การศึกษาวิเคราะห์และออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ คานสะพานคอนกรีตอัดแรงชนิด I-Girder

The Analysis and Design to optimize Prestressed Concrete Bridge Girder Type I-Girder.

ปรินทร ส่องแสงศิริศักดิ์ ศิรภพ เฉลิมเกียรติ สิวนารถ อยู่นาน* และ วัชรา ณ ระนอง

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา-ชลประทาน วิทยาลัยการชลประทาน สถาบันสมทบมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.นนทบุรี
*Corresponding author; E-mail address: siwanart.unan@gmail.com

บทคัดย่อ

ในการออกแบบโครงสร้างสะพานในปัจจุบันได้มีการนำเอาเทคโนโลยีคอนกรีตอัดแรงมาใช้ในการออกแบบกันอย่างแพร่หลาย จากการศึกษาข้อมูลคานคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป เป็นเทคโนโลยีที่นำมาใช้ในการก่อสร้างสะพานที่ทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักและรับแรงเฉือน ได้ดีกว่าคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วๆไป และรวดเร็วในการก่อสร้าง สำหรับการก่อสร้างสะพานที่มีช่วงของสะพานที่ยาวมากๆ การก่อสร้างจะพิจารณาใช้คานคอนกรีตอัดแรงในลักษณะหน้าตัดรูปตัวไอ (Prestress Concrete I Girder) งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงชนิด I-Girder ขนาดหน้าตัดตามมาตรฐานกรมทางหลวง ความยาว 15 เมตร โดยมีการปรับเปลี่ยนขนาดหน้าตัด ลดจำนวนเหล็กเสริมลง โดยที่โครงสร้างยังสามารถรับน้ำหนักใช้งานและน้ำหนักประลัยได้อย่างปลอดภัย จากผลการศึกษาและออกแบบดังกล่าวพบว่าเมื่อพิจารณาการรับน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO HL-93 แล้วนั้น หน้าตัดคานยังสามารถปรับลดขนาดหน้าตัดและลดลวดอัดแรงลงได้

คำสำคัญ: คานคอนกรีตอัดแรง, น้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO HL-93, I-Girder

Abstract

The technology of nowadays pre-stressed concrete is widely implemented in bridge0 structure design. According to the study, Precasted Concrete Girder has been used in bridge constructions due to its superior ability to support weight and shear strength than that of reinforced concrete with shorter construction time. Correspondingly, the construction of a bridge with a very long span would consider using prestressed concrete I girder. This research study on to design if precasted concrete Girder type I-Girder cross-sectional size according to Department of Highways standards, length 15 meters via the modification of cross-sectional dimensions with reduce the amount of prestressed concrete stranded but the structure can still support the working load and ultimate load safely. The study suggested that consider the ability of loading for the moving load of AASHTO HL-93 standard can also modifying the cross-sectional dimensions and reducing the amount of prestressed concrete stranded.

Keywords: (3-5 keywords must be given) abstract, format, methods

1. คำนำ

สะพานเป็นสิ่งก่อสร้างในการอำนวยความสะดวกในการสัญจรไปมา ในปัจจุบันได้มีการนำเอาเทคโนโลยีคอนกรีตอัดแรงมาใช้ในการก่อสร้างสะพานกันอย่างแพร่หลาย คานคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป เป็นเทคโนโลยีที่นำมาใช้ในการก่อสร้างสะพานที่ทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักและรับแรงดัด ได้ดีกว่าคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วๆไป และรวดเร็วในการก่อสร้าง สำหรับการก่อสร้างสะพานที่มีช่วงของสะพานที่ยาวมากๆ การก่อสร้างจะพิจารณาใช้คานคอนกรีตอัดแรงในลักษณะหน้าตัดรูปตัวไอ (Prestress Concrete I Girder) โดยตามมาตรฐานของกรมทางหลวงจะมีความยาว 15-20 เมตร และได้มีการออกแบบขนาดหน้าตัดใช้งานตามมาตรฐาน AASHTO (The American Association of State Highway and Transportation Officials) และออกแบบปรับใช้ตามประเทศต่างๆ งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงชนิด I-Girder โดยมีการปรับเปลี่ยนขนาดหน้าตัด ลดจำนวนเหล็กเสริมลง โดยที่โครงสร้างยังสามารถรับน้ำหนักใช้งานและน้ำหนักประลัยได้อย่างปลอดภัย

ผลจากการศึกษาและออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงชนิด I-Girder พบว่าเมื่อนำหน้าตัดคานคอนกรีตอัดแรงชนิด I-Girder ของมาตรฐานกรมทางหลวง ความยาวคาน 15 เมตร มาพิจารณาการรับน้ำหนักบรรทุกและการออกแบบปริมาณลวดอัดแรง จากการรับน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ ตามมาตรฐาน AASHTO HL-93 แล้วหน้าตัดคานยังสามารถปรับลดขนาดหน้าตัดและจำนวนลวดอัดแรงลงได้

