่ำสุด 390 MPa, กำลังรับแรงดึงต่ำสุด 560 MPa
ลวดอัดแรง (Tendon)	Seven-wire strand (Grade 270)

### 3.2.2 การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ

กำหนดคุณสมบัติของหน้าตัดเฟรมที่จะใช้สร้างแบบจำลองในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง โดยนำมาจากแบบรายละเอียดโครงสร้างในรูปที่ 3

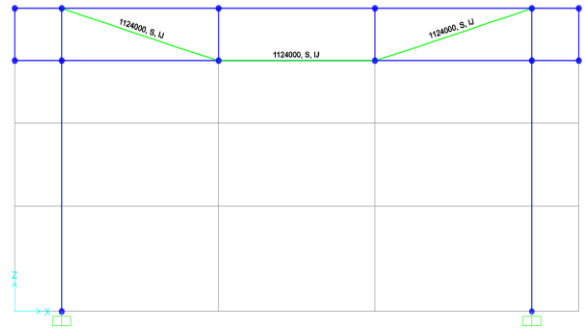


รูปที่ 4 แบบจำลองโครงข้อแข็งคอนกรีตอัดแรงในโปรแกรม SAP2000

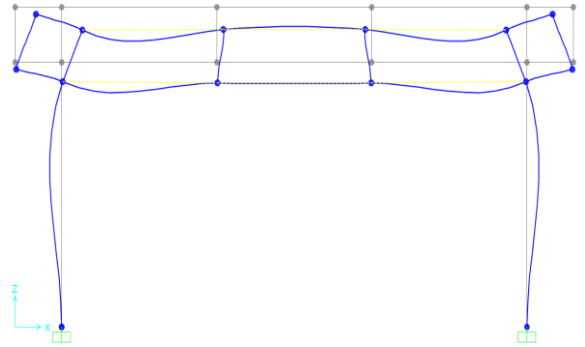
## 4. สภาวะหาแรงในลวด

ที่สภาวะนี้จะทำเพื่อหาค่าแรงในลวดหลังจากหักลบผลจากการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีและที่เกิดขึ้นในระยะยาว (Effective prestressing stress,  $f_{pe}$ ) โดยใช้หลักการของ Load-Balancing หาแรงในลวดที่ควบคุมการโก่งตัวของเฟรมโดยรวมโดยทำให้ทุกข้อต่อ (Joint) ของโครงสร้างมีการเคลื่อนที่ (Displacement) อยู่ในระดับเดียวกัน ภายใต้เงื่อนไขโหลดที่กระทำคือ น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load) + น้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม (Superimposed dead load) + 0.5 เท่าของน้ำหนักบรรทุกจร (Live load)

จากการวิเคราะห์พบว่าหากทดลองเปลี่ยนค่าแรงในลวดไปเรื่อย ๆ จนทำให้ข้อต่อของโครงสร้างมีการเคลื่อนที่ในแนวตั้งลงไปเท่ากัน ภายใต้โหลดกระทำตามที่กำหนดไว้ จะได้ว่าค่าแรงในลวดดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับ 1124 MPa (0.60 $f_{pu}$ ) ดังรูปที่ 5 และภาพการเสียรูปดังรูปที่ 6 ดังนั้นจึงได้ค่าแรงในลวด ( $f_{pe}$ ) ที่จะใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป เท่ากับ 1124 MPa



รูปที่ 5 โครงสร้างเฟรมคอนกรีตอัดแรงเมื่อกำหนดให้แรงในลวดมีค่า 1124 MPa



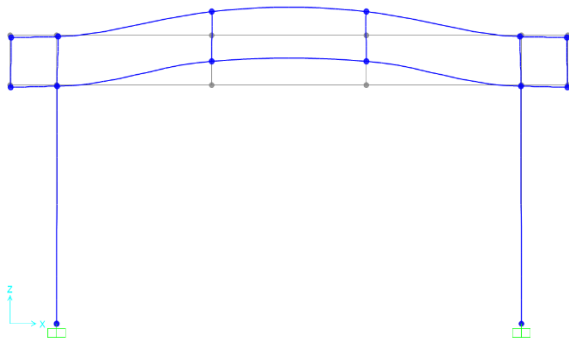
รูปที่ 6 การเสียรูปที่สภาวะหาแรงในลวด

## 5. สภาวะถ่ายแรง

ในการวิเคราะห์ที่สภาวะนี้ทำเพื่อตรวจสอบความสามารถในการรับแรงของโครงสร้าง โดยจะตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตต้องไม่เกินค่าที่ยอมให้ตามทีระบุในมาตรฐาน โดยที่สภาวะทันทีที่ถ่ายแรงจากลวดสู่คอนกรีต ตามมาตรฐานได้กำหนดหน่วยแรงที่ยอมให้เกิดในคอนกรีตไว้ โดยหน่วยแรงอัดที่ปลายของชิ้นส่วนที่มีจุดรองรับอย่างง่าย (Simply supported members) ยอมให้ไม่เกิน  $0.70f'_{ci}$  และในกรณีอื่นนอกจากนี้ หน่วยแรงอัดห้ามเกิน  $0.60f'_{ci}$  และได้กำหนดหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ที่ปลายของชิ้นส่วนที่มีจุดรองรับอย่างง่ายยอมให้ไม่เกิน  $0.50\sqrt{f'_{ci}}$  และในกรณีอื่นนอกจากนี้หน่วยแรงดึงไม่เกิน  $0.25\sqrt{f'_{ci}}$  โดยที่  $f'_{ci}$  คือกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่สภาวะเริ่มแรก

ภายใต้เงื่อนไขโหลดที่กระทำคือ น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load) และแรงในลวด (Prestress) ที่ได้จากสภาวะหาแรงในลวดและตรวจสอบชิ้นส่วนแต่ละชิ้นในเฟรมคอนกรีตอัดแรง ได้แก่ ชิ้นส่วน PF 2-2, PF 3-3, PF 5-5, PF 6-6, PF 8-8 และ PF 9-9 (ดังที่ได้กำหนดไว้ในรูปที่ 4) ซึ่งในแต่ละชิ้นส่วนจะตรวจสอบที่ 3 ตำแหน่งคือที่หน้าตัดบริเวณปลายชิ้นส่วน 2 ด้าน และที่หน้าตัดกึ่งกลางช่วง ได้ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 7

เมื่อทำการวิเคราะห์หาหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตดังในรูปที่ 8 เทียบกับหน่วยแรงดึงที่ยอมให้เกิดในคอนกรีตคือ  $0.25\sqrt{f'_{ci}}$  หรือ 1.48 MPa เมื่อ  $f'_{ci}$  เท่ากับ 35 MPa พบว่ามีตำแหน่งที่หน่วยแรงดึงเกิน 1.48 MPa ทั้งหมด 13 จุด โดยแสดงได้ดังตารางที่ 2



รูปที่ 7 การเลือกรูปที่สภาวะถ่ายแรง

ตารางที่ 2 ตำแหน่งที่หน่วยแรงดึงเกินค่าที่ยอมให้และแรงดึงที่เหล็กเสริมรับได้

ชิ้นส่วน	ตำแหน่งที่หน่วยแรงดึงเกิน 1.48 MPa	แรงดึงที่ เกิดขึ้นบน หน้าตัด (MN)	$A_s f_s$ (MN) $(f_s = 0.50$ $f_y)$
PF 2-2	<ul style="list-style-type: none"> <li>ปลายด้านซ้ายบริเวณผิวล่าง</li> <li>ปลายด้านขวาบริเวณผิวบน</li> </ul>	1.46 1.90	1.91 3.85
PF 3-3	<ul style="list-style-type: none"> <li>ปลายด้านซ้ายบริเวณผิวบน</li> <li>ปลายด้านขวาบริเวณผิวบน</li> </ul>	0.72 0.72	1.91 1.91
PF 5-5	<ul style="list-style-type: none"> <li>ปลายด้านซ้ายบริเวณผิวล่าง</li> <li>กึ่งกลางช่วงบริเวณผิวล่าง</li> <li>ปลายด้านขวาบริเวณผิวบน</li> </ul>	1.53 0.29 2.70	1.53 1.53 3.06
PF 6-6	<ul style="list-style-type: none"> <li>ปลายด้านซ้ายบริเวณผิวบน</li> <li>ปลายด้านขวาบริเวณผิวบน</li> </ul>	0.67 0.67	1.53 1.53
PF 8-8	<ul style="list-style-type: none"> <li>ปลายด้านบนบริเวณผิวด้านขวา</li> <li>ปลายด้านล่างบริเวณผิวด้านซ้าย</li> </ul>	2.15 1.32	2.30 2.30
PF 9-9	<ul style="list-style-type: none"> <li>ปลายด้านบนบริเวณผิวด้านขวา</li> <li>ปลายด้านล่างบริเวณผิวด้านซ้าย</li> </ul>	2.62 2.26	2.30 2.30

ตารางที่ 2 แสดงตำแหน่งบนเฟรมในรูปที่ 8 ที่เกิดหน่วยแรงดึงเกินค่าที่กำหนด โดยจะสามารถคำนวณแรงดึงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดได้ดังสมการที่ (1) และ (2)

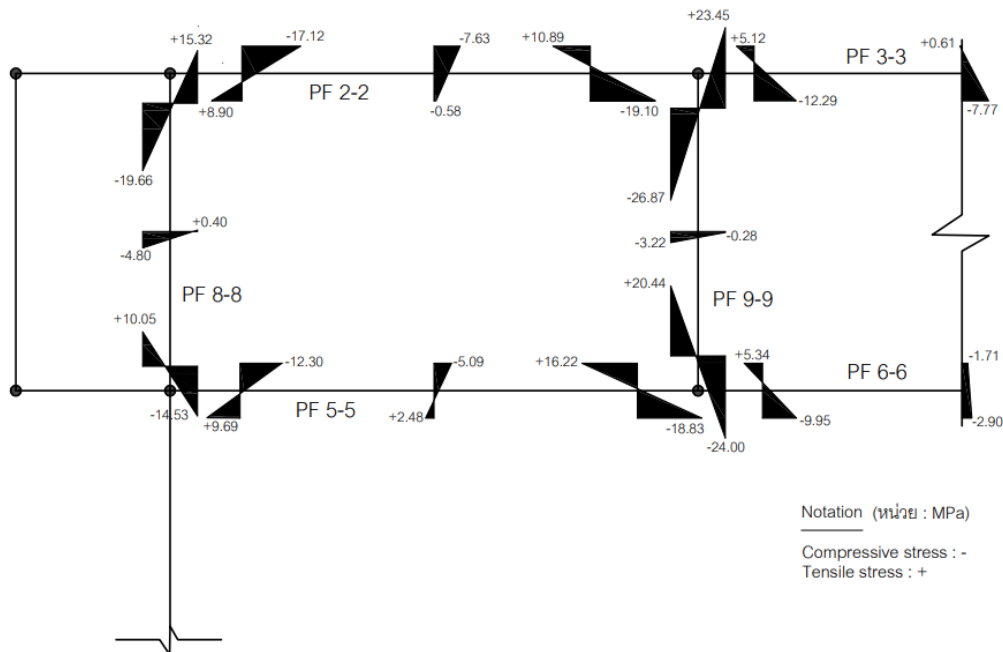
$$y = \frac{f_t}{f_t + f_c} \times t \quad (1)$$

$$T = \frac{l}{2} f_t y b \quad (2)$$

โดยที่  $f_t$  และ  $f_c$  คือหน่วยแรงดึงและหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดตามลำดับ ส่วน  $t$  และ  $b$  คือความลึกและความกว้างของหน้าตัดตามลำดับ  $y$  คือระยะจากแกนสะเทิน (Neutral axis) ของหน้าตัดจนถึงผิวที่เกิดหน่วยแรงดึง และ  $T$  คือแรงดึงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัด

เมื่อเกิดหน่วยแรงดึงเกินค่าที่กำหนด แล้วพิจารณาว่าคอนกรีตเกิดการแตกร้าว จึงนำเหล็กเสริมที่ได้ออกแบบไว้มาช่วยรับแรงดึงด้วย โดยแรงดึงที่เหล็กจะสามารถช่วยรับได้จะเท่ากับ  $A_s f_s$  โดยที่  $f_s$  มีค่าเท่ากับ  $0.5 f_y$  โดยเมื่อวิเคราะห์จากตารางที่ 2 ถ้านำเหล็กเสริมมาคำนวณรับแรงดึงด้วยจะพบว่าทุกตำแหน่งเหล็กเสริมที่ออกแบบไว้สามารถรองรับแรงดึงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดได้ทั้งหมด ยกเว้นเพียงกรณีเดียวคือที่ปลายด้านบนบริเวณผิวด้านขวาของชิ้นส่วน PF 9-9 ที่เหล็กเสริมรับหน่วยแรงดึงเกิน  $0.5 f_y$

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นในคอนกรีตในรูปที่ 8 เทียบกับหน่วยแรงอัดที่ยอมให้เกิดในคอนกรีตคือ  $0.60 f'_{ci}$  หรือ 21 MPa พบว่ามีตำแหน่งที่หน่วยแรงอัดเกิน 21 MPa ทั้งหมด 2 จุด คือที่ปลายด้านบนบริเวณผิวด้านซ้าย และที่ปลายด้านล่างบริเวณผิวด้านขวาของชิ้นส่วน PF 9-9 ที่เกิดหน่วยแรงอัดในคอนกรีต -26.87 MPa และ -24.00 MPa ตามลำดับ