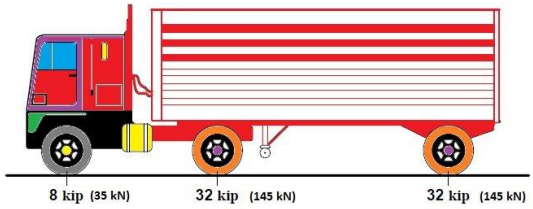
2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีผู้ศึกษาน้ำหนักบรรทุกที่จะนำมาใช้ในการออกแบบ และแนวทางการออกแบบคานสะพานคอนกรีตอัดแรง อัฏฐวิทย์ และคณะ [1] เปรียบเทียบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในสะพานคอนกรีตอัดแรง ในการรับน้ำหนักของรถบรรทุกตามมาตรฐานกรมทางหลวงและมาตรฐานของสมาคมทางและการขนส่งสหรัฐอเมริกา (AASHTO HL93) โดยการใช้หละกการของเส้นอิทธิพลในการวิเคราะห์โครงสร้าง วิศิษฐ์ศักดิ์ [2] ประเมินความสามารถในการต้านทานน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างส่วนบนของสะพานคอนกรีตอัดแรงแบบ I-GIRDER โดยวิธี LFR และ LRFR โดยมีการคำนวณการประเมินความสามารถในการต้านทานน้ำหนักบรรทุก และการออกแบบหน้าตัดคานในการประเมินโครงสร้าง Rana [3] เพิ่มประสิทธิภาพต้นทุนของระบบสะพาน I-Girder คอนกรีตอัดแรงหลังรับแรงดึง โดยเขาได้ทำการออกแบบขนาดหน้าตัด ลักษณะของหน้าตัด ไปจนถึงจำนวนลวดอัดแรง ทำการเปรียบเทียบกับคานเดิมที่ได้มีการออกแบบไว้ และเปรียบเทียบออกมาเป็นราคาในการผลิตคาน ผลจากการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยวิธีการออกแบบขนาดหน้าตัด ลดจำนวนลวดอัดแรง นั้นทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายไปได้ประมาณ 35% โดยค่าใช้จ่ายจะเพิ่มขึ้นทุกๆ 10 เมตร Dongzhou et al. [4] นำเสนอการประเมินรอยร้าวในสะพาน I-Girder คอนกรีตอัดแรงแบบประกบ โดยได้ทำการนำเสนอออกมาเป็นรูปแบบของแบบจำลองและวิเคราะห์แรงดึงที่เกิดขึ้น พบว่าบริเวณปลายคานเกิดแรงดึงสูงเกือบ 8% ของแรงอัดโดยมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานของ AASTHO และโดยปัจจัยที่ทำให้เกิดการแตกร้าวคือความเค้นดึงในแนวดิ่งสูงเป็นผลมาจากการอัดแรงในแนวนอน และจะมากขึ้นเมื่อความลึกของคานเพิ่มขึ้นด้วย เขาได้แนะนำให้เพิ่มการเสริมแรงในแนวตั้งหรือเพิ่มความกว้างของคาน โดยอยู่ภายในระยะ H/4 โดยวัดจากปลายที่ต่อกันของคาน Earney [5] นำเสนอเรื่องการแตกของปลายคานในคานอัดแรง เขาได้มีข้อสันนิษฐานว่าสิ่งที่ทำให้เกิดการแตกร้าวคือการขยายตัวทางความร้อนที่ถูกจำกัดและการหดตัวระหว่างการให้น้ำ และการถ่ายโอนแรงอัดแรง เขาจึงได้ใช้วิธีการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์ความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นระหว่างการให้น้ำ จากการวิเคราะห์พบว่าการถ่ายโอนแรงอัดนั้นทำให้เกิดความเค้นในแนวตั้งจริง แต่น้อยกว่าค่า Modulus of rupture และไม่น่าจะเป็นสาเหตุของการแตกร้าว แต่หากพิจารณาร่วมกับความเค้นตกค้างที่เกิดจากความร้อนจากการให้น้ำและการบ่มก็อาจจะเกิดรอยแตกร้าวได้ เขาได้เสนอข้อแนะนำในการออกแบบว่า ให้ปรับเปลี่ยนรูปทรงของคานเพื่อลดความแหลมคมจากการเปลี่ยนจากปีกเป็นอก หรือลดความเครียดของการถ่ายโอนแรงอัดโดยการเพิ่มความหนาของอก หรือทำการบล็อกปลาย เพื่อเพิ่มพื้นที่รับแรง

3. การออกแบบคานสะพานคอนกรีตอัดแรง I-girder

3.1 กำหนดใช้ Load Type ตามมาตรฐาน AASHTO HL93

การใช้น้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO HL93 เป็นการใช้น้ำหนักบรรทุกของยานพาหนะประเภท HL-93 แบบ 3 เพลา โดยจะมีน้ำหนักบรรทุกที่กระทำเท่ากับ 35 กิโลนิวตันในดพลาที่ 1 และ 145 กิโลนิวตัน ในเพลาที่ 3 และเพลาที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 น้ำหนักรถบรรทุก HL-93

3.2 กำหนดใช้คอนกรีตอัดแรง

กำหนดใช้คอนกรีตอัดแรง หน่วยน้ำหนัก 2500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร กำลังอัดประลัยของคอนกรีตทรงกระบอกขณะถ่ายแรง (f'_{ci}) 500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และกำลังอัดประลัยของคอนกรีตทรงกระบอกขณะใช้งาน (f'_c) 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

3.3 กำหนดใช้ลวดเกลียวอัดแรง

กำหนดลวดตีเกลียวอัดแรง ชนิดคลายแรงดึงต่ำ เกรด 270 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Es) 1,970,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าแรงดึงสูงสุด (F_{pu}) 18,730 กิโลกรัม ค่าแรงดึงที่จุดคราก (F_{py}) 16,857 กิโลกรัม

3.4 หน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable Stress)

หน่วยแรงที่ยอมให้ของคอนกรีตแบ่งเป็นหน่วยแรงอัดของคอนกรีตขณะถ่ายแรง (At transfer) ดังแสดงในสมการที่ (1), หน่วยแรงอัดของคอนกรีตขณะใช้งาน (At working load) ดังแสดงในสมการที่ (2), หน่วยแรงดึงของคอนกรีตขณะถ่ายแรง (At transfer) ดังแสดงในสมการที่ (3), หน่วยแรงดึงของคอนกรีตขณะถ่ายแรง (At transfer) ดังแสดงในสมการที่ (4), หน่วยแรงที่ยอมให้ของลวดตีเกลียวอัดแรงแบ่งเป็นหน่วยแรงดึงขณะถ่ายแรง ดังแสดงในสมการที่ (5), หน่วยแรงดึงขณะใช้งาน ให้เลือกค่าที่น้อยกว่าระหว่าง 2 สมการ ดังแสดงในสมการที่ (6) และ สมการที่ (7) และหน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริมคอนกรีต หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ ดังแสดงในสมการที่ (8)

$$F_{ct}=0.6f'_{ci} \quad (1)$$

F_{ct} คือ หน่วยแรงอัดของคอนกรีตขณะถ่ายแรง และ f'_{ci} คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตขณะถ่ายแรง

$$F_{cw}=0.4f'_c \quad (2)$$

F_{cw} คือ หน่วยแรงอัดของคอนกรีตขณะใช้งาน และ f'_c คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตขณะใช้งาน

$$F_{tt}=2.0\sqrt{f'_{ci}} \quad (3)$$

F_{tt} คือ หน่วยแรงดึงของคอนกรีตขณะถ่ายแรง และ f'_{ci} คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตขณะถ่ายแรง

$$F_{tw}=1.6\sqrt{f'_{c}} \quad (4)$$

F_{tw} คือ หน่วยแรงดึงของคอนกรีตขณะใช้งาน และ f'_{c} คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตขณะใช้งาน

$$F_{i}=0.9(0.7f_{su}) \quad (5)$$

F_{i} คือ หน่วยแรงดึงของคอนกรีตขณะถ่ายแรง และ f_{su} คือ แรงดึงสูงสุดของลวดเกลียวอัดแรง

$$F_{w}=0.8(0.7f_{su}) \quad (6)$$

F_{w} คือ หน่วยแรงดึงของคอนกรีตขณะใช้งาน และ f_{su} คือ แรงดึงสูงสุดของลวดเกลียวอัดแรง

$$F_{w}=0.8f_{py} \quad (7)$$

F_{w} คือ หน่วยแรงดึงของคอนกรีตขณะใช้งาน และ f_{py} คือ แรงดึงที่จุดครากของลวดเกลียวอัดแรง

$$F_{s}=0.5f_{y} \quad (8)$$

F_{s} คือ หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริมคอนกรีต และ f_{y} คือ หน่วยแรงที่จุดครากของเหล็กเสริม