รูปที่ 8 หน่วยแรงในคอนกรีต ที่สภาวะถ่ายแรง

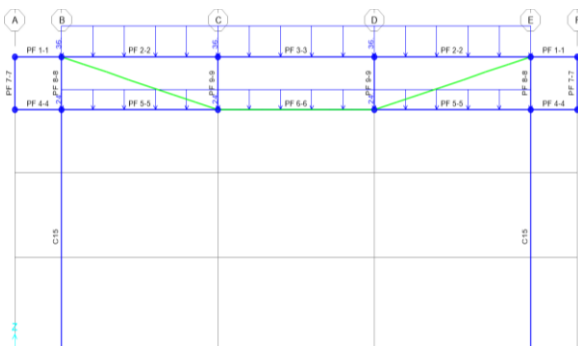
## 6. สภาวะใช้งาน

การวิเคราะห์ที่สภาวะนี้ทำเพื่อตรวจสอบความสามารถในการรับแรงของโครงสร้างที่สภาวะใช้งาน โดยจะตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตต้องไม่เกินค่าที่ยอมให้ตาม ACI 318-08 โดยที่สภาวะใช้งาน ตามมาตรฐานได้กำหนดหน่วยแรงที่ยอมให้เกิดในคอนกรีตไว้ โดยหน่วยแรงอัดของชิ้นส่วนภายใต้น้ำหนักกระทำไม่เกิน  $0.60f'_c$  และได้กำหนดหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ไม่เกิน  $0.62vf'_c$  โดยที่  $f'_c$  คือกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

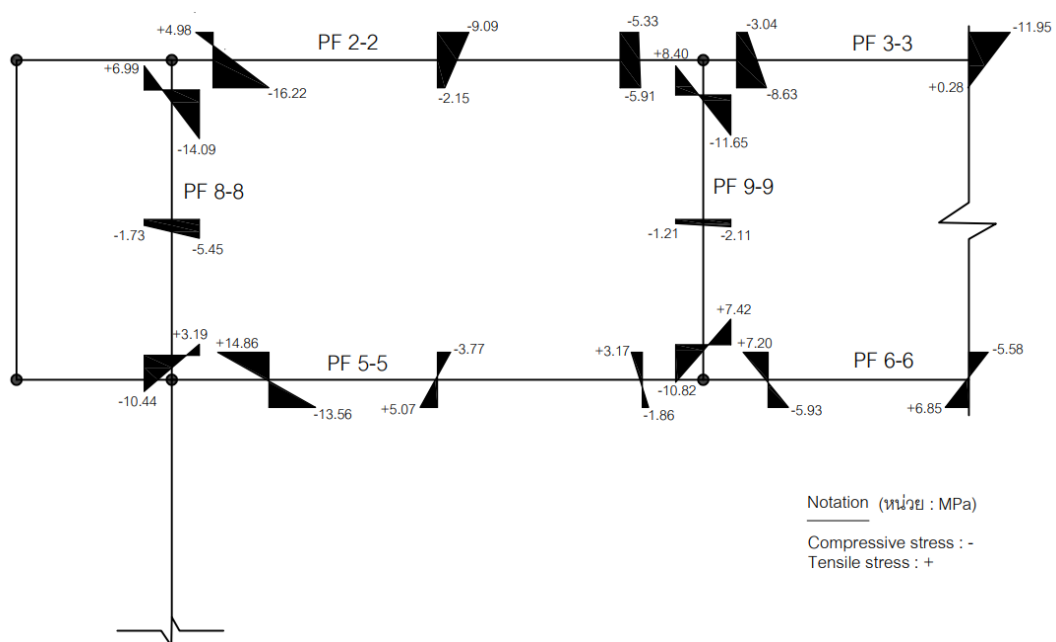
การวิเคราะห์ที่สภาวะนี้มีผลที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างได้หลายกรณี ขึ้นอยู่กับรูปแบบการจัดวางของน้ำหนักบรรทุกจร ซึ่งแต่ละรูปแบบจะส่งผลต่อความวิฤติในโครงสร้างที่แตกต่างกันไป โดยในการศึกษานี้จะพิจารณา รูปแบบการจัดเรียงของน้ำหนักบรรทุกจรทั้งหมด 4 รูปแบบ ดังนี้

### 6.1 การจัดเรียงน้ำหนักบรรทุกจรรูปแบบที่ 1

การวิเคราะห์จะคิดภายใต้ น้ำหนักบรรทุกคงที่ + น้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม + น้ำหนักบรรทุกจร และแรงในลวด (Prestress) ที่ได้จากสภาวะหาแรงในลวด โดยจัดน้ำหนักบรรทุกจรให้อยู่เต็มช่วงบนชิ้นส่วน PF 2-2, PF 3-3, PF 5-5, PF 6-6 ดังแสดงในรูปที่ 9

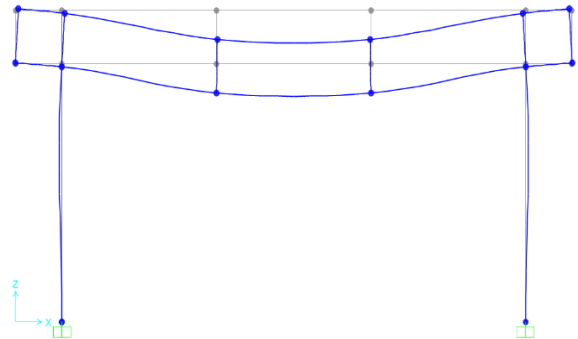


รูปที่ 9 การจัดน้ำหนักบรรทุกจรรูปแบบที่ 1 ที่สภาวะใช้งาน



รูปที่ 11 หน่วยแรงในคอนกรีต ที่สภาวะใช้งาน ของการจัดน้ำหนักบรรทุกจรรูปแบบที่ 1

ในการตรวจสอบชิ้นส่วนแต่ละชิ้นในเฟรมคอนกรีตอัดแรง ได้แก่ ชิ้นส่วน PF 2-2, PF 3-3, PF 5-5, PF 6-6, PF 8-8 และ PF 9-9 ดังที่ได้กำหนดไว้ในรูปที่ 4 ซึ่งในแต่ละชิ้นส่วนจะตรวจสอบที่ 3 ตำแหน่งคือที่หน้าตัดบริเวณปลายชิ้นส่วน 2 ด้าน และที่หน้าตัดกึ่งกลางช่วง โดยจะได้ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 การเสียรูปที่สภาวะใช้งาน ของการจัดน้ำหนักบรรทุกจรรูปแบบที่ 1

เมื่อทำการวิเคราะห์หาหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตดังในรูปที่ 11 เทียบกับหน่วยแรงดึงที่ยอมให้เกิดในคอนกรีตคือ  $0.62vf'_c$  หรือ 3.67 MPa เมื่อ  $f'_c$  เท่ากับ 35 MPa พบว่ามีตำแหน่งที่หน่วยแรงดึงเกิน 3.67 MPa ทั้งหมด 8 จุด โดยแสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงตำแหน่งบนเฟรมในรูปที่ 11 ที่เกิดหน่วยแรงดึงเกินค่าที่กำหนด โดยจะสามารถคำนวณแรงดึงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดได้ โดยเมื่อวิเคราะห์จากตารางที่ 3 ถ้านำเหล็กเสริมมาคำนวณรับแรงดึงด้วยจะพบว่าทุกตำแหน่งเหล็กเสริมที่ออกแบบไว้สามารถรองรับแรงดึงที่จะเกิดขึ้นบนหน้าตัดได้ทั้งหมด

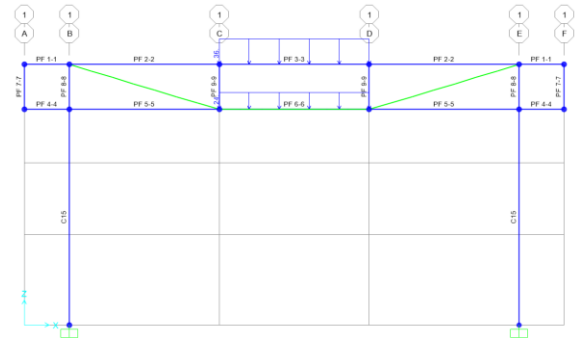
ตารางที่ 3 ตำแหน่งที่หน่วยแรงดึงเกินค่าที่ยอมให้และแรงดึงที่เหล็กเสริมรับได้

ชิ้นส่วน	ตำแหน่งที่หน่วยแรงดึงเกิน 3.67 MPa	แรงดึงที่ เกิดขึ้นบน หน้าตัด (MN)	$A_s f_s$ (MN) ( $f_s = 0.50 f_y$ )
PF 2-2	• ปลายด้านซ้ายบริเวณผิวบน	0.56	3.83
PF 5-5	• ปลายด้านซ้ายบริเวณผิวบน • กึ่งกลางช่วงบริเวณผิวล่าง	2.80 1.05	3.06 1.53
PF 6-6	• ปลายด้านซ้ายบริเวณผิวบน • กึ่งกลางช่วงบริเวณผิวล่าง	1.42 1.36	1.53 1.53
PF 8-8	• ปลายด้านบนบริเวณผิวด้านซ้าย	0.74	2.30
PF 9-9	• ปลายด้านล่างบริเวณผิวด้านขวา • ปลายด้านบนบริเวณผิวด้านซ้าย	0.73 0.84	2.30 2.30

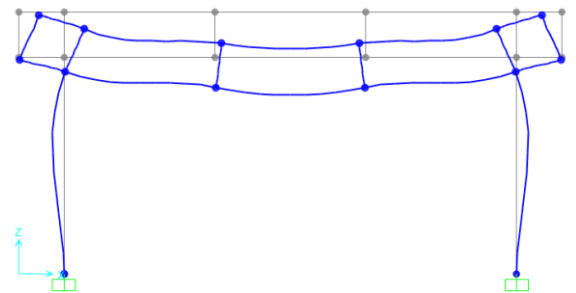
นอกจากนี้เมื่อพิจารณาหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นในคอนกรีตในรูปที่ 11 เทียบกับหน่วยแรงอัดที่ยอมให้เกิดในคอนกรีตคือ  $0.60 f'_c$  หรือ 21.0 MPa พบว่าไม่มีตำแหน่งใดเลยที่หน่วยแรงอัดเกิน 21.0 MPa

### 6.2 การจัดเรียงน้ำหนักบรรทุกจรรยาแบบที่ 2

การวิเคราะห์จะคิดภายใต้ น้ำหนักบรรทุกคงที่ + น้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม + น้ำหนักบรรทุกจร และแรงในลวด (Prestress) ที่ได้จากสภาวะหาแรงในลวด โดยจัดน้ำหนักบรรทุกจรให้อยู่เต็มช่วงบนชิ้นส่วน PF 3-3, PF 6-6 เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 12

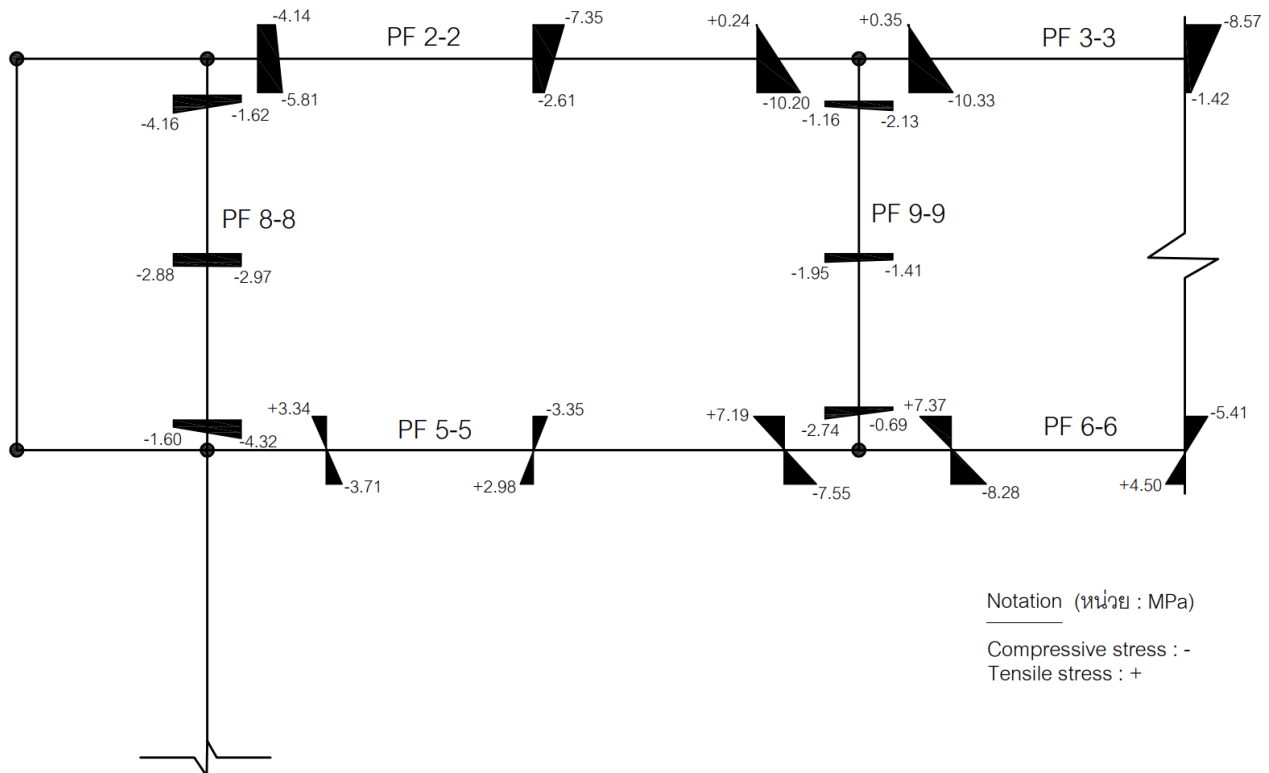


รูปที่ 12 การจัดน้ำหนักบรรทุกจรรยาแบบที่ 2 ที่สภาวะใช้งาน



รูปที่ 13 การเสียรูปที่สภาวะใช้งาน ของการจัดน้ำหนักบรรทุกจรรยาแบบที่ 2

เมื่อทำการวิเคราะห์หาหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตดังในรูปที่ 14 เทียบกับหน่วยแรงดึงที่ยอมให้เกิดในคอนกรีตคือ  $0.62 f'_c$  หรือ 3.67 MPa เมื่อ  $f'_c$  เท่ากับ 35 MPa พบว่ามีตำแหน่งที่หน่วยแรงดึงเกิน 3.67 MPa ทั้งหมด 3 จุด โดยแสดงได้ดังตารางที่ 4