3.5 การคำนวณโมเมนต์จสกน้ำหนักบรรทุก

ค่าโมเมนต์จากน้ำหนักคาน คำนวณได้จากสมการ ดังแสดงในสมการที่ (9), ค่าโมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุกคงที่อื่นๆ คำนวณได้จากสมการ ดังแสดงในสมการที่ (10), ค่าโมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุกจร คำนวณได้จากโปรแกรม Sap2000 และค่าโมเมนต์จากแรงกระแทก คำนวณได้จากสมการ ดังแสดงในสมการที่ (11)

$$M_c = \frac{w_s L^2}{8} \quad (9)$$

M_c คือ โมเมนต์จากน้ำหนักคาน, w_s คือ น้ำหนักคาน และ L คือ ความยาวของคาน

$$M_s = \frac{w_s L^2}{8} \quad (10)$$

M_s คือ โมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุกคงที่อื่นๆ, w_s คือ น้ำหนักคงที่อื่นๆ (น้ำหนักพื้นสำเร็จรูปและน้ำหนักแอสฟัลต์) และ L คือ ความยาวของคาน

$$M_L=IM_L \quad (11)$$

M_L คือ โมเมนต์จากแรงกระแทก, I คือ ตัวคูณแรงกระแทก และ M_L คือ โมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุกจร โดยที่ ค่า I คำนวณได้จากที่ (12)

$$I=\frac{15.24}{L+38} \quad (12)$$

I คือ ตัวคูณแรงกระแทก และ L คือ ความยาวของคาน

3.6 การคำนวณการรับแรงเฉือน

ค่าแรงเฉือนที่ระยะหนึ่งส่วนสี่ของคาน คำนวณได้จากสมการ ดังแสดงในสมการที่ (13), ค่าแรงเฉือนที่ได้จากน้ำหนักบรรทุกจร ในตำแหน่งระยะจากเพลาหลัง เป็นระยะ L/4 จากโปรแกรม Sap2000, ค่าแรงเฉือนที่คอนกรีตรับได้ คำนวณได้จากสมการ ดังแสดงในสมการที่ (14), และต้องไม่เกินกว่า สมการที่ (15) โดยเลือกค่าที่น้อยกว่า, ระยะเรียงของเหล็กปลอกรับแรงเฉือน คำนวณได้จากสมการ ดังแสดงในสมการที่ (16), ระยะเรียงของเหล็กปลอกตามมาตรฐานคำนวณได้จากสมการ ดังแสดงในสมการที่ (17) และปริมาณเหล็กลูกตั้งที่ปลายคาน คำนวณได้จากสมการ ดังแสดงในสมการที่ (18) และสมการที่ (19)

$$V_D= \frac{w_D L}{4} \quad (13)$$

V_D คือ แรงเฉือนจกน้ำหนักบรรทุกคงที่, w_D คือ น้ำหนักบรรทุกคงที่และ L คือ ความยาวของคาน

$$V_c= 0.06f'_c b'jd \quad (14)$$

V_c คือ ค่าแรงเฉือนที่คอนกรีตรับได้, f'_c คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตขณะใช้งาน, b' คือ ความกว้างช่วงแคบของหน้าตัดคาน, j คือ ค่าคงที่สำหรับออกแบบ, และ d คือ ความลึกของหน้าตัดคาน

$$V_c= 0.677\sqrt{f'_c} b'jd \quad (15)$$

V_c คือ ค่าแรงเฉือนที่คอนกรีตรับได้, f'_c คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตขณะใช้งาน, b' คือ ความกว้างช่วงแคบของหน้าตัดคาน, j คือ ค่าคงที่สำหรับออกแบบ, และ d คือ ความลึกของหน้าตัดคาน

$$S= \frac{\phi A_V f_y d}{V_u - \phi V_c} \quad (16)$$

S คือ ระยะเรียงของเหล็กปลอกรับแรงเฉือน, A_V คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม, f_y คือ หน่วยแรงที่จุดครากของเหล็กเสริม, V_u คือ ค่าแรงเฉือนประลัย, ϕV_c คือ ค่าแรงเฉือนที่คอนกรีตรับได้ลดค่า และ d คือ ความลึกของหน้าตัดคาน

$$S_{max}= \frac{A_V f_y}{3.5b'} \quad (17)$$

S_{max} คือ ระยะเรียงของเหล็กปลอกรับแรงเฉือนตามมาตรฐาน, A_V คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม, f_y คือ หน่วยแรงที่จุดครากของเหล็กเสริม, และ b' คือ ความกว้างช่วงแคบของหน้าตัดคาน

$$T = 0.04\mathrm{F_1} \tag{18}$$

T คือ แรงดึงของลวดเกลียวอัดแรง และ $\mathrm{F_1}$ คือ ค่าหน่วยแรงดึงของลวดเกลียวอัดแรงขณะถ่ายแรงคูณจำนวนลวดเกลียวอัดแรง

$$A_s = \frac{T}{f_s} \tag{19}$$

A_s คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงเฉือน, T คือ แรงดึงของลวดเกลียวอัดแรง และ f_s คือ หน่วยแรงที่จุดครากของเหล็กเสริม

3.7 การคำนวณการสูญเสียในลวดอัดแรง

ค่าแรงดึงของ Jack ขณะถ่ายแรง คำนวณได้จากสมการ ดังแสดงในสมการที่ (20), ค่าแรงดึงขณะถ่ายแรง คำนวณได้จากสมการ ดังแสดงในสมการที่ (21), ค่าการสูญเสียหน่วยแรงแบบทันทีทันใด คำนวณได้จากสมการ ดังแสดงในสมการที่ (22), ค่าการสูญเสียหน่วยแรงในระยะยาว คำนวณได้จากสมการ ดังแสดงในสมการที่ (23), ค่าการสูญเสียเนื่องจากการหดตัวแบบยืดหยุ่น คำนวณได้จากสมการ ดังแสดงในสมการที่ (24), ค่าการสูญเสียเนื่องจากการคืบตัวของคอนกรีต คำนวณได้จากสมการ ดังแสดงในสมการที่ (25) และค่าการสูญเสียเนื่องจากการล้าของคอนกรีต คำนวณได้จากสมการ ดังแสดงในสมการที่ (26)

$$P_j = 0.75 f_{pu} \tag{20}$$

P_j คือ แรงดึงของ *Jack* ขณะถ่ายแรง และ f_{pu} คือ แรงดึงสูงสุดของลวดเกลียวอัดแรง