รูปที่ 14 หน่วยแรงในคอนกรีต ที่สภาวะใช้งาน ของการจัดน้ำหนักบรรทุกจรรยาแบบที่ 2

ตารางที่ 4 ตำแหน่งที่หน่วยแรงดึงเกินค่าที่ยอมให้และแรงดึงที่เหล็กเสริมรับได้

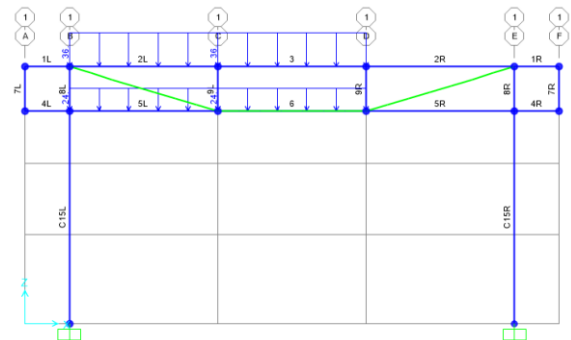
ชิ้นส่วน	ตำแหน่งที่หน่วยแรงดึงเกิน 3.67 MPa	แรงดึงที่ เกิดขึ้นบน หน้าตัด (MN)	$A_f f_s$ (MN) ( $f_s = 0.50$ $f_y$ )
PF 5-5	• ปลายด้านขวาบริเวณผิวบน	1.26	3.06
PF 6-6	• ปลายด้านซ้ายบริเวณผิวบน • กึ่งกลางช่วงบริเวณผิวล่าง	1.25 0.74	1.53

ตารางที่ 4 แสดงตำแหน่งบนเฟรมในรูปที่ 14 ที่เกิดหน่วยแรงดึงเกินค่าที่กำหนด โดยจะสามารถคำนวณแรงดึงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดได้ โดยเมื่อวิเคราะห์จากตารางที่ 4 ถ้านำเหล็กเสริมมาคำนวณรับแรงดึงด้วยจะพบว่าทุกตำแหน่งเหล็กเสริมที่ออกแบบไว้สามารถรองรับแรงดึงที่จะเกิดขึ้นบนหน้าตัดได้ทั้งหมด

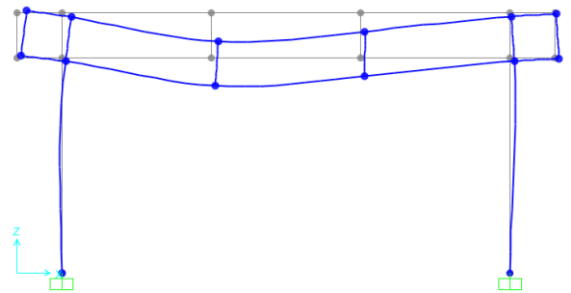
นอกจากนี้เมื่อพิจารณาหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นในคอนกรีตในรูปที่ 14 เทียบกับหน่วยแรงอัดที่ยอมให้เกิดในคอนกรีตคือ  $0.60 f'_c$  หรือ 21.0 MPa พบว่าไม่มีตำแหน่งใดเลยที่หน่วยแรงอัดเกิน 21.0 MPa

### 6.3 การจัดเรียงน้ำหนักบรรทุกรูปแบบที่ 3

การวิเคราะห์จะคิดภายใต้ น้ำหนักบรรทุกคงที่ + น้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม + น้ำหนักบรรทุกจร และแรงในลวด (Prestress) ที่ได้จากสภาวะหาแรงในลวด โดยจัดน้ำหนักบรรทุกจรให้อยู่เต็มช่วงบนชิ้นส่วน 2L, 3, 5L และ 6 เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 15

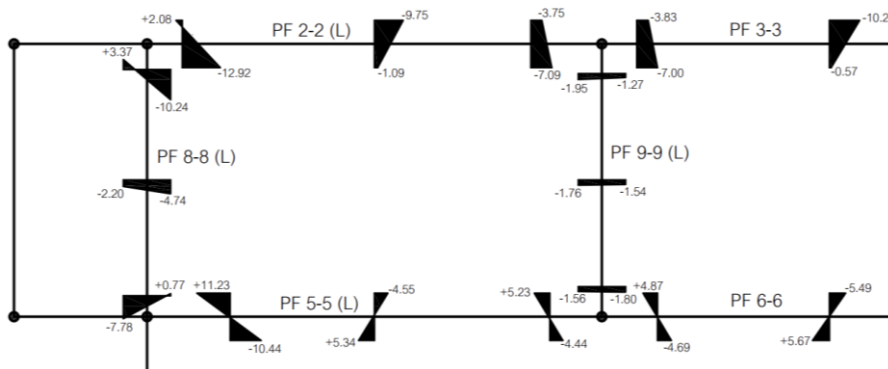


รูปที่ 15 การจัดน้ำหนักบรรทุกรูปแบบที่ 3 ที่สภาวะใช้งาน

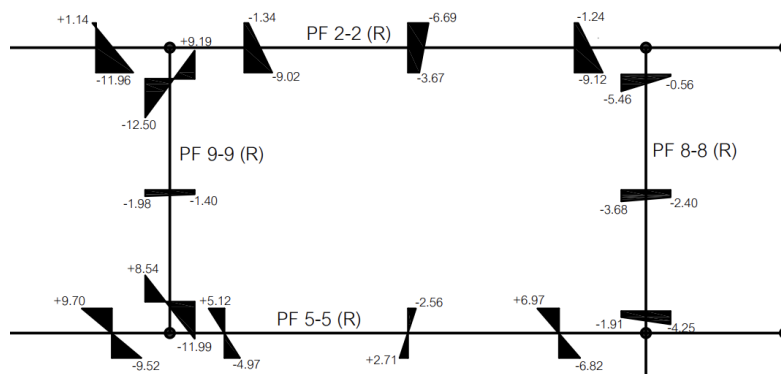


รูปที่ 16 การเสียรูปที่สภาวะใช้งาน ของการจัดน้ำหนักบรรทุกรูปแบบที่ 3

เมื่อทำการวิเคราะห์หาหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตดังในรูปที่ 17 และ 18 เทียบกับหน่วยแรงดึงที่ยอมให้เกิดในคอนกรีตคือ  $0.62 f'_c$  หรือ 3.67 MPa เมื่อ  $f'_c$  เท่ากับ 35 MPa พบว่ามีตำแหน่งที่หน่วยแรงดึงเกิน 3.67 MPa ทั้งหมด 10 จุด โดยแสดงได้ดังตารางที่ 5