$$P_i = 0.9 P_j \tag{21}$$

P_i คือ แรงดึงขณะถ่ายแรง และ P_j คือ แรงดึงของ *Jack* ขณะถ่ายแรง

$$f_{cir} = \frac{P}{A} - \frac{M_D e}{I} + \frac{P e^2}{I} \tag{22}$$

f_{cir} คือ ค่าการสูญเสียหน่วยแรงแบบทันทีทันใด, P คือ แรงดึงขณะถ่ายแรง, A คือ พื้นที่หน้าตัดคาน, M_D คือ โมเมนต์จากน้ำหนักคาน, e คือ ระยะเยื้องศูนย์ของลวดอัดแรง และ I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดคาน

$$f_{cds} = \frac{M_0 e}{I} \tag{23}$$

f_{cds} คือ ค่าการสูญเสียหน่วยแรงในระยะยาว, M_0 คือ โมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุกคงที่อื่นๆ, e คือ ระยะเยื้องศูนย์ของลวดอัดแรง และ I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดคาน

$$ES = \frac{E_s f_{cir}}{E_c} \tag{24}$$

ES คือ ค่าการสูญเสียเนื่องจากการหดตัวแบบยืดหยุ่น, E_s คือ ค่าโมดูลัสของลวดเกลียวอัดแรง, f_{cir} คือ ค่าการสูญเสียหน่วยแรงแบบทันทีทันใด และ E_c คือ ค่าโมดูลัสของคอนกรีต

$$CR = 12 f_{cir} - 7 f_{cds} \tag{25}$$

CR คือ ค่าการสูญเสียเนื่องจากการคืบตัวของคอนกรีต, f_{cir} คือ ค่าการสูญเสียหน่วยแรงแบบทันทีทันใด และ f_{cds} คือ ค่าการสูญเสียหน่วยแรงในระยะยาว

$$RE = 1410 - 0.4ES - 0.2(SH + CR) \tag{26}$$

RE คือ ค่าการสูญเสียเนื่องจากการล้าของคอนกรีต, ES คือ ค่าการสูญเสียเนื่องจากการหดตัวแบบยืดหยุ่น, SH คือ การสูญเสียเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต และ CR คือ ค่าการสูญเสียเนื่องจากการคืบตัวของคอนกรีต

3.8 การคำนวณหน่วยแรงที่เกิดขึ้น

การคำนวณหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวบนและผิวล่างของคานในแต่ละตำแหน่ง แบ่งออกเป็นขณะถ่ายแรง และขณะใช้งาน โดยหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวบนขณะถ่ายแรงคำนวณได้จาก สมการที่ (27), หน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวล่างขณะถ่ายแรงคำนวณได้จากสมการที่ (28), หน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวบนขณะถ่ายใช้งานคำนวณได้จาก สมการที่ (29) และหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวล่างขณะใช้งานคำนวณได้จากสมการที่ (30)

$$f_t = \frac{-F_i}{A} + \frac{F_i e}{S_t} - \frac{M_G}{S_t} \le F_{ct}, F_{tt} \tag{27}$$

f_t คือ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวบนขณะถ่ายแรง, F_i คือ หน่วยแรงดึงของลวดเกลียวอัดแรงขณะถ่ายแรงคูณจำนวนลวดเกลียวอัดแรง, A คือ พื้นที่หน้าตัดคาน, M_G คือ โมเมนต์จากน้ำหนักคาน, e คือ ระยะเยื้องศูนย์ของลวดอัดแรง, S_t คือ โมดูลัสหน้าตัดส่วนบน, F_{ct} คือ หน่วยแรงอัดของคอนกรีตขณะถ่ายแรง และ F_{tt} คือ หน่วยแรงดึงของคอนกรีตขณะถ่ายแรง

$$f_b = \frac{-F_i}{A} - \frac{F_i e}{S_b} + \frac{M_G}{S_b} \le F_{ct}, F_{tt} \tag{28}$$

f_b คือ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวล่างขณะถ่ายแรง, F_i คือ หน่วยแรงดึงของลวดเกลียวอัดแรงขณะถ่ายแรงคูณจำนวนลวดเกลียวอัดแรง, A คือ พื้นที่หน้าตัดคาน, M_G คือ โมเมนต์จากน้ำหนักคาน, e คือ ระยะเยื้องศูนย์ของลวดอัดแรง, S_b คือ โมดูลัสหน้าตัดส่วนล่าง, F_{ct} คือ หน่วยแรงอัดของคอนกรีตขณะถ่ายแรง และ F_{tt} คือ หน่วยแรงดึงของคอนกรีตขณะถ่ายแรง

$$f_t = \frac{-F_e}{A} + \frac{F_e e}{S_t} - \frac{M_T}{S_t} \le F_{cw}, F_{tw} \tag{29}$$

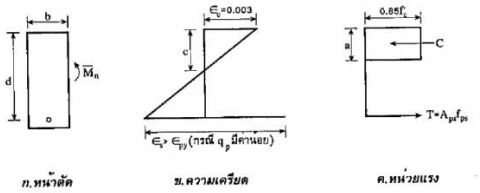
f_t คือ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวบนขณะใช้งาน, F_e คือ หน่วยแรงดึงของลวดเกลียวอัดแรงขณะใช้งานคูณจำนวนลวดเกลียวอัดแรง, A คือ พื้นที่หน้าตัดคาน, M_T คือ โมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่, e คือ ระยะเยื้องศูนย์ของลวดอัดแรง, S_t คือ โมดูลัสหน้าตัดส่วนบน, F_{cw} คือ หน่วยแรงอัดของคอนกรีตขณะใช้งาน และ F_{tw} คือ หน่วยแรงดึงของคอนกรีตขณะใช้งาน

$$f_b = \frac{-F_e}{A} - \frac{F_e e}{S_b} + \frac{M_T}{S_b} \leq F_{cw}, F_{tw} \quad (30)$$

f_t คือ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวบนขณะใช้งาน, F_e คือ หน่วยแรงดึงของลวดเกลียวอัดแรงขณะใช้งานคูณจำนวนลวดเกลียวอัดแรง, A คือ พื้นที่หน้าตัดคาน, M_T คือ โมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่, e คือ ระยะเยื้องศูนย์ของลวดอัดแรง, S_b คือ โมดูลัสหน้าตัดส่วนล่าง, F_{cw} คือ หน่วยแรงอัดของคอนกรีตขณะใช้งาน และ F_{tw} คือ หน่วยแรงดึงของคอนกรีตขณะใช้งาน

3.9 วิเคราะห์แรงดัดที่สภาวะประลัย

คานคอนกรีตอัดแรงพฤติกรรมหลังการแตกร้าวจะคล้ายคลึงกับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อคานเกิดการแตกร้าวคอนกรีตส่วนที่อยู่ใต้แกนสะเทินไม่สามารถรับหน่วยแรงดึงได้ ทำให้เหล็กเสริมต้องรับแรงดึงทั้งหมด จากการแจกแจงหน่วยแรงละความเครียดในหน้าตัดคานคอนกรีตอัดแรงมีลักษณะคล้ายคอนกรีตเสริมเหล็ก วิเคราะห์กำลังดัดโดยประมาณใช้วิธีคิดแรงอัดลัพธ์พื้นที่รูปสี่เหลี่ยมของ Whitney ที่โมเมนต์ดัดประลัย โดยกำหนดค่าความเครียดเป็น 0.003 สำหรับหน้าตัดที่มีค่าดัชนีเหล็กเสริมน้อยกว่าความเครียดในเหล็กเสริม โดยค่าดัชนีเหล็กเสริมคำนวณได้จากสมการดังแสดงในสมการที่ (33) การแจกแจงหน่วยแรงอัดเป็นค่าคงที่เท่ากับ 0.85f'$_c$ ดังแสดงในรูปที่ 2 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นคำนวณได้จากสมการ ดังสมการที่ (31)



รูปที่ 2 การแจกแจงความเครียดและหน่วยแรงแบบประมาณ

$$f_{ps} = f_{pu}\left(1 - \frac{0.5\rho_p f_{pu}}{f'_c}\right) \quad (31)$$

f_{ps} คือ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากลวดอัดแรง, f_{pu} คือ แรงดึงสูงสุดของลวดเกลียวอัดแรง, f'_c คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตขณะใช้งาน, และ ρ_p คือ อัตราส่วนเสริมเหล็กคำนวณได้จากสมการที่ (32)

$$\rho_p = A_{ps}/bd_p \quad (32)$$

ρ_p คือ อัตราส่วนเสริมเหล็ก, A_{ps} คือ หน้าตัดลวดเกลียวอัดแรง, b คือ ความกว้างของหน้าตัดคาน และ d_p คือ ความลึกประสิทธิผลของหน้าตัดคาน

$$q_p = \frac{\rho_p f_{ps}}{f'_c} < 0.3 \quad (33)$$

q_p คือ *ดัชนีเหล็กเสริม*, ρ_p คือ *อัตราส่วนเสริมเหล็ก*, f_{ps} คือ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากลวดอัดแรง และ f'_c คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตขณะใช้งาน

การวิเคราะห์กำลังดัดประลัยต้องตรวจสอบพื้นที่รับแรงอัดอยู่ในส่วนปีกหรือส่วนตัวแกน ถ้าความหนาของปีกมากพอที่ทำให้เป็นดังสมการที่ (34) แสดงว่าพื้นที่รับแรงอัดอยู่ในส่วนปีก ให้วิเคราะห์กำลังดัดประลัยกระทำเช่นเดียวกับคานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หากพื้นที่รับแรงอัดลึกเข้าไปในตัวแกน พิจารณาสมดุลของแรงคู่ควบดังแสดงในสมการที่ (35)

$$0.85f'_c h_f b < A_{ps} f_{ps} \quad (34)$$

f'_c คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตขณะใช้งาน, h_f คือ ความลึกประสิทธิผลของหน้าตัดด้านที่รับแรงอัด, b คือ ความกว้างของหน้าตัดคาน, A_{ps} คือ หน้าตัดลวดเกลียวอัดแรง และ f_{ps} คือ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากลวดอัดแรง

$$A_{ps} f_{ps} = 0.85f'_c(b - b_w) + 0.85f'_c b_w a \quad (35)$$

A_{ps} คือ หน้าตัดลวดเกลียวอัดแรง, f_{ps} คือ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากลวดอัดแรง, f'_c คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตขณะใช้งาน, b คือ ความกว้างของหน้าตัดคาน, b_w คือ ความกว้างของหน้าตัดคานช่วงแคบงาน และ a คือ ความลึกประสิทธิผลของหน้าตัดด้านที่รับแรงอัด

คิดโมเมนต์รอบเหล็กเสริมดังแสดงในสมการที่ (36) และตรวจสอบกำลังดัดประลัยของคานดังแสดงในสมการที่ (37) โดยที่ ϕ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ลดกำลังดัดประลัยเท่ากับ 0.9 นอกจากนี้เพื่อป้องกันไม่คานวิบัติสำหรับกรณีที่คานมีอัตรส่วนเหล็กเสริมน้อยมาก ให้ตรวจสอบดังสมการที่ (38)

$$\overline{M_u} = 0.85f'_c(b - b_w)h_r\left(d - \frac{h_r}{2}\right) + 0.85f'_c b_w a\left(d - \frac{a}{2}\right) \quad (36)$$

$\overline{M_u}$ คือ โมเมนต์ประลัย, f'_c คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตขณะใช้งาน, b คือ ความกว้างของหน้าตัดคาน, b_w คือ ความกว้างของหน้าตัดคานช่วงแคบงาน, h_r คือ ความลึกประสิทธิผลของหน้าตัดด้านที่รับแรงดึง, d คือ ความลึกของหน้าตัดคาน และ a คือ ความลึกประสิทธิผลของหน้าตัดด้านที่รับแรงอัด

$$\phi\overline{M_u} = 1.4(M_s + M_d) + 1.7M_l \quad (37)$$

$\phi\overline{M_u}$ คือ โมเมนต์ประลัยลดกำลัง, M_s คือ โมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม, M_d คือ โมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุกบรรทุก และ M_l คือ โมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่

$$\phi\overline{M_u}=1.2(M_{cr}) \quad (38)$$

โดยที่ M_{cr} คำนวนโดยใช้ค่าโมดูลัสแตกร้าวเท่ากับ $2.0\sqrt{f'_c}$ หน่วยกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

3.10 การตรวจสอบการโก่งตัว

ค่าการโก่งตัวขณะถ่ายแรง คำนวณได้จากสมการ ดังแสดงในสมการที่ (39), ค่าระยะโก่งตัวจากการอัดแรง คำนวณได้จากสมการ ดังแสดงในสมการที่ (40), ค่าการโก่งตัวจากน้ำหนักคาน คำนวณได้จากสมการ ดังแสดงในสมการที่ (41), ค่าระยะยกตัวสุทธิขณะถ่ายแรง คำนวณได้จากสมการ ดังแสดงในสมการที่ (42), ค่าระยะยกตัวขนะก่อสร้าง คำนวณได้จากสมการ ดังแสดงในสมการที่ (43), ค่าการโก่งตัวขณะใช้งาน คำนวณได้จากสมการ ดังแสดงในสมการที่ (44), ค่าการโก่งตัวเนื่องจากน้ำหนักคงที่เพิ่มเติม คำนวณได้จากสมการ ดังแสดงในสมการที่ (45), ค่าระยะยกตัวสุทธิขณะใช้งาน คำนวณได้จากสมการ ดังแสดงในสมการที่ (46), ค่าการโก่งตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร ค่าโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งต่างๆของเพลารถและที่ตำแหน่งกึ่งกลางคาน คำนวณได้จากสมการ ดังแสดงในสมการที่ (47) และสมการที่ (48) และค่าระยะการโก่งตัวที่ยอมให้ คำนวณได้จากสมการ ดังแสดงในสมการที่ (49)