รูปที่ 17 หน่วยแรงในคอนกรีต ที่สภาวะใช้งาน ของการจัดน้ำหนักบรรทุกรูปแบบที่ 3 (ครึ่งซ้าย)



รูปที่ 18 หน่วยแรงในคอนกรีต ที่สภาวะใช้งาน ของการจัดน้ำหนักบรรทุกรูปแบบที่ 3 (ครึ่งขวา)



ตารางที่ 5 ตำแหน่งที่หน่วยแรงดึงเกินค่าที่ยอมให้และแรงดึงที่เหล็กเสริมรับได้

ชิ้นส่วน	ตำแหน่งที่หน่วยแรงดึงเกิน 3.67 MPa	แรงดึงที่ เกิดขึ้นบน หน้าตัด (MN)	$A_f f_s$ (MN) ( $f_s = 0.50 f_y$ )
PF 5-5 (L)	• ปลายด้านซ้ายบริเวณผิวบน	2.09	3.06
	• กึ่งกลางช่วงบริเวณผิวล่าง	1.04	1.53
	• ปลายด้านขวาบริเวณผิวบน	1.02	3.06
PF 5-5 (R)	• ปลายด้านซ้ายบริเวณผิวบน	0.93	3.06
	• ปลายด้านขวาบริเวณผิวบน	1.27	3.06
PF 6-6	• ปลายด้านซ้ายบริเวณผิวบน	0.89	1.53
	• กึ่งกลางช่วงบริเวณผิวล่าง	1.04	1.53
	• ปลายด้านขวาบริเวณผิวบน	1.76	1.53
PF 9-9 (R)	• ปลายด้านล่างบริเวณผิวด้านซ้าย	0.85	2.30
	• ปลายด้านบนบริเวณผิวด้านขวา	0.93	2.30

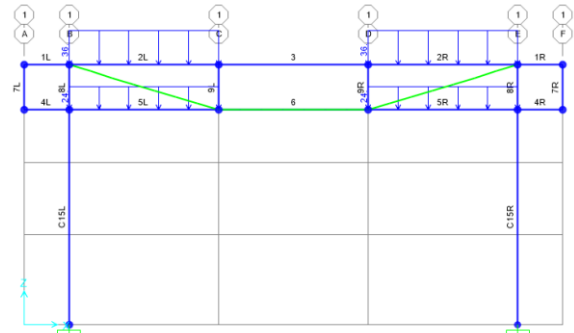
ตารางที่ 5 แสดงตำแหน่งบนเฟรมในรูปที่ 17 และ 18 ที่เกิดหน่วยแรงดึงเกินค่าที่กำหนด โดยจะสามารถคำนวณแรงดึงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดได้โดยเมื่อวิเคราะห์จากตารางที่ 5 ถ้านำเหล็กเสริมมาคำนวณรับแรงดึงด้วยจะพบว่าทุกตำแหน่งเหล็กเสริมที่ออกแบบไว้สามารถรองรับแรงดึงที่จะเกิดขึ้นบนหน้าตัดได้ทั้งหมด ยกเว้นเพียงกรณีเดียวคือที่ปลายด้านขวาบริเวณผิวบนของชิ้นส่วน PF 6-6 ที่เหล็กเสริมรับหน่วยแรงดึงเกิน  $0.5 f_y$

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นในคอนกรีตในรูปที่ 17 และ 18 เทียบกับหน่วยแรงอัดที่ยอมให้เกิดในคอนกรีตคือ  $0.60 f'_c$  หรือ 21.0 MPa พบว่าไม่มีตำแหน่งใดเลยที่หน่วยแรงอัดเกิน 21.0 MPa

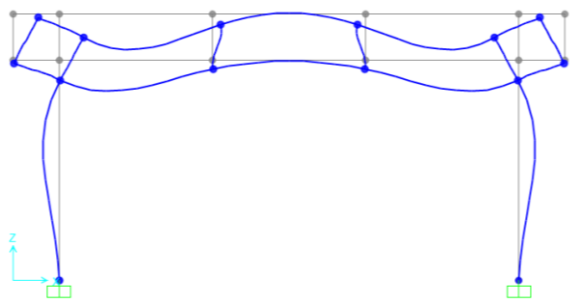
#### 6.4 การจัดเรียงน้ำหนักบรรทุกจรรยาแบบที่ 4

การวิเคราะห์จะคิดภายใต้ น้ำหนักบรรทุกคงที่ + น้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม + น้ำหนักบรรทุกจร และแรงในลวด (Prestress) ที่ได้จากสภาวะ

หาแรงในลวด โดยจัดน้ำหนักบรรทุกจรรยาให้อยู่เต็มช่วงบนชิ้นส่วน 2L, 2R, 5L และ 5R เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 19