$$E_{ci}=4270w^{1.5}\sqrt{f'_{ci}} \quad (39)$$

E_{ci} คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตขณะถ่ายแรง, w คือ น้ำหนักคอนกรีต และ f'_{ci} คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตขณะถ่ายแรง

$$\Delta_p=\frac{F_i e L^2}{8EI} \quad (40)$$

Δ_p คือ ค่าระยะโก่งตัวจากการอัดแรง, F_i คือ หน่วยแรงดึงของลวดเกลียวอัดแรงขณะถ่ายแรงคูณจำนวนลวดเกลียวอัดแรง, e คือ ระยะเยื้องศูนย์ของลวดอัดแรง, L คือ ความยาวของคาน, E คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต และ I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด

$$\Delta_0=\frac{5}{384}\frac{w_G L^4}{EI} \quad (41)$$

Δ_0 คือ ค่าระยะโก่งตัวจากการน้ำหนักคาน, w_G คือ น้ำหนักคาน, L คือ ความยาวของคาน, E คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต และ I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด

$$\Delta_t=\Delta_p-\Delta_0 \quad (42)$$

Δ_t คือ ค่าระยะยกตัวสุทธิขณะถ่ายแรง, Δ_p คือ ค่าระยะโก่งตัวจากการอัดแรง, และ Δ_0 คือ ค่าระยะโก่งตัวจากการน้ำหนักคาน

$$\Delta_L=1.8\Delta_t \quad (43)$$

Δ_L คือ ระยะยกตัวขนะก่อสร้าง และ Δ_t คือ ค่าระยะยกตัวสุทธิขณะถ่ายแรง

$$E_c=4270w^{1.5}\sqrt{f'_c} \quad (44)$$

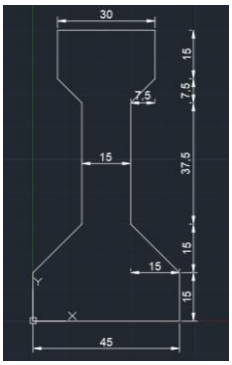
E_c คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตขณะใช้งาน, w คือ น้ำหนักคอนกรีต และ f'_c คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตขณะใช้งาน

$$\Delta_s=\frac{5}{384}\frac{w_s L^4}{EI} \quad (45)$$

Δ_s คือ ค่าระยะโก่งตัวจากการน้ำหนักคงที่เพิ่มเติม, w_s คือ น้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม, L คือ ความยาวของคาน, E คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต และ I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด

$$\Delta_c=\Delta_p-\Delta_s \quad (46)$$

Δ_c คือ ค่าระยะยกตัวสุทธิขณะ



รูปที่ 3 มิติขนาดหน้าตัดคาน

```
Specify second extension line origin or [Undo]:
Command: MASSPROP
Select objects: 1 found
Select objects:
 ----------------   REGIONS   ----------------
Area:                    2306.2500
Perimeter:               273.6396
Bounding box:         X: 0.0000  --  45.0000
                      Y: 0.0000  --  90.0000
Centroid:             X: 22.5000
                      Y: 39.5732
Moments of inertia:   X: 5603027.3437
                      Y: 1375839.8438
Product of inertia:  XY: -2053476.5625
Radii of gyration:    X: 49.2899
                      Y: 24.4248
Principal moments and X-Y directions about centroid:
                      I: 1991357.1837 along [1.0000 0.0000]
                      J: 208300.7812 along [0.0000 1.0000]
```

รูปที่ 4 ผลการหาโมเมนต์ความเฉื่อย พื้นที่หน้าตัด และแกนสะเทินของคาน ด้วยโปรแกรม Auto Cad

5. ผลการคำนวณโมเมนต์

5.1 ผลการคำนวณโมเมนต์จากการเคลื่อนที่ของน้ำหนักบรรทุกในแต่ละช่วง

ผลการคำนวณโมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุกจร HL-93 ด้วยโปรแกรม Sap 2000 ได้ทำการแบ่งการเคลื่อนที่ของน้ำหนักบรรทุกเป็น 14 ช่วง ช่วงละ 1 เมตร ตลอดความยาวคาน 15 เมตร โดยแบ่งการแสดงผลเป็น 7 ช่วง และผลโมเมนต์สูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการคำนวณโมเมนต์จากการเคลื่อนที่ของน้ำหนักบรรทุกในแต่ละช่วง

Location	M_L	WLF(M_L)	M_I = IM_L	M_{L+I}
MAX HL93	416.892	455.869	131.084	586.953
CL	414.125	452.843	130.214	583.057
1	402.950	440.623	126.700	567.323
2	395.600	432.586	124.389	556.975
3	376.583	411.791	118.409	530.201
4	336.067	367.487	105.670	473.157
5	284.550	311.154	89.471	400.625
6	211.367	231.128	66.460	297.589
7	116.517	127.411	36.637	164.047
End	0.000	0.000	0.000	0.000

5.2 ผลการคำนวณโมเมนต์สูงสุดจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ในแต่ละช่วง

ผลการคำนวณโมเมนต์สูงสุดจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ในแต่ละช่วงแสดงดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการคำนวณโมเมนต์สูงสุดจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ในแต่ละช่วง

Location	M_G	M_s	M_D
MAX HL93	159.258	116.025	275.283
CL	162.141	118.125	280.266
1	161.420	117.600	279.020
2	155.655	113.400	269.055
3	144.125	105.000	249.125
4	126.830	92.400	219.230
5	103.770	75.600	179.370
6	74.945	54.600	129.545
7	40.355	29.400	69.755
End	0.000	0.000	0.000

6. ผลการคำนวณการสูญเสียในลวดอัดแรง

การสูญเสียในลวดอัดแรง ชนิดถ่ายแรงก่อน เกิดการสูญเสียแบบทันทีทันใดและการสูญเสียแบบระยะยาว เกิดการสูญเสียเนื่องจากการหดตัวแบบยืดหยุ่น การสูญเสียเนื่องจากการคืบตัวของคอนกรีต การสูญเสียเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต และการสูญเสียเนื่องจากการล้าของคอนกรีต ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการคำนวณการสูญเสียในลวดอัดแรง

การสูญเสียในลวดอัดแรง		
P_j	2107.13	kN
P_i	1896.41	kN
f_{cir}	10862.9	kN/m^2
f_{cds}	1299.08	kN/m^2
ES	63296	kN/m^2
CR	121261	kN/m^2
SH	37500	kN/m^2
RE	83929.300	kN/m^2
f_{pj}	1423108	kN/m^2
Short term loss	4.448	%
Long term loss	17.054	%
Total Loss	21.501	%

7. ผลการคำนวณจำนวนลวดอัดแรง

จำนวนลวดอัดแรงที่ทำการอัดแรงเนื่องจากการรับโมเมนต์ของคานเนื่องจากน้ำหนักคงที่และน้ำหนักเคลื่อนที่ที่ทำให้เกิดหน่วยรงที่ผิวล่างของคาน ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการคำนวณจำนวนลวดอัดแรง

การคำนวนลวดอัดแรง		
M_G	162.141	kN·m
M_I	118.125	kN·m
M_L	455.869	kN·m
M_I	131.084	kN·m
f_b	17233.688	kN
f_b จากลวด	13314.504	kN
e	0.219	m
F	1531.366	kN
N req	13.366	เส้น
N used	15	เส้น

8. ผลการคำนวณหน่วยแรงที่เกิดขึ้น

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นต้องไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้ โดยที่หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของคอนกรีตขณะถ่ายแรงไม่เกิน 30000 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของคอนกรีตขณะถ่ายแรงไม่เกิน 4472.136 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของคอนกรีตขณะใช้งานไม่เกิน 24000 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร และหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของคอนกรีตขณะใช้งานไม่เกิน 3949.184 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร แบ่งการคำนวณหน่วยแรงที่เกิดขึ้น 3 กรณี ได้แก่ขณะตัดลวด ขณะยก และขณะใช้งาน หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัดลวดที่ผิวบนเกิดแรงดึง 2449.82 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร และที่ผิวล่างเกิดแรงอัด 19911.40 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร และหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในขณะยกและขณะใช้งาน ที่ตำแหน่งต่างๆ ของคานค่าสูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการคำนวณหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในกรณีขณะยกและขณะใช้งาน

กรณี	ขณะยก		ขณะใช้งาน	
หน่วยแรงที่ยอมให้	Ftt = 4472.136 kN/m2	Fct = -30000 kN/m2	Ftw = 3949.184 kN/m2	Fcw = -24000 kN/m2
Max HL93	-1583.06	-14340.03	-19821.87	2754.89
กลางคาน	-1656.06	-14282.75	-19849.40	2754.89
1	-1637.81	-14297.07	-19419.43	2439.07
2	-1491.82	-14411.63	-18905.04	2439.07
3	-1199.85	-14640.76	-17722.35	1107.27
4	-761.89	-14984.45	-15520.81	-620.40
5	-177.94	-15442.71	-12674.71	-2853.90
7	1427.91	-16702.92	-3908.10	-9733.57
ปลายคาน	2449.82	-17504.87	2012.46	-14379.78

9. ผลการคำนวนหน่วยแรงที่เกิดขึ้นขณะใช้งาน

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ขณะใช้งาน หรือสภาวะที่หน้าตัดสามารถรับแรงที่เกิดขึ้นเนื่องสภาวะอัดแรงและสภาวะใช้งาน โดยแรงที่เกิดขึ้นจะเกิดแรงอัดที่กระทำต่อหน้าตัด และโมเมนต์ที่เกิดจากการอัดแรงเยื้องศูนย์กลาง และแรงที่เกิดขึ้นขณะใช้งานจะเกิดจากแรงกระทำคงที่และแรงกระทำเคลื่อนที่ โดยหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจะต้องไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้

9.1 หน่วยแรงที่ยอมให้ที่ขณะใช้งาน

หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ = $0.45f'_c$ = -27000 kN/m^2

หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ = $1.16\sqrt{f'_c}$ = 2841 kN/m^2

9.2 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ขณะใช้งาน

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวบน

$$f_t = \frac{-F_e}{A} + \frac{F_e ey}{I} - \frac{M_T y}{I}$$

$$f_t = -\frac{15\times18730}{0.231\times100} + \frac{15\times18730\times0.219\times0.504}{0.020\times100} - \frac{862.236\times0.504}{0.020}$$

f_t = -18385.616 kN/m^2 < -27000 kN/m^2

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวล่าง

$$f_t = \frac{-F_e}{A} - \frac{F_e ey}{I} + \frac{M_T y}{I}$$

$$f_t = -\frac{15\times18730}{0.231\times100} - \frac{15\times18730\times0.219\times0.504}{0.020\times100} + \frac{862.236\times0.504}{0.020}$$

f_t = -5939.059 kN/m^2 < 2841 kN/m^2

10. ผลการคำนวณการเสริมเหล็กรับแรงเฉือน

10.1 โมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุกเพิ่มค่า

$M_u = 1.3(M_D + 1.67\,M_D)$ = 1638.619 kN-m

$\phi M_n = \phi A_{ps} f_{su} d_p (1\text{-}0.6\rho_{ps}\frac{f_{su}}{f'c})$ = 1716.711 kN-m $> M_u$

10.2 ตรวจสอบปริมาณเหล็กเสริมสูงสุดและต่ำสุด

ดัชนีการเสริมเหล็ก = 0.132 < 0.3

10.3 กำลังรับแรงเฉือน

V_D = 37.369 kN

10.4 แรงเฉือนจากน้ำหนักบรรทุกจร

R_L = 91.290 kN

V_u = 327.617 kN

V_C = 447.13 kN > V_u

ϕV_c = 175.067 kN

10.5 ระยะเรียง

$$S = \frac{\phi A_V f_y d}{V_u - \phi V_c}$$ = 0.315 m

ระยะเรียงตามมาตรฐาน

$$S_{max} = \frac{A_V f_y}{3.5b'}$$ = 1.197 m

S_{max} ต้องไม่เกิน 0.75h หรือ 60 เซนติเมตร

ใช้ Stirrup 2-DB10 @600mm

11. ผลการคำนวณการโก่งตัว

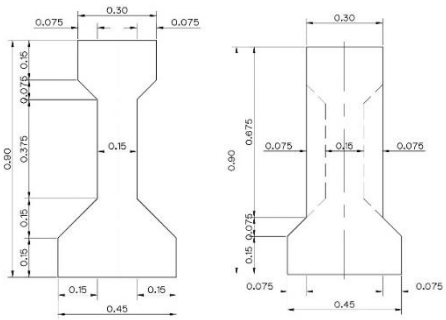
การโก่งตัวขณะถ่ายแรงของลวดขณะอัดแรง การรับบแรงจากน้ำหนักของคาน และการยกคานขณะก่อสร้าง และการโก่งตัวขณะใช้งานของน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติม และน้ำหนักบรรทุกจร ต้องไม่เกินค่าของการโก่งตัวที่ยอมให้ ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการคำนวณการโก่งตัว