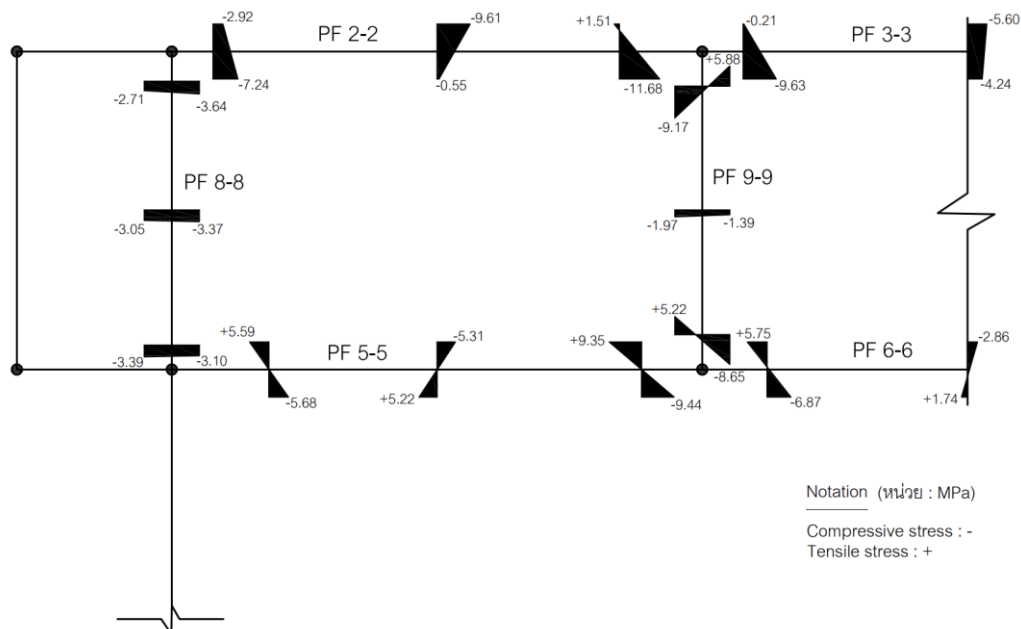


รูปที่ 19 การจัดน้ำหนักบรรทุกจรรยาแบบที่ 4 ที่สภาวะใช้งาน



รูปที่ 20 การเสียรูปที่สภาวะใช้งาน ของการจัดน้ำหนักบรรทุกจรรยาแบบที่ 4

เมื่อทำการวิเคราะห์หาหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตดังในรูปที่ 21 เทียบกับหน่วยแรงดึงที่ยอมให้เกิดในคอนกรีตคือ  $0.62 f'_c$  หรือ 3.67 MPa เมื่อ  $f'_c$  เท่ากับ 35 MPa พบว่ามีตำแหน่งที่หน่วยแรงดึงเกิน 3.67 MPa ทั้งหมด 6 จุด โดยแสดงได้ดังตารางที่ 6



รูปที่ 21 หน่วยแรงในคอนกรีต ที่สภาวะใช้งาน ของการจัดน้ำหนักบรรทุกจรรยาแบบที่ 4

ตารางที่ 6 ตำแหน่งที่หน่วยแรงดึงเกินค่าที่ยอมให้และแรงดึงที่เหล็กเสริมรับได้

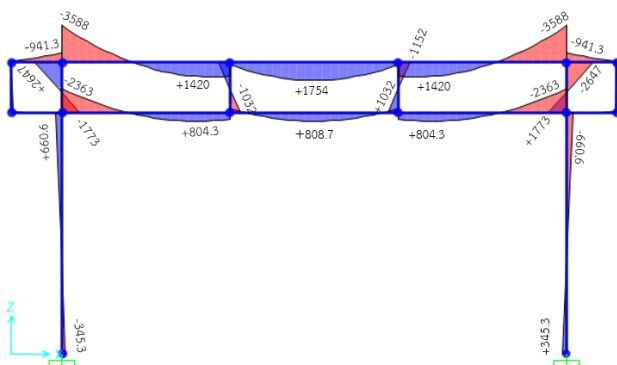
ชั้นส่วน	ตำแหน่งที่หน่วยแรงดึงเกิน 3.67 MPa	แรงดึงที่ เกิดขึ้นบน หน้าตัด (MN)	$A_f f_s$ (MN) ( $f_s = 0.50$ $f_y$ )
PF 5-5	• ปลายด้านซ้ายบริเวณผิวบน	1.00	3.06
	• กึ่งกลางช่วงบริเวณผิวล่าง	0.93	1.53
	• ปลายด้านขวาบริเวณผิวบน	1.67	3.06
PF 6-6	• ปลายด้านซ้ายบริเวณผิวบน	0.94	1.53
PF 9-9	• ปลายด้านล่างบริเวณผิวด้านซ้าย	0.47	2.30
	• ปลายด้านบนบริเวณผิวด้านขวา	0.55	2.30

ตารางที่ 6 แสดงตำแหน่งบนเฟรมในรูปที่ 21 ที่เกิดหน่วยแรงดึงเกินค่าที่กำหนด โดยจะสามารถคำนวณแรงดึงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดได้ โดยเมื่อวิเคราะห์จากตารางที่ 6 ถ้านำเหล็กเสริมมาคำนวณรับแรงดึงด้วยจะพบว่าทุกตำแหน่งเหล็กเสริมที่ออกแบบไว้สามารถรองรับแรงดึงที่จะเกิดขึ้นบนหน้าตัดได้ทั้งหมด

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นในคอนกรีตในรูปที่ 21 เทียบกับหน่วยแรงอัดที่ยอมให้เกิดในคอนกรีตคือ  $0.60 f'_c$  หรือ 21.0 MPa พบว่าไม่มีตำแหน่งใดเลยที่หน่วยแรงอัดเกิน 21.0 MPa

## 7. สภาวะประลัย

การวิเคราะห์ที่สภาวะประลัย ได้กำหนดใช้ Factored load เท่ากับ  $1.2D + 1.6L$  แทน Service load โดยน้ำหนักที่กระทำและการจัดน้ำหนักบรรทุกจะพิจารณาเหมือนกับในหัวข้อ 6.1 โดยจะได้ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 23



รูปที่ 22 Bending Moment Diagram ที่สภาวะประลัย (หน่วย KN/m<sup>2</sup>)

ในการตรวจสอบชั้นส่วนแต่ละชั้นในเฟรมคอนกรีตอัดแรง โดยจะตรวจสอบจากปริมาณเหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัดที่ต้องการ จากการออกแบบโดยพิจารณากรณีเสริมเฉพาะเหล็กรับแรงดึง (Single Reinforcement) หรือ การเสริมเหล็กรับแรงดึงและเหล็กรับแรงอัด (Double Reinforcement) [6] แล้วนำมาเปรียบเทียบกับเหล็กเสริมในแบบโครงสร้างในรูปที่ 3 ที่ได้ออกแบบไว้ก่อนแล้ว โดยแสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ปริมาณเหล็กที่ได้จากการออกแบบตามกับปริมาณเหล็กตามแบบ

ชั้นส่วน	ปริมาณเหล็กเสริม รับโมเมนต์ดัด ที่ต้องการ		ปริมาณเหล็กเสริม รับโมเมนต์ดัด ตามแบบโครงสร้าง	
	ปริมาณเหล็ก เสริมบน (mm <sup>2</sup> )	ปริมาณเหล็ก เสริมล่าง (mm <sup>2</sup> )	ปริมาณเหล็ก เสริมบน (mm <sup>2</sup> )	ปริมาณเหล็ก เสริมล่าง (mm <sup>2</sup> )
PF1-1(L)	3731	ไม่มีโมเมนต์ บวก	6874	1964
PF2-2(L)	15806	5491	19640	9820
PF3-3	ไม่มีโมเมนต์ ลบ	7304	9820	9820
PF4-4(L)	1652	1652	3928	1964
PF5-5(L)	14321	3307	15712	7856
PF6-6	ไม่มีโมเมนต์ ลบ	4384	7856	7856
PF7-7 (L)	1239	1107	1964	1964
PF8-8 (L)	7456	11754	11784	11784
PF9-9 (L)	9892	11032	11784	11784
PF7-7 (R)	1107	1239	1964	1964
PF8-8 (R)	11754	7456	11784	11784
PF9-9 (R)	11032	9892	11784	11784

หมายเหตุ: เนื่องจากการวิเคราะห์พบว่าชั้นส่วนในโครงสร้างมีความสมมาตรกัน จึงทำให้การออกแบบทำแค่ชั้นส่วนฝั่งเดียว ยกเว้นชั้นส่วน PF7-7, PF8-8 และ PF9-9

ตารางที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณเหล็กที่ได้จากการออกแบบกับปริมาณเหล็กตามแบบ จะพบว่าทุกชั้นส่วนมีปริมาณเหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัดตามแบบมากกว่าเหล็กเสริมที่ต้องการ และเพียงพอในสภาวะประลัย

## 8. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาเพื่อตรวจสอบความปลอดภัยของโครงสร้างโครงข้อแข็งคอนกรีตอัดแรง จากโครงการอาคารเรียนสาธิตจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ฝ่ายมัธยม โดยสร้างแบบจำลองในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง SAP2000 และทำการวิเคราะห์โครงสร้างในสภาวะต่างๆ สรุปผลได้ดังนี้

สถานะหาแรงในลวด ทำไปเพื่อหาค่าแรงในลวดหลังจากหักผลจากการสูญเสียแรงดึงแล้ว โดยใช้หลักการของ Load-Balancing ซึ่งหลังจากทำการวิเคราะห์ในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างแล้วพบว่าได้ค่าแรงในลวดที่เหมาะสมเท่ากับ 1124 เมกะปาสคาล หรือคิดเป็นประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังรับแรงดึงของลวดอัดแรง (Tensile Strength,  $f_{pu}$ )

เมื่อใช้ลวดอัดแรงชนิด Seven-wire strand เกรด 270 ซึ่งมีกำลังรับแรงดึง 1860 เมกะปาสคาล

การตรวจสอบที่สภาวะถ่ายแรงจากลวดคู่คอนกรีตเพื่อตรวจสอบกำลังของโครงสร้างขณะถ่ายแรง โดยจะตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตต้องไม่เกินค่าที่ยอมให้ตามที่ระบุในมาตรฐาน ACI 318-08 โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ผลออกมาแล้วพบว่าไม่มีบริเวณที่หน่วยแรงดึงมากกว่าที่ยอมให้อยู่ บางจุด แต่เมื่อนำเหล็กเสริมตามยาวมาช่วยรับแรงดึงที่เกิดขึ้น แล้วทำการตรวจสอบพบว่าเหล็กเสริมมีเพียงพอที่จะสามารถรับแรงดึงที่จะเกิดขึ้นได้ทั้งหมด ยกเว้นปลายด้านบนของชิ้นส่วน PF 9-9 ที่เหล็กเสริมรับหน่วยแรงดึงเกิน  $0.5 f_y$  นอกจากนี้เมื่อพิจารณาหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้น พบว่ามีตำแหน่งที่หน่วยแรงอัดเกินค่าที่ยอมให้ด้วยกันทั้งหมด 2 จุด คือที่ปลายด้านบนและที่ปลายด้านล่างของชิ้นส่วน PF 9-9 ทั้งนี้หน่วยแรงอัดในคอนกรีตที่มากเกินไปที่สภาวะถ่ายแรงอาจพิจารณาให้เหล็กเสริมช่วยรับแรงอัดนี้ได้

การตรวจสอบที่สภาวะใช้งานเพื่อตรวจสอบกำลังของโครงสร้าง เมื่อต้องแบกรับน้ำหนักบรรทุกจร โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ผลออกมาเมื่อพิจารณาการจัดเรียงน้ำหนักบรรทุกจรทั้ง 4 รูปแบบ แล้วพบว่าไม่มีบริเวณที่หน่วยแรงดึงเกินกว่าที่ยอมให้น้อยลงจากที่สภาวะทันทีที่ถ่ายแรงจากลวดคู่คอนกรีต เนื่องจากที่สภาวะใช้งานมีน้ำหนักบรรทุกจรมากระทำเพิ่มบนโครงสร้าง น้ำหนักส่วนมากจึงไปหักล้างกับแรงในลวด เหลือเพียง Unbalanced load บางส่วนที่ทำให้ตัวเฟรมโดยรวมเกิดการโก่งตัว (Deflection) แต่ละชิ้นส่วนในโครงสร้างเฟรมจึงรับโมเมนต์ดัดที่น้อยลง และเมื่อนำเหล็กเสริมตามยาวมาช่วยรับแรงดึงที่เกิดขึ้น ก็พบว่าทุกชิ้นส่วนมีเหล็กเสริมที่เพียงพอในการรับแรงดึงที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมด ยกเว้นเพียงกรณีเดียวได้แก่ การจัดเรียงน้ำหนักบรรทุกจรรูปแบบที่ 3 ที่พบว่ามีความหนาแน่นของเหล็กเสริมรับหน่วยแรงดึงเกิน  $0.5 f_y$  คือปลายด้านขวาบริเวณผิวบนของชิ้นส่วน PF 6-6 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้น พบว่าในการจัดเรียงน้ำหนักบรรทุกจรทั้งรูปแบบที่ 1, 2, 3, และ 4 ไม่มีตำแหน่งใดเลยที่หน่วยแรงอัดเกิน 21.0 MPa

การตรวจสอบที่สภาวะประลัยเพื่อตรวจสอบกำลังของโครงสร้าง เมื่อต้องแบกรับน้ำหนักที่สภาวะประลัย โดยเมื่อตรวจสอบจากปริมาณเหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัดที่ต้องการที่ได้จากการออกแบบโดยพิจารณารณีสเสริมเฉพาะเหล็กรับแรงดึง (Single Reinforcement) หรือ การเสริมเหล็กรับแรงดึงและเหล็กรับแรงอัด (Double Reinforcement) แล้วเปรียบเทียบกับเหล็กเสริมในแบบโครงสร้าง โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ผลออกมาแล้วพบว่าทุกชิ้นส่วนมีปริมาณเหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัดตามแบบมากกว่าเหล็กเสริมที่ต้องการ และเพียงพอในสภาวะประลัย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Nawy, E.G. (2012). *Prestressed Concrete: A Fundamental Approach*. Fifth Edition Update ACI, AASHTO, IBC 2009 Codes Version. Pearson. pp.15-18.
- [2] Lin, T.Y. and Burns, N.H. (1982). *Design of Prestressed Concrete Structures*. Third Edition. Wiley. pp.1-12.

- [3] Samir, P.S. (2013). *Precast Prestressed Concrete Truss-Girder for Roof Applications*. Master Thesis. University of Nebraska. USA.
- [4] ACI Committee 318 (2008). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. American Concrete Institute. pp.288-290.
- [5] CSI (2017). *CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, SAFE and CSI Bridge*. Computers & Structures, Inc., pp.105-144., pp.311.
- [6] วัฒนชัย สมิทธาการ, *การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก*, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พ.ศ.2563, หน้า 2-22 – 2-31.