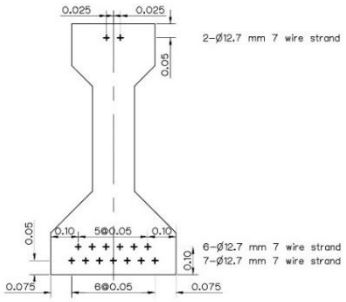
การโก่งตัวขณะถ่ายแรง			
ตรวจสอบการโก่งตัวขณะถ่ายแรง	E_{ci}	377414824.45	kN/m^2
ระยะโก่งตัวจากการอัดแรง	Δ_p	0.017	m
ระยะโก่งตัวจากการอัดแรง	Δ_p	0.017	m
การโก่งตัวจากน้ำหนักคานเอง	Δ_0	0.005	m
ระยะยกตัวสุทธิขณะถ่ายแรง	Δ_t	0.011	m
ระยะยกตัว ขณะก่อสร้าง	Δ_c	0.021	m
การโก่งตัวขณะใช้งาน			
ตรวจสอบการโก่งตัวขณะใช้งาน	E_c	41344097.22	kN/m^2
การโก่งตัวจากน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติม	Δ_s	0.003	m
ระยะยกตัวหลังจากก่อสร้างเสร็จ	Δ_c	0.013	m
ระยะโก่งตัวในช่วงเวลานานจากการอัดแรง	Δ_p	0.040	m
ระยะโก่งตัวในช่วงเวลานานจากน้ำหนักคาน	Δ_G	0.014	m
ระยะโก่งตัวในช่วงเวลานานจากน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติม	Δ_p	0.010	m
การโก่งตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร	Δ_{L+I}	0.002	m
ระยะโก่งตัวที่ยอมให้	Δ_{allow}	0.020	m

12. สรุปผลการศึกษา

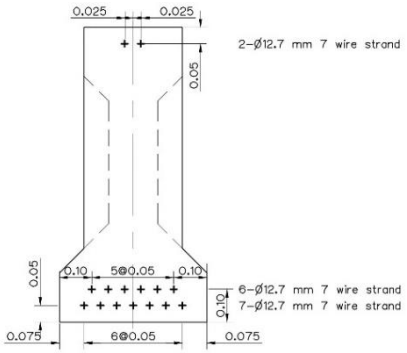
จากผลการคำนวณ วิเคราะห์และออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงชนิด I-girder เป็นการถ่ายแรงจากลวดตีเกลียวอัดแรงเข้าสู่คอนกรีตกำลังสูงเพื่อเพิ่มการรับแรงดึงที่ผิวล่างของคานคอนกรีต ทำให้คานคอนกรีตสามารถรับแรงดึงที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกใช้งานได้มากขึ้น ได้มีการปรับขนาดหน้าตัดดังแสดงในรูปที่ 5 และมีการลดปริมาณลวดอัดแรงให้มีการการเสริมลวดในปริมาณที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 6 และรูปที่ 7 ทำให้คานคอนกรีตอัดแรงชนิด I-girder สามารถรับแรงจากน้ำหนักบรรทุกใช้งานได้อย่างปลอดภัย และเปรียบเทียบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นของหน้าตัดคานตามมาตรฐานกรมทางหลวง และหน้าตัดคานที่ได้ทำการออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 8



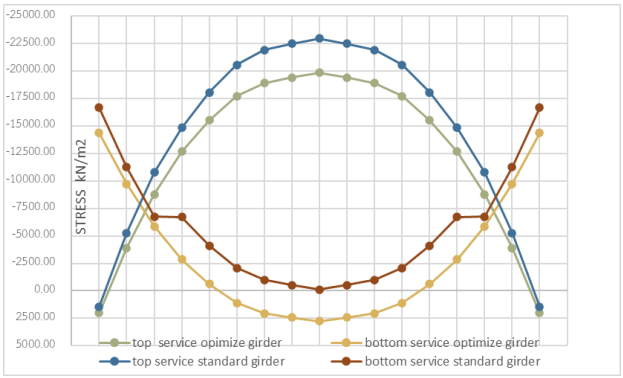
รูปที่ 5 มิติหน้าตัดคานบริเวณกลางคานและปลายคาน



รูปที่ 6 ตำแหน่งและจำนวนลวดอัดแรงบริเวณกลางคาน



รูปที่ 7 ตำแหน่งและจำนวนลวดอัดแรงบริเวณปลายคาน



รูปที่ 8 เปรียบเทียบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นของหน้าตัดคานรูปตัวไอ ตามมาตรฐานกรมทางหลวง และหน้าตัดคานรูปตัวไอที่ออกแบบเอง

13. ข้อเสนอแนะ

ออกแบบคานสะพานแบบมี Skew เพื่อรองรับการสร้างสะพานที่มี skew มากกว่า 0 องศา และออกแบบคานที่มีความยาวมากกว่า 15 เมตร เพื่อพัฒนาการออกแบบคานรองรับสะพานให้มีช่วงความยาวของสะพานที่มากขึ้นกว่ามาตรฐานกรมทางหลวงกำหนดไว้ในประเทศ

เอกสารอ้างอิง

[1] อัฏฐวิทย์ สุจริตพงศ์, วรียส ถิรดุลกุล และ ภูมิเกียรติ สว่างวงศ์ (2020). การเปรียบเทียบพฤติกรรมของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในสะพานคอนกรีตอัดแรงเมื่อรับน้ำหนักของรถบรรทุกไทยตามข้อกำหนดใหม่

ของกรมทางหลวงและรถบรรทุกตามมาตรฐานของสมาคมทางและการขนส่งสหรัฐอเมริกา(AASHTO-HL93). *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 25*, ชลบุรี, 15-17 กรกฎาคม 2563, หน้า 1673-1681.

[2] วิศิษฐ์ศักดิ์ หนูสุวรรณ (2012). *การประเมินความสามารถในการต้านทานน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างส่วนบนของสะพานคอนกรีตอัดแรงแบบ I-Girder โดยวิธี LFR และ LRFR*. วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ประเทศไทย.

[3] Shohel Rana (2010). Cost Optimization of Post-Tensioned Prestressed Concrete I-Girder. Ph.D. Dissertation, BANGLADESH UNIVERSITY OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY, Bangladesh.

[4] Huang, D., Arnold, S., Hu, B. (2012). Evaluation of Cracks in a Spliced, Prestressed Concrete I-Girder Bridge. *Transportation Research Record*, 2313, pp. 83-91.

[5] Earney, P. (2015). *Girder-End Cracking in Prestressed I-Girders.* University of Missouri, Department of Civil and Environmental Engineering, Columbia, 11 March 2015.